

# 環境省・各務原 実証試験結果 報告 LFP法による PFAS水浄化



高除去率・低コスト・低環境負荷を実現する  
ロングライフ水浄化技術への取り組み

2025年1月30日

株式会社 流機エンジニアリング

山内 仁

## 会社案内

# “フィルターイノベーション”を展開し 環境課題を解決する

- ◆設立：1977年5月
- ◆代表取締役社長：西村 聡
- ◆本社：東京都三田3-4-2
- ◆製造：つくばテクノセンター
- ◆開発：市原テクノセンター
- ◆従業員：166名（2024年9月末）



# (MF膜・精密ろ過膜) フィルターの特徴

ポリエステル基材

ろ過精度は $0.15\mu\text{m} \times 99.95\%$  or  $0.3\mu\text{m} 99.9\%$

耐熱  $120^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{pH}3\sim 11.5$  の液の処理可能

表面ろ過、膜表面で粒子を捕集。自動表面洗浄機能、目詰まりを起さず連続ろ過が可能

ろ過時の差圧  $1\sim 100\text{kPa}$

運転時のFlux  $\sim 400\text{LMH}$  (参考: ポンプ圧力- $10\text{kPa}$ 、純水のFlux  $12,000\sim 19,000\text{LMH}$ )



# フィルターに続く、環境装置ツリー

集塵機

GFP法：大気・排気 **PFAS, VOC, 悪臭等**

大気をろ過



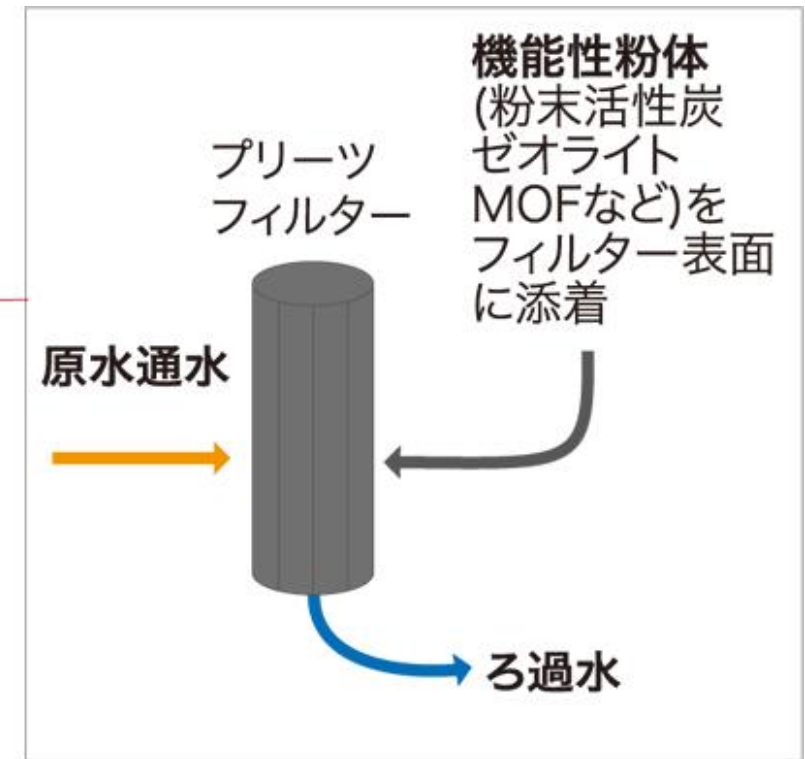
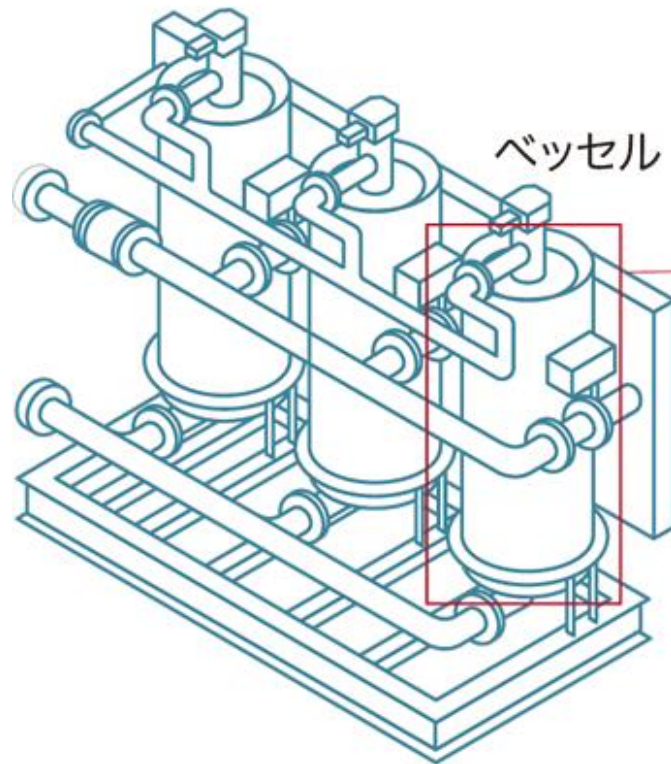
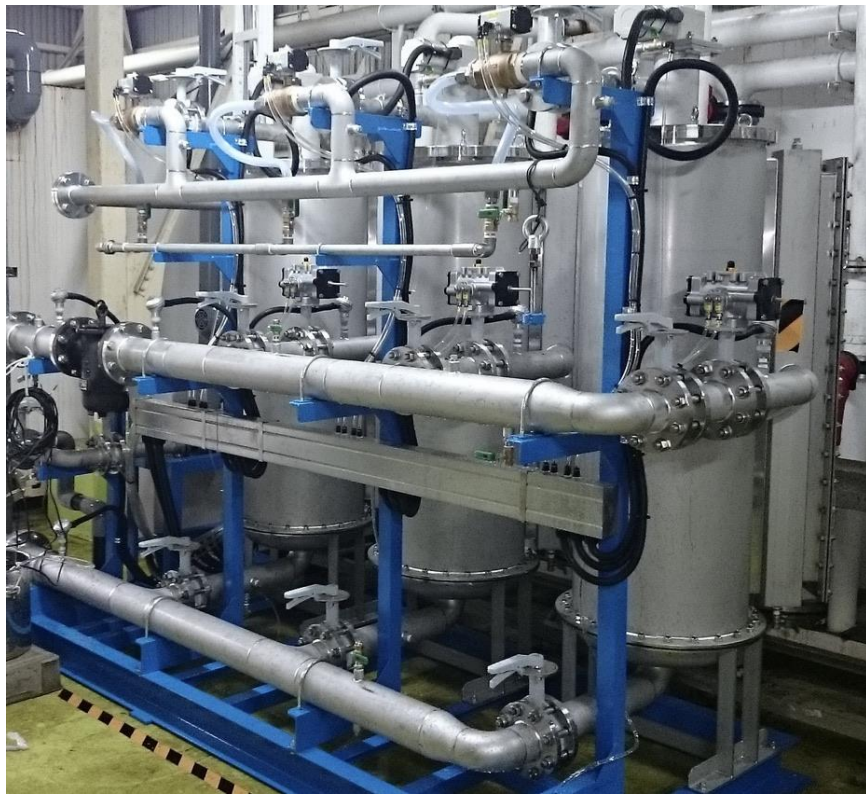
フィルター  
に  
機能性粉体  
(粉末活性炭)  
を  
添着



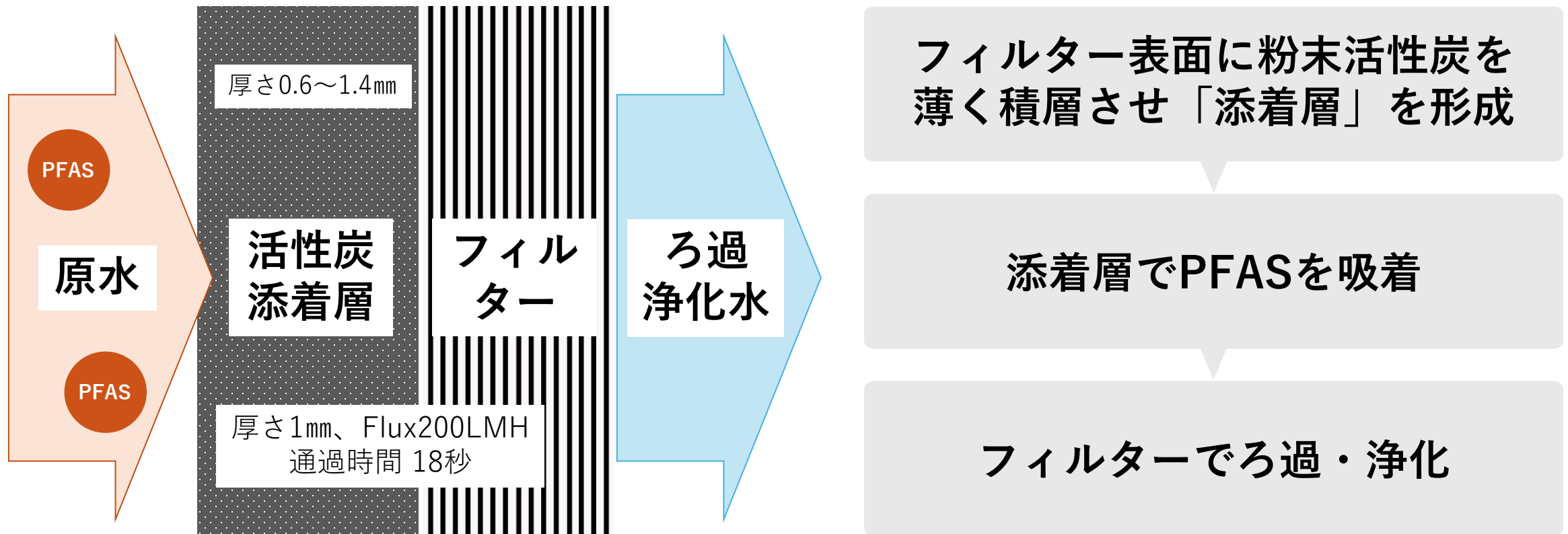
ECOクリーン：MF膜ろ過装置

LFP法：水 **PFAS, VOC, 悪臭, 色等**

# LFP = Liquid を Filter に添着させた Powder で ろ過・浄化



# 技術の原理と仕組み

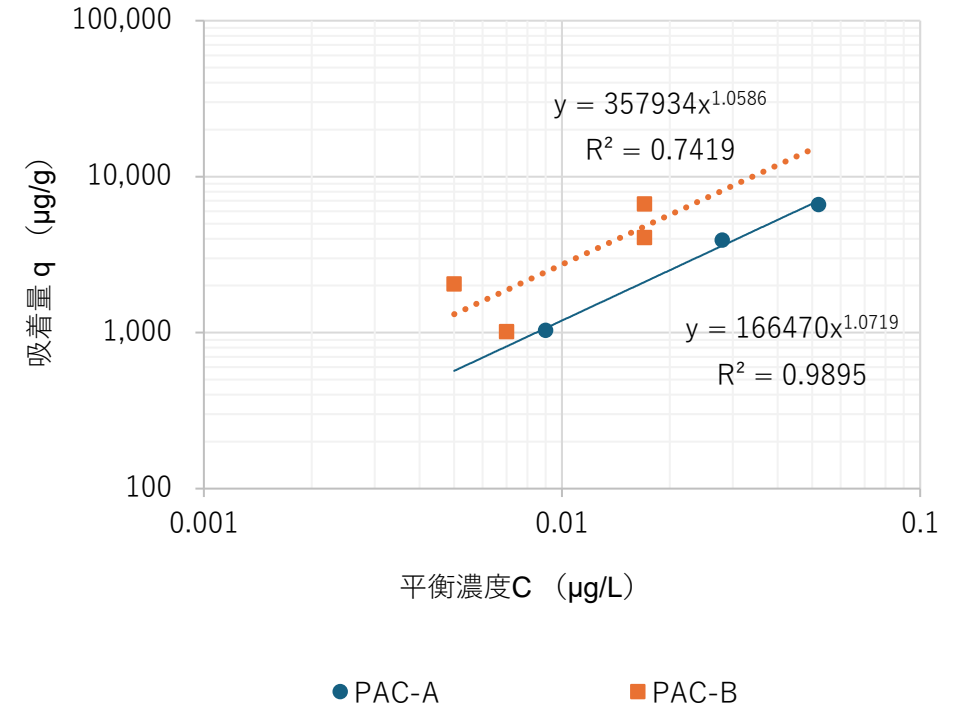
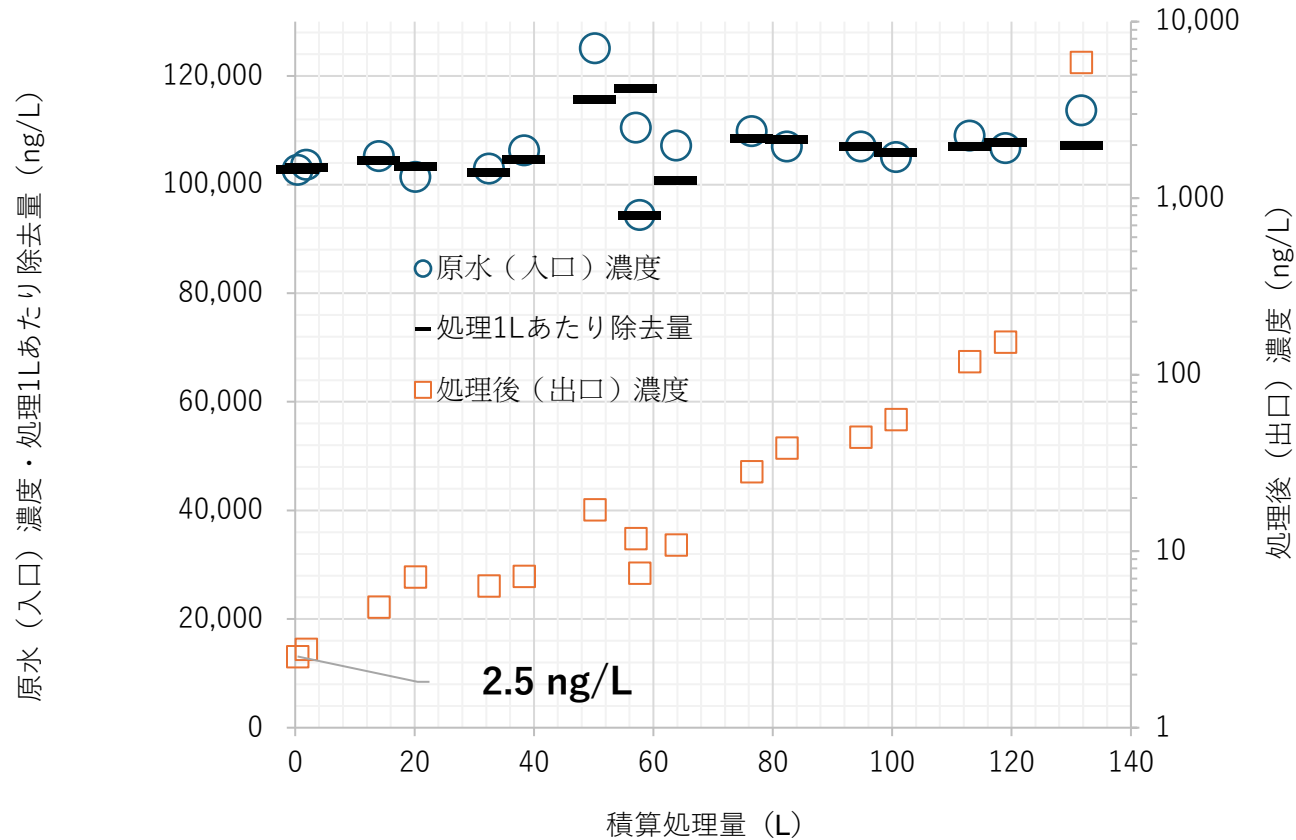


**機能性粉体細粒化のメリット**：細粒化により、吸着剤の比表面積が増加し、吸着速度と吸着容量が向上

Masud Hassan, Yanju Liu, Ravi Naidu, Jianhua Du, Fangjie Qi (2020年) : Adsorption of Perfluorooctane sulfonate (PFOS) onto metal oxides modified biochar.

**同上 デメリット**：粉体再生および回収の困難さ、流体抵抗の増加、凝集のリスク（吸着性能が低下）

# 環境省実証試験 取り組み前までのデータ



PAC-A（石炭系）とPAC-B（ヤシ殻炭）の吸着等温線  
 吸着量 $q$  石炭系 < ヤシ殻炭

## LFP法室内試験器：PFOA（10万ng/L）単独溶液 積算処理量と処理後濃度

西村章・山内仁(2022)：新技術・プリーツフィルター機能性粉体法（略称LFP法）によるPFAS汚染地下水の浄化

使用試験器：φ 70mm平膜、定流量試験器。 使用活性炭（PAC-B）：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（m<sup>2</sup>/g）1,020以上、1,310 以下

# フィルター及び吸着剤を使用した類似技術との比較

PFAS 除去技術		原理 吸着剤 交換方法	PFOA 原水濃度 除去率	エネルギーコスト・廃棄物減容化 に関する指標			
名称	吸着剤			操作圧力	Flux (LMH)	前処理 精度	廃棄物 濃縮水 発生割合
混合マトリック ス複合ナノ濾過 膜 (MMCNF) <sup>1)</sup>	シクロデキス トリン	NF膜の基材に吸 着剤を練り込む フィルターごと 交換	285.5 $\mu\text{g/L}$ 最大 99.9%	200kPa	15.4	NF > MF	10-30 %
<b>LFP</b>	ヤシ殻活性炭	MF膜に吸着剤粉 体を添着 吸着剤のみ交換	102 $\mu\text{g/L}$ 最大 99.998%	5~100kPa 理想5~ 25kPa	100~200		1/50,000以 下

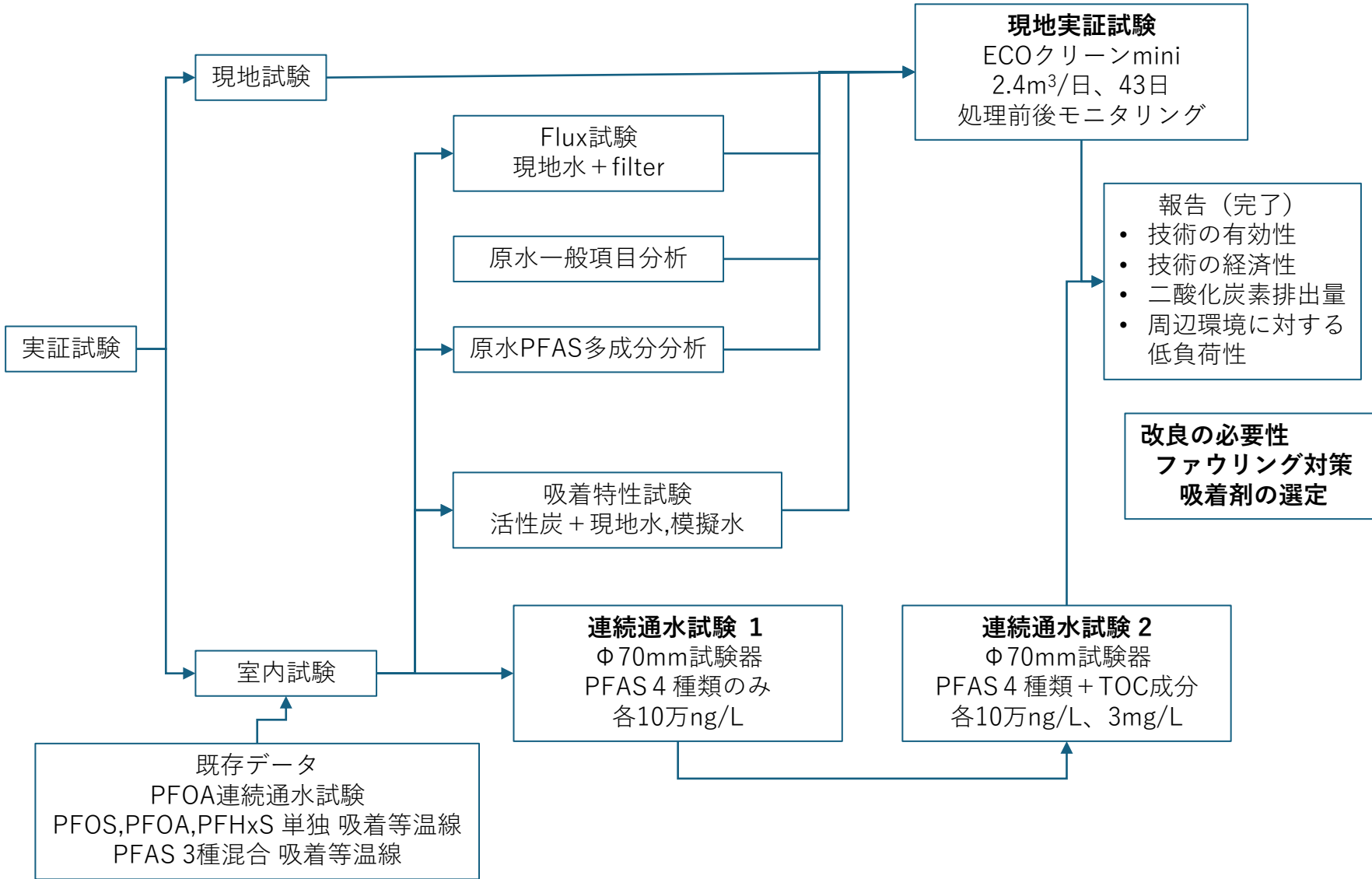
1): Mohit Chaudhary, Michal Sela-Adler, Avner Ronen, Oded Nir (2023), Efficient PFOA removal from drinking water by a dual-functional mixed-matrix-composite nanofiltration membrane,



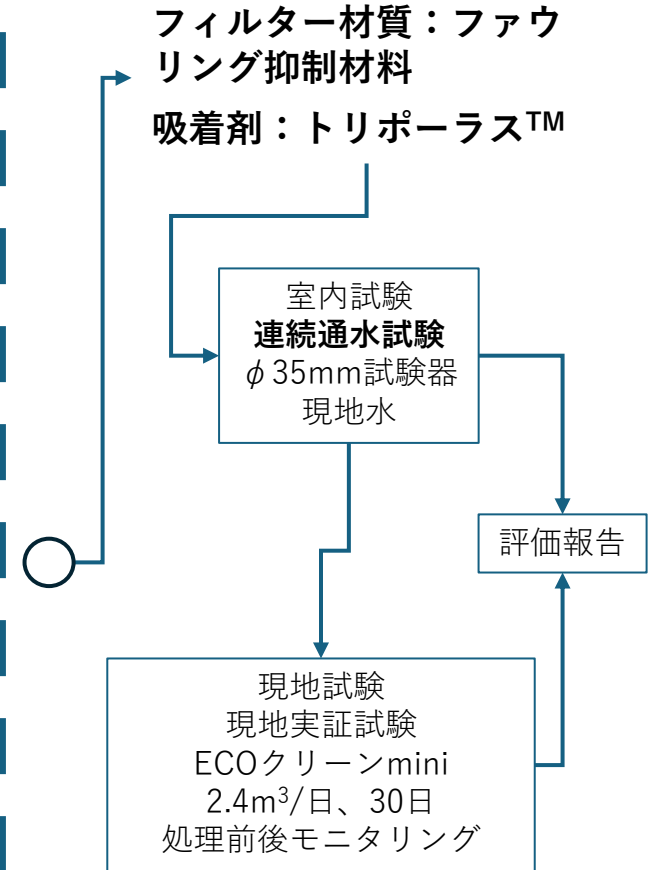
環境省“令和5年度低コスト・低負荷型土壤汚染調査対策技術検討調査  
「揚水及びフィルター（精密ろ過膜）と機能性粉体（活性炭）を用いた処  
理法（以下、本技術）によるPFAS地下水汚染の拡大防止技術」による研  
究委託業務”（2024年3月、弊社が受託）（以下、**環境省実証試験**）の現  
地実証試験および室内試験成果の一部を引用する。

# 試験フロー

## 環境省実証試験



## 各務原実証試験



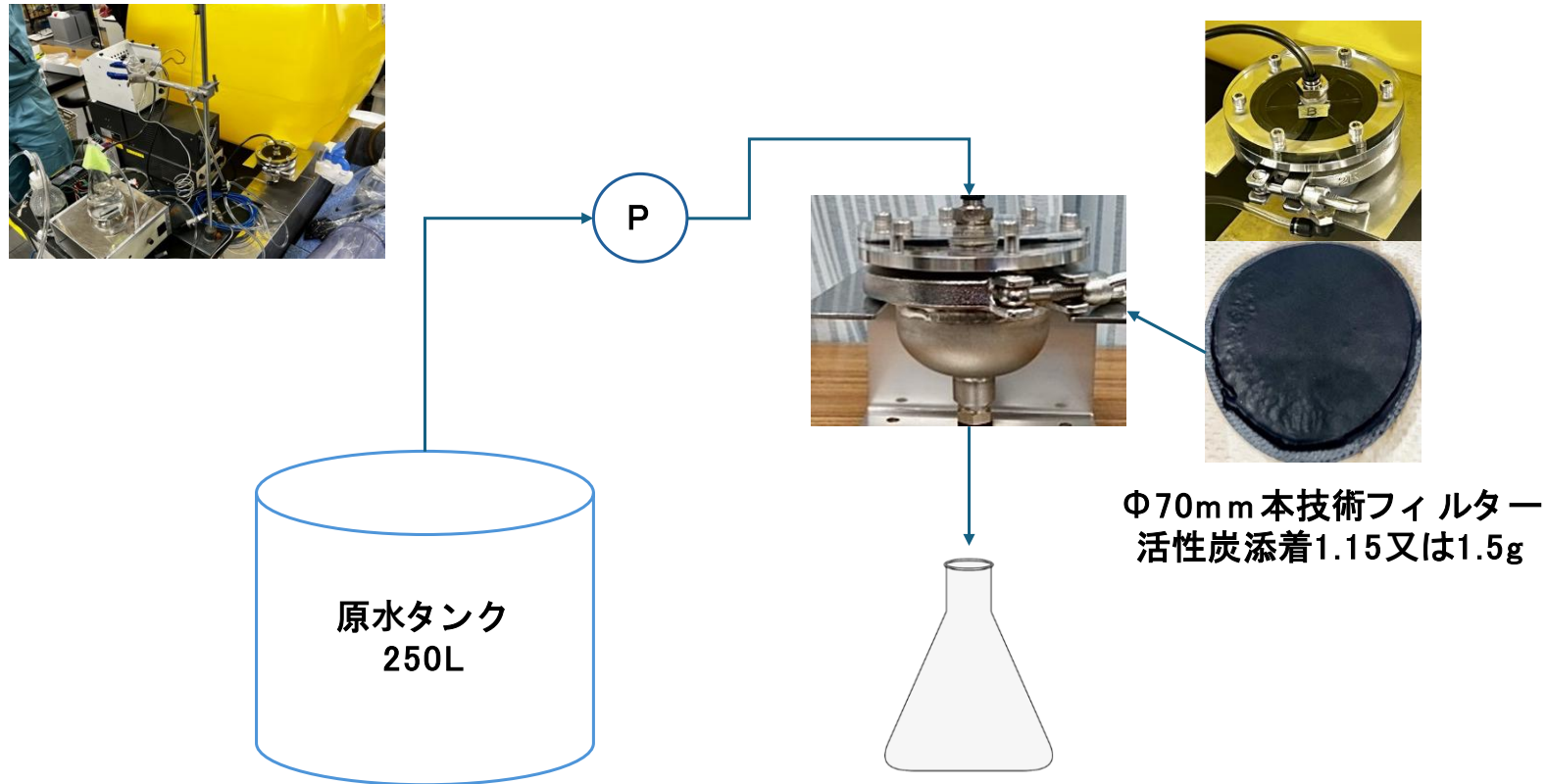
# 環境省実証試験

# 課題と試験方法

課題	予想される現象	実証試験での取り組み	試験方法
1 現場で長期浄化運転が可能か	ファウリングによる フィルター差圧の上昇、 ろ過停止	商業ベース機種を用いて、 実汚染現場で浄化	<b>現地試験：現地実証試験</b> 現地に <b>商業機</b> を持ち込み実施 湧水を43日間連続処理 モニタリング：PFOS, PFOA, PFHxS, 6:2FTS(以上 全期間)、PFHxA, PFPeA, PFBA (開始直後と処理量 16.5m <sup>3</sup> の2時期)
2 TOC等の溶存物質共存下での 吸着除去特性が不明	PFAS除去効率 低下	TOC共存下での浄化試験	<b>室内試験：連続通水試験1,2</b> <b>LFP法技術の試験器</b> 使用 模擬試験水 (各10万ng/L) を 処理
3 高濃度・複数PFAS種類共存 下での吸着除去特性が不明		高濃度PFAS 4種類のみ での浄化試験	TOC(フミン酸)3mg/L

使用活性炭：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 (m<sup>2</sup>/g) 1,020以上、1,310以下)

# 室内試験での使用試験器・処理フロー

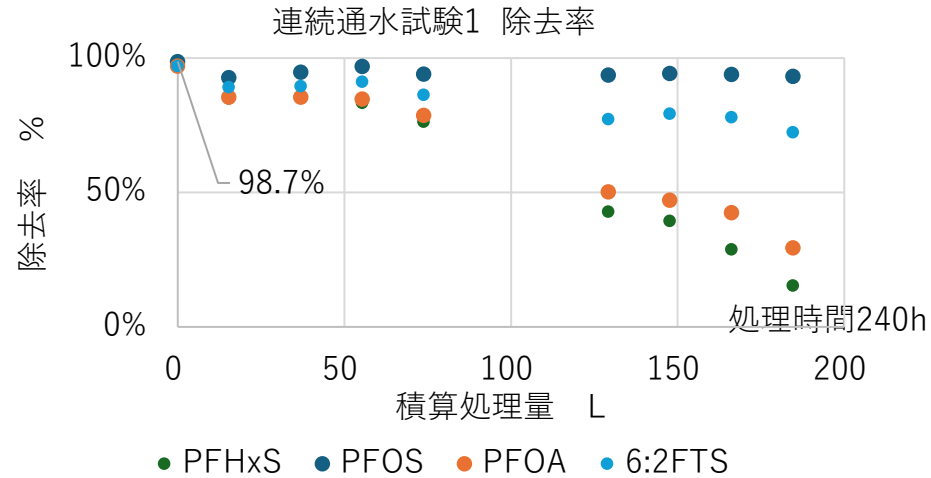


定流量試験器使用、フィルター大きさ・有効直径φ70 mm（面積1/260m<sup>2</sup>）、Flux200 LMH（0.77L/h）  
活性炭添着量 300 g/m<sup>2</sup>と500g / m<sup>2</sup>（φ70 mm平膜に粉末活性炭 **1.15g**または**1.92g** 添着）  
模擬試験水：PFOS, PFOA, PFHxS, 6:2FTS（各100,000 ng/L に調整）、TOC（フミン酸）3mg/L  
試験時間（通水時間）：240時間  
測定時間：0.5, 2, 4, 8, …, 240 h 後  
測定項目：pH, PFOS, PFOA, PFHxS, 6:2FTS, TOC, 水温, 入口・出口圧力, 流量（出口）

# 室内試験結果

## 汚染源を想定した高い濃度での試験

連続通水試験 1 条件：純水 + PFAS4種 各10万ng/L



### 連続通水試験1の結果

PFOS 及び 6:2FTS については、積算処理量 185 L まで除去率は 80%程度以上を維持

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%を下回り、積算処理量 185 L の時点では30~20%まで低下

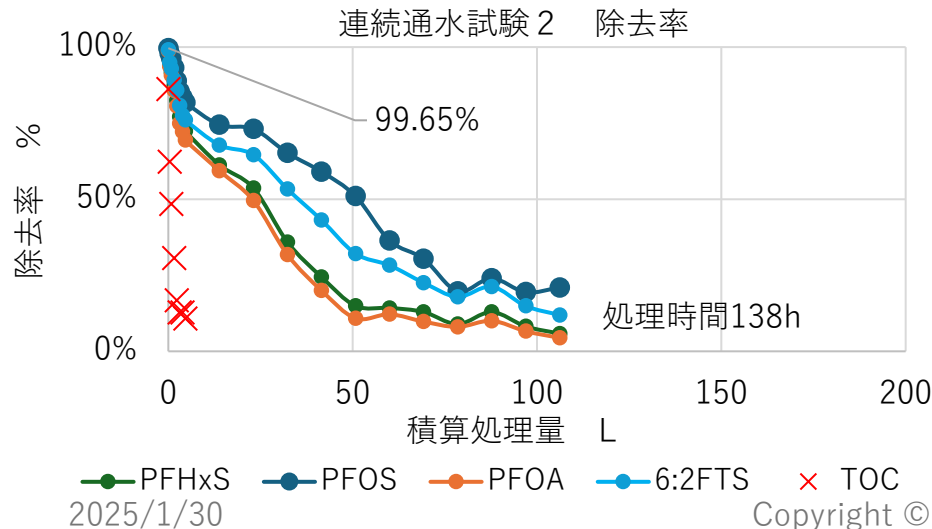
### 連続通水試験 2 の結果

TOC は積算処理量が 5 L の段階で除去率が 10%まで低下

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、PFOS では積算処理量約 80 L で除去率 20%程度まで低下

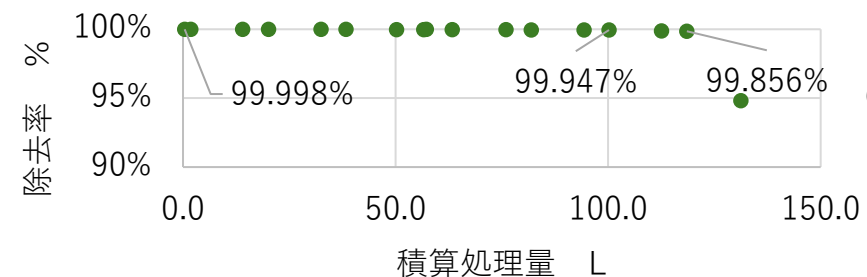
連続通水試験 2

条件：純水 + PFAS4種各 10万ng/L+TOC (フミン酸試薬) 3mg/L



PFAS4種：PFOS, PFOA, PFHxS, 6:2FTS

対照<sup>1)</sup> PFOA (単独) 10万ng/L

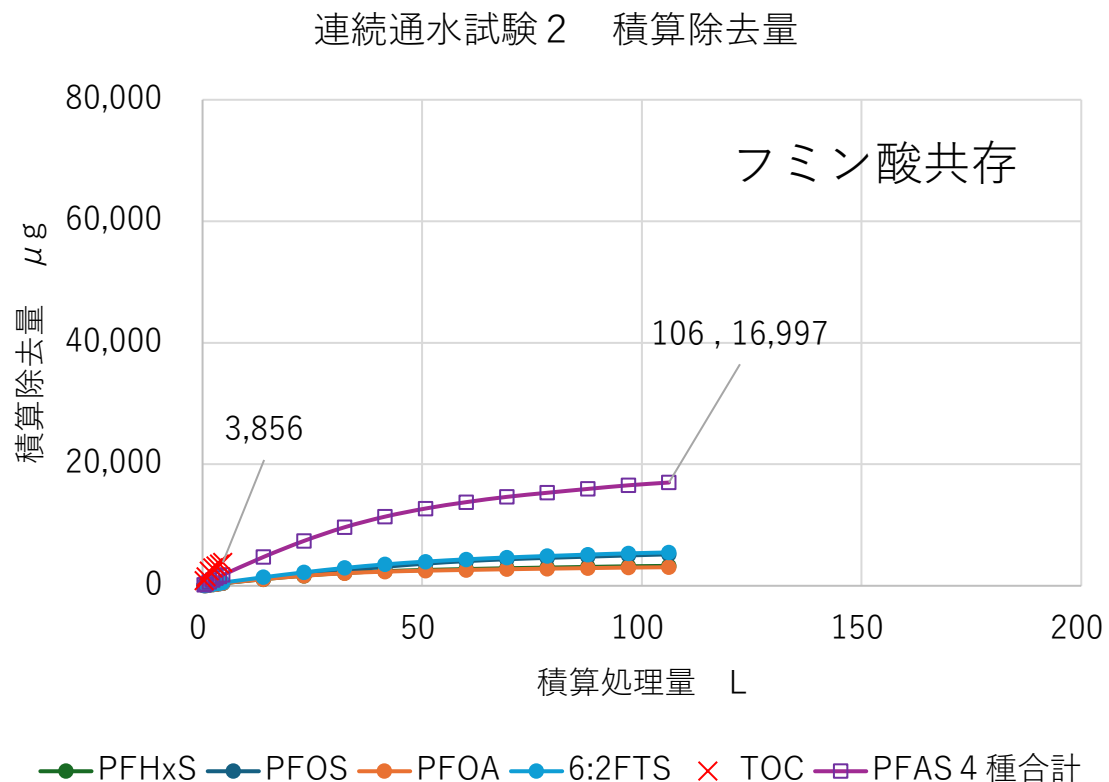
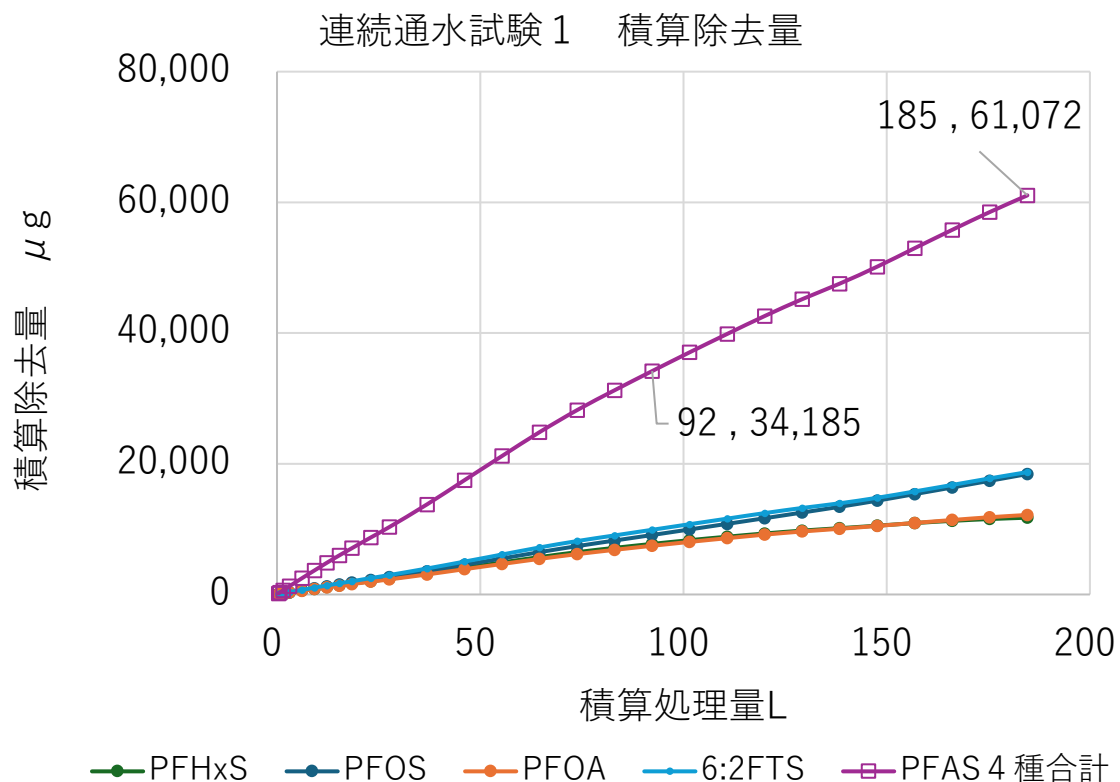


対照では  
100Lまで  
99.9%以上の  
除去率

山内仁・西村章・伊禮敏郎・宮城盛・草場周作・安原雅子 (2023) :PFAS 地下水汚染対策、沖縄の湧き水と生物多様性の保全、第28回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集 p438-442, 図3を編集

# 室内試験結果

## TOC共存下での積算除去量、吸着容量の比較



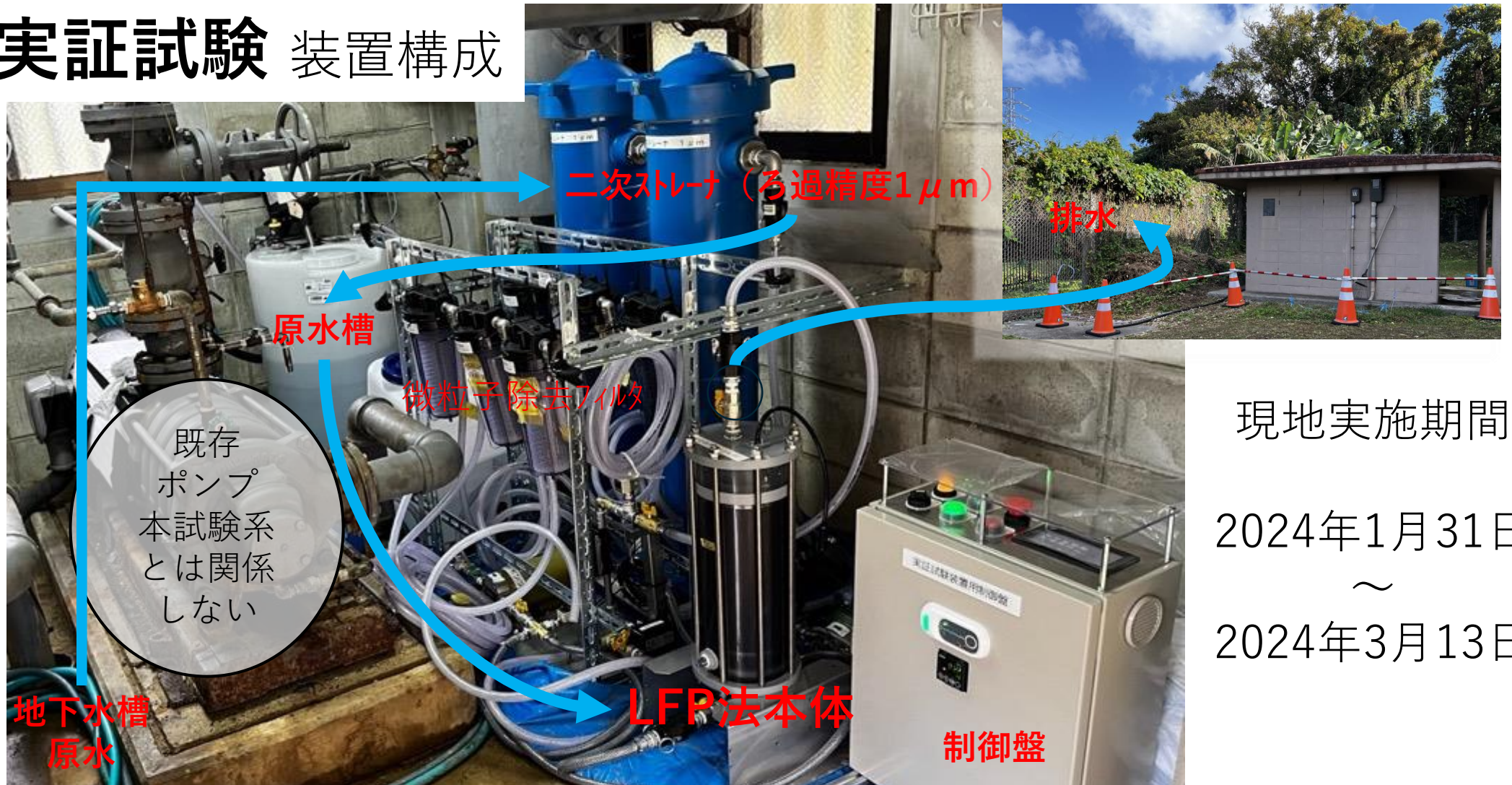
使用活性炭量 1.15g

試験1 PFAS4種各 10万ng/L 吸着容量 58,000 µg/g 以上 (5.8 %以上)

試験2 同上+TOC(フミン酸) 3mg/L添加 吸着容量 14,800 µg/g 程度 (1.5 %) . . . 試験1の1/4

改良点: TOC等で示される**自然有機物 (NOM)** に影響されない吸着剤の選定が必要

# 現地実証試験 装置構成



現地実施期間  
2024年1月31日  
～  
2024年3月13日

湧水A  
湧水B

地下水槽  
原水

Flux : ECOクリーンmini (フィルター面積1m<sup>2</sup>) 使用  
初期設定 Flux100 LMH、処理量100 L/h (2.4 m<sup>3</sup>/日)、運転43日間  
活性炭添着量500 g/m<sup>2</sup> (同装置では活性炭**500g**使用)

# 現地実証試験・原水の水質

	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	—	—

測定方法EPA Method1633(2022, LC/MS/MS法)、測定PFAS40種中で検出されたPFAS種を記載

—：測定せず

2025/1/30

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	°C	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
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
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

採水日：2023年11月28日

## 浄化時のモニタリング対象PFAS種

PFOS、PFOA、PFHxS（以下、PFAS 3種）

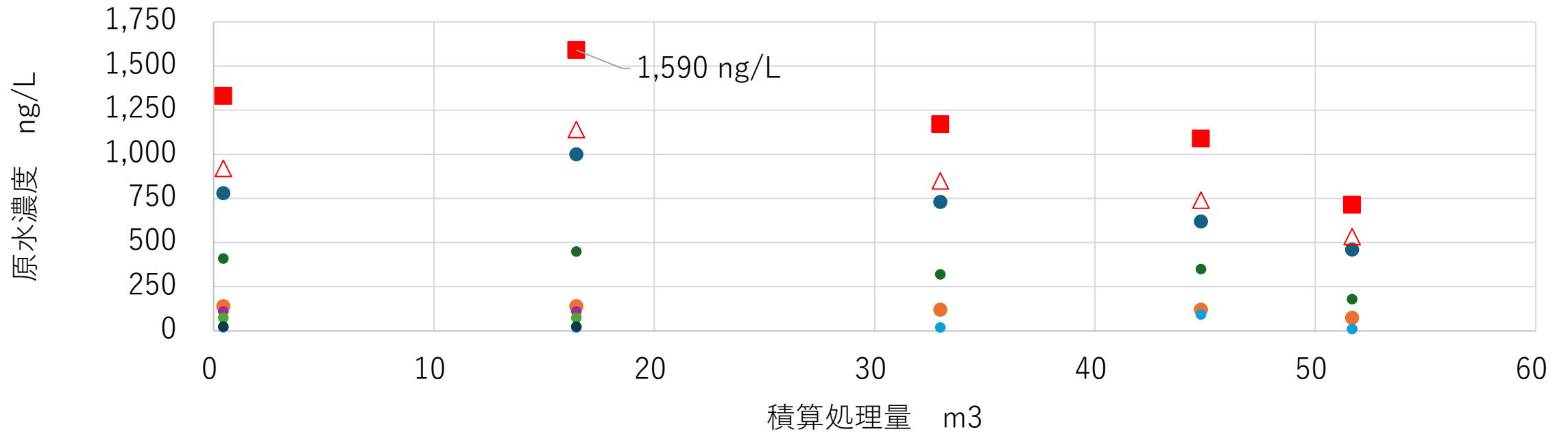
同上 + 6:2FTS（以下、PFAS 4種）

同上 + PFHxA、PFPeA、PFBA（以下、PFAS 7種）



# 現地実証試験 原水PFAS濃度の推移

現地試験（2024年1月31日－3月13日）期間中のPFAS濃度



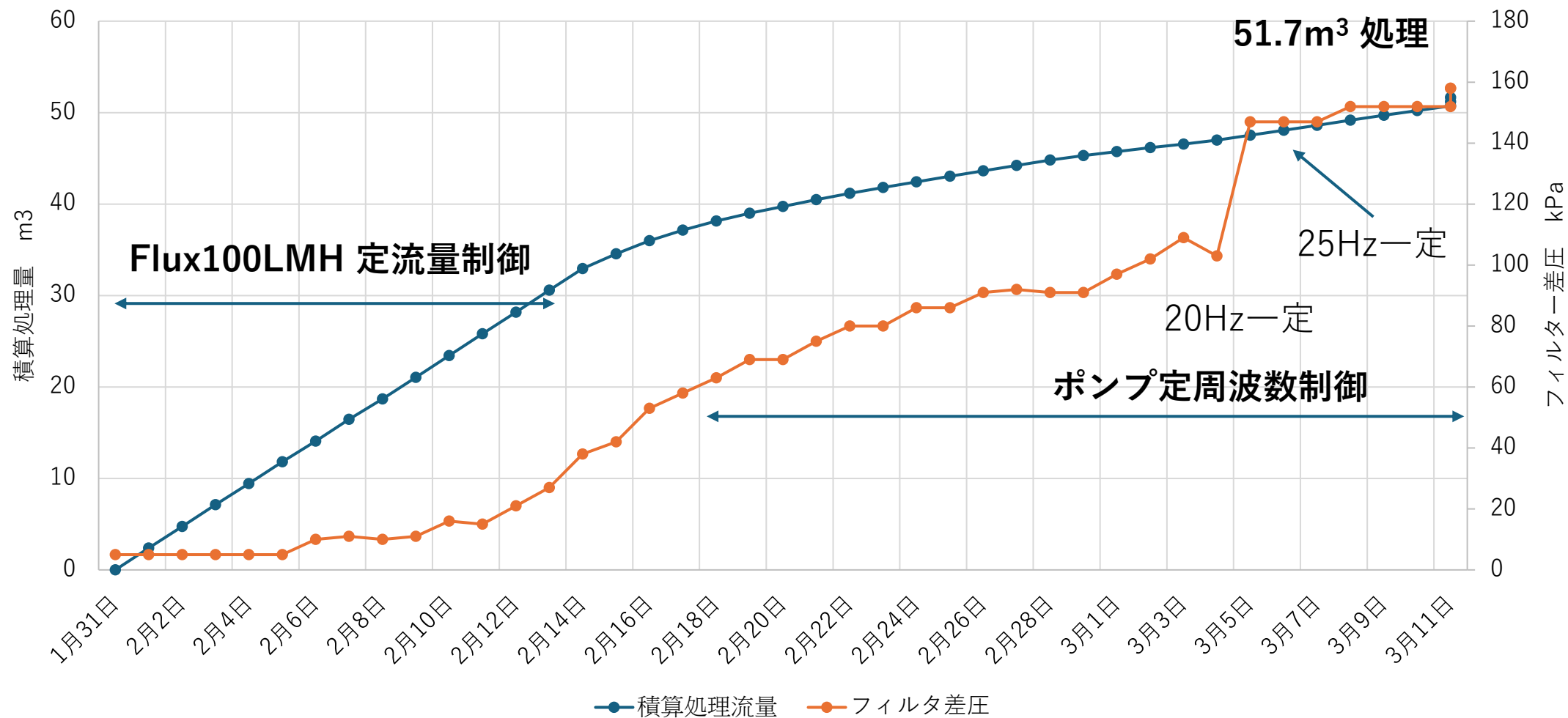
● PFOS ● PFOA ● PFHxS ● 6:2FTS ● PFHxA ● PFPeA ● PFBA △ PFOS+PFOA合算 ■ PFAS 3種合算

PFAS3種：PFOS, PFOA, PFHxS

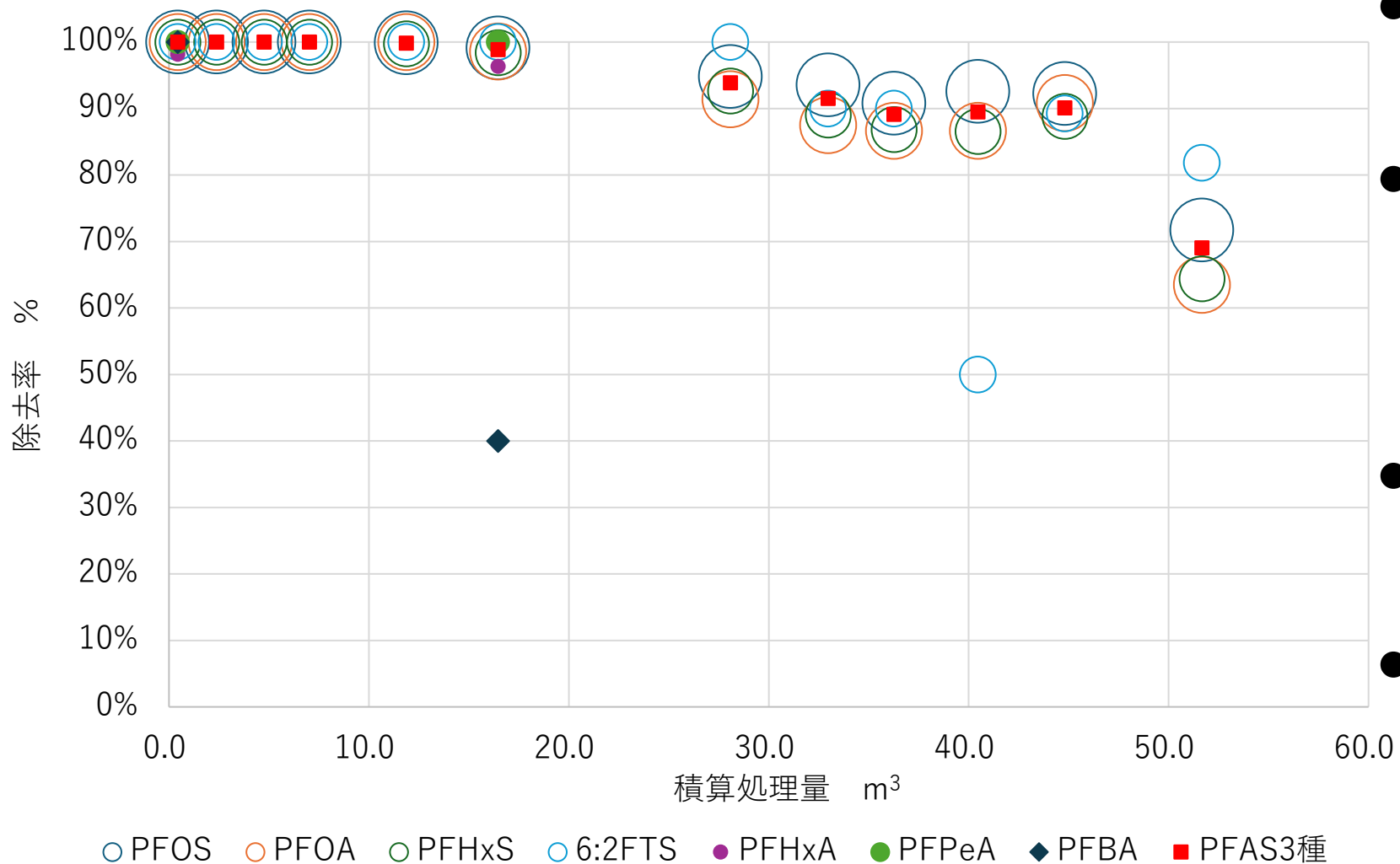
PFOS及びPFOAの合算値は534～1,140 ng/Lの範囲で推移

# 運転制御と処理量

積算処理量とフィルター差圧

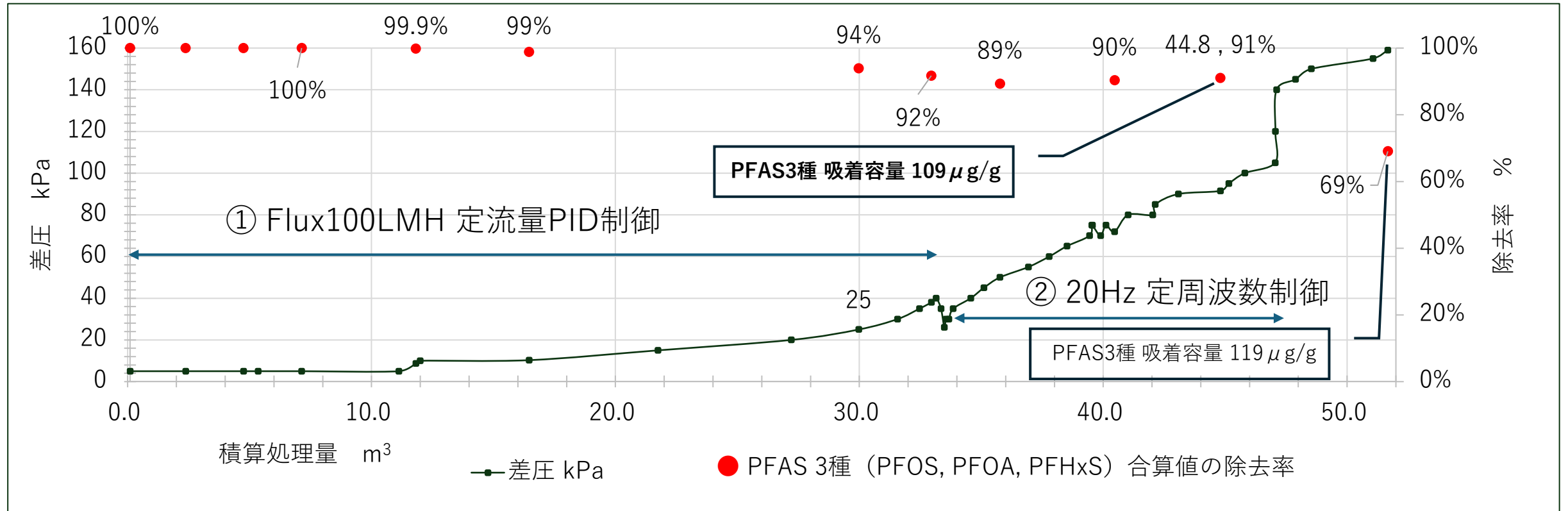


# 積算処理量と各PFAS種 除去率



- PFAS 7種で処理による濃度の低減が認められた（積算処理量が16.5 m<sup>3</sup>以降はPFAS 4種のデータのみ）
- PFOS及びPFOAの濃度（合算値）の処理後濃度は、試験開始から6日後までは1 ng/L以下（NDを含む）（処理量11.8m<sup>3</sup>）
- 積算処理量が16.5 m<sup>3</sup>の（開始8日目）時点で、PFBA除去率が40%と低下
- PFAS 3種 処理量 44.8 m<sup>3</sup>（29日目）まで、PFAS 3種の濃度の合算値で除去率概ね90%以上

# 積算処理量と差圧・PFAS 3種除去率



- ① 定ポンプ周波数制御（ポンプ周波数20Hz一定）することで、**PFAS 3種除去率は90%程度で積算処理量44.8m³まで一定**
- ② 文献<sup>1)</sup>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**
- ③ 改良点：**高除去率・ロングライフ運転のためには、ファウリング（差圧上昇）を防止するフィルター材質や洗浄再添着システム（実用済）が重要**

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.



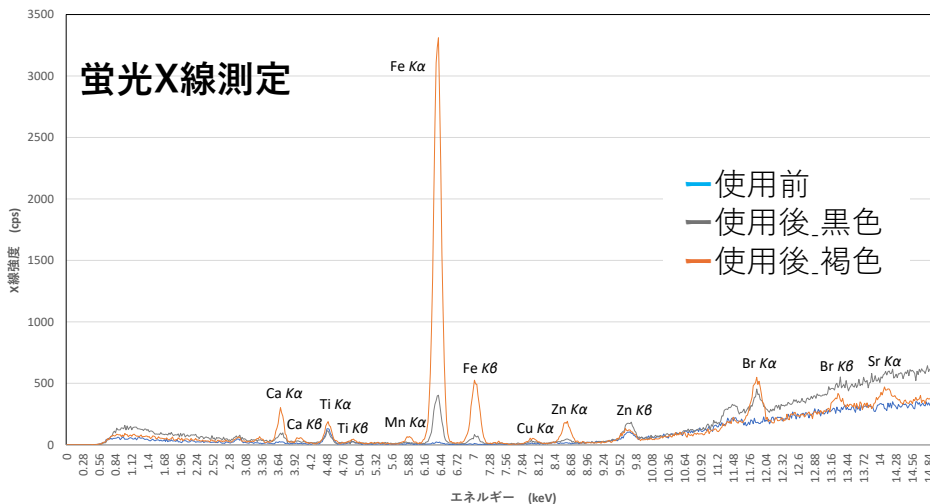
使用後二次ストレーナ



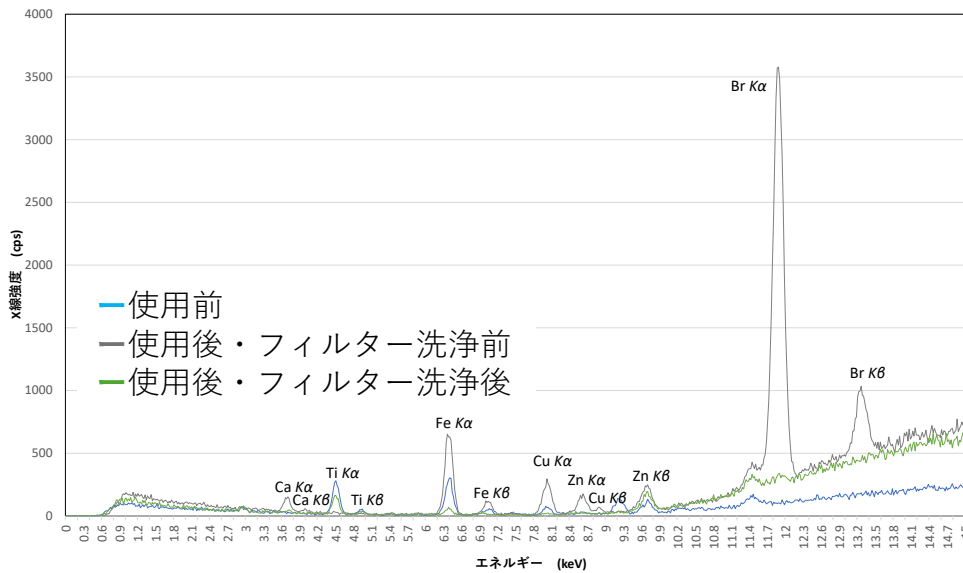
使用後  
MFフィルター

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)

2025/1/30



45kVの管球電圧のスペクトルによる二次ストレーナの使用  
前、使用後黒色部分、使用後褐色部分の比較



45kVの管球電圧のスペクトルによる  
filterの使用前、使用後・洗浄前、使用後・洗浄後の比較

# 蛍光X線分析による ファウリング物質の特定 フィルター洗浄効果の確認

**処理運転後：**フィルター・活性炭には粘土、鉄・銅・臭素・亜鉛・カルシウムが濃集。フィルター差圧の原因と思われる

**フィルター洗浄後：**粘土、鉄およびカルシウム等は除去（X線強度低減）

洗浄後のフィルター差圧は4～5kPaであり、出荷時とほぼ同じ差圧に戻る

⇒ フィルターは洗浄後、再使用可能と判断

⇒ 活性炭の再利用は、継続検討中

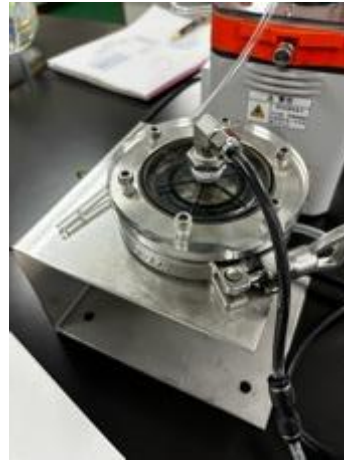
# 現地実証試験で得られた結果

項目	現場実証試験で得られた結果・評価	補足説明
有効性	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PFOS及びPFOAの濃度（合算値）の処理後濃度は、試験開始から6日後までは<b>1 ng/L以下（NDを含む）</b>（処理量11.8m<sup>3</sup>）</li> <li>● 処理量44.8 m<sup>3</sup>まで（開始～29日目）まで、PFOS、PFOA及びPFHxSの濃度の合算値で<b>除去率90%以上</b>を達成</li> </ul>	差圧上昇を防ぐことで、高い除去率を維持
経済性	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 文献<sup>1)</sup>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（m<sup>3</sup>）が推定で約<b>4倍</b></li> </ul>	差圧25kPa時点でフィルター洗浄、差圧をリセットし吸着剤を入れ替えることで、除去率94%以上で連続浄化が可能
操作性	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 濁度が上昇する環境下で、降雨による高濁度時の原水取り込み停止・復旧機能、二次ストレーナが機能し、<b>自動で43日間連続運転</b></li> <li>● 運転状況はWeb上で監視</li> </ul>	フィルター洗浄・吸着剤再添着機能は実装済み
安全 環境調和性	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>CO<sub>2</sub>排出量は0.2kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup></b>となると推計</li> </ul>	水道水の浄水処理で用いられてる安全な吸着剤・消毒剤を使用

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.

# 各務原実証試験 での取り組み

## 1) 室内試験 試験器



**1) 室内試験（連続通水試験）**  
ソニー知的財産サービス株式会社実施の試験に、LFP法室内試験器（フィルター径φ35mm）を提供（試験終了）

**2) 現地実証試験**  
ツネイシカムテックス株式会社実施の試験に、環境省実証試験機を提供（結果取りまとめ中）

**使用吸着剤**  
トリポーラス™（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カーボン素材）を使用

## 2) 現地実証試験 実施場所



ファウリングを低減したフィルター

試験機配置 全景

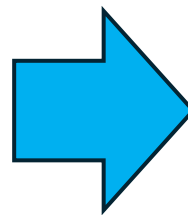


# 環境省実証試験からの改良点

改良前

改良後

フィルター

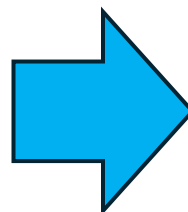


ろ過精度  $0.15 \mu\text{m} \times 99.95\%$

ろ過精度  $0.3 \mu\text{m} \times 99.9\%$  堆積ファウリングを改善

吸着剤

**ヤシ殻炭**



**トリポーラス™**

(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カーボン素材を使用)



# 各務原の原水濃度（NO.9 井戸原水・室内試験）

## 事前のデータ 水質一般項目とPFAS濃度

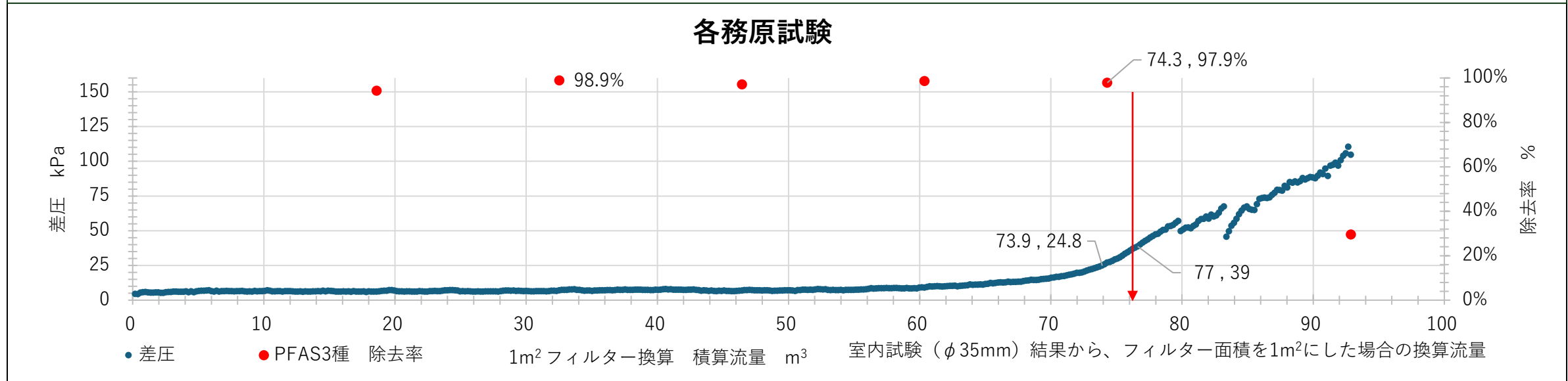
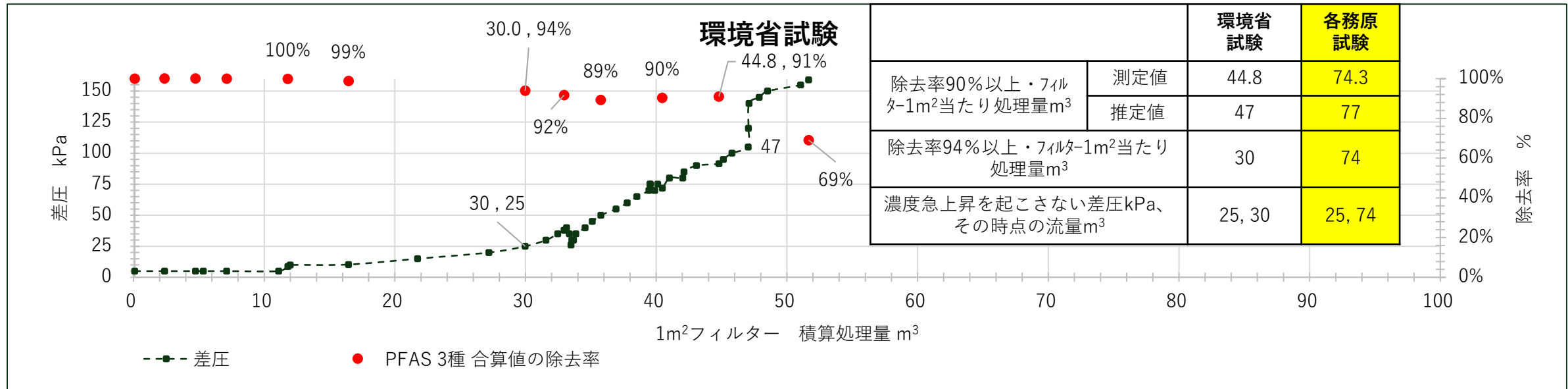
三井水源No.9取水井採水（24年5月）

項目	単位	測定値	PFAS種類	単位	測定値
pH	[-]	6.6	PFBS	[ng/L]	25
電気伝導率	[mS/m]	13.8	PFHxS	[ng/L]	289
TOC	[mg/L]	<0.2	PHHpS	[ng/L]	14
硝酸イオン	[mg/L]	6.44	PFOS	[ng/L]	365
塩化物イオン	[mg/L]	4.3	6:2FTSA	[ng/L]	7
硫酸イオン	[mg/L]	11.2	PFBA	[ng/L]	8
アルミニウム	[mg/L]	<0.02	PFPeA	[ng/L]	17
鉄	[mg/L]	<0.03	PFHxA	[ng/L]	49
ナトリウム	[mg/L]	10.1	PFHpA	[ng/L]	15
カルシウム	[mg/L]	12.0	PFOA	[ng/L]	66
マグネシウム	[mg/L]	2.7	PFNA	[ng/L]	70
カリウム	[mg/L]	2.9			
陰イオン界面活性剤	[mg/L]	<0.02			

## 試験時のPFAS濃度

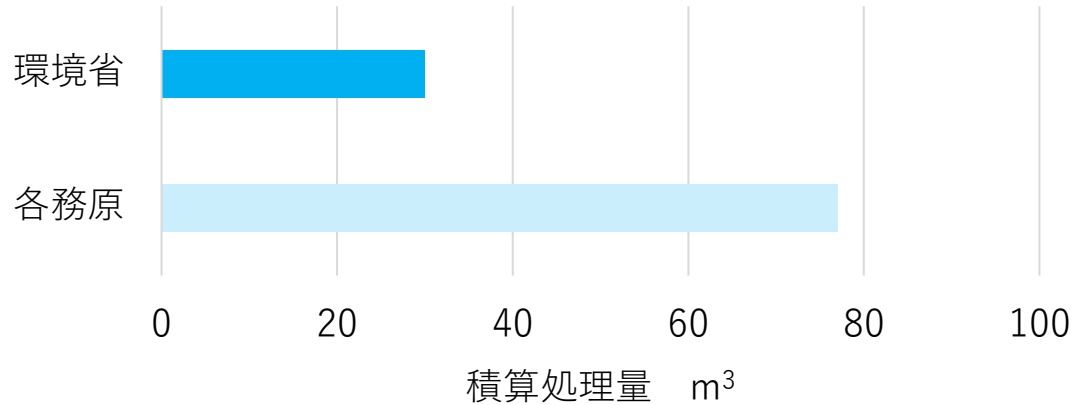
PFAS種/測定日	単位	9月13日	9月26日
PFHxS	ng/L	366.6	367.7
PFOS	ng/L	489.3	511.5
PFOA	ng/L	68.4	71.3
PFAS 3種合算	ng/L	924.3	950.5

# 積算処理量と差圧・除去率の比較 環境省実証試験と各務原試験 (フィルター1m<sup>2</sup>換算)

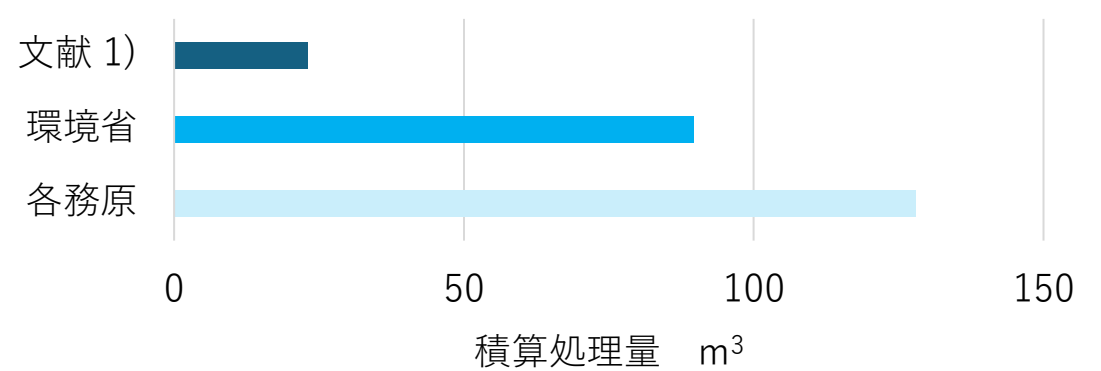


# 文献・環境省及び各務原実証試験結果の比較

高除去率(94%)維持する差圧 25kPaまでの処理量



吸着剤1kg当り除去率 **90%**以上での処理量

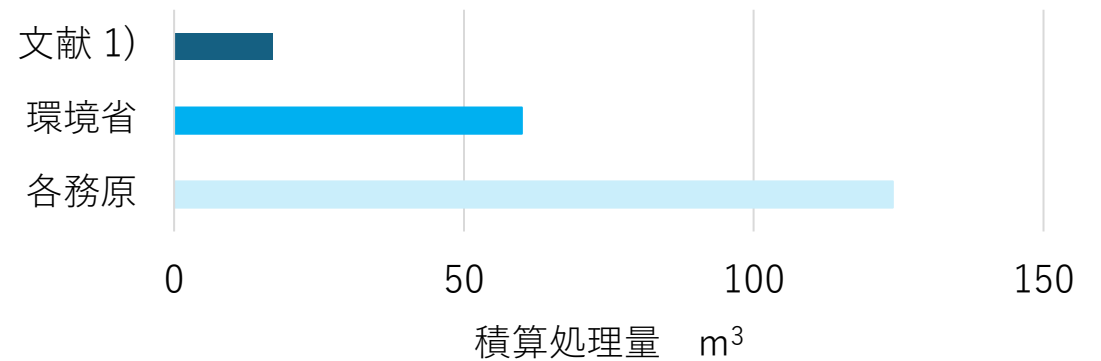


文献 1) Nakazawa Y, et al. Long-term removal of perfluoroalkyl substances via activated carbon process for general advanced treatment purposes. Water Research. 2023. Volume 245.

文献 1) 吸着剤1kg当り除去率 **90%**以上での処理量  
 活性炭かさ比重 0.3、空間速度 3.6 h<sup>-1</sup>、処理日数80日と仮定。  
 ろ材体積：(1.0 (kg) /0.3) /1000 ≒ 0.0033 (m<sup>3</sup>)  
 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 (m<sup>3</sup>/kg) × 3.6 (h<sup>-1</sup>) × 24 (h/日) × 80 (日) ≒ 23 (m<sup>3</sup>/kg)

文献 1) 吸着剤1kg当り除去率 **94%**以上での処理量  
 活性炭かさ比重 0.3、空間速度 3.6 h<sup>-1</sup>、処理日数60日と仮定。  
 ろ材体積：(1.0 (kg) /0.3) /1000 ≒ 0.0033 (m<sup>3</sup>)  
 従来技術における活性炭 1 kg 当たりの除去率 94%まで処理できる水量：  
 0.0033 (m<sup>3</sup>/kg) × 3.6 (h<sup>-1</sup>) × 24 (h/日) × 60 (日) ≒ 17 (m<sup>3</sup>/kg)

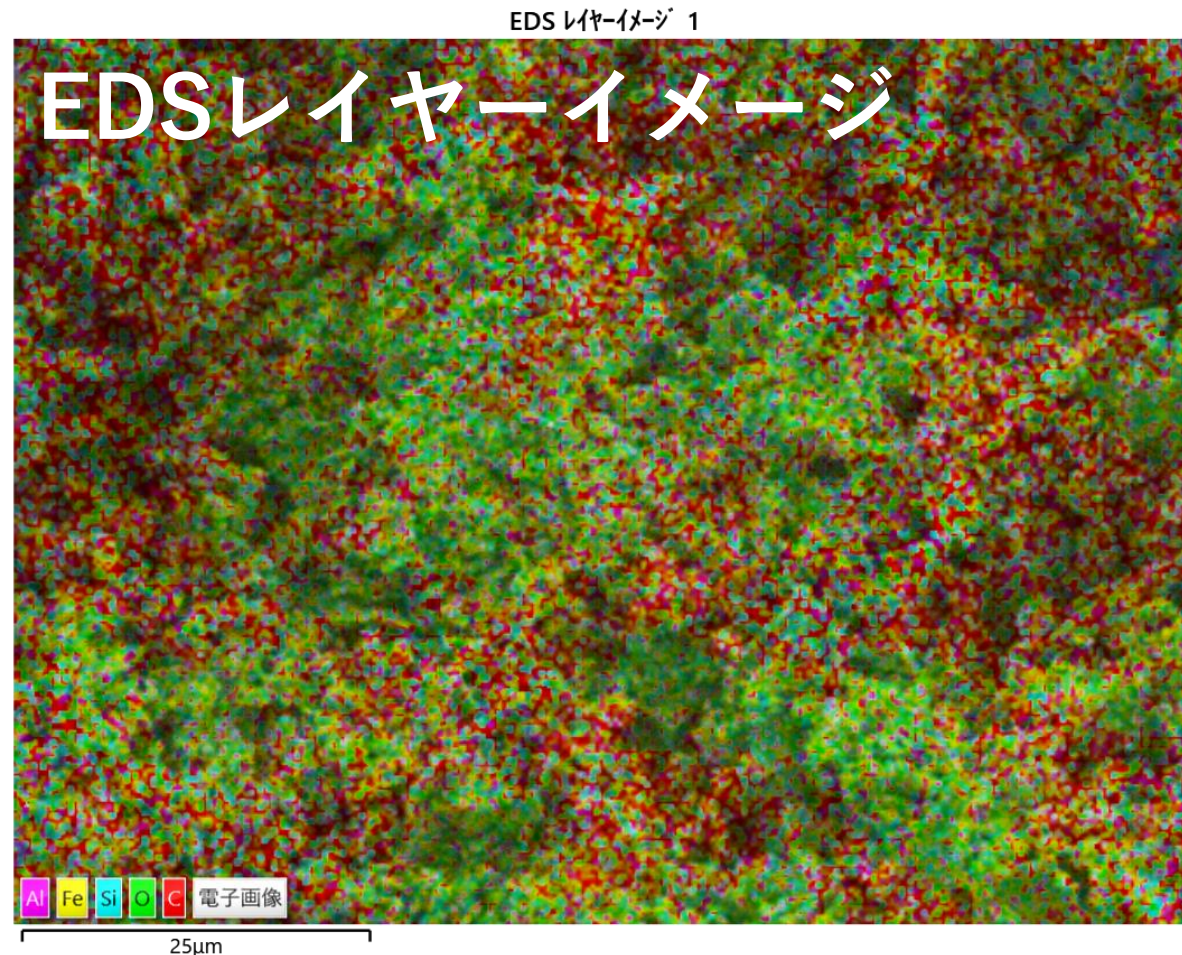
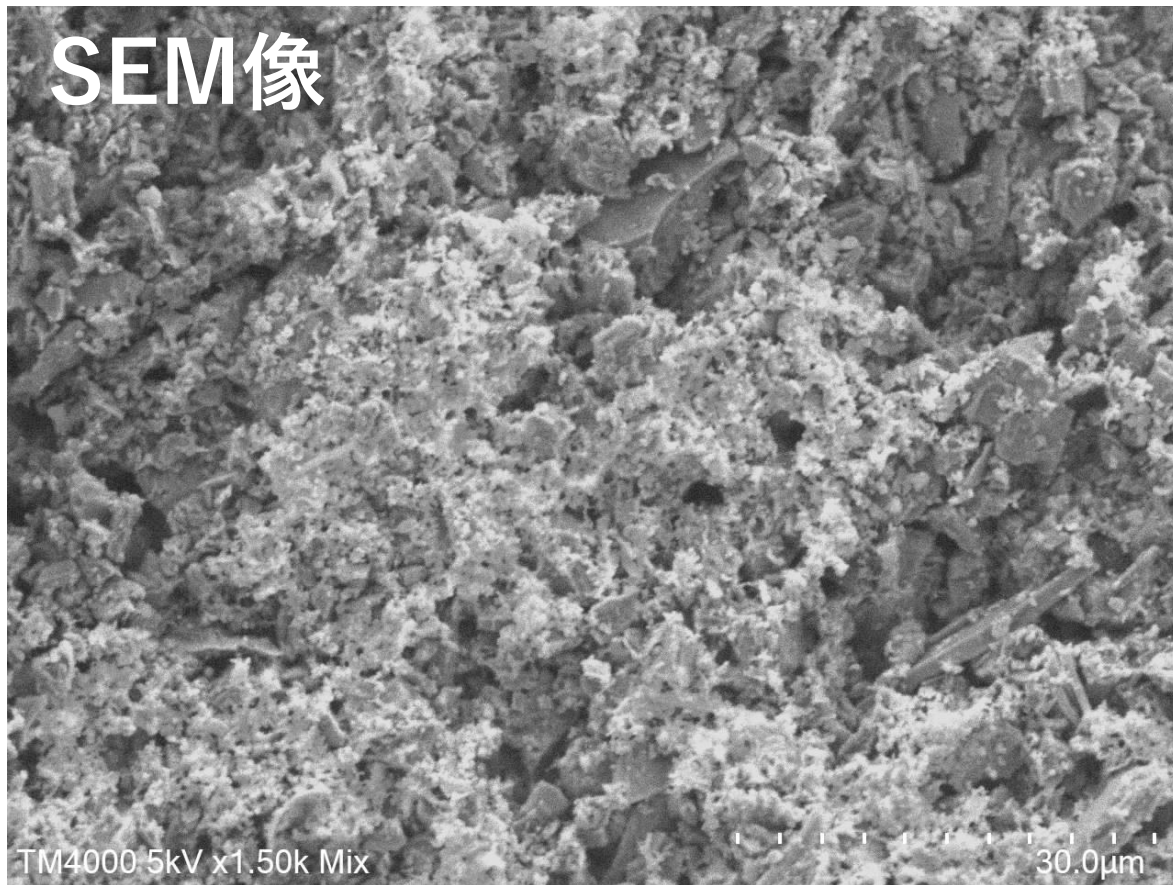
吸着剤1kg当り除去率 **94%**以上での処理量



各務原処理量はフィルター面積を1m<sup>2</sup>にした場合の換算値

# ファウリング物質の推定

各務原実証試験・連続通水試験で使用済みトリポラスのSEM、EDS 観察結果



- トリポラス粉体の粒度組成は $1\mu\text{m}$ 以上。一方、SEM像には径 $0.5\mu\text{m}$ 未満の微粒子が多数認められる。EDSレイヤーイメージでは、微粒子が多い範囲で酸素が多い。微粒子は連続処理中に析出した酸化物であり、ファイリング原因物質の可能性がある。
- 高除去率・ロングライフ運転のためには、ファウリングの原因解明と対策（前処理、フィルター洗浄など）の検証が今後の課題

# PFAS ライフサイクル & 地球循環



- 01 製造と生産
- 02 製品の使用
- 03 排出と環境への拡散
- 04 環境と健康への影響
- 05 リサイクルと環境修復

## LFP・GFP の適用現場

(現地浄化済み・適合試験済・計画中)

様々な現場 (水・大気、PFAS 濃度、短鎖・長鎖、NOM等水質、基準・・・) に合わせた前処理・機能性粉体で対応可能

### 沖縄県親水公園の実用機



# LFPは機能性材料の能力を活かす技術

- • • **新たな機能性材料（粉体）** を求めています

機能性粉体	LFPを用いた今後の取り組み
活性炭 天然ゼオライト • • •	畜産排水処理水 アンモニア・窒素・リンの回収・循環再利用
人工ゼオライト フェライト • • •	排気中CO <sub>2</sub> 濃縮回収
• • •	水中からレアメタルの回収

# 参考1 本技術によるPFAS吸着メカニズムの一考察

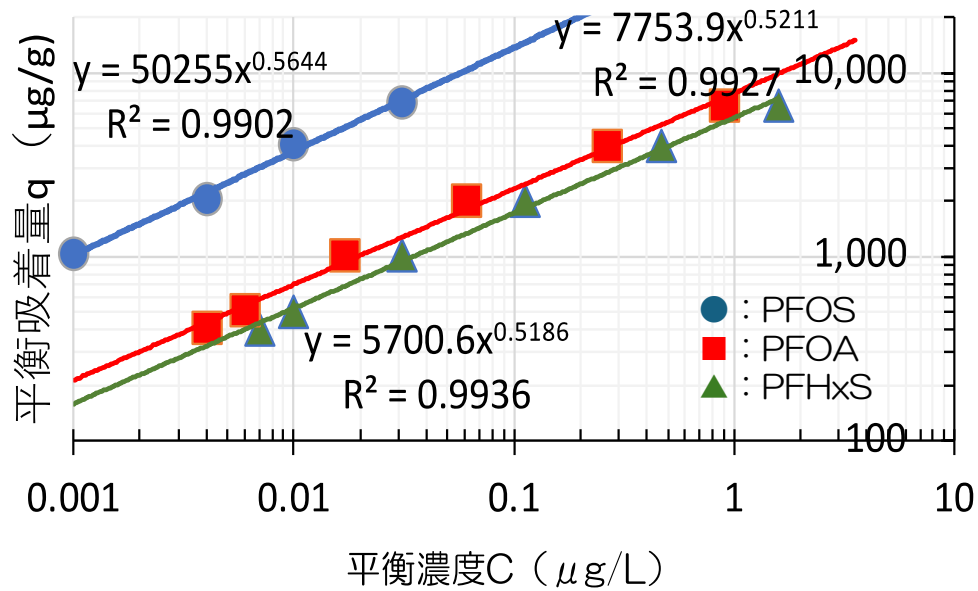


図1 PFAS 3種混合溶液における吸着等温線 (※2)

試験条件：PFOS, PFOA, PFHxS混合原水 濃度各10万ng/L、振とう時間72h、pH9ホウ酸緩衝液調整

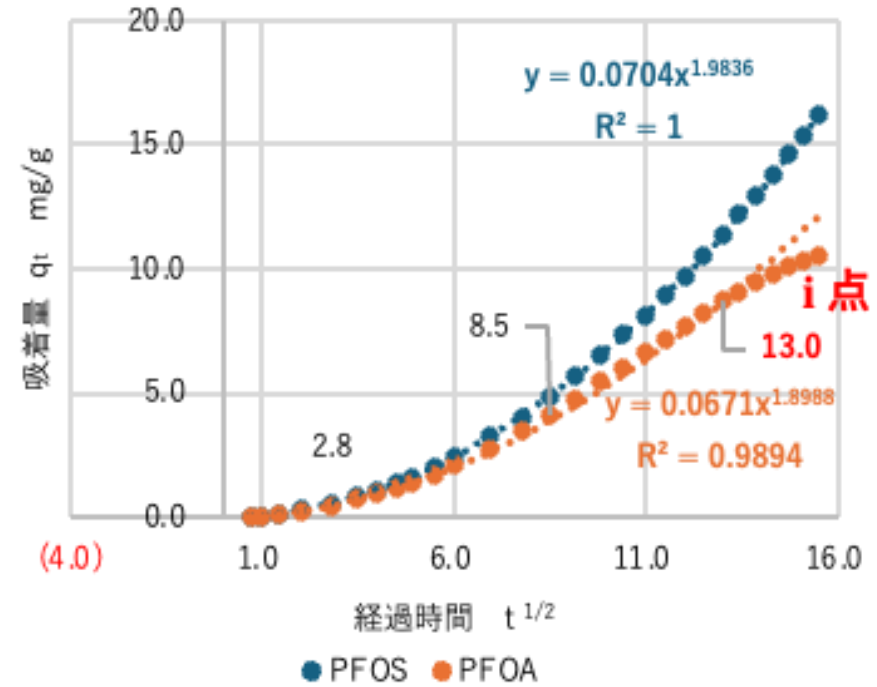


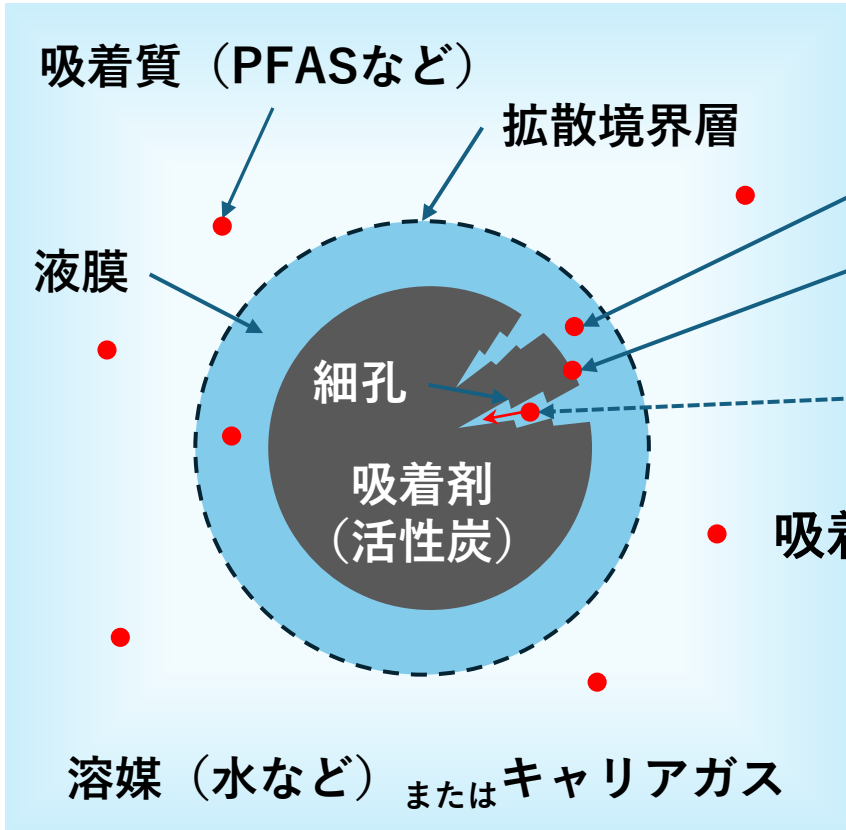
図2-1 連続通水試験試験1のPFOSとPFOAの  $t^{1/2}-q_t$  曲線

- 図1は、PFAS 3種混合溶液における吸着等温線である。PFOSの吸着量 $q$ はPFOAの5倍以上大きい
- 一方、図2-1は、連続通水試験1のPFOSとPFOAの  $t^{1/2}-q_t$  曲線 を表している。同図ではPFOSとPFOAの吸着量 $q_t$ に図1ほど大きな開きは生じていない。差が開き出すのは **i** 点以降

**なぜ？ この違いが生じたか**

※2 セミナー 排水中フッ素・ホウ素とPFASの除去・処理・浄化技術、プリーツフィルター機能性粉体法 (LFP法) によるPFAS土壌・地下水汚染および処分場浸出水の浄化、令和5年4月26日セミナー資料 (山内)

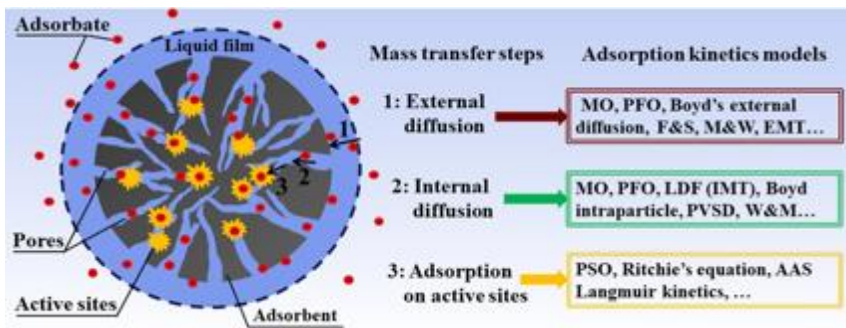
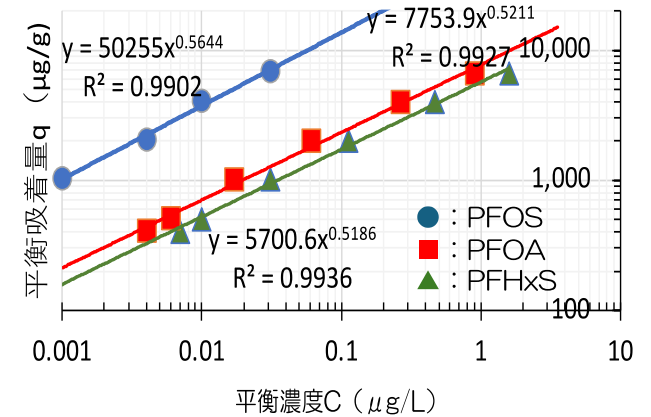
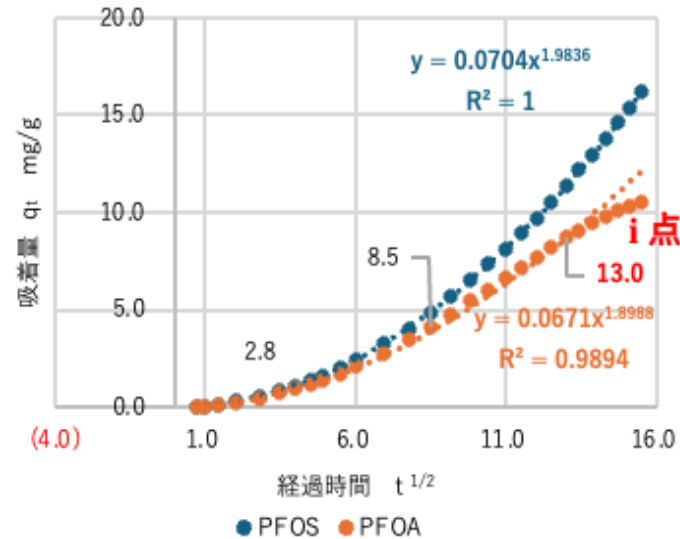
# 吸着のステップと本技術での吸着メカニズム



- ① 外部拡散 (液膜内の拡散、吸着速度は濃度勾配に依存)
  - ② 外表面吸着 (吸着速度は面積に依存) ・ ・ 迅速に進行
  - ③ 粒子内拡散 (吸着速度は濃度勾配と拡散係数に依存) ・ 遅い
- $q_t = k_{id}t^{1/2} + C$  ・ ・ ・ ① (Weber-Morrisモデル)

③粒子内拡散が律速になった吸着では、 $t^{1/2}$  に対する吸着量  $q_t$  が直線になる

● 吸着ステップ ①⇒②⇒③



Jianlong Wang, Xuan Guo : Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods, Journal of Hazardous Materials Volume 390, 15 May 2020, 122156 に、加筆

本技術での吸着は、**i** 点までは  
 ①外部拡散と②外表面吸着が主体  
**i** 点以降は③粒子内拡散が律速と推定

吸着等温線は  
 ③粒子内拡散まで進行して  
 平衡状態に達した結果



# 解説

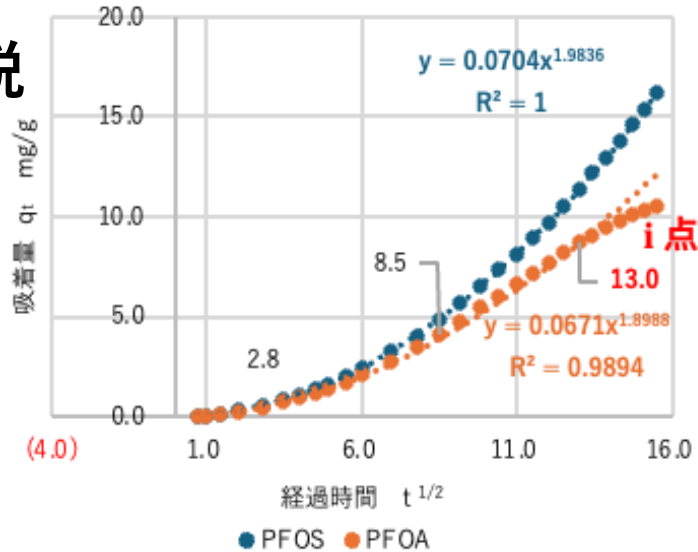


図2-1 連続通水試験試験1のPFOSとPFOAの $t^{1/2}$ - $q_t$ 曲線

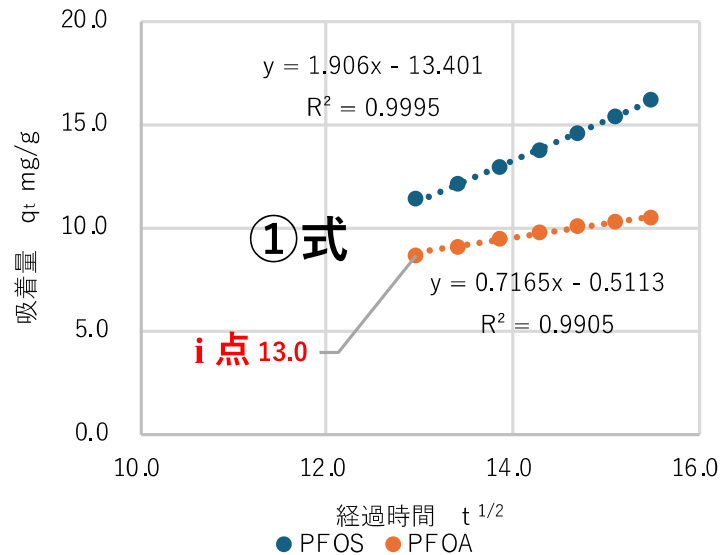


図2-2 図2-1の $t^{1/2} = 13.0$ 以降の $t^{1/2}$ - $q_t$ 曲線

- ① 活性炭の吸着プロセスは、外部拡散、外表面吸着、粒子内拡散の順に進行する。このうち、粒子内拡散は①式で表される。

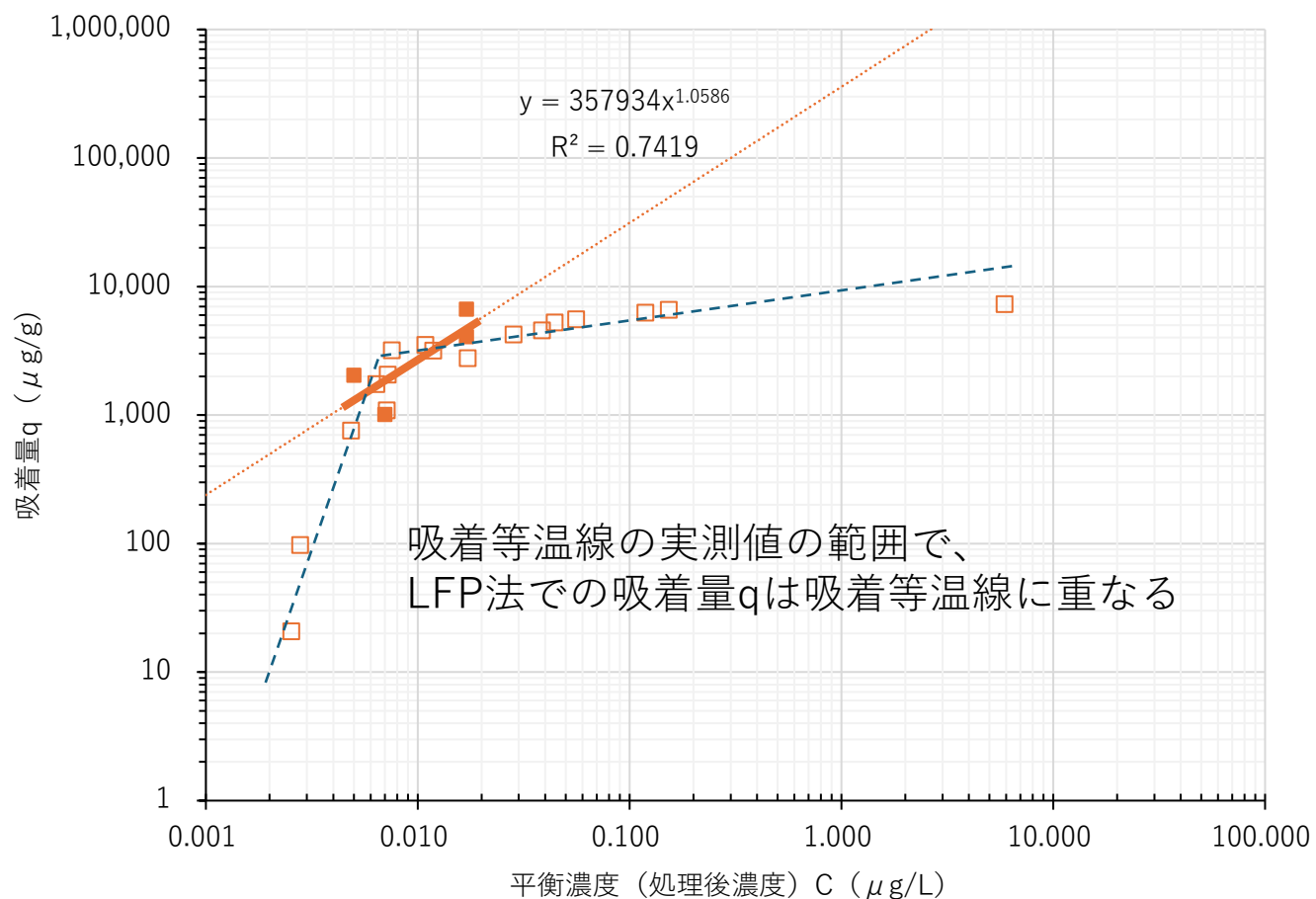
(横軸に $t^{1/2}$ を使用したのは、下記①式の開始点を把握するためである)

$$q_t = k_{id}t^{1/2} + C \quad \dots \textcircled{1} \quad (\text{Weber-Morrisモデル})$$

ここで、 $q_t$ は時刻  $t$ における吸着量 (mg/g)、 $k_{id}$ は粒子内拡散速度定数 (mg/g $\cdot$ min $^{1/2}$ )、 $t$ は時間 (min)、 $C$ は境膜拡散効果を反映する定数。時間の平方根 $t^{1/2}$ に対する吸着量 $q_t$ が直線である場合、粒子内拡散が支配的なメカニズムであると判断できる。

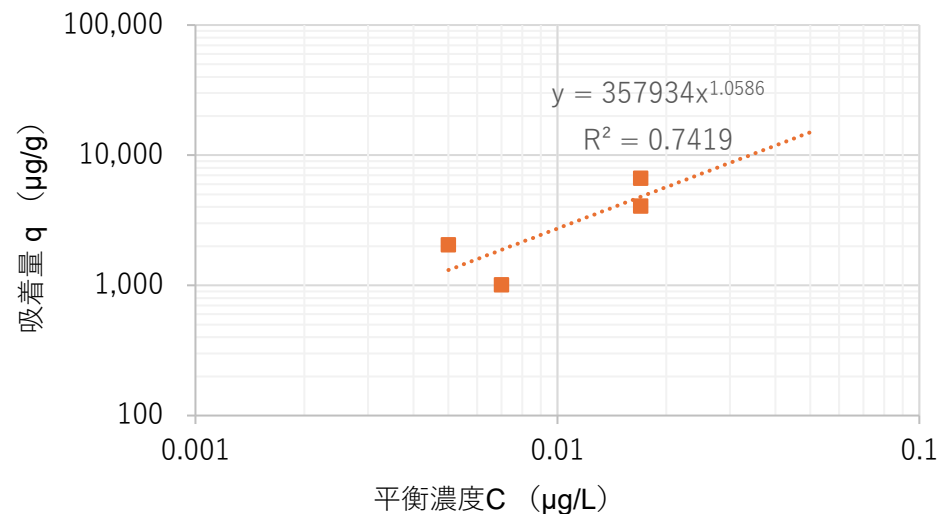
- ② 図2-2は、図2-1の $t^{1/2} = 13.0$ 以降の $t^{1/2}$ - $q_t$ 曲線を示している。この近似曲線は上記①式に示す「時間の平方根 $t^{1/2}$ に対する吸着量 $q_t$ が直線」に近い。また、PFOSとPFOAの $q_t$ の差が開き出し、さらに $t^{1/2}$ が大きくなると両者の $q_t$ は図1のように大きく開く傾向を示している。
- ③ 前項 図1の吸着等温線は吸着が粒子内拡散まで終了した状態と考えられる
- ④ 本技術によるPFAS吸着除去では、処理前半 (i点まで) は吸着速度が早い“外部拡散や外表面吸着”が吸着の主体。粒径が小さく単位体積当たりの表面積が大きいほど吸着は効率的になると予想。後半 (i点以降) は粒子内拡散が吸着速度の律速となっていると推定される。
- ⑤  $t^{1/2}$ - $q_t$  曲線が i 点に到達する前に吸着剤を入れ替えると、早い吸着速度で高い除去率を維持することが期待される。

## 参考2 吸着等温線とLFP連続通水試験の処理後濃度・吸着量の重ね図

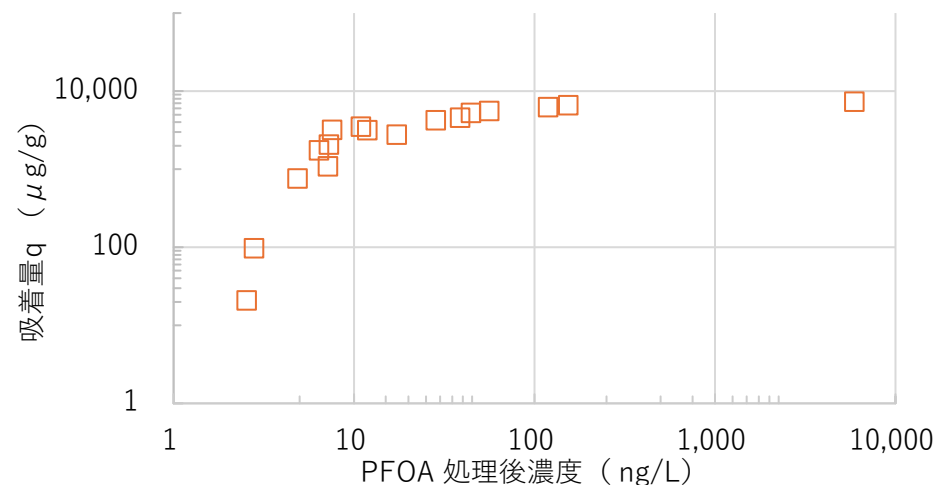


■ PFOA単独 吸着平衡    □ PFOA単独 連続通水    ..... 累乗 (PFOA単独 吸着平衡)

PFOA単独溶液(10万ng/L)・吸着等温線とLFP法での処理後濃度と吸着量の重ね図

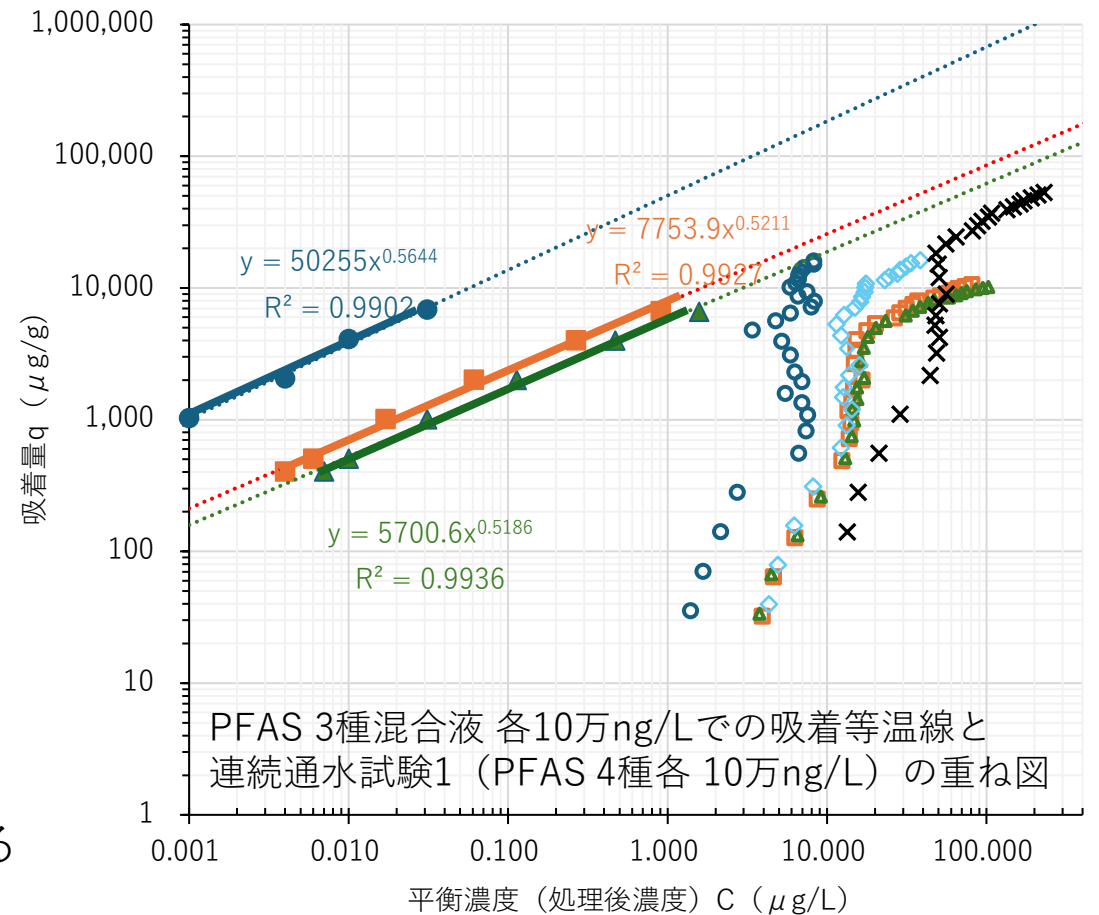
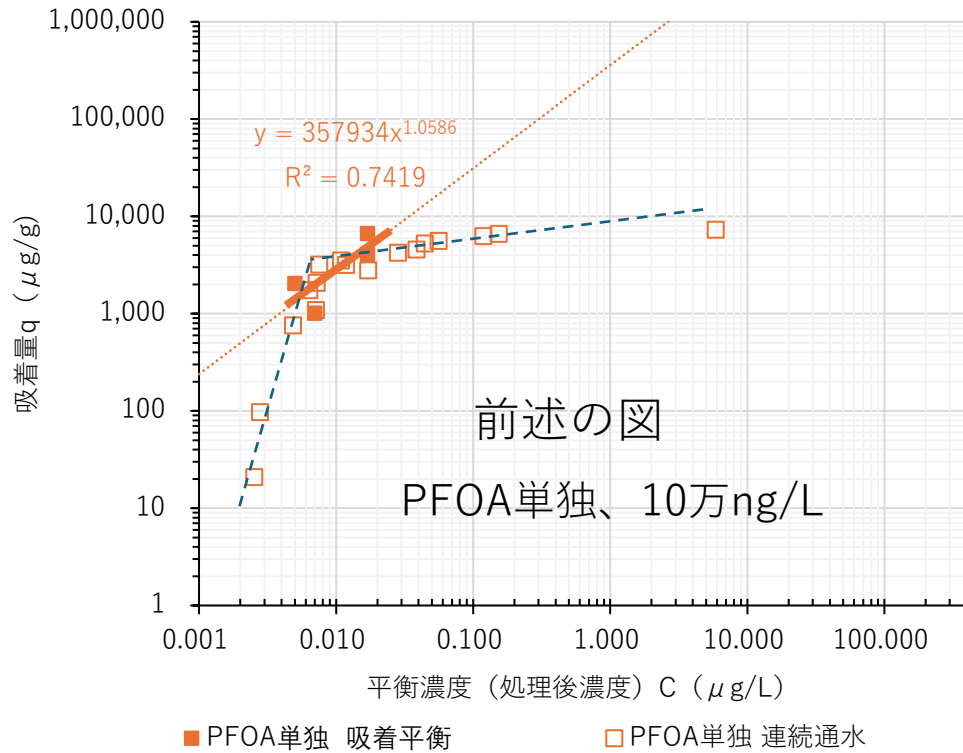


PFOA単独溶液(10万ng/L)・ヤシ殻炭の吸着等温線



PFOA単独溶液(10万ng/L)・LFP法での処理後濃度と吸着量との関係

# 吸着等温線とLFP連続通水試験の処理後濃度・吸着量の重ね図



1. LFP法でのC-q の関係は両対数グラフで“く”の字となる  
2つの吸着プロセス存在を予想する
2. 原水・吸着剤毎の吸着等温線とLFP法初期複数点の処理後濃度 (及び差圧の経過) を把握することにより、処理後濃度の推移・破過の時期等の予測が可能になる

- ▲ 3種混合PFHxS吸着平衡
- 3種混合PFOS吸着平衡
- 3種混合PFOA吸着平衡
- 4種混合PFOS連続通水1
- 4種混合PFOA連続通水1
- △ 4種混合PFHxS連続通水1
- ◇ 4種混合6:2FTS連続通水1
- × 4種混合 合算 連続通水1



HP 環境コラム

山内仁  
株式会社流機エンジニアリング  
E-mail [h.yamauchi@ryuki.com](mailto:h.yamauchi@ryuki.com)

ご清聴  
ありがとうございました