

実証結果報告書

- 1) 提案者の名称 株式会社環境管理センター
(協力機関：有限会社エコルネサンス・エンテック、
ジオラフター株式会社)
- 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 汚染中心濃度に対応した超低負荷型 PFAS 固定化等技術
- 4) 技術の分類/適用段階 固化・安定化、活性炭、表層土壌の固化・難透水性/実用レベル
- 5) 実証の期間 令和7年8月15日～令和8年2月13日

1. 技術の概要

1.1 原理と特徴

本技術は、PFAS 汚染対策として欧米にて広く採用されているオンサイト固定化（固化・安定化）処理を、表層や地盤を対象とした原位置処理に改良し、更に対応汚染レンジの広域化を図ったものである。

即ち、表層に対し固化・難透水性処理の地盤改良を施すことで、表層からの雨水等の地盤への浸透を抑止し、加えて地盤に対する土壌溶出濃度の抑制を図る。これらを総じて、地下水への汚染溶出量を可能な限り抑制し、更に地下水流による自然減衰（希釈）により、地下水流下流域における対策目標濃度を満たす程の汚染濃度の改善を図り、高濃度汚染が存在する汚染中心への原位置対策におけるアプローチを可能とした、広い適用汚染レンジを特長とした技術である。

本技術は、「Smart CapTM工法」と呼ばれる汚染浄化対策技術から着想したものであり、「Smart CapTM工法」は、グラウト材を地盤注入し、地盤内に柱状の補強体を築造して建築物を支える構造物を作成する従前技術である柱状改良法から派生した汚染対策技術である。

即ち、本技術は、「Smart CapTM工法」のオリジンとなるグラウト材施工による固化と共に、「Smart CapTM工法」の特徴である活性炭等を安定化材として使用した地盤に対する固定化（固化・安定化）を実施して、地盤からの汚染溶出濃度の抑制化を図る技術である。そして、「Smart CapTM工法」によって、汚染地盤に対し柱状改良を密に施した結果生じる、表層の泥濘化に対するトラフィカビリティの確保の為に、日常施工にて実施している表層の固化施工を応用し、現地表土に応じた固化条件の最適化を検討し、表層の固化・難透水性処理を実施することで、表層からの雨水等の地盤への浸透を最大限に抑止する。

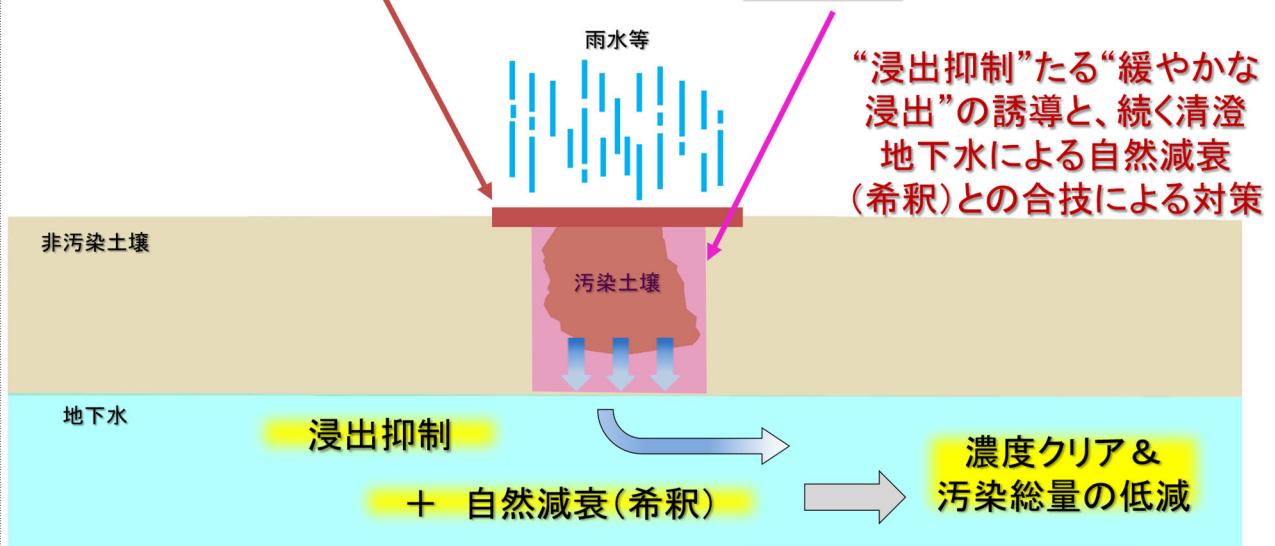
これらの地盤改良と表層改良の組合せにより、地下水流への不飽和帯由来の汚染溶出量を出来得る限り抑制し、以後は、「Smart CapTM工法」の対策理念の一つでもある、活性炭施用後の当該地の汚染総量の低減を、地下水流を介した自然減衰に委ね、更に、活性炭の地中固定分も含めて、出来得る限り環境に低負荷な汚染対策を実施するというコンセプトを引き継いで、本技術の構築に至った。

<地下水へのPFAS浸出抑制+自然減衰(希釈)>

～基準(目標)値クリアにて汚染総量の低減化を図る～

(表層) **浸透抑制**: 原位置低浸透化施工

(地盤) **溶出抑制**: 原位置固定化施工



広域な汚染レンジを有する汚染中心対応技術

1.2 技術の対策目標

技術の対策目標を示す (表 1-1)。

表 1-1 技術の対策目標

項目	対象	目標値
現地土壌に対する固化材・安定化材のラボ試験	PFOS PFOA	試験前後での溶出濃度の減少率で 99%以上 (好ましくは、試験後の土壌溶出濃度が 50ng/L 以下)。
現地土壌に対する固定化 (固化・安定化) による PFAS の溶出濃度変化	PFOS PFOA	実証試験前後での溶出濃度の減少率で 99%以上 (好ましくは、試験後の土壌溶出濃度が 50ng/L 以下)。
固定化処理土壌の固化・難透水化による透水係数変化	PFOS PFOA	試験後の透水係数が 10^{-9} m/s 以下 (または、試験前後の透水係数の比較で、1000 分の 1 以下となる透水係数の低下が認められること)。
原位置での土壌採取方法に関する QC の実践と評価	PFOS PFOA	消耗品からの PFAS 溶出がコンタミネーションの懸念を生じさせない水準であること、並びに、再利用機材等について、段階洗浄により PFAS 濃度が十分に低減される洗浄段数及び繰り返し洗浄回数の上限が明らかになること。

2. 実証試験結果

2.1 実証試験方法

2.1.1 試験概要

本実証事業は、「QC 試験」、「固定・安定化試験」、「環境負荷の評価」の3つで構成し、それぞれ試験、評価を行った（図 2-1-1）。

QC 試験では土壌調査に係る「消耗品溶出試験」、「採取器具洗浄試験」（表 2-1-1）、固定・安定化試験では PFAS 汚染対策技術に係る「試料調製」、「事前配合試験」、「安定化試験」、「透水試験」、「安定性確認試験（シリアルバッチ試験）」、「フラックス評価」（表 2-1-2）、環境負荷の評価では本対策技術の環境負荷に係る評価（表 2-1-3）を実施した。

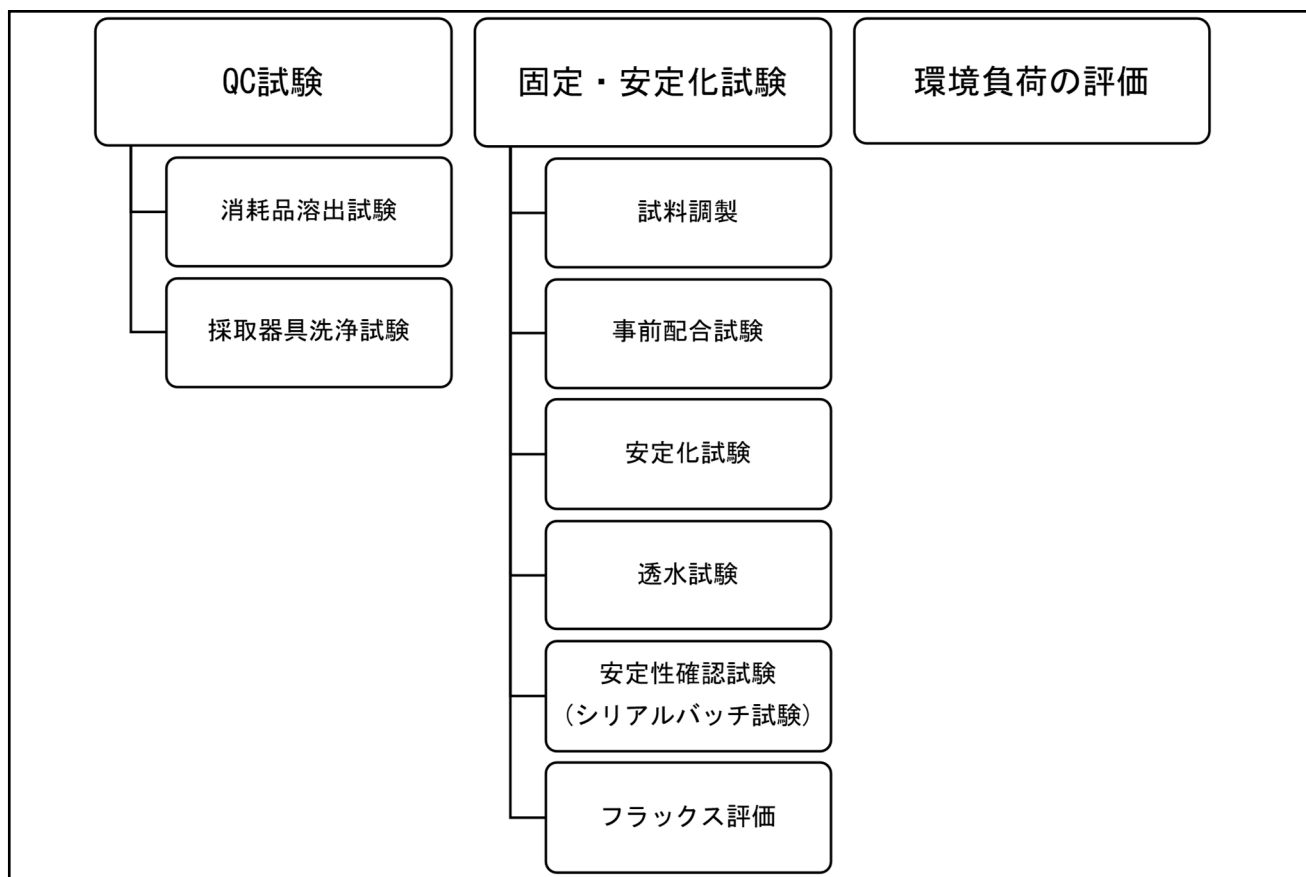


図 2-1-1 試験構成

表 2-1-1 QC 試験

試験名	概要
消耗品溶出試験	PFAS 類は多様な製品に使用されていることから、土壌調査で使用する消耗品に PFAS 類が含有されている可能性がある。 本試験では、土壌試料と直接接触する頻度が高い消耗品を選定し、消耗品からの PFAS 類の溶出の有無を確認することを目的とした。
採取器具洗浄試験	繰り返し使用する採取器具類は、調査地点ごとに洗浄が必要であるが、複数地点調査を行うことで、洗浄に用いるバケツ内水に PFAS 汚染が蓄積する可能性がある。 本試験では、採取器具の洗浄方法の妥当性を確認するとともに、繰り返し利用するバケツ内水の交換目安に関する知見を得ることを目的とした。

表 2-1-2 固定・安定化試験

試験名	概要
試料調製	供試試料の PFOA 汚染濃度は、採取地点及び深度ごとにばらつきが認められた。そのため、本試験では、ふるい分け及び供試試料の混合を行い、PFOA 汚染濃度の平準化を図ることとした。
事前配合試験	複数種類の活性炭及び添加材について、添加量を複数設定し、PFOA 溶出抑制効果を評価するため、ラボスケールで事前配合試験を実施した。 本試験により、最も溶出抑制効果が高い配合条件を選定した。
安定化試験	事前配合試験において最も良好な結果が得られた配合条件について、実施工に近い混合方法としてモルタルミキサーを用い、供試試料と活性炭等を混合した。 本試験では、実施工を想定した条件下における安定化効果の評価を行った。
透水試験	実施工においては、表層からの雨水等の浸透を抑制する目的で、表層に固化材を添加し、表層固化を行うことを想定している。 本試験では、複数条件のセメント添加率を設定し、透水係数及び一軸圧縮強さを測定することで表層固化層の物理的特性を確認した。
安定性確認試験 (シリアルバッチ 試験)	本技術は、PFAS 汚染土壌に活性炭等を混合することにより、PFAS の溶出量を抑制し、長期的な溶出挙動を制御することを目的とした技術である。 本試験では、活性炭等を混合して安定化させた土壌を対象に、シリアルバッチ試験を実施し、PFOA の再溶出挙動を評価するとともに、活性炭等による長期的な安定性を確認した。
フラックス評価	本技術は、PFOA を直接除去するのではなく、活性炭混合による溶出抑制と表層固化による浸透抑制を組み合わせることで、地下水への移行フラックスを低減することを目的とした対策である。 地下水リスクの評価においては溶出濃度のみでは不十分であることから、本検討では地下水面に流入する PFOA のフラックスを指標として評価した。

表 2-1-3 環境負荷の評価

試験名	概要
環境負荷の評価	本実証技術である「安定化」と、比較対象技術である「不溶化埋戻し」及び「掘削除去」について、工事に伴う温室効果ガス排出量を算定し、相互に比較することで、本技術の環境負荷を評価した。

2.1.2 QC 試験

(1) 消耗品溶出試験

土壌調査時において、採取土壌と直接接触する頻度が高い消耗品を選定し、PFOS、PFOA 溶出試験を行った。

試験は下記フローに基づき実施した。更に、本試験で使用する水道水についても分析を行った。

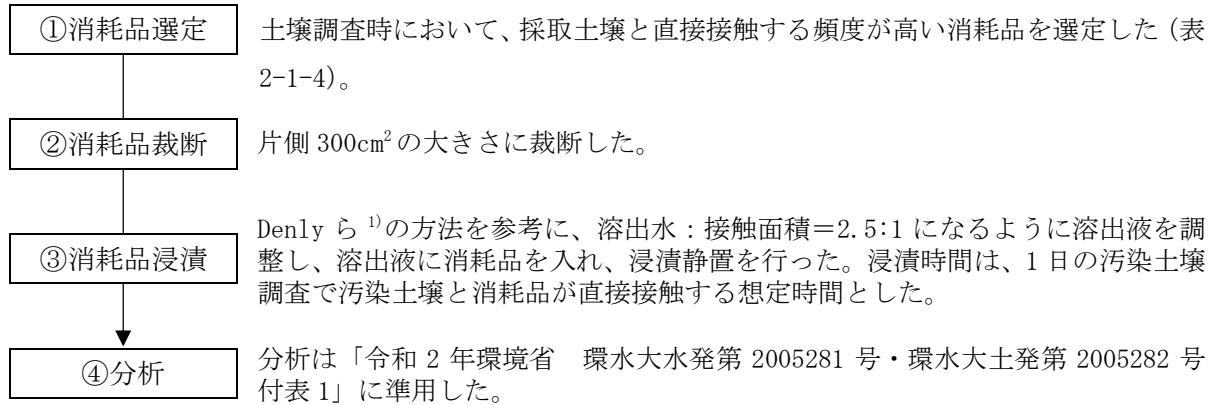


表 2-1-4 選定消耗品一覧

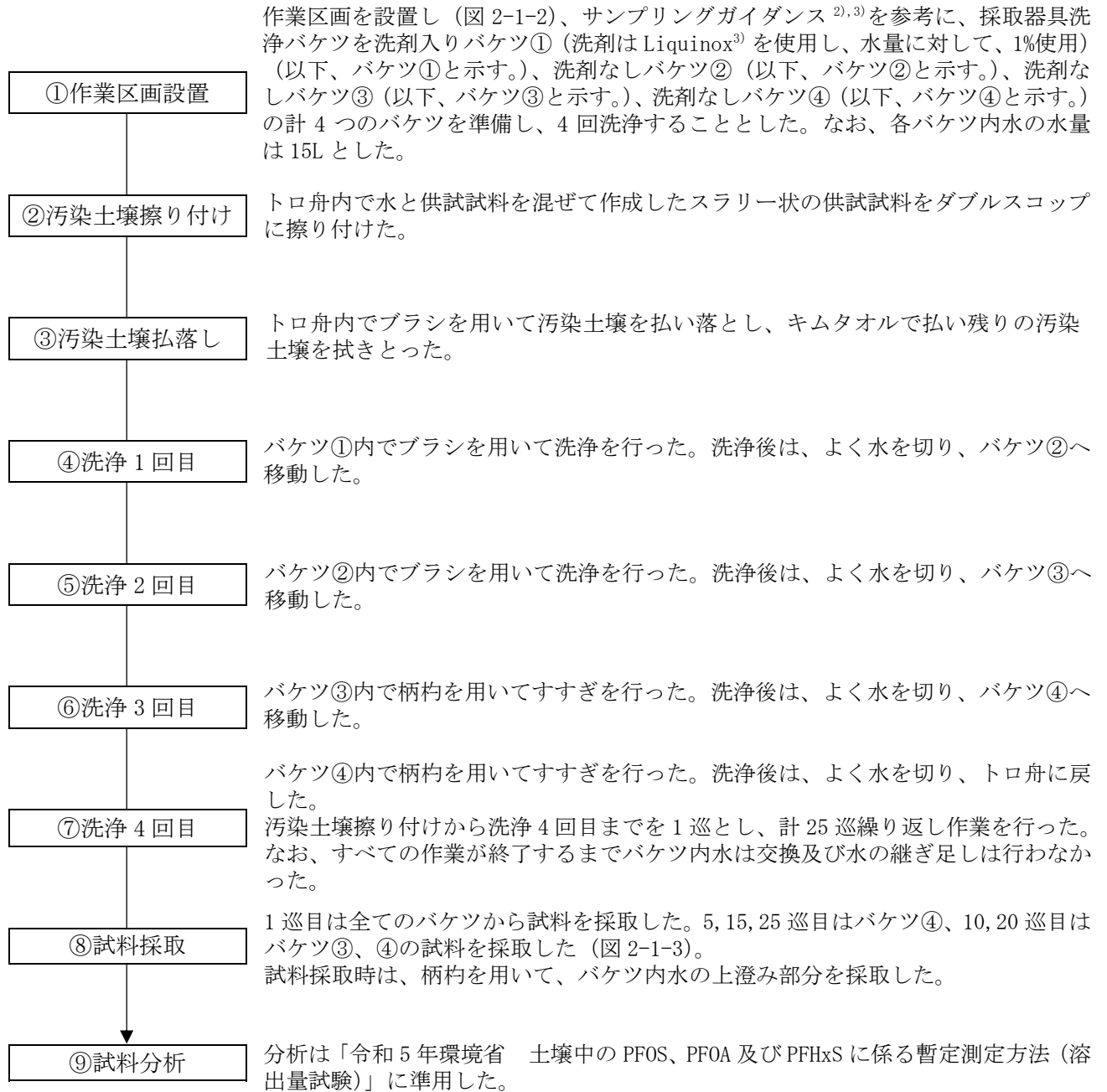
消耗品	浸漬時間※	用途
ニトリルグローブ	0.5	採取土壌を密閉袋に入れる際に着用
コアパックスリーブ	1	ボーリング土壌採取の際の土壌試料回収袋
採取用密閉袋	72	採取～輸送～ラボに至るまでの土壌保管袋
コア箱シート	8	ボーリング採取土壌収蔵用コア箱内シート
耐油ビニグローブ	8	作業中に保護具として着用
キムタオル	0.5	土壌採取器の洗浄/リンス後の水分ふき取り
ブルーシート（ロール）	1	洗浄/リンス後の土壌採取器の仮置き場シート
バケツ（ペール缶）	8	洗浄用の水を貯蔵
柄杓	8	現場での器具洗浄
溶出容器	72	消耗品溶出に用いる容器
水道水	—	洗浄に用いる

※浸漬時間は 1 日の汚染土壌調査で汚染土壌と直接接触する想定時間として、浸漬静置を行った。

(2) 採取器具洗浄試験

土壌調査において、繰り返し利用する採取器具の洗浄方法、及びバケツ（ペール缶を使用）内水の交換目安に関する知見を得るために実施した。

試験は下記フローに基づき実施した。本試験では供試試料（PFOS 溶出量：<5ng/L、PFOA 溶出量：2, 100, 000ng/L）を用いて試験を行った。



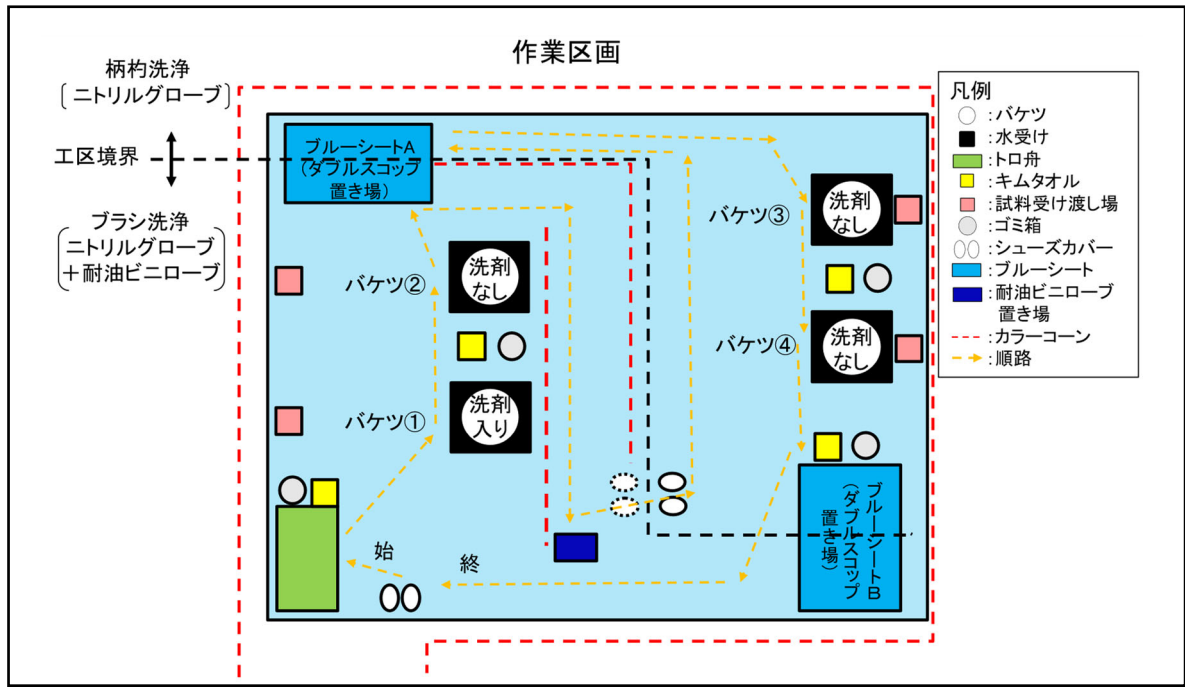


図 2-1-2 作業区画

○ : 分析対象

	バケツ① (洗剤入り)	バケツ② (洗剤なし)	バケツ③ (洗剤なし)	バケツ④ (洗剤なし)
1 巡目				
2 巡目				
⋮				
5 巡目				
⋮				
10 巡目				
⋮				
15 巡目				
⋮				
20 巡目				
⋮				
24 巡目				
25 巡目				

図 2-1-3 分析対象一覧

2.1.3 固定・安定化等試験

(1) 試料調製

「事前配合試験」、「安定化試験」、「透水試験」、「安定性確認試験（シリアルバッチ試験）」で供試試料を使用するため、供試試料の PFOA 汚染濃度平準化を実施した。

試験は下記フローに基づき実施した。

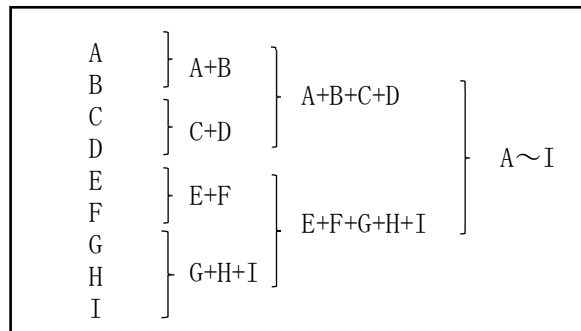
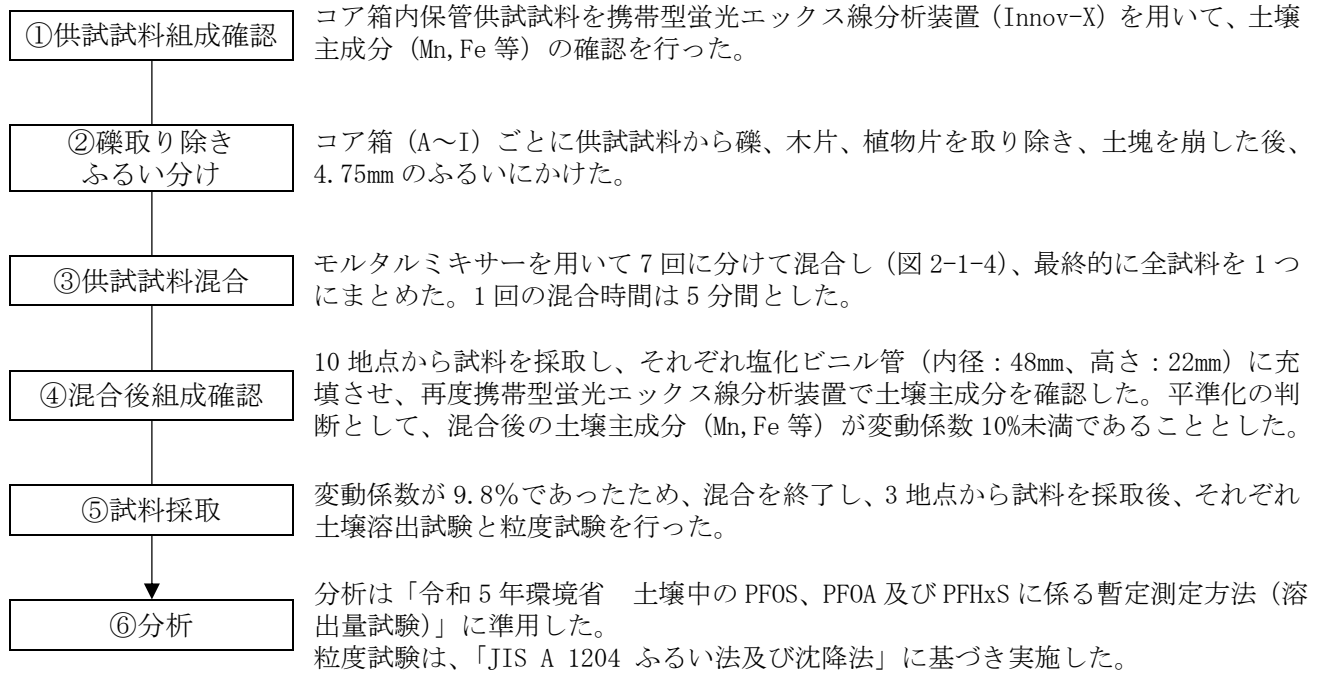


図 2-1-4 混合組み合わせ

(2) 事前配合試験

平準化供試試料に対して、最も好条件な活性炭、添加材の配合量の知見を得るためにラボにて事前配合試験を実施した。

試験は下記フローに基づき実施した。

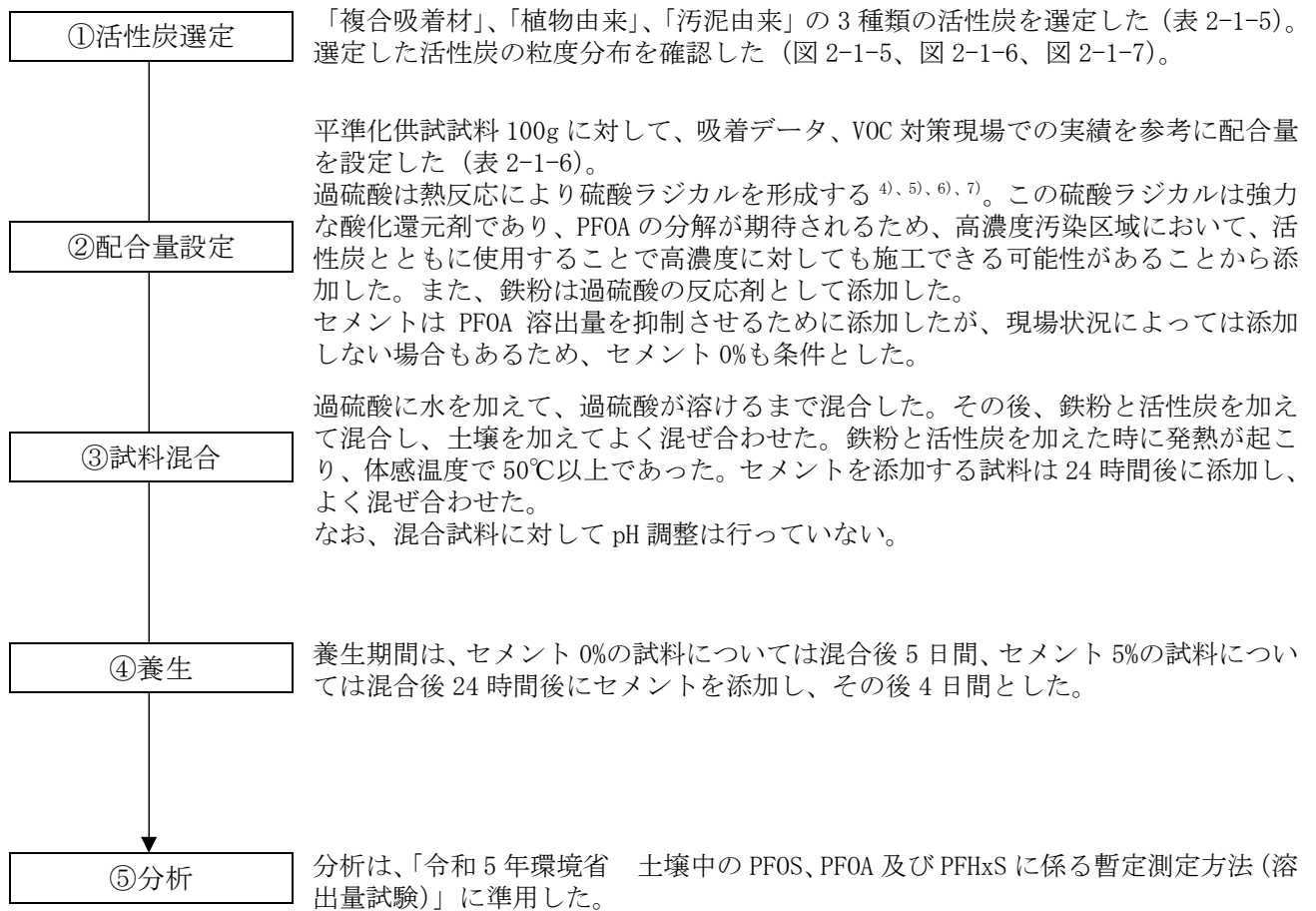


表 2-1-5 活性炭概要

活性炭名	複合吸着材	植物由来	汚泥由来
原料	炭素、粘土等	ヤシ殻	汚泥等
平均粒径(mm)	0.51	0.08	1.16
比表面積(m ² /g)	1090	990	110
費用*	710~870 円/kg	300 円程度/kg	100 円程度/kg
選定理由	海外における PFAS 汚染を対象とした施工実績がある	VOC に対しての「Smart Cap™工法」による施工実績がある	安価であり、炭素貯留効果が高い
入手難易度	入手しにくい	入手しやすい	入手しやすい

※購入先によって金額は変動する。

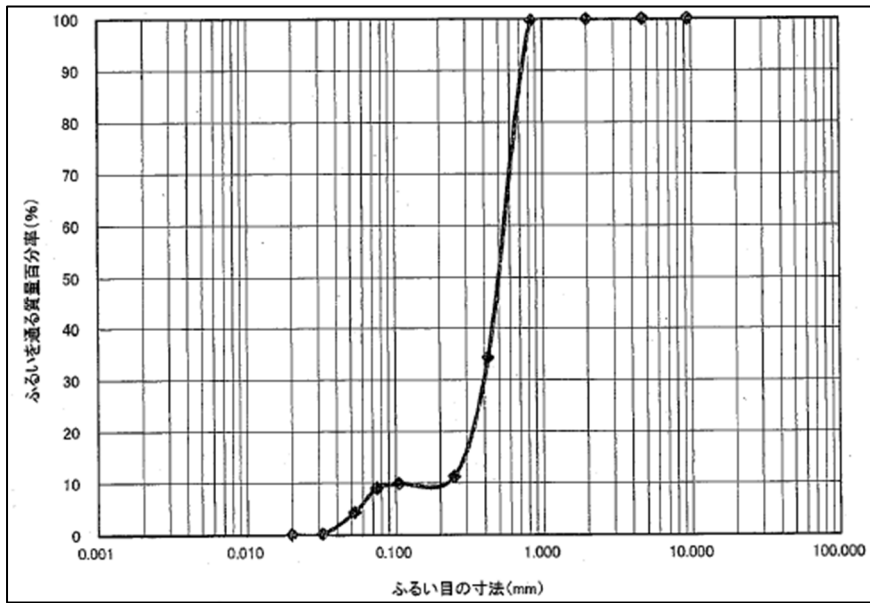


図 2-1-5 複合吸着材粒度分布

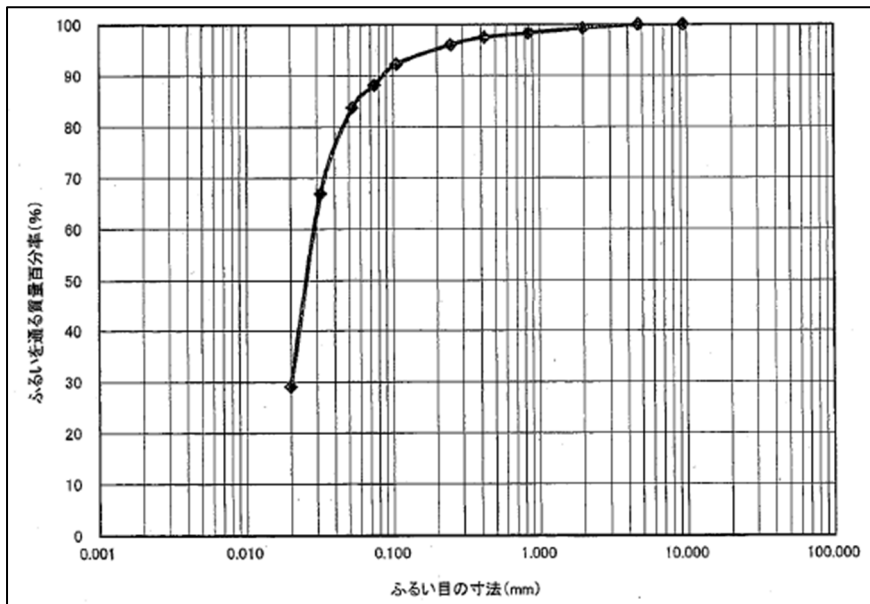


図 2-1-6 植物由来粒度分布

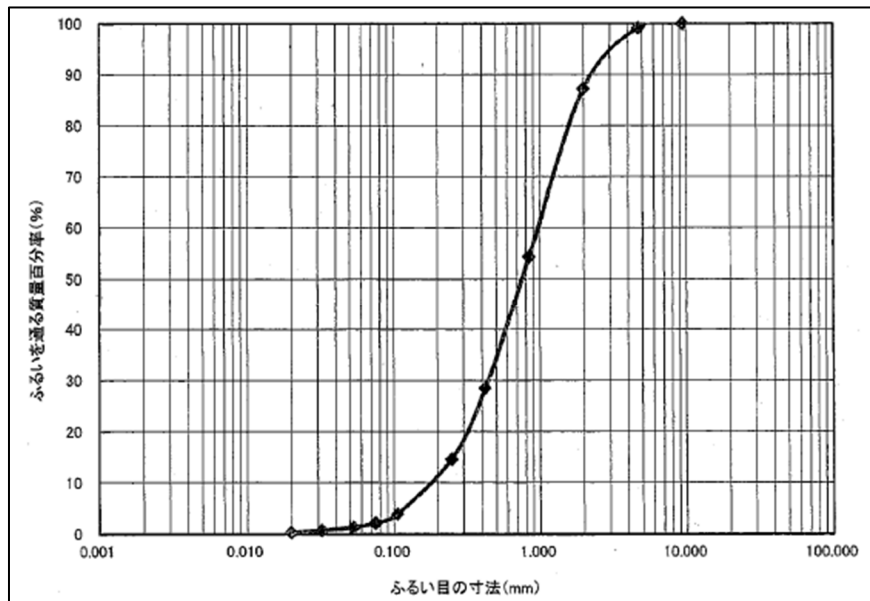


図 2-1-7 汚泥由来粒度分布

表 2-1-6 配合量

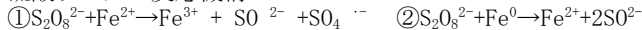
活性炭名	複合吸着材				植物由来				汚泥由来			
	3%	6%	3%	6%	3%	6%	3%	6%	3%	6%	3%	6%
活性炭※1	3%	6%	3%	6%	3%	6%	3%	6%	3%	6%	3%	6%
水	8.6mL※5											
ZVI (鉄粉)※2	2.0g (2%)※6											
過硫酸※3	1.3g※7											
セメント※4	5.0g※8 (5wt/%)	0%	5.0g※8 (5wt/%)	0%	5.0g※8 (5wt/%)	0%	5.0g※8 (5wt/%)	0%	5.0g※8 (5wt/%)	0%	5.0g※8 (5wt/%)	0%

※1：吸着データ⁸⁾を参考にしつつ、VOC対策現場での活性炭添加量も加味して、3%に設定した。また、溶出が減少しなかった場合、さらに添加する場合もあるため、6%も設定した。

※2：鉄粉は硫酸ラジカル反応の反応剤として添加した。

※3：過硫酸は鉄粉と硫酸ラジカル反応を起こし、PFOAの分解を行うため添加した^{4), 5), 6), 7)}。

硫酸ラジカル反応機構



※4：六価クロム溶出量低減型であり、土と混合すると水和反応により、土の固化を速めるものを使用した。

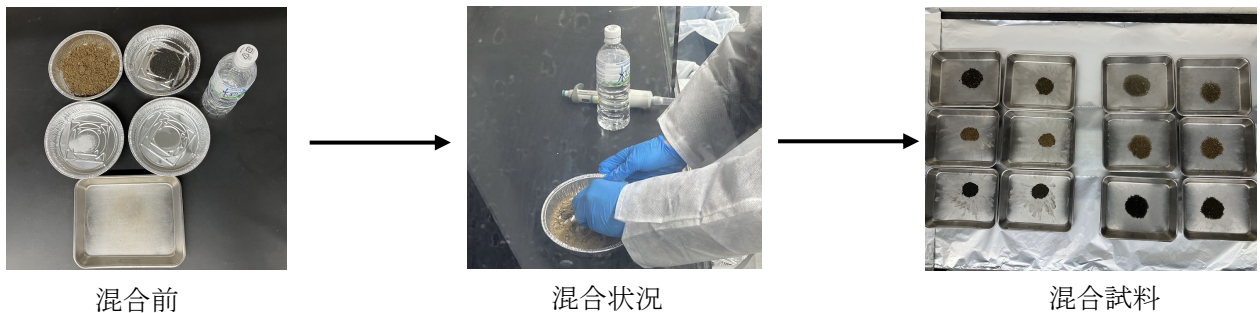
※5：鉄粉 140kg に対して、水 600L 使用

※6：土重量に対して、2%添加

※7：ZVI (鉄粉)：過硫酸=3:2 の比率で添加

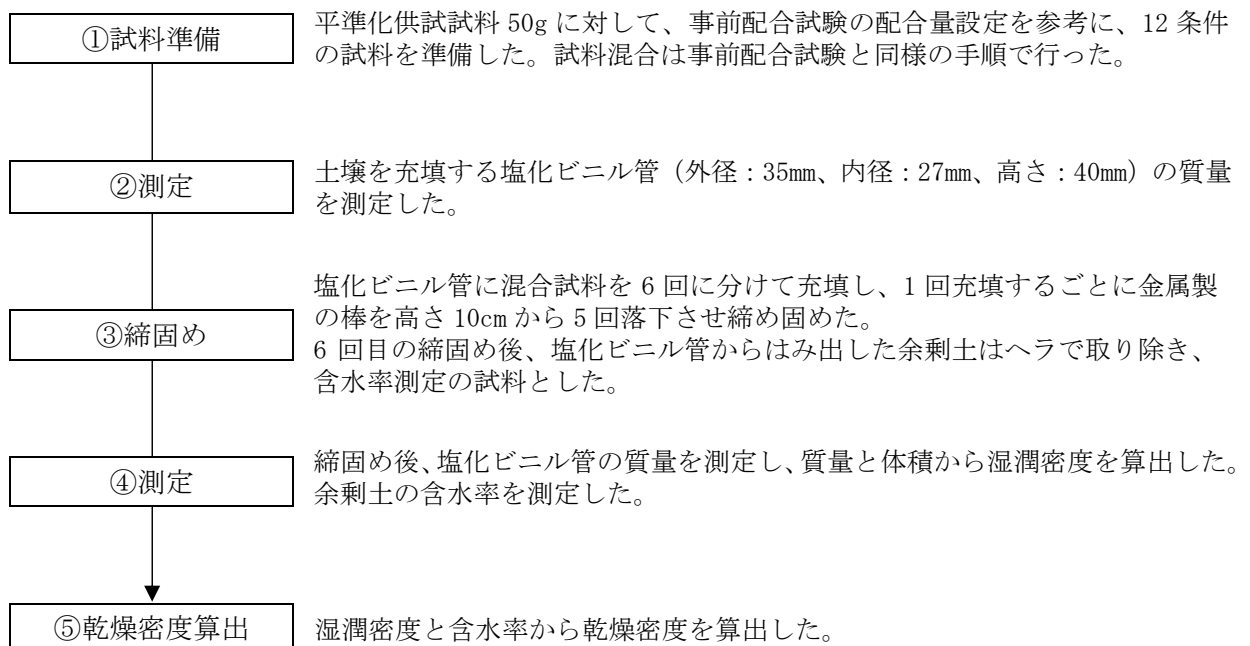
※8：m³あたり 80kg 添加 (土壌比重 1.8t/m³として換算)

VOC対策現場での実績を参考としている。



基礎的な物理特性を知るために事前配合試験と同様の試料を作成し、湿潤密度・乾燥密度試験を実施した。

試験は下記フローに基づき実施した。



(3) 安定化試験

当初セメントと活性炭を使用する固化・安定化試験を計画していたが、事前配合試験の結果により安定化のみとした。

実施工で使用する柱状改良機の混合方法と近い混合方法のモルタルミキサーを用いて、事前配合試験で最も好条件であった植物由来 6%を平準化供試試料と混合させ、混合の評価を行った。

試験は下記フローに基づき実施した。

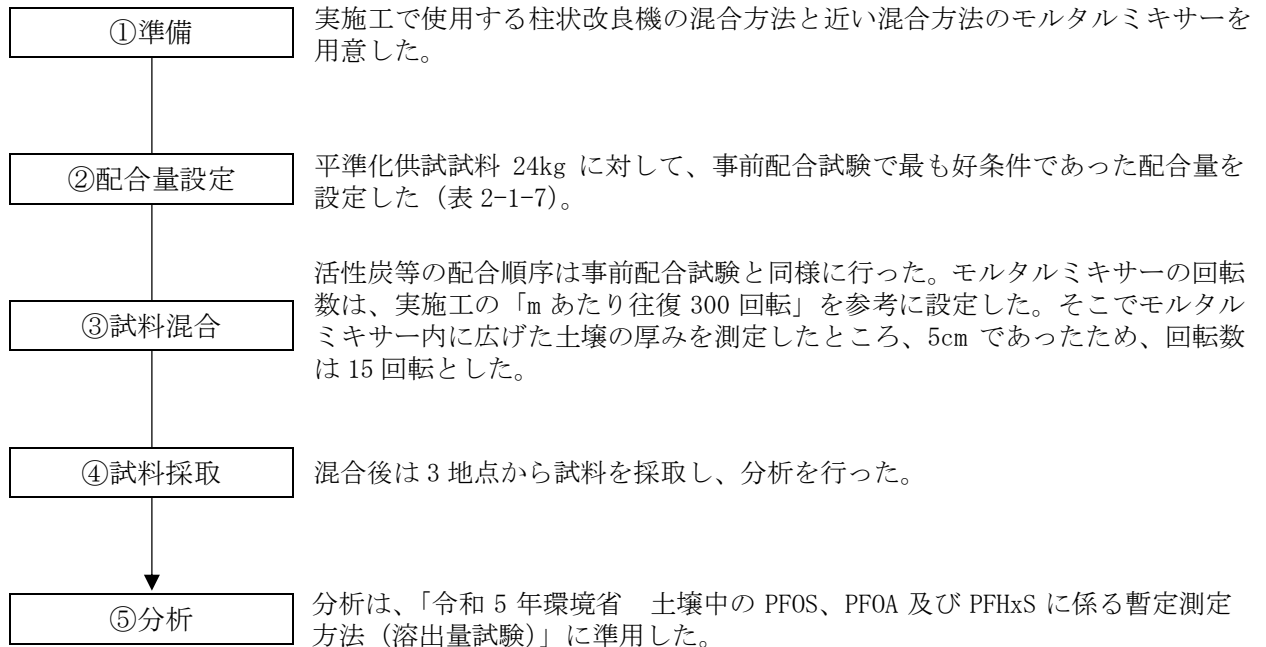


表 2-1-7 配合量

活性炭名	植物由来
活性炭	1440.0g (6%) ※1
水	2,057mL ※2
ZVI (鉄粉)	480.0g (2%) ※3
過硫酸	320.0g ※4

※1：事前配合試験で最も好条件であった配合率

※2：鉄粉 140kg に対して、水 600L 使用

※3：土重量に対して、2%添加

※4：ZVI (鉄粉)：過硫酸=3:2 の比率で添加

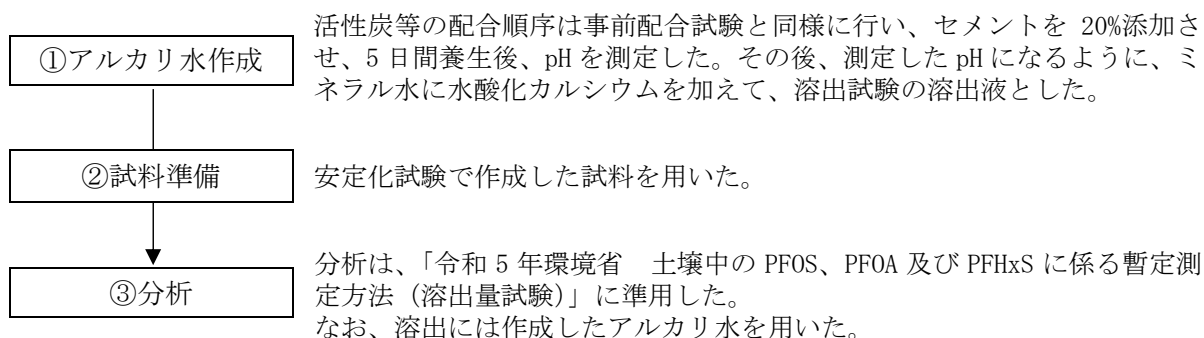
VOC 対策現場での実績を参考としている



モルタルミキサー混合状況

本技術は、セメントを用いて表層固化を行うため、表層からアルカリ水が溶出し、地盤に浸透する可能性がある。本試験では、安定化試験で作成した土壌試料をアルカリ水で溶出させ、アルカリ水による活性炭の吸着保持に対する影響の有無について知見を得ることとした。

試験は下記フローに基づき実施した。



(4) 透水試験

表層からの雨水等の浸透抑制を確認するために、複数条件でセメントを添加し、透水試験及び一軸圧縮試験を実施した。

試験は下記フローに基づき実施した。

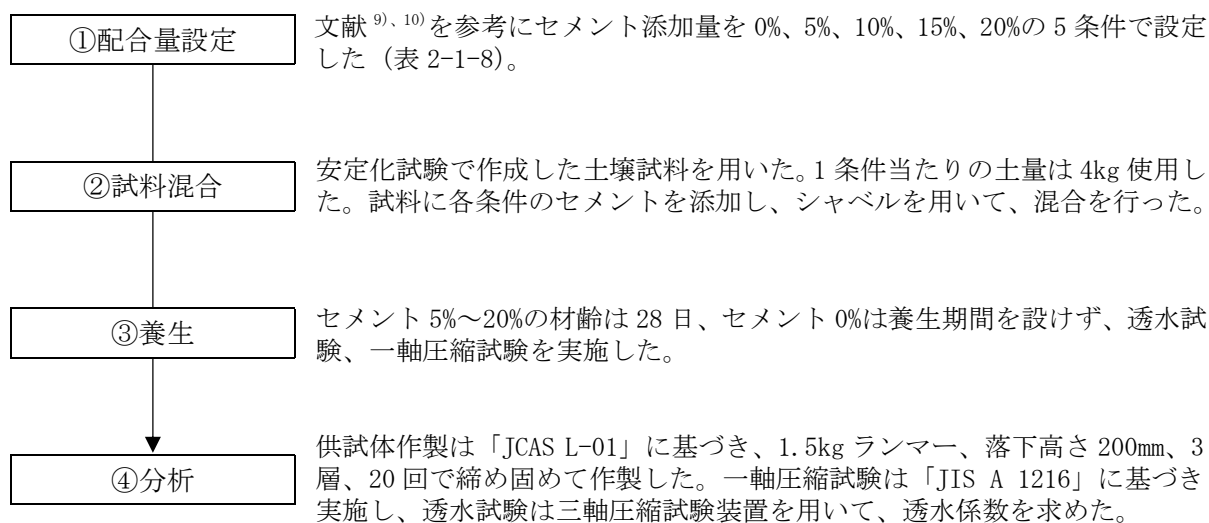


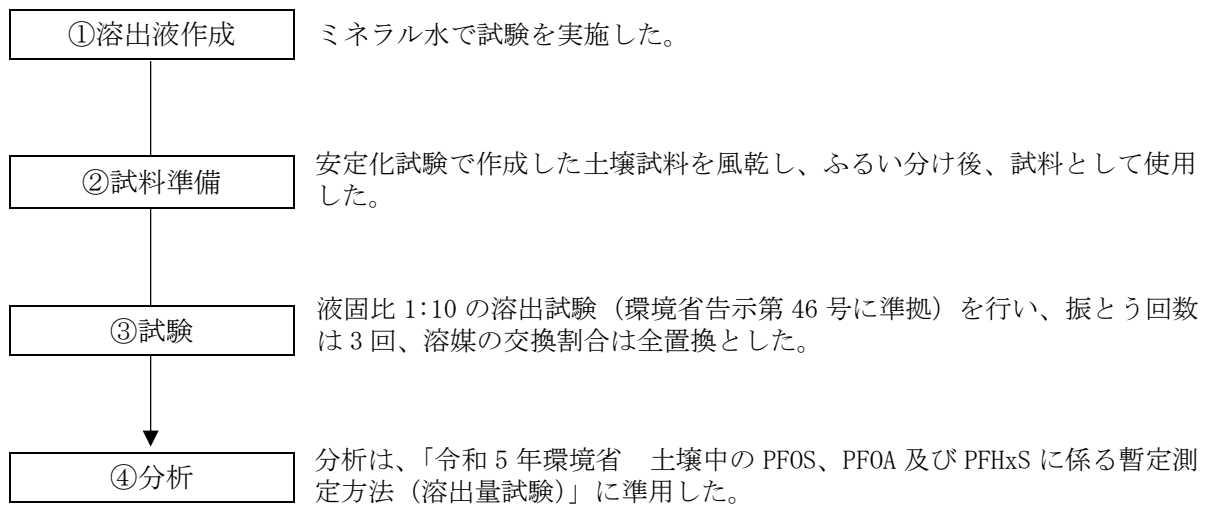
表2-1-8 セメント配合量

セメント	0g (0wt/%)	200g (5wt/%)	400g (10wt/%)	600g (15wt/%)	800g (20wt/%)
------	------------	--------------	---------------	---------------	---------------

(5) 安定性確認試験（シリアルバッチ試験）

安定化試料からの PFAS 再溶出の有無を確認し、活性炭の吸着保持が長期的に維持されるかを評価するためにシリアルバッチ試験を実施した。

試験は下記フローに基づき実施した。



2.1.4 環境負荷の評価

本技術の環境負荷についての知見を得るために、本技術と他の類似技術又は同種の技術（不溶化埋戻し施工、掘削除去施工）の温室効果ガス排出量を算定した。

機能単位は汚染土壌 100m³ (10m×10m×1m)とした。プロセスフローとして各対策技術の作業内容をフロー化し（図 2-1-8, 2-1-9, 2-1-10）、これをシステム境界とした。算定に用いる活動量データとして、カタログや公表データを参考¹¹⁾に、材料の使用量や使用する重機の燃料使用量、車両の走行距離等を設定した。温室効果ガス排出原単位は公表データや参考事例を引用した。

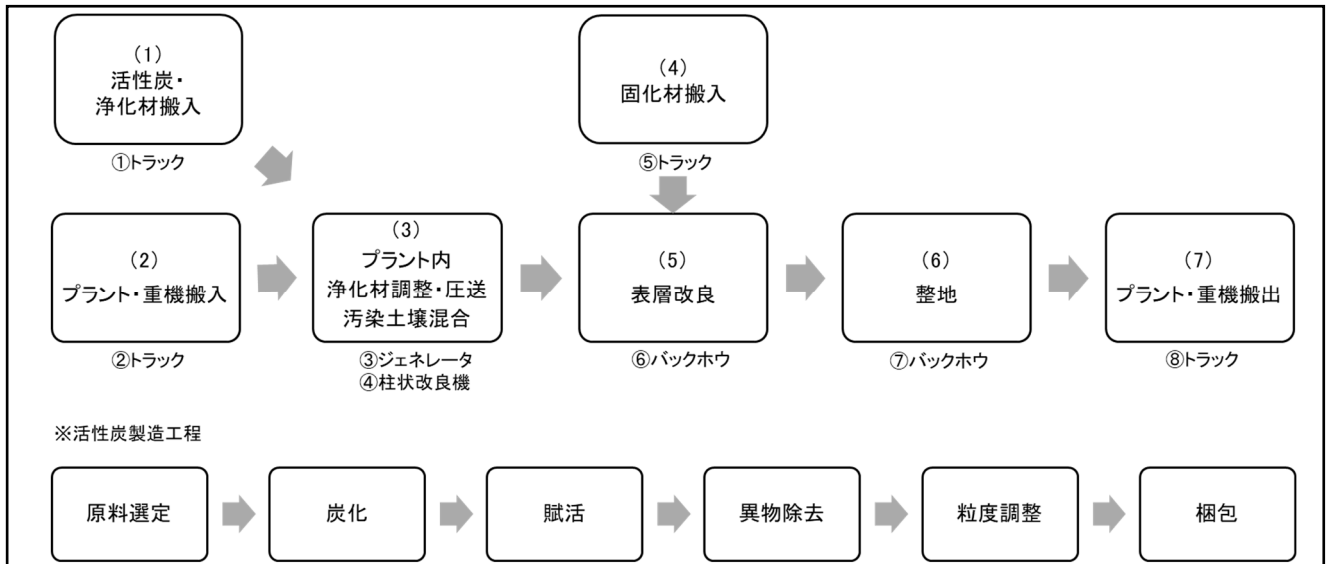


図 2-1-8 安定化施工のプロセスフロー、システム境界

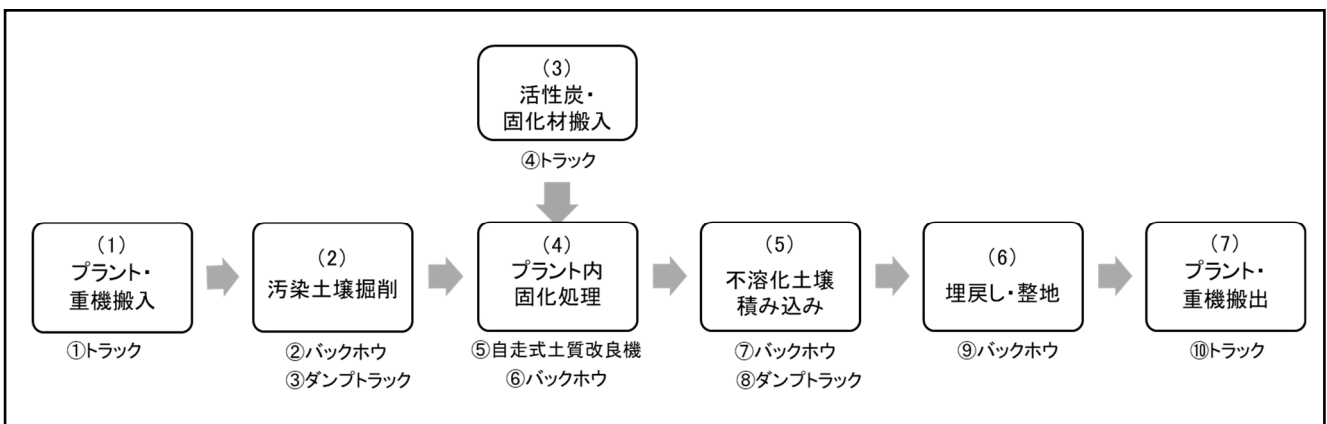


図 2-1-9 不溶化埋戻し施工のプロセスフロー、システム境界

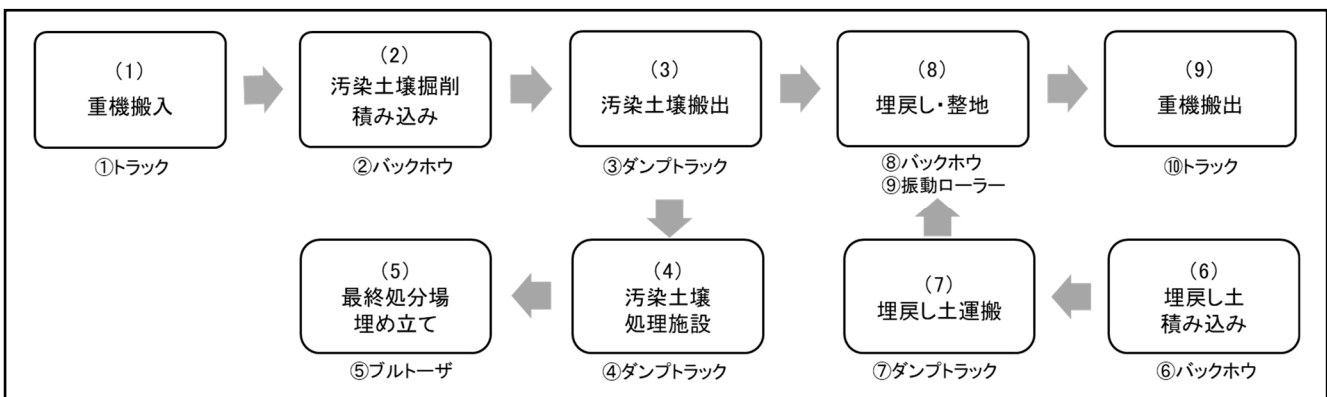


図 2-1-10 掘削除去施工のプロセスフロー、システム境界

2.2 実証試験結果

2.2.1 QC 試験

(1) 消耗品溶出試験

選定した消耗品及び本実証試験で使用する水道水からの PFOS、PFOA 溶出量は全て定量下限値未満であった（表 2-2-1）。

表 2-2-1 消耗品溶出試験結果（溶出量試験）（単位：ng/L）

	PFOS	PFOA
ニトリルグローブ	<0.1	<0.2
コアパックスリーブ	<0.1	<0.2
採取用密閉袋	<0.1	<0.2
コア箱シート	<0.1	<0.2
耐油ビニグローブ	<0.1	<0.2
キムタオル	<0.1	<0.2
ブルーシート（ロール）	<0.1	<0.2
バケツ（ペール缶）	<0.1	<0.2
柄杓	<0.1	<0.2
溶出容器	<0.1	<0.2
水道水	<0.1	<0.2

(2) 採取器具洗浄試験

本試験で使用した供試試料(PFOA 溶出量:2, 100, 000ng/L)に対して、1巡目のバケツ①では790ng/L、バケツ②では300ng/L、バケツ③、④では定量下限値未満であった。1巡目バケツ①でPFOA 溶出量が高かったのは、試験に使用した供試試料のPFOA 溶出量が高かったためと考えられる。また、バケツ④は5巡目までは定量下限値未満であったが、10巡目のバケツ④では定量下限値を超えていたため、5巡目以降でバケツ内水の交換が必要である（表 2-2-2）。

表 2-2-2 採取器具洗浄バケツ内水試験結果（溶出量試験）（単位：ng/L）

検体名		バケツ① (洗剤入り)	バケツ② (洗剤なし)	バケツ③ (洗剤なし)	バケツ④ (洗剤なし)
1 巡目	PFOS	<5	<5	<5	<5
	PFOA	790	300	<5	<5
5 巡目	PFOS	—	—	—	<5
	PFOA	—	—	—	<5
10 巡目	PFOS	—	—	<5	<5
	PFOA	—	—	43	11
15 巡目	PFOS	—	—	—	<5
	PFOA	—	—	—	14
20 巡目	PFOS	—	—	<5	<5
	PFOA	—	—	140	46
25 巡目	PFOS	—	—	—	<5
	PFOA	—	—	—	52

1. 供試試料汚染濃度…PFOS 溶出量：<5ng/L、PFOA 溶出量：2, 100, 000ng/L

2.2.2 固定・安定化試験

(1) 試料調整（供試試料の分析結果）

平準化前供試試料の PFOA 溶出量が 6.9~3,200,000ng/L であったのに対し、平準化後供試試料の PFOA 溶出量は 2,500,000~3,000,000ng/L となった（表 2-2-3）。3 試料の変動係数が 10%未満であったため平準化されたと判断し、「事前配合試験」、「安定化試験」、「透水試験」、「安定性確認試験（シリアルバッチ試験）」の試料として使用することとした。なお、試料①~③は供試試料平準化後に代表 3 地点から採取した試料を示す。

また、粒度試験の結果、ほぼ全ての平準化供試試料が、4.75mm のふるいを通り、粘土分が最も多く含まれていた（図 2-2-1）。

表 2-2-3 供試試料平準化試験結果（溶出量試験）

検体名	PFOS (ng/L)	PFOA (ng/L)	変動係数 (%)	pH
試料①	<5	2,500,000	9.8%	9.2
試料②	<5	2,600,000		9.5
試料③	<5	3,000,000		9.5

1. 平準化前供試試料 PFOA 溶出量濃度：6.9~3,200,000ng/L

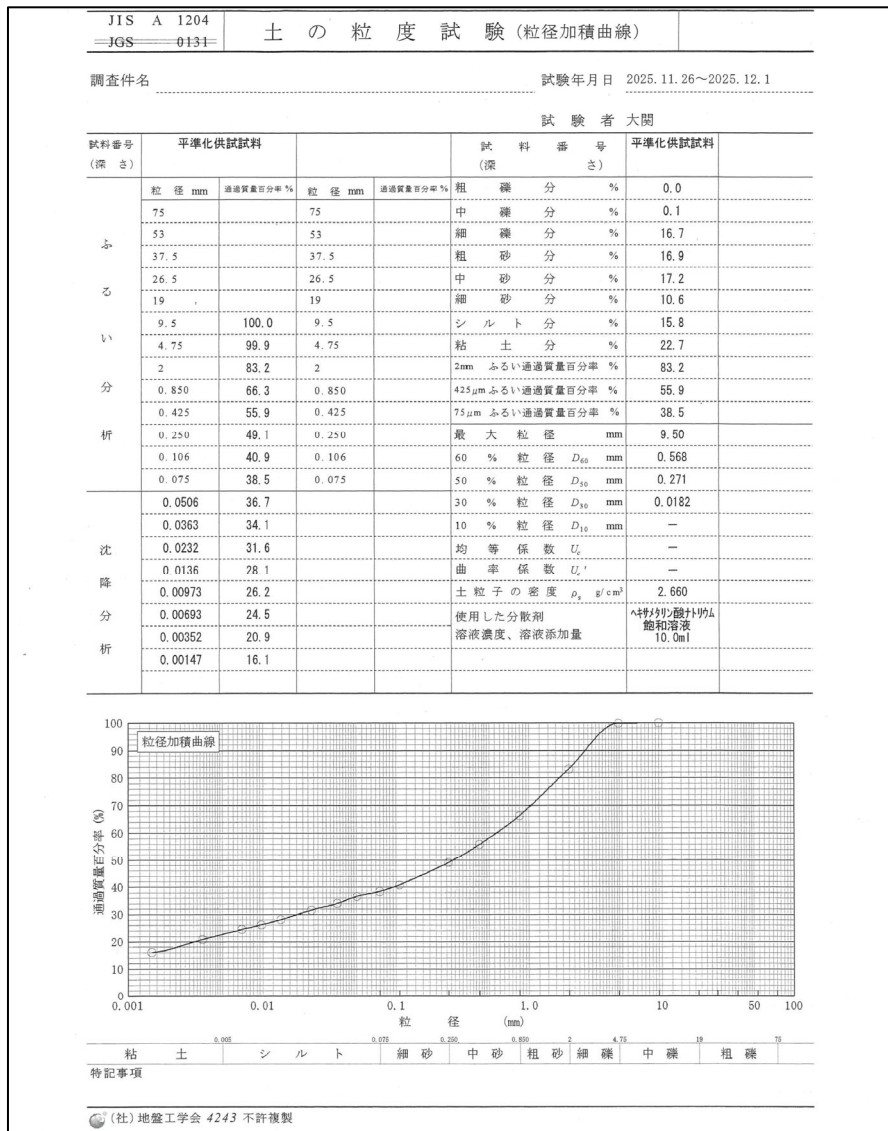


図 2-2-1 粒度試験結果

参考に供試試料の平準化前、平準化後の土壌組成を示す（表 2-2-4, 表 2-2-5）。

試料①～⑦はコア箱内保管状態の平準化前供試試料に対して代表 7 地点から土壌組成を測定したそれぞれの結果を示す。試料 1～10 は平準化後供試試料に対して、10 地点から試料を採取し、それぞれの土壌組成を測定した結果を示す。

表 2-2-4 平準化前供試試料土壌組成

(単位：ppm)

元素	試料①	試料②	試料③	試料④	試料⑤	試料⑥	試料⑦	変動係数
Mn	932	682	772	700	655	436	1,055	13%
Fe	33,759	38,181	16,770	32,999	29,898	22,154	34,839	24%
Zn	53	79	47	72	72	52	71	19%
Rb	51	88	78	77	61	62	86	19%
Sr	201	87	58	72	202	46	119	52%
Zr	121	176	104	147	99	170	113	22%

表 2-2-5 平準化後供試試料土壌組成

(単位：ppm)

元素	試料1	試料2	試料3	試料4	試料5	試料6	試料7	試料8	試料9	試料10	変動係数
Mn	671	575	603	579	547	600	683	573	541	552	8%
Fe	24,124	26,611	25,825	24,650	23,855	24,996	26,098	24,803	25,293	24,735	3%
Zn	65	78	67	75	69	67	68	64	63	76	7%
Rb	87	97	82	81	80	81	84	81	87	84	6%
Sr	79	79	90	85	90	101	92	87	89	97	7%
Zr	151	140	143	164	127	131	142	138	141	132	7%

(2) 事前配合試験

活性炭のブランク試験では、PFOS については植物由来の活性炭で検出され、PFOA は全ての活性炭で検出された（表 2-2-6）。

事前配合試験では、植物由来 6%・セメント 0%の条件において、PFOA 溶出量を最も低く抑制された（表 2-2-7）。この結果から、複合吸着材と植物由来の比表面積に大きな差が認められないことから、粒径の違いが PFOA 吸着挙動に影響を及ぼしている可能性が示唆された¹²⁾。また、全ての試験条件において、セメント 5%添加した試料には、PFOA 溶出量が増加する傾向が確認された。これはセメント添加により試料の pH が上昇し、アルカリ性側に移行したことが影響している可能性がある。活性炭表面は酸性側で正に帯電し、アルカリ性側で負に帯電する特性を有することが報告されている^{13)、14)}。そのため、セメントを添加した条件では、負に帯電した活性炭表面と陰イオン性を示す PFOA との間で静電的反発が生じ、活性炭への PFOA 吸着率が低下した可能性が考えられる。

単体混合試験では、鉄粉及び過硫酸を添加せず、活性炭のみ、及びセメントのみを添加した条件で混合試験を実施した。活性炭のみを添加した試験結果については、鉄粉及び過硫酸を添加した条件と概ね同様の傾向を示し、有意な差が認められなかった（表 2-2-8）。一方、セメントのみを添加した条件で PFOA 溶出量が増加した要因としては、脱プロトン化が進行し、PFOA を吸着する物質が減少したことにより、PFOA 溶出量が増加した可能性が考えられる¹⁵⁾（表 2-2-8）。

参考に各試験条件における湿潤密度・乾燥密度を示す（表 2-2-9）。

表 2-2-6 活性炭ブランク試験結果（溶出量試験）

活性炭名	複合吸着材	植物由来	汚泥由来
PFOS (ng/L)	<0.1	0.2	<0.1
PFOA (ng/L)	0.6	0.7	0.6
pH	7.7	9.6	7.6

表 2-2-7 事前配合試験結果（溶出量試験）

活性炭名	活性炭添加率	複合吸着材 (平均粒径：0.51mm 比表面積：1090m ² /g)		植物由来 (平均粒径：0.08mm 比表面積：990m ² /g)		汚泥由来 (平均粒径：1.16mm 比表面積：110m ² /g)	
		3%	6%	3%	6%	3%	6%
セメント 0%	PFOS (ng/L)	<5	<5	<5	<5	<5	<5
	PFOA (ng/L)	910	250	3,200	160	340,000	200,000
	pH	7.4	7.2	7.2	7.2	7.4	7.4
セメント 5%	PFOS (ng/L)	<5	<5	<5	<5	<5	<5
	PFOA (ng/L)	11,000	1,900	33,000	1,400	790,000	660,000
	pH	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6

1. 供試試料汚染濃度…PFOS 溶出量：<5ng/L、PFOA 溶出量：2,500,000～3,000,000ng/L

表 2-2-8 単体混合試験結果（溶出量試験）

	植物由来 6%			セメント 5%
	試料①	試料②	試料③	
PFOS (ng/L)	<5	<5	<5	<5
PFOA (ng/L)	86	150	130	3,300,000
pH	9.1	9.1	9.1	11.0

1. 供試試料汚染濃度…PFOS 溶出量：<5ng/L、PFOA 溶出量：2,500,000～3,000,000ng/L

2. 試料①～③は同一配合条件に試料である。

表 2-2-9 湿潤密度・乾燥密度試験結果

(単位：g/cm³)

活性炭名		複合吸着材		植物由来		汚泥由来	
活性炭添加率		3%	6%	3%	6%	3%	6%
セメント 0%	湿潤密度	1.49	1.36	1.68	1.89	1.51	1.72
	乾燥密度	1.32	1.17	1.44	1.59	1.32	1.48
セメント 5%	湿潤密度	1.70	1.39	1.74	1.50	1.59	1.56
	乾燥密度	1.46	1.20	1.48	1.30	1.39	1.37

(3) 安定化試験

本試験では、実証試験前後における PFOA 溶出濃度の減少率を 99%以上とすることを目標値として設定した。その結果、高濃度 PFOA 汚染土壌 (PFOA 溶出量 : 2,500,000~3,000,000ng/L) に対して、3 試料全てで 99%以上の減少率が確認された (表 2-2-10)。本試験における混合方法は、実施工で想定される柱状改良機による混合条件に近いモルタルミキサーを用いたものであることから、実現場においても試験と同程度の溶出抑制効果が期待されると考えられる。

また、アルカリ水 (pH 11.3、pH 11.5、pH 11.8) による溶出試験の結果、pH 上昇とともに PFOA 溶出量が増加する傾向が見られた (表 2-2-11)。これは事前配合試験のセメント添加による PFOA 溶出量の増加と同様の理由であると思われる。

表 2-2-10 安定化試験結果

植物由来 6%				
検体名	試料①	試料②	試料③	平均値
PFOS (ng/L)	<5	<5	<5	<5
PFOA (ng/L)	340	310	200	280
pH	8.0	7.9	7.9	7.9

1. 供試試料汚染濃度…PFOS 溶出量 : <5ng/L、PFOA 溶出量 : 2,500,000~3,000,000ng/L

表 2-2-11 アルカリ水影響試験

植物由来 6%				
検体名	試料① (pH 11.3)	試料② (pH 11.5)	試料③ (pH 11.8)	平均値
PFOS (ng/L)	<5	<5	<5	<5
PFOA (ng/L)	230	270	360	290
pH	8.4	8.4	9.1	8.6

1. 供試試料汚染濃度…PFOS 溶出量 : <5ng/L、PFOA 溶出量 : 2,500,000~3,000,000ng/L

(4) 透水試験

本試験では、試験前後の透水係数の比較で、1/1000 以下となる透水係数の低下が認められることを目標値として設定した。その結果、地盤の透水係数はセメント 0% (透水係数: $8.7 \times 10^{-8} \text{m/s}$) となり、表層固化でセメントを添加した場合、セメント添加率が 5% (透水係数: $7.3 \times 10^{-11} \text{m/s}$) であっても目標値を達成することが可能であることが確認された (表 2-2-12)。ただし、現場の土壌性状によって透水係数が変動するため、事前の確認が必要である。一軸圧縮強さ、透水係数がセメント添加量に応じて比例しなかった理由は、セメント添加量の限界があった、もしくは水分が足りなかったためと思われる (図 2-2-2)。

表 2-2-12 透水試験結果

試料名	セメント 添加量 C %	材齢 日	一軸圧縮強さ		湿潤密度		含水比		透水係数 k_{15} m/s
			q_u kN/m ²		ρ_t mg/m ³		w %		
セメント 0%	0	—	24	24	1.91	1.90	27.5	27.5	8.7×10^{-8}
			24		1.90		27.5		
			24		1.90		27.4		
セメント 5%	5	28	2090	2020	1.97	1.97	25.1	25.0	7.3×10^{-11}
			2050		1.97		24.8		
			1920		1.96		25.1		
セメント 10%	10	28	3860	4187	1.98	1.98	23.5	23.6	1.6×10^{-11}
			4230		1.97		23.7		
			4470		1.98		23.6		
セメント 15%	15	28	5550	5270	2.01	2.02	22.6	22.5	6.4×10^{-12}
			4780		2.02		22.5		
			5480		2.03		22.3		
セメント 20%	20	28	5100	5077	1.96	1.96	20.9	21.0	1.2×10^{-11}
			4770		1.96		21.0		
			5360		1.97		21.2		

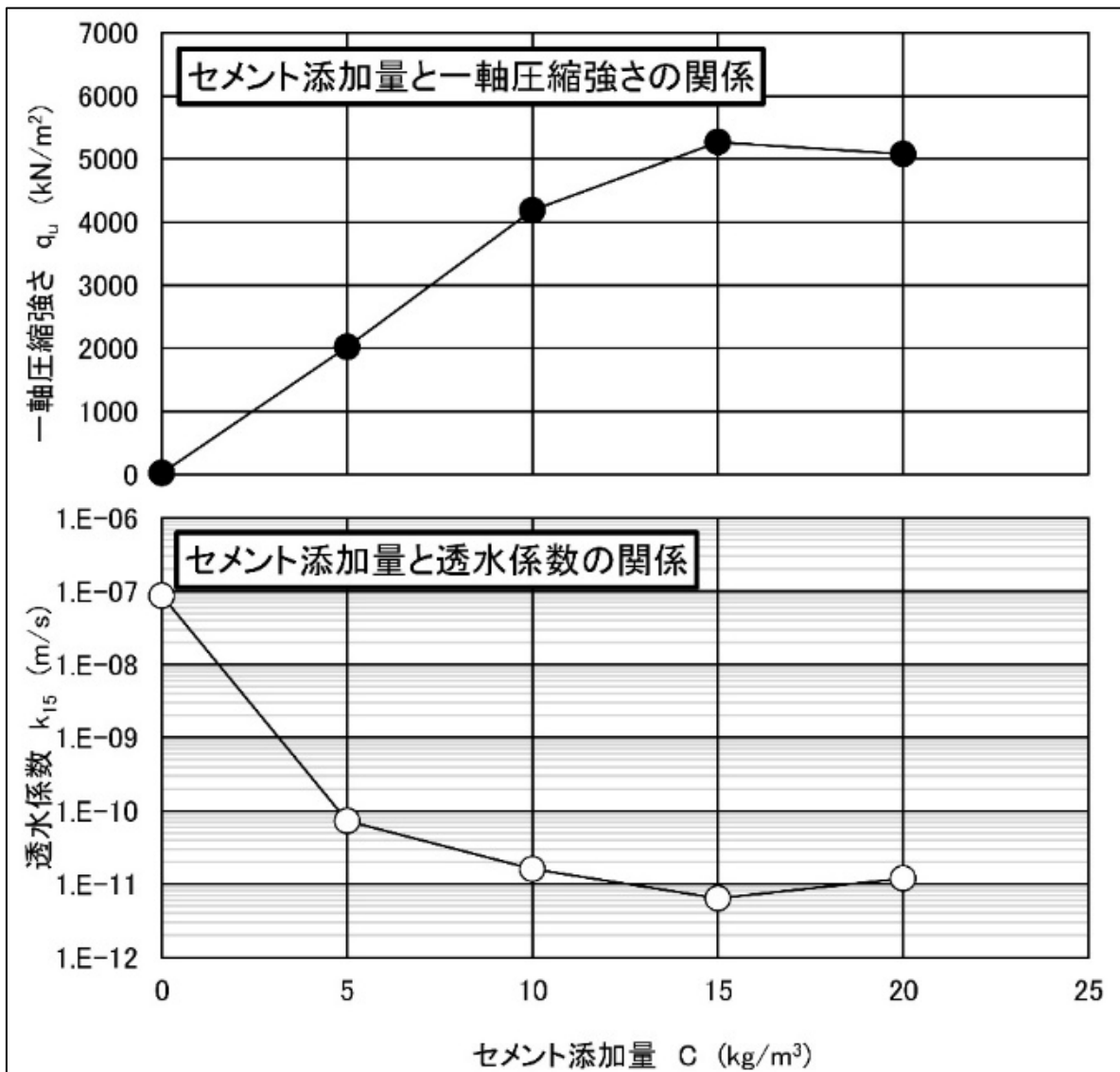


図 2-2-2 セメント添加量との関係図

(5) 安定性確認試験（シリアルバッチ試験）

ミネラル水によるシリアルバッチ試験では、全ての試料において振とう回数（液固比）の増加に伴い、PFOA 溶出量が減少する傾向が確認された（表 2-2-13、図 2-2-3）。この結果から、当該条件においては、PFOA の再溶出が進行しにくいことが示唆され、活性炭を用いた安定化処理による長期的な安定性が、一定程度確保されている可能性が示された。

表 2-2-13 安定性確認試験結果 (単位：ng/L)

検体名	ミネラル水①		ミネラル水②		ミネラル水③		平均値	
	PFOS	PFOA	PFOS	PFOA	PFOS	PFOA	PFOS	PFOA
1 回目	<5	330	<5	350	<5	280	<5	320
2 回目	<5	290	<5	300	<5	270	<5	290
3 回目	<5	240	<5	260	<5	220	<5	240

※供試試料汚染濃度…PFOS 溶出量：<5ng/L、PFOA 溶出量：2,500,000～3,000,000ng/L

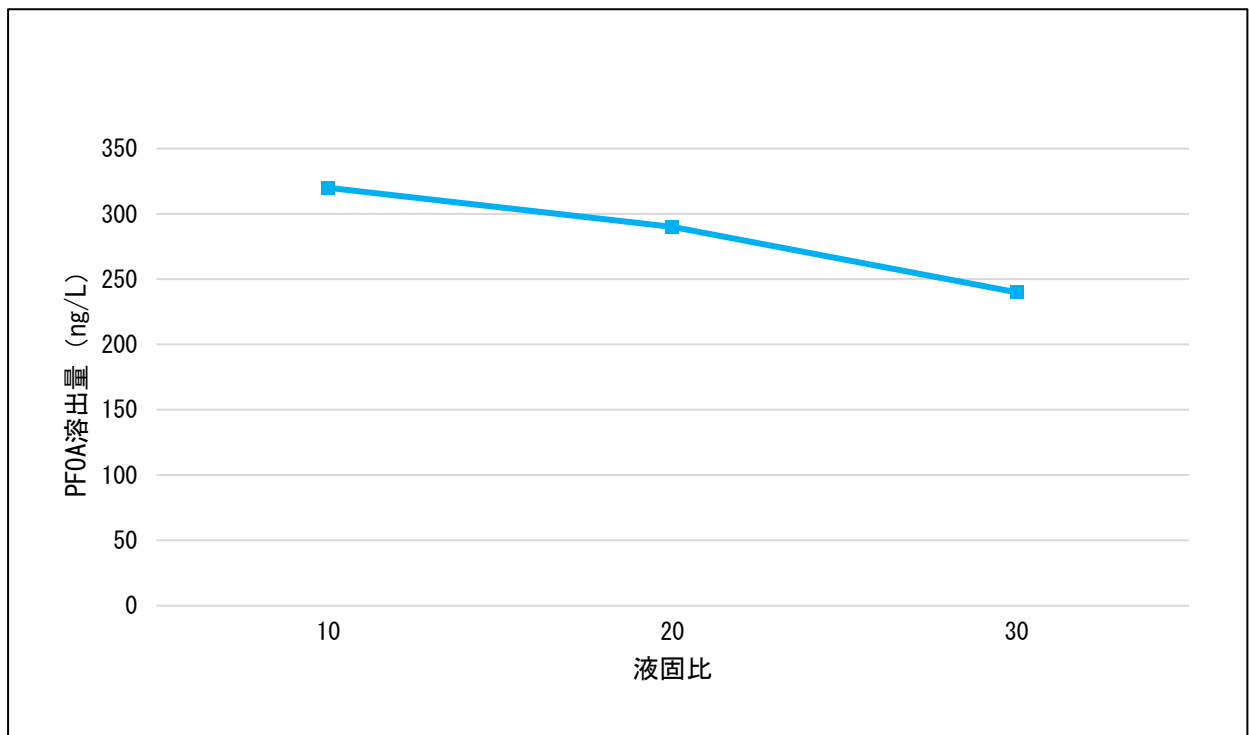


図 2-2-3 安定性確認試験（平均値）

(6) フラックス評価

1) フラックス評価の考え方

本技術は、汚染土壤中の PFOA を直接除去するのではなく、活性炭混合により溶出濃度を低減させ、さらに表層固化によって降雨浸透量を抑制することで、地下水への移行を抑えることを目的とした対策である。このような対策は、汚染物質の自然減衰機構を活用しつつ、移行速度を管理・抑制するという点で、Monitored Natural Attenuation (MNA) の考え方に近い側面を有する。ただし、本技術では自然作用のみに依拠するのではなく、人工的な安定化処理および浸透抑制を組み合わせる点に特徴がある。

地下水リスクを適切に評価するためには、単に溶出濃度のみを把握するのではなく、地下水面へ実際に移行する物質量を定量的に評価することが重要である。そこで本検討では、地下水面に流入する PFOA のフラックスを指標として評価を行った。

降雨が地表面に到達すると、その一部は地盤内へ浸透し、鉛直方向の浸透流が発生する(図 2-2-4)。この浸透流は、透水係数および動水勾配に依存し、ダルシー則により次式で表される。

$$q = k \cdot i \quad \dots \dots (式 1)$$

(q : ダルシー流速 (m/s)、 k : 透水係数 (m/s)、 i : 動水勾配)

なお、本評価では、降雨の内、表層の透水係数に依存した水量が地表から地中へと鉛直一次元方向に流入することを前提とした。

PFOA 汚染土壤に浸透水が接触すると、固相中の PFOA の一部が間隙水中へ溶解し、溶出濃度が形成される。このとき、単位面積あたりのフラックス (F) は、次式で表される。

$$F = v \cdot C \quad \dots \dots (式 2)$$

(F : フラックス (ng/m²/s)、 C : 溶出濃度 (ng/L)、 v : 間隙内実流速 (m/s)、 $v = q/n$ とする。 n : 間隙率)

すなわち、フラックスは「溶出濃度」と「浸透水量」の双方に依存する指標である。

2) フラックス算定結果

3 条件においてフラックス及び無処理に対する減少率を算出した。なお、間隙率は全て 0.5 (フラックス自体は間隙率に依存するが、減少率には影響しない)、また、地表面に水柱のない浸透条件となるため、動水勾配は常に 1 として計算した。溶出濃度は、シリアルバッチ試験の結果、液固比が 30 程度までは一定の溶出濃度となることが確認されたため、濃度一定条件としている。

無処理は活性炭、添加材及びセメントを適用しない条件、安定化は活性炭及び添加材を適用した条件、安定化+表層固化は安定化に加えて表層をセメントで固化させた条件とした(表 2-2-14)。

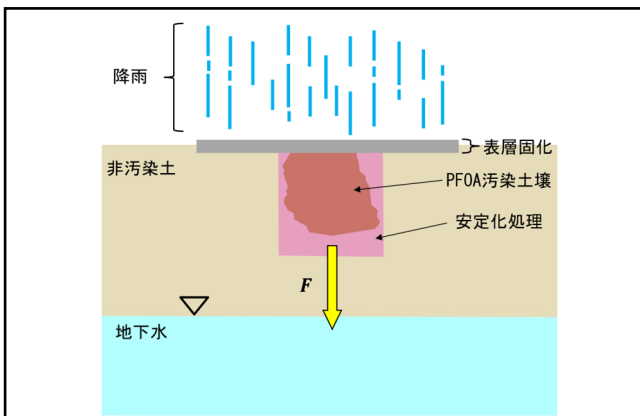


図 2-2-4 フラックス概要

表 2-2-14 フラックス及び減少率

処理条件	フラックス (ng/m ² /s)	減少率
無処理 (溶出濃度：2,500,000ng/L) (ダルシー流速：8.7E-08m/s)	435	0
安定化 (溶出濃度：280ng/L) (ダルシー流速：8.7E-08m/s)	0.04872	約 1/9,000
安定化+表層固化 (溶出濃度：280ng/L) (ダルシー流速：7.3E-11m/s)	0.00004088	約 1/11,000,000

結果より、安定化条件では溶出濃度が大幅に低減し、フラックスは無処理と比較して約 4 桁低減した。さらに表層固化を併用することで浸透水量が大きく抑制され、フラックスは無条件と比較して約 7 桁低減した。すなわち、本技術は、溶出濃度の低減と浸透水量の低減という二つの作用機構によりフラックスを低減させるものであり、その結果として地下水への移行負荷が大幅に抑制されることが示された。

以上より、本技術は地下水への PFOA 移行負荷を低減する対策として有効である可能性が示唆された。ただし、本評価は短期的な実験条件に基づくものであり、長期安全性、降雨変動、地下水流動条件の変化等を考慮した継続的な検証が今後の課題である。

2.2.3 環境負荷の評価

温室効果ガス排出量の算定に用いる活動量（表 2-2-15、表 2-2-16、表 2-2-17）は、各種重機の製品情報の燃費値や燃料消費率を用いて設定し、トラック等の走行距離は現場施工を参考にして条件設定した。活性炭投入量は本試験の添加量を用いた。

表 2-2-15 活動量（安定化施工）

No.	プロセス	項目	活動量	単位	備考
1	(1) 活性炭・浄化材搬入	活性炭	10,800	kg	土比重1.8t/m ³ 、土重量に対して活性炭6%使用
2		①軽油（トラック）	10.9	L	走行距離50km ^{*1} ÷燃費値4.57km/L ^{*2}
3	(2) プラント・重機搬入	②軽油（トラック）	10.9	L	走行距離50km ^{*1} ÷燃費値4.57km/L ^{*2}
4		③軽油（ジェネレータ）	103	L	稼働時間12時間 ^{*3} ×燃費値8.6L/h ^{*4}
5	(3) プラント内・浄化材調整・圧送、汚染土壌混合	④軽油（柱状改良機）	119	L	燃料消費率0.277L/kW-h ^{*5} ×定格出力47.6kW ^{*6} ×稼働時間9時間 ^{*3}
6		セメント	9,000	kg	土比重1.8t/m ³ 土重量に対してセメント5%使用
7	(4) 固化材搬入	⑤軽油（トラック）	10.9	L	走行距離50km ^{*1} ÷燃費値4.57km/L ^{*2}
8		⑥軽油（バックホウ）	20.8	L	燃料消費率0.144L/kW-h ^{*5} ×定格出力72.1kW ^{*7} ×稼働時間2時間 ^{*3}
9	(5) 表層改良	⑦軽油（バックホウ）	10.4	L	燃料消費率0.144L/kW-h ^{*5} ×定格出力72.1kW ^{*7} ×稼働時間1時間 ^{*3}
10	(6) 整地	⑧軽油（トラック）	10.9	L	走行距離50km ^{*1} ÷燃費値4.57km/L ^{*2}
10	(7) プラント・重機搬出	⑨軽油（トラック）	10.9	L	走行距離50km ^{*1} ÷燃費値4.57km/L ^{*2}

*1 活性炭販売代理店からの輸送距離、プラント・重機の輸送距離、生コン工場からの輸送距離は50kmと仮定した。

*2 国土交通省「自動車燃費一覧（令和7年3月）」を参考に、車両の燃費値を設定した。

*3 100m³の対策工事における、各重機の稼働時間をそれぞれ仮定した。

*4 「60kVAジェネレーター」（<https://iidakikai.co.jp/product/>【60kvaジェネレーター】）を参考に、重機の定格出力を設定した。

*5 国土交通省（2023）「土木工事標準歩掛」を参考に、各重機の燃料消費率を設定した。

*6 「G1-50C-β40KL-5」（<https://www.ybm.jp/product/gi-50c-beta>）を参考に、重機の定格出力を設定した。

*7 「PC128US-8」（https://kcsj.komatsu-/media/kcsj/contact/download/pdf/construction_machine/pc128_138us-8.pdf?）を参考に、重機の定格出力を設定した。

表 2-2-16 活動量（不溶化埋戻し施工）

No.	プロセス	項目	活動量	単位	備考
1	(1) プラント・重機搬入	①軽油（トラック）	10.9	L	走行距離50km ^{*1} ÷燃費値4.57km/L ^{*2}
2		②軽油（バックホウ）	125	L	燃料消費率0.144L/kW-h ^{*3} ×定格出力72.1kW ^{*4} ×稼働時間12時間 ^{*5}
3	(2) 汚染土壌掘削	③軽油（ダンプトラック）	0.88	L	走行距離0.2km ^{*1} ÷燃費値4.57km/L ^{*2} ×20台 ^{*6}
4		活性炭	10,800	kg	土比重1.8t/m ³ 、土重量に対して活性炭6%使用
5	(3) 活性炭・固化材搬入	セメント	9,000	kg	土重量に対してセメント5%使用
6		④軽油（トラック）	21.9	L	活性炭搬入（走行距離50km ^{*1} ÷燃費値4.57km/L ^{*2} ）＋セメント搬入（走行距離50km ^{*1} ÷燃費値4.57km/L ^{*2} ）
7	(4) プラント内固化処理	⑤軽油（自走式土質改良機）	158	L	燃料消費率0.144L/kW-h ^{*3} ×定格出力122kW ^{*7} ×稼働時間9時間 ^{*5}
8		⑥軽油（バックホウ）	93.4	L	燃料消費率0.144L/kW-h ^{*3} ×定格出力72.1kW ^{*4} ×稼働時間9時間 ^{*5}
9	(5) 不溶化土壌積み込み	⑦軽油（バックホウ）	31.1	L	燃料消費率0.144L/kW-h ^{*3} ×定格出力72.1kW ^{*4} ×稼働時間3時間 ^{*5}
10		⑧軽油（ダンプトラック）	1.31	L	走行距離0.2km ^{*1} ÷燃費値4.57km/L ^{*2} ×30台 ^{*6}
11	(6) 埋戻し・整地	⑨軽油（バックホウ）	62.3	L	燃料消費率0.144L/kW-h ^{*3} ×定格出力72.1kW ^{*4} ×稼働時間6時間 ^{*5}
12	(7) プラント・重機搬出	⑩軽油（トラック）	10.9	L	走行距離50km ^{*1} ÷燃費値4.57km/L ^{*2}

*1 活性炭販売代理店からの輸送距離、プラント・重機の輸送距離、生コン工場からの輸送距離は50km、汚染土壌の運搬距離は0.2kmと仮定した。

*2 国土交通省「自動車燃費一覧（令和7年3月）」を参考に、各重機・車両の燃費値を設定した。

*3 国土交通省（2023）「土木工事標準歩掛」を参考に、各重機の燃料消費率を設定した。

*4 「PC128US-8」（https://kcsj.komatsu-/media/kcsj/contact/download/pdf/construction_machine/pc128_138us-8.pdf?）を参考に、重機の定格出力を設定した。

*5 100m³の対策工事における、各重機の稼働時間をそれぞれ仮定した。

*6 ダンプトラックの積載量を9トンと仮定し、運搬台数を設定した。

*7 「SR2000G」（<https://japan.hitachi-kenki.co.jp/wp-content/uploads/2019/11/KA-JA074S.pdf>）を参考に、重機の定格出力を設定した。

表 2-2-17 活動量（掘削除去施工）

No.	プロセス	項目	活動量	単位	備考
1	(1) 重機搬入	①軽油（トラック）	10.9	L	走行距離50km ^{*1} ÷ 燃費値4.57km/L ^{*2}
2	(2) 汚染土壌掘削・積み込み	②軽油（バックホウ）	177	L	燃料消費率0.144L/kW-h ^{*3} × 定格出力72.1kW ^{*4} × 稼働時間17時間 ^{*5}
3	(3) 汚染土壌搬出	③軽油（ダンプトラック）	153	L	走行距離35km ^{*1} ÷ 燃費値4.57km/L ^{*2} × 20台 ^{*6}
4	(4) 汚染土壌処理施設	汚染土壌	180,000	kg	土比重1.8t/m ³
5		④軽油（ダンプトラック）	153	L	走行距離35km ^{*1} ÷ 燃費値4.57km/L ^{*2} × 20台 ^{*6}
6	(5) 最終処分場埋め立て	⑤軽油（ブルドーザ）	454	L	燃料消費率0.144L/kW-h ^{*3} × 定格出力450kW ^{*7} × 稼働時間7時間 ^{*5}
7	(6) 埋戻し土積み込み	⑥軽油（バックホウ）	93.4	L	燃料消費率0.144L/kW-h ^{*3} × 定格出力72.1kW ^{*4} × 稼働時間9時間 ^{*5}
8	(7) 埋戻し土運搬	⑦軽油（ダンプトラック）	153	L	走行距離35km ^{*1} ÷ 燃費値4.57km/L ^{*2} × 20台 ^{*6}
9	(8) 埋戻し・整地	⑧軽油（バックホウ）	114	L	燃料消費率0.144L/kW-h ^{*3} × 定格出力72.1kW ^{*4} × 稼働時間11時間 ^{*5}
10		⑨軽油（振動ローラー）	1.06	L	燃料消費率0.266L/kW-h ^{*3} × 定格出力4kW ^{*8} × 稼働時間1時間 ^{*5}
11	(9) 重機搬出	⑩軽油（トラック）	10.5	L	走行距離50km ^{*1} ÷ 燃費値4.57km/L ^{*2}

*1 重機の輸送距離は50km、汚染土壌及び埋戻し土の運搬距離は35kmと仮定した。

*2 国土交通省「自動車燃費一覧（令和7年3月）」を参考に、各重機・車両の燃費値を設定した。

*3 国土交通省（2023）「土木工事標準歩掛」を参考に、各重機の燃料消費率を設定した。

*4 「PC128US-8」（https://kcsj.komatsu.com/media/kcsj/contact/download/pdf/construction_machine/pc128_138us-8.pdf?）を参考に、重機の定格出力を設定した。

*5 100m³の対策工事における、各重機の稼働時間をそれぞれ仮定した。

*6 ダンプトラックの積載量を9トンと仮定し、運搬台数を設定した。

*7 「D10」（<https://www.nipponcat.co.jp/products/dozers/d10.html>）を参考に、重機の定格出力を設定した。

*8 「BVW57H」（https://www.kobelco-kenki.co.jp/products/bomag/pdf/BVW57H_BVW63H.pdf）を参考に、重機の定格出力を設定した。

排出原単位は各種公表資料から引用した（表 2-2-18）。

表 2-2-18 炭素貯留量

項目	数値	単位	出典
軽油	2.62	kg-CO2eq/L	環境省「算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧」 ^{*1} における「（参考1）燃料の使用に関する排出係数」から引用
活性炭	7.77	kg-CO2eq/kg	環境省「廃棄物処理施設の基幹的設備改良マニュアル」 ^{*2} における「表Ⅱ.2.3 薬品に係るCO2排出係数」から引用
汚染土壌焼却	1.02	kg-CO2eq/kg	環境省「算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧」 ^{*1} における「非エネルギー起源二酸化炭素（CO2）」の「廃棄物の焼却 廃油（特定有害産業廃棄物）」から引用
セメント	0.79	kg-CO2eq/kg	太平洋セメント（株）「太平洋セメントレポート2022」 ^{*3} の「環境」の「サプライチェーン全体でのCO2排出原単位」から引用（62ページ）

*1 https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/itiran_2023_rev4.pdf

*2 https://www.env.go.jp/recycle/misc/facility_improve/manual.pdf

*3 <https://www.taiheiyo-cement.co.jp/csr/pdf/data/2022/rep2022.pdf>

設定した活動量と排出原単位を用いて、温室効果ガス排出量を算定した。安定化施工の温室効果ガス排出量が100m³あたり約9万 kg-CO₂eqと最も小さく、次いで、不溶化埋戻し施工、掘削除去施工となった（表 2-2-19、表 2-2-20、表 2-2-21）。安定化施工は不溶化埋戻し施工と大きな差は見られないものの、掘削除去施工は約2倍の温室効果ガス排出量であった。掘削除去施工から安定化施工へ移行することで、温室効果ガス排出量を低減させることができることが示唆された。

表 2-2-19 温室効果ガス排出量（安定化施工）

No.	プロセス	項目	活動量	単位	排出量	単位
1	(1) 活性炭・浄化材搬入	活性炭	10,800	kg	8.39.E+04	kg-CO2eq
2		①軽油（トラック）	10.9	L	2.86.E+01	kg-CO2eq
3	(2) プラント・重機搬入	②軽油（トラック）	10.9	L	2.86.E+01	kg-CO2eq
4	(3) プラント内・浄化材調整・ 圧送、汚染土壌混合	③軽油（ジェネレータ）	103	L	2.70.E+02	kg-CO2eq
5		④軽油（柱状改良機）	119	L	3.12.E+02	kg-CO2eq
6	(4) 固化材搬入	セメント	9,000	kg	7.14.E+03	kg-CO2eq
7		⑤軽油（トラック）	10.9	L	2.86.E+01	kg-CO2eq
8	(5) 表層改良	⑥軽油（バックホウ）	20.8	L	5.45.E+01	kg-CO2eq
9	(6) 整地	⑦軽油（バックホウ）	10.4	L	2.72.E+01	kg-CO2eq
10	(7) プラント・重機搬出	⑧軽油（トラック）	10.9	L	2.86.E+01	kg-CO2eq
合計					9.18.E+04	kg-CO2eq

表 2-2-20 温室効果ガス排出量（不溶化埋戻し）

No.	プロセス	項目	活動量	単位	排出量	単位
1	(1) プラント・重機搬入	①軽油（トラック）	10.9	L	2.86.E+01	kg-CO2eq
2	(2) 汚染土壌掘削	②軽油（バックホウ）	125	L	3.28.E+02	kg-CO2eq
3		③軽油（ダンプトラック）	0.88	L	2.31.E+00	kg-CO2eq
4	(3) 活性炭・固化材搬入	活性炭	10,800	kg	8.39.E+04	kg-CO2eq
5		セメント	9,000	kg	7.14.E+03	kg-CO2eq
6		④軽油（トラック）	21.9	L	5.74.E+01	kg-CO2eq
7	(4) プラント内固化処理	⑤軽油（自走式土質改良機）	158	L	4.14.E+02	kg-CO2eq
8		⑥軽油（バックホウ）	93.4	L	2.45.E+02	kg-CO2eq
9	(5) 不溶化土壌積み込み	⑦軽油（バックホウ）	31.1	L	8.15.E+01	kg-CO2eq
10		⑧軽油（ダンプトラック）	1.31	L	3.43.E+00	kg-CO2eq
11	(6) 埋戻し・整地	⑨軽油（バックホウ）	62.3	L	1.63.E+02	kg-CO2eq
12	(7) プラント、重機搬出	⑩軽油（トラック）	10.9	L	2.86.E+01	kg-CO2eq
合計					9.24.E+04	kg-CO2eq

表 2-2-21 温室効果ガス排出量（掘削除去）

No.	プロセス	項目	活動量	単位	排出量	単位
1	(1) 重機搬入	①軽油（トラック）	10.9	L	2.86.E+01	kg-CO2eq
2	(2) 汚染土壌掘削・積み込み	②軽油（バックホウ）	177	L	4.64.E+02	kg-CO2eq
3	(3) 汚染土壌搬出	③軽油（ダンプトラック）	153	L	4.01.E+02	kg-CO2eq
4	(4) 汚染土壌処理施設	汚染土壌	180,000	kg	1.84.E+05	kg-CO2eq
5		④軽油（ダンプトラック）	153	L	4.01.E+02	kg-CO2eq
6	(5) 最終処分場埋め立て	⑤軽油（ブルドーザ）	454	L	1.19.E+03	kg-CO2eq
7	(6) 埋戻し土積み込み	⑥軽油（バックホウ）	93.4	L	2.45.E+02	kg-CO2eq
8	(7) 埋戻し土運搬	⑦軽油（ダンプトラック）	153	L	4.01.E+02	kg-CO2eq
9	(8) 埋戻し・整地	⑧軽油（バックホウ）	114	L	2.99.E+02	kg-CO2eq
10		⑨軽油（振動ローラー）	1.06	L	2.78.E+00	kg-CO2eq
11	(9) 重機搬出	⑩軽油（トラック）	10.5	L	2.75.E+01	kg-CO2eq
合計					1.87.E+05	kg-CO2eq

活性炭の長期使用による炭素貯留効果を検証するために、炭素貯留量を算定した（表 2-2-22）。農林水産省「バイオ炭の農地施用をめぐる事情（令和 7 年 4 月）」を参考に、以下の式を用いて炭素貯留量を算定した。炭素含有率及び 100 年後の炭素残存率は、木の実由来のバイオ炭と同等と仮定して引用した。

炭素貯留量 (kg-CO2)

$$= \text{土壤に投入された活性炭の量 (kg)} \times \text{炭素含有率} \times 100 \text{ 年後の炭素残存率} \times 44/12$$

その結果、活性炭の使用による一定の炭素貯留効果は認められた（図 2-2-5）。

表 2-2-22 炭素貯留量

工法	炭素貯留量 (単位 : kg-CO2)	備考
安定化	1.90E+04	10,800 (kg) × 0.74 × 0.65 × 44/12
不溶化埋戻し	1.90E+04	10,800 (kg) × 0.74 × 0.65 × 44/12
掘削除去	0.00E+00	—

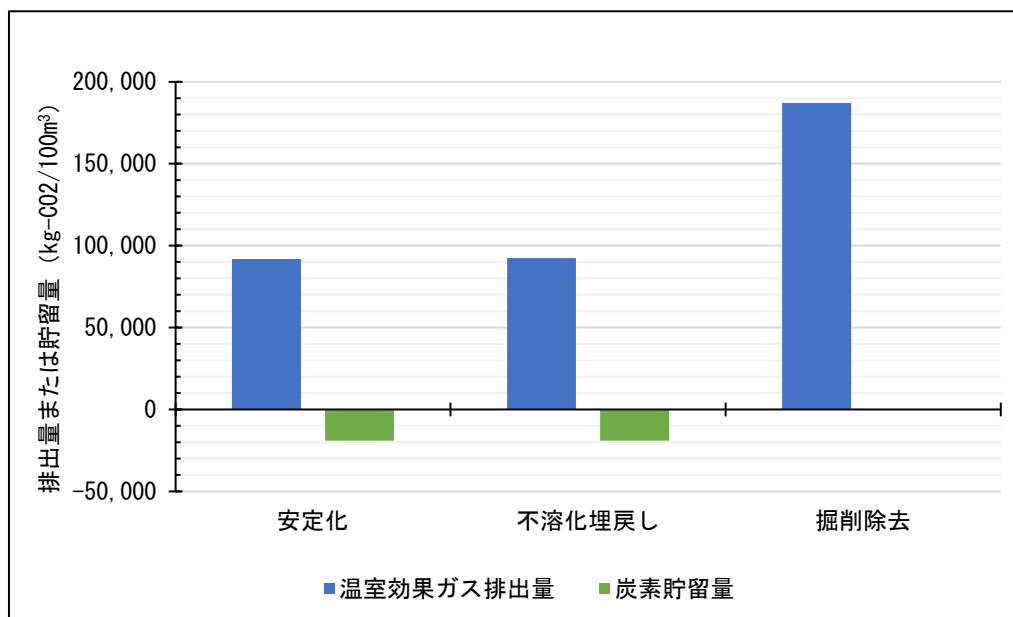


図 2-2-5 各施工による温室効果ガス排出量及び炭素貯留量

3. 実証試験の評価項目

3.1 対策技術の有効性

本実証試験の事前配合試験、及び安定化試験の両方の試験において、溶出量減少率 99%以上を達成し、表層の固化・難透水化処理においても地盤に対して表層の透水係数が 1/1000 以下となることを確認した。また、過硫酸や鉄粉を添加した試料と活性炭のみの試料との間で溶出抑制効果に大きな差は認められず、現場条件によっては活性炭のみの施工でも一定の対策効果が期待されることが示唆された。

活性炭による PFOA 吸着保持の安定性については、振とう回数（液固比）の増加に伴い溶出量が徐々に減少する傾向が確認され、施工後に活性炭からの溶出が時間と共に増加する可能性は低いと考えられる。ただし、表層固化によってアルカリ性浸透水が発生する場合には、活性炭の吸着保持特性に影響を与える可能性があるため、中性固化材の利用等を含めた事前の確認が必要である。

なお、本成果は、所定の室内試験条件下における基礎的なデータ取得を目的としたものであり、直ちに現場適用条件を規定するものではない。本技術の適用に当たっては、汚染層が地下水面と直接接していないことを前提とする。溶出抑制及び浸透抑制により地下水への移行フラックスを低減することを想定しており、地下水と汚染層が直接接触している条件下での適用は想定していない。このため、施工にあたっては地下水位の位置を事前に確認し、適用可否を判断する必要がある点に留意する必要がある。

3.2 対策技術の新規性・将来性

本技術のベース技術である「Smart CapTM工法」は、東京都地下水汚染拡大防止技術評価委員会において認定された 23 技術の内、VOC 汚染対策技術として 4 工法が選定され、既に商用化がすすめられている。このことから、本工法は技術的な課題が少なく、将来的な土壌汚染対策への幅広い活用が期待される技術として公的に評価・位置づけられている。

一方、本技術は「Smart CapTM工法」をオリジンとし、PFAS 対策への適用を想定して発展させた技術であり、その特長として、地盤に対する安定化技術による汚染溶出抑制と、表層に対する固化・難透水化による雨水等の浸透量低減を組合せることにより、地下水への汚染溶出量の低減を図る点が挙げられる。本技術のみでも対策目標濃度を満たすことが可能であるが、より高濃度の場合においては、低減された汚染溶出量に対して地下水流による自然減衰（希釈）を活用することで、地下水流下流域において対策目標濃度を満たす汚染濃度への改善を図ることも可能であり、現地における汚染総量の低減を実現する、一連の PFAS 対策工法・概念として整理される。

本工法・概念は、広く海外の関連技術や知見を広く調査した場合においても類似する事例が確認されておらず、この点において、本技術の独自性や新規性を見出すことができる。

3.3 対策技術の経済効率性

本技術は、表層からの雨水等の浸透及びそれに続く地盤からの汚染物質の溶出に起因する地下水への汚染浸出量を効果的に抑制し、さらに地下水流との接触による自然減衰（希釈）を通じて、地下水流下流域における対策目標濃度を満たす水質へ改善すると共に、現地における汚染総量の低減を図ることを技術的前提としている。加えて、初期施工後は、ランニングコストを伴う施工や管理をほぼ必要としない点を特長とする。

本技術のベースとなる「Smart CapTM工法」では、活性炭施用直後に汚染溶出量が減少するため、速や

かな現場撤収が可能となる。これは、従来工法と比較して現場の手離れ時期において大きな有意性を有するものである。本技術においても同様のコンセプトを踏襲しており、現場の手離れが良好であるという特長を有し、結果として総合的なコスト削減に寄与するものと考えられる。

本技術と従来技術のコスト（目安）は表 3-3-1 に示した通りである。

表 3-3-1 従来技術とのコストの比較

項目	本技術※ ¹ (Smart Cap™工法)	従来技術※ ² (掘削除去)
対象物質	VOC	
1m ³ 当たりの処理コスト(目安) [千円/ m ³]	40～80	100～200

※1：対策深度が深い場合でも、汚染土壌掘削・搬出等がほとんど発生しないため、従来技術と比較するとコストが低くなる。

※2：対策深度が深い場合、汚染土壌掘削・搬出、山留、場合によっては水処理等が発生するため、本技術と比較するとコストが高くなる。

3.4 対策技術の環境保全

本技術のオリジナル工法である「Smart Cap™工法」を用いた汚染対策施工における温室効果ガス排出量は、他の類似技術又は同種の技術と比較して、比較的低い水準に抑えることが示された。このことから、本技術は他の対策技術と比べて環境負荷を抑制しつつ、現場施工が可能であると位置づけられる。また、本技術では安定化材として活性炭を施工することから、地盤中への炭素貯留効果も期待され、温室効果ガス発生抑制の観点からも環境負荷の低い対策技術であると考えられる。

4. 当該技術の今後の展望

本実証事業では、活性炭を用いた安定化処理により PFOA 溶出濃度を大幅に低減できることが確認されるとともに、表層固化による透水係数の低下により雨水等の浸透を抑制可能であることが示された。特に高濃度 PFOA 汚染土壌を対象とした条件においても溶出量減少率 99%以上を達成し、安定化処理単独でも地下水面へ到達する移行フラックスを約 1/9,000 まで低減可能であることが確認された。さらに、安定化処理と表層固化処理を組み合わせた場合には、地下水面へ到達する PFOA の移行フラックスを約 1/11,000,000 まで低減可能であることが示された。

これらの結果は、本技術が溶出濃度の低減に加え、浸透抑制との組み合わせにより地下水へ移行する PFOA の量を大幅に抑制するフラックス制御型の原位置対策技術であることを示すものである。ただし、本成果は本実証事業で使用した土壌条件および室内試験条件下における基礎的知見であり、現場条件により効果変動する可能性があることから、適用前の確認および検証が重要である。

また、本技術の適用にあたっては、汚染層が地下水面と直接接していないこと、すなわち一定の不飽和帯が確保されていることを前提条件とする。地下水と汚染層が直接接触している条件下での適用は想定しておらず、施工前に地下水位および地盤条件を確認した上で適用可否を判断する必要がある。

今後は、PFOS 単独汚染および PFOS・PFOA 複合汚染に対する効果検証、配合条件の最適化、pH 条件が吸着挙動に及ぼす影響の整理、さらには長期的な溶出挙動および移行フラックスの変動評価を進めることで、本技術の適用条件および有効性をより明確化していく必要がある。本技術は、地下水への移行負荷を低減する低環境負荷型対策技術の一つとして、PFAS 汚染対策の選択肢となり得るものであり、段階的な技術検証を通じて実装への展開が期待される。

5. 参考文献

- 1) Denly, E., et al. (2019) ,Per- and polyfluoroalkyl substances in environmental sampling products: fact or fiction?, *Remediation*, 29(1), 65-76.
- 2) Minnesota Pollution Control Agency.(2022) ,Guidance for Per-and Polyfluoroalkyl substances (PFAS): Sampling
[<https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/p-eao2-27.pdf>]
- 3) Michigan Department of Environment, Great Lakes, and Energy (EGLE). (2022) ,General PFAS Sampling Guidance. Michigan PFAS Action Response Team. Available at:
[<https://www.michigan.gov/-/media/Project/Websites/PFAS-Response/Sampling-Guidance/General.pdf>]
- 4) Lee, Y.-C., Lo, S.-L., Kuo, J., Huang, C.-P. (2020) ,Efficient decomposition of perfluorooctanoic acid(PFOA) by persulfate with iron-modified activated carbon., *Water Research*, 174, 115610
- 5) Manz, K. E., Kulaots, I., Greenley, C. A., Landry, P. J., Lakshmi, K. V., Woodcock, M. J., Hellerich, L., Bryant, J. D., Apfelbaum, M., Pennell, K. D. (2023) ,Low-temperature persulfate activation by powdered activated carbon for simultaneous destruction of perfluorinated carboxylic acids and 1,4-dioxane.*,*Journal of Hazardous Materials*, 442, 129966.
- 6) Tran, T., et al. (2021) ,Iron-activated persulfate oxidation degrades aqueous perfluorooctanoic acid (PFOA) at ambient temperature.,*Chemosphere*, 281, 130824.
- 7) Lee, Y.-C., Lo, S.-L., Kuo, J., Huang, C.-P. (2013) ,Promoted degradation of perfluorooctanoic acid by persulfate when adding activated carbon.,*Journal of Hazardous Materials*, 261, 463-469.
- 8) Juhasz, A. L., Kastury, F., Herde, C., & Tang, W. (2022). Application of soil amendments for reducing PFAS leachability and bioavailability. *Environmental Pollution*, 307, Article 119498.
- 9) 佐野 博昭／姫野 季之／本田 欽也／河野 真也／河野 正臣／太田 宗一郎／澄川 圭治 (2025) 「材料判定の目安を満足しない土を農業用ため池築堤材料として活用するために固化材を混合した土の改良効果に関する一考察」. 『地盤工学ジャーナル』 20(3), 423-437.
- 10) Struble, L., Randall, C., & LBlanc, L. (2018) Strength, permeability, and microstructure of cement-treated dredging sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 42(2), 991-1007.
- 11) 国土交通省 (2023) 『土木工事標準歩掛』 (<https://www.mlit.go.jp/common/001589642.pdf>)
- 12) Xiao, X., Ulrich, B. A., Chen, B., & Higgins, C. P. (2017). Sorption of poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) relevant to aqueous film-forming foam (AFFF)-impacted groundwater by biochars and activated carbon. *Environmental Science & Technology*, 51(11), 6342–6351.
- 13) Hussain, F. A., Janisse, S. E., Heffern, M. C., Kinyua, M., & Velázquez, J. M. (2022). Adsorption of perfluorooctanoic acid from water by pH-modulated Brönsted acid and base sites in mesoporous hafnium oxide ceramics. *iScience*, 25(4), 104138.
- 14) Fatima, M., Kelso, C., & Hai, F. (2025). Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Perfluorooctanesulfonic Acid (PFOS) adsorption onto different adsorbents: A critical review of the impact of their chemical structure and retention mechanisms in soil and groundwater. *Water*, 17(9), 1401.

- 15) Kabiri, S., Tavakkoli, E., Navarro, D. A., Degryse, F., Grimison, C., Higgins, C. P., Mueller, J. F., Kookana, R. S., & McLaughlin, M. J. (2024). The complex effect of dissolved organic carbon on desorption of per- and poly-fluoroalkyl substances from soil under alkaline conditions. *Environmental Pollution*, 356, 124234.