

実証結果報告書

- 1) 提案者の名称 株式会社 大林組
- 2) 実証の区分 PFOS等の濃度低減のための対策技術の公募【土1現地以外】
- 3) 提案技術の名称 PFOS等汚染土壌の固化・安定化処理 ～汚染土壌からのPFOS等溶出抑制～
- 4) 技術の分類/適用段階 固化・安定化処理/ラボスケール
- 5) 実証の期間 令和7年8月20日～令和8年2月13日

1. 技術の概要

1.1 原理と特徴

PFOS・PFOA（以下、PFOS等）による汚染土壌の対策技術として、現時点で有効と考えられるのは熱処理または洗浄処理であるが、これらの処理方法は処理設備の設置や運転コストが高く、運用時にはCO₂排出等の環境負荷も大きい。提案者は、低コスト・低環境負荷なPFOS等汚染土壌の対策技術として、固化・安定化技術に着目して技術開発を進めてきた。具体的には、粉末活性炭と陽イオン系資材（酸化マグネシウム等）、固化材（セメント等）の3種の資材をPFOS等汚染土壌に混合することによってPFOS等の溶出量を低減する技術を開発し、模擬汚染土壌を用いた室内試験でPFOS等の溶出を90%以上低減できることを確認した。粉末活性炭には物理的な吸着効果を、陽イオン系資材にはPFOS等との静電引力による吸着を、固化材には吸着材の効果の持続性や強度増加による施工性の向上を期待している¹⁾。

- 1) 日野良太ほか：PFAS汚染土壌の不溶化処理に関する適用可能性，第16回地盤改良シンポジウム論文集，pp.505-509，2024.

固化・安定化処理は、通常の建設工事で用いられる重機や定置式の土壌改良装置によってPFOS等汚染土壌の処理が可能である。また、掘削した汚染土壌の処理にも、原位置での汚染土壌処理にも適用が可能であり、他の処理方法と比較して適用範囲が広い処理方法といえる。

固化・安定化処理の施工イメージを図1-1に示す。

なお、ここでいう固化・安定化処理は、土壌汚染対策法の実施措置として提示された原位置不溶化および不溶化埋め戻し等に該当するものとし、同法に基づく特定有害物質による土壌汚染対策工事では適用事例を有する。

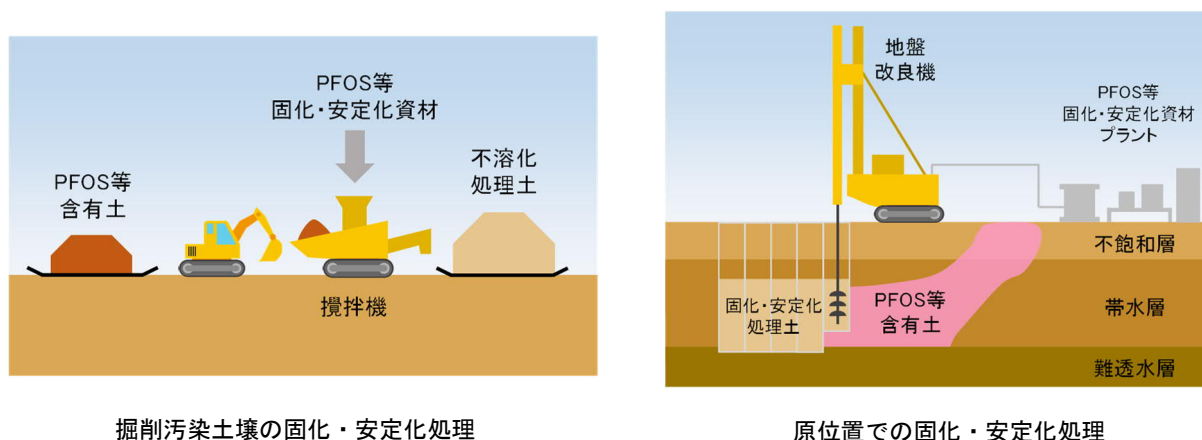


図 1-1 固化・安定化処理の施工イメージ

1.2 技術の対策目標

提案技術については、これまで数千 ng/L の模擬汚染土壌を用いた室内試験で PFOS 等の濃度（溶出量）低減効果を確認してきた。今回の実証試験は、数万~数十万 ng/L の実汚染土壌を対象として、実施工をイメージした小型の重機や攪拌装置を使用したパイロットスケールの試験によって提案技術の有効性を確認することを目的とした。

実証試験における具体的な目標は、以下の①~③を設定した。

表 1-1 提案技術の目標

目標	目的	目標値
① PFOS 等の濃度低減	処理による土壌中からの PFOS 等の溶出量 (PFOS 溶出量と PFOA 溶出量の合算値) の低減効果を評価	処理前後の溶出量の低減率 90%以上
② 処理コスト低減	提案技術の低コスト性を評価 (既存処理技術 (熱処理) との比較)	20,000 円/m ³ 以下
③ 環境への負荷低減	提案技術の二酸化炭素排出量の削減効果を評価 (既存処理技術 (熱処理) との比較)	360 kg-CO ₂ /m ³ 以下

また、上記の目標の確認のための試験・検討とは、別途、提案技術による処理技術の特性（強度増加や透水性の低下、溶出量低減効果の持続性など）を確認するための各種室内試験を本実証試験の中で実施した。

2. 実証試験結果

2.1 実証試験方法

2.1.1 PFOS 等の濃度低減の評価に関する試験

固化・安定化による PFOS 等の土壌溶出量の低減効果を確認するため、最初に室内で「トリタビリティ試験」を実施し、次に実施工を想定して小型重機や攪拌機を用いた「本試験」を実施した。

(1) トリタビリティ試験の方法

1) 試験土壌

トリタビリティ試験には、過去の土壌調査後にコア箱で保管されていた土壌のうち K-2 区画の深さ 0.0m～2.0m の土壌試料から 2mm 以上の礫や異物を除去をふるいで除去した土壌を用いた。対象区画と深さは、過去の汚染状況確認調査による結果を参考にして、試験用土壌の初期の PFOS 等の溶出量が数千 ng/L となるよう選定した。

2) 初期性状の確認

試験対象土壌の PFOS 等の初期状態を確認するため、試験対象土壌の PFOS 等の溶出量を、環境省「土壌中の PFOS、PFOA および PFHxS の暫定測定方法について」(以下、暫定法)により測定した。また、PFOS 等以外の PFAS の存在状況を確認するため、米国 EPA の Method 1633 による PFAS40 項目のスクリーニング測定を実施した。

上記の他に、土壌の物理的性状を把握するために粒度試験 (JIS A 1204)、透水試験 (JIS A 1218)、土粒子の密度試験 (JIS A 1202)、湿潤土の密度試験 (JIS A 1225) を実施し、土壌の化学的性状を把握するため、土壌の pH (JGS 0211)、電気伝導率 (JGS 0212)、強熱減量 (JIS A 1226)、有機炭素含有量 (JGS 0231) の測定を行った。

3) 試験材料

表 2-1 の資材を用いて試験を実施した。個別の資材の性状等については、巻末資料 D に添付した各資材の SDS を参照。

表 2-1 トリタビリティ試験に用いた資材

区分	材料	製造/場所	材料仕様
固化材	高炉セメント B 種	太平洋セメント	高炉スラグ (30～60%)、ポルトランドセメント (残量)
	半水石膏	吉野石膏	焼石膏
陽イオン 資材	酸化マグネシウム	宇部マテリアルズ	製品名グリーンライム NP、酸化マグネシウム (15～35%)、 その他に硫酸アルミニウム、硫酸カルシウム、重質炭酸カルシウム、石英を含有
	消石灰	同上	水酸化カルシウム (95%以上)、二酸化ケイ素
活性炭	粉末活性炭	フタムラ化学	原料：石炭 平均粒径：22 μ m 粒度 (75 μ m pass)：92% 比表面積：950 m^2/g 全細孔容積：0.55 mL/g 平均細孔直径：2.3 nm

4) 土壌と資材の混合

トリタビリティ試験用の土壌と固化・安定化処理資材の混合は、立花マテリアル株式会社東京支店 (千葉県三郷市) の試験室内で実施した。

5) 試験ケース

固化材 2 種、陽イオン資材 2 種、粉末活性炭 1 種（×添加量 2 種）を組み合わせ、表 2-2 に示す 14 ケースを設定し、資材の組み合わせによる溶出量低減効果の差を確認することとした。粉末活性炭の添加量については、これまでの室内試験での標準添加量 0.5%（土壌重量比）と、室内試験と実施工スケールで処理効果に差が出る可能性を考慮して添加量を標準より多くした 2.0%の 2 通りとし、効果の差を確認することとした。

表 2-2 トリタビリティ試験の試験ケース

資材	番号	ケース名	土壌	高炉セメント BB	半水石膏	酸化 Mg	消石灰	粉末活性炭	水道水
1 種	1	K2-1 種-BB	100	14.0	-	-	-	-	14.0
	2	K2-1 種-C	100	-	28.0	-	-	-	28.0
2 種	3	K2-2 種-BB-Mg	100	14.0	-	3.0	-	-	17.0
	4	K2-2 種-BB-Ca	100	14.0	-	-	3.0	-	17.0
	5	K2-2 種-C-Mg	100	-	28.0	3.0	-	-	31.0
	6	K2-2 種-C-Ca	100	-	28.0	-	3.0	-	31.0
3 種	7	K2-3 種-BB-Mg-標	100	14.0	-	3.0	-	0.5	17.5
	8	K2-3 種-BB-Mg-多	100	14.0	-	3.0	-	2.0	19.0
	9	K2-3 種-BB-Ca-標	100	14.0	-	-	3.0	0.5	17.5
	10	K2-3 種-BB-Ca-多	100	14.0	-	-	3.0	2.0	19.0
	11	K2-3 種-C-Mg-標	100	-	28.0	3.0	-	0.5	31.5
	12	K2-3 種-C-Mg-多	100	-	28.0	3.0	-	2.0	33.0
	13	K2-3 種-C-Ca-標	100	-	28.0	-	3.0	0.5	31.5
	14	K2-3 種-C-Ca-多	100	-	28.0	-	3.0	2.0	33.0

※各資材の量はすべてグラム (g)

6) 処理効果の確認

資材混合後、室温で 1 週間養生した各ケースの土壌試料の PFOS 等溶出量を暫定法により測定した。

(2) 本試験の方法

1) 試験対象土壌

現地での試験業者が掘削時に採取しフレキシブルコンテナ（以下、フレコン）で保管していた土壌のうち、本試験の対象土壌の PFOS 等初期溶出量が数万 ng/L となるよう、E4 区画（深さ 0.5~1.0m、溶出量 27,000~48,000 ng/L）の土壌を試験対象用土壌として選定した。また、初期溶出量が数十万 ng/L の土壌への効果も確認することとして、E1 区画（深さ 0.5m~1.0m、溶出量 310,000~310,000 ng/L）の土壌もあわせて試験対象とすることとした。

試験用土壌は 2025 年 10 月 6 日に現地試験業者からフレコン 4 袋（E4 区画土壌：フレコン 3 袋（約 1.5m³）および E1 区画土壌がフレコン 1 袋（約 0.5m³））で引渡しを受け、クレーン付の 8t ダンプにより現地（岡山県吉備中央町）から本試験の実施場所（千葉県野田市）に運搬した。

試験ヤードに搬入した土壌は、9.5mm 以上の礫や異物をふるいで除去してから本試験に用いた。なお、ふるい残留物は大部分がコンクリートガラであった。

2) 初期性状の測定

試料 E4 と E1 について、トリタビリティ試験と同様に PFOS 等の初期値を測定した。ただし、土質については本試験の主たる対象である試料 E4 についてのみ実施した。

3) 固化・安定化資材

トリタビリティ試験と同様の資材を用いて試験を実施した。

4) 土壌と資材の混合

試験用土壌と固化・安定化処理資材の混合は、立花マテリアル社野田事業場（千葉県野田市）の資材保管用のテント内に試験ヤードを整備して実施した。

資材の混合は、実工事における施工機械をイメージして、定置式の小型攪拌機と小型のバックホウの二つの混合方法で実施し、結果を比較することとした。ただし、E1 区画の土壌については粘性が強く上記の処理方法での混合が困難であったため、トリタビリティ試験と同様の室内試験で評価を行うこととした。

試験ヤードの状況および混合に用いた小型攪拌機と小形バックホウの写真を写真 2-1 と 2-2 に示す。本試験の実施の詳細については巻末資料 E の本試験報告書を参照のこと。

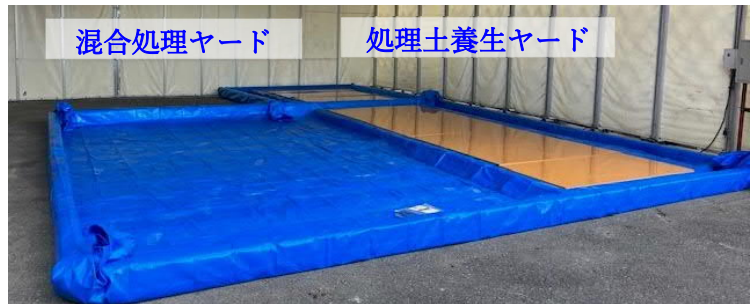


写真 2-1 試験ヤードの整備状況



写真 2-2 本試験における資材混合状況
(左：小型攪拌装置、右：小型バックホウ)

5) 試験ケース

資材の組み合わせ、混合方法に応じて表 2-3 に示す 4 ケースを設定した。

表 2-3 本試験の試験ケース

	試料	混合方法	土壌	高炉 BB	半水石膏	酸化 Mg	消石灰	活性炭	水道水
ケース①	E4	バックホウ	400	56	—	12	—	8	60.8
ケース②	E4	小型攪拌機	400	56	—	12	—	8	60.8
ケース③	E4	小型攪拌機	400	—	112	—	12	8	79.2
ケース④	E1	室内試験	10	1.4	—	0.3	—	0.2	2.5

※数字はすべて資材の重量 (kg)

6) 処理効果の確認

試験ヤードのテント内での養生開始後 1 週間後と 4 週間後に、処理後の土壌の山 5 地点からランダムに採取した試料を等量混合し、さらに 2mm ふるいで礫や異物を除去した土壌について、環境省の暫定法により PFOS 等の溶出量の測定を実施した。

2.1.2 処理コスト低減に関する検討方法

既存処理技術である熱処理（場外処理施設への搬出）のコストと固化・安定化処理の処理コストを比較することにより、提案技術のコスト低減効果を評価することとした。詳細は3.3で後述する。

2.1.3 環境負荷の低減に関する検討方法

既存処理技術である熱処理の二酸化炭素排出量と固化・安定化処理の二酸化炭素排出量を比較することにより、提案技術の環境負荷低減効果を評価することとした。詳細は3.3で後述する。

2.1.4 提案技術の特性を確認するための試験方法

上記2.1.1～2.1.3の試験・検討項目の他に、提案技術による処理土壌の特性（強度増加や処理効果の長期溶出特性等）について確認することとした。各試験の目的と試験方法を表2-4に示す。

表 2-4 提案技術による処理土の特性を確認するための試験

確認項目	目的	試験方法
④ 処理土の強度増加	処理による処理土の強度増加を確認	<ul style="list-style-type: none"> 試験方法： 土の一軸圧縮試験法（JIS A 1216:2009） 締固め条件： 安定処理土の締固めをしない供試体作製方法（JGS0821） 試験土壌： 本試験の処理土3ケース（ケース①～③）の処理土 実施時期： 処理土養生開始7日後、14日後、28日後 ※当初計画では、コーン指数の測定も計画していたが、処理後7日目で貫入不可（計測不可）であったため、実施せず。
⑤ 処理土の透水性低下	処理による処理土の透水性低下を確認	<ul style="list-style-type: none"> 試験方法： 土の透水試験方法（JIS A 1218:2009） 試験土壌： 未処理土および本試験の処理土（代表ケース②） 処理土は、処理後すぐにモールドに充填して28日経過後の試料1と28日経過後に粉砕してモールドに充填した試料2の2ケース 締固め条件： 未処理土は締固めなし（JGS 0821）、処理土1は締固めなし（同上）、処理土2は締固めあり（A法）
⑥ 処理土のpH変化に対する安定性	処理土の酸・アルカリ環境中での効果持続性を確認	<ul style="list-style-type: none"> 試験方法： 土壤環境センター「重金属等不溶化処理土壌のpH変化に対する安定性の相対的評価手法（GEPC TS-02-S-1,S-2）」 試験土壌： 未処理土1ケース、固化・安定化処理土（ケース②）、分級洗浄処理土（※）の合計3ケース 実施時期： 処理土養生が28日経過後 ※固化・安定化処理土との比較のため、分級洗浄処理土もあわせて試験した。分級洗浄処理土の作製方法については、巻末資料Fに詳細を示す。
⑦ 処理土の長期溶出特性（通水時）	処理によるPFOS等の溶出量低減効果の長期的な持続性を確認（再利用した処理土中を雨水や地下水が通過する状況を想定）	<ul style="list-style-type: none"> 試験方法： 上向流式カラム通水試験 カラム仕様： φ10cm×H50cm（土壌H=40cm） 通水速度： 0.001cm/sec（1～1.2mL/min） 試験土壌： 未処理土、固化・安定化処理土（ケース②）、分級洗浄処理土（※上記⑥と同じ）の合計3ケース 測定頻度： 固液比L/S=1、3、5、10、15（※） 測定項目： カラムからの浸出水のPFOS等濃度（通知法）、pHおよびEC（簡易水質計） ※当初計画ではL/S=20まで実施予定であったが、試験用土壌の受け取り時期が計画より遅くなったためL/S=15で終了
⑧ 処理土の長期溶出特性（湛水時）	処理によるPFOS等の溶出量低減効果の長期的な持続性を確認（固化された処理土塊が湛水した状況を想定）	<ul style="list-style-type: none"> 試験方法： タンクリーチング試験 試験仕様： φ5cm×土壌長10cmに成型した処理土をイオン交換水に液固比1:10で浸漬 試験土壌： 固化・安定化処理土（ケース②） 測定頻度： 湛水後1日、7日、14日、28日、44日（※） 測定項目： 浸漬水のPFOS等濃度（通知法）pHおよびEC（簡易水質計） ※当初計画では湛水後56日目まで実施予定であったが、試験用土壌の受け取り時期が計画より遅くなったため44日で終了

2.2 実証試験結果

2.2.1 PFOS 等の濃度低減

(1) 試験土壌の初期性状

1) トリタビリティ試験用土壌

トリタビリティ試験用土壌の初期性状を表 2-5 に示す。PFOS 等の溶出量は、PFOS が 5 ng/L 未満、PFOA が 15,000 ng/L であり、EPA 法によるスクリーニング分析 (40 項目) でも検出されたのは PFOA のみであった。

表 2-5 トリタビリティ試験土壌の初期性状

区分	項目	単位	測定結果
			試料 K2 (※)
PFOS 等	PFOS 溶出量	ng/L	5 未満
	PFOA 溶出量	ng/L	15,000
	PFAS40 項目スクリーニング	ng/L	PFOA 以外は定量下限未満
粒度分布	土質分類		粘性土質砂 (SCs)
	粒度分布	%	砂分 62.8%、シルト分 17.6%、粘土分 19.6%
化学的性状	水素イオン濃度指数 (pH)	—	8.3 (24.9°C)
	電気伝導率 (EC)	mS/m	14.2
	強熱減量 (IL)	%	5.1
	全有機炭素 (TOC)	mg/g-dry	2.0

※2mm ふるいにより礫や異物を除去した土壌

2) 本試験用土壌

本試験用の土壌の初期性状を表 2-6 に示す。2 試料ともトリタビリティ試験と同様、PFOS 等のうち検出されたのは、PFOA のみであった。土質の種類についてもトリタビリティ試験に用いた K2 試料とおおむね同じであったが、土壌 pH が 9.9 で K2 試料の 8.3 よりも高かった。

表 2-6 本試験土壌の初期性状

区分	項目	単位	測定結果	
			試料 E4 (※1)	試料 E1 (※1)
PFOS 等	PFOS 溶出量	ng/L	5 未満	100 未満
	PFOA 溶出量	ng/L	23,500 (※2)	240,000
	PFAS40 項目スクリーニング	ng/L	PFOA 以外は定量下限未満	同左
粒度分布	土質分類		細粒分質礫質砂 (SFG)	—
	粒度分布	%	礫分 38.1%、砂分 43.1%、シルト分 7.9%、粘土分 10.9%	—
化学的性状	水素イオン濃度指数 (pH)	—	9.9 (24.9°C)	—
	電気伝導率 (EC)	mS/m	15.5	—
	強熱減量 (IL)	%	7.0	—
	全有機炭素 (TOC)	mg/g-dry	1.0	—

※1 PFOS 等および化学性状の試験は 2mm ふるい通過試料、粒度分布試験は 9.5mm ふるい通過試料が対象

※2 E4 の PFOA 溶出量 4 は 2 検体の平均値

(2) トリタビリティ試験の結果

トリタビリティ試験の結果を図 2-1 に示す。

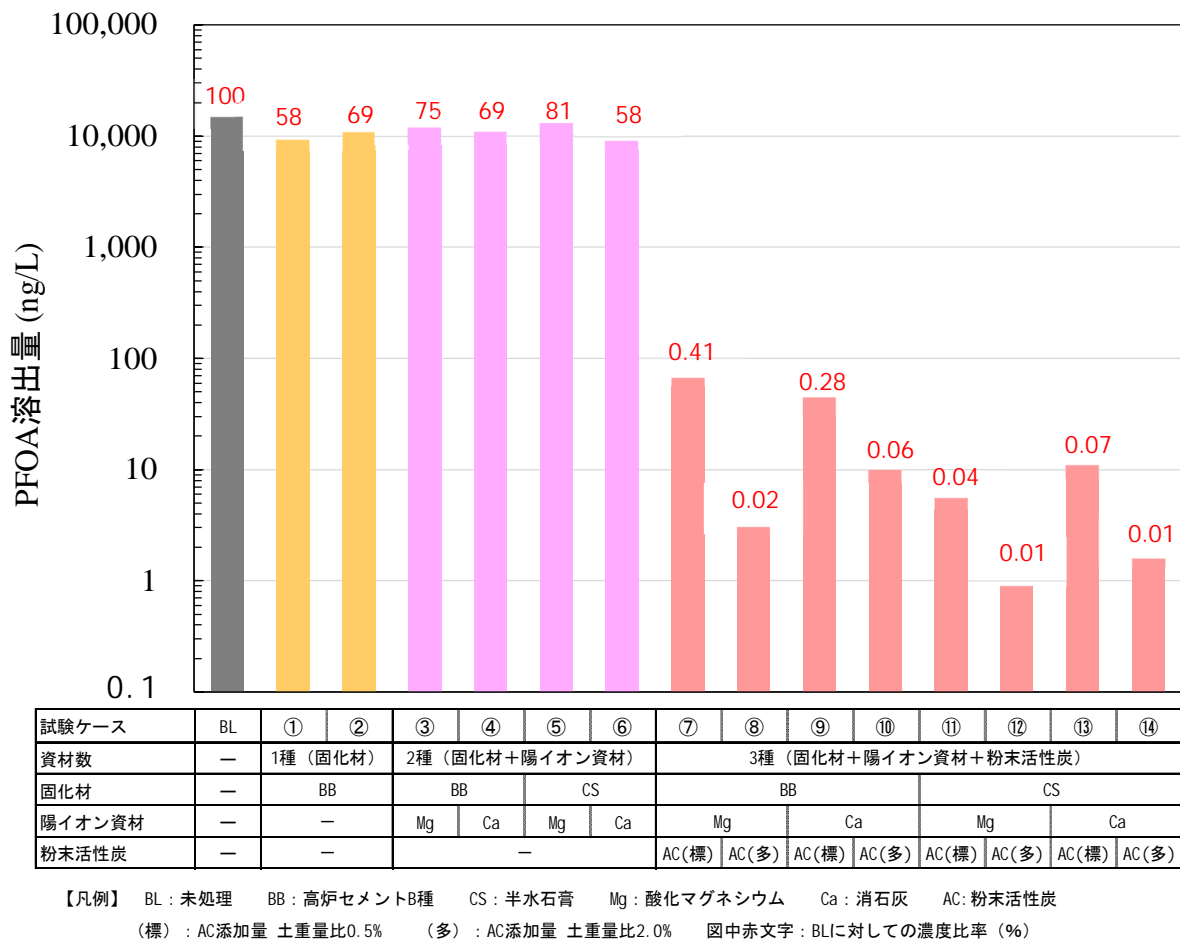


図 2-1 試験結果 (トリタビリティ試験)

※PFOS はすべてのケースで定量下限未満だったため、上記グラフでは PFOA の測定値結果を示している
 ※溶出量は 2mm ふるいを通過した土壌 (処理土は粉碎して 2mm ふるいを通過した土壌) に対する測定値

- 提案技術 (3 資材による固化・安定化処理) においては、いずれのケースにおいても処理土の PFOA 溶出量は、未処理土の 99% 以下まで低減され、多くのケースでは 99.9% 以下まで溶出量を低減し、目標とした溶出量の低減率 90% を満足した。さらに、粉末活性炭 2.0% のケースでは、全ケースで溶出量を 50 ng/L 以下とすることができた。
- 3 種配合における資材の配合による違いについては、全体的には、固化材に高炉セメントよりも半水石膏を用いたケースの低減率が高く、活性炭の量が多いケースの方が低減率が高かった。陽イオン資材の違いによる低減率の差は確認できなかった。
- 比較として実施した固化材 1 種配合による処理では、30~40% 程度の溶出量の低減がみられたが、固化材と陽イオン資材の 2 種配合による処理では、固化材 1 種配合と比較して溶出量の低減はみられなかった。
- 陽イオン資材について明確な効果が確認できなかった理由について検討するため、別途、追加試験を実施した。追加試験の結果については、巻末資料 G を参照。

(3) 本試験の結果

本試験の結果を図 2-2 に示す。

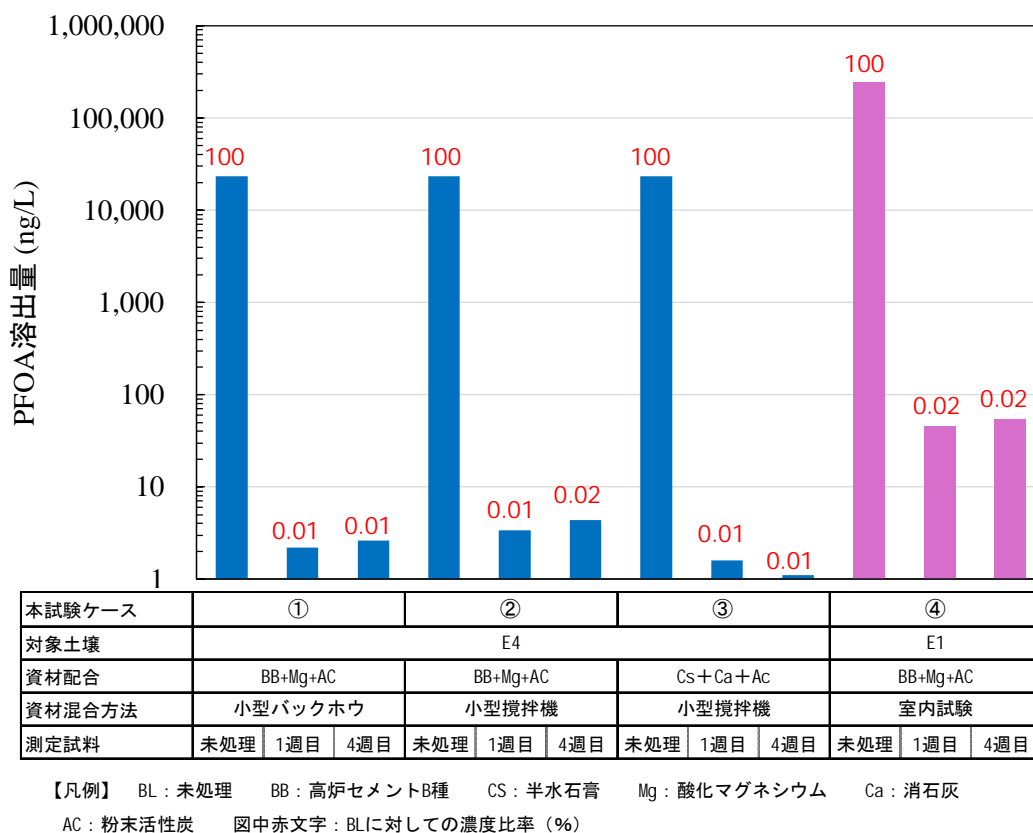


図 2-2 試験結果（本試験）

※PFOS はすべてのケースで定量下限未満だったため、上記グラフでは PFOA の測定値結果を示している
※溶出量は 2mm ふるいを通過した土壌（処理土は粉砕して 2mm ふるいを通過した土壌）に対する測定値

- 提案技術によって、本試験のいずれのケースにおいても、処理土の PFOA 溶出量を未処理土の 99.9% 以下まで低減し、目標とした低減率 90% を満足することができた。さらに、未処理土の溶出量が特に高かった E1 試料（初期 PFOS 等 240,000 ng/L）を除き、E4 試料（同 23,500 ng/L）では溶出量を 50 ng/L 以下まで低減することができた。
- E4 の処理土①②③の比較では、資材配合の違いや、混合処理方法の違いによる溶出量低減効果の差は確認できなかった。
- 処理後の養生 1 週目と 4 週目の結果を比較した場合、溶出量の低減が経時的に進行する傾向は確認できなかった。

2.2.2 提案技術の特性を確認するための試験方法

(1) 処理土の強度増加

本試験の4ケースのうち、ケース①～③の一軸圧縮試験の結果を表2-7に示す。

表 2-7 試験結果（一軸圧縮強度試験）

本試験 ケース	対象 試料	資材配合	攪拌方法	一軸圧縮強度 kN/m ²		
				7日後	14日後	21日後
①	E4	BB+Mg+AC	バックホウ	2,563	4,636	5,826
②		BB+Mg+AC	小型攪拌機	1,820	2,073	3,466
③		CS+Ca+AC	小型攪拌機	166	233	220

- 高炉セメント（BB）と酸化マグネシウム（Mg）と粉末活性炭（Ac）を処理資材として用いたケース①②においては、バックホウおよび小型攪拌装置とも養生日数に応じて強度が増加し、28日後では①は5,826 kN/m²、②は3,467 kN/m²まで増加した。①と②の強度の差の原因としては、混合方法以外に、土壌の含水状態や水道水の水压変動による給水量のばらつき等も考えられる。
- 半水石膏（CS）と消石灰（Ca）と粉末活性炭（AC）を用いたケース③では、養生日数の経過による強度増加はみられず、28日後の強度は220kN/m²であった。
- 今回の実証試験では、一軸圧縮強度について特定の目標は設定していないが、いずれのケースにおいても大型重機（杭打ち機等）の地耐力として必要とされる100～200kN/m²は確保できた。
- 高炉セメントを用いたケースでは、別途、セメント添加量を減らした場合の溶出量低減効果を確認するための追加試験を実施した。追加試験の結果については巻末資料Gを参照。

(2) 処理土の透水性低下

本試験の処理土のうち代表ケースの②と未処理土について、透水試験を実施した結果を表2-8に示す。処理土については、「処理土を処理直後にそのまま埋め戻して養生した場合」と、「処理後に仮置きした状態で養生し、粉砕した処理土壌を埋め戻し等に使用する場合」を想定して、二通りの方法で供試体を作製して透水試験を実施した。

表 2-8 試験結果（透水試験等）

試料土	使用 土壌	締固め 条件	湿潤密度 g/cm ³	土粒子密度 g/cm ³	間隙率 %	飽和度 %	透水係数 m/sec
未改良土	未処理土壌	JGS0821	1.286	2.714	60.6	35.9	1.85×10 ⁻⁴
処理土 本試験②-1 ※	処理直後成型 28日経過試料	JGS0821	1.906	2.714	44.7	90.4	1.67×10 ⁻¹⁰
処理土②-2 ※	処理28日後 粉砕した試料	A法	1.456	2.713	57.7	53.4	1.39×10 ⁻⁶

※②-1は処理直後の処理土を埋め戻した場合を想定、②-2は一定期間に仮置きした処理土を埋め戻した場合を想定

- 未処理土の透水係数が1.85×10⁻⁴ m/secであったのに対して、処理直後に成型して28日養生した試料では1.67×10⁻¹⁰ m/secで透水係数が低下した。また、養生28日経過後に粉砕して成型した試料についても、1.39×10⁻⁶ m/secで透水係数が低下したことから、提案技術による処理によって、処理土の透水性が低下することが確認できた。

(3) 処理土の pH 変化に対する安定性

固化・安定化処理土の pH 変化に対する安定性を評価するため、本試験の処理土（ケース②）と未処理土の中性、酸性、アルカリ性の各条件下における PFOS 等溶出量を測定した。また、比較のため、PFOS 等対策技術の候補としてあげられている分級洗浄処理土についても試験を実施した（分級洗浄処理土の試料作製方法は、巻末資料 F を参照）。試験結果を表 2-9 に示す。

表 2-9 試験結果（処理土の pH 変化に対する安定性評価試験）

試験条件	PFOA 溶出量 (ng/L)				PFOS 溶出量 (ng/L)			
	中性	酸性	アルカリ性	定量下限	中性	酸性	アルカリ性	定量下限
未処理土 (E-4)	26,000	25,000	24,000	5	<5	<5	<5	5
処理土 (E-4 ケース②)	6.1	5.0	8.2	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	0.1
【参考】 分級洗浄処理土 E-4	4,800	5,000	4,600	2	<1	<1	<1	1

※溶出量は 2mm ふるいを通過した土壌（処理土は粉碎して 2mm ふるいを通過した土壌）に対する測定値

- 固化・安定化処理土の溶出量は、酸性<中性<アルカリ性の結果であったが、いずれも数 ng/L であり、溶出量低減効果は全体としてはほとんど変化しなかった。
- 未処理土、および、参考として比較のために試験した分級洗浄処理土についても、酸・アルカリ条件の溶出量は、中性の場合と比較して大きな変化はみられなかった。

(4) 処理土の長期溶出特性（通水時：カラム通水試験結果）

固化・安定化処理土の長期溶出特性を評価するため、本試験の処理土（ケース②）を用いたカラム通水試験を実施した。上述の pH 変化に対する安定性評価試験と同様、未処理土と分級洗浄処理土についても試験を実施した。試験結果を表 2-10 に示す。

表 2-10 試験結果（上向流通水カラム試験）

試料	測定項目	単位	通水量（固液比）					定量下限
			L/S=1	L/S=3	L/S=5	L/S=10	L/S=15	
未処理土 (E-4)	PFOS	ng/L	280	350	370	99	66	0.1
	PFOA	ng/L	6,000	1,800	1,200	2,000	390	0.2
	pH	-	11.0	11.0	11.0	10.9	10.8	-
	EC	mS/m	56.6	55.9	47.7	45.1	44.4	-
固化・安定化処理土 (E-4 ケース②)	PFOS	ng/L	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1
	PFOA	ng/L	7.0	8.7	10	7.4	5.8	0.2
	pH	-	11.7	11.8	11.8	11.8	11.8	-
	EC	mS/m	186.4	145.8	152.1	127.5	130	-
【参考】 分級洗浄処理土 (E-4)	PFOS	ng/L	57	210	240	150	31	0.1
	PFOA	ng/L	5,400	3,700	2,300	760	1,400	0.2
	pH	-	10.5	10.5	10.7	10.6	10.7	-
	EC	mS/m	56.1	44.7	40.2	36.3	36.8	-

※処理土については、処理直後にカラム充填した試料の透水性が非常に低く通水継続が困難となり、養生 28 日後の処理土を粉碎して充填したカラムで透水試験を再実施した。

※pH および EC は簡易水質計による測定値

- 処理土の浸出水の PFOA 濃度は、処理 28 日目の土壌溶出量 (4 ng/L) と同程度の低濃度の結果が試験完了 (L/S=15) まで継続した。なお、初回 (L/S=1) の測定では、PFOS が微量検出されたが、2 回目以降の測定では定量下限未満の結果が継続した。
- 未処理土と分級洗浄処理土では、PFOA で L/S=1 から 15 にかけて、若干の低下がみられるものの、高濃度の浸出が継続した。また、PFOS についても数百 ng/L の浸出継続が確認された。
- pH と EC については、いずれのケースにおいても通水完了時 (L/S=15) まで緩やかに低下した。処理土については、pH や EC が大きく増加するようなことはなかった。

(5) 処理土の長期溶出特性 (湛水時：タンクリーチング試験結果)

本試験の処理土 (代表ケース②) の 28 日養生試料を用いて実施したタンクリーチング試験の結果を表 2-11 に示す。

表 2-11 試験結果 (タンクリーチング試験)

測定項目	単位	測定日 (湛水開始後の日数)					定量 下限
		1 日後	7 日後	14 日後	28 日後	44 日後	
PFOS	ng/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1
PFOA	ng/L	0.5	2.6	2.2	1.9	3.7	0.2
pH	-	11.4	11.4	11.6	11.9	11.9	-
EC	μS/cm	37.3	56.6	89.7	112.5	126.3	-

※pH および EC は簡易水質計による測定値

- 提案技術による固化処理土からの PFOA 溶出量は数 ng/L で安定しており、処理後 28 日の時点で暫定法により測定した PFOA 溶出量からの増加はみられなかった。

3. 実証試験の評価項目

3.1 対策技術の有効性

今回実証試験の結果からは、提案技術である固化・安定化処理は、PFOS 等含有土壌の処理方法として有効性が高い技術であると考えられる。本実証試験および過去に提案者が実施した室内試験の結果をふまえて、提案技術の有効性および適用範囲について整理した結果を以下に述べる。

3.1.1 処理対象土壌

(1) 汚染状態

今回の実証試験では、高濃度（数万～数百万 ng/L）の PFOA 含有土壌からの溶出量を 99～99.9%以上低減し、目標とした低減率 90%を満足することができた。また、溶出量が数万 ng/L レベルの PFOA 含有土壌までは、50ng/L レベルまで低減できることを確認できた。なお、今回実証試験における処理土の溶出量は、固化した処理土を 2mm 以下に粉碎した試料について測定したものであることから、実汚染サイトにおける処理後土壌からの溶出量（特に処理土が固化体となる原位置処理土の溶出量）は、固化体の寸法等の条件にもよるが、さらに小さくなる可能性がある。

また、今回の実証試験における結果は PFOA 含有土壌に対して得られたものであるが、別途実施した模擬汚染土を用いた室内試験において PFOS 溶出量を 99.9%以下まで低減した結果も得られており、提案技術は PFOA と PFOS の両者に対して適用可能と考える。

(2) 対象土質

今回実証試験対象の土壌には大小の礫やコンクリートガラが多く含まれていたため、9.5mm 以上の異物をふるいで除去した後に本試験を実施して溶出量の低減効果を確認できた。したがって、実際の処理においても、同様に最大粒径 9.5mm 以下の土壌であれば施工は可能と考えられる。

処理対象土の化学的性状については、今回実証試験は過去に実施した試験の土壌よりも高い pH の土壌であったが、十分な溶出量低減効果が確認できた。処理後の土壌の pH は固化材や陽イオン資材の影響が支配的と考えられることから、対象土の pH によって処理効果が大きく影響を受ける可能性は低いと予想される。ただし、有機物やその他の阻害物質による処理効果への影響は十分に検証されておらず、実施工においては、汚染サイトごとにトリタビリティ試験による適用性の確認が必要と考える。

3.1.2 処理メカニズム

固化材と吸着材の組み合わせについては、高炉セメント B 種と酸化マグネシウム、半水石膏と消石灰のいずれの組み合わせにおいても、本試験において同様の溶出量低減効果が確認できた。

トリタビリティ試験と追加試験結果からは、陽イオン系資材による溶出量低減効果が土質によって異なることが示唆されたため、土質の影響については継続的な検討が必要と考えられる。一方、実汚染サイトにおける処理工事では、通常的地盤改良工事と同様、サイトごとに配合試験を実施して最適な資材の組み合わせと配合を選定することで対応可能と考えられる。

3.1.3 処理工法

提案技術である固化・安定化処理は、掘削土の処理と原位置処理の両施工方法による適用を想定している。今回、トリタビリティ試験と本試験は掘削土を対象とした配合により溶出量低減効果を確認したが、追加試験では掘削土の処理と原位置処理をそれぞれ対象とした異なる配合においても、同様の溶出量低減効果が得られているため、提案技術は両施工方法による施工が可能であると考えられる。

ただし、掘削土の処理については本試験で実施工を想定した試験によって溶出量低減効果を確認しているが、原位置処理においては現時点で室内試験による効果確認のみであることから、今後、実際の汚染サイトにおける実施工を想定した現地試験による検証は必要と考えられる。

3.1.4 処理土の長期安定性

今回の実証試験において実施した上向流カラム通水試験およびタンクリーチング試験では、処理効果の持続性を確認できた。ただし、今回の室内試験では試験期間や試験条件が限定的であったこともあり、今後、さら定量的な検証が必要と考えられる。

一方、固化・安定化処理土の透水試験からは、透水性の低下による処理土からの浸出水量の低減も期待でき、その浸出水量の低減効果については長期的な持続性が期待できると考えられる。

3.1.5 処理中における汚染拡散対策

提案技術である固化・安定化処理は、処理中に PFOS 等を含む排ガスや処理水の排出もなく、通常の汚染土壌対策工事と同様の飛散・流出防止対策によって PFOS 等の汚染拡散防止ができると考えられる。このため、物質フローも明確であり、処理全体のシステムとして管理が容易な技術であるといえる。

3.2 対策技術の新規性・将来性

PFOS 等含有土壌に対しての固化・安定化処理は、国内で初の取り組みである。

固化・安定化処理は、現時点で PFOS 等含有土壌の処理技術として実績のある熱処理と比較して、次節で述べるようにコストおよび環境負荷を大幅に低減できる技術である。また、通常の建設機械で施工可能であることから速やかな対策が可能な技術であり、掘削土の処理と原位置処理の両方に適用できることから汎用性も高い技術である。

これらの特長から、固化・安定化処理は、将来性が非常に高い技術と考えられる。

3.3 対策技術の経済効率性

処理対象土量 30,000m³ の場合を想定し、既存処理技術である熱処理（場外処理施設への搬出）のコストと固化・安定化処理による処理コストを比較した。

検討にあたって想定した条件を表 3-1 に、検討結果を表 3-2 に示す。

表 3-1 対策技術のコスト検討条件

項目	提案技術 (固化・安定化処理) バックホウ利用	提案技術 (固化・安定化処理) 自走式攪拌機利用	従来技術 (熱処理) 産廃施設へ搬出
対策土量 (m ³)	30,000 m ³	30,000 m ³	30,000 m ³
使用重機および設備	バックホウ 0.7m ³ 級 9 台 (掘削・場内運搬・攪拌)	バックホウ 0.7m ³ 級 3 台 (掘削・場内運搬) 自走式攪拌機 3 台 (攪拌)	バックホウ 0.7m ³ 級 4 台 (掘削・場内運搬・積込)
使用資材	高炉セメント B 種 14% 酸化マグネシウム 3% 粉末活性炭 0.5% (いずれも土重量比)	同左	なし
日あたり処理量	300 m ³ /day	300 m ³ /day	100 m ³ /day
処理後の土壌	同じ敷地内で再利用	同左	焼却灰は埋立処分

※土壌や資材等の運搬コストについては立地により異なるため今回の検討では除外した。

表 3-2 対策技術のコスト検討結果

項目	提案技術 (固化・安定化処理) バックホウ利用	提案技術 (固化・安定化処理) 自走式攪拌機利用	従来技術 (熱処理) 場外産廃施設へ搬出
処理量 [m ³]	30,000	30,000	30,000
処理工事費用 [円]	800,000,000	560,000,000	7,125,000,000
材料費	385,000,000	385,000,000	—
労務費	270,000,000	85,000,000	100,000,000
処分費	—	—	6,950,000,000
直接経費	30,000,000	10,000,000	10,000,000
共通仮設費	25,000,000	10,000,000	10,000,000
現場管理費	50,000,000	40,000,000	30,000,000
一般管理費	40,000,000	30,000,000	25,000,000
1m ³ 当たりの処理コスト [円/m ³]	26,666	18,600	237,500
工事期間 [月]	5	5	15

※土壌や資材等の運搬コストについては立地により異なるため今回の検討では除外した。

※提案技術の工事期間は施工能力から設定し、従来技術の工事期間は受入能力から設定した。

- 今回の試算では、固化・安定化処理によって既存技術である熱処理のコストを大幅に低減可能であり、効率的に資材の混合処理が可能な自走式攪拌機を用いることによって、目標とした処理コスト 20,000 円/m³ を満足できることが確認できた。

3.4 対策技術の環境保全

前述の経済効率性の検討と同様、処理対象土量 30,000m³ の場合を想定し、熱処理（場外処理施設への搬出）の二酸化炭素排出量と固化・安定化処理による排出量を比較した結果を表 3-3 に示す。

表 3-3 対策技術による二酸化炭素排出量の削減

区分	項目	提案技術 バックホウ	提案技術 自走式攪拌機	熱処理	
二酸化炭素の 排出量 (kg-CO ₂)	重機稼働の燃料軽油	4,717,440	1,179,360	1,048,320	
	固化・安定化 資材の製造	酸化マグネシウム	469,800	469,800	—
		高炉セメント B 種	5,229,000	5,229,000	—
		活性炭	425,250	425,250	—
	熱処理（焼成処理）	—	—	82,044,701	
	合計	12,124,440	8,586,360	83,093,021	
土量 1m ³ あたり排出量 (kg-CO ₂ /m ³)		361	243	2,770	

※二酸化炭素の排出量の算出には、焼成処理による排出量を除き土壤環境センターの COCARA を用いて算出した。熱処理の排出量については、PFOS 等含有廃棄物の熱処理施設を有するクレハ環境株式会社の環境レポート 2025 年版より廃棄物受入量あたりの CO₂ 排出量を原単位として算出して、処理土量に乗じて算出した。

※土壌や資材等の運搬に伴う CO₂ 排出量については立地により異なるため今回の検討では除外した。

- 今回の試算では、固化・安定化処理によって、既存技術である熱処理（場外施設への搬出）の二酸化炭素排出量を大幅に削減し、効率的に資材の混合処理が可能な自走式攪拌機を用いることによって、目標とした排出量 360kg-CO₂/m³ を満足できることが確認できた。

4. 当該技術の今後の展望

提案技術の固化・安定化処理については、これまで室内試験によって溶出量が数千 ng/L 程度の PFOS 等含有土壌（模擬汚染土）に対して溶出量低減効果を確認できていた。今回の実証試験では、より高濃度の数万～数十万 ng/L の実汚染土壌（PFOA 含有土壌）に対して、実施工を想定した小型のバックホウや攪拌装置によって、溶出量を 99～99.9%低減できることが確認できた。

今後は、実汚染サイトにおいて、自走式攪拌機等による掘削土の処理や、地盤改良機による原位置処理等による対策効果の実証を進めていきたい。また、土質の種類や PFOS 等による汚染状態を考慮した最適な資材の種類と組み合わせ、添加量なども検討することによって技術の汎用性を高めたい。