

## 高レベル放射性廃棄物の PEM を対象とした閉鎖後の再冠水過程評価 (その2) ガラス固化体の発熱量の相違による緩衝材の再冠水挙動

株式会社大林組 正会員 ○佐藤 伸, 森岩 寛稀, 山本 修一, 志村 友行  
原子力発電環境整備機構 正会員 鈴木 寛, 後藤 考裕

### 1. 目的

原子力発電環境整備機構(以降, NUMO)は, 高レベル放射性廃棄物の操業技術の一つとして, 横置き・PEM方式の開発に取り組んでいる. この操業技術は, 人工バリア(ガラス固化体を封入したオーバーパックおよび緩衝材)を地上施設で鋼製容器(以下, PEM容器)内に一体化した後, 地下施設に搬入して処分坑道に定置するものである. 本シリーズ講演<sup>1)2)</sup>では, 横置き・PEM方式の開発のうち, PEM容器の構造と処分場閉鎖後の再冠水過程を評価した結果について報告する. 本稿では, ガラス固化体の発熱量の相違による緩衝材の再冠水挙動について報告する.

### 2. 検討概要

本稿では, 母岩を深成岩類とし, 処分坑道断面を幌型構造としたニアフィールドモデルにて実施した THM 連成解析<sup>1)</sup>について報告する. 解析では 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 CODE\_BRIGHT<sup>3)</sup>を用いた. 本解析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)とい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>4)</sup>(以降 BB モデル)が適用可能である. 解析モデルは図-1 に示すように, 三次元でモデル化し, 奥行き方向は繰返し対称性を考慮し, PEM 容器の中心から, ガラス固化体の定置間隔中央部までモデル化した. 適用する材料構成モデルは, 緩衝材および埋め戻し材を BB モデル, ガラス固化体, オーバーパック, PEM 容器, 鋼製台座, 処分坑道支保は線形弾性体としている. 材料パラメータは, THM 連成解析を実施することから, 熱物性, 気液混合二相流物性および力学物性等を設定する必要がある. そこで, 本検討では既往の検討から物性値を設定した.

例えば, 力学物性のうち, ベントナイト系材料については, 高山ら<sup>5)</sup>が実施した室内試験結果を引用し, 弾塑性パラメータは山本ら<sup>6)</sup>の検討を参照している. 気液混合二相流物性については, 藤崎ら<sup>7)</sup>の検討を参照した. 熱に関するパラメータについては, 谷口ら<sup>8)</sup>の試験結果から得られた熱伝導率算出式を用いて, 本検討仕様の熱伝導率を算定している. 用いた熱物性を表-1 に示す. 本検討では, PEM 容器の有効率を既報<sup>1)</sup>にて報告した有効率 11%とし, ガラス固化体の発熱量をパラメータとした検討を実施した. ガラス固化体の発熱量は, 既報<sup>1)</sup>より, ガラス固化体定置までに地上で管理する期間を 50年貯蔵 (Case 1) とするものと 30年貯蔵 (Case 2) とするものの, 2 ケース設定して検討を実施した. 各ケースにおけるガラス固化体の発熱量の経年変化を図-2 に示す. 解析ステップは, ガラス固化体定置から 21 日間で埋め戻しを行い, その後, 再冠水が生じると仮定した. 再冠水過程の水理境界条件については, TH 連成解析の結果を考慮して, 処分坑道壁面での水圧が閉鎖直後から 50 年かけて 5.0MPa (深度 500m の水圧相当) となるように段階的に上昇させた. 温度の境界条件については, 地表面から深度 1000m まで別途モデル

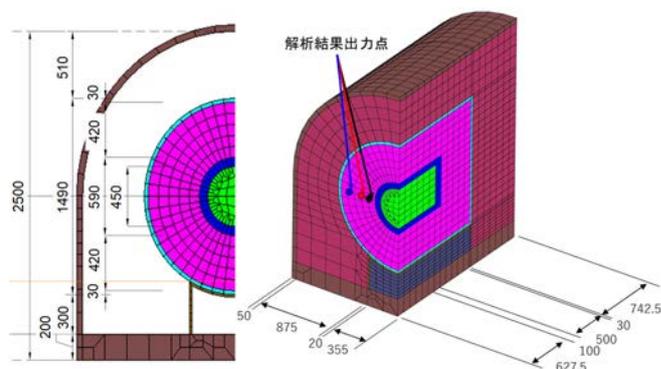


図-1 解析モデルの概要図

表-1 ガラス固化体の熱に関するパラメータ

部材	熱伝導率 (飽和) $\lambda_{\text{sat}}$ (W/m K)	熱伝導率 (乾燥) $\lambda_{\text{dry}}$ (W/m K)	比熱 $C_p$ (kJ/kg K)
緩衝材	1.411	0.295	0.290
埋め戻し材	1.429	0.369	0.301
PEM容器	45.92	45.92	0.421
台座部鋼製部材	51.60	51.60	0.473
支保工	2.600	2.600	1.050

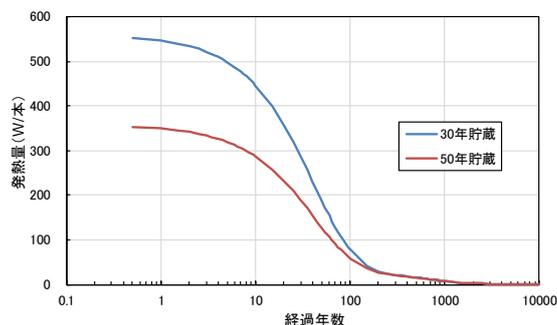


図-2 ガラス固化体の発熱量

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

化したファーフールドモデルから処分坑道壁面の温度を引き継ぎ規定した。

### 3. 検討結果

表-2 に埋め戻し材部および緩衝材部における飽和に要する時間を示し、各ケースにおける飽和度と温度の経時変化を図-5 に示す。なお、解析結果抽出点は緩衝材の内側・中央・外側 (図-1 参照) とした。表-2 より、ガラス固化体の温度の高くなる Case2 の方が飽和に至る時間が遅延した。これは、温度の上昇に伴い、ガラス固化体周辺では緩衝材中の間隙水が気化し、それに伴って間隙空気圧の上昇と相対湿度の低下 (マトリックサクシジョンの増加) が起こるため、温度が高いほど飽和度の低下が大きくなることに起因する。

図-6 に相対湿度と温度の経時変化を示す。図-6 より、ガラス固化体の温度上昇とともに、緩衝材内側の相対湿度が低下していることが分かる。特に、ガラス固化体の温度が高くなる Case2 の方が相対湿度の低下が大きいことが分かった。

次に、間隙比変化と平均有効応力の経時変化を図-7 に示す。Case1 と Case2 の結果を比較すると、ガラス固化体の温度上昇が高い Case2 の方が間隙水の気化に伴う間隙空気圧の上昇が大きいため、間隙比の増加と有効応力の低下がより大きくなる傾向がみられる。

以上から、ガラス固化体の発熱量の相違は、緩衝材の飽和までの時間と、緩衝材の飽和によって生じる乾燥密度分布の相違を引き起こす。なお、PEM 容器への影響としては、外力として膨潤圧のみならず、ガラス固化体の温度に依存する水蒸気圧も加わることが明らかとなっている。

### 4. 結論

横置き・PEM 方式による処分方式を対象にし、ガラス固化体の発熱量が緩衝材の再冠水挙動に与える影響を把握するため THM 連成解析を実施した。検討の結果、ガラス固化体の発熱量が高い場合、ガラス固化体付近の緩衝材の相対湿度および飽和度の低下が大きくなり、それに伴い水蒸気量も変化し、間隙空気圧が上昇し、間隙比の増加と有効応力の低下が大きくなる。そのため、ガラス固化体の地上での保管期間の違いによる埋設時のガラス固化体の発熱量の相違は、飽和時間、飽和後の緩衝材の密度分布および PEM 容器に加わる内圧に影響を及ぼすことが分かった。

**参考文献** 1) 鈴木ら: 高レベル放射性廃棄物の PEM を対象とした閉鎖後の再冠水過程評価 (その 1) PEM 容器の構造と再冠水挙動評価の解析条件, 土木学会第 75 回年次学術講演会公演概要集, 2020. 2) 森岩ら: 高レベル放射性廃棄物の PEM を対象とした閉鎖後の再冠水過程評価 (その 3) PEM 容器の透過性の相違による緩衝材の再冠水挙動, 土木学会第 75 回年次学術講演会公演概要集, 2020. 3) UPC: CODE\_BRIGHT User's Guide 2018. 4) E. E. Alonso, et. al.: A Constitutive model for partially saturated soils, Geotechnique, 40, No.3, 1990. 5) 高山ら: 緩衝材の長期圧密挙動に関する検討 (その 3) クニゲル<sup>®</sup>V1 とカオリナイトの基本特性の比較, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, 2019. 6) 山本ら: サクシジョン制御試験に基づくベントナイト系人工バリアの不飽和力学特性と保水特性, 土木学会論文集 C (地圏工学), 2019 年 75 巻 3 号, p. 257-272, 2019. 7) 藤崎ら: 熱-水-応力連成試験設備 (COUPLE) を用いた室内試験結果に基づく熱-水連成モデルの信頼性確認, JAEA-Research 2008-020, 2008. 8) 谷口ら: 熱的特性の緩衝材仕様に対する影響 (研究報告), JNC TN8400 99-052, 1999.

表-2 飽和までの時間

部材	飽和度 (%)	時間 (年)	
		Case 1	Case 2
埋め戻し材	95	14.8	11.8
	98	16.6	13.3
緩衝材	95	77.1	107.8
	98	96.3	140.8

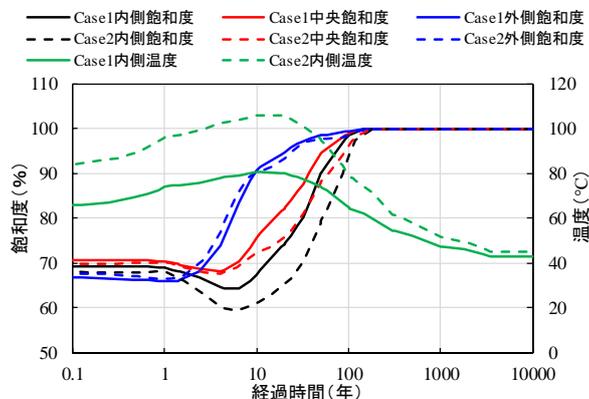


図-5 飽和度および温度経時変化

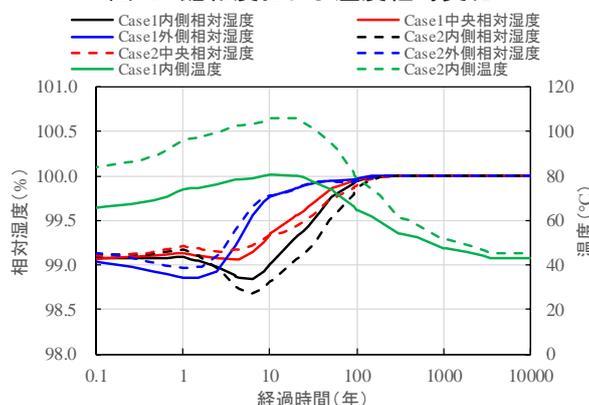


図-6 相対湿度および温度経時変化

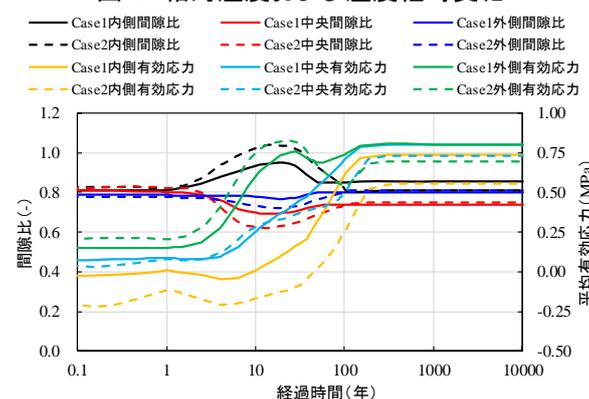


図-7 間隙比および平均有効応力経時変化