

TRU廃棄物の処分概念の検討 (Ⅲ)

(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
ⓧ	J1100 98-007	1998.5.1.
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		

1998年2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。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ください。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合せは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

TRU廃棄物の処分概念の検討（Ⅲ）

（動力炉・核燃料開発事業団 研究内容報告書）

概 要

1998年2月

鹿島建設株式会社

TRU 廃棄物処分概念の検討 (Ⅲ)

深沢 栄造* 田中 益弘* 山本 博之* 平 和男*
山本 正明** 奥津 一夫** 羽根 幸司** 青柳 孝義**
森川 誠司***
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。また TRU 廃棄物は、半減期が十万年以上の核種を含有するため、長期間にわたりこれを人間環境から隔離することが要求される。

本研究では処分システムの長期健全性に係わる重要事象の検討と、大空洞処分技術の開発、及び設計研究を実施した。本年度の研究成果を以下に示す。

- 1)平成 7 年度及び 8 年度に抽出・検討した事象について、漏れがないことを他研究の成果を踏まえて再検討した上で事象を整理した。また抽出された各事象に対する現状の知見、設計の考え方、課題・対応を整理し、今後の検討の方向性を明確にすることができた。
- 2)人工バリア材の体積変化に対するシステム健全性評価の一環として、人工バリア材のうち、ベントナイトの周辺に空隙が発生したことを想定し、飽和ベントナイトの自己シール状況の把握と止水機能の確認及び体積変化後の密度分布変化を調べた。また、自己シール性確認実験を補完することを目的に飽和ベントナイト試料に対する膨潤試験を行った。これらの結果を基に、人工バリア材の体積変化に対するシステム健全性の評価を行った。
- 3)処分システム閉鎖直後の状態を想定し、不飽和状態における底部ベントナイト層の変形挙動ならびに支持力評価を行った。また、平成 7 年度に実施した飽和状態における変形挙動に関しても再検討を行った。
- 4)平成 8 年度の委託研究で調査した「大久保モデル」を用いて試解析を実施し、大空洞の処分システム成立性を見通しを検討した。
- 5)ナトリウム型ベントナイト単体、カルシウム型に変質させたベントナイト単体、天然のカルシウム型ベントナイト単体およびカルシウム型に変質させたベントナイトにケイ砂を混合した材料に対し、飽和水酸化カルシウム水溶液を通水させた系で膨潤圧、

透水係数を試験により取得した。

6)これまで処分システム設計で考慮しているいくつかの処分方式に対し、数値解析法により空洞の安定性を評価した。解析結果より得られる変形、緩み領域を用いて構造的安定性の評価を行うことができた。

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：090D0268

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 処分システム解析室長 石黒 勝彦

* 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） 情報システム部

**** 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

E.Fukazawa*,M.Tanaka*,H.Yamamoto*,K.Taira*
M.Yamamoto**,K.Okutu**,K.Hane**,T.Aoyagi**
S.Morikawa***
M.Furuichi****

Abstract

It is reasonable to dispose of transuranic (TRU) waste in a large hollow excavated in a deep geologic formation because TRU waste is generated with less heat release, though in greater amounts, compared with high-level radioactive waste (HLW). On the other hand, TRU waste should be isolated from the human habitat for a long period of time as it contains radionuclides with half-lives greater than 100 thousand years.

This study is concerned with the examination of critical events related to the long-term stability of waste isolation system, development of large-hollow isolation techniques and design considerations. The present authors obtained the following results this fiscal year:

1) All the events that had been selected and examined in fiscal 1995 and 1996 were reviewed with consideration for the results of other researches. After confirming that nothing had been missed, all the events were reorganized. In addition, the present insights into each event were summarized, together with design concepts related to each event, remaining issues and steps to be taken. In so doing, the present authors identified the future direction of research;

2) As a means to evaluate the stability of waste isolation system against the volumetric changes of engineered barrier materials, it was assumed that bentonite, having been selected among other engineered barrier materials, developed pores in its perimeters. The saturated bentonite's self-sealing performance was then examined, as well as its water-sealing function and

density distributions after volumetric changes. A swelling test was also performed on the samples of saturated bentonite to supplement the self-sealing performance test. Based on the results obtained through these tests, the present authors evaluated the stability of the isolation system against the volumetric changes of engineered barrier materials;

3) Assuming the immediate post-closure period, the deformation behavior and load-bearing capacity of the bottom bentonite layer under the undersaturated condition were evaluated. The present authors also reviewed a research carried out in fiscal 1995 which was concerned with the deformation behavior of the bottom bentonite layer under the saturated condition;

4) A tentative analysis was performed adopting the Okubo Model which was found to be most viable in a research carried out under commission in fiscal 1995. In so doing, the outlook for the feasibility of the large-hollow isolation system was examined;

5) A series of tests were carried out to measure the swelling pressures and permeability coefficients of Na-bentonite, Ca-bentonite artificially altered from Na-bentonite (Ca-converted-bentonite simple substance), natural Ca-bentonite, and a mixture of silica sand and Ca-converted bentonite, by subjecting them to the saturated calcium hydroxide solution; and

6) For the evaluation of hollow stability, numerical analyses were carried out on a number of isolation techniques that had been adopted in the design of existing isolation systems. The present authors managed to evaluate the structural stability of hollow, using the deformations and loosened regions obtained through the analyses.

Work performed by KAJIMA Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

Contract No.090D0268

PNC Liaison: Isolation System Analysis Section, Waste Technology Development Division, Tokai Works, Katsuhiko Ishiguro

* :KAJIMA Technical Research Institute

** :KAJIMA Corporation, Civil Engineering Design Dept.

*** :KAJIMA Corporation, Information Processing Center

**** : KAJIMA Corporation, Nuclear Power Dept.

はじめに

本研究の目的は、平成7年度及び平成8年度に検討した TRU 廃棄物の処分概念を、今世紀末の取りまとめ報告書作成を念頭に、より一層充実させることである。

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. 処分システムの長期健全性に係わる重要事象の再検討

平成7年度及び8年度に抽出、検討した重要事象について、漏れがないことを他研究の成果を踏まえて再検討し、最終版を作成する。処分システムの長期健全性に係わる重要事象を評価するための知見を整理し、今後必要となる試験や解析について提案する。

2. 人工バリア材の体積変化に対するシステム健全性評価

人工バリア材の体積変化に対するシステム健全性評価の一環として、人工バリア材料のうちベントナイトの周辺に空隙が発生したことを想定し、飽和ベントナイトの自己シール状況の把握と止水機能の確認及び体積変化後の密度分布変化を調べる。また、自己シール性確認実験を補完することを目的に飽和ベントナイト試料に対する膨潤試験を行う。

以上の結果を基に、人工バリア材の体積変化に対するシステム健全性の評価を行う。

3. 人工バリアの力学的健全性評価

処分システム閉鎖直後の状態を想定し、不飽和状態における底部ベントナイト層の変形挙動並びに支持力評価を行う。また、平成7年度に実施した飽和状態における変形挙動に関しても再検討を行う。

4. 大空洞長期挙動の予備検討

平成8年度に引き続き長期的な岩盤挙動を評価する解析モデル及び解析モデルに必要なデータを調査する。その上で、平成8年度の委託研究成果報告書において概要を説明した「大久保モデル」を用いて試解析を実施する。これより、大空洞の処分システム成立性を見通しを立てる。

5. 人工バリア材の力学特性データの取得

ナトリウム型ベントナイト単体、カルシウム型に変質させたベントナイト単体、天然のカルシウム型ベントナイト単体およびカルシウム型に変質させたベ

ントナイトにケイ砂を混合した材料に対し、飽和水酸化カルシウム水溶液を通水させた系で膨潤圧，透水係数を試験により取得する。

6. 数値解析法による空洞安定解析

これまで処分システム設計で考慮しているいくつかの処分方式に対し、数値解析法により空洞の安定性を評価する。解析にあたっては、これまでと同様に岩体のみで評価を行う。解析としては、有限要素解析法を実施し、解析結果より得られる変形，緩み領域を用いて構造的安定性の評価を行う。

目 次

	PAGE
第1章 処分システムの長期健全性に係わる重要事象の検討	1.1-1
1.1 処分システムの長期健全性に係わる重要事象の再検討	1.1-1
1.1.1 目的	1.1-1
1.1.2 基本方針	1.1-1
1.1.3 「事象発生の起因」の抽出方法	1.1-4
1.1.4 処分場に発生する可能性のある事象と評価	1.1-6
1.1.5 抽出課題	1.1-12
1.2 人工バリア材の体積変化に対するシステム健全性評価	1.2-1
1.2.1 目的	1.2-1
1.2.2 実験結果	1.2-2
1.2.3 まとめと今後の課題	1.2-12
1.3 人工バリアの力学的健全性評価	1.3-1
1.3.1 目的	1.3-1
1.3.2 検討方法	1.3-3
1.3.3 検討結果	1.3-4
1.3.4 考察	1.3-5
1.3.5 今後の課題	1.3-6
1.4 大空洞長期挙動の予備検討	1.4-1
1.4.1 目的	1.4-1
1.4.2 モデルの設定	1.4-1
1.4.3 パラメータの設定	1.4-1
1.4.4 対象とする施設の形状	1.4-2
1.4.5 地圧の設定	1.4-3
1.4.6 結果の整理	1.4-3
1.4.7 考察	1.4-8
1.4.8 今後の課題	1.4-9
参考文献	1.4-9
1.5 人工バリア材料の力学特性データの取得	1.5-1
1.5.1 目的	1.5-1

1.5.2	使用材料	1.5-1
1.5.3	試験条件	1.5-1
1.5.4	試験方法	1.5-2
1.5.5	試験結果	1.5-2
1.5.6	まとめと今後の課題	1.5-8
第2章	大空洞処分技術の開発、及び処分システム設計研究	2.1-1
2.1	数値解析法による空洞安定解析	2.1-1
2.1.1	はじめに	2.1-1
2.1.2	検討条件	2.1-1
2.1.3	解析結果	2.1-3
2.1.4	まとめ	2.1-3
	参考文献	2.1-4
第3章	今後の課題	3-1

図 一 覧

第 1 章

1.2 人工バリア材の体積変化に対するシステム健全性評価

- 図-1.2.1 自己シール中の透水係数の経日変化(Na 型,空隙 30%)
- 図-1.2.2 自己シール中の透水係数の経日変化(Ca 型化,空隙 30%)
- 図-1.2.3 自己シール状況(Na 型, 空隙 30%)
- 図-1.2.4 自己シール状況(Ca 型化, 空隙 30%)
- 図-1.2.5 自己シール状況(Ca 型化, 空隙 30%)
- 図-1.2.6 自己シール実験後の乾燥密度と含水比分布(Na 型, 空隙 30%)
- 図-1.2.7 自己シール実験後の乾燥密度と含水比分布(Ca 型化, 空隙 30%)
- 図-1.2.8 空隙部の大きさと乾燥密度の関係(Na 型)
- 図-1.2.9 空隙部の大きさと含水比の関係(Na 型)
- 図-1.2.10 空隙部の大きさと乾燥密度の関係(Ca 型化)
- 図-1.2.11 空隙部の大きさと含水比の関係(Ca 型化)
- 図-1.2.12 膨潤圧発生後の膨潤量の経日変化
- 図-1.2.13 最大膨潤率と乾燥密度の関係
- 図-1.2.14 空隙率と透水係数の関係
- 図-1.2.15 空隙率と乾燥密度の関係(Na 型)
- 図-1.2.16 空隙率と乾燥密度の関係(Ca 型化)

1.4 大空洞長期挙動の検討

- 図-1.4-1 大断面岩洞方式(左)および坑道方式(右)の断面形状図
- 図-1.4-2 変位の時間変位図(硬岩, 天端部中央), $k=0.5, 1.5, 2.5$
- 図-1.4-3 変位の時間変位図(軟岩, 天端部中央), $k=0.5, 1.5, 2.5$
- 図-1.4-4 コンプライアンス比の分布図(硬岩)
- 図-1.4-5 コンプライアンス比の分布図(軟岩)

1.5 人工バリア材料の力学特性データの取得

- 図-1.5-1 膨潤圧と経過日数の関係
- 図-1.5-2 最大膨潤圧と乾燥密度の関係
- 図-1.5-3 膨潤圧と膨潤の発現時間
- 図-1.5-4 透水係数と経過日数の関係
- 図-1.5-5 透水係数と乾燥密度の関係
- 図-1.5-6 膨潤圧と経過日数の関係
- 図-1.5-7 最大膨潤圧と乾燥密度の関係
- 図-1.5-8 透水係数と経過日数の関係

図-1.5-9 透水係数と乾燥密度の関係

図-1.5-10 膨潤圧と経過日数の関係

図-1.5-11 透水係数と経過日数の関係

第2章

2.1 数値解析法による空洞安定解析

図-2.1-1 断面形状

図-2.1-2 解析用要素分割図（大断面岩洞方式、サイロ方式）

表 一 覧

第 1 章

1.1 処分システムの長期健全性に係わる重要事象の再検討

- 表-1.1-1 事象発生の起因（まとめ）
- 表-1.1-2 各部位の要求性能及び役割・構造
- 表-1.1-3 事象発生の起因の抽出結果
- 表-1.1-4 処分場に発生する可能性のある事象と評価（1/A）
- 表-1.1-5 処分場に発生する可能性のある事象と評価（2/A）
- 表-1.1-6 処分場に発生する可能性のある事象と評価（3/A）
- 表-1.1-7 処分場に発生する可能性のある事象と評価（4/A）
- 表-1.1-8 処分場に発生する可能性のある事象と評価（5/A）

1.2 人工バリア材の体積変化に対するシステム健全性評価

- 表-1.2.1 自己シール透水性
- 表-1.2.2 自己シール実験結果一覧表

1.3 人工バリアの力学的健全性評価

- 表-1.3-1 予想されるベントナイトの挙動と問題点

1.4 大空洞長期挙動の検討

- 表-1.4-1 解析用物性値
- 表-1.4-2 変位の絶対値の経時変化（硬岩）
- 表-1.4-3 変位の絶対値の経時変化（軟岩）

1.5 人工バリア材料の力学特性データの取得

- 表-1.5-1 使用材料
- 表-1.5-2 配合条件と試験数量

第 2 章

2.1 数値解析法による空洞安定解析

- 表-2.1-1 解析用物性値
- 表-2.1-2 局所安全係数による緩み領域〔岩洞方式－掘削後〕
- 表-2.1-3 変形図〔岩洞方式－掘削後〕
- 表-2.1-4 局所安全係数による緩み領域〔サイロ方式－掘削後〕
- 表-2.1-5 変形図〔サイロ方式－掘削後〕
- 表-2.1-6 掘削可能性（岩洞方式）
- 表-2.1-7 掘削可能性（サイロ方式）

第1章 処分システムの長期健全性に係る重要事象の検討

1.1 処分システムの長期健全性に係る重要事象の再検討

1.1.1 目的

平成7年度及び8年度に抽出、検討した重要事象について、漏れがないことを確認するために他研究の成果を踏まえて再検討する。また長期健全性に係る重要事象を評価するための知見を整理し、今後必要となる試験や解析についてまとめる。

1.1.2 基本方針

処分場に発生する可能性のある事象のまとめは、次の考え方に基づいて行うこととした。

(1) 基本的な考え方

処分施設の性能評価、安全評価を行うに当っては、処分施設に発生する可能性のある現象や変化を漏れなく抽出することが必要となる。この現象や変化を事象であると考え、事象は次のように定義できる。

「事象」の定義

事象とは、何かが起因して処分施設各部位に起る現象や変化で、その内、処分施設の性能や安全に関係するもの。

事象のまとめを性能評価や安全評価に資する有効なデータとするには、多数ある事象を漏れなく抽出し、簡潔に整理することが重要である。そのための一つの方法として、事象を発生させる起因を明確にし、事象を適切に分類整理することが有効である。ここでは、事象発生の起因として抽出される事項を、「処分場を構成する基本要素」が有する特性やその基本要素に生じる現象、出来事もしくは変化である考え次のように定義した。

「事象発生の起因」の定義

事象発生の起因は、処分場を構成する基本要素が有する特性とその基本要素自身が引き起こす現象や変化で、その内、他の要素に影響を与えるもの。

上述の「処分場を構成する基本要素」とは、処分施設サイトに物理的に存在するものであり、次のものがある。

①処分空洞内に設置される人工物。

②母 岩

上記の他に、物理的に存在するものとして、地下水・大気、人工物内に存在する空気・ガス・微生物、母岩内に存在する空気・ガス・微生物が考えられるが、地下水・大気等の変化は、外的要因による事項（例えば、地下水変動、断層のずれ、大気温度の変化等）に類するものであり、本検討では対象外であり考慮しないこととする。人工物や岩盤内にある空気・ガス・微生物は、もともと人工物や岩盤を構成するものと考え、基本要素として取り扱わないこととする。また、建設・操業・閉鎖の各段階では、有機物やその他の異物は残されないものとする。

処分場に発生する可能性のある事象と評価

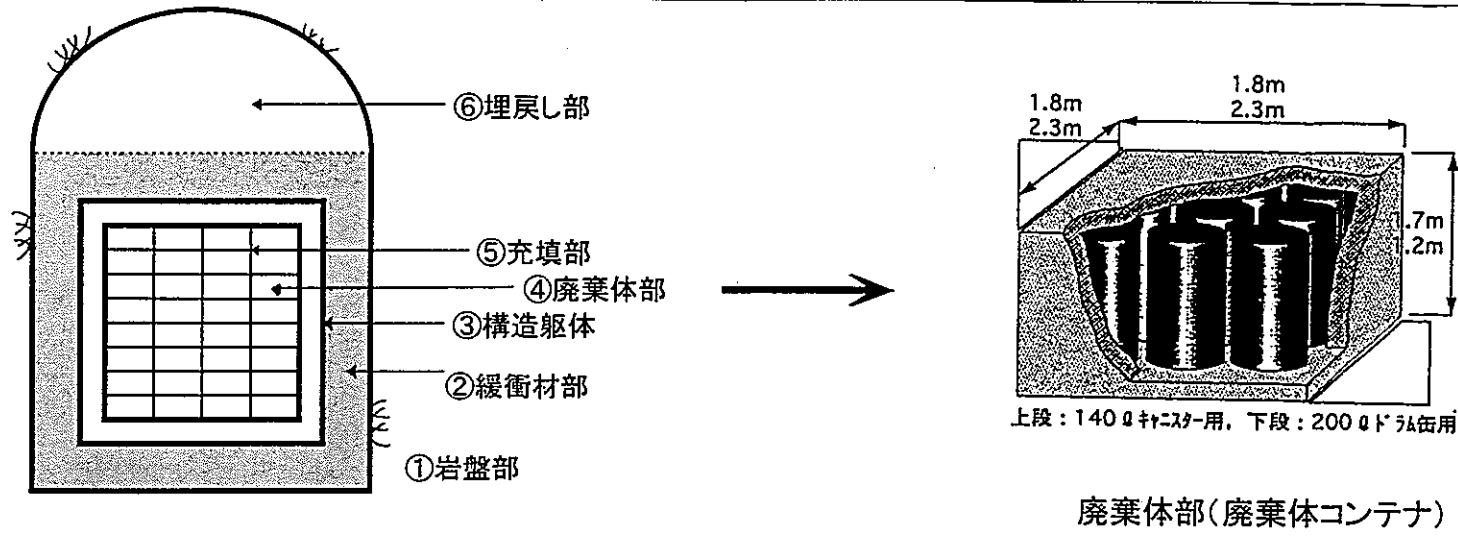
表-1.1-1に「事象発生の起因」となるものについてまとめた。また表-1.1-2にそれぞれの部位について、力学、水理学的観点からの要求性能、基本的考え方について整理し、概念構築の上で規定した各部位の役割・機能を明確にした。その上で処分場に発生する可能性のある事象と概念設計上の評価を整理した。評価覧のうち、「課題・対応」に記述があるものが重要事象であると考えられることができる。ただし、この例では事象のうち水理学的・力学的事象のみ評価しており、性能評価に関するものと思われる事象については一部意図的に空欄としている。

表-1.1-1 事象発生の起因（まとめ）

事象発生の起因	A	廃棄物の発熱
	B	廃棄物の放射線
	C	廃棄物内に存在する空隙
	D	コンクリート系材料内に存在する空隙
	E	自重の作用
	F	鋼材・金属の腐食
	G	有機物の腐食
	H	岩盤掘削
	I	止水グラウトの施工
	J	ロックボルトの施工
	K	再冠水

表-1.1-2 各部位の要求性能及び役割・構造

部位	役割・構造説明	要求機能		
		処分場閉鎖前(0~100年)	処分場閉鎖後(100年以降~)	超長期
①岩盤部	岩盤部は、岩盤自体で空洞の安定を保ち、長期的に過度のクリープ変形が生じないことを期待する。	・力学的安定性(掘削可能)を期待する。	—	・力学的安定性を期待する。 (長期的に過度のクリープ変形が生じないことを期待する。)
②緩衝材部	緩衝材部は、岩盤と構造躯体の間で地下水の侵入と核種の溶出・移行を抑制することを目的とする。長期間に渡って岩盤と構造躯体の間に存在することと所定の品質を維持する事が重要である。材料としては、ベントナイトやベントナイト混合土を考えている。	・力学的強度を期待する。	・難透水性を期待する。 ・自己シール性を期待する。 (亀裂が生じても元に戻る)	同左
③構造躯体	構造躯体は、作業時の作業性(廃棄体定置作業)向上や緩衝材の施工性向上の目的で設置し、難透水性は期待していない。	・力学的安定性を期待する。 (廃棄体を定置し、閉鎖が完了するまで強度を期待)	・再冠水後は力学的強度及び難透水性を期待しない。(例えば水圧に対しては壊れてもよい。)	同左
④廃棄体部	廃棄体部は、ドラム缶、キャニスターをRC製コンテナに収納して、作業時(廃棄体定置時)の力学的安定性の優れた構造を考えている。ドラム缶・キャニスター自重及びコンテナ自重はすべてコンテナ部材で支持する。	・力学的強度を期待する。 (ドラム缶自体には強度は期待しない。コンテナに期待)	・再冠水後は力学的強度を期待しない。	同左
⑤充填部	充填部は、構造躯体と廃棄体コンテナの間及びコンテナ内の空間を充填することにより、力学的安定性を高めると共に将来の空隙発生を抑制する。充填部の材料としては、セメント系のものと考えている。	・廃棄体部の力学的安定性を高める。	・空隙発生を抑制する。 (空間を埋める) ・力学的強度を期待しない。	同左
⑥埋戻し部	埋戻し部は、埋戻し材によって空洞部を充填する。材料としては、ベントナイト混合土や掘削ずり等を考えている。	—	・緩衝材の保護・機能維持を期待する。(空間を埋める)	同左



1.1.3 「事象発生の原因」の抽出方法

(1) 「事象発生の原因」の抽出

原因の定義に基づき、「TRU廃棄物の処分概念の検討(Ⅱ) (動力炉・核燃料開発事業団研究内容報告書)」（1997年3月：鹿島建設）に記載のFEPを概観すると、原因は次の項目に適合するものに分類することができる。

- ①人工的に処分場内に設置する材料・物質の特性およびそれ自身の変化の中で、処分場を構成する他の要素に影響を及ぼすもの。

代表例：廃棄体の発熱、空隙の存在 等

- ②処分場の自然状態・環境を変化させる人工的出来事、現象

代表例：空洞の掘削、再冠水 等

抽出した事象発生の原因(例)を表-1.1-3に示す。同表での基本要素は、同報告書で構築したTRU処分場コンセプトに基づいている。

(2) 「事象発生の原因」のまとめ

表-1.1-3では、基本要素として、処分場コンセプトに基づきすべての部品・部材を挙げ、それぞれに対して「事象発生の原因」を抽出している。その結果、本質的に同じ「事象発生の原因」が、各基本要素に重複して挙げられている。そこで、これら「事象発生の原因」を整理しまとめたものが表-1.1-1になる。

表-1.1-3 事象発生の原因の抽出結果

基本要素		起因の分類		
		①人工的に処分場内に設置する材料・物質の特性およびそれ自身の変化の中で、処分場を構成する他の要素に影響を及ぼすもの	②処分場の自然状態・環境を変化させる人工的出来事、現象	
人工物	廃棄体	廃棄物	廃棄物の発熱 廃棄物の放射線 廃棄体の重量 廃棄物内に存在する空隙 鋼材・金属の腐食 有機物の腐食	-
		廃棄物固化材(ガラス、アスファルト、セメント)	固化体内に存在する空隙 固化体の重量	-
		容器(ドラム缶、キャスター)	鋼材・金属の腐食 容器の重量	-
		コンテナ (RC製)	セメント系材料内に存在する空隙 コンテナの重量 鋼材・金属の腐食(鉄筋)	-
		コンテナ充填材 (セメント系材料)	セメント系材料内に存在する空隙 充填材の重量	-
	構築物	処分ピット (RC製)	セメント系材料内に存在する空隙 処分ピットの重量 鋼材・金属の腐食(鉄筋)	-
		緩衝材 (ベントナイト)	ベントナイトの重量	-
		鋼材(支保工、その他)	鋼材・金属の腐食	-
		吹付けコンクリート	鋼材・金属の腐食(鉄筋)	-
		グラウト材 (セメント系材料)	-	-
		ロックボルト	鋼材・金属の腐食	-
		ロックボルト定着材 (セメントモルタル)	-	-
	自然 (地質環境)	母 岩	有機物の腐食	岩盤掘削 止水グラウトの施工 ロックボルトの施工 再冠水

説明

(1) 緩衝材 (ベントナイト)、グラウト材 (セメント系材料)、ロックボルト定着材 (セメントモルタル) の欄

FEPの概観のレベルでは、特に事象発生の原因となる事項が見当たらないため「-」としている。今

後の詳細検討において起因とするものが抽出される可能性がある。

1.1.4 処分場に発生する可能性のある事象と評価

以下の表-1.1-4~1.1-8 では、表-1.1-1 に示した事象発生の起因毎に「処分場に発生する可能性のある事象」及び「評価」を各部位を構成する材料別に整理した。「処分場に発生する可能性のある事象」では、平成8年度報告書において整理した階層 FEP マトリックスにならい、6つの現象・特性に分類して整理した。また、「評価」では、「現状の知見」、「事象に対する設計の考え方」及び「課題・対応」に分けて整理した。このうち「課題・対応」欄に記述があるものは、現状において重要事象と考えることができるものである。ただし、本研究においては、土木分野に関連の深い熱、水理及び力学的事象を中心に「課題・対応」を評価しており、化学、放射線学及び物質移動に係わると思われる事象については一部意図的に空欄としている。

表-1.1-4 処分場に発生する可能性のある事象と評価(1/A)

事象の影響を受ける部位	処分場に発生する可能性のある事象						評 価			備 考	
	熱的現象・特性	水理学的現象・特性	力学的現象・特性	化学的現象・特性	放射線学的現象・特性	物質移動現象・特性	現状の知見	事象に対する設計の考え方	課題・対応		
a. 廃棄体	廃棄体の温度 廃棄体の温度は、セメント系材料、ペントナイト系材料及び母岩の温度との相互作用によって決まる。						<ul style="list-style-type: none"> 性能評価上、建設・作業中に起こる温度変化は考慮する必要がないと考えられている。 処分場閉鎖後が問題であり、廃棄物から発生する熱が有意な期間及び部分では最大温度を考慮し、発熱終了後及び影響が無い部分では閉鎖後の定常状態の温度を考慮する。 取出し後15年のハル・イントピースを熱源とする解析例 廃棄体温度60~450℃、空洞中心間距離の影響はわずか(鹿島)。 ハル・イントピース廃棄体の発熱特性の解析例 炉からの取出し後半年で410W、50年後で2.6Wとなり影響は少なくなる(鹿島) 	熱伝導解析を実施し、セメント系材料、ペントナイト系材料との相互作用を把握する。 地表面の温度を15℃、深度方向に3℃/100mの温度勾配を考慮する。	熱伝導解析モデルの構築	<ul style="list-style-type: none"> TRUの場合はHLWより空洞断面大きいため、廃棄体定置の不均質性を考慮できるモデルにする必要がある。 HLW 全量発熱性 TRU 20%発熱性 熱伝導解析モデルについては、高レベル研究で検討中 	
	廃棄体の熱物性 廃棄体の熱物性は、温度に依存するかもしれない。						<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体の熱膨張係数、熱伝導率及び比熱データの取得は現在行われていない。 	熱解析で必要となる熱伝導率及び比熱に対しては、コンクリート内側において、90vol%近くがセメント系材料であるため、その値を代用した。	—		
	廃棄体の熱膨張 廃棄体は、その発熱に伴い熱膨張する。							熱膨張に伴い緩衝材に応力が作用し、一部に亀裂ができて、水の浸潤とともに膨張し、亀裂はシールされる。(自己シール特性)	緩衝材の膨潤性能の確保		
			廃棄体の熱膨張による応力 熱膨張が拘束されることで廃棄体中に熱応力が発生する。					処分場閉鎖以降、廃棄体の強度には期待しない。	—	<ul style="list-style-type: none"> HLWではオーバーバックで耐圧を有する期間有しているが、TRUでは期待できない。 	
			廃棄体の体積変化 廃棄体は、その熱膨張で体積が変化する。					熱膨張に伴い緩衝材に応力が作用し、一部に亀裂ができて、水の浸潤とともに膨張し、亀裂はシールされる。(自己シール特性)	緩衝材の膨潤性能の確保		
			廃棄体の力学物性 廃棄体の温度は、その力学特性に影響を与える。				<ul style="list-style-type: none"> アスファルト固化体では、温度の影響が大きい。 	処分場閉鎖以降、廃棄体の強度は期待しない。	—	<ul style="list-style-type: none"> HLWには関係しない。 	
				廃棄体空隙水の化学 廃棄体の温度変化は、鉱物-水反応に影響を与えるため、空隙水の化学に影響を与える。							
				廃棄体中の微生物の活動 廃棄体の温度は微生物の活動・生息に影響を与える							
				廃棄体の腐食 廃棄体の温度の上昇により対流や拡散が促進されるため腐食速度が増加する。			<ul style="list-style-type: none"> 開放系では、温度の上昇とともに酸素の溶解度が低下するため、約80℃以上では温度上昇に伴い腐食速度は減少する。 	処分場閉鎖以降、廃棄体の強度は期待しない。	—		
				廃棄体中の腐食生成物生成 温度により生成する腐食生成物の種類が異なる可能性がある。				腐食生成物が相違しても、システムの力学的影響は変わらないと考える。	—		
			廃棄体成分の溶解 温度により廃棄体成分の溶出過程が変化する。			<ul style="list-style-type: none"> 例として、アスファルト固化体中の硝酸塩の溶出は廃棄体温度の影響を受ける。 	最終的には全量溶出としている。	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体中の硝酸塩量の評価 			
			廃棄体中の核種の溶解度 廃棄体の温度は、核種の溶解度に影響を与える。								

表-1.1-5 処分場に発生する可能性のある事象と評価(2/A)

事象の影響を受ける部位	処分場に発生する可能性のある事象						評 価			備 考	
	熱的現象・特性	水理学的現象・特性	力学的現象・特性	化学的現象・特性	放射線学的現象・特性	物質移動現象・特性	現状の知見	事象に対する設計の考え方	課題・対応		
b. セメント系材料に関する部位	セメント系材料の温度 セメント系材料の温度は、廃棄体、ベントナイト系材料及び母岩の温度との相互作用によって決まる。						・性能評価上、建設・作業中に起こる温度変化は考慮する必要がないと考えられている。 ・処分場閉鎖後が問題であり、廃棄物から発生する熱が有意な期間及び部分では最大温度を考慮し、発熱終了後及び影響が無い部分では閉鎖後の定常状態の温度を考慮する。 ・取出し後15年のハル・イント・ピースを熱源とする解析例 処分ピット温度50~300℃、空洞中心間距離の影響はわずか(鹿島)。	熱伝導解析を実施し、廃棄体、ベントナイト系材料との相互作用を把握する。 地表面の温度を15℃、深度方向に3℃/100mの温度勾配を考慮している。	熱伝導解析モデルの構築	・HLWでは支保工・覆工以外でのセメント系材料の使用を想定していないのに対し、TRUでは多量に使用する。	
	セメント系材料の熱物性 セメント系材料の熱物性は、温度により、かなりの幅で変動する。						・コンクリートの熱物性は体積の大部分を占める骨材の影響を受ける。熱膨張係数は、一般に石英質の骨材を用いると大きくなる。セメントペーストの熱膨張係数は骨材より大きい。そのため、セメントペースト量の多いコンクリートの方が熱膨張係数は大きくなる(日本コンクリート工学協会,1996)	一般的な値として、伝熱工学資料(日本機械学会)によると、温度293K、密度2,400kg/m ³ における石灰岩コンクリートの熱伝導率及び比熱は、各々1.2(W/mK)、0.90(kJ/kgK)である。	—		
	セメント系材料の熱膨張 セメント系材料には、その温度と熱膨張係数に応じた熱膨張が発生し体積が変化する。						・コンクリートの熱膨張係数は、100℃程度までの通常の温度変化範囲で7~13×10 ⁻⁶ /℃程度となる(日本コンクリート工学協会,1996)。	セメント系材料の膨張によって、ベントナイトに亀裂が生じても、水の浸潤とともに膨張し、亀裂はシールされる。(自己シール特性)	緩衝材の膨潤性能の確保		
		セメント系材料の冠水特性 セメント系材料中の温度勾配により水分移動が起こり、冠水特性が変化する。						評価期間に比べると、再冠水の時間は一瞬のことであり、冠水特性の変化は考慮しない。また再冠水中、後のセメント材料の強度は期待していない。	—		
		セメント系材料の水利特性 セメント系材料の水利特性は温度に依存する。					・セメント系材料が水圧の作用で破壊した後は、あまり影響のない事象である。	水利特性(難透水性)は期待していない。	—		
			セメント系材料の熱膨張による応力 熱膨張が拘束されることによりセメント系材料中に熱応力が発生する。				・熱膨張により応力が発生し、拘束条件によってひび割れ等が生じる。冠水後の水圧により破壊することを想定すれば、重要な事象とはならない。	処分場閉鎖以後のセメント系材料には構造部材としての機能は期待しない。	—		
			セメント系材料の力学物性 セメント系材料の力学物性は温度に依存する。				・圧縮強度の低下は、100℃前後までは比較的小さい。 ・それ以上では温度に反比例して残存強度が低下する。 ・150℃で長期保存した場合に崩壊したという報告がある。 ・静弾性係数は100℃以下でも温度に反比例して低下する。	ピットコンテナに用いるセメント材料は、作業時のみ力学強度を期待する。 作業時に発熱によりコンクリート強度が低下する可能性があるのであれば、部材厚を厚くする等設計的に対応可能である。	—		
				セメント系材料の空隙水の化学 セメント系材料の温度変化は、鉱物-水反応に影響を与えるため、空隙水の化学に影響を与える可能性がある。						—	
				セメント系材料の鉱物組成・特性 セメント系材料の骨材は、一般に高温の熱を受けて膨張する。					セメント系材料の膨張によって、ベントナイトに亀裂が生じても、水の浸潤とともに膨張し、亀裂はシールされる。(自己シール特性)	緩衝材の膨潤性能の確保	
				セメント系材料中の微生物の活動 セメント系材料の温度は微生物の活動・生息に影響を与える							

表-1.1-6 処分場に発生する可能性のある事象と評価(3/A)

事象の影響を受ける部位	処分場に発生する可能性のある事象						評価			備考
	熱的現象・特性	水理学的現象・特性	力学的現象・特性	化学的現象・特性	放射線学的現象・特性	物質移動現象・特性	現状の知見	事象に対する設計の考え方	課題・対応	
				セメント系材料の成分溶解特性 セメント系材料成分の溶出過程は、温度の影響を受ける。				処分場閉鎖後のセメント系材料には、健全性を期待しない。	セメント系材料の全溶出量の評価	
				セメント系材料中の鋼材の腐食 セメント系材料の温度上昇により対流や拡散が促進されるため腐食速度が増加する。			・開放系では、温度の上昇とともに酸素の溶解度が低下するため、約80℃以上では温度上昇に伴い腐食速度は減少する。	処分場閉鎖後のセメント系材料には、健全性を期待しない。	—	
				セメント系材料中の腐食生成物生成 セメント系材料は、温度により生成する腐食生成物の種類が異なる可能性がある。				処分場閉鎖後のセメント系材料には、健全性を期待しない。	—	
						セメント系材料中の核種移行・溶質移行 セメント系材料の温度は吸着等の核種移行、溶質の拡散に影響を与える可能性がある。				
						セメント系材料中のガス移行 セメント系材料の温度はガス移行に影響を与える。		ガスが発生するのは、金属腐食後であり、時間的には閉鎖後100年以降と考えられる。その時は温度は一定状態と考える。	—	
	ベントナイト系材料の熱物性温度によりベントナイトの熱物性は変化する。						・100℃以下では、ベントナイト(Na型)の熱伝導率への温度の影響は小さいことが確認されている。その他の熱物性についても影響は小さいと予想されている。	ベントナイトの限界温度(例えば100℃)を設定すれば設計の段階で温度を抑えることは可能である。	—	
ベントナイト系材料に関する部位	ベントナイト系材料の温度 ベントナイトの温度は、廃棄体、処分ピット及び母岩の温度との相互作用によって決まる。						・性能評価上、建設・作業中に起こる温度変化は考慮する必要がないと考えられている。 ・処分場閉鎖後が問題であり、廃棄物から発生する熱が有意な期間及び部分では最大温度を考慮し、発熱終了後及び影響が無い部分では閉鎖後の定常状態の温度を考慮する。 ・取出し後15年のハル・エントピースを熱源とする解析例の結果 ベントナイト温度45~280℃、空洞中心間距離の影響はわずか(鹿島)。 ・処分坑道間隔40m、廃棄体定置間隔5m、処分深度1200mの場合の解析例の結果 ベントナイト温度最大約150℃、ベントナイト厚が半分以下でも100℃を超える。温度の高い期間は50年よりも短い(Nagra,1994) ・熱解析を行う際は、熱物性の変化を考慮する必要がある。しかし、浸潤に伴う熱伝達率の変化を無視し、乾燥状態での熱物性を用いることで保守的な熱解析を行うことができる。	地表面の温度を15℃、深度方向に3℃/100mの温度勾配を考慮している。 熱伝導解析を実施し、廃棄体、セメント系材料との相互作用を把握する。	熱伝導解析モデルの構築	・TRUの場合はHLWより空洞断面大きいため、材料の不均質性を考慮できるモデルにする必要がある。
	ベントナイト系材料の熱膨張 ベントナイトは温度上昇により熱膨張する。また、乾燥収縮する場合は、熱膨張量に影響する。						・ベントナイトの線膨張係数により熱応力を評価する。 ・ベントナイトの乾燥収縮量を実験的に把握する必要がある(Kanno et al.,1993)。	熱膨張により亀裂が生じても水の浸潤とともに膨張し、亀裂はシールされる。(自己シール特性)	緩衝材の膨潤特性の確保	
		ベントナイト系材料の熱膨張による水理特性の変化 ベントナイトの熱膨張で空隙が増加、透水係数が変化する。					・ベントナイトの透水係数、水分拡散係数等の温度依存性の定量的評価が必要。			

表-1.1-7 処分場に発生する可能性のある事象と評価(4/A)

事象の影響を受ける部位	処分場に発生する可能性のある事象						評 価			備 考	
	熱的現象・特性	水理学的現象・特性	力学的現象・特性	化学的現象・特性	放射線学的現象・特性	物質移動現象・特性	現状の知見	事象に対する設計の考え方	課題・対応		
ベントナイト系材料に関する部位		ベントナイト系材料の冠水特性 ベントナイト中の温度勾配により水分移動が起こり、冠水特性が変化する。					・Philip-de Vries型のモデルでベントナイト中の水分移動現象を評価することが考えられている(Kanno et al.,1993)。	評価期間に比べると、再冠水の時間は一瞬のことであり、冠水特性の変化は考慮しない。	—		
		ベントナイト系材料の水理特性 ベントナイトの水理特性は温度に依存する。					・透水性を表す物性値の温度依存性を定量的に検討する必要がある。(Kanno et al 1993)	処分場周辺の岩体の温度を60℃とすれば、100年を超える期間において膨潤特性に大きな変化はない。	— (実サイト状況に応じて検討)		
			ベントナイト系材料の熱膨張による応力 ベントナイトの熱膨張が拘束されることで熱応力が発生する。				・応力の変化は、力学物性、熱物性(熱伝導率)、水理特性(透水係数)、膨潤量等に影響する。	熱膨張により亀裂が生じても水の浸潤とともに膨張し、亀裂はシールされる。(自己シール特性)	緩衝材の膨潤性能の確保		
			ベントナイト系材料の膨潤特性 ベントナイトの膨潤状態は温度に依存する。				・膨潤圧、膨潤量に及ぼす温度の影響を把握する必要がある。ただし、この影響は大きくないと考えられている。	処分場周辺の岩体の温度を60℃とすれば、100年を超える期間において膨潤特性に大きな変化はない。	— (実サイト状況に応じて検討)		
			ベントナイト系材料の力学物性 ベントナイトの力学特性は温度に依存する。				・温度をパラメータとしたベントナイトの力学試験を行う必要がある。ただし、この影響はあまり大きくないと考えられている。	力学試験の結果、影響はあまり大きくないといえる。(参照:動燃研究成果報告書「緩衝材の力学試験」,1992)	—		
				ベントナイト系材料空隙水の化学 ベントナイトの温度は鉱物-水反応に影響を与える。			・地熱や廃棄体による温度上昇を考慮した熱力学データの整備が必要。				
				ベントナイト系材料の鉱物組成・特性 ベントナイトの温度は鉱物-水反応、イライト化、ソリセメンテーション、ゼオライト化等の鉱物変質に影響を与える。			・イライト化 約100℃以下では顕著でなく、進行は非常に遅い。(Anderson,1984, Weaver,1989) ・ソリセメンテーション イライト化に伴い観察されることが多く、石英溶出によっても起り得る。(Pusch,1983,Johnston,1985) ・ゼオライト化 高温かつ高pHで進行するとの報告がある(動燃,1994)。	熱伝導解析を実施し、ベントナイトの温度上昇を100℃以下にする。	熱伝導解析モデルの構築		
				ベントナイト系材料中微生物の活動 ベントナイトの温度は微生物の活動・生息に影響を与える。							
				ベントナイト系材料中への塩の蓄積 ベントナイト中の温度勾配が塩の蓄積の重要要因となる。				・塩の蓄積はストリッパでの試験(Pusch,1985, Pusch et al.,1993)、室内試験(Kamland and Pusch,1995)で認められている。 ・溶質塩濃度の増加や沈殿はいずれも可逆反応であり、温度低下後は塩の存在の不均一性は無視できると考えられている。	処分場周辺の岩体温度を60℃とすれば、温度勾配は一定であるので問題はない。	—	
						ベントナイト系材料中の核種移行・溶質移行 ベントナイトの温度は吸着等の核種移行、溶質移行に影響を与える可能性がある。		・吸着 常温と地温程度(50~70℃)の間に大きな違いは無いと考えられている。 ・拡散 活性化エネルギーが得られている。			
					ベントナイト系材料中のガス移行 ベントナイトの温度はガス移行に影響を与える。						

表-1.1-8 処分場に発生する可能性のある事象と評価(5/A)

事象の影響を受ける部位	処分場に発生する可能性のある事象						評価			備考	
	熱的現象・特性	水理学的現象・特性	力学的現象・特性	化学的現象・特性	放射線学的現象・特性	物質移動現象・特性	現状の知見	事象に対する設計の考え方	課題・対応		
d. NF母岩	NF母岩の熱物性温度により変化する。							一般的な値として、結晶質岩系岩盤には熱伝導率2.9(W/mK)、比熱0.84(kJ/kgK)を、堆積岩系岩盤には熱伝導率2.3(W/mK)、比熱0.84(kJ/kgK)を適用している。	— (実サイトで測定)	高レベルに準じている。	
	NF母岩の温度 母岩の温度は、廃棄体、セメント系材料、ベントナイト系材料の温度との相互作用によって決まる。						・性能評価上、建設・作業中に起こる温度変化は考慮する必要がないと考えられている。 ・処分場閉鎖後が問題であり、廃棄物から発生する熱が有意な期間及び部分では最大温度を考慮し、発熱終了後及び影響が無い部分では閉鎖後の定常状態の温度を考慮する。 ・取出し後15年のハル・イントピースを熱源とする解析例の結果 母岩温度40~240℃、空洞中心間距離の影響はわずか(鹿島)。	地表面の温度を15℃、深度方向に3℃/100mの温度勾配を考慮している。 熱伝導解析を実施し、廃棄体、セメント系材料、ベントナイト系材料との相互作用を把握する。	熱伝導解析モデルの構築	・TRUの場合はHLWより空洞断面大きいため、岩盤の不均質性を考慮できるモデルにする必要がある。	
		NF母岩の地下水流動 NF母岩の温度変化により、地下水流動が変化する。						高レベルで検討中	ベントナイト内側の温度が100℃以下になるようにするので、その外側にあるNF母岩は100℃以下であり、問題ない。	—	
			NF母岩の応力 NF母岩の温度変化による温度応力が発生する。								
			NF母岩の力学物性 NF母岩中の温度差による母岩の膨張収縮に起因する機械的風化により、力学物性が変化する。					・機械的風化は、化学的変化を伴わずに細粒化する過程である。細粒化されることで化学的風化が促進される(土質工学会1985)。	発熱影響期間は、せいぜい100年であり、その後はほぼ一定値となることを考慮して、風化の進行は考慮しない。	—	
			NF母岩のクリープ変形 母岩温度は、母岩のクリープ変形特性に影響を与える。					・長期挙動を記述できるデータが現在取得されていない。	粘弾性モデルとして大久保モデルを用い、岩盤のクリープ変形について解析を行う。	モデルの確立、シナリオ構築	
				NF母岩の地下水化学 母岩温度は鉱物-水反応や鉱物の変質に影響を与える。また、処分場の温度によっては地下水が水蒸気化し体積膨張する恐れがある。					ベントナイト内側の温度が100℃以下になるようにするので、その外側にあるNF母岩は100℃以下であり、問題ない。	—	
				NF母岩の鉱物組成・特性変化 母岩温度は鉱物の変質に影響を与える。				・岩石の変質温度は150~300℃である。(IAEA) ・温度差による機械的風化は、鉱物組成を細粒化し、化学的風化を促進する。	ベントナイト内側の温度が100℃以下になるようにするので、その外側にあるNF母岩は100℃以下であり、問題ない。	—	
				NF母岩中の微生物の活動 母岩温度は岩中の微生物の活動や生息に影響を与える。				・自然状態の地熱においては十分生息可能と考えられる。			
							NF母岩中の核種移行 母岩温度は吸着や核種移行に影響する可能性がある。				
						NF母岩中のガス移行 母岩温度は母岩中のガス移行に影響すると考えられる。					

1.1.5 抽出課題

以上の整理により抽出された主な課題について以下に示す。

- ①緩衝材の膨潤性能の確保
- ②ベントナイト系材料のCa化による自己シール特性の変化
- ③緩衝材の膨潤に伴う透水係数の増加量算定
- ④底部ベントナイトの圧密
- ⑤不飽和ベントナイトの力学挙動
- ⑥岩盤のクリープ変形におけるモデルの確立，シナリオ構築
- ⑦ベントナイト系材料のCa化による水理物性の変化
- ⑧Ca(OH)₂溶液を使用した基礎試験
- ⑨塩水溶液を使用した基礎試験
- ⑩体積減少量の把握

(セメント系材料の全溶出量の評価，廃棄体の成分溶出量及び溶出速度の評価)

- ⑪水理地質構造が影響を及ぼす範囲の算定
- ⑫温度変化の影響を受ける岩盤部の力学的評価
- ⑬シーリング概念の確立
- ⑭核種の空隙水への溶解速度の評価
- ⑮粘性土の長期的な沈下量予測手法

本研究では、①から⑧に関する項目について「処分システムの長期健全性に係る重要事象の検討」として以下に示す節で検討を行った。

- ①～③→1.2 人工バリア材の体積変化に対するシステムの健全性評価
- ④～⑤→1.3 人工バリアの力学的健全性評価
- ⑥ →1.4 大空洞長期挙動の予備検討
- ⑦～⑧→1.5 人工バリア材料の力学特性データの取得

1.2 人工バリア材の体積変化に対するシステム健全性評価

1.2.1 目的

人工バリア材超長期的挙動として、①廃棄体・コンクリート材料の劣化、成分溶出、②ベントナイトの膨潤、圧密、クリープ、③周辺岩体のクリープが考えられ、これらの現象によりベントナイトの周辺に空隙が発生し、ベントナイトが膨潤することで処分システムに影響を及ぼすことが考えられる。平成8年度の研究では、体積変化現象に対するベントナイトの膨潤現象について、ベントナイトの密度変化から透水係数を算出し、その評価を行うことで処分システムの成立性評価を行った。しかし、この解析ではベントナイトが十分な膨潤性能を持っていることが前提となっており、ベントナイトの性能確認実験を行った上で処分システムの成立性を評価する必要がある。そこで本節では、ベントナイトの自己シール性、最大膨潤率、密度分布変化について実験を行い、人工バリア材の体積変化に対するシステム健全性の評価を行う。

1.2.2 実験結果

(1)自己シール中の透水試験

所定の空隙部のシールが終了するまで通水によるベントナイトの透水性を調べた。図- 1.2.1 ~ 1.2.2 は空隙部 30 %の Na 型及び Ca 型化ベントナイトの透水係数の経日変化を示す。図から明らかなように、Na 型は通水後一週間程度で空隙部へのベントナイトの膨潤により自己シールが起こり、透水係数も 10 日過ぎには 10^{-12} m/sec のオーダーまで小さくなった。一方、Ca 型化ベントナイトは 30 %の空隙部へ膨潤による自己シール性は小さく、通水後 45 日後でも透水係数は Na 型のように小さくならず 10^{-6} m/sec 程度のオーダーである。表- 1.2.1 に各実験で得られた最終時点での透水係数を示す。

表- 1.2.1 自己シール透水性

	空隙率	容器類別	k(m/sec)	通水期間(Days)	透水圧(MPa)
Na型	10	大	1.39E-12	15.0	0.80
		小	8.93E-13	26.1	0.80
		アクリル	3.86E-13	7.8	0.80
	20	大	1.08E-12	15.8	0.60
		小	1.13E-12	25.7	0.80
	30	大	3.32E-12	15.8	0.40
		小	1.59E-12	26.1	0.80
		アクリル	1.75E-12	8.1	0.80
	Ca化	10	大	1.26E-10	34.2
小			2.13E-07	42.2	0.01
アクリル			5.51E-11	42.0	0.05
20		大	6.92E-06	37.0	0.01
		小	6.74E-07	43.8	0.01
30		大	7.75E-06	37.0	0.01
		小	2.17E-06	43.8	0.05
		アクリル	3.99E-07	43.7	0.01

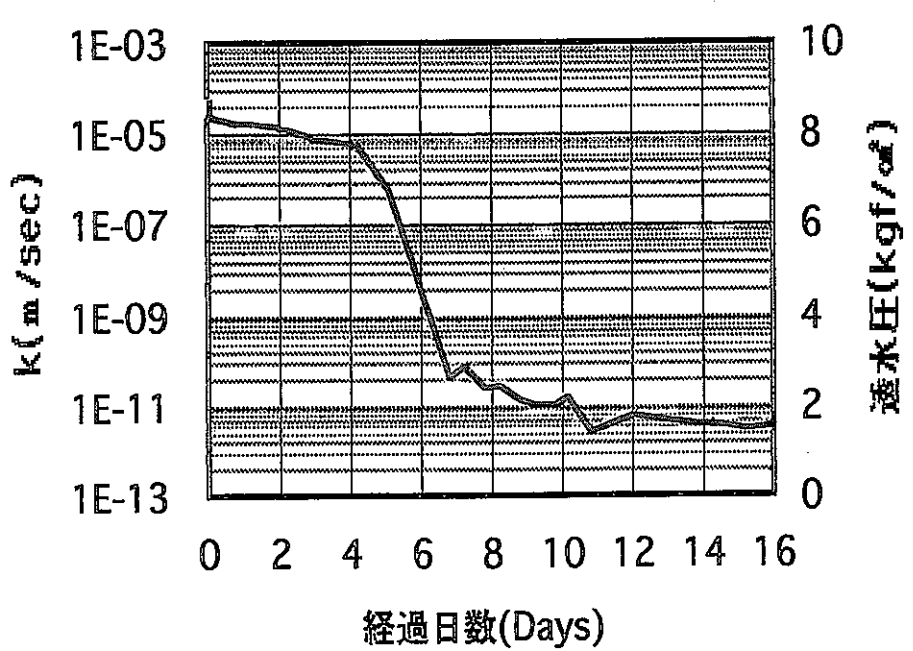


図- 1.2.1 自己シール中の透水係数の経日変化 (Na 型空隙 30 %)

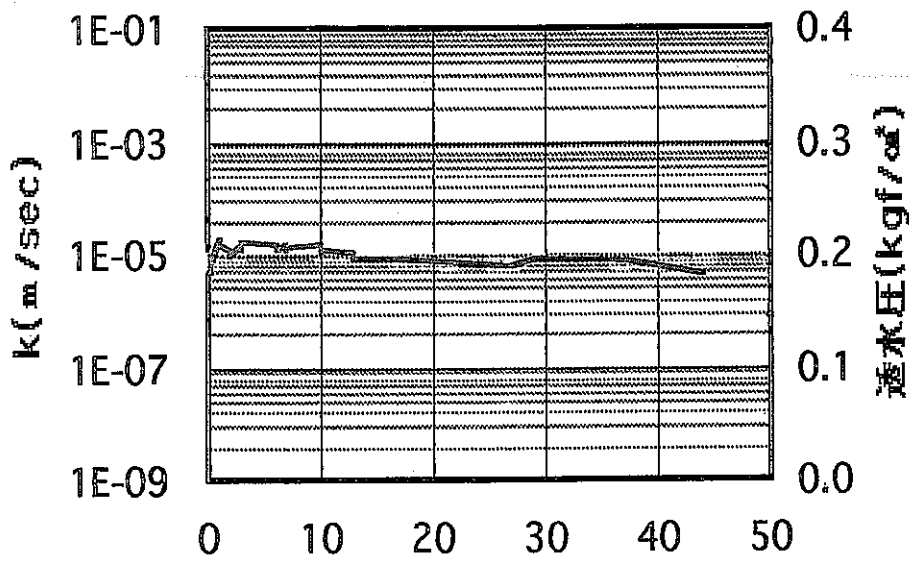


図- 1.2.2 自己シール中の透水係数の経日変化 (Ca 型化空隙 30 %)

(2)解体調査

通水による自己シール性確認後，実験装置を解体し，ベントナイトと容器壁部の自己シール状況の観察を行うと共にベントナイトをスライスして膨潤に伴う乾燥密度及び含水比分布を調べた。

(a)観察結果

図- 1.2.3 ~ 1.2.5 に空隙部 30 % の Na 型及び Ca 型化ベントナイトの自己シール状況を示す。Na 型は容器壁部まで十分膨潤し，透水係数で述べたように十分に自己シールしていることがわかる。一方，Ca 型化ベントナイトは膨潤量が小さいため空隙部を完全にシールすることが出来ていない。また，Ca 型化ベントナイトは Na 型ベントナイトに比較してコンシステンシーが小さいので，あたかも剥離しながら膨潤部分が下方に滑落している様子が見られる。

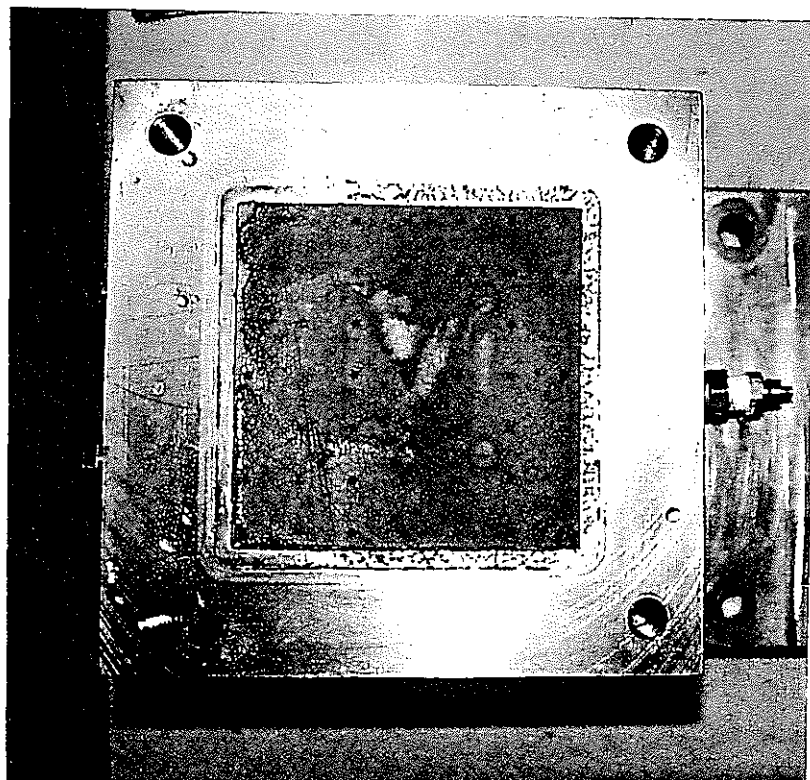


図- 1.2.3 自己シール状況 (Na 型，空隙 30 %)

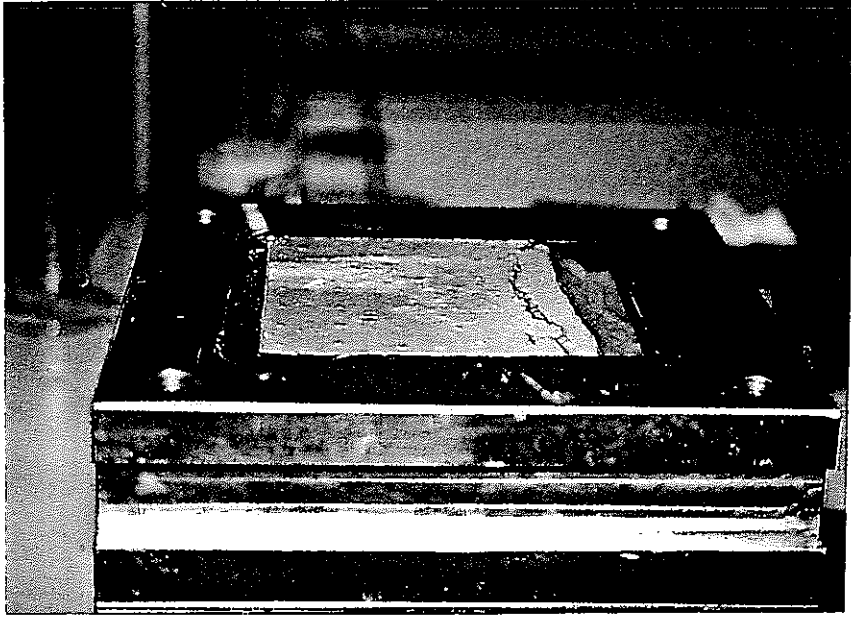


図- 1.2.4 自己シール状況 (Ca 型化, 空隙 30%)

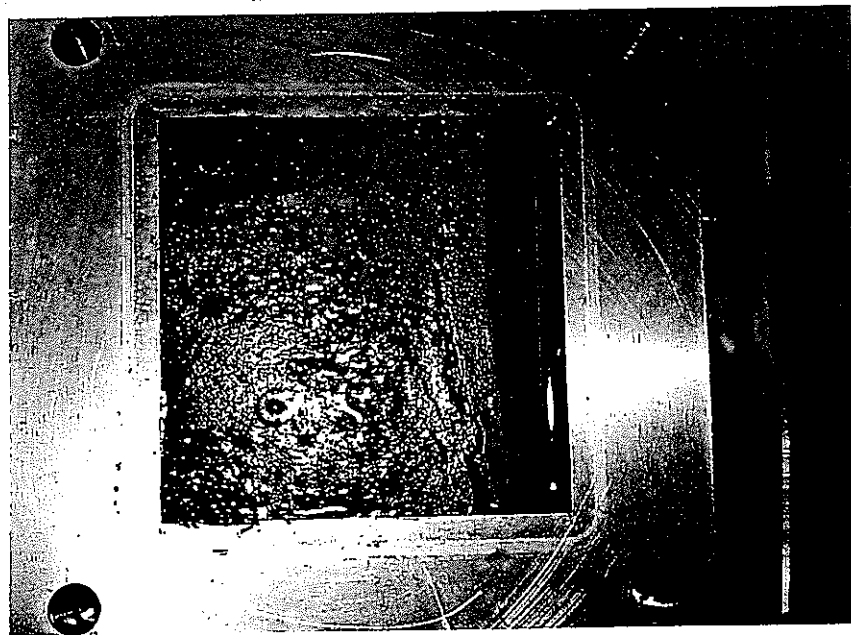


図- 1.2.5 自己シール状況 (Ca 型化, 空隙 30%)

(b)乾燥密度と含水比分布

図－ 1.2.6 ～ 1.2.7 に空隙部 30 %の Na 型及び Ca 型化ベントナイト供試体をスライスして求めた乾燥密度及び含水比分布を示す。ベントナイトの種類に関係なく空隙部に近い所ほど乾燥密度は小さくまた含水比は大きくなる傾向が見られる。特に膨潤の大きい Na 型ベントナイトの含水比は両端で約 120 %の含水比差がある。

図－ 1.2.8 ～ 1.2.11 は空隙部の大きさに対する Na 型及び Ca 型化ベントナイトの乾燥密度及び含水比の比較を示したものである。

ベントナイトの種類に関係なく空隙部が大きいほど密度の低下及び含水比の増加傾向が見られると共に、密度及び含水比の変化が空隙部と反対側の端部まで及んでいることから、空隙部が大きいと自己シールに伴う膨潤の影響は広がっていることがわかる。

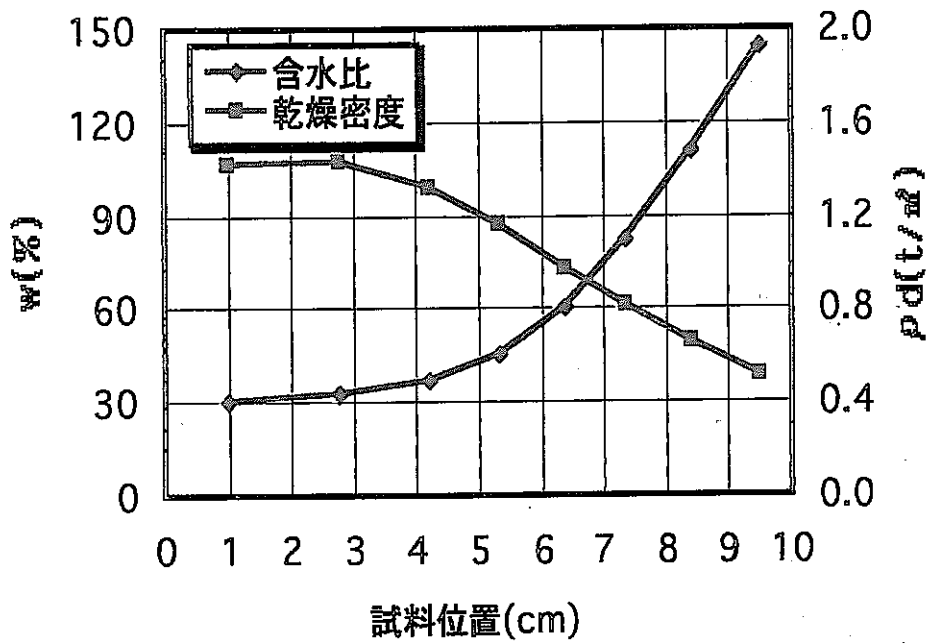


図- 1.2.6 自己シール実験後の乾燥密度と含水比分布 (Na 型, 空隙 30%)

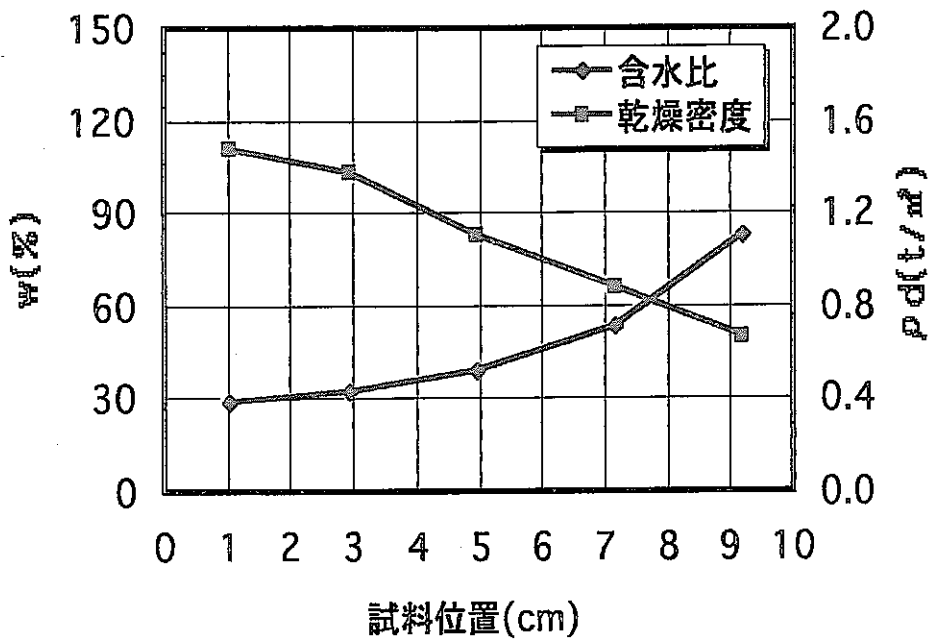


図- 1.2.7 自己シール実験後の乾燥密度と含水比分布 (Ca 型化, 空隙率 30%)

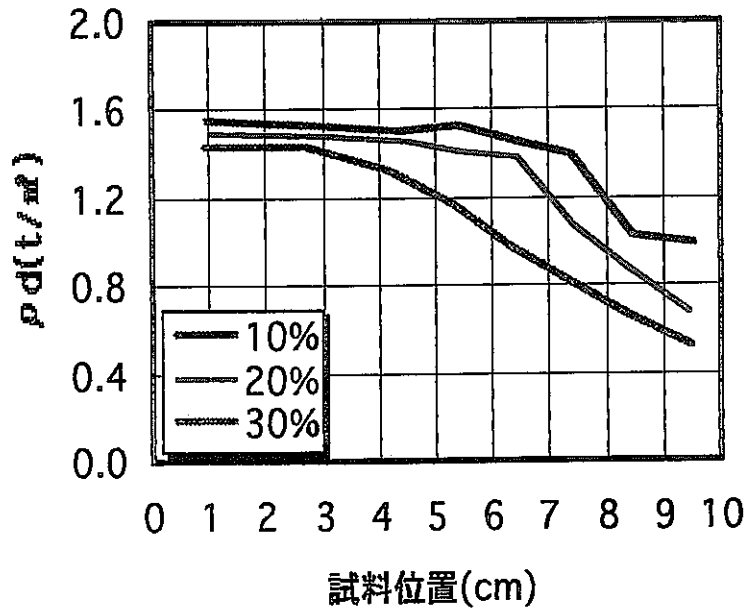


図-1.2.8 空隙部の大きさと乾燥密度の関係 (Na型)

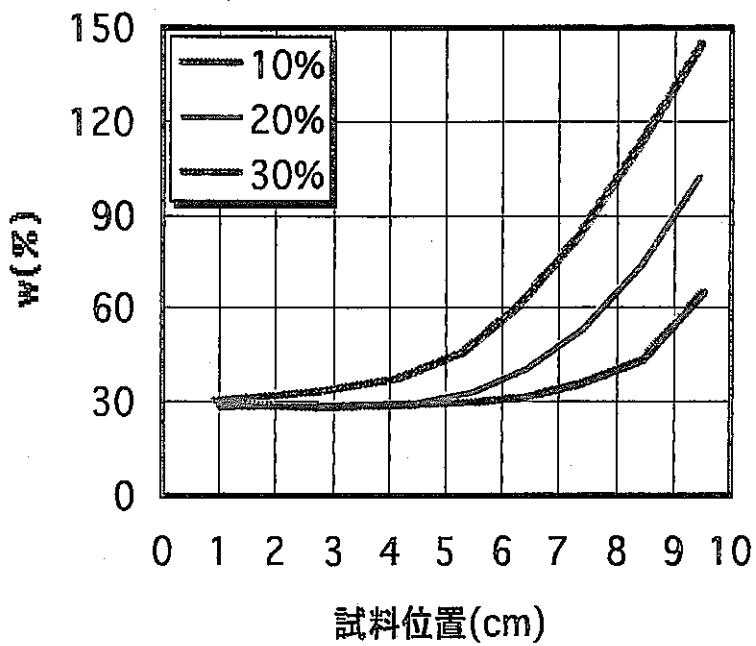


図-1.2.9 空隙部の大きさと含水比の関係 (Na型)

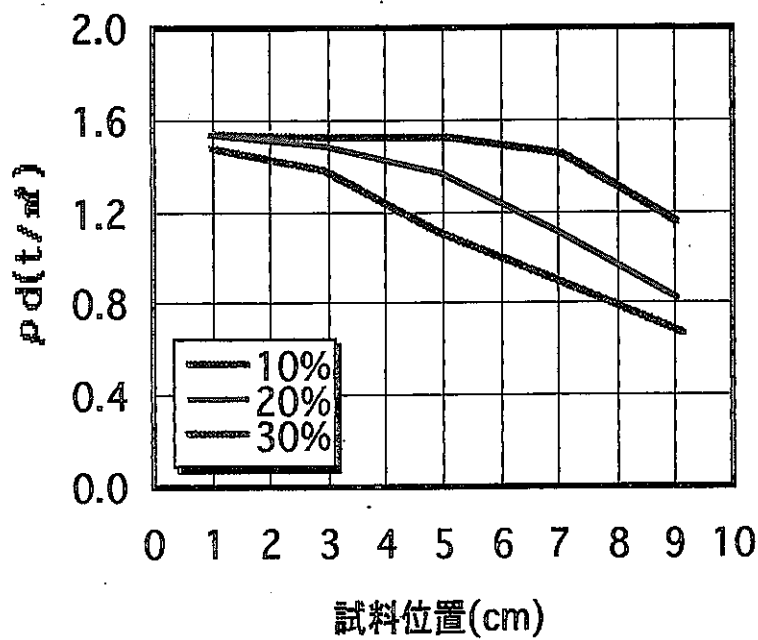


図- 1.2.10 空隙部の大きさと乾燥密度の関係 (Ca 型化)

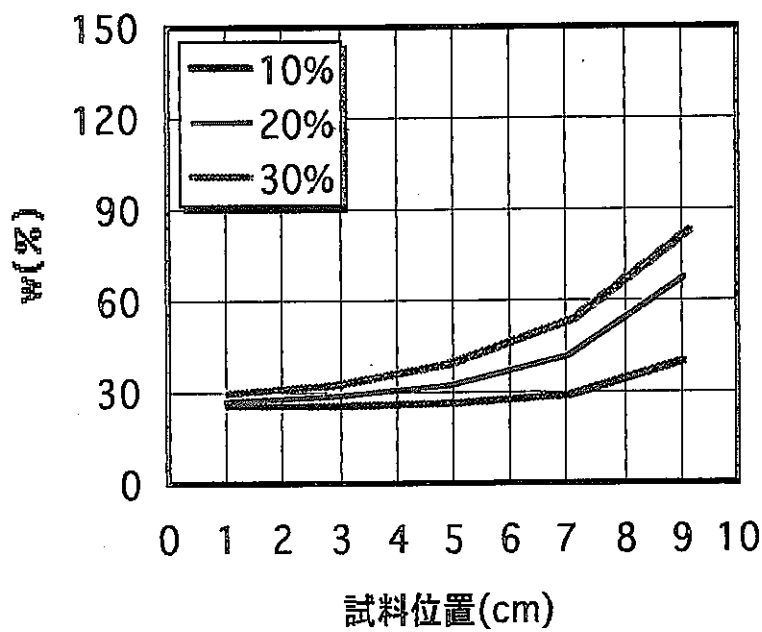


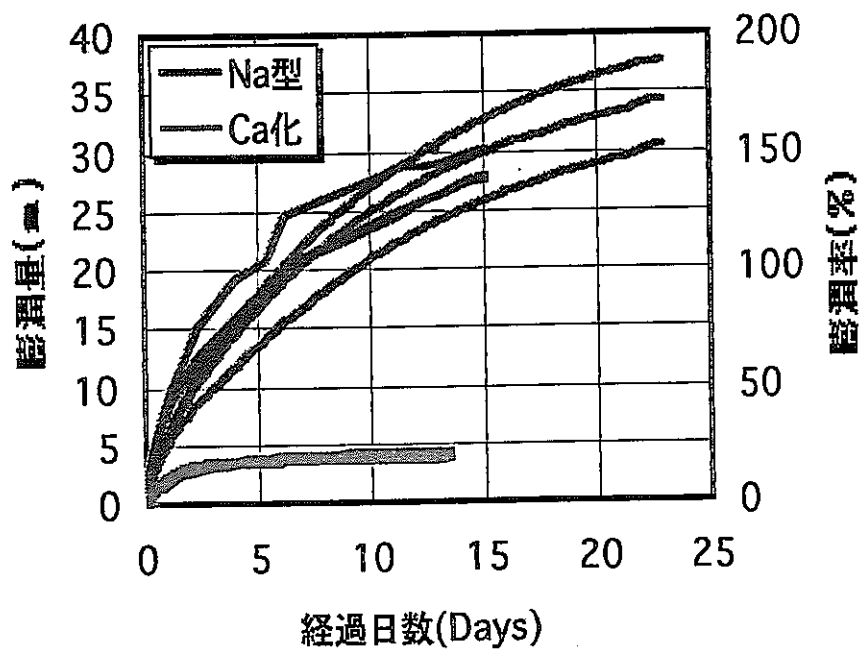
図- 1.2.11 空隙部の大きさと含水比の関係 (Ca 型化)

(c)膨潤量

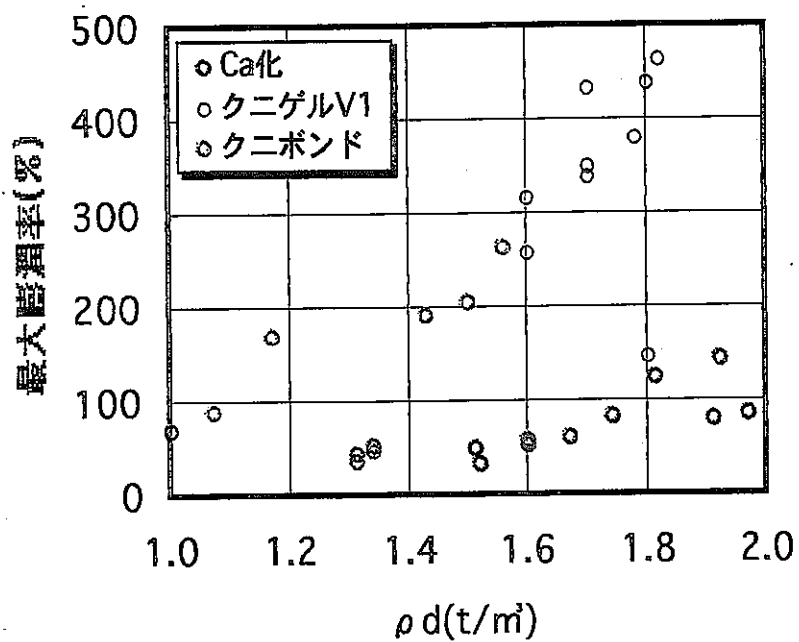
ベントナイト周辺に出来た空隙部に対する自己シールはベントナイトの膨潤量によって決まると考えられる。

図－ 1.2.12 は乾燥密度 1.6 t/m^3 の Na 型および Ca 型化ベントナイトについて膨潤圧試験（最大膨潤圧発生済）後の膨潤量測定結果を示したものである。図より Na 型ベントナイトは約半月で 150 %程度の膨潤率が発生しており、この膨潤率の大きさからも自己シール実験の空隙部 30 %は十分シール可能であることが推察される。一方、Ca 型化ベントナイトの膨潤は 10 日程度で終了し、その膨潤率は 25 %以下と小さい。したがって自己シール実験の空隙部 30 %はシール出来ないことがこの結果からも明らかである。図－ 1.2.13 は最大膨潤率と乾燥密度の関係を示す。

今回の試験乾燥密度 1.6 t/m^3 に対応する Na 型及び Ca 型化ベントナイトの最大膨潤率を見ると Na 型で 300 %程度 Ca 型化で 50 %程度であることから、膨潤圧発生後の膨潤量は、最大膨潤率の半分程度となる。



図一 1.2.12 膨潤圧発生後の膨潤量の経日変化



図一 1.2.13 最大膨潤率と乾燥密度の関係

1.2.3 まとめと今後の課題

表-1.2.2 に自己シール性確認実験の結果一覧表を示す。また、図-1.2.14 には空隙率と透水係数の関係を、図-1.2.15~1.2.16 にはナトリウム型およびカルシウム型化ベントナイトの空隙率と乾燥密度の関係を示す。なお、算定密度は、本実験による透水係数を用いて前年度報告した乾燥密度と透水係数の関係から算出した値である。平均密度は、実験後の密度分布を平均化した値である。

本節における一連の実験結果のまとめと今後の課題を以下に記す。

(1) 自己シール性について

自己シール性確認実験よりナトリウム型ベントナイト（乾燥密度 1.6g/cm^3 ）は、ベントナイト体積の 30%の空隙に対して 7~10 日という短期間でシールすることが確認された。この時、透水係数は $10^{-12}\sim 10^{-13}\text{m/sec}$ オーダーを示し、空隙がある初期の状態から 6 桁程度の低下が確認された。この透水係数は、膨潤後の平均密度から推定される値とほぼ同等であった。

一方、カルシウム型化ベントナイト（乾燥密度 1.6g/cm^3 ）は、ベントナイト体積の 10%の空隙に対してナトリウム型ベントナイトと同様に短期間でシールすることが確認された。ただし、この時の透水係数は $10^{-10}\sim 10^{-11}\text{m/sec}$ オーダーであり、膨潤後の平均密度から推定される値より 1 桁程度大きい値であった。また、20%、30%といった空隙率になると、シールされず、透水係数の低下は全く確認できなかった。

(2) 密度分布変化について

膨潤後の密度分布は、長期間後において均一化すると推測しているが、本実験期間では確認できなかった。現状得られた結果では、初期の空隙部に近いほど密度が小さい分布となっていた。

(3) 最大膨潤率について

体積拘束下で膨潤圧を発生させ膨潤圧が平衡状態となった後に体積拘束を取り除き膨潤量を測定する膨潤圧発生後の膨潤量測定試験では、ナトリウム

型ベントナイト（乾燥密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ）において試験期間 25 日程度で 150%の膨潤率が確認された。なお、膨潤はこの試験期間では収束しておらず、さらに膨潤する傾向にある。

一方、カルシウム型化ベントナイト（乾燥密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ）では、10 日程度で膨潤が終了してしまい、膨潤率も 25%と前者に比して低い水準で止まってしまった。

前述したように膨潤圧発生後の膨潤率は、ナトリウム型ベントナイトで 150%以上、カルシウム型化ベントナイト 25%とその差は大きい。平成 8 年度の報告書（「TRU廃棄物の処分概念の検討（Ⅱ）PNC ZJ1100 97-001」）によれば、処分施設内の体積減少量を保守的に設定した場合、カルシウム型化ベントナイトの膨潤量では体積減少分を十分に埋めきれない恐れがある。

今回確認したベントナイトの乾燥密度は、 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ である。したがって、今後は、現状の処分施設概念においてレファレンスとなっている乾燥密度 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ において、どの程度の膨潤率が確保できるか確認する必要がある。また、評価のキーとなるセメント系材料に対する体積減少量の合理的な推定やより体積減少量が少なくなると考えられる材料候補の選定や施工方法の検討といったことも必要と考えられる。

表-1.2.2 自己シール実験結果一覧表

	空隙率	容器類別	k(m/sec)	kより算定密度	実験後の平均密度	平均密度より算定したk(m/sec)	目視による自己シール
Na型	10	大	1.39E-12	1.23	1.40	7.27E-13	○
		小	8.93E-13	1.35	1.41	7.00E-13	○
		アクリル	3.86E-13	1.56	1.43	6.49E-13	○
	20	大	1.08E-12	1.30	1.28	1.15E-12	○
		小	1.13E-12	1.29	1.27	1.19E-12	○
	30	大	3.32E-12	1.00	1.11	2.19E-12	○
		小	1.59E-12	1.20	1.11	2.19E-12	○
		アクリル	1.75E-12	1.17	1.13	2.03E-12	○
	Ca化	10	大	1.26E-10	1.08	1.44	3.26E-12
小			2.13E-07	0.34	1.40	4.88E-12	(○)
アクリル			5.51E-11	1.16	1.43	3.61E-12	○
20		大	6.92E-06		1.27	1.81E-11	×
		小	6.74E-07	0.23	1.27	1.81E-11	×
30		大	7.75E-06		1.11	9.08E-11	×
		小	2.17E-06	0.11	1.00	2.75E-10	×
		アクリル	3.99E-07	0.28	1.13	7.42E-11	×

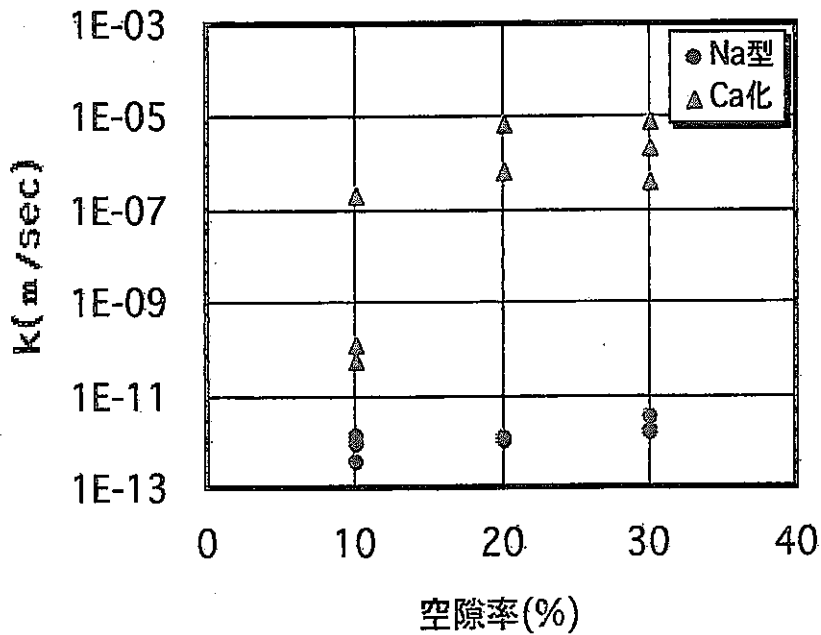


図-1.2.14 空隙率と透水係数の関係

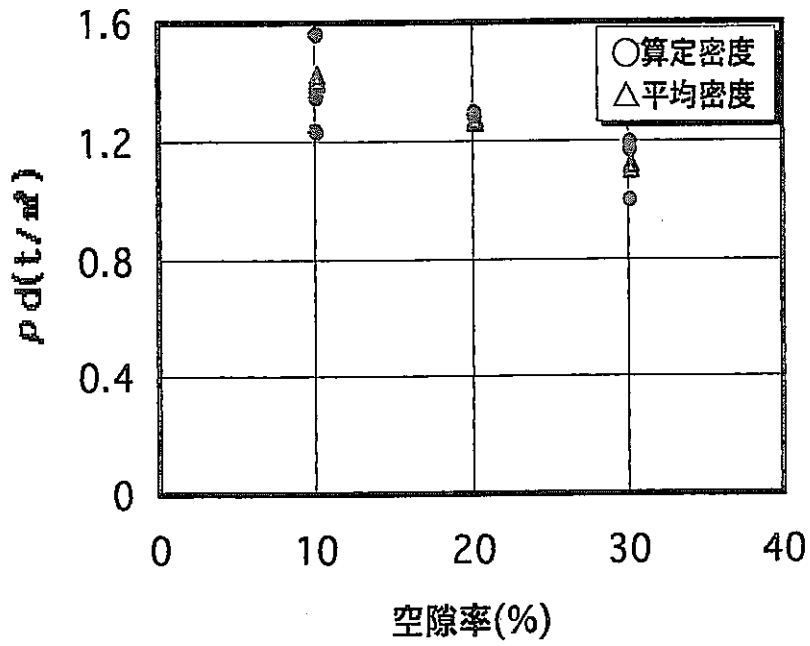


図- 1.2.15 空隙率と乾燥密度の関係 (Na 型)

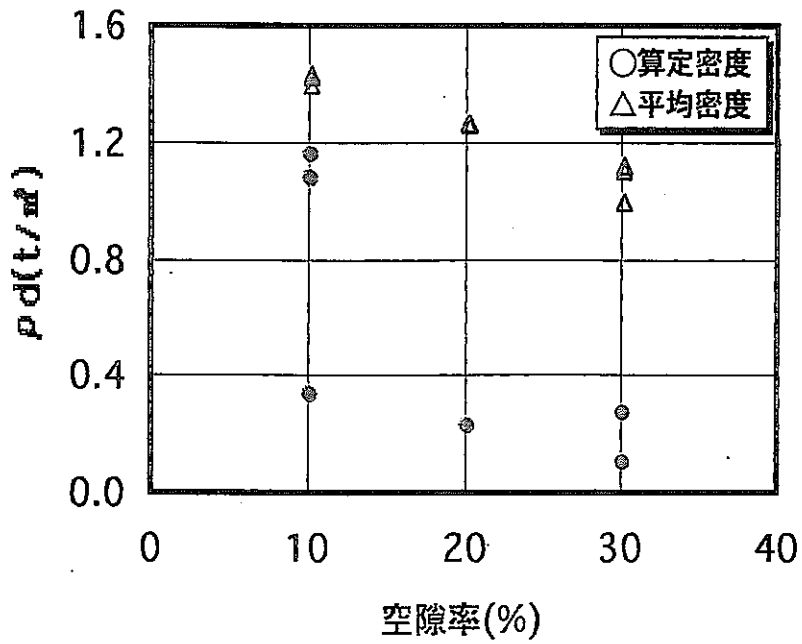


図- 1.2.16 空隙率と乾燥密度の関係 (Ca 型化)

1.3 人工バリアの力学的健全性評価

1.3.1. 目的

処分空洞の底部に設置される緩衝材、すなわちベントナイトには、構造躯体の建設、廃棄体の定置、充填材の充填、底部以外のベントナイトの設置、埋戻し材による閉鎖によって荷重が作用する。また、閉鎖後においては、地下水の再冠水によってベントナイトは膨潤すると考えられる。そのため、底部ベントナイト層には、表-1.3-1 に示す経時的な各状態が想定される。

底部ベントナイト層が著しく沈下する場合や支持力不足によって破壊に至った場合には、構造躯体を安定して支持できなくなり、処分技術上問題となることや、核種移行距離の減少や拡散場を維持できなくなることで、性能評価上問題となることが考えられる。そこで本項は、人工バリアのうち、底部ベントナイト層に着目して、その沈下ならびに支持力検討を行なうことにより力学的健全性を評価する。

なお、本検討では、岩盤は掘削完了時の形状を維持するものとする。

表-1.3-1 予想されるベントナイトの挙動と問題点

	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4
概要図	<p>▽ 底部ベントナイト層</p>	<p>▽</p>	<p>▽</p>	<p>▽</p>
状況	処分空洞の掘削が完了し、底部ベントナイト層を設置	構造躯体を構築し、廃棄体を定置した状態	処分システムの閉鎖が完了した状態。不飽和の底部ベントナイトに荷重が作用する状態を考慮	再冠水してから時間が経過し、底部、側部、上部ベントナイトがそれぞれ膨潤する状態を考慮
荷重	荷重の大きさ			
	—	構造躯体及び廃棄体の荷重が、底部ベントナイトに作用する。	処分空洞はベントナイトで閉鎖され、底部ベントナイトに作用する荷重は増大する。	再冠水により浮力が働き、荷重は減少する。
支持力検討	—	側部ベントナイトが敷設される前の状態のため、絞り出し破壊が生じる可能性がある。	側部ベントナイトが設置されるため、底部ベントナイトの動きはSTEP2に比して拘束される。	ベントナイトは飽和することにより、強度が低下し、支持力は減少する。
沈下検討	—	荷重载荷により、底部ベントナイト（不飽和）に初期沈下が生じ、その後徐々に沈下が生じる。	STEP2より荷重が増大することにより、さらに厳しい状態になる。	作用荷重は減少するが、ベントナイトが飽和状態になることで物性値（弾性係数）も小さくなる。

1.3-2

1.3.2 検討方法

(1)支持力検討

破壊モードを絞り出し破壊と考えた。以下に絞り出し破壊の式を示す。

$$q_f = 4 C_u + C_u B / 2 H$$

ここに、 q_f : 絞り出し破壊圧(MPa) C_u : 非排水せん断強度(MPa)

B : 荷重載荷幅(m) H : 底部ベントナイトの厚さ(m)

$$q_{fa} = q_f / 3 \quad (\text{安全率を } 3 \text{ として許容絞り出し破壊圧 } q_{fa} \text{ を考慮})$$

(2)沈下検討

沈下検討については、STEP3 (閉鎖完了時) および STEP4 (再冠水以降) に対して以下の方法により検討を行った。

1)STEP3 (閉鎖完了時)

a)初期沈下量

初期沈下量は底部ベントナイト層を弾性体とみなし、下式により算定する。

$$S_E = H \times w / E_{50}$$

ここに、 S_E : 初期沈下量 (m) H : 厚さ (m)

w : 作用荷重 (MPa) E_{50} : 弾性係数 (MPa)

b)クリープ沈下量

不飽和土の沈下に関する文献に基づき、クリープ沈下量は初期沈下量の1~3倍として算定する。

$$S_C = (1 \sim 3) \times S_E$$

ここに、 S_C : クリープ沈下量 (m)

S_E : 底部ベントナイト層の初期沈下量 (m)

2)STEP4(再冠水以降)

a)弾性沈下量

STEP3 から STEP4 にかけては作用荷重は減少するが、ベントナイトが不飽和状態から飽和状態に変わるため、物性値 (弾性係数) も小さくなる。そこでSTEP4 の状態 (作用荷重, 弾性係数) での弾性沈下量を計算し、その沈下量をSTEP4 での弾性沈下量とする。

b)圧密沈下量

b) 圧密沈下量

圧密沈下は、一次圧密沈下量を以下に示す算定式により求める。

$$S_{1c} = \frac{Cc}{1+e_0} H \log \frac{p_0 + W}{p_c}$$

ただし、 $p_0 + w > p_c$

ここに、 S_{1c} ：一次圧密沈下量 (m)

C_c ：底部ベントナイト層の圧縮指数

e_0 ：初期間隙比 p_0 ：初期(荷重載荷前)の有効応力(MPa)

p_c ：圧密降伏応力(MPa) w ：作用荷重(MPa)

1.3.3 検討結果

(1) 支持力検討結果

1) STEP3 (閉鎖完了時)

① 乾燥密度 1.6g/cm³ の場合

$$q_{fa} = 2.15 \text{MPa} > w = 0.9 \text{MPa}$$

② 乾燥密度 1.8g/cm³ の場合

$$q_{fa} = 6.45 \text{MPa} > w = 0.9 \text{MPa}$$

2) STEP4 (再冠水以降)

① 乾燥密度 1.6g/cm³ の場合

$$q_{fa} = 0.81 \text{MPa} > w = 0.6 \text{MPa}$$

② 乾燥密度 1.8g/cm³ の場合

$$q_{fa} = 5.59 \text{MPa} > w = 0.6 \text{MPa}$$

(2) 沈下量検討結果

1) STEP3 (閉鎖完了時)

a) 初期沈下量

① 乾燥密度 1.6g/cm³ の場合

$$S_E = H \times w / E_{50} = 0.45 \text{cm}$$

② 乾燥密度 1.8g/cm³ の場合

$$S_E = H \times w / E_{50} = 0.18 \text{cm}$$

b) クリープ沈下量

① 乾燥密度 1.6g/cm³ の場合

$$S_C = (1 \sim 3) \times S_E = 0.45 \text{cm} \sim 1.35 \text{cm}$$

② 乾燥密度 1.8g/cm³ の場合

$$S_C = (1 \sim 3) \times S_E = 0.18 \text{cm} \sim 0.54 \text{cm}$$

c) 総沈下量

① 乾燥密度 1.6g/cm³ の場合

$$S = S_E + S_C = 0.45\text{cm} + 0.45 \sim 1.35\text{cm} = 0.90 \sim 1.80\text{cm}$$

②乾燥密度 1.8g/cm^3 の場合

$$S = S_E + S_C = 0.18\text{cm} + 0.18 \sim 0.54\text{cm} = 0.36 \sim 0.72\text{cm}$$

2)STEP4 (再冠水以降)

a)初期沈下量

①乾燥密度 1.6g/cm^3 の場合

$$\text{初期沈下量 } S_E = \text{弾性沈下量(STEP4)} = 0.03\text{m}$$

②乾燥密度 1.8g/cm^3 の場合

$$\text{初期沈下量 } S_E = \text{弾性沈下量(STEP4)} = 0.006\text{m}$$

b)圧密沈下量

①乾燥密度 1.6g/cm^3 の場合

初期有効応力 $p_0 = 0.008\text{MPa}$ と作用荷重 $w = 0.9\text{MPa}$ の合計が、圧密降伏応力 $p_c = 1.5\text{MPa}$ を下回るため、圧密沈下は発生しない。

②乾燥密度 1.8g/cm^3 の場合

初期有効応力 $p_0 = 0.009\text{MPa}$ と作用荷重 $w = 0.9\text{MPa}$ の合計が、圧密降伏応力 $p_c = 4.7\text{MPa}$ を下回るため、圧密沈下は発生しない

c)総沈下量

$$\text{①乾燥密度 } 1.6\text{g/cm}^3 \text{ の場合} \quad S = S_E = 3.0\text{cm}$$

$$\text{②乾燥密度 } 1.8\text{g/cm}^3 \text{ の場合} \quad S = S_E = 0.6\text{cm}$$

1.3.4 考察

(1) 支持力について

底部ベントナイト層が不飽和状態である STEP3 においても、飽和状態となる STEP4 においても、絞り出し破壊は生じない結果となった。

このような観点から、本検討の対象とした処分概念においては、支持力に対する健全性を維持できるものと評価できる。

(2) 沈下について

底部ベントナイト層が不飽和状態である STEP3 における最大沈下量は、クリーブを考慮したとしても乾燥密度 1.6g/cm^3 で 1.80cm 、乾燥密度 1.8g/cm^3 で 0.72cm であり、底部ベントナイト層が飽和状態となる STEP4 においては、乾

燥密度 1.6g/cm^3 で 3.00cm ，乾燥密度 1.8g/cm^3 で 0.60cm となった。これより初期の底部ベントナイト層厚さ 100cm と比較すると僅かであることが分かった。

このような観点から、本検討の対象とした処分概念においては、沈下に対する健全性を維持できるものと評価できる。

1.3.5 今後の課題

- ① 不飽和土の支持力について、今回は簡易な方法を用いて検討した。今後、施工状況を模擬した支持力試験を行い、沈下量，支持力，破壊モードの確認をする必要がある。
- ② 今回の検討では、せん断クリープやベントナイトの流動については未検討であり、長期的な挙動を把握する上で今後の課題となる。

1.4 大空洞長期挙動の予備検討

1.4.1 目的

TRU 廃棄物処分場の形状・寸法などの検討が進められているが、この処分場の成立性の検討の一つとして岩盤の長期挙動を把握し、処分場の健全性の評価に役立てる。

1.4.2 モデルの設定

岩盤のクリープを記述するモデルは非常に多く提案されており確立されたものとはなっていないが、以下に示す特徴を有し現状で最適と考えられる大久保モデルを用いる。

1.4.3 パラメータの設定

動燃により高レベル廃棄物処分場を対象とした岩盤物性値の文献調査が行われ解析用の暫定的なパラメータが設定されている。岩種としては硬い岩盤（結晶質岩、酸性岩）および柔らかい岩盤（新第三世紀以降堆積岩、泥岩／凝灰岩）を設定した。物性値については、特に結晶質岩は亀裂の影響を受けると考えられるため、文献調査によって得られた物性のうち弾性係数、粘着力、引張・圧縮強度について亀裂の影響を考慮した低減係数を乗じたものとした。また、空洞内部の物性は、クリープ変形という単独の事象に着目し無視した。

表-1.4-1 解析用物性値

	単位	硬い岩盤	柔らかい岩盤
一軸圧縮強度	MPa	50	20
一軸引張強度	MPa	3.7	2.6
弾性係数	GPa	16	5
ポアソン比	—	0.25	0.28
m	—	20	5
n_0	—	30	20
飽和密度	g/cm ³	2.7	2.3
粘着力	MPa	7	3
内部摩擦角	deg	40	30

1.4.4 対象とする施設の形状

対象とする処分施設の設置深度および空洞の形態については、「TRU 廃棄物の処分概念の検討（Ⅱ）PNC ZJ1100 97-001、1997年3月」でいくつかの案が提示されている。この中から、今回は硬岩のケースとして深度300m、大断面岩洞方式、軟岩のケースとして深度300m、坑道方式について検討する。

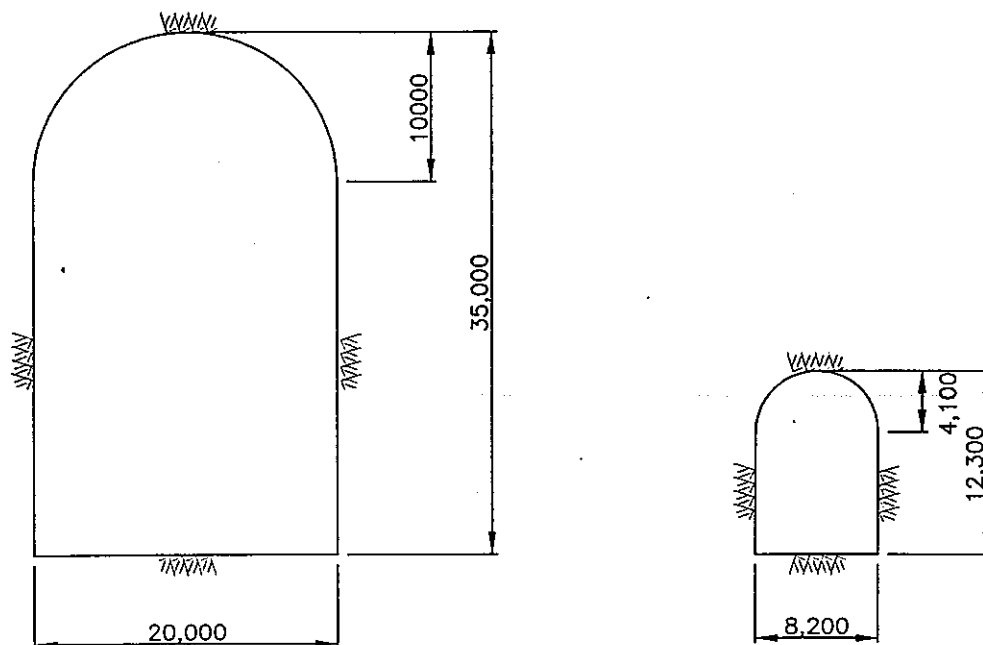


図-1.4-1 大断面岩洞方式（左）および坑道方式（右）の断面形状図

1.4.5 地圧の設定

鉛直地圧： $\sigma_v = \gamma H$

水平地圧： $\sigma_h = k \cdot \gamma H$

側圧係数 k の設定については、以下の2つの事例を考慮すると0.5~3.0までの値が考えられ、これによる岩盤クリープへの影響が大きいと考えられるためパラメータスタディーを行うこととする。側圧係数は、0.5、1.5、2.5の3ケースとした。

1.4.6 結果の整理

解析は300ステップ、即ち 2.9×10^{13} 秒（約100万年）まで行った。以下に解析結果について示す。

A. 変位の経時変化図（図-1.4-2、図-1.4-3）

0秒、1,000年、10,000年、100,000年のそれぞれの時間における絶対変位の値を表-1.4-2、表-1.4-3に示す0秒の値はクリープを計算する前の弾性解を示している。

表-1.4-2 変位の絶対値の経時変化（硬岩）、単位：mm

時間 (年)	側壁			天端		
	k = 0.5	k = 1.5	k = 2.5	k = 0.5	k = 1.5	k = 2.5
0	7.73	30.6	53.4	68.6	38.8	9.0
1,000	7.73	33.1	84.1	68.6	53.3	142.3
10,000	7.73	34.0	91.7	68.6	59.7	173.5
100,000	7.74	34.9	107.2	68.6	65.6	210.9

表-1.4-3 変位の絶対値の経時変化（軟岩）、単位：mm

時間 (年)	側壁			天端		
	k = 0.5	k = 1.5	k = 2.5	k = 0.5	k = 1.5	k = 2.5
0	6.8	28.3	49.9	163.3	84.5	5.8
1,000	7.9	33.9	81.1	164.4	95.1	58.0
10,000	9.2	35.5	89.0	165.3	98.7	71.5
100,000	11.0	37.5	99.1	166.4	103.4	88.1

次に、それぞれのステップでの絶対変位から0秒での弾性変位を差し引いた純粋なクリープ変位の時間変化を図-1.4-2、図-1.4-3に示す。硬岩、軟岩のそれぞれについて、空洞頂点及び側壁中央でのクリープ変位の増加の様子が分かる。

以上の結果から分かることを整理すると、

- ・弾性解は、側圧係数が 0.5 では天端部が、2.5 では側壁部が相対的に大きい。
- ・側圧係数が 0.5 ではクリープは小さく、2.5 では大きい。
- ・側壁部に比べ天端部の方がクリープ変位は大きいですが、変位量は側圧係数が 0.5 及び 1.5 では硬岩と軟岩の大きな差異はないものの、側圧係数 2.5 では硬岩のクリープが時間とともに大きくなる。

B. コンプライアンス比図（図-1.4-4～図-1.4-5）

以下の3つの時間ステップについてのコンプライアンス比図（初期コンプライアンスに対する各ステップでのコンプライアンスの比）を示す。

① $t=1.1s$

② $t=1.05 \times 10^3$ 年

③ $t=1.03 \times 10^4$ 年

- ・軟岩、 $k=0.5$ のケースを除いてクリープは天端部と底盤部で発生しており、時間とともに上下 45° 方向に延びている。
- ・コンプライアンスの変化は、硬岩では局所的で、軟岩では比較的広範囲に及んでいる。

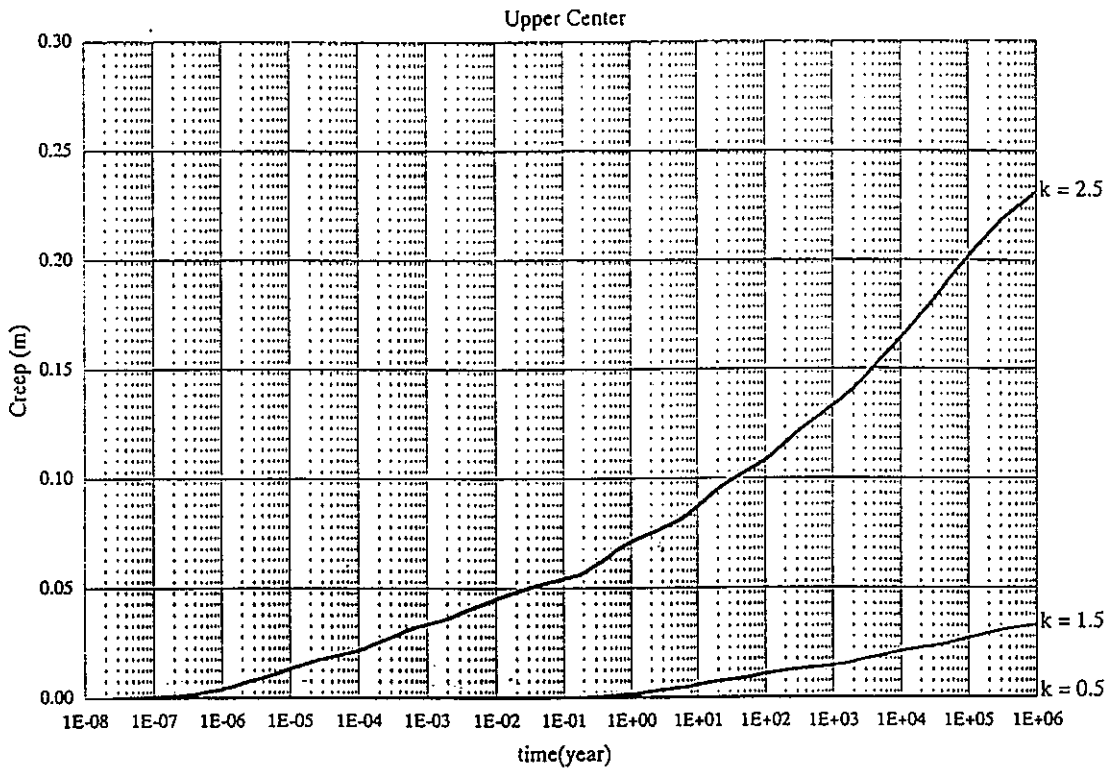


図-1.4-2 変位の時間変化図 (硬岩、天端部中央)、 $k = 0.5, 1.5, 2.5$

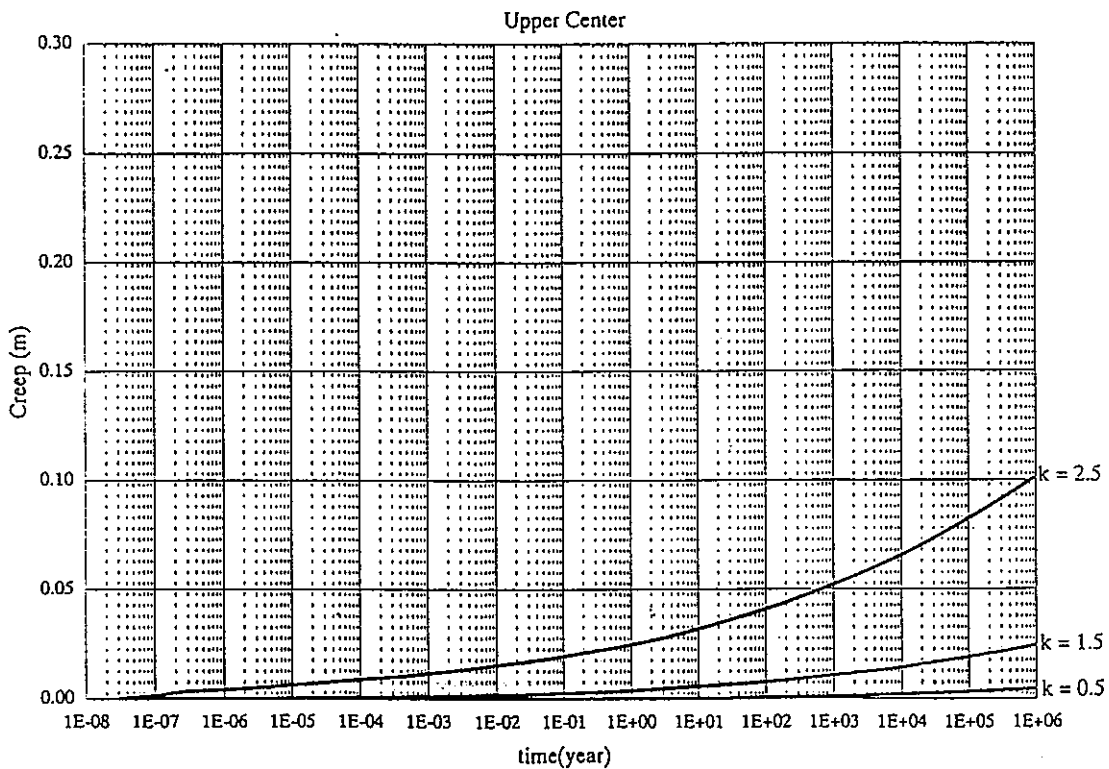


図-1.4-3 変位の時間変化図 (軟岩、天端部中央)、 $k = 0.5, 1.5, 2.5$

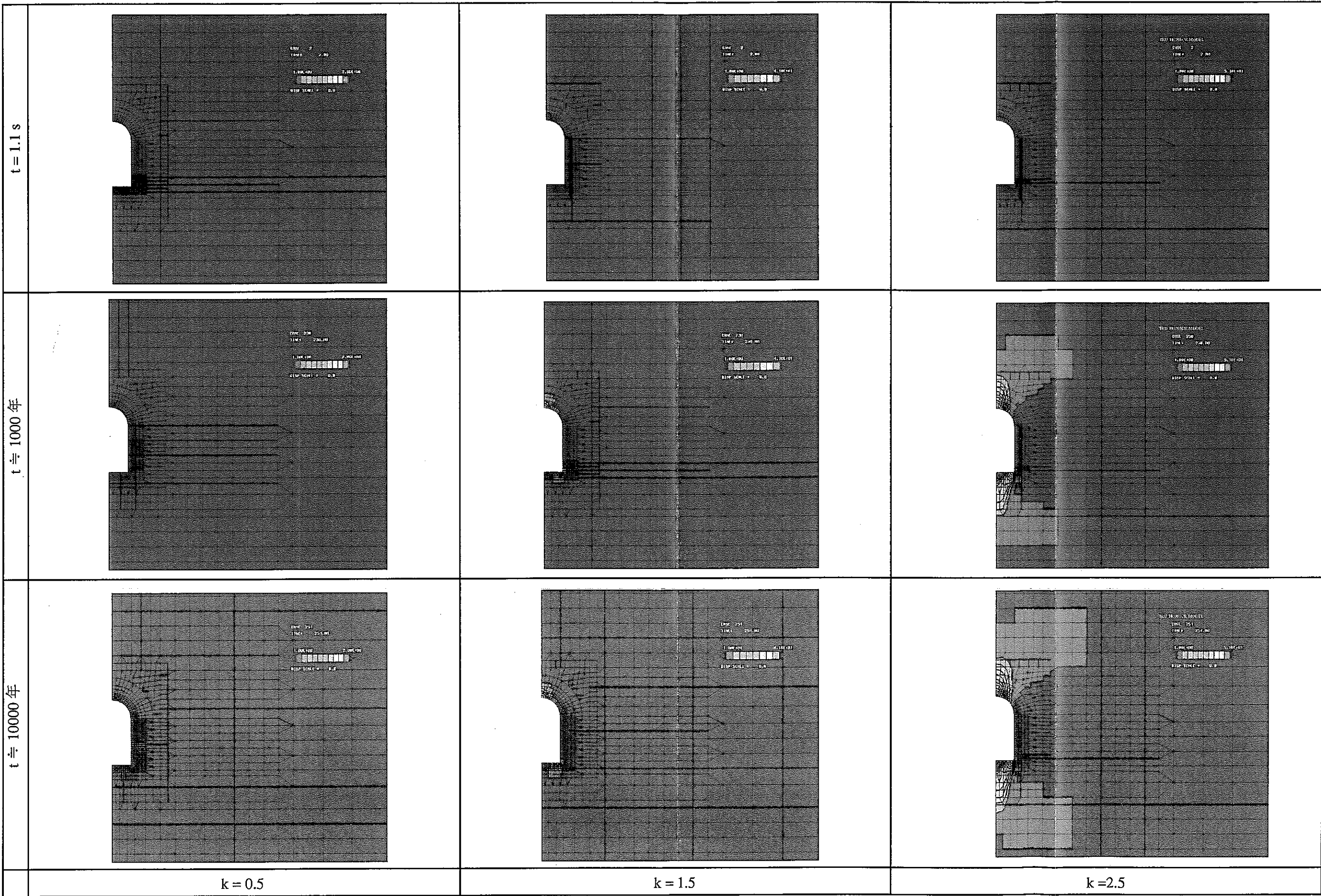


図-1.4-4 コンプライアンス比の分布図 (硬岩)

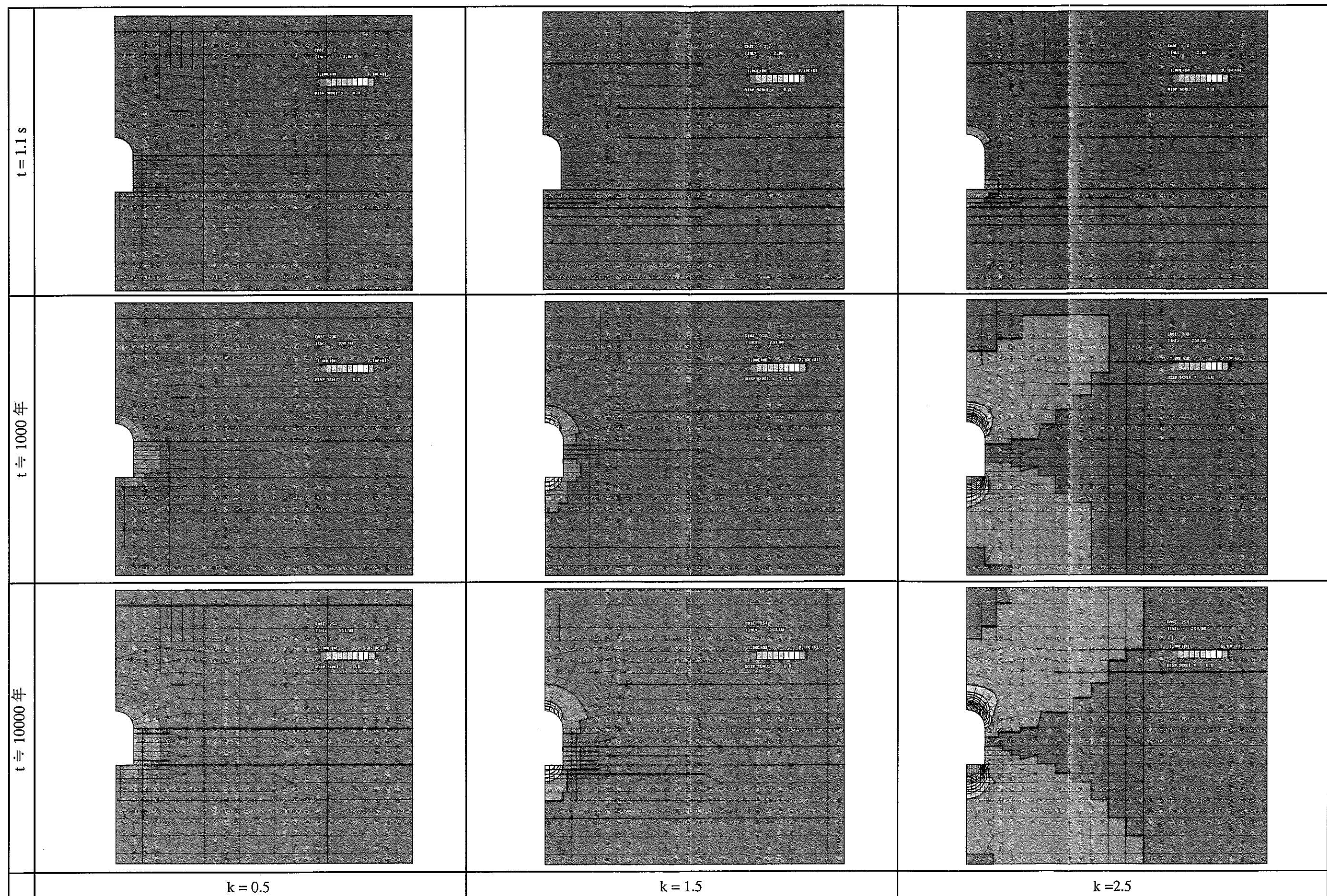


図-1.4-5 コンプライアンス比の分布図 (軟岩)

1.4.7 考察

硬岩の場合

- ・側圧係数 0.5 では、クリープ変形はほとんどなく、側圧係数 1.5 でも 10 万年前でクリープ変形は約 3cm と非常に小さく、空洞の長期安定性に問題はないといえる。
- ・側圧係数 2.5 では、10 万年後のクリープ変形は空洞の幅である 20m を基準に考えると $(210.9 - 9.0) / 20,000 \approx 10 / 1,000$ となり、やや大きめであるため安全性の判断基準についての検討が必要と考えられる。
- ・側圧係数 2.5 では、側壁部に引張が生じているが、現状の大久保モデルでは引張の破壊基準式が組み込まれていないためコンプライアンスの時間変化が正しく評価ができていない。この点を改良すれば、側壁部にもコンプライアンスの変化が現れてくると考えられる。

軟岩の場合

- ・側圧係数 0.5 では、クリープ変形はほとんどなく、側圧係数 1.5 でも 10 万年前でクリープ変形は約 2cm と非常に小さく、空洞の長期安定性に問題はないといえる。
- ・側圧係数 2.5 では、10 万年後のクリープ変形は空洞の幅である 8.2m を基準に考えると $(88.1 - 5.8) / 8,200 \approx 10 / 1,000$ となり、やや大きめであるため安全性の判断基準についての検討が必要と考えられる。

硬岩と軟岩の比較

- ・硬岩のケースでは大断面、軟岩のケースでは小断面を想定しているが、クリープ変形で見ると両者の間に大きな差異は見られない。従って、岩質の違いによる空洞の大きさの設定は岩盤の長期クリープの面からも妥当といえるのではないか。
- ・側圧係数 2.5 は、空洞の長期安定性の判断のためにはなんらかの指標の検討が必要と考えられる。一方、こうした側圧係数の大きなサイトが処分地として選定されるべきか否かの判断についても、他の設計に関する要件も含めて総合的に取り扱う必要がある。

1.4.8 今後の課題

今後の課題として考えられる事項を以下に示す。

解析モデルそのものの改良については、

- ・引張に対する破壊基準式を考慮する

解析結果の評価については、

- ・クリープ変形が大きい場合の空洞の安定性評価の方法について検討する
- ・モデルの信頼性についてナチュラルアナログ的な考え方を導入する

また、岩盤クリープが起因となって影響すると考えられる事項として、

- ・力学的緩み（クリープによる緩み）による、水理的緩み（透水係数の増加）の関係の検討を行う
- ・岩盤のクリープ変形が緩衝材に与える影響について検討する

[参考文献]

- 1) 動燃：地層処分システムにおけるシーリング研究（Ⅲ）、PNC PJ1100 94-002、1994.2
- 2) 動燃：地層処分施設の設計研究、PNC ZJ1449 97-004、1997.3
- 3) 動燃：TRU 廃棄物の処分概念の検討（Ⅱ）、PNC ZJ1100 97-001、1997.3
- 4) 原子力環境整備センター：平成5年度 低レベル放射性廃棄物処分可視画像化調査 地質条件予測コードの作成、H6.3
- 5) 大久保誠介：岩盤のクリープ、資源・素材学会誌、Vol.108., No.8, pp293-296, 1991
- 6) 大久保誠介他：非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレーション、日本鉱業学会誌、Vol.103, No.5, pp293-296, 1987

1.5 人工バリア材料の力学特性データの取得

1.5.1 目的

本試験は、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、Na 型ベントナイト、Ca 化ベントナイト、Ca 型ベントナイト、ケイ砂と Ca 化ベントナイトの混合材料の基本特性データを取得することを目的として実施したものである。

1.5.2 使用材料

本検討で使用した材料について表-1.5-1 に示す。

表-1.5-1 使用材料

種類	分類	製造元および商品名
ベントナイト	Na 型ベントナイト	クミネ工業製、クニゲルV 1
	Ca 化ベントナイト	クミネ工業製、クニゲルV 1 を強制的に Ca 型に変質させたもの
	Ca 型ベントナイト	クミネ工業製、クニボンド
砂	ケイ砂 3 号	日陶連原料製、愛知県瀬戸市窯元産
	ケイ砂 5 号	日陶連原料製、愛知県知多郡美浜産

1.5.3 試験条件

本検討での試験条件について表-1.5-2 に示す。

表-1.5-2 配合条件と試験数量

試料	項目	砂 配合率(%)	ベントナイト 配合率(%)	設定乾燥 密度 ρ_d (t/m^3)	初期含水比 ω (%)	膨潤圧 試験	透水 試験
Na 型ベントナイト		0	100	1.8	自然含水比	3	3
		0	100	1.2	自然含水比	3	3
Ca 化ベントナイト		0	100	1.8	自然含水比	3	3
		0	100	1.2	自然含水比	3	3
Ca 型ベントナイト		0	100	1.8	自然含水比	3	3
		0	100	1.2	自然含水比	3	3
ケイ砂 + Ca 化ベントナイト		70	30	1.8	自然含水比	3	3

*自然含水比（ベントナイト 6～10%）

1.5.4 試験方法

(1) 圧縮固化方法

ベントナイトは粉体であるため、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、圧縮装置を用いて、一定の荷重で静的に圧縮して作成した。

(2) 膨潤圧試験

膨潤圧試験装置は、円筒のモールド内に圧縮固化した供試体が、多孔質体を介して体積変化しないように設置する。この装置に上下から蒸留水を供給して、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。

(3) 透水試験

透水係数は、圧縮固化したベントナイト中を流れる浸透水がダルシーの法則に従うと仮定して、定水位透水試験を行った。

1.5.5 試験結果

(1) Na型及びCa化ベントナイト

(a) 膨潤圧

図-1.5-1 に膨潤圧と経過時間の関係（一部）を、図-1.5-2 に膨潤圧と乾燥密度の関係を示す。

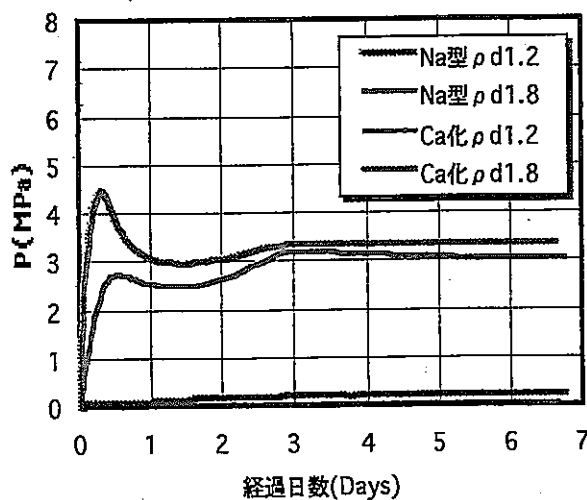


図-1.5-1 膨潤圧と経過日数の関係

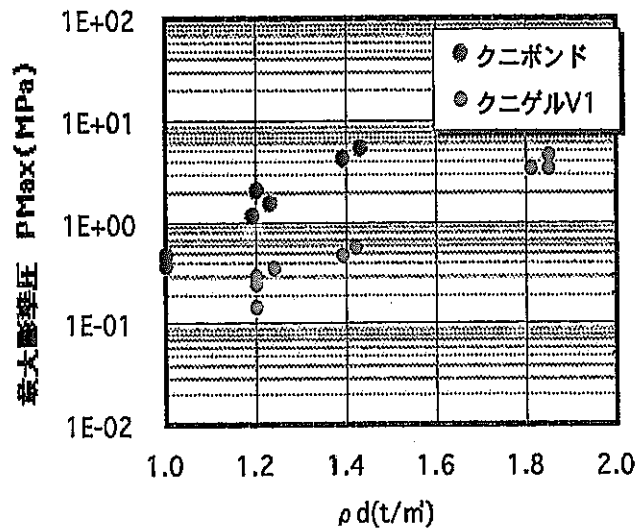


図-1.5-2 最大膨潤圧と乾燥密度の関係

図-1.5-1 に示したように、吸水を開始してすぐに第一のピークが得られ、一度減少した後再び増加して一定値を保持する傾向がある。この2つのピークをとる現象は、既往の知見でも種々報告されている。Pusch は Na 型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-1.5-3 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。

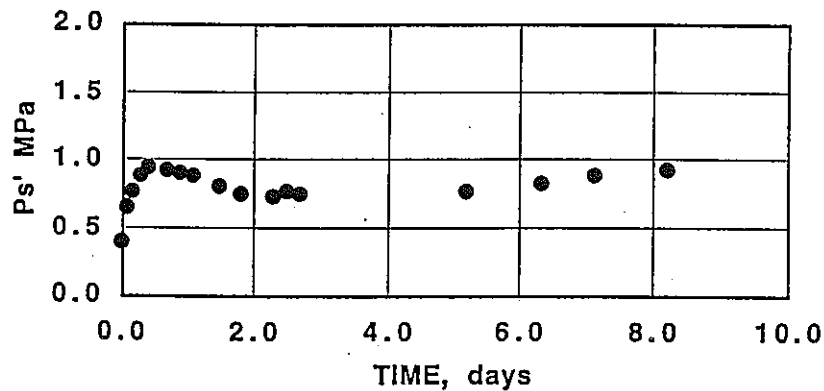


図-1.5-3 膨潤圧と膨潤の発現時間

(b) 透水係数

図-1.5-4 に透水係数と経過時間の関係（一部）を図-1.5-5 に透水係数と乾燥密度の関係を示す。

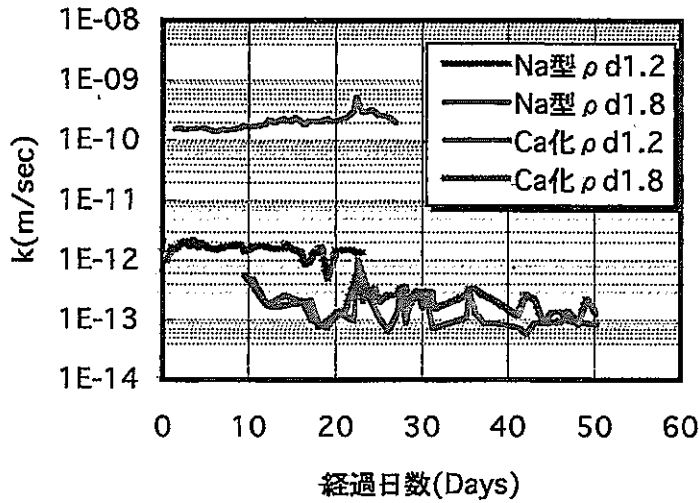


図-1.5-4 透水係数と経過日数の関係

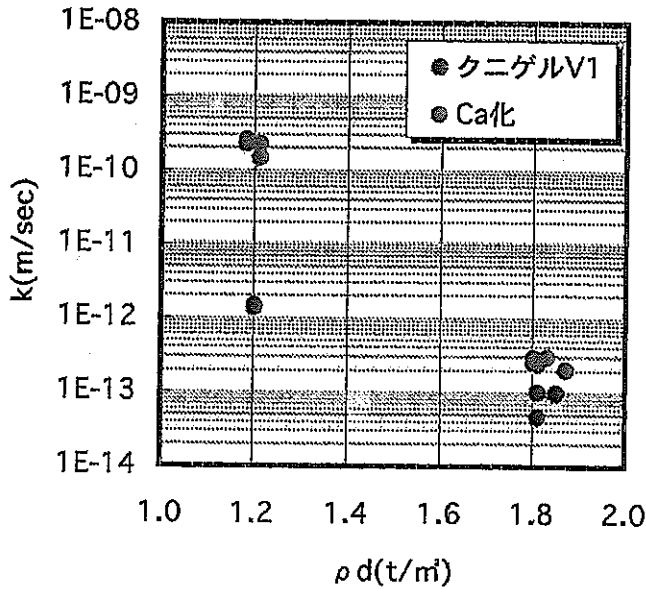


図-1.5-5 透水係数と乾燥密度の関係

透水係数と乾燥密度の関係では、乾燥密度の増加に伴って透水係数は小さくなる傾向を示し、既往のクニゲル V1 及び Ca 化クニゲル V1 の試験値に近似した結果を示した。これまでの試験結果を総合すると、乾燥密度 1.8t/m³ 程度の高乾燥密度領域では Ca 化クニゲル V1 とクニゲル V1 の透水係数はクニゲル V1 の方が若干小さい傾向にあるが、乾燥密度 1.2t/m³ 程度の低乾燥密度領域で

は二桁程度 Ca 化クニゲル V1 の透水係数が大きくなる。

(2)Ca 型ベントナイト

(a)膨潤圧

図-1.5-6 に膨潤圧と経過時間の関係 (一部) を、図-1.5-7 に膨潤圧と乾燥密度の関係を示す。

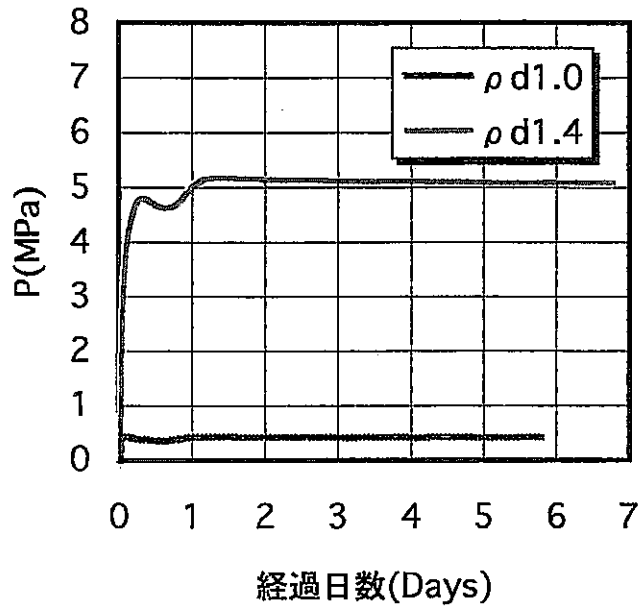


図-1.5-6 膨潤圧と経過日数の関係

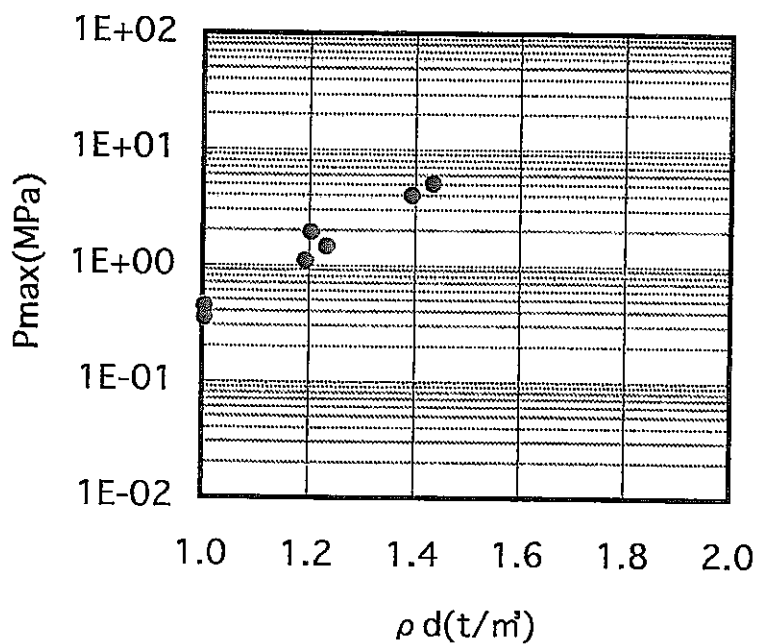


図-1.5-7 最大膨潤圧と乾燥密度の関係

(b) 透水係数

図-1.5-8 に透水係数と経過時間の関係 (一部) を、図-1.5-9 に透水係数と乾燥密度の関係を示す。

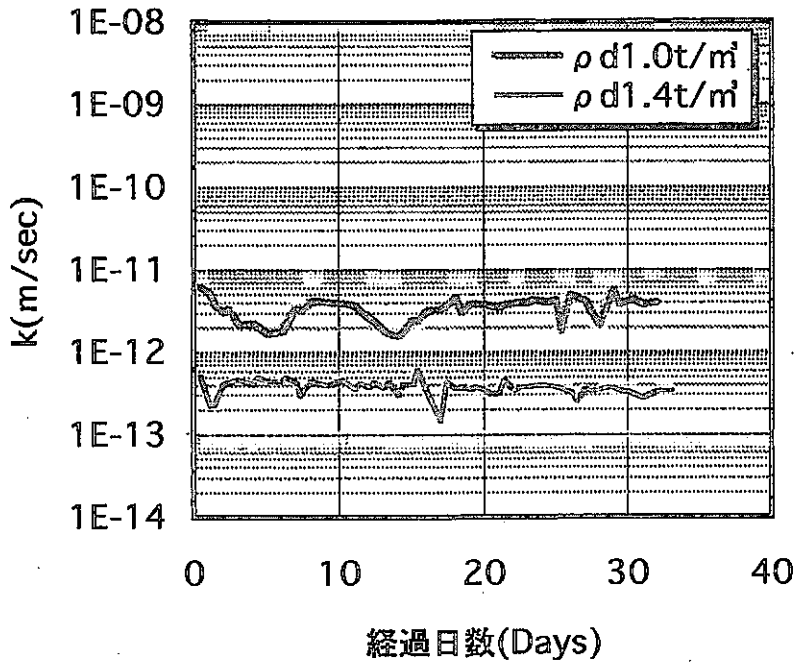


図-1.5-8 透水係数と経過日数の関係

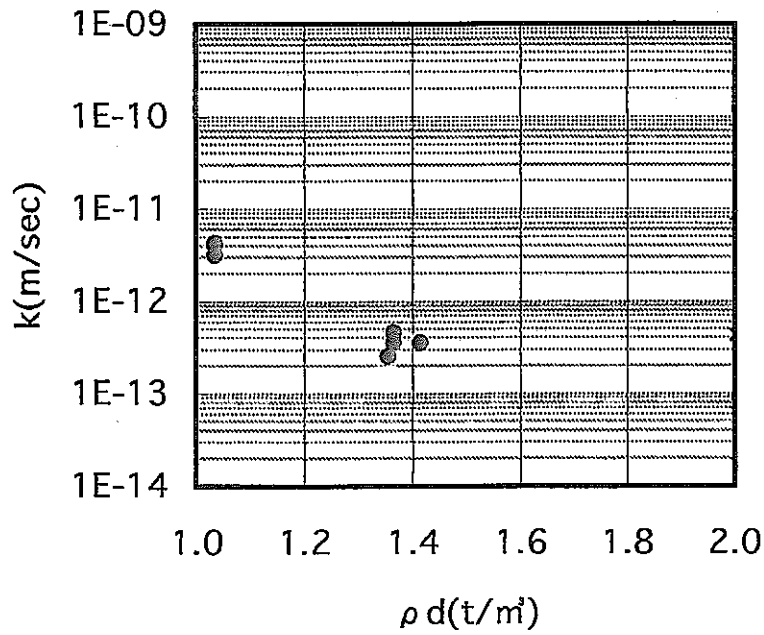


図-1.5-9 透水係数と乾燥密度の関係

(3)ケイ砂とCa化ベントナイトの混合材料

(a)膨潤圧

図-1.5-10 に膨潤圧と経過時間の関係（一部）を示す。

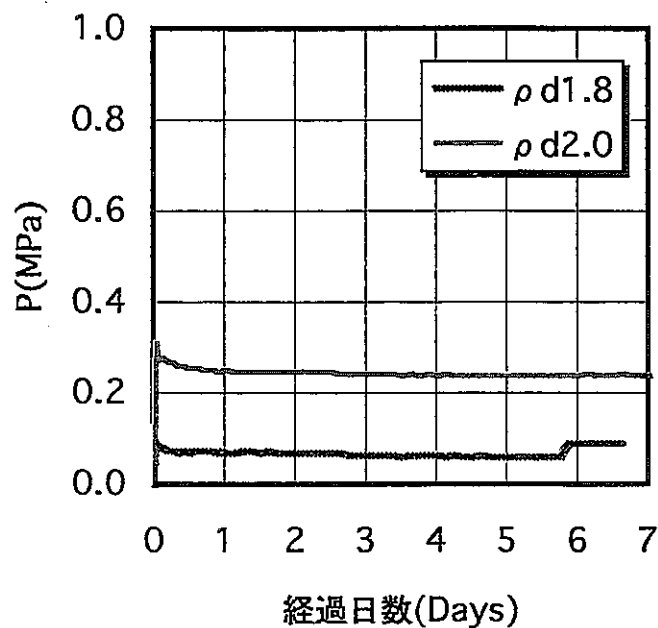


図-1.5-10 膨潤圧と経過日数の関係

(b)透水係数

図-1.5-11 に透水係数と経過時間の関係（一部）を示す。

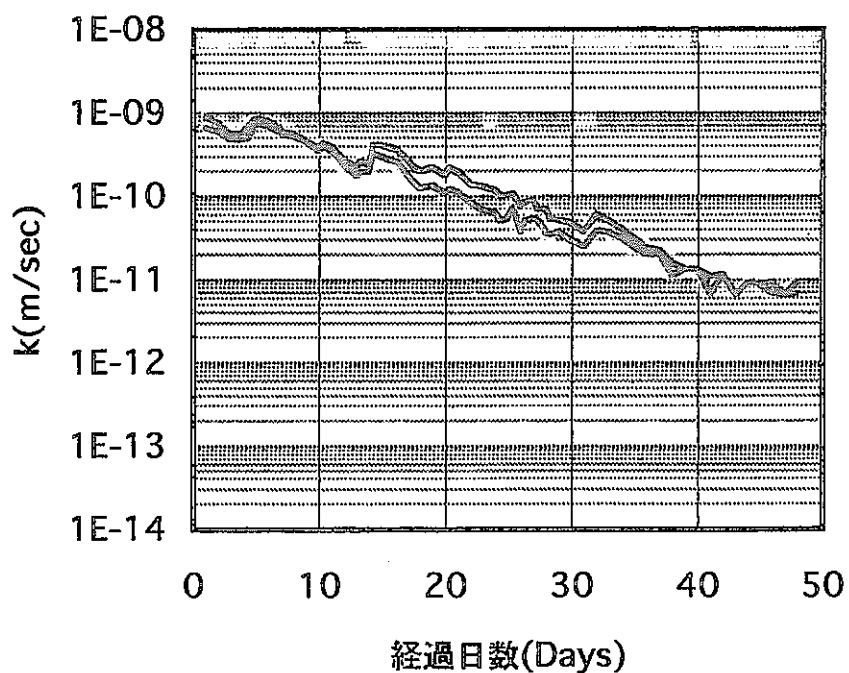


図-1.5-11 透水係数と経過日数の関係

1.5.6 まとめと今後の課題

(1)水酸化カルシウム水溶液系の通水による基本特性を蒸留水系での通水結果と比較すると以下のようなになる。

- ① Ca 化クニゲル V1 の透水性は蒸留水系に比べて大きい傾向が見られるが、クニゲル V1 及び Ca 型ベントナイトについては、ほぼ同程度と見られる。
- ②最大膨潤圧については、ベントナイトの種類に関係なく、ほぼ同程度である。

(2)今後の課題

- ①処分サイトが海水の影響を受ける場合も考えられるので、海水を含水させた系での基本特性データの取得も必要と思われる。
- ② Ca 化に対する自己シール性を明らかにするため膨潤量の把握が必要と思われる。

第2章 大空洞処分技術の開発，及びシステム設計研究

2.1 数値解析法による空洞安定解析

2.1.1 はじめに

放射性廃棄物処分施設建設における地山掘削後の空洞周辺岩盤の緩み領域，変形，応力状態を把握するため，有限要素法を用いて検討を行った。

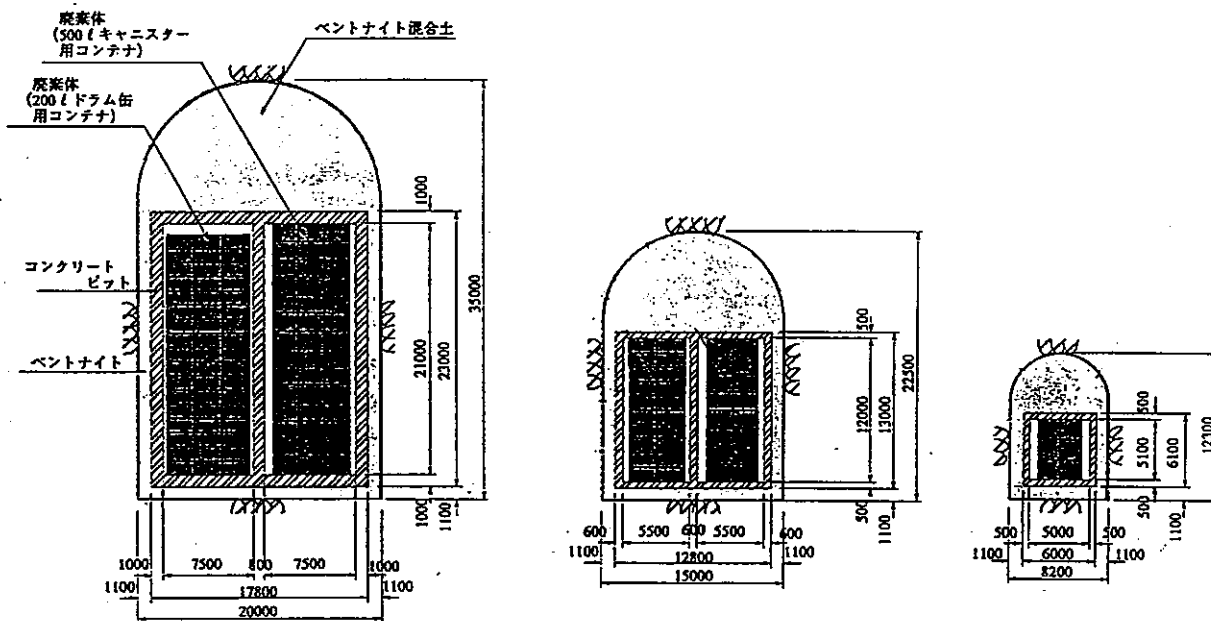
処分施設としての岩洞方式及びサイロ方式の空洞安定性を比較するため，緩み領域，変形を指標とした検討を行った。

2.1.2 検討条件

検討条件を以下に示す。

a. 断面形状

それぞれのモデルの断面形状を図-2.1-1に示す。



- ・大断面岩洞方式
- ・サイロ方式

- ・小断面岩洞方式

- ・坑道方式

図-2.1-1 断面形状

b. 検討モデル

- ・大断面岩洞方式，小断面岩洞方式，坑道方式 [2次元全応力線形弾性解析]
- ・サイロ方式 [3次元全応力線形弾性解析]

境界条件は，側方は鉛直方向ローラー，下端は固定境界とする。

大断面岩洞方式の解析用要素分割図を図-2.1-2に示す。

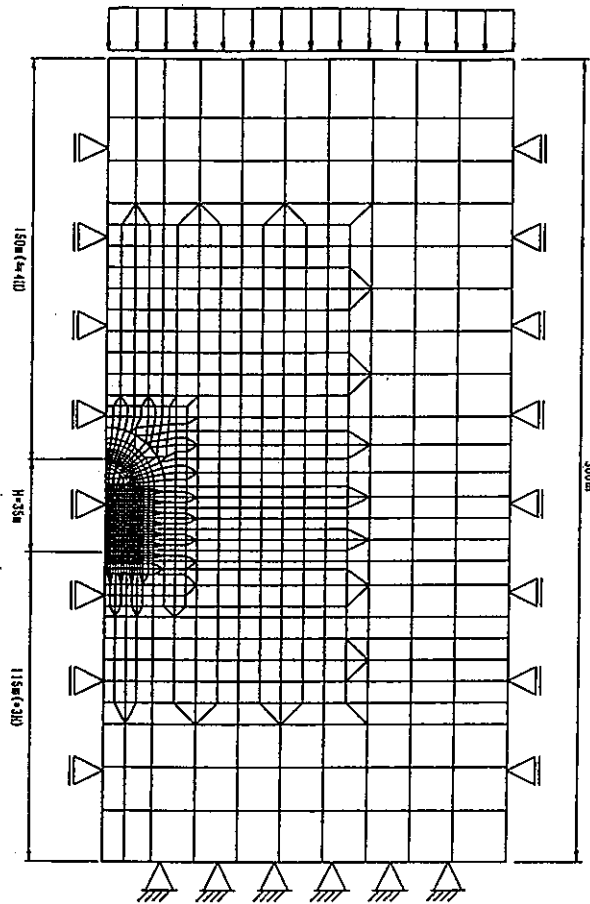


図-2.1-2 解析用要素分割図（大断面岩洞方式，サイロ方式）

c. 設置深度及び側圧係数

GL-300m [k=1.5] , GL-700m [k=1.2] （2ケース）

d. 岩種及び物性値

岩種は硬岩，軟岩の2種類とする。物性値を表-2.1-1に示す。

表-2.1-1 解析用物性値

		岩種	
		硬岩	軟岩
弾性係数 E	GPa(kgf/cm ²)	16(1.63×10 ⁵)	5(5.09×10 ⁴)
粘着力 c	MPa(kgf/cm ²)	7 (71.38)	3 (30.59)
内部摩擦角 φ	deg(radian)	40(0.6981317)	30(0.5235987)
ポアソン比 ν	—	0.25	0.28
飽和密度 γ	kgf/cm ³	2.7×10 ⁻³	2.3×10 ⁻³
鉛直応力	MPa(kgf/cm ²)	飽和密度×設置深度 (GL-300m, GL-700m)	

2.1.3 解析結果

岩洞方式の局所安全係数による緩み領域図，変形図（変形量，内空変位率）をそれぞれ表-2.1-2，表-2.1-3 に示す。またサイロ方式の局所安全係数による緩み領域図，変形図（変形量，内空変位率）をそれぞれ表-2.1-4，表-2.1-5 に示す。尚、今回の検討では支保は考慮していない。

2.1.4 まとめ

表-2.1-6 に岩洞方式の局所安全係数による緩み領域，変位量及び内空変位率，限界ひずみによる緩み領域の結果による掘削可能性の判定結果を示す。

表-2.1-7 にサイロ方式の局所安全係数による緩み領域，変位量及び内空変位率による掘削可能性の判定結果を示す。

判定基準：局所安全係数(Fs)による緩み領域(Fs ≤ 1.2)^{*1}

……ロックボルト支保を考慮して算定

変位量……4cm 未満^{*2}

内空変位率（内空変位/掘削幅）……2%未満^{*3+4}

限界ひずみ(ε₀)による緩み領域

……硬岩 0.13%未満，軟岩 0.17%未満^{*5} [下限値]

緩み領域については、Fs 緩みと同様

表-2.1-6 掘削可能性（岩洞方式）

			Fs 緩み (m)	許容 緩み (m)	変位量 (cm)	内空変位 率(%)	ε ₀ 緩み(m)		総合
							下限値		
							x	y	
大断面 岩洞	硬岩	GL-300m	6	6.3	2.515	0.126	0	0	○
		GL-700m	6		4.448	0.223	3	2	○
	軟岩	GL-300m	8	6.7	6.809	0.341	8	3	×
		GL-700m	12		12.081	0.607	24	12	×
小断面 岩洞	硬岩	GL-300m	3	4.7	1.592	0.106	0	0	○
		GL-700m	4		2.835	0.190	2	1	○
	軟岩	GL-300m	4	5.0	4.317	0.288	6	1	○
		GL-700m	8		7.715	0.517	16	8	×
坑道	硬岩	GL-300m	2	2.6	0.856	0.105	0	0	○
		GL-700m	2		1.538	0.188	1	1	○
	軟岩	GL-300m	2	2.8	2.319	0.283	3	1	○
		GL-700m	4		4.183	0.511	8	4	×

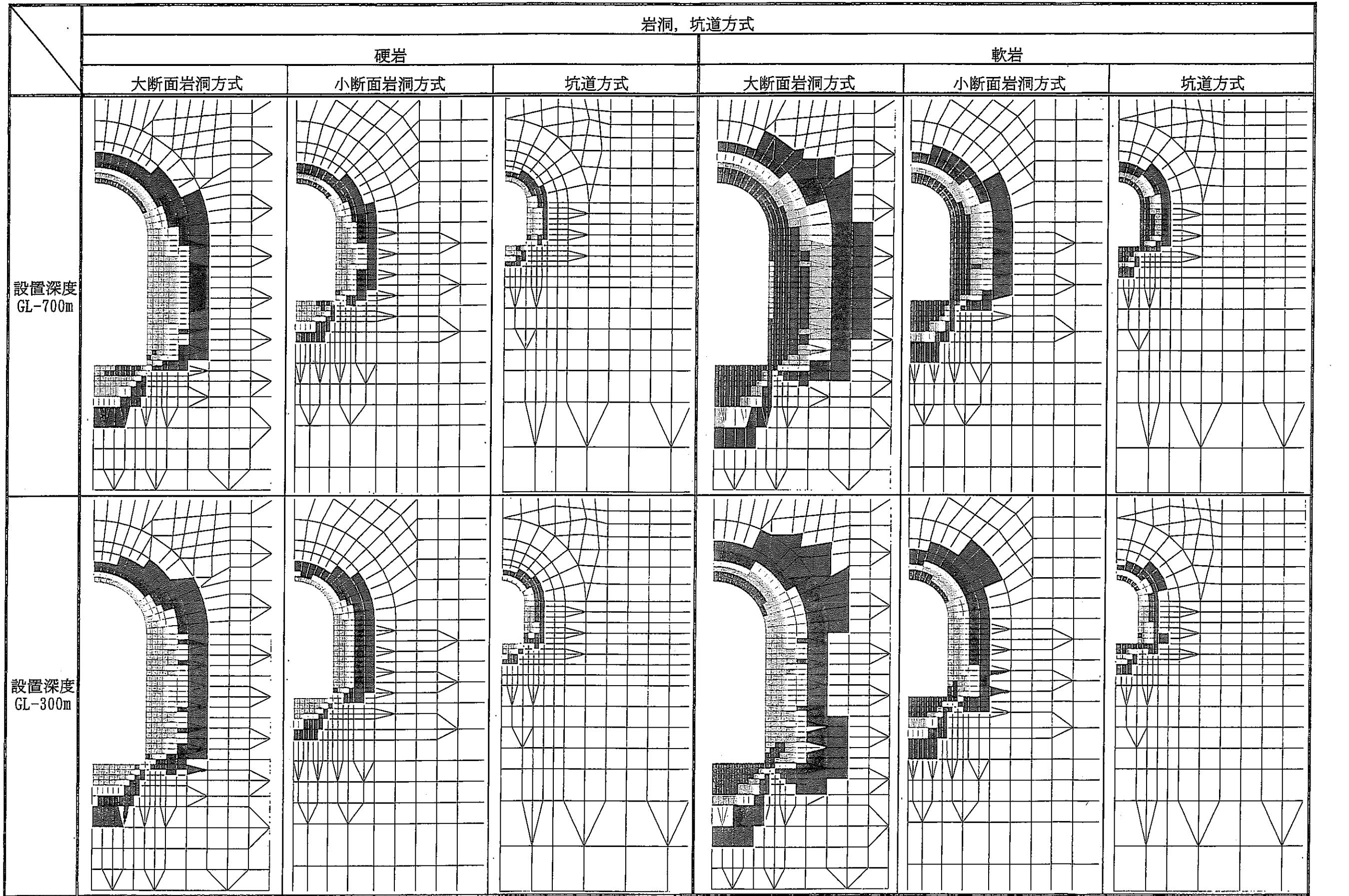
表-2.1-7 掘削可能性 (サイロ方式)

			Fs 緩み(m)	変位量(cm)	内空変位率 (%)	総合
サイロ	硬岩	GL-300m	4	0.839	0.042	○
		GL-700m	3	1.494	0.075	○
	軟岩	GL-300m	6	2.330	0.117	△
		GL-700m	8	4.151	0.208	×

	安定である
	掘削可能性はある
	掘削不可能である

- *1 掘削時の岩盤の緩み領域は、モール・クーロンの破壊基準を用い、せん断に地する局所安全係数 F_s が 1.2 以下の要素を緩み領域と定義する。
- *2 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年7月
- *3 土屋, 安田他「大型トンネル模型実験によるロックボルトの補強効果の検討」第15回 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 31-34, 1983年2月
- *4 岡林, 永井他「NATM 支保設計の考察」鹿島建設技術研究年報, 32 巻, pp. 43-52, 1984年6月
- *5 桜井, 清水「現場計測結果の逆解析による岩盤の力学定数の推定」土と基礎, 35-3(350), 1987.3

表-2.1-2 局所安全係数による緩み領域〔岩洞方式-掘削後〕

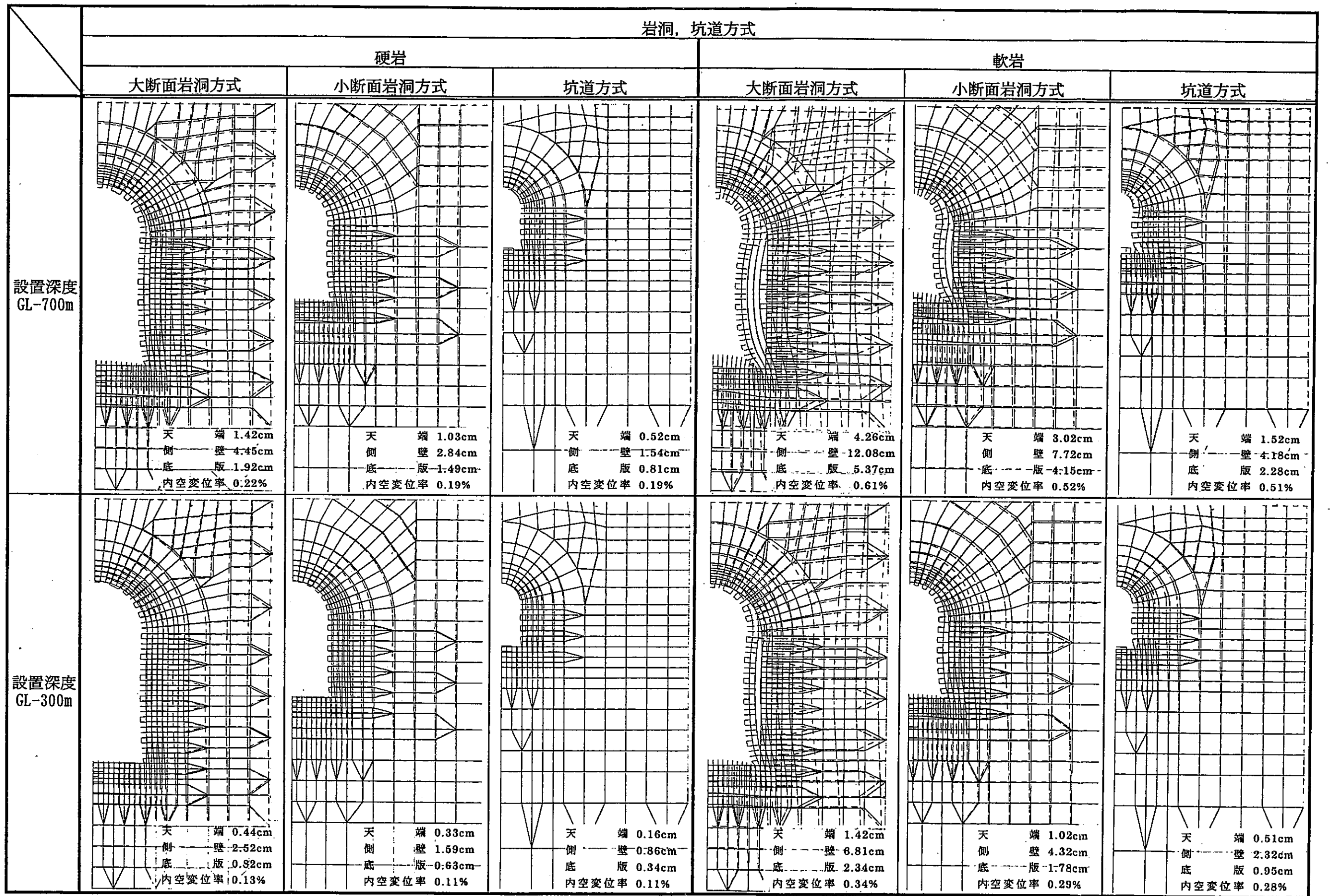


凡例：
 : $0.0 < F_s \leq 1.0$ 緩み領域
 : $1.0 < F_s \leq 1.2$ 緩み領域
 : $1.2 < F_s \leq 1.4$

: $1.4 < F_s \leq 1.6$
 : $1.6 < F_s \leq 2.0$

スケール： (m)

表-2.1-3 変形図〔岩洞方式-掘削後〕



変形図スケール ——— : 1(cm)=14.74(cm)

スケール: (m)

表-2.1-4 局所安全係数による緩み領域〔サイロ方式-掘削後〕

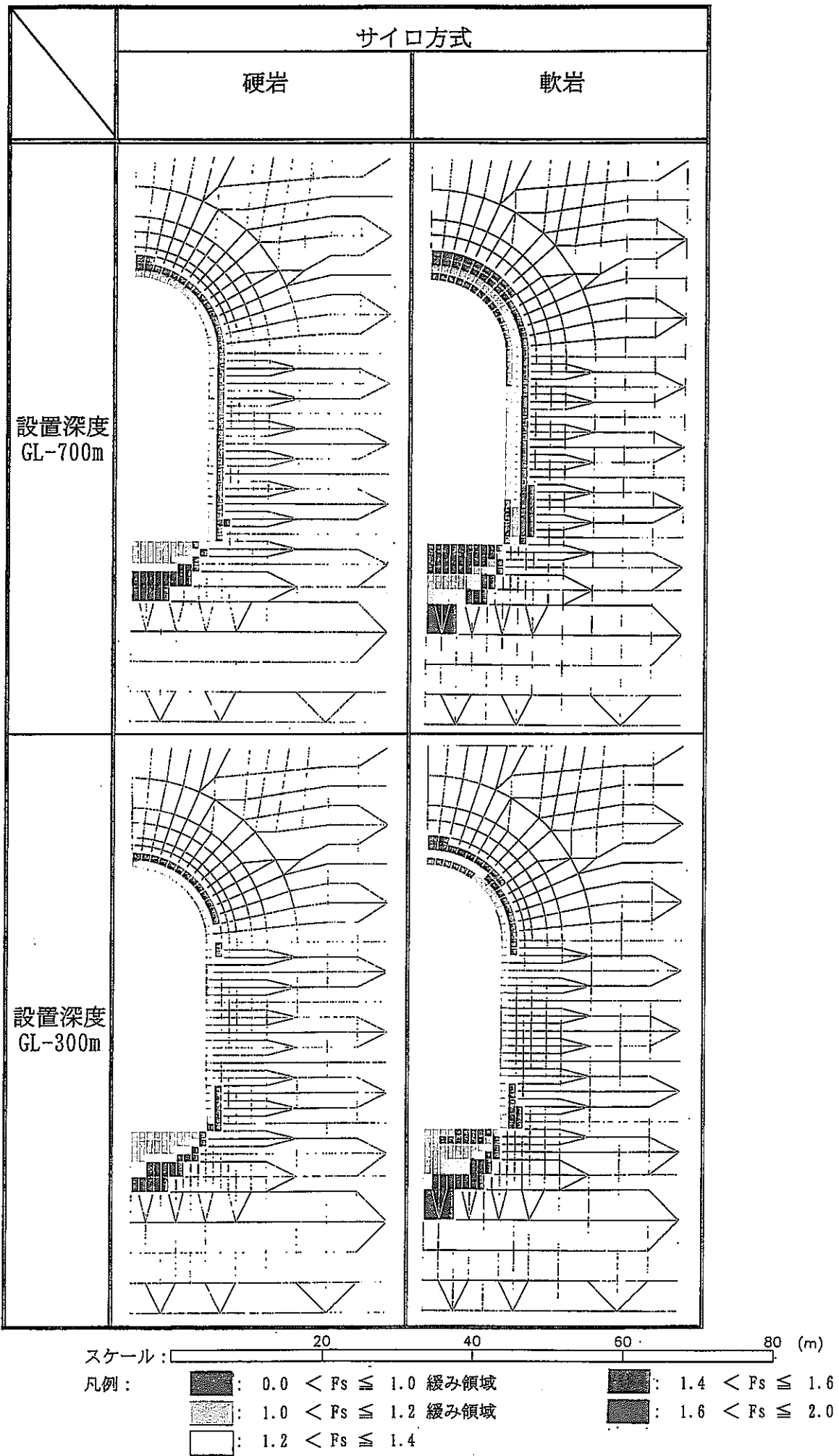
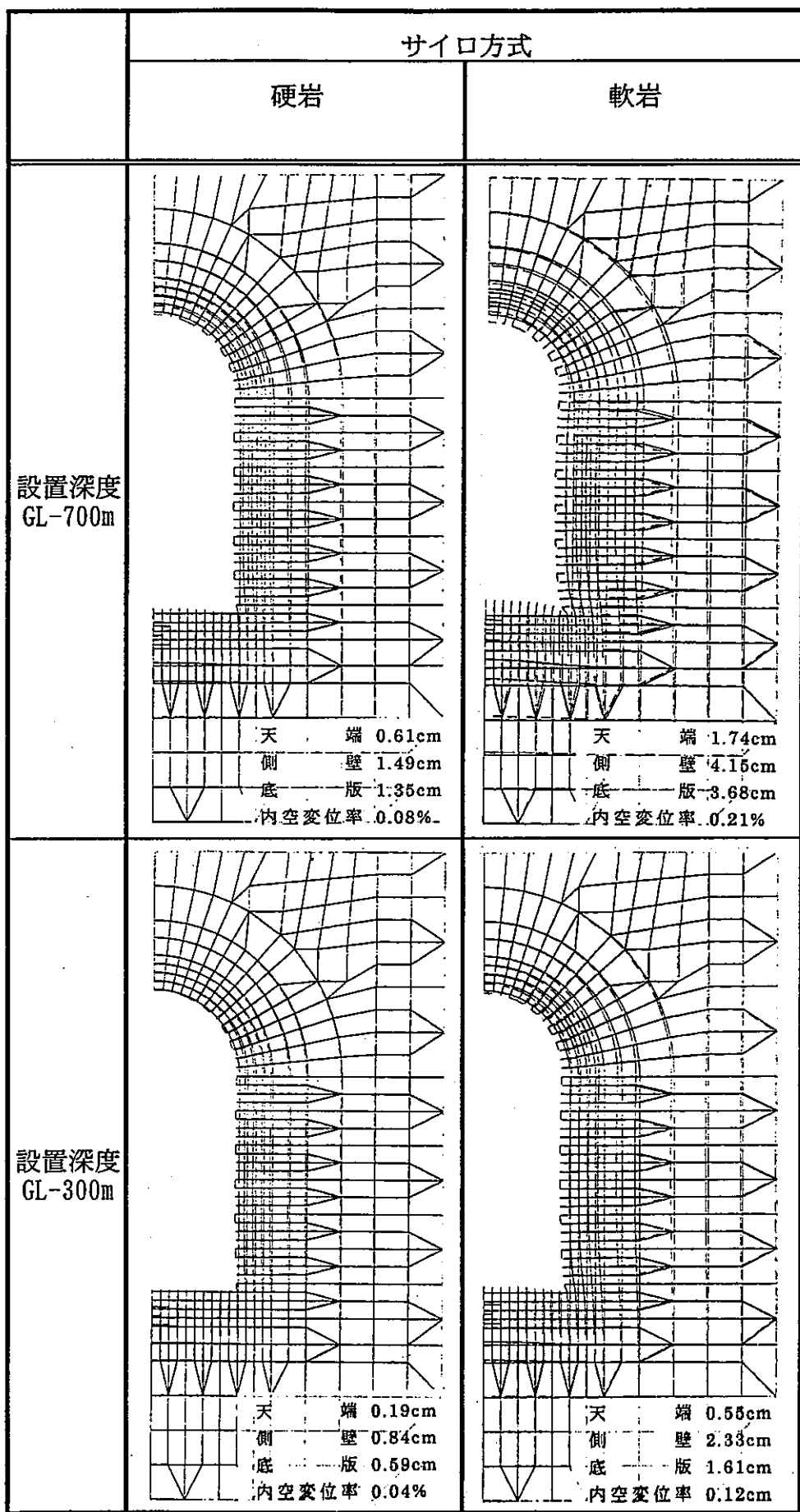


表-2.1-5 変形図〔サイロ方式-掘削後〕



スケール: 20 40 60 80 (m)

変形図スケール : 1 (cm) = 14.74 (cm)

第3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) 重要事象の再検討について

今年度は、平成7年度及び8年度に抽出、検討した重要事象について、漏れがないことを他研究の成果を踏まえて再検討し、最終版を作成した。今後はこの成果物に対して幅広くレビューを行うとともに、新しい知見については適宜とりいれて一層充実したものにする必要がある。

(2) ベントナイトの自己シール性について

今年度の検討では、Na型ベントナイトについては、十分な自己シール性を確認することができた。しかし、Ca化ベントナイトについては、十分な自己シール性を期待できない結果となり、ベントナイトのCa化についてシナリオ上の評価を検討する必要がある。

(3) 底部ベントナイトの支持力と沈下について

今年度の検討では、不飽和土の支持力及び沈下について簡易な方法を用いて検討した。今後、施工状況を模擬した支持力試験を行い、沈下量、支持力、破壊モードの確認をする必要がある。また今年度の検討では、せん断クリープやベントナイトの流動については未検討であり、長期的な挙動を把握する上で今後の課題となる。

(4) 大空洞長期挙動について

今年度の検討では、大久保モデルを用いて岩盤の長期クリープについて一つの結果を得ることができた。今後は、パラメータスタディーを行うことで長期クリープについてさらに研究を進める必要がある。

(5) 人工バリア材料の力学特性データの取得について

今年度は、Na型ベントナイト、Ca化ベントナイト、Ca型ベントナイト、ケイ砂+Ca化ベントナイトについて、飽和水酸化カルシウム水溶液を通水させ

た系で膨潤圧，透水係数を取得した。今後は、処分サイトが海水の影響を受ける場合も考えられるので、海水を含水させた系での基本特性データの取得が必要である。

(6) 数値解析法による空洞安定解析について

今年度の検討では、処分システム設計で考慮しているいくつかの処分方式に対し、有限要素法解析を実施し空洞の安定性を評価した。今後は解析上でロックボルトなどの支保工を数値的に評価して、構造的安定性の評価を行う必要がある。