

追加被ばく線量評価について

平成28年6月7日

環境省

目 次

- 1 再生利用に係る追加被ばく線量評価に当たっての考え方
- 2 放射能濃度を設定するための被ばく経路設定の考え方
- 3 再生利用の用途先ごとに算出される放射能濃度レベル
- 4 施設設計(覆土等の厚さ)による追加被ばく線量の更なる低減
- 5 災害・復旧時における追加被ばく線量の検討

1. 再生利用に係る追加被ばく線量評価に当たっての考え方

- 一般公衆及び作業者に対する追加被ばく線量が1 mSv/yを超えないことを条件として、再生資材中の放射性セシウム ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) の放射能濃度レベルを算出する。
- 算出した濃度レベルに基づき、供用時の一般公衆に対する追加的な被ばく線量の更なる低減のための遮へい厚等の施設の設計に関する条件の検討を行う。

対象プロセス		減容化・運搬・保管等	施工・供用（補修・改修工事の対応、二次的な土地利用等を含む）
濃度レベルを算出するための目安値	作業者	1 mSv/yを超えないようにする（当面の考え方※ ¹ ）	1 mSv/yを超えないようにする（作業者も一般公衆と同じ【公衆被ばく】扱い）
	一般公衆	1 mSv/yを超えないようにする（特措法※ ² 基本方針）	1 mSv/y を超えないようにする。
再生資材の濃度レベル		—	万一の場合も速やかに補修等の作業を実施できるよう、確実に電離則及び除染電離則の適用対象外となる濃度として、特措法の規制体系における斉一性も考慮して、8,000 Bq/kg以下を原則とする。なお、用途ごとの被ばく評価計算から誘導された濃度（1 mSv/y相当濃度）がこれ以下の場合は、その濃度以下とする。
施設の設計による追加被ばく線量のさらなる低減		—	破損時等を除く供用時における一般公衆の追加的な被ばく線量が、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（0.01 mSv/y※ ¹ ）になるように適切な遮へい等の措置を講じる。

※¹：ICRP勧告において「年に0.01～0.1 mSvの大きさのオーダー」は、「個人に何ら懸念を生じさせないと見なされる」リスクに相当し、かつ、「自然バックグラウンド放射線の変動と比べて小さい線量レベル」にも相当するとされている（ICRP Pub.104）。0.01 mSv/yはこのオーダーの下方に相当し、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に相当する値。

※¹「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」（平成23年6月3日原子力安全委員会）

※²「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」

2. 放射能濃度を設定するための被ばく経路設定の考え方

- ▶ 再生利用先として想定される代表的な用途ごとに被ばく経路を設定し、被ばく評価計算により、1 mSv/y相当の放射性セシウムの放射能濃度レベルを算出する。
- ▶ 以下のような条件の下で被ばく経路を設定し、施工時・供用時を通じて作業員への特別な防護措置や施設利用・周辺居住の制限を設けずに再生利用が可能となるような再生資材の放射能濃度レベルを算出する。
 - (1)用途ごとの作業工程及び施設利用の情報に基づいた評価
(既往のクリアランスレベル評価の際の設定を参照し、現実的なシナリオ・パラメータを設定)
 - (2)不確実性の大きいパラメータについては、安全側に立った値を設定
 - (3)利用開始時の ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の存在比を考慮

施工時

施工時の条件設定

- ✓ 再生資材の運搬、各種構造物の施工時における作業員及びその周辺住民の被ばく

通常の作業工程を調査し、再生資材（線源）からの被ばくを受けやすい工程、作業条件を抽出し、具体的な被ばく経路を選定する

供用時

供用時の条件設定

- ✓ 供用時の構造物の利用者、周辺住民の被ばく
- ✓ 通常の点検・補修作業時、改修・追加工事における作業員の被ばく

各用途の点検・補修作業、改修・追加工事の情報に基づく供用時の作業員、並びに通常の供用時の一般公衆を対象に、具体的な被ばく経路を選定する

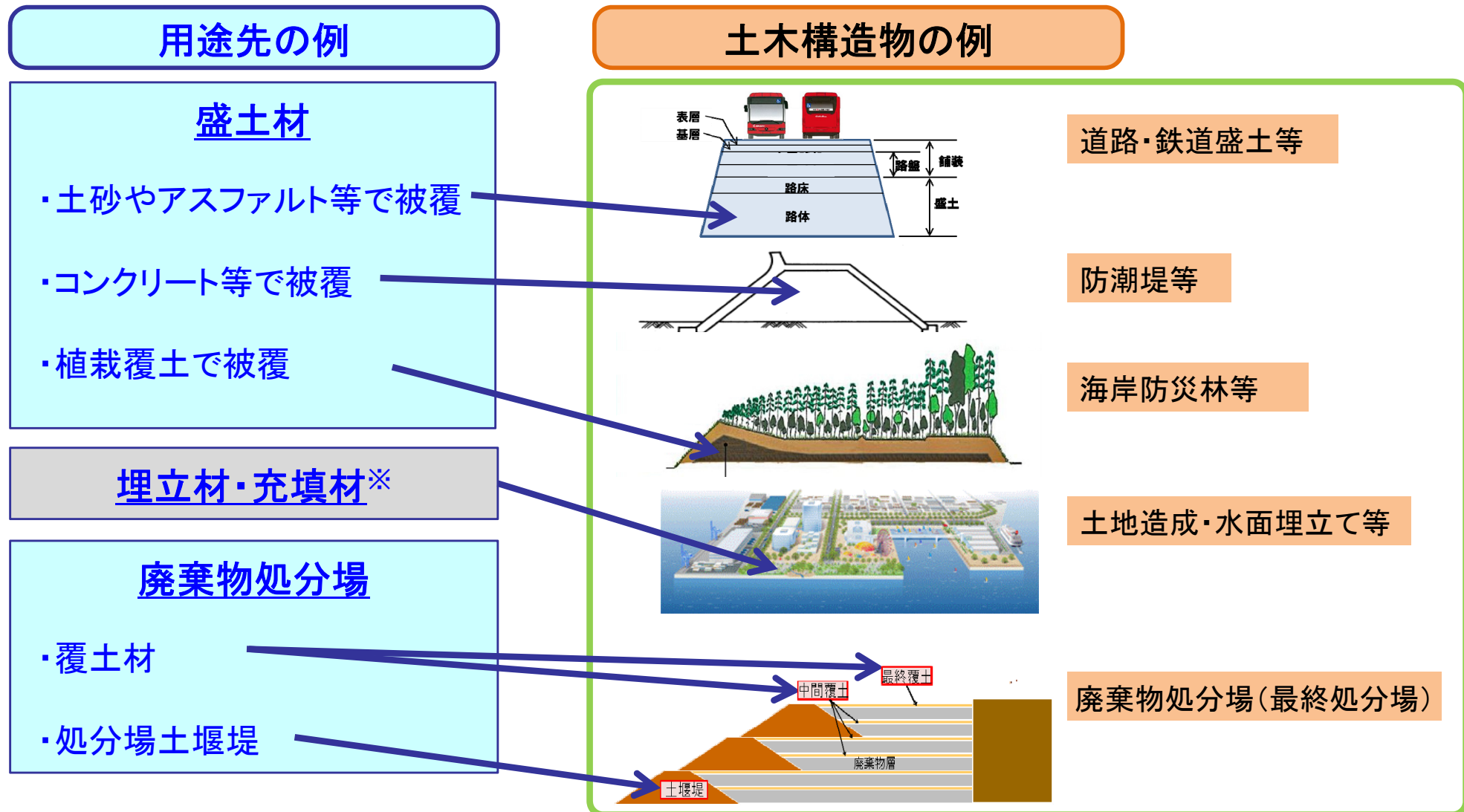
災害・復旧時の条件設定

- ✓ 地震、豪雨等の自然災害の発生に伴い土木構造物が破損した場合を想定
- ✓ 復旧時の際の作業員及び周辺住民の被ばく

自然災害による破損事例及び復旧方法を調査し、要因と破損形態を分析し、線量評価の観点から復旧時の具体的な被ばく経路を選定する

3. 再生利用の用途先ごとに算出される放射能濃度レベル

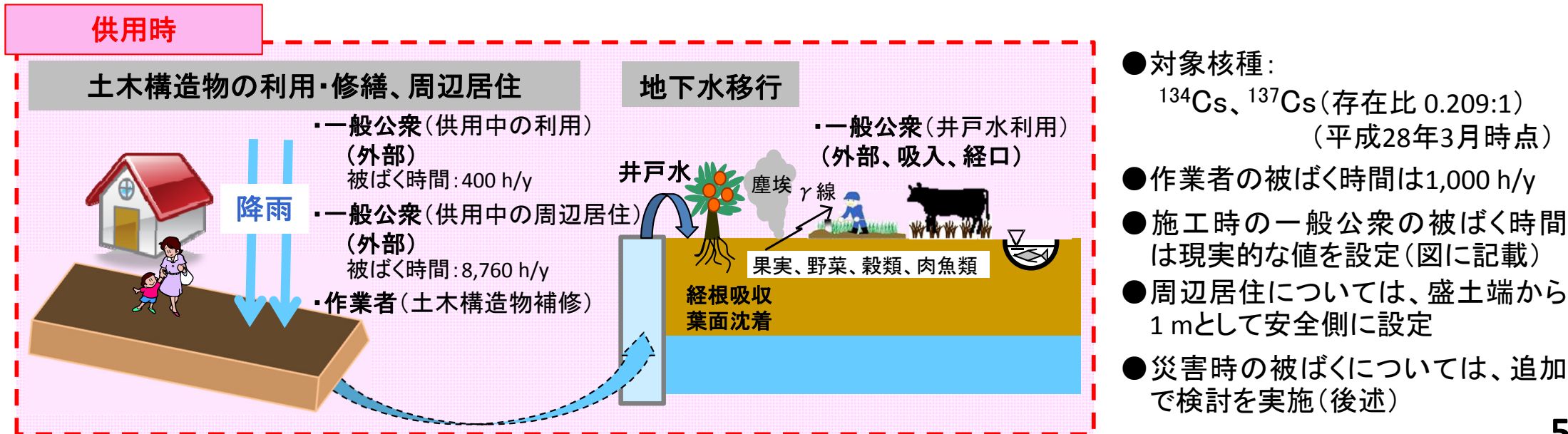
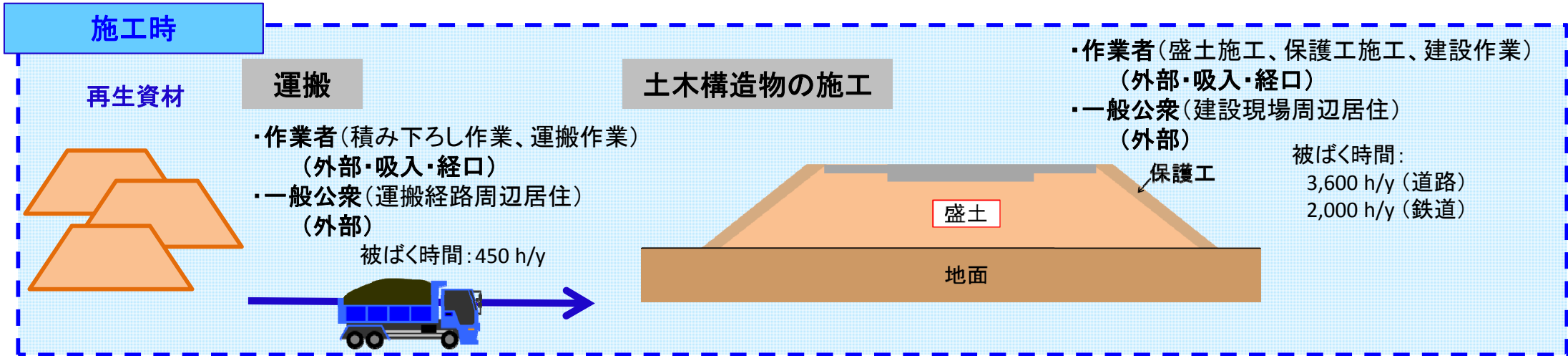
- 以下の用途先の例のうち盛土材及び廃棄物処分場の覆土材・土堰堤を再生資材の放射性セシウムの放射能濃度レベル設定の検討対象とした。なお、用途先はこれらに限定するものではなく、今後の検討で適宜追加される。



※被ばく線量評価結果については今後追加予定

3.1 (1) 土砂やアスファルト等で被覆された盛土における被ばく経路の設定

- 土砂やアスファルト等で被覆された盛土(例:道路、鉄道等)に再生資材を利用する場合を想定し、検討対象となる具体的な行為、対象者、被ばく形態(外部、吸入、経口)を整理し、被ばく経路を設定。



3.1 (2) 土砂やアスファルト等で被覆された盛土における被ばく評価結果（再生利用濃度レベル）

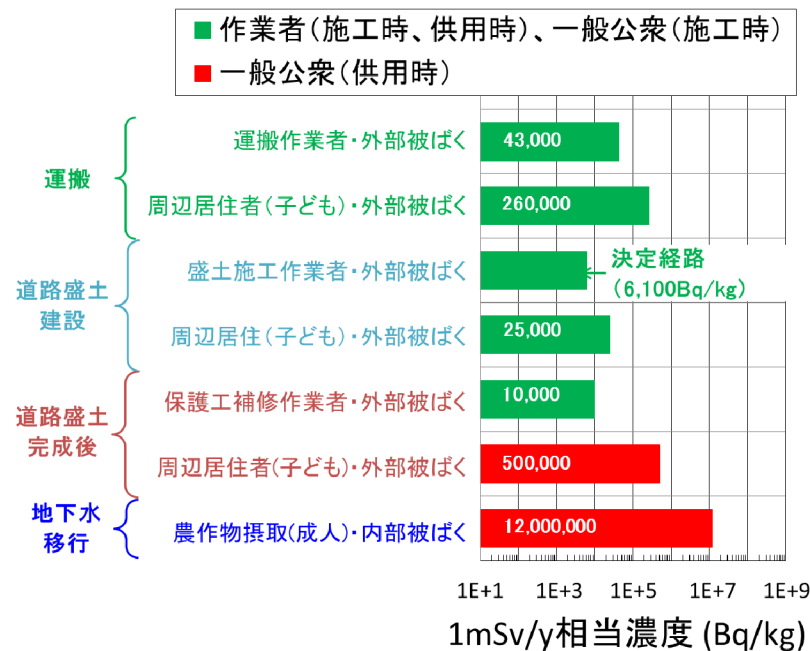
➤ 1 mSv/y(施工時、供用時)を超えない放射性セシウムの放射能濃度レベルを算出。道路盛土及び鉄道盛土を例とした場合の主要な被ばく経路における1 mSv/y相当濃度(決定経路:最も影響が大きい被ばく経路)は以下のとおり。

(1) 道路盛土(施工作業者の外部被ばく):6,100 Bq/kg

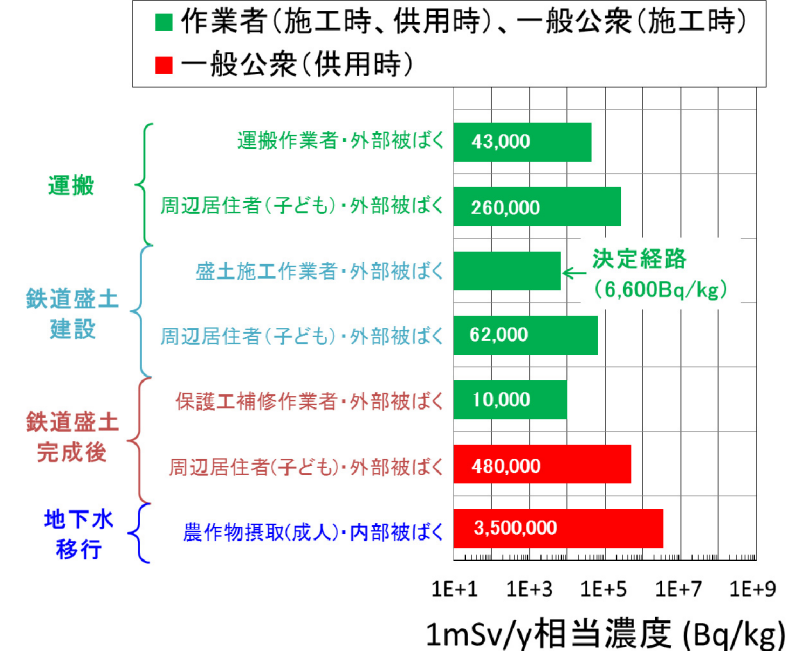
(2) 鉄道盛土(施工作業者の外部被ばく):6,600 Bq/kg

※詳細については、参考資料②-1～3を参照

道路盛土：保護工厚さ 30 cm



鉄道盛土：保護工厚さ 30 cm



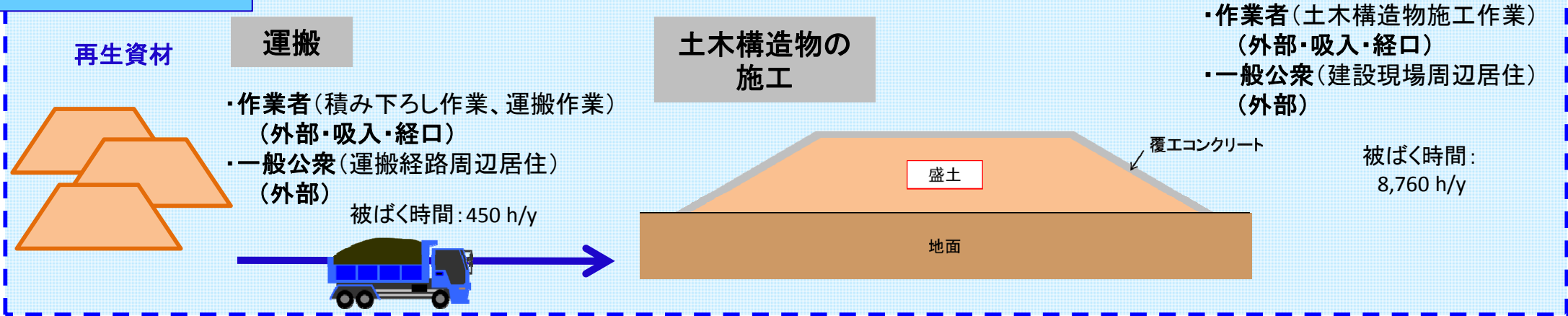
○保護工の厚さを変えて算出しても、最も影響が大きい被ばく経路は盛土施工作業員の外部被ばくであり、放射能濃度は同一の評価結果であった

※被ばく評価に用いた計算コード:クリアランスレベル評価コードPASCLR2、QAD-CGGP2Rコード、MCNP5コード(参考資料①を参照)

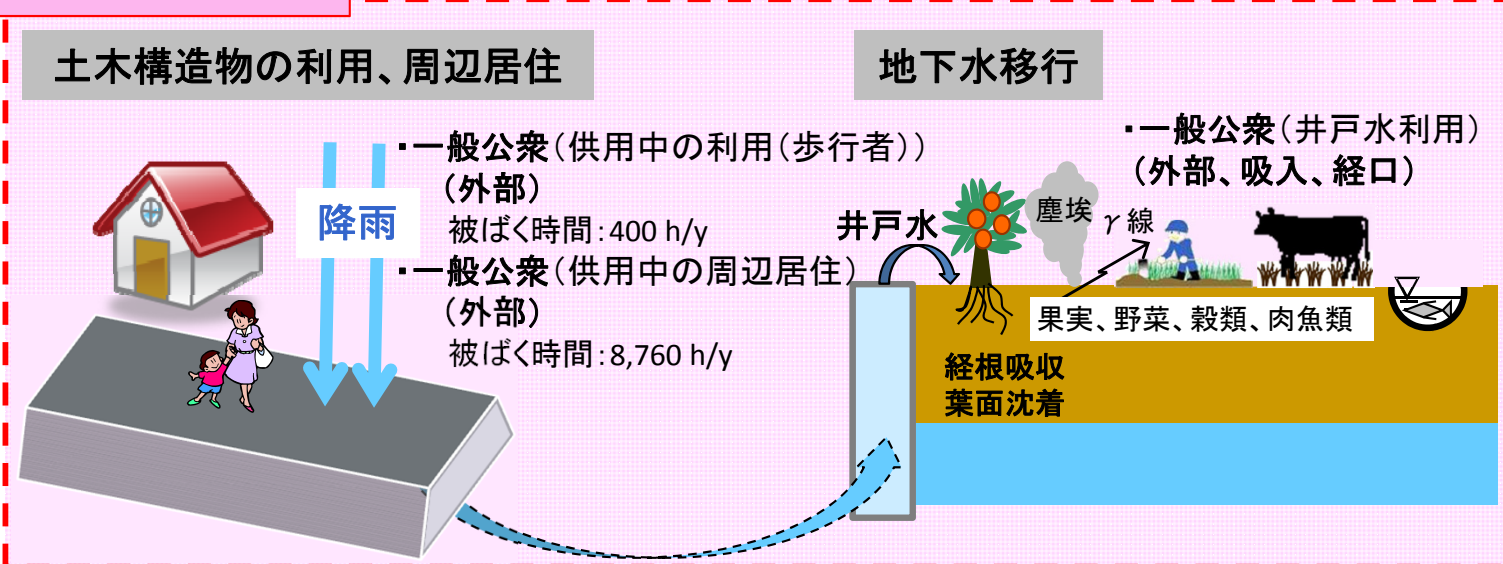
3.2 (1) コンクリート等で被覆された盛土における被ばく経路の設定

- コンクリート等で被覆された盛土(例:防潮堤等)に再生資材を利用する場合を想定し、検討対象となる具体的な行為、対象者、被ばく形態(外部、吸入、経口)を整理し、被ばく経路を設定。

施工時



供用時



- 対象核種:
 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs (存在比 0.209:1)
(平成28年3月時点)
- 作業者の被ばく時間は1,000 h/y
- 施工時の一般公衆の被ばく時間は、建設期間が1年以上の長期にわたる可能性があることから、保守的に8,760 h/y(年間にわたって被ばくする)とした。
- 周辺居住については、盛土端から1 mとして安全側に設定
- 土木構造物の点検・補修作業はあるが、被ばく時間が施工作業に比べ短く、遮へいされた状態であることから、検討対象から除外

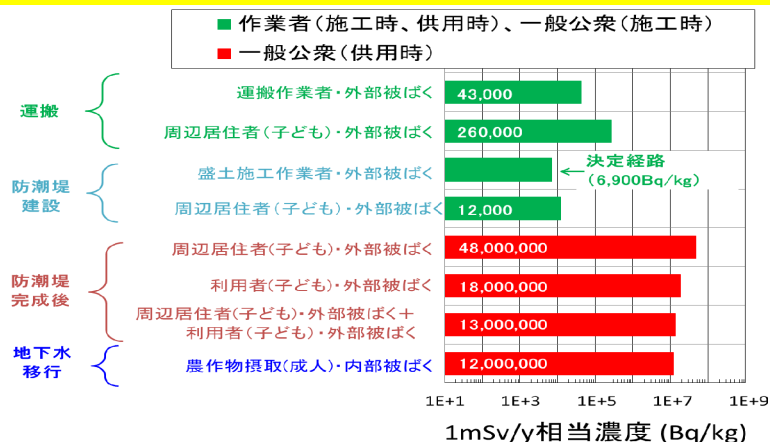
3.2 (2) コンクリート等で被覆された盛土における被ばく評価結果（再生利用濃度レベル）

➤ 1 mSv/y(施工時、供用時)を超えない放射性セシウムの放射能濃度レベルを算出。直立堤・傾斜堤(高さ8 m・15 m)を例とした場合の主要な被ばく経路における1 mSv/y相当濃度(決定経路:最も影響が大きい被ばく経路)は以下のとおり。

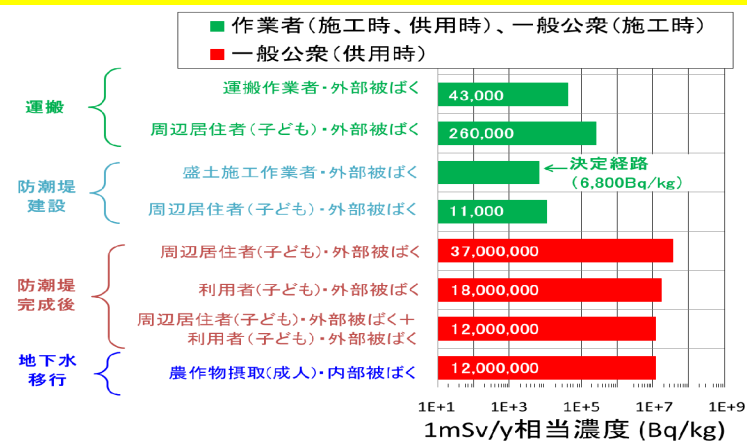
- 傾斜堤(高さ8m) (施工作業者の外部被ばく): 6,900 Bq/kg
- ◆ 直立堤(高さ8m) (施工作業者の外部被ばく): 7,500 Bq/kg

- 傾斜堤(高さ15m) (施工作業者の外部被ばく): 6,800 Bq/kg
 - ◆ 直立堤(高さ15m) (施工作業者の外部被ばく): 7,500 Bq/kg
- ※詳細については、参考資料③-1,2を参照

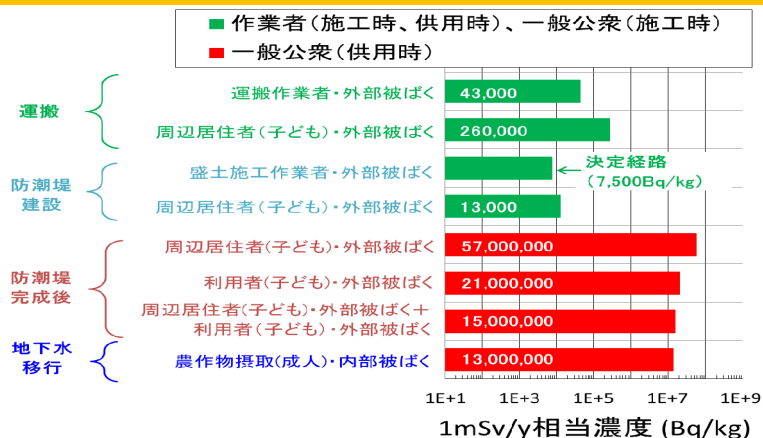
傾斜堤：盛土高さ 8 m



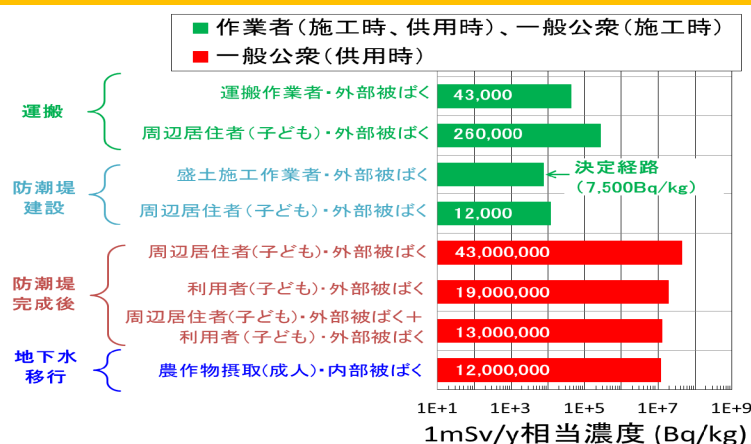
傾斜堤：盛土高さ 15 m



直立堤：盛土高さ 8 m



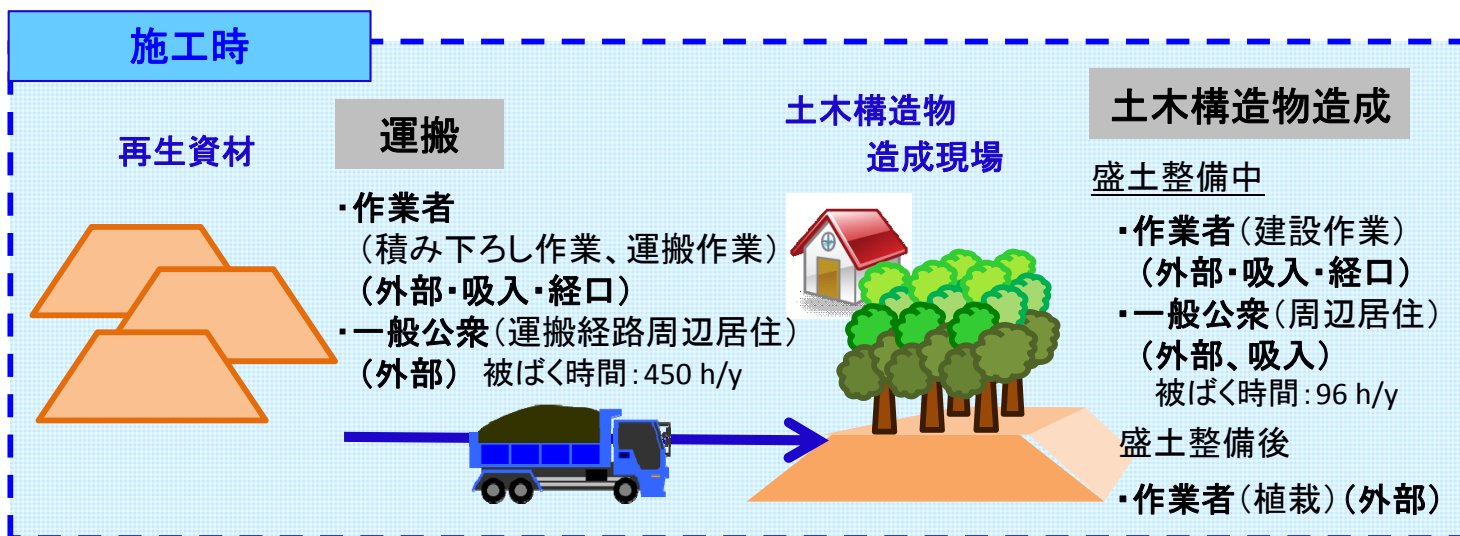
直立堤：盛土高さ 15 m



※被ばく評価に用いた計算コード: クリアランスレベル評価コードPASCLR2、QAD-CGGP2Rコード、MCNP5コード(参考資料①を参照)

3.3 (1) 植栽覆土で被覆された盛土における被ばく経路の設定

- 植栽覆土で被覆された盛土(例: 海岸防災林等)に再生資材を利用する場合を想定し、検討対象となる具体的な行為、対象者、被ばく形態(外部、吸入、経口)を整理し、被ばく経路を設定。



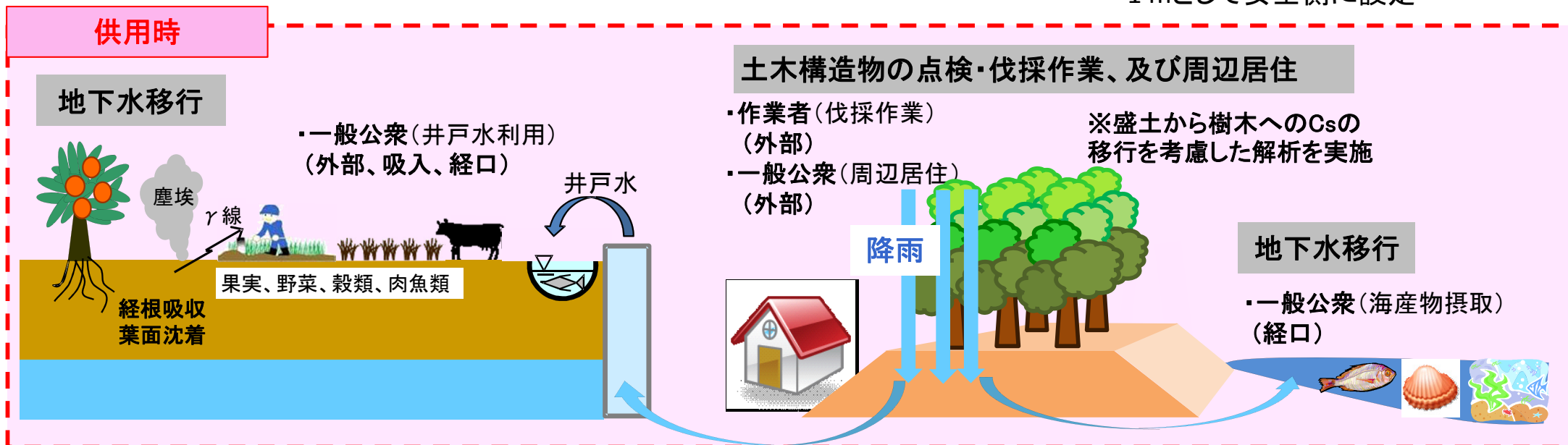
●対象核種:

^{134}Cs 、 ^{137}Cs (存在比 0.209:1)
(平成28年3月時点)

●作業者の被ばく時間は1,000 h/y

●施工時の一般公衆の被ばく時間は、96 h/y (盛土施工後はすぐに覆土の施工に取りかかることを想定し、盛土材が露出しているのは多くても年間4日間とした)

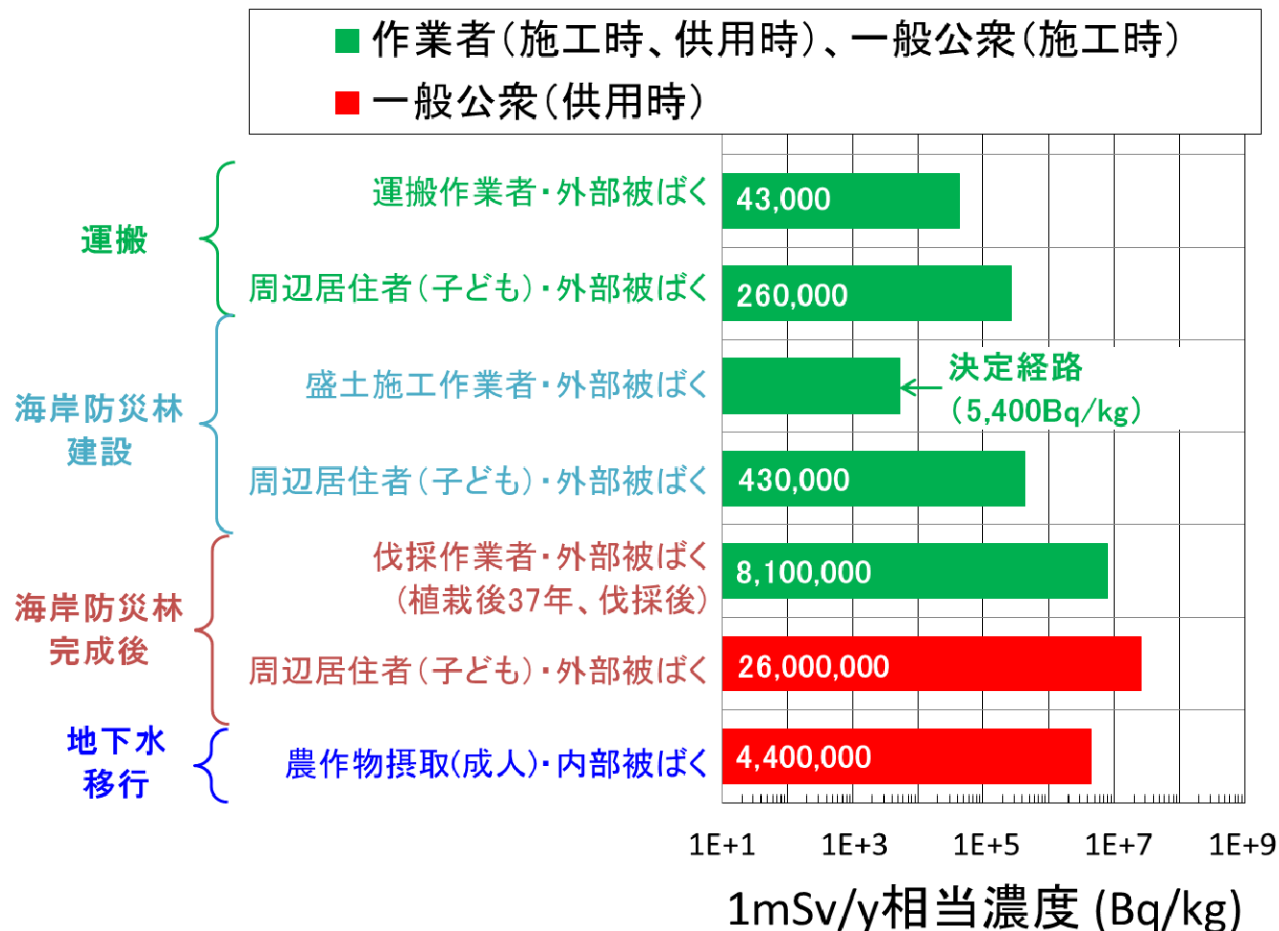
●周辺居住については、盛土端から1 mとして安全側に設定



3.3 (2) 植栽覆土で被覆された盛土における被ばく評価結果（再生利用濃度レベル）

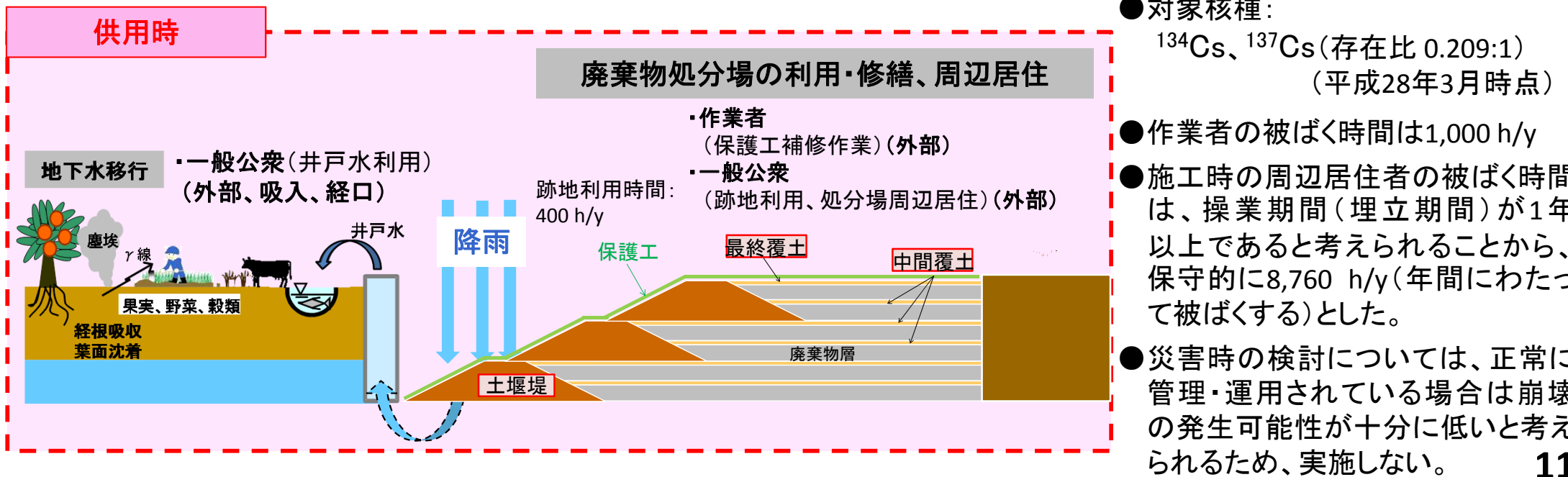
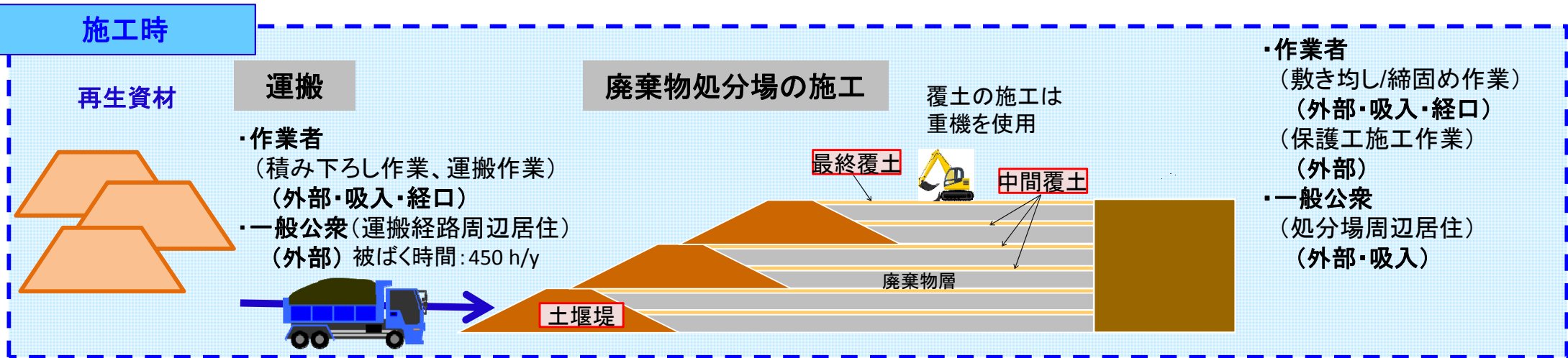
- 1 mSv/y(施工時、供用時)を超えない放射性セシウムの放射能濃度レベルを算出。海岸防災林を例とした場合の主要な被ばく経路における1 mSv/y相当濃度及び決定経路(最も影響が大きい被ばく経路)は、施工作業者における外部被ばくで5,400 Bq/kgとなった。

※詳細については参考資料④-1,2参照



3.4 (1) 廃棄物処分場における被ばく経路の設定

- 廃棄物処分場の中間覆土、最終覆土、土堰堤に再生資材を利用する場合を想定し、検討対象となる具体的な行為、対象者、被ばく形態(外部、吸入、経口)を整理し、被ばく経路を設定。



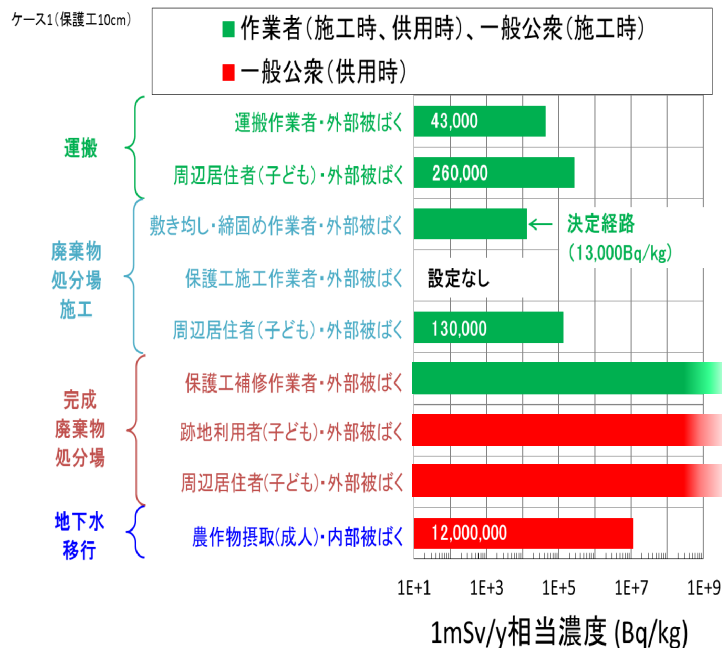
3.4 (2) 廃棄物処分場における被ばく評価結果 (再生利用濃度レベル)

➤ 1 mSv/y(施工時、供用時)を超えない放射性セシウムの放射能濃度レベルを算出。廃棄物処分場を例とした場合の主要な被ばく経路における1 mSv/y相当濃度(決定経路:最も影響が大きい被ばく経路)は以下のとおり。

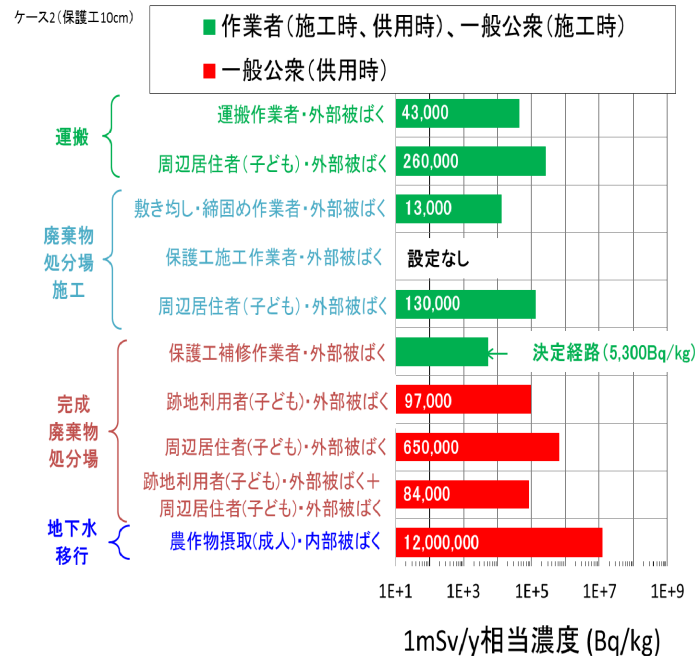
- (1) 中間覆土(敷き均し・締固め作業者の外部被ばく): 13,000 Bq/kg
- (2) 最終覆土(保護工補修作業者の外部被ばく): 5,300 Bq/kg
- (3) 土堰堤(敷き均し・締固め作業者の外部被ばく): 8,100 Bq/kg

※詳細については参考資料⑤-1,2参照

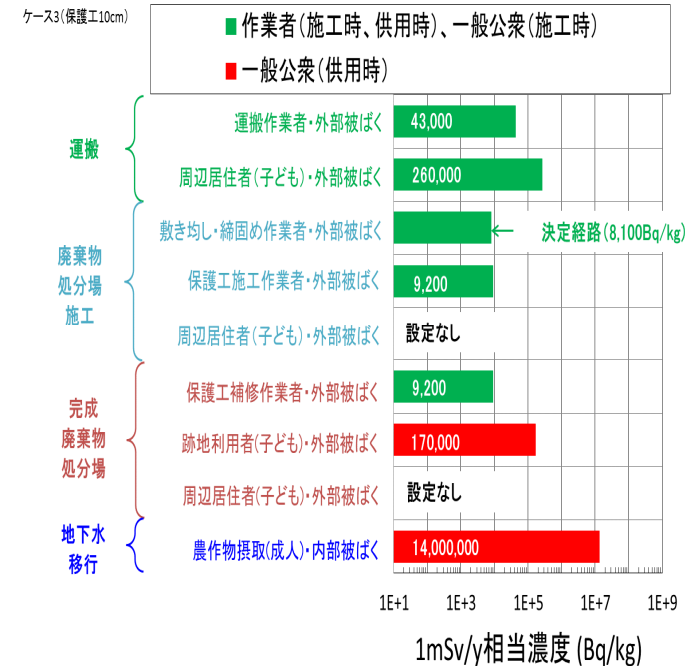
再生資材を中間覆土に使用



再生資材を最終覆土に使用



再生資材を土堰堤に使用



○保護工の厚さを10 cm～50 cmに設定して算出しても、最も影響が大きい被ばく経路と放射能濃度は同一の評価結果であった。

※被ばく評価に用いた計算コード: クリアランスレベル評価コードPASCLR2、QAD-CGGP2Rコード、MCNP5コード(参考資料①を参照)

3.5 再生利用の用途先ごとに算出される放射能濃度レベル

➤ 追加被ばく評価計算から算出される1 mSv/y相当濃度は下表のとおりであり、これが8,000 Bq/kgを超える場合は、再生利用可能濃度は8,000 Bq/kg以下とする。なお、周辺環境が一定程度汚染されており、電離則又は除染電離則に従って作業を行う場合は、電離則又は除染電離則の適用対象外となる濃度(上限10,000 Bq/kg)を超えて取り扱うことが可能であるが、再生利用可能濃度は原則に従い8,000 Bq/kg以下とする。

用途先	遮へい条件	決定経路と1 mSv/y相当の放射能濃度レベル					
		一般公衆	1年間の放射能濃度レベル (Bq/kg)	作業者	作業期間限定に応じた放射能濃度レベル(Bq/kg)		
					6か月	9か月	1年
盛土	法面保護工	建設現場周辺居住者子ども-外部被ばく	25,000	盛土施工作業者-外部被ばく(道路盛土)	12,000	8,100	6,100
				盛土施工作業者-外部被ばく(鉄道盛土)	13,000	8,800	6,600
	覆工コンクリート	建設現場周辺居住者子ども-外部被ばく(防潮堤(傾斜堤))	11,000	盛土施工作業者-外部被ばく (防潮堤(傾斜堤)高さ8 m)	14,000	9,200	6,900
				盛土施工作業者-外部被ばく (防潮堤(傾斜堤)高さ15 m)	14,000	9,100	6,800
		建設現場周辺居住者子ども-外部被ばく(防潮堤(直立堤))	12,000	盛土施工作業者-外部被ばく (防潮堤(直立堤)高さ8 m、15 m)	15,000	10,000	7,500
	植栽覆土	運搬経路周辺居住者子ども-外部被ばく	260,000	盛土施工作業者-外部被ばく	11,000	7,200	5,400
中間覆土材	法面保護工	建設現場周辺居住者子ども-外部被ばく	130,000	敷き均し・締固め作業-外部被ばく	26,000	17,000	13,000
最終覆土材		跡地利用者子ども-外部被ばく	97,000	保護工補修作業-外部被ばく	11,000	7,100	5,300
処分場土堰堤		跡地利用者子ども-外部被ばく	170,000	敷き均し・締固め作業-外部被ばく	16,000	11,000	8,100

「用途先」は、再生資材(線源)を再利用する構造部材を示している。

4 施設設計（覆土等の厚さ）による追加被ばく線量の更なる低減

➤ 破損時等を除く供用時において、施設設計（適切な遮へい等の措置）による追加被ばく線量の更なる低減について検討したところ、盛土では、覆土等の厚さを50 cm以上確保すれば、追加被ばく線量は0.01 mSv/yを超えない結果となった。また、廃棄物処分場では、30 cm以上の保護工の厚さを確保すれば、追加被ばく線量は0.01 mSv/yを超えない結果となった。

経路	用途先		覆土等	再生資材の 放射能濃度	覆土等の厚さに応じた一般公衆の追加被ばく線量(外部被ばく) [mSv/y]			
				[Bq/kg]	10 cm	30 cm	50 cm	100 cm
一般公衆の 外部被ばく	盛土		土砂・アス ファルト	6,000 ^{*1}	0.13	0.012	< 0.01	< 0.01
				8,000	0.18	0.016	< 0.01	< 0.01
			コンクリート	6,000 ^{*1}	— ^{*2}	— ^{*2}	< 0.01	< 0.01
				8,000	— ^{*2}	— ^{*2}	< 0.01	< 0.01
			植栽土砂	5,000 ^{*1}	— ^{*2}	— ^{*2}	— ^{*2}	< 0.01
				8,000	— ^{*2}	— ^{*2}	— ^{*2}	< 0.01
	廃棄物 処分場	中間覆土 ^{*3}	保護工 (客土等)	8,000	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
		最終覆土		5,000 ^{*1}	0.052	< 0.01	< 0.01	< 0.01
				8,000	0.083	< 0.01	< 0.01	< 0.01
		土堰堤		8,000	0.047	< 0.01	< 0.01	< 0.01

*1: 3.5に記載の1 mSv/y相当の放射能濃度レベル（1年間の放射能濃度レベル）のうち、一般公衆と作業者の全体で決定経路となる値の100Bq/kg以下の位を切り捨てて表記。

*2: 用途先の構造上必要な覆土等の設定値（海岸防災林は1 mの植栽覆土、防潮堤は50 cmの覆工コンクリート）に基づき評価。

*3: 中間覆土は土堰堤、廃棄物層、最終覆土により遮へいされているため、中間覆土のためだけの保護工は不要。

5 災害・復旧時における追加被ばく線量の検討①

- 公共事業等により新設される土木構造物は、既往の災害時の教訓を生かして設計され、供用後には、必要に応じた維持管理・補修を行うことで、それぞれの構造物で考慮されている発生頻度・規模の災害等に対する耐性を保持している。
- 再生利用の安全性に万全を期す観点から、万一、災害等により構造物の大規模な破損等が生じた場合を想定し、放射性物質による影響を評価する。

想定した大規模災害と破損事象

土木構造物	土砂やアスファルト等で被覆された盛土 (道路・鉄道盛土 等)	コンクリート等で被覆された盛土 (防潮堤 等)	植栽覆土で被覆された盛土 (海岸防災林 等)
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※ ¹ が発生するケース

※1 微細な放射性物質が煙のように流れる現象

* 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

5 災害・復旧時における追加被ばく線量の検討②

- 万一、津波等の災害により構造物の大規模な破損等が生じた場合であっても、想定したケースについて一般公衆及び作業者の追加被ばく線量はいずれも1 mSv/y以下となる結果が得られた。
- 大規模な破損等を防止するため、施設の計画・設計時において設置される地域及びその周辺の地形、地質、水理、災害履歴等を考慮するものとする。

土木構造物	評価対象として選定した災害の要因	8,000 Bq/kgの再生資材を用いた場合の追加被ばく線量検討結果(決定経路)	評価の条件等
土砂やアスファルト等で被覆された盛土 (例:道路盛土・鉄道盛土等)	地震及び異常降雨(豪雨)による「すべり崩壊」、「法面崩壊」、「分断崩壊」	作業者:0.64 mSv/y (分断崩壊、復旧作業者-外部) 一般公衆:0.21 mSv/y (すべり崩壊、周辺居住者(子ども)-外部)	・地震及び異常降雨(豪雨)によるすべり崩壊により崩落した盛土内の再生資材及び再生資材を含む回収土からの被ばくについて評価。 ・法面崩壊・分断崩壊により露呈した盛土内の再生資材からの被ばくについて評価。
コンクリート等で被覆された盛土 (例:防潮堤等)	津波による「決壊・流出」、「法面崩壊」	作業者: 0.81 mSv/y(盛土高さ8 m) 0.84 mSv/y(盛土高さ15 m) (法面崩壊、復旧作業者-外部) 一般公衆: 0.0020 mSv/y(盛土高さ8 m) 0.0067 mSv/y(盛土高さ15 m) (決壊・流出、海産物摂取(成人))	・津波による防潮堤の法面覆工の破壊、あるいは防潮堤の一区間が決壊し、破壊・決壊面に露呈した再生資材からの被ばくについて評価。 ・広範囲に流出した再生資材からの被ばく、並びに海に流出した再生資材により汚染された海産物の摂取による被ばくについて評価。
植栽覆土で被覆された盛土 (例:海岸防災林等)	津波 火災	作業者:0.47 mSv/y (津波、復旧作業者-外部) 一般公衆:0.0036 mSv/y (津波、海産物摂取(成人))	・津波により広範囲に流出した再生資材からの被ばく、並びに海へ流出した再生資材により汚染された海産物の摂取による被ばくについて評価。 ・火災によりプルームが発生し、地表沈着したCsからの被ばく及び再浮遊したCsの吸入による被ばくについて評価。

参考資料

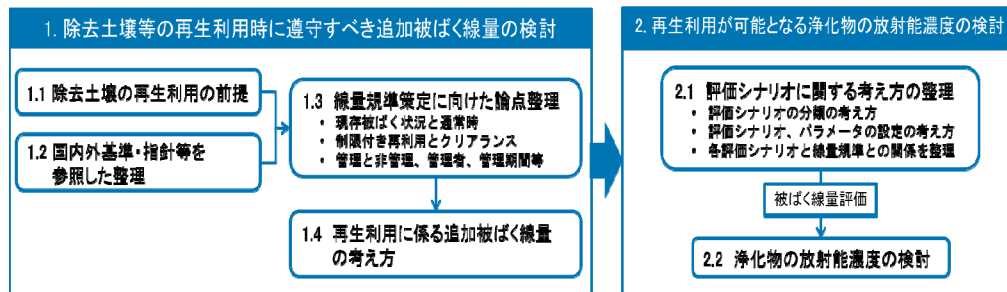
追加被ばく線量評価等の検討体制 ～放射線影響安全性評価検討ワーキンググループ～

1. 設置目的

- 減容処理後の浄化物の再生利用に向け、「中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会」において再生利用の基本的考え方等に関する議論に資するため、同検討会の下に、放射線防護等の専門家で構成される「平成27年度除去土壌等の再生利用に係る放射線影響に関する安全性評価検討ワーキンググループ」(放射線影響安全性評価検討WG)を設置
- 放射線防護に関する国際的な線量基準の考え方を基本に、国内の原子力施設由来の廃棄物及び災害廃棄物等の処理・処分等に係る国内の既往の法令や線量基準との関係性を踏まえつつ、除去土壌等の再生利用における追加被ばく線量の基準等について検討を行う

2. 検討項目

- 除去土壌等の再生利用時に遵守すべき追加被ばく線量
- 再生利用が可能となる浄化物の放射能濃度



検討フロー

3. WG委員

○: 委員長

氏 名	所属等
明石 真言	量子科学技術研究開発機構 執行役
飯本 武志	東京大学 環境安全本部 准教授
木村 英雄	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
○ 佐藤 努	北海道大学大学院 工学研究院 環境循環システム部門 資源循環工学分野 教授
田上 恵子	量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 福島再生支援本部 上席研究員
新堀 雄一	東北大学大学院 工学研究科 量子エネルギー工学専攻 教授
久田 真	東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 教授
山本 英明	日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島環境安全センター 技術主席

4. 検討経緯

開催日	議 題
第1回(1/12)	国内外基準・指針等を参照した本件の整理、論点の提示
第2回(1/27)	線量基準策定に向けた論点整理 再生利用時に遵守すべき追加被ばく線量の検討
第3回(2/16)	評価シナリオに関する考え方の整理
第4回(2/24)	評価シナリオを用途ごとに設定、被ばく経路を抽出 線量評価、浄化物の放射能濃度を検討
第5回(4/27)	再生利用の基本的考え方、浄化物の放射能濃度の検討
第6回(5/17)	

参考資料① 被ばく評価に用いた計算コードの概要と評価モデル

- 今回の被ばく評価に用いた、クリアランスレベル評価コードPASCLR2は、原子炉施設やウラン取扱施設等を対象に、クリアランス後の産業廃棄物としての埋設処分と再生材としての利用のシナリオに関する作業者と公衆の被ばく経路を網羅した線量評価が可能なコードであり、炉規法等のクリアランスレベル、特措法における濃度規準等を評価した実績を有する。
- 上記計算に用いる外部被ばく線量換算係数は、原子力施設等の遮へい計算で実績のあるQAD-CGGP2RコードまたはMCNP5コードを使用して算出した。

評価に使用した主な評価モデル

○再生資材の使用に係る評価モデル

外部被ばく線量: D_{ext} ($\mu\text{Sv/y}$) 粉塵吸入による内部被ばく線量: D_{inh} ($\mu\text{Sv/y}$)

$$D_{ext} = C_s \cdot S_o \cdot t_o \cdot DF_{ext} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda \cdot t_a)}{\lambda \cdot t_a} \quad D_{inh} = C_s \cdot C_d \cdot f_d \cdot B_o \cdot t_o \cdot DF_{inh} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda \cdot t_a)}{\lambda \cdot t_a}$$

直接経口による内部被ばく線量: D_{direct} ($\mu\text{Sv/y}$)

$$D_{direct} = C_s \cdot f_c \cdot q \cdot t_o \cdot DF_{ing} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda \cdot t_a)}{\lambda \cdot t_a}$$

○地下水移行に係る評価モデル

再生資材からの核種の漏出量: $J(t)$ (Bq/y)、漏出率: η (y^{-1})

$$J(t) = \eta \cdot C_s \cdot W \cdot \exp\{-(\lambda + \eta) \cdot t\}, \quad \eta = \frac{R_{IN}}{H_D \cdot (\varepsilon_w + \rho_w \cdot Kd_w)}$$

帯水層中の濃度: $C_{GW}(x, t)$ (Bq/m^3)

$$\frac{\partial}{\partial t} R_s \cdot C_{GW}(x, t) = D_x \cdot \frac{\partial^2 C_{GW}(x, t)}{\partial x^2} - U_s \cdot \frac{\partial C_{GW}(x, t)}{\partial x} - R_s \cdot \lambda \cdot C_{GW}(x, t)$$

$$R_s = 1 + \frac{1 - f_s}{f_s} \cdot Kd_s \cdot \rho_s, \quad D_x = D_{mx} |U_s| + D_d$$

井戸水の濃度: $C_{WW}(t)$ (Bq/m^3)

$C_{WW}(t) = C_{GW}(x_w, t) \cdot R_w$ → 井戸水の濃度 $C_{WW}(t)$ を用いて、飲料水摂取や井戸水を利用して育てた農作物、畜産物、淡水産物摂取に係る被ばく線量を計算。

C_s	: 再生資材の濃度 (Bq/g)
S_o	: 遮蔽係数 (—)
t_o	: 年間被ばく時間 (h/y)
DF_{ext}	: 外部被ばく線量換算係数 ($\mu\text{Sv/h per Bq/g}$)
λ	: 崩壊定数 (y^{-1})
t_a	: 被ばく中の減衰期間 (y)
C_d	: 空气中粉塵濃度 (g/m^3)
f_d	: 微粒子への放射性物質の濃縮係数 (吸入) (—)
B_o	: 呼吸量 (m^3/h)
DF_{inh}	: 吸入被ばくに対する線量係数 ($\mu\text{Sv/Bq}$)
f_c	: 微粒子への放射性物質の濃縮係数 (経口) (—)
q	: 粉塵の摂取率 (g/h)
DF_{ing}	: 経口摂取の内部被ばく線量係数 ($\mu\text{Sv/Bq}$)
W	: 再生資材の総量 (g)
R_{IN}	: 浸透水量 (m/y)
H_D	: 再生資材が使用される部材の厚さ (m)
ε_w	: 再生資材が使用される部材の空隙率 (—)
ρ_w	: 再生資材が使用される部材のかさ密度 (g/cm^3)
Kd_w	: 再生資材が使用される部材の分配係数 (ml/g)
R_s	: 帯水層遅延係数 (—)
D_x	: 地下水流方向の分散係数 (m^2/y)
U_s	: 地下水流速 (m/y)
f_s	: 帯水層空隙率 (—)
Kd_s	: 帯水層土壌に対する分配係数 (mL/g)
ρ_s	: 帯水層土壌真密度 (g/cm^3)
D_{mx}	: 地下水流方向の分散長 (m)
D_d	: 分子拡散係数 (m^2/y)
R_w	: 井戸水の混合割合 (—)

参考資料②-1 道路盛土を例とした検討経路

経路	検討対象		線源	対象者	被ばく形態
1	建設現場への運搬	積み下ろし作業	再生資材	作業者	外部
2					粉塵吸入
3					直接経口
4		運搬作業		作業者	外部
5		運搬経路周辺居住		一般公衆(子ども)	外部
6	盛土施工	敷き均し・ 締め固め	盛土	作業者	外部
7					粉塵吸入
8					直接経口
9	保護工	客土/植生基材吹付工		作業者	外部
10	建設現場 周辺居住	周辺居住		一般公衆(成人)	外部
11					粉塵吸入
12				一般公衆(子ども)	外部
13					粉塵吸入
14	道路施工	舗装・路盤材		作業者	外部
15	道路完成後	周辺居住		一般公衆(子ども)	外部
16		道路利用		一般公衆(子ども)	外部
17		道路補修作業		作業者	外部
18		保護工補修作業		作業者	外部
19		完成道路への雨水浸透による放射能物質の漏洩 (地下水移行)	飲料水摂取	井戸水	一般公衆(成人)
20	一般公衆(子ども)				経口
21	農耕作業		井戸水で灌漑した土壌	作業者	外部
22					粉塵吸入
23	農作物摂取		灌漑した土壌で生産された農作物	一般公衆(成人)	経口
24				一般公衆(子ども)	経口
25	畜産物摂取		灌漑した土壌で生産された畜産物	一般公衆(成人)	経口
26				一般公衆(子ども)	経口
27	畜産物摂取		井戸水で飼育された畜産物	一般公衆(成人)	経口
28				一般公衆(子ども)	経口
29	養殖淡水産物摂取		井戸水で養殖された淡水産物	一般公衆(成人)	経口
30				一般公衆(子ども)	経口

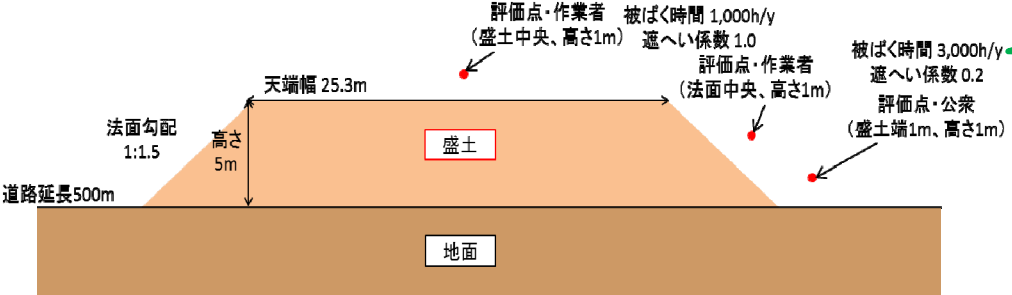
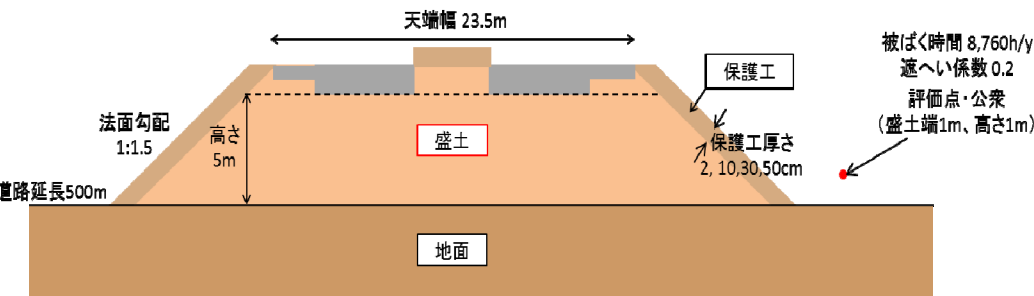
参考資料②-2 鉄道盛土を例とした検討経路

経路	検討対象		線源	対象者	被ばく形態
1	建設現場への運搬	積み下ろし作業	再生資材	作業者	外部
2					粉塵吸入
3					直接経口
4		運搬作業		作業者	外部
5		運搬経路周辺居住		一般公衆(子ども)	外部
6	盛土施工	敷き均し・ 締め固め	盛土	作業者	外部
7					粉塵吸入
8					直接経口
9	保護工	客土/植生基材 吹付工		作業者	外部
10	建設現場 周辺居住	周辺居住		一般公衆(成人)	外部
11				粉塵吸入	
12				一般公衆(子ども)	外部
13				粉塵吸入	
14	鉄道施工	バラスト敷設		作業者	外部
15	鉄道完成後	周辺居住		一般公衆(子ども)	外部
16		保線作業者		作業者	外部
17		保護工補修作業者		作業者	外部
18		完成鉄道への雨水浸透 による放射能物質の漏洩 (地下水移行)	飲料水摂取	井戸水	一般公衆(成人)
19	一般公衆(子ども)				経口
20	農耕作業		井戸水で灌漑した土壌	作業者	外部
21					粉塵吸入
22	農作物摂取		灌漑した土壌で生産された 農作物	一般公衆(成人)	経口
23				一般公衆(子ども)	経口
24	畜産物摂取		灌漑した土壌で生産された 畜産物	一般公衆(成人)	経口
25				一般公衆(子ども)	経口
26	畜産物摂取		井戸水で飼育された畜産物	一般公衆(成人)	経口
27				一般公衆(子ども)	経口
28	養殖淡水産物摂取		井戸水で養殖された 淡水産物	一般公衆(成人)	経口
29				一般公衆(子ども)	経口

参考資料②-3 道路・鉄道盛土を例とした検討条件の詳細

■ 道路盛土に対する評価体系

- ・道路盛土の評価体系は、「道路土工 切土工・斜面安定工指針」(日本道路協会)に基づき設定
(盛土高さ・法面勾配については基準がないため、感度解析を実施し、影響が収束する体系を決定)
- ・保護工(植生工)の厚さは、上記マニュアルに基づき2 cm(ケース1:草本類播種工)と10 cm(ケース2:木本類播種工)の2種類を設定
- ・さらに覆土が施工されることを想定して、保護工の厚さが30 cm(ケース3)と50 cm(ケース4)の場合についても検討を実施

施工時: 盛土建設	【かさ密度】 盛土: 2.0 g/cm³ 保護工: 1.7 g/cm³ 
供用時: 道路利用 周辺居住	
供用時: 地下水移行	・再生資材を使用する部材のみをソースタームに設定 ・道路盛土への浸透水量: 0.4 m/y (安全側に立った設定) (不透水性アスファルト: 1×10^{-7} cm/s、動水勾配: 1 → 浸透水量: 0.032 m/y) ・盛土の空隙率: 0.25 ・盛土の収着分配係数: 270 mL/g (IAEA TRS No.364, 土壌、砂) ・完成道路盛土端から井戸までの距離: 0 m

■ 鉄道盛土に対する評価体系

鉄道盛土と道路盛土の施工基準が同等である(日本道路公団資料)ことから、道路と同様の評価体系を設定
(※鉄道盛土では、供用時の鉄道保線作業者の被ばくについても検討(評価点: 道路利用者と同位置))

参考資料③-1 防潮堤を例とした検討経路

経路	検討対象		線源	対象者	被ばく形態
1	建設現場への運搬	積み下ろし作業	再生資材	作業者	外部
2					粉塵吸入
3					直接経口
4		運搬作業		作業者	外部
5		運搬経路周辺居住		一般公衆(子ども)	外部
6	盛土施工	敷き均し・ 締め固め	盛土	作業者	外部
7					粉塵吸入
8					直接経口
9	護岸工	基礎砕石工		作業者	外部
10	建設現場 周辺居住	周辺居住		一般公衆(成人)	外部
11					粉塵吸入
12				一般公衆(子ども)	外部
13					粉塵吸入
14	防潮堤完成後	周辺居住		一般公衆(子ども)	外部
15		防潮堤利用		一般公衆(子ども)	外部
16	完成防潮堤への雨水 浸透による放射能物質 の漏洩 (地下水移行)	飲料水摂取	井戸水	一般公衆(成人)	経口
17				一般公衆(子ども)	経口
18		農耕作業	井戸水で灌漑した土壌	作業者	外部
19					粉塵吸入
20		農作物摂取	灌漑した土壌で生産された 農作物	一般公衆(成人)	経口
21				一般公衆(子ども)	経口
22		畜産物摂取	灌漑した土壌で生産された 畜産物	一般公衆(成人)	経口
23				一般公衆(子ども)	経口
24		畜産物摂取	井戸水で飼育された畜産物	一般公衆(成人)	経口
25				一般公衆(子ども)	経口
26		養殖淡水産物摂取	井戸水で養殖された淡水産物	一般公衆(成人)	経口
27				一般公衆(子ども)	経口

参考資料③-2 防潮堤を例とした検討条件の詳細

- 防潮堤は、「傾斜堤」と「直立堤」の2種類を想定し、公開情報に基づき天端幅、法面勾配、覆工コンクリート厚さ等を設定し検討した。
- 防潮堤の高さは、施工仕様の情報を参考に8 m(ケース1)と15 m(ケース2)の2種類を想定。

	傾斜堤	直立堤
施工時： 防潮堤建設	【かさ密度】 盛土: 2.0 g/cm³	
供用時： 防潮堤利用 周辺居住	1 h/dの散歩を想定 1年間住み続けることを想定	
供用時： 地下水移行	- 再生資材を使用する部材のみをソースタームに設定 - 防潮堤への浸透水量: 0.4 m/y (安全側に立った設定) (不透水性アスファルト: 1×10^{-7} cm/s、動水勾配: 1 → 浸透水量: 0.032 m/y)	- 盛土の空隙率: 0.25 - 盛土の収着分配係数: 270 mL/g (IAEA TRS No.364, 土壌、砂) - 完成盛土端から井戸までの距離: 0 m

参考資料④-1 海岸防災林を例とした検討経路

経路	検討対象		線源	対象者	被ばく形態	備考
1	建設現場への運搬	積み下ろし作業	再生資材	作業者	外部	※経路No.14は、植栽後7年、17年、27年、37年、47年の伐採前・後を評価する。 ※経路No.15、16は、盛土造成直後(0年・植栽前)、植栽後2年、及び7年、17年、27年、37年、47年の伐採前・後を評価する。
2					粉塵吸入	
3		直接経口				
4		運搬作業		作業者	外部	
5		運搬経路 周辺居住		一般公衆(子ども)	外部	
6	海岸防災林造成	建設作業 (盛土整備中)	盛土	作業者	外部	
7					粉塵吸入	
8					直接経口	
9		周辺居住 (盛土整備中)		一般公衆(成人)	外部	
10				粉塵吸入		
11				一般公衆(子ども)	外部	
12				粉塵吸入		
13		植栽等作業 (盛土整備後)		作業者	外部	
14	海岸防災林完成後	伐採作業	盛土、樹木、伐採木 (伐採前・後)	作業者	外部	
15		周辺居住		一般公衆(成人)	外部	
16				一般公衆(子ども)	外部	
17	海岸防災林完成後の 地下水移行 (海側への流出)	海産物摂取	海産物 (魚類、無脊椎動物、藻類)	一般公衆(成人)	経口	
18				一般公衆(子ども)	経口	
19	海岸防災林完成後の 地下水移行 (井戸水利用)	飲料水摂取	井戸水	一般公衆(成人)	経口	
20				一般公衆(子ども)	経口	
21		農耕作業	井戸水で 灌漑した土壌	作業者	外部	
22					粉塵吸入	
23		農作物摂取	灌漑した土壌で生産された 農作物	一般公衆(成人)	経口	
24				一般公衆(子ども)	経口	
25		畜産物摂取	灌漑した土壌で生産された 畜産物	一般公衆(成人)	経口	
26				一般公衆(子ども)	経口	
27		畜産物摂取	井戸水で飼育された畜産物	一般公衆(成人)	経口	
28				一般公衆(子ども)	経口	
29		養殖淡水産物 摂取	井戸水で養殖された 淡水産物	一般公衆(成人)	経口	
30				一般公衆(子ども)	経口	

参考資料④-2 海岸防災林を例とした条件設定の詳細

- 再生資材は厚さ2 mの盛土に用いられ、盛土の上部に厚さ1 mの覆土(植栽基盤として非汚染の腐植土を想定)が敷設された構造として検討した。
- 既往の海岸防災林の評価サイズから、最も大きな評価体系(林帯幅＝盛土幅:200 m)を設定。

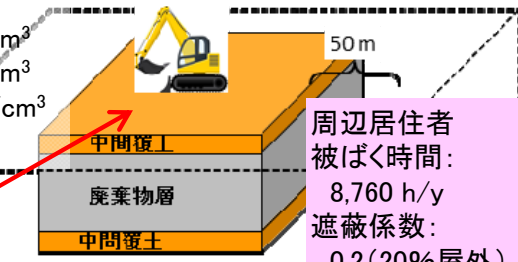
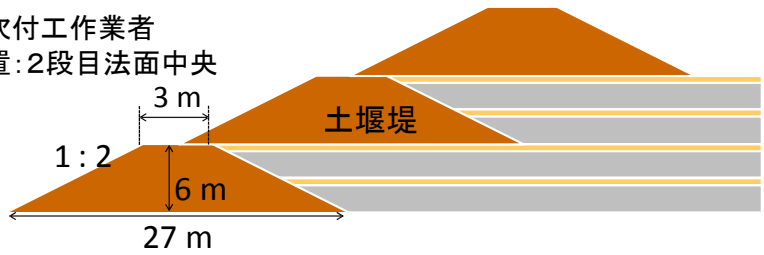
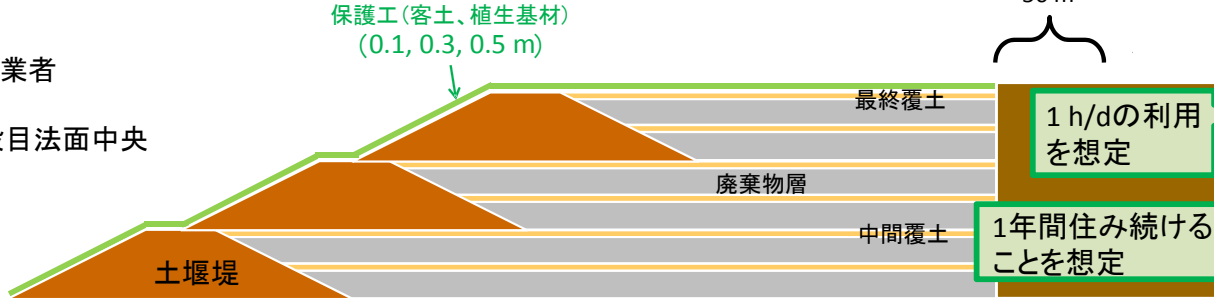
施工時 ・建設作業 ・植栽作業 ・周辺居住	【かさ密度】 盛土:2.0 g/cm³, 覆土:1.5 g/cm³ 盛土施工後はすぐに覆土が施工されると想定(盛土露出時間:4日間) ●建設作業・周辺居住者 評価点・作業者(盛土部中央、高さ1 m) 作業時間:1000 h/y 遮蔽係数:1.0 評価点・公衆(海岸防災林の陸側端、高さ1 m) 居住者の被ばく時間:96 h/y 遮蔽係数:0.2 ＜林帯幅(＝盛土幅)＞ 200m ＜再生資材層厚さ(一律)＞2m ●植栽作業 作業時間:1000 h/y 遮蔽係数:1.0 評価点・作業者(盛土部中央、高さ0.5 m) ＜林帯幅(＝盛土幅)＞ 200m ＜覆土厚さ＞1.0 m ＜再生資材層厚さ(一律)＞2m											
供用時 ・施設点検 ・伐採作業 ・周辺居住	・海岸防災林完成後の被ばくは、盛土からの放射線の他に最初の伐採以後の成長した樹木と、伐採木が地面へ堆積されている状態からの両者の放射線の影響を、経時的に考慮する。 ・樹木への核種の移行は、根系の伸長速度(4 cm/月)より、植栽後2年で起こると仮定。 評価点・作業者(盛土部中央、高さ1 m)伐採作業時間:1000 h/y 遮蔽係数:1.0 評価点・公衆(海岸防災林の陸側端、高さ1 m) 居住者の被ばく時間:8760 h/y 遮蔽係数:0.2 樹木への移行係数:5.5×10⁻³ ＜林帯幅(＝盛土幅)＞ 200m ＜再生資材層厚さ(一律)＞2m ＜覆土厚さ＞1.0 m <table border="1"> <thead> <tr> <th>評価時期</th><th>線源</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0年・植栽前</td><td>盛土のみ</td></tr> <tr> <td>植栽後0年</td><td rowspan="3">盛土＋樹木</td></tr> <tr> <td>植栽後2年</td></tr> <tr> <td>植栽後7年・伐採前</td></tr> <tr> <td>植栽後7年・伐採後</td><td rowspan="2">盛土＋樹木＋伐採木</td></tr> <tr> <td>植栽後17, 27, 37, 47年(伐採前・後)</td></tr> </tbody> </table>	評価時期	線源	0年・植栽前	盛土のみ	植栽後0年	盛土＋樹木	植栽後2年	植栽後7年・伐採前	植栽後7年・伐採後	盛土＋樹木＋伐採木	植栽後17, 27, 37, 47年(伐採前・後)
評価時期	線源											
0年・植栽前	盛土のみ											
植栽後0年	盛土＋樹木											
植栽後2年												
植栽後7年・伐採前												
植栽後7年・伐採後	盛土＋樹木＋伐採木											
植栽後17, 27, 37, 47年(伐採前・後)												
供用時 地下水移行	・再生資材を使用する部材のみをソースタームに設定 ・盛土への浸透水量:1.6 m/y(福島県浜通り沿岸の平年雨量の最大値) ・盛土の空隙率:0.3 ・盛土の収着分配係数:270 mL/g (IAEA TRS No.364, 土壌、砂) ・完成盛土端から海、井戸までの距離:0 m											

参考資料⑤-1 廃棄物処分場における検討経路

経路	検討対象			線源	対象者	被ばく形態	備考
1	施工時	廃棄物 処分場 への 運搬	積み下ろし作業	再生資材	作業者	外部	
2						粉塵吸入	
3						直接経口	
4			運搬作業	再生資材	作業者	外部	
5			運搬経路 周辺居住	再生資材	一般公衆(子ども)	外部	
6		廃棄物 処分場 施工	敷き均し・締固め	中間覆土/最終覆土/土堰堤※1	作業者	外部	※1 経路6-8, 10-16は 使用される部材に応じた ケース分けを行う。 ※2 経路9は土堰堤に 使用したケースのみ実施。 ※3 保護工厚さを変動さ せた評価を実施。
7						粉塵吸入	
8						直接経口	
9			保護工(客土、植生基材)施工	土堰堤※2	作業者	外部	
10			周辺居住	中間覆土/最終覆土※1	一般公衆(成人)	外部	
11						粉塵吸入	
12					一般公衆子ども	外部	
13						粉塵吸入	
14	供用時	廃棄物 処分場 完成後	保護工補修	中間覆土/最終覆土/土堰堤※1	作業者	外部	※使用される部材に応じ たケース分けを行う。
15			跡地の利用	中間覆土/最終覆土/土堰堤※1,3	一般公衆(子ども)	外部	
16			周辺居住	中間覆土/最終覆土※1,3	一般公衆(子ども)	外部	
17		地下水 移行	飲料水摂取	井戸水	一般公衆(成人)	経口	
18					一般公衆(子ども)	経口	
19			農耕作業	井戸水で灌漑した土壌	作業者	外部	
20						粉塵吸入	
21			農作物摂取	灌漑した土壌で生産された 農作物	一般公衆(成人)	経口	
22					一般公衆(子ども)	経口	
23			畜産物摂取	灌漑した土壌で生産された 畜産物	一般公衆(成人)	経口	
24					一般公衆(子ども)	経口	
25			畜産物摂取	井戸水で飼育された畜産物	一般公衆(成人)	経口	
26					一般公衆(子ども)	経口	
27			養殖淡水産物摂取	井戸水で養殖された淡水産物	一般公衆(成人)	経口	
28					一般公衆(子ども)	経口	

参考資料⑤-2 廃棄物処分場における検討条件の詳細

- 3段の土堰堤を有する廃棄物処分場を想定。外部被ばくの評価体系は「全国都市清掃会議、廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領 2010改訂版」を参照。
- 埋設終了後は、土堰堤法面、埋立地上面に保護工(客土、植生基盤)が0.1 m~0.5 m吹付けられ、10年後に公園等利用されるとした。
- 廃棄物処分場から周辺居住者(住宅)までの距離は、宮城県、千葉県の基準を参考に50 mとした。(上流側のみ)

線源	中間覆土または最終覆土	土堰堤
施工時: 廃棄物 処分場 施工	処分場面積: 200 m × 200 m 中間覆土(土壌): 厚さ0.5m、2.0 g/cm³ 最終覆土(土壌): 厚さ0.5m、1.5 g/cm³ 廃棄物(コンクリート): 厚さ3.0m、1.6 g/cm³ 周辺土壌(土壌): 1.5 g/cm³  覆土の敷き均し、締固め作業者 被ばく時間: 1,000 h/y 遮蔽係数: 0.4(重機を使用) 評価位置: 処分場上面中央 周辺居住者 被ばく時間: 8,760 h/y 遮蔽係数: 0.2(20%屋外) 評価位置: 処分場端から50m	土堰堤施工に係る作業者 被ばく時間: 1,000 h/y 遮蔽係数: 1.0(人力、遮蔽なし) 敷き均し、締固め作業者 評価位置: 3段目上面中央 保護工吹付工作業者 評価位置: 2段目法面中央 
供用時: 保護工補修 跡地利用 周辺居住	保護工(土壌): 厚さ0.1 m~0.5 m 1.7 g/cm³ 【土堰堤】 保護工補修作業者 跡地利用者 評価位置: 2段目法面中央 【中間覆土、最終覆土】 保護工補修作業、跡地利用者 評価位置: 処分場上面中央 	【中間覆土、最終覆土】 周辺居住者 評価位置: 処分場端から50 m 保護工補修作業 被ばく時間: 1,000 h/y 遮蔽係数: 1.0(人力、遮蔽なし) ※保護工が剥がれた状態を想定 跡地利用者(埋設10年後に利用) 被ばく時間: 400 h/y 遮蔽係数: 1.0(遮蔽なし) ※保護工による遮蔽を考慮 周辺居住者 被ばく時間: 8,760 h/y 遮蔽係数: 0.2(20 %屋外) 1 h/dの利用を想定 1年間住み続けることを想定
供用時: 地下水移行	- 再生資材を使用する部材のみをソースタームに設定 - 廃棄物処分場への浸透水量: 0.4 m/y	- 空隙率: 0.25(中間覆土、土堰堤)、0.43(最終覆土) - 土壌の収着分配係数: 270 mL/g (IAEA TRS No.364, 土壌、砂) - 廃棄物処分場端から井戸までの距離: 0 m

参考資料⑥-1 災害・復旧時における検討条件の概要

災害・復旧時における検討フロー*

1. 自然災害の要因と考えられる事象として地震、津波、火災、暴風・竜巻、異常降雨(豪雨)を選定し、各土木構造物において変状・崩壊をもたらす可能性のある要因を予察的に検討する。(下表参照)
2. 1.の検討結果を踏まえ、土木構造物に対する自然災害の要因や変状・崩壊の現象の検討例、災害事例などの文献を調査し、線量検討の観点から各土木構造物において検討対象とする災害要因と変状・崩壊の関係を整理する。
3. 線量検討のために災害後の再生資材(線源)の状態の変化をイメージ化するとともに、復旧方法の情報を基に復旧時における再生資材の状態変化もイメージ化する。
4. 上記2.及び3.を踏まえ、作業者、周辺住民の被ばくに関する災害時被ばく経路を具体化する。1 mSv/y相当濃度条件で仮に自然災害による構造物の破損が生じた場合の被ばく線量を検討し、1 mSv/yを超えていないことの確認を行う。

*:再生利用WG(土木学会)においても議論・確認した

変状・崩壊をもたらす可能性のある自然災害の要因の予察的検討

災害の要因	道路・鉄道盛土を例とした災害	防潮堤を例とした災害	海岸防災林を例とした災害
地震	地震動による盛土の変状・崩壊の可能性が考えられる	地震動による防潮堤の変状・崩壊の可能性が考えられる	地震動による海岸防災林の変状・崩壊の可能性が考えられる
津波	津波が到達しない内陸部にあるとして検討から除外	決壊などの堤防の崩壊の可能性が考えられる	津波による海岸防災林の流出の可能性が考えられる
火災	車両等の火災は考えられるが、変状・崩壊までは想定されないため対象外	車両等の火災は考えられるが、変状・崩壊までは想定されないため対象外	防災林樹木の火災の可能性が考えられる
暴風・竜巻	暴風等により破損する恐れは考えられないため対象外	暴風等により破損する恐れは考えられないため対象外	暴風等により防災林樹木の倒木の可能性が考えられる
異常降雨 (豪雨)	豪雨により盛土内の含水状態が変化し、盛土の変状・崩壊の可能性が考えられる	全面に不透水被覆があるため豪雨より防潮堤が変状・崩壊する恐れは考えられないため対象外	豪雨により盛土内の含水状態が変化し、盛土の変状・崩壊の可能性が考えられる

(注)災害要因による道路路盤材の変状・崩壊の可能性は考えられないため、道路路盤材に対する災害時は検討の対象外

参考資料⑥-2-1 道路・鉄道盛土を例とした災害・復旧時被ばく経路

- 盛土の破損形態に対する調査結果に基づき、災害時の道路・鉄道盛土の破損形態として、
Ⅰ. すべり崩壊、Ⅱ. 法面崩壊、Ⅲ. 分断崩壊の3形態を検討。

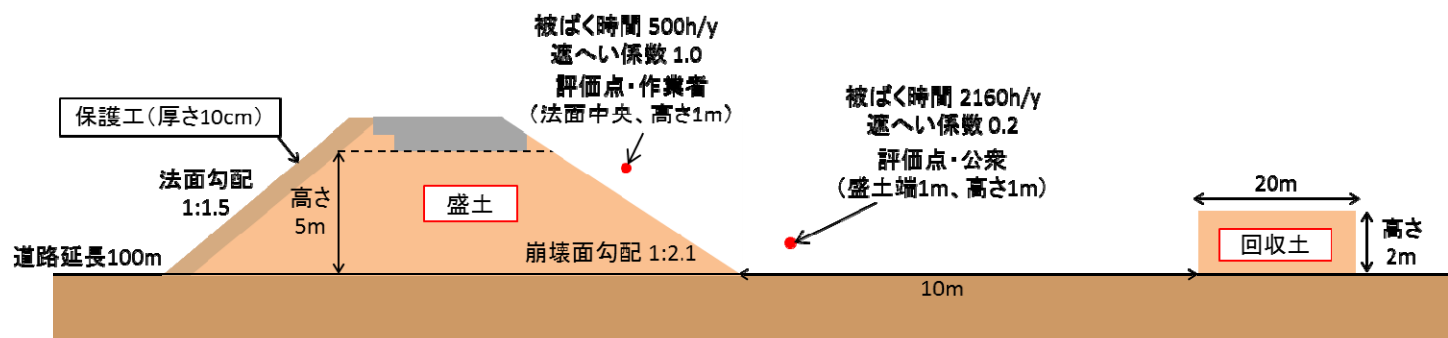
盛土の破損形態、イメージ	盛土の変状・崩壊現象	復旧方法	被ばく経路
Ⅰ すべり崩壊 - 盛土内部より断面が円弧を描く円弧すべりにより大規模に崩落するケース。 - 再生土の露出面としては「Ⅱ 法面崩壊」と同様。Ⅱに比べてより規模が大きく再生土を含む崩壊土が近隣住居付近まで移動し、その線源からの線量寄与も考えられる。	A1: 軟弱層上での円弧すべり・沈下変形 A3: 地すべり地帯での大崩壊 B3: 表面水による洗掘・崩壊 B4: 地盤と盛土との境界面に沿った崩壊 B6: 土石流による法面崩壊 C1: 間隙水圧作用による崩壊 D1: 間隙水圧上昇による大規模な流動的崩壊 D2: 不安定な基礎地盤とともに崩壊	- 崩落土を撤去した後、崩落面の地質調査を行う。 - 地質自体に問題が無ければ、再度盛土を成型する。成形の際、土砂を詰めた耐候性大型土のう袋を積み上げ、支保工を打ち込み固定させる手法が多く用いられる。	収集・保管した崩落土と残存盛土部を線源とし、復旧時の壊面整地作業、盛土敷設、支保工打ち込み等の作業（外部、粉塵吸入、直接経口摂取）及び周辺住民（外部）の被ばくを検討。
Ⅱ 法面崩壊 - 盛土法面の表層が流出、崩壊するケース。 - 法面覆工材部のみが崩落し、内部の再生土が露出する状態を想定。	B1: 雨水の表面侵食によるガリ（掘れ溝）の発生 B2: 雨水の浸透による表層すべり D4: 表層すべり・腹付盛土の変形	- 崩落土を撤去した後、崩落面の地質調査を行う。 - 地質自体に大きな問題が無ければ、崩落防止のため支保工を打ち込む盛土を固定し、再度、法面保護工を行う。	盛土法面の覆土のみが崩落し線源が露出した状態での支保工打ち込み作業及び法面保護工における作業及びその周辺住民の被ばくを検討。
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。 - 天端部は分断により部分的に遮蔽能力が失われているが、法面については崩壊に至らず変位に留まり、遮蔽能力は失われていないものと考えられる。	D3: 基礎地盤の液状化による崩壊	- 盛土上部の分断している箇所については天端構造物の撤去後、再度盛土の敷設となる。 - 法面についてはこれ以上の崩壊を防ぐため、支保工打ち込みや法面保護工を行う。	盛土上部の分断している箇所に対し盛土上部の撤去・整地が行われるため、盛土上部が撤去・整地され、再生土が上面でオープンになっている状態を想定する。 この状態での盛土敷設、支保工打ち込み等の作業及び周辺住民の被ばくを検討。

参考資料⑥-2-2 道路・鉄道盛土を例とした災害・復旧時検討条件の詳細

- 代表的に、道路盛土に対して検討を実施する。(鉄道盛土：一般道路の体系と同様)
- 被ばく期間は、事例調査による復旧期間の最大値3ヶ月に基づき、その間の1日8時間・60日の労働時間と仮定し、500 h/yとする。

I. すべり崩壊

検討対象：すべり崩壊により崩壊した盛土及び回収土からの被ばく



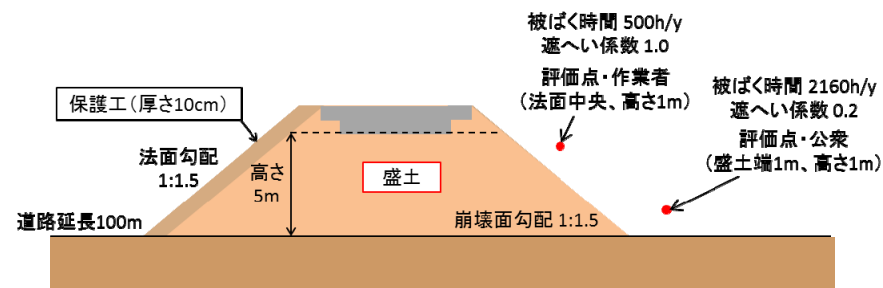
- 崩壊面の勾配：1:2.1
(事例調査¹⁾による崩壊後の傾斜角24～27°より設定)

- 回収土体系：20 m四方×2m
(耐候性大型土のう袋を2段積み上げた場合を想定)

II. 法面崩壊

検討対象：法面崩壊により露呈した盛土からの被ばく

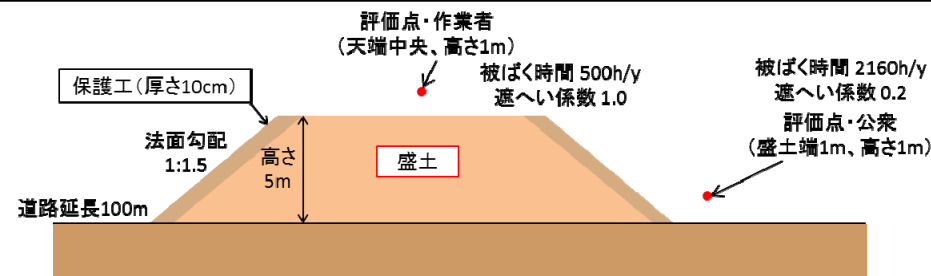
- 崩壊面の勾配 1:1.5
(安全側に立って保護工のみが崩壊した場合を想定)
- 崩壊した保護工は線源を含まないことから、回収土による被ばくは検討対象としない。



III. 分断崩壊

検討対象：分断崩壊により露呈した盛土からの被ばく

- 崩壊後の盛土形態：道路部分を全て剥がした状態
(安全側に立って盛土上面が全て露呈している状態を想定)
- 崩壊した道路部分の多くは道路部材(非線源)であることから、回収土による被ばくは検討対象としない。



1) 土木学会、「2007年能登半島地震による能登有料道路の大規模盛土斜面崩壊原因の分析」

参考資料⑥-2-3 道路・鉄道盛土を例とした災害・復旧時の被ばく線量の検討

- 道路・鉄道盛土の災害・復旧時の被ばく線量の検討経路は以下のとおり。
- 各経路の中で被ばく線量が最大となるのは、分断崩壊した場合の復旧作業者の外部被ばくである。
(右グラフは、道路を代表例として再生資材濃度8,000 Bq/kgで試算した例)

①すべり崩壊での経路

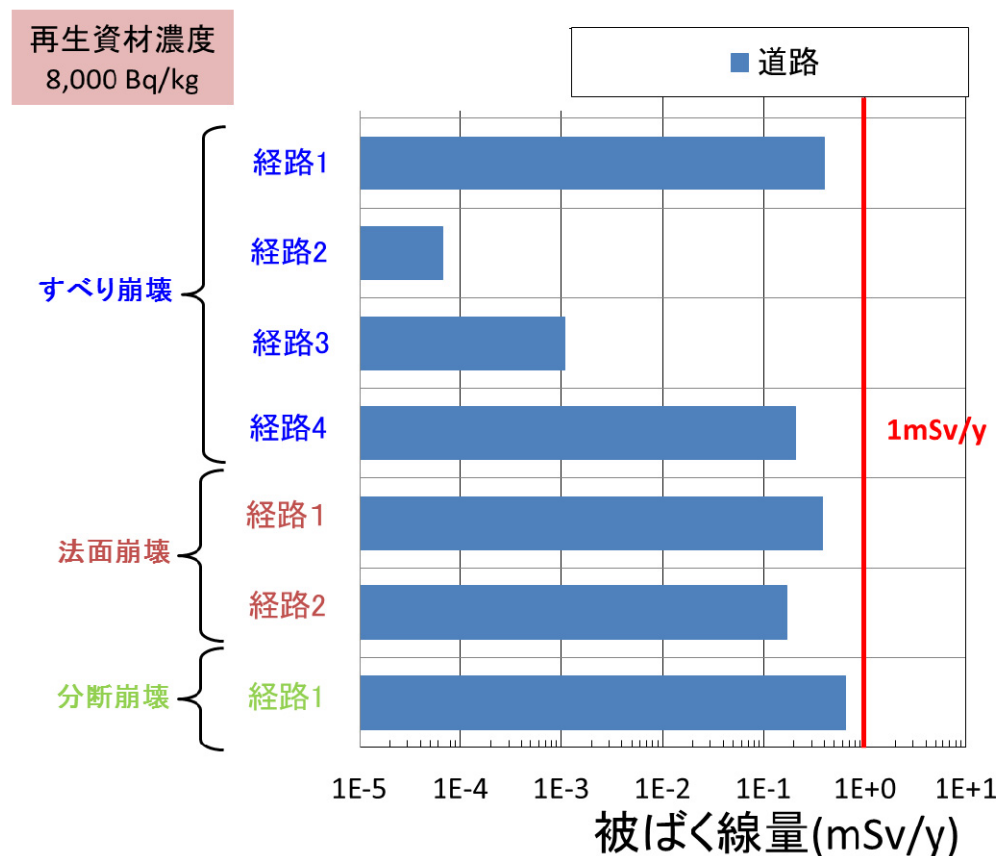
経路	検討対象	線源	対象者	被ばく形態
1	復旧作業	すべり崩壊が生じた盛土、及び回収された崩壊土	復旧作業者	外部
2				粉塵吸入
3				直接経口
4	周辺居住		一般公衆(子ども)	外部

②法面崩壊での経路

経路	検討対象	線源	対象者	被ばく形態
1	復旧作業	法面崩壊が生じた盛土	復旧作業者	外部
2	周辺居住		一般公衆(子ども)	外部

③分断崩壊での経路

経路	検討対象	線源	対象者	被ばく形態
1	復旧作業	分断崩壊が生じた盛土	復旧作業者	外部
2	周辺居住		一般公衆(子ども)	外部
3	回収土 周辺作業	回収土	回収作業者	外部
4	周辺居住		一般公衆(子ども)	外部



※分断崩壊は4つの経路のうち、最も線量が高い経路1のみグラフ化

参考資料⑥-3-1 防潮堤を例とした災害・復旧時被ばく経路

- 災害シナリオ中、地震動による防潮堤の亀裂の発生、基礎地盤の液状化による防潮堤の沈下については、遮へい機能自体は維持されるため、評価対象から除外。
- 自然災害による防潮堤の破損に対する文献調査^{1～5)}を実施し、代表的な破損形態を整理。
- 防潮堤の破損として、Ⅰ. 決壊・流出、Ⅱ. 法面崩壊の2つを検討対象として選定。

防潮堤の破損形態、イメージ	災害事例(発生場所、破損規模)	復旧方法	被ばく経路
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。 - 堤防が切り取られた形状と成り、決壊面に再生資材が露出する状態を想定。	【津波】 東日本大震災(2011) 大船渡市(岩手) : 570 m 山田町(岩手) : 412 m 田老海岸(岩手) : 200 m 野田海岸(岩手) : 120 m 金浜地区(岩手) : 35 m 御伊勢浜海岸(宮城) : 265 m 松崎尾崎の海岸(宮城) : 350 m	- 現地盤の調査・地盤改良(安定化等)を行う。 - 地質自体に大きな問題が無ければ、破損部分への再盛土により再構築を行う。	- 復旧作業(線源:決壊により露呈した盛土、流出し広範囲に分布した盛土)、及び、決壊によって流出し広範囲に分布した盛土の回収作業の被ばくを検討。 (※周辺居住者は、災害時には避難しているとし、検討対象から除外。) - 海へ流出した盛土により汚染された海産物を摂取する一般公衆(成人・子ども)
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。 - 法面覆工コンクリートのみが崩落し内部の再生資材が露出するモデルを想定。	【津波】 東日本大震災(2011) 市川海岸(青森) : 1 km 横道海岸(青森) : 1 km 百石海岸(青森) : 1 km 三沢海岸(青森) : 180 m 長浜海岸(宮城) : 50 m 南浜町(宮城) : 20 m	- 盛土破損面の調査及び改良を行う。 - 大きな問題がなければ、法面覆工コンクリートの再設置を行う。	- 復旧作業(線源:洗掘により露呈した盛土)崩壊面付近での法面覆工コンクリートの施工作業に対する被ばく(外部)を検討。 (※内部被ばくについては、Ⅰ. 決壊・流出で検討するため、検討対象から除外。)
Ⅲ 倒壊(パラペット) 津波到達時の衝撃によって、堤防のパラペット部(堤防上部に設置される胸壁)が倒壊するケース。	【高波】 台風23号(2004) 菜生海岸(高知):パラペット部(高さ1 m)	倒壊したパラペット部を撤去し、新たなパラペットの設置・固定を行う。	破損部分はパラペットのみであり、線源である盛土の露呈・流出等は想定されないため、検討対象から除外する。
Ⅳ ひび割れ・沈下 地震動による亀裂の発生／地盤沈下により、堤防全体が沈下するケース	【地震】 新潟県中越沖地震(2007) 観音岬(新潟) : 30 m	- ひび割れ箇所でのモルタル充填 - 基礎補強工事	堤防盛土の被覆そのものには重大な損傷がなく、遮へい能力は失われることは無いとして検討対象から除外。

1) 地盤工学ジャーナル、「青森県・岩手県北部における地震と津波による複合地盤災害」(2012)
 2) 土木学会論文集、「2011年東北地方太平洋沖地震津波による岩手県宮古市の津波被害調査」(2012)
 3) 地盤工学会、「2011年東北地方太平洋沖地震調査 宮城県北部の地盤災害調査速報」(2011)

4) 岩手県農林水産部、「希望郷いわて農業・農村復興への歩み」(2014)
 5) 国土技術研究センター、「高知県菜生海岸における被災事例調査」(2005)

参考資料⑥-3-2 防潮堤を例とした災害・復旧時検討条件の詳細

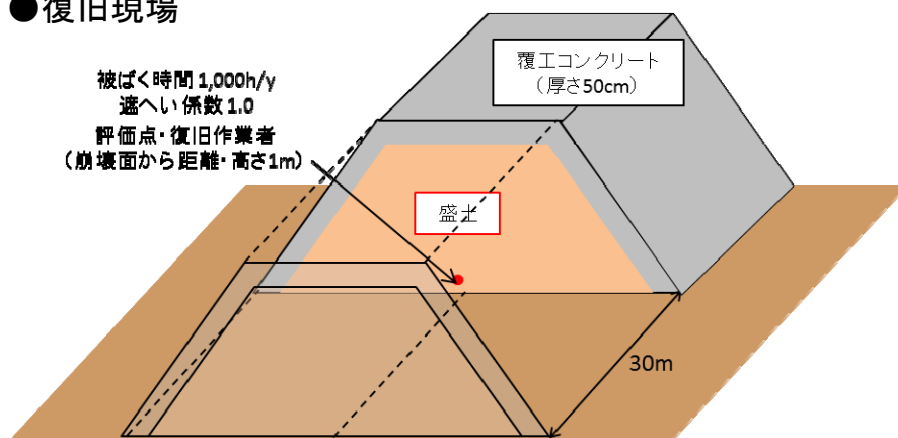
- 代表的に、傾斜堤に対して検討を実施する。
- 防潮堤の津波による災害の場合、復旧作業は長期に及ぶケースも考えられるため、作業者の被ばく期間は安全側に立って施工時と同じ1,000 h/yと仮定する。

I. 決壊・流出

検討対象：決壊により露呈した盛土（2面）及び流出により発生した津波堆積土からの被ばく

● 復旧現場

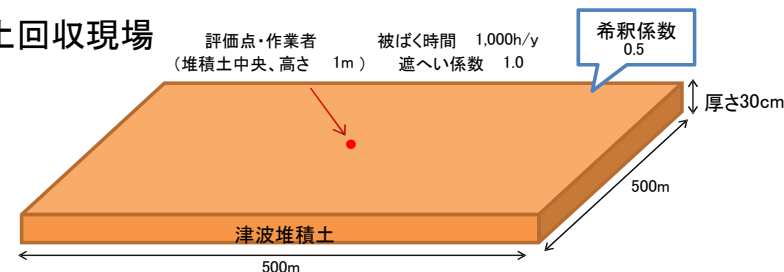
被ばく時間 1,000h/y
遮へい係数 1.0
評価点・復旧作業者
（崩壊面から距離・高さ1m）



- 決壊延長距離：30 m
（事例調査結果における決壊延長距離の最小値）

● 崩壊土回収現場

評価点・作業者
（堆積土中央、高さ 1m）
被ばく時間 1,000h/y
遮へい係数 1.0



- 津波堆積土の分布範囲：500 m四方
（外部被ばく線量が収束する程度の範囲）
- 津波堆積土の厚さ：30 cm
（津波による堆積土に対する事例調査※における堆積土厚さの最大値）

検討対象：海への盛土の流出により汚染した海産物摂取による被ばく

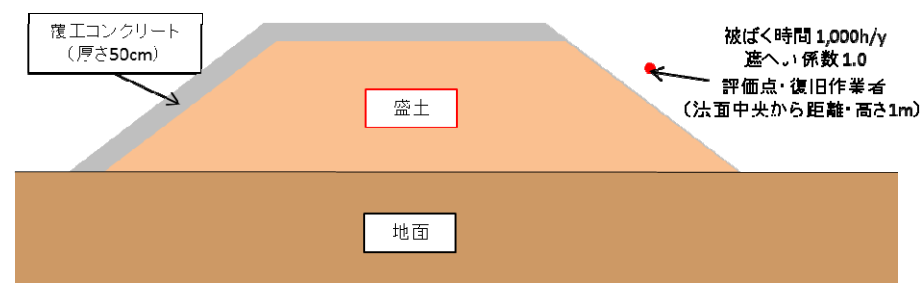
- 盛土の流出量：延長500 mの防潮堤にある盛土全量
（事例調査¹⁾の最大値570 mより設定）

- 海水交換水量： $8.0 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{y}$ （国内平均大潮期における潮流最小値0.255 m/sと安全側に仮定した混合面積1,000 m²より設定）

II. 法面崩壊

検討対象：法面崩壊により露呈した盛土からの被ばく

- 安全側に立って法面に施工された覆工コンクリートの全てが洗掘による法面崩壊で流出したと想定する。
- 決壊延長距離：500 m
（建設時と同じ距離（外部被ばく線量が収束する程度の距離）とした）



1) 常田 賢一、Rakhmadyah Bayu、谷本隆介、中山義久、「2011年東北地方太平洋沖地震の津波による堆積土の堆積特性に関する調査」

参考資料⑥-3-3 防潮堤を例とした災害・復旧時の被ばく線量の検討

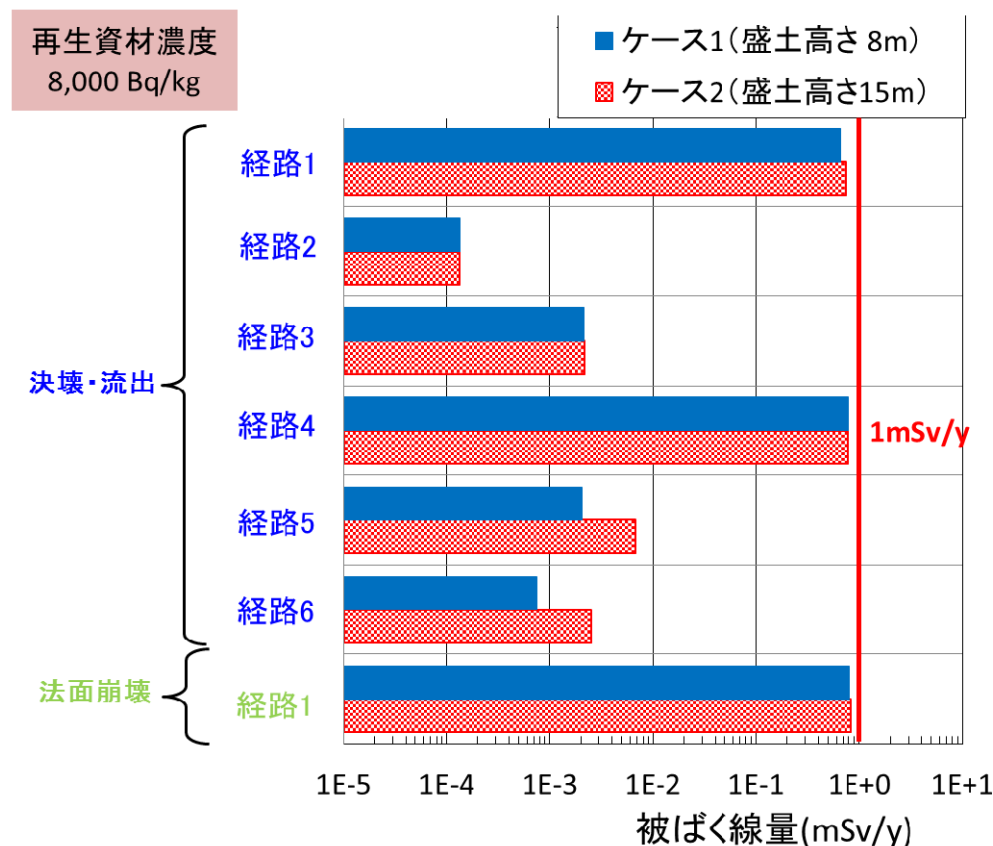
- 防潮堤の災害・復旧時の被ばく線量の検討経路は以下のとおり。
- 各経路の中で被ばく線量が最大となるのは、法面崩壊した場合の復旧作業者の外部被ばくである。
(右グラフは再生資材濃度8,000 Bq/kgで試算した例)

①決壊・流出での経路

経路	検討対象	線源	対象者	被ばく形態
1	復旧作業	盛土が露呈した防潮堤	復旧作業者	外部
2				粉塵吸入
3				直接経口
4		流出した盛土		外部
5	海産物摂取	海産物 (魚類・無脊椎動物・藻類)	一般公衆(成人)	経口
6			一般公衆(子ども)	経口

②法面崩壊での経路

経路	検討対象	線源	対象者	被ばく形態
1	復旧作業	盛土が露呈した防潮堤	復旧作業者	外部



参考資料⑥-4-1 海岸防災林を例とした災害時被ばく経路

- 海岸防災林において想定される災害(津波、火災、暴風・竜巻、地震、豪雨)について、文献調査に基づき、各災害に対する検討条件を整理。
- 海岸防災林で検討対象とする災害として、津波と火災の2つを選定。

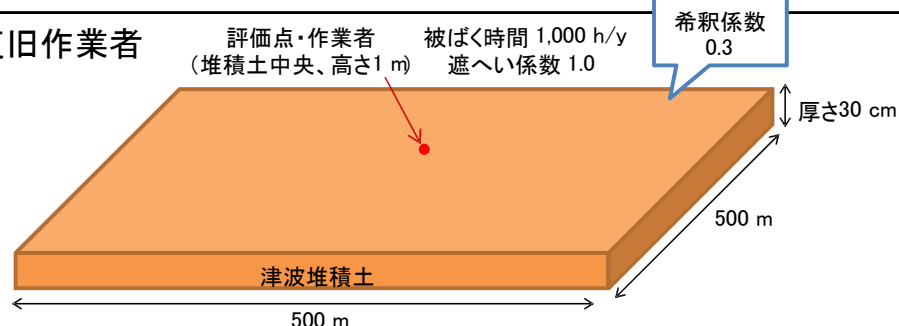
自然災害	災害事例(発生場所、規模)	想定される被ばく	被ばく経路
津波	東日本大震災(2011) ・宮城、岩手、福島他	・津波による破壊で発生した津波堆積土からの被ばく ・海へ流出した盛土により汚染した海産物摂取による被ばく	・復旧作業者 (周辺居住者は災害時には避難しているとし、検討対象から除外) ・海産物を摂取する一般公衆(成人、子ども)
火災	秋田県能代市(1943):21ha消失 【参考】福島県内の一般の森林火災例 ¹⁾ ・鹿島町(1977)、204.90 ha ・川内村(1982)、63.00 ha ・塙町、鮫川村(1987)、204.80 ha ・船引町(1996)、78.99 ha ・浪江町(1999)、24.80 ha ・いわき市(2005)、36.40 ha ・保原町(2005)、14.00 ha	・火災により発生したプルーム由来の被ばく	消防士、周辺居住者に対する ・外部被ばく (クラウド、地表沈着したCsからの被ばく) ・内部被ばく (クラウド、再浮遊したCsの吸入による被ばく)
暴風・竜巻	海岸防災林での事例はなし 【参考】過去10年間の主な風倒木被害例 ²⁾ ・台風7号災(1998) 大阪・奈良・和歌山、計4,552 ha ・台風18号災(1999) 熊本・大分・鹿児島、計3,858 ha	・倒木した樹木からの被ばく	・伐採作業において同様の被ばくを評価しているため、検討対象から除外
		・倒木した樹木の根返りにより露呈した盛土からの被ばく	・本評価の設定(覆土1 m)では盛土が露呈する可能性は低いため、検討対象から除外
地震	海岸防災林での事例はなし	・崩壊により露呈した盛土からの被ばく	・再生資材を覆う覆土の厚さが1 mである場合、盛土のすべり崩壊・法面崩壊・分断破壊のいずれにおいても再生土壌が露出する可能性が低いため、検討対象から除外
豪雨	海岸防災林での事例はなし		

1) 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、平成24年2月

2) http://www.bousaihaku.com/cgi-bin/hp/index2.cgi?ac1=B102&ac2=&ac3=4938&Page=hpd2_view

参考資料⑥-4-2 海岸防災林を例とした災害時検討条件の詳細

- 海岸防災林の盛土材として除去土壌を再利用した場合に、火災・津波により何らかの損壊が発生した場合の追加被ばく線量について検討を行う。検討は、各自然災害に特有な損壊により生じる公衆・作業者の被ばくに対して実施する。

自然災害	火 災	津 波
検討対象	火災により発生したプルームからの被ばく	・津波により広範囲に分布した津波堆積土からの被ばく ・海へ流出した盛土により汚染された海産物摂取による被ばく
検討経路	周辺居住者・消防士に対する ・外部被ばく(クラウド、地表沈着したCsからの被ばく) ・内部被ばく(クラウド、再浮遊したCsの吸入による被ばく)	・復旧作業員に対する外部被ばく ・海産物を摂取する一般公衆(成人・子ども)に対する内部被ばく
評価体系	➤ 想定する火災の規模: 延焼面積20 ha、延焼期間1日(既往の森林火災評価¹⁾での最大値) ➤ 検討時期: 37年後(海岸防災林樹木中のCs濃度が最も高くなる時期) ➤ 検討条件既往の森林火災評価¹⁾を踏襲し様々な大気の状態に対して計算を行い、最も影響が大きくなる条件を導出。 ・大気安定度:A型(不安定)、D型(中立)、F型(安定) ・プルーム上昇高さ:100,200,500 m 1)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	・復旧作業員  ➤ 線源:津波堆積土(盛土と覆土が均質に混合すると仮定) ・厚さ → 津波堆積物に対する調査結果²⁾の最大値 ・半径 → 被ばく線量の値が収束する程度の値 ➤ 被ばく時間:1,000 h/y 年間労働時間のうち半分の時間を、復旧作業に費やすと仮定 ・一般公衆(海産物摂取) ➤ 盛土の流出範囲:海岸防災林(幅200 m、延長500 m)内にある盛土の全量が流出すると仮定 ➤ 海水交換水量: $8.0 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{y}$ (国内の平均大潮期における潮流最小値0.255 m/sと安全側に仮定した混合面積1,000 m²より設定) 2)常田 賢一、Rakhmadyah Bayu、谷本隆介、中山義久、「2011年東北地方太平洋沖地震の津波による堆積土の堆積特性に関する調査」

参考資料⑥-4-3 海岸防災林を例とした災害・復旧時の被ばく線量の検討

- 海岸防災林の災害・復旧時の被ばく線量の検討経路は以下のとおり。
- 各経路の中で被ばく線量が最大となるのは、津波の場合の復旧作業者の外部被ばくである。
(右グラフは再生資材濃度8,000 Bq/kgで試算した例)

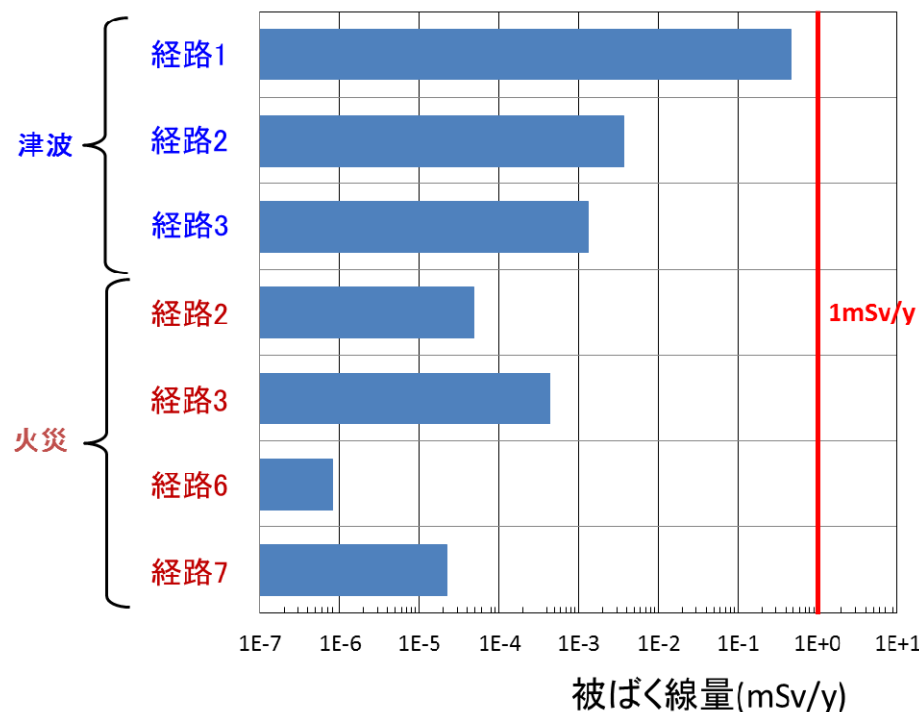
①津波での経路

経路	検討対象		線源	対象者	被ばく形態
1	復旧作業	堆積土撤去	津波堆積土	復旧作業者	外部
2	海産物摂取		海産物 (魚類、無脊椎動物、藻類)	一般公衆(成人)	経口
3				一般公衆(子ども)	経口

②火災での経路

経路	対象者	被ばく形態
1	消防士	プルームに含まれるCsによる外部被ばく
2		地表沈着したCsによる外部被ばく
3		プルームに含まれるCsの吸入による内部被ばく
4		地表沈着したCsの再浮遊によるCsの吸入による内部被ばく
5	周辺居住 (一般公衆)	プルームに含まれるCsによる外部被ばく
6		地表沈着したCsによる外部被ばく
7		プルームに含まれるCsの吸入による内部被ばく
8		地表沈着したCsの再浮遊によるCsの吸入による内部被ばく

再生資材濃度
8,000 Bq/kg

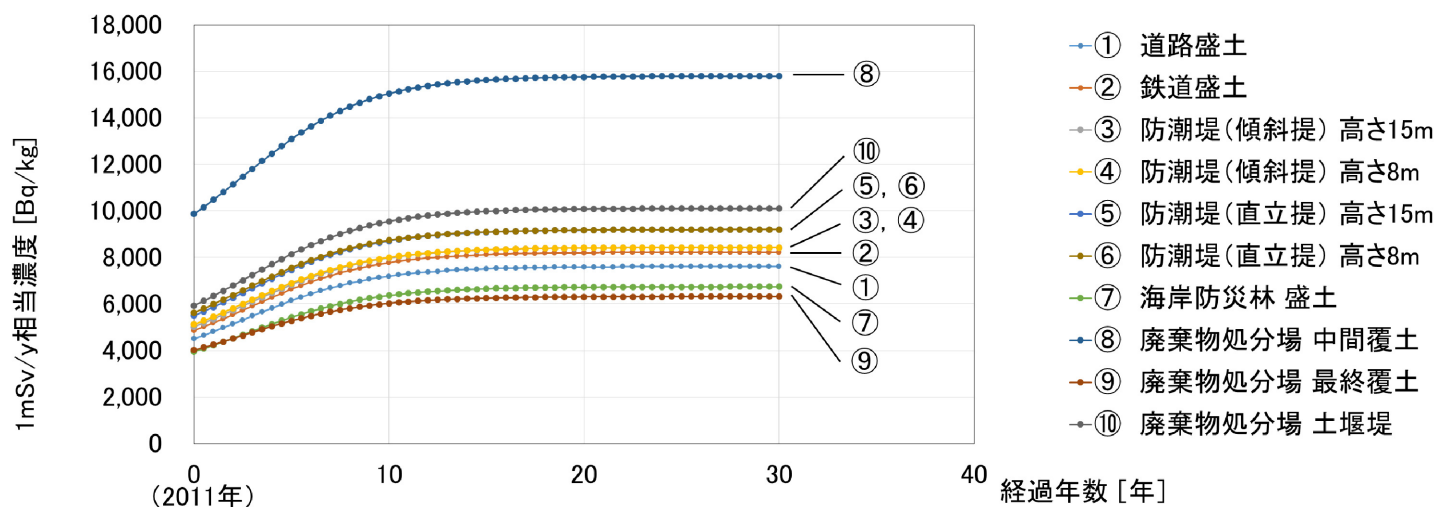


※火災は8つの経路のうち、線量の大きさ順に上位4つの経路のみグラフ化

参考資料⑦ 年間1 mSv相当濃度の経時変化

- ^{134}Cs と ^{137}Cs は追加被ばく線量に及ぼす影響が異なる(^{134}Cs の方が影響が大きい)ため、追加被ばく線量評価は再生利用時の ^{134}Cs と ^{137}Cs の存在比を考慮する必要がある。
- 今回の被ばく線量評価における年間1 mSv相当濃度は、平成28年3月現在の ^{134}Cs と ^{137}Cs の存在比を基に算出しているが、今後、時間経過に伴い、追加被ばく線量に及ぼす影響がより小さい ^{137}Cs が支配的となることから、年間1 mSv相当濃度は増加する方向で推移する。このため、再生利用後の追加被ばくは時間経過に伴い低減する方向で推移する。

事故時からの 経過年数	1 mSv/y相当濃度 [Bq/kg]									
	道路盛土	鉄道盛土	防潮堤（傾斜堤）		防潮堤（直立堤）		海岸防災林 盛土	廃棄物処分場		
			高さ15 m	高さ8 m	高さ15 m	高さ8 m		中間覆土	最終覆土	土堰堤
0(2011(H23)年)	4,500	4,900	5,000	5,100	5,500	5,600	4,000	9,900	4,000	5,900
5(2016(H28)年)	6,100	6,600	6,800	6,900	7,500	7,500	5,400	13,000	5,300	8,100
10(2021(H33)年)	7,200	7,800	8,000	8,000	8,700	8,700	6,400	15,000	6,000	9,500
15(2026(H38)年)	7,500	8,100	8,300	8,300	9,100	9,100	6,700	16,000	6,300	10,000
20(2031(H43)年)	7,600	8,200	8,400	8,400	9,200	9,200	6,700	16,000	6,300	10,000
25(2036(H48)年)	7,600	8,200	8,400	8,400	9,200	9,200	6,700	16,000	6,300	10,000
30(2041(H53)年)	7,600	8,200	8,400	8,400	9,200	9,200	6,700	16,000	6,300	10,000



参考資料⑧ 再生利用とクリアランスの比較

	再生利用	クリアランス
考え方	○事故により原子力施設外に広く飛散した放射性物質に汚染された土壌のうち、適切な処理をして再生資材としてのものを、追加被ばく線量を制限するための措置等を施し、放射性物質汚染対処特措法に基づく基準等に従い適切な管理の下で、用途を限定して使用する。	○原子力施設等の解体等で発生するもののうち、放射性物質として取り扱う必要のないものについて、原子炉等規制法等の放射線防護に係る規制の枠組みから除外して制約なく利用する。
対象物	○除去土壌に由来する再生資材	○金属くず、コンクリート破片、ガラスくず（ロックウール及びグラスウールに限る）
管理の内容	○有り ・計画・設計時の条件 使用する場所、事業種、使用部位等の限定 ・再生資材の放射能濃度の限定 用途ごとの追加被ばく線量評価を基に設定 ・施工・供用時における管理方法 出荷時の濃度確認、受入量の管理、分別保管、持ち出しの管理、遮へい厚の確保・維持、飛散・流出の防止措置、保守点検、記録の作成・保管等	○無し
担保措置	○有り ・管理の内容について、特措法に基づく基準等として規定する予定	○無し
参照する追加被ばく線量	○施工時、修復時等も含め1 mSv/y以下。一般公衆が長期にわたって利用する供用時は、0.01 mSv/y以下	○0.01 mSv/y以下
関係法律	放射性物質汚染対処特措法	原子炉等規制法等

参考資料⑨ 追加被ばく線量のめやす

- 再生利用においては、破損時等を除く供用時における一般公衆の追加的な被ばく線量が、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(年間0.01 mSv)になるように適切な遮へい等の措置を講じる。
- 年間0.01 mSv(=10 μSv)は、下図のように、自然放射線のレベルと比べて十分小さい値である。

