

令和5年度低コスト・低負荷型土壤汚染調査対策技術検討調査結果

実施機関：株式会社流機エンジニアリング

技術名称：揚水及びフィルター（精密ろ過膜）と機能性粉体（活性炭）を用いた処理法によるPFAS地下水汚染の拡大防止技術

技術の区分：地下水汚染の拡大の防止、原位置浄化（汚染源での地下水揚水）、吸着法による地下水中汚染物質の吸着除去

実証試験の評価対象物質：ペルフルオロオクタンスルホン酸（PFOS）、ペルフルオロオクタン酸（PFOA）及びペルフルオロヘキサンスルホン酸（PFHxS）

試験期間：令和5年10月～令和6年3月

1. 技術の原理及び特徴

本技術は、水処理を行うフィルターに機能性材料を粉体化した機能性粉体を積層することで添着させ、機能性粉体で液体をろ過して浄化する技術である（図1）。水質浄化において広く使用されている粒状活性炭を用いた技術に比べ、粉末の活性炭をフィルター上に密に積層させることで、浄化対象物質の活性炭への吸着及びそれによる除去性能の向上を図っている点が特徴である。

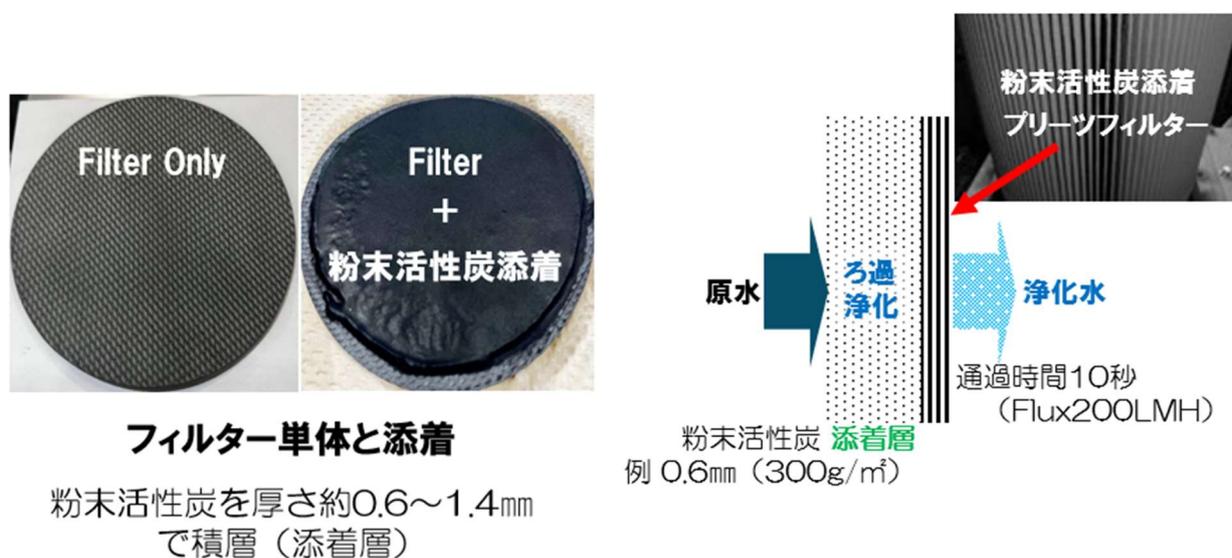


図1 フィルターと活性炭添着層、原水のろ過浄化

粉末活性炭のフィルターへの添着は、水と粉末活性炭の懸濁液を作り、その懸濁液をフィルターでろ過することにより行う。この際の活性炭の添着量はフィルター面積に対して300～700 g/m²、厚さ0.6～1.4 mmである。また、処理原水の浄化は、フィルター上の活性炭で原水をろ過することで行われる。処理原水が添着層を通過する時間は、添着層の厚さが0.6 mm(フィルター面積当たり300 g/m²)、ろ過時の原水のFlux 200 LMH (L/m²/h、流速にして20

cm/h) の状態では、約 10 秒である。本実証で用いたフィルターの総面積は室内試験器では 1/260 m²、現地実証試験で用いた装置では 1 m²となっている。

なお、本実証試験では、機能性粉体として様々な水処理において利用実績の多い活性炭を使用した。活性炭に代えてイオン交換樹脂や他吸着剤の粉体を使用することも技術的に可能である。

また、本実証試験で使用した粉末活性炭の仕様は次のとおり。

粉末活性炭：市販のヤシ殻活性炭 (D50=12 μm、D20=5 μm)、乾燥減量 (wt%) 5 以下、比表面積 (m²/g) 1,020 以上、1,310 以下

2. 実証試験に向けた検討 (原水の水質測定)

本実証試験に先立ち、後述する 3 の実証試験で用いる原水として対象とする地点 (以下、合流地点と呼ぶ。) 及びその上流で合流前の 2 か所の湧水 (以下、湧水 A、湧水 B と呼ぶ。) の計 3 か所の原水の水質を測定した。合流地点の水は導水管を通り揚水ポンプ建屋下の貯水槽に導かれており、3 (2) の現地実証試験の処理原水は、この揚水ポンプ建屋下の貯水槽から採取した。

① 処理原水の水質一般項目分析

処理原水の水質一般項目の分析結果を表 1 及び図 2 に示す。採取した 2 か所の湧水及び合流地点における水質に大きな差はなく、いずれも Ca-HCO₃ 型 (カルシウム-重炭酸型) でほぼ同じであった (図 2)。また、当該湧水には、一般細菌、全有機炭素 (以下、TOC と呼ぶ。)、ノルマルヘキサン抽出物質等が検出されており、長期間にわたりろ過を行った場合、フィルターのファウリング (目詰まり) が発生する可能性があることが想定される水質であった。

表 1 処理原水水質一般項目分析結果

採水日：2023年11月28日

試験対象	単位	分析結果		
		合流地点	湧水 A	湧水 B
採取時間	—	11:13	10:41	10:55
水温	℃	23.7	23.5	23.0
pH	—	7.6	7.6	7.4
一般細菌	CFU/mL	450	120	350
大腸菌	—	検出	検出	検出
亜硝酸態窒素	mg/L	0.004 未満	0.004 未満	0.004 未満
硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素	mg/L	4.4	4.4	3.3
塩化物イオン	mg/L	36	36	36
TOC	mg/L	0.2	0.1	0.2
COD	mg/L	0.5 未満	0.5 未満	0.5 未満
BOD	mg/L	0.5 未満	0.5 未満	0.5 未満
ノルマルヘキサン抽出物質	mg/L	0.5 未満	0.6	0.5 未満
臭気	—	異常なし	異常なし	異常なし
色度	度	0.5 未満	0.5 未満	0.5 未満
濁度	度	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満
カルシウム・マグネシウム等（硬度）	mg/L	300	300	300
鉄及びその化合物	mg/L	0.01	0.01	0.02
浮遊物質（SS）	mg/L	0.5 未満	0.5 未満	0.5 未満
フミン酸	mg/L	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満
ナトリウムイオン	mg/L	27	27	27
カリウムイオン	mg/L	2.4	2.4	2.4
カルシウムイオン	mg/L	110	110	110
マグネシウムイオン	mg/L	5.2	5.2	5.3
重炭酸イオン	mg/L	330	330	330
硫酸イオン	mg/L	21	21	21
硝酸イオン	mg/L	20	19	15
亜硝酸イオン	mg/L	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満
リン酸イオン	mg/L	0.12	0.12	0.12
イオン状シリカ	mg/L	6.6	6.6	6.6
アルミニウムイオン	mg/L	0.02 未満	0.02 未満	0.02 未満
二価鉄	mg/L	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満
全マンガン	mg/L	0.01 未満	0.01 未満	0.01 未満

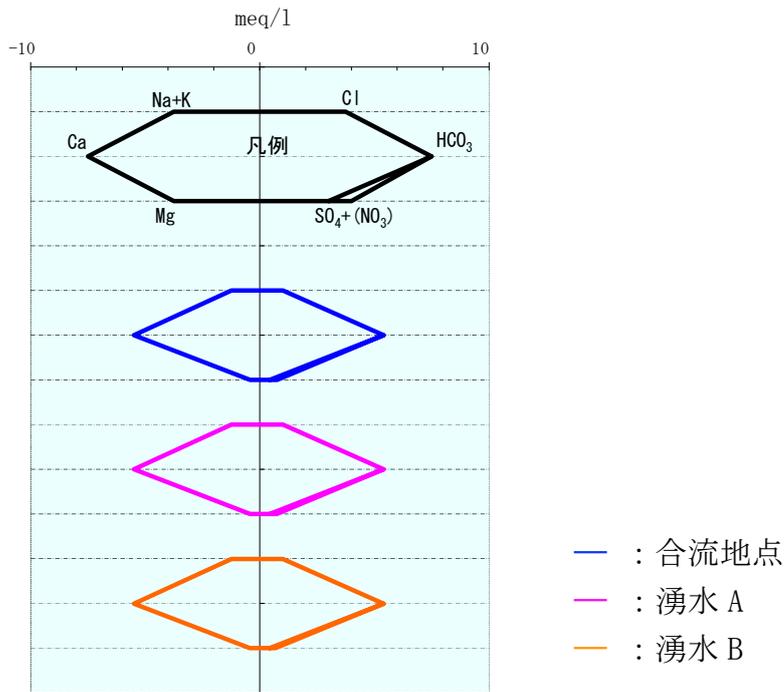


図 2 処理原水の水質に係るヘキサダイアグラム

② 処理原水中に含まれるPFAS多成分分析

採取した原水における複数分子種の PFAS を測定したところ、2か所の湧水及び合流地点の PFOS、PFOA、PFHxS 及び PFOS の代替物質として知られる 6:2FTS (以下、「PFAS 4 種」と呼ぶ。) の濃度に大きな差異はみられなかった。水中 PFAS 濃度の分析結果において、合流地点にて検出値が大きかった 13 分子種 (濃度順) を表 2 に示す。

表 2 処理原水 PFAS 多成分分析で検出値が大きかった物質

	処理原水において検出された PFAS 分子種 (濃度順)	炭素数	濃度 ng/L		
			合流地点	湧水 A	湧水 B
1	ペルフルオロオクタンスルホン酸(PFOS)	8	600	630	710
2	ペルフルオロヘキサンスルホン酸(PFHxS)	6	370	440	380
3	ペルフルオロオクタン酸(PFOA)	8	120	120	120
4	ペルフルオロヘキサン酸(PFHxA)	6	97	—	—
5	1H、1H、2H、2H-ペルフルオロオクタンスルホン酸(6:2 FTS)	8	88	93	92
6	ペルフルオロペンタン酸(PFPeA)	5	72	—	—
7	ペルフルオロヘプタン酸(PFHpA)	7	40	—	—
8	ペルフルオロペンタンスルホン酸(PFPeS)	5	37	—	—
9	ペルフルオロブタンスルホン酸(PFBS)	4	27	—	—
10	ペルフルオロブタン酸(PFBA)	4	23	—	—
11	ペルフルオロヘプタンスルホン酸(PFHpS)	7	16	—	—
12	ペルフルオロノナン酸(PFNA)	9	7	—	—
13	ペルフルオロオクタンスルホンアミド (PFOSA)	8	5	—	—

— : 測定せず

3. 実証試験方法

(1) フィルター及び機能性粉体の基礎特性把握試験

① Flux 試験

後述の②以降の試験の実施に先立ち、採取した処理原水を本技術に用いるフィルターでろ過できるかどうかを確認するため、Flux 試験を実施した。試験は、減圧ろ過試験器（φ70 mm 本技術のフィルターと同じ材質の平膜、フィルター面積 1/260 m²、吸引圧力-10 kPa）及び定流量ろ過試験器（φ70 mm の同上フィルターを用いてフィルター上に粉末活性炭 500 g/m²を添着、Flux100-150 LMH）の2種類の試験器を用いて行った。

② 連続通水試験 1

純水に PFAS 4 種を各 100,000 ng/L 添加した高濃度の模擬試験水を作成し（全量を一度に作成）、この模擬試験水に対して、定流量ろ過試験器（フィルター上に粉末活性炭 1.15 g/φ70 mm = 300 g/m²を添着）を用いて、活性炭への競争吸着、連続通水処理過程での処理後の濃度、除去率、通水量と濃度・除去率の変化、活性炭の破過の時期、吸着容量（活性炭 1 g 当たりの吸着量）を評価した。

通水時間は合計 240 時間、処理量は合計 185 L である。

③ 連続通水試験 2

処理原水中に共存する TOC 成分が本技術の PFAS 処理性能に与える影響を検討するため、②と同様に PFAS 4 種を添加した模擬試験水にフミン酸を添加した試験水（フミン酸試薬を用いて TOC として 3.0 mg/L に調整）を作成した後、このフミン酸添加試験水を処理する連続通水試験を実施し、TOC 成分の活性炭フィルター（※）への競争吸着を評価した。

通水時間は合計 138 時間、処理量は合計 106 L である。

※ 粉末活性炭添着済フィルター。

(2) 現地実証試験

PFAS 4 種を基本としつつ、専門家の意見も踏まえ必要に応じて、ペルフルオロヘキサン酸（PFHxA）、ペルフルオロペンタン酸（PFPeA）及びペルフルオロブタン酸（PFBA）の3種を追加した7種（以下「PFAS 7種」と呼ぶ。）を測定項目として43日間の連続処理を行い、本技術の有効性、経済性、環境負荷について評価をとりまとめた。他の水質項目としては、本技術において吸着の競合の有無を調査する目的で TOC 及び硬度についても、追加で測定を行った。

本実証試験の装置構成及び処理フローを図3に示す。本技術において、フィルターには精密ろ過装置・型式 ECO クリーン mini（※）を用いた。本装置の構成としては、二次ストレーナ（ろ過精度 1 μm のフィルター）、原水槽、ECO クリーン mini（以下、「本体」と呼ぶ。）、微粒子除去フィルター（ろ過精度 1 及び 0.5 μm）、制御盤及び濁度計となっている。

建屋下の貯水槽から汲み上げた原水は、二次ストレーナに通されシルト・粘土等を除去された後、原水槽に入る。次に、原水は原水槽から本体に送られ、本体のフィルターに添着された粉末活性炭で PFAS が吸着除去される。PFAS が除去された処理水は外部に排水される。微粒子除去フィルターは、原水を原水槽と同フィルター間で循環させることにより原水中のシルト・粘土等を除去する役割がある。濁度計は原水取水前の濁度を計測する。制御盤は本システムの自動運転(定流量運転または定ポンプ周波数運転、原水高濁度時の取水停止機能)を制御する。なお、本技術での活性炭添着層は現地にて形成した。なお、本技術では活性炭が破過した場合には、自動でフィルター上の活性炭を洗浄排出し、新しい活性炭を再添着する機能を付加することが可能である。また、同様の装置を用いた先行事例の情報を踏まえ、本装置では、ファウリング防止等の対策を組み込んでいる。

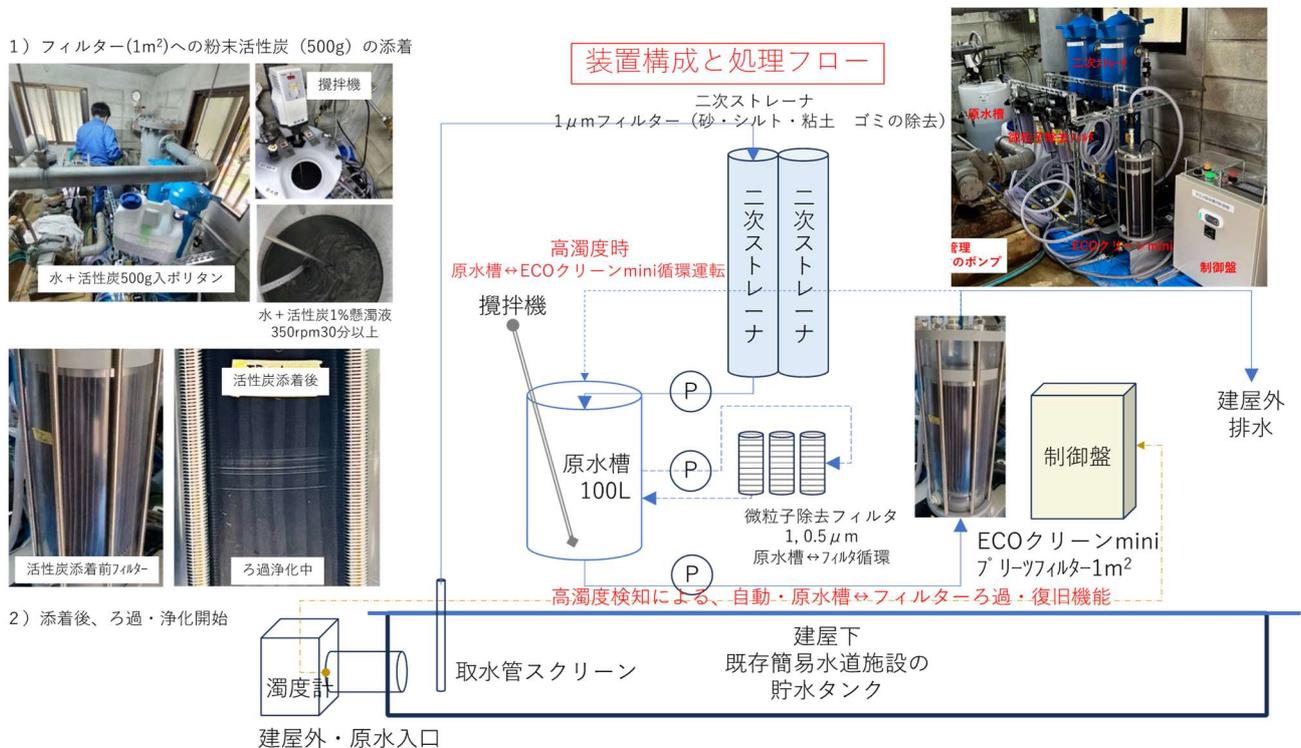


図 3 装置の構成、処理フロー

※ ECO クリーン mini :
 小規模サイト向け MF 膜 (精密ろ過膜、ろ過精度 0.15 μm) ろ過式水処理装置。フィルター面積 1 m²、本体の高さ 700 mm、重量 8 kg

4. 実証試験結果

(1) 室内試験

① Flux 試験

処理原水における初期の Flux は 14,040 LMH であった。比較のため測定した純水における Flux 18,720 LMH と遜色がなく、採取した原水は、前処理無しで本技術の活性炭フィルターでろ過が可能であることを確認した。3(2)の現地実証試験と同様の処理条件下で、採取した原水の連続ろ過を行った試験の結果、ろ過量が 52,190 mL 時（フィルター面積 1 m²で換算すると 13.5 m³処理）における差圧上昇は 72 kPa であり、比較的大きな差圧の上昇がみられた。この差圧上昇の原因としては、30 日を超える試験期間でフィルター上にバイオフィウリングや炭酸カルシウムとみられる結晶様物質の析出が発生し、これらが影響を与えたことが考えられた。

この結果より、現地実証試験においては、試験装置に取水直後の原水を流入させ浄化処理を行うこと、殺菌剤として次亜塩素酸ナトリウムを添加すること、原水槽での給水時の水しぶきを抑制して処理原水と空気の接触をできるだけ抑え炭酸カルシウムの析出を予防する対策を行った。

② 連続通水試験 1

試験の結果を図 4 に示す。各時点での PFAS 4 種の除去率は、直前に測定した活性炭処理前の PFAS 濃度に基づき算出した。

試験開始から積算処理量が 0.385 L（以下、「通水初期」と呼ぶ。）時点では、除去率は 97% から 98% であった（表 3）。PFOS 及び 6:2FTS については、積算処理量 185 L まで除去率が 80% 程度以上を維持していた（図 4）。一方、PFOA 及び PFHxS については、積算処理量が 75 L を超えた頃から除去率が 80% を下回るようになり、積算処理量 185 L の時点では除去率が 30~20% まで低下した。また、PFOS に比べて 6:2FTS の除去率では大きく減少する傾向が見られた。

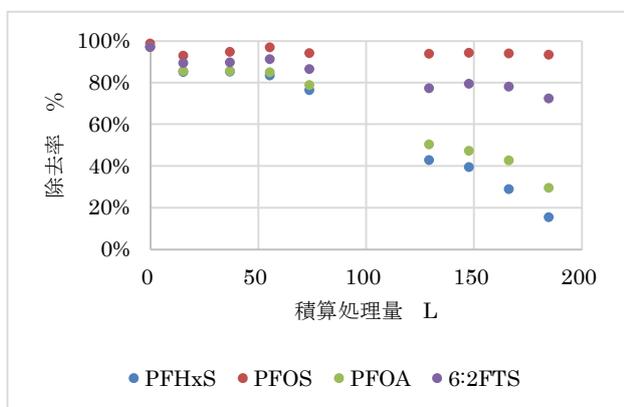


表 3 通水初期の PFAS 濃度及び除去率

	PFHxS	PFOS	PFOA	6:2FTS
処理前濃度 ng/L	1.040×10^5	1.072×10^5	0.9965×10^5	1.228×10^5
処理後濃度 ng/L	3.075×10^3	1.413×10^3	2.982×10^3	3.688×10^3
除去率 %	97.04	98.68	97.01	97.00

図 4 積算処理量と除去率

③ 連続通水試験 2

本試験の結果を図 5 から図 8 に示す。各時点での PFAS 4 種及び TOC の除去率は、②と同様に、直前に測定した活性炭処理前の濃度に基づき算出した。

通水初期の除去率については、PFAS 4 種全てで連続通水試験 1 (表 3) より高く、99%以上に達したものもあった(表 4)。この理由としては、本試験で用いた検液はフミン酸を溶解させた液を 0.45 μm メンブレンフィルターを用いてろ過したろ液を取り使用している。また、この検液に対してろ過精度 0.15 μm のフィルターを用いていることから 0.15 μm ~ 0.45 μm 間のフミン酸が処理原水からの PFAS の吸着除去に関与している可能性が考えられる。

図 5 は、本試験における PFAS 4 種及び TOC の積算処理量に対する除去率を示している。TOC は積算処理量が 5 L の段階で除去率が 10% まで低下し、これ以上の吸着除去は認められない、活性炭が破過した状態となった。また、PFOA と PFHxS では積算処理量が約 50 L の段階で除去率が 10% 程度に低下した。一方、PFOS では積算処理量約 80 L で除去率 20% 程度まで低下したが、その後も 20% 程度の除去率が維持された。

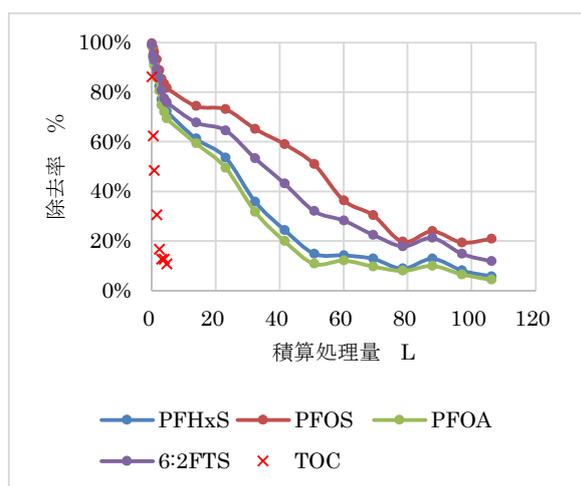


表 4 通水初期の PFAS 濃度及び除去率

	PFHxS	PFOS	PFOA	6:2FTS
処理前濃度 ng/L	1.083×10^5	1.032×10^5	1.116×10^5	1.324×10^5
処理後濃度 ng/L	1.330×10^3	0.3640×10^3	1.320×10^3	1.218×10^3
除去率 %	98.77	99.65	98.82	99.08

図 5 積算処理量と除去率

図 6 は、積算処理量と差圧 (ろ過する際の送水圧力でフィルターにかかる圧力) を示している。差圧は積算処理量に対して指数関数的に上昇している。これは、TOC 成分として添加されたフミン酸の微粒子が活性炭フィルターをファウリングさせたことによるものと考えられる。なお、本試験では差圧が 300 kPa (カタログ上のフィルター差圧上限値) に達した時点で試験を終了させた。

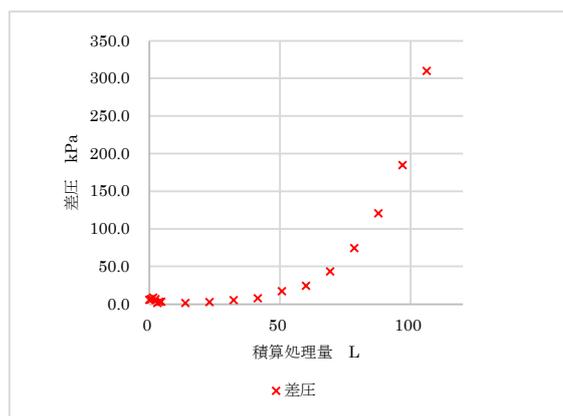


図 6 積算処理量と差圧

表 5、図 7 及び図 8 に、連続通水試験 1 と 2 における積算除去量、吸着容量 (※) を比較した結果を示す。図 7 の連続通水試験 1 の結果では、積算処理量が 185 L となった時点においても積算除去量は増加傾向であったが、図 8 の連続通水試験 2 では積算処理量 80 L 程度で積算除去量の増加がほぼみられなくなった。一例として、2 つの試験結果における積算処理量が 97 L 前後時点での積算除去量を比較すると、連続通水試験 2 の積算除去量は連続通水試験 1 の 50% 以下、PFAS 4 種にフミン酸を加えた積算除去量でも連続通水試験 1 の 60% 程度となった。PFAS 4 種合計吸着容量は、連続通水試験 1 では 58,000 µg/g 以上、連続通水試験 2 では 14,800 µg/g 程度となった (表 5)。

※吸着容量の算出方法

$$\frac{(\text{処理前濃度}[\mu\text{g/L}] - \text{処理後濃度}[\mu\text{g/L}]) \times \text{処理量}[\text{L}]}{\text{使用した活性炭量}[\text{g}]}$$

表 5 PFAS の積算除去量及び吸着容量の比較

時期	試験名称	PFAS 4 種合計 積算除去量 (µg)	PFAS 4 種合計 吸着容量 (µg/g)
処理量 92 L 時	連続通水試験 1	34,200 程度	—
処理量 97 L 時	連続通水試験 2 (フミン酸添加)	16,500 程度上記の 48% (PFAS+TOC 20,300 上記の 59%)	—
試験終了時 処理量 185 L	連続通水試験 1	61,000 以上	58,000 以上
試験終了時 処理量 106 L	連続通水試験 2 (フミン酸添加)	17,000 程度	14,800 程度

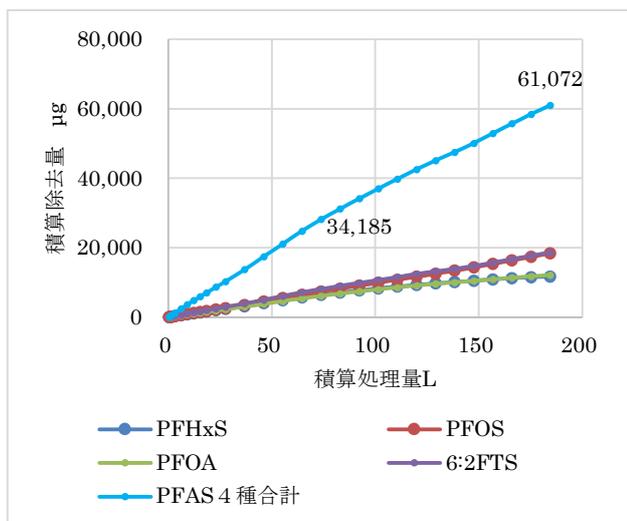


図7 連続通水試験1 積算処理量と積算除去量

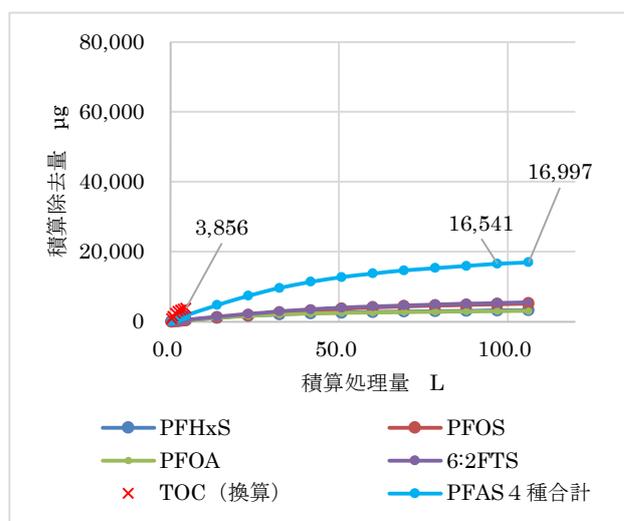


図8 連続通水試験2 積算処理量と積算除去量

このように本試験では、TOC 成分としてフミン酸を添加することにより、PFAS 4 種の吸着量が大幅に低下する結果となった。この原因としては、本技術に用いられるフィルターに添着された活性炭の細孔を TOC 成分のフミン酸が塞ぎ、吸着性能の低下につながったことが考えられる。前述のとおり、実証試験で用いた原水においても同様に TOC 成分が検出されており、当該成分が処理性能に影響を与えることも考えられることから、TOC 濃度が高い地下水に対して本技術を用い、浄化対象水に含まれる PFAS を効果的に吸着・除去するためには、TOC 成分の影響を受けにくい PFAS に特化した吸着剤の開発が求められる。

(2) 現地実証試験

① 測定項目における濃度及び差圧

43 日間の連続実証試験を実施し、本調査の現地連続処理試験の結果として得られた処理水中の PFAS 濃度、除去率、吸着容量の結果について図 9～12 に示す。

試験期間中、試験開始当初は概ね毎日、開始後 1 週間以降は概ね 1 週間に 1～2 回程度、原水（処理前）及び現地試験装置でろ過した処理水（処理後）の水質分析を行った。

図 9 に試験期間中の PFAS 7 種の処理前と処理後の濃度、図 10 には、処理前と処理後の TOC 濃度及び硬度を示す。なお、試験期間中を通した処理量の経時変化は図 12 に示している。

PFAS 7 種では、処理開始から積算処理量が 7,000 L 程度となるまでの期間において、処理後の濃度はほぼ全て不検出であり、本技術の処理による濃度の低減が認められた（図 9）。一方、TOC や硬度については、本技術の処理による有意な濃度低減は認められなかった（図 10）。

図 11 に、試験期間中の処理前と処理後の PFOS 及び PFOA の濃度（合算値）を示す。処理前濃度は、1,140 から 534 ng/L であり、処理後濃度は、試験開始から 6 日後（2 月 5 日）までは 1 ng/L 以下（ND を含む）であった。その後、処理後濃度は段階的に上昇し、開始 8 日目（2 月 7 日）に 11 ng/L、15 日目（2 月 14 日）に 62 ng/L、22 日目（2 月 21 日）では 70 ng/L、29 日目（2 月 28 日）に 59 ng/L、43 日目（3 月 13 日）に 157 ng/L となった。なお、濃度が定量下限値未満であった場合は 0 ng/L とした

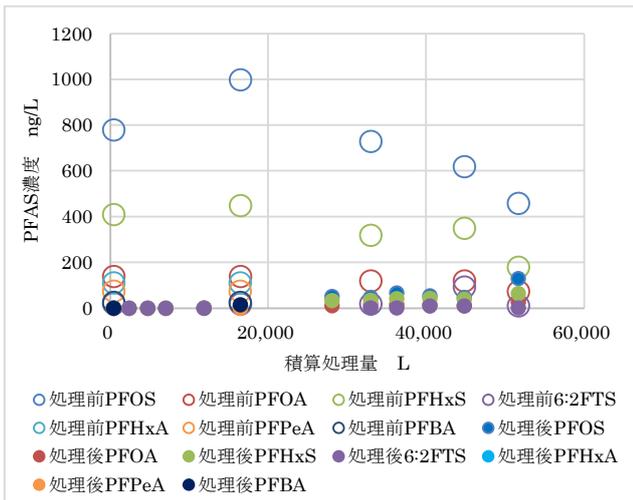


図 9 PFAS の処理前と処理後濃度

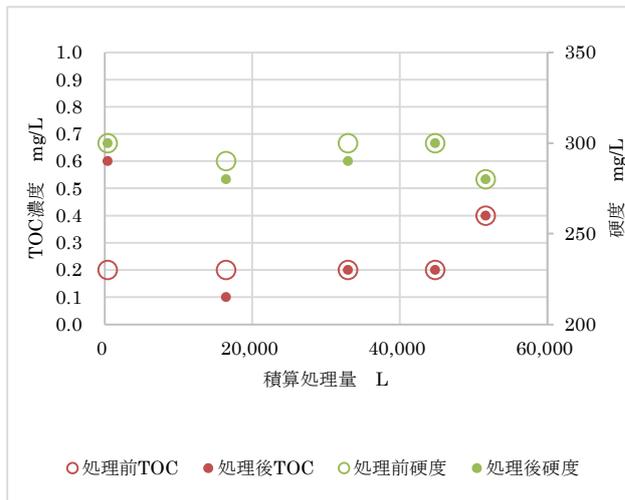


図 10 処理前と処理後の TOC 濃度及び硬度

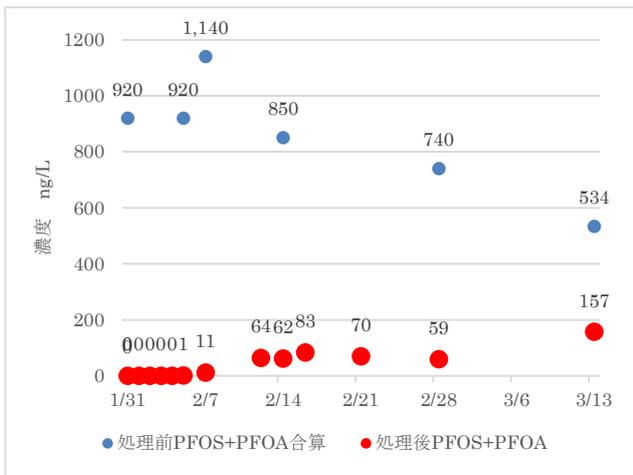


図 11 PFOS, PFOA の処理前と処理後濃度（合算値）

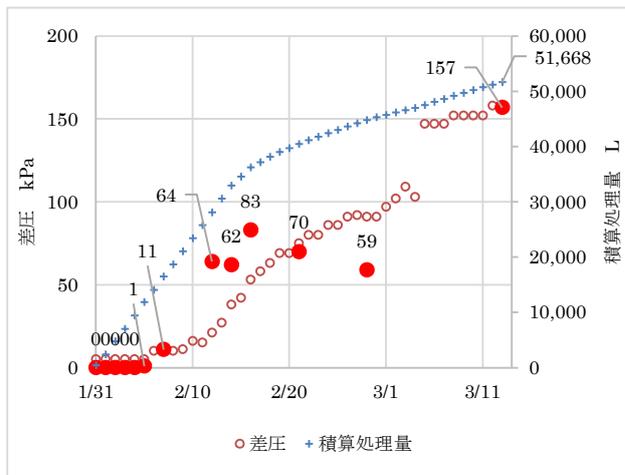


図 12 積算処理量と差圧
（図中、処理後の PFOS 及び PFOA 濃度の合算値を●及び数値[ng/L]でプロット）

本試験を通した試験装置による最終的な原水処理量は、積算で 51.7 m³ となった。1 日の処理量については、試験開始から概ね 2 週間が経過した 2 月 12 日頃から差圧が上昇したことを受け、吸着効率が低下したと考えられる活性炭により多くの PFAS を吸着させるべく、2 月 14 日に流量、2 月 16 日にポンプ周波数、3 月 5 日に再度ポンプ周波数をそれぞれ調整したため、この時期を挟んで減少した（図 12）。

なお、差圧上昇の原因には、一つに、当該原水中に含まれていた粘土、鉄及びカルシウム成分が考えられる。このような粘土成分等を含む原水の処理を本技術で行う場合、現場に応じた検証が必要だが、二次ストレーナ機能を強化すること、及び、自動フィルター洗浄・活性炭の再添着機能を加えることで課題の解決ができると考えられる。

図 13 は処理原水の積算処理量と PFAS 7 種の除去率、図 14 は試験期間中の PFOS、PFOA 及び PFHxS（以下「PFAS 3 種」と呼ぶ。）の処理前と処理後の濃度（合算値）及び除去率を示している。処理量 44.8 m³ まで（開始～29 日目）まで、PFAS 3 種の濃度の合算値で除去率 90%以上を達成した。一方、PFBA は積算処理量が 16.5 m³ の時点で除去率が 40%に低下した（積算処理量が 16.5 m³ 以降はデータなし）（図 13、14）。

このように PFAS 種によって除去率の低下に傾向の差が認められた要因については、PFAS 種により活性炭吸着容量に差がある可能性があることが挙げられる。活性炭の吸着は一般的に「活性炭吸着容量 長鎖 > 短鎖」と知られており、炭素数が 4 と最も少ない PFBA の場合に除去率低下が最も著しくなったと考えられる。

図 15 は、PFAS 3 種の除去率と吸着容量の関係を示している。除去率 90%の時（開始 29 日目、処理量 44.8 m³）の吸着容量は、PFAS 3 種の合算値として 109 µg/g であった。

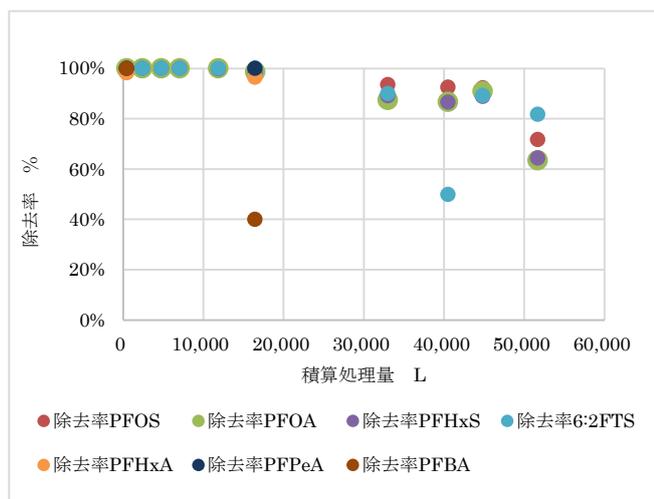


図 13 積算処理量と PFAS 7 種の除去率

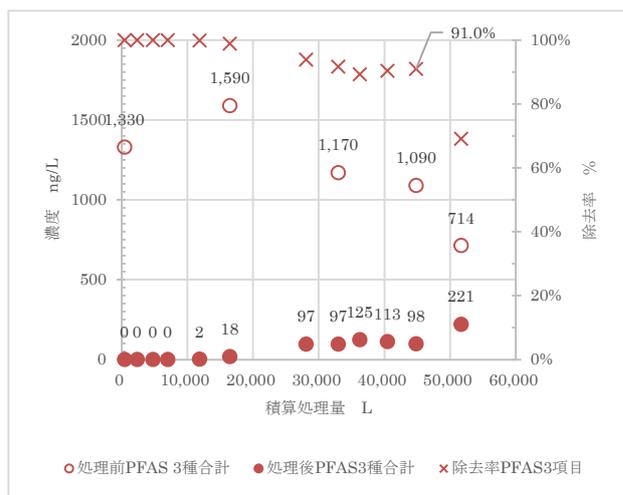


図 14 PFAS 3 種の処理前・処理後濃度、除去量

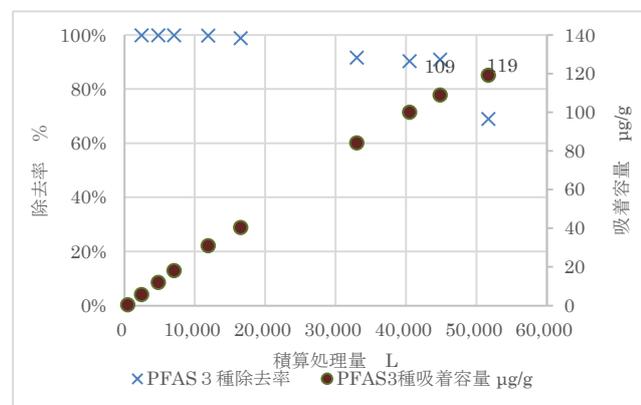


図 15 PFAS 3 種の除去率と吸着容量

② 使用電力量

図 16 に、現地実証試験期間中の積算処理量、使用電力量を示す。最終的な積算処理量は 51,668 L、使用電力量は 107 kW であった。

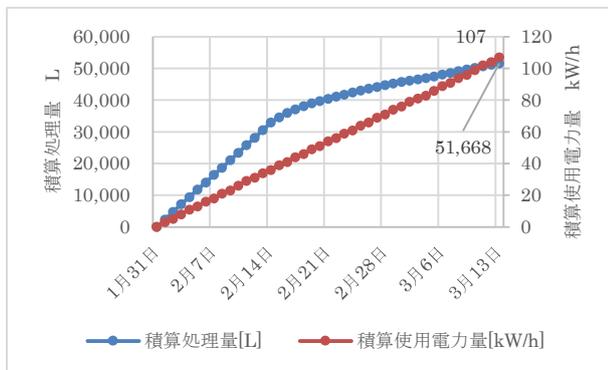


図 16 積算処理量及び積算使用電力量の推移

③ 処理原水の濁度の影響

図 17 は、現地実証試験期間中の 2 月 7 日から 8 日にかけて発生した処理原水の濁度の変化と、この間の積算処理量の関係を表している。2 月 8 日 0 時頃、濁度上昇が認められ、このタイミングで積算処理量の増加が停止した。また、濁度が平常に戻った段階で、積算処理量が再び増加した。なお現地では 2 月 7 日 17 時より降雨が続いていた。濁度の上昇は降雨による影響と考えている。

本装置には、装置のろ過浄化系の外（二次ストレーナより上流側）で原水濁度を検知した後、原水の取水を停止し、原水槽とフィルターを循環ろ過する運転に自動で切り替える仕組みを導入している。上記のモニタリング結果から、導入した濁度対策が機能していることが確認できた。

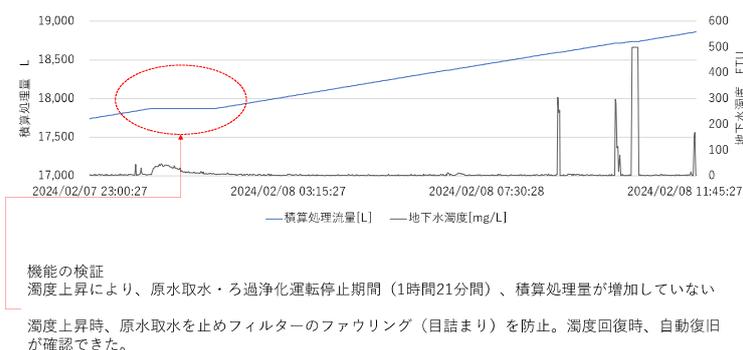


図 17 処理原水の濁度と積算処理量

④ ファウリング状況の分析

図 18 には、使用後に撤去した二次ストレーナのフィルターを示している。同フィルターは褐色化しており、フィルター内外に粘土が付着していたことから、濁度物質と考えられる粘土粒子の除去が行われたと判断できる。ただし、フィルターの外側やストレーナ容器内面にも粘土が付着していたことから、粘土の一部は本技術の活性炭やフィルターまで到達したと予想される。

連続処理試験によるファウリング物質の状況を把握することを目的として、二次ストレーナの使用前フィルター、使用後のフィルター残渣（褐色残渣（粘土）及び黒色残渣、図 18）、並びに本技術の使用前フィルター、使用後かつ洗浄前の活性炭及びフィルター（図 19）及び使用後かつ洗浄後の本技術フィルターを対象とし、蛍光 X 線分析を行った。



図 18 二次ストレーナの使用后フィルター



図 19 使用後かつ洗浄前の本技術フィルター

測定結果を表 6 及び図 20、21 に示す。二次ストレーナでは使用前フィルターで硫黄、チタンが検出された。黒色残渣からは新たに、カルシウム、鉄、銅及び臭素が検出された。褐色残渣（粘土）では、さらに、シリコン、カリウム、マンガン、亜鉛及びストロンチウムが検出された（表 6 の全項目を検出）。カルシウム、鉄及び臭素は黒色残渣より大きなピークであった。

本技術フィルターでは、使用前でチタン、鉄及び銅が検出された。使用後の活性炭では、鉄、銅の他、新たに、カルシウム、亜鉛及び臭素が検出された。鉄、銅及び臭素は使用前フィルターよりも高いピークであった。使用後かつ洗浄後のフィルターでは多くの元素のピークが低下しており、ファウリングの原因となる物質として一般的に知られている鉄は検出されたがピークは活性炭より低く、カルシウムは不検出であった。

この結果に基づいたファウリングの評価を以下に示す。

- 二次ストレーナのフィルターでは、フィルターのファウリング物質や活性炭の吸着阻害物質となることが知られている粘土、鉄、マンガン及びカルシウムが検出されていることから、同フィルターにおけるこれらの阻害物質の除去効果が認められた。
- 活性炭でも鉄、カルシウム等の濃集が認められたが、洗浄後のフィルターではさらに小さいピークまたは不検出であった。洗浄することで鉄及びカルシウム等は除去でき、本技術フィルターの洗浄再利用は可能であると判断した。洗浄後、通水時の差圧が減少した（差圧、4～5 kPa、出荷時とほぼ同じ差圧に戻る）ことも確認した。
- 臭素について、湧水の上流に存在する海成堆積物等が由来の場合、海水に含まれることで知られるヨウ素や塩素も検出されると考えられるが、今回の分析結果からヨウ素及び塩素は認められていないことから、臭素は人為由来である可能性が考えられる。

表6 蛍光 X 線測定結果

対象物	二次ストレーナ フィルター			本技術フィルター		
	使用前	使用後	使用後	使用前	使用後かつ 洗浄前	使用後かつ 洗浄後
測定対象	フィルター	黒色残渣	褐色残渣 (粘土)	フィルター	活性炭	フィルター
シリコン(Si)	—	—	○	—	—	—
硫黄(S)	○	○	○	—	—	—
カリウム (K)	—	—	○	—	—	—
カルシウム (Ca)	—	○	◎	—	○	—
チタン (Ti)	○	○	○	○	—	○
マンガン (Mn)	—	—	○	—	—	—
鉄 (Fe)	—	○	●	○	◎	○
銅 (Cu)	—	○	○	○	◎	—
亜鉛 (Zn)	—	—	○	—	○	—
臭素 (Br)	—	○	◎	—	●	—
ストロンチウ ム (Sr)	—	—	○	—	—	—

各物質の相対的検出ピークの高さ（相対的な濃度の高低）：

（ピーク・濃度高）● > ◎ > ○（ピーク・濃度低） > —（不検出）

測定器：株式会社堀場製作所製のハンドヘルド型蛍光 X 線分析装置(MESA-630)

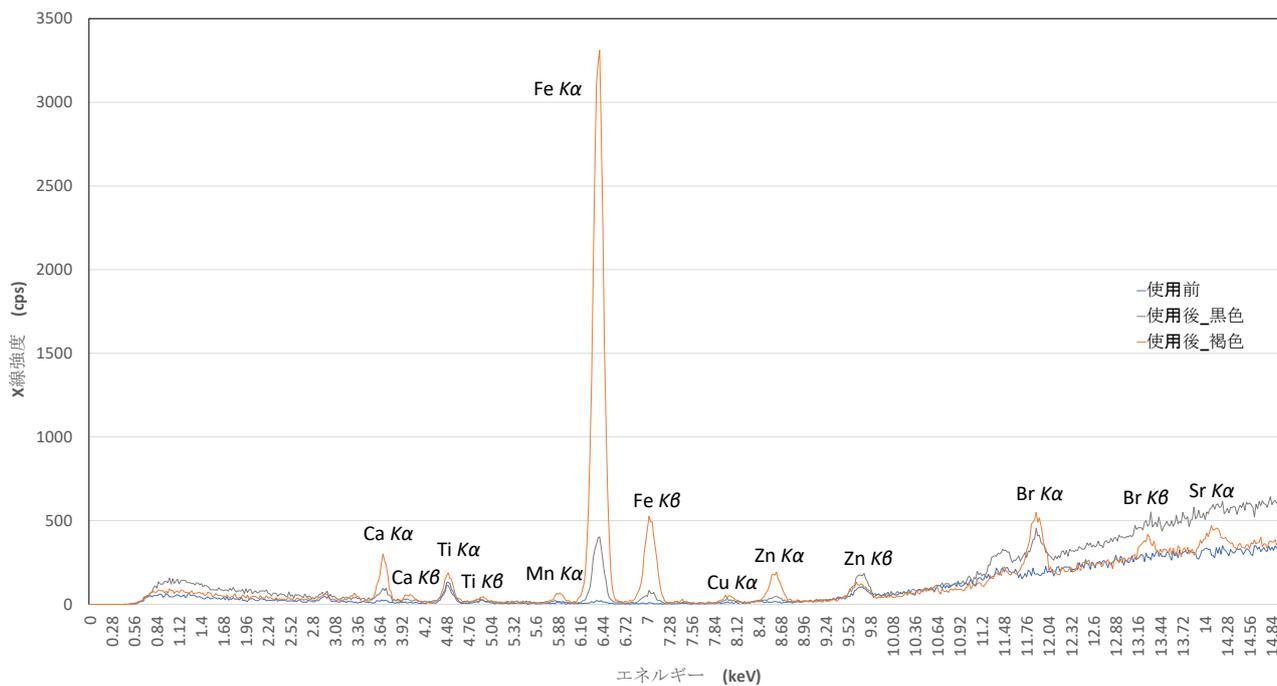


図 20 45 kV の管球電圧のスペクトルによる二次ストレー使用前、使用后黒色残渣、使用后褐色残渣の比較

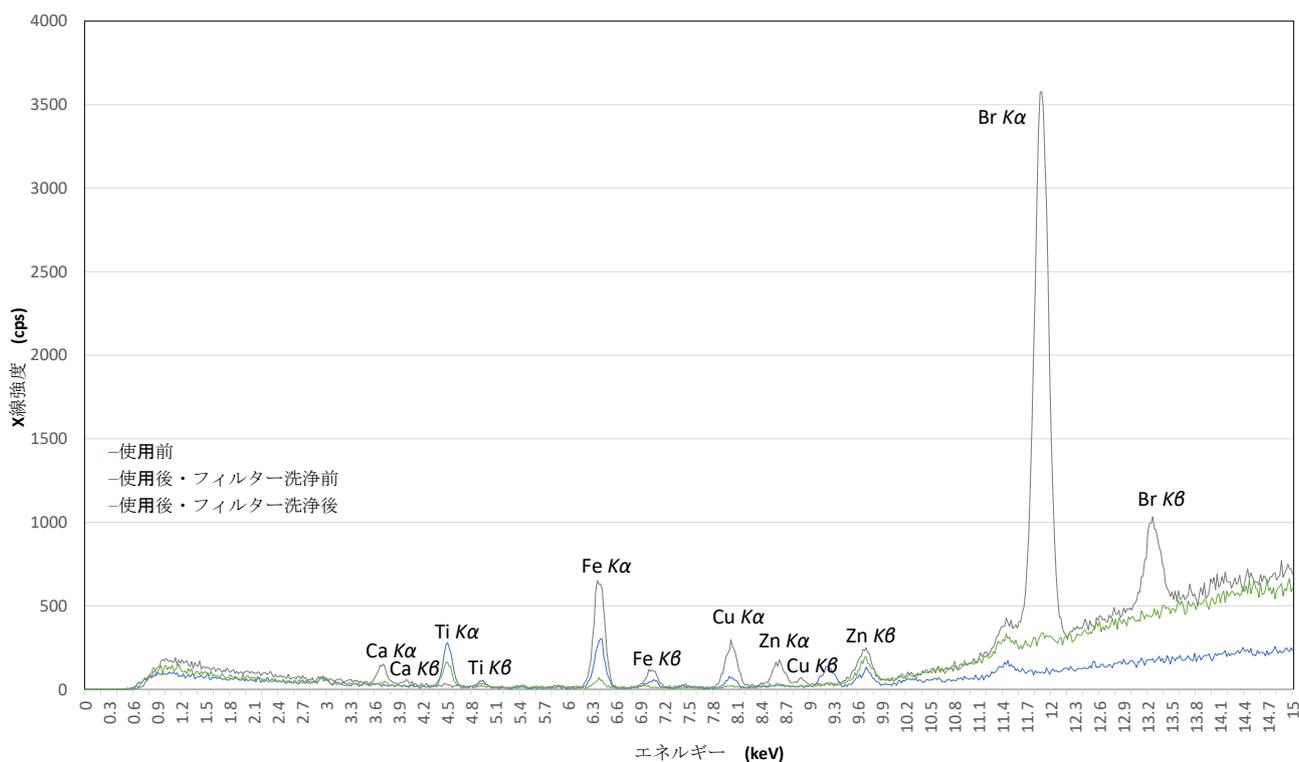


図 21 45 kV の管球電圧のスペクトルによる使用前フィルター、使用后フィルター洗浄前(添着活性炭)、使用后フィルター洗浄後の比較

5. 実証試験評価

(1) 技術の有効性

① 現地実証試験における処理後濃度及びFlux

43 日間の連続処理試験の結果、水環境中の要監視項目として暫定指針値が設定されている PFOS 及び PFOA 濃度の合算値について、試験開始初日から 6 日目までは、処理前は 1,140 ng/L～534 ng/L であったものが、処理後には不検出となったことから、PFOS 及び PFOA については処理後濃度 1 ng/L 未満とする目標を達成していたが、6 日目以降において、PFOS 及び PFOA の処理後濃度は段階的に上昇し、43 日目時点では、約 70%の除去率となった。また、Flux は、通水開始時の初期値としては 100 LMH としており、原水の積算処理量の推移から、15 日目までは、目標である 100 LMH と同程度で推移していた。こうしたことから、フィルター洗浄や活性炭再添着の頻度を検討していく必要がある等課題が認められた。

② 高濃度の模擬試験水における除去率

純水に PFAS 4 種 (PFOS、PFOA、PFHxS 及び 6:2FTS) を各 100,000 ng/L 添加した模擬試験水を用いた室内試験の結果、PFAS 4 種の除去率については、通水初期 (試験開始から積算処理量が 0.385 L 時点まで) は TOC が存在しない条件では 97.0～98.7%、共存する条件では 98.8～99.7%を示し、最大の除去率を示した PFOS においても目標である 99.99%以上は未達成となった。この結果から、複数種の PFAS が共存する場合には除去効率の低下が課題として考えられた。

また、除去率は積算処理量が増加するにつれて低下し、PFOA 及び PFHxS に対する除去率は PFOS 及び 6:2FTS に対する除去率と比較し早期に低下したことから、PFAS の分子種によって除去率の低下の傾向に差が認められた。

③ 本技術の吸着容量

模擬試験水を用いた室内試験の結果、吸着容量は TOC が存在しない条件では 58,000 µg/g、また、実環境を想定し 3.0 mg/L と TOC が共存する条件では 14,800 µg/g と低下したが、目標である 5,000 µg/g 以上を達成した。

(2) 技術の経済性

本技術の試験結果は、文献で報告がある従来技術 (※1) である粒状活性炭法に比べて、活性炭 1 kg 当たりの除去率 90%以上が維持された状態において処理が行えた水量 (m³) が推定で約 4 倍 (※2) となった。

浄化に係るコストについては、装置の製造・設置に係る費用等のインシヤルコストは考慮せず、装置の運転にかかる活性炭購入費、電気料金等を計上 (粉末活性炭の添着等の加工費、人件費等は計上していない。) したランニングコストは、1 m³処理あたりの単価は 13.7 円であった。今後、インシヤルコスト、人件費、耐用年数等のコストの算出が課題であると考えられる。

※1 Nakazawa Y, et al. Long-term removal of perfluoroalkyl substances via activated carbon process for general advanced treatment purposes. Water Research. 2023. Volume 245.

※2 従来技術において、活性炭かさ比重 0.3、空間速度 3.6 h⁻¹、処理日数 80 日と仮定。
ろ材体積：(1.0 (kg) /0.3) /1000 ≒ 0.0033 (m³)

従来技術における活性炭 1 kg 当たりの除去率 90%まで処理できる水量：

0.0033 (m³/kg) ×3.6 (h⁻¹) ×24 (h/日) ×80 (日) ≒ 23 (m³/kg)

本技術における活性炭 1 kg 当たりの除去率 90%まで処理できた水量：89.6 m³/kg

(3) 二酸化炭素排出量

表7に示す通り、1 m³処理する際の二酸化炭素排出量は 0.2 kg-CO₂/m³ となり、目標である 2 kg-CO₂/m³以下を達成した。

表7 本技術の二酸化炭素排出量

項目	仕様	使用量 30 m ³ 処理当たり	CO ₂ 排出係数	CO ₂ 排出量
活性炭	ヤシ殻炭	500 g	3.94 t-CO ₂ /t-AC	0.001970 t 30m ³ 処理当たり
電気	—	8.0 kWh 別現場(同一技術) データ引用	0.000488 t-CO ₂ /kWh	0.003953 t 30m ³ 処理当たり
合計	—	—	—	0.005923 t 30m ³ 処理当たり
1 m ³ 処理当たり の CO ₂ 排出量	—	—	—	0.2 kg/m ³

(4) 周辺環境に対する低負荷性

本技術において騒音を測定した結果、建屋内のポンプ駆動部の等価騒音レベル(Leq) (※)は 57.7 dB となり、技術目標であるポンプ駆動部で 60 dB 以下に適合していた。一方、作業範囲境界での評価は困難であった。

また、振動については、建屋内外問わず 25 dB 未満、最大でも 30 dB であり、技術目標である 45 dB 以下に適合していた。

※等価騒音レベル (Leq) : ある時間範囲について、変動する騒音レベルをエネルギー的な平均値として表したものの。

6. 検討会による評価

本実証における揚水及びフィルターと機能性粉体を用いた処理法による PFAS 地下水汚染の拡大防止技術検討調査は、浄化技術を現地で連続的な水質浄化を行い本技術の処理性能やその安定性等について検討することを目的に実施された。下記に実証試験の目標及び評価を示す。

評価項目		技術目標	結果概要
技術の有効性	処理の安定性	1) 現地実証試験にて、処理後濃度 1 ng/L 未満、Flux100 LMH 2) 高濃度模擬試験水で、除去率 99.99%以上	<p>1) 現地実証試験では、PFOS 及び PFOA の濃度の合算値において処理前は 1,140 ng/L～534 ng/L であったものが、処理後には不検出となったことから、PFOS 及び PFOA については処理後濃度 1 ng/L 未満とする目標を達成していたが、6 日目以降において、PFOS 及び PFOA の処理後濃度は段階的に上昇し、43 日目時点では、70%程度の除去率となった。こうしたことから、フィルター洗浄や活性炭再添着の頻度を検討していく必要がある等課題が認められた。</p> <p>2) (処理の安定性及び処理性能) PFAS 4 種 (PFOS、PFOA、PFHxS 及び 6:2FTS) の除去率については、通水初期 (試験開始から積算処理量が 0.385 L 時点まで) は TOC が存在しない条件では 97.0～98.7%、共存する条件では 98.8～99.7%を示し、最大の除去率を示した PFOS においても目標である 99.99%以上は未達成となった。この結果から、複数種の PFAS が共存する場合には除去効率の低下が課題として考えられた。</p> <p>1) 模擬試験水を用いた室内試験の結果、吸着容量は TOC が存在しない条件では 58,000 µg/g、また、実環境を想定し 3.0 mg/L と TOC が共存する条件では 14,800 µg/g と低下したが、目標である 5,000 µg/g 以上を達成した。</p>
	処理性能	1) 活性炭吸着容量 5,000 µg/g 以上 2) 高濃度模擬試験水で、10 秒間のろ過で除去率 99.99%以上	

<p>技術の 経済性</p>	<p>浄化に係る ランニング コスト</p>	<p>6円/m³以下 ※浄化に係るコストについては、装置の製造・設置に係る費用等のイニシャルコストは考慮せず、装置の運転にかかる活性炭購入費、電気料金等を計上（粉末活性炭の添着等の加工費、人件費等は計上していない。）</p>	<p>本技術の試験結果は、文献で報告がある従来技術である粒状活性炭法に比べて、活性炭1 kg当たりの除去率90%以上が維持された状態において処理が行えた水量（m³）が推定で約4倍となった。また、1 m³処理あたりの単価は13.7円であった。今後、人件費、耐用年数等のコストの算出が課題であると考えられる。</p>
<p>環境負 荷度</p>	<p>活性炭・電 気使用等による二酸化炭素排出量の削減</p>	<p>2 kg-CO₂/m³以下</p>	<p>CO₂排出量 0.2 kg-CO₂/m³ となると推計された。</p>
	<p>周辺環境に対する低負荷性</p>	<p>騒音：ポンプ駆動部で60 dB以下 作業範囲境界で40 dB以下 振動：45 dB以下</p>	<p>本技術において騒音を測定した結果、建屋内のポンプ駆動部の等価騒音レベル（Leq）（※）は57.7 dBとなり、技術目標であるポンプ駆動部で60 dB以下に適合していた。一方、作業範囲境界での評価は困難であった。また、振動については、建屋内外問わず25 dB未満、最大でも30 dBであり、技術目標である45 dB以下に適合していた。 ※等価騒音レベル（Leq）：ある時間範囲について、変動する騒音レベルをエネルギー的な平均値として表したものの。</p>