

緩衝材の基本特性データベース
(データ集・記録集)

2004 年 2 月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

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ください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

電話:029-282-1122(代表)
ファックス:029-282-7980
電子メール:jserv@jnc.go.jp

Inquiries 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)
2004

緩衝材の基本特性データベース
(データ集・記録集)

菊池広人^{**}，棚井憲治^{*}

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材には、止水性、自己シール性、応力緩衝性、核種収着性、熱伝導性、化学的緩衝性、オーバーパック支持性などが長期にわたり維持されることが期待されている。これらの要求性能を比較的満足し得る材料として、天然に産する粘土が注目され、中でも圧縮されたベントナイト（以下、圧縮ベントナイト）は、非常に低い透水性により水の動きの抑制、水の浸潤に伴い膨潤し、圧縮ベントナイト中の間隙や隣接する岩盤中の割れ目を充填する機能、陽イオン核種を吸着する陽イオン交換機能を有しており、緩衝材として最も有力な材料であると考えられる。

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）では、これまでに、地層処分場における人工バリア、地下施設の設計および性能評価を行うとともに、処分事業展開や国の安全規制に必要となる技術基準に資する基盤情報整備として、緩衝材の基本特性（水理・膨潤・力学・熱特性）に関してデータの拡充を行ってきた。

本報告においては、サイクル機構が2003年12月までに取得した緩衝材の基本特性データをデータ集として取りまとめたので報告する。

* 東海事業所 環境保全・研究開発センター処分研究部 処分バリア性能研究グループ
** 検査開発株式会社

Basic characteristics data base of buffer material
(Set of Data)

Hirohito KIKUCHI^{**}, Kenji TANAI^{*}

Abstract

For the buffer material of geological disposal of High-Level radioactive Waste (HLW) in Japan, it is expected to maintain its low water permeability, thermal conductivity, self-sealing, radionuclide sorption and retardation, chemical buffering, overpack support and stress buffering properties over a long period of time.

Natural clay is mentioned as a material that can relatively satisfy above functions. Among the kinds of natural clay, bentonite when compacted is superior because (i) it has exceptionally low water permeability and properties to control the movement of water in buffer, (ii) it fills void spaces in the buffer and fractures in the host rock as it swells upon water uptake, (iii) it has the ability to exchange cations and to adsorb cationic radioelements. Japan Nuclear Cycle Development Institute has extended the basic characteristics data of buffer material as one of the base information required for safe regulation of a country and HLW disposal project.

This report presents the basic characteristics data of the buffer material which JNC acquired by December, 2003 was collected as a collection of data.

* Barrier Performance Group, Waste Isolation research Division,
Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

** Inspection Development Corporation

目 次

1 はじめに	1
2 内容	1
2.1 飽和透水特性	3
2.2 膨潤特性	4
2.3 力学特性	6
2.4 熱特性	9
2.5 締固め特性	10
2.6 乾燥収縮特性	11
3 おわりに	12
4 引用文献	13

添付 データファイル CD

図 目 次

図 2-1 記載内容図	1
-------------	---

表 目 次

表 2-1 整備した緩衝材の基本特性データベース	2
--------------------------	---

1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材には、止水性、自己シール性、応力緩衝性、核種収着性、熱伝導性、化学的緩衝性、オーバーパック支持性などが長期にわたり維持されることが期待されている。これらの要求性能を比較的満足し得る材料として、天然に産する粘土が注目され、中でも圧縮されたベントナイト(以下、圧縮ベントナイト)は、非常に低い透水性により水の動きの抑制、水の浸潤に伴い膨潤し、圧縮ベントナイト中の間隙や隣接する岩盤中の割れ目を充填する機能、陽イオン核種を吸着する陽イオン交換機能を有しており、緩衝材として最も有力な材料であると考えられる。

核燃料サイクル開発機構(以下、サイクル機構)では、これまでに、地層処分場における人工バリア、地下施設の設計および性能評価、処分事業展開や国の安全規制に必要な技術基準に資する基盤情報整備として、緩衝材の基本特性(水理・膨潤・力学・熱特性)に関してデータの拡充を行った。

本報告においては、サイクル機構が2003年12月までに取得した緩衝材の基本特性データをデータ集として取りまとめたので報告する。

2 内容

データベースに関する一覧を表2-1に示す。また、各特性の詳細情報を2.1~2.6に示すとともに、図2-1に各特性の詳細情報について記載内容を示す

なお、整備を行った緩衝材の基本特性データベースを添付CDに示す。

<File name>	ファイル名
・各特性ファイル名	
├──	試験名：引用文献
└──	試験名：引用文献
<Experimental conditions>	試験条件等
・試験名	
ベントナイト	:
乾燥密度	:
ケイ砂混合率	:
試験温度	:
供試体寸法	:
試験水	:
試験方法	:
<Details>	各試験における注意事項、詳細等
・注意事項および詳細等	

図 2-1 記載内容図

表 2-1 整備した緩衝材の基本特性データベース

特性データ名 (File 名)	概 要	詳細
飽和透水特性 Hydraulic characteristics	透水試験 (降水系) (1992, 1997) 透水試験 (海水系) (2003)	2.1
膨潤特性 Swelling characteristics	飽和膨潤応力 (1999) 不飽和膨潤応力 (1999) 飽和膨潤ひずみ (1999) 不飽和膨潤ひずみ (1999)	2.2
力学特性 Mechanical characteristics	一軸圧縮試験 (1992, 1999) 圧裂試験 (1999) 一次元圧密試験 (1997, 1999) 非圧密非排水三軸試験 (1992) 圧密非排水三軸圧縮試験 (1999) 圧密非排水三軸クリープ試験 (1999) 動的三軸試験 (1999) 弾性波速度測定 (1999) 液状化試験 (1999)	2.3
熱特性 Heat characteristics	熱物性測定 (1992, 1999, 2003)	2.4
締固め特性 Compaction characteristics	動的締固め試験 (1999) 静的締固め試験 (1999)	2.5
乾燥収縮特性 Drying shrinkage characteristics	乾燥収縮試験結果 (1999)	2.6

2.1 飽和透水特性

<File name>

・ Hydraulic characteristics

- └ 透水試験（降水系）：鈴木ほか，1992；松本ほか，1997
- └ 透水試験（海水系）：菊池ほか，2003

< Experimental conditions >

・ 透水試験（降水系）

- ベントナイト : クニゲル V1
- 乾燥密度[g/cm³] : 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8
- ケイ砂仕様 : 3号, 5号
- ケイ砂混合率[-] : 0, 30, 50, 60, 70
- 試験温度[] : 25, 40, 60, 80, 90, 室温
- 供試体寸法[mm] : 50×H10, 50×H5
- 供給圧力[kgf/cm²] : 1.0 ~ 8.0
- 透過液 : 蒸留水
- 試験方法 : 定水位透水試験（JIS A 1218, JSF T 311）

・ 透水試験（海水系）

- ベントナイト : クニゲル V1
- 乾燥密度[g/cm³] : 1.2, 1.4, 1.6, 1.8
- ケイ砂混合率[-] : 0, 30
- 試験温度[] : 25, 60, 90
- 供試体寸法[mm] : 50×H10
- 供給圧力[kgf/cm²] : 1.0 ~ 5.0
- 透過液 : 人工海水（ASTM D-1141-98 基準）
- 試験方法 : 定水位透水試験（JIS A 1218, JSF T 311）

<Details>

- ・ 供給圧力においては，膨潤圧力以下で調整した。
- ・ ケイ砂の仕様においては，3号，5号ケイ砂を1対1で混合し，試験に供した。
- ・ 供試体作製においては，側方拘束条件で一軸方向から圧縮して作製した。
- ・ ベントナイトの含水比においては，任意に調整した材料を用いた。
- ・ 透水係数の温度依存性に関して，透過する水の物質温度（粘性係数・密度）による変化が考えられることから，岩石等の多孔質体の透水性を評価する際に用いられる固有透過度の概念を用いて整理を行っている。

2.2 膨潤特性

<File name>

・ Swelling characteristics

— 飽和膨潤応力	: 鈴木・藤田, 1999
— 不飽和膨潤応力	: 鈴木・藤田, 1999
— 飽和膨潤ひずみ	: 鈴木・藤田, 1999
— 不飽和膨潤ひずみ	: 鈴木・藤田, 1999

< Experimental conditions >

・ 飽和膨潤応力

ベントナイト	: クニゲル V1, 粒状ベントナイト OT-9607
乾燥密度[g/cm ³]	: 1.4, 1.6, 1.65 (OT-9707のみ), 1.7, 1.8
ケイ砂仕様	: 3号, 5号
ケイ砂混合率[-]	: 0, 30
初期含水比[%]	: 0, 5, 6, 7, 9.5, 10, 12, 14.5, 16, 21
試験温度[]	: 25, 40, 60, 70, 90, 室温(約 20),
供試体寸法[mm]	: 20×H20
供試体隙間率[%]	: 0, 5, 10, 20
間隙水圧[MPa]	: 0, 0.1, 0.5, 1.0
試験水	: 蒸留水, 人工海水 (ASTM D-1141-98 基準)
試験方法	: 圧密試験類似法 (JIS A 1217)

・ 不飽和膨潤応力

ベントナイト	: クニゲル V1
乾燥密度[g/cm ³]	: 1.6, 1.8
ケイ砂混合率[-]	: 0, 30
初期含水比[%]	: 6, 10
相対湿度[%]	: 75, 79.2, 81, 85, 86, 93.1, 98, 100
試験温度[]	: 室温(約 20)
供試体寸法[mm]	: 20×H20
試験方法	: 圧密試験類似法

・飽和膨潤ひずみ

ベントナイト : クニゲル V1
乾燥密度[g/cm³] : 1.8
ケイ砂混合率[-] : 0
初期含水比[%] : 10
設定載荷応力[MPa] : 0.5 , 1 , 2 , 4
試験温度[] : 室温 (約 20)
供試体寸法[mm] : 20×H20
供給圧力[kgf/cm²] : 0
透過液 : 蒸留水
試験方法 : 圧密試験類似法

・不飽和膨潤ひずみ

ベントナイト : クニゲル V1 , 粒状ベントナイト OT-9607
乾燥密度[g/cm³] : 1.6, 1.65, 1.8
初期含水比[%] : 10, 16
試験温度[] : 25 40 60 70 , 25 60 90
供試体寸法[mm] : 20×H20
供給圧力[MPa] : 0.05
透過液 : 蒸留水
試験方法 : 圧密試験類似法

<Details>

- ・ベントナイトの膨潤性を表す指標としては、ここでは、拘束境界面に作用する応力を膨潤応力と定義する。
- ・供試体の状態量と膨潤応力が定常となった時の値を平衡膨潤応力と定義する。
- ・供試体作製においては、側方拘束条件で一軸圧縮方向もしくは、上下二方向から圧縮して作製した。
- ・ケイ砂の仕様においては、3号、5号ケイ砂を1対1で混合し、試験に供した。
- ・ベントナイトの含水比においては、任意に調整した材料を用いた。
- ・飽和膨潤応力および膨潤ひずみ測定における試験水の供給においては、自然給水もしくは、加圧給水にて行っている。また、不飽和膨潤応力および膨潤ひずみ測定においては、蒸気圧法、サイクロメータ法にて相対湿度調整を行っている。

2.3 力学特性

<File name>

・ Mechanical characteristics

— 一軸圧縮試験	: 藤田ほか,1992 ; 高治・鈴木,1999 ; 鈴木・藤田,1999
— 圧裂試験	: 高治・鈴木 ; 1999
— 一次元圧密試験	: 並河ほか ; 1997 , 高治 , 鈴木 ; 1999
— 非圧密非排水三軸試験	: 藤田ほか ; 1992
— 圧密非排水三軸圧縮試験	: 並河ほか ; 1997 , 高治 , 鈴木 ; 1999
— 圧密非排水三軸クリープ試験	: 高治 , 鈴木 ; 1999
— 動的三軸試験	: 高治 , 谷口 ; 1999
— 弾性波速度測定	: 高治 , 谷口 ; 1999
— 液状化試験	: 高治 , 谷口 ; 1999

< Experimental conditions >

・ 一軸圧縮試験

ベントナイト	: クニゲル V1
乾燥密度[g/cm ³]	: 1.6 , 1.8
ケイ砂混合率[%]	: 0
初期含水比[%]	: 6.81 ~ 23.65
試験温度[]	: 室温 (約 20)
供試体寸法[mm]	: 30×H60
試験水	: 蒸留水
載荷速度[mm min ⁻¹]	: 0.1 [a 0.17%min ⁻¹]
試験方法	: 一軸圧縮試験 (JGS T 511)

・ 圧裂試験

ベントナイト	: クニゲル V1
乾燥密度[g/cm ³]	: 1.4 , 1.6 , 1.8 , 2.0
ケイ砂混合率[-]	: 0 , 20 , 30
初期含水比[%]	: 7
試験温度[]	: 室温 (約 20)
供試体寸法[mm]	: 49×H49 (30×H30)
ひずみ速度[mm min ⁻¹]	: 0.5 (0.3)
試験方法	: 圧裂試験 (JIS M 0303)

・一次元圧密試験

ベントナイト	: クニゲル V1
乾燥密度[g/cm ³]	: 1.6, 1.8
ケイ砂混合率[-]	: 0, 30
初期含水比[%]	: 5.7, 5.9, 8.48 (圧縮成型時)
試験温度[]	: 室温 (約 20)
供試体寸法[mm]	: 60×H20
試験水	: 蒸留水
試験方法	: 一次元圧密試験 (JGS T411)

・非圧密非排水三軸試験

ベントナイト	: クニゲル V1
乾燥密度[g/cm ³]	: 1.6, 1.8
ケイ砂混合率[-]	: 0, 30
初期含水比[%]	: 7.2 ~ 8.5 (圧縮成型時)
試験温度[]	: 室温 (約 25)
供試体寸法[mm]	: 50×H100
軸変位速度[mm min ⁻¹]	: 0.01[a 0.01%min ⁻¹]
有効拘束圧[MPa]	: 0.49, 0.98, 1.47, 1.96, 2.45, 2.94
試験水	: 蒸留水
試験方法	: 非圧密非排水三軸試験 (JGS T 523)

・圧密非排水三軸圧縮試験

ベントナイト	: 粒状ベントナイト OT-9607
乾燥密度[g/cm ³]	: 1.65
初期含水比[%]	: 15 (圧縮成型時)
試験温度[]	: 室温 (約 25)
供試体寸法[mm]	: 50×H100
軸変位速度[mm min ⁻¹]	: 0.01[a 0.01%min ⁻¹]
有効拘束圧[MPa]	: 0.9, 1.4, 1.9, 2.9
試験水	: 蒸留水
試験方法	: 圧密非排水三軸試験 (JGS T 523)

・圧密非排水三軸クリープ試験

ベントナイト : クニゲル V1
乾燥密度[g/cm³] : 1.6
ケイ砂混合率[-] : 30
初期含水比[%] : 7.3 (圧縮成型時)
試験温度[] : 室温 (約 25)
供試体寸法[mm] : 50×H100
試験水 : 蒸留水
試験方法 : 圧密非排水三軸クリープ試験

・動的三軸試験

ベントナイト : クニゲル V1
乾燥密度[g/cm³] : 1.6 , 1.8
ケイ砂混合率[-] : 0 , 30
飽和条件 : 飽和 , 不飽和
試験温度[] : 室温 (約 20)
供試体寸法[mm] : 50×H100
有効拘束圧[MPa] : 飽和 0.294 , 0.49 , 0.686 , 0.98 , 1.96 , 2.94 , 3.92
不飽和 0.098 , 0.196 , 4.41
試験水 : 蒸留水
試験方法 : 動的三軸試験 (JGS T 542)

・弾性波速度測定

ベントナイト : クニゲル V1
乾燥密度[g/cm³] : 1.6 , 1.8
ケイ砂混合率[-] : 0 , 30
初期含水比[%] : 7 ~ 飽和
試験温度[] : 室温 (約 20)
供試体寸法[mm] : 50×H100
試験水 : 蒸留水
試験方法 : 透過式超音波速度測定

・液状化試験

ベントナイト : クニゲル V1
乾燥密度[g/cm³] : 1.6
ケイ砂混合率[-] : 0
初期含水比[%] : 飽和
試験温度[] : 室温 (約 20)
供試体寸法[mm] : 50×H100
有効拘束圧[MPa] : 2.94 , 0.49
繰返し応力振幅比 : 0.241 , 0.145 , 0.100 , 0.150
試験水 : 蒸留水
試験方法 : 液状化試験 (JGS T 541)

<Details>

- ・ 供試体作製においては、側方拘束条件で上下二方向から圧縮して作製した。
- ・ ケイ砂の仕様においては、3号、5号ケイ砂を1対1で混合し、試験に供した。
- ・ ベントナイトの含水比においては、任意に調整した材料を用いた。
- ・ 三軸試験における側圧の载荷においては、膨潤圧力相当とした。
- ・ 試験方法、手順においては、地盤工学会基準に準拠している。

2.4 熱特性

<File name>

・ Heat characteristics

└─ 熱物性測定 : 藤田ほか, 1992 ; 鈴木・谷口, 1999 ; 谷口ほか, 1999 ,
菊池・棚井, 2003

< Experimental conditions >

・ 熱物性測定 (1)

ベントナイト : クニゲル V1
乾燥密度[g/cm³] : 1.0 , 1.2 , 1.4 , 1.6 , 1.8 , 2.0
ケイ砂仕様 : 3号 , 5号
ケイ砂混合率[-] : 0 , 30 , 50 , 80
含水比[%] : 0 ~ 飽和
試験温度[] : 20 ~ 100 , 室温 (約 20)
供試体寸法[mm] : 50×H10 , 110×H120 , W100×D50×H50
試験水 : 蒸留水
試験方法 : 非定常プローブ法 , 非定常線熱源法 , 非定常点熱源法 ,
非定常面熱源法

<Details>

- ・ケイ砂の仕様においては、3号、5号ケイ砂を1対1で混合し、試験に供した。
- ・供試体作製においては、側方拘束条件で一軸方向から圧縮して作製した。
- ・ベントナイトの含水比においては、任意に調整した材料を用いた。
- ・熱伝導率測定においては、非定常プローブ法、非定常線熱源法、非定常面熱源法を用いた。
- ・熱拡散率測定においては、非定常プローブ法、非定常点熱源法、非定常面熱源法を用いた。
- ・比熱の算出においては、熱伝導率と熱拡散率の関係から算出を行った。

2.5 締固め特性

<File name>

Compaction characteristics

- 動的締固め試験：千々松ほか，1999
- 静的締固め試験：千々松ほか，1999

< Experimental conditions >

・動的締固め試験

- ベントナイト : クニゲル V1, 粒状ベントナイト OT 9607
- ケイ砂仕様 : 3号, 5号, 7号
- ケイ砂混合率[-] : 0, 30, 50
- 供試体寸法[mm] : 50×H100
- 試験水 : 蒸留水
- 締固めエネルギー : 1.0Ec (5.5kJm⁻³), 15Ec
- 試験方法 : 標準締固め試験 (JGS T 711)

・静的締固め試験

- ベントナイト : クニゲル V1
- ケイ砂仕様 : 3号, 5号, 7号
- ケイ砂混合率[-] : 0, 15, 30, 50, 70
- 供試体寸法[mm] : 50×H100
- 試験水 : 蒸留水
- 締固め圧力[MPa]: 20, 50
- 試験方法 : 締固め試験類似法

<Details>

- ・ケイ砂の仕様においては、3号、5号ケイ砂を1対1で混合し、試験に供した。
- ・供試体作製においては、側方拘束条件で一軸方向から締め固めを行った。

2.6 乾燥収縮特性

<File name>

Drying shrinkage characteristics

└─ 乾燥収縮試験結果 : 鈴木・藤田, 1999

< Experimental conditions >

・乾燥収縮試験

ベントナイト : クニゲル V1, 粒状ベントナイト OT 9607

乾燥密度[g/cm³] : 1.6, 1.65, 1.8

ケイ砂混合率[-] : 0, 30

含水比[%] : 2 ~ 25

供試体寸法[mm] : 30×H60

乾燥状態 : 炉乾燥 110[]

試験方法 : 土の収縮定数試験 (JSF T 145-1990)

<Details>

- ・ 供試体作製においては, 側方拘束条件で上下二方向から圧縮して作製した。
- ・ ケイ砂の仕様においては, 3号, 5号ケイ砂を1対1で混合し, 試験に供した。
- ・ ベントナイトの含水比においては, 任意に調整した材料を用いた。

3 おわりに

サイクル機構では実施主体が進める概要調査地区の選定や国の安全審査基本指針類の策定のための基盤情報の一つとして、緩衝材の基本特性データベースの構築を進めているところである。

本報告書は、その第一段階として、第2次取りまとめも含めサイクル機構が2003年12月までに取得したデータをもとに、各種特性を分類整理しデータ集として添付のCDに取りまとめたものである。

今後は、実際の地質環境条件を考慮した基本特性データの拡充を進めつつデータ集の更新を行い、データベースシステムの構築を実施していく予定である。

4 引用文献

- 松本一浩,菅野毅,藤田朝雄,鈴木英明:“緩衝材の飽和透水特性”,動燃技術資料,PNC TN8410 97-296(1997)
- 菊池広人,棚井憲治,松本一浩,佐藤治夫,上野健一,鐵剛志:“緩衝材の飽和透水特性 -II - 海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響 -”,サイクル機構技術資料,JNC TN8430 2003-002(2003)
- 鈴木英明,柴田雅博,山形順二,広瀬郁郎,寺門一馬:“緩衝材の特性試験(I)”,動燃技術資料,PNC TN8410 92-057(1992)
- 鈴木英明,藤田朝雄:“緩衝材の膨潤特性”,サイクル機構技術資料,JNC TN8400 99-038(1999)
- 高治一彦,鈴木英明:“緩衝材の静的力学特性”,サイクル機構技術資料,JNC TN8400 99-041(1999)
- 並河努,菅野毅,石川博久,石黒勝彦:“緩衝材の圧密特性”,動燃技術資料,PNC TN8410 97-051(1997)
- 藤田朝雄,五月女敦,原啓二:“緩衝材の力学試験”,動燃技術資料,PNC TN8410 92-170(1992)
- 高治一彦,谷口航:“緩衝材の動的力学特性”,サイクル機構技術資料,JNC TN8400 99-042(1999)
- 藤田朝雄,杉田裕,納多勝,幾世橋広:“緩衝材の熱物性試験”,動燃技術資料,PNC TN1410 92-052(1992)
- 鈴木英明,谷口航:“緩衝材の熱物性試験(II)”,サイクル機構技術資料,JNC TN8430 99-006(1999)
- 谷口航,鈴木英明,杉野宏幸,松本一浩,千々松正和,柴田雅博:“熱的特性の緩衝材仕様に対する影響”,サイクル機構技術資料,JNC TN8400 99-052(1999)
- 菊池広人,棚井憲治:“緩衝材の熱物性試験(III) - 面熱源法による緩衝材熱物性の取得 -”,サイクル機構技術資料,JNC TN8430 2003-009(2003)
- 千々松正和,杉田裕,雨宮清:“緩衝材の製作・施工技術に関する検討”,サイクル機構技術資料,JNC TN8400 99-035(1999)
- 鈴木英明,藤田朝雄:“緩衝材の乾燥収縮特性”,サイクル機構技術資料,JNC TN8400 99-016(1999)
- 並河努,菅野毅,石川博久,石黒勝彦:“緩衝材のせん断特性1”,動燃技術資料,PNC TN8410 97-074(1997)