参考資料1－3

除去土壌の埋設に係る放射性セシウムの挙動の把握

平成26年３月
環境省除染チーム

除去土壌の埋設に係る試験施工の実施

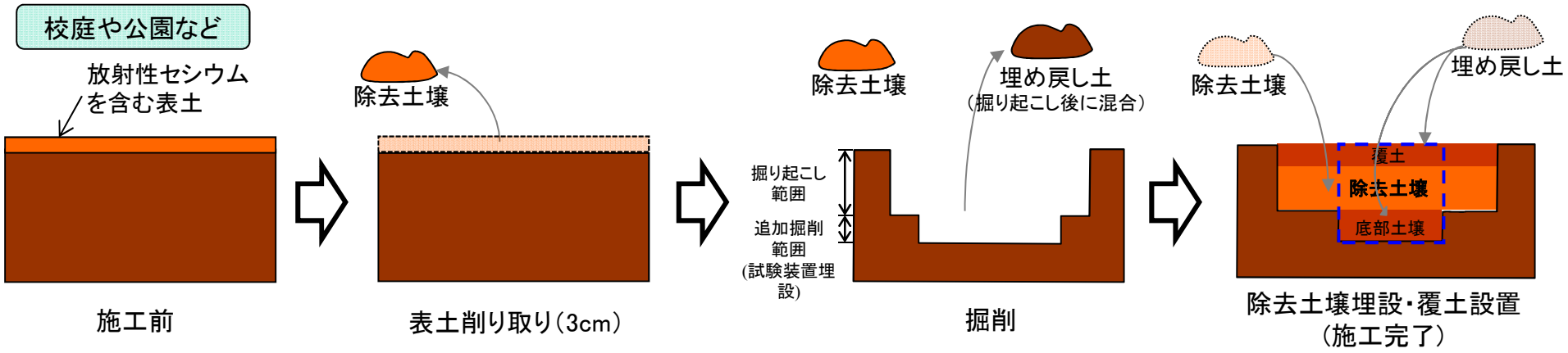
【目的】

○ 現在までの様々な研究等から、放射性セシウムは土粒子に収着して移行しにくいとの知見が得られているが、今般、実際に除去土壌を埋設し、除去土壌中の放射性セシウムの挙動を把握するための試験施工を実施することとした。

○ また、本試験施工の実施に当たっては、土壌中の水の動きを阻害しないよう、特段の遮水措置を実施せずに、そのまま除去土壌を埋設した。

試験施工の様子

試験施工のイメージ



放射性セシウムを含む表土を削り取る
→除去土壌

削り取った表土の
下層の土壌を掘削する
→埋め戻し土

掘削地に除去土壌を埋め、
その上を埋め戻し土で覆う

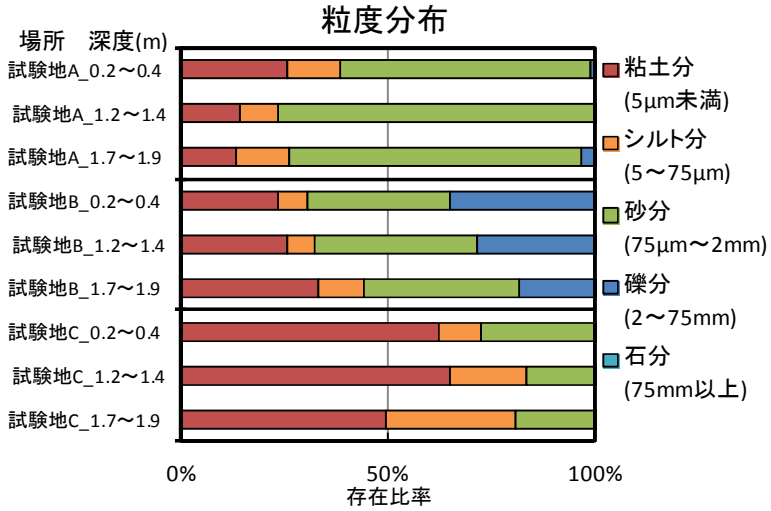
: 試験エリア

実施内容（試験施工の概要）

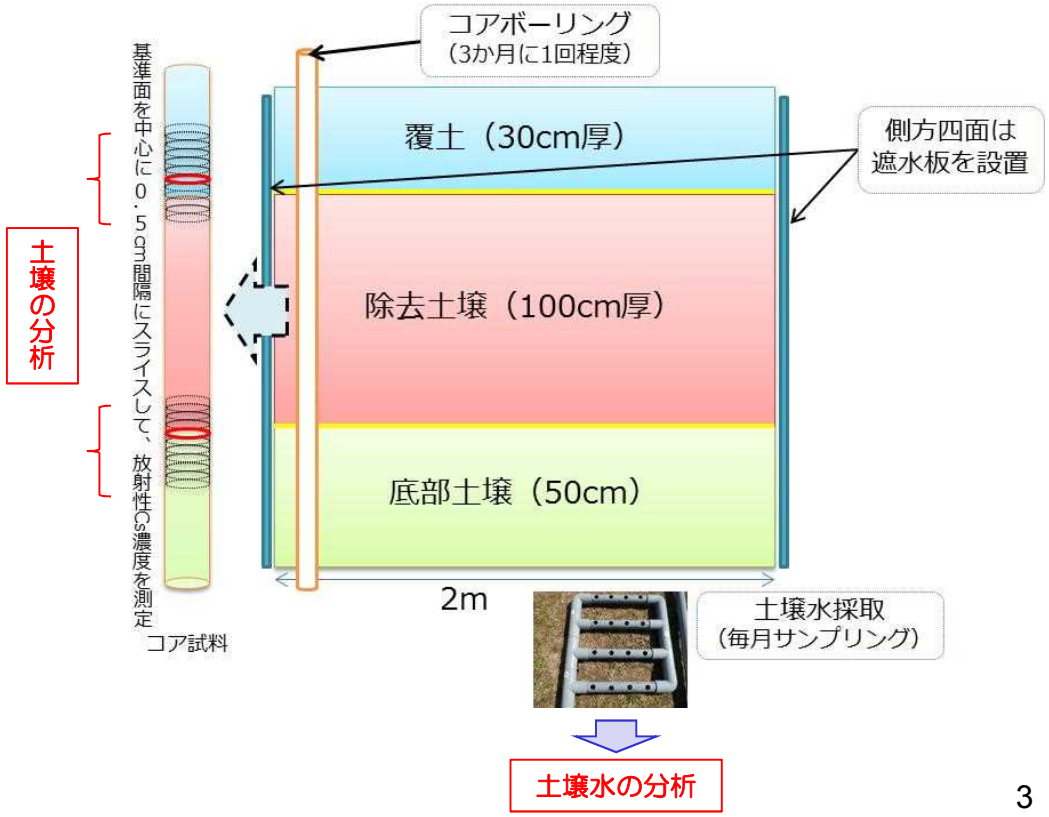
○試験施工は関東地方における汚染状況重点調査地域のうち３か所の公園において実施。
○除去土壌を埋設した場所の一部を試験エリア（4m^2）として設定し、散水（10か月間で年間浸透水量（400mm）の約8～10年分）による加速試験を実施。
○コアボーリングを実施し、鉛直方向の土壌中の放射性セシウム濃度を測定するとともに、現場試験地の底部から採水した土壌水の放射性セシウム濃度を測定。

除去土壌の性状

試験地	土壌分類
試験地A	粘土質細砂
試験地B	粘土質細砂
試験地C	岩瀬砂 （細砂又は中砂）



試験エリアの概要



実施内容（調査・分析の内容）①

○コアボーリングや土壌水分析等の現場試験に加え、試験エリアで採取した土壌を用いて、理想的な条件から厳しい条件まで含めてラボ試験を行った。
○さらに、現場試験及びラボ試験の時間を超える長期間の移行について数値解析によるシミュレーションを実施した。

	試験項目	確認項目	時間枠
現場試験	・土壌分析（深度分布） ・浸透土壌水分析	実環境下における放射性セシウムの土壌中の移行 ・下方への移行（降雨浸透） ・上方への移行（毛管上昇）	～10か月
ラボ試験	・通水カラム試験 ・溶出特性試験 ・吸着特性試験	・放射性セシウムの土壌中の移行（浮遊土粒子など；理想的な条件～厳しい条件） ・溶けやすさ（長期、共存陽イオン影響） ・収着分配係数（土壌への収着度合い）	～10か月
数値解析	・１次元移流分散モデル（シミュレーション）	・現場試験及びラボ試験の時間スケールを超える長期間の移行予測（収着分配係数を用いたモデル）	～100年

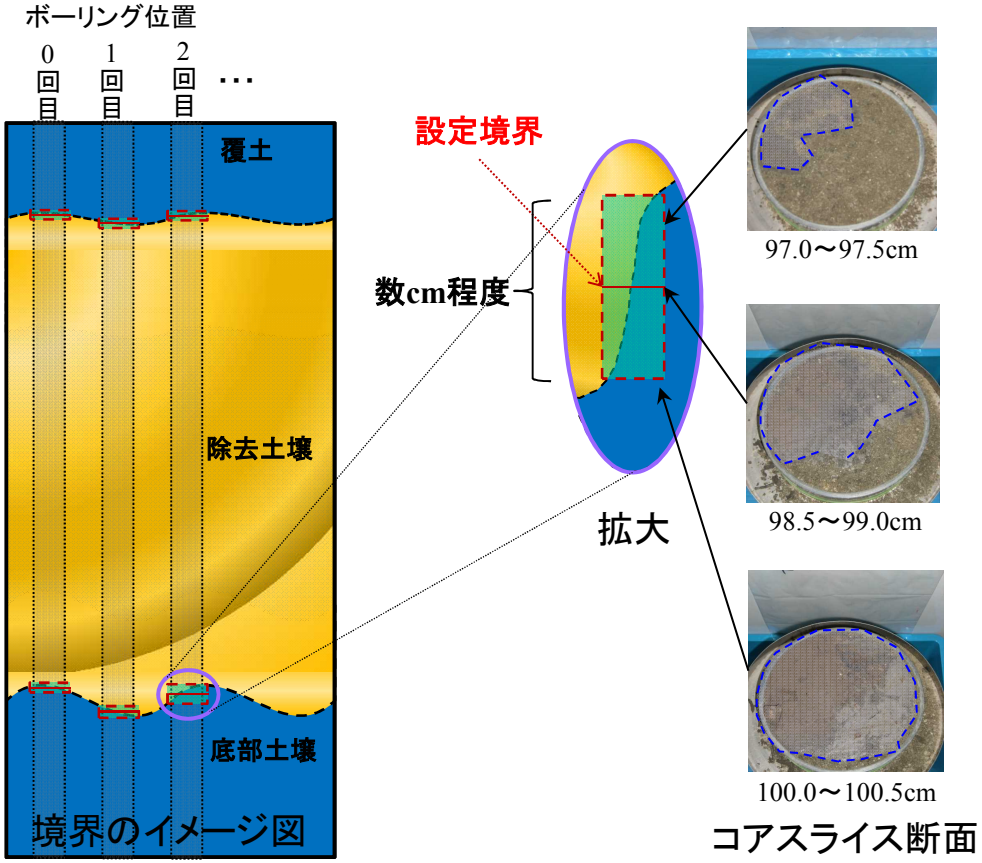
実施内容（調査・分析の内容）②

○放射性セシウムの移行に関する以下の事象に着目し、調査・分析を実施。
【A】土壌から間隙水に溶出して移行するかどうか。
【B】間隙水の毛管上昇とともに移動し上部覆土側に濃縮するかどうか。
【C】水の流れに伴って土壌粒子やコロイドと共に浮遊し移動するかどうか。

実施項目	実施の目的と内容	実施条件等
（1）放射性セシウムの移行挙動の確認	**現場試験において、散水による加速試験を実施し、除去土壌中の放射性セシウムの自然環境下における挙動を確認。**	・関東地方の汚染状況重点調査地域における公園3か所 ・散水：10か月間で浸透水量約8～10年分
①土壌中濃度分布の分析（現場試験・ボーリング調査）	・【A,B】について定期的なボーリング調査により鉛直方向の濃度分布を調査し、放射性セシウムの移行を確認。	・3か月ごとにコアボーリングを実施し、鉛直方向0.5cmごとに土壌中の放射性セシウム濃度を測定。
②土壌水中の濃度分析（現場試験・土壌水分析）	・【A】について現地試験地を浸透した水を分析し、除去土壌から底部埋め戻し土を通過する放射性セシウムを確認。	・現場試験地の底部に設置した土壌水採水管から定期的に土壌水を採水して、放射性セシウム濃度を測定。
③移行挙動に関する確認試験（ラボ・通水カラム試験）	・【C】について通水カラム試験により、放射性セシウムの移動を調査。 →現場試験地を模擬した3層のカラム →除去土壌からの土粒子の浮遊を確認する1層のカラム	・現場試験地の土壌を使用。 ・通水カラム： 3層「埋め戻し土-除去土壌-埋め戻し土」 1層「除去土壌」 ・通水カラムからの排出水の分析。
（2）土壌中の放射性セシウムの特性	**放射性セシウムの土壌からの溶出特性及び土壌への収着特性を確認。**	・現場試験地の土壌を使用。 ・液固比：10mL/g。
①溶出特性に関する試験（ラボ試験）	・逐次溶出試験により、溶出量を確認。陽イオン（アンモニウムイオン）の共存も想定。 ・長期浸漬試験により、長期的な溶出を確認。	・逐次溶出試験：純水、1mol/L酢酸アンモニウム溶液。 ・長期浸漬試験：純水、10か月間。
②収着特性に関する試験（ラボ試験）	・収着特性試験により、土壌への収着分配係数を確認。 ・陽イオン（アンモニウムイオン）の共存も想定。	・試験水：純水、10^{-4}、10^{-3}mol/L酢酸アンモニウム溶液。
（3）長期間の移行予測（数値解析）	**100年間の放射性セシウムの移行を予測。** ・現場試験やラボ試験で得られたデータ及び一般的な値として文献値を使用したシミュレーションを実施。	・収着分配係数：1,000mL/g（試験結果を参考に共存陽イオン影響を保守的に評価）。 ・その他のパラメータ：実測値又は文献値。

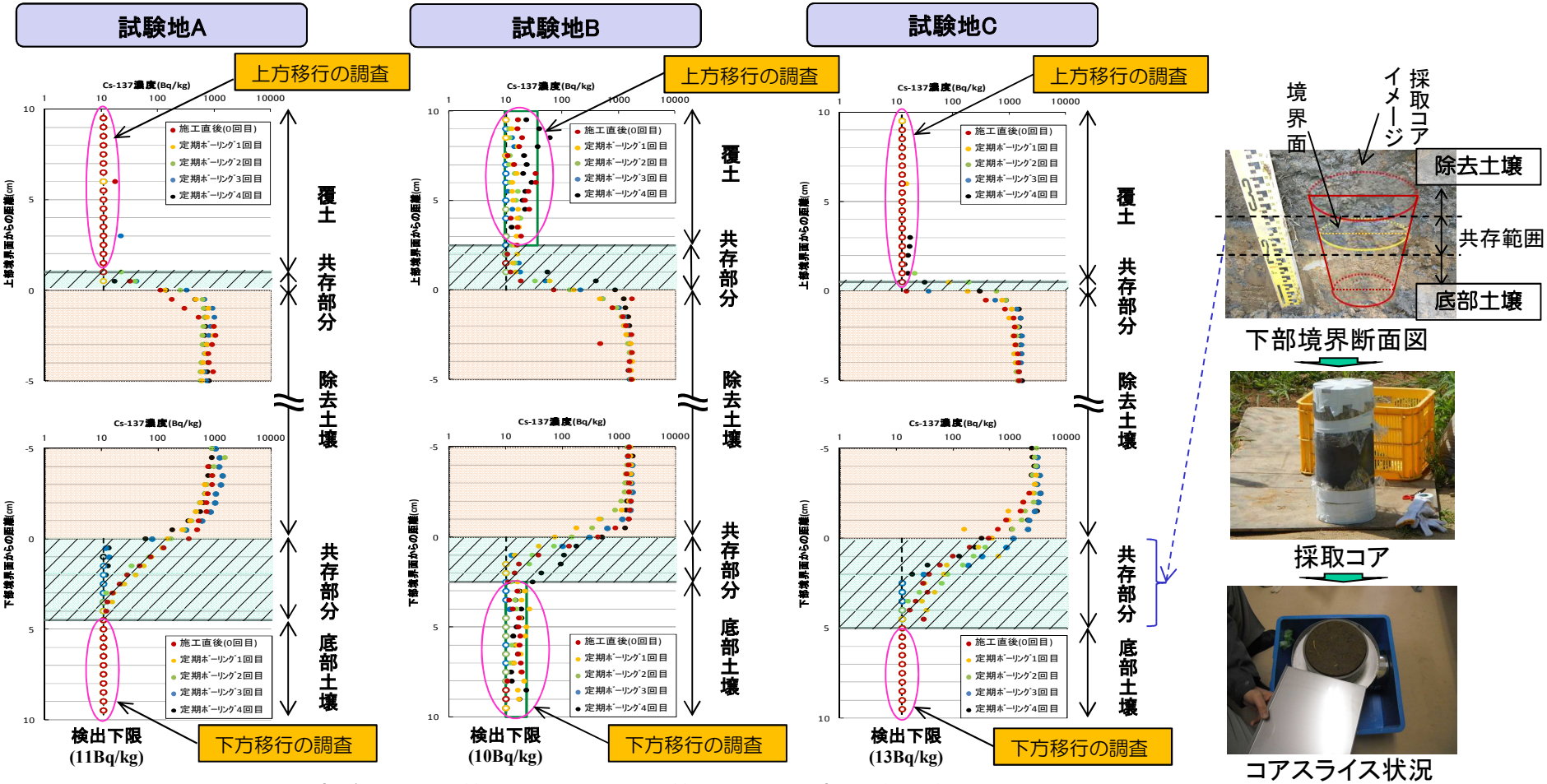
放射性セシウムの移行挙動の確認（ボーリング調査）①

①土壌中濃度分布の分析（現場試験・ボーリング調査）
小型の転圧機械で締め固めながら、埋め戻しを行い、施工直後にコアボーリングを行い初期濃度分布を確認した。その後、3カ月ごとにコアボーリングを実施し、除去土壌の上部境界及び底部境界付近の土壌コアを5mm厚さで濃度分析した。
なお、現場試験では、施工時の影響により、施工直後から、除去土壌と埋め戻し土との境界付近においては、それらの土壌の共存が見られたことから、調査に当たっては、共存のない範囲のコアスライス土壌中の放射性セシウム濃度を分析した。



放射性セシウムの移行挙動の確認（ボーリング調査）①

①土壌中濃度分布の分析（現場試験・ボーリング調査）
上述のように、除去土壌と埋め戻し土との共存が見られたことから、共存のない範囲について、放射性セシウムの上方移行と下方移行を調査した。



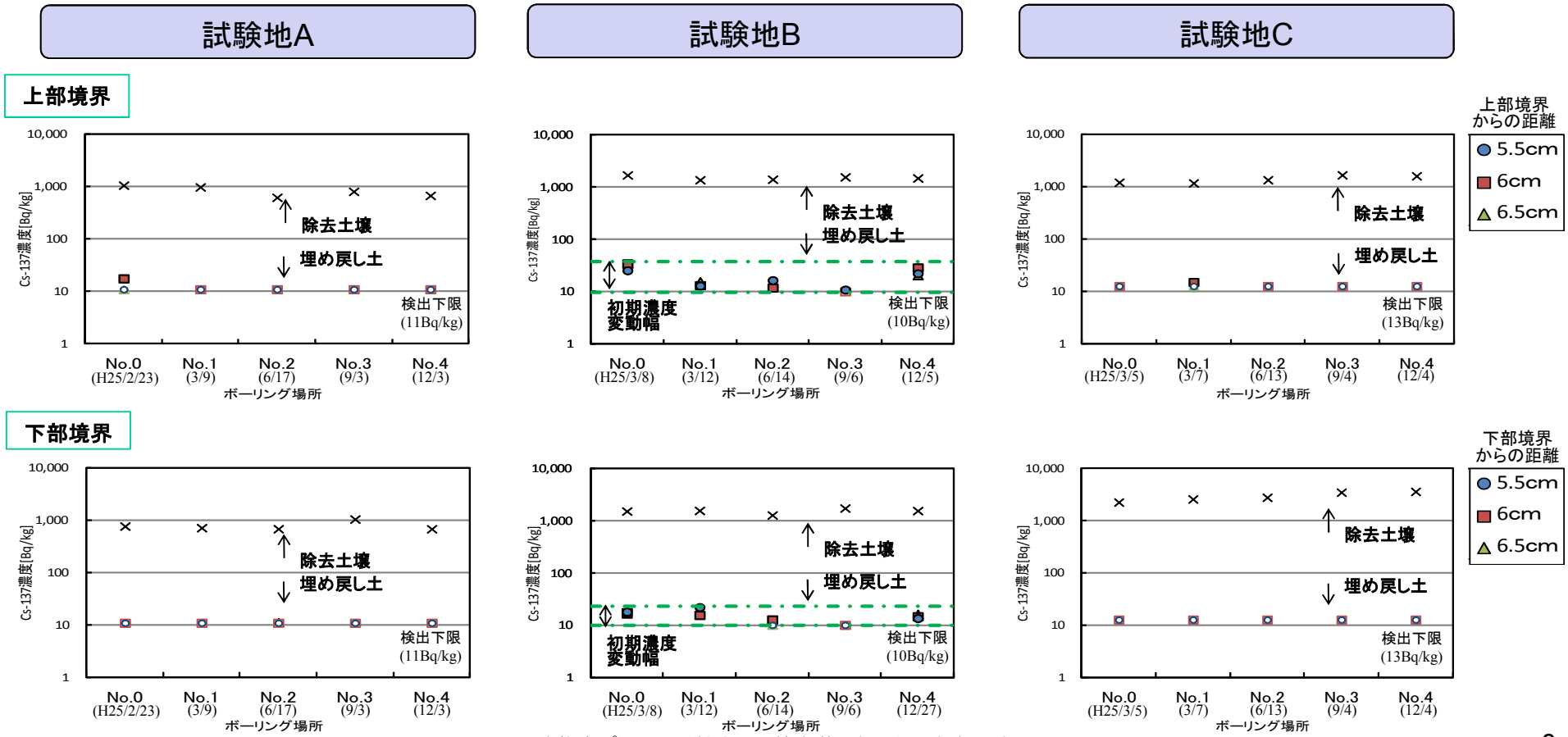
:埋め戻し土と除去土壌が共存する範囲、　○:評価範囲、　□:初期濃度変動幅

白抜きプロットは検出下限値未満であったことを示す。

放射性セシウムの移行挙動の確認（ボーリング調査）③

①土壌中濃度分布の分析（現場試験・ボーリング調査）

除去土壌と埋め戻し土との共存が見られない範囲の埋め戻し土の濃度を調査した結果、いずれの試験地においても、放射性セシウムは検出下限値未満、又は埋め戻し土の初期濃度（表土除去前、3cm以深に分布していた放射性セシウムに起因）の変動範囲内であり、放射性セシウムの移動は確認されなかった。



白抜きプロットは検出下限値未満であったことを示す。

放射性セシウムの移行挙動の確認（土壌水分析）

②土壌水中の濃度分析（現場試験・土壌水分析）

現場試験において、底部土壌下部から、土壌水を定期的に採取し、放射性セシウム濃度を分析した結果、すべての検体で検出下限値未満（約1Bq/L）であった。

土壌水の分析（現場試験）

試験地	採取時期	土壌水中 Cs-137濃度 (Bq/L)
試験地A	平成25年4月	ND
	平成25年6月	ND
	平成25年7月	ND
	平成25年8月	ND
	平成25年9月	ND
	平成25年10月	ND
	平成25年11月	ND
	平成25年12月	ND
	平成26年1月	ND
試験地B	平成25年4月	ND
	平成25年5月	ND
	平成25年7月	ND
	平成25年8月	ND
	平成25年9月	ND
	平成25年10月	ND
	平成25年11月	ND
	平成25年12月	ND
	平成26年1月	ND
試験地C	平成25年4月	ND
	平成25年5月	ND
	平成25年7月	ND
	平成25年8月	ND
	平成25年9月	ND
	平成25年10月	ND
	平成25年11月	ND
	平成25年12月	ND
	平成26年1月	ND

- 試験エリアにおいて定期的に散水を実施（10か月で約3,200～3,900mm（浸透水量換算で約8～10年分））。
- NDは検出下限値（約1Bq/L）未満であることを示す。
- 試料はろ過なしで測定。

放射性セシウムの移行挙動の確認（通水カラム試験）

③移行挙動に関する確認試験（ラボ・通水カラム試験）

現場試験地から採取した土壌試料による通水カラム試験を実施した結果、すべてのカラムにおいて排出水中の放射性セシウムは検出下限値未満であった。これより、放射性セシウムが付着した土粒子の浮遊が少ないか、又は、浮遊が生じたとしても、ろ過作用により放射性セシウムが付着した土粒子が土壌の間隙に捕捉されていると考えられる。

通水カラム（３層：上部、除去土壌、底部）

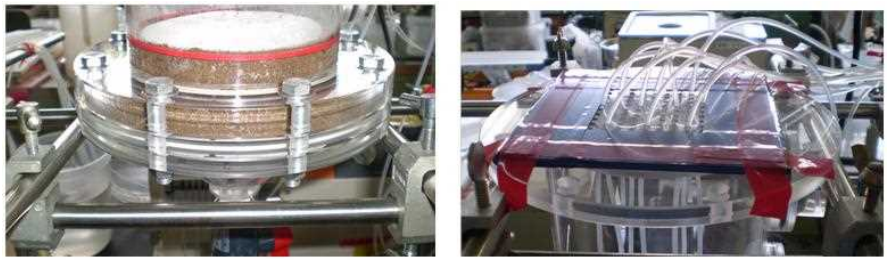
現場試験の土壌構成を模擬して、土壌中の放射性セシウムの移動を確認。

土壌採取地	累積通水量	土壌水中 Cs-137濃度 (Bq/L)
試験地A	40mm	ND
	400mm	ND
	840mm	ND
試験地B	40mm	ND
	400mm	ND
	840mm	ND
試験地C	40mm	ND
	400mm	ND
	840mm	ND

20mm/日の通水(バッチ)を約4か月。検出下限値は1～2Bq/L。
試料はろ過なしで測定。

通水カラム（１層：除去土壌のみ）

底部土壌による放射性セシウムの収着や浮遊した土粒子の捕捉が期待されない状況を想定して、土壌中の放射性セシウムの移動を確認。



土壌採取地	累積通水量	土壌水中 Cs-137濃度 (Bq/L)
試験地A	140mm	ND
試験地B	140mm	ND
試験地C	140mm	ND

20mm/日の通水を7日間連続。検出下限値は1～2Bq/L。
試料はろ過なしで測定。

土壌中の放射性セシウムの特性①

①溶出特性に関する試験（ラボ試験）

試験地から採取した除去土壌で、純水及び1mol/L酢酸アンモニウム溶液による逐次溶出試験を実施した結果、すべての検体で放射性セシウムは検出下限値（10～15Bq/L）未満であった。

さらに、10か月間の長期浸漬試験でも、放射性セシウムは検出下限値（1～2Bq/L）未満であったことから、土壌中の放射性セシウムの間隙水への溶出は極めて低いことが確認された。

逐次溶出試験

土壌採取地	採取時期	土壌分類	Cs-134 (Bq/kg乾土)	Cs-137 (Bq/kg乾土)	Cs合計 (Bq/kg乾土)	溶出試験		
						浸漬液	溶出液 Cs-134 (Bq/L)	溶出液 Cs-137 (Bq/L)
試験地A	平成25年2月	粘土質細砂	319	681	1,000	純水	ND	ND
						1M酢酸アンモニウム	ND	ND
試験地B	平成25年2月	粘土質細砂	1,035	1,841	2,876	純水	ND	ND
						1M酢酸アンモニウム	ND	ND
試験地C	平成25年2月	岩瀬砂(細砂又は中砂)	643	1,207	1,850	純水	ND	ND
						1M酢酸アンモニウム	ND	ND

液固比　10mL/g。
純水は6時間振とう。
1mol/L酢酸アンモニウムは18時間振とう。
溶出液濃度欄の「ND」は、検出下限値（10～15Bq/L）未満であることを示す。

長期浸漬試験

土壌採取地	採取時期	土壌分類	Cs-134 (Bq/kg乾土)	Cs-137 (Bq/kg乾土)	Cs合計 (Bq/kg乾土)	溶出試験（純水）		
						浸漬期間	溶出液 Cs-134 (Bq/L)	溶出液 Cs-137 (Bq/L)
試験地A	平成25年2月	粘土質細砂	319	681	1,000	10か月	ND	ND
試験地B	平成25年2月	粘土質細砂	1,035	1,841	2,876	10か月	ND	ND
試験地C	平成25年2月	岩瀬砂(細砂又は中砂)	643	1,207	1,850	10か月	ND	ND

液固比　10mL/g。
溶出液濃度欄の「ND」は、検出下限値（1～2Bq/L）未満であることを示す。

土壌中の放射性セシウムの特性②

②収着特性に関する試験（ラボ試験）

現場試験地で採取した除去土壌を用いて収着特性試験を行った結果、純水を用いた試験で、収着分配係数は2×10^3～6×10^3mL/gの値が得られた。

また、共存する陽イオンの中で土壌からの放射性セシウムの収着に最も影響を与えると考えられるアンモニウムイオンの存在を考慮しても、収着分配係数は1×10^3mL/g以上の値が得られた。これにより、放射性セシウムは土粒子に高い割合で収着し、移動速度が遅くなると考えられる。

収着特性試験

採取地	収着分配係数(mL/g)		
	純水	酢酸アンモニウム濃度	
		1×10^{-4} (mol/L)	1×10^{-3} (mol/L)
試験地A	6×10^3	5×10^3	1×10^3
試験地B	4×10^3	3×10^3	-
試験地C	2×10^3	2×10^3	-

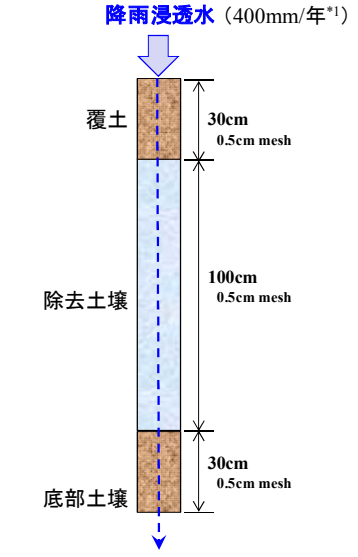
試験期間：7日

長期的な移行予測

現場試験及びラボ試験の時間枠を超える長期間（100年間；セシウム-137が1/10程度に減衰）の移行について、収着分配係数を除去土壌の多様性、環境影響（共存陽イオン）を保守的に考慮し1,000mL/gとして数値解析により予測を行った。

- 除去土壌中の放射性セシウムは半減期に従い100年間で1/10程度に低下する。
- 土壌から溶け出して移行する範囲は境界から数10cm程度である。
- 底部土壌に移行する範囲における最大の濃度は、埋設時の除去土壌の初期濃度と比較して、10cm程度で約1/100、30cm程度で約1/10,000である。

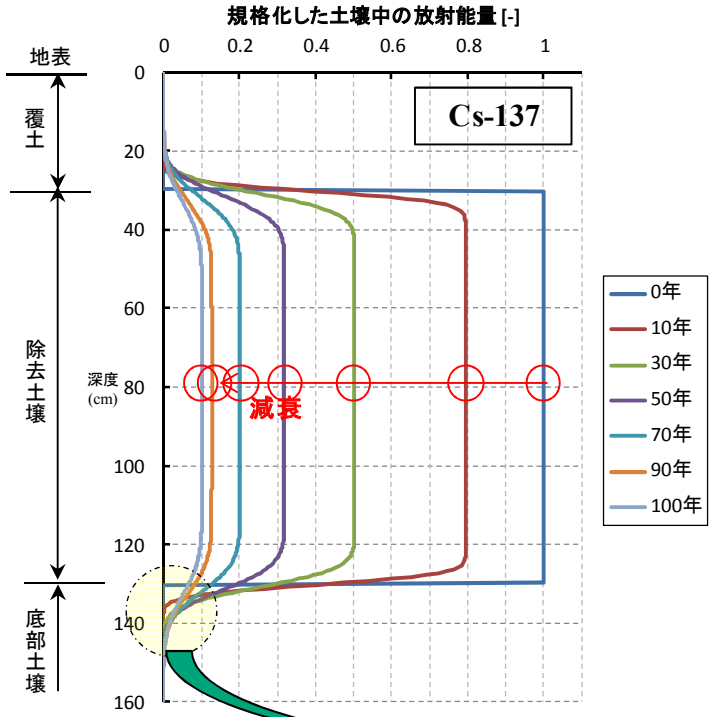
解析モデル

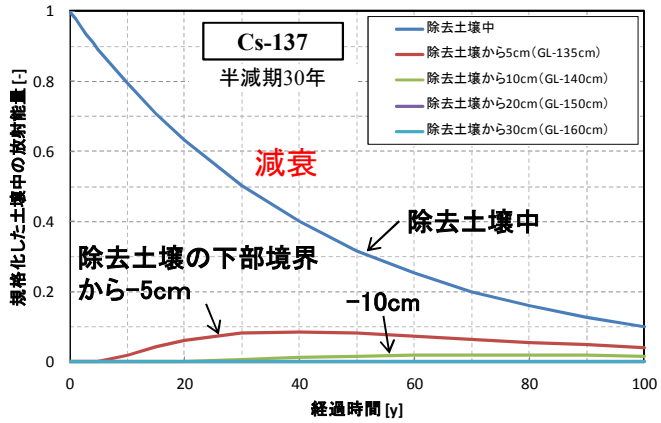


収着分配係数(mL/g)	: 1,000
間隙率(-)	: 0.5
乾燥密度(kg/m^3)	: 1,350
拡散係数(m^2/s)	: 2×10^{-9} *2
分散長(m)	: 0.01 *2

※1「地下水ハンドブック」、建設産業調査会、1998
※2「地下水シミュレーション」、日本地下水学会、2010

数値解析結果





底部土壌の濃度変化

まとめ

本試験施工によって、除去土壌の埋設における放射性セシウムの移行特性について、以下のことが確認された。

○ 現場試験及び通水カラム試験の結果、放射性セシウムの土壌中の移行現象は、土壌の分析からも土壌水の分析からも確認されなかった（検出下限値未満）。

○ 現場試験地の土壌を用いた溶出特性試験の結果、純水及び1mol/L酢酸アンモニウム溶液への放射性セシウムの溶出は確認されなかった（検出下限値未満）。

○ 現場試験地の土壌を用いた収着特性試験の結果、実環境において想定される上限側のアンモニウムイオン濃度も含めても収着分配係数は10^3mL/gオーダーの値であった。

○ 長期予測として数値解析を行った結果、通常想定される収着分配係数の範囲においては放射性セシウムの動きは遅く、その移行範囲は除去土壌周辺の狭い範囲（100年間で数10cm程度）に限定され、半減期に従って減衰することを確認した。