

地層処分の断層シナリオを対象とした ニューラルネットワークによる核種移行解析手法の構築

木賊 尋也^{*1} 若杉圭一郎^{*2}

Development of Radionuclide Migration Analysis in Fault Scenarios for Geological Disposal by Neural Network Approach

Hiroya TOKUSA^{*1} and Keiichiro WAKASUGI^{*2}

(Received on Mar. 31, 2025 and accepted on Sep. 16, 2025)

Abstract

In this study, a novel evaluation approach utilizing a neural network was developed to assess the impact of major uncertainty factors in fault scenarios on the maximum annual total dose in geological disposal. The study clarified how variations in fault magnitude, occurrence timing, and fault location affect the results of safety assessment. A more realistic radionuclide transport model was constructed by considering the distinct characteristics of multiple sub-regions within a fault zone, namely the gouge zone, damage zone, and fracture zone. Based on training data obtained from numerical simulations using this model, a machine learning was conducted to obtain prediction models to efficiently estimate the maximum annual total dose. Using this predictive model, an uncertainty analysis was conducted for 1,000 cases involving various combinations of uncertainty factors such as fault magnitude, occurrence timing, and fault location. The results demonstrated that, in all cases, the predicted maximum annual total dose was no more than 12.5 $\mu\text{Sv/yr}$ and remained below the reference levels for unlikely events recommended by the International Commission on Radiological Protection (ICRP). Furthermore, an analysis of the contributions from each fault zone region to the maximum annual total dose revealed that the degree of influence varies depending on the fault's scale and location. These findings indicate that accounting for the number of waste packages located in each fault zone region is essential for an appropriate evaluation of the maximum annual total dose.

Keywords: Geological disposal, Neural networks, Machine learning, Fault scenario, Nuclide migration analysis

1. 緒言

地層処分の実施においては、文献調査、概要調査、精密調査による段階的な地下環境の調査を通じて、長期的に安定な地層が存在するサイトが選定される。これら一連の調査によって断層運動が観測された地域は、地層処分システムに重大な影響を及ぼす可能性があるため、候補地から除外される。このような選定プロセスにより、断層運動が地層処分システムに影響を及ぼす可能性は低いと考えられている。

しかしながら、地層処分は数十年以上の超長期の時間スケールを対象とするため、不可避な不確実性を伴う。大坪ら¹⁾は、このような長期的評価においては、地質そのものが本質的に不確実性を有するため、とりわけ数千年から数百万年という時間スケールにおいては、現在確認されていない断層の形成や既存断層の再活動が生じる可能性を完全に排除することは困難であるとしている。このような断層活動に関する不確実性を踏まえると、地層処分の安全評価においては、調査段階における断層の回避措置に加え、地質の本質的な不確実性に基づき、将来新たに発生しうる断層

活動の影響をあらかじめ評価し、その影響が処分場の安全機能や閉じ込め性能に与える影響を適切に評価（以下、断層影響評価）しておくことが不可欠である。また、国際的にも、発生の可能性が極めて小さい天然現象に起因した稀頻度シナリオについてのめやす線量が設けられており²⁾、新断層発生の不確実性を考慮してもこれらのめやす線量を満たすことを確認することも必要である。このため、これまでに断層影響評価に関する複数の研究が行われており、その例として、第2次取りまとめ（以下、H12）³⁾ および NUMO 包括的技術報告書（以下、NUMO 報告書）⁴⁾ における評価が挙げられる。

H12 の評価では、2,000 m×2,000 m の処分場に断層が対角線上に直撃するシナリオを想定し、これにより断層運動が処分場に与える影響を概略的に評価している。

一方、近年の断層の内部構造に関する研究から、断層帯は破碎の度合いに応じて異なる物理・水理特性を有する複数の領域から構成されることが明らかとなっている⁵⁾。そのため断層内に位置する廃棄体は、その位置する領域の特性によって異なる影響を受ける可能性がある。しかしながら、H12 では断層運動により岩盤がずれた境界面（以下、断層面）に位置する廃棄体のみを評価対象としており、断層帯の他

^{*1} 工学研究科応用理化学専攻修士課程

^{*2} 工学研究科応用理化学専攻教授

領域に位置する廃棄体の影響は考慮されていない。さらに、断層の規模（本研究では地震の規模を示すマグニチュードに基づき評価）、断層発生時刻および発生位置といった断層発生に伴う不確実性（以下、これらの因子を「不確実性因子」と呼ぶ）が結果に与える影響を包括的に把握するためには、各不確実性因子の組み合わせを考慮した解析が必要となる。しかし、これらの因子の組み合わせは膨大であり、個別に数値解析を行うには大きな計算負荷を伴う。このような背景から H12 の評価では、断層発生時刻については 1,000 年、1 万年、10 万年の 3 パターンが想定されているものの、断層の発生位置は対角線上の 1 パターンに限定され、断層の規模については考慮されていない。このため、不確実性に関する評価は限定的なものにとどまっている。

一方 NUMO 報告書では、断層帯を構成する複数の領域（破碎の度合いに基づく区分）が考慮されている点で H12 よりも進展が見られるが、不確実性因子に関する体系的かつ定量的な検討は依然として限定的である。

以上のことから、本研究では、断層帯を構成する各領域の特性を反映した核種移行モデルを構築するとともに、各領域に位置する廃棄体の本数を考慮することで、断層帯内の位置に応じた廃棄体の年間あたりの線量率（以下、年間線量という）への寄与を詳細に評価する。また、断層の規模、発生時刻、発生位置といった不確実性因子が最大線量に与える影響を分析することを目的とする。なお、これらの不確実性因子に応じて、断層内に存在する廃棄体本数や発生した断層の位置に応じて断層までの核種の移行距離が変化するため、既往の評価のように廃棄体 1 体あたりの評価結果に影響を受ける廃棄体数を乗じるというアプローチでは正確な評価ができない。すなわち、処分場に定置される 4 万本の廃棄体それぞれについて個別に評価を行うことが必要となる。このような大規模かつ多様なシナリオに基づく評価を人力で実施することは、膨大な作業時間や労力を要する。そこで、本研究ではニューラルネットワークを用いた機械学習を導入することで計算コストの効率化を図り、多種多様な断層の影響を考慮した評価を可能とするための手法についても検討する。

2. 断層帯の特徴および廃棄体への影響

既往の評価事例⁴⁾を参考に設定した本研究における断層帯の概念図を Fig.1 に、各領域に位置する廃棄体を受けるバリア機能への影響をまとめたものを Table 1 に示す。

断層面の直近には断層ガウジ帯（以下、ガウジ帯）が形成される。ガウジ帯は断層面に隣接する領域であり、特に強い破碎および粉碎を受けている。また、断層運動に伴う摩擦熱や深部流体の影響による熱水変質により、粘土状の物質に変化した粘土鉱物で構成されるとされている⁹⁾。この領域に位置する廃棄体への影響としては、強い断層運動の影響を保守的に見積もり、ガラス固化体が瞬時溶解することを仮定する。また、断層運動によって緩衝材が破壊されることで、緩衝材中の収着・拡散機能が喪失することを想定する。

ガウジ帯の外側には断層破碎帯（以下、破碎帯）が広がる。破碎帯も岩石が破碎された領域であるが、構成される岩石片はガウジ帯に比べて大きく、比較的粗い破碎物から

構成される⁹⁾。この領域については、断層による緩衝材の安全機能の喪失に加え、地下水の増加に伴う影響を考慮し、ガラス固化体の溶解速度が増加すると仮定する。これは、地下水の流れが速い環境では、溶解したガラス成分や核種が速やかに移行し、溶解面が常に新しい地下水と接触することで、溶解が促進されるためである。なお、溶解速度の具体的な値は NUMO 報告書を参考に設定している。さらに破碎帯の外側には、プロセスゾーン（以下、割れ目帯）が存在する。割れ目帯は、固結性を保ちながらも割れ目の密度が高く断層活動の影響を受ける領域であるが、人工バリアには直接的な影響を及ぼさないと考えられる。したがってこの領域では、天然バリアの変化、すなわち割れ目の密度の増加による地下水流動の促進を考慮し、透水係数の増加を仮定する。なお、NUMO 報告書においても割れ目帯は考慮されているが、割れ目帯に位置する廃棄体から放出された核種は瞬時に断層面まで流入することが仮定されており、母岩中の移行は保守的に無視されている。一方、本研究では割れ目帯に位置する廃棄体から破碎帯までの母岩中の移行を考慮した。この際、割れ目帯内に存在する廃棄体の位置によって破碎帯までの距離が異なる点に着目し、これら移行距離の違いを考慮した現実的な設定を行った。

NUMO 報告書には、断層帯の各領域における透水係数について、日本全国の地質データに基づく平均値が示されている。これによると、粘土質のガウジ帯は最も透水係数が小さく、最も透水係数が大きいのは破碎帯であることが示されている。このため本研究では、ガウジ帯、破碎帯および割れ目帯に位置する廃棄体からの核種は破碎帯を通り帯水層まで移行すると仮定した。このため、ガウジ帯および破碎帯に位置する廃棄体については、人工バリアを移行した核種が、直接断層（破碎帯）を通して地表へ移行すると仮定している。なお、断層運動の影響を受けない領域として健全な母岩を設定し、この領域に位置する廃棄体については、断層の影響を受けないものとした。

なお、その他の数値設定に関しては H12 を参考に設定した。

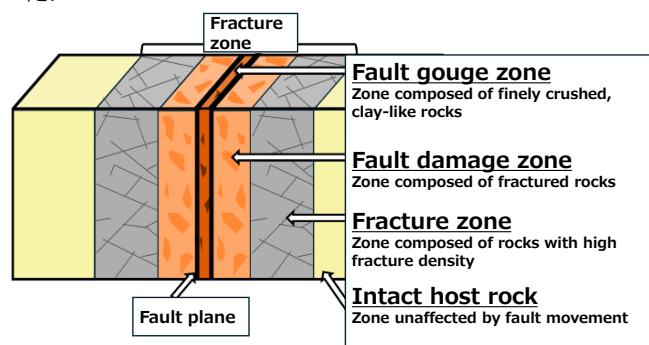


Fig.1 Conceptual model of fault zones.

Table 1 Impact of fault activity on the safety functions in each barrier.

	Fault gouge zone	Fault damage zone	Fracture zone	Impact host rock
Vitrified waste	Instant dissolution	Decrease of dissolution rate(lifetime: 360 years, dissolution rate: 67.2 g/m ² /y)	No effect (dissolution rate: 0.365 g/m ² /y)	No effect (dissolution rate: 0.365 g/m ² /y)
Buffer material	Lost of safety functions (sorption and diffusion)	Lost of safety functions (sorption and diffusion)	No effect (Same value as in the H12)	No effect (Same value as in the H12)
Natural barrier	No natural barrier effect	No natural barrier effect	Permeability increases by two orders of magnitude (Logarithmic mean of the transmissivity: -7.99)	No effect (Logarithmic mean of the transmissivity: -9.99)

3. 断層影響評価モデルの設定

本研究では、断層影響評価モデルの設定において、H12 のレファレンスケースで採用されている評価体系や各種設定を適用した。具体的には、断層発生前の評価体系については、モデル・データともに H12 の設定を採用し、断層発生後については、各領域で想定される安全機能の喪失および劣化に応じて、H12 のモデルのパラメータを適宜変更して評価を行った (Table1)。

また、処分場に関しては以下のような設定を行った。

- H12 と同様に 2,000 m×2,000 m の面積の処分場に 4 万体の廃棄体が処分される。
- 断層帯は必ず処分場を直撃し、処分場を貫通すると仮定する。
- 廃棄体は前章で定義した 4 つの領域 (ガウジ帯、破碎帯、割れ目帯、健全な母岩) のいずれかに位置する。

さらに廃棄体から生活圏までの核種移行経路に関して、本研究では、処分前から既に存在していた断層を「既存断層」、処分後新たに発生した断層を「新生断層」と定義した上で、以下を仮定した。

- 処分後 1000 年が経過するとオーバーパック (以下、OP) が寿命により損傷し、核種の溶出が始まる。
- 新生断層発生前にガラス固化体から溶出し、人工バリア外側まで達した核種は、既存断層を通過して帯水層まで移行し、そこから生活圏へと移行する。
- 新生断層発生後は、ガラス固化体から溶出した核種および緩衝材に存在していた核種は、新生断層を通過して生活圏へ移行する。
- 新生断層中の核種移行モデルは、断層破碎帯の地質学的特徴、すなわち破碎物の隙間を通じた地下水や物質の移行を考慮し、破碎帯を多孔質媒体としてモデル化する。

4. ニューラルネットワークを用いた評価手法

ニューラルネットワーク (以下、NN) とは人間の脳の神経回路を模倣して設計された機械学習モデルである。NN は、与えられたデータからパターンを学習し、未知の値を予測することが可能であり、現在では画像認識や音声認識、自然言語処理などさまざまな分野で広く活用されている。

本研究では、結果に影響を与える説明変数と、それによって得られる目的変数のペア (これを教師データと呼ぶ) を用いて予測モデルを構築する「教師あり学習」を採用した。このとき、具体的には中間層 (学習を行う層) とそのニューロン (演算単位) の数を設定し、教師データの結果とサンプリングによって得られたモデルの予測値を比較する。この誤差が最小となるように中間層やニューロン数を調整しながら学習を繰り返すことで、精度の高い予測が可能となる。この後、構築された予測モデルに対して、説明変数をサンプリングにより設定し、未知の目的変数の予測を行う。ここでは、最終的に断層帯の各領域での年間線量を合計して算出した総線量の最大値 (以下、最大総線量) を目的変数として予測する。本研究の解析手順を Fig.2 に示す。

当初は、Fig.2 に示す解析手順を構築するにあたり、各領域の年間線量を個別に予測し、それらを合計することで最大総線量を算出するというシンプルなアプローチを試行した。しかし、どのような説明変数を用いても、精度の良い予測結果を得ることができなかった。これは、目的変数 (最大総線量) を今回対象とした説明変数 (不確実性因子) のみから直接予測することに限界があったためと考えられる。そこで、Fig.2 に示すように、最大総線量を構成する要因を「各領域に位置する廃棄体数」と「最大総線量時刻における各領域の廃棄体 1 体あたりの年間線量」に分け、それぞれ個別に NN を適用した後、得られた結果から最大総線量を算出する

アプローチを採用した。具体的には、まず説明変数から総線量が最大となる時刻を NN で予測し、その結果を説明変数として用いることでガウジ帯、破砕帯、割れ目帯、健全な母岩のそれぞれの領域における廃棄体 1 体あたりの年間線量を求め、この和と各領域に位置する廃棄体数から最大総線量を推定するという階層的アプローチを導入した。このため、NN による推定では、各核種についての年間線量を評価することはせず、領域ごとに最大線量を生じるときの全核種の合計値としての年間線量のみを評価している。

マグニチュードの設定にあたっては、実際の断層活動の調査に基づいて示された経験式である松田式⁷⁾を参考にした。この式は、日本で発生した内陸型地震のデータをもとに、断層全体の長さ（以下、断層長さ） L km とマグニチュード M の関係を表す経験式である（式 (1)）。松田式ではマグニチュードの範囲は $M6.2 \sim M8.0$ とされているが、本研究ではより広範囲な影響評価を目的として、この経験式が $M6.0 \sim M9.0$ においても成立するものと仮定し、当該範囲を解析対象とした。

$$\log L = 0.6M - 2.9 \quad (1)$$

L : 断層長さ km

M : マグニチュード

本研究では、断層発生位置を数値化するために、 $2,000\text{m} \times 2,000\text{m}$ の処分場を座標上に設定した。次に、断層を処分場に対してランダムに直撃させ、断層と処分場の境界との交点の座標を算出し、この座標を説明変数における断層発生位置の値として用いた。なお、前章で述べた通り、必ず処分場を貫通するという条件のもと、説明変数として用いている。

断層発生時刻に関しては、適切なサイト選定が行われた場合、少なくとも処分後 1000 年以内に断層が処分場を直撃する可能性は低いと考えられる。さらに、既往の報告書⁸⁾では、断層運動に伴うせん断力が OP に与える影響を評価する試験が実施されており、その結果、OP がせん断力に対して十分な耐性を有することが確認されている。したがって、仮に OP が機能する処分後 1000 年以内に断層運動が生じたとしても、核種の溶出が始まる可能性は低いと予測される。また、既往の研究では、断層発生時刻の上限として 10 万年を設定しているが、本研究ではより広範囲な時間スケールの影響を評価するため、評価対象期間を処分後 1,000 年から 100 万年までに拡張した。

破砕帯および割れ目帯の面積に関しては、まずマグニチュードに基づいて松田式より断層長さを算出し、次に金折の論文⁹⁾にて示された経験式（式(2)および式(3)）を用いてそれぞれの幅を計算した。その後、断層発生位置に基づき処分場内における断層帯の位置を決定し、最終的に各領域の面積を求めた。

$$T = 0.83 \times 10^{-3} L^{1.15} \quad (2)$$

$$P = 1.6 \times 10^{-2} L \quad (3)$$

T : 破砕帯片幅 m

P : 割れ目帯片幅 m

また、「各領域に位置する廃棄体数」における教師データに関しては、Fig.3 に示すように処分場を 25×25 の計 625 ブロックに分割し、ブロック単位で各領域に位置する廃棄体数を計数した値を使用した。なお、ガウジ帯は他の領域と比較して幅が非常に狭いため、一本の直線（断層面）として再現し、この直線に接する人工バリアの数をガウジ帯に位置する廃棄体数として、廃棄体単位で正確に計数した。

「最大総線量に達する時刻」および「最大総線量時刻における廃棄体 1 体あたりの年間線量」における教師データの目的変数に関しては、2, 3 章で定義した条件に基づき、核種移行解析ソフトにて解析モデルを構築し、これを利用して得られた結果を用いた。なお、ここで解析ソフトは、工学・環境・ビジネスなど様々なシステムに加え、核種移行解析も可能な汎用シミュレーションソフトである GoldSim¹⁰⁾を用いた。また、割れ目帯および健全な母岩に位置する廃棄体に関しては、各ブロックの位置に応じて破砕帯までの移行距離が異なる。このため、これら移行距離の違いに起因する移行遅延効果の影響を適切に考慮するために、ブロックごとに移行距離を算出し、それぞれに対応した解析を実施した。

また、これらの解析結果に基づき得られた健全な母岩に位置する廃棄体からの最大総線量は、ほかの領域に比べて 2～3 オーダー程度低く、その影響は非常に小さいと判断された。したがって、健全な母岩に位置する廃棄体からの年間線量は最大総線量の計算から除外した。なお、健全な母岩に位置する廃棄体からの年間線量が相対的に高くなるケース（マグニチュードが低く、断層が処分場の端部を直撃するケース）においても、他の領域に比べて依然として十分に低い値であることが確認されている。

本研究では、上記の設定条件に基づき、教師データとして 100 ケースを収集した。一般的に、NN を用いた予測においては、教師データの数が多ほど予測精度の向上が期待される。しかし今回、教師データの数を 50 ケースから 100 ケースに増やした場合でも最大総線量の予測誤差の改善はほとんどみられなかった。このため、本研究では教師データは 100 ケースで妥当であると判断した。

また、誤差の算出方法に関しては、収集した 100 ケースの教師データのうち無作為に抽出した 10 ケースをテストデータとして使用し、数値解析による解析値と予測結果を比較することで評価を行った。比較結果を Fig.4 に示す。比較の結果、テストデータにおける誤差は、最大で 15.1 % で、平均で 5.4 % であった。NN を用いた予測では、入力空間の局所的な情報不足などのさまざまな要因により精度の低い予測結果（外れ値）が生じる可能性があることから、平均誤差が約 5 % 程度に収まっていることは、構築した NN モデルが最大総線量の予測に対して十分な精度を有していると判断できる。なお、従来の数値解析手法では、教師データ 1 ケースの作成に約 5 時間を要するのに対し、NN を用いた予測では、約 1 時間で 1,000 ケースの解析が可能となった。以上の

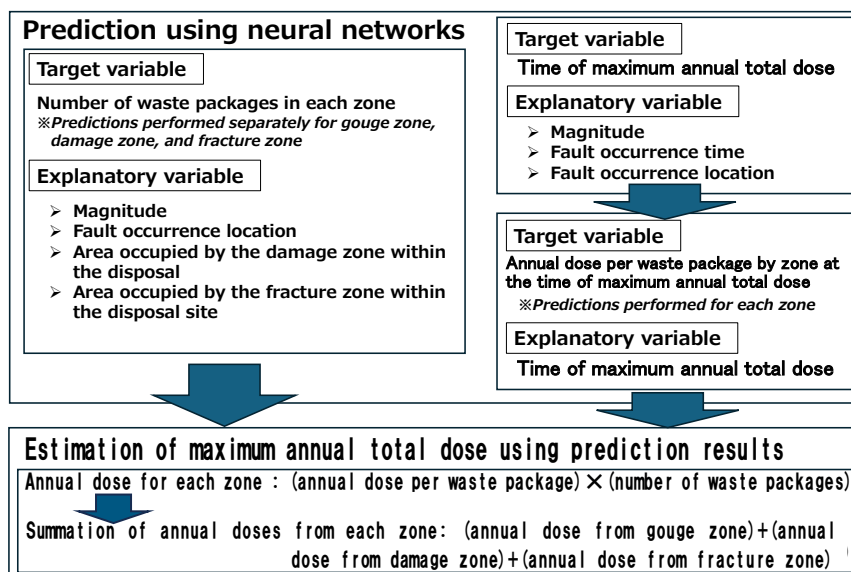


Fig.2 Overall workflow for deriving predictive equation.

ことから、NN の活用により、計算負荷を抑えながら従来手法と同等の解析精度を確保できることを確認した。

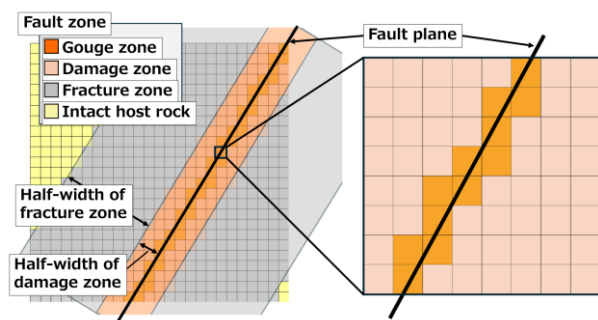


Fig.3 Conceptual diagram of a fault zone occurring in the disposal site.

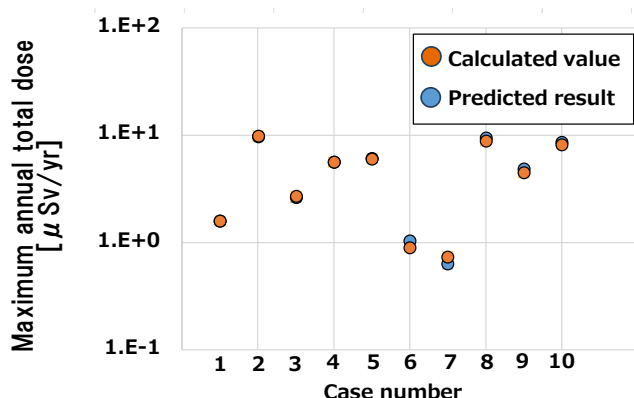


Fig.4 Predicted result of the maximum annual total dose.

5. 断層影響に関する不確実性解析

本研究では、1,000 ケースのサンプリングデータに対して最大総線量の予測を実施した。サンプリング数の設定に関しては、500 ケースおよび1,000 ケースの場合で最大総線量

の標準偏差を比較した結果、両者に大きな差は見られなかった。したがって、サンプリング数として1,000 ケースを採用することが妥当であると判断した。本章では、得られた予測結果をもとに、不確実性因子が最大総線量に与える影響、ならびに断層帯の各領域が最大総線量にどのように寄与しているのかについて考察する。

5.1 最大総線量の上限值に関する考察

ICPR 勧告では、天然現象の影響によるシナリオ（稀頻度シナリオ）において参考とすべき長期間の被ばくの年間線量のめやす値として1~20 mSv/yr の範囲が示されている。本研究における予測結果に基づく最大総線量の上限値は12.5 μSv/yr であり、このめやす値を超えるケースは存在しなかった。

また、この値は既往の断層影響評価における年間線量の最大値、すなわち H12 における1,600 μSv/yr や、NUMO 報告書における100 μSv/yr（深成岩類）と比較しても低い結果となっている。これは、H12 では断層中の移行遅延効果が考慮されておらず、核種が瞬時に生活圏へ移行するという保守的な設定が採用されているのに対し、本研究では、断層を多孔質媒体としてモデル化し、移行過程における核種の収着や拡散等の移行遅延効果を考慮したため年間線量が低くなったと考えられる。また NUMO 報告書では、本研究と同様に断層を多孔質媒体としたモデルが採用されているが、パラメータの設定が本研究と比較して保守的であること（例えば、本研究では動水勾配が0.01 であるのに対し、NUMO 報告書では0.05 など）が影響していると考えられる。なお、NN では核種ごとの年間線量の予測はできないが、各不確実性因子の幅からまんべんなくランダムにサンプリングした教師データの結果では、最大総線量に最も寄与する核種（以下、支配核種）はすべて²²⁹Thであった。このため、NN で評価したケースにおいても支配核種は²²⁹Th であると考えられる。

5.2 重回帰分析

各不確実性因子に対して重回帰分析を行い、最大総線量との相関を評価した。なお、重回帰分析を行うにあたり、データの標準化を行った。また、断層発生位置に関しては、断層の全長のうち処分場を直撃する部分の長さ（以下、「処分場に直撃した断層長さ」）を算出し、このパラメータを説明変数として重回帰分析を行った。各不確実性因子に対する最大総線量の予測結果について、最大総線量に最も影響を与えた領域（以下、支配領域）とともにプロットした結果を Fig.5, 6, 7 に、各パラメータに対する偏回帰係数を Table 2 に示す。Table 2 より、断層発生時刻は最大総線量との相関は極めて小さいことがわかる。一方、マグニチュードや処分場に直撃した断層長さといった、廃棄体数に影響を与えるパラメータは最大総線量に対して正の相関を示すことが明らかとなった。

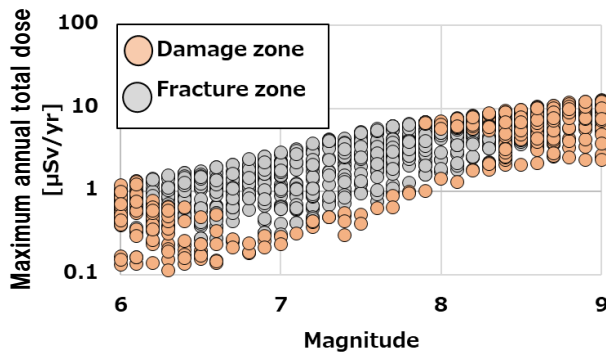


Fig.5 Maximum annual total dose for magnitude.

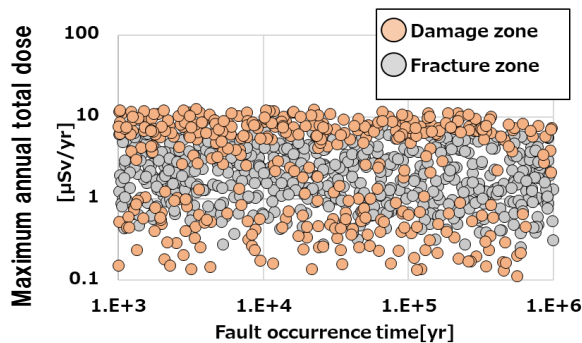


Fig.6 Maximum annual total dose for fault occurrence time.

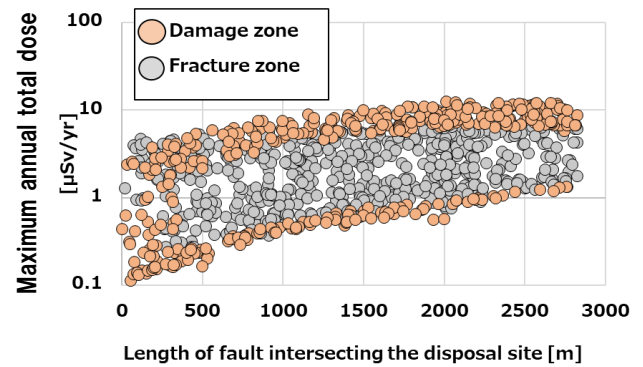


Fig.7 Maximum annual total dose for length of fault intersecting the disposal site.

Table 2 Partial regression coefficients of uncertainty factors for the maximum annual total dose.

	Magnitude	Fault occurrence time	Length of fault intersecting the disposal site
Partial regression coefficient	0.81	-0.057	0.46

5.3 マグニチュードと支配領域の関係

断層が処分場の対角線上に直撃したケースを想定し、代表的なマグニチュードごとの断層帯各領域の面積を例示した図を Fig.8 に示す。

Fig.5 よりマグニチュードの増加に伴い支配領域が破碎帯から割れ目帯、そして再び破碎帯へと変化していることがわかる。M6 付近では断層の規模が小さいため、断層帯が処分場を占める割合が小さい (Fig.8 左図)。この場合、廃棄体への影響が大きく、かつガウジ帯よりも廃棄体数の多い破碎帯が支配領域となるケースが多い。さらにマグニチュードが大きくなるにつれ断層帯が処分場を占める割合が徐々に大きくなり、その結果割れ目帯に位置する廃棄体数が増加することに起因して、割れ目帯が支配領域となる (Fig.8 中央図)。一方、M8 以降では断層帯の規模が処分場と同等あるいは処分場以上のスケールとなり、破碎帯に位置する廃棄体数が増加する (Fig.8 右図)。これにより、割れ目帯が処分場外縁付近に位置するため、この領域内の廃棄体数が減少し、結果として再び支配領域が破碎帯となるケースが増加する。

また、約 M6.7~8.3 の範囲では、最大総線量の変動幅のうち低い側のケースで破碎帯が支配領域となるケースが見られた。これらのケースはいずれも、処分場に直撃した断層長さが 500 m 以下であった。断層が処分場の端部を直撃するような短い長さでは、割れ目帯に位置する廃棄体数の増加が顕著ではなく、このため、M6.7~7.8 の範囲においても一部で支配領域が破碎帯となる傾向が確認された。

一方、Fig.7 から断層長さが 500 m 以下の場合、破碎帯が支配領域になる傾向が確認できるが、これは上述の Fig.5 の結果と整合している。また、同一の断層長さにおける最大総線量の幅は、破碎帯が支配領域となるケースが上限を形成している。これは Fig.5 で示されているように、マグニチュードが 8 以上のケースの多くで破碎帯が支配領域になっているためであり、したがって各断層長さにおける最大総線量の上限はマグニチュードの大きいケース、すなわち破碎帯が支配領域となるケースによって規定されていると考えられる。

以上の結果から、断層の廃棄体への影響は、割れ目帯、破碎帯、ガウジ帯の順で大きくなると仮定したが、最大総線量への影響は必ずしもこの順番で寄与が大きくなるとは限らず、断層の規模や位置に応じて各領域に存在する廃棄体数にも大きく左右されることが示された。

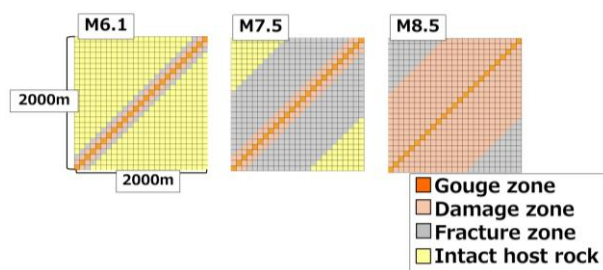


Fig.8 The extent of the fault zone for each magnitude.

6. 結言

本研究では断層帯の各領域の特徴を考慮した核種移行モデルを構築するとともに、NNを用いることにより断層の設定に関する不確実性が最大総線量に与える影響を評価した。本研究により得られた知見は以下のとおりである。

- 従来の断層影響評価では、1本の廃棄体に対する解析結果に断層の影響を受ける廃棄体本数を乗じて総線量を算出していた。本研究ではこれを見直し、断層の影響度に応じて廃棄体を類型化し、実スケール（4万本）を対象とした精緻化した評価モデルを構築した。さらに、断層構造についても、破碎帯・割れ目帯・ガウジ帯といった断層の構造的特徴を反映させたモデルを構築し、より現実的な評価を可能とした。
- このような大規模かつ高解像度なモデルに対して、従来の数値解析手法はモデル構築やパラメータ設定が煩雑であり、さらにこれを用いて不確実性を考慮した多数のケースを解析することは現実的ではない。このため、本研究では、計算負荷を抑えながら高精度な解析を実現できる NN を用いた推定手法の有効性を示し、従来の数値解析手法と同等の結果を得ることが可能であることを確認した。
- NNを用いて 1000 ケースのサンプリングデータに対する最大総線量の予測を行った。その結果、ICRP 勧告における稀頻度シナリオの線量基準値（1 mSv/yr）を超えるケースはなく、最大でも 12.5 μ Sv/yr であった。このような低い値となった要因は、既往の評価で保守的に無視されていた

断層中の移行遅延や断層までの移行距離を適切に考慮したことにある。これにより、既往の評価が過度に保守的であった可能性が示唆された。

- 感度解析・重回帰分析の結果、最大総線量はマグニチュードおよび処分場に直撃した断層長さとの正の相関を示すことが確認された。これは、これらのパラメータの増加が断層帯全体に位置する廃棄体数の増加につながるためである。
- 最大総線量への寄与に関しては、廃棄体への影響が最も高いとされるガウジ帯よりも、破碎帯や割れ目帯に存在する廃棄体の方が大きな影響を示すケースが多かった。これは、ガウジ帯の領域の大きさはマグニチュードによらず一定である一方、破碎帯や割れ目帯の領域はマグニチュードの増加とともに大きくなり、それに伴い廃棄体数が増加することに起因する。このことから、最大総線量に対しては廃棄体への影響度に加えて断層の規模や位置に応じて各領域に存在する廃棄体数を考慮することが必要であることが示された。

今後は、本研究で構築した解析手法および得られた知見を、安全評価における他の不確実性要因にも適用し、核種移行に関わるプロセスを簡略化せずに現実的にモデル化することで、広範な不確実性を考慮した安全評価を実施する予定である。これにより、今後の包括的な安全評価に貢献することが期待される。

参考文献

- 1) 大坪誠 他:地層処分の長期安全を評価する際の断層活動における不確実性, 地質学雑誌 第 120 巻 第 12 号, pp.423-433 (2014).
- 2) ICRP:長寿命放射性固体廃棄物の地層処分における放射線防護,ICRP Publication 122 (2013).
- 3) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄物処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ一分冊3,JNC TN1400 99-023(1999).
- 4) 原子力発電環境整備機構: 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-TR20-03, 原子力発電環境整備機構 (2021).
- 5) Aiming Lin 他: Spatial variations in damage zone width along strike-slip faults: An example from active faults in southwest Japan. Journal of structural Geology, volume57, pages1-15, (2013).
- 6) 大鹿村中央構造線博物館:断層岩の分類,<https://mtl-museum.com/study/faultrocks/classification/>.
- 7) 松田時彦: 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震 2, 第 28 巻, pp.269-283(1975).
- 8) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構: 平成 25 年度地層処分技術調査等事業処分システム評価確証技術開発報告書 (2014).

- 9) 金折裕司: 「断層の影響はどこまで及んでいるか」, 応用地質, 第 41 巻, 第 6 号, pp.323-332(2001).
- 10) GoldSim Technology Group LLC: GoldSim Contaminant Transport Module User's Guide, GoldSim Technology Group LLC(2009).