

高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術 —その6 地下施設の設計・建設—[†]

金川 忠¹ 野崎隆司² 出口 朗³ 高橋美昭³ 石井 卓⁴ 河村秀紀⁵

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、わが国では地下数 100m から 1000m 程度までの地下深部を対象に種々の検討がなされている。本稿は、37,800 本の廃棄体を埋設処分する地下施設について、処分予定地の建設可能性を概略的に確認する基本設計の考え方、建設深度や施設規模の検討、基本的な施設配置例の概要を示し、つぎに、処分地における具体的な詳細設計として空洞形状やその大きさ、支保形式やその材料、坑道の離間距離や廃棄体の埋設密度、地下施設内の換気や排水について検討し、詳細な施設配置計画を例示した。さらに、地下施設の施工として坑道の掘削方法やそのずりの搬出方法と設備、坑道周辺岩盤のグラウトの方法とその材料、換気・冷房・排水の設備などについて示し、掘削時の施工管理についても現状技術との対応で概要を示したものである。

Keywords: 放射性廃棄物, 地層処分, 地下施設, 施設設計

In Japan, several kinds of techniques needed for high-level radioactive waste disposal have been researched and developed for the deep underground rock formation which is distributed from several hundreds meter to one thousand meter below the surface. In order to confirm roughly the feasibility on the construction of disposal, as a first step in this study, a fundamental design concept of the underground facilities necessary to dispose of about 37,800 waste forms is discussed, and the depth and scale of the disposal facilities are estimated. Furthermore, an example of the basic layout design for disposal facilities finally is demonstrated under the above discussion.

In the second step, we discussed the more detail design, such as the shape and dimension of tunnels, the types and materials for tunnel timbering, the minimum distance between adjacent tunnels or waste forms and the ventilation and drainage system. Furthermore, we demonstrate an example of the detailed layout design of total disposal facilities under the above discussion.

We also investigated the some construction techniques such as the excavation method, the carrying out method of excavated rocks, the grouting method for rocks around tunnels and the grouting materials and the equipment for ventilation, air-cooling and drainage in tunnels, and then propose roughly a method for construction management based on the present available techniques.

Keywords: radioactive wastes, geological disposal, underground facility, facility design

1 はじめに

本特集では、「高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術」として、処分の実施主体が行う処分サイト選定、地質・地下水特性調査、施設設計、安全評価、施設の建設、廃棄体埋設、施設の閉鎖など、一連の処分事業を模擬的に机上で検討した。

地下深部の地質環境は、一般に地表近くに比べて地質学的な長時間に対してもきわめて安定であると考えられていることから、わが国では高レベル放射性廃棄物を地下数 100 m から 1000 m 程度までの深地層中に処分することを基本方針としている。そして、その処分サイトの選定プロセスについては本特集の (その 2) で述べたように、処分候補地の選定、処分予定地の選定および処分地の選

定の 3 段階で適地の絞り込みを行うことになっている。

高レベル放射性廃棄物の地下への処分とは、まず地上から地下の処分位置まで立坑あるいは斜坑を掘削してアクセスする。そして、処分位置において処分坑道または処分孔を掘削して廃棄体を定置し、その後で廃棄体や各坑道等すべてを埋め戻すことである。したがって、処分候補地の選定段階では、これらの地下施設を地下深部に配置できるような広がりを持つ岩体の存在を文献調査等により見極めることになる。この処分候補地選定段階の調査・検討は本特集の (その 3) に示されている。

地下施設の設計としては、上記 3 段階のうちの処分予定地として選定された地点において実施される「基本設計 (概念設計)」と処分地として選定された地点において実施される「詳細設計」の 2 つの段階がある。基本設計は、処分予定地選定段階までの数少ない調査データに基づいて建設深度や地下での施設規模 (広がり) を概略的に設定し、処分場建設が可能であることを確認するために行われる。詳細設計は、処分地選定段階における地上からの詳細な調査データを用いて、地下施設の構成要素について具体的な設計が行われる。

本報告 (その 6) では、本特集の (その 1) で述べたように、わが国で広く分布する堆積岩および結晶質岩の仮想 2 サイトを対象として、(その 4) の人工バリアの設計および (その 7) の廃棄体の埋設と処分施設の埋戻しとの技術的な調整を図りつつ、地下施設の設計・建設を検討したものである。

[†] Execution techniques for high-level radioactive waste disposal: VI Design and construction for underground facilities, by Tadashi Kanagawa (kanagawa@criepi.denken.or.jp), Takashi Nozaki, Akira Deguchi, Yoshiaki Takahashi, Takashi Ishii and Hideki Kawamura

1 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 バックエンドプロジェクト Nuclear Fuel Cycle Back-End Project Abiko Research Laboratory Central Research Institute of Electric Power Industry 〒270-1194 我孫子市我孫子 1646
2 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 地盤耐震部 Geotechnical & Earthquake Engineering Department Abiko Research Laboratory Central Research Institute of Electric Power Industry 〒270-1194 我孫子市我孫子 1646
3 東京電力(株) 原子力技術部 原子燃料サイクルグループ Nuclear Fuel Cycle Engineering Nuclear Power Engineering Dept. Tokyo Electric Power Company 〒100-0011 千代田区内幸町 1-1-3
4 清水建設(株) 電力・エネルギー本部 エネルギープロジェクト部 Energy Project Dept. Power & Energy Project Div. Shimizu Corporation 港区芝浦 1-2-3
5 (株)大林組 東京本社 Civil Engineering Technology Div. Obayashi Corporation 〒108-8502 港区港南 2-15-2

2 設計・施工の基本的考え方

2.1 考慮すべき地質環境条件

地下施設の設計・施工において、まず考慮すべき事項は、選定された地点の地質環境がどのような状況にあるかを把握することである。しかも、今後地下に処分施設が建設され、その影響が地質環境に及ぶことを十分に配慮しておく必要がある。

地質環境条件としては、基本的に自然環境下における地形、地質構造、地下の水理的・力学的・熱的な環境条件があり、さらに施設周辺の岩盤を構成する地層、断層等についての物理特性・力学特性・水理特性・熱特性などがある。

2.2 設計・施工の要件

地下施設の設計・施工に関する基本的な要件としては、以下のものが挙げられる。

- ① 要求性能を満足すること。
- ② 設計条件を満足すること。
- ③ 施工時の安全性を確保すること。
- ④ 経済的に有利であること。

そこで、これらの要件を受けて、上記①、②に対しては、本稿 3,4 章の地下施設の設計においてできるだけ根拠を示して設計し、上記③に対しては、5 章の地下施設の施工において反映させることにした。また、上記④に対しては、本稿の全般にわたり現状技術の流用の可否や物量等に関して経済性を意識した設計・施工を行った。

2.3 地下施設の構成要素と設備項目

地下施設の空洞(坑道)群の構成を Fig.1 に示す。これらの各坑道はその役目に応じて、支保、グラウト、廃棄体、緩衝材、埋戻し材、プラグ等により構成される。

地下施設の施工では、坑道の掘削・支保構築の期間(建設段階)と坑道内での廃棄体搬送・定置から坑道埋戻しまでの期間(操業・閉鎖段階)に大きく分けることができる。この施工に関わる主要な設備構成を示すと、Fig.2 のようになる。これらの構成要素に対して、地下深部における各坑道の基本設計と詳細設計および地下施設固有の施工方法と主要な設備について詳細に検討する。ただし、建設段階の検討項目については本稿(その 6)で扱うが、操業・閉鎖段階の検討項目については主に(その 7)で扱う。なお、各坑道の安定性は、建設段階および操業・閉鎖段階の数十年間にわたって必要であるが、これらの期間は支保の維持管理により対処することもできる。閉鎖後の長期的な安定性については、長期性能評価の観点も含めて検討すべき性質の要件であり、今後の検討課題である。

3 地下施設の基本設計

3.1 設計の検討フロー

処分事業スケジュールの中で示された地下施設の設計としては、処分予定地選定段階で実施される「地下施設の基本設計」と処分地選定段階で実施される「地下施設の詳細設計」とに大別される。この 3 章では、この内の基本設計に関わる検討を行い、詳細設計については 4 章で述べる。

処分予定地選定段階では、基本設計として処分予定地の地質条件等を考慮した地下施設の深度と規模(広がり)を概略的に設定することが主たる目的となる。この段階では、処分候補地選定段階の調査に加え、地表踏査や限られた数のボーリング調査等による処分予定地選定段階の調査が行われている。したがって、地下施設の基本設計はそれらの数少ないデータ等に基づいて Fig.3 に示したフローに従って行う。

なお、これらの設計は、仮想地点として選定されている結晶質岩(花崗岩)分布地域と堆積岩分布地域の 2 地点について具体的に行う。

3.2 建設深度の設定

地下施設の建設深度は浅い方が経済的であるが、放射性核種に対する安全評価上は一般的には深い方が望ましい。この深度の設定に当たっては総合的な検討が必要であるが、ここでは空洞の力学的安定性と地下水流動場の観点から検討を行う。

3.2.1 空洞の力学的安定性の解析的概略検討

力学的な安定性を解析的に検討するためには、空洞形状、地山条件、地圧条件、支保形状等の様々な条件設定が必要である。しかし、建設深度は「処分予定地選定段階」で概略的に設定する必要があり、その段階では十分な岩盤物性などが得られていない。

比較的簡易に空洞安定性を検討する方法としては、理論解析(Eggerの方法)がある。この方法では、岩盤を完全弾塑性体と仮定して、岩盤の弾性係数、せん断強度、内部まさつ角、ポアソン比および地圧条件等を与えることにより、二次元円形空洞周辺の塑性領域や支保厚さを求めることができる。岩盤の安定性評価基準には、応力またはひずみで定義する方法があるが、ここでは、経験に基づく便宜的な方法ではあるが限界ひずみを用いることにした。これは、調査データの少ないこの段階での概略的な検討には適用できると考えたためである。ただし、この基準の適用性に関しては、非常に深い位置に掘削する空洞に対してもある程度有効であることを海外の掘削事例あるいは今後の国内の類似掘削例を参考にして、その妥当性を確認していくことが課題となる。

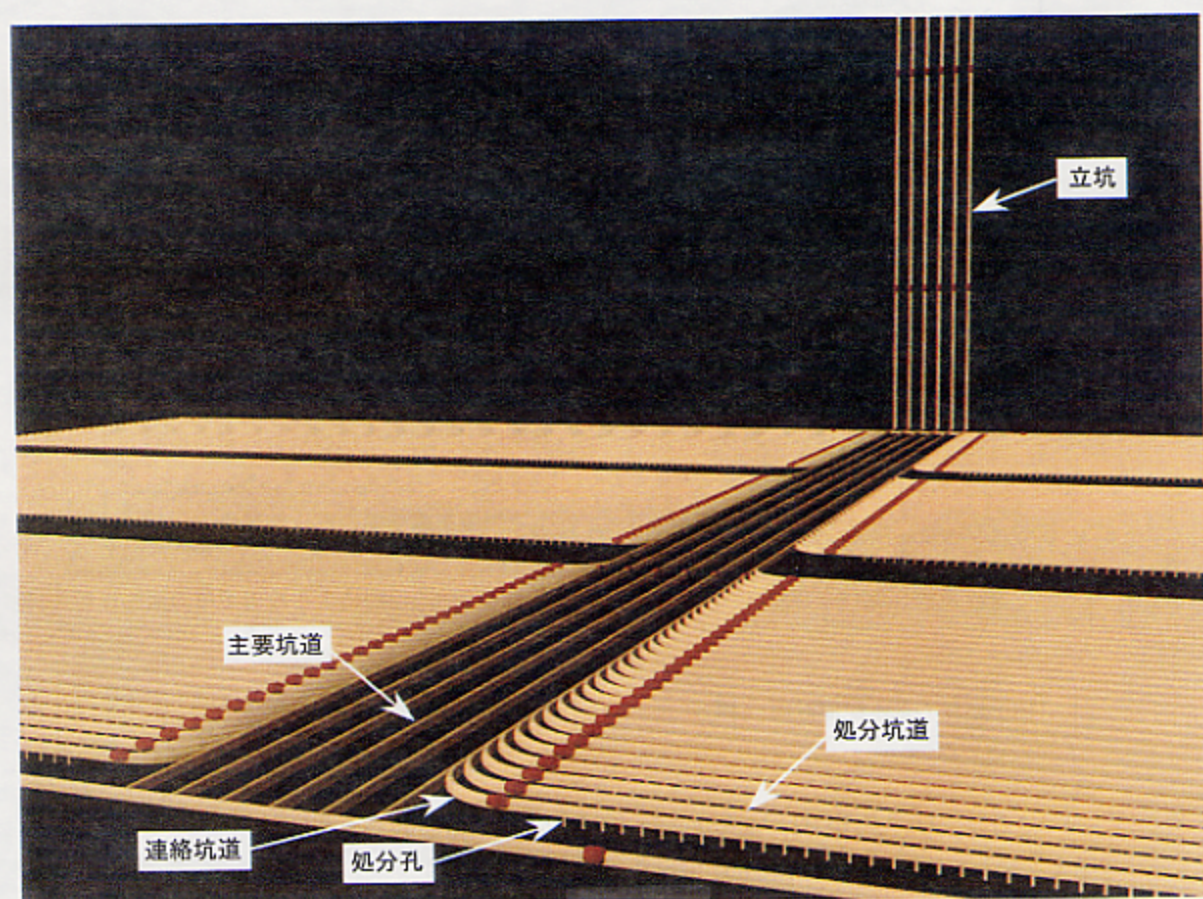
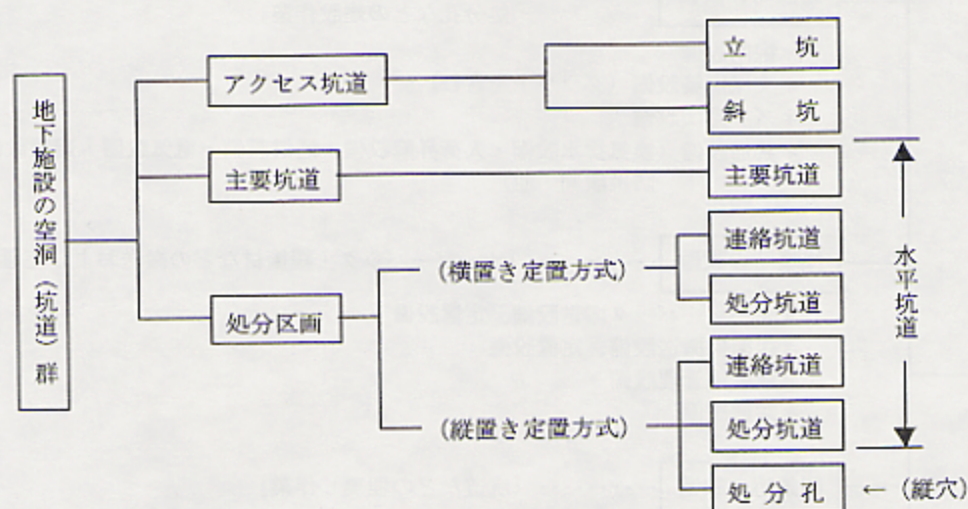


Fig.1 Composition of tunnel groups in underground facilities

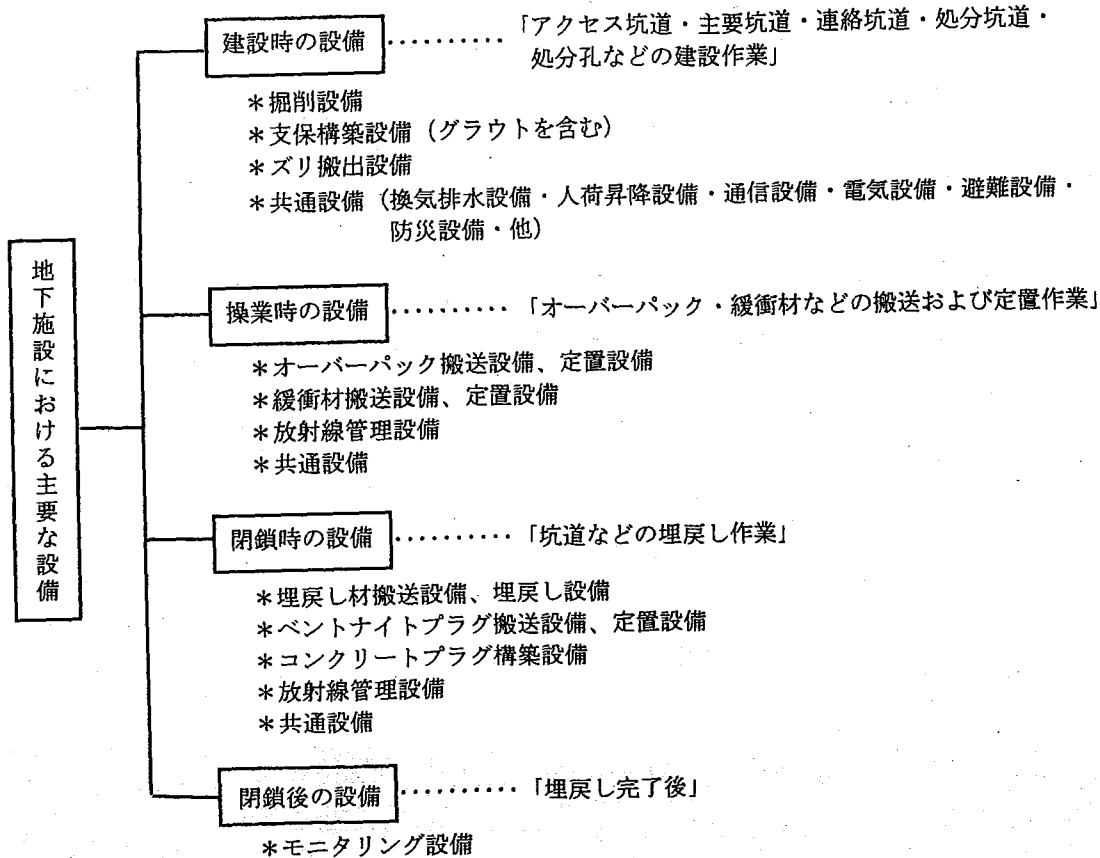


Fig.2 Main composition of plants in underground facilities

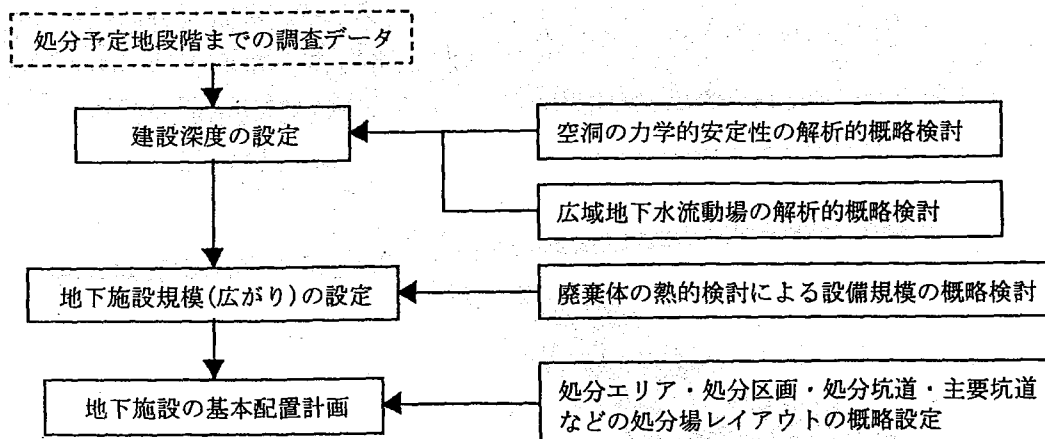


Fig.3 Basis schematic flow for design of underground facilities

また、平面ひずみ状態を仮定した二次元解析の場合、通常は、切羽の三次元効果を考慮するために地圧解放率と呼ばれるパラメータを導入する。これは、実際の場合、切羽近傍の岩盤が三次元的な変位拘束を受けた状態で支保工が施工され、その後さらに掘削が進行すると支保工に「あと荷」が作用するため、この状況を二次元断面の

解析上で表現しようとするものである。具体的には、二次元円形空洞に地圧 100 % の内の一部（地圧解放率）を作用させ、空洞が変形した後に空洞内壁に支保工を建て込んだモデルを表現して残りの地圧を作用させる計算方法である。

堆積岩分布地域の掘削限界深度を算出した例を Fig.4

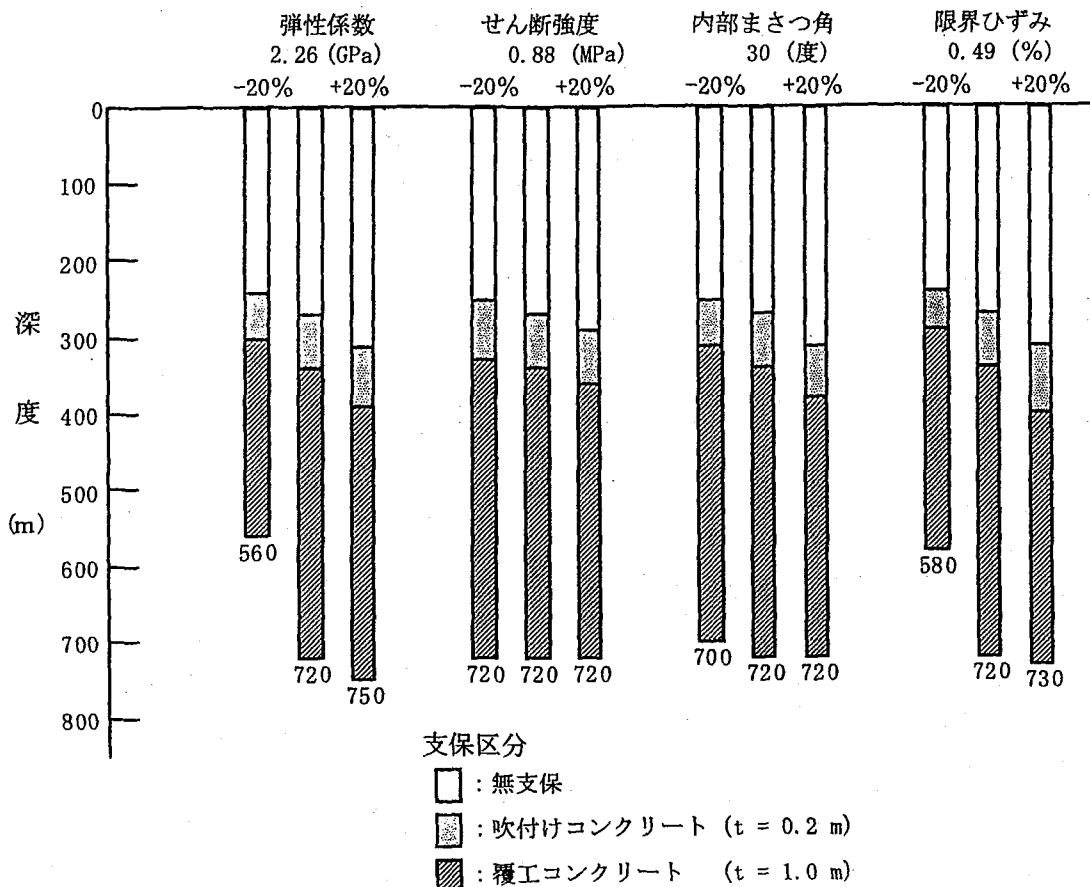


Fig.4 Critical depth for excavating from viewpoint of dynamic stability in area of sedimentary rock formation

に示す。縦軸は深度で泥岩のD層の物性値に着目した場合の支保を考慮して掘削限界深度を求めたものである。この場合の空洞径はφ6.5 m、地圧解放率は50%とした。各物性値については、その感度を調べるために±20%の変動を与えた算出結果も併せて示したが、解析手法が岩盤の安定性をひずみで判断しているため、弾性係数や限界ひずみ等の変形に関する物性の方がせん断強度や内部まっさつ角等の強度物性の影響よりも大きく現われている。以上より、堆積岩分布地域（一軸圧縮強度10.8 MPa）の掘削限界深度は、厚さ1 mの覆工コンクリートによる支保を施すことにより約700 m程度までは掘削可能と評価できる。結晶質岩分布地域（一軸圧縮強度82.4 MPa）についても同様の検討の結果、深さ1000 m程度までは無支保で十分に岩盤の安定性が保持される結果となっている。

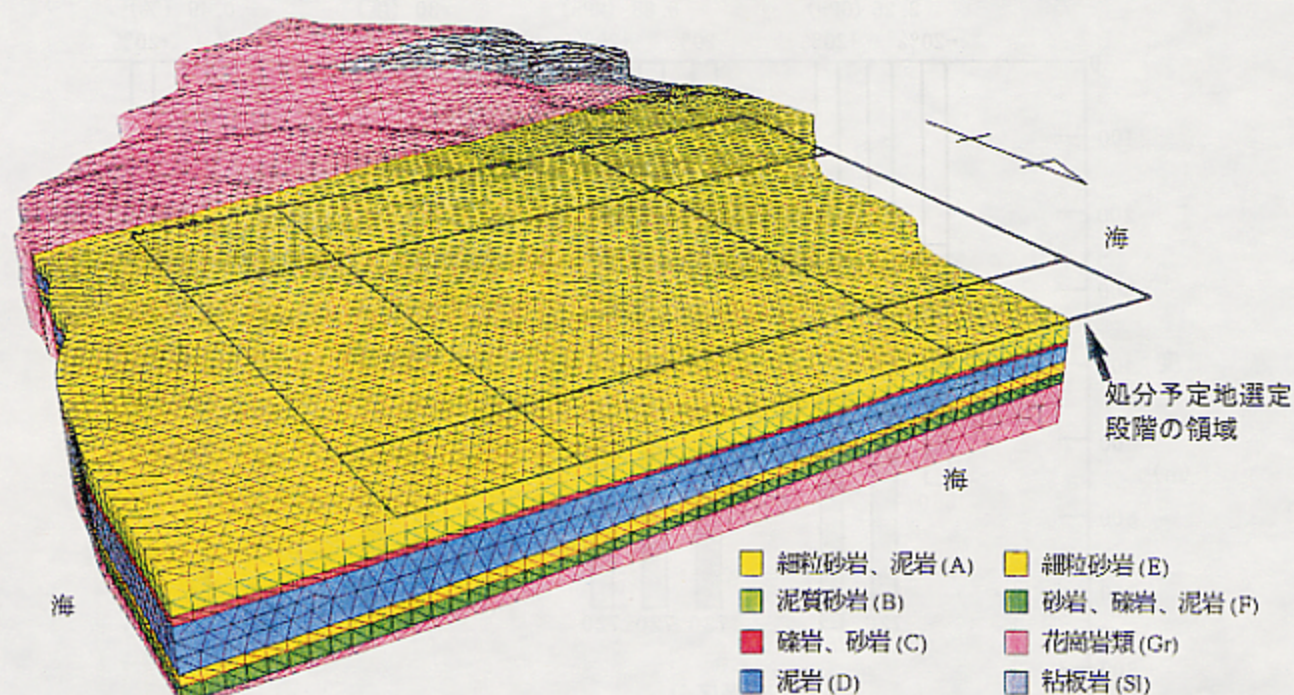
なお、調査が「処分地選定段階」まで進んで、物性のばらつきや岩盤の亀裂情報などが得られた段階では、より高度な数値解析による詳細な検討によって力学的な安定性に関する設計の信頼性を確認する必要がある。岩盤の挙動は不連続面の影響が支配的であるので、岩盤の割れ目特性を把握し、その情報を反映しうる解析手法により設計することが今後の課題である。また、将来適用する高度な解析手法については、その妥当性を確認するた

めの実証を前もって実施しておくとともに、検討に用いた岩盤物性等のパラメータの妥当性についても、事前に実施する地下調査施設において検証しておくことが必要である。

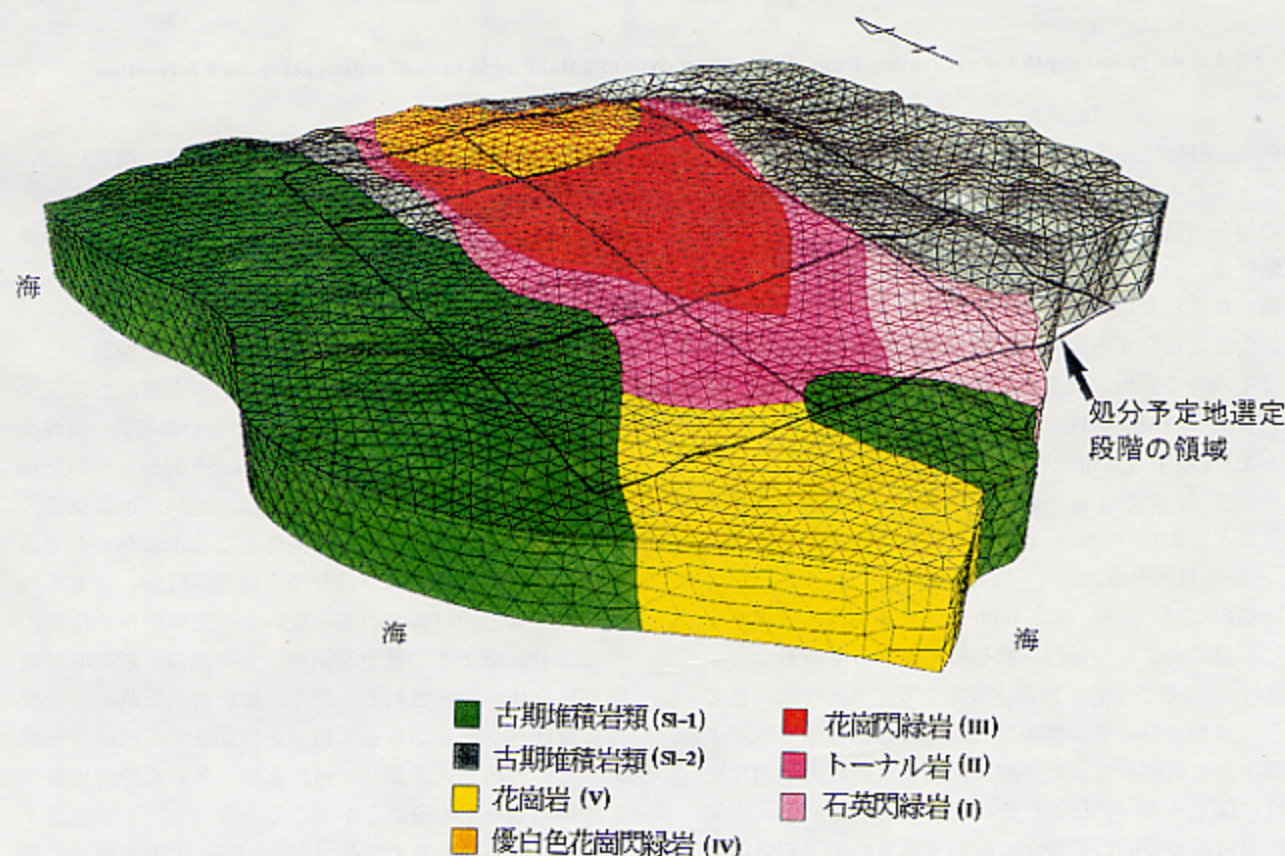
3.2.2 広域地下水流動場の解析的概略検討

処分予定地周辺の広域的な地下水流動場の検討では、複雑な地形や地質構造を表現することが必要なため三次元FEMによる数値解析法を適用する。その場合、岩盤を多孔質体とみなし、連続の式とダルシー則から導いた浸透流方程式を用いる。この解析には、地形、地質構造、各地層の透水係数および境界条件となる水頭が必要である。この段階の調査は「処分予定地選定段階」であるため十分な入力値は得られていないが、この解析を行うことにより、地下水の低流速領域、下降流の卓越領域が概略的に立体的に示される。また、解析結果を基に、各要素の流速ベクトルから仮想粒子を移動させて流跡線を求め、その流出先を評価して希釈水量の多い海や河川等への流出領域を求めることができる。

Fig.5に堆積岩および花崗岩（結晶質岩）分布地域の有限要素解析モデルを示す。これらから、堆積岩分布地域について検討した結果を述べると、大局的には南方の高地から北方へ向かう流動であるが、深くなると地形の細



(1) Computational model for area of sedimentary rock formation
(30,739 nodes and 161,931 elements in FEM analysis)



(2) Computational model for area of granite rock formation
(22,581 nodes and 89,218 elements in FEM analysis)

Fig.5 FEM analysis model for sedimentary and granite rock formations

かな起伏の影響は少なくなる傾向を示している。また、図中の処分予定地選定段階の領域ではほとんどが上昇流であり、流出先は概ね直上もしくはやや北側(海寄り)の地表部となるため、地下水流向の面から有利な地点を見出すことはできない。したがって、本地域の場合は、最も流速の遅いD層内のより深い位置に地下施設を建設することが望ましいと考えられる。

花崗岩分布地域については、大局的には東方の高地から西方の海に向かう扇形の流動であるが、浅部においては地形の激しい起伏変化の影響を受けて循環流的な流動傾向を示している。これらから、流速が比較的遅く、下降流となって移行距離が長く、流出先が海となる中央の沢の上・中流域右岸でEL.-500 m付近が相対的に有利な地下施設位置となった。

なお、以上の施設位置は数少ない調査データを用いた概略的な検討の結果であることから、「処分地選定段階」のさらに詳細な調査結果を踏まえて再検討し、総合的に地下施設の深度・位置等を設定する必要がある。

3.2.3 地下施設規模(広がり)の検討

地下施設規模とは、処分を予定している廃棄体を全て埋設するのに必要な規模(広がり)であり、その規模に見合う大きな岩体の存在を事前に確認しなければならない。この施設規模は、「処分予定地選定段階」で概略的に設定する必要がある。

施設規模は、基本的には処分する廃棄体総数と廃棄体の平面的な埋設間隔により定まる。廃棄体埋設間隔を求めるには、処分坑道離間距離と処分坑道内の廃棄体埋設間隔を坑道の力学的安定性と緩衝材の熱的安定性から検討することになる。

しかしながら、処分予定地選定段階における調査では、十分な岩盤物性等が得られていない。そこで、詳細な検討は「処分地選定段階」において種々条件を考慮して総合的に検討することになるが、ここでは既往の成果を利用して処分坑道離間距離を予め与えて熱的な検討により廃棄体埋設間隔を求め、概略的な施設規模を算定した。

熱的解析のモデルとしては、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、処分坑道(縦型設置方式ではさらに処分孔)等を表現する必要があるため、三次元FEMによる数値解析を行う。支配方程式は非定常の熱伝導方程式である。なお、温度の初期条件は原子炉取り出し後の冷却期間として54年経過した廃棄体を対象とし、さらに自然状態の地温分布を考慮する。初期地温は、堆積岩の深度500mで25℃、花崗岩の深度1000mで33℃となる。判定規準としては、緩衝材の熱的な劣化を考慮し、緩衝材の温度上限値を100℃とする(本特集の(その4)参照)。これらの初期条件を考慮した上で、ガラス固化体からの発熱が緩衝材に伝播した場合の緩衝材の温度が100℃を越えないように廃棄体埋設間隔を求める。

Fig.6は、坑道離間距離を12mとした場合の堆積岩横置き方式と花崗岩縦置き方式について、深度と廃棄体中心間隔の関係を求めたもので、それに相当する施設面積(規模)も併せて示してある。すなわち、堆積岩横置き方式の場合は、深度500mで廃棄体間隔が約4.0mとなり、その施設規模は1.80 km² (1.34 km 四方)となる。花崗岩縦置き方式の場合は、深度1,000mで廃棄体間隔が約3.4mとなり、施設規模は1.54 km² (1.24 km 四方)となる。

施設規模に関わる熱的支配要因を挙げると、岩盤や緩衝材の熱伝導率、バリア材間(オーバーバック・緩衝材間、および緩衝材・岩盤間)のギャップのモデル化、地温等である。Fig.6の堆積岩と花崗岩の施設規模の相違は、主に岩盤の熱伝導率の違い(堆積岩1.67, 花崗岩2.30 W/mK)によるものである。

緩衝材の熱伝導率の影響も大きく、1.7 W/mKを1.0 W/mKとすると廃棄体間隔が約0.5m大きくなる。バリア材間のギャップを密着させた場合と空気(0.071 W/mK)を用いた場合では1m程度異なる。

3.2.4 基本設計(基本配置計画)

(1) 基本配置計画の検討フロー

地下施設の建設深度と施設規模の概略的な検討結果を踏まえて、Fig.7に示す手順により基本配置計画の検討を行う。ここでの設定は、処分予定地選定段階までの少ない調査データに基づくもので、基本設計(概念設計)に位置付けられる。したがって、調査が処分地選定段階に進展することにより、後述(4章)のように各計画も見直される。

(2) 基本配置計画で考慮すべき検討項目

Fig.7の検討フローに示した項目について、それぞれ考慮すべき要件を以下に示す。

- ① 処分エリアの設定
 - ・施設規模
 - ・断層破碎帯の位置
 - ・対象となる地層の層厚と傾斜
 - ・塩淡水境界の位置
- ② 処分坑道の配置(方向)の設定
 - ・節理の卓越方向
 - ・地圧の最大圧縮主応力の方向
 - ・地下水流向
- ③ 処分区画数(区画割り)の設定
 - ・排熱のための換気量の算定
 - ・地温と主要坑道断面積
- ④ 基本的操業計画の設定
 - ・掘削エリア、定置エリア、埋戻しエリア
 - ・放射線管理区域と非管理区域
 - ・二方向避難
- ⑤ 処分区画および主要坑道の配置
 - ・換気と排水のルート

- ・物流
- ⑥ アクセス坑道の配置
 - ・地下水流動場
 - ・搬送物ルート
- ⑦ 地下施設レイアウトの概略設定
 - ・上記①～⑥の設定項目

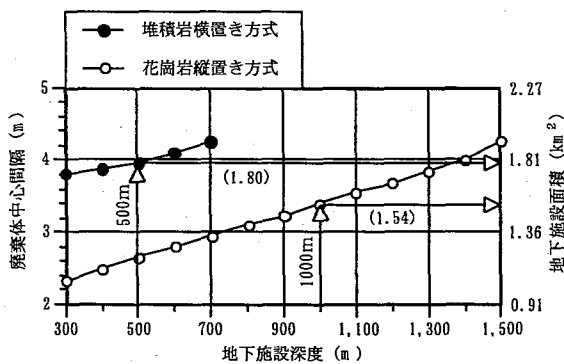


Fig.6 Calculated results for relation between disposal depth and facility scale.

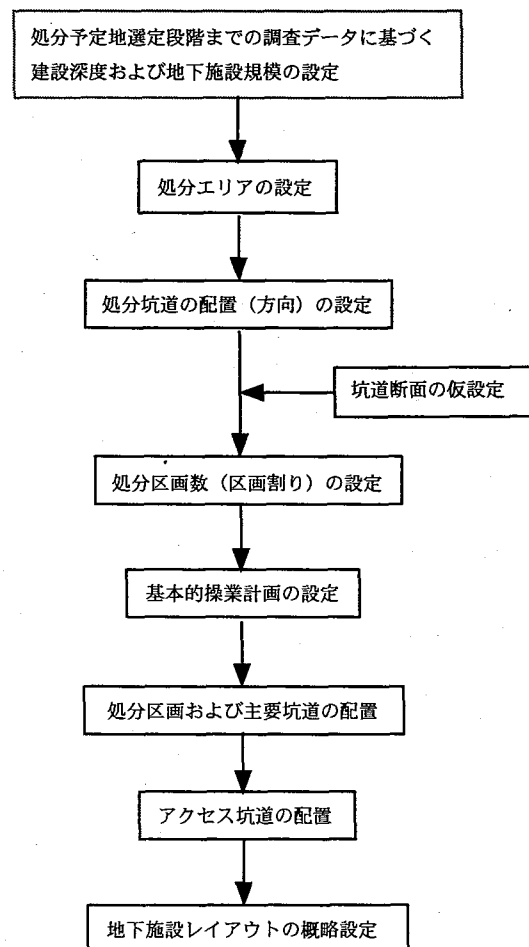


Fig.7 Schematic flow of investigation for basic plan of facility layout.

(3) 地下施設レイアウトの概略設定(基本配置計画)

地下施設の基本設計では、前述のような検討結果を踏まえて、設計・施工の立場から最も好ましいと考えられる位置に設定する。

花崗岩分布地域における基本配置計画(概念設計)をFig.8に示す。同図より、与えられた地質環境条件下では、断層破碎帯に囲まれた大きな領域(F)内に地下施設位置が設定される。しかし、日本の地質構造を考えると、断層破碎帯を取込むような領域の検討も必要である。そこで、ここでは若干水平に移動した断層破碎帯を含む領域(AとC)内に設定し直し、その位置を基本配置として以後の検討を進める。

堆積岩分布地域における基本配置計画(概念設計)をFig.9に示す。同図より、与えられた地質環境条件下では、D層の中心領域で淡水域内に設定される。しかし、この位置は算出された塩淡境界の凹みの位置である。現時点では塩水環境への施設配置がバリア性能の発揮を妨げるか否かについて判明していない。そこで、保守的に考えて淡水域への設置の確実性を考慮して塩淡境界の南端部よりさらに南側の淡水域中に設定し直し、その位置を基本配置として以後の検討を進める。

以上より、地下施設の概略レイアウトはつぎの条件で設定する。

[花崗岩分布地域]

深 度・・・EL-500 m (GL-1000 m)

平面位置・・・断層破碎帯をまたぐ領域内

処分坑道の方向・・・地下水流向に垂直、水平面内最大主応力の方向と同一

処分区画・・・換気性能より6区画を設定

主要坑道・・・掘削および埋戻し区画と放射線管理区域を含む定置区画を別ルートで設定

アクセス坑道・・・坑口を地下水流動場の上流側に配置

[堆積岩分布地域]

深 度・・・EL-500 m (GL-520 m)

平面位置・・・D層内で塩淡境界南端部より南側の淡水域中

処分坑道の方向・・・地下水流向に垂直、地圧条件は等圧なため制約なし

処分区画・・・換気性能より6区画を設定

主要坑道・・・掘削および埋戻し区画と放射線管理区域を含む定置区画を別ルートで設定

アクセス坑道・・・坑口を地下水流動場の上流側に配置

4 地下施設の詳細設計

4.1 設計の検討フロー

前述の3章において、処分予定地選定段階の調査デー

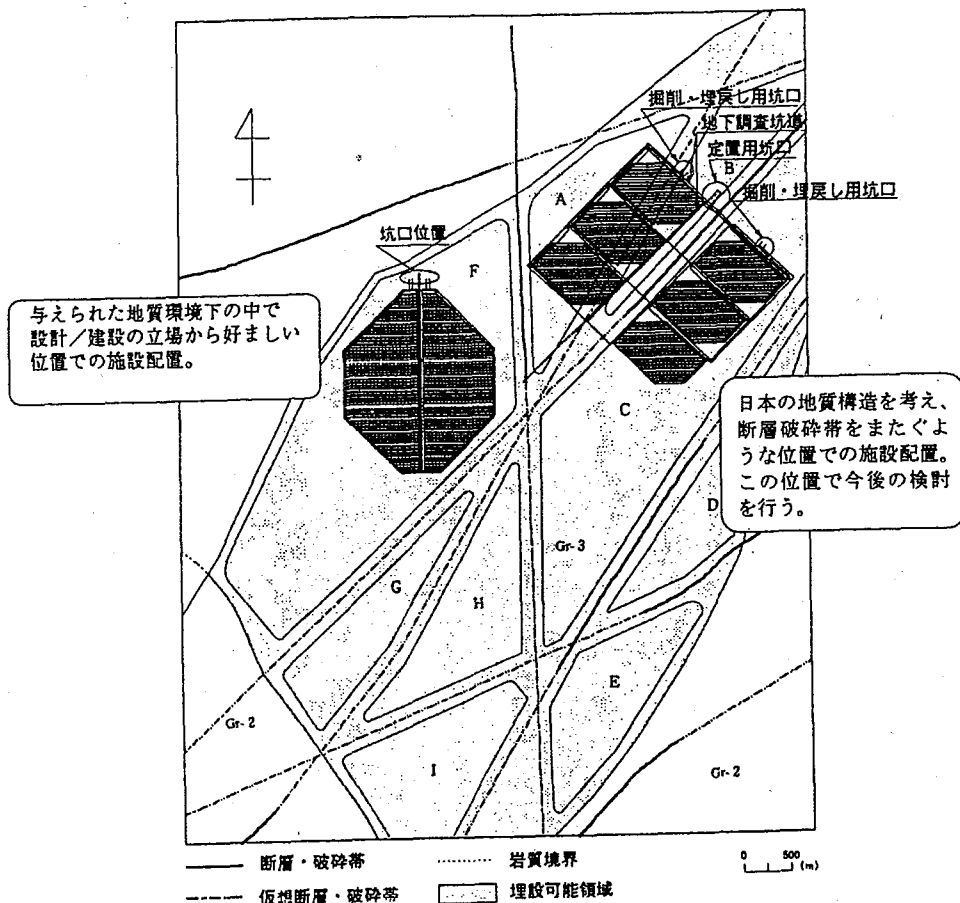


Fig.8 Basic plan of facility layout in area of granite rock formation (conceptual design)

タに基づく地下施設の概略レイアウトを検討した。ここでは、調査がさらに進んだ処分地選定段階の調査データを用いて各設計項目を詳細に検討する。

Fig.10 に詳細設計の検討フローを示す。まず、空洞形状と必要断面積を設定する。空洞としては、アクセス坑道、主要坑道、処分坑道、処分孔である。そこで、それぞれについて断面形状の設定要因を検討し、各断面の設定を行う。また、支保工に求められる要求性能と支保材料についても検討して支保工を設計する。処分坑道の離間距離と廃棄体の埋設間隔は、施設規模と処分坑道の総延長に直接的に関わるため、地下施設の経済性に大きく影響する重要な設計項目である。地層処分特有の問題であり、諸条件の中で力学的および熱的な検討を詳細に行う。

以上の各詳細設計より、各坑道の仕様、処分坑道長、アクセス坑道の配置を設定して地下施設の詳細配置計画を策定する。そして、この詳細配置計画に対して換気・排水設計を行う。これは、従来の地下構造物に比べて格段に坑道長が長いことに特徴があるため、現状技術でどこまで設計が可能であるかを検討する。また、この詳細設計に対して、操業が可能であるかの検討を行い、最終的な地下施設の詳細レイアウトを設定する。

4.2 空洞形状・必要断面積の設定

各坑道群として、アクセス坑道、主要坑道、処分坑道、処分孔のそれぞれについて、坑道形状とその必要断面積の設定を行う。

断面形状を定めるためには、まず、その坑道内を通過または坑道内で稼働する各設備の大きさや作業余裕スペースを検討する必要がある。ここでは、この空間を「建築限界」と呼ぶ。つぎに、換気・給排水設備や照明設備などの諸設備を設置する空間が必要となる。また、作業者が往来する場合は安全通路が必要である。これらは、建築限界を侵さないように配置することが必要であり、ここでは「坑道余裕幅」と呼ぶことにする。

一例として、処分坑道の断面設定について、その要点を示すと以下のようなものである。また、Fig.11 に検討結果の例を示す。

4.2.1 建築限界の設定

坑道内で稼働する各設備の規模を検討すると、縦置き定置方式の場合はオーバーバック搬送定置設備が最大となる。また、横置き定置方式では緩衝材搬送定置設備が最大である。この設備寸法に設備搬送時のぶれや固定治具などの寸法（作業余裕スペース）を加えて建築限界を設定する。

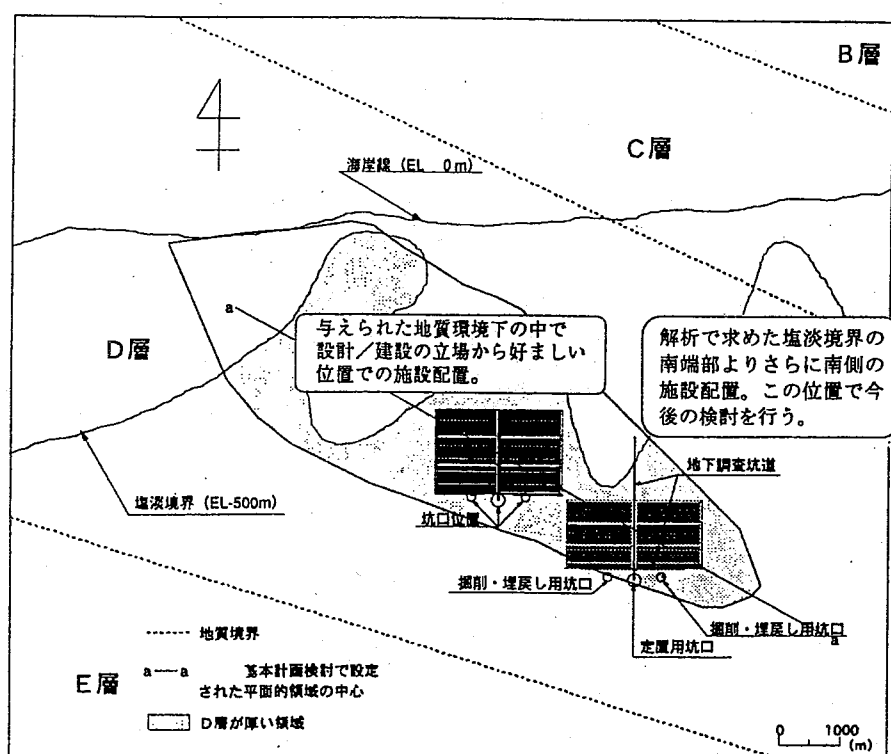


Fig.9 Basic plan of facility layout in area of sedimentary rock Formation (conceptual design)

4.2.2 坑道余裕幅の設定

坑道内の諸設備としては、主に換気設備、給排水設備、防災設備、電気供給設備、安全対策設備、照明設備等が考えられる。

縦置き定置方式の場合は、諸設備と安全通路を建築限界を侵さない空間に配置することが必要である。安全通路は、労働安全衛生規則によると幅 0.6 m、高さ 1.8 m が必要である。そこで、これを余裕幅とし、片側に安全通路、もう一方に諸設備を配置する。

横置き定置方式の場合は、無人作業となるため安全通路は必要がなく、必要な諸設備は作業車両に搭載されるため、坑道余裕幅の設定は必要がない。

4.2.3 断面形状の設定

断面形状は円形と幌形で代表される。円形坑道は、幌形坑道に比べて力学的な安定性に優れているが、建築限界を侵さないためには断面が大きくなって掘削量が増大する欠点がある。この断面形状は、坑道の使用目的、岩盤や地圧の状況、支保の程度等、技術的・経済的な観点から総合的に検討して設定する必要がある。そのため、ここでは円形と幌形の両者について設計を試みる。

4.3 支保形式・支保材の設定

地下構造物を対象とした土木工事においては、既に数

千 km にも及ぶ道路・鉄道トンネルの施工実績がある。坑道の総延長が 100~200 km にもなる地下施設の建設においても、従来の経験を生かし、現状技術を利用して設計・施工を行うことが、安全性・確実性・合理性・経済性等において優位である。特に、支保設計においては、地圧状態と岩盤性状を考慮し、安全性が確保できる範囲でできるだけ軽くすべきであり、また、その支保材についても従来から多用されているコンクリートを主体とした材料を用いなければ、経済的に成り立たなくなる可能性がある。

そこで、アクセス坑道、主要坑道、処分坑道のそれぞれについて、コンクリートを主体とした支保形式および支保材の設定を行う。その要件としては、以下ののようなものが挙げられる。

① 力学的安定性

- ・建設～操業の期間において、周辺岩盤を安定に保持する。

② 化学的安定性

- ・コンクリートと緩衝材の接触により、緩衝材が許容限度を越えて劣化することを避ける。
- ・コンクリートの劣化により、支保工部分が許容限度を越えた高透水性ゾーンとなることを避ける。

上記①については、地質条件、岩盤物性、地圧条件、

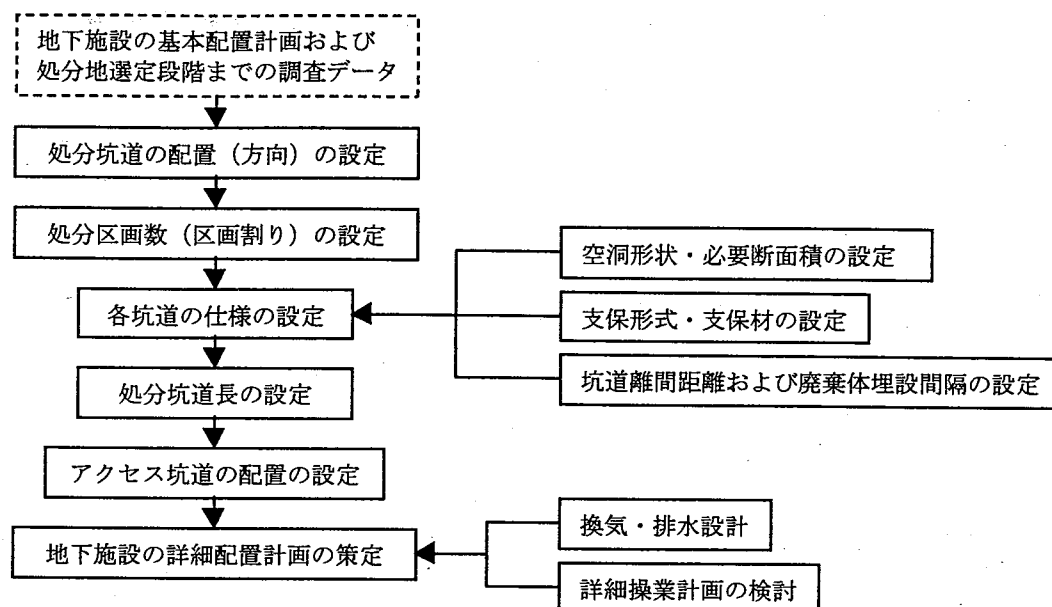


Fig.10 Schematic flow of investigation for detailed design of underground facilities

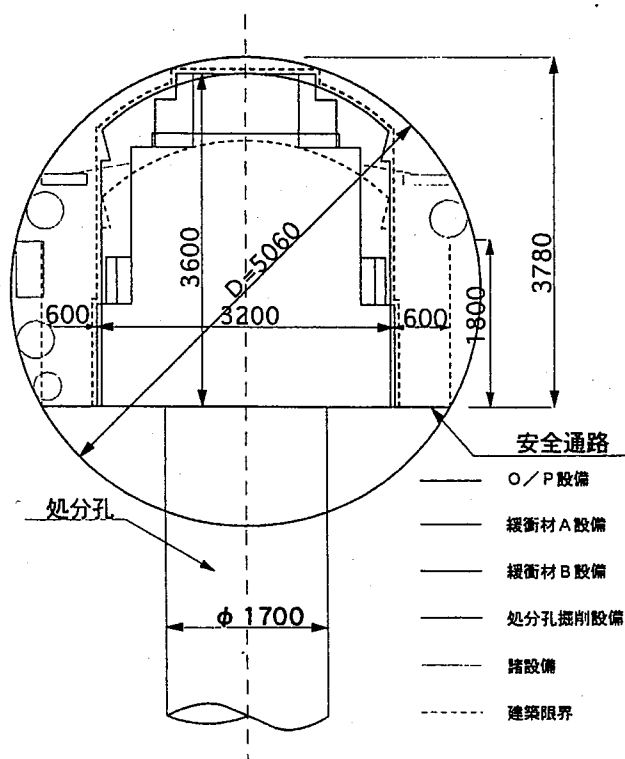


Fig.11 Necessary shape of section for vertical emplacement of waste packages in disposal tunnel (an example of circular-shaped tunnel)

支保工などを考慮して弾塑性理論解や FEM 解析などを行い、坑道の力学的な安定性を確認する。上記②の緩衝材の長期化学的劣化については、コンクリート支保から溶出するカルシウム成分によって周辺が高 pH 環境になった場合、緩衝材への長期的な影響の程度が現状では明確に示せない場合を考慮し、支保材として低 pH コンクリートの使用などについても検討する。また、コンクリートの劣化による高透水性ゾーンの形成・影響については、別途、性能評価の観点から確認する必要がある。

以上の要件より、結晶質岩分布地域では解析的に無支保で力学的安定性が保たれるため、坑道壁面の肌落ち防止による作業の安全性確保やハンドリング設備走向時の坑道寸法の確保を考慮して、吹付けコンクリートや覆工コンクリートを基本として支保設計を行った。

堆積岩分布地域は、地圧の大きさに比べて岩盤強度が小さいため、支保なしでは岩盤の力学的安定性が保たれない解析結果となった。直径が 5m 前後の坑道に対して、覆工コンクリートを適用するとその厚さが 1m にもなり現実的でない。そのため、覆工コンクリートよりも強度の大きなコンクリートセグメントによる設計を試みた。

結果を Fig.12 に示す。

4.4 坑道離間距離および廃棄体埋設間隔の設定

処分坑道の離間距離と廃棄体の埋設間隔は、熱的な観点でみると、処分坑道の離間距離をより大きく取ることにより廃棄体の埋設間隔をより小さくすることができる。結果として、処分坑道の総延長は短くなる。地下施設の大部分を占める処分坑道が短くなれば、坑道掘削費や埋戻し材料費・施工費などの面からより経済的になると考えられる。

まず、縦置き定置方式の場合は、力学的な観点から最小の処分孔間隔（廃棄体埋設間隔）と坑道離間距離を求め、熱的な条件を満足するかを判定する。熱的な条件を満足しない場合は、満足するまで坑道離間距離と処分孔間隔を広げていく。この内の力学的な検討では、FEM の三次元弾塑性解析により掘削の影響範囲を定めることにし、坑道離間距離および処分孔間隔については以下の条件を満足するものとする。

- ① 隣接坑道間および処分孔間に、局所安全率 1.5 以上の領域が十分確保されていること。
- ② 坑道離間距離は最低でも掘削幅の 2 倍以上であり、処分孔間隔は最低でも孔径の 2 倍以上であること。

また、処分孔間隔については処分孔近傍の岩盤が最も近い天然バリアであることを考慮し、上記①、②の条件の他に、さらに以下の条件も満足するものとする。

- ③ 処分孔間隔を小さくすることにより、処分孔周辺の最大せん断ひずみ分布が大きく変わらないこと。

熱的な検討は、FEM 三次元非定常熱拡散解析により緩衝材温度を求めることとし、緩衝材が熱的に劣化しないための条件を以下のように設定する。

- ④ 緩衝材の温度上限値を 100℃ とする。

ただし、上記の評価基準により設定された各間隔は、坑道の安定性を予測する技術をより高度化することや緩衝材のバリア性能への温度の影響の程度をより定量的に評価することなどによって、今後さらに合理的・経済的な設計が可能となることが期待される。

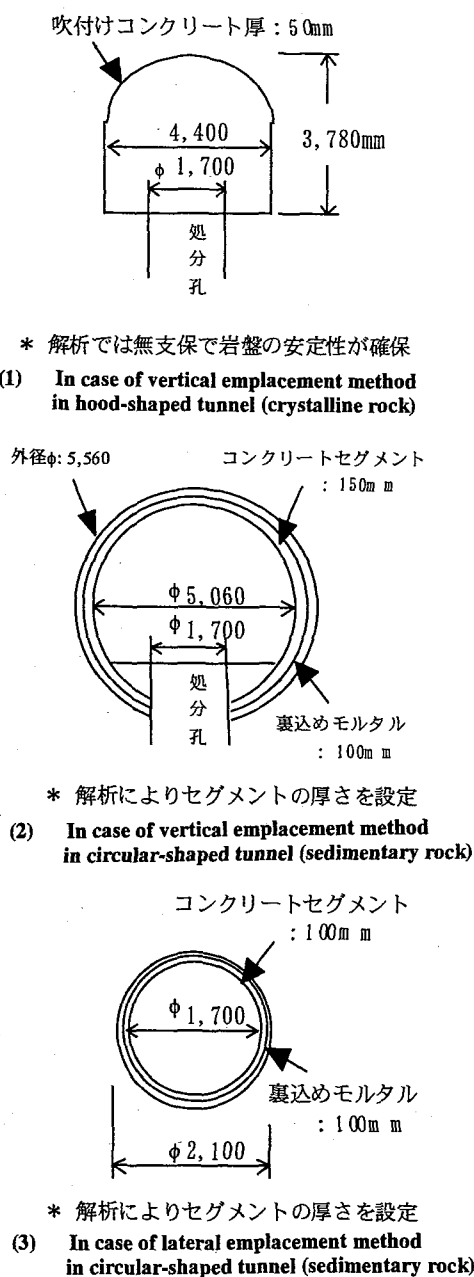


Fig.12 Example of design for supporting system for disposal tunnel

つぎに、横置き定置方式の場合は、人工バリアの仕様による緩衝材の必要な厚さが処分坑道内の埋設間隔の最小値となる。そこで、処分坑道長を短くする観点から、最小埋設間隔において緩衝材の温度上限値をクリアできるように坑道離間距離を求める。緩衝材はベントナイトに20%の砂を混入したものであり、バリア材間（オーバーバックと緩衝材の間、緩衝材と岩盤の間）に生じる隙間は最も保守的な場合として空気の熱伝導率を用いた。また、人工バリアの仕様により緩衝材の厚さは40 cmを確保できれば良いとした。

上記の結果例として、堆積岩縦置き、花崗岩縦置きおよび堆積岩横置きの場合を示すと、Table 1 になる。同表のケース1についてみると、力学的に求めた最小廃棄体埋設間隔と最小坑道離間距離を用いても緩衝材の最高温度は約75℃であり、熱的には余裕がある結果となっている。このように、地質環境条件によっては熱的な制約よりも力学的な制約の方が厳しくなる場合もあることから、両者の検討を十分に行う必要があることを示している。同表には、各ケースの処分坑道の総延長も参考に示す。なお、ここでは力学的な検討をFEMの三次元弾塑性解析により実施したが、前記3.2.1でも示したように、物性のばらつきや岩盤の亀裂情報などを含んだより高度な数値解析による詳細な検討によって、力学的安定性に関する設計の信頼性を確認する必要がある。

4.5 換気・排水設計

4.5.1 換気的设计

内燃機関等から発生する有毒ガス、発破の後ガスおよび吹付けコンクリートの作業時の粉塵等は、これを除去または希釈して、坑内作業員等に新鮮な空気を供給する必要がある。これは、処分場が完成するまでのプロセスである掘削、定置、埋戻しまでを考慮する。定置エリアは放射線管理区域を含むため、掘削エリアや埋戻しエリアとは換気系統を別に設ける。

換気方式は、定置エリアを排気方式（負圧）とし、掘削・埋戻しエリアを送気方式（正圧）とする。これにより、

換気系統に何らかの事故が発生しても、定置エリア内の汚染の可能性がある空気が掘削・埋戻しエリアへ流れ込むことはない。換気系統を区分するためには、主要坑道の要所に隔壁扉を設置する。また、必要に応じて局所ファンや集塵機等を設置する。

これらの要件を考慮した花崗岩縦置き定置方式の換気システムの例をFig.13に示す。同図によれば、以下のようになる。

① 建設・埋戻し用換気

人員・資材搬送用として1本、掘削ずり・埋戻し材搬送用として1本の合計2本のアクセス坑道を1組とし、この内1本を送気ファンによる送気用（正圧）、他の1本を排気用として用いる。2本を1組としたアクセス坑道は2ヵ所に設けることとし、掘削エリアや埋戻しエリアの換気を隔壁扉により外周の主要坑道を利用して循環させるようにする。

② 操業用換気

人員・資材搬送用として1本、廃棄体・緩衝材搬送用に1本、換気・排水用に1本の合計3本について、この内1本を排気ファンによる排気用（負圧）、他の2本を吸気用として用いる。そして、隔壁扉により中央の主要坑道を利用して定置エリア内を循環させる。また、排気ファンの箇所には、汚染監視装置で稼働する放射性物質除去フィルターを設置する。

4.5.2 排水の設計

(1) 湧水量の算定

排水計画の策定には、まず湧水量の算定が必要である。その算定には、道路トンネルや鉄道トンネルで多用され、排水溝の断面・勾配の設定や排水設備の検討などに一般に用いられている「井戸の公式」を採用する。この公式は、透水係数、水位、坑道長さ、集水の影響範囲等から求めるものである。ただし、単一坑道の場合の算定方法である。

主要坑道は地下施設周辺に配置されることから井戸の公式を適用することでよいが、処分坑道は連設坑道の影響を考慮する必要がある。そこで、処分坑道については、

Table 1 Example of investigated results for interval between each disposal tunnel and distance between each emplaced waste package.

ケース	廃棄体埋設間隔 (m)	坑道離間距離 (m)	緩衝材最高温度 (℃)	処分坑道総延長 (km)
ケース 1: 堆積岩縦置き	5.5 (3.2φ) (力学的条件)	12 (2.2W) (力学的条件)	75.12	208
ケース 2: 花崗岩縦置き	3.5 (2.1φ) (力学的条件)	10 (2.2W) (力学的条件)	95.04	132
ケース 3: 堆積岩横置き	2.66 (人工バリエ仕様)	15.5 (熱的条件)	99.68	101

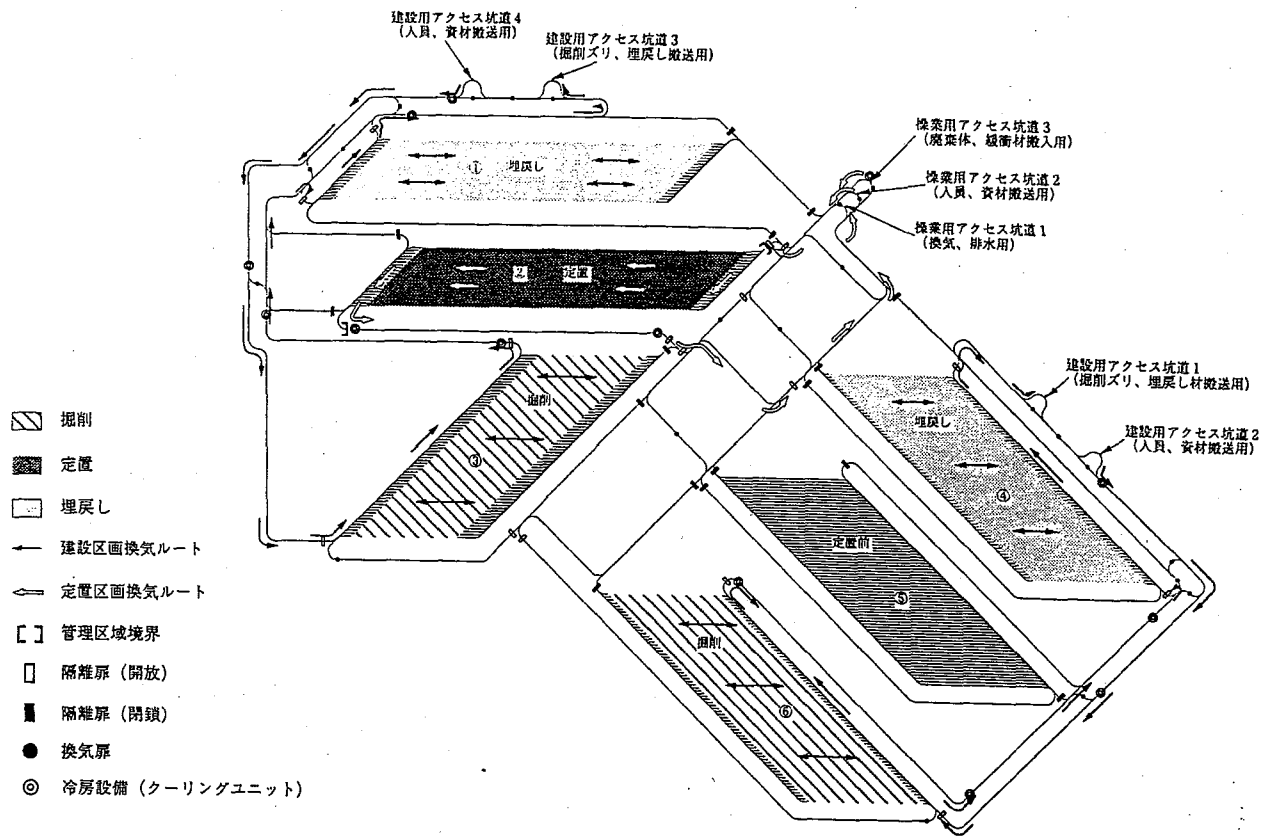


Fig.13 Ventilation system in underground facilities (vertical emplacement in granite rock formation)

二次元FEMによる飽和・不飽和の非定常浸透流解析を行い、連設の影響を考慮する。すなわち、端部の処分坑道については井戸の公式を用い、2本目以降は連設による水圧の低減比率を乗じて求める。低減効果算出の一例を示すと、Fig.14のようになる。

上記の方法で、同時に開口している区画内の処分坑道および主要坑道を対象とした処分場全体の総湧水量（最大値）を求めると、以下のようになる。

- ① 花崗岩縦置き定置方式 81.4 m³/min
- ② 堆積岩縦置き定置方式 35.9 m³/min
- ③ 堆積岩横置き定置方式 18.9 m³/min

各ケースで値が異なるのは、透水係数、水位、深度、同時に開口している区画数（処分坑道本数）、処分坑道長などの相違によるものである。また、総湧水量が多いのは地下処分場の特徴である深度が深いことと、処分坑道が一般のトンネル等に比べて格段に長いことによるものである。

(2) 排水ルート

処分坑道からの湧水や作業用水を自然流下方式により集水し、各処分区画の下流側1ヵ所に設けたピットに貯水する。そして、その水をピット内に設置した水中ポンプにより、主要坑道内に敷設した排水管を通してアク

セス坑道下部の大規模な排水ピットに送水する。

主要坑道には自然集水が可能な300～500m間隔にピットを設置し、主要坑道からの湧水を集水する。そして、処分坑道の場合と同様に水中ポンプにより、主要坑道内に敷設した排水管を通してアクセス坑道下部の大規模な排水ピットに送水する。

アクセス坑道下部の大規模な排水ピットに集められた水は、数台の排水ポンプにより各配管を通して直接地上に送水され、汚染監視装置（万一の対策として放射性物質除去装置を経由する場合もある）や濁水処理設備を経て放流される。

4.6 詳細配置計画の策定

4.6.1 詳細配置計画

前述4章の結果を受け、各条件下の地下施設の詳細配置計画を行う。ただし、断層からの離間距離については、現状では処分坑道を何メートル離すべきかについての指針はない。処分予定地の地質環境を把握できる時点では、性能評価などにより特定の断層の定量的な検討による離間距離の設定が可能になるものと考えられる。本稿においては暫定的な値として、規模の大きい断層から処分区画までは100m以上、幅1m以下の断層に対しては処分

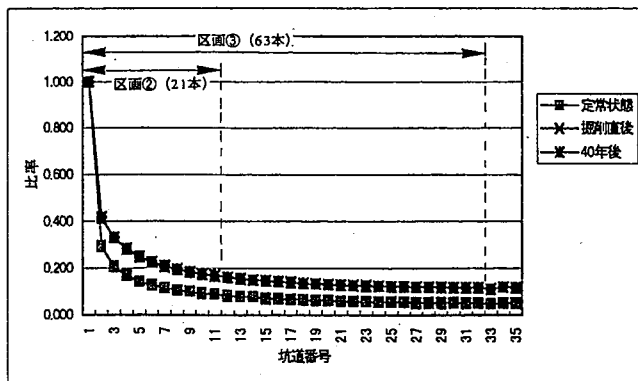


Fig.14 Reduction effect of water pressure in connected disposal tunnel (vertical emplacement in granite rock formation)

孔を10 m以上離すこととした。

縦置き定置方式の配置計画として、Fig.15に花崗岩地域、Fig.16に堆積岩地域の場合について例示する。

以下に、詳細配置計画の主要な設定条件を示す。

- ① 花崗岩分布地域の詳細配置計画 縦置き定置方式、Fig.15)
 - ・ 幅5～20 mで長さ900 m以上の断層破碎帯に対しては、処分区画を100 m以上離れた。
 - ・ 幅1 mで長さ500 m程度の断層破碎帯に対しては、処分孔を10 m以上離れた。
 - ・ 節理等の走向 (NE-SWとNW-SE) と傾斜 (80～90度) に対しては、処分坑道を東西方向とし、節理等の走向と一致しないようにした。
 - ・ 処分区画数は坑内風速基準で廃棄体発熱量を換気できる廃棄体数より6区画とした。
 - ・ 各坑道の断面形状と支保工は、それぞれ前記4.2と4.3で検討した結果とした。
 - ・ 処分坑道の離間距離は10 m、処分孔間隔(廃棄体埋設間隔)は3.5 mとした。
 - ・ 主要坑道と処分坑道の交角は135度、接合部の曲率半径は搬送設備仕様より30 mとした。
 - ・ アクセス坑道は地下水流動場の上流側とし、地下施設の北側に建設用2本×2箇所と操業用3本の合計7本を設置した。
- ② 堆積岩分布地域の詳細配置計画 (縦置き定置方式、Fig.16)
 - ・ 現在の塩淡水境界に対して、淡水域側に地下施設全体を配置した。
 - ・ 幅10～30 cmで長さ500 m以上の断層破碎帯に対しては、処分孔を10 m以上離れた。
 - ・ 節理等の走向 (NW-SEとE-W) と傾斜 (70～90度) に対しては、処分坑道を東より北へ30度傾け、節理等の走向と一致しないようにした。
 - ・ 処分区画数は坑内風速基準で廃棄体発熱量を換気でき

る廃棄体数より8区画とした。

- ・ 各坑道の断面形状と支保工は、それぞれ前記4.2と4.3で検討した結果とした。
- ・ 処分坑道の離間距離は12 m、処分孔間隔(廃棄体埋設間隔)は5.5 mとした。
- ・ 主要坑道と処分坑道の交角は120度、接合部の曲率半径は搬送設備仕様より30 mとした。
- ・ アクセス坑道は地下水流動場の上流側とし、地下施設の南側に建設用2本×2箇所と操業用3本の合計7本を設置した。

4.6.2 詳細操業計画

地下施設の配置計画をもとに、施設内の主な操業計画について検討する。工程に余裕がある場合は坑道の合理化を図り、余裕がない場合は坑道の増設を図って配置計画にフィードバックする必要がある。

操業の対象となる主な設備は以下の通りである。

① 廃棄体・緩衝材の搬送・定置設備

各坑道ごとに廃棄体・緩衝材の搬送と定置が実施される。このための設備については本特集の(その7)に詳述されている。廃棄体・緩衝材の搬送・定置に要する時間については地下施設全体の工程の検討に反映して考慮した。

② ずり搬送設備

まず、坑道の断面積と長さから総ずり量を求め、一日当りの要求ずり出し量を算出する。この要求ずり出し量は、マスタースケジュールに沿って廃棄体37,800本を40年間で定置する条件より算定している。

掘削方法によりずりが流体となる場合は、処分坑道～主要坑道～坑底施設の間を流体輸送方式による搬出となるため管路の敷設を行う。その場合は搬送設備の走行はない。その他の掘削ずりの搬出は鋼車などによるレール方式となる。

③ 埋戻し材搬送設備

埋戻し材の搬送設備としては、立坑の場合はキブル、主要坑道はシャトルカー、処分坑道はストレッチコンベア等とする。

以上の設備を中心に操業計画をたてる。まず、坑道毎に長さを求め、各材料の坑道内搬送時間や積降し・積み込み時間、定置作業時間、戻りの走行時間等を算出して、その合計時間を搬送設備の占有時間とする。その際、以下の制約を設ける。

- ① 「掘削および埋戻し工程」と「定置工程」は常に別ルートとする。
- ② 一日当りの操業時間は16時間以内とする。
- ③ 作業を伴う同じ工程は重ならないようにする。
- ④ 処分坑道内での工程の順序は、廃棄体定置前の緩衝材の搬送・定置、廃棄体の搬送・定置、廃棄体定置後の緩衝材の搬送・定置の順とする。

- ⑤ 主要坑道内での工程は、先に始まった工程が先に終了するものとする。したがって、先に走行している搬送設備を後から走行してきた搬送設備が追い越すことはできない。

以上の制約の中で、一日5本の廃棄体を埋設できるように、詳細な工程表を作成する。工程表はかなり複雑となるが、検討ケースは以下に示す14ケースである。

- ① 堆積岩 (縦置き)……立坑と斜坑について、それぞれ緩衝材が一体型とブロック型
② 花崗岩 (縦置き)……立坑と斜坑について、それぞれ緩衝材が一体型とブロック型

- ③ 堆積岩 (横置き)……立坑と斜坑について、それぞれ緩衝材が一体型、積上げ型、押し込み型

以上の検討結果は、各ケースに応じて一日の所要時間が7~16時間、各設備数が1~5台必要となった。

4.6.3 人員配置計画

地下施設の操作に関わる業務としては、① 運転・監視業務、② 保全業務、③ 技術管理業務がある。また、地下施設内で用いられる諸設備としては、① 廃棄体搬送設備、② 緩衝材搬送設備、③ 換気設備、④ 排水設備、⑤ 電気通信設備、⑥ 坑道維持等が挙げられる。

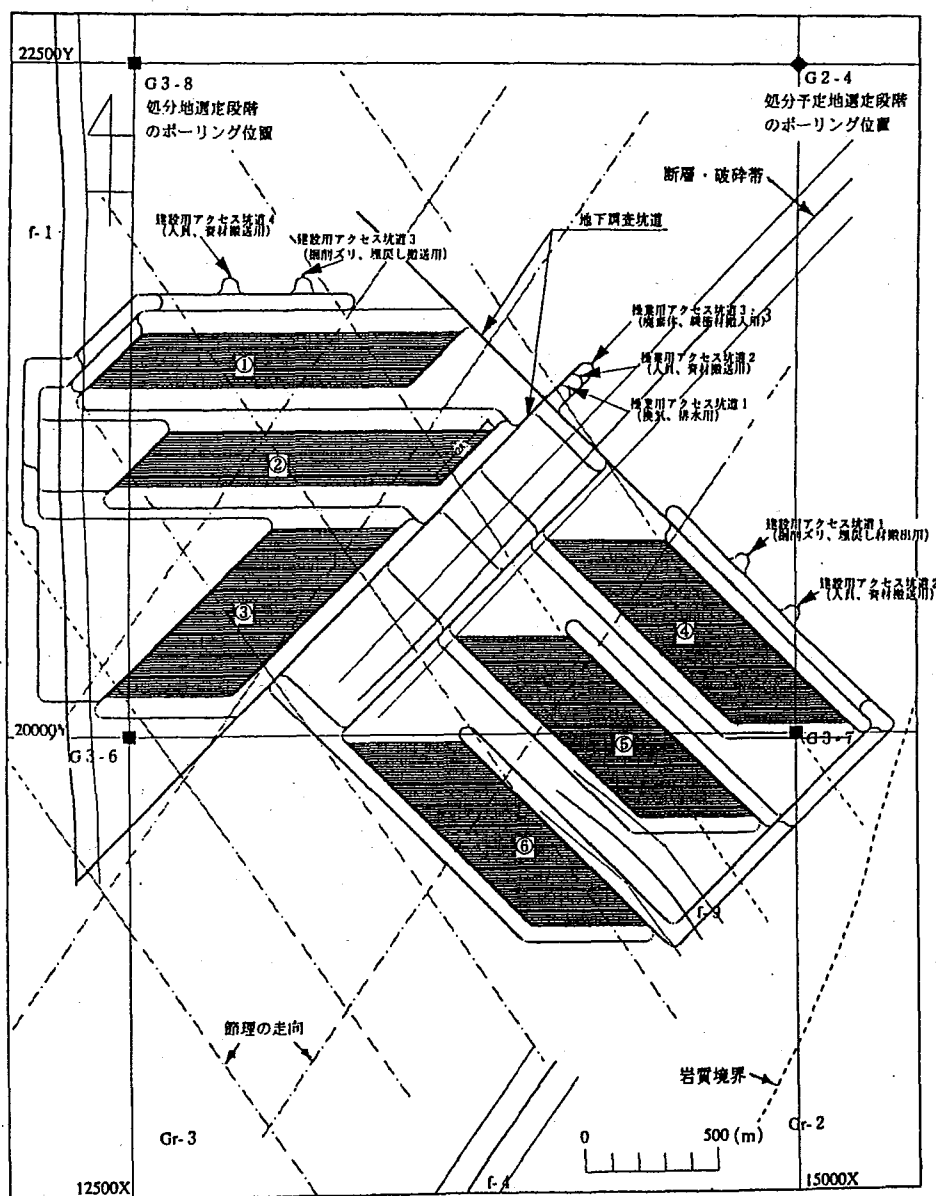


Fig.15 Detailed plan of facility layout in area of granite rock Formation (vertical emplacement method)

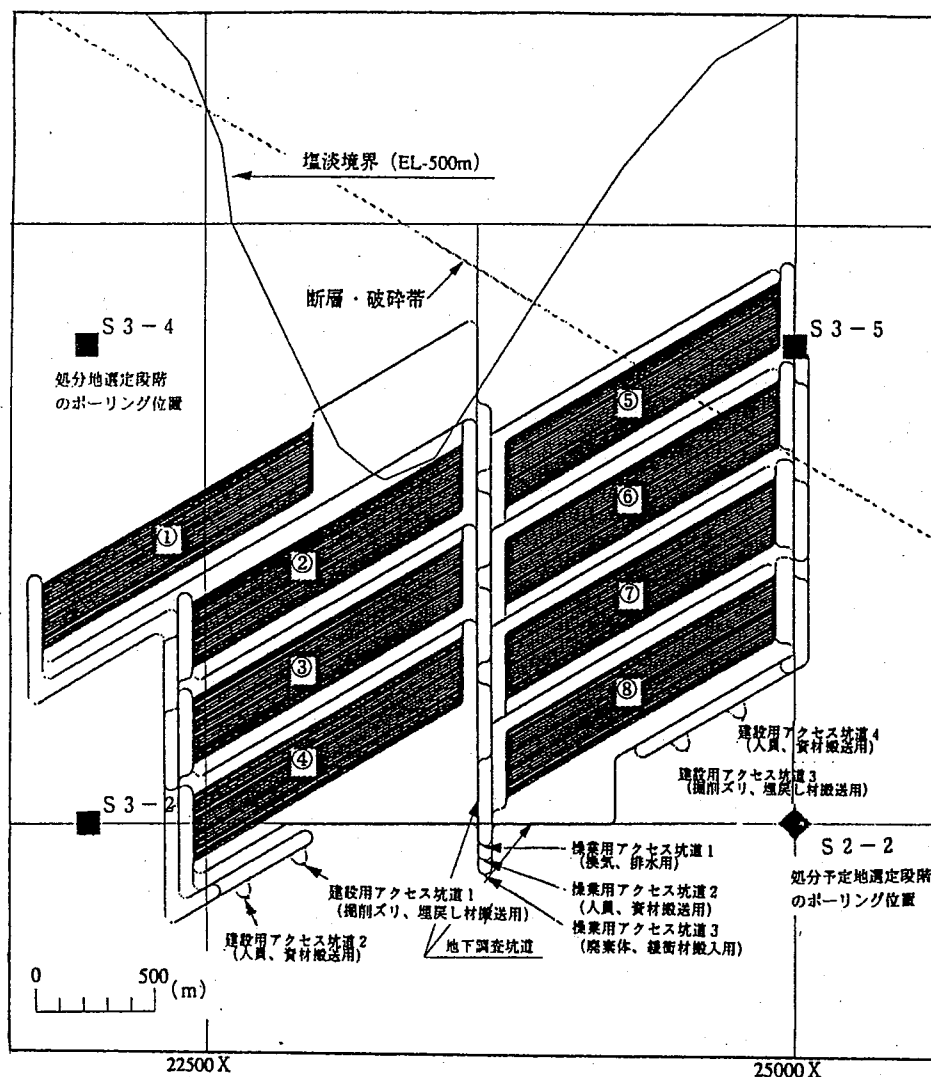


Fig.16 Detailed plan of facility layout in area of sedimentary rock formation (vertical emplacement method)

これらに対して、種々の状況・状態を想定し、前記14ケースについて詳細な人員配置計画を行った結果、各ケースに応じて24～73人の要員が必要となった。

5 地下施設の施工

5.1 施工の基本的考え方

処分場としての地下施設の建設は、従来の地下構造物に比べて地圧の大きな地下500～1000mの深部であり、坑道の総延長も100～200kmにも及ぶ大工事である。既に、数千キロメートルにも及ぶ道路・鉄道トンネル等の施工実績を考慮すると、これまで切磋琢磨されてきた現状技術を利用することは、安全性・確実性・合理性・経済性等に対して優れていると考えられる。

地下施設は、地下深部の岩盤に坑道を掘削して建設されるが、この掘削によって周辺岩盤には損傷領域が発生する。したがって、人工バリアにおける放射性核種の閉じ込め性能上、この領域をできる限り小さくするような工法を用いて掘削することが望ましい。

施工方法の選定に際しては、マスタースケジュールに示される範囲内で建設できるような工法・設備を選択するとともに、綿密な施工管理体制を敷いて、安全で経済的・合理的な施工を行うことが必要である。

これらのことから、前述の地下施設の詳細配置計画に基づいて、以下の項目について検討する。

- ① 掘削・ずり搬送方法と設備
- ② グラウト材の選定と施工
- ③ 換気・冷房・排水設備

- ④ 関連設備
- ⑤ 掘削時の施工管理

5.2 掘削・ずり搬送方法と設備の検討

ここでは、アクセス坑道 (立坑・斜坑)、主要坑道、処分坑道、処分孔のそれぞれについて、要求品質に対応するように現状技術を踏まえて工法や設備の検討を行う。

まず、各坑道毎に要求品質・性能を述べ、それを満足するような現状技術における工法・設備を幅広く検討し、結果の集約を行う。集約結果の一例として、処分坑道の掘削方法とずり搬送方法を Table 2 に示すが、ほぼ現状技術で対応可能であることがわかる。主要坑道、アクセス坑道 (立坑・斜坑) についても同様に検討したが、何れも現状技術かその延長で対応可能である。ただし、縦置き定置方式の処分孔掘削については、狭い坑道内における大口径の掘削であり、これまで施工要求がなかったことから適合する掘削機械が現状ではない。

以下に、処分孔での検討概要を示す。

① 処分孔の主な仕様

- ・削孔径は、 $\phi 1.70$ m.
- ・削孔長は、3.81 m (最大 5 m).
- ・施工精度は、深さ 5 m 位置で計画線とのずれが 10 cm 以内。

② 掘削機の要件

- ・対象岩盤は、一軸強度が 80 MPa の結晶質岩と 10 MPa の堆積岩。
- ・周辺地山の損傷の影響が少ない機械削孔。
- ・削孔速度は、0.4~0.5 m/時 (1 日 2 方の 16 時間労働で 1 本の削孔を想定)。

③ 掘削機の現状

- ・仕様にあった掘削機は現状ではない。
- ・現状のリバースサーキュレーションドリルは以下の仕様である。
全断面回転削孔方式。
土砂・砂礫・軟弱層を対象。
 $\phi 400 \sim 2,000$ mm, 深度 50~200 m で実績。
ずり処理を含めた削孔機として完成度が高い。
本体重量 12.5 tf.

④ 掘削機の検討

処分孔の掘削に適合する掘削機は現状では存在しないため、上記のリバースサーキュレーションドリルを改良することとして机上検討を行った。その結果、掘削機の概要図は Fig.17 のようになり、その仕様は以下の通りである。

- ・ドリルシャフト式でローラービットによる全断面回転削孔。
- ・推進反力は処分坑道壁面。
- ・回転数 10 rpm.

- ・推進速度 0.8 cm/min.

- ・ずり搬出はバキューム方式で 1.2 m³/時。

5.3 グラウト材の選定と施工

5.3.1 グラウチング技術の現状

岩盤のグラウチングは、ダム、トンネルおよび地下空洞などで多くの実績を有している。しかし、実績のあるセメント系グラウトによる岩盤の透水性の改良限界は 10^{-7} m/sec 程度であり、その長期耐久性については明らかになっていない。

グラウチングの方式としては、カーテン状に浸透流の流出を抑制するカーテングラウチングや幅広い難透水性ゾーンの形成と地山の変形性の改良を目的としたコンソリデーショングラウチングなど、目的に応じた種々の方式がある。グラウチング効果の判定は、実施後にボーリング孔を削孔して 10 kgf/cm² の圧力水を注入し、1 m 当りで 1 分間に注入される水の量 (リットル) で定義されるルジオン値やセメントの単位注入量などで評価される。

グラウト材としては、強度のあるセメント系材料の他に、浸透性の良い水ガラス系や高強度などの特性を持つ高分子系などがある。また、亀裂性の岩盤である水封式石油地下タンクにおいては、自然浸透方式による粘土グラウチングを行って 10^{-8} m/sec の透水係数が得られた例がある。さらに、高圧な湧水がある場合は高炉コロイドセメントと特殊珪酸ソーダの注入やウレタン樹脂の注入などで成功した例などがある。

5.3.2 地下施設におけるグラウチングの目的と種類

地下施設でのグラウチングの種類[2]については、Fig.18 に示すように以下の 4 つの種類が考えられる。

- ① 弱層・湧水箇所に対するグラウチング
- ② 掘削損傷領域の改良を目的としたグラウチング
- ③ 坑道から岩盤内部へ積極的に止水ゾーンを構築するためのグラウチング
- ④ 破砕帯の透水性改良を目的としたグラウチング

このうち、①は主に掘削時、②、③、④は主に埋戻し時に実施される。掘削時においては、通常のトンネルと同様に切羽前方の地盤改良と止水が目的となるが、埋戻し時においては、核種の移行経路に対する長期透水性の改良が考えられる。しかし、グラウチングの長期耐久性については前述のように明らかになっていないため、ここでは、施工中および操業中の湧水量を低減させるための止水グラウチングを対象とし、その施工方法についても示す。

また、上記以外でとくに注意すべきものとして、縦置き定置方式による処分孔の掘削時の問題がある。すなわち、処分孔の掘削時に岩盤亀裂からの湧水が少量存在しても緩衝材の定置が困難となることが予想される。そこで、処分孔掘削時に亀裂からの湧水を生じさせないために、処分坑道の掘削時にその底盤に入念なグラウチング

Table 2 Method for excavating of a disposal tunnel (vertical emplacement) and conveyance of excavated rocks

岩 種	結晶質岩	堆積岩
掘削方式	硬岩での掘削が用意で、幌形断面を合理的に掘削できる方法として、トンネルワークステーションを用いた全断面発破掘削とする。	円形トンネルで支保をセグメント覆工で行うため、全断面機械掘削 (TBM) とする。TBM のタイプはエレクターでセグメントが組める適用実績の多いシールドタイプとする。
掘削速度	平均月進 100 m とする。	平均月進 150 m とする。
施工精度	計画とのずれ量は、全長で数 mm 確保する。	計画とのずれ量は、全長で ± 10 cm 確保する。
ずり搬送方法	ずり出しには曲線区間もあり、比較的短い坑道でもあることから、ベルトコンベア方式では耐久性と経済性の観点から不適當であるため、シャトルカーまたはずり鋼車によるレール方式とする。	

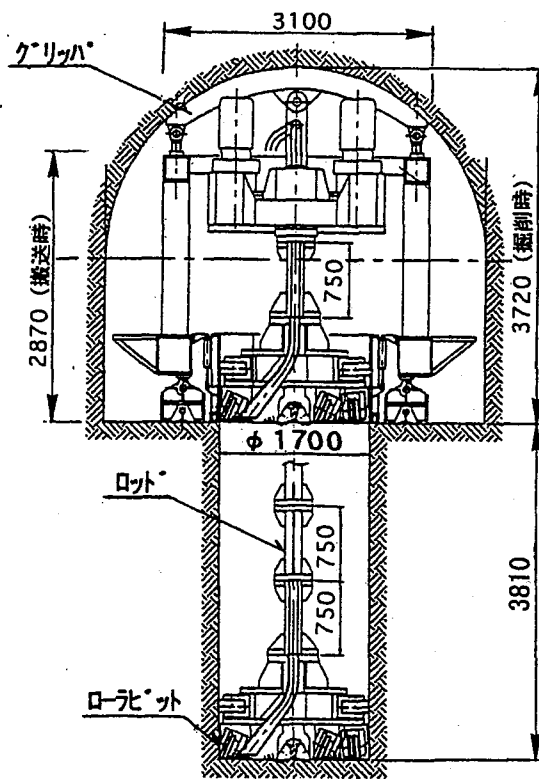


Fig.17 Excavating machine for disposal hole.

を実施することが重要である。

5.3.3 グ라우チングの設計施工

仮想2サイト (堆積岩・結晶質岩分布地域) について、グ라우チングの検討を行った。検討に際しては、現状技術を踏まえて実施し、前提条件として以下の値を設定した。

- 母岩の透水係数 堆積岩 1.0×10^{-8} m/sec
- 結晶質岩 1.4×10^{-8} m/sec

- 坑道の緩み範囲 ($0.2 \times D$ の範囲の透水係数) 1.0×10^{-6} m/sec
- 坑道の緩み範囲 ($1.0 \times D$ の範囲の透水係数) 1.0×10^{-7} m/sec
- 断層 f1, f3, f9 の透水係数 (結晶質岩) 1.0×10^{-6} m/sec
- 坑道の土かぶり 堆積岩 : 520 m
結晶質岩 : 1,000 m

以下に、前記 5.3.2 のグ라우チングの種類に応じた検討結果を示す。

① 弱層、湧水個所に対するグ라우チング

- 改良範囲は $2D$ 、注入圧は湧水圧の 2~3 倍、孔間隔は 3 m 以下。

② 掘削損傷領域の改良を目的としたグ라우チング

- 弱層・湧水個所以外は、坑道縦断方向に約 10 m ピッチで地山の透水性の確認。
- グ라우チング改良限界値 (透水係数が 10^{-7} m/sec 程度) 以下の場合、孔埋めして完了。
- グ라우チング改良限界値以上の場合、中央内挿法で順次グ라우チングする。注入圧力は、湧水圧 + 3 kgf/cm² 程度。改良範囲は $1D$ 。
- 弱層・湧水個所は、縦断方向の改良範囲 = 弱層幅 + 縦断方向 (トンネル軸方向) の前後 10 m、断層を中心として 3 m ピッチ。横断方向の改良範囲は $1D$ 、 60° ピッチで 6 本。改良できていない場合は、各方向の中間に追加孔を実施。

③ 坑道から岩盤内へ積極的に止水ゾーンを構築するためのグ라우チング

- 横断方向は、改良範囲 $2D$ 、 60° で 6 本。縦断方向は最小限 6 m で、3 m ピッチ。また、費用対効果および最終的な坑内排水量の観点からグ라우チング範囲を判断する。

④ 破碎帯の浸透性改良を目的としたグラウチング

・破碎帯の状況により、さらなる改良を図る必要がある場合は、放射状の注入を実施。ステージ長は5m。

なお、これらのグラウト材については原則的に普通セメントを使用し、亀裂が微小な岩質の部分は限定的に超微粒子セメントを用いることを基本とする。

5.4 換気・冷房・排水設備の検討

5.4.1 換気設備

前記 4.5.1 の設計に従って、具体的に換気設備の検討を行う。一例として、堆積岩の縦置き定置方式の場合で、掘削・埋戻しエリアの換気概念を Fig.19、定置エリアの換気概念を Fig.20 に示す。どちらのケースも換気ファンとしては、風量 $1000 \text{ m}^3/\text{min}$ 、動力 $37 \text{ kW} \times 2$ 台が必要となる。ただし、各作業場所には局所換気ファンが必要となる。

また、排気側には集塵機を取り付ける。実際には各作業場所で集塵機を用いているので必要ないと考えられるが、周辺環境の維持から設置することが望ましい。その場合、集塵機も風量 $1000 \text{ m}^3/\text{min}$ 、動力 $37 \text{ kW} \times 2$ 台が必要となる。

定置エリアの排気には HEPA フィルターを取り付ける。通常は HEPA フィルターを通過させず、汚染監視装置の

作動により通過するようにする。

5.4.2 冷房設備

作業環境を保持するためには、坑内温度に配慮する必要がある。ここでは、処分坑道内は作業中に不快感を与えない温度として 28°C 以下とし、主要坑道内は、通行が主であるため 30°C 以下と定めて、冷房設備について検討する。

坑内温度を支配する要因は、廃棄体や各種設備(掘削・搬送定置・埋戻し等の設備)からの放熱と地温等である。地温は、結晶質岩分布地域では地下 1000m 位置で約 33°C 、堆積岩分布地域では地下 520m で 25°C となっている。

廃棄体や各種設備からの放熱を算定し、地温を考慮して所定の坑内温度になるように冷房設備を検討した結果の例を示すと以下のようなものである。

① 結晶質岩分布地域 (縦置き定置) の場合

・ 主要坑道	17.2 万 kcal/h	24 台
・ 処分坑道掘削時	28.8 万 kcal/h	1 台
・ 処分孔掘削時	28.8 万 kcal/h	1 台
・ 定置作業中	28.8 万 kcal/h	1 台
・ 埋戻し作業中	28.8 万 kcal/h	1 台

② 堆積岩分布地域 (縦置き定置) の場合

・ 処分坑道掘削時	7.74 万 kcal/h	1 台
・ 処分孔掘削時	1.29 万 kcal/h	1 台

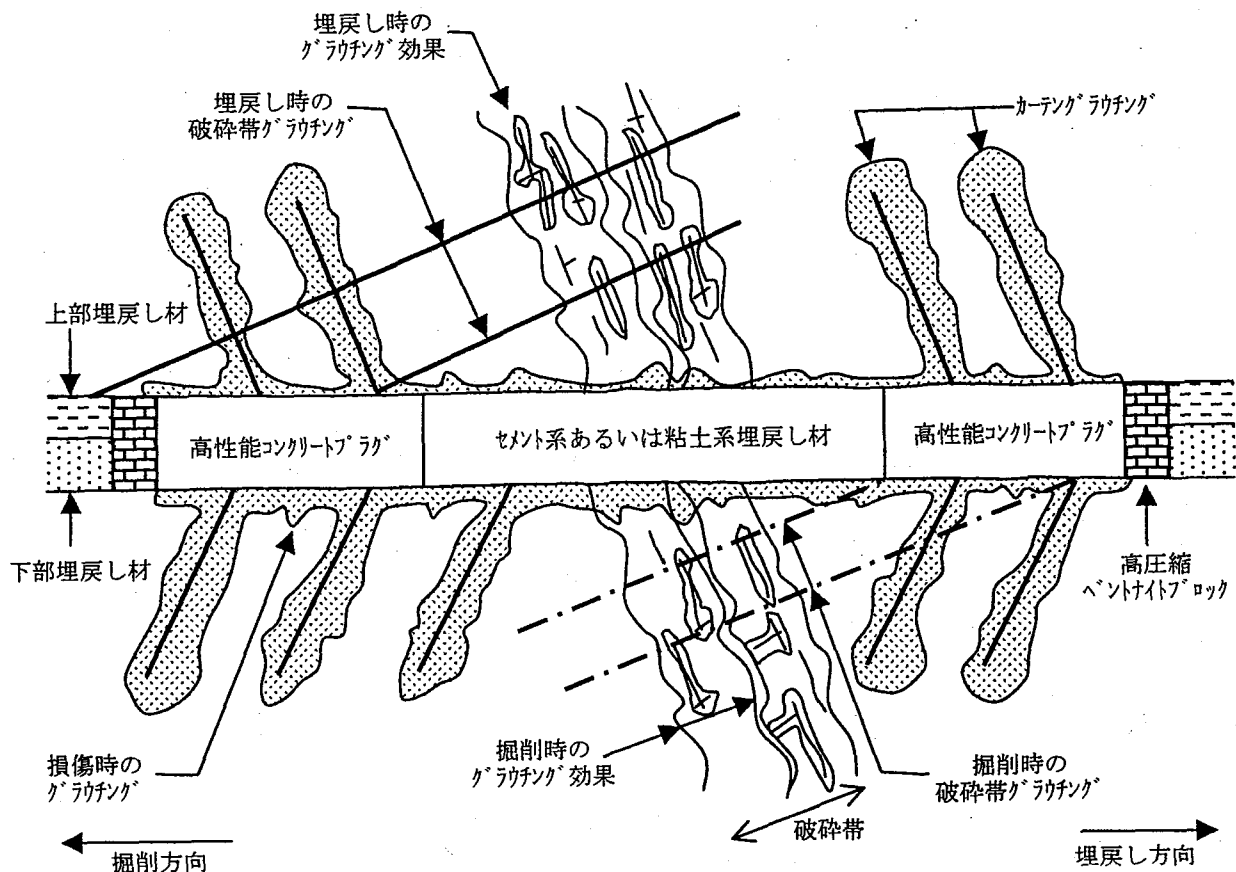


Fig.18 Variety of grouting in underground facilities

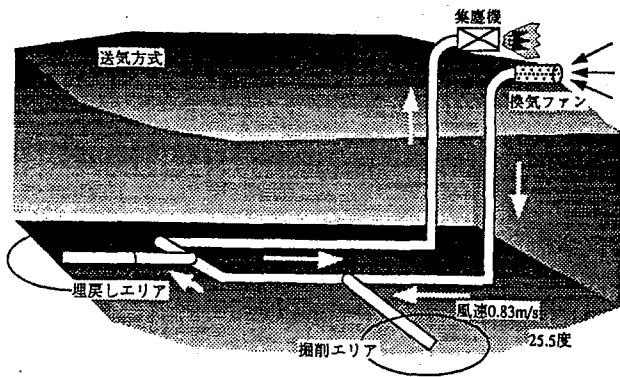


Fig.19 Conceptual diagram for ventilation in excavated / backfilled tunnel area (vertical emplacement in sediment-ary rock formation)

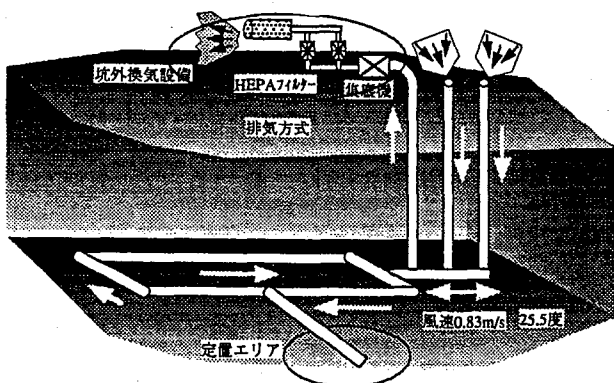


Fig.20 Conceptual diagram for ventilation in emplacement area of tunnel (vertical emplacement in sedimentary rock formation)

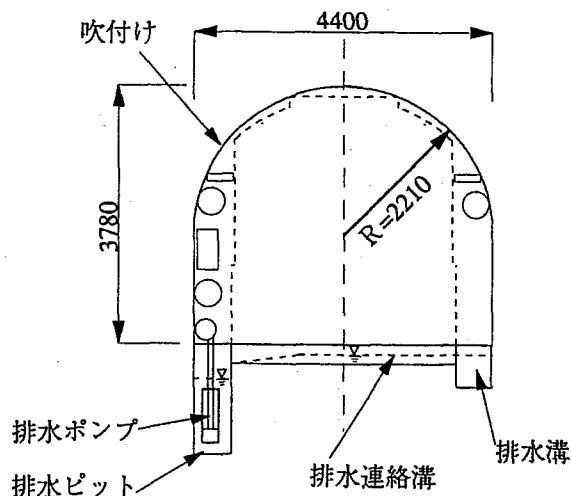


Fig.21 Drainage pit in main tunnel (vertical em-placement in granite rock formation)

5.4.3 排水設備

排水設備は、処分区画、主要坑道、アクセス坑道に必要である。それぞれの排水処理に必要なポンプと排水ピットの仕様を定める。一例として、Fig.21 に花崗岩縦置き定置の主要坑道における排水ピットの例を示す。既製の水中ポンプで送水可能である。アクセス坑道下部のピットは、地下施設全体から集水されるので大規模となる。例として花崗岩縦置き定置の場合を示すと、約 20 m×20 m×深さ 4 m 程度に相当するピット容量が必要となる。この場合の排水ポンプは、花崗岩地域では 1000 m の揚程が必要であることから規模も大きくなる。横型のポンプは既製品があるが、縦型のポンプも製作は可能である。吸い込みが良く、据え付け面積の小さい縦型の方が良好である。

ポンプの電気容量を示すと、以下の通りとなる。

- ・花崗岩縦置き 3,650 kw×3 台=18,250 kw
- ・堆積岩縦置き 1,450 kw×3 台= 4,350 kw
- ・堆積岩横置き 650 kw×3 台= 2,370 kw

5.5 関連設備

一般の道路トンネルにおいては、事故発生時の非常用設備が交通量とトンネル延長に基づき 5 段階に区分されて設置されている。地下処分場は交通量は少ないが総延長が大きいので、最上階の設備設置に相当する。

Table 3 にトンネル内の非常用設備名を示す。地下処分場においてもこれらの設備を設置する必要がある。

Table 3 Emergency facilities in tunnels.

分類	設備名
通報・警備装置	・ 非常電話 ・ 押ボタン ・ 火災探知器 ・ 非常警報装置
消火設備	・ 消火器 ・ 消火栓
避難・誘導設備	・ 誘導表示板 ・ 排煙設備または非難通路
その他の設備	・ 給水栓 ・ 無線通信補助設備 ・ ラジオ再放送設備または拡声放送設備 ・ 水噴霧器 ・ 監視装置

5.6 掘削時の施工管理

施工管理とは、要求品質の物を限られた工期とコストで安全かつ合理的に施工するための管理方法である。トンネル等の施工管理は、数千キロメートルに及ぶ従来の施工実績から、ほぼ確立されているものと考えられる。

ここでは、現状の施工管理方法を調査し、以下の観点から地下施設に適用する。

5.6.1 掘削管理

トンネルや立坑等の坑道の掘削管理は、以下の点について行う。

- ① 切羽の中心線およびレベルの測量を適切な時期に行い、施工精度を確保する。
- ② 切羽観察および坑内計測を定められた日時に行って記録し、その結果を設計・施工に反映する。
- ③ 過装薬発破で地山をいためたり、余掘りを発生させないように、使用薬量を管理する。
- ④ 浮石などを除去するこそく等を確実にし、設計掘削断面を確保する。
- ⑤ 坑内作業環境をモニターし、所要規準値を確保する。

5.6.2 計測管理

トンネル工事における地山の安定性は、地山条件、掘削断面積、支保の規模と施工時期等に関連する。したがって、施工中の観察や計測により、設計・施工の妥当性を常に判断し、工事に反映させることが重要である。

計測工としては、内空変位等のような比較的簡易な計測を行う「計測 A」と地中変位計等の計測器を設置して行う「計測 B」がある。

計測の種類は、内空変位、天端沈下、地中変位、ロックボルト軸力、吹付け応力、覆工応力等があり、適宜行う。

5.6.3 坑内観察

計測だけではとらえられないトンネル挙動について、観察、把握、評価する必要がある。とくに、岩盤は不均質・不連続であるため、場所の違いにより大きく挙動が異なる場合が多い。施工中は切羽に現われる地質状況の変化を確認し、設計・施工が適切であるかを判断しなければならない。

観測を行う項目は、以下の通りである。

- ① 岩種や地層の走向・傾斜等の地質構造
- ② 固結度等、地山の硬軟の程度
- ③ 割れ目の方向、間隔、状態
- ④ 湧水の量、位置、水質
- ⑤ 切羽の自立性

5.6.4 支保材の施工管理

支保材の施工管理の検討フローを Fig.22 に示す。支保工の要件・仕様については、前述 4.3 に示す通りである。品質・出来形管理項目としては、以下の通りである。

- ① コンクリートセグメント
- ② 裏込め注入材

③ 覆工コンクリート

④ 吹付けコンクリート

⑤ ロックボルト

⑥ コンクリート中の混和材料

上記の品質・出来形管理項目については、それぞれ適切な管理方法（試験・検査方法）や管理内容（頻度・基準・対応策）を定めておく必要がある。また、地下施設の建設から閉鎖に至るまでの施工管理を検討する際、とくに重要で注目すべき項目は以下の通りである。これらの項目は支保材の品質特性に大きく影響するので注意が必要である。

- ① 地圧
- ② 湧水（有害な地下水成分）
- ③ 地温
- ④ 地震

5.6.5 グラウト材の施工管理

品質・出来形管理項目を挙げると、以下の通りである。

- ① ボーリング管理（孔設置位置検査、岩盤状況確認、施工性確認など）
- ② 注入管理（材料の配合、注入速度、注入圧力、注入完了基準、効果判定基準など）
- ③ 透水試験（ルジオンテスト）管理（加圧力、限界圧力、注入量、地下水位、ルジオン値など）

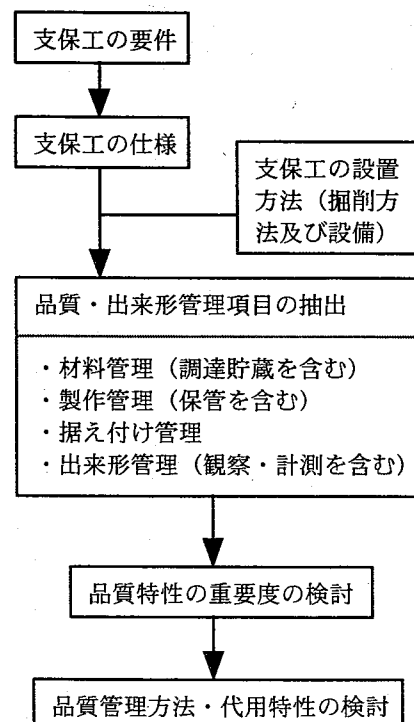


Fig.22 Schematic flow of investigation for execution control of tunnel supporting system

6 まとめ

地下施設の設計・施工では、施設の各構成要素に対して、基本設計および詳細設計とその設計の例示を行うとともに、設計に対する具体的な施工方法や機械設備などについて検討した。

(1) 地下施設の基本設計

基本設計は、建設深度や地下施設の規模(広がり)を概略的に算定し、処分場建設が可能であることを確認するために行われる。

① 建設深度と施設規模

建設深度は堆積岩分布地域では深さ 500 m 付近の D 層中央部、花崗岩分布地域では深さ 1,000 m 付近が岩盤物性や地下水流動場の観点で有利な地下施設位置となった。また、施設規模は坑道の力学的安定性と緩衝材の熱的安定性の観点から算定し、堆積岩横置き定置方式の場合が 1.80 km^2 (1.34 km 四方)、花崗岩縦置き定置方式が 1.54 km^2 (1.24 km 四方)となった。

② 概略的な施設配置 (基本配置計画)

基本設計の例示として概略的な施設配置を検討した結果、堆積岩地域では塩淡水境界の淡水域側に施設を配置し、各坑道群も概略的に設定した。また、花崗岩地域では、日本の地質構造を考慮して大きな断層破砕帯を 1 本取り込んだ領域内に施設を配置し、坑道群の概略設定を行った。

(2) 地下施設の詳細設計

詳細設計は、地下施設の構成要素について具体的な設計を行う。

① 空洞形状・必要断面積の設定

空洞断面は、坑道内を通過または稼働する各設備の大きさと安全通路や諸設備を設置する余裕幅を検討し、断面形状 (円形・楕形) を考慮して設定した。

② 支保形式・支保材の選定

物量的に膨大となる支保材は、経済性の観点から従来より多用されているコンクリートを主体とした材料を用いることとした。

支保形式については、花崗岩分布地域では吹付けコンクリートや覆工コンクリートを基本とした設計を行い、堆積岩分布地域は覆工コンクリートより強度の大きなコンクリートセグメントとその裏込めモルタルを基本とした設計を行った。

③ 処分坑道離間距離と廃棄体埋設間隔の詳細設定

縦置き定置方式の場合は、まず力学的な観点から最小の処分孔間隔 (廃棄体埋設間隔) と坑道離間距離を求め、熱的な条件を満足するかを判定した。横置き定置方式の場合は、緩衝材の必要な厚さが処分坑道内の埋設間隔の最小値となることから、最小間隔で緩衝材の温度上限値をクリアできるように坑道離間距離を求めた。

検討の結果、坑道離間距離を大きくすると施設規模は大きくなるが坑道総延長は短くなり、坑道掘削土量や埋戻し材の総量は少なくなることがわかった。

④ 換気・排水設計

換気方式は、定置エリアを排気方式 (負圧)、掘削エリアと埋戻しエリアを送気方式 (正圧) とし、主要坑道の要所に隔壁扉を設けて各エリアを区分した。これにより、換気系統に事故が発生しても定置エリアの汚染の可能性のある空気が他のエリアに流れ込まないシステムとした。

坑道内の湧水量の算定は、一般に用いられる井戸の公式を採用し、処分坑道の連設の影響は FEM 解析により水压低減効果を考慮して求めた。

排水ルートは、処分坑道では各処分区画の下流側に、主要坑道は 300~500 m 間隔にそれぞれピットを設置して自然集水し、水中ポンプにより排水管を通してアクセス坑道下部の大排水ピットに送水することとした。そして、大排水ピットから大型ポンプにより配管で直接地上に送り、汚染監視装置や濁水処理設備を経て放流する計画とした。

⑤ 詳細配置計画の策定

花崗岩分布地域における縦置き定置方式、堆積岩分布地域における縦置きおよび横置き定置方式の場合について、地質・地圧条件などを考慮の上、具体的に詳細な施設配置計画を策定し例示した。

その配置計画を基に、廃棄体・掘削ずり・埋戻し材などの搬送時間を詳細に算定し、1 日 5 本の廃棄体が埋設可能な操業計画を策定して、配置計画に問題がないことを確認した。

(3) 地下施設の施工

地下施設の建設においては現状技術を利用することが、安全性・確実性・合理性・経済性等に対して優位であることから、施工に関する現状技術を幅広く調査し、マスタースケジュールを意識して地下施設への適用を検討した。

① 掘削・ずり搬送方法と設備

アクセス坑道、主要坑道、処分坑道に関しては、現状技術である発破・NATM 工法や TBM 工法による岩盤掘削とシャトルカーなどによるレール方式やベルトコンベア方式によるずり搬送方法などの組み合わせで対応可能であることを示した。

ただし、縦置き定置方式の処分孔の掘削については、狭い坑道内における大口径の掘削のため、これまで施工要求がなかったことから適合する掘削機械が現状では存在しないことがわかり、今後、掘削機械の開発または従来機器の改善とその検証が必要であることを示した。

② グラウト材の選定と施工

岩盤のグラウチングは、止水性を対象としたグラウチングについて主に検討した。また、縦置き定置方式にお

ける処分孔の掘削時に岩盤亀裂からの湧水が生じないように、処分坑道掘削時に坑道底盤に十分なグラウチングを行う必要があることを示した。

グラウト材については、目的に応じて各種の材料があるが、ここでは原則的に普通セメントを使用するものとし、亀裂が微小な岩質の部分は限定的に超微粒子セメントを用いることを基本とした。

③ 換気・冷房・排水設備

換気設備としては、定置エリアの排気ファンおよび掘削・埋戻しエリアの送気ファンの風量がともに 1000 m³/min 必要となった。また、作業環境を保持するために坑道内には冷房設備が必要となった。

排水設備は、処分区画および主要坑道のピットからアクセス坑道下部の大型ピットまでの送水は既製の水中ポ

ンプで容量的に可能であるが、大型ピットから地上までの排水には揚程の大きな大型ポンプが必要となった。

参考文献

- [1] 高レベル事業推進準備会：高レベル放射性廃棄物処分手業に関する検討 中間とりまとめ（平成7年度）〔基礎的検討〕参考資料（1996）。
- [2] Simmons, G. R., Baumgartner, P.: The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Engineering for a Disposal Facility, AECL-10715, COG-93-5 (1994).