

分 置

限定資料

PNC ZJ1100 96-005

## TRU廃棄物の処分概念の検討

(動力炉・核燃料開発事業団 研究内容報告書)

技術資料		
開示区分	レポートNo.	受領日
☑	ZJ1100 96-005	1996.8.21

この資料は技術管理室保存資料です  
閲覧には技術資料閲覧票が必要です  
動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室

1996年3月

鹿島建設株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。については、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

技術開発推進部・技術管理室

PNC ZJ1100 96-005

# TRU廃棄物の処分概念の検討

(動力炉・核燃料開発事業団 研究内容報告書)

1996年3月

鹿島建設株式会社

## TRU廃棄物の処分概念の検討

阿部 裕\* 深沢 栄造\* 平 和男\* 田中 俊行\* 近藤 嘉広\*  
山本 正明\*\* 清水 保明\*\* 奥津 一夫\*\* 赤坂 直人\*\*  
古市 光昭\*\*\*

### 要　旨

TRU廃棄物は、高レベル放射性廃棄物と比較して発生量が多いが、発熱性があるものが少ないため、深地層中に大空洞を掘削して処分することが合理的である。

本研究では廃棄体特性に応じた処分システム概念の構築を行うと共に、人工バリアに係わる基本力学定数を取得する。本年度の研究成果を以下に示す。

- 1) TRU廃棄物の特性や発生量、さらには人工バリア材や岩盤の特性等を考慮し、処分システムの基本概念を構築した。その結果、大断面岩洞方式、小断面岩洞方式、坑道方式、サイロ方式の4種類の処分システム概念を示すことができた。
- 2) 処分システムの長期力学的挙動を検討し、圧密解析、体積変化解析を行い、長期挙動の影響を定量的に評価した。その結果、処分場を構成する材料の体積変化がシステムの成立性に大きく影響することが明らかとなり、今後より一層の検討を実施する必要性があることを確認した。
- 3) Ca化されたNaベントナイトの基礎的な物性（膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強度）を取得し、既存の知見とともに諸物性を検討した。その結果、乾燥密度  $1.8\text{g/cm}^3$  (ベントナイト 100%) 程度ではNaベントナイトとCa化されたベントナイトの物性には、差異は認められなかった。
- 4) 構築した処分システムについて、コストの検討を行った。その結果、大断面岩洞方式、小断面岩洞方式、サイロ方式、坑道方式の順にコストが高くなる傾向を定量的に把握した。

---

本報告書は、鹿島建設株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：070D 0326

事業団担当部課室および担当者 東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室 室長 石川 博久

\* 鹿島建設（株）技術研究所

\*\* 鹿島建設（株）建設総事業本部 土木設計本部

\*\*\* 鹿島建設（株）建設総事業本部 原子力室

A Study of Isolation Concept for Transuranic Radioactive Waste Isolation System

H.Abe\*, E.Fukazawa\*, K.Taira\*, T.Tanaka\*, Y.Kondo\*  
M.Yamamoto\*\*, Y.Shimizu\*\*, K.Okutsu\*\*, N.Akasaka\*\*  
M.Furuichi\*\*\*

Abstract

The amount of TRU waste is more than that of high level radioactive waste. It is a rational way that TRU waste is isolated in large-scale openings excavated deeply underground because the value caused by an exothermic reaction of TRU waste is relatively low.

This study aims to create the concept of TRU waste isolation systems according to property of waste. In addition, it is carried out to examine fundamental dynamic constants of engineered barrier. The following are results at this year;

- 1) To consider the property of TRU waste, the volume of TRU waste, the property of engineered barrier and the property of rock, and to create the basic concept of TRU waste isolation system. The results shows that, we can create four types of isolation systems. These names are extra large-scale opening, large-scale opening, tunnel and silo.
- 2) To examine the long-range dynamic phenomena of isolation systems, and to analyze about consolidation and change of volume. It has been definitely shown by the results of analysis that change of volume about materials have a great influence on the materialization of isolation systems. And it is made known that necessity of more study about change of volume.
- 3) Comprehensive data of bentonite exchanged of initially absorbed Na to Ca are collected to evaluate basic characteristics such as swelling pressure, a modulus of water permeability and unconfined compressive strength. With some relevant knowledge, these characteristics of Ca bentonite are discussed. The results shows that, there is no difference about characteristics between Na bentonite and Ca bentonite, if dry density is about 1.8g/cm<sup>3</sup>(100%bentonite).
- 4) To estimate the cost of TRU waste isolation systems. The results shows that, the cost of TRU waste have a tendency to costly in the order of extra large-scale opening, large-scale opening, silo and tunnel.

---

Work performed by KAJIMA Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation. Contract No.070D0326

PNC Liaison:Geological Isolation Technology Section, Waste Technology Development Division, Tokai Works, Hirohisa Isikawa

\* : Kajima Technical Research Institute

\*\* : Kajima Corporation, Civil Engineering Design Dept.

\*\*\*: Kajima Corporation, Nuclear Power Dept.

## はじめに

本研究の目的は、廃棄体、人工バリアを含む処分システムについて、力学的特性、変質、体積変化などの安定性を評価することにより、TRU廃棄物の廃棄体特性に応じた処分システムの概念を示すことである。

## 研究の内容

本研究で実施する研究内容を以下に説明する。

### 1. 処分システムの明確化

#### (1) 処分システムの基本概念及び仕様の明確化

TRU廃棄物の各廃棄体について、廃棄体の特性、発生量、人工バリア材の特性、岩盤の特性等を考慮し、(2)、(3)の検討、解析も参考にしながら人工バリアの構成、形状及び寸法並びに空洞の形状、寸法等、処分システムの基本概念及び仕様を明らかにする。その際、類似の廃棄物はまとめて埋設することを考慮するが、まとめられる場合はその根拠を明確にする。

#### (2) 処分システムの長期力学挙動のシナリオ検討

人工バリアの力学的安定性、変質、材料特性、廃棄体の体積変化、廃棄体の発熱等処分場閉鎖の以前及び以降に生じる事象について検討し、さらに確率的に低い事象や事象間の関係を考慮して、力学挙動に関して評価対象とする基本シナリオを設定する。

#### (3) 力学挙動評価モデルに基づく解析

基本シナリオにおいて生じる力学挙動の各事象の中で、特に廃棄体の発熱、構成材料の体積変化及び人工バリア材（ベントナイト）の圧密挙動について、評価に使うべきモデルを設定する。設定したモデルを用いて解析を実施し、発熱、体積変化及び圧密挙動の重要性を明らかにする。

### 2. 人工バリア材料の力学特性データの取得

カルシウム型に変質させたベントナイト単体及びケイ砂を混合した材料に対し、膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強度等の特性データを試験により取得する。

### 3. コストの試算

「処分システムの明確化」で構築した処分概念について、建設・操業・閉鎖に要する費用を算出する。費用については、内訳を記述し、各項目の全体コストに対する割合が分かるようにし、さらに、処分深度、空洞の大きさ及び人工バリアの仕様の変化が全体コストに与える影響を評価する。

## 目 次

PAGE

第1章 処分システムの明確化 -----	1.1-1
1.1 処分システムの基本概念及び仕様の明確化 -----	1.1-1
1.1.1 前提条件 -----	1.1-2
1.1.1.1 廃棄体特性 -----	1.1-2
(1) ハル・エンドピース圧縮固化体 -----	1.1-4
(2) アスファルト固化体 -----	1.1-7
(3) セメント固化体 -----	1.1-8
(4) プラスチック固化体 -----	1.1-9
(5) 溶融固化体 -----	1.1-9
1.1.1.2 サイト特性 -----	1.1-11
(1) 岩盤の力学特性 -----	1.1-11
(2) 岩盤の水理特性 -----	1.1-11
1.1.1.3 検討対象施設 -----	1.1-13
(1) 主要施設 -----	1.1-13
(a) 地上施設 -----	1.1-13
(b) 地下施設 -----	1.1-14
(c) 工事用設備 -----	1.1-15
(2) 各施設の検討範囲 -----	1.1-16
1.1.1.4 その他の前提条件 -----	1.1-17
(1) 廃棄体の搬入スケジュール -----	1.1-17
(2) 放射線管理(放射線管理区域と非放射線管理区域の区分)の考え方 --	1.1-18
(3) その他 -----	1.1-19
1.1.2 人工バリアの基本概念 -----	1.1-20
1.1.2.1 人工バリアの目的 -----	1.1-20
1.1.2.2 人工バリアの基本構成 -----	1.1-20
1.1.2.3 人工バリアの候補材料 -----	1.1-21
(1) 構造材 -----	1.1-21
(a) 要求性能 -----	1.1-21
(b) 候補材料とその特徴 -----	1.1-21
(2) 充填材 -----	1.1-22
(a) 要求性能 -----	1.1-22
(b) 候補材料とその特徴 -----	1.1-22
(3) 緩衝材 -----	1.1-23
(a) 要求性能 -----	1.1-23
(b) 候補材料とその特徴 -----	1.1-23
1.1.2.4 人工バリアの基本構造 -----	1.1-26

1.1.3 処分施設に係わる技術	-----	1.1-29
1.1.3.1 設計研究	-----	1.1-29
(1) 処分空洞の設置深度	-----	1.1-29
(2) 空洞安定解析	-----	1.1-30
(a) 処分空洞の規模	-----	1.1-30
(b) 処分空洞の形態	-----	1.1-38
(3) 熱解析	-----	1.1-40
(a) 基本的な考え方	-----	1.1-40
(b) 検討方法	-----	1.1-40
(c) 検討結果	-----	1.1-47
(4) 体積変化解析	-----	1.1-55
(a) 基本的な考え方	-----	1.1-55
(b) 検討方法	-----	1.1-55
(c) 検討結果	-----	1.1-55
(5) 処分場コンセプト	-----	1.1-61
(a) 処分空洞の断面形状	-----	1.1-64
(b) 処分空洞の長さ	-----	1.1-82
(c) 処分空洞の離間距離	-----	1.1-84
(d) 処分空洞の配置	-----	1.1-88
(e) 主要坑道の断面・配置・本数	-----	1.1-93
(f) 連絡坑道の断面・配置	-----	1.1-95
(g) 処分パネルの概念	-----	1.1-101
(h) 処分パネルの配置	-----	1.1-102
(i) 処分パネルの大きさ	-----	1.1-106
(j) アクセス坑道の形式	-----	1.1-109
(k) アクセス坑道の本数・断面・配置	-----	1.1-111
(l) 廃棄体の埋設密度	-----	1.1-114
1.1.3.2 建設計画	-----	1.1-115
(1) 施工手順	-----	1.1-115
(2) アクセス坑道	-----	1.1-116
(a) 基本的な考え方	-----	1.1-116
(b) 本検討での設定	-----	1.1-116
(3) 主要坑道、連絡坑道および換気坑道	-----	1.1-119
(a) 基本的な考え方	-----	1.1-119
(b) 本検討での設定	-----	1.1-119
(4) 処分空洞	-----	1.1-121
(a) 基本的な考え方	-----	1.1-121
(b) 本検討での設定	-----	1.1-121
(5) 人工バリア製造設備の仕様	-----	1.1-125

1.1.3.3 操業計画	-----	1.1-126
(1) 廃棄体収納容器（コンテナ）	-----	1.1-126
(a) 基本的な考え方	-----	1.1-126
(b) 本検討での設定	-----	1.1-126
(2) 廃棄体の定置方法	-----	1.1-131
(a) 基本的な考え方	-----	1.1-131
(b) 本検討での設定	-----	1.1-131
(3) 廃棄体の搬送方法	-----	1.1-137
(a) 基本的な考え方	-----	1.1-137
(b) 本検討での設定	-----	1.1-137
(4) 操業全体の流れと工程	-----	1.1-139
(a) 操業の基本的要件	-----	1.1-139
(b) 操業手順	-----	1.1-140
(c) 搬送経路	-----	1.1-141
(d) 各作業の所要時間	-----	1.1-143
(e) 処分量の確認	-----	1.1-144
1.1.3.4 閉鎖計画	-----	1.1-146
(1) 閉鎖の目的及び要求性能	-----	1.1-146
(2) 閉鎖の要素技術	-----	1.1-146
(a) 埋戻し	-----	1.1-146
(b) プラグ	-----	1.1-147
(c) グラウト	-----	1.1-147
(3) 閉鎖の候補材料	-----	1.1-147
(4) 処分空洞の閉鎖	-----	1.1-147
(5) アクセス・主要坑道・連絡坑道の閉鎖	-----	1.1-150
1.1.3.5 その他	-----	1.1-151
(1) 換気システム	-----	1.1-151
(a) 基本的な考え方	-----	1.1-151
(b) 本検討での設定	-----	1.1-151
(2) 排水システム	-----	1.1-155
(a) 基本的な考え方	-----	1.1-155
(b) 本検討での設定	-----	1.1-155
1.1.4 全体レイアウト	-----	1.1-160
1.2 処分システムの長期力学挙動のシナリオ検討	-----	1.2-1
1.2.1 地下水シナリオの検討	-----	1.2-1
1.2.1.1 事象の抽出	-----	1.2-3
1.2.1.2 各事象の相関	-----	1.2-5
(1) 建設時	-----	1.2-5
(a) 挖削	-----	1.2-5
(b) 人工バリアの構築	-----	1.2-6

(2) 操業時	-----	1.2-7
(3) 閉鎖時	-----	1.2-8
(4) 閉鎖後	-----	1.2-9
<b>1.3 力学挙動評価モデルに基づく解析</b>	-----	<b>1.3-1</b>
1.3.1 熱解析	-----	1.3-1
1.3.2 体積変化解析	-----	1.3-1
1.3.3 ベントナイトの圧密解析	-----	1.3-2
1.3.3.1 解析条件	-----	1.3-2
(1) 解析方法	-----	1.3-2
(2) 解析用物性値	-----	1.3-2
(3) 解析モデル	-----	1.3-4
(4) 解析ケース	-----	1.3-5
(5) 排水条件	-----	1.3-5
(6) 荷重条件	-----	1.3-5
(7) 境界条件	-----	1.3-7
1.3.3.2 解析結果	-----	1.3-8
1.3.4 まとめと今後の課題	-----	1.3-9
1.3.4.1 熱解析	-----	1.3-9
1.3.4.2 体積変化解析	-----	1.3-9
1.3.4.3 ベントナイトの圧密解析	-----	1.3-9
<b>第2章 人工バリア材料の力学特性データの取得</b>	-----	<b>2-1</b>
2.1 目的	-----	2-1
2.2 使用材料	-----	2-1
2.3 試験条件	-----	2-2
2.3.1 Ca化ベントナイト	-----	2-2
2.3.2 ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料	-----	2-3
2.4 試験方法	-----	2-4
2.4.1 圧縮固化方法	-----	2-4
2.4.2 膨潤圧試験	-----	2-4
2.4.3 透水試験	-----	2-5
2.4.4 一軸圧縮試験	-----	2-5
2.5 試験結果	-----	2-7
2.5.1 Ca化ベントナイト	-----	2-7
2.5.1.1 膨潤圧	-----	2-7
2.5.1.2 透水係数	-----	2-10
2.5.1.3 一軸圧縮強さ	-----	2-12
2.5.2 ケイ砂とCa化ケニゲルV1の混合材料	-----	2-13
2.5.2.1 膨潤圧	-----	2-13
2.5.2.2 透水係数	-----	2-15

2.5.2.3 一軸圧縮強さ	-----	2-17
2.6 まとめと今後の課題	-----	2-19
2.6.1 Ca化ベントナイト	-----	2-19
2.6.1.1 膨潤圧	-----	2-19
2.6.1.2 透水係数	-----	2-19
2.6.1.3 一軸圧縮強さ	-----	2-19
2.6.1.4 今後の課題	-----	2-19
2.6.2 ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料	-----	2-19
2.6.2.1 膨潤圧	-----	2-19
2.6.2.2 透水係数	-----	2-19
2.6.2.3 一軸圧縮強さ	-----	2-19
2.6.2.4 今後の課題	-----	2-19
<b>第3章 コストの試算</b>	-----	<b>3-1</b>
3.1 コスト試算の基本的な考え方	-----	3-1
3.1.1 対象施設	-----	3-1
3.1.2 コスト試算範囲	-----	3-1
3.1.2.1 地上施設	-----	3-1
3.1.2.2 地下施設	-----	3-1
3.1.2.3 工事用設備	-----	3-2
3.1.2.4 操業関連	-----	3-2
3.1.3 地上施設の建設費用	-----	3-3
3.1.4 地下施設の建設費用	-----	3-3
3.1.4.1 積算ベース	-----	3-3
3.1.4.2 コスト算定での仮定	-----	3-3
3.2 コスト試算	-----	3-4
3.2.1 検討ケース	-----	3-4
3.2.2 検討結果	-----	3-4
3.2.2.1 地上施設	-----	3-4
3.2.2.2 地下施設	-----	3-4
3.2.3 コスト試算の結果	-----	3-11
3.2.3.1 建設段階	-----	3-11
3.2.3.2 閉鎖段階	-----	3-13
<b>第4章 今後の課題</b>	-----	<b>4-1</b>
<b>添付資料 シナリオ検討における事象の相関関係とその説明</b>	-----	<b>付-1</b>

## 図一覧

### 第1章

- 図-1.1.1 検討フロー
- 図-1.1.2 ハル・エンドピース圧縮固化体キャニスター1本当たりの発熱量の経時変化
- 図-1.1.3 ハル・エンドピース圧縮固化体断面状況
- 図-1.1.4 硬化コンクリートの構成
- 図-1.1.5 地質と湧水量
- 図-1.1.6 人工バリアの基本構成
- 図-1.1.7 各処分空洞方式に対する人工バリアの基本構造形態
- 図-1.1.8 解析概念図
- 図-1.1.9 土かぶり  $h$  と側圧係数  $\sigma_{Hav}/\sigma_z$  の関係
- 図-1.1.10 処分深度と掘削可能径との関係
- 図-1.1.11 解析モデル
- 図-1.1.12 要素分割図（全体図）
- 図-1.1.13 要素分割図（廃棄体部分拡大図）
- 図-1.1.14 境界条件
- 図-1.1.15 廃棄体量と換算廃棄体直径
- 図-1.1.16 発熱特性
- 図-1.1.17 解析による温度算定位置
- 図-1.1.18 最高温度と空洞中心間距離（ベントナイト内面、深さ=300m、結晶質岩）
- 図-1.1.19 最高温度と空洞中心間距離（ベントナイト内面、深さ=300m、堆積岩）
- 図-1.1.20 最高温度と空洞中心間距離（ベントナイト内面、深さ=700m、結晶質岩）
- 図-1.1.21 最高温度と空洞中心間距離（ベントナイト内面、深さ=700m、堆積岩）
- 図-1.1.22 廃棄体空隙率と変形量の関係
- 図-1.1.23 変形概念図（廃棄体空隙率30%の場合）
- 図-1.1.24 変形概念図（コンクリートからの溶出を考慮した場合）
- 図-1.1.25 乾燥密度と透水係数の関係
- 図-1.1.26 ① 大断面岩洞方式 断面形状図
- 図-1.1.26 ② 大断面岩洞方式 支保工図
- 図-1.1.27 ① 小断面岩洞方式 断面形状図
- 図-1.1.27 ② 小断面岩洞方式 支保工図
- 図-1.1.28 ① 坑道方式 断面形状図
- 図-1.1.28 ② 坑道方式 支保工図
- 図-1.1.29 ① サイロ方式 断面形状図
- 図-1.1.29 ② サイロ方式 支保工図
- 図-1.1.30 等分布荷重時3辺固定1辺自由スラブの応力図と自由辺のたわみ
- 図-1.1.31 等変分布荷重時3辺固定1辺自由スラブの応力図と自由辺のたわみ
- 図-1.1.32 荷重図（水圧作用：大断面岩洞方式）
- 図-1.1.33 応力度照査用断面図（水圧作用：大断面岩洞方式）

- 図-1.1.34 荷重図（水圧作用：坑道方式）  
図-1.1.35 応力度照査用断面図（水圧作用：坑道方式）  
図-1.1.36 荷重図（ベントナイト土圧作用）  
図-1.1.37 応力度照査用断面図（ベントナイト土圧：大断面岩洞方式）  
図-1.1.38 応力度照査用断面図（ベントナイト土圧：小断面岩洞方式）  
図-1.1.39 応力度照査用断面図（ベントナイト土圧：坑道方式）  
図-1.1.40 離間距離の概念図（消防法、岩盤タンクの適用基準）  
図-1.1.41 大断面岩洞方式 処分空洞配置図  
図-1.1.42 小断面岩洞方式 処分空洞配置図  
図-1.1.43 坑道方式 処分空洞配置図  
図-1.1.44 サイロ方式 処分空洞配置図  
図-1.1.45 主要坑道断面形状図  
図-1.1.46 主要坑道概念図  
図-1.1.47 大断面岩洞方式 連絡坑道断面図  
図-1.1.48 小断面岩洞方式 連絡坑道断面図  
図-1.1.49 坑道方式 連絡坑道断面図  
図-1.1.50 サイロ方式 連絡坑道断面図  
図-1.1.51 連絡坑道接続概念図  
図-1.1.52 放射線管理区域と建設・操業・閉鎖作業の関係  
図-1.1.53 大断面岩洞方式 処分パネル図  
図-1.1.54 小断面岩洞方式 処分パネル図  
図-1.1.55 坑道方式 処分パネル図  
図-1.1.56 サイロ方式 処分パネル図  
図-1.1.57 立坑断面図  
図-1.1.58 地下施設の施工手順  
図-1.1.59 施工手順の概念（岩洞方式の場合）  
図-1.1.60 施工手順の概念（サイロ方式の場合）  
図-1.1.61 物質のγ線しゃへい効果  
図-1.1.62 廃棄体コンテナ 形状図  
図-1.1.63 廃棄体コンテナの製造  
図-1.1.64 大断面岩洞方式 廃棄体定置図  
図-1.1.65 小断面岩洞方式 廃棄体定置図  
図-1.1.66 坑道方式 廃棄体定置図  
図-1.1.67 サイロ方式 廃棄体定置図  
図-1.1.68 搬送台車と牽引車の仕様概念  
図-1.1.69 操業手順の概念図  
図-1.1.70 搬送経路（坑道型の場合）  
図-1.1.71 搬送経路（岩洞型：小断面の場合）  
図-1.1.72 搬送経路（岩洞型：大断面の場合）  
図-1.1.73 搬送経路（サイロ型の場合）

- 図－1.1.74 各処分空洞方式の閉鎖  
 図－1.1.75 透水係数とベントナイト混合率の関係  
 図－1.1.76 坑道方式での換気システム概念  
 図－1.1.77 小断面岩洞方式での換気システム概念  
 図－1.1.78 大断面岩洞方式での換気システム概念  
 図－1.1.79 サイロ方式での換気システム概念  
 図－1.1.80 坑道方式での排水システム概念  
 図－1.1.81 小断面岩洞方式での排水システム概念  
 図－1.1.82 大断面岩洞方式での排水システム概念  
 図－1.1.83 サイロ方式での排水システム概念  
 図－1.1.84 大断面岩洞方式 レイアウト図  
 図－1.1.85 小断面岩洞方式 レイアウト図  
 図－1.1.86 坑道方式 レイアウト図  
 図－1.1.87 サイロ方式 レイアウト図  
 図－1.1.88 レイアウト比較図  
 図－1.2.1 掘削による事象相関フロー図  
 図－1.2.2 廃棄体定置による事象相関フロー図  
 図－1.2.3 閉鎖後の事象相関フロー図  
 図－1.3.1 クニゲルV1の三軸試験結果  
 図－1.3.2 解析対象位置  
 図－1.3.3 解析モデル  
 図－1.3.4 排水条件（一次元解析の場合）  
 図－1.3.5 排水条件（二次元解析の場合）  
 図－1.3.6 荷重図  
 図－1.3.7 境界条件  
 図－1.3.8 ケース2の圧密終了時における変位図  
 図－1.3.9 圧密時間と圧密沈下量の関係

## 第2章

- 図－2.2.1 使用材料の粒度特性  
 図－2.4.1 圧縮固化方法  
 図－2.4.2 膨潤圧試験装置  
 図－2.4.3 一軸圧縮試験状況  
 図－2.5.1 膨潤圧と経過日数の関係  
 図－2.5.2 膨潤圧と乾燥密度の関係  
 図－2.5.3 膨潤圧と膨潤の発現時間  
 図－2.5.4 透水係数と経過日数の関係  
 図－2.5.5 透水係数と乾燥密度の関係  
 図－2.5.6 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係  
 図－2.5.7 膨潤圧と経過時間の関係（ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料）

- 図-2.5.4 透水係数と経過日数の関係
- 図-2.5.5 透水係数と乾燥密度の関係
- 図-2.5.6 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係
- 図-2.5.7 膨潤圧と経過時間の関係 (ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料)
- 図-2.5.8 膨潤圧とベントナイト配合率の関係  
(ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料)
- 図-2.5.9 透水係数と経過日数の関係 (ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料)
- 図-2.5.10 透水係数とベントナイト配合率の関係  
(ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料)
- 図-2.5.11 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

### 第3章

- 図-3.2.1 地下施設の建設・閉鎖及び操業に関するコスト試算結果  
(結晶質岩系岩盤 A 300m )
- 図-3.2.2 地下施設の建設・閉鎖及び操業に関するコスト試算結果  
(結晶質岩系岩盤 B 300m )
- 図-3.2.3 地下施設の建設・閉鎖及び操業に関するコスト試算結果  
(結晶質岩系岩盤 A 700m )
- 図-3.2.4 地下施設の建設・閉鎖及び操業に関するコスト試算結果  
(堆積岩系岩盤 A 300m )
- 図-3.2.5 工事費内訳比較 建設の場合 (A 300m)
- 図-3.2.6 工事費内訳比較 閉鎖の場合 (A 300m)
- 図-3.2.7 ベントナイト混合比率の違いによる単価の相違

## 表一覧

### 第1章

- 表－1.1.1 廃棄体特性
- 表－1.1.2 固化形態による廃棄体の分類
- 表－1.1.3 ハル・エンドピース圧縮固化体の発熱特性を計算するための条件
- 表－1.1.4 廃棄体熱特性
- 表－1.1.5 岩盤物性値
- 表－1.1.6 アクセス坑道に要求される機能
- 表－1.1.7 各施設の検討方法
- 表－1.1.8 概略スケジュール
- 表－1.1.9 管理区域の考え方
- 表－1.1.10 人工バリア基本構造形態の特徴比較
- 表－1.1.11 諸外国での処分深度
- 表－1.1.12 緩み領域実測例
- 表－1.1.13 許容緩み領域を設定する方法による解析結果
- 表－1.1.14 許容変位量を設定する方法による解析結果
- 表－1.1.15 空洞安定解析結果のまとめ
- 表－1.1.16 掘削最大径
- 表－1.1.17 T R U 廃棄物処分空洞の形態の比較
- 表－1.1.18 廃棄体量及び空洞中心間距離
- 表－1.1.19 材料の物性値
- 表－1.1.20 発熱密度
- 表－1.1.21 解析ケース一覧表
- 表－1.1.22 各処分方式の廃棄体空隙率と変形量の関係
- 表－1.1.23 コンクリート部分のセメント成分溶出を考慮した変形量
- 表－1.1.24 変形後のベントナイト密度
- 表－1.1.25 空洞規模と温度・変形
- 表－1.1.26 廃棄体定置方式の比較
- 表－1.1.27 処分空洞長
- 表－1.1.28 離間距離算定結果
- 表－1.1.29 空洞幅と離間距離（力学的検討による）
- 表－1.1.30 空洞幅と離間距離
- 表－1.1.31 処分空洞配置案
- 表－1.1.32 パネル配置の比較
- 表－1.1.33 処分パネルの設定根拠
- 表－1.1.34 立坑と斜坑の比較
- 表－1.1.35 諸外国でのアクセス方式
- 表－1.1.36 立坑掘削工法の評価
- 表－1.1.37 坑道掘削工法の評価

- 表－1.1.38 操業の基本的要件  
表－1.1.39 操業作業の項目と所要時間  
表－1.1.40 操業作業の1日当たり工程  
表－1.1.41 レイアウト検討における検討条件①  
表－1.1.42 レイアウト検討における検討条件②  
表－1.2.1 シナリオ検討事象例  
表－1.2.2 力学的・水理学的観点からの事象  
表－1.3.1 解析用物性値  
表－1.3.2 解析ケース  
表－1.3.3 解析結果

## 第2章

- 表－2.2.1 使用材料の物理特性  
表－2.2.2 クニゲルV1とCa化クニゲルV1の物性比較  
表－2.3.1 実施項目と物性値  
表－2.3.2 Ca化ベントナイトの配合条件と試験項目  
表－2.3.3 ケイ砂とCa化ベントナイトの試験条件  
表－2.5.1 膨潤圧試験結果  
表－2.5.2 透水試験結果  
表－2.5.3 一軸圧縮試験結果  
表－2.5.4 膨潤圧試験結果  
表－2.5.5 透水試験結果  
表－2.5.6 一軸圧縮試験結果

## 第3章

- 表－3.1.1 対象施設一覧  
表－3.2.1 検討ケース一覧表  
表－3.2.2 コスト試算結果一覧表

## 第1章 処分システムの明確化

### 1.1 処分システムの基本概念及び仕様の明確化

図-1.1.1に本章の検討フローを示す。フロー終点のコストの試算については、第3章において述べる。

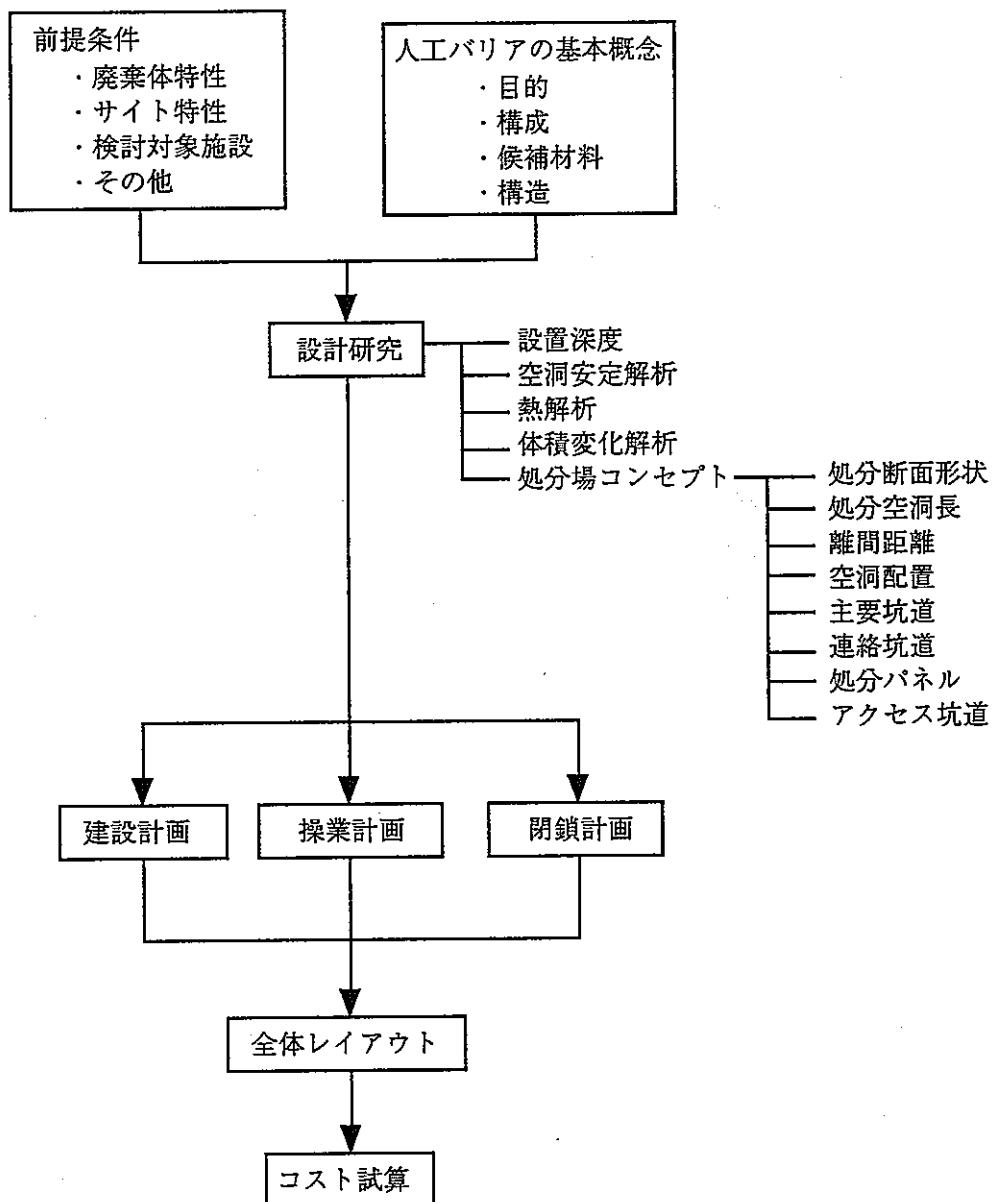


図-1.1.1 検討フロー

### 1.1.1 前提条件

本検討ではT R U廃棄物の処分方針として、高レベル放射性廃棄物と同様に地下数百メートルより深い岩盤中に処分する「地層処分」の概念を適用する。

以下においては、本検討を実施するにあたり具体的な前提条件として必要となる、廃棄体特性、サイト特性、検討対象施設等について整理する。

#### 1.1.1.1 廃棄体特性

廃棄体特性としては、発生量、発熱特性、有害空隙、体積減少、放射能量、ガス発生等が考えられる。この内、本検討においては、特に処分システムの形状に影響を及ぼすと考えられる、発生量、発熱特性、有害空隙、体積減少に着目する。

表-1.1.1に本検討において対象とする廃棄物の種類、容器、固化形態、発熱特性の有無、有害空隙量、体積減少量、廃棄体発生量を整理する。

廃棄体の発生量の見通しについては、動力炉・核燃料開発事業団（P N C）殿の実績、民間再処理施設（J N F L）の設計等を基に、昭和62年の「原子力開発利用長期計画」等に基づく操業計画を勘案し、2010年時点の発生量を約30万本と予測した。

発生量30万本の内訳は、P N C殿の再処理工場から約8万本、J N F Lの再処理工場から約12万本、及び海外再処理委託に伴って発生する返還固化体が10数万本である。ただし本検討においては、廃棄体の性状が不明である返還固化体については検討対象外とする。したがって、本検討の対象とする廃棄体の総量は、表-1.1.1に示す約20万本となる。

また、動力炉・核燃料開発事業団殿提示の条件より、以下に参考として、P N C殿及びJ N F Lの再処理量を示す。

##### ① P N C殿再処理量

- ・1981～1997；1,530ton(=17年×90ton/年)
- ・1998～2010；520ton(=13年×40ton/年)

##### ② J N F L再処理量

- ・1998～2010；8,200ton

(注；J N F Lの年間計画再処理量は800ton/年であるが、本格操業を2003年と仮定し、算出した)

表-1.1.1 廃棄体特性

廃棄物の種類	容器 <sup>*1</sup>	固化形態	発熱特性	有害空隙 vol.%	体積減少 vol.%	廃棄体発生量			
						PNC	JNFL	計(本)	(%)
ハル・エンド・ピース	キャニスター	圧縮	有り	約 30% <sup>*2</sup>	—	4,762	32,800	37,562	18.8
低レベル廃液	ドラム缶	アスファルト	無し	不明	約 30% <sup>*2</sup>	22,815	0	22,815	11.4
		セメントを想定	無し	不明	10~20% <sup>*3</sup>	156	8,200	8,356	4.2
極低レベル廃液	ドラム缶	アスファルト	無し	不明	約 30% <sup>*2</sup>	30,420	0	30,420	15.2
		セメントを想定	無し	不明	10~20% <sup>*3</sup>	208	32,800	33,008	16.5
廃溶媒	ドラム缶	プラスチック+セメント充填	無し	不明	10~20% <sup>*3</sup>	3,803	0	3,803	1.9
		セメントを想定	無し	不明	10~20% <sup>*3</sup>	26	8,200	8,226	4.1
スラッジ	ドラム缶	セメントを想定	無し	不明	10~20% <sup>*3</sup>	10,205	0	10,205	5.1
低レベル雑固体 (可燃性)	ドラム缶	溶融+セメント充填	無し	不明	10~20% <sup>*3</sup>	31	410	441	0.2
低レベル雑固体 (不燃性)	ドラム缶	溶融+セメント充填	無し	不明	10~20% <sup>*3</sup>	1,021	9,840	10,861	5.4
極低レベル雑固体 (可燃性)	ドラム缶	溶融+セメント充填	無し	不明	10~20% <sup>*3</sup>	153	10,660	10,813	5.4
極低レベル雑固体 (不燃性)	ドラム缶	溶融+セメント充填	無し	不明	10~20% <sup>*3</sup>	3,572	19,680	23,252	11.6
合計						77,172	122,590	199,762	100.0

\*1:キャニスター; 100L(Φ 43cm×104cm)、ドラム缶; 200L(Φ 58cm×85cm)

\*2:廃棄体容器に対する vol.%

\*3:廃棄体に含まれるセメント系材料に対する vol.%

一方、表-1.1.1は、固化形態の観点から表-1.1.2に示す分類に集約することができる。

表-1.1.2に、固化形態による廃棄体の分類を示す。

表-1.1.2 固化形態による廃棄体の分類

廃棄体の種類	容器 <sup>*1</sup>	発熱特性	有害空隙 vol.%	体積減少 vol.%	廃棄体発生量				
					PNC	JNFL	計(本)	(%)	
ハル・エンド・ピース圧縮固化体	キャニスター	有り	約 30% <sup>*2</sup>	—	4,762	32,800	37,562	18.8	
アスファルト固化体	ドラム缶	無し	不明	約 30% <sup>*2</sup>	53,235	0	53,235	26.7	
セメント固化体	ドラム缶	無し	不明	10~20% <sup>*3</sup>	10,595	49,200	59,795	29.9	
プラスチック固化体(セメント充填)	ドラム缶	無し	不明	10~20% <sup>*3</sup>	3,803	0	3,803	1.9	
溶融固化体(セメント充填)	ドラム缶	無し	不明	10~20% <sup>*3</sup>	4,777	40,590	45,367	22.7	
合計						77,172	122,590	199,762	100.0

\*1:キャニスター; 100L(Φ 43cm×104cm)、ドラム缶; 200L(Φ 58cm×85cm)

\*2:廃棄体容器に対する vol.%

\*3:廃棄体に含まれるセメント系材料に対する vol.%

以下に、表-1.1.2に記した各廃棄体種類毎の発生量、発熱特性、有害空隙、体積減少について詳述する。

(1) ハル・エンドピース圧縮固化体

① 発生量

100L キャニスターに換算して、PNC 殿から 4,762 本、JNFL から 32,800 本、合計 37,562 本が発生する。

② 発熱特性

T R U 核種を含む放射性廃棄物の大部分は非発熱性であるが、ハル・エンドピース廃棄物においては放射能濃度が高く、放射化生成物による発熱性を有している。

本検討におけるハル・エンドピース圧縮固化体の発熱特性としては、動力炉・核燃料開発事業団殿が実施した結果を適用する。ハル・エンドピース圧縮固化体の発熱特性は、表-1.1.3 に示す条件で、燃焼計算コード ORIGEN2(Croff, 1980)を用いて計算した。その結果を表-1.1.4 に示す。また、図-1.1.2 は、表-1.1.4 に示される一部のデータをグラフ化したものである。

表-1.1.3 ハル・エンドピース圧縮固化体の発熱特性を計算するための条件

燃焼条件	燃焼度(BURNUP) : 28,000MWD/MTU 比出力(POWER) : 35MW/MTU フラックス(FLUX) : $2.49 \times 10^{14} \text{N/cm}^2 \cdot \text{sec}$		
元素の除去率	FISSION PRODUCTS (核分裂生成物: FP)	H(トリチウム)	(吸収) 60% (溶解) $40.0\% \times \text{Ave}0.05\%$
		Kr	(吸収) 0.1% *(希ガス) 99.9%
		Ru	(吸収) 1.1% (溶解) $98.9\% \times \text{Ave}0.05\%$
		Cs,Ce,Eu	(吸収) 0.2% (溶解) $99.8\% \times \text{Ave}0.05\%$
		Xe	*(希ガス) 100.0%
		上記核種以外	(溶解) $100.0\% \times \text{Ave}0.05\%$
	ACTINIDES + DAUGHTERS (アクチニド + 娘核種: AC)	Pu	(吸収) 0.06% (溶解) $99.94\% \times 1.0\%$
		U	(溶解) 100.0% $\times 1.0\%$
		上記核種以外	(溶解) $100.0\% \times \text{Ave}0.05\%$
	ACTIVATION PRODUCTS (放射化生成物: AP)	全核種	全量

\* 希ガスは付着には考慮しない。

表-1.1.4 廃棄体熱特性  
(ハル圧縮体の発熱量: キャニスター1本あたり)

炉からの取り出し年	Watts	Kcal/h
5.0E-01	4.10E+02	3.53E+02
1.0E+00	1.76E+02	1.52E+02
5.0E+00	5.69E+01	4.89E+01
1.0E+01	2.94E+01	2.53E+01
1.5E+01	1.15E+01	9.89E+00
2.0E+01	7.80E+00	6.71E+00
3.0E+01	4.20E+00	3.61E+00
5.0E+01	2.57E+00	2.22E+00
1.0E+02	1.47E+00	1.27E+00
5.0E+02	5.95E-01	5.12E-01
1.0E+03	5.51E-01	4.74E-01
5.0E+03	4.21E-01	3.62E-01
1.0E+04	3.10E-01	2.67E-01

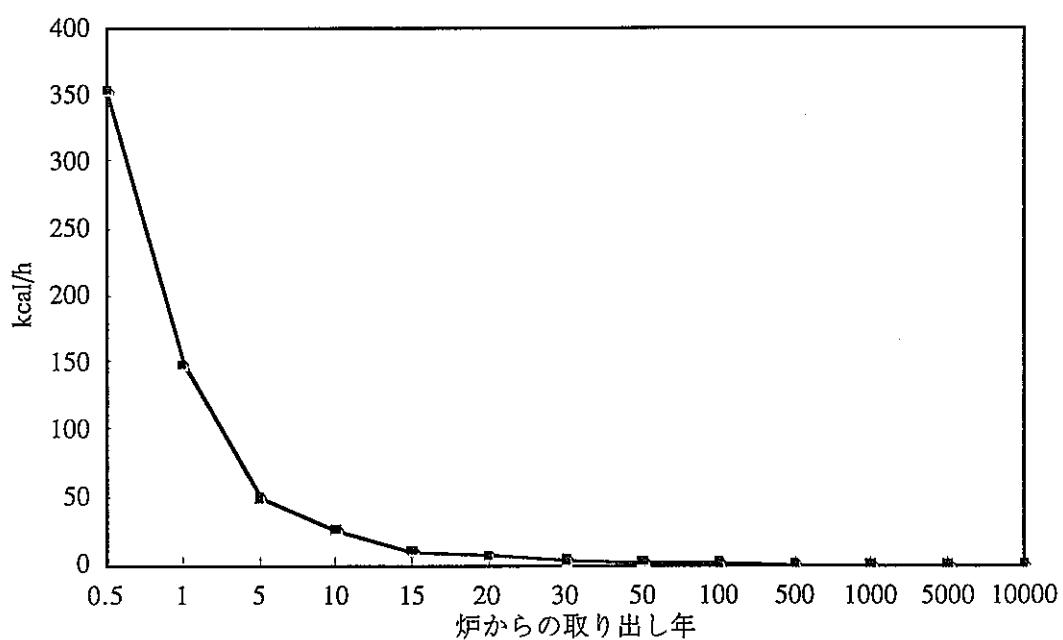


図-1.1.2 ハル・エンドピース圧縮固化体キャニスター1本当たりの発熱量の経時変化

### ③ 有害空隙

ハル・エンドピース圧縮固化体中には、図-1.1.3に示すように廃棄体製作上、内部に空隙を有している。その空隙の量は、容積比に換算して約30%（約30L）と言われている。

現在のところ、この内部空隙に対する充填材の充填は考えられていない。しかし、強度あるいは体積減少の観点から、今後の検討如何によってはそのような要求が発生する可能性がある。

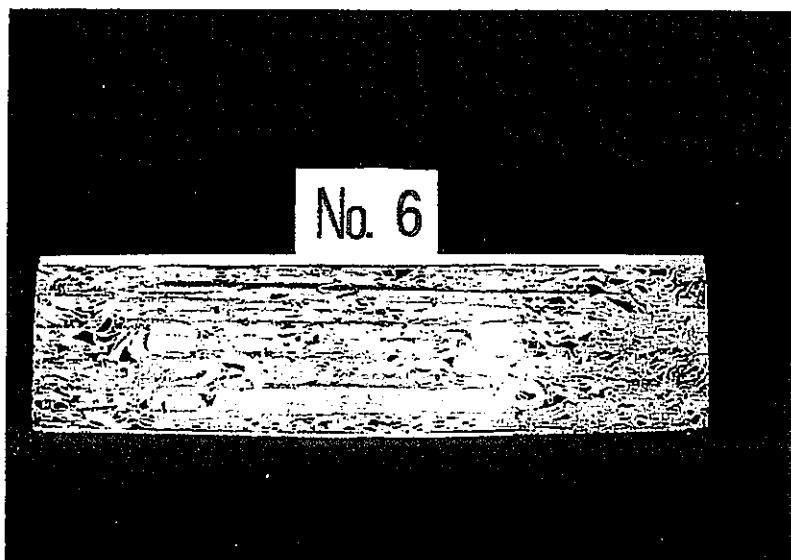
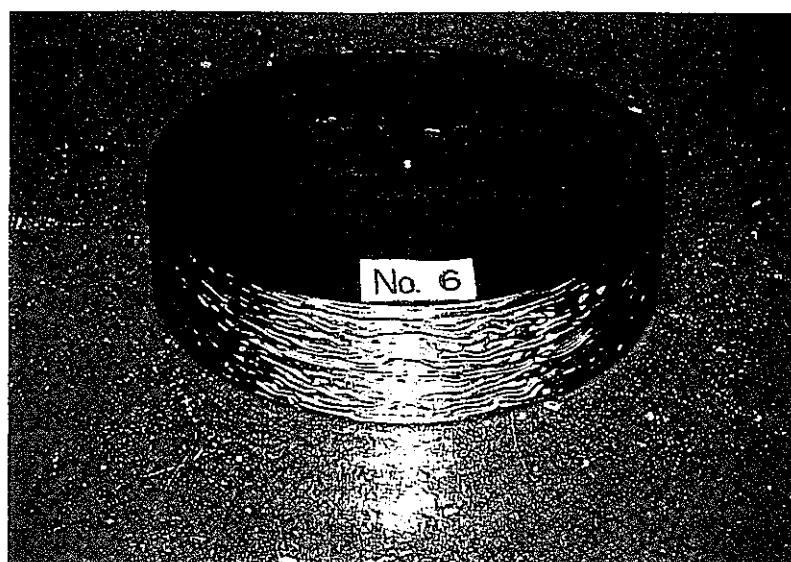


図-1.1.3 ハル・エンドピース圧縮固化体断面状況

#### ④ 体積減少

ハル・エンドピース圧縮固化体に対しては、後述するようなセメント水和物や硝酸塩の溶出による廃棄体の体積減少は生じない。しかし、上述した有害空隙を内部に有しているため、閉鎖後の高圧力下における圧縮変形が生じる可能性がある。

### (2) アスファルト固化体

#### ① 発生量

200L ドラム缶に換算して、PNC 殿からのみ 53,235 本が発生する。その内訳は、低レベル廃液が 22,815 本、極低レベル廃液が 30,420 本である。

#### ② 発熱特性

発熱しない。

#### ③ 有害空隙

現状において、廃棄体内の有害空隙量は不明である。

#### ④ 体積減少

アスファルト固化体には、可溶性の硝酸塩（25°C の水に対する溶解度 92g/100g<sup>1)</sup>）が含まれている。アスファルト固化体の地下深部への処分において想定される事象として「アスファルト固化体からの硝酸塩の地下水への流出」が考えられる。

アスファルト固化体中には硝酸塩が最大で重量の 50% 程度含まれている<sup>2)</sup>ため、硝酸塩が流出することによりアスファルト固化体の体積が減少する。このため、アスファルト固化体中に含まれる硝酸塩の体積を以下の仮定に基づき算定した。

#### ○前提条件

- ・アスファルト固化体の比重を 1.4 とする<sup>2)</sup>。
- ・硝酸塩の含有量を固化体の 50wt.% とする<sup>2)</sup>。
- ・硝酸塩は、全て NaNO<sub>3</sub> の化学形態とする。
- ・NaNO<sub>3</sub> の比重を 2.3 とする<sup>1)</sup>。

#### ○計算結果

固化体の体積を Vs(cm<sup>3</sup>)、NaNO<sub>3</sub> の体積を Vn(cm<sup>3</sup>) とすると、次式が成り立つ。

$$\frac{2.3 \times V_n}{1.4 \times V_s} = 0.5$$
$$V_n = 0.3 V_s$$

以上より、アスファルト固化体の 30vol% (約 60L) が NaNO<sub>3</sub> となり、溶出による体積減少が生じる可能性がある。

なお、アスファルトの比重は、1.01 となる。この値は、ブローンアスファルト単体の比重とほぼ同じである。

### (3) セメント固化体

#### ① 発生量

200L ドラム缶に換算して、PNC 殿から 10,595 本、JNFL から 49,200 本、合計 59,795 本が発生する。その内訳は、低レベル廃液が 8,356 本 (PNC ; 156 本、JNFL ; 8,200 本)、極低レベル廃液が 33,008 本 (PNC ; 208 本、JNFL ; 32,800 本)、廃溶媒が 8,226 本 (PNC ; 26 本、JNFL ; 8,200 本)、スラッジが 10,205 本 (PNC のみ) である。

#### ② 発熱特性

発熱しない。

#### ③ 有害空隙

現状において、廃棄体内の有害空隙量は不明である。

#### ④ 体積減少

セメント水和物中の水酸化カルシウム ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) は、 $\text{SO}_4^{2-}$  イオンや  $\text{Cl}^-$  と反応して可溶性の  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (石膏) や  $\text{CaCl}_2$  (塩化カルシウム) を生成し、地下水中に溶出する。このため、長期的にはセメント水和物の体積減少が生じる。しかしながら、その体積減少量は定量的に把握されていない。

そこで本検討においては、普通ポルトランドセメントを使用した一般的な硬化コンクリートを構成する各要素の体積比より、空隙と水酸化カルシウムが体積減少に寄与すると考え、セメント系材料の 10~20vol.% と設定した。その根拠は、以下のとおりである。

図-1.1.4<sup>3)</sup> に、一般的な硬化コンクリートの構成を示す。図-1.1.4 に示すとおり、硬化コンクリート全体の 25~30vol.% は、空隙を含むセメント硬化体組織である。空隙は、後述する要因により発生し、硬化コンクリート全体の数~10 数 vol.% で存在する。また、水酸化カルシウムの生成量は、 $(\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S})$  の量がセメント重量の 75% の場合 (通常のポルトランドセメント)、約 40wt.%<sup>4)</sup> であることを考慮し、セメント水和物の約半分 (全体の 10vol.% 弱) と仮定した。この両者の合計として、前述の値を設定した。

#### ○空隙の発生要因

- ・セメントの硬化機構から不可逆的に生じる毛管孔隙およびゲル空隙
- ・成型時の材料分離による空隙
- ・施工時締固め不良による空隙
- ・界面活性剤 (AE 剤等) を用いることによる微小独立気泡

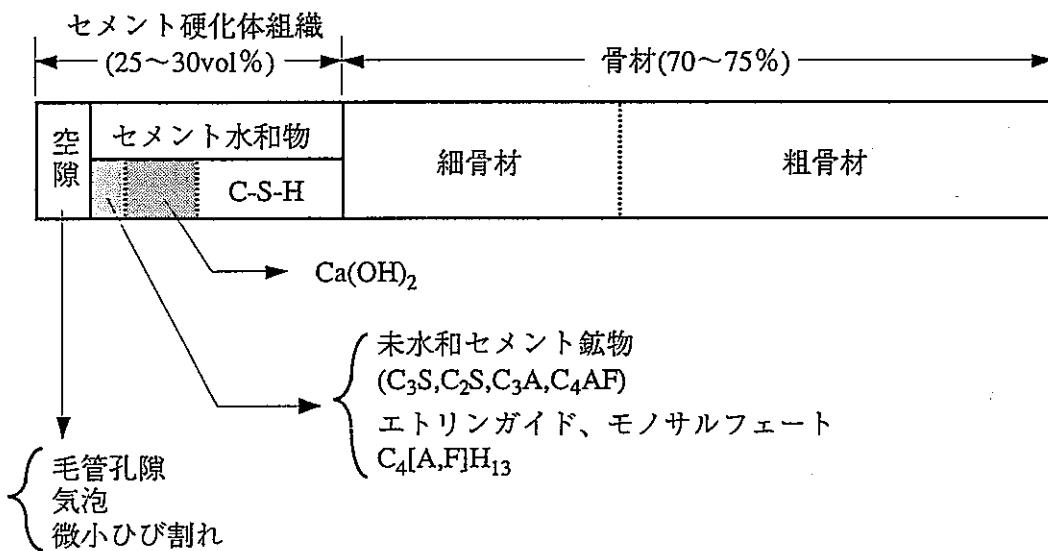


図-1.1.4 硬化コンクリートの構成<sup>3)</sup>

一方、生成された  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  は、セメント硬化体中の  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  や  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  と反応し、エトリンガイト ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) と呼ばれる物質を生成する。この際に体積の膨張を伴い、硬化体のひび割れや破壊を引き起こす可能性がある。他方においてはこの性質を膨張材として利用し、グラウト材やコンクリート部材の乾燥収縮の補償、さらにはセルフプレストレスの導入に活用されている。しかしながら、本検討における処分システム全体への影響という観点から体積膨張量を鑑みると、その量は微少である。したがって、処分システムに結果的なダメージを与えるとは考えにくいため、本検討では対象外とした。

#### (4) プラスチック固化体

##### ① 発生量

200L ドラム缶に換算して、PNC 殿からのみ 3,803 本が発生する。その全てが、廃溶媒である。

##### ② 発熱特性

発熱しない。

##### ③ 有害空隙

現状において、廃棄体内の有害空隙量は不明である。

##### ④ 体積減少

セメント固化体と同様に、充填材として用いられているセメント系材料の 10~20vol.% と設定した

#### (5) 溶融固化体

##### ① 発生量

200L ドラム缶に換算して、PNC 殿から 4,777 本、JNFL から 40,590 本、合計 45,367

本が発生する。その内訳は、低レベル雑固体（可燃性）が441本（PNC；31本、JNFL；410本）、低レベル雑固体（不燃性）が10,861本（PNC；1,021本、JNFL；9,840本）、極低レベル雑固体（可燃性）が10,813本（PNC；153本、JNFL；10,660本）、極低レベル雑固体（不燃性）が23,252本（PNC；3,572本、JNFL；19,680本）である。

② 発熱特性

発熱しない。

③ 有害空隙

現状において、廃棄体内の有害空隙量は不明である。

④ 体積減少

セメント固化体と同様に、充填材として用いられているセメント系材料の10～20vol.%と設定した。

### 1.1.1.2 サイト特性

サイト特性としては、岩盤の力学特性及び水理特性、人間生活に起因する社会的現象等が考えられる。この内、本検討においては、空洞安定性に大きく影響する岩盤の力学特性を主として考慮する。岩盤の水理特性に対しては、施工性ならびにコストに影響を及ぼす湧水量に着目する。また、本検討では地層処分を前提としていること、さらにはシステムの成立性を地下水シナリオの観点から評価することを前提に、人間生活に起因する社会的現象については対象外とする。

#### (1) 岩盤の力学特性

本検討に用いる処分場の対象岩盤は、結晶質岩系岩盤と堆積岩系岩盤とする。岩盤の力学的特性は、結晶質岩系岩盤には日本に広く分布する花崗岩を、堆積岩系岩盤には第三紀の堆積岩をそれぞれ代表的な岩種とする。また、結晶質岩系岩盤については2種類の物性値を、堆積岩系岩盤については3種類の物性値を検討用に設定する。表-1.1.5に検討に用いる岩盤物性値を示す。

表-1.1.5 岩盤物性値

物性 岩種	単位体積重量 (kgf/m <sup>3</sup> )	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (deg)	一軸圧縮強度 (MPa)
結晶質岩系岩盤	A	2,700	30,000	0.2	7.5	35
	B	2,700	10,000	0.2	6.0	35
堆積岩系岩盤	A	2,300	4,000	0.3	4.0	30
	B	2,300	2,000	0.3	2.0	30
	C	2,300	1,000	0.4	1.0	25
						20

なお上記の岩盤物性値は、動力炉・核燃料開発事業団殿の「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 一平成3年度ー」(平成4年9月)<sup>9)</sup>の値を参考に設定を行った。

#### (2) 岩盤の水理特性

本検討においては、岩盤の水理特性として、施工性並びにコストに影響を及ぼす湧水量に着目する。

湧水量については地盤の透水係数と表面積から求める方法がある。しかし、ここではより実際に近いと考えられる実態調査に基づくデータによって想定する。実態調査のデータを図-1.1.5に示す。

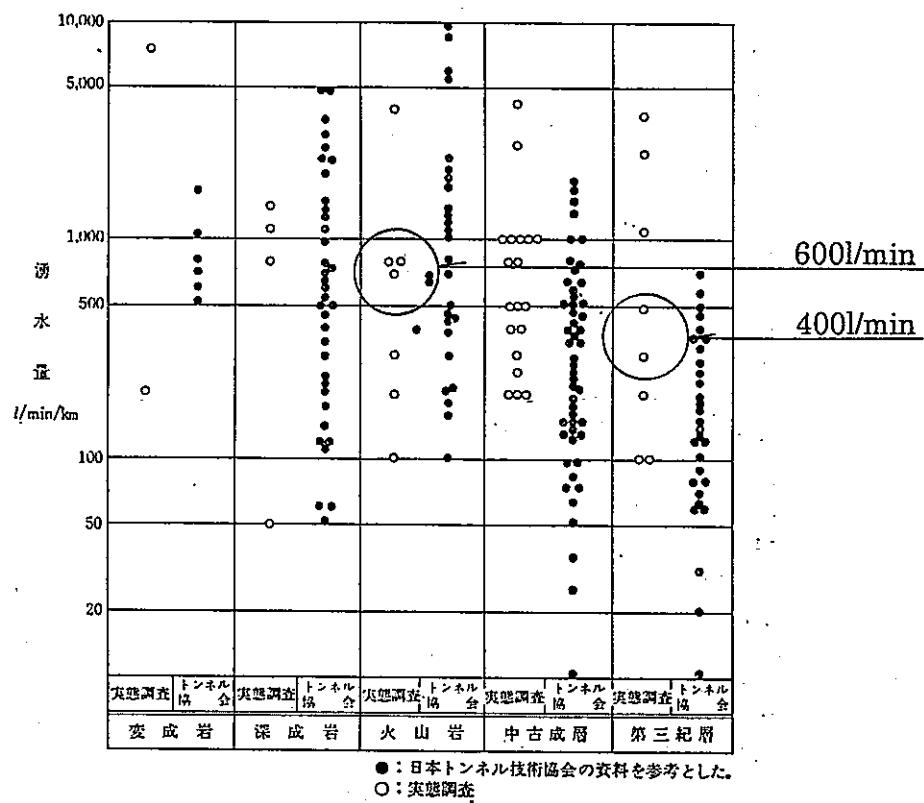


図-1.1.5 地質と湧水量<sup>6)</sup>

図-1.1.5より、地下施設の掘削に伴う空洞 1kmあたりの湧水量を、次のように想定する。この値は、トンネルを掘削を行うときの湧水量の想定に一般的に用いられる値である。

- ・結晶質岩系岩盤       $0.6\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$
- ・堆積岩系岩盤       $0.4\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$

### 1.1.1.3 検討対象施設

ここでは、TRU廃棄物処分施設における地上施設、地下施設、工事用設備の検討対象施設についての説明および検討レベルについて述べる。

#### (1) 主要施設

##### (a) 地上施設

TRU廃棄物処分施設における地上施設を構成するものとして、次に示す施設が挙げられる。

###### ① 港湾施設

再処理工場から船舶にて輸送されてきたTRU廃棄物を荷揚げし、陸走車両へ積み替える施設、及び廃棄物輸送用船舶の港としての防波堤、バースおよび護岸等の施設。

###### ② 輸送施設

TRU廃棄物を港湾から処分施設まで輸送するための専用道路あるいは鉄道施設および関連する付帯施設。

###### ③ 地上受入施設

廃棄体の受け入れ、一時保管、パッケージング、検査など操業の中核をなす施設。

###### ④ 搬出検査施設

パッケージングされた廃棄体を処分場へ搬入する前の最終検査を行う施設。

###### ⑤ 換気施設

地上施設としての換気施設には、建設エリア換気施設、操業・閉鎖エリア換気施設などがある。

###### ⑥ 排水施設

地上施設としての排水施設には、建設エリア排水施設、操業・閉鎖エリア排水施設などがある

###### ⑦ 供給施設

電力、水の供給を行うための施設。受・変電設備、非常用発電設備、給水ポンプ、貯水槽などからなる。

###### ⑧ 管理施設

管理施設には、地上施設管理、処分場内設備管理、一般事務施設、コンピューター施設などがある。処分施設全体の管理を行う施設で、コントロールルームを中心に通信施設も設置される。

## ⑨ その他の施設

その他の施設として、放射性物質を取り扱うため警備棟や敷地、エリア境界のフェンスなどの警備施設、消防施設・ヘリポートなど火災時のための緊急施設、従業員のための宿舎・運動施設・売店・食堂などの厚生施設、来訪者へのPR施設、環境整備のための植樹・植芝・花壇などの緑化施設、従業員や来訪者用の駐車場などが挙げられる。

### (b) 地下施設

#### ① アクセス坑道

アクセス坑道は、地上と廃棄体を収容する地下施設を結ぶ経路であり、地下作業で必要とされるあらゆる機能が集約した動脈となる。アクセス坑道に要求される機能には、以下の項目が挙げられる。

表-1.1.6 アクセス坑道に要求される機能

	建設	操業	閉鎖
TRU廃棄体搬入	—	○	—
作業員の入出	○	○	○
各種建設材料の搬入	○	○	○
掘削ズリの搬出	○	—	—
換気（排気、送気）	○	○	○
地下水の排水	○	○	○
エネルギーの供給	○	○	○
給水、給電	○	○	○
通信	○	○	○
緊急避難	○	○	○

これらの機能のうち、TRU廃棄体搬入、作業員の入出、各種建設材料の搬入、掘削ズリの搬出、換気、緊急避難口の6つに関しては、アクセス坑道の断面を決定する上で、特に重要な項目である。他の機能はアクセス坑道断面の一部を利用することにより対処可能である。

またアクセス坑道の方式は、一般的に立坑方式と斜坑方式（スパイラル方式を含む）に大別される。

#### ② 主要坑道

主要坑道とは、アクセス坑道と処分エリアを接続する坑道である。その役割は、廃棄体の搬送等処分作業に必要な経路と、処分区画建設に必要な経路に分類される。

#### ③ 連絡坑道

連絡坑道とは、処分エリア内に配置されており、処分空洞と主要坑道を接続するための坑道である。

#### ④ 処分空洞

処分空洞とは、TRU廃棄物を収納するための空洞である。廃棄体の特性に応じて空洞の形状には岩洞型・トンネル（坑道）型やサイロ型が用いられる。処分空洞内には廃棄体を搬送、定置するためのハンドリング施設が設置される。

#### ⑤ 地下付帯施設

地下に設置される付帯施設としては、建設・操業・閉鎖作業を安全に進めるための管理施設、各作業に使用する機械類のメンテナンスなどを行うワークスペース、掘削ズリ資材などの仮置きスペース、防災施設、受変電施設、充填材圧送基地等が挙げられる。

### (c) 工事用設備

#### ① コンクリート・モルタル製造設備

コンクリート・モルタルの製造に必要な設備には以下に挙げるものが考えられる。

- ・掘削ズリ仮置きヤード
- ・骨材製造設備
- ・セメントサイロ
- ・コンクリートミキサー

#### ② ベントナイト・ベントナイト混合土製造設備

ベントナイト・ベントナイト混合土製造に必要な設備には以下に挙げるものが考えられる。

- ・掘削ズリ仮置きヤード（コンクリート製造設備と共有する）
- ・骨材製造設備（コンクリート製造設備と共有する）
- ・ベントナイトサイロ
- ・ベントナイト混合土製造ミキサー
- ・ベントナイトブロック製造プラント
- ・ベントナイトブロック仮置きヤード

#### ③ 建設準備施設

建設準備施設には、以下のようなものが挙げられる。

- ・建設用資材置場
- ・建設用機材置場
- ・機材、設備修理工場
- ・濁水処理プラント
- ・鉄筋加工工場

#### ④ 土捨て場

掘削により発生した残土の捨て場。

(2) 各施設の検討範囲

「(1) 主要施設」で挙げた地上施設、地下施設、工事用設備の各施設について、本検討での検討レベルを表-1.1.7に示す。

表-1.1.7 各施設の検討方法

施 設 名		検討 レベル	
		詳細検討	概略検討
地 上 施 設	港湾施設	—	—
	輸送施設	—	—
	地上受入施設	—	○
	搬出検査施設	—	○
	換気施設	—	○
	排水施設	—	○
	供給施設	—	○
	管理施設	—	○
地 下 施 設	その他の施設	—	○
	アクセス坑道	○	—
	主要坑道	○	—
	連絡坑道	○	—
	処分空洞	○	—
工 事 備 用	地下付帯施設	—	○
	コンクリート製造設備	—	○
	ペントナイト混合土製造設備	—	○
	建設準備施設	—	○

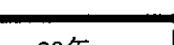
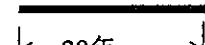
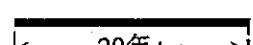
#### 1.1.1.4 その他の前提条件

##### (1) 廃棄体の搬入スケジュール

廃棄体の処分場への搬入スケジュールは、表-1.1.1に示した約20万本の廃棄体を20年間で処分場へ入れることとする。これは空洞の施工スピードと廃棄体搬入スピードを勘案した上で作業的に可能な期間として、後述するように1日に処分場へ搬入する廃棄体量を約40本、1年に約1万本処分するという観点から設定した。処分場の概略スケジュールを表-1.1.8に示す。

また、処分場はいくつかのエリアに分割し、作業や管理を実施することとする。この分割されたエリアを本検討では「処分パネル」と定義する。処分パネルの定義についての詳細は、後述する。

表-1.1.8 概略スケジュール

項目	工程	備考
アクセス坑道施工		
主要坑道施工		
連絡坑道・ 処分空洞施工		1パネル建設完了後 廃棄体の搬入開始
廃棄体搬入		20万本を20年間で 処分
閉鎖		主要坑道、アクセス の閉鎖期間も含む
デコミッショング		地上施設の解体・ 撤去

## (2) 放射線管理（放射線管理区域と非放射線管理区域の区分）の考え方

本検討での放射線管理の考え方は以下のとおりとする。

- ・処分場全体を放射線管理区域と非放射線管理区域とに区分する。
- ・放射線管理区域とは廃棄体の搬送・定置などの廃棄体の移動作業が伴う区域とする。
- ・非放射線管理区域とは、廃棄体の移動作業がない区域とする。

放射線管理の考え方は建設・操業・閉鎖の各作業ごとに区分して考える必要がある。建設・操業・閉鎖の各作業を行っている区間をそれぞれここでは建設区間、操業区間、閉鎖区間と称することとし、以下にその定義と放射線管理の考え方について示す。

建設区間とは、処分空洞を建設している区間のことである。廃棄体を搬送する作業が無いため非放射線管理区域とする。

操業区間とは、処分空洞内に廃棄体を搬入・定置している区間のことである。廃棄体をハンドリングする作業を行っているため放射線管理区域とする。

閉鎖区間とは、定置した廃棄体周囲を充填材により埋戻しを行っている区間のことである。作業の性格上、放射線管理区域とするが、空洞の閉鎖作業を行っている処分パネルのみを放射線管理区域とし、閉鎖するために用いる充填材等を搬送する主要坑道やアクセス坑道は放射線管理区域に含まないこととする。したがって、建設と閉鎖を併用する場合の主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道は非放射線管理区域とする。

なお、主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道等の概念については後述する。

以上の考え方を表-1.1.9に整理する。

表-1.1.9 管理区域の考え方

		放射線管理区域	非放射線管理区域
建設区間		—	○
操業区間		○	—
閉鎖区間	○(処分パネルのみ)		—
併用 区間	建設と操業	○	—
	建設と閉鎖	—	○

### (3) その他

以下に本検討で前提条件とする項目を列挙する。

- ・高レベル廃棄物処分施設との併設は考えない。
- ・廃棄体の再取り出しは考えない。
- ・土木技術的観点に的を絞り進める。したがって、核種移行解析結果の処分形式・処分方式等へのフィードバックは考慮しない。
- ・コスト試算の検討範囲は建設・操業・閉鎖までの間とする。また関連施設のデコミッションも考慮する。コスト試算の対象施設は 1.1.1.3において挙げた施設とする。
- ・全体スケジュールとして検討する範囲は、建設開始後から閉鎖終了までとする。
- ・操業時および閉鎖時のモニタリングは考えない。
- ・処分場建設に先立って原地盤の調査を行うために作られる地下調査施設については本検討では考慮しない。また、そのための事前技術調査費もコスト試算では考慮しないこととする。ただし地下調査施設の考え方として、処分場の建設に先行して立坑を掘削し、その立坑を施設として利用する方法がある。
- ・廃棄体の埋設密度に対する条件は、廃棄体の熱特性および廃棄体の体積変化をベースに考える。

## 1.1.2 人工バリアの基本概念

### 1.1.2.1 人工バリアの目的

本検討における人工バリアとは、岩盤（天然バリア）と廃棄体の間に設置または充填される材料のことを指す。

人工バリアの目的は、

「廃棄体から溶出する放射性核種が天然バリアに移行する時間を遅延させること」である。この目的を達成するために人工バリアには、要求性能に応じた構成、材料、構造が求められる。以下においては、これらについて述べる。

### 1.1.2.2 人工バリアの基本構成

本検討における人工バリアは、図-1.1.6 に示すように構造材及び充填材、緩衝材から構成されるシステムを基本とする。

また、一般には廃棄体の固化に用いるセメント、アスファルト、プラスチック等や廃棄体容器も人工バリアの範疇に入る<sup>7)</sup>。しかし本検討では、「1.1.1 前提条件」で示したとおり、これらを与条件として扱い、検討の対象としない。岩盤は、天然バリアに分類される。

緩衝材には、地下水の侵入と核種の溶出・移行を抑制するといった長期間にわたって担保しなければならない性能を保有させる。構造材及び充填材については、廃棄体の安定かつ効率的な定置や構造材内部に発生する間隙の充填といった短期的な性能を主として保有させる。

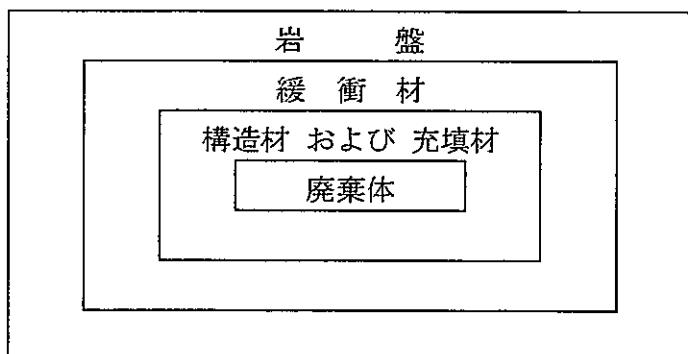


図-1.1.6 人工バリアの基本構成

### 1.1.2.3 人工バリアの候補材料

#### (1) 構造材

##### (a) 要求性能

処分空洞内には、廃棄体を安定かつ効率的に定置するための処分施設として構造材を設置する。構造材については、このような操業性の他に熱伝導性や化学的緩衝性が要求される。

構造材の主な要求性能としては、以下に示す項目が挙げられる。

- ①廃棄体の安定かつ効率的な定置 → 操業性
- ②廃棄体からの放熱による人工バリアの温度上昇の抑制 → 热伝導性
- ③人工バリア間隙中における地下水のpHの適正な維持 → 化学的緩衝性
- ④廃棄物から溶出する放射性核種移行の遅延 → 核種吸着遅延性

##### (b) 候補材料とその特徴

前述した要求性能を満足する材料として、鉄筋コンクリートが挙げられる。コンクリートには、以下に示す特長があり<sup>4)</sup>、多くの土木・建築用構造材として用いられている。

- ・任意の形状・寸法の部材および構造物を造ることが可能である。
- ・構造物全体を単体的に造ることが容易である。
- ・材料の入手および材料の運搬が容易である。
- ・任意の強度のものを利用することが容易である。
- ・品質のばらつきが少ない。
- ・施工にあたって特別の熟練工を必要としない。

以下においては、コンクリートの特徴を要求性能毎に整理する。

###### ①操業性

廃棄体を安定かつ効率的に定置していくためには、処分施設としての鉄筋コンクリートを設置することが効果的であると考える。鉄筋コンクリートは、前述した特長を有しており、現在の土木構造材として最も優れた材料である。

###### ②熱伝導性

コンクリートの熱伝導率は、約  $1.2 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ <sup>8)</sup> 程度である。後述するベントナイトと同等もしくはそれ以上の熱伝導率を有している。

###### ③化学的緩衝性

地下水のpHが高いアルカリ環境においては、ウラン(U)、プルトニウム(Pu)、アメリシウム(Am)といった溶解度が低くなる核種が存在する。そのため人工バリア内の地下水を高pHに保つことは、核種溶解の遅延という観点からは重要な要素である。

一般にセメントペーストのpHは、概ね 12~13<sup>9)</sup> と言われており、人工バリア内の地下水を高pHに維持する性質を有している。

一方、後述するベントナイトが高pHの地下水と接触すると、ゼオライトという鉱物に変質することが知られている。しかし、ゼオライト化が緩衝材に要求される性能にどの程度影響するかは知られておらず、今後の研究成果を待つ必要がある。

#### ④核種吸着遅延性

T R U 廃棄物に含まれる放射性核種の内、炭素( $C_{14}$ )やヨウ素( $I_{129}$ )といった核種は、後述する緩衝材(ベントナイト)には核種吸着遅延性を期待できないことが知られている。

炭素( $C_{14}$ )は、廃棄体中において  $CO_3^{2-}$  の形態で存在する。他方、セメント系材料の主成分である水酸化カルシウム( $Ca(OH)_2$ )は、Ca イオンとして地下水中に溶解する。この両者が結合し、炭酸カルシウム( $CaCO_3$ )の形態に変化し、沈殿する。沈殿した炭酸カルシウムは、分子が大きく緩衝材から外部に出にくい状態となる。

一方、ヨウ素( $I_{129}$ )に対しては、炭素( $C_{14}$ )ほど明確なセメント系材料の核種吸着遅延性は確認されていない。しかしながら、セメント系材料への期待は大きく、今後の研究成果を待つ必要がある。

### (2) 充填材

#### (a) 要求性能

構造材の内部に定置された廃棄体間には、隙間が発生する。主として、この隙間を物理的安定性の観点から埋める材料として充填材を設置する。充填材については、このような物理的安定性の他に充填性や熱伝導性、化学的緩衝性が要求される。

充填材の主な要求性能としては、以下に示す項目が挙げられる。

- ①構造材内部に発生する間隙の充填 → 自己充填性、物理的安定性
- ②廃棄体からの放熱による人工バリアの温度上昇の抑制 → 熱伝導性
- ③人工バリア間隙中における地下水の pH の適正な維持 → 化学的緩衝性
- ④廃棄物から溶出する放射性核種移行の遅延 → 核種吸着遅延性

#### (b) 候補材料とその特徴

前述した要求性能を満足する材料として、セメントモルタルが挙げられる。セメントモルタルは、六ヶ所における低レベル放射性廃棄物埋設施設の充填材として採用されており、優れた自己充填性を有している。またセメントモルタルは、コンクリートから粗骨材を除いたものであり、前述したコンクリートと同様の特長を有している。

以下においては、セメントモルタルの特徴を要求性能毎に整理する。

##### ①自己充填性、物理的安定性

セメントモルタルは、その要求性能に応じた混和剤を混入することにより、前述したように優れた自己充填性を發揮する。このことから、岩盤の割れ目やロックアンカー等のグラウト材として、多くの土木工事において用いられている。

このように人工バリア内の間隙を充填材によって充填することは、バリア内の有害空隙を無くし、物理的に一体化した安定な構造体を実現する。

##### ②熱伝導性

構造材(コンクリート)と同様。

##### ③化学的緩衝性

構造材(コンクリート)と同様。

##### ④核種吸着遅延性

構造材(コンクリート)と同様。

### (3) 緩衝材

#### (a) 要求性能

岩盤と構造材および充填材の間には、地下水の侵入と核種の溶出・移行を抑制するための緩衝材を設置する。緩衝材については、このような止水性、吸着性の他に様々な物理的、化学的緩衝性が要求される。

緩衝材の主な要求性能としては、以下に示す項目が挙げられる<sup>9)</sup>。

- ①廃棄体への地下水の接触の遅延および地下水で飽和後的人工バリア中の地下水移動の抑制 → 止水性
- ②廃棄体の化学的反応から発生するガスの処分場内からの逸散 → 透気性
- ③周辺岩盤との隙間および亀裂開口部等の充填 → 自己シール性
- ④廃棄物から溶出する放射性核種移行の遅延 → 核種吸着遅延性
- ⑤廃棄体からの放熱による人工バリアの温度上昇の抑制 → 熱伝導性
- ⑥廃棄体の固定・保持 → 廃棄体支持性
- ⑦周辺岩盤の変形等により生じる応力（歪）の緩和 → 力学的緩衝性

#### (b) 候補材料とその特徴

前述した要求性能を比較的よく満足する材料として、天然に産出する粘土が注目されている<sup>9)</sup>。これは、粘土が一般的に低透水性であり、吸着性を有すること、さらに、天然で産出するため処分で考えなければならない長期間の安定性が期待できることなどによる。

また、天然に産出するベントナイトは交換性陽イオンの種類により、Na型とCa型に大別される。その内、Na型の方が前述した要求性能をより満足することが知られている。

現在、国内における高レベル放射性廃棄物地層処分研究<sup>9)</sup>においては、Na型ベントナイトを緩衝材の候補材料として研究が進められている。また、六ヶ所における低レベル放射性廃棄物埋設施設においても、同様の材料を用いた施設建設が進めらようとしている。

一方、海外の研究機関（スウェーデン SKB、スイス Nagra、カナダ AECL 等）においても、Na型ベントナイトを緩衝材の候補材料とした研究が進められている。

このような材料自身が有する特長や国内外の研究動向を鑑み、本研究においても Na型ベントナイトを緩衝材の候補材料として採用する。以下においては、Na型ベントナイトの特徴を要求性能毎に整理する。

##### ①止水性

圧縮されたベントナイトは、非常に低い透水性を示し、緩衝材中での水の動きを抑制する優れた性能を有している。

ベントナイトの透水係数は、密度に依存することが知られている（第3章参照）。乾燥密度約  $1.8\text{g/cm}^3$  では、透水係数は約  $10^{-13}\text{m/sec}$  以下の難透水性を示す<sup>10)</sup>。

また、ベントナイトとケイ砂を混合したベントナイト混合土の透水係数は、配合比 3 : 7、乾燥密度  $1.7\text{g/cm}^3$  で、約  $10^{-11}\text{m/sec}$  以下の難透水性を示す<sup>11)</sup>。

## ②透気性

透気性と透水性の間には、ある程度の相関関係を有し、透気性は透水性より小さいことが一般に知られている。したがって、ベントナイトの透気係数は、上記の透水係数より小さくなることが予想される。ガス発生に伴う透気対策は、今後の課題である。

## ③自己シール性

圧縮されたベントナイトは、水の浸潤に伴い膨張し、緩衝材中の隙間や隣接する岩盤中の割れ目を充填する性能を有している。この膨潤性は、Pusch ら(1991)の研究によると以下に示す2つのメカニズムにより発生すると考えられている<sup>5)</sup>。

- ・電荷を帯びた粒子が持つ電気二重層による粒子間の反発力
- ・層状構造を持つモンモリロナイト結晶の層間陽イオンの水和、層状粘土結晶と水分子の分子間力等による層間の拡大

ベントナイトの膨潤圧力は、密度に依存することが知られている（第3章参照）。乾燥密度 1.79g/cm<sup>3</sup>では膨潤圧力は 4.8Mpa であり、また 1.58g/cm<sup>3</sup>でも 1.2Mpa の膨潤圧力を示す<sup>10)</sup>ことから、人工バリア内の空隙や岩盤の亀裂等を自己シールできる膨潤性を有していると考えられる。

また、ベントナイトとケイ砂を混合したベントナイト混合土の膨潤圧力は、配合比 7:3、乾燥密度 1.66g/cm<sup>3</sup>で 0.23Mpa<sup>11)</sup>となる。ケイ砂と混合することにより、極端に膨潤圧力が低下する特徴を有している。

## ④核種吸着遅延性<sup>5)</sup>

一般に物質の収着には、化学吸着と物理吸着がある。化学吸着のメカニズムとしては、静電引力によるイオン交換、錯体生成反応による表面錯体生成等が考えられる。

ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトは、結晶構造中に  $\text{Si}^{4+} \Rightarrow \text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+} \Rightarrow \text{Mg}^{2+}$  といったイオンの同形置換を有することにより、負の電荷を帯びている。この負の電荷により、モンモリロナイトは一般に 80~150meq/100g の大きな陽イオン交換容量を持っている。

また、モンモリロナイトは結晶の端面に水酸基を持つこと、800m<sup>2</sup>/g 程度の比較的大きな比表面積を持つことから、表面錯体の生成や物理吸着に関しても優れた特性を有していると考えられる。

さらに、ベントナイトの圧縮成形体中の物質の移行においては、間隙構造による分子ふるい効果、電荷によるイオン排除効果等が期待される。

## ⑤熱伝導性<sup>5)</sup>

圧縮ベントナイトの熱伝導率は、乾燥密度、含水比等に依存する。したがって、密度が大きいほど、含水比が高いほど、熱伝導率は大きい。乾燥密度 1.8g/cm<sup>3</sup>の場合、初期含水比 10%の乾燥状態においても熱伝導率は、約 1.0W·m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> という値が得られている。

また、ベントナイトにケイ砂を混合すると、ケイ砂の割合が大きいほど、熱伝導率は大きくなる。したがって、熱伝導性を向上させるためには、乾燥密度を上げる他にケイ

砂を混合することが有効であると考えられる。

一方、ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトは、熱によりイライトという鉱物に変化すること（イライト化）が知られている。イライトを起こすことにより、緩衝材に要求される止水性、自己シール性、核種吸着遅延性といった性能が低下することが知られている。

天然における続成作用等でイライト化が認められるのは約 50~60°C 程度以上の温度であるが、約 100°C 以下の温度ではイライト化変質は顕著ではなく、その進行は非常に遅い。また、100°C を越える温度条件であっても、時間や環境条件によりイライト化が進行しない場合もあるが、詳細については今後の研究成果を待つ必要がある。以上のことから、現状においてはベントナイトの温度が 100°C を越えないように処分システムを構築することが肝要である。

#### ⑥廃棄体支持性と力学的緩衝性

これまでの知見<sup>5)</sup>によると、ベントナイトは乾燥密度 1.8g/cm<sup>3</sup>の場合、約 5Mpa の一軸圧縮強度を有している。この値は、通常の土木構造物の設計・施工で取り扱う粘土に置き換えると、「固結した」（0.4Mpa 以上）という最も硬い分類に入る。したがって、粘土としてはかなりの支持力を有していると考えられる。

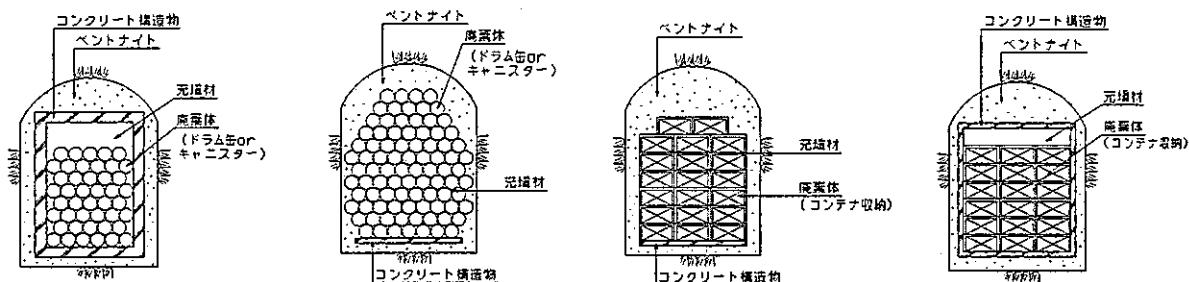
しかし、ベントナイトには前述した膨潤特性の他、粘土材料としての圧密特性（一次圧密）およびクリープ特性（二次圧密）を有している。実際の長期的なベントナイトの力学的挙動は、これらの特性が複雑に絡み合って発生するもとと考えられる。したがって、今後はこれらの特性を説明するデータを精力的に取得していくとともに、緩衝材の力学挙動モデルの開発が課題である。

#### 1.1.2.4 人工バリアの基本構造

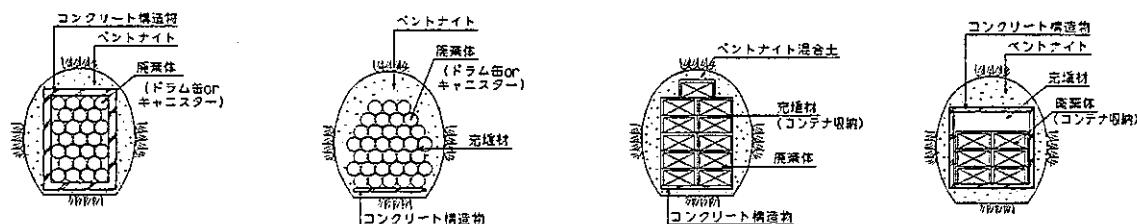
これまでの述べてきた人工バリアの基本構成および候補材料を念頭に、各処分空洞方式（岩洞方式、坑道方式、サイロ方式）に対して考える人工バリアの基本構造形態を図-1.1.7に示す。

ここで「コンテナ」という新しい概念が登場する。これは廃棄体を数本取りまとめて収納する、コンクリート製の矩形の箱である。放射線のしやへい、操業性の向上、落下時の強度担保といった性能を期待し、導入した。コンテナに関する詳細は後述する。

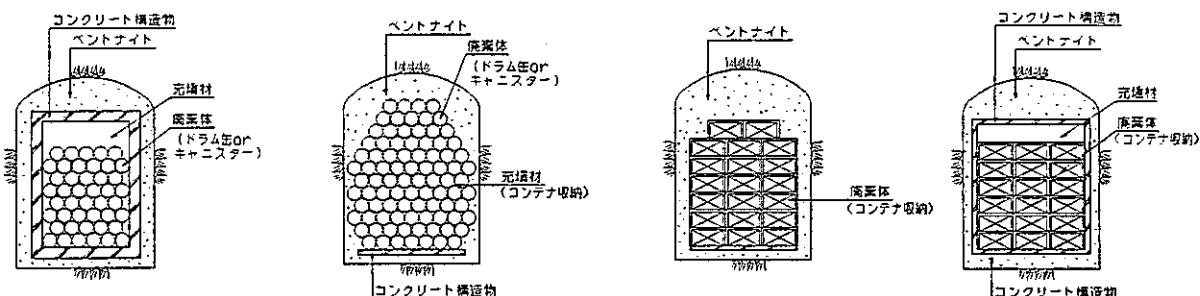
また表-1.1.10においては、図-1.1.7に示す4種類の人工バリア基本構造形態に対する特徴の比較を行う。



岩洞方式の人工バリア材構造



坑道方式の人工バリア構造



サイロ方式の人工バリア構造

図-1.1.7 各処分空洞方式に対する人工バリアの基本構造形態

表-1.1.10 人工バリア基本構造形態の特徴比較

基本構造形態	特 徴	評価
○ガイド有り乱積処分	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄体の定置時における物理的安定性は、ガイド（コンクリートピット）により保持される。</li> <li>コンクリートピットを設置するため、廃棄体の定置以前に底部および側部のベントナイトの施工が可能である。</li> <li>1断面あたりに廃棄体量を多量に処分できる。</li> <li>廃棄体をむき出して搬送・定置しなければならず、放射線しやへいの観点から問題がある。</li> </ul>	×
○乱積処分	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄体の定置時における物理的安定性に、欠如している。</li> <li>廃棄体の定置とベントナイトの施工を同時進行する必要があり、操業と閉鎖という2つの作業が錯綜する。</li> <li>1断面あたりに廃棄体量を多量に処分できる。</li> <li>廃棄体をむき出して搬送・定置しなければならず、放射線しやへいの観点から問題がある。</li> </ul>	×
○ガイド有り コンテナ積み処分	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄体の定置時における物理的安定性は、ガイド（コンクリートピット）およびコンテナにより、この中で最も安定に保持される。</li> <li>コンクリートピットを設置するため、廃棄体の定置以前に底部および側部のベントナイトの施工が可能である。</li> <li>コンテナを使用する分、1断面あたりの廃棄体量が制限される。</li> <li>廃棄体をコンテナに収納して搬送・定置するため、放射線しやへいの観点から安全性が確保される。</li> <li>コンクリートピットの設置およびコンテナの使用により、処分コストがこの中で最も高くなる。</li> </ul>	○
○コンテナ積み処分	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄体の定置時における物理的安定性は、コンテナによりある程度保たれるが、ガイドが無い分不安定要素は大きい。</li> <li>廃棄体の定置とベントナイトの施工を同時進行する必要があり、操業と閉鎖という2つの作業が錯綜する。</li> <li>コンテナを使用する分、1断面あたりの廃棄体量が制限される。</li> <li>廃棄体をコンテナに収納して搬送・定置するため、放射線しやへいの観点から安全性が確保される。</li> </ul>	×

本検討においては、これまでに示してきた4種類の基本構造形態の中から、コスト的には不利な側面もあるが、それに勝る長所を有していると判断される「ガイド有りコンテナ積処分」を採用する。その理由は以下に示すとおりである。

- ① コンクリートピットを設置するため、廃棄体の定置以前に底部および側部のペントナイトの施工が可能である。このことにより、品質の高いペントナイトが施工できると考える。また、作業が錯綜せずに済む。
- ② 廃棄体をコンテナに収納して搬送・定置するため、放射線しゃへいの観点から安全性が確保される。さらに、安定性、落下強度および耐埋設荷重強度の向上、有害空隙の減少といったプラス効果が期待できる。
- ③ コンクリートピットとコンテナを用いることにより、廃棄体の定置時における物理的安定性が、格段に向上する。

### 1.1.8 処分施設に係わる技術

#### 1.1.8.1 設計研究

##### (1) 処分空洞の設置深度

設計研究の前提となる処分空洞の設置深度は、地層処分であること、及び諸外国で計画されている処分場の深度を参考に、パラメータとして300m及び700mを設定した。

表-1.1.11に諸外国における処分深度を示す。

表-1.1.11 諸外国での処分深度<sup>12)</sup>

国名	処分場名	処分深度	備考
アメリカ	YUCCA Mountain	360m	高レベル・TRU
	WIPP	650m	CH-TRU,RH-TRU
スウェーデン	SFR	60m	中・低レベル
	SFL	500～550m	高レベル,中・低レベル
スイス	B Type	数百m(山腹)	水平坑道 中・低レベル
	C Type	1200m	中・高レベル
フランス	ANDRA 検討	150～200m	中・低レベル(TRU含む)
ベルギー	Mol-Dessel	180～270m	中レベル・ $\alpha$ 廃棄物
ドイツ	コンラッド	1100～1200m	中・低レベル
	ゴアレーベン	660～900m	すべての廃棄物
イギリス	セラフィールド	200～1000m	中・低レベル
フィンランド	VLJ	70～100m	中・低レベル

## (2) 空洞安定解析

### (a) 処分空洞の規模

#### (i) 基本的な考え方

通常、地下空洞を掘削する場合、掘削に伴い発生する緩み荷重を支保るために、吹付コンクリートやロックボルト等の支保工を設置する。しかし、数百年から数千年、数万年といった長期間にわたって支保工が、初期の性状を保ち続けられるか否かは不明である。現状の技術レベルからは、不可能と判断せざるを得ない。

したがって、放射性廃棄物の処分空洞を掘削するにあたっては、長期的な支保工の効果は期待せず、極力岩体のみで安定性を保つことが可能な規模とする必要がある。

#### (ii) 検討方法

処分深度および岩盤物性毎に、弾塑性理論解析を用いて掘削可能な空洞の規模を検討する。空洞の安定解析については、近年、計算機の普及や性能の向上を背景に有限要素法による弾塑性解析が実設計として多く適用されている。しかし、本検討においては設定した条件における概略検討を目的として、前述の弾塑性理論解析を選択した。

弾塑性理論解析としては、図-1.1.8に示すように円形トンネルを対象とし、モール・クーロンの破壊規準を用いた弾塑性理論（岡、1977）を適用する。

解析にあたっては岩盤の初期応力を設定する必要があり、初期応力も等方であるとは限らない。しかし、本検討は詳細な設計ではなく、ある深度で掘削可能なトンネル径の見通しを得ることが目的であるので、モデルは円形モデルを用いる。初期応力は、図-1.1.9に示すような国内のトンネル・地下発電所・鉱山での土被りと側圧係数の実測データ<sup>13)</sup>を参考にすると、その関係は0.5~2.0程度の間に集中しておりそのほとんどが1.5以下であることから、本検討では土被り圧の1.5倍の値が等方等圧に作用するものと仮定する。支保による内圧は、前述したように岩体のみで安定性を確保させるため考慮しない。しかし、この場合においても作業の安全確保の観点から、厚さ10cmの吹付コンクリートおよび緩み領域の1.5倍以上のロックボルトを施工する。また、降伏後の岩盤挙動としてバイリニア型の完全弾塑性モデルを用いる。

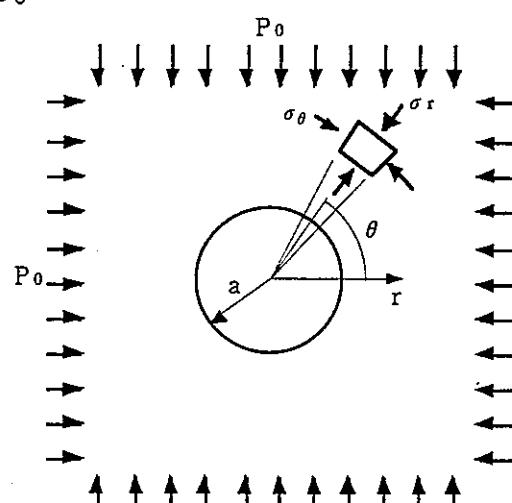


図-1.1.8 解析概念図

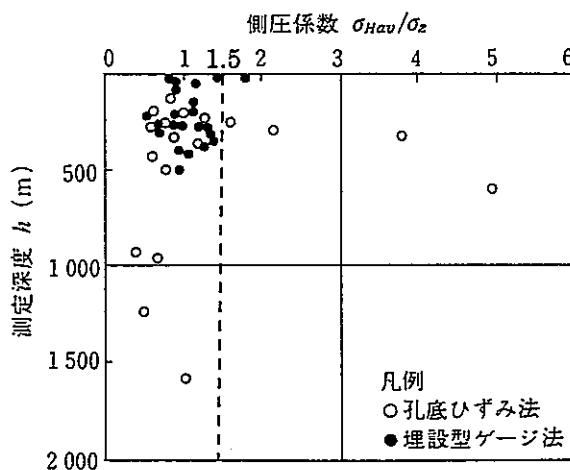


図-1.1.9 土かぶり  $h$  と側圧係数  $\sigma_{Hav}/\sigma_z$  の関係<sup>13)</sup>

以下に解析に用いる式を示す。

モール・クーロンの破壊規準は次式で表すことができる。

$$\sigma_\theta = \lambda \sigma_r + q_u \quad (1.1.1)$$

ここで、

$$\lambda = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (1.1.2)$$

$$q_u = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (1.1.3)$$

ここに、 $\sigma_\theta$ :接線方向応力

$q_u$  : 一軸圧縮強度

$\sigma_r$  : 半径方向応力

$\phi$  : 内部摩擦角

$c$  : 粘着力

破壊領域の応力は、

$$\sigma_r = \left\{ \frac{r}{a} \right\}^{\lambda-1} \cdot \left\{ p_i + \frac{q_u}{\lambda-1} \right\} - \frac{q_u}{\lambda-1} \quad (1.1.4)$$

$$\sigma_\theta = \lambda \left\{ \frac{r}{a} \right\}^{\lambda-1} \cdot \left\{ p_i + \frac{q_u}{\lambda-1} \right\} - \frac{q_u}{\lambda-1} \quad (1.1.5)$$

ここに、 $p_i$ :内圧

$r$  : 任意円の半径

$a$  : 空洞半径

となる。

弾性領域と破壊域の境界半径 R は、

$$R = a \left\{ \frac{2}{\lambda + 1} \cdot \frac{p_0(\lambda - 1) + q_u}{p_i(\lambda - 1) + q_u} \right\}^{\frac{1}{\lambda - 1}} \quad (1.1.6)$$

ここに、 $p_0$ :地山の初期応力

である。

境界半径の応力状態は、

$$\sigma_{r,R} = \frac{2p_0 - q_u}{\lambda + 1} = p' \quad (1.1.7)$$

$$\sigma_{\theta,R} = \frac{2p_0\lambda + q_u}{\lambda + 1} \quad (1.1.8)$$

である。一方、境界半径の変位  $u_R$  は、

$$u_R = \frac{(1+\nu)(p_0 - p')}{E} \cdot \frac{R^2}{a} \quad (1.1.9)$$

ここに、 $\nu$ : ポアソン比

$E$ : 弹性係数

である。

トンネル壁面での変位量  $u_i$  は、次式になる。

$$u_i = \frac{(1+\nu)(p_0 - p')}{E} \cdot \frac{R^2}{a} \quad (1.1.10)$$

以上の解析式を用いて実際に掘削可能径を求める場合には、境界条件を設定する必要がある。境界条件としては、以下に記す2種類がある。

- ① 許容緩み領域を設定する方法
- ② 許容変位量を設定する方法

許容緩み領域  $R_a$  は、表-1.1.12<sup>14)</sup>を参考に、極力発生しない場合として 1.5m を仮定する。したがって、式(1.1.6)で示される弾性領域と破壊域の境界半径 R は、許容緩み領域  $R_a$  と空洞半径 a の和として表される。

許容変位量  $u_a$  は、既施工の地下発電所における事例調査<sup>15)</sup>の結果から 4cm と設定する。調査結果によると、空洞断面積に関わらず変位量が 4cm を越えたサイトでは、岩盤の一部崩落、変位の急激な増加、コンクリートのクラック発生といった変状を生じている。

また、解析条件によっては、掘削可能径が無限大となる場合もあり得るが、本検討においては従来の施工実績を鑑みてトンネルと地下発電所空洞の中間を取り直径 30 m を上限とする。

表-1.1.12 緩み領域実測例<sup>14)</sup>

トンネル名	線名	地質	緩み領域(m)	備考
青函		第三紀泥岩	1.2~2.0	調査坑
		凝灰岩	1.2~1.4	
			0.8~1.1	
神居	函館	蛇紋岩	3.0~3.5	試験坑
新登川	紅葉山	々	3.5	導坑
剣城	北陸	第三紀泥岩	9~10	
			7	
矢立	奥羽	第三紀凝灰岩	3.0	
徳重	鹿児島	風化安山岩	8~10	単線

### (iii) 検討結果

#### ① 許容緩み領域を設定する方法

前述したように許容緩み領域  $R_a = 1.5m$  として解析を行った。

解析結果を結晶質岩系岩盤と堆積岩系岩盤に分け、図-1.1.10に示す。図中の各曲線は、条件として与えた岩盤物性値および許容緩み領域に対する深度と掘削可能な空洞径の限界値を示している。したがって、各曲線の上側に相当する深度および空洞径の組み合わせであれば掘削可能と判断される。また、図-1.1.10に示す×および△印は、国内に既存するトンネルおよび地下発電所空洞の施工実績である。

この結果によると、結晶質岩系岩盤では B 程度の物性値を保有していれば、ほとんどのトンネルおよび地下発電所空洞が施工可能と判断される。

一方、堆積岩系岩盤においては、A 程度の物性値を保有していなければならず、B および C 程度の岩盤物性値では実現が困難と判断される。

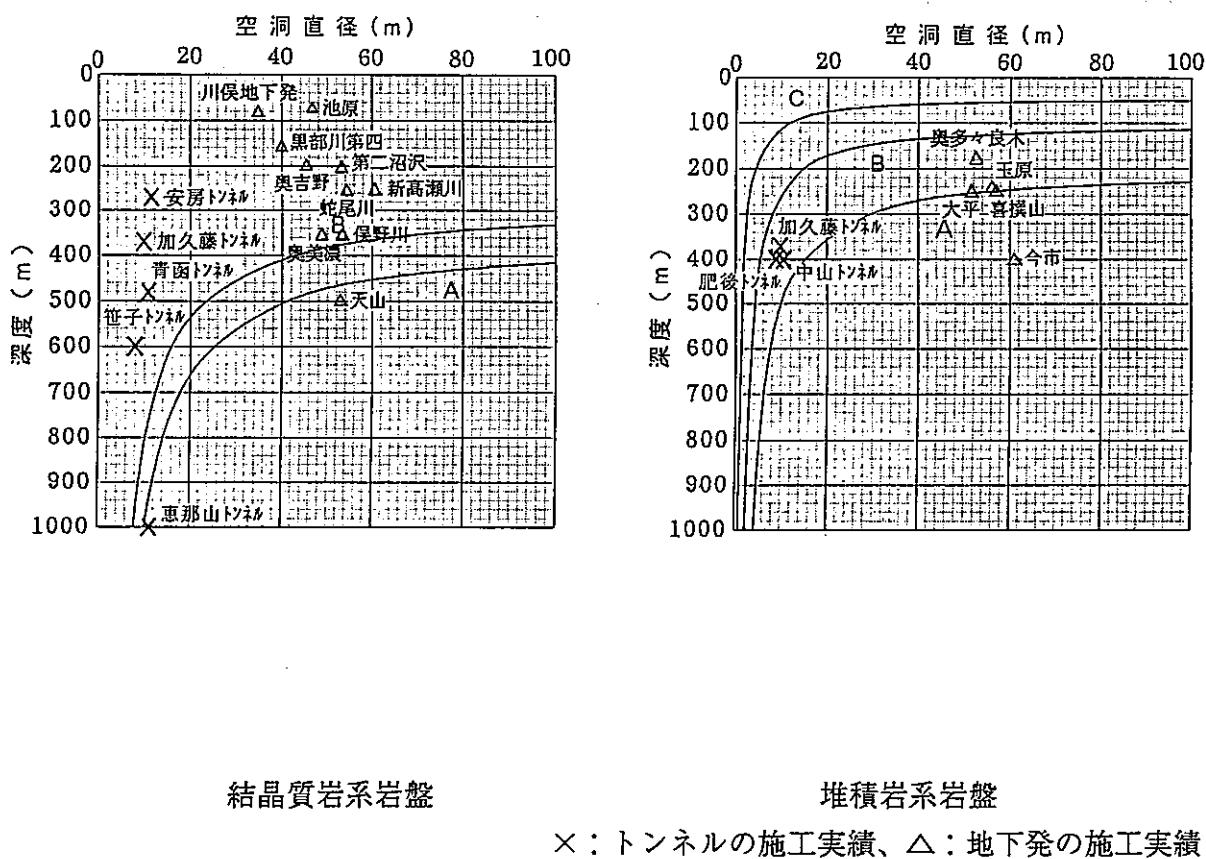


図-1.1.10 処分深度と掘削可能径との関係

また表-1.1.13は、本検討において対象とする処分深度における結果を整理したものである。

表-1.1.13 許容緩み領域を設定する方法による解析結果

		処分深度 300m				処分深度 700m			
		直 径 $\phi$ (m)	壁面変位 u(cm)	緩み領域 w(m)	ボルト長 l(m)	直 径 $\phi$ (m)	壁面変位 u(cm)	緩み領域 w(m)	ボルト長 l(m)
結晶質岩 系岩盤	A	30	0.7	0.0	0.0	17	1.0	1.5	3.0
	B	30	2.1	0.1	1.0	12	2.3	1.5	3.0
堆積岩系 岩盤	A	27	4.6	1.5	3.0	6	3.3	1.5	3.0
	B	7	3.0	1.4	3.0	3	5.2	1.5	3.0
	C	2	3.5	1.3	2.0	1	10.0	1.4	3.0

(注)吹付コンクリート厚：10cm

支保内圧：0.0Mpa

ボルト長＝緩み領域の1.5倍以上

## ② 許容変位量を設定する方法

前述したように許容変位量  $u_a=4\text{cm}$  として解析を行った。

表-1.1.14に、本検討において対象とする処分深度における結果を整理する。

表-1.1.14 許容変位量を設定する方法による解析結果

		処分深度 300m				処分深度 700m			
		直 径 $\phi$ (m)	壁面変位 u(cm)	緩み領域 w(m)	ボルト長 l(m)	直 径 $\phi$ (m)	壁面変位 u(cm)	緩み領域 w(m)	ボルト長 l(m)
結晶質岩 系岩盤	A	30	0.7	0.0	0.0	30	1.8	2.6	4.0
	B	30	2.1	0.1	1.0	10	2.2	1.3	2.0
堆積岩系 岩盤	A	23	3.9	1.3	2.0	7	3.8	1.7	3.0
	B	9	3.9	1.8	3.0	2	3.5	1.0	2.0
	C	2	3.5	1.3	2.0	不可能	—	—	—

(注)吹付コンクリート厚：10cm

支保内圧：0.0Mpa

ボルト長＝緩み領域の1.5倍以上

(iv) 空洞規模の設定

表-1.1.15に2種類の境界条件による空洞安定解析結果を整理する。表中の円は掘削可能径を示し、円から出ている放射状の線はロックボルトの必要性を模式的に表現したものである。また直径10m未満の結果に対しては、大量処分を命題としているTRU廃棄物処分システムには不適格と判断し、「成立せず」と表示した。

表-1.1.15 空洞安定解析結果のまとめ

		深度300m		深度700m	
		許容緩み領域	許容変位量	許容緩み領域	許容変位量
結晶質岩系岩盤	A				
	B				
堆積岩系岩盤	A			成立せず	成立せず
	B	成立せず	成立せず	成立せず	成立せず
	C	成立せず	成立せず	成立せず	成立せず

表-1.1.15 を踏まえ、本検討において適用する岩種および処分深度に対する掘削最大径を表-1.1.16 のように設定する。

表-1.1.16 掘削最大径

		深度 300m	深度 700m
結晶質岩系岩盤	A	3 0 m	3 0 m
	B	3 0 m	1 0 m
堆積岩系岩盤	A	2 0 m	成立せず
	B	成立せず	成立せず
	C	成立せず	成立せず

## (b) 処分空洞の形態

「(a) 処分空洞の規模」において掘削可能な最大径を各岩種と処分深度に対して弾塑性理論解析により求めた。その結果を基に、本検討で対象とする処分空洞の形態の設定を行う。

地下に建設される構造物には、一般的にトンネル・サイロ・地下発電所などの大断面岩洞が挙げられる。

一方TRU廃棄物は、低レベル放射性廃棄物と比較して、放射能レベルが高くかつ半減期が長い核種を含有することや、高レベル放射性廃棄物と比較して発生量が多いことなどから、それらの処分空洞形態とは異なったコンセプトを構築する必要がある。そこで本検討ではこれらを考慮して、処分空洞として上記3種類（トンネル・サイロ・大断面岩洞）の構造形態を考える。

「(a) 処分空洞の規模」で求められた掘削可能径と、トンネル・サイロ・大断面岩洞などの構造形態との関連について、本検討では以下のように設定を行った。

- ・掘削径30mは大規模地下発電所にほぼ相当する。（大断面岩洞方式）
- ・掘削径20mは地下発電所とトンネルの中間程度の大きさとなり小規模の岩洞と考えられる。（小断面岩洞方式）
- ・掘削径10mはトンネルにほぼ相当する。（坑道方式）
- ・岩洞を縦型に設置するという観点から掘削径20mのサイロ構造物を考える。（サイロ方式）

これらの構造形式の内、どの処分形態を選択するかについては、施工性・操業性・性能評価・経済性など、様々な観点による比較検討を行う必要がある。ここでは下記の4項目についての比較を行う。

- ・施工性（実績について）
- ・操業性（操業のしやすさなど）
- ・性能評価（熱、体積変化に対する評価など）
- ・経済性（掘削、埋設密度について）

比較を表-1.1.17に示す。

表-1.1.17 TRU廃棄物処分空洞の形態の比較

項目	岩洞方式		坑道方式	サイロ方式
	大断面岩洞方式	小断面岩洞方式		
概念図				
施工性	・地下発電所での施工実績があり、施工可能である。	・同左	・トンネルでの施工実績があり、施工可能である	・神岡鉱山での地下実験装置の実績がある。また圧縮空気の岩盤内貯蔵システムにおいても、同様な空洞が考えられている。
操業性	断面形状が大きく、1ヶ所にまとめて処分できることから操業性はかなり良い。	大断面岩洞方式と比較すると断面が小さくなり若干操業性は落ちる。	断面の大きさが小さくなるため、1ヶ所にまとめて処分できないことから操業性は悪い。	大断面岩洞方式と同様、1ヶ所にまとめて処分できるため操業性は良い。 クレーンの移動距離が短く、作業がコンパクトである。
性能評価	断面が大きいため発熱性廃棄物、体積変化の大きい廃棄物、放射能濃度の高い廃棄物をまとめて処分すると人工バリア等に影響を及ぼす。	大断面岩洞方式と同様、発熱性廃棄物、体積変化の大きい廃棄物、放射能濃度の高い廃棄物の処分は処分方法を検討する必要がある。	埋設密度が他の方式に比べ小さいため、発熱性廃棄物、体積変化の大きい廃棄物の処分に有利である。	大断面岩洞方式と同様、発熱性廃棄物、体積変化の大きい廃棄物、放射能濃度の高い廃棄物をまとめて処分すると人工バリアに影響を及ぼす。
経済性	坑道延長が最も短くなり掘削費は安い。	大断面岩洞方式よりも坑道延長は長くなり、掘削費は若干高くなる。	坑道延長が長くなり、掘削費が他の方式より高い可能性がある。	施工用の坑道が余分に必要なため、岩洞方式より高くなる可能性がある。
	高い。	高いが大断面岩洞方式に比べるとやや落ちる。	低い	高い

\* : 埋設密度=廃棄体本数/掘削体積

### (3) 热解析

#### (a) 基本的な考え方

各処分方式の内、坑道方式は放熱性がよいと考えられることから発熱性を有するハル・エンドピース廃棄体を処分する可能性がある。また大断面岩洞方式・小断面岩洞方式及びサイロ方式においても、発熱性廃棄物の定置密度を低くしたり、廃棄体を処分する前段階に中間貯蔵の概念を取り入れれば、ある程度温度の下がった発熱性廃棄体を処分することも可能となることが考えられる。

そこで本検討では熱解析を実施し、発熱性廃棄体の定置密度についての検討を行う。処分空洞に発熱性廃棄体を処分した場合の、ペントナイト及び周辺岩盤の温度上昇を求め、バリア材としての機能が損なわれないような発熱性廃棄物の定置密度の検討を行う。

また、隣り合う空洞間の熱的干渉の影響についても検討する。

#### (b) 検討方法

本検討における熱解析は、有限要素法による解析コード「ANSYS」を用いて計算した。

##### ① 解析モデル

解析は図-1.1.11に示す2次元軸対称モデルを用いた。廃棄体の集合を円形とし、その周囲を厚さ50cmのコンクリート及び100cmのペントナイトで囲んでいるとしてモデル化した。廃棄体の量は空洞断面の大きさに応じて3ケース（空洞断面直径：10m, 20m, 30m）を設定した。

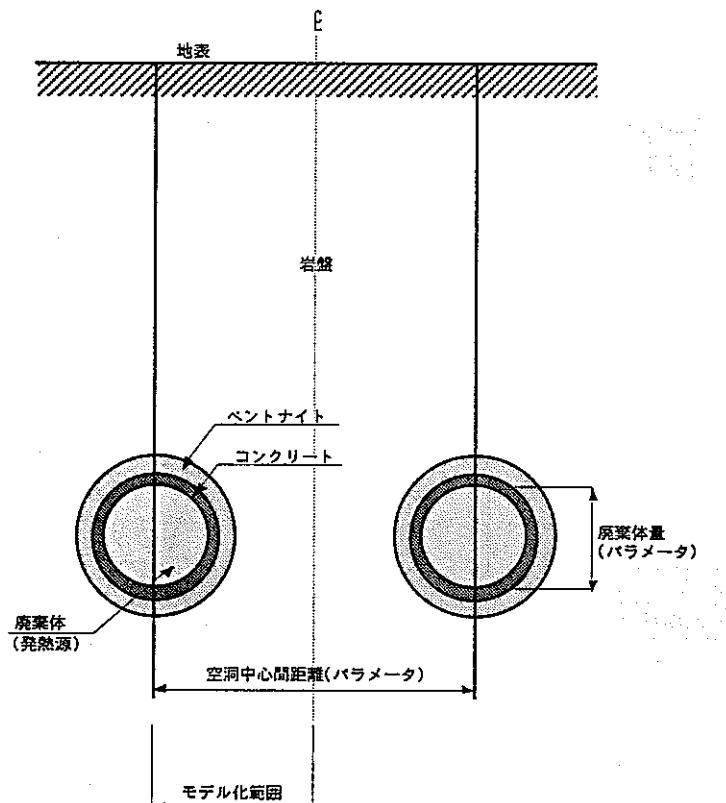


図-1.1.11 解析モデル

## ② 要素分割及び境界条件

図-1.1.12と図-1.1.13のそれぞれに解析に用いた要素分割図の全体図と、廃棄体部分の拡大図、図-1.1.14に境界条件を示す。また表-1.1.18にパラメータの値を示す。

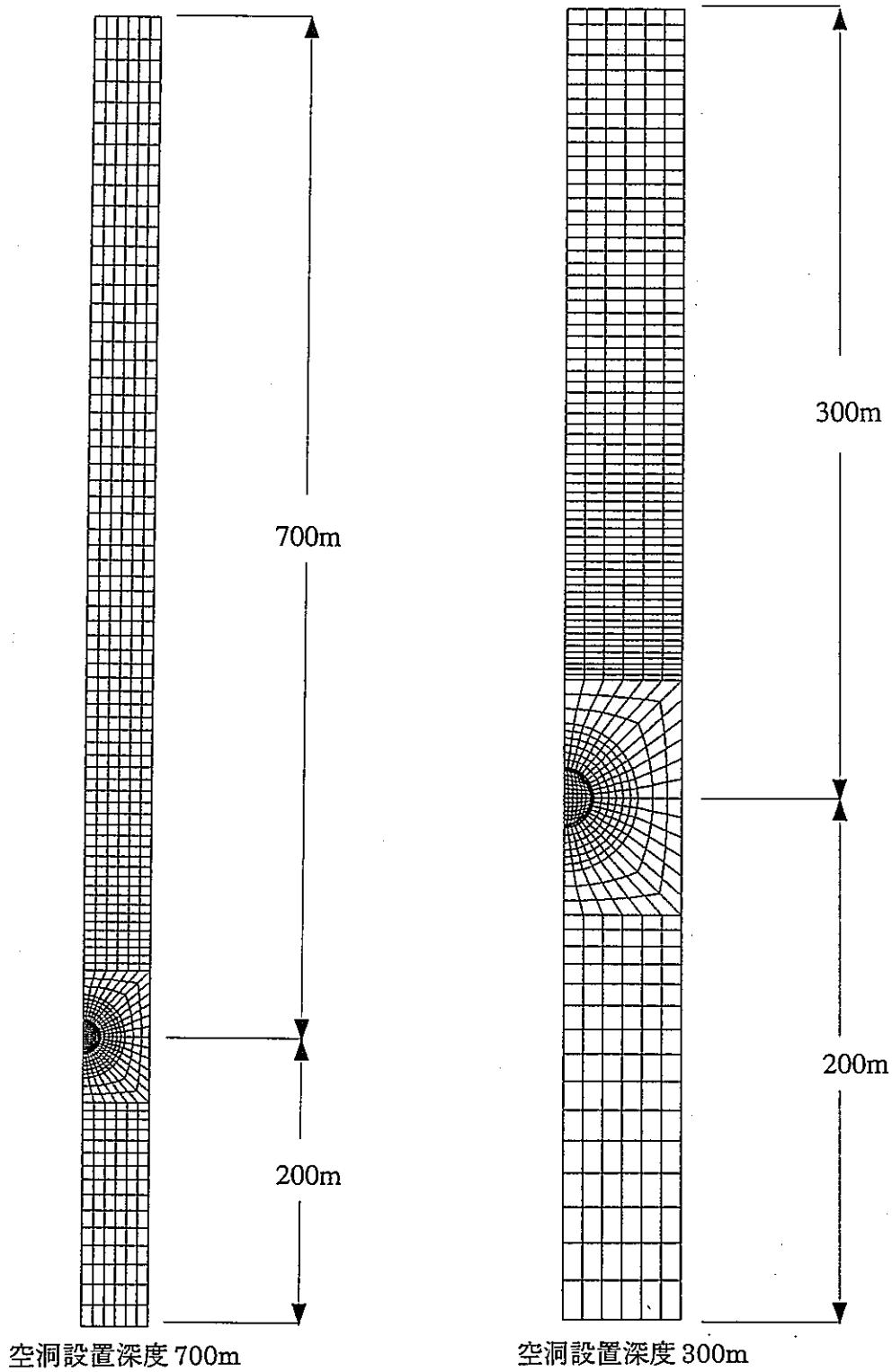
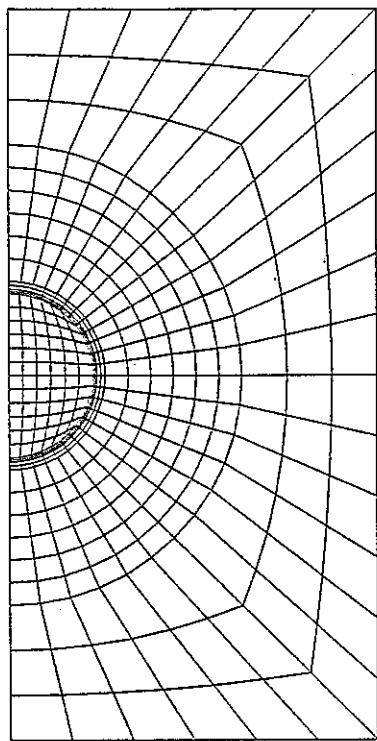
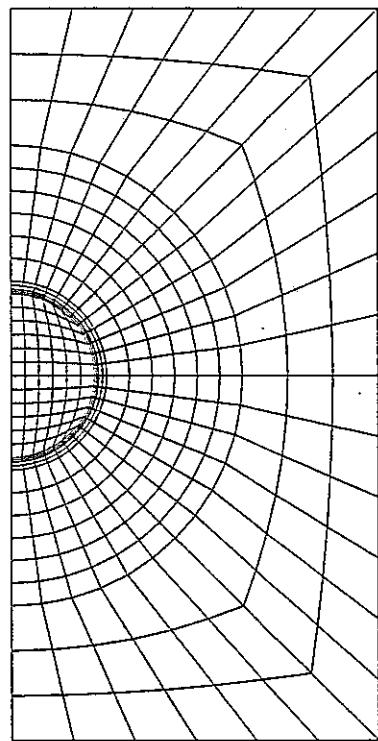


図-1.1.12 要素分割図（全体図）



空洞設置深度 700m



空洞設置深度 300m

図-1.1.13 要素分割図（廃棄体部分拡大図）

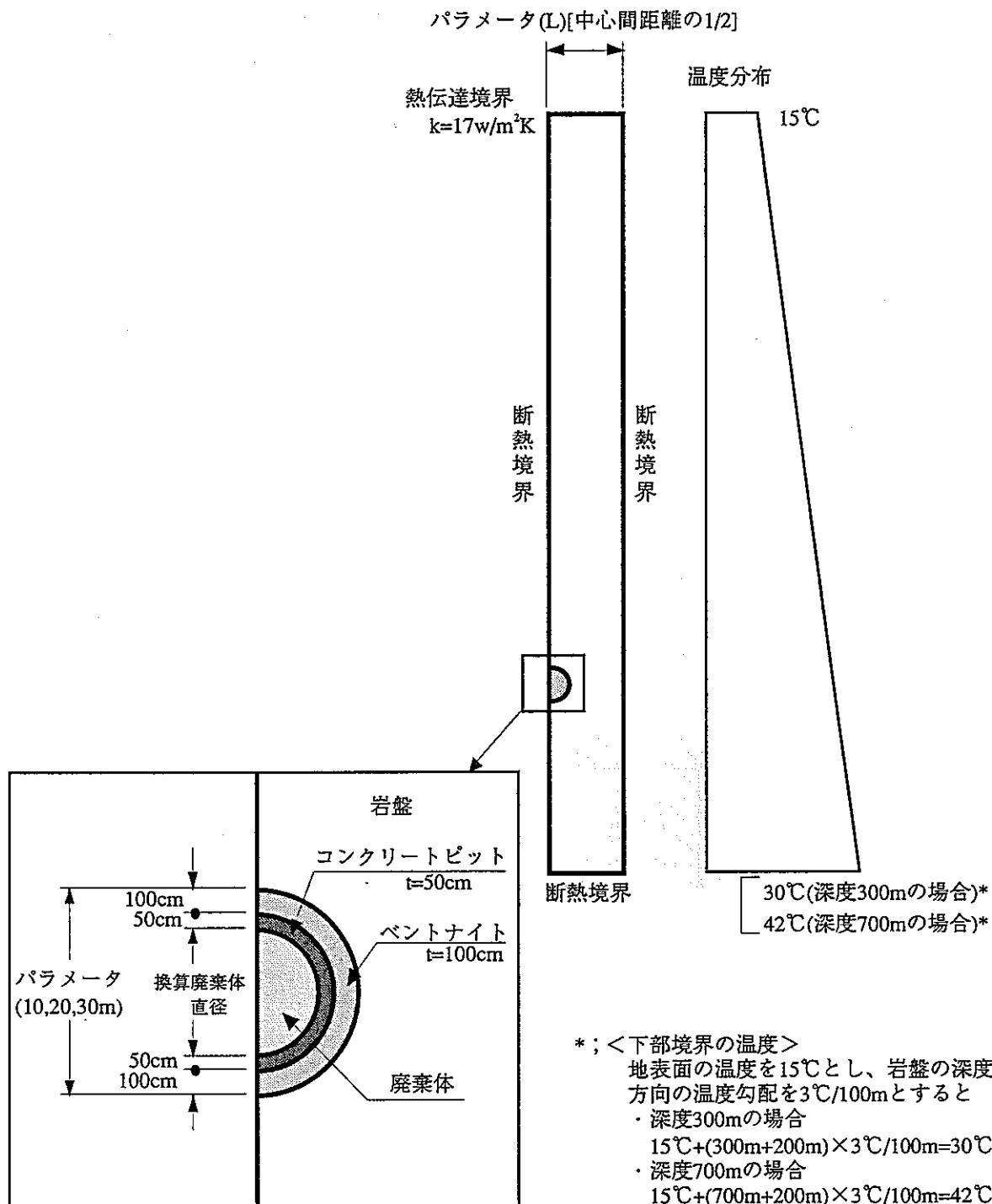


図-1.1.14 境界条件

表-1.1.18 廃棄体量及び空洞中心間距離

		廃棄体量 (本/m)	換算廃棄体直径 (m)	空洞中心間距離 2×L(m)		
空洞	直径			3D	4D	5D
10	15	15	4.2	30	40	50
20	150	150	12.4	60	80	100
D(m)	30	410	20.3	90	120	150

表-1.1.18に示した廃棄体量は、設定した空洞断面に対する奥行き1mあたりの本数である。本数は、空洞直径から片側1.5m(ペントナイト厚+吹付コンクリート厚と仮定)、計3.0mを差し引いた円形内に収まるコンクリートピット(厚さ50cmと仮定)を想定し、定置可能なコンテナ数より求めた。このとき、コンテナの寸法は幅1,510mm×奥行き1,510mm×高さ1,300mmとし、1コンテナあたり4本の廃棄体を収納するものとした。コンテナに関する詳細は、後述する。

換算廃棄体直径は、解析上の発熱条件を付与する範囲を示すもので、コンクリートピット内側の矩形面積を等価な円に換算することにより算定した。この円内に、前記の廃棄体量が平均的に収まっているとして解析を実施する。

図-1.1.15に各断面形状に対する廃棄体量及び換算廃棄体直径の算定方法を示す。

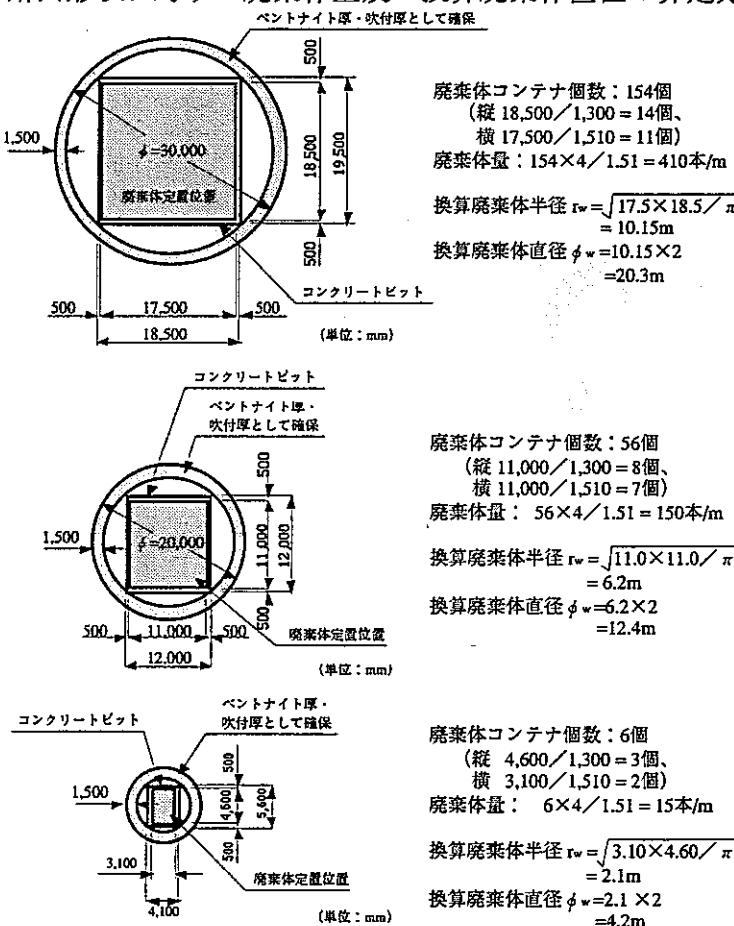


図-1.1.15 廃棄体量と換算廃棄体直径

### ③ 解析用物性値

表-1.1.19に本解析で使用した材料ごとの物性値を示す。<sup>5)</sup>

ハル・エンドピース廃棄体の熱伝導率及び比熱については、現在データが取得されていない。しかし、換算廃棄体直径内の90vol%近くはコンテナや充填材のセメント系材料で占められており、コンクリートの熱物性で代表できるものとした。

表-1.1.19 材料の物性値<sup>5)</sup>

材料	物性値	熱伝導率 (W/(m · K))	比熱 (kJ/(kg · K))	単位体積重量 (kg/m <sup>3</sup> )
廃棄体	1.2	0.90	2,400	
コンクリート*	1.2	0.90	2,400	
ベントナイト混合土	0.9	0.60	1,900	
岩盤	結晶質岩系岩盤	2.9	0.84	2,700
	堆積岩系岩盤	2.3	0.84	2,300

\* : コンクリートの物性値は参考文献<sup>6)</sup>による。

### ④ 廃棄体の発熱特性

解析は15年の冷却期間をおいた場合で実施する。廃棄体取り出し直後（冷却期間0年）での予備解析を実施したところ、設定した処分システムが全て成立しない結果となった。そこで処分システムを成り立たせるために、冷却期間として15年程度が必要であると考え解析を実施する。

15年の時点での廃棄体の熱特性は表-1.1.4に示したとおり、1本あたり11.5Wである。1本あたりの発熱特性に、各空洞形状ごとに設定した廃棄体量を乗じ、換算廃棄体直径が占める面積で除した平均の発熱密度を熱源として与えた。表-1.1.20に各ケースの発熱密度を示す。また発熱密度の経時変化を図-1.1.16に示す。

表-1.1.20 発熱密度

	空洞直径 D(m)		
	10	20	30
発熱密度(W/m <sup>3</sup> )	12.5	14.3	14.6

空洞直径10mの場合の発熱密度（奥行き1mあたり）の算定方法を参考に示す。

$$\text{発熱密度} = \frac{11.5(\text{W}/\text{本}) \times 15(\text{本}/\text{m})}{\pi \times (4.2/2)^2(\text{m}^2)} = 12.5(\text{W}/\text{m}^3)$$

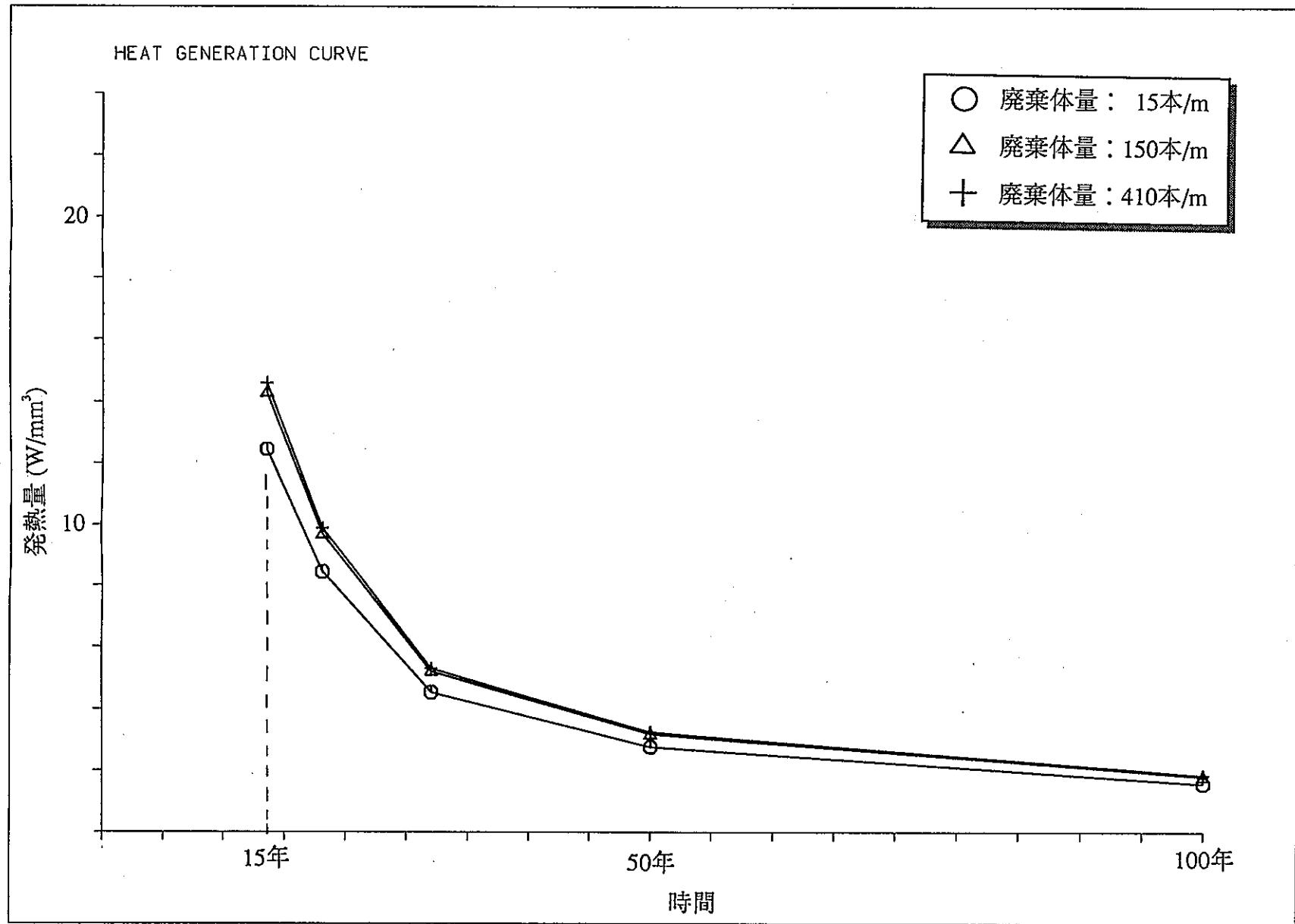


図-1.1.16 発熱特性

(c) 検討結果

① 解析ケース

実施した解析ケースの一覧を表-1.1.21に示す。

② 解析による温度算定位置

熱解析を実施し、各部位の温度の経時変化を見る。図-1.1.17に、温度算定位置を示す。

表 - 1.1.21 解析ケース一覧表

岩 質		結 晶 質 岩			堆 積 岩			廃棄体量 (本/m)	
深度	離間距離	3D	4D	5D	3D	4D	5D		
300m	空洞直徑D(m)	10	CASE3101K	CASE3102K	CASE3103K	CASE3101T	CASE3102T	CASE3103T	15
		20	CASE3201K	CASE3202K	CASE3203K	CASE3201T	CASE3202T	CASE3203T	150
		30	CASE3301K	CASE3302K	CASE3303K	CASE3301T	CASE3302T	CASE3303T	410
700m	空洞直徑D(m)	10	CASE7101K	CASE7102K	CASE7103K	CASE7101T	CASE7102T	CASE7103T	15
		20	CASE7201K	CASE7202K	CASE7203K	CASE7201T	CASE7202T	CASE7203T	150
		30	CASE7301K	CASE7302K	CASE7303K	CASE7301T	CASE7302T	CASE7303T	410

1.1.49

MODEL-1 : z=700 m

ORIGINAL — 2.997

Y  
R  
Z

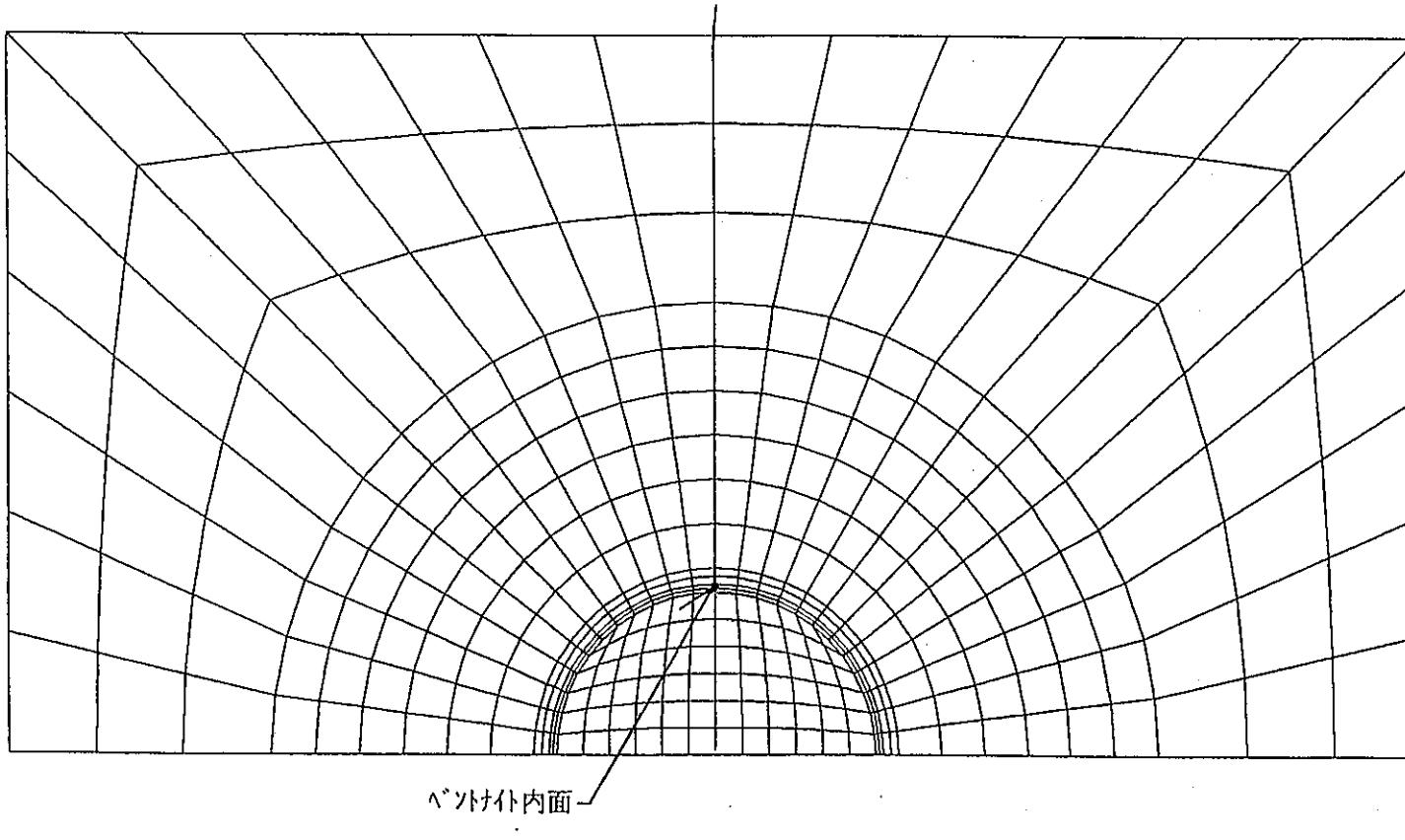


図-1.1.17 解析による温度算定位置

### ③ 温度算定結果

解析結果を図-1.1.18～1.1.21に示す。図-1.1.18～21は各ケースについてのベントナイト内面での最高温度と離間距離の関係のグラフである。

これらのグラフより以下のことが言える。

- ・ピーカの温度は空洞直径  $\phi=30m$  (大断面岩洞方式)、空洞直径  $\phi=20m$  (小断面岩洞方式)、空洞直径  $\phi=10m$  (坑道方式) の順に高くそれぞれのベントナイト内面での最高温度はそれぞれ 250°C、150°C、50°C程度まで上昇する。断面が大きくなるに従って最高温度が高いのは、空洞内の廃棄体量が多くなるためである。これより 15 年の冷却期間をおいた場合でも大断面岩洞方式では、ベントナイト内面の温度が 100°Cを大幅に上回るため、発熱性廃棄体の処分は困難であると考えられる。一方、坑道方式は発熱性廃棄体のみを処分することが可能になると考えられる。小断面岩洞方式は非発熱性廃棄体と発熱性廃棄体を半数程度ずつ混在させた形態をとると処分が可能であると考えられる。
- ・処分深度の違い (300m と 700m) による比較では、地温の差以上の差異は認められない。
- ・岩種の違いによる比較では、堆積岩系岩盤の方が結晶質岩系岩盤と比較して、空洞径が大きくなるに従って最高温度が高くなつた。これは堆積岩系岩盤の熱伝導率が結晶質岩系岩盤に比べて小さいことと、単位体積重量が小さいため結晶質岩系岩盤より少ない熱エネルギーで温度が上昇するためである。
- ・3 D～5 D の範囲では、空洞中心間距離による影響はほとんどない。

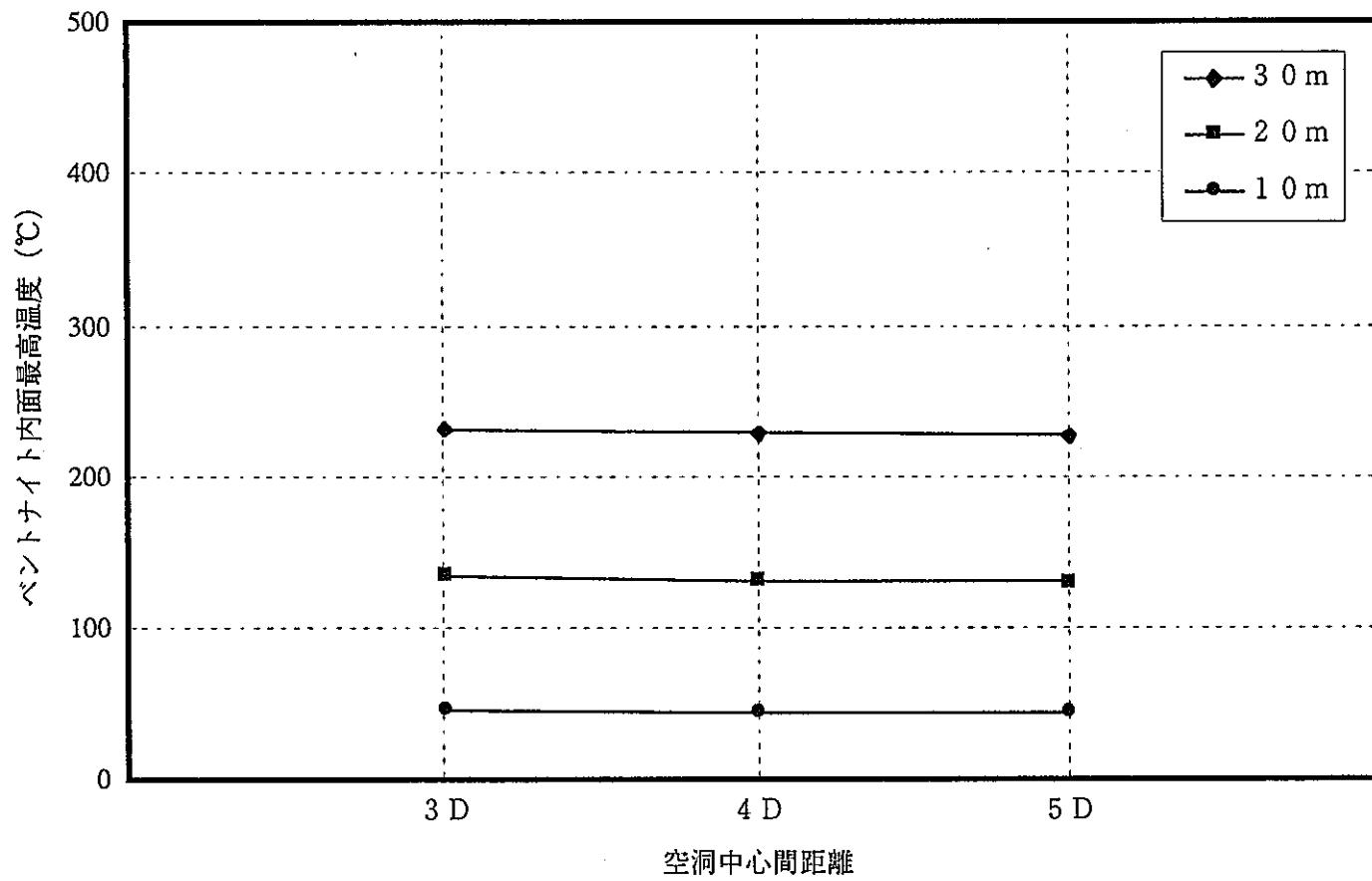


図-1.1.18 最高温度と空洞中心間距離（ペントナイト内面、深さ=300m、結晶質岩）

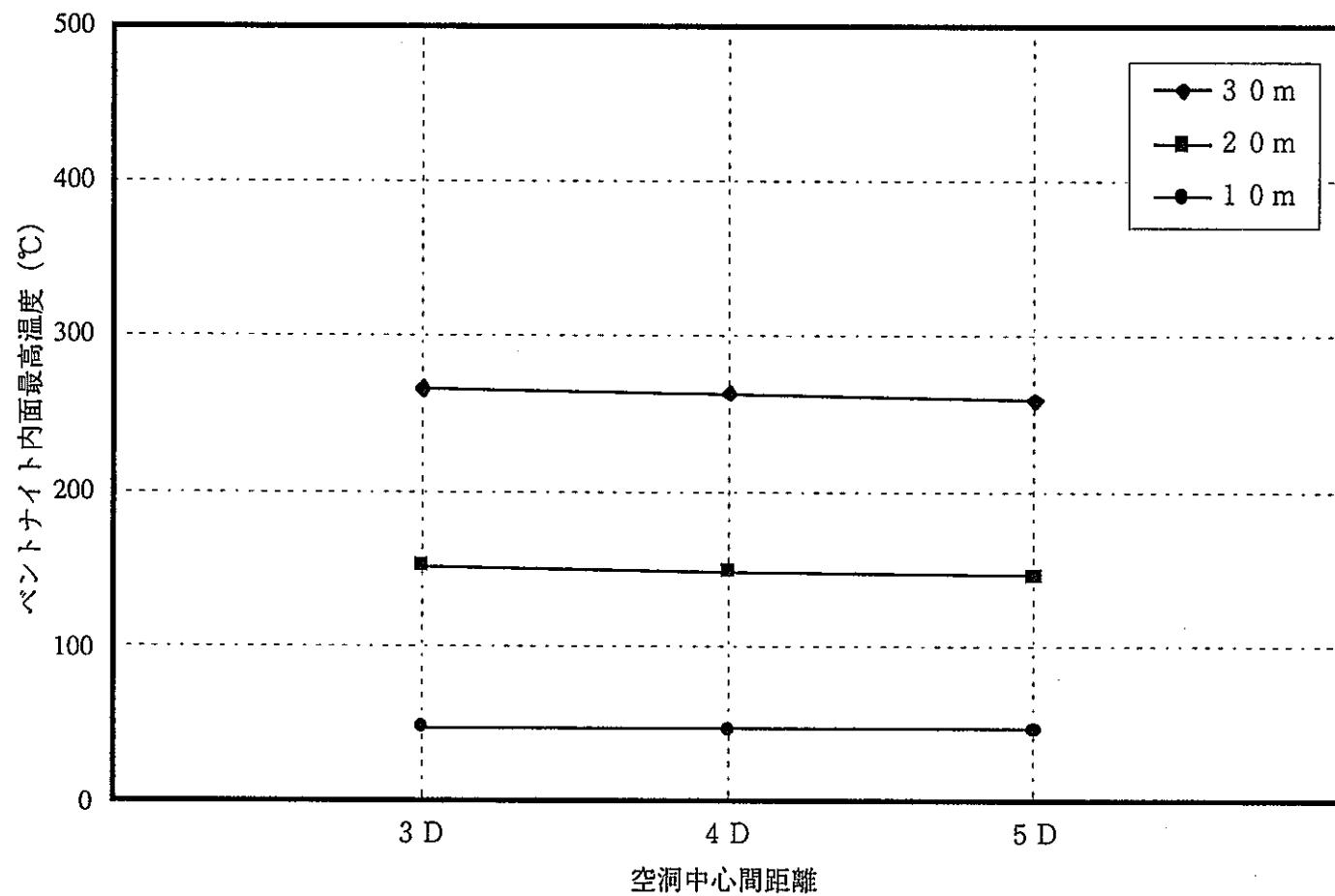


図-1.1.19 最高温度と空洞中心間距離（ベントナイト内面、深さ=300m、堆積岩）

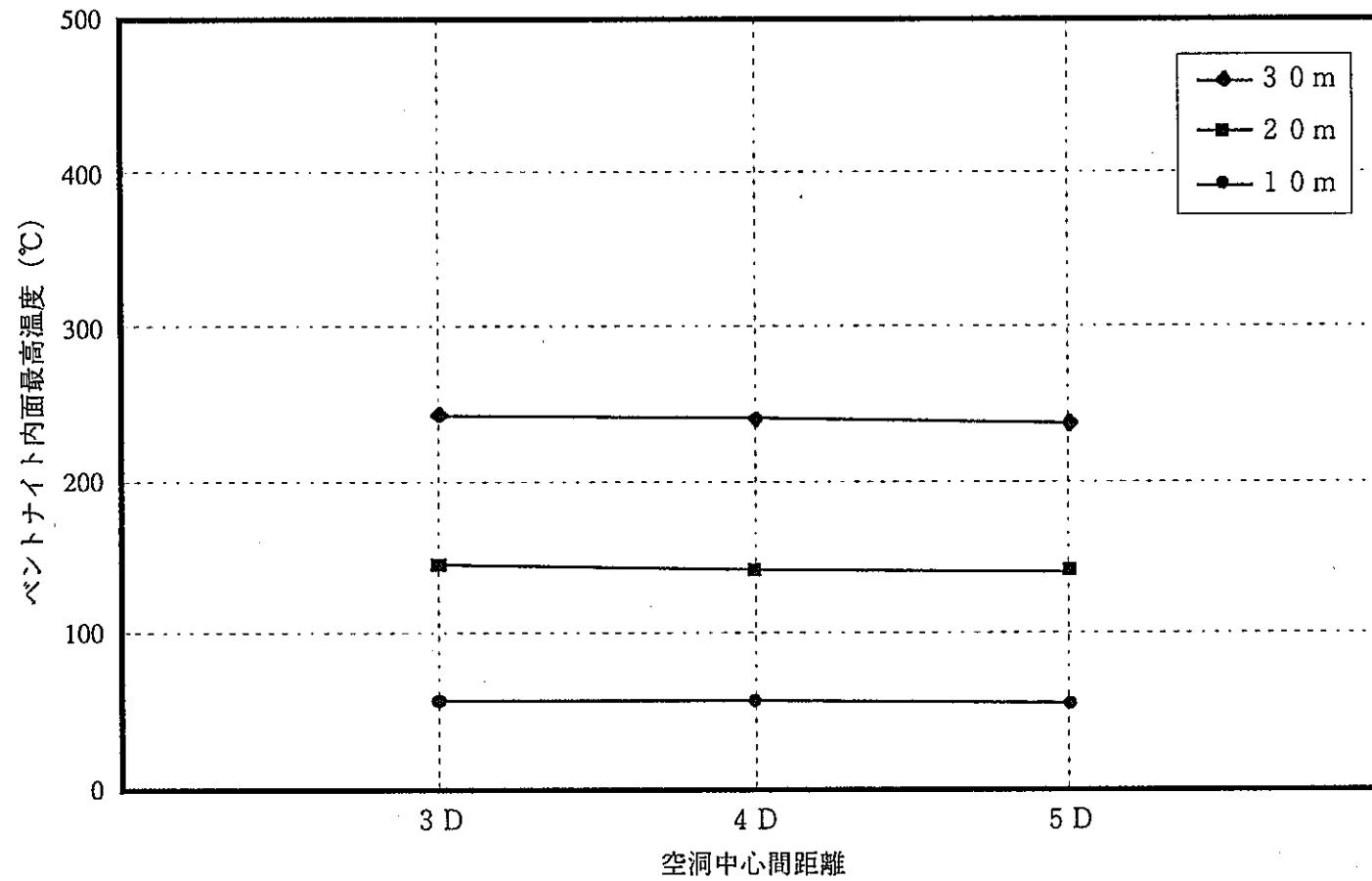


図-1.1.20 最高温度と空洞中心間距離（ベントナイト内面、深さ=700m、結晶質岩）

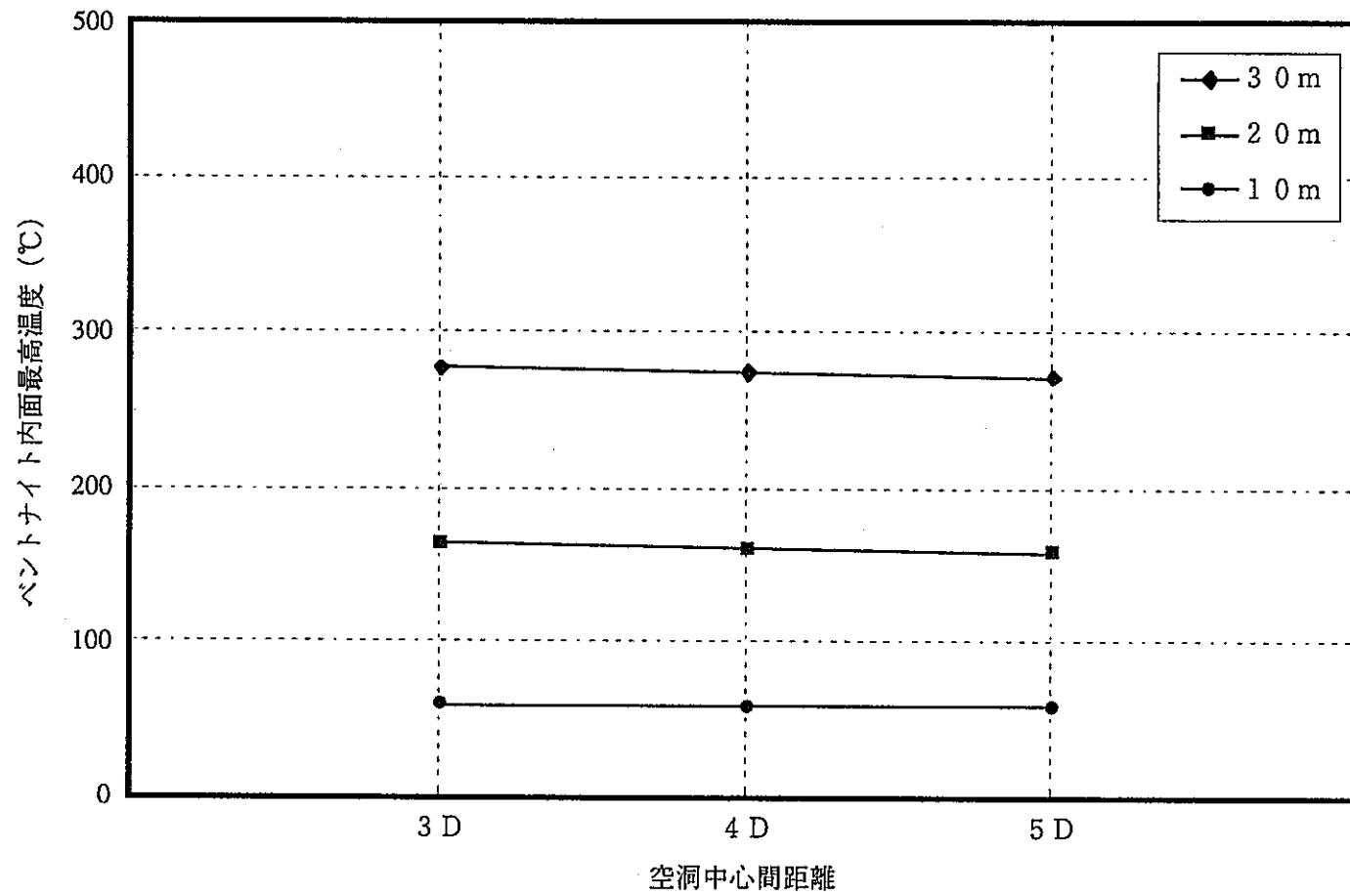


図-1.1.21 最高温度と空洞中心間距離（ベントナイト内面、深さ=700m、堆積岩）

#### (4) 体積変化解析

##### (a) 基本的な考え方

本検討で想定している廃棄体の中で、ハル・エンドピースに有害空隙が存在すること、及びアスファルト固化体・セメント固化体等の廃棄体やセメント系材料の体積減少が生じることは、前述したとおりである。

そこで、有害空隙及び体積減少による廃棄体の変形が、ペントナイトの変形や物性値にどの程度影響するかを、把握する必要がある。

##### (b) 検討方法

ペントナイトの変形量は、以下に記す二通りの方法により算定した。

①廃棄体のみの体積変化を考慮した場合

②廃棄体およびセメント系材料の体積変化を考慮した場合

前者では、廃棄体のみの体積変化に着目し、廃棄体の有害空隙量や成分溶出量に対し廃棄体空隙率というパラメータを導入することにより表現した。本検討においては、廃棄体空隙率として1本あたり15、20、30、40、50vol.%の5ケースを設定した。また、廃棄体容器にはキャニスター（Φ43cm×H104cm）を想定し、大断面岩洞方式、小断面岩洞方式、坑道方式に対して検討を行った。

後者の検討は、コンテナやコンクリートピットなどのセメント系材料の成分溶出に伴う体積変化にも着目したものである。この場合、廃棄体空隙率は1本あたり30vol.%とし、廃棄体以外のセメント系材料の体積変化量を15vol.%とした（図-1.1.4 参照）。

また、①の方法による変形量計算結果に基づいてペントナイトの乾燥密度および透水係数の概略検討を実施した。

検討に用いた廃棄体コンテナ形状、処分空洞の形状寸法等の設定については後述する。

##### (c) 検討結果

###### (i) 変形量

①廃棄体のみの体積変化を考慮した場合

変形量の算定結果を表-1.1.22に示す。また廃棄体空隙率と変形量の関係を図-1.1.22に示す。

変形量は廃棄体空隙率が大きくなるほど増加する傾向にあるが、その割合は空洞が大きいほど顕著である。例えば空隙率が30%の場合で見ると、変形量はそれぞれ大断面岩洞方式は45cm、小断面岩洞方式は27cm、坑道方式は8cmとなる。したがって大断面の空洞に廃棄体を定位する場合には、なるべく平均的な空隙率を小さくする必要がある。（空隙率の大きな廃棄体と小さな廃棄体を混在させる）

表-1.1.22 各処分方式の廃棄体空隙率と変形量の関係

		大断面岩洞	小断面岩洞	坑道
キャニスター体積(m <sup>3</sup> )		0.15 (φ 43cm×H 104cm)		
コンテナ個数 (1断面当たり)*	150	54	6	
廃棄体個数及び体積(m <sup>3</sup> ) (1断面当たり)*	600	216	24	
コンクリート部分総体積(m <sup>3</sup> /1断面) (コンクリートピット含む)	620.7	228.1	31.7	
廃棄体 空隙率 50%	空隙量(m <sup>3</sup> )	45.0	16.2	1.8
	換算空隙率(%)*	7.2	7.1	5.6
	变形量(cm)**	74.9	44.5	13.2
廃棄体 空隙率 40%	空隙量(m <sup>3</sup> )	36.0	13.0	1.4
	換算空隙率(%)*	5.8	5.7	4.5
	变形量(cm)**	59.7	35.4	10.5
廃棄体 空隙率 30%	空隙量(m <sup>3</sup> )	27.0	9.7	1.1
	換算空隙率(%)*	4.3	4.3	3.4
	变形量(cm)**	44.6	26.5	7.9
廃棄体 空隙率 20%	空隙量(m <sup>3</sup> )	18.0	6.5	0.7
	換算空隙率(%)*	2.9	2.8	2.3
	变形量(cm)**	29.6	17.6	5.2
廃棄体 空隙率 15%	空隙量(m <sup>3</sup> )	13.5	4.9	0.5
	換算空隙率(%)*	2.2	2.1	1.7
	变形量(cm)**	22.2	13.2	3.9

\*: 奥行き 1.51m (コンテナ 1列分)

\*\*: 換算空隙率 (%) = (空隙量 / コンクリート部分総体積) × 100

\*\*: 変形量は水平方向変位、鉛直方向変位それぞれの合計を示す。

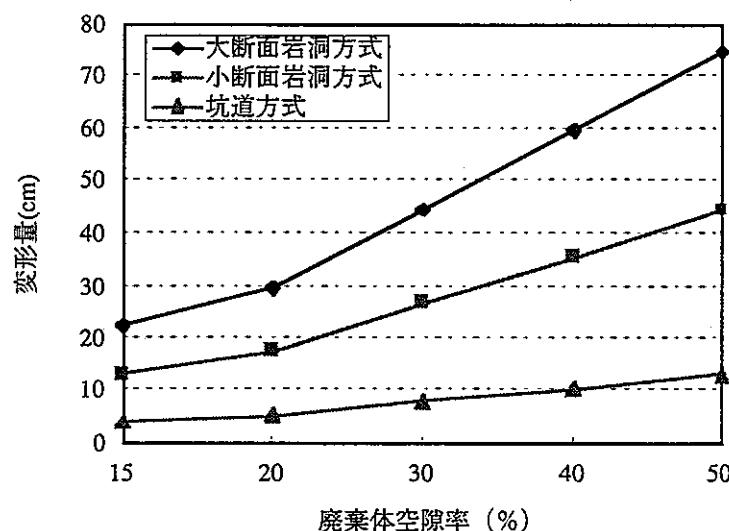


図-1.1.22 廃棄体空隙率と変形量の関係

図-1.1.23 に廃棄体空隙率 30% の場合の変形概念図を示す。

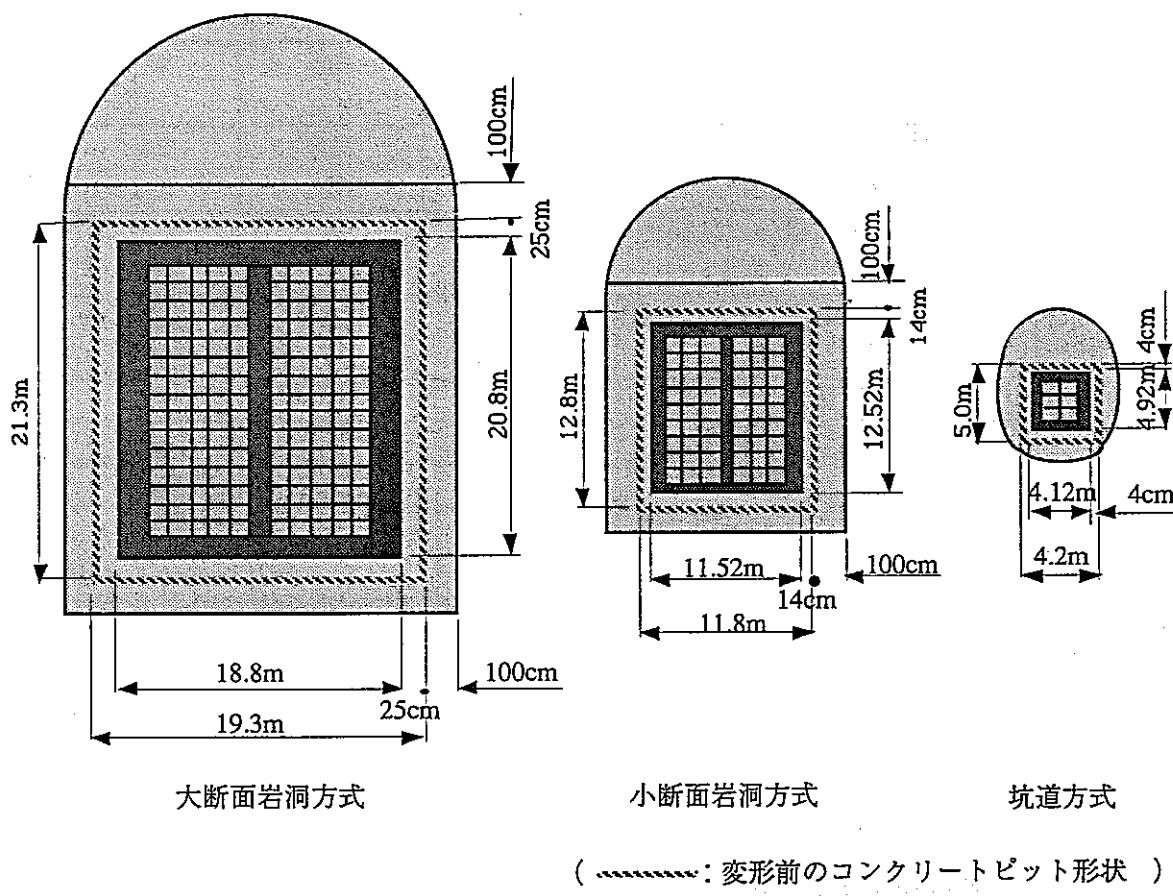


図-1.1.23 変形概念図（廃棄体空隙率 30% の場合）  
(形状寸法の設定は(5)において述べる)

②廃棄体及びセメント系材料の体積変化を考慮した場合

変形量の算定結果を、表-1.1.23 に示す。またその時の変形概念図を図-1.1.24 に示す。

表-1.1.23 コンクリート部分のセメント成分溶出を考慮した変形量

	大断面岩洞	小断面岩洞	坑道
キャニスター体積(m <sup>3</sup> )	0.15 ( $\phi$ 43cm × H 104cm)		
コンテナ個数 (1断面当たり)	150	54	6
廃棄体個数及び体積(m <sup>3</sup> ) (1断面当たり)	600 90.0	216 32.4	24 3.6
コンクリート部分総体積(m <sup>3</sup> /1断面) (コンクリートピット含む)	620.7	228.1	31.7
コンクリート部分総体積(m <sup>3</sup> /1断面) (廃棄体体積除く)	530.7	195.7	28.1
空隙量(m <sup>3</sup> )	106.6	39.1	5.3
換算空隙率(%)	17.2	17.1	16.7
変形量(cm)	180.0	110.0	40.0

\* : 奥行き 1.51m (コンテナ 1列分)

※ : 換算空隙率 (%) = (空隙量 / コンクリート部分総体積) × 100

\*\* : 変形量は水平方向変位、鉛直方向変位それぞれの合計を示す。

この結果から表-1.1.22 の廃棄体空隙率 30%よりも変形量は大幅に増加することがわかる。

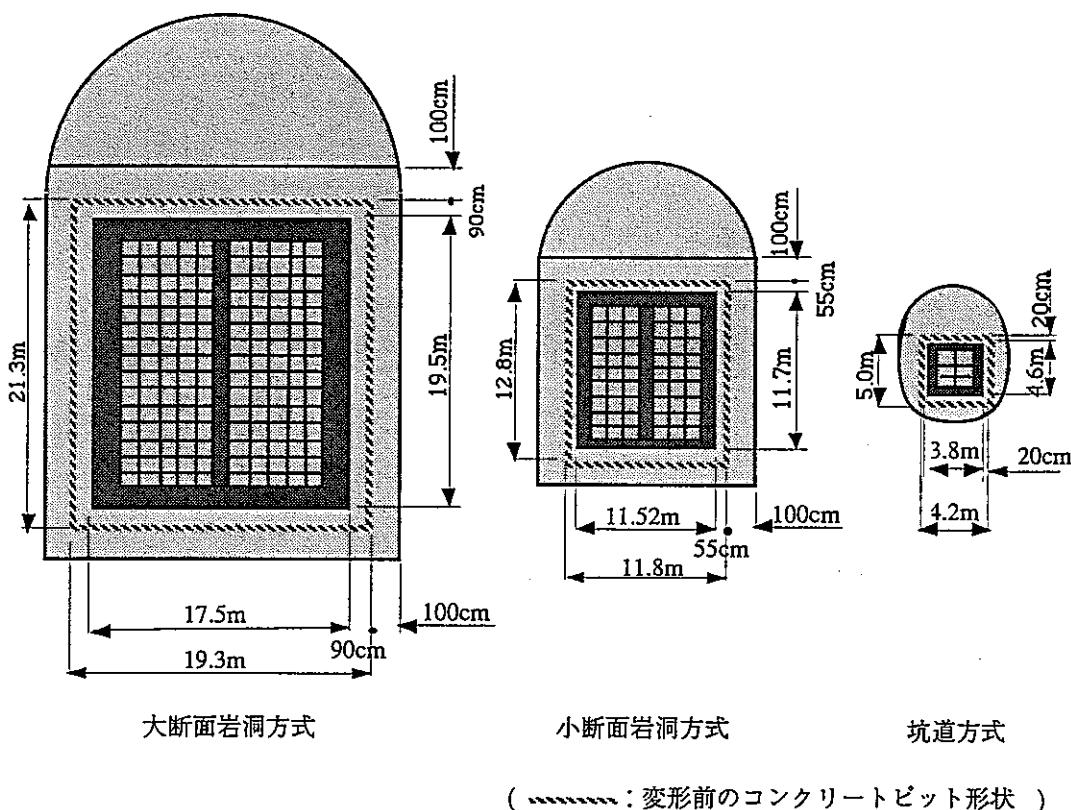


図-1.1.24 変形概念図 (セメント系材料の体積変化を考慮した場合)

### (ii) 変形によるペントナイトの密度変化

ペントナイトは膨潤現象により廃棄体やコンクリートの体積変化分だけ膨張变形すると考えられる。したがって、ペントナイトの密度が変化し、ペントナイトの要求性能が低下する可能性がある。そこで変形後のペントナイトの乾燥密度を以下の方法で概略算定する。

$$\text{変形後のペントナイトの乾燥密度} = \frac{\text{ペントナイト厚さ}}{\text{ペントナイト厚さ} + \text{変形量}/2} \times 1.8(\text{tf/m}^3)$$

表-1.1.22 の結果を基にしたペントナイト密度の算定結果を表-1.1.24 に示す。

表-1.1.24 変形後のペントナイトの密度

		大断面岩洞方式	小断面岩洞方式	坑道方式
廃棄体空隙率	変形量/2(cm)	37.5	22.3	6.6
50%	乾燥密度(tf/m <sup>3</sup> )	1.30	1.47	1.69
廃棄体空隙率	変形量/2(cm)	29.9	17.7	5.3
40%	乾燥密度(tf/m <sup>3</sup> )	1.39	1.53	1.71
廃棄体空隙率	変形量/2(cm)	22.3	13.3	4.0
30%	乾燥密度(tf/m <sup>3</sup> )	1.47	1.59	1.73
廃棄体空隙率	変形量/2(cm)	14.8	8.8	2.6
20%	乾燥密度(tf/m <sup>3</sup> )	1.57	1.65	1.75
廃棄体空隙率	変形量/2(cm)	11.1	6.6	2.0
15%	乾燥密度(tf/m <sup>3</sup> )	1.62	1.69	1.77

表-1.1.24 に示したように、ペントナイトが変形することにより乾燥密度は、1.3～1.7(tf/m<sup>3</sup>)程度になることがわかった。

### (iii) ペントナイトの密度と透水係数の関係

ペントナイトが変形することにより透水係数が変化する。透水係数の大きさによっては人工バリアとしての要求性能が保持できない場合がある。そこで実験により求められたペントナイトの乾燥密度と透水係数の関係を参考にして、表-1.1.24 に示した概略算定によって求めた乾燥密度での透水係数の概略値を見る。

図-1.1.25 にペントナイトの乾燥密度と透水係数の関係のグラフを示す。このグラフより密度が 1.8(tf/m<sup>3</sup>)から 1.3～1.7(tf/m<sup>3</sup>)に変化することにより、透水係数は 1～2 オーダー大きくなることがわかる。したがって、この増加量を安全評価に見込む必要がある。

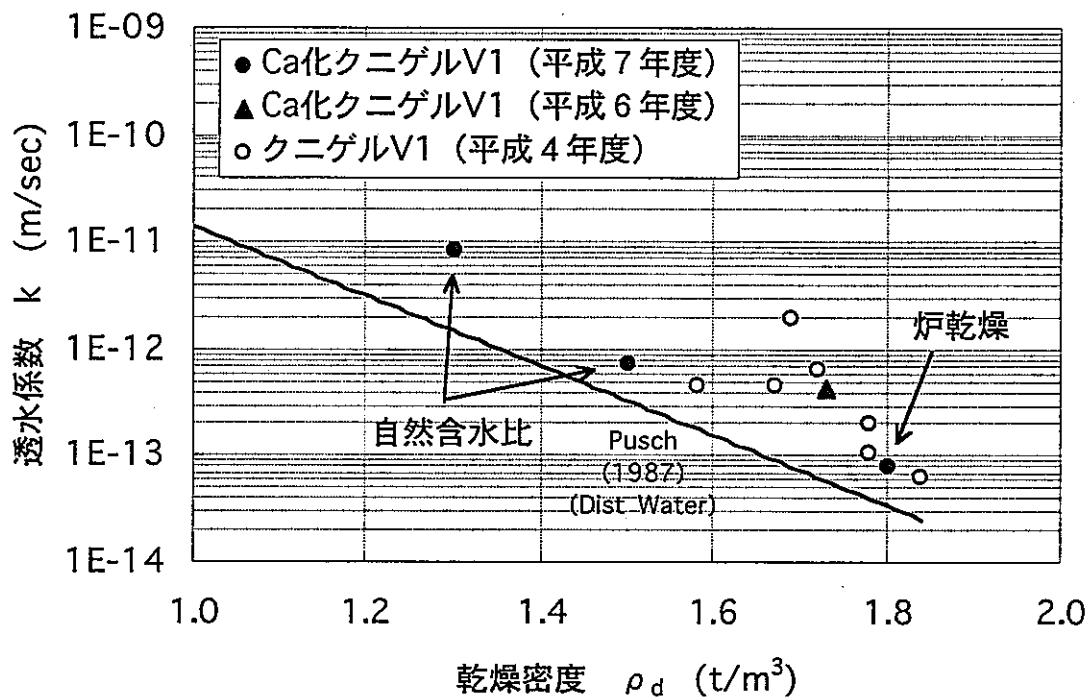


図-1.1.25 乾燥密度と透水係数の関係

## (5) 処分場コンセプト

(3)及び(4)の結果から、廃棄体発熱による人工バリア（ペントナイト）の温度上昇や廃棄体体積変化と処分空洞規模には、表-1.1.25に示す関係があることが定量的に確認できた。

表-1.1.25 空洞規模と温度・変形

	坑道 ← → 大断面岩洞
	小 ← 処分空洞面積 → 大
	小 ← 廃棄物処分量（断面あたり） → 大
人工バリアの温度上昇	低 ← → 高
人工バリアの変形	小 ← → 大

すなわち、空洞規模が大きくなれば（処分空洞面積が大）、人工バリアの温度上昇は大きく、また人工バリアの変形も大きくなる。このような結果を念頭に処分コンセプト構築上の基本的考え方を整理すると次のようになる。

- イ. 廃棄体定置において、発熱性の廃棄体（ハル・エンドピース圧縮固化体）、体積変化が大きい廃棄体（ハル・エンドピース圧縮固化体、アスファルト固化体）、その他の廃棄体（溶融固化体、プラスチック固化体等）を一様に分散させて配置し、人工バリアの平均的な温度上昇や変形量を許容値以内に抑えるという考え方。
- ロ. 発熱性を有する固化体やアスファルト固化体のように体積変化しやすいと考えられる廃棄体は坑道型処分場へ、溶融固化体のように発熱がなく、体積変化がほとんどない固化体は岩洞型の処分場へ処分するという考え方。

上記イとロの廃棄体定置方式について定性的な比較を行った。表-1.1.26に比較表を示す。ここではイの方式を分散方式、ロの方式を分離方式と表記した。

表-1.1.26 廃棄体定置方式の比較

	分散方式	分別方式
概要	廃棄体定置において、発熱量・体積変化が大きい廃棄体（圧縮固化体・アスファルト固化体）とその他の廃棄体（溶融固化体・プラスチック固化体等）を一様に分散させて配置し、人工バリアの温度上昇を許容値以内に抑える。また、平均的な変形量を許容値以内に抑えるという考え方。	発熱量・体積変化が大きい廃棄体と、他の廃棄体を分離し、別々の処分空洞に処分する考え方。
処分パネル	処分パネル内は全て同じ方式の処分空洞となる。	一つの処分パネル内に、発熱量・体積変化が大きい廃棄体を処分する処分空洞と、他の廃棄体を処分する処分空洞の2種類の処分空洞が存在する可能性がある。
廃棄体定置	閉鎖後のベントナイトの温度及び変形が許容値以内におさまるような廃棄体搬入計画（例えば中間貯蔵）及び廃棄体定置方法をとる必要がある。	発熱量・体積変化が大きい廃棄体とその他の廃棄体を分けて処分するため、どちらの廃棄体でも即座に処分空洞内に搬入させることができる。
処分空洞の形状	現在計画している空洞形状で対応が可能である。	発熱量・体積変化の大きい廃棄体とその他の廃棄体の搬入スケジュールによっては、処分空洞の規模及び形状が処分パネルによって異なる可能性がある。
廃棄体コンテナ	廃棄体コンテナを、ドラム缶・キャニスター共に収納可能な形状にすることによる定置作業の合理化が図れる。	廃棄体コンテナは、ドラム缶・キャニスター共に収納可能な形状でも問題はないと考えられるが、それぞれの形状に合わせた廃棄体コンテナの形状を設定する。

上表中に示されている処分パネル・廃棄体コンテナの概念については後述する。

イ.ロ.のいずれの場合も成立性について解析的・実験的・実証的な検討が必要であるが、本研究では、

- ・発熱性廃棄体と非発熱性廃棄体を混在させて処分すれば、小断面岩洞方式では人工バリアの温度上昇を100°C以下にすることが可能との見通しを得たが、大断面岩洞方式では発熱性廃棄物の処分は困難であることが考えられる。また、坑道方式では発熱性廃棄体のみを処分しても人工バリアの温度上昇は100°C以下におさまることが確認できた。

- ・廃棄体の体積減少に伴う人工バリアの止水性能は、処分空洞の大きさを適切に設定すれば確保可能との見通しを得た。
- ・分散処分するためには各廃棄体の定形化コンテナ化が必須であり、これにより定置作業の合理化が図れる。

以上より、イの方式を中心に以下の検討を進める。

### (a) 処分空洞の断面形状

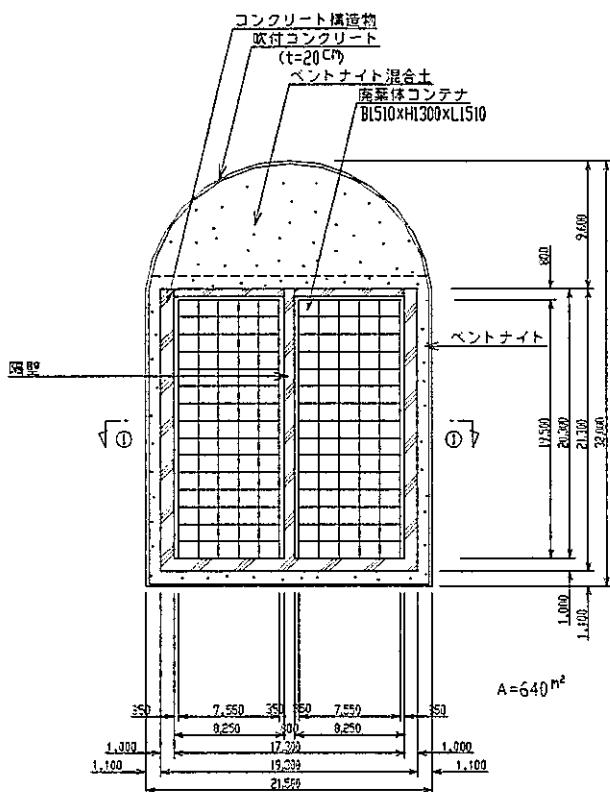
(2)にて設定、比較を行った4タイプの処分空洞形式について、それぞれの具体的な断面形状を設定する。

#### (i) 断面形状の設定

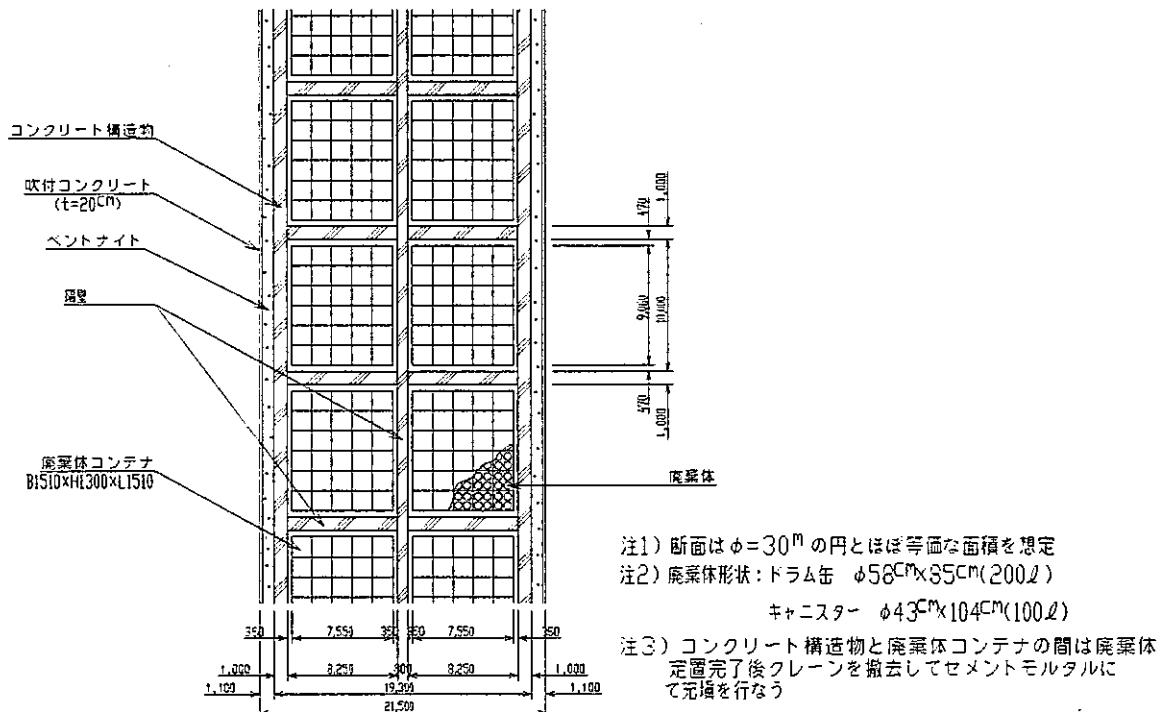
以下に断面形状を設定するための条件を示す。

- ・処分空洞形状は、過去の地下発電所などの施工実績を参考にして設定を行う。
- ・処分空洞の断面の大きさは、弾塑性理論解析で求めた掘削可能最大径の面積に相当する断面積を持つ大きさとする。
- ・処分空洞内的人工バリアの構造はベントナイト、コンクリート（セメントモルタル）によることとする。なお、人工バリアの概念や構造についての詳細は「1.1.2 人工バリアの基本概念」にて前述した。
- ・処分空洞内には廃棄体の定置のためにコンクリートピットを構築することとし、その部材厚は構造的安定性より求める。なお、この概略検討については「(ii) コンクリート構造物の側壁部材厚の概略検討」に示す。
- ・廃棄体（ドラム缶、キャニスター）は、ハンドリングや搬送・定置作業の安全性と効率性から廃棄体コンテナに格納させる。廃棄体コンテナとは、コンクリート製の箱状のものである。廃棄体ドラム缶もしくは廃棄体キャニスターを、重量・エレベーター仕様・作業効率等の観点から4本一組をコンテナ内に格納し、搬送、定置する。廃棄体コンテナの形状は幅1.51m,長さ1.51m,高さ1.8mとする。なお廃棄体コンテナの形状設定等の詳細については「1.1.3.3 操業計画」にて後述する。
- ・処分空洞内に定置する廃棄体コンテナの数量は、図-1.1.15に示したように、掘削可能径の円内(30m, 20m, 10m)にベントナイト厚及び吹付コンクリート厚を合わせた1.5mを確保し、コンクリートピット（矩形）の部材厚を50cmとした場合に入る廃棄体コンテナの数量とする。

以上の条件で設定した大断面岩洞方式、小断面岩洞方式、坑道方式、サイロ方式の断面形状図及び、表-1.1.13 及び表-1.1.14に示した弾塑性理論解析結果から設定した支保工図（代表断面）について図-1.1.26～1.1.29に示す。



## 断面図



### 平面図 (①-①断面)

図-1.1.26 ① 大断面岩洞方式 断面形状図

結晶質岩系岩盤A, 深度700mの場合

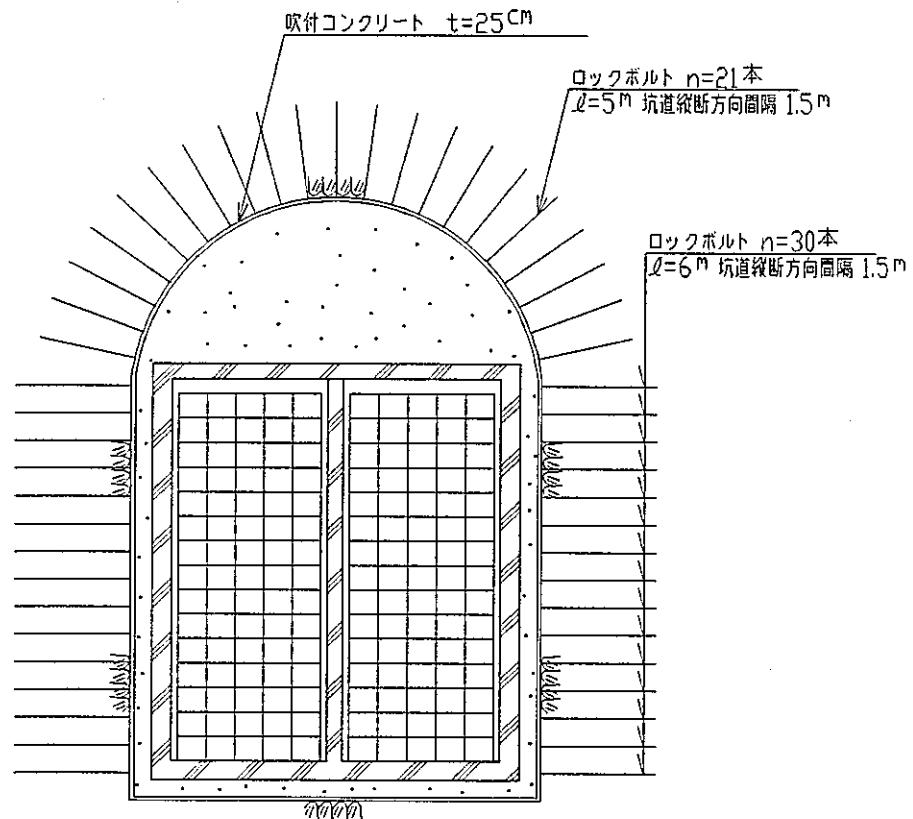
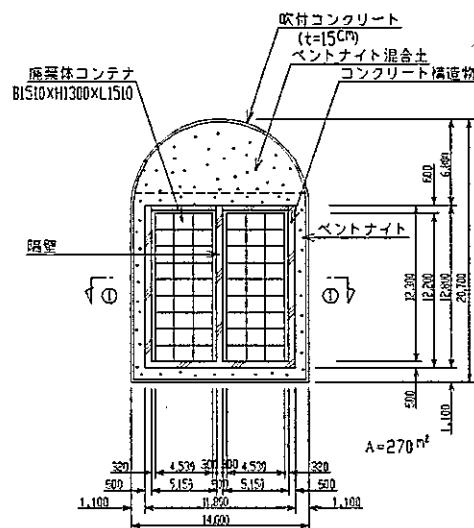
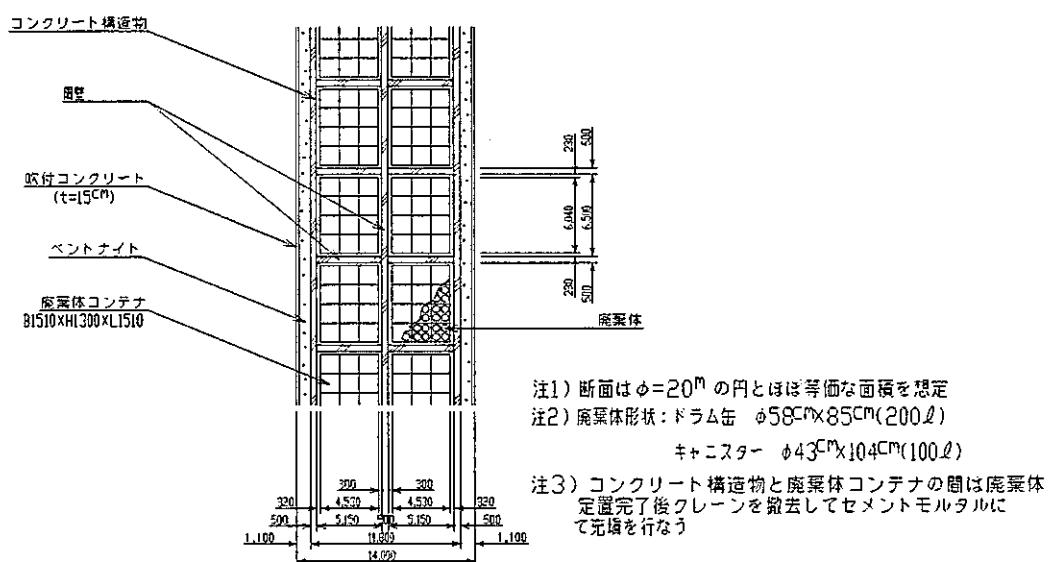


図-1.1.26 ② 大断面岩洞方式 支保工図



断面図



平面図 (①-①断面)

図-1.1.27 ① 小断面岩洞方式 断面形状図

堆積岩系岩盤A、深度300mの場合

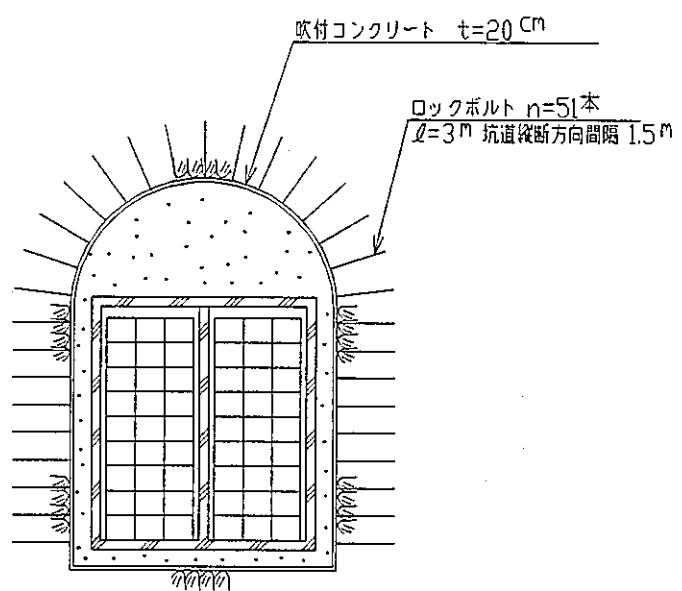
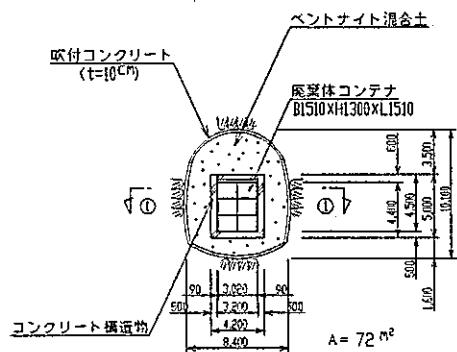
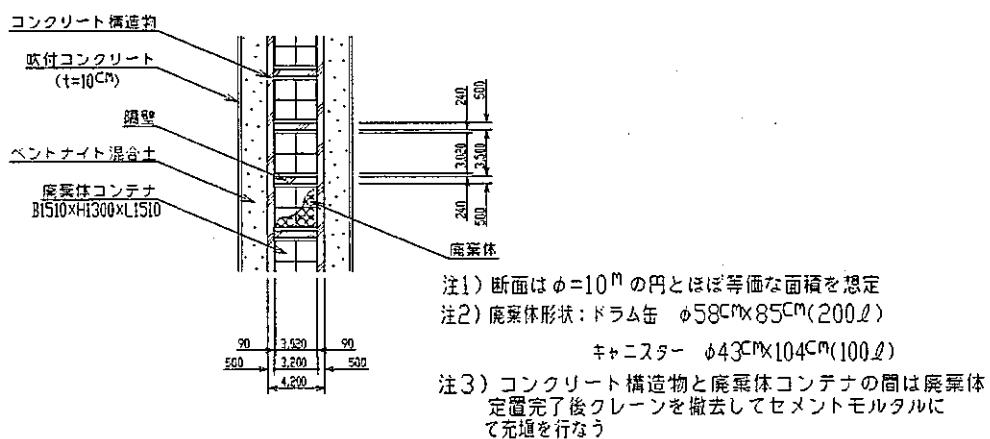


図-1.1.27 ② 小断面岩洞方式 支保工図



断面図



平面図 (①-①断面)

図-1.1.28 ① 坑道方式 断面形状図

結晶質岩系岩盤B、深度700mの場合

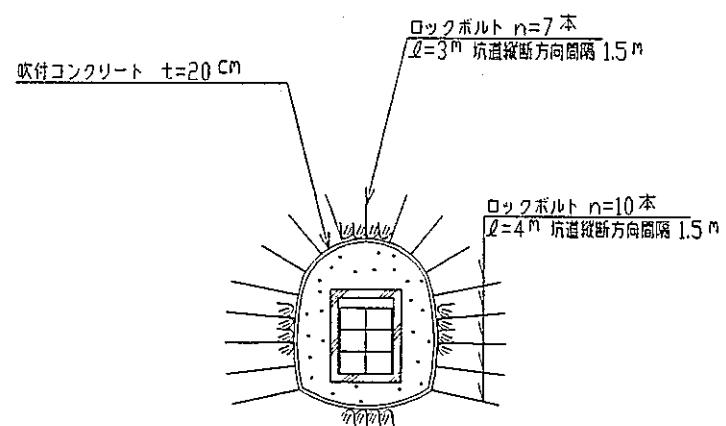
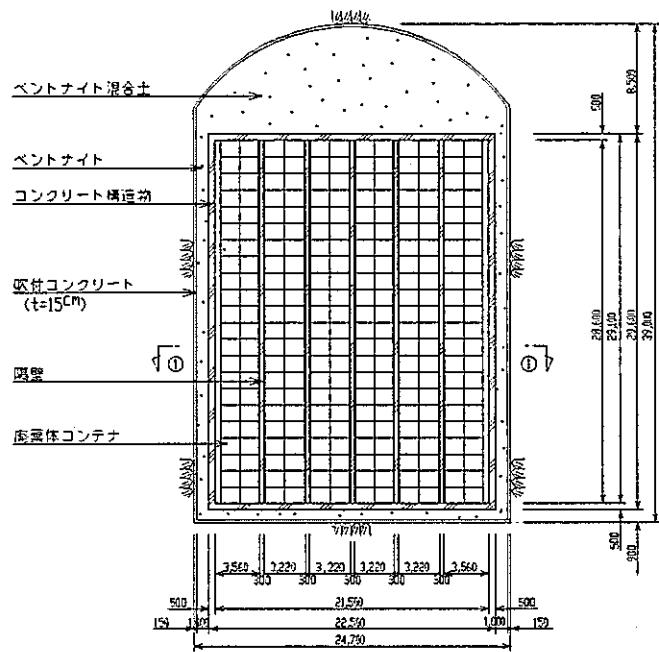
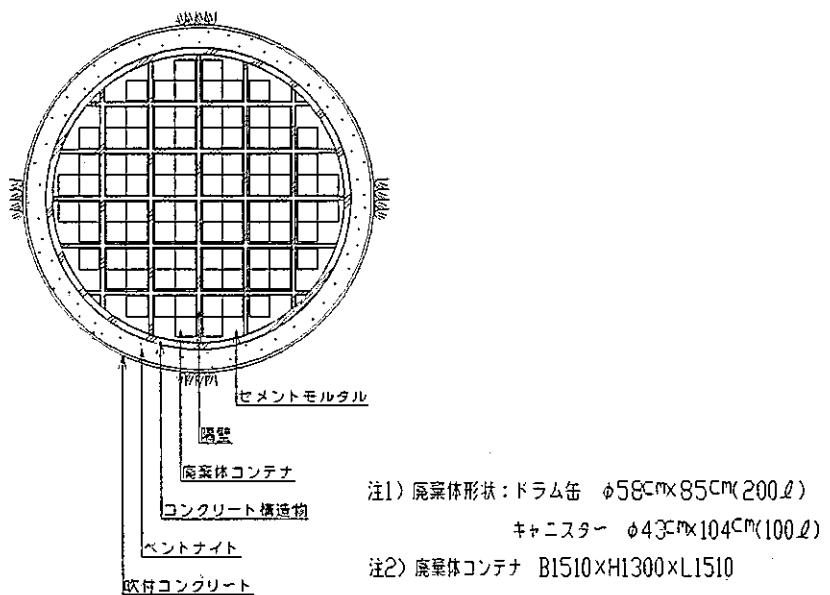


図-1.1.28 ② 坑道方式 支保工図



断面図



平面図 (①-①断面)

図-1.1.29 ① サイロ方式 断面形状図

結晶質岩系岩盤A, 深度700mの場合

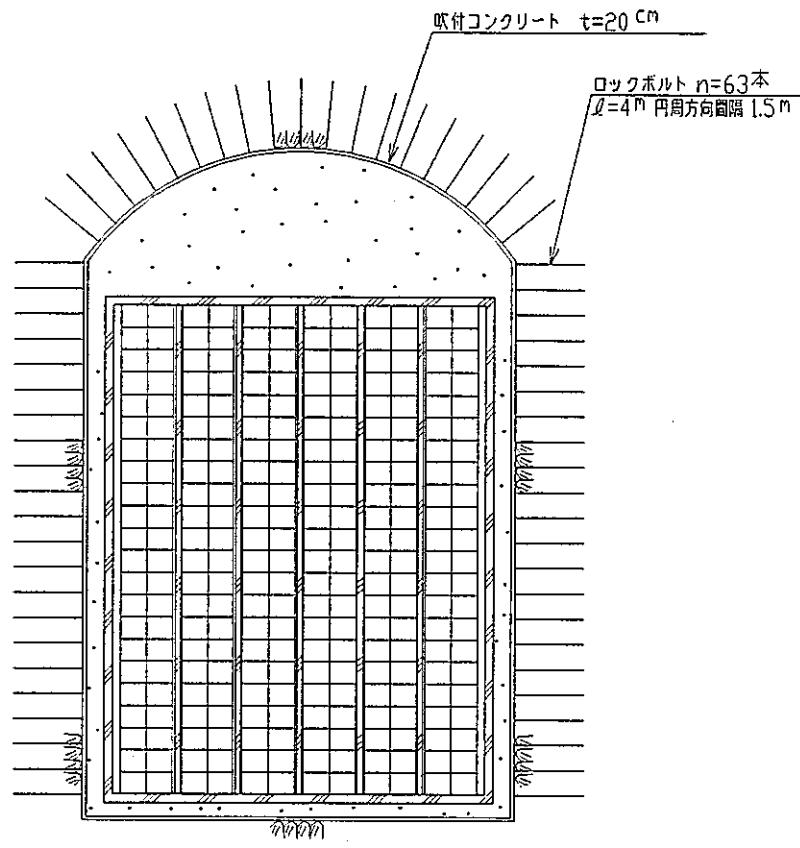


図-1.1.29 ② サイロ方式 支保工図

## (ii) コンクリート構造物の側壁部材厚の概略検討

廃棄物処分施設として岩盤中に掘削された岩洞・坑道および大断面空洞（サイロ）には、廃棄体定置のためにコンクリート構造物（ピット）を構築する。そこで、コンクリートピットの構造的安定性及び側壁部材厚についての検討を行う。

### ① 検討条件

#### ア. 検討対象断面

検討対象断面は、岩洞方式の大断面岩洞方式 ( $\phi=30m$  相当)、小断面岩洞方式 ( $\phi=20m$  相当) 及び坑道方式 ( $\phi=10m$  相当) について検討する。このときコンクリートピットの側壁高さはそれぞれ 20m, 13m, 5m 程度となる。また岩洞・坑道縦断方向には隔壁を設置する。これはコンクリートピットの構造的安定性と廃棄体定置のために設置するものである。隔壁間隔は、大断面岩洞方式は 10m、小断面岩洞方式は 6.5m、坑道方式は 3.5m として検討を行う。

検討は「コンクリート標準示方書（土木学会）平成 3 年度版」に基づいて行うものとする。

#### イ. 単位体積重量

水 :  $\gamma_w = 1.0 \text{tf/m}^3$

ベントナイト混合土 :  $\gamma = 1.8 \text{tf/m}^3$

#### ウ. 材料

##### a) コンクリート

弹性係数 :  $E_c = 1.4 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$

設計基準強度 :  $f_{c,k} = 240 \text{kgf/cm}^2$

##### b) 鉄筋

弹性係数 :  $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$

鉄筋は SD295 を使用

##### c) 許容応力度

コンクリート :  $\sigma_{c,a} = 90 \text{kgf/cm}^2$

鉄筋 :  $\sigma_{s,a} = 1,800 \text{kgf/cm}^2$

#### エ. 設置深度

300m と 700m の 2 ケースとする。なお概略検討のため、それぞれの深度は底版上面の深度とする。

### ② 荷重

荷重については、コンクリートピットに荷重が作用する以下の 2 ケースについて考える。

- 閉鎖完了後、地下水の再冠水によってコンクリートピット側壁に水圧が作用する場合
- 建設時の側部ベントナイト施工時に、ベントナイト土圧がコンクリートピット側壁に作用する場合

なお、ベントナイト土圧作用時の側圧係数は、砂質土、粘性土の一般的な値として「道路橋示方書・同解説（日本道路協会）」に示されている 0.5 程度を考える。

### ③検討モデル

コンクリートピットには、空洞縦断方向に隔壁を設置する。したがって、検討は側壁を3辺固定1辺自由版にモデル化することによって行う。図-1.1.30及び図-1.1.31にノモグラムを示す。<sup>16)</sup> 図-1.1.30及び図-1.1.31より側壁に発生する最大モーメントを求め、許容応力度設計法により鉄筋及びコンクリートの応力度を求め、複鉄筋断面としてそれぞれの許容応力度以下であることを検討し、部材の応力度を照査する。

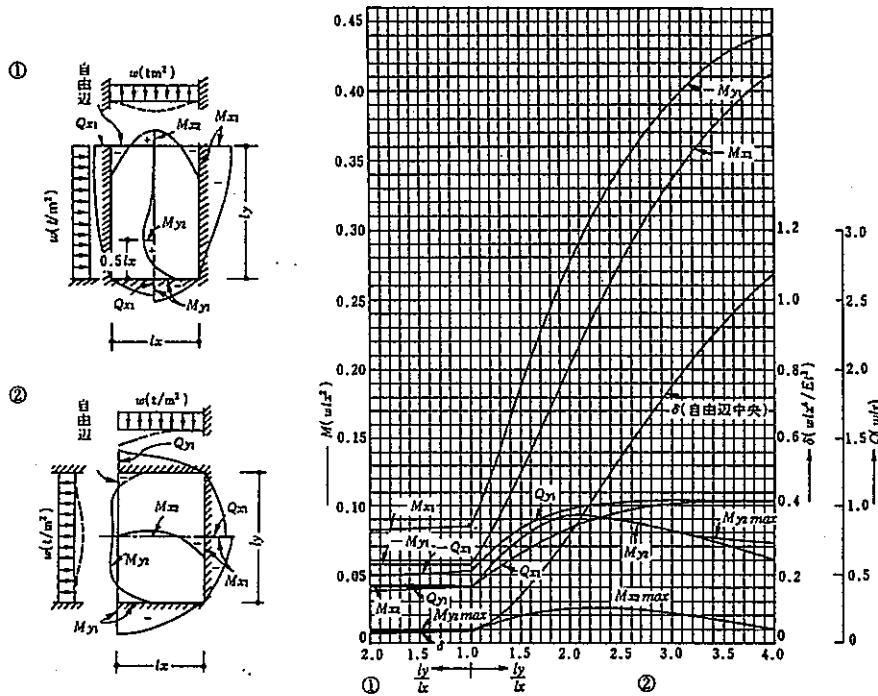


図-1.1.30 等分布荷重時3辺固定1辺自由スラブの応力図と自由辺のたわみ<sup>16)</sup>

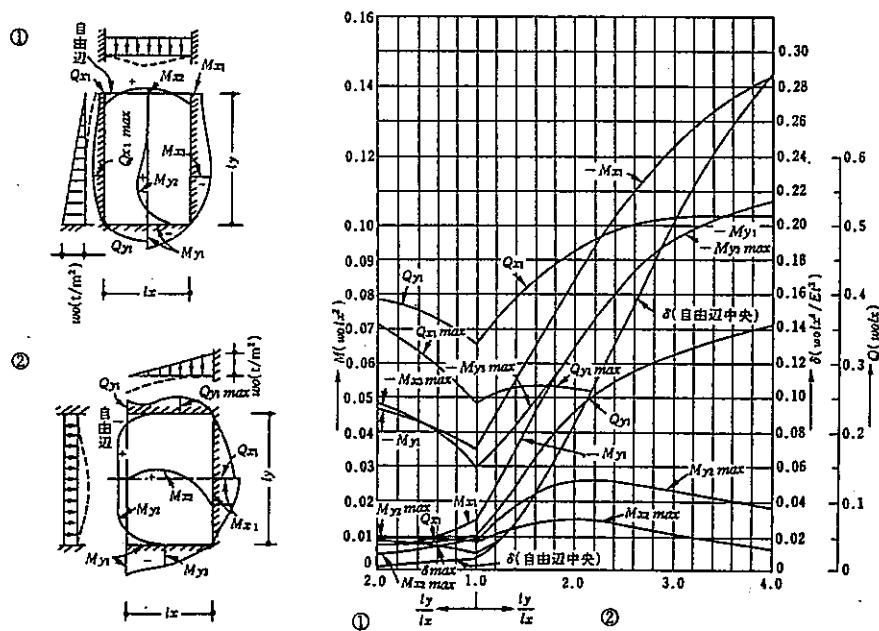


図-1.1.31 等変分布荷重時3辺固定1辺自由スラブの応力図と自由辺のたわみ<sup>16)</sup>

#### ④検討結果

以下に各ケースごとの検討結果について示す。

##### ア. 水圧が作用する場合

###### a) 設置深度 300m、大断面岩洞方式の場合

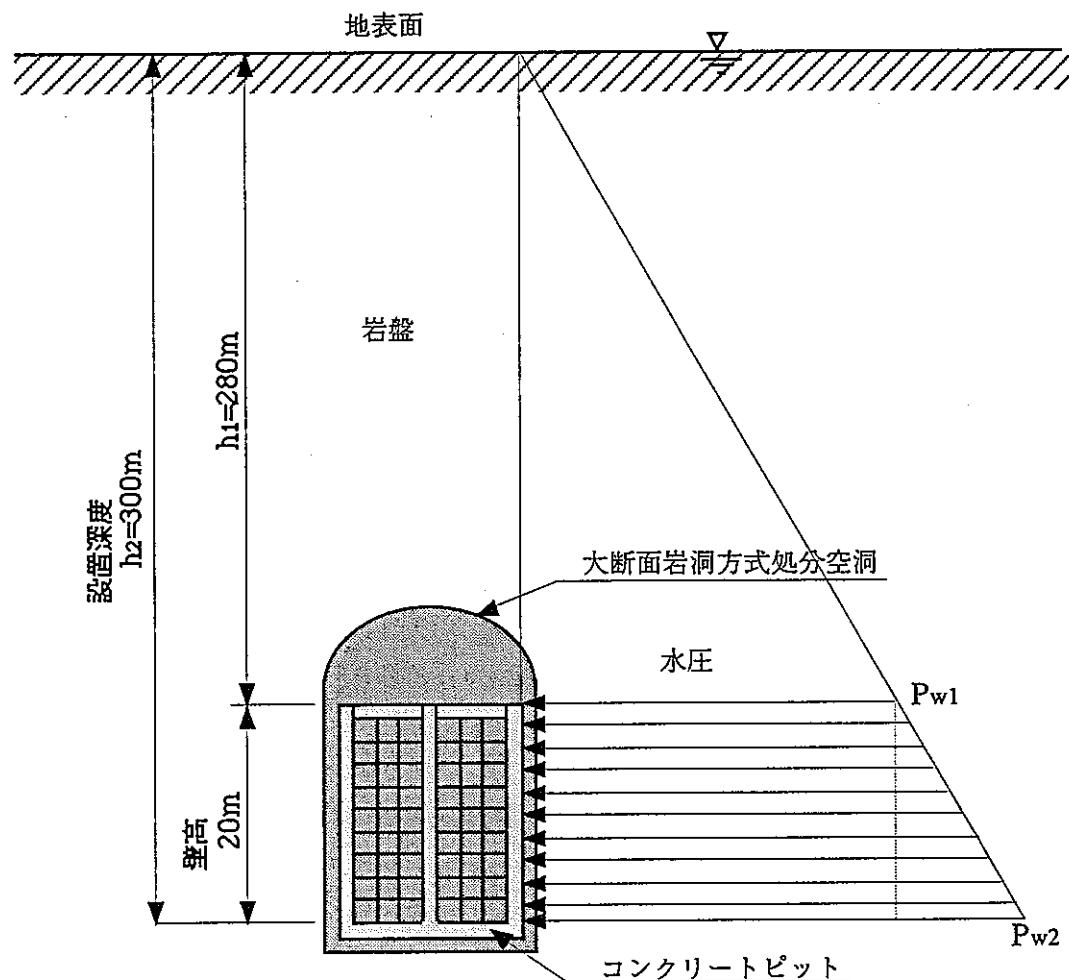


図-1.1.32 荷重図（水圧作用：大断面岩洞方式）

$$P_{w1} = \gamma_w \cdot h_1 = 1.0 \times 280 = 280 \text{ tf/m}^2$$

$$P_{w2} = \gamma_w \cdot h_2 = 1.0 \times 300 = 300 \text{ tf/m}^2$$

図-1.1.30 及び図-1.1.31 より、側壁に発生するモーメントの最大値は、

$$\begin{aligned} M_{max} &= 0.082 \times 280 \times 10^2 + 0.048 \times (300-280) \times 10^2 \\ &= 2,392 \text{ tf} \cdot \text{m/m} \end{aligned}$$

図-1.1.33 に示すように壁厚を 5m、鉄筋を引張側、圧縮側共に 10-D29 (D29 の鉄筋を 1m あたり 10 本) を配置し、鉄筋のかぶりを 5cm とした場合で  $M_{max}$  が作用したときの応力度照査を行うと、

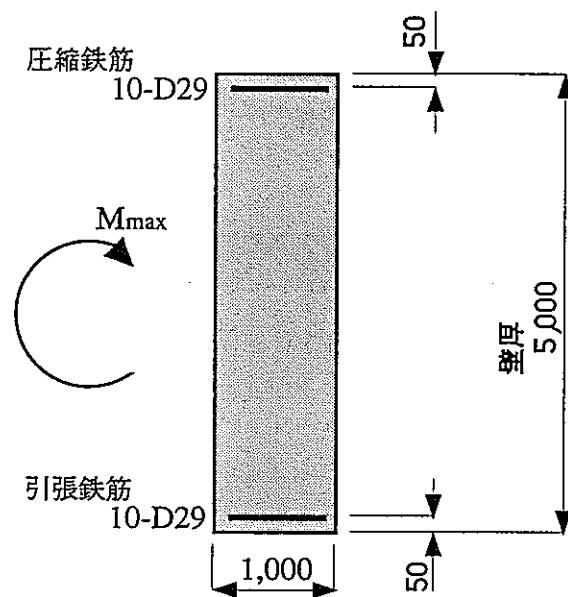


図-1.1.33 応力度照査用断面図（水圧作用：大断面岩洞方式）

コンクリートの圧縮応力度

$$\sigma_c = 103 \text{kgf/cm}^2 > \sigma_{c,a} = 90 \text{kgf/cm}^2 \quad \text{NG}$$

鉄筋の引張応力度

$$\sigma_s = 7,887 \text{kgf/cm}^2 > \sigma_{s,a} = 1,800 \text{kgf/cm}^2 \quad \text{NG}$$

となる。また壁厚を 10m とし鉄筋量を引張側、圧縮側共に 10-D35（かぶり 10cm）を入れた場合で  $M_{max}$  が作用したときには、

コンクリートの圧縮応力度

$$\sigma_c = 30 \text{kgf/cm}^2 < \sigma_{c,a} = 90 \text{kgf/cm}^2 \quad \text{OK}$$

鉄筋の引張応力度

$$\sigma_s = 2,637 \text{kgf/cm}^2 > \sigma_{s,a} = 1,800 \text{kgf/cm}^2 \quad \text{NG}$$

となり両者とも許容応力度を大きく上回ってしまう。したがって設計として成り立たない。

b) 設置深度 300m、坑道方式の場合

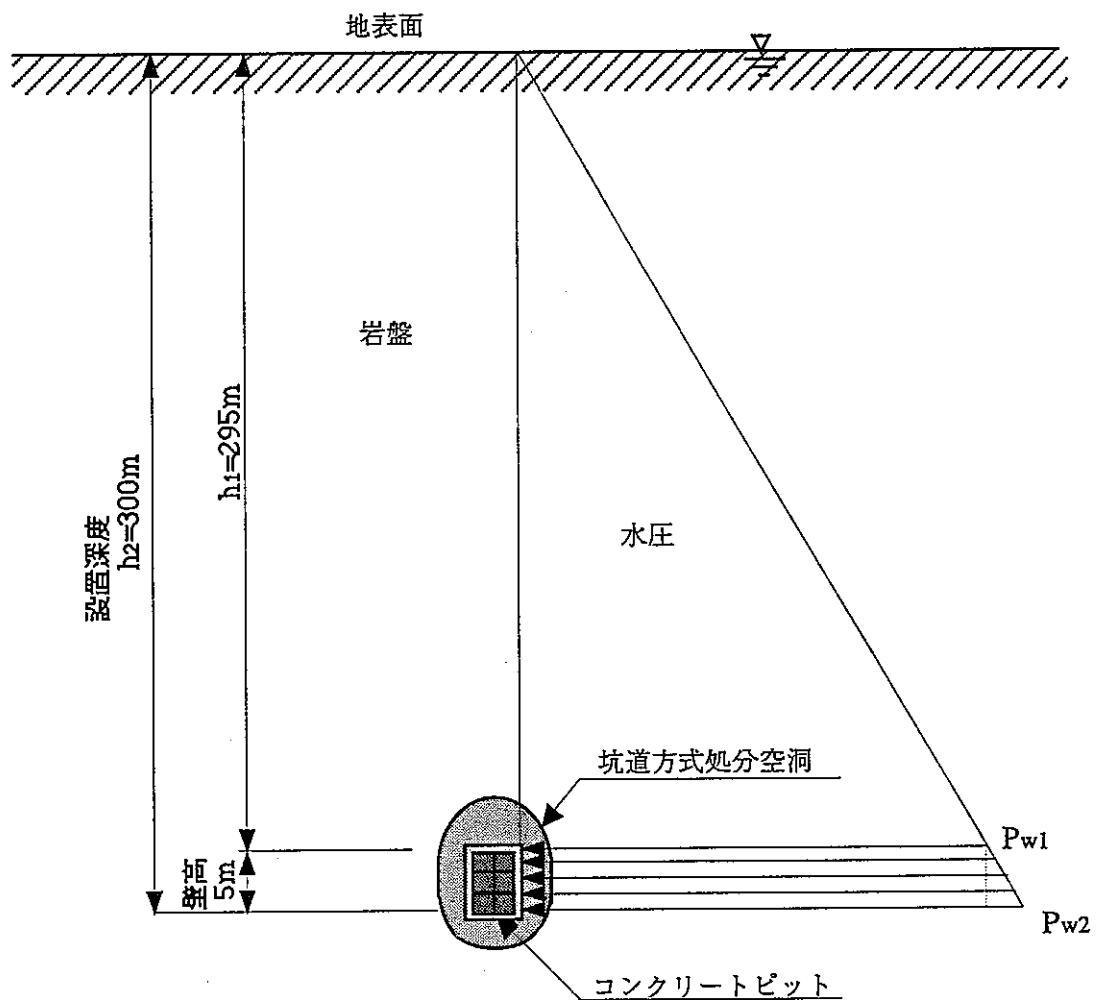


図-1.1.34 荷重図（水圧作用：坑道方式）

$$P_{w1} = \gamma_w \cdot h_1 = 1.0 \times 295 = 295 \text{tf/m}^2$$

$$P_{w2} = \gamma_w \cdot h_2 = 1.0 \times 300 = 300 \text{tf/m}^2$$

図-1.1.30 及び図-1.1.31 より、側壁に発生するモーメントの最大値は、

$$\begin{aligned} M_{max} &= 0.084 \times 295 \times 3.5^2 + 0.041 \times (300 - 295) \times 3.5^2 \\ &= 306 \text{tf}\cdot\text{m/m} \end{aligned}$$

図-1.1.35 に示すように壁厚を 2m、鉄筋を引張側、圧縮側共に 10-D29 を配置し、鉄筋のかぶりを 5cm とした場合で  $M_{max}$  が作用したときの応力度照査を行うと、

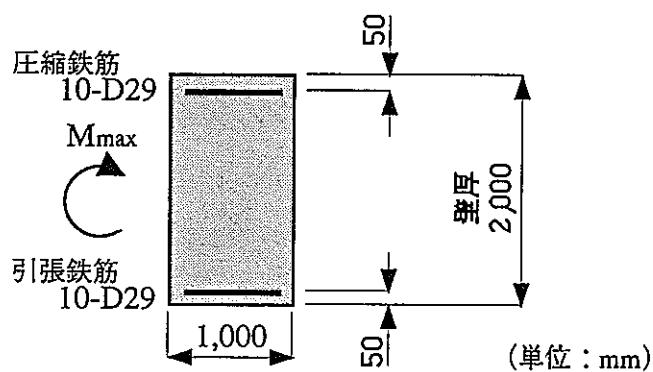


図-1.1.35 応力度照査用断面図（水圧作用：坑道方式）

コンクリートの圧縮応力度

$$\sigma_c = 53 \text{kgf/cm}^2 < \sigma_{c,a} = 90 \text{kgf/cm}^2 \quad \text{OK}$$

鉄筋の引張応力度

$$\sigma_s = 2,609 \text{kgf/cm}^2 > \sigma_{s,a} = 1,800 \text{kgf/cm}^2 \quad \text{NG}$$

となり、大断面岩洞方式同様、許容応力度を上回るため設計として成り立たない。

c) 中断面岩洞方式及び設置深度 700m の場合

a), b)と同様、設計として成り立たないため、ここでは記述を省略する。

#### イ. ベントナイト土圧が作用する場合

この場合は、岩洞・坑道内に構築されたコンクリートピットと岩盤との間にベントナイトを充填したときの荷重のみを作用させる。したがってコンクリートピットの部材厚は、設置深度と関係なく一定となる。

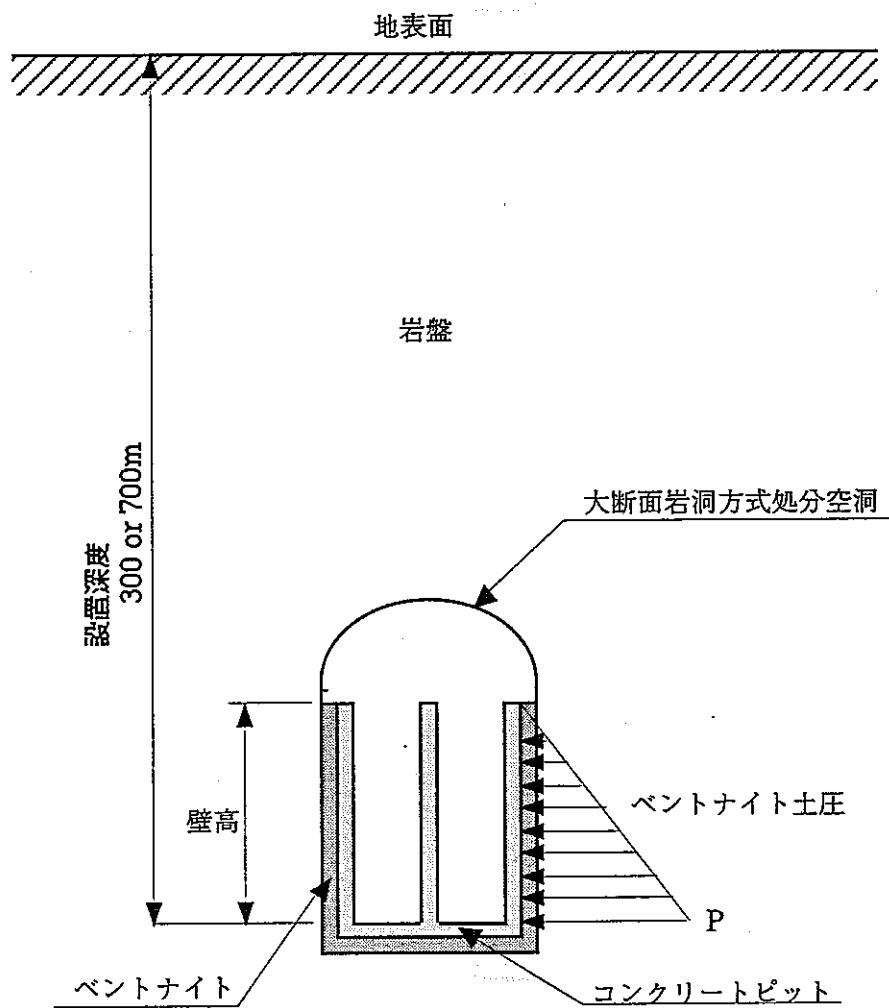


図-1.1.36 荷重図（ベントナイト土圧作用）

#### a) 大断面岩洞方式の場合（壁高 $h = 20m$ ）

$$P = K_0 \cdot \gamma \cdot h = 0.5 \times 1.8 \times 20 = 18.0 \text{tf/m}^2$$

図-1.1.31より、側壁に発生するモーメントの最大値は、

$$M_{max} = 0.048 \times 18 \times 10^2 = 86.4 \text{tf}\cdot\text{m}/\text{m}$$

図-1.1.37に示すように壁厚を1m、鉄筋を引張側、圧縮側共に10-D29を配置し、鉄筋のかぶりを5cmとした場合で  $M_{max}$  が作用したときの応力度照査を行うと、

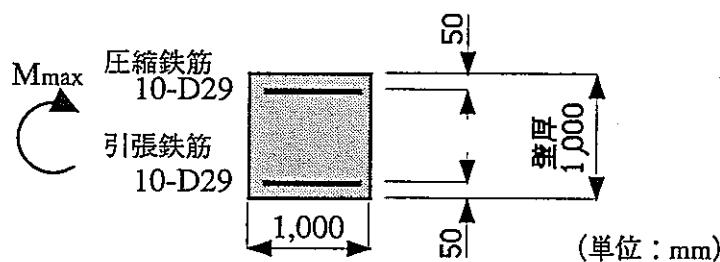


図-1.1.37 応力度照査用断面図（ベントナイト土圧：大断面岩洞方式）

コンクリートの圧縮応力度

$$\sigma_c = 45 \text{kgf/cm}^2 < \sigma_{c,a} = 90 \text{kgf/cm}^2 \quad \text{OK}$$

鉄筋の引張応力度

$$\sigma_s = 1,545 \text{kgf/cm}^2 < \sigma_{s,a} = 1,800 \text{kgf/cm}^2 \quad \text{OK}$$

となり許容値以内におさまる。

b) 小断面岩洞方式の場合（壁高 h=13m）

$$P = K_0 \cdot \gamma \cdot h = 0.5 \times 1.8 \times 13 = 11.7 \text{tf/m}^2$$

図-1.1.31より、側壁に発生するモーメントの最大値は、

$$M_{max} = 0.048 \times 11.7 \times 6.5^2 = 23.7 \text{tf}\cdot\text{m/m}$$

図-1.1.38に示すように壁厚を50cm、鉄筋を引張側、圧縮側共に8-D25を配置し、鉄筋のかぶりを5cmとした場合で  $M_{max}$  が作用したときの応力度照査を行うと、

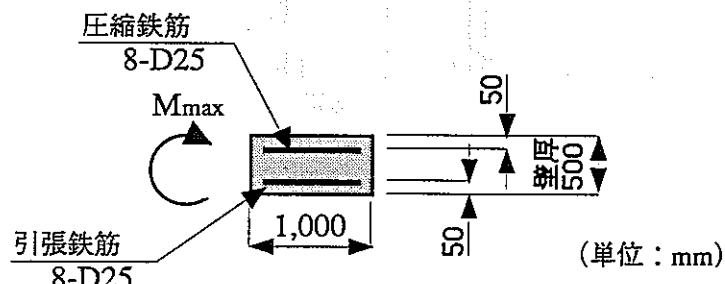


図-1.1.38 応力度照査用断面図（ベントナイト土圧：小断面岩洞方式）

コンクリートの圧縮応力度

$$\sigma_c = 50 \text{kgf/cm}^2 < \sigma_{c,a} = 90 \text{kgf/cm}^2 \quad \text{OK}$$

鉄筋の引張応力度

$$\sigma_s = 1,464 \text{kgf/cm}^2 < \sigma_{s,a} = 1,800 \text{kgf/cm}^2 \quad \text{OK}$$

となり、許容値以内におさまる。

c) 坑道方式の場合 (壁高  $h = 5m$ )

$$P = K_0 \cdot \gamma \cdot h = 0.5 \times 1.8 \times 5 = 4.5 \text{tf/m}^2$$

図-1.1.31より、側壁に発生するモーメントの最大値は、

$$M_{\max} = 0.041 \times 4.5 \times 3.5^2 = 2.3 \text{tf}\cdot\text{m}/\text{m}$$

図-1.1.39に示すように壁厚を50cm、鉄筋を引張側、圧縮側共に5-D13を配置し、鉄筋のかぶりを5cmとした場合で  $M_{\max}$  が作用したときの応力度照査を行うと、

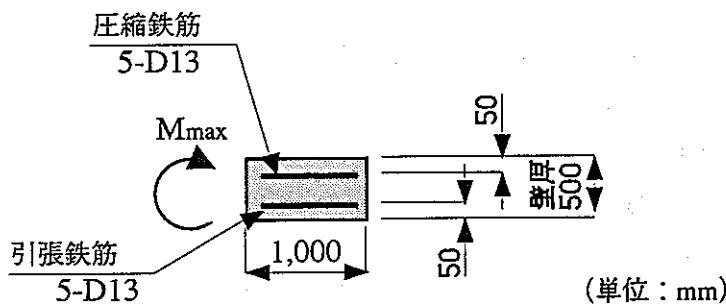


図-1.1.39 応力度照査用断面図 (ペントナイト土圧: 坑道方式)

コンクリートの圧縮応力度

$$\sigma_c = 12 \text{kgf/cm}^2 < \sigma_{c,a} = 90 \text{kgf/cm}^2 \quad \text{OK}$$

鉄筋の引張応力度

$$\sigma_s = 862 \text{kgf/cm}^2 < \sigma_{s,a} = 1,800 \text{kgf/cm}^2 \quad \text{OK}$$

となり、許容値以内におさまる。

以上より、本検討では、

- ・コンクリートピットに水圧が作用した場合には設計として成り立たないことから、長期的な力学的強度は期待しない。
  - ・コンクリートピットは、廃棄物定置のためのガイドとして利用し、その壁厚は側部ペントナイト施工時に作用する土圧によって決める。
- こととする。したがって、各処分方式でのコンクリートピットの壁厚を

大断面岩洞方式: 1.0m

小断面岩洞方式: 0.5m

坑道方式: 0.5m

と設定する。またサイロ方式については空洞径が小断面岩洞方式と同程度であることから、コンクリートピット部材厚は0.5mとする。

(b) 処分空洞の長さ

(i) 基本的な考え方

処分空洞の長さを設定するためには、以下の項目を考慮する必要がある。

・総発生廃棄物量と処分形態

総発生廃棄物量と処分形態（岩洞、坑道断面積やサイロ断面積）から必要総延長が算定できる。

・岩盤の分布条件

岩盤の分布条件の考慮については、パネル配置のところでも述べたとおり、処分場自身が最小となるような配置が望ましいことから、空洞長の設定にも考慮する必要がある。

・建設、操業、閉鎖に関する要因

建設に関しては、施工機械、施工の段取り、作業効率、掘削ズリの搬出、施工精度の観点から適切な長さの設定が行われる。

操業に関しては、廃棄体の搬送距離や定置性の考慮が必要となる。

閉鎖に関しては、充填材の搬入などの作業効率の考慮が必要となる。

・経済性に関する要因

作業性のみでなく、最も経済的になるような処分空洞長を設定する必要がある。

処分空洞の長さは、上記の要因を全て満足するようなものが望ましく、処分コンセプトの構築に関して大変重要な問題であり、同時に非常に難しい問題でもある。特に、上記要因のうち岩盤の分布条件などは、具体的な土層断面が想定されているわけではないため不確定な要因となり、空洞長設定時に考慮することは難しいと考えられる。

(ii) 本検討での設定

本検討においては上記の項目の内、特に以下の項目に着目して設定を行う。

・総廃棄物発生量と処分形態

・建設、操業、閉鎖に関する要因

岩盤に関する項目（分布条件、天然バリアの機能）については現段階では考慮することができないためここでは除外する。また経済性に関する要因に関しては二次的な要因になりうると考えられるため、2項目のみに着目して処分空洞長の検討を行う。

## ①検討条件

以下に処分空洞の長さを設定するための前提条件を示す。

- ・1方式のみの配置で長さを設定する。処分空洞長の設定では、処分場内での大断面岩洞方式と小断面岩洞方式の併設などは考えない。
- ・総廃棄体発生量は表-1.1.1から20万本とする。したがって総廃棄体コンテナ個数は、「(a) 処分空洞の断面形状」でコンテナ内にドラム缶もしくはキャニスターを4本一組で格納することから、20万/4本で5万個となる。
- ・処分空洞の形状及び隔壁間隔、隔壁部材厚さは図-1.1.26~1.1.29に示した形状とする。
- ・廃棄体コンテナの形状は「(a) 処分空洞の断面形状」に示した 1.51m×1.51m×1.3m とする。
- ・処分パネルは8枚とする。なお、処分パネルの概念、設定根拠については後述する。
- ・1パネルあたりの廃棄体コンテナ数は6,250個、廃棄体本数にして25,000本となる。
- ・処分空洞の長さの範囲は、岩洞方式については100m程度、坑道方式については200m~300m程度の間とする。
- ・作業用のスペースも考慮する。(施工、廃棄体搬入の面から)

## ②処分空洞長の設定

以上の条件から、各方式の処分空洞1本の長さを決定する。表-1.1.27に設定の根拠とした廃棄体数量及び設定した処分空洞長を示す。

表-1.1.27 処分空洞長

処 分 方 式	大断面岩洞	小断面岩洞	坑道	サイロ
廃棄体量	約20万本			
廃棄体コンテナ数	5万個			
処分パネル数	8本			
空洞断面あたり廃棄体コンテナ数	150個	54個	6個	96個
空洞奥行方向*廃棄体コンテナ総数	約333個	約926個	約8333個	約521個
1パネル処分空洞数	1本	2本	9本	3基
処分空洞数	8本	16本	72本	24基
空洞奥行方向*廃棄体コンテナ数(1パネルあたり)	約42個 (64m)	約116個 (175m)	約1042個 (1573m)	約65m (85m)
処分空洞長*(隔壁・作業スペースを含む)	95.0m	115.0m	240.0m	39.0m

\*: サイロ方式に関しては深さ方向

### (c) 処分空洞の離間距離

処分施設は処分空洞が並列して配置されるような形態をとるため、施工時の岩盤掘削によって生じる緩み領域が、隣接する空洞間で互いに干渉しないような離間距離を保つ必要がある。以下に本検討での設定の考え方を各格納施設形態について示す。

#### (i) 基本的な考え方

##### ① 岩洞・坑道方式の離間距離

岩洞・坑道方式の離間距離は、鉄道・道路トンネル及び地下発電所・地下石油備蓄基地などの大規模地下空洞の施工実績を参考にすることができる。また、各種指針・基準類によっても必要離間距離が規定されている。<sup>17)</sup> 各種指針や基準類によると空洞間の離間距離は、空洞直径（掘削幅）の2～3倍以上（岩種によっては5倍以上）の距離を確保する必要があるとしている。地下発電所や地下石油備蓄基地の指針<sup>18)</sup>においては、算定式によって離間距離を求める方法も示されている。一方、鉄道や道路トンネルの施工実績を見ると、離間距離は直径の2～3倍程度としているものが多い。

詳細な設定方法としては、有限要素法などの数値解析を用いる方法がある。掘削によって生じる空洞の緩み領域を求め、隣接空洞が相互干渉しないような離間距離を設定する。

##### ② サイロ方式の離間距離

サイロ方式の離間距離の検討については、我国では実施された例がほとんどない。しかし、揚水式地下発電所や地下原子力発電所の検討では、離間距離の提案式が存在し、その提案式によると直径程度の離間距離をとればよいとされている。またLNG地下タンクの指針によると直径の1/2以上とすればよいとされている。また岩洞・坑道方式の離間距離の設定方法と同様に数値解析を用いて設定する方法もある。

#### (ii) 力学的な方法による離間距離の検討

##### ① 岩洞・坑道方式の離間距離

本検討では各種指針・基準類のうち、算定式によって離間距離を求める方法が示されている消防法、岩盤タンクの適用基準（昭和62年5月19日通達）に着目した。それによると、空洞相互間の距離は次式から算定される値L以上を確保することと定められている。

$$L = \frac{B_1 + H_1 + B_2 + H_2}{4} + R_1 + R_2 \quad (1.1.11)$$

ここに、L：確保すべき距離（当該岩盤空洞の空間の内壁面から隣接する空間の内壁面までの距離）

B<sub>1</sub>：当該空間の内壁面の最大幅

H<sub>1</sub>：当該空間の内壁面の最大高さ

B<sub>2</sub>：隣接する空間の内壁面の最大幅

H<sub>2</sub>：隣接する空間の内壁面の最大高さ

R<sub>1</sub>：当該空間を構成する岩盤の緩み領域の幅

R<sub>2</sub>：隣接する空間を構成する岩盤の緩み領域の幅

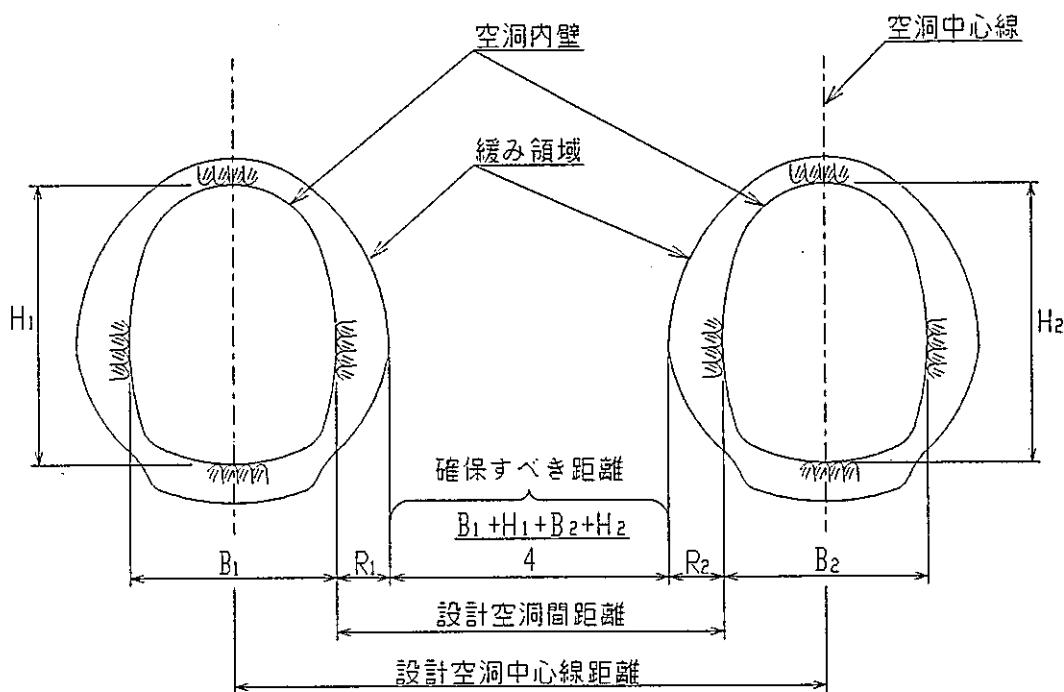


図-1.1.40 離間距離の概念図（消防法、岩盤タンクの適用基準）

表-1.1.28 に、空洞規模を各岩盤条件で掘削可能な最大径とした場合の離間距離を示す。

表-1.1.28 離間距離算定結果

		深度 300 m		深度 700 m			
		最大掘削径	緩み領域	離間距離	最大掘削径	緩み領域	離間距離
結晶質岩系岩盤	A	30.0	0.0	30.0	30.0	2.7	40.0
	B	30.0	0.2	35.0	10.0	1.3	15.0
堆積岩系岩盤	A	20.0	1.8	25.0	—	—	—
	B	—	—	—	—	—	—
	C	—	—	—	—	—	—

(単位 : m)

表-1.1.28 の離間距離の算定結果は、円形断面での弾塑性理論解析から得られた緩み領域の数値を基に算定したものである。現在設定している処分空洞の断面形状の掘削による緩み領域については別の解析方法（例えば有限要素法解析など）を用いると求めることができるが、本検討では、現在設定している処分空洞断面に対する離間距離の設定を、上記の離間距離算定結果、過去の施工実績、各種指針・基準類から総合的に判断して、空洞幅の2倍以上とすることとした。表-1.1.29 に空洞幅と離間距離を示す。表-1.1.29 の値は空洞幅の2倍以上かつ5 m ごとに切り上げて設定した。

表-1.1.29 空洞幅と離間距離（力学的検討による）

	大断面岩洞	小断面岩洞	坑道
空 洞 幅	21.5	14.0	8.4
離 間 距 離	45.0	30.0	20.0

(単位：m)

表-1.1.29 の値は表-1.1.28 に示した離間距離の算定結果の値をすべて上回るため、力学的な方法による離間距離の検討結果は表-1.1.29 の値とする。

## ②サイロ方式の離間距離

本検討でのサイロ方式の離間距離の検討方法は岩洞・坑道方式に準じることとし、空洞直径の2倍以上を確保する。したがってサイロ方式の離間距離は  $2 \times 24.7 = 49.4\text{m}$  以上確保すればよい。

### (iii) 热解析の結果による離間距離の検討

(3)で示したように処分空洞に発熱性廃棄体を処分した場合、発熱量によっては周囲の人工バリア及び天然バリアに熱的な影響を与える。したがって隣接する処分空洞への熱的影響が考えられる。そこで熱解析の結果から離間距離の検討を行う。処分空洞に発熱性廃棄体を処分した場合に、廃棄体の発熱が人工バリア材及び周辺岩盤のどの程度の距離まで影響するかを求め、隣接する空洞との相互影響がないような離間距離を設定することとする。

#### ① 解析条件及び解析結果

解析条件及び解析結果は(3)に示したとおりである。

図-1.1.18～1.1.21より、空洞間隔を中心間距離で3D、4D、5D（D：空洞直径）として熱解析を実施した結果、離間距離による温度の大きな違いは見られなかった。

### (iv) 本検討での設定

離間距離の検討を、力学的な観点及び熱的な観点から行った。それぞれの検討結果を考慮し、本検討では力学的な方法による結果から、離間距離は空洞幅の2倍以上とし、表-1.1.30に示す値以上を確保する。

表-1.1.30 空洞幅と離間距離

	大断面岩洞	小断面岩洞	坑道	サイロ
空洞幅	21.5	14.0	8.4	24.7
離間距離	45.0	30.0	20.0	50.0

サイロの空洞幅はサイロ直径を示す。

(単位：m)

#### (d) 処分空洞の配置

##### (i) 基本的な考え方

処分空洞の配置を設定するにあたっては、処分空洞以外に設置される施設との位置関係が大きく関与してくる。処分空洞以外の施設とは「1.1.1.3 (b) 地下施設」で挙げた主要坑道、連絡坑道等である。また処分パネルの考え方にも関係してくる。ここでは、主要坑道、連絡坑道、処分パネルについての詳細な設定は後述することとし、処分パネル内において処分空洞をどのように配置するかについてを検討する。

処分空洞の配置を考える上で処分パネル内に配置されるものに連絡坑道がある。これらをどのように配置するか検討するのに考慮する要因には以下のものが挙げられる。

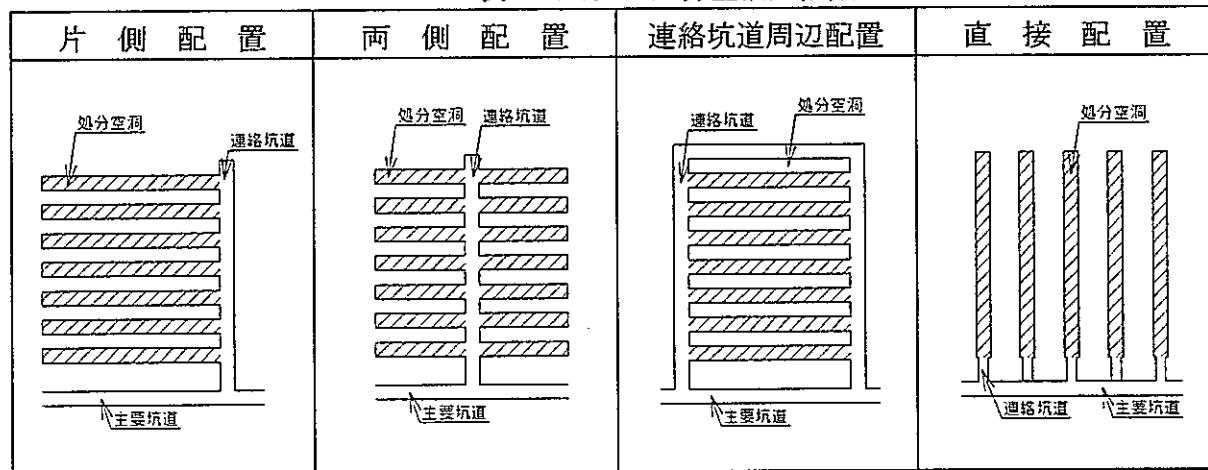
- ・廃棄体処分空洞形態
- ・処分場の地質条件
- ・工学的掘削可能性や空洞離間距離
- ・廃棄体特性や廃棄体の搬入速度
- ・建設、操業、閉鎖の作業性や作業速度
- ・処分スケジュール
- ・経済性
- ・物流、換気、避難ルートの確保

これらを総合的に勘案して、処分空洞の配置の設定をする必要がある。ただし処分場の地質条件に関しては、具体的な地質が示されていないため、ここでは考慮しない。

##### (ii) 本検討での設定

処分空洞と連絡坑道の配置オプションとしては、行き止まりの処分空洞とするか、向かい側の連絡坑道に抜けられるかの2種類に代表されると考えられる。そこで本検討では、その2種類について考えられる配置形態のうち、表-1.1.31に挙げる形態を想定する。

表-1.1.31 処分空洞配置案



「(b) 処分空洞の長さ」において各方式の処分空洞長及び1パネル(処分パネルの概念については後述する)ごとの処分空洞本数を設定した。それによると岩洞・坑道方式の1パネルあたりの処分空洞本数は、大断面岩洞方式で1本、小断面岩洞方式で2本、坑道方式で9本である。これらの1パネルあたりの処分空洞本数に対し、以下の見解が得られる。

- ・片側配置及び両側配置は、処分空洞が多数存在する場合では、主要坑道からの分岐が各パネルにつき1本であることから、パネル区分や作業区分を明確に分離することができる。しかし本検討では処分空洞本数が大断面岩洞方式で1本、小断面岩洞方式で2本、坑道方式でも9本と少ないため、表-1.1.31に示したように連絡坑道と直角に処分空洞を配置する必要性はないと考えられる。また片側配置や両側配置のように連絡坑道と処分空洞を直角に接続にした場合、重機の転回、廃棄体の積み換えなど掘削作業性や廃棄体定置作業性が極端に低下することも考えられる。処分場の全体レイアウトを考えた場合には、主要坑道と平行に処分空洞が配置されることとなる。したがって、全体レイアウトは極端な長方形になり、掘削距離の増加や、廃棄体搬入の作業性が悪くなることが考えられる。
- ・連絡坑道周辺配置は、換気の観点では空気の流れがよいが、掘削量の増加・閉鎖量の増加となるためコスト高になる。処分空洞両側からの廃棄体搬入が可能となるが、基本的には片側配置及び両側配置と同様、少ない処分空洞数ではあまり効率的とは言えない。
- ・直接配置は主要坑道からの分岐が処分空洞の数量だけ存在し、パネル区分及び作業区分は主要坑道もしくは分岐点で行わなければならない。しかし連絡坑道としての必要最小限の長さの掘削のみで機能するため掘削量は比較的小ないと考えられる。また同じパネル内の他の処分空洞と独立しており、かつ連絡坑道と処分空洞がほぼ一体化しているため廃棄体搬入の作業性が良いことや、処分空洞の閉鎖に引き続き連絡坑道の閉鎖が可能になることなどのメリットが挙げられる。

以上の観点から、本検討での岩洞・坑道方式の処分空洞の配置は直接方式で考えることとする。ただし岩洞方式に関しては断面が非常に大きいため2方向からの掘削作業となり、掘削用の坑道が必要となってくる。したがってパネルごとにではなく、2パネルに1本の割合で処分空洞をとりまくような連絡坑道を配置する。

サイロ方式については「(b) 処分空洞の長さ」に示した表-1.1.27よりサイロの基数が24基となったため、1パネルあたり3基となる。ここでサイロ1基あたり連絡坑道1本の直接配置を採用した場合、併設する処分空洞の離間距離の条件から全体の配置が極端な長方形になることが予想される。したがってサイロ方式については片側配置を基本形とする。ただし岩洞方式と同様に掘削用の連絡坑道が必要になってくるため、片側配置と連絡坑道周辺配置を併用した配置にする。またサイロ方式も岩洞方式と同様に2パネルに1本の割合で連絡坑道を配置する。

以上の各方式での処分空洞の配置図を図-1.1.41～1.1.44に示す。なお図中の主要坑道の設定及び連絡坑道の設定や、主要坑道と連絡坑道の接続については(e)及び(f)にて述べる。なお、連絡坑道の全体の配置については、全体レイアウト図(1.1.4節)にて示す。

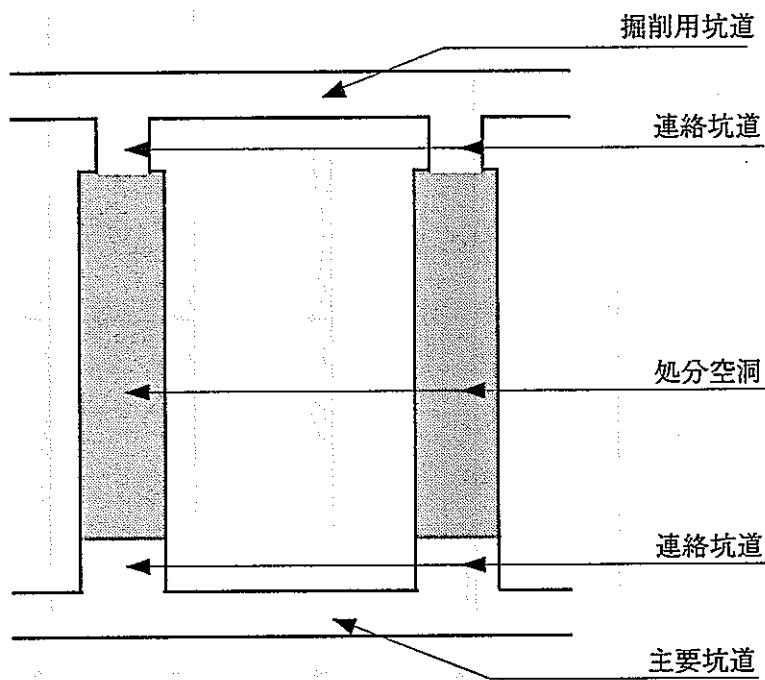


図-1.1.41 大断面岩洞方式 処分空洞配置図

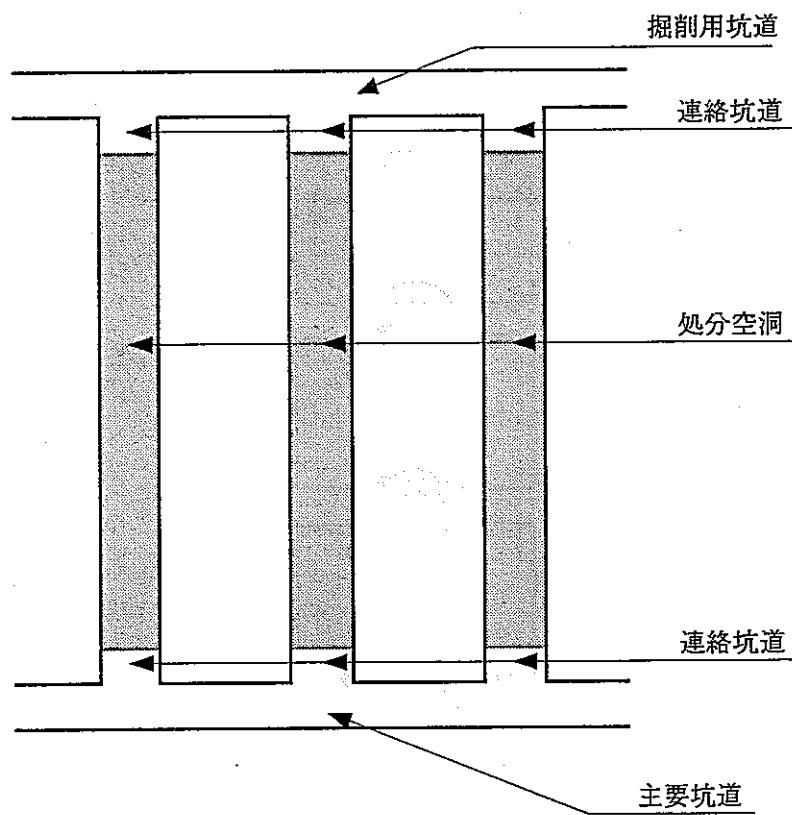


図-1.1.42 小断面岩洞方式 処分空洞配置図

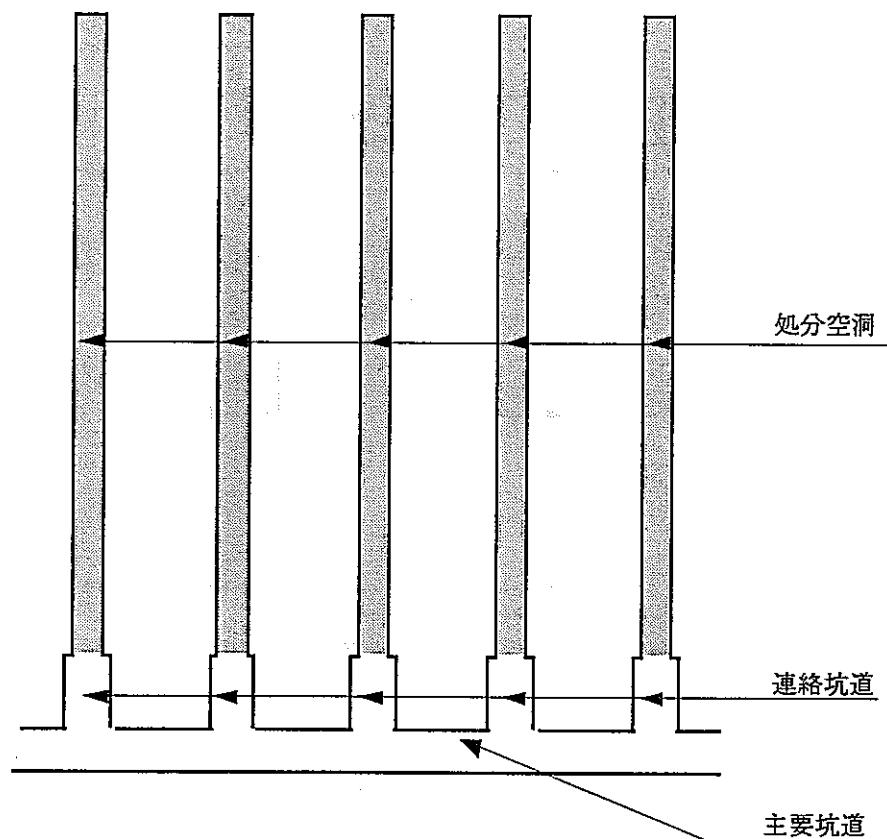


図-1.1.43 坑道方式 処分空洞配置図

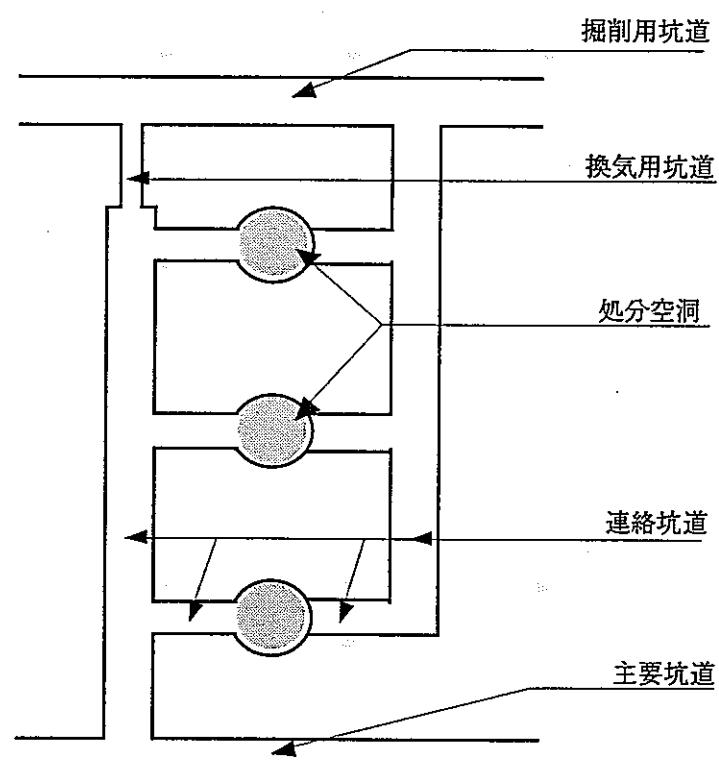


図-1.1.44 サイロ方式 処分空洞配置図

## (e) 主要坑道の断面・配置・本数

### (i) 基本的な考え方

主要坑道の断面形状及び配置の設定において最も重視しなければならない項目は、機能性についてである。主要坑道の役割は、アクセス坑道と連絡坑道を接続し、建設時の建設機材及び資材の搬出入、操業時の廃棄体の搬入、閉鎖時の充填材の搬入が挙げられる。また、主要坑道内には給水、排水、換気、エネルギー供給等のユーティリティー施設が設置される。そのためそれぞれの役割及び機能が効率よくかつ経済的に働くような断面、配置の設定をする必要がある。また建設・操業・閉鎖の並行作業性及び処分パネルの配置やアクセス坑道との位置関係を勘案して設定を行う必要がある。一方放射線管理の面から見ると、管理が容易に行える配置や本数の設定が必要となる。

### (ii) 本検討での設定

#### ① 断面形状

断面形状の設定では、以下の点に着目して設定を行う。

- ・建設用車両、機材が容易に通行できる幅員、高さ
- ・廃棄体搬送車両が容易に通行できる幅員
- ・空洞の安定性

主要坑道には、建設時に建設用車両のとして大型ダンプトラックや、大型建設用重機が通行することが考えられる。そこで幅員については、大型ダンプトラックが2台通行できる程度の幅員は最低でも必要と考えられる。これは建設用車両が故障によって停止した場合に、1台分の幅員では主要坑道が故障車両によって閉鎖されてしまい、建設作業及び操業、閉鎖作業に至る処分場全体の機能が停止してしまう恐れがあるからである。

高さについては、主要坑道天井部に換気用ダクトを設置したうえで、建設用大型重機が通行できる高さが必要となる。以上の条件と空洞の安定性及び経済性を考慮すると主要坑道の断面形状は、馬蹄形や幌形となると考えられる。

本検討では以上の理由から主要坑道の断面形状を、図-1.1.45に示す断面形状とした。

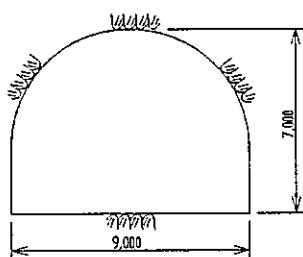


図-1.1.45 主要坑道断面形状図

## ② 配置・本数

主要坑道の配置の設定において考慮する項目には、

- ・放射線管理のしやすさ
- ・作業性
- ・安全性

等が挙げられる。これらの項目を踏まえた上で、本検討では主要坑道の配置を設定するにあたって、以下のような前提条件を設定した。

- ・処分場全体のレイアウト形状が極端な長方形にならないようにする。このことは処分空洞建設時や、廃棄体搬入時の作業性を良くすることにも繋がる。
- ・主要坑道の両側に処分パネルを配置する。根拠は「(h) 処分パネルの配置」にて後述する。
- ・複雑な経路とならないために、主要坑道の本数はできる限り少なくする。
- ・作業の安全性から主要坑道内は一方通行とする。したがって最低でも2本の坑道を平行に配置する。
- ・車両の通行が頻繁に行われると考えられるため、安全性から交差部を極力作らない。
- ・建設の容易さ、作業性、安全性の観点から直線形状を基本とする。
- ・放射線管理区域と非放射線管理区域での作業の分割が明確にできるような配置にする。

以上の前提条件から主要坑道を処分場の中央部に2本を直線状に配置し、端部は曲線形状で繋がっている環状になっている形式を設定する。図-1.1.46に概念図を示す。

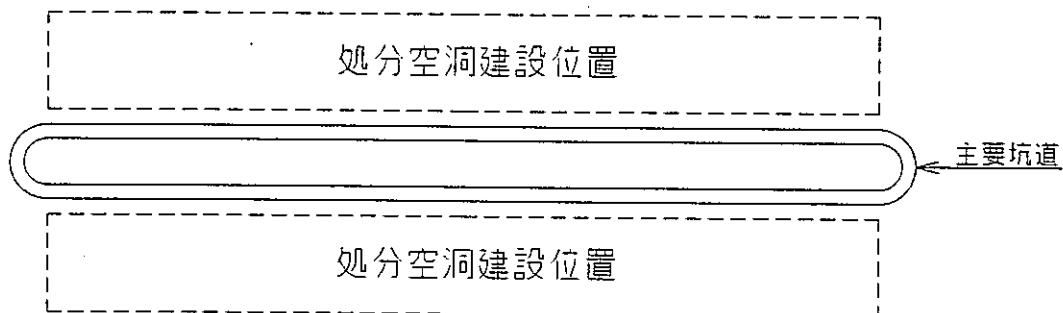


図-1.1.46 主要坑道概念図

## (f) 連絡坑道の断面・配置

### (i) 基本的な考え方

連絡坑道の断面形状の設定においても、主要坑道の断面形状の設定と同様に建設・操業・閉鎖各作業の効率性、機能性の面を重視する。連絡坑道の役割は主要坑道と処分空洞を接続し、建設機材及び資材の搬出入、操業時の廃棄体の搬入、閉鎖時の充填材の搬入が挙げられ、主要坑道とほぼ同じである。したがってそれぞれの役割及び機能が効率よくかつ経済的に働くような断面、配置の設定をする必要がある。

連絡坑道の配置に関しては、「(d) 処分空洞の配置」でも述べたように、種々の形態が考えられるが、建設作業の容易さ、建設・廃棄体定置・閉鎖の並行作業性、経済性を勘案して設定する必要がある。また、処分空洞の形態や本数に応じて、連絡坑道の配置形態や長さも変わってくると考えられるため、処分空洞の形態に応じた連絡坑道の設定が必要となってくる。このことは全体レイアウトに関しても影響してくることであるため十分な検討が必要であると考えられる。

### (ii) 本検討での設定

#### ① 断面形状

連絡坑道の断面形状の設定においては、主要坑道の断面設定と同様に以下の点に着目して検討を行う。

- ・建設用車両、機材が容易に通行できる幅員、高さ
- ・廃棄体搬送車両が容易に通行できる幅員
- ・空洞の安定性

連絡坑道も主要坑道と同様に、建設時には大型ダンプトラック及び大型建設用重機の通行が考えられる。したがって連絡坑道においても、主要坑道と同様に大型ダンプトラックが2台通行できる幅員を確保する。

さらに連絡坑道の断面形状の設定で考慮しなければならない条件として、大型建設用重機が主要坑道と連絡坑道の接続部を曲れるような幅員を確保しなければならないことが挙げられる。連絡坑道と主要坑道の接続部についての詳細は②にて記述する。

また、連絡坑道は処分空洞に直接接続されるため、処分空洞の形状（空洞幅、空洞高さ）についても考慮する必要がある。

本検討では主要坑道に接続されている連絡坑道の幅を、大断面岩洞方式と小断面岩洞方式は、施工性の観点から処分空洞の幅に合わせることとする。また、坑道方式及びサイロ方式は重機が曲がることができる幅を確保することで空洞幅を設定する。

空洞の安定性の観点から見た場合には、断面形状は馬蹄系や幌形になると考えられる。

以上の考え方より本検討で設定した連絡坑道の断面形状図とその位置図を各処分空洞方式ごとに図-1.1.47～1.1.50に示す。

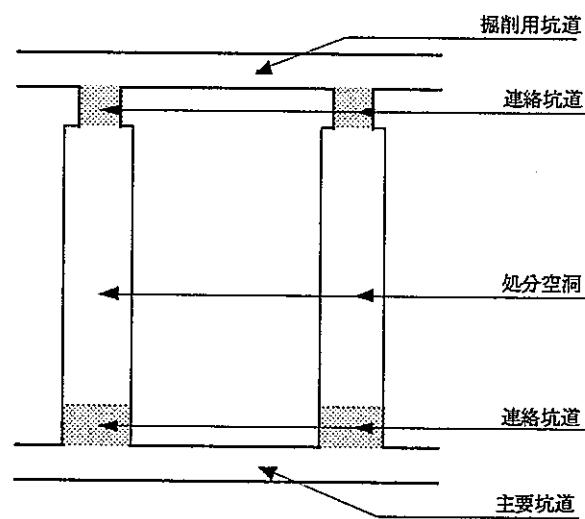
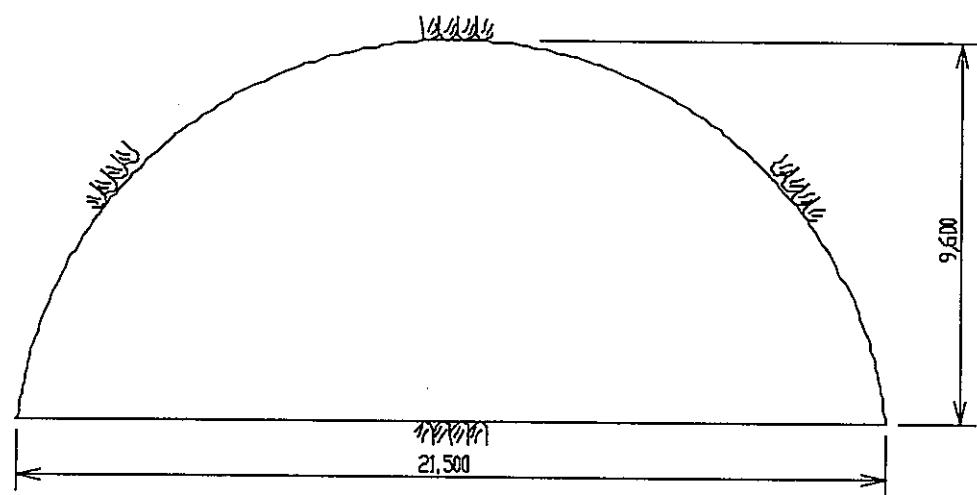
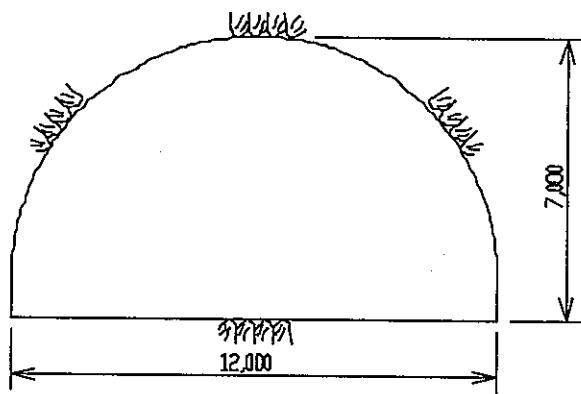


図-1.1.47 大断面岩洞方式 連絡坑道断面図

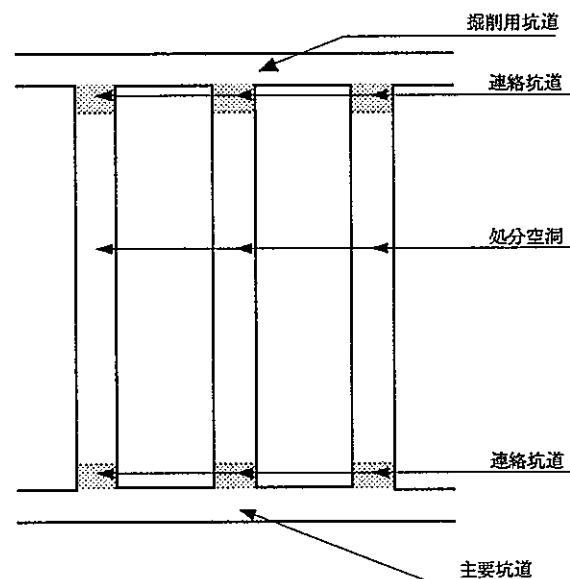
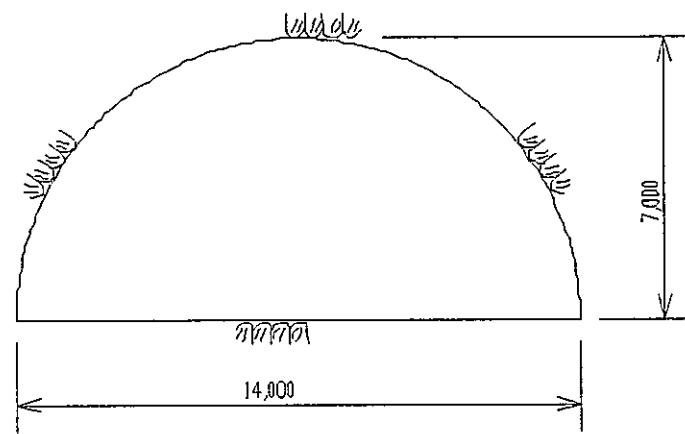


図-1.1.48 小断面岩洞方式 連絡坑道断面図

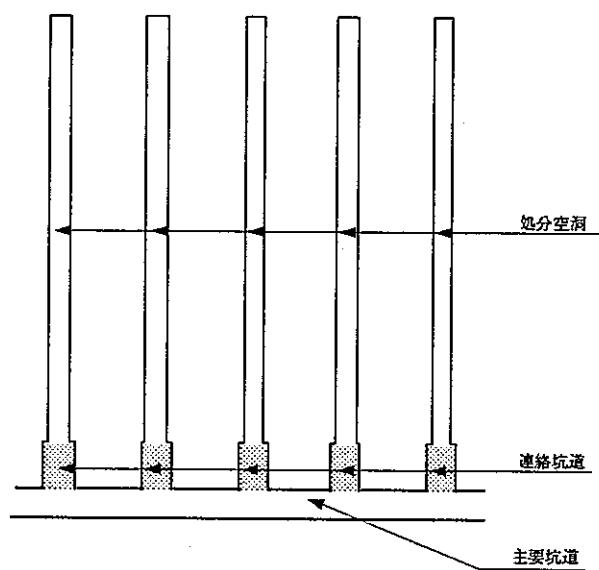
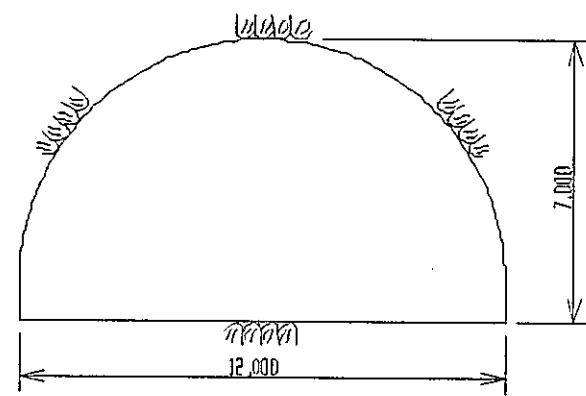


図-1.1.49 坑道方式 連絡坑道断面図

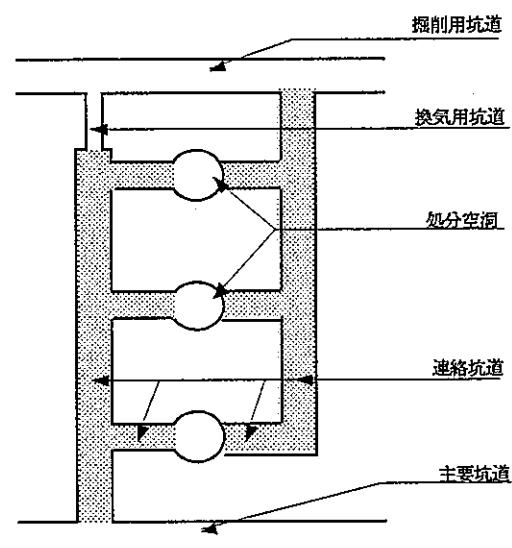
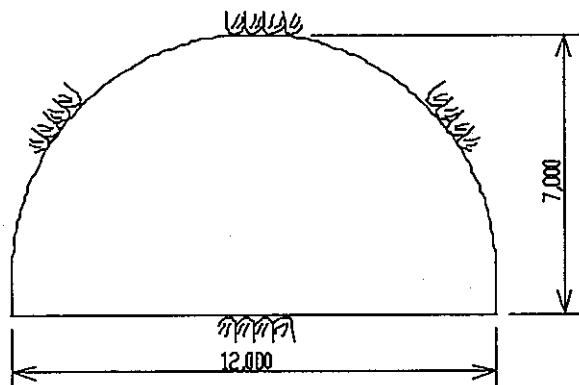


図-1.1.50 サイロ方式 連絡坑道断面図

## ② 配置

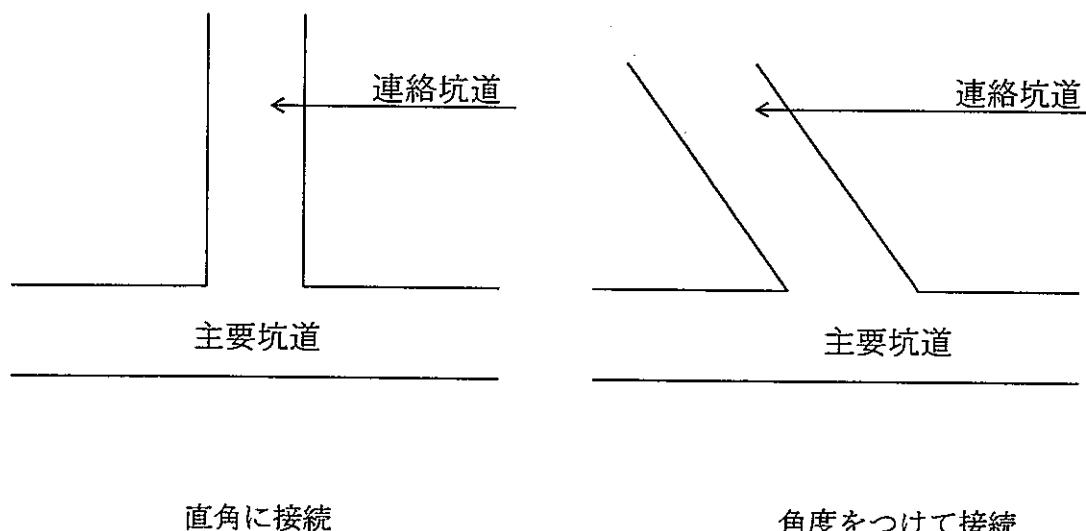
連絡坑道の基本的な配置形態は「(d) 処分空洞の配置」の表－1.1.31で挙げたような4種類が考えられる。「(d) 処分空洞の配置」において述べたように本検討での連絡坑道の配置は図－1.1.41～1.3.44に示したとおりとする。

連絡坑道と主要坑道の接続部に関しては、図－1.1.51に示したような直角に接続する方法と角度をつけて接続する方法の2つが挙げられる。

角度をつけて接続した場合（下右図）には、主要坑道は一方通行であるため大型建設用重機の連絡坑道への出入りが困難になる。

また、無人での操業を考え、誘導員の配置が不可能な場合を考慮すると、安全性の観点から角度をつけて接続した場合は見通しが悪くなる。

したがって連絡坑道と主要坑道の接続は直角に接続することとする。



図－1.1.51 連絡坑道接続概念図

(g) 処分パネルの概念

処分空洞の建設、操業、閉鎖の各作業を行っていく時に、それぞれ1本ごとに作業や管理を行っていくのは、処分空洞数が多い場合には非常に困難であると考えられる。また建設、操業、閉鎖の各作業を並行して行っていく場合においては、複雑なシステムになると考えられる。そこで、処分空洞を何本かずつにまとめることにより、処分場全体をいくつかのグループに分け、そのグループごとに作業や管理を行っていく方式をとることとする。そのグループを、本検討では「処分パネル」と定義する。

処分パネルの構成は、処分空洞と連絡坑道からなる。これらの配置については(d)に示した。

(h) 処分パネルの配置

(i) 基本的な考え方

TRU廃棄物処分場の処分パネルの配置及びパネル分け、枚数の設定は、以下の項目について考慮する必要がある。

① 放射線管理

処分パネルの配置並びにパネル枚数の設定においては、操業時などの放射線管理区域と、建設時などの非放射線管理区域との明確な区別が必要になってくる。建設・操業・閉鎖の各作業は、一般的にはパネル毎に区分して行うと想定されるため、それらの作業が輻輳しないような配置が望ましい。

② 作業工程

パネル配置・枚数の設定には、建設・操業・閉鎖の各作業工程を考慮する必要がある。あらかじめ定まっている処分場操業スケジュールや廃棄体搬入スケジュールに対して、建設のスケジュールをそれらに対応させて設定する必要があるため、パネル配置は建設工程と合致するような計画をする必要がある。

③ 地盤条件

パネルの大きさを設定するには、原地盤の岩体がどのように分布しており、その岩体の分布の広さを考慮する必要がある。

(ii) 本検討での設定

① 前提条件

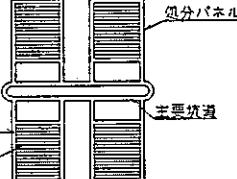
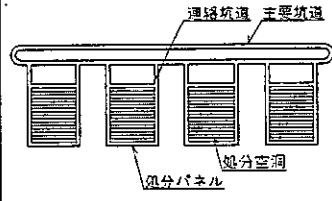
(i)に挙げた項目のうち、地盤条件については処分場建設予定地が未定で、具体的な岩盤条件が設定されていないため理想的な岩盤の基での検討を行うものとし、直接的な要因とはせず考慮しない。したがって本検討の処分パネルの設定には、放射線管理及び作業工程について考慮し設定を行うこととする。本検討で処分パネルの配置及び枚数を設定する際に、前提とした条件を以下に示す。

- ・建設、操業、閉鎖の3作業を放射線管理の面から分離する。
- ・処分パネル数の設定は、廃棄体処分スケジュールと処分場建設開始～処分場閉鎖完了までの期間で設定する。
- ・放射線管理の考え方は、「1.1.1 前提条件」でも述べたとおりであり、閉鎖時の主要坑道は非放射線管理区域とする。
- ・可能な限り主要坑道の数は少なくする。
- ・主要坑道内は一方向通行とする（交差点を避けるため）。
- ・岩盤条件は、処分場の具体的な設置地域が想定されていないことから、理想的な物性値を持つ岩盤とし、一様な物性値の岩盤が広範囲にわたって分布しているものと仮定する。

## ② パネル配置の比較

パネル配置について一般的に想定される配置パターン2ケースで、安全評価、放射線管理、建設・操業・閉鎖についての比較を行った。表-1.1.32にその比較を示す。

表-1.1.32 パネル配置の比較

	パネルの配置	核種移行解析	放射線管理	建設・操業 ・閉鎖	坑道長さ
両側配置	主要坑道の両側に処分パネルを配置する方法   (概念図)	本検討では考慮しない。	左右もしくは、上下に分離することにより各作業においての放射線管理が行える。	主要坑道の両側にパネルを配置することにより、坑道を効率よく使用できる。	占有面積は両配置方式ともほぼ等しいが、両側配置は集中的に配置され、主要坑道が短い。
片側配置	主要坑道の片側のみ処分パネルを配置する方法   (概念図)	本検討では考慮しない。	両側配置と同様に、左右もしくは上下に分離することで各作業での放射線管理が行える。	主要坑道の片側にのみ処分パネルを配置することで、坑道の有効利用が図れない場合がある。	パネルの枚数が増加する、と、極端な長方形になる可能性があり、坑道の長さが長くなる。 搬送距離の増加。

上記の比較表より、放射線管理の観点では両者で大きな違いはないと考えられる。一方、建設・操業・閉鎖の観点と占有面積の観点において、両側配置の方が有利となることがわかる。また経済性の観点から、片側配置は両側配置と比較して、坑道が長くなり、搬送距離も長くなるため経済性に劣る。

したがって本検討では、主要坑道の両側に処分パネルを配置する両側配置の形式を採用する。

### ③ 処分パネルと放射線管理

「② パネル配置の比較」において主要坑道の両側に処分パネルを配置することとした。その配置に従って、放射線管理について考える。放射線管理は建設、操業、閉鎖作業が同時に進行することができ、かつ放射線管理区域と非放射線管理区域の区分が明確に行われる必要がある。また処分場を細かく分割して放射線管理を行うよりも、大きく区分した方が作業性、放射線管理の考え方について容易になると考えられる。

本検討においては、処分パネルを主要坑道の両側配置したことから、放射線管理区域と非放射線管理区域を大きく2つ（上下、左右など）に分ける。分け方については主要坑道に平行な軸で上下に分ける方法と、主要坑道に垂直な軸で左右に分ける方法があるが、本検討では後者の左右に分ける方法を採用することとする。

### ④ 処分パネルの枚数

処分パネルの枚数は、③において示した放射線管理の考え方を基に設定を行う。③において放射線管理区域と非放射線管理区域を処分場中心で左右に分けて考えることにした。したがって処分パネルの枚数は左右とも同じ枚数にする。これは建設、操業、閉鎖の各作業を並行して行うためである。その考え方は⑤に示す。

具体的な枚数については「(f) 処分空洞の長さ」において大断面岩洞方式の処分空洞長を100m程度としたときに処分空洞数が8本となったことから、処分パネルの枚数は1パネル1本で左右それぞれに4枚ずつの計8枚とする。小断面岩洞方式、坑道方式、サイロ方式もこれに従い、それぞれ8パネルとする。

### ⑤ 処分パネルの配置と建設・操業・閉鎖の関係

建設・操業・閉鎖の輻輳作業の関係を図-1.1.52に示す。同時に放射線管理区域と非放射線管理区域についても示す。図-1.1.52に示すように主要坑道の中心でエリアを左右に分割し、放射線管理区域と非放射線管理区域を明確に区分する。建設及び閉鎖と、操業が同じエリア内で行うことのないような作業計画を設定する必要がある。

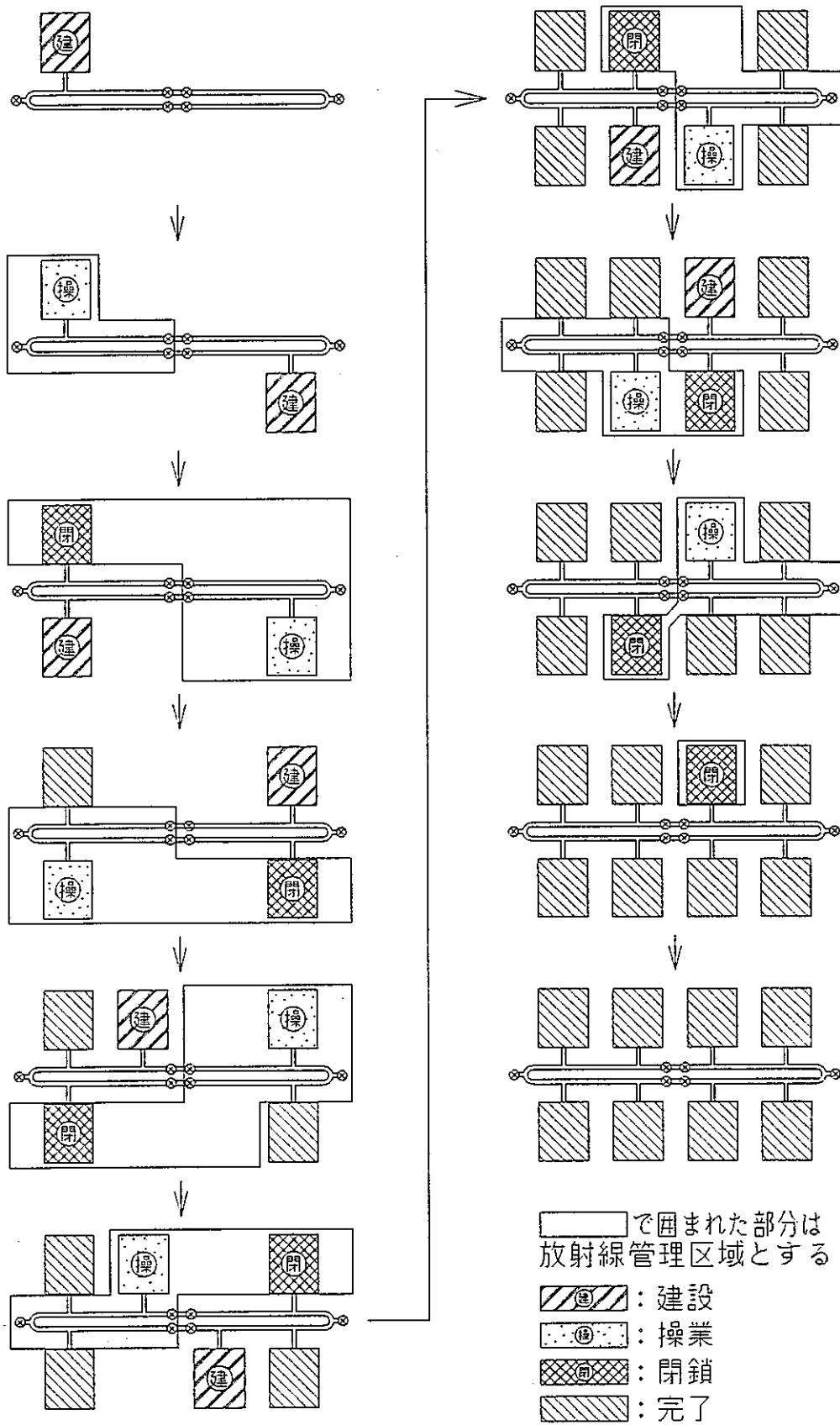


図-1.1.52 放射線管理区域と建設・操業・閉鎖作業の関係

(i) 処分パネルの大きさ

(i) 基本的な考え方

T R U廃棄物処分場の処分パネルの大きさを設定するための要因としては、以下のものが挙げられる。

- ・処分空洞の形状（岩洞、坑道、サイロ）
- ・処分空洞の大きさ、空洞長さ
- ・処分空洞の数量（岩洞・坑道方式の場合は本数、サイロ方式の場合は基数）
- ・処分空洞の離間距離

処分空洞方式が岩洞・坑道方式の場合は、複数の岩洞又は坑道が並列して配置されることとなる。そのため、パネルの大きさは必然的に岩洞・坑道の長さ、岩洞・坑道間の離間距離に左右されることとなる。

処分空洞方式がサイロ方式の場合は、単独のサイロがある離間距離をとって配置されることとなる。

廃棄物処分場の処分パネルの大きさは、上記の要因及び岩盤条件などを総合的に判断して設定する必要があるが、本検討では現時点では不確定な岩盤条件については考慮せず、処分空洞に関するもののみで設定することとする。

(ii) 本検討での設定

本検討では、廃棄物処分場の建設予定地を具体的に想定していないため、岩盤条件については考慮せず、理想的な岩盤物性値の岩体が広範囲にわたって分布しているものと仮定する。表-1.1.33 に処分パネルの大きさの設定根拠となる値を示す。処分空洞幅は(a)より、処分空洞長は(b)より、離間距離は(c)よりそれぞれ引用した。

表-1.1.33 処分パネルの設定根拠

	大断面岩洞	小断面岩洞	坑道	サイロ
処分空洞幅	21.5m	14.0m	8.4m	24.7m
処分空洞長	95.0m	115.0m	240.0m	24.7m
総処分空洞数	8本	16本	72本	24基
離間距離	45.0m	30.0m	20.0m	50.3m
1パネル処分空洞数	1本	2本	9本	3基

表-1.1.33 の中の、処分空洞幅、処分空洞長、離間距離、1パネル処分空洞数を用いて各処分空洞方式での処分パネル図を図-1.1.53～1.1.56 に示す。

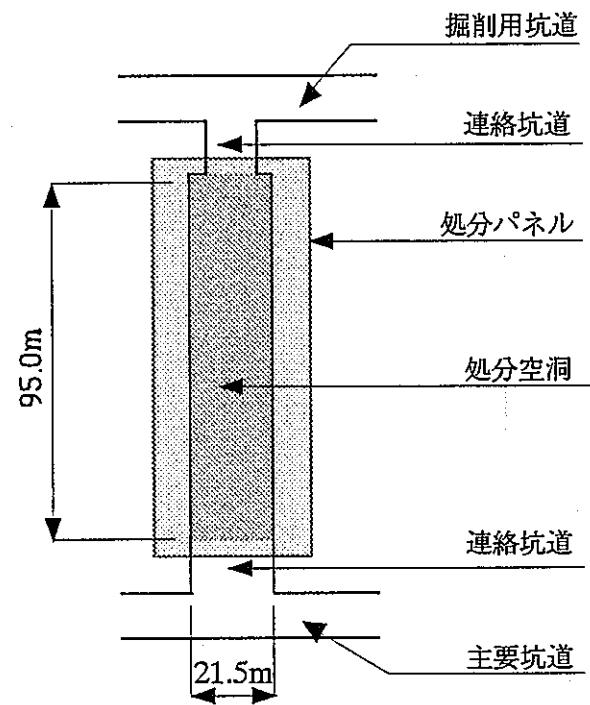


図-1.1.53 大断面岩洞方式 処分パネル図

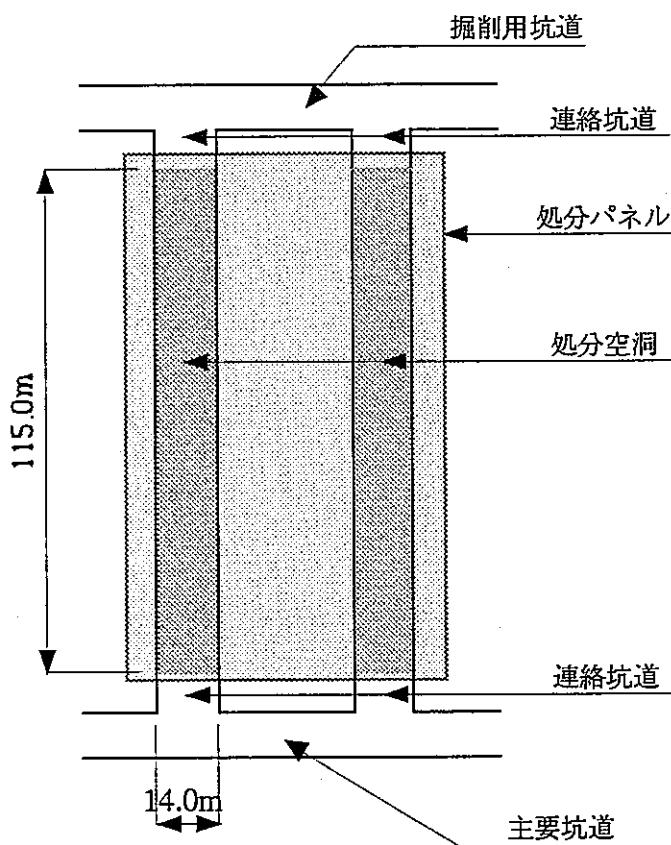


図-1.1.54 小断面岩洞方式 処分パネル図

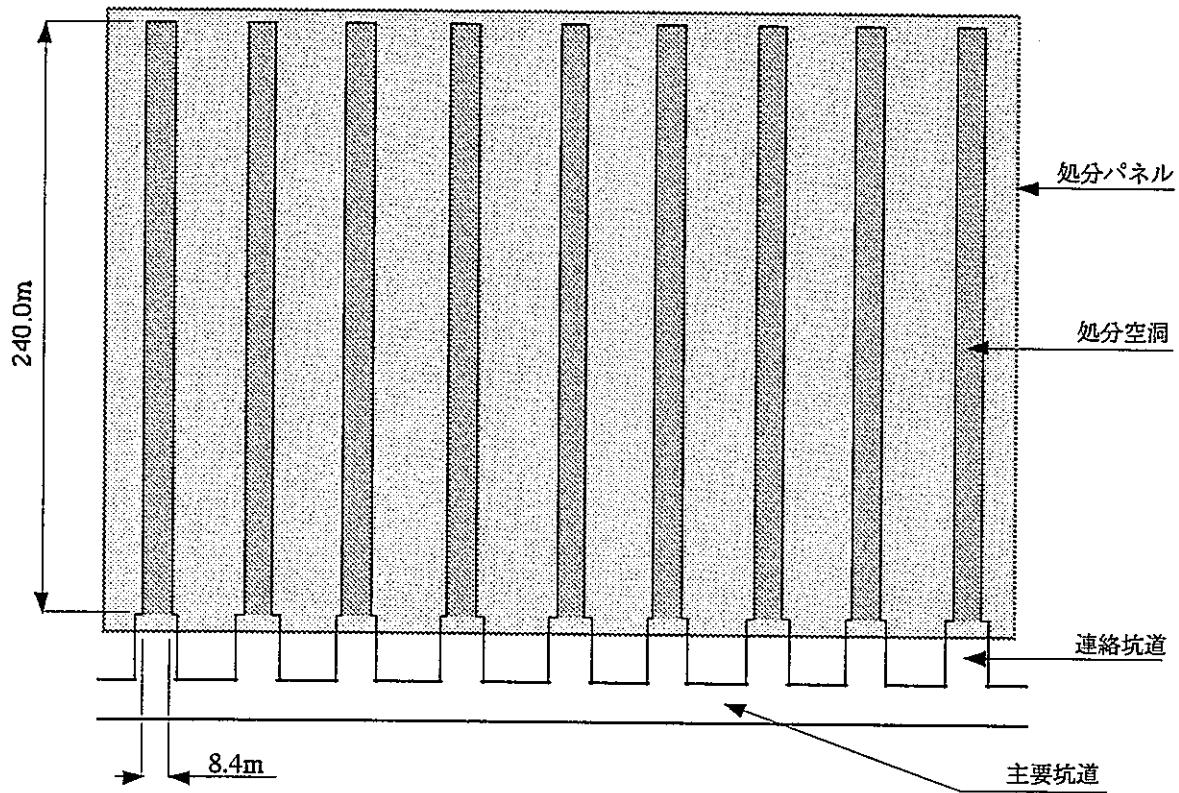


図-1.1.55 坑道方式 処分パネル図

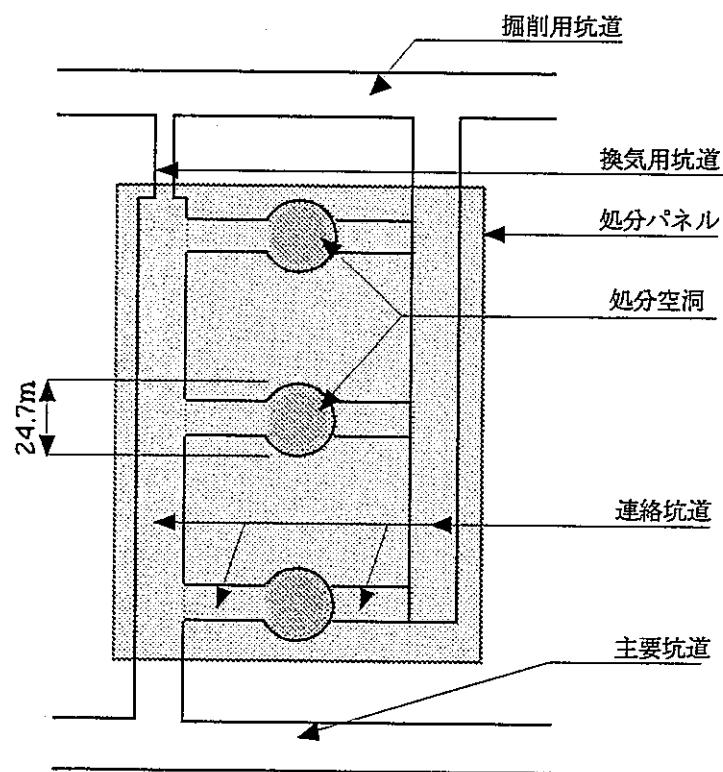


図-1.1.56 サイロ方式 処分パネル図

## (j) アクセス坑道の形式

### (i) 基本的な考え方

地上から地下へのアクセス方法としては、大別すると立坑方式と、スパイラル方式を含む斜坑方式の2種類が考えられる。どちらの方式を選択するかは処分場概念作成上のパラメータとなるが、本検討ではこれを種々の観点から定性的に比較を行うことにより、適切なアクセス方式の設定を行う。

立坑と斜坑を、主に建設と操業の観点から、掘削距離、コスト、廃棄体搬送方法、搬送能力、アクセス距離、施工の項目で比較を行うと表-1.1.34 のようになる。

表-1.1.34 立坑と斜坑の比較

項目	立坑	斜坑
掘削距離	短い。	長い。
コスト	深度が200m程度以深になると大幅に経済的となるとされている。	深ければ深いほど掘削距離が長くなり不経済となる。
搬送方法	エレベーターによる。	車両・鉄道による。
搬送能力	車両と比較すると少量しか輸送できない。	大量の資材が輸送でき、効率的である。
アクセス距離	短い。	長い。
施工	現状技術レベルで対処可能である。	現状技術レベルで対処可能である。

定性的には表-1.1.34 に示すような比較ができるが、立坑と斜坑のどちらを選択するかの他の要因として

- ・処分施設の立地点の自然環境  
(地形、地質構造、岩盤特性等)
- ・地上施設の用地確保

などが挙げられる。ただしこれらの要因については本検討では直接的な要因になり得ないと考えられるため、表-1.1.34 に挙げた項目についての比較で検討を行う。

(ii) 諸外国アクセス方式と本検討での設定

本検討でのアクセス方式を設定するにあたり、ここで諸外国の放射性廃棄物処分場の計画で、検討しているアクセス方式と処分深度を示す。<sup>11)</sup>

表-1.1.35 諸外国でのアクセス方式<sup>11)</sup>

国 名	処分場名	処分深度	アクセス方式		備 考
			立坑	斜坑	
アメリカ	YUCCA Mountain	360m	—	○	高レベル・TRU
	WIPP	650m	○	—	CH, RH-TRU
スウェーデン	SFR	60m	—	○	中・低レベル
	SFL	500～550m	○	—	高・中・低レベル
スイス	B Type	数百m(山腹)	○	—	水平坑道 中・低レベル
	C Type	1200m	○	—	中・高レベル
フランス	ANDRA 検討	150～200m	○	—	中・高レベル(TRU)
ベルギー	Mol-Dessel	180～270m	○	—	中レベル・ $\alpha$ 廃棄物
ドイツ	コンラッド	1100～1200m	○	—	中・低レベル
	ゴアレーベン	660～900m	○	—	すべての廃棄物
イギリス	セラフィールド	200～1000m	○	—	中・低レベル
フィンランド	VLJ	70～100m	○	○	中・低レベル

諸外国の処分場では、処分深度にかかわらず立坑を検討している国が多い。

諸外国でのアクセス方式、及び表-1.1.34 の比較表の内容を考慮し、本検討ではアクセス方式を立坑とし、斜坑はオプションとして考えることとする。

(k) アクセス坑道の本数・断面・配置

(i) 基本的な考え方

① 立坑の本数

立坑は、「1.1.1.3 検討対象施設 (1) 主要施設 (b) 地下施設 ① アクセス坑道」の表-1.1.6で述べたような多用な目的に使用される。そこで、ここでは立坑についての仕様を設定する。立坑は多用な目的のため、地下施設の安全性確保の観点から、廃棄体を搬送する経路（放射線管理区域）と処分施設の建設・閉鎖時の工事車両が通行する経路（非放射線管理区域）とを分割する必要がある。また、建設・操業・閉鎖の並行作業を考慮することから、複数の計画本数を考える。

② 立坑の断面

立坑の断面についても本数の設定の考え方と同様に、目的及び機能に応じた断面を設定する。廃棄体及び資機材の搬入、掘削ズリの搬出など、物流のクリティカルパスとならないような直径及び断面を設定する必要がある。

③ 立坑の配置

立坑の配置には、

ア.立坑をある場所に集中させて近接配置する集中方式

イ.立坑を分散させて配置する分散方式

の2種類が考えられる。位置的に見ると、集中方式では、

- ・中央集中配置
- ・端部集中配置

が考えられる。一方、分散方式では

- ・中央周辺配置
- ・周辺分散配置
- ・2ヶ所分散配置
- ・3ヶ所分散配置

などがあり、様々なオプションが考えられる。配置は各作業性や地下処分施設のレイアウトを極力小さくすること及び地上施設の占有面積を勘案し、集中方式が有利となると考えられる。ただし、周辺岩盤の安定性を考慮して、立坑間にも適当な離間距離をとる必要がある。

## (ii) 本検討での設定

### ① 本数

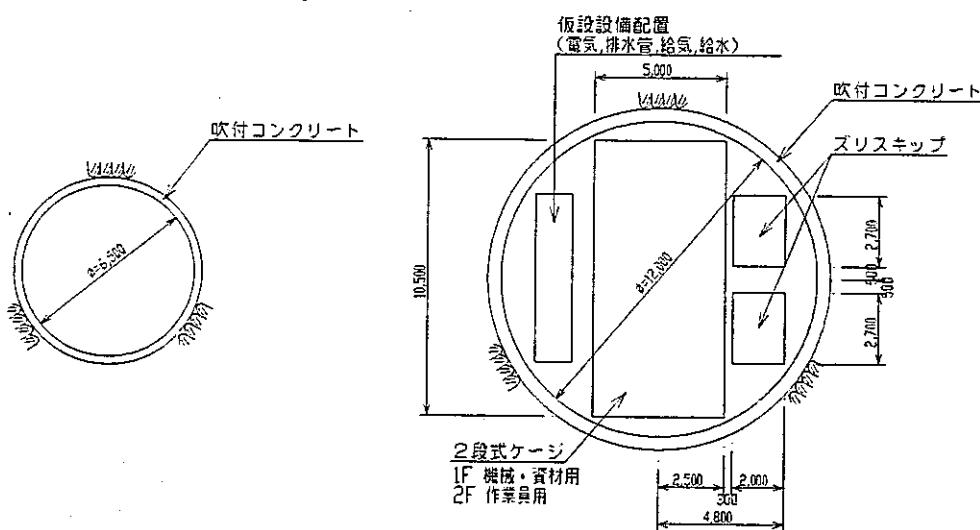
立坑の本数は、「1.1.1.3 検討対象施設 (1) 主要施設 (b) 地下施設 ① アクセス坑道」で挙げた各項目に基づいて設定を行う。本検討では建設・操業・閉鎖の各作業の独立性も考慮して、廃棄体搬入立坑を2本、作業員の出入用と各種建設材料の搬入及び掘削ズリの搬出用立坑を2本、換気用立坑を2本の計6本を設置することとする。なお、避難用としての立坑は換気用立坑と兼用することとし、給排水・エネルギー供給・通信は、作業員・材料運搬用立坑と兼用することとする。

### ② 断面

立坑の断面の決定方法は以下のものが挙げられる。

- ・過去の大深度立坑施工実績
- ・廃棄体搬入エレベーター仕様
- ・建設機材、資材搬入用エレベーター仕様

これらを総合的に考慮して立坑径を設定する必要がある。廃棄体搬入用立坑については、エレベーター設置スペースを考慮に入れると、直径6m～7mの円形断面となることから、本検討では直径6.5mの円形断面とする。一方、作業員・建設資機材出入用立坑については、最初にその立坑を用いて、建設に用いる大型建設重機及び大型ダンプトラックを地下に搬入する必要がある。大型建設重機及び大型ダンプトラックを分解し部品ごとに運び込み、地下で組み立てた上で建設作業にとりかかる。したがって重機の部品の大きさによってエレベーターの仕様が決まり、立坑断面が定まってくると考えられる。その方法により立坑断面を定めると、作業員・建設資材出入用立坑は直径12mの円形断面が必要となる。それぞれの断面形状図を図-1.1.57に示す。



廃棄体搬入用

作業員・建設資機材入出用立坑

図-1.1.57 立坑断面図

### ③ 配置

配置は作業性の観点から集中方式とする。また設置位置は、換気用立坑は換気の効率を良くするために主要坑道の両端に配置することとし、他の立坑は中央に配置する。

## (I) 廃棄体の埋設密度

### (i) 基本的な考え方

廃棄体の埋設密度は、廃棄体の処分形態や定置方法にも大きく関与してくる項目である。廃棄体の埋設密度を設定する際に関係してくるものとして廃棄体特性及び廃棄体の体積変化が挙げられる。

廃棄体特性のうち、熱的観点から見ると、一般的に廃棄体は非発熱性のものと発熱性のものに大きく分類される。非発熱性廃棄体は集中定置が可能であるが、発熱性廃棄体はその発熱量によっては、集中配置は不可能である。その場合には、後述する2方策が考えられる。一つは、非発熱性廃棄体中に発熱性廃棄体を一様に分散定置し温度上昇量を抑える「分散方式」である。もう一つは、それぞれを分別し、さらに発熱性廃棄体については温度上昇量が問題にならない密度で定置する「分別方式」である。

一方、廃棄体の体積変化の観点から見るとハル・エンドピースは体積の約30%の有害空隙が存在する。またアスファルト固化体は、硝酸塩の溶出による約30%の体積変化を生ずる。そのため、これらの廃棄体を集中して処分した場合、廃棄体の変形からコンクリートピットの変形、さらにはベントナイトの変形と繋がり、変形量が過大な場合は人工バリアの要求性能に影響を及ぼすことが考えられる。したがって体積変化の大きい廃棄体についても体積変化の影響が少ない処分方式で埋設するか、あるいは体積変化の少ない廃棄体と混在させて処分する必要がある。

### (ii) 本検討での設定

本検討では、大断面岩洞方式、小断面岩洞方式、坑道方式、サイロ方式について発熱性廃棄体を収納した場合を想定して熱解析を実施し、人工バリア材及び周辺岩盤の熱的な経時変化を求め、人工バリア材の機能を破壊するような熱量が発生しないように、廃棄体定置量や廃棄体定置密度を求める。

また、体積変化の影響についても有害空隙量を仮定し人工バリアの変形量を求め、要求性能を満たすような定置密度を求める。

### 1.1.3.2 建設計画

ここでは、地下施設の掘削に関する施工手順、施工方法について検討する。

#### (1) 施工順序

地下施設は、レイアウトから下図に示す順序で施工するものとする。

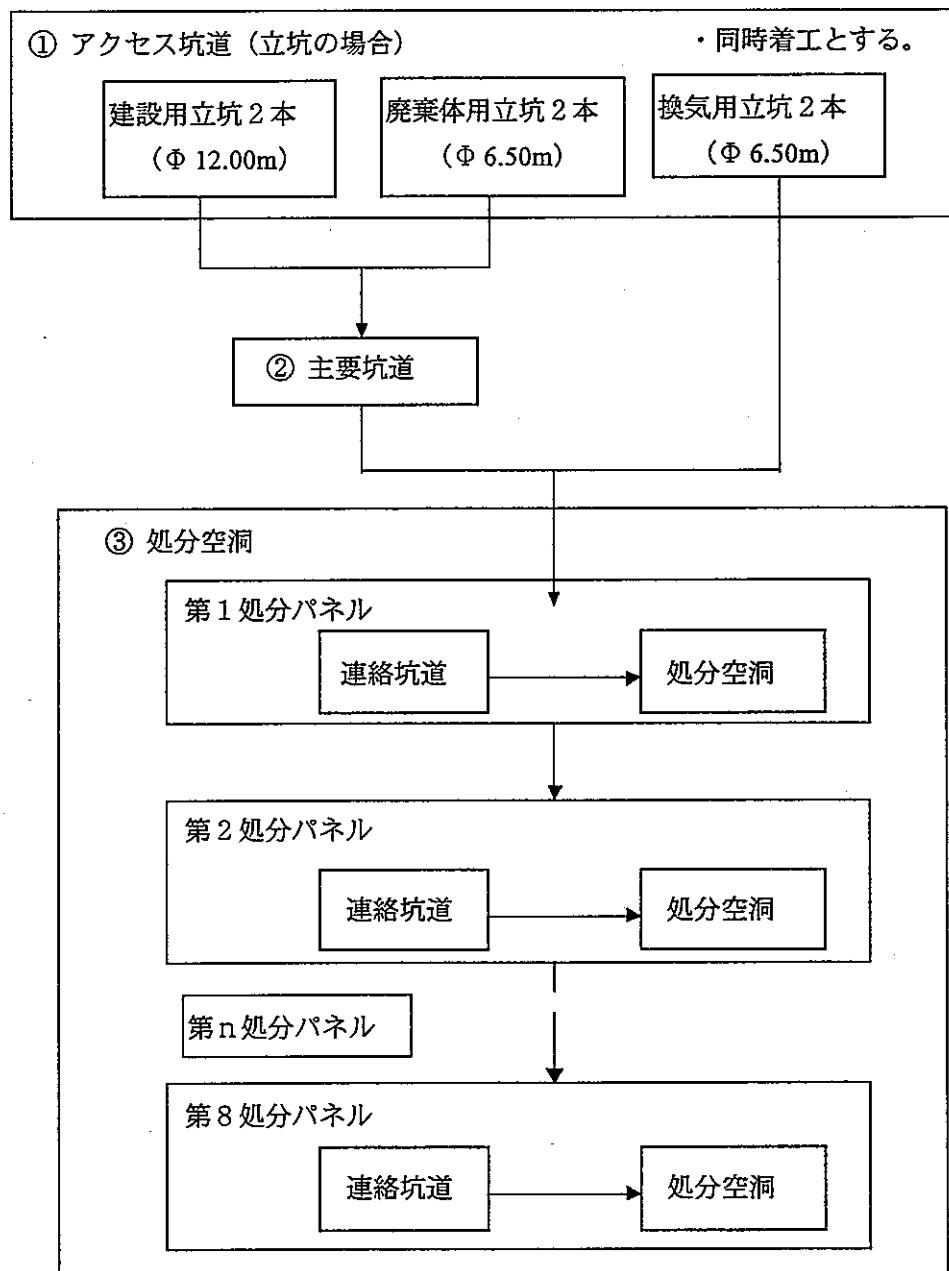


図-1.1.58 地下施設の施工手順

施工順序において、主要坑道の施工後は操業・閉鎖工程などとの整合性を考慮して順次処分パネルを施工することになる。

## (2) アクセス坑道

### (a) 基本的な考え方

アクセス坑道（立坑の場合）の施工方法を検討する上での主要な項目として次のことが考えられる。

- ・掘削順序（順次施工、同時着工）
- ・掘削工法（発破、機械）
- ・支保工、覆工方式

施工順序として各立坑を順次施工する方法と全立坑を同時に着工する方法が考えられる。各立坑を順次施工とした場合は、最初に掘削した立坑から主要坑道を一部掘削すれば、切上り工法や先進導坑施工による切広げ掘削する工法等の適用も可能となる。一方、全立坑を同時に着工する方法に比べ工期は長くなることが想定される。本検討では、工期が短くなることを考慮し立坑6本を同時に着工することとする。

掘削工法としては発破による方法と立坑掘削機やロードヘッダー等を用いた機械掘削による方法が考えられる。処分施設の場合、周辺岩盤を極力緩めないことが掘削工法を選定する上で重要な事項の一つとなっていることを考慮すると、機械掘削の適用が考えられる。しかし、機械掘削を適用する場合は、対象とする岩盤の硬さが問題となる。本検討で設定している岩盤の一軸圧縮強度( $q_u$ )は、堆積岩系岩盤の場合においても $q_u=50\text{ MPa}$ 以上と想定されることから、掘削対象の岩盤強度の観点から機械掘削の適用には経済性や作業効率で問題があると考えられる。

以上のことから、本検討では制御発破などの極力周辺岩盤を緩めない発破工法を採用することとする。今後の技術の進展によっては機械掘削の適用も考えられる。

支保工、覆工方式としては、高い地圧が想定されることから急速施工の可能な方式が求められる。また、地質、湧水等の変化および断面の変更に容易に対応可能な方法が望まれる。

### (b) 本検討での設定

立坑の場合の現状技術における掘削工法の一般的な分類比較を表-1.1.36に示す。

#### (i) 積岩系岩盤の場合

本検討では、同時に6本を施工するので、初期の設備投資が多大となり経済的でないとの考え方より、表-1.1.36のうち機械掘削は除外する。また立坑6本同時施工することから立坑下部に坑道がないため、切上げ工法は除外され切下がり工法が検討対象となる。以上より、堆積岩系岩盤で適用可能な掘削工法として表-1.1.36より次のものが考えられる。

- ・ショートステップ工法
- ・ロングステップ工法

ここで、高地圧を受けることと周辺岩盤への影響を考慮するとロングステップ工法は不適当と考えられる。

発破工法としては、周辺地盤の緩みを低減できるプレスプリッティングやスマーズブラストティングなど制御発破を採用するものとする。

#### (ii) 結晶質岩系岩盤の場合

堆積岩系岩盤の場合と同様に、結晶質岩系岩盤で適用可能な掘削工法として表-1.1.36より次のものが考えられる。

- ・ショートステップ工法
- ・ロングステップ工法

ここで、良質な岩盤であるものの周辺岩盤を緩めないこと、高地圧を受けることを考慮するとロングステップ工法は不適当と考えられる。

表-1.1.36 立坑掘削工法の評価

	工法の概要	適応地質	適用深度	断面	支保工・覆工	設備	安全性	緩み	施工条件に対する適用性					評価
									下部導坑なし	内径	深度	軟岩	硬岩	
立坑掘削 工法	ショートステップ工法	1発破ごとに掘削覆工(逆巻)を繰り返す。	軟岩～硬岩 (地質に対する適応性大)	特に制限なし (4.0m以下) 短いと割高	制限なし (4.0m以下) 非能率	コンクリート	大	普通	△	○	○	○	○	△
	ロングステップ工法	地山を一次支保工で押さえ、20～30mごとに順巻でまとめて覆工する。	中硬岩～硬岩 (軟弱、不良地質には不適)	同上	同上	鋼製支保工 コンクリート	大	普通	×	○	○	○	△	○ 端縁 ×△
	NATM工法	ロックボルト、吹付けコンクリートで地山を拘束。必要に応じて覆工する。	軟岩～硬岩	同上	同上	ロックボルト 吹付コンクリート	大	普通	○	○	○	○	○	○
発破掘削 切上り工法	人力切上り工法	立坑枠を組み、それを足場として切り上る。	中硬岩～硬岩	100m以下	4.0～8.0m <sup>2</sup> (矩形)	鋼製または木製支保工	小	悪	×	×	—	—	—	—
	クライマー工法	アリマッククライマーを用いて切上る。	中硬岩～硬岩 亀裂が多いとき不適	200m以下	4.0～6.0m <sup>2</sup> (矩形)	無支保	やや大	悪	×	×	—	—	—	—
	ステージカット プラスチ工法	長孔穿孔発破による切上り工法	同上	100m以下	特になし	同上	小	良	×	×	—	—	—	—
機械掘削 工法	レイズボーラ工法	パイロット孔を掘下げ(上げ) リミングアップ(ダウン)する。	軟岩～中硬岩 (崩落性、膨張性地山は不適。硬岩はコストアップ)	200m以下	φ1.0～2.0	同上	やや大	良	◎	×	—	—	—	—
	リバースサーチュ レーション工法	泥水を使用した全断面掘下げ方式。	軟岩(膨張性、逸水地山不可。硬岩は割高)	500m以上可	φ1.0～7.5	無支保またはケーシングパイプ	大	良	◎	○	△	○	△	○△
	シールド 切上り工法	鋼製セグメント支保組立装置付き、掘上り方式。	軟岩～中硬岩 (膨張性、崩落性地山でも可)	60～80m以下	φ1.2～1.5	鋼製 セグメント	やや大	良	◎	×	—	—	—	—
大断面工法	全断面立坑掘削機 による工法	全断面掘下り方式。支保工、覆工併行。	中硬岩～硬岩 不良地質は不可	500mの実績あり	φ4.5～9.0	鋼製セグメント、コンクリートセグメントまたは吹付コンクリート	特に大	良	◎	○	○	○	△	○
	自由断面掘削機	発破掘削に用いるスカフォードにロードヘッダを設置し切削する。	軟岩	特に制限なし	特に制限なし	セグメント 吹付コンクリート	やや大	良	◎	○	○	○	○	○ 端縁 ◎×
	シャフトボーリング 機械	スカフォード下で堅型ディスクカッタを回転させ切削する。	中硬岩～硬岩	特に制限なし	特に制限なし	セグメント 吹付コンクリート	大	良	◎	○	○	○	—	○
導坑先進切拡げ 工法	導坑先進切拡げ方式。導坑はクライマ、レイズボーラなどによる。	軟岩～硬岩(導坑掘削方式に規制される)	200m以下(導坑掘削方式に規制される)	φ0.4以上	コンクリート または吹付コンクリート	やや大	普通	◎	×	—	—	—	—	—
	全断面切上り工法	ケーブルボルト支保工を用いて発破入り足場にて切上る方式。	中硬岩～硬岩 (不良地山では剪壊盤改良)	100～200m以下	φ0.8以上	同上	やや大	良	×	×	—	—	—	—

### (3) 主要坑道、連絡坑道および換気坑道

#### (a) 基本的な考え方

主要坑道、連絡坑道等の施工方法を検討する上での主要な項目として次のことが考えられる。

- ・周辺岩盤への影響が小さい工法
- ・坑道断面形状に適合した工法
- ・坑道施工延長に適合した工法
- ・地質変化への対応が容易な工法
- ・工期的に満足し、経済的にも妥当な工法

機械掘削工法が優れていると考えられるが、経済性の面で問題となる可能性が高い。

掘削断面形状の観点からは円形ではない掘削断面にTBM工法やシールド工法を適用することは現状技術では経済性、技術面で問題があると考えられる。

坑道施工延長によっては、汎用性が少ない全断面掘削機やシールド掘削機は設備費が過大となることが想定される。以上のことから、本検討では極力周辺岩盤を緩めない発破工法（例えば、制御発破）を採用することとする。今後の技術の進展によっては機械掘削の適用も考えられる。

支保工、覆工方式としては、高い地圧が想定されることから急速施工の可能な方式が求められる。また、地質、湧水等の変化および断面の変更に対応が容易に可能な方法が望まれる。

#### (b) 本検討での設定

現状技術における掘削工法の分類比較を表-1.1.37に示す。

##### (i) 堆積岩系岩盤の場合

設備の経済性の観点から問題となる機械掘削の適用は現状技術では考えにくいことから、本検討では、掘削を極力周辺岩盤の緩みを抑えるプレスプリッティングやスムーズブレッディングなど制御発破により行うものとする。

支保工・覆工は、本検討で想定している掘削深度（300m、700m）から下記の長所を有しているNATM工法が現状技術からみて最適な工法と考えられる。

- ・地質、湧水等の変化に即応できる。
- ・状況に応じて断面を自由に変更できる。
- ・横坑との連結部施工が容易である。

以上の検討から、堆積岩系岩盤の坑道は制御発破により掘削しNATM工法により施工するものとする。

##### (ii) 結晶質岩系岩盤の場合

堆積岩系岩盤の場合と同様に、結晶質岩系岩盤の坑道は制御発破により掘削しNATM工法で施工するものとする。良質な岩盤であることから無支保にすることも考えられる。

表-1.1.37 坑道掘削工法の評価

工 法		工 法 の 概 要	適 応 地 質	支保工、覆工	設 備	安全 性	施工条件に対する必要性		評 価
							緩 み	延長に対する経済性	
発破掘削	NATM工法	発破、ズリ出しの後、直ちに吹付コンクリート、ロックボルトで地山を拘束する。	軟岩～硬岩	・吹付コンクリート ・ロックボルト	普 通	△	×	○	×
機械掘削	全断面掘削機(TBM)	地山に反力をとり、掘削しながら推進する。機械後方で支保工を行う。	中軟岩～硬岩 (不良地質は不可)	・吹付コンクリート ・支保工	大	○	○	×	×
	自由断面掘削機	ブーム付きカッターで切削し、直ちに吹付コンクリート、ロックボルトで地山を拘束する。	軟岩～中硬岩	・吹付コンクリート ・ロックボルト	やや大	○	○	○	○
	シールド掘削機	シールド機内でセグメントを組立て、これに反力をとり掘進する。	軟岩～硬岩	鋼製・コンクリートセグメント	大	○	○	×	×

#### (4) 処分空洞

##### (a) 基本的な考え方

本検討では、岩洞方式（大断面  $H=32.0m, B=21.5m$ 、小断面  $H=20.7m, B=14.0m$ ）坑道方式（ $H=10.1m, B=8.4m$ ）及びサイロ方式（ $H=39.0m, \Phi=24.7m$ ）の3つの方式の処分空洞を設定している。坑道方式の場合は、断面形状とその他の条件が主要坑道や連絡坑道に同等であることから施工方法も同じ方法を適用できるものと考えられる。

処分空洞の施工方法を検討する上で主要な項目は、主要坑道、連絡坑道等と同様であり次の項目が考えられる。

- ・周辺岩盤への影響が小さい工法
- ・坑道断面形状に適合した工法
- ・坑道施工延長に適合した工法
- ・地質変化への対応が容易な工法
- ・工期的に満足し、経済的にも妥当な工法

一方、岩洞方式とサイロ方式は掘削断面が大きく、上記の項目に加え掘削方法の検討が重要となる。掘削方法としては規模及び形状の観点から類似している地下発電所と同じ方法によることが適切と考えられる。

##### (b) 本検討での設定

###### (i) 岩洞方式の場合

掘削は、連絡坑道の場合と同様に堆積岩系及び結晶質岩系とも対象岩盤の硬さに対する適用性と設備の経済性の観点から機械掘削の適用は現状技術では考えにくいことから、極力周辺岩盤の緩みを抑える制御発破により行うものとする。

支保工・覆工も、本検討で想定している掘削深度（300m、700m）からNATM工法が現状技術からみて最適な工法と考えられる。

一方、施工手順としては、地下発電所での実績から以下に示す方法を想定する。

- ・岩洞上部連絡坑道及び下部連絡坑道を掘削する。
- ・空洞頂部（頂設）を掘削後、吹付け、ロックボルトを施工する。
- ・頂設下面と下部連絡坑道間にずり出し用立坑（グローリホール  $\Phi 2.0m \sim 2.5m$  程度）を施工する。
- ・頂設下部からベンチカット（1ベンチ高さ 5.0m 程度）により制御発破で分割掘削する。
- ・掘削ずりは、グローリホールにより空洞下部に施工した連絡坑道に落とし搬出する。
- ・資材は天井クレーンを設置しベンチ部に供給する。吹付けコンクリートはシートにて供給する。

施工手順の概念を図-1.1.59に示す。

1.1.122

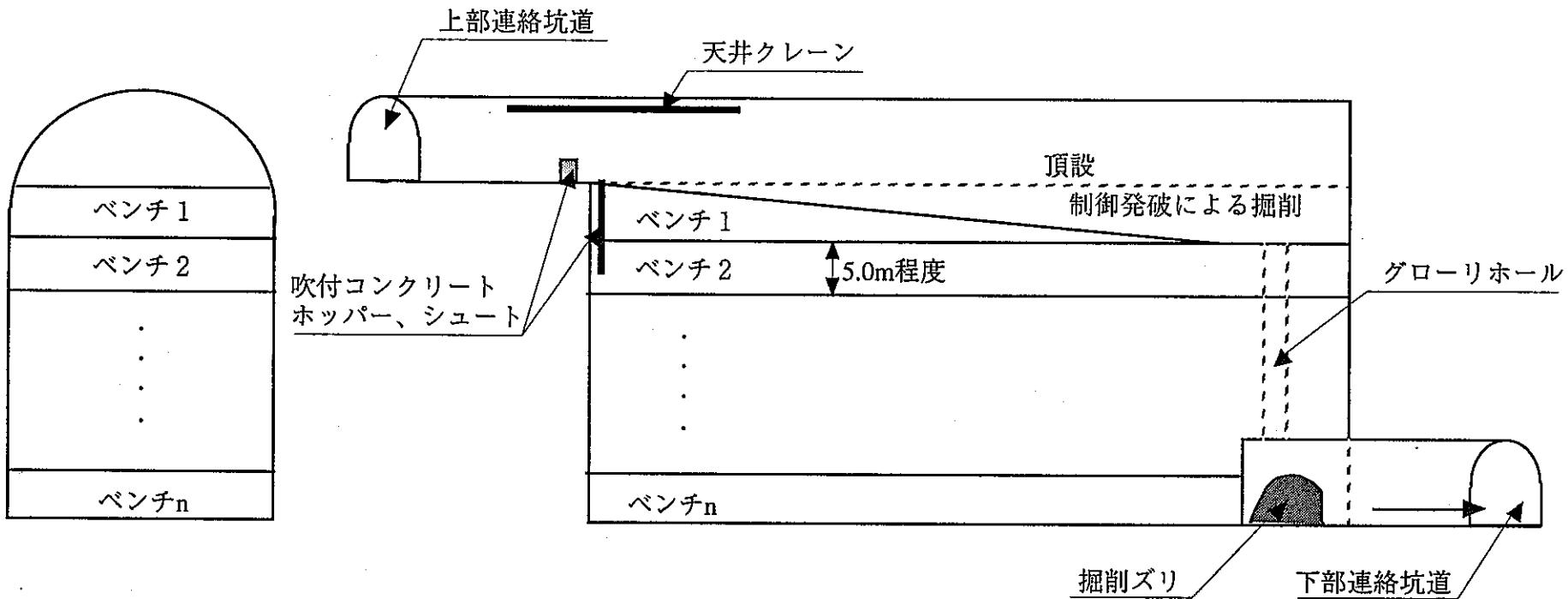


図-1.1.59 施工手順の概念（岩洞方式の場合）

#### (ii) 坑道方式の場合

主要坑道、連絡坑道の場合と同様に、堆積岩系及び結晶質岩系とも制御発破により掘削し支保工・覆工はNATM工法によるものとする。

#### (iii) サイロ方式の場合

サイロ方式の掘削は岩洞方式と同様に、堆積岩系及び結晶質岩系とも極力周辺岩盤の緩みを抑える制御発破により行い、支保工・覆工はNATM工法によるものとする。施工手順についても同様に地下発電所での実績から以下に示す方法を想定する。

- ・サイロ上部連絡坑道及び下部連絡坑道を掘削する。
- ・サイロ上部連絡坑道からアーチ部をアーチ切抜け方式により掘削する。
- ・アーチ部の吹付け、ロックボルトを施工する。
- ・サイロ下部連絡坑道とアーチ部間にずり出し用立坑（グローリホールΦ 2.0m～2.5m程度）を施工する。
- ・アーチ部下面からベンチカット（1ベンチ高さ1.5m程度）により制御発破で分割掘削する。
- ・掘削ずりはグローリホールより下部連絡坑道に落とし搬出する。
- ・資材は天井クレーンを設置しベンチ部に供給する。吹付けコンクリートはシートにて供給する。

施工手順の概念を図-1.1.60に示す。

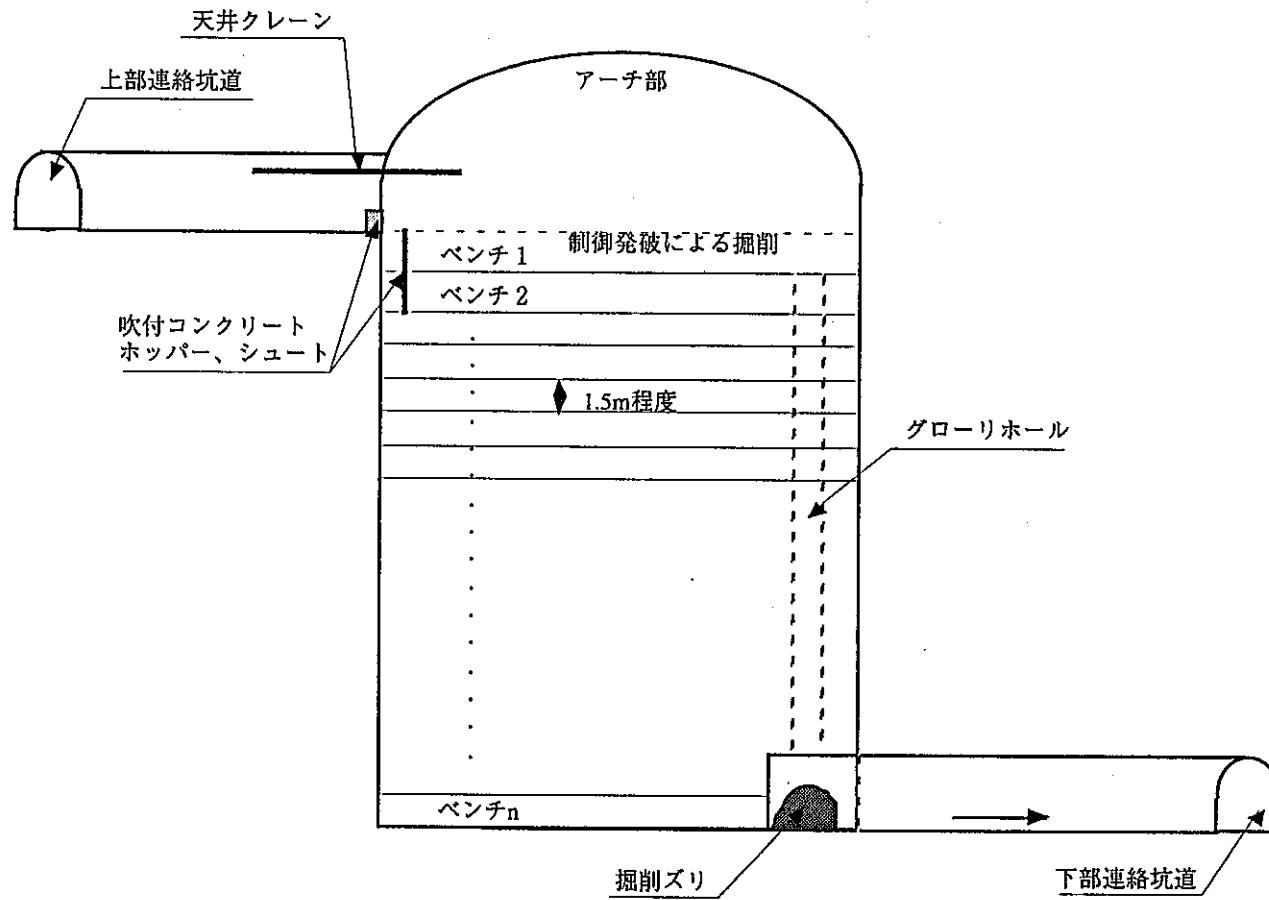


図-1.1.60 施工手順の概念（サイロ方式の場合）

##### (5) 人工バリア製造設備の仕様

建設、操業及び閉鎖段階に使用する人工バリア材（セメント系材料、ベントナイト系材料）の製造は地上で実施することとする。製造に必要な主な設備を以下に挙げる。

- ・掘削ズリ置きヤード
- ・骨材製造設備
- ・セメントサイロ
- ・ベントナイトサイロ
- ・コンクリート製造プラント（ミキサー）
- ・ベントナイト混合土製造プラント（ミキサー）
- ・ベントナイトブロック製造プラント
- ・ベントナイトブロック仮置きヤード

これらの設備は、それぞれの1日の最大使用量を想定し、その量から必要なサイロ容量、ミキサー容量、ヤード広さなどの設定を行う。

### 1.1.3.3 操業計画

#### (1) 廃棄体収納容器（コンテナ）

##### (a) 基本的な考え方

本検討では、処分施設搬入における廃棄体の形態として「1.1.1 前提条件」で示した廃棄体の熱特性によって分類した以下の2種類を考慮する。

- ・非発熱性廃棄物

低レベル廃液、廃溶媒及び雑固体等を収納した200L（Φ58×85cm）ドラム缶

- ・発熱性廃棄物

ハル・エンドピースを収納した100L（Φ43×104cm）キャニスター

上記の廃棄体を地下処分空洞に搬入し定置する一連の操業の流れを検討するには、廃棄体の搬送・定置をどのような形態で行うかを設定することが必要となる。この廃棄体の搬送・定置時の形態とその重量は、搬送方法、定置方法を検討する上で基本的な要素の一つであり、主として次の項目と関連する。

- ・搬送車両の仕様

最大積載重量、廃棄体積載数、寸法、搬送車両への廃棄体積載方法等

- ・廃棄体ハンドリング機器の仕様

地上施設、地下施設での廃棄体ハンドリング機器の仕様

- ・廃棄体の定置方法及び定置数量

- ・操業時のサイクルタイム及び工程スケジュール

操業における廃棄体のハンドリング・搬送・定置作業の安全性と効率を考慮すると、廃棄体を数本まとめて収納した容器（以下、廃棄体コンテナと言う）を用いることが考えられる。廃棄体の最終処分形状とその重量は、この廃棄体コンテナを想定し検討する。

#### (b) 本検討での設定

##### (i) 廃棄体コンテナの形状寸法・重量

廃棄体コンテナの形状寸法・重量の設定を行うために、次のことを考慮する。

- ・立坑エレベーターの仕様

- ・搬送車両の仕様

- ・定置設備の仕様

- ・操業効率

- ・処分空洞の効率的利用

- ・廃棄体コンテナの放射線に対するしゃへい性

## ① 立坑エレベーターの仕様

アクセス方式を立坑とした場合は、エレベーターかごの大きさと積載可能重量が廃棄体コンテナの仕様を設定する要素となる。本検討で設定している立坑直径は 6.5 m であるが、地下施設用のケーブル等の設備が設置されることなども考慮して、エレベーターかごの大きさは、幅 2.5 m、奥行き 4.0 m、高さ 5.0 m、積載重量を 20t とした。

## ② 搬送車輌の仕様

搬送車輌の仕様の面からは廃棄体コンテナの幅が要点となる。本検討での主要坑道、連絡坑道は、建設時に必要な幅として 9.0m と設定した。操業時に 2 車線通行をし、更に余裕 1 m を想定すると、搬送車輌の幅は 3.5 m 程度は可能となる。一方、エレベーターかごの幅は 2.5m 程度であることから、搬送車輌の幅は余裕をみて 2.0m 程度と想定できる。従って、廃棄体コンテナの幅は、搬送車輌の仕様の面から 2.0m 以下とする。

廃棄体コンテナの重量については、エレベーターの方で制限されることから、搬送車輌からの制限は設定しない。

## ③ 定置設備の仕様

定置設備の仕様の面からは、廃棄体コンテナの重量が要点となる。定置設備として、天井クレーン、フォークリフトが想定されるが、一般的に、エレベーターの制限重量以上の仕様のものは容易に設備できる。従って、定置設備として廃棄体コンテナの重量に対する制限は設定しない。

## ④ 操業効率

操業効率の面からは、廃棄体コンテナに収納する廃棄体数を多くし、搬送・定置の工数を減少させることが考えられる。また、廃棄体コンテナの種類を少なくしつつ平面形状を正方形とし操業工程を単純化することがよいと言える。従って、操業効率の面からは、廃棄体コンテナには出来るだけ多くの廃棄体を収納するものとし、形状の種類は 1 種類とするなどを想定する。

廃棄体コンテナの高さは、安定性を考慮すると少なくとも幅より低くすることが考えられる。

## ⑤ 処分空洞の効率的利用

処分空洞により多くの廃棄体を処分しようとすると、廃棄体コンテナの寸法は小さい方が有利となる可能性があるが、操業の作業性は廃棄体コンテナ数が増加することから低下すると考えられる。設定した処分空洞規模を考えると廃棄体コンテナの大きさが処分空洞の効率的利用の観点からは大きく影響するとは考えにくいことから、本検討では本要因は考慮しないこととする。

## ⑥ 廃棄体コンテナの放射線に対するしやへい性

放射線は加速された粒子線と電磁放射線に大別され、前者には $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、中性子線、陽子線、後者にはX線、 $\gamma$ 線がある。このうち $\gamma$ 線及び中性子線は透過性が大きく、生体に放射線障害を起こしたり、材料の性質を劣化させたりするとされているので厳重にしやへいする必要がある。

図-1.1.61 に、物質の $\gamma$ 線しやへい効果を示す<sup>9)</sup>。各材料をしやへい体として用いた場合に、 $\gamma$ 線強度を1/10に低減させる必要厚さを示したものである。コンクリートに関して言えば、しやへい体の厚さを薄くする必要がある場合には密度の大きい重量コンクリートが用いられるが、一般には経済性を考えて普通骨材コンクリートが使用される。

コンクリート製の廃棄体コンテナの部材厚として10cm程度を設定すると、図-1.1.61より、0.4MeV程度の $\gamma$ 線エネルギーなら1/10程度に低減できることがわかる。ただし、廃棄体ドラム缶及びキャニスターからどの程度の放射線が漏出するか定量的な数値が示されていないため、今後ドラム缶及びキャニスターからの放射線漏出量の把握と、その放射線量による廃棄体コンテナ部材厚の検討を行う必要がある。

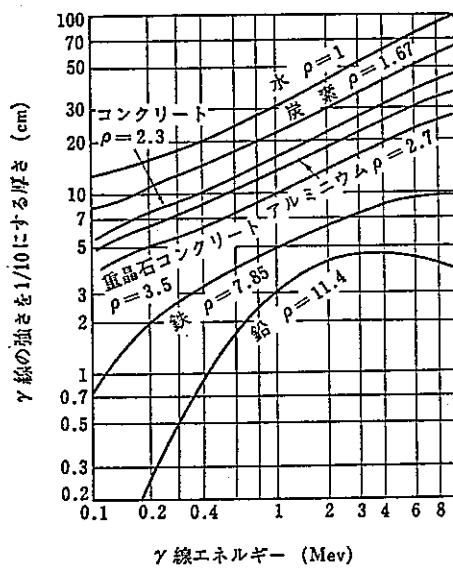


図-1.1.61 物質の $\gamma$ 線しやへい効果

以上の検討から、廃棄体コンテナの寸法及び重量を設定する条件として次のことが考えられる。

- ・重 量 (搬送台車を含む) 20 ton 程度
- ・寸 法 幅 2.0m 以下  
高さ 幅以下  
(200L ドラム缶及び100L キャニスターを両方とも収納可能)
- ・平 面 形 状 正方形

上記条件を満足した廃棄体コンテナの形状及び重量を図-1.1.62 に示す。

1.1.129

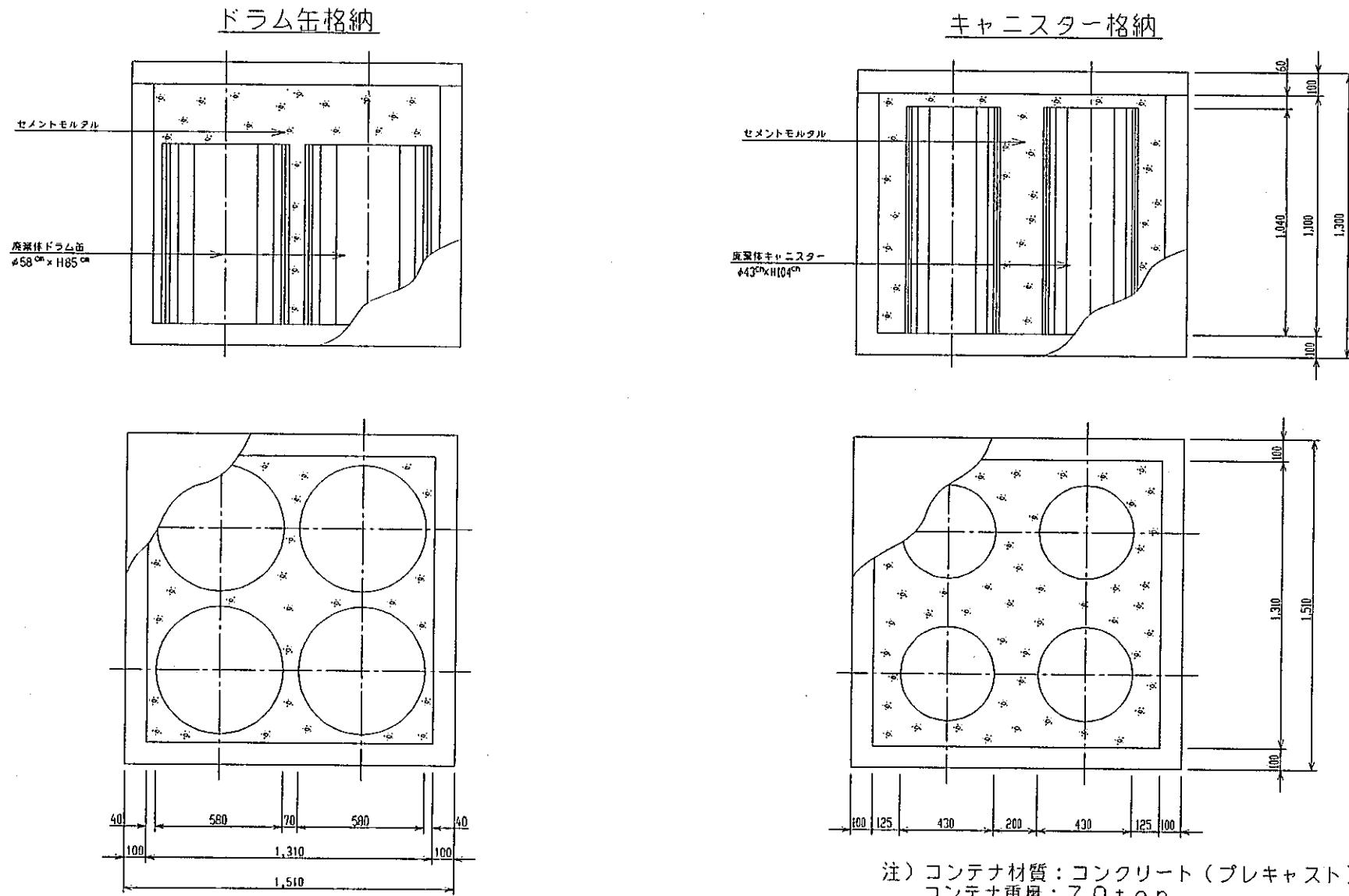


図-1.1.62 廃棄体コンテナ 形状図

## (ii) 廃棄体コンテナの製造

廃棄体コンテナは、地上施設において発熱性廃棄体と非発熱性廃棄体とをそれぞれ別の系統で収納して製造し、地下施設へ搬送されるものとする。この廃棄体コンテナ製造施設には、廃棄体の一時保管機能と製造したコンテナの仮置き機能があるものとする。

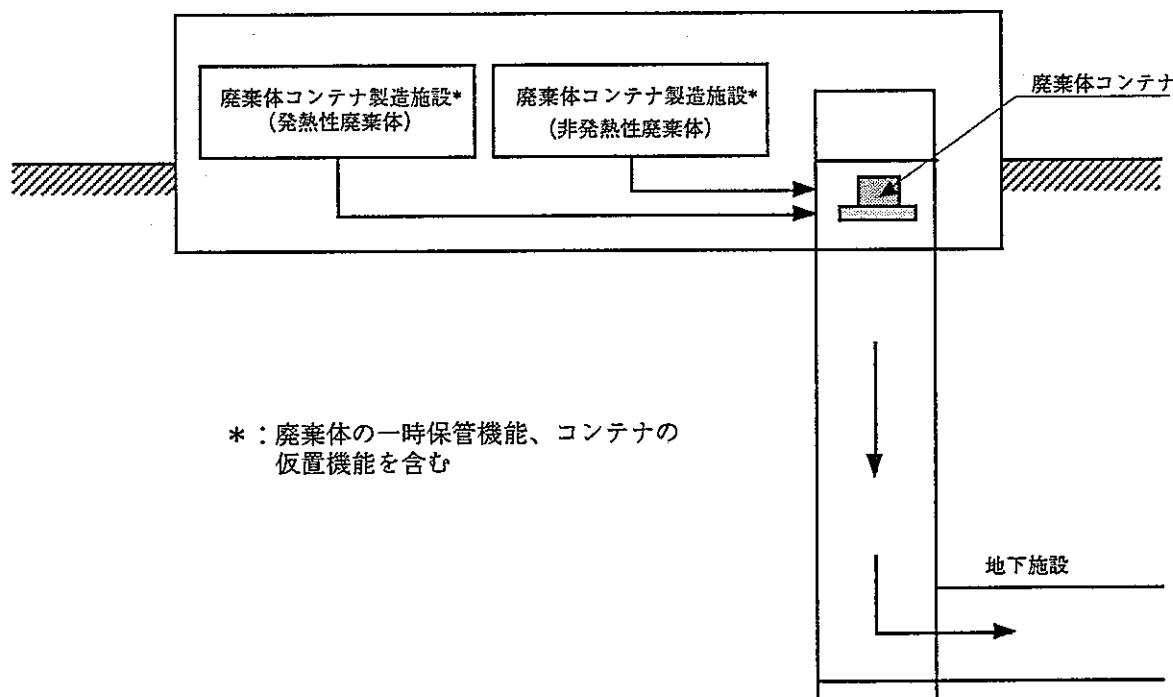


図-1.1.63 廃棄体コンテナの製造

## (2) 廃棄体の定置方法

### (a) 基本的な考え方

廃棄物地層処分空洞の形状としては、坑道型と地下発電所の例に見られる岩洞型及びサイロ型の3つが考えられる。一般的には廃棄体の定置方法は、この処分空洞の形状及び廃棄体特性の違いに対応して異なったものとなる。

しかし本検討では、廃棄体は全て同じ形状の廃棄体コンテナに収納して処分する。従って、定置方法の検討では、廃棄体特性の違いによる影響は少なく、主として坑道・岩洞型とサイロ型の違いが重要になると言える。

廃棄体の熱特性による定置方法への影響は、発熱性廃棄体を処分空洞内にどのように分散させて定置するかなど熱解析の結果を反映して検討する必要がある。本検討では同じ形状の廃棄体コンテナを処分空間に積み上げていく作業となるため、発熱性廃棄体を任意の位置に定置することが容易に可能である。そのため、定置方法の検討上特に廃棄体の特性を考慮する必要はないと言える。

### (b) 本検討での設定

#### (i) 定置作業の基本仕様

定置作業は次の理由により自動化を目指したものと想定する。

- ・放射性物質を取り扱うため、作業員の被ばくを回避するため。
- ・長期間に渡る同一作業の繰り返しとなるため。
- ・高効率化したシステムを構築するため。
- ・操業開始までの期間内に信頼性のある定置作業機器の開発は可能と考えられる。

#### (ii) 坑道型・岩洞型の定置方法

##### ① 定置作業機器

定置作業機器としては、比較的大きな断面の岩洞型では天井クレーンにより、比較的小さい断面の坑道型ではフォークリフトが考えられる。本検討で設定した処分施設での処分ピットの高さは20.3m、12.3m、4.5mであることから、処分ピットの高さ4.5mの坑道型以外はフォークリフトでは対応不可能であり天井クレーンを採用することになる。また、フォークリフトで対応可能なピットの高さである場合でも、前述のように自動化することを考慮すると安全性と信頼性の観点から優位な天井クレーンの採用が望まれる。

以上のことから、本検討では廃棄体の定置作業には天井クレーンを用いることとする。

## ② 処分ピットの区分形式

廃棄体コンテナを定置するために構築するコンクリートピットは、構造上の力学的条件から隔壁により幾つかに分割する必要がある。分割の大きさを設定する要素として、定置作業を天井クレーンで行うことによる定置精度・安全性及び構造上の要求が考えられる。

本検討では、処分ピットを構造上必要な隔壁間隔により分割することとする。坑道型と岩洞型断面の隔壁で分割したピットの大きさは以下のとおりである。

・ 岩洞型（大断面）	幅 8.25m × 奥行き 10.0m	(廃棄体コンテナ 5 個 × 6 個)
・ 岩洞型（小断面）	幅 5.15m × 奥行き 6.5m	(廃棄体コンテナ 3 個 × 4 個)
・ 坑道型	幅 3.2m × 奥行き 3.5m	(廃棄体コンテナ 2 個 × 2 個)

## (iii) サイロ型の定置方法

### ① 定置作業機器

坑道型、岩洞型の場合と同様に天井クレーンにより定置作業を行うものとする。

### ② 処分ピットの区分形式

坑道型・岩洞型の場合と同じ理由から、処分ピットを幾つかに分割する。本検討で設定したサイロ空洞処分ピットの高さは 28.6 m であることから、定置精度が坑道型・岩洞型の場合より問題になるとを考えられる。

本検討では、処分ピットを構造上必要な間隔と定置精度を考慮して廃棄体コンテナ 4 個分の面積 (3.22m × 3.22m) をもつ大きさとする。

定置方法について個々の項目の設定を行った。それらに基づき、本検討で設定した定置方法をまとめて図-1.1.64～図-1.1.67 に示す。

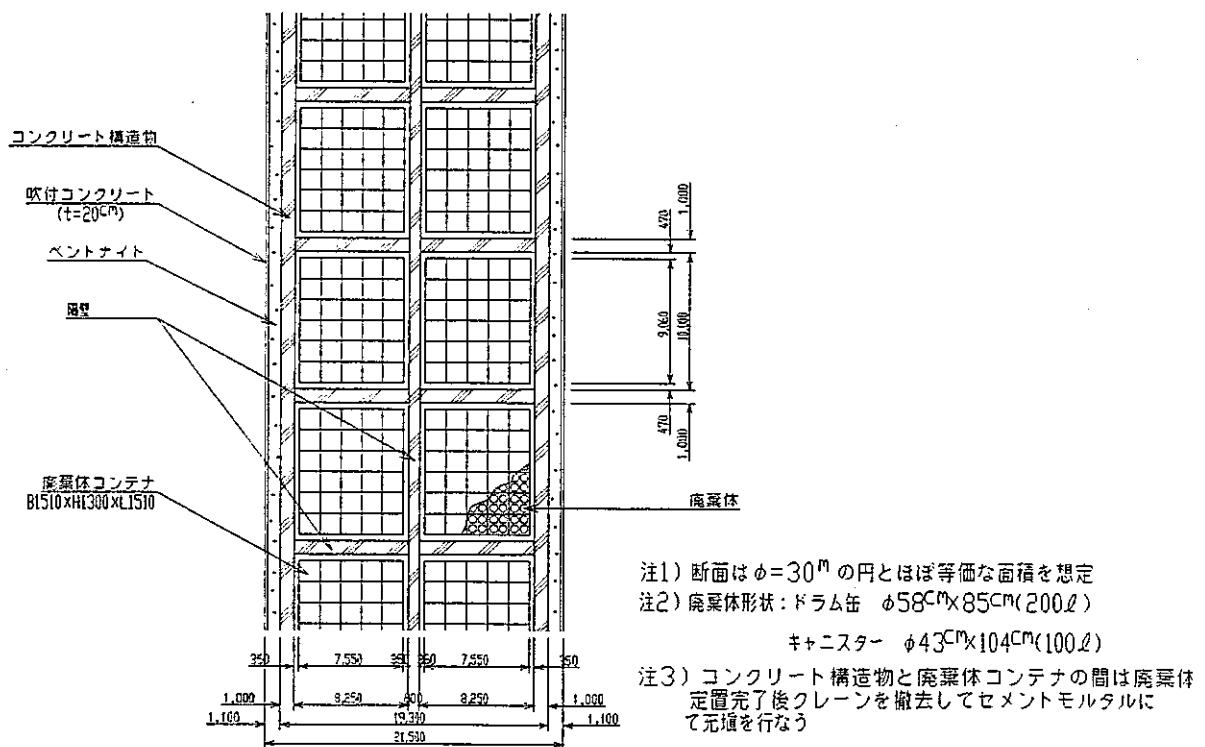
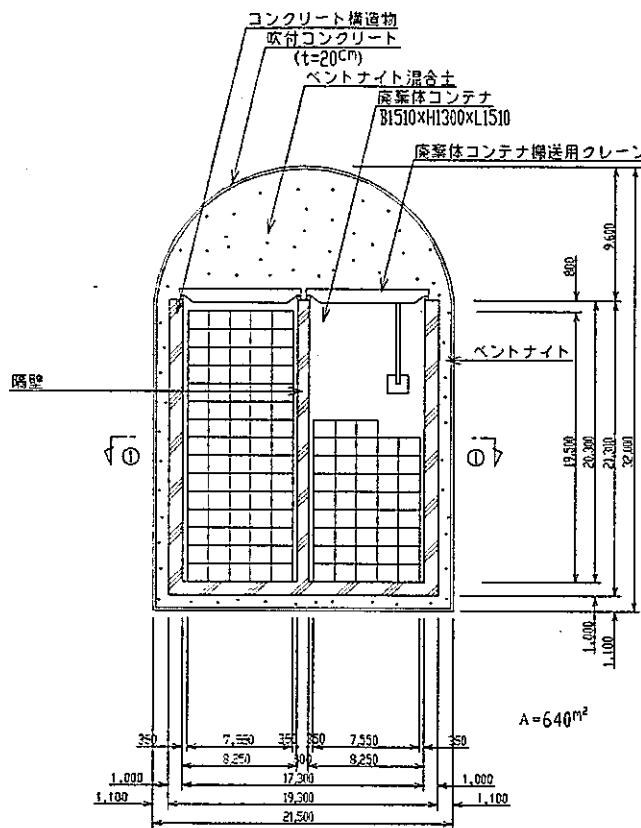


図-1.1.64 大断面岩洞方式 廃棄体定置図

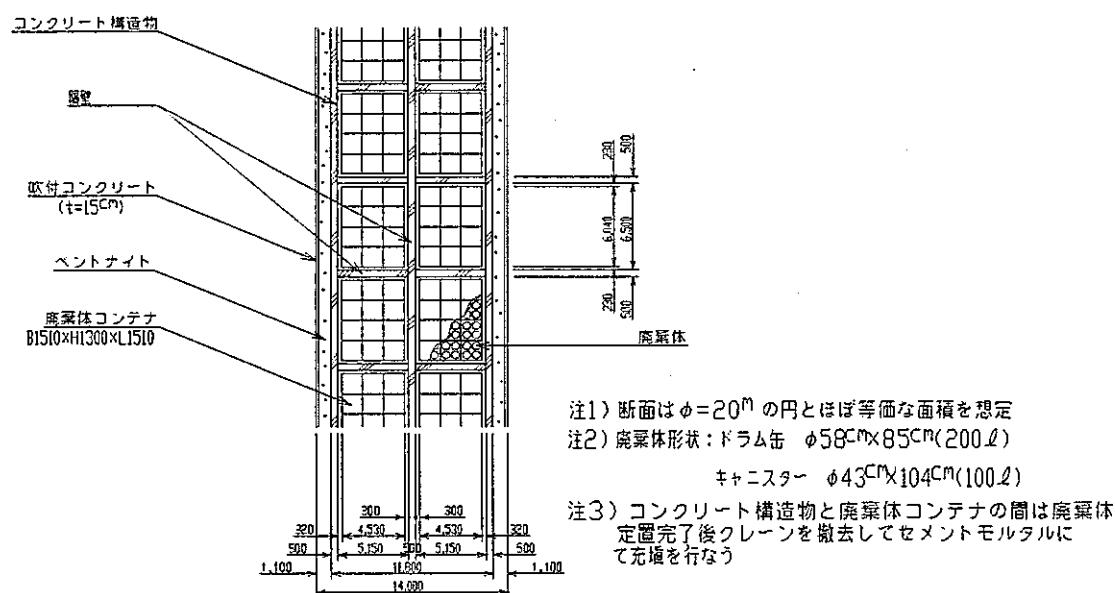
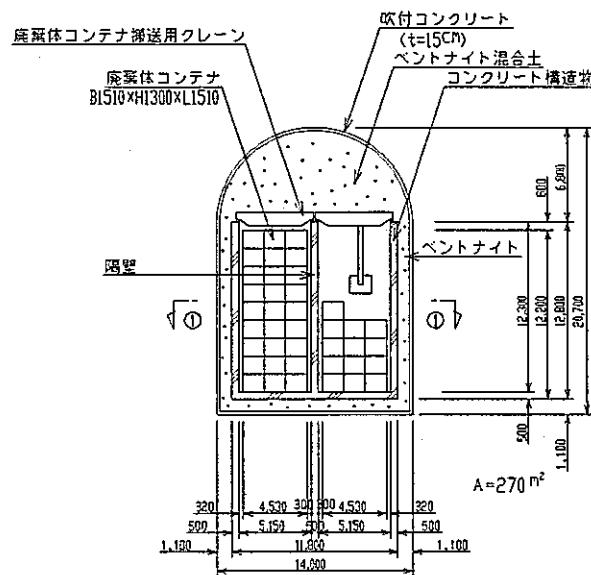
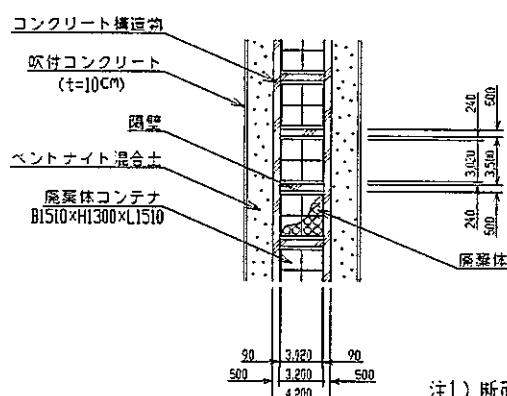
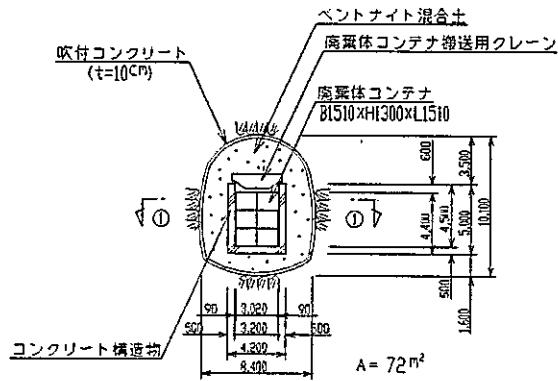


図-1.1.65 小断面岩洞方式 廃棄体定置図



注1) 断面は  $\phi=10\text{m}$  の円とほぼ等価な面積を想定  
注2) 廃棄体形状: ドラム缶  $\phi 58\text{cm} \times 85\text{cm}$  (200L)  
キャニスター  $\phi 43\text{cm} \times 104\text{cm}$  (100L)

注3) コンクリート構造物と廃棄体コンテナの間は廃棄体  
定位完了後クレーンを撤去してセメントモルタルに  
て充填を行なう

図-1.1.66 坑道方式 廃棄体定置図

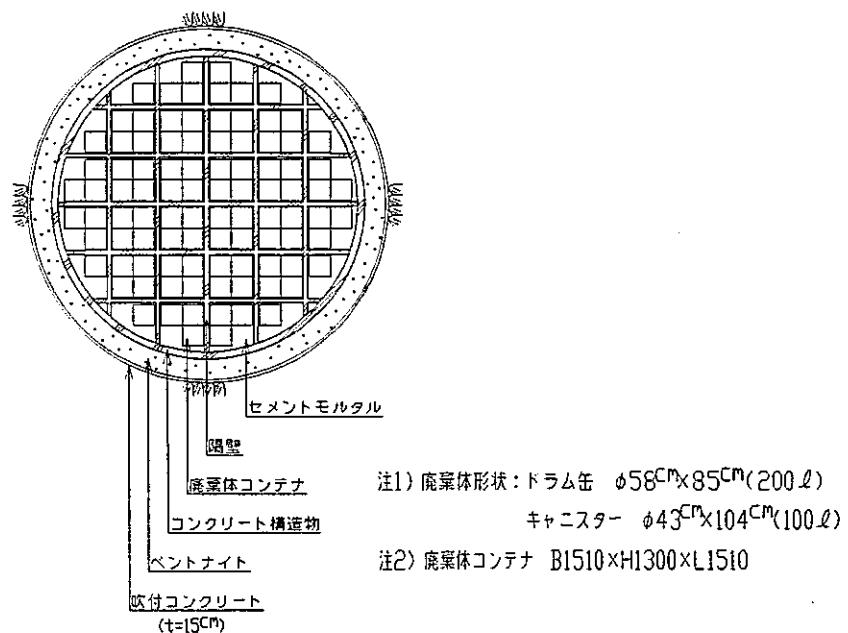
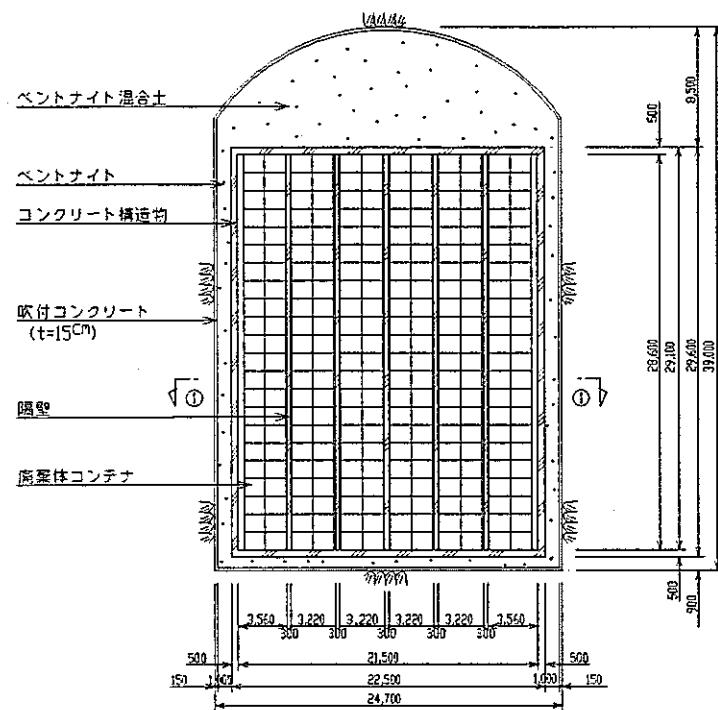


図-1.1.67 サイロ方式 廃棄体定置図

### (3) 廃棄体の搬送方法

搬送方法の検討は、廃棄体コンテナを地上施設から地下施設へ搬入し、所定の処分空洞内の定置位置に移送するまでの範囲とする。

#### (a) 基本的な考え方

操業は、長期間にわたり同一作業を繰り返し行うこと及び放射線管理を要する廃棄体を取り扱う作業であることから、各種作業は出来る限り自動化しつつ効率のよいものとすることが望まれる。

#### (b) 本検討での設定

##### (i) 立坑での搬送方法

廃棄体をアクセス坑道を通じて搬送するとき、地上部及び地下部で廃棄体コンテナの積み降し作業が発生する。その際、廃棄体を積み替える作業は安全性と作業効率の面から避けるのが良いと考えられる。

本検討では、廃棄体コンテナを直接操作する作業を減らしつつ効率的にするため、搬送台車により搬送することとする。この方式では、立坑エレベーターへの積み降しは搬送台車ごとを行うため、廃棄体コンテナをハンドリングする作業は、地上施設での積込みと処分空洞内定置位置での荷降し時のみとなる。

##### (ii) 地下施設内での搬送方法

地下施設内では、搬送台車に載せた廃棄体コンテナを牽引車により立坑部から処分空洞の出来る限り定置位置に近い所まで搬送する。

搬送方式としては、次の方法が考えられる。

- ・軌道方式
- ・無軌道方式

これらの方にはそれぞれ特質があるが、本検討では操業パネルの移動に伴う搬送経路の変更への対応性、更には、主要坑道は操業作業時と建設・閉鎖作業時に兼用されるために搬送車両の他に工事車両が通行することを考慮し、無軌道方式を設定する。この方式については信頼性に問題があるとも考えられるが、操業開始までには解決できるものと考えられる。

##### (iii) 搬送台車と牽引車の仕様

###### ① 搬送台車

搬送台車の大きさと重量は、廃棄体コンテナの寸法・重量、立坑エレベーターかごの寸法・積載可能重量等を考慮して設定する。

###### ・搬送台車の重量

廃棄体コンテナを2個積載するものとする。廃棄体コンテナ重量は、現時点で廃棄体の重量が全てわかっていないため、コンテナ内を全てコンクリートで充填した場合の重量で仮定した。

廃棄体コンテナ重量	$1.51m \times 1.51m \times 1.3m \times 2.4t/m^3 = 7.0ton$
	$7.0ton \times 2 = 14.0ton$
搬送台車自重（想定）	8.0 ton
合 計	22.0 ton

#### ・搬送台車の寸法

廃棄体コンテナ（ $1.51m \times 1.51m$ ）を2個積載するものとすれば、搬送台車の大きさは、固定器具及び余裕を考慮して  $2.0m \times 4.0m$  程度以下になると想定できる。

以上より、搬送台車は、本検討で設定した立坑エレベーターの積載可能重量、かごの大きさ及び主要坑道、連絡坑道の幅以下となる。

本検討では、搬送台車の仕様を廃棄体コンテナを2個積載する幅  $2.0m$ 、長さ  $4.0m$  のものとする。

#### ② 牽引車

牽引車の性能は、搬送台車の牽引台数、搬送経路の勾配等を考慮して設定する。本検討では、牽引車の性能を走行速度で設定するものとし、往路・復路とも  $6 km/h$  と想定する。

搬送台車と牽引車の仕様概念を図-1.1.68に示す。

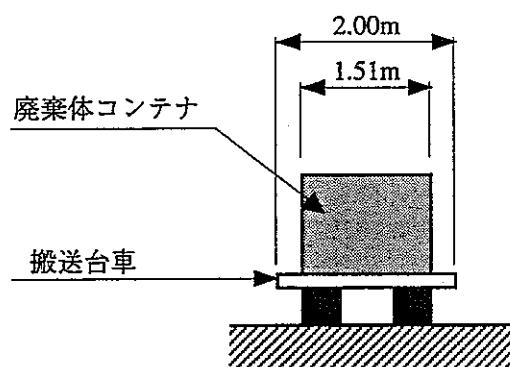
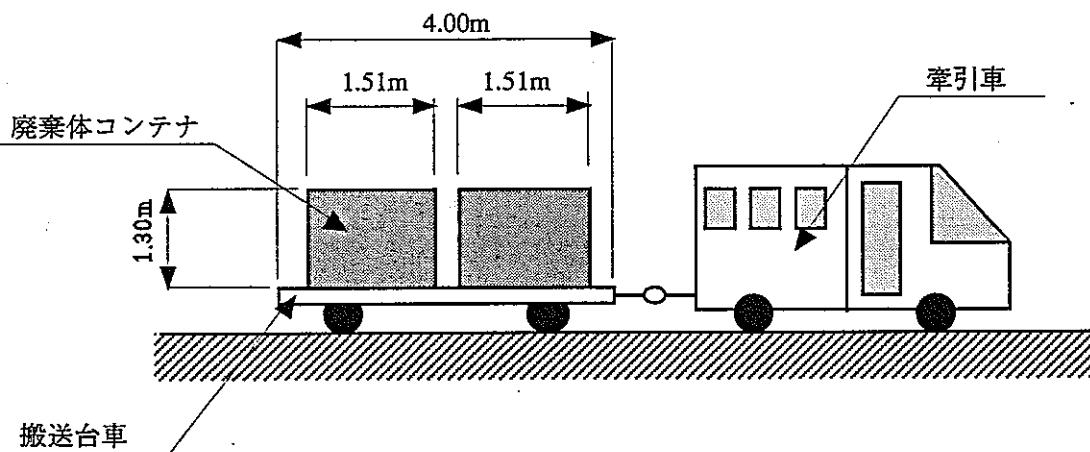


図-1.1.68 搬送台車と牽引車の仕様概念

#### (4) 操業全体の流れと工程

(1)～(3)において操業の主要な要素について検討を行った。ここでは、検討結果を操業の基本的要件としてまとめて示す。また、操業手順の概念を示しそれに基づく操業に必要な各種搬送設備、定置設備の作業時間と設定し、全体スケジュールを検討する上で必要な操業作業の工程を検討する。

##### (a) 操業の基本的要件

(1)～(3)で検討した結果をまとめて表-1.1.38に示す。

表-1.1.38 操業の基本的要件

項目	設定内容	備考
廃棄体に関する要件	廃棄体形状 200L (Φ 58×85cm) ドラム缶 (非発熱体) 100L (Φ 43×104cm) キャニスター (発熱体)	
	処分量 200,000本 (非発熱体+発熱体)	
	最終処分形態 廃棄体コンテナを使用 形状 幅 1.51m 奥行き 1.51m 高さ 1.30m 重量 約 7.0 t/個 廃棄体収納数 4本/個	
	廃棄体コンテナ個数 50,000個 (200,000/4=50,000)	
	処分期間 20年	
搬送に関する要件	処分速度 廃棄体コンテナ 2,500個/年 10個/日 (年 250日稼動)	
	処分深度 結晶質岩系 300m 700m 堆積岩系 300m	
	操業と他の作業との関係 操業は建設・閉鎖と同一時期に行うが、地下処分施設をアクセス坑道部を中心に2分割した一方で独立して行う。 従って、基本的に搬送ルートは建設・閉鎖作業とは分離している	
定置に関する要件	搬送方法 搬送台車に廃棄体コンテナを2個載せ牽引車により搬送する アクセス坑道(立坑)では搬送台車ごとエレベーターに載せる アクセス坑道(立坑)は廃棄体搬送専用である。	
	処分空洞型式 以下の4型式とする。 ・坑道型 ・岩洞型(大断面) ・岩洞型(小断面) ・サイロ型	
定置機器	どの処分空洞型式も天井クレーンによる。	

(b)操業手順

操業手順の概念を図-1.1.69に示す。

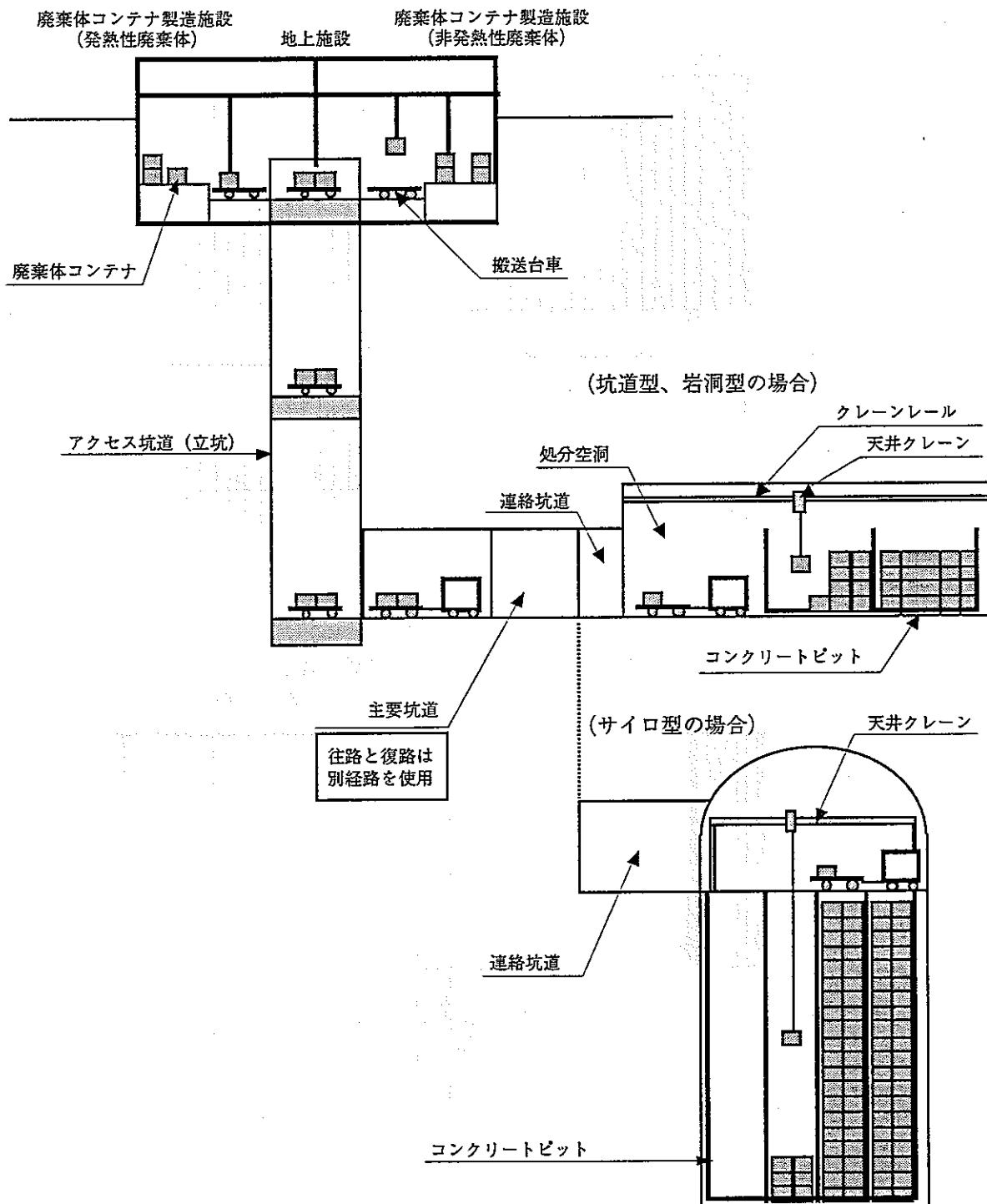
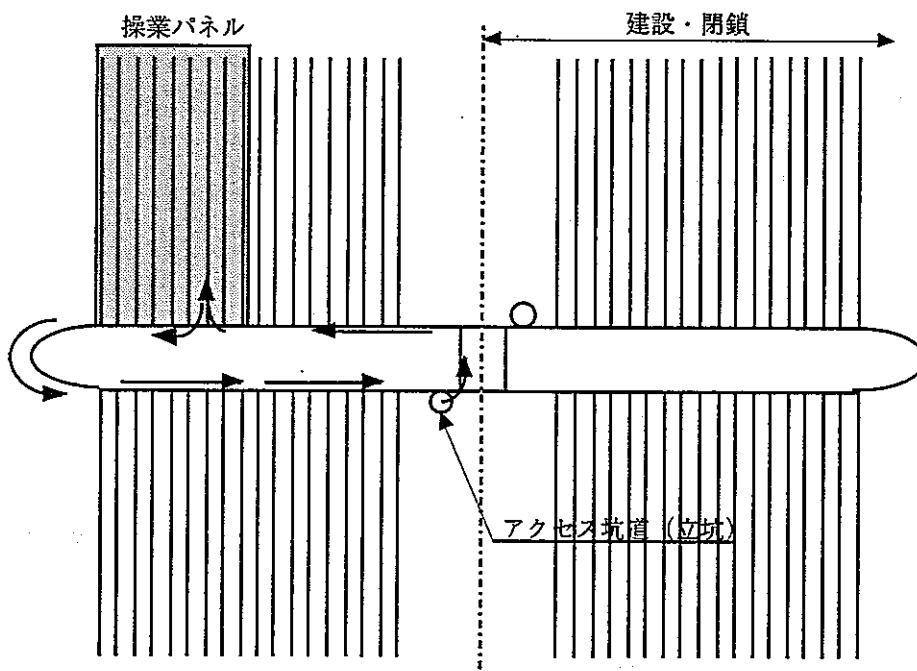


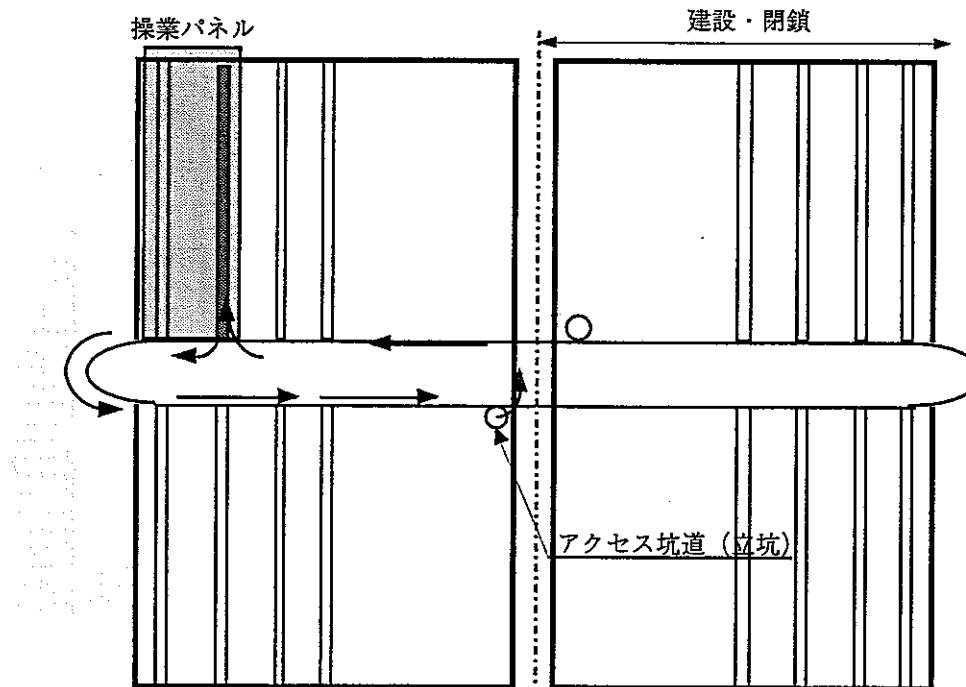
図-1.1.69 操業手順の概念図

(c) 搬送経路

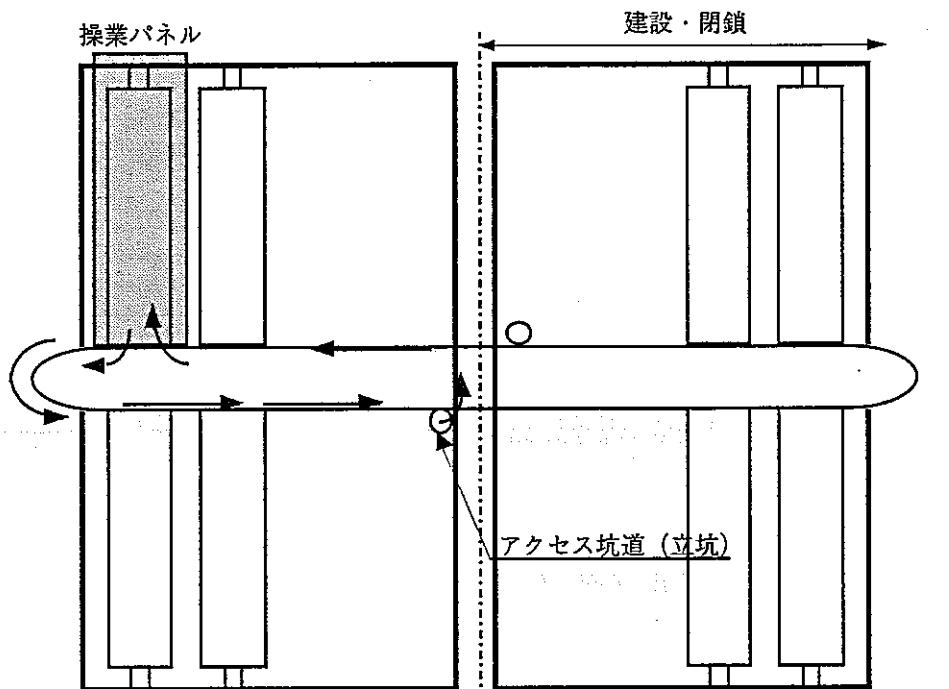
各処分空洞型式の地下施設における搬送経路の概要及びアクセス坑道（立坑）から処分空洞の荷降し位置までの搬送距離を図-1.1.70～図-1.1.73に示す。



搬送経路長さ アクセス坑道立坑～処分坑道荷降ろし位置間往復 約 1.5 km  
図-1.1.70 搬送経路（坑道型の場合）

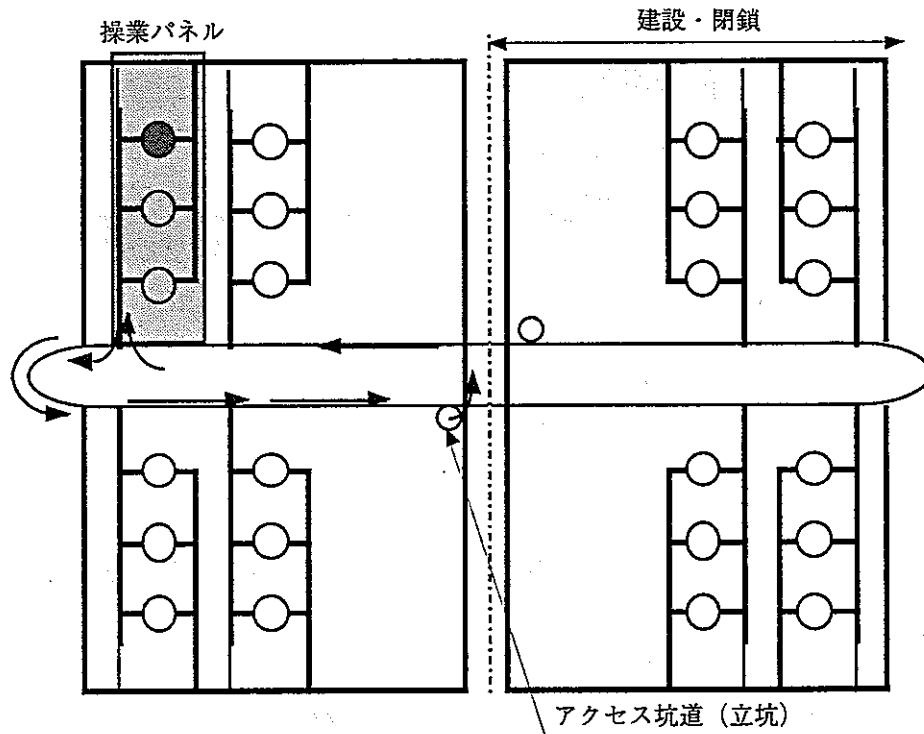


搬送経路長さ アクセス坑道立坑～処分岩洞荷降ろし位置間往復 約 0.83 km  
図-1.1.71 搬送経路（岩洞型：小断面の場合）



搬送経路長さ アクセス坑道立坑～処分岩洞荷降ろし位置間往復 約 0.71 km

図-1.1.72 搬送経路（岩洞型：大断面の場合）



搬送経路長さ アクセス坑道立坑～処分サイロ荷降ろし位置間往復 約 1.3 km

図-1.1.73 搬送経路（サイロ型の場合）

(d) 各作業の所要時間

各操業作業の所要時間を操業手順に従ってまとめた結果を表-1.1.39に示す。

表-1.1.39 操業作業の項目と所要時間

作業項目	作業内容	使用機器	所要時間
廃棄体 コンテナ 搬入作業	搬送台車への積み込み		10分
	立坑エレベーター降下	エレベーター 200m/min	立坑300mの場合 2分 立坑700mの場合 4分
	搬送台車の降ろし		2分
	空搬送台車積み込み		2分
	立坑エレベーター上昇	エレベーター 200m/min	立坑300mの場合 2分 立坑700mの場合 4分
	空搬送台車の降ろし		2分
	合計 (立坑300mの場合)		約20分
	合計 (立坑700mの場合)		約20分
	牽引車の連結		1分
	処分空洞までの搬送 (往路)	坑道型 1500m/2/100m/min	8分
地下施設内 搬送作業	処分空洞での荷降ろし		10分
	立坑までの移動 (復路)	坑道型 1500m/2/100m/min	8分
	牽引車の連結		1分
	処分空洞までの搬送 (往路)	岩洞型 (小) 830m/2/100m/min	5分
	処分空洞での荷降ろし		10分
	立坑までの移動 (復路)	岩洞型 (小) 830m/2/100m/min	5分
	牽引車の連結		1分
	処分空洞までの搬送 (往路)	岩洞型 (大) 710m/2/100m/min	4分
	処分空洞での荷降ろし		10分
	立坑までの移動 (復路)	岩洞型 (大) 710m/2/100m/min	4分
定置作業	牽引車の連結		1分
	処分空洞までの搬送 (往路)	サイロ型 1300m/2/100m/min	7分
	処分空洞での荷降ろし		10分
	立坑までの移動 (復路)	サイロ型 1300m/2/100m/min	7分
	牽引車の連結		1分
	吊り上げ+移動+定置+定位置復帰	クレーン走行速度 20m/min 走行距離 (max) 240m クレーン昇降速度 5m/min 昇降距離 (max) 3.5m 定置 2分	20分
	合計 (坑道型)		20分
	吊り上げ+移動+定置+定位置復帰	クレーン走行速度 20m/min 走行距離 (max) 115m クレーン昇降速度 5m/min 昇降距離 (max) 11.0m 定置 2分	20分
	合計 (岩洞型 (小断面))		20分
	吊り上げ+移動+定置+定位置復帰	クレーン走行速度 20m/min 走行距離 (max) 95m クレーン昇降速度 5m/min 昇降距離 (max) 19.0m 定置 2分	20分
サイロ型	吊り上げ+移動+定置+定位置復帰	クレーン走行速度 20m/min 走行距離 (max) 22m クレーン昇降速度 5m/min 昇降距離 (max) 27.3m 定置 2分	20分
	合計 (サイロ型)		20分

(e) 处分量の確認

各作業の所要時間を基に、1日に処分定置可能な廃棄体コンテナ数を作業工程を作成し確認する。

表-1.1.40によると、各作業の所要時間は地下施設の深さや処分空洞型式の違いにより異なるが、どの場合でも数分の差である。そこで、作業工程は各作業の所要時間の内、最大のものを用いて検討する。作業工程を検討するのに用いる所要時間を以下に示す。

- #### ・廃棄体コンテナ搬入作業

立坑 700m の場合を採用

地上施設→地下施設

16分 ÷ 20分

### 地下施設→地上施設

8分÷10分

- #### • 地下施設内搬送作業

坑道型の場合を採用

立 坑→操業空洞

19分 ÷ 20分

### 操業空洞→立 坑

8分 ÷ 10分

- ### • 定置作業

坑道型の場合を採用

29分 ÷ 30分

表-1.1.40 操業作業の1日当たり工程

上表より、最も工程上不利な坑道型の場合においても、1日当り廃棄体コンテナ20個を定置処分できる。

従って、本検討での操業方法によれば、どの処分空洞型式でも廃棄体コンテナ1日当り処分量10個の定置処分は可能である。

#### 1.1.3.4 閉鎖計画

##### (1) 閉鎖の目的及び要求性能

閉鎖の目的のうち最も重要視される要件は、閉鎖部が核種移行におけるクリティカルパスにならないように適当な難透水性を保有させることにある。岩盤中に坑道及び立坑を掘削すると、それらの周辺には掘削に伴う緩み領域が発生するが、それらを閉鎖するにあたっては、緩み領域も含めて合理的に要求される性能を達成させることが必要になる。閉鎖部の要求性能については、本来安全評価から設定されるべきものであるが、ここでは便宜的に周辺岩盤部（健全部）が本来有している核種移行に関する特性と同等と考え、廃棄体から漏出した核種の地上に到達する時間が、周辺岩盤部を通過する場合と閉鎖部を通過する場合とを比較し、同等であることを目標とする。

上記要求性能を満足させるためには、

- ・水理学的地質環境の維持
- ・化学的地質環境の維持

等が求められる。

閉鎖への要求性能として他に挙げられるものには、

- ・地上からの人の侵入防止
- ・周辺岩盤の物理的変形の防止

などがある。

##### (2) 閉鎖の要素技術

閉鎖システムは、埋戻し、プラグ、グラウトの3つの要素技術から構成する。各要素についての説明を以下に示す。

###### (a) 埋戻し

埋戻しとは、廃棄体を処分位置に定置後、処分空洞や立坑等の開口部を難透水性材料によって埋戻し、岩盤中に入人工的に設けられた開口部をフローパスとする核種移行を妨げることを目的とする。埋戻し材によって空洞部を充填することにより、空洞部が地下の水理機構に与える影響を少なくすることを目的とする。埋戻し材の透水係数は、周辺岩盤部よりも1オーダー程度低いものを想定する。材料は、要求性能、経済性、掘削ズリの処理等を考慮して、掘削ズリを利用した骨材とベントナイトの混合土を候補材料とする。世界的にも埋戻しには掘削ズリを利用する方向である。閉鎖時は覆工コンクリート及びロックボルトなどの支保部材は残したまま埋め戻すが、プラグ設置部分については、支保部材の部分が水みちとなり、核種移行のクリティカルパスとなることを防ぐ目的から、撤去した後に埋め戻すこととする。

#### (b) プラグ

プラグ設置の主な目的は、①難透水性の粘土系材料やセメント系材料またはそれらの混合材料によるプラグを設置することにより、岩盤中に人工的に設けられた立坑等の開口部をフローパスとする核種移行を妨げ、埋戻しだけでは期待できない母岩の緩み領域の地下水流入出のフローバリアとしての役割を果たすこと、②母岩と埋戻しの境界部の接着不良に対するフローバリアとしての役割を果たすこと、③地圧及び上載荷重の応力機構としての役割を果たすこと、の3つに集約される。日本では長期耐久性、難透水性の観点からベントナイトを第一の候補材料としている。

#### (c) グラウト

空洞建設時に傷めた部分の修復、プラグの設置地点の周辺岩盤の補強（特に止水性の観点から）等を目的とする。具体的には、プラグ周辺岩盤の難透水性の確保、予測しきれない割れ目、弱部に対する透水性の観点からの補強、建設段階の一時的な止水対策などである。

坑道の閉鎖は、これらの3つの要素技術が場所と目的に応じて組み合わされて設計・施工される。

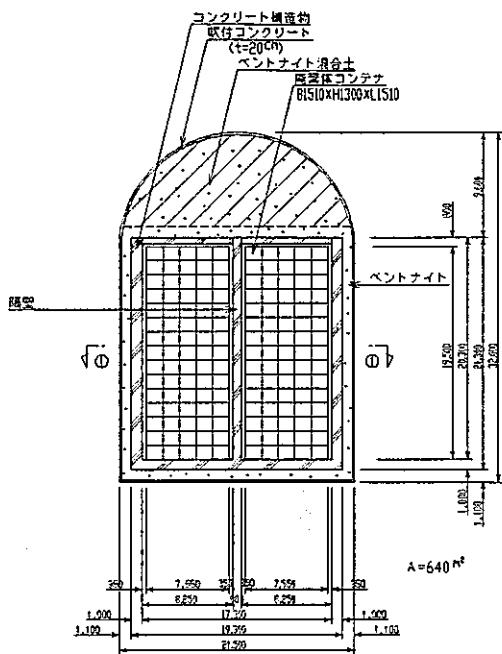
### (3) 閉鎖の候補材料

前述した要求性能は人工バリアとほぼ同等であるため、閉鎖の要求性能を満足させる可能性のある材料としては、人工バリアと同様にセメント系材料やベントナイト系材料が考えられるが前述の通り、難透水性、経済性、長期耐久性の観点からベントナイト系材料を基本と考える。

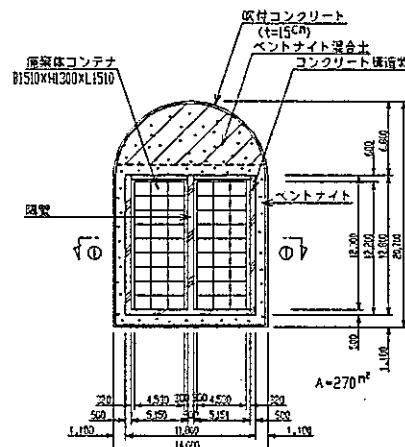
経済性の検討においては単に材料・施工の比較のみでなく、掘削ズリの処理も検討対象にする必要がある。

### (4) 処分空洞の閉鎖

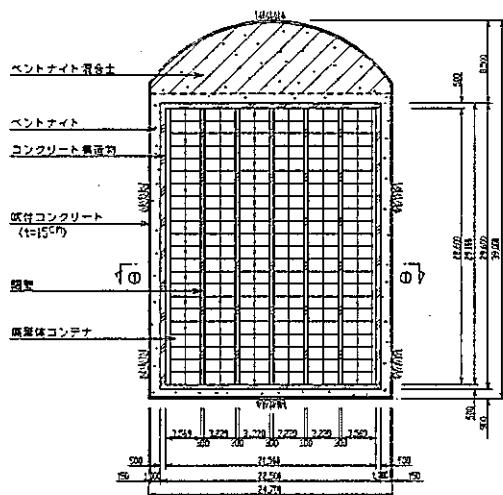
処分空洞の断面形状は図-1.1.74に示す通りであり、閉鎖に関する検討対象として斜線部分を取り上げる。



大断面岩洞方式



小断面岩洞方式



サイロ方式

図-1.1.74 各处分空洞方式の閉鎖

なお、坑道方式については全断面を人工バリアとして取り扱うこととする。

閉鎖材料は、経済性及び掘削土砂の処理を考慮して基本的に掘削ズリを利用したベントナイト混合土を用いることとする。

田中ら<sup>19)</sup>によると礫及びケイ砂を混入したベントナイト混合土のベントナイト混合率(Bm)と透水係数の関係は、図-1.1.75の通りである。ベントナイト混合率が約12%以上で $10^{-9}$ cm/sec以下の難透水性が得られることがわかる。(試験室レベル) 図中Gmは、礫混合率を示し、ベントナイト及び礫以外の部分はケイ砂である。また、混合率は重量比である。

一方、ベントナイト混合率が約12%以下になると透水係数の増え方が急勾配になる。ここではベントナイト混合率を15%に設定する。

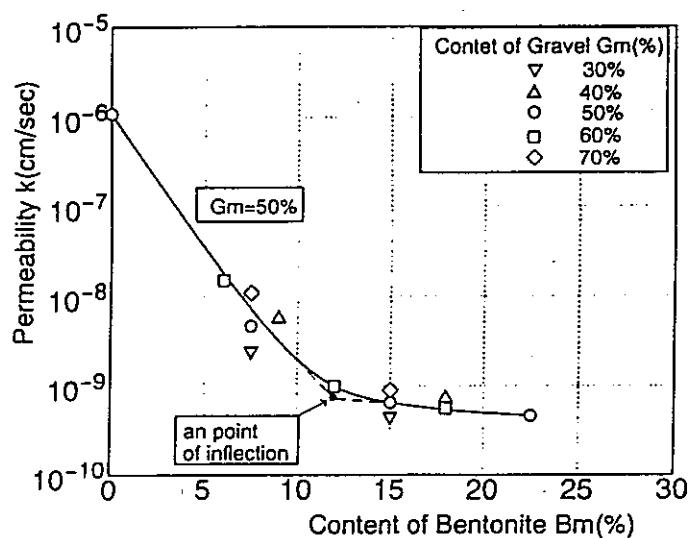


図-1.1.75 透水係数とベントナイト混合率の関係<sup>19)</sup>

閉鎖の方法としては、機械施工が可能な高さまでは埋戻し材を敷き詰めて振動ローラーによって転圧・締め固めを行う。残りの部分については、ベントナイト混合土ブロックを積み上げる。またベントナイト混合土ブロックと周辺岩盤の間隙には、ベントナイトパウダーを吹き込むこととする。

閉鎖作業が終了したエリアについては、埋戻し材の変形を防止するために処分空洞と連絡坑道の間にコンクリートプラグを設置する。

ベントナイト混合土ブロックの大きさについては、以下の点から $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 40\text{cm}$ の直方体とする。

- ① ベントナイト混合土ブロックの積み上げが手作業になる可能性があることから、取り扱い易さの面より30kg/個程度とする。
- ② 自重による引張破壊に対しての安全率(Fs)としてFs=2.0を考える。

なお強度面からのブロックの大きさの検討については実験室レベルの試験が必要である。

## (5) アクセス坑道・主要坑道・連絡坑道の閉鎖

閉鎖に対する要求性能のうち最も重要視されるものは止水性能であり、特に処分場建設のために閉鎖されるアクセス坑道は、核種を乗せた地下水が生活圏に達するクリティカルパスになる可能性がある。従って、アクセス坑道・主要坑道・連絡坑道の閉鎖に対しても、周辺健全岩盤部と同等の難透水性を保有させることとする。

具体的には、埋戻し材としては処分空洞の閉鎖と同様のベントナイト混合土を用いることとし、さらに周辺岩盤の緩み部分や周辺岩盤部と埋戻し部の隙間が水みちにならないよう軸方向に一定間隔でプラグを設置することとする。

プラグには難透水性、膨張性及び長期耐久性を期待することから、材料としてはベントナイトを利用する。またプラグの周辺部については、掘削方法の開発、グラウトの利用等により止水性をより完全なものにする。

立坑部の埋戻しは、ベントナイト混合土を下部より順次転圧・締め固めを行うこととする。一方、トンネル部の埋戻しについては処分空洞と同様の方法によるものとしベントナイトブロックと周辺岩盤の間隙はベントナイトパウダーで充填することとする。

### 1.1.3.5 その他

ここでは、地下施設の換気システム及び排水システムを建設、操業及び閉鎖の各段階に分けて検討する。

#### (1) 換気システム

##### (a) 基本的な考え方

地下処分場の換気システムに要求される機能として次のことが考えられる。

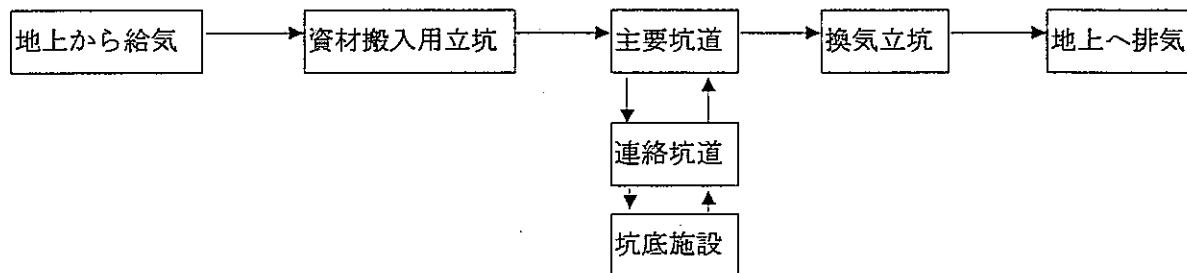
- ・作業要員、作業空間への良質な空気の供給
- ・建設用機器類からの排気ガスの除去と希釈
- ・建設時の発破によるガス、粉塵、地山からのガス及びその他有害なガスの除去と希釈
- ・操業区域、閉鎖区域等管理区域の換気
- ・地熱の低下

換気の基本的な流れは、資材搬入用立坑( $\Phi 12.0\text{m}$ : 2本)から給気し換気立坑( $\Phi 6.5\text{m}$ : 2本)から排気するものとし、上記各機能を満足するシステムとする。

##### (b) 本検討での設定

###### (i) 建設段階

建設段階では、換気立坑が構築される前と後でシステムが異なる。換気立坑が構築される前のアクセス坑道(立坑)及び主要坑道等の建設時は、送風機と風管による地上からの送気により換気する。一方、換気立坑と接続された後は換気立坑地上部に送風機を設置し坑内の空気を排気する。この時点で換気経路は以下のようになる。



各処分パネルの建設時においては、上記の基幹となる換気経路が確保されているため、連絡坑道に送風機を設置して風管による送風を行う。ここで、岩洞形式及びサイロ形式の処分パネルの場合は、1回の発破規模が大きいため別途発破によるガスを排出するための専用の換気設備を設置することとする。

###### (ii) 操業段階

操業段階では、操業、建設及び閉鎖の作業が各処分パネルで行われる。操業段階において、廃棄体搬入経路、操業パネル及び閉鎖パネル(パネル内のみ)は放射線管理区域となるため、換気システムは建設に関わる非放射線管理区域と明確に区分するようを行う。

操業パネルの処分空洞へは、坑道方式を除き主要坑道、連絡坑道から送風しパネル反対側の連絡坑道、換気坑道を通り換気立坑から地上へ排気する。坑道方式の場合は連絡坑道に送風機を設置し風管により送風する。排気は主要坑道を通り換気立坑から地上へ排出する。操業パネルを通過した排気は全て地上換気設備でモニタリングする。また、操業を終了したパネルの処分空洞は閉鎖作業開始まで立ち入り禁止とし空気の出入りが無いように管理する。

#### (iii) 閉鎖段階

閉鎖段階での換気は、建設時パネルの換気方法と同様に連絡坑道に送風機を設置して風管による送風で行う。閉鎖パネル内は放射線管理区域のためそこから排出される排気はモニタリングを行う。

以上の設定に基づく各処分空洞方式での換気システムの概念を図-1.1.76～図-1.1.79に示す。

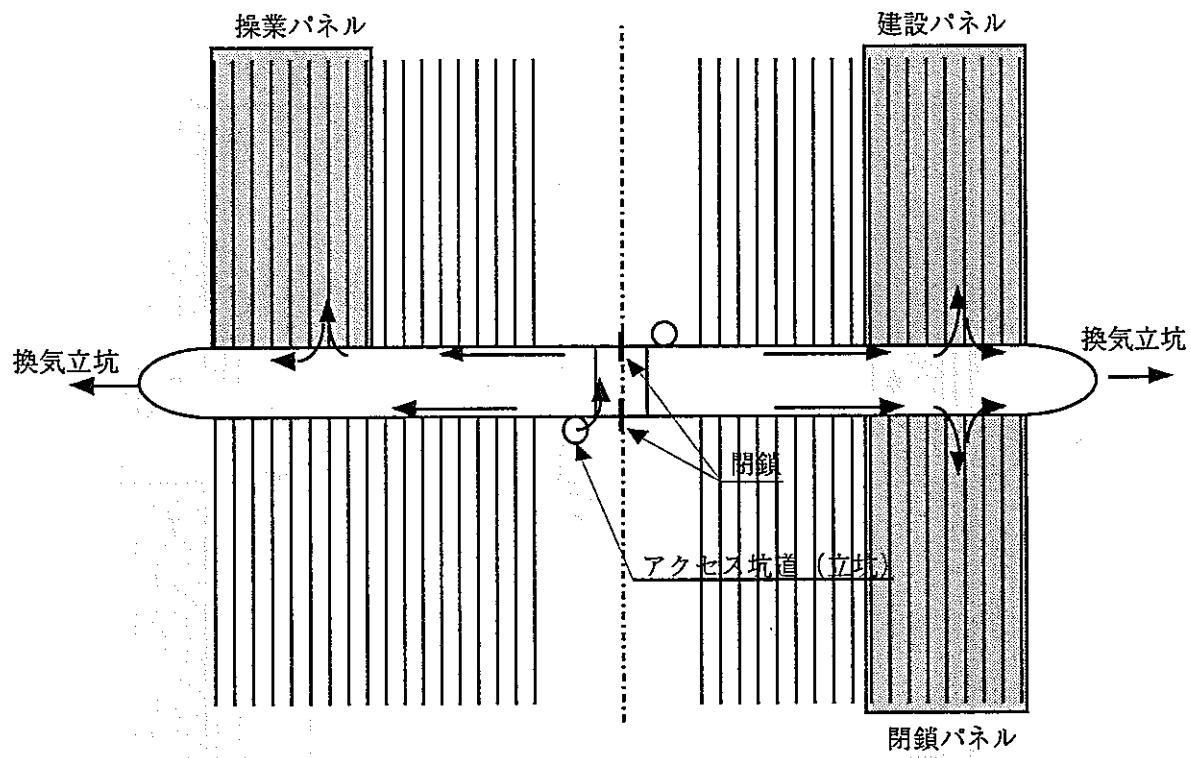


図-1.1.76 坑道方式での換気システム概念

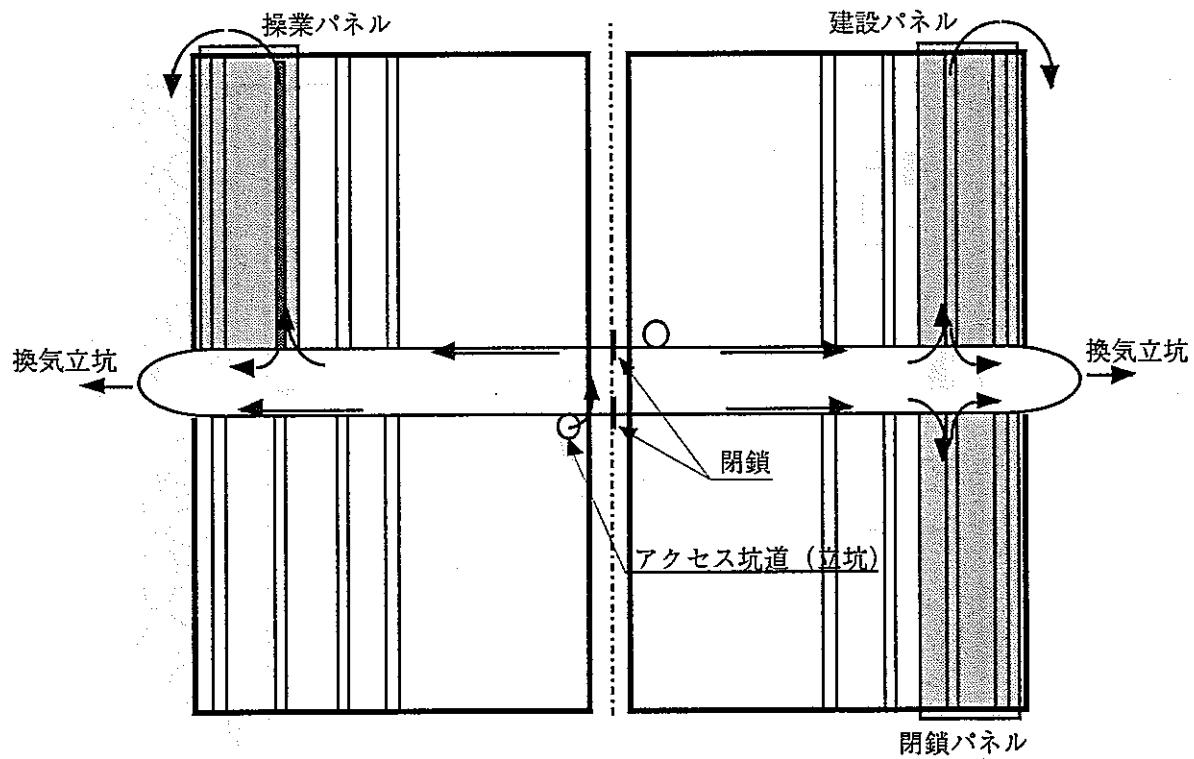


図-1.1.77 小断面岩洞方式での換気システム概念

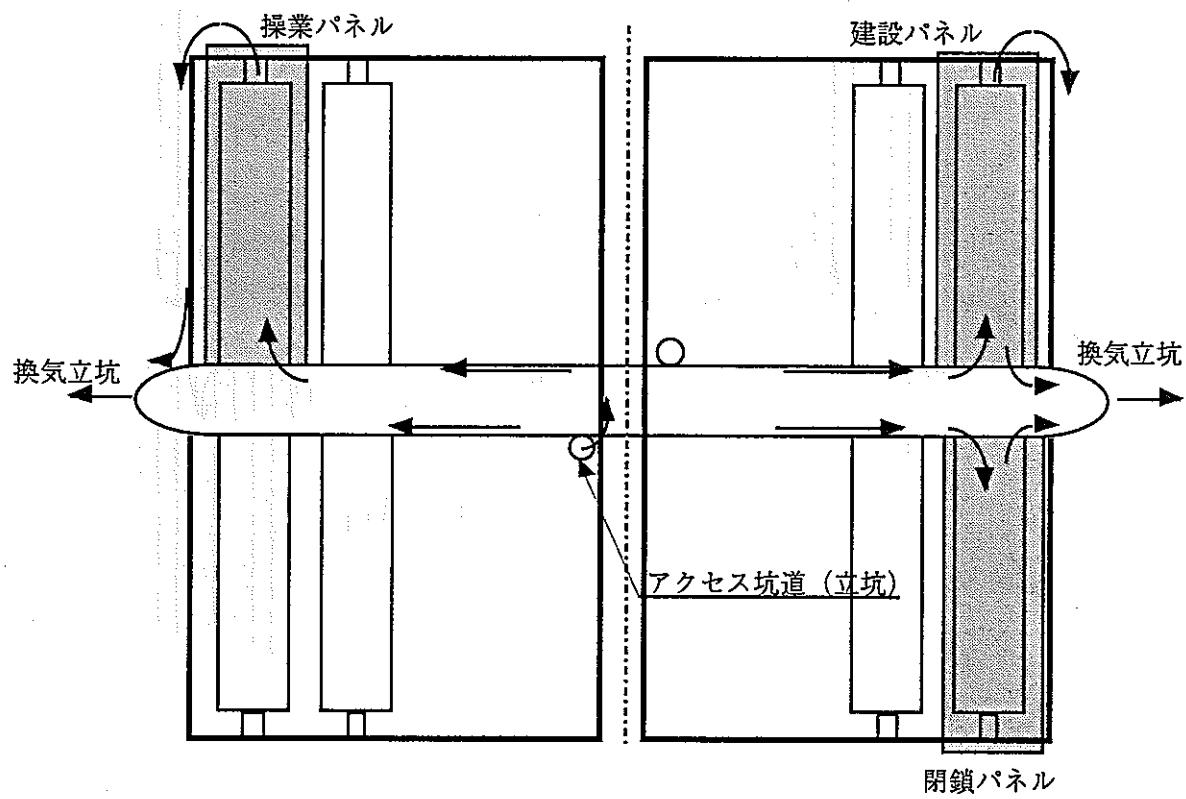


図-1.1.78 大断面岩洞方式での換気システム概念

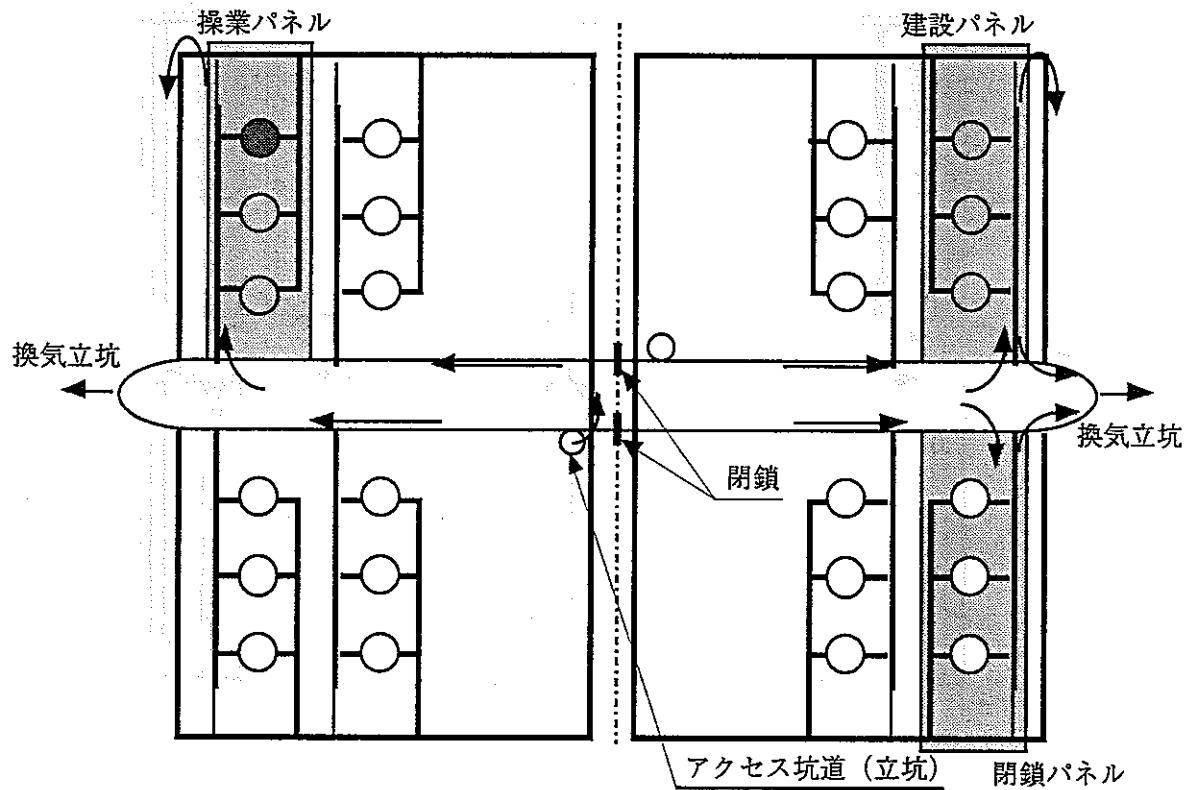


図-1.1.79 サイロ方式での換気システム概念

## (2) 排水システム

### (a) 基本的な考え方

地下処分場の排水システムに要求される機能として次のことが考えられる。

- ・地山湧水の排水
- ・削孔や吹付コンクリート施工等工事に伴う水の排水
- ・その他雑水の排水

排水の基本的なシステムは、地下施設内で発生した排水を施設中央に設置した中継ポンプ室に集水し沈殿槽で処理した後、資材搬入用立坑（Φ 12.0m: 2本）から地上へポンプ排水するものとする。また、放射線管理区域である操業区域からの排水についてはモニタリングを行うこととする。

### (b) 本検討での設定

本検討では、処分空洞の掘削が完了し、ベントナイトの施工が開始されるまでには、処分空洞内の地山湧水が発生しないように十分な止水対策（閉鎖完了まで担保されるもの）を施す。

#### (i) 建設段階

アクセス坑道および換気立坑の建設では、自然流下で排水ができないため、排水用配管で可動ポンプにより地上へ排水する。

中継ポンプ室が建設されるまでの主要坑道や連絡坑道からの排水は、坑道に排水溝を設け自然流下でアクセス坑道底部に集水し、可動ポンプで地上へ排水する。

中継ポンプ室建設後は、地下施設内で建設に伴い生じる地山からの湧水や工事排水はすべて中継ポンプ室に集水し、土砂等を沈殿させた後ポンプで地上設備へ排水する。坑道方式の場合を除き、処分空洞内の排水は掘削ズリ排出用に建設される連絡坑道、掘削用坑道へ流下させポンプにより上部の主要坑道排水溝へ排水する。坑道方式の場合は処分空洞に設けた排水溝により自然流下で主要坑道へ排水する。

処分空洞については止水対策を十分に行っておくことが必要である。

#### (ii) 操業段階

操業段階では、処分ピット内のコンクリート充填作業及びそれに伴う圧送配管の洗浄等による排水が発生する。この操業段階の排水も建設段階の時と同様、坑道方式の場合を除いて、処分空洞内の排水は掘削ズリ排出用に建設される連絡坑道、掘削用坑道へ流下させポンプにより上部の主要坑道排水溝へ排水する。坑道方式の場合は処分空洞に設けた排水溝により自然流下で主要坑道へ排水する。すべての排水は中継ポンプ室に集水し土砂等を沈殿させた後ポンプで地上設備へ排水する。

操業パネルは放射線管理区域のため上記排水はモニタリングする。

### (iii) 閉鎖段階

閉鎖段階では連絡坑道閉鎖時に排水溝も閉鎖し、閉鎖パネルからの排水が無いようにする。放射線管理区分から閉鎖パネル内は管理区域となることから、閉鎖時においてもパネル内からの排水がある場合は、建設段階の場合と同様に止水対策を行うとともに閉鎖までの期間の排水については別途モニタリングを行う必要がある。

### (iv) 中継ポンプ室

中継ポンプ室への排水は、処分施設内から主要坑道等の排水溝を通って集められるため土砂が混入している。また、コンクリート工事やNATM工法による掘削工事による排水はスラリー状の汚泥を含んでおり、そのままではポンプ室から地上施設へ排水するには困難な面がある。そこで、中継ポンプ室には、圧送ポンプと貯水槽に加え沈殿槽及び汚泥をケーキ状にして排出するための脱水設備を設置するものとする。

### (v) 想定排水量

排水システムの必要処理能力は、地下施設の地山からの湧水と削孔やコンクリート打設等に伴う工事排水の量を想定し設定する。湧水量については地盤の透水係数と表面積から求める方法があるが、ここではより実際に近いと考えられる実態調査に基づくデータによって想定する。実態調査の資料は図-1.1.5に示した。

図-1.1.5より、地下施設の掘削に伴う空洞 1km当たり湧水量を、トンネル掘削の想定湧水量として一般的に用いられている値から次のように想定した。

- ・結晶質岩系岩盤       $0.6 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$
- ・堆積岩系岩盤       $0.4 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$

空洞延長は各処分空洞方式により異なる。本検討では次に示す条件に基づき湧水に関する空洞延長を設定し湧水量を想定する。

- ・操業パネル及び閉鎖パネルについては建設段階において十分な止水対策がとられるため湧水については考慮しない。
- ・アクセス坑道から湧水がある場合は別途設備により排水する。

上記条件から、各処分空洞方式での湧水に関する空洞延長は主要坑道、換気坑道および建設パネルの連絡坑道と処分空洞とする。後述のレイアウト図に基づいて算定した湧水に関する空洞延長を以下に示す。

- ・大断面岩洞方式

$$L = 2924m + 540m + (320m + 760m)/8 = 3599m$$

- ・小断面岩洞方式

$$L = 3464m + 620m + (640m + 1840m)/8 = 4394m$$

- ・坑道方式

$$L = 2952m + 0m + (1440m + 17280m)/8 = 5292m$$

・サイロ方式

$$L = 4070m + 1008m + (3577m + 243m) / 8 = 5556m$$

これより、地山からの湧水量は最も多くなる結晶質岩系岩盤のサイロ方式の場合で次のようなになる。

$$V = 5.556 \text{ km} \times 0.6 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km} = 3.33 \text{ m}^3/\text{min}$$

一方、建設に伴う工事排水は一般的に  $0.2 \text{ m}^3/\text{min}$  と想定できる。

以上より、本検討では岩盤条件及び空洞方式により異なるが、排水システムの処理能力として排水量が最も多い場合を採用し次のように想定する。

$$V = 3.33 \text{ m}^3/\text{min} + 0.2 \text{ m}^3/\text{min} = 3.53 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\approx 4 \text{ m}^3/\text{min}$$

以上の検討による各処分方式の排水システムの概念を図-1.1.80～図-1.1.83 に示す。

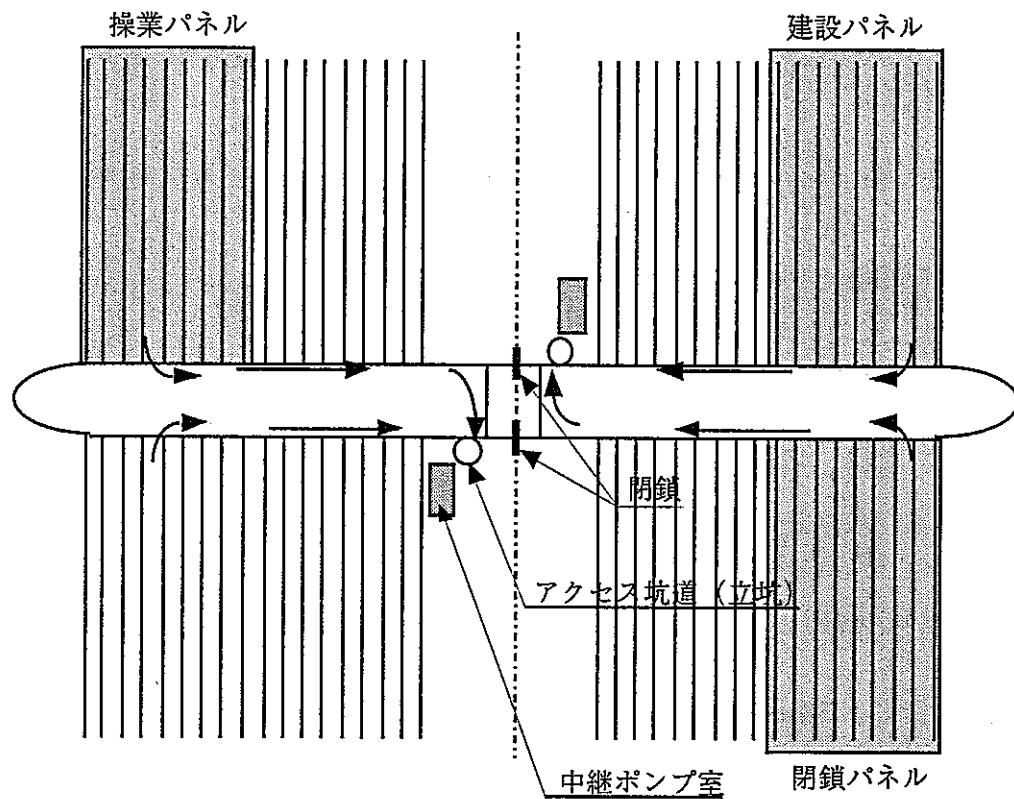


図-1.1.80 坑道方式での排水システム概念

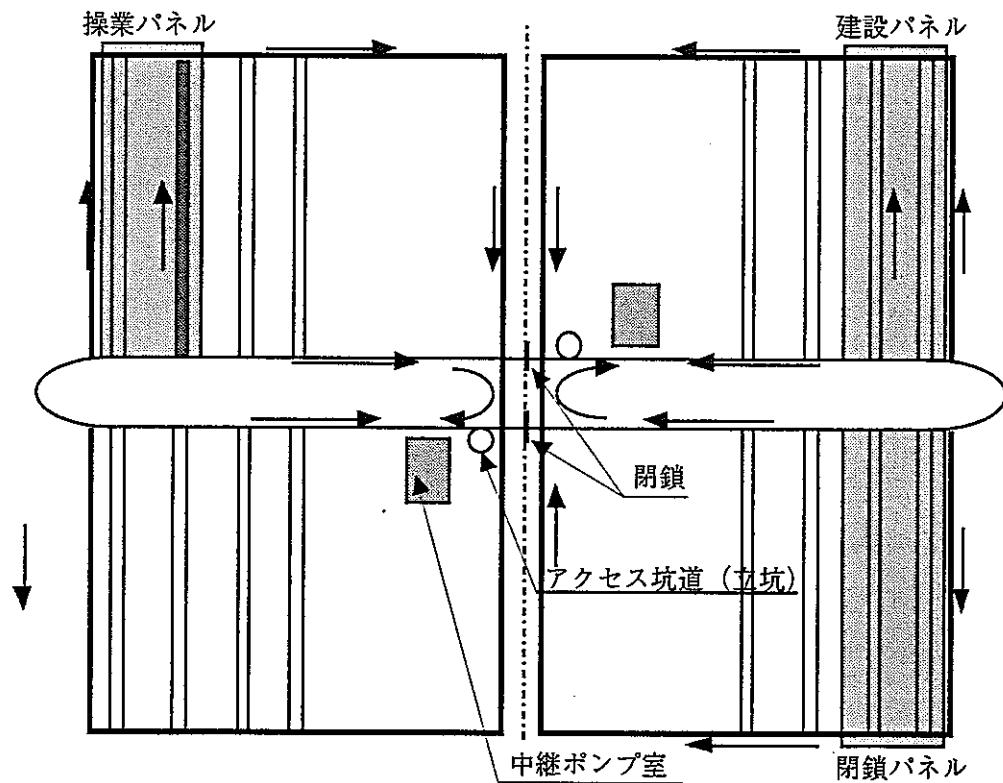


図-1.1.81 小断面岩洞方式での排水システム概念

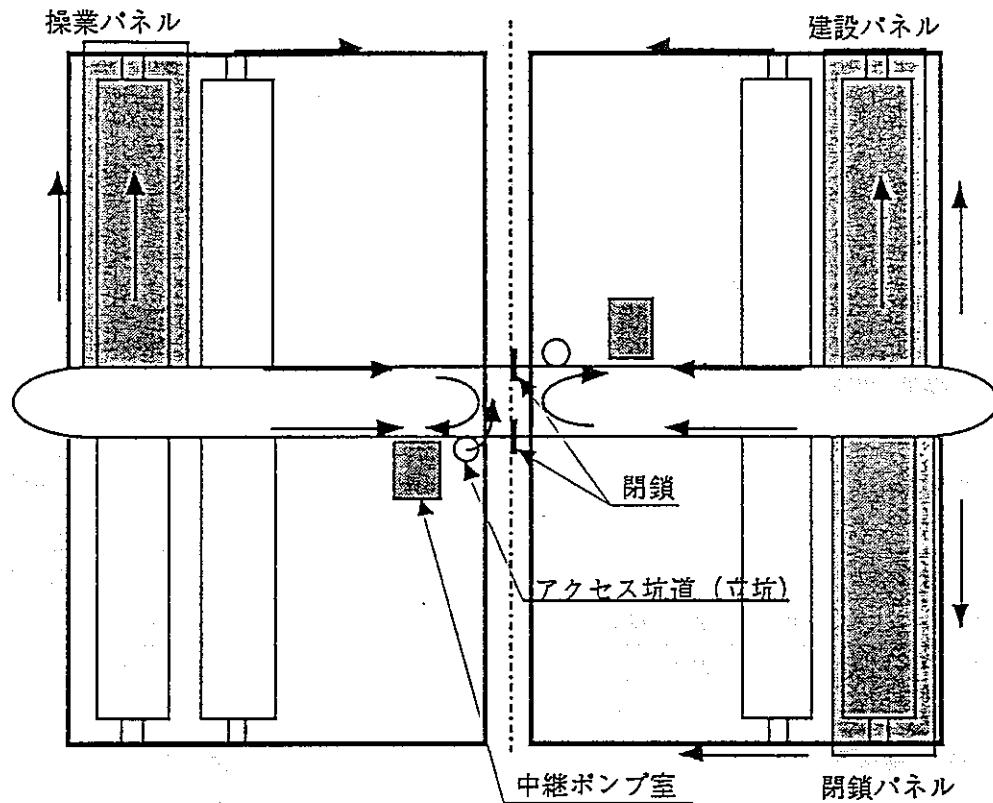


図-1.1.82 大断面岩洞方式での排水システム概念

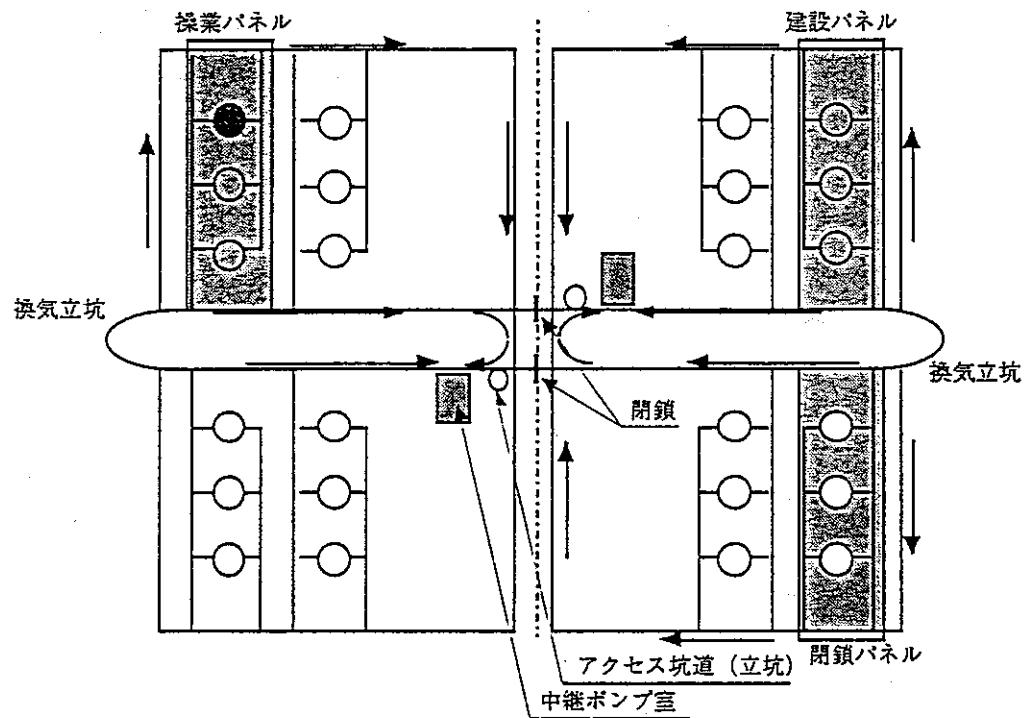


図-1.1.83 サイロ方式での排水システム概念

#### 1.1.4 全体レイアウト

全体レイアウトを設定する際に考慮する施設の仕様についての検討を、「1.1.3 処分場コンセプトにおける検討条件」について行った。表-1.1.41と表-1.1.42にその仕様と設定結果をまとめて示す。

表-1.1.41 レイアウト検討における検討条件①

仕 様	設 定 結 果	備 考
岩 種	結晶質岩系岩盤、堆積岩系岩盤	
廃棄体処分量	200,000 本	ドラム缶、キャニスターの本数
建設・操業・閉鎖スケジュール	全てを並行して行う。	
操業期間	20 年間	約 20 万本の廃棄体を年間 1 万本のペースで処分
建設速度	操業と同一速度とする。(20 年間)	処分空洞の建設を対象とする。
閉鎖速度	操業と同一速度とする。(20 年間)	処分空洞の閉鎖を対象とする。
作業の競合の有無	建設、操業、閉鎖はパネル毎に独立して行う。付隨する物流ルートも独立する。	建設と閉鎖は同じルートを使用。
処分場設置深度	300m、700m の 2 ケースとする。	結晶質岩、堆積岩共に 2 ケースを定する。
アクセス坑道の形式	立坑とする。	斜坑はオプション
アクセス坑道の本数	6 本(廃棄体搬入用 2 本、作業員出入用・材料搬入・ズリ出し 2 本、換気用 2 本)とする。	避難用、給排水、エネルギー供給用は立坑と兼ねる。
アクセスの坑道配置	集中方式とする。ただし換気用立坑は主要坑道の両端に配置する。	
主要坑道の配置	中央部に 2 本を並行に配置、端部は接続し環状にする。	
連絡坑道と処分空洞の配置	直接配置型を基本形とする。ただしサイロ方式は片側配置形とする。	2 パネルごとに建設用の連絡坑道を周辺配置
処分空洞の配置	主要坑道に垂直に配置する。	
処分空洞の本数	大断面岩洞：8 本、小断面岩洞：16 本 坑道：72 本、サイロ：24 基	
処分空洞の長さ	大断面岩洞：95m、小断面岩洞：115m 坑道：240m、サイロ：39m	サイロは深さ
処分空洞の間隔	大断面岩洞 45.0m	力学的検討結果と熱解析の検討結果から算定。
	小断面岩洞 30.0m	
	坑道 20.0m	
	サイロ 50.3m	

表-1.1.42 レイアウト検討における検討条件②

処分空洞形状及び処分形態	大断面岩洞	小断面岩洞	坑道	サイロ	備考
処分空洞					
処分形態	各方式ともコンクリートピットを構築する。ドラム缶又はキャニスターを4本一組とした廃棄体コンテナをクレーンにて運搬、定置する。				
処分パネルの枚数	各方式共通で8枚とする。				
廃棄体埋設密度	今後検討する。		熱的観点と廃棄体の体積変化を考慮して設定		
地下水、断層、破碎帯等	原則として考慮しない		理想的な岩盤条件として検討		

1.1.1～1.1.3 の結果をまとめた表-1.1.41 と表-1.1.42 を基に、各処分空洞方式の全体レイアウト図を図-1.1.84～1.1.87 に示す。また図-1.1.88 にレイアウト比較図を示す。

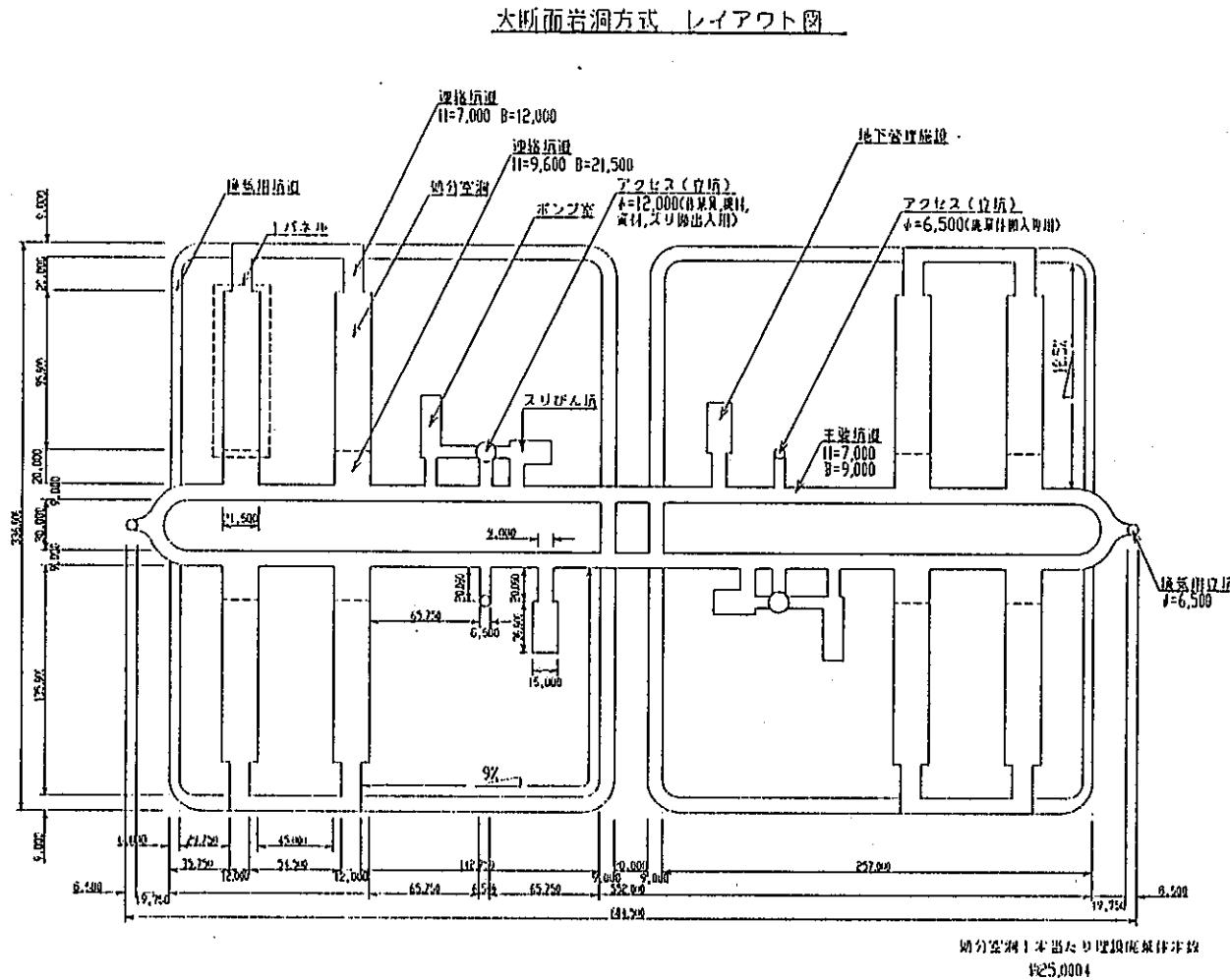


図-1.1.84 大断面岩洞方式 レイアウト図

小断面岩洞方式 レイアウト図

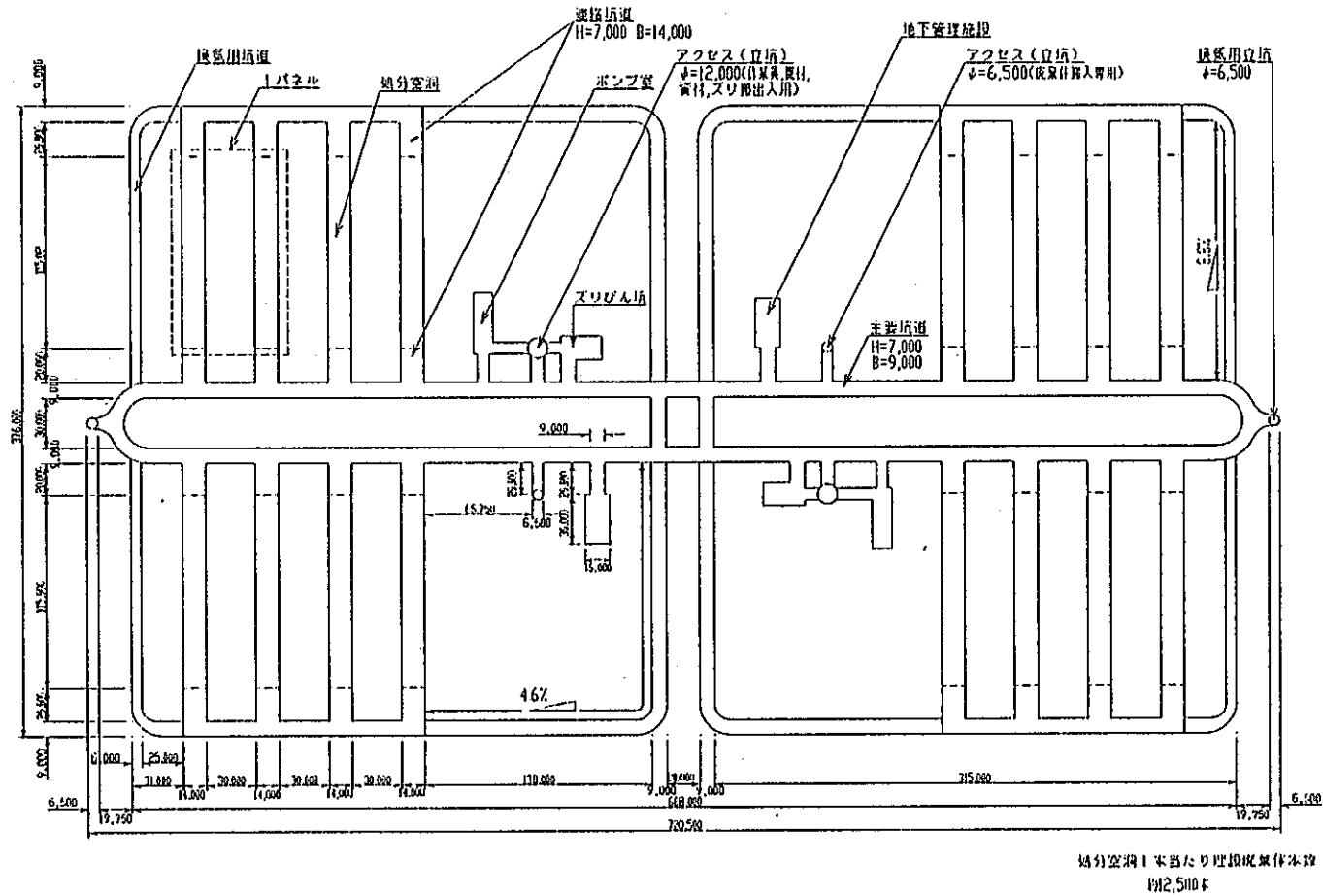


図-1.1.85 小断面岩洞方式 レイアウト図

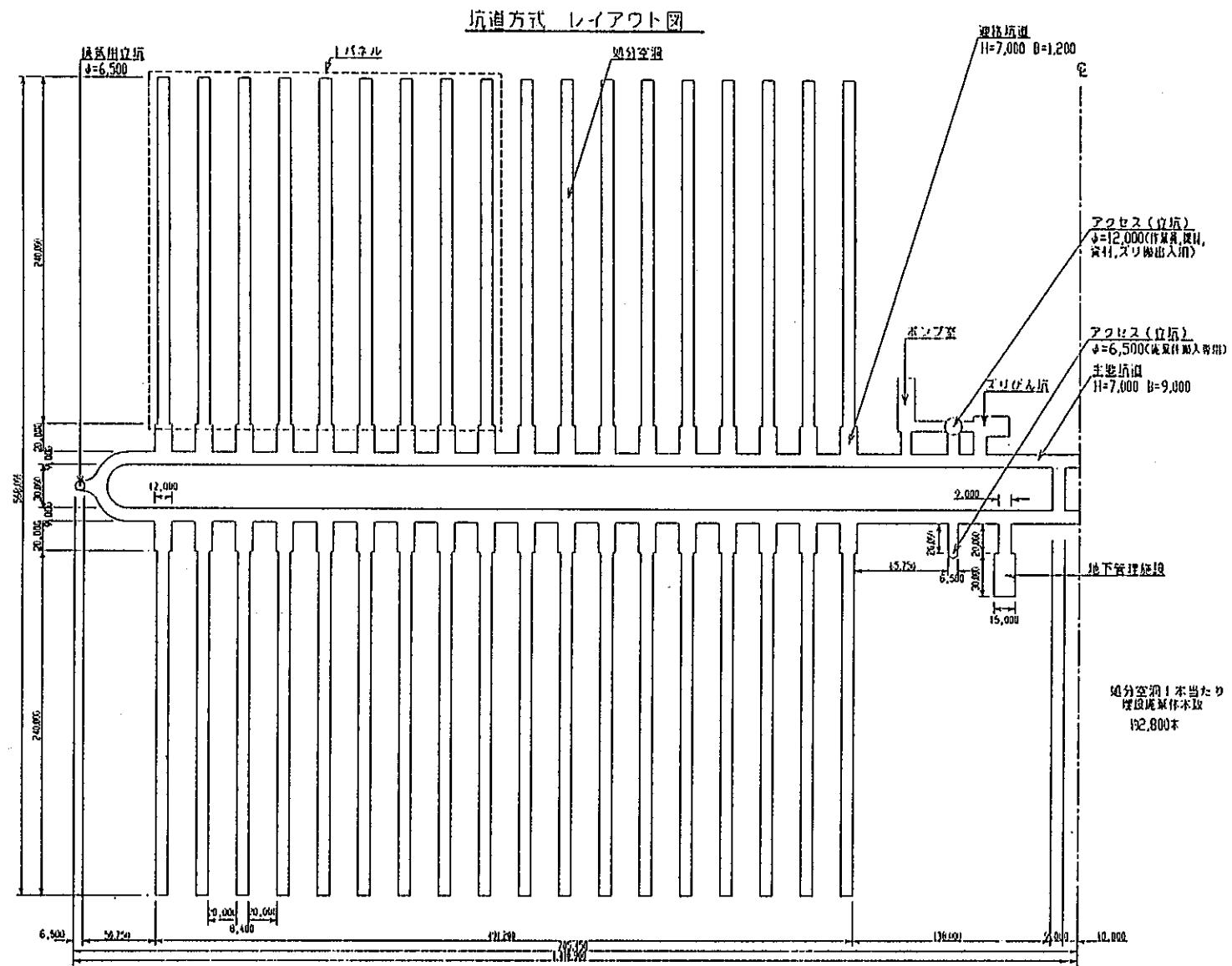


図-1.1.86 坑道方式 レイアウト図

## サイロ方式 レイアウト図

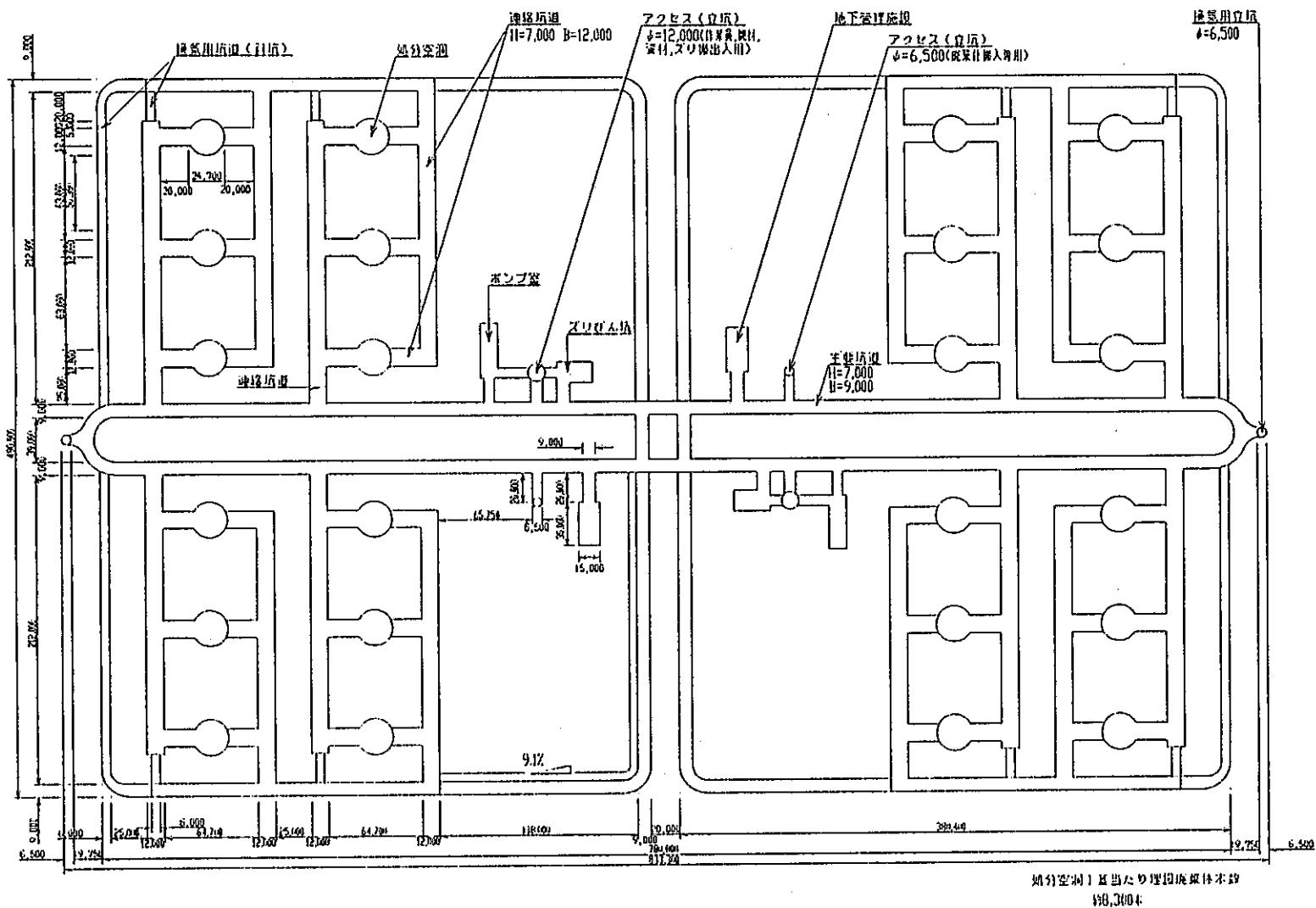
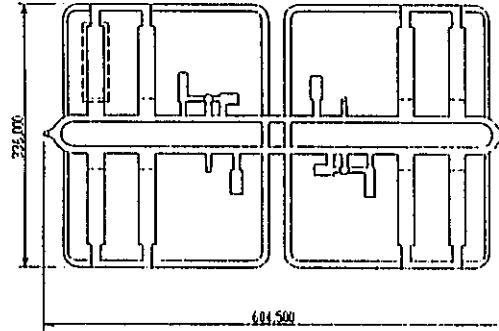


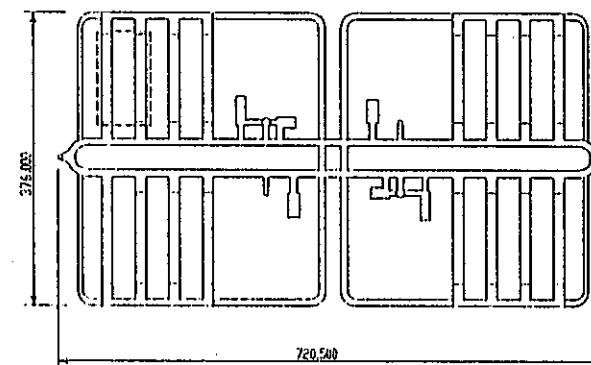
図-1.1.87 サイロ方式 レイアウト図

## レイアウト比較図

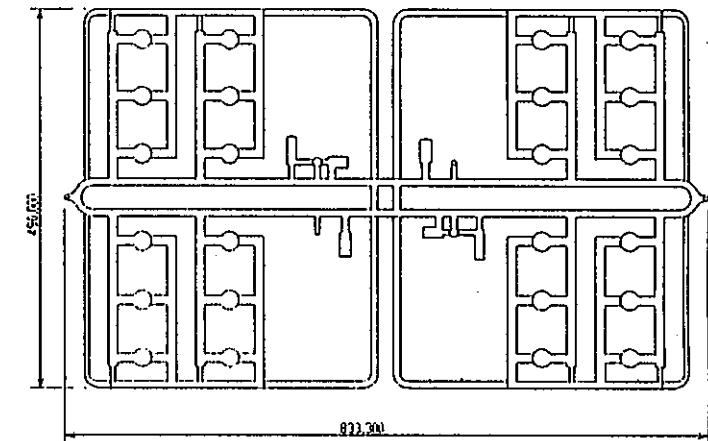
大断面岩洞方式



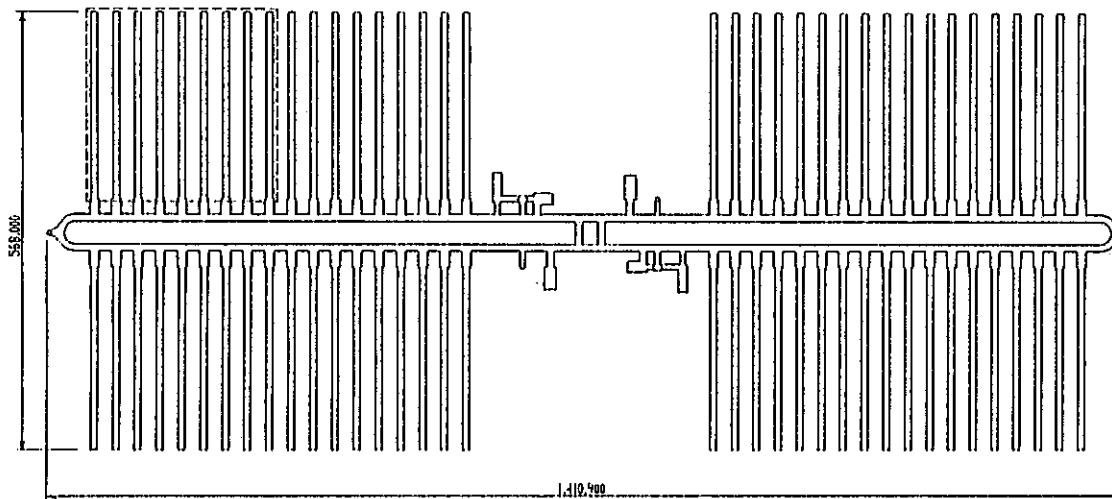
小断面岩洞方式



サイロ方式



坑道方式



処分方式	掘削量( $m^3$ )	延長(m)	敷地面積( $m^2$ )
大断面岩洞方式	486,400	760	203,000
小断面岩洞方式	496,000	1,840	271,000
坑道方式	1,244,000	17,280	801,400
サイロ方式	418,500	(936)	408,300

サイロ方式の延長は深度方向の延べ掘削深さを示す。掘削量・延長は処分空洞のみ。

図-1.1.88 レイアウト比較図

## 1.2 処分システムの長期力学挙動のシナリオ検討

### 1.2.1 地下水シナリオの検討

T R U放射性廃棄物処分場の成立性を検討する場合、処分場コンセプトの基本概念の構築と並んで、シナリオ検討を実施する必要がある。放射性廃棄物の地層処分は、人工バリアと天然バリアの多重バリアシステムにより、廃棄物中に含まれる放射性核種を長期的に隔離することを目的としている。したがって、構築した基本概念が長期的な各種事象の下で隔離性能を担保できるか否かを評価することが重要である。

まず、処分場に関する事象をグローバルに洗い出すために、下記の観点から国内外の研究を参考に事象を整理すると、事象例として表-1.2.1が得られる。<sup>20)</sup> 処分場の成立性を評価するためには、これらすべての事象を対象として構築したコンセプトの性能を確認する必要があるが、本検討では、「1.1 処分システムの基本概念及び仕様の明確化」で構築した処分場コンセプトを対象に力学的・水理学的な観点から事象を抽出し、それが処分場にどのような影響を及ぼすかについての検討を行う。

#### 廃棄物及び処分場に起因する事象

熱的現象

水理学的現象

力学的現象

放射線学的現象

化学的現象

自然学的現象

地球外の現象

地質学的現象

気候学的現象

地形学的現象

水理学的現象

物質移動及び地球化学的現象

エコロジー的現象

人間活動による現象

処分場の設計及び建設

操業及び閉鎖

閉鎖後の地下活動（処分場への侵入）

閉鎖後の地表の活動

表-1.2.1 シナリオ検討事象例 20)

廃棄物及び 処分場に起因する 事象	<p>1.熱的現象</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)母岩の亀裂開口幅変化</li> <li>2)熱による水理条件の変化（対流、水圧・粘性変化）</li> <li>3)熱による化学条件の変化（溶解度・吸着性・分種化の変化、鉱物化）</li> </ol> <p>2.水理学的現象</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)再冠水</li> <li>2)緩衝材中の水の移動</li> </ol>	<p>3.力学的現象</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)廃棄体の移動</li> <li>2)応力場の変化</li> <li>3)母岩の変形</li> <li>4)処分坑道の破断</li> <li>5)ガスによる効果</li> <li>6)廃棄体の変形</li> <li>7)廃棄体の体積変化</li> <li>8)充填材の変形</li> <li>9)充填材の体積変化</li> </ol>	<p>4.放射線学的現象</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)放射線分解（<math>\alpha</math>線、<math>\beta</math>線）</li> <li>2)照射損傷</li> <li>3)臨界</li> <li>4)放射塊変（崩壊連鎖における）</li> </ol>	<p>5.化学的現象</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)金属の腐食（局部／均一腐食、内部因子及び外部因子による腐食、水素等のガス発生）</li> <li>2)母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用</li> <li>3)有機物による効果</li> <li>4)微生物の効果</li> </ol>
	<p>1.地球外の現象</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)隕石の衝突</li> <li>2)太陽輻射</li> </ol> <p>2.地質学的現象</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)プレート運動／テクトニクス的变化</li> <li>2)地磁気の変化</li> <li>3)火成活動</li> <li>4)変成作用</li> <li>5)統成作用</li> <li>6)隆起／沈降</li> <li>7)地震／断層活動</li> <li>8)岩体の不均質性（透水性、鉱物組成）</li> </ol> <p>3.気候学的現象</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)降雨、気温、土壤の水収支</li> <li>2)洪水</li> <li>3)海面変動</li> <li>4)永久凍結層の影響</li> <li>5)氷河作用（氷河侵食等）</li> </ol>	<p>4.地形学的現象</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)地滑り</li> <li>2)表面削除</li> <li>3)河川侵食</li> <li>4)河川の蛇行</li> <li>5)海食</li> <li>6)堆積作用</li> <li>7)寒冷気候の影響（ソリフラクション等）</li> <li>8)化学的侵食作用及び風化作用</li> </ol> <p>5.水理学的現象</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)地下水循環</li> <li>2)不均質系での地下水流動</li> <li>3)地下水流動状況の変化</li> <li>4)地下水系への海水の浸入</li> <li>5)塩淡境界の影響</li> <li>6)被圧帶水層</li> <li>7)地熱の影響</li> </ol>	<p>6.物質移動及び地球化学的現象</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)移流／分散</li> <li>2)拡散</li> <li>3)マトリクス拡散</li> <li>4)ガスを媒体とした物質移動</li> <li>5)多相流及びガスに駆動された地下水流动</li> <li>6)吸着（線形／非線形、可逆／不可逆）</li> <li>7)溶解、沈降及び結晶化</li> <li>8)コロイドの生成、溶解及び移動</li> <li>9)錯形成種</li> <li>10)亀裂表面の風化及び鉱物化</li> <li>11)土壤や有機物の残骸の蓄積</li> <li>12)質量、同位体、化学種の希釈</li> <li>13)化学的均配（電気化学的効果及び化学的浸透）</li> <li>14)放射性核種及び酸化性因子のチャンネル化</li> <li>15)再濃集</li> <li>16)pHの変動</li> <li>17)酸化性雰囲気</li> </ol>	<p>7.エコロジー的現象</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)植物による吸収</li> <li>2)動物による吸収</li> <li>3)土壤及び堆積物中のバイオターベーション</li> <li>4)土壤生成作用</li> <li>5)化学的変化</li> <li>6)微生物との相互作用</li> <li>7)生態系の変化（山火事等）</li> <li>8)気候変動への生態系の追従（砂漠化等）</li> <li>9)動植物の変化</li> </ol>
自然現象による 事象	<p>1.処分場の設計及び建設</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)未検出の過去の掘削（試錐孔等）</li> <li>2)調査用試錐孔の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化</li> <li>3)応力場の変化（地盤沈下、沈降、空洞の形成）</li> <li>4)母岩の脱水</li> <li>5)人工材料の欠陥（オーバーパックの早期破損等）</li> </ol> <p>2.採査及び閉鎖</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)緩衝材または埋め戻し材の圧縮あるいは空隙の作成</li> <li>2)廃棄物の不均質性（物理的あるいは化学的）</li> </ol>	<p>3.閉鎖後の地下活動（処分場への侵入）</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)廃棄物あるいは資材回収</li> <li>2)テロ行為あるいは戦争</li> <li>3)試錐</li> <li>4)採鉱</li> <li>5)地熱エネルギー生産</li> <li>6)資源採取</li> <li>7)トンネル工事利用</li> <li>8)地下構造物建設（居住、他の廃棄物の処分）</li> <li>9)考古学的調査</li> <li>10)液体廃棄物等の注入</li> <li>11)地下水の汲み上げ</li> </ol>	<p>4.閉鎖後の地表の活動</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1)記録の喪失</li> <li>2)ダム、貯水池の建設、放水</li> <li>3)河川の引水</li> <li>4)灌漑</li> <li>5)土壤改良及び地下水水質制御</li> <li>6)農（酪農を含む）林木産業</li> <li>7)人口変化及び都市開発</li> <li>8)人間活動による気候変化（温室効果等）</li> <li>9)採石、泥炭採取</li> </ol>	
人間活動による 事象				

### 1.2.1.1 事象の抽出

処分システムの基本概念に基づき力学的・水理学的な観点から処分場に起こりうる事象について抽出を行う。事象の抽出を行う基本条件を以下に示す。

- ・時間経過の考え方は処分システムの基本概念に基づき、建設→操業→閉鎖→閉鎖以降とする。
- ・事象を想定する対象物は、人工バリア（ペントナイト、ペントナイト混合土、コンクリート）、天然バリア（岩盤）、廃棄体（廃棄物、廃棄体容器）である。

以上の条件に基づいた、力学的・水理学的な観点からの事象を表-1.2.2に示す。

表-1.2.2 力学的・水理学的観点からの事象

S T E P		事象	
		第一次	第二次以降
建設	・掘削	・岩盤応力の変化 ・地下水の低下	・岩盤緩み域の発生 ・岩盤の透水係数の変化 ・支保工（吹付コンクリート・ロックボルト）の設置 ・化学環境の変化 ・不飽和領域の発生（岩盤と空気の接触） ・岩盤の風化・スレーキング ・空洞の安定性低下 ・地中温度の変化 ・地下水組成の変化 ・地下水の化学的変質
	・人工バリアの構築	・ペントナイトの設置 ・コンクリートピットの設置	
操業	・廃棄体の定置	・底部ペントナイトの変形 ・廃棄体の発熱	・底部ペントナイトの変形 ・コンクリートピットの沈下・傾斜 ・人工バリア（ペントナイト厚さの不足）の欠損 ・コンクリートの熱による劣化 ・ペントナイトの熱変質
閉鎖		・グラウト ・プラグの設置 ・埋戻し	
閉鎖後		・地下水の再冠水 ・セメント系材料の長期的劣化 ・岩盤クリープ	・コンクリートピットへの水圧の作用 ・コンクリートピットの破壊 ・ペントナイトの変形 ・ペントナイトの透水係数の変化 ・廃棄体容器変形・破損 ・廃棄体体積変化・変形 ・ペントナイトの膨潤・圧密 ・廃棄体容器への地下水の接触 ・廃棄体及び廃棄体容器の腐食 ・ガス発生 ・人工バリア（ペントナイト）の破壊 ・硝酸塩の流出 ・岩盤への廃棄体の腐食膨張荷重の作用 ・ペントナイトの流出 ・人工バリアの変形 ・ペントナイトの隔離性能の低下 ・ペントナイトの地下水による化学的変質 ・地中温度の変化 ・バクテリア ・バクテリアによる人工バリアの欠損 ・コンクリートからのCaイオン流出 ・ペントナイトのCa化 ・ペントナイト特性の変化（透水係数、膨潤圧） ・コンクリートからのCaイオン流出 ・コンクリート体積の変化 ・セメント系材料の強度低下（圧縮、引張、せん断） ・部材結合力が欠損 ・廃棄物・セメント系材料が混在した状態

### 1.2.1.2 各事象の相関

表-1.2.2に示した各STEPの事象についての相関を示す。

#### (1) 建設時

建設時に行われる作業は、岩盤の掘削と、人工バリア（ペントナイト、コンクリートピット）の構築とに区分される。以下にそれぞれの作業についての検討を実施する。

##### (a) 掘削

掘削においての事象相関関係をフローにして図-1.2.1に示す。

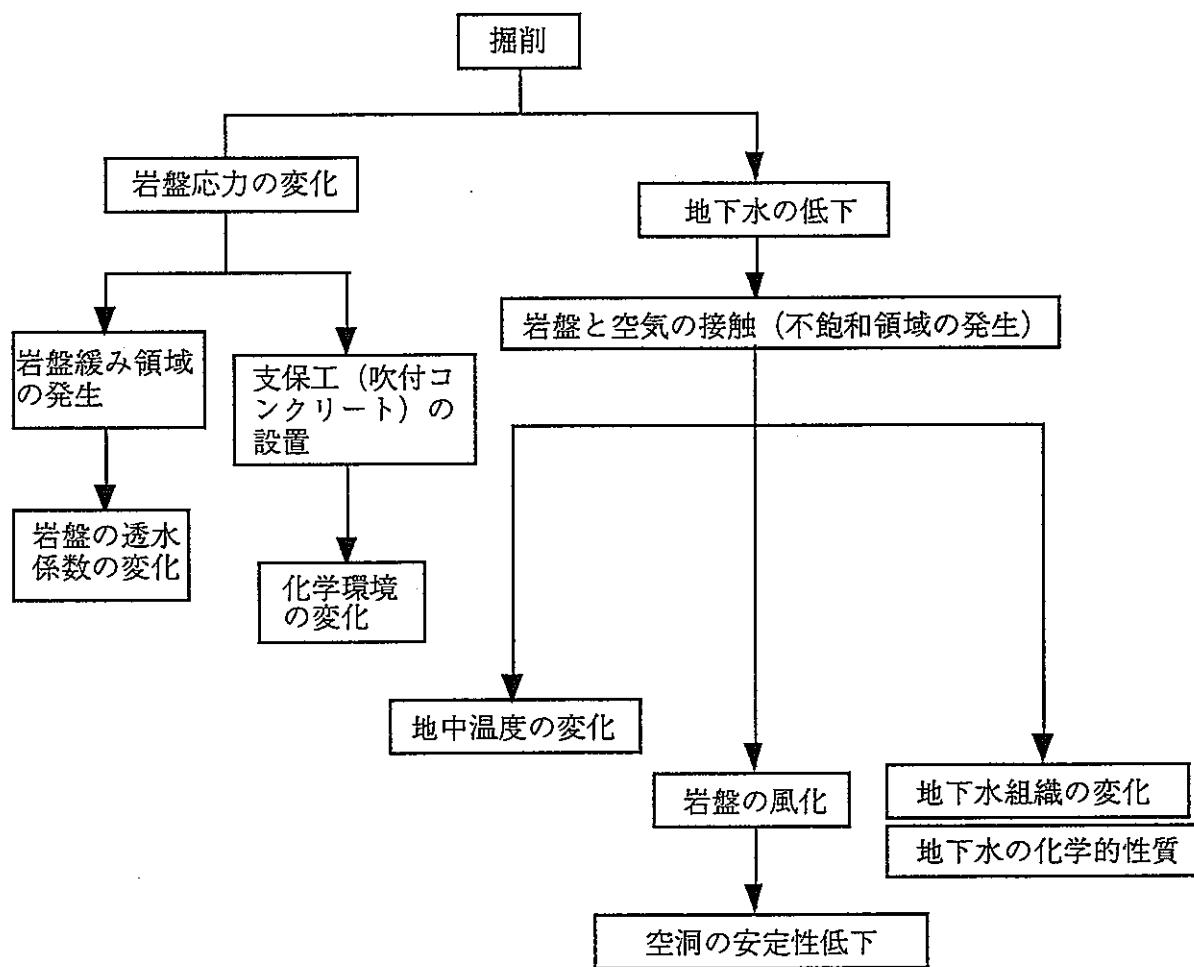


図-1.2.1 掘削による事象相関フロー図

### (b) 人工バリアの構築

人工バリアの構築時の事象として考えられるのは、ベントナイトの設置とコンクリートピットの設置である。本検討では、シナリオ検討を力学的・水理学的な観点に着目しているため、施工的な観点、例えば施工不良及び品質不良等については人為的なものであるため考慮しない。またベントナイトの設置後、その上部にコンクリートピットの設置を行うことから、ベントナイトにコンクリートピットの荷重が作用しベントナイトの変形等が考えられるが、ベントナイトに作用する荷重は廃棄体荷重の方が大きいことから、ここでは検討せず廃棄体定置時において検討する。

## (2) 操業時

操業時に行われる作業は、廃棄体の定置が主となる。したがって、操業時のシナリオ検討は廃棄体定置における力学的・水理学的事象について実施する。

掘削においての事象相関関係をフローにして図-1.2.2に示す。

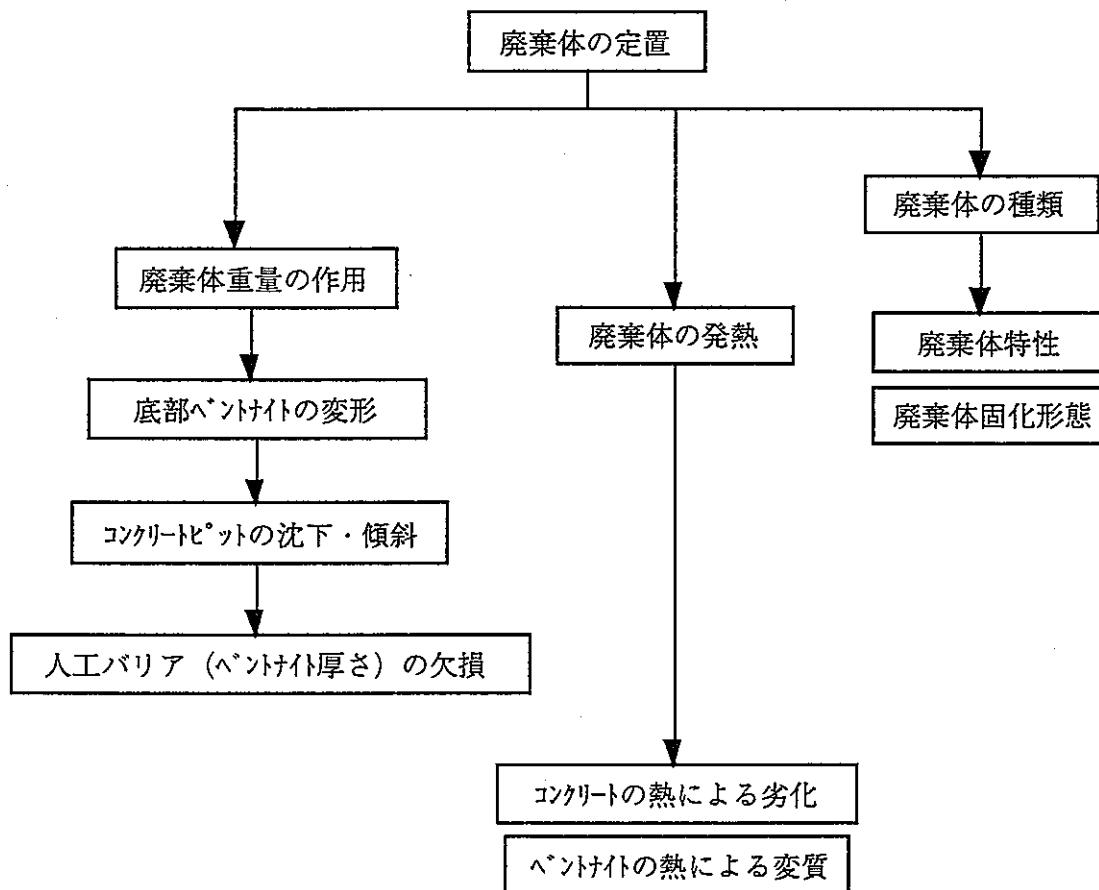


図-1.2.2 廃棄体定置による事象相関フロー図

### (3) 閉鎖時

閉鎖時に行われる作業は、空洞、坑道類、アクセス坑道の埋戻し及びグラウト、プラグの設置である。これらについても施工的なことについては考慮しない。

#### (4) 閉鎖後

閉鎖後に起こりうる事象の相関について図-1.2.3に示す。

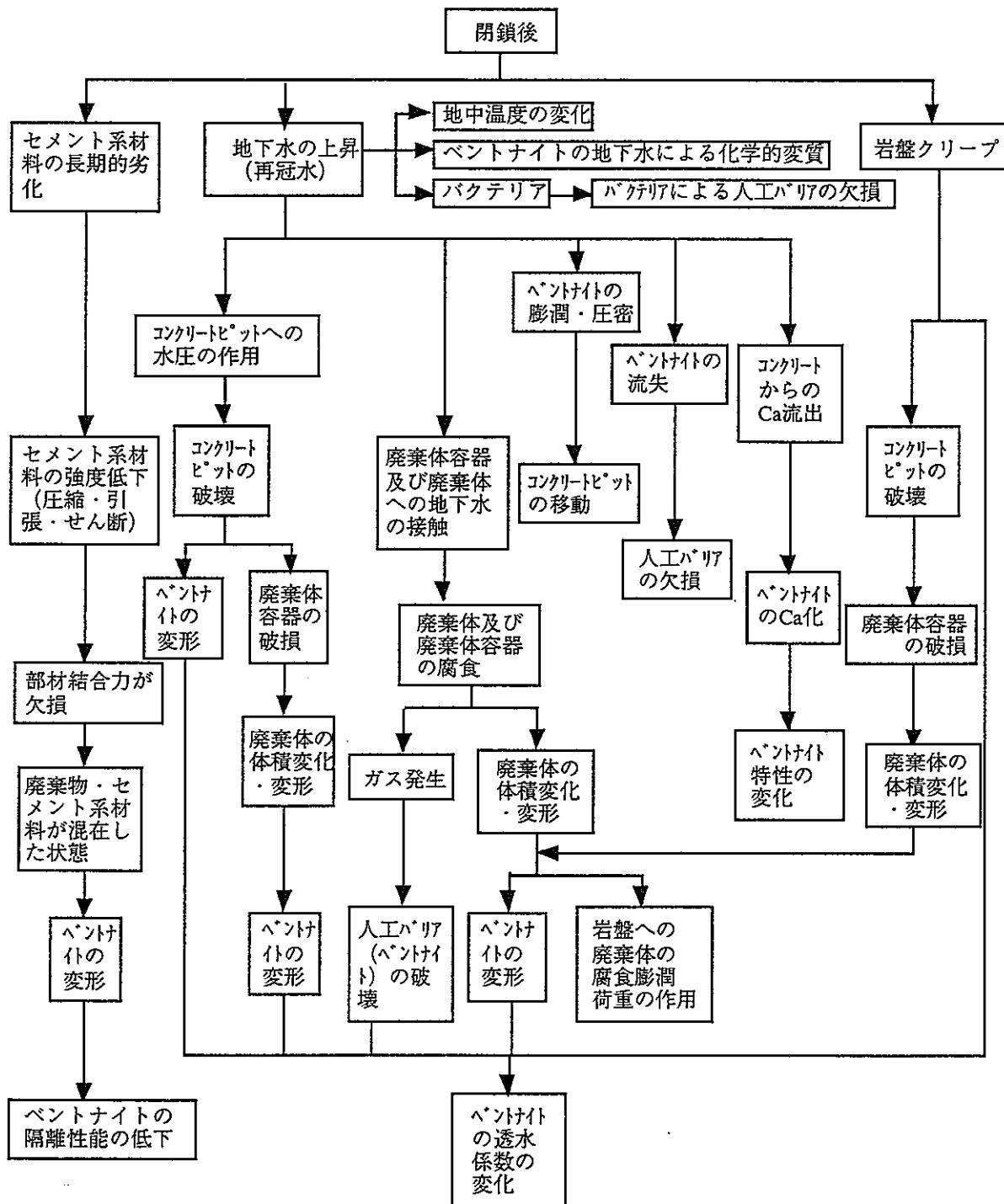


図-1.2.3 閉鎖後の事象相関フロー図

### 1.3 力学挙動評価モデルに基づく解析

#### 1.3.1 热解析

大断面岩洞方式、小断面岩洞方式、坑道方式へ発熱性廃棄体（ハル・エンドピース圧縮固化体）を処分した場合の熱の影響について、熱解析を実施したことは前述した。その結果、ペントナイト内面での最高温度は大断面岩洞方式で250°C、小断面岩洞方式で150°C、坑道方式で50°C程度まで上昇することが明らかとなった。

#### 1.3.2 体積変化解析

ハル・エンドピース圧縮固化体に含まれる有害空隙、アスファルト固化体からの硝酸塩の溶出による廃棄体の体積変化の影響を解析的に検討した。その結果、廃棄体の体積変化によるペントナイトの変形は、空洞断面の増大に伴い増加し、そのオーダーは数cm～数十cmとなった。それに伴い、ペントナイトの乾燥密度は1.8tf/m<sup>3</sup>から1.3～1.7tf/m<sup>3</sup>程度となり、透水係数は1～2オーダー大きくなることがわかった。また、セメント成分の溶出も考慮した検討の結果は、考慮しない場合の変形量よりも大幅に増加することが明らかとなった。

### 1.3.3 力学挙動評価モデルに基づく解析

処分場の操業～閉鎖後において、処分空洞の底部に設置されたベントナイトには、廃棄体、コンクリートピット及び上部ベントナイトの荷重が作用し、力学的挙動を生ずることが考えられる。このうち長期的な力学的挙動としての圧密沈下現象は処分空洞への悪影響が懸念されるため、予測解析を行った。

#### 1.3.1 解析条件

##### (1) 解析方法

土の力学的挙動を表現するモデルとして弾塑性理論に基づく構成式が挙げられる。土の弾塑性構成式には様々なモデルが提案されているが、その中でも代表的なモデルとして、Cam-Clay モデル、関口・太田モデルが挙げられる。Cam-Clay モデルは、粘土のせん断・圧密現象を統一的に表現できるモデルとして解析によく用いられている。また関口・太田モデルは、Cam-Clay モデルと等価な弾塑性モデルであるが、土要素の異方応力状態、主応力の回転さらにそれに伴うダイレイタンシー効果の変化等を表現できるとされている。

そこで本検討では、この関口・太田の弾塑性モデルを用いた有限要素法解析を実施し、底部ベントナイトの圧密沈下量の検討を行う。解析コードは鹿島建設所有の「LIMDAC」である。

##### (2) 解析用物性値

関口・太田モデルで解析するために必要な物性値を表-1.3.1 に示す。物性値は Na 型ベントナイトのクニゲル V 1 (乾燥密度:  $\gamma_d = 1.8$ ) の値を用いた。

表-1.3.1 解析用物性値

データ		
飽和密度 $\rho_s$	(tf/m <sup>3</sup> )	2.0
弾性係数 E	(Mpa)	70
ポアソン比 $\nu$	(—)	0.4
透水係数 k	(m/s)	$1.0 \times 10^{-13}$
初期間隙比 $e_0$	(—)	0.50
圧縮指数 Cc	(—)	0.27
膨潤指数 Cs	(—)	0.18
critical state パラメータ M	(—)	0.50
ダイレイタンシー係数 D <sup>*1</sup>	(—)	0.0521
鉛直先行圧密応力	(MPa)	60.0
静止土圧係数 $k_0^{*2}$	(—)	0.77
水の単位体積重量 $\gamma_w$	(tf/m <sup>3</sup> )	1.0

上記物性値の内、飽和密度、弾性係数、ポアソン比、及び透水係数については、文献5)から引用した。また初期間隙比、圧縮指数、膨潤指数および critical state パラメータ M は、図-1.3.1 に示す動力炉・核燃料開発事業団より受領した図-1.3.1 の三軸圧密試験結果よ

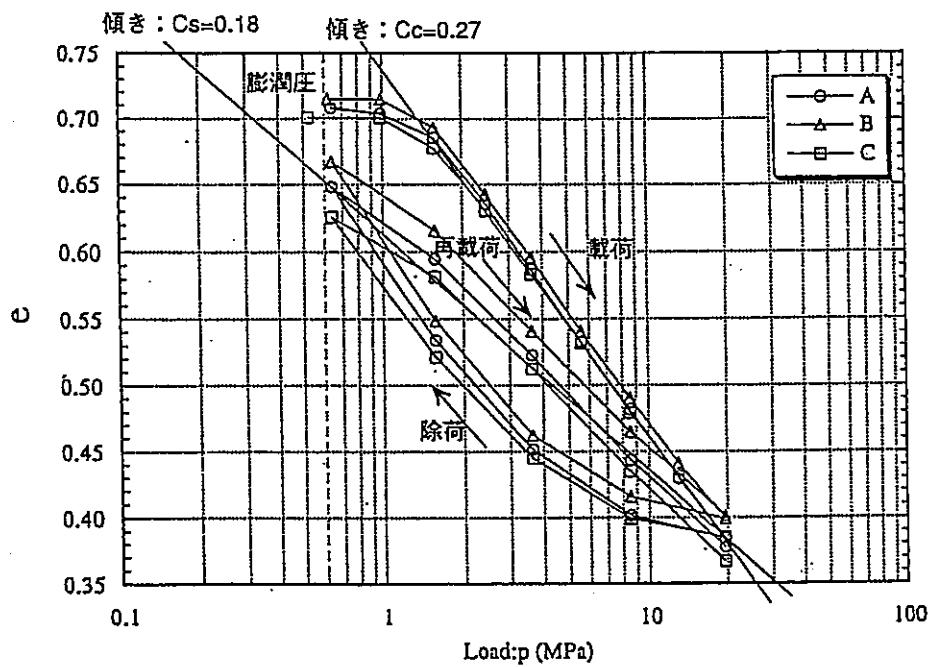


図-1.3.1 クニゲルV 1の三軸圧密試験結果

\* 1 : ダイレイタンシー係数 D

ダイレイタンシー係数 D(ダイレイタンシーによる体積変化に比例する定数)と critical state パラメータ M には以下に示す関係式がある。

$$M = (\lambda - \kappa) / D (1 + e_0)$$

$$\text{ここに } \lambda = 0.434 C_c$$

$$\kappa = 0.434 C_s$$

これより、

$$\begin{aligned} D &= (\lambda - \kappa) / M (1 + e_0) \\ &= 0.434 (0.27 - 0.18) / 0.50 (1 + 0.50) \\ &= 0.0521 \end{aligned}$$

となる。

\* 2 : 静止土圧係数

$$k'_0 = 1 - \sin \phi$$

ここに  $\phi$  は土の内部摩擦角であり、critical state パラメータ M とのあいだに

$$M = 6 \sin \phi / (3 - \sin \phi)$$

なる関係式があることから、 $M = 0.5$  より  $\phi = 13.3^\circ$  、  $k'_0 = 0.77$  となる。

### (3) 解析モデル

解析は、図-1.3.2に示す大断面岩洞方式の底部ベントナイト部を取り出し、軸対称でモデル化した。図-1.3.3に解析用要素分割図を示す。

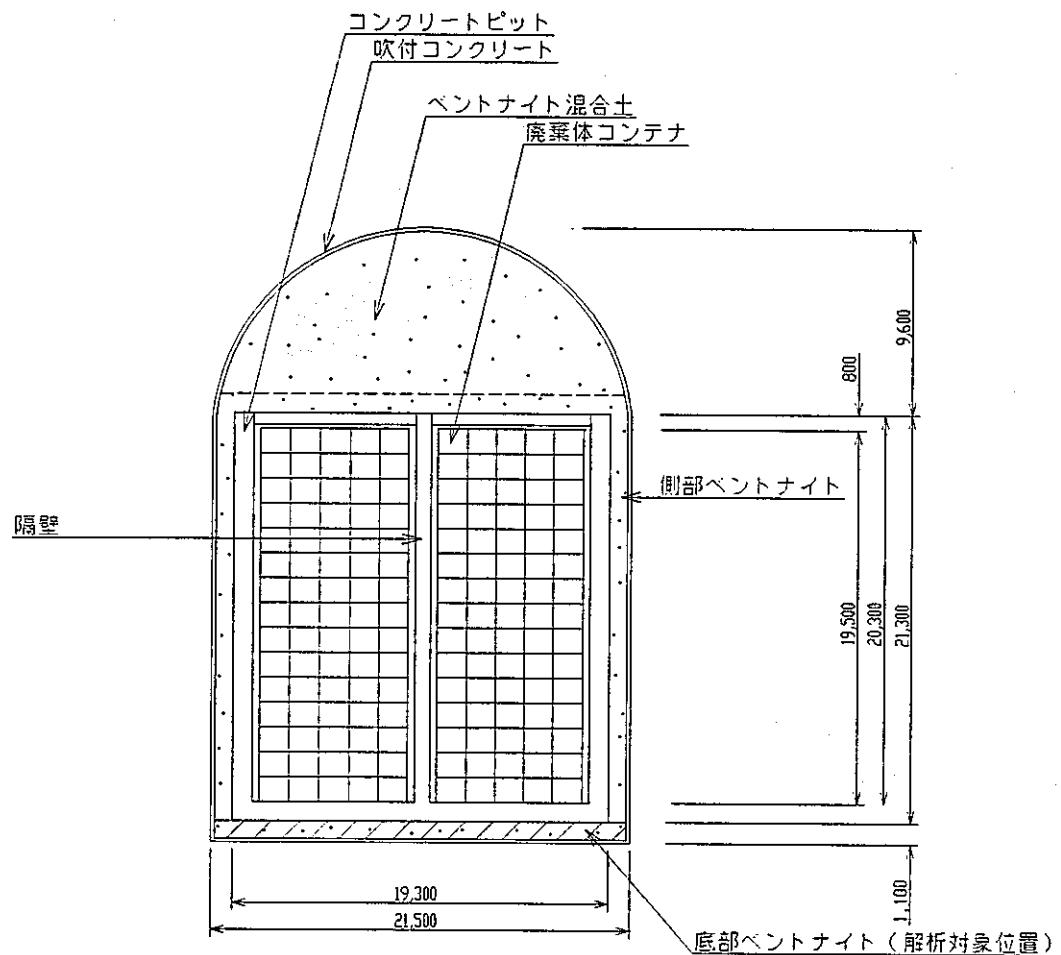


図-1.3.2 解析対象位置

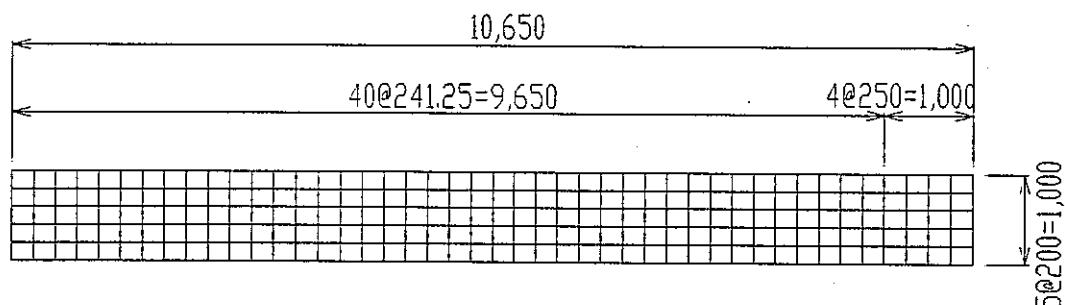


図-1.3.3 解析モデル

#### (4) 解析ケース

側部ベントナイトの影響を考察するため、以下の2ケースで解析を行った。

表-1.3.2 解析ケース

ケース1	ケース2
弾塑性一次元解析	弾塑性二次元解析

#### (5) 排水条件

側部ベントナイトの影響はケース2において排水条件により考慮した。

##### (a) ケース1（一次元解析）の場合

上下面是排水とし、側面は非排水とする。

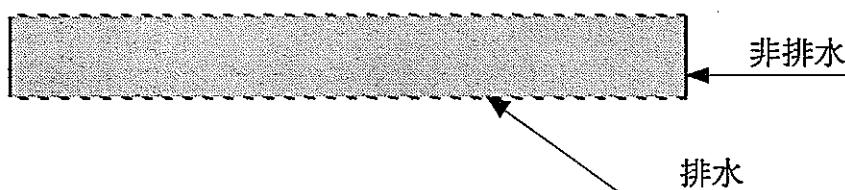


図-1.3.4 排水条件（一次元解析の場合）

##### (b) ケース2（二次元解析）の場合

解析モデル上面において、側部ベントナイトと接している部分は非排水とし、残りの部分は排水とする。また、下面是全て排水とし、対称軸（左側面）は非排水とし、右側面は排水とする。

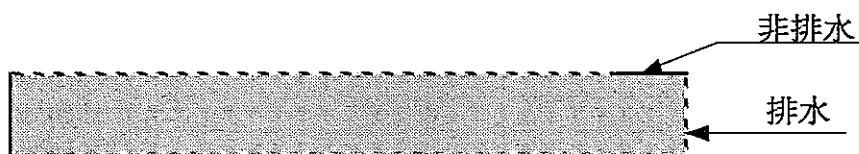


図-1.3.5 排水条件（二次元解析の場合）

#### (6) 荷重条件

底部ベントナイトに作用する荷重は、上部及び側部ベントナイト重量、コンクリートピット重量、廃棄体重量である。ただし、廃棄体重量に関しては現在データが取得されてない。そこで廃棄体定置部分のほとんどは廃棄体コンテナ及びセメント系材料で占められることから、コンクリートの重量と同じとした。

荷重は、解析モデル上面に一様な等分布荷重が載荷するものとして以下のように算定した。

$$P = P_c + P_b$$

ここで、 $P$ ：底部ベントナイトに載かる上載荷重

$P_c$ ：コンクリートピット部重量 ( $\gamma_c = 2.3 \text{tf/m}^3$ )

$P_b$ ：上部、側部ベントナイト部重量 ( $\gamma_b = 2.0 \text{tf/m}^3$  (飽和密度))

ただし、廃棄体の単位体積重量は、コンクリートの単位体積重量と等しいものとし、コンクリートピット部重量に含む。

したがって、

$$P_c = A_c \times \gamma_c \quad (A_c : \text{コンクリートピット部の面積})$$

$$= 19.3 \times 21.3 \times 2.3$$

$$= 945.5 \text{tf/m}$$

$$P_B = A_B \times \gamma_B \quad (A_B : \text{上部ベントナイト部の面積})$$

$$= \{(1.0 \times 21.3 \times 2) + (\pi \times 9.6^2) / 2\} \times 2.0$$

$$= 374.7 \text{tf/m}$$

$$P = 945.5 \text{tf/m} + 374.7 \text{tf/m}$$

$$= 1320.2 \text{tf/m}$$

となり、底部ベントナイトに作用する荷重は、底部ベントナイト幅で除し、

$$1320.2 \text{tf/m} / 21.3 \text{m} = 62.0 \text{tf/m/m}$$

となる。

また、荷重載荷の過程を模擬するため、便宜的に全工程（20年）とピットの総数から1断面の廃棄に要する日数を65日とし、1日当たり0.95tf/mの等分布荷重を62.0tf/mになるまで載荷させた。

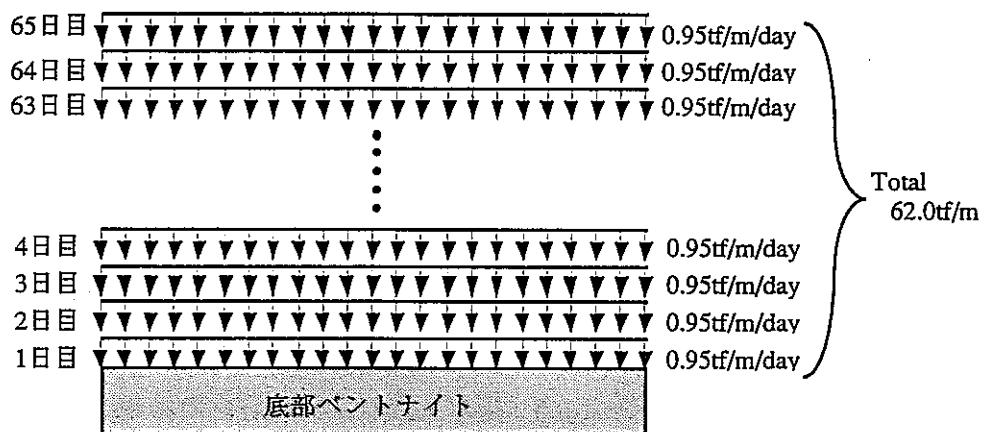


図-1.3.6 荷重図

なお、各要素の鉛直先行圧密応力に乾燥密度1.8g/cm<sup>3</sup>のクニゲルV1に対し試験より得られている膨潤圧（P=6.0MPa）と要素自身の自重を考慮した。解析は、ベントナイトを正規圧密状態（過圧密比1.0）と仮定し、鉛直先行圧密圧力=圧密降伏応力として行った。

(7) 境界条件

境界条件は以下のように設定した

側面……鉛直ローラとする。

下面……岩盤に支持されているため、固定境界とする。

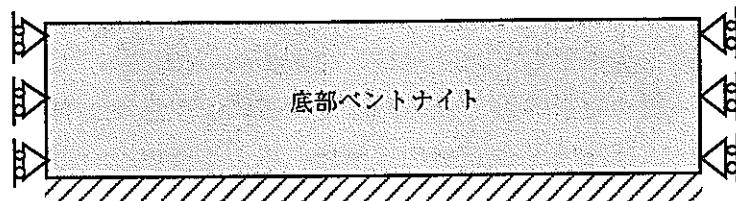


図-1.3.7 境界条件

### 1.3.3.2 解析結果

解析結果を以下に示す。表-1.3.3に各ケースでのモデル対称軸上面での最終沈下量と圧密時間 $t_{95}$ を示す。また図-1.3.8にケース2の圧密終了時の変位図を、図-1.3.9に各ケースの圧密時間と圧密沈下量の関係を、それぞれ示す。

ベントナイトの最大圧密沈下量はケース1（弾塑性一次元解析）で5.6mm（モデル対称軸上面部）、ケース2（弾塑性二次元解析）で8.6mm（側部ベントナイト隅角部）となった。ただし、ケース2のモデル対称軸上面部での最終沈下量は5.7mmとなったことから、ケース2での側部ベントナイト隅角部の沈下は、排水条件の違いによる局所的な変位によるものと考えられる。

図-1.3.9の圧密時間-圧密沈下量の関係は、解析モデル対称軸上面の沈下量をプロットしたものである。

表-1.3.3 解析結果

	ケース1	ケース2
最終沈下量 S (モデル対称軸上面)	5.6mm	5.7mm
圧密時間 $t_{95}^*$	9.6年	9.8年

\*……  $t_{95}$ は、圧密度95%時の圧密時間を表す。

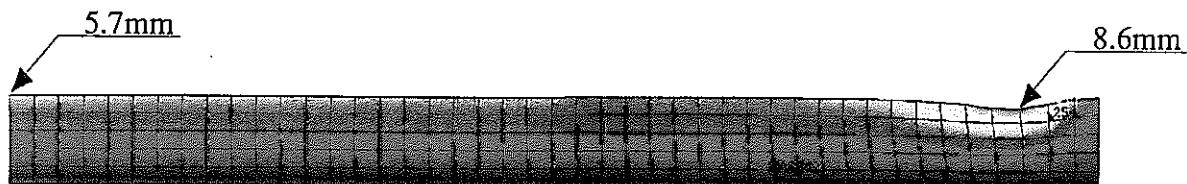


図-1.3.8 ケース2の圧密終了時における変位図

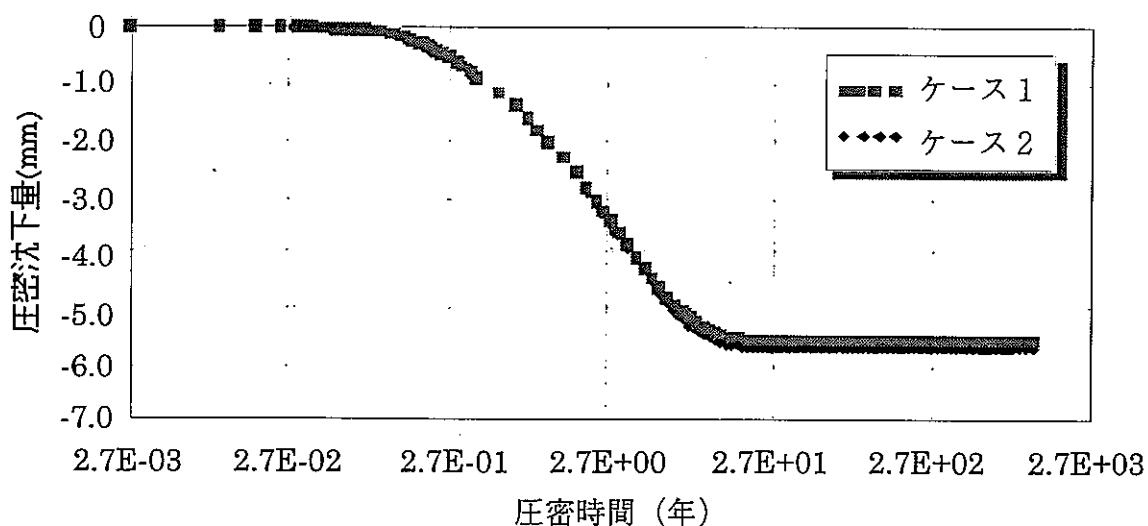


図-1.3.9 圧密時間と圧密沈下量の関係

### 1.3.4 まとめと今後の課題

#### 1.3.4.1 熱解析

熱解析の結果、大断面岩洞方式ではベントナイト内面で250°Cまで温度が上昇することから、発熱性廃棄体の処分は困難であると考えられる。一方、坑道方式は最高温度が50°C程度であることから、発熱性廃棄体のみを処分することが可能である。小断面岩洞方式は最高温度が150°C程度となったことから、発熱性廃棄体と非発熱性廃棄体を半数程度ずつ混在させた形態で処分が可能であると考えられる。

今後はこの熱解析の結果を反映させた処分コンセプトの構築を行うことが必要である。

#### 1.3.4.2 体積変化解析

廃棄体の体積減少量をパラメトリックに仮定し解析的な検討を行った結果、変形量は数cm～数十cmのオーダーとなった。また、本検討の処分コンセプトでは廃棄体定置のためにコンクリートピットやコンテナ等のセメント系材料を用いており、それらからのセメント成分の溶出を考慮すると、かなりの変形量が発生する。廃棄体、セメント系材料の体積変化は、処分コンセプトに大きな影響を与える要因となりうることが判った。

今後は、体積変化量の正確な把握を行うと共に、詳細な検討を実施することにより変形量を求め、上記熱解析の結果と併せて処分コンセプトに反映させていくことが必要である。

#### 1.3.4.3 ベントナイトの圧密解析

底部ベントナイトを対象とした圧密弾塑性解析の結果、モデル対称軸上面の変形量には一次元解析と二次元解析に有意な差が生じないことを確認した。沈下量が数mm程度におさえられた要因としては、今回解析に用いたベントナイトの膨潤圧が6.0MPaであり、これを先行圧密応力と仮定したことにより弾性解析の範囲におさまったことが挙げられる。一方膨潤圧のより小さい、すなわち乾燥密度のより小さいベントナイトを用いて解析した場合は、塑性領域の挙動を示し、沈下量のより大きな結果が得られると予想される。

体積変化解析の人工バリアの変形量の数cm～数十cmと比較して、圧密沈下量は数mmであることから、圧密沈下がバリアシステムに与える影響は相対的に小さく、問題はないと考えられる。

ベントナイトは一般の粘性土と違って、水を吸収することにより著しく膨潤する特性を有している。そのため、地下水の再冠水が始まつてからの挙動は次のようになるものと考えられる。

ベントナイトの膨潤圧が大きい場合、コンクリートの強度を超えると、コンクリート内部や廃棄体の空隙部分を押しつぶし体積減少が生じる。この時、一旦膨潤圧は低下するが、引き続きベントナイトが膨潤し、体積減少分まで膨潤すると、再び膨潤圧が増加する。この内部空隙の圧縮とベントナイトの膨潤という現象を、平衡状態になるまで繰り返す。膨潤圧がコンクリートの破壊強度まで到らない場合は、体積変化を生じない状態で膨潤圧と

コンクリートの圧縮応力が釣り合っていると考えられる。このような状態から実際に圧密沈下が生じるかどうかは不明であるとともに、既往の解析手段ではシミュレートする手法は見あたらない。

今後は、ベントナイト単体の現象として力学挙動を検討するのではなく、地下水再冠水以降のベントナイトの力学挙動、廃棄体の体積変化等の、処分場全体の挙動がどのような過程をたどるのかを検討した上で、その現象をモデル化した解析、あるいは実験的手法により検討を実施する必要があると考えられる。

## 第1章 参考文献

- 1) 岩波理化学事典：第4版，岩波書店，1989年2月
- 2) 動力炉・核燃料開発事業団，アスファルト固化技術開発施設（パンフレット）
- 3) 小林一輔，コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断，森北出版株式会社，pp.48, 1991年7月
- 4) 樋口芳郎，村田二郎，小林春夫，わかり易い土木講座10 コンクリート工学(I)施工，彰国社，昭和58年7月
- 5) 動力炉・核燃料開発事業団，高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度－，PNC TN 1410 92-08, 平成4年9月
- 6) 社団法人 日本建設機械化協会，建設工事に伴う濁水対策ハンドブック，pp.174, 昭和60年
- 7) 財団法人 原子力環境整備センター，放射性廃棄物関連用語解説集，昭和61年6月
- 8) 日本機械学会：伝熱工学資料：改訂第4版，pp.322, 1986年
- 9) 岩崎訓明，コンクリートの特性，共立出版株式会社，昭和53年6月
- 10) 鹿島建設株式会社，地層処分システムにおけるシーリング研究(II)（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書），PNC PJ1100 93-001, 1993年2月
- 11) 鹿島建設株式会社，地層処分システムにおけるシーリング研究(III)（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書），PNC PJ1100 94-002, 1994年2月
- 12) 鹿島建設株式会社，T R U廃棄物処分システムにおける人工バリアの長期力学的挙動の研究（動力炉・核燃料開発事業団 研究内容報告書），PNC ZJ1100 95-004, 1995年3月
- 13) 鹿島建設株式会社 土木設計本部編，土木設計の要点① 設計の基本知識，鹿島出版会，pp.172, 1994年4月
- 14) 社団法人 土質工学会編，岩の工学的性質と設計・施工への応用，昭和60年2月
- 15) 野崎隆司，伊藤洋，日比野敏，大規模地下空洞における各種安定化対策工とその考察，電力土木，No.209, pp.40～48, 1987.7
- 16) 日本建築協会，鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，pp.448～449, 1975
- 17) 例えば，日本道路公団，設計要領第三集 第9編 トンネル，道路厚生会，平成5年3月
- 18) 例えば，土木学会，危険物保安技術協会，岩盤タンクの安全確保に関する調査報告書，pp.88～92, 昭和61年9月
- 19) 田中俊行，深沢栄造，平和男，須山泰宏，人工地盤構築材料の開発（その3）－礫混入ベントナイト混合土の透水特性－，鹿島技術研究所年報，Vol.43, pp.205, 1995年12月
- 20) 日本原子力情報センター，高レベル放射性廃棄物処分に係る技術的課題，特別講演会資料，pp.235, 1995.11

## 第2章 人工バリア材料の力学的特性データの取得

### 2.1 目的

人工バリア材（ベントナイト）の長期力学的挙動を把握するために、Ca化に変質させたベントナイト（以下Ca化ベントナイト）およびケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料（ケイ砂の混合率を変化させた場合）の基本特性データ（膨潤圧、透水係数、強度定数等）を取得することを目的として実施したものである。また、Na型ベントナイトおよびNa型ベントナイトとケイ砂の混合材料との比較を行う。

### 2.2 使用材料

本試験で使用したベントナイトは、Na型ベントナイト（クニミネ工業製、クニゲルV1）を強制的にCa型に変質させたものを、また、砂は市販されているケイ砂6号を用いた。

図-2.2.1に使用材料の粒度分布を、表-2.2.1に物理特性を示す。ベントナイトの土粒子の密度 $\rho_s$ は、既往の研究結果<sup>9)</sup>を参考にして $2.70\text{g/cm}^3$ と一定にした。

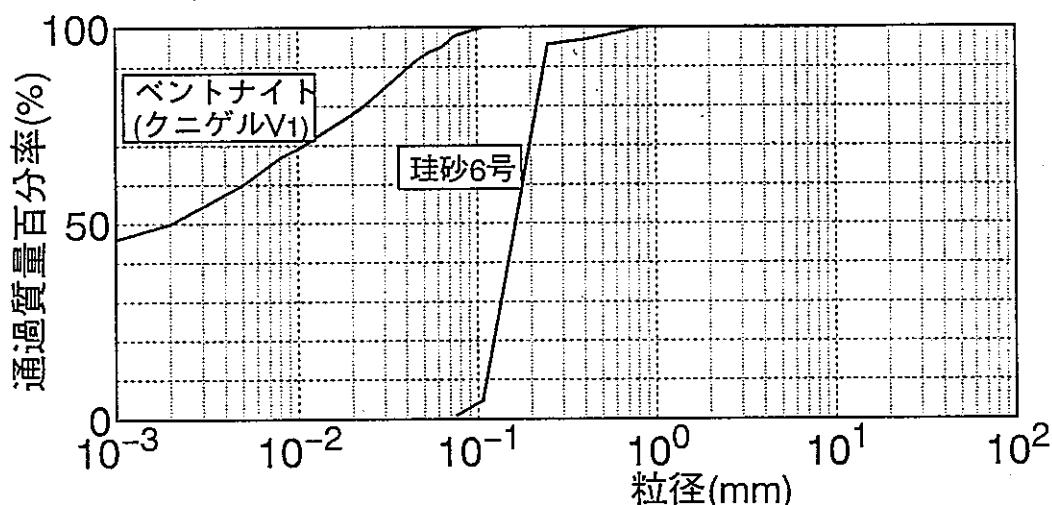


図-2.2.1 使用材料の粒度特性

表-2.2.1 使用材料の物理特性

種類	名称	自然含水比 $w_n$ (%)	土粒子の密度 $\rho_s$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
砂	ケイ砂6号	0.2	2.68
ベントナイト	Ca化クニゲルV1	6.5	2.70
	クニゲルV1	5.8	

表-2.2.2にクニゲルV1とCa化クニゲルV1の物性の比較を示す。Ca化処理を行うことにより、Na型ベントナイト中に最も多く含まれる、交換性陽イオン $\text{Na}^+$ が $\text{Ca}^{2+}$ と交換される。Na型ベントナイトを強制的にCa化処理を行った場合、置換されずに残る $\text{Na}^+$ 量は5～10meqの値をとり、これ以上の置換は期待できない。今回、処理後のベントナイト中に含まれる $\text{Na}^+$ 量を一つの目安とし、確実に置換されたと思われる10meq以下という基準をクリアしたCa化ベントナイトを使用した。

表-2.2.2 クニゲルV1とCa化クニゲルV1の物性比較

		クニゲルV1	Ca化クニゲルV1
pH		10.1	9.4
MB吸着量	mmol/100g	70.0	71.3
溶出イオン量	Na <sup>+</sup> meq/100g	53.9	5.2
	K <sup>+</sup> meq/100g	1.4	1.4
	Ca <sup>2+</sup> meq/100g	48.5	102.8
	Mg <sup>2+</sup> meq/100g	7.4	7.0
Total	meq/100g	111.2	116.4
陽イオン交換容量	meq/100g	59.9	60.8

### 2.3 試験条件

表-2.3.1に実施する項目と求める物性値を示す。

表-2.3.1 実施項目と物性値

試験項目	試験方法	供試体寸法	物性値
膨潤圧試験		φ4cm×h2cm	膨潤圧 P (MPa)
透水試験		φ4cm×h2cm	透水係数 k (m/sec)
一軸圧縮試験	JIS A 1216	φ5cm×h10cm	一軸圧縮強さ qu (MPa)

対象とする材料は、①Ca化ベントナイト（単体）および②ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料である。

#### 2.3.1 Ca化ベントナイト

Ca化ベントナイト（単体）の試験については、平成6年度の試験結果（次頁）を補間するために実施した。表-2.3.2に配合条件と試験項目を示す。

表-2.3.2 Ca化ベントナイトの配合条件と試験項目

	乾燥密度 $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	初期含水比 w (%)	膨潤圧 P (MPa)	透水係数 k (m/sec)	一軸圧縮強さ qu (MPa)
①	1.30	自然含水比	○	○	
②	1.50	自然含水比	○	○	
③	1.80	炉乾燥	○	○	
④	1.60	自然含水比			○

#### 2.3.2 ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料

ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料の基本特性を把握するために各試験を実施する。表-2.3.3に配合条件と試験項目を示す。なお、膨潤圧試験と透水試験は初期含水比が自然含水比状態で、一軸圧縮試験は初期飽和度約30%で試料調整を行ったものについて、

試験を実施した。

表-2.3.3 ケイ砂とCa化ペントナイトの試験条件

	砂配合率 (%)	ペントナイト 配合率 (%)	初期含水比 w (%)	乾燥密度 $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	膨潤圧 P (MPa)	透水係数 k (m/sec)	一軸圧縮強さ qu (MPa)
①	70	30	2.2	1.70	○	○	○
②	50	50	3.6	1.70	○	○	○
③	30	70	5.2	1.70	○	○	○

## 2.4 試験方法

### 2.4.1 圧縮固化方法

ベントナイトは粉体で市販されており、実際の人工バリア材料として使用するためには圧縮成型する必要がある。均質な圧縮固化体の供試体は、図-2.4.1に示す一軸圧縮試験装置を用いて、一定の荷重で静的に圧縮して作成した。

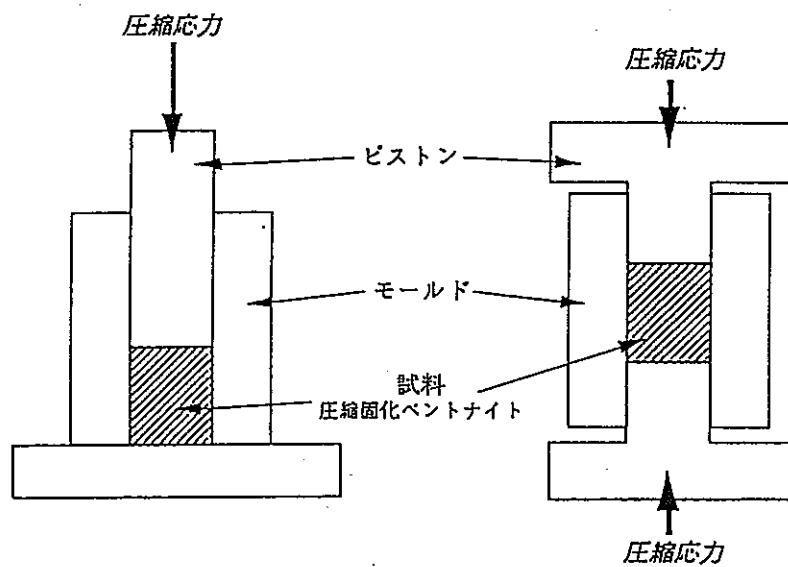


図-2.4.1 圧縮固化方法

### 2.4.2 膨潤圧試験

図-2.4.2に膨潤圧試験装置を示す。この試験装置は、円筒のモールド内に圧縮固化した供試体 ( $\phi 4\text{cm} \times h2\text{cm}$ ) が多孔質体を介して体積変化しないように設置され、上下から脱気水を供給して、ピストンと固定枠の間に入れた小型のロードセルで膨潤圧力を測定するものである。

試験の手順を以下に示す。

- ①所定の乾燥密度と含水比から、必要な試料として所要の湿潤重量を測定する。
- ②円筒のモールドの中に所定の重量に測定した試料を入れ、一軸圧縮試験装置を用いて、軸方向に圧縮固化する。
- ③圧縮固化後、試験体の割れが無いかチェックして、セルを固定枠にセットする。
- ④供試体内を上下から真空度を徐々に高めていき、負圧 $-1\text{kgf/cm}^2$ の状態でしばらく放置する。
- ⑤負圧を止めて、水頭差約100cmで、上下より吸水させて、膨潤圧の測定を行う。
- ⑥膨潤圧が一定になった後、約10日間放置して試験を終了する。

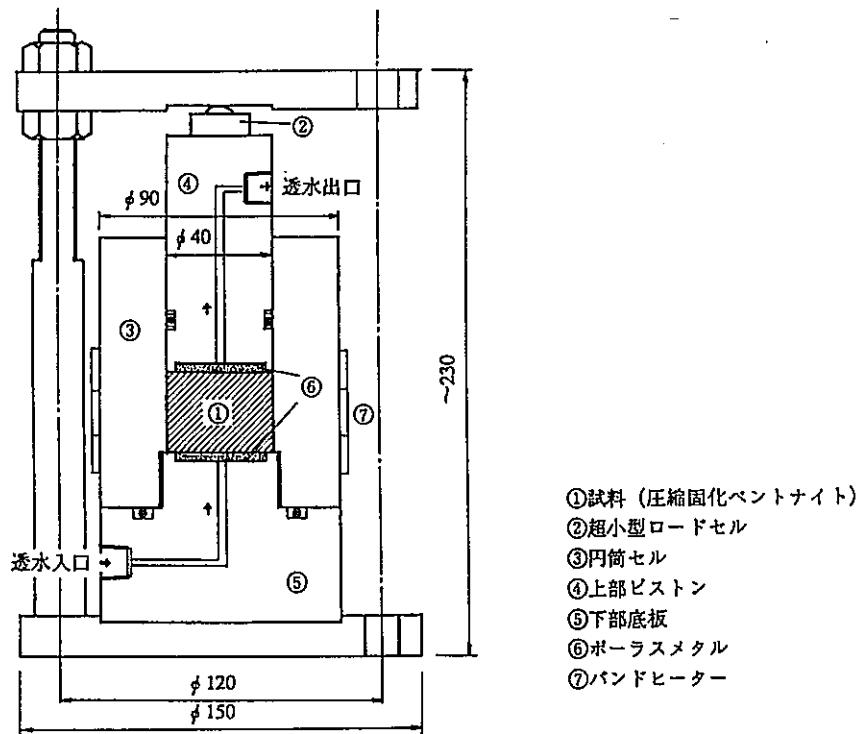


図-2.4.2 膨潤圧試験装置

#### 2.4.3 透水試験

透水試験装置は、膨潤圧試験装置と同じものを用い、膨潤圧測定終了後、透水係数を測定した。

透水係数は、圧縮固化したペントナイト中を流れる浸透水がDarcy（ダルシー）の法則に従うと仮定して、定水位透水試験によって式-2.4.1を用いて算定した。浸透水には脱気水を用いた。

$$k_T = \frac{Q}{Ait} \text{ (m/sec)} \quad (2.4.1)$$

ここに、 $k_T$ ：測定時の温度T°Cに対する透水係数、Q：浸透流量、A：供試体の断面積、i：動水勾配 (=H/L, H：水頭差、L：供試体寸法)、t：測定時間

さらに、水の温度に対する補正係数をかけてk (15°Cにおける透水係数) を式-2.4.2によって求めた。

$$k = k_T \times \frac{\eta_T}{\eta_{15}} \text{ (m/sec)} \quad (2.4.2)$$

ここに、 $\eta_T$ 、 $\eta_{15}$ ：粘性係数を示し、各々T°C、15°Cにおける水の粘性係数

#### 2.4.4 一軸圧縮試験

供試体は、所定のモールド(φ5cm × h 10cm)に設定した乾燥密度、含水比で圧縮固化したもの用い、試験は以下の手順で行った。

- ①供試体を試験機に設置する。
- ②毎分1%の圧縮ひずみが生じる割合を標準として、連続的に圧縮する。
- ③圧縮中は、圧縮量と圧縮力をはかる。
- ④圧縮ひずみが15%に達したら圧縮を終了する。
- ⑤供試体の変形・破壊状況などを観察し、記録する。

図-2.4.3に一軸圧縮試験状況を示す。

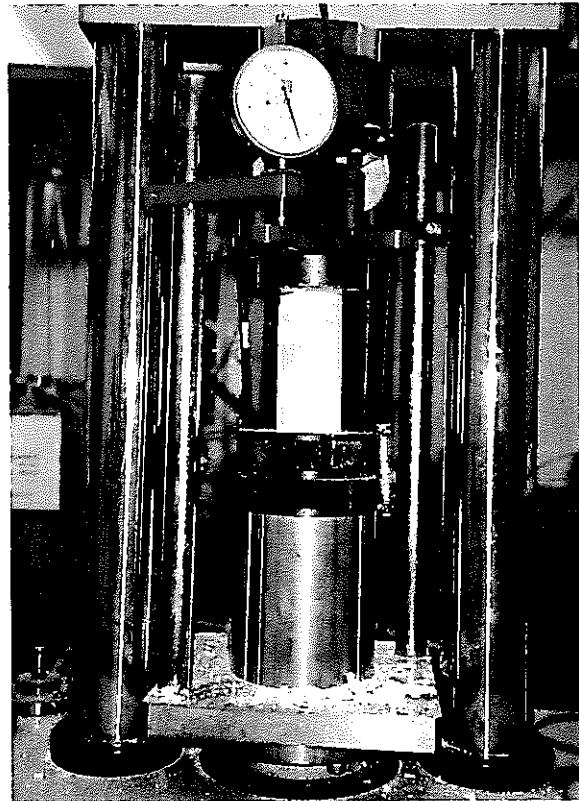


図-2.4.3 一軸圧縮試験状況

## 2.5 試験結果

### 2.5.1 Ca化ペントナイト

#### 2.5.1.1 膨潤圧

試験は乾燥密度3種類に変化させて行った。設定乾燥密度1.3, 1.5t/m<sup>3</sup>については自然含水比( $w_n=6.5\%$ ), 1.8t/m<sup>3</sup>については炉乾燥後( $w_n=0.0\%$ )の試料、圧縮固化を行って作製した。試料の初期飽和度Sroは16~21.9%, 試験後の飽和度は約100%であった。

表-2.5.1に膨潤圧試験結果を示す。図-2.5.1に膨潤圧と経過時間の関係を、図-2.5.2に膨潤圧と乾燥密度の関係を示す。なお、参考のため、Ca化クニゲルV1の試験結果(平成6年度)<sup>2)</sup>およびクニゲルV1の試験結果(平成4年度)<sup>3)</sup>も記す。

表-2.5.1 膨潤圧試験結果

		乾燥密度 $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	初期飽和度 Sro(%)	最終飽和度 Sr(%)	最大膨潤圧 $P_{max}$ (MPa)
平成7年度 (Ca化クニゲルV1)	H7-4	1.30	16.2	100.0	0.1
	H7-5	1.50	21.9	100.0	0.5
	H7-9	1.80	0.0	100.0	6.7
平成6年度 (Ca化クニゲルV1)	H6-1	1.73	33.6	99.2	2.4
	H6-2	1.76	35.5	97.4	5.5
	H6-3	1.77	35.8	97.7	6.7
平成7年度 (クニゲルV1)	H7-7	1.10	16.5	100.0	0.1
	H7-8	1.40	21.8	99.9	0.5
平成4年度 シーリングⅡ (クニゲルV1)	H2-8	1.84	40.4	97.3	9.8
	H2-5	1.79	37.2	97.7	4.8
	H2-9	1.78	36.6	99.8	5.0
	H2-12	1.71	32.7	100.0	2.2
	H2-7	1.69	31.6	98.9	2.8
	H2-3	1.67	30.6	100.0	1.8
	H2-1	1.58	26.7	100.0	1.2

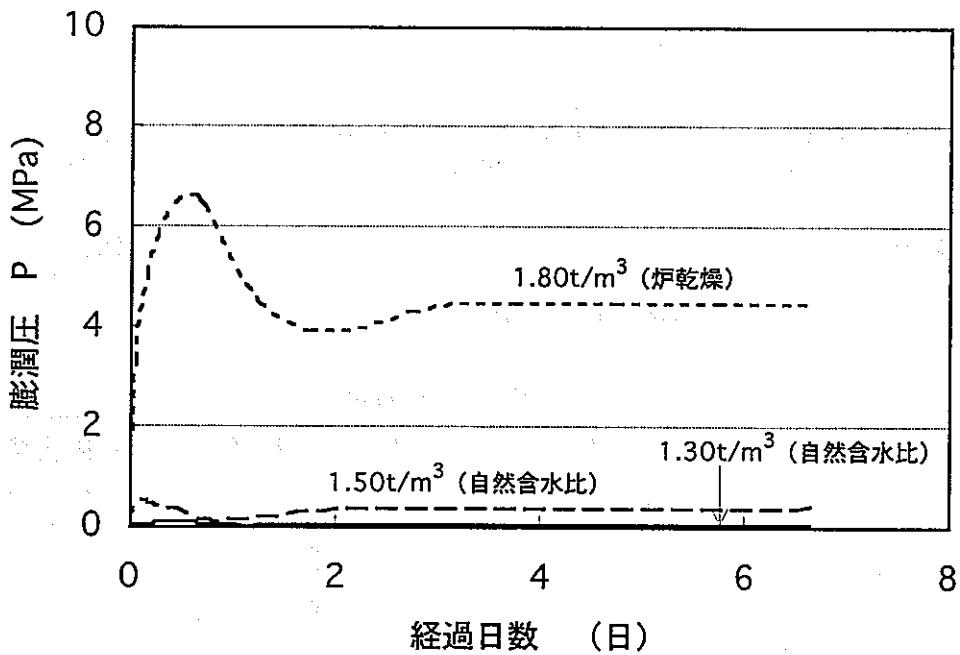


図-2.5.1 膨潤圧と経過日数の関係

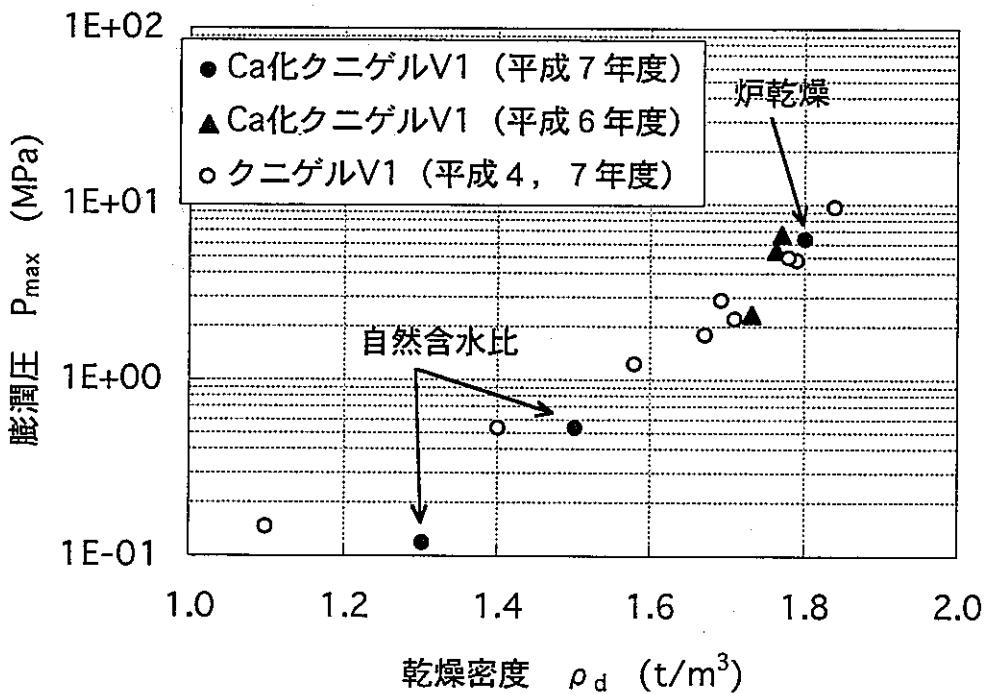


図-2.5.2 膨潤圧と乾燥密度の関係

これらの図から次のようなことがわかった。

膨潤圧は、いずれの場合において、約0.5日で第1ピークが得られ、その後減少した後再び増加して約3日後に第2ピークが得られる。その後は一定値を保持するという傾向を示している。この2つのピークをとる現象は、既往の知見<sup>4), 5)</sup>でも種々報告されており、自然含水比で圧縮固化した試料では、初期の乾燥密度が比較的小さい場合、膨潤圧の時間変化において2つのピークが観測されるが、膨潤試料では、初期状態の乾燥密度によらず2つのピークは認められないことが得られている。

Pusch<sup>6)</sup>はNaベントナイトを用いて、膨潤圧と膨潤の発現時間の関係について図-2.5.3に示す傾向があることを指摘している。この図から、膨潤圧は2つのピークが現れることを示し、第1のピークは主に圧縮変形することによる弾性エネルギーの関数によるもので、更に膨潤すると膨潤圧が低下する。原因は粒子間距離が増加することによる膨潤圧の低下やベントナイトのせん断変形による圧力の低下と考えられている。第2のピークは粘土粒子の再配列によって、膨潤圧が増加した降伏点であると考えている。

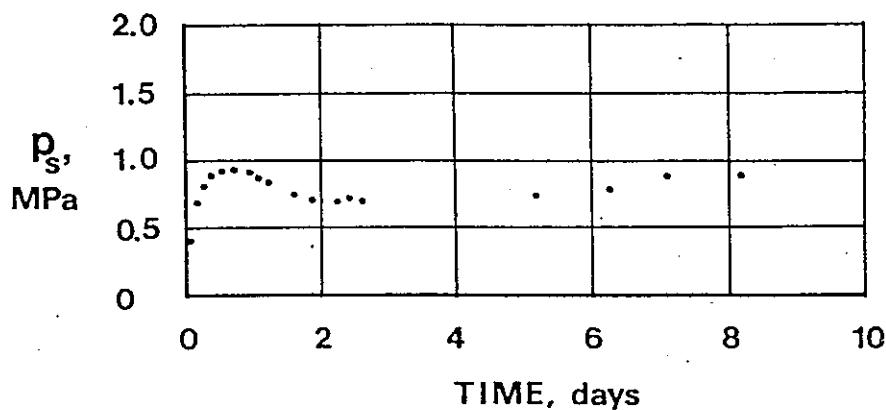


図-2.5.3 膨潤圧と膨潤の発現時間

Ca化クニゲルV1の膨潤圧は、乾燥密度  $\rho_d = 1.7 \sim 1.8 \text{ t/m}^3$  で圧縮固化した結果、6.4～6.7MPa、 $1.5 \text{ t/m}^3$  で0.5MPa、 $1.3 \text{ t/m}^3$  で0.1MPaの値が得られた。膨潤圧と乾燥密度の関係では、乾燥密度の増加に伴って膨潤圧は大きくなっている。既往のクニゲルV1の試験値と同等の値となっている。

### 2.5.1.2 透水係数

表-2.5.2に透水試験結果を示す。透水係数は通水圧 $0.6\text{ MPa}$ , 動水勾配 $3.0 \times 10^3$ のときの値を示す。なお参考のため、Ca化クニゲルV1の試験結果（平成6年度）<sup>2)</sup>およびクニゲルV1の試験結果（平成4年度）<sup>3)</sup>も記す。図-2.5.4に透水係数と経過時間の関係を、図-2.5.5に透水係数と乾燥密度の関係を示す。

表-2.5.2 透水試験結果

		乾燥密度 $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	初期飽和度 Sro (%)	最終飽和度 Sr (%)	透水係数 k (m/sec)
平成7年度 (Ca化クニゲルV1)	H7-1	1.30	16.3	100.0	$8.4 \times 10^{-12}$
	H7-2	1.50	21.9	99.6	$7.6 \times 10^{-13}$
	H7-3	1.80	0.0	100.0	$8.1 \times 10^{-14}$
平成6年度 (Ca化クニゲルV1)	H6-1	1.73	33.6	99.2	$4.5 \times 10^{-13}$
	H3-5	1.84	40.4	100.0	$6.6 \times 10^{-14}$
平成4年度 シーリングII (クニゲルV1)	H3-9	1.78	36.6	100.0	$2.1 \times 10^{-13}$
	H3-3	1.78	36.6	100.0	$1.1 \times 10^{-13}$
H3-6	H3-6	1.72	33.2	100.0	$6.5 \times 10^{-13}$
	H3-4	1.69	31.6	98.7	$2.0 \times 10^{-12}$
H3-2	H3-2	1.67	30.6	100.0	$4.6 \times 10^{-13}$
	H3-1	1.58	26.7	100.0	$4.6 \times 10^{-13}$

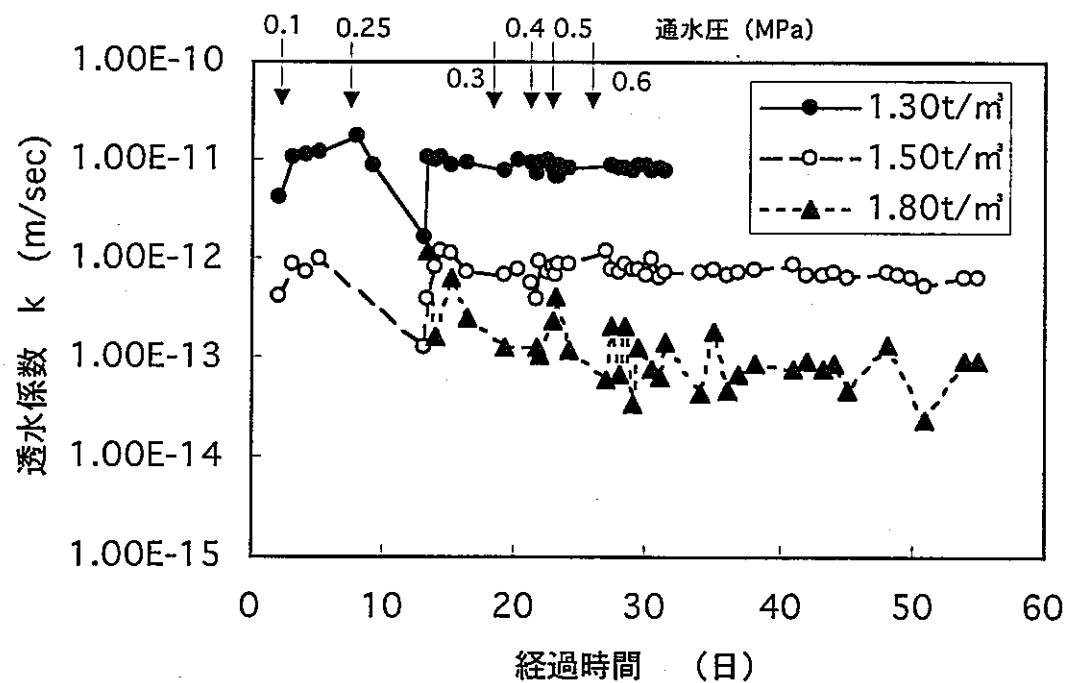


図-2.5.4 透水係数と経過日数の関係

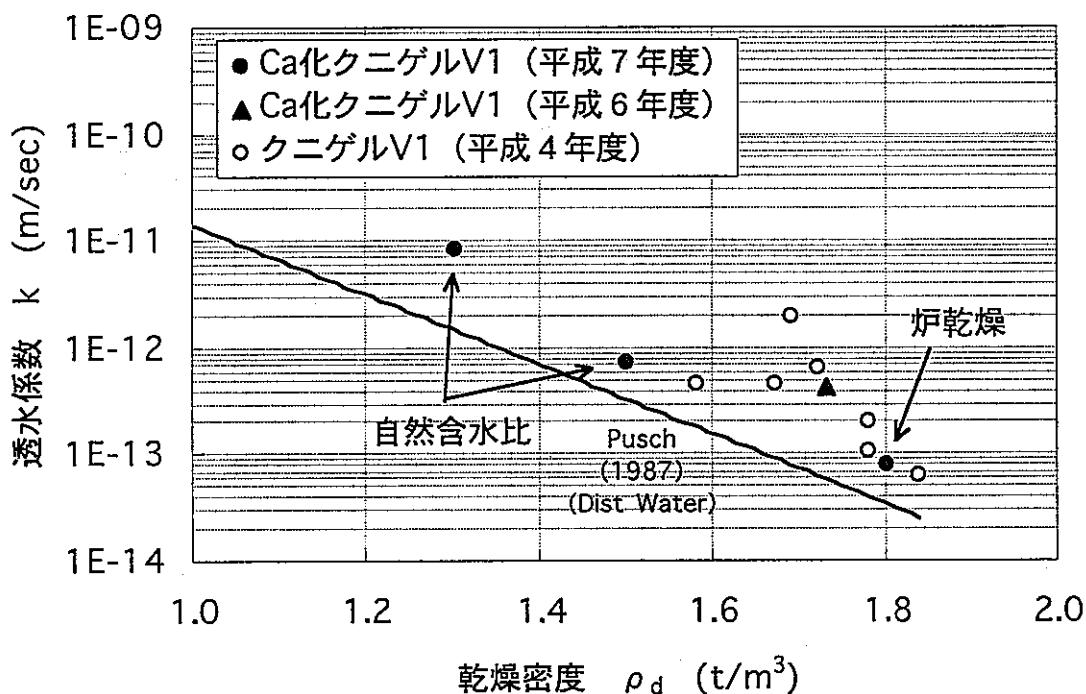


図-2.5.5 透水係数と乾燥密度の関係

これらの結果から次のことがわかった。

透水係数と経過時間の関係について、通水圧が0.3MPa以下であれば、 $\rho_d = 1.23 \sim 1.49 \text{ t/m}^3$ での透水係数は大きくばらついており、 $\rho_d = 1.70 \text{ t/m}^3$ では安定している。しかし通水圧が0.3MPa以上であれば、透水係数はほぼ一定の値をとっており、この範囲であればダルシー則が成立するものと思われる。

今回のCa化クニゲルV1の透水係数は $\rho_d = 1.70 \text{ t/m}^3$ で $8.1 \times 10^{-14} \text{ m/sec}$ 、 $\rho_d = 1.49 \text{ t/m}^3$ で $7.6 \times 10^{-13} \text{ m/sec}$ 、 $\rho_d = 1.23 \text{ t/m}^3$ で $8.4 \times 10^{-12} \text{ m/sec}$ となっており、既往のクニゲルV1の試験結果と同様 $k < 1 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$ の小さい値をとっている。

透水係数と乾燥密度の関係では、透水係数は乾燥密度の増加に伴って小さくなる傾向が見られている。図中に示す直線はPusch (1987)<sup>7</sup>がMX80 (ワイオミング産) に蒸留水を透過させて得た結果であるが、ペントナイトの種類が異なるにも係わらず、今回の試験結果とほぼ同等の値をとっている。また、Ca化クニゲルV1、クニゲルV1とも $\rho_d < 1.6 \text{ t/m}^3$ のデータが欠乏しており、その範囲での取得が今後の課題である。

### 2.5.1.3 一軸圧縮強さ

表-2.5.3に一軸圧縮試験結果を示す。参考のため、今年度（平成7年度）実施したクニゲルV1の試験結果も記す。図-2.5.6に一軸圧縮強さ $q_u$ と乾燥密度 $\rho_d$ の関係を示す。

表-2.5.3 一軸圧縮試験結果

	乾燥密度 $\rho_d$ $t/m^3$	含水比 w %	間隙比 e	飽和度 Sro %	一軸圧縮強さ $q_u$ MPa
平成7年度 (Ca化クニゲルV1)	1.59	7.6	0.70	29.4	2.57
	1.57	7.4	0.72	27.9	4.00
平成7年度 (クニゲルV1)	1.58	5.4	0.71	20.5	1.84
	1.56	5.4	0.73	19.8	1.52
	1.65	5.7	0.64	24.2	1.07
	1.69	5.6	0.60	25.2	1.52
	1.72	5.7	0.57	27.1	2.71

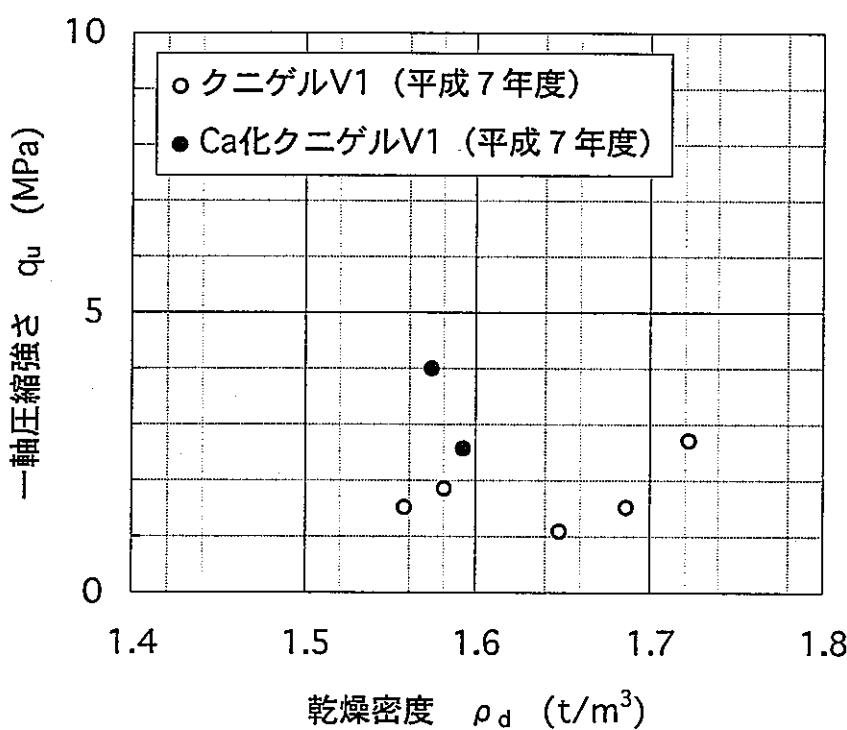


図-2.5.6 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

今回の試験結果では、Ca化クニゲルV1の一軸圧縮強さ $q_u$ は、 $\rho_d < 1.57 \sim 1.59 t/m^3$ で、2.57~4.00MPaの値となった。同じ $\rho_d$ のクニゲルV1の試験結果と比べて、ほぼ同等の値をとる。

## 2.5.2 ケイ砂とCa化クニゲルV1の混合材料

### 2.5.2.1 膨潤圧

試験は、3種類のベントナイトとケイ砂の配合率を変化させて行った。試料はともに自然含水比（Ca化クニゲルV1：6.5%，ケイ砂：0.2%）で十分に混合し、設定の乾燥密度 $1.70\text{t/m}^3$ に圧縮固化した。試料の初期飽和度 $S_{ro}$ は配合率によって異なるが、10~23.5%となり、試験後の飽和度は約100%であった。

表-2.5.4に膨潤圧試験結果を示す。なお参考のため、ケイ砂とクニゲルV1の混合材料の試験結果（平成5年度）<sup>⑨</sup>も記す。図-2.5.7に膨潤圧と経過時間の関係を、図-2.5.8に膨潤圧とベントナイト配合率の関係を示す。

表-2.5.4 膨潤圧試験結果

		硅砂配合率 S (%)	ベントナイト 配合率 B (%)	乾燥密度 $\rho_d (\text{t/m}^3)$	初期含水比 w (%)	初期飽和度 $S_{ro} (%)$	最終飽和度 Sr (%)	最大膨潤圧 Pmax (MPa)
平成7年度 (ケイ砂+ Ca化クニゲルV1)	T-3	70	30	1.70	2.2	10.0	99.1	0.04
	T-2	50	50	1.70	3.6	16.5	100.0	0.11
	T-1	30	70	1.69	5.2	23.5	100.0	0.58
	H7-9	0	100	1.80	0.0	0.0	100.0	6.70
平成5年度 シーリングⅢ (クニゲルV1)	K-6	70	30	1.70	7.0	32.1	97.7	0.11
	K-4	50	50	1.69	7.0	31.6	97.4	0.23
	K-2	30	70	1.66	7.0	30.2	99.2	0.23

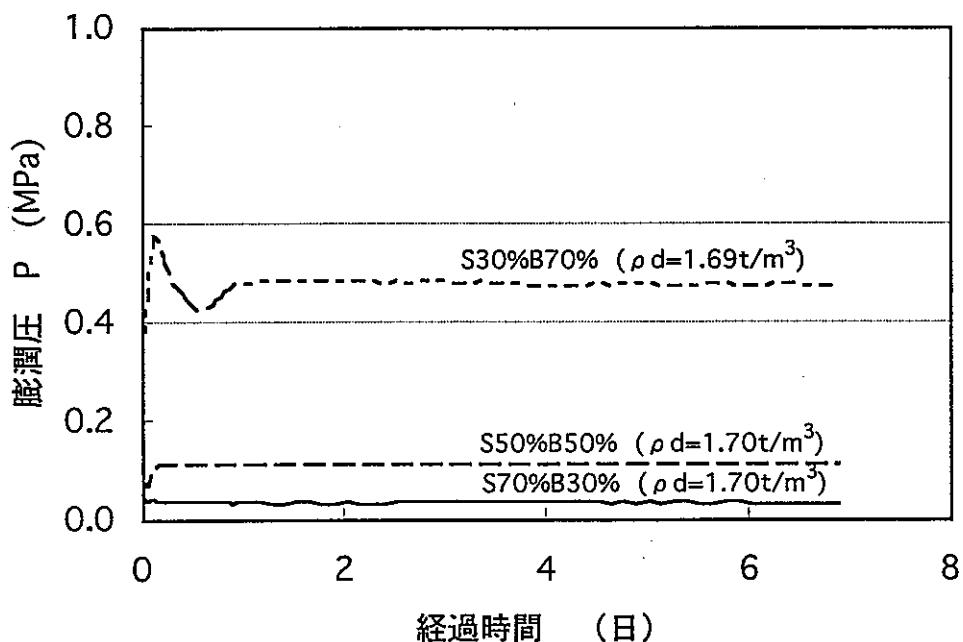


図-2.5.7 膨潤圧と経過時間の関係  
(ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料)

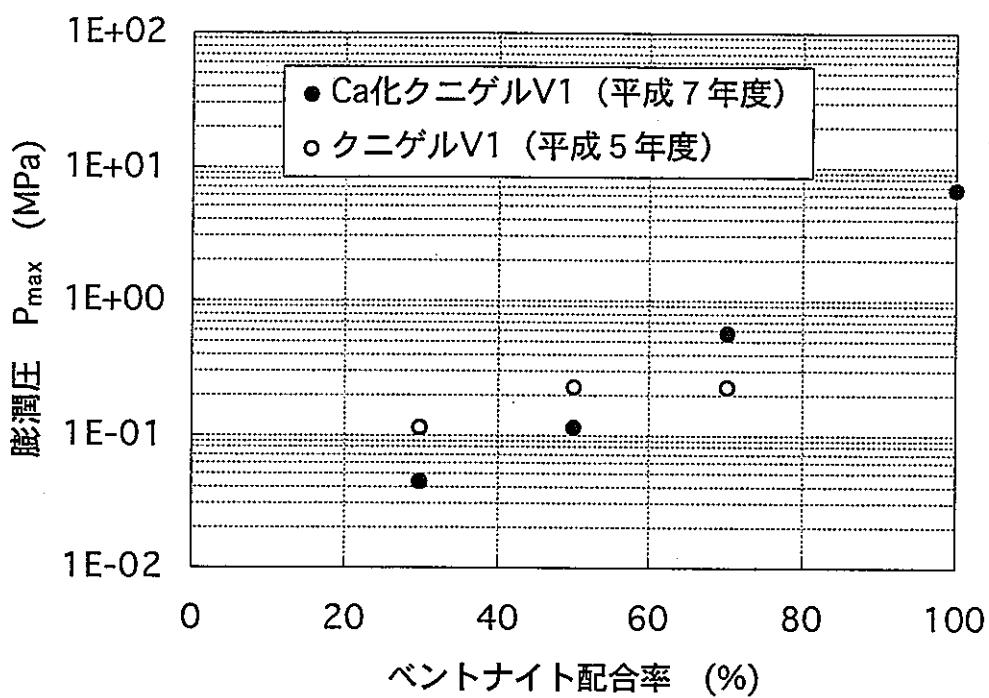


図-2.5.8 膨潤圧とベントナイト配合率の関係  
(ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料)

これらの結果から、次のようなことが分かった。

ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料の膨潤圧は、既往の結果と同様、時間の経過に伴って、二つのピーク値をとる。

乾燥密度を $1.70\text{t/m}^3$ と一定にした結果、ベントナイト配合率70%で $0.58\text{MPa}$ 、50%で $0.11\text{MPa}$ 、30%で $0.04\text{MPa}$ の値をとり、ベントナイト配合率の増加に伴って膨潤圧は大きくなる。また、既往のケイ砂とクニゲルV1の混合材料の試験結果と比較して、ほぼ同程度の値をとっている。

### 2.5.2.2 透水係数

表-2.5.5に透水試験結果を示す。透水係数は、ベントナイト配合率B=30%の場合は通水圧0.02MPa, B=50, 70%の場合は通水圧0.08MPaのときの値を示す。なお参考のため、ケイ砂とクニゲルV1の混合材料の試験結果(平成5年度)<sup>8)</sup>も記す。図-2.5.9に透水係数と経過時間の関係を、図-2.5.10に透水係数とベントナイト配合率の関係を示す。

表-2.5.5 透水試験結果

		珪砂配合率 S (%)	ベントナイト 配合率 B (%)	乾燥密度 $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	初期含水比 w (%)	初期飽和度 Sro (%)	最終飽和度 Sr (%)	透水係数 k (m/sec)
平成7年度 (ケイ砂+ Ca化クニゲルV1)	T-3	70	30	1.69	2.4	11.0	97.3	$5.20 \times 10^{-9}$
	T-2	50	50	1.79	4.0	21.3	100.0	$1.18 \times 10^{-11}$
	T-1	30	70	1.71	4.4	20.4	100.0	$2.76 \times 10^{-12}$
平成5年度 シーリングⅢ (クニゲルV1)	K-6	70	30	1.70	1.7	37.0	97.7	$4.62 \times 10^{-12}$
	K-4	50	50	1.69	2.9	37.4	97.4	$1.63 \times 10^{-12}$
	K-2	30	70	1.66	4.1	38.5	99.2	$9.26 \times 10^{-13}$

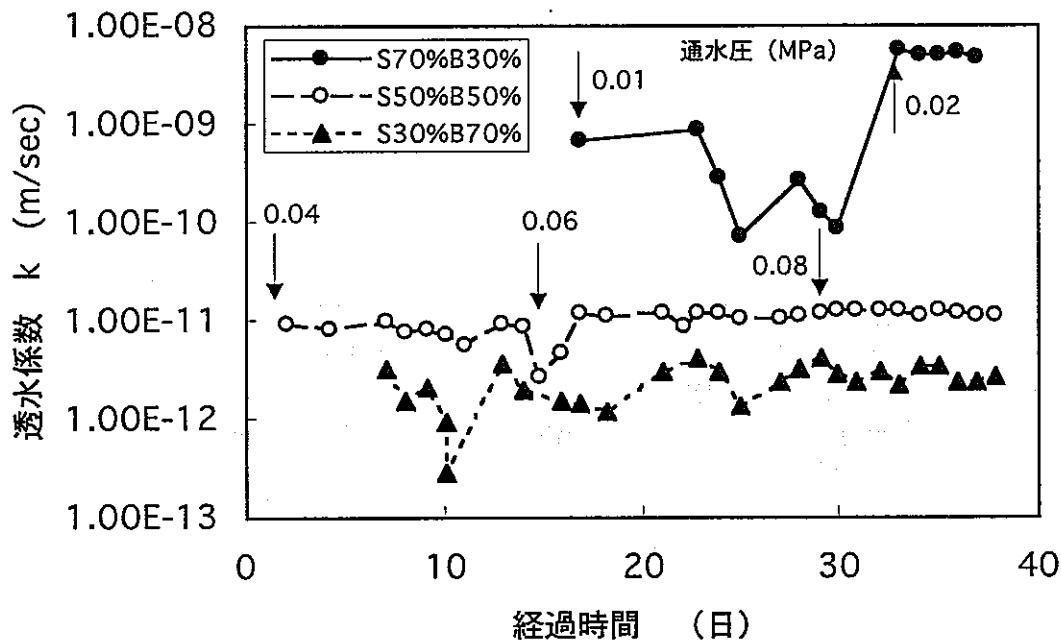


図-2.5.9 透水係数と経過日数の関係  
(ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料)

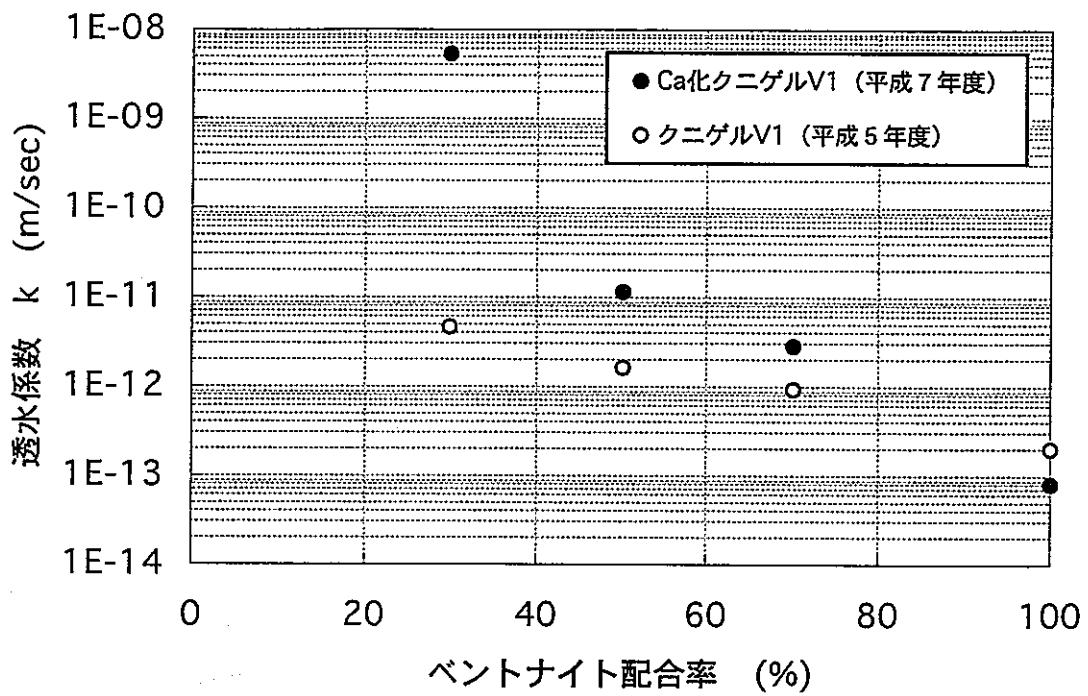


図-2.5.10 透水係数とベントナイト配合率の関係  
(ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料)

これらの結果から次のことが分かった。

ケイ砂とCa化クニゲルV1の混合材料の透水係数と経過時間の関係について、ベントナイト配合率50%, 70%の場合、透水係数はほぼ一定の値を示している。しかし、ベントナイト配合率30%の場合、透水係数はばらついており、非常に通水圧に敏感であることがわかる。透水係数とベントナイト配合率の関係について、 $\rho_d = 1.7 \text{ t/m}^3$ と一定とした場合、透水係数はベントナイト配合率30%で $5.2 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$ 、50%で $1.2 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$ の値を取っており、ベントナイト配合率の増加に伴って、透水係数は減少している。既往のクニゲルV1の結果と比較すると、今回の試験では、Ca化クニゲルV1の透水係数が、ベントナイト配合率の減少に伴って、既往のクニゲルV1より大きくなるという結果となった。

### 2.5.2.3 一軸圧縮強さ

表-2.5.6に一軸圧縮試験結果を示す。参考のため、今年度（平成7年度）実施したクニゲルV1の試験結果も記す。図-2.5.11に一軸圧縮強さと乾燥密度の関係を示す。

表-2.5.6 一軸圧縮試験結果

ケイ砂 配合率 %	ベントナイト 配合率 %	乾燥密度 $\rho_d$ g/cm	含水比 w %	間隙比 e	飽和度 Sro %	一軸圧縮強さ $q_u$ MPa	変形係数 $E_{50}$ MPa
70	30	1.68	7.1	0.61	31.3	0.31	40.2
70	30	1.68	7.3	0.61	32.2	0.34	41.2
50	50	1.65	7.1	0.64	30.2	0.42	91.2
50	50	1.66	7.1	0.63	30.5	0.43	70.6
30	70	1.62	7.4	0.67	29.9	1.41	142.2
30	70	1.60	7.6	0.68	30.0	1.06	139.3
70	30	1.73	6.7	0.56	32.2	0.14	45.1
70	30	1.67	7.1	0.62	31.3	0.16	24.5
50	50	1.68	6.9	0.61	30.4	0.43	45.1
50	50	1.65	6.8	0.64	28.7	0.20	69.6
30	70	1.63	6.9	0.66	28.3	0.79	87.3
30	70	1.63	6.9	0.66	28.2	0.68	85.3

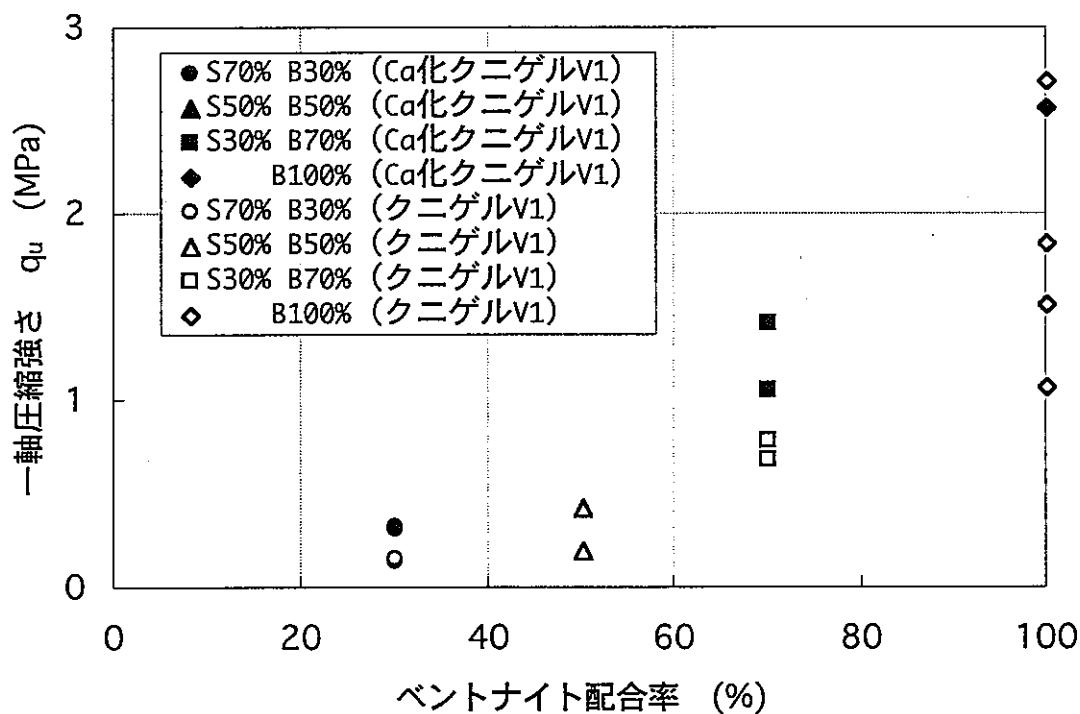


図-2.5.11 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

これらの図から、次のようなことがわかった。

ケイ砂とCa化クニゲルV1の混合材料の一軸圧縮強さ $q_u$ は、乾燥密度を1.60～1.68t/m<sup>3</sup>の範囲とした場合、ベントナイト配合率30%で0.3MPa、50%で0.4MPa、70%で1.2MPa、100%で3.3MPaとなっており、ベントナイトの配合率の増加に伴って、 $q_u$ は大きくなっている。また、既往のケイ砂とクニゲルV1の混合材料の結果と比較して、ほぼ同等の一軸圧縮強さをとる。

## 2.6 まとめと今後の課題

### 2.6.1. Ca化ペントナイト

#### 2.6.1.1 膨潤圧

Ca化ペントナイトの膨潤圧は、今回および昨年度の試験条件（乾燥密度 $1.7\sim1.8t/m^3$ 、自然含水比）の範囲では、Na型ペントナイトを用いた場合と同程度の値をとる。

#### 2.6.1.2 透水係数

Ca化ペントナイトの透水係数は、今回および昨年度の試験条件（乾燥密度 $1.7\sim1.8t/m^3$ 、自然含水比）の範囲では、Na型ペントナイトを用いた場合と同程度の値をとる。しかし、乾燥密度の小さい場合のデータが不足しており、今後取得する必要がある。

#### 2.6.1.3 一軸圧縮強さ

Ca化ペントナイトの一軸圧縮強さは、同じ乾燥密度で比較するとNa型ペントナイトを用いた場合とほぼ同等の値をとる。

#### 2.6.1.4 今後の課題

膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強度は、Ca化ペントナイト、Na型ペントナイトの両方について、乾燥密度の小さい場合のデータが不足しており、今後取得する必要がある。

## 2.6.2 ケイ砂とCa化ペントナイトの混合材料

#### 2.6.2.1 膨潤圧

ケイ砂とCa化ペントナイトの混合材料の膨潤圧は、今回の試験条件乾燥密度 $1.7t/m^3$ 、自然含水比では、ペントナイトの配合率の増加に伴って膨潤圧は大きくなる。膨潤圧はペントナイト配合率によらず、Na型ペントナイトを用いた場合と同程度の値をとる。

#### 2.6.2.2 透水係数

ケイ砂とCa化ペントナイトの混合材料の透水係数は、ペントナイト配合率の減少に伴って大きくなる。ケイ砂とCa化ペントナイトの混合材料の透水係数は、ペントナイト配合率の減少に伴って、Na型より大きくなる傾向が見られている。

#### 2.6.2.3 一軸圧縮強さ

ケイ砂とCa化ペントナイトの混合材料の一軸圧縮強さは、同じ乾燥密度で比較すると、ペントナイト配合率の増加に伴って大きくなる。また、一軸圧縮強さはペントナイト配合率によらず、Na型ペントナイトを用いた場合と同程度の値をとる。

#### 2.6.2.4 今後の課題

ケイ砂とCa化ペントナイトの膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強さについて、ペントナイト配合率および乾燥密度を変化させた場合のデータが欠乏しており、今後取得する必要がある。

ケイ砂とCa化ペントナイトの混合材料の透水係数は、ペントナイト配合率の減少に伴って、Na型ペントナイトより大きくなる傾向が見られており、その真実について確認する必要がある。

## 第2章 参考文献

- 1) 小峰秀雄・緒方信英：膨潤性土質材料の物理的性質と締固め特性，電力中央研究所報告，U90024, 1990.8.
- 2) 鹿島建設株式会社：T R U廃棄物処分システムにおける人工バリアの長期力学的挙動の研究，動力炉・核燃料開発事業団 研究内容報告書，1995.
- 3) 鹿島建設株式会社：地層処分におけるシーリング研究（Ⅱ），動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書，1993.
- 4) 吉田宏・西謙治：固化ベントナイトの止水技術への応用に関する研究，鹿島技術研究所年報第38号，1990.10.
- 5) 小峰秀雄・緒方信英・西好一：高レベル放射性廃棄物地層処分のために緩衝材の力学特性（その1）—締固めたベントナイトの吸水膨潤メカニズムの実験的検討—，電力中央研究所報告，U92039, 1992.12.
- 6) Pusch,R.,:Swelling pressure of highly compacted bentonite,SKBF/KBS Techni-cal report 80-13,1980.
- 7) Pusch,R.,:Models of water and gas flow through smectite clay,SKBF/KBS Tech-nical report 87-10,1987.
- 8) 鹿島建設株式会社：地層処分におけるシーリング研究（Ⅲ），動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書，1994.

### 第3章 コストの試算

第1章で構築した処分場コンセプトについてのコストの算定を行う。

#### 3.1 コスト試算の基本的な考え方

本検討におけるコスト試算の考え方について以下に示す。

##### 3.1.1 対象施設

本検討でコスト試算の対象となりうる施設・設備の一覧を表-3.1.1に示す。

表-3.1.1 対象施設一覧

地質環境調査研究施設	
施 設 ／ 設 備 名	地上受入施設 搬出検査施設 換気施設 排水施設 供給施設 管理施設
	アクセス坑道 主要坑道 連絡坑道 処分空洞 地下付帯施設
工事用設備	
	道路施設 港湾施設 土捨て場
サイト周辺施設	

##### 3.1.2 コスト試算範囲

コスト試算は表-3.1.1の内、地上施設の建設、地下施設の建設・閉鎖、工事用施設の建設、操業を対象とする。ただし、用地取得費用や地質環境調査研究施設、サイト周辺施設及びモニタリングの費用は含まない。

###### 3.1.2.1 地上施設

地上受入施設、搬出検査施設及び管理施設については、概略の施設規模を設定しコスト試算を行う。

換気施設、供給施設及び排水施設については、地下施設の建設費用に含め試算する。

###### 3.1.2.2 地下施設

第1章で設定した施設概念に基づき積算する。

### 3.1.2.3 工事用設備

工事用設備は地下施設の建設費用に含め試算する。

### 3.1.2.4 操業関連

操業に含まれる費用は、

- a) 廃棄体（キャニスター、ドラム缶）をコンクリート製コンテナに格納する費用
- b) 作製したコンテナを地上より地下の定置位置まで通常の方法で搬送する費用である。放射性廃棄物としての特別必要な費用は含まれていない。

### 3.1.3 地上施設の建設費用

地上受入施設及び搬出検査施設は、

建屋容積：250,000m<sup>3</sup>（地上2階、地下1階）

建設単価：300,000円/m<sup>3</sup>

を想定する。

また管理建屋は

床面積：3,000m<sup>3</sup>（地上2階）

建設単価：1,000,000円/m<sup>3</sup>

を想定する。

### 3.1.4 地下施設の建設費用

#### 3.1.4.1 積算ベース

本検討でのコスト算定に当たっての積算のベースを以下に示す。

- ・施工計画、工程計画及びコスト算定は平成7年度版「建設省土木工事積算基準」<sup>1)</sup>をベースに計画した。
- ・使用材料単価は、建設物価1996年2月版<sup>2)</sup>を参考とした。
- ・職種別単価は、平成7年度三省協定単価とした。

#### 3.1.4.2 コスト算定での仮定

以下にコスト算定上の仮定条件を示す。

- ・工程計画は20万本を20年間で処分することを基本とし、アクセス・主要坑道・処分空洞の掘削は1ヶ月の実作業日数を平均23日とした。1日2方作業とし、1方の実作業時間を8時間とした。その他の作業については、1ヶ月23日・1日1方作業とし、1方の実作業時間を8時間とする。
- ・処分場は沿岸の平地を想定し計画する。
- ・掘削による湧水は、前出の図-1.1.5を参考にして  
　　結晶質岩系岩盤：600l/min/km  
　　堆積岩系岩盤：400l/min/km  
　　として想定し、排水設備・濁水処理を計画する。
- ・掘削残土（ズリ）はアクセス坑口より1km離れた地点まで運搬し、押し土・整形の処分とする。

- ・処分場のアクセス方式は立坑によるものとする。
- ・地質構造の変化、高地熱（一般的に深度30m 每に1°C上昇）、閉鎖工施工時の空洞湧水のベントナイトに与える影響、PSアンカーアー工、ボーリンググラウト等の、地下深部に建設する際に予想される不確定要素の出費を直接工事費の、建設・操業時は100%を、閉鎖時は3%を考慮する。
- ・構造物の高品質を確保するため、技術管理費として直接工事費の30%を計上する。
- ・経費の率計上は、積算基準に基づいた。ただし、現場管理費に関しては、大深度でのトンネル・空洞の建設という観点から、通常の1.5倍の値を用いることとする。

したがって経費の率計上は、

共通仮設費（率分）	6.44%
現場管理費	26.84% (17.89% × 1.5)
一般管理費	9.39%

とする。

## 3.2 コスト試算

### 3.2.1 検討ケース

表-3.2.1に検討ケース一覧表を示す。岩盤特性と埋設深度及び空洞規模との関連で、成立する処分形式は限定される。想定した処分形式（坑道方式、岩洞方式、サイロ方式）についてすべて比較することができるのは、結晶質岩系岩盤A（深度300m、700m）及び結晶質岩系岩盤B（深度300m）である。

### 3.2.2 検討結果

#### 3.2.2.1 地上施設

地上施設については岩盤種類、処分形式によらず全て同一であると考えた。

・地上受入施設及び搬出検査施設	750億円
・管理施設	30億円
合計	780億円

#### 3.2.2.2 地下施設

表-3.2.2に地下施設の建設・閉鎖、及び操業に関するコスト試算結果を示す。また図-3.2.1～3.2.4に岩種・深度別のコスト試算結果を示す。ただし、岩種ごとに掘削単価を設定していないため、岩種によるコスト差は表れていない。

例えば、表-3.2.2によれば、結晶質岩系岩盤A（深度300m）では、建設、操業、閉鎖の総費用は

大断面岩洞方式	2,589億円（ケース1）
小断面岩洞方式	2,787億円（ケース4）
坑道方式	4,497億円（ケース8）
サイロ方式	3,466億円（ケース13）

となっている。大断面岩洞方式、小断面岩洞方式、サイロ方式、坑道方式の順に経済的である。また、閉鎖費用が全体費用の中で相当分を占めている。このような傾向はその他の岩種でも同様であると言える。

表-3.2.1 検討ケース一覧表

深度(m)		300				700			
処分形式		大断面 岩洞方式	小断面 岩洞方式	坑道方式	サロ方式	大断面 岩洞方式	小断面 岩洞方式	坑道方式	サロ方式
結晶質岩 系岩盤	A	1	4	8	13	3	7	11	16
	B	2	5	9	14	×	×	12	×
堆積岩 系岩盤	A	×	6	10	15	×	×	×	×
	B	×	×	×	×	×	×	×	×
	C	×	×	×	×	×	×	×	×

表中の数値はケース番号を示す。

表-3.2.2 コスト試算結果一覧表（億円）

ケース	地上施設	地下施設の操業	操業	地下施設の閉鎖	小計	合 計
1	780	935	638	1,016	2,589	3,369
2	780	935	638	1,016	2,589	3,369
3	780	1,148	649	1,187	2,984	3,764
4	780	1,003	642	1,142	2,787	3,567
5	780	1,003	642	1,142	2,787	3,567
6	780	1,003	642	1,142	2,787	3,567
7	780	1,315	655	1,315	3,285	4,065
8	780	1,522	649	2,325	4,497	5,277
9	780	1,522	649	2,325	4,497	5,277
10	780	1,522	649	2,325	4,497	5,277
11	780	1,735	660	2,496	4,891	5,671
12	780	1,735	660	2,496	4,891	5,671
13	780	1,276	629	1,561	3,466	4,246
14	780	1,276	629	1,561	3,466	4,246
15	780	1,276	629	1,561	3,466	4,246
16	780	1,491	641	1,761	3,893	4,673

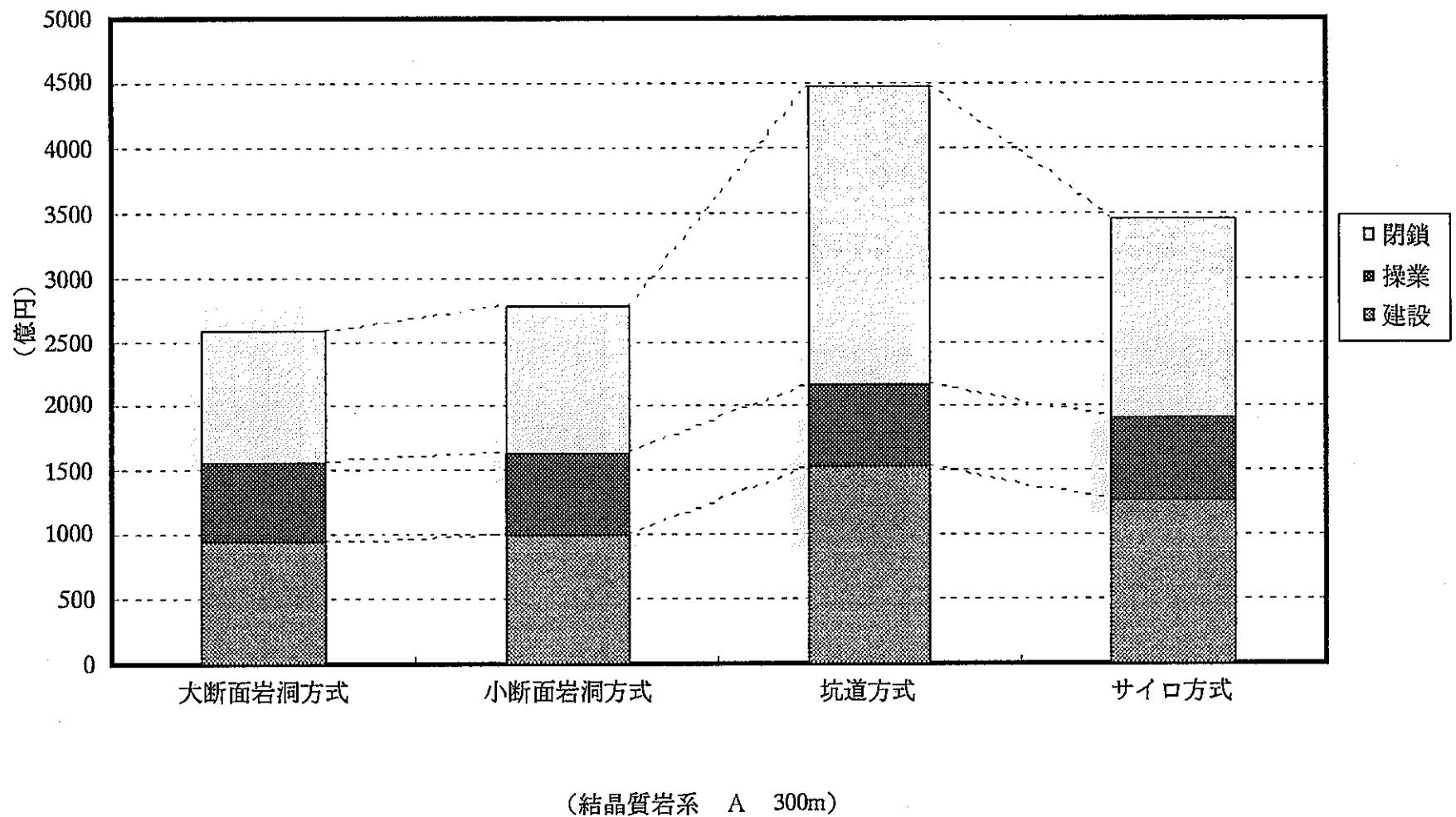


図-3.2.1 地下施設の建設・閉鎖及び操業に関するコスト試算結果（結晶質岩系岩盤A、300m）

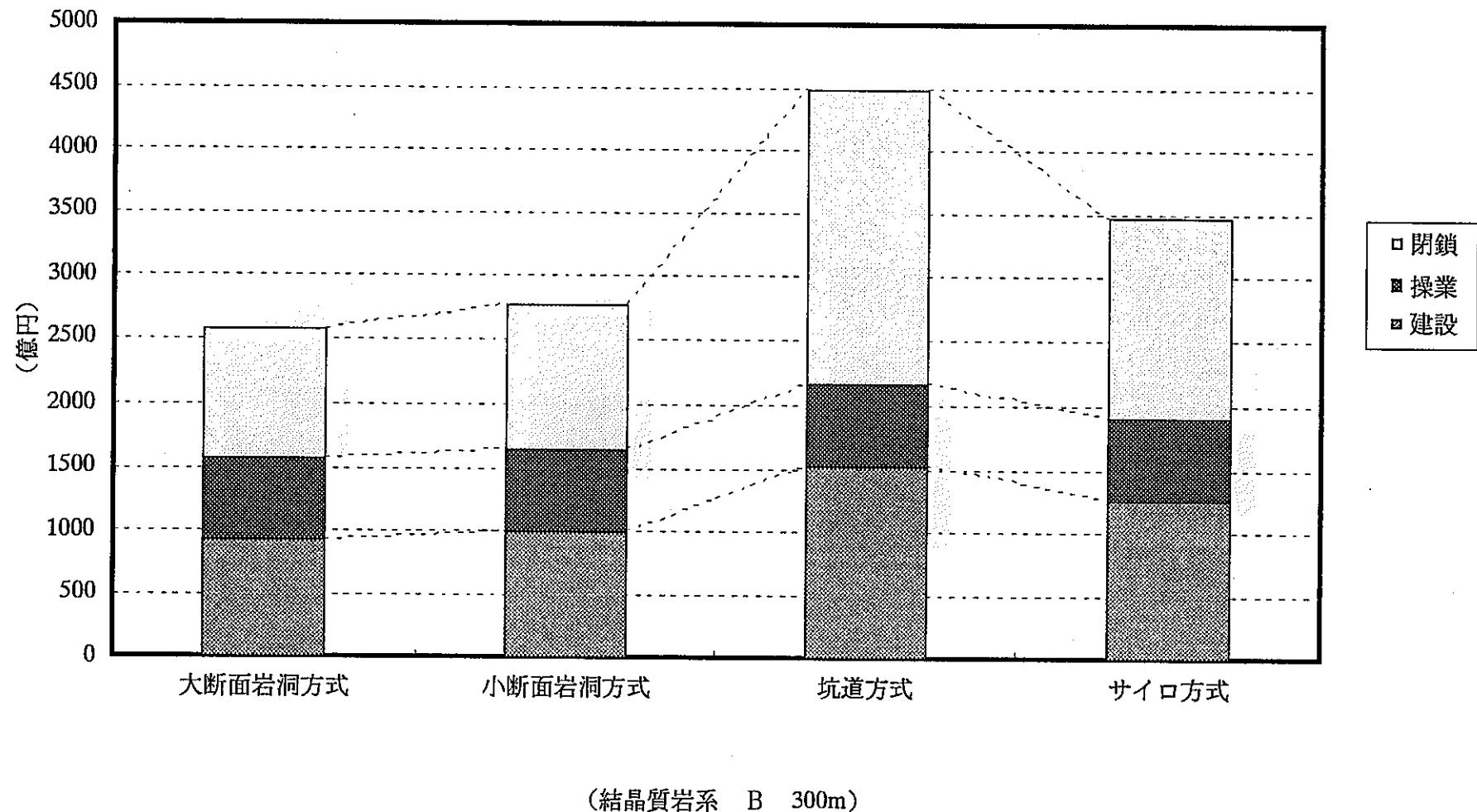


図-3.2.2 地下施設の建設・閉鎖及び操業に関するコスト試算結果（結晶質岩系岩盤B、300m）

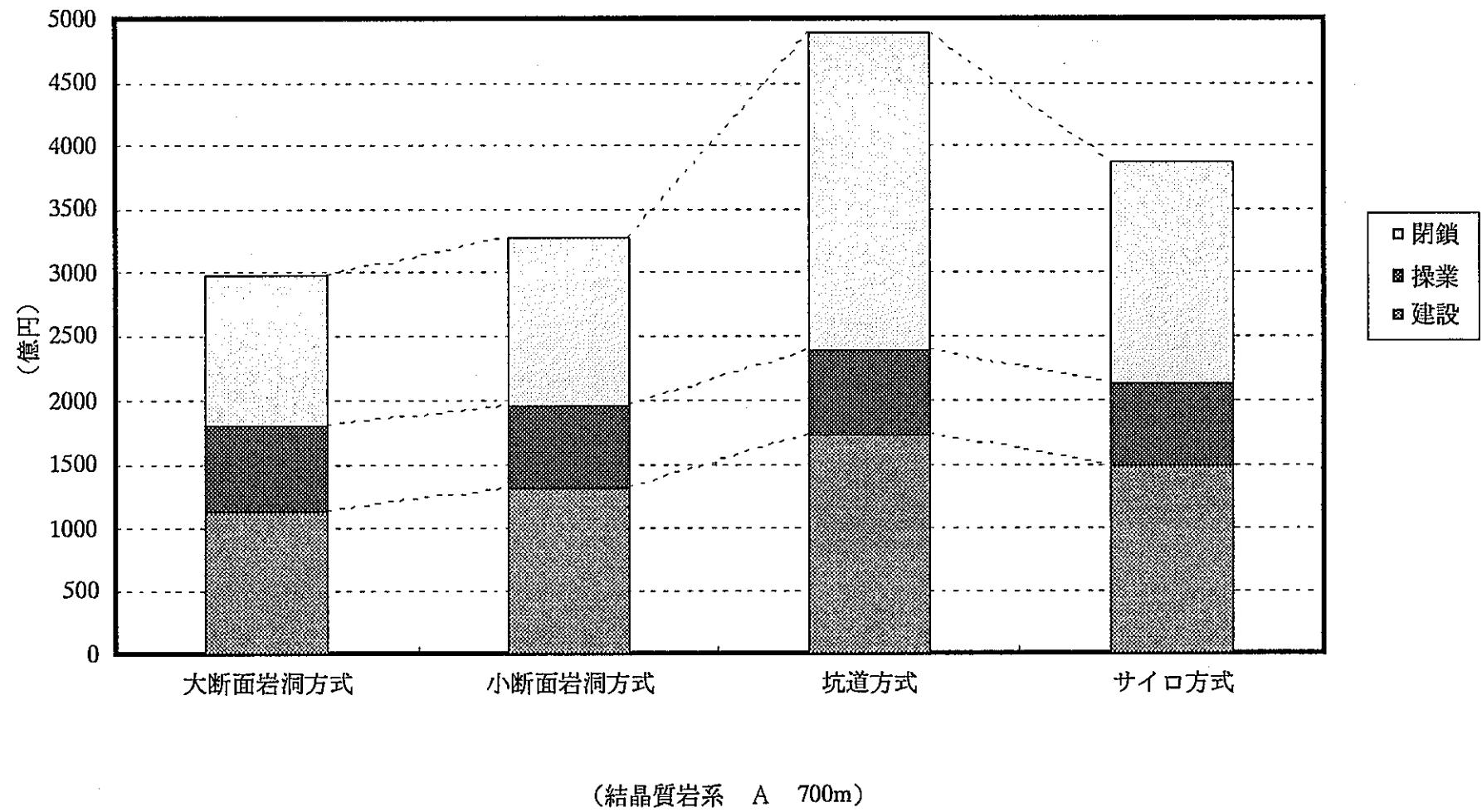


図-3.2.3 地下施設の建設・閉鎖及び操業に関するコスト試算結果（結晶質岩系岩盤A、700m）

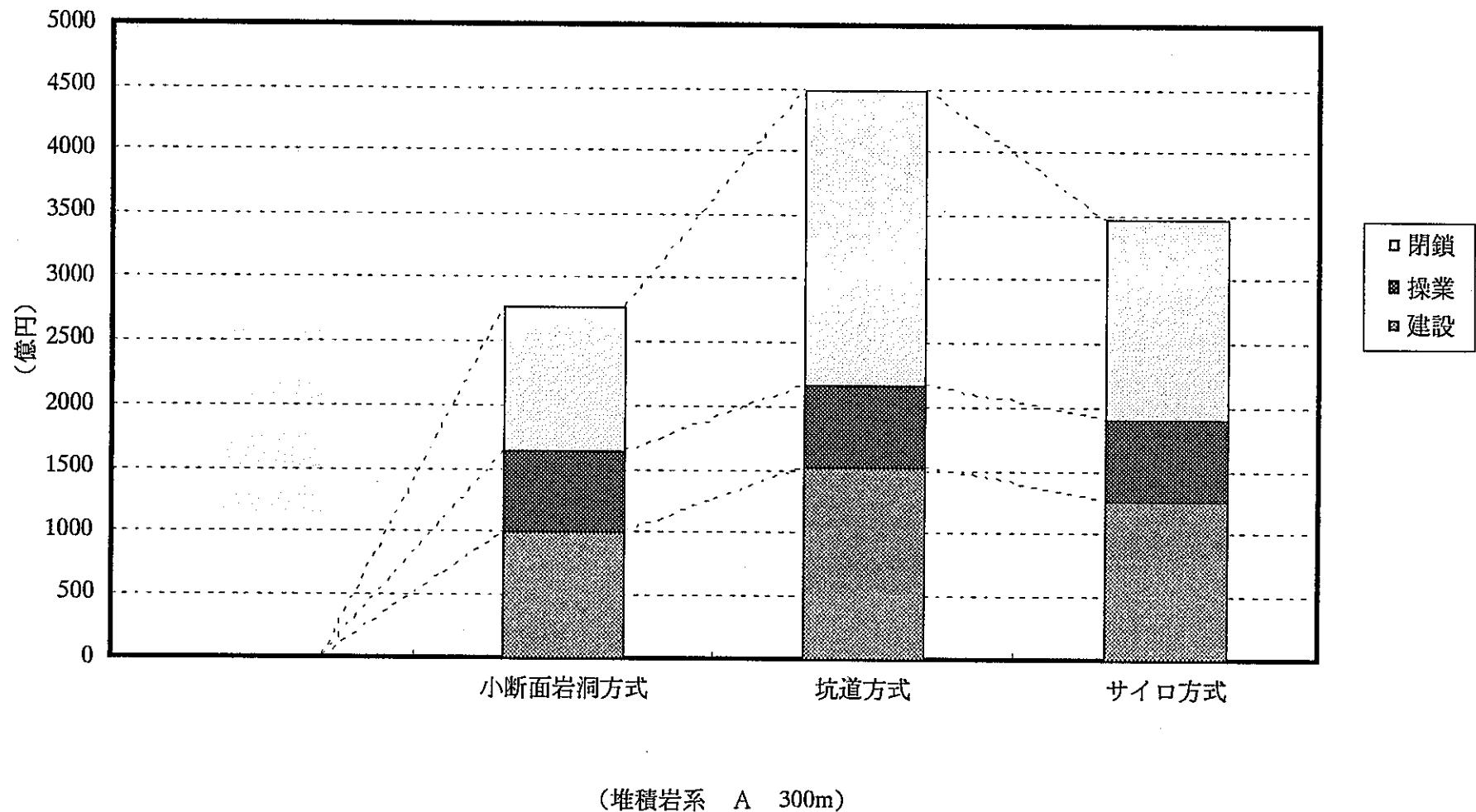


図-3.2.4 地下施設の建設・閉鎖及び操業に関するコスト試算結果（堆積岩系岩盤A、300m）

### 3.2.3 コスト試算の結果

本節では前節での試算結果を基に、建設段階と閉鎖段階について試算内容の分析を試みる。対象とするケースは全ての処分形式が成立する結晶質岩系岩盤A種（深度300m）とする。

#### 3.2.3.1 建設段階

図-3.2.5は建設段階の工事費内訳を各方式ごとに示したものである。この図で「アクセス坑道」には、地表と地下施設を接続する立坑や換気用の坑道、さらには主要坑道を含んでいる。また「処分空洞」には、処分空洞と連絡坑道が含まれる。

各方式とも直接工事費として掘削費用が多いが、コンクリート構造物の建設費用がかなりの割合を占めている。本研究におけるコンクリート構造物の目的あるいは位置付けは、操業時定置作業の効率化と信頼性向上であり、処分施設全体の信頼性の寄与面から考えるとその役割は低いと言える。したがって、コンクリート構造物の機能を代替する構造物や方法の検討は、処分施設概念をより合理的にする上で必要であると考えられる。

廃棄物処分に必要な処分空洞容積は図-1.1.88より以下に示す通りである。

大断面岩洞方式	49万 m <sup>3</sup>
小断面岩洞方式	50万 m <sup>3</sup>
坑道方式	125万 m <sup>3</sup>
サイロ方式	45万 m <sup>3</sup>

処分空洞の容積のみに着目すれば、サイロ方式が一番効率的であると言える。しかし、図-3.2.5によれば全体の掘削費用が一番安価なのは大断面岩洞方式である。これは、サイロ方式では処分空洞を掘削するために補助的な坑道を、サイロ部分の上下に1本ずつ2本構築する必要があり、その坑道部分の容積を加えると掘削費が岩洞方式に比して多くなることに起因する。

## 建設

- 注1) []内数値は、大断面岩洞方式工事費を1とした場合の比率を示す。  
 注2) グラフ内の()内数値はその方式の全工事費に対する比率を示す。  
 注3) グラフ外の()内数値は各工事の大断面岩洞方式を1とした場合の比率を示す。

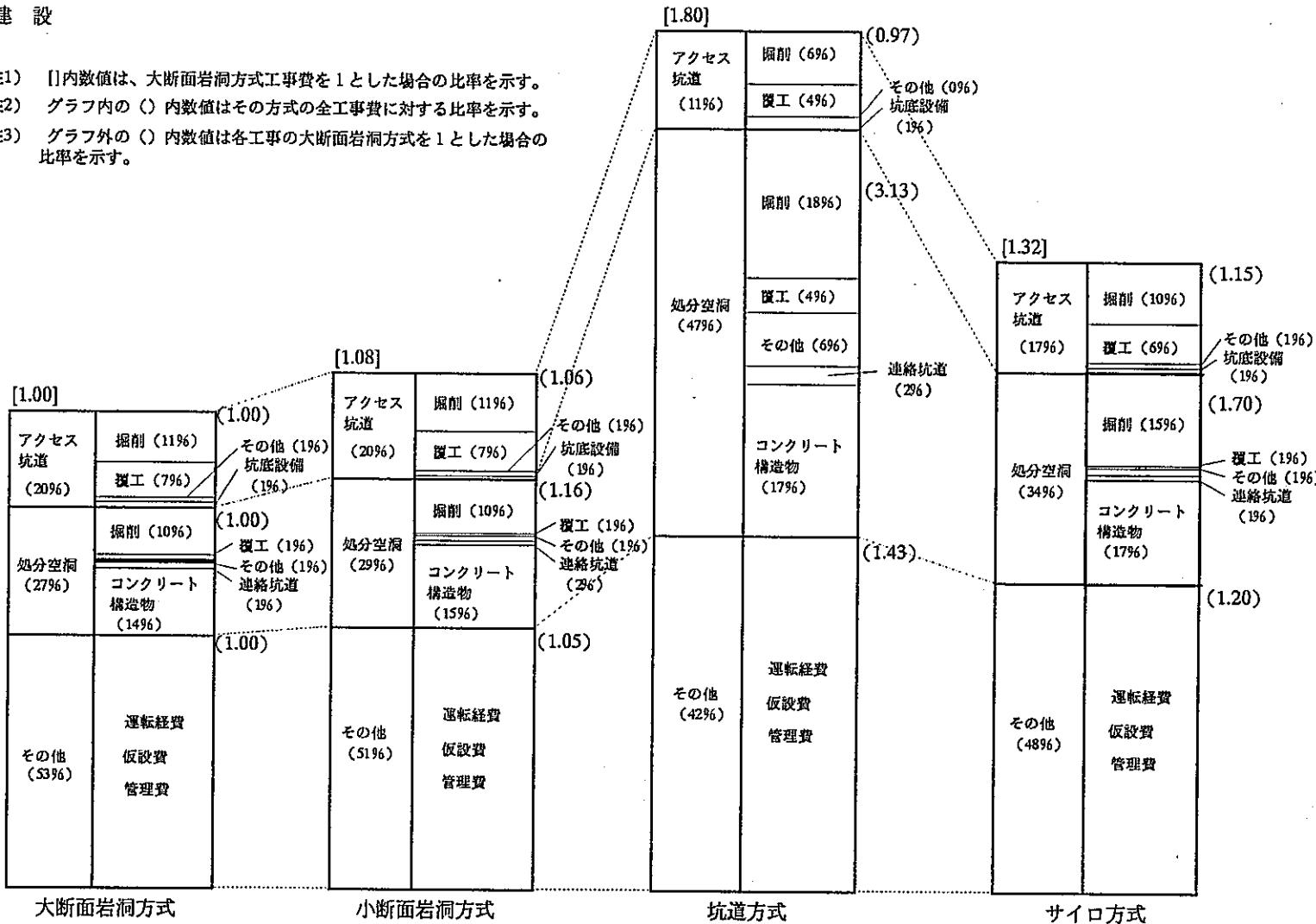


図-3.2.5 工事費内訳比較 建設の場合 (A 300m)

### 3.2.3.2 閉鎖段階

図-3.2.6 は、閉鎖段階の工事費内訳を各方式ごとに示したものである。

工事費のうち、材料費が25%～35%を占めている。（注；仮設費や管理費は直接工事費（材料費+施工費）の割掛けで算定するので、全工事費のうち材料費に関連する費用の割合はさらに多い）これは、主として人工バリア材等として使用するベントナイトが高価であることに起因する。

例証として、図-3.2.7にベントナイトの混合比率をパラメータとした場合のベントナイト混合土の単価について示す。横軸は混合比率（重量比）、縦軸はベントナイト混合土単価である。例えば、ベントナイトを100%使用する場合に比して30%にすれば、単価は約3分の1となることが判る。したがって、人工バリア材や埋戻し材の仕様は処分施設の経済性に大きな影響を与えると言え、安全評価の観点も含め慎重に決定する必要がある。

## 閉鎖

- 注1) []内数値は、大断面岩洞方式工事費を1とした場合の比率を示す。  
 注2) グラフ内の () 内数値はその方式の全工事費に対する比率を示す。  
 注3) グラフ外の () 内数値は各工事の大断面岩洞方式を1とした場合の比率を示す。

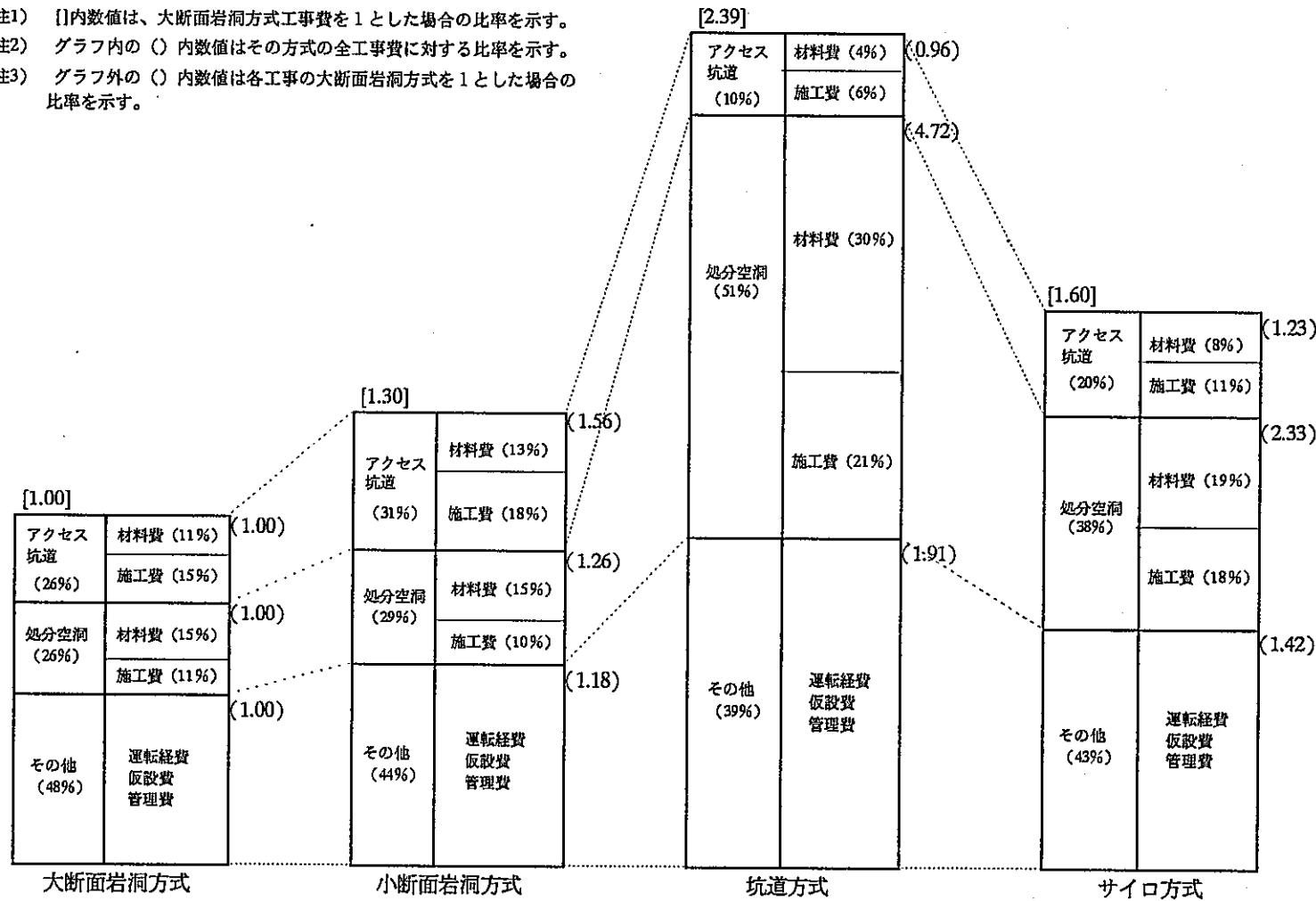


図-3.2.6 工事費内訳比較 閉鎖の場合 (A 300m)

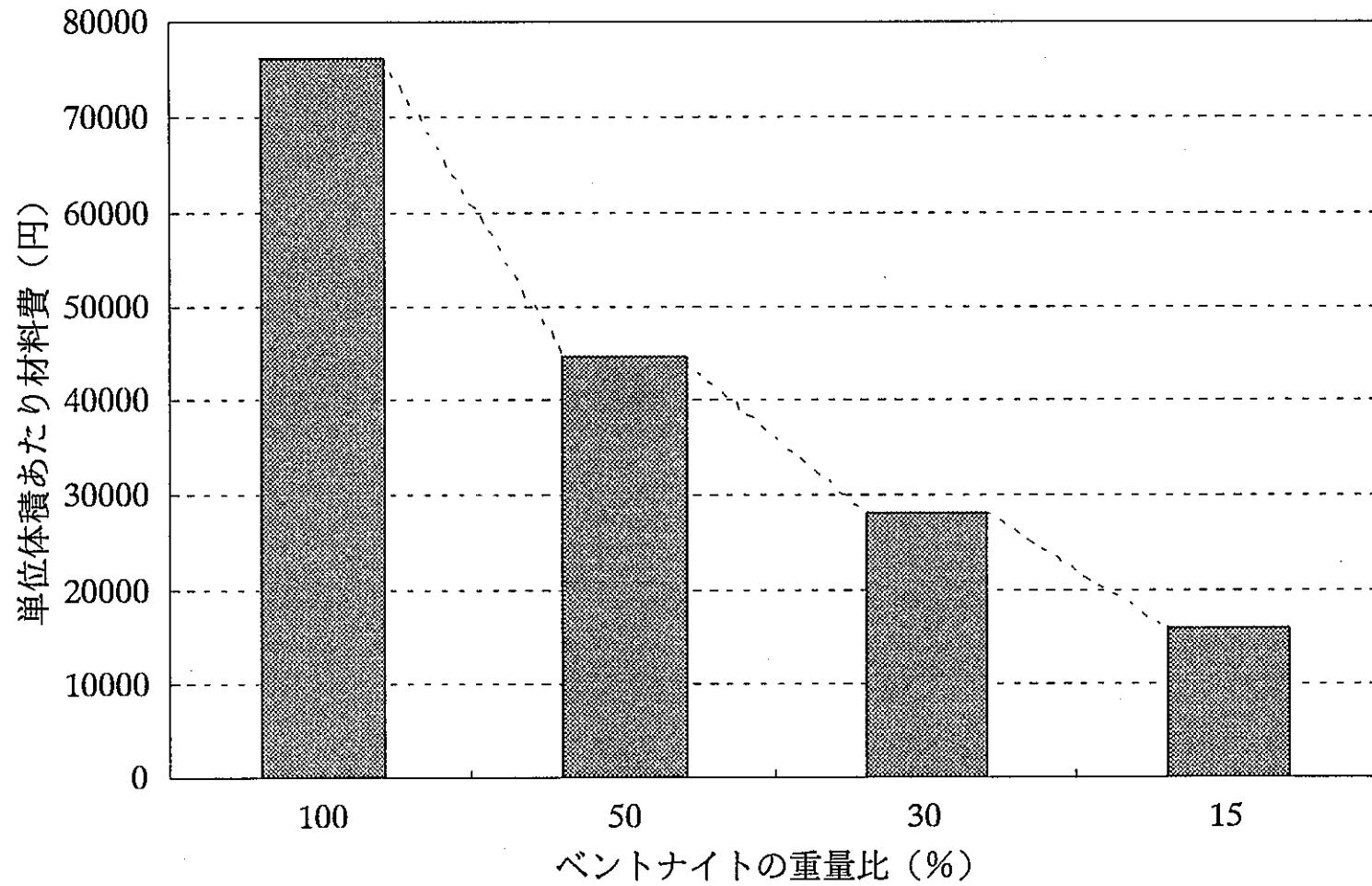


図-3.2.7 ベントナイト混合比率の違いによる単価の相違

### 第3章 参考文献

- 1) 建設省土木工事積算基準, 平成7年度版
- 2) 建設物価 1996年 2月版

## 第4章 今後の課題

今後検討すべき課題について以下に示す。

### (1) セメント系材料の長期劣化に伴う体積変化

閉鎖完了以降の地下水の再冠水によりセメント系材料と地下水が接触する。これに起因してセメント系材料の体積変化という現象が生じる。この現象については、化学的な観点において水酸化カルシウムの溶出やエトリンガイト生成による膨張といった知見が得られている。しかしながら、実規模構造物における溶出量や膨張量には言及していない。

本年度の検討においては、水酸化カルシウムの溶出量及び微細な独立気泡等により構成される内部空隙量に起因する体積変化量を仮定し、変形量の概略検討を行った。

今後は、セメント水和物成分の溶出量（水酸化カルシウム）や膨張量（エトリンガイト）の定量的な把握を行い、処分場コンセプトに反映できるセメント系材料の体積変化量を推定することが必要である。

### (2) アスファルト固化体の長期的な体積変化

アスファルト固化体についても内部に閉じこめられた水溶性硝酸塩が溶出し、体積変化を生じることが知られている。

本年度の検討においては、硝酸塩の流出量を30%と仮定し、それに伴う体積変化、さらには変形量の概略検討を実施した。

今後は、セメント系材料と同様に定量的な溶出量を把握し、アスファルト固化体の体積変化量を推定することが必要である。

### (3) 有害空隙量の把握

廃棄体内部に存在するの有害空隙量の内、現時点において確認されているのは、ハル・エンドピース廃棄体の30%のみである。その他の廃棄体については確認されていないのが現状である。

(1)、(2)はもとより体積変化といった問題を取り込んだ処分場コンセプトを構築するためには、ハル・エンドピース廃棄体以外に有害な空隙を有する廃棄体の有無及び空隙量の把握が必要である。

### (4) ベントナイトとコンクリートの長期相互挙動

本年度の検討では、コンクリートは長期的には破壊し、人工バリアの機能はベントナイトで保持するという仮定の下で検討を行っている。そこでコンクリートの破壊が進み砂状になった場合での、ベントナイトと砂状コンクリートの相互変形挙動を実験的に評価し、ベントナイトの人工バリアとしての長期的な機能維持への影響を確認することが必要と考えられる。

#### (5) ガス透気

廃棄体と地下水が接触すると、金属が腐食しガスが発生する。ガス発生に伴う処分場への影響、特に人工バリア材への影響を検討する必要がある。

#### (6) 岩盤の長期安定性

岩盤の掘削に伴う長期的な挙動に岩盤クリープが挙げられる。その岩盤クリープを評価するためのモデルの調査及び合理的と考えられるモデルを用いての解析的検討が必要である。

#### (7) 支保工効果を取り入れた空洞安定解析の実施

本年度の検討では、掘削可能な空洞径の設定を円形断面を対象とした弾塑性理論解析を用いて実施した。今後は、断面形状を考慮でき、かつ支保工の効果も取り入れることでできる有限要素法解析を実施し、空洞安定性を確認する必要がある。

#### (8) ベントナイトの力学的特性値の取得

ベントナイトの挙動、特に膨潤・圧密特性を解析的に評価するためには、より一層のパラメータ取得が必要不可欠である。

また、底部ベントナイトとして支持力的に、さらには埋戻土として経済的にも有望な礫混じりベントナイト混合土の適用可能性の検討及びパラメータ取得が必要である。

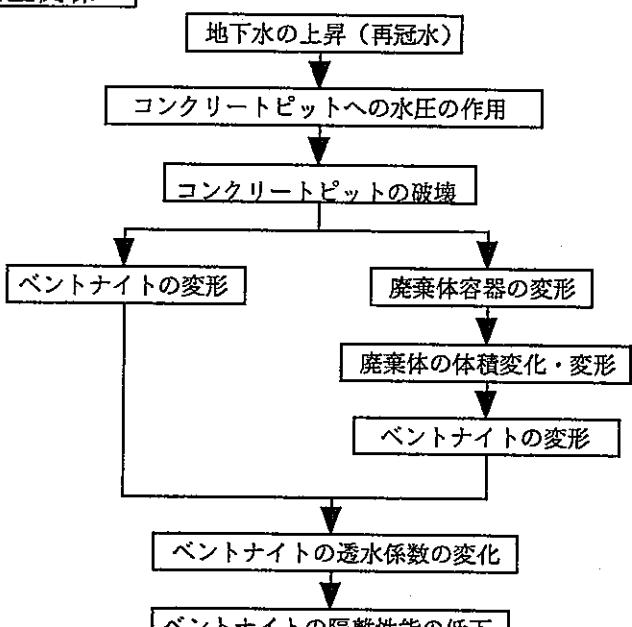
添付資料 シナリオ検討における事象の相関とその説明

第一次事象	岩盤応力の変化
第二次事象との相互関係	
<pre> graph TD     A[岩盤応力の変化] --&gt; B[支保工（吹付コンクリート）の設置]     A --&gt; C[岩盤緩み領域の発生]     B --&gt; D[化学環境の変化]     C --&gt; E[岩盤の透水係数の変化]   </pre>	
<b>説明</b>	
<p>岩盤を掘削する場合、掘削に伴って岩盤の緩み領域が発生するが、その要因は以下のように説明されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 応力解放に伴う岩盤の緩み</li> <li>② 掘削工事に伴う岩盤の損傷</li> <li>③ 掘削後の支保工設置の時期</li> </ul> <p>①については、地山の保有している応力は非常に大きいため避けられない。    ②については、損傷の少ない掘削方法（制御発破など）を選定することで緩みを少なくすることができる。    ③については、掘削後の時間の経過と共に緩みが拡大するため、いかに早く支保工を設置するかで緩みの発生量を少なくできる。</p>	
<b>課題</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・安全評価の観点からの岩盤緩みの評価。</li> <li>・現状での掘削技術では支保工なしでは掘削できないため、コンクリートを使用せざるを得ない。このため、セメント系材料のベントナイトへの影響が懸念される。</li> </ul>	
<b>対応</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・安全評価の観点から岩盤の緩みをカバーできるシーリングコンセプトとすることが重要である。（この内容については別研究で検討中のため本研究では記述しない。）</li> <li>・セメント系材料の各種ベントナイト（Na型ベントナイト、Ca化ベントナイト）への影響を評価し、性能を確保できる人工バリアコンセプトの確立が必要。（現在、Ca化ベントナイトの物性試験を実施中。）</li> </ul>	

第一次事象	地下水の低下
第二次事象との相互関係	
<pre> graph TD     A[地下水の低下] --&gt; B[岩盤と空気の接触（不飽和領域の発生）]     B --&gt; C[岩盤の風化・スレーキング]     B --&gt; D[地下水組織の変化]     B --&gt; E[地下水の化学的变化]     B --&gt; F[地中温度の変化]     C --&gt; G[空洞の安定性評価]     </pre>	
<p><b>説明</b></p> <p>岩盤の掘削に伴い、地下水は低下する。このため岩盤と地下水が空気に接触する。地下水については空気（酸素）に触れることにより化学的変化を生じる可能性があり、岩盤については風化、スレーキングによって強度低下の可能性がある。</p>	
<p><b>課題</b></p> <p>処分場コンセプトの観点からは特になし</p>	
<p><b>対応</b></p> <p>岩盤が風化・スレーキング等による強度低下の懸念がある場合、掘削後の早い時期に吹き付コンクリート等の処置をする必要があり、施工計画に反映しておく。</p>	

第一次事象	廃棄体重量の作用
第二次事象との相互関係	
<pre> graph TD     A["廃棄体重量の作用"] --&gt; B["底部ベントナイトの変形"]     B --&gt; C["コンクリートピットの沈下・傾斜"]     C --&gt; D["人工バリアの欠損（ベントナイト厚さの不足）"]   </pre>	
<p><b>説明</b></p> <p>廃棄体を定置して行くに従ってコンクリートピットと底部ベントナイトに荷重が作用する。荷重が作用したベントナイトは変形し、その変形の大小によってはコンクリートピットの沈下・傾斜を引き起こす。またこのことは、底部ベントナイトが所定厚さよりも薄くなることであり、止水性、核種吸着性などの要求性能の低下となる。</p>	
<p><b>課題</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・底部ベントナイトに所定の支持力を持たせる。</li> <li>・長期的に有害な変形を生じさせない。</li> </ul>	
<p><b>対応</b></p> <p>以下の検討の実施。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① ベントナイトが所定の支持力を有する工夫を施す。例えばレキを混入することにより支持力が大幅に増加する。</li> <li>② 長期的なベントナイトの変形挙動を把握し、有害な沈下が生じないようなベントナイト混合土を設計する。</li> </ol>	

第一次事象	廃棄体の発熱
第二次事象との相互関係	
<pre> graph TD     A["廃棄体の発熱"] --&gt; B["コンクリートの 熱による劣化"]     A --&gt; C["ベントナイトの 熱による変質"]   </pre>	
<p><b>説明</b></p> <p>TRU廃棄物の中には発熱性を有する廃棄体（ハル・エンドピース）が存在し、廃棄体の発熱量、定置密度によっては人工バリアに熱的な影響を及ぼす。</p>	
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>天然バリア、人工バリアが廃棄体の発熱によって劣化、変質しない措置。</li> </ul>
対応	<p>熱解析を実施し、コンクリート及びベントナイトに影響を与えない熱量となるように廃棄体の埋設密度や処分方式を決定する。</p>

<b>第一次事象</b> <b>第二次事象との相互関係</b>	<b>地下水の上昇（再冠水）</b>
 <pre> graph TD     A[地下水の上昇（再冠水）] --&gt; B[コンクリートピットへの水圧の作用]     B --&gt; C[コンクリートピットの破壊]     C --&gt; D[ベントナイトの変形]     C --&gt; E[廃棄体容器の変形]     E --&gt; F[廃棄体の体積変化・変形]     F --&gt; G[ベントナイトの変形]     G --&gt; H[ベントナイトの透水係数の変化]     H --&gt; I[ベントナイトの隔離性能の低下]   </pre>	
<b>説明</b>	
<p>処分空洞、主要・連絡坑道、アクセスまでの閉鎖が完了すると掘削のために低下させていた地下水が再び冠水するため、処分場内のコンクリートに多大な水圧が作用し、コンクリートが破壊する。（本研究ではコンクリートには人工バリアの機能は期待せず、廃棄体定置のみに用いることとしている。）そのため廃棄体容器の破損の可能性が生じる。内部に収容されている廃棄体には空隙が存在するため、容器が破損すると廃棄体の体積変化・変形が起こる。廃棄体の変形、コンクリートの破壊が生じるとベントナイトにも変形を生じ、結果的にベントナイトの透水係数が変化することとなる。</p>	
<b>課題</b>	
コンクリートピットの設計思想 <ul style="list-style-type: none"> <li>・再冠水後に直ちに破壊して良いか</li> <li>・収納する廃棄体コンテナの効果（壁の押さえとして期待できるか）</li> </ul>	
<b>対応</b>	
空隙の存在と廃棄体コンテナのコンクリートピット壁の支え効果を定量的に解析する。	

第一次事象	地下水の上昇(再冠水)
第二次事象との相互関係	<pre> graph TD     A[地下水の上昇] --&gt; B[廃棄体容器及び廃棄体への地下水の接触]     A --&gt; C[コンクリートからのCaイオンの流出]     B --&gt; D[廃棄体・廃棄体容器の腐食]     C --&gt; D     D --&gt; E[ベントナイトの変形]     E --&gt; F[硫酸塩の流出]     F --&gt; G[ガス発生]     F --&gt; H[廃棄体の体積変化]     G --&gt; I[人工バリア(ベントナイト)の破壊]     G --&gt; J[ベントナイトの変形]     H --&gt; K[岩盤への廃棄体の腐食膨張荷重の作用]     I --&gt; L[ベントナイトの透水係数の変化]     J --&gt; L     K --&gt; L     L --&gt; M[ベントナイトの隔離性能の低下]     </pre>
説明	
<p>地下水が再冠水することにより廃棄体や周囲のコンクリートへの地下水の接触が考えられる。地下水の接触により廃棄体・廃棄体容器が腐食しまたは、コンクリートからCaイオンが流出し、以下の現象が生じる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 硝酸塩の流出</li> <li>② ガスの発生</li> <li>③ 腐食による体積変化</li> </ul> <p>これらの現象は廃棄体の体積変化・変形に繋がりベントナイトの変形を引き起こす。また廃棄体の腐食荷重が岩盤へ作用することも考えられる。</p>	
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・硫酸塩流出量の推定</li> <li>・ガス発生量の推定</li> <li>・体積変化量の推定</li> </ul>
対応	空隙の存在に応じた人工バリア変形量を求め、人工バリアが破壊するかどうか（破壊ひずみに達するか）解析する。
	<p>The diagram shows a cross-section of a cylindrical soil sample. A horizontal force is applied to the right side, indicated by a double-headed arrow labeled "強制変位" (forced displacement). The left side is fixed. A vertical line within the cylinder is labeled "ひずみを求める" (strain to be determined).</p>

第一次事象	地下水の上昇（再冠水）
第二次事象との相互関係	<pre> graph TD     A[地下水の上昇（再冠水）] --&gt; B[ペントナイトの膨潤・圧密]     B --&gt; C[コンクリートピットの破壊]     C --&gt; D[ペントナイトの変形]     C --&gt; E[廃棄体容器の変形]     E --&gt; F[廃棄体の体積変化・変形]     F --&gt; G[ペントナイトの変形]     G --&gt; H[ペントナイトの透水係数の変化]     H --&gt; I[ペントナイトの隔離性能の低下]   </pre>
説明	
地下水の再冠水によりペントナイトが膨潤する。膨潤終了後、底部ペントナイトには処分場全体の荷重が作用しているため、ペントナイトの圧密変形が生じる。圧密変形が過大に進行した場合には、コンクリートピットの破壊が生じる。	
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ペントナイトの膨潤特性の把握</li> <li>・圧密変形量の推定</li> <li>・透水性変形量の把握</li> </ul>
対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ペントナイトの膨潤特性については、これまでの試験結果より乾燥密度と膨潤圧の関係を把握している。今後データ信頼性の向上に向け、データ数の拡充を図る。</li> <li>・圧密変形量については、本年度底部ペントナイトに対し解析を実施した。乾燥密度が<math>1.8\text{g/cm}^3</math>であれば、大断面岩洞方式で6mm程度という結果を得た。</li> </ul>

第一次事象	地下水の上昇（再冠水）
第二次事象との相互関係	
<pre> graph TD     A[地下水の上昇] --&gt; B[ベントナイトの流出]     B --&gt; C[人工バリアの変形]     C --&gt; D[ベントナイトの透水係数の変化]     D --&gt; E[ベントナイトの隔離性能の低下]   </pre>	
<p><b>説明</b>        地下水流によりベントナイトが岩盤中の開口亀裂へ流出する可能性がある。</p>	
<p><b>課題</b>        ベントナイトが流出することにより人口バリアの欠損が起こり、ベントナイトの要求性能の低下が考えられる。</p>	
<p><b>対応</b>        深部地下における地下水流速は非常に小さいため、ベントナイトの流出は基本的に起こらないと考えられるが、信頼性向上のためには開口亀裂へのグラウト注入を実施する</p>	

第一次事象	地下水の上昇（再冠水）
第二次事象との相互関係	
<pre> graph TD     A[地下水の上昇] --&gt; B[コンクリートからのCa流出]     B --&gt; C[ペントナイトのCa化]     C --&gt; D[ペントナイト特性の変化]     D --&gt; E[ペントナイトの透水係数の変化]     E --&gt; F[ペントナイトの隔離性能の低下]   </pre>	
説明	地下水によりコンクリートからCaが流出した場合、コンクリートと隣接しているペントナイトがCa化される。
課題	Na型ペントナイトがCa化されることにより、ペントナイトに期待している機能が損なわれる可能性がある。
対応	これまでの試験より、ケイ砂配合率の多いCa化ペントナイトではNa型と比して透水係数が大きくなるという結果を得た。 今後はデータの信頼性向上に向け、データ数の拡充を図る。

第一次事象	セメント系材料の長期的劣化
第二次事象との相互関係	
<pre> graph TD     A[セメント系材料の長期的劣化] --&gt; B[セメント系材料の強度低下 (圧縮・引張・せん断)]     B --&gt; C[部材結合力が欠損]     C --&gt; D[廃棄物・セメント系材料が混在した状態]     D --&gt; E[ベントナイトの変形]     E --&gt; F[ベントナイトの透水係数の変化]     F --&gt; G[ベントナイトの隔離性能の低下]   </pre>	
<p><b>説明</b></p> <p>セメント系材料は長期的には劣化する。劣化に伴い材料の強度低下が起こり最終的には部材結合力がなくなり、砂状になる。この状態では廃棄物と砂状になったセメント系材料が混在することになる。この混在した廃棄物と材料の周辺にはベントナイトがあるが、この状態でいろいろな外力（岩盤からの力、地震力など）を受けた場合、ベントナイトが変形し所定の隔離性能が発揮できなくなる。</p>	
<p><b>課題</b></p> <p>解析的検討が難しい。</p>	
<p><b>対応</b></p> <p>実験的検討の実施。</p>	

第一次事象	岩盤クリープ
第二次事象との相互関係	
<pre> graph TD     A[岩盤クリープ] --&gt; B[ペントナイトの変形]     B --&gt; C[ペントナイトの透水係数の変化]     C --&gt; D[ペントナイトの隔離性能の変化]   </pre>	
<p><b>説明</b></p> <p>岩盤には長期的な変形挙動として、クリープ変形が生じる。クリープは岩種物性、載荷履歴、応力、化学的物質など様々な要因から起こると考えられている。クリープ変形が進行するとペントナイトの変形から透水係数の変化という現象が生じる。</p>	
<p><b>課題</b></p> <p>長期的な岩盤のクリープ特性の把握方法</p>	
<p><b>対応</b></p> <p>高レベル放射性廃棄物処分研究の成果を待つ。</p>	