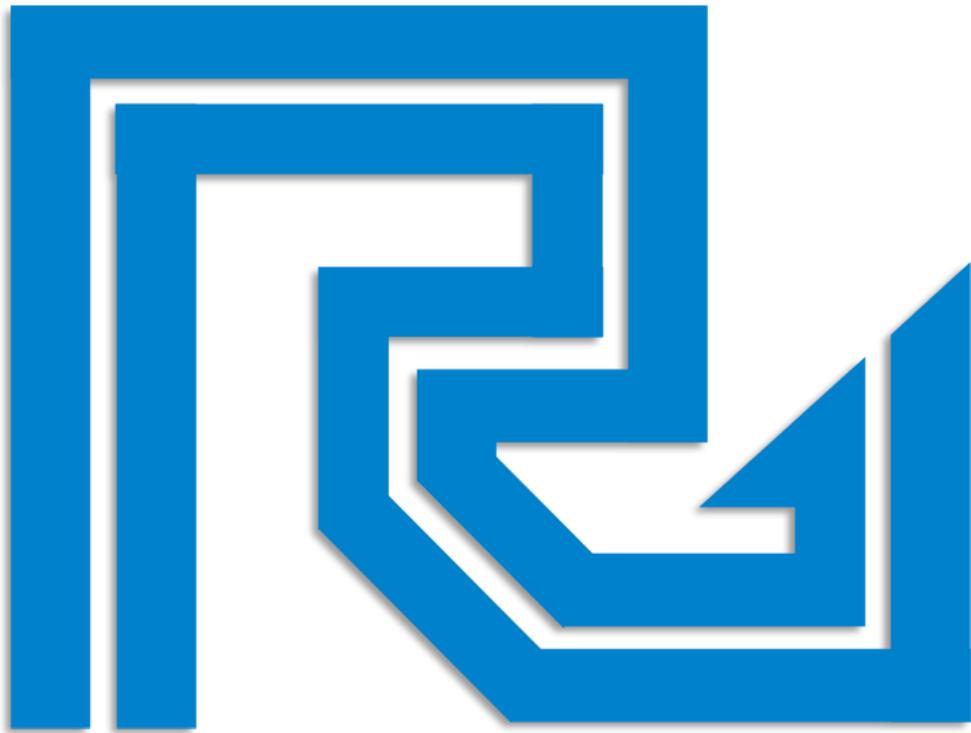


フィルターと機能性粉体を用いた 処理法によるPFAS土壌・地下水の浄化技術



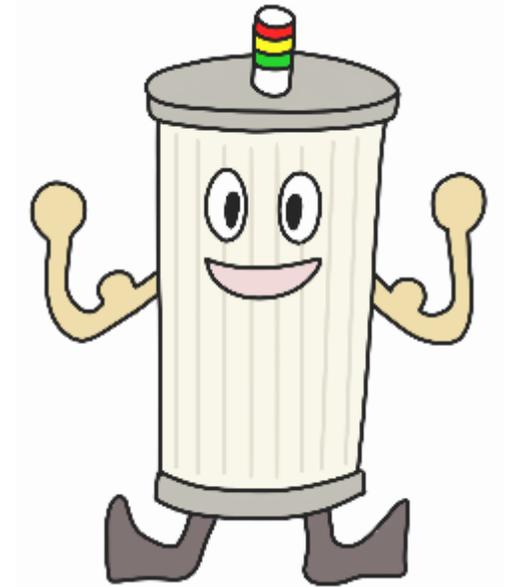
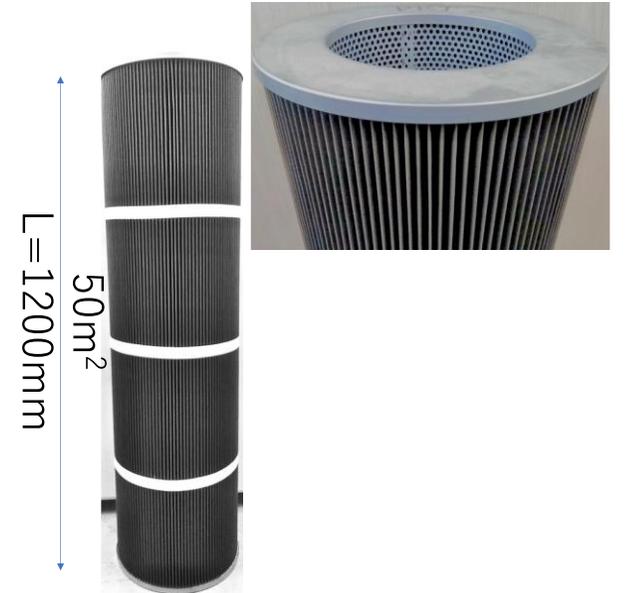
 株式会社流機 エンジニアリング

<https://www.ryuki.com>

Copyright ©RYUKI Engineering. All Rights Reserved.

目次

1. フィルターと機能性粉体を用いたLFP法とはなにか？
2. なぜLFPが効果的なのか
3. 開発の経緯 基礎技術FP法とPFAS水汚染浄化への地元の期待
4. 粉体のハンドリングの煩雑さを解決した装置の特徴
5. 機能性粉体の選択により様々な用途（畜産排水、CO2固定化など）に展開できるLFP
6. PFAS地下水汚染浄化採用事例
7. 他工法との組み合わせによる土壌浄化への展開
8. 浄化設計実施の手順



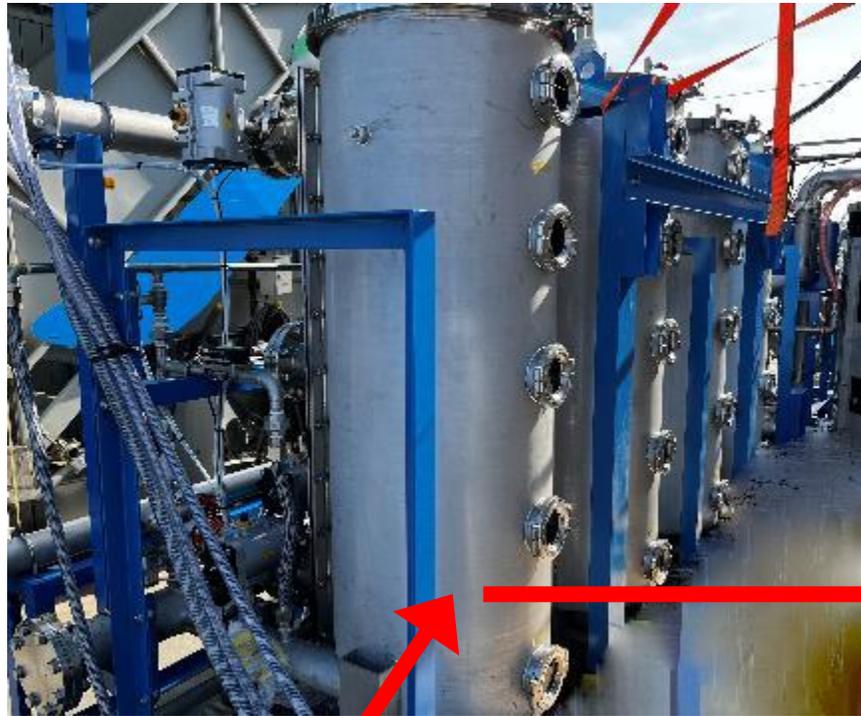
①

**フィルターと機能性粉体を用いた
LFP法とはなにか？**

LFP法の仕組みと特徴

180cm

Liquidを、Filterに添着させたPowderで、ろ過・浄化



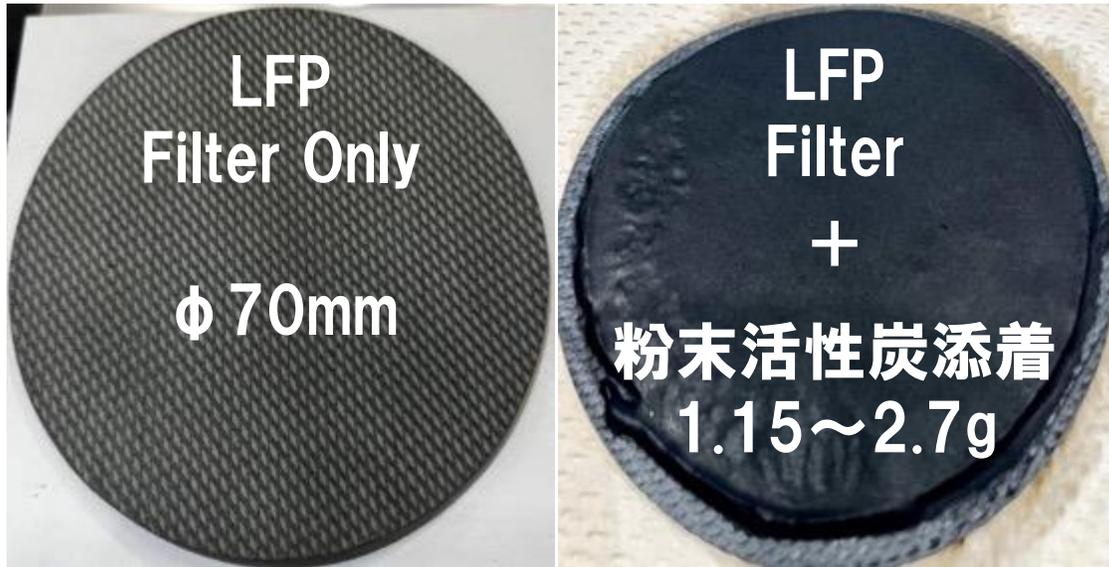
ベッセル

精密ろ過膜

ろ過装置本体

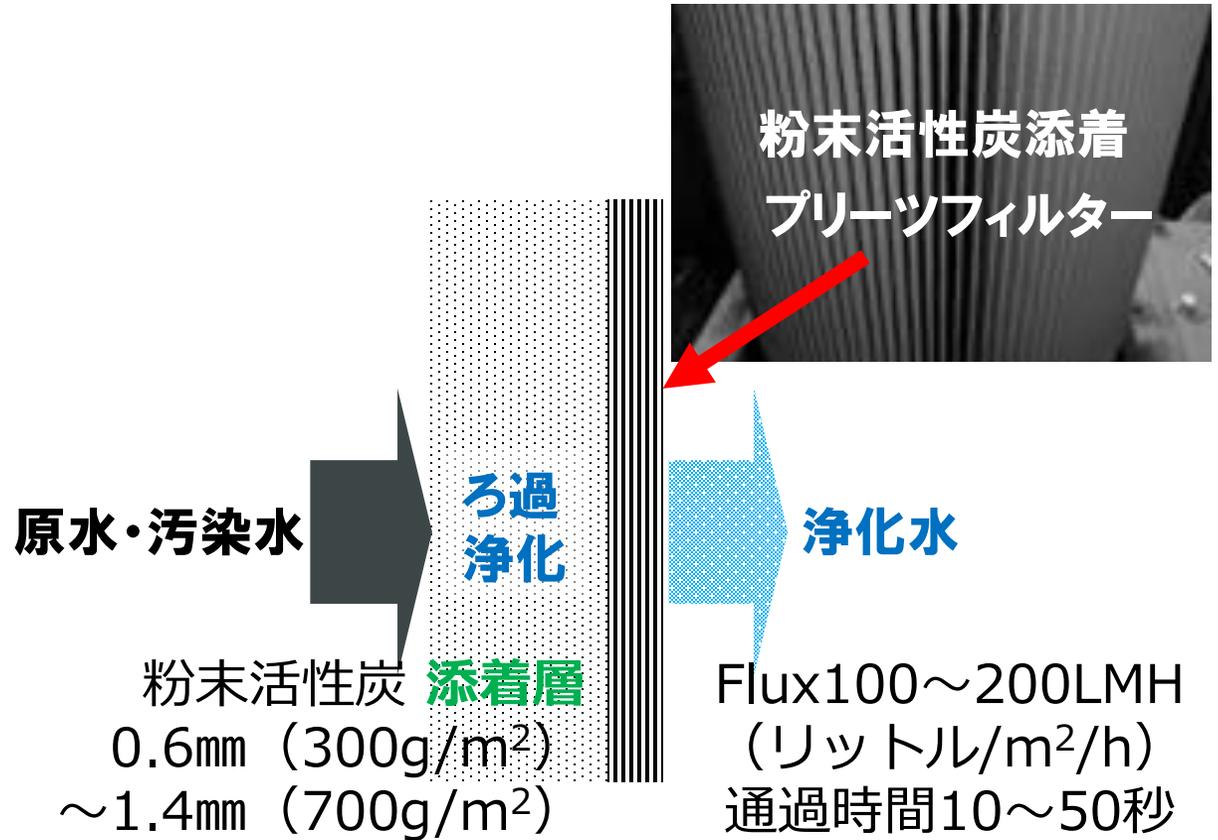


機能性粉体のフィルターへの“添着”とは



フィルター単体と添着

粉末活性炭を厚さ約0.6~1.4mmで
密に積層（添着層）



LFPでのPleats Filterと粉末活性炭(PAC)
添着層(Attached thin layer)

LFPによる有機化合物の除去効果

試料	原水の起源	対象物質	単位	原水濃度	LFP法 処理水 濃度	除去率	原水の特徴 (前処理)	使用 活性炭	使用機器	活性炭 添着量g/ m ²
①	模擬汚染水	PFOA	ng/L	102,752	2.5	99.99%以上	模擬汚染水	ヤシ殻	定流量連続 ろ過試験器	500
②	沖縄湧水	PFOS	ng/L	2,200	1未満	99.9%以上	湧水	石炭	減圧 ろ過試験器	1,000
③	沖縄湧水 ¹⁾	PFOS+ PFOA+ PFHxS	ng/L	合算値 292	1未満	—	湧水	ヤシ殻	実機	500
④	水道水源 河川水 ¹⁾	PFOS+ PFOA+ PFHxS	ng/L	合算値 67	1未満	—	褐色濁水 SS 29mg/L, TOC 3.9mg/L (凝集・ろ過)	ヤシ殻	減圧 ろ過試験器	500
⑤	処分場 浸出水 ²⁾	PFOS+ PFOA+ PFHxS	ng/L	合算値 6,978	1	99.98%以上	処分場浸出水 TOC 4.7mg/L (酸化剤)	ヤシ殻	減圧 ろ過試験器	700

1) 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

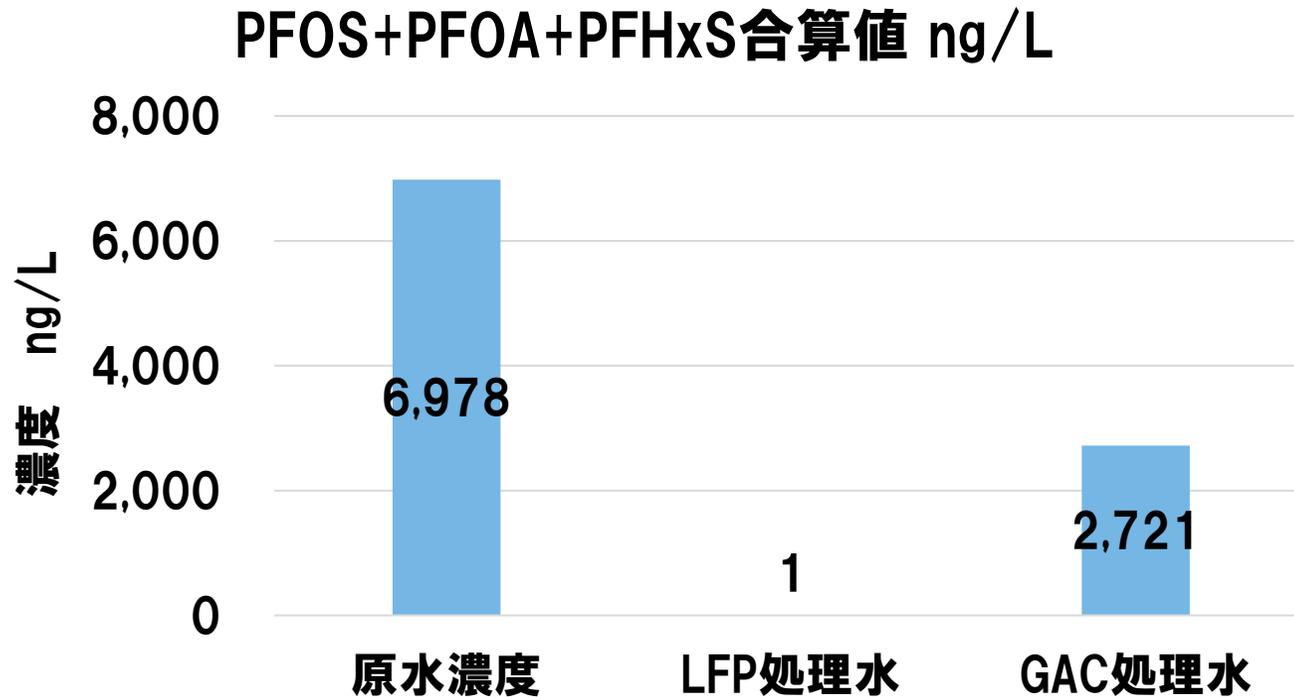
2) 西省子, 瀬尾卓, 大悟法弘充, 鷹背寛人, 西村聡, 山内仁 (2023) : 廃棄物埋立処分場浸出水中PFAS (有機フッ素化合物) のLFP法によるオンサイト浄化の検討, 第28回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集

活性炭種類	窒素吸着法		レーザー回折法	
	比表面積 (m ² /g)	全細孔容積 (cm ³ /g)	メディアン径 (μm)	モード径 (μm)
石炭系	970	0.49	29.21	39.62
ヤシ殻	1,180	0.52	10.79	13.98

PFAS除去効果 同一原水・LFPとGACの比較

使用試験器減：圧ろ過試験器

φ70mmLFP用 MF膜でろ過、吸引圧力-10kPa



項目	LFP処理	GAC処理
使用活性炭	ヤシ殻	石炭系
使用活性炭量 g	2.7	269
活性炭層厚さ mm	1.4	85
ろ過時Flux LMH	864	5,349
ろ過通過時間 s	5.4	57
除去率 %	99.98	61

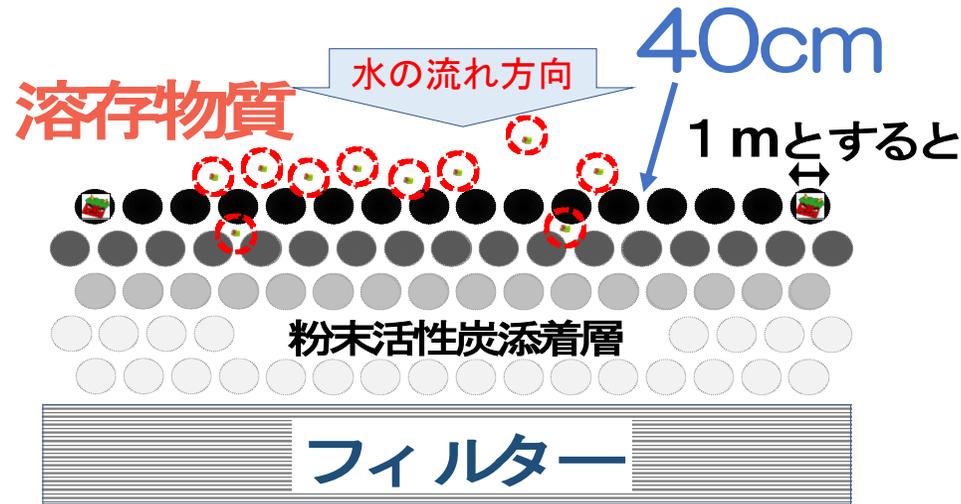
出典：西省子，瀬尾卓，大悟法弘充，鷹薮寛人，西村聡，山内仁（2023）：廃棄物埋立処分場浸出水中PFAS（有機フッ素化合物）のLFP法によるオンサイト浄化の検討，第28回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集

②

なぜLFPが効果的なのか

高い除去率・吸着容量・吸着速度

機能性材料を粉体化し、粉体をフィルター上で密に積層“添着”することにより、材料の機能を大きく活かす



粉末活性炭での粒子間間隙

細粒化に比例して、単位体積あたりの表面積は増加する。粉末活性炭の大きさを仮に直径1m（実際はD50=12 μ m）とすると、添着層内での間隙はわずか40cm。水は狭い間隙を通過していくのでPFASは活性炭に効果的に引きつけられる（高い除去率・吸着速度）とした

“鬼ごっこ理論”

添着層内での
“吸着前線”
と呼ぶ吸着メカニズムで
説明される
高い吸着容量

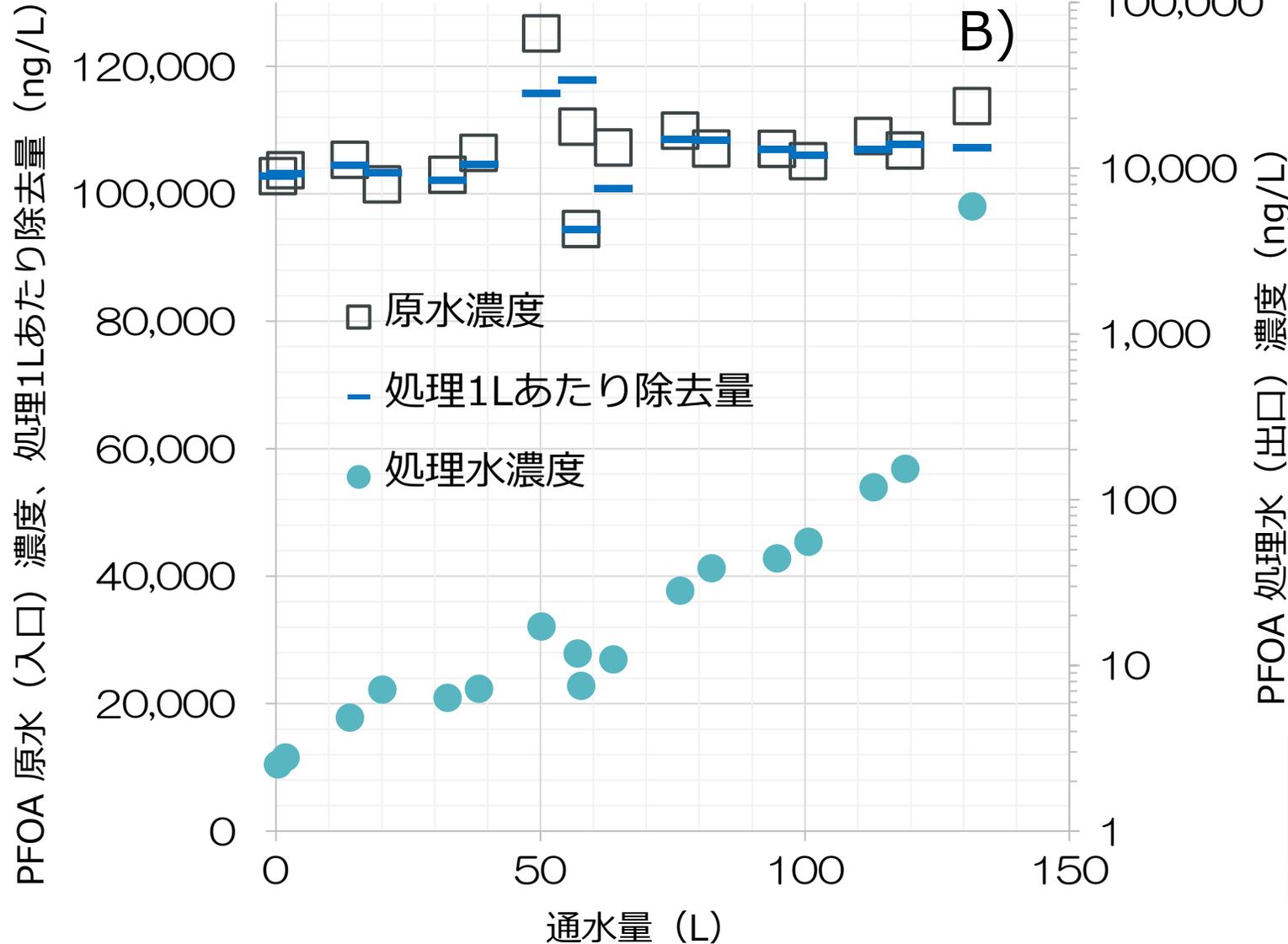


高い除去率
吸着速度・吸着容量

PFOA模擬汚染水 連続通水試験結果

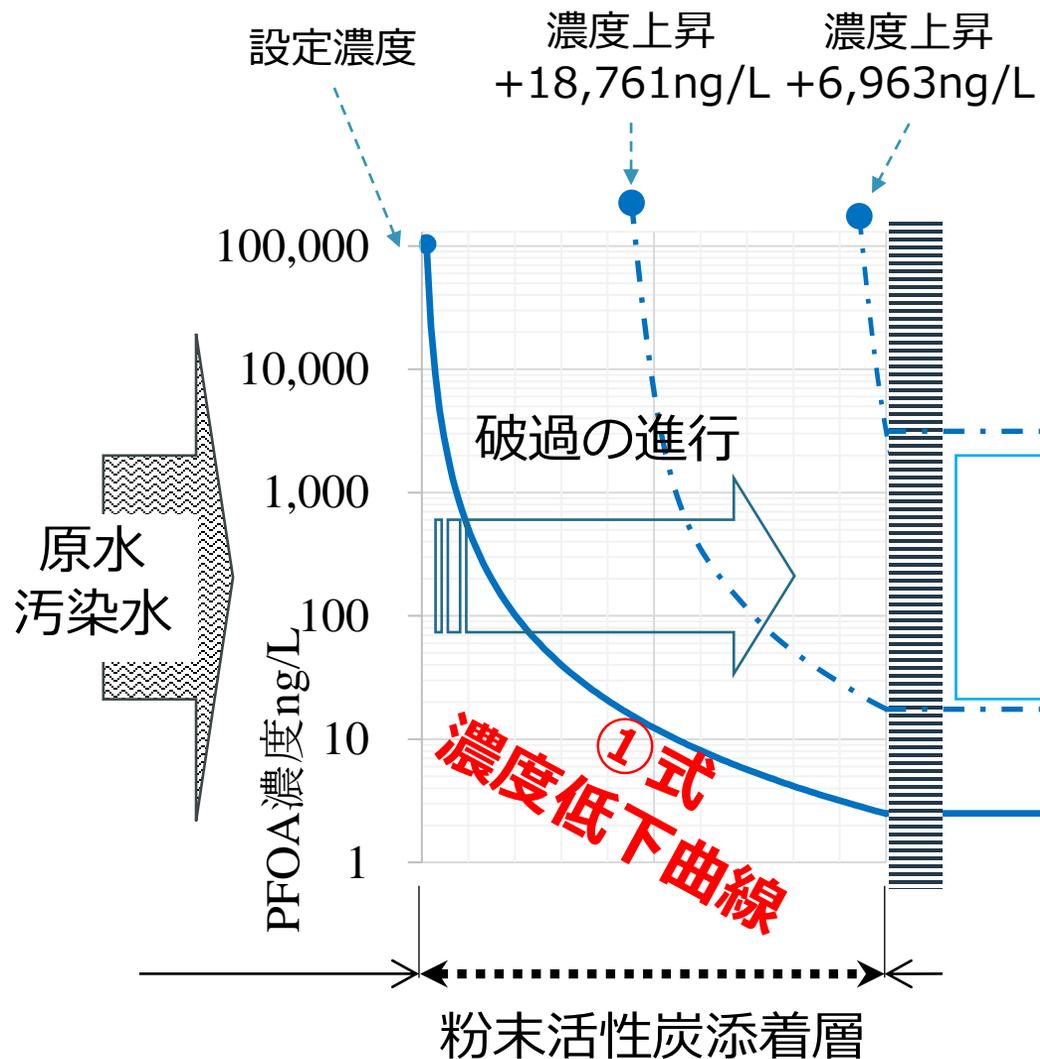
特徴的な2つの現象

- A) 原水濃度（直前値より）
18,761ng/L上昇を、ほぼ吸収
（処理水濃度上昇10ng/L）
- B) 原水濃度（直前値より）
6,963ng/L上昇に伴い、処理
水濃度5,896ng/Lに上昇。た
だし、処理1Lあたり除去量は
変化なし（107,212ng/L）



定流量連続ろ過試験器
Φ70mm LFP用MF膜使用
使用活性炭：ヤシ殻炭

添着層内の濃度低下曲線（推定）



- 濃度低下曲線 $y = ax^{-n}$ （推定）・・・①
- 通水初期：前方の活性炭は、高い濃度のPFASに接し、大きな吸着容量となる
- 前方活性炭破過後、後方の活性炭も高い濃度のPFASに接し、大きな吸着容量となる
- 活性炭全体が、大きな吸着容量を維持

B) 通水131L、出口濃度5,896ng/L

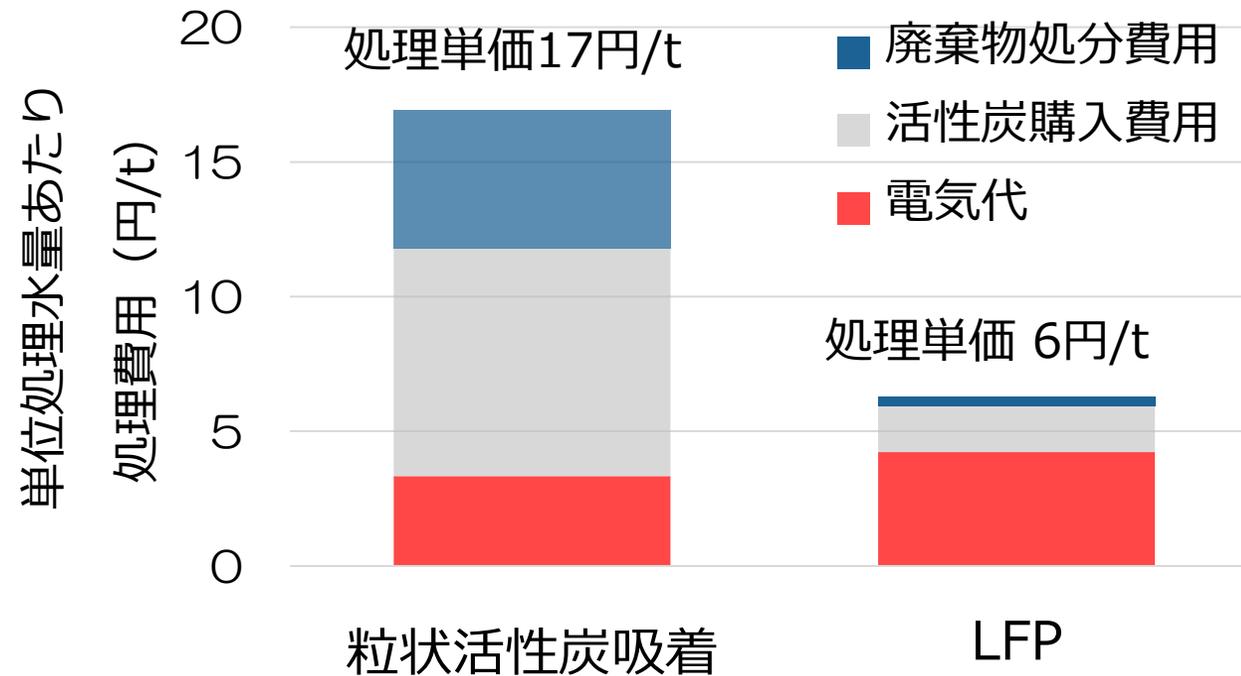
ろ過水（浄化水）

A) 通水50L、出口濃度17.2ng/L

通水初期0.4L処理、出口濃度2.5ng/L

技術の経済性

ラボ試験に基づいた試算値



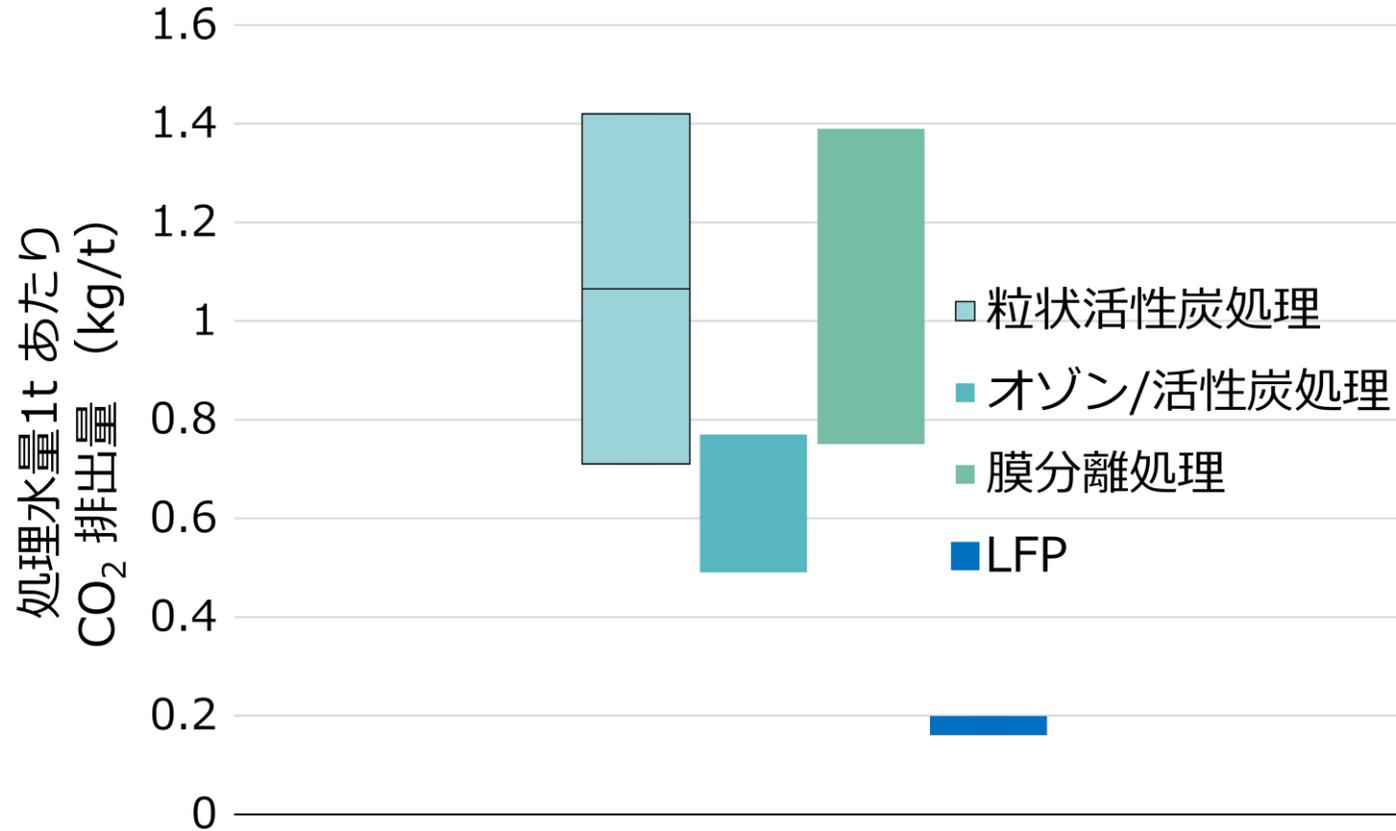
処理単価(ランニング)

処理単価は従来技術・粒状活性炭吸着処理の**1/3**

技術の環境負荷度

各処理方法でのCO₂排出量

※LFPはラボ試験に基づいた試算値



LFPのCO₂排出量は、従来技術の**1/3~1/7**

従来技術の引用文献：津野洋，西村文武，高部祐剛，林佳史，谷井信夫，丸野紘史，高木明寛（2013）：廃棄物埋立処分場におけるオンサイト型PFCsの除去・処理技術の開発-省資源、省エネルギー、省メンテナンスを考慮した実現可能な処理技術の選定と評価-，有機フッ素化合物の最終処分場における環境流出挙動の解明と対策技術に関する研究，平成24年度環境研究総合推進費補助金研究事業研究報告書 有機フッ素化合物の最終処分場における環境流出挙動の解明と対策技術に関する研究（平成25年3月），環境省，p.77-83.

③

開発の経緯 基礎技術FP法と PFAS水汚染浄化への地元の期待

排気処理装置 FP法 VOCs99%除去



- **FP法**：FilterにPowder活性炭を添着させ、そこをVOCs排気が通過することにより、VOCsを吸着除去する排気処理装置
- 2010年頃から、トンネル集塵技術を基に、土壤汚染浄化ニーズに対応して開発
- 土壤汚染浄化や工場排気のVOC処理、脱臭で使用
- トルエンの除去率 99%以上
- 写真はVOC土壤汚染原位置浄化プラント

特許

日本特許（FP法関連の特許）

- ✓ 特許番号5317885 ガス処理装置
- ✓ 特許番号5732204 脱臭装置及び脱臭方法
- ✓ 特許番号6140326 揮発性有機化合物の吸着材の再生方法
- ✓ 特願2018-108026 脱臭設備及び脱臭方法

開発の経緯



④

**粉体のハンドリングの煩雑さを
解決した装置の特徴**

LFPの機能・自動化で粉体使用のデメリットを解消

- ① **自動化** [機能性粉体添着→ろ過・浄化→使用済み機能性粉体の洗浄排出→機能性粉体の再添着]
- ② **破過した機能性粉体（活性炭）だけを交換**
- ③ **フィルターは概ね4～10年間連続使用**

完全オートメーション

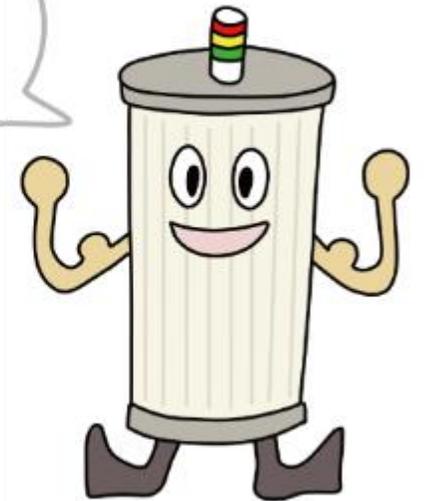


活性炭添着、ろ過吸着、
活性炭の洗浄剥離、再添着まで全自動

Point フィルター交換不要！
自動洗浄し、繰り返し使用可能

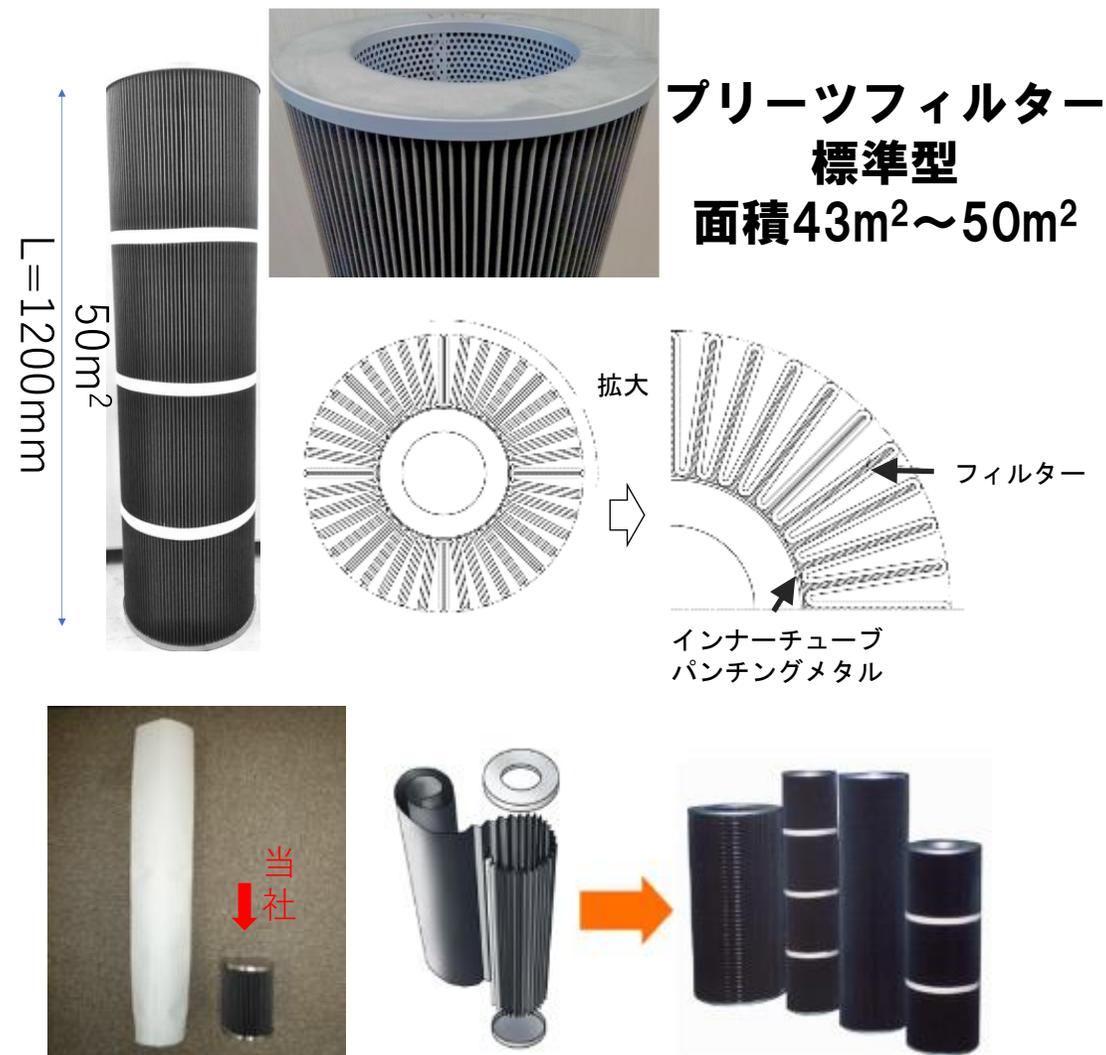
ろ過能力が低下すると
機能性粉体のみを自動で入れ替え。
フィルターは使い捨てでなく、
自動洗浄して繰り返し使用できます。

コストや
交換手間を
大幅に削減！！



フィルターの特徴

- ポリエステル基材
- ろ過精度は $0.15\ \mu\text{m} \times 99.95\%$
- 耐熱 120°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、目詰まりを起こさず
連続ろ過が可能
- ろ過時の差圧 $0 \sim 100\text{kPa}$
- 運転時のFlux $100 \sim 400\text{LMH}$
(参考：真空ポンプ圧力 -10kPa 、純水のFlux
 $12,000 \sim 19,000\text{LMH}$)



⑤

**機能性粉体の選択により様々な用途
（畜産排水、CO2濃縮など）に展開
できるLFP**

機能性粉体の種類・機能と活用の取り組み

機能性粉体	概説	機能と活用
PFASで使用 活性炭	材質が石炭、ヤシ殻、竹等 よりなる多孔質体	脱臭・脱色、有機物化合物(PFAS、VOC)、 窒素リン、金属イオンの吸着除去に使用
畜産排水で使用 ゼオライト	天然または人工鉱物よりなる 多孔質体	畜産排水中の窒素、アンモニアの 吸着除去に期待
フェライト系材料	フェライトを主成分としたCO ₂ 吸着剤	排気中のCO ₂ 吸着・濃縮・脱着に期待
MOF (金属有機 構造体)	人工的に合成された金属 イオンと有機分子からなる 多孔質体	大気中アンモニアの吸着・濃縮・脱着に 期待。水中での構造維持が課題

畜産排水処理



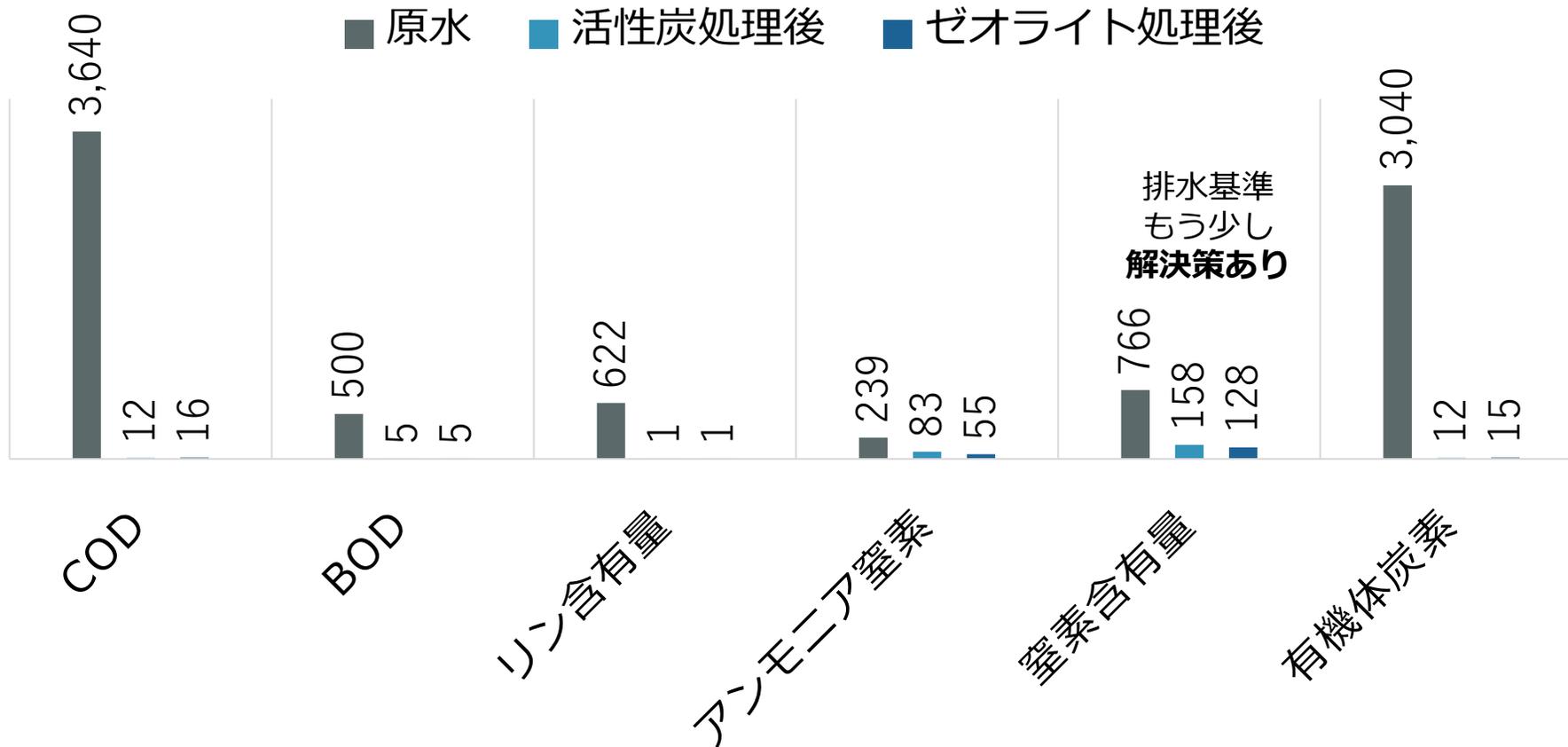
畜産排水処理 前



畜産排水処理 後

LFPによる畜産排水の処理結果

LFP処理結果 (単位mg/L)



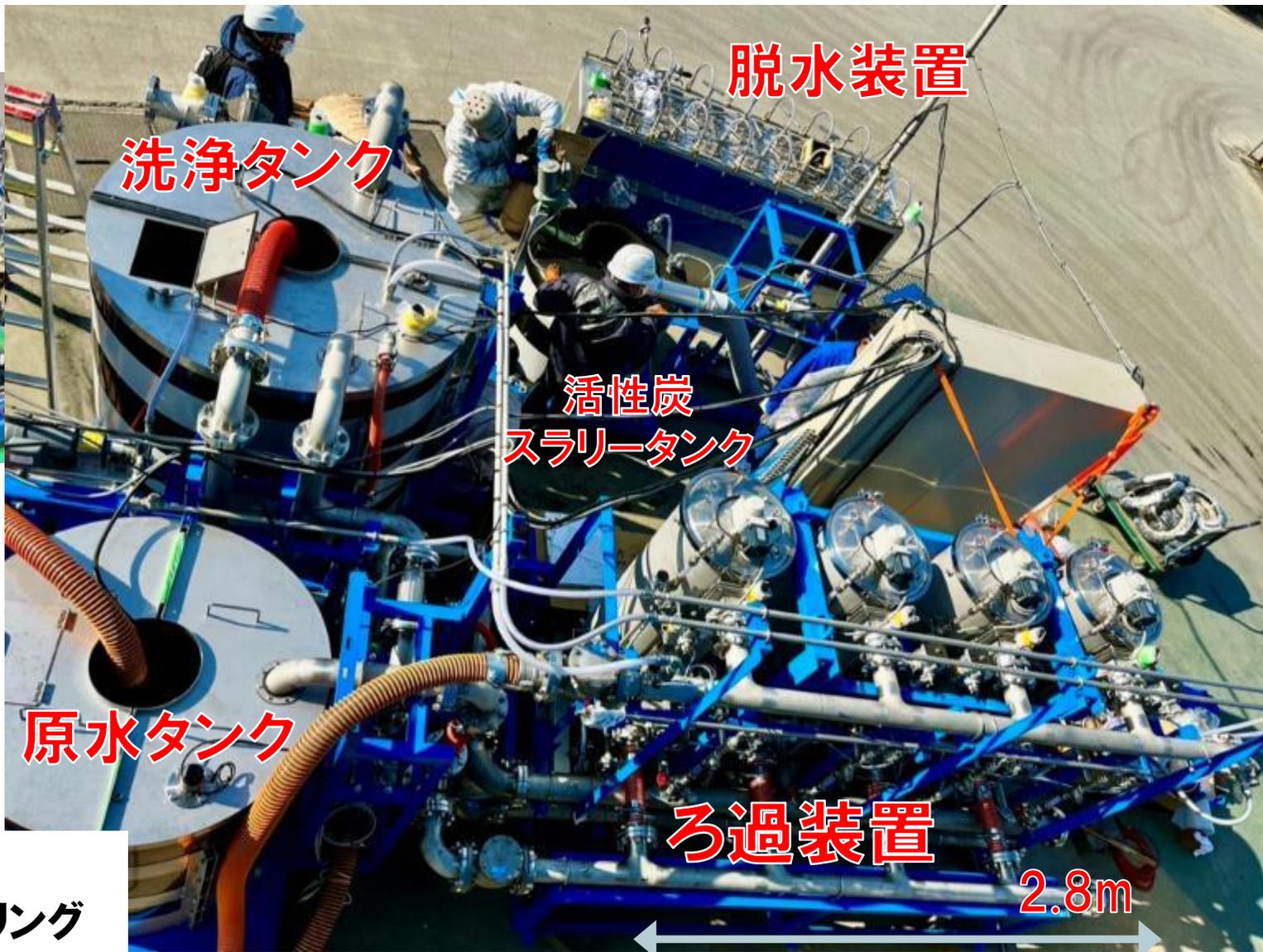
試験条件
減圧ろ過試験器使用、使用フィルター有効
直径70mm、処理量500ml
使用活性炭1.9g、市販のヤシ殻活性炭、
D50=12 μ m、乾燥減量 (wt%) 5以下、比
表面積 (m²/g) 1,020以上1,310以下

⑥

PFAS地下水汚染浄化採用事例



LFP実機の例



リアルタイム オンラインモニター

- ろ過供給量[m³/h]
- フィルター差圧 4本[kPa]
- 原水タンク水の濁度[TC-100、0~100ppm]
- ストレーナろ過差圧[kPa]
- 原水ポンプ運転周波数[Hz]
- 原水温度[°C]
- ろ過供給量積算値[m³]
- 殺菌剤供給・定流量ろ過浄化制御設定

元請工事会社:(株)太名嘉組

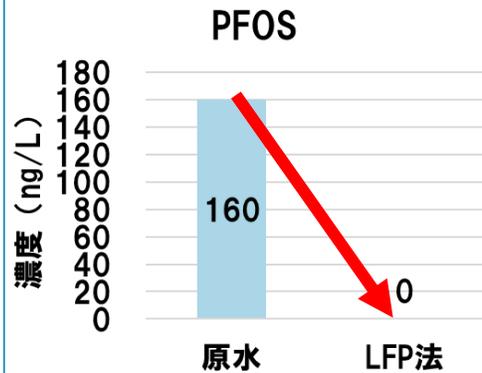
水処理担当:(株)エンバイオ・エンジニアリング



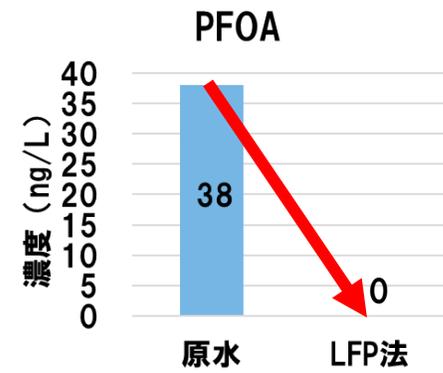
原水・マンホール

要求事項

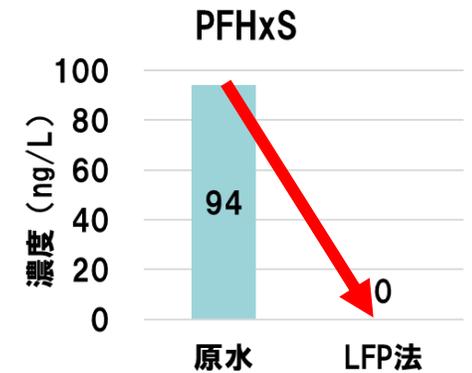
- 処理能力 30t/h
- 処理後濃度 PFOS+PFOA
合算値 50ng/L 適合
- 約37m³の機械室に入る設備



160ng/L→ND



38ng/L→ND



94ng/L→ND

⑦

他工法との組み合わせによる 土壌浄化への展開

PFAS土壤汚染原位置浄化浄化技術との組み合わせ

- ① 原位置化学的酸化分解
(電気発熱法 + 熱活性過硫酸法)
- ② 原位置土壤洗浄
(注水・揚水法、電気発熱法 + 注水・揚水)
- ③ 地下水揚水処理
(揚水、溶出促進 + 揚水)

揚水したPFAS水の
浄化(減容化)

対象濃度PFAS100,000ng/L³⁾
様々な溶存成分

LFP・減容化

無害化・焼却処分

出典：中島誠（2023）：土壤・地下水におけるPFAS汚染の実態と対策、廃棄物資源循環学会令和5年度第2回セミナー231023、廃棄物・土壤分野における有機フッ素化合物(PFAS)問題の動向と最新の知見資料、廃棄物資源循環学会。

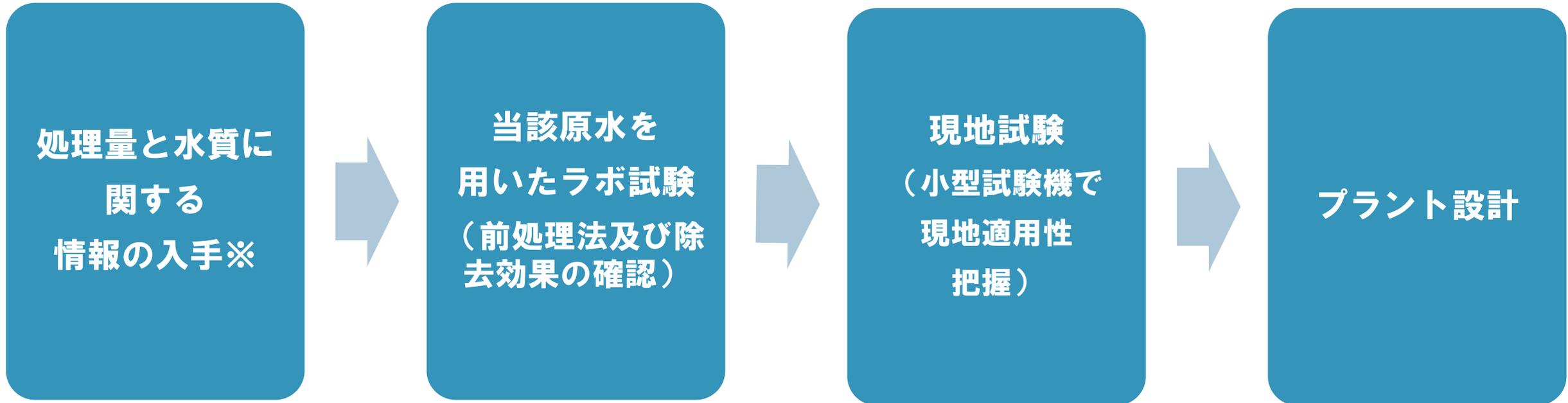
参考文献：3) Review of water treatment systems for PFAS removal, Report no. 14/20, Aug 2020, Concawe(Conservation of Clean Air and Water in Europe) (Concawe Report Aug. 2020)



⑧

浄化設計実施の手順

浄化設計実施の手順



※pH、水温、濁度、SS、TOC/COD/BOD、Fe、Mn、Ca、PFAS濃度と、地下水・湧水が対象の場合には対象地位置及び地質の情報

ラボ試験・現地試験で、ファウリング防止の効果、ランニングコスト等の確認

各種大きさのLFP装置



名称：ECOクリーンLFP 50M
標準処理量 5～8t/h/ベッセル1本
重量：ベッセル4棟で2,000kg
用途：湧水・地下水・排水浄化
浄水取水ポンプ場での浄化
湧水の浄化（自治体へ納入）・地下水浄化（レンタル）で、稼働中



名称：ECOクリーンLFP 10M
標準処理量 1～1.6t/h/ベッセル1本
重量：500kg
用途：湧水・地下水・排水浄化
現地実証試験



名称：ECOクリーンmini (1m²)
標準処理量 0.1～0.2t/h/ベッセル1本
重量：全体60kg以内、15kg分割構造
用途：湧水・地下水・排水浄化
現地実証試験
調査ボーリング作業水の処理

本日発表のまとめ

① LFPは水（liquid）をフィルター（filter）に添着させた機能性粉体（powder）でろ過し浄化する新しい処理方法

② LFP法が効果的である理由
機能性材料を粉体で用い、フィルター上で添着（密集）させて使用している

③ 低いランニングコスト・CO₂排出量

④ 技術応用の多様性
土壌汚染浄化、畜産排水処理・窒素の循環再利用、CO₂固定化など



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

山内 仁 略歴

学歴：国立弘前大学理学研究科、専攻：地質、堆積学、教育学

資格 技術士 総合技術監理、応用理学（地質）

業務経歴 上下水・廃棄物・防災・環境・土壌地下水汚染対策業務

1993年～ 安全環境関連業務（上水、廃棄物、不発弾・毒ガス対策、土壌地下水）

ニカラグア国マナグア市上水道整備計画基本設計調査（JICA）

廃棄物広域最終処分場地質地下水調査（神奈川県）

東京国際空港新B滑走路磁気探査（運輸省）

大久野島土壌汚染対策実施設計（環境省）

京都府城陽市寺田奥山における調査の計画の立案・実施（道路公団、防衛省）

改正土壌汚染対策法の検討委員（環境省）

2012年～2014年（中国江蘇省南京）中日合弁 In Situ Solution China 総経理

2015年～セミナー講師（日本商工会、春光会、日本財産保険）

2018年～2020年（南京）ENBIO南京 副総経理

土壌地下水から、大気・水・地下水の環境総合コンサル・エンジニアリング

2021年～現在 株式会社流機エンジニアリング、アジア・アフリカ環境ソリューション室
サステイナブルな大気・水・地下水環境対策を推進