

実証結果報告書

- 1) 提案者の名称 株式会社エコサイズ
(協力機関：株式会社MCエバテック)
- 2) 実証の区分 PFOS等の濃度低減のための対策技術の公募【水1・現地】
- 3) 提案技術の名称 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
- 4) 技術の分類/適用段階 吸着除去ならびに熱分解・無害化/実用レベル
- 5) 実証の期間 令和7年8月20日～令和8年1月16日

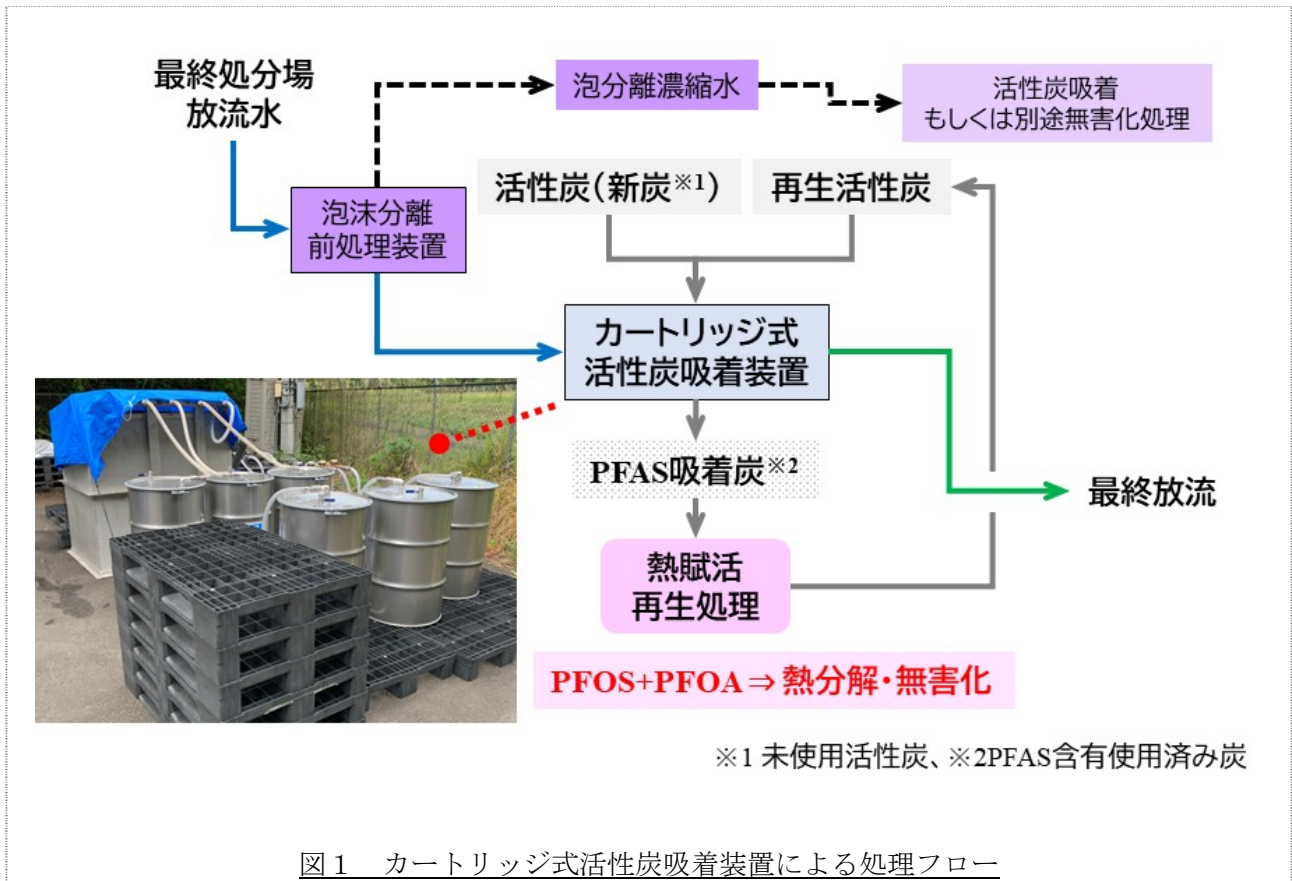
1. 技術の概要

1.1 原理と特徴

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(図1)。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を実施するため、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。



1.2 技術の対策目標

今回の実証試験における処理対象の管理型処分場の放流水は、PFOS+PFOA 濃度が最大 600,000ng/L 程度、発生水量 40m³/day（水処理設備運転時 3～5m³/h）であり、求められる PFOS 等の吸着除去総量が多いと想定されるため、活性炭カートリッジの設置本数や交換頻度を適切に設定する必要がある。

本試験では、活性炭の推奨吸着処理条件「空間速度 SV 5/h 以下での連続通水」とするため、処理流路を 3 列並列としてそれぞれカートリッジ 2 基を直列に配した装置構成を基準とし、PFOS 等の吸着総量が「100～150mg/kg 活性炭」となるようにカートリッジの交換頻度を 1 週間程度（総通水量 200～250m³）に設定し、この運用条件において PFOS 等の十分な除去性能が得られるかを確認する。

また、PFOS 等を含む使用済み活性炭（以下、PFAS 含有使用済み炭）の熱賦活再生による能力回復が十分であるかとともに、含有していた PFOS 等の熱賦活再生時の熱分解挙動（再生した活性炭（以下、再生活性炭）への残留や排水・排ガスへの漏出が無いこと）および再生活性炭の PFOS 等の吸着処理性能を確認する。

泡沫分離処理については、処理条件（発泡方法や風量、反応時間ならびに泡沫分離回収方法）の最適化に向けて試験検証を行う。

表 1 に、実証試験における技術目標と評価方法を示す。

表 1 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 < 1 μg/L、同じく排ガス中の PFOS+PFOA < 0.06 μg/m ³ N	実証試験データを基に評価

2. 実証試験結果

2.1 実証試験方法

2.1.1 原水モニタリング

試験原水（処分場の既設水処理設備の放流水）ならびに浸出水（既設設備処理前）を、通水試験の実施に併せて採取・分析し、試験処理対象の PFOS、PFOA の他、活性炭被吸着成分の COD や TOC、通水阻害の原因となり得る硬度成分（Ca、Mg）などの水質項目の変化をモニタリングした。

分析項目：pH、EC、COD、TOC、SS、Ca、Mg、PFOS、PFOA

（一部試料については PFBS、PFBA、PFHxA、PFHpA、PFNA、6:2FTS、8:2FTS、GenX の 1 点検量による半定量を行った。）

2.1.2 連続通水試験

放流水受入槽に流入した試験原水を処理装置調整槽に汲み上げ、図2ならびに図3に示す処理フローでカートリッジに通水処理し、所定のタイミングで処理水を採取して分析サンプルとした。長期連続通水試験における処理水は、連続的に少量ずつ採水したものを平均化して分析サンプルとした。なお、PFOS等の除去率は以下の通り処理水中のPFOS等の濃度を原水中の濃度で除することで算出した。

除去率， % = (1-処理後濃度/原水濃度) × 100

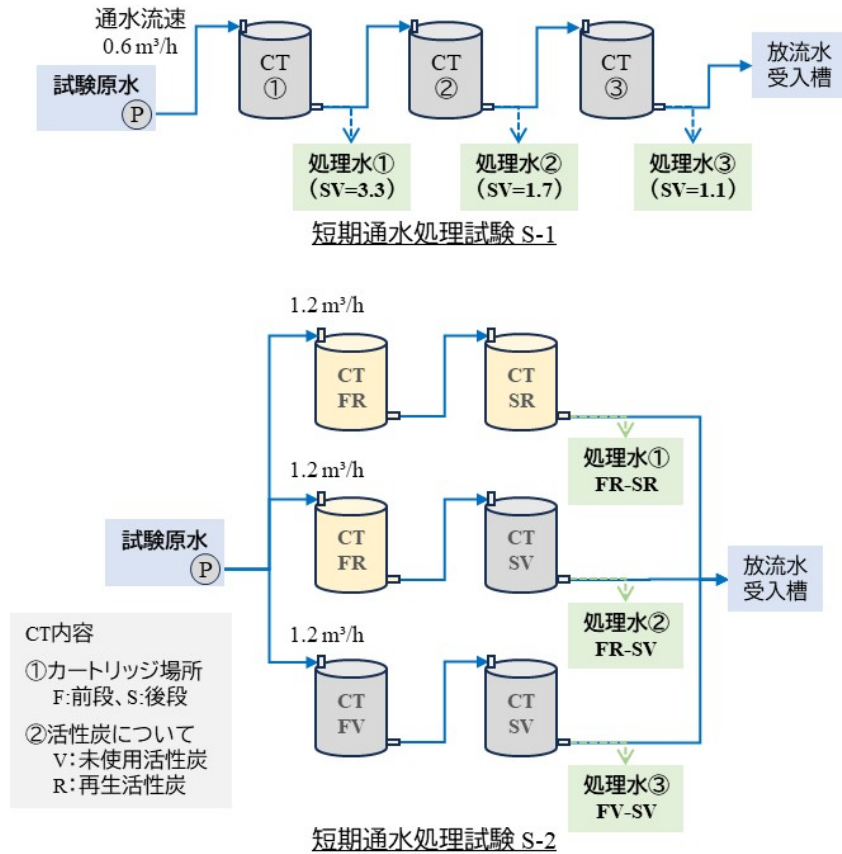


図2 短期通水処理試験 S-1 および S-2 処理フロー

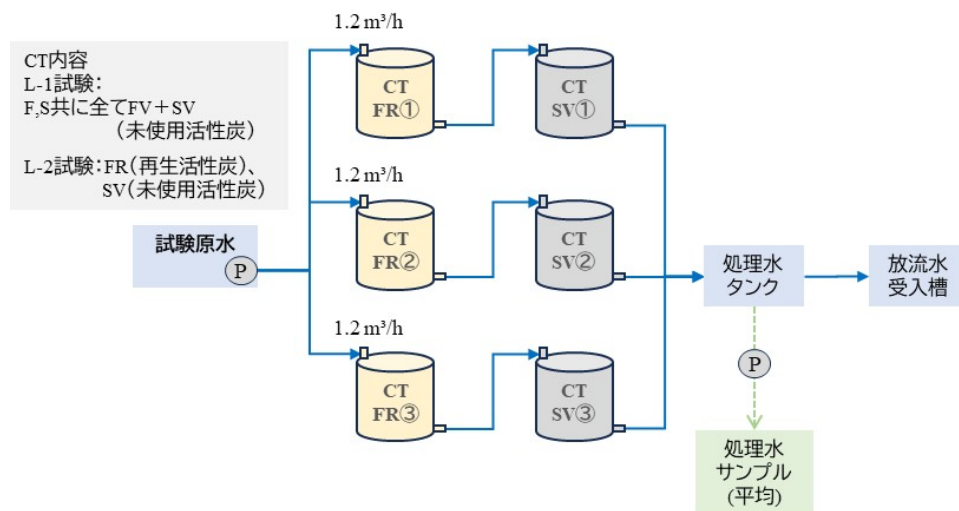


図3 長期通水処理試験 L-1 および L-2 処理フロー

>カートリッジ式活性炭吸着装置の性能諸元

活性炭カートリッジ： 石炭系粒状活性炭 80 kg 充填 吸着層 180 ℓ (Φ560×H730)/基
流路構成 (標準)： カートリッジ配置 直列 2 基×3 流路、計 6 基 (活性炭量 計 480 kg)
1 流路あたりの通水流量 約 1.2 m³/h (空間速度 SV=3.3/h、線速度 LV=4.8 m)

>短期通水試験 S-1 (未使用活性炭のみ使用)

図 2 に示すとおり、カートリッジ本数の見極めを行うためにカートリッジ 3 基直列×1 流路、通水量 0.6m³/h にて通水試験を行い、各カートリッジ出口での PFAS 量を確認した。

>短期通水試験 S-2 (未使用活性炭と再生活性炭の併用・比較)

S-1 試験の結果を受け、カートリッジ 2 基直列×3 流路として、未使用活性炭、再生活性炭およびその組み合わせによる効果を短期試験にて確認を行った。なお、図中の F (First:通水上流側(前段))、S (Second:通水 downstream 側(後段)) はカートリッジの配置場所、V (Virgin:未使用活性炭)、R (Reactivation:再生活性炭) は活性炭の状態を表す。1 流路目は再生活性炭 (FR、SR) のみ、2 流路目は再生活性炭 1 基 (FR) と未使用活性炭 1 基 (SV) の併用、3 流路目は対照として未使用活性炭 (FV、SV) のみとしそれぞれ平均 1.2m³/h の通水量にて通水処理を行った。

>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)

長期連続通水試験 (L-1、L-2) は図 3 に示すとおり、L-1 試験は未使用活性炭のみ、L-2 試験は未使用活性炭と再生活性炭を併用した。なお、通水条件は短期通水試験 S-2 と同様に各流路それぞれ平均 1.2m³/h の通水量にて 1 週間単位で連続通水を行ない (通水量 200~250m³/week)、処理水のサンプリングは一部を自動で連続採取し、1 週間分を平均化して分析サンプルとした。また、L-2 試験のカートリッジの構成は、何れも前段に再生活性炭 (FR)、後段に未使用活性炭 (SV) とした。

>PFAS 含有使用済み炭の PFAS 吸着帯の分析

通水試験 L-1 (10/7~10/20 通水分) に使用したカートリッジを回収し、前・後段それぞれのカートリッジについて上/中/下層の合計 6 箇所の活性炭を採取し、PFOS 等の含有量を測定して吸着帯の分布を確認した。なお、分析対象は PFOS、PFOA、PFHxS、PFBS、PFBA、PFHxA、PFHpA、PFNA、6:2 FTS、8:2 FTS、GenX の 11 項目である。

2.1.3 活性炭再生試験

前述の連続通水処理試験に供した PFAS 含有使用済み炭を、株式会社 MC エバテック（以下、MCET）の活性炭再生施設（図 4）にて熱賦活再生処理を行った。

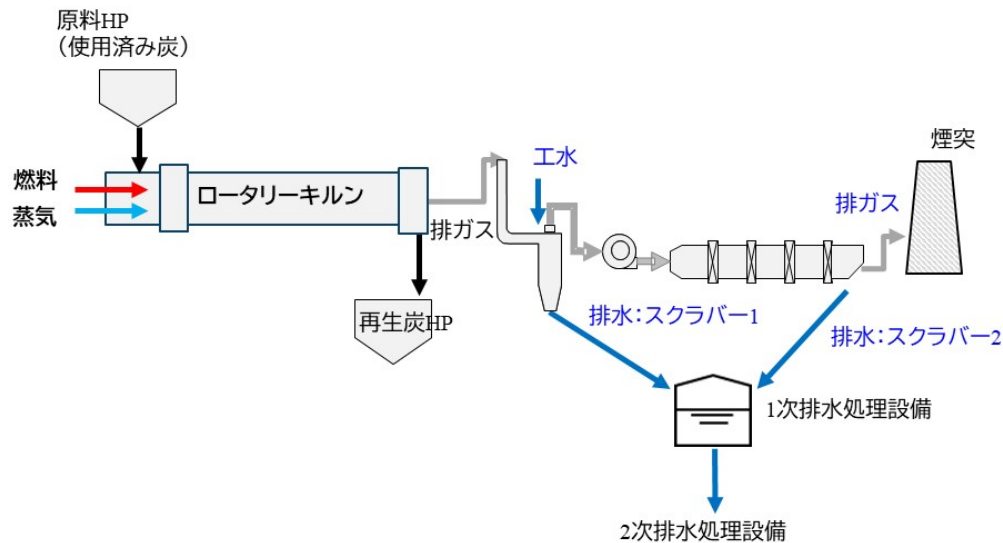


図 4 MCET 社 活性炭再生および排ガス・排水処理系統の模式図

活性炭の再生は、ロータリーキルン式再生炉を用いた加熱賦活処理にて行う。発生する排ガスは 2 段のスクラバー（工水使用）により急冷・除塵し無害化して大気中に放出する。スクラバー排水は pH 調整等の一次処理の後、更に二次処理して系外に排出する。

本試験では、通水処理試験に供した PFAS 含有使用済み炭を 2 回に分けて再生試験を行った。

>PFAS 含有使用済み炭の分析に供する試料のサンプリング方法

1 回目（R-1）の再生試験では、再生試験の前に、S-1、L-1 で使用した各カートリッジの PFAS 含有使用済み炭を 1m³ のフレキシブルコンテナ（フレコン）に移し替え、得られた各フレコン（9 袋）から右に示すサンプリング棒にて、1 フレコンから 3 回サンプリングし代表サンプルを作成した。この時の PFOS 含有量は 1 μg/kg、PFOA 含有量は 9,720 μg/kg であった。

2 回目（R-2）の再生試験では、再生試験の前に、S-2、L-2、S-3 で使用した各カートリッジの PFAS 含有使用済み炭をカートリッジ毎に右に示すサンプリング棒にてカートリッジの上層・中層・下層より各 1 回サンプリングを行い、各カートリッジから得られたサンプルを混合することで代表サンプルを作成した。この時の PFOS 含有量は 30 μg/kg、PFOA 含有量は 77,000 μg/kg であった。



サンプリング棒

>活性炭中の総フッ素および PFAS 類の評価方法

未使用活性炭、PFAS 含有使用済み炭、再生活性炭それぞれについて、PFOS 及び PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項（令和 4 年 9 月 環境省環境再生・資源循環局廃棄物規制課）の 参考資料 5（PFOS、PFOA 又はその塩を含む廃棄物の採取・分析方法）に記載の、 6. 固体状廃棄物（燃え殻、ばい

じん、鉍さい、汚泥等) に準じ前処理を行い、解析には絶対検量法を用いて PFOS、PFOA、PFHxS の定量を行った。また、PFBS、PFBA、PFHxA、PFHpA、PFNA、6:2FTS、8:2FTS、GenX は 1 点検量による値のため数値としての信頼性は低いものとなっている。なお、絶対検量法を用いた理由としては、活性炭中に吸着される PFAS 類の量は比較的高濃度であることから希釈操作により内部標準物質である $^{13}\text{C}_4$ -ペルフルオロオクタンスルホン酸ナトリウム、 $^{13}\text{C}_4$ -ペルフルオロオクタン酸、2 物質混合メタノール溶液のピークが検出できなくなることがあるためである。

総フッ素 (F) 量の分析方法は、燃焼イオンクロマトグラフ法 (日東精工アナリテック社製 AQF-2100H) にて定量を行った。

>再生処理時の排水、排ガス測定

再生処理時に排ガスの急冷・除塵を行うスクラバー 1 排水、中和工程のスクラバー 2 排水、ならびに最終的な排ガスの 3 箇所を採取し分析に供した。

排水分析：環水大発第 2005281 号 環水大土発第 2005282 号 付表 1 に準じ実施した。なお、分析はスクラバー 1 およびスクラバー 2 から単独で 1 時間に 1 回採取し、計 7 回分をスクラバー毎で混合した溶液を検液とした。対照として、スクラバーに使用した工水についても確認を行った。

排ガス測定：PFOS 及び PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項 (令和 4 年 9 月 環境省環境再生・資源循環局廃棄物規制課) の参考資料 5 (PFOS、PFOA 又はその塩を含む廃棄物の採取・分析方法) に記載の 9. 排ガスに準じ実施した。

2.1.4 泡沫分離処理試験

試験原水について、小型泡沫分離試験器ならびに泡沫分離前処理装置 (活性炭通水装置に実装) を用いて分離濃縮処理を行ない、泡沫分離濃縮水および処理水 (S-3 試験) の水質を分析した。S-3 試験で用いた試験装置の構成を図 5、図 6 に、処理条件を表 2 に示す。なお、各泡沫分離試験後の処理水は L-1 試験、L-2 試験同様にカートリッジを用いて直列 2 基×3 流路の計 6 基で通水処理を行った。

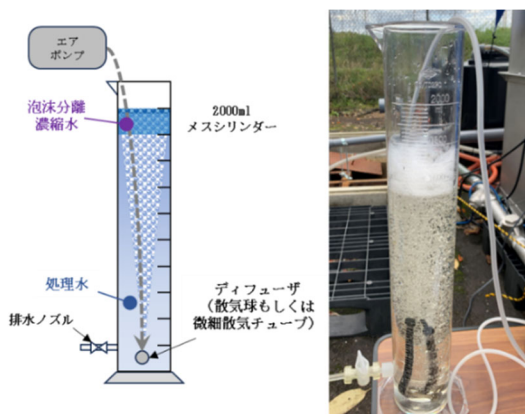


図 5 小スケール試験 (小型泡沫分離試験器)

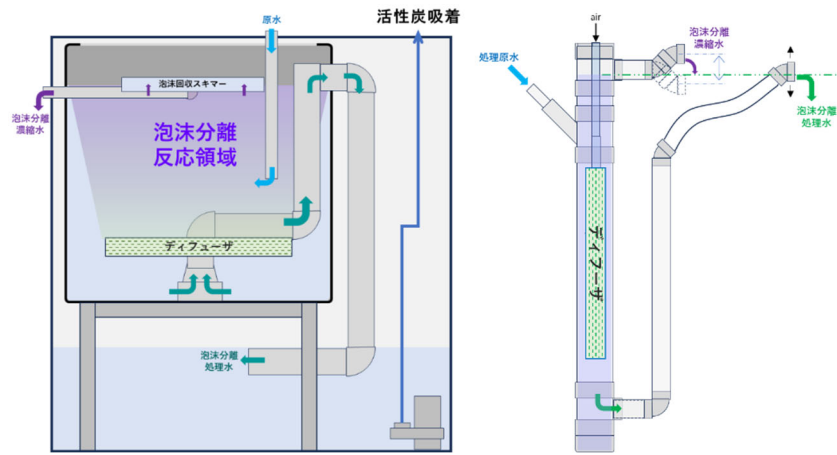


図6 泡沫分離前処理装置（処理装置実装モデル 左；1次濃縮用 右；2次濃縮用）

表2 泡沫分離処理試験条件の詳細

試験	発泡方法	風量	反応槽容積	反応時間	泡沫回収分離方法
小スケール試験 (小型泡沫試験器)	散気球 微細散気チューブ 微細散気板	2.5～60 L/min	500～2000ml	7.5～10分 (バッチ)	泡沫直接回収 下部ドレン抜 アスピレータ吸引回収
泡沫分離前処理装置 (通水処理装置実装)	微細散気チューブ(大)	10～60 L/min	1次装置;500L 2次装置;9L	1次装置;3.6 m ³ /h(連続通水) 2次装置;0.18 m ³ /h(連続通水)	越流分離回収

2.2 実証試験結果

2.2.1 原水モニタリング結果

試験期間中の試験原水および浸出水の水質モニタリング結果を表3および表4に、PFOSならびにPFOAの試験期間中の濃度推移を図7に示す。

原水中のPFOS、PFOAの濃度は試験期間中に大きく変動し、PFOAで最大440,000 ng/L、期間平均220,000 ng/Lであることが認められた。一方、PFOSは最大750 ng/L、平均400 ng/L検出された。他の活性炭被吸着成分として、COD濃度は30 mg/L程度であった。またPFAS半定量分析の結果、99%以上がPFOAであることが確認され、その他PFOS以外については、PFHxA、PFHpA、PFNAが他のPFASよりも高い濃度で検出された。

表3 試験原水および浸出水の水質モニタリング結果

検体No.	採取日時	pH (-)	EC (mS/m)	COD (mg/L)	TOC (mg/L)	SS (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	PFOS (ng/L)	PFOA (ng/L)
<試験原水(既設設備放流水)試料>										
EF-01	25/08/07 10:30	7.37	107	9.2	11	2	88	59	<5	92,000
EF-02	25/09/02 13:15	8.25	150	18	19	1	48	65	65	48,000
EF-03	25/09/03 13:25	7.69	154	24	20	1	60	66	93	57,000
EF-04	25/09/04 11:00	8.17	157	22	20	<1	70	67	150	76,000
EF-05	25/09/05 14:20	8.08	153	21	19	1	73	64	140	83,000
EF-06	25/09/06 13:50	7.97	158	19	21	1	78	67	130	86,000
EF-07	25/09/16 10:25	7.87	156	22	20	<1	91	64	240	140,000
EF-08	25/09/22 12:00	8.13	156	25	22	1	98	68	240	190,000
EF-09	25/09/30 11:10	8.04	154	30	22	1	88	65	330	140,000
EF-10	25/10/07 10:55	8.39	151	28	23	<1	85	63	480	170,000
EF-11	25/10/14 10:40	8.08	152	26	24	2	91	61	410	220,000
EF-12	25/10/21 14:10	8.54	150	33	24	<1	97	67	560	240,000
EF-13	25/10/29 13:35	7.55	147	33	25	<1	99	65	710	330,000
EF-14	25/11/07 11:10	8.26	125	31	23	<1	57	61	570	440,000
EF-15	25/11/11 13:25	7.33	137	/	/	/	63	66	590	250,000
EF-15B	25/11/11 13:25	/	/	/	/	/	/	/	/	380,000
EF-16	25/11/13 11:05	7.59	140	37	28	<1	68	66	610	300,000
EF-17	25/11/14 13:35	7.93	146	39	28	1	71	64	750	310,000
EF-18	25/11/17 11:05	7.79	144	38	28	<1	60	63	380	280,000
EF-19	25/11/20 11:25	7.58	146	37	31	<1	66	66	600	340,000
EF-20	25/11/27 14:30	8.34	154	35	31	<1	61	66	690	280,000
EF-21	26/12/09 09:20	8.09	149	27	24	<1	54	64	91	170,000
EF-22	26/12/18 14:45	8.30	158	35	23	1	55	65	580	370,000
<浸出水(既設調整槽より採取)>										
LC-01	25/08/07 10:30	7.26	196	35	38	4	/	/	1,100	690,000
LC-02	25/11/20 13:50	7.54	180	52	39	3	/	/	1,100	440,000
LC-03	26/01/14 13:30	/	/	48	38	2	/	/	1,200	290,000

PFAS類定性分析実施

表4 試験原水のPFAS類定量および1点検量による半定量分析結果

検体No.	試料詳細	PFOS (ng/L)	PFOA (ng/L)	PFBS (ng/L)	PFBA (ng/L)	PFHxA (ng/L)	PFHpA (ng/L)	PFNA (ng/L)	6:2 FTS (ng/L)	8:2 FTS (ng/L)	GenX (ng/L)
EF-01	放流水 (8/7採取)	<5	92,000	22	<1	430	340	71	3	<1	<1
EF-19	放流水 (11/20採取)	600	340,000	18	<1	130	120	140	1	11	13
LC-01	浸出水 (8/7採取)	1,100	690,000	12	<1	63	53	110	4	18	5

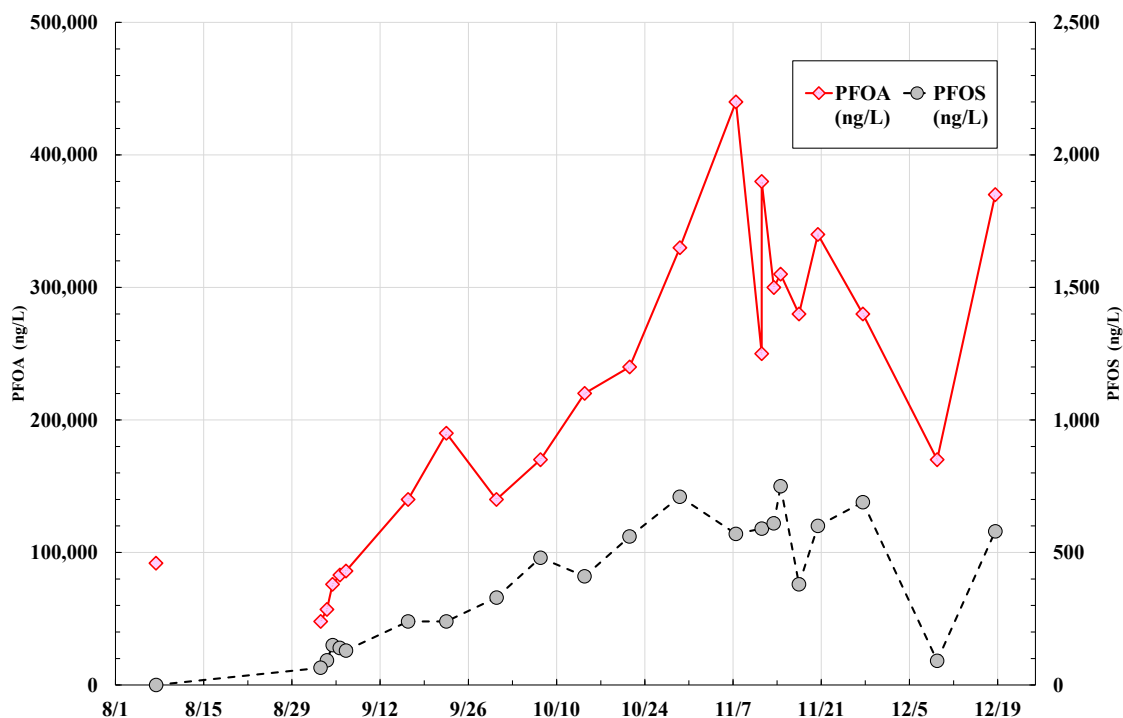


図7 試験原水中のPFOS、PFOA濃度の推移

2.2.2 実機連続通水試験結果

>短期通水処理試験 S-1

短期通水試験 S-1 の結果を表 5 に示す。また、通水倍数と PFOS、PFOA の除去率の関係を図 8 に示す。なお、近似は多項式近似を用い、通水倍数とは処理水量をカートリッジ内の活性炭容積で除した値である。

S-1 試験実施期間中 (9/2~9/6) は試験原水の PFOS 濃度 (平均) 120 ng/L、PFOA 濃度 (平均) 70,000ng/L と比較的低い値であった。処理水の PFOS はすべて検出下限(5ng/L)未満となり、PFOA 除去率は通水倍数が最大の 285 倍でも 99.99%以上であることが確認された。

なお、後の L-1 試験の最中に採取した参考試料 A (通水倍数 1400 倍) では、PFOS 除去率 80%程度、PFOA 除去率 50%程度まで除去率が低下していた。また、参考試料 B (カートリッジ配置の後段で 1400 倍相当を通水処理した後、前段に移して更に 458 倍相当の通水を行ったもの) では PFOS 除去率 85%程度、PFOA 除去率 55%程度であった。これらの結果も踏まえ図 8 に示したように、PFOS、PFOA 除去率は通水倍数 400~500 倍を超えた辺りから低下していくと推測される。

以上の結果から、後述する L-1 長期試験の試験条件を確定した。

表5 短期通水試験 S-1 水質分析結果

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(%)
試験原水の平均値(対照)				21		20		1	120		70,000	
処理水①	3.2	6.77	161	0.7	97	<0.3	98%以上	2	<5	97%以上	5	99.99
	5.0	6.16	147	<0.5	98%以上	<0.3	98%以上	2	<5	97%以上	<5	99.99%以上
	7.1	6.35	147	0.6	97	0.5	97	1	<5	97%以上	<5	99.99%以上
	9.8	6.52	147	0.8	96	0.9	95	2	<5	97%以上	<5	99.99%以上
	13	6.68	148	0.8	96	0.9	95	4	<5	97%以上	<5	99.99%以上
	32	7.47	156	1.4	93	2.2	89	2	<5	97%以上	<5	99.99%以上
	113	8.15	157	2.9	86	3.9	80	2	<5	97%以上	<5	99.99%以上
	221	8.03	150	3.8	82	4.4	78	1	<5	97%以上	<5	99.99%以上
285	7.94	159	2.9	86	4.9	75	1	<5	97%以上	<5	99.99%以上	
処理水②	2.5	5.24	150	0.5	97.6	<0.3	98%以上	10	<5	97%以上	<5	99.99%以上
	3.6	5.59	147	<0.5	98%以上	<0.3	98%以上	2	<5	97%以上	<5	99.99%以上
	4.9	6.07	148	<0.5	98%以上	<0.3	98%以上	5	<5	97%以上	<5	99.99%以上
	6.7	6.54	147	0.6	97	<0.3	98%以上	1	<5	97%以上	<5	99.99%以上
	56	8.09	158	1.8	91	2.9	85	2	<5	97%以上	<5	99.99%以上
	110	8.05	150	2.1	90	3.2	84	1	<5	97%以上	<5	99.99%以上
142	7.86	157	2.2	89	3.5	82	1	<5	97%以上	<5	99.99%以上	
処理水③	2.5	5.07	151	0.8	96	<0.3	98%以上	1	<5	97%以上	<5	99.99%以上
	37	7.97	158	1.4	93	2.4	88	<1	<5	97%以上	100	99.86
	74	8.04	149	1.8	91	2.9	85	1	<5	97%以上	11	99.98
	95	7.88	157	1.5	93	3.2	84	1	<5	97%以上	<5	99.99%以上
参考試料A※	1,400	8.25	125	25	22.7	18	25.0	<1	120	80.4	170,000	49.5
参考試料B※	1,400+458	6.81	146	28	17.6	19	25.5	<1	86	85.4	150,000	56.2

注) 対照の試験原水の各項目値は、試験期間中の対照原水 (EF-02~EF06) の平均値。

※参考試料 A および B は、長期試験 L-1 実施中 (10/20~11/13) に、S-1 と同条件で通水倍数過大のケースを再現して得られた検体。

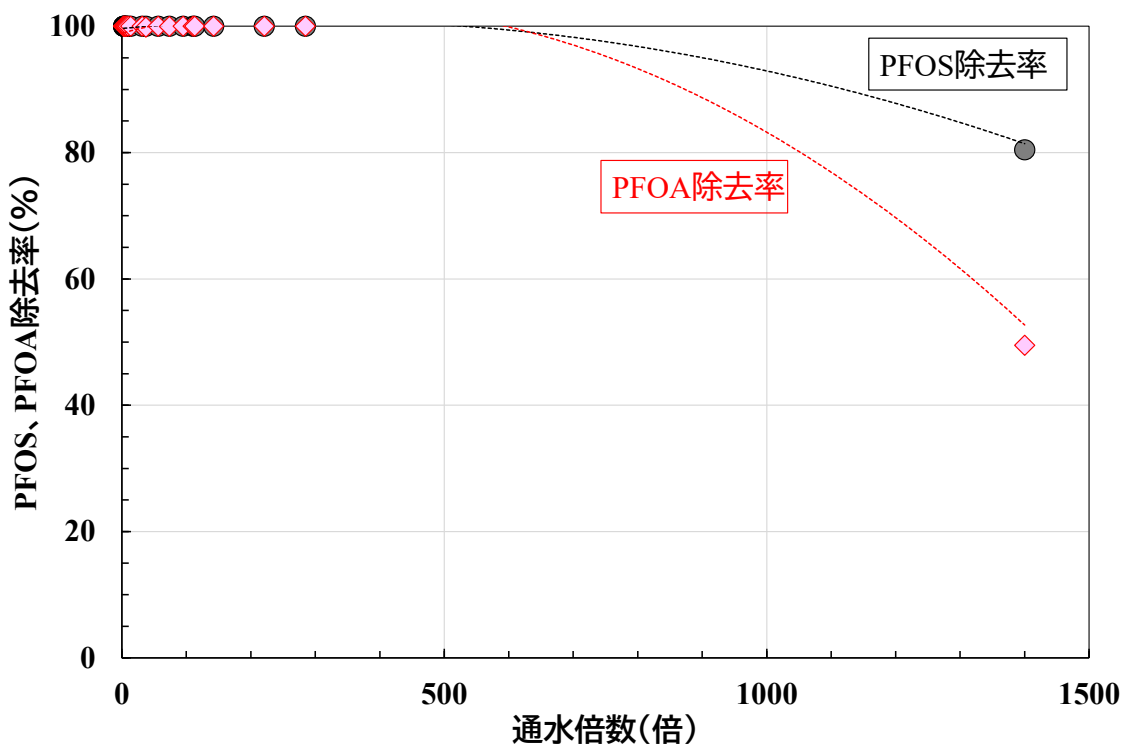


図8 通水倍数とPFOS、PFOA除去率の相関図 (短期通水処理試験 S-1)

>短期通水試験 S-2

表6にS-2試験における水質分析結果を示す。処理水①(カートリッジ内容物の全て再生活性炭)、処理水②(再生活性炭と未使用活性炭の併用)、処理水③(全て未使用活性炭)の通水性能を示す。いずれの条件においても通水倍数300倍程度までPFOS除去率で99%以上(定量下限未満)、PFOA除去率で99.99%以上となり、再生活性炭と未使用活性炭は同等の吸着能力を有することが確認された。

表6 短期通水処理試験 S-2 水質分析結果

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(%)
試験原水の平均値(対照)												
処理水① (全て再生活性炭)	51.4	7.76	148	7.4	80.4	1.7	94.1	<1	<5	99%以上	9	99.997
	115	7.72	145	7.7	79.6	2.9	89.9	<1	<5	99%以上	12	99.996
	260	7.47	147	4.8	87.3	4.2	85.4	<1	<5	99%以上	<5	99.998以上
処理水② (再生炭+新炭)	57	7.77	148	8.2	78.3	2.2	92.3	<1	<5	99%以上	<5	99.998以上
	129	7.73	145	8.0	78.8	3.3	88.5	<1	<5	99%以上	10	99.997
	303	7.51	148	6.4	83.0	6.2	78.4	<1	<5	99%以上	<5	99.998以上
処理水③ (全て未使用活性炭)	55	7.74	147	7.9	79.1	2.3	92.0	<1	<5	99%以上	<5	99.998以上
	123	7.73	145	8.1	78.5	3.3	88.5	1	<5	99%以上	8	99.997
	289	7.53	148	7.0	81.5	6.6	77.0	<1	<5	99%以上	18	99.994
処理水①~③平均	284	7.61	151	6.3	83.3	4.0	86.1	2	<5	99%以上	55	99.982

注)対照の試験原水の各項目値は、試験期間中の対照原水(EF-16~EF19)の平均値。

>長期連続通水試験 L-1 (全量未使用活性炭使用)、L-2 (再生活性炭・未使用活性炭併用)

表7に長期連続通水試験 L-1、L-2におけるカートリッジ交換履歴および通水量の記録を、表8に処理水の水質分析結果を示す。なお、長期連続通水試験は基本的に1週間単位でカートリッジの交換を行ったが、表7欄外の※2、※3に示すように、10月~11月半ばの通水量が少ない場合にカートリッジ交換を延期して水質分析のみ実施したケース(L-1③, ④, ⑤, ⑥)、2~3週間未交換で通水量を過剰としたケース(L-1⑦, ⑧)、後段のカートリッジ3基を前段の3基として再度使用するメリーゴーラウンド方式で通水処理を行ったケース(L-1⑨)なども試行した。

未使用活性炭のみを使用したL-1試験、再生活性炭・未使用活性炭を併用したL-2試験いずれにおいても、通水倍数100倍程度~最大640倍の処理条件にて、PFOS除去率は99%以上(検出下限5ng/L未満)、PFOA除去率も概ね99.9%以上という結果が得られた。また、L-1試験における通水倍数640倍の条件(L-1⑧)では、通水試験後に比較的高濃度のPFOA(870ng/L)が検出された。これは、原水中のPFOA濃度が比較的高い時期(390,000ng/L)に、カートリッジの寿命見極めのために通水量を増大させたことによるものと考えられるが、PFOAの除去率としては99.8%であった。

表7 活性炭カートリッジの運用記録

通水期間 (実質通水日数 ^{※1})	試験内容	カートリッジ			通水量 (m ³)	カートリッジ 回収日
		本数	No.	内容物		
9/2 ~ 9/8 (5)	S-1	3	A-1 ~ A-3	新炭	56.1	9/8
9/8 ~ 9/16 (7)	L-1	6	B-1 ~ B-6	新炭	255.1	9/16
9/16 ~ 9/22 (5)		6	C-1 ~ C-6	新炭	236.1	9/22
9/22 ~ 9/30 (2) ^{※2}		6	A-1 ~ A-6	新炭	352.1	10/7
9/30 ~ 10/7 (7)						
10/7 ~ 10/14 (2) ^{※2}		6	B-1 ~ B-6	新炭	240.4	10/20
10/14 ~ 10/20 (5) ^{※2}						
10/20 ~ 10/29 (8)		3	C-1 ~ C-3	新炭	694.4	11/7
10/29 ~ 11/7 (8)						
10/20 ~ 10/29 (8)		3	C-4 ~ C-6	新炭	943.5	11/13
10/29 ~ 11/7 (8)						
11/7 ~ 11/13 (5)	3	A-4 ~ A-6	新炭 ^{※3}	249.1	11/27	
11/13 ~ 11/20 (6)	S-2	3	A-1 ~ A-3	新炭	310.1	11/20
		3	B-1 ~ B-3	再生炭		11/20
11/20 ~ 11/27 (6)	L-2	3	A-4 ~ A-6	新炭 ^{※3}	236.3	11/27
		3	C-1 ~ C-3	再生炭		11/27
11/27 ~ 12/9 (8)		3	B-4 ~ B-6	新炭	145.8	12/9
		3	C-4 ~ C-6	再生炭		
12/9 ~ 12/18 (8)	S-3	3	A-1 ~ A-3	新炭	269.1	12/18
		3	B-1 ~ B-3	再生炭		
12/18 ~ 12/24 (5)		3	A-4 ~ A-6	新炭	154.6	1/14
		3	C-1 ~ C-3	再生炭		12/24
12/24~(待機)		3	B-4 ~ B-6	新炭		1/14
		3	C-4 ~ C-6	再生炭		

※1 通水試験は日曜除く平日昼間(夜間および日曜日は原水の発生無し)

※2 9/23~9/27、10/9~10/13、10/18 は水量不足のため水処理停止

※3 A-4~A-6(新炭)は11/7~11/13に供用の後に残置し、11/20~11/27に再度使用してから回収

表8 長期連続通水試験 L-1、L-2 水質分析結果

試料	通水回数	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

>PFAS 含有使用済み炭中の総フッ素および PFAS 類の吸着帯評価

長期連続通水試験 L-1 (10/7~10/20 通水分) に供した前段 3 基、後段 3 基の計 6 基のカートリッジから、それぞれ上層・中層・下層の PFAS 含有使用済み炭をサンプラーにより採取し (図 9)、各試料の PFAS 類含有量を測定することで、PFAS 類の吸着帯分布を確認した。

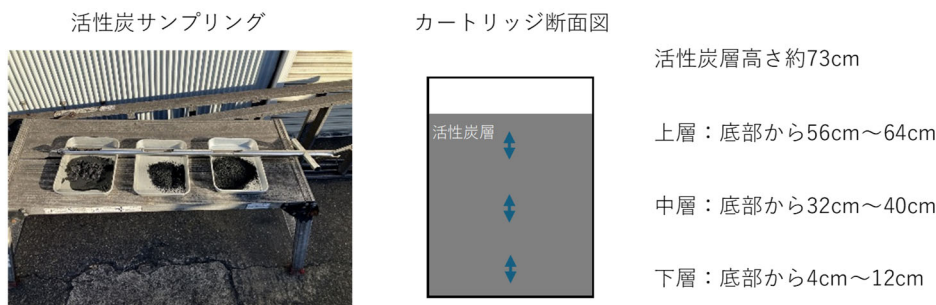


図 9 カートリッジからの活性炭採取内容

通水試験に用いたカートリッジ内の総フッ素および PFAS 類の含有量を表 9 に、物質毎の含有量分布を図 10 に示す。なお、表 9 に示す比率は PFAS 類のみとした。

表 9 と図 10 に示すとおり、通水時上流側のカートリッジ 1 基目 (カートリッジ No①、②、③) で総フッ素量は約 90% 程度、また、PFOS、PFOA、PFHxS はほぼ 100% 吸着されていることが確認された。一方 PFOS、PFOA、PFHxS に次いで比較的含有量が高い PFHxA や PFHpA、GenX は、カートリッジ 1 基目中層から下流側 2 基目にかけて多く分布していることがわかった。

これらより、カートリッジ 1 基目上層に吸着された PFHxA 等は分子量の違いによる吸着力の差、又は濃度勾配により追い出されることで吸着帯が下流側にシフトしたことなどが推察される。

以下に試験期間中の原水 PFOS、PFOA 濃度から未使用活性炭への理論吸着量を示す。なお、本試算は未使用活性炭に単一成分のみが吸着していると仮定している。

PFOS : 総通水量 $240.4\text{m}^3 \times$ 原水の PFOS 平均濃度 $480\text{ng/L} / 480\text{ kg-AC} = 240.4\text{ ng/g}$

(表 9 に示すとおり実測の含有量平均は $30\text{ng/g}(\mu\text{g/kg})$ 、なお、定量下限値以下の場合は定量下限値を用いて試算)

PFOA : 総通水量 $240.4\text{m}^3 \times$ 原水の PFOA 平均濃度 $210,000\text{ng/L} / 480\text{ kg-AC} = 105,175\text{ ng/g}$

(表 9 に示すとおり実測の含有量平均は $77,700\text{ng/g}(\mu\text{g/kg})$ 、なお、定量下限値以下の場合は定量下限値を用いて試算)

上記より、PFOS 含有量については表 9 に示す実測の含有量 ($30\mu\text{g/kg}$) と大きな乖離が見られた。この要因として、もともと原水中の PFOS 濃度が低いことや試験期間中に PFOS 濃度が大きく変動していたことなどの可能性が推察される。一方、PFOA 量は理論吸着量と実測値 ($77,700\mu\text{g/kg}$) ではやや乖離が見られたことから、PFAS 含有使用済み炭中には一部、雑物 (例えば COD) 等が吸着することで実測値が低くなっている可能性が考えられる。

表9 カートリッジ内の総フッ素およびPFAS類含有量

カートリッジ		通水上流側(前段)B-1~B-3						通水 downstream側(下段)B-4~B-6						合計値	平均値
カートリッジ内部No		①		②		③		④		⑤		⑥			
サンプリング場所		上層		中層		下層		上層		中層		下層			
評価方法	物質	含有量 μg/kg	比率 %	含有量 μg/kg	比率 %	含有量 μg/kg	比率 %	含有量 μg/kg	比率 %	含有量 μg/kg	比率 %	含有量 μg/kg	比率 %	含有量 μg/kg	含有量 μg/kg
定量(定量下限)	総フッ素	1,700,000	-	760,000	-	300,000	-	130,000	-	83,000	-	53,000	-	3,026,000	504,333
定量(<0.05)	PFOS	163	90	15	8	2.54	1	<0.05	0	<0.05	0	<0.05	0	181	30
	PFOA	363,333	78	91,333	20	10,967	2	553	0	12	0	2.43	0	466,201	77,700
	PFHxS	347	86	51	13	4.67	1	0.07	0	<0.05	0	<0.05	0	402	67
半定量 1点検量 (<0.05)	PFBS	<0.05	4	0.66	48	0.42	30	0.15	11	<0.05	4	<0.05	4	1.38	0.23
	PFBA	<0.05	1	<0.05	1	0.05	1	0.21	6	1.60	47	1.43	42	3.39	0.57
	PFHxA	<0.05	0	6.17	11	9.07	17	19	35	12	22	8.27	15	54	8.98
	PFHpA	<0.05	0	5.27	23	5.80	25	9.47	41	1.50	6	1.11	5	23	3.87
	PFNA	<0.05	1	<0.05	1	4.50	89	0.33	7	<0.05	1	<0.05	1	5.03	0.84
	6:2FTS	0.07	21	<0.05	15	0.06	18	<0.05	15	<0.05	15	<0.05	15	0.33	0.06
	8:2FTS	<0.05	12	0.18	41	<0.05	12	<0.05	12	<0.05	12	<0.05	12	0.43	0.07
	GenX	<0.05	0	2.43	12	7.40	37	8.23	41	1.60	8	0.35	2	20	3.34

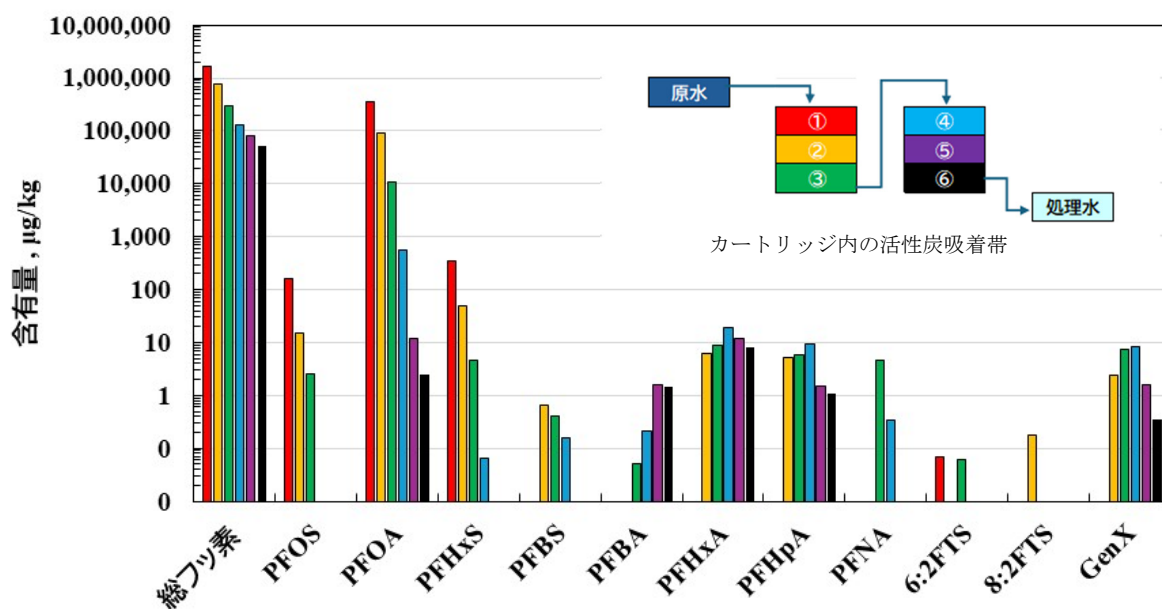


図10 総フッ素およびPFAS類の含有量の分布

2.2.3 活性炭再生試験結果

今回の再生試験における再生条件を表10に示す。

1回目の再生試験(R-1)では、前述のS-1、L-1に供したPFAS含有使用済み炭2,160kg(未使用活性炭を通水試験したもの)を、2回目(R-2)ではS-2、L-2、S-3に供したPFAS含有使用済み炭3,360kg(未使用活性炭1,920kg、R-1再生活性炭1,440kg通水試験したもの)を用いた。

R-1では熱賦活再生時の温度条件が880~900℃となるよう設定し、一般的条件に比べやや賦活が進行し易い状態とした。一方、R-2では、R-1で得られた再生活性炭の材料特性の結果を受け、表10に示すとおりロータリーキルン炉の最高温度の平均値(炉前温度-平均)を893℃から876℃に低下させると共にロータリーキルンの回転速度を早くすることで、PFAS含有使用済み炭のキルン内での滞留時間を短縮させた条件で熱賦活再生処理を行った。

表 1 0 再生処理条件

試験試験No		R-1		R-2		備考	
試験日		R7年11月6日	R7年11月7日	R8年1月15日	R8年1月16日		
状態		無負荷時 (空運転)	再生時	無負荷時 (空運転)	再生時		
再生 条件	投入量	kg-dry	-	2,160	-	3,360	
	キルン回転数	秒/回	-	110	-	100	
	炉前温度_平均	℃	813	893	799	876	
	炉前通過時間	h	-	1.0	-	0.6	原料投入開始から初回出始め時間/5ゾーン
	ガス滞留時間	約, sec	-	20	-	22	

>熱賦活再生結果

R-1、R-2 試験に供した PFAS 含有使用済み炭およびその再生活性炭の材料特性を未使用活性炭と比較した。活性炭の材料特性、活性炭中の総フッ素量および PFOS、PFOA 含有量を表 1 1 に示す。なお、R-1 試験における PFAS 含有使用済み炭（吸着帯試験）は、PFAS 含有使用済み炭と示すものとサンプリング方法が異なり、R-2 試験と同等のサンプリング方法にて前述の「PFAS 含有使用済み炭の PFAS 類の吸着帯の評価」により得られた結果である。

R-1、R-2 試験後の再生活性炭の材料特性は、熱賦活再生により充填密度は未使用活性炭よりも低くなり、活性炭のミクロ孔由来の表面積を示すヨウ素吸着量は未使用活性炭および PFAS 含有使用済み炭に比べ増大し、硬さについては日本水道協会水道用粒状活性炭規格 (JWWA A114) の 90%以上を維持できていることが確認された。また熱賦活再生収率は、再生条件を変更した R-2 試験における再生活性炭の方が低く 75%であった。この熱賦活再生収率の低下は従来から実施している一般的な熱賦活再生でも見られる傾向であり、細孔量が多くなったことによるものと考えられる。

表 1 1 および表 1 2 に示す各活性炭中の総フッ素量および PFAS 含有量から、R-1、R-2 試験ともに再生活性炭中の PFOS、PFOA 含有量は定量下限値以下の $0.05 \mu\text{g}/\text{kg}$ 未満であり、PFOS 及び PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項（以下、技術的留意事項）に示される残渣の管理目標参考値 $5 \mu\text{g}/\text{kg}$ を大きく下回ることが確認された。また PFOS、PFOA 以外の PFAS 類についても、熱賦活再生により再生活性炭中から分解除去されていることがわかった。

一方、総フッ素量については、熱賦活再生により得られた再生活性炭では PFAS 含有使用済み炭に比べ低減するものの、未使用活性炭と比べ高い含有量を示している。これら再生活性炭中へのフッ素の残留は、熱賦活再生により PFAS 類の分解生成物であるフッ素が未使用活性炭にもともと含まれる灰分（例えば Ca 等）と結合したことや、評価対象以外的高温で分解される有機フッ素化合物や無機塩等¹⁾によるものと推察されるが、現時点では不明確である。

以上より、R-1 試験に供した PFAS 含有使用済み炭中の総フッ素量および PFAS 類の含有量は、PFAS 含有使用済み炭（吸着帯試験）の値の方が理論吸着量や R-2 試験における PFAS 含有使用済み炭と近いことから真値であると推察され、PFAS 含有使用済み炭のサンプリング方法については今後の課題であることが示唆された。

>再生活性炭の評価

一般的には基本項目として充填密度、ヨウ素吸着量、硬さ、粒度測定を、顧客要求事項に応じ、pH、メチレンブルー脱色性能等の評価を行う。また、PFAS 類の吸着は物理吸着が主であることから、ミクロ孔の由来の表面積を示すヨウ素吸着量を確認することで代用できるものと予想される。

表 1 1 各活性炭の材料特性、活性炭中の総フッ素量および PFOS、PFOA 含有量 (R-1、R-2)

再生試験日	通水試験No	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
R7年 11月7日	S-1,L-1	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
R8年 1月16日	S-2,L-2 S-3	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

表 1 2 各活性炭中の総フッ素量および PFAS 類の含有量 (R-1、R-2)

再生試験No				R-1			R-2		
熱賦活再生実施日				R7年11月7日			R8年1月16日		
評価方法 (定量下限)	物質	単位	技術的 留意事項 基準値	未使用 活性炭	PFAS含有 使用済み炭	PFAS含有 使用済み炭 (吸着帯試験)	再生 活性炭	PFAS含有 使用済み炭	再生 活性炭
定量(<5,000)	総フッ素	μg/kg	-	10,000	410,000	504,333	150,000	770,000	130,000
定量 (<0.05)	PFOS	μg/kg	<5	<0.05	1	30	<0.05	34	<0.05
	PFOA	μg/kg		0.13	9,720	77,700	<0.05	81,000	<0.05
	PFHxS	μg/kg		-	<0.05	8	67	<0.05	84
半定量 1点検量 (<0.05)	PFBS	μg/kg	-	<0.05	0.60	0.23	<0.05	4	<0.05
	PFBA	μg/kg	-	<0.05	<0.05	1	<0.05	<0.05	0.06
	PFHxA	μg/kg	-	<0.05	8	9	<0.05	26	<0.05
	PFHpA	μg/kg	-	<0.05	5	4	<0.05	63	<0.05
	PFNA	μg/kg	-	<0.05	6	1	<0.05	52	<0.05
	6:2FTS	μg/kg	-	<0.05	0.07	0.06	<0.05	5	<0.05
	8:2FTS	μg/kg	-	<0.05	0.05	0.07	<0.05	2	<0.05
	GenX	μg/kg	-	<0.05	5	3	<0.05	6	0.27

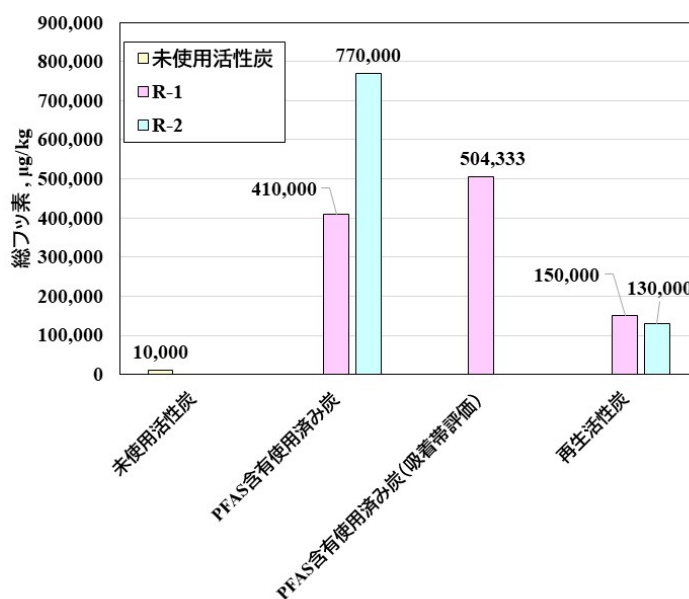


図 1 1 各活性炭中の AQF にて評価した総フッ素量

>熱賦活再生時の排水、排ガス測定 (R-1、R-2)

表 1 3 に R-1 および R-2 熱賦活再生における無負荷時および再生処理時の排水（スクラバー1、2）分析結果を示す。なお、無負荷時とは PFAS 含有使用済み炭をロータリーキルン炉に投入した際の比較対象とするため、炉内が空の状態（無負荷時）で評価した結果である。

表 1 3 に示すとおり R-1、R-2 試験ともに無負荷時は使用している工水とほぼ同等のフッ化物イオン、PFOS、PFOA 量であることわかる。一方、再生時の排水中のいずれからもフッ化物イオンが多く検出され、特にスクラバー2 ではスクラバー1 の 1.4~1.5 倍程度、かつ、スクラバーで使用している工水や無負荷時に比べ約 30 倍以上が検出されたことから、PFAS 含有使用済み炭中に含まれる PFAS 類が分解されていることが示唆された。

また、再生時の排水中の PFAS 類は PFBA、PFHxA がわずかに検出されたものの、PFOS、PFOA およびその他 PFAS 類は定量下限値以下であることが確認された。なお、検出された PFBA、PFHxA はいずれも無負荷時または工水中の検出量とほぼ同等であることから、PFAS 含有使用済み炭の熱賦活再生により発生したものは考えにくい。

PFAS 含有使用済み炭を用いた熱賦活再生時の排水影響を確認した結果、各スクラバーにおいて技術的留意事項に示される管理目標参考値 $1 \mu\text{g/L}$ 以下、フッ化物イオン量としては水質汚濁防止法の $15,000 \mu\text{g/L}$ (15mg/L , 海域) 以下を下回っていることが確認された。なお、各スクラバーの排水は、pH 調整のための一次排水処理設備を経由し、更に二次排水処理設備にて処理され海域へ放流される。

表 1 3 無負荷時および再生処理時の排水分析結果 (R-1、R-2)

再生試験No				R-1						R-2					
熱賦活再生実施日				R7年11月6日			R7年11月7日			R8年1月15日			R8年1月16日		
評価方法 (定量下限)	物質	単位	技術的留意 事項 基準値	無負荷時			再生時			無負荷時			再生時		
				PFAS含有使用済み炭の投入無			PFAS含有使用済み炭投入			PFAS含有使用済み炭の投入無			PFAS含有使用済み炭投入		
				使用水 (工水)	スクラバー1	スクラバー2	使用水 (工水)	スクラバー1	スクラバー2	使用水 (工水)	スクラバー1	スクラバー2	使用水 (工水)	スクラバー1	スクラバー2
-	pH	-	-	7.8	7.4	7.3	8.1	7.6	8.7	8.1	7.3	9.1	7.8	6.8	8.0
定量(<50)	Fイオン	μg/L	<15,000 ^{※1}	100	100	110	100	3,500	5,000	110	160	220	110	9,150	14,000
定量 (<0.0005)	PFOS	μg/L	<1	0.0009	<0.0005	<0.0005	0.0008	<0.0005	<0.0005	0.0011	0.0006	<0.0005	0.0012	<0.0005	<0.0005
	PFOA	μg/L		0.0023	0.0045	0.0006	0.0022	<0.0005	<0.0005	0.0038	0.0024	0.0019	0.0035	<0.0005	<0.0005
	PFHxS	μg/L		-	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
半定量 1点検量 (<0.001)	PFBS	μg/L	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	<0.001	<0.001
	PFBA	μg/L	-	0.011	0.010	0.019	0.008	0.007	0.017	0.005	0.004	0.004	0.005	0.001	0.005
	PFHxA	μg/L	-	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.002	<0.001	0.001
	PFHpA	μg/L	-	0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	<0.001	<0.001
	PFNA	μg/L	-	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	<0.001
	6:2FTS	μg/L	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	8:2FTS	μg/L	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	GenX	μg/L	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

※「<」は定量下限値以下。※1 水質汚濁防止法

表 1 4 に R-1 および R-2 活性炭再生試験における無負荷時および再生処理時の排ガス分析結果を、表 1 5 にトラベルブランクの値を除いた際の分析値および酸素濃度 12%換算することで再解析した結果を示す。なお、トラベルブランクとは排ガスを採取する際の吸収液中に含まれる各種含有量であり、表 1 5 はトラベルブランクを除いた際に負の値又は定量下限値である $0.0002 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ 以下となった場合は定量下限値である $0.0002 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ とし酸素濃度 12%換算値を算出した。

表 1 5 に示すとおり、再生時の排ガスについても排水試験結果同様に R-1、R-2 試験共に同等の結果が得られ、排ガス中の PFOS、PFOA 合算値は技術的留意事項に示される管理目標参考値 $0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ 以下、フッ化水素量は大気汚染防止法の $5,000 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ 以下を大きく下回っていることが確認された。

また、R-2 熱賦活再生時に微量に検出された PFOS、PFOA 以外の PFAS 類は無負荷時と大きな差が見られないことから、再生処理過程での未分解又は形態変化により検出されたものとは考えにくい。

表 1 4 無負荷時および再生処理時の排ガス分析結果 (R-1、R-2)

再生試験No				R-1			R-2		
熱賦活再生実施日				-	R7年11月6日	R7年11月7日	-	R8年1月15日	R8年1月16日
評価方法 (定量下限)	物質	単位	技術的留意事項 基準値	トラブルブラン ク吸収液のみ	無負荷時 PFAS含有使用 済み炭の投入無	再生時 PFAS含有使用済 み炭投入	トラブルブラン ク吸収液のみ	無負荷時 PFAS含有使用 済み炭の投入無	再生時 PFAS含有使用 済み炭投入
定量(<100)	フッ化水素	μg/m ³ N	<5,000 ^{※1}	-	<100	<100	-	<100	<100
定量 (<0.0002)	PFOS	μg/m ³ N	<0.06	<0.0002	0.0004	0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0002
	PFOA	μg/m ³ N		0.0024	0.0017	0.0025	<0.0002	0.0004	0.0003
	PFHxS	μg/m ³ N		-	<0.0002	0.0041	<0.0002	<0.0002	<0.0002
半定量 1点検量 (<0.0002)	PFBS	μg/m ³ N	-	<0.0002	0.0004	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0004
	PFBA	μg/m ³ N	-	0.0004	0.0006	0.0003	0.0014	0.0026	0.0072
	PFHxA	μg/m ³ N	-	0.0004	0.0005	0.0004	0.0004	0.0007	0.0005
	PFHpA	μg/m ³ N	-	<0.0002	0.0002	0.0003	<0.0002	<0.0002	<0.0002
	PFNA	μg/m ³ N	-	<0.0002	0.0002	0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002
	6:2FTS	μg/m ³ N	-	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0004	0.0008
	8:2FTS	μg/m ³ N	-	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0004
	GenX	μg/m ³ N	-	<0.0002	0.0002	0.0003	<0.0002	<0.0002	<0.0002

※「<」は定量下限値以下。※1 大気汚濁防止法

表 1 5 再解析した排ガス分析結果 (R-1、R-2)

再生試験No				R-1				R-2			
熱賦活再生実施日				R7年11月6日		R7年11月7日		R8年1月15日		R8年1月16日	
評価方法 (定量下限)	物質	単位	技術的留意事項 基準値	無負荷時 PFAS含有使用済み炭の 投入無		再生時 PFAS含有使用済み炭 投入		無負荷時 PFAS含有使用済み炭の 投入無		再生時 PFAS含有使用済み炭 投入	
酸素濃度			%	19.3		16.1		20.2		16.4	
				実測	12%酸素換算	実測	12%酸素換算	実測	12%酸素換算	実測	12%酸素換算
定量(<100)	フッ化水素	μg/m ³ N	<5,000 ^{※1}	<100	<529	<100	<184	<100	<900	<100	<196
定量 (<0.0002)	PFOS	μg/m ³ N	<0.06	0.0002	0.0010	<0.0002	<0.0004	<0.0002	<0.0018	<0.0002	<0.0004
	PFOA	μg/m ³ N		<0.0002	<0.0011	<0.0002	<0.0004	0.0002	0.0018	<0.0002	<0.0004
	PFHxS	μg/m ³ N		-	0.0039	0.0209	<0.0002	<0.0004	<0.0002	<0.0018	<0.0002
半定量 1点検量 (<0.0002)	PFBS	μg/m ³ N	-	0.0002	0.0011	<0.0002	<0.0004	<0.0002	<0.0018	0.0002	0.0004
	PFBA	μg/m ³ N	-	0.0002	0.0008	<0.0002	<0.0004	0.0012	0.0108	0.0058	0.0113
	PFHxA	μg/m ³ N	-	0.0002	0.0009	<0.0002	<0.0004	0.0003	0.0027	<0.0002	<0.0004
	PFHpA	μg/m ³ N	-	<0.0002	<0.0011	<0.0002	<0.0004	<0.0002	<0.0018	<0.0002	<0.0004
	PFNA	μg/m ³ N	-	<0.0002	<0.0011	<0.0002	<0.0004	<0.0002	<0.0018	<0.0002	<0.0004
	6:2FTS	μg/m ³ N	-	<0.0002	<0.0011	<0.0002	<0.0004	0.0002	0.0018	0.0006	0.0012
	8:2FTS	μg/m ³ N	-	<0.0002	<0.0011	<0.0002	<0.0004	<0.0002	<0.0018	<0.0002	<0.0004
	GenX	μg/m ³ N	-	<0.0002	<0.0011	<0.0002	<0.0004	<0.0002	<0.0018	<0.0002	<0.0004

※「<」は定量下限値以下。※1 大気汚濁防止法、※2 実測の酸素濃度が20%を超えたため20%で試算

> 再生活性炭の細孔特性について

PFAS 類の吸着は活性炭の細孔による物理吸着が主であることから、窒素ガス吸着法により未使用活性炭、再生活性炭の細孔特性を評価した。表 1 6 に各試料の細孔特性を、図 1 2 に BJH 法 (Barrett-Joyner-Halenda) により解析した細孔径分布を示す。

表 1 6 に示すとおり再生活性炭は何れも比表面積の増大に伴い未使用活性炭に比べ、全細孔容積・各細孔容積が大きくなっていることが確認された。また、図 1 2 に示す細孔径分布から、熱賦活再生により未使用活性炭に比べ各細孔径における窒素吸着量が増大しており、2 回目の再生活性炭は 1 回目の再生活性炭に比べ細孔径 5nm 以上の細孔量がやや増大していることがわかった。

また、前述の表 1 1 で示した熱賦活再生収率の低下も表 1 6 に示す細孔容積 (細孔量) の増大によるものと考えられる。

表 1 6 窒素ガス吸着法による細孔特性解析結果

状態		未使用活性炭 (新炭)	再生活性炭		備考
再生試験No			R-1	R-2	
熱賦活再生実施日			R7年11月7日	R8年1月16日	
比表面積	m ² /g	986	1,101	1,112	BET多点法
全細孔容積	ml/g	0.49	0.57	0.61	P/P ₀ =0.93におけるN ₂ 吸着量
ミクロ孔容積(~2nm)	ml/g	0.36	0.39	0.40	全細孔容積-メソ孔容積
メソ孔容積(2~30nm)	ml/g	0.14	0.18	0.20	BJH法で解析した2~30nm累積
平均細孔径	nm	1.79	1.84	1.91	BJH法

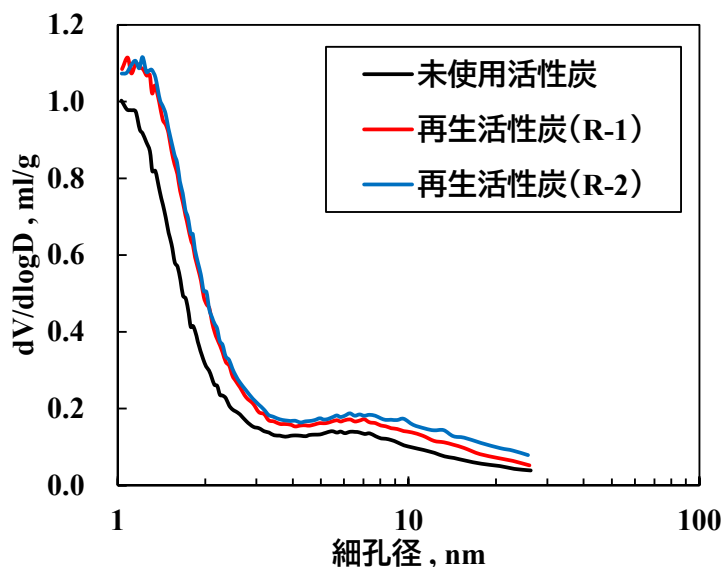


図 1 2 BJH 法による細孔径分布解析結果

> PFOS、PFOA の分解効率 (A) および分解除去率 (A_{DRE}) について

PFOS 及び PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項に従い、PFOS、PFOA の分解効率および分解除去率 (DRE) を試算した結果を表 1 7 に示す。なお、output における排ガスは表 1 5 に示す酸素濃度 12%換算値を用い、定量下限値以下の値については定量下限値を用いて試算した。

分解効率，% (A) の算出 = $\{1 - (E \div I)\} \times 100$

E: PFOS 又は PFOA の総排出量 (output: 再生活性炭、排水、排ガス)

I: PFOA等の総投入量 (input:PFAS 含有使用済み炭)

分解除去率，% (A_{DRE}) の算出 = $\{1 - (M \div I)\} \times 100$

M: 排ガス中の PFOS 又は PFOA 量 (output: 排ガス)

I: PFOA等の総投入量 (input:PFAS 含有使用済み炭)

R-1 については PFAS 含有使用済み炭のサンプリング方法が異なる場合 (input 値が異なる) の分解効率、分解除去率を示しており、input の PFAS 量により分解効率・分解除去率 (A_{DRE}) が大きく変化することがわかる。また、R-2 の分解効率、分解除去率からも、R-1 は吸着帯試験時の PFOS、PFOA 含有量の方が input 値としては妥当であると考えられる。

以上を踏まえ表 17 に示すとおり R-1、R-2 とともに PFOS の分解効率は 99%、分解除去率は 99.9% と試算され、技術的留意事項に示される分解効率 99.999% 以上、分解除去率 99.9999% は未達でとなったが、これは技術的留意事項にも記載されているとおり input 量 50,000 μg/kg 以下のため投入量が少ないためであると考えられる。一方、PFOA は R-1、R-2 とともに input 量が高いことから分解効率は 99.999%、分解除去率は 99.9999% を達成していることが確認された。

表 17 PFOS、PFOA の分解効率 (A) および分解除去率 (A_{DRE}) の試算結果

再生試験No				R-1				R-2		
熱賦活再生実施日				R7年11月7日		R7年11月7日		R8年1月16日		
名称				PFAS含有使用済み炭		PFAS含有使用済み炭 (吸着帯試験)		PFAS含有使用済み炭		
解析対象物質				PFOS	PFOA	PFOS	PFOA	PFOS	PFOA	
input	PFAS含有 使用済み炭	投入量		kg-dry	378	378	378	378	392	392
		PFOS/PFOA	含有量	μg/kg	1	9,720	30	77,700	34	81,000
	a.総量		μg	385	3,672,216	11,419	29,355,110	13,328	31,752,000	
output	再生活性炭	回収量		kg-dry	299	299	299	299	294	294
		PFOS/PFOA	含有量	μg/kg	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
			b.総量	μg	14.925	14.925	14.925	14.925	14.7	14.7
		排水 (スクラバー1)	排水量		m ³ /h	5.4	5.4	5.4	5.4	4.9
	再生時間		h	6	6	6	6	6	6	
	PFOS/PFOA		含有量	μg/L	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
			c.総量	μg	16.2	16.2	16.2	16.2	14.58	14.58
	排水 (スクラバー2)	排水量		m ³ /h	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432
		再生時間		h	6	6	6	6	6	6
		PFOS/PFOA	含有量	μg/L	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
			d.総量	μg	1.296	1.296	1.296	1.296	1.296	1.296
	排ガス	乾きガス量		m ³ /h	2330	2330	2330	2330	1950	1950
再生時間		h	6	6	6	6	6	6		
PFOS/PFOA		含有量	μg/m ³	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	
		e.総量	μg	5.592	5.592	5.592	5.592	4.68	4.68	
分解効率(A)=(1-((b+c+d+e)/a))*100				%	90.11623	99.99896	99.66711	99.99987	99.73547	99.99989
分解率除去率(A _{DRE})=(1-(e/a))*100				%	98.54602	99.99985	99.95103	99.99998	99.96489	99.99999

※斜字は定量下限値の値を使用

> フッ素 (F) 収支の試算について

フッ素収支について、燃焼イオンクロマトグラフ法により得られた各活性炭中の総フッ素量とイオンクロマトグラフ法により得られた排水、排ガス中のフッ化物イオン量（排ガスは酸素濃度 12%換算値による補正值を用いてフッ素換算した値。フッ化水素量×(19/20)）から試算した結果を表 1 8 に示す。

なお、「再生時の結果使用」の値は再生時に得られた結果をそのまま使用、「BL との差分」は未使用活性炭や排水・排ガス中の無負荷時のフッ素量を除いた場合の 2 パターンとし、定量下限値以下の値については定量下限値を用いて、以下の式にて試算した。

$$\text{フッ素 (F) 収支, \%} = \frac{\text{output (再生活性炭+排水 (スクラバー1+スクラバー2) の F 量+排ガス中の F 量)}{\text{input の F 量}} \times 100$$

表 1 8 に示すとおり試算方法によらず F の収支は、R-1 での PFAS 含有使用済み炭（吸着帯試験）で 92%、R-2 での PFAS 含有使用済み炭で 114%と、概ね 100%に近い値が試算され、PFAS 含有使用済み炭中の F は一部が再生活性炭に残留するものの、約 70%以上が排水中にフッ化物イオンとして移行していることがわかった。また、R-2 の F 収支は 100%を超えているが、サンプリングや分析精度の影響を加味すると R-1、R-2 試験共に比較的高い F の収支であると考えられる。

表 1 8 フッ素収支の試算結果

解析について				再生時の結果を引用			BLとの差分			
				R7年11月7日		R8年1月16日	R7年11月7日		R8年1月16日	
試験日				R-1		R-2	R-1		R-2	
再生試験No				R-1		R-2	R-1		R-2	
名称				PFAS含有使用済み炭	PFAS含有使用済み炭 (吸着帯試験)	PFAS含有使用済み炭	PFAS含有使用済み炭	PFAS含有使用済み炭 (吸着帯試験)	PFAS含有使用済み炭	
input	PFAS含有 使用済み炭	投入量	kg-dry	378	378	392	378	378	392	
		総フッ素	含有量	µg/kg	410,000	504,333	770,000	400,000	494,333	760,000
			a.総量	µg	154,898,000	190,537,133	301,840,000	151,120,000	186,759,133	297,920,000
output	再生活性炭	回収量	kg-dry	299	299	294	299	299	294	
		総フッ素	含有量	µg/kg	150,000	150,000	130,000	150,000	150,000	130,000
			b.総量	µg	44,775,000	44,775,000	38,220,000	44,775,000	44,775,000	38,220,000
	排水 (スクラバー1)	排水量	m ³ /h	5.4	5.4	4.9	5.4	5.4	4.9	
		再生時間	h	6	6	6	6	6	6	
		c.Fイオン量	µg/L	3,500	3,500	9,150	3,400	3,400	8,930	
	排水 (スクラバー2)	c.Fイオン量	µg	113,400,000	113,400,000	266,814,000	110,160,000	110,160,000	260,398,800	
		排水量	m ³ /h	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	
		再生時間	h	6	6	6	6	6	6	
		d.Fイオン量	µg/L	5,500	5,500	14,000	5,390	5,390	13,780	
排ガス	d.Fイオン量	µg	14,256,000	14,256,000	36,288,000	13,970,880	13,970,880	35,717,760		
	乾きガス量	m ³ /h	2330	2330	1950	2330	2330	1950		
	再生時間	h	6	6	6	6	6	6		
	フッ化水素量	µg/m ³	184	184	196	184	184	196		
	e.Fイオン量	µg	2,567,755	2,567,755	2,289,130	2,567,755	2,567,755	2,289,130		
Fの収支((b+c+d+e)/a)*100				%	113	92	114	113	92	113

※斜字は定量下限値の値を使用

2.2.4 泡沫分離処理試験結果

泡沫分離処理試験 S-3 の結果を表 19 (PFOA)、表 20 (PFOS) に示す。

試験原水は発生させた泡の保持力が弱く、発生後速やかに破泡してしまうため、泡沫のみを効率よく分離回収するのは困難であった。今回の試験では、Run4 (ラボスケールでのアスピレータ吸引回収) や Run6 (実機 2 次前処理装置での少流量処理、泡越流回収) での濃縮分離効率が高く、Run6 では PFOA で約 8 倍、PFOS で 11 倍の濃度に濃縮分離が行われた。その際の処理水中の濃度は約 60% 程度の低減が出来ており、後の活性炭吸着処理の負荷低減が期待できる。なお、濃縮倍数、除去率は以下の式により求めた。

濃縮倍数 = 濃縮水濃度 / 原水濃度、除去率 = (1 - 処理水濃度 / 原水濃度) × 100

表 19 泡沫分離処理試験結果 (対象 PFOA)

試験	発泡方法	風量	反応容積	反応時間	泡沫分離方法	泡回収割合	原水濃度 (ng/L)	濃縮水濃度 (ng/L)	濃縮倍数 (倍)	処理水濃度 (ng/L)	除去率 (%)	備考
Run 1A	散気球	2.5 L/min	2000 ml	7.5 分 (バッチ)	下部ドレン抜	10%	310,000	330,000	1.1	260,000	16%	2段濃縮 最終濃縮率 187 %
Run 1B						10%	330,000	580,000	1.8	360,000	-9%	
Run 2A	微細散気チューブ	2.5 L/min	2000 ml	7.5 分 (バッチ)	下部ドレン抜	10%	380,000	460,000	1.2	290,000	24%	2段濃縮 最終濃縮率 126 %
Run 2B						10%	460,000	480,000	1.0	370,000	20%	
Run 3	微細散気チューブ	2.5 L/min	2000 ml	7.5 分 (バッチ)	泡回収・復水	5%程度	380,000	500,000	1.3	160,000	58%	発泡剤(中性洗剤)添加 0.5ml/2000ml
Run 4	微細散気板	4L/min	500 ml	10 分 (バッチ)	アスピレータ吸引回収	20%	266,000	1,221,000	4.6	16,000	94%	ラボテスト
Run 5	微細散気チューブ(大)	60 L/min	500 L	3.6 m ³ /h (連続通水)	越流 (スキマー回収)	5%	370,000	800,000	2.2	210,000	43%	一次前処理装置 TESTRUN
Run 6	微細散気チューブ(大)	10 L/min	9 L	0.18 m ³ /h (連続通水)	越流 (配管流出・回収)	5%	370,000	3,100,000	8.4	130,000	65%	二次前処理装置 TESTRUN
Run 7	微細散気チューブ(大)	60 L/min	500 L	3.6 m ³ /h (連続通水)	越流 (配管流出・回収)	10%	370,000			340,000	8%	一次前処理装置 TESTRUN

表 20 泡沫分離処理試験結果 (対象 PFOS)

試験	発泡方法	風量	反応容積	反応時間	泡沫分離方法	泡回収割合	原水濃度 (ng/L)	濃縮水濃度 (ng/L)	濃縮倍数 (倍)	処理水濃度 (ng/L)	除去率 (%)	備考
Run 5	微細散気チューブ(大)	60 L/min	500 L	3.6 m ³ /h (連続通水)	越流 (スキマー回収)	5%	580	800	1.4	270	53%	一次前処理装置 TESTRUN
Run 6	微細散気チューブ(大)	10 L/min	9 L	0.18 m ³ /h (連続通水)	越流 (配管流出・回収)	5%	580	6,500	11.2	200	66%	二次前処理装置 TESTRUN
Run 7	微細散気チューブ(大)	60 L/min	500 L	3.6 m ³ /h (連続通水)	越流 (配管流出・回収)	10%	580			260	55%	一次前処理装置 TESTRUN

3. 実証試験の評価項目

3.1 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。

② PFAS 含有使用済み炭の熱賦活再生

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 5 μg/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。

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（ A_{DRE} ）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。

また、PFAS 含有使用済み炭中の PFOS、PFOA 濃度を正確に評価するためのサンプリング方法、各分析における定量下限値の低下および PFAS 含有使用済み炭中の PFAS 類の含有量評価方法などの課題が得られた。

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。

3.2 対策技術の新規性・将来性

活性炭を用いた PFAS 類の吸着除去は、既に各 PFAS 対策の処理方法として国内外を問わずに広く普及している。また、国内においては現状、PFAS 処理に供した PFAS 含有使用済み炭は産業廃棄物として焼却処分されている。その中で、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。

以上より、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、今後は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、非常時の対応や、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。

3.3 対策技術の経済効率性

本技術の試験結果から、カートリッジ式活性炭吸着装置による処理水量や原水濃度に応じた運用により PFOS 等濃度の低減が可能であること、また、PFAS 含有使用済み炭の熱賦活再生が可能であり再生活性炭を再利用できることが確認されたことから、以下のとおり経済性を試算した。

カートリッジ活性炭吸着装置は従来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も、当初に設定した 756 円/m³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/m³となった (試験期間中の総処理水量 3,199m³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/m³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/m³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。

3.4 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 <1 μg/L) および排ガス中の管理目標参考値 (PFOS+PFOA <0.06 μg/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 2-1 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。

表 2 1 に示すように、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 2 1 CO₂ 排出量の試算結果

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 CO₂ の排出係数は $44\text{-CO}_2 / 12\text{-C} = 3.67$ となる。また、CO₂ の排出量は $3.67 \times \text{炭素分率} (90\%)$ で $3.3\text{t-CO}_2/\text{t-PFAS}$ 含有使用済み炭とした。

4. 当該技術の今後の展望

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ものの、比較的容易かつ安価に設置できることが期待される。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事が予想されるが、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。

いずれにしても、活性炭での吸着除去とその再生過程での PFOS、PFOA の熱分解を実現できるこの活性炭再生循環運用システムは、経済性、環境負荷低減および循環型社会の構築の観点から有効であると考えられる。

また、米国では既に活性炭を用いた PFAS 類の吸着および熱賦活再生による熱分解と再生活性炭の活用が商業化されていることから、国内で熱賦活再生および再生活性炭の活用を普及していくことが期待される。これを後押しするためには、本技術を含む使用済み活性炭の熱賦活再生および再生活性炭の活用についてのガイドライン（例えば、PFOS 及び PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項）の制定なども有効であると考えられる。その為にも、活性炭再生事業者での二次汚染防止に対する科学的技術根拠の確保や自社に応じた運用ルール（二次汚染防止を観点にした受入れ基準・環境評価）の制定などが社会的信頼性向上のためにも必要不可欠であると考えられる。

引用文献

- 1). Junli Wang, et al. Pyrolysis of Two Perfluoroalkanesulfonates (PFASs) and PFSA-Laden Granular Activated Carbon (GAC): Decomposition Mechanisms and the Role of GAC. Environmental Science & Technology (2024)
- 2). Anna Vilén, et al. Comparative life cycle assessment of activated carbon production from various raw materials. Journal of Environmental Management 324(2022)