

## 発熱及び注水条件下における高密度ベントナイト内水分移動機構の詳細解析

地圏環境テクノロジー 正会員 森 康二, 多田 和広, 田原 康博  
 原子力環境整備・資金管理センター 正会員 朝野 英一, 林 秀郎  
 東京大学工学系研究科 正会員 登坂 博行

### 1. 目的

ガス発生時の人工バリア(EBS)内部状態の解析は、再冠水が終了した完全飽和を前提とするが、実際には再冠水が進行する中で腐食ガス発生と EBS 中の移行が同時進行する複合挙動と考えられる。ガス発生・移行の前提条件としての EBS 内部状態の違いは、構造健全性やバリア性能を評価する上で重要となる破過圧や押し出し水量の予測に影響を与える。本稿では、再冠水後、ガス発生・移行を含めた一連の長期挙動予測における解析モデルの適用性検証の一環として、スペイン放射性廃棄物管理公社 ENRESA を主体として行われた国際共同研究 FEBEX より、工学規模における再冠水過程を模擬したモックアップ試験系の再現解析を行い、ベントナイト内部の水分状態を解析した結果について報告する。

### 2. FEBEX モックアップ試験系の概要

図 1 に FEBEX モックアップ試験系の概要を示す。ベントナイトは多数の成型ブロックを用いて全長 6m、直径 1.62m の円筒形状に組み合わされ、スチール製容器内に格納される。ブロック間の隙間を含めたバルク乾燥密度は  $1.65\text{Mg/m}^3$  である。試験系統は加熱試験系と注水試験系から構成される。加熱試験はベントナイト中心部に埋め込まれた 2 体のヒータによる。注水試験は給水タンクに接続されたベントナイト外側からの圧入による。本試験は 1997~2002 年までの間に実施され、ベントナイト内部の計 25 か所の測定断面に埋め込んだ温度、圧力および相対湿度等の各種センサーにより連続計測が行われた。

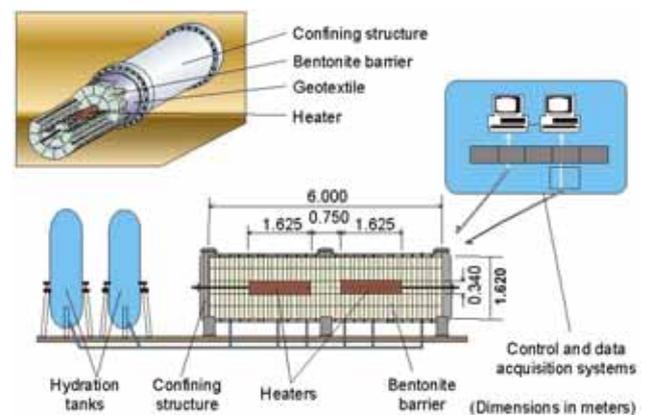


図 1. FEBEX モックアップ試験系の概要<sup>1)</sup>

### 3. 解析手法

対象システムは、水、ガスの 2 相流れに水蒸気、溶解ガスの移流拡散、熱移動を加えた 2 相 5 成分体系とし、ベントナイト内の動的な水分状態を解析した。固相 - 流体相間の熱交換は瞬時平衡を仮定し、水蒸気生成・凝縮、ガス溶解・遊離の相変化を考慮した。本解析は積分型有限差分法に基づく汎用地圏流体シミュレータ GETFLOWS によった。

### 4. 試験系のモデル化と解析条件

本試験系の EBS は 2 つのヒータ A、B を直列に配置した横置き方式である。長手方向はヒータ A と B の中間点 (AB 面) を対称面とし、周方向は加熱と注水時の圧力負荷が支配的とした軸対称性を仮定した。図 2 に 2 次元軸対称モデルを示す。ベントナイト部の初期温度は  $21^\circ\text{C}$ 、水飽和率は 58.6% である。ヒータ部には温度変化条件を与え、外周のステンレス容器は、圧力一定としてベントナイト最外周からの均質な注水条件を模擬した。モックアップ試験系で使用されたベントナイトの浸透率、毛細管圧力、熱伝導率等の基本データは各種の室内実験により取得されている<sup>2)</sup>。これらの物性条件を表 1 に示した。

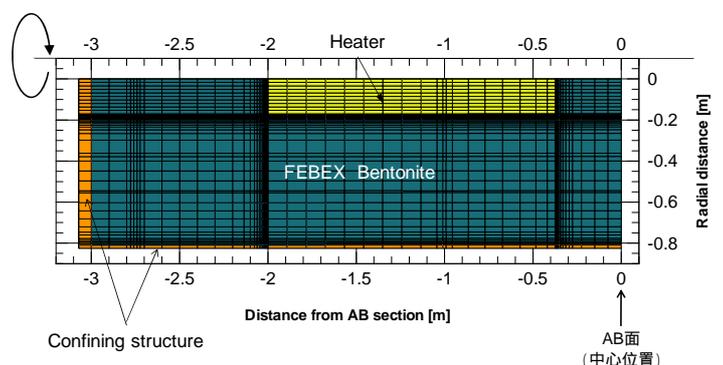


図 2. 2 次元軸対称モデルの格子システム

キーワード ベントナイト, 再冠水, ガス移行, FEBEX, 2 相流れ

連絡先 〒101-0052 東京都千代田区神田小川町 2-1 檜ビル 6F, TEL 03-5283-5825

5. 結果・考察

熱源からの距離  $r$  が異なる幾つかの出力点について、温度、注水量及び相対湿度(RH)の経時変化を実験結果と解析結果で比較した(図3)。図4は実験開始から約500日後のベントナイト内部の水飽和度、水蒸気濃度及び温度の分布コンターである。各点の温度変化及び径方向の温度勾配は、両者で良く一致する結果となった。RHについては、実験開始直後の温度上昇による急激な増加とその後の水蒸気拡散によって低下する特徴的な傾向が良好に再現された。これより、熱源から外側へ向かうベントナイト内部の水分移動は、熱源近傍の高温側で生成された水蒸気がガス相中を拡散移動し、熱源から離れた低温側で凝縮する潜熱移動を考慮した2相流体流動として解釈できるものと考えられる。実験開始後の20~300日間に見られるヒータ近傍( $r=0.22\text{m}$ )でのRHの低下は、解析結果が実験結果に対して早い傾向となった。ヒータから離れた地点( $r=0.70\text{m}$ )では解析結果が実験結果より応答が緩慢となった。本試験では、試験体中に埋め込まれたセンサーケーブルやブロック間の隙間を事前注水によって膨潤させ、試料全体を均質化させる操作が行われている。この過程でのベントナイト内部の水分状態の変化が実験開始時の初期状態となり、直後の非定常変化の実験結果と解析結果の相違に關与しているものと考えられる。なお、CODE\_BRIGHT等による同様の解析結果<sup>3)</sup>では、ここで得られた結果と同様の傾向が得られており、実験開始時のベントナイト内部の水分状態の不均質性が指摘されている。

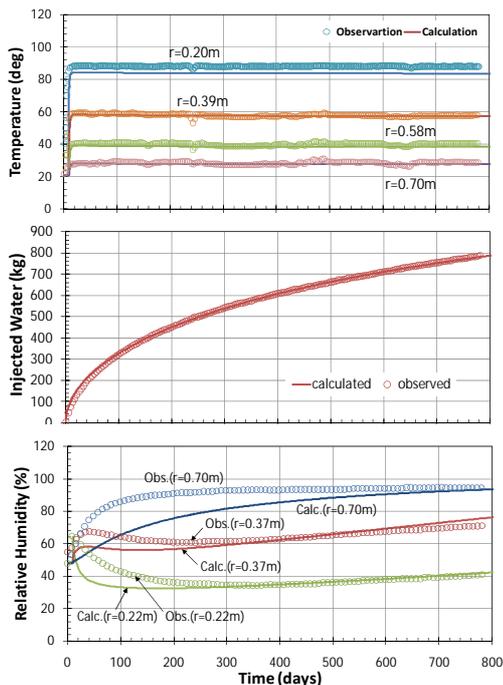


図3. 温度、注水量、相対湿度のシミュレーション結果と実験結果の比較

表1. 解析条件

乾燥密度	$\rho_d$	$[\text{Mg}/\text{m}^3]$	1.64
空隙率	$\phi$	[-]	0.4
絶対浸透率(水)	$K_w$	$[\text{m}^2]$	$1.0 \times 10^{-21}$
絶対浸透率(ガス)	$K_g$	$[\text{m}^2]$	$10 \times K_w$
相対浸透率曲線(水)	$k_{rw}$	[-]	$S_w^n$
	$n$	[-]	1.95
相対浸透率曲線(ガス)	$k_{rg}$	[-]	1
毛細管圧力曲線	$P_c$	$[\text{Pa}]$	Van-Genuchten
	$S_{r0}$	[-]	0.1
	$S_{r\text{max}}$	[-]	1
	$P_0$	$[\text{Pa}]$	30
	$\lambda$	[-]	0.32
水蒸気拡散係数	$D_{m,v}$	$[\text{m}^2/\text{s}]$	$2.13 \times 10^{-5}$
熱伝導率	$K_T$	$[\text{W}/\text{mK}]$	1.1
比熱	$C_s$	$[\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}]$	870.5

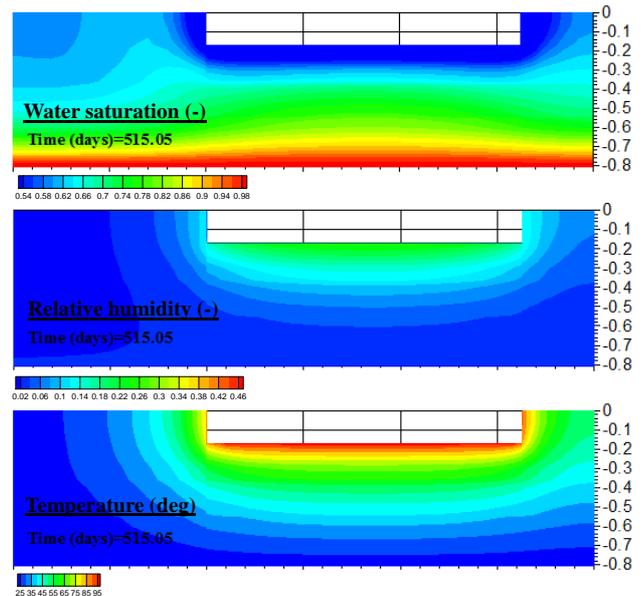


図4. 実験開始500日後のベントナイト内部の水飽和度、水蒸気濃度、温度分布

6. まとめ

FEBEX モックアップ試験系のモデル化と非等温系2相流解析を行い、実験データを良好に再現した。処分場閉鎖後のベントナイト内部の温度分布の変化は、水蒸気生成、拡散、凝縮等が関与した水分状態の再配置を生じさせる。ガス発生・移行挙動の解析における破過圧や押し出し水量の予測は、廃棄体周囲の水分状態によって大きく影響を受ける。今後は、再冠水挙動を含めたEBS長期挙動変遷の解析手法を確立させていきたい。

本報告は経済産業省からの委託による「地層処分技術調査等人工バリア長期性能評価技術開発」の成果の一部である。

参考文献

- 1) GTS ホームページ <http://www.grimself.com/febex>
- 2) ENRESA, FEBEX project full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high level radioactive waste in crystalline host rock, FINAL REPORT
- 3) P.L. Martin, J.M.Barcala and F.Huertas, Large-scale and long-term coupled thermo-hydro-mechanic experiments with bentonite: the FEBEX mock-up test, Journal of Iberian geology, 32(2), 2592-282, 2006