PFOS 等の濃度低減のための対策技術集

令和８年６月

環境省　水・大気環境局　環境管理課

有機フッ素化合物対策室

PFOS 等の濃度低減のための対策技術集

＜目　次＞

1.　本技術集について 1
1.1　技術集の趣旨 1
1.2　PFOS 等の濃度低減のための対策技術の分類 2
1.3　実証技術一覧 3

【各実証技術の概要】

2.　土壌の濃度低減のための対策技術 5
2.1　PFOS・PFOA を含む土壌のロータリーキルン式熱分解処理による濃度低減技術（No. S1） 6
2.2　PFOS 等汚染土壌の浄化を目的とした分級洗浄技術（No. S2） 11
2.3　汚染中心濃度に対応した超低負荷型 PFAS 固定化等技術（No. S3） 18
2.4　PFOS 等汚染土壌の固化・安定化処理　～汚染土壌からの PFOS 等溶出抑制～（No. S4） 24

3.　水の濃度低減のための対策技術 29
3.1　カートリッジ式活性炭吸着装置および泡沫分離前処理装置を用いた活性炭再生循環運用による高濃度 PFAS 含有水の処理方法（No. W1） 30
3.2　PFAS 除去用イオン交換樹脂を用いた処理実証（No. W2） 37
3.3　400kHz 付近キャビテーション超音波–酸化ラジカルハイブリッドによる PFAS 無害化モジュール　～処理量 50m³/日で原位置 50ng/L 達成を目指す～（No. W3） 43
3.4　溶媒抽出技術、「エマルションフロー」を用いた PFOS 等の濃度低減と光分解技術を用いた回収 PFOS 等の無害化に関する実証実験（No. W4） 49
3.5　分離・分解技術による PFAS 含有水の処理実証（泡沫分離／プラズマ）（No. W5） 55

4.　参考資料 63
4.1　PFOS 等の濃度低減のための対策技術に関する実証事業運営会議委員 63

1.　本技術集について

1.1　技術集の趣旨

PFAS（ペルフルオロアルキル化合物及びポリフルオロアルキル化合物の総称）のうち、PFOS （ペルフルオロオクタンスルホン酸）及び PFOA（ペルフルオロオクタン酸）については、残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約（POPs 条約）において廃絶等の対象とされるとともに、国内においては化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律（化審法）に基づき製造・輸入等が原則禁止されている。一方で、主に過去に環境中に排出されたものが環境中に残っていることから公共用水域等で検出されている。このため、水道水における水質基準（水道事業者等による基準遵守や検査が義務）、公共用水域及び地下水の要監視項目として指針値がそれぞれ PFOS 及び PFOA の合計値で 50 ng/L として定められている。加えて、公共用水域等で指針値を超えて PFOS 及び PFOA が検出された場合の対応について、環境省が対応の手引きを作成し、関係地方公共団体に通知を行っている。こうした取組により、主なばく露経路の一つとして考えられる飲用によるばく露の防止が図られているところである。

このような中で、近年、国内外で様々な PFOS 等の濃度低減のための対策技術が提案され始めているが、国内における対策の実施例は限られている。このため、環境省では、PFOS 等の濃度低減のための対策技術に関する知見を充実させることを目的に実証事業を実施した。実証事業では、有識者（※参考資料参照）から構成される実証事業運営会議において、実証の対象となる技術の選定や評価等を行った。有識者による評価結果は本技術集に含められており、有識者の指摘を踏まえて、各実証事業実施者は最終的な報告書をまとめた。

本技術集は、健康リスク低減の観点から、関係者が PFOS 等の濃度を低減させることを検討する場合に、検討の参考となるよう、実証事業実施者の報告書を技術集として取りまとめたものである。一定の条件の下で行われた実証試験の結果の一つであることに留意が必要であるとともに、同じ技術であっても、異なる条件等では異なる結果が得られる可能性があることから、技術を導入する際は、条件に適した技術を十分に検討する必要がある。

1.2　PFOS 等の濃度低減のための対策技術の分類

PFAS の濃度低減のための対策技術として一般的に検討、導入されている技術の一例として整理した 4 分類 18 技術を表 1 に示す。（注：あくまで一例であり、ここに挙げた以外にも利用できる技術はあり得る。）

表 1　PFAS の濃度低減のための対策技術の分類の例

分類	処理技術		技術の概要	適用媒体
1. 吸着	1.1	活性炭	多孔質表面との相互作用により PFAS を吸着	水
	1.2	イオン交換樹脂	イオン交換基との作用により PFAS を吸着	水
2. 分離・濃縮	2.1	土壌洗浄	土壌の洗浄・分級により PFAS 含有粒子を分離	土壌
	2.2	膜処理	膜透過差を利用して PFAS を分離・濃縮	水
	2.3	泡沫分離	起泡剤等により発生させた泡沫表面への PFAS 付着特性を利用して PFAS を分離・濃縮	水
	2.4	加圧浮上分離	加圧水により発生させた気泡への PFAS 付着特性を利用して PFAS を分離・濃縮	水
	2.5	アルカリ注水・揚水法	アルカリ注水と揚水により PFAS を分離	水・土壌
	2.6	凝集沈殿法	凝集フロックの形成により PFAS を分離	水
	2.7	溶媒抽出	溶媒への分配差を利用して PFAS を分離・濃縮	水
	2.8	バイオ（ファイト）レメディエーション	植物等への取込みにより PFAS を分離	水・土壌
3. 分解	3.1	焼却・熱処理	高温燃焼により PFAS を分解	水・土壌
	3.2	間接熱処理	外部加熱により PFAS を揮散・分解	土壌
	3.3	プラズマ・電気分解	高反応種や電極反応により PFAS を分解	水
	3.4	光分解	紫外線や光触媒反応により PFAS を分解	水
	3.5	超臨界・亜臨界	高温高圧水反応により PFAS を分解	水
	3.6	超音波	キャビテーション反応により PFAS を分解	水
4. 汚染拡大防止	4.1	遮水壁・浄化壁	遮水壁や浄化壁を用いて PFAS の拡散を防止	水
	4.2	固化・安定化	吸着剤や固化剤を用いて土壌からの PFAS 溶出を防止	土壌

注）技術によって実用段階のものも研究段階のものも含まれている。

1.3　実証技術一覧

1.3.1　PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業

濃度低減のための効果的な対策技術に関する知見を充実させることを目的として、PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業を実施。実証サイトは、【土１】埋土による土地造成地（PFOA が主）、【水１】産業廃棄物最終処分場（管理型）、既設排水処理設備の放流水（PFOA が主）、【水２】産業廃棄物最終処分場（安定型）、浸透水（PFOA が主）で、現地（オンサイト）3 件、現地以外（ラボ）6 件の計 9 件の技術について実証試験を行った。なお、【水２】の処分場については、安定型ではあるが、浸透水が集排水管により集水され公共用水域へ排水される構造となっている。

表 2　PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業　実証技術一覧

No.	技術の分類	技術の名称	実証事業者名	実証区分	対象試料※
S1	焼却・熱処理	PFOS・PFOA を含む土壌のロータリーキルン式熱分解処理による濃度低減技術	株式会社鴻池組	現地	土１
S2	土壌洗浄	PFOS 等汚染土壌の浄化を目的とした分級洗浄技術	清水建設株式会社	現地以外	
S3	固化・安定化	汚染中心濃度に対応した超低負荷型 PFAS 固定化等技術	株式会社環境管理センター		
S4	固化・安定化	PFOS 等汚染土壌の固化・安定化処理　～汚染土壌からの PFOS 等溶出抑制～	株式会社大林組		
W1	活性炭（再生）/泡沫分離	カートリッジ式活性炭吸着装置および泡沫分離前処理装置を用いた活性炭再生循環運用による高濃度 PFAS 含有水の処理方法	株式会社エコサイズ	現地	水１
W2	イオン交換樹脂	PFAS 除去用イオン交換樹脂を用いた処理実証	株式会社奥村組		水２
W3	超音波	400kHz 付近キャビテーション超音波-酸化ラジカルハイブリッドによる PFAS 無害化モジュール～処理量 50m³/日で原位置 50ng/L 達成を目指す～	株式会社日立ハイテク	現地以外	水１・水２
W4	溶媒抽出/光分解	溶媒抽出技術、「エマルションフロー」を用いた PFOS 等の濃度低減と光分解技術を用いた回収 PFOS 等の無害化に関する実証実験	株式会社エマルションフローテクノロジーズ		
W5	泡沫分離/プラズマ	分離・分解技術による PFAS 含有水の処理実証（泡沫分離／プラズマ）	清水建設株式会社		水２

※土１：埋土による土地造成地、水１：産業廃棄物最終処分場（管理型、埋立終了）放流水、水２：産業廃棄物最終処分場（安定型、埋立中）浸透水

【各実証技術の概要】

※各実証技術の概要では、以下の項目に係る情報をまとめている。

技術の分類：表 1 を踏まえた技術の分類
実証区分・対象試料：表 2 における現地又は現地以外の区別や実証試験で利用した試料番号
適用段階：実用レベル、パイロットスケール、ラボスケール等の技術成熟度
実証規模：実証において処理を行った試料の量
実証事業者名：実証を行った事業者名
実証期間：実証を行った期間
技術の原理：実証対象の技術の原理、メカニズムや概要
適用条件：実証対象の技術が適用できる条件や範囲についての留意点
技術目標：実証における目標や評価方法
対策技術の有効性：物質フローが明らかであり、確実に濃度低減及び副産物対策が可能か等
対策技術の新規性・将来性：未評価であり、新規性がある技術であるか。技術的な課題が少なく、将来国内での活用が期待できるか等
対策技術の経済効率性※：他の類似・同種技術に比べ、イニシャル・ランニング含めた総合コスト削減が見込まれるか。時間的効率性や現場施工性などの効率性が期待できるか等
対策技術の環境保全※：長期及び短期いずれも他の類似・同種技術に比べ環境負荷が低いか等
実証試験結果に対する運営会議の評価：運営会議における有識者の評価

※なお、経済効率性や環境保全において試算された値については、前提条件や検討対象となる範囲等が技術ごとに異なる場合があることに留意が必要である。

2.　土壌の濃度低減のための対策技術

No.	技術の分類	技術の名称	実証事業者名	実証区分	対象試料※
S1	焼却・熱処理	PFOS・PFOA を含む土壌のロータリーキルン式熱分解処理による濃度低減技術	株式会社鴻池組	現地	土１
S2	土壌洗浄	PFOS 等汚染土壌の浄化を目的とした分級洗浄技術	清水建設株式会社	現地以外	
S3	固化・安定化	汚染中心濃度に対応した超低負荷型 PFAS 固定化等技術	株式会社環境管理センター		
S4	固化・安定化	PFOS 等汚染土壌の固化・安定化処理　～汚染土壌からの PFOS 等溶出抑制～	株式会社大林組		

※【土１】埋土による土地造成地（PFOA が主）

2.1　PFOS・PFOA を含む土壌のロータリーキルン式熱分解処理による濃度低減技術（No. S1）

技術の分類：焼却・熱処理

実証区分・対象試料：現地（土１）

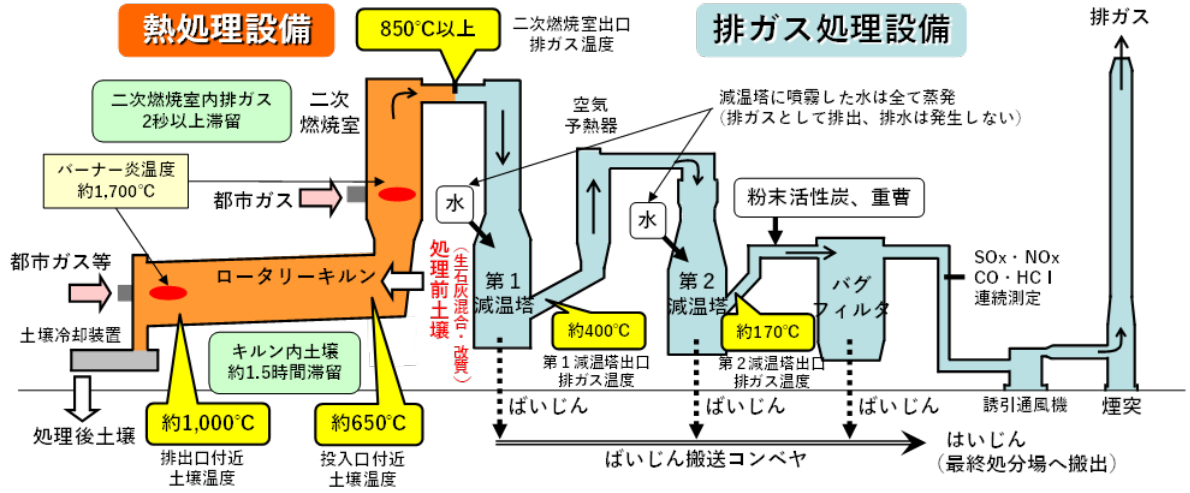
適用段階：実用レベル

実証規模：約 1,400t（約 680m^3）

実証事業者名：株式会社鴻池組

実証期間：PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業：令和 7 年 9 月～令和 8 年 1 月

技術の原理：ロータリーキルン炉内（土壌投入口付近温度約 650 ℃、土壌排出口付近（バーナー付近）温度約 1,000 ℃、約 1.5 時間滞留）で土壌中の PFOS 等を分解または揮発させ。排ガスへ移行した PFOS 等は二次燃焼室内（バーナー炎温度約 1,700 ℃、出口ガス温度 850 ℃以上、2 秒以上滞留）の再加熱で分解する。



	ロータリーキルン	二次燃焼室	第１減温塔	空気予熱器	第２減温塔	バグフィルタ	煙突
概要	土壌中のPFOS・PFOA等の分解または揮発	排ガス中のPFOS・PFOA等の分解	水噴霧による排ガス冷却	排ガスと燃焼空気との熱交換	水噴霧による排ガス冷却	ばいじん等の捕集、酸性ガスの中和・捕集、PFOS・PFOA等の吸着・捕集	排ガスの排出

図 1　ロータリーキルン式熱分解処理設備フロー（No. S1）

適用条件：PFOS および PFOA の溶出量が数 mg/L オーダーの土壌まで対応可能。おおむね 30 cm 以上の大きさの岩石、鉄筋、ゴミ等の粗大異物の混入が無いこと。

技術目標：

表 3　実証試験における技術目標と評価方法（No. S1）

項目	目的	目標値	評価
PFOS＋ PFOA 濃度	PFOS＋PFOA 濃度の除去の評価	処理後土壌の PFOS＋PFOA 濃度：50 ng/L 以下	実証試験における公定法分析結果を基に評価
		ばいじん（バグフィルタ）の PFOS＋PFOA 濃度：50 ng/L 以下	
		排ガス（煙突）の PFOS＋PFOA 濃度：60 ng/ m^3 N 以下	
処理コスト	低コスト性を評価	430,000 円／m^3 以下 （215,000 円／t 以下）	実証試験データを基に評価
環境への負荷	燃料・電気使用等による二酸化炭素排出量の削減を評価	1,656 kg-CO_2／m^3 以下 （828 kg-CO_2／t 以下） ※実証試験計画時の試算結果	実証試験データを基に評価
	周辺環境に対する低負荷性を評価	排ガス（煙突）のフッ化水素濃度：5 mg／m^3 N 以下	実証試験における公定法分析結果を基に評価

備考　1　排水は発生しない。
　　2　騒音・振動については、実証試験を実施する設備の設置位置周辺は工業専用地域であり、騒音・振動の規制区域外であることから評価外とした。
　　3　処理量 3 t/h の試験で上記評価を行うものとする。

2.1.1　対策技術の有効性

本実証試験では、処理前土壌の PFOS 溶出量が定量下限未満であったため、以下、PFOA の濃度については、PFOS 及び PFOA の合計値と同義となる。実証試験では約 1,400t の土壌試料を PFOA 溶出量別（低濃度（溶出量 44,000 ng/L）、中濃度（溶出量 76,000 ng/L）、高濃度（溶出量 140,000 ng/L））に分け、熱分解処理試験を行なったところ、すべてのケースで処理後土壌、ばいじんの溶出量は技術目標の PFOA 溶出量 50ng/L 以下を満足した。排ガスについても、技術目標の PFOA 60ng/m^3N 以下、フッ化水素 5mg/m^3N 以下を満足した。土壌試料に含まれる PFOA は、ロータリーキルンおよび二次燃焼室でそのほとんどが熱分解・除去されていることが示唆された（PFOS・PFOA 以外の PFAS については、一部の試料を除いて定量下限値未満だった）。PFOA の分解率を計算すると、99.995%以上（注：分解後の土壌の含有量が定量下限値未満となったため、99.995%は定量下限値を用いて計算した値）となった。

表 4　主たる試料の PFOS・PFOA 分析結果一覧（No. S1）

			処理前	処理後						
			土壌	土壌	ばいじん				排ガス	
			① 処理前土壌	② 処理後土壌	⑤ 第1減温塔ばいじん	⑥ 第2減温塔ばいじん	⑦ バグフィルターばいじん		③ 排ガスバグフィルター前	④ 排ガスバグフィルター後
低濃度	含有量	PFOS ng/g-dry	< 0.8	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	PFOS ng/m^{3}N	< 0.8	< 0.9
		PFOA ng/g-dry	**230**	< 0.01	< 0.01	< 0.01	**0.02**	PFOA ng/m^{3}N	< 0.8	< 0.9
		評価	—	—	—	—	—	評価	—	○
	溶出量	PFOS ng/L	< 40	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	フッ化水素 mg/m^{3}N	< 0.5	< 0.5
		PFOA ng/L	**44,000**	< 0.1	< 0.1	**1.0**	< 0.1			
		評価	—	○	○	○	○	評価	—	○
中濃度	含有量	PFOS ng/g-dry	< 0.8	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	PFOS ng/m^{3}N	< 0.9	< 1
		PFOA ng/g-dry	**480**	< 0.01	< 0.01	**0.01**	**0.01**	PFOA ng/m^{3}N	**1.0**	< 1
		評価	—	—	—	—	—	評価	—	○
	溶出量	PFOS ng/L	< 40	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	フッ化水素 mg/m^{3}N	< 0.5	< 0.5
		PFOA ng/L	**76,000**	< 0.1	< 0.1	**1.2**	< 0.1			
		評価	—	○	○	○	○	評価	—	○
高濃度	含有量	PFOS ng/g-dry	< 0.8	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	PFOS ng/m^{3}N	< 0.8	< 0.9
		PFOA ng/g-dry	**1,300**	< 0.01	< 0.01	**0.06**	**0.06**	PFOA ng/m^{3}N	**2.6**	**1.0**
		評価	—	—	—	—	—	評価	—	○
	溶出量	PFOS ng/L	< 40	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	フッ化水素 mg/m^{3}N	< 0.5	< 0.5
		PFOA ng/L	**140,000**	< 0.1	< 0.1	**7.7**	< 0.1			
		評価	—	○	○	○	○	評価	—	○
技術目標				処理後土壌・ばいじん PFOS+PFOA 溶出量 50ng/L以下				排ガス（バグフィルター後（煙突）） PFOS+PFOA 濃度　60ng/m^{3}N以下 フッ化水素濃度　5mg/m^{3}N以下		

2.1.2　対策技術の新規性・将来性

PFOA の分解効率は、低濃度：99.995 %、中濃度：99.998 %、高濃度：99.9989 %と、いずれも 99.99 %（4 ナイン）以上であった（注：定量下限未満の結果の場合は、定量下限値を用いて計算を行った。）。今回の実証試験では、排ガスの二次燃焼室出口温度を 850 ℃以上（860 ℃）の条件で処理を行ったが、高濃度試料の処理においても十分な分解効率を達成した。

2.1.3　対策技術の経済効率性

従来技術の焼却処理（混焼炉、混焼率 3 %）とのコスト比較を表 5　従来技術とのコスト比較表 5 に示す。

表 5　従来技術とのコスト比較（No. S1）

項目		本技術 （ロータリーキルン式熱分解）	従来技術 （焼却処理）
施設タイプ		専焼炉	混焼炉(混焼率 3 %想定)
処理量	[t]	1402.16	1402.16
日当り処理量	[t/日]	65.5 (改良後で 72 t/日)	3.0～6.0 ※処理能力 100～200 t/日
1 t 当たりの処理コスト※1	[円/t]	215,000	300,000～
処理コスト	[円]	301,464,400	420,648,000～
1 t 当たりの施工費※2	[円/t]	250,000	345,000～
施工費※	[円]	350,540,000	483,745,200～
運転期間	[日]	21.4 日 受入後に前処理：1 日間、翌日より処理可能 処理後土壌保管：30 日間 （分析で基準適合なら搬出）これらを含めると搬入から 2 か月弱を要す。	100 t/日施設：468 日 200 t/日施設：234 日 （いずれも混焼率 3%時） ※廃棄物処理施設で産業廃棄物として処理する場合、マニュフェスト交付から 180 日以内に最終処分を終了する必要があり、受入施設可能な施設が限定もしくは分散する必要がある。

※1　処理後物の処分費を含む。

※2　今回の実証試験における掘削・埋戻し、運搬の直接工事費をベースに算出したもので、分析やモニタリング費用等は含んでいない（今回の掘削は、オープン掘削で土留を使用していないほか、湧水処理などの費用も発生しなかったことから、必要最小限で施工できたことに留意のこと）。

2.1.4　対策技術の環境保全

排ガスおよびばいじんのいずれについても、処理目標を十分に満足する PFOS+PFOA 濃度であり、周辺環境への影響はないことが確認された。表 6　二酸化炭素排出量の試算結果表 6 に二酸化炭素排出量の算定結果を示す。

表 6　二酸化炭素排出量の試算結果（No. S1）

項目	実証前の試算（計画時） ＝技術目標	実績ベース
二酸化炭素排出量	1,656 kg-CO_2/m^3 (828 kg-CO_2/t)	851 kg-CO_2/m^3 (412.9 kg-CO_2/t)

2.1.5　実証試験結果に対する運営会議の評価

（※上述の実証の最終的な報告は、本評価を踏まえてまとめられている。）

(1) 有効性

・溶出量 3 万 ng/L 程度～14 万 ng/L 程度の土壌について、既存の汚染土壌処理施設における通常の運転方法で特別な工程を追加することなく、目標（処理後土壌の

PFOS+PFOA 濃度 50 ng/L 以下）を達成できた。また、ばいじんや排ガスの PFOS+PFOA 濃度も目標値以下であり、土壌中 PFOS 等の濃度低減が確実にできることを確認でき高く評価できる。

・熱分解に伴う排ガスやばいじんについては、より揮発性の高い短鎖 PFAS を含む有機フッ素化合物についても分析方法を構築し、評価を行うことが望ましい。

・原状復旧における処理後土壌の活用も含めた手法も検討することが期待される。

・既存の処理施設を活かしながら確実に PFOS 等の濃度低減に資する技術として導入されることが期待される。

(2) 新規性・将来性

・排ガスの二次燃焼温度が 850℃程度での PFOS 等の熱分解処理に問題がないことを確認したことは、新規性があると評価できる。

・PFOA については十分な分解性能が確認されたが、PFOS を含む他の PFAS については改めて効果を確認する必要がある。

(3) 経済効率性

・排ガスの二次燃焼温度が 850℃程度で処理可能であるため、より高温で処理する場合と比べて安価である。今回は専焼炉であることから、将来的なニーズは課題であるが、効率的に処理できる。

・掘削及び輸送を伴うオフサイトでの処理が必要であり、総じてコストは高くなる傾向があるため、より一層のコスト削減という課題が残る。礫分が少ない土壌の場合は今回よりもエネルギーを要する可能性があり、事前に処理対象の土質を把握することが望ましい。

(4) 環境保全

・フッ化水素を含め排ガスの環境負荷に係る目標値を達成していることについては評価できる。

・土壌掘削時の騒音や振動の観点も考慮することが望ましい。

・礫分が少ない土壌の場合は今回よりもエネルギーを要する可能性があり、事前に処理対象の土質を把握することが望ましい。

2.2　PFOS 等汚染土壌の浄化を目的とした分級洗浄技術（No. S2）

技術の分類：土壌洗浄

実証区分・対象試料：現地以外（土１）

適用段階：実用レベル

実証規模：kg オーダー

実証事業者名：清水建設株式会社

実証期間：PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業：令和 7 年 8 月～令和 7 年 12 月

技術の原理：土壌洗浄技術は、細粒分(粘土、シルト、土壌有機物など)に汚染物質が吸着、偏在する性質を利用し、細粒分を分離、除去することによって浄化土を産出するもの。本技術は、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る。

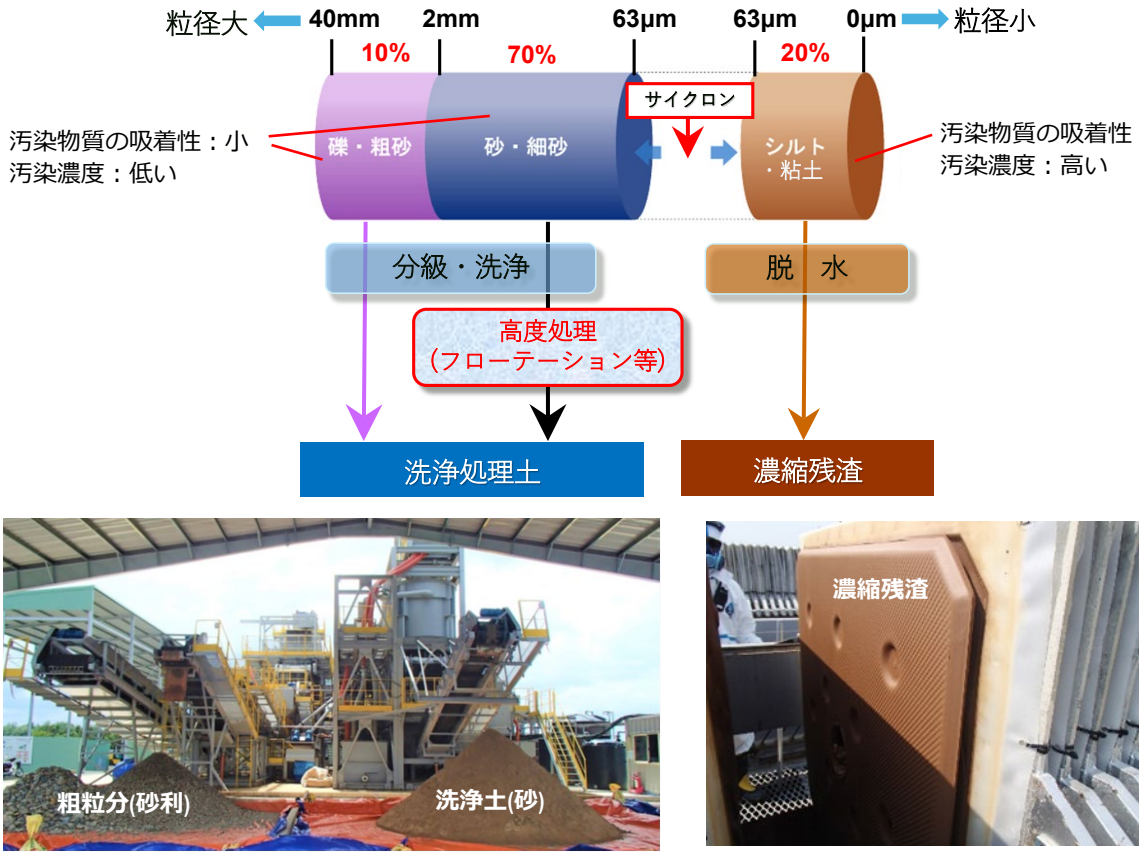


図 2　土壌洗浄技術の原理（No. S2）

適用条件：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。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。

技術目標：

表 7　技術目標と評価方法（No. S2）

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_2 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_2 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 [1), 2)])	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 溶出量を評価	洗浄礫・洗浄砂の PFOS+PFOA 溶出量を 50 ng/L 以下 [3)]	実証試験における公定法分析結果を基に評価

2.2.1　対策技術の有効性

実証試験における土壌洗浄技術の有効性を表 8 に示す。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。

今回の土壌はアルカリ性(pH10 前後)の土壌であったため、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。

[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

表 8　実証試験における土壌洗浄技術の有効性（No. S2）

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_2 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_2 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($CaCO_3$、$Ca(OH)_2$)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

2.2.2　対策技術の新規性・将来性

現時点での本対策技術の新規性は以下の 2 つとなる。

・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。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

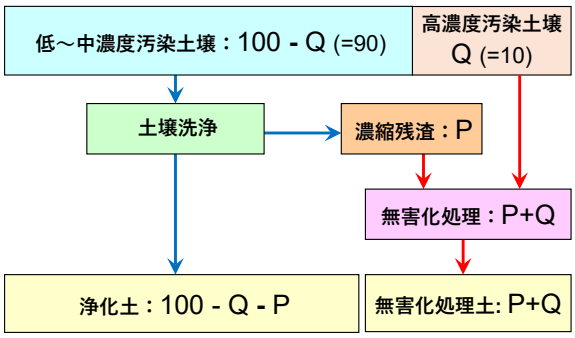
（4）浄化費用と浄化工事期間の算出

2.2.3 対策技術の経済効率性

図 3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 = (土壌洗浄費用)/(無害化処理費用) で求められる。

土壌洗浄による浄化費用の削減効果を図 4 に示す。無害化処理と土壌洗浄とのコスト比は n = 3～5 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。土壌の運搬費用は含まれておらず、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。



無害化処理単位コスト: A
土壌洗浄単位コスト: B
コスト比: n = A/B,　A = nB
土壌洗浄費用(無害化処理を含む) : (100 – Q)B + (P+Q)A
濃縮残渣の発生量: P = (100 – Q)×α　(α = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4)
全量の無害化処理費用: 100A = 100 nB
土壌洗浄による浄化費用の削減効果，R
R = (土壌洗浄費用)/(無害化処理費用)

図 3　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)　（No. S2）

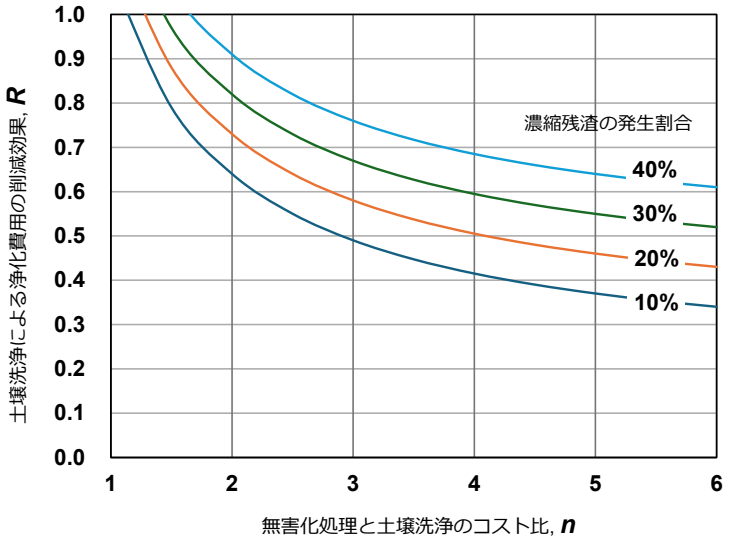


図 4　土壌洗浄による浄化費用の削減効果、高濃度土壌が 10%占める場合(Q = 10)
（No. S2）

2.2.4　対策技術の環境保全

PFAS 汚染土壌を、全量外部の処理施設に運搬した場合の CO_2 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_2 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_2 発生量も算出した。それに対し、土壌洗浄処理に伴う CO_2 発生量と濃縮残渣だけを加熱処理する場合の CO_2 発生量も算出し、削減比を検証した。

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_2 は約 80%削減できることが見込まれる。

表 9　運搬に伴う CO_2 発生抑制比較（No. S2）

	ダンプ１台当たりの CO2発生量（kg-CO2/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（m3）	ダンプ台数（台）	CO2発生量（kg-CO2）	搬出土量（m3）	ダンプ台数（台）	CO2発生量（kg-CO2）
汚染土の搬出	141	1000	182	**25,662**	200	37	**5,217**
	ダンプ１台当たりの CO2発生量（kg-CO2/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（m3）	ダンプ台数（台）	CO2発生量（kg-CO2）	搬出土量（m3）	ダンプ台数（台）	CO2発生量（kg-CO2）
埋戻土の搬入	47	1000	182	**8,554**	200	37	**1,739**
合計				**34,216**			**6,956**

表 10　土壌処理に伴う CO_2 発生抑制比較（No. S2）

加熱処理１ｔ当たりの CO2発生量（kg-CO2/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						
				発電に伴うCO2発生				濃縮残渣の加熱処理に伴うCO2発生		合計 CO2発生量（kg-CO2）
	処理土量（m3）	処理土量（t）	CO2発生量（kg-CO2）	CO2発生量（kg-CO2/ kWh）	洗浄処理土量(m3)	処理必要時間(hr)	CO2発生量（kg-CO2）	加熱処理土量（t）	CO2発生量（kg-CO2）	
285	1000	1800	**513,000**	0.51	1000	45	**23**	360	**102,600**	**102,623**

2.2.5　実証試験結果に対する運営会議の評価

（※上述の実証の最終的な報告は、本評価を踏まえてまとめられている。）

(1) 有効性

- 土壌洗浄と酸洗浄の併用により土壌中の PFOS・PFOA は 99%以上除去され、さらに洗浄水中に溶出した PFOS・PFOA も凝集沈殿処理によって 99.5～99.9%と極めて高い効率で除去されることは高く評価できる。
- 土質によっては効果が限定的となる場合があり、高濃度（10 万 ng/L）では溶出量 50ng/L を超える場合があり、適用範囲、前処理の必要性、浄化土壌としての再利用性の評価について課題が残る。
- 技術の適用範囲を広げるためには、PFOS・PFOA 以外の PFAS の処理性能や挙動の検証、短鎖 PFAS など揮発性成分の分析強化、スラッジや高濃度残渣の処理方法などの検証が必要である。
- これらの課題を克服すれば、既存技術を応用しつつ、処理後土壌の利活用や対策への展開が見込まれる。

(2) 新規性・将来性

- PFOS 等を対象にした分級洗浄技術として新規性があると評価できる。
- X 剤の詳細情報や凝集メカニズムについての説明が望ましい。

・ 低濃度の汚染土壌には将来的な実用可能性が期待できるが、多様な土壌や高濃度土壌への適用は課題が残るほか、処理後残渣（高濃度土壌・スラッジ）の効率的な処理を含めたシステム構築が求められる。

(3) 経済効率性

・ 土壌洗浄を適用した場合、熱分解処理に比べて 40～70%のコスト低減ができることは評価できる。

・ 具体的な数値の不足や熱分解処理との比較に偏っていることから経済的な評価に課題が残る。

(4) 環境保全

・ 熱分解処理と比べて CO_2 排出量を大幅に削減できる点は評価できる。

・ 分級された土壌や残渣の処理に対する評価、本技術の適用条件を含め、詳細な評価について課題が残る。

・ 従来の土壌汚染対策手法に倣って対策を取れば、環境負荷に係る課題の克服が見込まれる。

2.3　汚染中心濃度に対応した超低負荷型 PFAS 固定化等技術（No. S3）

技術の分類：固化・安定化

実証区分・対象試料：現地以外（土１）

適用段階：実用レベル

実証規模：100g 程度～kg オーダー

実証事業者名：株式会社環境管理センター

実証期間：PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業：令和７ 年８ 月～令和８ 年２ 月

技術の原理：本技術は、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・難透水化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。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、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。

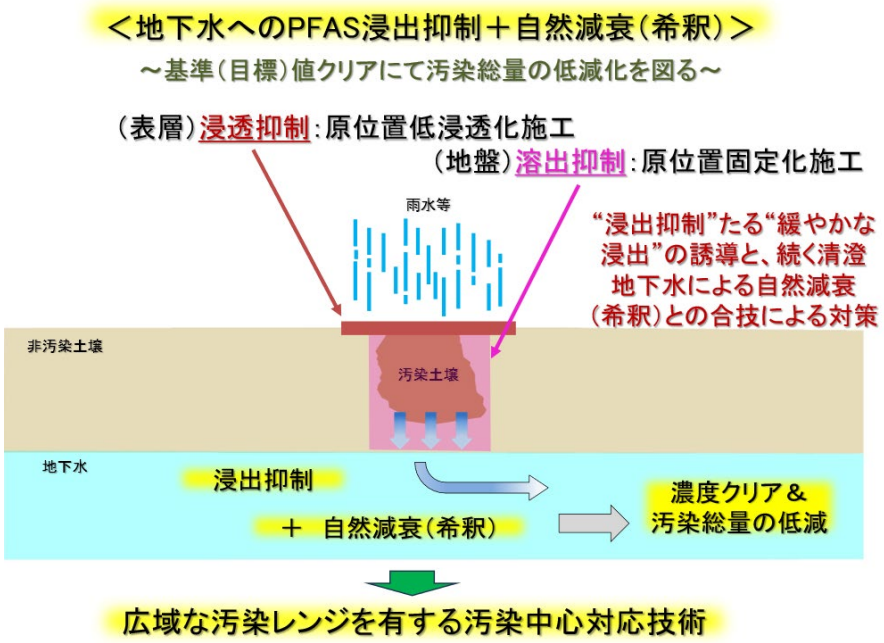


図 5　技術の原理（No. S3）

適用条件：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。

技術目標：

表 11　技術の対策目標（No. S3）

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。

2.3.1　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。試験結果より、安定化によりフラックスは無処理と比較して約 4 桁低減し、さらに表層固化を併用することで、フラックスは無条件と比較して約 7 桁低減した。

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。

表 12　植物由来活性炭 6%配合土壌安定化試験結果（No. S3）

溶出量（ng/L）

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

※本表の数値は活性炭配合・攪拌後の試料について代表 3 点（①～③）を採取して溶出量を測定した結果。活性炭配合前の試料について代表 3 点を採取し、溶出量を測定した結果は、PFOA：2,500,000ng/L、2,600,000ng/L、3,000,000ng/L、PFOS：いずれも<5ng/L、であった。

図 6　モルタルミキサー混合状況（No. S3）

2.3.2　対策技術の新規性・将来性

本技術のベース技術である「Smart Cap™工法」（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）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 Cap™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いない。

2.3.3 対策技術の経済効率性

本技術は、初期施工後に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 Cap™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 13 に示した通りである。

表 13　従来技術とのコストの比較（No. S3）

［千円/ m^3］

項目	本技術※1 （Smart Cap™工法）	従来技術※2 （掘削除去）
1m^3 当たりの処理コスト(目安)	40～80	100～200

※VOC を想定したコストの目安。本技術は、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。

2.3.4 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。

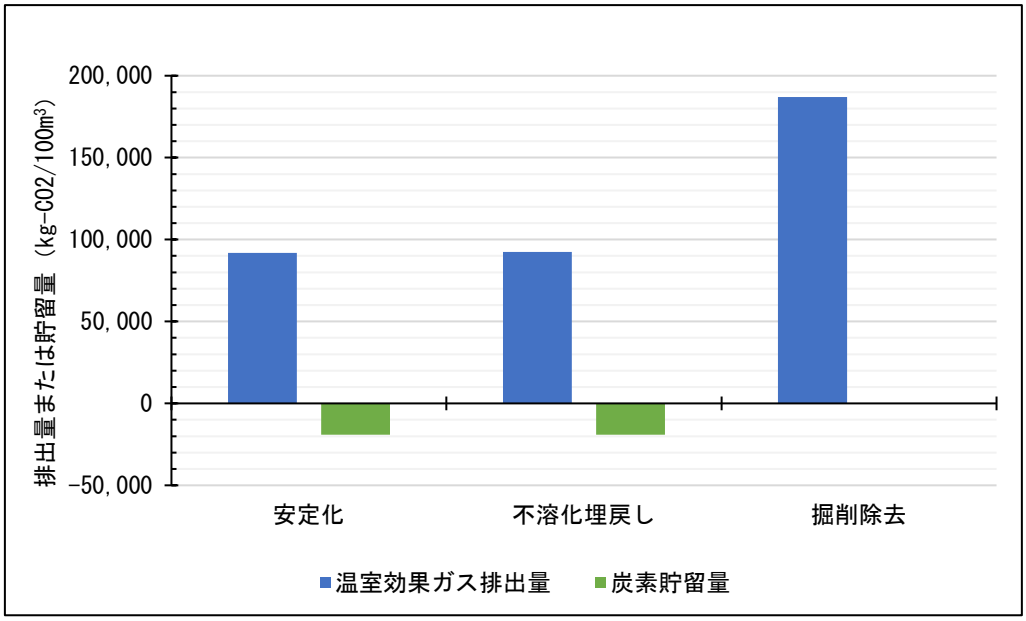


図 7　各施工による温室効果ガス排出量及び炭素貯留量（No. S3）

2.3.5　実証試験結果に対する運営会議の評価

（※上述の実証の最終的な報告は、本評価を踏まえてまとめられている。）

(1) 有効性

・活性炭混合による土壌中 PFOA の溶出量の 99%以上の低減効果が得られ、土壌中 PFOA の濃度が高くない場合に本技術が有効であることが示唆されたことは評価できる。一方で、適用条件を整理することが望ましい。

・安定化試験、透水試験における各目標値は達成したものの、両者を組み合わせた技術としての評価や、地下水への流入フラックスの試算を含めた環境中の有効性評価、土質による効果の違いの評価、土壌強度に関する評価、長期的な性能に関する評価について課題が残る。今後、現場で実証試験を行い、効果を確認することが期待される。

・セメント混合によって pH が上昇すると PFOA 溶出量が増加している点や、他の PFAS に関しての効果についても確認することが期待される。

・今後さらなる検証を進め有効性を改めて確認することで、土壌搬出を伴わない低コスト・低負荷型の対策技術としての展開が見込まれる。

(2) 新規性・将来性

・活性炭を使った固化、セメントを使った難透水化とも新しい技術ではないが、それを組み合わせることにより PFOS 等の地下水への流入量を低減しようとした試みは新規性があり評価できる。

・将来性についても、低減率がトリータビリティ試験により確認されれば、課題は少ないが、有効性に関しては改めて確認する必要がある（有効性評価を参照）ほか、本技術による効果について目標を明確に示すことが望ましい。

(3) 経済効率性

・経済性については具体的な評価がなく、今後の課題であるが、熱分解に比べれば比較的安価であるものと考えられる。
・現場実務の知見を有する事業者との連携が望まれる。

(4) 環境保全

・CO_2 排出量が掘削除去(最終処分場埋立)の半分程度に削減できていることは、脱炭素の視点からは評価できる。その他の観点の評価は課題。
・本技術の適用に向けては、現地での検証及び評価を重ね、適切なリスクコミュニケーションによる住民の理解などが必要と考えられる。

2.4　PFOS 等汚染土壌の固化・安定化処理　～汚染土壌からの PFOS 等溶出抑制～（No. S4）

技術の分類：固化・安定化

実証区分・対象試料：現地以外（土１）

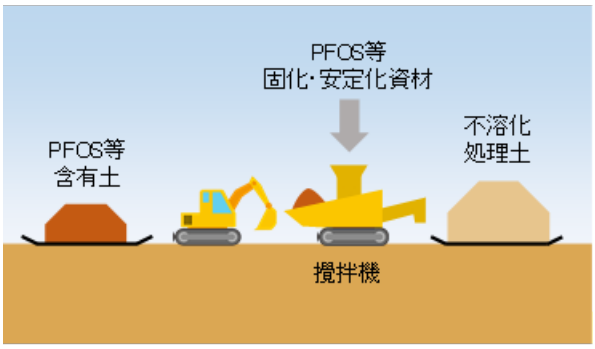
適用段階：実用レベル[4]

実証規模：400kg

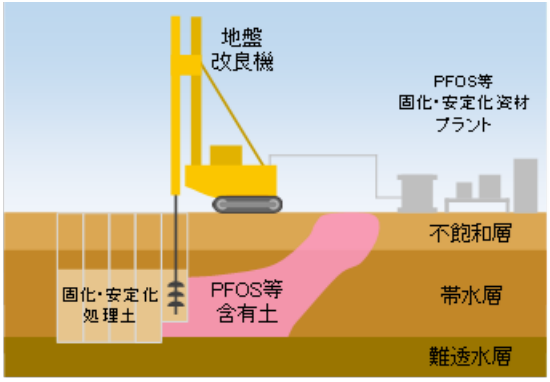
実証事業者名：株式会社大林組

実証期間：PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業：令和 7 年 8 月～令和 8 年 2 月

技術の原理：固化・安定化処理は、通常の建設工事で用いられる重機や定置式の土壌改良装置によって PFOS 等汚染土壌の処理が可能である。また、掘削した汚染土壌の処理にも、原位置での汚染土壌処理にも適用が可能であり、他の処理方法と比較して適用範囲が広い処理方法といえる。なお、ここでいう固化・安定化処理は、土壌汚染対策法の実施措置として提示された原位置不溶化および不溶化埋め戻し等に該当するものである。本実証では、粉末活性炭と陽イオン系資材（酸化マグネシウム等）、固化材（セメント等）の 3 種の資材を PFOS 等汚染土壌に混合することによって PFOS 等の溶出量を低減する技術を実証した。粉末活性炭には物理的な吸着効果を、陽イオン系資材には PFOS 等との静電引力による吸着を、固化材には吸着材の効果の持続性や強度増加による施工性の向上を期待している。



掘削汚染土壌の固化・安定化処理



原位置での固化・安定化処理

図 8　固化・安定化処理の施工イメージ（No. S4）

[4] 他の実証技術とも比較の上、分類を行った。

図 9　資材混合状況（左：小型撹拌装置、右：小型バックホウ）（No. S4）

適用条件：今回実証試験における処理土の溶出量は、固化した処理土を 2mm 以下に粉砕した試料について測定したものであることから、実汚染サイトにおける処理後土壌からの溶出量（特に処理土が固化体となる原位置処理土の溶出量）は、固化体の寸法等の条件にもよるが、さらに小さくなる可能性がある。今回実証試験対象の土壌には大小の礫やコンクリートガラが多く含まれていたため、9.5mm 以上の異物をふるいで除去した後に本試験を実施して溶出量の低減効果を確認できた。したがって、実際の処理においても、同様に最大粒径 9.5mm 以下の土壌であれば施工は可能と考えられる。有機物やその他の阻害物質による処理効果への影響は十分に検証されておらず、実施工においては、汚染サイトごとにトリタビリティ試験による適用性の確認が必要である。今回の室内試験では試験期間や試験条件が限定的であったこともあり、今後、さら定量的な検証が必要と考えられる。また、陽イオン系資材による溶出量低減効果が土質によって異なることが示唆されたため、土質の影響については継続的な検討が必要と考えられる。

技術目標：

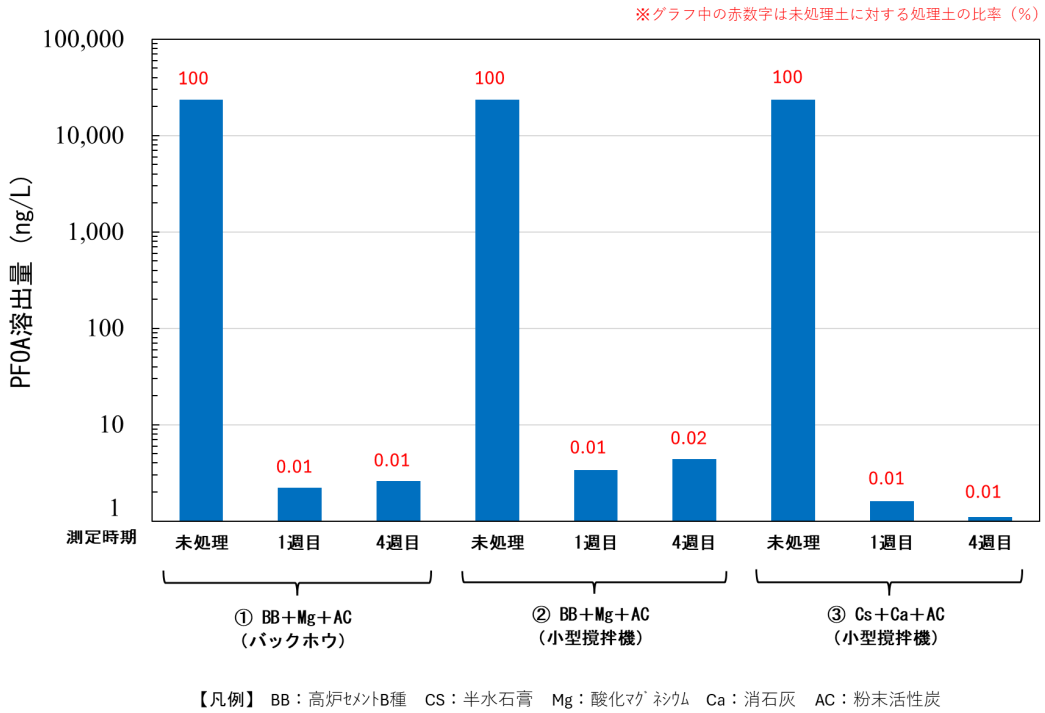
表 14　提案技術の技術目標（No. S4）

目標	目的	目標値
① PFOS 等の濃度低減	処理による土壌中からの PFOS 等の溶出量（PFOS 溶出量と PFOA 溶出量の合算値）の低減効果を評価	処理前後の溶出量の低減率 90%以上
② 処理コスト低減	提案技術の低コスト性を評価（既存処理技術（熱処理）との比較）	20,000 円／m^3 以下
③ 環境への負荷低減	提案技術の二酸化炭素排出量の削減効果を評価（既存処理技術（熱処理）との比較）	360 kg-CO_2／m^3 以下

2.4.1　対策技術の有効性

今回の実証試験では、高濃度（数万～数百万 ng/L）の PFOA 含有土壌からの溶出量を 99～99.9%以上低減し、目標とした低減率 90%を満足することができた。また、溶出量が数万 ng/L レベルの PFOA 含有土壌までは、50ng/L レベルまで低減できることを確認できた。また、今回の実証試験における結果は PFOA 含有土壌に対して得られたもので

あるが、別途実施した模擬汚染土を用いた室内試験において PFOS 溶出量を 99.9%以下まで低減した結果も得られており、提案技術は PFOA と PFOS の両者に対して適用可能と考える。今回実証試験対象の土壌には大小の礫やコンクリートガラが多く含まれていたため、9.5mm 以上の異物をふるいで除去した後に本試験を実施して溶出量の低減効果を確認した。処理対象土の化学的性状については、今回実証試験は過去に実施した試験の土壌よりも高い pH の土壌であったが、十分な溶出量低減効果が確認できた。処理後の土壌の pH は固化材や陽イオン資材の影響が支配的と考えられることから、対象土の pH によって処理効果が大きく影響を受ける可能性は低いと予想される。固化材と吸着材の組み合わせについては、高炉セメント B 種と酸化マグネシウム、半水石膏と消石灰のいずれの組み合わせにおいても、本試験において同様の溶出量低減効果が確認できた。今回の実証試験において実施した上向流カラム通水試験およびタンクリーチング試験では、処理効果の持続性を確認できた。ただし、今回の室内試験では試験期間や試験条件が限定的であったこともあり、今後、さら定量的な検証が必要と考えられる。一方、固化・安定化処理土の透水試験からは、透水性の低下による処理土からの浸出水量の低減も期待でき、その浸出水量の低減効果については長期的な持続性が期待できると考えられる。



※PFOS はすべてのケースで定量下限未満だったため、上記グラフでは PFOA の測定値結果を示している

図 10　試験結果（No. S4）

2.4.2 対策技術の新規性・将来性

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

2.4.3 対策技術の経済効率性

処理対象土量 30,000m^3 の場合を想定し、既存処理技術である熱処理（場外処理施設への搬出）のコストと固化・安定化処理による処理コストを比較した。今回の試算では、固化・安定化処理によって既存技術である熱処理のコストを大幅に低減可能であり、効率的に資材の混合処理が可能な自走式撹拌機を用いることによって、目標とした処理コスト 20,000 円/m^3 を満足できることが確認できた。

表 15　対策技術のコスト検討結果（No. S4）

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

※土壌や資材等の運搬コストについては立地により異なるため今回の検討では除外した。
※提案技術の工事期間は施工能力から設定し、従来技術の工事期間は受入能力から設定した。

2.4.4 対策技術の環境保全

処理対象土量 30,000m^3 の場合を想定し、熱処理（場外処理施設への搬出）の二酸化炭素排出量と固化・安定化処理による排出量を比較した結果を表 16 に示す。今回の試算では、固化・安定化処理によって、既存技術である熱処理（場外施設への搬出）の二酸化炭素排出量を大幅に削減し、効率的に資材の混合処理が可能な自走式撹拌機を用いることによって、目標とした排出量 360kg-CO_2/m^3 を満足できることが確認できた。

表 16　対策技術による二酸化炭素排出量の削減（No. S4）

区分	項目		提案技術 バックホウ	提案技術 自走式攪拌機	熱処理
二酸化炭素の排出量（kg-CO_2）	重機稼働の燃料軽油		4,717,440	1,179,360	1,048,320
	固化・安定化資材の製造	酸化マグネシウム	469,800	469,800	—
		高炉セメントB種	5,229,000	5,229,000	—
		活性炭	425,250	425,250	—
	熱処理（焼成処理）		—	—	82,044,701
	合計		12,124,440	8,586,360	83,093,021
土量 1m^3 あたり排出量（kg-CO_2 /m^3）			361	243	2,770

※二酸化炭素の排出量の算出には、焼成処理による排出量を除き土壌環境センターの COCARA を用いて算出した。熱　処理の排出量については、PFOS 等含有廃棄物の熱処理施設を有する事業者の廃棄物受入量あたりの CO_2 排出量を原単位として算出して、処理土量に乗じて算出した。
※土壌や資材等の運搬に伴う CO_2 排出量については立地により異なるため今回の検討では除外した。

2.4.5　実証試験結果に対する運営会議の評価

（※上述の実証の最終的な報告は、本評価を踏まえてまとめられている。）

(1) 有効性

・2 万 ng/L 程度から 20 万 ng/L 程度まで幅広い範囲で 99～99.9%の溶出量の低減が確認され、技術として有効性が高いことは評価できる。

・PFOA 以外の PFAS に対する効果、土質による除去率の差、資材の役割、長期的な安定性について評価することが望ましい。

・パイロットスケールで現場適用性がある程度確認されたが、実際の現場での技術の評価や本技術を適用する条件を整理することが望まれる。

(2) 新規性・将来性

・新たな技術ではないが、国内での PFOS 等に対する試みとしては一定の新規性がある。また、通常の建設機械を用いており、汎用性が期待できる。

・一般的な建設機械を用いた施工は確立されているなど、実用化に向けた課題は比較的少なく、実装が期待される技術。

(3) 経済効率性

・バックホウなど一般的な建設機械で作業が可能であり、簡便で比較的安価な技術であることは評価できる。

・評価指標や最適化については更なる検討が望ましい。

(4) 環境保全

・CO_2 排出量が低減できること、通常の土壌改良と同様に適切な施工を行うことにより環境負荷を小さく出来ることも評価できる。

・本技術の適用に向けては、現地での検証及び評価を重ね、適切なリスクコミュニケーションによる住民の理解の促進が必要と考えられる。

3. 水の濃度低減のための対策技術

No.	技術の分類	技術の名称	実証事業者名	実証区分	対象試料※
W1	活性炭（再生）/泡沫分離	カートリッジ式活性炭吸着装置および泡沫分離前処理装置を用いた活性炭再生循環運用による高濃度 PFAS 含有水の処理方法	株式会社エコサイズ	現地	水 1
W2	イオン交換樹脂	PFAS 除去用イオン交換樹脂を用いた処理実証	株式会社奥村組		水 2
W3	超音波	400kHz 付近キャビテーション超音波-酸化ラジカルハイブリッドによる PFAS 無害化モジュール～処理量 50m³/日で原位置 50ng/L 達成を目指す～	株式会社日立ハイテク	現地以外	水 1・水 2
W4	溶媒抽出/光分解	溶媒抽出技術、「エマルションフロー」を用いた PFOS 等の濃度低減と光分解技術を用いた回収 PFOS 等の無害化に関する実証実験	株式会社エマルションフローテクノロジーズ		
W5	泡沫分離/プラズマ	分離・分解技術による PFAS 含有水の処理実証（泡沫分離／プラズマ）	清水建設株式会社		水 2

※【水１】産業廃棄物最終処分場（管理型、埋立終了）、既設排水処理設備の放流水（PFOA が主）
【水２】産業廃棄物最終処分場（安定型、埋立中）、浸透水（PFOA が主）

3.1　カートリッジ式活性炭吸着装置および泡沫分離前処理装置を用いた活性炭再生循環運用による高濃度 PFAS 含有水の処理方法（No. W1）

技術の分類：活性炭（再生）／泡沫分離

実証区分・対象試料：現地（水 1）

適用段階：実用レベル

実証規模：200～250m^3/週

実証事業者名：株式会社エコサイズ（※株式会社 MC エバテックと協力）

実証期間：PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業：令和 7 年 8 月～令和 8 年 1 月

技術の原理：本技術は、カートリッジ式活性炭吸着装置を用いて最終処分場放流水に含まれる高濃度の PFOS 等を吸着除去するものであり、また使用した後の活性炭を再生処理・循環運用するシステムである。さらに前処理として泡沫分離処理を組み込むことによる処理の効率化も検討する。技術の特徴として、活性炭をカートリッジにより運用することで①処理水量や PFOS 等の濃度負荷に応じ基数や流路を設定できる、②活性炭の入替や再生処理は専用工場で実施するため使用現場での取替作業が容易、かつ入替時の環境漏洩リスク等を少なく出来るといった利点がある。また使用後の PFOS 等を含有する活性炭を熱賦活再生する際に、吸着した PFOS 等を熱分解・無害化することが出来る。さらに、前処理工程として泡沫分離濃縮法による PFOS 等の濃度低減を組み合わせ、活性炭の延命化（交換・再生頻度の低減）が図れることが期待される。その場合、濃縮分離された PFOS 等は、別途で活性炭へ吸着もしくは他の無害化処理方法（廃棄物処理等）に回すことも可能である。

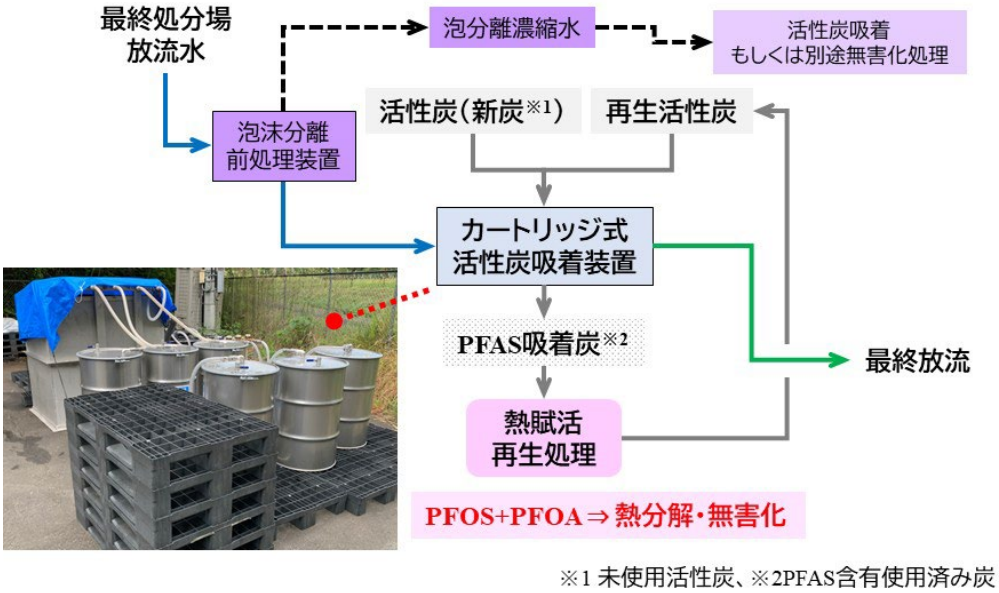


図 11　カートリッジ式活性炭吸着装置による処理フロー（No. W1）

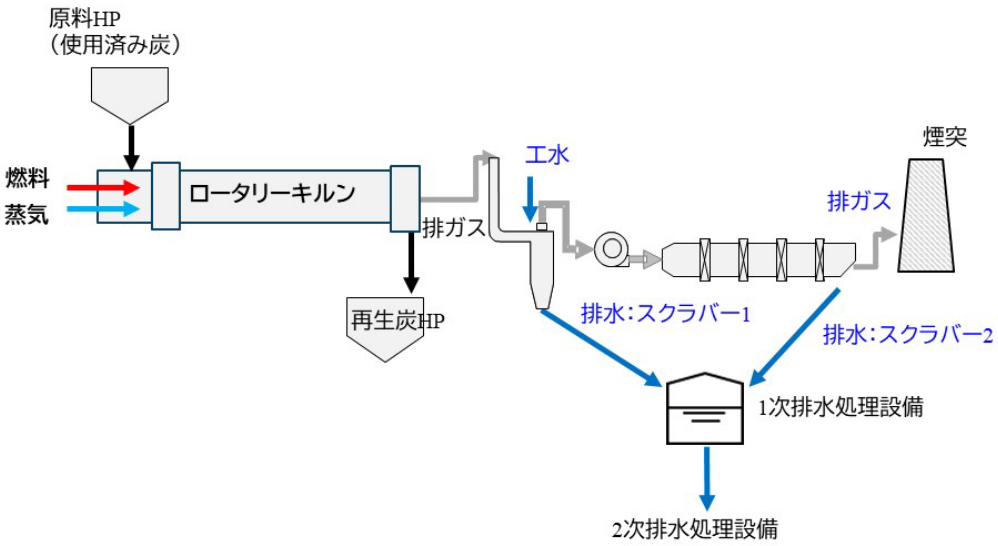


図 12　活性炭再生および排ガス・排水処理系統の模式図（No. W1）

適用条件：カートリッジ式活性炭吸着装置については、原水の PFAS 類濃度を含めその他水質に応じた装置設計および運用方法を立案していく必要があり、必ずしも同一設備での運用が出来るとは限らない。活性炭の再生についても注意が必要である。また、泡沫分離処理との組合せにより未使用活性炭又は再生活性炭の寿命延長につながることが予想されるが、泡沫分離で濃縮した PFAS 類が高濃度になることや、PFAS 類濃度が比較的低い場合は効果的な濃縮分離が出来ない可能性がある。

技術目標：

表 17　実証試験における技術目標と評価方法

項目	目的	目標値	評価
PFOS＋PFOA 濃度低減	放流水（原水）中からの PFOS＋PFOA 濃度の除去性能の評価	カートリッジ処理後の PFOS＋PFOA 濃度 50ng/L 以下、又は処理前後の除去率 99%以上	実証試験における公定法分析結果を基に評価
処理コスト	低コスト性を評価	泡沫分離＋活性炭再生循環運用により 756 円/m^3 以下（運転費用のみ）	実証試験データを基に評価
環境への負荷	活性炭使用量の削減	再生循環運用により、全量新炭（以下、未使用活性炭）使用時に対し 50%削減	実証試験データを基に評価
	活性炭再生処理時の環境負荷評価	再生処理時に発生する廃水中の PFOS＋PFOA＜1μg/L、同じく排ガス中の PFOS＋PFOA<0.06μg/m^3N	実証試験データを基に評価

3.1.1 対策技術の有効性

①カートリッジ式活性炭吸着装置による PFAS 類の低減

PFOS＋PFOA 濃度が最大 600,000ng/L、排水量 50m³/日の条件下にて、カートリッジ式活性炭吸着装置を 2 基直列×3 流路設置し、長期試験（L-1）にて空間速度 SV=3.3/h(1 流路あたり約 1.2m³/h)で 1 週間単位での通水試験を行ったところ、処理水中の PFOS 濃度は 5ng/L 未満を維持した。一方、PFOA については除去率 99.9%以上が確認されたものの、原水濃度が高く濃度変動も大きいことから目標の 50ng/L 以下を達成しない場合があった。 カートリッジ式活性炭吸着装置中の PFAS 類の吸着帯を確認したところ、原水が投入される前段カートリッジの上段・中段部に 98%程度の PFOS、PFOA の吸着がみられたことから、1 週間単位で前段のカートリッジを交換し後段のカートリッジを前段へ、後段には新たなカートリッジを設置する方法（メリーゴーラウンド方式）が有効であることが示唆された。

再生活性炭を用いた短期試験（S-2）および長期試験（L-2）における PFOS、PFOA の除去率は、未使用活性炭のみを充填したカートリッジと同等の除去率（99%以上）が得られることが確認された。これらのことから、PFOS、PFOA の除去に再生活性炭（未使用活性炭同様に）が有効であると明らかになった。

②PFAS 含有使用済み炭の熱賦活再生（※株式会社 MC エバテックにて実施）

PFAS 含有使用済み炭の熱賦活再生処理では、熱賦活再生処理温度 850℃以上とすることで、活性炭の材料特性（ヨウ素吸着、窒素ガス吸着による細孔構造、硬さ）は未使用活性炭と同等以上を示し、再生活性炭中の PFOS および PFOA 含有量の合算値は技術的留意事項に示される残渣の管理目標参考値 5μg/kg 以下になることが確認された。

活性炭に吸着された PFAS 類は熱賦活再生により熱分解され、フッ化物イオンとして排水中から多く検出された。また、熱賦活再生時に排出される PFOS、PFOA およびフッ化物イオン、フッ化水素は技術的留意事項および水質汚濁法・大気汚染防止法に示される閾値以下であることがわかった。なお、再生メーカーの設備（炉、燃料、排ガス処理設備）は各社固有であることなどから、本結果が全てに適用できるとも限らない点は注意が必要である。

2 回の再生試験における分解効率は PFOS で 99%、PFOA で 99.999%、分解除去率（ADRE）は PFOS で 99.9%、PFOA で 99.9999%を示し、フッ素の収支についてもバラツキはあるものの概ね 100%近く、再現性は高いと考えられる。

③泡沫分離について

泡沫分離前処理について、実機レベルで濃縮分離 5～10%（分離容量）とすることで、濃縮分離後の処理水 PFAS 類濃度を 1/3 程度に低減できることを確認した。カートリッジ通水原水の PFAS 類濃度低減により、前述①でのカートリッジ交換周期を延長することが可能であり、本試験の処理条件に適用すると交換周期を 2～3 週間単位に出来ると考えられる。

表 18　長期連続通水試験 L-1（未使用活性炭のみ使用）、L-2 （未使用活性炭と再生活性炭の併用）水質分析結果（No. W1）

試料	通水倍数	pH (-)	EC (mS/m)	COD (mg/L)	COD 除去率 (%)	TOC (mg/L)	TOC 除去率 (%)	SS (mg/L)	PFOS (ng/L)	PFOS 除去率 (%)	PFOA (ng/L)	PFOA 除去率 (%)
L-1①	236	7.65	162	2.3	88.8	7.1	65.4	<1	<5	99%以上	100	99.912
L-1②	219	8.04	154	2.4	89.8	8.6	59.0	<1	<5	99%以上	25	99.985
L-1③	64	8.13	155	2.1	93.0	3.5	84.1	<1	<5	99%以上	150	99.893
L-1④	323	8.19	151	2.5	91.4	4.6	79.6	<1	<5	99%以上	8	99.995
L-1⑤	75	8.03	149	2.4	91.1	3.6	84.7	2	<5	99%以上	12	99.994
L-1⑥	223	8.66	147	5.8	80.3	4.8	80.0	<1	<5	99%以上	100	99.957
L-1⑦	324	8.24	149	4.1	87.6	4.9	80.0	<1	<5	99%以上	10	99.996
L-1⑧	640	8.27	139	7.5	76.6	6.4	73.3	<1	<5	99%以上	870	99.774
L-1⑨	231	7.56	140	7.2	78.8	4.0	84.3	2	<5	99%以上	33	99.990
L-2①	135	7.61	151	6.3	83.3	4.0	86.1	2	<5	99%以上	55	99.982
L-2②	284	8.40	153	5.1	85.8	5.6	81.9	<1	<5	99%以上	16	99.995
L-2③	219	8.53	149	3.0	90.3	3.4	87.6	<1	<5	98%以上	51	99.977

表 19　使用済み活性炭の熱賦活再生試験における各活性炭の材料特性、PFOS、PFOA 含有量等（No. W1）

再生試験 No	状態	投入量 kg	回収量 kg	収率 %	水分 %	充填密度 g/ml	ヨウ素吸着量 mg/g	揮発分 %	硬さ %	総フッ素 μg/kg	PFOS μg/kg	PFOA μg/kg
-	未使用活性炭					0.45	1,070		95.7	10,000	<0.05	0.13
R-1	PFAS 含有使用済み炭	2,160			48.2	0.47	870	5.5	97.5	410,000	1	9,720
	PFAS 含有使用済み炭（吸着帯試験）									504,333	30	77,700
	再生活性炭		1,700	79	1.4	0.42	1,090		95.9	150,000	<0.05	<0.05
R-2	PFAS 含有使用済み炭	3,360			53.7	0.47	880	5.6	96.5	770,000	34	81,000
	再生活性炭		2,520	75	0.7	0.42	1110		94.7	130,000	<0.05	<0.05

3.1.2 対策技術の新規性・将来性

国内の実設備において PFAS 含有使用済み炭の熱賦活再生における PFOS、PFOA の熱分解挙動を明らかにした。また、再生活性炭は未使用活性炭と同等程度の PFAS 類の吸着性能を有することが確認された。現状は産業廃棄物として処分される PFAS 含有使用済み炭を熱賦活再生に切り替えることで、PFAS 類を熱分解により無害化するとともに再生活性炭として再利用できる点から、未使用活性炭の使用比率や産業廃棄物処分量の低減につながり、循環型社会の構築に寄与するとともに二酸化炭素削減に貢献できると考えられる。また、PFAS 含有使用済み炭は熱賦活再生により細孔特性および PFAS 類の吸着性能が回復することから、熱賦活による収率低下分を未使用活性炭により補填しながら運用することが可能である。仮に熱賦活収率を約 70%（収率低下分約 30%）とした場合は、熱賦活再生を約 3 回行う過程で全てが未使用活性炭に置き換わる運用となる。

今回の対策技術として提案したカートリッジ式活性炭吸着装置は比較的容易に作製・設置が可能であることから、非常時の対応、大掛かりな吸着塔の建設スペースや設置費用に限りがある場合の対策としても有望であると考えられる。一方、カートリッジ式活性炭吸着設備の課題としては、カートリッジを原水濃度見合いで頻繁に交換する必要があることや、一度に処理できる流量に制約がある点が挙げられる。

3.1.3 対策技術の経済効率性

カートリッジ活性炭吸着装置は従来の吸着塔建設に比べ設計・設置が容易であることや、再生活性炭の運用が可能であるが、当初に設定した 756 円/m^3 以下（運転費用のみ）の目標に対して、本試験での運用実績では 2,174 円/m^3 となった（試験期間中の総処理水量 3,199m^3 に対し、試験に供した活性炭コスト、再生処理試験コスト、カートリッジ交換や内容物入替に要した作業費を元に算出）。本試験結果から導かれた運転条件（1 週間単位でカートリッジ 3 基を交換し、メリーゴーラウンド方式）を適用すると、処理コストは 1,048 円/m^3 と試算された。さらに泡沫分離前処理との組合せにより交換周期を２倍に延長（２週間毎）するものと仮定すると処理コストは 756 円/m^3 となる（濃縮分離液の産廃処分費用も仮定して計算）。また、従来技術では PFAS 含有使用済み炭は産業廃棄物として焼却処分されることから、再生活性炭を再利用（1 回だけ）すると仮定した場合でも、従来技術に比べ産業廃棄物としての処分（焼却）費用を新炭だけの運用の場合と比較して半分程度の費用にできるものと考えられる。

再生活性炭を広く活用する事によって、未使用活性炭の使用量（補充用の活性炭使用量）も少なく出来ることから、さらなるコストダウンにつながる可能性がある。

3.1.4 対策技術の環境保全

本技術の試験結果から、当初設定した技術目標である活性炭の使用量の削減については、再生活性炭の循環運用により、未使用活性炭のみ使用時に対し 50%削減の目標を達成した。熱賦活再生における環境負荷の評価では、技術的留意事項に示される廃水中の

管理目標参考値（PFOS＋PFOA ＜1μg/L）および排ガス中の管理目標参考値(PFOS+PFOA<0.06μg/m³N)の PFOS、PFOA 量を十分に満足する結果が得られた。また、排水中のフッ化物イオンおよび排ガス中のフッ化水素についても水質汚濁防止法・大気汚染防止法を満足していることが確認された。

二酸化炭素排出量について、従来技術と再生活性炭を活用した場合の試算を試みた。試算結果を表 20 に示す。なお試算前提として、従来技術は石炭系の未使用活性炭を使用し PFAS 含有使用済み炭は焼却処分とし、再生活性炭の活用は熱賦活再生収率をやや低めの 70%として、不足分は未使用活性炭を 30%補填することとしている。また、PFAS 類吸着設備の運転 PFAS 含有使用済み炭の移送に掛かる二酸化炭素排出量は従来技術と同様として試算上からは除いている。再生活性炭を循環運用することで二酸化炭素の排出量を 66.3%削減することが可能であり、熱賦活再生回数を 1 回ではなく数回繰り返すことで更なる二酸化炭素の排出量の低減も示唆される。

表 20　CO_2 排出量の試算結果（No. W1）

区分	内訳	使用比率 %	CO_2排出係数 t-CO_2/t-活性炭	CO_2排出量 t-CO_2/t-活性炭	CO_2削減率 %
従来技術	未使用活性炭(石炭系活性炭)	100	9.5[2)]	12.8	-
	産業廃棄物としての焼却	100	3.3※		
再生活性炭活用	再生活性炭	70	2.1[2)]	4.32	66.3
	未使用活性炭(石炭系活性炭)	30	9.5[2)]		

※　PFAS 含有使用済み炭として石炭系活性炭の炭素分 90%、灰分（不純物）10%と想定し、未使用活性炭 1t を完全燃焼させた際の CO_2 の排出係数は 44-CO_2 / 12-C=3.67 となる。また、CO_2 の排出量は 3.67×炭素分率（90%）で 3.3t-CO_2/t-PFAS 含有使用済み炭とした。

3.1.5　実証試験結果に対する運営会議の評価

（※上述の実証の最終的な報告は、本評価を踏まえてまとめられている。）

(1) 有効性

・PFOA の除去率は 99.99%以上で活性炭処理の有効性が示された点は評価できる。

・850℃で使用済活性炭を安全に再生できた点は高く評価できる。

・泡沫分離については、本実証においては検討が必ずしも十分ではなかった。泡沫分離濃縮を前処理とした活性炭処理の評価が課題として残る。

・短鎖 PFAS が吸着しにくいことは既往研究の通りだが、PFAS に関する挙動を更に解析することが期待される。

(2) 新規性・将来性

・再生活性炭の循環運用が期待できる点は評価できる。新炭と再生炭の性能の比較検証を行うことが望ましい。

・泡沫処理で高濃度 PFAS を除去し、吸着剤への負荷を減らすことが重要な目的であったが、本実証では検討が不十分だった。エアレーションの改善が課題である。

(3) 経済効率性

・装置もコンパクトであり、活性炭を再生しながら利用するというシステムは期待される。

・将来的な効率化は期待されるものの、活性炭処理、泡沫分離処理等の処理条件の最適化に十分には至っておらず、泡沫処理を組み合わせた最適化が今後の課題である。

(4) 環境保全

・使用済活性炭の再生は評価できる。

・再生工程の排ガスも含めた分析や処理条件（滞留時間等）の明確化が望ましい。

3.2　PFAS 除去用イオン交換樹脂[5]を用いた処理実証（No. W2）

技術の分類：イオン交換樹脂

実証区分・対象試料：現地（水２）

適用段階：実証レベル

実証規模：2～15m^3/日

実証事業者名：株式会社奥村組

実証期間：PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業：令和７ 年８ 月～令和８ 年２ 月

技術の原理：イオン交換樹脂による不純物等の除去原理としては、対象物質が持つ正または負の電荷を帯びた官能基と樹脂が持つ反対の電荷を帯びた官能基間に生じるイオン交換反応による吸着が主な作用である。本実証で対象とする PFOS や PFOA（以下、PFOS 等）はカルボキシル基やスルホ基を持ち、負の電荷を帯びているため、これらの除去にはアニオン交換樹脂が使用されている。さらに、PFOS 等は８ 個の炭素分子が直列に繋がった構造を有しており、この疎水基とイオン交換樹脂との間に疎水性相互作用（疎水性結合）も生じることとなり、これら ２ 種類の作用によって強固に吸着される。PFOS と PFOA を比較した場合、スルホ基を有する PFOS の方が疎水性相互作用が強く、吸着されやすいことが知られている。また、その他の PFAS 類に関しても同様に炭素数が４ 個と疎水基の短い PFBS から順に炭素数の多い物質の方が吸着しやすいと考えられる。本実証で用いた樹脂は、一般的な水処理用アニオン樹脂から PFOS 等除去に適した製品（汎用品）を選択したもので、PFOS 等の除去に特化した専用開発品に比べ価格や供給面で取り扱いやすい。本樹脂の母体構造はポリスチレン＋ジビニルベンゼンで、構造はマクロポーラスである。また、本樹脂は官能基がプロトン化されていない遊離塩基型であり、吸着する際には対象物をカウンターごと吸着するという特徴がある。

図 13　水処理試験装置（No. W2）

[5] 実証試験で利用したイオン交換樹脂は PFOS 等除去に適した汎用品。

適用条件：本実証で使用したイオン交換樹脂は長鎖 PFAS のみならず短鎖 PFAS にも吸着能を示し、破過遅延効果に優れる。他方で、カルシウムスケールの発生による樹脂塔閉塞等の問題が生じるような水質の場合は、前処理の実施が必要となる場合がある。本実証試験で得られた結果を踏まえて試験で使用したイオン交換樹脂の適応範囲については、塩濃度は電気伝導度で 0～2,300 μS/cm の範囲内の水質である。2,300 μS/cm 以上の水質においても適応できる可能性はあるが、塩水のような数%の塩が共存している水質においては、より PFAS との吸着が強い樹脂を使用する必要があると考えられる。有機物は全有機炭素量で 0～19 mg/L の範囲内の水質で、工場排水などフミン酸よりも高分子かつ疎水性の高い有機物が多量に含まれる場合は事前検証が必要である。

技術目標：

表 21　実証試験の評価目標と方法（No. W2）

番号	項目	目的	目標	方法
①	PFOS＋PFOA 濃度	・PFOS 等の除去効果の評価 ・空間速度と吸着能関係評価	処理後の PFOS＋PFOA 濃度 50 ng/L 以下	実証試験における公定法分析結果を基に評価
②	①以外※1 の PFAS 濃度	浸透水からの PFAS 除去の評価	濃度変化の把握	①同様の手順で LC-MS/MS にて分析を行い、結果を基に評価
③	PFOS＋PFOA 吸着量	イオン交換樹脂の吸着可能量の評価	イオン交換樹脂への吸着量の把握	試験後のイオン交換樹脂より PFOS、PFOA を抽出し、①同様の方法で分析を行い、結果を基に評価
④	処理コスト	低コスト性を評価	1,000 円/m^3 以下	実証試験データを基に評価
⑤	環境への負荷	電気使用による二酸化炭素排出量の削減を評価	1.0 kg-CO_2/m^3 以下※2	実証試験データを基に評価
⑥		周辺環境に対する低負荷性を評価	騒音：50 dB 以下 振動：60 dB 以下	実証試験における公定法分析結果を基に評価

※1　C4～12（C8 及び C11 を除く）のペルフルオロスルホン酸、C4～18（C8、C15 及び C17 を除く）のペルフルオロカルボン酸
※2　ランニングによる CO_2 排出量

3.2.1　対策技術の有効性

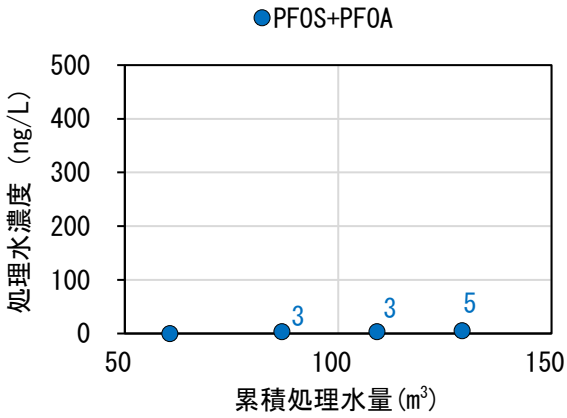
本実証で用いた弱塩基性アニオン交換樹脂は、PFOS・PFOA をはじめとする陰イオン性 PFAS に対して高い選択的吸着性能を示し、実排水条件下においても目標の処理効果が得られた。実証試験では、PFOS（平均 158 ng/L）、PFOA（平均 2,542 ng/L）を含む排水に対して、処理水中 PFOS＋PFOA 濃度を環境省指針値である 50 ng/L 未満まで安定して低減することが可能であった。

1 本目樹脂塔（25L 容量）後段では、87 m^3 通水（3,470 BV：Bed Volume 通水倍率）時点で PFOA が検出（3 ng/L）されており、129 m^3 通水（5,160 BV）時点では 5 ng/L へと上昇傾向が確認された。2 本目の樹脂塔後では、200 m^3 通水時点で PFOA が検出（5

ng/L）されるようになり、256 m³ 通水時点で 90 ng/L と指針値（50ng/L）を超過した。なお、PFOS に関しては試験期間中、処理水で検出されることはなかったため含んでいない。直列に接続した樹脂塔を順次交換しながら水処理を継続する場合、イオン交換樹脂を無駄なく使い切るためには、可能な限り前段の樹脂塔に PFOS 等を吸着させた状態で交換することが望ましい。一方で、後段の樹脂塔には、本試験における 2 本目の樹脂塔と同様に、先行して短鎖 PFAS が流入していると考えられる。そのため、樹脂塔の交換時期や容量を設定する際には、2 本目の樹脂塔における PFOS 等の流出開始処理水量を指標として用いることが適切であると考えられる。

また、安定型処分場浸出水に特有の有機物（フミン酸等）やカルシウム等の溶存塩類を含む水質条件においても、総 PFAS 吸着量は室内試験結果とほぼ同等であり、性能低下は限定的であった。このことから、本樹脂が PFAS に対して高い選択性を有し、共存物質の影響を比較的受けにくいことが確認された。

さらに、室内試験と実証試験における PFAS の吸着量や破過特性の差が小さいことから、室内試験データを用いて現場スケールでの樹脂量や交換時期を概ね推定できる可能性が示された。一方、安定した水処理を継続するためにはカルシウムスケールの発生による樹脂塔閉塞を抑制する必要がある。対策としては、装置流入前にカルシウムを除去する方法と沈殿しないように pH 調整を行う方法がある。



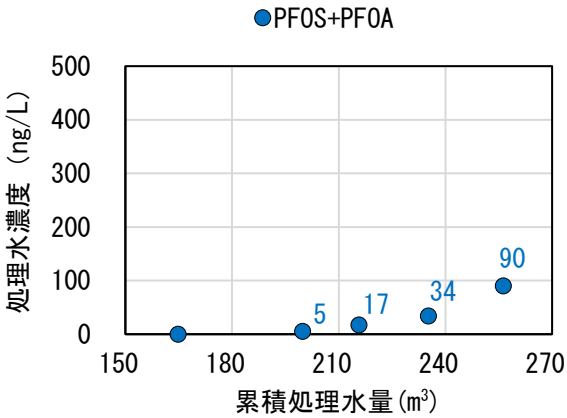


図 14　処理水中の各種 PFAS 濃度（左：25L 樹脂塔 1 本目後　右：25L 樹脂塔 2 本目後）（No. W2）

3.2.2　対策技術の新規性・将来性

国内で PFAS 除去に使用されているイオン交換樹脂は専用開発品が主流である一方、今回採用した樹脂は汎用品であり、コスト・供給安定性・調達性の面で優れ、実装性の高い PFAS 処理技術として位置づけられる。さらに、活性炭と比較して本樹脂は長鎖 PFAS のみならず短鎖 PFAS にも吸着能を示し、破過遅延効果に優れる。また、同様に高い除去性能を有する RO やナノろ過などの膜分離技術が PFAS を高濃度に含む濃縮廃液の継

続的な保管・管理を要するのに対し、イオン交換方式では廃棄物管理の中心が固形物である使用済み樹脂となるため、液体廃棄物の漏えいリスクが小さく、現場での取扱いが比較的容易である。これらの特徴から、本技術は装置構成が簡易でエネルギー負荷が小さく、既存設備への後付け導入や段階的拡張が容易である。このため、本技術は幅広い水質条件に対して適用可能性が高く、国内 PFAS 対策において実用性と将来性を備えた処理技術であると評価できる。さらに将来的には、処理水質における PFOA 濃度と色度の原因成分の関係を整理することで、色度を用いたオンライン監視や維持管理の高度化・自動監視システムへの応用が期待される。さらに、本実証試験でイオン交換樹脂の再生ができる可能性があることを確認できた。国内で PFAS 除去に使用されている専用開発品の多くは PFAS 吸着に特化した特殊官能基のため再生が困難であり、本樹脂を用いた技術は資源循環の観点においても有効な技術となり得る。

3.2.3 対策技術の経済効率性

カルシウムスケール対策として中和処理を PFOS 等処理装置前に設置する場合のランニングコストを計算する。算出したコストを表 22　処理コスト（No. W2）表 22 に、処理水量の違いによる中和装置とメンテナンス費について表 23 に示す。日当たりの平均処理水量を 20 m³ とした場合のランニングコストは、中和処理なしで 858 円/m³、中和処理を含め 1,125 円/m³ となり、中和処理なしでは目標値（1,000 円以下）を達成した。

表 22　処理コスト（No. W2）

項目	式	1m³ 処理の単価
電気料金	0.24ｋW×1023 円	255 円
樹脂購入費	4,500 円/L÷（476.3 m³÷50 L）	472 円
樹脂処分費　処理量 20 m³ 想定	(650 円×765 L-R＋95,000 円)÷20m³÷365 日	81 円
メンテナンス費　処理量 20 m³ 想定	15,000 円×2 名×1 回÷20m³÷30 日	50 円
小計（スケール対策なし）		**858 円**
中和装置 電気料金	0.03 kW×1023 円	31 円
硫酸（pH 調整用）	5,000 円÷6,000 g×116 g	97 円
中和装置 日処理量 20 m³ 想定	83,000 円/台÷20 m³÷30 日	139 円
合計（スケール対策あり）		**1,125 円**

表 23　1 日あたりの処理水量と中和装置リースおよびメンテナンス費（No. W2）

条件	式	1m³ 処理あたりの単価
中和装置リース 日処理量 10 m³	83,000 円/台÷10 m³÷30 日	277 円
中和装置リース日処理量 20 m³	83,000 円/台÷20 m³÷30 日	139 円
中和装置リース日処理量 30 m³	83,000 円/台÷30 m³÷30 日	92 円
中和装置リース日処理量 50 m³	83,000 円/台÷50m³÷30 日	55 円
メンテナンス日処理量 10 m³	15,000 円×2 名×1 回÷10 m³÷30 日	100 円
メンテナンス日処理量 20 m³	15,000 円×2 名×1 回÷20 m³÷30 日	50 円
メンテナンス日処理量 30 m³	15,000 円×2 名×1 回÷30 m³÷30 日	34 円
メンテナンス日処理量 50 m³	15,000 円×2 名×1 回÷50 m³÷30 日	12 円

3.2.4 対策技術の環境保全

本技術で音や振動を発生する設備は、装置に水を送る水中ポンプのみである。装置運転前後での騒音および振動の測定を行った。騒音の測定結果は、蝉の鳴き声や付近で行われていた工事により、運転前においても運転後に比べ高い値となっている。運転中の騒音は水中ポンプが設置されている原水タンク周辺で目標値（50 dB）を超過しているが、原水タンクから 5 m 程度離れた地点では目標値を満足する結果であった。振動は、全ての地点で目標値である 60dB を満足した。以上の結果より、装置設置場所と敷地境界の離隔が 5.0m 以上離れている場合は騒音対策は不要な技術であると評価する。なお、本試験では水中ポンプを原水タンク底につけて設置しており、これを浮かせて設置することにより、より騒音の発生を抑制することが可能である。

また、本技術は CO_2 を発生させる内燃機関は存在せず、使用する電源は水処理装置へ送る水中ポンプのみである。ここでは、消費電力量と処理水量から処理水量 1 m^3 当たりの消費電力量を導き出した結果、浸透水 1 m^3 処理当たりの CO_2 排出量は 0.87 kg-CO_2/m^3 であり、目標とした 1.0 kg-CO_2/m^3 を満足した。なお、本試験では、浸透水量が 50 m^3/日で設計しており、実際の浸透水量よりも消費電力量の多いポンプを使用しており、さらに 2 系統に水を送るためポンプを 2 台稼働していたことから、実処理量にあわせたポンプを選定することでより CO_2 の排出量は抑えられると考える。

3.2.5 実証試験結果に対する運営会議の評価

（※上述の実証の最終的な報告は、本評価を踏まえてまとめられている。）

(1) 有効性

・目標濃度を確実に達成したことに加え、短鎖 PFAS の吸着挙動を明らかにした点は高く評価できる。

・スケールについて吸着性能への影響が限定的であることを証明したことも評価できる。一方で、樹脂の閉塞防止に向けた前処理システムの構築や安定運転のための運用手順の明確化が課題である。

・今後は、吸着材の再利用（再生）に関する検討を深めるとともに、競合する PFAS を踏まえた最適な処理プロセスの提案が期待される。

(2) 新規性・将来性

・既存技術であるため実装のハードルが低く、汎用樹脂の活用により実排水で実証した点は将来性が認められる。

・炭酸カルシウムによる閉塞とその原因究明の結果は社会実装において有用である。

・他の事例と比較した際の技術的優位性の整理や、カルシウム飽和条件下における設備設計の最適化が課題である。

・今後は、汎用樹脂の限界を見極めつつ、多様な適用事例を積み上げることで、最適な活用条件を明確にしていくことが期待される。

(3) 経済効率性

・目標処理単価を達成するには至らなかったが、高濃度な共存物質の影響や樹脂の交換頻度を緻密に反映させたコスト算出が行われており、実用化に向けた現実的な指標として評価できる。
・他の既存技術との経済的優位性の比較や、前処理を含めたトータルコストの評価が課題である。

(4) 環境保全

・CO_2 排出量や騒音において目標を十分に達成しているほか、駆動機器の選定によって更なる低減が可能である点は評価できる。
・資材の製造・再生・廃棄に至るまでを包含したライフサイクル全体での環境負荷の評価が期待される。

3.3　400kHz 付近キャビテーション超音波-酸化ラジカルハイブリッドによる PFAS 無害化モジュール　～処理量 50m³/日で原位置 50ng/L 達成を目指す～（No. W3）

技術の分類：超音波

実証区分・対象試料：現地以外（水１・水２）

適用段階：実機・パイロットスケール

実証規模：2L

実証事業者名：株式会社日立ハイテク

実証期間：PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業：令和７ 年８ 月～令和８ 年１ 月

技術の原理：本実証試験では、超音波照射で生じるキャビテーション気泡（微小気泡）の圧壊時に PFAS 類を分解する超音波技術が採用された。集束型超音波振動子により生成させたキャビテーション気泡の崩壊時に、局所的な高温・高圧場と OH ラジカル等が発生し、PFAS を物理的・化学的に分解可能な技術である。主として音響キャビテーション気泡界面近傍でキャビテーション気泡の崩壊時に発生する局所的な高温・高圧場およびラジカル種（・OH など）の作用により進行する局所反応である。すなわち、(i) 気泡界面への PFAS 濃縮、(ii) 気泡崩壊に伴う局所高温・高圧場、(iii) 崩壊により生成する反応性種（ラジカル等）が同一空間で重畳することで、C-F 切断を含む分解が進行する。したがって支配因子は、①キャビテーション強度（密度・崩壊の“質”）、②界面への濃縮効率、③界面への物質移動（再分配・拡散）、④ラジカル有効寿命（スカベンジ影響）、⑤水質（pH、EC、塩濃度、界面活性物質）である。これらの因子は、初期分解速度と長時間側（テイル部）の挙動を独立に変調し得る。本実証で使用した装置は FUST Lab 社製の超音波処理装置「DEBREX」であり、400kHz 帯の集束超音波を照射することで効率的な PFAS 分解を行うものである。

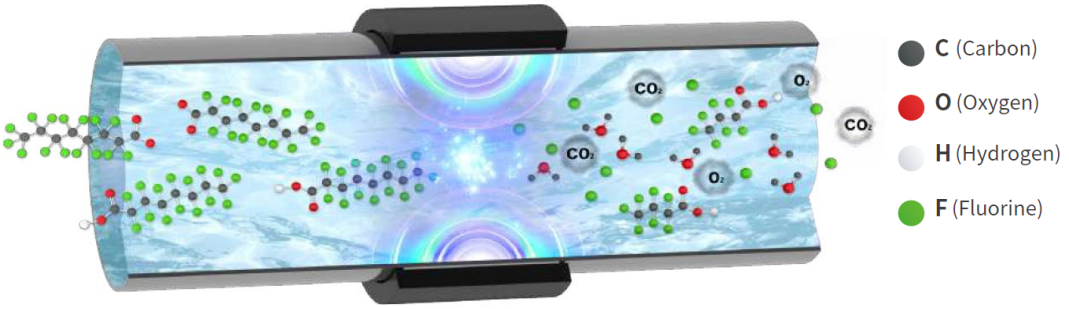


図 15　集束型超音波システム模式図（No. W3）

図 16　超音波分解装置（No. W3）

適用条件：本試験では濃度範囲として 4 ～ 600×10^3 ng/L を想定。処理能力は 50 m^3/日（1 ユニット）を基本とし、ユニット追加により 最大 500 m^3/日まで拡張可能。高イオン強度や極端な pH 条件では界面反応が阻害され得る一方で、中性～弱塩基性条件では安定した分解性能が発揮される。

技術目標：

表 24　実証試験における技術目標・評価方法（No. W3）

区分	評価項目	目的	目標値 （対策目標）	評価方法
有効性	PFOS+PFOA 合計濃度	放流水・浸透水中の PFOS+PFOA 濃度低減の評価	処理後：PFOS+PFOA 合計 ＜50 ng/L	EPA537.1 準拠[22]の固相抽出＋LC-MS（Bruker Compact QTOF）でターゲット定量
経済性	処理コスト	低コスト性評価	71.3 円/m^3 以下	電力原単位等に基づき算出
環境負荷	CO_2排出量	燃料・電気使用等による CO_2排出削減評価	0.938 kg-CO_2/m^3 以下	電力由来排出係数等に基づき算出

3.3.1　対策技術の有効性

本実証では、集束超音波キャビテーション分解技術による PFOS・PFOA を含む PFAS の低減効果を検証し、当初設定した対策目標を達成可能であることを確認した。PFOS および PFOA は処理時間の延長に伴い低下し、12 時間程度の処理によりそれぞれ約 16 ng/L、約 20 ng/L まで低減され、合計 36 ng/L と目標値を下回る水質が得られた。

さらに、本技術の有効性は PFOS・PFOA に限定されず、広範な PFAS への適用性としても確認された。実証では 25 種類の PFAS 濃度をモニタリングし、6 時間処理時点で長鎖～中鎖 PFAS の多くにおいて 95-99% 程度の除去（低減）という結果が得られ、検出限界近傍まで低下する成分が多数確認された。例えば、水 2 試料中のスルホン酸型 PFAS（例：PFOS ）については、処理開始 1 時間で大きく減少し、数時間の処理で 50 ng/L 以下に到達した後、最終的に数 ng/L レベルまで低減した。

一方で、分解挙動については、初期分解速度と処理時間が経過した後（テイル部）の分解が、それぞれ独立して水質の影響を受けることが明らかとなった。サンプルに何も添加を行わない無添加条件では 1-2 時間で約 95% 以上、6 時間で 99% 以上の分解が進行し、低濃度域においても分解が継続したのに対し、硫酸塩添加（高イオン強度）条件や pH2 条件ではテイル部の分解が抑制され、最終到達濃度が高止まりする傾向が確認された。これらは、反応場が単にキャビテーション発生の有無で決まるのではなく、EC・pH・界面状態により有効な反応の維持に影響を与えることを示唆する。したがって実運用上は、pH および EC のモニタリングと管理（必要に応じた中和等）を行い、テイル部の分解を確保する運転設計とすることで、PFOS+PFOA 合計 < 50 ng/L の達成確度を高め得る。

加えて、追加検討として、本技術による PFAS 低減が吸着・濃縮による「見かけ上の除去」ではなく、分子構造の切断を伴う分解であることを裏づける観点から、生成物・副生成物に関する確認を実施した。処理水中では PFAS 分解に由来する無機フッ化物イオンが検出され、PFOA を例とした中間生成物分析では短鎖 PFCA（C7～C5）の生成が確認された。さらに、これら短鎖 PFCA についても処理継続により減少する傾向が認められ、PFAS が段階的に短鎖化した後、無機フッ化物イオンの生成を伴いながら、より無機化方向へ分解が進行していることが示唆された。加えて、長時間処理後のサンプルに対して網羅的なノンターゲット分析を実施した結果、PFAS の蓄積は確認されなかった。

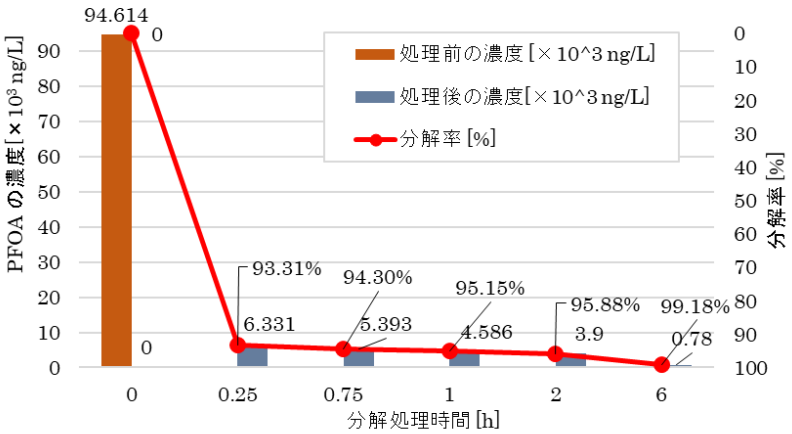


図 17　超音波分解処理における PFOA の濃度変化（試料：水 1）

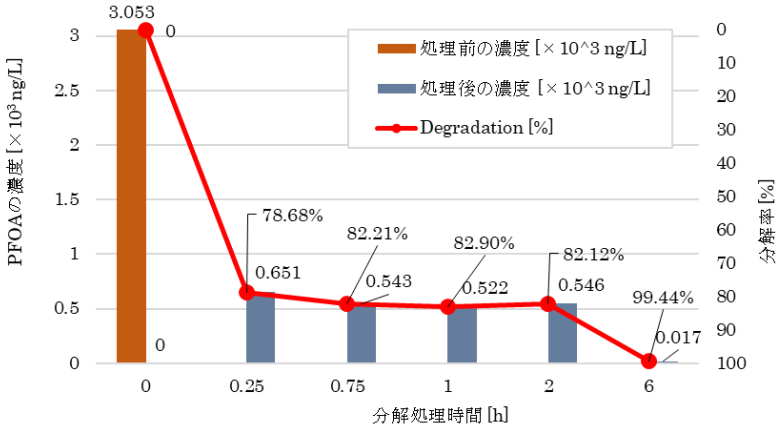


図 18　超音波分解処理における PFOA の濃度変化（試料：水 2）

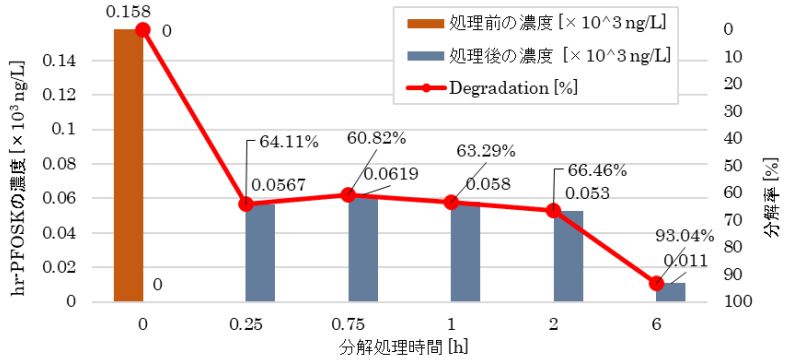


図 19 超音波分解処理における PFOS の濃度変化（試料：水 2）

3.3.2　対策技術の新規性・将来性

本技術の新規性は、薬剤を一切使用せず、水中において PFAS 分子そのものを直接分解できる点にある。特に、一つの処理システムで C4～C12 の長鎖・短鎖 PFAS を横断的に扱える包括性は重要な新規性である。本技術は、短鎖 PFAS についても処理時間を要するものの最終的に分解可能であることを示し、PFAS 汚染問題を包括的に解決し得る潜在力を有することを明らかにした。

将来の普及展開の観点では、本技術は単独適用に留まらず、他の対策技術と組み合わせることで、さらなる適用範囲拡大およびエネルギー効率向上が期待される。具体的には、フォーム分離（泡沫分離）やイオン交換等による前処理（濃縮）と、本超音波分解技術を組み合わせた「濃縮＋分解」二段階プロセスが有望である。これらの濃縮操作と本技術を組み合わせることで、希薄濃度の短鎖 PFAS についても処理対象を濃縮相に限定でき、超音波処理のエネルギー効率を大幅に改善できる可能性がある。

さらに、本技術は 高度分析技術との親和性が高い点においても将来性を有する。実証では、ノンターゲット分析や自動データ処理ソフトウェアを導入することで、従来は把握が困難であった PFAS 副生成物や微量成分の包括的監視を可能とした。今後は、これらの分析情報を運転制御にフィードバックすることで、処理過程で生成する未知物質も含めてリアルタイムに監視しながら運転条件を最適化する、スマート制御型の環境浄化システムへと発展させることが可能である。

3.3.3 対策技術の経済効率性

経済性については、実サイト適用では、前処理（濃縮・pH 調整等）、後処理、分析・監視、設備保守・消耗部品交換等の管理維持費が全体コストに影響する。連続運用では CAPEX（設備費）と OPEX（電力・部品交換・保守等）の比率が変化し、スケールメリットや運用条件に強く依存するため、実際には、対象サイトの処理量・初期濃度・水質条件を確定した上で、(i) 電力原単位、(ii) 部品寿命と交換費、(iii) 保守点検費、(iv) 分析・監視費、を含む形で総コスト（円/m^3）を再評価する必要がある。

本実証では保守的に、超音波使用時の平均消費電力 0.800 kW が 12 時間継続すると仮定し、消費電力量を E=0.800×12=9.6 kWh/バッチ（2 L）と推定した。電力単価 p は東京電力 EP の電力量料金（実勢単価、p = 32.66 円/kWh）を用いた。以上により、処理コスト（円/m^3）は C = (E ×p)/0.002 として参考推定した。本実証で取得したベンチ条件（2 L 閉回路循環）に基づいた考推定値として（1.57×10^5 円/m^3）と整理されたが、連続通水との直接比較には適さないことに留意が必要である。一方で、連続処理の場合、消費電力は通常 1.6～2.0 kWh で、処理能力 100～400 kg/h 程度である。連続処理の場合の処理コストは 71.3 円/m^3となる。また、目安として、機材として数千万円程度、電力以外のランニングコストとしては数百万円／月程度が考えられるが、本試験は限定的な環境下で小型超音波モジュールを用いた PFAS 処理の可能性を検証した結果であり、プロセスが最適化された場合にはさらに検討が必要である。

本実証では分解速度定数の計測とエネルギー指標（処理水量あたりの消費電力など）の統合解析を行い、反応速度論的な解析から目標濃度に到達する必要最短時間を算出し、不必要な過処理を避ける運転管理手法や、キャビテーション発生効率を高める周波数・出力制御など、いくつかの省エネ運転の方向性が見出された。

3.3.4 対策技術の環境保全

運転時の CO_2 排出は主として電力消費に起因する。超音波 ON 時の平均消費電力を約 800 W と確認したため、12 時間運転を仮定して E=9.6kWh/バッチ（2 L）と推定した。排出係数は環境省公表の全国平均排出係数 0.423 kg-CO_2/kWh を用い、CO_2排出量（kg-CO_2/m^3）は G=(E×0.423)/0.002 として参考推定した（CO_2排出量 G= 2.03×10^3 kg-CO_2/m^3（= 約 4.06 kg-CO_2/2L バッチ））。なお、本実証は閉回路循環のベンチ条件であり、連続通水を前提とする原単位（kg-CO_2/m^3）とは処理量定義が一致しないため、実運転条件での処理量・電力ログ取得後に再評価が必要である。

副生成物の観点においても、ノンターゲット分析を含む測定範囲において、処理に伴い一貫して増加する高強度の新規ピークは顕在化しなかった。ただし、未知の低分子フッ素化合物が痕跡レベルで生成する可能性は完全には否定できない。また、処理によって生成する無機フッ化物イオンは、処理水中で数～数十 μg/L 程度の低濃度に留まり、環境影響上問題となる水準ではないことを確認した。さらに、TOC や UV254 の測定結果においても処理前後で顕著な有機物の増加は認められず、大量の有機中間体が処理水中に蓄積している兆候は見られなかった。

もう一つの重要な環境的利点は、二次廃棄物を実質的に発生させない点にある。本技術では、使用済み吸着材や汚泥のような廃棄物が発生しない。処理水は PFAS が除去・分解される以外に水質成分の大きな変化を伴わないため、既存の水処理系統にも容易に統合でき、追加的な環境負荷を最小限に抑えることができる。

3.3.5 実証試験結果に対する運営会議の評価

（※上述の実証の最終的な報告は、本評価を踏まえてまとめられている。）

(1) 有効性

- 10 万 ng/L 程度を 12 時間の処理で 20ng/L まで低減させており、目標（50ng/L 以下）を達成している点は評価できる。濃度が今回よりも低い場合にはより短時間で処理することが可能と考えられる。
- どの程度の処理で最終的な分解（F-まで）に至っているのかやフッ素の収支、分解速度パラメータ、キャビテーションにおける超音波の役割について明確にすることが期待される。

(2) 新規性・将来性

- 既に海外では実証されている技術であるが、一定の条件で安定的な分解を実現できたこと、国内で実証試験のデータを収集し、公表することは評価できる。
- 分解に時間を要することから、反応時間を短縮させることが望ましい。
- 本技術の優位性についての定量的な分析を行うことが望ましい。

(3) 経済効率性

- 消費するのは基本的には電力であり、ランニングコストは比較的安価となる可能性はあるが、イニシャルコストが明らかになっていないほか、実処理の規模を想定した場合の評価が課題である。
- 処理時間の短縮化は引き続き課題である。

(4) 環境保全

- 電力消費は目標を達成している。
- PFAS の分解についての更なる分析が課題である。

3.4　溶媒抽出技術、「エマルションフロー」を用いた PFOS 等の濃度低減と光分解技術を用いた回収 PFOS 等の無害化に関する実証実験（No. W4）

技術の分類：溶媒抽出／光分解

実証区分・分析試料：現地以外（水１・水２）

適用段階：実証段階

実証規模：450mL～150L

実証事業者名：株式会社エマルションフローテクノロジーズ（※ウシオ電機株式会社と協力）

実証期間：PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業：令和 7 年 8 月～令和 8 年 2 月

技術の原理：本実証において、エマルションフロー技術は、水相と油相を乳濁状態まで微細に接触させつつ、同一装置内で同時に相分離を進行させるという流動状態（エマルションフロー現象）を利用している。従来のミキサーセトラー型溶媒抽出装置では、乳濁混合後に重力分離や遠心分離による静置工程を必要とするため、装置の大型化や処理能力の制約、さらには排水中への油分混入が避けられなかった。一方、エマルションフローでは、乳濁混合領域と相分離領域が同一容器内に共存しており、混合と分離が連続的に進行するため、静置槽や外力を用いた分離工程を必要としない。この構造上の特性により、従来法と比較して 5～10 倍程度の高い処理能力を有しつつ、排水中への油分混入を極めて低いレベルに抑制することが可能となっている。また、光直接分解技術は、触媒、添加物を用いることなく、水溶液中の PFAS に対して、直接、172 nm の真空紫外光を照射して分解する新技術である。PFOA は液中で一定量がイオン化され、172 nm 付近で高い光吸収を示す。イオン化した PFOA に真空紫外光が照射され、光子や電子の衝突により分解反応が開始される。CO2 の解離、水分子 H2O から生成される OH ラディカルと中間生成物との反応により、HF が解離すると考えられている。この一連の反応の結果、炭素（CF2）が 1 つずつ減少し、短鎖化しながら分解が進むと推定されている。

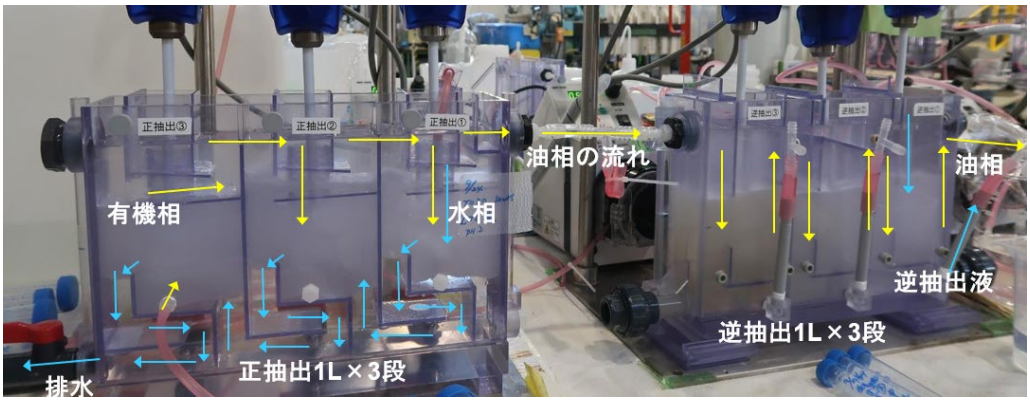


図 20　エマルションフロー装置内での水相・油相の流れ（No. W4）

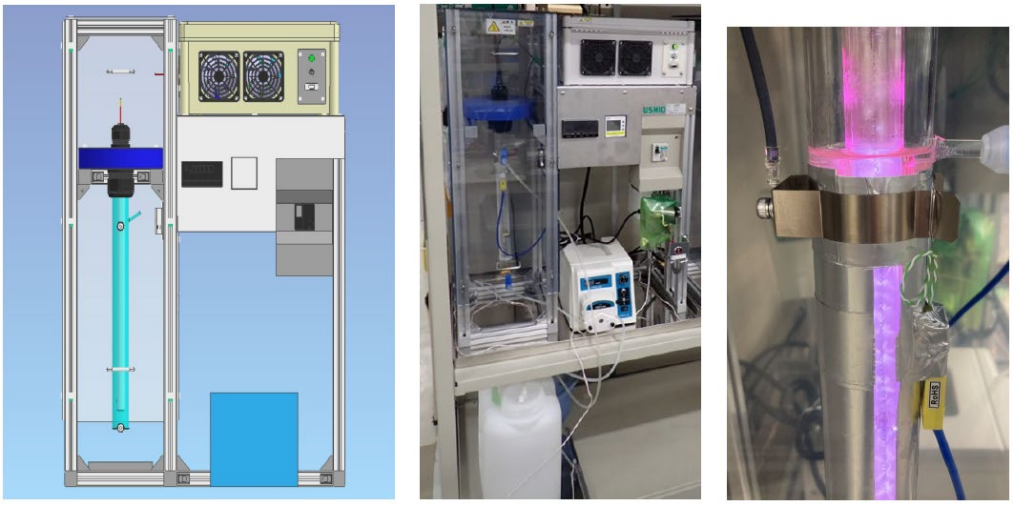


図 21　光分解フロー式試験装置の概要（No. W4）

適用条件：エマルションフローのロバスト性の高さ（夾雑物の存在などの周辺環境の影響に対する強靭さ）は、本事業でも証明できた。ppt（＝ng/L）オーダーから wt%オーダーまでのきわめて幅広い範囲の PFAS 濃縮回収に適用でき、数 ppb を超える濃度で PFAS が含まれる排水、短鎖から長鎖まで複数の PFAS が含まれる排水、種類が異なる PFAS が一緒に含まれる排水、共存物質（有機成分、電解質成分、固形成分など）が多く含まれる排水に対しては、他の方法よりも経済合理性を確保できると考えられる。一方で、PFAS の濃度が数 ppb を下回り、かつ共存物質がほとんど含まれない清澄な原水に対しては、必ずしも、他の方法（たとえば、活性炭吸着）よりも経済合理性が高いとは言えない。

技術目標：

表 25　技術の対策目標（No. W4）

項目	目的	目標値
【濃縮回収技術】 PFOS＋ PFOA 除去率	PFOS＋PFOA の濃度が目標値に至るまで除去できることを評価	処理後の PFOS＋PFOA 濃度が合計で 50 ng／L 以下、または処理後の除去率 99.9%以上(3 段程度の装置で 1/1000 以下にまで除去)
【濃縮回収技術】 PFOS＋ PFOA 濃縮度	PFOS＋PFOA 分解を効率的に行うため、PFOS＋PFOA を濃縮しながら回収	100 倍 程度の濃縮度を目標に PFOS＋PFOA を濃縮
【濃縮回収技術】 処理コスト	PFOS＋PFOA 濃度が、最大 600,000 ng/L の場合に、従来法と比較して、より低コストで処理できることを確認	原水 1 ㎥あたりの処理コスト 3,982 円／㎥と設定[6]し、従来法(活性炭吸着、イオン交換、膜分離など)とは異なり、高濃度(最大 600,000 ng/L) かつ、複数種類の PFAS があっても経済合理性が確保できることを検証

[6] 10 年間の稼働を前提に設備費用を按分した場合のコスト。案分しない場合は 19,566 円／m³。

【濃縮回収技術】 環境への負荷	燃料・電気使用等による二酸化炭素排出量の削減を評価	1.4 kg-CO_2／m^3以下 と設定し、従来法(活性炭吸着、イオン交換、膜分離など)よりも二酸化炭素排出量が少ないことを検証
	周辺環境に対する低負荷性を評価	処理後の排水に含まれる PFOS＋PFOA 濃度の合計が 50 ng／L 以下であるとともに、PFAS 以外の有害物質の濃度も水質基準値以下であることを確認
【光分解技術】 PFOA 高濃縮溶液分解	浸透水濃縮後の PFOA 高濃度水の分解の評価	原水処理前後の濃度を確認し、除去率等 99%以上であることを確認
	濃縮プロセスにおける夾雑物耐性の評価	薬液なしの場合と濃縮プロセスでの薬液を含む場合を比較；除去率等 99%時の時間長は、後者が前者の 2.5 倍以下
【光分解技術】 環境耐久性	光分解技術の耐久性	500 時間で光源に異常なきこと

3.4.1 対策技術の有効性

本事業から、産業廃棄物処分場からの浸出水（水 1 および水 2）からの PFOA ＋PFOS の回収・濃縮に対して、エマルションフローが有効であることがわかった。また、エマルションフローで濃縮回収した PFAS の分解には、ウシオ光分解が有効であることがわかった。すなわち、技術の対策目標として掲げた目標を達成できた。

浸出水には、土壌由来の有機酸成分（フミン酸、フルボ酸）や色素（クロロフィルなど）、電解質成分（主として、アルカリ金属、アルカリ土類金属の塩）が含まれるが、エマルションフローでは、これらの共存成分に大きく影響されることなく、PFOS＋PFOA を高効率に濃縮回収できた。すなわち、3 段の正抽出段によって、水 1（原水）および水 2（原水）から、99.9%の PFOS ＋ PFOA を回収できた。それによって、原水中の PFAS 濃度を 1/1000 にできるが、水 2 では、PFOS＋PFOA 濃度が約 2 ppt（=ng/L）となり、50 ppt（=ng/L）を大幅に下回った。

また、3 段の逆抽出段によって、水 1（原水）に含まれる PFOS＋PFOA を 44 倍の濃度に濃縮した。この濃縮液（原水の体積の 1/44）に対して、小規模装置（バッチ式）を用いて、同じ操作を繰り返したところ、2400 倍の濃縮度に至った。具体的には、PFOS ＋PFOA 濃度は、約 50 ppb から 120,000 ppb（＝120 ppm）までに濃縮された。なお、2 回の濃縮を経ても、ウシオ光分解の効率低下を招く KOH（塩基）の濃度は増加させることなく、PFOS＋PFOA を 2400 倍に至るまで濃縮できた。このように、1 回で高濃縮を行うのではなく、複数回の濃縮で濃縮率を上げれば、電解質の濃度を上げることなく非常に高い濃縮率を得ることができる。

光分解は PFOA 濃度に関わらず一次反応であることから、照射時間を長くすると分解はさらに進んでいくと考えられ、99%分解除去できることが示唆された。耐久性試験を実施した結果、500 時間を超えたあたりから分解速度が低下し、827 時間でガラスの紫外線歪みによるクラックにより破損する結果となったが、500 時間時点では外観に異常もなく、分解速度の経時変化も 80%以上を維持している。500 時間での異常はないとは言えるが、劣化が発生している点では今後の改善、改良が必要であり、今後は歪みの影響を受けにくいガラスの材質や構造、製作方法を検討し、さらなる長寿命化に向けた開発を進めていく。

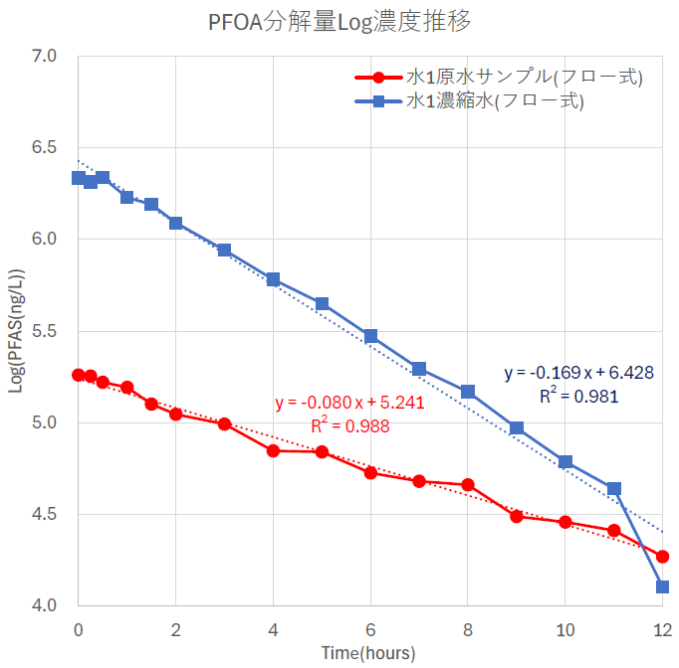


図 22 フロー式（循環式）光分解による水 1 サンプルの PFOA 濃度推移（No. W4）

3.4.2 対策技術の新規性・将来性

今まで、溶媒抽出（液液抽出）が PFAS 含有排水の処理に利用されたことはなく、新規性は非常に高い。分析での前処理として、PFAS を溶媒抽出して濃縮することは、以前から行われているが、排水や環境水からの PFAS 回収・除去に対して、溶媒抽出が利用された例はない。従来の溶媒抽出の装置（たとえば、ミキサーセトラー）では、水相と油相の相混合の後、重力による両相の分離（相分離）を待たなければならない都合上、排水に油滴が漏出しやすいが、相混合と相分離が同時に起こるエマルションフローでは、排水に油滴が混入することなく、完全な油水分離が可能である。実際、エマルションフローは、排水からの油分回収にも利用できる装置として、水処理分野で注目されている。また、エマルションフローは、高濃度の PFAS、短鎖も含めた多種多様な PFAS、共存物質が多い中からの PFAS の回収に対して有効な方法である。

3.4.3 対策技術の経済効率性

本実証結果を踏まえ、経済効率性の評価を行った。主なコスト上昇要因として、実排水には多くの有機物や塩類が含まれており、それらによる分解阻害の影響が非常に大きい。これらの物質が EFT による濃縮で一部除去されてはいるがまだ多く残っていることで光透過が阻害されて分解に時間を要することや、濃縮において逆抽出の際にアルカリ(KOH)の添加が必要であり、光分解への影響を低減させるため添加剤の費用も追加となる等もコスト情報上昇要因のとして挙げられる。

表 26　120m³/日前提での現地稼働コスト及び二酸化炭素排出量（No. W4）

項目		本技術	本技術	本技術	従来技術
		EFT濃縮回収技術	ウシオ光分解技術	EFT＋ウシオ	（　GAC　）
処理量	[㎥/日]	120	120	120	120
処理コスト	[円/年]	110,578,594	115,309,416	225,888,010	23,940,789,985
初期費用	[円]	490,237,104	45,000,000	535,237,104	22,013,403,277
	装置代	103,894,000	45,000,000	148,894,000	21,763,764,082
	建設費（設計・工事費込）	366,745,820		366,745,820	
	消耗品初期投入費	19,597,284	-	-	249,639,195
運転費用	[円/年]	61,554,884	110,809,416	172,364,300	1,927,386,707
	消耗品費	6,498,001	108,324,120	114,822,121	998,556,780
	用役費	2,450,459	1,135,296	3,585,755	-
	運用・保守費	52,606,424	1,350,000	53,956,424	652,912,922
	焼却処理費用	-	-	-	275,917,005
1㎥当たり処理コスト	[円/m³]	2,525	2,633	5,157	546,593
運転期間	[年]	10	10	10	10
二酸化炭素排出量	[kg/m³]	1.13	0.61	1.74	401.23

試算前提条件：原水流量：120 ㎥/日、原水 PFAS 濃度：50,000ng/L、PFAS 濃度低減目標：50ng/L、運転期間：10 年間

3.4.4　対策技術の環境保全

溶媒抽出（液液抽出）では、有機溶媒（水と混和しない油のような溶媒）、抽出剤（有機溶媒相にとどまりやすい有機化合物）といった有機化合物を利用するため、一般的に、これらが排水に混入することで起こる水環境の汚染が懸念される。油水分離の能力が非常に高いエマルションフローでは、排水に油滴を混入させることなく、溶媒抽出を行うことができる。ただし、溶媒抽出処理後の排水に含まれる油分は、油滴だけではなく、水への溶解度（温度依存の物性値）に従って溶け込む有機成分も存在する。ゆえに、有機溶媒としては、水にほとんど溶解せず、かつ無毒で化学反応性が低いものを選択するべきである。また、その有機溶媒に溶解させて用いる抽出剤も、水にほとんど溶解せず、毒性も化学反応性も低いものを選ぶべきである。

PFAS 濃縮・回収で用いる有機溶媒としては、水への溶解度がきわめて低く、なおかつ毒性、化学反応性もきわめて低い n-ドデカンを選択した。有機溶媒である n-ドデカンの水への溶解度をガスクロマトグラム質量分析計（GC-MS）により分析した結果、検出限界値の 0.001 ppm（＝1 ppb）を下回る値であった。この値（1 ppb 未満）は、n-ドデカンに対する微生物への水生環境有害性（急性）の数値として報告されているオオミジンコに対する 48 時間での 50%効果濃度（全個体数の 50%に遊泳異常が発生する濃度）よりも大幅に低い。なお、n-ドデカンに対しては、魚類、甲殻類（微生物以外）に対する水生環境有害性の値は報告されていない。

3.4.5 実証試験結果に対する運営会議の評価

（※上述の実証の最終的な報告は、本評価を踏まえてまとめられている。）

(1) 有効性

・ エマルジョンによる濃縮回収技術については、除去率 99.9%であり、濃縮技術として評価できる。

・ 光分解については、高い分解率を示した点は評価できる。一方で、処理に時間を要することや UV ランプの寿命に課題がある。

(2) 新規性・将来性

・ 短鎖 PFAS も含めた濃縮回収が期待され、エマルジョンによる濃縮と光分解の組み合わせは新規性があると評価できる。

・ スケールアップや適用可能な水質等の定量的明確化が望ましい。

(3) 経済効率性

・ エマルジョンによる濃縮回収技術と光分解技術を組み合わせることで、濃度や物質に応じた最適化が可能と考えられる。一方で、それぞれの技術を他の技術と組み合わせて最適化を図ることが出来る可能性もあり、個々の技術の経済性評価が期待される。

・ 現時点では、装置費用が高額であるなど、コスト優位性が不明であることが課題。UV ランプの交換頻度や個々の現場でこのシステムを構築するのかどうか検討する必要がある。

(4) 環境保全

・ CO_2 排出量や騒音は少ないと考えられる。また、抽出剤を再利用可能である。

・ 抽出剤の使用に当たって、管理面などで法令等の確認が必要である。

・ 夾雑物由来の分解物質の確認が課題である。

3.5　分離・分解技術による PFAS 含有水の処理実証（泡沫分離／プラズマ）（No. W5）

技術の分類：泡沫分離／プラズマ

実証区分・分析試料：現地以外（水 2）

適用段階：（泡沫分離）実機・パイロットスケール／（プラズマ）ラボスケール

実証規模：3m^3

実証事業者名：清水建設株式会社

実証期間：PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業：令和 7 年 8 月～令和 8 年 2 月

技術の原理：泡沫分離法は、様々な物質が泡沫の気液界面に吸着・濃縮される特性を利用して汚染物質を除去する安価で処理効率の高い方法として広く知られており、同様の特性を持つ PFAS においても泡沫分離法が有効であることが報告されている。本実証における装置は、処理対象水にディフューザーを通じ一定量の空気を送り込むことで底部より微細な気泡を発生させる気液接触塔を有する。ここで、水中で発生した気泡の気液界面に PFAS が吸着・濃縮し、水面に形成された泡沫層を空気とともに系外に排出させることで、最終的に気液接触塔内の処理対象水から PFAS を分離する仕組みとなっている。プラズマ技術は、高温の状態等で陽イオンと電子が分かれたプラズマ状態の物質を液体に照射することで水和電子をはじめとする様々なラジカルを発生させ、特に水和電子が PFAS の分解や脱フッ素を起こすことが知られている。本処理技術では、アルゴン雰囲気下においてパルス電源等の使用により水面から数 cm 放した電極からプラズマを効率良く発生させ、濃縮された PFAS 含有水（泡沫分離によって得られた回収泡沫）にプラズマを照射し、複数種のラジカルを単独もしくは複合的に作用させることにより水中の PFAS を分解する。加えて、プラズマ処理による PFAS の分解効率を高める技術として凍結濃縮技術を併用することを提案している。同技術は、氷結晶は水分子のみから構成されることを原理とし、氷結した水分と液体中の物質を分離して物質側の濃度を高める効果を利用している。

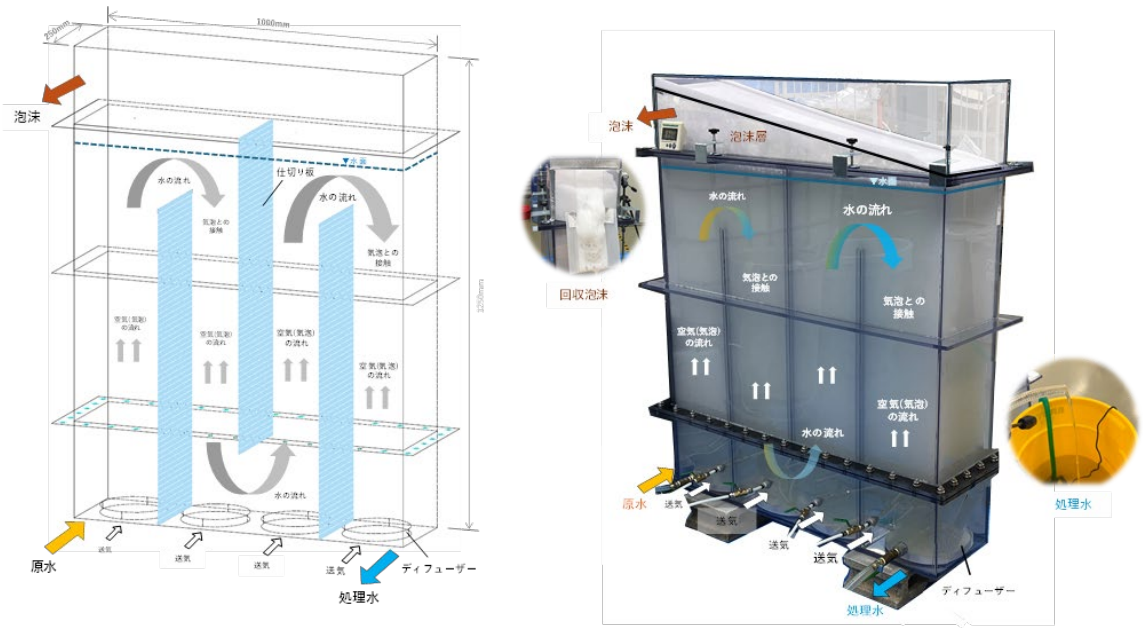


図 23　本試験（連続式）装置（泡沫分離）（No. W5）

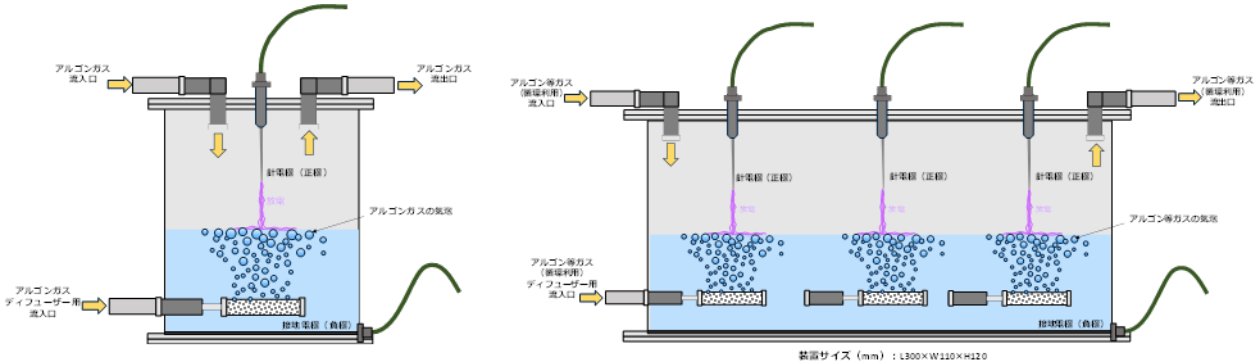


図 24　プラズマ処理で用いたリアクター（左：針電極 1 本リアクター、右：針電極 3 本リアクター）（No. W5）

適用条件：泡沫分離法による PFAS 含有水処理は高濃度から低濃度までの処理が可能。ただし、今回の実証では、効果的な泡沫生成と分離を実現するために起泡剤としての界面活性剤や無機塩を助剤として予め添加しており、泡沫分離の後段に生物処理を組み合わせる等の対処が必要となる場合がある。また、大型化には、回収泡沫槽の容量を小さくするために機械式消泡手段等が必要となる場合がある。泡沫分離による運転コストは焼却費用と比較して低いため、一定の処理量を分岐点としてコストメリットがでてくると考えられる。プラズマ分解の装置の大型化に際しては、初期コスト低減の検討が必要と考えられる。

技術目標：

表 27　実証試験における技術目標と評価方法（泡沫分離／プラズマ）（No. W5）

項目	目的	目標値	評価
PFOS＋ PFOA 濃度	浸透水中からの PFOS＋ PFOA 濃度の除去の評価	処理後の PFOS＋PFOA 濃度 50 ng/L 以下、または処理前後の除去率等 99%以上	実証試験における公定法分析結果を基に評価 分析方法： 環水大水発第 2005281 号、 環水大土発第 2005282 号
短鎖 PFAS 濃度 ・PFHxS ・PFHxA ・PFBS ・PFBA	浸透水中からの短鎖 PFAS 濃度の除去の評価	処理前後の短鎖 PFAS の除去率 PFHxS：90% PFHxA：60% PFBS：70% PFBA：10%	実証試験における公定法分析結果を基に評価 分析方法： 環水大水発第 2005281 号、 環水大土発第 2005282 号
泡沫分離率 （泡沫分離）	低コスト性を評価	処理水量の 10%以下 PFAS 濃縮率からエネルギー効率を算出	実証試験データを基に評価
分解効率 （プラズマ）	低コスト性を評価	濃度低減率と消費電力から得られる効率を算出 電気化学酸化分解（Electrochemical Oxidation）とエネルギー効率を比較	実証試験データを基に評価
マスバランス	対策効果を評価	各試験で得られたマスバランスにばらつきがないことを確認	実証試験データを基に評価

3.5.1　対策技術の有効性

＜泡沫分離＞

泡沫分離法の処理フローの特徴として、気液接触塔への送気直後より水面に浮上した気泡から泡沫層が形成され、空気とともに系外に排出される。ここで分離・回収された泡沫には濃縮された PFAS が存在しており、焼却等によって最終的に分解処理（二次処理）されるが、PFAS を高濃度に含有する泡沫は最終的に液体として回収されるため、活性炭による吸着処理とは異なりプラズマ等の焼却以外の二次処理方法も容易に選択可能となる。泡沫分離においては、いかに PFAS を高濃度に濃縮するかが、エネルギー効率やコストに大きく影響するため、PFAS の除去率は技術を評価するうえで最も重要なファクターとなる。今回の実証では、効果的な泡沫生成と分離を実現するために起泡剤としてアニオン界面活性剤（ドデシル硫酸ナトリウム）を用いることで、PFOS 及び PFOA の除去率の目標である 99%以上を達成した。また、短鎖 PFAS においては、両性界面活性剤（主成分：脂肪酸アミドプロピルベタイン）を用いることで除去率の向上が図られることを確認している。

＜凍結濃縮＞

凍結濃縮では外部からの温度制御のみで濃縮が完結するため、濃縮物の二次処理として分解処理等を行う際にも阻害とならないことから、泡沫分離よりも二次処理方法の選択肢の幅が広がることが特徴となる。今回の実証では、原水の濃度（PFOS：190 ng/L、PFOA：2,400 ng/L）と凍結濃縮された回収泡沫の濃度（PFOS：16,000、PFOA：190,000

ng/L）を比較した場合は、平均で 81.7 倍に濃縮されていることになり、「泡沫分離」と「凍結濃縮」を組み合わせることによる高い PFAS 濃縮効果が期待できる。

＜プラズマ＞

「SDS 泡沫分離回収泡沫」をプラズマ処理した結果、PFOS、PFOA、PFHxS については 60 min で 93.0%～97.4%、SDS を追加添加した条件では 180 min で 96.8%～99.7%の分解が確認され、概ね除去率の目標を達成した。一方、「SDS 泡沫分離回収泡沫濃縮水」の処理では、PFHxA、PFBS、PFBA について、60 min で 13.8%～19.7%、SDS を追加添加した「SDS 泡沫分離回収泡沫」では 180 min で 27.1%～52.4%の分解率であった。

最も分解率が高かった処理時間 180 min における PFOA の分解効率を試算した場合、処理前濃度 47,000 ng/L が処理後に 200ng/L にまで低減するのにかかった電力量は 20 W×3 h（180min）=60 Wh、リアクター内の試料量 0.7 L を加味すると、0.0018 Wh/ng-PFOA となる。ただし、より高濃度の試料を用いた場合は、分解効率は更に向上する可能性がある。

表 28　泡沫分離試験（連続式）結果（No. W5）

単位（ng/L）

	アニオン界面活性剤添加					両性界面活性剤添加				
	処理前	処理後	除去率(%)	回収泡沫	濃縮倍率	処理前	処理後	除去率(%)	回収泡沫	濃縮倍率
PFOS	180	2	98.9	8,300	46.1	310	<1	99.9	6,600	21.3
PFOA	3,100	12	99.6	130,000	41.9	2,700	<1	99.9	83,000	30.7
PFHxS	120	3	97.5	5,700	47.5	160	<1	99.9	3,500	21.9
PFHxA	15,000	12,000	20.0	200,000	13.3	14,000	2,000	85.7	1,000,000	71.4
PFBS	1,200	1,300	-8.3	5,300	4.4	1,200	300	75.0	77,000	64.2
PFBA	4,500	3,400	24.4	4,000	0.9	4,700	3,500	25.5	5,100	1.1
アニオン界面活性剤 (mg/L)		<0.02								

※除去率＝（1－処理後／処理前）×100 (%)　※濃縮倍率＝回収泡沫／処理前

○処理水量：2.6 L/min

○送気量：12～15 L/min × 4 基（ディフューザー）

○滞留時間（HRT）：約 1.5 hr（処理装置内の水位調整に伴い若干の変動あり）

3.5.2　対策技術の新規性・将来性

＜泡沫分離＞

泡沫分離に最低限必要な装置は、原水槽、泡沫分離槽、処理水槽、回収泡沫槽、コンプレッサーで済むことから、イニシャルコストが小さいことに加え、容易に現地で組み立てられる可搬型とすることができる。泡沫分離の連続処理化にも成功しており、ノッチタンクのような箱型の装置とすることで大容量化（スケールアップ）への道筋も付いたと考えられる。今後は、有機フッ素化合物を取り扱う工場や最終処分場の水処理施設の近傍に本装置を設置し、そこから排出される廃水や浸出水を現地で処理することを視野に入れている。更には、試験結果で示したとおり、泡沫分離は処理前後の水質に影響を

与えないことから、既存の他の水処理（生物処理／活性炭等）フローへ組み込むことも容易である。

また、活性炭やイオン交換樹脂、逆浸透膜などとは異なり、フィルター構造がないため目詰まりを起こさないこと、ポンプやコンプレッサー以外の駆動装置がないためメンテナンスが容易なことが挙げられる。処理に際して添加する薬剤は起泡剤のみであり、起泡状態に影響をもたらさない水質条件であれば pH 調整等の前処理の必要がない。他方、水処理全体の負荷や処理水を放流する際の環境影響を考慮した場合は、外部から添加する起泡剤や助剤の量はできる限り少なくするのが好ましい。一般に界面活性剤の生物毒性はカチオン系が最も高く、起泡剤としてカチオン界面活性剤を添加する場合は、泡沫分離後の処理水を環境中に直接放流せず、例えば泡沫分離の後段に生物処理を組み合わせる等の対処が必要となる。

＜凍結濃縮＞

凍結濃縮は加温を伴わず、低温環境下の物理反応であるためガス等の発生もないことから、適用範囲が広く、品質、安全性ともに優れていると考えられる。これらの特性を利用して、生物処理が困難な産業廃水処理等の環境分野に適用される事例が公表されている。本実証のように、凍結濃縮技術の PFAS 含有水への適用は国内外において初めて取り組みと思われるが、原理的には一般的な水溶性物質と同様な挙動を示すことにより炭素鎖長による PFAS の物質特性にかかわらず溶液からの濃縮分離が可能であると考える。将来的に本技術を実用化するためには、熱交換によるエネルギー効率の改善と高濃度溶液に対する品質の向上が課題として挙げられる。

＜プラズマ＞

国内では PFAS を分解・処理する技術は焼却以外に商業規模で適用されたものはないが、焼却にはエネルギーとコストが多くかかり、燃焼に化石燃料も必要なことが課題として挙げられる。一方で、プラズマによる PFAS 処理は 100%電気エネルギーを使用することや、泡沫分離や凍結濃縮と組み合わせることで PFAS を効率良く分解することができる。プラズマによる PFAS の処理技術は国内ではまだ商用化されているものは存在しないが、原理的には短鎖 PFAS の分解も可能である。将来的な実用化に向けて、連続式リアクターの構築が考えられる。なお、装置の大型化に際し、高額な電源コストが懸念されることから、初期コストを下げるよう検討が必要となる。

3.5.3 対策技術の経済効率性

泡沫分離の経済効率性について、過去の適用実績及び本実証試験結果をもとに概算費用を算出した（処理水量：100～1000 m^3、300 L／時（8 時間運転／日））。泡沫分離による運転コストは焼却費用と比較して低いため、当該能力による処理の場合は処理量が 100m^3 程度を分岐点として運用することでコストメリットがでてくると考えられる。運転費用（ランニングコスト）の主要な変動要素は処理水量であり、24 時間連続とするこ

とでコストダウン（工期短縮による労務費減）が見込まれる。ただし、処理水量は工場排水や最終処分場の浸出水等の PFAS 含有水発生施設の規模によるため、一元的に決められるものではない。

表 29　両性界面活性剤添加時の泡沫分離処理コストの比較（概算）（No. W5）

処理量		100 m³	200 m³	300 m³	500 m³	1000 m³
処理コスト（初期＋運転費用）	[千円]	13,998	17,174	20,349	26,701	42,579
初期費用	[千円]	10,823	10,823	10,823	10,823	10,823
運転費用	[千円]	3,176	6,351	9,528	15,877	31,756
材料（薬剤）費		5	9	14	23	46
廃棄物（回収泡沫）処分費		485	967	1,451	2,418	4,835
その他		2,686	5,375	8,063	13,436	26,875
運転期間	[月]	2.5	5.0	7.5	12.5	25.0
二酸化炭素排出量	[kg/ m³]	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92
1 m³ 当たり処理コスト（初期＋運転費用）	[千円/ m³]	140	86	68	53	43
1 m³ 当たり処理コスト（運転費用）	[千円/ m³]	32	32	32	32	32

＜内訳＞

初期費用（イニシャルコスト）：泡沫分離処理装置の本体価格（9,000 千円）
本体設置工事費及び人件費（1,823 千円）

運転費用（ランニングコスト）：

処理量 100m³ の場合

材料（薬剤）費（5 千円）
回収泡沫（PFAS 含有水）処分費※（485 千円）
その他
・労務費（1,750 千円）＝3.5 千円/日×20 日×2.5 箇月
・共通仮設費（100 千円）
・現場管理費（500 千円）
・一般管理費（336 千円）

※回収泡沫は産業廃棄物として焼却処分（処理単価 150 千円／m³ と想定）

＜凍結濃縮＞

凍結時間は凍結体の形状（凍結開始点から完了までの距離）と凍結速度によって算出され、2.0 L の凍結体の場合は 50 時間（＝100 mm／2 mm/h）、10 L の凍結体の場合は 115 時間（＝230 mm／2 mm/h）となる。これらをもとに試算すると、処理水量の凍結濃縮に必要な電気料金は、それぞれ 32 円（＝50 時間×（458 円/月÷30 日÷24 時間））、74 円（＝115 時間×（458 円/月÷30 日÷24 時間））と算出される（凍結体の解凍は室温による自然解凍とする）。最終的に 1 リットル当たりの電気料金に換算した場合は 16 円／L、7.4 円／L となる（凍結体の形状により変動あり）。

＜プラズマ＞

現状はラボレベルで実証された段階だが、本実証試験結果をもとに最もランニングコストに占める割合が大きいと考えられる直接プラズマ照射にかかる概算費用を算出した場合、分解効率：0.0018 Wh/ng-PFOA、処理濃度：50,000 ng/L（泡沫分離による回収泡沫と同程度と設定）、処理水量：1 m3、消費電力量：0.0018 Wh/ng×50,000 ng/L×1 m^3＝90 kWh から、プラズマ照射のみにかかるコストは 90 kWh×31 円/kWh＝2,790 円/m^3 と試算される。なお、実際に装置化した場合には、装置本体の費用や装置本体の電気代がかかることとなる。また、本試験で用いた SDS 等の薬剤の費用もかかるが、割合的にはかなり低いと考えられる。

3.5.4 対策技術の環境保全

＜共通＞

・可搬型とすることで装置を発生場所の近傍に設置可能であり、濃縮＋分解により処理が現地で完結するため、処理対象物の輸送による CO_2 の排出がない

・活性炭のような廃棄物処理を伴う残渣（固形廃棄物）の発生がない

＜泡沫分離＞

・処理後の濃縮物（泡沫）が液体として得られるため、二次処理において環境負荷の大きい焼却以外の分解方法も選択可能

・起泡剤として添加した界面活性剤は、多段処理による回収や生物処理が可能（系外への排出がない）

・泡沫分離後の処理水に残留する界面活性剤は水道法に基づく水質基準値未満となる

・送気装置以外の騒音・振動の発生源がない

・従来の活性炭処理フローの前段階で適用することで負荷が低減され、活性炭消費量を削減可能

・泡沫回収時の排気中の PFAS を捕捉する装置（トラップ）を設置することで、意図せぬ大気中への PFAS の放出を防止することが可能

＜プラズマ＞

・騒音・振動を伴う装置がない

・他方式よりプラズマのエネルギー効率が高く電気使用量が少ない

・凍結濃縮の併用により処理対象物の濃縮率を高めることで、プラズマ処理の時間短縮と分解効率をプラズマ単独の処理よりも向上させることが可能

3.5.5 実証試験結果に対する運営会議の評価

（※上述の実証の最終的な報告は、本評価を踏まえてまとめられている。）

(1) 有効性

・泡沫分離による 99.9%の除去率やパイロットスケールへの可能性に加え、プラズマ分解が界面活性剤としての特性を持つ PFAS の分解プロセスとして合理的であることは高く評価できる。
・プラズマ分解における短鎖 PFAS の副生成の確認やその対応、システム全体での正確な物質収支（マスバランス）の把握が望ましい。
・プラズマ分解や凍結濃縮の処理量は課題。
・今後は、処理システムの具体化と連続処理を実証していくことが期待される。

(2) 新規性・将来性

・泡沫分離の実用性が期待される。
・濃縮と分解を組み合わせたシステムや界面活性剤を活用したプラズマ処理としてデータが得られた点は評価できる。
・現時点ではプラズマ処理技術の実規模へのスケールアップが課題である。
・凍結濃縮の閾値（PFAS 濃度）の明確化や実機化に向けた処理可能量の具体化が期待される。

(3) 経済効率性

・泡沫分離とプラズマ分解の組み合わせは有力なシステムになり得るが、現時点での維持管理コストは他技術と比較して高額であり、他の技術との比較や詳細な分析や改善が必要である。
・コスト算出の根拠が技術ごとに統一させることが望ましい。
・プラズマ処理については、専門的な人員配置の要否を含めた検討が必要である。

(4) 環境保全

・難分解性化合物を分解できるプラズマ技術の特性は環境負荷低減の観点から合理的であり、副生成物に関する更なる分析も期待される。
・利用する界面活性剤も制御可能であり、現地で濃縮と分解を完結型できるメリットはあると評価できる。
・凍結濃縮やプラズマ分解における CO_2 排出量の算出根拠をより明確にすることが課題

4. 参考資料

4.1 PFOS 等の濃度低減のための対策技術に関する実証事業運営会議委員

（50 音順・敬称略）

氏　名	所属及び役職
江種　伸之	国立大学法人　和歌山大学　システム工学部 教授
遠藤　和人	国立研究開発法人　国立環境研究所　福島地域協働研究拠点 廃棄物・資源循環研究室 室長
倉持　秀敏	国立研究開発法人　国立環境研究所　資源循環領域 副領域長
小坂　浩司	国立研究開発法人　国立環境研究所　環境リスク・健康領域 水道水質研究和光分室 上級主幹研究員
小林　剛	国立大学法人　横浜国立大学大学院　環境情報研究院 自然環境と情報部門 教授
肴倉　宏史	国立研究開発法人　国立環境研究所　資源循環領域 試験評価・適正管理研究室 室長
平田　健正	国立大学法人　和歌山大学 名誉教授
矢吹　芳教	地方独立行政法人　大阪府立環境農林水産総合研究所 環境研究部　環境調査グループ 主幹研究員
山村　寛	学校法人　中央大学　理工学部 教授