次世代PFAS評価技術

金沢大学　理工研究域
地球社会基盤学系
原　宏江

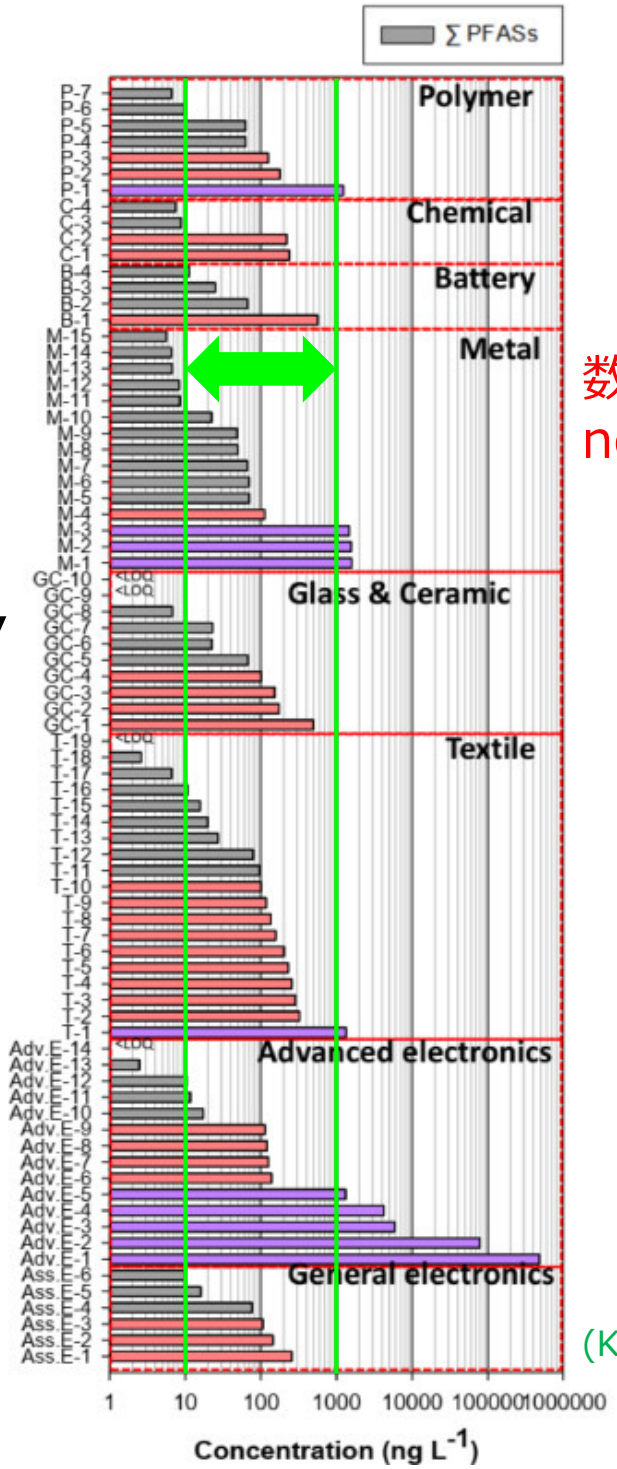
アウトライン

1. 技術開発の必要性
2. 技術開発の概要
3. 技術提案のポイント

1.技術開発の必要性
産業排水中のPFAS濃度

- 韓国の工業地域で77施設(8業種)を対象に排水中PFASを測定
- 電子機器系（モバイル機器，ソーラーパネル，メモリ，シリコンウエハー）の排出濃度が最も多く，化学系・電池系は比較的低かった

８業種：
General electronics: ディスプレイ，リモコン，医療機器
Advanced electronics: モバイル機器，ソーラーパネル，メモリ，シリコンウエハー
Textile: ポリエステル，ウール，生地
Glass and ceramic: トイレ，ディスプレイ用ガラス
Metal: ケーブル，バルブ，スプリング，モールド，製錬
Battery: 鉛電池，リチウム電池
Chemical:コーティング剤，プリント基盤エッチング液
Polymer: 液晶ディスプレイフィルム，車インテリア用プラ，PE, PP PS

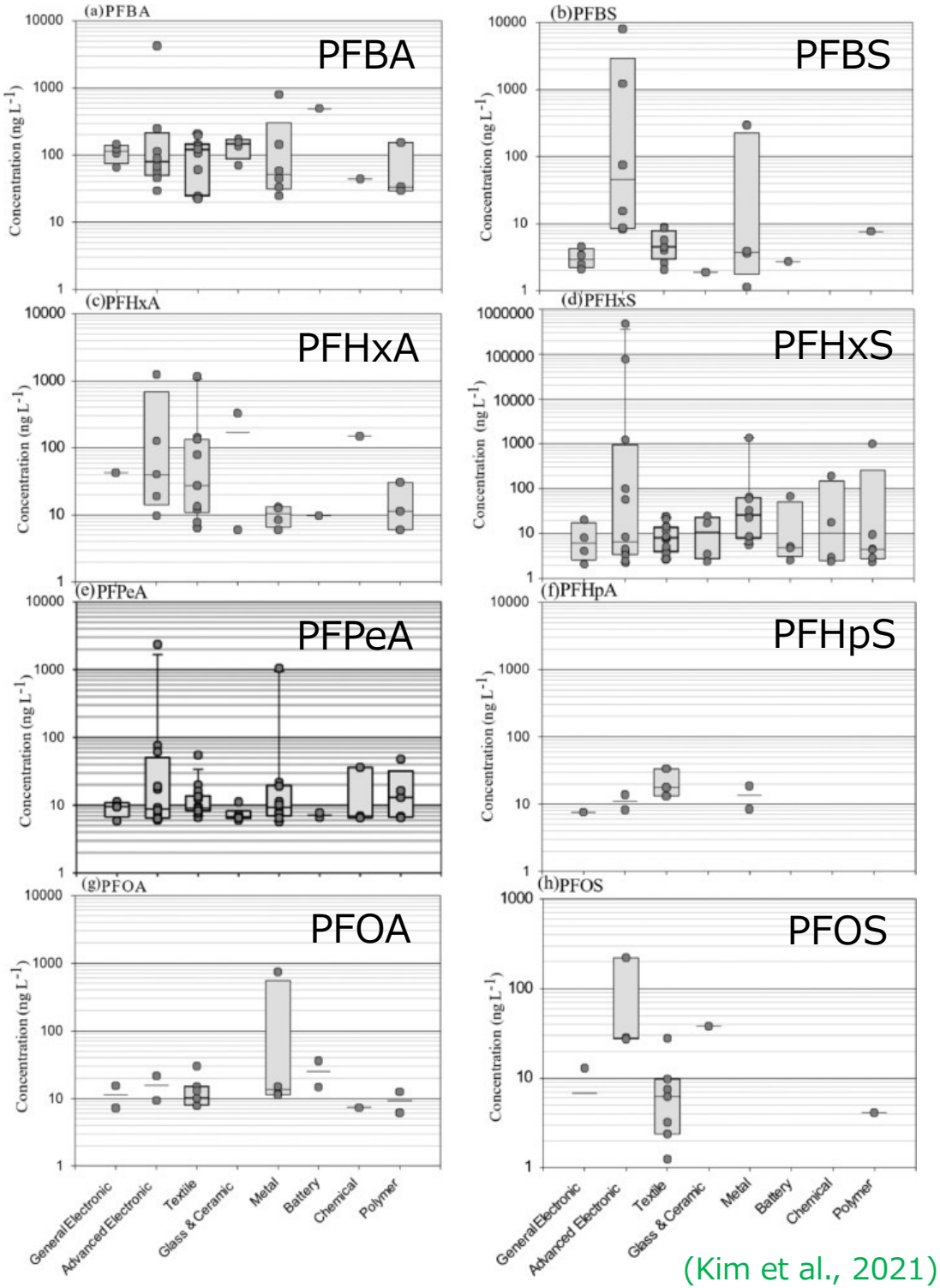


数十～1,000 ng/L

(Kim et al., 2021)

1.技術開発の必要性
産業排水中のPFAS濃度

- 排水中PFASの濃度レベルは10^{1}~10^{6}ng/Lと幅広い
- PFHxSはいずれの業種の排水（＋河川水）でも高頻度で検出された
  (Kim et al., 2021)

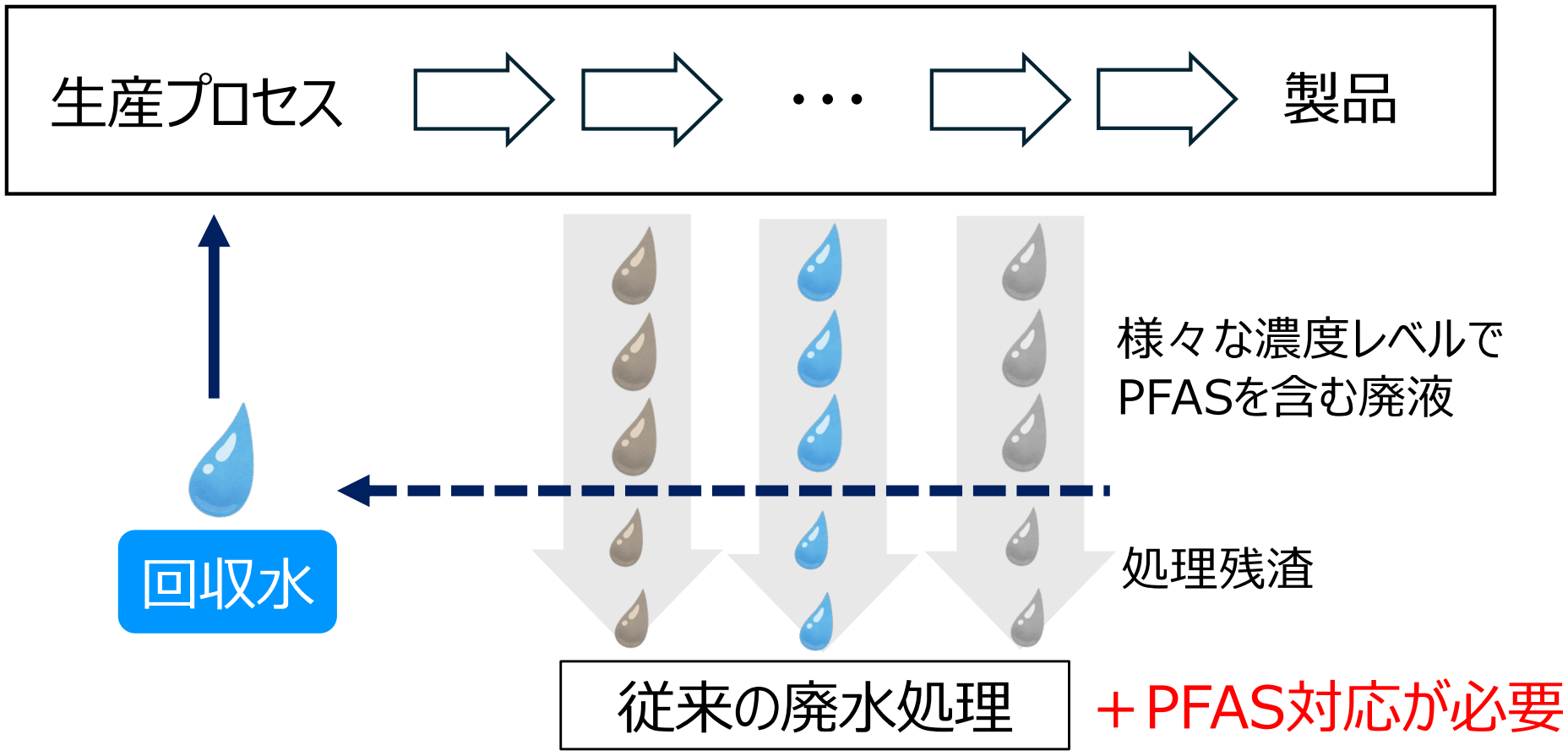


(Kim et al., 2021)

1.技術開発の必要性

今必要とされるPFAS計測技術

エレクトロニクス,
フッ素系樹脂, 金属など

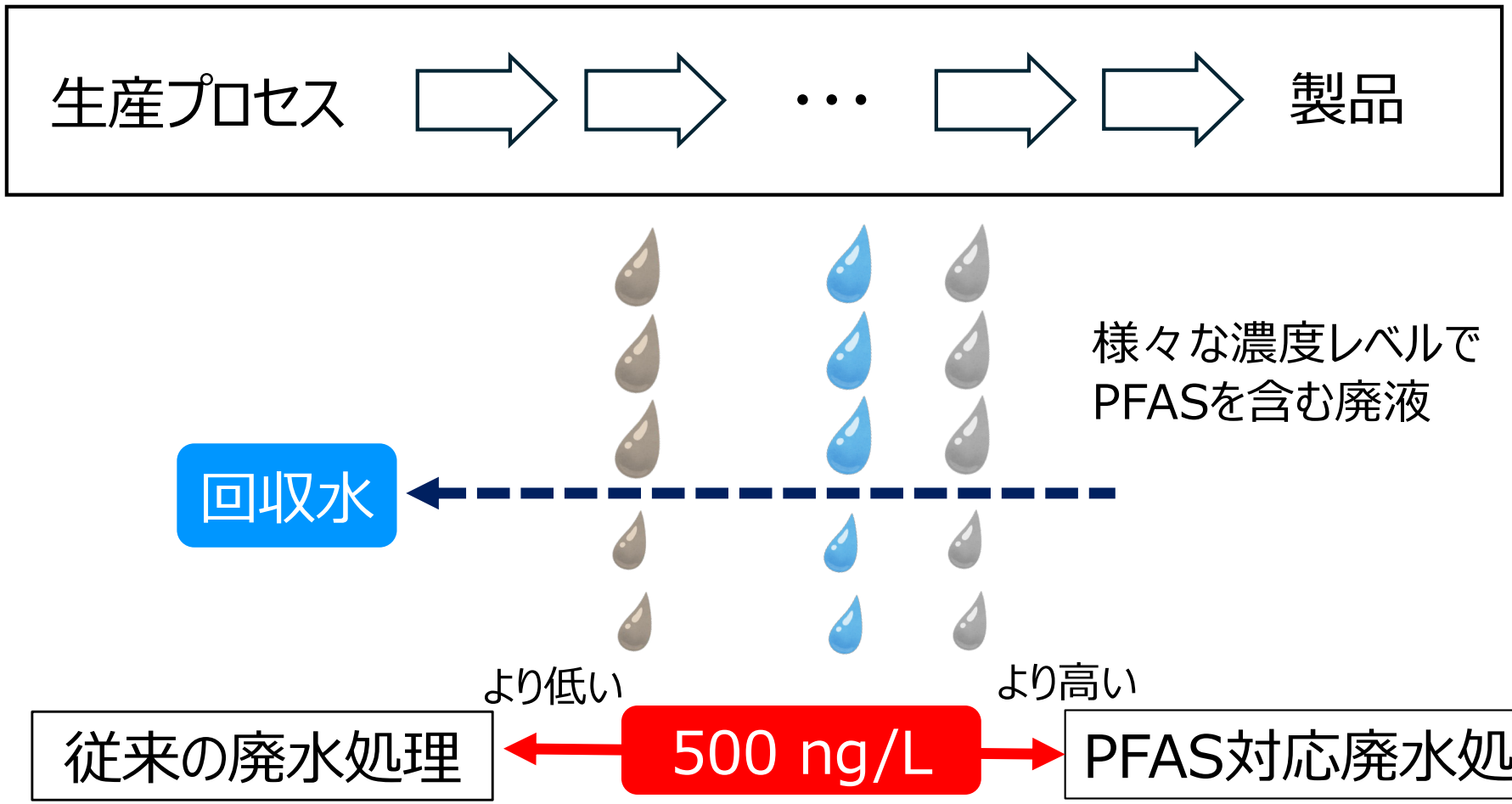


- すべての廃水に対して一律にPFAS対応を行うのは非経済的
- 最終的な分解処理に回る廃水・処理残渣を最小化したい

1.技術開発の必要性

今必要とされるPFAS計測技術

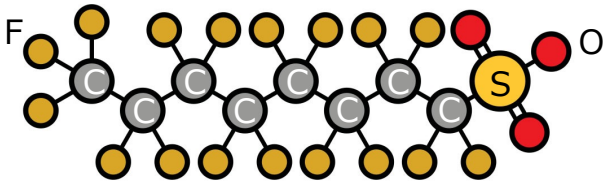
エレクトロニクス,
フッ素系樹脂, 金属など



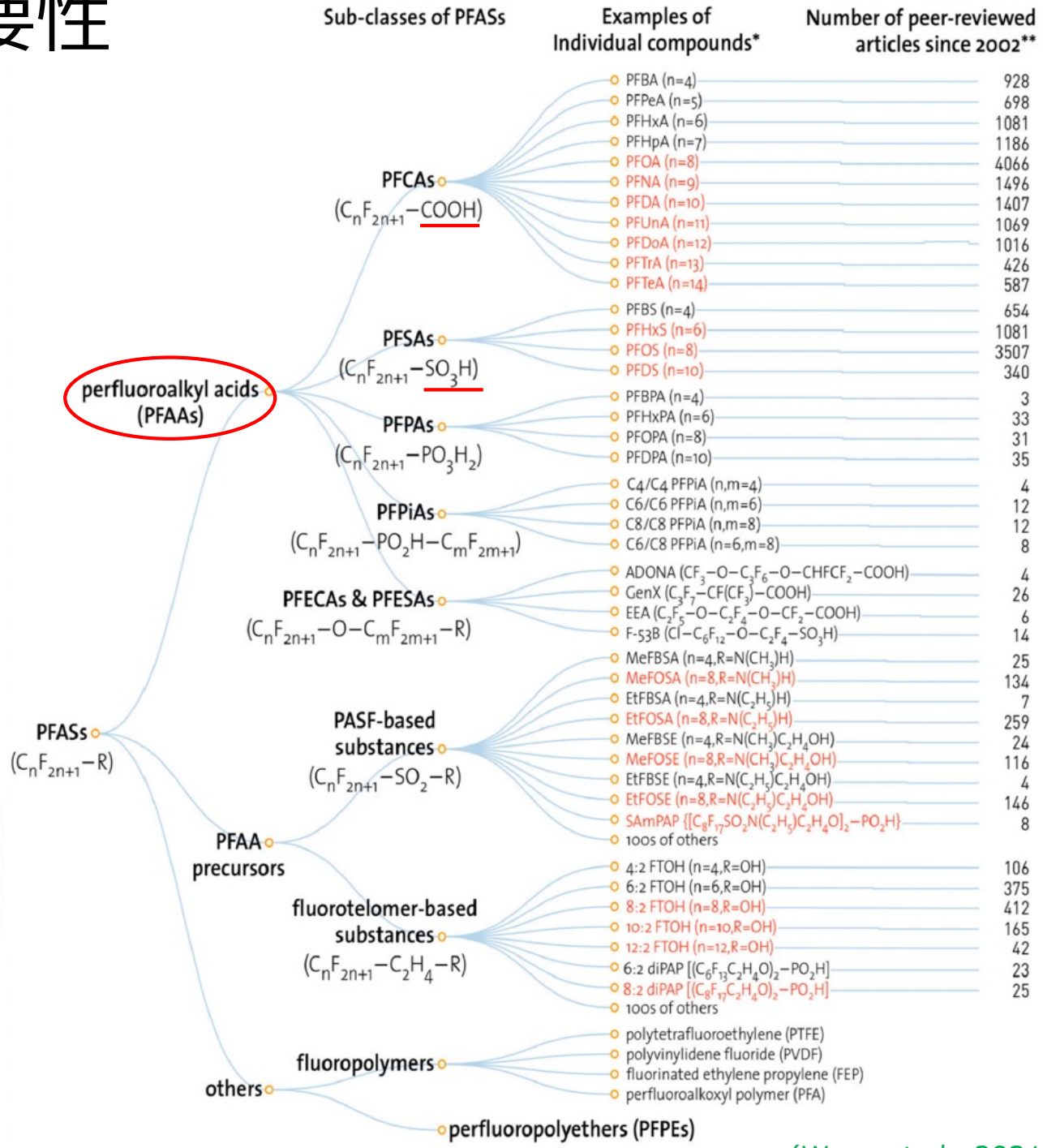
現場で簡便・迅速に確認できるPFAS計測技術が必要

1.技術開発の必要性
PFASの分類

- PFASは4700種類以上の化学物質の一群
  (OECD, 2018)

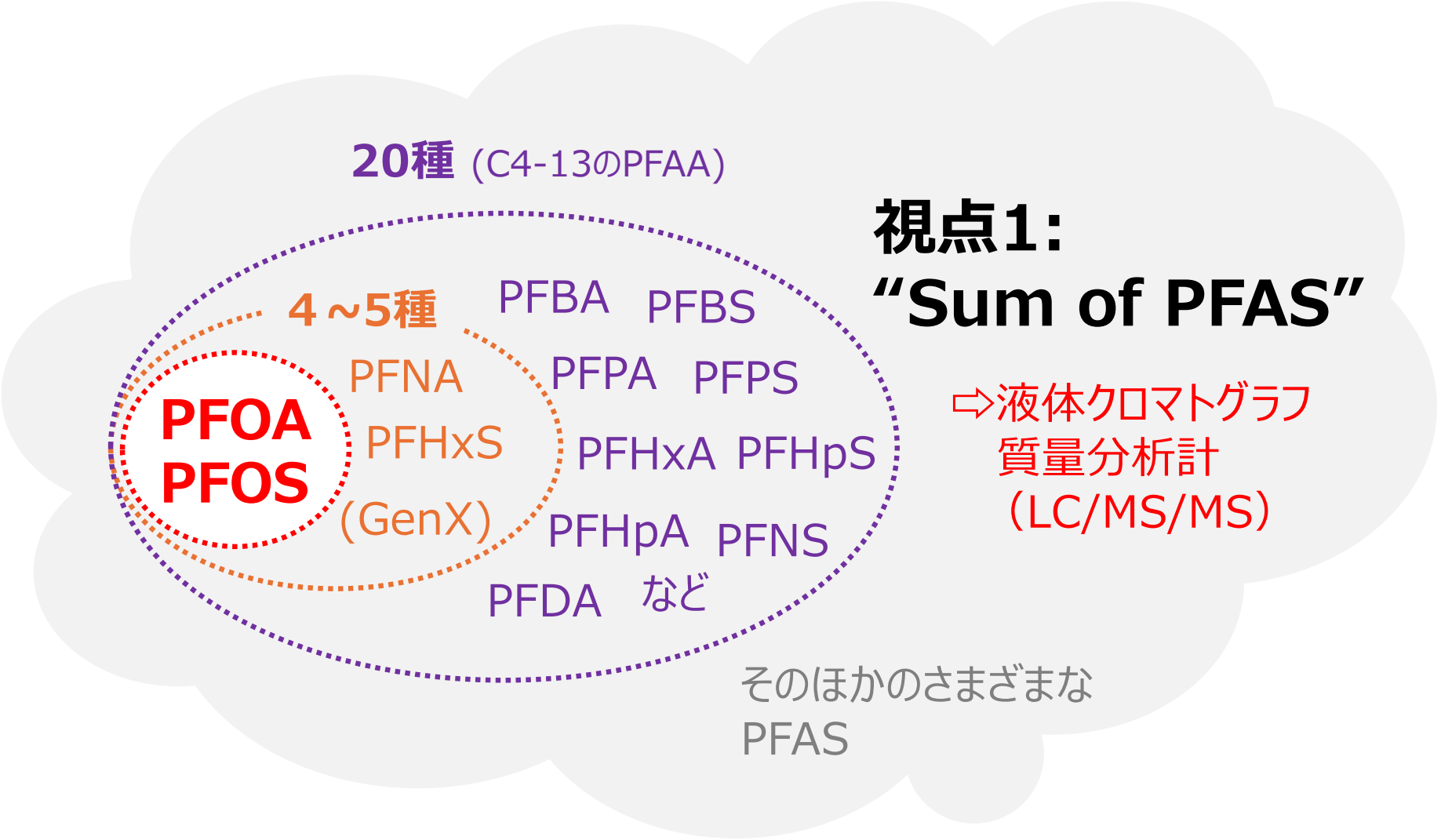


- PFAAだけでなく，PFAA前駆体についても目標値等を設定している地域がある
- PFAAは毒性情報が多く報告されているが，作用機構については十分にわかっていない
  (Fenton et al., 2020)



(Wang et al., 2021)

1.技術開発の必要性
どのPFASを見ればよいか？



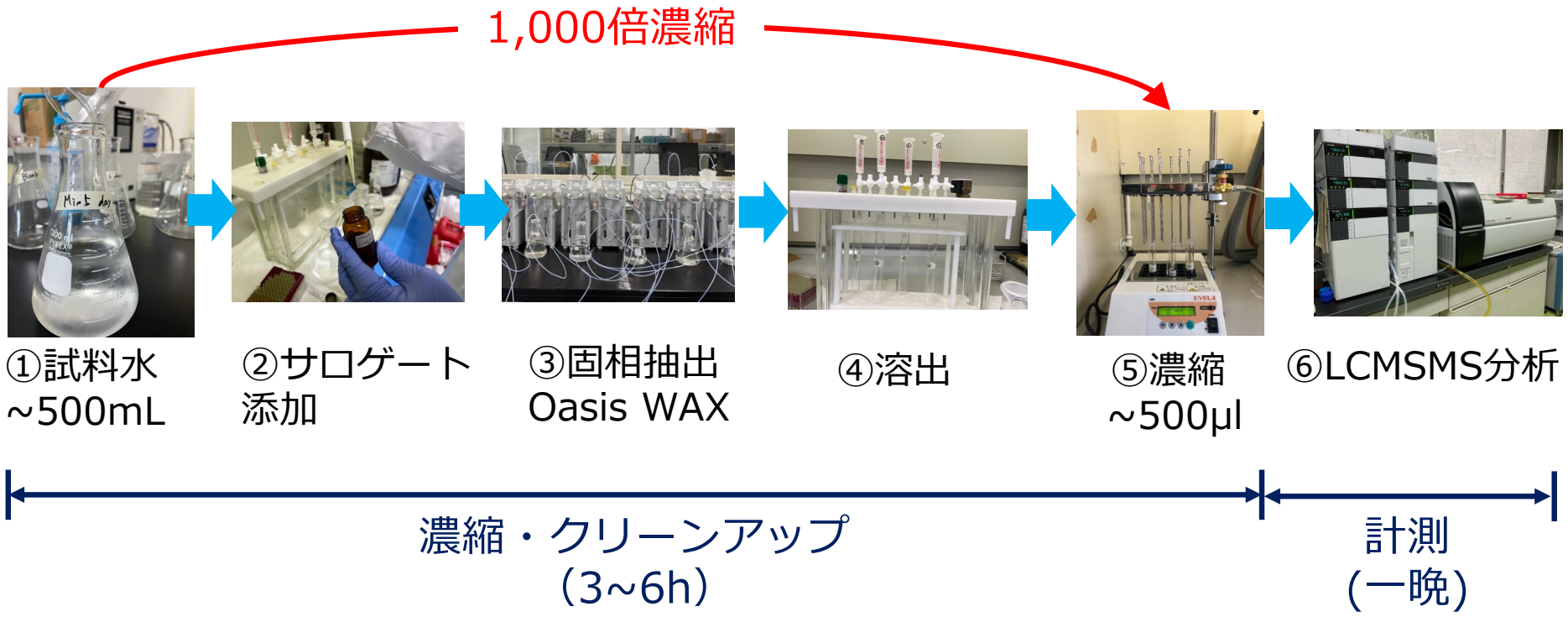
視点1:
“Sum of PFAS”

⇨液体クロマトグラフ
質量分析計
（LC/MS/MS）

視点2: “Total PFAS” ⇨全有機フッ素分析

1.技術開発の必要性
“Sum of PFAS”分析のリアル

■LCMSMSによるバッチ分析の例（8~24検体）



- 10^0ng/Lオーダーまで確実に定量できる (Dhiman and Ansari, 2024; Rodriguez et al., 2020))
- 一般的なLCMSMSを用いたでは，定量結果を確認できるのは翌日以降
- 測定PFASごとの同位体標識標準物質（サロゲート），PFAS用の固相抽出カラム(米国Waters社)，高価なLCMSMS装置を要す

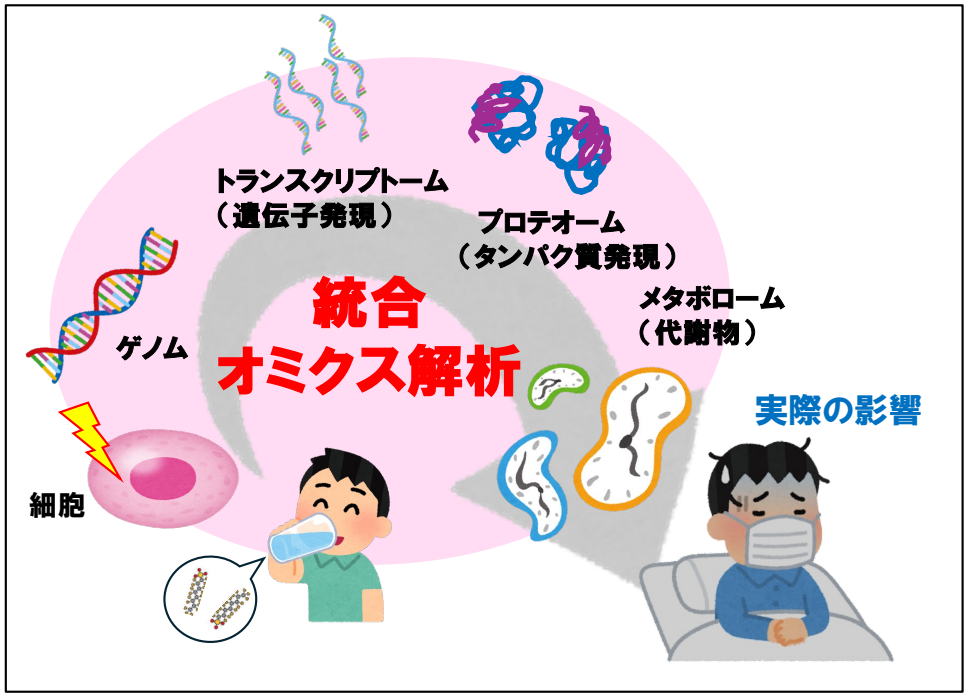
2.技術開発の概要
これまでに開発されたイムノセンサー

バイオレセプター	ターゲットPFAS	出典
ヒト血清由来アルブミン(hSA)	PFOA (PFOSの不干渉を確認)	Moro et al., 2020
ペルオキシソーム増殖剤活性化受容体(PPARα)	PFOS	Zhang et al., 2011
ペルオキシソーム増殖剤活性化受容体(PPARα) +金ナノ粒子	PFOS （5 ng/Lまで検出）	Xia et al., 2011

- PFOA・PFOS以外のPFAS,あるいは”Sum of PFAS”に対応するバイオレセプターは今のところ報告されていない
  （開発されたバイオレセプターの特異性の検証も十分とはいえない）
- 再掲/ PFAAは毒性情報が多く報告されているが，作用機構については十分にわかっていない

生体応答を網羅的に解析し，PFAS種に特異的な応答を明らかにするとともに，バイオレセプターとなりうる新たな生体分子を発見する

2.技術開発の概要
網羅的な生体応答解析による新たなバイオレセプターの探索



(Steur et al., 2019を踏まえ作成)

- **トランスクリプトミクス**
  （網羅的な遺伝子発現解析）
  細胞や組織からmRNAを抽出し，DNAマイクロアレイや次世代シーケンサーを用いて発現遺伝子とその発現量の情報を得る．
- **プロテオミクス**
  （網羅的なタンパク発現解析）
  細胞や組織からタンパク質を抽出し，消化酵素により断片化処理したペプチド断片をLCMSMSを用いて計測し，発現タンパク質とその発現量の情報を得る．

- 医薬品，重金属，環境試料などの毒性影響評価に適用した事例が多数ある．
- 早期の生体応答を利用するため，化学分析では検知困難な軽微な水質の違いも検出可能．例:膜ろ過処理水 (Hara-Yamamura et al., 2013)
- PFASへの適用事例はこれまでに4件. (Peng et al., 2013; Hu et al., 2022; Hang et al., 2022; Lie et al., 2023)

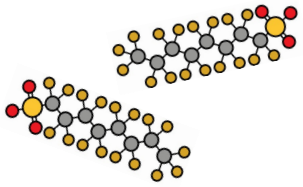
- PFASに特異的な生体応答の可能性. (Nguyen et al., 2024)

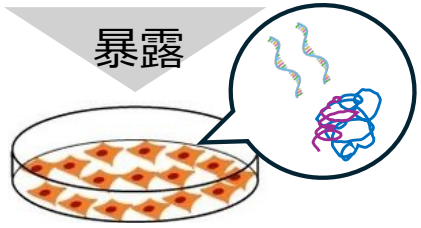
  特定のステロイドの増加や減少，免疫応答の活性化，ステロイド合成の促進など

2.技術開発の概要
網羅的な生体応答解析による新たなバイオレセプターの探索

網羅的遺伝子発現解析
網羅的タンパク発現解析

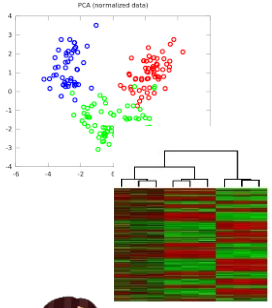
対象：PFOA, PFOS
(PFHxS, PFNA, GenX)





ヒト培養細胞

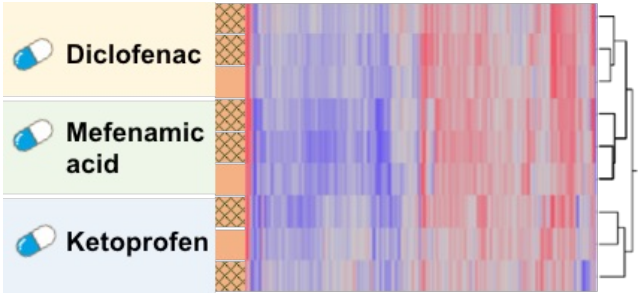
- 細胞からの抽出物を次世代ｼｰｹﾝｼﾝｸ，LCMSMSに供す
- 全遺伝子の塩基配列を一度に解読し，発現量を測定

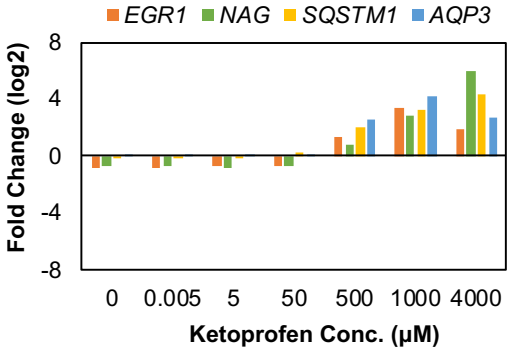


- 有意変動成分の抽出と機能分析
- MSCOT分析，主成分分析，クラスター分析
- 既知毒性物質データとの比較

ﾊﾞｲｵｲﾝﾌｫﾏﾃｨｸｽ分析

対象PFASに特異的な生体応答を特定できないか？
（以下は医薬品での試み）





(Fukushima et al., 2014; Hara–Yamamura et al., 2022)

3. 技術提案のポイント

新たな”Sum of PFAS”分析技術のニーズ

- 分解技術の制約・経済性の観点から，PFAS廃液の選別が重要
- 現行の”Sum of PFAS”分析よりも低感度（100ng/Lレベル）でよいので，現地で迅速簡便に実施できる計測技術が必要

提案技術の要点

- バイオセンサーは確立されたプラットフォーム（迅速・簡便・感度も見込める）
- 網羅的な生体応答解析により新たなPFAS特異的バイオレセプターを開発

開発技術の波及効果

- “Sum of PFAS”型規制の対象種は今後も拡大していく可能性があり，本技術開発で得られる知見・ノウハウを活用できる
- センサーとしての製品化（特に，バイオレセプターの固定）においては，関連企業との協働
- 毒性影響に基づく検出により“Total PFAS”監視も可能になるのでは？