

TRU 廃棄物処分システムにおけるガス移行長期挙動解析モデルの高度化

(株)地圏環境テクノロジー 正会員 ○田原 康博, 正会員 多田 和広, 正会員 森 康二
(株)大林組 正会員 佐藤 伸, 正会員 志村 友行, 正会員 林 秀郎
(公・財)原子力環境整備促進・資金管理センター 非会員 朝野 英一, 正会員 並木 和人

1. はじめに

人工バリアシステム（Engineered Barrier System, 以下、EBS）中のガスは、間隙水中への溶解・拡散、自由ガスの生成・移行、選択的流れ、水・ガス相互干渉がもはや生じない微視的・巨視的フラクチャリングの発生等の様々な移行形態をとる。これらが処分場閉鎖後のいつの時点で、どこで発生するかは、EBS 内部の水分状態や不均質性と密接に関連し不確実性を有している。原子力環境整備促進・資金管理センターでは、TRU 廃棄物処分システムを対象とし、EBS 中の長期的なガス移行挙動解析の高度化研究を進めており、①ベントナイト系材料中のガス移行機構の解明及び、②THMC 連成事象を含む長期挙動変遷の予測手法の確立を目指している。

ガス移行機構の解明では、これまでに複数のベントナイト供試体を用いた室内飽和試験データ及び、ガス注入試験データの再現解析によって、供試体飽和時の浸潤過程とガス注入時の排水過程で異なる移行機構を同定し、両過程を一貫して取扱える新たな解析手法を開発した。また、長期挙動変遷の予測では、ガス移行パラメータの感度解析とモンテカルロシミュレーションによる不確実性評価を行い、重要な評価指標となる施設内の最大ガス圧や岩盤への累積押し出し水量と EBS 状態設定との関係を分析した。

本稿では、これらのガス移行長期挙動解析モデルの高度化に向けた取り組みの一部と現状の課題を示す。

2. 室内試験データの再現解析に基づくガス移行機構の同定

円筒状に成形したベントナイト供試体（φ60mm×h50mm, 乾燥密度 1.36Mg/m³, 100%クニゲル V1）に対し、室内飽和試験、ガス注入試験が実施され、試験時の注水量、排水量及び、排気量等の変化が測定されている¹⁾。本検討では、飽和試験、ガス注入試験で実測されたデータをそれぞれ独立に再現し、浸潤過程及び、排水過程におけるガス移行機構を同定した。水の浸潤過程では、ガスの流れは媒体中の選択的流れや空隙壁面での滑り等によって比較的高いモビリティを示し、水でほぼ飽和した状態であっても速やかに供試体外へ排出される機構が同定された。一方、飽和したベントナイトにガス注入を行った排水過程では、一般的な水・ガス 2 相置換挙動が生じるが、ある圧力閾値を越えた段階で流路拡幅が起こり、モビリティが増大するガス移行機構が同定された。このとき、同定された 2 相流パラメータ（毛細管圧力、相対浸透率など）は、それぞれの試験過程で全く異なるものとなった。これは、ベントナイト内の水分状態変化によって生じた膨潤・収縮変形が有効空隙率と 2 相流パラメータに影響を及ぼした力学連成現象によるものと解釈される。

実際の処分システムにおいては、浸潤過程と排水過程が明確に区分けできるわけではなく、空間的、時間的に不均質に発生すると考えられる。そこで、本研究ではガス移行挙動の異なる両過程を一貫して取扱える新しい解析手法（膨潤・収縮変形を考慮した 2 相流解析モデル）を開発した。この手法は、ベントナイトの膨潤・収縮に伴うマクロポア（流体移動に寄与する空隙）の変形、流体モビリティ及び、2 相流パラメータの変化を、媒体の飽和度と関連付けた構成モデルによって表現するものである。すなわち、時々刻々と変化する水分状態とその履歴（浸潤か排水）に依存した 2 相流パラメータを考慮した長期挙動予測が可能となる。開発手法の適用性は、上述の飽和試験データ及び、ガス注入試験データの再現解析により確認した。

3. 不確実性を考慮したガス移行解析

第 2 次 TRU レポート²⁾のリファレンスケースを対象とし、使用データの不確実性を考慮したガス移行解析を実施し、施設内の最大ガス圧や岩盤への累積押し出し水量等の重要な評価指標に対する影響を評価した。使用モデル

キーワード TRU 廃棄物, ガス移行, ベントナイト, 再現解析, 不確実性, モンテカルロシミュレーション

連絡先 〒101-0052 東京都千代田区神田小川町 2-1 檜ビル 6F (株)地圏環境テクノロジー TEL 03-5283-5825

は上記の膨潤・収縮変形を考慮した 2 相流解析モデルを基本とし、等温状態を仮定した水・ガス 2 相流解析モデル、非等温状態を仮定した熱・水・ガス連成モデルの 2 つを用いた。不確実性を考慮するデータに関しては、上述の評価指標に対する感度が大きいものとして、浸透率、間隙率、膨潤圧、初期飽和度の 4 つを選定し、それらのばらつきの分布を確率密度関数で記述し、1 次元ガス移行解析に基づくモンテカルロシミュレーションを実施した。確率変数のサンプリングには LHS (Latin Hypercube Sampling) 法を用いた。

モンテカルロシミュレーションによって得られた廃棄体中央部ガス圧の時間変化を図 1 に示す。また、選定した 4 つのデータと評価指標の関係をまとめた。図 2 は初期飽和度と最大ガス圧の関係を示したものである。その結果、最大ガス圧に関しては初期飽和度に、押し出し水量に関しては間隙率と初期飽和度に対して強い相関関係が見られた。初期飽和度に関しては、利用可能なデータが少なく、幅広にばらつきを設定したことにより、評価指標との相関関係が強く表れた。また、初期に EBS 内に存在する水量を決める間隙率は押し出し水量に大きく影響したと解釈される。浸透率、膨潤圧に関しては、データのばらつきが他と比較して小さいため相対的に相関が小さくなった。

これらの関係から評価指標に対して危険側、平均、安全側を示す 3 ケースのデータセットを抽出し、典型的な TRU 廃棄物処分システムを模擬した 2 次元モデルによって詳細解析を実施した。図 3 に上記 3 ケースの廃棄体中央部ガス圧、岩盤への累積押し出し水量の時間変化を示す。施設内最大ガス圧、岩盤への累積押し出し水量は、それぞれ 5.87~5.95 MPa, 4.23~6.04Nm³/m となった。また、ガス圧上昇の発生時期の相違は 30~70 年であった。これらの結果より、ガス発生時点における EBS 内部の水分状態はガス移行解析の結果を大きく左右し、その水分状態の精度良い予測が不確実性低減につながると考えられる。

4. おわりに

TRU 廃棄物処分システムにおけるガス移行長期挙動解析モデルの高度化の一環として、室内試験データの再現解析、不確実性を考慮したガス移行解析を実施した。本検討の結果、供試体飽和時の浸潤過程とガス注入時の排水過程で異なる移行機構を同定し、両過程を一貫して取扱える膨潤・収縮変形を考慮した 2 相流解析モデルの適用性を確認した。また、不確実性低減のためにガス発生時点における EBS 内部の水分状態の精度良い予測が重要であることが示された。なお、本報告は経済産業省から公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが受託した「TRU 廃棄物処分技術：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) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター, 2010. 平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 2 分冊) —ガス移行挙動の評価—.
- 2) 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構, 2005. TRU 廃棄物処分技術検討書—第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—.

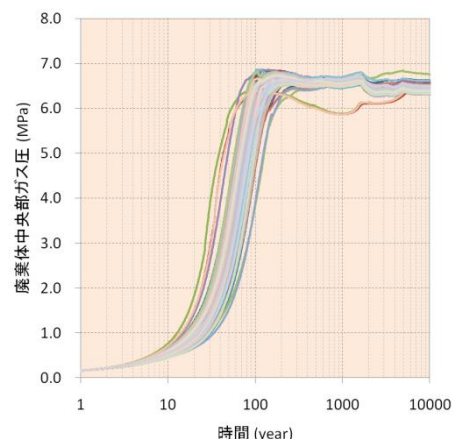


図 1 廃棄体中央部ガス圧の時間変化

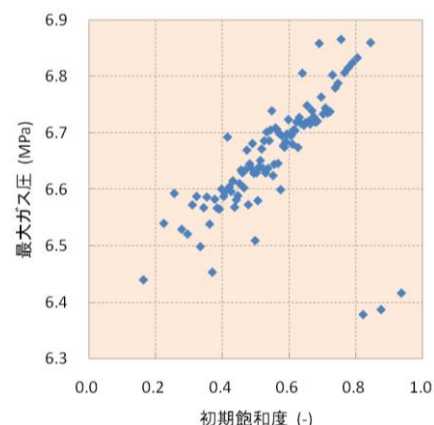


図 2 初期飽和度と最大ガス圧の関係

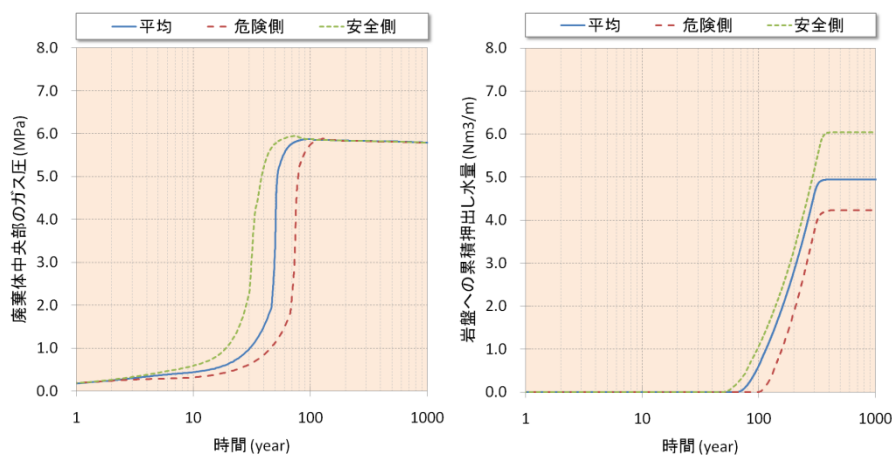


図 3 廃棄体中央部ガス圧、岩盤への累積押し出し水量の時間変化