

## ベントナイト系緩衝材の乾燥に伴う含水比低下・体積収縮の傾向

増田良一\*1 雨宮清\*2 トラン デュク フィ オアン\*3 小峯秀雄\*4

高レベル放射性廃棄物地層処分では、廃棄物の周辺に緩衝材と呼ばれるベントナイト系材料による人工的な障壁（人工バリア）が構築される。緩衝材は廃棄物の発熱により高温に曝されるため、熱変質による性能低下が懸念されており、所定の温度を超えないように施設設計／評価が行われる。適切な設計／評価を行うためには、高温下での緩衝材の挙動の把握が必要である。本研究では、ベントナイト系材料を圧縮したブロックを対象に、緩衝材の仕様（ベントナイトとケイ砂の混合割合、乾燥密度、含水比）と乾燥させる温度をパラメータとした乾燥収縮試験を実施し、これらと乾燥に伴う含水比変化、乾燥収縮の関係、および熱影響評価における留意点を整理した。

**Keywords :** 高レベル放射性廃棄物, 地層処分, 人工バリア, ベントナイト, 緩衝材, 乾燥収縮, 含水比

In high-level radioactive wastes geological disposal, an engineered barrier by bentonite which is called buffer around a waste package is built. When the buffer suffers high temperature by generation of heat from wastes for long term, the heat may deteriorate barrier performance of the buffer material. In order to evaluate suitable heat influence for design of the repository, behavior of buffer under high temperature needs to be clarified. In this research, dry shrinkage examinations of bentonite-based buffer were carried out, and the tendency of the relations between specification of buffer, temperature and water ratio depression, dry shrinkage were clarified.

**Keywords:** high-level radioactive waste, geological disposal, engineered barrier system, bentonite, buffer, drying shrinkage, water content

### 1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、大深度地下に埋設される廃棄物周辺に、ベントナイト系材料を高密度に圧縮した緩衝材と呼ばれる人工的な障壁(人工バリア)が構築される。緩衝材はベントナイトの持つ止水機能、核種収着機能等により、廃棄物から溶出した放射性核種の生物圏への移行を遅延し、地層処分の長期的な安全性を高める重要な役割を担う[1]。高レベル放射性廃棄物は高い発熱率を有することから[2]、その周辺に設置される緩衝材は高温に曝される。そのためベントナイトの熱変質による緩衝材のバリア機能の低下が懸念されており[2]、緩衝材が所定の温度を超えないように適切な離間距離を与えて廃棄物は配置される。

離間距離の検討、熱影響評価においては、高温に曝された緩衝材の体積収縮や含水比低下による熱伝導性低下等、岩盤側への放熱を阻害する緩衝材の挙動・現象を考慮する必要がある。高温下での緩衝材の挙動については、核燃料サイクル開発機構(現日本原子力研究開発機構)により炉乾燥させた供試体のひび割れの発生状況、体積収縮に関するデータが取得されているが[1]、緩衝材仕様と乾燥収縮の関係や乾燥させる温度の影響については明らかにされ

ておらず、データの拡充が望まれる。

本研究では、乾燥させる温度および緩衝材の主要な仕様項目をパラメータとした乾燥収縮試験を実施し、ベントナイト系材料の乾燥に伴う含水比変化および体積変化の傾向を明らかにするとともに、熱影響評価を実施する上での留意点についても検討を行った。

### 2 試験方法

#### (1) 試験方法

緩衝材の材料であるベントナイトおよびベントナイトにケイ砂を混合した材料を静的に圧縮して製作した供試体を対象に、乾燥炉内もしくは空調管理を行った試験室内で28日間にわたり乾燥させ、その間の供試体の含水比変化および体積変化を測定した。

#### (2) 試験条件

試験条件をTable 1に整理した。試験条件の詳細を以下に詳述する。なお、緩衝材の乾燥収縮量を求める基準は整備されていないことから、本試験ではコンクリートの乾燥収縮試験方法(JIS A1129)を参考に試験条件の設定を行った。

##### a. 乾燥条件

供試体を乾燥させる温度（以降、乾燥温度 $T$ と称す）と供試体の含水比変化および体積変化の関係を把握するため、20°C、60°C、110°Cの3条件の乾燥温度を設定した。乾燥温度20°Cの場合は温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ に制御・管理した試験室内に設置することで乾燥を行い、乾燥温度60°C、110°Cの場合は乾燥炉内で乾燥を行った。

##### b. 供試体の仕様

供試体はFig. 1に示すように、材料を圧縮試験機により静的に一方方向に圧縮成形した $10 \times 10 \times 20$  cmの直方体ブロックを、電動カッターにより $5 \times 5 \times 20$  cmの寸法に4分割したものを用いた。

供試体の仕様をTable 2に示す。ベントナイトは、地層処

Study on trend of volumetric shrinkage and water content depression of bentonite-based buffer under dry condition by Ryouichi Masuda (masuda.ryouichi@tepcoco.jp), Kiyoshi Amemiya, Tran Duc Phi Oanh, Hideo Komine

- \*1 東京電力(株) 原子力設備管理部  
Tokyo Electric Power Compan, Nuclear Asset Management Department  
〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3
- \*2 (株)間組 技術・環境本部原子力部  
Hazama Corporation, Technology&Environment Division,  
Nuclear Power Department  
〒105-8479 東京都港区虎ノ門 2-2-5
- \*3 (株)間組 国際事業統括支店  
Hazama Corporation, International Division  
〒105-8479 東京都港区虎ノ門 2-2-5
- \*4 茨城大学 工学部都市システム工学科  
Ibaraki University, Department of Urban & Civil Engineering  
〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1

(Received 22 September 2008; accepted 10 February 2009)

Table 1 Conditions of Drying Shrinkage Test

項目	条件・範囲
乾燥温度 および 試験環境	① 20℃ 空調管理を行った試験室内 (温度20±1℃, 相対湿度60±5%) ② 60℃ ③ 110℃ } 乾燥炉
試験期間	・28日間
測定項目	・長辺方向の寸法 ・供試体の質量
測定頻度	・開始～7日目:1回/日 (一部ケースは1日目のみ1回/数時間) ・7日目～28日目:1回/週
供試体数	・57 供試体

Table 2 Specification of Test Pieces

項目	仕様・範囲
ベントナイト	クニゲルV1 (モンシロ付含有率51%)
ケイ砂	3, 4, 5, 6, 7 号ケイ砂混合 (乾燥質量比で均等に配合)
ケイ砂混合率	Rs = 0, 20, 30, 50 %
乾燥密度	$\rho_d = 1.6, 1.7, 1.8 \text{ Mg/m}^3$
初期含水比	w <sub>0</sub> = 10~18 %

Table 3 Test Cases

ケース	ケイ砂混合率 Rs (%)	乾燥密度 $\rho_d$ (Mg/m <sup>3</sup> )	初期含水比 (目標) w <sub>0</sub> (%)
K0-1	0	1.7	18
K2-1※2	20	1.7	10
K2-2			13
K2-3※1		1.8	18
K2-4※1			14
K3-1	30	1.6	18
K3-2		1.7	10
K3-3			13
K3-4※1			16
K3-5※1		1.8	13
K5-1	50	1.7	14

※1: 供試体数は1ケース1供試体を原則。ただし、※1の4ケースについてはばらつきの確認のために2供試体で試験。

※2: 試験中に供試体が損傷したため、試験結果から除外。

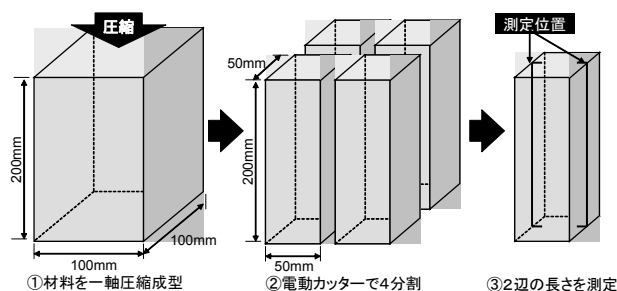


Fig. 1 Test Pieces

分野において代表的なNa型ベントナイトであるクニゲルV1を使用した。混合する骨材は3~7号ケイ砂を乾燥質量比で均等に混合したものである。材料に関する試験パラメータは、ケイ砂の混合率Rs (全乾燥質量中のケイ砂の乾燥質量の割合)、乾燥密度、含水比とし、11ケースの仕様

を設定した。ケイ砂混合率Rsは0, 20, 30, 50%の4種類を設定し、乾燥密度は1.6~1.8 Mg/m<sup>3</sup>、初期含水比は10~18%の範囲で設定した。試験ケースの一覧をTable 3に示す。1ケースに1供試体を供したが、一部ケースについては個体差による試験結果のばらつきを確認するため2供試体で試験を行い、平均値を測定結果とした。

c. 測定項目および方法

本試験における測定項目は、含水比変化および体積収縮である。含水比変化は緩衝材の熱伝導率と密接に関係する[3]。また、体積収縮により発生する隙間は熱伝達を阻害する。いずれも緩衝材の温度上昇に影響を及ぼす重要な現象である。

含水比は、設定した時間ごとに供試体の質量測定を行い、質量減少量を大気に放出された水分の質量(以降、水分放出量  $\Delta m_w$  と称す)とみなして供試体中の水分量を計算し、乾燥質量で除すことで計算を行った。

体積収縮は、供試体の長辺の一次元の線収縮率を乾燥収縮率Lsとして測定を行った。乾燥収縮率Lsの定義は(1)式のとおりである。

$$Ls_t = \frac{L_0 - L_t}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

ここに、

Ls<sub>t</sub> : t日後の初期状態からの乾燥収縮率 (%)

L<sub>0</sub> : 初期状態での供試体長辺の寸法 (cm)

L<sub>t</sub> : t 日経過時の供試体長辺の寸法 (cm)

寸法測定は、乾燥炉の場合も炉から取り出し試験室(温度20±1℃, 相対湿度60±5%に制御)で行った。測定位置はFig.1に示した2箇所であり、それぞれノギスにより5回測定した平均値とした。

含水比および乾燥収縮率の測定頻度は、試験開始から7日目までは1回/日とし、それ以降は1回/週とした。なお、2供試体で試験を行ったケースについては、1日目のみ1回/数時間の頻度でデータを取得した。

3 試験結果

(1) 経時的な水分放出量および乾燥収縮率の推移

試験開始から28日経過時までの各供試体の水分放出量  $\Delta m_w$  の推移および経時的な乾燥収縮率Lsの推移をFig. 2~7に示す。水分放出および体積収縮に変化が生じた期間を見ると、乾燥温度20℃の場合は14日、60℃の場合は8日、110℃の場合は2日程度である。それぞれに変化が生じた期間は重複しており、供試体の乾燥収縮が水分放出に伴い生じているものであることがわかる。

(2) 28日経過時の水分放出量および乾燥収縮率

試験ケースごとの28日経過時の供試体からの水分放出

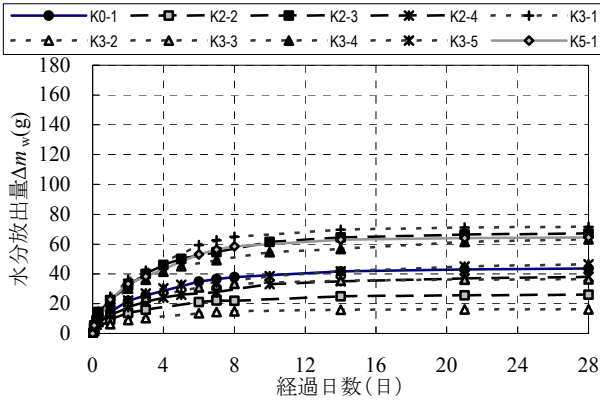


Fig. 2 Amount of Water Release ( $T=20^\circ\text{C}$ )

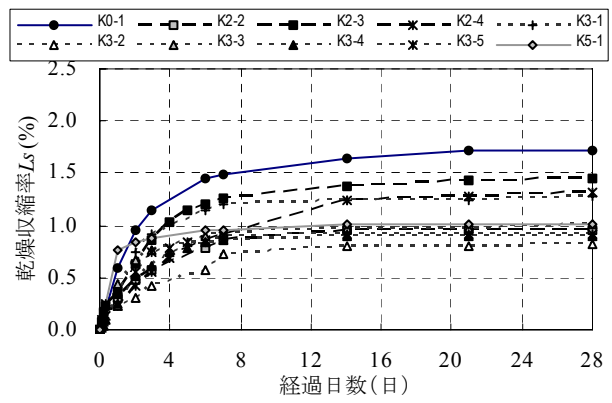


Fig. 3 Drying Shrinkage Ratio ( $T=20^\circ\text{C}$ )

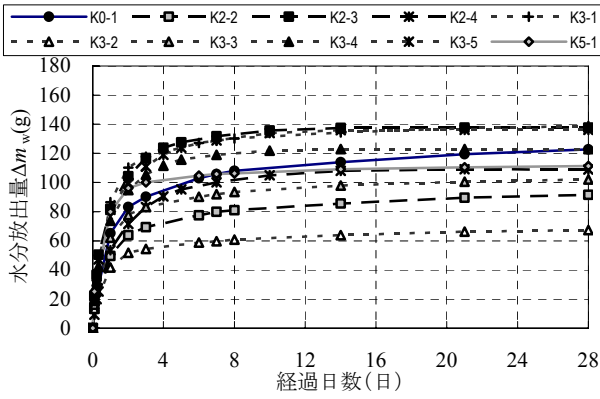


Fig. 4 Amount of Water Release ( $T=60^\circ\text{C}$ )

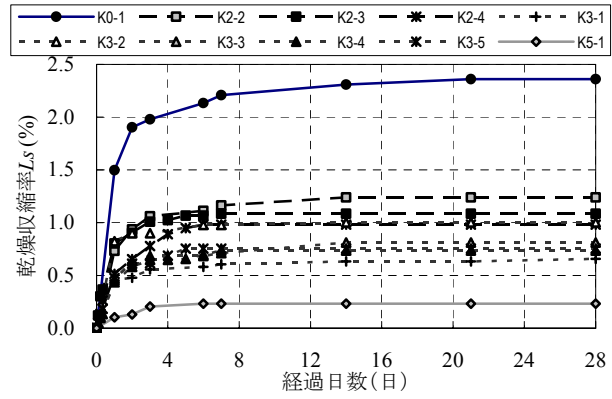


Fig. 5 Drying Shrinkage Ratio ( $T=60^\circ\text{C}$ )

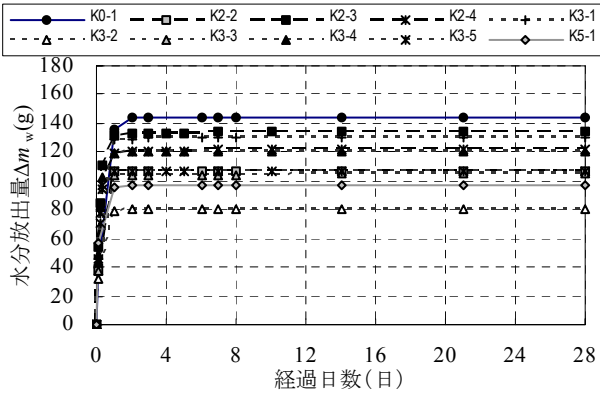


Fig. 6 Amount of Water Release ( $T=110^\circ\text{C}$ )

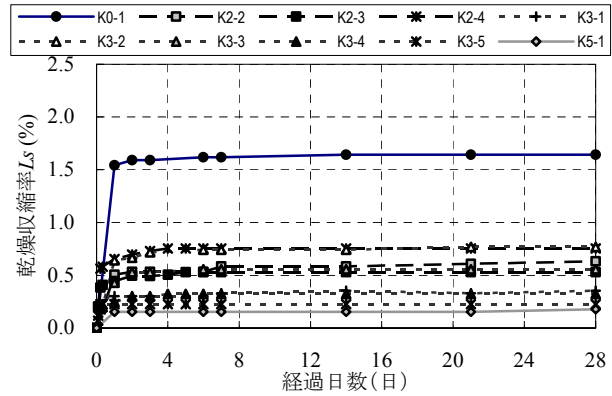


Fig. 7 Drying Shrinkage Ratio ( $T=110^\circ\text{C}$ )

Table 4 Amount of Water Release and Drying Shrinkage Ratio (28days)

Case	水分放出量 $\Delta m_{w28}$ (g) および 28 日経過後の含水比 $w_{28}$ (%)						乾燥収縮率 $L_{S28}$ (%)		
	$T=20^\circ\text{C}$		$T=60^\circ\text{C}$		$T=110^\circ\text{C}$		$T=20^\circ\text{C}$	$T=60^\circ\text{C}$	$T=110^\circ\text{C}$
	$\Delta m_{w28}$ (g)	$w_{28}$ (%)	$\Delta m_{w28}$ (g)	$w_{28}$ (%)	$\Delta m_{w28}$ (g)	$w_{28}$ (%)			
K0-1	43.7	14.2	122.7	7.1	144.3	5.9	1.72	2.36	1.64
K2-2	25.9	10.9	91.6	5.0	106.9	4.1	0.96	1.24	0.63
K2-3	67.0	10.5	137.6	1.3	134.1	0.9	1.46	1.08	0.53
K2-4	38.0	9.7	109.0	1.5	121.4	0.3	1.32	0.98	0.75
K3-1	71.6	11.7	138.7	6.3	130.3	6.1	1.27	0.66	0.35
K3-2	16.2	8.6	67.3	3.8	80.5	3.3	0.82	1.00	0.77
K3-3	36.3	9.8	102.1	4.6	104.7	4.2	1.02	0.81	0.56
K3-4	63.1	8.7	123.0	1.1	120.4	1.3	0.90	0.74	0.32
K3-5	46.4	8.0	136.2	0.0	106.8	0.3	0.92	0.75	0.23
K5-1	64.5	8.8	111.3	5.0	97.0	5.4	1.00	0.23	0.18

量 $\Delta m_{w28}$ 、含水比 $w_{28}$ および乾燥収縮率 $LS_{28}$ を整理しTable 4に示す。なお、各記号末尾の数字は経過日数を示す。28日経過時の供試体の含水比は0.0~14.2%、乾燥収縮率は0.18~2.36%となった。

#### 4 含水比変化、体積収縮の傾向整理

##### (1) 含水比変化の傾向

以下に、乾燥温度、緩衝材仕様と28日経過時の含水比 $w_{28}$ の関係を示す。

##### a. 初期含水比と含水比変化の関係

初期含水比 $w_0$ と28日経過時の含水比 $w_{28}$ の関係をFig. 8に示す。図中の直線は乾燥温度ごとの近似線である。低温で乾燥させた場合の方が28日経過時の含水比は高い傾向にあり、とくに20℃乾燥の条件では60℃以上の場合に比べ含水比が高く、水分放出量は少ない。一方、乾燥温度60℃、110℃の条件では、最終的に到達した含水比の差はわずかである。また、全体的に初期含水比の高い供試体の方が、28日経過時の含水比も高い傾向にある。

##### b. 乾燥密度と含水比変化の関係

供試体の乾燥密度 $\rho_d$ と28日経過時の含水比 $w_{28}$ の関係をFig. 9に示す。図を見ると、高い乾燥密度の供試体の方が、例外なく28日経過時の含水比が低くなる傾向にあることがわかる。

##### c. ケイ砂混合率と含水比変化の関係

供試体のケイ砂混合率 $R_s$ と28日経過時の含水比 $w_{28}$ の関係をFig. 10に示す。全体的な傾向としては、ケイ砂混合率の増加に伴い28日経過時の含水比は低くなっている。とくに、ケイ砂混合率の低い領域で変化の感度が高い。

##### (2) 体積収縮の傾向整理

##### a. 水分放出量と乾燥収縮率の関係

水分放出量 $\Delta m_{w28}$ と28日経過時の乾燥収縮率 $LS_{28}$ の関係をFig. 11に示す。グラフから両者に明確な相関性は確認できず、水分放出量は乾燥収縮率に対して支配的な因子ではないことがわかる。

##### b. 乾燥温度と乾燥収縮率の関係

乾燥温度 $T$ と28日経過時の乾燥収縮率 $LS_{28}$ の関係をFig. 12に示す。乾燥温度と乾燥収縮率の関係は、60℃と110℃の比較では例外なく高温で乾燥させた場合の方が乾燥収縮率は小さく、乾燥温度20℃と60℃の比較ではケースによって傾向が異なる。全体的には乾燥温度の上昇に伴い乾燥収縮率は低下する傾向が見られる。

##### c. 初期含水比と乾燥収縮率の関係

供試体の初期含水比 $w_0$ と28日経過時の乾燥収縮率 $LS_{28}$ の関係をFig. 13に示す。両者の関係について特定の傾向を読み取ることはできない。乾燥温度別に変化の傾向を見ると、60℃乾燥、110℃乾燥の場合は初期含水比の増加に伴い乾燥収縮率が小さくなる傾向が優勢であるのに対し、

20℃乾燥の場合は乾燥収縮率が大きくなる傾向が見られ、乾燥温度によって傾向が逆転している。

##### d. 乾燥密度と乾燥収縮率の関係

供試体の乾燥密度 $\rho_d$ と28日経過時の乾燥収縮率 $LS_{28}$ の関係をFig. 14に示す。試験で設定した乾燥密度の範囲においては、乾燥収縮率との特徴的な関係の傾向は見出せない。

##### e. ケイ砂混合率と乾燥収縮率の関係

ケイ砂混合率 $R_s$ と28日経過時の乾燥収縮率 $LS_{28}$ の関係をFig. 15に示す。乾燥温度の低いケースで一部例外が見られるものの、ケイ砂混合率の高い方が乾燥収縮率は小さくなる傾向が優勢であることがわかる。とくに60℃以上の温度で炉乾燥を行った供試体については、ベントナイト単体のケース( $R_s=0\%$ )の乾燥収縮率が突出している。乾燥収縮抑制に対して、ケイ砂混合率の増加は有効であると考えられる。

### 5 乾燥時挙動評価における留意事項

Table 5に、試験結果に基づき整理した含水比変化、体積変化の傾向を示した。

表に整理した傾向の中でとくに注目すべきと考えられるのは、低温で乾燥させた場合の方が乾燥収縮率は増加す

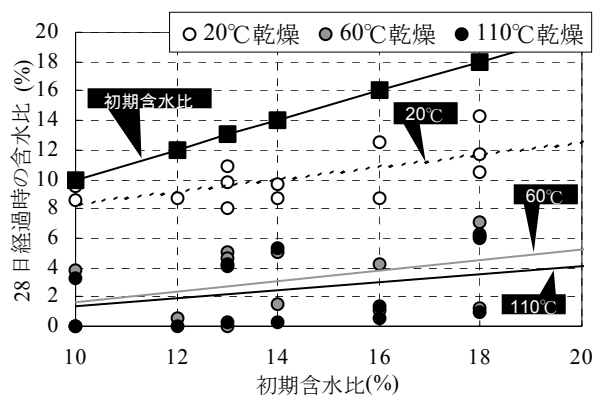


Fig. 8 Water Content at Beginning and 28 days after

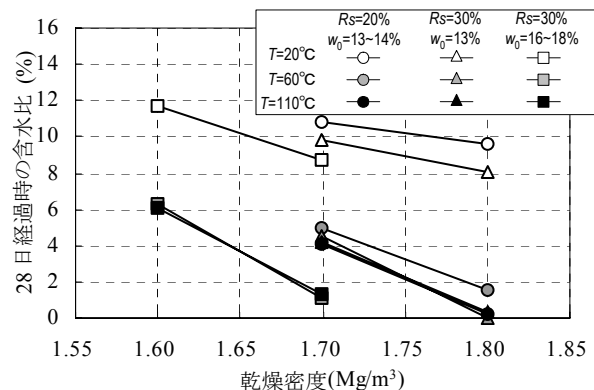


Fig. 9 Water Content at 28 days and Dry Density

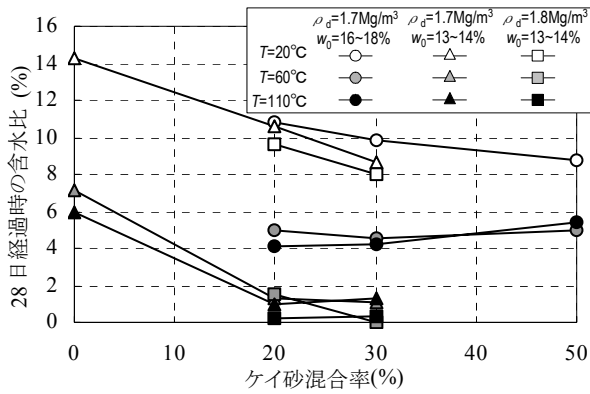


Fig. 10 Water Content at 28 days and Sand ratio

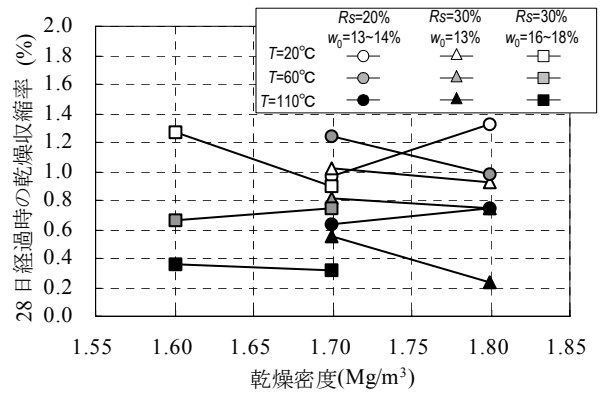


Fig. 14 Shrinkage Ratio and Dry Density

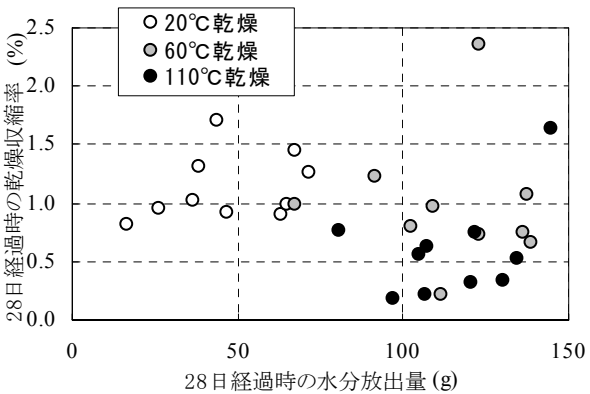


Fig. 11 Shrinkage Ratio and amount of Water release at 28 days

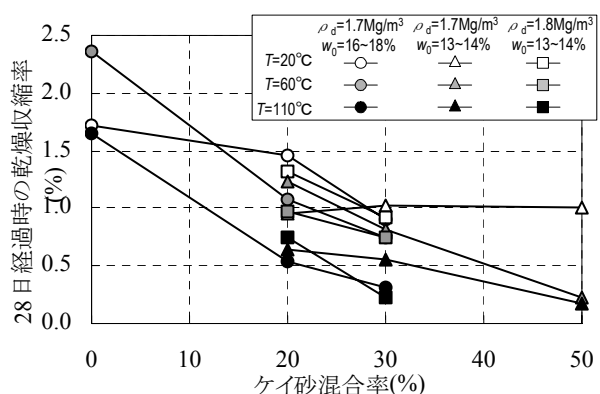


Fig. 15 Shrinkage Ratio and Sand ratio

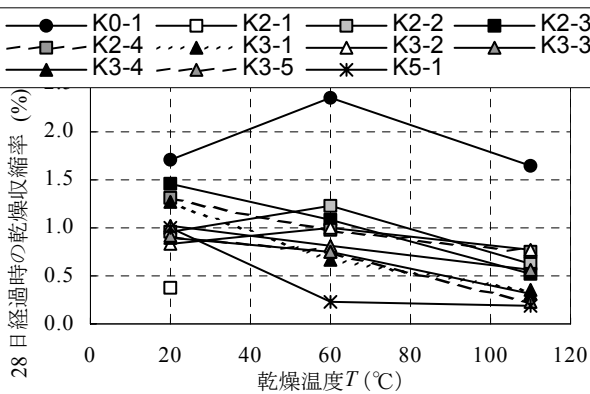


Fig. 12 Shrinkage Ratio and Drying Temperature

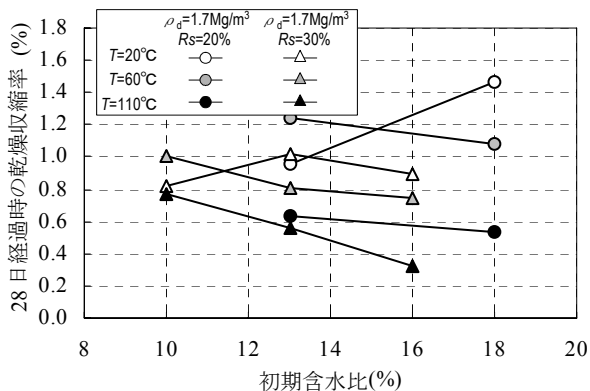


Fig. 13 Shrinkage Ratio and Initial Water Content

Table 5 Characteristics of Water Content and Drying Shrinkage

	乾燥後の含水比		乾燥収縮率	
	低温側	高温側	低温側	高温側
乾燥温度 (温度上昇時の変化)	↘	↘	↘	↘
乾燥密度 (密度増加時の傾向)	↓	↓	—	—
ケイ砂混合率 (混合率増加時の傾向)	↓	—	↘	↓
初期含水比 (含水比増加時の傾向)	↗	↗	↗	↓

低温側：20°C, 20°C~60°C 高温側：60°C, 110°C, 60°C~110°C  
 ↑/↓：増加/減少      ↗/↘：増加/減少傾向が優勢  
 —：特定の傾向無し

る傾向にある点である。水分放出量が少ない低温乾燥の方が乾燥収縮率は小さくなるものと予想されたが、試験では逆の傾向となった。この傾向の原因としては、高温乾燥の場合は急激な乾燥に伴う粘土粒子による骨格構造の形成による供試体の体積収縮の阻害が考えられる。

上記傾向を踏まえると、乾燥の進行速度によって乾燥収縮率は大きく変わってくるということであり、評価対象とする現象に対して適切な条件で取得した乾燥収縮に関する

るデータに基づく検討が必要であると言える。例えば、緩衝材は100℃を上限温度として設計が行われることから、炉乾燥(110℃乾燥)による乾燥収縮に関するデータを適用した場合には、危険側の評価となる可能性が高い。また、緩衝材定置作業時あるいは定置後の埋め戻しまでの期間においては、その間に曝される温度・湿度によっては大きな体積収縮が発生する可能性があり注意が必要である。緩衝材に体積収縮が生じた場合には、緩衝材と岩盤間に隙間が形成され、放熱性の低下による緩衝材の温度上昇、熱変質も懸念される。

## 6 結論

本研究で得られた主な成果を下記に示す。

- 1) ベントナイト・ケイ砂混合材料を圧縮した供試体を対象に乾燥収縮試験を実施した。試験室および乾燥炉で28日間乾燥させた供試体の含水比は0.0～14.2%，乾燥収縮率(線収縮率)は0.18～2.36%となった。
- 2) 乾燥に伴う体積収縮は、乾燥温度に影響されることが明らかになった。乾燥温度が低い方が、乾燥に伴う水分放出量は減少するにも係わらず、体積収縮率は増加する傾向にある。
- 3) 緩衝材の仕様と乾燥収縮の関係については、乾燥温度によって両者の関係の傾向が逆転する場合がある。ケイ砂混合率は乾燥温度によらず増加させることで乾燥収縮減少の傾向にあり、乾燥収縮の抑制に有効である。
- 4) 緩衝材の乾燥収縮の評価における留意すべき点として、乾燥収縮に関する試験データは評価する現象に則した温度条件で取得する必要がある。炉乾燥により取得した乾燥収縮に関するデータを適用した評価は、危険側になる可能性がある。

## 参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 分冊2, 4.1.2 緩衝材, pp.IV-69～IV-198 (1999).
- [2] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 分冊2, 第三章 設計の基本的考え方および前提となる条件, pp.-III-1～III-21 (1999).
- [3] 増田良一, 小野文彦, 雨宮清, 千々松正和：ベントナイト系緩衝材の仕様と熱伝導率の関係. 日本原子力学会 2004 年春の年会 (2004).