2017年春の年会

バックエンド部会セッション

福島第一原発事故による環境汚染の回復に伴う汚染廃棄物の管理と除去土壌の減容・再生利用の取り組み

Challenges for management of radioactively contaminated wastes and volume reduction and reuse/recycling of removed soil derived from the activities for environmental remediation after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident

（4）除去土壌の再生利用の安全評価

(4) Safety Assessment for Reuse of Removed Soil

*澤口 拓磨[1]，高井 静霞[1]，梅澤 克洋[1]，武田 聖司[1]，岡田 尚[1]

[1]国立研究開発法人　日本原子力研究開発機構

1. はじめに

福島県内の除染等の措置に伴い生じた大量の除去土壌等は、中間貯蔵を経た後、福島県外で最終処分することとなっており、環境省は県外最終処分に向けた除去土壌等の減容・再生利用に関する技術開発、減容処理後の土壌等の再生利用の推進等に係る中長期的な方針として技術開発戦略を公表した[1]。県外最終処分の実現に向けては、最終処分量の低減が鍵であり、環境省は、汚染の程度を低減させる適切な処理を行い放射能濃度を用途に応じて適切に制限した再生資材を、安全性の確保を大前提としつつ地元の理解を得て利用する「再生資材化した除去土壌の安全な利用に係る基本的考え方」（環境省、平成 28 年 6 月）[2]を示した。そこで、本評価では、除去土壌の再生利用に係る指針等の策定に資するため、当該再生利用に係る作業者および一般公衆の追加被ばく線量を導出し、当該線量を制限するための放射性セシウム（^{134}Cs+^{137}Cs）濃度の算出や施設の設計条件の検討を行った。本報告は、上記「基本的考え方」に反映した評価結果および追加評価データを示す。

2. 追加被ばく線量の評価方法

2-1. 評価の前提条件

- 再生資材は、無条件に市場に流通させるのではなく、管理主体や責任体制を明確とすることが可能な公共事業等における土木構造物への限定した利用とする。
- 本評価において対象とする公共の土木構造物は、道路・鉄道盛土、防潮堤、海岸防災林、最終処分場の 4 種類とする。
- 特定の場所での利用を想定せず、各土木構造物における典型的な仕様や構造を設定した評価とする。
- 再生資材が利用される構造部材（盛土材、中間覆土材、最終覆土材、土堰堤材）ごとに評価する。
- 再生資材を用いた施工時から供用時の追加被ばく線量の他に、地震等の自然災害による構造物の崩壊による被ばくの影響も評価する。
- 本評価の上で、再生資材の利用の開始時期は福島第一原子力発電所事故から 5 年後とする。事故直後の ^{134}Cs と ^{137}Cs の存在割合は 1:1 と仮定する。よって再生利用開始時の ^{134}Cs と ^{137}Cs の存在割合は 0.209：1 とする。

*Takuma Sawaguchi[1], Shizuka Takai[1], Katsuhiro Umezawa[1], Seiji Takeda[1] and Takashi Okada[1]

[1]Japan Atomic Energy Agency

2-2. 評価の考え方

再生資材の利用に伴い作業者および一般公衆が受ける追加被ばく線量を評価するためには、「評価シナリオ・被ばく経路」、「評価モデル」および「評価パラメータ」が必要であり、それぞれ以下の考え方のもとに設定した。

評価シナリオ・被ばく経路の設定

土木構造物の施工時（施工作業、周辺居住など）およびその完成後の供用時（土木構造物の直接的な利用、周辺居住、補修・改修工事や災害時の対応など）において、線源である再生資材からの直接的な被ばくや線源からの放射性セシウムの環境中への移行に伴い生じる被ばくの可能性のある状態を具体的に記述する（評価シナリオの作成）。さらに、各シナリオにおいて被ばく対象者と被ばく形態（外部被ばく、粉塵吸入や経口摂取による内部被ばく）を具体化し被ばく経路として設定する。

評価モデルの設定

それぞれの評価シナリオの被ばく経路の線量を計算するために必要な評価モデルを設定する。上記の評価シナリオ・被ばく経路の評価モデルは原子炉施設等のクリアランスレベル[3]を算出するための評価モデルと基本的に同じであり、そのモデルの多くは評価対象に即して条件を適宜変更することにより評価可能である。また、クリアランスレベル評価で対応していないシナリオの評価では、既往の評価実績のある評価モデルを参考とする。

評価パラメータの設定

上記の評価モデルによる解析に必要となる評価パラメータは、対象とする土木構造物の設計や施工等に関する情報および既往のクリアランスレベル評価[3, 4]のパラメータ値を考慮し、現実的、代表的な値を設定することを基本とする。ただし、いくつものバリエーションが考えられる場合や不確実性の大きい場合は保守的なパラメータの値を設定する。

これらに基づいて、次の 3 つの追加被ばく線量評価を行った。

①1mSv/y を超えない条件を満足する放射能濃度レベル（1mSv/y 相当濃度）の評価

施工時から供用時において通常想定されるシナリオ・被ばく経路を対象に、再生資材中の放射性セシウムの単位濃度（1Bq/g）による追加被ばく線量を導出する。また、特措法基本方針（平成 23 年 11 月閣議決定）における除去土壌の減容化、運搬、保管等に伴う追加被ばく線量のめやす（1mSv/年を超えないようにすること）を踏まえ、上記線量結果から、作業者および一般公衆に対する全ての被ばく経路の追加被ばく線量が「1mSv/y を超えない」条件を満足する再生資材中の放射性セシウムの濃度（1mSv/y 相当濃度）を算出し、各被ばく経路の放射能濃度の最小値を、土木構造物に再生利用可能な放射能濃度レベルとする。

②供用時の一般公衆に対する線量低減の条件検討のための追加被ばく線量評価

①の評価により算出した再生利用可能な放射能濃度レベルの条件による線量評価から、通常の供用時の一般公衆に対する追加被ばく線量が、放射線による障害防止のための措置を必要としないレベルである 0.01mSv/y（10 μ Sv/y）を満足する設計（遮へい材として働く構造部材の厚さ）条件について検討を行う。また、放射性物質汚染対処特措法に基づく指定廃棄物の基準（8,000Bq/kg 超）等を考慮し、再生資材の放射性セシウム濃度として 8,000Bq/kg を選定した場合の試算も行う。

③災害による土木構造物の変状・崩壊を想定した場合の追加被ばく線量評価

①の評価により算出した再生利用可能な放射能濃度レベルの条件のもと、仮に地震等の災害による土木構造物の変状・崩壊が生じた場合の追加被ばく線量を評価し、災害時および復旧時の作業者および周辺住民が受ける追加被ばく線量が 1mSv/y を超えていないことの確認を行う。

2-3. シナリオ・被ばく経路の設定

再生資材を土木構造物の盛土材等として利用する際、施工作業に関する特別な制限および供用時の周辺住民の利用制限を設けない条件のもとでシナリオ・被ばく経路を設定した。施工時から供用時におけるシナリオを**図 1** のように分類した。また、再生資材を各土木構造物に利用した場合に対し、各シナリオにおける被ばく経路をそれぞれ設定した。一例として、**図 2** に「道路・鉄道盛土」の評価（施工時シナリオと供用時シナリオ）で設定した被ばく経路の概念図を示す。災害時シナリオについては、**表 1** に示す大規模災害と破損事象を想定した被ばく経路を設定した。なお、「最終処分場」については、災害による土堰堤の崩壊・変状が想定されるが、過去の事例調査の結果から、正常に管理・運用されている場合は発生確率が十分に低いと考えられることから、災害時評価から除外した。

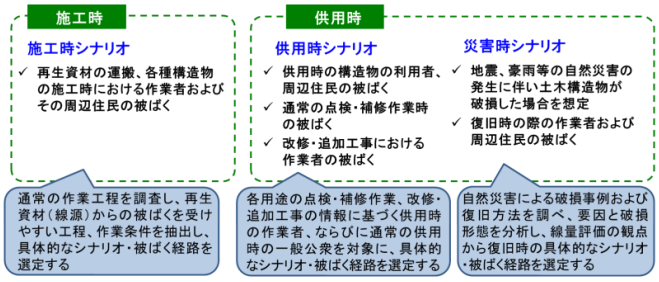


図 1　土木構造物の施工時および供用時のシナリオ分類

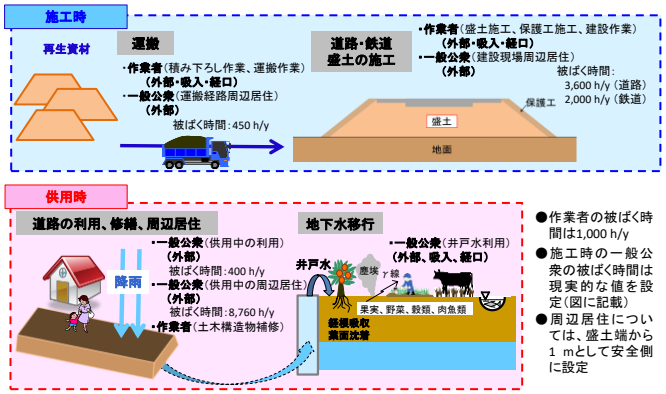


図 2　「道路・鉄道盛土」評価で選定した被ばく経路

表 1　災害時シナリオで想定した大規模災害と破損事象

土木構造物	道路・鉄道盛土	防潮堤	海岸防災林
想定災害	地震・異常降雨	津波	津波・火災
破損事象	Ⅰ. すべり崩壊 盛土内部により断面が円弧を描く円弧すべりにより大規模に崩落するケース Ⅱ. 法面崩壊 盛土法面の表層が流出、崩壊するケース Ⅲ. 分断崩壊 基礎地盤の液状化等により盛土が沈下をはじめ、その沈下量が大きい場合に盛土の形状が保てず全体的に分断しながら崩壊するケース	Ⅰ. 決壊・流出 津波により堤防の一区間が決壊・流出するケース Ⅱ. 法面崩壊 津波による洗掘により法面基部が 破壊され、法面覆工が破壊されるケース	Ⅰ. 津波 津波により防災林が破壊され津波堆積土や盛土の海への流出が発生するケース Ⅱ. 火災 火災によりプルーム（微細な放射性物質が煙のように流れる現象）が発生するケース

＊大規模な破損等の評価に当たり、復旧に要する期間については、土砂やアスファルト等で被覆された盛土については最大3か月、コンクリート等で被覆された盛土及び植栽覆土で被覆された盛土については1年で評価

2-4. 評価モデルの設定

再生資材を線源とする直接線や散乱線による外部被ばく、粉塵吸入や直接経口による内部被ばく、地下水移行に係るモデルについては、基本的に既往のクリアランスレベル評価[3]と同じとした。また、盛土材（再生資材）から樹木への放射性セシウムの移行を想定した海岸防災林に対する評価では、災害廃棄物の再生利用評価[5]や森林火災に係る影響評価[6]で使用されたモデルを参考とし、樹木・伐採木からの直接的な被ばくや、樹木の延焼に伴い発生するプルーム等からの被ばくを評価した。

2-5. 評価パラメータの設定

施工時の作業者に対する、重機による遮へい係数、ダスト濃度、呼吸率、ダストの経口摂取率など、および供用時における井戸水利用の評価に必要な地下水による移行等のパラメータは、特定の条件・場所に限定せず保守的な条件を基づいた設定である既往のクリアランスレベル評価の設定を踏襲した。

外部被ばくの線量換算係数は、直接線が卓越する線源体系では原子炉施設等の遮へい計算で実績のある遮へい計算コード QAD-CGGP2R[7]を使用し、さらにスカイシャインによる効果を考慮する必要がある場合は 3 次元輸送計算コード MCNP5[8]を使用した。その際の具体的な線源体系は、各土木構造物の設計や施工等に関する情報に基づき設定し、施工時から供用時までの評価経路ごとに保守性を確保できる作業者および一般公衆との評価位置を決め、外部被ばくの線量換算係数を計算した。

3. 濃度レベル算出のための追加被ばく線量評価

再生資材を「道路・鉄道盛土」、「防潮堤」、「海岸防災林」、「最終処分場」の盛土材等として利用した場

合に対し、施工時から供用時において通常想定されるシナリオ（施工時シナリオと供用時シナリオ）における作業者および一般公衆の追加被ばく線量をクリアランスレベル評価コードPASCLR2[9]を用いて評価し、その結果から決定経路の1mSv/y相当濃度を算出した（**表2**参照）。得られた用途ごとの決定経路の1mSv/y相当濃度は5,300～13,000Bq/kgとなった。

4. 「1mSv/yを超えない放射能濃度」および「指定廃棄物の基準値」による線量評価

3.の結果を踏まえ、対象とした土木構造物全てに対し追加被ばく線量が1mSv/yを超えない条件を満足する再生資材中の放射性セシウム濃度として5,000Bq/kgを選定した場合において、供用時の一般公衆の追加被ばく線量が0.01mSv/y（10μSv/y）を満足する設計（遮へい材厚さ）条件について検討した。また、万一の場合も速やかに補修等の作業を実施できるよう、確実に電離則又は除染電離則の適用対象外となる（10,000Bq/kgを超えない）濃度であり、指定廃棄物の基準値である8,000Bq/kgを選定した場合においても同様の検討を行った。5,000Bq/kgおよび8,000Bq/kgの再生資材を4種類の土木構造物（道路・鉄道盛土、防潮堤、海岸防災林、最終処分場）の盛土材等として利用した場合における作業者および一般公衆が受ける追加被ばく線量の最大値の結果を**表2**に示す。本結果から、5,000Bq/kgの再生資材をこれら土木構造物に利用する場合、一般公衆の追加被ばく線量を0.01mSv/y以下にするためには30～40cm以上の遮へい材厚さが必要であることが分かった。一方、8,000Bq/kgの再生資材を利用する場合、同線量めやすを満足するための遮へい材厚さは30～50cm以上となるが、最終処分場（中間覆土、土堰堤）以外の用途における作業者の追加被ばく線量は1mSv/yを超える結果となり、当該用途に係る作業者に対しては被ばく管理を行う必要性が示唆された。

表2　1mSv/y相当濃度および5,000・8,000Bq/kgの再生資材を利用した場合において作業者・一般公衆が受ける追加被ばく線量の最大値

土木構造物		遮へい材厚さ（cm）	1mSv/y相当濃度（Bq/kg）	決定経路	追加被ばく線量（mSv/y） 5,000Bq/kgの再生資材を使用した場合 作業者		一般公衆（供用時）		8,000Bq/kgの再生資材を使用した場合 作業者		一般公衆（供用時）	
道路盛土	一般道路	10	6,600	盛土施工作業者・外部	0.75	盛土施工作業者・外部	0.11	道路周辺居住者（子ども）・外部	1.2	盛土施工作業者・外部	0.17	道路周辺居住者（子ども）・外部
		30					0.0097				0.016	
		50					0.0013				0.0021	
	高速道路	10	6,100	盛土施工作業者・外部	0.81	盛土施工作業者・外部	0.11	道路周辺居住者（子ども）・外部	1.3	盛土施工作業者・外部	0.18	道路周辺居住者（子ども）・外部
		30					0.010				0.016	
		50					0.0015				0.0023	
鉄道盛土		10	6,600	盛土施工作業者・外部	0.75	盛土施工作業者・外部	0.11	鉄道周辺居住者（子ども）・外部	1.2	盛土施工作業者・外部	0.17	鉄道周辺居住者（子ども）・外部
		30					0.010				0.017	
		50					0.0023				0.0036	
防潮堤	傾斜堤（高さ8m）	10	6,900	盛土施工作業者・外部	0.73	盛土施工作業者・外部	0.057	防潮堤利用者（子ども）・外部	1.2	盛土施工作業者・外部	0.091	防潮堤利用者（子ども）・外部
		30					0.0034				0.0055	
		50					0.00042	農作物摂取（成人）			0.00067	農作物摂取（成人）
	傾斜堤（高さ15m）	10	6,800	盛土施工作業者・外部	0.73	盛土施工作業者・外部	0.058	防潮堤利用者（子ども）・外部	1.2	盛土施工作業者・外部	0.093	防潮堤利用者（子ども）・外部
		30					0.0036				0.0057	
		50					0.00042	農作物摂取（成人）			0.00067	農作物摂取（成人）
	直立堤（高さ8m）	10	7,500	盛土施工作業者・外部	0.66	盛土施工作業者・外部	0.053	防潮堤利用者（子ども）・外部	1.1	盛土施工作業者・外部	0.084	防潮堤利用者（子ども）・外部
		30					0.0031				0.0049	
		50					0.00038	農作物摂取（成人）			0.00060	農作物摂取（成人）
	直立堤（高さ15m）	10	7,500	盛土施工作業者・外部	0.67	盛土施工作業者・外部	0.054	防潮堤利用者（子ども）・外部	1.1	盛土施工作業者・外部	0.086	防潮堤利用者（子ども）・外部
		30					0.0034				0.0055	
		50					0.00042	農作物摂取（成人）			0.00067	農作物摂取（成人）
海岸防災林		30	5,400	盛土施工作業者・外部	0.92	盛土施工作業者・外部	0.026	防災林周辺居住者（子ども）・外部	1.5	盛土施工作業者・外部	0.041	防災林周辺居住者（子ども）・外部
		40					0.0094				0.015	
		50					0.0031				0.0050	
		60					0.0011				0.0018	
		80					0.0011	農作物摂取（成人）			0.0018	農作物摂取（成人）
		100					0.0011				0.0018	
最終処分場	中間覆土	10	13,000	敷均し・締固め作業者・外部	0.38	敷均し・締固め作業者・外部	0.00043	農作物摂取（成人）	0.61	敷均し・締固め作業者・外部	0.00069	農作物摂取（成人）
		30										
		50										
	最終覆土	10	5,300	保護工補修作業者・外部	0.95	保護工補修作業者・外部	0.052	跡地利用者（子ども）・外部	1.5	保護工補修作業者・外部	0.083	跡地利用者（子ども）・外部
		30					0.0026				0.0042	
		50					0.00041	農作物摂取（成人）			0.00066	農作物摂取（成人）
	土堰堤	10	8,100	敷均し・締固め作業者・外部	0.61	敷均し・締固め作業者・外部	0.029	跡地利用者（子ども）・外部	1.0	敷均し・締固め作業者・外部	0.047	跡地利用者（子ども）・外部
		30					0.0017				0.0028	
		50					0.00037	農作物摂取（成人）			0.00059	農作物摂取（成人）

※作業者（施工時、供用時）、一般公衆（供用時）が受ける追加被ばく線量がそれぞれ1mSv/y、10μSv/yを超えたケースを網掛けした。

5. 災害時シナリオに対する線量評価

4.と同様に、再生資材の放射性セシウム濃度を5,000Bq/kgおよび8,000Bq/kgに選定して「道路・鉄道盛土」、「防潮堤」、「海岸防災林」の盛土材として利用した場合に対し、災害時シナリオにおける作業者および一般公衆が受ける追加被ばく線量を評価した。各用途で追加被ばく線量が最大となった経路の評価結果を**表3**に示す。5,000Bq/kgおよび8,000Bq/kgの再生資材を利用した場合、災害時における用途ごとの最大

追加被ばく線量はそれぞれ 0.30～0.52mSv/y、0.47～0.84mSv/y となり、全ての用途で 1mSv/y を超えない結果となった。

表 3　災害時シナリオの評価結果

土木構造物		追加被ばく線量(mSv/y)							
		5,000Bq/kgの再生資材を使用した場合				8,000Bq/kgの再生資材を使用した場合			
		作業者		一般公衆		作業者		一般公衆	
道路盛土 鉄道盛土		0.40	分断崩壊 復旧作業者・外部	0.25	分断崩壊 回収土周辺居住者(子ども)・外部	0.64	分断崩壊 復旧作業者・外部	0.40	分断崩壊 回収土周辺居住者(子ども)・外部
防潮堤	傾斜堤 (高さ8m)	0.51	法面崩壊 復旧作業者・外部	0.0013	津波 海産物摂取(成人)	0.81	法面崩壊 復旧作業者・外部	0.0020	津波 海産物摂取(成人)
	傾斜堤 (高さ15m)	0.52	法面崩壊 復旧作業者・外部	0.0042	津波 海産物摂取(成人)	0.84	決壊・流出 復旧作業者・外部	0.0067	津波 海産物摂取(成人)
海岸防災林		0.30	津波 復旧作業者・外部	0.0023	津波 海産物摂取(成人)	0.47	津波 復旧作業者・外部	0.0036	津波 海産物摂取(成人)

6. まとめ

再生資材を 4 種類の土木構造物（道路・鉄道盛土、防潮堤、海岸防災林、最終処分場）の盛土材として利用することを想定し、施工時から供用時の作業者および一般公衆に対し 1mSv/y をめやす値とした線量評価を行い、1mSv/y 相当濃度を算出した。その結果、これらの土木構造物全てに対し 1mSv/y を満たす濃度は 5,300～13,000Bq/kg であることを示した。また、5,000Bq/kg の再生資材を利用した場合における追加被ばく線量の最大値から、供用時の一般公衆の追加被ばく線量が 0.01mSv/y（10 μ Sv/y）を満足する施設の設計（遮へい材厚さ）条件を提示した。一方、8,000Bq/kg の再生資材を利用した場合、最終処分場（中間覆土、土堰堤）以外の用途に係る作業者が受ける追加被ばく線量は 1mSv/y を超える結果となり、これら作業者に対しては被ばく管理を行う必要性が示唆された。さらに、各土木構造物に対し、地震等の災害による構造物の変状・崩壊をもたらす可能性を検討し、再生資材の濃度 5,000Bq/kg および 8,000Bq/kg の条件のもと災害・復旧時の作業者および一般公衆の追加被ばく線量を評価した。その結果、対象となった 3 種類の土木構造物（道路・鉄道盛土、防潮堤、海岸防災林）において、作業者および一般公衆の追加被ばく線量は 1mSv/y を超えない結果となった。

以上の評価結果を踏まえ、環境省は「工事そのものの規模、再生資材の利用量、作業員の労務時間管理等により、作業員が 1 年間のうち再生資材に直接接触する作業（重機を用いた作業を除く）に従事する期間」を、例えば 6 ヶ月/年に制限することで、8,000Bq/kg の再生資材を利用した場合の作業者の追加被ばく線量を 1mSv/y 以下にできることを示している[2]。

参考文献

[1] 環境省、中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略、2016.
[2] 環境省、再生資材化した除去土壌の安全な利用に係る基本的考え方、2016.
[3] 原子力安全委員会、原子炉施設及び核燃料使用施設の解体等に伴って発生するもののうち放射性廃棄物として扱う必要のないものの放射能濃度について、2004.
[4] 文部科学省、放射線障害防止法に規定するクリアランスレベルについて、2010.
[5] Y. SAKAMOTO and S. TANAKA; QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised Versions of QAD-CGGP and G33-GP, JAERI-M90-110, 1990.
[6] 澤口拓磨 他、汚染された災害廃棄物等の再利用に向けた取り組み（その 1）－海岸防災林の盛土材への再利用にかかわる線量評価－、日本原子力学会ﾊﾞｯｸｴﾝﾄﾞ部会第 29 回ﾊﾞｯｸｴﾝﾄﾞ夏期ｾﾐﾅｰ資料集、2013.
[7] 独立行政法人原子力安全基盤機構、警戒区域及び計画的避難区域内での大規模火災の影響評価に関する調査報告書、JNES-RE-2011-0004、2012.
[8] X-5 Monte Carlo Team, MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Ver.5, LA-UR-03-1987, 2003.
[9] 武田聖司 他、ウラン及び TRU 核種を含む放射性廃棄物に対するクリアランスレベル評価コードシステム PASCLR 第 2 版の開発、JAEA-Data/Code 2006-003、2006.