



隆起・侵食を伴う地層処分システムの核種移行評価

－ 仮想的堆積岩サイトを対象に －

日本原子力研究開発機構 安全研究センター 環境影響評価研究グループ（発表者：島田太郎）

本研究は、原子力規制委員会原子力規制庁「平成25年度地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備」として実施したものである

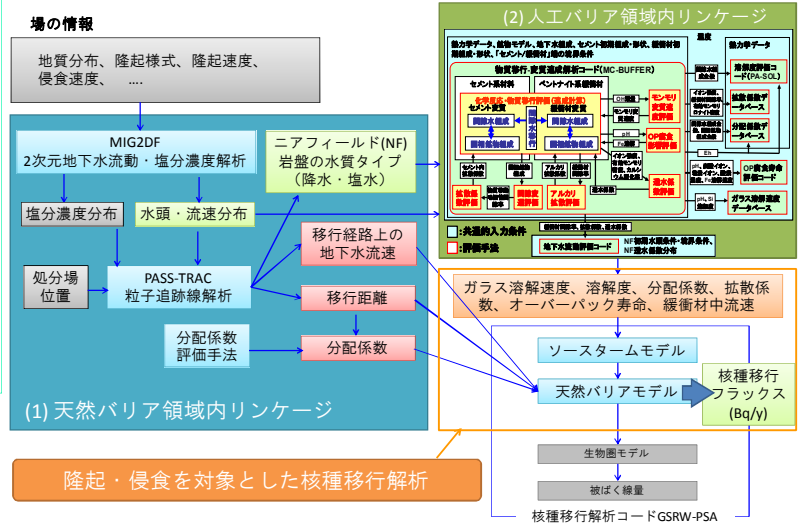
はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムの長期的な安全性評価においては、地震活動、火山活動などの地質・気候関連事象の発生に伴う処分システムの特性変化の影響を考慮する必要がある。

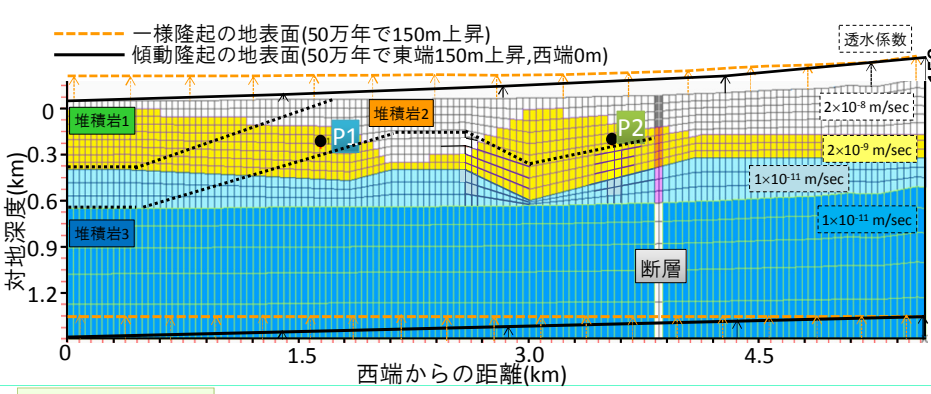
本研究では、地質・気候関連事象のうち隆起・侵食に着目し、隆起・侵食による天然バリア及び人工バリア領域内の水理・化学の特性変化と、それに伴う地下水流速や分配係数などの核種移行パラメータの変化を適切に関連付けた核種移行・線量の解析を可能とする総合的な安全評価手法の開発を行った。さらに、仮想的な堆積岩サイトにおいて隆起・侵食が生じたケースに対し、本手法を適用した解析を行い、その結果から安全規制の観点から重要となる天然バリアの調査要件を検討した。

- ✓ 各バリア領域における時間・空間的な特性変化を評価するための各種モデル・コードの整備
- ✓ 一連の評価に必要な入出力パラメータを特定、それらの関連性（リンケージ）を体系的に整理

総合的な安全評価手法の構築



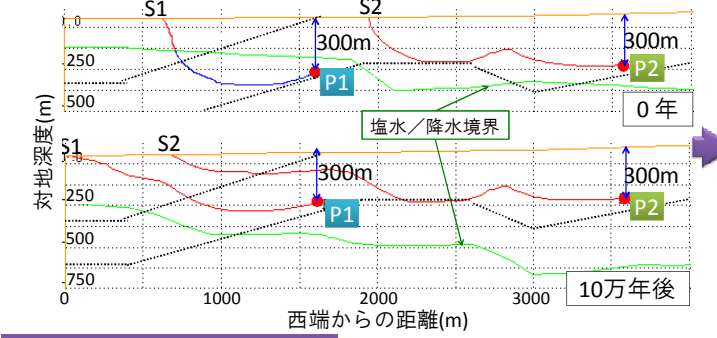
仮想的な堆積岩サイトを対象とした解析条件



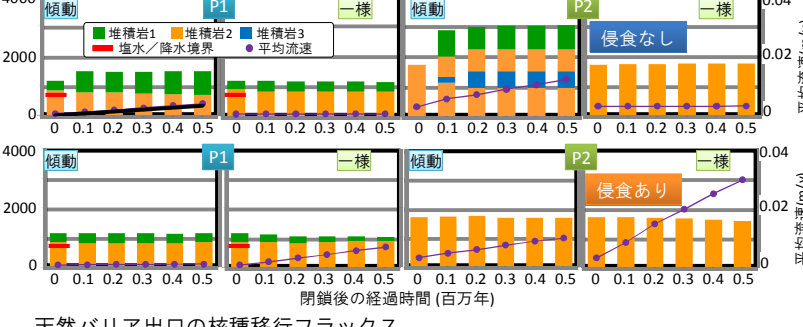
天然バリア領域内リンケージ方法の具体例及び特徴

- ##### 地下水流動解析MIG2DF
- 塩分濃度の支配方程式である移流分散方程式と地下水流動方程式を連成した2次元非定常解析（ガラーキン有限要素法）により水頭・流速・塩分濃度の分布を算出
 - 隆起量が位置により異なる地形・地質構造の変化を、有限要素の形状変化で再現
 - 侵食の進行に伴う水理境界の対地深度の上昇、深度が浅くなることによる透水係数の増加を考慮
- ##### 粒子線追跡解析PASS-TRAC
- 運動した粒子追跡法により、仮想的な処分場位置からの移行経路・移行経路上の流速を算出
 - 移行経路上の岩種（堆積岩1～3）、水質タイプ（降水/塩水）の時間的違いに応じた移行距離（内訳）の算出

解析結果

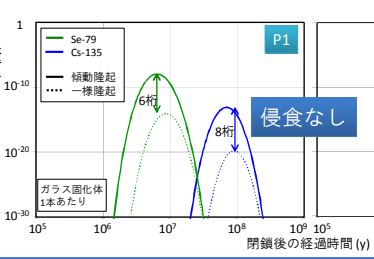


各解析ケースの移行距離、平均流速の変遷（10万年ごと）



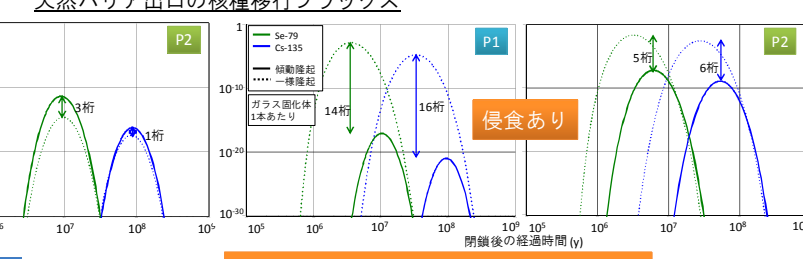
地下水流動・粒子追跡線解析結果

- 侵食がない場合、傾動隆起により動水勾配が上昇して、地下水流速が増加、流出点がより遠くへ
- 侵食がある場合、一様隆起の方が対地深度の減少率が大きく、流速が増加、移行距離は減少
- 塩水降水境界は降雨による涵養で10万年後には深い位置へ移動し、以降、移行経路はすべて降水のみで構成



侵食がない場合の天然バリア核種移行結果

- 傾動隆起の方が一様隆起よりも核種移行フラックスのピーク値が大きい
- P2の方が流速は大きい、移行距離も長く、分配係数の大きい堆積岩3を通るため、フラックスは小さい



侵食がある場合の天然バリア核種移行結果

- 一様隆起でP2の場合にフラックスピーク値が最大
- 移行距離の減少と流速増加の相乗効果で核種の出口への到達が加速される
- 対地深度の違いにより傾動隆起で P2 >> P1

まとめ

隆起・侵食による処分システム内の特性変化から核種移行・線量評価までのリンケージを図った総合的な安全評価手法を整備した。また、本手法による解析から、隆起形態（一様、傾動）と侵食条件の組み合わせ、及び処分場レイアウトの条件により、主要核種であるSe-79とCs-135の移行フラックスは大きく変化することがわかった。よって、サイト選定では、水理・地質構造、地下水の涵養・流出域、隆起形態・褶曲構造、隆起・侵食の速度などの情報が重要となり、それらは適切に処分場レイアウト（深度、水平位置）の設定において考慮される必要がある。今後は、隆起・侵食以外の地質・気候関連事象についても、評価手法の整備を進める。

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムの長期的な安全性評価においては、地震活動、火山活動などの地質気候関連事象の発生に伴う処分システムの特長変化の影響を考慮する必要があります。本研究では、地質・気候関連事象のうち隆起・侵食に着目し、隆起・侵食による天然バリア及び人工バリア領域内の水理・化学の特性変化と、それに伴う地下水流速や分配係数などの核種移行パラメータの変化を適切に関連付けた核種移行・線量の解析を可能とする総合的な安全評価手法の開発を行いました。さらに、仮想的な堆積岩サイトにおいて隆起・侵食が生じたケースに対し、本手法を適用した解析を行い、その結果から安全規制の観点から重要となる天然バリアの調査要件を検討しました。

各バリア領域における時間・空間的な特性変化を評価するモデル・コード整備では、一連の評価に必要な入出力パラメータを特定、それらの関連性（リンケージ）を整理して、図に示したような総合的な安全評価手法を構築しました。天然バリア領域内リンケージ方法の具体例を挙げると、地下水流動解析コード **MIG2DF** では塩分濃度の支配方程式である移流分散方程式と地下水流動方程式を連成した 2 次元非定常解析（ガラキン有限要素法）により水頭・流速・塩分濃度の分布を算出します。このとき隆起量が位置により異なる地形・地質構造の変化を、有限要素の形状変化で再現しました。また、侵食の進行に伴う水理境界の対地深度の上昇、深度が浅くなることによる透水係数の増加を考慮できるようにしました。粒子追跡線解析コード **PASS-TRAC** では地下水流動解析結果に連動した粒子追跡法により、仮想的な処分場位置からの移行経路・移行経路上の流速を算出し、移行経路上の岩種、水質タイプの時間的な違いに対応した移行距離及びその内訳を出力でき、これらの結果に基づいて、核種移行解析コード **GSRW-PSA** における天然バリア上の移行経路の評価パラメータを設定することが可能となりました。

本研究では図に示すように堆積岩で構成される処分場サイトを仮想的に設定し、隆起のタイプ（傾動、一様）と侵食のある・なしで解析ケースを設定しました。隆起量は 50 万年で 150m としました。

その結果、地下水流動解析では、侵食がない場合には、傾動隆起により動水勾配が上昇して、地下水流速が増加し、流出点がより遠くへ移動しました。一方、侵食がある場合には、一様隆起の方が対地深度の減少率が大きく、流速が増加し、移行距離は減少しました。また、塩水降水境界は、降雨による涵養で 10 万年後にはより深い位置へ移動し、その後の移行経路はすべて降水で構成されました。

核種移行解析では、侵食がない場合では、傾動隆起の方が一様隆起よりも核種移行フラックスのピーク値が大きく、また、P2の方が流速は大きいですが、移行距離も長く、分配係数の大きい堆積岩 3 を通るため、フラックスは小さくなりました。侵食がある場合では、一様隆起で P2 の場合にフラックスピーク値が最大となり、移行距離の減少と流速増加の相乗効果で核種の出口への到達が加速されました。また、対地深度の違いにより傾動隆起で P2 よりも P1 の方がピークフラックスの値が大きくなりました。

これらの結果から、サイト選定では、水理・地質構造、地下水の涵養・流出域、隆起形態・褶曲構造、隆起・侵食の速度などの情報が重要となり、それらは適切に処分場レイアウト（深度、水平位置）の設定において考慮される必要があると言えます。今後は、隆起・侵食以外の地質・気候関連事象、特に地震活動、火山活動についても、評価手法の整備を進める予定です。

1. はじめに

- 1F事故で放射性セシウムで汚染された大量の災害廃棄物は、物量低減・有効活用のため可能な限り再利用が求められる。
- 現行の再利用可能な放射性セシウム濃度の基準*1:

災害廃棄物(金属、コンクリート、木質系廃棄物等):100Bq/kg

- ・一般の廃棄物に対しても自主基準として広く使用*2
- ・根拠: 原子炉施設での金属・コンクリートのクリアランスレベル

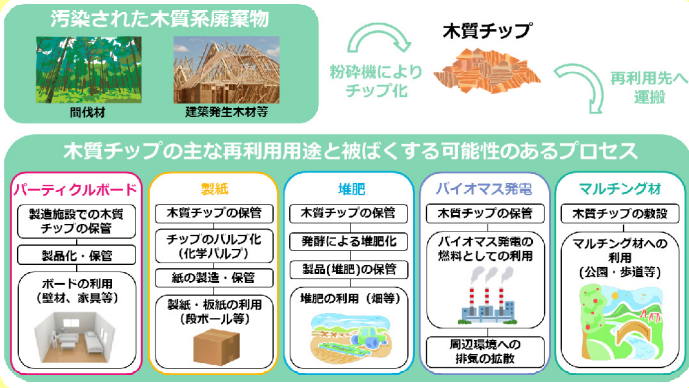
- クリアランスレベルは金属・コンクリートの再利用に対する線量評価により導出されたもの。
- 木質系廃棄物の再利用に対する線量評価は行われていない。
→木質系廃棄物に対する100Bq/kgの妥当性は未確認。

- 本評価では、**木質系廃棄物の再利用に対する線量評価を行い木質系廃棄物に対する100Bq/kgの妥当性、現状の再利用の安全性を確認した。**
→木質系廃棄物は一般にチップ化された後再利用されるため、評価対象は**木質チップ**とする。

2. 評価方法

- ① 木質チップの再利用に係わる作業工程・利用形態を調査し、木質チップ固有の特性・福島周辺における実態を考慮して、評価経路やパラメータを決定。

木質チップの再利用に伴い被ばくする可能性のあるプロセス



- ② 設定した評価経路に対し作業員や公衆の被ばく線量を計算。

(例)パーティクルボードへの再利用に対する評価経路・パラメータ



- ③ 計算結果から基準線量を満たす木質チップ中Cs濃度を導出

- 基準線量(原安委による当面の安全確保の考え方(2011/6/3)*3)
- 処理に伴って周辺住民が受ける線量は1mSv/yを超えないようにする
- 処理を行う作業員が受ける線量は可能な限り1mSv/yを超えないことが望ましい
- 再利用して生産された製品から受ける線量は10μSv/y以下にする

参考文献:

*1 環境省「災害廃棄物の広域処理の推進について(東日本大震災により生じた災害廃棄物の広域処理の推進に係るガイドライン)(H23.8.11)
*2 中外テクノス株式会社「平成24年度放射性物質の影響を受けた廃棄物由来再生製品調査業務報告書(再生製品編)」(H25.3)
*3 原子力安全委員会「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の影響を受けた廃棄物の処理処分等に関する安全確保の当面の考え方について」(H23.6.3)
*4 農林水産省「放射性セシウムを含む肥料・土壌改良資材・培土及び飼料の暫定許容値の設定について」(H24.3.23)

3. 結果及び考察

- 各評価経路に対し、基準線量相当木質チップ中Cs濃度を導出、最小値(=全評価経路で被ばく線量≦基準線量となる濃度)をめやす濃度とし、現行の基準値100Bq/kgと比較。

(例)パーティクルボードへの再利用に対する結果

被ばく経路		基準線量に相当する木質チップ中の全Cs濃度 (Bq/kg)		
再利用処理に伴う被ばく	木質チップ運搬作業員	【外部】	120	
	木質チップ運搬経路周辺居住者(子ども)	【外部】	120	
	木質チップ積み下ろし作業員	【外部】	120	
		【吸入】	120	
	ストックヤード周辺作業員	【外部】	120	
		【吸入】	120	
	【基準線量】 1mSv/y	ストックヤード周辺居住者(子ども)	【外部】	120
		サイロ周辺作業員	【外部】	120
		サイロ周辺居住者(子ども)	【外部】	120
		パーティクルボード倉庫作業員	【外部】	120
パーティクルボード倉庫周辺居住者(子ども)		【外部】	120	
住居建築作業員		【吸入】	120	
再利用された製品の利用に伴う被ばく	住居建築現場周辺居住者	【吸入】	120	
	住居建築現場周辺居住者(子ども)	【吸入】	120	
	住居居住者	【外部】	120	
	住居居住者(子ども)	【外部】	120	
	ベッド使用者	【外部】	120	
	ベッド使用者(子ども)	【外部】	120	
【基準線量】 10μSv/y				

- パーティクルボードへの再利用：
めやす濃度(=最小値:120Bq/kg) > 100Bq/kg(現行の基準)
→パーティクルボードへの再利用に対し、100Bq/kgの妥当性を確認

- 木質チップの各再利用用途に対するめやす濃度(Bq/kg)

再利用用途	各再利用用途に対するめやす濃度(Bq/kg)
パーティクルボード	ベッド使用者(子ども) 【外部】 120
製紙	回収ボイラー補修作業員 【外部】 1900
堆肥	農耕作業員 【外部】 2700
バイオマス発電	燃焼炉補修作業員 【外部】 2200
マルチング材	公園周辺居住者(子ども) 【外部】 260

- 木質チップの全ての再利用用途：
めやす濃度 > 100Bq/kg(現行の基準)
→現在の木質系廃棄物の再利用に対し、100Bq/kgの妥当性を確認

- ✓ 堆肥に対する暫定許容値: 400Bq/kg*4
- ・震災前の土壤中Cs濃度より設定されている。
- ・評価の結果、堆肥に対するめやす濃度2700Bq/kgは、400Bq/kgを7倍程度上回っており、**暫定許容値400Bq/kgの妥当性を確認した。**
(※堆肥材料は木質チップのみ→堆肥中の濃度=木質チップ中の濃度)

4. おわりに

- 汚染された木質系廃棄物の再利用(一般にチップ化後に再利用)に対する安全性を確認するため、木質チップの再利用に係わる線量評価を行った。
- 木質チップの再利用に伴い被ばくが想定される全評価経路に対し

基準線量に相当する放射性セシウムのめやす濃度 > 現行の再利用に対する放射性Cs濃度基準100Bq/kg

- **木質系廃棄物の再利用に対する現行の放射性Cs濃度基準100Bq/kgの妥当性を確認し、現状の再利用の安全性を確かめた。**
- 堆肥についても、農林水産省の暫定値に対して安全性を確認した。

福島第 1 原子力発電所事故により汚染した木質系廃棄物の再利用に係わる線量評価

日本原子力研究開発機構 安全研究センター 環境影響評価研究グループ

福島第 1 原子力発電所事故により大気中に放出された放射性セシウム (Cs-134 および Cs-137) は、福島県外を含む広範囲の周辺環境を汚染しました。そのような環境中にある汚染物は、その量が膨大であるため、物量低減および資源の有効活用のために、再利用が望まれてきました。本研究グループでは、放射性物質により汚染した災害廃棄物等の再利用に関する取扱方針の策定のための技術的な情報を迅速に提示することを目的として、災害廃棄物等の処理・処分や再利用に伴う作業員および公衆の被ばく線量の評価を行ってきました。

本研究では、福島第 1 原子力発電所事故により汚染された木質系廃棄物の再利用に対する線量評価を実施しました。木質系廃棄物 (間伐材や建設発生木材等) は、粉砕機によりチップ化することで木質チップとして様々な用途に再利用されており、現在汚染された木質系廃棄物の再利用は原子炉施設等で発生する金属やコンクリートを対象とした放射性セシウム (Cs-134 及び Cs-137) に対するクリアランスレベル 100Bq/kg に基づき行われています。しかし、汚染された木質系廃棄物の再利用に対する線量評価は現在までに行われておらず、 100Bq/kg という基準値の木質系廃棄物の再利用に対する安全性は確認されていませんでした。

そこで本研究では、木質系廃棄物再利用の現状の安全性を確かめることを目的として、木質チップの主要な再利用用途に対し、各用途における運搬から製品化までの一連の作業工程と公衆の最終的な製品の利用実態を調査しました。さらに、調査結果をもとに設定した各用途における被ばく経路において、再利用に伴って作業員および公衆が満たすべき基準線量に相当する木質チップ中の放射性セシウム濃度を算出しました。その結果、全経路において基準線量相当放射性セシウム濃度は 100Bq/kg を上回り、現行の基準値 100Bq/kg が木質チップの再利用に対する作業員および公衆の安全性を担保していることを確認しました。