

## 実証結果報告書

- 1) 提案者の名称 清水建設株式会社
- 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】
- 3) 提案技術の名称 PFOS 等汚染土壌の除害化・減容化を目的とした分級洗浄技術
- 4) 技術の分類/適段階 土壌洗浄/実用レベル
- 5) 実証の期間 令和7年8月20日～令和7年12月12日 (計29日間)
  - 8月20日～8月25日 (4日間)
  - 9月10日～9月26日 (11日間)
  - 11月4日～11月14日 (9日間)
  - 12月8日～12月12日 (5日間)

## 目 次

1. 土壌洗浄技術の概要 .....	1
1.1 原理と特徴 .....	1
1.2 技術の対策目標 .....	4
2. 実証試験結果 .....	5
2.1 実証試験方法 .....	5
2.1.1 土壌洗浄実証試験 .....	5
2.1.2 白色付着物, 白色塊の顕微鏡観察と成分解析(新規).....	5
2.2 実証試験結果 .....	7
2.2.1 汚染土壌の PFAS 濃度, 土壌 pH, TOC, Fe, Ca 濃度 .....	7
2.2.2 汚染土壌に含まれる白色塊, 白色付着物の顕微鏡観察と成分解析.....	8
2.2.3 土壌試料の粒度構成, 洗浄に伴う粒度構成の変化.....	11
2.2.4 土壌洗浄による PFOA 除去プロセス, 洗浄砂の PFOA 溶出量, 土壌 pH .....	14
2.2.5 pH と PFOA 溶出量の関係(pH を変化させた溶出試験).....	22
2.2.6 凝集沈殿による OF スラリーの PFOA 除去 .....	23
2.2.7 土壌洗浄試験における PFOA の収支 .....	26
2.2.8 土壌洗浄実証試験の評価 .....	27
3. 実証試験の評価項目 .....	28
3.1 対策技術の有効性 .....	28
3.2 対策技術の新規性・将来性 .....	31
3.3 対策技術の経済効率性 .....	33
3.4 対策技術の環境保全 .....	35
3.4.1 土壌運搬量削減に伴う CO <sub>2</sub> 削減.....	35
3.4.2 土壌洗浄処理を行うことに伴う CO <sub>2</sub> 削減.....	36
4. 当該技術の今後の展望 .....	38
5. 添付資料 .....	39

# 1. 土壌洗浄技術の概要

## 1.1 原理と特徴

当社の土壌洗浄技術は、湿式フルイ、ハイドロサイクロン、フローテーションなどの分級・洗浄プロセスから構成されており、図-1.1 に示すように土壌から汚染物質を含有する細粒分(粘土, シルト, 土壌有機物など)を分離, 除去することによって浄化土を産出する. 重金属類や有機化合物などの有害物質の多くが, 砂分, 砂利, 礫などの吸着性の低い粗粒分よりも吸着性の高い細粒分に吸着, 偏在しやすいという性質を利用している. 重金属類, 鉱物油, 農薬, ダイオキシン類などによる汚染土壌を対象に累積 240 万 ton の浄化処理実績を有する. 本技術は, 強力洗剤を用いて汚染物質を水へ溶出させる化学的洗浄法とは全く異なり, 汚染物質が水へ溶出しないように配慮している. 適切な水処理を行なうことによって汚染物質を含まない清浄な処理水を得ることができるため, 処理水の循環利用が可能である.

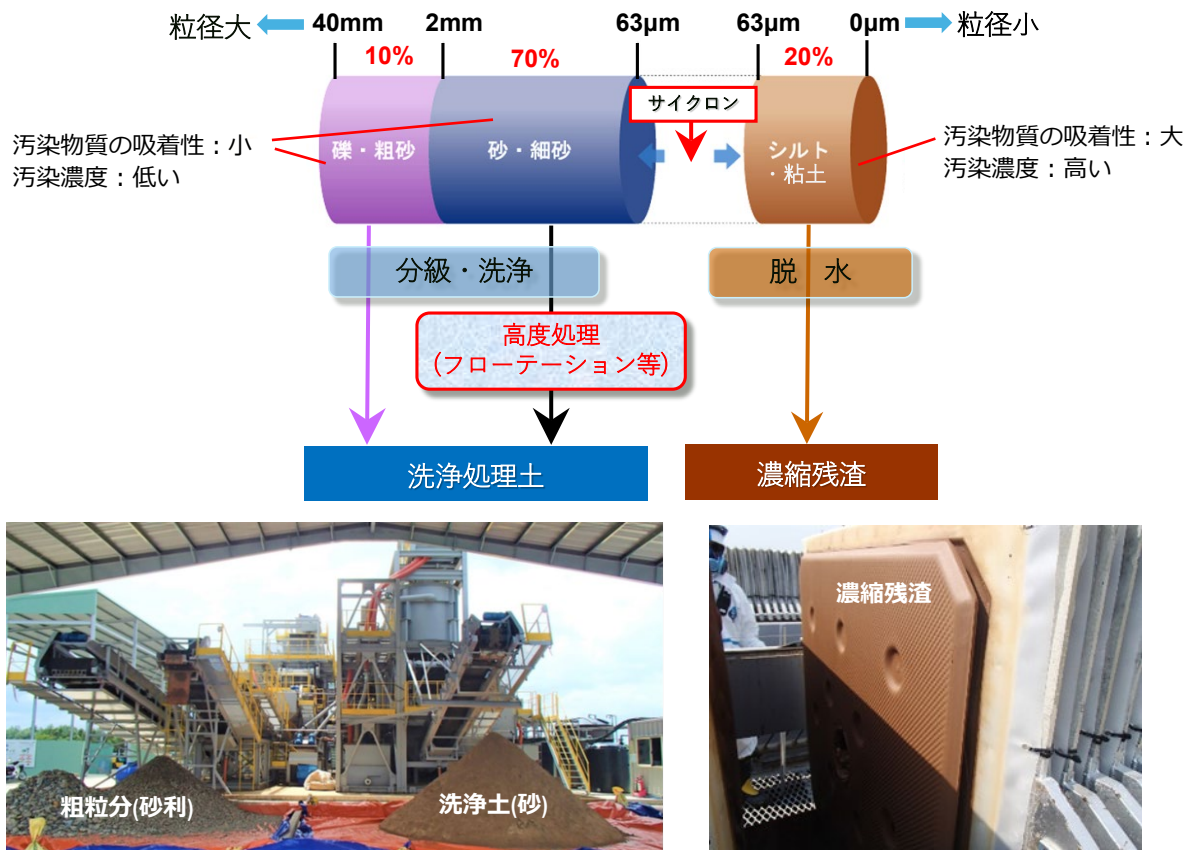


図-1.1 土壌洗浄技術の原理

本土壌洗浄技術の処理フロー例を図-1.2 に示す。汚染土壌の性状や汚染物質の種類によって洗浄プロセスのラインナップは適宜組み替える。2 段湿式フルイによって元土壌(feed soil)は、2 mm 以上の粗砂分(砂利・礫)と 2 mm 以下の土壌に篩い分けられる。2 mm 以下の土壌スラリーは、ハイドロサイクロン(50%分級径が 63  $\mu\text{m}$  の場合)によって 63  $\mu\text{m}$  未満の細粒分を含むオーバーフロー(OF)と 63  $\mu\text{m}$  以上の砂・細砂分を含むアンダーフロー(UF)に分級される。UF 中の砂・細砂分は、スクラバーにおいて捕収剤を含む複数の薬剤が添加され、スクラビングによって土壌粒子表面から汚染相(汚染物質を含む粒子)が効果的に剥離される。続いて、フローテーションセルに入り、起泡剤が添加されフローテーションが行なわれる。汚染物質を吸着した粒子(汚染相)は、土壌粒子との界面化学的性質の差によって選択的に気泡に付着し、気泡と共に液表面まで上昇しフロス(泡沫)として系外へ除去される。洗浄された砂・細砂分は、脱水工程を経て洗浄土となる。OF とフロスに含まれる細粒分は、凝集沈殿とプレス脱水を経て濃縮残渣(脱水ケーキ)となる。

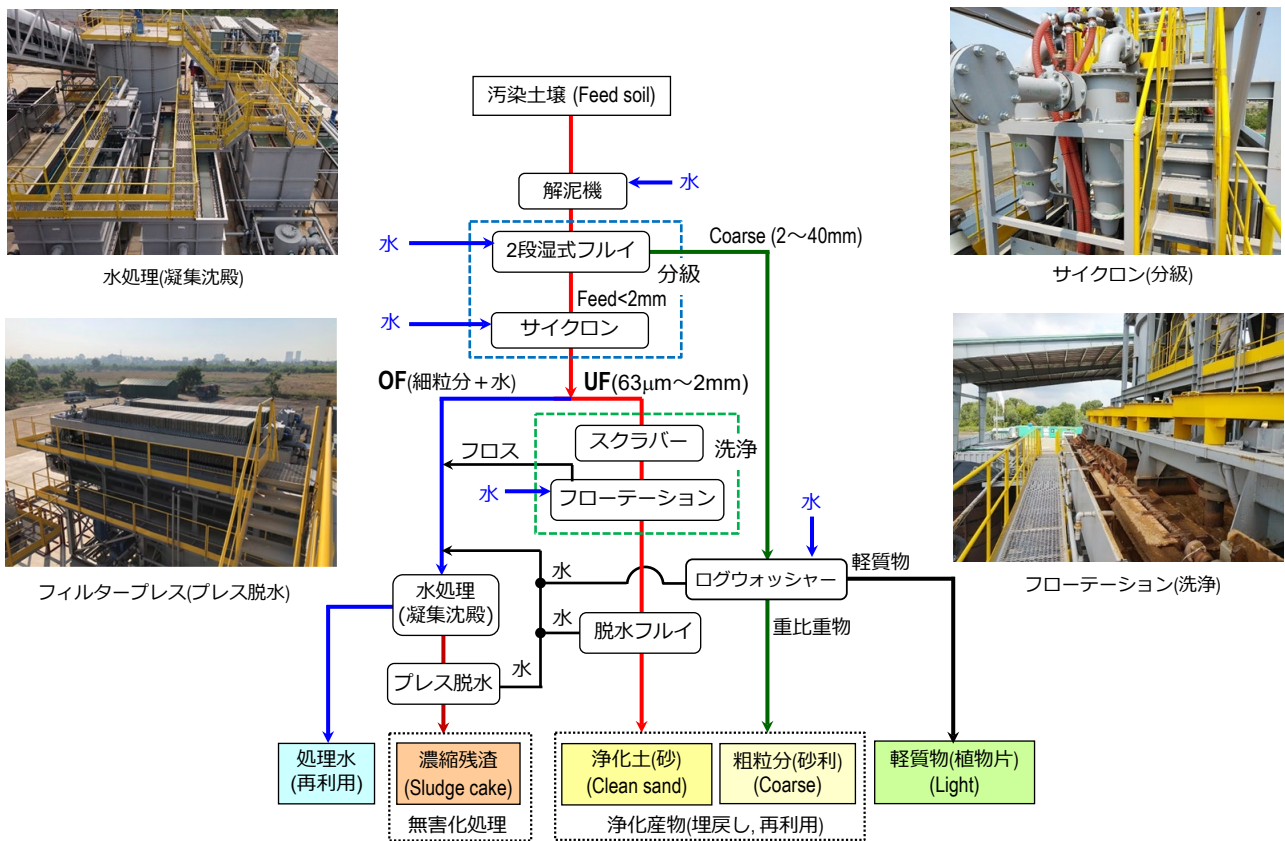


図-1.2 土壌洗浄プラントの処理フローの例

他の汚染物質(農薬, ダイオキシン類, 重金属, 鉱物油など)とは異なり, PFAS には水に溶けやすいという性質があるため, 土壌洗浄処理においても意図しない PFAS の溶出が一定量以上あると考えられる。このため PFAS 汚染土壌の洗浄処理においては, 水処理(凝集沈殿)プロセスにおいて「水に溶出した溶解態 PFAS を効率的かつ確実に除去」することが極めて重要となる。

土壤洗浄技術の特徴は、(a)汚染土壤の減容化、(b)高い費用対効果、(c)環境に優しい浄化技術の3つに要約される。大量のPFAS汚染土壤の浄化対策を考えた場合、図-1.3に示すように土壤洗浄と無害化処理(例えば、焼却処理)の組合せが、他の処理法に比べて費用対効果が高い浄化対策を実現できると考えている。汚染土壤調査では高濃度データに注目が集まりがちであるが、工場跡地のように汚染が広がっている場合には、高濃度土壤(浄化基準値の100倍超過)は比較的少なく、大部分は低～中濃度の汚染土壤(浄化基準値の100倍以下)であることが多い。

低～中濃度のPFAS汚染土壤については、コストの安い土壤洗浄によって溶出量目標値を満足する浄化土を産出し、土壤洗浄処理から発生する高濃度の濃縮残渣と高濃度のPFAS汚染土壤については、コストは高いが確実にPFASを分解・除去できる無害化処理によって処理を行なう。土壤洗浄と無害化処理を図-1.3のように組合せることによって、経済的に汚染土壤全体の浄化を達成することが可能となる。

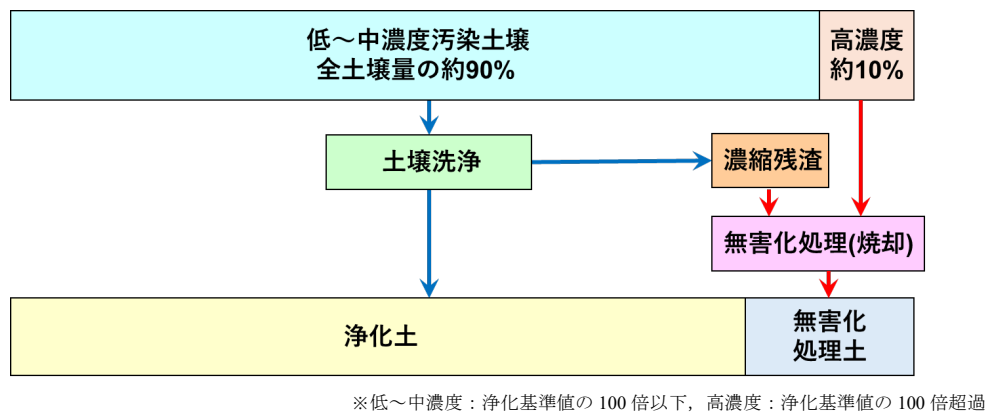


図-1.3 土壤洗浄と無害化処理の組み合わせ、減容化による浄化費用の削減

## 1.2 技術の対策目標

後述するように今回の土壌試料は、通常の土壌よりも高いアルカリ性(pH10 前後)と、高い PFOA 溶出量を示す特異的な土壌であった。土壌試料の主な特徴を以下に要約する。

- PFAS の約 99%が PFOA であり、低濃度試料の PFOA 溶出量が 6,840 ng/L、高濃度試料の PFOA 溶出量が 88,650 ng/L であった。PFOS 溶出量は、低濃度、高濃度ともに定量下限値未満であった。
- 砂利～礫の割合が高い。このため、土壌(<2 mm)、砂利(2～9.5 mm)、砂利(>9.5 mm)に分けて土壌洗浄試験を実施した。
- 高いアルカリ性を示す。溶出試験の溶出液 pH が 9.6～10.4 であった。カルシウム(Ca)含有量も高く 0.65～2.1 wt%であった。土壌中に白色の付着物、白色塊(脆い)が多く含まれることが観察された。このため、土壌試料に含まれる白色付着物、白色塊について顕微鏡観察と成分解析を新たに実施した。
- 土壌試料の PFOA 分析値(含有量、溶出量)のバラツキが大きかった。分析に供した試料量を表-1.2 に示す。砂利のように大きな粒径の試料の分析値が大きくバラツクのは今までも経験したが、2 mm 以下の土壌の分析値のバラツキが大きいのには今まであまり経験が無い。

実証試験の技術目標は、表-1.1 に示すように計画時の目標に加えて新たに 3 つの目標を加えた。

表-1.1 技術目標と評価方法

項目	目的	目標値	評価
PFOS + PFOA の除去 (土壌)	PFOS + PFOA の土壌溶出量及び含有量除去率の評価	処理前後の除去率 99%以上	実証試験における公定法分析結果を基に評価
PFOS + PFOA の除去 (洗浄水)	PFOS + PFOA の除去率の評価	処理前後の除去率等 98%以上	実証試験における公定法分析結果を基に評価
PFOS + PFOA の収支	PFOS + PFOA の収支の評価	90%以上	実証試験における公定法分析結果を基に評価
環境への負荷 (CO <sub>2</sub> 削減)	洗浄礫・洗浄砂を場内埋戻し出来る仮定とした場合の土壌運搬量削減に伴う CO <sub>2</sub> 削減を評価	全量搬出した場合と比較して 50%以上削減 ※柱状図より粒度分布を推定	実証試験データを基に評価
(新規)浄化土の pH (埋戻し土の基準 <sup>1),2)</sup> )	洗浄礫・洗浄砂を埋め戻す場合の土壌 pH を評価	洗浄礫・洗浄砂の pH を 4.0 以上 9.0 以下	実証試験における土壌 pH 分析結果を基に評価
(新規)白色付着物、白色塊の観察と成分解析	白色付着物、白色塊の構成物質を解明	特に無し	SEM-EDX, XRD による成分解析結果を基に評価
(新規)浄化土の PFOS + PFOA 溶出量 (低濃度土壌の目標)	洗浄礫・洗浄砂の PFOS+PFOA 溶出量の評価	洗浄礫・洗浄砂の PFOS+PFOA 溶出量を 50 ng/L 以下 <sup>3)</sup>	実証試験における公定法分析結果を基に評価

表-1.2 PFAS の含有量分析、溶出量分析に用いた試料量

実験の時期	PFAS含有量	PFAS溶出量	備考
2025年8月	5 g	50 g	破碎しないでPFAS含有量分析が可能な最大粒径は20 mmであった。このため、砂利(>9.5mm)のPFAS分析は9.5～20 mmの砂利に対して行なった。
2025年9月	5 g	50 g	
2025年11月	10 g (一部 5g)	50 g	
2025年12月	10 g (一部 5g)	50 g	

1) 茨城県土砂等による土地の埋立て等の規制に関する条例施行規則(茨城県規則第 41 号)、平成 16 年 3 月、pH は 4.0 以上 9.0 以下

2) 君津市土砂等の埋立て等による土壌の汚染及び災害の発生の防止に関する条例施行規則(規則第 39 号)、平成 24 年 10 月、pH は 4.0 以上 8.5 以下

3) 水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準等の施行等について(通知)(環水大管発第 2506309 号)、令和 7 年 6 月

## 2. 実証試験結果

### 2.1 実証試験方法

#### 2.1.1 土壌洗浄実証試験

今回の土壌試料は、通常の土壌よりも高いアルカリ性(pH10 前後)と高い PFOA 溶出量を示す特異的な土壌であった。PFAS の約 99%が PFOA であり、低濃度試料の PFOA 溶出量が 6,840 ng/L、高濃度試料の PFOA 溶出量が 88,650 ng/L であった。土壌試料中の砂利～礫の割合が高いため、土壌(< 2 mm)、砂利(2~9.5 mm)、砂利(> 9.5 mm)に分けて土壌洗浄試験を実施した。元土壌の pH は 9.6~10.4 と高いアルカリ性であり、フローテーション後の洗浄砂の pH も 9.8~10.3 と高いアルカリ性を示した。埋戻し土の pH の基準は 4.0 以上 9.0 以下であるため、中和処理を兼ねて酸洗浄試験(新規)を追加、実施した。土壌洗浄実証試験の試験フローを図-2.1 に示す。

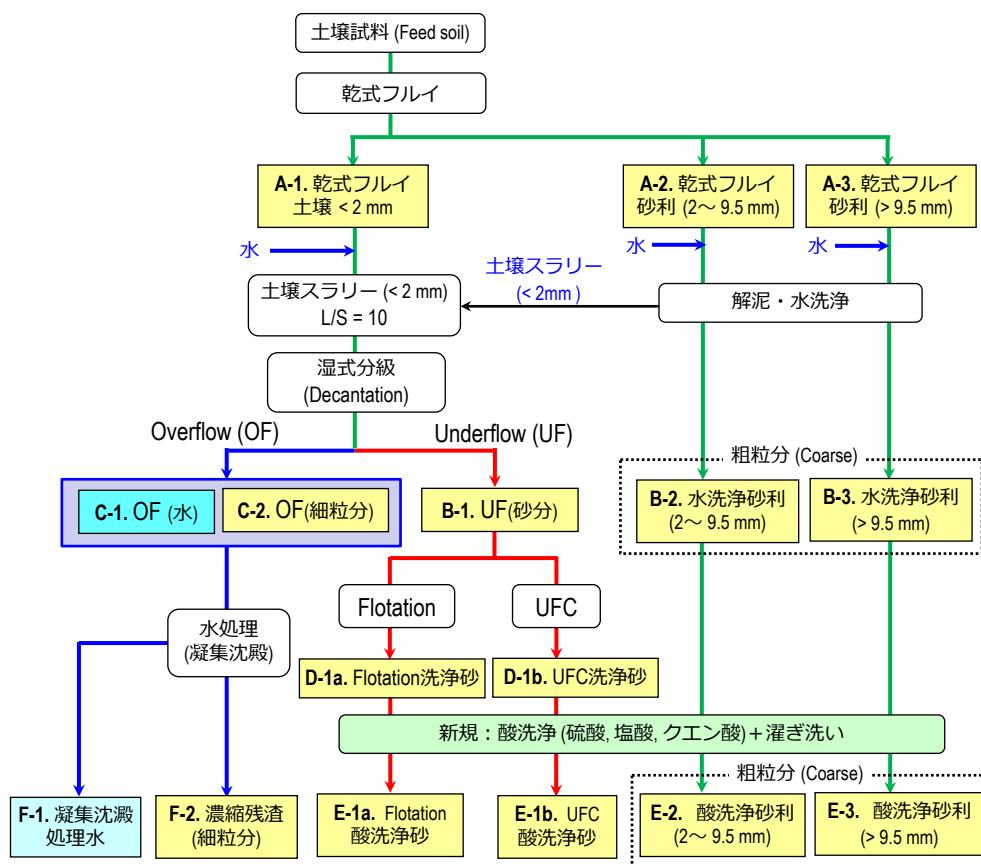


図-2.1 土壌洗浄実証試験の試験フロー

#### 2.1.2 白色付着物、白色塊の顕微鏡観察と成分解析(新規)

今回の土壌試料は通常の土壌よりも高いアルカリ性(pH10 前後)を示し、土壌中に白色の付着物と脆い白色塊(指で潰すことができる)を多く含むという特異的な土壌であった。コア箱の土壌試料において観察された白色付着物と白色塊を写真-2.1 に示す。このため、光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて、白色付着物と白色塊の観察を行なった。次に SEM に付帯しているエネルギー分散型 X 線分光法(EDX)による白色付着物と白色塊の表面の元素分析を行なった。さらに白色塊については、X 線回折装置(XRD)を用いて結晶構造の組成について解析を実施した。顕微鏡観察、成分解析で用いた SEM, EDX, XRD の機器を写真-2.2 に示す。

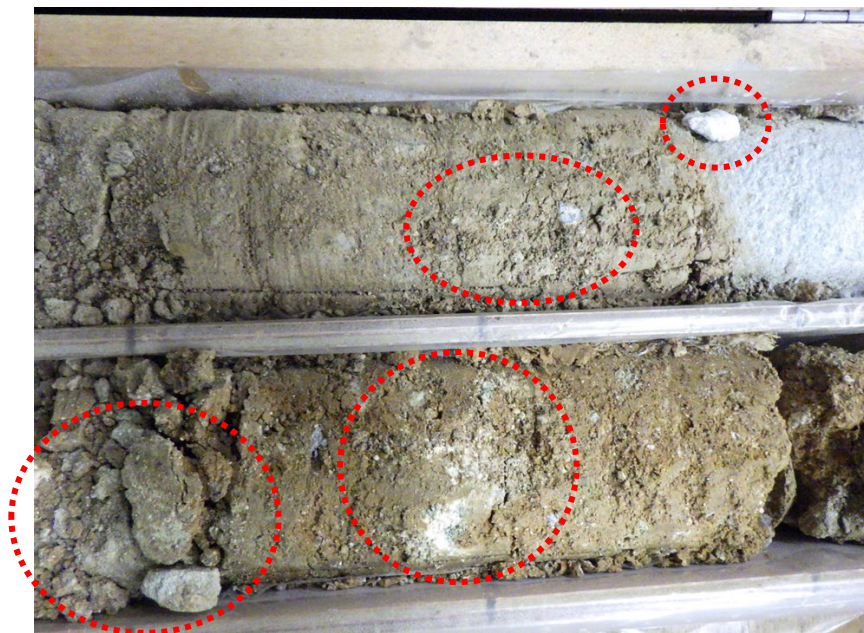
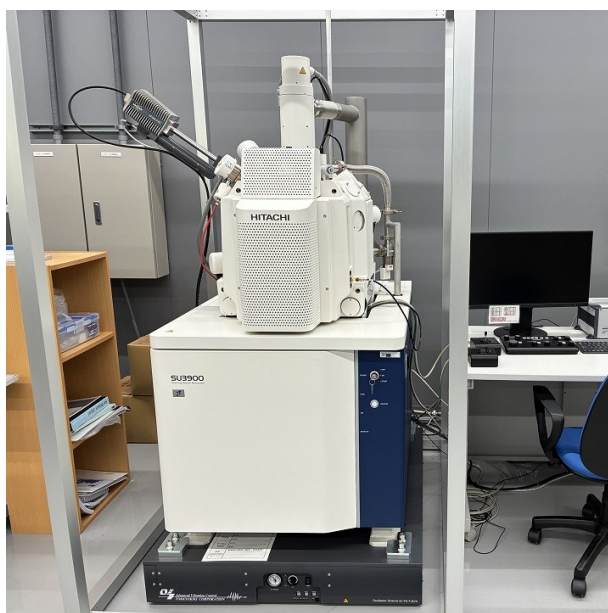
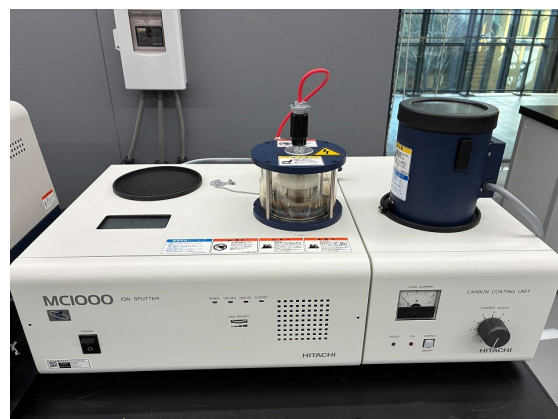


写真-2.1 土壌試料(コア箱)中に含まれる白色付着物, 白色塊



(a) SEM(走査型電子顕微鏡), SU3900, 日立ハイテク社製



(b) 白金蒸着装置 : MC1000, 日立ハイテク社製



(c) XRD(X線回折装置), D8 ADVANCE, ブルカー・ジャパン社製

写真-2.2 顕微鏡観察, 成分析で用いた SEM, EDX, XRD の機器

## 2.2 実証試験結果

### 2.2.1 汚染土壌の PFAS 濃度, 土壌 pH, TOC, Fe, Ca 濃度

汚染土壌の PFAS 濃度, 土壌 pH, TOC, Fe, Ca 濃度の分析結果を表-2.1 (低濃度土壌), 表-2.2 (高濃度土壌)に示す. 土壌試料の主な特徴と分析結果に基づく判断を以下に要約する.

- PFAS の約 99%が PFOA であり, 低濃度土壌(< 2 mm)の PFOA 溶出量が 6,840 ng/L, 高濃度土壌(< 2 mm)の PFOA 溶出量が 88,650 ng/L であった. PFOS 溶出量は, 低濃度, 高濃度ともに定量下限値未満であった. 他の PFAS (PFNA, PFHpA, PFHxA, PFPeA, PFBA)の濃度は含有量, 溶出量とも低濃度もしくは定量下限値未満であった. このため, 土壌洗浄試験における PFAS の分析項目は, PFOA 含有量と PFOA 溶出量に絞り込んだ. Flotation 試験の 1 条件において, 他の PFAS (PFNA, PFHpA, PFHxA, PFPeA, PFBA)の溶出量を分析したが, 全て低濃度であった.
- 低濃度土壌の砂利(2~9.5 mm), 砂利(> 9.5 mm)の PFOA 溶出量は, それぞれ 1,459 ng/L, 757 ng/L であり, 高濃度土壌の砂利(2~9.5 mm), 砂利(> 9.5 mm)の PFOA 溶出量は, それぞれ 15,100 ng/L, 9,608 ng/L であった.
- 低濃度土壌, 高濃度土壌ともに通常の土壌よりも高いアルカリ性(pH10 前後)を示した. 溶出試験の溶出液 pH は土壌(<2mm), 砂利を含めて 9.6~10.4 であった. カルシウム(Ca)含有量も高く 0.65~2.1 wt%であった. 有機炭素(TOC)含有量はかなり低く 0.03~0.32 wt%であり, 鉄(Fe)含有量は通常の土壌と変わらない 2.0~3.8 wt%であった.
- 土壌試料の PFOA 分析値(含有量, 溶出量)のバラツキが大きかった. 砂利のように大きな粒径の試料の分析値が大きくバラツクことは今までも経験があるが, 2 mm 以下の土壌の分析値が大きくバラツクのは今まであまり経験が無い. このため, 土壌洗浄試験の性能評価(PFOA 除去率)に当たっては, 元土壌の PFOA 分析データの平均値(一部, 中央値)を用いて行なうことにした.

表-2.1 元土壌の PFAS 濃度, 土壌 pH, TOC, Fe, Ca 濃度の一覧, 低濃度土壌

低濃度土壌 (Low)	PFAS含有量 (µg/kg)							TOC, Fe, Ca (wt %)			PFAS溶出量 (ng/L)						溶出液 pH	
	PFOS	PFOA	PFNA	PFHpA	PFHxA	PFPeA	PFBA	TOC	Fe	Ca	PFOS	PFOA	PFNA	PFHpA	PFHxA	PFPeA		PFBA
乾式フルイ 土壌(<2 mm)	<0.1	51.4	<0.1	0.4	<0.1	0.3	<0.1	0.19	3.0	2.0	<1	4,849	5	39	7	27	5	9.7
	---	150.7	---	---	---	---	---	0.22	3.0	1.9	---	6,900	---	---	---	---	---	9.5
	---	89.5	---	---	---	---	---	0.22	2.7	2.0	---	6,840	---	---	---	---	---	9.8
中央値	<0.1	<b>89.5</b>	<0.1	0.4	<0.1	0.3	<0.1	<b>0.22</b>	<b>3.0</b>	<b>2.0</b>	<1	<b>6,840</b>	5	39	7	27	5	<b>9.7</b>
	---	(99.2%)	---	(0.44%)	---	(0.33%)	---	---	---	---	---	(98.8%)	(0.1%)	(0.6%)	(0.1%)	(0.4%)	(0.1%)	---
乾式フルイ	<0.1	14.0	---	---	---	---	---	---	---	---	<1	1,916	---	---	---	---	---	10.1
砂利	<0.1	8.7	---	---	---	---	---	---	---	---	<1	2,100	---	---	---	---	---	10.4
(2~9.5 mm)	---	19	---	---	---	---	---	0.06	2.9	1.0	---	1,400	---	---	---	---	---	10.6
	---	6.7	---	---	---	---	---	---	2.3	1.3	---	580	---	---	---	---	---	10.5
	---	19	---	---	---	---	---	0.06	2.0	0.87	---	1,300	---	---	---	---	---	10.3
平均値	<0.1	<b>13.5</b>	---	---	---	---	---	<b>0.06</b>	<b>2.4</b>	<b>1.1</b>	<1	<b>1,459</b>	---	---	---	---	---	<b>10.4</b>
乾式フルイ	<0.1	11.0	---	---	---	---	---	---	---	---	<1	1,110	---	---	---	---	---	10.2
砂利	<0.1	3.2	---	---	---	---	---	---	---	---	<1	585	---	---	---	---	---	10.5
(> 9.5 mm)	---	1.9	---	---	---	---	---	0.03	2.2	0.35	---	1,200	---	---	---	---	---	9.1
	---	5.1	---	---	---	---	---	---	3.0	2.0	---	210	---	---	---	---	---	10.1
	---	1.5	---	---	---	---	---	0.07	3.8	3.9	---	680	---	---	---	---	---	9.8
平均値	<0.1	<b>4.5</b>	---	---	---	---	---	<b>0.05</b>	<b>3.0</b>	<b>2.1</b>	<1	<b>757</b>	---	---	---	---	---	<b>9.9</b>
Flotation 洗浄砂	---	22	---	---	---	---	---	---	2.1	0.98	---	170	<1	<b>11</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>22</b>	10.2

(注) PFAS 溶出量の下に括弧内で示したパーセント値(%)は, PFAS 溶出量の総量(合計値)に対するそれぞれの PFAS 溶出量の割合を示している. PFAS 含有量についても同様.

表-2.2 元土壌の PFAS 濃度, 土壌 pH, TOC, Fe, Ca 濃度の一覧, 高濃度土壌

高濃度土壌 (High)	PFAS含有量 (µg/kg)							TOC, Fe, Ca (wt %)			PFAS溶出量 (ng/L)							溶出液 pH
	PFOS	PFOA	PFNA	PFHpA	PFHxA	PFPeA	PFBA	TOC	Fe	Ca	PFOS	PFOA	PFNA	PFHpA	PFHxA	PFPeA	PFBA	
乾式フルイ 土壌(<2 mm)	<0.2	756	1.2	3.5	0.3	1.1	<0.2	0.14	2.9	2.1	<20	76,580	90	380	50	130	<20	9.3
乾式フルイ 土壌(<2 mm)	<0.2	1,208	---	---	---	---	---	0.32	3.1	2.0	---	100,720	---	---	---	---	---	9.8
平均値	<0.2	<b>982</b>	1.2	3.5	0.3	1.1	<0.2	<b>0.23</b>	<b>3.0</b>	<b>2.1</b>	<20	<b>88,650</b>	90	380	50	130	<20	<b>9.6</b>
	---	(99.4%)	(0.12%)	(0.35%)	(0.03%)	(0.11%)	---	---	---	---	---	(99.3%)	(0.10%)	(0.43%)	(0.06%)	(0.15%)	---	---
乾式フルイ 砂利 (2~9.5 mm)	<0.2	524	0.5	7.3	0.7	1.6	<0.2	---	---	---	<20	16,100	<20	90	30	40	<20	9.6
乾式フルイ 砂利 (2~9.5 mm)	<0.2	201	---	---	---	---	---	---	---	---	---	15,110	---	---	---	---	---	9.8
乾式フルイ 砂利 (2~9.5 mm)	---	191	---	---	---	---	---	0.06	2.0	0.81	---	18,120	---	---	---	---	---	9.8
乾式フルイ 砂利 (2~9.5 mm)	---	86.5	---	---	---	---	---	---	2.6	1.2	---	11,070	---	---	---	---	---	10.2
平均値	<0.2	<b>251</b>	0.5	7.3	0.7	1.6	<0.2	<b>0.06</b>	<b>2.3</b>	<b>1.0</b>	<20	<b>15,100</b>	<20	90	30	40	<20	<b>9.9</b>
	---	(96.1%)	(0.19%)	(2.8%)	(0.27%)	(0.61%)	---	---	---	---	---	(99.0%)	---	(0.59%)	(0.20%)	(0.26%)	---	---
乾式フルイ 砂利 (>9.5 mm)	<0.2	1,419	0.7	8.5	0.3	0.6	<0.2	---	---	---	<20	11,070	<20	70	20	50	<20	9.5
乾式フルイ 砂利 (>9.5 mm)	<0.2	292	---	---	---	---	---	---	---	---	<20	12,080	---	---	---	---	---	9.3
乾式フルイ 砂利 (>9.5 mm)	---	867	---	---	---	---	---	0.03	2.0	0.81	---	13,080	---	---	---	---	---	10.1
乾式フルイ 砂利 (>9.5 mm)	---	13.0	---	---	---	---	---	---	2.0	0.48	---	2,200	---	---	---	---	---	9.7
平均値	<0.2	<b>648</b>	0.7	8.5	0.3	0.6	<0.2	<b>0.03</b>	<b>2.0</b>	<b>0.65</b>	<20	<b>9,608</b>	<20	70	20	50	<20	<b>9.7</b>
	---	(98.5%)	(0.11%)	(1.3%)	(0.05%)	(0.09%)	---	---	---	---	---	(98.6%)	---	(0.72%)	(0.21%)	(0.51%)	---	---

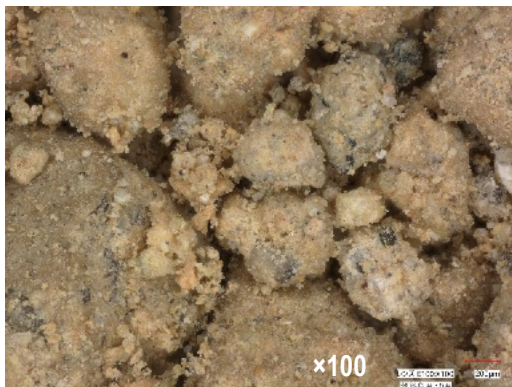
(注) PFAS 溶出量の下に括弧内で示したパーセント値(%)は, PFAS 溶出量の総量(合計値)に対するそれぞれの PFAS 溶出量の割合を示している. PFAS 含有量についても同様.

## 2.2.2 汚染土壌に含まれる白色塊, 白色付着物の顕微鏡観察と成分解析

対象土壌の溶出液の pH は 9.6~10.4 の高いアルカリ性を示した. また, カルシウム(Ca)含有量が概ね 2%であり, 日本の平均的な土壌よりも高いことが表-2.3 に記載した文献値<sup>4)</sup>との比較から判明した. そこで, 光学顕微鏡観察によって土壌粒子表面を詳細に観察したところ, 写真-2.3 に示すように水洗い後の土壌においても白色付着物が表面に付着した土壌粒子と白色塊が多数確認された.

表-2.3 低濃度土壌の Ca 含有量と土壌 pH の分析値, Ca 含有量の国内文献値との比較

土壌試料	Ca (wt%)	土壌 pH	備考
低濃度土壌	2.0	9.7	
(乾式フルイ土壌 <2 mm)	1.9	9.8	同じ試料を 3 回別々に採取し分析
	2.0	9.5	
山間部 (森林)	0.8~1.0	----	文献値
農耕地 (畑地)	0.5~2.1	----	文献値, 施肥による石灰の添加あり



(a) 水洗い前の土壌粒子表面, 砂分(63 µm~2 mm)



(b) 水洗い後の土壌粒子表面, 砂分(63 µm~2 mm)

写真-2.3 水洗い前後の土壌粒子の表面, 粒子表面の白色付着物, 低濃度土壌

4) Yamada, I. : Elemental composition of agricultural soils in Japan in relation to soil type, land use and region, *Soil Science and Plant Nutrition*, 58(1), pp. 1-10, 2012.

光学顕微鏡を用いて水洗浄後の砂利(2~9.5 mm)に含まれる白色塊と粒子表面の白色付着物を撮影したものを写真-2.4 (a), (b)に示す。走査型電子顕微鏡(SEM)で白色塊の表面を撮影したものを写真-2.5 に示す。土壌粒子を白色のマトリックスで固めたような状態が観察された。白色塊は脆く、写真-2.6 に示すように乳鉢ですりつぶすと簡単に砕け、細かい白色の粉体粒子と土壌粒子に分かれた。

次に、白色塊及び白色付着物が付着した土壌粒子について SEM に附帯している EDX を用いてエネルギー分散型 X 線分光法(EDX)による粒子表面の元素分析を行なった。結果を図-2.2, 図-2.3 に示す。結果から、白色塊及び土壌粒子表面に付着した白色付着物にはカルシウムが相対的に多く含まれていることが分かった。X 線回折装置(XRD)を用いて白色塊表面の結晶構造の組成について解析を行った結果を図-2.4 に示す。白色塊には  $\text{CaCO}_3$ (Calcite, Vaterite 等)や  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandite)などが含まれていることが確認された。炭酸カルシウム( $\text{CaCO}_3$ )や水酸化カルシウム( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )はいずれもセメントや生石灰等に由来して生成することが知られている化合物<sup>5)</sup>である。

以上より、今回の PFAS 汚染土壌は Ca 含有量(概ね 2%)が平均的な国内の自然土壌と比較して大きく、その原因は  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  といった Ca 化合物を多く含む塊や付着物の存在によるものと考えられた。Ca を多く含む塊や付着物の由来は不明であるが、XRD の結果や当該地が造成された土地であることを鑑みると、地盤改良等により人為的に添加されたセメントや生石灰等の影響が考えられる。また、これらの白色塊や白色付着物に含まれる Ca 分が高濃度の PFOA を吸着・保持している可能性が高いと考えた。



(a) 白色塊



(b) 粒子表面の白色付着物

写真-2.4 水洗浄後の砂利(2~9.5 mm)に含まれる白色塊(a), 粒子表面の白色付着物(b), 低濃度土壌

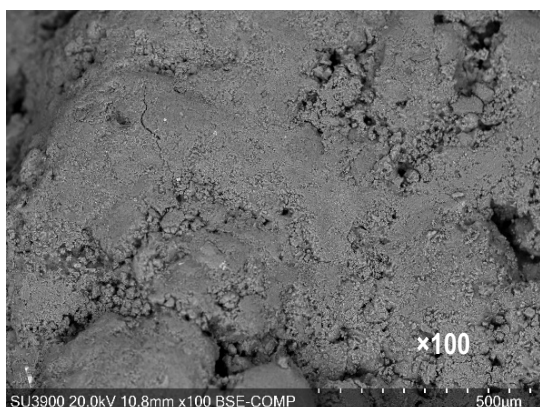


写真-2.5 白色塊表面の SEM 画像

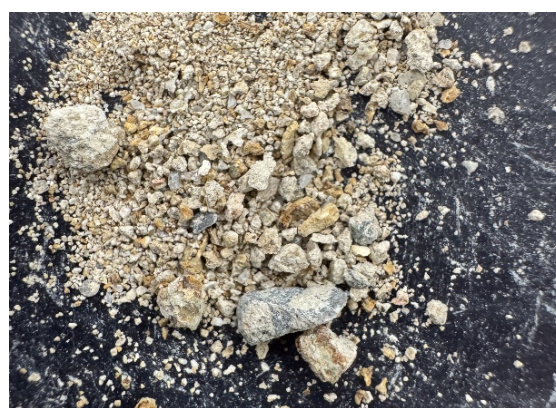
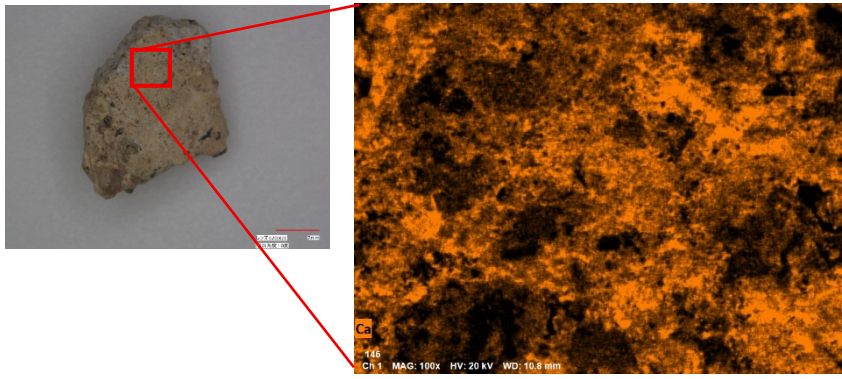


写真-2.6 白色塊を乳鉢で潰した状態

5) 一般社団法人セメント協会, [https://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jy\\_21.html](https://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jy_21.html).

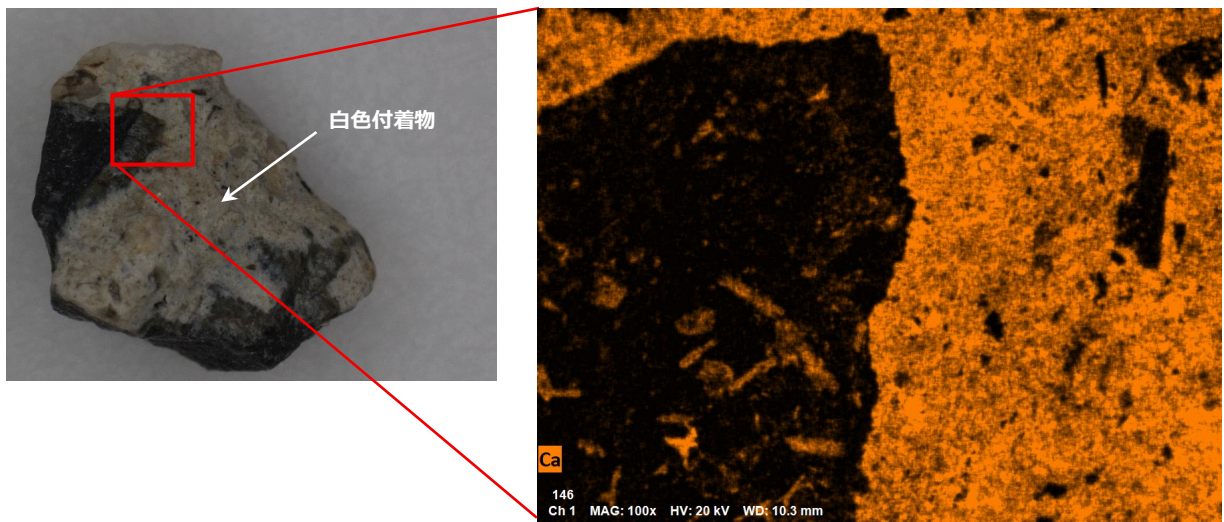


元素	質量(%)
Oxygen	32.0
Magnesium	1.0
Aluminium	6.1
Silicon	12.0
Potassium	0.9
Calcium	24.5
Titanium	0.2
Iron	2.6
Platinum	2.1
Sulfur	0.8
Sodium	0.4
その他	17.3

SEM-EDX 画像, Ca 含有量が視野中で相対的に多い箇所をオレンジ色に着色

※ SEM-EDX 観察のため Platinum を粒子表面に蒸着 (Platinum は参考値)

図-2.2 白色塊表面の SEM-EDX 画像, 各元素の含有量の推定結果



SEM-EDX 画像, Ca 含有量が視野中で相対的に多い箇所をオレンジ色に着色

図-2.3 白色付着物の SEM-EDX 画像

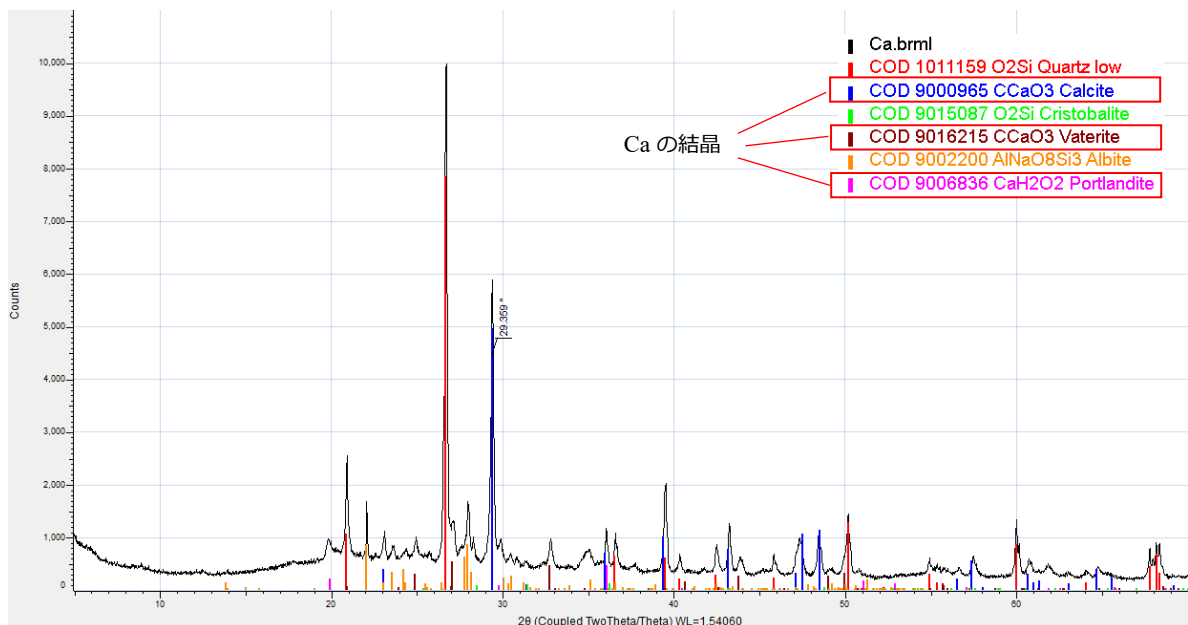


図-2.4 XRD による白色塊の結晶構造の組成解析結果

### 2.2.3 土壌試料の粒度構成, 洗浄に伴う粒度構成の変化

#### (1) 湿式分級による土壌中の砂分と細粒分の分離

湿式分級(Decantation)の概要, それに伴う土壌中の砂分(UF)と細粒分(OF)の分離を図-2.5, 図-2.6を用いて説明する. 図-2.6のように土壌(<2 mm)を L/S=10 でスラリー化した土壌スラリー (feed slurry)を十分攪拌し, 短時間静置した後, 上部の容器を傾けて細粒分を含むスラリーを下部の容器へ流し込む. 上部の容器に堆積した砂分を UF (Underflow), 下部の容器のスラリーを OF (Overflow)と呼称した. 図-2.5に示すように Feed slurry の質量を 1 とすると, UF と OF への質量の分配はそれぞれ  $x, 1-x$  となる. Feed slurry, UF, OF の DS (固形分率)の測定値を基に  $x$  の値を求めることができる. 固形分率 DS(%)は, 水の質量( $m_w$ )を含む固形分全体の質量における固形分の質量( $m_s$ )の割合であり(1)式で定義される. UF へ分配される質量  $x$  は物質収支より(2)式で求められる. 図-2.5に示すように feed slurry, UF, OF の DS がそれぞれ 9.1%, 50.0%, 4.0%の場合は,  $x = (9.1-4.0)/(50.0-4.0) = 0.1109$  となる.

$$DS(\%) = \frac{m_s}{(m_s + m_w)} \times 100 \quad (1)$$

$$x = \frac{DS_{Feed} - DS_{OF}}{DS_{UF} - DS_{OF}} \quad (2)$$

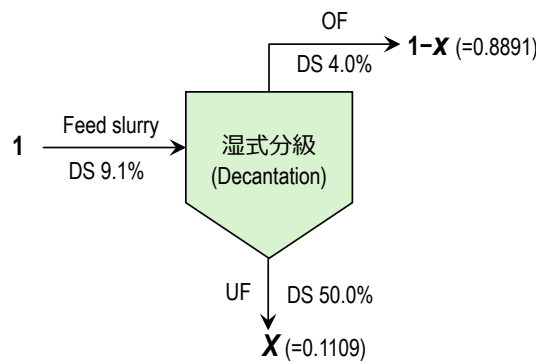


図-2.5 湿式分級による UF と OF の分離

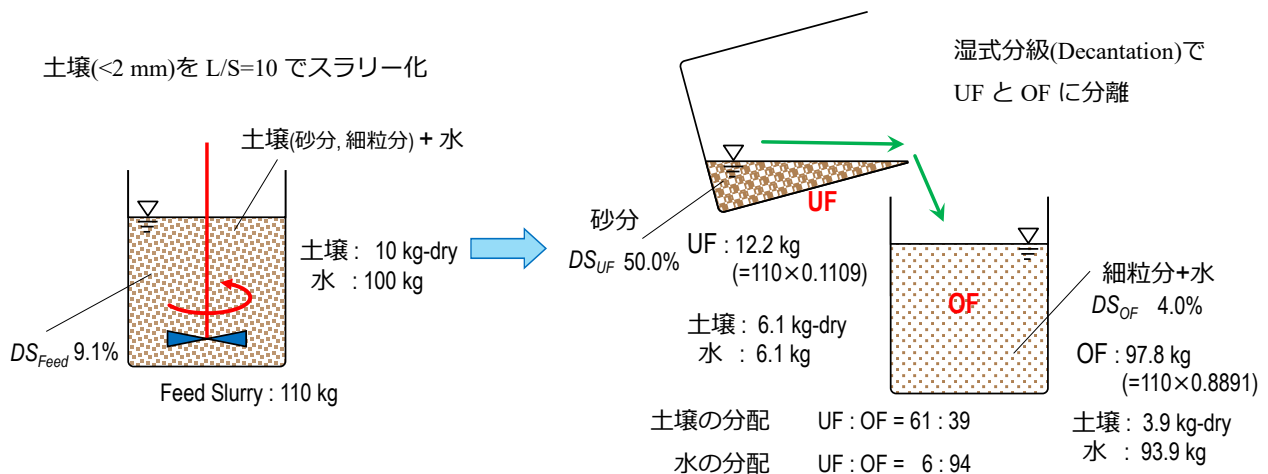


図-2.6 湿式分級(Decantation)による UF(砂分)と OF(細粒分+水)の分離の例

具体例として、図-2.6に示すように土壌 10 kg-dry を水 100 kg (=100 L)でスラリー化した場合、feed slurry の DS は 9.1 %となる。この feed slurry を湿式分級(Decantation)によって UF と OF に分離する。UF の DS が 50.0 %，OF の DS が 4.0 %の場合，土壌は UF : OF = 61 : 39 に分配され，水は UF : OF = 6 : 94 に分配される。土壌スラリー中の水の大部分は OF へ分配される。

今回の土壌試料の粒度構成，洗浄に伴う粒度構成の変化を図-2.7，図-2.8に示す。土壌試料の粒度構成，洗浄に伴う粒度構成の変化を以下に要約する。図-1.2，図-2.1で説明したように，UF(砂分)，粗粒分(砂利)が各々浄化土(砂)，洗浄砂利として浄化産物となり，OF(細粒分)が濃縮残渣(脱水ケーキ)となる。

### 低濃度土壌

- 元土壌の粒度構成は，土壌(<2mm)が 47.4 %，砂利(2~9.5 mm)が 21.1 %，砂利(>9.5 mm)が 31.5 %であった。通常の土壌よりも砂利の割合がかなり高い。
- 水洗浄によって，砂利に含まれる団粒状の塊は解泥されて土壌(<2mm)側へ移行する。このため，水洗浄後の構成は，土壌(<2mm)が 53.0 %，砂利(2~9.5 mm)が 18.0 %，砂利(>9.5 mm)が 29.0 %となった。
- 土壌(<2mm)は湿式分級(Decantation)によって UF(砂分)と OF(細粒分)に分けられる。UF : OF = 60 : 40 の割合で分配されたため，湿式分級後の粒度構成は OF(細粒分)が 21.2 %，UF(砂分)が 31.8 %，砂利(2~9.5 mm)が 18.0 %，砂利(>9.5 mm)が 29.0 %となった。
- 洗浄によって元土壌の 78.8 %が浄化産物(砂分+砂利)となり，元土壌の 21.2 %が濃縮残渣となる。

### 高濃度土壌

- 元土壌の粒度構成は，土壌(<2mm)が 44.4 %，砂利(2~9.5 mm)が 20.2 %，砂利(>9.5 mm)が 35.4 %であった。通常の土壌よりも砂利の割合がかなり高い。
- 水洗浄によって，砂利に含まれる団粒状の塊は解泥されて土壌(<2mm)側へ移行する。このため，水洗浄後の構成は，土壌(<2mm)が 51.0 %，砂利(2~9.5 mm)が 17.2 %，砂利(>9.5 mm)が 31.8 %となった。
- 土壌(<2mm)は湿式分級(Decantation)によって UF(砂分)と OF(細粒分)に分けられる。UF : OF = 65 : 35 の割合で分配されたため，湿式分級後の粒度構成は OF(細粒分)が 17.8 %，UF(砂分)が 33.2 %，砂利(2~9.5 mm)が 17.2 %，砂利(>9.5 mm)が 31.8 %となった。
- 洗浄によって元土壌の 82.2 %が浄化産物(砂分+砂利)となり，元土壌の 17.8 %が濃縮残渣となる。

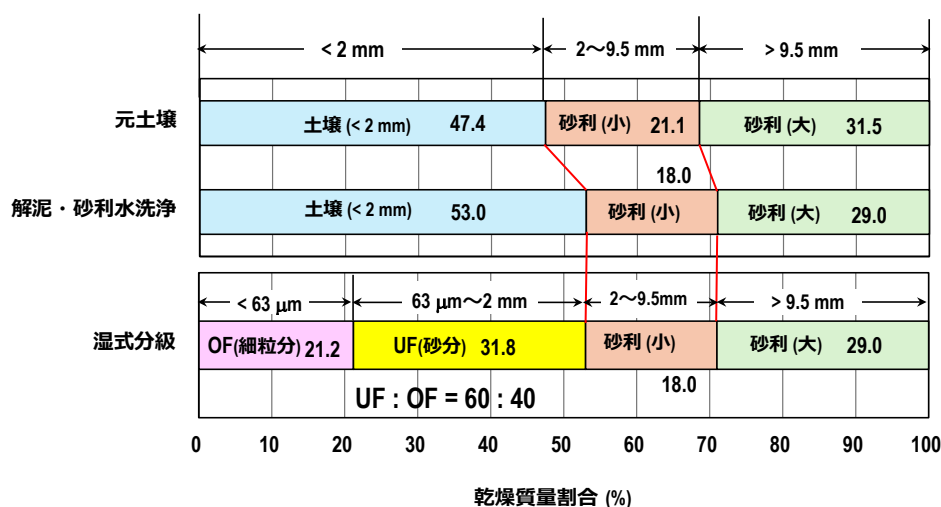


図-2.7 元土壌の粒度構成，洗浄に伴う粒度構成の変化，低濃度土壌

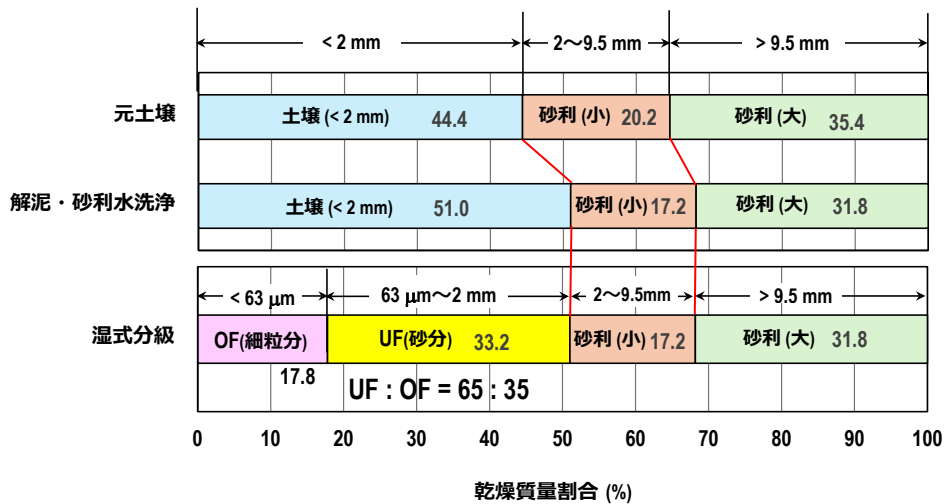


図-2.8 元土壌の粒度構成，洗浄に伴う粒度構成の変化，高濃度土壌

湿式分級までの洗浄処理の主要な結果を表-2.4 (低濃度)，表-2.5 (高濃度)に要約する。

表-2.4 湿式分級までの洗浄処理の主要な結果，低濃度土壌

	土壌(< 2mm)	砂利(2~9.5 mm)	砂利(>9.5 mm)	
元土壌の粒度構成 (%)	47.4%	21.1%	31.5%	
元土壌のPFOA含有量 (µg/kg)	89.5	13.5	4.5	
元土壌のPFOA溶出量 (ng/L)	6,840	1,459	757	
元土壌の土壌pH	9.7	10.4	9.9	
解泥・水洗浄後の粒度構成 (%)	53.0%	18.0%	29.0%	
↓ 湿式分級(Decantation)				
	UF(砂分)	OF(細粒分)	砂利(2~9.5 mm)	砂利(>9.5 mm)
湿式分級後の粒度構成 (%)	31.8%	21.2%	18.0%	29.0%

表-2.5 湿式分級までの洗浄処理の主要な結果，高濃度土壌

	土壌(< 2mm)	砂利(2~9.5 mm)	砂利(>9.5 mm)	
元土壌の粒度構成 (%)	44.4%	20.2%	35.4%	
元土壌のPFOA含有量 (µg/kg)	982	251	648	
元土壌のPFOA溶出量 (ng/L)	88,650	15,100	9,608	
元土壌の土壌pH	9.6	9.9	9.7	
解泥・水洗浄後の粒度構成 (%)	51.0%	17.2%	31.8%	
↓ 湿式分級(Decantation)				
	UF(砂分)	OF(細粒分)	砂利(2~9.5 mm)	砂利(>9.5 mm)
湿式分級後の粒度構成 (%)	33.2%	17.8%	17.2%	31.8%

## 2.2.4 土壌洗浄による PFOA 除去プロセス, 洗浄砂の PFOA 溶出量, 土壌 pH

前述したように, 土壌試料の PFOA 分析値(含有量, 溶出量)のバラツキが大きかった. このため, 土壌洗浄試験の性能評価(PFOA 除去率)に当たっては, 元土壌の PFOA 分析データの平均値(一部, 中央値)を用いて行なうことにした. 土壌洗浄試験の分析値(PFOA, 土壌 pH, TOC, Fe, Ca), PFOA 除去率を整理し, 土壌洗浄による PFOA の除去プロセス, 洗浄砂の PFOA 溶出量, 土壌 pH, 土壌中の TOC, Fe, Ca の含有量についてまとめたものを表-2.6(低濃度土壌), 表-2.7(高濃度土壌)に示す. 尚, PFOA の除去率は次式で定義し, 計算に当たっては含有量の定量下限値未満(< 0.4 µg/kg)は 0.2 µg/kg, 溶出量の定量下限値未満(< 40 ng/L)は 20 ng/L として計算を行なった.

$$\text{除去率(\%)} = \left(1 - \left(\frac{\text{浄化土の濃度}}{\text{元土壌の濃度}}\right)\right) \times 100$$

低濃度土壌の洗浄試験(表-2.6)の主要な結果を以下に要約する.

### 土壌(< 2mm), 低濃度土壌

- 2 mm 以下の土壌(A-1, PFOA 溶出量 6,840 ng/L, pH 9.7)は, 湿式分級によって UF(砂分), OF(細粒分+水)に分離される. このプロセスで UF(砂分)の PFOA 溶出量は 286 ng/L (230~340 ng/L)まで低減した(B-1). (PFOA 溶出量の除去率は 95.8 %) 土壌 pH は 10.1 と元土壌とほぼ同じ高アルカリ性であった. 湿式分級のプロセスでは土壌中の PFOA の大部分は水へ溶出する. OF スラリーの PFOA 濃度は 6,300 ng/L (6,000~6,600 ng/L)と高い値となった(C-1).
- UF(砂分)は flotation プロセスで PFOA を含む汚染粒子が除去されて PFOA 溶出量は 130 ng/L (91~180 ng/L)まで低減した(D-1a). (PFOA 溶出量の除去率は 98.1 %) 土壌 pH は 10.1 と元土壌とほぼ同じ高アルカリ性であった. UFC (Up-flow column)よりも Flotation の方が PFOA 除去に有効であった.
- UF(砂分)は UFC プロセスで PFOA を含む細粒分が分離, 除去されて PFOA 溶出量は 178 ng/L (100~300 ng/L)まで低減した(D-1b). (PFOA 溶出量の除去率は 97.4 %) 土壌 pH は 10.2 と元土壌とほぼ同じ高アルカリ性であった.
- 中和処理を兼ねて酸洗浄を行なうと, Flotation を経た酸洗浄砂の PFOA 溶出量は定量下限値未満(< 40 ng/L)まで低減し溶出量の目標値(50 ng/L)を達成した(E-1a). PFOA 溶出量の除去率は 99.7 %となり, 目標除去率(99%)を達成した. 土壌 pH は 4.6 (4.4~4.9)と埋戻し土の基準(pH 4~9)を満足した. 今回の汚染土壌は高アルカリ性の特異的な土壌であったため, 通常の土壌洗浄プロセスでは溶出量目標値と埋戻し土の pH 基準を満足することができなかったが, 酸洗浄プロセスを追加することによって溶出量目標値と埋戻し土の pH 基準の両方を満足できることがわかった.
- 中和処理を兼ねて酸洗浄を行なうと, UFC を経た酸洗浄砂についても PFOA 溶出量は 29.3 ng/L まで低減し溶出量の目標値(50 ng/L)を達成した(E-1b). PFOA 溶出量の除去率は 99.6 %となり, 目標除去率(99%)を達成した.

### 砂利(2mm~9.5 mm), 低濃度土壌

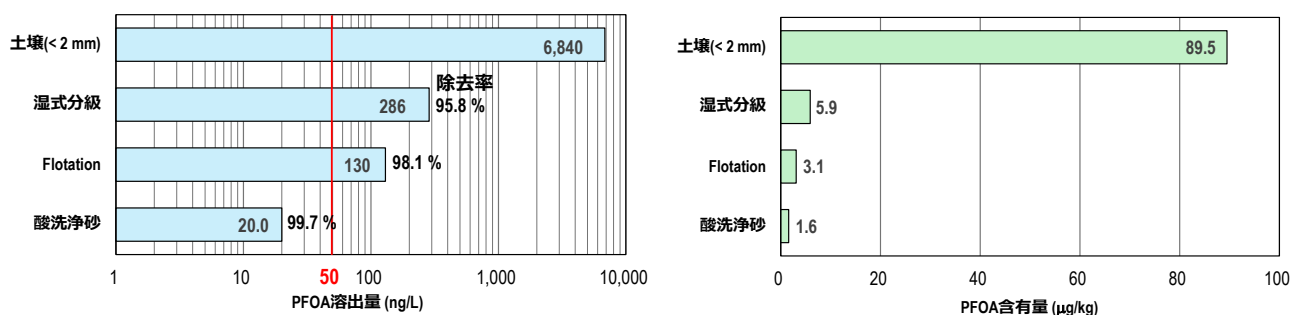
- 2~9.5 mm の砂利(A-2, PFOA 溶出量 1,459 ng/L, pH 10.4)は, 水洗浄によって砂利(2~9.5 mm)の PFOA 溶出量は 396 ng/L (120~690 ng/L)まで低減した(B-2). (PFOA 溶出量の除去率は 72.9%) 土壌 pH は 10.2 と元土壌とほぼ同じ高アルカリ性であった.
- 中和処理を兼ねて酸洗浄を行なうと, 酸洗浄砂利(2~9 mm)の PFOA 溶出量は 83 ng/L (70~100 ng/L)まで低減した(E-2). 溶出量の目標値(50 ng/L)は達成できなかったが, 目標値に近い値まで溶出量を低減することができた. PFOA 溶出量の除去率は 94.3 %であった.

### 砂利(> 9.5 mm), 低濃度土壌

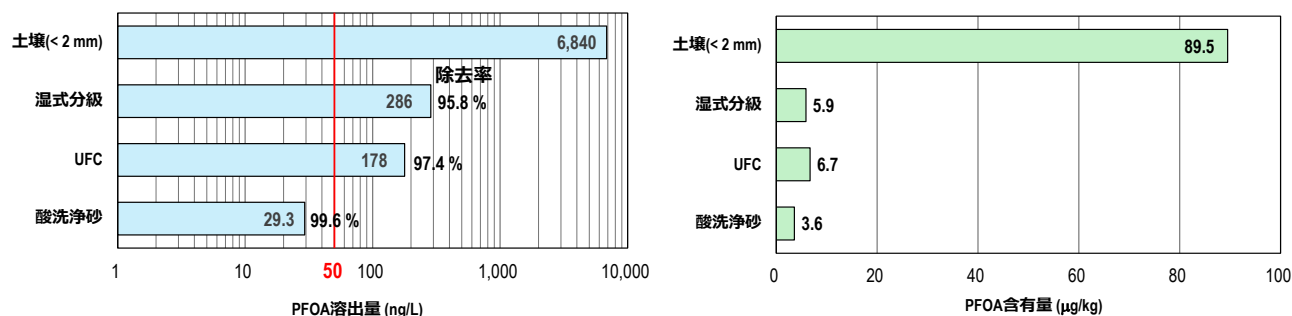
- 9.5 mm 以上の砂利(A-3, PFOA 溶出量 757 ng/L, pH 9.9)は, 水洗浄によって砂利(>9.5 mm)の PFOA 溶出量は 303 ng/L (<40~645 ng/L)まで低減した(B-3). (PFOA 溶出量の除去率は 60.0%) 大きな砂利(>9.5 mm)については水洗浄だけで溶出量の目標値と埋戻し土の pH 基準の両方を満足した場合があった. 土壌 pH は 9.6 と元土壌とほぼ同じ高アルカリ性であった.

- 中和処理を兼ねて酸洗浄を行なうと、酸洗浄砂利(>9.5 mm)の PFOA 溶出量は 43.8 ng/L (28~65.5 ng/L) まで低減した(E-3)。(PFOA 溶出量の除去率は 85.2 %) 大きな砂利(>9.5 mm)については酸洗浄によって溶出量目標値と埋戻し土の pH 基準の両方を満足した場合は 3 例中 2 例(28.0 ng/L, 38.0 ng/L)であった。溶出量目標値を満足しなかった場合も 65.5 ng/L と溶出量の目標値(50 ng/L)に近い値まで溶出量を低減することができた。

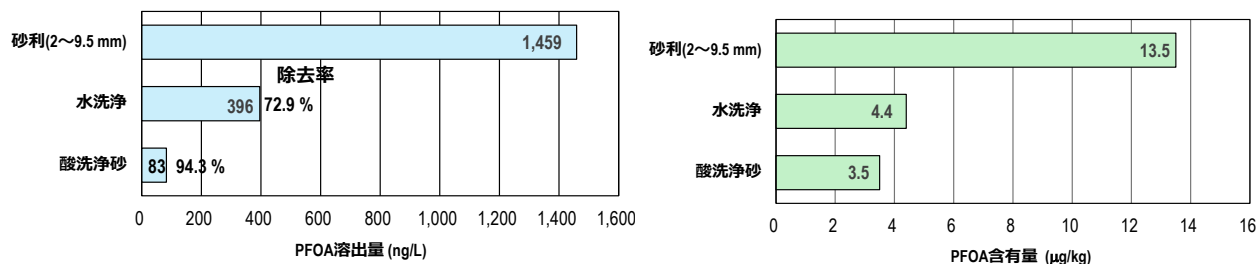
土壌(<2mm), 砂利(2~9.5 mm), 砂利(>9.5 mm)別に、一連の洗浄プロセスによる PFOA 溶出量の低減効果を PFOA 含有量の減少と対比して図-2.9 に示す。湿式分級の過程で PFOA 含有量の大部分が水(OF)へ移行すること、これに伴い PFOA 含有量, PFOA 溶出量ともに大幅に減少することがわかった。湿式分級後に残存している PFOA は土壌粒子表面に強く吸着(固着)しているものと考えられた。酸洗浄によって、PFOA 含有量と PFOA 溶出量がさらに減少することが認められた。酸洗浄によって PFOA 溶出量が大幅に低減する理由としては、土壌粒子表面に強く固着してる Ca 溶出が考えられた。



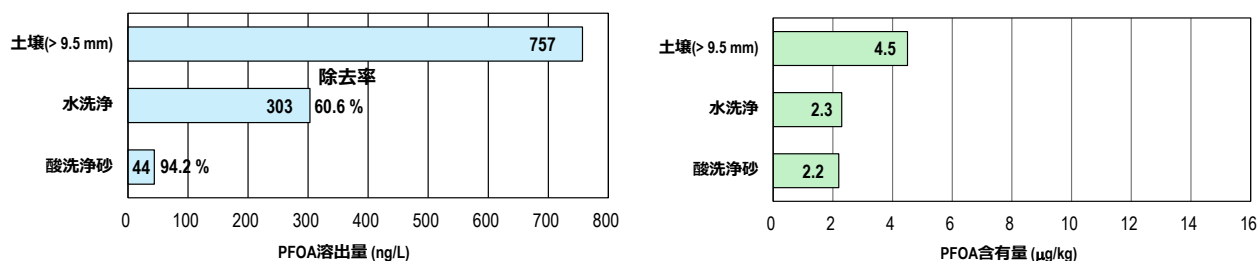
(a) 洗浄プロセスにおける PFOA 溶出量(左)と PFOA 含有量(右)の減少, Flotation, 土壌(<2mm)



(b) 洗浄プロセスにおける PFOA 溶出量(左)と PFOA 含有量(右)の減少, UFC, 土壌(<2mm)



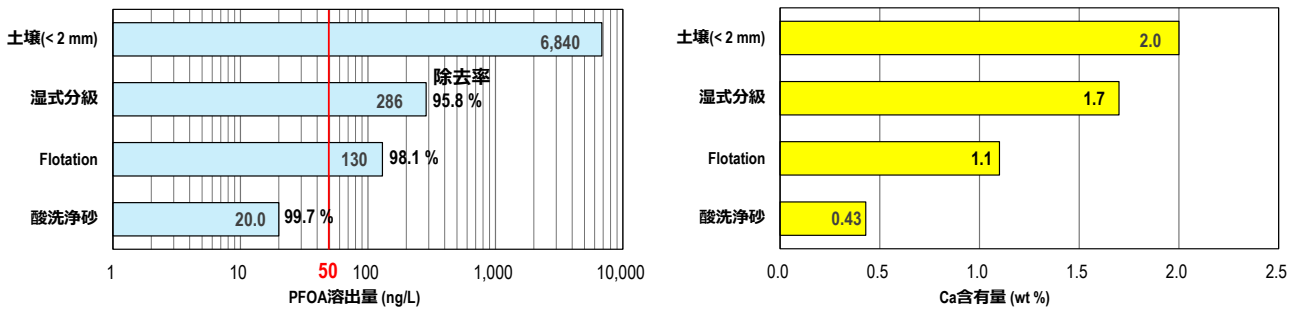
(c) 洗浄プロセスにおける PFOA 溶出量(左)と PFOA 含有量(右)の減少, 砂利(2~9.5 mm)



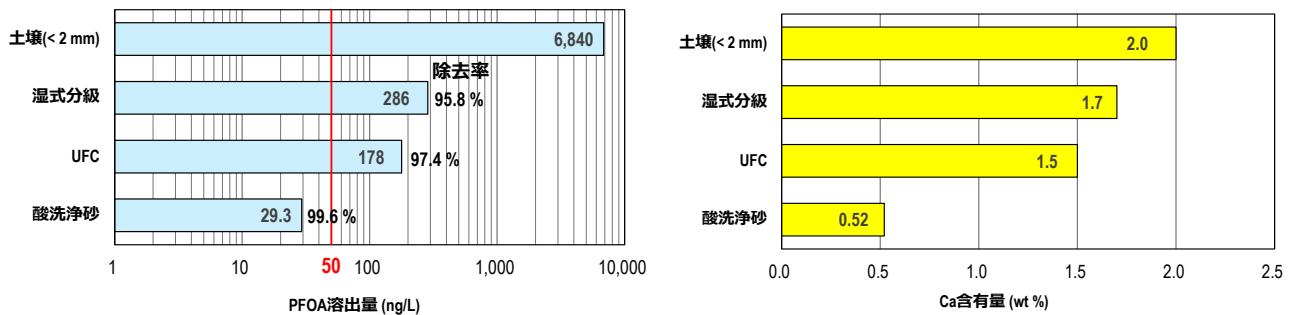
(d) 洗浄プロセスにおける PFOA 溶出量(左)と PFOA 含有量(右)の減少, 砂利(>9.5 mm)

図-2.9 一連の洗浄プロセスにおける PFOA 溶出量と PFOA 含有量の減少, 低濃度土壌

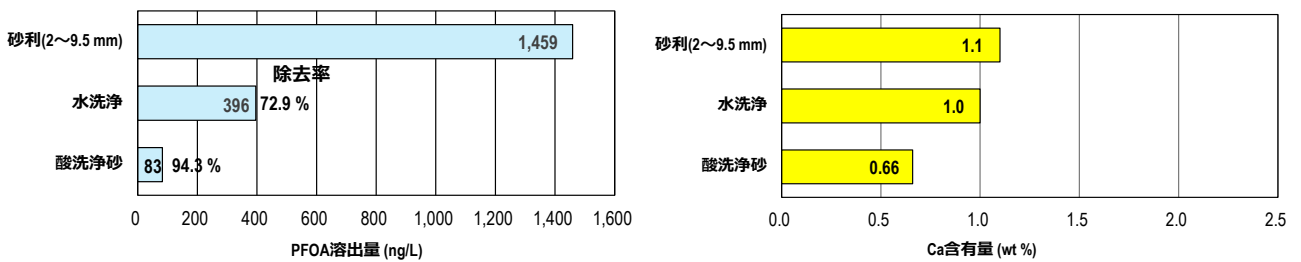
土壌(<2mm), 砂利(2~9.5 mm), 砂利(> 9.5 mm)別に, 一連の洗浄プロセスにおける PFOA 溶出量の減少を Ca 含有量の減少と対比して図-2.10 に示す. 土壌(<2 mm)の場合, 湿式分級~flotation/UFC では土壌内に 1%以上の Ca が残存すること, 酸洗浄によって Ca が約 0.5%以下になると溶出量が 50 ng/L となることがわかった. 砂利(2~9.5 mm), 砂利(> 9.5 mm)の場合も同様に Ca が 0.5%以下になると溶出量が大きく低減することが認められた. 湿式分級~flotation 後に残存している Ca は土壌粒子表面に強く吸着(固着)しており, この Ca に保持されている PFOA が溶出量の低減を妨げていることが推測された. 今回の土壌試料においては, 土壌中の Ca が PFOA の吸着・保持に大きく寄与しているものと考えられた.



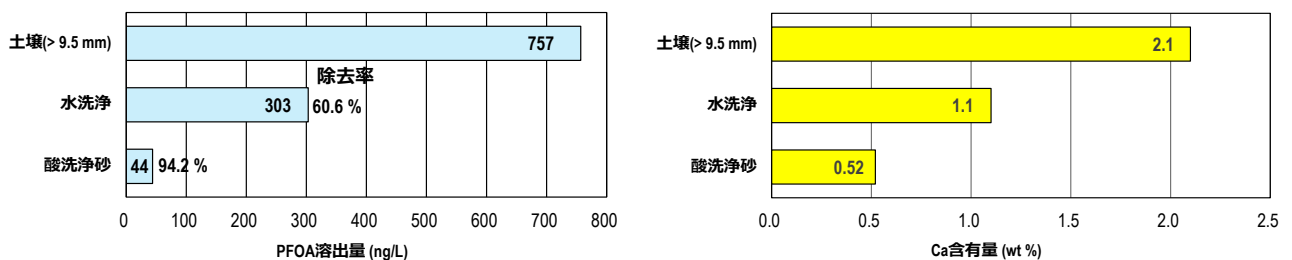
(a) 洗浄プロセスにおける PFOA 溶出量(左)と Ca 含有量(右)の低減, Flotation, 土壌(<2mm)



(b) 洗浄プロセスにおける PFOA 溶出量(左)と Ca 含有量(右)の低減, UFC, 土壌(<2mm)



(c) 洗浄プロセスにおける PFOA 溶出量(左)と Ca 含有量(右)の低減, 砂利(2~9.5 mm)



(d) 洗浄プロセスにおける PFOA 溶出量(左)と Ca 含有量(右)の低減, 砂利(> 9.5 mm)

図-2.10 土壌洗浄および酸洗浄による Ca 減少に伴う PFOA 溶出量の低減, 低濃度土壌

表-2.6 土壌洗浄によるPFOAの除去プロセス、洗浄砂のPFOA溶出量と土壌pH、低濃度土壌

A-1. 乾式フルレイ 土壌 < 2 mm									
元土壌 (乾式分級)	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	
中央値	89.5	--	6,840	--	0.22	3.0	2.0	9.7	
最大値	150.7	--	6,900	--	0.22	3.0	2.0	9.8	
最小値	51.4	--	4,849	--	0.19	2.7	1.9	9.5	
B-1. UF (砂分), 湿式分級(Decantation)									
湿式分級 砂利の水洗浄	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	
平均値	5.9	93.4%	286	95.8%	0.14	2.3	1.7	10.1	
最大値	9.1	89.8%	340	95.0%	0.18	2.4	1.7	10.4	
最小値	3.8	95.8%	230	96.6%	0.09	2.2	1.6	9.9	
D-1a. Flotation洗浄砂									
Flotation UFC	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	
平均値	3.1	96.5%	130	98.1%	--	2.1	1.1	10.1	
最大値	6.1	93.2%	180	97.4%	--	2.1	1.1	10.3	
最小値	1.6	98.2%	91	98.7%	--	2.1	1.1	9.8	
D-1b. UFC (Up-flow column)洗浄砂									
Flotation UFC	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	
平均値	6.7	92.6%	178	97.4%	0.16	2.2	1.5	10.2	
最大値	13	85.5%	300	95.6%	0.18	2.4	1.7	10.4	
最小値	1.9	97.9%	100	98.5%	0.13	2.0	1.2	10.0	
E-1a. Flotation 酸洗浄砂									
酸洗浄	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	
平均値	1.6	98.3%	<40	99.7%	--	2.0	0.43	4.6	
最大値	3.4	96.2%	<40	99.7%	--	2.4	0.47	4.9	
最小値	<0.4	99.8%	<40	99.7%	--	1.8	0.33	4.4	
E-1b. UFC 酸洗浄砂									
酸洗浄	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	
平均値	3.6	95.9%	29.3	99.6%	--	1.9	0.52	6.8	
最大値	5.3	94.1%	41.0	99.4%	--	2.1	0.69	10.7	
最小値	0.99	98.9%	<40	99.7%	--	1.7	0.35	4.6	
E-1c. UF 酸洗浄砂									
酸洗浄	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	
平均値	1.6	98.3%	<40	99.7%	--	2.0	0.43	4.6	
最大値	3.4	96.2%	<40	99.7%	--	2.4	0.47	4.9	
最小値	<0.4	99.8%	<40	99.7%	--	1.8	0.33	4.4	
C-1. OF (水), 湿式分級(Decantation)									
湿式分級 砂利の水洗浄	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	
平均値	10	67.4%	396	72.9%	0.06	2.0	1.0	10.2	
最大値	5.5	59.2%	690	52.7%	0.07	2.4	1.2	10.8	
最小値	1.8	86.6%	120	91.8%	0.04	1.5	0.77	9.7	
B-2. 水洗浄砂利(2~9.5 mm)									
湿式分級 砂利の水洗浄	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	
平均値	4.4	67.4%	396	72.9%	0.06	2.0	1.0	10.2	
最大値	5.5	59.2%	690	52.7%	0.07	2.4	1.2	10.8	
最小値	1.8	86.6%	120	91.8%	0.04	1.5	0.77	9.7	
B-3. 水洗浄砂利(>9.5 mm)									
湿式分級 砂利の水洗浄	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	
平均値	2.3	49.0%	303	60.0%	0.07	3.2	1.1	9.6	
最大値	3.8	16.3%	645	14.8%	0.11	5.5	2.4	10.2	
最小値	1.5	67.0%	<40	97.4%	0.02	1.4	0.13	8.6	
A-2. 乾式フルレイ 砂利(2~9.5 mm)									
元土壌 (乾式分級)	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	
中央値	13.5	--	1,459	--	0.06	2.4	1.1	10.4	
最大値	19	--	2,100	--	0.06	2.9	1.3	10.6	
最小値	6.7	--	580	--	0.06	2.0	0.87	10.1	
A-3. 乾式フルレイ 砂利(>9.5 mm)									
元土壌 (乾式分級)	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	分析値	除去率 (%)	
中央値	4.5	--	757	--	0.05	3.0	2.1	9.9	
最大値	11.0	--	1,200	--	0.07	3.8	3.9	10.5	
最小値	1.5	--	210	--	0.03	2.2	0.4	9.1	

(注) 除去率の計算において <0.4 µg/kg は 0.2 µg/kg, <40 ng/L は 20 ng/L として計算を行った。

高濃度土壌の洗浄試験(表-2.7)の主要な結果を以下に要約する。

#### 土壌(<2mm), 高濃度土壌

- 2 mm 以下の土壌(A-1, PFOA 溶出量 88,650 ng/L, pH 9.6)は, 湿式分級によって UF(砂分), OF(細粒分+水)に分離される。このプロセスで UF(砂分)の PFOA 溶出量は 6,067 ng/L (4,800~8,400 ng/L)まで低減した(B-1)。 (PFOA 溶出量の除去率は 93.2%) 土壌 pH は 10.1 と高いアルカリ性であった。湿式分級のプロセスでは土壌中の PFOA の大部分は水へ溶出する。OF スラリーの PFOA 濃度は 115,000 ng/L (100,000~115,000 ng/L)と非常に高い値となった(C-1)。
- UF(砂分)は flotation プロセスで PFOA を含む汚染粒子が除去されて PFOA 溶出量は 4,700 ng/L (2,400~6,200 ng/L)まで低減した(D-1a)。 (PFOA 溶出量の除去率は 94.7%) 土壌 pH は 10.0 と高いアルカリ性であった。
- UF(砂分)は UFC プロセスで PFOA を含む細粒分が分離, 除去されて PFOA 溶出量は 2,400 ng/L (1,000~4,000 ng/L)まで低減した(D-1b)。 (PFOA 溶出量の除去率は 97.3%) 土壌 pH は 10.0 と高いアルカリ性であった。
- 中和処理を兼ねて酸洗浄を行なうと, Flotation を経た酸洗浄砂の PFOA 溶出量は 1,453 ng/L (510~2,000 ng/L)まで低減した(E-1a)。 PFOA 溶出量の除去率は 98.4% と目標除去率(99%)に非常に近い値であった。土壌 pH は 4.9 (4.4~5.4)と埋戻し土の基準(pH 4~9)を満足した。
- 中和処理を兼ねて酸洗浄を行なうと, UFC を経た酸洗浄砂の PFOA 溶出量は 1,600 ng/L (1,500~1,700 ng/L)まで低減した(E-1b)。 PFOA 溶出量の除去率は 98.2% と目標除去率(99%)に非常に近い値であった。土壌 pH は 4.7 と埋戻し土の基準(pH 4~9)を満足した。

#### 砂利(2mm~9.5 mm), 高濃度土壌

- 2~9.5 mm の砂利(A-2, PFOA 溶出量 15,100 ng/L, pH 9.9)は, 水洗浄によって砂利(2~9.5 mm)の PFOA 溶出量は 4,850 ng/L (1,000~6,900 ng/L)まで低減した(B-2)。 (PFOA 溶出量の除去率は 67.9%) 土壌 pH は 9.9 と元土壌とほぼ同じ高アルカリ性であった。
- 中和処理を兼ねて酸洗浄を行なうと, 酸洗浄砂利(2~9.5 mm)の PFOA 溶出量は 647 ng/L (330~810 ng/L)まで低減した(E-2)。 PFOA 溶出量の除去率は 95.7% であった。

#### 砂利(>9.5 mm), 高濃度土壌

- 9.5 mm 以上の砂利(A-3, PFOA 溶出量 9,608 ng/L, pH 9.7)は, 水洗浄によって砂利(>9.5 mm)の PFOA 溶出量は 3,200 ng/L (1,800~4,500 ng/L)まで低減した(B-3)。 (PFOA 溶出量の除去率は 66.7%) 土壌 pH は 9.6 と元土壌とほぼ同じ高アルカリ性であった。
- 中和処理を兼ねて酸洗浄を行なうと, 酸洗浄砂利(>9.5 mm)の PFOA 溶出量は 575 ng/L (80~900 ng/L)まで低減した(E-3)。 (PFOA 溶出量の除去率は 94.0%) 大きな砂利(>9 mm)については酸洗浄によって溶出量が 80 ng/L まで低減した場合があった。

表-2.7 土壌洗浄によるPFOAの除去プロセス、洗浄砂のPFOA溶出量と土壌pH、高濃度土壌

A-1. 乾式フルレイ 土壌 < 2 mm									
元土壌 (乾式分級)	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (ng/L)	除去率 (%)	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (wt%)	除去率 (wt%)	
平均値	982	--	88,650	--	0.23	3.0	2.1	9.6	--
最大値	1,208	--	100,720	--	0.32	3.1	2.1	9.8	--
最小値	756	--	76,580	--	0.14	2.9	2.0	9.3	--

B-1. UF (砂分), 湿式分級(Decantation)									
湿式分級 砂利の水洗浄	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (ng/L)	除去率 (%)	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (wt%)	除去率 (wt%)	
平均値	111.7	88.6%	6,067	93.2%	0.30	2.2	1.5	10.0	--
最大値	170.6	82.6%	8,400	90.5%	0.31	2.4	1.7	10.0	--
最小値	78.4	92.0%	4,800	94.6%	0.29	2.0	1.3	10.0	--

C-1. OF (水), 湿式分級(Decantation)									
L/S	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値 (ng/L)	除去率 (%)	分析値 (ng/L)	除去率 (%)	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (wt%)	除去率 (wt%)	
10	115,000	--	115,000	--	0.06	2.3	1.0	9.9	--
10	130,000	--	130,000	--	0.06	2.6	1.2	10.2	--
10	100,000	--	100,000	--	0.06	2.0	0.8	9.6	--

B-2. 水洗浄砂利 (2~9.5 mm)									
PFOA含有量	PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH	A-2. 乾式フルレイ 砂利 (2~9.5 mm)	
	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (ng/L)	除去率 (%)	分析値 (wt%)	除去率 (wt%)		分析値 (μg/kg)	除去率 (%)
49.0	92.4%	3,200	66.7%	0.07	3.1	1.6	9.9	648	--
76.5	88.2%	4,500	53.2%	0.07	3.1	1.6	10.1	1,419	--
12.0	98.1%	1,800	81.3%	0.07	3.1	1.6	9.7	2,200	--

B-3. 水洗浄砂利 (> 9.5 mm)									
PFOA含有量	PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH	A-3. 乾式フルレイ 砂利 (> 9.5 mm)	
	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (ng/L)	除去率 (%)	分析値 (wt%)	除去率 (wt%)		分析値 (μg/kg)	除去率 (%)
49.0	92.4%	3,200	66.7%	0.13	2.5	1.0	9.6	0.03	2.0
76.5	88.2%	4,500	53.2%	0.13	3.5	1.5	9.8	0.03	2.0
12.0	98.1%	1,800	81.3%	0.13	1.5	0.47	9.4	0.03	2.0

D-1a. Flotation(洗浄砂)									
Flotation UFC	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (ng/L)	除去率 (%)	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (wt%)	除去率 (wt%)	
平均値	228.6	76.7%	4,700	94.7%	--	2.1	1.0	10.0	--
最大値	372.1	62.1%	6,200	93.0%	--	2.1	1.0	10.2	--
最小値	130.6	86.7%	2,400	97.3%	--	2.1	1.0	9.7	--

D-1b. UFC (Up-flow column)洗浄砂									
Flotation UFC	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (ng/L)	除去率 (%)	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (wt%)	除去率 (wt%)	
平均値	119.1	87.9%	2,400	97.3%	0.18	2.3	1.2	10.0	--
最大値	170.6	82.6%	4,000	95.5%	0.20	2.3	1.2	10.1	--
最小値	54.0	94.5%	1,000	98.9%	0.18	2.2	1.1	9.9	--

E-1a. Flotation 酸洗浄砂									
酸洗浄	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (ng/L)	除去率 (%)	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (wt%)	除去率 (wt%)	
平均値	80	91.9%	1,453	98.4%	--	2.1	0.48	4.9	--
最大値	110	88.8%	2,000	97.7%	--	2.2	0.54	5.4	--
最小値	21	97.9%	510	99.4%	--	1.9	0.42	4.4	--

E-1b. UFC 酸洗浄砂									
酸洗浄	PFOA含有量		PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH
	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (ng/L)	除去率 (%)	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (wt%)	除去率 (wt%)	
平均値	221	77.5%	1,600	98.2%	--	2.2	0.73	4.7	--
最大値	281	71.4%	1,700	98.1%	--	2.3	1.0	4.7	--
最小値	161	83.6%	1,500	98.3%	--	2.1	0.45	4.7	--

E-2. 酸洗浄砂利 (2~9.5 mm)									
PFOA含有量	PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH	E-2. 酸洗浄砂利 (2~9.5 mm)	
	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (ng/L)	除去率 (%)	分析値 (wt%)	除去率 (wt%)		分析値 (μg/kg)	除去率 (%)
24.3	90.3%	647	95.7%	--	2.3	1.1	5.5	45.2	93.0%
40	84.1%	810	94.6%	--	2.5	1.2	9.6	92	85.8%
14	94.4%	330	97.8%	--	2.1	1.1	3.3	5.6	99.1%

E-3. 酸洗浄砂利 (> 9.5 mm)									
PFOA含有量	PFOA溶出量		溶出液		TOC Fe Ca		pH	E-3. 酸洗浄砂利 (> 9.5 mm)	
	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	分析値 (ng/L)	除去率 (%)	分析値 (wt%)	除去率 (wt%)		分析値 (μg/kg)	除去率 (%)
45.2	93.0%	575	94.0%	--	2.0	0.42	4.1	92	85.8%
92	85.8%	900	90.6%	--	2.2	0.69	6.4	80	99.2%
5.6	99.1%	80	99.2%	--	1.4	0.09	3.1	--	--

(注) 除去率の計算において < 0.4 μg/kg は 0.2 μg/kg, < 40 ng/L は 20 ng/L として計算を行った。

一連の土壌洗浄処理，酸洗浄処理の主要な結果と目標に対する評価を表-2.8 (低濃度)，表-2.9 (高濃度)に要約して示す。

尚，酸洗浄には，図-2.1 に示したように塩酸，硫酸，クエン酸の3種類を用いた。酸洗浄後の土壌試料は水道水で軽く濯ぎ洗いを行なった。土壌(< 2 mm)に対しては塩酸と硫酸を，砂利(> 9.5 mm, 2~9.5 mm)に対しては塩酸，硫酸，クエン酸を個別に用いた。今回の試験では塩酸と硫酸の処理効果に大きな差異は見られなかったが，砂利に対しては塩酸や硫酸よりもクエン酸の方がやや効果的であった。実務を考えると硫酸<sup>6)</sup>の使用が適当と考える。

表-2.8 土壌洗浄処理，酸洗浄処理の主要な結果と目標に対する評価，低濃度土壌

	土壌(<2mm)	砂利(2~9.5 mm)	砂利(>9.5 mm)	
元土壌の粒度構成 (%)	47.4%	21.1%	31.5%	
元土壌のPFOA含有量 (µg/kg)	89.5	13.5	4.5	
元土壌のPFOA溶出量 (ng/L)	6,840	1,459	757	
元土壌の土壌pH	9.7	10.4	9.9	
解泥・水洗浄後の粒度構成 (%)	53.0%	18.0%	29.0%	
↓ 土壌洗浄(水洗浄，湿式分級+flotation)				
	洗浄砂(UF)	濃縮残渣(OF)	砂利(2~9.5 mm)	砂利(>9.5 mm)
土壌洗浄処理後の粒度構成 (%)	31.8%	21.2%	18.0%	29.0%
土壌洗浄処理後のPFOA含有量 (µg/kg)	3.1	191.2	4.4	2.3
土壌洗浄処理後のPFOA溶出量 (ng/L)	130	---	396	303
溶出量目標値(50 ng/L)の達成	No	---	No	No
土壌洗浄処理のPFOA除去率	98.1%	---	72.9%	60.0%
溶出量除去率目標値(99%)の達成	No	---	No	No
土壌洗浄処理後の土壌pH	10.1	---	10.2	9.6
埋戻し土のpH基準(4.0~9.0)の達成	No	---	No	No
↓ 酸洗浄				
	洗浄砂(UF)	濃縮残渣(OF)	砂利(2~9.5 mm)	砂利(>9.5 mm)
土壌洗浄+酸洗浄後のPFOA溶出量 (ng/L)	< 40	---	83	43.8
溶出量目標値(50 ng/L)の達成	Yes	---	No	Yes
土壌洗浄+酸洗浄処理のPFOA除去率	99.7%	---	94.3%	94.2%
溶出量除去率目標値(99%)の達成	Yes	---	No	No
土壌洗浄+酸洗浄後の土壌pH	4.6	---	4.8	9.0
埋戻し土のpH基準(4.0~9.0)の達成	Yes	---	Yes	Yes

6) 今回の酸洗浄試験では，0.04 N, 0.2 N, 1 N の硫酸を使用した。

表-2.9 土壌洗浄処理、酸洗浄処理の主要な結果と目標に対する評価、高濃度土壌

	土壌(<2mm)	砂利(2~9.5 mm)	砂利(>9.5 mm)
元土壌の粒度構成 (%)	44.4%	20.2%	35.4%
元土壌のPFOA含有量 (µg/kg)	982	251	648
元土壌のPFOA溶出量 (ng/L)	88,650	15,100	9,608
元土壌の土壌pH	9.6	9.9	9.7
解泥・水洗浄後の粒度構成 (%)	51.0%	17.2%	31.8%

↓ 土壌洗浄(水洗浄, 湿式分級+flotation)

	洗浄砂(UF)	濃縮残渣(OF)	砂利(2~9.5 mm)	砂利(>9.5 mm)
土壌洗浄処理後の粒度構成 (%)	33.2%	17.8%	17.2%	31.8%
土壌洗浄処理後のPFOA含有量 (µg/kg)	228.6	2,518	53.1	49.0
土壌洗浄処理後のPFOA溶出量 (ng/L)	4,700	---	4,850	3,200
溶出量目標値(50 ng/L)の達成	No	---	No	No
土壌洗浄処理のPFOA除去率	94.7%	---	67.9%	66.7%
溶出量除去率目標値(99 %)の達成	No	---	No	No
土壌洗浄処理後の土壌pH	10.0	---	9.9	9.6
埋戻し土のpH基準(4.0~9.0)の達成	No	---	No	No

↓ 酸洗浄

	洗浄砂(UF)	濃縮残渣(OF)	砂利(2~9.5 mm)	砂利(>9.5 mm)
土壌洗浄+酸洗浄後のPFOA溶出量 (ng/L)	1,453	---	647	575
溶出量目標値(50 ng/L)の達成	No	---	No	No
土壌洗浄+酸洗浄処理のPFOA除去率	97.7~99.4%	---	95.7%	94.0%
溶出量除去率目標値(99 %)の達成	No/Yes	---	No	No
土壌洗浄+酸洗浄後の土壌pH	4.9	---	5.5	4.1
埋戻し土のpH基準(4.0~9.0)の達成	Yes	---	Yes	Yes

## 2.2.5 pH と PFOA 溶出量の関係(pH を変化させた溶出試験)

新たに水洗浄した低濃度土壌の砂利(2~9.5 mm), 砂利(> 9.5 mm)を用いて, pH を段階的に変えた溶出試験(L/S = 10)を実施した. 水洗浄後の砂利の PFOA 含有量分析値(n=2)は, 砂利(2~9.5 mm)が 5.0 µg/kg, 5.2 µg/kg, 砂利(> 9.5 mm)が 1.5 µg/kg, 1.6 µg/kg であった. 水洗浄後の砂利の PFOA 溶出量分析値(n=2)は, 砂利(2~9.5 mm)が 690 ng/L, 480 ng/L, 砂利(> 9.5 mm)が 130 ng/L, 260 ng/L であった.

溶出液 pH と PFOA 溶出量の関係を図-2.11 に示す. PFOA 溶出量は pH が酸性側になるほど大きく, pH がアルカリ性側になるほど小さくなることが認められた.

土壌(鉱物)粒子の表面電荷は図-2.12(a)に示すように pH によって変化する. 図-2.12(b)に示すように, 酸性側で土壌表面は正(+)に帯電するため PFAS は吸着し, アルカリ性側で土壌表面は負(-)に帯電するため PFAS は脱着することが報告されている. 今回の土壌試料の場合は, これとは逆に pH が低くなるほど PFOA 溶出量が大きく増加することが判明した. 今回の土壌試料の場合, pH を酸性側にすることは PFOA の吸着を促しているわけではなく, PFOA の溶出を促していることになる. 図-2.10 に示した酸洗浄による Ca 含有量の減少に伴う PFOA 溶出量の低減効果を併せて考えると, (a) pH が酸性側になると土壌に付着している Ca 分が溶出すること, (b) このため Ca に吸着していた PFOA も一緒に溶出したことが示唆された.

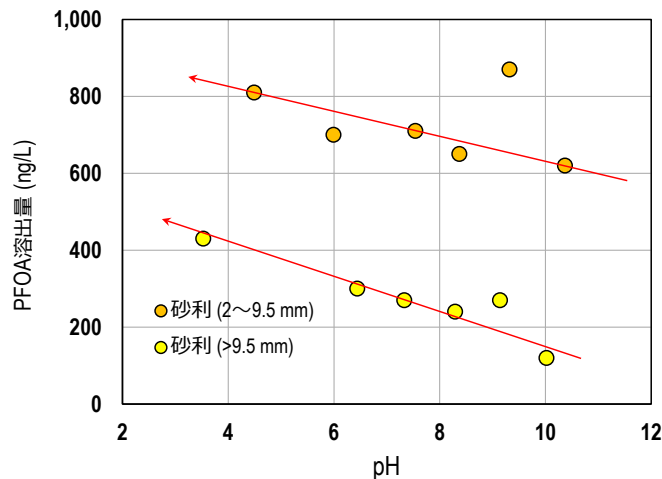


図-2.11 溶出液 pH と PFOA 溶出量の関係, 水洗浄後の砂利, 低濃度土壌

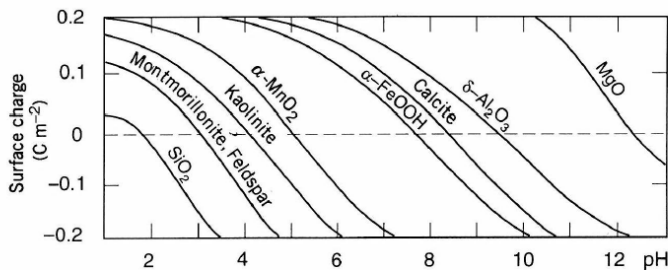
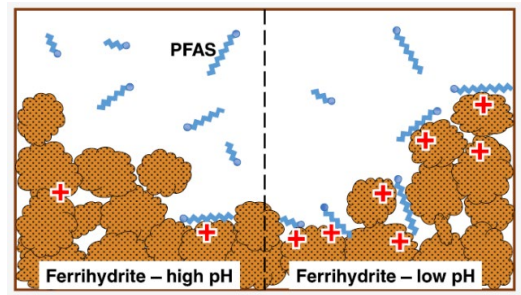


Figure 9.9. Effect of pH on approximate surface charge ( $C m^{-2}$ ) of a few representative colloids. At  $pH_{pzc}$  the surface charge is zero. The measurements of the surface charge depend on the solution composition. The curves given are general trends. The curve for calcite is valid for a suspension of  $CaCO_3$  in equilibrium with air ( $p_{CO_2} = 10^{-3.5}$  atm).



(a) pH による鉱物表面電荷の変化(荷電ゼロ点(Point of Zero Charge)の説明) (b) 表面電荷による PFAS の吸着(酸性)と脱着(アルカリ性)

図-2.12 pH による鉱物表面電荷の変化(荷電ゼロ点の説明)<sup>7)</sup>, 表面電荷による PFAS の吸着と脱着<sup>8)</sup>

7) Stumm, W., Morgan, J., J.: Aquatic Chemistry, Wiley-Interscience.

8) Hugo Campos-Pereira, Dan B. Kleja, Carin Sjöstedt, Lutz Ahrens, Wantana Klysubun, and Jon Petter Gustafsson: The Adsorption of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) onto Ferrihydrite Is Governed by Surface Charge, *Environmental Science Technology*, 54, 15722–15730, 2020.

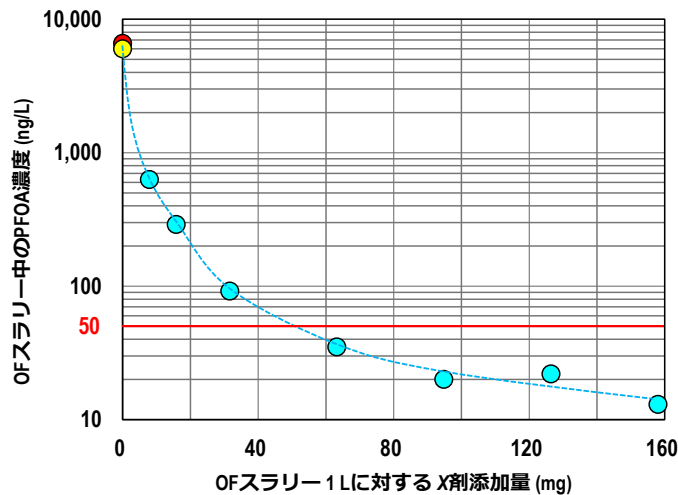
## 2.2.6 凝集沈殿による OF スラリーの PFOA 除去

高濃度の溶存態 PFOA を含む湿式分級の OF スラリーの凝集沈殿試験を行なった。前述したように、L/S=10 でスラリー化した土壌スラリー中の水の大部分は OF へ分配される。湿式分級の過程で PFOA 含有量の大部分が溶出し水(OF)へ移行するため、OF スラリーの溶存態 PFOA 濃度は非常に高くなる。

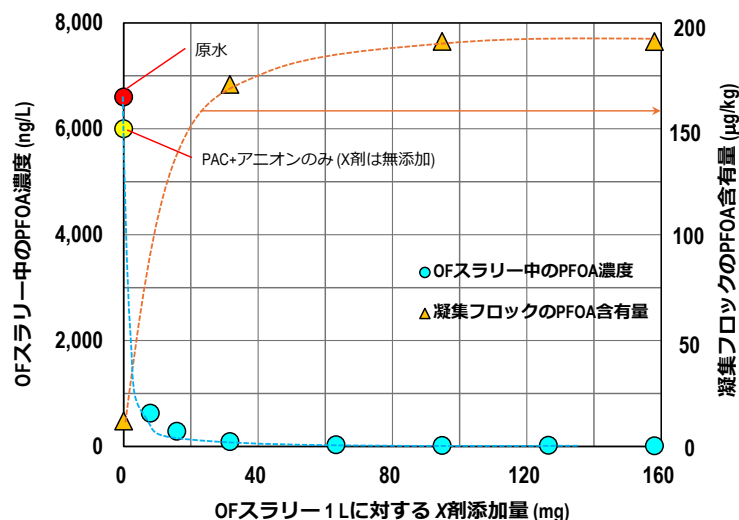
凝集沈殿試験では使用した薬剤は以下の通りであり、下記の順序で添加した。

- pH 調整剤：硫酸，水酸化ナトリウム
- X 剤：カチオン系界面活性剤
- 無機凝集剤：PAC (ポリ塩化アルミニウム)
- アニオン系高分子凝集剤

X 剤(カチオン系界面活性剤)を用いた凝集沈殿による低濃度土壌の OF スラリー中の溶存態 PFOA の除去，凝集フロックの PFOA 含有量の増大を図-2.13 に示す。図-2.13(a)より，X 剤の添加に伴って OF スラリー中の溶存態 PFOA 濃度(6,600 ng/L)が 50 ng/L 未満の 13 ng/L まで大幅に減少することが確認された。溶存態 PFOA の除去率は 99.8%であった。図-2.13(b)に示したように，OF スラリー中の溶存態 PFOA が除去されるのに伴い凝集フロックの PFOA 含有量は大きく増大する。凝集フロックの PFOA 含有量は 191.2 μg/kg であった。この凝集フロック(スラッジ)がプレス脱水を経て，濃縮残渣となる。



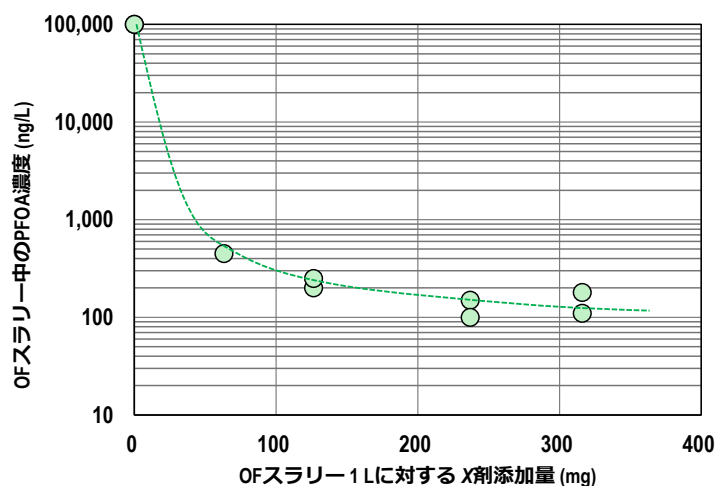
(a) X 剤の添加に伴う凝集沈殿による OF スラリー中の溶存態 PFOA 濃度の減少，低濃度土壌の OF



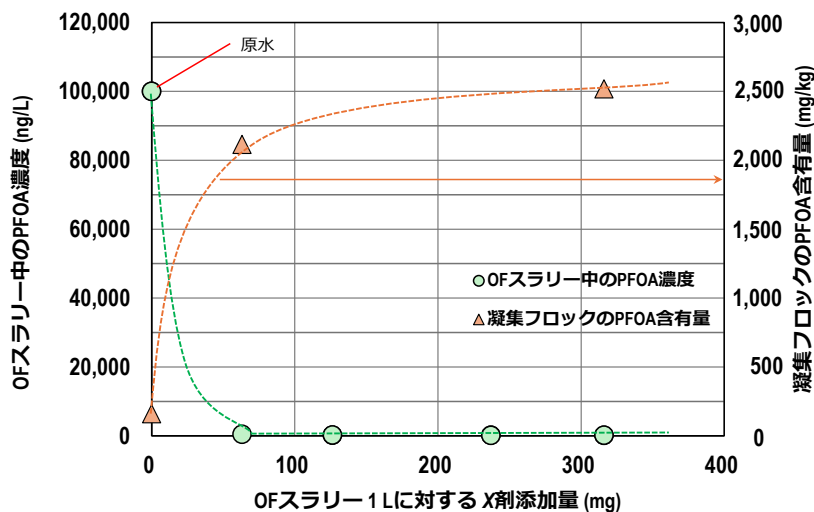
(b) OF スラリー中の溶存態 PFOA の除去に伴う凝集フロックの PFOA 含有量の増大，低濃度土壌の OF

図-2.13 凝集沈殿による OF スラリー中の溶存態 PFOA の除去，凝集フロックの PFOA 含有量の増大，低濃度土壌

X剤(カチオン系界面活性剤)を用いた凝集沈殿による高濃度土壌の OF スラリー中の溶存態 PFOA の除去, 凝集フロックの PFOA 含有量の増大を図-2.14 に示す. 図-2.14(a)より, X 剤の添加に伴って OF スラリー中の溶存態 PFOA 濃度(100,000 ng/L)が 100~200 ng/L まで大幅に減少することが確認された. 溶存態 PFOA の除去率は 99.8~99.9%であった. 図-2.14(b)に示したように, OF スラリー中の溶存態 PFOA が除去されるのに伴い凝集フロック(スラッジ)の PFOA 含有量は大きく増大する. 凝集フロックの PFOA 含有量は 2,518  $\mu\text{g}/\text{kg}$  であった. この凝集フロック(スラッジ)がプレス脱水を経て, 濃縮残渣となる.



(a) X剤(カチオン系界面活性剤)の添加に伴う凝集沈殿による OF スラリー中の溶存態 PFOA 濃度の減少, 低濃度土壌の OF



(b) OF スラリー中の溶存態 PFOA の除去に伴う凝集フロックの PFOA 含有量の増大, 低濃度土壌の OF

図-2.14 凝集沈殿による OF スラリー中の溶存態 PFOA の除去, 凝集フロックの PFOA 含有量の増大, 高濃度土壌

カチオン系界面活性剤である X 剤が凝集沈殿処理水中に残存しているか否かを調べることにした。低濃度土壌の OF スラリー凝集沈殿試験(Run 4, Run 5, Run 8, Run 9)の処理水を対象に、(a) JIS 法に基づく陽イオン界面活性剤の分析、(b) LC-MS/MS MRM 法による X 剤濃度の分析の両方を実施した。

凝集沈殿試験(Run 4, Run 5, Run 8, Run 9)の概要を表-2.10 に示す。次に凝集沈殿試験(Run 4, Run 5, Run 8, Run 9)の処理水を、以下のように混合した混合処理水、その混合処理水を活性炭で吸着処理した活性炭処理水を作成した。

- Low, 処理水, 4&5 : Run 4 と Run 5 の処理水を 1:1 で混合した混合処理水
- Low, 処理水, 4&5\_AC : 上記の混合処理水の活性炭(AC)処理水
- Low, 処理水, 8&9 : Run 8 と Run 9 の処理水を 1:1 で混合した混合処理水
- Low, 処理水, 8&9\_AC : 上記の混合処理水の活性炭(AC)処理水

JIS 法に基づく陽イオン界面活性剤の分析結果を表-2.11 に、LC-MS/MS MRM 法による X 剤濃度の分析結果を表-2.12 に示す。JIS 法に基づく陽イオン界面活性剤の分析値が全て「検出せず」であり、LC-MS/MS MRM 法による X 剤濃度は全て定量下限値未満(< 0.2 ppb)であった。以上より、X 剤添加量が多い場合(Low, 処理水, 4&5)においても凝集沈殿処理水中に X 剤は残存していないことが確認された。また、活性炭吸着処理は特に必要が無いことも確認された。

表-2.10 OF スラリー凝集沈殿試験(Run 4, Run 5, Run 8, Run 9)の概要, 低濃度土壌

	OFスラリー (mL)	原水 PFOA濃度 (ng/L)	X剤添加量 (mg)	処理水 PFOA濃度 (ng/L)	PFOA除去率 (%)	凝集フロック PFOA含有量 (µg/kg)
Run 4	1,000	6,600	158.0	13	99.8%	191.2
Run 5	1,000	6,600	126.4	22	99.7%	---
Run 8	1,000	6,600	31.6	92	98.6%	171
Run 9	1,000	6,600	15.8	290	95.6%	---

表-2.11 JIS 法に基づく陽イオン界面活性剤の分析結果

分析試験項目	結果	定量下限	分析方法
Low, 処理水, 4 & 5	陽イオン界面活性剤 検出せず	0.3 mg/L	JIS K 0102-4:2024「工業用水・工場排水試験方法」付属書B(参考)「オレンジII吸光光度分析法による陽イオン界面活性剤の定量」
Low, 処理水, 4 & 5_AC	陽イオン界面活性剤 検出せず		
Low, 処理水, 8 & 9	陽イオン界面活性剤 検出せず		
Low, 処理水, 8 & 9_AC	陽イオン界面活性剤 検出せず		

表-2.12 LC-MS/MS MRM 法による X 剤(カチオン系界面活性剤)濃度の分析結果

分析項目	実測濃度	定量下限	実測濃度 (参考値)	定量下限 (参考値)	分析方法
Low, 処理水, 4 & 5	X剤 (陽イオン界面活性剤) < 0.2 ppb	0.2 ppb	< 0.2 µg/L	0.2 µg/L	液体クロマトグラフィー—質量分析法(LC-MS/MS MRM法) (X剤の主成分であるカチオン界面活性剤を対象物質として測定。X剤2%(v/v)エタノール溶液を用いて検量線を作成、定量。実質濃度(参考値)はX剤の密度を 0.8 g/mLとして算出)
Low, 処理水, 4 & 5_AC	X剤 (陽イオン界面活性剤) < 0.2 ppb		< 0.2 µg/L		
Low, 処理水, 8 & 9	X剤 (陽イオン界面活性剤) < 0.2 ppb		< 0.2 µg/L		
Low, 処理水, 8 & 9_AC	X剤 (陽イオン界面活性剤) < 0.2 ppb		< 0.2 µg/L		

## 2.2.7 土壤洗浄試験における PFOA の収支

土壤(<2mm)の土壤洗浄における OF スラリーの凝集沈殿結果を図-2.15 に要約して示す。

PFOA 量の収支計算結果を図-2.16(低濃度), 図-2.17(高濃度)に示す。低濃度土壤(<2mm)の PFOA 量の収支は 89.6%, 高濃度土壤(<2mm)の PFOA 量の収支は 97.2%となった。

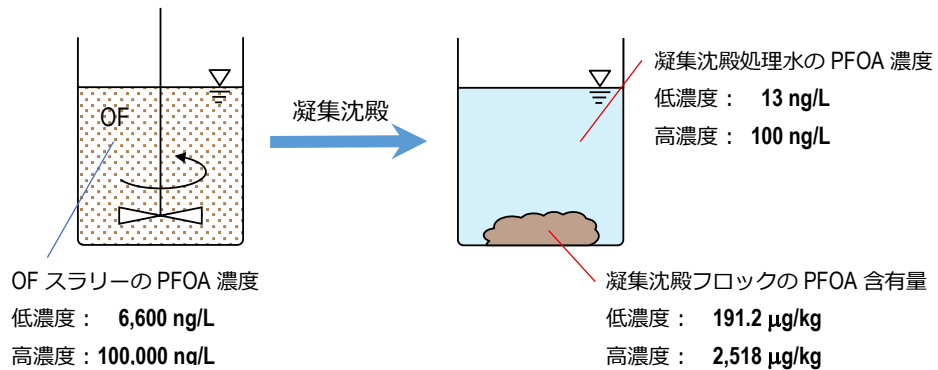


図-2.15 OF スラリーの凝集沈殿結果の要約

低濃度土壤(<2mm)			
土壤乾燥質量 (kg)	100.0		
PFOA含有量 (μg/kg)	89.5		
PFOA量 (μg)	8,950		
↓ 湿式分級 (L/S = 10), 凝集沈殿			
	UF(砂分)	OF(細粒分)	OF(水)
UF, OFの乾燥質量 (kg), OF中の水の質量 (kg)	60.0	40.0	1,000
湿式分級後のPFOA含有量 (μg/kg)	5.9	8.4	---
OFスラリーのPFOA濃度 (ng/L)	---	---	6,600
OF凝集沈殿処理水のPFOA濃度 (ng/L)	---	---	13
凝集フロク(濃縮残渣)のPFOA含有量 (μg/kg)	---	191.2	---
PFOA量 (μg)	354	7,648	13
PFOA量の合計 (mg)	8,015		
PFOA量の収支 (%)	89.6%		

図-2.16 土壤(<2 mm)に関する PFOA 量の収支計算結果, 低濃度土壤

高濃度土壤(<2mm)			
土壤乾燥質量 (kg)	100.0		
PFOA含有量 (μg/kg)	982.0		
PFOA量 (μg)	98,200		
↓ 湿式分級 (L/S = 10), 凝集沈殿			
	UF(砂分)	OF(細粒分)	OF(水)
UF, OFの乾燥質量 (kg), OF中の水の質量 (kg)	65.0	35.0	1,000
湿式分級後のPFOA含有量 (μg/kg)	111.7	120.6	---
OFスラリーのPFOA濃度 (ng/L)	---	---	100,000
OF凝集沈殿処理水のPFOA濃度 (ng/L)	---	---	100
凝集フロク(濃縮残渣)のPFOA含有量 (μg/kg)	---	2,518	---
PFOA量 (μg)	7260.5	88,130	100
PFOA量の合計 (mg)	95,491		
PFOA量の収支 (%)	97.2%		

図-2.17 土壤(<2 mm)に関する PFOA 量の収支計算結果, 高濃度土壤

## 2.2.8 土壌洗浄実証試験の評価

土壌洗浄実証試験の評価を表-2.13 に要約して示す。計画時の目標、新たに加えた 3 つの目標の全てを概ね達成した。今回の汚染土壌は高アルカリ性の特異的な土壌であったため、通常の土壌洗浄プロセスでは溶出量目標値と埋戻し土の pH 基準を満足することができなかったが、酸洗浄プロセスを追加することによって溶出量目標値と埋戻し土の pH 基準の両方を満足できた。参考のため、溶出量除去率と浄化可能な汚染濃度を表-2.14 に示す。

表-2.13 土壌洗浄実証試験の評価

項目	目的	目標値	評価
PFOS + PFOA の除去 (土壌)	PFOS+PFOA の土壌溶出量 及び含有量除去率の評価	処理前後の除去率 99%以上	低濃度土壌(<2mm)の溶出量除去率:99.7% 溶出量除去率 99%以上を達成 低濃度土壌(<2mm)の含有量除去率:98.3% 高濃度土壌(<2mm)の溶出量除去率:98~99.4%
PFOS + PFOA の除去 (洗浄水)	PFOS+PFOA の除去率の評 価	処理前後の除去率等 98%以上	低濃度土壌の洗浄水の除去率:99.5~99.8% 高濃度土壌の洗浄水の除去率:99.7~99.9% PFOS+PFOA 除去率 98%以上を達成
PFOS+PFOA の収支	PFOS+PFOA の収支の評価	90%以上	低濃度土壌の PFOS+PFOA 収支:89.6% 高濃度土壌の PFOS+PFOA 収支:97.2% PFOS+PFOA 収支 90%以上を概ね達成
環境への負荷 (CO <sub>2</sub> 削減)	洗浄礫・洗浄砂を場内埋戻し 出来る仮定とした場合の土壌 運搬量削減に伴う CO <sub>2</sub> 削減を 評価	全量搬出した場合と比較して 50%以上削減 ※柱状図より粒度分布を推定	全量搬出して焼却処理する場合に比べて、現地 で土壌洗浄すると CO <sub>2</sub> を約 80% 削減可能
(新規)浄化土の pH (埋戻し土の基準)	洗浄礫・洗浄砂を埋め戻す場 合の土壌 pH を評価	洗浄礫・洗浄砂の pH を 4.0 以上 9.0 以下	低濃度土壌の洗浄砂の pH:9.8~10.1 低濃度土壌の洗浄砂利(砂利)の pH:9.7~10.8 土壌洗浄+酸洗浄の洗浄砂の pH:4.6~6.8 土壌洗浄+酸洗浄の洗浄礫の pH:4.8~7.1 中和処理を兼ねた酸洗浄を追加することによっ て、埋戻し土の pH 基準を満足
(新規)白色付着物、白 色塊の観察と成分解析	白色付着物、白色塊の構成物 質を解明	特に無し	白色付着物、白色塊の主な構成物質は Ca 化合 物(CaCO <sub>3</sub> , Ca(OH) <sub>2</sub> )であった。人為的に添加され たセメントや石灰の影響が考えられた。
(新規)浄化土の PFOS + PFOA 溶出量 (低濃度土壌の目標)	洗浄礫・洗浄砂の PFOS+PFOA 溶出量を評価	洗浄礫・洗浄砂の PFOS+PFOA 溶出量を 50 ng/L 以下	低濃度土壌の酸洗浄砂の溶出量:< 40 ng/L PFOS+PFOA 溶出量 50 ng/L 以下を達成 酸洗浄砂利(2~9.5mm)の溶出量:70~100 ng/L 酸洗浄砂利(>9.5mm)の溶出量:28~65 ng/L 酸洗浄砂利(>9.5mm)は 3 例中 2 例が溶出量 50 ng/L 以下を達成

表-2.14 溶出量除去率と浄化可能な汚染濃度

PFOS+PFOA 溶出量除去率 (%)	浄化可能な汚染濃度 A (ng/L)	浄化可能な汚染濃度 B (ng/L)	浄化可能な汚染濃度 C (ng/L)	浄化可能な汚染濃度 D (ng/L)
90.0%	500	1,000	2,500	5,000
95.0%	1,000	2,000	5,000	10,000
98.0%	2,500	5,000	12,500	25,000
99.0%	5,000	10,000	25,000	50,000
99.5%	10,000	20,000	50,000	100,000
99.8%	25,000	50,000	125,000	250,000
浄化基準 (ng/L)	50	100	250	500

### 3. 実証試験の評価項目

#### 3.1 対策技術の有効性

今回の実証試験における土壌洗浄技術の有効性を表-3.1 に要約して示す。土壌洗浄によって PFOS+PFOA の土壌溶出量除去率 98%以上、土壌洗浄+酸洗浄によって PFOS+PFOA の土壌溶出量除去率 99%以上を達成した。水に溶出した PFOS+PFOA についても、X剤(カチオン系界面活性剤)を用いた凝集沈殿によって PFOS+PFOA の除去率 99%以上(99.5%~99.9%)を達成した。土壌洗浄は浄化対策に非常に有効である。

今回の汚染土壌は、通常の土壌よりも高いアルカリ性(pH10 前後)の特異的な土壌であったため、通常の土壌洗浄プロセスでは溶出量目標値と埋戻し土の pH 基準を満足することができなかったが、酸洗浄プロセスを追加することによって溶出量目標値(50 ng/L 以下)と埋戻し土の pH 基準(pH 4~9)の両方を満足できた。

参考のため、溶出量除去率と浄化可能な汚染濃度を表-3.2 に示す。浄化土の溶出量目標値を 50 ng/L とした場合、溶出量除去率 98%では 2,500 ng/L までの汚染土壌に洗浄処理は適用可能であり、溶出量除去率 99%~99.5%では 5,000 ng/L~10,000 ng/L までの汚染土壌に洗浄処理は適用可能である。

表-3.1 実証試験における土壌洗浄技術の有効性

項目	目標値	有効性
PFOS + PFOA の土壌溶出量及び含有量の除去	処理前後の除去率 99%以上	低濃度土壌(< 2mm)の溶出量除去率:98.1% (土壌洗浄) 溶出量除去率 98%以上を達成 (土壌洗浄) 低濃度土壌(< 2mm)の溶出量除去率:99.7% (土壌洗浄+酸洗浄) 溶出量除去率 99%以上を達成 (土壌洗浄+酸洗浄) 低濃度土壌(< 2mm)の含有量除去率:98.3% (土壌洗浄+酸洗浄) 高濃度土壌(< 2mm)の溶出量除去率:98~99.4% (土壌洗浄+酸洗浄)
水に溶出した PFOS + PFOA の除去 (洗浄水)	処理前後の除去率等 98%以上	低濃度土壌の洗浄水の除去率:99.5~99.8% 高濃度土壌の洗浄水の除去率:99.7~99.9% PFOS+PFOA 除去率 98%以上を達成
環境への負荷 (CO <sub>2</sub> 削減)	全量搬出した場合と比較して 50%以上削減	全量搬出して焼却処理する場合に比べて、現地で土壌洗浄すると CO <sub>2</sub> を約 80% 削減可能
洗浄礫・洗浄砂を埋め戻す場合の土壌 pH 基準への適合	洗浄礫・洗浄砂の pH を 4.0 以上 9.0 以下	低濃度土壌の洗浄砂の pH: 9.8~10.1 低濃度土壌の洗浄砂利(砂利)の pH: 9.7~10.8 土壌洗浄+酸洗浄の洗浄砂の pH: 4.6~6.8 土壌洗浄+酸洗浄の洗浄礫の pH: 4.8~7.1 中和処理を兼ねた酸洗浄を追加することによって、埋戻し土の pH 基準を満足
白色付着物、白色塊の構成物質を解明	特に無し	白色付着物、白色塊の主な構成物質は Ca 化合物(CaCO <sub>3</sub> , Ca(OH) <sub>2</sub> )であった。人為的に添加されたセメントや石灰の影響が考えられた。
洗浄砂利(礫)、洗浄砂の PFOS+PFOA 溶出量 (低濃度土壌の目標)	洗浄礫・洗浄砂の PFOS+PFOA 溶出量を 50 ng/L 以下	低濃度土壌の酸洗浄砂の溶出量:< 40 ng/L PFOA+PFOA 溶出量 50 ng/L 以下を達成 酸洗浄砂利(2~9.5mm)の溶出量: 70~100 ng/L 酸洗浄砂利(>9.5mm)の溶出量: 28~65 ng/L 酸洗浄砂利(>9.5mm)は 3 例中 2 例が溶出量 50 ng/L 以下を達成

表-3.2 溶出量除去率と適用可能な汚染濃度

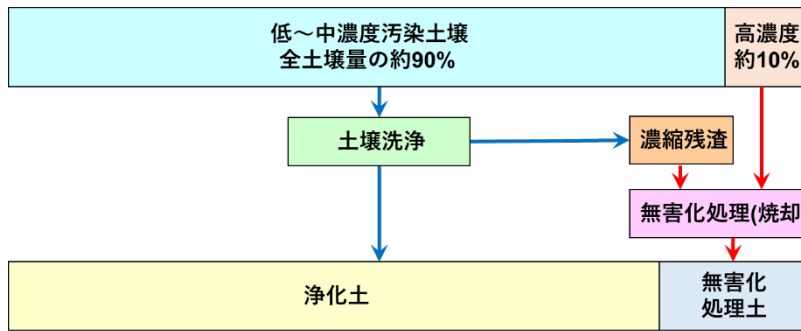
PFOS+PFOA 溶出量除去率 (%)	適用可能な汚染濃度 A (ng/L)	適用可能な汚染濃度 B (ng/L)	適用可能な汚染濃度 C (ng/L)	適用可能な汚染濃度 D (ng/L)
90.0%	500	1,000	2,500	5,000
95.0%	1,000	2,000	5,000	10,000
98.0%	2,500	5,000	12,500	25,000
99.0%	5,000	10,000	25,000	50,000
99.5%	10,000	20,000	50,000	100,000
99.8%	25,000	50,000	125,000	250,000
浄化基準 (ng/L)	50	100	250	500

土壌洗浄技術の特徴は、(a)汚染土壌の減容化、(b)高い費用対効果、(c)環境に優しい浄化技術の3つに要約される。大量のPFAS汚染土壌の浄化対策を考えた場合、図-3.1に示すように土壌洗浄と無害化処理(例えば、焼却処理)の組合せが、他の処理法に比べて費用対効果が高い浄化対策を実現できると考えている。汚染土壌調査では高濃度データに注目が集まりがちであるが、工場跡地のように汚染が広がっている場合には、高濃度土壌は比較的少なく、大部分は低～中濃度の汚染土壌である場合が多い。

低～中濃度のPFAS汚染土壌(浄化基準値の100倍以下)については、コストの安い土壌洗浄によって溶出量目標値を満足する浄化土を産出し、土壌洗浄処理から発生する高濃度の濃縮残渣と高濃度のPFAS汚染土壌(浄化基準値の100倍超過)については、コストは高いが確実にPFASを分解・除去できる無害化処理によって処理を行なう。土壌洗浄と無害化処理を図-3.1のように組合せることによって、経済的に汚染土壌全体の浄化を達成することが可能となる。

土壌洗浄技術の有効性を以下に記す。このような長所があるため、土壌洗浄技術は、重金属類、鉍物油、農薬、ダイオキシン類などによる汚染土壌を対象に広く活用された。土地の再開発を考えている顧客からは「短期間で浄化対策が完了すること」が高く評価された。現地で土壌洗浄を行なう「オンサイト土壌洗浄(図-3.2)」は土壌運搬費を大きく削減できるため、より一層の浄化費用の削減が可能となる。土壌運搬費の大きな削減は、運搬に伴うCO<sub>2</sub>発生量の大きな削減にも繋がる。

- 安価な処理コスト
- 汚染土壌の減容化に伴う高い費用対効果
- 多種多様な汚染土壌へ対応可能
- 環境への負荷が小さい。CO<sub>2</sub>削減効果が高い。
- 現地で土壌洗浄を行なうことが可能(オンサイト土壌洗浄) →土壌運搬費とCO<sub>2</sub>を削減
- オンサイトの場合、外部からの埋戻し土(客土)を大幅に減量可 →客土運搬費とCO<sub>2</sub>を削減
- 63μm未満の細粒分率が大きい場合(概ね50%超過)、処理効果は小さい。
- 処理能力が大きい(洗浄プラント1基当たり40～60 ton/hr (=1,000 ton/day)の処理能力)(短期間で浄化対策を完了することができる。)
- 浄化土(洗浄砂)の万全な品質管理(公定法による分析、計量証明書)



※低～中濃度：浄化基準値の100倍以下，高濃度：浄化基準値の100倍超過

図-3.1 土壌洗浄と無害化処理の組み合わせ，減容化による浄化費用の削減

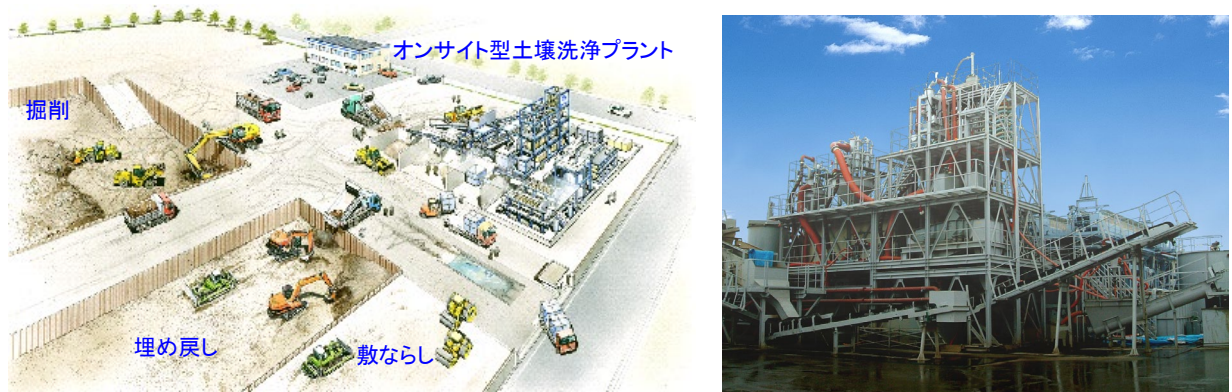


図-3.2 オンサイト土壌洗浄プラントの例

### 3.2 対策技術の新規性・将来性

アメリカの大学の実験室を借りて、飛行場の高濃度 PFAS 汚染サイトから採取した PFAS 汚染土壌を対象とした土壌洗浄の事前適用性試験を 2023~2024 年に実施した。PFAS 汚染の主体は泡消火器由来の PFOS であった。その時に得られた知見と課題を以下に記す。

- 土壌洗浄によって PFOS 含有量除去率 98%~99%を達成することは十分可能
- 課題は、水へ溶出した PFOS の安価かつ連続処理が可能な除去(回収)方法を見つけることであった。活性炭吸着で PFOS を除去(回収)することは可能であるが非常に高コストである。  
(このため、凝集沈殿で PFOS を除去(回収)することが可能な X 剤の実験的検討を開始した。)

一連の実験的検討で見出した新規の X 剤(カチオン系界面活性剤)による PFAS 除去機構を図-3.3 に示す。今回の実証試験で X 剤は PFOS だけではなく、PFOA の除去に 非常に有効であることが確認された。今回の実証試験において、低濃度土壌の洗浄水中の PFOS+PFOA 除去率は 99.5%~99.8%であり、高濃度土壌の洗浄水中の PFOS+PFOA 除去率は 99.7%~99.9%であった

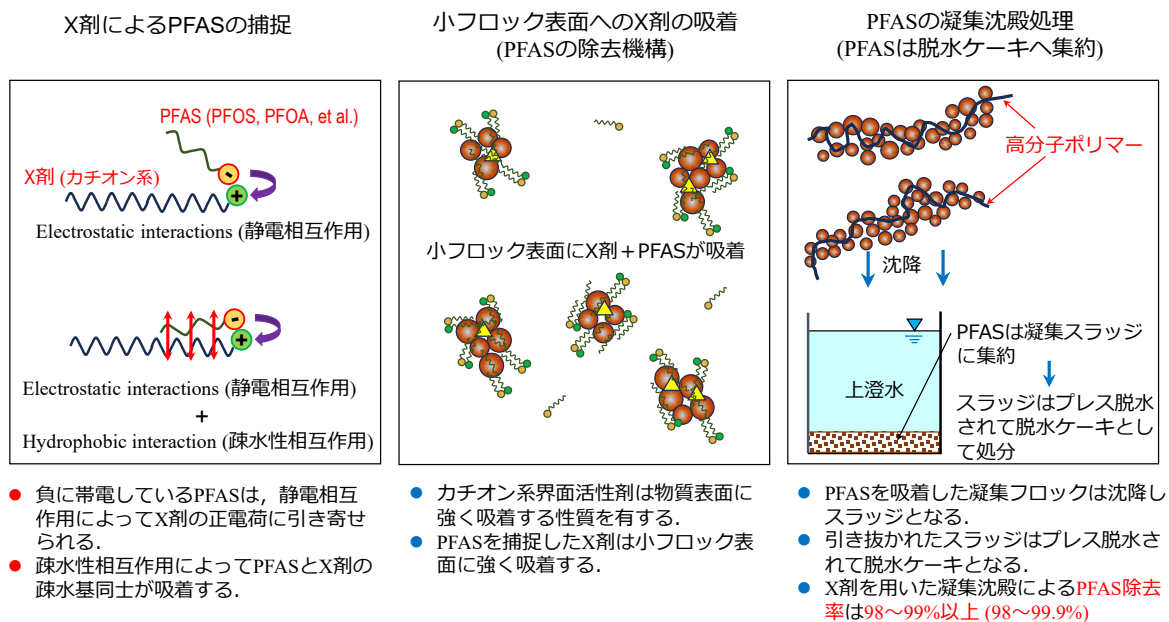


図-3.3 X剤(カチオン系界面活性剤)を用いた溶存態 PFAS の除去機構

今回の実証試験で対象とした土壌は、平均的な国内の自然土壌と比較して高いアルカリ性と高いPFOA溶出量を示す特異的な土壌であった。このため、PFOA溶出量を目標値(50 ng/L)まで低減することと、土壌pHを埋戻し土の基準(pH: 4~9)に適合させることの両方が課題となった。実験を重ねている内に、土壌粒子表面に強く吸着(固着)しているカルシウム(Ca)がPFOAの吸着・保持の役割を担っているように推測された。このことから、今回の土壌試料に対しては新たに「酸洗浄」を追加した。人為的にセメントや石灰が添加された汚染土壌は高アルカリ性となるため、中和処理を兼ねた酸洗浄は必ず必要になると考える。今回新たに追加した酸洗浄は未だ確立されていないが、将来的に必要となる新規技術の1つと考える。

以上より、現時点での対策技術の新規性は以下の2つとなる。新たなPFAS汚染土壌に取り組むたびに、新規性のある対策技術は増えていくと考える。

- X剤(カチオン系界面活性剤)を用いた凝集沈殿による溶存態PFAS(PFOS, PFOA)の除去技術
- 高アルカリ性(pH10前後)のPFAS汚染土壌に対する酸洗浄技術

一般論になるが、土壌洗浄技術において重要な事柄を以下に記す。

- 汚染物質の土壌中の存在形態の理解
- 汚染物質が土壌中に吸着・保持される理由(メカニズム)の理解
- 汚染物質の物理/化学特性の正確な理解
- 土壌スラリーの関する化学工学(輸送, 分級, 脱水など)の理解

これらの事柄を正しく理解した上で、洗浄プロセスのラインナップ, 洗浄フロー, 使用する薬剤の選定を行なう。このため、汚染土壌の受け入れに当たっては事前適用性試験(トリータビリティ試験)が非常に重要となる。今までの数多くの経験と実績によって培ったノウハウがあるため、事前適用性試験の結果によって実機の設計を行なうことができる。

日本においてPFAS汚染土壌の浄化対策が必要になった場合は、以下の手順で対策案を講じることが望ましいと考える。

- (1) 汚染サイトの土壌調査
  - 土壌の性状(粒度構成, pH, その他)
  - PFAS汚染濃度
  - その他の汚染物質の有無
- (2) トリータビリティ試験の実施 → 土壌洗浄の適用性の判断(可否)
- (3) 合理的かつ低コストの浄化プロセス(ラインナップ), 洗浄フローの設計
- (4) 浄化費用と浄化工事期間の算出

### 3.3 対策技術の経済効率性

土壌洗浄技術は減容化(volume reduction)技術であり、図-3.4 に示すように汚染土壌(100)は、洗浄によって浄化土(100-P)と濃縮残渣(P)が産出される。濃縮残渣の発生量は元土壌の粒度構成、すなわち細粒分の割合( $\alpha$ )によって決まる。細粒分の割合が 20% ( $\alpha=0.2$ ) の場合、濃縮残渣の発生量は  $P=20$  となる。

無害化処理の単位コストを A、土壌洗浄の単位コストを B とすると、両者のコスト比  $n$  は  $n = A/B$  となる。(諸物価高騰の折、処理単価ではなくコスト比( $n$ )で経済効率性を考える。) 汚染土壌の全量(100)を土壌洗浄処理した場合、発生した濃縮残渣(P)の無害化処理費用を含めると、土壌洗浄費用は  $100B + PA$  となる。汚染土壌の全量(100)を無害化処理した場合、無害化処理費用は  $100A$  となる。土壌洗浄による浄化費用の削減効果(R)は、 $R = (\text{土壌洗浄費用}) / (\text{無害化処理費用})$  であり、(3)式で求められる。

$$R = \frac{100B + PA}{100A} = \frac{100B + PnB}{100nB} = \frac{100 + 100\alpha n}{100n} = \frac{1 + \alpha n}{n} \quad (3)$$

※R は値が小さいほど削減効果は大きいことを示す。

土壌洗浄による浄化費用の削減効果を図-3.5 に示す。無害化処理と土壌洗浄とのコスト比は  $n = 3 \sim 5$  であるので、土壌洗浄を適用した場合は、全量無害化処理する場合の費用の 30%~70% で浄化できることがわかる。当然の事ながら、濃縮残渣の発生割合( $\alpha$ )が小さいほど浄化費用を低減することができる。濃縮残渣の発生割合が 10% ( $\alpha=0.1$ ) の場合は、全量を無害化処理する場合の費用の 30%~40% で浄化できることがわかる。図-3.5 に示した浄化費用には、土壌の運搬費用は含まれていない。無害化処理施設への土壌運搬費用まで考えると、現地で土壌洗浄を行なった場合の経済効率性はさらに高くなる。

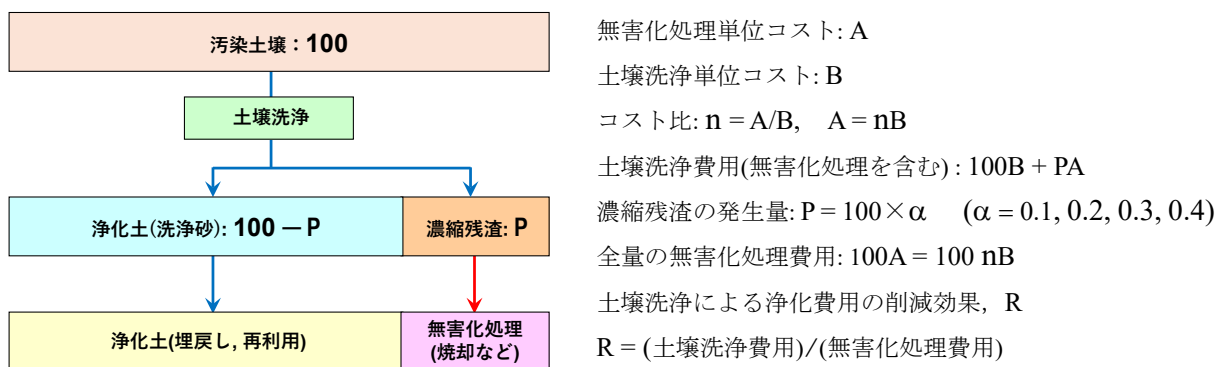


図-3.4 土壌洗浄技術による減容化，減容化による浄化費用の削減

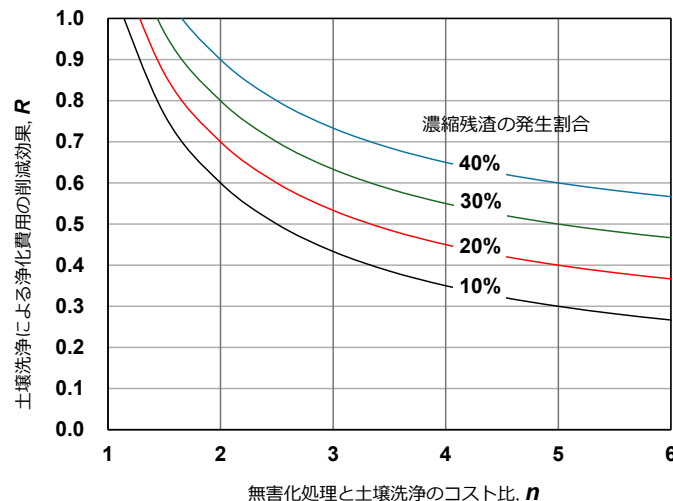


図-3.5 土壌洗浄による浄化費用の削減効果

次に図-3.6に示すように汚染土壌全体の内、高濃度汚染土壌(浄化基準値の100倍超過)がQ、低～中濃度汚染土壌(浄化基準値の100倍以下)が100-Qを占める場合について考える。この場合、土壌洗浄処理から発生する高濃度の濃縮残渣と高濃度のPFAS汚染土壌については、コストは高いが確実にPFASを分解・除去できる無害化処理によって処理を行なう。そして土壌洗浄からは浄化土(100-Q-P)と濃縮残渣(P)が産出される。

低～中濃度汚染土壌(100-Q)を土壌洗浄処理した場合、濃縮残渣(P)と高濃度汚染土壌(Q)の無害化処理費用を含めると、土壌洗浄費用は(100-Q)B+(P+Q)Aとなる。汚染土壌全量(100)の無害化処理費用は100Aである。土壌洗浄による浄化費用の削減効果は、 $R = (\text{土壌洗浄費用}) / (\text{無害化処理費用})$ であり、(4)式で求められる。

$$R = \frac{(100 - Q)B + (P + Q)nB}{100nB} = \frac{(100 - Q) + (P + Q)n}{100n} \quad (4)$$

高濃度汚染土壌が全体の10%を占める場合、 $Q = 10$ であるので(4)式は(5)式となる。

$$R = \frac{0.9 + (0.9\alpha + 0.1)n}{n} \quad (5)$$

土壌洗浄による浄化費用の削減効果を図-3.7に示す。無害化処理と土壌洗浄とのコスト比は $n = 3 \sim 5$ であるので、土壌洗浄を適用した場合は、全量無害化処理する場合の費用の40%～75%で浄化できることがわかる。当然の事ながら、濃縮残渣の発生割合( $\alpha$ )が小さいほど浄化費用を低減することができる。濃縮残渣の発生割合が10%( $\alpha = 0.1$ )の場合は、全量を無害化処理する場合の費用の37%～48%で浄化できることがわかる。図-3.7に示した浄化費用には、土壌の運搬費用は含まれていない。無害化処理施設への土壌運搬費用まで考えると、現地で土壌洗浄を行なった場合の経済効率性はさらに高くなる。

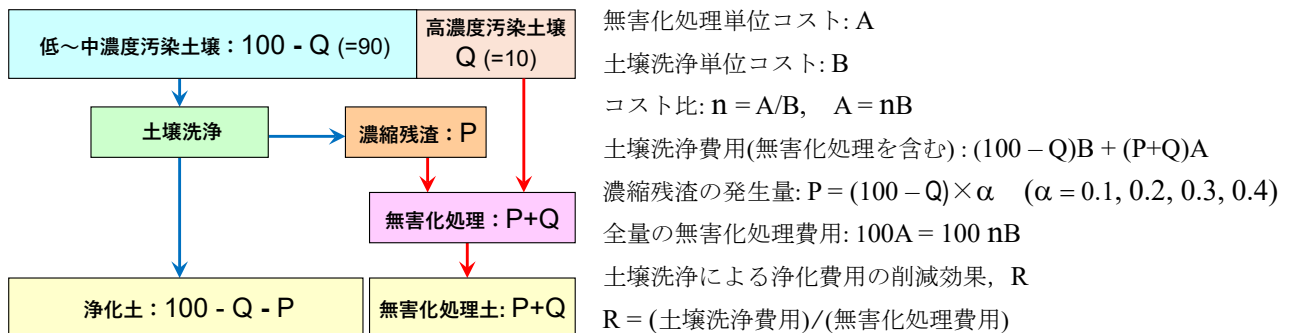


図-3.6 土壌洗浄技術による減容化, 減容化による浄化費用の削減, 高濃度土壌が10%占める場合( $Q = 10$ )

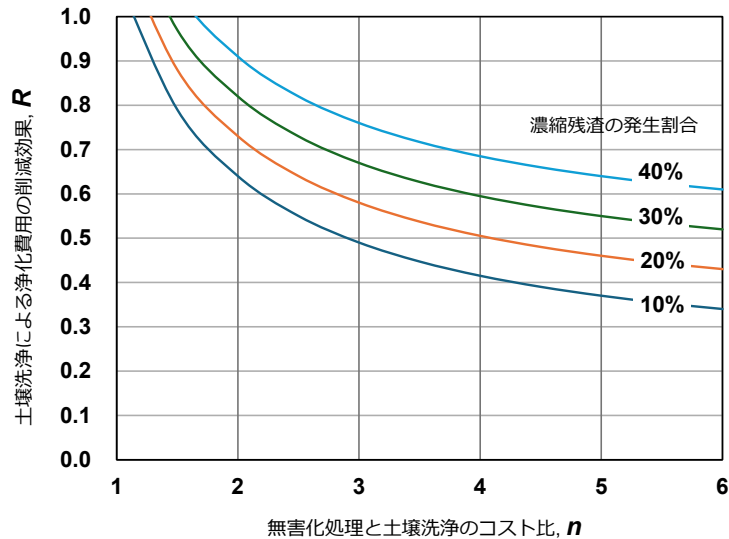


図-3.7 土壤洗浄による浄化費用の削減効果，高濃度土壤が10%占める場合(Q = 10)

### 3.4 対策技術の環境保全

PFAS 汚染土壤を，全量外部の処理施設に運搬した場合の CO<sub>2</sub> 発生量を，運搬距離，車種，燃費等から算出した．それに対し，洗浄礫，洗浄砂を埋戻す想定とし，実際に発生した濃縮残渣だけを外部の処理施設に運搬する前提で，同様に CO<sub>2</sub> 発生量を算出し，削減比を検証した．

加えて，全量外部の処理施設に搬出した場合，処理方法としては加熱処理が想定されることから，加熱処理に伴う CO<sub>2</sub> 発生量も算出した．それに対し，土壤洗浄処理に伴う CO<sub>2</sub> 発生量と濃縮残渣だけを加熱処理する場合の CO<sub>2</sub> 発生量も算出し，削減比を検証した．

これらの検証には，本試験で用いた土壤 1,000 m<sup>3</sup> を処理する想定とし，細粒分率は試験で得られた 20%の値を用いて検証した．

#### 3.4.1 土壤運搬量削減に伴う CO<sub>2</sub> 削減

ダンプ 1 台を外部の PFAS 汚染土壤処理施設に運搬した場合，さらに搬出した土量分を埋戻し用として搬入した場合の CO<sub>2</sub> 発生量を，運搬距離，車種，燃費等から以下のように算出した．

【運搬距離】〔汚染土搬出〕 180km（現地～兵庫県尼崎市（想定委託処理先））

〔埋戻土搬入〕 60km（岡山県小田郡矢掛町（想定搬入元）～現地）

【燃料】 軽油

【燃費】 3.3 km/L

【CO<sub>2</sub> 排出係数】 2.58 kg-CO<sub>2</sub>/L<sup>9)</sup>

【ダンプ 1 台の CO<sub>2</sub> 排出量】

〔汚染土搬出〕 180 (km) ÷ 3.3 (km/L) × 2.58 (kg-CO<sub>2</sub>/L) = 141 (kg-CO<sub>2</sub>/台)

〔埋戻土搬入〕 60 (km) ÷ 3.3 (km/L) × 2.58 (kg-CO<sub>2</sub>/L) = 47 (kg-CO<sub>2</sub>/台)

上記条件を使用し，1,000m<sup>3</sup> の土壤処理に伴う運搬による CO<sub>2</sub> 発生量は表-3.3 のように算出された．

9) (公) 全日本トラック協会：CO<sub>2</sub> 排出量簡易算定ツール

表-3.3 運搬に伴う CO<sub>2</sub> 発生抑制比較

汚染土の搬出	ダンプ1台当たりのCO <sub>2</sub> 発生量 (kg-CO <sub>2</sub> /台)	汚染土全量を外部搬出処理した場合			土壌洗浄を行い濃縮残渣だけを外部搬出処理した場合		
		搬出土量 (m <sup>3</sup> )	ダンプ台数 (台)	CO <sub>2</sub> 発生量 (kg-CO <sub>2</sub> )	搬出土量 (m <sup>3</sup> )	ダンプ台数 (台)	CO <sub>2</sub> 発生量 (kg-CO <sub>2</sub> )
	141	1000	182	<b>25,662</b>	200	37	<b>5,217</b>
埋戻土の搬入	ダンプ1台当たりのCO <sub>2</sub> 発生量 (kg-CO <sub>2</sub> /台)	埋戻土全量を外部から搬入した場合			土壌洗浄を行い濃縮残渣分だけを外部から搬入した場合		
		搬出土量 (m <sup>3</sup> )	ダンプ台数 (台)	CO <sub>2</sub> 発生量 (kg-CO <sub>2</sub> )	搬出土量 (m <sup>3</sup> )	ダンプ台数 (台)	CO <sub>2</sub> 発生量 (kg-CO <sub>2</sub> )
	47	1000	182	<b>8,554</b>	200	37	<b>1,739</b>
合計		<b>34,216</b>			<b>6,956</b>		

### 3.4.2 土壌洗浄処理を行うことに伴う CO<sub>2</sub> 削減

土壌加熱処理 1 ton を処理した場合の CO<sub>2</sub> 発生量を直接表記している資料は確認できなかったが、セメント製造プロセス時に発生する CO<sub>2</sub> は、以下から算出される<sup>10)</sup>。

【セメント製造時の CO<sub>2</sub> 発生量】 712 (kg-CO<sub>2</sub>/t-cem)

【上記のうち加熱によるエネルギー由来の CO<sub>2</sub> 発生量】 712 × 40% = 285 (kg-CO<sub>2</sub>/t-cem)

土壌処理 1 ton とセメント製造 1 ton が同等のエネルギーを消費すると仮定し、

土壌加熱処理 1 ton を処理した場合の CO<sub>2</sub> 発生量 = 285 (kg-CO<sub>2</sub>/ton)

を使用した。

また、土壌洗浄処理 1 ton を処理した場合の CO<sub>2</sub> 発生量を直接表記している資料は確認できなかったが、一般的な土壌洗浄処理に必要な電気容量から、発生する CO<sub>2</sub> は以下のように算出された<sup>11)</sup>。

【一般的な土壌洗浄プラントの電気容量】 1,000 (kVA)

【発電に伴う CO<sub>2</sub> 発生量】 0.00051 (ton-CO<sub>2</sub>/kWh) = 0.51 (kg-CO<sub>2</sub>/kWh)

【1000 m<sup>3</sup> 処理するために必要な時間】 1,000 (m<sup>3</sup>) × 1.8 (ton/m<sup>3</sup>) ÷ 40 (ton/hr) = 45 (hr)

以上から、1,000 m<sup>3</sup> を土壌処理することに伴う CO<sub>2</sub> 発生量は表-3.4 のように算出された。なお加熱処理、洗浄処理ともに、重機使用による CO<sub>2</sub> 排出量は算出対象外とした。

表-3.4 土壌処理に伴う CO<sub>2</sub> 発生抑制比較

加熱処理 1 t 当たりの CO <sub>2</sub> 発生量 (kg-CO <sub>2</sub> /t)	全量加熱処理した場合			土壌洗浄を行い濃縮残渣だけを加熱処理した場合						
	処理土量 (m <sup>3</sup> )	処理土量 (t)	CO <sub>2</sub> 発生量 (kg-CO <sub>2</sub> )	発電に伴うCO <sub>2</sub> 発生			濃縮残渣の加熱処理に伴うCO <sub>2</sub> 発生		合計 CO <sub>2</sub> 発生量 (kg-CO <sub>2</sub> )	
				CO <sub>2</sub> 発生量 (kg-CO <sub>2</sub> /kWh)	洗浄処理土量(m <sup>3</sup> )	処理必要時間(hr)	CO <sub>2</sub> 発生量 (kg-CO <sub>2</sub> )	加熱処理土量 (t)		CO <sub>2</sub> 発生量 (kg-CO <sub>2</sub> )
285	1000	1800	<b>513,000</b>	0.51	1000	45	<b>23</b>	360	<b>102,600</b>	<b>102,623</b>

10) 経済産業省「トランジションファイナンス」に関するセメント分野における技術ロードマップ

11) 環境省：電気事業者別排出係数(特定排出者の温室効果ガス排出量算定用)

以上から、全量外部搬出して加熱処理する場合（運搬 34,216 + 処理 513,000 = 547,216 kg）に比べ、  
土壌洗浄処理を選択することにより（運搬 6,956 + 処理 102,623 = 109,579 kg）、発生する CO<sub>2</sub> は約 80%  
削減できることが見込まれる。

## 4. 当該技術の今後の展望

国内の PFAS 汚染土壌の浄化対策にオンサイト土壌洗浄プラント(図-3.8)を活用したいと考えている。低～中濃度の PFAS 汚染土壌(浄化基準値の 100 倍以下)については、コストの安い土壌洗浄によって溶出量基準を満足する浄化土を産出し、土壌洗浄処理から発生する高濃度の濃縮残渣と高濃度の PFAS 汚染土壌(浄化基準値の 100 倍超過)については、コストは高いが確実に PFAS を分解・除去できる無害化処理によって処理を行なう。土壌洗浄と無害化処理を組み合わせることによって、経済的に汚染土壌全体の浄化を達成することが可能となる。

オンサイト土壌洗浄技術の有効性を以下に述べる。現地で土壌洗浄を行なうオンサイト土壌洗浄は土壌運搬費を大きく削減できるため、より一層の浄化費用の削減が可能となる。土壌運搬費の大きな削減は、運搬に伴う CO<sub>2</sub> 発生量の大きな削減にも繋がる。

- 安価な処理コスト
- 汚染土壌の減容化に伴う高い費用対効果
- 多種多様な汚染土壌へ対応可能
- 環境への負荷が小さい。CO<sub>2</sub>削減効果が高い。
- 現地で土壌洗浄を行なうことが可能(オンサイト土壌洗浄) →土壌運搬費と CO<sub>2</sub>を削減
- オンサイト土壌洗浄の場合、外部からの埋戻し土(客土)を大幅に減量できる。
- 63μm 未満の細粒分率が大きい場合(概ね 50%超過), 処理効果は小さい。
- 処理能力が大きい(洗浄プラント 1 基当たり 40~60 ton/hr (= 1,000 ton/day)の処理能力)(短時間で浄化対策を完了することができる。)
- 浄化土(洗浄砂)の万全な品質管理 (公定法による分析, 計量証明書)

過去においても新たな汚染土壌に取り組むたびに、新規性のある対策技術は増えていった。例えば、土壌中に有害物質を吸着した炭ガラ粒子を多数含む土壌の洗浄処理においては、上向流で炭ガラ粒子を分離・除去する Up-flow column (UFC)を適用した。PFAS 汚染土壌に対しても新たな汚染土壌に取り組むたびに、(必要性に迫られて)新規性のある対策技術は増えていくと考える。このため、国内の PFAS 汚染土壌に対しては、土壌調査段階から取り組み、幅広い PFAS 汚染土壌に対して事前検討性試験(トリータビリティ試験)を積極的に行ないたいと考えている。

現時点で見えている課題を挙げると、PFAS 分析に要する時間である。現時点では PFAS の分析に数週間という長い時間を要している。土壌洗浄の浄化土(洗浄砂)の品質検査に毎回 3~4 週間の時間を要することは、広い面積のストックヤードを必要とすることを意味する。PFAS の簡易分析や迅速分析法の技術開発を切に期待する。



図-3.8 オンサイト土壌洗浄プラントによる PFAS 汚染土壌の浄化(イメージ)

## 5. 添付資料

- A.1. 土壤洗浄試験の分析値(PFOA, 土壤 pH, TOC, Fe, Ca), PFOA 除去率(含有量, 溶出量) の一覧,  
低濃度土壤
- A.2. 土壤洗浄試験の分析値(PFOA, 土壤 pH, TOC, Fe, Ca), PFOA 除去率(含有量, 溶出量) の一覧,  
高濃度土壤

A.1. 土壌洗浄試験の分析値(PFOA, 土壌 pH, TOC, Fe, Ca), PFOA 除去率(含有量, 溶出量)の一覧, 低濃度土壌

表-A.1 土壌洗浄試験の分析値の一覧, 土壌洗浄による PFOA (含有量, 溶出量)の除去率, 低濃度土壌

	PFOA含有量				PFOA溶出量				PFOA含有量				PFOA溶出量					
	分析値	除去率	(μg/kg)	(%)	分析値	除去率	(ng/L)	(%)	分析値	除去率	(μg/kg)	(%)	分析値	除去率	(ng/L)	(%)		
A-1	A-1. 乾式フルイ(土壌 < 2 mm)																	
	51.4	--	4,849	--	0.19	3.0	2.0	9.7	11.0	--	1,110	--	10.1	--	1,110	--	10.2	
	150.7	--	6,900	--	0.22	3.0	1.9	9.5	3.2	--	585	--	10.4	--	585	--	10.5	
	89.5	--	6,840	--	0.22	2.7	2.0	9.8	1.9	--	1,200	--	10.6	--	1,200	--	10.3	
中央値	89.5	--	6,840	--	0.22	3.0	2.0	9.7	1.5	--	680	--	10.3	--	680	--	9.8	
湿式フルイ(63 μm~2 mm)																		
参考	5.8	--	230	--	0.13	2.1	1.4	10.4	13.5	--	1,459	--	10.4	--	1,459	--	10.4	
12.1	--	340	--	--	--	--	--	8.9	13.5	--	1,459	--	10.4	--	1,459	--	10.4	
3.9	--	280	--	0.15	2.1	1.5	10.3	13.5	--	1,459	--	10.4	--	1,459	--	10.4		
平均値	7.3	--	283	--	0.14	2.1	1.5	10.4	13.5	--	1,459	--	10.4	--	1,459	--	10.4	
B-1	B-1. UF(砂分), 湿式分級(Decantation)																	
	4.9	94.5%	330	95.2%	0.18	2.4	1.7	9.9	4.8	64.4%	352	75.9%	0.07	1.5	1.2	9.8	1.7	62.6%
	4.1	95.4%	340	95.0%	--	--	--	--	5.5	59.2%	403	72.4%	--	--	--	10.0	3.8	16.3%
	9.1	89.8%	320	95.3%	0.09	2.2	1.6	10.3	4.1	69.6%	332	77.2%	--	--	--	9.7	2.3	49.3%
6.8	92.4%	330	95.2%	--	--	--	--	1.8	86.6%	120	91.8%	--	--	--	10.7	3.0	33.9%	
3.8	95.8%	230	96.6%	--	--	--	--	5.0	62.9%	690	52.7%	0.04	2.4	0.85	10.8	1.5	67.0%	
6.0	93.3%	250	96.3%	--	--	--	--	5.2	61.4%	480	67.1%	--	--	--	10.4	1.6	64.8%	
6.4	92.8%	260	96.2%	--	--	--	--	9.9	--	1,000	--	--	--	--	--	--	--	
6.4	92.8%	230	96.6%	--	--	--	--	7.7	--	790	--	--	--	--	--	--	--	
平均値	5.9	93.4%	286	95.8%	0.14	2.3	1.7	10.1	4.4	67.4%	396	72.9%	0.06	2.0	1.0	10.2	2.3	49.0%
B-2. 水洗浄砂利(2~9.5 mm)																		
8.0	--	775	--	--	--	--	9.4	4.8	64.4%	352	75.9%	0.07	1.5	1.2	9.8	1.7	62.6%	
6.5	--	780	--	--	--	--	9.5	5.5	59.2%	403	72.4%	--	--	--	10.0	3.8	16.3%	
9.7	--	876	--	--	--	--	9.6	4.1	69.6%	332	77.2%	--	--	--	9.7	2.3	49.3%	
6.8	92.4%	330	95.2%	--	--	--	--	1.8	86.6%	120	91.8%	--	--	--	10.7	3.0	33.9%	
3.8	95.8%	230	96.6%	--	--	--	--	5.0	62.9%	690	52.7%	0.04	2.4	0.85	10.8	1.5	67.0%	
6.0	93.3%	250	96.3%	--	--	--	--	5.2	61.4%	480	67.1%	--	--	--	10.4	1.6	64.8%	
6.4	92.8%	260	96.2%	--	--	--	--	9.9	--	1,000	--	--	--	--	--	--	--	
6.4	92.8%	230	96.6%	--	--	--	--	7.7	--	790	--	--	--	--	--	--	--	
平均値	5.9	93.4%	286	95.8%	0.14	2.3	1.7	10.1	4.4	67.4%	396	72.9%	0.06	2.0	1.0	10.2	2.3	49.0%
B-3. 水洗浄砂利(>9.5 mm)																		
2.9	96.8%	100	98.5%	--	--	--	10.2	1.7	62.6%	594	21.5%	0.11	5.5	2.4	9.9	1.7	62.6%	
1.6	98.2%	91	98.7%	--	--	--	9.8	3.8	16.3%	170	77.5%	--	--	--	9.9	3.8	16.3%	
2.1	97.7%	150	97.8%	--	--	--	10.2	2.3	49.3%	645	14.8%	--	--	--	10.2	2.3	49.3%	
3.0	96.6%	130	98.1%	--	--	--	10.2	3.0	33.9%	<40	97.4%	--	--	--	8.6	3.0	33.9%	
6.1	93.2%	180	97.4%	--	--	--	10.3	1.5	67.0%	130	82.8%	0.02	1.4	0.13	9.8	1.5	67.0%	
3.1	96.5%	130	98.1%	--	--	--	10.1	1.6	64.8%	260	65.7%	--	--	--	9.0	1.6	64.8%	
平均値	3.1	96.5%	130	98.1%	--	--	10.1	1.6	64.8%	260	65.7%	--	--	--	9.0	1.6	64.8%	
D-1a. Flotation(洗浄砂)																		
2.9	96.8%	100	98.5%	--	--	--	10.2	1.7	62.6%	594	21.5%	0.11	5.5	2.4	9.9	1.7	62.6%	
1.6	98.2%	91	98.7%	--	--	--	9.8	3.8	16.3%	170	77.5%	--	--	--	9.9	3.8	16.3%	
2.1	97.7%	150	97.8%	--	--	--	10.2	2.3	49.3%	645	14.8%	--	--	--	10.2	2.3	49.3%	
3.0	96.6%	130	98.1%	--	--	--	10.2	3.0	33.9%	<40	97.4%	--	--	--	8.6	3.0	33.9%	
6.1	93.2%	180	97.4%	--	--	--	10.3	1.5	67.0%	130	82.8%	0.02	1.4	0.13	9.8	1.5	67.0%	
3.1	96.5%	130	98.1%	--	--	--	10.1	1.6	64.8%	260	65.7%	--	--	--	9.0	1.6	64.8%	
平均値	3.1	96.5%	130	98.1%	--	--	10.1	1.6	64.8%	260	65.7%	--	--	--	9.0	1.6	64.8%	
D-1b. Flotation(洗浄砂)																		
2.0	97.8%	<40	99.7%	--	--	--	4.4	4.8	64.4%	352	75.9%	0.07	1.5	1.2	9.8	4.8	64.4%	
<0.4	99.8%	<40	99.7%	--	--	--	4.9	5.5	59.2%	403	72.4%	--	--	--	10.0	5.5	59.2%	
3.4	96.2%	<40	99.7%	--	--	--	4.6	4.1	69.6%	332	77.2%	--	--	--	9.7	4.1	69.6%	
1.4	98.4%	<40	99.7%	--	--	--	4.5	1.8	86.6%	120	91.8%	--	--	--	10.7	1.8	86.6%	
0.8	99.1%	<40	99.7%	--	--	--	4.7	5.0	62.9%	690	52.7%	0.04	2.4	0.85	10.8	5.0	62.9%	
平均値	1.6	98.3%	<40	99.7%	--	--	4.6	5.2	61.4%	480	67.1%	--	--	--	10.4	5.2	61.4%	
D-1c. Flotation(洗浄砂)																		
2.0	97.8%	<40	99.7%	--	--	--	4.4	4.8	64.4%	352	75.9%	0.07	1.5	1.2	9.8	4.8	64.4%	
<0.4	99.8%	<40	99.7%	--	--	--	4.9	5.5	59.2%	403	72.4%	--	--	--	10.0	5.5	59.2%	
3.4	96.2%	<40	99.7%	--	--	--	4.6	4.1	69.6%	332	77.2%	--	--	--	9.7	4.1	69.6%	
1.4	98.4%	<40	99.7%	--	--	--	4.5	1.8	86.6%	120	91.8%	--	--	--	10.7	1.8	86.6%	
0.8	99.1%	<40	99.7%	--	--	--	4.7	5.0	62.9%	690	52.7%	0.04	2.4	0.85	10.8	5.0	62.9%	
平均値	1.6	98.3%	<40	99.7%	--	--	4.6	5.2	61.4%	480	67.1%	--	--	--	10.4	5.2	61.4%	
D-1d. Flotation(洗浄砂)																		
2.0	97.8%	<40	99.7%	--	--	--	4.4	4.8	64.4%	352	75.9%	0.07	1.5	1.2	9.8	4.8	64.4%	
<0.4	99.8%	<40	99.7%	--	--	--	4.9	5.5	59.2%	403	72.4%	--	--	--	10.0	5.5	59.2%	
3.4	96.2%	<40	99.7%	--	--	--	4.6	4.1	69.6%	332	77.2%	--	--	--	9.7	4.1	69.6%	
1.4	98.4%	<40	99.7%	--	--	--	4.5	1.8	86.6%	120	91.8%	--	--	--	10.7	1.8	86.6%	
0.8	99.1%	<40	99.7%	--	--	--	4.7	5.0	62.9%	690	52.7%	0.04	2.4	0.85	10.8	5.0	62.9%	
平均値	1.6	98.3%	<40	99.7%	--	--	4.6	5.2	61.4%	480	67.1%	--	--	--	10.4	5.2	61.4%	
D-1e. Flotation(洗浄砂)																		
2.0	97.8%	<40	99.7%	--	--	--	4.4	4.8	64.4%	352	75.9%	0.07	1.5	1.2	9.8	4.8	64.4%	
<0.4	99.8%	<40	99.7%	--	--	--	4.9	5.5	59.2%	403	72.4%	--	--	--	10.0	5.5	59.2%	
3.4	96.2%	<40	99.7%	--	--	--	4.6	4.1	69.6%	332	77.2%	--	--	--	9.7	4.1	69.6%	
1.4	98.4%	<40	99.7%	--	--	--	4.5	1.8	86.6%	120	91.8%	--	--	--	10.7	1.8	86.6%	
0.8	99.1%	<40	99.7%	--	--	--	4.7	5.0	62.9%	690	52.7%	0.04	2.4	0.85	10.8	5.0	62.9%	
平均値	1.6	98.3%	<40	99.7%	--	--	4.6	5.2	61.4%	480	67.1%	--	--	--	10.4	5.2	61.4%	
E-1a. 酸洗浄砂利(>9.5 mm)																		
0.18	96.0%	280	96.3%	--	--	--	9.5	0.18	96.0%	280	96.3%	--	--	--	9.5	0.18	96.0%	
2.5	44.9%	65.5	91.3%	--	--	--	10.3	3.3	75.5%	80	94.5%	--	--	--	3.5	2.5	44.9%	
3.8	16.3%	380	95.0%	--	--	--	7.1	5.1	62.2%	100	93.1%	--	--	--	7.6	3.8	16.3%	
平均値	2.2	52.4%	43.8	94.2%	--	--	9.0	3.5	74.3%	83	94.3%	--	--	--	4.8	2.2	52.4%	
E-2. 酸洗浄砂利(2~9.5 mm)																		
2.0	85.2%	70	95.2%	--	--	--	3.3	2.0	85.2%	70	95.2%	--	--	--	3.3	2.0	85.2%	
3.3	75.5%	80	94.5%	--	--	--	3.5	3.3	75.5%	80	94.5%	--	--	--	3.5	3.3	75.5%	
5.1	62.2%	100	93.1%	--	--	--	7.6	5.1	62.2%	100	93.1%	--	--	--	7.6	5.1	62.2%	
平均値	3.5	74.3%	83	94.3%	--	--	4.8	3.5	74.3%	83	94.3%	--	--	--	4.8	3.5	74.3%	
E-3. 酸洗浄砂利(>9.5 mm)																		
0.18	96.0%	280	96.3%	--	--	--	9.5	0.18	96.0%	280	96.3%	--	--					

A.2. 土壤洗浄試験の分析値(PFOA, 土壤 pH, TOC, Fe, Ca), PFOA 除去率(含有量, 溶出量)の一覧, 高濃度土壤

表-A.2 土壤洗浄試験の分析値の一覧, 土壤洗浄による PFOA (含有量, 溶出量)の除去率, 高濃度土壤

	PFOA含有量			PFOA溶出量			PFOA含有量			PFOA溶出量			PFOA含有量			PFOA溶出量				
	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	(wt%) (wt%) (-)	分析値 (ng/L)	除去率 (%)	(wt%) (wt%) (-)	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	(wt%) (wt%) (-)	分析値 (ng/L)	除去率 (%)	(wt%) (wt%) (-)	分析値 (μg/kg)	除去率 (%)	(wt%) (wt%) (-)	分析値 (ng/L)	除去率 (%)	(wt%) (wt%) (-)		
<b>A-1</b>	756	--	0.14 2.9 2.1 9.3	76,580	--	0.14 2.9 2.1 9.3	201	--	15,110	--	15,110	--	292	--	12,080	--	12,080	--	9.3	
平均	982	--	0.2 3.0 2.1 9.6	88,650	--	0.2 3.0 2.1 9.6	191	--	18,120	--	18,120	--	867	--	13,080	--	13,080	--	10.1	
参考	67.3	--	0.26 2.0 1.1 9.8	4,100	--	0.26 2.0 1.1 9.8	86.5	--	11,070	--	11,070	--	130	--	2,200	--	2,200	--	9.7	
平均	59.7	--	0.26 2.0 1.1 9.8	4,550	--	0.26 2.0 1.1 9.8	平均	251	15,100	--	15,100	--	平均	648	9,608	--	9,608	--	9.7	
<b>B-1</b>	78.4	92.0%	0.29 2.0 1.3 10.0	5,000	94.4%	0.29 2.0 1.3 10.0	62.4	75.1%	6,900	54.3%	6,900	54.3%	58.4	91.0%	4,500	53.2%	4,500	53.2%	9.8	
平均	111.7	88.6%	0.30 2.2 1.5 10.0	6,067	93.2%	0.30 2.2 1.5 10.0	平均	53.1	78.8%	4,850	67.9%	4,850	67.9%	平均	49.0	92.4%	3,200	66.7%	3,200	66.7%
<b>B-2</b>	170.6	82.6%	0.31 2.4 1.7 10.0	8,400	90.5%	0.31 2.4 1.7 10.0	62.4	75.1%	6,900	54.3%	6,900	54.3%	58.4	91.0%	4,500	53.2%	4,500	53.2%	9.8	
平均	111.7	88.6%	0.30 2.2 1.5 10.0	6,067	93.2%	0.30 2.2 1.5 10.0	平均	53.1	78.8%	4,850	67.9%	4,850	67.9%	平均	49.0	92.4%	3,200	66.7%	3,200	66.7%
<b>B-3</b>	86.0	91.2%	0.31 2.4 1.7 10.0	8,400	90.5%	0.31 2.4 1.7 10.0	62.4	75.1%	6,900	54.3%	6,900	54.3%	58.4	91.0%	4,500	53.2%	4,500	53.2%	9.8	
平均	111.7	88.6%	0.30 2.2 1.5 10.0	6,067	93.2%	0.30 2.2 1.5 10.0	平均	53.1	78.8%	4,850	67.9%	4,850	67.9%	平均	49.0	92.4%	3,200	66.7%	3,200	66.7%
<b>D-1a</b>	130.6	86.7%	0.29 2.0 1.3 10.0	5,000	94.4%	0.29 2.0 1.3 10.0	62.4	75.1%	6,900	54.3%	6,900	54.3%	58.4	91.0%	4,500	53.2%	4,500	53.2%	9.8	
平均	228.6	76.7%	0.30 2.2 1.5 10.0	4,700	94.7%	0.30 2.2 1.5 10.0	平均	53.1	78.8%	4,850	67.9%	4,850	67.9%	平均	49.0	92.4%	3,200	66.7%	3,200	66.7%
<b>D-1b</b>	372.1	62.1%	0.29 2.0 1.3 10.0	6,200	93.0%	0.29 2.0 1.3 10.0	62.4	75.1%	6,900	54.3%	6,900	54.3%	58.4	91.0%	4,500	53.2%	4,500	53.2%	9.8	
平均	228.6	76.7%	0.30 2.2 1.5 10.0	4,700	94.7%	0.30 2.2 1.5 10.0	平均	53.1	78.8%	4,850	67.9%	4,850	67.9%	平均	49.0	92.4%	3,200	66.7%	3,200	66.7%
<b>E-1a</b>	21	97.9%	2.1 0.42 4.5	510	99.4%	2.1 0.42 4.5	62.4	75.1%	6,900	54.3%	6,900	54.3%	58.4	91.0%	4,500	53.2%	4,500	53.2%	9.8	
平均	80	91.9%	2.1 0.48 4.9	1,453	98.4%	2.1 0.48 4.9	平均	53.1	78.8%	4,850	67.9%	4,850	67.9%	平均	49.0	92.4%	3,200	66.7%	3,200	66.7%
<b>E-1b</b>	88	91.0%	2.2 0.54 5.4	2,000	97.7%	2.2 0.54 5.4	62.4	75.1%	6,900	54.3%	6,900	54.3%	58.4	91.0%	4,500	53.2%	4,500	53.2%	9.8	
平均	80	91.9%	2.1 0.48 4.9	1,453	98.4%	2.1 0.48 4.9	平均	53.1	78.8%	4,850	67.9%	4,850	67.9%	平均	49.0	92.4%	3,200	66.7%	3,200	66.7%
<b>E-2</b>	40	84.0%	2.1 1.1 3.6	800	94.7%	2.1 1.1 3.6	62.4	75.1%	6,900	54.3%	6,900	54.3%	58.4	91.0%	4,500	53.2%	4,500	53.2%	9.8	
平均	24.3	90.3%	2.3 1.1 5.5	647	95.7%	2.3 1.1 5.5	平均	53.1	78.8%	4,850	67.9%	4,850	67.9%	平均	49.0	92.4%	3,200	66.7%	3,200	66.7%
<b>E-3</b>	54	91.7%	2.1 0.57 3.6	590	93.9%	2.1 0.57 3.6	62.4	75.1%	6,900	54.3%	6,900	54.3%	58.4	91.0%	4,500	53.2%	4,500	53.2%	9.8	
平均	45.2	93.0%	2.0 0.42 4.1	575	94.0%	2.0 0.42 4.1	平均	53.1	78.8%	4,850	67.9%	4,850	67.9%	平均	49.0	92.4%	3,200	66.7%	3,200	66.7%

(注) 除去率の計算において <0.4 μg/kg は 0.2 μg/kg, <40 ng/L は 20 ng/L として計算を行った。