

熱 - 水 - 応力 - 化学連成解析モデルの開発 (1)
 - 室内連成試験による熱 - 水連成モデルの検証 -

日本原子力研究開発機構

正会員 ○藤崎 淳, 鈴木 英明, 藤田 朝雄
 非会員 内藤 守正, 油井 三和

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分において人工バリア定置後の廃棄体周辺は、熱的、水理的、力学的、化学的なプロセスが相互に影響を及ぼしあう、熱 - 水 - 応力 - 化学連成場が形成されることが予想される。これらの影響を定量的に把握し、人工バリア設計への反映や性能評価の信頼性を向上させることを目的として、日本原子力研究開発機構では熱 - 水 - 応力 - 化学連成モデル及び解析コードの開発を進めている。本報告では、室内で実施した連成試験結果を用いて行った、処分場における廃棄体周辺の環境を想定した条件下での熱 - 水連成モデルの適用性評価について述べる。

2. 熱 - 水 - 応力 - 化学連成試験

熱 - 水 - 応力連成試験設備 (以下, COUPLE) の概要を図1に示す。

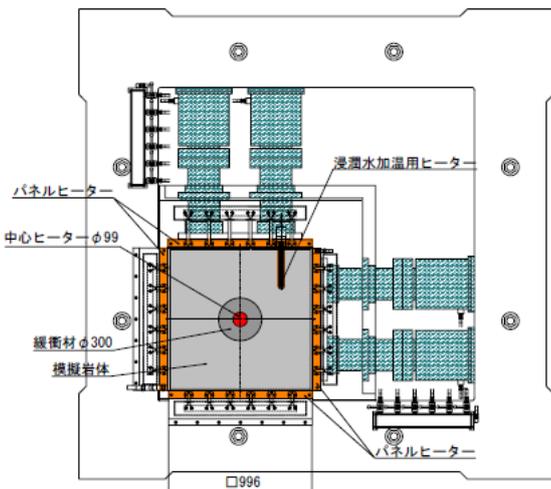
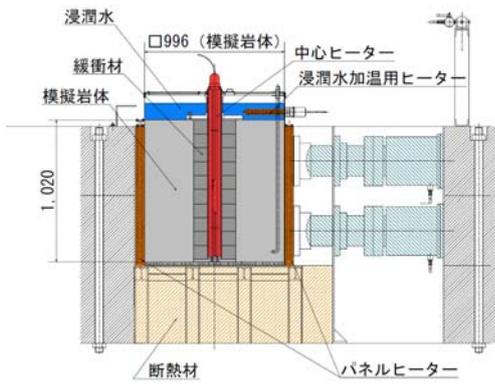


図1 COUPLE 概要図 (上: 鉛直断面図, 下: 平面図)

本試験の試験体は、オーバーパックを模擬したステンレス製のヒーター、緩衝材 (ベントナイト/ケイ砂混合体)、岩盤を模擬したモルタルからなり、高レベル

放射性廃棄物地層処分において、廃棄体周辺で想定される連成環境条件を模擬することが可能である。図2に試験における境界条件を示す。中心ヒーターの温度は、試験開始当初は表面温度が 90°Cになるように制御し、試験開始から 476 日後より 5°Cづつ3回に分けて 15°C低下させた。また、緩衝材中の水分量 (含水比) 測定にはサイクロメータを、温度の測定には熱電対を用いた。

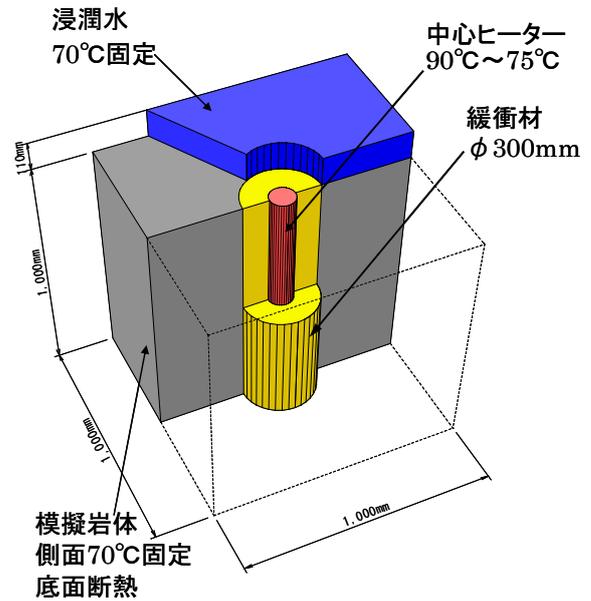


図2 試験における境界条件

3. 室内連成試験系を対象とした熱 - 水連成解析

解析に用いた物性値を表1に示す。

表1 解析に用いた物性値

	緩衝材	模擬岩体(モルタル)
乾燥密度 ($Mg \cdot m^{-3}$)	1.6	1.23
間隙率 (-)	0.403	0.311
初期飽和度 (-)	0.5	1.0
固有透過度 (m^2)	4.0×10^{-20}	4.5×10^{-18}
水分特性曲線を定める van Genuchtenモデル ²⁾ のパラメーター	θ_s	0.403
	θ_r	0.0
	$\alpha (m^{-1})$	1.2×10^{-2}
	n	1.4
不飽和透水モデル	室内試験によりキャリブレーション	van Genuchtenモデル
熱伝導率 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	含水比の関数	7.91×10^{-1}
比熱容量 ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	含水比の関数	5.78×10^{-1}

キーワード: 高レベル放射性廃棄物, 熱 - 水連成解析, 室内連成試験, モデル検証

連絡先: 日本原子力研究開発機構, 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 TEL029-282-1111

これらの物性値のうち、模擬岩体の不飽和浸透特性については、モルタル供試体を用いて pF 試験を実施し、得られた水分特性曲線を van Genuchten モデル²⁾でフィッティングすることによって、関連するパラメータを同定した。不飽和透水係数については、van Genuchten モデルにより推定した。緩衝材の不飽和水分特性曲線については、既往の実験データ¹⁾に対して van Genuchten モデルを適用した。不飽和透水係数については緩衝材/モルタル複合供試体(図3)を用いた浸潤試験を実施し、その結果をもとにキャリブレーションを行い設定した。また、温度勾配に依存する水蒸気移動の拡散係数は、Philip & de Vries³⁾式に基づき設定した。

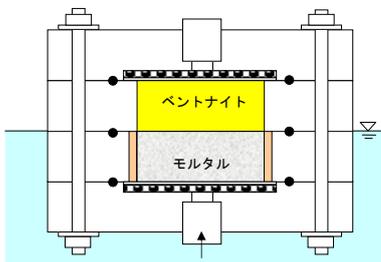


図3 緩衝材/モルタル複合供試体を用いた浸潤試験概念図

熱解析に関するパラメータについては、対象とする緩衝材の熱伝導率 λ (W/m/K) および比熱容量 C (kJ/kg/K) を以下の含水比 ω の関数で表すモデルを適用した¹⁾。

$$\lambda = 4.44 \times 10^{-1} + 1.38 \times 10^{-2} \omega + 6.14 \times 10^{-3} \omega^2 - 1.69 \times 10^{-4} \omega^3$$

$$c = (34.1 + 4.18\omega) / (100 + \omega)$$

解析には熱 - 水 - 応力連成解析コード THAMES3D⁴⁾を用いた。使用した解析メッシュを図4に示す。境界条件は、試験で設定した条件と同様に設定した。

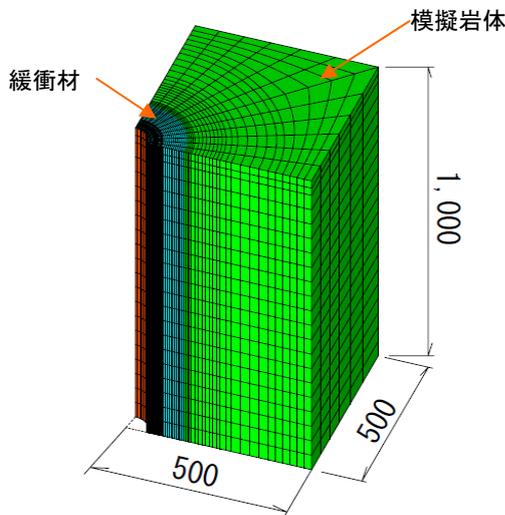


図4 解析メッシュ

図5に上記の熱-水連成モデルを用いた解析結果と試験における測定結果を示す。グラフの横軸は試験開始からの経過日数を、左縦軸は含水比を、そして右縦軸は中心ヒーター表面温度を示す。含水比測定位置は高さが試験体底面より500mm、水平位置がヒータから10mm、20mm、そして45mmである。低含水比側で測定値のプロットが存在しないのは、測定に用いたサイクロメーターの測定原理上、低湿度状態での測定が不可能であるためである。ここでは、ヒーター表面温度を経過時間と共に変化させる境界条件においても、モデルを用いた解析結果と試験における測定結果とは良い一致を示している。

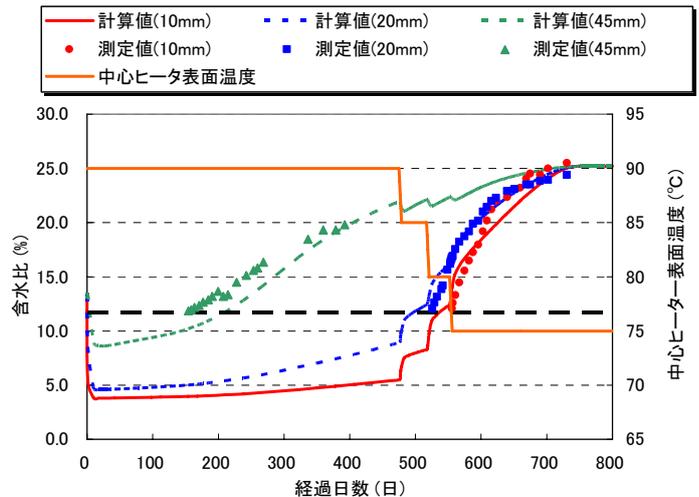


図5 解析結果と測定結果の比較

4. まとめ

室内連成試験の計測値と熱 - 水連成モデルを用いた数値解析結果を対比させて、モデルにより緩衝材の浸潤挙動を定量的に把握できることを確認した。このことは、今回適用した熱 - 水連成モデルを、処分場の廃棄体周辺の環境を想定した条件において適用することの妥当性を示唆するものと考えられる。今後は、試験終了後に緩衝材を解体・サンプリングして得られる化学的情報を用いて、熱 - 水 - 化学連成モデルの検証を行う予定である。

【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—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊2 地層処分の工学技術，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-022，1999

2)van Genuchten, M.Th. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, pp.892-898, 1980.

3)Philip, J.R. and de Vries, D.A. : Moisture movement in porous material under temperature gradients, *EOS Trans* 38, pp.222-232, 1990

4)Chijimatsu, M., et al. : Experiment and Validation of Numerical Simulation of Coupled Thermal, Hydraulic and Mechanical Behaviour in the Engineered Buffer Materials, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 24, pp.403-424, 2000