

高レベル廃棄物地層処分場の建設技術の検討



1992年9月

動力炉・核燃料開発事業団

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
Evaluation and Patent Office, 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

高レベル廃棄物地層処分場の建設技術の検討

杉原 弘造* , 棚井 憲治**

要 旨

高レベル放射性廃棄物は、安定な形態に固化し冷却のため30～50年間貯蔵した後、地下数百メートルより深い地層中に処分することを基本方針としており、現在、我が国において地層処分の有効性を明らかにするための研究開発が進められているところである。

本報告書では、処分場の技術的な見通しを示すために、建設に関する施工法を検討しとりまとめた。

この結果、地下施設の建設については、現状技術が適用できる見通しが得られた。

また、今回の検討により今後の技術開発課題が明らかとなった。

* : 中部事業所 環境地質課

** : 本社 環境技術開発推進本部 処分研究グループ

目次

1. はじめに	1
2. 技術的検討条件	2
2.1 処分場仕様例の設定	2
2.2 施工条件	7
2.3 施工手順	11
3. 検討内容	14
3.1 アクセス坑道	14
3.2 主要・連絡坑道	22
3.3 処分坑道	32
3.4 処分孔	34
4. まとめ	41
4.1 技術的課題	41
5. 参考文献	43

1. はじめに

本報告書での検討の対象は、処分場の地下施設を構成すると考えられるアクセス坑道、連絡坑道、主要坑道、処分坑道、処分孔及び建設に係わる坑外設備の施工方法である。

処分場の建設には、従来の土木工事で対象とされなかった地下深部を対象とすることから、建設工法、支保工、地熱・湧水の対策工などについて十分な対応が必要になると考えられる。

建設では、実際の岩盤条件や立地条件などにに基づき最適な工法が決定されると考えられるので、具体的な場所が決まっていない時点で正確な検討は困難である。このため、ここでは施工実績のある工法（土木学会、1986）に基づいて概略的な検討を実施することとした。

なお、以下に述べるのはあくまでもここで仮定した岩盤条件の下で処分場を建設するとすればどのような方法が考えられるか、という一例を示すものである。細部の数値等については、従来の工事で用いられている数値を参考に設定している。

2. 技術的検討条件

2.1 処分場仕様例の設定

処分場の建設技術の検討を行うにあたり、その前提となる処分場の仕様例を設定する際、基本となる条件を以下の通り仮定した。

- ① 処分するガラス固化体の本数については、40,000本とし、それを1ヶ所の処分場に処分するものとする。
- ② 対象とする岩種は、結晶質岩系と堆積岩系とし、前者は基本深度1,000m、後者は500mとする。
- ③ ガラス固化体の定置方式としては、図2.1-1に示すような種々の方式のうち、坑道横置方式（A案）と処分孔縦置方式（B案）を基本とし、結晶質岩系は坑道横置方式と処分孔縦置方式の両方式を、堆積岩系は坑道横置方式をモデルケースとする。
- ④ 処分施設は、ガラス固化体を受入れ、必要な検査、オーバーパックへの封入等をしたのち搬送する地上施設と地下深部に建設される廃棄体を定置する地下施設から構成されるものとする。
また、地下施設は、地上と地下の施設を結ぶアクセス坑道、廃棄体を定置する処分坑道、それぞれの坑道を連絡する坑道群（主要坑道及び連絡坑道）から構成されるものとする。
- ⑤ 地上から地下施設へのアクセスには、立坑、斜坑、スパイラル坑道など、様々なタイプが考えられるが、ここでは、立坑方式を基本として検討する。
- ⑥ 地層処分システムを構成する廃棄体及び人工バリアの形状は、図2.1-2に示すものとする。

(1) 地下施設の仕様例の検討

上記の基本条件を踏まえ、処分場のレイアウト及び各諸元を一義的にモデルケースとして設定する。

(a) 立坑

立坑は、操業を考慮して直径6.5mの円形とする（図2.1-3）。本数については、建設・操業・閉鎖を独立ルートとし、それぞれの作業を並行して進める期間があるものとして考え、各々2本、計6本とする。

また、立坑の施工延長は、基本条件における基本深度+サンブ部とする。

このサンブ長については、ズリピット、キブル等のズリ出し設備を考慮し、結晶質岩系では55m、堆積岩系では35mとする。

さらに、立坑間隔（中心間距離）は、掘削径の3倍以上を目安とし、かつ覆工厚さを考慮して30mとする。

(b) 処分坑道

結晶質岩系、処分孔縦置方式の場合、処分孔を掘削するために幌形5m×5mの形状寸法を必要とする。坑道横置方式の場合には、TBMの使用が可能な内径3mの坑道とする。図2.1-4にこれらの断面を示す。

処分坑道間隔（中心間距離）は、最大掘削径 5 m を基本とし、掘削径の 3 倍以上を目安として 15m とした。ただし、主要坑道と処分坑道の間隔は余裕をみて 25m とする。また、坑道方向の埋設ピッチは、熱解析結果（五月女ほか、1992）から、7 m とする。

(c) 主要・連絡坑道

空洞の安定解析結果（五月女、1992）を踏まえ、

- ①結晶質岩系，処分孔縦置方式の場合；幌形 5 m × 5 m
- ②結晶質岩系，坑道横置方式の場合；幌形 4 m × 5 m
- ③堆積岩系，坑道横置方式の場合；3 心断面

とする。これらの断面を図 2.1 - 5 に示す。

(d) 処分区画

モデルケースとして処分区画数を 8 区画（5000本／区画 × 8 区画 = 40,000本）と設定し、その配置は、結晶質岩系、堆積岩系ともに一平面内並列（2 × 4）配置とする。また、建設時のズリ出し運行の確実性を図るため、坑道の交差部を R40 の曲率とした。さらに、処分坑道両端部は、主要坑道の影響及びプラグ設置の可能性を考慮して非埋設区画を設ける。今回設定した処分区画の形状を図 2.1 - 6 に示す。

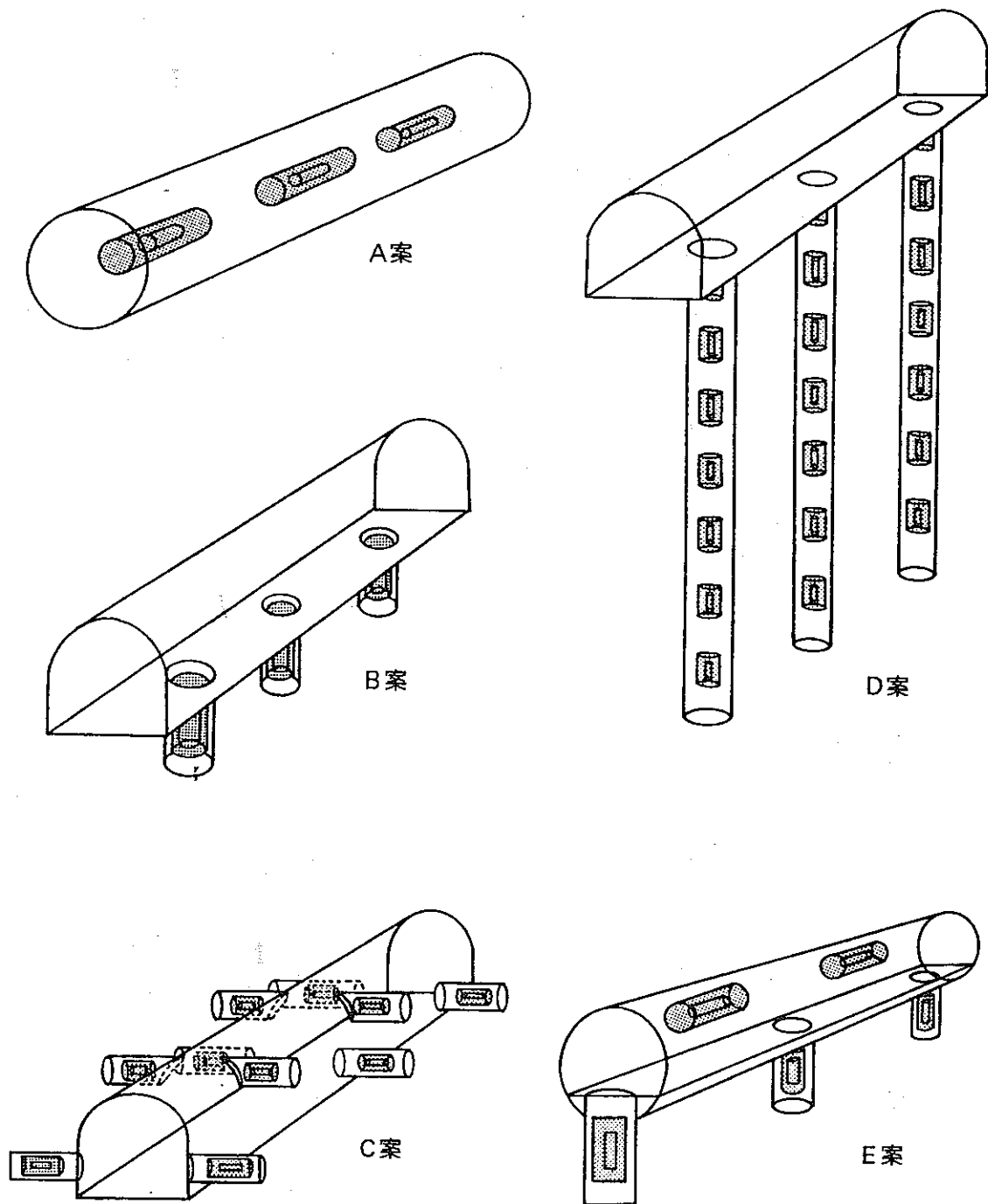
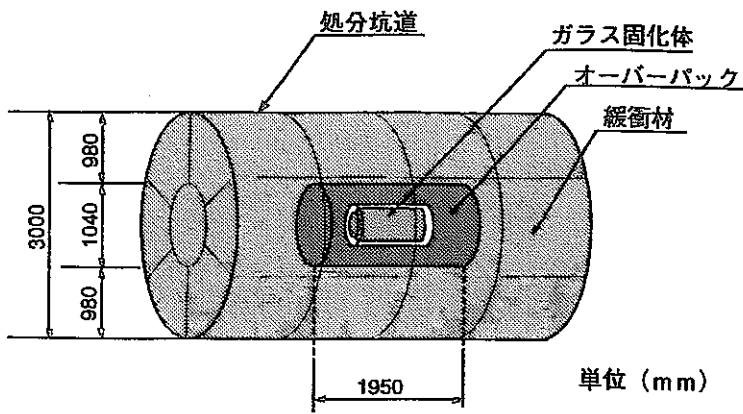
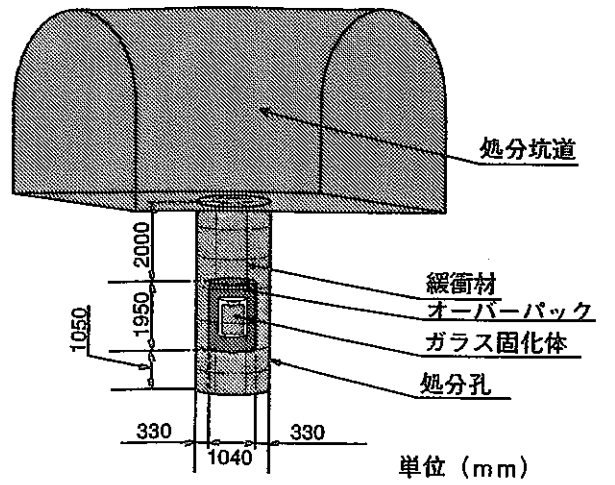


図2.1-1 ガラス固化体の定置方式



(坑道横置き方式)



(処分孔縦置き方式)

図 2.1 - 2 処分形態ごとの仕様

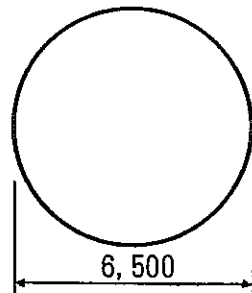


図 2.1 - 3 立坑の仕様

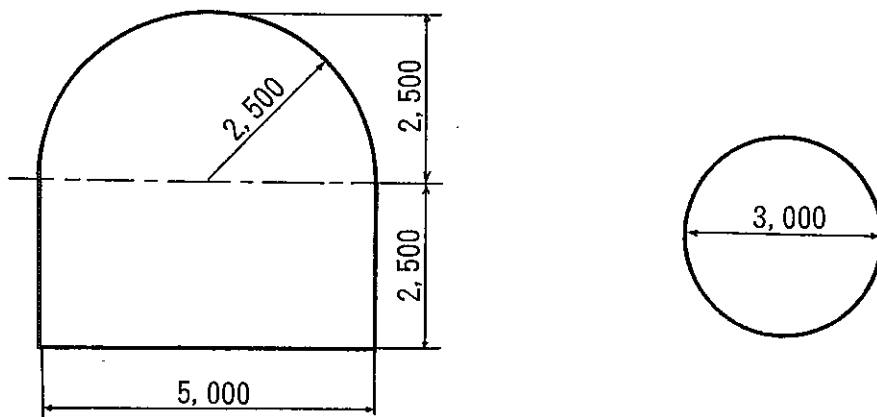


図 2.1 - 4 処分坑道の仕様

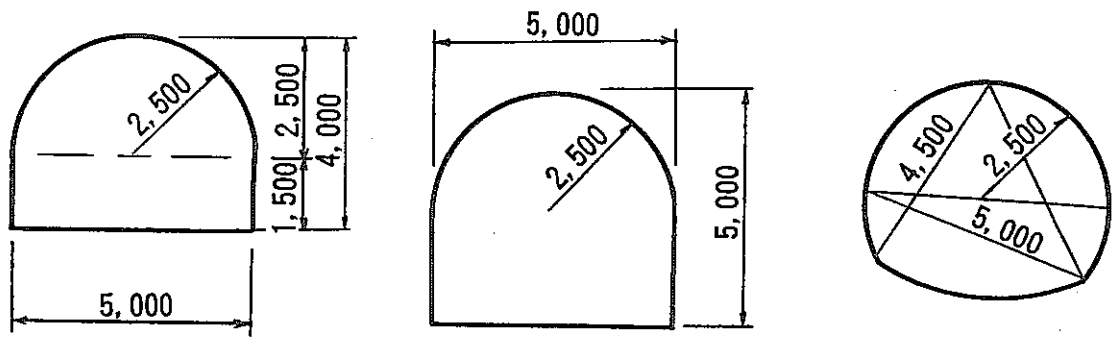


図2.1-5 主要・連絡坑道の仕様

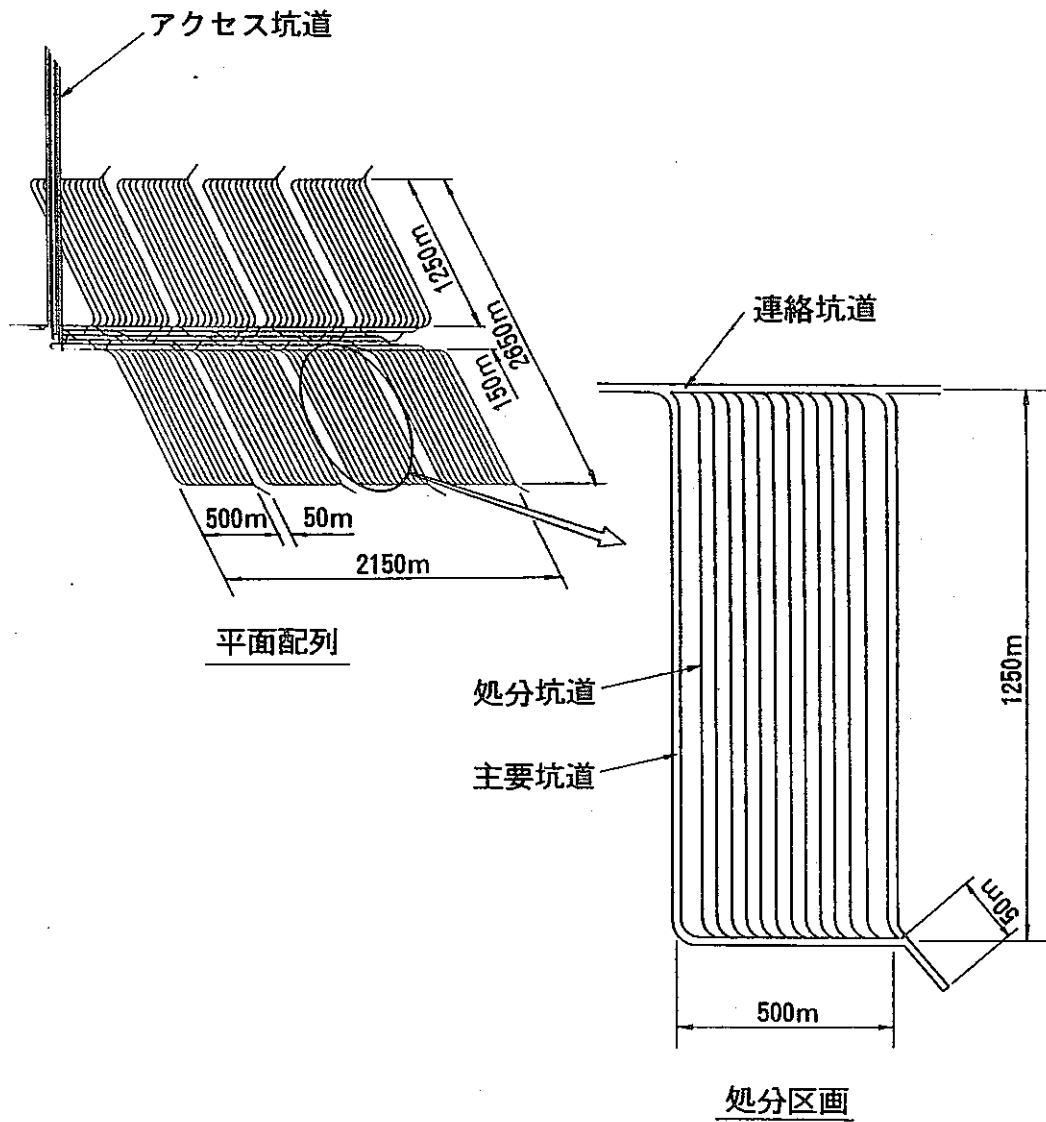


図2.1-6 処分区画の形状

2.2 施工条件

2.1項で設定した条件を基に施工条件となる各坑道の施工断面、湧水及び地熱等について整理する。

(1) 施工断面

(a) 立坑

結晶質岩系における立坑の施工断面については、空洞の安定解析（五月女ほか、1992）の面からコンクリート吹付けを行い、部分的にはロックボルトの打設を考えるものとする。また、立坑は剝離した場合の飛来落下の危険が大きき供用期間も数十年と長期にわたることも考えられることから、コンクリートの二次覆工を行うものとした。

堆積岩系については、同様に空洞の安定解析（五月女ほか、1992）をもとに安全裕度をみた支保厚とし、さらに、既往の設計例より二次覆工を行うものとした。

これらの施工断面を図2.2-1及び図2.2-2に示す。

(b) 主要・連絡坑道

主要・連絡坑道は、物流や避難のメインルートとなり、交差部が多いこと、また連絡坑道は、数十年の期間にわたって供用することになると考えられることから、長期の空洞維持を考慮して支保工を施すものとした。

結晶質岩系における支保工としては、吹付けコンクリートを考え、さらに二次覆工を行うものとした。これは、NATM（高山、1983）の考え方にに基づき、掘削後早期に吹付けコンクリートで壁面を防護することにより、地山の緩みを抑えるとともに、壁面の劣化を防ぎ、二次覆工により供用中の安全を確保するものである。堆積岩系については、地山の物性値と処分深度から、地山の押し出しが予想されることから、空洞の安定性と施工性を考慮し、円形に近い馬蹄形断面を考え、支保構造としては、吹付けコンクリート、ロックボルトを使用することとした。これらの施工断面を図2.2-3及び図2.2-4に示す。

(c) 処分坑道

結晶質岩系における処分坑道の施工断面は、主要・連絡坑道と同様の形状であり、埋戻しを考慮して原則として無支保とするが、部分的な区間にはロックボルト、金網による安全対策を行うものとする。

堆積岩系の場合は安定解析（Hoek and Brown, 1980）及び施工性から、鋼製セグメント（プレート換算厚合計26mm）による支保とし、施工性を考慮して以下の通り掘削半径を1.75mとした。

各ケースの坑道断面を図2.2-5及び図2.2-6に示す。

内空半径	:	1.500m
セグメント厚	:	0.200m
変形量	:	0.023m
施工余裕	:	0.027m
掘削半径	:	1.750m

(d) 処分孔

処分孔については、廃棄体及び人工バリアの形状に基づき、図2.2-7に示す形状とし、無支保とする。

(2) 湧水及び地熱

施工計画を作成する上で対策を講じなければならないのは湧水と地熱である。

特に処分場は大深度に及ぶので考慮が必要となるが、実際の湧水量や地熱は、現場により相当変化すると考えられるので、ここでは簡単な仮定に基づいた。

すなわち湧水量については、岩盤の透水係数を 10^{-6} cm/sと仮定し計算により求めた。また地熱については地温勾配を $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ とした。

この仮定によると結晶質岩系の場合の湧水量は、立坑1本当たり $0.15\text{m}^3/\text{分}$ 、1処分区画から $1.63\text{m}^3/\text{分}$ 、堆積岩系の場合は各々 $0.04\text{m}^3/\text{分}$ 、 $1.06\text{m}^3/\text{分}$ となる。

この値は、均一地盤の場合の値であり部分的な湧水部、同時施工する坑道の数、設備余裕を考慮して、排水設備容量は結晶質岩系の場合、立坑1本当たり $1.0\text{m}^3/\text{分}$ 、水平坑道は $8.0\text{m}^3/\text{分}$ 、堆積岩系の場合は各々 $0.4\text{m}^3/\text{分}$ 及び $6.0\text{m}^3/\text{分}$ とした。地熱については、地表温度を 15°C とした場合、結晶質岩系で 45°C 、堆積岩系で 30°C となる。坑内作業温度は、 37°C （労基則611条）以下で規制されているが、実際のトンネルでは環境の改善による作業効率を考慮して坑内温度を 30°C 以下を目標としている場合が多い。そこで、ここでは、これらを考慮して 28°C を管理目標として設定した。

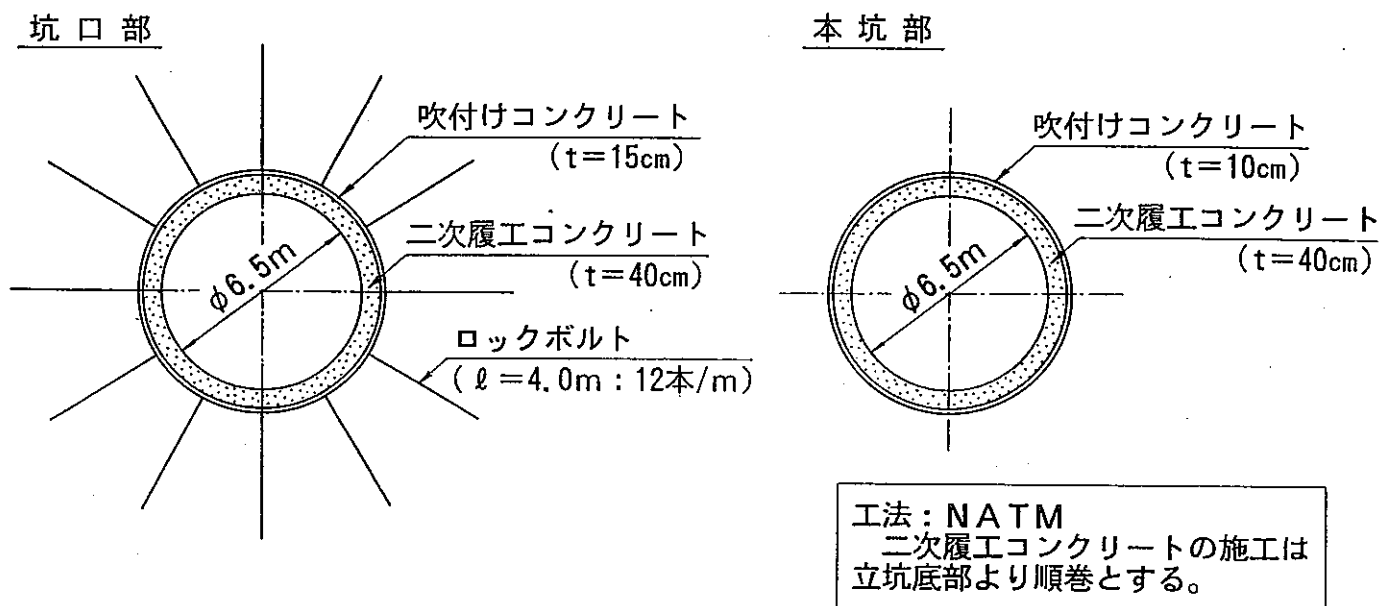


図2.2-1 結晶質岩系における立坑断面

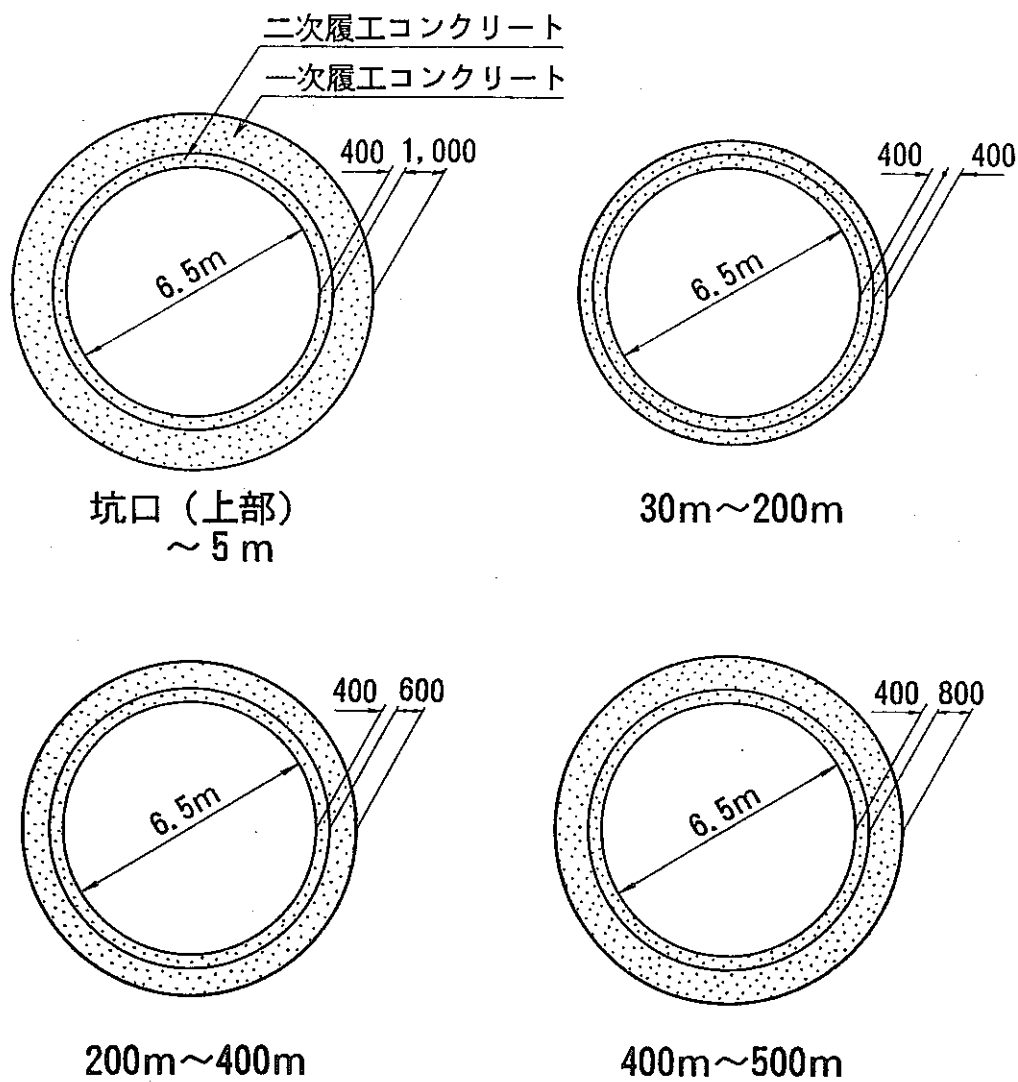


図2.2-2 堆積岩系における立坑断面

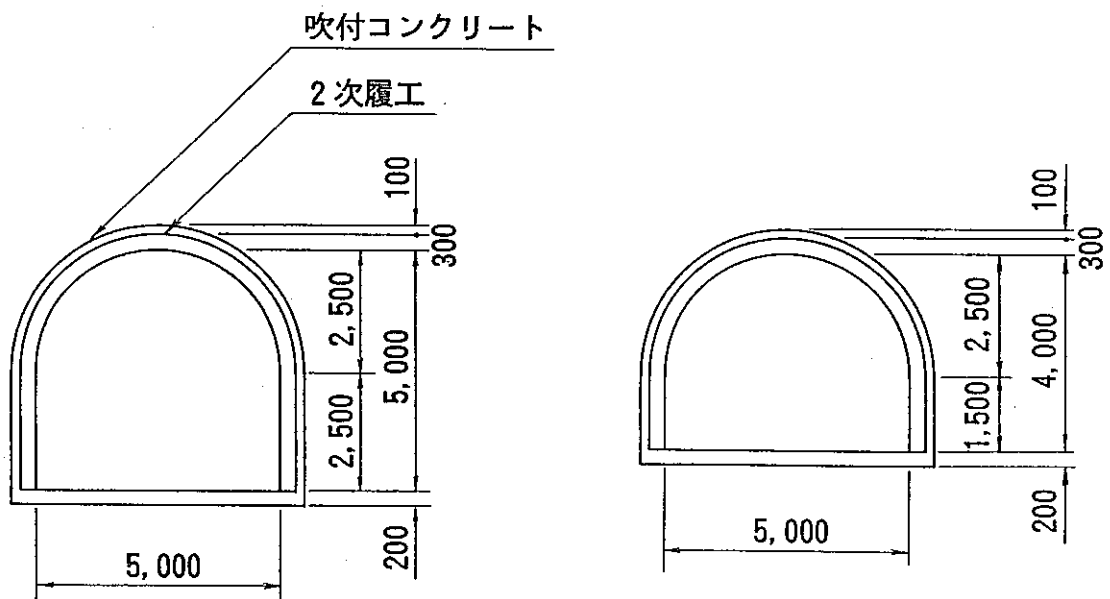


図2.2-3 結晶質岩系における主要・連絡坑道断面

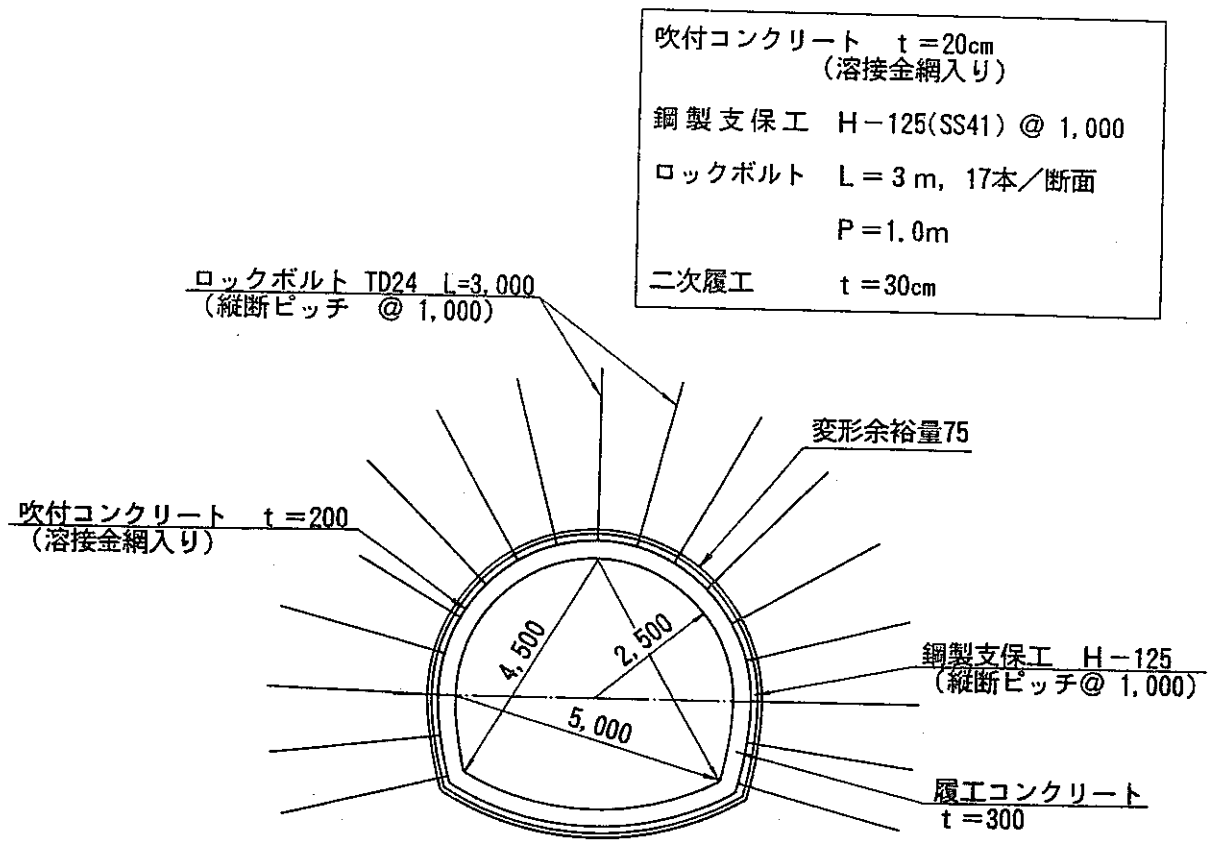


図2.2-4 堆積岩系における主要・連絡坑道断面

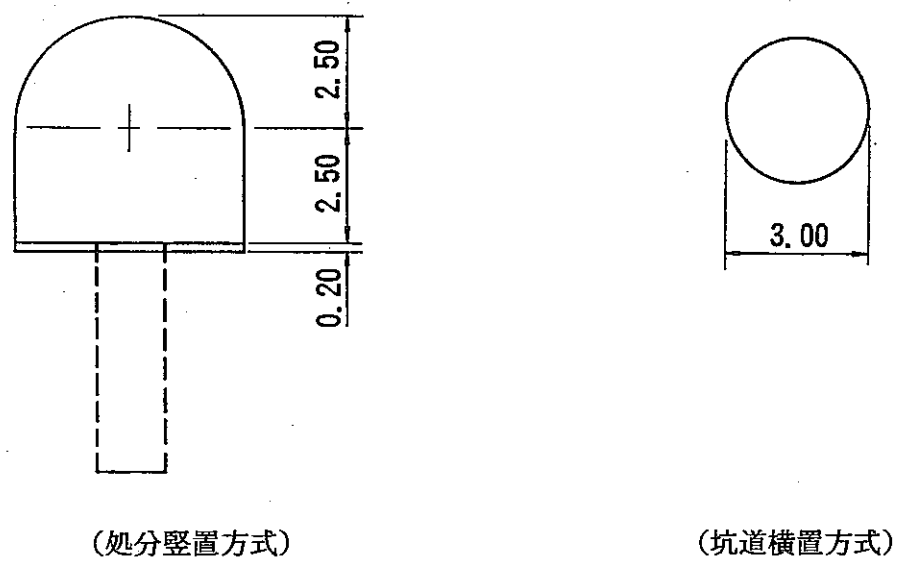


図2.2-5 結晶質岩系における処分坑道断面

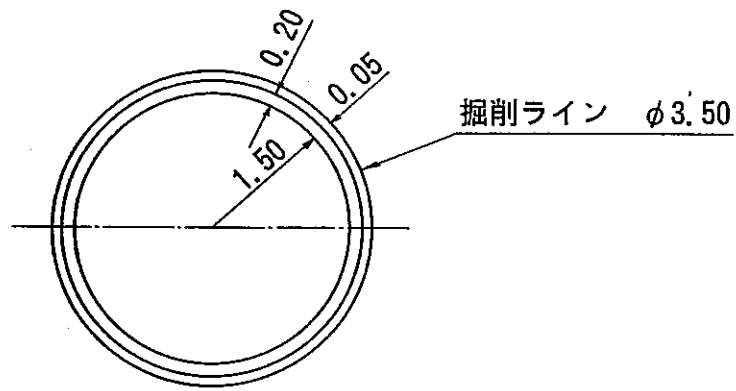


図 2.2 - 6 堆積岩系における処分坑道断面

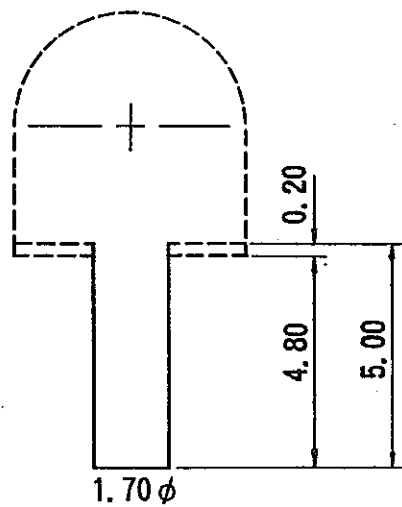


図 2.2 - 7 結晶質岩系における処分孔断面

2.3 施工手順

施工手順は次の順序とする。

- ①坑外設備（敷地造成、道路工事を含む）
- ②建設用アクセス坑道
- ③連絡坑道
- ④主要坑道
- ⑤処分坑道
- ⑥処分孔（処分孔縦置きの場合）

坑外設備としては、

- ①巻き上げ設備
- ②給排気設備
- ③給水処理設備
- ④電気設備
- ⑤資材関係設備
- ⑥ズリストックヤード
- ⑦管理建屋

が考えられる。このほか、外溝設備や道路があるが、これらは立地条件により異なる。

坑外設備の①～⑥の一例を平面図として図2.3-1に示す。これは、最も設備が大きくなる横坑掘削時を想定しているが、操業用立坑及び閉鎖用立坑工事関係は入っていない。ズリストックヤードは、掘削ズリの一時仮置き場で、90m×130mとすると2m高さに積み上げた場合、約6日分の仮置きが可能である。ズリは最終的には、ズリ堆積場へ運搬、堆積するが、これについては立地条件に合わせて設置する。

主要坑道の施工以下は処分区画毎の工事となり、各処分区画が順次施工されていく。また、処分坑道と処分孔の施工も一定期間ずらして重複する。操業用及び閉鎖用アクセス坑道の施工は建設用アクセス坑道施工後、順次施工する。

- ①ズリ搬出用立坑
- ②人荷用立坑
- ③ケーブル巻上室
- ④ロープ保守ウィンチ
- ⑤給気ファン
- ⑥圧縮機室
- ⑦クーリングタワー
- ⑧ジブクレーン (6 t × 30m)
- ⑨資材倉庫
- ⑩修理工場
- ⑪油脂類庫
- ⑫部品庫
- ⑬火工所
- ⑭火薬取扱所
- ⑮コンクリートプラント
- ⑯セメントサイロ
- ⑰骨材ストックビン (S, 300㎡)
- ⑱ " (G, 300㎡)
- ⑲ " (G, 300㎡)
- ⑳ストックコンベア
- ㉑供給コンベア
- ㉒原水槽
- ㉓pH処理層
- ㉔シクナー
- ㉕フィルタープレス室
- ㉖特別高圧変電所
- ㉗変電所管理室

- ㉘非常用発電機設備
- ㉙クーリングタワー
- ㉚屋外燃料タンク
- ㉛ズリストックヤード (11,700㎡)
- ㉜操業用立坑
- ㉝閉鎖用立坑

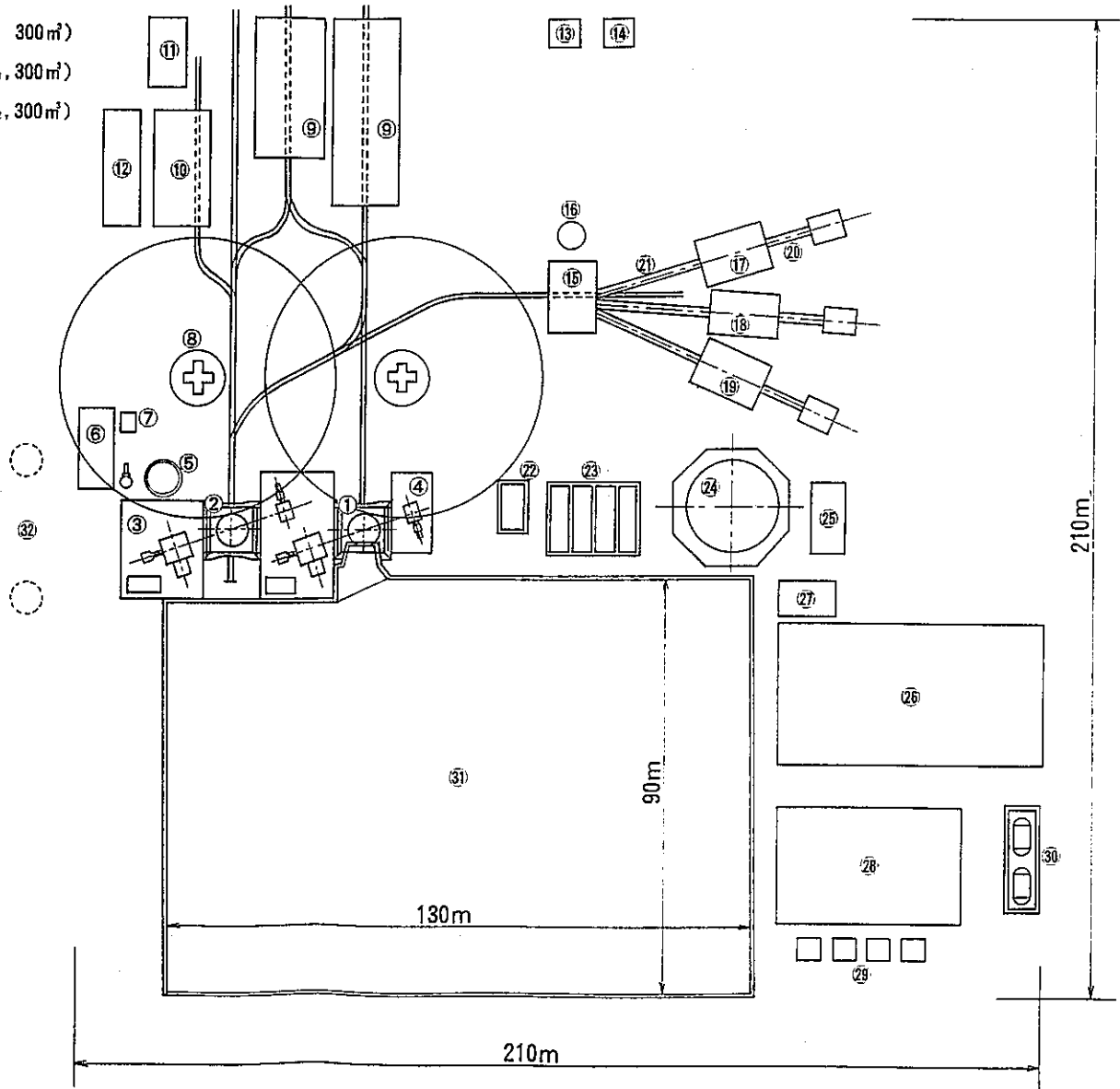


図 2.3 - 1 坑外設備平面図

3. 検討内容

地下施設は、アクセス坑道、連絡坑道及び主要坑道、処分坑道、処分孔から構成される。ここでは、それぞれについて工法、施工手順、対策工を検討する。

3.1 アクセス坑道

アクセス坑道としては立坑と斜坑が考えられるが、ここでは基本的なケースとして立坑について述べる。

3.1.1 工法の検討

現在開発されている立坑の工法を表3.1-1にまとめる（北新建設，1978）。

このうち掘削深度、坑道配置、地質条件、作業能率、安全性、信頼性、経済性などを考慮すると以下の3工法が挙げられる。

①ショートステップ工法

②NATM

③全断面機械掘削工法

このうち全断面掘削工法は、周辺岩盤に対する影響を考慮すると有利であるが、実績が少ないことから、以下の検討では除外することとした。

したがって、残りの工法のうち作業の安全性、深度に対する技術的信頼性、施工実績等から総合的に判断すると、結晶質岩系ではNATM、堆積岩系ではショートステップ工法が最も適用性が高いと考えられる。また、岩盤への影響を低減するために、発破にはスムーズブラスティング工法を用いる。

2本目からの立坑は、排水やズリ搬出を目的とした先進導坑を掘削した後、切り抜け掘削する方法も考えられるが、以下では代表例として全断面掘り下がり方式について述べる。

坑口部については坑内設備の設置、やぐら基礎の設置、岩盤強度を考慮し開削工法及びクローラクレーンとミニバックホーによる工法で施工する。

3.1.2 施工概要

立坑の全体施工フローを図3.1-1に示す。結晶質岩系の場合は立坑深度が1,000mに及ぶため、GL-500mのところポンプ座を設けるが、図3.1-1では省略している。図3.1-2、図3.1-3には結晶質岩系及び堆積岩系の施工・設備概要を示す。施工法、深度の違いにより若干の違いはあるが基本的な構成は同じである。また、使用機械、設備については、結晶質岩系の場合のものを一例として表3.1-2に示す。

以下には一般的と考えられる例として、図3.1-1に示した各工事の概要について述べる。

(1) 坑口部

坑口上部は地表下3～5mまで開削工法で施工し、やぐら基礎フーチング、坑口座張基礎を兼用で構築する。

坑口下部は、発破工法で施工し、発破の影響（スカフォード、坑口座張等へ

の), 地山状況を考慮して施工延長を20~30mとする。また, 1発破有効長を1.0 mとし, 発破後ミニバックホーによりズリキブルヘズリを積み込み, クローラクレーンで搬出する。その後, 結晶質岩系の場合は吹き付けコンクリート及びロックボルトの打設, 堆積岩系の場合はショートステップ工法にて覆工を行う。

坑口部の施工終了後, 坑口座張, やぐら設備等の坑口部仮設工事を行う。

(2) 本坑部

発破作業における穿孔にはアンブレラジャンボを使用し, 発破有効長を1.2~1.5mとする。また, 発破は岩盤への影響を低減するためスムーズブラスティング工法により行う。

ズリ出し作業は, スカフォード下部に取り付けたシャフトローダーにより, ズリキブルに積み込み坑外へ搬出する。ズリキブルは2台用意し, 積み込み, 搬出を並行して行い, 坑外で転倒ドアにより強制転倒し, ダンプトラック等で所定の場所に運搬する。

また, 一次覆工工事については, 結晶質岩系ではNATM, 堆積岩系ではショートステップにより行い, サイクル長は1.2~1.5mとする。

コンクリート吹き付け作業はスカフォード上に設置した吹付け機を用い乾式にて行う。ショートステップでは, サイクル長分のズリ出し後, 整地, 敷板を行い, 前回打設の型枠を脱型, 整備, 移動, 組立てを行う。コンクリートはコンクリートキブルで坑外より搬入し, スカフォード上のホッパーに受け坑底に供給する。サンブ部についても同様の施工で行う。

接続部についてはレグドリルによる削孔, 発破後, シャフトローダー及びドーザーショベルによりキブルにズリを積み込み, 吹き付けコンクリートを行う。堆積岩系の場合は鋼製セントルを組み立てて鉄筋コンクリートにより覆工する。

二次覆工工事は, 高所作業となるため, 安全性, 工期, 経済性を考慮して, スライディングフォーム工法(コンクリートの硬化速度に合わせて連続的に型枠をスライドさせコンクリートを打設する方法)により順巻で施工する。

3.1.3 対策工

大深度の立坑を建設する場合に想定される問題点のうち, 代表的なものとして破砕帯, 湧水, ガス, 山はね, 地温等が考えられることから, ここでは, これらの予知方法と対策の概要について整理する。破砕帯, 山はね, 湧水については, 事前調査段階での大深度ボーリングによりある程度予測できると考えられるが, 立坑掘削開始までに予知できない破砕帯が存在することを考慮して, その状況を事前に把握するために, 切羽より定期的かつ連続的にピッチ20m程度で先進探査ボーリングを行う。この探査ボーリングは湧水対策にも活用できる。

予測された破砕帯への対策は, 地山補強対策と湧水対策に分けられる。

地山補強対策(稲毛, 1980~1981)としては, 結晶質岩系の場合は破砕の程度に従って, ロックボルトの打設, 金網の設置, 二次吹付けコンクリート, ロック

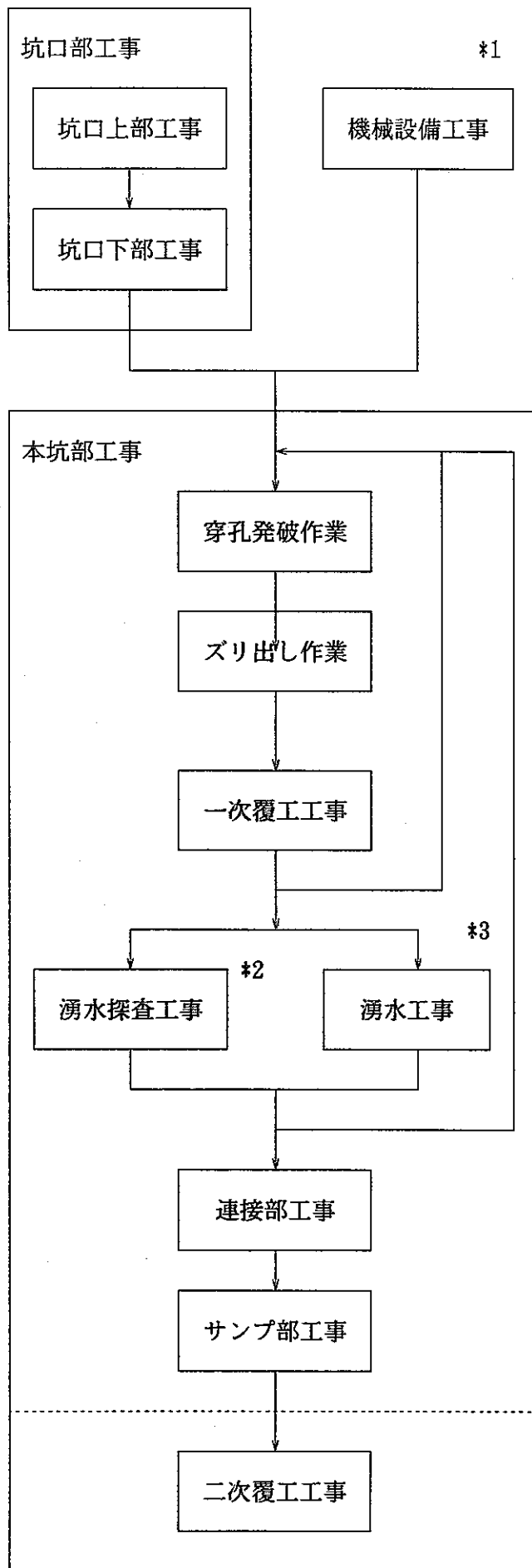
ボルトの増し打ち、掘削ステップ長の短縮、鋼製支保工や鉄矢木の使用が考えられる。堆積岩系の場合には大きな地圧の発生による地山の膨張が考えられるので、この場合は鋼製セグメントを用いて支保を行う。また地山が自立しない様な場合は湧水対策と同様のセメントミルクの注入等が考えられる。

湧水対策としては、湧水を減らすためのグラウトの施工や湧水を処置するためのウォーターリングの設置、ポンプ座からの排水などが考えられる。前者は湧水状況に応じて、後者は計画的に実施するのが普通である。

ガスの問題には、ガス湧出による酸素欠乏やガス中毒とガス突出によるガス爆発とが考えられる。ガスの湧出、突出等を完全に防止することは実際上不可能であるが、通気（平松，1974；建設業労働災害防止協会，1991）により対応できるものと考えられる。

表3.1-1 現状の立坑建設工法

工 法 名		概 要	
発破掘削掘り下がり工法	ロングステップ工法	地質状況に応じて20~40mを1ステップとして掘削し、掘削終了後に下部にフーティングを設け、順巻きでコンクリートを覆工する工法。掘削支保を施工し1.5m~2.5mずつ掘り下げる。	
	ショートステップ工法	1ステップ長を1.2~3.0mとし穿孔、発破、ズリ出し後、直ちに掘削した部分を覆工する工法。施工中の岩盤の露出面積・時間が少ないので、崩落・落石が少なくなり安全性が向上する。	
	NATM	地質状況により掘削手順はことなるが、一般的には穿孔、発破、ズリ出し、一次吹きつけコンクリート、ロックボルト打設を繰り返し、計測結果に応じ、ロックボルトの増し打ち、二次吹きつけコンクリートを行う工法。	
	準同時工法	本工法は地質状況の良好な場合に採用される工法で、掘削の一部（ズリ積み）と覆工作業を並行して行う。北海道の炭坑立坑での実績がある。	
発破掘削掘り上がり工法	クライマー工法	小口径の立坑開削や大口径立坑開削用導坑掘削に用いられる工法で、立坑底部に坑道を掘削し、これを基地にして立坑を掘り上がる工法。作業足場は、機械（レイズクレイマーと呼ばれる）で上下する。	
	ステージブラッシング工法	上部より立坑全長を削孔し下部から分割発破して掘り上がる工法。長孔削孔となり孔曲がりが大きくなると良好な発破効果が得られないことから、立坑延長の長いものには不適。	
	足場付掘り上がり工法	木製支保工を組み上げ、これを足場として上向きに発破孔を穿孔し、発破掘削していく工法。この工法は、作業全体を人力に頼っているため、設備は不要であるが熟練工が必要となる。	
機械掘削工法	レイズボーラー工法	小口径立坑掘削や大口径立坑開削用導坑掘削に用いられる工法。 φ250mm程度のパイロット孔を上部より貫通させ、リーミング用のビットにより上向きにリーミングアップして立坑を開削する。	
	リバースサーキュレーション工法	掘削孔内を泥水で満たし、泥水により孔壁を保持しながら全断面を掘り下がる工法。掘削ズリの搬出にはエアリフトを用い、覆工はケーシングパイプによる。	
	全断面立坑掘削機工法	TBMの考え方を立坑掘削に採用した工法で、切羽の進行に応じて覆工作業・ライニング作業を並行して行う。パイロット孔リーミングダウン方式、全断面掘削方式とがあるが、特に後者の事例はほとんどない。	
	シールド掘り上がり工法	レイズボーラーを上向き構造とし、シールドセグメント組み上げ機構を付加した工法。不良地質での実績が多い。	
その他の工法	大断面掘削工法	導坑先導切上げ工法	クライマー、レイズボーラー等により導坑を掘削し、上部より発破掘削し掘削ズリは導坑を利用して坑底に排出する工法。揚水式地下発電所のサージタンク工事などに用いられる。
		上向き全断面掘り上がり工法	上向きにベンチカットを行い、1~3mずつ全断面発破掘削で掘り上がる工法。天端切羽の崩落防止のため、ケーブルボルトを打設し、作業足場には掘削ズリを用いる。
	圧気潜函工法	湧水の多い地盤や軟弱な地盤の場合に採用される。井筒内の作業室に圧縮空気を送り土砂や湧水の浸入を抑えて掘削を進め函体を沈下させていく工法。	
	凍結工法	立坑の外周に設けたボアホールの中に冷却管を挿入し、周囲の地盤を凍結させて凍結筒を形成し、これを遮水壁・土留め壁として立坑を掘削する工法。	



* 1
機械設備工事（仮設建物を
含む）は、本坑部工事着手
前に、坑口上下部の工事と
並行して行う

* 2
湧水探査工事は、坑口下部
工事終了後、本坑部（サン
プ部を含む）工事と交互に
30mピッチで行う。
（湧水探査工事の結果、湧
水が予想される場合には、
防水工事を行う。）

* 3
揚水工事（ポンプ座）は、
本坑部工事と交互に50mピ
ッチで行う。

図3.1-1 立坑の全体施工フロー図

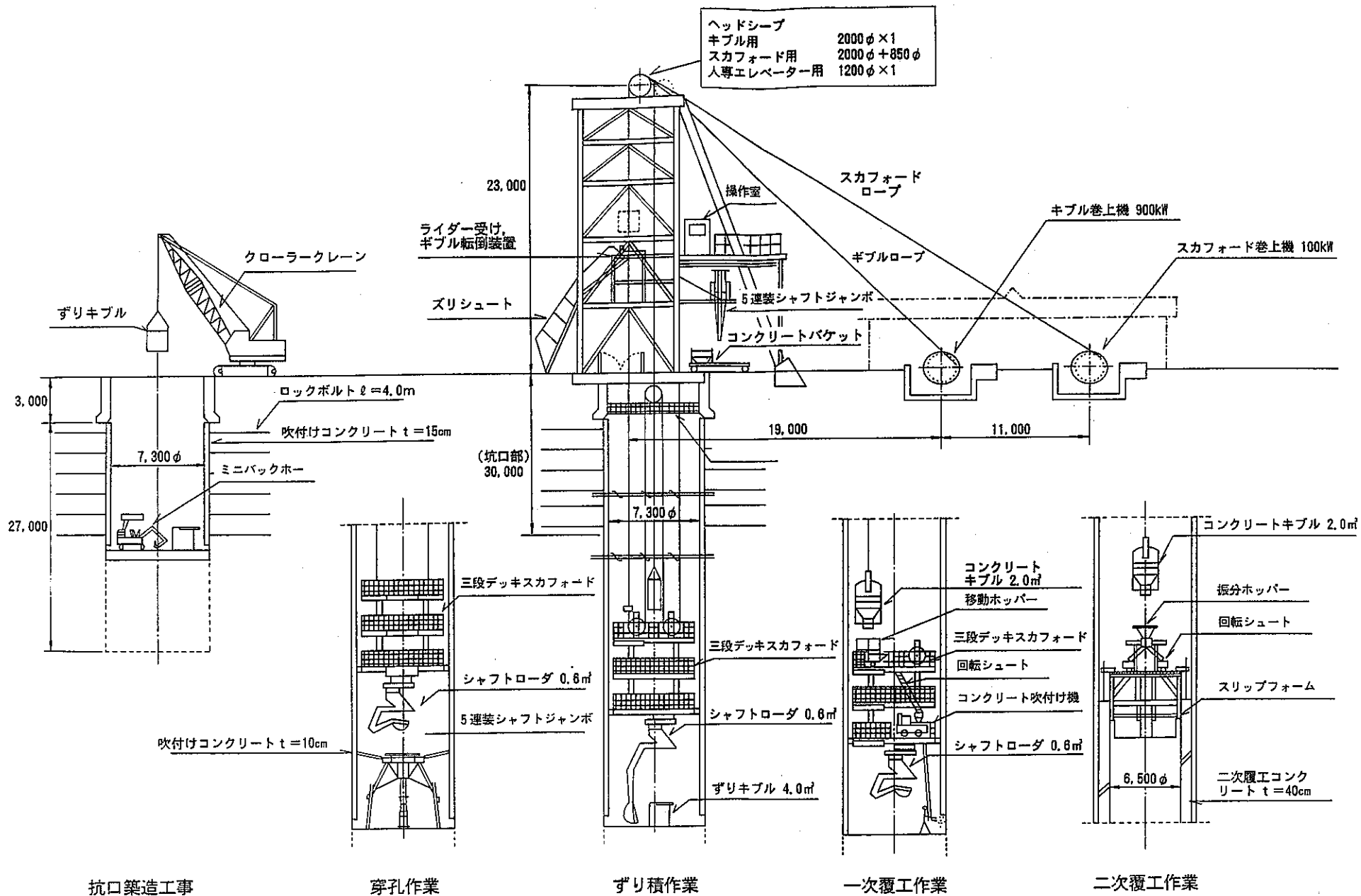


図 3.1 - 2 施工・設備概要図 (結晶質岩・立坑)

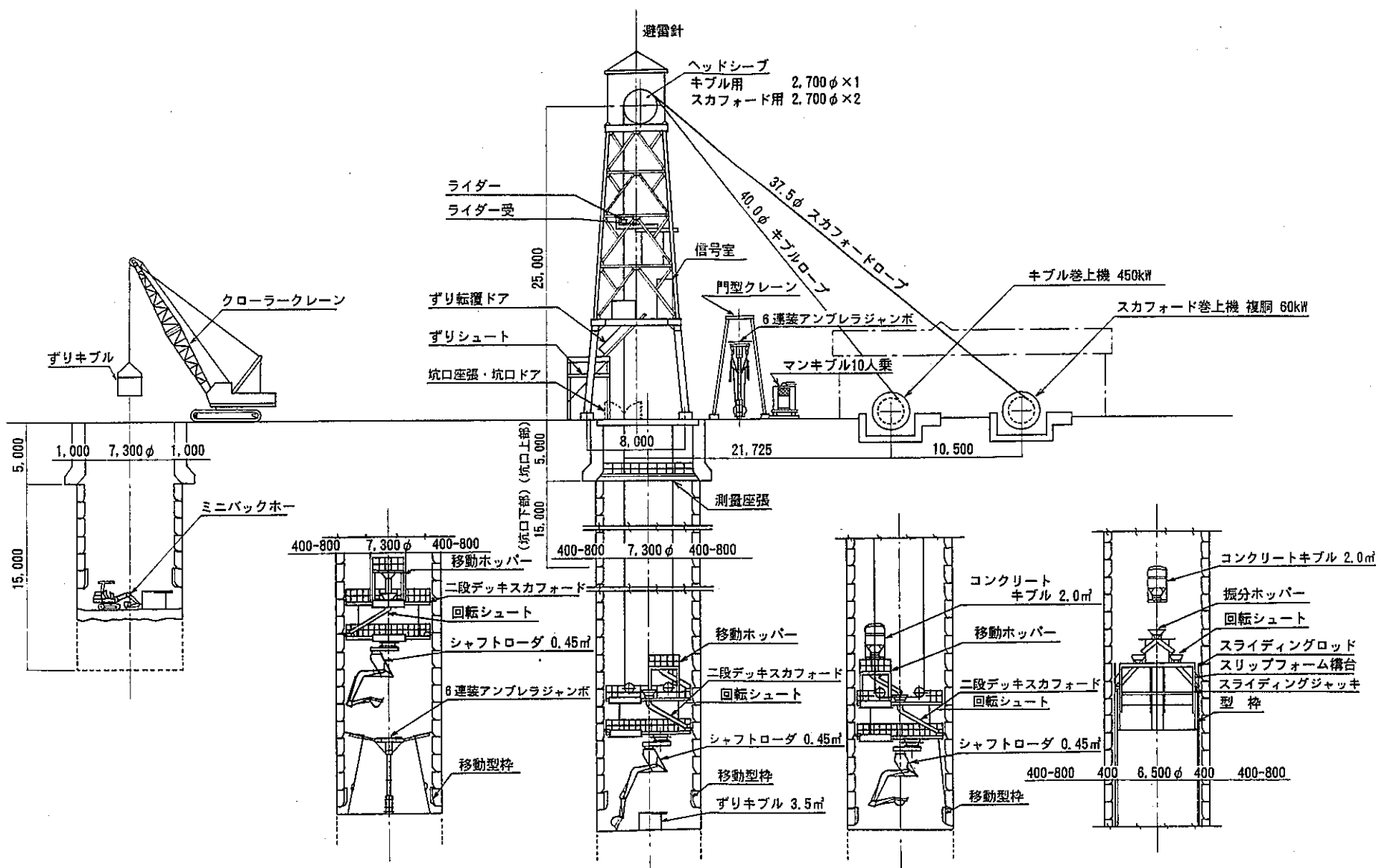


図 3.1 - 3 施工・設備概要図 (堆積岩・立坑)

表3.1-2 使用機械・設備（結晶質岩系・立坑）

機械、設備名称	単位	数量	仕 様
(1)掘削檜設備	式	1	高さ25m, ヘッドシーブ×4, 避雷針設備一式
(2)キブル巻上設備 キブル巻上機 キブル類	台式	1 1	900kw, 単胴, V=300m/min, 36mmφシンキングロープ 4m ³ ズリ用×2, 2m ³ コンクリート用×1
(3)スcaffold巻上設備 スcaffold巻上機 スcaffold	台式 基	1 1	100kw, 単胴, V=8m/min, 38mmφサンロープ 6.9mφ×三段デッキ, キブル通過孔2.3mφ
(4)人専用エレベータ設備	台	1	150kw, 単胴, V=180m/min, 6人乗り
(5)坑口設備 坑口座張 坑口運搬設備	式 式	1 1	坑口ドア, 坑口座張, 測量座張, エレベータ乗場 10t テルハクレーン, 軌条台車, 3t 門型クレーン
(6)ズリ捨て設備 ズリ受け設備 ズリ運搬設備	式 式	1 1	ライダー受け, ズリシュート, キブル転倒装置 D60級ドーザーショベル, 11t ダンプトラック
(7)コンプレッサ設備	式	1	150kw × 2 台, 150mmφ鋼管
(8)換気設備	式	1	37kw × 2 連コントラファン, 1.0mφスパイラル風管
(9)掘削設備 穿孔機 ズリ積機	台式 台	1 1	5連装油圧シャフトジャンボ 0.6m ³ シャフトマッカー
(10)覆工設備 <一次>吹付け設備 <二次>型枠・作業台 スリッパ装置 <共通>コンクリートプラント 坑口設備	式 式 式 基 基	1 1 1 1 1	アリバ280型, 乾湿両用, コンクリートホッパー×1 6.5mφ×1.5mH, 三段デッキ作業台 スライドジャッキ, タイミングロッド, コンクリートホッパー 30m ³ /hr 2.0m ³ コンクリートバケット (台車搭載)
(11)給排水設備 給水ポンプ 坑内排水ポンプ 排水処理設備	式 台式 式	1 44 1	50mmφタービンポンプ × 1, 10m ³ 水槽 × 1 37kw水中ポンプ 2.0m ³ /min×60mH (予備22台) 処理能力120m ³ /hr
(12)電気設備 受電設備 通信設備 非常用電源設備	式 式 式 式	1 1 1 1	500kva×3, 200kva × 3, 50kva×1, 300kva × 4 防水呼鈴, 無電池式電話機, ケーブル類 ディーゼル発電機 1000kw×1台
(13)湧水探査用設備			(油圧シャフトジャンボ併用又はロータリー式ドリルマシン)
(14)ポンプ座掘削設備 穿孔機 ズリ積機	台式 台	4 1	40kg級レッグドリル 0.4m ³ 級トラクターショベル

3.2 主要・連絡坑道

3.2.1 工法

- (1) 掘削工法（日本トンネル協会，1981；高山ほか，1977；資源エネルギー庁・新エネルギー財団，1991）

水平坑道の掘削工法の代表的なものは図3.2-1に示すように、

- ①発破工法
- ②TBM工法
- ③ブーム式機械掘削工法

が挙げられる。

これらの工法のうち、結晶質岩系を対象とする場合、ブーム式機械掘削工法については、硬岩に対する十分な掘削能力を有しておらず進行も限られたものとなる。また、TBM工法については、現状において円形断面に限られている。

一方、発破工法については、実績的に問題はなく経済性等からも実現性を有する工法であり、地層処分で問題となる岩盤への損傷に対しても、スムーズブラスティングを採用することにより、低減できるものと考えられる。このようなことから、結晶質岩系に対しては、スムーズブラスティングによる発破工法を採用する。

堆積岩系の場合については、堆積岩の強度に対して十分対応が可能であること、地山の損傷も最小限に抑えることができること、さらに、掘削断面の変化に対しても対応が可能であり、NATM工法との併用にも適し、安全性が高いと考えられることから、ブーム式機械掘削工法を採用する。

- (2) ズリ出し工法

ズリ出しの方法は無軌道車両方式と軌道方式が一般的である。処分場においては換気経路が立坑に限られるので、極力粉塵や有害ガスを発生させない方式が望ましい。軌道方式は長距離の大量ズリ運搬に適し、走行による粉塵、排気ガスを出さないののでここでは軌道方式を考える。なお、建設期間が長期に及ぶ場合には、設備、コストの観点から、無軌道車両方式が有利となる可能性がある。

3.2.2 施工概要

連絡坑道及び主要坑道の施工フローを図3.2-2に示す。また各岩種における施工順序及び使用機械を図3.2-3、図3.2-4に示す。図3.2-4では二次覆工作業以下が省略してあるが、図3.2-3と同じである。

以下には一般的と考えられる例として、図3.2-2に示した各工事の概要を述べる。

- (1) 横坑掘削準備工事

横坑の掘削に先立って、資材の搬入・搬出、人員の入出坑、ズリ出しを行うための設備等を設置する横坑掘削準備工事が必要となる。この準備工事は、立坑設備工事、立坑周辺掘削工事、坑内仮設・機械設備工事に大別される。

(a) 立坑設備工事

掘削ズリ容量が最大となるのは「主要坑道掘削」，「処分坑道掘削」，「処分孔掘削（結晶質岩系，処分孔堅置方式の場合）」が重複する期間で，この期間のズリ搬出量に合わせて立坑設備を設置する。2本の建設用立坑は，1本はズリ搬出立坑として使用し，もう1本は資材や人員の入出坑用の人荷立坑として使用する。

図3.2-5にズリ搬出用立坑の設備図を示す。ズリ搬出は12 m^3 のズリ上げスキップ2台を用い，1日ズリ運搬量約3700 m^3 の能力をもつものとする。ズリ搬出立坑断面を図3.2-6に示す。

図3.2-7に人荷用立坑の設備図を示す。人荷用立坑は，5m（長さ） \times 2.5m（幅） \times 14m（高さ）の人荷用ゲージを昇降させ資材，人員の搬送を行う。また，立坑坑口部には，換気設備及び気密性を保持するための気密デッキを設ける計画とする。換気設備容量は，立坑内風速を6 m/sec程度とした場合の容量約10,000 m^3/min クラスの送風機を設置し，ズリ搬出立坑を排気，人荷用立坑を入気とする。なお，排水管，給水管，換気管，送電ケーブルといった横坑掘削に必要な配管，ケーブル類もこの人荷立坑内に設置するものとする。図3.2-6に人荷用立坑断面図を示す。

(b) 立坑周辺掘削工事，坑内仮設・機械設備工事

立坑坑底の連絡坑道との接続部周辺においては，ズリ転倒室，バッテリー充電場，揚水設備（ポンプ室），修理工場等といった坑内仮設備が設置されるのでそれに伴う空洞掘削が必要となる。

(2) 主要・連絡坑道工事

掘削は，結晶質岩系の場合は油圧2ブームジャンボにより削孔を行い，発破有効長は2mを標準とし，スムーズプラスティングにより行う。堆積岩系の掘削はクローラ式のブーム式機械掘削機により，1掘進長1mを標準として行う。

ズリ積み込みは結晶質岩系の場合にはロッカーショベル，堆積岩系の場合には掘削機に付属のズリかき寄せ装置及びベルトコンベアにより行う。運搬には6 m^3 ズリ鋼車とバッテリーロコにより行い，ズリ鋼車の入れ換えにはチェリーピッカを用いる。

支保工作業については，作業の安全性，発生する粉塵等を考慮し結晶質岩系の場合は，吹付ロボットを用い湿式による吹付コンクリートを行う。堆積岩系の場合は，この一次吹付コンクリート施工後，鋼製支保工の建込及び金網取付を行い，二次吹付を施工し，その後ロックボルトを打設する。

二次覆工は，掘削切羽との距離を充分とって双方の作業が干渉し合わなくなった時点で開始し，スライドセントルを用いて，ポンプによりコンクリートを打設する。材料の運搬はアジテーターカーを用いる。

二次覆工と並行してインバートコンクリートを打設する。インバートコンクリートの1打設長は30mとし，レール撤去，盤ならし，型枠組み，コンク

リート打設、養生、レール再敷設のサイクルとする。コンクリート打設には、二次覆工工事の場合と同様に、打設にはポンプを用い、材料運搬にはアジテーターカーを使用する。

3.2.3 対策工

破碎帯、湧水位置を事前に知るために、先行する連絡坑道と主要坑道においては、周辺岩盤を極力損傷しない範囲で先行コアボーリングを行うこととする。この先行コアボーリングにより破碎帯や湧水、コアディスクキングが確認された場合にはその程度に応じて対策をとる。

破碎帯の対策としては、フォアパイリング工、鏡吹付けコンクリート工、鏡止めボルト工、上下二段ミニベンチ等を単独又は組み合わせて実施する。地山が自立しない場合や湧水がある場合にはセメントの注入を実施する。

山はねについては、現在のところ発生機構が十分解明されておらず、正確にその発生を予知することは困難であるが、一般的にはA E計測及び掘削切羽の温度計測により予知を行う方法もある。対策としては、破碎帯への対策工と同じような補強対策を実施する。

堆積岩系の場合は、大きな地圧と地山の押し出しが考えられるが、NATMの支保のランクを上げたり、掘削ピッチを縮めたりして対応する。

地温については、深度1,000mとなる結晶質岩系の場合や夏期で外気温の高い場合には、通気だけでは対応できないことが考えられる。このような場合には冷房設備の設置が必要と考えられる。

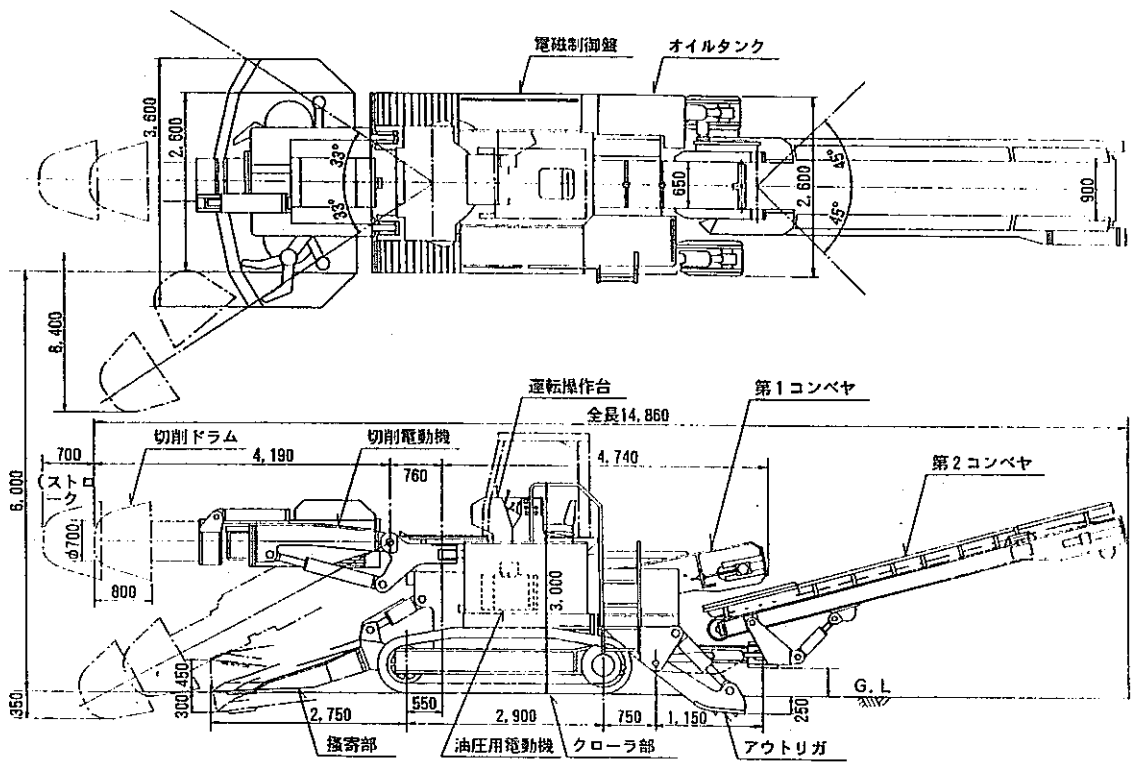
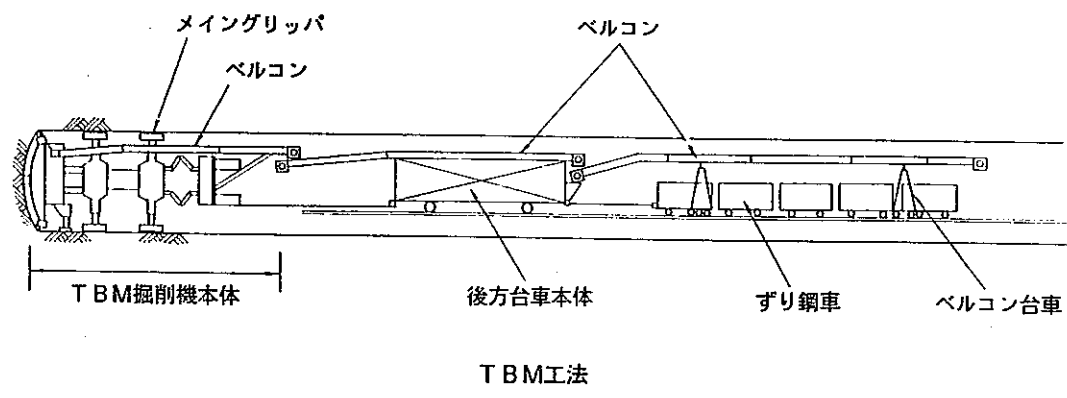
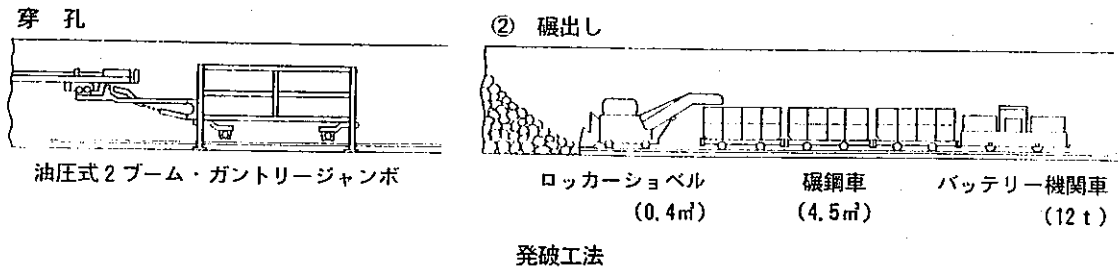


図3.2-1 水平坑道の代表的な掘削工法

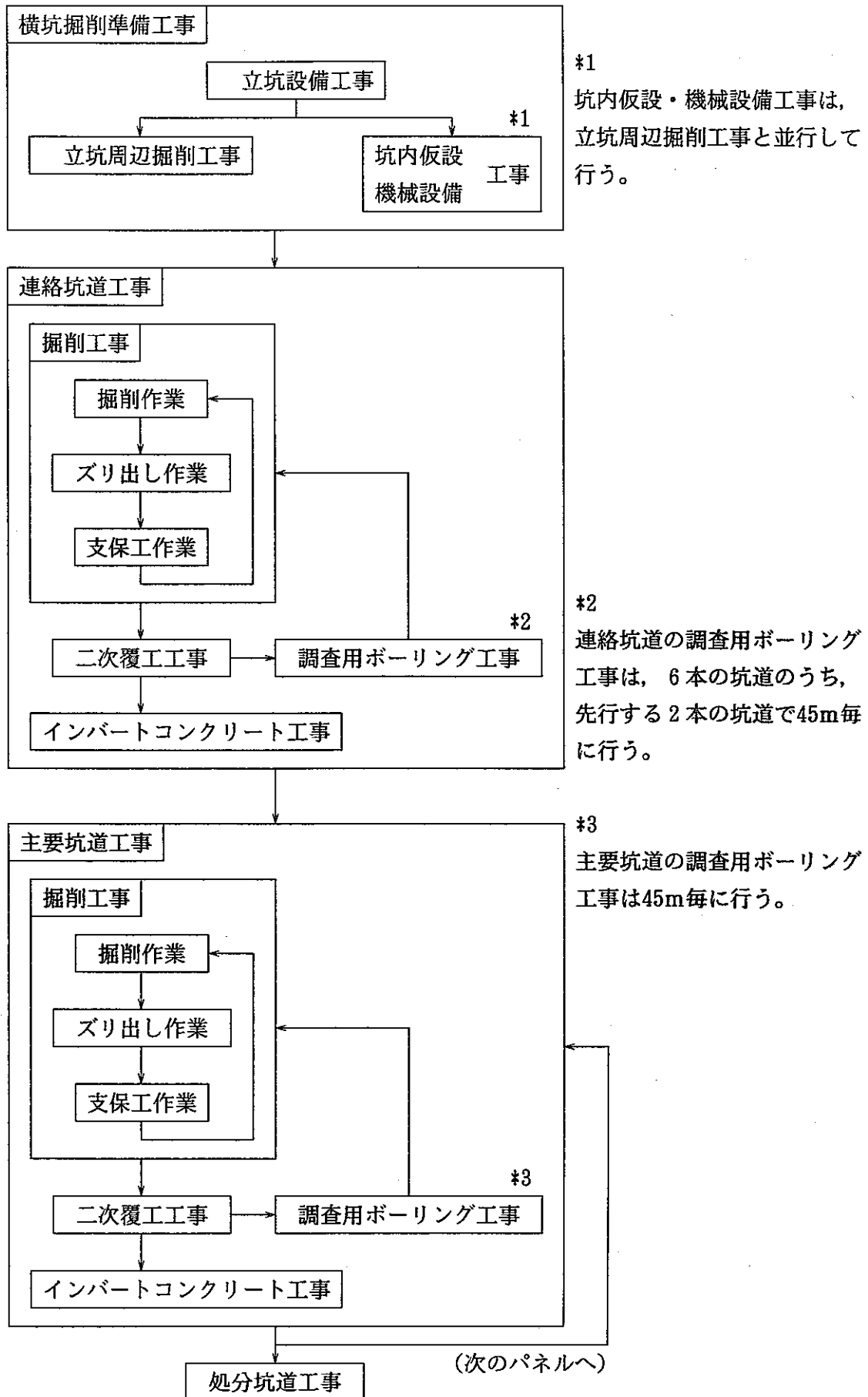
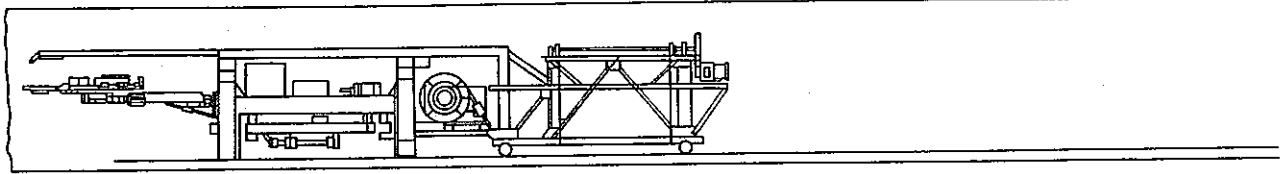


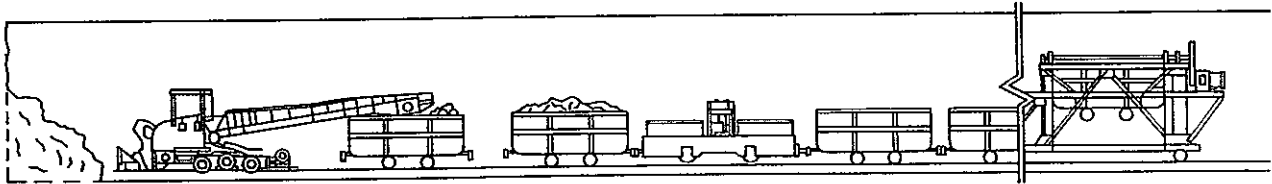
図3.2-2 主要・連絡坑道の施工フロー

①削孔、装薬



2ブーム油圧ガントリージャンボ (HD-135)(チェリーピッカ付)

②発破、ズリ出し

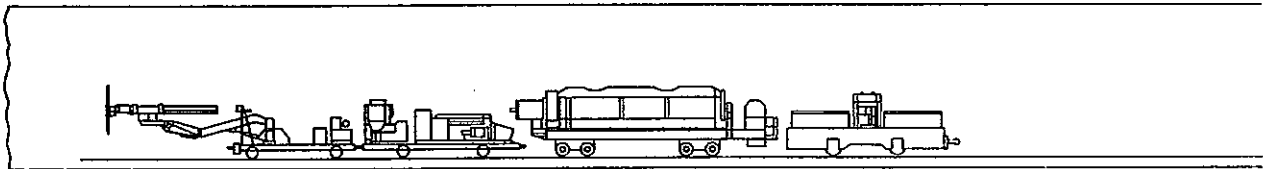


ロッカーショベル(6m³)

ズリ鋼車(6m³) バッテリー機関車(12t)

チェリーピッカ

③吹付コンクリート

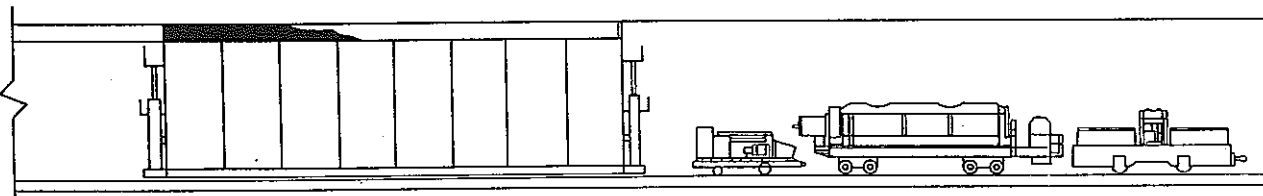


吹付ロボット

吹付機

アジテータカー

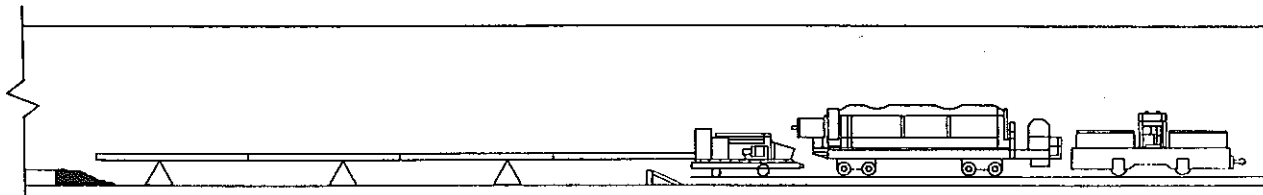
④二次履工



スライドセントル(12m)

コンクリートポンプ

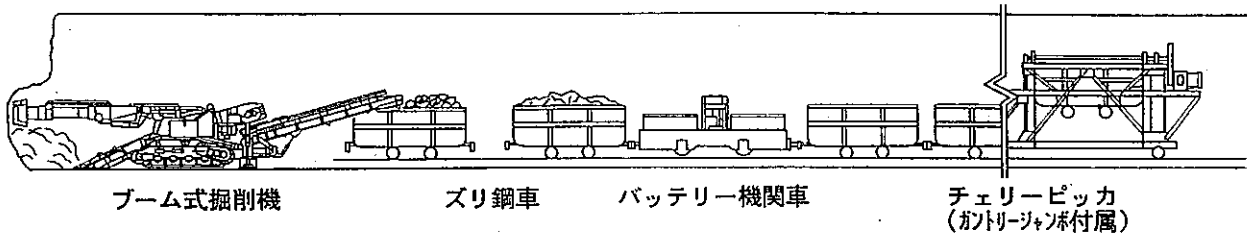
⑤インバートコンクリート



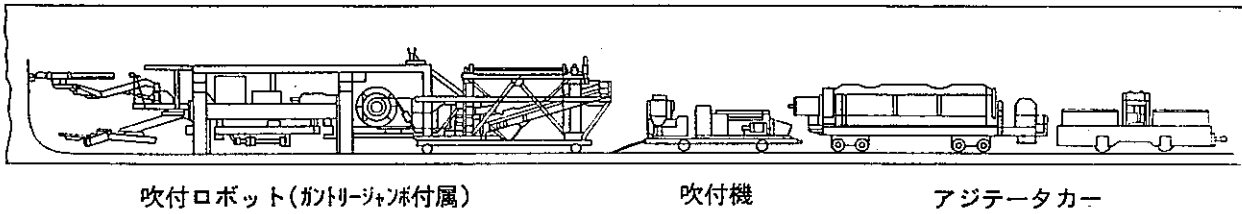
打設用配管

図3.2-3 結晶質岩系主要・連絡坑道施工順序図

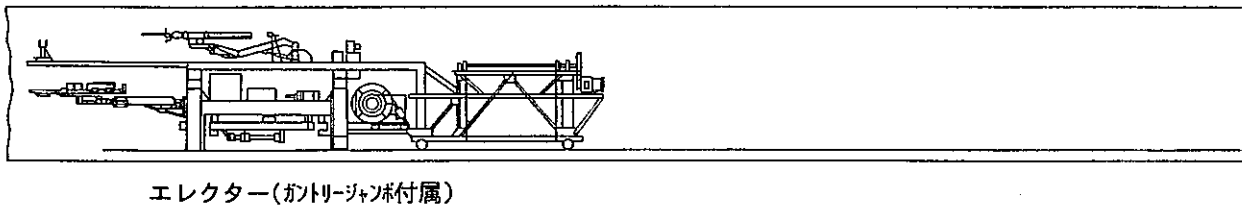
①掘削・ズリ出し



②1次吹付コンクリート ④2次吹付コンクリート



③鋼製支保工建込・金網取付



④ロックボルト打設

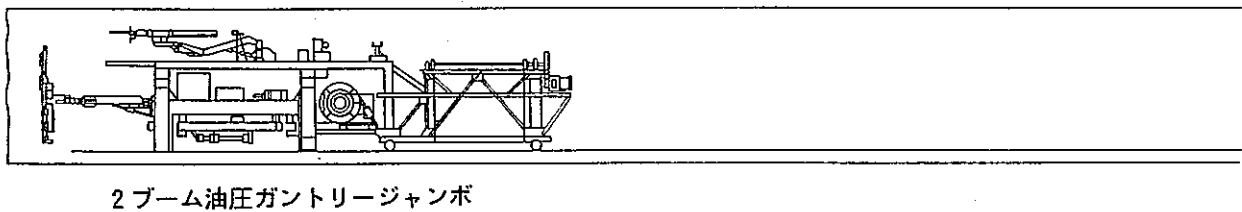


図3.2-4 堆積岩系主要・連絡坑道施工順序図

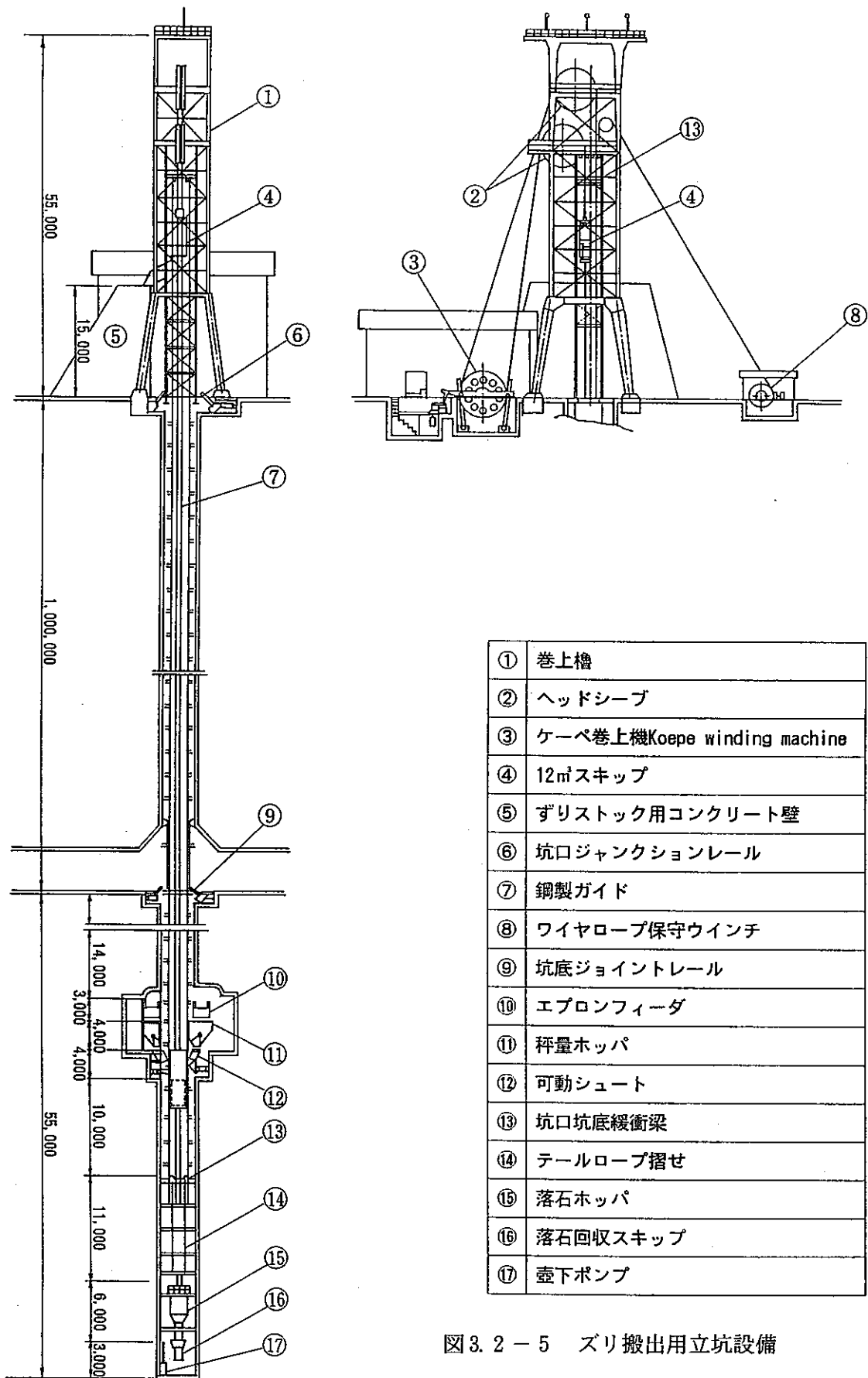
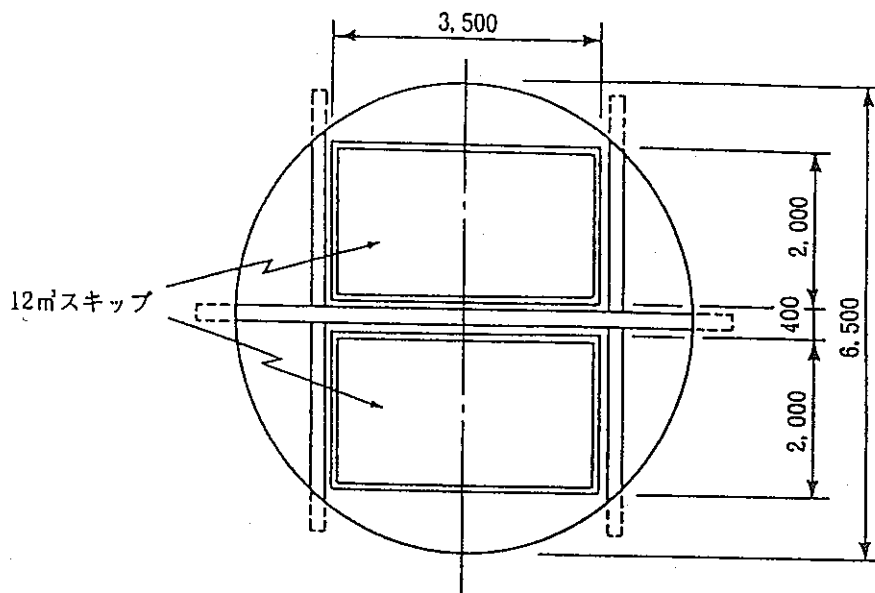
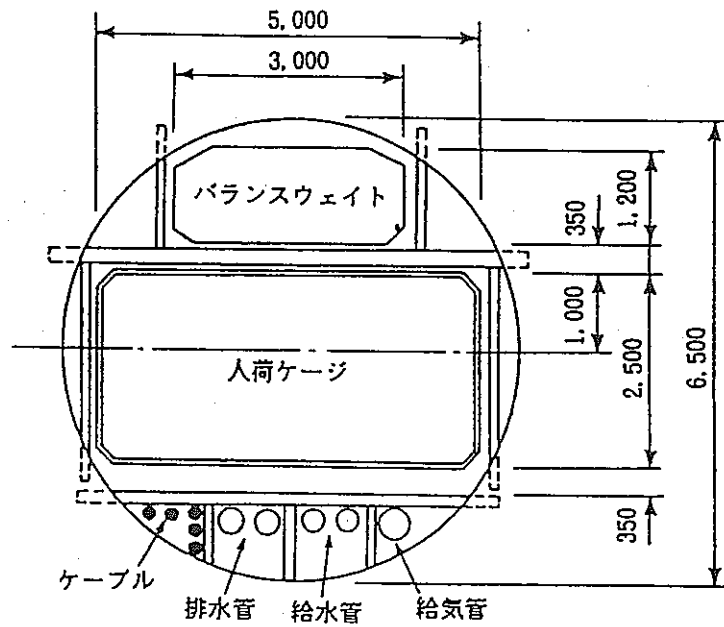


図3.2-5 ズリ搬出用立坑設備

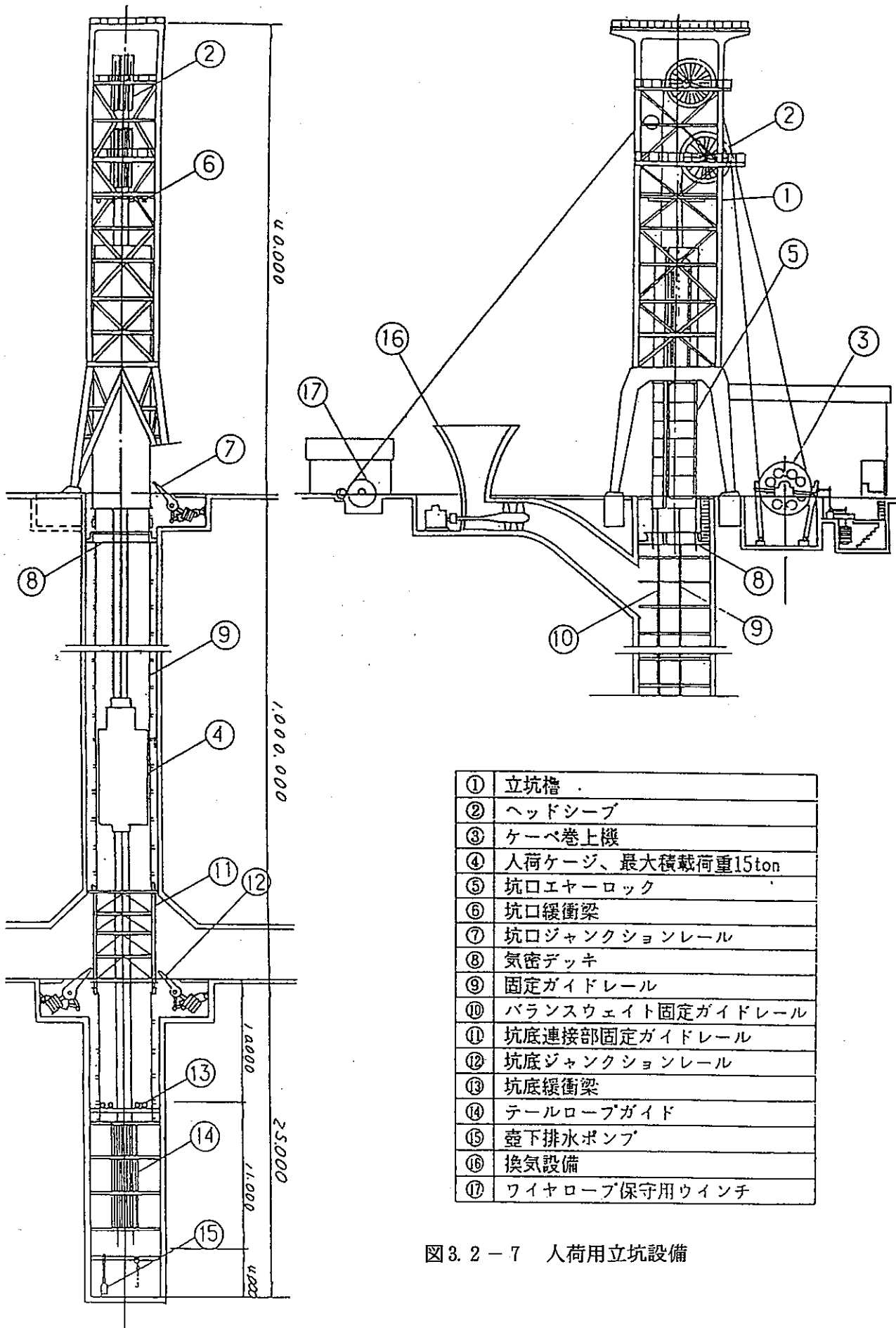


(ズリ搬出用立坑断面)



(人荷用立坑断面)

図3.2-6 立坑断面図



①	立坑槽
②	ヘッドシーブ
③	ケーベ巻上機
④	人荷ケージ、最大積載荷重15ton
⑤	坑口エヤーロック
⑥	坑口緩衝梁
⑦	坑口ジャンクションレール
⑧	気密デッキ
⑨	固定ガイドレール
⑩	バランスウェイト固定ガイドレール
⑪	坑底接続部固定ガイドレール
⑫	坑底ジャンクションレール
⑬	坑底緩衝梁
⑭	テールロープガイド
⑮	壺下排水ポンプ
⑯	換気設備
⑰	ワイヤロープ保守用ウインチ

図3.2-7 人荷用立坑設備

3.3 処分坑道

3.3.1 工法

(1) 掘削工法

主要・連絡坑道の場合と同様の検討から、処分孔縦置きの場合はスムーズブラスティングによる発破工法、坑道横置きの場合はTBM工法を採用する。

(2) ズリ出し工法

処分孔縦置きの場合は、主要・連絡坑道の場合と同じである。坑道横置きの場合に用いる小口径TBM工法（資源エネルギー庁・新エネルギー財団，1991）のズリ出し方式としては、

- ・流体輸送方式
- ・ベルトコンベア方式

がある。流体輸送方式の場合は、排泥管を利用して掘削ズリをポンプで流体輸送するため、小断面で連続的なズリ運搬ができるが、排泥管の径によってはズリの再破碎や輸送後の固液分離の設備が必要となる。ベルトコンベア方式の場合は、ズリの再破碎の必要性は少なく大規模な設備を必要としない。処分坑道の全長にわたってのベルトコンベア方式は、スペースや故障時の対応を考えると、ズリ鋼車との併用が望ましいと考えられる。よって、ここではTBMの後方台車まではベルトコンベア方式とし、ズリ鋼車を組み合わせる方式を採用する。ただし、小断面のためレールは複線とならないので、ズリ仮置用の車両をTBM後方に常設し待ち時間をなくす。

3.3.2 施工概要

処分孔縦置きの場合は、主要・連絡坑道の場合と支保作業と二次覆工を行わない点が異なるだけで、その他は同じになることから、以下は坑道横置きの場合に限って一例を述べる。

坑道横置きの場合の処分坑道の施工フローを図3.3-1に示す。但し今回の設定では結晶質岩系の場合は、支保作業及びセグメント組立ては行われない。

処分坑道の掘削は、主要坑道の施工が完了した時点で行うが、処分坑道の出入口においては、他の作業に支障なくTBMの組立、解体をする必要があるため、主要・連絡坑道と同断面（ただし二次覆工は施工せずインバートのみ施工）のすりつけ部を約70m設ける。

このすりつけ部の施工は、主要・連絡坑道と同様の方式で行う。

TBMによる掘削は、カッターヘッドを切羽に圧着しながら回転させ、カッターヘッド前面に設けたディスクカッターにより岩を圧砕する方法で行われる。

掘削機は、直接岩盤を掘削する掘削機本体とこれを駆動するための設備を搭載した後続車によって構成される。推進方式としては、グリッパーシューを坑壁に圧着して主推進シリンダーで掘進する方式と、断層破碎帯や軟弱地山でグリッパーシューが沈み十分な反力が得られない場合、掘削機後方に構築されたセグメントを反力受けとして、推進シリンダーで掘進する方式があり、結晶質岩系では前

者、堆積岩系では後者が主になると考えられる。

掘削されたズリは複数のベルトコンベアを通じて後方へ輸送され積み込まれる。

ズリ搬出は、掘削断面が3 mと小さく、単線軌道となること、さらに処分坑道の性格上拡幅部を設けて車両入換えはできないことを考慮して、ズリ運搬車両としてシャトルカーを使用する。この際、ズリ運搬車両の待ち時間による稼働率の低下を防ぐためにズリ仮置車両をTBM後方に常に定置しておく。

坑道掘削は能率を考えると複数切羽となることが考えられることから、ズリ搬出の効率を考慮して掘削は両方向から行う。

堆積岩系の場合は、掘削1 m毎にエレクターによる鋼製セグメントの組み上げを行い、このセグメントを推進の反力受けとする。

3.3.3 対策工

他の坑道と同様の施工上の対策を講じるべき点が考えられるが、主要坑道の施工により事前の情報が多いものと思われる。

破碎帯については、結晶質岩系の場合も鋼製セグメントを用いたり、事前にセメントの注入を行い対応する。セメント注入は湧水対策ともなる。

山はねについてはTBMの場合、安全上あまり大きな問題とはならないは思われるが、必要に応じて切羽に近い位置でフリクションボルトを打設する。

堆積岩系の場合は地山の押し出しによりTBMが捕捉される可能性がある。これは地山のクリープ的な挙動によるものと考えられるので、オーバーカット用ゲージカッターにより掘削径を大きくしたり、できるだけ早期にセグメントを組み立てることや、地山状況を常に把握して施工に反映させる方法を取り対応する。

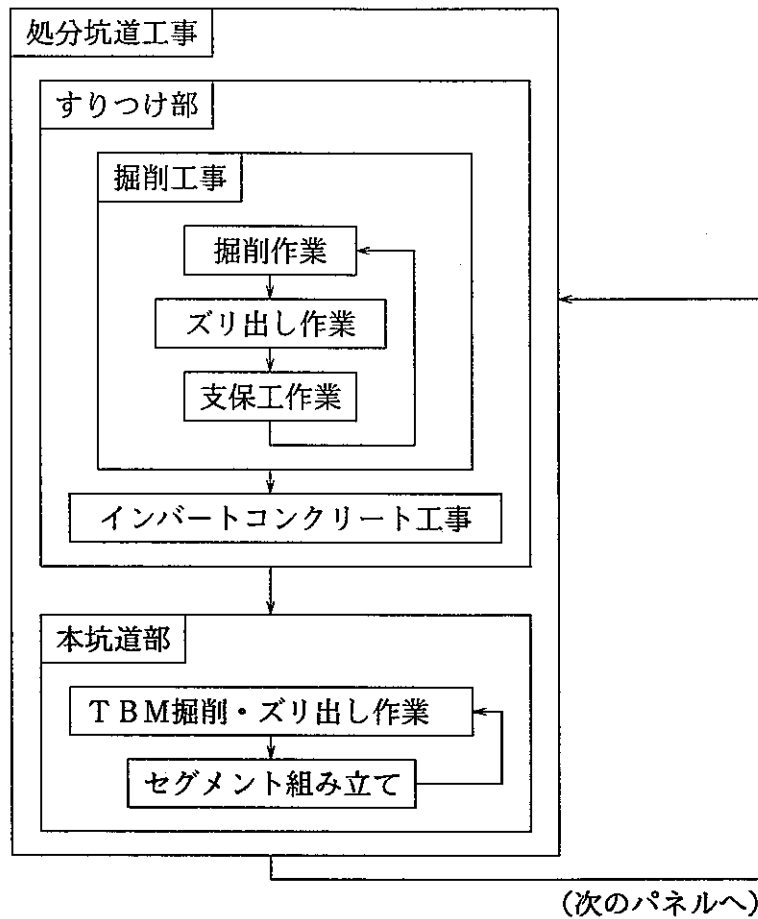


図3.3-1 処分坑道施工フロー

3.4 処分孔

処分孔は、「2.技術的検討条件」で述べたように1孔当たり $\phi 1.70\text{m}$, $l = 5\text{m}$ の円筒形の空間が必要とされる。また、処分孔としての性格上、その掘削方法、仕上がりには特に留意する必要がある。

3.4.1 工法

現在可能と考えられる処分孔の掘削方式を列举すると、表3.4-1に示すようなものが挙げられる。

これらの工法のうち、

- ・リバースサーキュレーション工法
- ・ブーム式掘削機工法
- ・コアボーリング
- ・ウォータージェットによる工法

については、装置の規模、対象岩質の強度、掘削能力、実績の点で問題があり、下記の2工法が有力である。

- ・全断面掘削機工法
- ・ラインドリリングによる工法（橋本，1987）

この工法を比較すると、全断面掘削機工法の方が安全性、施工性、仕上がり精度等の面で優れていることから、ここでは全断面掘削機工法を採用する。

3.4.2 施工概要

全断面掘削機工法による処分孔の施工全体フローを図3.4-1に示す。また、処分孔の施工・設備の概要を図3.4-2に示す。

施工機械設備は、①掘削機本体、②発進・格納架台、③後続台車設備、④土砂分離・ズリ積込設備より構成される。以下にこれらの概要を述べる。

① 掘削機本体

硬岩用のTBMと同様のローラーカッターを岩盤に押しつけて回転させ、岩盤を圧砕する圧砕型の掘削機である（Wirth社，1988）。

② 発進・格納架台

移動時には掘削機本体を格納し、掘削機の発進時にはグリッパーに反力を与える移動式の架台である。

③ 後続台車設備

後続台車設備は台車に搭載され移動するものであり、油圧装置、流体輸送装置、電気設備、運転座席等から構成されている。

④ 土砂分離・ズリ積込設備

掘削機本体から流体輸送ポンプにより排出されたズリを水と土砂に分離し、鋼車に積み込む設備である。

施工順序の概要を以下に述べるとともに図3.4-3に示す。

① 掘削位置への移動・セット

掘削機を納めた後続台車設備を掘削位置までレール上を移動させ、発進・格納架台のサイドジャッキを張り架台を固定する。

② 掘削

掘削機のグリッパージャッキを拡張し、マシンを架台に固定して掘進する。1ストローク（50cm程度）掘進後、グリッパージャッキを縮小し、送りシリンダーにより掘削機本体を引き下げる。再びグリッパージャッキを拡張し、マシンを架台あるいは岩盤に固定し以上の作業を繰り返す。

③ ズリ搬出

掘削されたズリは流水を利用して吸入ポンプにより孔外まで搬出し、後続車のエア抜きタンクに送られ、そこから最後尾の土砂分離設備台車（スクリーン及びサイクロン搭載）に送られる。ここで土砂（ズリ）と水は分離され、ズリはベルコンによってズリ鋼車に積み込まれ、立坑を通して坑外に搬出される。

④ 掘削機引き上げ

$l = 5\text{ m}$ の処分孔を掘削した後グリッパージャッキを縮小し、ウインチにより発進・格納架台内に掘削機を収め、サイドジャッキを縮小し、次孔へ移動する。

処分坑道掘削終了部分については、ただちに処分孔の掘削が可能であるので、全体工期の短縮をはかるために1処分区画内で処分坑道掘削と処分孔の掘削を同時に行う。処分坑道は、1坑道につき2切羽とし各坑道を連絡坑道側、主要坑道側の両側から掘削する。処分孔掘削のために坑道中央部のレールを撤去する必要があるので、坑道中央からそれぞれ接続・主要坑道方向に向けて施工を行う。

処分孔は素掘り（無支保）であるので支保工はない。

また、ここでは標準的な岩盤を想定し大きな地質的変化がないものとし、対策工は考えないこととした。

表3.4-1 処分孔の掘削方法

工 法 名	概 要
リバースキュレーション 工法	<p>全断面を一度に上部から掘り下げる方式で、掘削孔内を常に満水状態に保ち、孔底のドリルビットにより掘削した掘削ズリを逆循環（リバースキュレーション）方式により水とともに連続的に排出するものである。ビットの回転は、上部のロータリーテーブルまたはパワースイベルをとおして伝達される。大口径の実績もあるが、大規模な坑外設備を要する。</p>
全断面掘削機工法	<p>TBMの考え方を立体掘削に採用した全断面掘削機の応用である。ドリル本体は、油圧シリンダーを孔壁に張り固定し、ドリルビットは本体に組み込まれた伝導モーターで回転される。掘削ズリの排出は、泥水を利用した流体輸送方式による。実績はない。</p>
ブーム式掘削機工法	<p>ブーム式掘削機を立坑掘削用に改造したタイプのもので、切削部はブーム式掘削機とほぼ同様である。掘削機本体は、孔壁にグリッパにより固定され、掘削されたズリは吸込管を通して泥水とともに吸い込まれ排出される。</p>
コアボーリング	<p>超大口径のボーリングにより処分孔を建設する工法。$l = 5$ mのコアは回収できないため、数ステップに分けたボーリング・コア切取り（あるいは破碎）・回収作業が必要となる。$\phi = 1.70$ mでのコアボーリングの実績はない。</p>
ラインドリングによる工法	<p>処分孔円周に沿って掘削機により$\phi = 60$ mm程度の孔を連続して削孔し、地山との縁切りを行う。この後、中心部の岩体の破碎及び回収、さらに、孔壁面を平滑にするための仕上げ掘削が必要となる。</p>
ウォータージェットによる工法	<p>上述のラインドリングによるかわりに、高水圧を利用したウォータージェットにより地山との縁切りを行う。ラインドリング工法の場合と同様、縁切りされた中心部の岩体は、あらためて破碎及び回収する必要がある。現時点でのウォータージェットの技術では、5 mを一度で切削する能力がないので、数ステップに分けた切削となる。</p>

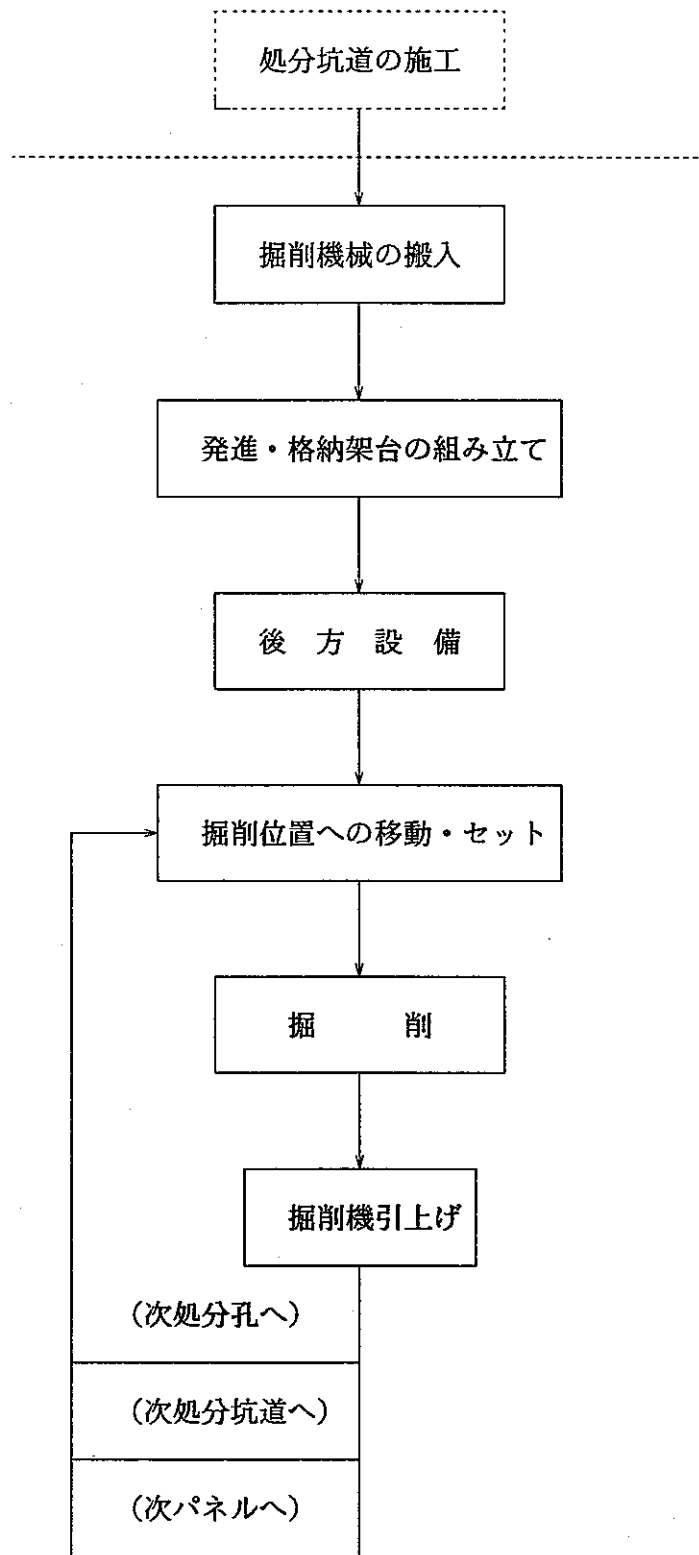
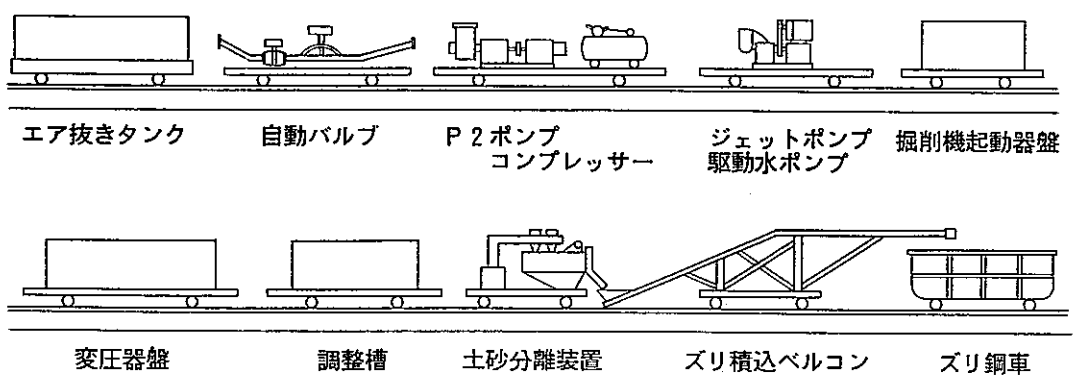
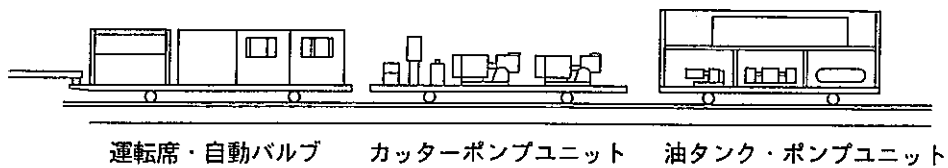
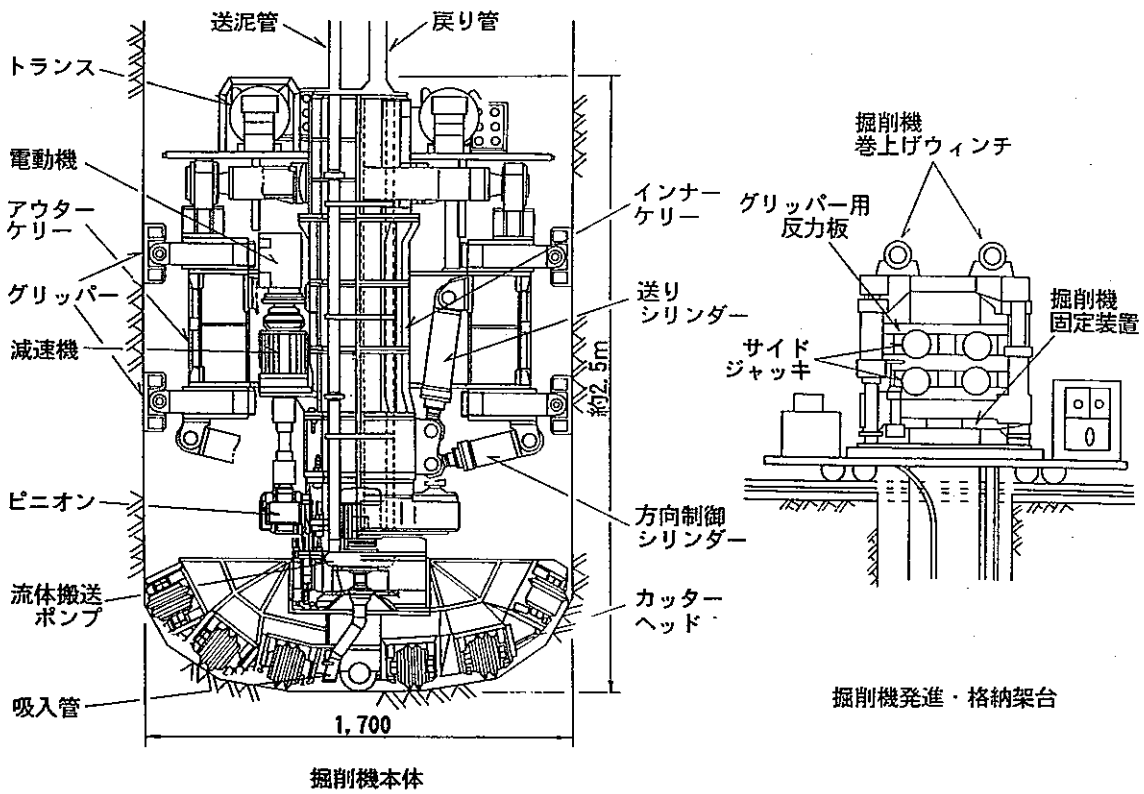


図3.4-1 処分孔の施工全体フロー



後続台車設備

図 3. 4 - 2 処分孔掘削設備概要

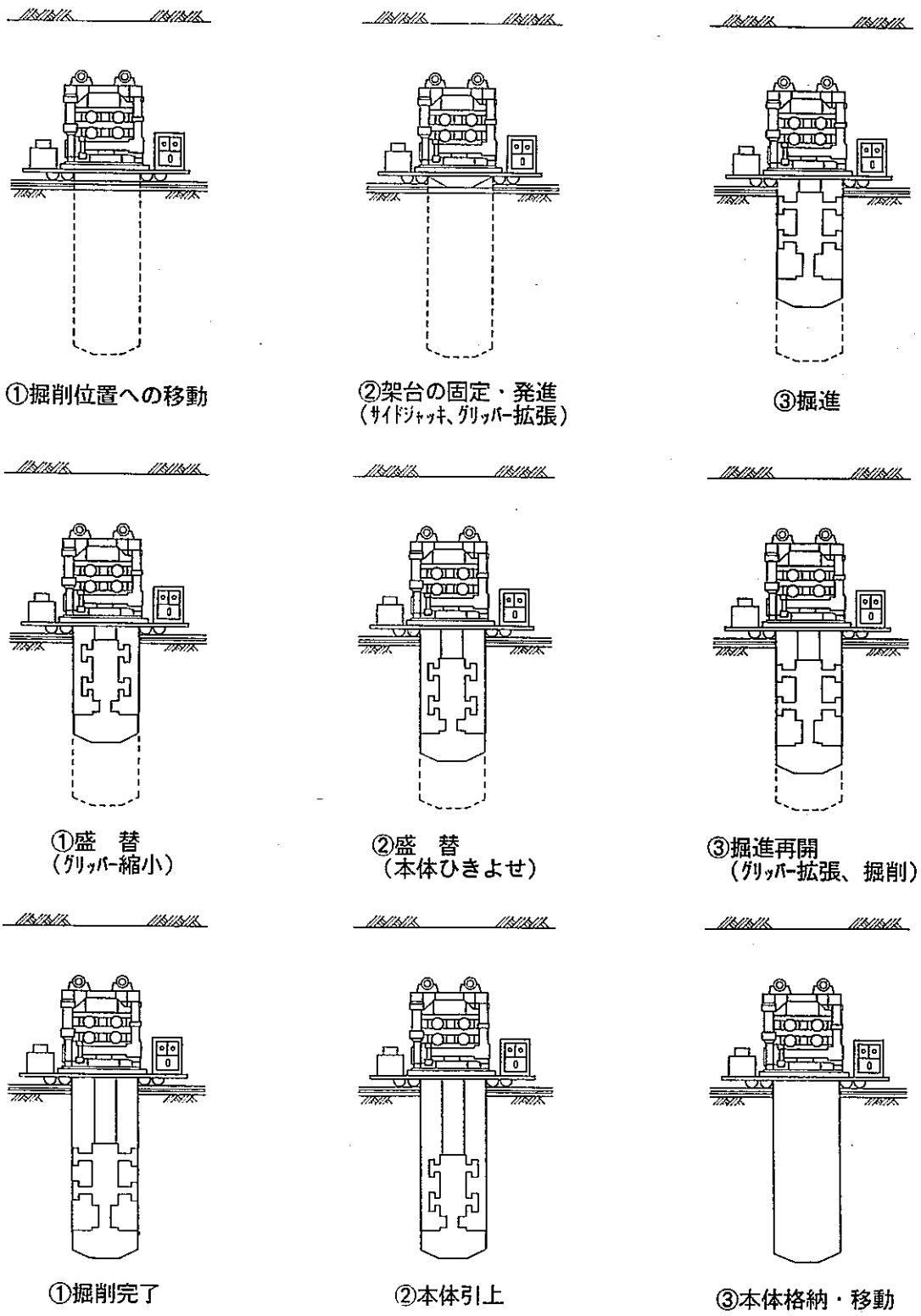


図3.4-3 処分孔掘削・施工順序

4. まとめ

処分場の施工方法を検討した結果、現状技術の範囲内で設定された地下施設の施工の見通しがあると思われる。しかしながら、500m～1000mの深部施工という条件を勘案すると、作業の安全性等から完全機械化施工（ロボット化）のような施行技術の高度化を図る必要がある。また、岩盤状況に応じた適切な施工方法や対策工を実施していくには、事前に岩盤状況を精度よく把握する必要がある。このための方法としては、現在でもレーダーやボーリング孔を利用した方法があるが、より簡便で高精度な手法の開発が今後の課題となる。

また、操業および人工バリアの設置には高い精度が要求されることから、高度化された自動化施工や施工管理システムの開発が重要であり、実現性を確認するには地下深部環境下、あるいは模擬した条件下での技術の確証試験を繰り返し実施することが今後の課題となる。

以下には、今後の技術的課題と今回検討した内容を取りまとめる。

4.1 技術的課題

(1) 立坑

(a) 前方予測技術及び対策

①先方地山の湧水量、ガスなどの地質状況を簡便かつ高精度に予知する技術の開発

②高圧注入技術、ガス抜き技術及びその管理、効果確認技術の開発

③山はね対策（望月ほか、1990）

(b) 作業の効率化、自動化

①作業の機械化、自動化、ロボット化

②情報化施工システムの開発

③影響領域を少なくするための発破工法の改良

④支保、覆工の材料開発と施工の自動化

⑤ズリ搬出技術の開発

(2) 水平坑道

(a) 交差部の検討

①交差部の補強技術の改良

②交差部角度が90°に近い場合の車両運行手法の開発

(b) 前方予測技術及び対策

①レーダー、ボーリング等の前方予測技術の開発

②山はねを抑制する手法（補強、ロックボルト等）の開発

(c) 車両運行管理方法

①施工サイクル管理、運行可能限界などの検討

(d) 作業の効率化、自動化

①作業の機械化、自動化、ロボット化

②幌型あるいは硬岩用の自由断面掘削機の開発

(3) 処分孔

(a) 前方予測技術及び対策

- ①岩盤の地質状況の予知技術開発
- ②掘削した処分孔の孔壁を安定させる手法の開発

(b) 作業の効率化, 自動化

- ①作業の自動化, ロボット化
- ②水圧ジェット等の新技術を活用した施工システムの開発
- ③ズリの固液分離, 搬送技術の開発

5. 参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳編）同解説，1986
- 2) 平松良雄：通気学，内田老鶴圃新社，1974
- 3) 北新建設株式会社：立坑開削法（増補版），1978
- 4) Hoek E. and Brown E. T. : Underground Excavation in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980
- 5) 稲毛正昭：換気立坑入門(5)～(8)，トンネルと地下，第11巻，第10号～第12号および第12巻，第2号，1980～1981
- 6) 建設業労働災害防止協会：ずい道工事における換気技術指針，1991
- 7) 枡本正，本田裕夫，萩森健治；山岳トンネルの新技术(7)，トンネルと地下，第18巻，第10号，1987
- 8) 望月常好，他：土被り200mで山はね現象に遭遇，トンネルと地下，第21巻，第9号，1990
- 9) 日本トンネル技術協会：トンネル工事事用資材ハンドブック，1981
- 10) 五月女敦，藤田朝雄，原啓二，納多勝：地層処分場の熱的安定性の検討，PNC TN1410 92-054
- 11) 五月女敦，藤田朝雄，原啓二，納多勝：地層処分場の空洞安定性の検討，PNC TN1410 92-055
- 12) 通産省資源エネルギー庁，新エネルギー財団：中小水力標準化モデルプラント設計調査報告書－TBM工法によるトンネル施工の合理化－，1991
- 13) 高山昭，今田徹，尾登数夫：トンネル施工法，山海堂，1977
- 14) 高山昭（監修）：NATMの理論と実際，土木学社，1983
- 15) Wirth社（ドイツ），Shaft Boring Machine，1988