

福島環境修復有識者検討委員会による除染技術等の調査検討 第2報

平成23年10月～平成24年3月

一般社団法人 日本原子力技術協会

1. 福島環境修復有識者検討委員会設置の目的と検討内容

この有識者検討委員会は、日本原子力技術協会が基礎調査として、平成23年度後半から平成24年度にかけて実施している「原子力発電所周辺の環境修復に関する調査」の成果として得られる国内外の土壌環境修復技術（除染、原位置固化、汚染土壌の除去或いは土壌入れ替えなど）について、福島汚染地域の浄化への適用性に関して、学識経験者等の参加協力を得て検討を進めるために設置したものである。

平成23年度の実施内容としては、米国エネルギー省の核関連施設周辺の汚染浄化事例及び我が国における重金属等の有害物汚染浄化事例などの技術情報に対して、専門的立場からレビューを行い、福島の環境修復への適用性の観点から個々の技術を検討・評価した。

また、これらの技術情報を福島の環境修復に携わる方々が参考にしやすいように、クリーンアップ分科会の EURANOS ハンドブックの除染情報と同様の形態でデータベース化を行っている。

2. 有識者検討委員会の構成

区分	名前	所属	原子力学会等委員活動
学識経験者	新堀 雄一	東北大学工学研究科量子エネルギー工学専攻 准教授	埋設後管理分科会主査、浅地中処分安全評価分科会副主査
学識経験者	宮脇健太郎	明星大学 理工学部 総合理工学科（環境・生態系）教授	埋設後管理分科会委員
学術研究機関	川上 泰	原子力安全研究協会 研究参与（兼務・原技協 TA）	浅地中処分安全評価分科会主査、埋設後管理分科会委員、クリーンアップ分科会委員
学術研究機関	河西 基	電中研 地球工学研究所バックエンド研究センター長	埋設後管理分科会委員、浅地中処分安全評価分科会委員
その他団体（非営利）	山本 正史	原子力環境整備促進・資金管理センター 基準・規格調査研究プロジェクト チーフ・プロジェクトマネジャー	埋設後管理分科会副主査 浅地中処分安全評価分科会幹事、クリーンアップ分科会委員
その他団体（非営利）	吉原 恒一	日本原子力技術協会 規格基準部 調査役	埋設後管理分科会幹事 浅地中処分安全評価分科会委員、クリーンアップ分科会委員
その他団体（非営利）	石倉 武	財団法人 エネルギー総合工学研究所 NUPEC(原子力工学センター 参事、(兼務・原技協 TA)	廃止措置分科会委員
民間会社	橋本 正憲	ランドソリューション(株)	
民間会社	沼田 守	日揮(株)技術研究所 所長	
民間会社	野上 義夫	日本エヌ・ユー・エス(株)環境事業部門 事業開発室 室長代理	埋設後管理分科会常時参加者
民間会社	関口 高志	戸田建設(株) 岩盤技術部 課長	土木学会・設計品証WG委員 浅地中処分安全評価分科会委員、クリーンアップ分科会委員
常時参加者等：エネ総研・木村公隆、電事連・山田基之（非公式参加） JANTI/仙波毅・池田整・安田裕二・初岡賢政			

(2) 平成 23 年度の審議状況

第 1 報ですでに報告済みにつき省略するが、今回の報告に係る審議事項のみ抜粋して以下に再掲した。

- ・田畑の除染では、関東ローム層では Cs がかなり深く浸透する場合もあること、及び除染方法の最適化検討では、線量率の低減化に加え、農用地としての土壌の適性を考慮すべき。
- ・土壌への Cs の吸着は強いが、焼却灰などからは溶出し易いことが環境省のガイドラインでも述べられており、留意する必要がある。
- ・農地のカドミウム汚染では天地返し等の対策が取られているが、福島でこの方法を採用した場合、線量率低減化は図れるが、天地返しを行った農地では、下層部に汚染土壌が残留するので農耕の再開には不安あり。
- ・上記課題の解決策として表層汚染土の剥ぎ取り＋他場所からの客土があるが、土質が変わると農作への悪影響が懸念される。これを解決するいいアイデアはないか。

3. 環境修復技術の調査結果と福島への適用性検討

3.1 米国エネルギー省（DOE）環境修復技術に関する調査

第 1 報で報告済みにつき、省略する。

この調査結果は、日本原子力技術協会 HP に、平成 24 年 6 月 15 日に掲載している。

(URL <http://www.gengikyo.jp/>)

3.2 我が国の土壌汚染修復技術の調査

我が国において過去に重金属等の有害物によって汚染された一般環境汚染（特に土壌汚染）の修復事例とその考え方についての調査を行った。

(1) 調査対象とした汚染物質

調査対象とする「重金属等の有害物」の具体的な種類は、「土壌汚染対策法」の第二種特定有害物質の 9 種類と「ダイオキシン類対策特別措置法」に基づくダイオキシン類とした。

・第二種特定有害物質の 9 種類

- ①カドミウム及びその化合物 / ②六価クロム化合物 / ③シアン化合物
- ④水銀及びその化合物 / ⑤セレン及びその化合物 / ⑥鉛及びその化合物
- ⑦砒素及びその化合物 / ⑧ふっ素及びその化合物 / ⑨ほう素及びその化合物

・ダイオキシン類

- ①ポリ塩化ジベンゾフラン / ②ポリ塩化ジベンゾーパラージオキシン
- ③コプラナーポリ塩化ビフェニル

(2) 土壌環境汚染修復技術の概要調査

概要調査に当たり、まず、環境省の「土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン改定版（平成 23 年 8 月）」等の公開文献を参照し、基準（土壌溶出量基準、土壌含有量基準、地下水基準、第二溶出量基準、運搬に関する基準）や調査、区域指定の考え方、土壌汚染対策の分類と件数について整理した。次に、土壌汚染対策法に基づく措置の概要と要求事項を整理し、それらについて、福島県環境修復技術としての適用性の予備的検討を行った。その結果を表 3.2-1 に示す。

また、土壌環境修復技術の概要調査結果の具体的な内容については別紙 3.6 に示す。

表 3.2-1 環境修復技術としての評価結果

土壌汚染対策法に基づく措置	適用可能性 ◎高、○有、×低
地下水の水質の測定	(検討対象外)
原位置封じ込め	○
遮水工封じ込め	◎
地下水汚染の拡大の防止	○
土壌汚染の除去（掘削除去）	◎
土壌汚染の除去（原位置浄化）	○
遮断工封じ込め	◎
不溶化（原位置不溶化）	○
不溶化（不溶化埋め戻し）	○
舗装	◎
立入禁止措置	◎
土壌入換え（区域外）	◎
土壌入換え（区域内）	◎
盛土	◎

（３）土壌環境汚染修復技術の詳細調査

概要調査で得られた修復技術の内、以下の技術については、より詳細に環境修復技術の内容を把握するため、具体的な詳細調査を行った。なお、「地下水の水質測定」は調査対象事項ではないため除外し、「遮水工封じ込め」、「遮断工封じ込め」については、中間貯蔵施設等の地下水対策に関する技術であるため、この詳細調査の対象からは除外した。詳細調査の対象とした技術は以下のとおりである。

- ・土壌汚染の除去（掘削除去*、原位置浄化） *掘削除去は除去後の処理方法の調査
- ・不溶化（原位置不溶化、不溶化埋め戻し）

なお、環境修復技術の詳細調査結果の具体的な内容については別紙 3.7 に示す。

（４）我が国の土壌汚染修復技術のコスト比較

土壌汚染修復のコスト比較は、いつまでに（期間）、何を（対象とする汚染物質）、どのように（環境修復の方法）、どこで（環境修復の場所又は処分先）、どこまで（環境修復の目標）行うか、という計画に基づいて行う必要がある。

この調査では、対策費用の試算例と実際に選択されている対策内容、不動産鑑定を行う際の汚染を保有する土地の評価方式と内容、汚染物質ごとの概算処理費、処理を伴う土壌汚染対策の一般的な工事費用について、調査、整理を行った。

その結果、舗装等のばく路経路遮断型の措置は、掘削除去の措置に比べて低コストであるが、実際に採用される措置としては掘削除去の方が多いこと、掘削除去後の処理費用については、多くのケースにおいて、不溶化処理→洗浄処理→埋立処分→熱処理の順に高くなることが分かった。

なお、我が国の土壌汚染修復技術のコスト比較の具体的な内容は、別紙 3.8 に示す。

（５）ダイオキシン類の調査

ダイオキシン類については、関連省庁のパンフレットや環境省の「ダイオキシン類基準不適合土壌の処理に関するガイドライン（平成 23 年 3 月）」等を参照し、基準（耐容一日摂取量、環境基準）や

ダイオキシン類基準不適合土の保管設備、処理設備での飛散防止のための構造、設備の例等について調査、整理を行った。その結果、ダイオキシン類の対策は特別措置法の制定後急速に進み、現在は排出量が激減していることや飛散防止や地下水浸透防止の考え方には福島の実地修復の参考になることがわかった。ダイオキシン類に関する調査結果を別紙 3.9 に示す。

(6) 我が国の土壌汚染修復技術の福島への適用性検討

福島における放射性セシウムによる土壌汚染の実態に関するデータ、国や自治体の土壌汚染修復の基本的考え方、原子力学会クリーンアップ分科会の除染技術カタログに掲載されている除染技術などを参考にして、本調査で得られた我が国の土壌汚染修復技術の福島への適用性について、土地の利用用途（農業用地、公園、森林など）別に検討し、有力な候補技術の絞り込みを行った。

検討結果の概要を、別紙 3.10 に取りまとめて示す。

(7) 除染技術カタログ掲載候補技術

上記（6）の検討結果に基づき、我が国の土壌汚染修復技術のうち、原子力学会クリーンアップ分科会の除染技術カタログへ提供できるとされる有望技術の候補として、表 3.2-2 に示す有望技術の中から、特に適用可能性が高いと考えられる以下の3つの技術を選定した。

- ・被ばく経路の遮断 天地返し（入換え）
- ・移行低減栽培技術 吸着性の物質の投与
- ・休耕田での措置 土壌の入換え

なお、これらの3つの技術については、除染技術カタログへの掲載フォームの形に整理して、別紙 3.11 に示す。

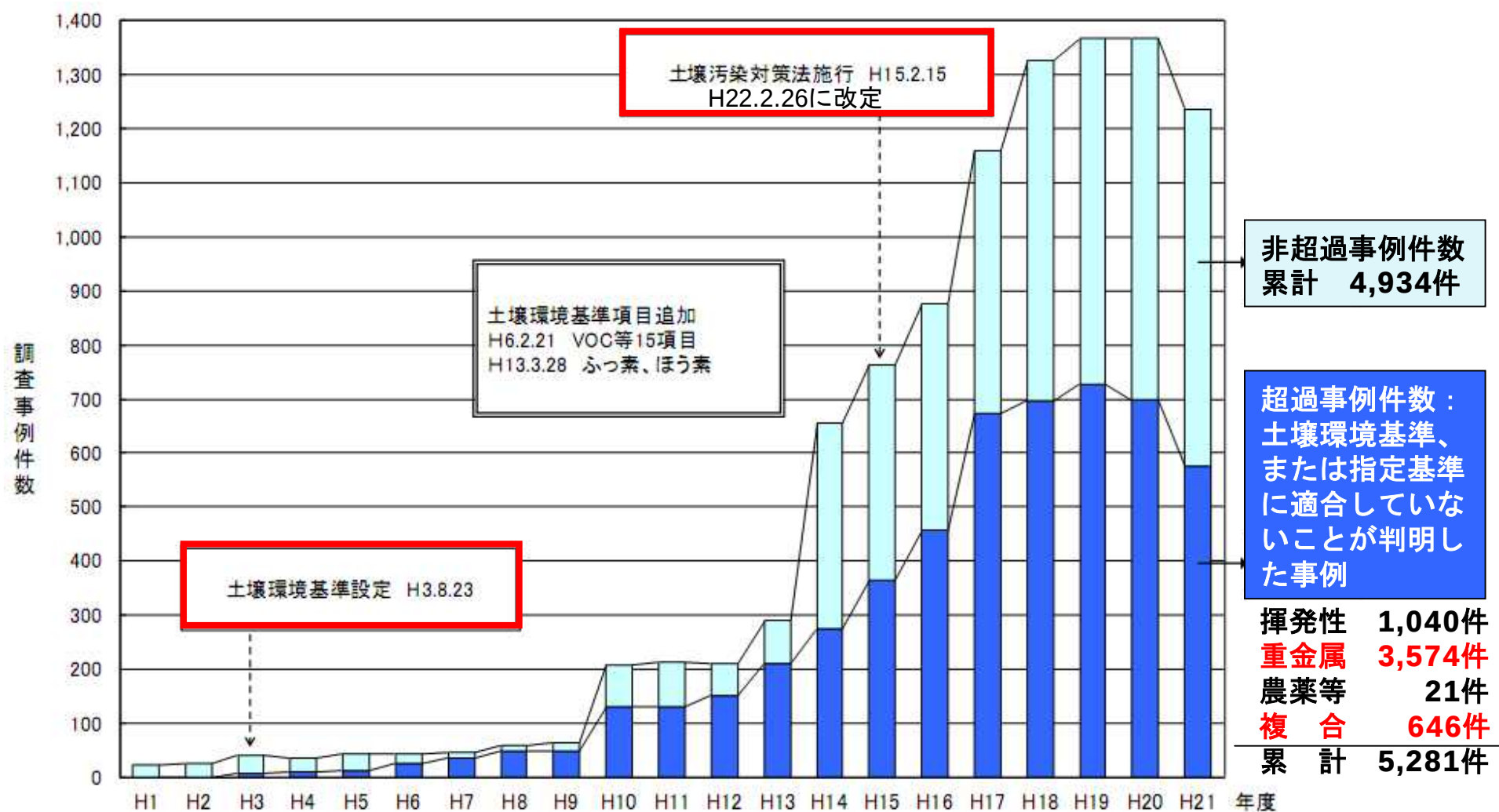
表 3.2-2 環境修復技術のうち有望技術の選定

環境修復技術		選定した有望技術 (CUP番号はCUP分科会除染技術カタログの既掲載項目、 は追加候補)	
土 壌 汚 染 の 除 去	表土の削り取り	—	CUP 19:水耕田 表土の剥ぎ取り、24:畑地表土の剥ぎ取り
	除草	—	
	荒かき(水による土壌攪拌・除去) * 水田のみ	—	CUP 20:水耕田 荒かき
	土壌洗浄(表土の削り取り後の処理)	—	CUP 21:水耕田 土壌洗浄、28:畑地 土壌洗浄、29:畑地 土壌の希酸洗浄とCsの吸着除去
被 ば く 経 路 の 遮 断	天地返し(入換)	畑地 天地返し(局所反転深耕)	深耕との組み合わせが効率的で、汚染土壌の排出もない
	反転耕(攪拌・入換)	—	CUP 26:畑地 プラウによる表土剥ぎ取りと埋設
	深耕(攪拌)	—	CUP 18:水耕田 鋤き込み、25:畑地 土地掘り起し
移 行 低 減 栽 培 技 術	施肥	—	CUP 23:水耕田 施肥、31:畑地 施肥
	低セシウム吸収作物の栽培 * 畑地のみ	—	CUP 27:畑地 低セシウム吸収作物の栽培
	吸着性の物質の投与	畑地・水耕田 原位置不溶化(ゼオライトの投与)	移行低減栽培技術としてセシウムへの効果が確認されており、汚染土壌の排出もない
休 耕 田 で の 措 置	覆土	—	CUP 10:敷地 表面被覆
	土壌の入換え	畑地 土壌の入換え(休耕田の活用)	汚染田畑と休耕田を一括して除染でき、汚染土壌の排出もない
	ファイトレメディエーション	—	CUP 22:水耕田 ファイトレメディエーション、30:畑地 ファイトレメディエーション
汚 染 の 流 入 防 止	吸着性の物質の投与	—	技術の内容は移行低減栽培技術と同等
	畦道、用水路の除染	—	ここでは技術の内容まで言及していない

別紙3.6 我が国の土壤環境修復技術調査結果

1. 我が国の土壤環境汚染の実態

1.1 土壤環境基準超過事例の推移



1.2 重金属等の汚染状態に関する基準及び地下水基準

地下水の摂取等 によるリスク		直接摂取に よるリスク		地下水の水質汚濁の基準	措置の選択を決めるための基準
第二種特定有害物質の種類		土壌溶出量基準 (mg/L)	土壌含有量基準 (mg/kg)	地下水基準 (mg/L)	第二溶出量基準 (mg/L)
Cd		0.01以下	150以下	0.01以下	0.3以下
Cr ⁶⁺		0.05以下	250以下	0.05以下	1.5以下
CN		検出されないこと	50以下 (遊離シアンとして)	検出されないこと	1.0以下
Hg		水銀が0.0005以下、 かつ、アルキル水銀 が検出されないこと	15以下	水銀が0.0005以下、 かつ、アルキル水銀 が検出されないこと	水銀が0.005以下、 かつ、アルキル水銀 が検出されないこと
Se		0.01以下	150以下	0.01以下	0.3以下
Pb		0.01以下	150以下	0.01以下	0.3以下
As		0.01以下	150以下	0.01以下	0.3以下
F		0.8以下	4,000以下	0.8以下	24以下
B		1以下	4,000以下	1以下	30以下

同じ値
 10～30倍

1.3 健康被害のリスクに対する汚染の除去等の措置

地下水の摂取等によるリスクに対する汚染の除去等の措置

措置の種類	第二種特定有害物質 (重金属等)		【凡例】 ◎講ずべき汚染の除去等の措置（指示措置） ○環境省令で定める汚染の除去等の措置（指示措置と同等以上の効果を有すると認められる措置） ×選択できない措置
	第二溶出量基準		
	適合	不適合	
不透水層がある場合 → 原位置封じ込め	◎	◎*	
遮水工封じ込め	◎	◎*	
地下水汚染の拡大の防止	○	○	
土壌汚染の除去	○	○	
遮断工封じ込め	○	○	
不溶化	○	×	

不透水層がある場合

地下水の摂取等によるリスク

土壌に含まれる有害物質が地下水に溶け出して、その有害物質を含んだ地下水を飲んで口にするによるリスク

直接摂取によるリスク

有害物質を含む土壌を口や肌などから直接摂取することによるリスク

* 基準不適合土壌の汚染状態を第二溶出量基準に適合させた上で行うことが必要

直接摂取によるリスクに対する汚染の除去等の措置

措置の種類	通常の土地	盛土では支障がある土地*1	特別な場合*2	【凡例】 ◎講ずべき汚染の除去等の措置(指示措置) ○環境省令で定める汚染の除去等の措置(指示措置と同等以上の効果を有すると認められる措置) ×選択できない措置
舗装	○	○	○	
立入禁止	○	○	○	
盛土	◎	×	×	
土壌入換え	○	◎	×	
土壌汚染の除去	○	○	◎	

*1 「盛土では支障がある土地」とは、住宅やマンション（一階部分が店舗等の住宅以外の用途であるものを除く。）で、盛土して50 cmかさ上げされると日常生活に著しい支障が生ずる土地

*2 乳幼児の砂遊び等に日常的に利用されている砂場等や、遊園地等で土地の形質の変更が頻繁に行われ盛土等の効果の確保に支障がある土地については、土壌汚染の除去を指示することとなる。

環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）に加筆

1.4 重金属等に対する土壤汚染対策の措置工法別件数

ハッチング部は
件数が多い措置

措置※1	措置の タイプ	健康被害のリスク		土壤環境基準設定(H3.8.23)～H21年度の件数※2 (土壤汚染対策法(H15.2.15)に基づく措置の件数)	
		地下水摂取	直接摂取		
地下水の水質の測定	ばく露経路 遮断型の 対策	○	—	214 (12)	
原位置封じ込め		○	—	80 (3)	うち、鋼矢板工法 32 地中壁工法 19
遮水工封じ込め		○	—	13 (0)	
地下水汚染の拡大の防止		○	—	— ※3	
土壤汚染の除去(掘削除去)	土壤汚染 の除去	○	○	2,296 (199)	掘削除去後の土壤の処理方法:次項
土壤汚染の除去(原位置浄化)		○	○	92 (4)	うち、地下水揚水 58、化学的分解 13 土壤ガス吸引 4、バイオレメディエーション 4
遮断工封じ込め	ばく露経路 遮断型の 対策	○	—	23 (1)	
不溶化(原位置不溶化)		○	—	55 (0)	
不溶化(不溶化埋め戻し)		○	—	66 (0)	
舗装		—	○	324 (24)	うち、アスファルト 185、コンクリート 139
立入禁止		—	○	81 (12)	
土壤入換え(区域外)		—	○	69 (2)	
土壤入換え(区域内)		—	○	29 (2)	
盛土		—	○	102 (4)	

※1 措置の区分

環境省 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に
関するガイドライン 改訂版 (平成23年8月)

※2 実施件数

環境省 平成21年度 土壤汚染対策法の施行状況及び土壤
汚染調査・対策事例等に関する調査結果 (平成23年3月)

※3

その他で計上した120件(2件)
に含まれると考えられる

1.5 「掘削除去」後の土壌の処理方法とその件数

ハッチング部は
件数が多い措置

「掘削除去」後の土壌の処理の方法		土壌環境基準設定(H3.8.23)～H21年度の件数 (土壌汚染対策法(H15.2.15)に基づく措置の件数)
熱処理		敷地内 8 (1) 敷地外 143 (16)
洗浄処理		敷地内 25 (3) 敷地外 404 (98)
化学処理		敷地内 37 (2) 敷地外 67 (1)
生物処理		敷地内 1 (0) 敷地外 0 (0)
抽出処理		敷地内 4 (1) 敷地外 47 (30)
その他		敷地内 7 (0) 敷地外 19 (4)
処分場 (廃棄物処理法の 最終処分場)	管理型(一廃)	43 (3)
	管理型(産廃)	272 (50)
	遮断型	13 (1)
	安定型	7 (0)
埋立場所 (海洋汚染防止法 の埋立場所等)	管理型処分場相当	100 (7)
	遮断型	2 (1)
	安定型	1 (0)
セメント製造施設の利用		960 (0)
その他		39 (0)

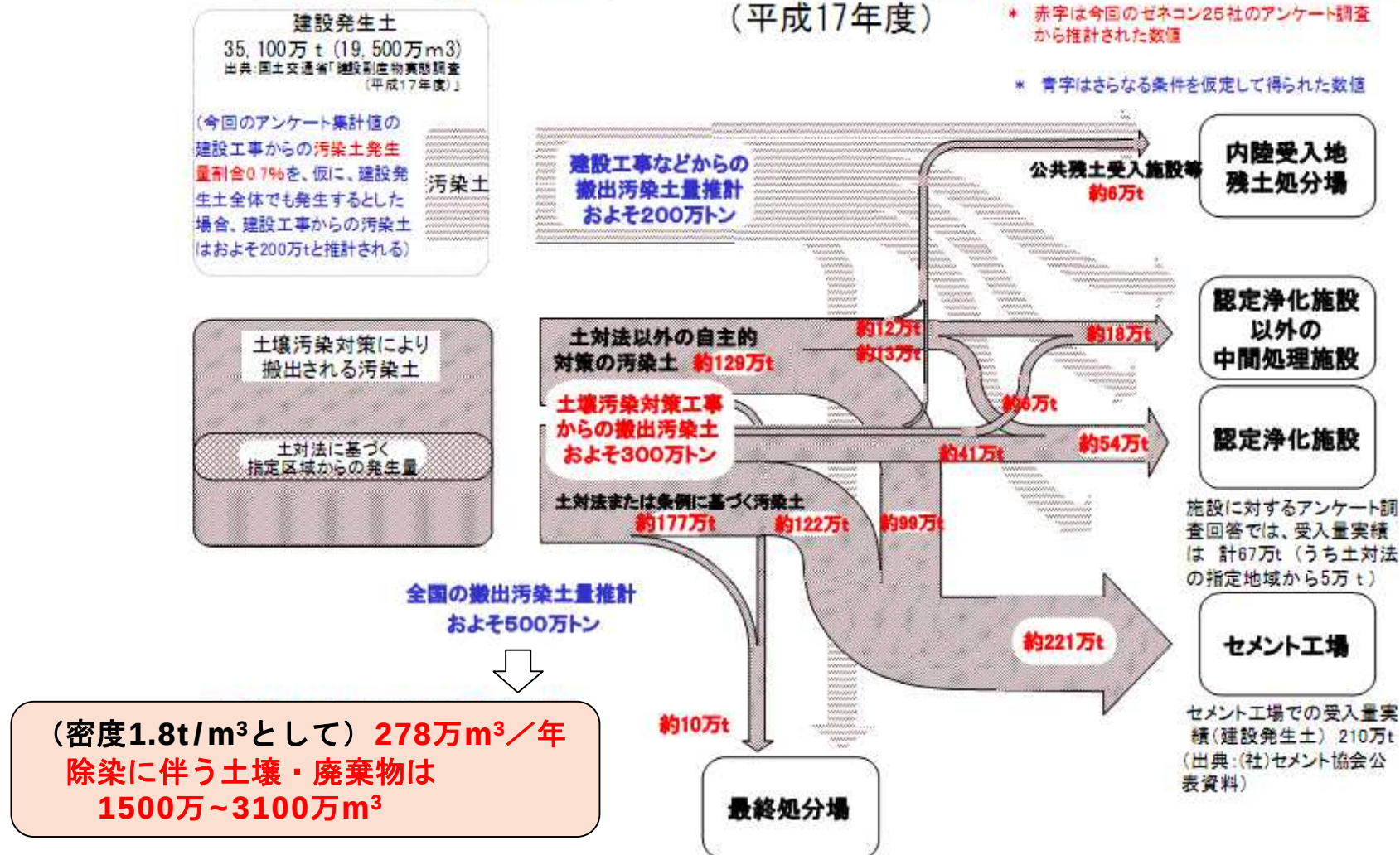
1.6 重金属等による汚染土壌の掘削除去後の土壌の処理

我が国の搬出汚染土の全体的な流れのイメージ(推計)

(平成17年度)

* 赤字は今回のゼネコン25社のアンケート調査から推計された数値

* 青字はさらなる条件を仮定して得られた数値



1.7 運搬に関する基準の概要（法第17条、規則第65条）

- ・ 運搬中は、汚染土壌を耐久性を有する浸透防止シート等で覆うことや、汚染土壌を密閉性を有し、損傷しにくいドラム缶、フレキシブルコンテナ及びコンテナ等の容器に入れて運搬する。
- ・ 汚染土壌の搬出に当たっては、自動車等のタイヤ・車体、作業員の長靴等に付着した汚染土壌を要措置区域等外へ持ち出さないよう、搬出前に洗浄等を行う。
- ・ 住宅街、商店街、通学路、狭い道路を避ける等、地域住民に対する影響を低減するように努める。
- ・ 混雑した時間帯や通学通園時間を避ける。
- ・ 積込みにあたっては、低騒音型の重機等を選択し、騒音を低減する。

緊急時の対応

- ・ 汚染土壌の運搬中に、特定有害物質等が飛散等、地下浸透、悪臭が発散した場合には、直ちに運搬を中止し、自動車等又は保管施設の点検を行うとともに、当該特定有害物質を含む固体の回収を図るなど、周辺環境への汚染の拡散防止のための必要な措置を講ずる必要がある（運搬通知記の第1の2(2)）。

1.8 調査時点とその後の土地利用状況

(第一種～第三種特定有害物質)

土壤環境基準設定 (H3.8.23) ～H21年度の件数

(件数:複数回答有)

H22年3月末 時点の土地 利用形態 調査時の 土地利用 形態	工場・事業場敷地	工場・事業場跡地	住宅地	廃棄物処分場跡地	公園・運動場	道路	河川敷	農用地	山林	その他	不明	合計(延べ数)
工場・事業場敷地	1,904	379	281	2	12	40	2	4	1	52	176	2,853
工場・事業場跡地	154	771	218	103	15	48	2	1	1	80	147	1,540
住宅地	20	10	174	0	5	11	0	1	0	14	18	253
廃棄物処分場跡地	2	1	2	9	0	2	0	1	0	1	2	20
公園・運動場	6	3	3	0	33	5	0	0	0	6	3	59
道路	9	3	4	0	3	54	0	0	0	1	2	76
河川敷	0	1	0	0	1	1	20	0	0	2	0	25
農用地	7	1	2	1	0	3	0	13	0	2	0	29
山林	2	0	0	0	0	5	0	0	16	3	2	28
その他	11	3	11	0	2	10	0	2	2	177	16	234
不明	4	3	12	0	0	1	0	0	0	0	42	62
合計(延べ数)	2,119	1,175	707	115	71	180	24	22	20	338	408	5,179

注)「工場・事業場敷地」にはサービス業も含む。

調査時の土地利用状況

工場・事業所敷地および跡地 計4,393件 (85%)

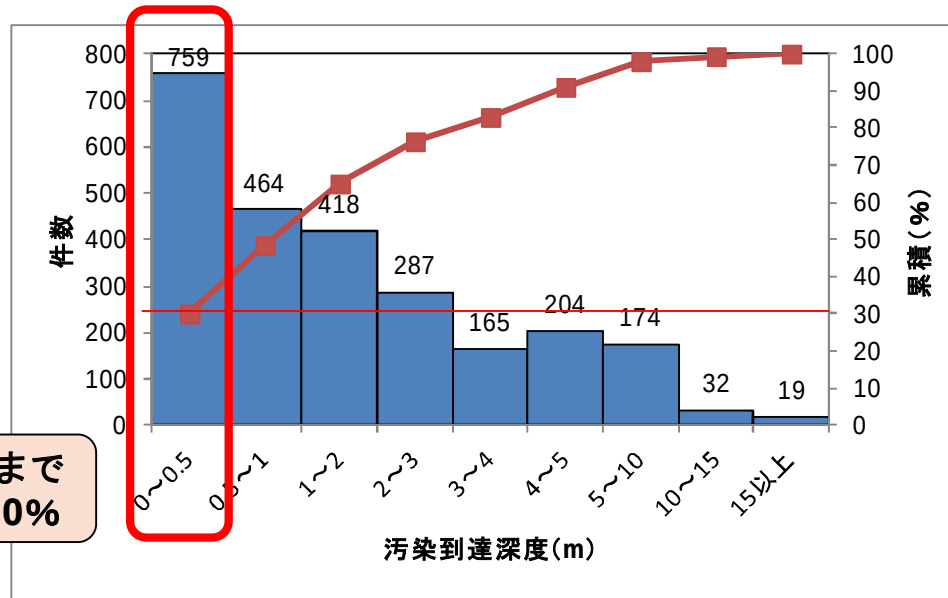
農用地 計29件 (0.6%)

山林 計28件 (0.5%)

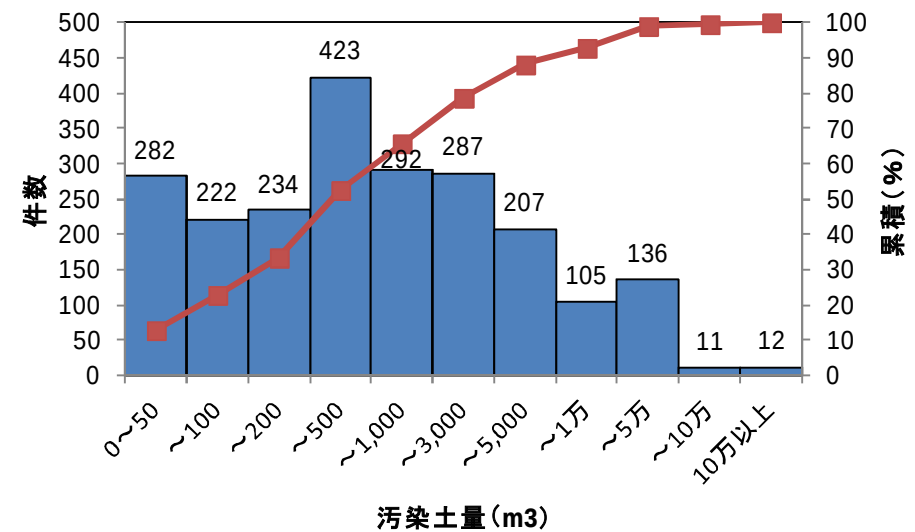
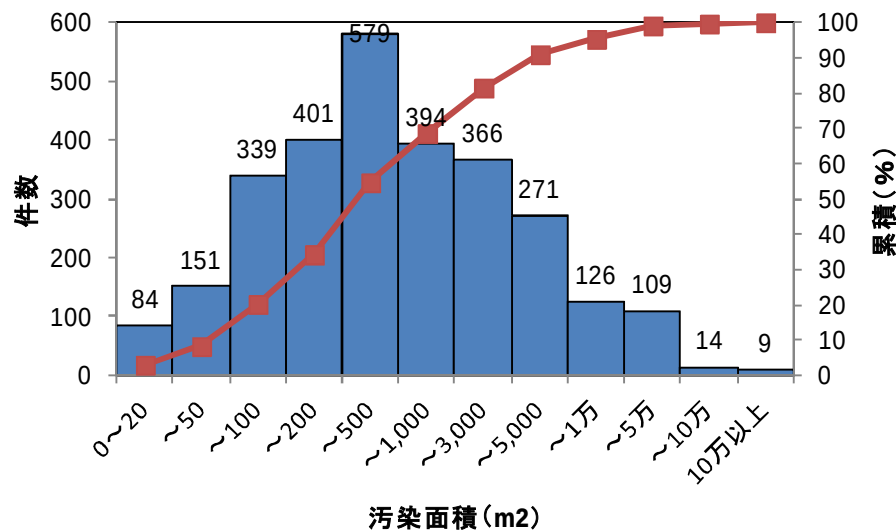
土壤汚染の場所は、
ほとんど工場・事業所で、
農用地、山林は少ない

1.9 重金属等による土壤汚染の規模（深度、面積、発生土量）

土壤環境基準設定（H3.8.23）
～H21年度の件数



深度で0.5mまでの汚染は約30%



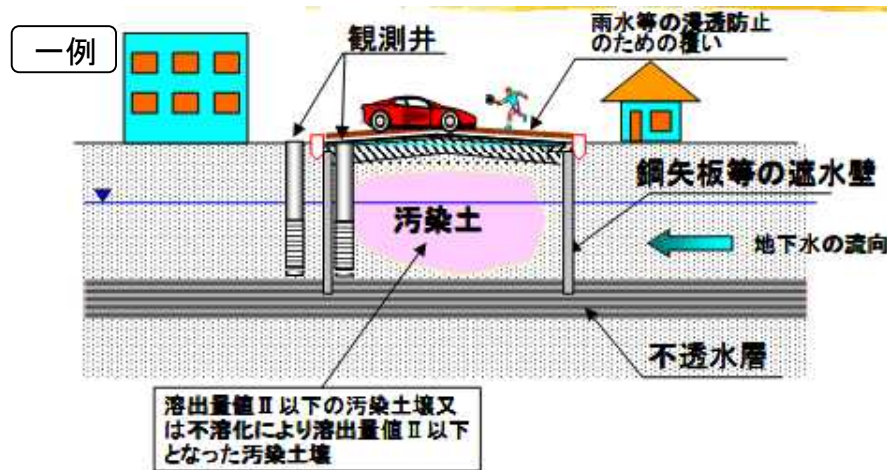
2. 土壤環境修復技術と適用性の予備的検討

2.1 土壤汚染対策法に基づく措置の一覧

措置	参考：除染技術カタログ Ver.1.0（日本原子力学会 H23.10.24） 敷地、水耕田、畑地、公共施設の汚染土壤についての対策 ※数字はNo.
地下水の水質の測定	
原位置封じ込め	
遮水工封じ込め	
地下水汚染の拡大の防止	
土壤汚染の除去（掘削除去）	9 敷地 削り取り、12 敷地 芝刈り、13 敷地 草や灌木の撤去、 19(24) 水耕田(畑地) 表土の剥ぎ取り、21(28) 水耕田(畑地) 土壤洗浄、 29 畑地 土壤の希酸洗浄とCsの吸着除去、50 公共施設 運動場 表土替え
土壤汚染の除去（原位置浄化）	22(30) 水耕田(畑地) ファイトレメディエーション
遮断工封じ込め	
不溶化（原位置不溶化）	14 敷地 汚染物の表面固定
不溶化（不溶化埋め戻し）	
舗装	
立入禁止	
土壤入換え（区域外）	
土壤入換え（区域内）	11 敷地 天地返し、18 水耕田 鋤き込み、25 畑地 土地掘り起こし、 26 畑地 プラウによる表土剥ぎ取りと埋設
盛土	10 敷地 表面被覆
（土壤汚染対策法に準じた 措置以外）	18 水耕田 鋤き込み、20 水耕田 荒かき、23(31) 水耕田(畑地) 施肥、 25 畑地 土地掘り起こし、27 畑地 低Cs吸収栽培の栽培

以下、福島への適用性の予備的検討（適用可能性 高：◎、有：○、低：×）

2.2 原位置封じ込め



環境省 土壤汚染対策法に係る技術的事項について（答申）
中央環境審議会、平成14年9月20日

福島への適用性の予備的検討：○

汚染の分布が局地的であり、下部の適当な深さに不透水層がある場合に有効な方法である。

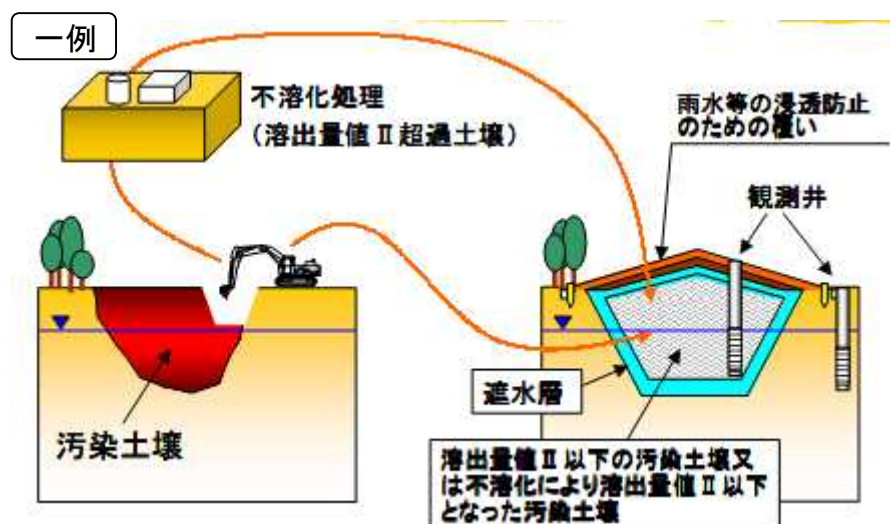
福島では、広範囲で表層部分のみの汚染であるが、農用地以外の事業所敷地や空き地などでは、**舗装・盛土の措置との組み合わせで原位置封じ込めが適用される可能性がある**と考えられる。

要求事項

- ① 土壤溶出量基準に不適合な土壤の範囲及び深さを対象とすること
- ② 第二溶出量基準に適合する土壤を対象とすること
- ③ **不透水層が適切な遮水効果を有すること**
- ④ **遮水壁が適切な遮水効果を有すること**
- ⑤ **覆いが適切な飛散等防止及び遮水効果を有すること**
- ⑥ **覆いの損壊防止措置がなされていること**
- ⑦ 措置の実施場所の地下水下流側で水質の測定を実施すること
- ⑧ 封じ込め範囲に観測井を設け、雨水、地下水その他の水の浸入がないことを確認すること
- ⑨ 措置に伴う汚染拡散防止のための措置が講じられていること

環境省 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

2.3 遮水工封じ込め



環境省 土壤汚染対策法に係る技術的事項について（答申）
中央環境審議会、平成14年9月20日

要求事項

- ① 土壤溶出量基準に不適合な土壌の範囲及び深さを対象とすること
- ② 第二溶出量基準に適合する土壌を対象とすること
- ③ 底面及び側面に敷設した遮水シート等が適切な遮水効果を有すること
- ④ 覆いが適切な飛散等防止及び遮水効果を有すること
- ⑤ 覆いの損壊防止措置がなされていること
- ⑥ 措置の実施場所の地下水下流側で水質の測定を実施すること
- ⑦ 封じ込め内部に観測井を設け、雨水、地下水その他の水の浸入がないことを確認すること
- ⑧ 措置に伴う汚染拡散防止のための措置が講じられていること

環境省 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

遮水シートの要求事項

透水係数 $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 以下

覆いの飛散防止、遮水効果の要件

コンクリート層の場合 10cm以上

アスファルト層の場合 3cm以上

必要に応じ土による覆いも追加

環境省 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

福島への適用性の予備的検討：◎

仮置場と中間貯蔵施設のうち、低濃度・非溶出性対応型施設が相当すると考えられる。

土壤汚染対策の遮水シート、覆いに対する要求事項が参考になるが、別途、直接放射線による外部被ばくの防護が必要となる。

2.4 揚水施設による地下水汚染の拡大防止

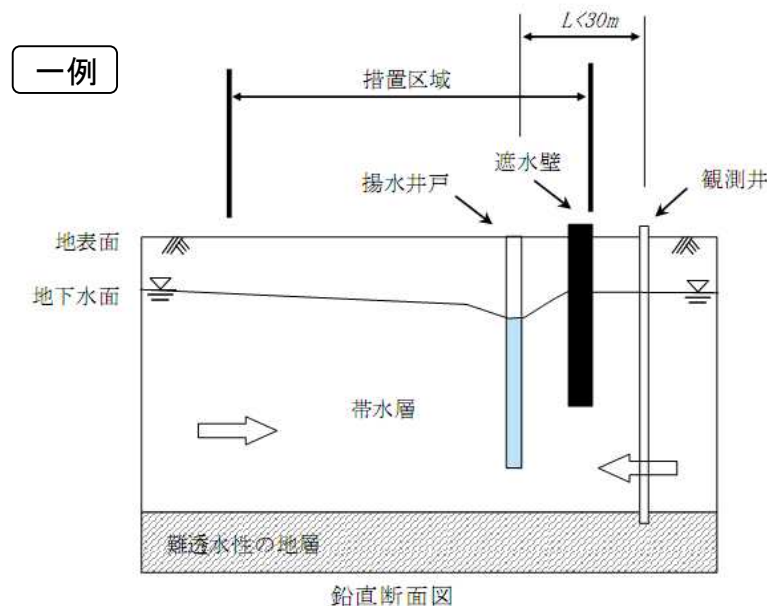


図 5.4.3-9 揚水施設による地下水汚染の拡大の防止の概念図
(遮水壁を併用する場合の例 その2)

要求事項

- ① 土壤汚染に起因する地下水汚染の拡大を防止できること
- ② 揚水した地下水は、適正に処理すること
- ③ 地下水汚染が拡大するおそれがあると認められる範囲で水質の測定を実施すること
- ④ 地下水の水質の測定結果は都道府県知事に報告すること
- ⑤ 措置に伴う汚染拡散防止のための措置が講じられていること

環境省 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版 (平成23年8月)

地下水汚染が到達し得る一定の距離の目安

Cr ⁶⁺	概ね500m
As、F、B	概ね250m
CN、Cd、Pb、Hg、Se	概ね 80m

環境省 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版 (平成23年8月)

福島への適用性の予備的検討：○

森林や内陸部の田畑などで汚染が残存し、表流水や地下水を経由して河川や湖沼へ流出することが想定される場合、**汚染地から下流の適当な位置に揚水施設（あるいは取水施設）を設置することが想定される。**

揚水（取水）した地下水については、**Csの濃度を測定の上、必要に応じて水処理（吸着材による除去等）を行う。**

雨水浸透水や動水勾配、土中での吸着・離脱、森林での生態系循環等を考慮した**Csの中・長期的な移動特性の把握が必要**

2.5 透過性地下水浄化壁による地下水汚染の拡大防止

一例

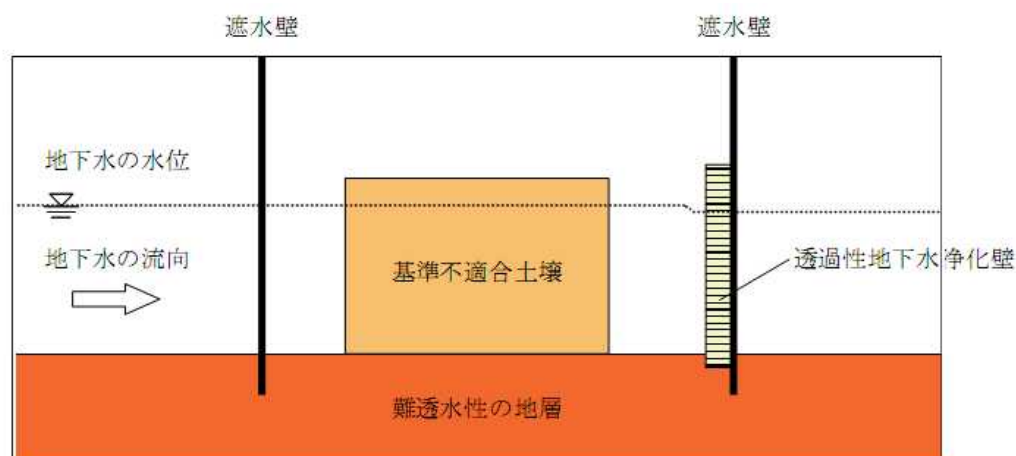


図 5.4.3-12 原位置封じ込めと透過性地下水浄化壁の組み合わせによる地下水汚染の拡大の防止の例

要求事項

- ① 土壌汚染に起因する地下水汚染の拡大を防止できること
- ② 地下水汚染が拡大するおそれがあると認められる範囲で水質の測定を実施すること
- ③ 地下水の水質の測定結果は都道府県知事に報告すること
- ④ 措置に伴う汚染拡散防止のための措置が講じられていること

環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

本方法は吸着作用を有する物質がその吸着能力を超えると吸着能力が低下することから、効果を発揮できる期間が有限であることに留意が必要である。使われる吸着材の例として活性炭、吸着性金属等が考えられる。

設置方法は次の二つがある。

- ・ 吸着材を帯水層中へ混合攪拌若しくは注入する方法
- ・ 吸着材を予め混合した浄化壁で置換する方法

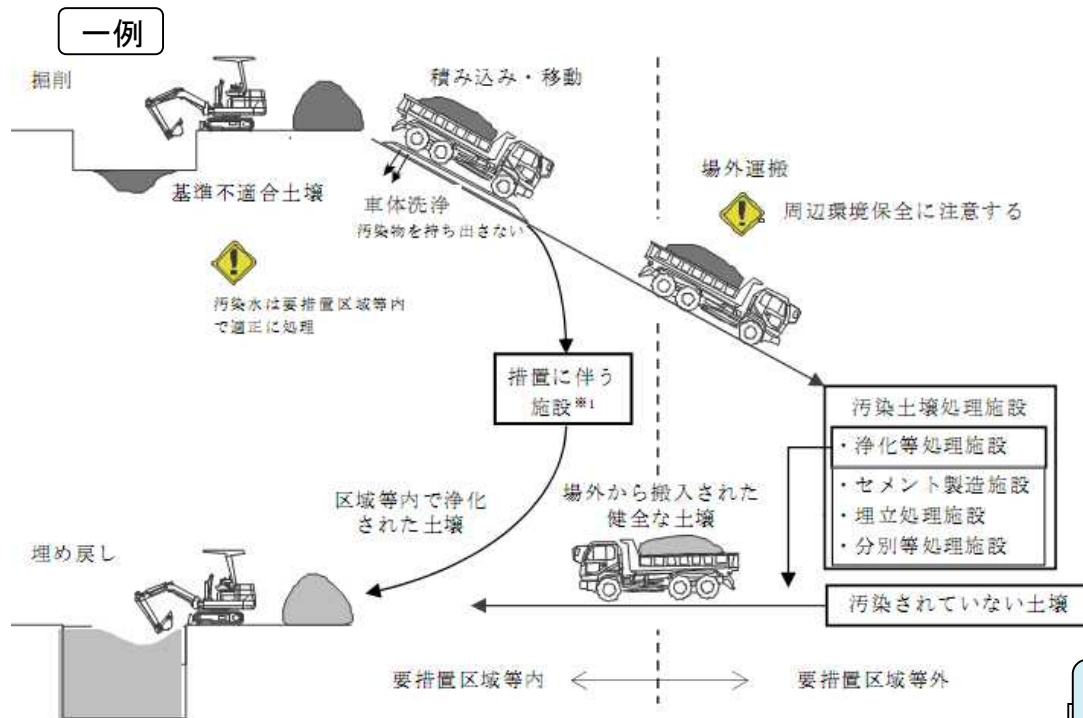
環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

福島への適用性の予備的検討：○

前項と同様の目的で、汚染地から下流の適当な位置に透過性地下水浄化壁を設置することが想定される。

吸着材は適宜交換し、使用済みの吸着材は、Csの濃度によって、放射性物質に汚染された廃棄物として扱う必要がある。

2.6 土壌汚染の除去（掘削除去）



※1：措置に伴う施設

要措置区域等と一筆であるなど要措置区域等内の土地の所有者等と同一の者が所有等をする当該要措置区域等に隣接する土地において、一時的な保管、特定有害物質の除去等を行い、再度、当該要措置区域等内に当該汚染土壌を埋め戻す場合において、一時的な保管、特定有害物質の除去等を行う施設

環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

要求事項

- ①基準不適合土壌の範囲及び深さを対象とすること
- ②現地で掘削して浄化を行う場合は、浄化が適切に行われ埋め戻されること
ただし、建築物の構築を行う場合等掘削した場所に土壌を埋める必要がない場合は除く
- ③掘削して基準不適合土壌を場外で処分する場合は、汚染されていない土壌で埋め戻されること
ただし、建築物の構築を行う場合等掘削した場所に土壌を埋める必要がない場合は除く
- ④土壌溶出量基準不適合の要措置区域では措置実施場所の地下水調査を実施すること
- ⑤搬出する際には周辺環境に注意する
- ⑥措置に伴う汚染拡散防止のための措置が講じられていること

環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

福島への適用性の予備的検討：◎

特に高濃度の汚染土壌の除染では、掘削除去が最も基本的な方法と考えられる。

表層土壌の固形回収技術や水田の水による土壌攪拌・除去技術（沈砂池、水浄化設備が必要）などが検討されている。

掘削後の汚染土壌の処理方法で細分化される15

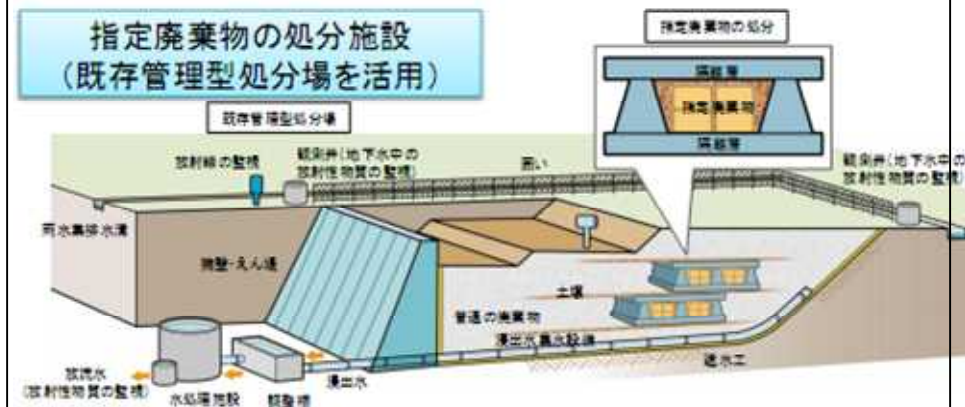
2.7 掘削除去後の土壌の処理方法

我が国の土壌汚染対策

「掘削除去」後の土壌の処理の方法	
熱処理	
洗浄処理	
化学処理	
生物処理	
抽出処理	
その他	
処分場 (廃棄物処理法の最終処分場)	管理型(一廃)
	管理型(産廃)
	遮断型
	安定型
埋立場所 (海洋汚染防止法の埋立場所等)	管理型処分場相当
	遮断型
	安定型
セメント製造施設の利用	
その他	

環境省 平成21年度 土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果(平成23年3月)を基に作成

福島への適用性の予備的検討：◎



環境省 東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染の対処において必要な中間貯蔵施設等の基本的考え方について (H23.10.29)

各処理については、JAEAが行っている除染技術実証試験事業などで実験や技術開発(洗浄処理が多い)が行われている。

既存処分場の活用では、指定廃棄物を処分する管理型処分場についての例(上図)が示されている。

セメント製造施設は、低濃度の汚染土壌や処理後の土壌について、濃度上限値を定めただえで、活用が望まれる。

処分場、埋立場所では、別途、直接線による外部被ばくの防護が必要となる。

2.8 土壌汚染地の原位置浄化

	地下水 摂取等	直接 摂取	処理の方法	備考
原位置 抽出	○	—	土壌ガス吸引	揮発性有機化合物 向けの技術のため 適用可能性は低い
			エアースパージング	
			地下水揚水	表層部分の広範な 汚染なので適用可 能性は低い 電気修復法は実績 が少ない
			電気修復法※	
原位置 分解	○	○	化学処理	
			生物処理	
ファイトレメ ディエーション	○	○		
原位置 土壌洗浄	○	○		

※電気修復法：3種類の動電現象（電気分解、電気浸透、電気泳動）を利用して、重金属等のイオンを陰極および陽極で濃縮・回収する技術

※環境省の下記ガイドラインに記載はない

環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）を基に作成

要求事項

- ①基準不適合土壌の範囲及び深さを対象とすること
- ②原位置で特定有害物質を取り除くこと
- ③特定有害物質が抽出又は分解される手法で土壌溶出量基準に適合するものであること
（地下水摂取等のリスクに対する措置のみ）
- ④措置の実施場所の地下水下流側で水質の測定を実施すること
（地下水摂取等のリスクに対する措置のみ）
- ⑤特定有害物質が抽出又は分解される手法で土壌含有量基準に適合するものであること
（直接摂取のリスクに対する措置のみ）
- ⑥周辺環境配慮がなされていること
- ⑦措置に伴い発生した廃棄物を適正に保管し、搬出、処分すること
- ⑧措置に伴う汚染拡散防止のための措置が講じられていること

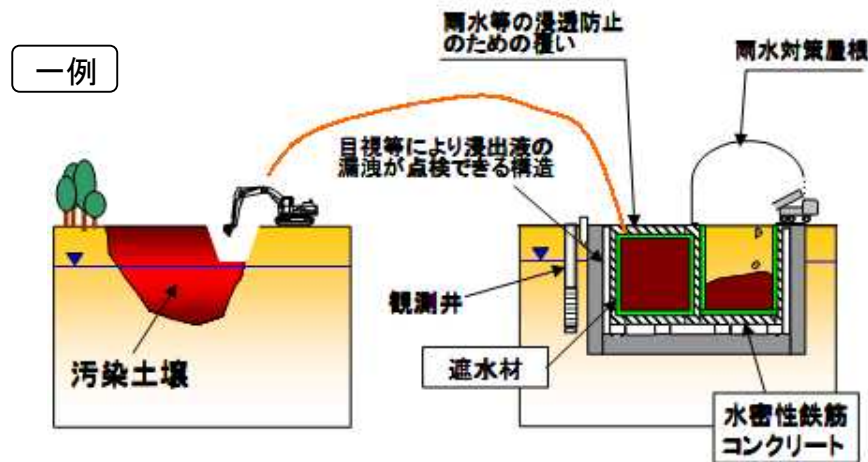
環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

福島への適用性に関する
予備的検討：○

原位置抽出については、全般に適用可能性は低い。

その他の技術は、土壌汚染対策でも実施事例が少ないが、福島では、低濃度汚染の場合に、適用可能性はあると考えられる。

2.9 遮断工封じ込め



環境省 土壤汚染対策法に係る技術的事項について（答申）
中央環境審議会、平成14年9月20日

要求事項

- ①基準不適合土壌の範囲及び深さを対象とすること
- ②第一種特定有害物質を含まないこと
- ③仕切り設備が適切な遮断の効力を有すること
- ④目視、その他の方法で損壊の有無を確認できる構造であること
- ⑤覆いの損壊防止措置がなされていること
- ⑥措置の実施場所の地下水下流側で水質の測定を実施すること
- ⑦封じ込め内部に観測井を設け、雨水、地下水その他の水の浸入がないことを確認すること
- ⑧措置に伴う汚染拡散防止のための措置が講じられていること

環境省 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に
関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

仕切り設備の遮断の要求事項

一軸圧縮強度 25N/mm²以上

水密性を有する鉄筋コンクリート透水係数

環境省 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に
関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

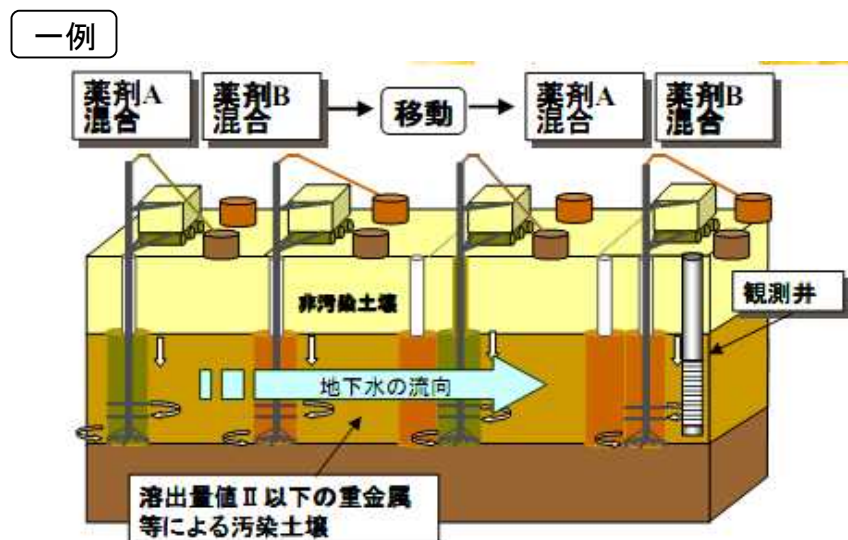
福島への適用性の予備的検討：◎

中間貯蔵施設のうち、高濃度・溶出性対応型施設が相当すると考えられる。

土壤汚染対策の仕切り設備、点検方法、覆いに対する要求事項が参考になる。

土壤汚染対策の要求事項に加え、別途、直接線による外部被ばくの防護と減容化の作業や最終処分場への移設のための取り出し容易性が必要となる。

2.10 原位置不溶化



環境省 土壤汚染対策法に係る技術的事項について（答申）
中央環境審議会、平成14年9月20日

要求事項

- ① 第二種特定有害物質であって第二溶出量基準に適合する土壤の範囲及び深さを対象とすること
- ② 掘削せずに原位置で実施すること
- ③ 特定有害物質の不溶化が効果的に行われること
- ④ 土壤を直接摂取するリスクを考慮すること
- ⑤ 措置の実施場所の地下水下流側で水質の測定を実施すること
- ⑥ 周辺環境配慮がなされていること
- ⑦ 措置に伴う汚染拡散防止のため措置が講じられていること

環境省 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）



環境省 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

福島への適用性の予備的検討：○

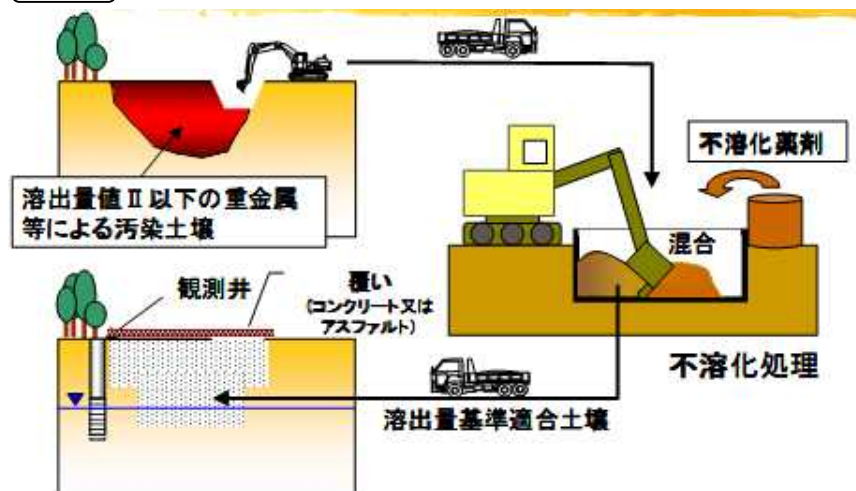
農用地などの有機土や粘土の土壤では、Csの収着性が元々高いが、溶出量をより下げることがある場合には不溶化を行うことも想定される。

表層部分の汚染なので、別途、直接線による外部被ばくの防護が必要となる。

土壤の固化の技術で不溶化が促進される場合、土地の利用形態によっては有効な方法になると考えられる。

2.11 不溶化埋め戻し

一例



環境省 土壤汚染対策法に係る技術的事項について（答申）
中央環境審議会、平成14年9月20日

要求事項

- ①第二種特定有害物質であって第二溶出量基準に適合する土壌の範囲及び深さを対象とすること
- ②不溶化対象土壌を掘削、不溶化して埋め戻されること
- ③特定有害物質の不溶化が効果的に行われること
- ④土壌を直接摂取するリスクを考慮すること
- ⑤措置の実施場所の地下水下流側で水質の測定を実施すること
- ⑥周辺環境配慮がなされていること
- ⑦措置に伴う汚染拡散防止のため措置が講じられていること

環境省 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

福島への適用性の予備的検討：○

長野県の灰色低地土、栃木県のクロボク土（火山灰土）に天然ゼオライトを1割程度混入した培地で非放射性Csのチンゲンサイによる吸収を無処理区の1-2%程度に低減させたポット試験が報告されている（後藤逸男：農業および園芸,86(2011)）。なお、水溶液からのCs除去に比べて同様の研究例は少ない。

日本農学会 東日本大震災からの農林水産業の復興に向けて
―被害の認識と理解、復興へのテクニカル リコメンデーション―
2011年11月17日

以下、原位置不溶化の場合と同様に、

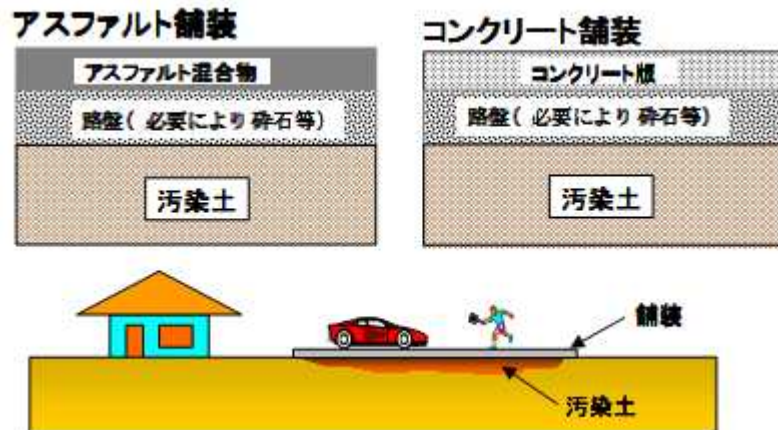
農用地などの有機土や粘土の土壌に対しては元々Csの収着性が高いが、埋め戻しの場所または仮置場や中間貯蔵施設で溶出量をより下げ必要がある場合には不溶化を行うことも想定される。

不溶化後の土壌に対しては、別途、直接線による外部被ばくの防護が必要となる。

土壌の固化の技術で不溶化が促進される場合、埋め戻しの場所の土地利用形態によっては有効な方法になると考えられる。

2.12 舗装

一例



環境省 土壤汚染対策法に係る技術的事項について（答申）
中央環境審議会、平成14年9月20日

舗装による被覆の厚さの目安

舗装の種類	舗装仕様	路盤仕様	一般での用途
コンクリート舗装	10 cm	10 cm（碎石、砂利、砂等）	歩道程度
アスファルト舗装	3 cm	10 cm（碎石、砂利、砂等）	歩道程度

要求事項

- ①堅牢、かつ、土壤の飛散等の遮断の効力を有するものにより覆うこと
- ②覆いの損壊防止のための措置がなされていること
- ③措置に伴う汚染拡散防止のための措置が講じられていること

環境省 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

福島への適用性の予備的検討：◎

遮へい材の厚さと放射線（Cs-137）の減衰値

遮へい材	半価層※1	1/10価層※2
鉛	0.7cm	2.2cm
鉄	1.5cm	5.0cm
コンクリート	4.9cm	16.3cm

※1 半価層：放射線の強さ（線量率）を1/2に弱める遮へい体の厚さ

※2 1/10価層：放射線の強さを1/10に弱める遮へい体の厚さ

出典：ICRP Pub.21, 体外線源からの電離放射線に対する防護のためのデータ(1971)

eカレッジ Webに記載の表を基に作成
<http://www.e-college.fdma.go.jp/search/pdf/10-2.pdf>

土壤汚染対策の要件である10cmのコンクリート舗装で、直接線に対し、約1/4程度の遮へい効果（路盤には無視した場合）が見込まれる。

2.13 立ち入り禁止措置

一例



環境省 土壤汚染対策法に係る技術的事項について（答申）
中央環境審議会、平成14年9月20日

要求事項

- ①人が立ち入るのを防止することのできる**囲い**を設けること
- ②基準不適合土壤の**飛散等**（基準不適合土壤又は特定有害物質の飛散、揮散又は流出）の**防止対策**がなされていること
- ③入り口の見やすい箇所に**関係者以外の立ち入りを禁止することを表示する立て札**その他の施設を設けること
- ④措置に伴う汚染拡散防止のための措置が講じられていること

囲いの種類

- ・土木工事用万能堀、ブロック堀等（最低 1.8m程度）
- ・フェンス（最低 1.8m程度）
- ・工場又は事業所内等で人が管理できる場所では、工事用柵やロープ、有刺鉄線等でも可

環境省 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

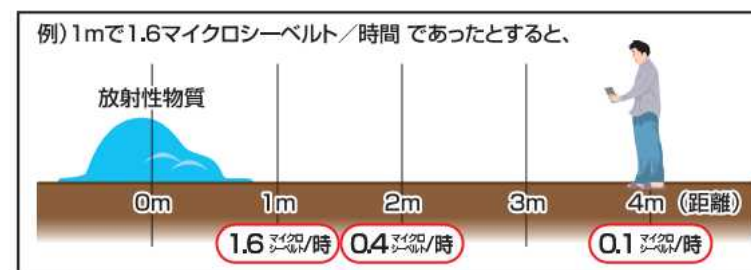
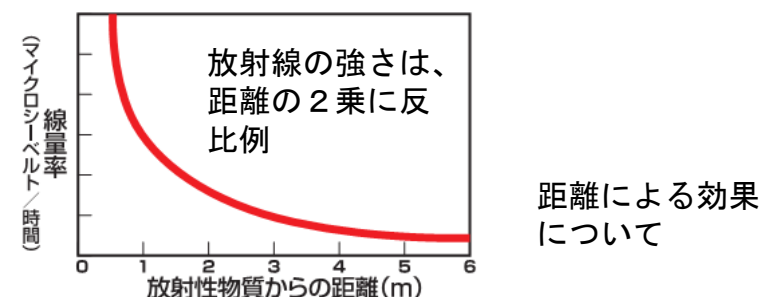
福島への適用性の予備的検討：◎

現状で、**警戒区域**と**計画的避難区域**は**立ち入り禁止**となっている。今後、次の場合に必要と考えられる。

警戒区域や計画的避難区域のうち、「**居住制限区域**」、「**帰還困難区域**」

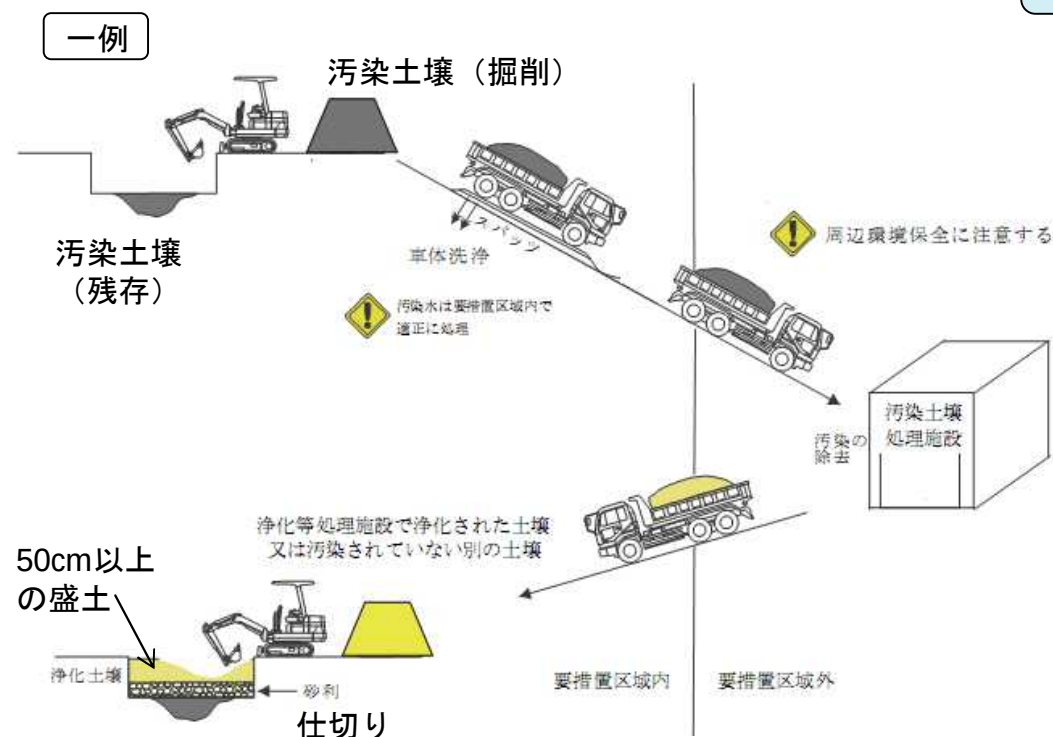
森林は**林縁から20mを除染**の方針（農林水産省）

別途、**直接線による外部被ばく**の**防護**が必要。



福島県生活環境部除染対策課 生活空間における放射線量低減化の手引き 要約版（第2版）（平成23年10月31日）に加筆

2.14 土壌入れ換え（汚染区域外へ移動）



要求事項

- ① 基準不適合土壌及びその直下の土壌を掘削すること
- ② 50 cm以上の盛土
- ③ 盛土材と基準不適合土壌の間に仕切りがあること
- ④ 盛土の損壊防止措置がなされていること
- ⑤ 搬出する際には周辺環境に注意する
- ⑥ 措置に伴う汚染拡散防止のための措置が講じられていること

環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

福島への適用性の予備的検討：◎

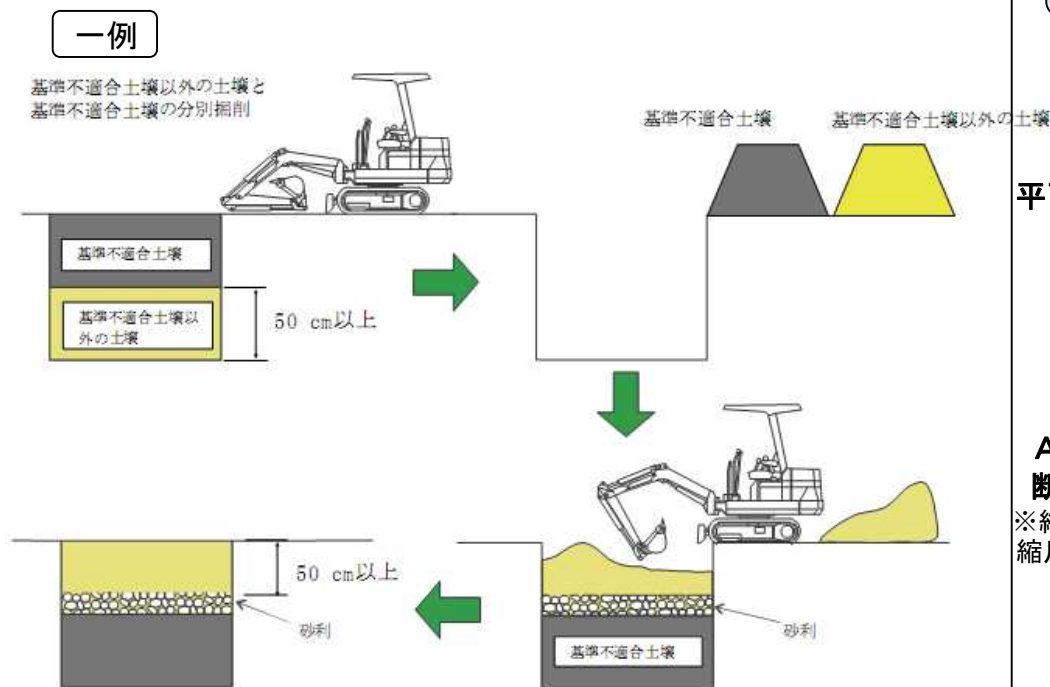
ガイドラインで一例で示されているのは、地表面から50cmの深さまで掘削してもなお下層に汚染土壌が残存している場合を想定した方法である。

福島では、**広範囲で表層部分のみの汚染**なので、一例で示された方法での土壌入れ換え（区域外）の適用可能性は低いと考えられる。

一方、**表層の汚染土壌を除去し、浄化処理施設で浄化された土壌又は区域外の汚染されていない土壌と入れ換える方法**は、**福島でも適用可能性が高い**と考えられる。

ここでは、一例で示された方法以外も含めるものとし、土壌入れ換え（区域外）の適用可能性は高いと考える。

2.15 土壌入れ換え（汚染区域内で行う修復措置）



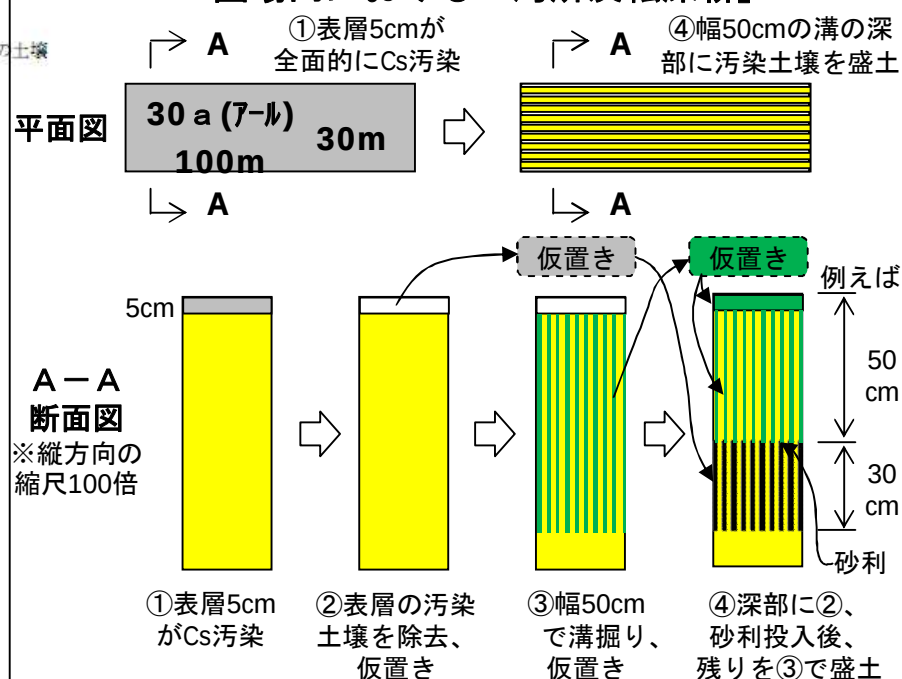
要求事項

- ① 基準不適合土壌の範囲及び深さを対象とすること
- ② 50 cm 以上の同位置区域内の汚染されていない土壌による盛土
- ③ 盛土材と基準不適合土壌の間に仕切りがあること
- ④ 盛土の損壊防止措置がなされていること
- ⑤ 周辺環境配慮がなされていること
- ⑥ 措置に伴う汚染拡散防止のための措置が講じられていること

環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に
関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

福島への適用性の予備的検討：◎

圃場内における「局所反転深耕」



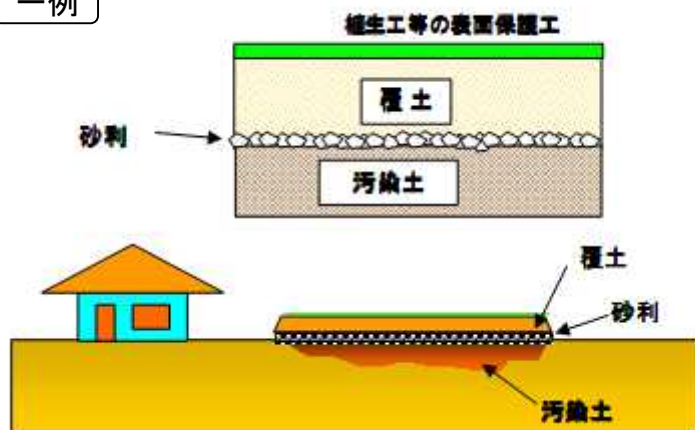
日本農学会 東日本大震災からの農林水産業の復興に向けて
一被害の認識と理解、復興へのテクニカル リコメンデーション—
2011年11月17日 を基に作成

100m×30mの田畑で汚染土壌に50cmの離隔を確保する場合の非汚染部の掘削土量
左図：1,500m³、上図：375m³

直接線の外部被ばくの防護の必要厚さの考
え方は次項を参照

2.16 盛土

一例



環境省 土壤汚染対策法に係る技術的事項について（答申）
中央環境審議会、平成14年9月20日

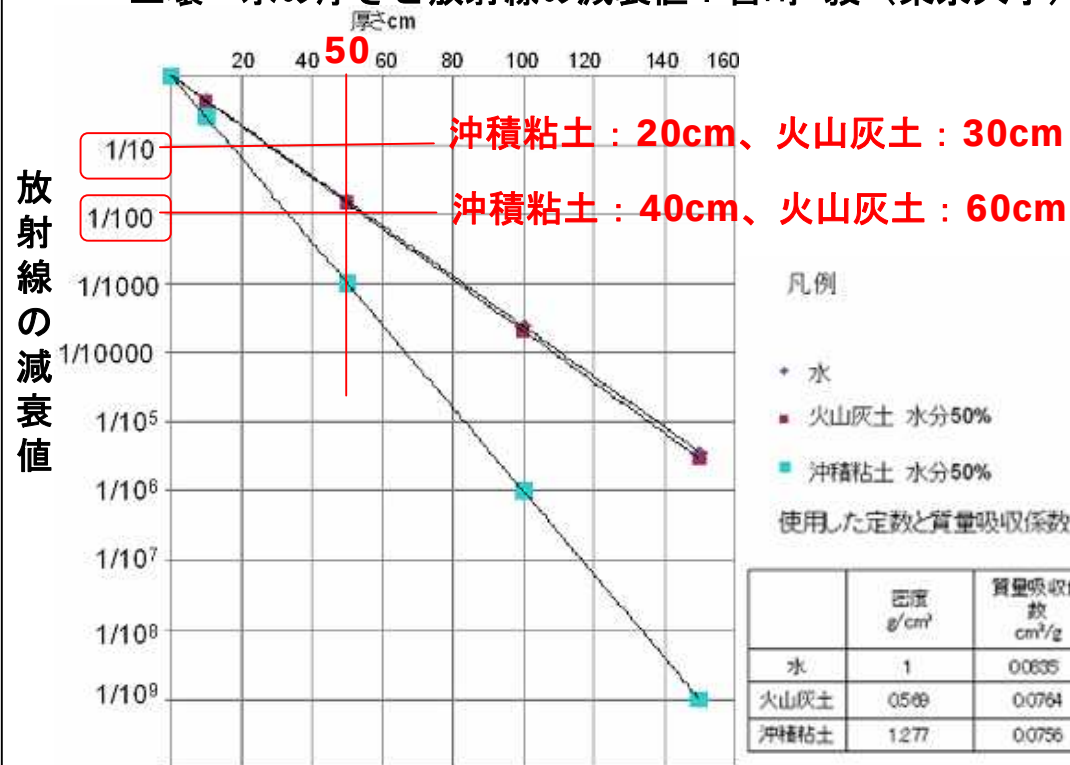
要求事項

- ① 50 cm 以上の盛土
- ② 盛土材と基準不適合土壌の間に仕切りがあること
- ③ 盛土の損壊防止のための措置がなされていること
- ④ 措置に伴う汚染拡散防止のための措置が講じられていること

環境省 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）

福島への適用性の予備的検討：◎

土壌・水の厚さと放射線の減衰値：宮崎 毅（東京大学）



日本農学会 東日本大震災からの農林水産業の復興に向けて
一被害の認識と理解、復興へのテクニカル リコメンデーションー
2011年11月17日 を基に作成

土壤汚染対策の要件である50cmの盛土で、直接線に対し、1/100～1/1000程度の遮へい効果が見込まれる。

2.17 評価結果と詳細調査対象の選定

措置	適用可能性 ◎高、○有、×低	詳細調査の要・不要 ○+ハッチング:要、－: 不要	
地下水の水質の測定	◎(検討対象外)	－	本調査の検討対象外
原位置封じ込め	○	－	福島での適用可能性はそれほど高くなく、また環境省のガイドライン*で技術の概要を把握できる
遮水工封じ込め	◎	－	福島では仮置場、中間貯蔵施設、または管理型処分場への処分で適用される可能性のある技術であり、本調査の検討対象外
地下水汚染の拡大の防止	○	－	福島での適用可能性はそれほど高くなく、また環境省のガイドライン*で技術の概要を把握できる
土壌汚染の除去 (掘削除去)	◎	○	福島への適用可能性が高いと想定され、かつ、掘削除去後の土壌の処理方法が多様であるため、詳細に調査(ただし、処分、埋立、再利用は除く)
土壌汚染の除去 (原位置浄化)	○	○	福島での適用可能性はそれほど高くないが、具体的な方法の説明のため詳細に調査(ただし、適用可能性が低いと考えられる原位置抽出は除く)
遮断工封じ込め	◎	－	福島では仮置場、中間貯蔵施設(または県外での遮断型処分場への処分)で適用される可能性のある技術であり、本調査の検討対象外
不溶化(原位置不溶化)	○	○	福島への適用可能性が高いとは言えないが、農用地で汚染土壌を残置する除染技術を選定した場合、農作物への移行低減を考慮する必要があるため、不溶化の技術を参考情報として詳細に調査
不溶化(不溶化埋め戻し)	○		
舗装	◎	－	環境省のガイドライン*で技術の概要を把握できる
立入禁止	◎	－	環境省のガイドライン*で技術の概要を把握できる
土壌入換え(区域外)	◎	－	環境省のガイドライン*で技術の概要を把握できる
土壌入換え(区域内)	◎	－	環境省のガイドライン*で技術の概要を把握できる
盛土	◎	－	環境省のガイドライン*で技術の概要を把握できる

* 環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版 (平成23年8月)

別紙3.7 我が国の土壤環境修復技術の詳細調査結果

1. 掘削除去

1.1 「掘削除去」後の土壤の処理の方法（熱処理）

項目	内容
汚染物質	CN、Hg
処理方法の概要	掘削除去した基準不適合土壤を加熱して特定有害物質を抽出又は分解する処理方法
細分類	・熱分解：特定有害物質を分解処理 ・熱脱着・揮発：比較的沸点が低い物質を土壤から抽出
特徴	・高温熱分解は 800 °C以上（高温） ・抽出（脱着）を目的とするものでは 400～600°C程度（中温） ・抽出（揮発）を目的とするものでは 150～200°C（低温）

環境省 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23 年8月）を基に作成

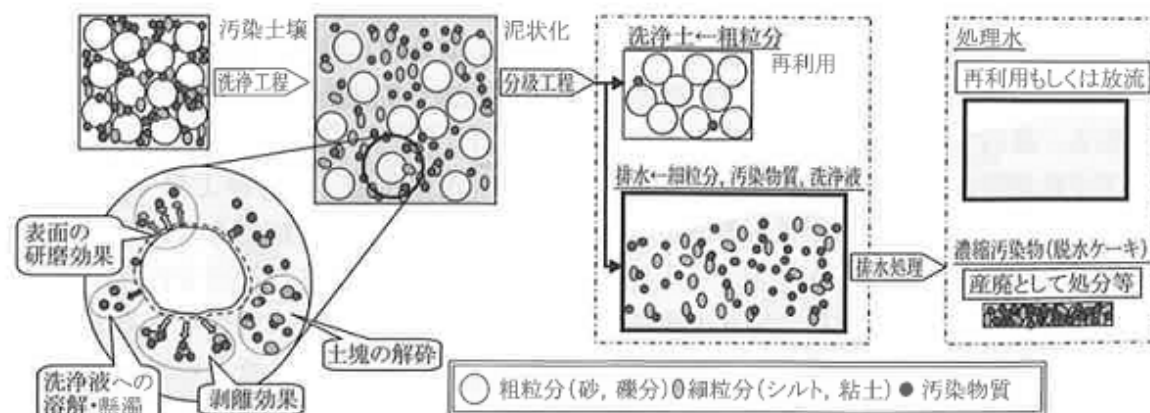
1.2 「掘削除去」後の土壌の処理の方法（洗浄処理）

項目	内容
汚染物質	全般
処理方法の概要	掘削除去した土壌を機械的に洗浄して特定有害物質を除去する方法
細分類	・分級：土壌を粒度により分級して、特定有害物質が吸着・濃縮している部分の土壌を抽出（分離） ・洗浄：特定有害物質を洗浄液中に溶出させることにより浄化 ※分級と洗浄は組み合わせて使われることもある
特徴	・洗浄の効率は、土粒子の粒径に関係し、一般的に土粒子のうち粗粒分からは特定有害物質の除去は比較的容易であり、細粒分からの除去は困難 ・汚染の濃縮した細粒分及び特定有害物質が溶出した洗浄水は、水処理により二次処理物（凝集沈殿汚泥や脱水ケーキ等）が発生するため、別途処分が必要

環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）を基に作成

JAEAが行っている**除染技術実証試験事業**では**洗浄処理**が最も多く採択されており、「掘削除去」後の土壌の処理方法のうち、福島への適用可能性が最も高いと考えられるので、より詳細な文献調査を実施

1.3 洗淨処理（分級+洗淨）の概要と適用性



掘削除去（洗淨処理）の概要図

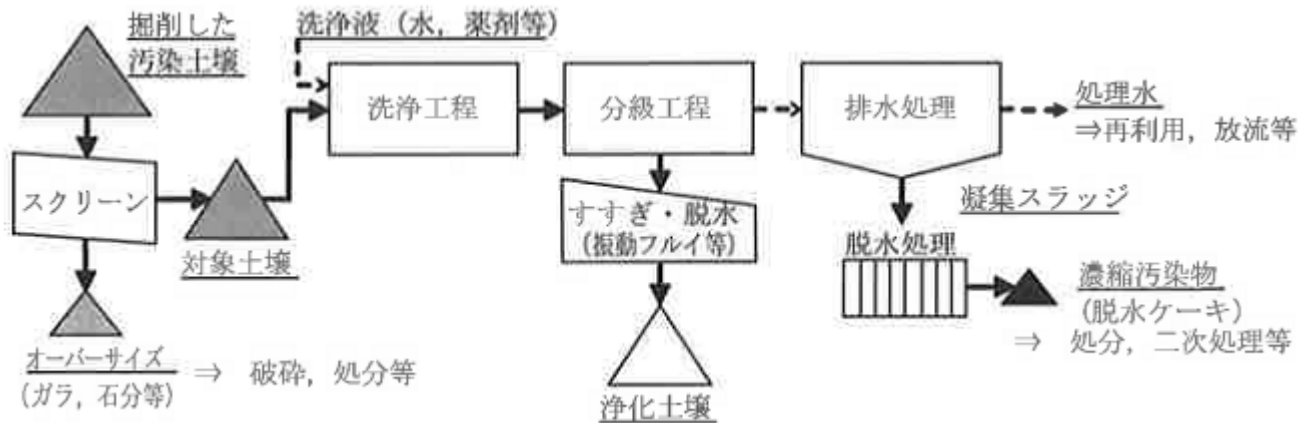
掘削除去（洗淨処理）の適用性

- ・ 細粒分含有率
10%以下：最も適、30%未満：経済的に適、50%未満：適用限界
- ・ 土壌中の有機物
高有機質土：ふるいの目詰まり、比重分離の妨げ
有機物に汚染物質が吸着し濃縮：処理が困難
- ・ 汚染物質の存在形態
土粒子表面に存在し、細粒分ほど含有率が高い：洗淨処理が適
粒径ごとに明確な濃度差なし：洗淨処理が困難
特定の粒径に特異的に汚染が存在：洗淨処理が困難
- ・ 廃棄物等の異物混入の有無
細かく粉碎されたがれき類：分別が困難

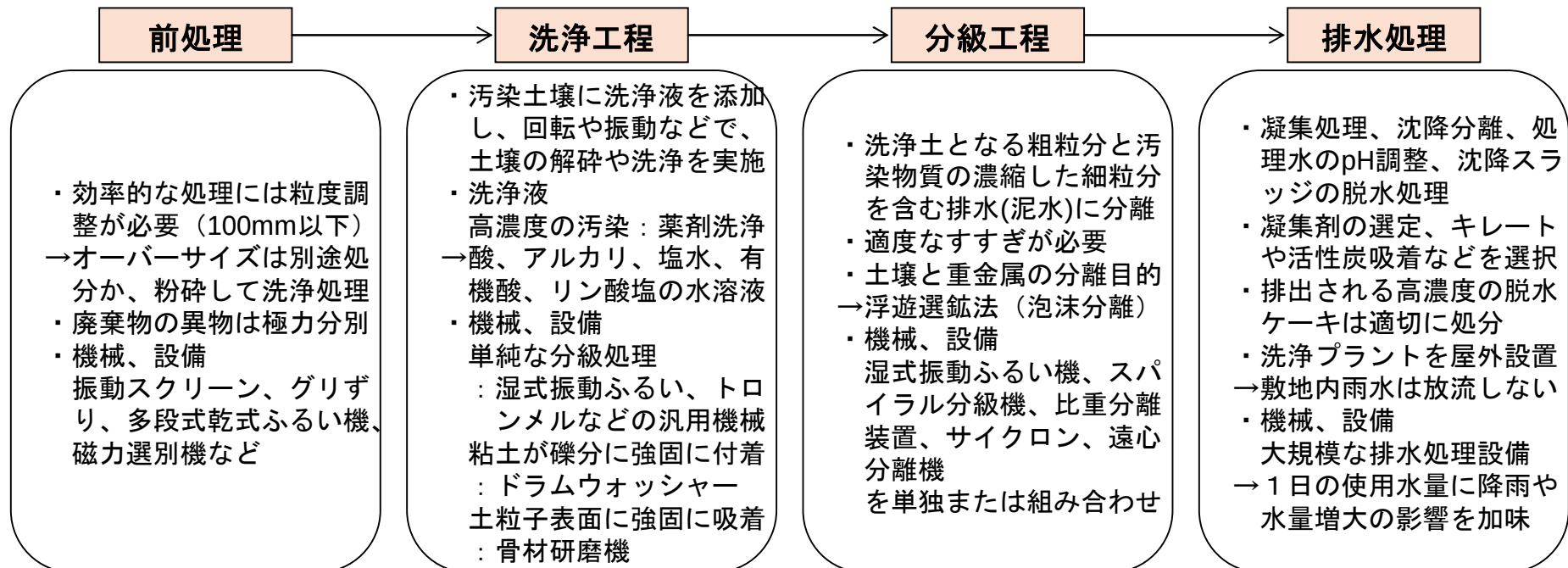
汚染形態例と洗淨処理の適用性

	汚染形態	模式図	土壌洗淨法の適用性	適用性判断上で留意すべき要素
①	土粒子表面に汚染物質が付着、もしくは粘土鉱物と吸着したものが付着		通常の分級洗淨で浄化可能。	・ 土質および濃度（特に細粒分量）
②	土粒子表面への化学的吸着（錯体、塩など）		土粒子表面の磨砕（研磨）洗淨が必要。	・ 汚染物質の吸着形態 ・ 土質および濃度
③	土粒子表面を汚染物質がコーティング（付着）		土粒子表面の磨砕（研磨）洗淨が必要。	・ 汚染物質の性状（溶解性、粘性等） ・ 土質および濃度
④	土粒子内部に汚染物質が含浸		土壌洗淨困難、薬剤で抽出できれば可能性あり。	・ 汚染物質の性状（溶解性、粘性等） ・ 土質および濃度
⑤	汚染物質が土粒子の凹凸や孔に浸入		粒子表面の研磨洗淨、もしくは薬剤洗淨が必要	・ 汚染物質の性状（溶解性、粘性等） ・ 土質および濃度
⑥	汚染物質が粒子状もしくは液状で間隙内に存在（単体で存在）		粒子状：適用可能だが、分別が必要な場合あり 液状：適用可能	・ 汚染物質の性状（粒径、比重、溶解性等） ・ 土質および濃度
⑦	汚染された廃棄物等の異物混入		土壌洗淨困難な場合が多い、分別や薬剤使用で可能性あり	・ 廃棄物の性状（粒径、比重、強度等） ・ 汚染物質の性状

1.4 洗浄処理（分級＋洗浄）の処理フロー



掘削除去（洗浄処理）の処理フロー



1.5 「掘削除去」後の土壌の処理の方法（化学処理）

項目	内容
汚染物質	CN
処理方法の概要	掘削した基準不適合土壌に薬剤を添加し、化学的に特定有害物質を分解した後、埋め戻す方法
細分類	・酸化分解 （・還元分解：第一種特定有害物質の場合） （・アルカリ触媒分解：PCBの場合）
特徴	・使用する主な薬剤：オゾン、過酸化水素、過マンガン酸塩、及び過硫酸塩、フェントン法（過酸化水素と鉄塩） ・毒物及び劇物や危険物等に指定される薬剤を使用する場合は、当薬剤の保管場所及び使用場所において、関連法令を遵守 ・薬剤混合装置及び設置場所や基準不適合土壌の仮置き場所は、粉じんの飛散防止及び排水等の地下浸透を防止 ・処理土壌を埋め戻す際には、特定有害物質の浄化確認に加え、埋め戻し材として適切であるかを確認

環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）を基に作成

1.6 「掘削除去」後の土壌の処理の方法（生物処理）

項目	内容
汚染物質	CN
処理方法の概要	基準不適合土壌に棲息する分解微生物（微生物自体を添加することもある）を利用し、生物学的に特定有害物質を分解
細分類	・バイオスティミュレーション：酸素（通常は空気を使用）や栄養物質等を加えて土壌中の微生物を活性化し、特定有害物質の分解浄化作用を促進 ・バイオオーグメンテーション：特定有害物質の分解に効果を発揮する微生物を外部で培養し、土壌中に注入するとともに、さらに酸素や栄養物質等を与えることで微生物を活性化し、浄化作用を促進するもの。
特徴	・温度の影響を受けやすい ・分解に時間がかかる ・想定しない有害物質の生成が起こる場合があるので、事前の適用可能性試験による判断が必要 ・特定有害物質の減少のみでなく、分解経路や分解生成物を確認した上で、科学的観点からも適切な浄化がなされているかを確認することが重要

2. 原位置浄化

2.1 原位置分解による原位置浄化

項目	内容
汚染物質	CN
処理方法の概要	基準不適合土壌を掘削することなく化学的作用や生物学的作用により特定有害物質を原位置において分解する方法
細分類	・化学処理：基準不適合土壌中に薬剤を添加し、化学的に特定有害物質の分解を行う方法 → 酸化分解と還元分解 ・生物処理：土壌中に棲息する分解微生物等の生物学的作用を利用して、特定有害物質を分解 → バイオスティミュレーションとバイオオーグメンテーション
特徴	・分解過程において意図しない化学物質が生成される場合があるため、事前に分解経路や反応生成物の挙動の確認が必要 ・揮散等による土壌溶出量の変化(減少)との見極めが必要 ・特定有害物質の分解経路の把握が重要 ・地中への薬剤の注入や混合を伴う方法では、より安全な薬剤の使用を検討するとともに、地下水モニタリングによる監視、揚水や遮水壁等の周辺拡散防止のための措置が必要

環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）を基に作成

2.2 ファイトレメディエーションによる原位置浄化

項目	内容
汚染物質	全般
処理方法の概要	植物が根から水分や養分を吸収する働きを主に利用して、土壌中から特定有害物質を抽出除去する方法
細分類* (重金属への適用がないものは除く)	・ファイトエキストラクション: 土壌中の汚染物質を吸収、植物体に蓄積→全般 ・ファイトスタビリゼーション: 土壌中の汚染物質を根表面に蓄積、酸化・還元による無害化、不溶化→全般 ・ファイトフィルトレーション: 地下水中の汚染物質を根表面に吸着することにより除去→全般、放射性物質へも適用 ・ファイトボラティリゼーション: 土壌中の汚染物質を吸収、地上部に移行、大気中に拡散→Hg、Se ・ハイドロリックバリアー: 植物の揚水機能により、汚染地下水の拡散を制御→全般 ・ベジテイティキャップ: 雨水の浸透を抑制することにより、汚染物質の移行を抑制→全般
特徴	・吸収された特定有害物質のほとんどは、植物の根や茎、あるいは葉に蓄積されるが、大気中に放出される場合もあり ・比較的緩やかに進行するため、一般的に浄化は長期間 ・適用される地域の気候、土壌の特性が大きく影響*

* 平田健正、前川統一郎、土壌・地下水汚染－原位置浄化技術の開発と実用化－、(2009年普及版)

環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版 (平成23年8月) を基に作成

2.3 原位置土壌洗浄による原位置浄化

項目	内容
汚染物質	Cr ⁶⁺ 、Pb、As等*
処理方法の概要	基準不適合土壌中に清浄な水又は溶出を促進させる化学物質を溶解させた水等を注水し、同時に地下水を揚水することにより基準不適合土壌中の地下水の流速を高め、揚水した水から特定有害物質を除去することにより、基準不適合土壌中の特定有害物質の濃度を低下させる方法
細分類	—
特徴	・直接摂取リスクに係る原位置浄化でも活用 ・均質で透水性の良好な土質、すなわち砂、レキを多く含有する砂質土が最適(透水係数で10^{-4}cm/s以上)* ・事前に対象土壌のトリータビリティ試験を実施し、対象土壌の処理可能性を確認* ・対象土壌や配管などの地下構造の把握が重要* ・目詰まりと生物汚染の対策が重要* ・浄化効果の確認のためモニタリングやボーリング調査が必要*

* 平田健正、前川統一郎、土壌・地下水汚染—原位置浄化技術の開発と実用化—、(2009年普及版)

環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版 (平成23年8月) を基に作成

3. 不溶化（原位置不溶化、不溶化埋め戻し）

3.1 原位置不溶化

項目	内容
汚染物質	全般
処理方法の概要	基準不適合土壌のある範囲及び深さについて、ボーリング等の方法により把握した上で、その場所において薬剤の注入その他の基準不適合土壌を掘削せずに行う方法により、特定有害物質が水に溶出しないように性状を変更して土壌溶出量基準に適合する汚染状態にある土地とする方法
細分類	・薬剤の注入 ・深層混合工法による深部の土壌の攪拌 ・スタビライザー等を用いた浅層混合工法による表層土壌の攪拌
特徴	・飛散防止のためシートで覆う、覆土、舗装等の措置をとること ・土壌の採取により、土壌溶出量基準に適合する汚染状態にあることを確認し、地下水の採取により、地下水汚染が生じていない状態が2年間継続することにより確認 ・事前の適用可能性試験で不溶化や効果の安定性を確認 ・地下水の特定有害物質と薬剤の濃度等を周囲でモニタリング

3.2 不溶化埋め戻し

項目	内容
汚染物質	全般
処理方法の概要	基準不適合土壌のある範囲及び深さについて、ボーリング等の方法により把握した上で、基準不適合土壌を掘削し、掘削された基準不適合土壌について薬剤の注入その他の方法により、特定有害物質が水に溶出しないように性状を変更して土壌溶出量基準に適合する汚染状態にある土壌となるように埋め戻す方法
細分類	・バックホウや専用の混合機等で混合
特徴	・飛散防止のためシートで覆う、覆土、舗装等の措置をとること ・埋め戻す前に、土壌の採取により、土壌溶出量基準に適合する汚染状態にあることを確認 ・措置の実施後、地下水の採取により、地下水汚染が生じていない状態が2年間継続することにより確認 ・掘削から埋戻しまで時間がかかるので、その間、土留めが必要 ・地下水の特定有害物質と薬剤の濃度等を周囲でモニタリング

環境省 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン 改訂版（平成23年8月）を基に作成

3.3 対象とする特定有害物質と主な不溶化剤

分類	土中の形態		汚染物質	主な不溶化剤
陽イオン	土粒子に吸着されやすく、水酸化物等で沈殿しやすいため、水に溶解しにくく、拡散しがたい	土粒子に吸着、陽イオン	Cd、Hg、Pb	カルシウム系(セメントを含む)、硫化物系、キレート剤、リン酸系、鉄系*、粘土系*
陰イオン	土粒子に吸着されにくく、沈殿物も生成しにくいため、拡散しやすく、不溶化処理が難しい場合あり	オキソ酸イオン	Se、As	カルシウム系(セメントを含む)、鉄系、マグネシウム系、セリウム系
			Cr ⁶⁺	鉄系(還元)
			B	カルシウム系(セメントを含む)、マグネシウム系、セリウム系
		陰イオン	F	
			CN	鉄系、マグネシウム系

* 陽イオンの主な不溶化剤で、鉄系、粘土系は文献調査の結果等を考慮し追記

地盤工学会、地盤工学・実務シリーズ25、続・土壌・地下水汚染の調査・予測・対策 平成20年4月30日 を基に作成

別紙3.8 我が国の土壤環境修復技術のコスト比較

1. 対策費用の試算例と実際に選択されている対策内容

対策手法の比較

	ばく露経路遮断型の 対策	土壤汚染の除去	
		原位置浄化	掘削除去
対策費用	低い	低くなる場合が多い	高い
工期	短期間	短期間～長期間	短期間
汚染土壌の搬出	搬出なし	搬出なし	搬出あり
対策後の管理	土地改変の制限・届出、 地下水モニタリング ^(注1)	地下水モニタリング	地下水モニタリング

(注1) 対策手法によっては不要の場合がある。

環境省 平成17年度 土壤汚染対策法の施行状況及び土壤汚染調査・対策事例等に関する調査結果（平成19年10月）に加筆

対策費用の試算例 (工事費用と維持管理費(20年間)の合計)

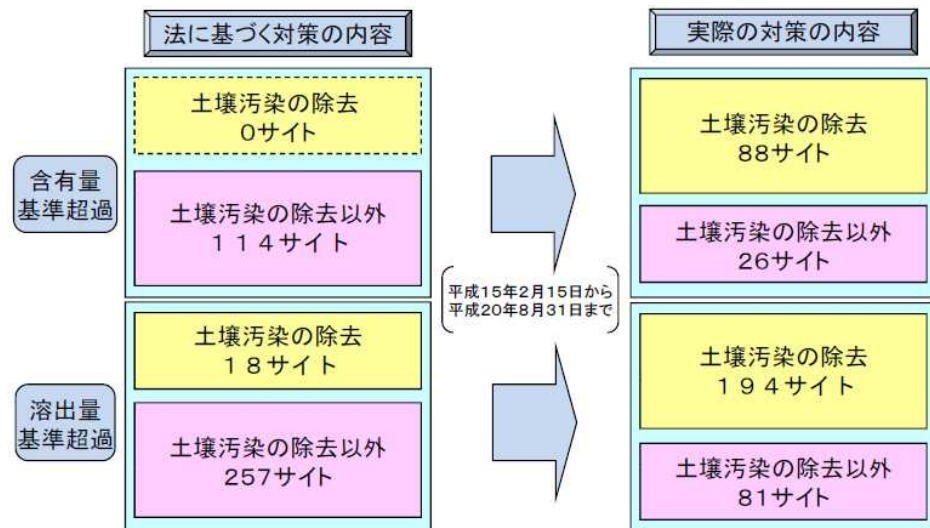
《ケース1》
含有量基準を超過する場合
(重金属)

・掘削除去の場合 約4.5 億円
・舗装の場合 約0.2 億円

＜モデルケースの設定条件＞

敷地面積: 10,000 m²
土壤汚染の面積: 3,000 m²
土壤汚染の平均深さ: GL -3 m
対策工事対象土量: 9,000 m³
汚染状況: 重金属が土壤含有量基準不適合

指定区域に関する法に基づく対策内容と実際の対策内容の違い



環境省調べ

実際には費用が高い掘削除去
を選択するケースが多い

環境省 「今後の土壤汚染対策の在り方について（案）」に対する意見募集の結果及び環境大臣への答申について、平成20年12月19日に加筆

2. 土壤汚染修復でのコスト比較の考え方

土壤汚染修復でのコスト比較は、いつまでに（期間）、何を（対象とする汚染物質）、どのように（環境修復の方法）、どこで（環境修復の場所又は処分先）、どこまで（環境修復の目標）行うか、という計画に基づいて行う。

森島義博、八巻淳、廣田裕二、土壤汚染と不動産評価・売買、東洋経済新報社、2003年を基に作成

いつまでに、どこまで、の観点では、掘削除去が早く、効果も確実である。一方、地下水の揚水処理や原位置浄化での生物・化学処理等は時間がかかる。掘削除去については、除去後の処理方法についても考慮が必要である。

平成14年7月、国土交通省により「不動産鑑定評価基準」が改定され、不動産の価格を形成する要因として、土壤汚染が追加された。

また別添のデータベース（土木学会）で、工法ごとのコストを比較する。

汚染を保有する土地の評価方式と内容

評価手法	内 容
原価方式	汚染がないと仮定した場合の価値から、対策費用及びスティグマによる減価額を差し引いて、価値を算定
収益方式	収益還元利回りの査定時に、賃料、空室率、諸経費等に汚染が及ぼす影響を考慮
比較方式	類似の汚染がある土地取引の価格を参照

土木学会 建設技術研究委員会 土壤・地下水汚染対策研究小委員会、“【研究報告】土壤・地下水汚染の現状と調査・対策技術の動向”、土木学会、(2004)を基に作成

3. 汚染物質ごとの処理方法の概算処理費－1

汚染物質ごとに掘削除去の場合の処理方法に応じた概算処理費を比較する。

また一般的な工事費用算定の際の内訳について示す。

汚染物質	処理方法	内容	概算処理費	備考
Cd Hg Se Pb As	洗浄方法	洗浄装置にて有害物質を土壌から分離する。処理済清浄土は再利用、埋戻しする。濃縮有害物が発生し産廃処分要。	@ 15,000 ～ 25,000/t	オンサイトの処理の場合、装置設置費は別。処理工場へ運搬する場合、運搬費は別。
	低温熱処理処理 (200～400℃)	水銀は沸点が低いのでガス化しやすく熱をかけて土壌から分離し後段で回収する。	@ 30,000 ～ 50,000/t	オンサイトの処理の場合、装置設置費は別。処理工場へ運搬する場合、運搬費は別。
	高温熱処理 (800～1200℃)	高温で重金属を分離し後段で回収する。金属重金属を塩化物として揮発分離する塩化物揮散法などが行われている。	@ 30,000 ～ 50,000/t	オンサイトの処理の場合、装置設置費は別。処理工場へ運搬する場合、運搬費は別。
	埋立処分	管理型最終処分場埋立基準に合格する性状のものを埋立処分する。	@ 25,000 ～ 30,000/t	発生場所から最終処分場までの運搬費は別。
Cr ⁶⁺	洗浄処理	洗浄装置にて有害物質を土壌から分離する。処理済清浄土は再利用、埋戻しする。濃縮有害物が発生し産廃処分要。	@ 15,000 ～ 25,000/t	オンサイトの処理の場合、装置設置費は別。処理工場へ運搬する場合、運搬費は別。
	高温熱処理 (800～1200℃)	高温で重金属を分離し後段で回収する。重金属を塩化物として揮発分離する塩化物揮散法などが行われている。	@ 30,000 ～ 50,000/t	オンサイトの処理の場合、装置設置費は別。処理工場へ運搬する場合、運搬費は別。
	埋立処分	管理型最終処分場埋立基準に合格する性状のものを埋立処分する。	@ 25,000 ～ 30,000/t	発生場所から最終処分場までの運搬費は別。

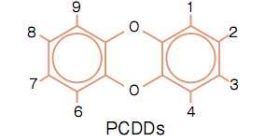
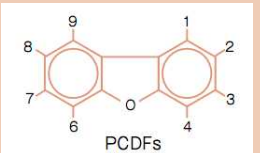
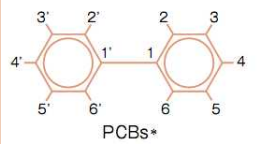
森島義博、八巻淳、廣田裕二、土壌汚染と不動産評価・売買、東洋経済新報社、2003年

4. 汚染物質ごとの処理方法の概算処理費－2

汚染物質	処理方法	内容	概算処理費	備考
F	洗浄処理	洗浄装置にてふっ素を土壌から分離する。ふっ素洗浄の実績はとぼしいので事前にトリータビリティーテストが必要である。水溶性のふっ素化合物であれば容易に洗浄できる。	@15,000～25,000/t	事前にトリータビリティーテストが必要。オンサイトの処理の場合、設置費は別。運搬費は別。
	不溶化処理	カルシウム(Ca)と反応させてCaFを形成すれば不溶化できる。	@10,000～20,000/t	オンサイトの処理の場合、設置費は別。運搬費は別。
	埋立処分	埋立基準がないので受入側に確認することが必要。溶出量値を下げるためにはCa混合処理が必要。	@25,000～30,000/t	受入条件確認が必要である。
B	埋立処分	埋立基準がないので受入側に確認することが必要。	@25,000～30,000/t	運送費は別。
	洗浄処理	溶解性のほう素化合物は洗浄可能。ほう素の洗浄実績は少ないので事前のトリータビリティーテストが必要。	@15,000～25,000/t	運送費は別。

森島義博、八巻淳、廣田裕二、土壌汚染と不動産評価・売買、東洋経済新報社、2003年

ダイオキシン類の毒性等価係数 (TEF : Toxic Equivalency Factor)

	化合物名	TEF値 *1 (WHO 1998 TEF)	TEF値 *2 (WHO 2006 TEF)
PCDD (ポリ塩化ジベンゾ-パラ-ジオキシン) 	2,3,7,8-TeCDD	1	1
	1,2,3,7,8-PeCDD	1	1
	1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	0.1
	1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	0.1
	1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	0.1
	1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	0.01
	OCDD	0.0001	0.0003
PCDF (ポリ塩化ジベンゾフラン) 	2,3,7,8-TeCDF	0.1	0.1
	1,2,3,7,8-PeCDF	0.05	0.03
	2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	0.3
	1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	0.1
	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	0.1
	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0.1
	2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	0.1
	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	0.01
	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	0.01
	OCDF	0.0001	0.0003
コプラナー PCB 	3,4,4',5-TeCB	0.0001	0.0003
	3,3',4,4'-TeCB	0.0001	0.0001
	3,3',4,4',5-PeCB	0.1	0.1
	3,3',4,4',5,5'-HxCB	0.01	0.03
	2,3,3',4,4'-PeCB	0.0001	0.00003
	2,3,4,4',5-PeCB	0.0005	0.00003
	2,3',4,4',5-PeCB	0.0001	0.00003
	2',3,4,4',5-PeCB	0.0001	0.00003
	2,3,3',4,4',5-HxCB	0.0005	0.00003
	2,3,3',4,4',5-HxCB	0.0005	0.00003
	2,3',4,4',5,5'-HxCB	0.00001	0.00003
	2,3,3',4,4',5,5'-HpCB	0.0001	0.00003

最も毒性が強い
2,3,7,8-TeCDDの毒性を1

他のダイオキシン類
の仲間の毒性の強さ
を換算した係数

ダイオキシン類の毒性を足
し合わせた値

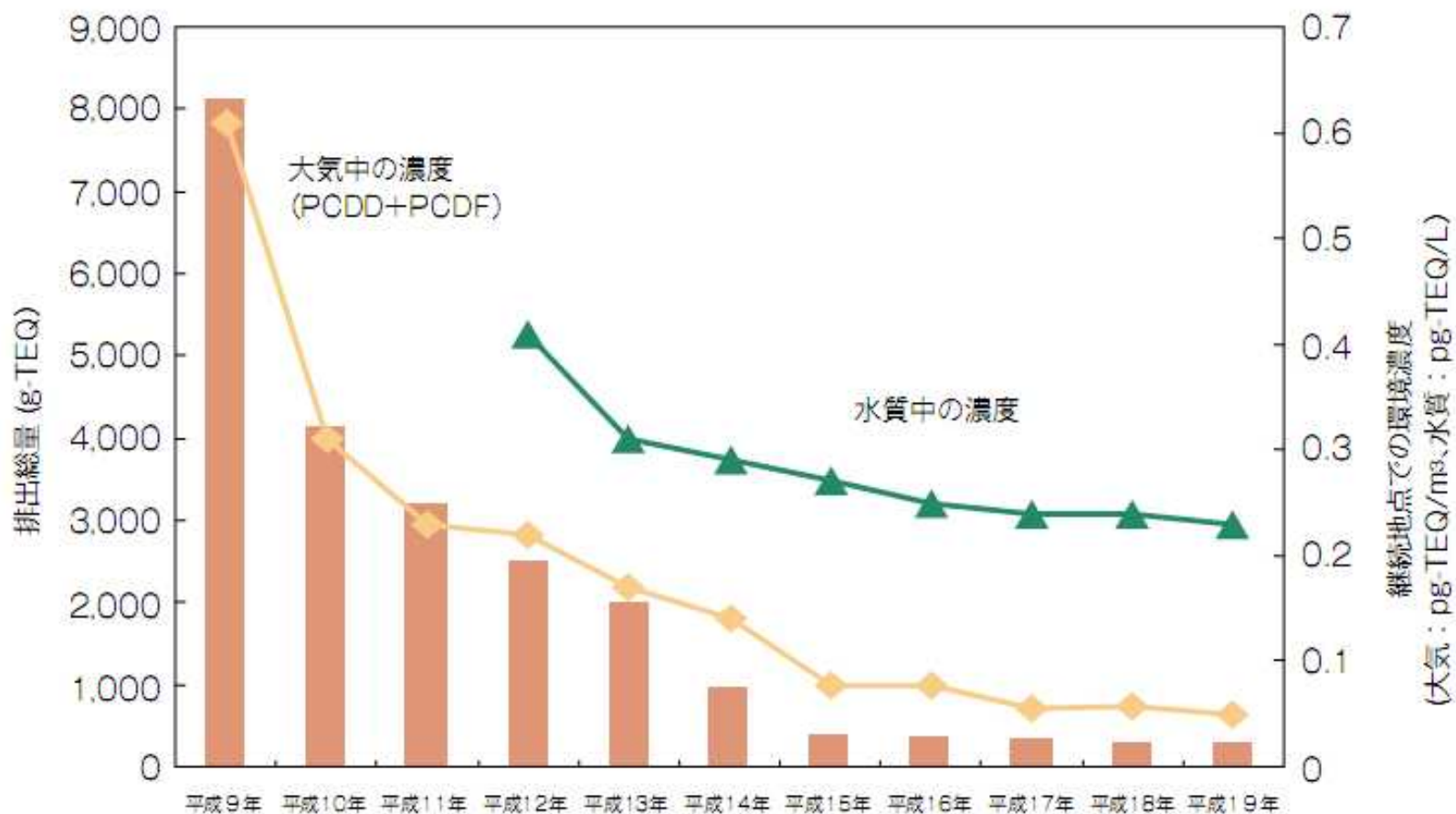
通常、毒性等量
TEQ • Toxic Equivalent

を用いてダイオキシン類の
濃度を表現

(*1: 1997年にWHOより提案され1998年に専門誌に掲載されたもの)

(*2: 2005年にWHOより提案され2006年に専門誌に掲載されたもの)

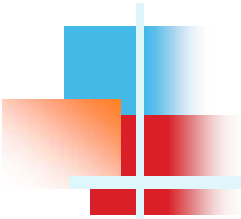
排出総量と大気及び水質中のダイオキシン類濃度の推移



↑
ダイオキシン類特別措置法
(H11.7.16)

↑
平成15年のダイオキシン類の推計
排出量は平成9年比で約95%削減

関係省庁共通パンフレット（内閣府、警察庁、総務省、外務省、文部科学省、厚生労働省、農林水産省、経済産業省、国土交通省、環境省）、ダイオキシン類（2009）に加筆



ダイオキシン類の耐容一日摂取量と環境基準

ダイオキシン類対策特別措置法

耐容一日摂取量 [TDI]

4pg-TEQ/体重kg/日

環境基準

大気● ...年平均値 0.6pg-TEQ/m³以下

水質● ...年平均値 1pg-TEQ/L以下

底質● ...150pg-TEQ/g以下

土壌● ...1,000pg-TEQ/g以下（調査指標250pg-TEQ/g） *

● *土壌にあつては、調査指標以上の場合には必要な調査を実施すること

ダイオキシン類基準不適合土の保管設備、処理設備 での飛散防止のための構造

* 3ng (ナノグラム) = 3,000pg (ピコグラム)

表 2.3-1 各設備における主に飛散を防止するための構造

設備名		ダイオキシン類基準不適合土壌の汚染状態	
		3ng-TEQ/g 以下 *	3ng-TEQ/g 超過 *
保管設備	容器による対応	下記のいずれかの容器に入れ、粉じん等が飛散しにくい構造に保管すること。 ① フレキシブルコンテナ ② ドラム缶 ③ 上記①、②と同等以上の効果を有する容器	下記のいずれかの容器に入れ、粉じん等が飛散しにくい構造に保管すること(①により保管を行う場合には、外気と遮断された構造であること(長期保管では②で保管することが望ましい))。 ① フレキシブルコンテナ ② ドラム缶 ③ 上記①、②と同等以上の効果を有する容器
	構造物による対応	下記のいずれかの構造の設備内で直置き保管すること。 ① 粉じん等が飛散しにくい構造かつ防じんカバー等によりダイオキシン類基準不適合土壌が覆われていること。 ② 建屋等で外気と遮断できる構造かつ集塵機が設置されていること。 ③ 上記①、②と同等以上の効果を有する構造。	直置き保管は行わないこと。*
処理設備 (埋立地以外)		下記のいずれかの構造の設備内で処理を行うこと。 ① 建屋等で外気と遮断できる構造かつ集塵機が設置されていること。 ② 上記①と同等以上の効果を有する構造。	
処理設備 (埋立地)		下記のいずれかの構造で埋立を行うこと。 ① 散水設備によって散水が行われている。 ② 防じんカバー等で覆われている。 ③ 薬液の散布又は表層の締固めが行われている。 ④ 上記①から③と同等以上の効果を有する構造。	ダイオキシン類の量が 3ng-TEQ/g を超えるものを受け入れないこと。

※ 保管設備と供給設備が一体である場合については、当該保管施設において、3ng-TEQ/g を超過したダイオキシン類基準不適合土壌を容器から開封し供給する場合には、当該保管施設は処理設備(埋立地以外)と同等以上の効果を有する構造である必要がある

ダイオキシン類基準不適合土の飛散防止、地下浸透防止の設備の例

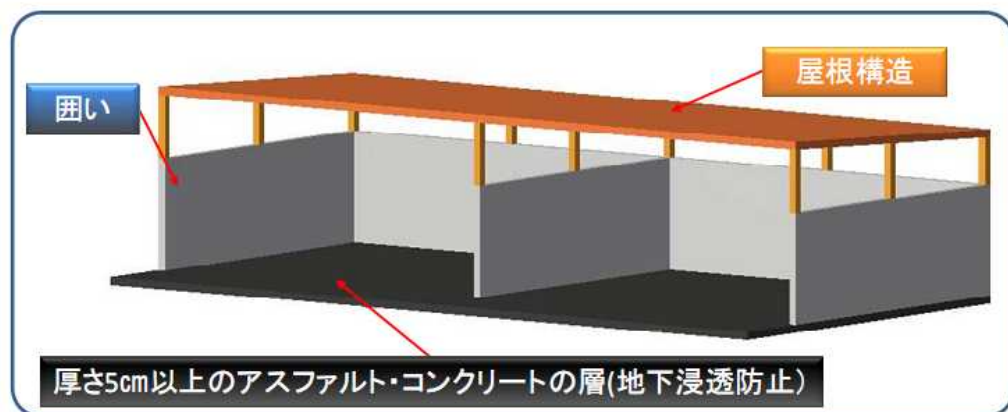


図 2.3-1 粉じん等が飛散しにくい構造の例



図 2.3-2 飛散防止措置が講じられた施設内移動の例（ドラム缶）

地下浸透防止の構造

下記施設の保管設備、処理設備、施設内移動

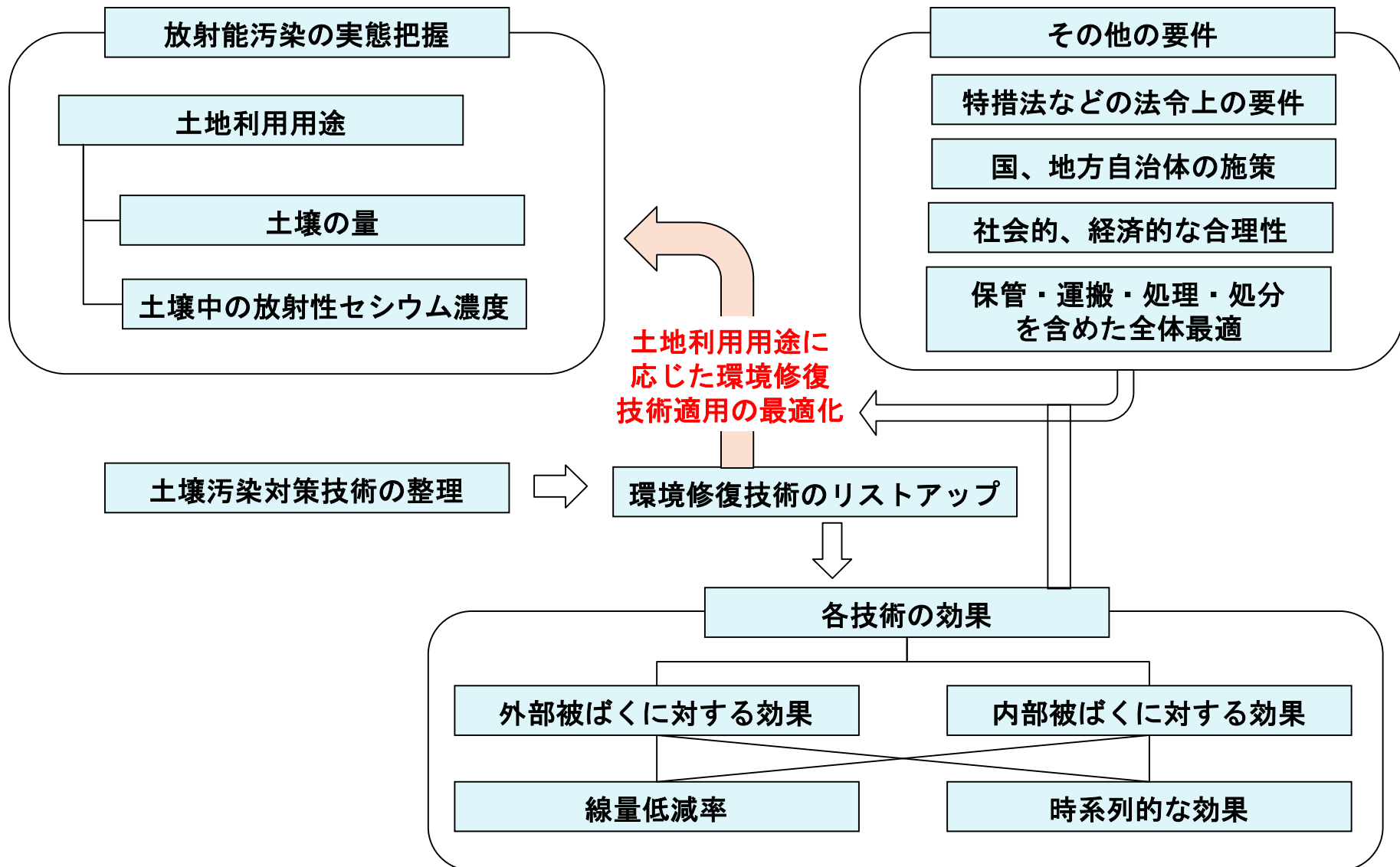
- ・ 浄化施設
- ・ セメント焼成施設
- ・ 前処理施設
- ・ 埋立施設（処理設備は別途基準）

下記のいずれか又は同等以上の耐久性及び遮断の効果を有するもの

- ① 厚さ 10 cm以上のセメント・コンクリートの層
- ② 厚さ 5 cm以上のアスファルト・コンクリートの層

別紙 3.10 我が国の土壤汚染修復技術の福島への適用性検討

1. 福島への適用性検討の考え方



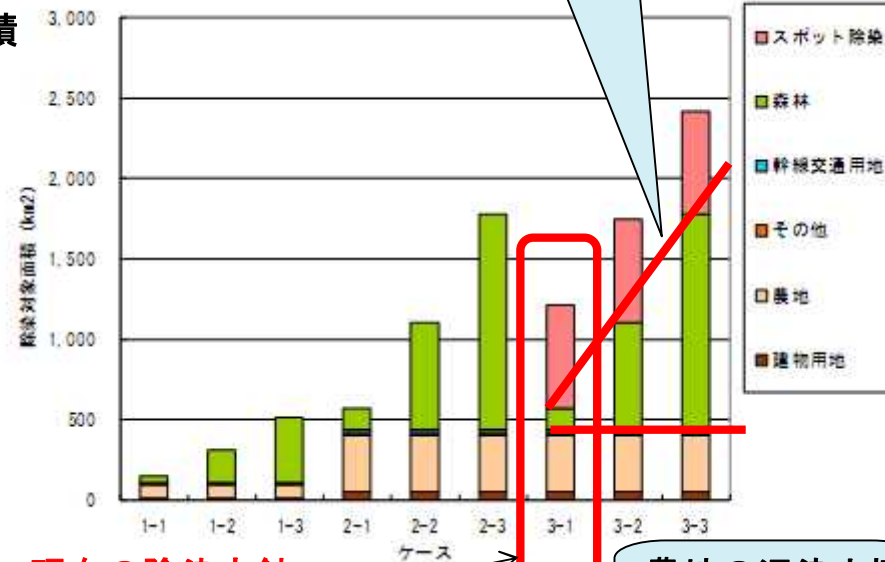
2. 除染対象面積と土壌の量の推定

試算ケース

ケース	線量と方法	森林の除染	対象面積
1-1	20mSv/y以上 面的除染	10%	147 Km ²
1-2		50%	311 Km ²
1-3		100%	515 Km ²
2-1	5mSv/y以上 面的除染	10%	569 Km ²
2-2		50%	1,106 Km ²
2-3		100%	1,778 Km ²
3-1	5mSv/y以上 面的除染 1～5mSv/y スポット除染	10%	1,211 Km ²
3-2		50%	1,748 Km ²
3-3		100%	2,419 Km ²

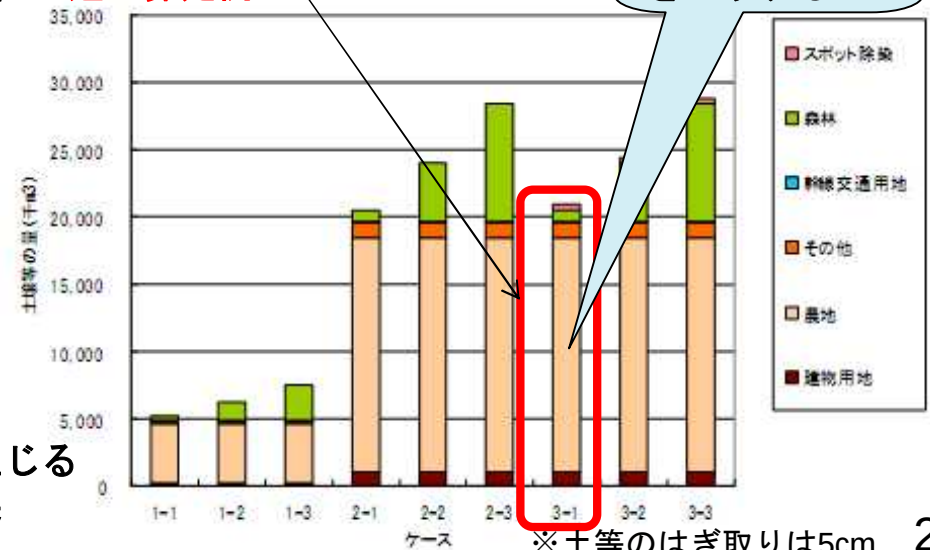
環境省 第2回環境回復検討会 資料7 除去等の措置等に伴って生じる土壌等の量の推定について（H23.9.27）を基に作成、グラフに加筆

除染対象面積
の推定結果



現在の除染方針
に近い算定例

農地の汚染土壌
をどうするか?



除染によって生じる
土量の推定結果

※土等のはぎ取りは5cm 2

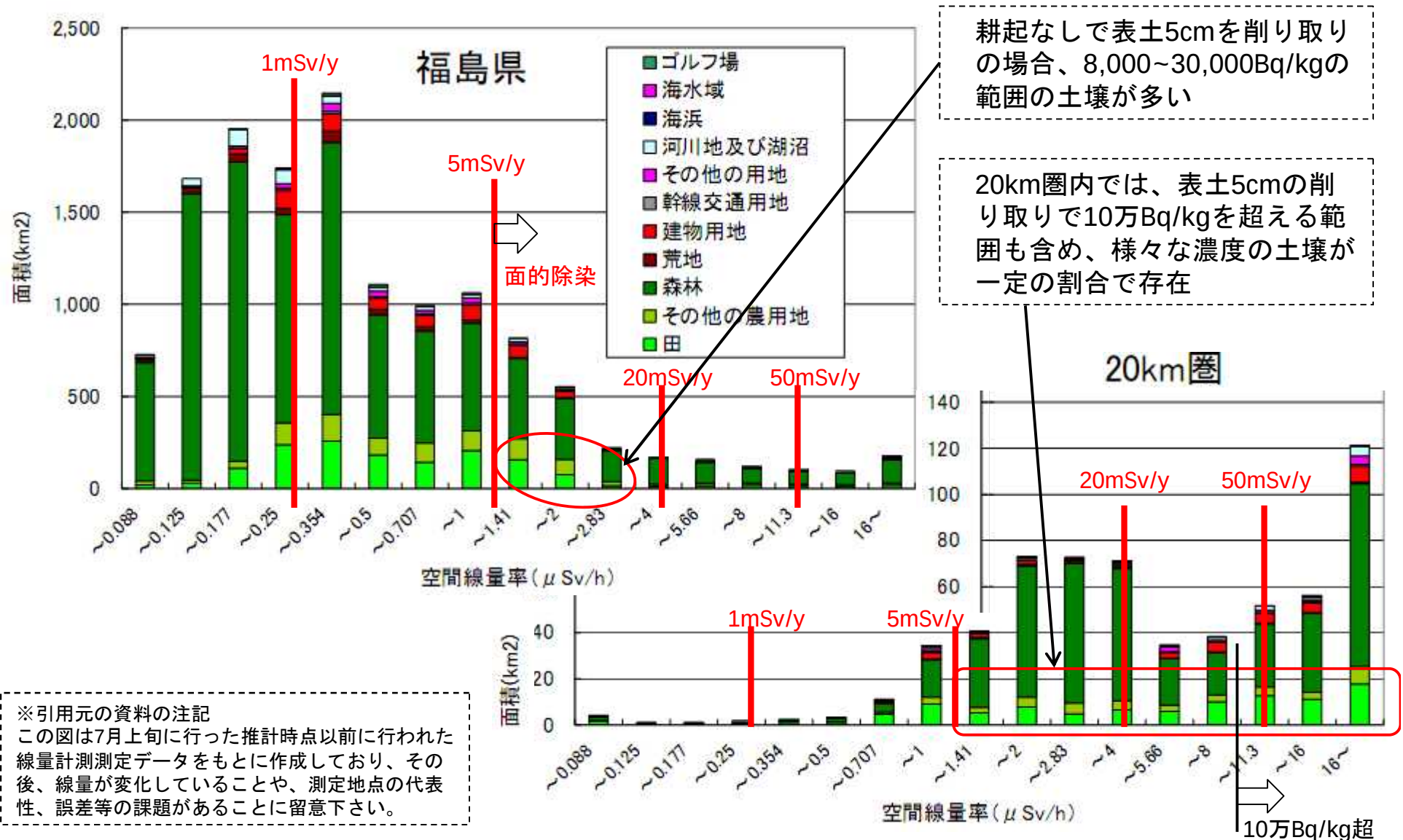
3. 除染に伴い発生する土壌等の量の推定

上段：場所の面積
下段：土壌等の量

上段：場所の面積
下段：土壌等の量

場所		除染方法	除染に伴って 生じる主なもの	5mSv/y以上 を面的除染	20mSv/y以上 を面的除染
建物用地(住宅地、市街地) ※建ぺい率60%と仮定 →40%の土壌部分が対象		土壌のはぎ取り (5cm)	土壌	51 km ² 1,024 千m ³	10 km ² 193 千m ³
幹線交通用地		側溝の清掃	汚泥	13 km ² 50 千m ³	4 km ² 17 千m ³
農地	田、畑、果樹園等	土壌のはぎ取り (5cm)	土壌	349 km ² 17,425 千m ³	88 km ² 4,387 千m ³
森林	除染する量 10% 50% 100%	落ち葉回収・草刈り、 枝打ち	落ち葉、草、枝	134 km ² 1,206 千m ³	41 km ² 367 千m ³
				671 km ² 4,562 千m ³	204 km ² 1,387 千m ³
				1,343 km ² 8,758 千m ³	408 km ² 2,662 千m ³
その他	学校、公園、運動競 技場、空港、競馬場、 野球場、港湾地区、 人工造成地の空地、 ゴルフ場 等	土壌のはぎ取り (5cm)	土壌	23 km ² 1,128 千m ³	5 km ² 245 千m ³

4. 除染に伴い発生する土壌等の面積の推定

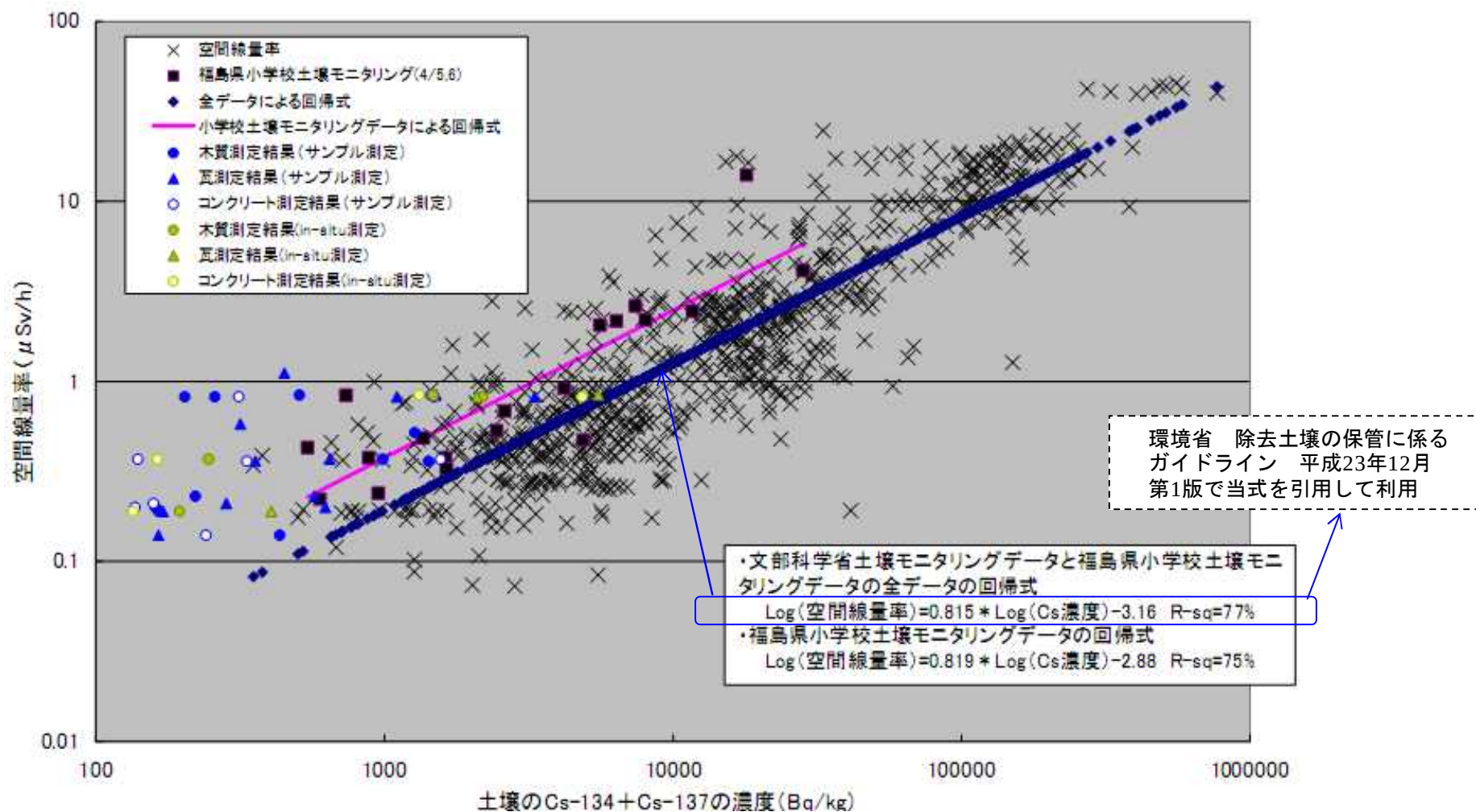


5. 線量・空間線量率と放射性セシウム濃度との関係

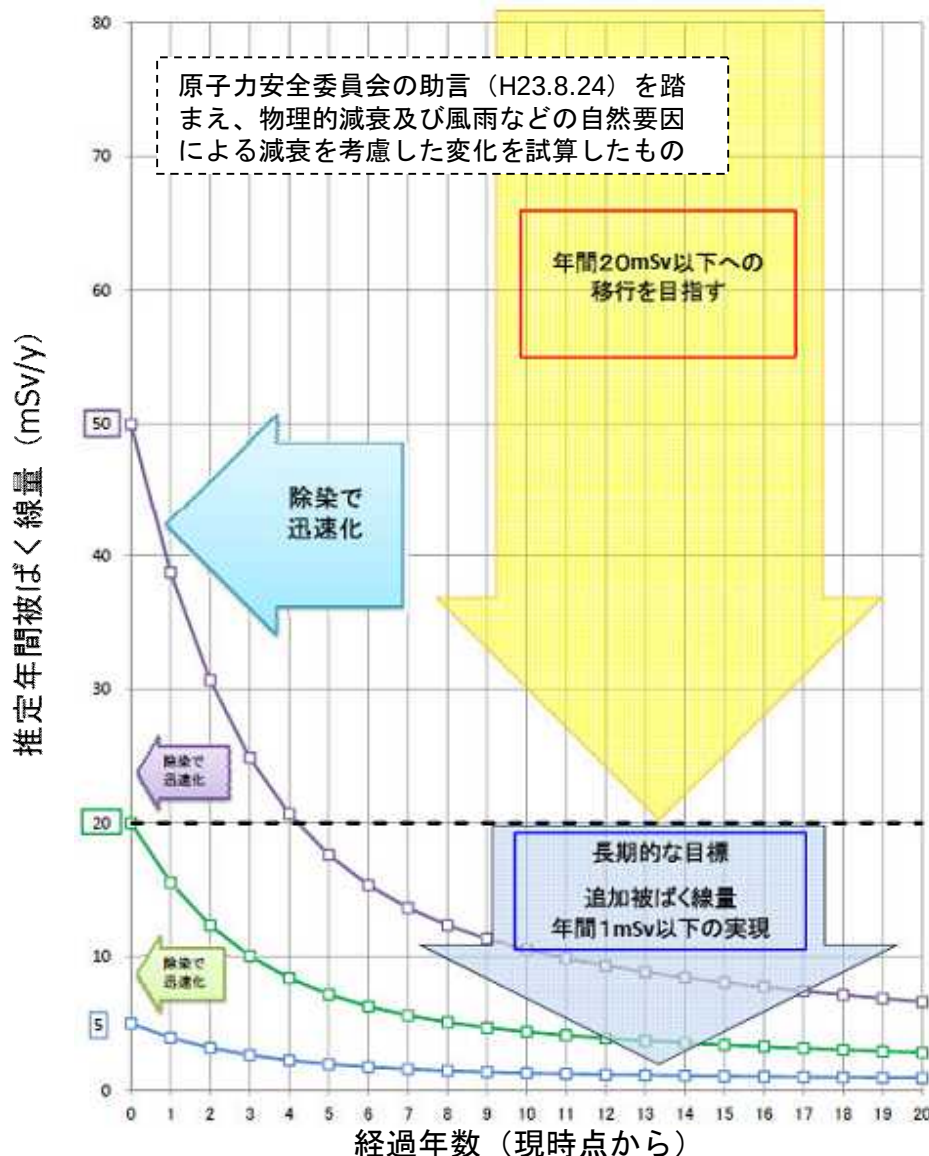
	単位	線量・空間線量率と放射性セシウム濃度との関係						
①追加の年間被ばく線量 バックグラウンドなし	mSv/y	1	5	9	16	20	43	50
②空間線量率(高さ1m) バックグラウンドなし	μSv/h	0.19	0.95	1.71	3.04	3.80	8.18	9.50
③空間線量率(高さ1m) バックグラウンド含む測定値	μSv/h	0.23	0.99 →1	1.75	3.08 →3	3.84	8.22	9.54
④土壌中のCs-134+Cs-137 の濃度(表層5cm)	Bq/kg	1,242 →1.2千	7,446 →8千	15,000	30,000	39,289 →4万	10万	120,005 →12万
⑤水田のCs-134+Cs-137 の濃度(表層15cm)	Bq/kg	0.4千	2.6千	5,000	—	1.3万	3.3万	4万
⑥畑のCs-134+Cs-137 の濃度(表層15～30cm) (右記は30cmで算定)	Bq/kg	0.3千	1.3千	—	5,000	0.7万	1.7万	3万
⑦表面汚染密度 バックグラウンドを含む (右記は表層5cmで算定)	Bq/m ²	7.8万	52万	97.5万	195万	260万	650万	780万

- 注記
1. 橙にハッチング：各列の基準値として入力した値、水色にハッチング：その他の重要な数値
 2. 「→〇」、〇千、〇万の表記は概算値
 3. 線量率と濃度の換算は概ね平成23年8月頃の測定値であり、時間の経過に伴い、関係式は変化する
 4. ②→①：屋外8時間、屋内16時間（遮へい係数：0.4）で算定 ①＝（②×8＋②×16×0.4）／1,000
 5. ②→③：バックグラウンド：0.04μSv/hを加算 ③＝②＋0.04
 6. ④→③：測定データに基づく関係式（次項）
 7. ⑤、⑥→④：放射性セシウムは表層5cmのみに存在と仮定して算定 ④＝⑤×15/5、④＝⑥×30/5
 8. ④→⑦：土壌の単位体積重量1.3 g/cm³とすると、1m²当たりの表層5cmの土壌は65kg
したがって、1Bq/m²→1Bq/65kg＝0.015Bq/kg（H23.5.8統合本部記者会見）

6. 空間線量率と土壤中のCsの濃度との関係



7. 物理的減衰および自然要因による減衰を考慮した 推定年間被ばく線量の変化



原子力委員会 新大綱策定会議 第6回 資料第5-2号 参考資料
内閣府 原子力被災者支援生活チーム 平成23年9月27日

原子力災害対策本部の考え方

- 汚染の発生から 5カ月後の核種組成
Cs-134: Cs-137 = 1 : 1 (H23.8)
- 物理的半減期による減衰を考慮
Cs-134 : 2.06年、Cs-137 : 30.17年
- 無限平面に沈着した単位放射能から空間線量率を求める際の線量換算係数
Cs-134 : $5.47\text{E-}9(\text{mSv/h}) / (\text{Bq/m}^2)$
Cs-137 : $2.00\text{E-}9(\text{mSv/h}) / (\text{Bq/m}^2)$
→空間線量率に与える寄与率
Cs-134 : Cs-137 = 0.73 : 0.27
- ウェザリングを考慮：駒村らの回帰式
農用地のCs-137の滞留半減時間 18.4年
ウェザリングによる半減期 47.2年

$$D_i(t) = D_i(0) \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{\tau_w} \cdot t\right) \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t)$$

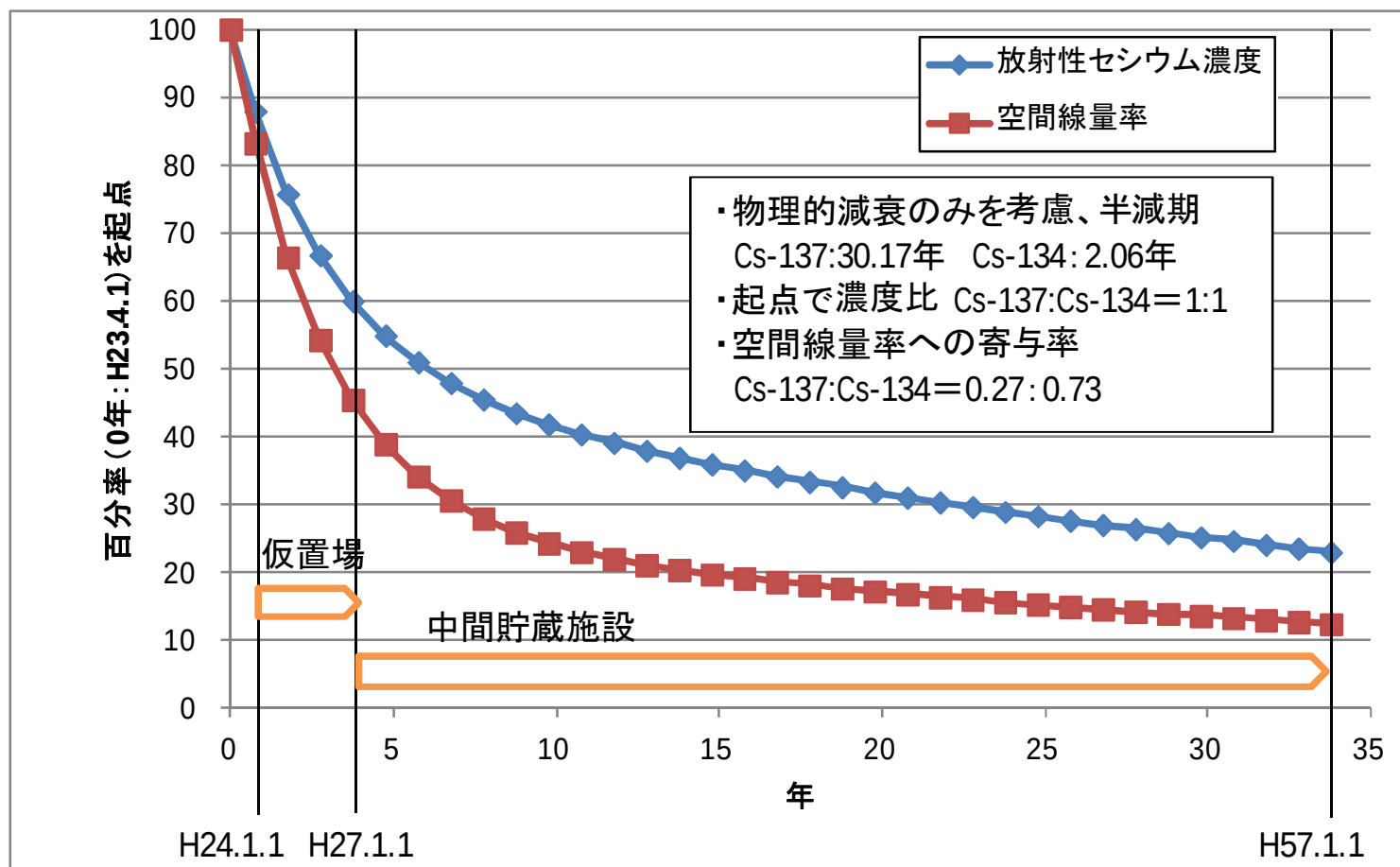
$D_i(0)$: 核種 i による空間線量率の初期値

τ_w : ウェザリングによる半減期

λ_i : 核種 i の崩壊定数

原子力災害対策本部 第64回原子力安全委員会 資料第1-1号
現在の空間線量率から将来の空間線量率を予測する考え方について 平成23年8月24日

8. 放射性セシウム濃度と空間線量率の低減率の正規化



時期	H23.4.1	H24.1.1	H25.1.1	H26.1.1	H27.1.1	H57.1.1
	事故発生直後	特措法施行 仮置場開始	仮置場	仮置場	中間貯蔵開始	中間貯蔵終了、 最終処分
放射性セシウム濃度(百分率)	100.0	88.0	75.8	66.8	60.0	23.0
空間線量率(百分率)	100.0	83.3	66.4	54.3	45.4	12.4
Cs-134/Cs-137(濃度比)	1.000	0.790	0.578	0.422	0.309	0.000

9. 物理的減衰および自然要因による減衰の考え方の整理

原子力災害対策本部の考え方

現在の空間線量率から将来の空間線量率を予測（前項）

原子力災害対策本部 第64回原子力安全委員会 資料第1-1号
現在の空間線量率から将来の空間線量率を予測する考え方について 平成23年8月24日



原子力安全委員会の助言

提示の内容で差し支えない

原安委が指摘した留意事項

○空間線量率の予測に関して、ウェザリングについては日本の土壌、気候等の特徴を十分に踏まえ、適切に効果を見込むこと。

○防護措置の実施にあたってはモニタリングの実績に基づき被ばく線量を評価すること。

○実測値と予測値との比較を行い、将来予測を適宜見直すこと。

原安委 第64回原子力安全委員会 資料第1-2号「現在の空間線量率から将来の空間線量率を予測する考え方について」に関する助言（回答） 平成23年8月24日

本検討での考え方

・ 除染を行わない場合の将来予測ではウェザリングの効果を考慮するが、**被ばく経路の遮断型の対策（覆土や天地返し等）を行った場合の将来予測ではウェザリングの効果を無視（次項参照）**

・ **除染技術を実施した場合の空間線量率の低減を将来予測に反映**
・ 空間線量率の低減率は実証試験やモニタリングの実績に基づくことを基本とするが、本検討では想定値も含む

・ 核種組成の見直し（保守側で最新の知見）
原子力災害対策本部

Cs -134: Cs-137 = 1 : 1 (H23.8)



環境省 がれき再利用のシミュレーション*

－文科省「土壌モニタリングの測定結果」

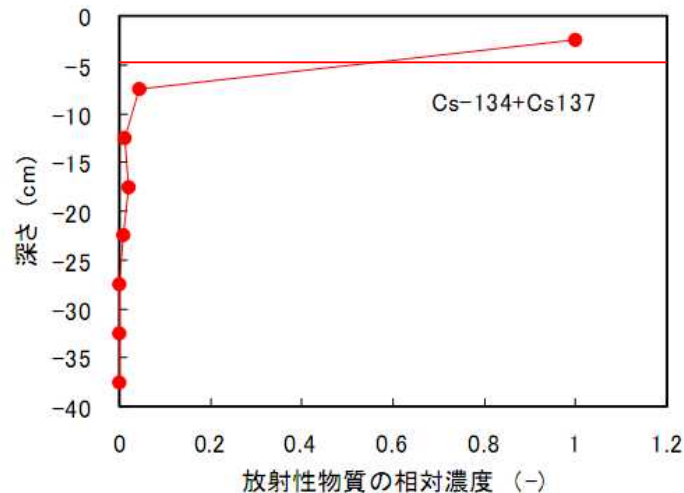
－福島県「福島県環境放射線モニタリング小・中学校等実施結果（土壌・ダスト）について」

のデータを基に、**Cs -134: Cs-137 = 0.806 : 1**

※本検討ではH24.1.1時点(H23.4.1で1:1)と想定

* 環境省 第11回災害廃棄物安全評価検討会 資料7-1 コンクリートがれき再利用におけるシミュレーションについて（日本原子力研究開発機構）（H23.12.25）

10. 土壌中のCsの深度分布と形態



環境省 第3回災害廃棄物安全評価検討会
資料3 災害廃棄物の放射能濃度の推定方法について
図6 (原子力安全基盤機構) (H23.6.19) に加筆

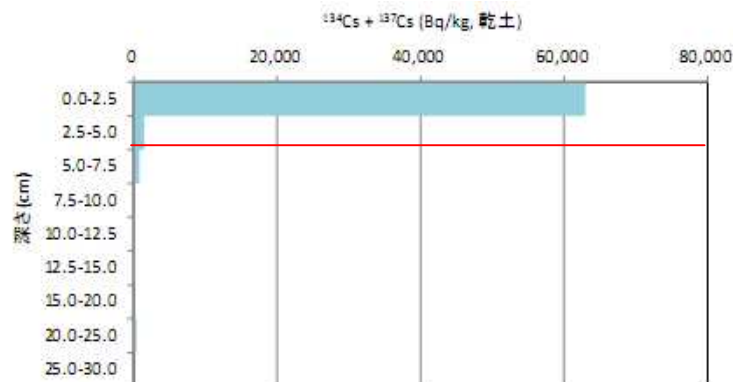


図1：飯舘村伊丹沢の水田土壌の放射性セシウム濃度

プレスリリース 農林水産省 農地土壌の放射性物質除去技術（除染技術）について【別添4】各技術についての解説 (H23.9.14) に加筆

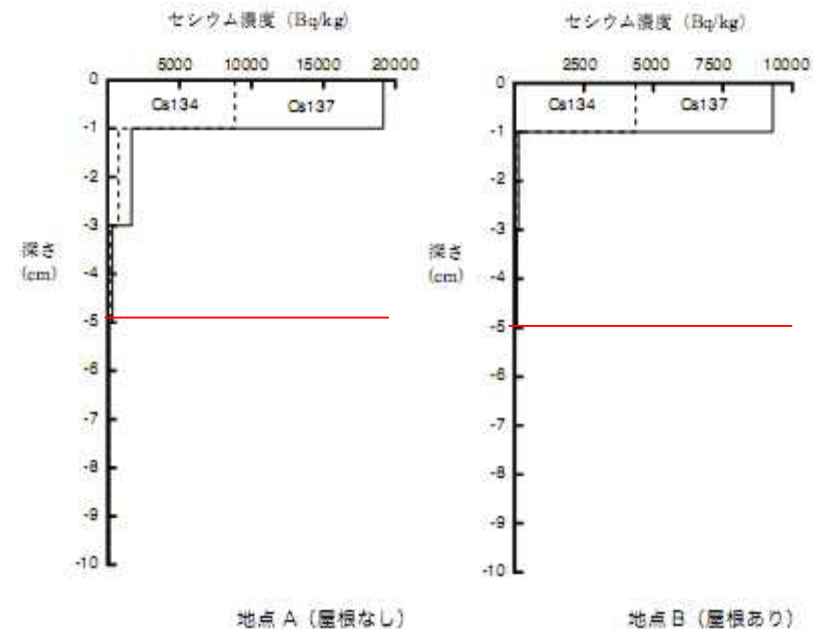


図1 深度方向の濃度分布 (7月24日時点の濃度に換算)

保高ら、放射性物質の土壌中の深度方向の分布および土壌洗浄法の適用性試験結果について 2011年9月27日に加筆

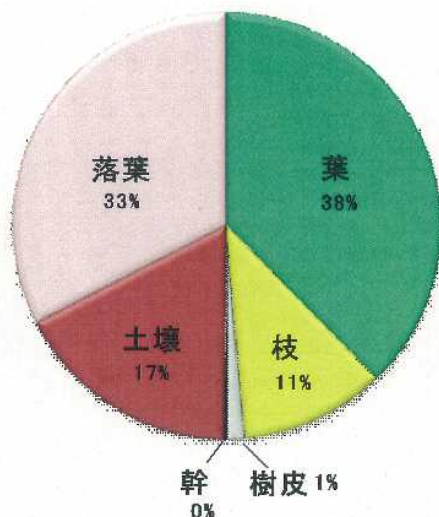
現状では、Csは、ほとんど地表面から数cm～5cm
(図の赤線)の表層部分にとどまっている。

Csの土中での形態は、イオン交換態が10%、有機物との結合体が20%、粘土鉱物等との強固な結合態が70%

Tsukada ら(2008) Journal of Environmental Radioactivity, 99, 875-881.

日本土壤肥料学会 原発事故関連情報(1): 放射性核種(セシウム)の土壌-作物(特に水稻)系での動きに関する基礎的知見 で紹介
<http://jssspn.jp/info/secretariat/post-15.html>

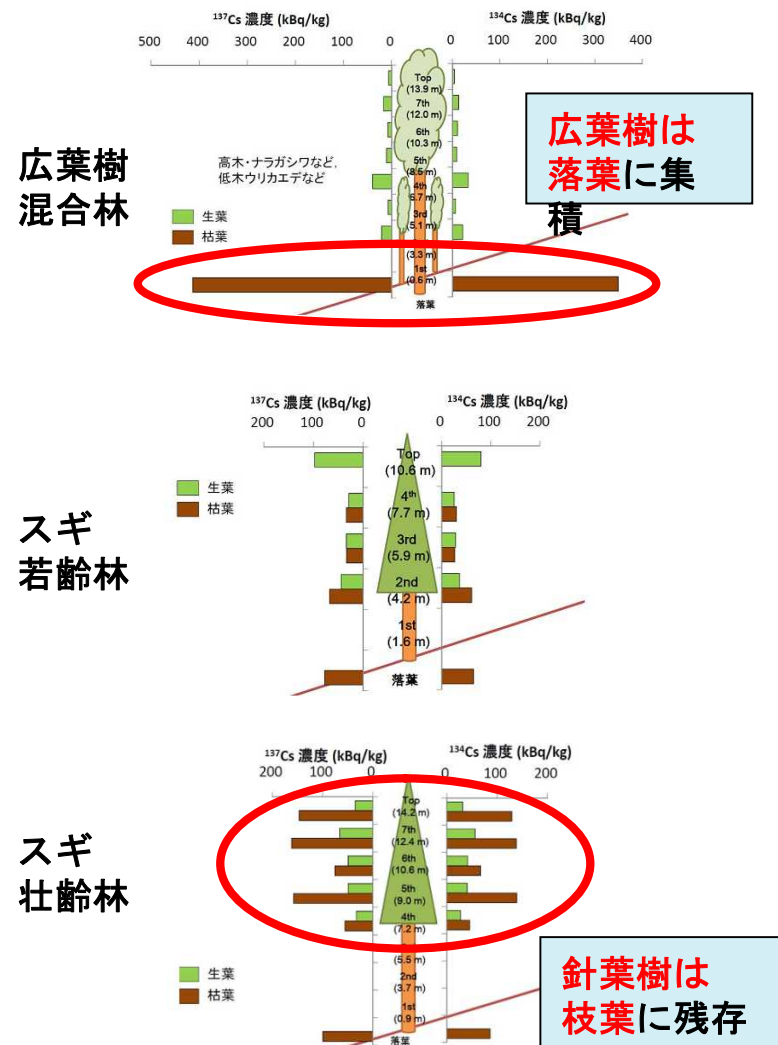
11. 森林内土壌のCsの分布



Csの量
= 濃度 × 重量

プレスリリース 農林水産省
森林内の放射性物質の分布状況及び
分析結果について (中間とりまとめ)
別添1 森林内の放射性物質の分布状
況の概要について (H23.9.30) に加筆

スギ林内に分布するCs-134+Cs-137の割合



文部科学省による放射性物質の分布状況等に関する調査
研究 (森林内における放射性物質の移行調査) の結果
について 別紙4 森林内土壌における放射性セシウム
の深度別の蓄積状況の確認結果 (H23.9.14) に加筆

12. 場所によるウェザリングの考え方

	農用地	森林	一般家屋	市街地	道路
灌漑水による負荷量	○	—	—	—	—
風雨等による表面流去 (下水への流出を含む)	○	○	○	○	○
下層への溶脱量	○	○	○	△	△
農作物、植物、樹木への吸収量	○	○	家庭菜園 ○	—	—
樹木→落葉→土壌→樹木等の物質循環	△	○	△	—	—

- ・ 原子力災害対策本部の示したウェザリングの考え方の基は農用地が対象（駒村ら）。
- ・ 農用地以外の場所では、灌漑水による負荷はない。
- ・ 森林では、樹木を含めた物質循環が他の場所よりも活発であると考えられる。
- ・ 市街地や（舗装された）道路では、下層への溶脱量は少なく、表面流去による下水への流出が多いと考えられる。
- ・ 市街地や（舗装された）道路では、公園や街路樹を除き、農作物、植物、樹木などによる吸収はほとんどない。
- ・ ウェザリングによる減少量だけでなく、他の場所からウェザリングにより流入してくる量も考慮する必要がある。

13. 作付制限と放射性セシウム濃度の調査

原子力災害対策本部が「稲の作付けに関する考え方」で水田→稲の移行の指標と土壌中の放射性セシウム濃度の上限値を公表（平成23年4月8日）

移行の指標

1959年から2001年まで、全国17か所の水田の土壌と収穫された米の放射性セシウムを分析した結果（計564データポイント）を解析

- 土壌の種類による差がないことを確認
- 各データポイントでの玄米中及び土壌中の放射性セシウム量の比（移行係数）を算出し、モデル化

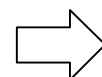
水田の土壌から玄米への放射性セシウムの移行の指標は 0.1（幾何平均値は0.012）

消費者の健康保護に配慮し、安全サイドにたった数字

農林水産省 消費・安全局 放射性物質の基礎知識
「食品等に含まれる放射性物質」平成23年12月に加筆

土壌中の放射性セシウム濃度の上限値

移行の指標（0.1）を前提として、玄米中の放射性セシウム濃度が食品衛生法上の暫定規制値（500Bq/kg）以下となる土壌中放射性セシウム濃度の上限値：**5,000Bq/kg**



原子力災害対策本部長（管総理）が福島県に対して、警戒区域、計画的避難区域及び緊急時避難準備区域で稲の作付制限を指示（平成23年4月22日）



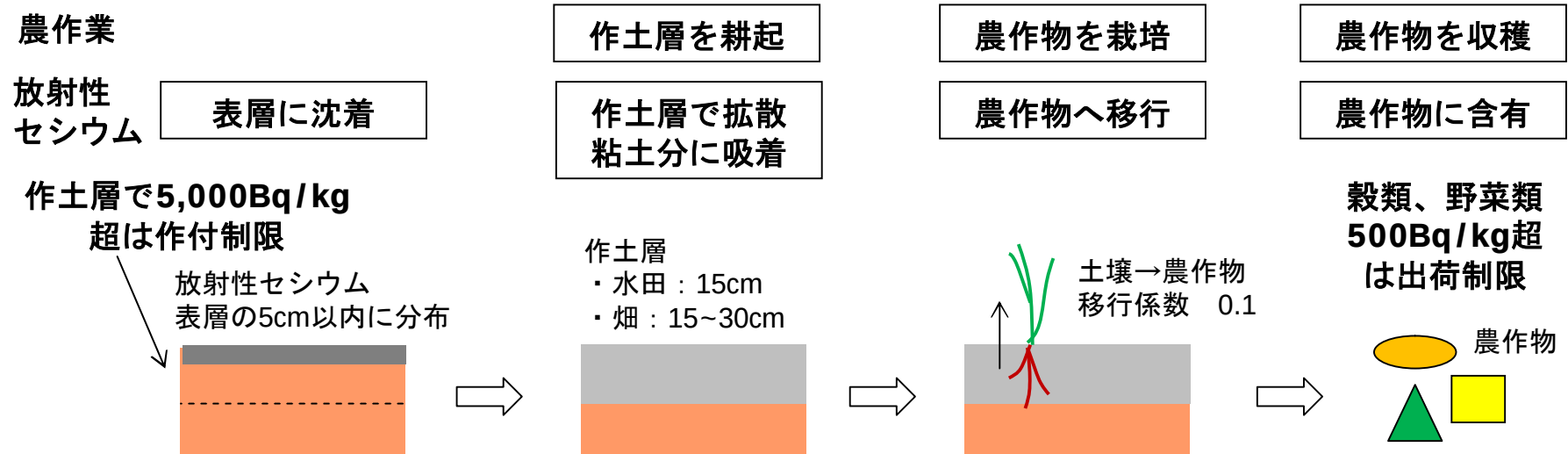
23年米の放射性セシウムの調査（17都県）

総検体数	100 Bq/kg 以下	100 Bq/kg超 300 Bq/kg以下	300 Bq/kg超 500 Bq/kg以下	500 Bq/kg 超
3,217	3,208	7	1	1
うち 福島県	1,276	1,268	6	1

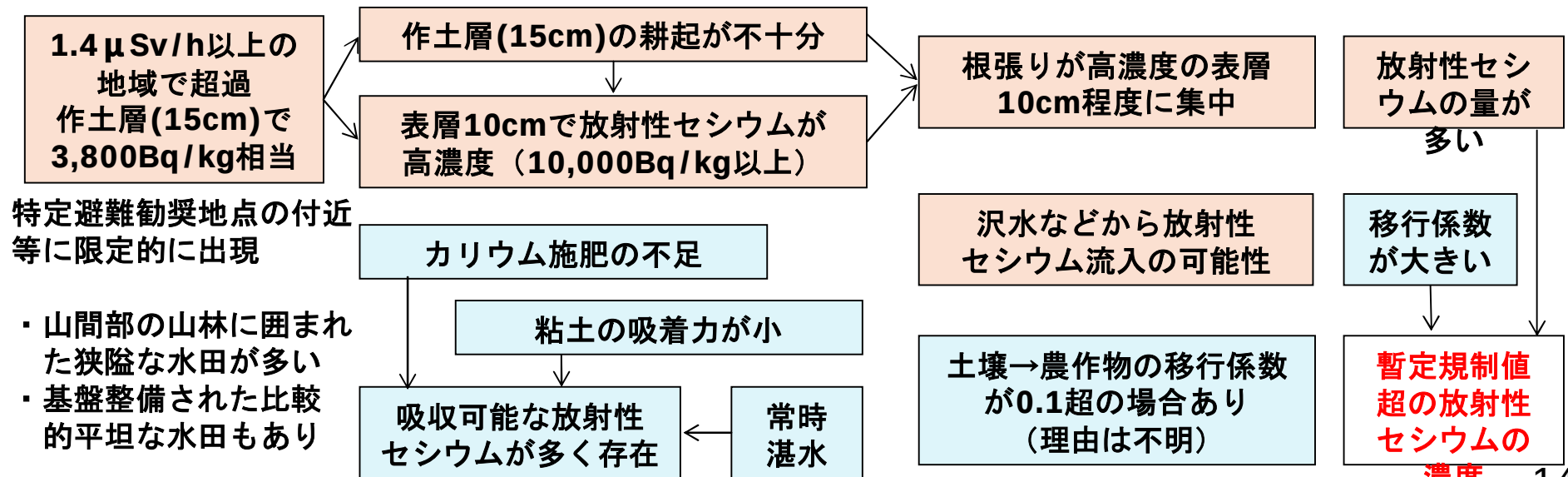
福島市大波地区（旧小国村）で暫定規制値を超える米が検出（→出荷制限）されたことを受けた実施した福島県の米の放射性セシウム濃度の緊急調査

	検体数	暫定規制値の超過数
①福島市旧小国村	5,066	283
②特定避難勧奨地点が存在する地域等(6市)	5,793	20
①②以外の地域で放射性セシウムが検出された地域(17市町村)	8,342	1

14. 暫定規制値超過の要因分析



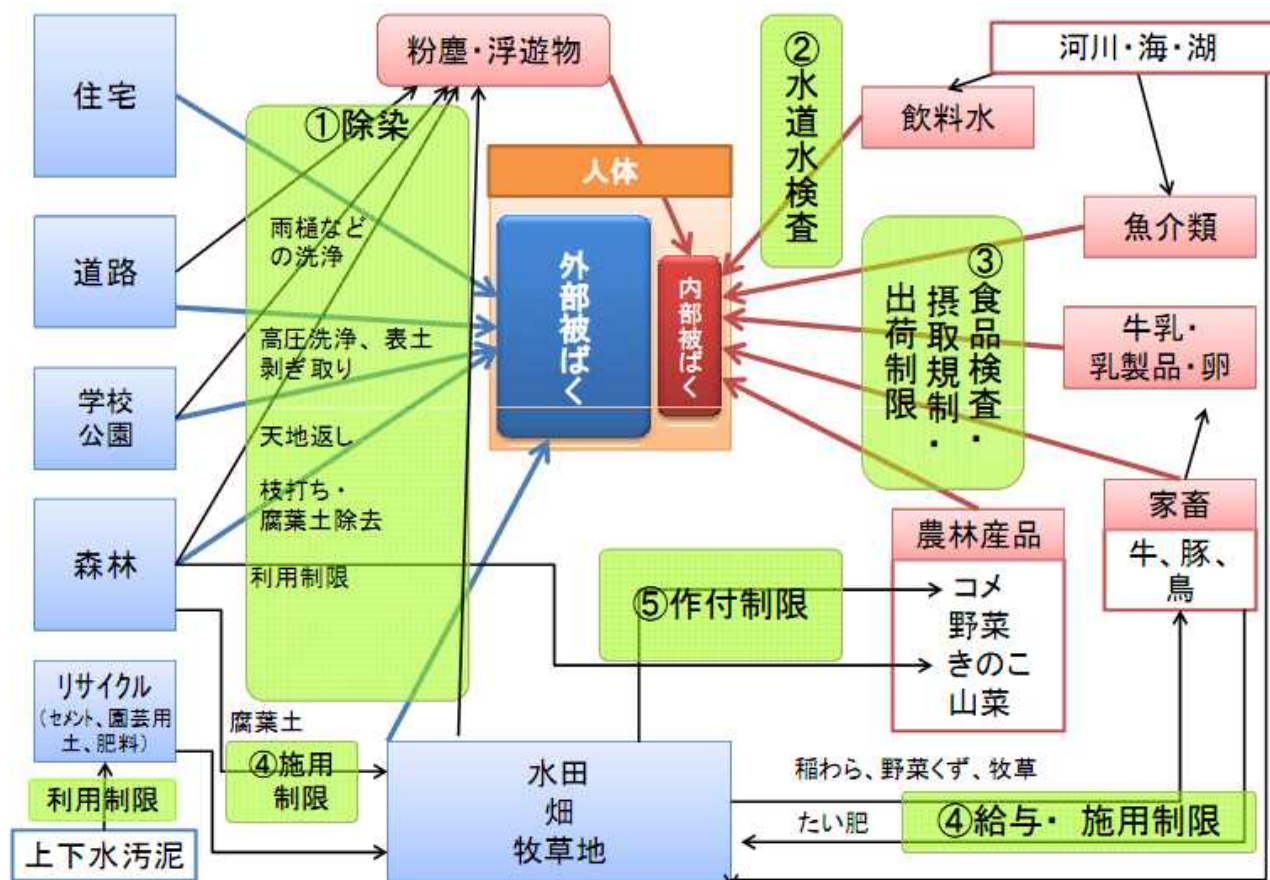
暫定規制値超過の要因分析（福島県、農林水産省）



15. 土地利用用途に応じた環境修復技術適用性検討

15.1 全体的な考え方

放射能汚染の連鎖と拡大防止策



本検討での考え方

- ・ **直接線による外部被ばくの低減**が対策の基本
- ・ **粉塵・浮遊物の吸引による内部被ばくの低減**は、汚染土壌が高濃度の場合の**作業者**に対して考慮
- ・ **農用地**では、別途、森林や水源からの**汚染の流入**および**農作物の摂取による内部被ばくの低減**さらに食品中の放射性物質に関する**暫定規制値の見直し**を考慮
- ・ **森林**では、別途、農用地などへの**汚染の流出防止**および**林作物の摂取による内部被ばくの低減**を考慮
- ・ **学校・公園**は**子供の生活環境**であることから、**より早く確実な対策**を選定

15.2 特措法による除染技術適用の考え方

特措法

（土壌等の除染等の措置の基準）

第四十条 第1項

除染特別地域又は除染実施区域に係る土壌等の除染等の措置を行う者は、**環境省令で定める基準**に従い、当該土壌等の除染等の措置を行わなければならない。

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（平成二十三年法律第百十号）



土壌の除染等の措置

- ①表土の削り取り
- ②土壌による覆うこと（表土と表土の下層にある土壌の入換えを含む）
- ③深耕
- ④上記と同等以上の効果があると認められるもの

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（平成二十三年法律第百十号）の第40条第1項に基づき定められた環境省令第三十三号 第54条第1項イ

15.3 農用地・森林における除染技術適用の考え方

農用地		
放射性Cs濃度※1	畑※3	水田※3
～5,000Bq/kg※2	耕起されていないところで●表土削り取りの選択可 必要に応じて、○反転耕、○移行低減栽培技術、 ●水による土壌攪拌・除去	
5,000Bq/kg～ 10,000Bq/kg	地下水位 低：●表土削り取り ○反転耕 高：●表土削り取り	●表土削り取り ●水による土壌攪拌・除去 (低地土以外は効果低) ○反転耕(耕盤が壊れる) (低地土以外では地下水位 が低い場合のみ適用)
10,000Bq/kg～ 25,000Bq/kg	●表土削り取り	
25,000Bq/kg～	●表土削り取り※高線量下での作業技術の検討要 (例：土ぼこりの飛散防止のために固化剤使用)	

森林	
除染	除染方法
落葉等の 除去※1	・林縁から20m程度の範囲で除去
枝葉等の 除去※2	・住居等に接している枝葉 の多い樹木についてでき るだけ高い位置まで除去 ・林縁から20m程度の範囲で除去

- ※1 作物の根が集中する作土層(通常、畑：表面から15～30cm、
水田：表面から15cmの深度)の平均濃度
- ※2 当面の目標 5,000Bq/kg以上の農地※4をそれ未満に下げること
(畑：6,300ha、水田：2,000haと推計)
- ※3 ●は廃棄土壌が出る方法、○は出ない方法
- ※4 5000Bq/kg(作付制限の汚染度)×0.1(放射性Csの移行の指標)
=500Bq/kg(飲食物摂取制限に関する指標)

農林水産省、農地土壌の放射性物質除去技術(除染技術)作業の手引き 第1版、
(平成24年3月)を基に作成

※4 原子力安全委員会、原子力施設等の防災対策について(昭和55年6月、H22改定版)

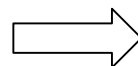
- ※1 落葉等の除去の留意事項
- ・表土を流出させないように、徐々に範囲を広げて実施
 - ・常緑樹は3,4年程度継続した除去が効果的
 - ・落葉樹の場合は1回の除去作業でより高い除去効果が期待
- ※2 枝葉等の除去の留意事項
- ・立木の成長を著しく損なわないよう樹冠長の半分程度を目安
 - ・落葉等の除去で十分な効果が得られない場合に実施

プレスリリース 農林水産省 森林内の放射性物質の分布状況及び分析結果について(中間とりまとめ)別添2
放射性物質の分布状況を踏まえた住居等近隣の森林における除染のポイントについて(H23.9.30)に加筆

15.4 国等の農用地への除染技術適用の考え方（１）

日本原子力学会 除染技術カタログ

水耕田	18 鋤き込み 19 表土の剥ぎ取り 20 荒かき 21 土壌洗浄 22 ファイトレメディエーション 23 施肥
畑地	24 表土の剥ぎ取り 25 土地掘り起こし 26 プラウによる表土剥ぎ取りと埋設 27 低Cs吸収栽培の栽培 28 土壌洗浄 29 土壌の希酸洗浄とCsの吸着除去 30 ファイトレメディエーション 31 施肥



知見を取り
入れて整理

内閣府 除染技術カタログ

水田	F-1 農地の表土削り取り F-2 農地の芝、牧草の剥ぎ取り F-3 反転耕(土層の天地返し) F-4 水田の土壌攪拌(代かき)、 除去
畑地	F-1 農地の表土削り取り F-2 農地の芝、牧草の剥ぎ取り F-3 反転耕(土層の天地返し)

内閣府原子力被災者生活支援チーム 除染技術カタログ
平成23年11月22日

他に、農業・畜産の項目として、牧草地、果樹園、畜舎がある

日本原子力学会 除染技術カタログ Ver.1.0 平成23年10月24日
他に、農用地の関連項目として、果樹園、牧草地がある

15.4 国等の農用地への除染技術適用の考え方（２）

環境省 除染等の措置 に係るガイドライン

	農用地の除染	
	耕起なし	耕起あり
5,000 Bq/kg 以下*	除草後、 反転耕	反転耕 または 深耕等
5,000 Bq/kg 超*	除草後、 表土削り取り または 水による土壌攪拌・除去 または 反転耕	

* 土壌中の放射性セシウム濃度の基準が見直された場合はそれに準拠

環境省 除染等の措置に係るガイドライン 平成23年12月 第1版
他に、農用地の除染として果樹園、茶園等がある。

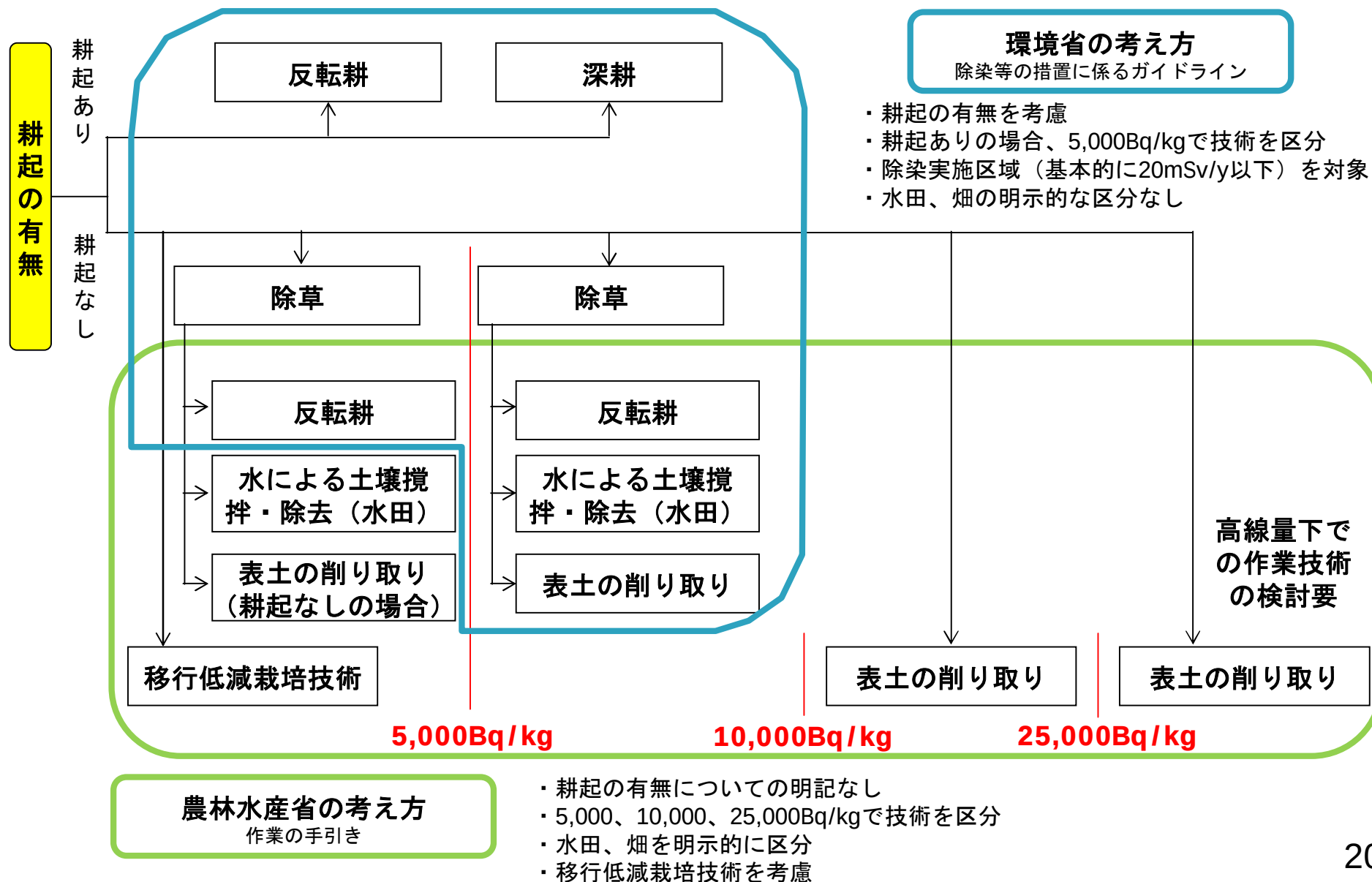
福島県 農林地等除染基本方針

	水田・畑地の除染		
	米を作付しなかった市町村、地域		米を作付した市町村、地域*
	耕起なし	耕起あり	
未検出*	除草後、 表土削り取り または 吸着資材を施用して、反転耕 か深耕 または 水による土壌攪拌・除去（水田）	吸着資材を施用して、 反転耕 または 深耕	吸着資材を施用して、 反転耕 または 深耕
5,000 Bq/kg 以下*			
5,000 Bq/kg 超*			

* 米を作付した市町村、地域の除染方法を未検出、5,000Bq/kg以下、5,000Bq/kg超に分けて記載しているが、記載内容は同一のため、セルを結合して表記

福島県農林水産部 福島県農林地等除染基本方針（農用地編）
平成23年12月5日
他に、農用地の関連項目として、樹園地、牧草地がある

15.4 国等の農用地への除染技術適用の考え方（3）



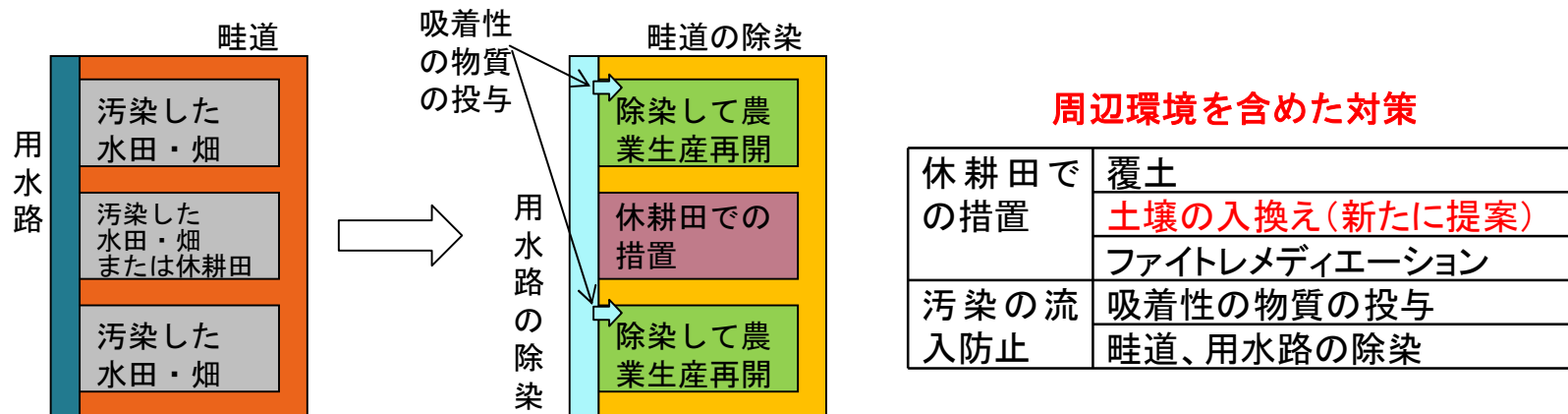
15.5 農用地への環境修復技術適用の最適化の考え方

本検討での考え方

①国等により示されている技術を幅広く選定し、土壤汚染対策技術と対比して整理

※天地返し：上下入換え、反転耕：攪拌して上下入換え、深耕：攪拌を明確に区別

※農業生産の再開を目的とした水田・畑の除染に限定せず、周辺環境も含めた対策を考慮



②外部被ばくと内部被ばくに対する効果の指標を設定し、定量的な目標設定

③農用地における環境修復技術適用の最適化を検討

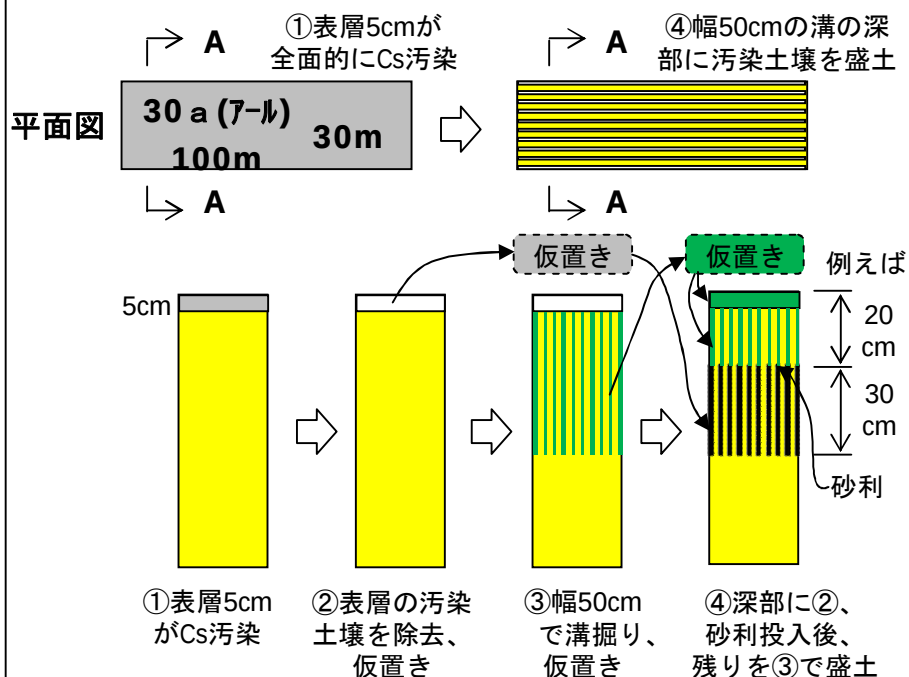
※ 外部被ばく 物理的減衰と除染による線量低減効果を考慮

※ 内部被ばく 食品中の放射性物質に関する暫定規制値の見直しを考慮

15.6 天地返し、反転耕、深耕の区別

天地返し（耕起なしが対象）

耕起なしの農用地において適した天地返しとして、「**局所反転深耕**」とする。
非汚染部による離隔の厚さは、濃度と作土深さ、地下水位などを考慮して設定

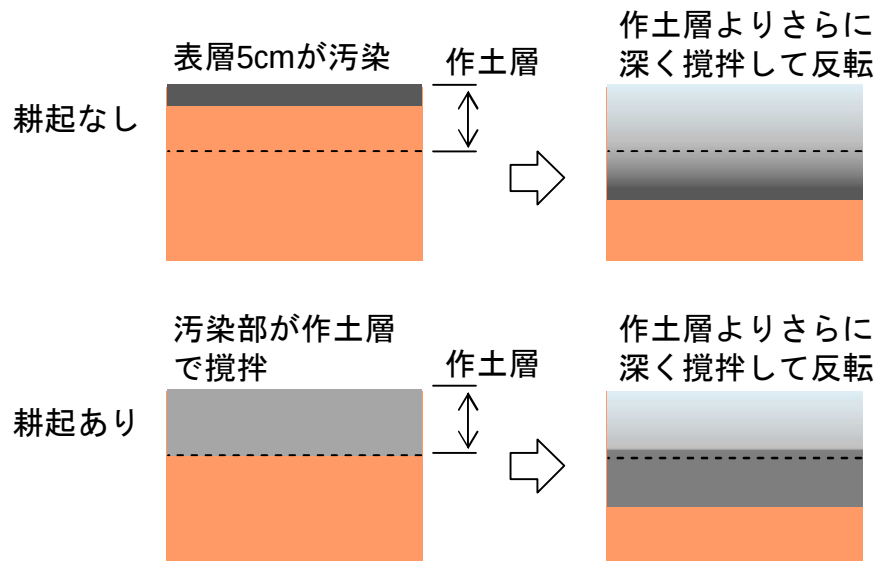


日本農学会 東日本大震災からの農林水産業の復興に向けて
一被害の認識と理解、復興へのテクニカル リコメンデーション
2011年11月17日 を基に作成

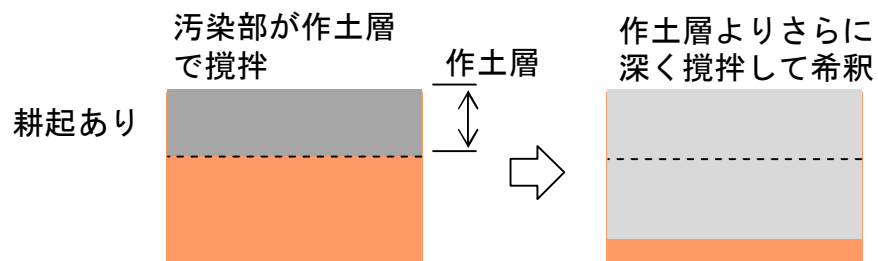
100m×30mの田畑で汚染土壌に20cmの離隔を確保する場合の非汚染部の掘削土量

左図：600m³、上図：225m³

反転耕（耕起あり・なしが対象）



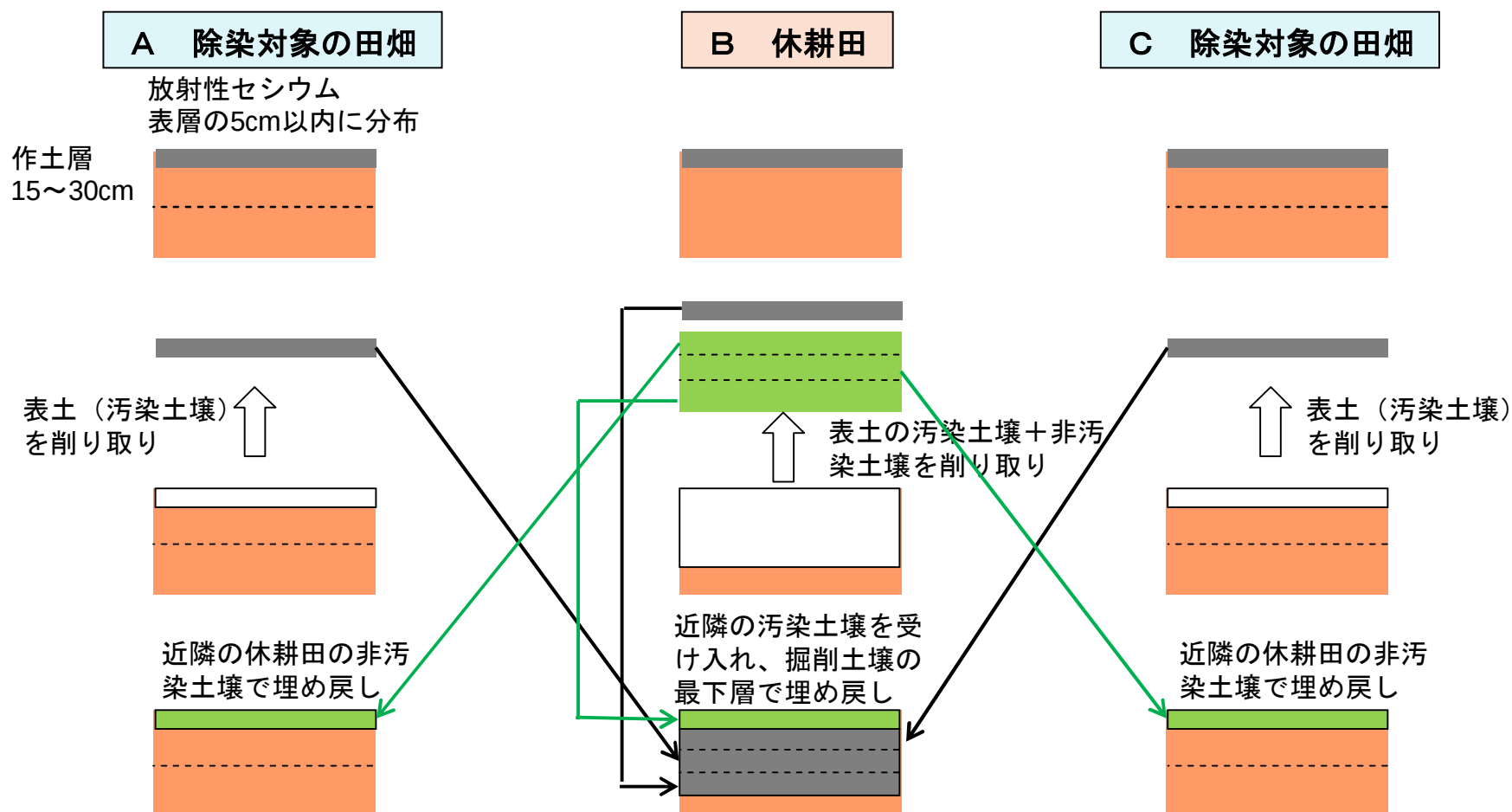
深耕（耕起ありが対象）



15.7 休耕田を活用した「土壌の入換え」の提案

特徴

除染対象の田畑 (A、C)	休耕田 (B)
○ 汚染土壌を除去できる ○ 除去した土壌の保管・処理・処分が不要 △ 近隣の非汚染土壌で埋め戻すため耕作に適だが、深い部分の土壌が耕作に適していない可能性あり	○ 外部からの土壌の搬入や汚染土壌の保管・処理・処分が不要 △ 低濃度であれば、十分に減衰後、耕作の再開が可能 × 汚染土壌の量が当初の時よりも多くなる



16. 放射能汚染修復技術と土壤汚染対策技術との比較

ハッチング部の環境修復技術は、国等の農用地への除染技術に挙げられていないもの

環境修復技術		具体的な技術の例	参考となる土壤汚染対策技術
土壤汚染の除去	表土の削り取り	トラクタによる碎土の後、バックホーで掘削 固化剤を用いた表層除去工法	土壤汚染の除去（掘削除去）
	除草	ターフスライサーで切り取り、フロントロー ダーで切り取った草と表土を剥ぎ取り	土壤汚染の除去（掘削除去）* ³
	荒かき（水による土壤 攪拌・除去）* ¹	バーチカルハローによる表層攪拌 二次処理として汚染水のセシウム除去技術	土壤汚染の除去（原位置浄化： 原位置土壤洗浄）* ³
	土壤洗浄（表土の削 り取り後の処理）	洗浄・分級 土壤の希酸洗浄とCsの吸着除去	土壤汚染の除去（掘削除去） →洗浄処理
被ばく経路の遮断	天地返し（入換）	バックホーで掘削、埋め戻し（局所反転深耕、 離隔20cm）	土壤入換え（区域内）* ³
	反転耕（攪拌・入換）	プラウ反転耕（30～60cm）	土壤入換え（区域内）* ³
	深耕（攪拌）	ロータリー（深）耕（作土層の倍程度）	土壤入換え（区域内）* ³
移行低減 栽培技術	施肥	カリウムが不足している場合にカリウム施肥	—
	低セシウム吸収作物 の栽培* ²	高セシウム吸収作物を栽培していた場合に 低セシウム吸収作物に変更	—
	吸着性の物質の投与	セシウムの吸着性の高い粘土分が少ない場 合にゼオライトを投与	不溶化（原位置不溶化）
休耕田で の措置	覆土	バックホーでの覆土（20cm）	盛土
	土壤の入換え	休耕田と他の耕地との土壤の入換え	土壤入換え（区域内・外）* ³
	ファイトレメディエー ション	高セシウム吸収作物を選定 汚染植物の処理技術	土壤汚染の除去（原位置浄化： ファイトレメディエーション）
汚染の流 入防止	吸着性の物質の投与	取水口付近でゼオライトを投与	地下水汚染の拡大防止* ³
	畦道、用水路の除染	表土の削り取り、底泥の除去等	—

*¹ 水田のみ

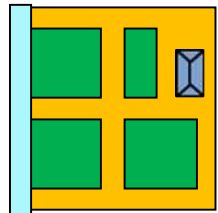
*² 畑のみ

*³ 概念的に異なるが、考え方の参考
となる技術

17. 環境修復技術の効果と最適化検討

17.1 効果の指標とその確認方法

外部被ばくに対する効果



農地に隣接して居住している
農家の外部被ばく（直接線）

評価条件

- ・ 農作業 8h、室内 16h
- ・ バックグラウンド $0.04 \mu\text{Sv/h}$
- ・ 空間線量率の測定高さ：1m

年間の外部被ばく (mSv/y)

$$= (\text{空間線量率の測定値} - \text{バックグラウンド}) \\ \times (8\text{h} + 0.4 \times 16\text{h}) \times 365 \times 1/1000$$

外部被ばくの評価は生活空間における空間線量率（測定高さ：1m）に基づくが、水田・畑で実施した環境修復技術の効果は、土壌表面の空間線量率（測定高さ：1cm）の低減率を指標とし、周辺からの影響を排除する。

外部被ばくに対する効果の指標

土壌表面の空間線量率の低減率

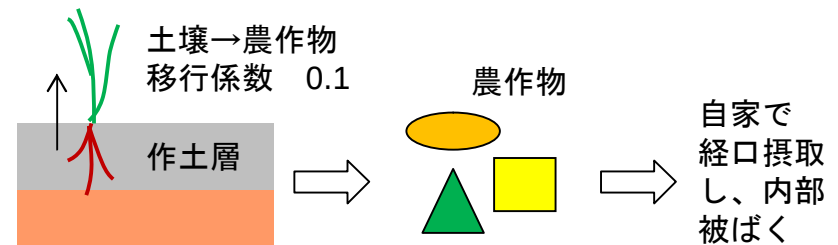
効果の
確認方法

ガイドライン*に従い、除染作業前後の空間線量率を測定

* 環境省 除染関係ガイドライン 第2編 除染等の措置に係るガイドライン 平成23年12月 第1版 IV. 土壌の除染等の措置

内部被ばくに対する効果

自給自足をしている農家の内部被ばく（農作物摂取）



農作物の放射性セシウム濃度 (Bq/kg)

$$= \text{作土層の放射性セシウム濃度} \times \text{移行係数}$$

環境修復技術を実施した時点で、内部被ばくに対する効果を判断できるように、作土層から得られるデータを基本的な指標とする。

内部被ばくに対する効果の指標

作土層の放射性セシウム濃度の低減率
(必要に応じ、移行係数、農作物の放射性セシウム濃度も考察)

ガイドライン*に従い、除染作業前後の作土層の放射性セシウム濃度を確認（濃度の測定または空間線量率から推定）

17.2 環境修復技術の効果の定量的な目標設定

環境修復技術		外部被ばく(直接線)に対する効果 土壌表面の空間線量率の低減率		内部被ばく(農作物摂取)に対する効果 作土層の放射性セシウム濃度の低減率	
		実証試験*3	目標設定*4	実証試験*3	目標設定*4
土壌汚染の除去	表土の削り取り	掘削 4cm 53% 固化剤 3cm 54%	5cm以下 目標 70% 分布範囲 目標 90%	掘削 4cm 75% 固化剤 3cm 82%	5cm以下 目標 70% 分布範囲 目標 90%
	除草	—	後続の他の技術 とセットで考慮	3cm 97% 5cm 99%	後続の他の技術 とセットで考慮
	荒かき(水による土壌 攪拌・除去)*1	14% 水:検出限界以下	目標 30%	36%	目標 30%
	土壌洗浄(表土の削り 取り後の処理)	—	—	—	—
被ばく経路の遮断	天地返し(入換)	—	20cm離隔 目標 70%	—	20cmの離隔 目標 70%
	反転耕(攪拌・入換)	耕起なし 30cm プラウ耕 55%	耕起なし 目標 50% 耕起あり 目標 30%	—	耕起なし 目標 50% 耕起あり 目標 30%
	深耕(攪拌)	耕起なし 15cm ロータリー耕 39%	作土層の倍を深耕 耕起あり 目標 30%	—	作土層の倍を深耕 耕起あり 目標 30%
移行低減栽培技術	施肥	—	外部被ばくの 低減効果はない	—	(移行係数の低減対策 移行係数の目標 0.01 少なくとも0.1以下)
	低セシウム吸収作物 の栽培*2			—	
	吸着性の物質の投与			—	
休耕田での措置	覆土	—	沖積粘土で20cm 目標 70%*5	—	耕作しないので 内部被ばくは生じない
	土壌の入換え	—	休耕田:覆土に準じる		
	ファイトレメディエーション	—	長期的な効果に期待	(移行係数 0.00674)	
汚染の流入防止	吸着性の物質の投与	—	補助的な対策 長期的な効果に期待	-	補助的な対策 長期的な効果に期待
	畦道、用水路の除染				

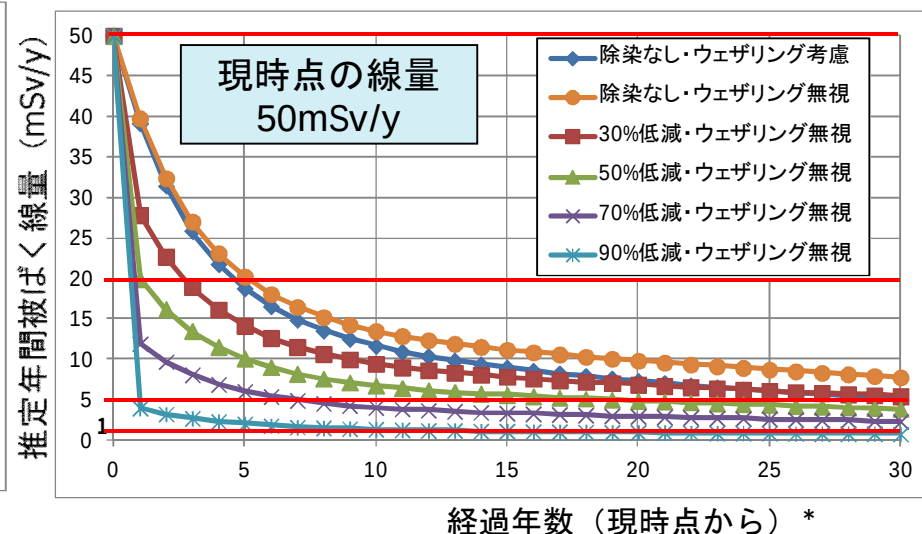
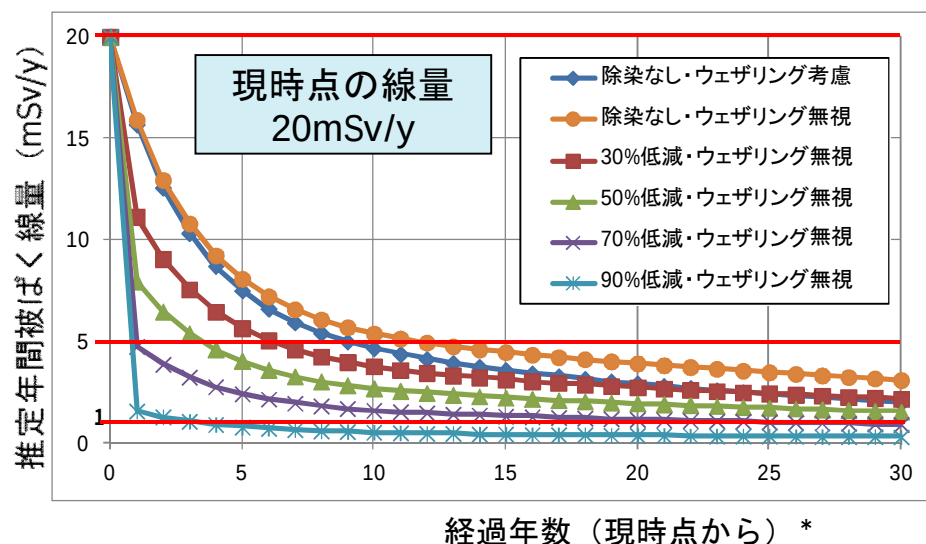
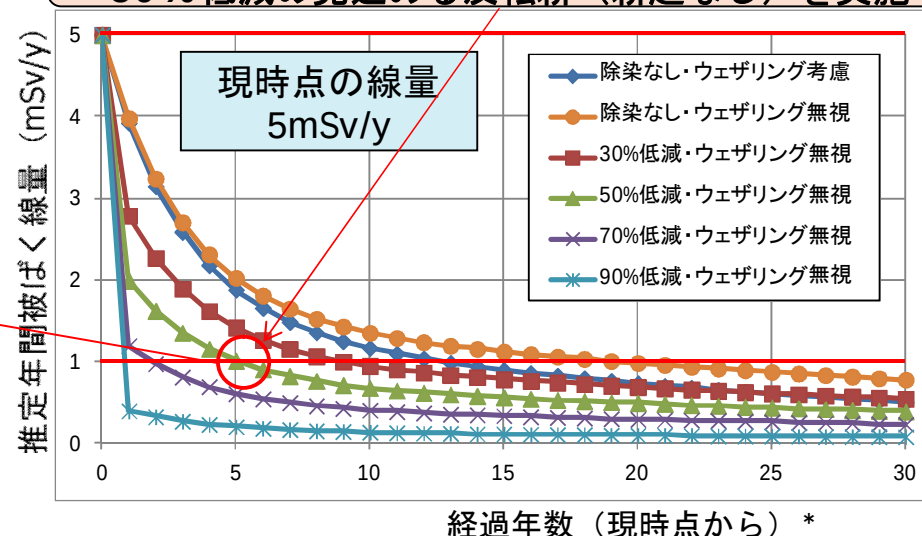
*1 水田のみ *2 畑のみ *3 農林水産省 農地土壌の放射性物質除去技術(除染技術) *4 目標設定値は、実証試験やモデル
について【別添4】各技術についての解説 平成23年9月14日 事業のデータに基づき、随時見直し

*5 福有3-3-1(1)
571付 30参照

17.3 物理的減衰と除染による線量低減効果を考慮した環境修復技術適用の最適化（外部被ばくに対する効果）

土壌表面の空間線量率の低減率	除染効果を定量的に見込める環境修復技術	
	耕起なし	耕起あり
30%低減	・水田のみ：荒かき（水による土壌攪拌・除去）	・反転耕 ・深耕
50%低減	・反転耕	—
70%低減	・表土削り取り（5cm以下） ・天地返し（離隔20cm） ・休耕田：覆土 ・休耕田：土壌の入換え	—
90%低減	・表土削り取り（分布範囲）	・表土削り取り（分布範囲）

例：5～6年程度で5mSv/y→1mSv/yにしたい場合
→50%低減の見込める反転耕（耕起なし）を実施



* 現時点は、平成24年1月1日と想定

17.4 森林における環境修復技術適用の最適化の考え方

農林水産省

日本原子力学会 除染技術カタログ
を基に環境修復技術を整理

除染	除染方法
落葉等の除去※ ¹	・林縁から20m程度の範囲で除去
枝葉等の除去※ ²	・住居等に接している枝葉の多い樹木についてできるだけ高い位置まで除去

※1 落葉等の除去の留意事項

- ・表土を流出させないように、徐々に範囲を広げて実施
- ・常緑樹は3,4年程度継続した除去が効果的
- ・落葉樹の場合は1回の除去作業でより高い除去効果が期待

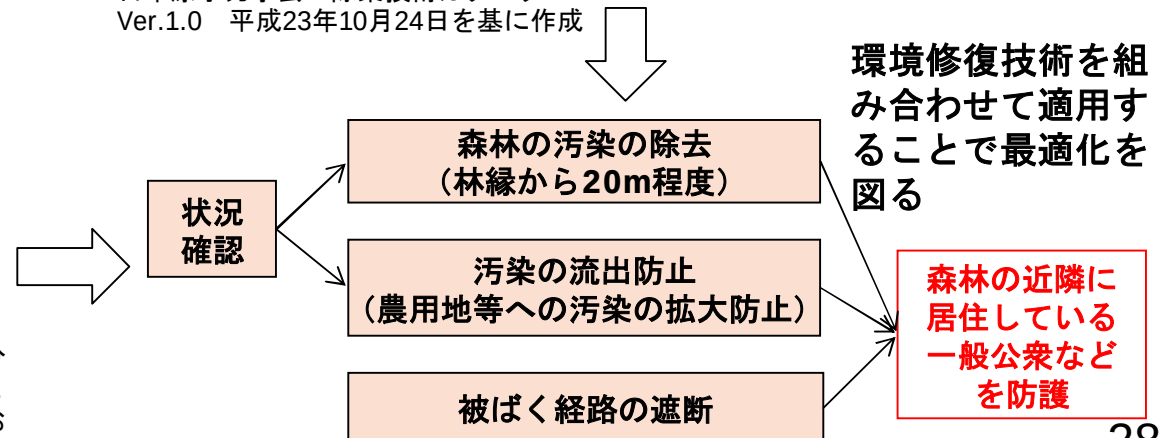
※2 枝葉等の除去の留意事項

- ・立木の成長を著しく損なわないよう樹冠長の半分程度を目安
- ・落葉等の除去で十分な効果が得られない場合に実施

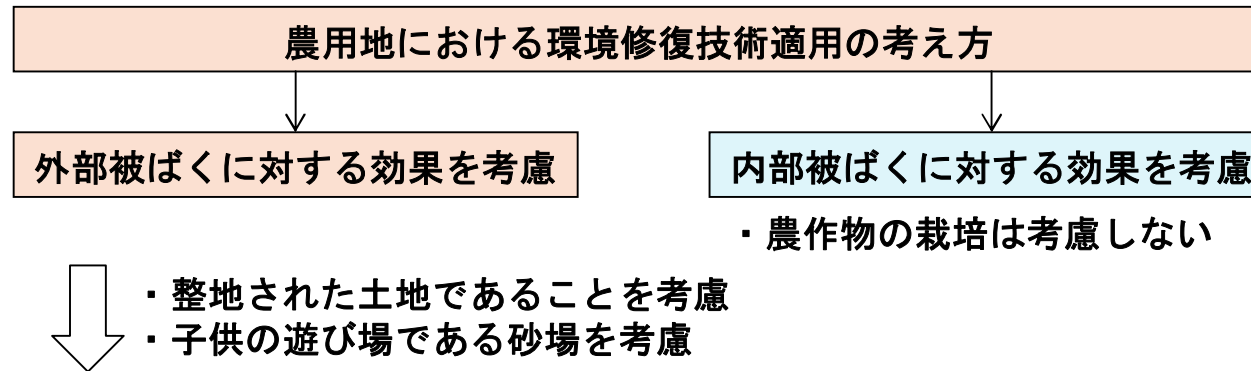
プレスリリース 農林水産省 森林内の放射性物質の分布状況及び分析結果について（中間とりまとめ）別添2 放射性物質の分布状況を踏まえた住居等近隣の森林における除染のポイントについて（H23.9.30）に加筆

環境修復技術*		参考となる 土壌汚染対策技術
状況確認	モニタリング (葉、樹体、土壌、表面水)	地下水の水質の測定
森林の汚染の除去	落葉の回収	—
	樹木および灌木の剪定・間伐	—
汚染の流出防止	集水域での水処理	地下水汚染の拡大の防止
	放射性セシウム濃縮域における堆積物の除去	—
被ばく経路の遮断	立ち入り制限	立入禁止
	林産物の摂取制限	—

* 日本原子力学会 除染技術カタログ
Ver.1.0 平成23年10月24日を基に作成



17.5 学校・公園における環境修復技術適用の最適化の考え方



環境修復技術* ¹		具体的な技術の例	参考となる土壌汚染対策技術
土壌汚染 などの除去	表土の削り取り	ブルドーザーで表層を掘削、除去 砂場ではシャベル、スコップなどで表層の砂を除去	土壌汚染の除去（掘削除去）
	芝生等の剥ぎ取り	芝刈り機、ソッドカッターなどで芝生と表土を剥ぎ取り	土壌汚染の除去（掘削除去）* ²
	側溝の泥、草、枯葉などの除去	手作業で除去	土壌汚染の除去（掘削除去）* ²
	土壌洗浄（表土の削り取り後の処理）	洗浄・分級 土壌の希酸洗浄とCsの吸着除去	土壌汚染の除去（掘削除去） →洗浄処理
被ばく経路の遮断	天地返し（入換）	バックホーで掘削、埋め戻し（離隔20cm）	土壌入換え（区域内）
	覆土	バックホーでの覆土（20cm）	盛土

* 1 日本原子力学会 除染技術カタログ
Ver.1.0 平成23年10月24日および
内閣府原子力被災者生活支援チーム
除染技術カタログ 平成23年11月22日
を基に作成

* 2 概念的に異なるが、考え方の参考となる技術

技術例			項目	文献調査	福島環境修復有識者検討委員会による追記情報
畑地		天地返し (局所反転深耕)	目的		土表面の空間線量率を低下させるとともに、作物への移行吸収量を低下させる。
			対策	対策の内容	表土の汚染土壌を5cm程度剥ぎ取った後に、圃場の長辺に沿って、幅 50 cm程度、深さ50cm程度の溝を複数掘り、剥ぎ取った排土を埋めた後、溝掘り残土で溝の上部(30cm程度)および表土の剥ぎ取り部(5cm程度)を覆土する。 ¹
				汚染の拡大防止対策	・溝掘りの深さは地下水位以上とするのが望ましい。 ・放射性物質は残存するため、比較的軽度の汚染土壌に向いている。 ・事前に雑草等の除去を行い、表面の起伏をならしておく。 ・土埃が舞いやすいので、実施前に地表に水を撒くか、再浮遊を防止できる器具を使用する。
				作業員の被ばく対策	作業員が被曝する可能性がある被曝経路は、以下のものがある。 ・環境と汚染された機器からの外部被曝 ・地面と他の表面(正常なレベル以上に高められた)からの再浮遊物質の吸引 ・作業者の手からの粉塵の不注意による摂取 上記イタリック体で示した経路からの影響は重要ではなく、個人用保護具(PPE)により、これらの経路からの放射線量を制御することができる。
			効果		<u>表面の汚染物質の低減</u> 汚染物質を除去しないので、除染係数(DF)は「1」である。 <u>表面線量率の低減</u> セシウムなどの高エネルギーのガンマ線放射核種による外部被曝放射線量率は、20cmの覆土の効果で5分の1から10分の1、溝部分への汚染土壌の集約でさらに数分の1に低減する。効果的に実施されれば、ベータ線の線量率は100%低減できる。 <u>再浮遊の低減</u> 地表面上の再浮遊物質の大気濃度は、ガンマ線の外部被曝放射線量率の低減以上に、さらに低減する。
			適用対象の選定方法		・汚染の沈着が起こってから耕作されていない場所で汚染度が比較的軽度の場所、粘性土壌 ・地下水位が高くない場所(少なくとも50cmよりも深いことが望ましい)
			装置・技術・材料	特別に必要な装置	表土剥ぎ取り用耕作機械(芝刈り機等) 溝掘り、覆土用掘削機械(バックホー等)
				特別に必要な技術	工作機械を使用する技能を持った作業者(作業目的を十分説明する必要あり)
				必要な安全対策	非常に埃っぽい状況下では、呼吸保護具と防護服を着用することが望ましい。
			経済性		汚染土壌の排出がないので、仮置き以降の保管・処分に係るコストを節減できる。
			2次廃棄物	汚染物の量・種類	なし
				汚染物の取扱い方法	なし
			その他特記事項		・溝掘り部の土壌が粒度や土質の関係で耕作に適さない場合は、畑地の表面高さを表土の除去分の5cm下げるか土壌改良または客土の搬入を行い、溝掘り部で掘削した非汚染土壌は搬出 ・溝掘りの幅、深さ、間隔は現地の状況に応じて適切な値を設定 ・畑地以外の敷地でも適用可能
			EURANOS参照元		

技術例			項目	文献調査	福島環境修復有識者検討委員会による追記情報
畑地 水耕田		原位置不溶化 （ゼオライトの投与）	目的		作物への移行吸収量を低下させる。
			対策	対策の内容	水耕田、畑地に、セシウムの吸着能が高いゼオライトを投与して、作土層で攪拌・混合し、セシウムを吸着させることで、農作物への移行吸収量を低下させる。
				汚染の拡大防止対策	・休耕田の掘削の深さは地下水位以上とするのが望ましい。 ・放射性物質を残存させるため、比較的軽度の汚染土壌に向いている。 ・投入に際し、攪拌・混合するときに土埃が舞いやすいので、実施前に地表に水を撒くか、再浮遊を防止できる器具を使用する。
				作業員の被ばく対策	作業員が被曝する可能性がある被曝経路は、以下のものがある。 ・環境と汚染された機器からの外部被曝 ・地面と他の表面（正常なレベル以上に高められた）からの再浮遊物質の吸引 ・ <u>作業者の手からの粉塵の不注意による摂取</u> 上記イタリック体で示した経路からの影響は重要ではなく、個人用保護具（PPE）により、これらの経路からの放射線量を制御することができる。
			効果		<u>表面の汚染物質の低減</u> 汚染物質を除去しないので、除染係数（DF）は「1」である。 <u>表面線量率の低減</u> 事故後、耕起をしていなかった場合、投入時の攪拌・混合により、土壌の掘り起こしと同様の効果（ガンマ線、ベータ線による放射線量率は、少なくとも1/2程度低減）が見込まれる。 <u>再浮遊の低減</u> 事故後、耕起をしていなかった場合、投入時の攪拌・混合により、土壌の掘り起こしと同様の効果が見込まれる。
			適用対象の選定方法		・汚染度が比較的軽度の場所、粘性土壌 ・他の除染技術との併用も考えられる。
			装置・ 技術・ 材料	特に必要な装置	耕運機、または鋤を用いて人力
				特に必要な技術	農業用の機械を使用する技能を持った作業者（作業目的を十分説明する必要あり）
				必要な安全対策	非常に埃っぽい状況下では、呼吸保護具と防護服を着用することが望ましい。
			経済性		汚染土壌の排出がないので、仮置き以降の保管・処分に係るコストを節減できる。
			2次 廃棄物	汚染物の量・種類	なし
				汚染物の取扱い方法	なし
			その他特記事項		・ゼオライトの供給能力に限界がある。 ・効果的な投入量を見極める必要がある。（土壌の量の1%の投与で10%の移行低減、10%の投与で40%の移行低減とのデータがある。：福島県農業総合センター） ・過剰に投与すると、農作物に必要な栄養分も吸収してしまうことが考えられる。
			EURANOS参照元		

別紙3.11 クリーンアップ分科会 除染技術カタログへの掲載候補 畑地 土壌の入換え(休耕田の活用)

技術例			項目	文献調査	福島環境修復有識者検討委員会による追記情報
畑地		土壌の入換え (休耕田の活用)	目的		土表面の空間線量率を低下させるとともに、作物への移行吸収量を低下させる。
			対策	対策の内容	除染対象の畑地：表土の汚染土壌を5cm程度剥ぎ取り、近傍の休耕田の掘削後、その下層部へ埋め戻す。また休耕田の掘削土壌の下層部を客土として表層に覆土する。 休耕田：表土の汚染土壌を5cm程度剥ぎ取り、仮置きする。さらに深部を30cm程度掘削し、一部を除染対象の畑地の客土として搬出し、残りを別の場所に仮置きする。その後、仮置きした汚染土壌と近傍の除染対象の畑地の汚染土壌とをあわせて深部を埋め戻し、最後に別の場所に仮置きしていた非汚染土壌で覆土する。
				汚染の拡大防止対策	・休耕田の掘削の深さは地下水位以上とするのが望ましい。 ・放射性物質が休耕田の側に残存するため、比較的軽度の汚染土壌に向いている。 ・事前に雑草等の除去を行い、表面の起伏をならしておく。 ・土埃が舞いやすいので、実施前に地表に水を撒くか、再浮遊を防止できる器具を使用する。
				作業員の被ばく対策	作業員が被曝する可能性がある被曝経路は、以下のものがある。 ・環境と汚染された機器からの外部被曝 ・地面と他の表面（正常なレベル以上に高められた）からの再浮遊物質の吸引 ・ <u>作業者の手からの粉塵の不注意による摂取</u> 上記イタリック体で示した経路からの影響は重要ではなく、個人用保護具（PPE）により、これらの経路からの放射線量を制御することができる。
			効果		<u>表面の汚染物質の低減</u> 除去深度が最適化されるならば、除染係数（DF）は10～30が期待できるが、標準除去深度が用いられるならば、有効性は、汚染が土壌の深度方向に移行する程減少する。 <u>表面線量率の低減</u> 土壌表面上の外部ガンマとベータ放射線量率は、おおよそDFの値で低減する。 <u>再浮遊の低減</u> 地表面上の再浮遊大気濃度は、DFの値で低減する。 <u>休耕田での効果</u> 除染対象の畑地から持ち込む土壌の汚染度合と非汚染土壌による覆土の厚さによるが、天地返し（上下層の土の入換え）の場合と同様な効果が見込まれる。
			適用対象の選定方法		・汚染の沈着が起こってから耕作されていない場所で汚染度が比較的軽度の場所、粘性土壌 ・休耕田の方は、地下水位が高くない場所
			装置・技術・材料	特に必要な装置	雑草等の除去（芝刈り機等） 表土剥ぎ取り用耕作機械（動力付きスクレーパー、グレーダー、ブルドーザー等） 掘削、覆土用掘削機械（バックホー等） 除染対象の畑地～休耕田間の土壌の運搬車両
				特に必要な技術	工作機械を使用する技能を持った作業者（作業目的を十分説明する必要あり）
				必要な安全対策	非常に埃っぽい状況下では、呼吸保護具と防護服を着用することが望ましい。
			経済性		汚染土壌の排出がないので、仮置き以降の保管・処分に係るコストを節減できる。
			2次廃棄物	汚染物の量・種類	なし
				汚染物の取扱い方法	なし
			その他特記事項		・休耕田の深部の土壌が粒度や土質の関係で耕作に適さない場合は、畑地の表面高さを表土の除去分の5cm下げるか土壌改良または客土の搬入を行い、休耕田で掘削した非汚染土壌は搬出 ・休耕田に埋め戻した汚染土壌の放射性セシウムの濃度が十分に減衰すれば耕作の再開が可能 ・畑地以外の敷地でも適用可能
			EURANOS参照元		