

一般セッション | V. 核燃料サイクルと材料：505-2 放射性廃棄物処分と環境

2024年9月13日(金) 9:45 ~ 10:35 M会場(講義棟B棟2F B202)

[3M01-03] 数値シミュレーション2

座長:大和田 仁(原環セ)

9:45 ~ 10:00

[3M01]

セメント系材料の状態設定に用いる反応輸送解析モデルの妥当性確認（その2）

*小池 彩華¹、石田 圭輔¹、三原 守弘²、柴田 真仁³、澤田 佳代³ (1. NUMO、2. JAEA、3. 太平洋コンサルタント)

10:00 ~ 10:15

[3M02]

ニューラルネットワークを用いた地層処分の断層シナリオに対する不確実性解析

*木賊 尋也¹、若杉 圭一郎¹ (1. 東海大学)

10:15 ~ 10:30

[3M03]

海水準変動による塩淡水境界の移動が核種移行経路に及ぼす影響評価

*高橋 正太郎¹、若杉 圭一郎¹ (1. 東海大学)

10:30 ~ 10:35

座長持ち時間

セメント系材料の状態設定に用いる反応輸送解析モデルの妥当性確認（その2）

Validation of reactive transport model for evolution of cementitious material (2)

*小池 彩華¹, 石田 圭輔¹, 三原 守弘², 柴田 真仁³, 澤田 佳代³

¹NUMO, ²JAEA, ³太平洋コンサルタント

セメント系材料の状態評価に用いる反応輸送解析モデルの妥当性確認を目的として、セメント系材料試料と接する浸漬溶液の Ca 濃度が一定となる試験体系を構築し、これを対象とした解析結果との比較を行った。

キーワード：地層処分, TRU 廃棄物, セメント系材料, 反応輸送解析モデル

1. 緒言

NUMO は処分坑道に使用されるセメント系材料の状態評価を可能とする反応輸送解析モデル[1]を整備してきた。前回発表では、セメント系材料の溶脱領域における I と Cs⁺ の拡散挙動を観察するため、セメント系材料試料を CsI 溶液に一定期間静置した浸漬試験を活用し、この試験体系を簡略化して行った反応輸送解析と浸漬試験で得られた試料の Ca 溶脱領域を対象に比較を行った。解析結果は試験で観察された Ca 溶脱領域よりも過小に評価される結果となった。これは、試験容器の形状等を簡略化した解析体系を用いたことで、試料の境界における浸漬溶液の Ca 濃度を解析上表現できなかったことが一因と考えられた[2]。本発表では境界条件が明確で解析への反映が容易となる、浸漬溶液の Ca 濃度を一定とした試験体系を構築し、解析結果と試験結果の比較を通じた反応輸送解析モデルの妥当性確認について報告する。

2. 実施内容

試料の境界における浸漬溶液の Ca 濃度を一定 (= 2.0 mg/dm³) に保つため、試料と接触する浸漬溶液（純水）を常時交換する試験体系とした（図 1）。この試験体系に普通ポルトランドセメントのペースト硬化体（W/C=55%）を 14, 28, 63 日間、室温 20℃で浸漬し、浸漬試料の Ca 濃度分布について電子線マイクロアナライザー（EPMA）を用いて分析を行った。化学反応モデルと物質移行モデルから構成される反応輸送解析モデル（MINARET コード[1], 熱力学データ JAEA-TDB v1.2 を使用）を用いて、この試験体系を、試料と接触する浸漬溶液を Ca 濃度一定、反対側の端面を反射境界とする一次元の解析体系として表現した。使用するパラメータ（平衡定数、拡散係数）の不確実性の範囲内で解析を実施した。解析結果の一例を図 2 に示す。本技術開発で整備した反応輸送解析モデルを用いて、セメント系材料の溶脱領域をより確からしく評価することが可能となった。

参考文献

[1] NUMO（原子力発電環境整備機構）（2021）：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－, NUMO-TR-20-03.

[2] 小池彩華, 石田圭輔, 浜本貴文, 三原守弘（2023）：セメント系材料の状態設定に用いる反応輸送解析モデルの妥当性確認, 2023 年秋の大会, 1D08.

*Ayaka Koike¹, Keisuke Ishida¹, Morihiro Mihara², Masahito Shibata³ and Kayo Sawada³.

¹NUMO, ²JAEA, ³Taiheiyō Consultant.

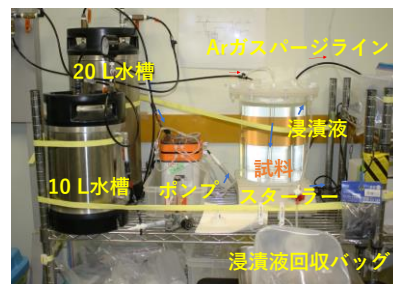


図 1 流通型浸漬試験装置の概略

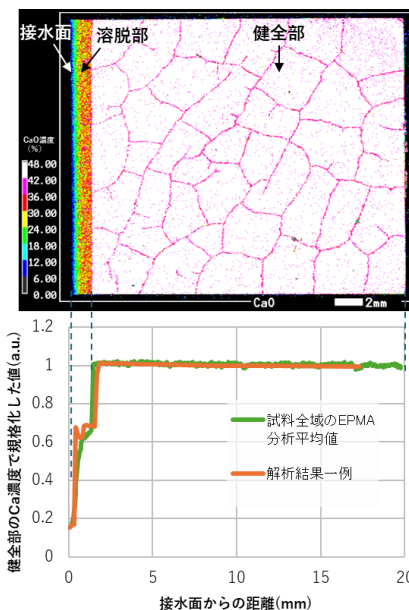


図 2 63 日間浸漬させた試料全域の EPMA 分析結果(上)と解析結果の比較例 (下)
(Ca²⁺の自由水拡散係数 $7.93 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 、ポルトランドサイトの平衡定数 $\log K=22.8$ のケース)

ニューラルネットワークを用いた地層処分の断層シナリオに対する不確実性解析

Uncertainty analysis on fault scenario using neural network in geological disposal.

*木賊 尋也¹, 若杉 圭一郎¹

¹ 東海大学

複数の領域を合わせ持つ断層帯が処分場を横切るシナリオに基づくモデルを作成し、ニューラルネットワークを適用したモンテカルロシミュレーションを通じて、断層の規模や発生時期に関わる不確実性が最大線量に与える影響を評価した。

キーワード: 地層処分, ニューラルネットワーク, 核種移行, 線量評価, 断層帯

1. 緒言

地層処分の安全評価は超長期の時間を対象とするため、遠い将来に予期せぬ断層が発生する可能性がある。そのため、断層が発生した場合の影響を把握しておく必要がある。地層処分の断層シナリオに対する既往の安全評価[1]では、断層を単純な一本の亀裂としてモデル化し、断層の発生時期や断層位置等を保守的に設定した上で、代表的な廃棄体のみを対象に断層の影響を評価する簡略的な手法が用いられている。しかし、本来断層の規模や発生時期には不確実性が存在するとともに、これまでの断層の内部構造に関する知見[2]として、岩盤の破碎の度合いにより構造の異なる複数の領域を合わせ持つ断層帯が形成されることが分かっており、断層帯の領域ごとに廃棄体を受ける影響が異なると考えられる。そのため本研究では断層帯の構造を考慮した核種移行モデルを構築するとともに、断層の発生時期や位置の不確実性を考慮した解析を行うことで、これらの不確実性が最大線量に与える影響を評価することを目的とする。

2. 解析方法

本研究の概念モデルを図1に示す。ここでは2km×2kmの正方形の処分場に40000体の廃棄体が処分されると仮定した。また処分場を、日本の活断層における現地調査の結果[2]を参考に断層帯を構成する断層ガウジ帯、断層角礫帯、割れ目帯に加え、断層の影響を受けない健全な母岩の4つの領域に区分し、各領域の特性をもとに、位置する廃棄体を受けるバリア機能への影響を考慮した核種移行モデルを作成した。なお、断層角礫帯と割れ目帯については、既往の文献[3]を参考に、その幅をマグニチュードに応じて変化させた。また生活圏への移行については、既往の研究[4]より断層角礫帯の透水性が最も高いことから、断層角礫帯を多孔質媒体と仮定したうえで、どの領域に位置する廃棄体も断層角礫帯を通り地表へ移行すると仮定した。その後、このモデルを用いて計算負荷を抑えつつ多種多様な断層の影響を評価するため、ニューラルネットワーク(以下NNとする)による機械学習を用いた。具体的には断層の規模、発生時刻、処分場に直撃した断層長さ(X1、X2、Y2より算出)を、不確実性パラメータとした。この時、断層は必ず処分場を横切るという保守的な設定とした。その後、各不確実性パラメータをランダムに設定した50個の教師データ(内5個はテストデータとして利用)について、「GoldSim」にて核種移行解析を行った。その後、教師データの結果をもとに最大線量を導出する予測モデルをNNにて構築するとともに、テストデータによりその妥当性を確認した。また、この予測モデルをもとにモンテカルロシミュレーション(試行回数1,000)を行い、この結果を用いた感度解析により不確実性パラメータの最大線量への影響を分析した。

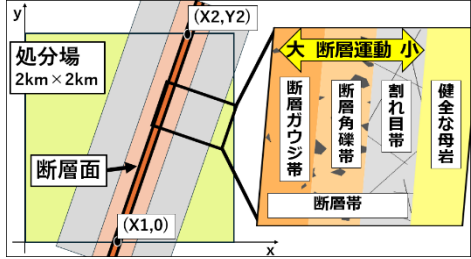


図1 概念モデル

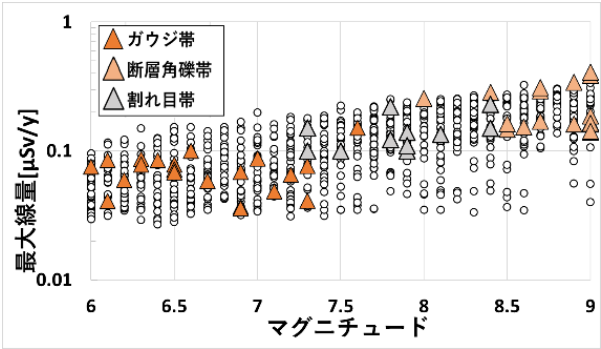


図2 マグニチュードに対する最大線量

3. 結果・結論

モンテカルロシミュレーションによるマグニチュードに対する最大線量の散布図を図2に示す。図2より最大線量は0.02~0.4[μSv/y]の範囲に分布していることが分かる。この値は断層シナリオに対する既往の安全評価[1]における最大線量(27~160[μSv/y])に比べ低い値となっている。これは、既往の安全評価では断層が直撃した廃棄体からの核種の移行は母岩や断層中での移行遅延を考慮せず直接生活圏へと流入するのに対し、ここでは断層を多孔質媒体と仮定して、すべての廃棄体がこの断層中を移行し、移行遅延の影響を受けるためである。また、図2において教師データを用いて各ケースの最大線量に最も寄与する領域(以下「支配領域」)を示した。その結果、支配領域はマグニチュードにより異なり、M7.2以下ではガウジ帯が、M7.2~M8.4では割れ目帯が、M8.4以上では断層角礫帯が支配領域となった。断層角礫帯、および割れ目帯の領域の幅はマグニチュードに依存するため、M7.2以下では断層角礫帯や割れ目帯に位置する廃棄体が少ないことに起因して、ガウジ帯が支配領域となった。一方、M7.2以上では、断層角礫帯や割れ目帯に位置する廃棄体が多くなり、ガウジ帯に位置する廃棄体からの寄与は相対的に小さくなった。特に、M7.2~M8.4では割れ目帯に位置する廃棄体が最も多くなり、最大線量への寄与も大きくなる。断層角礫帯と割れ目帯に位置する廃棄体の移行率は、1本当たりで考えると断層角礫帯の方が高いが、本数の違いを考慮すると領域からの線量の大小関係が逆転するため、割れ目帯に位置する廃棄体からの寄与が大きくなったと考えられる。なおM8.4以上では、断層角礫帯に位置する廃棄体の数が増加し、1本当たりの廃棄体からの寄与も大きいことから断層角礫帯が支配領域となっている。以上のことから、最大線量に対する断層帯の各領域からの寄与はマグニチュードによって異なり、破碎の影響に応じて複数の領域を設定して評価することの必要性が示唆された。

参考文献

[1] JNC(1999),地層処分研究開発第2次とりまとめ,JNC-TN1400 99-023 [2] Lin and Yamashita(2013),Journal of Structural Geology, 57, pp1-15 [3] 金折(2001),応用地質 41, 6, pp323-332 [4] NUMO(2021),包括的技術報告書, NUMO-TR-20-03

*Hiroya Tokusa¹, Keiichiro Wakasugi¹

¹Tokai Univ.

海水準変動による塩淡水境界の移動が核種移行経路に及ぼす影響評価

Assessment of effect on movement of saltwater-freshwater boundary due to sea-level change on nuclide migration pathways

* 高橋 正太朗¹, 若杉 圭一郎¹

¹ 東海大学

沿岸部の地下水環境は、海水系・降水系の二種類の地下水によって形成される塩淡水境界が存在し、さらに海水準変動による時間変化も伴うことによって複雑な特性を持っている。そこで、本研究では、海水準変動を考慮した密度流解析を実施することにより、上記の特性が核種移行経路に及ぼす影響について評価した。

キーワード：地層処分，沿岸部，海水準変動，密度流解析，粒子追跡線解析

1. 緒言

沿岸部は、動水勾配が小さいことによって地下水流れが緩慢であることや、放射性廃棄物の輸送面でも好ましい地域であることから、地層処分に適した環境であると考えられている。しかし、海水系・降水系の二種類の地下水によって形成される塩淡水境界や、塩分密度の差によって生じる密度流、さらにはこれらに海水準変動による地下水流動の時間変化も伴うことにより核種の移行経路が複雑に変化するため、場合によっては核種の移行が促進される可能性がある。そこで、本研究では、海水準変動を考慮した密度流解析を行うことによって、地下水流動や塩淡水境界の変化を把握すると共に、それらが核種移行経路に及ぼす影響を評価することを目的とする。

2. 解析方法

本解析では、一種類の岩種（透水係数： 1.0×10^{-7} [m/s] 間隙率：2[%]）からなる陸域・大陸棚・大陸傾斜で構成された単層の鉛直二次元モデル^[1]（図1）を作成した。陸域及び大陸棚の深度1000 mにそれぞれ処分場が存在するケースを想定し、Dtransu-2D・ELを利用して海水準変動を考慮した密度流解析を行った。海水準変動の周期は、海退7万年、海進2万年とした。また、核種移行経路の評価のため、処分場を発生源として1.4万年おきに粒子を移行させる粒子追跡線解析も行った。粒子追跡線解析においては、海水準変動の影響評価について、粒子が発生する各時間断面での塩淡水境界の位置からの評価と連続的な塩淡水境界の移動を考慮した評価とでは移行経路の変化に違いが生じると考えられる。このため、実際の連続的な塩淡水境界の時間変化が移行中の粒子に及ぼす影響を考慮し、地表面に粒子発生時での固定境界を与えた固定モデルに加え、海水位変化に応じた時間変動境界を与えることで連続的な塩淡水境界の移動を再現した移動モデルの二つの解析を行った。さらに、固定モデルを基準とした移動モデルとの結果の相対比をもって、双方の評価の保守性について検討した。

3. 結果・考察

図3に1.4万年おきに粒子を発生させたそれぞれの時間での固定モデルと移動モデルで得られた移行時間・距離の相対比を示した。陸域の処分場では、両モデル共に粒子が図1で示すような地表へ斜め向きに移行する同じ経路を辿ったため、相対比が1.0倍と差がほぼ無かった。対して、大陸棚に処分場を想定したケースでは、発生点が塩水域中である時（約2.8万年時まで）は図2に示すように、移動モデルにおいて海水準変動の海退により塩淡水境界が処分場に接近するため、発生した粒子が塩淡水境界に沿って移行し、固定モデルよりも移行時間・移行距離が短くなった（図3参照）。しかし、4.2万年以降の発生点が淡水域になる陸化後では、5.6万年で陸化前とは差は小さいものの相対比が1.1倍と、固定モデルが保守的になるような変化が見られた。以上から、本モデルの条件においては、海底下の大陸棚での海退時では、移動モデルに対して固定モデルが非保守的となるような変化が見られたが、大陸棚の陸化後は上記の時とは比べて差は小さいものの両者の保守性が逆転するような変化になることを把握した。今後は、これらの違いが核種移行解析に与える影響を評価していく予定である。

参考文献

[1] 産業技術総合研究所他：“平成28年度地層処分技術調査等事 沿岸部処分システム高度化開発報告書”（平成29年6月），p303-306

*Shotaro Takahashi¹, Keiichiro Wakasugi¹

¹Tokai Univ.

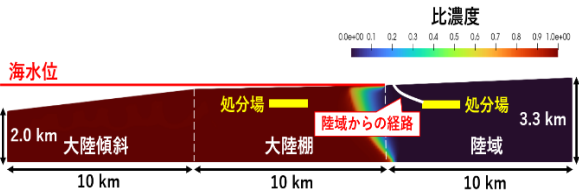


図1，沿岸部モデルと陸域の処分場からの経路

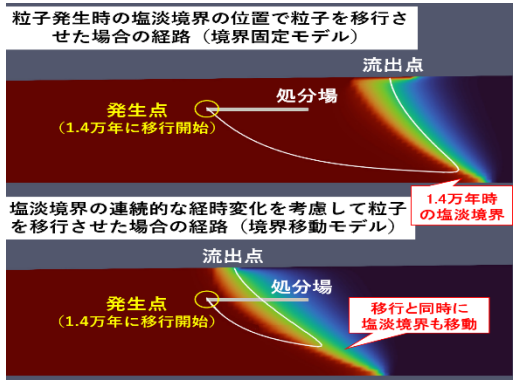


図2，1.4 万年に発生した粒子の核種移行経路の比較（上：固定モデル 下：移動モデル）

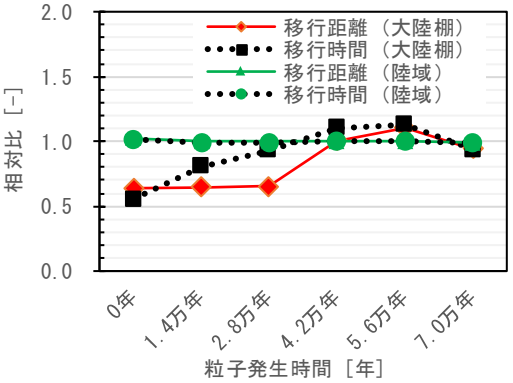


図3，大陸棚及び陸域の処分場を対象とした核種の移行距離・時間（固定・移動モデルの相対比）