

PFAS処理技術の性能に関する試験 中間報告書

試験企業一覧

令和6年9月5日時点

No.	試験企業名	提供項目	試験名	試験内容	浄水処理方式等の種別				
					粒状活性炭	イオン交換樹脂	その他ろ材	その他技術	詳細
1	メタウォーター株式会社	試験場所	粒状活性炭およびイオン交換樹脂のPFAS除去性能評価	・カラム試験 ・振とう試験 ・RSSCT（高速小規模カラム試験） ・パイロット試験	○	○			粒状活性炭 イオン交換樹脂
2	ソニー知的財産サービス株式会社	試料水	珪殻由来の多孔質カーボン素材（トリポーラス）のPFAS除去性能試験	・パッチ吸着試験 ・RSSCT（高速小規模カラム試験） ・PFAS浄化装置実装実験			○		トリポーラス
3	株式会社クボタ	試料水	活性炭のPFAS除去性能評価試験	・RSSCT（高速小規模カラム試験）	○				粒状活性炭
4	三菱ケミカル・クリンスイ株式会社	試験場所	自社製品のPFAS除去性能試験	・通水試験				○	自社製品（浄水器）
5	株式会社川本製作所	試験場所	自社製品のPFAS除去性能試験	・通水試験				○	自社製品（浄水器）
6	株式会社ピー・オー・アイ技術研究所	試料水	焼結造粘土によるPFASの無害化	・PFAS無害化試験				○	浄化土
7	興和株式会社	試験場所	PFAS吸着剤DEXSORB®（Cyclopure社）のPFAS除去性能評価	・性能評価試験			○		PFAS吸着剤DEXSORB®
8	株式会社エンバイオ・エンジニアリング	試験場所	各帯水層のPFAS地下水濃度の把握を目的とした新たな地下水採水技術の手法	・PFASフリー採水器具を用いた水質調査 ・各スクリーン位置での濃度測定				○	採水方法の検証
9	三菱化工機株式会社	試料水	電気分解装置による地下水中のPFOS/PFOAの分解処理	・電気分解				○	電極分解
10	水道機工株式会社	試験場所	PFAS除去試験	・RSSCT（高速小規模カラム試験）	○	○	○		粒状活性炭 イオン交換樹脂 ペントナイト系吸着剤

※「その他」とは、中期的水質改善対策の検討における分類とする。

報告書あり

※本報告書は、試験者が自ら行った試験結果に関する報告書である。

粒状活性炭およびイオン交換樹脂の PFAS 除去性能評価

No. 1

メタウォーター株式会社

1. はじめに

有機フッ素化合物 (PFAS) に関して、国内での水道水源の PFAS 処理技術として評価事例¹⁾が多いのは、粒状活性炭 (GAC) である。一方、同じく吸着プロセスであるイオン交換樹脂 (IER) は、GAC に比べて空塔接触時間 (EBCT) が短いため必要な吸着材の容量を少なくでき、また吸着容量が大きく交換周期が長いこと、廃棄物量を削減できる。逆洗が不要なため、逆洗や排水処理の設備が不要でありメンテナンスが容易である等の長所がある。しかしながら、IER は海外で導入が進んでいるものの、国内での適用事例は少なく、評価方法も確立されていない。

そこで本試験では GAC の破過寿命予測に用いられる RSSCT (Rapid Small Scale Column Test) を IER に適用し、パイロット実験と合わせて PFAS の除去性評価を実施中である。

2. 実験方法

(1) 実験原水

三井水源地の原水 (地下水) を用いた。採水および水質検査は 2024 年 7 月 2 日から 1 回/週程度の頻度で実施しており、8 月 26 日までの期間の PFOS は 51~118ng/L、PFOA は

13~19ng/L、PFHxS は 39~62ng/L であった。

(2) RSSCT (迅速小規模カラム試験)

RSSCT は米国の AWWA 試験法 (ASTMD6586)²⁾で規格化されており、吸着材を粉砕し小粒径化することで、カラム試験を迅速化かつ小規模化し、吸着材の破過寿命を評価する試験である。RSSCT に供するカラムの設計にあたっては、粒子拡散係数が粒子サイズに依存せず、微量有機物の予測に適した CD 式 (Constant diffusivity) を用いた。実験装置のイメージを図 1 に示す。なお RSSCT で対象とした吸着材は、石炭系 (GAC1) 1 種類、イオン交換樹脂は 2 種類 (IER1、IER2) とし、7 月 25 日に採水した水を用いて実施した。

(3) パイロット実験

実設備を想定し、水道設計指針や吸着材メーカーの推奨値を参考にした実験条件を設定し、吸着材の充填高さは 1.5~2m とした。パイロット実験装置のフローを図 2 に示す。なおパイロット実験で対象とした吸着材は、石炭系 (GAC1) 1 種類、イオン交換樹脂は 3 種類 (IER1、IER2、IER3) とし、GAC1 の系列のみ逆洗を実施できるものとした。

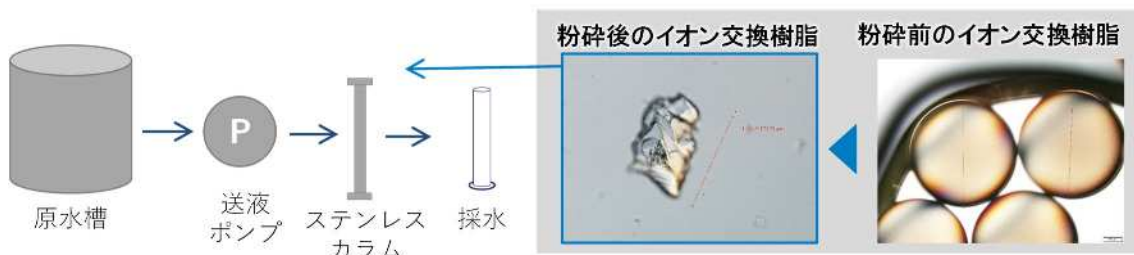


図 1 RSSCT 実験装置イメージ

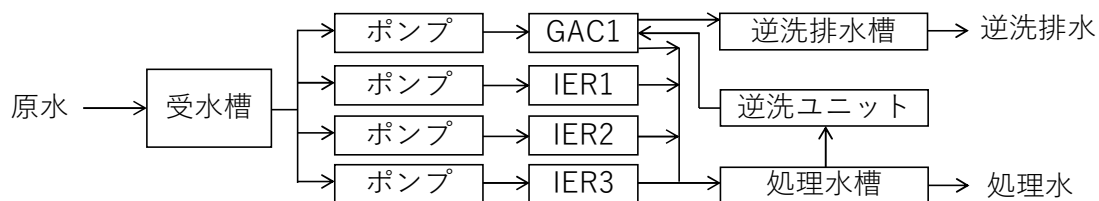


図 2 パイロット実験装置フロー

粒状活性炭およびイオン交換樹脂の PFAS 除去性能評価

No. 1

メタウォーター株式会社

(4) 分析

液体クロマトグラフ質量分析計 (Waters 製 Xevo TQ-S micro タンデム四重極質量分析計) による定量分析を行い、直鎖と分岐鎖の合計値で評価し定量下限は 1ng/L とした。

3. 実験結果

(1) RSSCT

RSSCT に用いた原水の PFOS は 67ng/L、PFOA は 17 ng/L、PFHxS は 55ng/L であった。縦軸を残存率 (処理水の PFAS 濃度 C /原水の PFAS 濃度 C_0)、横軸を RSSCT での通水倍率としたときの PFOS、PFOA および PFHxS の破過曲線を図 3~5 に示す。処理水中の PFAS 濃度が <1ng/L の場合、1ng/L として扱った。GAC の破過は 10 万 BV 程度であり、IER については 60 万 BV まで PFOS、PFOA、PFHxS はいずれも検出されなかった。

(2) パイロット

本稿作成時点 (8 月末) においてパイロット実験装置は約 2 か月程度運転しており、IER の系列は通水 1 週間後より損失水頭が安定し、その後横ばいである。GAC 系列の損失水頭は通水 1 か月間上昇傾向であったが、その後横ばいである。また処理水の PFOS、PFOA および PFHxS は、GAC および IER のいずれの系列からも検出されていない。

4. 今後の予定

今後はパイロット実験を継続し、今回得られた RSSCT の破過曲線と実際の破過曲線を比較し、RSSCT 破過曲線の補正係数を検証する予定である。補正係数のイメージを図 6 に示す。

【参考文献】

- 1) 福原ら, 令和 3 年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集, p. 220-221, 2022.
- 2) ASTM International, ASTM D6586-

03(2014) Standard Practice for the Prediction of Contaminant Adsorption On GAC In Aqueous Systems Using Rapid Small-Scale Column Tests, 2014.

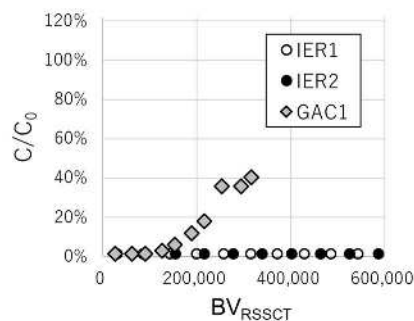


図 3 破過曲線 (PFOS)

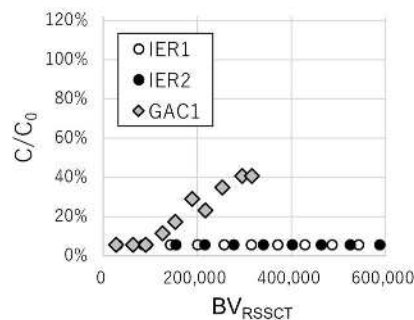


図 4 破過曲線 (PFOA)

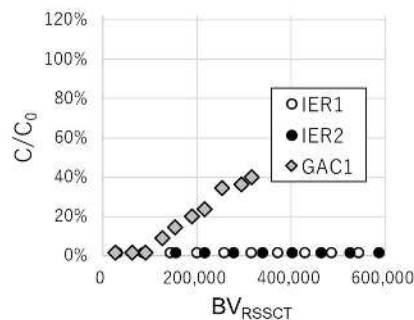


図 5 破過曲線 (PFHxS)

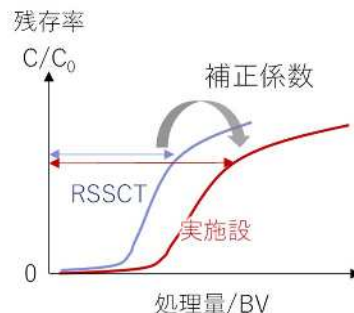


図 6 補正係数イメージ

籾殻由来の多孔質カーボン素材（トリポーラス）の PFAS 除去性能試験

No. 2

ソニー知的財産サービス株式会社

中間報告書（2024 年 9 月 5 日）

トリポーラスTMはソニーグループ株式会社が開発した米の籾殻由来の多孔質炭素材料である。マイクロ孔、メソ孔、マクロ孔の 3 つの領域にそれぞれ細孔を有するという特徴的な細孔構造により、従来型の活性炭とは異なる吸着特性を示す。PFAS に対する吸着特性に優れることもこれまでに確認されており^[1]、下記の通り、各務原市環境水中の PFAS 除去に関する実証試験を行った結果を報告する。

【試験名】

三井水源環境水を用いた PFAS バッチ吸着試験 1

【試験内容】

トリポーラスを用いた三井水源環境水中における PFAS のバッチ吸着試験を行った。また、従来型のヤシ殻系活性炭も同時に試験し、特性の比較を行った。

試験方法の概要を図 1 に示す。バッチ吸着試験とは、PFAS を含有する試験水と吸着材を一定比率で一定時間混合した後、試験水中に残留している PFAS 濃度を定量することにより吸着材の特性を評価する試験である。詳細な試験条件は以下の通りである。吸着材：表 1 のうち、トリポーラス A、従来活性炭 A

試験水：三井水源 No. 7 取水井より 24 年 1 月に採水。水質は表 2 の通り。

吸着材量：10 mg

試験液量：20 mL

吸着条件：室温で 1 時間（一般的な粉末活性炭処理の際の接触時間と同等程度）

【試験結果】

図 2 に結果を示す。水浄化用の一般的な

ヤシ殻系活性炭と比較し、トリポーラスが短時間で高い除去効果を示すことが確認された。

【試験名】

三井水源環境水を用いた PFAS バッチ吸着試験 2

【試験内容】

続いて、長時間吸着条件（吸着平衡条件）における除去特性の評価を行った。試験は前述のバッチ吸着試験 1 と同様の方法で行った。詳細な条件は以下の通りである。

吸着材：表 1 のうち、トリポーラス A、トリポーラス B、従来活性炭 B、従来活性炭 C
試験水：三井水源 No. 9 取水井より 24 年 5 月に採水。水質は表 2 の通り。

吸着材量：5 mg

試験液量：100 mL

吸着条件：室温で 48 時間

【試験結果】

図 3 に結果を示す。吸着時間が長時間の場合においても、PFAS 除去用に用いられている石炭系活性炭と比較し、トリポーラスが優れた特性を示すことが確認された。

【試験名】

三井水源環境水を用いた迅速小規模カラム試験

【試験内容】

浄水場においては、主に粒状活性炭を吸着塔に充填し、通水形式で用いることが多い。そこで、通水形式におけるトリポーラスの PFAS 除去特性の確認を行うため、迅速小規模カラム試験（以下、RSSCT）を実施した。

RSSCT は実際に運用を想定する施設の条件を元に、ラボスケールの小規模カラムで所定の条件で試験を行うことで、実施施設の寿命特性等を予測できる試験である。

粉殻由来の多孔質カーボン素材（トリポーラス）の PFAS 除去性能試験

ソニー知的財産サービス株式会社

今回は、各務原市の現行の運用条件（曝気槽への粒状活性炭設置）を元に、RSSCT による寿命予測を行った。試験概要、およびその条件を図 4 に示す。試験水は、バッチ吸着試験 2 と同じく、三井水源 No. 9 取水井より採水（24 年 5 月）した環境水を用いた。吸着材は表 1 に記載するトリポーラス A、従来活性炭 B、従来活性炭 C を粗粉碎した後、目開き 0.090 mm および 0.125 mm のふるいを用いて分級し、平均粒径を 0.107 mm に調整したものを用いた。同体積のカラムに充填した際の吸着材重量は、トリポーラス A が 171 mg、従来活性炭 B が 246 mg、従来活性炭 C が 260 mg となり、トリポーラスはかさ密度が大きく異なっている。PFAS の分析対象は、PFBS、PFHxS、PFOS、PFHxA、PFOA、PFNA の 6 種とした。

本 RSSCT での空間速度は、実施設での空間速度 $SV=24 \text{ h}^{-1}$ をもとに $SV=2096 \text{ h}^{-1}$ とした。同市曝気槽の空間速度は一般的な浄水場の粒状活性炭処理における空間速度よりも数倍～10 倍ほど大きいため、本 RSSCT における空間速度も一般的な条件より大きいことを留意されたい。

【試験結果】

図 5 に各 PFAS の破過特性を示す。石炭系活性炭と比較し、トリポーラスは以下の傾向が見られた。

PFOS、PFNA：通水初期～通水倍率 30 万程度までにおいて、大きく優れる

PFHxS、PFOA：通水初期～通水倍率 20 万程度までにおいて、優れる

PFBS、PFHxA：およそ同等の特性を示す

活性炭系素材においては、PFAS のオクタノール/水分配係数（疎水性の指標）が大きいほど吸着しやすいことが知られており、

トリポーラスも同様の傾向を示すが、よりその傾向が強いことがこの結果から示唆される。

図 6 は同市曝気槽での運用時間に換算した際の、PFOS+PFOA の破過曲線を示している。仮に今回の環境水を用い、PFOS+PFOA の濃度の和が 50 ng/L に到達した時点をも寿命とした際、石炭系活性炭がそれぞれ約 2.8 か月、約 3.8 か月であるのに対し、トリポーラスは約 8.9 か月と極めて長寿命を示した。以上のことから、通水形式での運用においても、トリポーラスが優れた除去特性を示すことが確認された。

【試験名】

PFAS 浄化装置へのトリポーラスの実装試験

【試験者】

ソニー知的財産サービス株式会社、株式会社流機エンジニアリング

【試験内容】

PFAS 浄化装置として実績のある流機エンジニアリング製 ECO クリーン LFP のテスト装置（実機の原理を利用した室内テスト機）を用いた実証実験を行っている。

ECO クリーン LFP は粉末活性炭を添着したプリーツフィルターに PFAS 試料水を通水することで効率的に PFAS 除去が可能な装置である。本装置ではフィルターへの粉末活性炭の添着、および使用後の排出が自動化されているため、ハンドリング性が悪いという粉末活性炭の課題の解決、および人的コスト低減に貢献する装置となっている。

現在、三井水源 No. 7 取水井から 24 年 8 月に採水した環境水を用い、トリポーラスとヤシ殻系活性炭の浄化特性の比較評価を実施している（24 年 9 月末に完了予定）。

籾殻由来の多孔質カーボン素材（トリポーラス）の PFAS 除去性能試験

No. 2

ソニー知的財産サービス株式会社

【試験結果】

試験実施中。

ポーラスは更に長い寿命を示し、交換や廃棄コストの低減に更に大きく貢献することが期待される。

【まとめ】

今回、トリポーラスによる各務原市の環境水中の PFAS 除去実証試験を行った。バッチ吸着試験 1 の結果から、短時間での PFAS 除去特性が高いことが示された。この結果は、トリポーラスが持つ特徴的な階層的な細孔構造に起因すると考えられる。本試験は一般的に浄水の上流側の工程で用いられる粉末活性炭の接触時間と同程度の時間軸での評価であり、このような使い方への適性も高いことが示唆される。また、バッチ吸着試験 2 の結果から、PFAS 向けに用いられている石炭系活性炭と比較して吸着平衡条件における吸着量も大きいことが確認された。トリポーラスを用いて PFAS 除去をする場合、石炭系活性炭と比較してより少量で同等濃度まで低減できること、同添加量ではより濃度を低減できると予想される。

さらに同市の曝気槽での使用を想定した RSSCT の結果から、トリポーラスは通水形式での使用においても高い効果を発揮することが示された。国内の暫定目標値の対象物質として指定されている PFOS と PFOA の合算濃度が 50 ng/L に到達する時点を仮に寿命とすると、石炭系活性炭と比較して最大 3 倍程度の寿命を示すことが確認された。したがって、同施設でトリポーラスを使用する場合、交換頻度の低減（交換コストの低減）や廃棄物量の低減（廃棄コストの低減）に貢献することが期待される。一般的な国内の浄水場においては、同施設よりも更に小さな空間速度で処理することが知られている。そのような条件で使用した場合、トリ

【参考文献】

- [1] N. Yamashita et al., Biochar from paddy field - A solution to reduce PFAS pollution in the environment. *Chemosphere* **364**, 143073 (2024).

籾殻由来の多孔質カーボン素材（トリポーラス）の PFAS 除去性能試験

No. 2

ソニー知的財産サービス株式会社

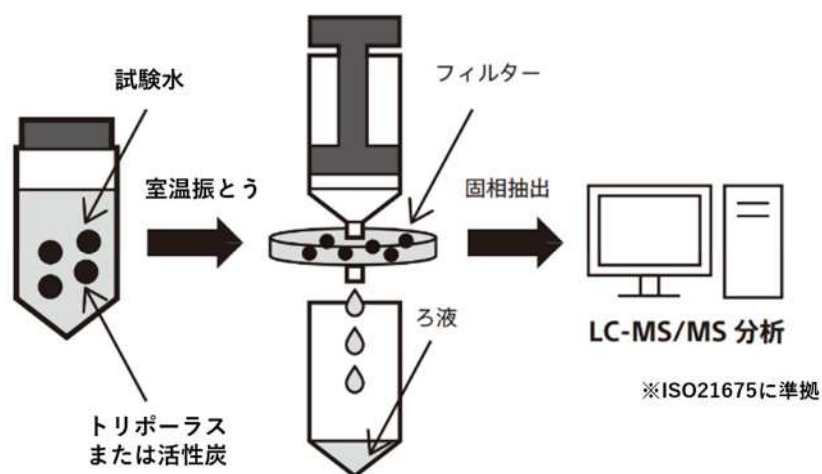


図 1 バッチ吸着試験の概要

表 1 実証実験に使用した吸着材の物性

吸着材	原料	粒径 (mm)	比表面積* (m ² /g)	細孔容積 (cm ³ /g)*		
				<2 nm	2-50 nm	50-200 nm
トリポーラスA	米の籾殻	0.2-0.5	876	0.32	0.43	0.04
トリポーラスB	米の籾殻	0.5-1.7	973	0.40	0.20	0.04
従来活性炭A	ヤシ殻	0.2-0.5	1150	0.50	0.08	0.01
従来活性炭B	石炭	0.4-1.7	979	0.43	0.15	0.02
従来活性炭C	石炭	0.5-1.7	1067	0.52	0.18	0.01

*窒素吸着法による

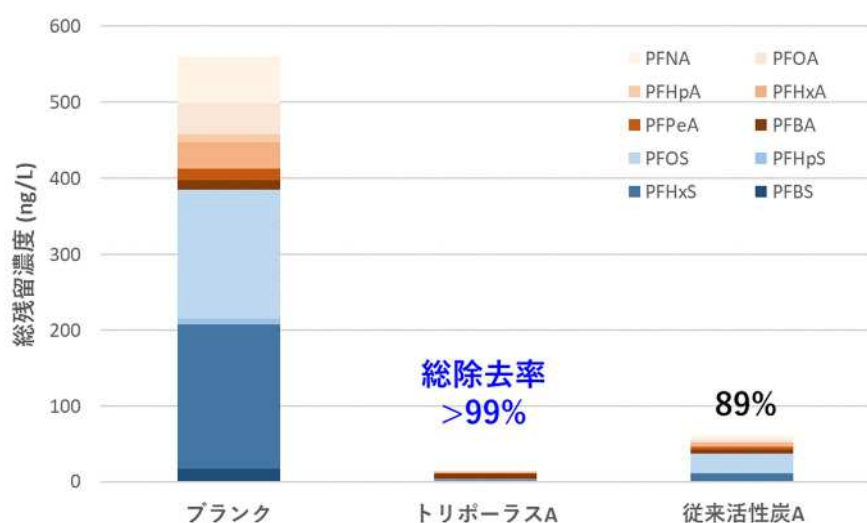
粉殻由来の多孔質カーボン素材（トリポラス）の PFAS 除去性能試験

No. 2

ソニー知的財産サービス株式会社

表 2 試験水の水質

水質項目	単位	No.7取水井 (24年1月)	No.9取水井 (24年5月)
pH	[-]	7.5	6.6
電気伝導率	[mS/m]	15	13.8
陰イオン界面活性剤	[mg/L]	<0.02	<0.02
全有機炭素	[mg/L]	<0.3	<0.2
PFBS	[ng/L]	18	25
PFHxS	[ng/L]	190	289
PFOS	[ng/L]	180	365
PFHxA	[ng/L]	35	49
PFOA	[ng/L]	41	66
PFNA	[ng/L]	61	70



※ブランクは吸着材なしで同様の操作を行った場合の濃度を示す

図 2 バッチ吸着試験 1 の結果

No. 2

粉殻由来の多孔質カーボン素材（トリポーラス）の PFAS 除去性能試験

ソニー知的財産サービス株式会社

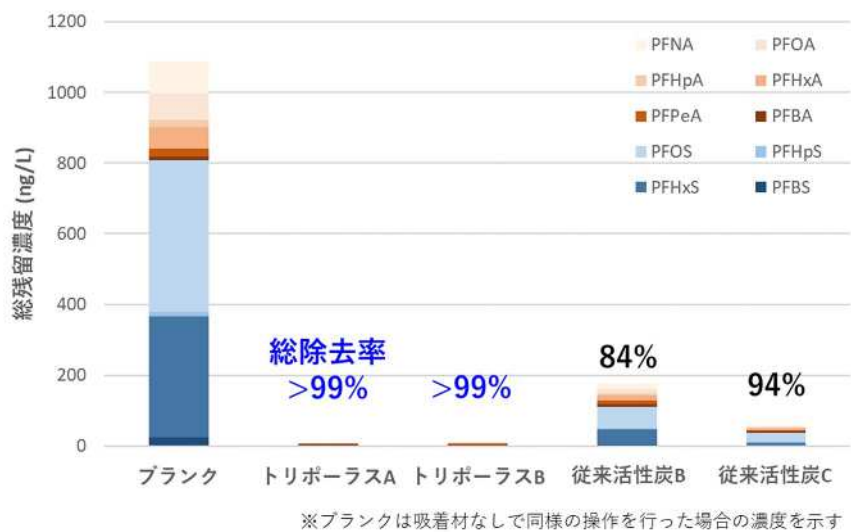


図 3 バッチ吸着試験 2 の結果

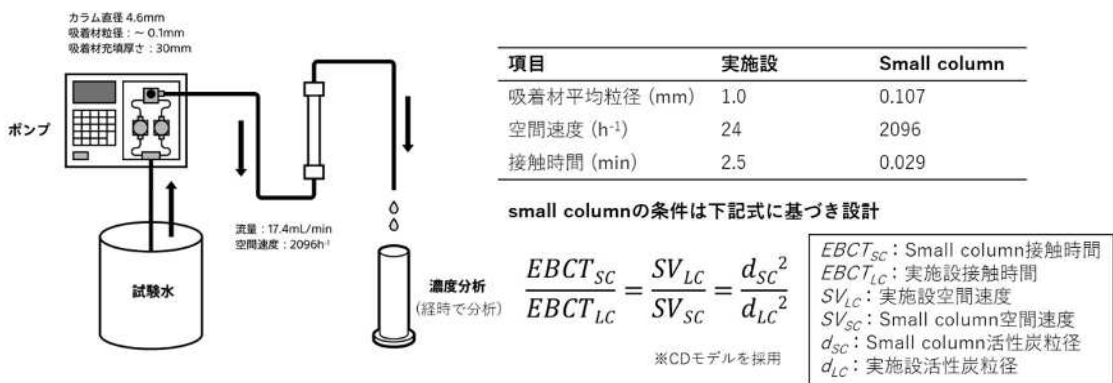


図 4 各務原市の曝気槽を想定した RSSCT の概要

粉殻由来の多孔質カーボン素材（トリポーラス）の PFAS 除去性能試験

No. 2

ソニー知的財産サービス株式会社

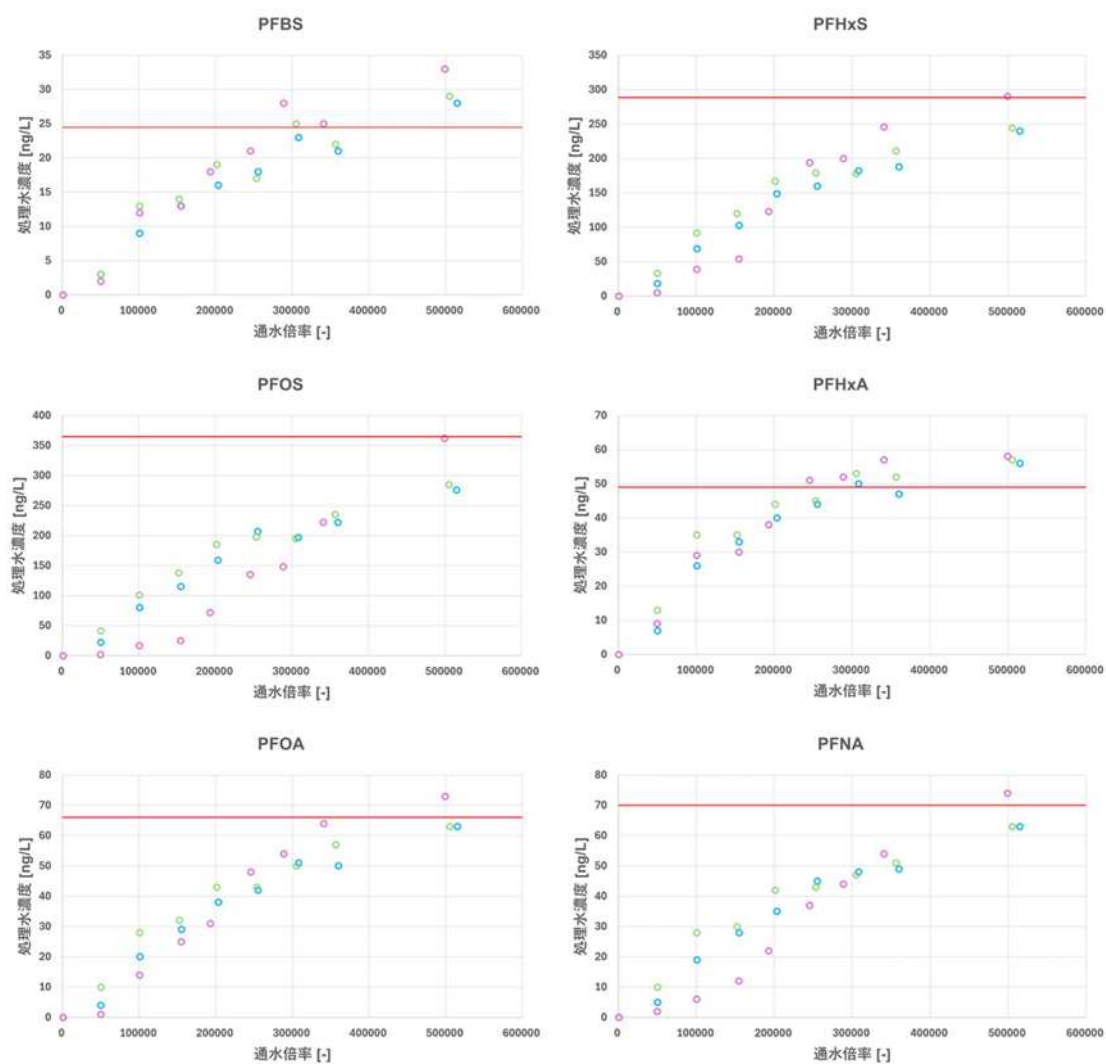


図 5 各務原市の曝気槽を想定した RSSCT の結果（通水倍率 vs 濃度）

○ トリポーラス A、○ 従来活性炭 B、○ 従来活性炭 C、— 初期濃度

粉殻由来の多孔質カーボン素材（トリポーラス）の PFAS 除去性能試験

No. 2

ソニー知的財産サービス株式会社

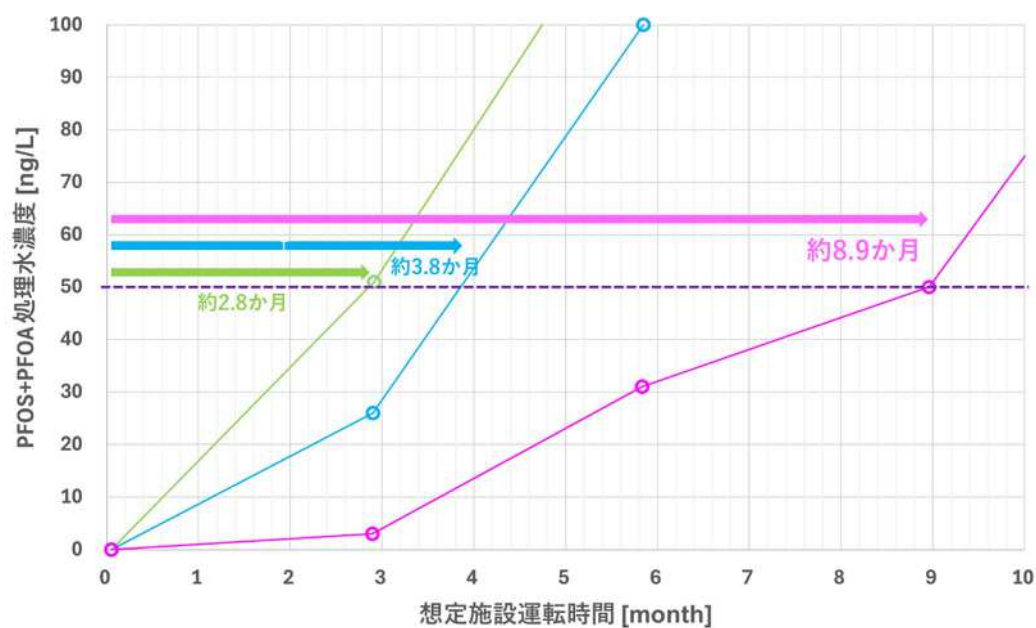


図 6 各務原市の曝気槽での使用で想定される各材料の寿命予測

○ トリポーラス A、○ 従来活性炭 B、○ 従来活性炭 C

活性炭の PFAS 除去性能評価試験

No. 3

株式会社クボタ

【試験内容】

1. 目的

粒状活性炭による PFAS 除去に関して、従来の JWWA 規格適合品（従来炭）と PFAS 除去性を高めるためにメソ孔（2～50nm）を発達させた活性炭（PFAS 用炭）との比較および交換寿命の推定を行う。

2. 試験方法

粒状活性炭処理の加速試験として知られている RSSCT (rapid small-scale column test) では、小カラムとフルスケール吸着塔との間に下記の関係があるとされている¹⁾。

$$EBCT_{sc}/EBCT_{lc} = (R_{sc}/R_{lc})^2 = t_{sc}/t_{lc}$$

EBCT_{sc}: 小カラムの空塔接触時間

EBCT_{lc}: フルスケール吸着塔の空塔接触時間

R_{sc}: 小カラムの活性炭粒子半径

R_{lc}: フルスケール吸着塔の活性炭粒子半径

t_{sc}: 小カラムの経過時間

t_{lc}: フルスケール吸着塔の経過時間

RSSCT 試験装置の概要を図 1 に示す。ピンミルで粉砕した供試活性炭を篩分けし（篩目開き 178～250μm）、微粉炭を洗浄除去してカラムに充填した。カラム閉塞防止のため、プレフィルターでろ過した三井水源池原水を HPLC 用送液ユニットでカラムへ連続通水した。

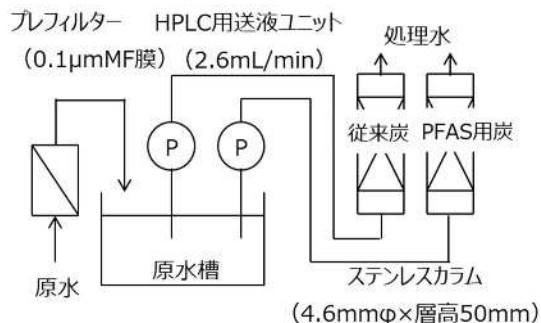


図 1 RSSCT 試験装置の概要

【試験結果】

1) 各 PFAS の除去性

通水倍率（BV＝累積通水量/活性炭充填量）に対する各 PFAS 処理水濃度の経時変化を図 2 に示す。BV=0 の点は原水濃度である。

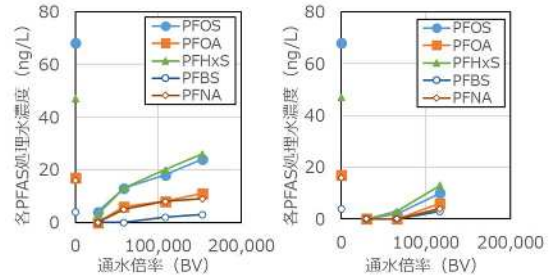


図 2 各 PFAS 処理水濃度の経時変化
（左：従来炭、右：PFAS 用炭）

2) 推定交換寿命

応急対応設備では安全を見て約 4 ヶ月周期で計画的に交換されており、浄水濃度平均は 17.4ng/L（2024/8/26 まで）²⁾である。処理目標値を 10ng/L に設定し、実施設通水日数に換算した PFOS+PFOA 濃度を図 3 に示す。確度未検証だが、推定交換寿命は従来炭で約 1 年弱、PFAS 用炭で約 2 年となった。



図 3 供試活性炭の推定交換寿命

【まとめ】

粒状活性炭処理施設での推定交換寿命と PFAS 用炭の有効性を示した。処理影響因子についても今後検討する予定。

1) 米国 ASTM 規格 D6586-03 (2021)

2) 各務原市モニタリング調査結果から算出

浄水器の PFAS 低減能力確認 三菱ケミカル・クリンスイ株式会社

No. 4

【試験内容】

岐阜県各務原市における, PFAS (有機フッ素化合物) 処理技術などの技術向上および情報蓄積を図り, 今後の安定的な施設計画に役立てることを目的とした「PFAS 処理技術の性能に関する試験企業の募集」事業により, 試料水および試験場所の提供をうけ, 試料水中の PFAS の分析と, 一般家庭や業務用として用いられる浄水器の低減能力の確認を行った。

示のろ過流量を維持する方法により連続して通水し (図 1), 浄水器の処理前後の PFAS の濃度を分析することにより, 低減能力の確認を行った。

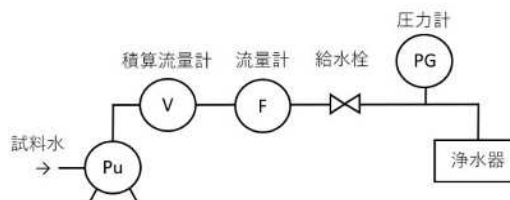


図 1 通水の方法

A) 試料水の提供 (短期性能試験)

三井水源地の試料水 (原水: 地下水) について, 下 7 種類の PFAS の分析を行った。

- ① PFOS (ペルフルオロオクタンスルホン酸)
- ② PFOA (ペルフルオロオクタン酸)
- ③ PFHpA (ペルフルオロヘプタン酸)
- ④ PFHxS (ペルフルオロヘキサンスルホン酸)
- ⑤ PFNA (ペルフルオロノナン酸)
- ⑥ PFBS (ペルフルオロブタンスルホン酸)
- ⑦ PFDA (ペルフルオロデカン酸)

分析は, 水道法第 20 条登録水質検査機関 第 166 号 三菱ケミカルアクア・ソリューションズ株式会社にて, 以下の条件により実施した。

分析法: LC/MS/MS 直接分析法

前処理: 検水にメタノールを添加し,
50%メタノール溶液とする

検水量: 30ml

浄水器は, ポリエチレン製中空糸膜と粒状活性炭と不織布とで構成される MP02-4 と, 粒状活性炭と繊維状活性炭と不織布とで構成される MP02-3, 及び, MP02-3 の活性炭種類を変更した MP02-3 改良品の合計 3 種類を使用した (図 2)。



図 2 浄水器 MP02

分析は, 水道水の水質管理目標設定項目である PFOS 及び PFOA と, 要検討項目である PFHxS の 3 物質について行った。

B) 試験所の提供 (中期性能試験)

三井水源地 No. 7 取水所 (試験水: 三井水源地導水管) に, 三菱ケミカル・クリンスイ株式会社の浄水器を設置して, 浄水器の表

浄水器の PFAS 低減能力確認

三菱ケミカル・クリンスイ株式会社

No. 4

表 1 PFAS分析結果

試料水の採取場所	採取日	濃度 ng/L						
		PFOS	PFOA	PFHpA	PFHxS	PFNA	PFBS	PFDA
三井水源地 No.9取水ポンプ場（原水）	2024/4/15	365	66.2	15.3	264	80.4	23.8	<2
三井水源地 原水集合（処理前）	2024/4/15	41.2	14.6	5.7	37.6	12.5	2.9	<2
三井水源地 浄水（処理後）	2024/4/15	7.9	2.9	<2	7.2	2.4	<2	<2
三井水源地 No.7取水ポンプ場（原水）	2024/5/20	101	19.8	4.4	72.8	24.3	7.7	<2

【試験結果】

A) 試料水の提供（短期性能試験）

4つの試料水の分析結果を表1に示す。

水道水の結果、PFOS及びPFOA、PFHxSを含む6種類のPFASが検出された。

B) 試験所の提供（中期性能試験）

浄水器 MP02-4 を、表示ろ過流量 8 L/min 一定で通水した試験結果を表2に示す。積算通水量 57,487 L 時点の浄水器処理後水の PFAS 濃度は、水道水の水質管理目標値（暫定目標値：PFOS と PFOA の合算で 50 ng/L 以下）を満たしていた。

表 2 MP02-4 処理後水の PFAS 濃度

積算 通水量 (L)	浄水器処理後水のPFAS濃度 (ng/L)		
	PFOS	PFOA	PFHxS
78	<0.4	<0.4	<0.4
57,487	6.1	5.1	6.5
157,677	51.0	16.6	43.8

次に、浄水器 MP02-3 及び、搭載している活性炭の種類を変更した MP02-3 改良品を、表示ろ過流量 10 L/min 一定で通水した試験結果を図3に示す。

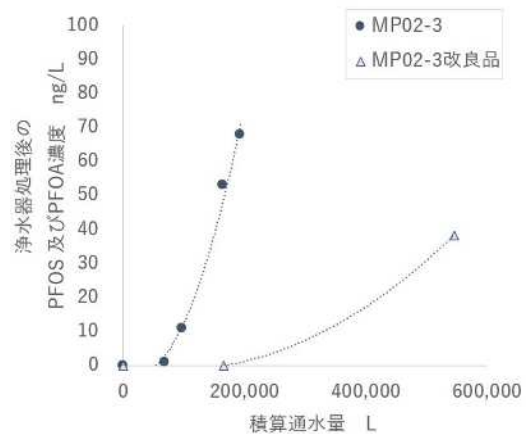


図3 MP02-3 及び MP02-3 改良品の
処理後水の PFAS 濃度推移

【まとめ】

試料水の分析により、6種類のPFASが検出された。活性炭を用いてPFOS及びPFOAを浄水処理する場合、その他のPFASが競合物質となり、低減能力が低下する可能性がある。

また、活性炭は、種類によりPFAS低減能力が異なり、目的に適した活性炭（浄水器）を選択することが重要となる。

例えば、MP02-3は、原水のPFOS及びPFOAの濃度合計が約120 ng/Lの場合、図3より積算通水量150,000 Lまでは暫定目標値の50 ng/L以下と内挿され、カートリッジ交換時期の目安となる。

自社浄水処理製品の PFAS 除去性能試験 株式会社川本製作所

No. 5

【試験内容】

1) 目的

当社水処理機器の PFAS に対する除去性能(処理能力)の確認試験を実施する。

また、試験結果を共有し、水道末端設備における PFAS 除去方法の選択肢を広げる。

2) 試験概要

試験日：2024 年 5 月 20 日(月) 9:30～15:30

試験場所：三井水源地 No. 9 取水井ポンプ室

試験水：三井水源地導水管（原水集合）

測定項目：PFOS 及び PFOA、PFOS、PFOA

試験機：

ケース 1. 成形活性炭浄水器(MRK2)

ケース 2. 粒状活性炭ろ過槽(MAC3)

ケース 3. 陽イオン交換樹脂ろ過槽(MAE)

通水圧力：約 0.275 MPa

ろ過流量：約 42 L/min

総使用水量：約 4.2 m³(42 L/min×100 min)

3) 手順および条件

本試験の概略図を、図 1 に示した。また、各試験機の外形図を、図 2 に示し、試験風景を写真 1～2 に示した。

各試験機に 2) の条件のもと原水(地下水)を 30 分間通水させ、処理水として採水した。

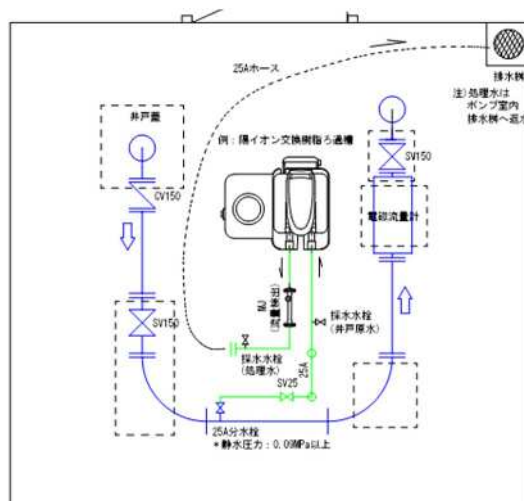


図 1 概略図

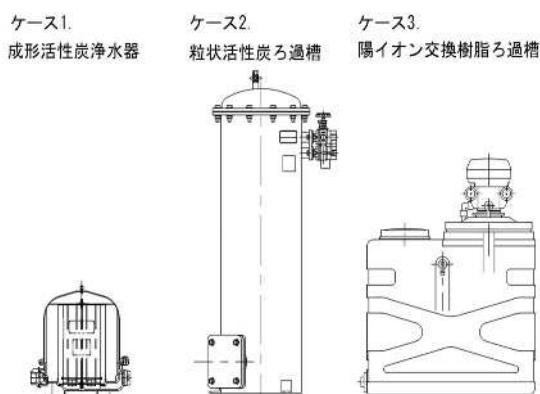


図 2 試験機外形図

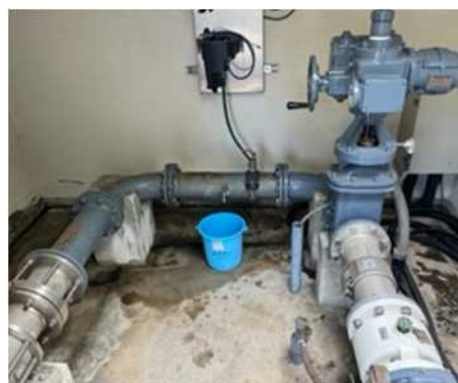


写真 1 三井 No. 9 号井戸ポンプ室

自社浄水処理製品の PFAS 除去性能試験

No. 5

株式会社川本製作所



写真 2 試験風景（導水管→試験機通水）

【試験結果】

水質検査結果を、表 1 に示す。

表 1-1 水質検査結果 (PFOS 及び PFOA)

No	試料名	PFOS及びPFOA
1	成形活性炭浄水器 (MRK2)処理水	4ng/L
2	粒状活性炭ろ過槽 (MAC3)処理水	4ng/L未満
3	陽イオン交換樹脂ろ過槽 (MAE)処理水	162ng/L
4	原水	165ng/L

表 1-2 水質検査結果 (PFOS)

No	試料名	PFOS
1	成形活性炭浄水器 (MRK2)処理水	4ng/L
2	粒状活性炭ろ過槽 (MAC3)処理水	2ng/L未満
3	陽イオン交換樹脂ろ過槽 (MAE)処理水	130ng/L
4	原水	131ng/L

表 1-3 水質検査結果 (PFOA)

No	試料名	PFOA
1	成形活性炭浄水器 (MRK2)処理水	2ng/L未満
2	粒状活性炭ろ過槽 (MAC3)処理水	2ng/L未満
3	陽イオン交換樹脂ろ過槽 (MAE)処理水	32ng/L
4	原水	34ng/L

【まとめ】

試験結果より、ろ過材に活性炭を用いた試験機において、PFOS 及び PFOA の暫定目標値 (50ng/L) 以下まで除去可能であることを確認した。このことから、一般家庭用 (井戸水用) 向け浄水器 MRK2 のろ過材である成形活性炭、設備向け活性炭ろ過槽 MAC3 のろ過材である粒状活性炭を用いることで PFAS を除去可能と示唆された。

一方、一般的に PFAS 除去能力を有しているとされる陽イオン交換樹脂では、PFAS は除去されていなかった。このことからイオン交換樹脂の種類 (置換基) により除去可否が決まるものと推定される。イオン交換樹脂によるろ過は、ろ過材の選定が今後の課題となる。またイオン交換樹脂のろ過は再生時、高濃度の PFAS の排出が予想され、イオン交換樹脂の回収、または、再生時の排水の処理が課題として大きく残ると推測される。

よって、今後は、活性炭を用いたろ過装置による PFAS の除去機構の構築に向けた計画を策定していく。各活性炭による PFAS 総除去量測定においても、実用にあたり、交換周期の把握のため、長期間の試験による追加検証を検討する。

焼結造粒粘土による PFAS 無害化試験

No. 6

株式会社ピー・オー・アイ技術研究所

中間報告書 (2024. 9. 5)

【試験内容】

目的 : PFAS の水処理での完全無害化
概略図 : 別紙システム図のとおり
概要 : PFAS 試料水に世界特許取得の
焼結造粒粘土(浄化土)を入れて
太陽光(紫外線)を照射する。
使用材 : トレー、浄化土、紫外線灯
条件 : 太陽光の照射(紫外線灯の照射)
実施場所 : 有限会社ソルチ本社
測定項目 : PFOS 直鎖体と分岐鎖体、PFOA
直鎖体と分岐鎖体
必要水量 : 20 リットル×2 本

【まとめ】

今回の試験結果は中間時点ではあるが、
活性炭等による吸着後の焼却処分なしの焼
結造粒粘土(浄化土 TC-100 及び SSP-100)
による環境に配慮した安全な水処理だけで
PFOS・PFOA の処理ができることを実証で
きた。

今回の試験は、1 日 4 時間の照射での中
間結果であり、最終の報告では全ての項目
において、PFOS 及び PFOA の合計での暫定
基準値 50ng/L 以下になると確信する。

以上

【試験結果】地下水原水と SSP-100(浄化
土の粒度の細かいもの)は、以下に示す。

	原水	処理後
PFOS (C8) (直鎖及び 分岐鎖)	380ng/L	58ng/L
PFOA (C8) (直鎖及び 分岐鎖)	66ng/L	31ng/L
PFOS 及び PFOA(直鎖 及び分岐鎖)	450ng/L	89ng/L
PFOS (C8) (直鎖のみ)	240ng/L	33ng/L
PFOA (C8) (直鎖のみ)	59ng/L	29ng/L

★PFOS・PFOA含有汚染水の無害化概略図

作成(株)ピー・オー・アイ技術研究所

● 有限会社ソルチ・特許:第7038440号の焼結造粒粘土(浄化土SGC TC-100)

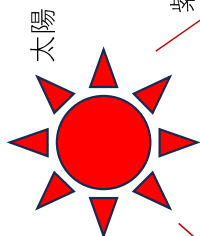
■ 紫外線灯(紫外線灯利用で24時間・365日連続処理が可能です)

・焼却処分ではなく浄化土による分解システムです

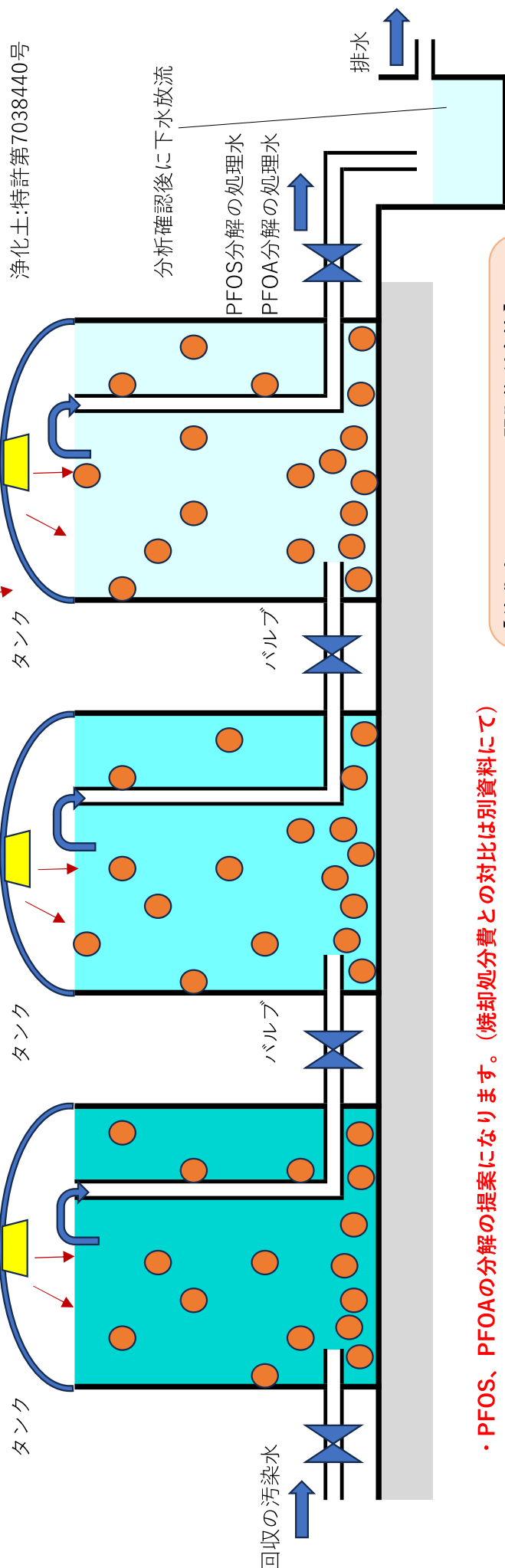
・タンク内に上記の浄化土を水量の30%程度入れて紫外線にてPFOSを分解処理

・太陽光(紫外線)が期待できない夜間等は紫外線灯にて分解処理する

(試験では1日4時間の紫外線をあてて、1週間で90%のPFOSが分解)



紫外線



【浄化土SGC TC-100の開発権利会社】

有限会社ソルチ

【提案社】

株式会社ピー・オー・アイ技術研究所

・PFOS、PFOAの分解の提案になります。(焼却処分費との対比は別資料にて)

・回収の汚染水量に合わせてタンクの容量、数量を決定します。

・各タンクは、オーバーフロー方式を採用しています。

・処理水は最終槽にて分析確認後に下水放流します。

・紫外線灯により24時間365日の処理が可能です。

・浄化土は農作地にも使用でき安全性も実証済みです。



各帯水層の PFAS 地下水濃度の把握を目的とした新たな地下水採水技術の手法

株式会社エンバイオ・エンジニアリング

【試験内容】

- (1) PFAS フリーの採水器具を使用して、各スクリーンの設置深度にて、原水の PFOS・PFOA 濃度を測定し、定期的実施している検査結果と比較する。



図 1. 使用ポンプ（メガモンスーンポンプ）

- (2) 各スクリーン位置での PFOS・PFOA 濃度を測定し、上部帯水層と下部帯水層の汚染状況を確認する。帯水層調査の方法は、QED 社製：スナップサンプラーを用いて限定的な帯水層深度の地下水才析を実施する。

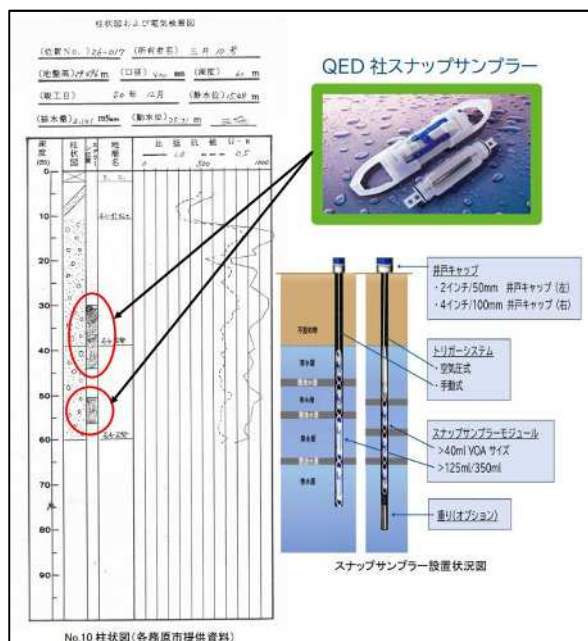


図 2. スナップサンプラーと設置位置

【試験場所】

三井水源地 10 号取水井戸

【試験結果】

試験結果を次に示す。

表 1. 試験結果

地下水モニタリングの実施内容

評価対象	評価基準	地点	採水・分析時期
地下水	PFOS+PFOA	No.10 号取水井戸	・10 号井戸ポンプ撤去前 ・PFAS フリーポンプ（メガモンスーンポンプ）による揚水時 ・QED 社製スナップサンプラーによる採水（上下スクリーン位置）

地下水モニタリングの分析結果

評価対象	単位	帯水層位置	6月3日採水 (井戸ポンプ撤去前)	6月4日採水 (PFAS フリーポンプ)	6月10日採水 (スナップサンプラー)
ペルフルオロオクタン酸 (PFOS)	ng/L	上部	240	170	220
		下部		250	200
ペルフルオロオクタン酸 (PFOA)	ng/L	上部	34	29	31
		下部		33	35

なお、各務原市が定期的実施している No. 10 号取水井戸の PFAS 濃度は以下となる。

- ・令和 3 年 5 月 : 130ng/L
- ・令和 4 年 4 月 : 160ng/L
- ・令和 4 年 10 月 : 220ng/L
- ・令和 5 年 2 月 : 320ng/L
- ・令和 5 年 8 月 : 220ng/L
- ・令和 5 年 12 月 : 260ng/L

【まとめ】

(1) 考察

- ①各務原市が定期的実施している検査結果と相違ない
- ②PFAS フリーポンプ（メガモンスーンポンプ）と QED 社製：スナップサンプラーの採水器具の違いによる濃度の違いはない
- ③上部帯水層および下部帯水層に PFOS+PFOA 濃度の違いはない
- ④上記の結果にて、上部帯水層と下部帯水層は同様の汚染状況と判断されたが、今回の結果にて以下の状況が推察される
 - ・地表面から下部帯水層まで PFAS 汚染が広がっている
 - ・上部帯水層の透水性が高く下部帯水層スクリーン部での水の流れが止まっている
 - ・下部スクリーン部が閉塞しており地下水の流入が止まっている

(2) 今後の展望

今回の地下水濃度の結果が、スクリーン部の閉塞により地下水流入が止まっており、下部帯水層の PFAS 濃度の現状を反映できていない可能性があるため、他の水源井戸にて同様の試験を実施する事が望ましいと判断する。

電気分解装置による地下水中の PFOS/PFOA の分解処理

No. 9

三菱化工機株式会社

【試験内容】

(1) 目的

水中の PFOS/PFOA の処理は現時点で活性炭吸着法が一般的であるが PFOS/PFOA を吸着した活性炭の処理・処分が必要となる。このため電気分解によりフッ素イオンに分解することを目的とし、以下の確認、把握により最適処理条件を求める。

- ・ 電解物質濃度
- ・ 最適電流、電圧条件の把握
- ・ 処理時間

(2) 概要

電気分解は対象水中に電解物質がないと通電しないため、PFOS/PFOA 含有地下水の電気伝導度（以下、EC）を確認し、通電に必要な EC を確保するため、食塩を用いて塩化物イオン濃度（以降、 Cl^- ）を調整した。 Cl^- 濃度別に電気分解処理を行い、最適電流、電圧、処理時間を求めた。

(3) 装置概要

図 1 に装置概略図、図 2 に装置写真を示す。装置はアストム社製アシライザー EX3B からイオン交換膜、バイポーラ膜を取り外し、電気分解装置として使用する。表 1 にその仕様を示す。電極は陽極に白金、陰極にチタンを用い、電極液は Na_2SO_4 を用いた。

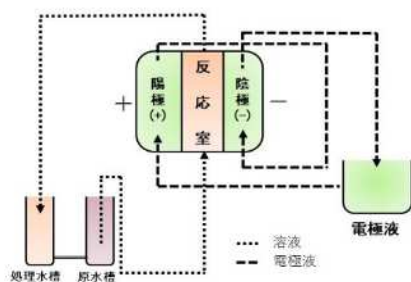


図 1 装置概略図



図 2 装置写真

表 1 装置仕様概要

型 式	アシライザー EX3B
機 能	バイポーラ膜電気透析装置
表 示	電流、電圧、塩液・酸液・アルカリ液電気伝導度、時間、積算電流
通電面積	55.0 cm ² /セル 10セル
有効面積	550 cm ²
電極材質	陽極：白金 陰極：チタン
通電条件	定電圧(3パターン選択可)・定電流
最大電流	4.4A
最大電圧	15V
膜対数	10
使用可能上限温度	40.0℃
処理能力	500ml~1000ml/回

(4) 実験条件

原水 Cl^- 濃度を 0.5%, 0.8%, 1.0%, 2.0% に調整し、それぞれ 1,000ml を電気分解装置にかけた。

(5) 測定項目

pH, 電気伝導度、PFOS/PFOA

(6) 実施場所

福岡大学資源循環・環境制御システム研究所（北九州市若松区向洋町 10 番地）

(7) PFOS/PFOA の分析方法

試料を水質基準における健水発 1010001 号の「別添 4 目標 31」に準じて前処理を行った。その後、LC-HRMS で定性評価を行った。同様に LC/MS/MS でも分析を行い有機フッ素化合物の定量値を算出した。

電気分解装置による地下水中の PFOS/PFOA の分解処理

No. 9

三菱化工機株式会社

【試験結果】

表 1 に処理対象水の分析結果を、表 2 に電気分解処理後の分析結果を示した。

表 1 のように処理対象水の PFOS/PFOA は 830ng/L であり、表 2 のように Cl^- 濃度 0.8% 以上で電気分解処理により PFOS/PFOA は完全分解された。

処理前より処理後の EC 値が上昇したのは PFOS/PFOA が電氣的に分解され、 F^- イオン等になったためと推察される。pH については処理前後で変化はなかった。処理時間は EC 値の変化がなくなるまでの時間とし、 Cl^- 濃度が 0.8% の時、117 分であった。電圧は EC が低い場合は比抵抗値が上昇し、電極を損傷させるため今回は EC 値 10mS/cm 以下は 9V、EC 値 10mS/cm 以上は 15V で稼働させた。なお Cl^- 未調整の原水も電気分解処理を行ったが初期 EC 値が 1.0 mS/L 以下 (0.33mS/cm) で比抵抗値が高く、電氣的処理が望めないため、EC 値のみ測定した。EC 値が通電後若干上昇しているのは EC 計に付着した物質等による影響で計測誤差の範囲と考えられる。

表1 処理対象水の分析結果

	PFOS/PFOA (ng/L)	F及びその化合物 (mg/L)	EC (mS/cm)	pH
原水	830	<0.05	0.33	7.3

【まとめ】

PFOS/PFOA 含有排水を電気分解装置にかけ電解処理を行った結果、 Cl^- 0.8% 以上で、検出限界濃度未満まで PFOS/PFOA を分解できることを確認した。

活性炭による処理では処理後の活性炭について別途処分が必要なことを考慮すると、電気分解により PFOS/PFOA が完全に分解されることから、電解処理は PFOS/PFOA を含む排水の処理に有効な処理方式であると言える。

今後の展望として、実規模レベルへの展開にあたっては、電解処理にかかる電力費、添加する塩濃度のランニングコストについて検討が必要なほか、処理後の塩水について濃度規制がある場合は処理水の膜分離などが必要となるため、塩水の処理にかかる費用についての検討も必要な点に注意する必要がある。この場合、図 1 の電気分解装置の反応室にイオン交換膜を入れた電気透析装置として稼働させることにより、添加した食塩を濃縮塩として回収することが可能であり、濃縮塩を塩濃度調整用に循環利用することにより添加量は削減可能となる。また電気透析装置では原水 Cl^- 濃度 0.8% を水道基準である 200mg/L 以下に脱塩することが可能である。

表2 電気分解後の分析結果

	PFOS/PFOA (ng/L)	F及びその化合物 (mg/L)	EC (mS/cm)		pH		処理時間 (min)	電圧 (V)
Cl^- 濃度	処理後		処理前	処理後	処理前	処理後		
原水	—	—	0.33	0.33	7.3	7.3	240	9
0.5%	270	<0.05	6.9	7.9	7.3	7.3	146	9
0.8%	<5	<0.05	10.8	16.5	7.3	7.3	117	15
1.0%	<5	<0.05	13.5	21.6	7.3	7.3	84	15
2.0%	<5	<0.05	25.3	44.2	7.3	7.3	58	15

PFAS 除去試験

No. 10

水道機工株式会社

中間報告書 2024. 9. 5

【試験内容】

1. 目的

弊社開発中の PFAS 処理技術を生かし、三井水源地原水に対する PFAS の処理性を確認するとともに、安定的な施設計画に役立てることを目的とする。

2. 概要

PFAS 除去を目的とした吸着剤による処理を検討する。

PFAS 除去用吸着剤として、①粒状活性炭 (GAC)、②イオン交換樹脂 (IE)、③ベントナイト系吸着剤 (FS) を用いた。PFAS に関する処理性や各吸着剤の寿命に関するの情報収集を行った。

3. 概略図

試験概略図を図 1 に示す。

4. 使用材料

受水タンク、原水タンク、増圧ポンプ、原水ポンプ、吸着カラム、流量計、前処理装置、配管

5. 手順

- ① 原水を受水タンクに導水する。原水は増圧したのち、夾雑物除去のための前処理装置へ通水し、原水タンクに導水する。各槽の余剰な原水はオーバーフローから排水される。
- ② 原水を原水ポンプで加圧し、吸着カラムに通水する。
- ③ 適宜、原水、処理水を採水し、PFAS の分析を行う。
- ④ PFAS の処理水濃度の推移を確認し、吸着剤の寿命を把握する。

6. 条件

吸着剤：粒状活性炭、イオン交換樹脂、ベントナイト系吸着剤

SV : 10~20 h⁻¹

7. 測定項目

PFOS、PFOA

8. 実施場所

三井水源地内

9. 必要水量

8 L/min

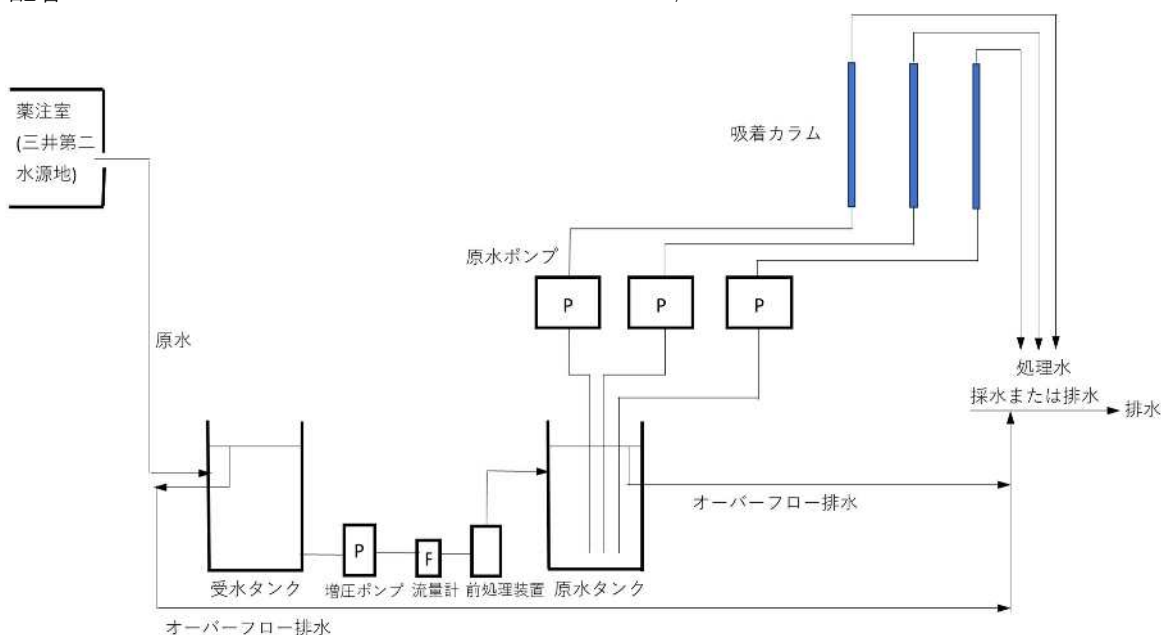


図 1 試験概略図

PFAS 除去試験

水道機工株式会社

No. 10

【試験結果】

実験途中ではあるが、現状得られたデータ
(通水 4 日時点) を表 1 に示す。

表 1 PFOS+PFOA の濃度

項目	PFOS+PFOA 濃度 [ng/L]
原水	49～120
粒状活性炭処理水	<2
イオン交換処理水	<2
ベントナイト処理水	<2

原水の PFOS+PFOA 濃度は 49～120 ng/L であり、平均は 98 ng/L だった。

粒状活性炭、イオン交換樹脂、ベントナイト系吸着剤の 3 種類すべての吸着剤で、PFOS+PFOA の処理が可能だった。処理水の PFOS+PFOA 濃度は、定量下限値以下 (<2 ng/L) だった。

【まとめ】

3 種類すべての吸着剤において、PFOS+PFOA の処理が可能であることを確認した。今後も通水試験を継続し、通水時間による PFOS+PFOA 濃度の推移を確認することで、各吸着剤の寿命を把握できる。吸着剤の寿命を把握することで、PFAS 除去設備のライフサイクルコスト (LCC) 試算が可能となる。