

締め固めた状態で加熱したベントナイトの室温における透水・膨潤特性試験

電力中央研究所 正会員 ○渡邊保貴, 正会員 吉川絵麻, 非会員 横山信吾, 非会員 新橋美里
原子力発電環境整備機構 正会員 山本陽一, 正会員 後藤考裕, 非会員 根本脩平

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物処分では、廃棄体の周囲に緩衝材として締め固めたベントナイトを設置することが検討されている。緩衝材は、廃棄体からの発熱により高温に曝されることが予想されており、その最高温度や温度変化は、ガラス固化体の発熱量や処分坑道中心間距離および廃棄体定置間隔、周辺岩盤の地温などによって変わる¹⁾。スイスのグリムゼルでは、処分施設設計の最適化に向けて、最高 200℃のヒーターとベントナイト系材料を用いた原位置試験が行われている²⁾。緩衝材には低透水性や自己シール性などが期待されているため、高温に曝されたベントナイト系材料の透水特性や膨潤特性を理解することは重要である。過去には、粉末状で加熱したベントナイトを用いた室内試験は数多く行われている^{例えば 3), 4)}。一方で、締め固めたベントナイトの状態での加熱後の諸特性はほとんど調べられておらず、特に、試料の湿潤状態を維持した加熱に関しては先行研究がほとんどない。そこで、本研究では、締め固めベントナイトに対して高飽和度を維持した加熱、および、脱水を伴う加熱を行い、加熱後の供試体の透水特性および膨潤特性を室温下の室内試験により調べた。

2. 試験方法

2.1 試料および供試体作製

本研究では、Na 型ベントナイトとしてクニゲル V1 (クニミネ工業製) を使用した。目標乾燥密度 1.5 Mg/m³ において飽和度 90% になるように、イオン交換水を用いて含水比を調整した。含水比調整後の試料を用いて、静的締め固めにより、厚さ 10 mm または 20 mm、直径 60 mm の供試体を作製した。

2.2 締め固めベントナイトの加熱養生

処分施設において、緩衝材は廃棄体発熱と地下水浸潤の作用を共に受ける。そのため、緩衝材の飽和度と温度は、位置と時期により様々な状態を取りうる。例えば、岩盤側の緩衝材は飽和度と温度の上昇が共に生じ、廃棄体側では脱水を伴う昇温となることが予想される。そこで本研究では、昇温時に緩衝材で (1) 高飽和度が維持される場合と (2) 脱水が生じる場合を考え、以下に示す手順により、イオン交換水または人工海水で飽和度を高めた締め固めベントナイトに約 200℃で最長 90 日の温度履歴を与えた。

(1) 高飽和度を維持した加熱養生

供試体を透水セル (図 1) に収容した状態でイオン交換水または人工海水 (マリンアート SF-1) を給水し、文献⁵⁾の方法により推定される飽和度が 99% 以上であることを確認した。

イオン交換水条件で加熱する場合には、透水セル (図 1) のコック部分を止水プラグに、止水リングをゴム製から銅製のものに交換した。そして、供試体上部のポーラスメタルおよび配管内を排水した後に密閉し、200℃設定の恒温器内に設置した。透水セル内を一部空気に置換した理由は、昇温時に水の膨張圧が透水セルに直接作用することを避けるためである。

人工海水条件で加熱する場合には、ステンレスの腐食と溶存鉄が試料の変質に関与することを避けるため、チタン製の供試体リング類を用いた。予め供試体の飽和度を高めた後、この供試体を浸漬セルに収容した (図 2)。ベントナイトのイオン交換反応に関しては液固比が大きいほど原位置の状態に近づくと考え、浸漬容器内で浸漬セルを人工海水 500 g に浸漬した。浸漬容器上蓋の配管接手部と恒温器外に設置した圧力計および逃し弁をステンレス管で接続し、浸漬容器内の圧力を監視しながら、200℃に設定した恒温器内で加熱養生を行った。

(2) 脱水を伴う加熱養生

飽和度 90% の供試体を透水セル (図 1) に収容し、コックを開けた状態で、200℃設定した恒温器内で加熱養生を行った。

2.3 透水膨潤圧試験および膨潤変形試験

加熱後の透水セルおよび浸漬容器は、(1)と(2)に記したコック

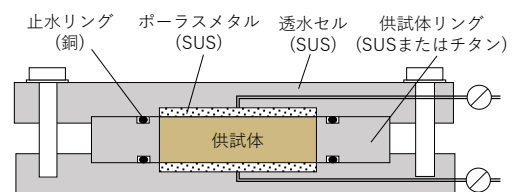


図1 透水セル

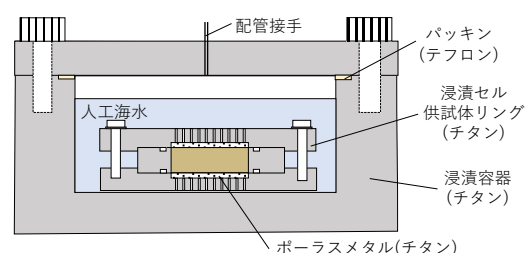


図2 浸漬容器および浸漬セル

キーワード 放射性廃棄物処分, ベントナイト, 温度 連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 一般財団法人 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 地質・地下環境研究部門 TEL 070-6568-9619

の開閉状態を維持したまま、約 16～24 時間をかけて室温まで放冷した。この供試体を用いて、透水膨潤圧試験⁵⁾および膨潤変形試験⁵⁾を行った。透水膨潤圧試験では、荷重計を内蔵した透水セルと厚さ 20 mm の供試体を使用し、イオン交換水または人工海水を給水することで鉛直圧を測定した。前報⁶⁾より、透水セル組立ての際にボルト締めトルクを統一することで、平衡鉛直圧と平衡膨潤圧は同等とみなした。平衡膨潤圧を上回らない圧力範囲で透水圧を作用させて透水係数を測定した。膨潤変形試験では、高い膨潤率が想定される場合には、変位量の測定可能範囲を考慮し、厚さ 10 mm の供試体を約 7 mm に端面切削してから試験に供した。上載圧は 19.8 kPa とした。

3. 結果と考察

平衡膨潤圧と加熱期間の関係を図 3 に示す。加熱期間の増加に伴い平衡膨潤圧は低下する傾向が認められた。各ケースにおいて、加熱 7～30 日の時点で平衡膨潤圧は概ね一定の値に収束した。次に、最大膨潤率と加熱期間の関係を図 4 に示す。加熱期間と共に最大膨潤率は低下し、各ケースにおいて、加熱 7～30 日で概ね一定の値に収束した。イオン交換水条件の 90 日間の加熱では、脱水を伴う加熱より高飽和度を維持する加熱の方が、平衡膨潤圧と最大膨潤率は共に低くなる傾向が認められた。加熱前後における透水係数の比較を図 5 に示す。イオン交換水の条件では、透水係数の変化は最大で約 2 倍であり、透水係数と加熱期間の間に相関性はなかった。一方、人工海水の条件では、加熱期間の増加と共に透水係数は大きくなる傾向があり、加熱 90 日では加熱前の 4.6 倍の値になった。

先行研究^{7,8)}では、高温の水蒸気に曝されたスメクタイトやベントナイトでは膨潤力や膨潤圧が低下することが報告されている。膨潤圧が低下したベントナイトでは、スメクタイトにシリカが沈着している様子が観察され、これによる膠着効果が膨潤圧低下の原因と考察されている⁸⁾。脱水を伴う加熱より高飽和度を維持した加熱の方が膨潤特性の低下が大きかったことから、昇温から降温までの一連の温度履歴において間隙水が存在することが、膨潤特性の変化に強く関与していると考えられる。透水性の増加には、加熱後に膨潤性が低下したことで粗大な間隙が残りやすかったことが一因として考えられるが、化学的変質などの視点で更なる分析は必要である。今後、加熱期間や供試体条件を考慮してデータを拡充すると共に、加熱後供試体の固相分析を行い、特性変化のメカニズムを把握したうえで、透水および膨潤特性を設計等に活用することが重要と考えられる。

4. まとめ

本研究では、飽和度を高めた締固めベントナイトを 200℃設定した恒温器内で最長 90 日加熱し、これを室温に冷ました後の透水および膨潤特性を調べた。この試験条件と加熱期間においては、加熱 7～30 日の時点で平衡膨潤圧と最大膨潤率は概ね一定の値まで低下し、透水係数は海水条件では増加傾向であった。今後、固相分析を行い、昇温から降温までの温度履歴を受けた締固めベントナイトの特性変化のメカニズムを検討する。

参考文献 1) 原子力発電環境整備機構：包括的技術報告, NUMO-TR-20-03, 2021. 2) Grimsel Test Site, High Temperature Effects on Bentonite Buffers (HotBENT), <https://www.grimsel.com/gts-projects/hotbent-high-temperature-effects-on-bentonite-buffers/hotbent-introduction>. 3) 白河部ほか：土木学会論文集 C, Vol.77, No.2, pp.103-117, 2021. 4) Kale and Ravi: Applied Clay Science, 165, pp.22-39, 2018. 5) 山本ほか：NUMO-電中研共同研究報告書, NUMO-TR-21-02, 2022. 6) 渡邊ほか：土木学会第 77 回年次学術講演会, CS12-34, 2022. 7) Couture: Nature, Vol.318, No.7, pp.50-52, 1985. 8) Pusch et al.: Applied Clay Science, Vol.23, pp.239-244, 2003.

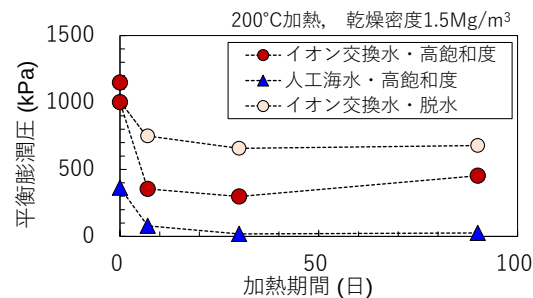


図 3 平衡膨潤圧と加熱期間の関係

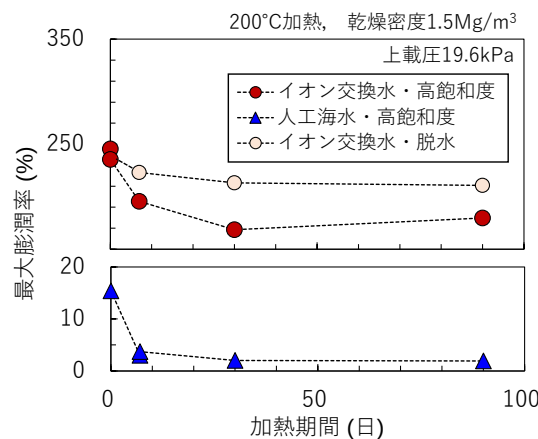


図 4 最大膨潤率と加熱期間の関係

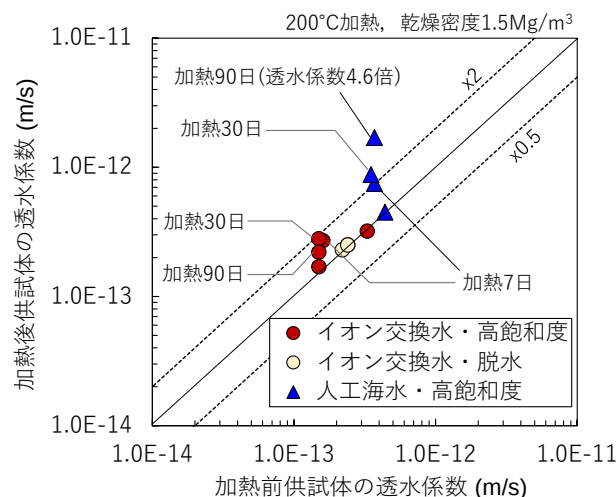


図 5 加熱前後の供試体の透水係数