

## HE-E 試験に温度変化を与えた場合の予察解析

株式会社大林組 正会員 ○佐藤 伸, 志村 友行, 山本 修一  
NAGRA 非正会員 Florian Kober

## 1. はじめに

放射性廃棄物処分に関する国際共同研究の一環としてスイス北西部のジュラ州に位置するモンテリ岩盤試験場では48種類の原位置試験が実施中である<sup>1)</sup>。その内の一つに熱・流体・応力連成（以降、THM連成）挙動を把握するために放射性廃棄物処分場の人工バリアを1/2スケールで模擬した原位置ヒーター試験（HE-E試験）があり、2011年6月から約11年間継続実施中である。HE-E試験では今後の試験方針について現在議論されており、温度変化を与えることも検討されている。そこで、本検討では、現状から温度を上昇あるいは下降した場合の試験に与える影響について予察解析を実施し、相対湿度変化と温度変化に着目した考察を行った。

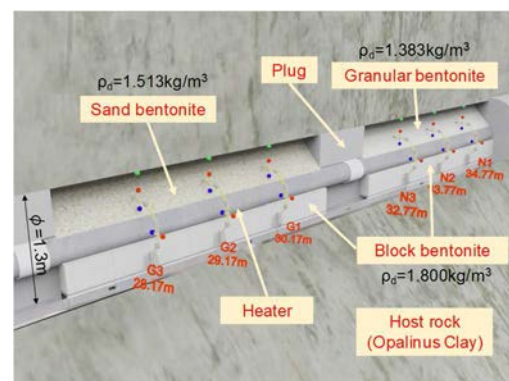


図-1 HE-E試験の概要図

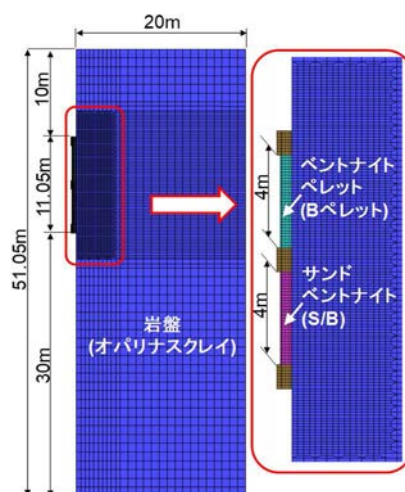


図-2 解析モデル（左：全体モデル、右：人工バリア近傍拡大図）

## 2. 検討概要

HE-E試験は図-1に示すように坑道延長約50m、直径 $\phi$ 1.3mの坑道内中央に模擬廃棄体（ヒーター）を設置し、ヒーター周辺に100%粒状ベントナイト（ $\rho_s=1.383\text{kg/m}^3$ 、以降Bペレット）あるいは粒状ベントナイトを65%配合させた砂混合土（ $\rho_s=1.513\text{kg/m}^3$ 、以降S/B）で埋め戻されている。本試験の目的は、THM連成解析の検証に必要な試験データベースの構築と要素試験から得られた材料パラメータをフィールドスケールにUpscalingする妥当性検証である。本検討では数値解析によりTHM連成挙動を考慮する必要があるため、スペインのカタルーニャ工科大で開発された解析コードCODE\_BRIGHT<sup>2)</sup>を用いた。本コードは間隙水の加熱による水蒸気化（液相から気相）、間隙空気圧増加による水への溶解（気相から液相）と言った相変換を考慮できる。さらに、膨潤性粘土の弾塑性挙動を表現できるBarcelona Basic Model<sup>3)</sup>（以降BBモデル）が適用可能である。解析モデルは、坑道中心を対称軸とする軸対称でモデル化し、坑道内はプラグコンクリートとベントナイト系埋戻し材をモデル化した。図-2に解析モデルを示す。適用する材料構成モデルは、ベントナイト系材料はBBモデル、岩盤はMohr-Coulomb破壊基準による弾塑性モデル及びその他は弾性とした。解析に用いる材料物性値は、Gaus I., et al.<sup>4)</sup>における各種要素試験から設定された材料パラメータを用いた。解析ステップは、

i)岩盤の初期状態作成、ii)坑道掘削による大気圧解放、iii)ベンチレーション試験（坑道壁面に2MPaのサクション保持<sup>4)</sup>）、iv)試験体設置、v)ヒーター加熱（ヒーター表面温度を365日で約140°Cまで上昇させる過程を含む3500日間（約9.6年）の加熱）、vi)3501日目から100日間で温度上昇または下降させ、その後、温度を一定にした試験開始から25年間の解析を6ステップで実施した。

## 3. 解析結果

本検討では、Bペレット部のヒーターを停止させ、S/B部のヒーターは温度を保持したケース（ケース1）と両方のヒーター温度を175°Cまで上昇させるケース（ケース2）を実施した。着目するセンサーは、図-3に示す人工バリア内に設置されている、温度と相対湿度センサーとする。センサーは、縦断面図の赤で示す位置にセンサー架台（断面図参照）が配置されており、ヒーター側、中央部及び岩盤側の各位置に温度計と湿度計が設置されている。各セ

キーワード 原位置試験, 熱・流体・応力連成, 有効応力解析法, 放射性廃棄物処分

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 ㈱大林組原子力本部原子力環境技術部 TEL03-5769-1307

センサーは円周方向の 12 時、3 時及び 9 時の位置に設置されているが、計測結果に異方性は認められず円周方向に広がるような分布であることが確認された。よって、軸対象によるモデル化は妥当と考え、円周方向の比較対象とするセンサーは計測結果が安定している個所と解析結果を比較した。

図-4 及び図-5 にケース 1 の人工バリア内の温度変化を示す。解析における温度の再現性は、若干岩盤側が高めに評価されているものの良好である。B ペレット部のヒーターを試験開始から 3500 日に停止させると人工バリア内部の温度も一気に低下する。一方、温度を保持する S/B 部についても B ペレット部のヒーター停止の影響を受けて温度が若干低下しているのが分かる。図-6 及び図-7 にケース 1 における人工バリア内部の相対湿度変化を示す。計測結果と解析結果は比較的良好的な再現性を示しているのが分かる。ヒーター停止後については、B ペレット部は飽和が徐々に進行（相対湿度が上昇）するものの、ヒーターを停止しない S/B 部については、相対湿度は一定値を保つ。この時、温度変化は隣接する B ペレット部の影響を受けたものの、相対湿度については、影響を受けないことが分かる。次に、ケース 2 の結果として S/B 部の人工バリア内部の温度の経時変化を図-8 に示し、相対湿度の経時変化を図-9 に示す。温度を上昇させるとそれに伴い、相対湿度は若干低下することが分かる。温度変化を与えることにより、現在定常状態である試験に対し変化を与えることが可能になる。ただし、ヒーターはシステム上、温度停止させると再起動できないため、温度上昇させてから過熱を停止させることが良いと言える。

#### 4. おわりに

HE-E 試験の今後の試験方針を設定するための一案として温度変化を与えた場合の影響について、予察解析を行った。本試験は、THM 連成解析の検証に必要な試験データベースの構築が目的の一つであるため、試験結果に変化がある方が解析の妥当性検証用データとしては有益と考える。よって、一度温度を上げてその後ヒーターを停止させる方が、このまま温度を一定に保つ試験よりも有益であると言える。

**参考文献** 1) <https://www.mont-terri.ch/> 2)UPC: CODE\_BRIGHT User's Guide 2018., 3) E. E. Alonso, et. al.: A Constitutive model for partially saturated soils, Geotechnique, 40, No.3, 1990. 4) Gaus, I., et al.: HE-E Experiment: Lay-out, Interpretation and THM Modeling, D2.2-11: Final Report on the HE-E Experiment and Modelling and Interpretation of the HE-E Experiment of the PEBS Project, EURATOM7, 2014.

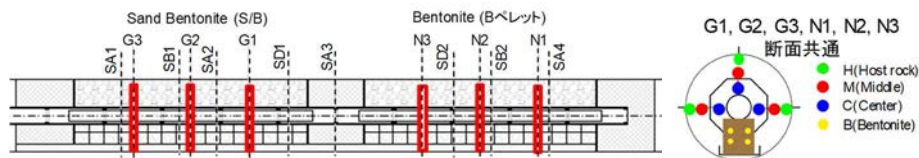


図-3 人工バリア内センサー配置図

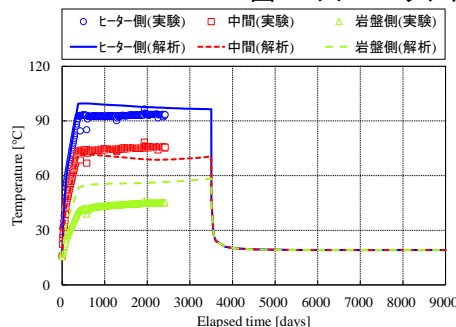


図-4 ケース1 Bペレット内温度変化

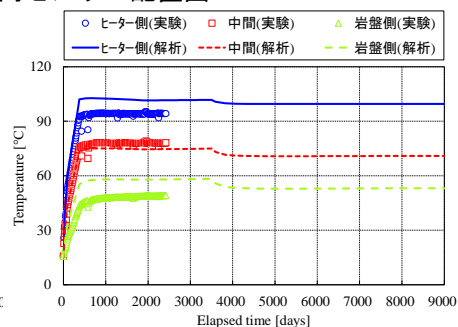


図-5 ケース1 S/B内温度変化

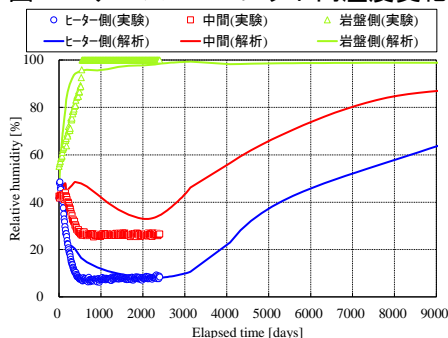


図-6 ケース1 Bペレット内相対湿度変化

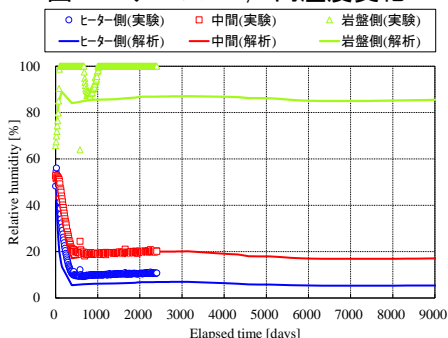


図-7 ケース1 S/B内相対湿度変化

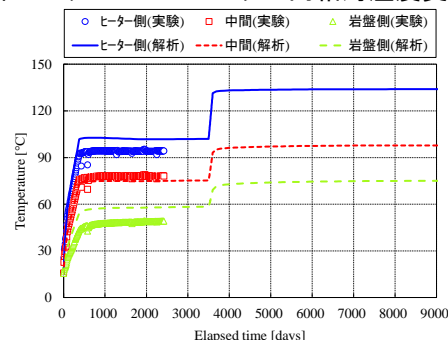


図-8 ケース2 S/B部内温度変化

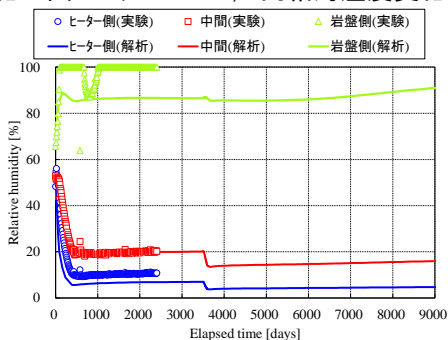


図-9 ケース2 S/B部内相対湿度変化