

T R U 廃棄物の処分概念の検討（V）
－人工バリア材料の力学特性に関する研究－
(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書)

概要

2000年2月

鹿島建設株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 情報協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura,Naka-gun, Ibaraki 319-1184,

Japan

◎核燃料サイクル開発機構(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2000

TRU廃棄物処分概念の検討（V） －人工バリア材料の力学特性に関する研究－

田中 益弘* 山本 博之* 藤澤 理*
奥津 一夫** 三浦 一彦** 高村 尚**

要 旨

TRU廃棄物には長半減期核種が含まれるため、長期間にわたりこれを生物圏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して①人工バリア材料の力学特性データの取得及び評価、②海水系地下水環境下における人工バリア材料の力学特性データの取得及び評価、③人工バリアの自己シール性の観点からのデータ取得並びに最適設計を実施した。本年度の研究成果を以下に示す。

1) Ca型化ペントナイトにケイ砂を30wt.%混合した乾燥密度 1.6Mgm^{-3} の材料について水酸化カルシウム水溶液を通水した場合の基本特性（膨潤圧、膨潤量、透水係数）を取得し、既存の研究から推定される基本データ予測と比較した。

その結果、最大膨潤圧は 0.53MPa 、最大膨潤率43%、透水係数 $3.4 \times 10^{-11}\text{ms}^{-1}$ であること、また膨潤圧及び透水係数は有効ペントナイト乾燥密度よりほぼ推定が可能であることが確認された。

2) Na型ペントナイトを人工海水で強制的に変質させた塩水化ペントナイトにケイ砂30wt.%混合した乾燥密度 1.6Mgm^{-3} の材料について人工海水を通水した場合の基本特性（膨潤圧、膨潤量、透水係数）を取得し海水系地下水の影響を考慮した。

その結果、最大膨潤圧は 0.74MPa 、最大膨潤率50%、透水係数 $2.7 \times 10^{-11}\text{ms}^{-1}$ であり、基本特性がCa型化ペントナイトに類似していること、またこの要因は、塩水化によるCa²⁺イオンの増加（Ca化が起こっている）であることが確認された。

3)人工バリアの体積変化に対するシステム健全性評価の一環として、自己シール性確認実験を実施してきたが、自己シール性をより的確にとらえるため、シール中の透水性及び膨潤圧を測定した。実験で得られた自己シール可能な膨潤圧及び性能評価上必要な透水係数から自己シール性能を担保する有効ペントナイト乾燥密度を算出し、緩衝材の設計を実施した。

本報告書は、鹿島建設（株）が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

契約番号：110D0161

機構担当部課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ

* 鹿島建設（株） 技術研究所

A Study of Disposal Concept for TRU Waste (V)

— A Study on the Mechanical Properties of Engineered Barrier Materials —

M.Tanaka*, H.Yamamoto*, O.Fujisawa*
K.Okutsu**, K.Miura**, H.Takamura**

Abstract

TRU waste should be isolated from biosphere for a long period of time as it includes long lived nuclides. In this study, 1) data were collected on the mechanical properties of engineered barrier materials, 2) affection on the mechanical properties of Na bentonito by salt water was studied and 3) soundness of the disposal system against changes in the volume of engineered barrier was evaluated, to examine critical events related to the long-term soundness of the disposal system. Described below are the results of the studies.

- 1) The swelling pressure, swelling amount and permeability were obtained for a material consisting of NaCa-exchanged bentonito and silica sand with a relative weight of 30% (with a dry density of 1.6Mgm^{-3}) by supplying saturated calcium hydroxide aqueous solution. As a result, it was confirmed that the swelling pressure and permeability were approximately estimated from the relation between these properties and the effective dry density of bentonito.
- 2) The swelling pressure, swelling amount and permeability were obtained for a material consisting of salty Na bentonito and silica sand with a relative weight of 30% (with a dry density of 1.6Mgm^{-3}) by supplying artifical salt water. As a result, it was confirmed that these properties were approximately these properties of NaCa-bentonito.
- 3) Tests were conducted as a part of the evaluation of system soundness against changes in the volume of engineered barrier. Development of a void around bentonito was assumed. Self sealing of Na and NaCa-exchanged bentonito, and theirs water cut-off capability and swelling pressure were investigated. As a result, it was confirmed that the change of permeability and swelling pressure under self sealing of bentonito. Based on the test results (i.e. the both relations between the swelling pressure and dry density, and the permeability and dry density), soundness of the system was verified against changes of the volume of engineered barrier materials.

This work was performed by KAJIMA Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

Contract No.110D0161

JNC Liaison: Repository System Analysis Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

* KAJIMA Technical Research Institute

** KAJIMA Corporation, Civil Engineering Design Dept.

はじめに

本研究の目的は、平成 7 年度～平成 10 年度の鹿島委託研究「TRU 廃棄物の処分概念の検討（I）～（IV）」の検討結果を踏まえ、今世紀末の TRU 廃棄物処分概念の取りまとめに向けた試験データの補強ならびに検討による新たな知見の蓄積を行うことである。

研究の内容

本研究で実施する研究内容を以下に記述する。

1. 人工バリア材料の力学特性データの取得及び評価

これまでに、密度・ケイ砂の混合比を変えた場合の Ca 型化ペントナイトの基本特性データ（拘束条件下の膨潤圧、膨潤量、透水係数）を取得してきた。今年度は、これまでに取得していない乾燥密度 1.6 Mgm^{-3} の Ca 型化ペントナイト（ケイ砂 30% 配合）の基本データを取得し、既存の研究から推定される基本特性データ予想値と比較することで、これまでの成果の確認を行う。

2. 海水系地下水環境下における人工バリア材料の力学特性データの取得及び評価

将来 TRU 廃棄物処分場が海水系地下水環境下に建設される可能性がある。セメント並びに海水系地下水環境下にある Na 型ペントナイトは、Ca 型化するとともに海水による変質を受ける可能性がある。ここではこれらの複合的な影響を予測するため、海水系地下水の影響のみに着目し、海水によって強制的に変質させた乾燥密度 1.6 Mgm^{-3} の Na 型ペントナイト（以下塩水化ペントナイト、ケイ砂 30% 配合）の海水系地下水環境下における基本特性データを取得する。また、この結果をこれまで取得してきた Na 型、Ca 型化ペントナイトの基本特性データと比較検討し、海水系地下水の影響について考察する。

3. 人工バリアの自己シール性の観点からデータ取得並びに最適設計

これまで、ペントナイトの自己シール性を評価するために、拘束条件下での最大膨潤圧発生後の膨潤量を取得し評価してきた。しかし実験上、この膨潤量データにはバラつきがあり、自己シール性を定量的に評価することは困難である。そこで拘束条件下で最大膨潤圧を発生したペントナイトがその後生じる空間に対し再膨潤する際の膨潤圧を定量的な評価が可能なパラメータとして選定し、この値を取得する。また、取得したパラメータ値とこれまでにわかっている拘束条件下での最大膨潤圧・密度・透水係数との関係から、拡散場を維持するのに必要なペントナイト量を算出し、ペントナイトの最適設計を行う。

目 次

	PAGE
第1章 人工バリア材料の力学特性データの取得及び評価	1-1
1.1 目的	1-1
1.2 使用材料	1-1
1.3 試験方法と条件	1-3
1.4 試験結果	1-4
1.4.1 膨潤圧試験結果	1-4
1.4.2 膨潤量試験結果	1-7
1.4.3 透水試験結果	1-9
1.5 まとめと今後の課題	1-12
参考文献	1-12
第2章 海水系地下水環境下における人工バリア材料の 力学特性データの取得及び評価	2-1
2.1 目的	2-1
2.2 使用材料	2-1
2.3 試験方法と条件	2-3
2.4 試験結果	2-5
2.4.1 膨潤圧試験結果	2-5
2.4.2 膨潤量試験結果	2-8
2.4.3 透水試験結果	2-10
2.5 まとめと今後の課題	2-13
参考文献	2-13
第3章 人工バリア材料の自己シール性の観点からのデータ取得並びに最適設計	
3.1 目的	3-1
3.2 使用材料	3-1
3.3 実験方法	3-2
3.4 実験結果	3-5
3.4.1 自己シール中の透水性及び膨潤圧	3-5

3.4.2	解体調査	3-8
3.5	人工バリアシステムの成立性について	3-14
3.5.1	成立性評価の基本的な考え方	3-14
3.5.2	自己シール可能な最低膨潤圧	3-16
3.5.3	性能評価上必要な透水係数	3-18
3.5.4	人工バリアシステムが成立するために必要な 有効ペントナイト	3-18
3.5.5	廃棄体及び構造躯体等の体積減少量による ペントナイトの膨潤について	3-19
3.6	緩衝材の設計	3-20
3.6.1	試設計基本条件ケース	3-20
3.6.2	試設計方法	3-20
3.6.3	緩衝材の試設計	3-20
3.6.4	考察	3-21
	参考文献	3-21
	付録	3-22

図一覧

第1章 人工バリア材料の力学特性データの取得及び評価

- 図1-1 Ca型化ペントナイトの粒度特性
- 図1-2 ケイ砂の粒度特性
- 図1-3 膨潤圧と経過日数の関係
- 図1-4 ベントナイト混合率～膨潤圧関係
- 図1-5 有効ペントナイト乾燥密度～膨潤圧関係
- 図1-6 膨潤率と経過日数の関係
- 図1-7 材料及び水溶液と膨潤率の関係
- 図1-8 透水係数と経過日数の関係
- 図1-9 ベントナイト混合率と透水係数の関係
- 図1-10 有効ペントナイト乾燥密度と透水係数の関係

第2章 海水地下水環境下における人工バリア材料の力学特性データの取得及び評価

- 図2-1 塩水化ペントナイトの粒度特性
- 図2-2 ケイ砂の粒度特性
- 図2-3 膨潤圧と経過日数の関係
- 図2-4 ベントナイト混合率と膨潤圧の関係
- 図2-5 有効ペントナイト乾燥密度と膨潤圧関係
- 図2-6 膨潤率と経過日数の関係
- 図2-7 水酸化カルシウム水溶液と人工海水の通水による膨潤率の比較
- 図2-8 透水係数と経過日数の関係
- 図2-9 ベントナイト混合率と透水係数の関係
- 図2-10 有効ペントナイト乾燥密度と透水係数の関係
- 図2-11 乾燥密度と透水係数の関係

第3章 人工バリア材料の自己シール性の観点からのデータ取得並びに最適設計

- 図3-1 供試体作製方法
- 図3-2 実験容器と圧力センサー
- 図3-3 鋼製容器

図 3-4 実験フロー

- 図 3-5 自己シールの透水係数と膨潤圧の経日変化 (Ca 型化空隙 5 %)
図 3-6 自己シールの透水係数と膨潤圧の経日変化 (Ca 型化空隙 10 %)
図 3-7 自己シールの透水係数と膨潤圧の経日変化 (Ca 型化空隙 15 %)
図 3-8 自己シールの透水係数と膨潤圧の経日変化 (Na 型空隙 30 %)
図 3-9 自己シール状況 (Ca 型化空隙 5 %)
図 3-10 自己シール状況 (Ca 型化空隙 10 %)
図 3-11 自己シール状況 (Ca 型化空隙 15 %)
図 3-12 自己シール状況 (Na 型空隙 30 %)
図 3-13 自己シール後の乾燥密度と含水比分布 (Ca 型化空隙 5 %)
図 3-14 自己シール後の乾燥密度と含水比分布 (Ca 型化空隙 10 %)
図 3-15 自己シール後の乾燥密度と含水比分布 (Ca 型化空隙 15 %)
図 3-16 自己シール後の乾燥密度と含水比分布 (Na 型空隙 30 %)
図 3-17 空隙部大きさと乾燥密度の関係
図 3-18 空隙部大きさと含水比の関係
図 3-19 評価基本フロー
図 3-20 自己シール実験における透水係数と膨潤圧測定結果 (Na 型)
図 3-21 自己シール実験における透水係数と膨潤圧の模式図
図 3-22 有効ペントナイト乾燥密度と膨潤圧の関係
図 3-23 有効ペントナイト乾燥密度と透水係数の関係
図 3-24 TRU廃棄物処分概念書で示されている処分坑道断面

付録

- 図-1 TRU廃棄物処分概念書で示されている処分坑道断面

表一覧

第1章 人工バリア材料の力学特性データの取得及び評価

表 1-1 使用材料

表 1-2 使用材料の物理特性

表 1-3 クニゲルV 1 及び Ca 型化クニゲルV 1 の化学特性

表 1-4 試験方法

表 1-5 配合条件と試験数量

表 1-6 膨潤圧試験結果

表 1-7 膨潤量試験結果

表 1-8 透水試験結果

第2章 海水系地下水環境下における人工バリア材料の力学特性データの取得及び評価

表 2-1 使用材料

表 2-2 使用材料の物理特性

表 2-3 クニゲルV 1 及び塩水化ベントナイト浸出陽イオン量

表 2-4 試験方法

表 2-5 配合条件と試験数量

表 2-6 人工海水の成分表

表 2-7 膨潤圧試験結果

表 2-8 膨潤量試験結果

表 2-9 透水試験結果

第3章 人工バリア材料の自己シール性の観点からのデータ取得並びに最適設計

表 3-1 供試体の仕様

表 3-2 自己シールの透水係数と膨潤圧

表 3-3 人工バリアシステム成立のために必要な有効ベントナイト乾燥密度

表 3-4 設計基本条件ケース

付録

表-1 人工バリアシステム成立のために必要な有効ベントナイト乾燥密度

表-2 設計基本条件ケース

第1章 人工バリア材料の力学特性データの取得及び評価

1.1 目的

本試験は、人工バリア材料（ベントナイト系混合土）の長期力学的挙動を把握するために、Ca型化ベントナイトとケイ砂の混合材料（Ca型化ベントナイトとケイ砂の混合率を7:3としたもの）の基本特性データ（飽和水酸化カルシウム水溶液を通水させた系での膨潤圧、膨潤量の透水係数）を取得し、既存の研究から推定される基本データ予測値と比較することで、これまでの成果の確認を目的として実施したものである。

1.2 使用材料

本試験で使用したベントナイトは、表1-1に示すようにクニミネ工業製、Ca型化ベントナイトと日陶連原料製の愛知県瀬戸市窯元産及び知多郡美浜産のケイ砂3号及び5号である。なお、ケイ砂は、ケイ砂3号及び5号を乾燥重量比1:1に配合したものを使用した。

図1-1にベントナイトの粒度特性（クニミネ工業資料値）を、図1-2にケイ砂の粒度特性（当社測定値）を示す。また、使用材料の物理特性を表1-2に示す（当社測定値。ただし土粒子の密度を除く）。

また、表1-3にクニゲルV1及びCa型化クニゲルV1の化学特性を示す。

表1-1 使用材料

種類	分類	製造元及び商品名
ベントナイト	Ca型化ベントナイト	クニミネ工業製 クニゲルV1を強制的にCa型化して変質させたもの
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

表1-2 使用材料の物理特性

種類	名称	自然含水比 Wn (%)	土粒子の密度 ρ_s (Mg m ⁻³)	液性限界 WL (%)	塑性限界 Wp (%)	塑性指数 Ip (%)
ベントナイト	Ca型化クニゲルV1	1.6	2.7	121.0	23.9	97.1
砂	ケイ砂3号+5号	0.0	2.7	—	—	—

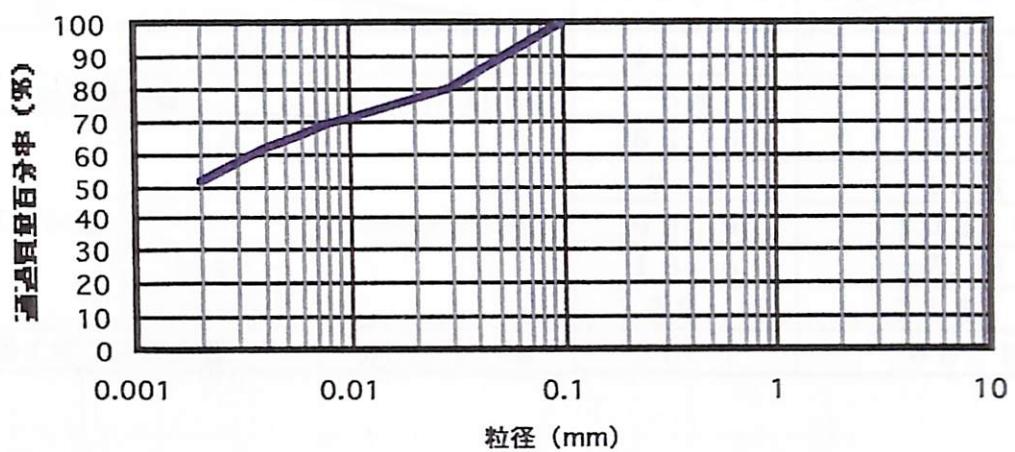


図 1－1 Ca型化ペントナイトの粒度特性

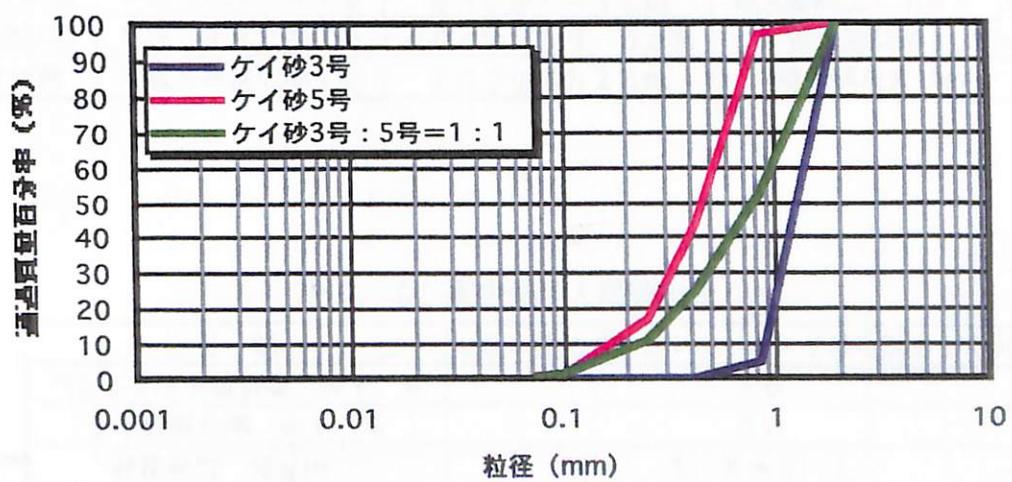


図 1－2 ケイ砂の粒度特性

表1-3 クニゲルV1及びCa型化クニゲルV1の化学特性

項目	試料	クニゲルV1	Ca型化クニゲルV1
pH		10.1	9.4
MB吸着量	mmol/100g	6.8	7.1
溶出イオン量	Na ⁺	55.6	5.2
	K ⁺	0.9	1.4
	Ca ²⁺	49.4	102.8
	Mg ²⁺	16.5	7.0
	total	122.4	116.4
陽イオン交換容量	meq/100g	60.7	60.8

1.3 試験方法と条件

表1-4に試験方法を、表1-5に配合条件と試験数量を示す。

対象とする材料は、Ca型化ベントナイトとケイ砂の混合材料である。

表1-4 試験方法

試験項目	試験方法	供試体寸法	取得物性値
膨潤圧試験	平成8年度に準ずる	φ4cm×h2cm	最大膨潤圧Pmax(MPa)
膨潤量試験	平成9年度に準ずる	φ6cm×h0.5cm	最大膨潤率ε _h (%)
透水試験	平成8年度に準ずる	φ4cm×h2cm	透水係数K(m s ⁻¹)

表1-5 配合条件と試験数量

分類	Ca型化ベントナイトにケイ砂を混合した材料
ベントナイト混合率 w.t. %	70
ケイ砂混合率 w.t. %	30
乾燥密度 Mgm ⁻³	1.6±0.1
膨潤圧試験数	3
膨潤量試験数	3
透水試験試験数	3

備考：大気下。室温(20℃)。初期含水比=自然含水比(6~10%)。

ケイ砂は、3号及び5号を重量比1:1で混合したものを使用する。

1.4 試験結果

1.4.1 膨潤圧試験結果

表 1-6 に膨潤圧試験結果を示す。図 1-3 に膨潤圧と経過日数の関係を、図 1-4 及び図 1-5 には、既存の研究結果と比較するため、ベントナイト混合率と膨潤圧及び有効ベントナイト乾燥密度と膨潤圧関係に今回の試験結果をプロットしたものを示す。

表 1-6 膨潤圧試験結果

ケイ砂 配合率 Cs (wt %)	ベントナイト 配合率 Cb (wt %)	乾燥密度 ρ_d ($M g m^{-3}$)	含水比 w (%)	初期飽和度 Sr_0 (%)	最終飽和度 Sr (%)	最大膨潤圧 PMax (MPa)
30	70	1.61	1.77	6.9	95.3	0.48
30	70	1.62	1.77	6.9	90.2	0.56
30	70	1.61	1.77	6.9	92.9	0.56

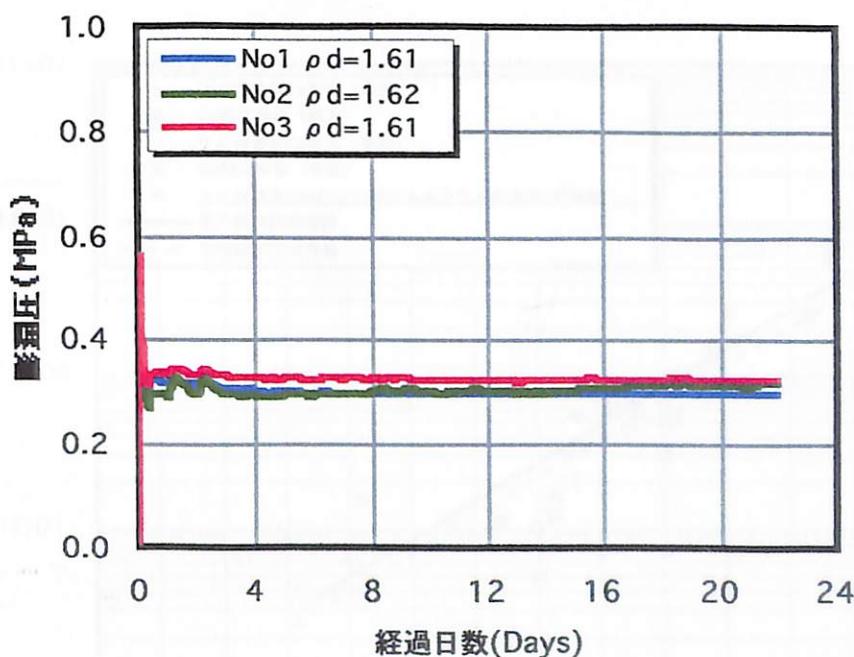


図 1-3 膨潤圧と経過日数の関係

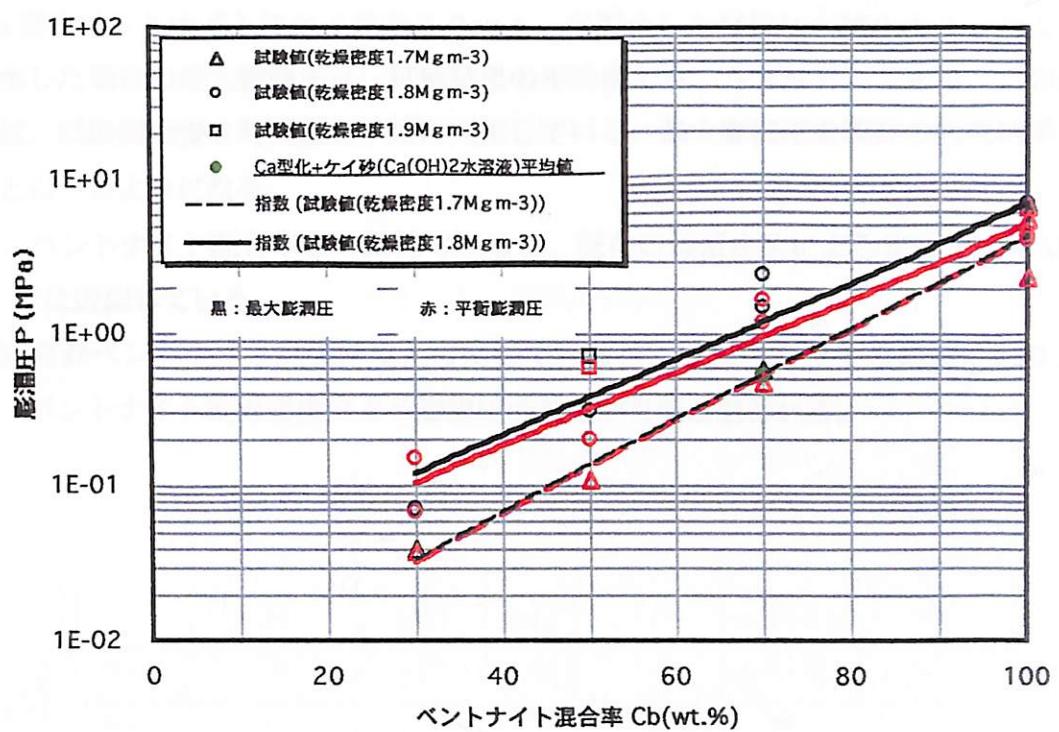


図 1-4 ベントナイト混合率～膨潤圧関係

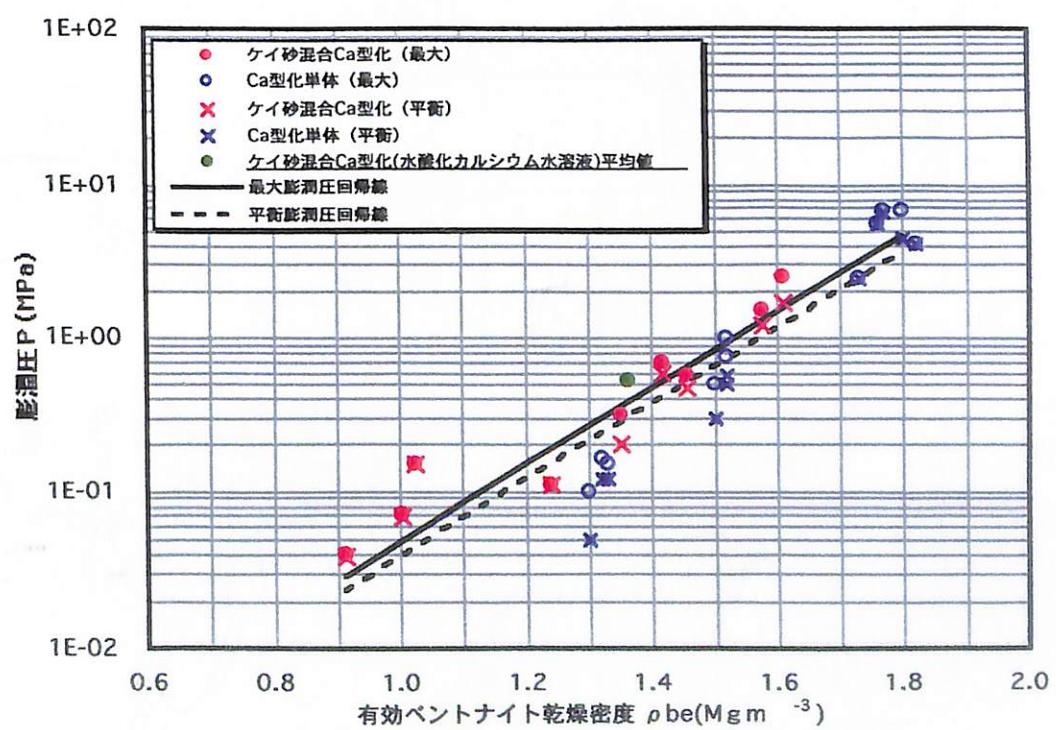


図 1-5 有効ベントナイト乾燥密度～膨潤圧関係

Ca型化ベントナイトにケイ砂を30wt.%混合した材料に水酸化カルシウム水溶液を通水した場合の最大膨潤圧は、試験結果の平均値で0.53MPaである。この最大膨潤圧は、試験開始後2時間程の早期に発生している。最大膨潤圧を既存の研究結果と比較すると以下のようになる。

- ① ベントナイト配合率との関係でみると、既存の蒸留水系による密度 1.7Mg m^{-3} に近似している。
- ② 有効ベントナイト乾燥密度との関係でみると、ほぼバラツキの範囲にあり、有効ベントナイト乾燥密度により膨潤圧の推定が可能と思われる。

1.4.2 膨潤量試験結果

表 1-7 に膨潤量試験結果を示す。図 1-6 に膨潤率と経過日数の関係を、図 1-7 に変質過程を考慮した材料及び水溶液と膨潤との関係を示す。

表 1-7 膨潤量試験結果

ケイ砂 配合率 Cs (wt.%)	ペントナイト 配合率 Cb (wt.%)	乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)	含水比 w (%)	初期飽和度 Sr ₀ (%)	最終飽和度 Sr (%)	最大膨潤率 ε_h (%)
30	70	1.67	1.77	7.7	92.2	48.8
30	70	1.60	1.77	6.9	96.6	41.6
30	70	1.63	1.77	7.3	95.2	44.5
30	70	1.60	1.77	7.0	96.3	40.4
30	70	1.60	1.77	7.0	99.1	39.6

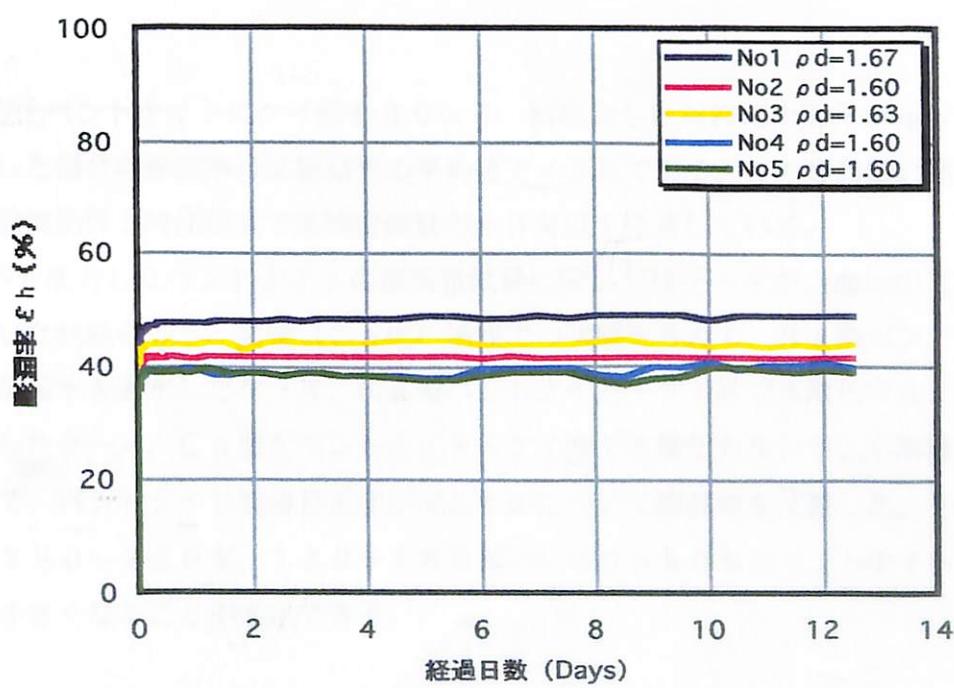


図 1-6 膨潤率と経過日数の関係

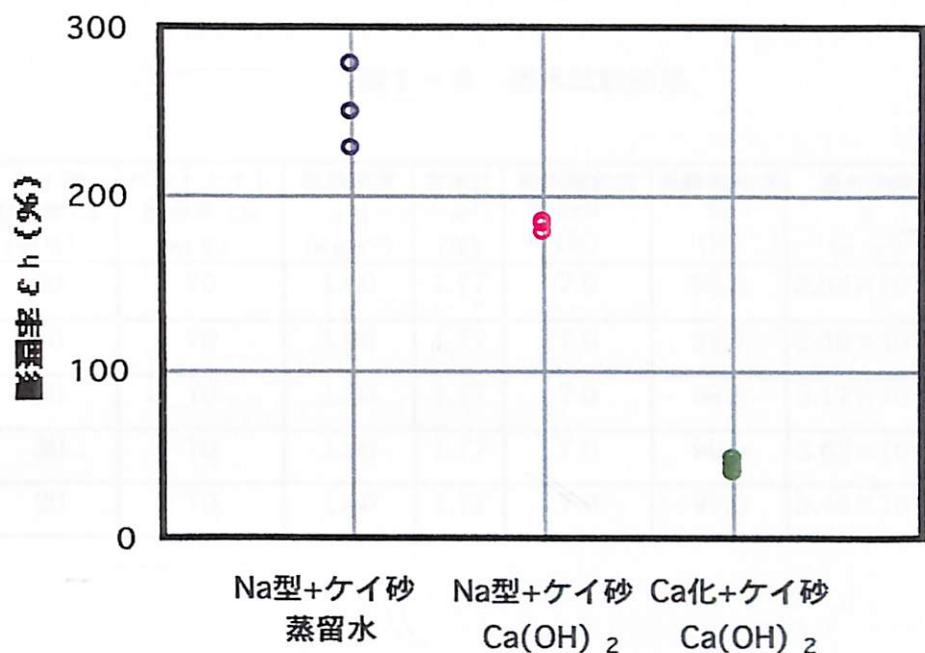


図 1-7 材料及び水溶液と膨潤率の関係

Ca型化ペントナイトにケイ砂を30 w t. %混合した材料に水酸化カルシウム水溶液を通水した場合の膨潤率は試験結果の平均値で43%である。この膨潤量の発生も膨潤圧同様試験開始後2時間程度で最終膨潤量の90%以上に達している。

ケイ砂を混合したペントナイトの膨潤量試験に関してはデータが少ないので、当社独自で実施した試験のうち、変質(Ca化)過程での状態を考えて、Na型ペントナイト+ケイ砂で蒸留水を通水したケース、Na型ペントナイト+ケイ砂で水酸化カルシウム水溶液を通水したケース、Ca型化ペントナイト+ケイ砂で水酸化カルシウム水溶液を通水したケースで、ペントナイト混合率密度が同じものについて膨潤率を比較した。その結果、膨潤率は230~250%、130~180%、40~50%とペントナイトの変質過程で順次小さくなることが推定できる。

表 1-8 に透水試験結果を示す。図 1-8 に透水係数と経過日数の関係を、図 1-9 及び図 1-10 には、既存の研究結果と比較するため、ベントナイト混合率と透水係数及び有効ベントナイト乾燥密度と透水係数関係に今回の試験結果をプロットしたものを示す。

表 1-8 透水試験結果

ケイ砂 配合率 Cs (wt.%)	ペントナイト 配合率 Cb (wt.%)	乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)	含水比 w (%)	初期飽和度 Sr ₀ (%)	最終飽和度 Sr (%)	透水係数 k (m s ⁻¹)	通水圧 (Mpa)
30	70	1.60	1.77	7.0	98.8	3.32×10^{-11}	0.4
30	70	1.60	1.77	7.0	97.7	2.49×10^{-11}	0.4
30	70	1.60	1.77	7.0	98.9	3.17×10^{-11}	0.4
30	70	1.60	1.77	7.0	99.0	3.63×10^{-11}	0.4
30	70	1.60	1.77	7.0	97.0	3.48×10^{-11}	0.4

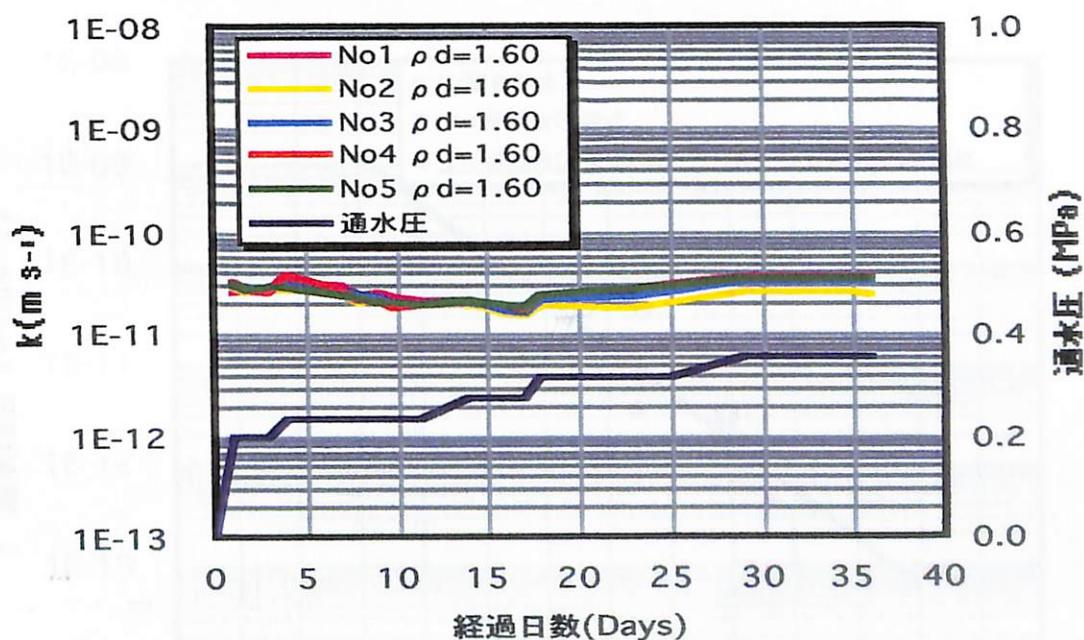


図 1-8 透水係数と経過日数の関係

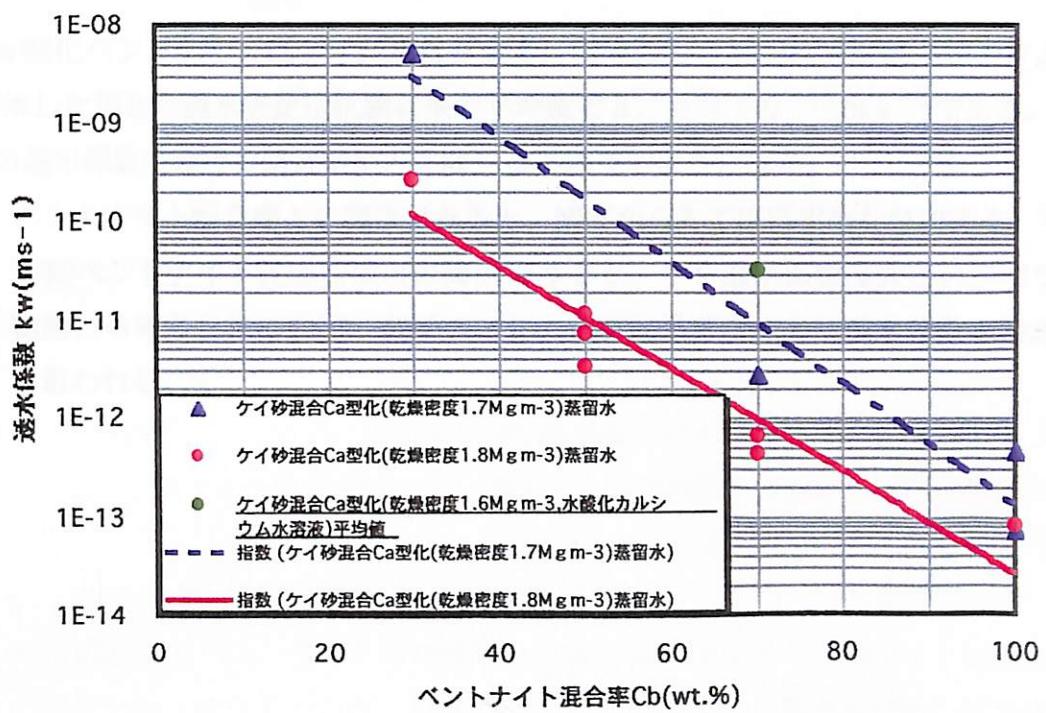


図1-9 ベントナイト混合率と透水係数の関係

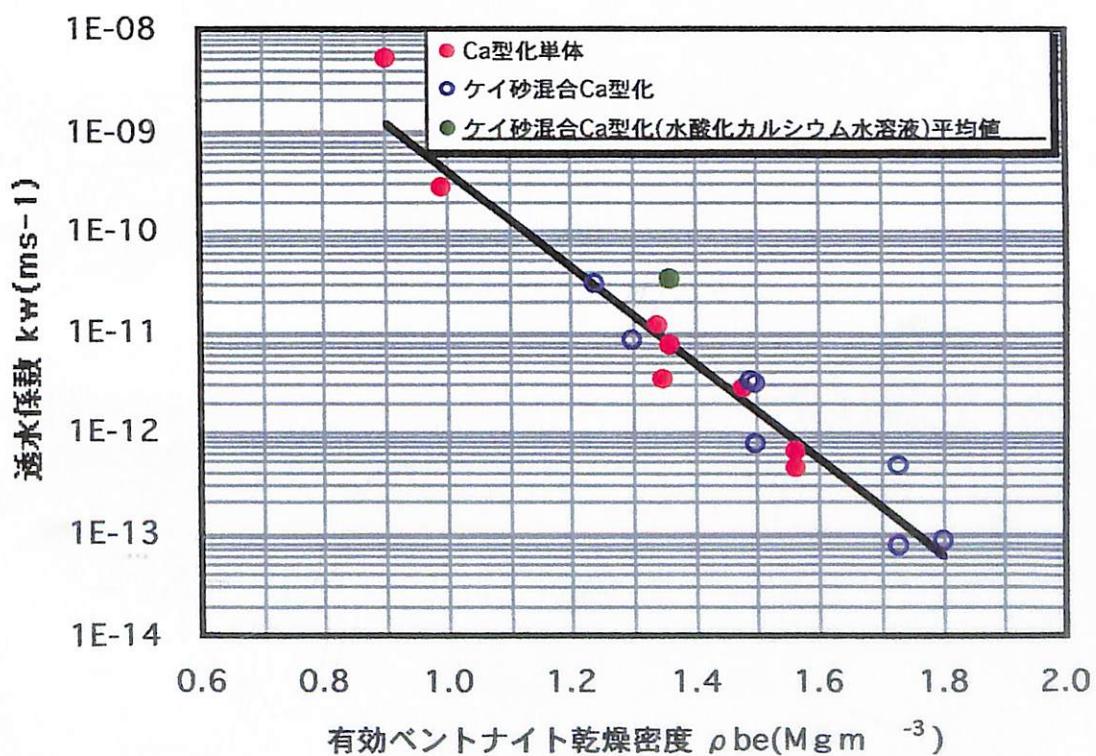


図1-10 有効ベントナイト乾燥密度と透水係数の関係

Ca型化ペントナイトにケイ砂を30wt.%混合した材料に水酸化カルシウム水溶液を通水した場合の透水係数は試験結果の平均値で $3.4 \times 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ である。

この透水係数を既存の研究結果と比較すると以下のようになる。

- ① ペントナイト配合率との関係でみると、密度からみてほぼ妥当な値である。
- ② 有効ペントナイト乾燥密度との関係でみると、やや透水係数は大きいがバラツキの範囲とも考えられるので、有効ペントナイト乾燥密度により透水係数の推定が可能と思われる。

1.5 まとめと今後の課題

Ca型化ベントナイトにケイ砂を30wt.%混合した材料に水酸化カルシウム水溶液を通水した場合の基本特性（膨潤圧、膨潤量、透水係数）を既存の研究から推定される基本データ予測値と比較すると以下のようになる。

- ① Na型ベントナイトがCa型化することで、膨潤圧及び膨潤率は小さくなり、透水係数は大きくなる。特に膨潤率の低下が著しい。
- ② ベントナイト配合率が小さくなるほど、膨潤圧及び膨潤量は小さくなり、透水係数は大きくなる。
- ③ 乾燥密度が小さいほど、膨潤圧及び膨潤量は小さくなり、透水係数は大きくなる。
- ④ 有効ベントナイト乾燥密度より、膨潤圧及び透水係数の推定が可能と思われる。

今後の課題としては以下に記す事項が挙げられる。

- ① ケイ砂混じりベントナイトの膨潤圧及び透水係数は有効ベントナイト乾燥密度により推定可能と考えられるが、膨潤量の推定方法はない。膨潤量に関しても有効ベントナイト乾燥密度での推定方法を検討する上で、種々のベントナイト配合率を考慮したケイ砂混じりベントナイトの膨潤量を把握する必要があると思われる。
- ② これまで、Ca化率100%に近いところでのCa型化ベントナイトの基本データを取得してきたが、ベントナイトの中長期的な変質特性を明らかにするためCa型化過程での基本特性を把握する必要がある。

参考文献

- 1) 鹿島建設株式会社：TRU廃棄物の検討（II）、PNC ZJ110097-001 1997
- 2) カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性-膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強度及び弾性係数-, 動燃事業団技術資料, PNCTN8410 98-021, 1998

第2章 海水系地下水環境下における人工バリア材料の力学特性データの取得及び評価

2.1 目的

本試験は、人工バリア材（ベントナイト系混合土）の長期力学的挙動を把握するために、塩水化ベントナイトとケイ砂の混合材料（塩水化ベントナイトとケイ砂の混合率を7:3としたもの）の基本特性データ（人工海水を通水させた系での膨潤圧、膨潤量の透水係数）を取得し、海水系地下水の影響について考察することを目的として実施したものである。

2.2 使用材料

本試験で使用したベントナイトは、表2-1に示すように当社製、塩水化ベントナイトと日陶連原料製の愛知県瀬戸市窯元産及び知多郡美浜産のケイ砂3号及び5号である。なお、ケイ砂は、ケイ砂3号及び5号を乾燥重量比1:1に配合したものを使用した。

図2-1にベントナイトの粒度特性（当社測定値）を、図2-2にケイ砂の粒度特性（当社測定値）を示す。また、使用材料の物理特性を表2-2に示す（当社測定値。ただし土粒子の密度を除く）。

また、表2-3にクニゲルV1及び塩水化ベントナイト浸出陽イオン測定結果を示す。

表2-1 使用材料

種類	分類	製造元及び商品名
ベントナイト	塩水化ベントナイト**	鹿島技術開発 クニゲルV1を人工海水で飼育的に変質させたもの
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

表2-2 使用材料の物理特性

種類	名称	自然含水比 Wn (%)	土粒子の密度 ρ_s (Mg m ⁻³)	液性限界 WL (%)	塑性限界 Wp (%)	塑性指数 Ip (%)
ベントナイト	塩水化クニゲルV1	3.0	2.7			
砂	ケイ砂3号+5号	0.0	2.7	-	-	-

*データなし

**ベントナイト塩水化処理を以下の方法で行った。

- 1) イオン交換をバッチ式で行った。
- 2) ベントナイト（クニゲルV1）粉体1kgに対して処理水（人工海水）200とし、1時間攪拌混合する。
その状態で2日間放置する。
- 3) 上澄みを除去し、それと同等量の人工海水を補充して1時間攪拌混合する。
- 4) 3)の作業を3回繰り返す。上澄みが海水性状にあることを確認する。
- 5) 処理後、イオン交換水で濾過水の電気伝導度が20μs以下になるまで洗う（1ヶ月）。
- 6) 洗浄後、乾燥・粉碎する。

人工海水で処理したベントナイトを以下、塩水化ベントナイトという。

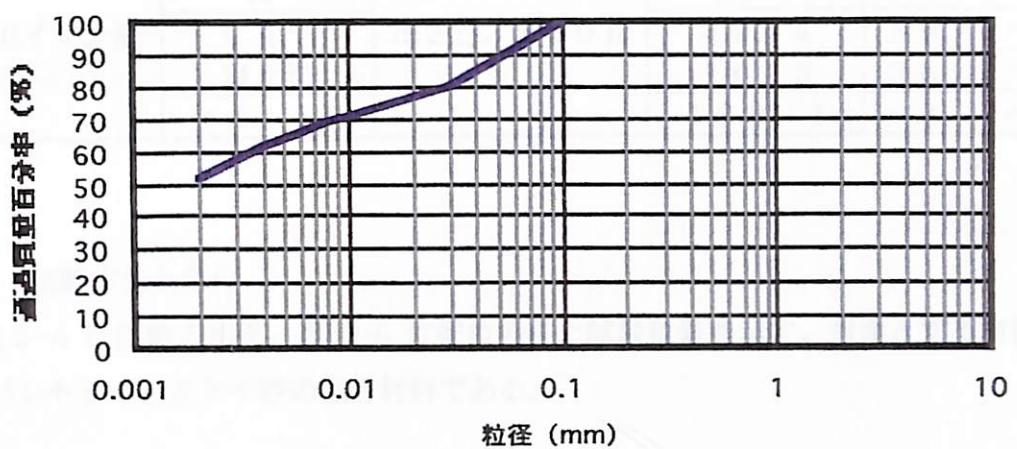


図 2-1 塩水化ベントナイトの粒度特性

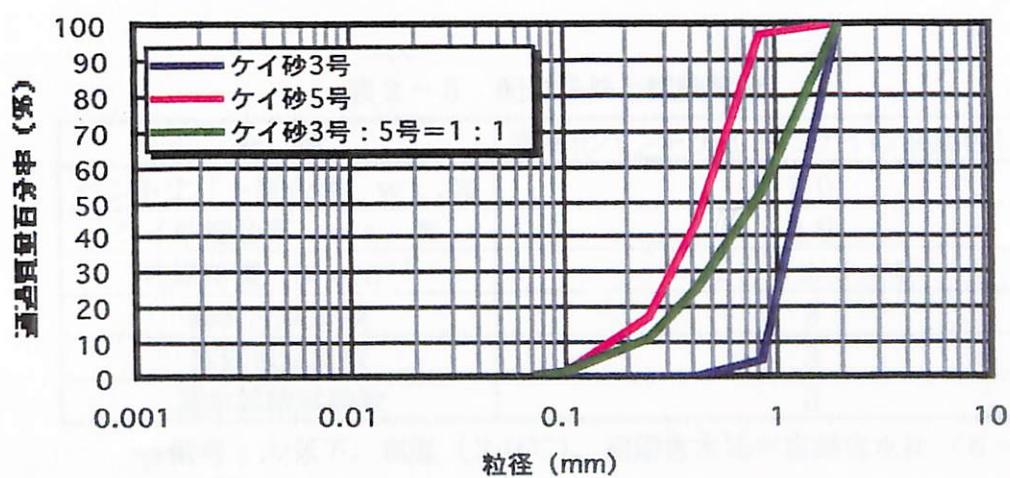


図 2-2 ケイ砂の粒度特性

表2-3 クニゲルV1及び塩水化ペントナイト浸出陽イオン量

項目	試 料		クニゲルV1	塩水化ペントナイト
	Na ⁺	K ⁺	meq/100g	meq/100g
溶出イオン量	55.6	8.6~9.4		
	0.9	2.9~3.2		
	49.4	39.2~47.2		
	16.5	36.7~41.9		
	total	122.4	93.7~95.3	

2.3 試験方法と条件

表2-4に試験方法を、表2-5に配合条件と試験数量を示す。対象とする材料は、塩水化ペントナイトとケイ砂の混合材料である。

表2-4 試験方法

試験項目	試験方法	供試体寸法	取得物性値
膨潤圧試験	平成8年度に準ずる	φ4cm×h2cm	最大膨潤圧P _{max} (MPa)
膨潤量試験	平成9年度に準ずる	φ6cm×h0.5cm	最大膨潤率ε _h (%)
透水試験	平成8年度に準ずる	φ4cm×h2cm	透水係数K(m s ⁻¹)

表2-5 配合条件と試験数量

分類	塩水化ペントナイトにケイ砂を混合した材料
ペントナイト混合率 w.t.%	70
ケイ砂混合率 w.t.%	30
乾燥密度 M gm ⁻³	1.6±0.1
膨潤圧試験数	3
膨潤量試験数	3
透水試験試験数	3

備考：大気下。室温(20℃)。初期含水比=自然含水比(6~10%)。

ケイ砂は、3号及び5号を重量比1:1で混合したものを使用する。

(1) 乾燥密度の設定

塩水化ペントナイトとケイ砂の混合材料の試験実績は少ないので、Ca型化ペントナイトとケイ砂の場合と同一乾燥密度の 1.6 M g m^{-3} とした。

なお、締固め初期含水比は自然含水比とした。

(2) 人工海水

試験水溶液である人工海水は、ASTMの人工海水の組成に近い八洲薬品製を使用した。

表2-6にその成分を示す。

(3) 試験温度

試験は大気下で室温20°Cの条件下で実施した。

表2-6 人工海水の成分表

塩化マグネシウム(6水塩)…222.23g	臭化カリウム…2.01g
塩化カルシウム(2水塩)…30.70g	ホウ酸…0.54g
塩化ストロンチウム(6水塩)…0.85g	フッ化ナトリウム…0.06g
塩化カリウム…13.89g	塩化ナトリウム…490.68g
炭酸水素ナトリウム…4.02g	硫酸ナトリウム(無水)…81.88g
	純水…200(19694g)

2.4 試験結果

2.4.1 膨潤圧試験結果

表 2-7 に膨潤圧試験結果を示す。図 2-3 に膨潤圧と経過日数の関係を示す。

表 2-7 膨潤圧試験結果

ケイ砂 配合率 Cs (wt.%)	ペントナイト 配合率 Cb (wt.%)	乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)	含水比 w (%)	初期飽和度 Sr ₀ (%)	最終飽和度 Sr (%)	最大膨潤圧 P _{Max} (Mpa)
30	70	1.57	2.10	7.8	100.0	0.74
30	70	1.56	2.10	7.8	100.0	0.64
30	70	1.57	2.10	7.8	100.0	0.80

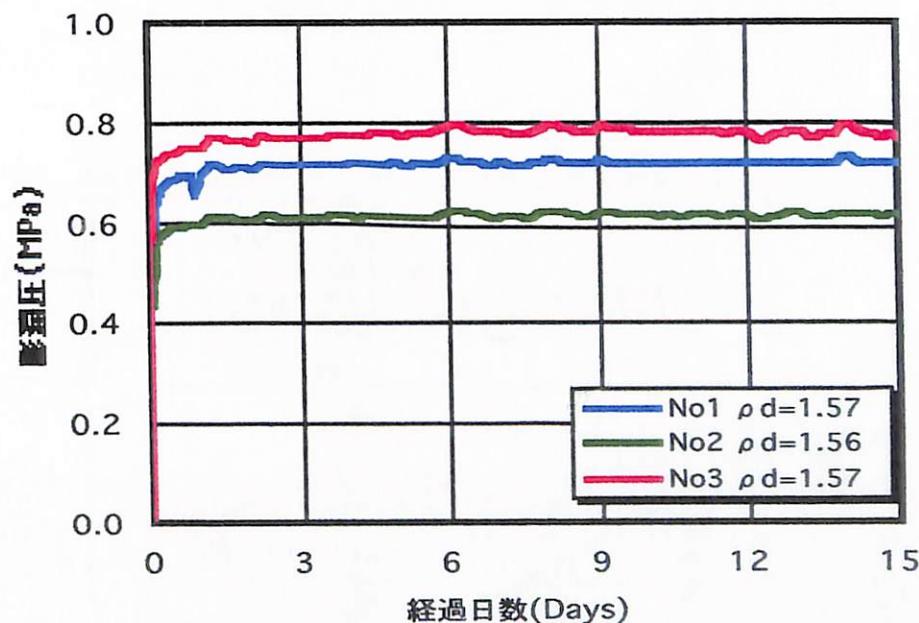


図 2-3 膨潤圧と経過日数の関係

塩水化ベントナイト系材料に関する既往研究は少ないので、Ca型化ベントナイト系材料の既存の研究結果と比較するため、図1-8及び図1-9に塩水化ベントナイトの結果をプロットした。(塩水化ベントナイトの浸出陽イオンを見ると Mg^{2+} は増加し、 Na^+ は減少しており、塩水化により Ca^{2+} の変化は少ないので見かけ上Ca化が進んでいる)

図2-4及び図2-5にベントナイト混合率と膨潤圧及び有効ベントナイト乾燥密度と膨潤圧関係を示す。

塩水化ベントナイトにケイ砂を30wt.%混合した材料に人工海水を通水した場合の最大膨潤圧は、試験結果の平均値で、0.74MPaであり、Ca型化ベントナイト系材料より大きい。この最大膨潤圧の発生は、Ca型化ベントナイト系材料と同様早いが、ピーク値を持たない。最大膨潤圧をCa型化ベントナイト系材料の既存の研究結果と比較すると、以下のことが推定される。

- ① ベントナイト配合率との関係からみると、塩水化ベントナイト系材料はCa化の程度が小さいことで既存のCa型化ベントナイト系材料より大きい値となっている。
- ② 有効ベントナイト乾燥密度との関係でみると、バラツキの範囲にあるとも考えられるが、有効ベントナイト乾燥密度より算定した膨潤圧より大きな値となっている。

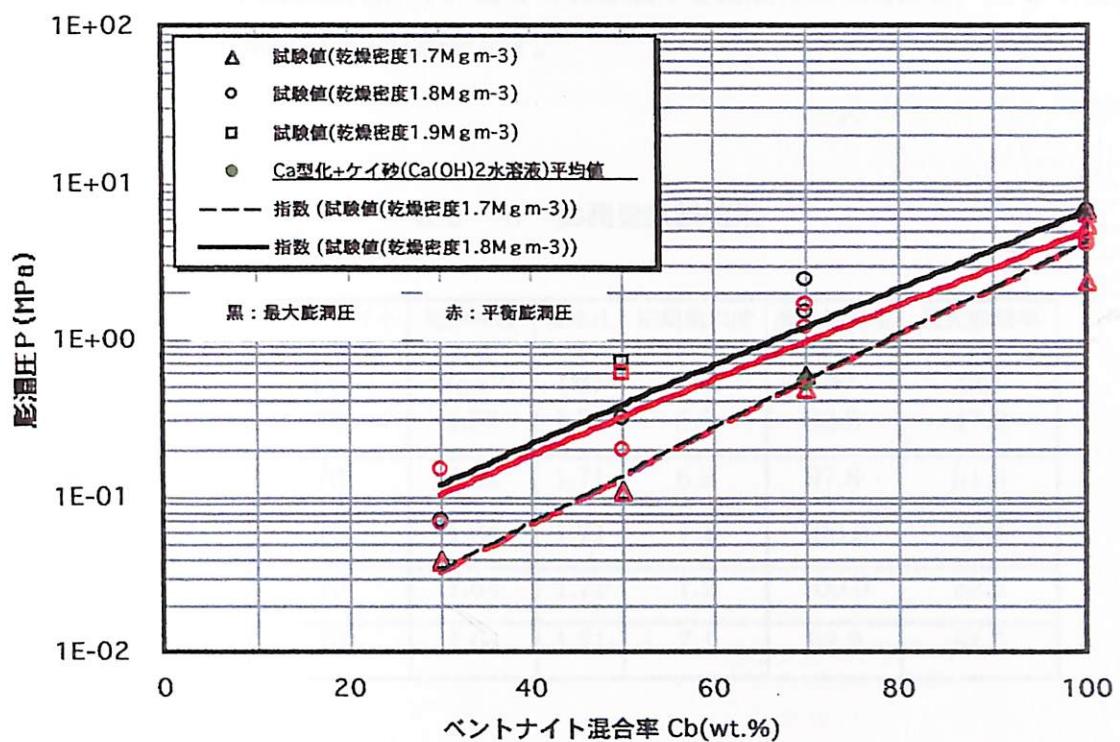


図 2-4 ベントナイト混合率と膨潤圧の関係

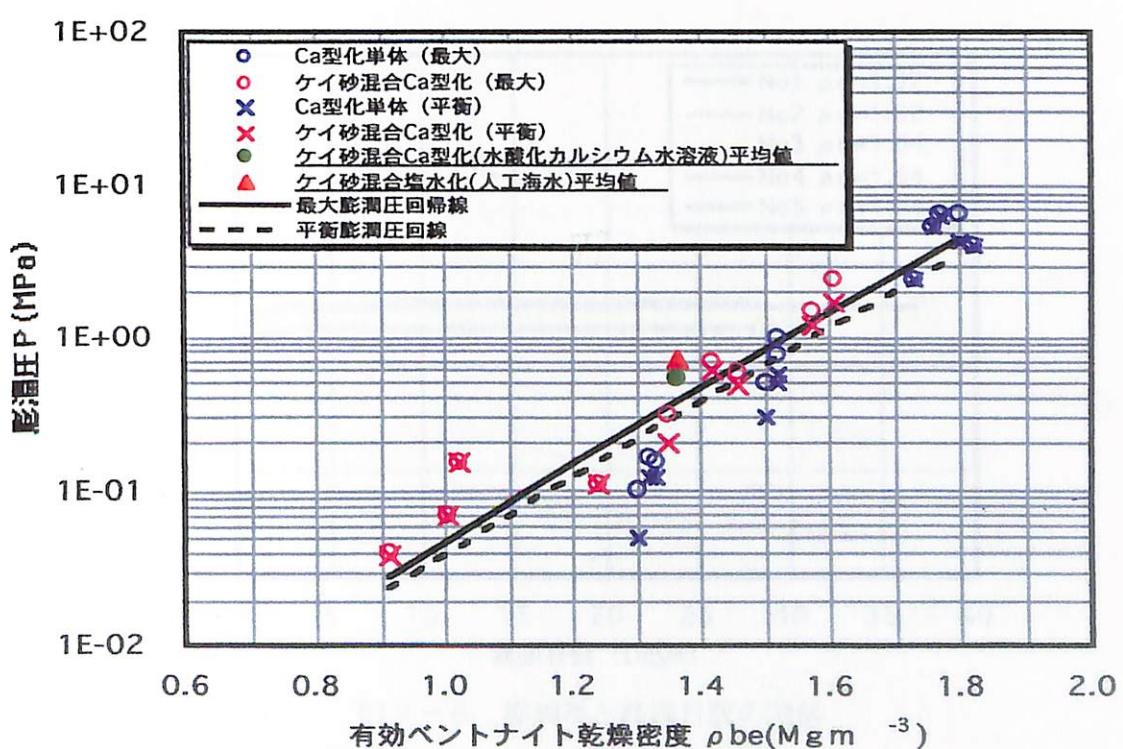


図 2-5 有効ベントナイト乾燥密度と膨潤圧関係

2.4.2 膨潤量試験結果

表 2-8 に膨潤量試験結果を示す。図 2-6 に膨潤率と経過日数の関係を、図 2-7 に C a 型化ペントナイト系材料との比較を示す。

表 2-8 膨潤量試験結果

ケイ砂 配合率 Cs (wt%)	ペントナイト 配合率 Cb (wt%)	乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)	含水比 w (%)	初期飽和度 Sr ₀ (%)	最終飽和度 Sr (%)	最大膨潤率 ϵ_h (%)
30	70	1.57	1.71	6.5	82.5	47.2
30	70	1.62	1.71	6.9	97.8	51.3
30	70	1.64	1.71	7.1	100.0	49.1
30	70	1.64	1.71	7.2	100.0	52.2
30	70	1.64	1.71	7.1	92.9	51.5

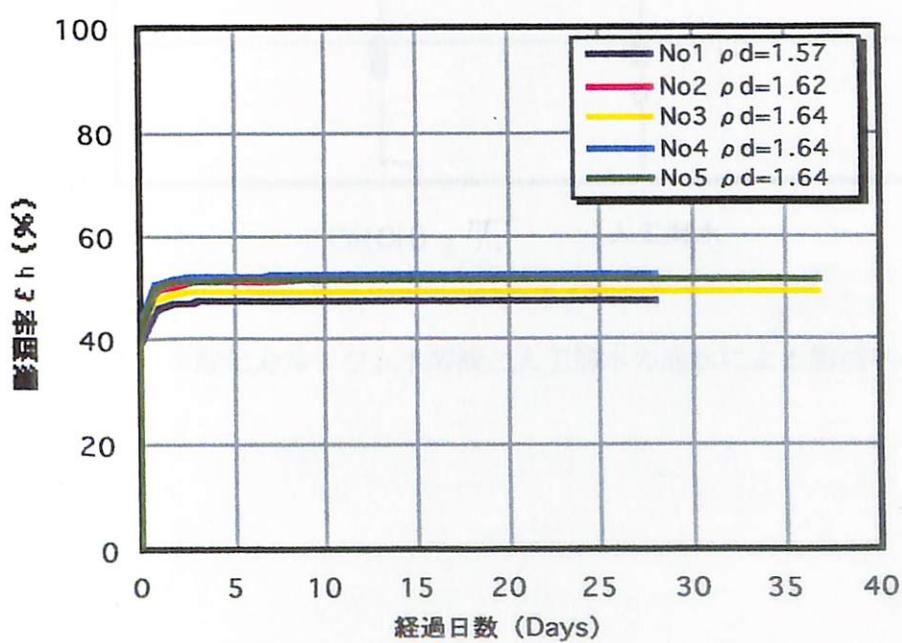


図 2-6 膨潤率と経過日数の関係

塩水化ベントナイトにケイ砂を 30 w t. % 混合した材料に人工海水を通水した場合の膨潤率は試験結果の平均値で 50 % である。膨潤量の発生も早く、膨潤量もほぼ同じことから、膨潤特性は Ca 型化ベントナイト系材料に近似していることがわかる。

なお、データ数は少ないが塩水化ベントナイト系材料と Na 型ベントナイト系材料を人工海水による膨潤量で比較するとほぼ同じことから、ベントナイトの変質（塩水化）による膨潤量の低下というよりは、人工海水を通水することによる影響が大きいことが想定される。

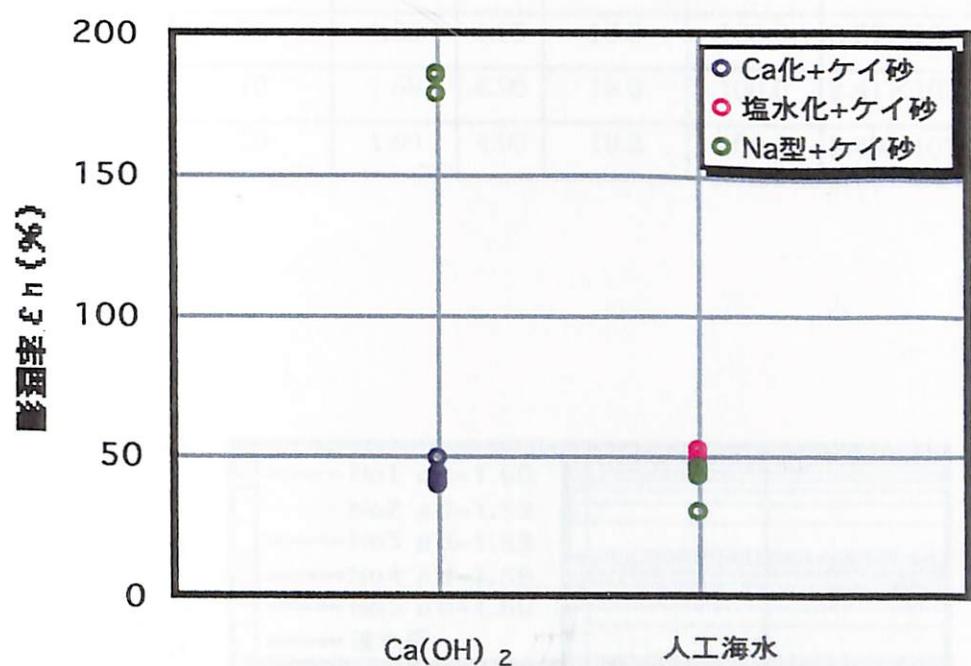


図 2-7 水酸化カルシウム水溶液と人工海水の通水による膨潤率の比較

2.4.3 透水試験結果

表 2-9 に透水試験結果を示す。図 2-8 に透水係数と経過日数の関係を、図 2-9 及び図 2-10 には、塩水化ペントナイト系が Ca 型化ペントナイト系に類似していることから、図 1-13 及び図 1-14 に試験結果をプロットしたものと示す。

また、図 2-11 には既存の研究成果と比較するため乾燥密度を透水係数との関係を示す。

表 2-9 透水試験結果

ケイ砂 配合率 Cs (wt.%)	ペントナイト 配合率 Cb (wt.%)	乾燥密度 ρ_d (M g m ⁻³)	含水比 w (%)	初期飽和度 Sr ₀ (%)	最終飽和度 Sr (%)	透水係数 k (m s ⁻¹)	通水圧 (Mpa)
30	70	1.60	4.90	19.2	100.0	2.49×10^{-11}	0.5
30	70	1.59	4.90	19.0	100.0	3.00×10^{-11}	0.5
30	70	1.59	4.90	18.9	100.0	2.67×10^{-11}	0.5
30	70	1.59	4.90	19.0	100.0	2.41×10^{-11}	0.5
30	70	1.60	4.90	19.2	100.0	2.49×10^{-11}	0.5

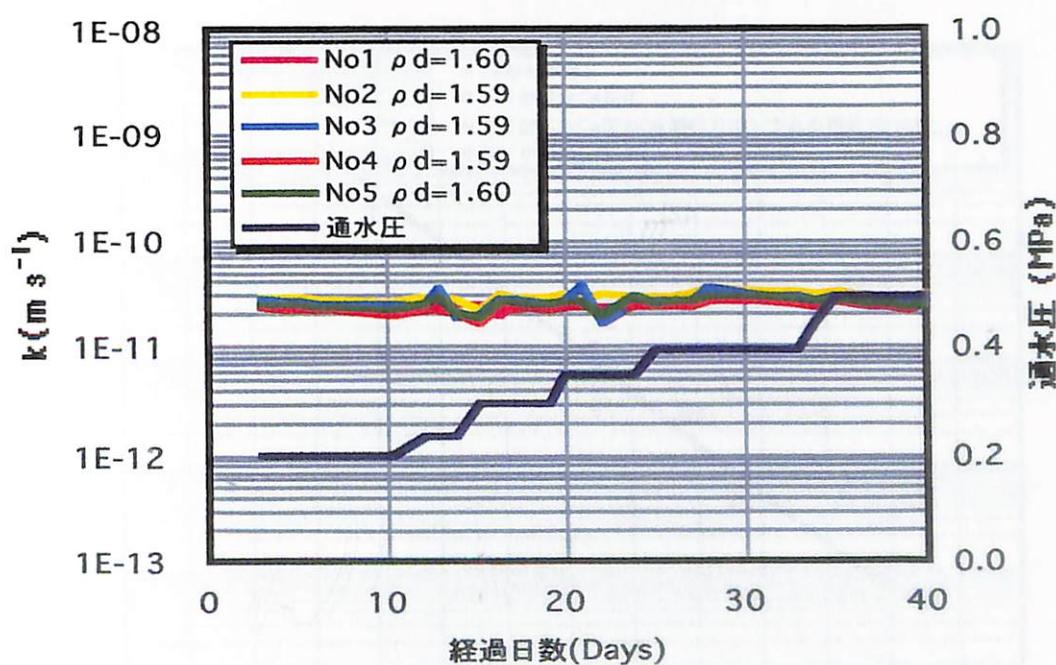


図 2-8 透水係数と経過日数の関係

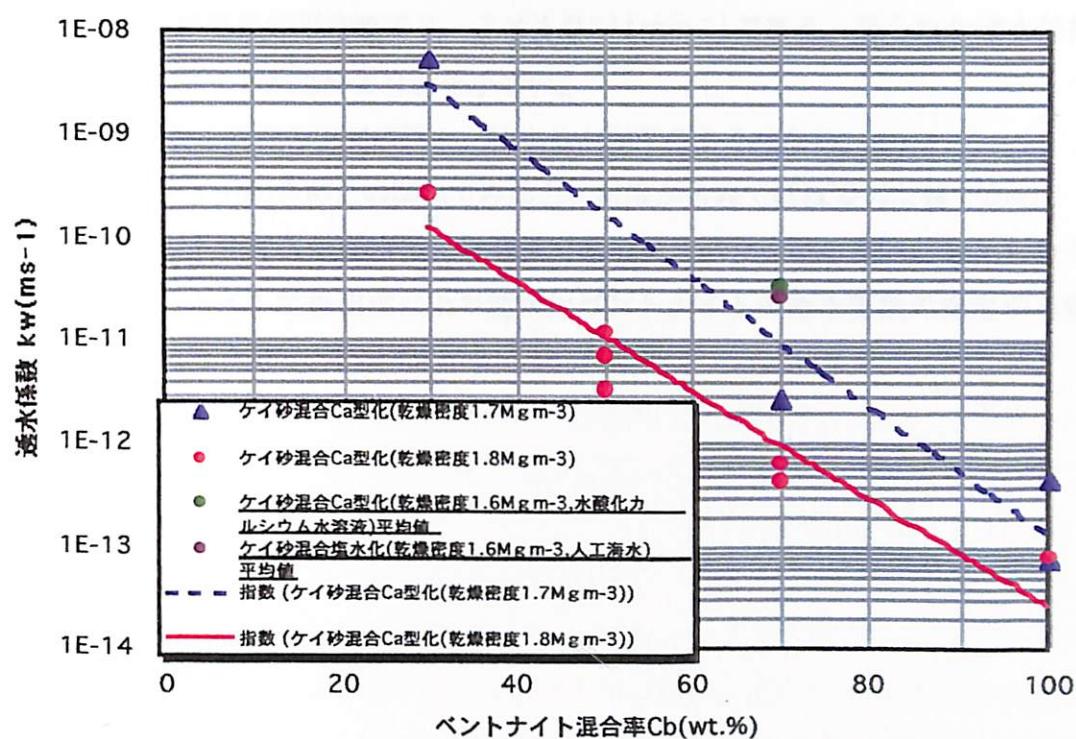


図 2-9 ベントナイト混合率と透水係数の関係

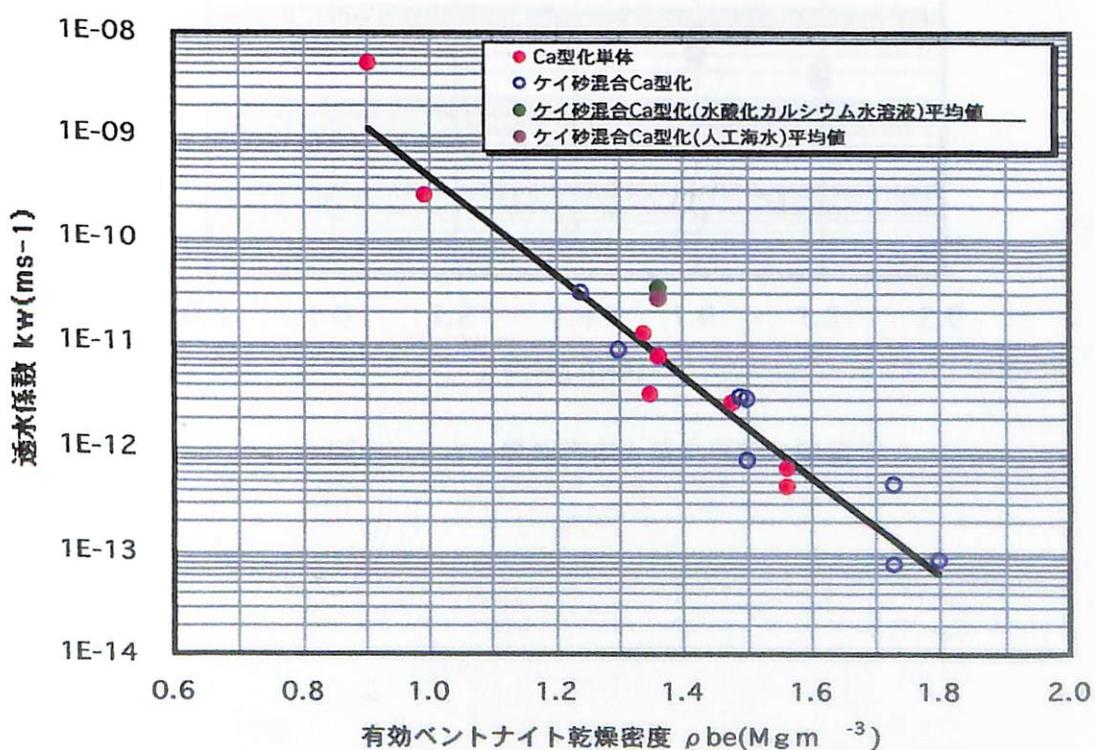


図 2-10 有効ベントナイト乾燥密度と透水係数の関係

塩水化ベントナイトにケイ砂30wt.%混合した材料に人工海水を通水した場合の透水係数は、試験結果の平均値で $2.7 \times 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ である。得られた透水係数は、Ca型化ベントナイト系材料より若干小さい。

この透水係数を既存の研究成果と比較すると以下のようになる。

- ① ベントナイト配合率との関係でみると、密度からみてほぼ妥当な値である。
- ② 有効ベントナイト乾燥密度との関係でみると、バラツキの範囲と考えられるので有効ベントナイト乾燥密度により塩水化ベントナイトの透水係数の推定が可能と思われる。

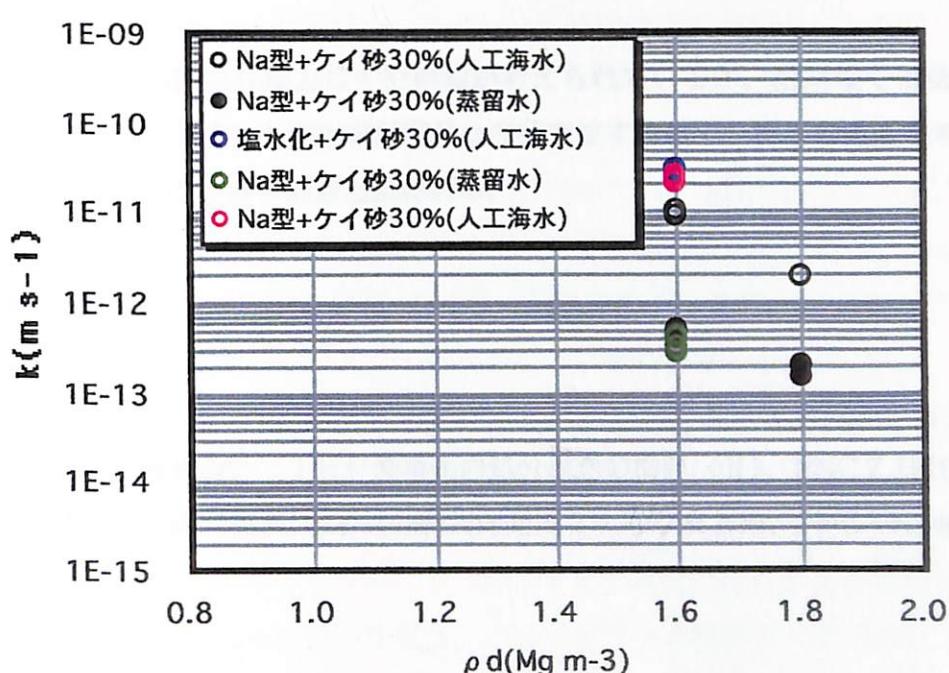


図2-11 乾燥密度と透水係数の関係

2.5 まとめと今後の課題

塩水化ベントナイトにケイ砂を30 wt. %混合した材料に人工海水を通水した場合の基本特性（膨潤圧、膨潤量、透水係数）より海水系地下水の影響を考慮すると以下のようになる。

- ① Na型ベントナイトを人工海水で強制的に変質させた塩水化ベントナイトはMg²⁺イオンの増加と共にNa⁺イオンが減少しており、Ca²⁺イオンは変化が小さいことから見かけ上Ca化が進んでいるため、その基本特性はCa型化ベントナイトに類似している。
- ② 既往の研究（例えばJNC高レベル放射性廃棄物地層処分）に見られるように人工海水そのものがベントナイトの基本特性に大きく影響しているように想定される。

今後の課題として以下に記す事項が挙げられる。

- ① 本年度、初めて配合率のケイ砂混じりベントナイトで海水系を考慮した試験を実施したので海水系での影響をより明確にするため、処分サイトが海水の影響を受ける場合も考えられることから、塩水を含水させた系での基本特性データの取得が必要と思われる。
- ② 処分施設の立地として沿岸域が考えられているが、沿岸域では条件によって陸水域（淡水域）と海水域が複雑な形状で接するので、海水の濃度を考慮した基本特性データの取得も必要と思われる。

参考文献

- 1)鹿島建設株式会社：TRU廃棄物の処分概念の検討（II）、PNC ZJ1100 97-001,1997
- 2)核燃料サイクル開発機構：地層処分研究開発第2次取りまとめ、JNC TN1400 99-022,1999

第3章 人工バリア材料の自己シール性の観点からのデータ取得並びに最適設計

3.1 目的

T R U廃棄物の処分施設内に定置される廃棄体には空隙を有するものがあるとともに、可溶性の塩やセメント系固化材を含むものがある。超長期的に起こりうる挙動として、これらの成分溶出に伴う空隙の発生が想定される。また、セメント系材料の候補材料となる構造躯体や充填材も同様に成分溶出に伴う空隙の発生が想定される。これらの空隙が潰れ緩衝材（ペントナイト）の内側において体積変化（減少）が生じた場合、周囲のペントナイトの膨潤が促進され、ペントナイトに期待する最重要機能である難透水性に影響を及ぼすことが考えられる。

平成8年度の委託研究「T R U廃棄物の処分概念の検討（II）」では、体積変化現象に対するペントナイトの膨潤現象について、ペ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、この解析ではペ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、ペントナイトの膨潤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った。

平成9年度の委託研究「T R U廃棄物の処分概念の検討（III）」では、乾燥密度1.6Mgm⁻³のペントナイトに対して自己シール性確認実験を行い、人工バリア材料の体積変化に対するシステム健全性の評価を行った。実験は、まず体積変化を拘束した状態でペントナイトに最大膨潤圧を発生させる。その後、ペントナイトの横に空隙が瞬時に生じたとし、その空隙をペントナイトの膨潤性能で埋めていく過程での透水係数の変化及び空隙を埋めた後のペントナイトの密度や含水比の変化を調べるものである。その結果、処分施設内の体積変化を保守的に設定した場合、乾燥密度1.6Mgm⁻³のC a型化ペ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生じた。

そこで、平成10年度の委託研究「T R U廃棄物の処分概念の検討（IV）」では乾燥密度1.8Mgm⁻³に増加させたC a型化ペントナイトによる自己シール性確認実験を行い、C a型化ペントナイトの乾燥密度増加によるシール性の改善を確認した。

今年度は、ペントナイトの自己シール性をより確実に把握するため自己シール過程での透水係数及び膨潤圧の変化を測定し、ペントナイトの密度変化を明確化し、人工バリア材料（ペントナイト）の厚さ等の最適設計を行う。

3.2 使用材料

実験に供するベントナイトは自然含水比状態のNa型ベントナイト、Ca型化ベントナイトである。供試体は図3-1に示す締固め治具を用いて静的圧縮加圧法により、表3-1に示す寸法に成型した。仕上がり密度は 1.6 Mg m^{-3} とし、締固め時の圧縮応力は30 MPaであった。図3-2に実験容器と圧力センサーの寸法を示す。また、図3-3に鋼製実験容器の写真を示す。

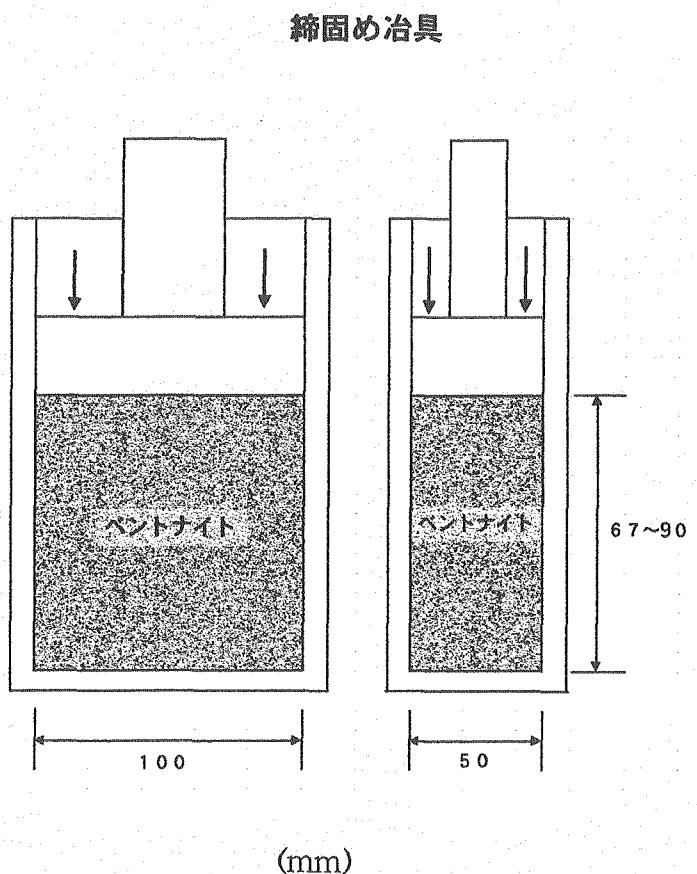
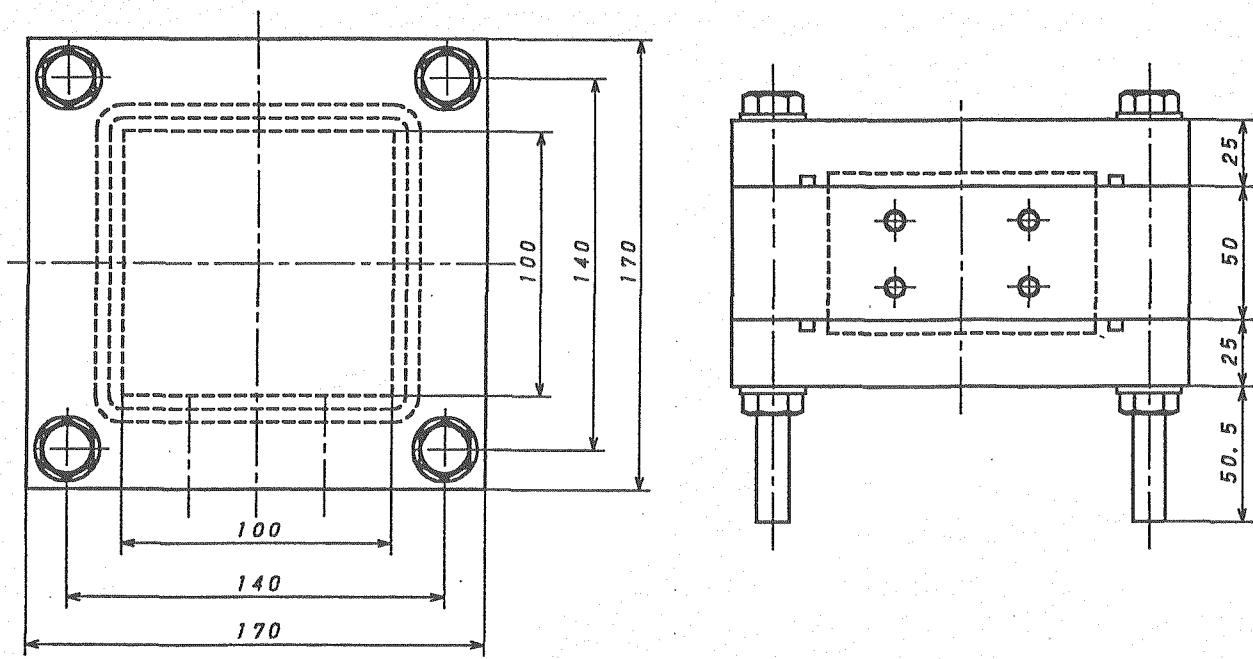


図3-1 供試体作製方法

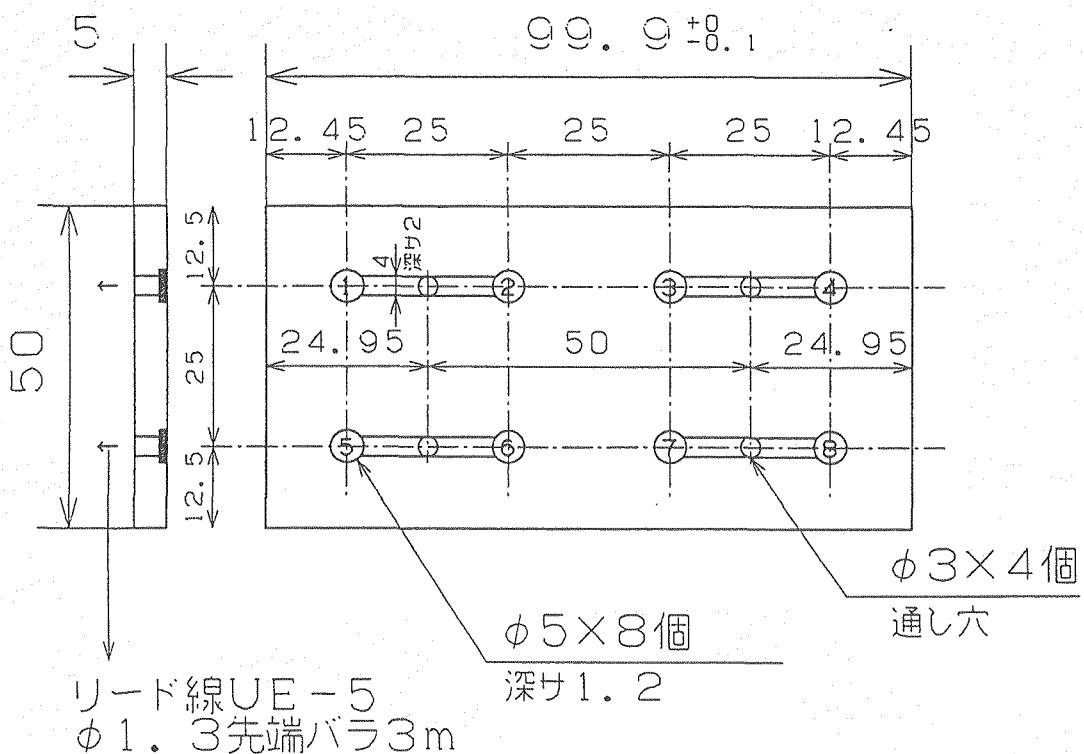
表3-1 供試体の仕様

供試体No.	1	2	3	4
ベントナイト	Ca型化	Ca型化	Ca型化	Na型
空隙量 (%) *	5	10	15	30
供試体寸法	$90.3 \times 50 \times 100$	$85.5 \times 50 \times 100$	$80.8 \times 50 \times 100$	$66.5 \times 10 \times 100$

*空隙量は容器体積（センサー部の体積を除く）に対する比率です。



鋼製容器寸法図(mm)



圧力センサー寸法図(mm)

図3-2 実験容器と圧力センサー

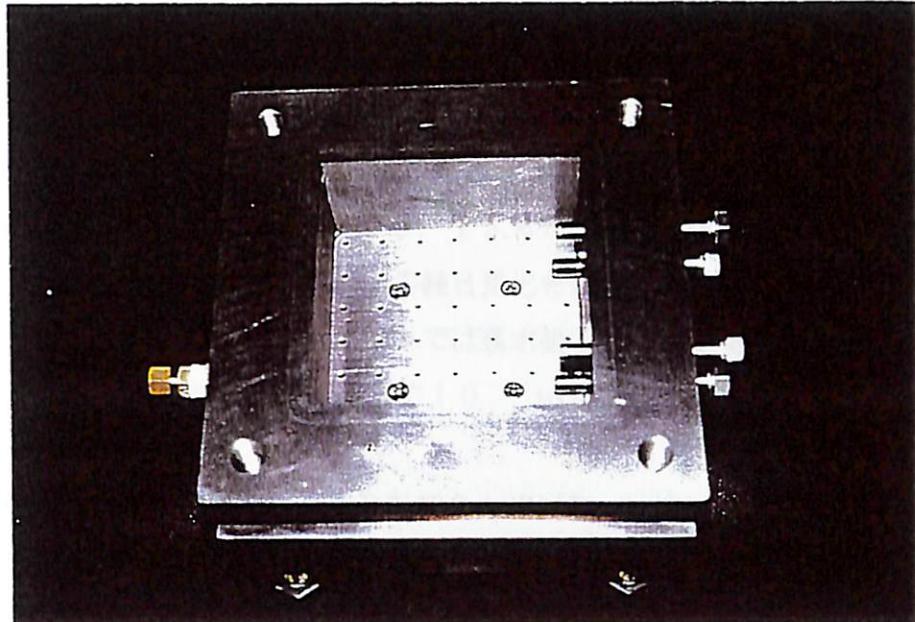


図3-3 鋼製容器

3.3 実験方法

実験のフローを図3-4に示す。

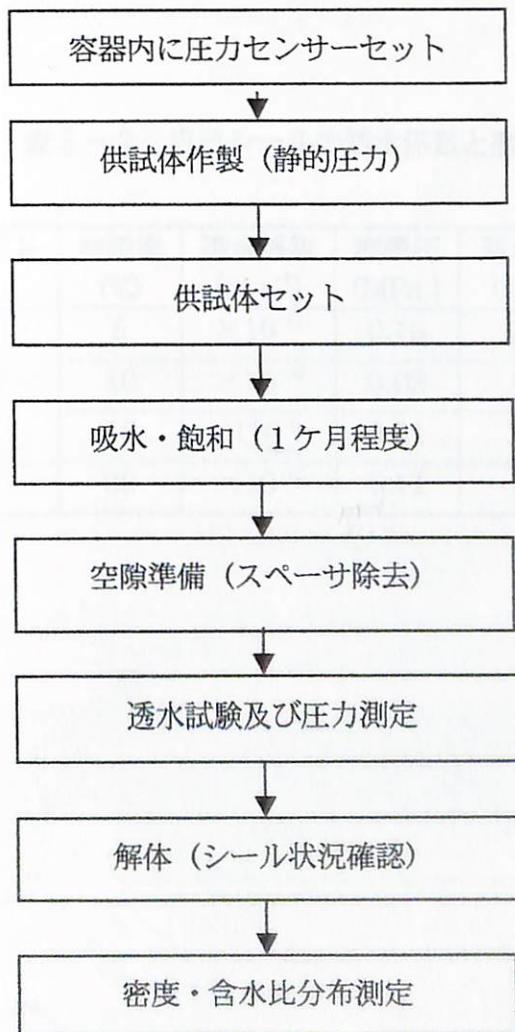


図3-4 実験フロー

3.4 実験結果

3.4.1 自己シール中の透水性及び膨潤圧

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と膨潤圧を調べた。図3-5～図3-8に空隙部5, 10, 15%のCa型化ベントナイト及び30%のNa型ベントナイトの透水係数と膨潤圧の経日変化を示す。図から明らかのように、空隙部5%及び10%のCa型化ベントナイトでは通水後4日程度で空隙部が自己シールされ、透水係数も7日過ぎにはそれぞれ5%で $10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ 、10%で $10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ のオーダまで小さくなっている。

膨潤圧も5%で0.14MPa、10%で0.03MPaに達している。

また、空隙部30%のNa型ベントナイトについては通水後7日程度で空隙部が自己シールされ、透水係数も10日過ぎには、 $10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ まで小さくなり、膨潤圧0.11MPaに達している。しかし、Ca型化ベントナイトでは、空隙部15%で透水係数は 10^{-5} m s^{-1} のオーダであり、膨潤圧も0.01MPaと小さく、自己シールされていない。

表3-2に各実験で得られた最終時点での透水係数と膨潤圧の結果を示す。

表3-2 自己シールの透水係数と膨潤圧

ベントナイト	空隙率 (%)	透水係数 (m s^{-1})	膨潤圧 (MPa)	通水期間 (Days)	通水圧 (MPa)
Ca型化	5	$\times 10^{-11}$	0.15	18.0	0.10
	10	$\times 10^{-10}$	0.03	19.5	0.01
	15	$\times 10^{-5}$	0.01	20.9	0.01
Na型	30	$\times 10^{-12}$	0.11	15.0	0.01

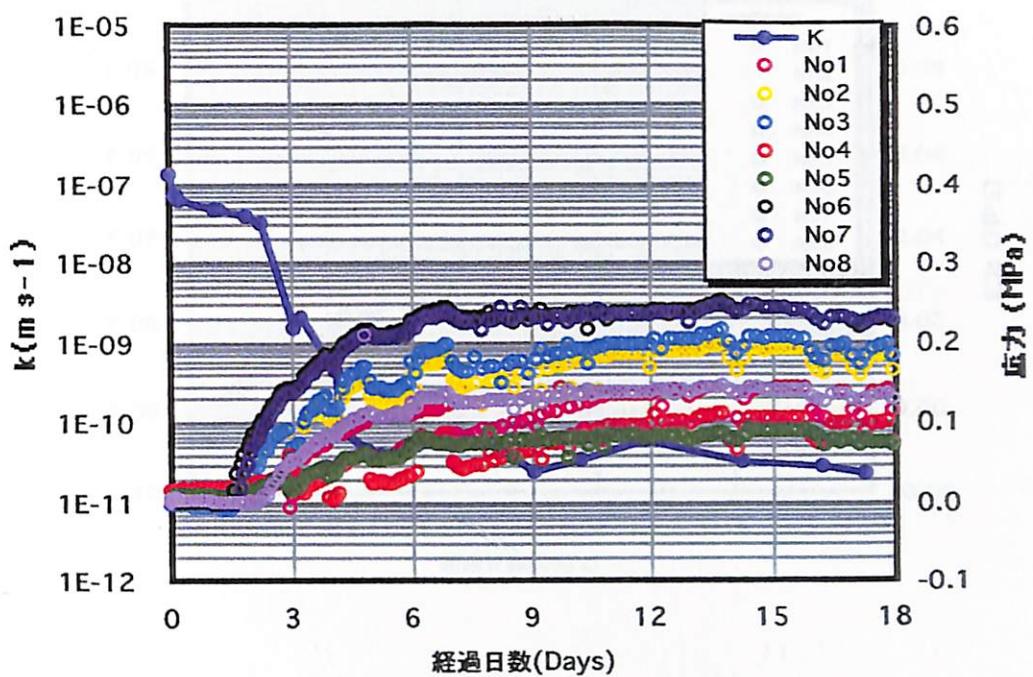


図3-5 自己シール中の透水係数と膨潤圧の経日変化 (Ca型化空隙 5 %)

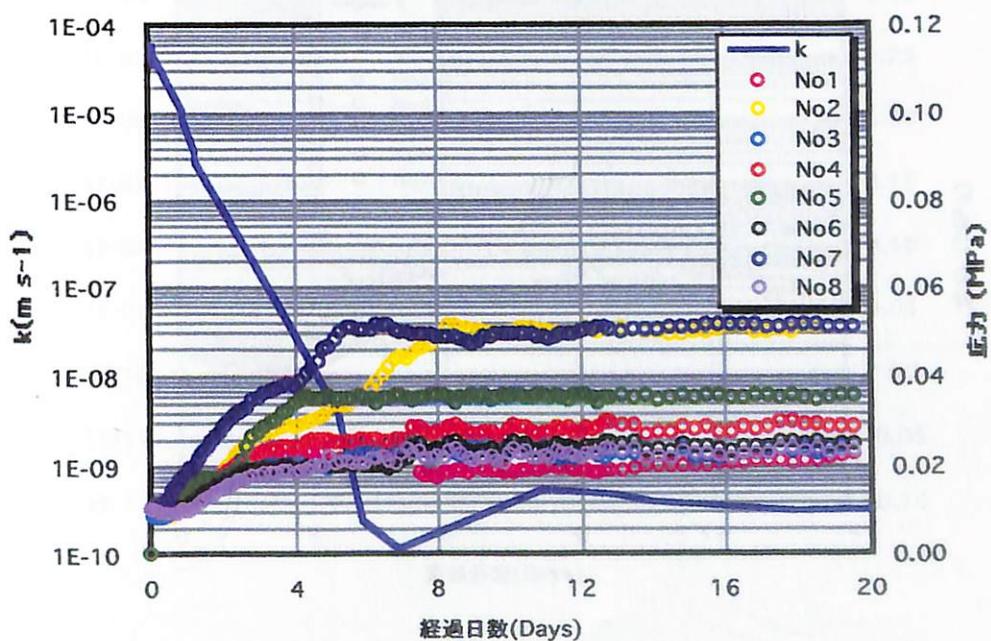


図3-6 自己シール中の透水係数と膨潤圧の経日変化 (Ca型化空隙 10 %)

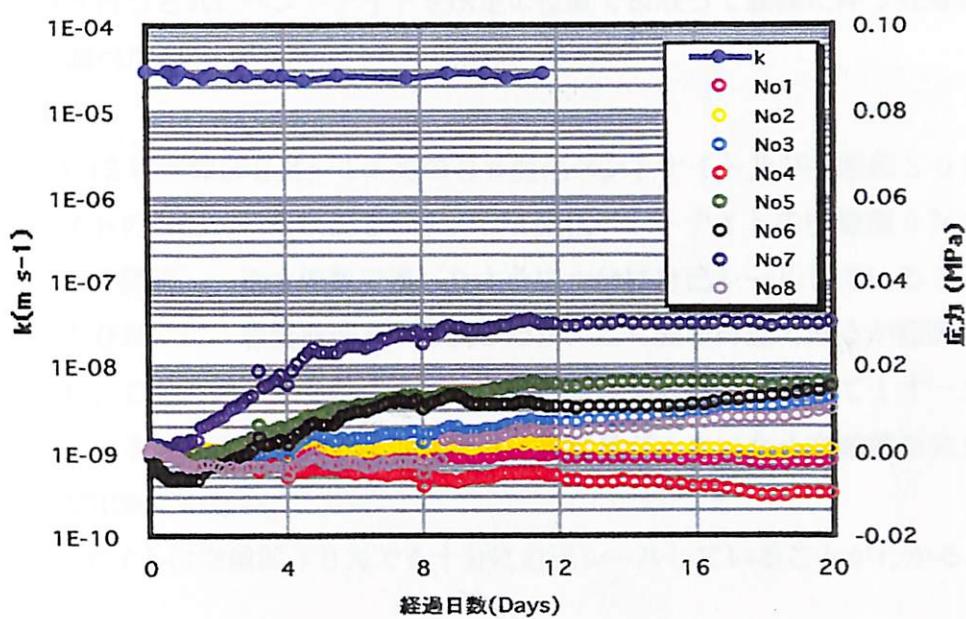


図3-7 自己シール中の透水係数と膨潤圧の経日変化 (Ca型化空隙 15 %)

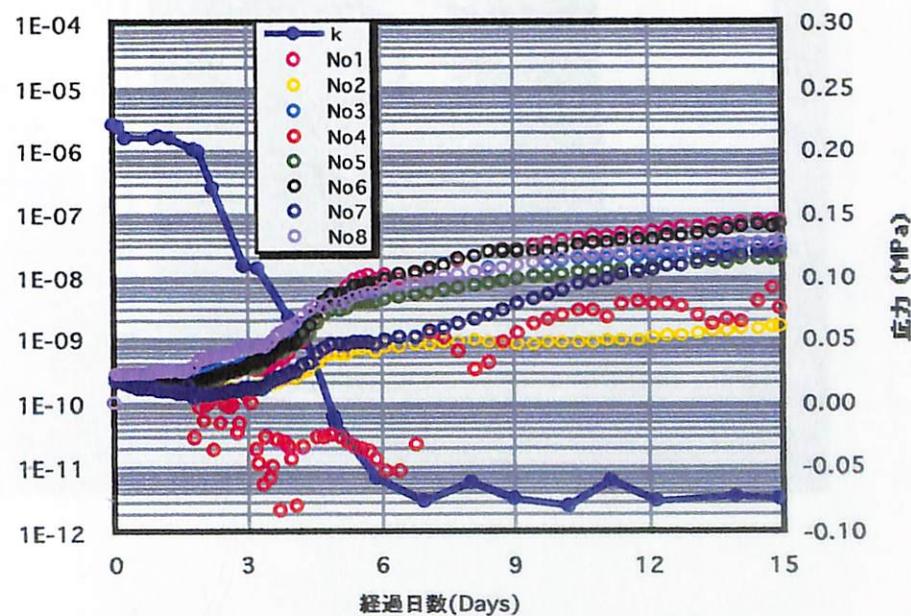


図3-8 自己シール中の透水係数と膨潤圧の経日変化 (Na型空隙 30 %)

3.4.2 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所定の位置で抜取って膨潤に伴う乾燥密度及び含水比分布を調べた。

(1) 観察結果

図3-9～図3-12に空隙部5%～15%のCa型化ベントナイト及び空隙部30%のNa型ベントナイトの自己シール状況を示す。Ca型化ベントナイトの空隙部5%では、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。空隙部10%では、容器壁部まで膨潤したが、ごく表面付近であるが膨潤が不十分な部分があり、このため透水係数で述べたように空隙部5%に比較して1オーダー程度大きくなっている。一方、空隙部15%では、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。

Na型ベントナイトは空隙部30%でも十分に自己シールしていることがわかる。



図3-9 自己シール状況 (Ca型化空隙5%)

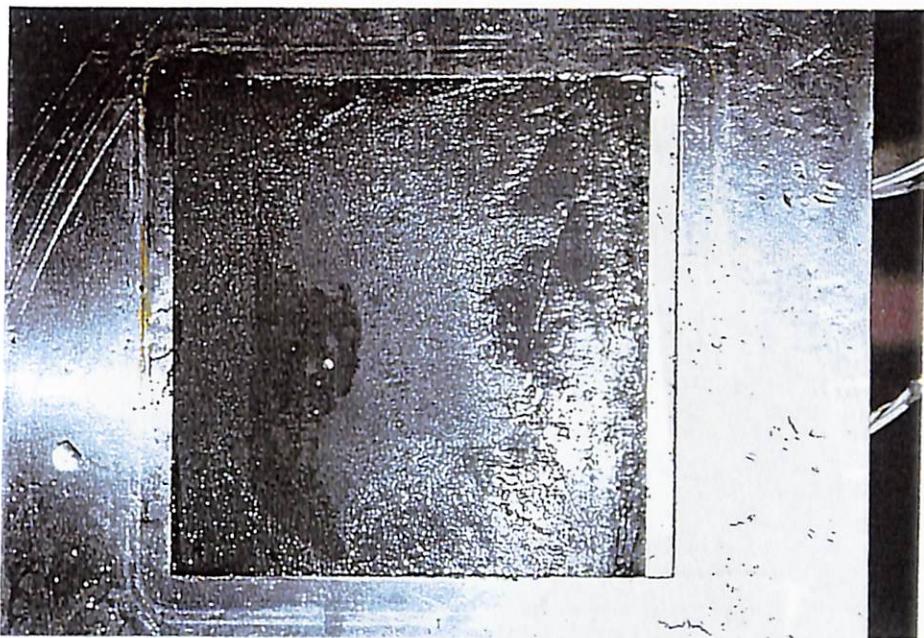


図 3-10 自己シール状況 (Ca 型化空隙 10 %)

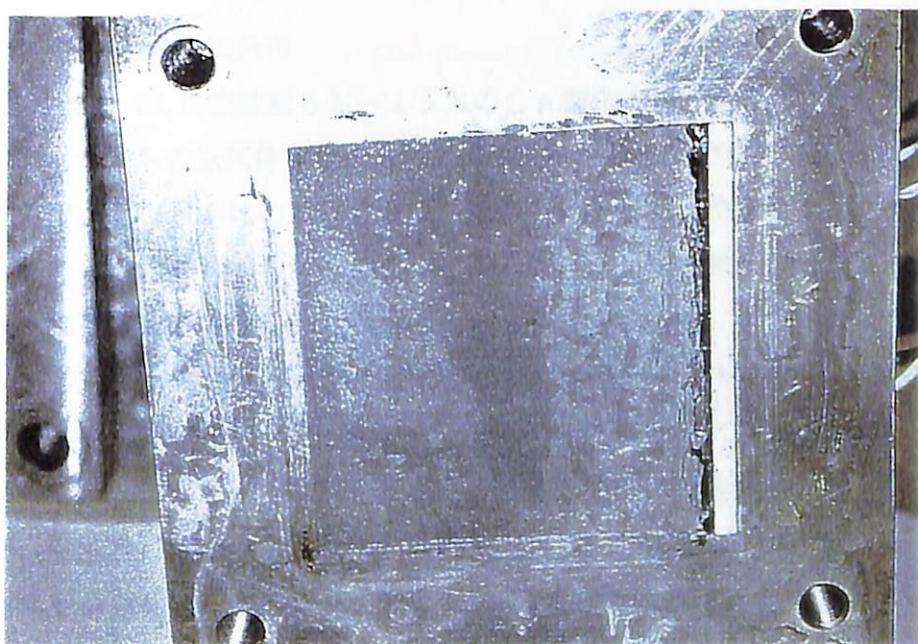


図 3-11 自己シール状況 (Ca 型化空隙 15 %)

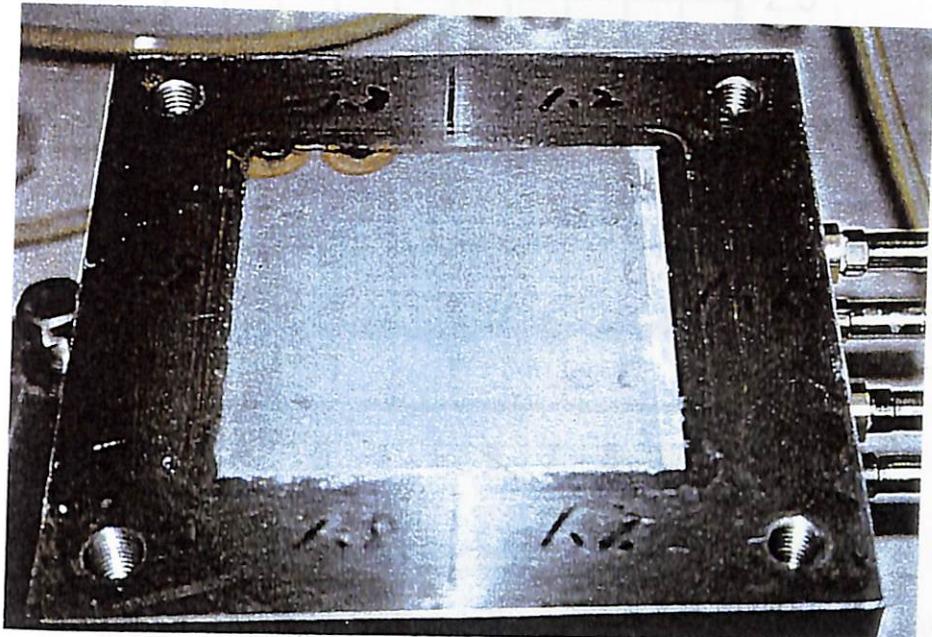


図 3-12 自己シール状況 (N a型空隙 30%)

(2) 乾燥密度と含水比分布

図 3-13～図 3-16 に空隙部 5%～15% の Ca 型化ペントナイト及び空隙部 30% の Na 型ペントナイトの供試体より抜取って求めた乾燥密度及び含水比分布を示す。なお、抜取り後の密度及び含水比のプロットは、それぞれの抜取り位置中央部の位置の数値として示している。図から明らかなように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。

図 3-17～図 3-18 は空隙部の大きさに対する Ca 型化ペントナイト及び Na 型ペ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。

図から明らかなように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。また、密度及び含水比の変化が、空隙部とは反対の端部まで及んでいる。このことから、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。

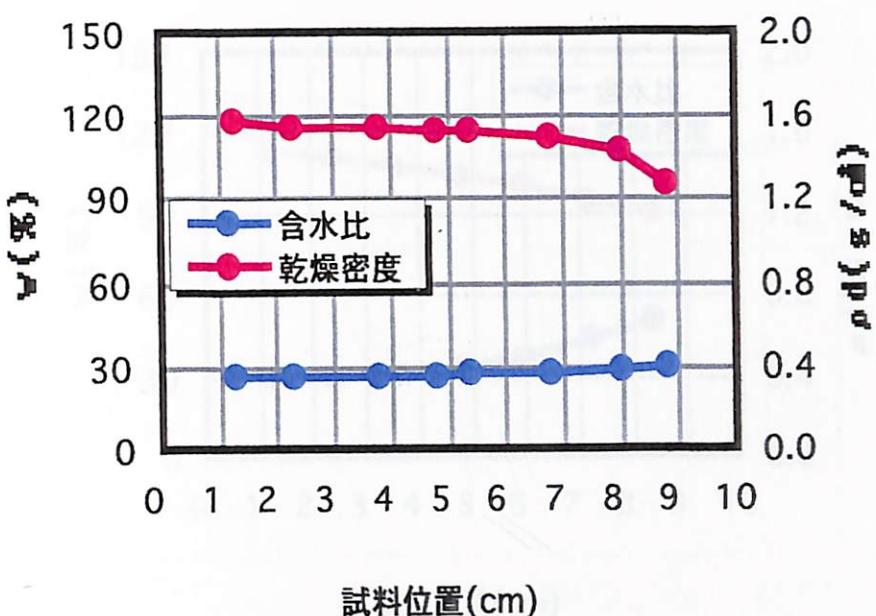


図 3-13 自己シール実験後の乾燥密度と含水比分布 (C a 型化空隙 5 %)

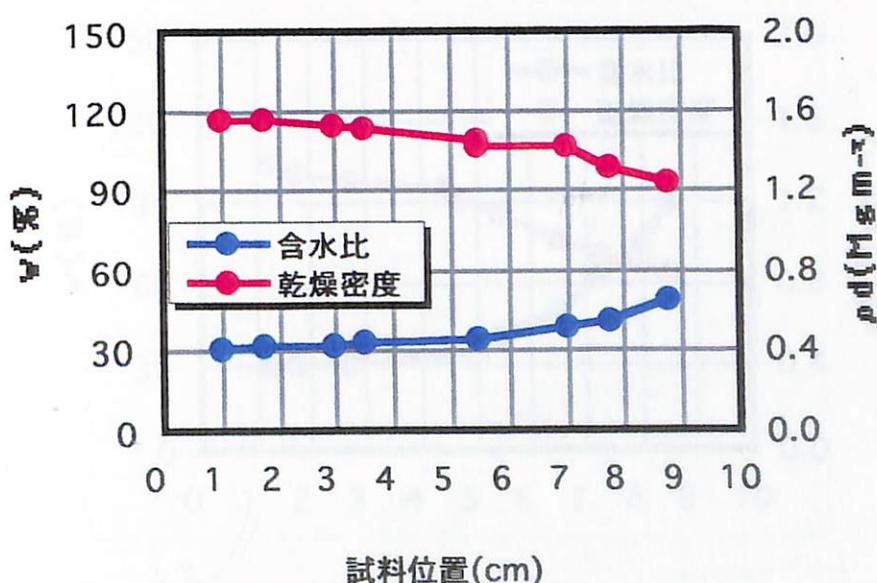


図 3-14 自己シール実験後の乾燥密度と含水比分布 (C a 型化空隙率 10 %)

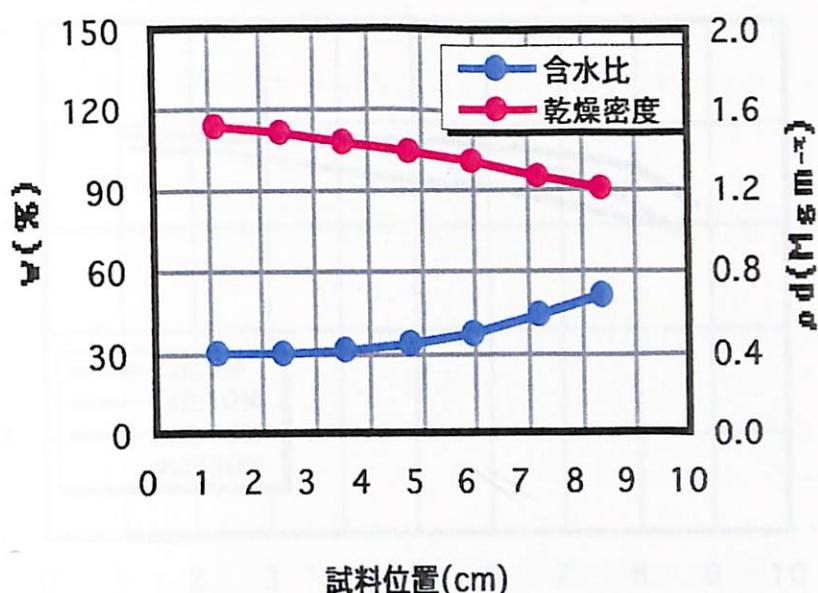


図3-15 自己シール実験後の乾燥密度と含水比分布 (Ca型空隙率 15 %)

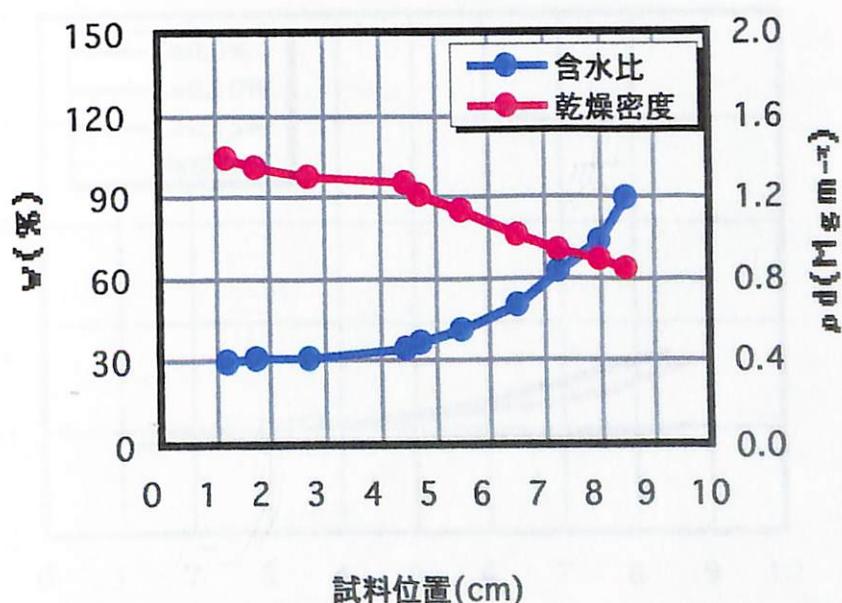


図3-16 自己シール実験後の乾燥密度と含水比分布 (Na型空隙 30 %)

アーランタルの成り得るところ
の水を多く含む土壤に適する吸水性肥料アーランタルは、その特徴を
表す以下のようになる。

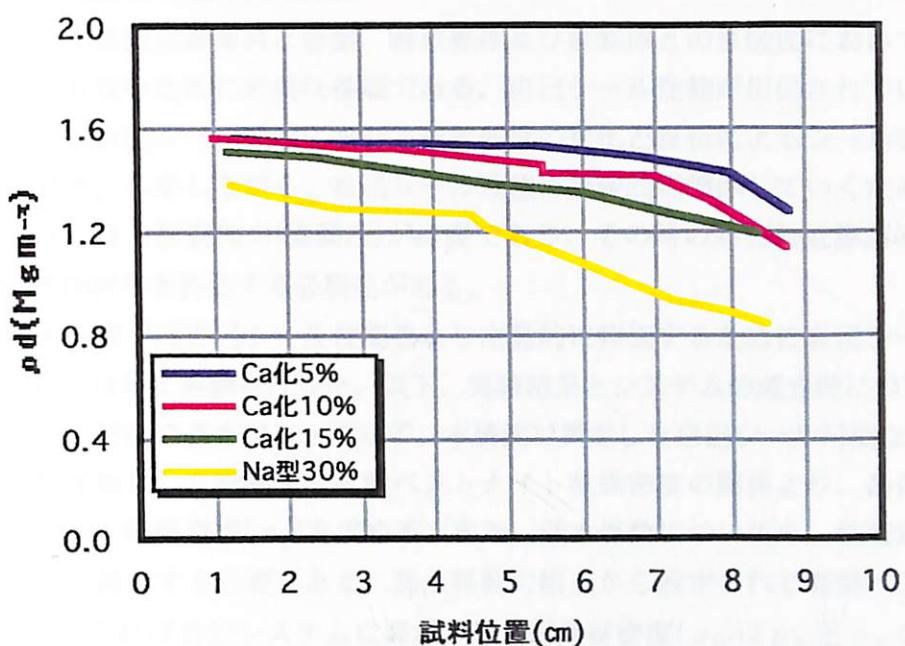


図3-17 空隙部の大きさと乾燥密度の関係

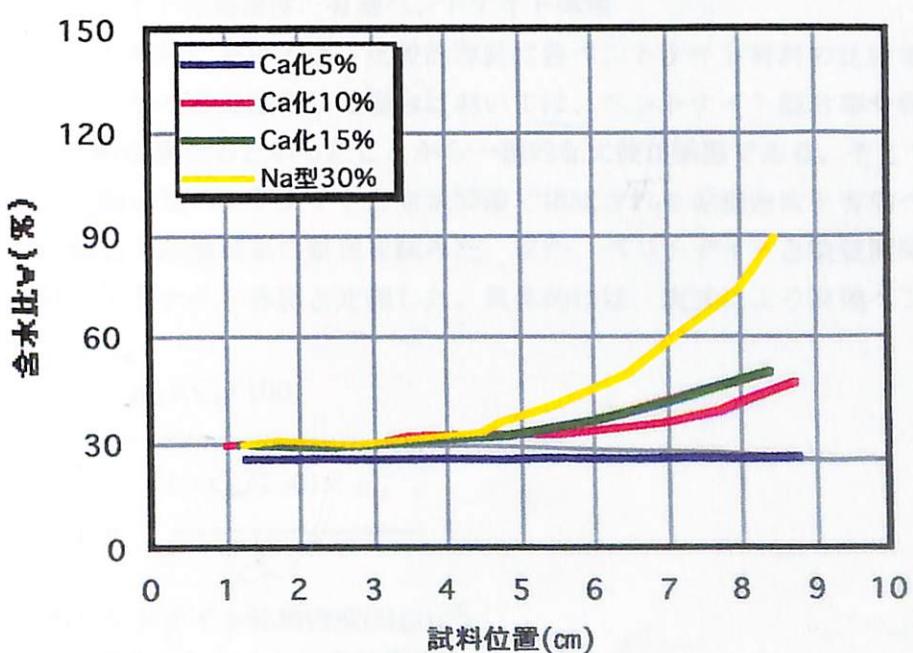


図3-18 空隙部の大きさと含水比の関係

3.5 人工バリアシステムの成立性について

本研究で得られた自己シール時に発生する膨潤圧と人工バリアシステム成立性の関係について考察すると以下のようになる。

3.5.1 成立性評価の基本的考え方

自己シール性能は緩衝材と岩盤、構造躯体及び廃棄体との接触面において、その部分が水みちにならないために必要な性能である。自己シール性能が担保されているかどうかの評価は従来、自己シール実験における透水係数の変化と目視によるシール状況に注目して考察してきた。しかしながら、自己シール性能を持続的に担保していくためには、ある一定以上のさらなる膨潤能力(膨潤圧)が必要であり、その時の必要最低膨潤圧及び有効ペントナイト乾燥密度を評価する必要性がある。

そこで本研究では自己シール性能をより定量的に評価するために自己シールした状態での膨潤圧に注目して実験を行った。以下、実験結果とシステムの成立性について考察する。

図3-19に評価の基本フローを示す。本研究で算定した自己シール可能な最低膨潤圧(P_0)と既往研究を整理した膨潤圧ー有効ペントナイト乾燥密度の関係より、最低膨潤圧時の有効ペントナイト乾燥密度(ρ_p)を求める。また、透水係数についても、性能評価上要求される値を最低限確保する必要がある。透水係数の観点から設定される有効ペントナイト乾燥密度を ρ_k とすれば処分システムに要求される緩衝材密度(ρ_0)は ρ_p と ρ_k の大きい方と考えることができる。一方、緩衝材は構造躯体・廃棄体の体積減少と共に膨潤することで密度が減少していくが、このときの膨潤後の密度を ρ' とする(ρ' は空洞形状、構造躯体形状、緩衝材厚などの幾何形状で定義可能)と、システムが成立するには、 ρ' は ρ_0 以上の密度となる必要がある。

*有効ペントナイト乾燥密度、有効ペントナイト体積

ペントナイト単体においては、比較的容易に各ペントナイト材料の比較を行うことができる。しかし、ケイ砂を混合した場合においては、ペントナイト混合率や乾燥密度、さらには使用ケイ砂が異なるといったことから一義的な比較が困難である。そこで本報告ではケイ砂部分を除いたペントナイトと空気間隙で構成される乾燥密度を有効ペントナイト乾燥密度と定義して試験結果の整理を試みた。また、ペントナイトと空気間隙で構成される部分を有効ペントナイト体積と定義した。具体的には、次式により有効ペントナイト乾燥密度を算定した。

$$\rho_{be} = \frac{\rho_d \times C_b / 100}{(1 - C_b / 100) \times \rho_d}$$
$$1 - \frac{G_s}{}$$

ρ_{be} : 有効ペントナイト乾燥密度(Mgm⁻³)

ρ_d : ケイ砂混合ペントナイトの乾燥密度(Mgm⁻³)

C_b : ペントナイト混合率(%)

G_s : ケイ砂の土粒子密度(Mgm⁻³)

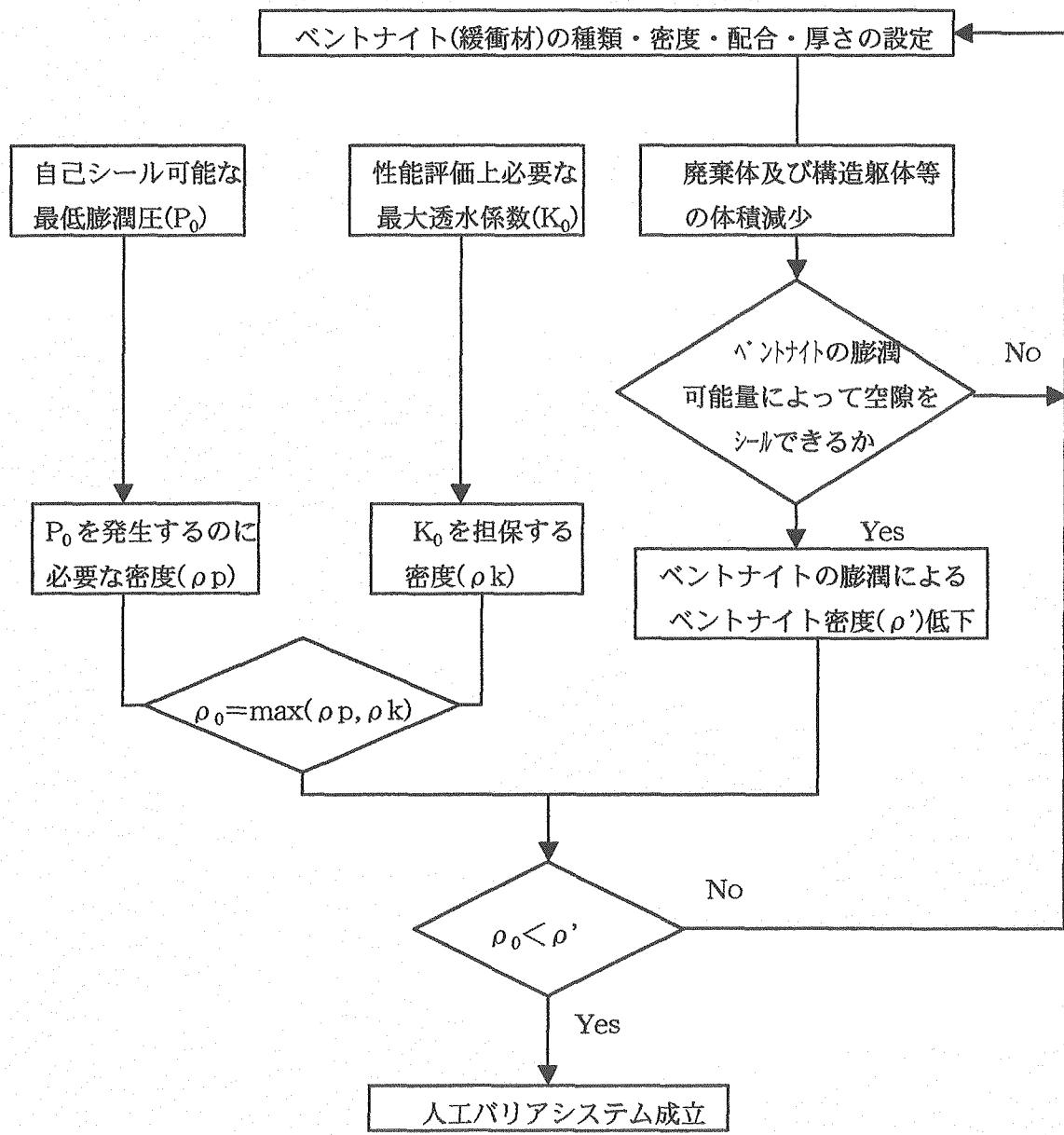


図 3-19 評価基本フロー

3.5.2 自己シール可能な最低膨潤圧

(1)Na型ベントナイトを考えた場合

Na型ベントナイトを用いた自己シール実験により、透水係数と実験装置の側面で測定された膨潤圧を図3-8および図3-20に示す。これを模式的に描いたものを図3-21に示す。これによれば、透水係数は膨潤圧の増加に応じて小さくなるが、ある値(10^{-11}m/sec 程度)以上では膨潤圧が増加してもほぼ一定値となる。このときの膨潤圧を壁面とベントナイト間のシール性を評価する場合の最低膨潤圧とすれば、ベントナイトと壁面は十分シールされていると考えられる。したがって、膨潤圧が 0.1MPa あれば自己シールされるものと考える。また、図3-22より有効ベントナイト乾燥密度は 1.1Mgm^{-3} 以上必要と考える。

(2)Ca型化ベントナイトを考えた場合

Ca型化ベントナイトを用いた自己シール実験により、透水係数と実験装置の側面で測定された膨潤圧を図3-5～図3-7に示す。この実験結果から判断すると膨潤圧が 0.1MPa あれば自己シールされるものと考えられる。また、図3-22より有効ベントナイト乾燥密度は 1.3Mgm^{-3} 以上必要となる。

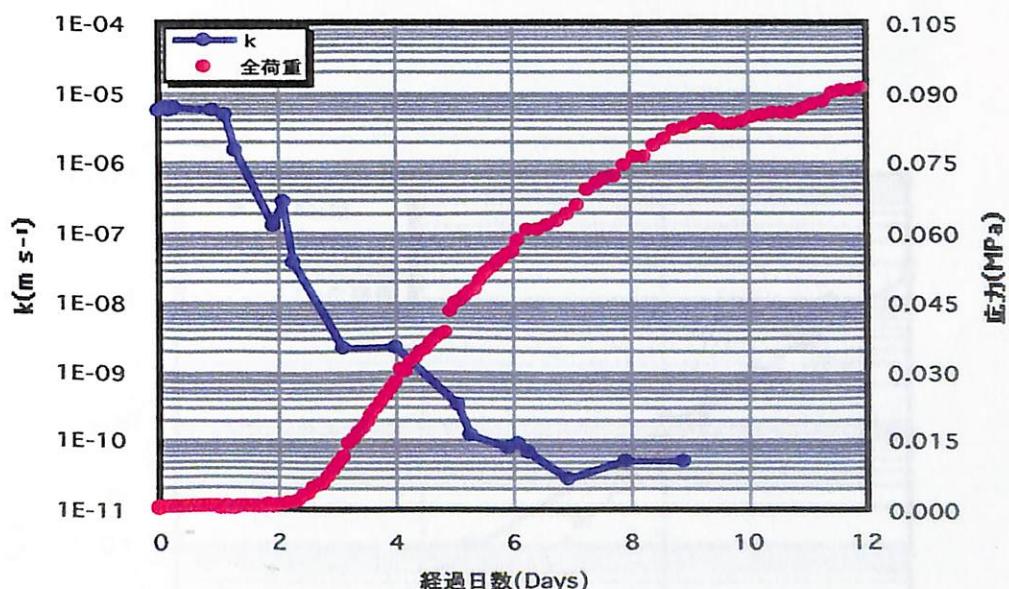


図3-20 自己シール実験における透水係数と膨潤圧測定結果(Na型)

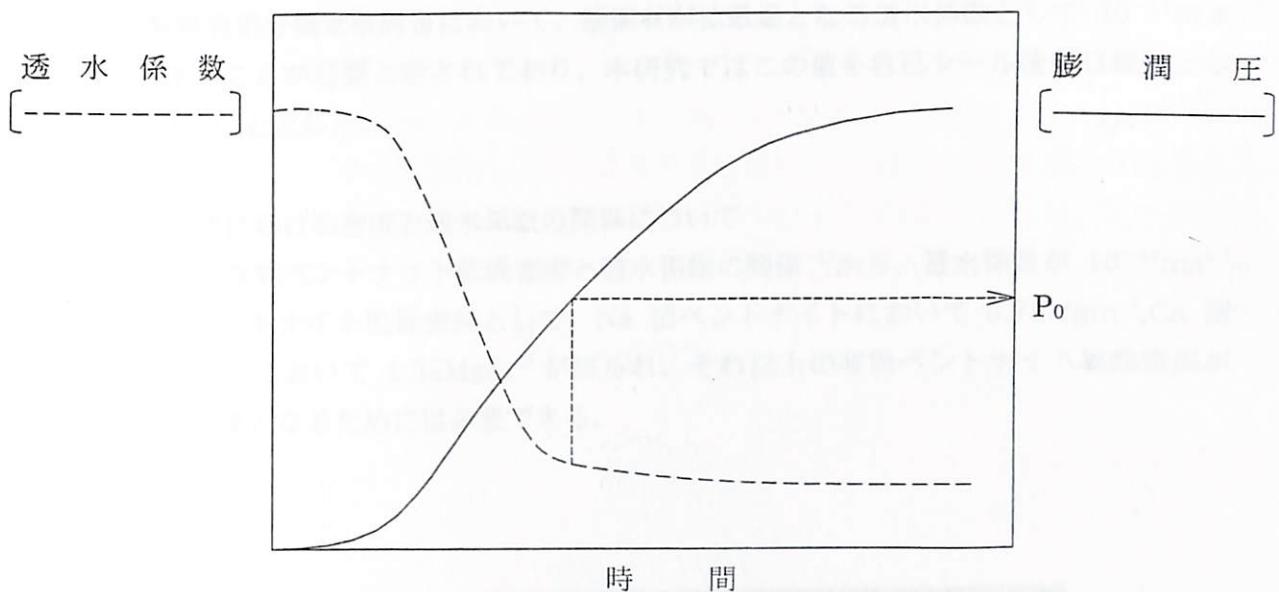


図 3-21 自己シール実験における透水係数と膨潤圧の模式図

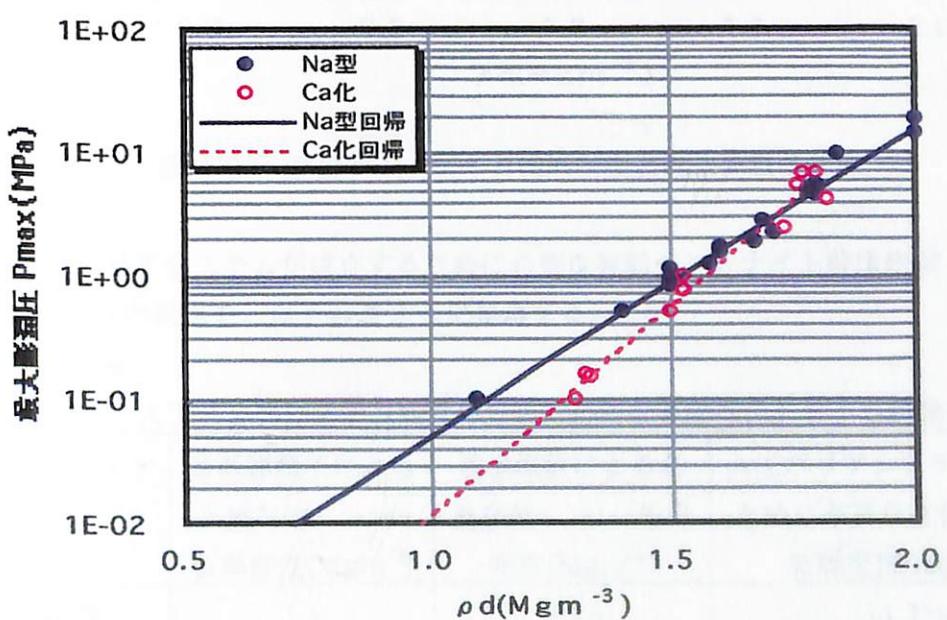


図 3-22 有効ベントナイト乾燥密度と膨潤圧の関係

3.5.3 性能評価上必要な透水係数

(1) 性能評価上必要な透水係数について

TRU 廃棄物処分概念検討書において、緩衝材が拡散場となる透水係数として $10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ 以下であることが必要と示されており、本研究ではこの値を自己シール後の目標値として検討を行うこととした。

(2)既往の研究における密度と透水係数の関係について

図 3-23 の有効ペントナイト乾燥密度と透水係数の関係¹⁾から、透水係数が 10^{-11} ms^{-1} となる有効ペントナイト乾燥密度として、Na 型ペントナイトにおいて 0.75 Mgm^{-3} , Ca 型化ペントナイトにおいて 1.35 Mgm^{-3} が得られ、それ以上の有効ペントナイト乾燥密度が緩衝材が拡散場となるためには必要である。

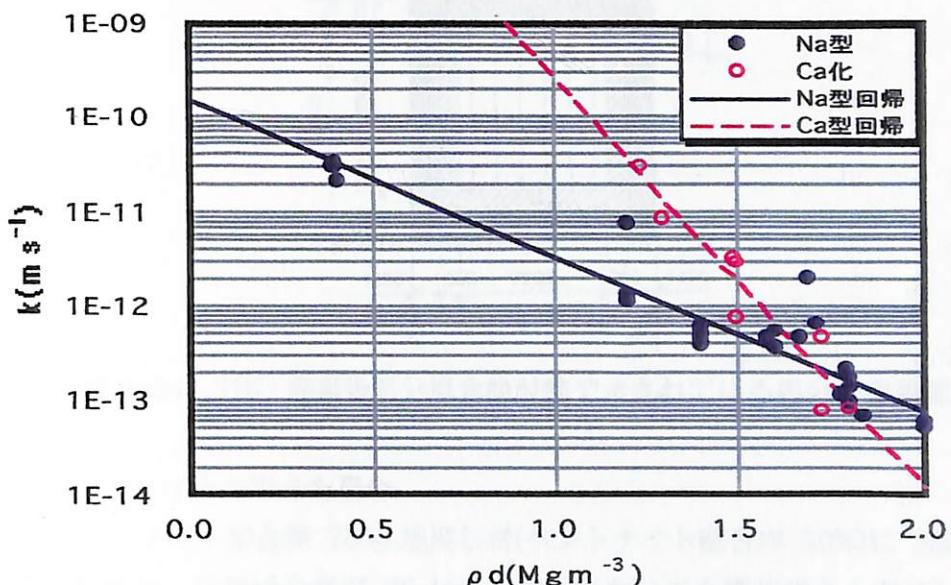


図 3-23 有効ペントナイト乾燥密度と透水係数の関係

3.5.4 人工バリアシステムが成立するために必要な有効ペントナイト乾燥密度

3.5.2～3.5.3 の結果を、以下の表 3-3 に整理する。

表 3-3 人工バリアシステム成立のために必要な有効ペントナイト乾燥密度

ペントナイト	最低膨潤圧による 必要有効ペントナイト 乾燥密度(Mgm^{-3})	透水係数による必 要有効ペントナイト乾燥 密度(Mgm^{-3})	人工バリアシステム成立の ために必要な有効ペントナイト 乾燥密度(Mgm^{-3})
Na 型	1.1	0.75	1.1
Ca 型化	1.3	1.35	1.35

3.5.5 廃棄体及び構造躯体等の体積減少量によるベントナイトの膨潤について

昨年度までの研究で廃棄体や構造躯体等は、廃棄体内に存在する空隙及びセメント系材料からの Ca 成分等の溶出による体積減少が想定され、それに伴い周囲にあるベントナイトが膨潤することが考えられている。このときベントナイト(緩衝材)内側空間の体積減少量について、その空間の 10~30%が減少すると仮定している。図 3-24 に示す TRU 廃棄物処分概念検討書²⁾で考えられている結晶質岩系岩盤ケースの処分概念の場合、体積減少量により発生する空間をベントナイト(緩衝材+埋戻し材)の膨潤により埋めることを考えると、以下の結果となった。

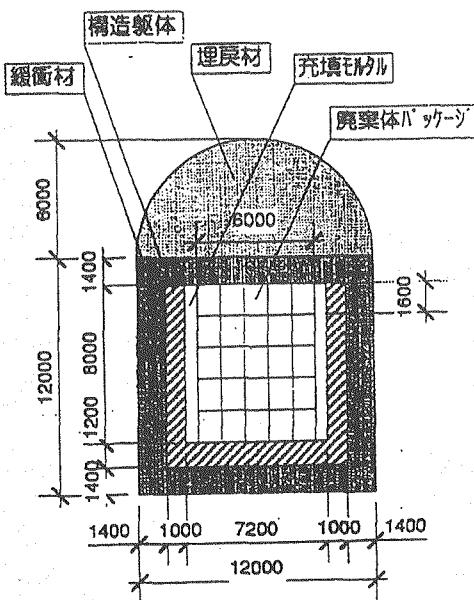


図 3-24 TRU 廃棄物処分概念検討書で示されている処分坑道断面

(1) Na 型ベントナイトを考えた場合

緩衝材(ベントナイト配合率 70%),埋戻し材(ベントナイト配合率 50%)に Na 型ベントナイトを考えた場合、体積減少量が $25.4m^3$ の場合においても現状考えられている緩衝材厚さ 1.4m(図 3-24 の仕様)で十分空間を埋めることができる。

(2) Ca 型化ベントナイトに変質することを考えた場合

ここでは、Ca 型化ベントナイトの有効ベントナイト乾燥密度が小さい範囲のデータが不足しているため、Ca 型に変質した緩衝材、埋戻し材(Ca 型化ベントナイト)の仕様として、とともに有効ベントナイト乾燥密度 $1.6 Mgm^{-3}$ 、ベントナイト 100%と設定した。この場合、これまでの研究より Ca 型化ベントナイトの膨潤率は 20%⁴⁾と考えられる。緩衝材の厚さを 1.4m(図 3-24 の仕様)とした場合、膨潤可能体積が $23.2m^3$ であるので、体積減少量が 20%と想定したケース(体積減少量 $17.0m^3$)においては空間を埋めることができる。また、緩衝材及び埋戻し材を有効ベントナイト乾燥密度 $1.8 Mgm^{-3}$ 、ベントナイト 100%として考えた場合、膨潤率は 30%⁴⁾と考えられ、緩衝材の厚さ 1.4m で膨潤可能体積が $34.8m^3$ であるので、厚さ 1.4m で最大の体積減少量($25.4m^3$)を考えた場合でも空間を埋めができる。

3.6 緩衝材の設計

ここでは、「3.5 人工バリアシステムの成立性について」の結果をもとに、いくつかの設計条件における緩衝材の設計を試みる。

3.6.1 設計基本条件ケース

設計基本条件ケースを以下の表-3.4 に示す。ここで、case1 は TRU 廃棄物処分概念検討書で示された概念のケース、case2 は case1 に対して配合率を 100%としたケース、case3 は Ca 型化ペントナイトで配合率を 100%としたケース、case4 は Ca 型化ペントナイトで乾燥密度を 1.7 Mgm^{-3} 、配合率を 100%としたケースである。

表-3.4 設計基本条件ケース

case	ペントナイト種類	乾燥密度 (Mgm^{-3})	ペントナイト 厚さ(m)	緩衝材部ペントナイト 配合率(%)	廃棄体及び構造躯体 等の体積減少量(%)
case1	Na 型ペントナイト	1.6	1.4	70	20
case2	Na 型ペントナイト	1.6	1.4	100	30
case3	Ca 型化ペントナイト	1.6	1.4	100	20
case4	Ca 型化ペントナイト	1.7	1.4	100	30

3.6.2 試設計方法

それぞれのケースにおける試設計は、図 3-24 に示した処分坑道断面をもとに行い、廃棄体及び構造躯体の初期体積は一定と考え、ペントナイトの種類、厚さ、密度、配合率をパラメーターとして設計を行うこととした。なお、埋め戻し材部のペントナイト配合率は Na 型で 50%, Ca 型化で 100%と固定して考えた。

3.6.3 緩衝材の試設計

表-3.4 に示すケース 1~5 について緩衝材の試設計を行う。

(1)case1

TRU 廃棄物処分概念検討書で示されている Na 型ペントナイト(乾燥密度 1.6 Mgm^{-3} 、配合率 70%、厚さ 1.4m)、廃棄体及び構造躯体等の体積減少量が 20%の場合、体積減少による膨潤後の緩衝材部の有効ペントナイト乾燥密度は、 1.13 Mgm^{-3} となり、システムの健全性は保たれる。

(2)case2

Na 型ペントナイト(乾燥密度 1.6 Mgm^{-3} 、配合率 100%、厚さ 1.4m)、廃棄体及び構造躯体等の体積減少量が 30%の場合、体積減少による膨潤後の緩衝材部の有効ペントナイト乾燥密度は、 1.27 Mgm^{-3} となり、システムの健全性は保たれる。

(3)case3

Ca 型化ペントナイト(乾燥密度 1.6 Mgm^{-3} 、配合率 100%、厚さ 1.4m)、廃棄体及び構

造躯体等の体積減少量が 20%の場合、体積減少による膨潤後の緩衝材部の有効ペントナイト乾燥密度は、 1.40 Mgm^{-3} となる。また、3.5.5(2)の検討より、以上の条件であれば、ペントナイトは十分膨潤する能力を有しているので、システムの成立性は保たれる。

(4)case4

Ca 型化ペントナイト(乾燥密度 1.7 Mgm^{-3} 、配合率 100%、厚さ 1.4m)、廃棄体及び構造躯体等の体積減少量が 30%の場合、体積減少による膨潤後の緩衝材部の有効ペントナイト乾燥密度は、 1.39 Mgm^{-3} となる。また、3.5.5(2)の検討より、以上の条件であれば、ペントナイトは十分膨潤する能力を有しているので、システムの健全性は保たれる。

3.6.4 考察

以上のケースのような条件に設計することで、緩衝材(ペントナイト)は膨潤後も自己シール性能を十分有することが言える。このように今年度までの研究成果及びシステムの成立性の評価から、膨潤後のペントナイト乾燥密度を把握できれば、自己シール可能な最低膨潤圧(P_0)、性能評価上必要な最大透水係数(K_0)を満足できる仕様を決定できることがわかった。

また、体積減少量の評価及びペントナイトの Ca 化によって緩衝材の仕様は大きく変わるために、今後はセメント成分の溶出に伴う体積減少量の評価及び Ca 化への変質過程の評価が重要であると考えられる。さらに設計の対応方法として、断面当りの廃棄体量を少なくすることも考えられる。

参考文献

- 1)前田宗宏、棚井憲治、伊藤勝、三原守弘、田中益弘(1998)：カルシウム型化およびカルシウム型ペントナイトの基本特性 -膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強度および弾性係数-, 動燃事業団公開技術資料、PNC TN8410 98-021.
- 2)共同作業チーム(2000)：TRU 廃棄物処分概念検討書
- 3)古市光昭、奥津一夫、田中益弘(1999)：高レベル放射性廃棄物処分場の埋戻しの検討(その 2), 日本原子力学会 原子力バックエンド研究 No.5 Vol.2
- 4)青柳孝義、三原守弘、田中益弘、奥津一夫(1999)：人工バリア材の体積変化に対するシステム健全性評価、サイクル機構技術資料、JNC TN8400 99-058.

付録 堆積岩系岩盤における処分概念の場合の緩衝材設計

(1) 成立性評価の基本的考え方

図3-19に示す基本フローにしたがって、堆積岩系岩盤ケースにおける人工バリアシステムが成立するかどうか評価を行う。

(2) 人工バリアシステムが成立するために必要な有効ペントナイト乾燥密度

3.5.2～3.5.3で得られた結果を、以下の表-1に整理する。

表-1 人工バリアシステム成立のために必要な有効ペントナイト乾燥密度

ペントナイト	最低膨潤圧による必要 有効ペントナイト乾燥密度 (Mgm ⁻³)	透水係数による必 要有効ペントナイト乾燥 密度(Mgm ⁻³)	人工バリアシステム成立の ために必要な有効ペントナイト 乾燥密度(Mgm ⁻³)
Na型	1.1	0.75	1.1
Ca型化	1.3	1.35	1.35

(3) 廃棄体及び構造躯体等の体積減少量によるペントナイトの膨潤について

図-1に示すTRU廃棄物処分概念検討書²⁾で考えられている堆積岩系岩盤ケース(グループ2)の処分概念の場合、体積減少量は4.8m³～14.3m³となった。この減少量により発生する空間をペントナイト(緩衝材)の膨潤により埋めることを考えると、以下の結果となった。

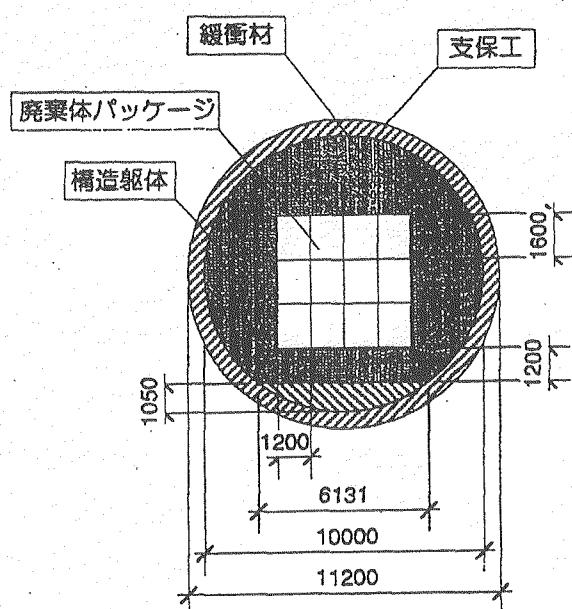


図-1 TRU廃棄物処分概念検討書で示されている処分坑道断面

1) Na型ペントナイトを考えた場合

緩衝材(ペントナイト配合率 70%)に Na 型ペントナイトを考えた場合、体積減少量が 14.3m^3 の場合においても現状考えられている緩衝材厚さ 1.4m(図 3-24 の仕様)で十分空間を埋めることができる。

2) Ca型化ペントナイトに変質することを考えた場合

ここでは、Ca 型化ペントナイトの有効ペントナイト乾燥密度が小さい範囲のデータが不足しているため、Ca 型に変質した緩衝材(Ca 型化ペントナイト)の仕様として、有効ペントナイト乾燥密度 1.6 Mgm^{-3} 、ペントナイト 100%と設定した。この場合、これまでの研究より膨潤率は 20%⁴⁾と考えられる。緩衝材の厚さを 1.4m(図-1 の仕様)とした場合、膨潤可能体積が 10.2m^3 であるので、体積減少量が 10%と想定したケース(体積減少量 4.8m^3)においては空間を埋めることができる。また、緩衝材を有効ペントナイト乾燥密度 1.8 Mgm^{-3} 、ペントナイト 100%として考えた場合、膨潤率は 30%⁴⁾と考えられ、緩衝材の厚さ 1.4m で膨潤可能体積が 15.3m^3 であるので、最大の体積減少量(14.3m^3)を考えた場合、空間を埋めることができる。

(4) 緩衝材の設計

ここでは、以上の結果をもとに、いくつかの設計条件における緩衝材の設計を試みる。

1) 設計基本条件ケース

設計基本条件ケースを以下の表-2 に示す。ここで、case1 は TRU 廃棄物処分概念検討書で示された概念のケース、case2 は case1 に対して配合率を 100%としたケース、case3 は Ca 型化ペントナイトで配合率を 100%としたケース、case4 は Ca 型化ペントナイトで乾燥密度を 1.8 Mgm^{-3} 、配合率を 100%としたケースである。

表-2 設計基本条件ケース

case	ペントナイト種類	乾燥密度 (Mgm^{-3})	ペントナイト 厚さ(m)	緩衝材部ペントナイト 配合率(%)	廃棄体及び構造躯体 等の体積減少量(%)
case1	Na型ペントナイト	1.6	1.4	70	20
case2	Na型ペントナイト	1.6	1.4	100	30
case3	Ca型化ペントナイト	1.6	1.4	100	10
case4	Ca型化ペントナイト	1.8	1.4	100	30

2) 試設計方法

それぞれのケースにおける試設計は、図-1 に示した処分坑道断面をもとに行い、廃棄体及び構造躯体の初期体積は一定と考え、ペントナイトの種類、厚さ、密度、配合率をパラメーターとして設計を行うこととした。

3) 緩衝材の試設計

表-3.4 に示すケース 1~5 について緩衝材の試設計を行う。

case1

TRU 廃棄物処分概念検討書で示されている Na 型ペントナイト(乾燥密度 1.6 Mgm^{-3} 、配合率 70%、厚さ 1.4m)、廃棄体及び構造躯体等の体積減少量が 10%の場合、体積減少による膨潤後の緩衝材部の有効ペントナイト乾燥密度は、 1.17 Mgm^{-3} となり、システムの健全性は保たれる。

case2

Na 型ペントナイト(乾燥密度 1.6 Mgm^{-3} 、配合率 100%、厚さ 1.4m)、廃棄体及び構造躯体等の体積減少量が 30%の場合、体積減少による膨潤後の緩衝材部の有効ペントナイト乾燥密度は、 1.25 Mgm^{-3} となり、システムの健全性は保たれる。

case3

Ca 型化ペントナイト(乾燥密度 1.6 Mgm^{-3} 、配合率 100%、厚さ 1.4m)、廃棄体及び構造躯体等の体積減少量が 10%の場合、体積減少による膨潤後の緩衝材部の有効ペントナイト乾燥密度は、 1.46 Mgm^{-3} となる。また、(3)の検討より、以上の条件であれば、ペントナイトは十分膨潤する能力を有しているので、システムの成立性は保たれる。

case4

Ca 型化ペントナイト(乾燥密度 1.8 Mgm^{-3} 、配合率 100%、厚さ 1.4m)、廃棄体及び構造躯体等の体積減少量が 30%の場合、体積減少による膨潤後の緩衝材部の有効ペントナイト乾燥密度は、 1.41 Mgm^{-3} となる。また、(3)の検討より、以上の条件であれば、ペントナイトは十分膨潤する能力を有しているので、システムの健全性は保たれる。