

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)

概要

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
マ	J1100 96-006	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

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。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

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)

概 要

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 1.8g/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^3 (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と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 -----	1.1-1
1.1.1.1 廃棄体特性 -----	1.1-1
1.1.1.2 サイト特性 -----	1.1-2
1.1.2 人工バリアの基本概念 -----	1.1-3
1.1.2.1 人工バリアの目的 -----	1.1-3
1.1.2.2 人工バリアの基本構成 -----	1.1-3
1.1.2.3 人工バリアの候補材料 -----	1.1-3
1.1.2.4 人工バリアの基本構造 -----	1.1-3
1.1.3 処分施設に係わる技術 -----	1.1-4
1.1.3.1 設計研究 -----	1.1-4
(1) 処分空洞の設置深度 -----	1.1-4
(2) 空洞安定解析 -----	1.1-4
(3) 熱解析 -----	1.1-6
(4) 体積変化解析 -----	1.1-9
(5) 処分場コンセプト -----	1.1-11
(a) 処分空洞の断面形状 -----	1.1-11
(b) 処分空洞の長さ -----	1.1-14
(c) 処分空洞の離間距離 -----	1.1-14
(d) 処分空洞の配置 -----	1.1-14
(e) 主要坑道の断面・配置・本数 -----	1.1-15
(f) 連絡坑道の断面・配置 -----	1.1-15
(g) 処分パネルの概念 -----	1.1-15
(h) 処分パネルの配置 -----	1.1-17
(i) 処分パネルの大きさ -----	1.1-17
(j) アクセス坑道の形式 -----	1.1-17
(k) アクセス坑道の本数・断面・配置 -----	1.1-17
1.1.3.2 建設計画 -----	1.1-19
(1) アクセス坑道 -----	1.1-19
(2) 主要坑道、連絡坑道および換気坑道 -----	1.1-19
(3) 処分空洞 -----	1.1-19
(4) 人工バリア製造設備の仕様 -----	1.1-19
1.1.3.3 操業計画 -----	1.1-20
(1) 廃棄体収納容器（コンテナ） -----	1.1-20
(2) 廃棄体の定置方法 -----	1.1-20

(3) 廃棄体の搬送方法 -----	1.1-20
(4) 操業全体の流れと工程 -----	1.1-21
1.1.3.4 閉鎖計画 -----	1.1-23
(1) 閉鎖の目的及び要求性能 -----	1.1-23
(2) 閉鎖の要素技術 -----	1.1-23
(3) 閉鎖の候補材料 -----	1.1-23
(4) 処分空洞の閉鎖 -----	1.1-23
(5) アクセス・主要坑道・連絡坑道の閉鎖 -----	1.1-24
1.1.3.5 その他 -----	1.1-25
(1) 換気システム -----	1.1-25
(2) 排水システム -----	1.1-25
1.1.4 全体レイアウト -----	1.1-26
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 -----	1.2-1
1.2.1.2 各事象の相関 -----	1.2-1
1.3 力学挙動評価モデルに基づく解析 -----	1.3-1
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 -----	1.3-1
1.3.3.1 解析条件 -----	1.3-1
1.3.3.2 解析結果 -----	1.3-2
1.3.4 まとめと今後の課題 -----	1.3-4
1.3.4.1 熱解析 -----	1.3-4
1.3.4.2 体積変化解析 -----	1.3-4
1.3.4.3 ベントナイトの圧密解析 -----	1.3-4
第2章 人工バリア材料の力学特性データの取得 -----	2-1
2.1 目的 -----	2-1
2.2 使用材料 -----	2-1
2.3 試験条件 -----	2-1
2.3.1 Ca化ベントナイト -----	2-1
2.3.2 ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料 -----	2-1
2.4 試験結果 -----	2-1
2.4.1 Ca化ベントナイト -----	2-1
2.4.1.1 膨潤圧 -----	2-1
2.4.1.2 透水係数 -----	2-2
2.4.1.3 一軸圧縮強さ -----	2-3
2.4.2 ケイ砂とCa化クニゲルV1の混合材料 -----	2-3
2.4.2.1 膨潤圧 -----	2-3

2.4.2.2	透水係数	-----	2-4
2.4.2.3	一軸圧縮強さ	-----	2-4
2.5	まとめと今後の課題	-----	2-5
2.5.1	Ca化ベントナイト	-----	2-5
2.5.2	ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料	-----	2-5
第3章	コストの試算	-----	3-1
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
3.1.3	地上施設の建設費用	-----	3-1
3.1.4	地下施設の建設費用	-----	3-1
3.1.4.1	積算ベース	-----	3-1
3.1.4.2	コスト算定での仮定	-----	3-2
3.2	コスト試算	-----	3-2
3.2.1	検討ケース	-----	3-2
3.2.2	検討結果	-----	3-2
3.2.2.1	地上施設	-----	3-2
3.2.2.2	地下施設	-----	3-2
3.2.3	コスト試算の結果	-----	3-4
3.2.3.1	建設段階	-----	3-4
3.2.3.2	閉鎖段階	-----	3-4
第4章	今後の課題	-----	4-1

図一覧

第1章

- 図-1.1.1 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-1.1.2 ガイド有りコンテナ積み処分の概念図
- 図-1.1.3 解析モデル
- 図-1.1.4 最高温度と空洞中心間距離（ベントナイト内面）
- 図-1.1.5 廃棄体空隙率と変形量の関係
- 図-1.1.6 乾燥密度と透水係数の関係
- 図-1.1.7 大断面岩洞方式 断面形状図
- 図-1.1.8 小断面岩洞方式 断面形状図
- 図-1.1.9 坑道方式 断面形状図
- 図-1.1.10 サイロ方式 断面形状図
- 図-1.1.11 主要坑道概念図
- 図-1.1.12 連絡坑道位置図
- 図-1.1.13 放射線管理区域と建設・操業・閉鎖作業の関係
- 図-1.1.14 廃棄体コンテナ 形状図
- 図-1.1.15 操業手順
- 図-1.1.16 各処分空洞方式の閉鎖
- 図-1.1.17 大断面岩洞方式 レイアウト図
- 図-1.1.18 小断面岩洞方式 レイアウト図
- 図-1.1.19 坑道方式 レイアウト図
- 図-1.1.20 サイロ方式 レイアウト図
- 図-1.1.21 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 ケース2の圧密終了時間における変形図
- 図-1.3.2 圧密時間と圧密沈下量の関係

第2章

- 図-2.4.1 膨潤圧と乾燥密度の関係
- 図-2.4.2 透水係数と乾燥密度の関係
- 図-2.4.3 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係
- 図-2.4.4 膨潤圧とベントナイト配合率の関係
- 図-2.4.5 透水係数とベントナイト配合率の関係
- 図-2.4.6 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

第3章

- 図-3.2.1 コスト試算結果
- 図-3.2.2 工事費内訳比較 建設の場合 (A 300m)
- 図-3.2.3 工事費内訳比較 閉鎖の場合 (A 300m)
- 図-3.2.4 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 岩盤物性値
- 表-1.1.3 許容緩み領域を設定する方法による解析結果
- 表-1.1.4 許容変位量を設定する方法による解析結果
- 表-1.1.5 掘削最大径
- 表-1.1.6 廃棄体量及び空洞中心間距離
- 表-1.1.7 材料の物性値
- 表-1.1.8 発熱密度
- 表-1.1.9 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-1.1.10 変形後のベントナイト密度
- 表-1.1.11 空洞規模と温度・変形
- 表-1.1.12 処分空洞長
- 表-1.1.13 空洞幅と離間距離
- 表-1.1.14 処分空洞配置案
- 表-1.1.15 処分パネルの設定根拠
- 表-1.1.16 操業作業の項目と所要時間
- 表-1.2.1 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 解析結果

第2章

- 表-2.3.1 Ca化ベントナイトの配合条件と試験項目
- 表-2.3.2 ケイ砂とCa化ベントナイトの試験条件

第3章

- 表-3.1.1 対象施設一覧

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

1.1.1 前提条件

1.1.1.1 廃棄体特性

本検討ではTRU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。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。

表-1.1.1 廃棄体特性

廃棄物の種類	容器 ^{*1}	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% ^{*2}	—	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% ^{*2}	22,815	0	22,815	11.4
		セメントを想定	無し	不明	10~20% ^{*3}	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% ^{*2}	30,420	0	30,420	15.2
		セメントを想定	無し	不明	10~20% ^{*3}	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% ^{*3}	3,803	0	3,803	1.9
		セメントを想定	無し	不明	10~20% ^{*3}	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% ^{*3}	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% ^{*3}	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% ^{*3}	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% ^{*3}	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% ^{*3}	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.%

また、ハル・エンドピース圧縮固化体の発熱特性を図-1.1.1に示す。

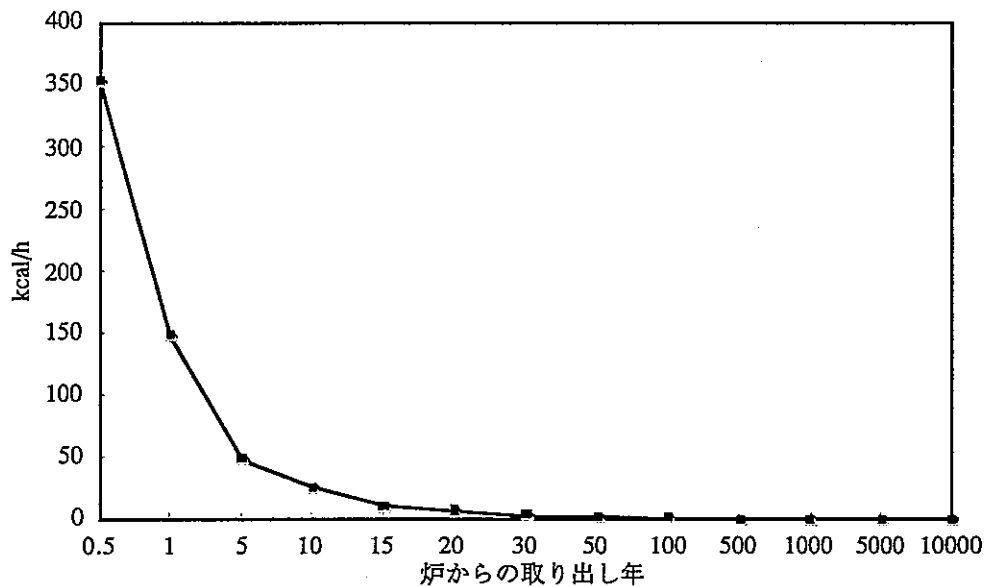


図-1.1.1 ハル・エンドピース圧縮固化体キャニスター1本当たりの発熱量の経時変化

1.1.1.2 サイト特性

(1) 岩盤の力学特性

表-1.1.2 に検討に用いる岩盤物性値を示す。

表-1.1.2 岩盤物性値¹⁾

物性 岩種	単位体積重量 (kgf/m ³)	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 (kgf/cm ²)	
結晶質岩	A	2,700	30,000	0.2	7.5	35	1,200
系岩盤	B	2,700	10,000	0.2	6.0	35	900
堆積岩系	A	2,300	4,000	0.3	4.0	30	700
岩盤	B	2,300	2,000	0.3	2.0	30	450
	C	2,300	1,000	0.4	1.0	25	200

(2) 岩盤の水理特性

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。実態調査に基づくデータ²⁾により、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。

- ・ 結晶質岩系岩盤 0.6m³/min/km
- ・ 堆積岩系岩盤 0.4m³/min/km

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

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。

1.1.2.2 人工バリアの基本構成

人工バリアは、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。

1.1.2.3 人工バリアの候補材料

(1) 構造材

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。構造材の主な要求性能としては、操業性、熱伝導性、化学的緩衝性、核種吸着遅延性がある。この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。

(2) 充填材

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。充填材の主な要求性能としては、物理的安定性、熱伝導性、化学的緩衝性、核種吸着遅延性がある。この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。

(3) 緩衝材

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。緩衝材の主な要求性能としては、透気性、止水性、自己シール性、核種吸着遅延性、熱伝導性、廃棄体支持性、力学的緩衝性がある¹⁾。この要求性能を比較的良好に満足する材料として、Na型ベントナイトが挙げられる。

1.1.2.4 人工バリアの基本構造

本検討においては、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み処分」(図-1.1.2)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ベントナイトの施工が可能である。このことにより、品質の高いベ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。

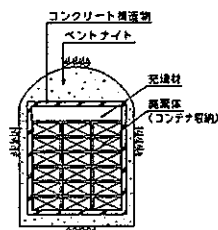


図-1.1.2 ガイド有りコンテナ積み処分の概念図

1.1.3 処分施設に係わる技術

1.1.3.1 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。

(2) 空洞安定解析

(a) 処分空洞の規模

処分深度および岩盤物性毎に、弾塑性理論解析を用いて岩体のみで安定性を保つ空洞の規模を検討する。解析は、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。弾塑性理論解析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、極力発生しない場合として1.5mを仮定する。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²⁾の結果から4cmと設定する。

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間を取り直径30mを上限とする。許容緩み領域 $R_a=1.5m$ として解析を行った結果を表-1.1.3に示す。許容変位量 $u_a=4cm$ として解析を行った結果を表-1.1.4に示す。

表-1.1.3 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 ϕ (m)	壁面変位 u(cm)	緩み領域 w(m)	ボルト長 l(m)	直 径 ϕ (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

表-1.1.4 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 ϕ (m)	壁面変位 u(cm)	緩み領域 w(m)	ボルト長 l(m)	直 径 ϕ (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	—	—	—

以上より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-1.1.5のように設定する。

表-1.1.5 掘削最大径

		深度 300m	深度 700m
結晶質岩系岩盤	A	30 m	30 m
	B	30 m	10 m
堆積岩系岩盤	A	20 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)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。(a)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)

(3) 熱解析

本検討では有限要素法による解析コード「ANSYS」を用いて熱解析を実施し、処分空洞に発熱性廃棄物を処分した場合における、ベントナイト内側の温度上昇を求める。

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。

解析は図-1.1.3に示す2次元軸対称モデルを用いた。廃棄物の集合を円形とし、その周囲を厚さ50cmのコンクリート及び100cmのベントナイトで囲んでいるとしてモデル化した。廃棄物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。表-1.1.6に廃棄体量を示す。

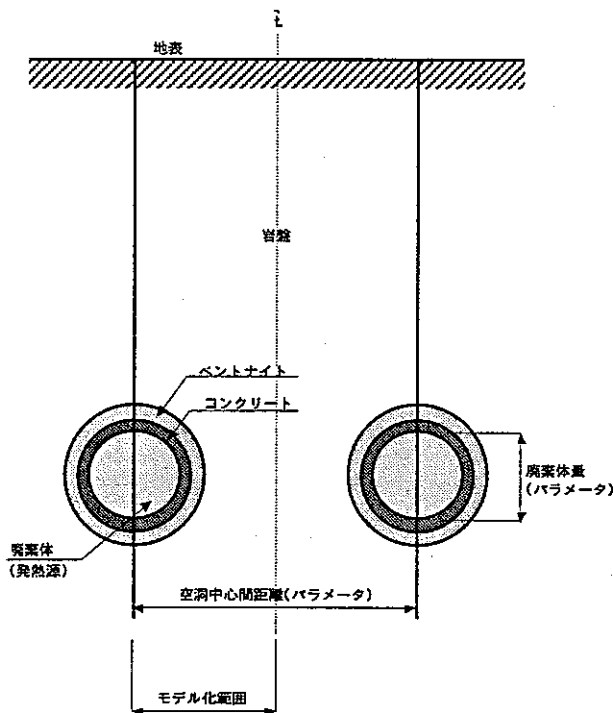


図-1.1.3 解析モデル

表-1.1.6 廃棄体量及び空洞中心間距離

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

表-1.1.7に本解析で使用した材料ごとの物性値を示す。リハル・エンドピース廃棄体の熱伝導率および比熱については、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てん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-1.1.7 材料の物性値¹⁾

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 ³)
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⁴⁾による。

廃棄体の発熱密度を表-1.1.8に示す。解析は15年の冷却期間をおいた場合で実施する。

表-1.1.8 発熱密度

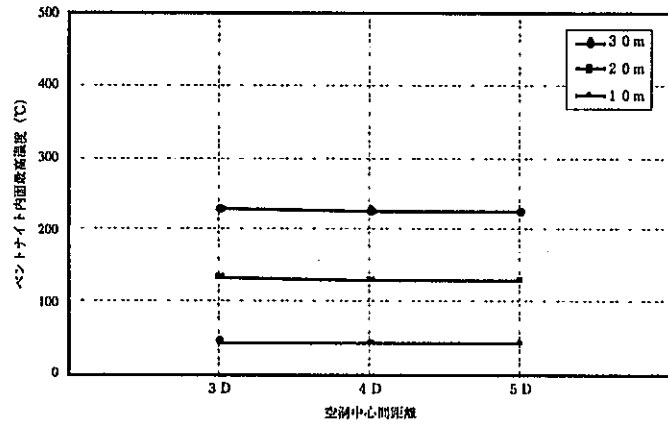
	空洞直径 D(m)		
	10	20	30
発熱密度(W/m ³)	12.5	14.3	14.6

③ 解析結果

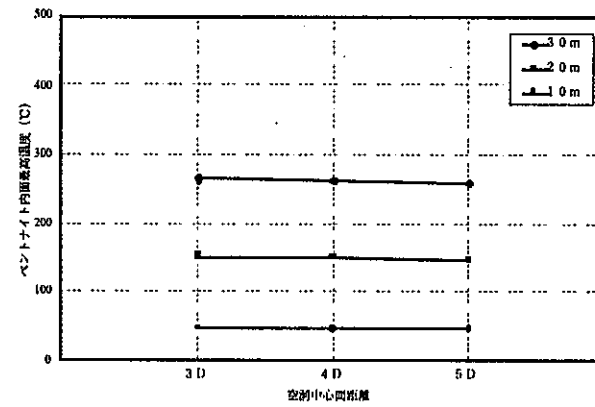
解析結果を図-1.1.4に示す。図-1.1.4は各ケースについてのベントナイト内面での最高温度と離間距離の関係のグラフである。

これらのグラフより以下のことが言える。

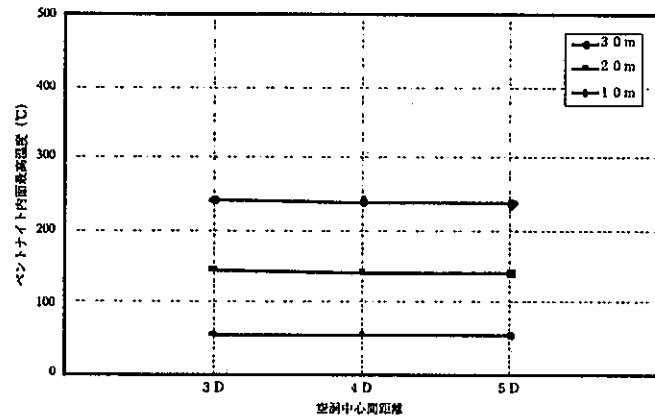
- ・ピークの温度は空洞直径 $\phi=30\text{m}$ （大断面岩洞方式）、空洞直径 $\phi=20\text{m}$ （小断面岩洞方式）、空洞直径 $\phi=10\text{m}$ （坑道方式）の順に高くそれぞれのベントナイト内面での最高温度はそれぞれ250℃、150℃、50℃程度まで上昇する。断面が大きくなるに従って最高温度が高いのは、空洞内の廃棄体量が多くなるためである。これより15年の冷却期間をおいた場合でも大断面岩洞方式では、ベントナイト内面の温度が100℃を大幅に上回るため、発熱性廃棄体の処分は困難であると考えられる。一方、坑道方式は発熱性廃棄体のみを処分することが可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った。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上昇するためである。
- ・3D～5Dの範囲では、空洞中心間距離による影響はほとんどない。



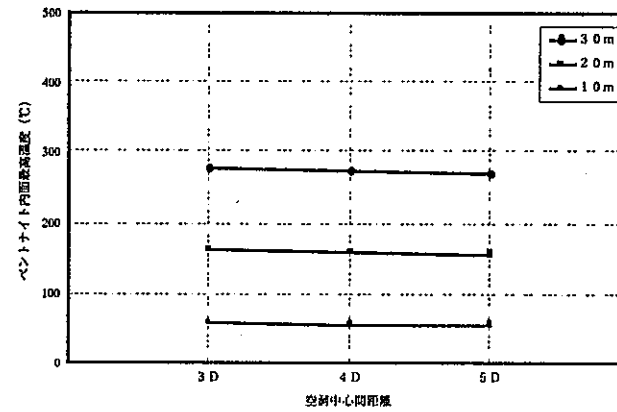
深さ=300m、結晶質岩



深さ=300m、堆積岩



深さ=700m、結晶質岩



深さ=700m、堆積岩

図-1.1.4 最高温度と空洞中心間距離 (ベントナイト内面)

(4) 体積変化解析

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。したがって、有害空隙及び体積減少による廃棄体の変形が、ベ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。

ベ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（ ϕ 43cm×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。

また、①の方法による変形量計算結果に基づいてベ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。

算定結果を図-1.1.5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。

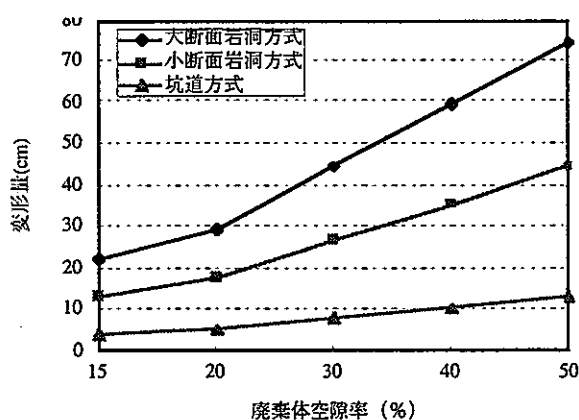


図-1.1.5 廃棄体空隙率と変形量の関係

また、コンクリートピットを含む廃棄体部分からのセメント成分の溶出量を体積の15%と仮定した場合の変形量を表-1.1.9に示す。

表-1.1.9 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
変形量(cm)	180.0	110.0	40.0

この結果から図-1.1.5の各ケースよりも変形量は大幅に増加することがわかる。

コンクリートの収縮変形により、充填されているベントナイトは膨潤等の現象によりコンクリートの体積変化分だけ膨張変形すると考えられる。したがってベントナイトの密度が変化し、ベントナイトの要求性能が低下する可能性がある。そこで変形後のベントナイトの密度を概略算定する。

図-1.1.5の結果を基にしたベントナイト密度の算定結果を表-1.1.10に算定結果を示す。

表-1.1.10 変形後のベントナイト密度

廃棄体空隙率	大断面岩洞方式	小断面岩洞方式	坑道方式
50%	1.30	1.47	1.69
40%	1.39	1.53	1.71
30%	1.47	1.59	1.73
20%	1.57	1.65	1.75
15%	1.62	1.69	1.77

表-1.1.10に示したように、ベントナイトが変形することにより密度は1.3~1.7(tf/m³)程度になることがわかった。

ベ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ベ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-1.1.10に示した概略算定によって求めた密度での透水係数の概略値を見る。

図-1.1.6にベ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/m³)から1.3~1.7(tf/m³)に変化することにより、透水係数は1~2オーダー低下することがわかる。したがって、この低下量を安全評価に見込む必要がある。

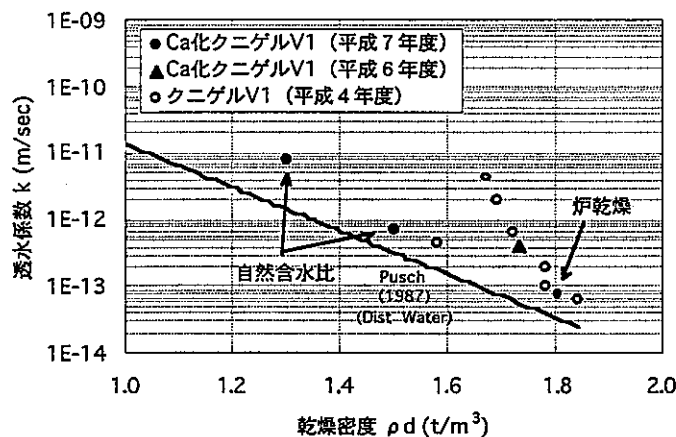


図-1.1.6 乾燥密度と透水係数の関係

(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（ベントナイト）の温度上昇や、廃棄体体積変化と処分空洞規模には、表-1.1.11 に示す関係があることが定量的に確認できた。

表-1.1.11 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

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（圧縮固化体、アスファルト固化体）、その他の廃棄体（熔融固化体、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、熔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。

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℃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℃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

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を図-1.1.7~1.1.10 に示す。コンクリート構造物の側壁部材厚は、側部ベントナイトの土圧により決定した。

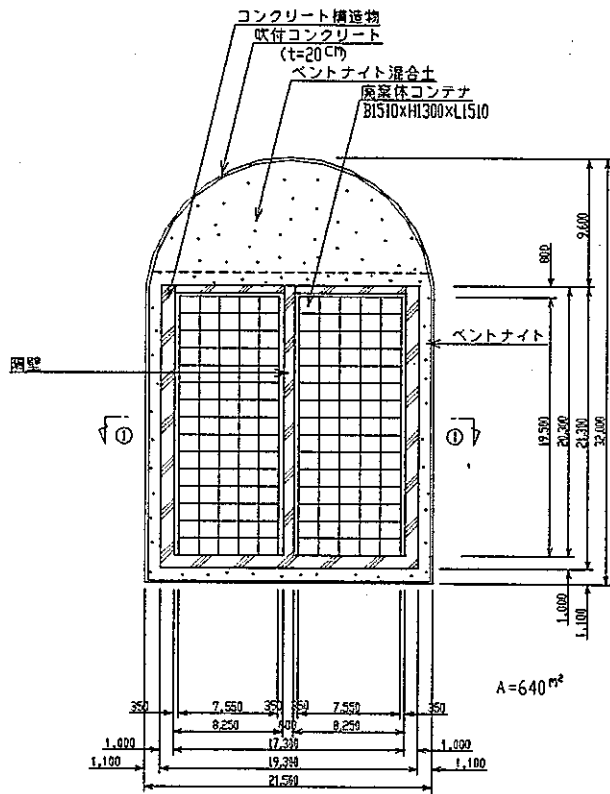


図-1.1.7 大断面岩洞方式 断面形状図

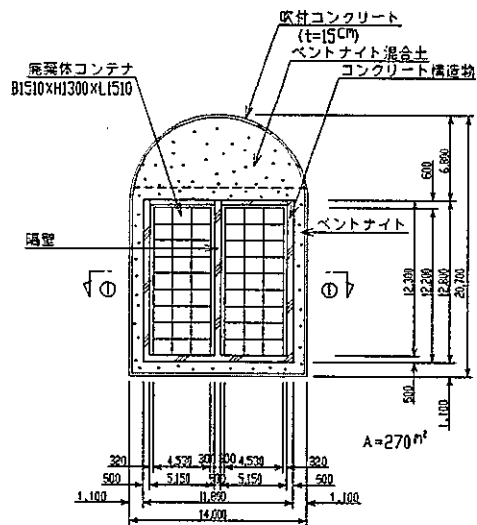


図-1.1.8 小断面岩洞方式 断面形状図

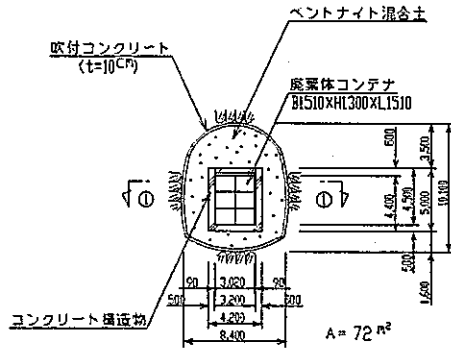


図-1.1.9 坑道方式 断面形状図

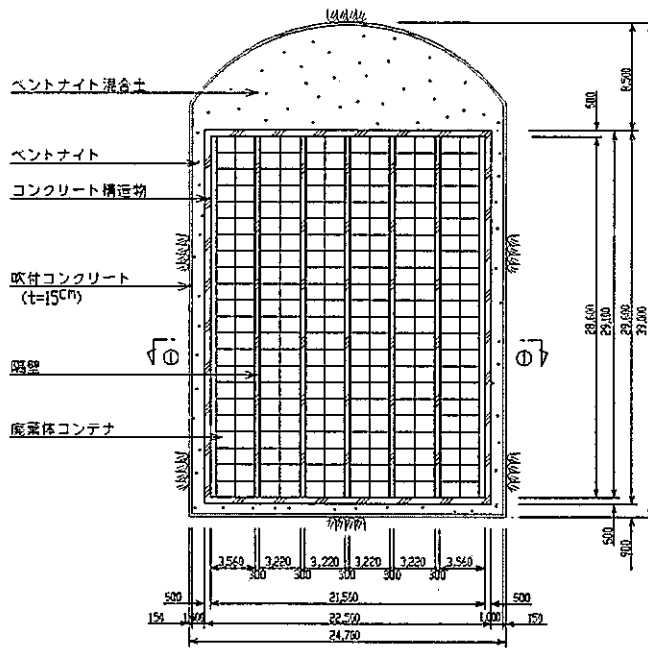


図-1.1.10 サイロ方式 断面形状図

(b) 処分空洞の長さ

表-1.1.12 に各処分方式に対する処分空洞長を示す。

表-1.1.12 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

処分空洞の離間距離は、消防法における岩盤タンクの適用基準（昭和62年5月19日通達）、及び熱解析の結果を参考に空洞幅の2倍以上とした。表-1.1.13 に各処分方式に対する離間距離を示す。

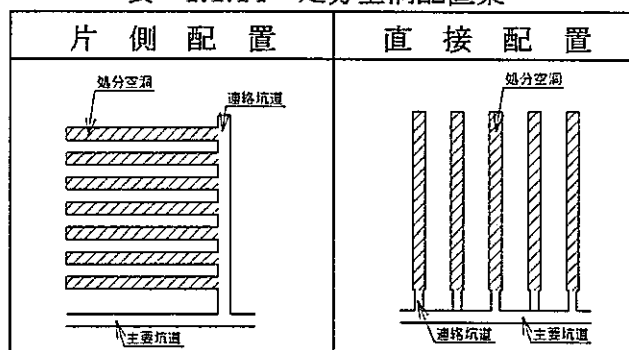
表-1.1.13 空洞幅と離間距離

	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

表-1.1.14 処分空洞配置案



岩洞・坑道方式の処分空洞の配置は、表-1.1.14における直接配置とする。サイロ方式は片側配置とする。また、断面の大きい岩洞及びサイロ方式では、掘削作業の効率化より掘削用の坑道が必要となる。

(e) 主要坑道の断面・配置・本数

断面形状は、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)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、安全性から交差点を極力作らない。
- ・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-1.1.11に概念図を示す。

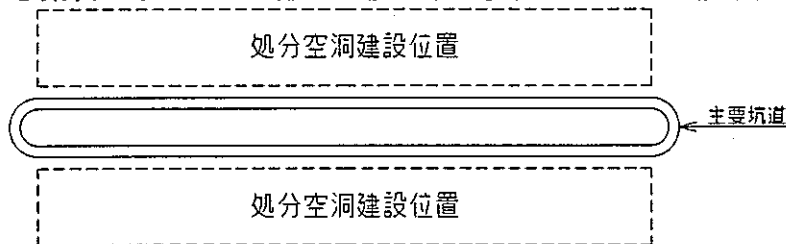


図-1.1.11 主要坑道概念図

(f) 連絡坑道の断面・配置

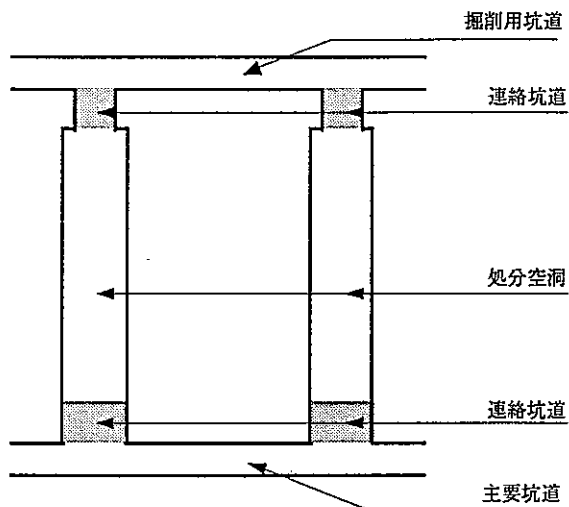
連絡坑道の断面形状の設定においては、以下の点に着目して検討を行う。

- ・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
- ・処分空洞の形状

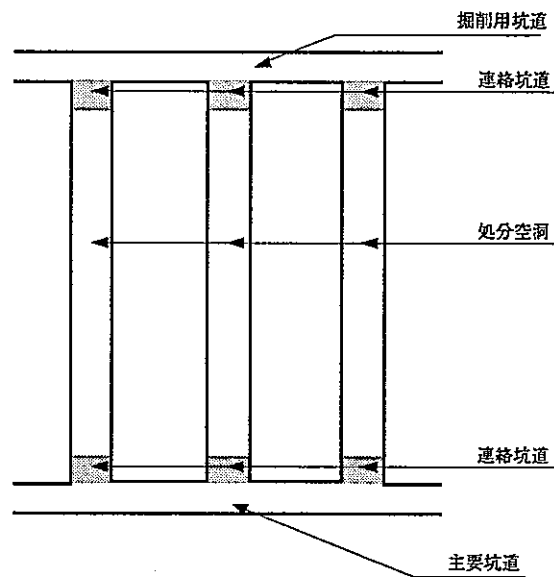
図-1.1.12に連絡坑道の位置を示す。

(g) 処分パネルの概念

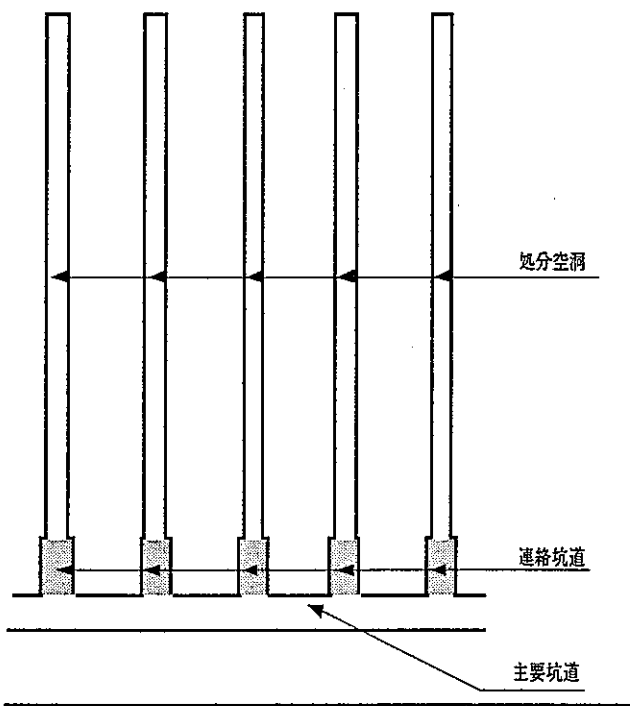
処分空洞の建設、操業、閉鎖の各作業を行っていく時に、それぞれ1本ごとに作業や管理を行っていくのは、処分空洞数が多い場合には非常に困難であると考えられる。また建設、操業、閉鎖の各作業を並行して行っていく場合においては、複雑なシステムになると考えられる。そこで、処分空洞を何本かずつにまとめることにより、処分場全体をいくつかのグループに分け、そのグループごとに作業や管理を行っていく方式をとることとする。そのグループを、本検討では「処分パネル」と定義する。



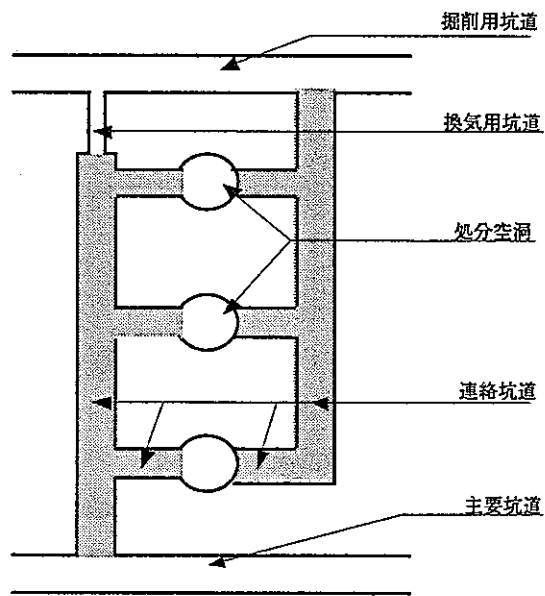
大断面岩洞方式



小断面岩洞方式



坑道方式



サイロ方式

図-1.1.12 連絡坑道位置図

(h) 処分パネルの配置

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、放射線管理、作業工程、地盤条件について考慮する必要がある。

処分パネルの枚数は、放射線管理の考え方と、(f)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。

また、建設・操業・閉鎖の輻輳作業の関係を図-1.1.13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-1.1.13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。

(i) 処分パネルの大きさ

表-1.1.15に処分パネルの大きさの設定根拠となる値を示す。

表-1.1.15 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

(j) アクセス坑道の形式

アクセス坑道の形式は、諸外国の例を参考に立坑とした。

(k) アクセス坑道の本数・断面・配置

① 立坑の本数

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、作業員の入出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 立坑の断面

廃棄体搬入用立坑は、エレベーター設置スペースを考慮に入れ、直径6.5mの円形断面とする。作業員・建設資材入出用立坑は、重機部品の搬入を考慮し、直径12mの円形断面が必要となる。

③ 立坑の配置

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。

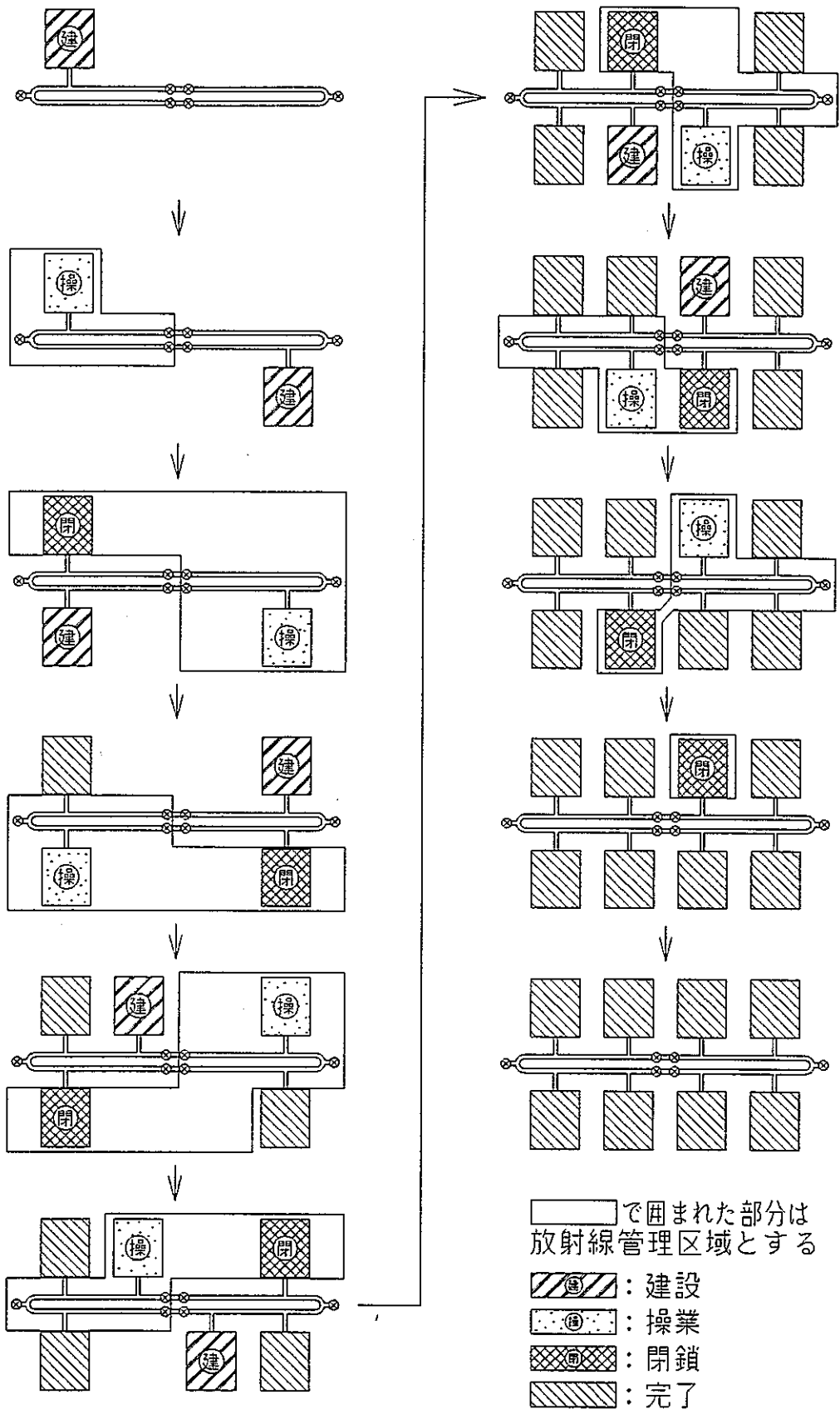


図-1.1.13 放射線管理区域と建設・操業・閉鎖作業の関係

1.1.3.2 建設計画

(1) アクセス坑道

施工順序は、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を想定する。

掘削工法は、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。切下り工法としてはショートステップ工法とする。

支保工、覆工方式は、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。

(2) 主要坑道、連絡坑道および換気坑道

堆積岩系岩盤の場合は、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ラッシ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。

結晶質岩系岩盤の場合は、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。

(3) 処分空洞

(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。

また施工手順は、地下発電所と同様のでの方法を想定する。

(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の方法を想定する。

(4) 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。各設備は、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）

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。

廃棄体コンテナの形状及び重量を図-1.1.14 に示す。

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システムで収納して製造し、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。

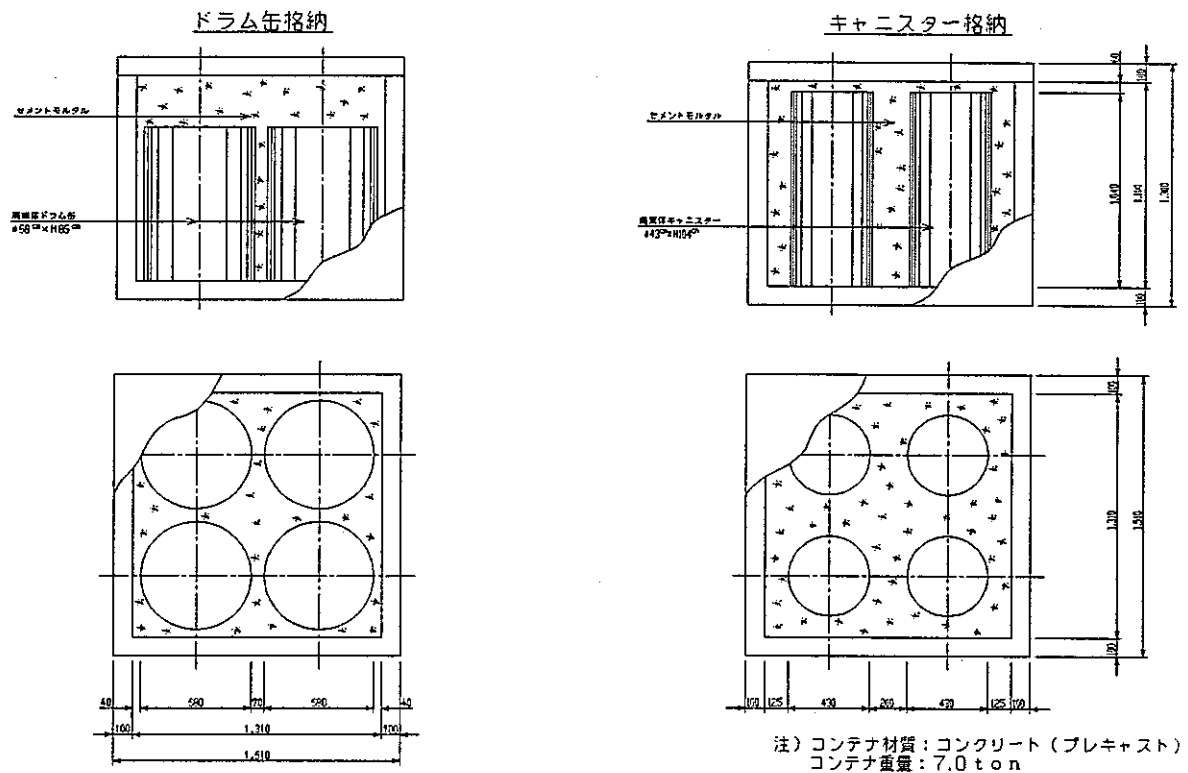


図-1.1.14 廃棄体コンテナ 形状図

(2) 廃棄体の定置方法

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。

(3) 廃棄体の搬送方法

(i) 立坑での搬送方法

廃棄体コンテナを直接操作する作業を減らしか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、地上施設での積み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。搬送方式は、無軌道方式を設定する。

(iii) 搬送台車と牽引車の仕様

① 搬送台車

搬送台車は廃棄体コンテナを2個積載するものとする。

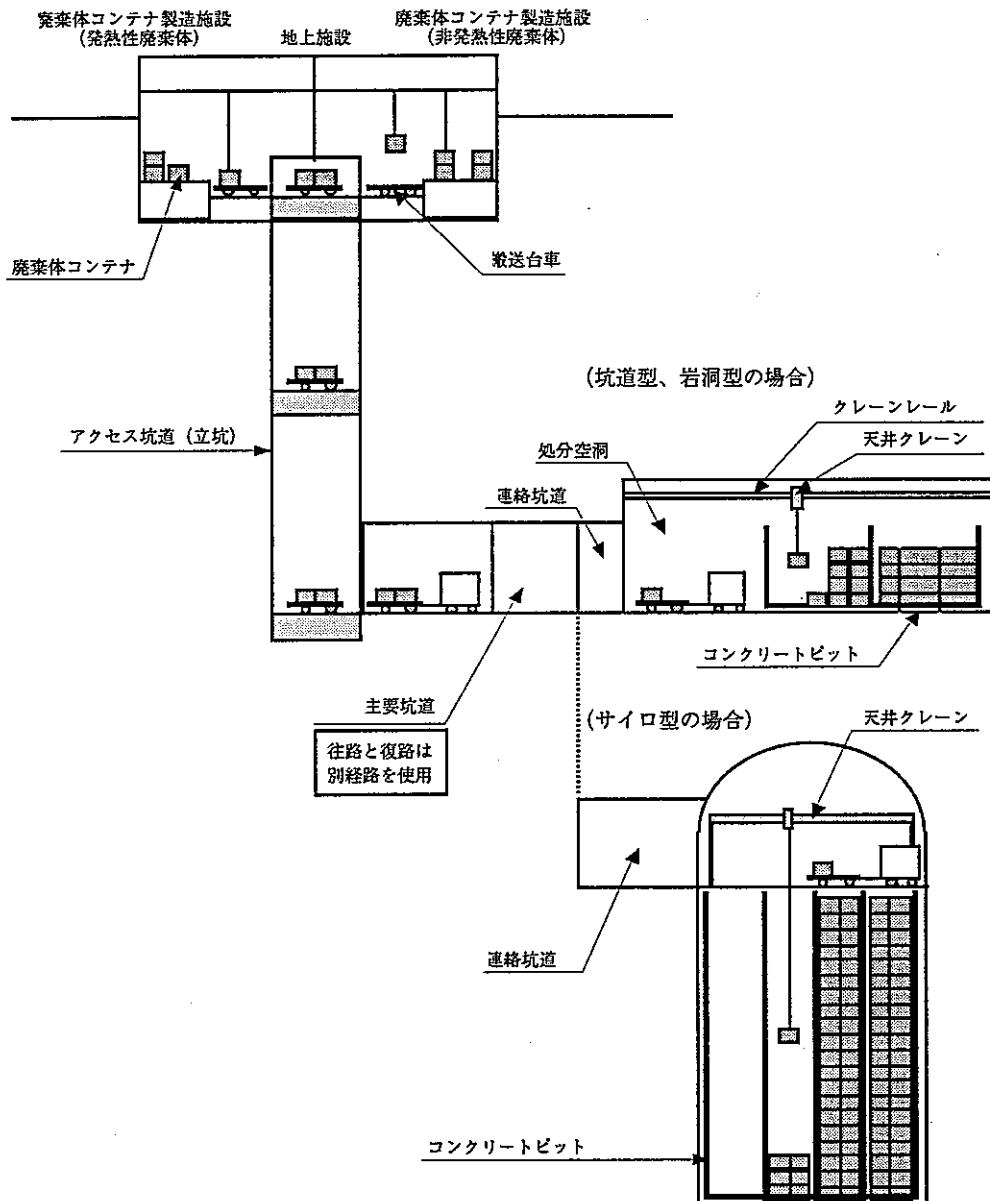
② 牽引車

牽引車の性能は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。

(4) 操業全体の流れと工程

(a) 操業手順

操業手順の概念を図-1.1.15に示す。



(b) 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-1.1.16に示す。

表-1.1.16 操業作業の項目と所要時間

作業項目		作業内容	所要時間
廃棄体コンテナ搬入作業	廃棄体コンテナの地下施設への搬送	合計（立坑300mの場合）	20分
		合計（立坑700mの場合）	24分
地下施設内搬送作業	坑道型	合計（坑道型の場合）	27分
	岩洞型（小断面）	合計（岩洞型：小断面）	21分
	岩洞型（大断面）	合計（岩洞型：大断面）	19分
	サイロ型	合計（サイロ型）	25分
定置作業	坑道型	合計（坑道型）	29分
	岩洞型（小断面）	合計（岩洞型：小断面）	23分
	岩洞型（大断面）	合計（岩洞型：大断面）	27分
	サイロ型	合計（サイロ型）	26分

(c) 処分量の確認

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。閉鎖部の要求性能については、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。

(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。

(3) 閉鎖の候補材料

前述した要求性能を満足させる材料として、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。

(4) 処分空洞の閉鎖

処分空洞の断面形状は図-1.1.16 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。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。

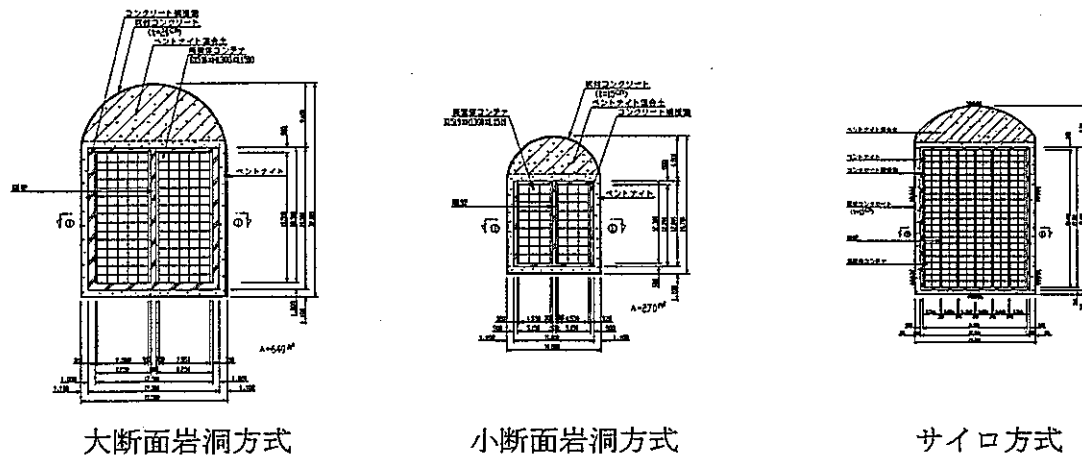


図-1.1.16 各処分空洞方式の閉鎖

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はコンクリートプラグを設置する。

(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、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。

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に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

(1) 換気システム

地下処分場の換気システムは下記各機能を満足するシステムとする。

- ・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

(2) 排水システム

地下処分場の排水システムは下記各機能を満足するシステムとする。

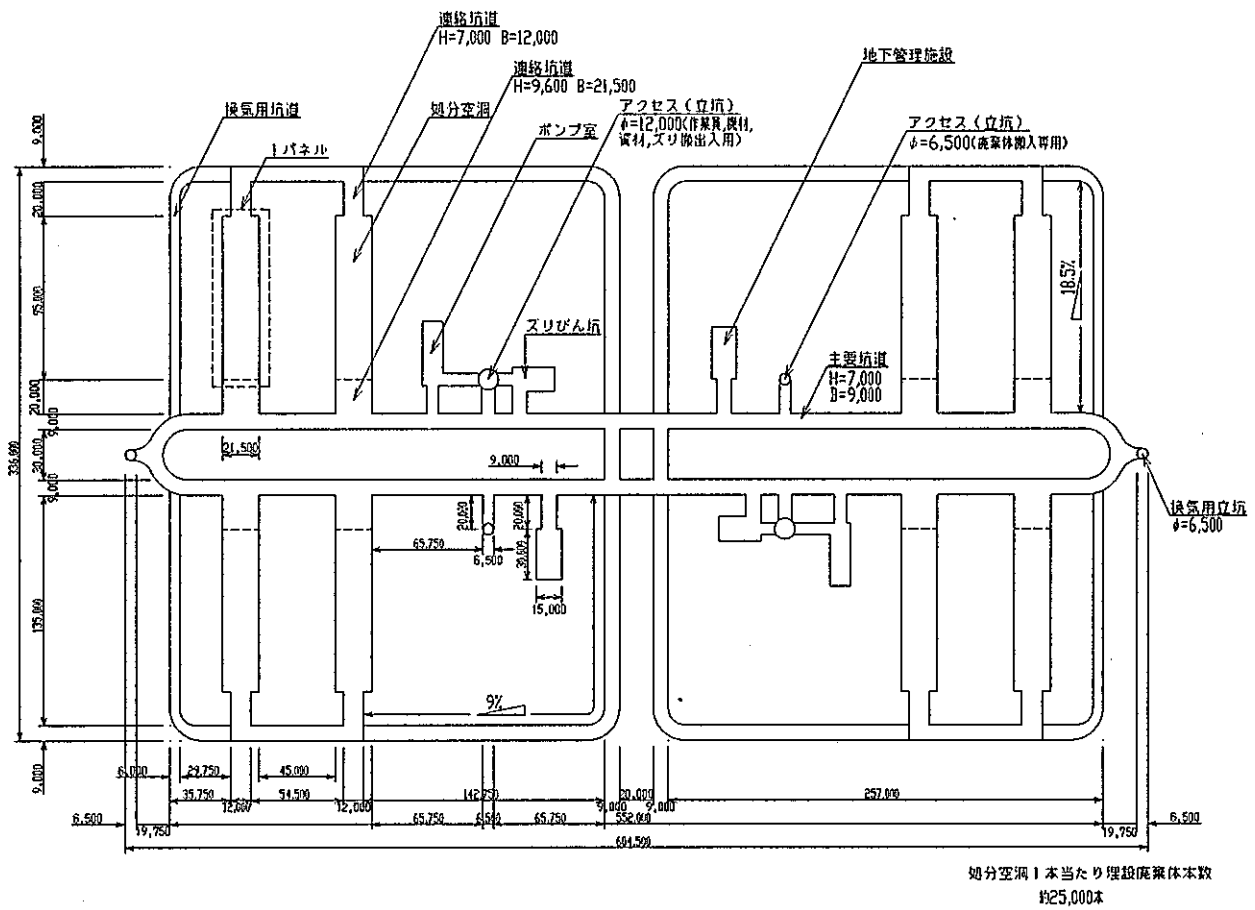
- ・地山湧水の排水
- ・削孔や吹付コンクリート施工等工事に伴う水の排水
- ・その他雑水の排水

また、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止水対策（閉鎖完了まで担保されるもの）を基本とする。

1.1.4 全体レイアウト

各処分空洞方式の全体レイアウト図を図-1.1.17～1.1.20に示す。また図-1.1.21にレイアウト比較図を示す。

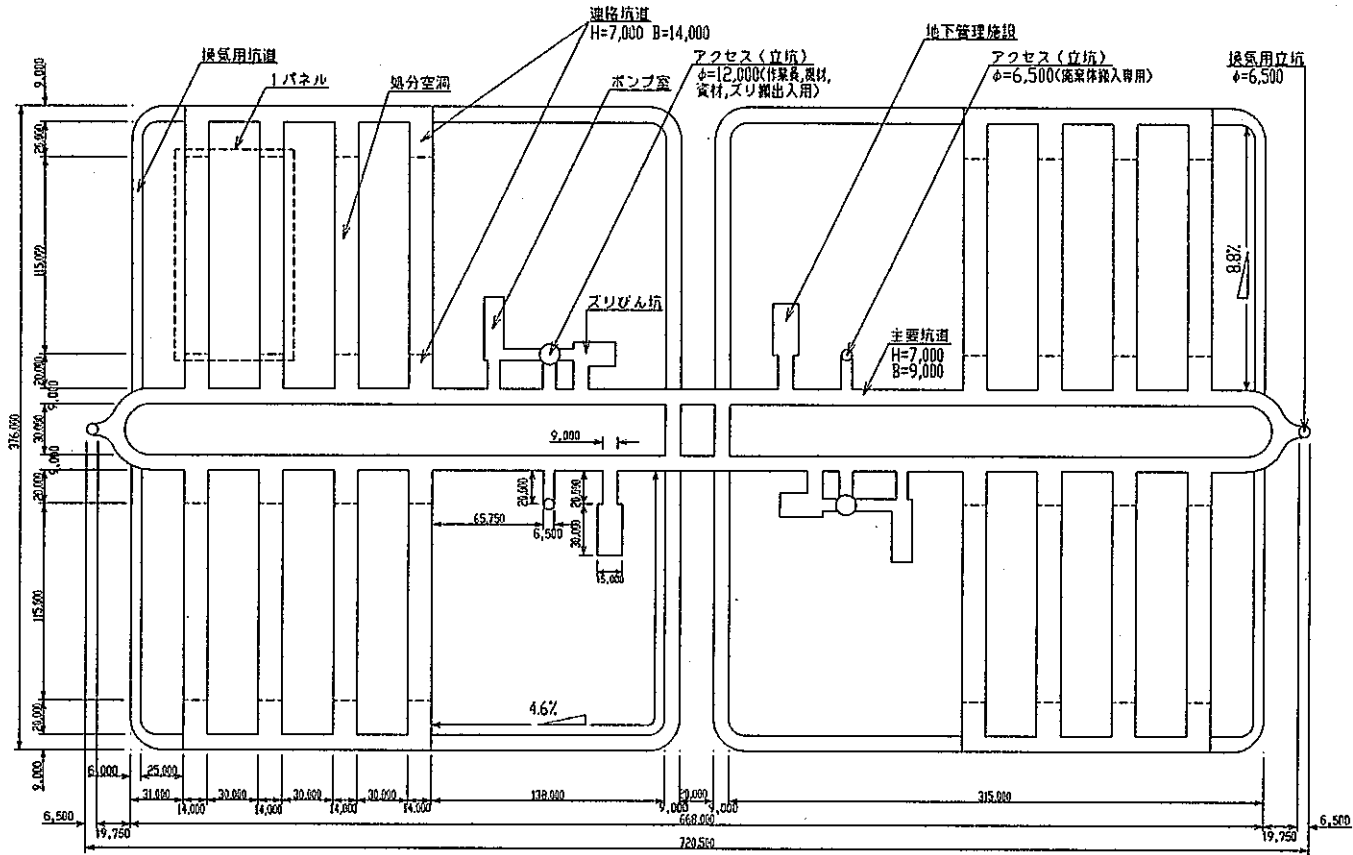
大断面岩洞方式 レイアウト図



1.1.27

図-1.1.17 大断面岩洞方式 レイアウト図

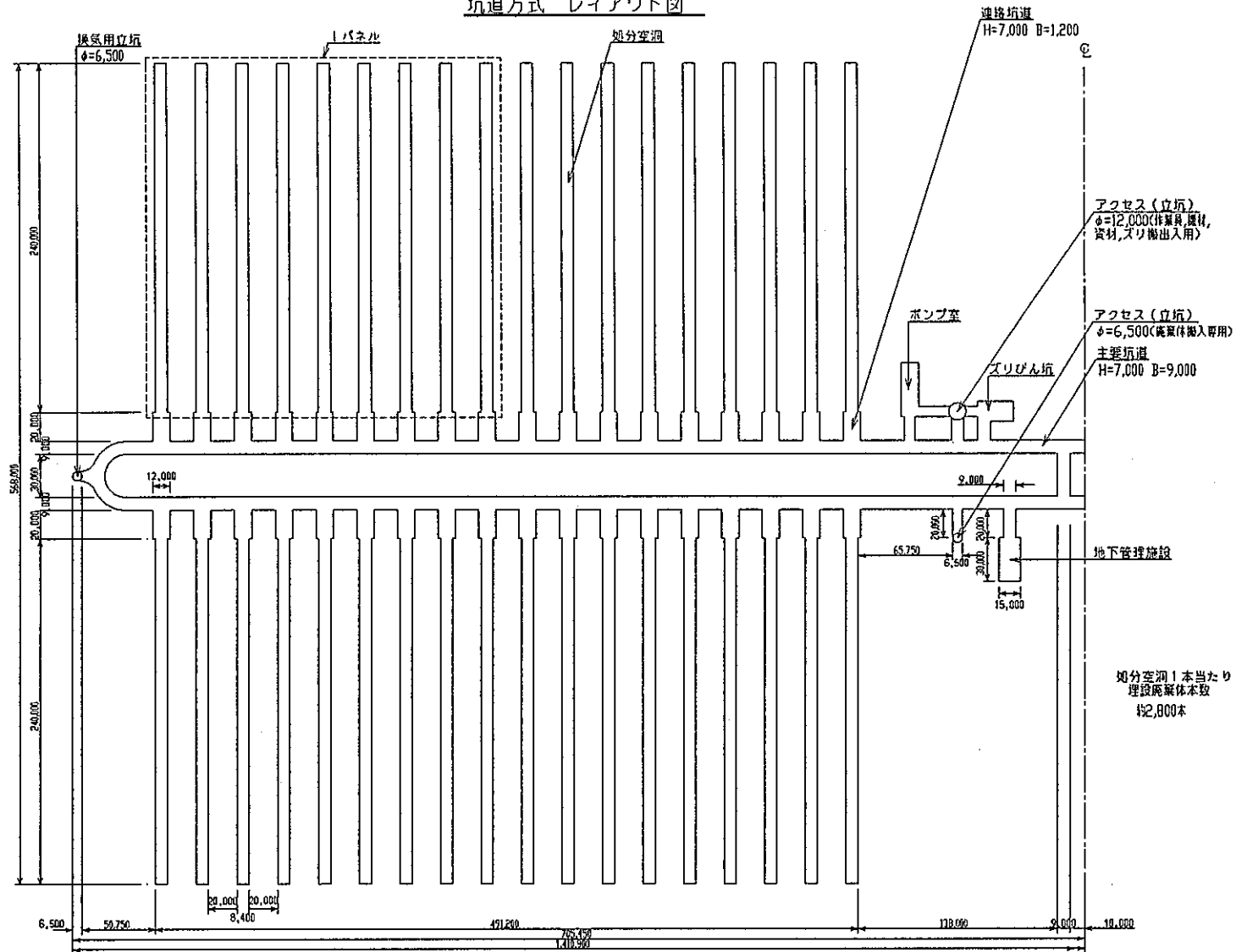
小断面岩洞方式 レイアウト図



処分空洞 1本当たり埋設廃棄体本数 約12,500本

図-1.1.18 小断面岩洞方式 レイアウト図

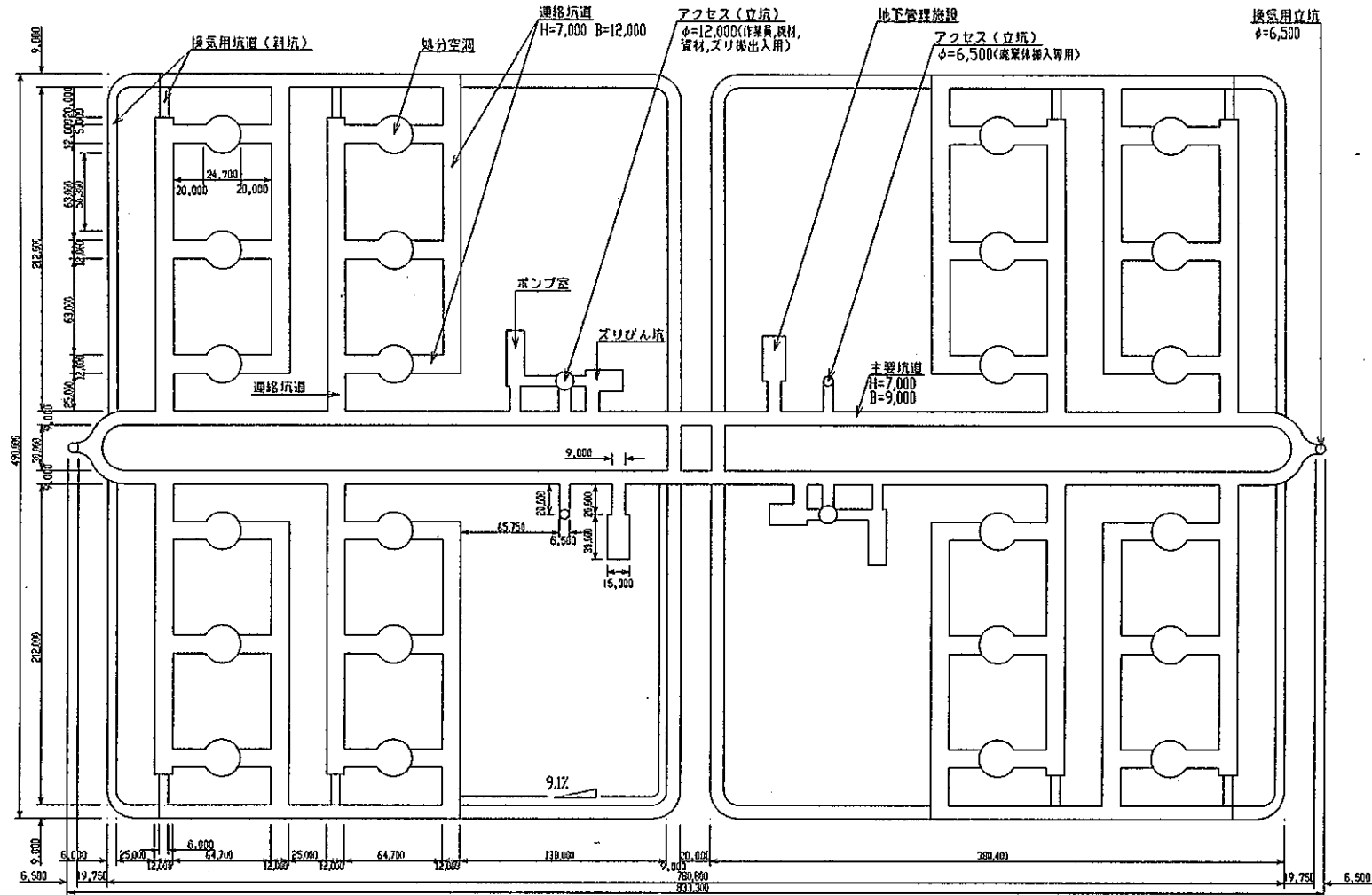
坑道方式 レイアウト図



1.1-29

図-1.1.19 坑道方式 レイアウト図

サイロ方式 レイアウト図

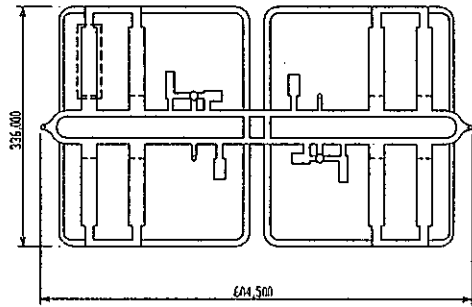


処分空室 1 基当たり埋設廃棄体本数
約8,300本

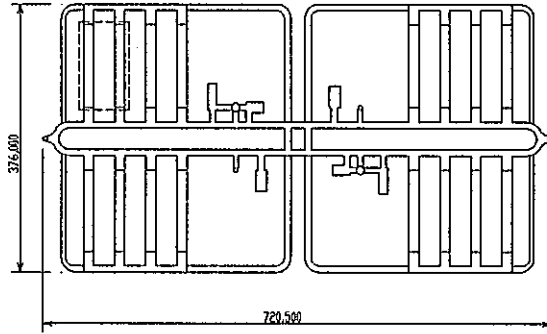
図-1.1.20 サイロ方式 レイアウト図

レイアウト比較図

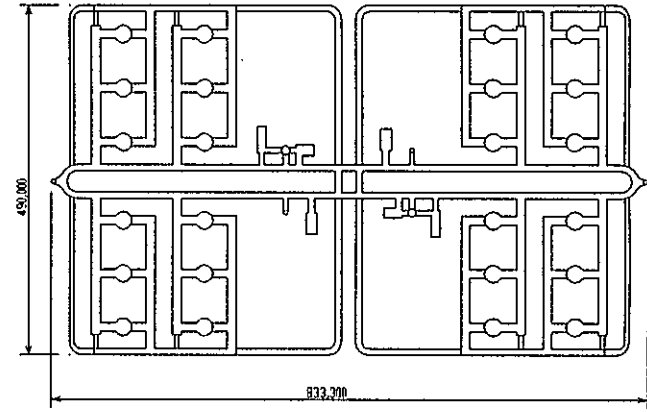
大断面岩洞方式



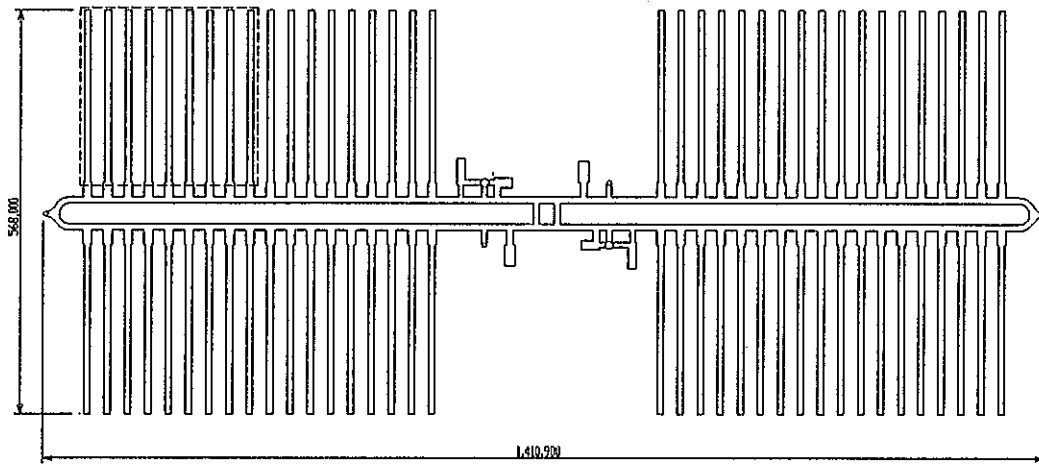
小断面岩洞方式



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	496,800	1,840	271,000
坑道方式	1,244,000	17,280	801,400
サイロ方式	448,500	(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-1.1.21 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。

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。

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（ベントナイト、ベントナイト混合土、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-1.2.1に示す。

1.2.1.2 各事象の相関

表-1.2.1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（ベントナイト、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

掘削における事象相関関係をフローにして図-1.2.1に示す。

(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。

表-1.2.1 力学的・水理学的観点からの事象

STEP		事 象	
		第 一 次	第 二 次 以 降
建設	掘削	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤応力の変化 地下水の低下 	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> ベントナイトの設置 コンクリートピットの設置 	
操業	廃棄体の定置	<ul style="list-style-type: none"> 底部ベントナイトの変形 廃棄体の発熱 	<ul style="list-style-type: none"> 底部ベントナイトの変形 コンクリートピットの沈下・傾斜 人工バリア（ベ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 ベントナイトの熱変質
	閉鎖	<ul style="list-style-type: none"> グラウト プラグの設置 埋戻し 	
	閉鎖後	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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 ベントナイトの変形 ベ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 ベントナイトの膨潤・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（ベントナイト）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 ベントナイトの流出 人工バリアの変形 ベントナイトの隔離性能の低下 ベ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 ベントナイトのCa化 ベ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

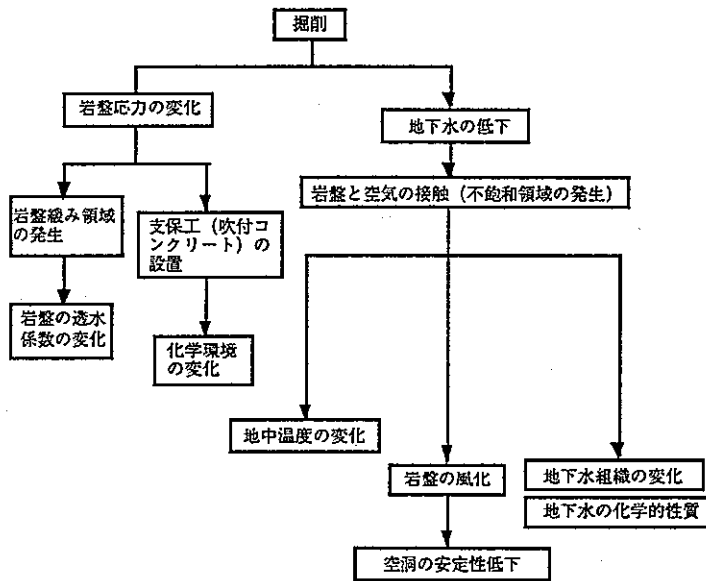


図-1.2.1 掘削による事象相関フロー図

(2) 作業時

作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、作業時のシナリオ検討は廃棄体定置における力学的・水理学的な事象について実施する。

掘削における事象相関関係をフローにして図-1.2.2に示す。

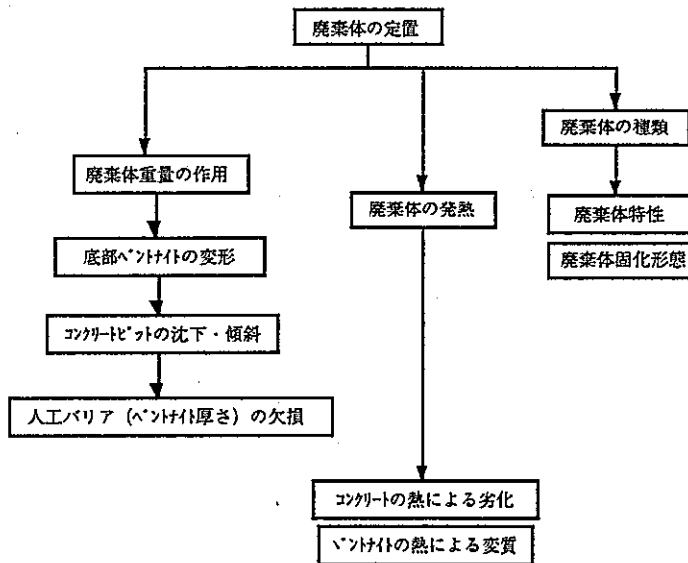


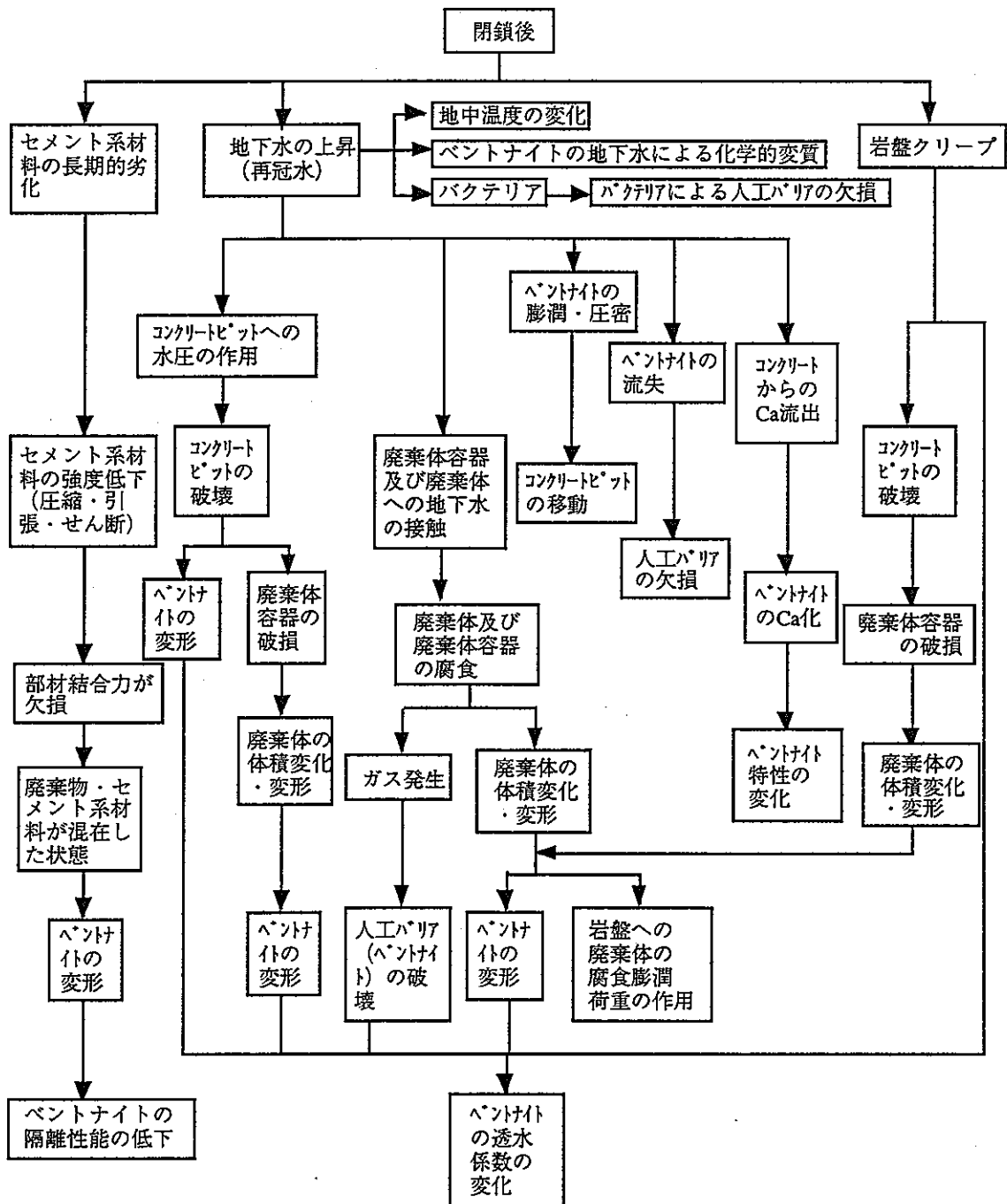
図-1.2.2 廃棄体定置による事象相関フロー図

(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。



1.3 力学挙動評価モデルに基づく解析

1.3.1 熱解析

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、ベントナイト内面での最高温度は大断面岩洞方式で250℃、小断面岩洞方式で150℃、坑道方式で50℃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ベ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、ベントナイトの乾燥密度は1.8tf/m³から1.3～1.7tf/m³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 ベントナイトの圧密解析

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影響が懸念されるため、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。

1.3.3.1 解析条件

(1) 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V1（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 ρ_s	(tf/m ³)	2.0
弾性係数 E	(Mpa)	70
ポアソン比 ν	(-)	0.4
透水係数 k	(m/s)	1.0×10^{-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
ダイレイタンスー係数 D^{*1}	(-)	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 γ_w	(tf/m ³)	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、動力炉・核燃料開発事業団が実施した三軸圧密試験結果より設定した。

(2) 解析モデル

解析は、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。

(3) 解析ケース

側部ベントナイトの影響を考察するため、弾塑性一次元解析（ケース 1）と弾塑性二次元解析（ケース 2）の 2 ケースで解析を行った。

(4) 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。ケース 1（一次元解析）の場合は上下面は排水とし、側面は非排水とする。一方、ケース 2（二次元解析）の場合は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、下面は全て排水とし、対称軸は非排水、反対の側面は排水とする。

(5) 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いない。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。

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。

なお、各要素の鉛直先行圧密応力には、乾燥密度 1.8g/cm^3 のクニゲル V1 に対し試験より得られている膨潤圧（ $P=6.0\text{MPa}$ ）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。

(6) 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。

1.3.3.2 解析結果

解析結果を以下に示す。表-1.3.2 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-1.3.1 にケース 2 の圧密終了時の変位図を、図-1.3.2 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-1.3.2 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-1.3.2 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。

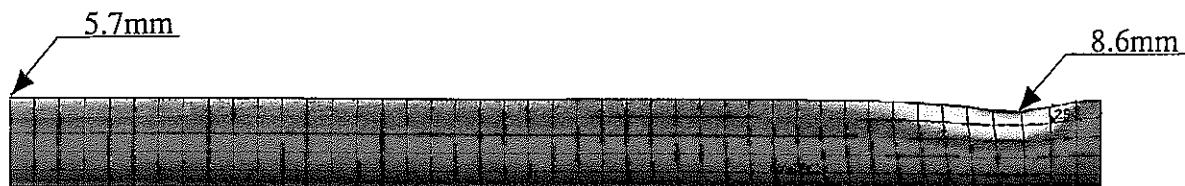


図-1.3.1 ケース2の圧密終了時における変位図

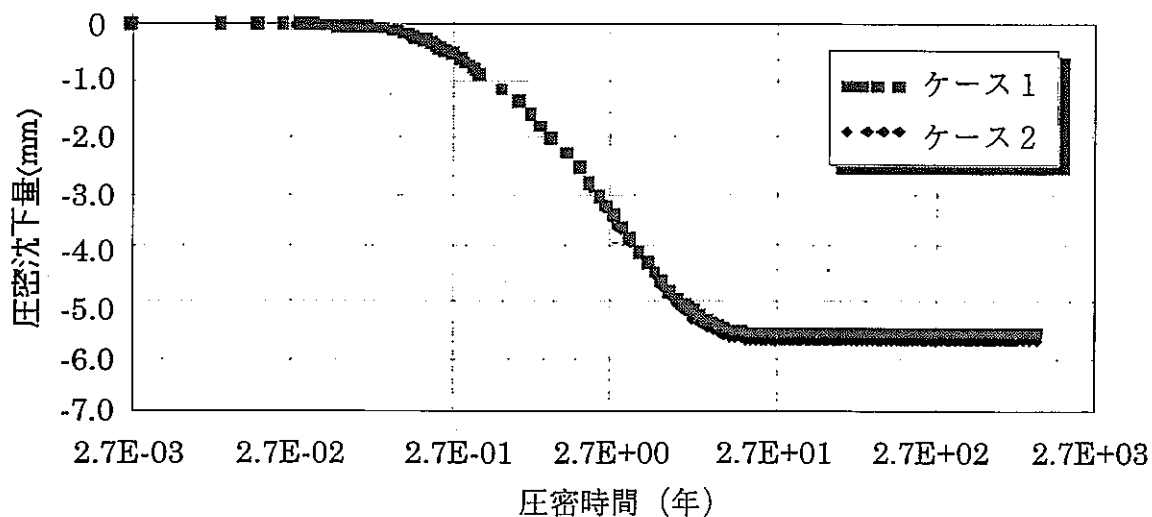


図-1.3.2 圧密時間と圧密沈下量の関係

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℃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℃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℃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、体積減少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っ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) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 日本機械学会：伝熱工学資料：改訂第4版，pp.322，1986年

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。

今回、処理後のベントナイト中に含まれる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。

2.3 試験条件

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

表-2.3.1 Ca化ベントナイトの配合条件と試験項目

	乾燥密度 $\rho_d(t/m^3)$	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

表-2.3.2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-2.3.2 ケイ砂とCa化ベントナイトの試験条件

	砂配合率 (%)	ベントナイト 配合率 (%)	初期含水比 w (%)	乾燥密度 $\rho_d(t/m^3)$	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 試験結果

2.4.1 Ca化ベントナイト

2.4.1.1 膨潤圧

図-2.4.1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）¹⁾およびクニゲルV1の試験結果（平成4年度）²⁾も記す。

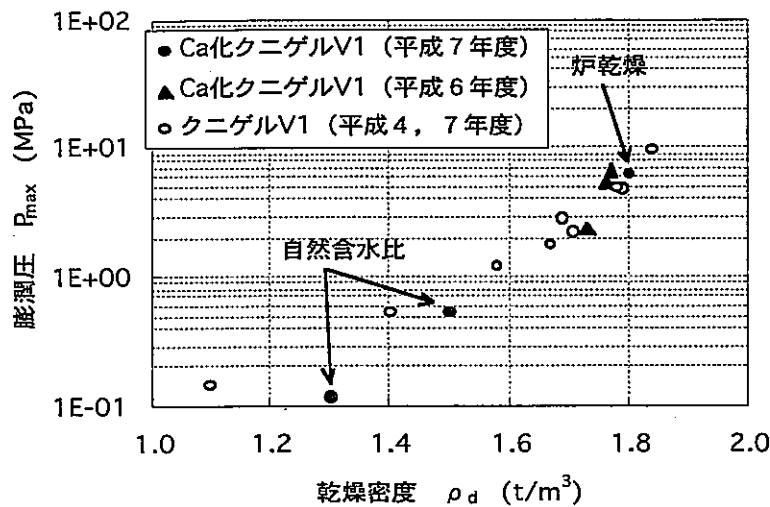


図-2.4.1 膨潤圧と乾燥密度の関係

この図から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、 1.5t/m^3 で0.5MPa、 1.3t/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おり、既往のクニゲルV1の試験値と同等の値となっている。

2.4.1.2 透水係数

図-2.4.2に透水係数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)¹⁾およびクニゲルV1の試験結果(平成4年度)²⁾も記す。

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)³⁾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、ベ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。

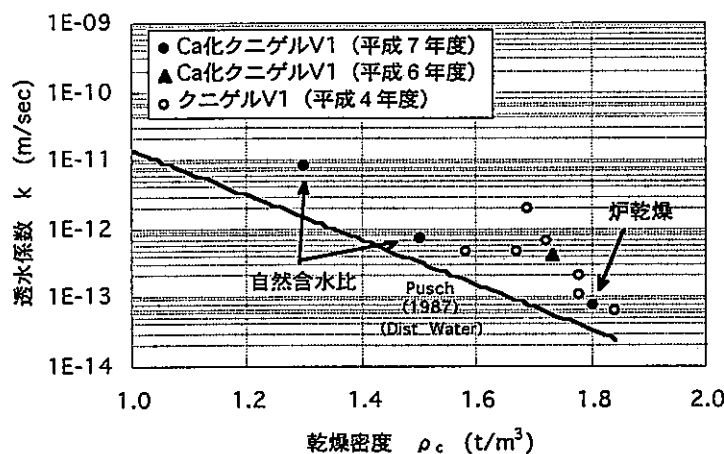


図-2.4.2 透水係数と乾燥密度の関係

2.4.1.3 一軸圧縮強さ

図-2.4.3に一軸圧縮強さ q_u と乾燥密度 ρ_d の関係を示す。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。

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、 $\rho_d < 1.57 \sim 1.59 \text{ t/m}^3$ で、2.57~4.00MPaの値となった。同じ ρ_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。

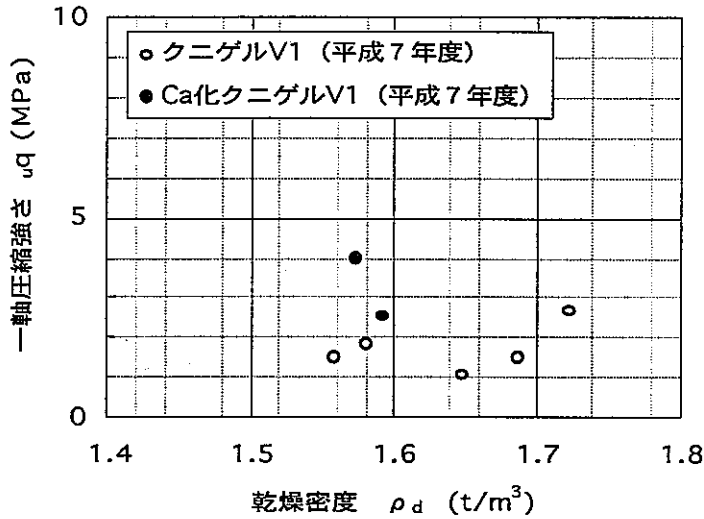


図-2.4.3 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

2.4.2 ケイ砂とCa化クニゲルV1の混合材料

2.4.2.1 膨潤圧

図-2.4.4に膨潤圧と経過時間の関係を示す。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）⁴⁾も記す。

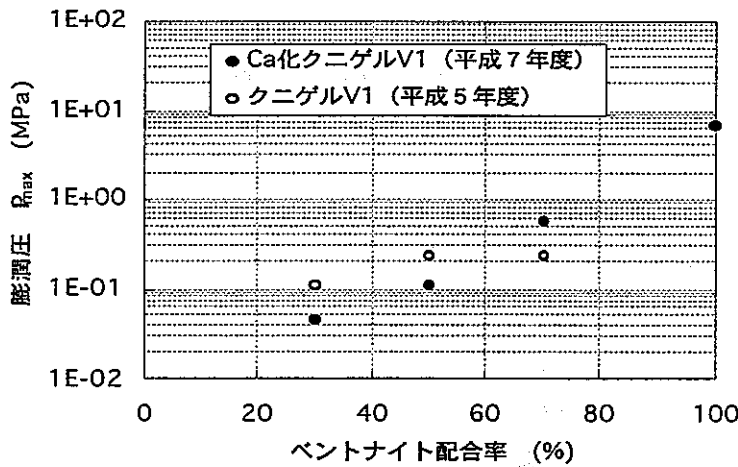


図-2.4.4 膨潤圧とベントナイト配合率の関係

この図からケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料の膨潤圧は、乾燥密度を 1.70 t/m^3 と一定にした結果、ベントナイト配合率70%で0.58MPa、50%で0.11MPa、30%で0.04MPa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。

2.4.2.2 透水係数

図-2.4.5に透水係数とベントナイト配合率の関係を示す。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）⁴⁾も記す。

この図から、ケイ砂とCa化クニゲルV1の混合材料の透水係数とベントナイト配合率の関係について、 $\rho_d=1.7t/m^3$ と一定とした場合、透水係数はベントナイト配合率30%で $5.2 \times 10^{-9}m/sec$ 、50%で $1.2 \times 10^{-11}m/sec$ 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。

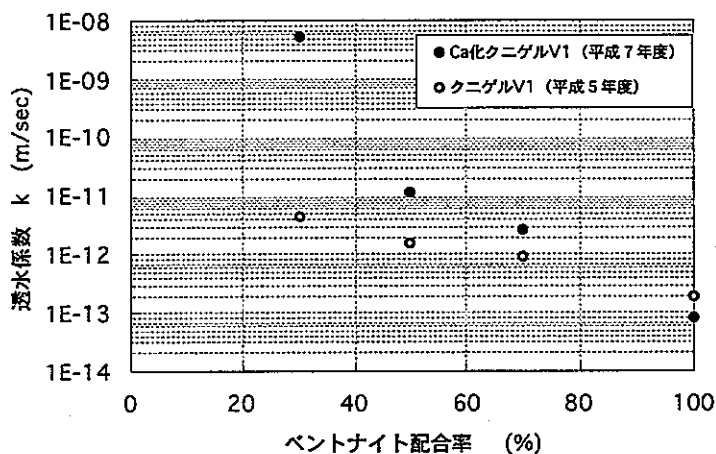


図-2.4.5 透水係数とベントナイト配合率の関係

2.4.2.3 一軸圧縮強さ

図-2.4.6に一軸圧縮強さと乾燥密度の関係を示す。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。

この図からケイ砂と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 $1.60 \sim 1.68t/m^3$ 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。

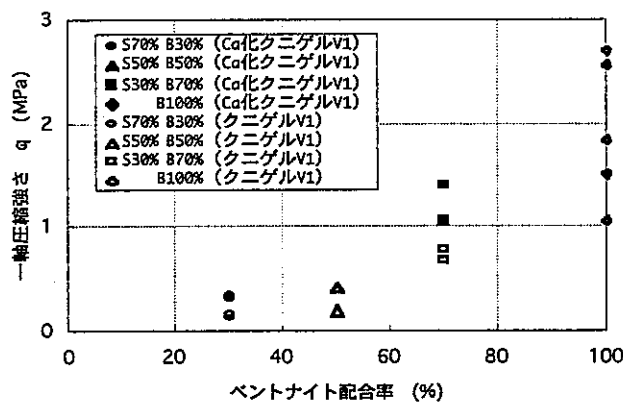


図-2.4.6 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

2.5 まとめと今後の課題

2.5.1. Ca化ベントナイト

膨潤圧，透水係数，一軸圧縮強度は，Ca化ベントナイト，Na型ベ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。

2.5.2 ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料

ケイ砂とCa化ベントナイトの膨潤圧，透水係数，一軸圧縮強さについて，ベ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化ベントナイトの混合材料の透水係数は，ベントナイト配合率の減少に伴って，Na型ベ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)鹿島建設株式会社：TRU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.
- 2)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.
- 3)Pusch,R.:Models of water and gas flow through smectite clay,SKBF/KBS Technical report 87-10,1987.
- 4)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

3.1.1 対象施設

本検討におけるコスト試算の対象施設・設備を表-3.1.1に示す。

表-3.1.1 対象施設一覧

施設 / 設 備 名	地質環境調査研究施設	
	地上施設	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	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	

3.1.2 コスト試算範囲

コスト試算は地上施設の建設、地下施設の建設・閉鎖、工事用設備全般の建設及び操業を対象とする。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。

3.1.3 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：250,000m³(地上2階、地下1階)、建設単価：300,000円/m³を想定する。

また管理建屋は、床面積：3,000m²(地上2階)、建設単価：1,000,000円/m²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

- ・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」¹⁾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²⁾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

- ・ 工程計画は 20 万本を 20 年間で処分することを基本とした。
- ・ 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、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。
- ・ 掘削残土はアクセス坑口より 1 km 離れた地点まで運搬し、処分する。
- ・ 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、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。

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%

3.2 コスト試算

3.2.1 検討ケース

検討ケースは、岩盤特性、埋設深度及び空洞規模の組み合わせの内、処分システムが成立するものとする。

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。

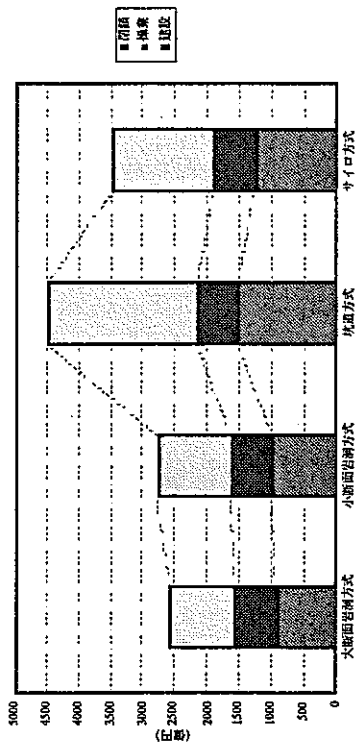
・ 地上受入施設及び搬出検査施設	750 億円
・ 管理施設	30 億円
合計	780 億円

3.2.2.2 地下施設

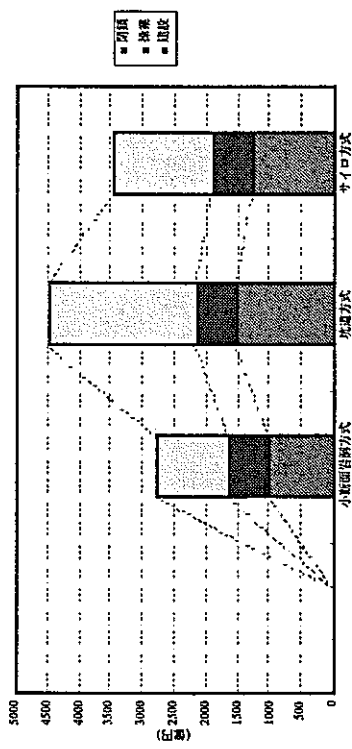
表-3.2.2 に地下施設の建設、操業、閉鎖に関するコスト試算結果を示す。また図-3.2.1 ~3.2.4 に岩種・深度別のコスト試算結果を示す。例えば、図-3.2.1 によれば、結晶質岩系岩盤 A（深度 300m）では、建設、操業、閉鎖の総費用は

大断面岩洞方式	2,589 億円
小断面岩洞方式	2,787 億円
坑道方式	4,497 億円
サイロ方式	3,466 億円

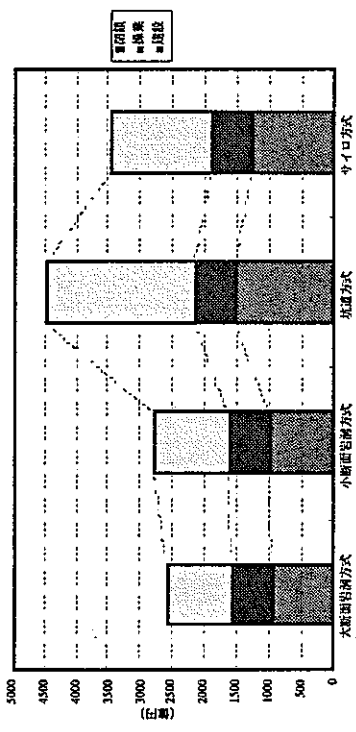
となっている。大断面岩洞方式、小断面岩洞方式、サイロ方式、坑道方式の順に経済的である。また、閉鎖費用が全体費用の中で相当分を占めている。このような傾向はその他の岩種でも同様であると言える。



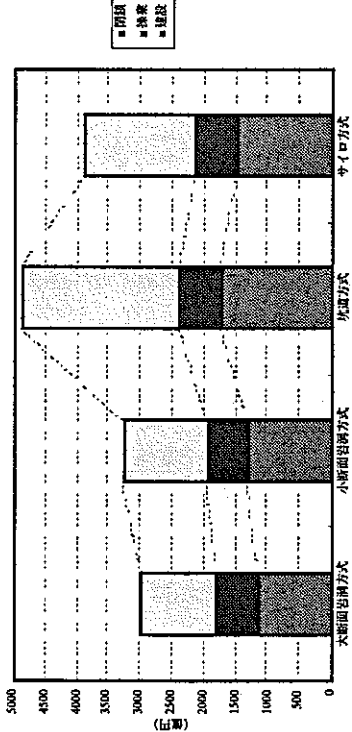
(結晶質岩系岩盤 B、300m)



(堆積岩系岩盤 A、300m)



(結晶質岩系岩盤 A、700m)



(堆積岩系岩盤 A、700m)

図一3.2.1 コスト試算結果

3.2.3 コスト試算の結果

3.2.3.1 建設段階

図-3.2.2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。

各方式とも直接工事費として掘削費用、及び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。

廃棄物処分に必要な処分空洞容積は図-1.1.88より

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

となり、サイロ方式が一番効率的であると言える。しかし、図-3.2.2によればコスト試算上では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。これは掘削単価の相違は別として、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。

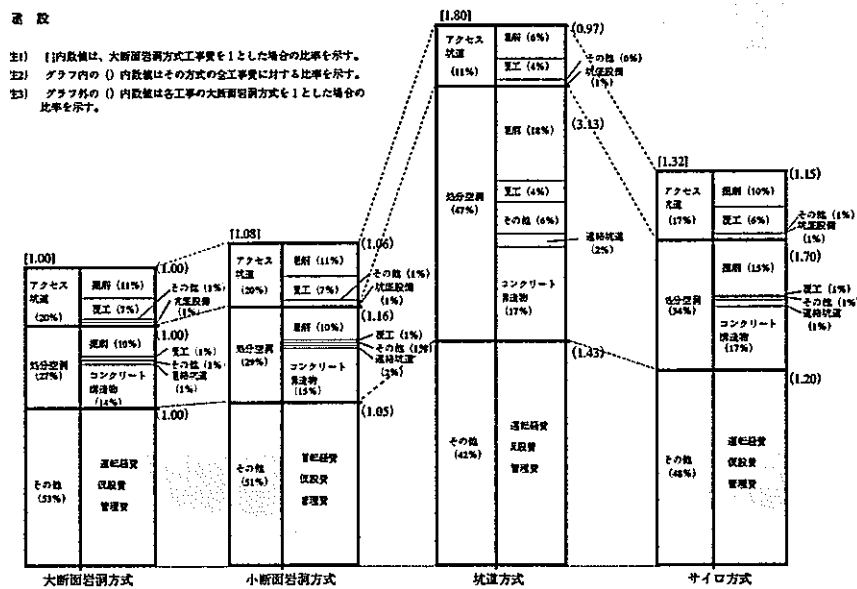


図-3.2.2 工事費内訳比較 建設の場合 (A 300m)

3.2.3.2 閉鎖段階

図-3.2.3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。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-3.2.4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。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見え、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。

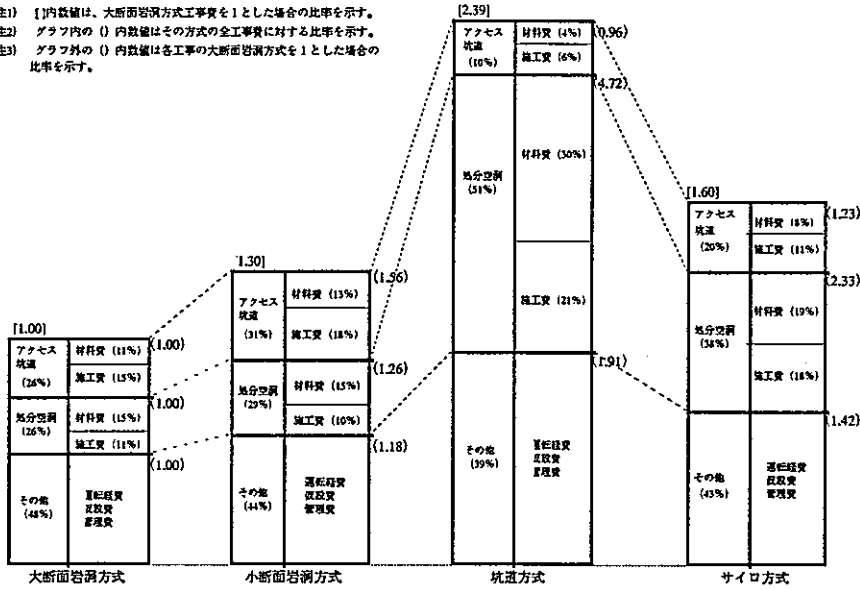


図-3.2.3 工事費内訳比較 閉鎖の場合 (A 300m)

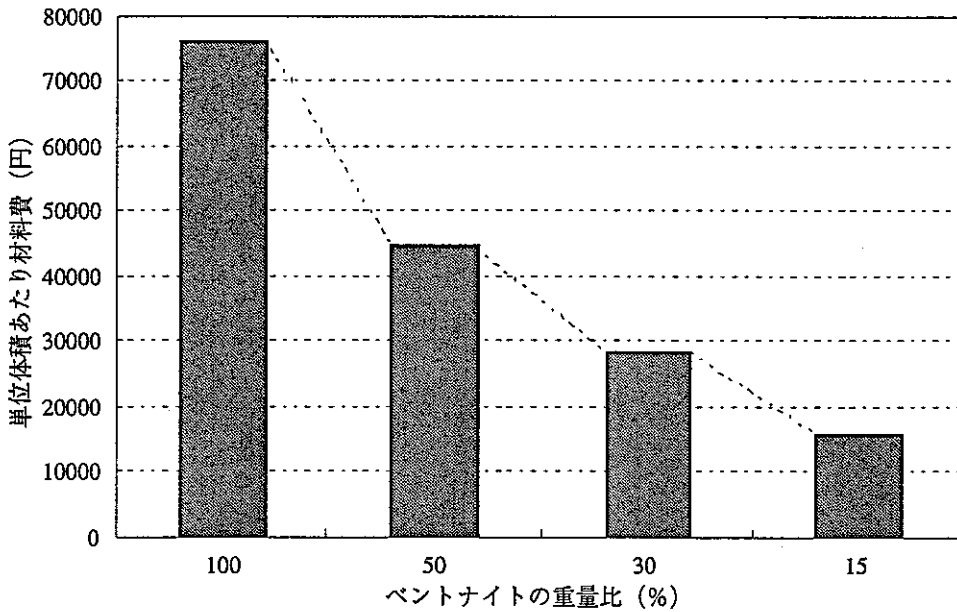


図-3.2.4 ベントナイト混合比率の違いによる単価の相違

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