

地層処分における緩衝材の再冠水挙動に関する解析的検討 Study on behavior of the buffer material through Saturation Process in the geological disposal

吉野 修* 石山 宏二*
Osamu Yoshino Koji Ishiyama
金澤 伸一** 飯塚 敦***
Shinichi Kanazawa Atsushi Iizuka

要 約

地層処分事業は、サイト選定から閉鎖まで 100 年にわたる事業であり、閉鎖後においても処分した高レベル放射性廃棄物の安全性は担保されるものでなくてはならない。このため長期の安全性評価が必要となり、その結果は処分場の設計の保守性や信頼性、閉鎖時の判断材料、閉鎖後の性能評価に反映されることになる。評価に用いる解析コードは想定される現象を表現するために熱・水・応力・化学現象を連成させるものが多い。現在、筆者らは解析コード DACSAR-MP をもとに長期の安全性評価に用いることを目的に開発を進めている。

本報告では、長期の安全性評価に用いる解析コード開発の一端として高レベル放射性廃棄物を定置後の地下水再冠水時の緩衝材飽和挙動の検討を実施した。その結果、地下水が回復しても緩衝材は完全飽和しない場合があることが分かった。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 地層処分の概要
- § 3. 解析モデルの開発
- § 4. 地層処分の緩衝材の再冠水挙動の検討
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分は、原子力発電環境整備機構が実施主体として事業の安全な実施に向けて技術の整備に取り組んでいる。地層処分場の規模は原子力発電によって発生すると見込まれるガラス固化体 40,000 本以上を地下 300 m 以深に配置した処分坑道および処分孔に定置することを想定しており、5～6 km² の広大な領域になる。地層処分では、図-1 に示すように廃棄物の特徴に応じた適切な人工バリアと安定した地層（天然バリア）を組み合わせた多重バリアシステムにより高レベル放射性廃棄物を閉じ込めることにより生活環境から隔離することとしている¹⁾。

* 技術研究所土木技術グループ

** 技術研究所

*** 福島工業高等専門学校

**** 神戸大学

地層処分事業は、建設・操業で 60 年程度、閉鎖で 10 年度見込まれ、サイト選定からの全期間では 100 年程度にわたる長期のプロジェクトとなる。さらに長期安全性の評価の期間は 10 万年が設定されている。

長期の安全性評価では、建設時から操業、閉鎖以降までの期間で応力状態の変化、高レベル放射性廃棄物の放熱、地下水の浸潤および流動および化学的環境の変化が想定されており、これらを連成した数値解析を行い、多重バリアシステムの挙動を把握し、その健全性を確認する。

現在、様々な解析コードが提案され長期安全性の評価の取り組みがなされており、本報告では緩衝材が不飽和状態から飽和に至る状態を再現可能な解析コード



図-1 高レベル放射性廃棄物処分の基本的なバリア構成²⁾

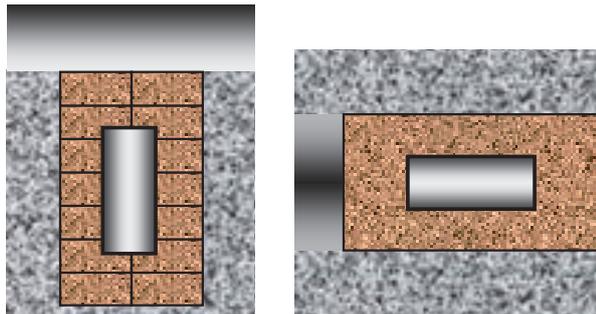
DACSAR-MP を利用・機能拡張して、地層処分の長期安全性評価および建設・操業段階における設計・施工に関わる知見を得るための取り組みを示す。

§2. 地層処分の概要

2-1 地層処分における建設・操業

地下施設の建設段階では、アクセス坑道、連絡坑道および処分坑道から構成される坑道群を施工することが想定されている³⁾。

操業段階では、高レベル放射性廃棄物は地上の設備においてガラス固化体として安定化され、十分に冷却したのちに炭素鋼でできたオーバーパックに格納し一体化される（以下、一体化したものを廃棄体という）。廃棄体は地下 300 m 以深に掘削された処分坑道に緩衝材に保護された状態で定置される（図-2）。その後、処分坑道の埋戻しおよびプラグの設置をして操業完了となる。以降、地下水は元の状態まで徐々に回復し、緩衝材に浸潤する（再冠水）。地層処分における多重バリアシステム構成の概要を表-1 に示す。



① 処分孔縦置き定置方式 床面に処分孔を削孔し、処分孔内に廃棄体を定置
 ② 処分坑道横置き定置方式 坑道に廃棄体を横置きに定置

図-2 代表的な廃棄体定置方法

2-2 地層処分の安全性評価

安全性評価は、「地層処分システムに関連する危険性に対して、サイトの地質環境や処分場の設計が技術的な要件を満足するだけの安全機能を発揮し得るか否かを体系的に分析する作業過程」である⁴⁾。

地層処分システムの安全性評価は、以下の特徴を有するため、評価に使用するシナリオ、モデル、データセットなどに対して十分に検討されているかが重要である。

- ・極めて長い時間スケールを考慮しなければならない
- ・天然の地層という不均質で大きな空間領域を対象とする
- ・実際に構築し、その挙動から設計にフィードバックして最適化を図り安全性を実証できる対象は一部に限られる

表-1 多重バリアシステム構成の概要

項目		仕様
ガラス固化体	役割	高レベル放射性廃棄物をガラスマトリクスによる浸出抑制
	容器材質	ステンレス
	サイズ	高さ 1.3m, 直径 40cm 重さ 500kg
オーバーパック	役割	水圧・地圧等からからの防護, 耐熱性・熱伝導性, 対放射線性
	材質	炭素鋼
	サイズ	高さ 1.73m, 直径 82cm
緩衝材	役割	移流による移行抑制, コロイド移行の防止・抑制, 収着による放射性物質の移行遅延, 低透水性, コロイドろ過能, 収着性
	配合	Na 型ベントナイト: 珪砂=70:30
	乾燥密度	1.6g/cm ³ 以上
	サイズ	高さ 3.1m, 直径 2.22m (縦置き)
天然バリア	役割	地質の長期的な変動, 人の接近抑制

§3. 解析モデルの開発

本研究では、地層処分のシナリオに基づく坑道掘削、廃棄体や人工バリアの設置および坑道閉鎖等に起因する熱、水理、力学あるいは化学的擾乱によって、ニアフィールドに及ぼす挙動を把握・評価するため、FEM による現象解析モデルを構築・整備することを目的としている。

対象とする解析モデルは、図-3 に示すように事業段階により環境が変化し、建設・操業および地下水の再冠水が終了するまでの期間は土/水/空気に関わる熱、水理、力学の連成問題が主体となり、それ以降の長期では力学と化学の連成問題が主体になると考えられる。

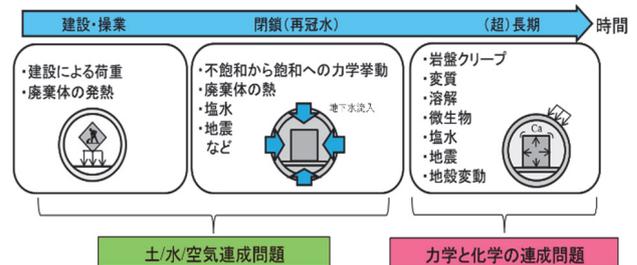


図-3 対象とする解析モデルの内容

検討に用いた解析プログラムは、土/水/空気連成有限解析コード DACSAR-MP である。緩衝材と埋戻し材を不飽和土として捉え、緩衝材を構成するベントナイトの膨潤性を表現できる高山ら⁵⁾が提案した構成モデルを使用する。

また、本モデルでは図-4 に示すように土を土粒子(固相)、水(液相)、空気(気相)の集合体として扱うものである。応力は、式(1)(2)に示すように有効応力

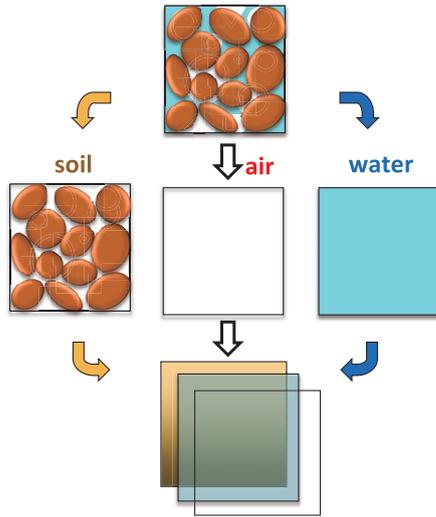


図-4 土/水/空気連成の考え方

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + (1 - S_e) p_a + S_e p_w \quad (1)$$

全応力 有効応力 気相 液相

$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - p_a \delta_{ij}) + S_e \cdot (p_a - p_w) \delta_{ij} \quad (2)$$

ネット応力 サクシオン

- σ'_{ij} : 有効応力
- σ_{ij} : 全応力
- p_a : 間隙空気圧
- p_w : 間隙水圧
- S_e : 有効飽和度 ($S_e = \frac{(S_r - S_{r0})}{(1 - S_{r0})}$)
- S_r : 飽和度, S_{r0} : 初期飽和度

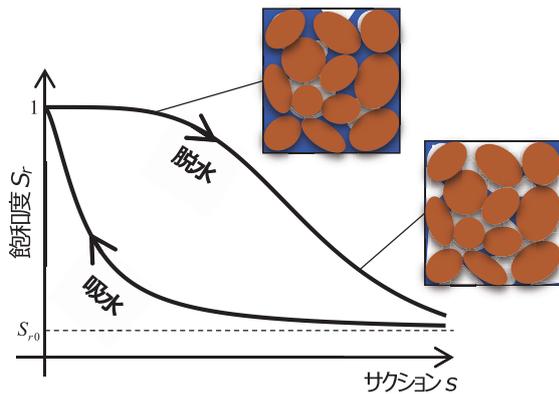


図-5 水分特性曲線

と有効飽和度により変化する間隙空気圧および間隙水圧の和として表現する。また、緩衝材の不飽和から飽和に至るまでの挙動は、図-5に示すサクシオンと体積含水率（飽和度）の関係を示す水分特性曲線を用いて表現する。

また、再冠水の挙動を考えた場合、土粒子の間隙中の空気は上方に移動または徐々に水に溶け込むものとし、そのうち空気の水への溶存は、以下のように表現できる

よう解析モデルを拡張した（図-6, 図-7）。

- ① 気相が液相に溶けている領域がある
- ② 気相と液相の間で質量のやり取りはない（各相で質量保存則が成立する）
- ③ 気相が液相に溶存する量は、ヘンリーの法則に従う

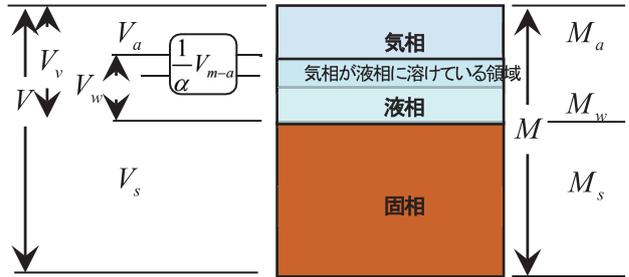


図-6 空気溶存のモデル

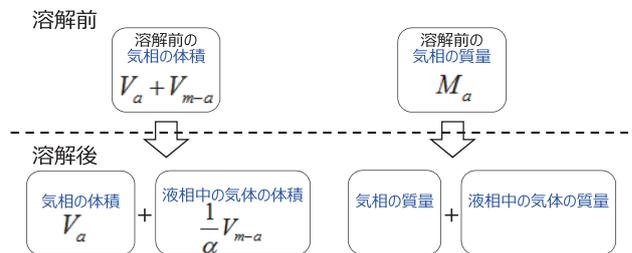


図-7 空気溶存の考え方

§ 4. 地層処分の緩衝材の再冠水挙動の検討

4-1 解析条件

解析コードの妥当性検証と地下水の回復に伴う緩衝材の飽和になる挙動を確認するため、再冠水シミュレーションを実施した。

解析モデルは、図-8に示すような地層処分研究開発第二次取りまとめ³⁾で提示されている軟岩系岩盤の処分分孔縦置き方式断面とする。解析は廃棄体定置後、処分

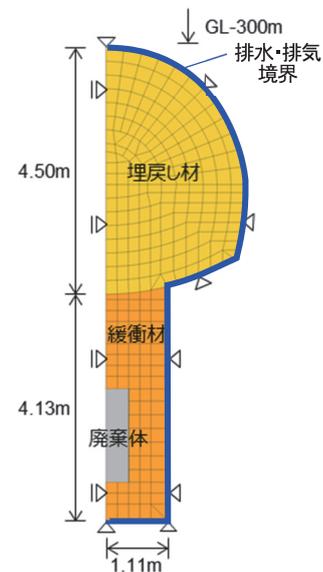


図-8 解析メッシュ図・境界条件

表-2 主な物性値

	乾燥密度 ρ g/cm ³	圧縮指数 λ	膨潤指数 κ_0	ポアソン比 ν'	初期 間隙比 e_i	初期飽和 度 Sr_i	モンモリロナイ ト含有率 α_{mon}	透水係数 m/sec	透気係数 m/sec
緩衝材	1.60	0.14	0.01	0.45	0.640	0.5	0.40	1.0×10^{-12}	3.2×10^{-6}
埋戻し材	1.40	0.14	0.01	0.45	0.691	0.5	0.30	1.0×10^{-10}	3.2×10^{-6}

坑道を埋戻し材で閉塞した時を初期状態とし、坑道および処分孔周囲を排水・排気境界として、地下水の回復はモデル下部から水頭が上昇して所定期間で最終的に水頭が土被りに相当する 300 m になるよう設定した。この地下水回復までの期間をパラメータとして 1 年から 100 年で設定し、解析の対象期間は 1,000 年とした。解析に用いた主な物性値を表-2 に示す。緩衝材の初期飽和度は、自然含水比のベントナイトとケイ砂を所定の仕様（乾燥密度 1.60 g/cm³）に締め固めた状態に対応する 50% とした。なお実際の建設・作業段階では、緩衝材の設置や廃棄体を定置するために予め隙間を設け、最終的にペレット等で充填をすることになっているが、本検討では緩衝材および埋戻し材は隙間は初めから無く、一様な状態とする。

また、現状の解析コードでは廃棄体の崩壊熱および化学的変質は考慮していない。

解析は土/水/空気の連成問題として扱い、以下の点に着目して緩衝材が飽和に至る挙動について確認する。

- ・水に対する空気溶存の有無
- ・坑道、処分孔周囲への地下水回復の期間

4-2 空気溶存の有無による緩衝材挙動の検証

地下水回復期間を 100 年として空気溶存の有無による緩衝材の飽和挙動への影響を確認した。

図-9 に示すように飽和しにくいと考えられる廃棄体上部の緩衝材と処分坑道埋戻し材の中心を着目点として飽和状況の経時変化を比較した。低飽和度では、空気溶存の有無に関わらず同じ挙動を示すが、飽和度 95% 以上になると差が現れ、空気溶存を考慮しない場合では残留空気のため飽和度 98% 程度で一定となる。

空気溶存の有無による地下水回復に伴う緩衝材の飽和度分布を図-10、図-11 に示す。地下水回復開始から 50 年までは境界付近を除くと飽和度は大きく変わらない。一方 50 年以降において緩衝材の飽和度が概ね 95% を超えるとそれぞれの挙動の差が現れる。空気溶存なしの場合では緩衝材の周囲から飽和が進行するものの、残留空気が空気だまりとなり緩衝材内部の飽和がなかなか進まない状況となっている。一方、空気溶存ありの場合では飽和が比較的早く進行し最終的に完全飽和になっている。

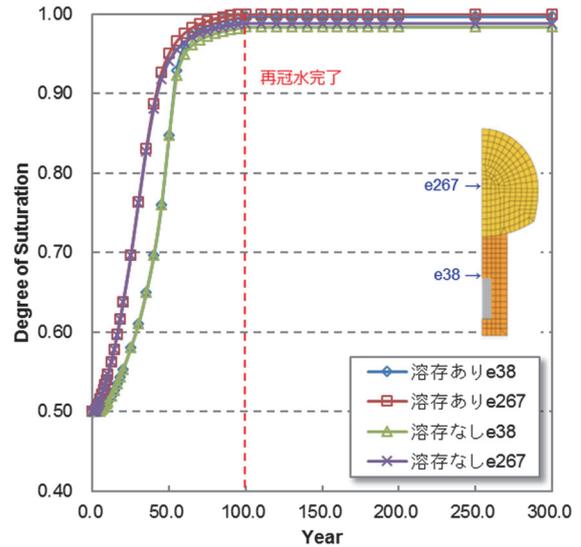


図-9 着目点における空気溶存有無による飽和度の経時変化 (地下水回復期間:100年)

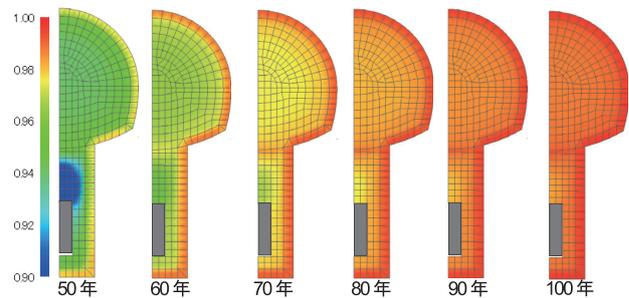


図-10 緩衝材の飽和状況 (空気溶存なし)

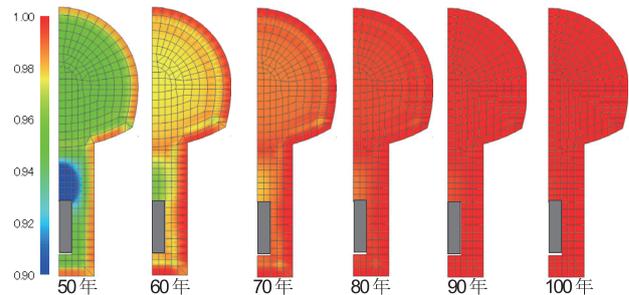


図-11 緩衝材の飽和状況 (空気溶存あり)

4-3 地下水回復期間による緩衝材飽和状況の検証

水への空気溶存を考慮した上で、地下水回復に要する期間が緩衝材の飽和挙動への影響を検討した。期間を 1 年から 100 年の間で 9 ケースとした。

地下水回復期間 10 年, 100 年の場合の坑道および処分孔の着目点における飽和度の経時変化を図-12, 図-13 に示す。両者とも多くの着目点では飽和しているものの廃棄体上部の着目点では飽和の進行が他の地点より遅く, 地下水回復期間 10 年の場合については完全飽和になっていないことが分かる。

緩衝材の飽和度分布の経時変化を図-14, 図-15 に示す。地下水回復期間 10 年では, その期間になっても廃棄体上部の緩衝材に不飽和の部分が存在する。その後,

不飽和部分も浸潤が進み飽和度が 0.95 以上となり概ね飽和する。一方, 地下水回復期間 100 年の場合では, 約 60 年で廃棄体周囲の緩衝材が飽和している。早期の地下水回復は外周部の緩衝材が飽和・膨潤し難透水層となるため内部への浸潤が遅くなることにより地下水回復が完了しても完全飽和にならず不飽和の部分が残るものと考えられる。地下水回復が緩やかに進むと外部の緩衝材の飽和が急激に進まないため内部への浸潤が進むことにより地下水回復が完了する前に飽和になると考えられる。

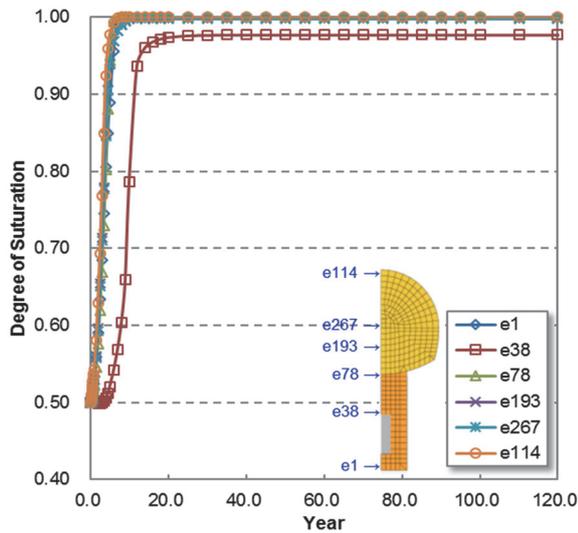


図-12 着目点における飽和度の経時変化 (地下水回復期間: 10 年)

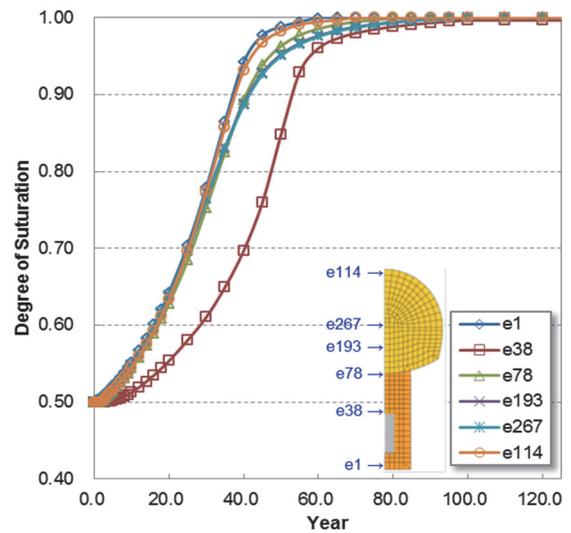


図-13 着目点における飽和度の経時変化 (地下水回復期間: 100 年)

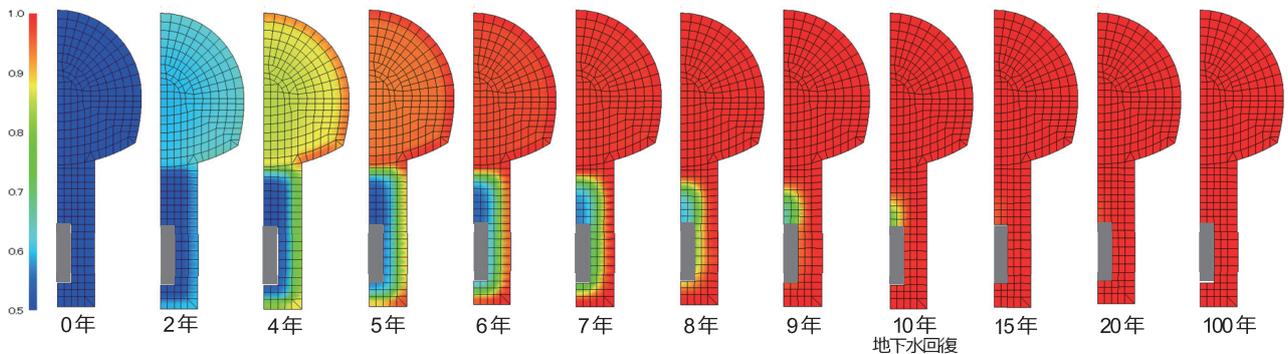


図-14 飽和度分布の経時変化 (地下水回復期間: 10 年)

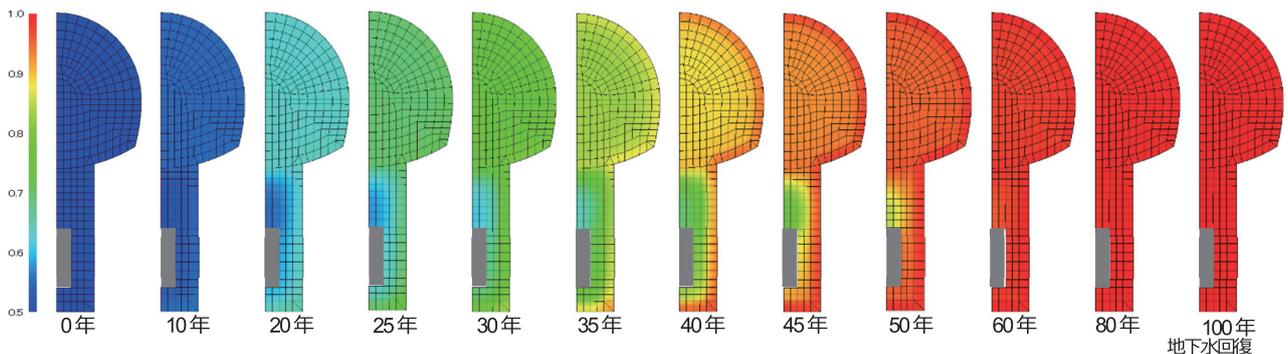


図-15 飽和度分布の経時変化 (地下水回復期間: 100 年)

地下水が回復する際に緩衝材への浸潤が最も遅い廃棄体上部の着目点について、期間による挙動の違いを図-16に示す。地下水回復期間が短い20年までのケースでは飽和が進行する浸潤速度はほぼ同じとなっており、期間が長くなると緩やかに飽和が進行している。最終的に緩衝材の飽和度はすべて0.95以上となっているが、地下水回復期間が50年より短いものは完全飽和に至らないまま一定となっている。

緩衝材の仕様では、透水係数は 1.0×10^{-11} m/s以下と規定しており、要素試験によれば $1.0 \times 10^{-11} \sim 1.0 \times 10^{-13}$ m/s程度の範囲の幅を持っている³⁾。緩衝材の飽和挙動についてこの透水係数の範囲の幅が与えるの影響を検討した。その結果を図-17に示す。透水係数が 1.0

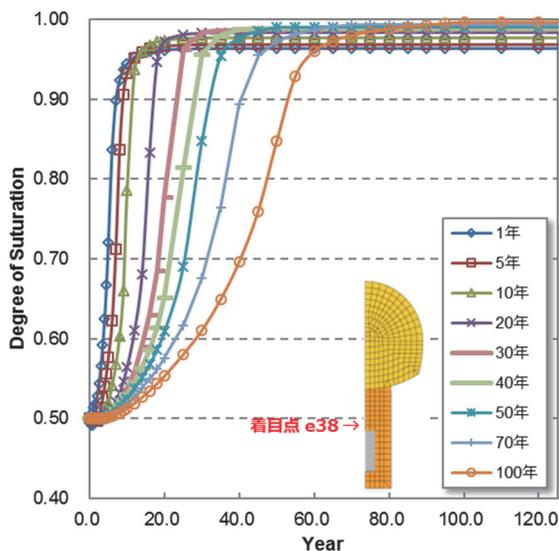


図-16 地下水回復期間による飽和度の経時変化の比較

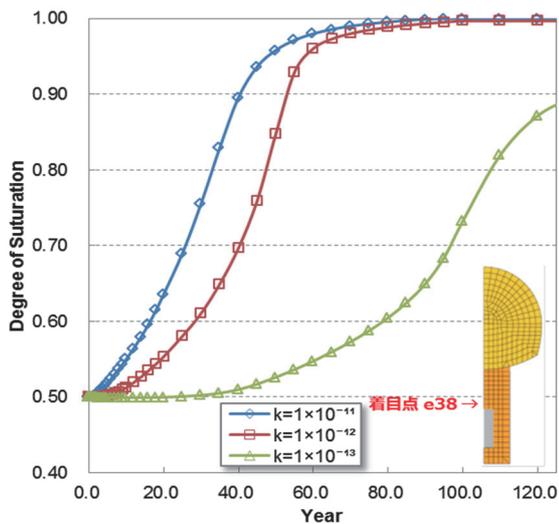


図-17 緩衝材の初期透水係数による飽和度の経時変化の比較 (地下水回復期間：100年)

$\times 10^{-11}$ m/s, 1.0×10^{-12} m/s では地下水回復完了を待たずに飽和しているが、透水係数が 1.0×10^{-13} m/sの場合では地下水回復期間100年において飽和に至らず、飽和度は約65%である。このとき不飽和の期間が100年以上続くことで、廃棄体の熱拡散や酸化環境から還元環境への移行など様々な課題が残ると考えられる。

§5. おわりに

地層処分竖置き方式を対象として地下水回復に伴う緩衝材挙動の解析を実施し、地下水回復期間による緩衝材の飽和挙動について再現・検討した。

水への空気の影響について検討した結果、緩衝材中の空気は水への溶存を考慮しないと飽和は0.95以上にはなるものの空気だまりができるため完全飽和にならないことが分かった。

また、坑道や処分孔周囲の地下水回復までの期間について検討をした。その結果、地下水回復期間は地下水の緩衝材への浸潤に影響し、期間が短い場合は外側の緩衝材が早期に飽和して膨潤挙動により難透水層となるため、地下水が回復しても緩衝材中心部に不飽和部分が残る、逆に回復期間が長いと緩やかに浸潤が進み完全飽和になり、その期間より緩衝材が飽和するまでの期間は短くなることが分かった。

緩衝材の透水係数についての検討では、初期透水係数が小さいと飽和までの期間が長くなり、緩衝材が不飽和である状態が長く続くことが分かった。

今後、廃棄体周囲の緩衝材が飽和の進行が遅いため不飽和状態が続くとき、安全性評価にどのように影響するか、検討をする予定である。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：いま改めて考えよう地層処分，2016.4.
- 2) 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保（2010年度版），2011.9.
- 3) JNC（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，JNC TN1400 99-022，1999.11.
- 4) IAEA: Disposal of Radioactive Waste, Draft Specific Safety Requirements No.SSR-5 DS354 Draft4, International Atomic Energy Agency., 2009.
- 5) 高山裕介：ベントナイトの力学モデルと放射性廃棄物地層処分における緩衝材としての品質評価，神戸大学，2014.