

令和6年度第2回環境保全技術セミナー  
(於：アスティ 45)  
主催：一般社団法人 北海道環境保全技術協会

# 土壌・地下水におけるPFAS汚染の 実態と対策について

 国際航業

フェロー 事業統括本部（地盤環境研究） 中島 誠

2025/3/7

## 目次

- 1 PFASとは
- 2 PFASの摂取による人の健康への影響
- 3 我が国のPFAS汚染に対する対応の状況
- 4 PFASによる土壌・地下水汚染の特徴
- 5 PFASによる土壌・地下水汚染の実態と事例
- 6 PFASによる土壌・地下水汚染の調査方法と留意点
- 7 PFASによる土壌・地下水汚染の対策方法・対策技術
- 8 今後の課題と展望
- 9 海外のPFAS汚染に対する対応の状況

# 1 PFASとは

# PFAS（ペル／ポリフルオロアルキル化合物）とは



## PFASの定義

- 少なくとも1つの完全にフッ素化されたメチルまたはメチレン炭素原子（H/Cl/B/I原子が結合していない）を含むフッ素化合物
- 2021年に公表されたOECD（経済協力開発機構）の定義
  - 炭素数3以上のペルフルオロアルキル部分（すなわち、 $-C_nF_{2n}-$ 、 $n \geq 3$ ）または炭素数3以上のアペルフルオロアルキルエーテル部分（すなわち、 $-C_nF_{2n}O_mC_{2m}F-$ ）、 $n, m \geq 1$ ）を含むペルフルオロカーボンを含む
  - すなわち、**幾つかの例外を除き、少なくとも過フッ素化メチル基（ $-CF_3$ ）または過フッ素化メチレン基（ $-CF_2-$ ）を有する化学物質はPFASである**
- 米国におけるPFASの定義（米国TCSA（有害物質規制法）における定義）
  - 構造部位に $R-(CF_2)-C(F)(R')R''$ を含む化学物質または混合物
  - $CF_2$ 部分と $CF_3$ 部分は両方とも飽和炭素であり、R基（R、R'またはR''）はいずれも水素になりえない

# PFAS（ペル／ポリフルオロアルキル化合物）の特徴と用途



## PFASの特徴

- 耐熱性、難燃性、耐熱性、耐候性、防汚性、耐薬品性、撥水性、撥油性、非粘着性、界面活性、潤滑性、電気絶縁性、誘電特性等の特性をもつ
- 個々のPFASにはそれぞれに異なる特性や用途、環境面の特徴があり、性質が大きく異なる

## PFASの過去および現在の使用（業界／用途） ……ITRC (2023)より

- 航空・宇宙、自動車、殺生物剤（除草剤と殺虫剤）、バイオテクノロジー、建築・建設、ケーブル・配線、化学工業、化粧品／パーソナルケア製品、エレクトロニクス、エネルギー、爆発物・推進剤・銃・弾薬、防火／安全、食品加工、家庭用品と清掃用品、メディカル製品、金属メッキ、石油生産、鋳業、原子力産業、石油・ガス産業、紙と包装、製薬業界、写真産業、PFAS製造、フォトリソグラフィと半導体、プラスチックとゴム、レクリエーションと音楽機器、リサイクルと材料回収、冷媒、テキスタイル（椅子張り、カーペット）・レーザー・アパレル、木材産業

様々な用途に広く使用されており、自然界や体内で分解されにくく蓄積されにくい

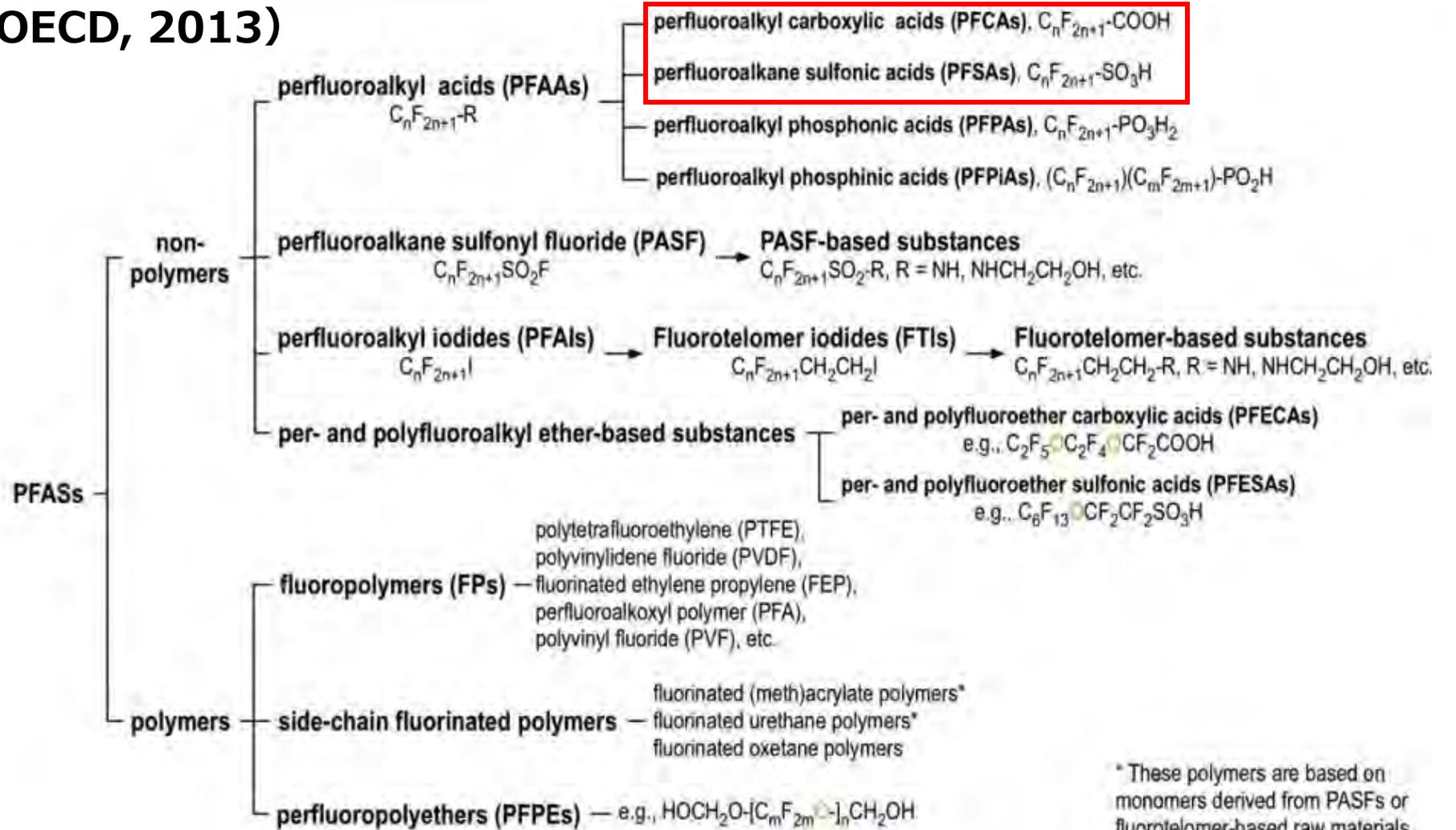


“Forever chemicals”（永遠の化学物質）  
と言われている

# PFAS (ペル/ポリフルオロアルキル化合物) とは



## PFASの一般的な分類 (OECD, 2013)



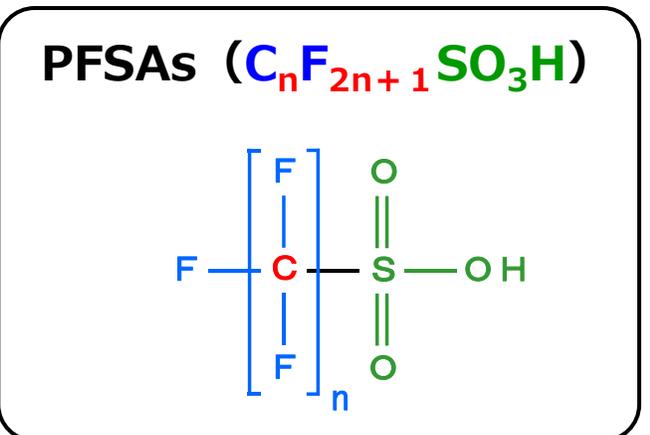
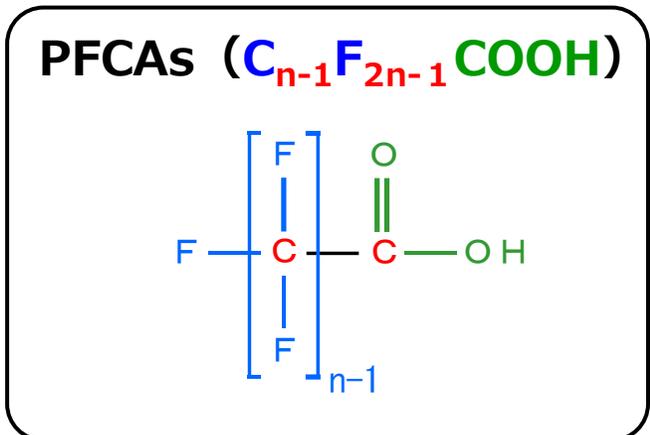
\* These polymers are based on monomers derived from PASFs or fluorotelomer-based raw materials.



# PFOA、PFOS、PFHxS



## PFCAs (ペルフルオロアルキルカルボン酸類)、PFSA (ペルフルオロアルキルスルホン酸類)



C数 (n)	PFCAs (ペルフルオロアルキルカルボン酸)		PFSA (ペルフルオロアルキルスルホン酸)	
	略称	CF <sub>2</sub> 鎖数 (n-1)	略称	CF <sub>2</sub> 鎖数 (n)
4	Buta	PFBA	<b>PFBS</b>	<b>4</b>
5	Penta	PFPeA	PFPeS	5
6	Hexa	PFHxA	<b>PFHxS</b>	<b>6</b>
7	Hepta	PFHpA	PFHpS	7
<b>8</b>	<b>Octa</b>	<b>PFOA</b>	<b>PFOS</b>	<b>8</b>
9	Nona	<b>PFNA</b>	PFNS	9
10	Deca	PFDA	PFDS	10
11	UnDeca	PFUnDA	PFUnDS	11
12	DoDeca	PFDoDA	PFDoDS	12
13	TriDeca	PFTTrDA	PFTTrDS	13
14	TetraDeca	PFTTeDA	PFTTeDS	14

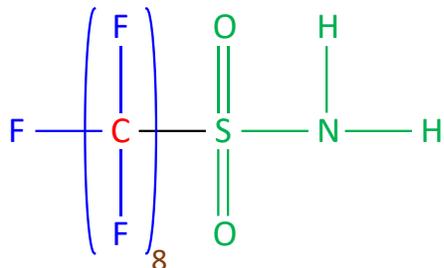




# 主なPFASの構造式②

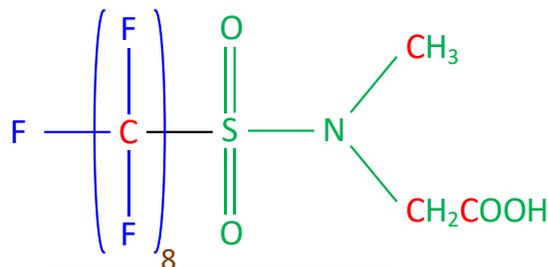


ペルフルオロオクタン  
スルホンアミド (FOSA)



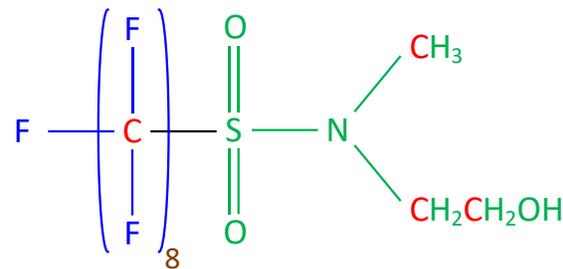
(C8) PFOSA (FOSA)

ペルフルオロオクタンスルホン  
アミド酢酸 (FOSAA)

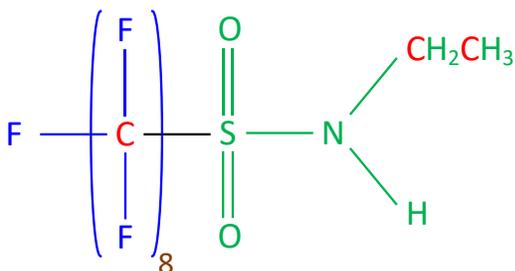


(C12) NMeFOSAA

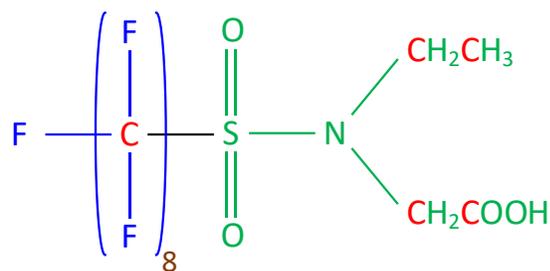
ペルフルオロオクタンスルホン  
アミドエタノール (FOSE)



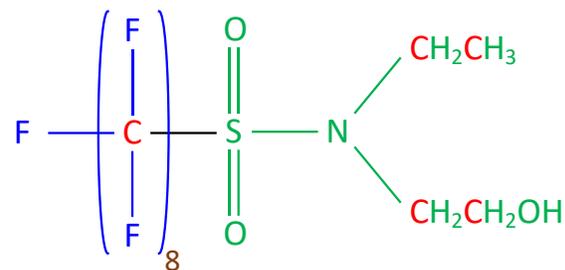
(C11) NMeFOSE



(C9) NETFOSA



(C11) NETFOSAA

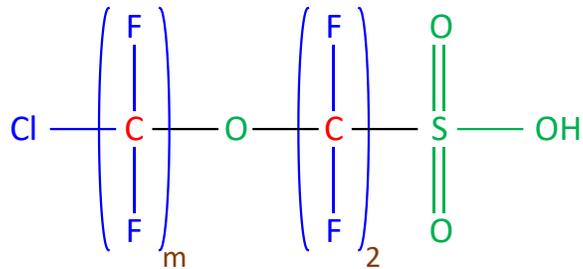


(C12) NETFOSE

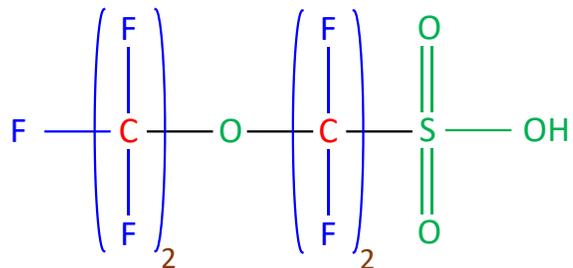


# 主なPFASの構造式③

## エチルスルホン酸

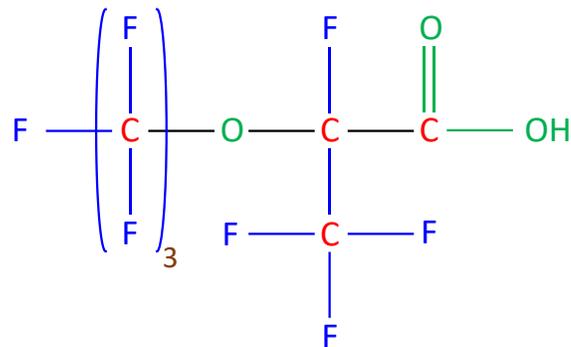


m=6 (C8) 9Cl-PF3ONS (9Cl-F53B)  
8 (C10) 11Cl-PF3ONS(11Cl-F53B)

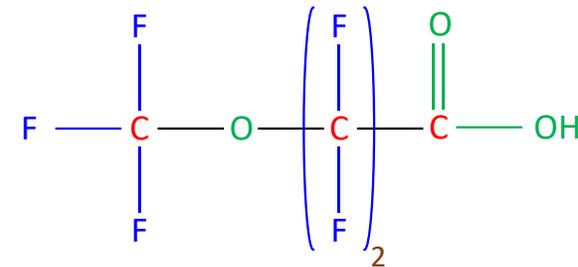


(C4) PFEESA

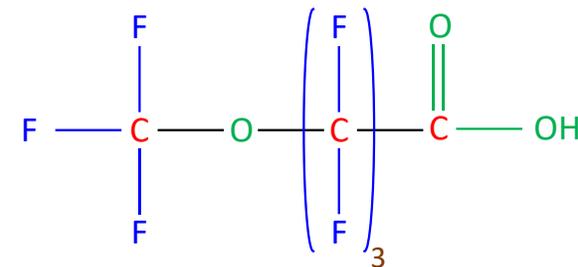
## ペル/ポリフルオロエーテルカルボン酸



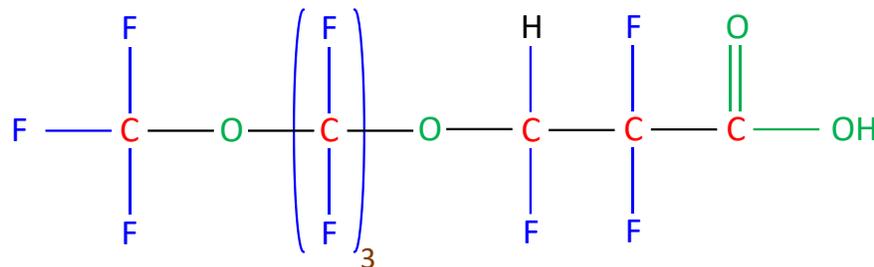
(C6) HFPO (GenX)



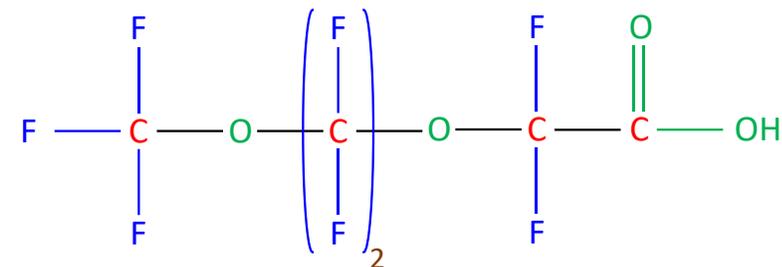
(C4) PFMPA



(C5) PFMBA



(C7) ADONA



(C5) NFDHA

# 2

## PFASの摂取による 人の健康への影響

# 背景① – POPs条約



## 残留性有機汚染物質（POPs）に関するストックホルム条約（2001年5月採択、2004年5月発効）

- 環境中での残留性、生物蓄積性、人や生物への毒性が高く、長距離移動性が懸念される残留性有機汚染物質（POPs：Persistent Organic Pollutants）の製造及び使用の廃絶・制限、排出の削減、これらの物質を含む廃棄物等の適正処理を規定している条約
- 目的
  - 環境と開発に関するリオ宣言の第15原則に規定する予防的な取組方法に留意しつつ、POPsから人の健康及び環境を保護することを目的とする
- 規制内容
  - **附属書A： 製造・使用、輸出入の原則禁止**
    - PFOAとその塩及びPFOA関連物質（2019～）
    - PFHxSとその塩及びPFHxS関連物質（2022～）
  - **附属書B： 製造・使用、輸出入の制限**
    - PFOSとその塩及びPFOSF（2009～） ※PFOSF：ペルフルオロオクタンスルホン酸フルオリド
  - 附属書C： 非意図的に生成される物質の排出の削減及び廃絶

2022年～  
C9-C21の長鎖PFCAについて検討委員会  
(POPRC) にて規制検討



# PFOS、PFOAの摂取による健康影響（発がん性）

## PFOA、PFOSに関する国際がん機関（IARC）の発がん性分類結果の概要

物質	一連の科学的根拠			グループ (ヒトに対する 発がん性)
	ヒトに対する発がん性 (ヒトの疫学研究)	動物に対する発がん性 (ラットやマウス等の動物実験)	発がんの機序 (発がん性物質としての主要な特性)	
PFOA	限られている (腎細胞がん、精巣がん) 不十分 (その他のがん種)	十分	強い ・ばく露されたヒト ・ヒト初代培養細胞 ・実験系	グループ1 (あり)
PFOS	不十分	限られている	強い ・ばく露されたヒト ・ヒト初代培養細胞 ・実験系	グループ2B (ある可能性 あり)

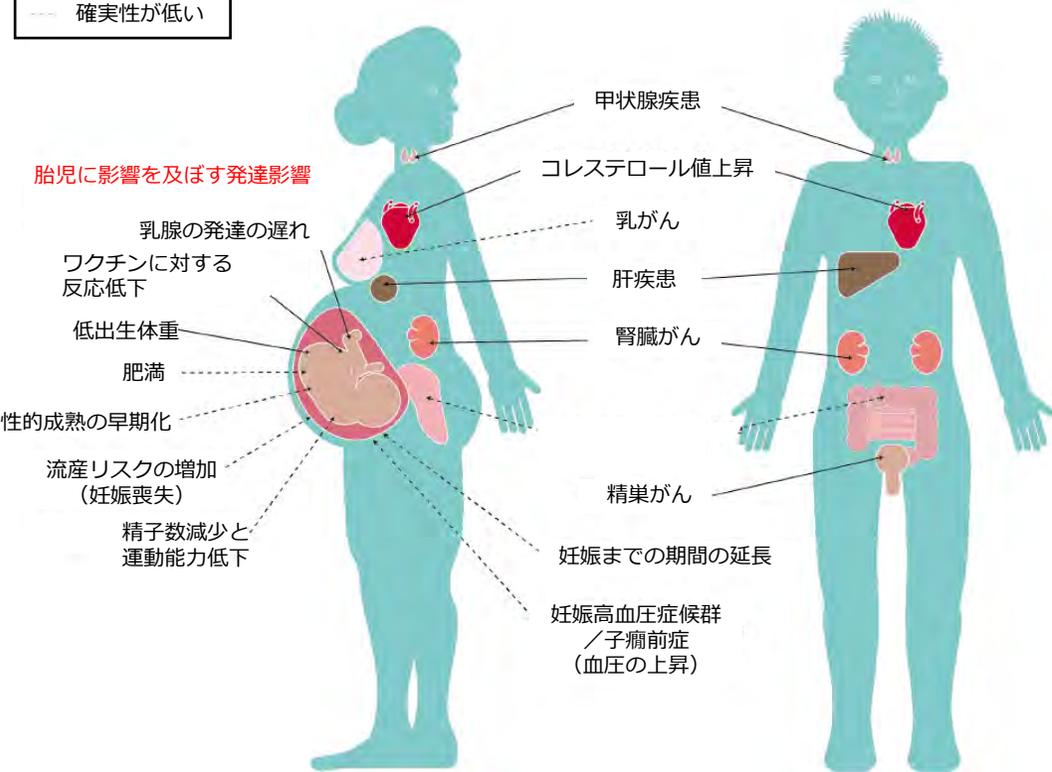
## 国際がん機関（IARC）の発がん性分類

グループ	評価内容	
1	ヒトに対して発がん性がある	コールタール、アスベスト、たばこ、カドミウム、アルコール飲料、加工肉、ベンゼン、ベンゾ(a)ピレン、トリクロロエチレン、クロロエチレン、カドミウム、六価クロム等
2A	おそらくヒトに対して発がん性がある	アクリルアミド、非常に熱い飲料（65℃以上）、ヒドラジン、夜間勤務、レッドミート（赤肉）、テトラクロロエチレン、1,1,1-トリクロロエタン、ジクロロメタン、鉛等
2B	ヒトに対して発がん性がある可能性がある	ベンゾフラン、フェノバルビタール、わらび、漬物、ガソリン、四塩化炭素、1,2-ジクロロエタン、1,3-ジクロロプロペン、1,4-ジオキサン、メチル水銀化合物等
3	ヒトに対する発がん性について分類できない	カフェイン、お茶、コレステロール、1,1,2-トリクロロエタン、無機水銀等

# PFASの摂取による健康影響



— 確実性が高い  
- 確実性が低い



## PFASによる人の健康影響 (欧州環境機構による)

EEA (2019)

## 食品安全委員会によるPFOS、PFOA、PFHxSの エンドポイントごとの健康影響の検討結果 (日本)

健康影響	影響を及ぼす可能性
肝臓	増加の程度が軽微であること、のちに疾患に結びつくか否かが不明であり臨床的な意義が不明であること等から、影響を及ぼす可能性は否定できないものの <u>証拠は不十分であり、指標値の算出は困難</u>
脂質代謝	増加の程度が軽微であること、のちに疾患に結びつくか否かが不明であり臨床的な意義が不明であること等から、影響を及ぼす可能性は否定できないものの <u>証拠は不十分であり、指標値の算出は困難</u>
免疫	ワクチン接種後の抗体応答の低下について、可能性は否定できないものの、これまでに報告された知見の <u>証拠の質や十分さに課題があり、指標値を算出することは困難</u>
生殖・発生	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ <b>疫学研究</b> 出生時体重低下との関連は否定できないものの、<u>知見は限られており、出生後の成長に及ぼす影響については不明であり、指標値を算出するには情報が不十分</u></li> <li>◆ <b>動物試験</b> 出生児への影響について複数の報告が報告が同様の結果を示し、<u>証拠の確かさは強い</u>  <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ただし、<u>動物実験の結果</u>は高用量でみられた影響であり、<u>疫学研究でみられた出生時体重の低下とは分けて考えることが適当</u></li> </ul> </li> </ul>
発がん	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ <b>PFOA</b>と腎臓がん、精巣がん、乳がんとの関連については、関連がみられたという報告はあるものの、ほかに関連がなかったとする報告もあり、結果に一貫性がなく、<u>証拠は限定的</u></li> <li>◆ <b>PFOS</b>と肝臓がん、乳がん、<b>PFHxS</b>と腎臓がん、乳がんとの関連については、<u>証拠は不十分</u></li> </ul>

食品安全委員会資料 (2024)

# PFASの摂取による健康影響についてのわが国の現状における評価



## PFASに関する食品健康影響評価

- 食品安全委員会

- 2024年6月

- 有機フッ素化合物（PFAS）に関する食品健康影響評価の結果（評価書）を環境大臣へ通知
    - ✓ PFOS、PFOA、PFHxSについて、国際的に整合性の取れた健康影響評価が確立されている状況ではない
    - ✓ 現時点で得ることができたデータおよび科学的知見に基づく、PFOSおよびPFOAの耐容一日摂取量（TDI）として、以下のとおり設定することが妥当と判断
      - TDI PFOS : 20 ng/kg体重/日、PFOA : 20 ng/kg体重/日、PFHxS : 現時点では算出は困難
- 将来的に、科学的知見が集積してくれば、TDIを見直す根拠となる可能性あり

# PFOAによる環境水汚染による健康被害



## デュポンのワシントン工場（米国ウエストバージニア州）におけるPFOA汚染（裁判を取り上げた映画あり）

- デュポンのワシントン工場（ウエストバージニア州）がテフロン<sup>®</sup>の製造工程で使用される**PFOA**を含む廃棄物を40年垂れ流し、土地や水道水の取水源である川を汚染させた川を汚染した事例
- 家畜や住民人や動物を病気や死に陥れた
- 近隣の農場で飼育していた家畜（牛）の病死
- 女性労働者から生まれた子供の奇形
- 2001年に近隣住民ら7万人以上が集団訴訟
- 約7万人の住民の調査結果6つの疾患（腎臓がん、精巣がん、高コレステロール（脂質異常）、潰瘍性大腸炎、甲状腺疾患、妊娠高血圧症との関連が浮上
- 2017年、デュポンとケマーズが等分に負担し、和解金6億7070万ドル（約765億円）支払うことで和解

2019年公開（2021年12月国内劇場公開）



# 3

## 我が国のPFAS汚染に対する 対応の状況



# 背景② – PFASに関する規制動向 (条約、欧州、米国、日本)

-		PFOS	PFOA	PFHxS	PFCAs	PFHxA	PFBS	PFHpA	総PFAS
国際条約	POPs条約	2009 附属書B	2019 附属書A	2022 附属書A	C9-C22 付属書A – 議論予定	-	-	-	-
欧州	REACH 高懸念物質(SVHC)	-	2013 追加	2017 追加	2012(C11-C14) 2015(C9) 2017(C10) 追加	-	2020 追加	2023.1 追加	-
	REACH 制限物質	-	2017 追加	審議中	2023.2 (C9-C14) 追加	審議中	-	-	審議中
米国	TSCA (SNUR)	2002 追加	2020 追加	2007 追加	2020 (C7-C20) 追加	-	-	-	2023.11.13 1,364物質 追加
日本	化審法	2010 第一種特定 化学物質	2021 第一種特定 化学物質	2024.2.1 第一種特定 化学物質	PFHxS関連物質 2025以降	-	-	-	-
	水道水質基準	2020 水質管理目標設定項目		2021 要検討項目	PFOAの分岐異性体又はその塩 2024.9.10	-	-	-	-
	水質・地下水 環境基準	2020 要監視項目		2021 要調査項目	PFOA関連物質 2025.1.10 (予定)	-	-	-	-
	水質汚濁防止法	2023 指定物質	2023 指定物質	-	-	-	-	-	-

※ POPs条約：残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約、TSCA：有害物質規制法、SNUR：重要新規利用規則

# 日本および諸外国の飲料水に関する目標値等の設定状況



	PFOS	PFOA	新たな目標値等の動き
日本 (2020)	50 (合算値)		2025年2月 「PFOS及びPFOA」の水質基準項目、基準値への格上げ (2026年4月1日施行)、PFHxSの要監視項目の維持、およびPFBS、PFHxS、PFBA、PFPeA、PFHxA、PFHpA、PFNA、HFPO-DA (Gen X) のPFAS類としての要検討項目への位置付けについて中央環境審議会の小委員会で合意
WHO	—	—	2022年 暫定ガイドライン値提案 ⇒パブリックコメントまで終了 PFOS : 100、PFOA : 100、総PFAS : 500
米国 (2016)	70 (合算値)		<p><b>2024年4月10日 最終PFAS国家一次飲料水規制公表</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ MCL (最大濃度レベル) PFOS : 4、PFOA : 4、PFHxS : 10、PFNA : 10</li> <li>・ PFHxS、PFNA、HFPO-DA(GenX)、PFBSを2つ以上含む混合物 ハザード指数1 - MCL (最大濃度レベル) : PFNA : 10、PFHxS : 10、PFBS : 2000、GenX : 10</li> </ul> <p>※1 2027年までに公共水道システムの初期監視を完了し、継続的な順守の監視に移行                  ※2 2027年から飲料水の濃度レベルに関する情報の国民への提供が必要                  ※3 監視によりMCL超過が確認した場合の公共水道システムにおけるPFAS濃度削減による解決の実装に5年間 (2029年) まで猶予あり</p>
英国 (2021)	100	100	—
ドイツ (2017)	100	100	2023年 飲料水に関する法令改正 20PFAS合計 (C=4~13のPFSAおよびPFCA) : 100 4PFAS合計 (PFOS、PFOA、PFNA、PFHxS) : 20 ※20PFASは2026年~、4PFASは2028年~
カナダ (2018)	600	200	2023年 総PFASの目標値を提案 総PFAS : 30

※単位 : ng/L

# わが国の水道水・水環境のPFAS汚染に対するこれまでの対応①



## 水質に関する基準の現状

### ● 水道水の水質基準における対応

- PFOS（ペルフルオロオクタンスルホン酸）、PFOA（ペルフルオロオクタン酸）
  - 2020年4月
    - ✓ 「PFOS及びPFOA」の位置付けを要検討項目から水質管理目標値設定項目へ変更
    - ✓ 「PFOS及びPFOA」の目標値（暫定）として **0.00005 mg/L (= 50 ng/L)** を設定
- PFHxS（ペルフルオロヘキサンスルホン酸）
  - 2021年3月
    - ✓ 要検討項目にPFHxSが追加

1 ng/Lは、東京ドーム1つ分の容積（120万m<sup>3</sup>）に1.2 g含まれる状態

### ● 公共用水域・地下水の環境基準への対応

- PFOS（ペルフルオロオクタンスルホン酸）、PFOA（ペルフルオロオクタン酸）
  - 2020年5月
    - ✓ 水質環境基準及び地下水環境基準の要監視項目に「PFOS及びPFOA」が追加、指針値（暫定） **0.00005 mg/L (= 50 ng/L)** 制定
  - 2023年2月
    - ✓ 水質汚濁防止法の指定物質にPFOS、PFOAが追加 ⇒ 事故時の措置の対象
- PFHxS（ペルフルオロヘキサンスルホン酸）
  - 2021年3月
    - ✓ 要調査項目にPFHxSが追加

# わが国の水道水・水環境のPFAS汚染に対するこれまでの対応②



水道水の目標値（暫定）・指針値（暫定）の0.00005 mg/L（= 50 ng/L）の設定根拠

## ● PFOS、PFOAそれぞれの暫定目標値の算定

- PFOS、PFOAの**耐容一日摂取量（TDI）**としてそれぞれ**20 ng/kg/day**を用いる

- PFOS暫定目標値

人が毎日摂取して有害な影響が出ない量

$$\begin{aligned} &= \text{TDI} [\text{ng/kg/day}] \times \text{体重} [\text{kg}] \times \text{水道水の割当率} [-] / \text{1日当たり摂取量} [\text{L/day}] \\ &= 20 \times 50 \times 0.1 / 2 = 50 [\text{ng/L}] \end{aligned}$$

- PFOA暫定目標値

$$\begin{aligned} &= \text{TDI} [\text{ng/kg/day}] \times \text{体重} [\text{kg}] \times \text{水道水の割当率} [-] / \text{1日当たり摂取量} [\text{L/day}] \\ &= 20 \times 50 \times 0.1 / 2 = 50 [\text{ng/L}] \end{aligned}$$

## ● 「PFOS及びPFOA」の目標値（暫定）・指針値（暫定）

- U.S.EPAは、PFOSとPFOAの健康勧告値を**70 ng/L**と算出。一方で、飲料水中にPFASとPFOAの両方が認められる場合は**PFOSとPFOAの総濃度（合計値）**を健康勧告値の**70 ng/L**と比較すべきとしている（保守的で健康保護的なアプローチ）
  - このようなU.S.EPAの考え方は妥当と考えられる
- **安全側の観点**から、**目標値（暫定）**をPFOSとPFOAの合算値として**50 ng/L**とする
- PFOS及びPFOAが水環境中において異なる挙動を示すという明確な根拠が今のところ報告されていないことから、**指針値（暫定）**もPFOSとPFOAの合算値として**50 ng/L**とする

# わが国の水道水・水環境のPFAS汚染に対する最近の対応①



## 水道水や環境水におけるPFOS、PFOAの目標値等の検討

- 水質基準逐次改正検討会 ……水道水におけるPFOSおよびPFOAの目標値等
- PFOS・PFOAに係る水質の目標値等の専門家会議 ……水質環境基準健康項目の設定および付随事項

## 科学的根拠に基づくPFASに対する総合的な対応の検討（検討中）

- PFASに対する総合戦略検討専門家会議

……PFOSおよびPFOAへの対応、他のPFASへの対応、PFASに関する更なる科学的知見の充実等

# わが国の水道水・水環境のPFAS汚染に対する最近の対応②



## 水道における水質基準等の見直し（検討中）

- 中央環境審議会 水環境・土壌農薬部会 水道水質・衛生管理小委員会（第1回、2025.2.6）
  - 水道における水質基準等の見直しについて（第1次報告）（案）
    - 「PFOS及びPFOA」を現行の水質管理目標設定項目から水質基準項目へ見直すことが適当
    - 「PFOS及びPFOA」の基準値を、現在の暫定目標値と同じ50 ng/L（0.00005 mg/L）とするのが妥当
    - 施行時期は、2026年（令和8年）4月1日とすることが適当
  - PFOS、PFOA以外のPFASの取扱いについて
    - PFHxSについて、引き続き要検討項目に位置付けることが適当
    - PFAS群として、PFBS、PFHxS、PFBA、PFPeA、PFHxA、PFHpA、PFNA、HFPO-DAを要検討項目に位置付けることが適当

## 水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準等の見直し（検討中）

- 中央環境審議会 水環境・土壌農薬部会 人の健康の保護に関する水・土壌環境基準小委員会（第1回、2025.2.6）
  - 水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準等の見直しについて（第7次報告）（案）
    - 「PFOS及びPFOA」を現行の指針値（暫定）から指針値にし、指針値（暫定）と同じ50 ng/Lとすることが適当

# わが国の水道水・水環境のPFAS汚染等への取組みの成果



## PFASに関する食品健康影響評価

- 2024年6月 「有機フッ素化合物（PFAS）の食品健康影響評価書」（食品安全委員会）

## PFAS含有廃棄物に対する対応

- 2011年3月 「PFOS含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項」（環境省）
- 2022年9月 「PFOS及びPFOA含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項」（環境省）

## PFASによる水環境汚染への対応、総合的な対応

- 2020年6月 「PFOS及びPFOAに関する対応の手引き」（環境省、厚生労働省）  
(2024年11月 第2版)
- 2023年7月 「PFASに対する今後の対策の方向性」（環境省、PFASに対する総合戦略検討専門家会議）
- 2023年7月 「PFOS、PFOAに関するQ&A集」（環境省、PFASに対する総合戦略検討専門家会議）  
(2024年8月更新)
- 2023年7月 土壌中のPFOS、PFOA及びPFHxSに係る暫定測定方法（溶出量試験）（環境省）

# PFASに対する今後の対策の方向性（2023年7月）



## PFOS、PFOAへの対応について

### 1. 管理の強化等

- 正確な市中在庫量の把握等の管理強化
- 泡消火薬剤の更なる代替促進
- 環境中への流出防止の徹底
- 水質の暫定目標値の取扱いの検討

### 2. 暫定目標値等を超えて検出されている地域等における対応

- 「対応の手引き」の充実による飲用ばく露の防止の徹底
- 自治体による健康状態の把握

### 3. リスクコミュニケーション

- Q&A集を活用した丁寧なリスクコミュニケーションの実施

### 4. 存在状況に関する調査の強化等

- 環境モニタリングの強化
- 化学物質の人へのばく露モニタリング調査の本調査の実施に向けた検討

## PFOS、PFOA以外のPFASへの対応

### 物質群1：POPs条約で廃絶対象となっている物質等

1. 管理の在り方廃絶対象となって物質（PFHxS）及び検討中の物質（長鎖PFCA（PFNA等））の優先的な取組の検討
2. 存在状況に関する調査の強化等

### 物質群2：それ以外の物質

1. 当面对応すべき候補物質の整理
2. 存在状況に関する調査の強化等
3. 2. を踏まえた対応

## PFASに関する更なる科学的知見等の充実について

1. 国内外の健康影響に関する科学的知見及び対策技術等の情報の継続的な収集
2. 国内における関連する研究（健康影響やクロスメディアを通じたばく露防止の対策等）の推進

「PFASに関する今後の対応の方向性」（2023.7、PFASに関する総合戦略専門家会議）

# PFASに対する当面の主な取り組み（2024年8月，環境省）



## 飲用によるばく露の防止に資するモニタリングの強化応について

- 飲用によるばく露の防止に資するモニタリングの強化
- 水道水PFOS等全国調査
- 水道水における目標値の取扱いの検討
- 水道水における浄化技術に係る知見の収集。整理

## 科学的・技術的知見の更なる充実

- PFAS総合研究
- 子どもの健康と環境に関する全国調査（エコチル調査）の活用
- 化学物質の人へのばく露量モニタリング調査の本調査

## 汚染拡大防止に資する取組

- PFOS等含有泡消火薬剤の在庫量調査の実施
- **地下水・土壌等に関する技術的知見の充実**
  - 地下水・土壌中の挙動等に関する知見や、PFASの濃度低減に資する処理技術等に関する知見を充実させる
- 活性炭に関する技術的知見の充実
- PFOS等含有廃棄物の適正処理の推進
- POPs条約を受けた対応

## リスクコミュニケーションの推進等

- 行政官向けハンドブックの作成
- 自治体との連携

（PFASに関する総合戦略専門家会議資料（2024.8.1）より）

# PFOS及びPFOAに関する対応の手引き（第2版）（2024年11月）



## 1. 本手引きについて

本手引きは、公共用水域や地下水のPFOS及びPFOAが目標値等を超えて検出が確認された場合等に、各都道府県又は関係市（水質汚濁防止法政令市を含む。以下「都道府県等」という。）などにおいて、飲用によるばく露の防止等の取組を実施する参考となる情報を整理したものである。なお、本手引き記載の内容については、地域の実情等に合わせ活用されることが適当である。

## 2. PFOS及びPFOAの性状・用途

## 3. PFOS及びPFOAの国内外の動向

## 4. 超過地点周辺における対応

### ① 飲用によるばく露の防止の徹底

- 目標値を超えて検出された地下水等を水源としている地域の水道事業者等への速やかな情報提供
- 井戸等の設置者へのPFOS及びPFOAの特性やこれらの目標値が設定されたことについての情報提供
- 当該井戸等を飲用に供している場合の、水道水の利用を促す等による、飲用を控えるよう助言等の実施
- 日頃からの井戸等の設置場所、設置数、水質の状況等に関する情報の収集・整理
- 水道法の対象と規制対象とならない飲用井戸等に対する衛生管理

### ② 継続的な監視調査の実施

- 目標値等を超えて検出された地域における、濃度の経年的な推移を把握

### ③ 追加調査の実施

- ばく露防止の取組を確実に実施するため、必要に応じて調査範囲を拡大し、追加的な調査を実施

## 5. 健康影響等に関する情報発信

### ① リスクコミュニケーションの実施

- 住民の不安に寄り添い透明性を確保しながら適切な情報発信を実施
- 目標値等の設定根拠、科学的知見等を踏まえた調査や研究が進められていることの説明

### ② 地域住民の健康状態の把握

- 地方公共団体が直ちに取り組める対応（地域診断の実施、既存の健康診査の定期受診の推進）

## 6. その他

- 特に排出源となり得る施設が立地している地域における、公共用水域又は地下水の水質測定計画へ位置付け、調査の充実など、適切な対応の検討

※ 赤字部分は、第2版で追加された内容

# 土壌、地下水のPFAS分析方法（PFOS、PFOA、PFHxS）



## 土壌の汚染状態の測定方法

・・・2023年7月末に環境省から土壌汚染の暫定測定方法が示された

### ● PFOS、PFOA、PFHxS

#### - 土壌溶出量

- 「土壌中のPFOS、PFOA、PFHxSに係る暫定測定方法（溶出量試験）」（令和5年7月31日）

#### - 土壌含有量（全量）

- 「＜参考＞土壌中のPFOS、PFOA、PFHxSに係る暫定測定方法（含有量試験（全量分析））」（令和5年7月31日）
- 他に、幾つかの含有量測定方法が土壌に利用または提案されている
  - ✓ 底質のPFOS・PFOA含有量測定方法（要調査項目調査マニュアル）
  - ✓ 環境試料中（水中、固体中、汚泥中、生体組織中）のPFAS含有量測定方法（EPA method 1633）
  - ✓ 農地土壌（農研機構）のPFAS含有量測定方法、

## 地下水の汚染状態の測定方法

### ● PFOS、PFOA

#### - 地下水濃度

- 「ペルフルオロオクタンスルホン酸（PFOS）及びペルフルオロオクタン酸（PFOA）の測定方法」（令和2年5月28日付け環水大水発第2005281号、環水大土発第2005282号環境省水・大気環境局長通知「水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準等の施行等について」付表1

# 4 PFASによる土壌・地下水汚染 の特徴

# PFAS（ペル／ポリフルオロアルキル化合物）の特徴と用途



## PFASの特徴

- 耐熱性、難燃性、耐熱性、耐候性、防汚性、耐薬品性、撥水性、撥油性、非粘着性、界面活性、潤滑性、電気絶縁性、誘電特性等の特性をもつ
- 個々のPFASにはそれぞれに異なる特性や用途、環境面の特徴があり、性質が大きく異なる

## PFASの過去および現在の使用（業界／用途） ……ITRC (2023)より

- 航空・宇宙、自動車、殺生物剤（除草剤と殺虫剤）、バイオテクノロジー、建築・建設、ケーブル・配線、化学工業、化粧品／パーソナルケア製品、エレクトロニクス、エネルギー、爆発物・推進剤・銃・弾薬、防火／安全、食品加工、家庭用品と清掃用品、メディカル製品、金属メッキ、石油生産、鋳業、原子力産業、石油・ガス産業、紙と包装、製薬業界、写真産業、PFAS製造、フォトリソグラフィと半導体、プラスチックとゴム、レクリエーションと音楽機器、リサイクルと材料回収、冷媒、テキスタイル（椅子張り、カーペット）・レーザー・アパレル、木材産業

- PFASは様々な用途に幅広く使用されてきている。⇒潜在的汚染源
- PFOS、PFOAについて、既に製造・使用が中止されている  
（一部、貯蔵・保管されている含有製品が市中に存在している）

# PFASの環境中への放出・蓄積と人による摂取

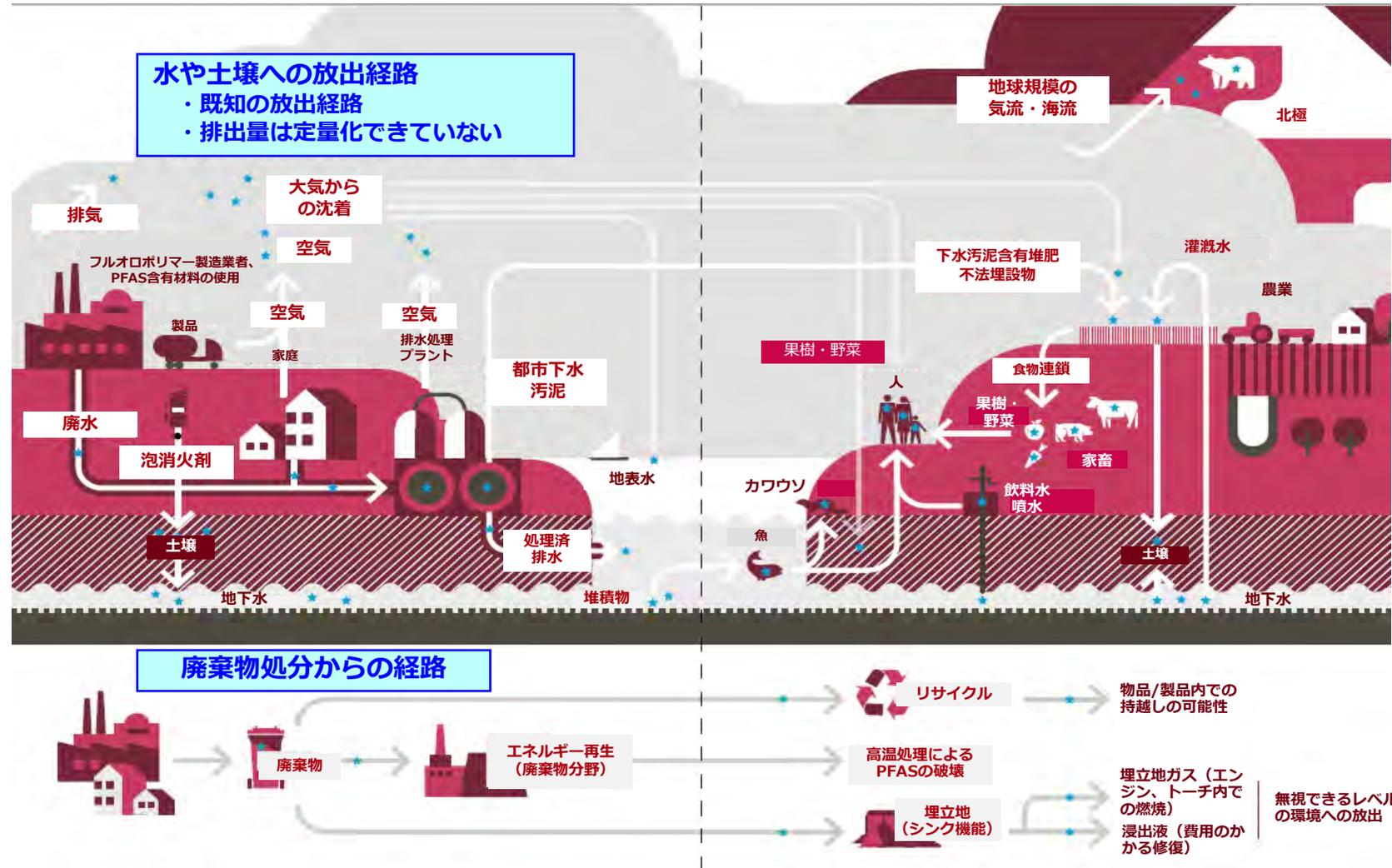


## PFASの環境中への放出

- フルオロポリマー製造、PFAS含有材料の使用
  - 排気、廃水、製品からの空気
- 家庭でのPFAS含有製品の使用
  - 排水、空気
- 泡消火剤の貯蔵・保管・使用
  - 散布、漏洩
- 排水処理
  - 処理済原水、都市下水汚泥 (⇒バイオソリッド)、空気

## PFASの人体への蓄積

- 地下水、地表水 (飲用、浴用) (飲用、吸入、吸収)
- 食品 (農畜水産物) (摂食)
- 空気 (吸入)
- 土壌 (粉塵) (吸入)



German Environmental Agency (2020)より図を引用

# PFASのイオン状態



## PFASのイオン状態

- 解離型、非解離型を含む官能基が、PFASの多くの動態および輸送特性を支配する
  - 化合物のイオン状態が、電荷特性、物理的・化学特性を決定し、環境中での動態と輸送を制御する

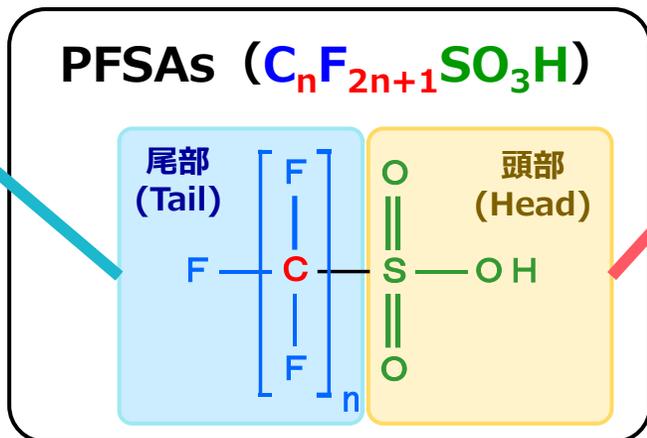
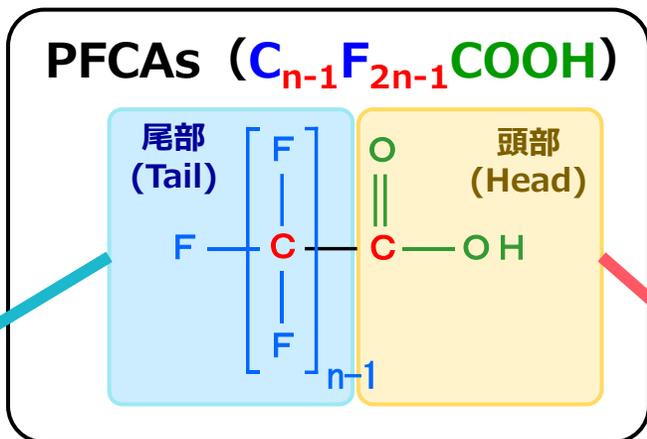
分類	性質
アニオン性	カルボン酸、スルホン酸、硫酸塩、リン酸塩のような1つ以上の酸性官能基を含み、イオンを放出してアニオンを形成することができる
カチオン性	アミンのような1つ以上の塩基性官能基をふくみ、水素イオンを得てカチオンを形成するか、第4級アンモニウム基の場合のように永久電荷をもつことができる
双性イオン性	2つ以上の官能基を含み、少なくとも1つはアニオンを形成し、1つはカチオンを形成することができる
非イオン性	イオンに解離しない（例：アルコール）

ITRC (2023)による

# PFASの土壌への吸着、土壌からの溶出の特徴（吸着特性）

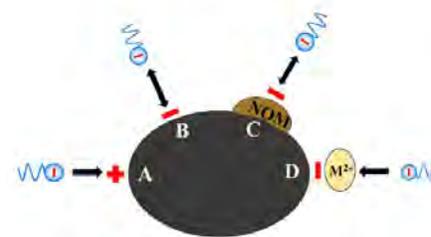


PFCAs（ペルフルオロアルキルカルボン酸類）、PFSA（ペルフルオロアルキルスルホン酸類）



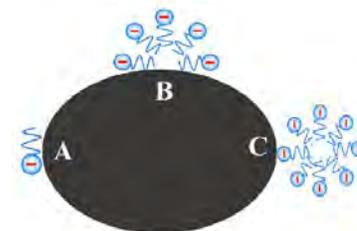
疎水性  
フッ化  
炭素鎖

官能基  
(親水性)



- A: 静電引力
- B: 静電反発力
- C: 静電反発力
- D: 二価架橋効果

PFAS吸着プロセス (Lei et al., 2023)



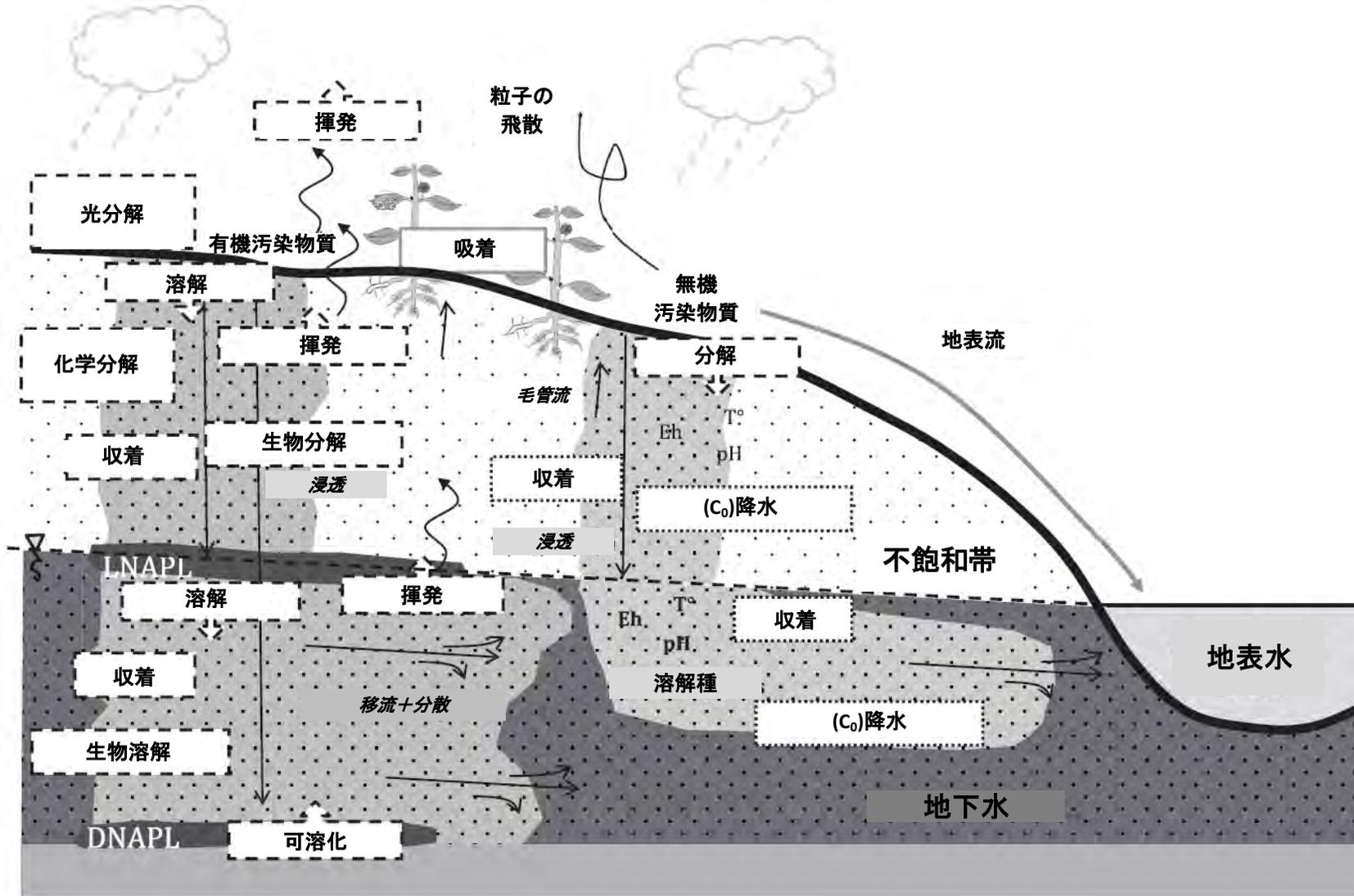
- PFAS陽イオン
- A: 疎水性相互作用
- B: 半ミセル構造
- C: ミセル構造

疎水性凝集によるPFASの吸着 (Lei et al., 2023)

- 界面活性剤のように挙動し、空気-水界面では尾部（疎水性）が空气中、頭部（親水性）が水中にある状態で気水界面に蓄積 (ITRC, 2023)



# [参考] 汚染源による地下水への影響に作用するプロセス

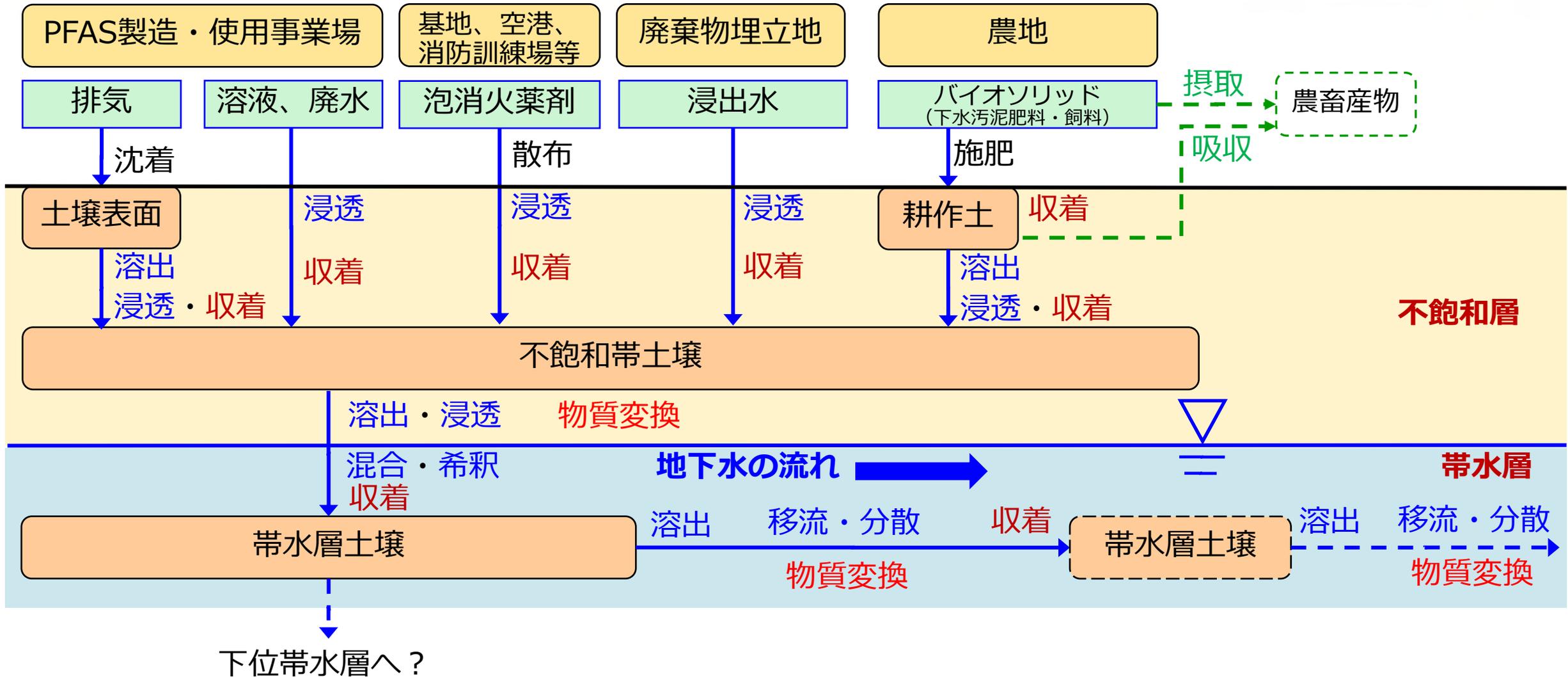


ISO 15175:2018

Soil quality – Characterization of contaminated soil related to groundwater protection

- 全ての汚染物質が対象

# PFASの土壌への供給と土壌・地下水中的での挙動の概念図（案）



# PFASの土壌への吸着しやすさ、土壌からの溶出①



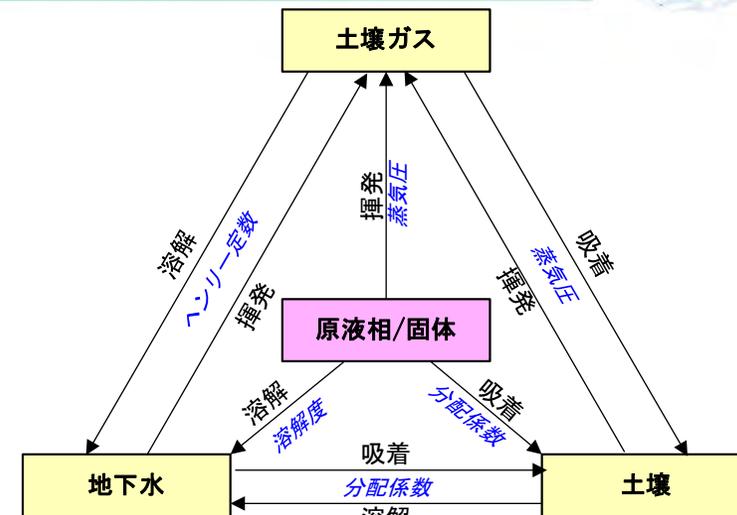
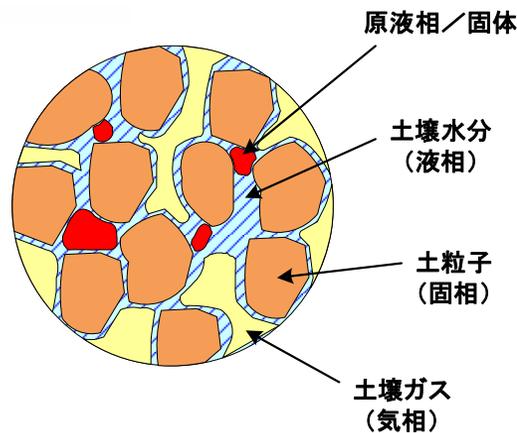
## 土壌中での化学物質の分配（不飽和帯の場合）

$$C_s / C_w = K_d$$

$C_s$  : 土壌固相濃度(mg/kg)

$C_w$  : 土壌液相濃度(mg/L)

$K_d$  : 土壌-水分配係数(L/kg)



### ● 有機化合物の場合

$$C_s / C_w = K_d = f_{oc} \cdot K_{oc}$$

$$K_{oc} = 0.411 \cdot K_{ow}$$

$K_{oc}$  : 有機炭素-水分配係数(L/kg)

$K_{ow}$  : オクタノール-水分配係数(L/kg)

$f_{oc}$  : 有機炭素含有率(-)

## 土壌中における汚染物質の三相（または四相）分配

### （参考）揮発性有機化合物（VOCs）の $\log_{10} K_{oc}$

環境省の計算ツールで用いられている値などを対数表示

物質	$\log_{10} K_{oc}$ (log (L/kg))	物質	$\log_{10} K_{oc}$ (log (L/kg))
テトラクロロエチレン	2.20	1,2-ジクロロエタン	1.23
トリクロロエチレン	1.83	四塩化炭素	1.69
1,2-ジクロロエチレン	1.56	ジクロロメタン	1.08
1,1-ジクロロエチレン	1.54	ベンゼン	1.77
クロロエチレン	1.29	1,3-ジクロロプロペン	1.66
1,1,1-トリクロロエタン	1.91	1,4-ジオキサン	0.23
1,1,-トリクロロエタン	1.70		

#### ● 揮発性有機化合物（VOC）

$K_{oc} = 12 \sim 158$  ( $\log_{10} K_{oc} = 1.08 \sim 2.20$ )

#### ● 1,4-ジオキサン

$K_{oc} = 1.7$  ( $\log_{10} K_{oc} = 0.23$ )



# [参考] 汚染源による地下水への影響に作用するプロセス



ISO 15175:2018

Soil quality – Characterization of contaminated soil related to groundwater protection

- 全ての汚染物質が対象

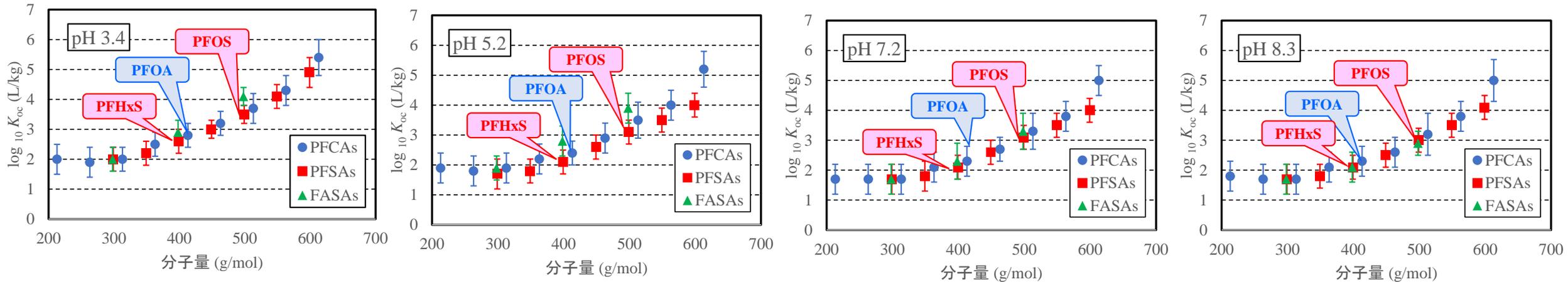


# PFASの土壌への吸着しやすさ、土壌からの溶出②

## バッチ試験で求められた土壌-水分配係数 ( $\log K_d$ )

- 30℃で風乾・0.5 mmメッシュふるい分け後の10種類の土壌にPFASを添加 (メタノール  $\leq 0.3\%$ )
- 土壌の有機炭素 (OC) 量は0.08~4.9%

$K_d = [ \text{有機炭素-水分配係数} (K_{oc}) ] \times [ \text{有機炭素含有率} (f_{oc}) ]$  より求めた  $\log_{10} K_{oc}$



## PFCAs、PFSAs、ペルフルオロアルカンスルホンアミド (FASAs) についての各pHにおける分子量と $\log_{10} K_{oc}$ の関係

Nguyen et al. (2020)の試験データをもとに作成

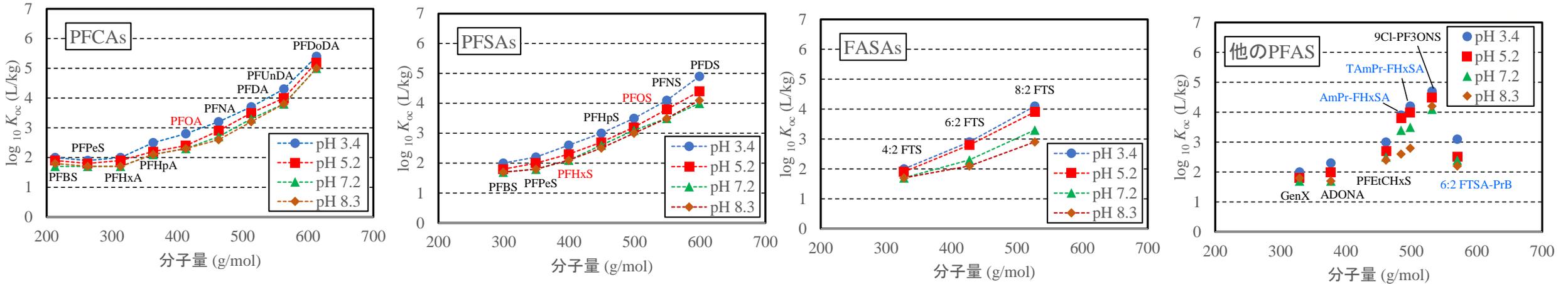
- 分子量と  $\log_{10} K_{oc}$  値の関係は、PFCAs、PFSAs、FASAsの種類に関係なく、ほぼ同じ
  - 分子量350 g/mol以上で、分子量と  $\log_{10} K_{oc}$  値の間にほぼ比例関係が認められる
  - $K_{oc}$  は、VOC  $\leq$  PFAS (PFASの方がVOCよりも土壌へ吸着しやすい傾向あり)

Nguyen et al. (2020)の試験データをもとに整理・検討



# PFASの土壌への吸着しやすさ、土壌からの溶出③

$K_d = [ \text{有機炭素 - 水分配系数} (K_{oc}) ] \times [ \text{有機炭素含有率} (f_{oc}) ]$  より求めた  $\log_{10} K_{oc}$



青字：双性イオン

## PFCAs、PFSAs、FASAsおよび他のPFASについてのpHと分子量- $\log_{10} K_{oc}$ 関係

- $\log_{10} K_{oc}$  値は、いずれのPFASも、pHが高いほど小さい（土壌に吸着しにくく、溶出しやすい）
- 双性イオンである6:2 FTSA-PrBは、分子量の大きさに比べて $\log_{10} K_{oc}$  値が小さい

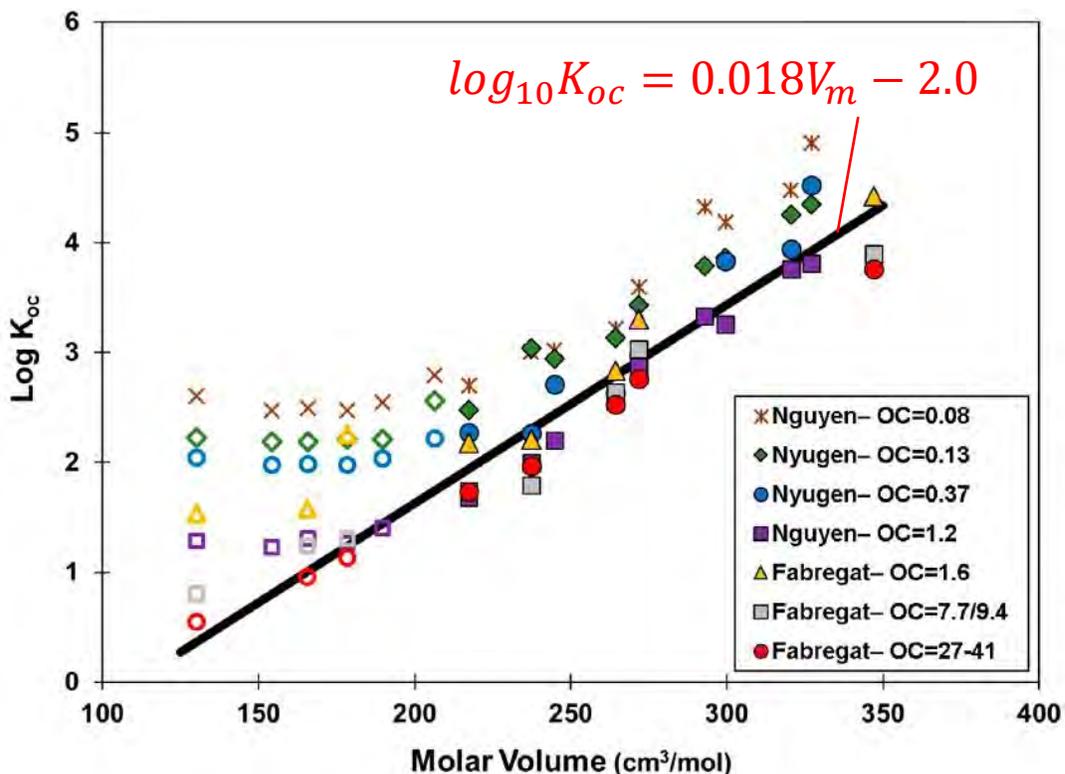
Nguyen et al. (2020)の試験データをもとに整理・検討

# PFASの土壌への吸着しやすさ、土壌からの溶出④



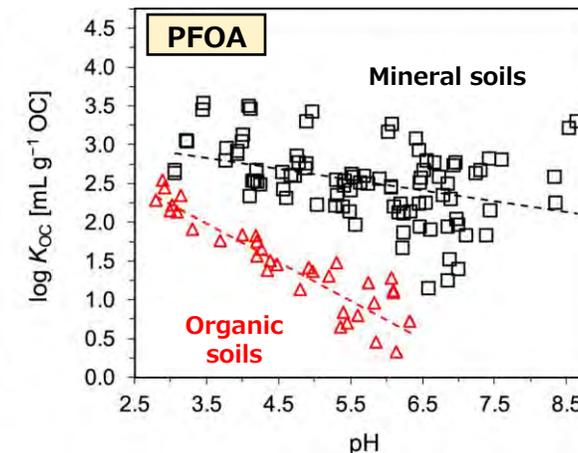
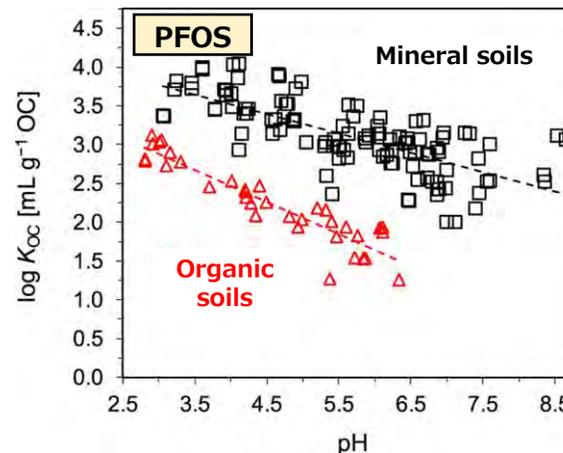
## PFCAs（ペルフルオロアルキルカルボン酸類）、PFSA（ペルフルオロアルキルスルホン酸類）

- PFASの土壌からの溶出特性は $K_{oc}$ と $f_{oc}$ で表わされるが、データのばらつきは大きい



長鎖・短鎖PFASの1モル当たり分子体積 ( $V_m$ ) と  $\log_{10} K_{oc}$  の関係

Brusseau (2023)



### PFOS、PFOAのpHと有機炭素-水分配係数 ( $\log K_{oc}$ ) の関係

- ・無機質土は、4種類の土壌 ( $f_{oc}=0.19\sim3.1\%$ ) のデータ
  - ・有機質土は、3種類の土壌 ( $f_{oc}=45\sim54\%$ ) のデータ
- Campos-Pereira et al. (2023)

- $K_d$ と $f_{oc}$ から算定される $K_{oc}$ 値に、無機質土と有機質土で大きな差が生じている

# PFASの土壌への収着に影響を与える要因



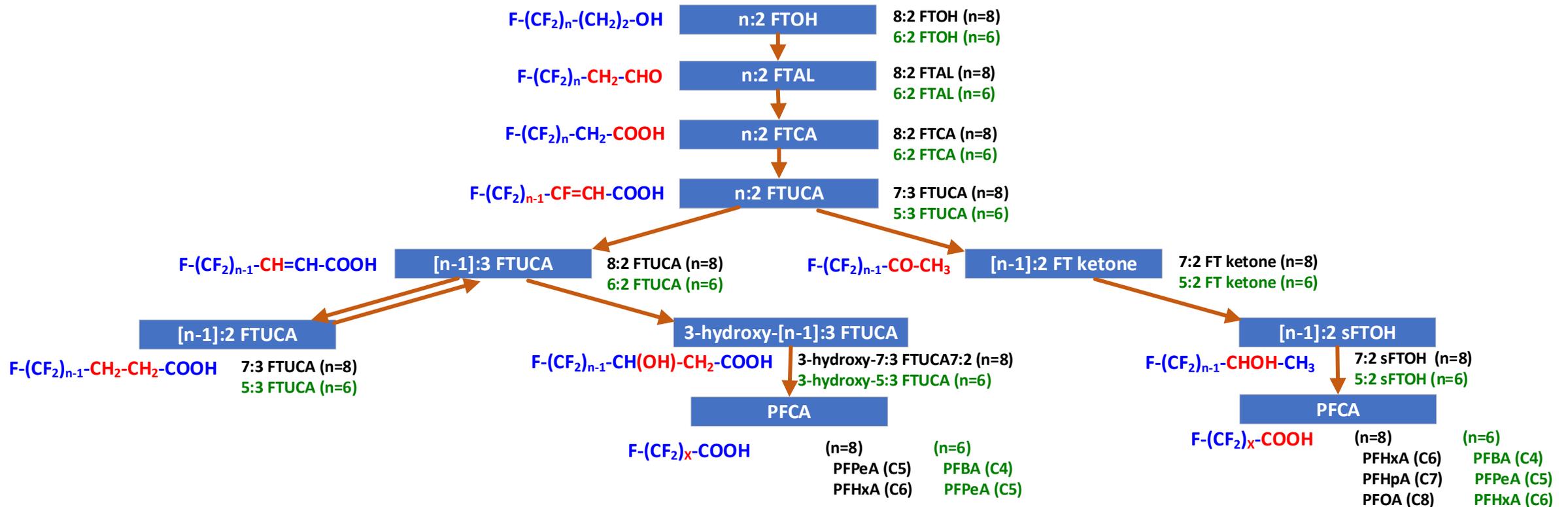
要因		収着への影響 (収着しやすさ)	研究結果	
カテゴリー	仕様		効果	参考文献
PFAS特性	機能グループ	PFCA < PFSA	一貫性あり	Gellrichら(2012), Zhaoら(2014), Milinovicら(2015), Loganathan & Wilson (2022), Laftら(2022), Wangら(2022)
	炭素鎖の長さ	短 < 長	一貫性あり	
土壌特性	有機炭素 (OC)	低 < 高	混合	Beckerら(2008) , Kwadijkら(2010), Pan & You(2010), Youら(2010), Ahrensら(2011), Chenら(2012), Milinovicら(2015), Luftら(2022)
	陽イオン交換容量 (CEC)	低 < 高	混合	Barzen-Hansonら(2017), Xiaoら(2019), Mejia-Avendañoら(2020), Nguyenら(2020)
	陰イオン交換容量 (AEC)	低 < 高	混合	Barzen-Hansonら(2017), Liら(2019)
	フミン酸 (HA)	低土壌含有量 : 高 < 低	ND	Zhangら(2014)
		高土壌含有量 : 低 < 高		Higgins & Luthy(2019)
鉍物		ND	Hellsingら(2016)	
水質特性	pH	高 < 低	混合	Zhangら(2014)
	陽イオン	二価陽イオン濃度 : 低 < 高	一貫性あり	Higgins & Luthy(2006), Kwadijkら(2010, 2013), Martzら(2019), Youら(2010), Chenら(2012), Caiら(2022)
		一価陽イオン濃度 : 低 < 高	混合	Higgins & Luthy(2006), Chenら(2013), Caiら(2022)

Wang et al. (2023)



# 環境中での前駆物質からのPFOA等の生成

PFASの環境中での挙動の評価・将来予測、土壌・地下水汚染対策における分解技術の選定・設計において、対象物質への前駆物質からの変質を考慮することが重要となる

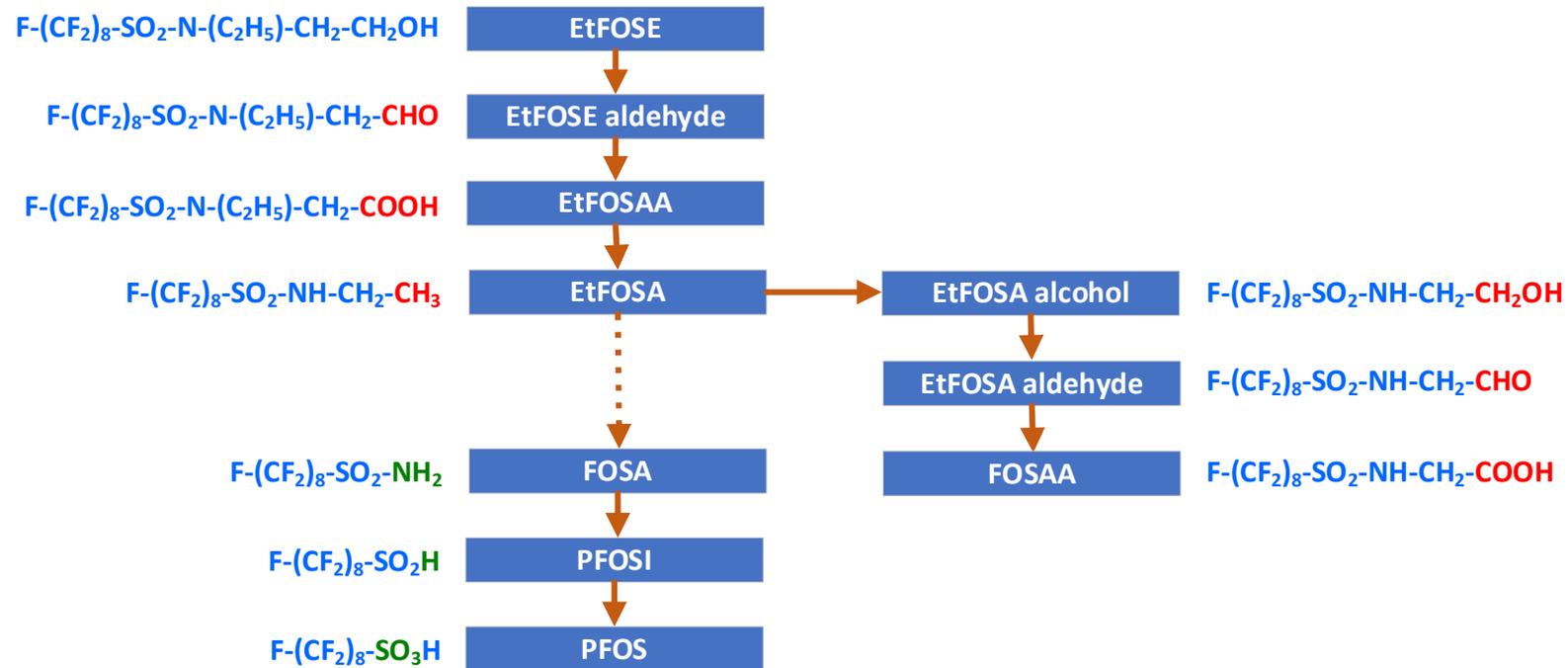


## フルオロテロマーアルコール類 (8:2 FTOH、6:2 FTOH) からの微生物分解経路

(遠藤・尾形 (2021) がHamid et al. (2020) をもとに修正した図に基づき作成)



# 環境中での前駆物質からのPFOSの生成

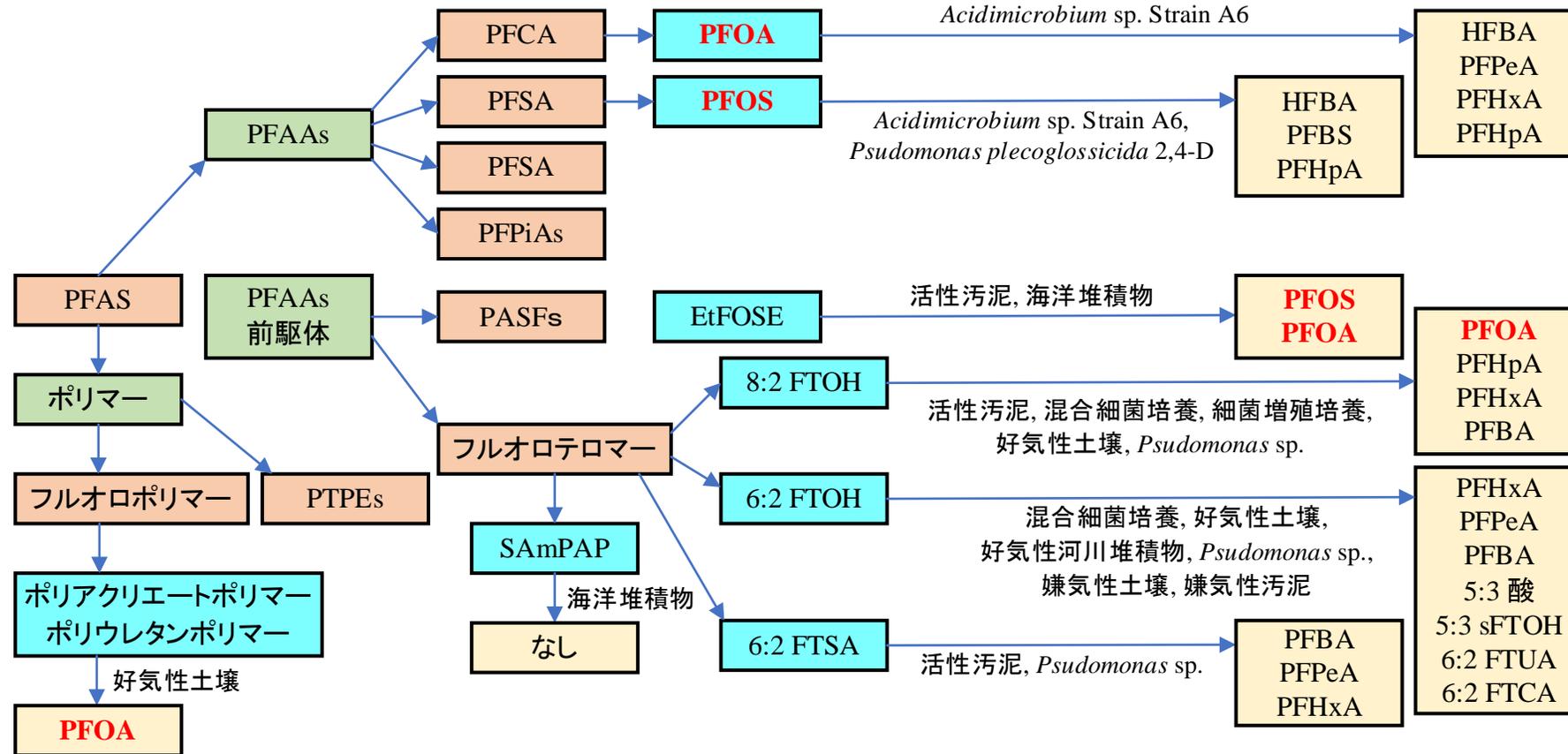


## エチルペルフルオロオクタンスルホン酸アミド (EtFOSE) からの微生物分解経路

(遠藤・尾形 (2021) がAvendano & Liu (2015) をもとに修正した図に基づき作成)



# 環境中での前駆物質からのPFOS、PFOA等の生成



特定のPFASの生分解／変換／脱フッ素化における微生物またはマイクロコズム（微生物生態系）の種類  
(Grgas et al. (2023) )

# 5

## PFASによる土壌・地下水汚染 の実態と事例



# PFASによる土壌汚染の実態（世界）

## 世界の2,500サイト30,000試料のデータ

- 一次汚染サイト n=1,000
  - PFAS製造サイト、消防訓練場、その他の泡消火薬剤関連サイトを含む
- 二次汚染サイト 10文献9サイト
  - 一次汚染源サイトに隣接するサイト
  - PFAS汚染媒体使用サイト
- バックグラウンド n≒5,700
  - 世界各地の1,400地点超で採取された約5,700試料
  - 都市部と農村部の両方で採取
    - 住宅の庭や庭園、農地、校庭、商業施設、公園など

サイトのタイプ別PFOS、PFOA土壌濃度

	PFOSの最高濃度 (µg/kg)		PFOAの最高濃度 (µg/kg)	
	範囲	中央値	範囲	中央値
一次汚染サイト	0.4~460,000	8,722	2~50,000	83
二次汚染サイト	0.4~5,500	680	0.8~2,531	38
バックグラウンド	0.003~162	2.7	0.01~124	2.7

Brusseau et al. (2020)をもとに作成

# PFASによる土壌汚染の実態 (泡消火薬剤による米国本土の汚染サイト)

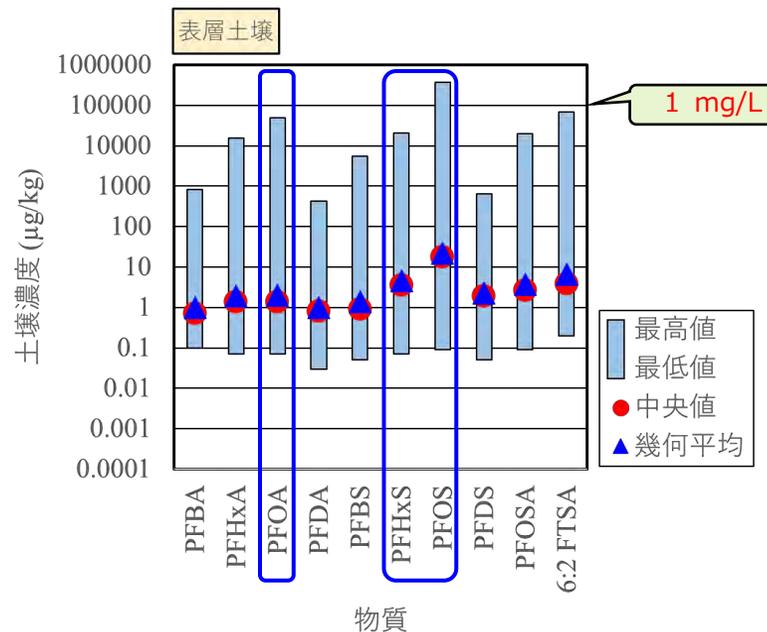


## U.S. Air Forceの泡消火薬剤 (AFFF) 汚染サイトデータベースから取得された10種類のPFASの土壌濃度 (それぞれ360~4259試料)

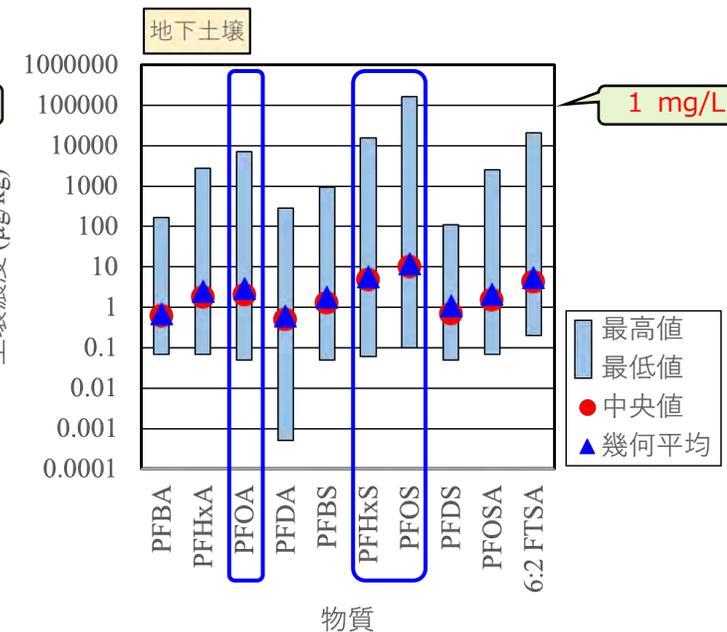
- PFOS、PFHxS、PFOA、PFHxAの検出数が多い
- 最高濃度は表層土壌の方が高い
- 幾何平均濃度は、表層土壌濃度が地下土壌濃度の0.7~2.1倍

### 表層土壌、地下土壌のPFAS土壌濃度の最高値(μg/kg)

	表層土壌	地下土壌
PFOS (μg/kg)	373,000	160,000
PFHxS (μg/kg)	21,000	15,300
PFOA (μg/kg)	50,000	7,220
PFHxA (μg/kg)	15,300	2,700



表層土壌 (深さ6~30cm)



地下土壌 (深さ30cm以深)

### 10種類のPFASの土壌濃度

Brusseu et al. (2020)をもとに作成

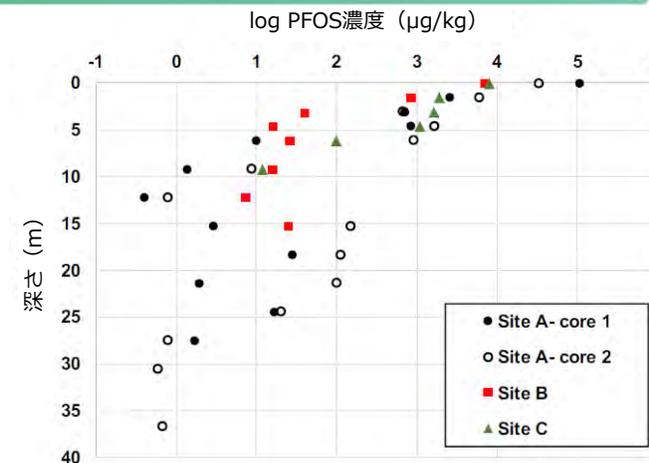
# PFASによる土壤汚染の実態（泡消火薬剤による汚染サイト）



## 深度方向のPFASによる土壤汚染濃度分布の例

- PFAS濃度の深度分布について報告された15研究（12サイト）
  - 7件は4m以上の深さまでの報告
  - 残りは1～2m以浅までの報告
- 多くの事例では、濃度は深さとともに数桁低下している
- Site Aでは、深さ37mまでPFOS濃度0.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 以上検出

● バックグラウンド濃度の判断が重要になる可能性あり

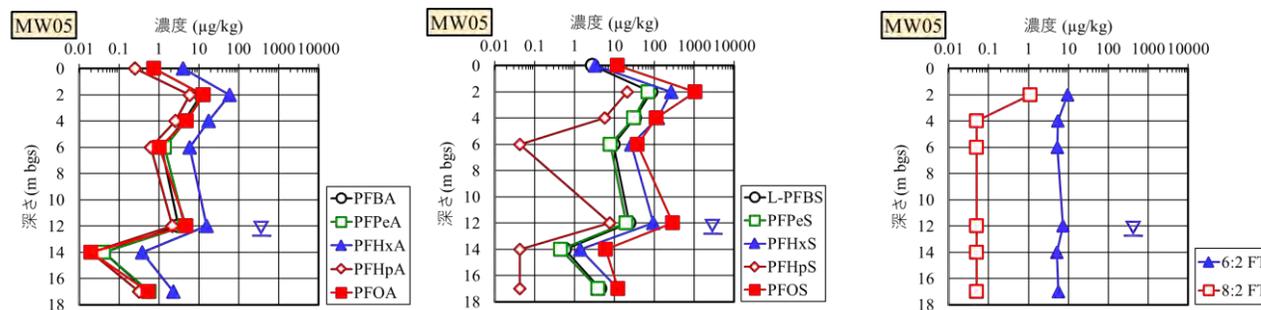


PFOS土壤濃度の鉛直プロファイルの例  
(U.S. Air Force AFFF汚染サイトデータベースのデータによる) (Brusseau et al., 2020)

## ニューサウスウェールズ州（オーストラリア）の空軍基地における地下水汚染サイトでのPFAS土壤濃度の鉛直分布

- 深さ7m～10mに粘土層（飽和）
- 不圧地下水位は深さ12.50m

- 地表付近より深さ2mの方が濃度が高い
- 深さ2m～6m：深さとともに濃度が低下
- 深さ6mより深さ12mの濃度が高い

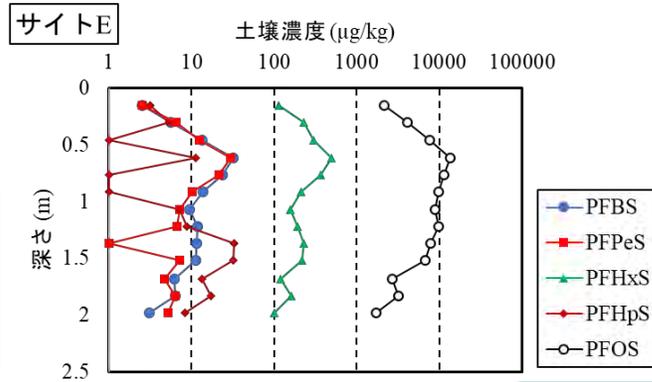
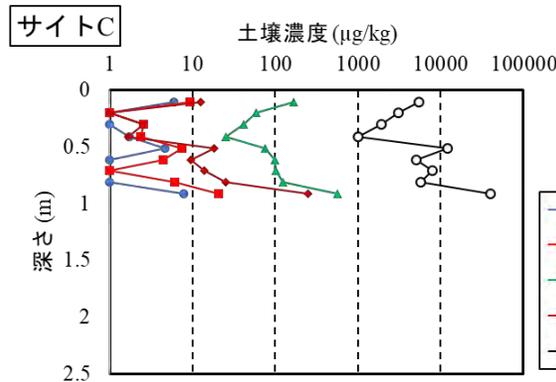
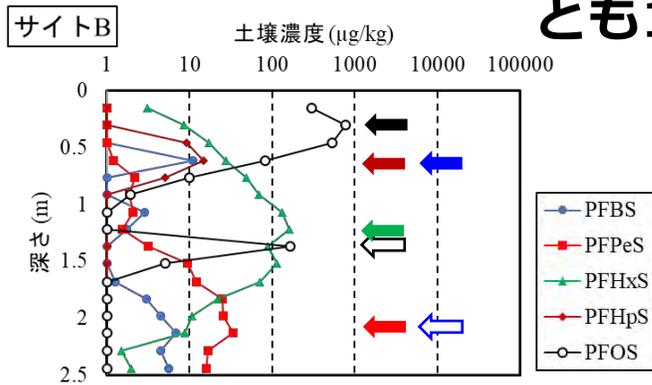
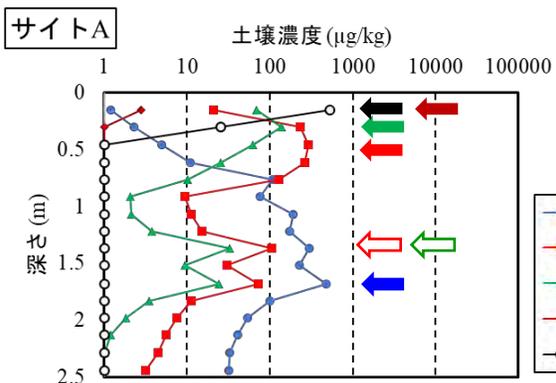


オーストラリア、ニューサウスウェールズ州の空軍基地における消防訓練場（FTA）付近での深度方向の各PFASの土壤濃度分布 (Bakele et al(2020)をもとに作成)

# PFASによる土壌汚染の実態 (米国のPFAS汚染サイトにおける不飽和帯土壌中のPFAS分布)



## ほとんどの地点は、ATTFの最終放出の確認から少なくとも10年以上経過後に実施された調査の結果



- **サイトA** : 米国西部に位置し、国防総省 (U.S.DOD) が消防訓練場として使用しているサイト
  - ・ 気候 : 半乾燥 (年降水量 250~500 mm)
  - ・ 不飽和土壌 : シルト質砂
  - ・ 地下水位 : 約G.L. -20 m
  - ・ 最後に報告されたAFFFの放出 : 2017年
- **サイトB** : 米国西部に位置し、U.S.DODがフラッシュオーバー火災の訓練場として使用しているサイト
  - ・ 気候 : 半乾燥
  - ・ 不飽和土壌 : 礫質砂
  - ・ 地下水位 : 約G.L. -3 m
- **サイトC** : 米国東部に位置し、U.S.DODが1960年代~1980年代に消防訓練活動を行っていたサイト
  - ・ 不飽和土壌 : 砂およびシルト、一部粘土
  - ・ AFFFの取扱いの報告 : 2018年
  - ・ 地下水位 : 約G.L. -0.9 m
- **サイトE** : 米国西部に位置する消防署に隣接したU.S.DODのサイト
  - ・ 不飽和土壌 : シルト質砂~砂質シルト
  - ・ 地下水位 : 約G.L. -6 m
  - ・ 2008年にこのサイトで約5ガロンの濃縮AFFFの事故放出が報告された

### サイトの異なる4地点で測定された不飽和帯のPFASs土壌濃度 (µg/kg) の深度分布

※ 定量下限値未満は定量下限値が1µg/kg以上の場合も含めて1µg/kgとしてプロットしている

- **サイトA、B**
  - ・ 疎水性が低い (CF鎖の短い) PFSAほど、最大濃度位置が深い傾向
- **サイトC、D**
  - ・ 各PFSAの濃度の鉛直分布は類似

(Schaefer et al. (2024)をもとに作成)



## [参考] 汚泥肥料中のPFAS

### 汚泥肥料中のPFOSおよびPFOAの含有量（「肥料等試験法」（2023）8.7の分析法による）

- 86試料（収集した汚泥試料）についての分析結果

物質	平均値 (LB) ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	平均値 (UB) ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	最大値 ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	中央値 ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	< 0.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 試料数
PFOS	4.8	4.9	54	1.5	25
PFOA	16	16	250	1.8	24

・ 平均値は、定量下限値未満を0として算出したもの (LB) と定量下限として算出したもの (UB) をそれぞれ記載

- PFOS、PFOAともに90%以上が50  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 未満
- 現時点での考え方と評価
  - 最も高かった汚泥肥料（250  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ）を長期間適用したほ場で生産された農作物を毎日食べ続けるなど、現在得られている知見を基に保守的に試算しても、食品安全委員会が設定したPFOS、PFOAの耐容一日摂取量（TDI）である20 ng/kg-体重/日を超過することはないと考えられる
- 今後の対応方針
  - 農地土壌から農作物への移行に関する研究や、農地土壌におけるPFASの蓄積性などに係る情報収集を進め、科学的知見をさらに蓄積していく

「汚泥肥料中のPFOS及びPFOAについて」（農林水産省、2024）



# PFASによる地下水汚染の実態（世界）

1999～2021年に発表された96の報告書の約21,000データ（時系列、重複、不検出資料の除去後）

- サイト分類
  - 一次汚染源サイト n=8,460
    - 消防訓練場、製造工場
  - 二次汚染源サイト n=6,279
    - バイオソリッド施用、廃水処理、埋立地
  - 汚染源不明サイト n=5,990
    - 近隣でPFAS汚染源が特定されていないサイト

## 汚染源タイプごとの地下水中PFOS、PFOA濃度（最高濃度の中央値）

	PFOS (ng/L)	PFOA (ng/L)
一次汚染サイト	45,700	7,400
二次汚染サイト	95	96
バックグラウンド	30	15

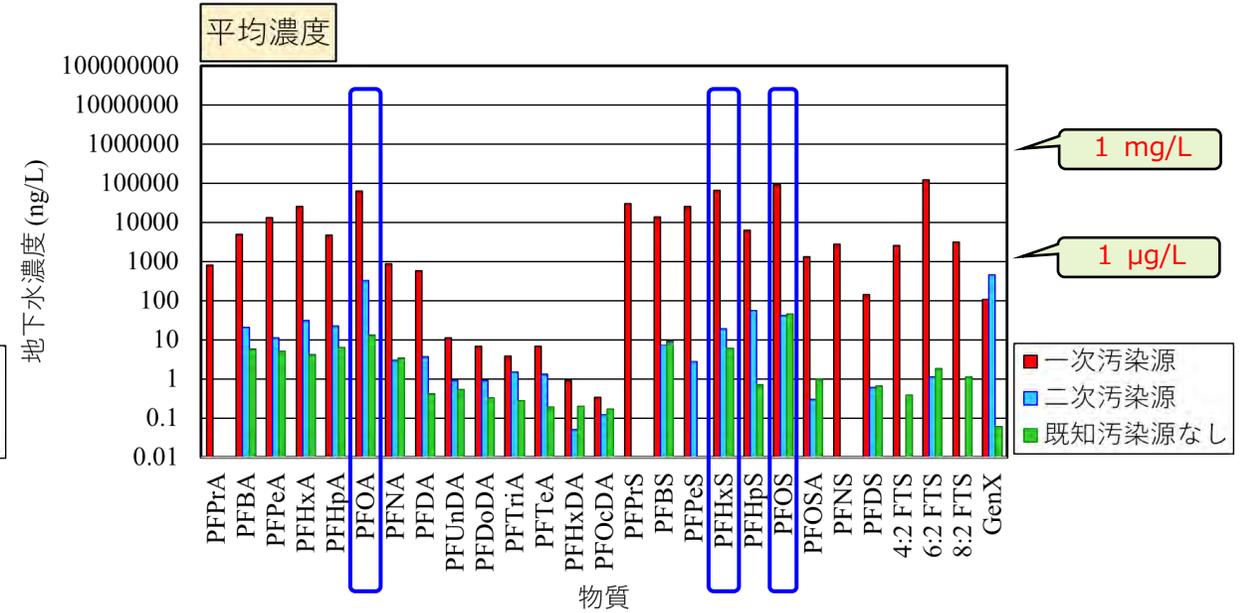
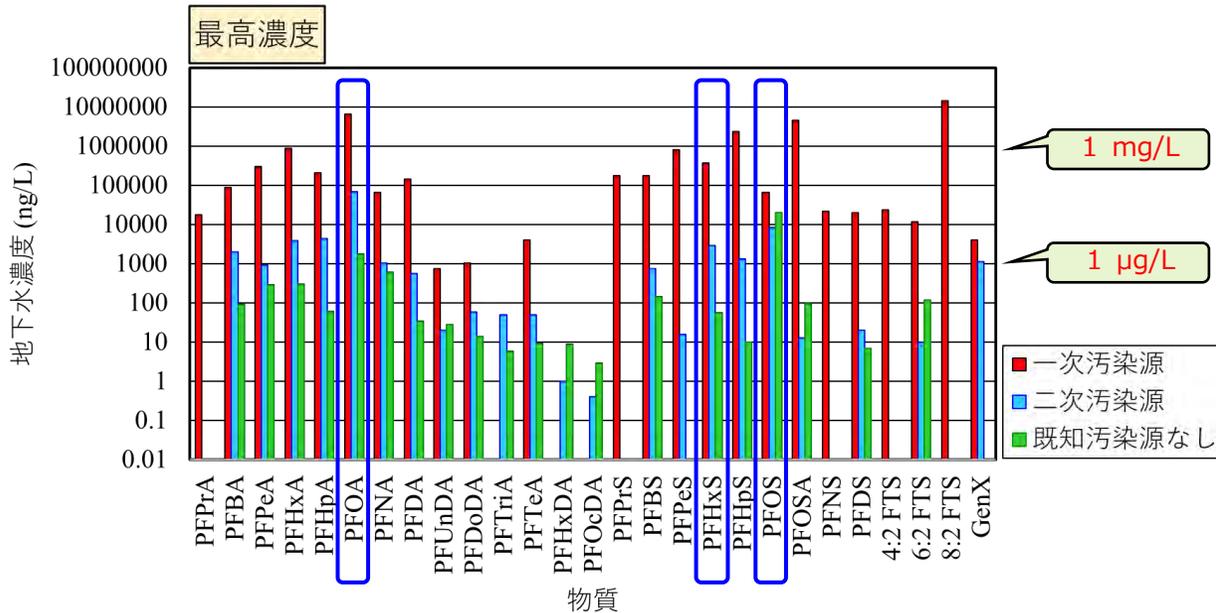
Johnson et al. (2022)をもとに作成



# PFASによる地下水汚染の実態（世界）

1999～2021年に発表された96の報告書の約21,000データ（時系列、重複、不検出資料の除去後）

- サイト分類
  - 一次汚染源サイト n=8,460 消防訓練場、製造工場
  - 二次汚染源サイト n=6,279 バイオソリッド施用、廃水処理、埋立地
  - 汚染源不明サイト n=5,990 近隣でPFAS汚染源が特定されていないサイト



汚染源タイプごとの地下水中PFAS濃度（最高濃度、平均濃度）

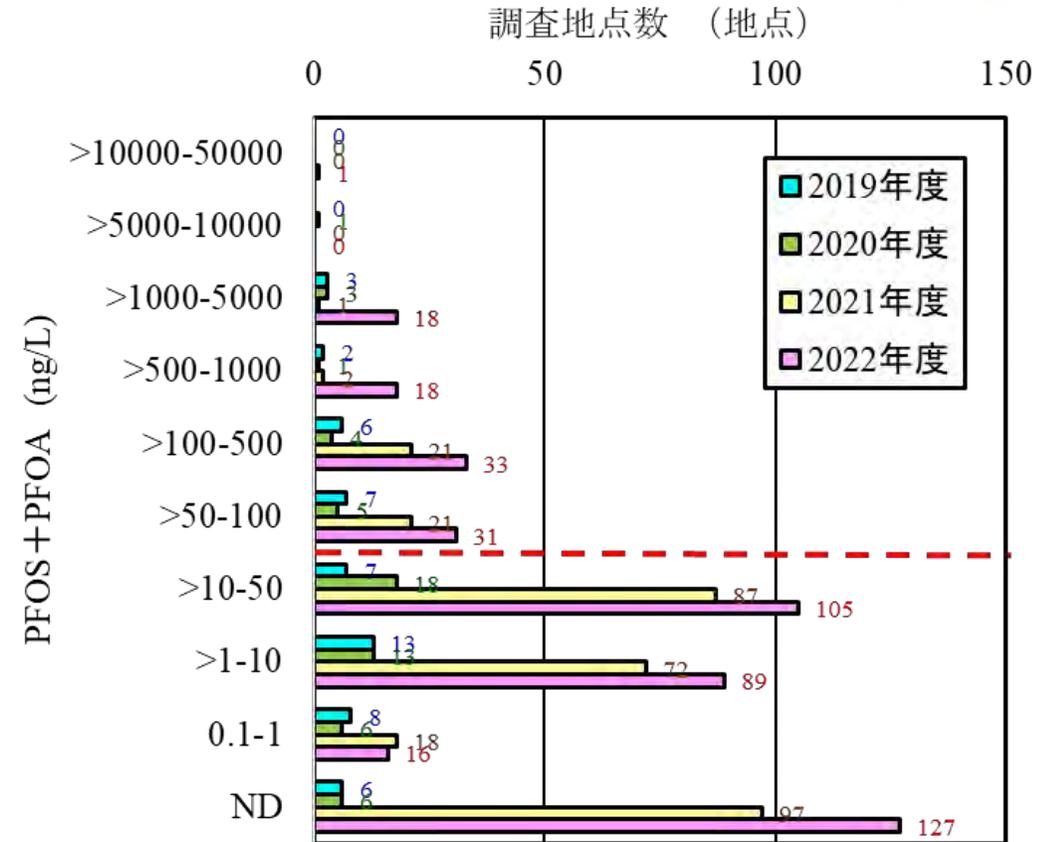
Johnson et al. (2022)をもとに作成



# わが国の地下水汚染状況（2019(R1)～2022(R4)年度）

## 地下水のPFOS及びPFOA濃度

- 2019(R1) 年度、2020(R2)年度
  - PFOS又はPFOAの排出源となりうる施設周辺等
    - 2019年度 46地点
      - ✓ 調査数52 超過18 (34.2%) ※複数回測定あり
    - 2020年度 53地点
      - ✓ 調査数57 超過14 (24.6%) ※複数回測定あり
- 2021 (R3) 年度、2022 (R4) 年度
  - 環境省に報告のあった地点の調査結果
    - 2021年度 317地点 超過43 (13.6%)
      - ✓ 調査数319 超過45 (14.1%) ※複数回測定あり
    - 2022年度 382地点 超過74/382 (19.4%)
      - ✓ 調査数438 超過101 (23.1%)
- 4年間のべ数
  - 調査数866 超過178 (20.6%)



地下水PFOS+PFOA濃度の頻度分布

※同一地点で複数回の測定あり

環境省 (2021～2024)をもとに作成

# わが国の地下水汚染状況 (2019(R1)~2022(R4)年度)

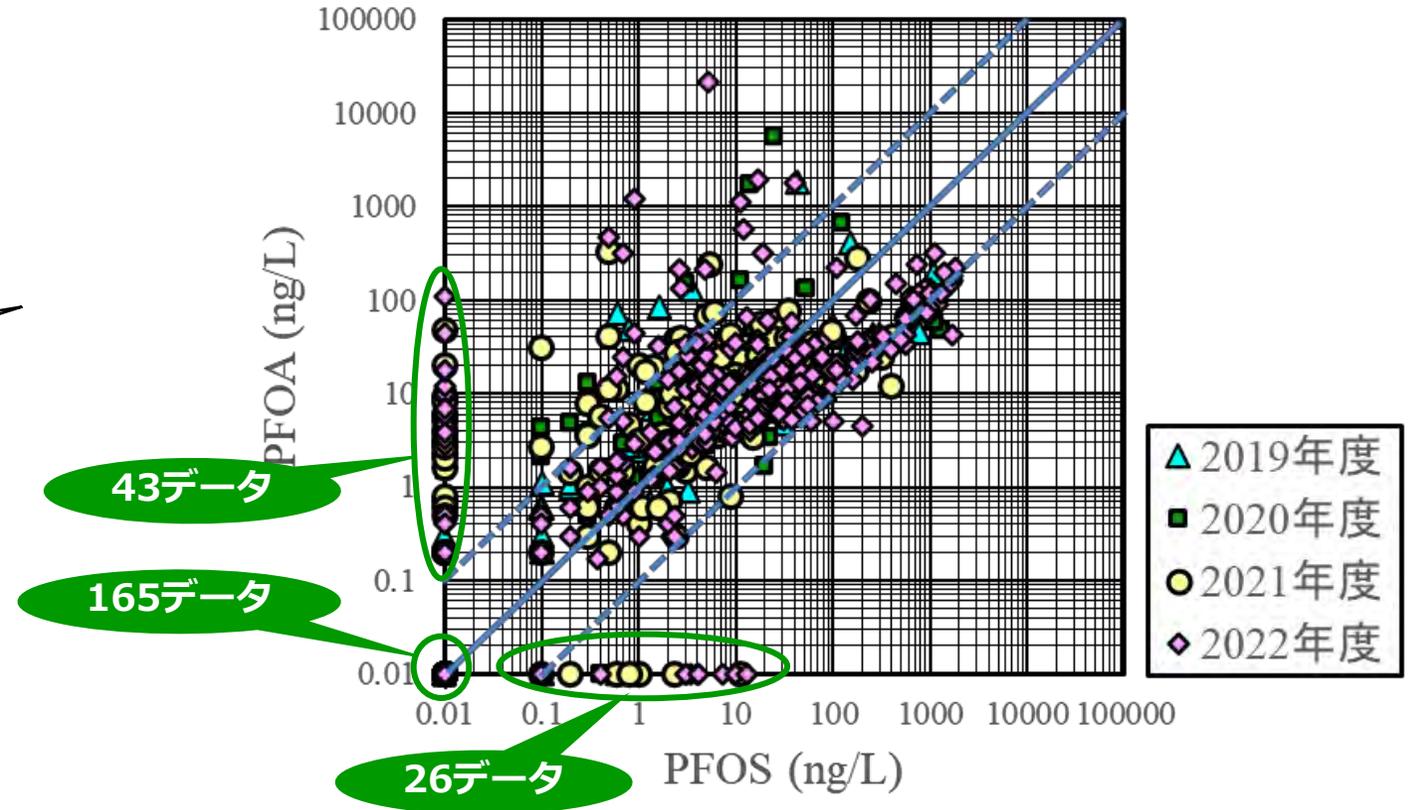


## 地下水のPFOS及びPFOA濃度

- 両物質検出調査数 499 (68.1%)
- PFOSのみ検出 26 (3.5%)
- PFOAのみ検出 43 (5.9%)

### PFOSとPFOAの両方が検出された地下水

- PFOSはPFOAの概ね10倍以下の濃度であることが多い
- PFOAはPFOSより100~1,000倍高い濃度である場合もある



地下水のPFOS濃度とPFOA濃度関係 (n=733)

環境省 (2021~2024)をもとに作成

# わが国のPFASによる地下水汚染の事例（普天間基地周辺）①



## 普天間基地周辺のPFASによる地下水汚染

- 現段階では、飛行場で使用等されてきた泡消火薬剤が汚染源であると推定されている



- ① PFOS等の使用・漏洩・流出事故が発生する。
- ②-1 地表面等から地下浸透する。
- ②-2 吸込穴(ポノール)から地下浸透する。
- ③-1 降雨の浸透によって下方へ移動、PFOS等の一部は不飽和帯に残留する。
- ③-2 PFOS等の一部は地下水面に到達する。
- ④ 地下水面に到達したPFOS等は地下水とともに島尻泥岩層上面の形状\*や地下水位の影響を受け地盤中を移動する。
- ④-1 流速の大きい領域に到達したPFOS等は数週間程度の短い期間で、下流側の湧水へ到達する。
- ④-2 流速の小さい領域に到達したPFOS等は数十年の期間をかけて下流側の湧水へ到達する。
- ⑤ 湧水・地下水で検出される。

普天間飛行場周辺において想定されているサイト概念モデル

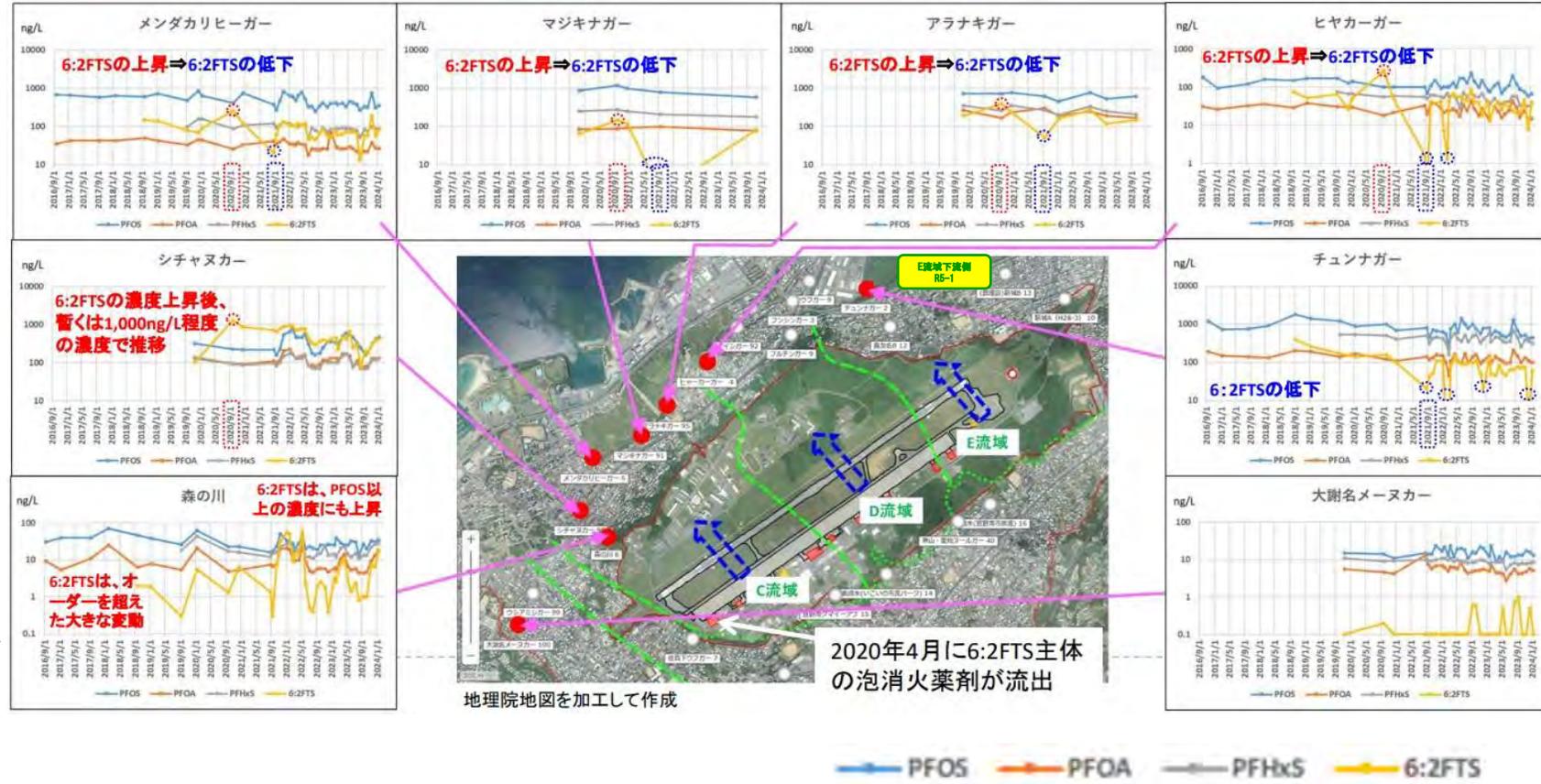
沖縄県 (2024)

# わが国のPFASによる地下水汚染の事例（普天間基地周辺）②



## 普天間基地周辺のPFASによる地下水汚染

- 現段階では、飛行場で使用等されてきた泡消火薬剤が汚染源であると推定されている
- PFOS等4物質合計で1,000 ng/Lを超える濃度が検出される地点は、C流域とE流域に分布
  - 特に、E流域下流側のR5-1孔では6,300 ng/L検出、その下流側のチュンナガーとヒージャーガーで1,200 ng/L検出
- 泡消火薬剤関連物質と考えられている6:2 FTSの濃度変化が大きい



普天間飛行場下流側の湧水のPFOS、PFOA、PFHxS、6:2 FTS濃度（直鎖体のみ）の経時変化（2016～2024年）

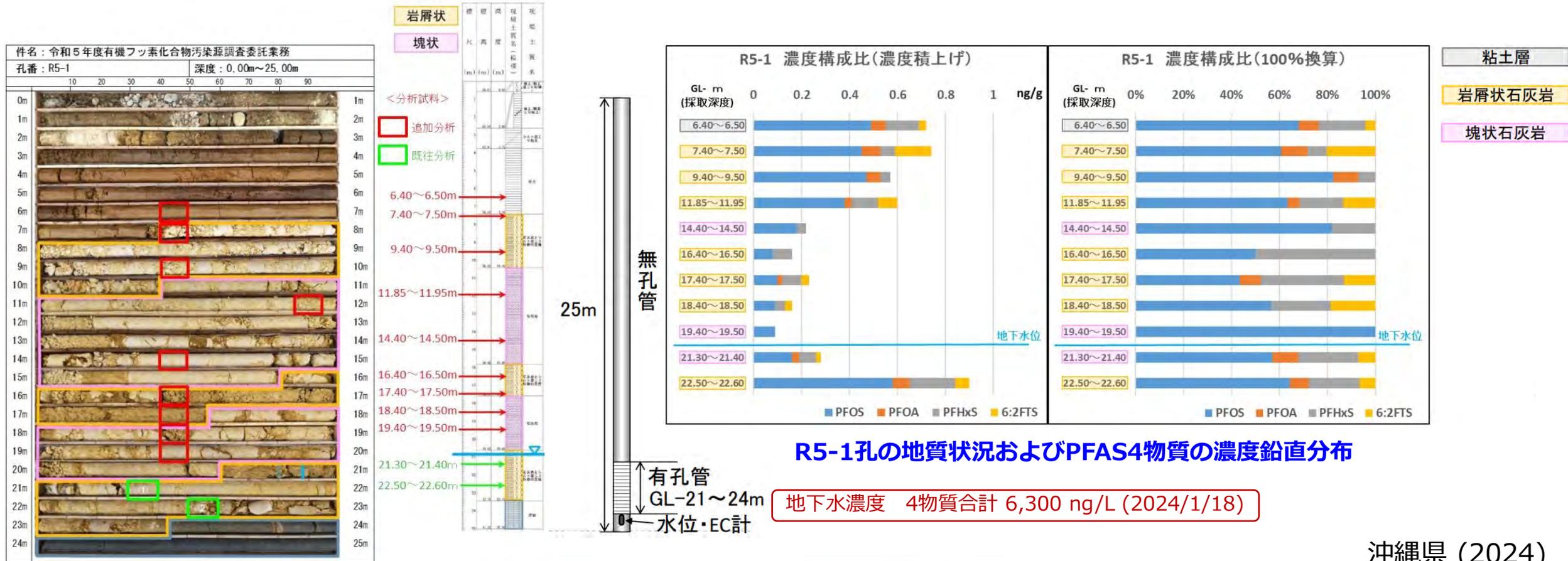
沖縄県（2024）

# わが国のPFASによる地下水汚染の事例（普天間基地周辺）③



## R5-1孔（E流域下流側）の地質およびPFAS4物質の濃度鉛直分布

- 地下水位以浅の粘土層、石灰岩でPFAS4物質が検出
- 地下水位以深で各PFASの濃度が上昇



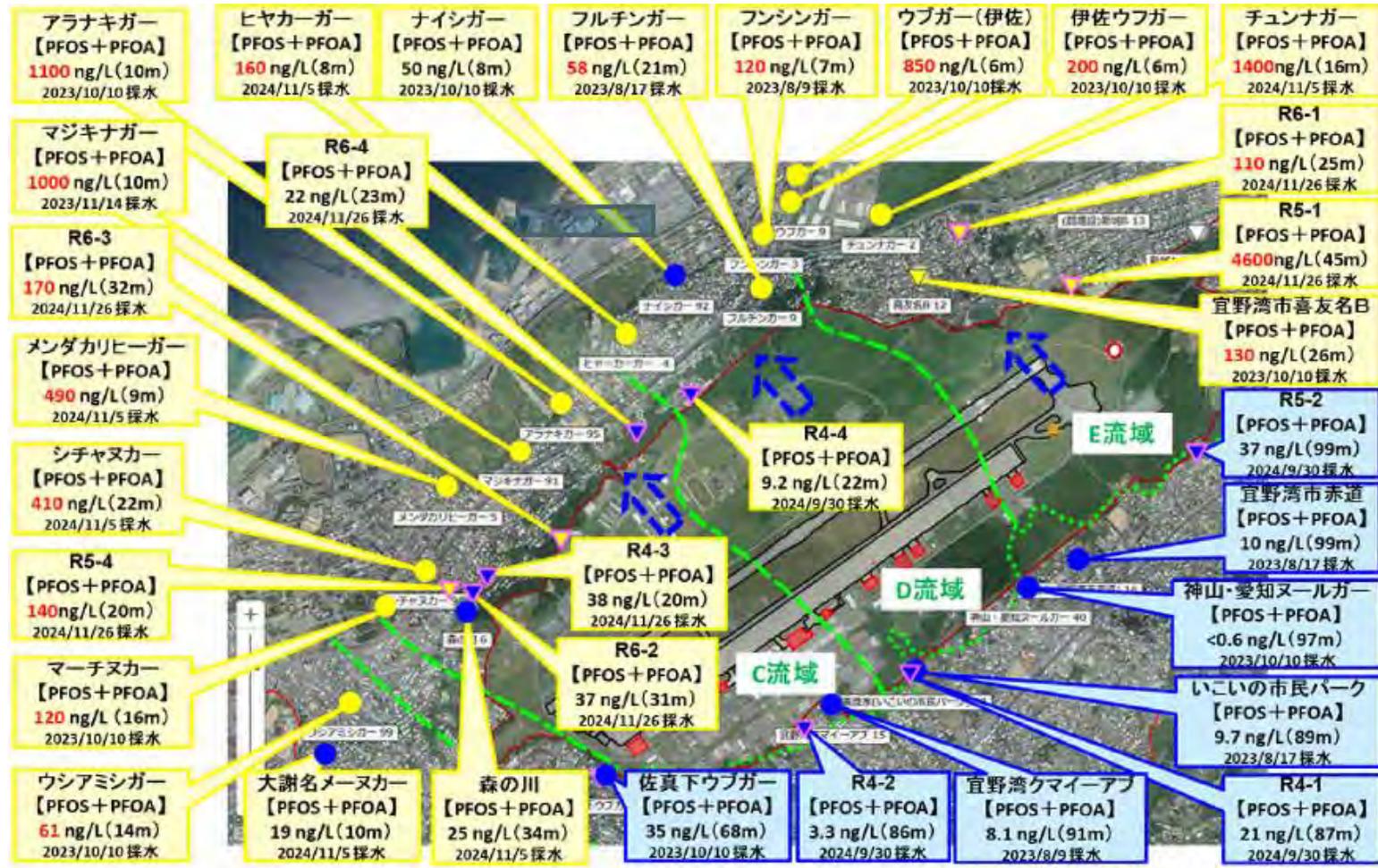
沖縄県 (2024)

# わが国のPFASによる地下水汚染の事例（普天間基地周辺）④



**PFOS+PFOA濃度**

- **地下水 上流側**
  - ・ 50ng/L以下
- **地下水 下流側**
  - ・ C流域の下流側
    - 1,000ng/L以上の地点あり
  - ・ D流域の下流側
    - C流域、E流域に比べ、濃度が低い地点が分布
  - ・ E流域の下流側
    - 4,000ng/L以上の地点あり



**【PFOS+PFOAの濃度分布】**  
(採水: 2023年8月~2024年11月)

- 50 ng/L 以下
- 50 ng/L 超過

要監視項目 暫定指針値: 50 ng/L

- ▽ 本事業で新設した観測井戸
- ▽ 既設の観測井戸
- 湧水地点

図中の( )は湧水地点の地盤標高値、観測井戸の地下水水位標高値を示す。

注) 左図の流域界は、参考文献(平成16年度宜野湾市自然環境調査報告書 宜野湾市)に基づき表示しているが、その境界ラインは今後の検討結果により見直す可能性がある。

地理院地図を加工して作成した。

普天間飛行場周辺におけるPFOS+PFOAの検出状況 (2023年~2024年)

沖縄県 (2025)

# わが国のPFASによる地下水汚染の事例（普天間基地周辺）⑤



## 普天間基地周辺のPFOS等の汚染源の推定（令和6年度第3回専門家会議（令和7年2月4日）段階）

- 既存資料などの収集・整理結果より、PFOS等の汚染源となり得る場所は、泡消火薬剤の使用等が確認された①格納庫や消火訓練施設と考えられ、②地表排水の流末に位置する吸収穴（ポノール）も泡消火薬剤の漏洩や流出があった場合は地下へ浸透する場所となり得ると考えられている



地理院地図を加工して作成した。

① 普天間飛行場内の格納庫、消火訓練施設及びそれら周辺の地表面等

PFOS等を含む泡消火薬剤の使用・漏洩流出が確認された場所

● 日本政府は、格納庫地下貯水槽に残る未処理の汚染水を全て防衛省が引き取り、焼却処分すると発表。（2021年10月17日）

● しかし、過去に使用等されたPFOS等を含む泡消火薬剤が地表面等から地下浸透して、土壌中や地盤中に残留している可能性あり。

② 普天間飛行場内の吸収穴（PFOS等を含む地表排水を放流）

地表排水の流末に位置する場所

● 事故等により、PFOS等を含む泡消火薬剤が流出した場合は、速やかに地下水面に到達する可能性あり。

注) 左図の吸収穴（ポノール）と地表排水路の概略位置は、「宜野湾市史第9巻資料編8 宜野湾市史編集委員会」と「在沖米軍基地周辺環境マップ普天間飛行場報告書 平成15年3月 沖縄県文化環境部」をもとに表示している。

- 2016年以前（1970年代～2015年頃）
  - ・ 成分の主体がPFOSの古いタイプの泡消火薬剤を使用
- 2016年頃以降（2016年頃～2021年8月）
  - ・ PFOS・PFOAを主成分としない新しいタイプの有機フッ素系の泡消火薬剤への入れ替えが開始されたと考えられる
- 2020年4月
  - ・ 泡消火薬剤の流出事故において、流出先の河川水から検出されたPFOS等の90%以上が6:2 FTSであることが判明  
⇒新しい対応の泡消火薬剤に入替えられていたことを示唆
- 2021年9月
  - ・ 新しいタイプの泡消火薬剤への入れ替え完了

## 普天間飛行場周辺において推定された汚染源と流出経路

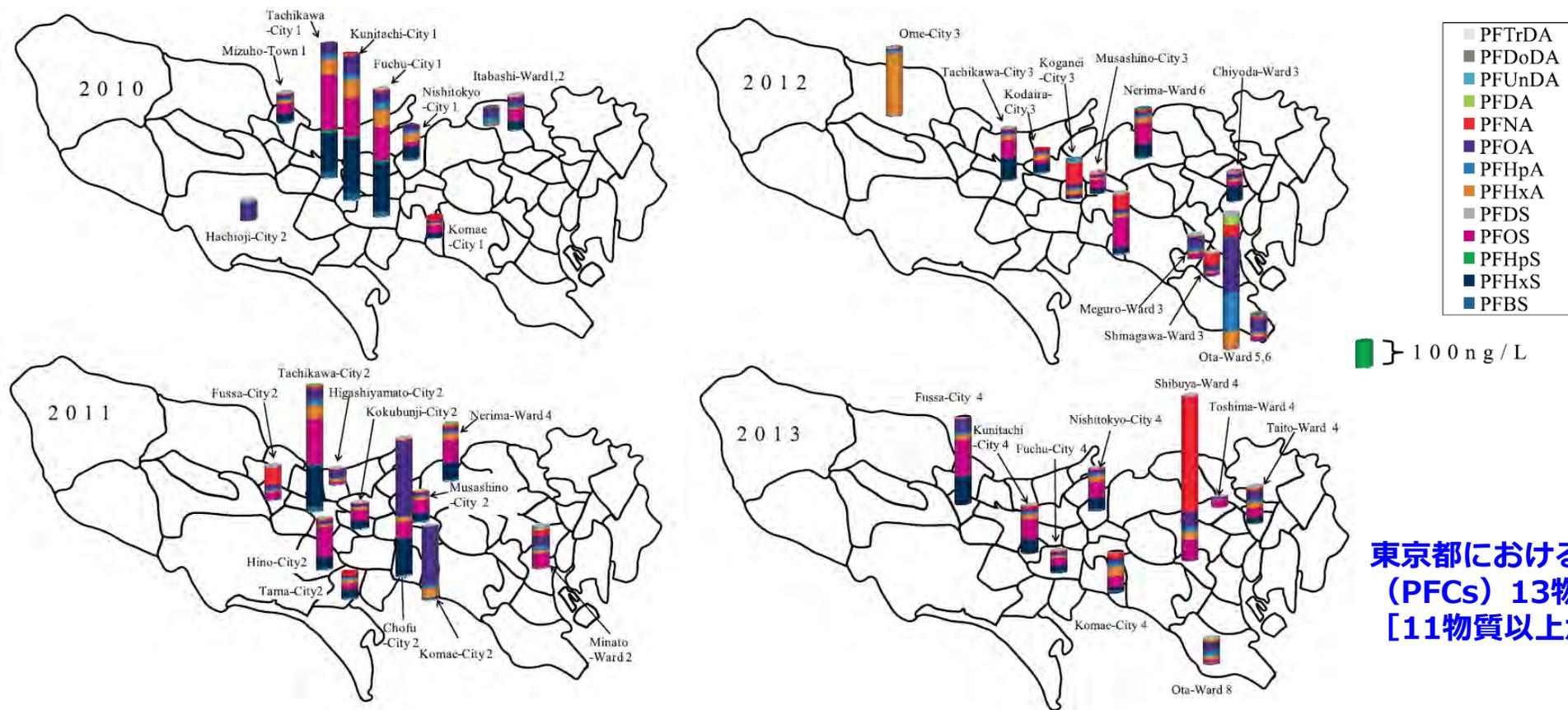
沖縄県（2025）



# わが国のPFASによる地下水汚染の事例（東京都）①

## 2011～2013年度における東京都内の有機フッ素化合物（PFCs）による地下水汚染分布

- 100 ng/L以上検出された地点が毎年確認されたが、最高値を示す物質はそれぞれ異なっていた
- PFCsによる地下水汚染実態が著しく偏在している（多数の汚染源が存在している）と推察された



東京都における地下水の有機フッ素化合物（PFCs）13物質の濃度分布  
 [11物質以上が30 ng/Lを超過した地点]

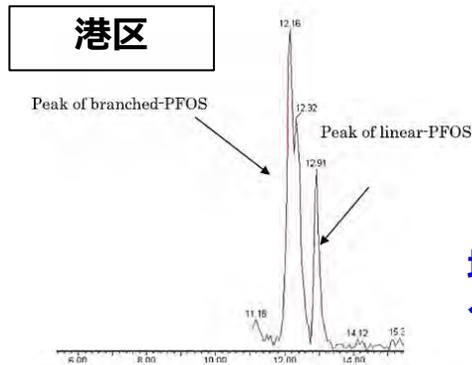
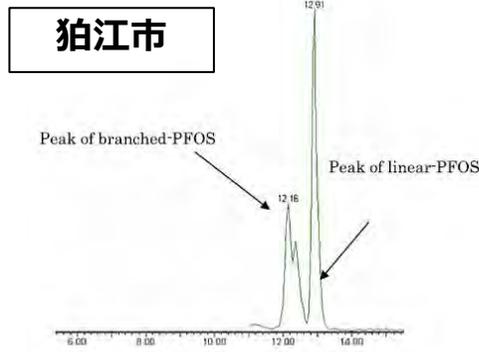
西野ら (2015)

# わが国のPFASによる地下水汚染の事例（東京都）②

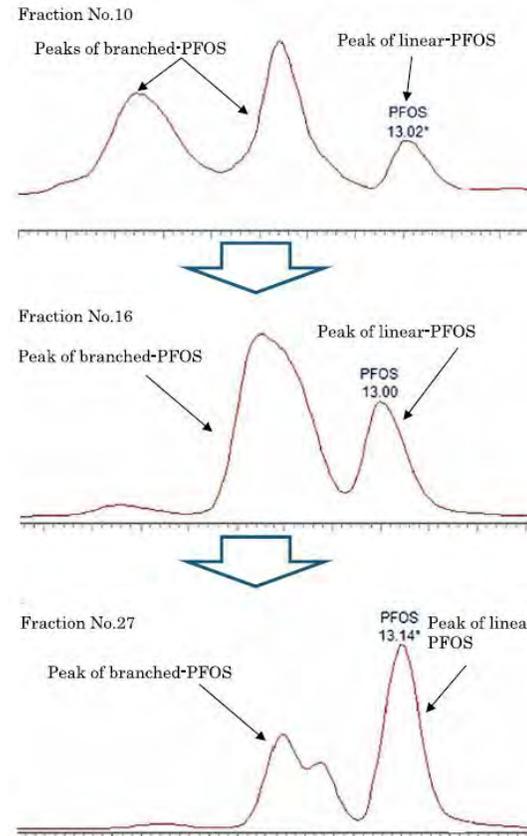


## PFOSの直鎖体と分岐側鎖体の構成比の違い、変化

- 地下水中のPFOSの直鎖体と分岐側鎖体の濃度構成比、地点により大きく異なっていた
- 土壌中のPFOSの浸透しやすさは直鎖体と分岐側鎖体で異なっていた（分岐側鎖体は移動しやすい）



地下水試料中のPFOSのクロマトグラム



実験当初

実験の進行

カラム上端にPFCs水溶液を負荷後、超純水を順次注ぎ入れ、自然流下

PFCs13種類物質混合水溶液溶液浸透実験（土壌カラム試験）におけるPFOSのクロマトグラムの変化

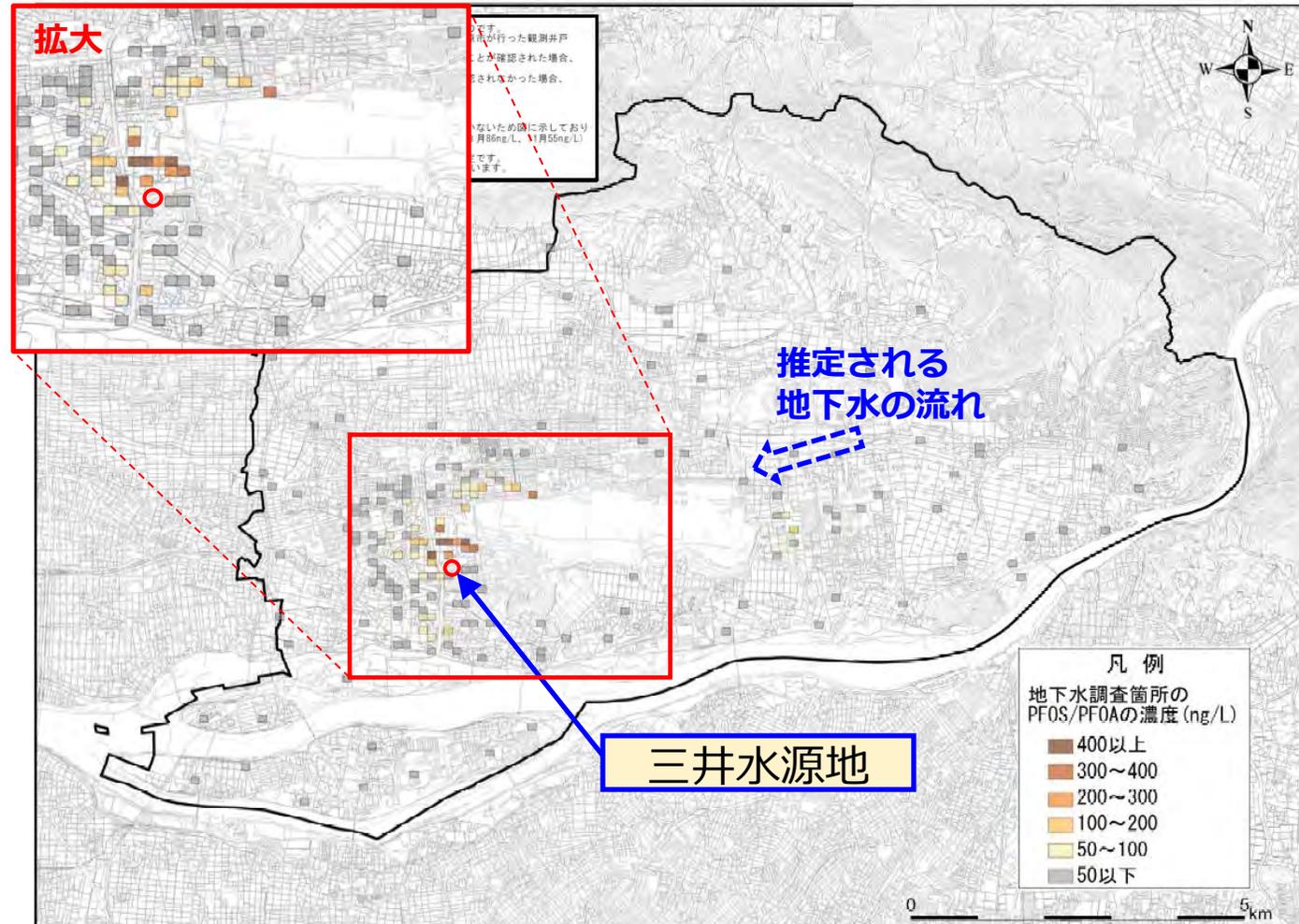
西野ら (2015)

# わが国のPFASによる地下水汚染の事例（各務原市）①



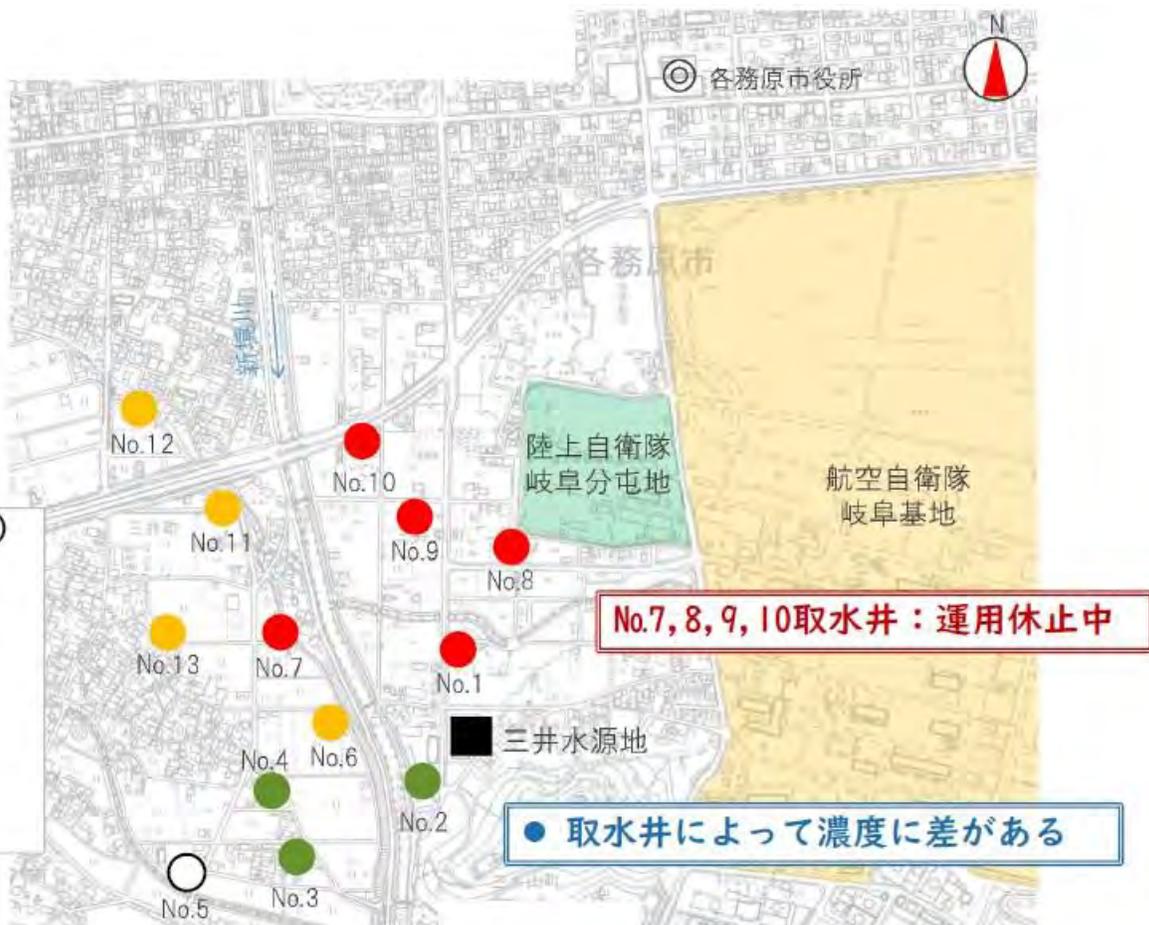
## 岐阜県各務原市のPFOS・PFOAによる地下水汚染の状況

- 三井水源地の取水井戸における調査（R3.5～R6.1）および市が行った観測井95ヶ所における調査（R5.8～9）の結果、10本でPFOS及びPFOAが暫定目標値（50ng/L）超過が確認された井戸について、半径500m以内の井戸の調査を繰り返し実施（R5.8～12）
- メッシュ内の濃度の最高値で色分け
- 岐阜基地内の2本の井戸は暫定目標値以下、既知の独自調査では1本の井戸で暫定目標値超過（R5.3：86ng/L、R5.11：55ng/L）－**図中に表示なし**

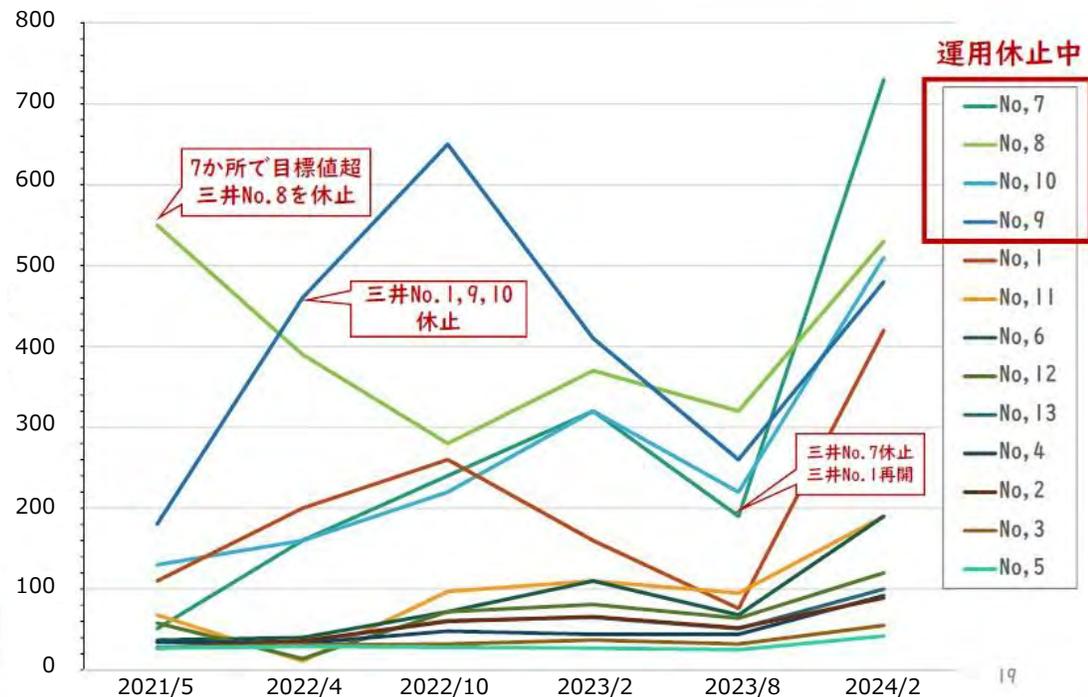


各務原市公表資料（2024）をもとに一部加筆

# わが国のPFASによる地下水汚染の事例（各務原市）②



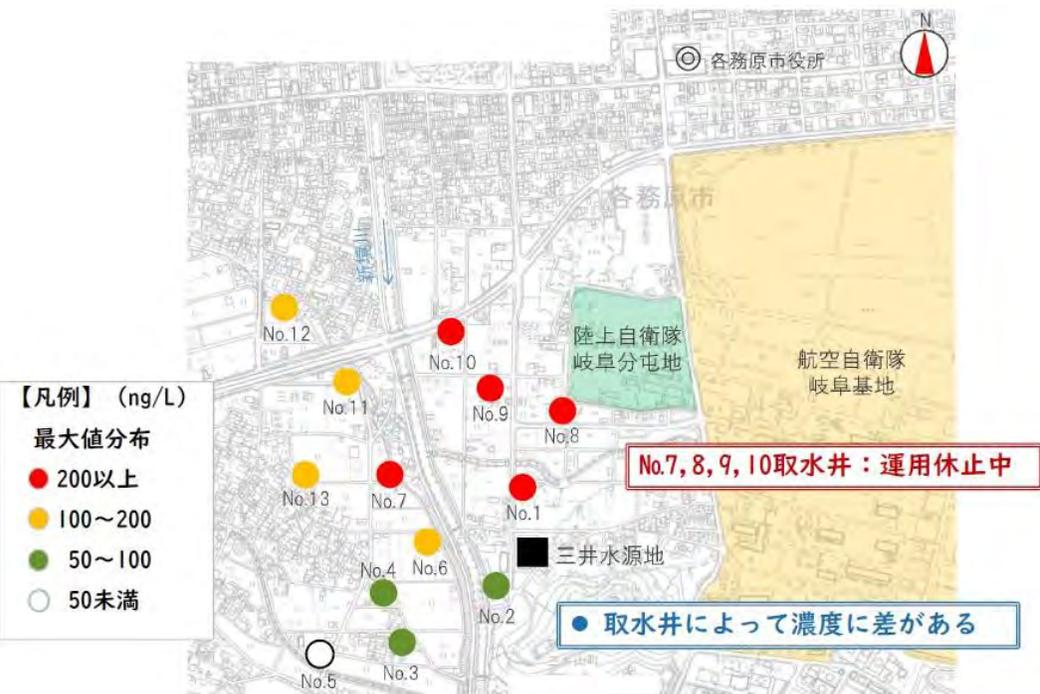
三井水源地の全13水源井のPFOS・PFOA濃度の分布



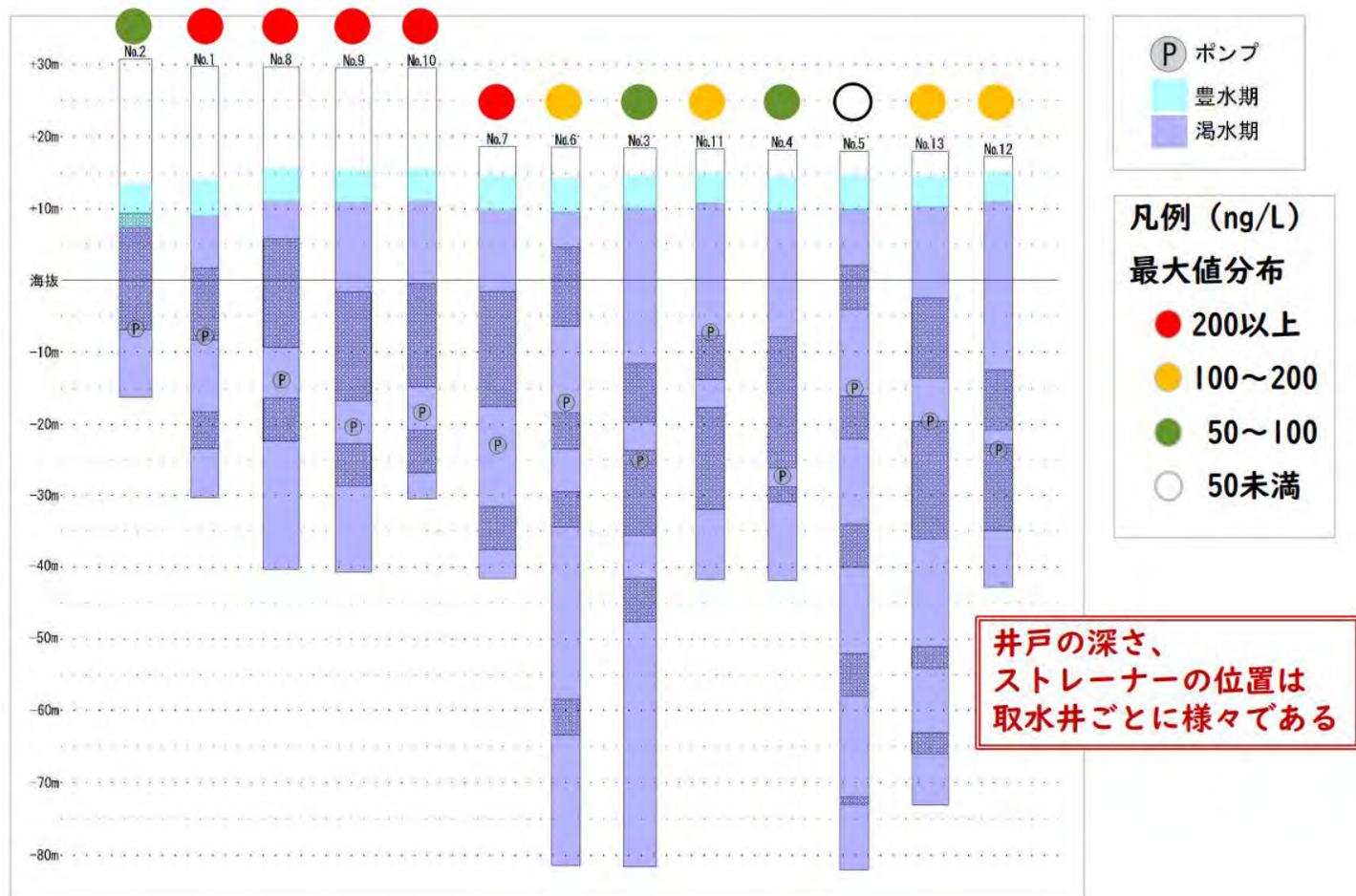
三井水源地の全13水源井のPFOS+PFOA濃度の推移

第1回各務原市水質改善対策委員会資料21(2024.6.29)

# わが国のPFASによる地下水汚染の事例（各務原市）③



三井水源地の全13水源井のPFOS・PFOA濃度の分布



水源井の柱状図（ストレーナー位置）

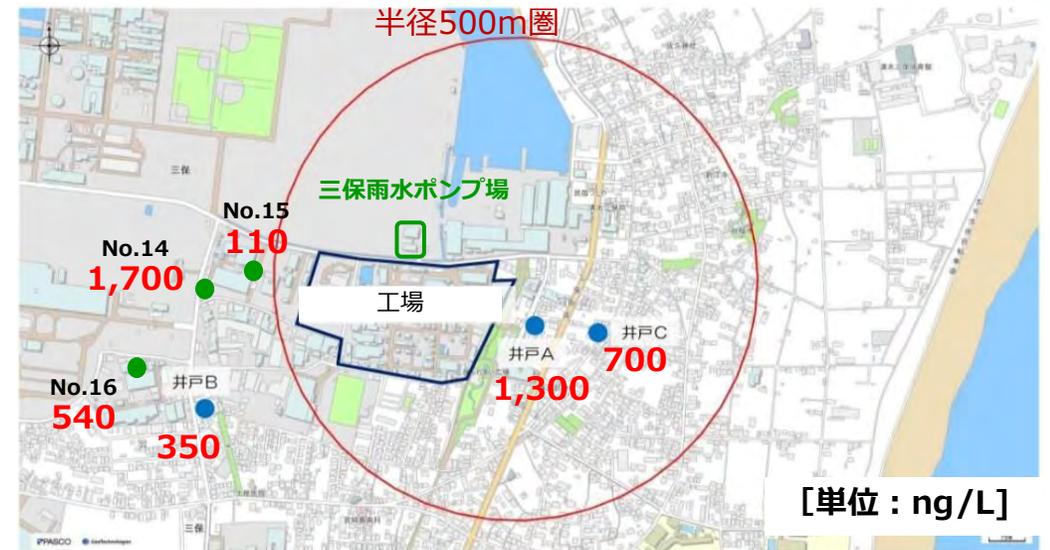
第1回各務原市水質改善対策委員会資料21(2024.6.29)

# わが国のPFASによる地下水汚染の事例（静岡市）①



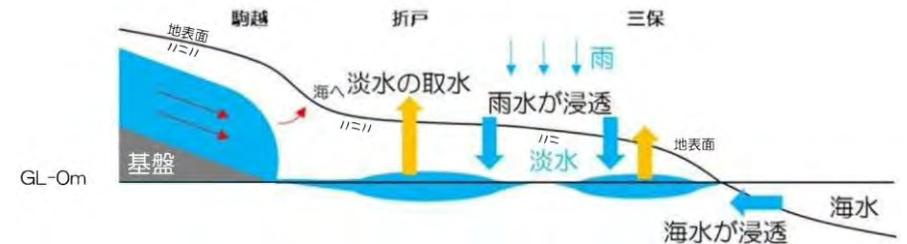
## PFAS使用事業場周辺のPFASによる地下水汚染事例

- 1965年よりPFOAを使用（2013年12月に使用中止）
- 2023年12月12日 静岡市が、三保雨水ポンプ場の排水から指針値（暫定）の220倍（11,000ng/L）のPFOA+PFOSが検出されたと発表
- 事業者が、同日、拡散防止対策を発表
  - 雨水幹線内の流水の浄化
  - 浄化設備の増強
  - 雨水浸透抑制対策（コンクリート被覆）
  - 敷地境界への地下水遮水壁の設置
- 静岡市が調査範囲を広げて井戸の地下水調査を実施
- 事業者・地元自治体・市の三者連絡会による対策の協議
- モニタリング調査の継続



場所非表示：井戸D（610ng/L）、井戸E（7.4ng/L）

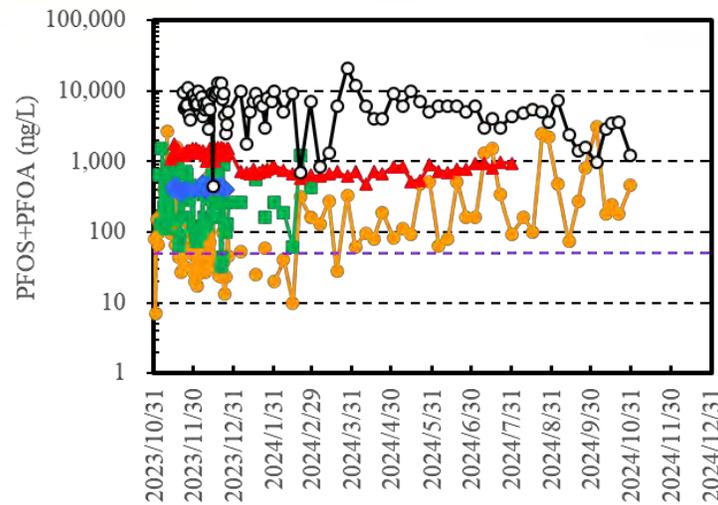
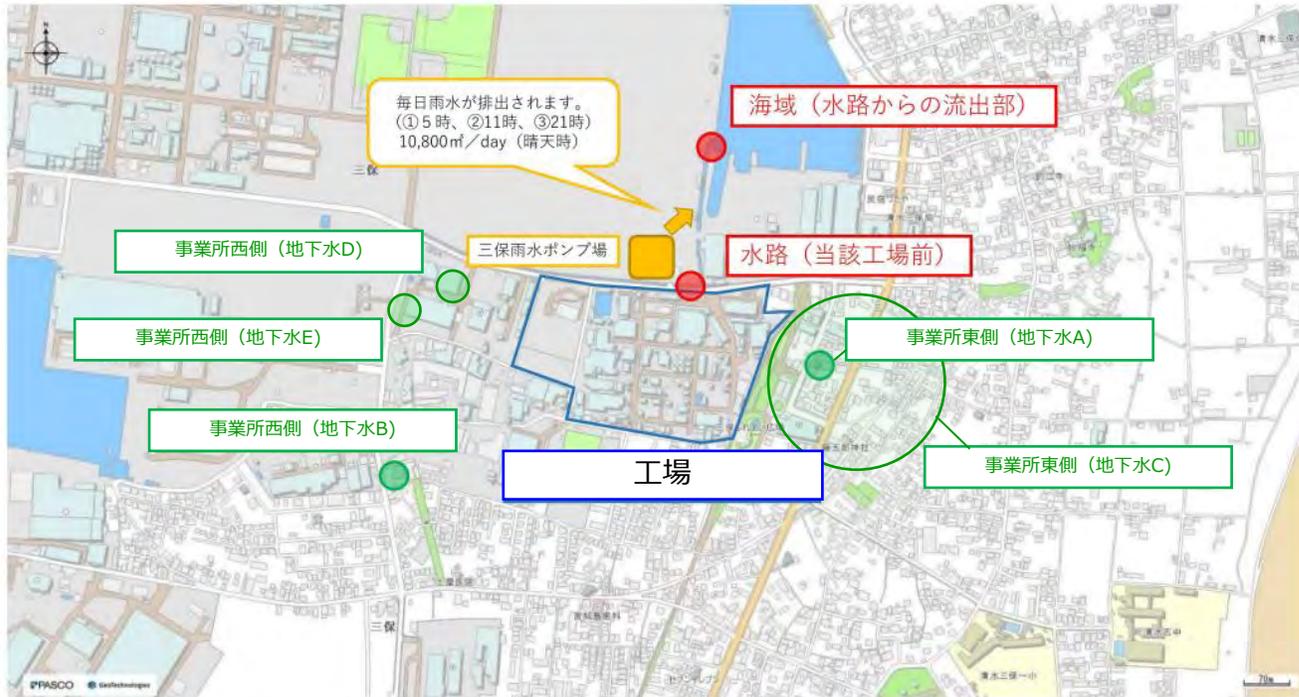
## 使用事業所周辺井戸の地下水のPFOA+PFOA濃度 （2023年10月17～20日、11月15日）



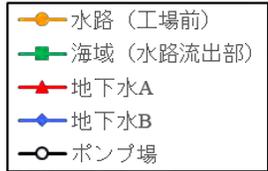
## 三保半島の地下水イメージ

（三保、折戸、駒越地区の地下水は独立して形成されている）  
静岡市公表資料をもとに作成

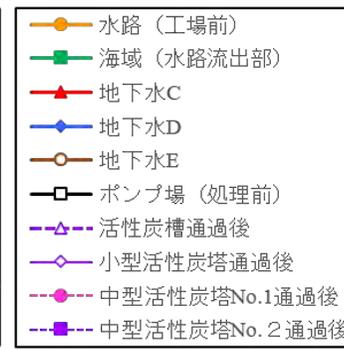
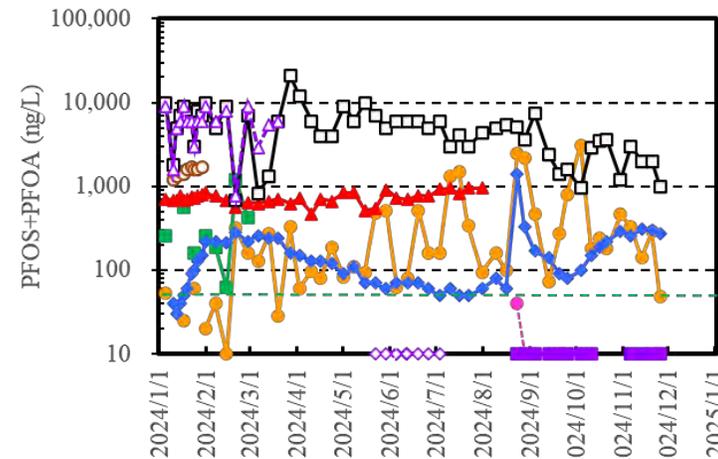
# わが国のPFASによる地下水汚染の事例（静岡市）②



- ※1 水路、海域の値はポンプ場からの放流終了後の値
- ※2 ポンプ場の値は活性炭塔通過前の値
- ※3 濃度はPFOAのみの濃度の場合もあり（≒PFOS+PFOA）



毎日調査の結果（PFOS+PFOA濃度）



PFOS定期モニタリング結果（PFOS+PFOA濃度）

静岡市公表資料をもとに作成

# わが国のPFASによる地下水汚染の事例（静岡市）③



## 事業者によるPFAS対策の実施（実施予定、実施中、計画・検討中のものを含む）

- ポンプ場におけるPFAS浄化対策
  - 活性炭塔の増設 ⇒ポンプ場からのPFASを含む排水の浄化
    - ポンプ場内への小型活性炭塔の移設（2024.4）、中型活性炭塔（2基）の移設（2024.7）
    - ポンプ場全排水浄化用の大型活性炭塔の設置（実証実験・検証：2024.7～2025.3予定）
- 工場周辺における雨水排水管の補修（～2024.8） ⇒PFASを含む雨水等の流入量の抑制
- 工場敷地内の濃度低減対策
  - 現地調査（ボーリング調査、透水試験、地下水調査、土壌調査）の実施（～2024.5）
  - 対策の実施
    - 地下水対策（場内活性炭塔設置） – 地下水揚水処理
    - 土壌対策 – 掘削除去、コンクリート被覆等
    - 遮水壁設置
    - 活性炭塔の増設
    - 工場前溝渠の浚渫
- 地元とのコミュニケーション
  - 三者連絡会（市、地元連合自治会、事業者）の定期開催

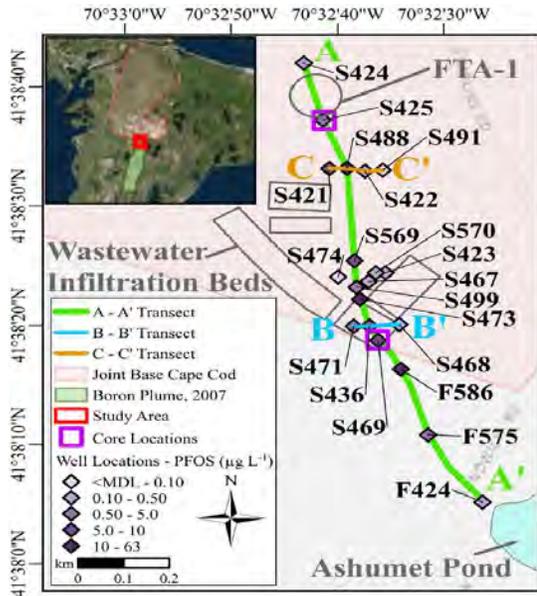
静岡市長定例記者会見資料、事業者ホームページ「PFOAに関する当社の取り組み」をもとに作成

# 地下水流動に伴う地下水のPFAA前駆体からの変質の把握事例①

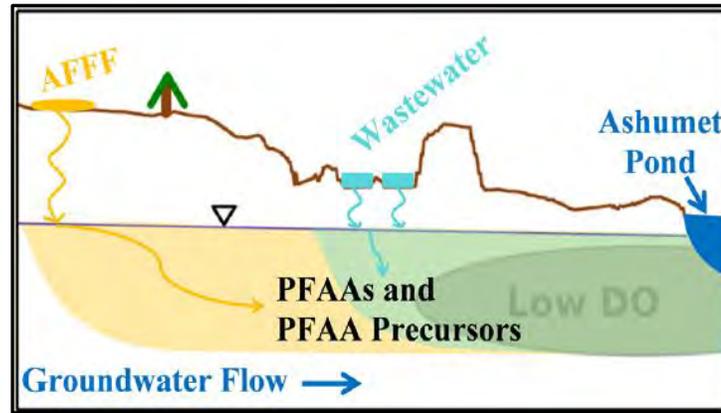


## 米国マサチューセッツ州ケープゴッドの旧消防訓練場 (FTA)

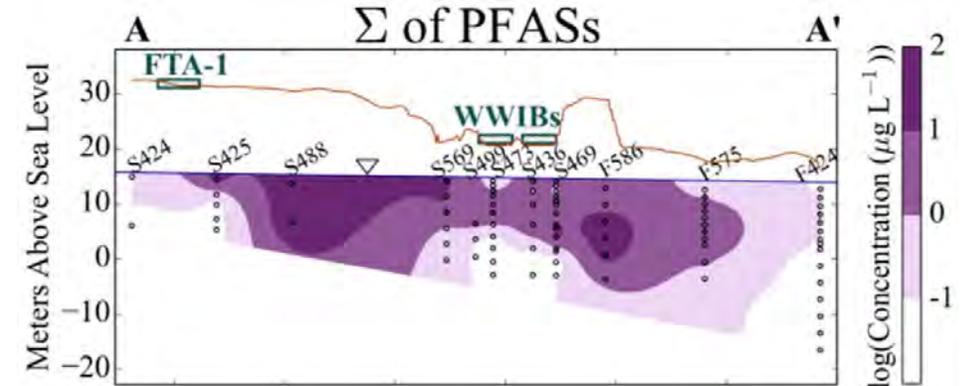
- 泡消火薬剤 (AFFF) の使用 (1970年?~1985年、1997年)
  - AFFF使用場所からPFASが不飽和帯や地下水へ長期的に流入
- 二次処理された軍事基地の生活排水が浸透床を通して砂礫帯水層へ廃棄 (1936年~1995年)
- FTA-1で、深さ11mまで土壌を掘削し、燃料成分、塩素系溶剤を対象時に加熱処理 (157~204°C) した履歴あり (1977年)
- 不圧帯水層：氷河期のアウトウォッシュ堆積物 (中~粗砂)、 $k=1.27 \times 10^{-3} \text{m/s}$



地下水観測井の位置



PFAAsとPFAA前駆体による  
地下水汚染の概念図

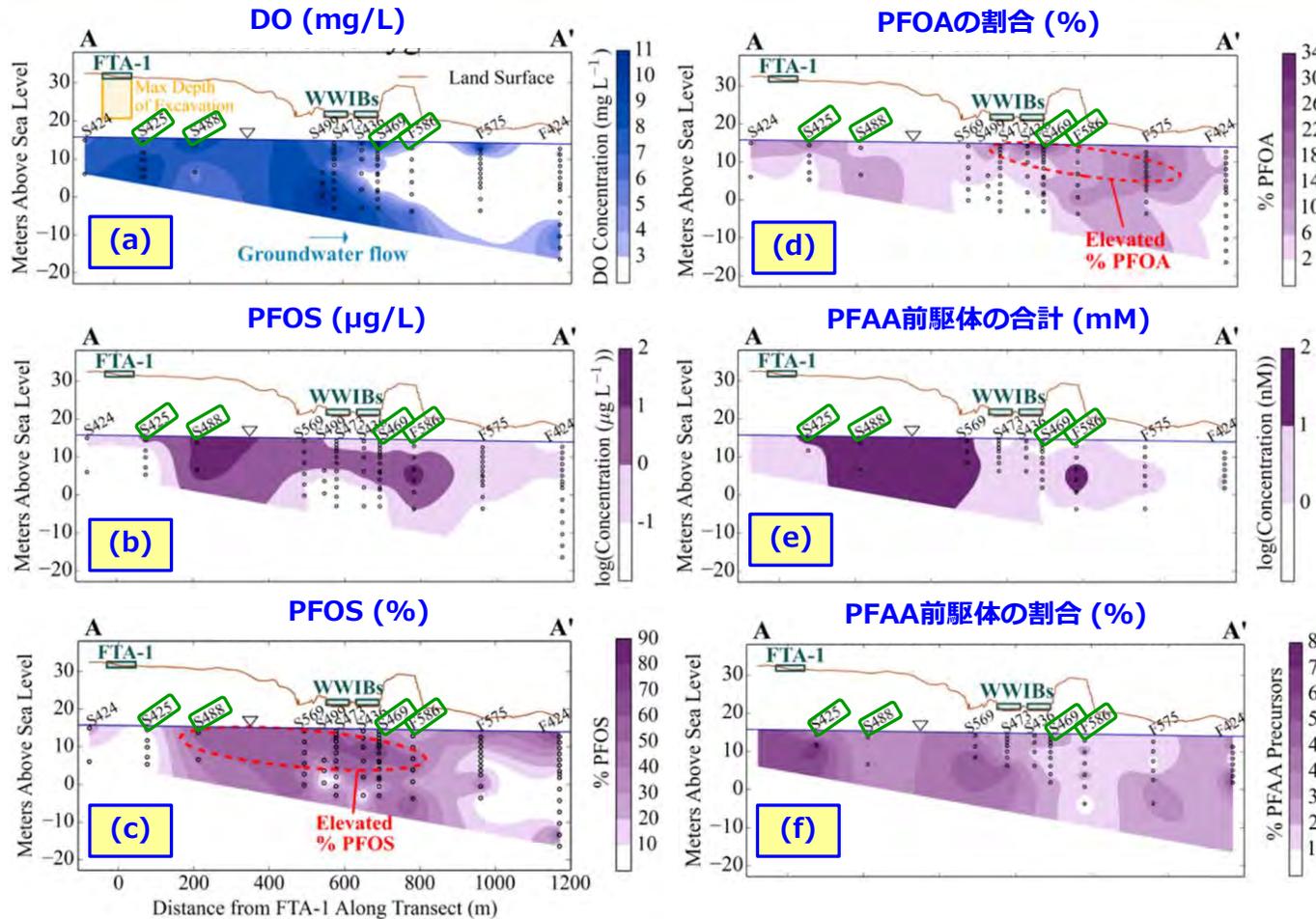


地下水のPFASs合計濃度の断面分布

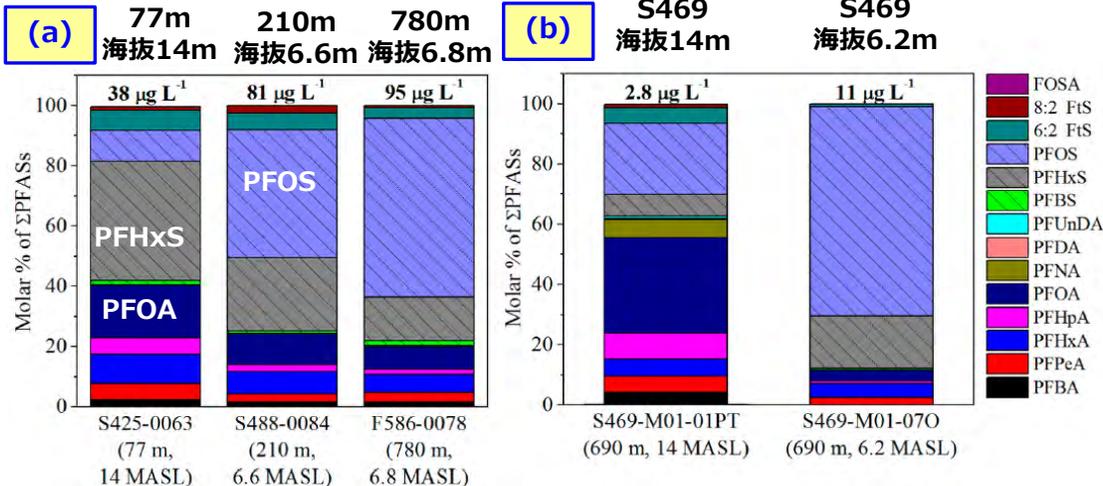
(PFBA, PFPeA, PFHxA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFBS, PFHxS, PFOS, PFDS, FOSA, 6:2 FTS, 8:2 FTS)

Weber et al. (2017)

# 地下水流動に伴う地下水のPFAS前駆体からの変質の把握事例②



● 汚染源ごとに、地下水の流れにともなってPFAS前駆体の濃度割合が減りPFOSやPFOAの濃度割合が増えている傾向



地下水のPFASsモル濃度構成比  
 (a) FTA-1の近傍～下流側  
 (b) 排水処理プラントの浸透床位置  
 (水位直下 (海抜14m) と深部 (海抜6.2m) )

FT-1地下水質断面分布図 (2015.5～7データ)  
 ※1 (c)、(d)はモル濃度割合  
 ※2 (d)、(e)のPFAS前駆体のモル濃度はTOP Assay法による値

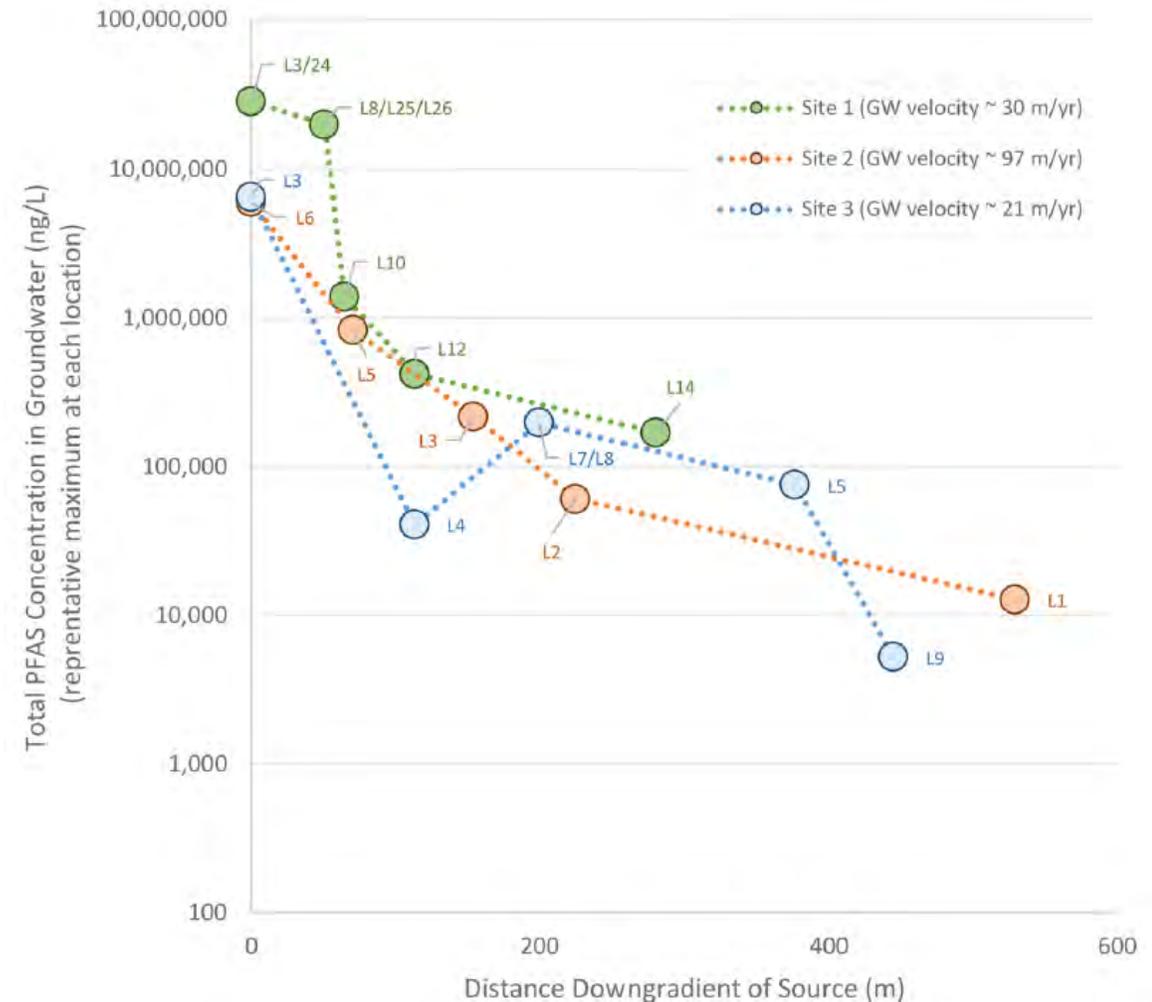
Weber et al. (2017)

# PFASによる土壌・地下水汚染の実態 (米国南部の泡消火薬剤による汚染サイトの例①)



## PFASの土壌・地下水中での輸送・減衰プロセスの例

- 汚染源付近では、距離の増加とともに総PFAS濃度が急激に低下
  - 汚染源の全PFAS濃度は1～10 mg/Lオーダー
  - 下流側100～150 m付近まで急激に濃度が低下（100 m下流までで1オーダー以上濃度低下）
  - それより下流側では濃度低下が穏やか
  - 400～600 m下流でも1 µg/Lオーダー～10 µg/Lオーダー



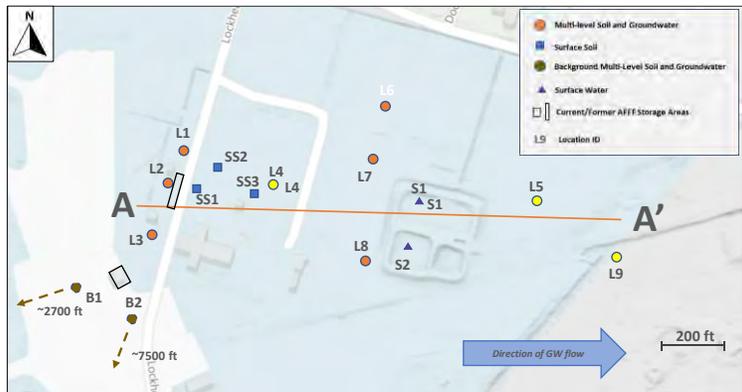
汚染源から下流側への距離に対する地下水の総PFAS濃度の変化 (サイト1～3)

Adamson et al. (2022)

# PFASによる土壌・地下水汚染の実態 (米国南部の泡消火薬剤による汚染サイトの例②)

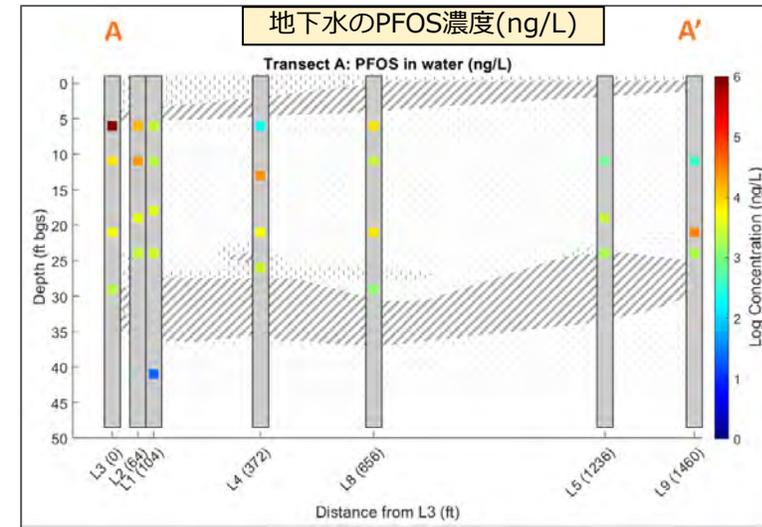
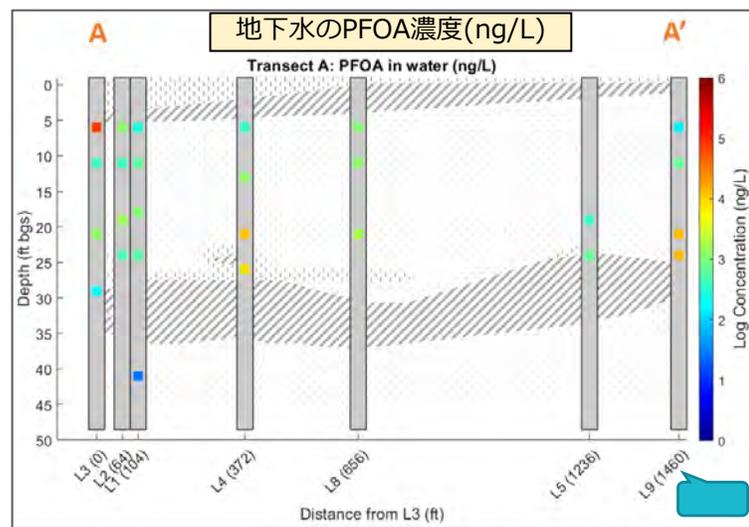
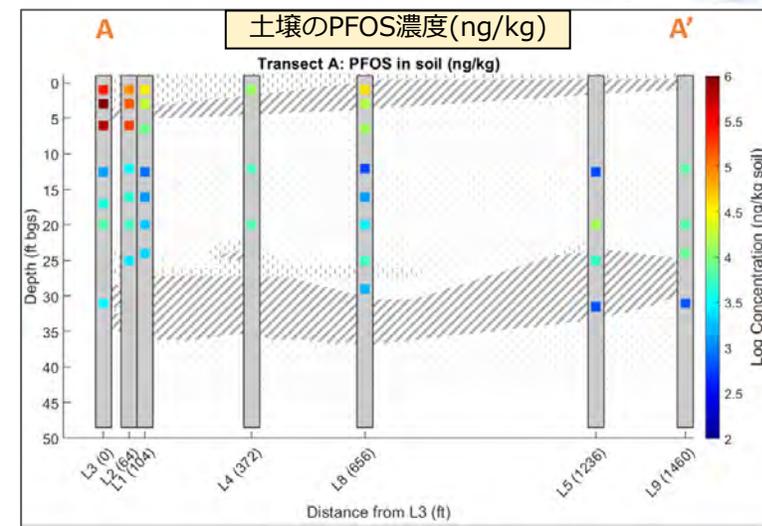
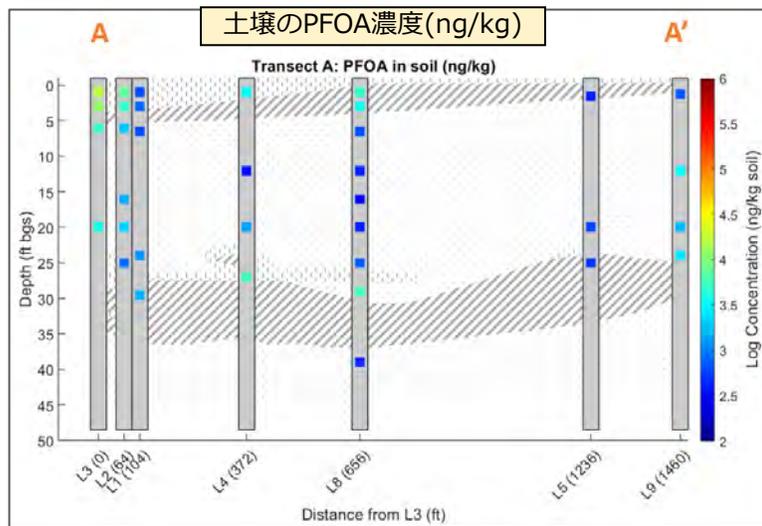


## PFASの土壌・地下水中での輸送・減衰プロセスの例



### サイト3：泡消火薬剤の保管・移送エリア

- 汚染源では、深さ方向に濃度が減衰
- 1,460 ft (445m) 下流側で、帯水層下部で土壌、地下水いずれも高濃度
  - ✓ 汚染地下水が選択的に通過している部分の可能性あり (土壌への再吸着の可能性)



土壌、地下水の総PFAS、PFOA,PFOSの濃度 (サイト3)

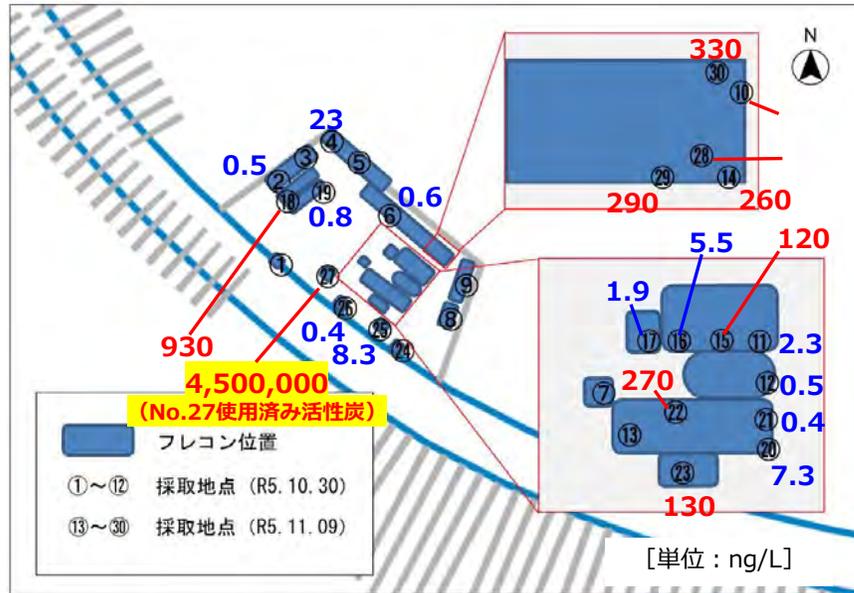
Adamson et al. (2022)

# わが国におけるPFASによる土壤汚染状況の事例（吉備中央町）①

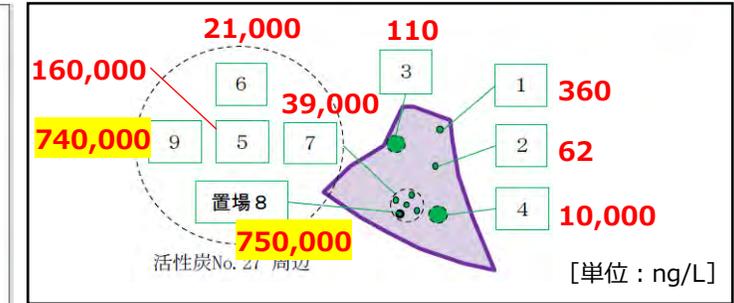


## 土壤汚染調査結果

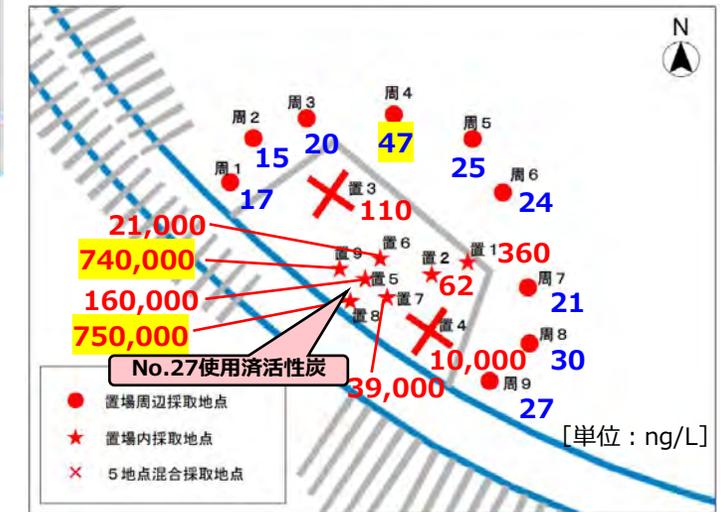
- 令和4年度水道統計調査にて、円城浄水場（案田配水池）でPFOS+PFOAが**1,400ng/L**検出（2023年10月13日に保健所より連絡）
- 水源である河平ダム、上流における公共用水域の水質調査
  - 河平ダム **1,100ng/L**
  - 西側沢F1 **62,000ng/L**
- 西側沢F1の上流部の資材置場の使用済活性炭（No.27）から高濃度のPFOS+PFOAが検出（PFOA主体）
  - 最高4,500,000ng/L**
- 使用済活性炭から表層土壤への浸透と考えることが妥当



使用済活性炭の調査結果（溶出試験）  
（PFOS及びPFOAの溶出量）



資材置場内表層土壤調査結果  
（PFOS及びPFOAの土壤溶出量）



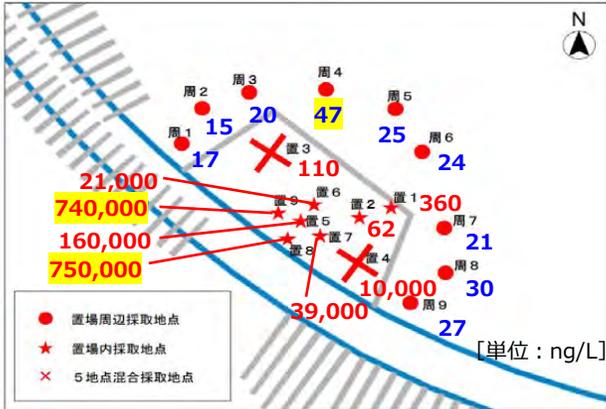
資材置場周辺表層土壤調査結果  
（PFOS及びPFOAの土壤溶出量）

吉備中央町原因究明委員会資料をもとに作成

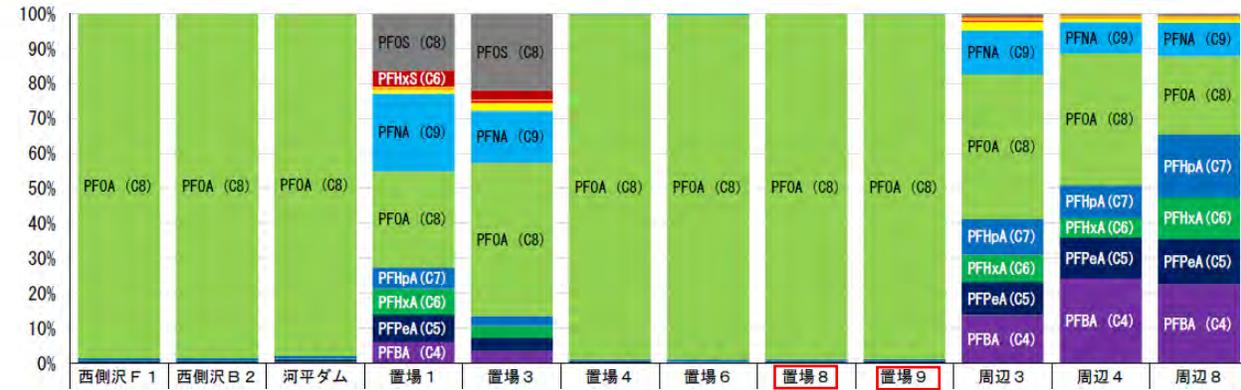
# わが国におけるPFASによる土壤汚染状況の事例（吉備中央町）②



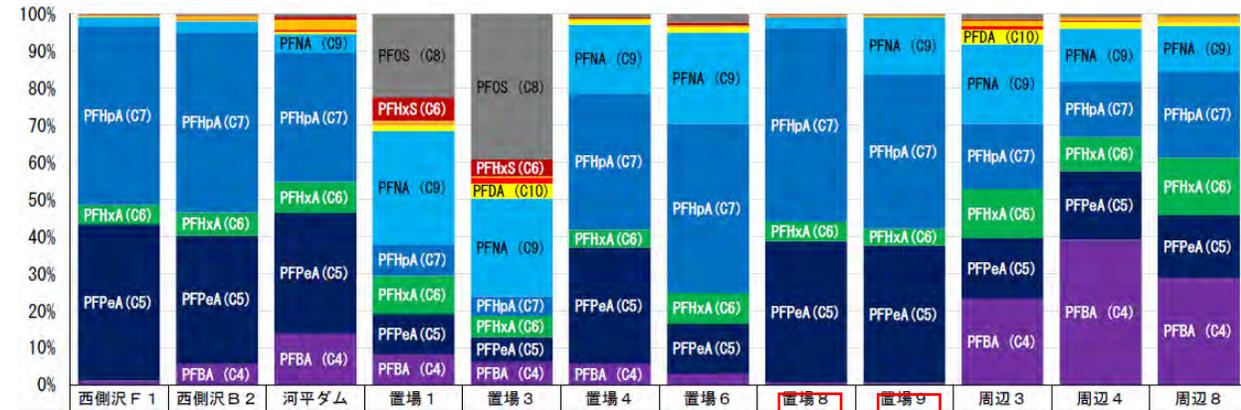
## 岡山県吉備中央町土壤汚染調査結果



- 置場4、6、8、9は、PFOAの土壤溶出量10,000ng/L以上の地点
- 置場1、3は、周辺にPFOSの溶出量68~170ng/Lの使用済活性炭の置場

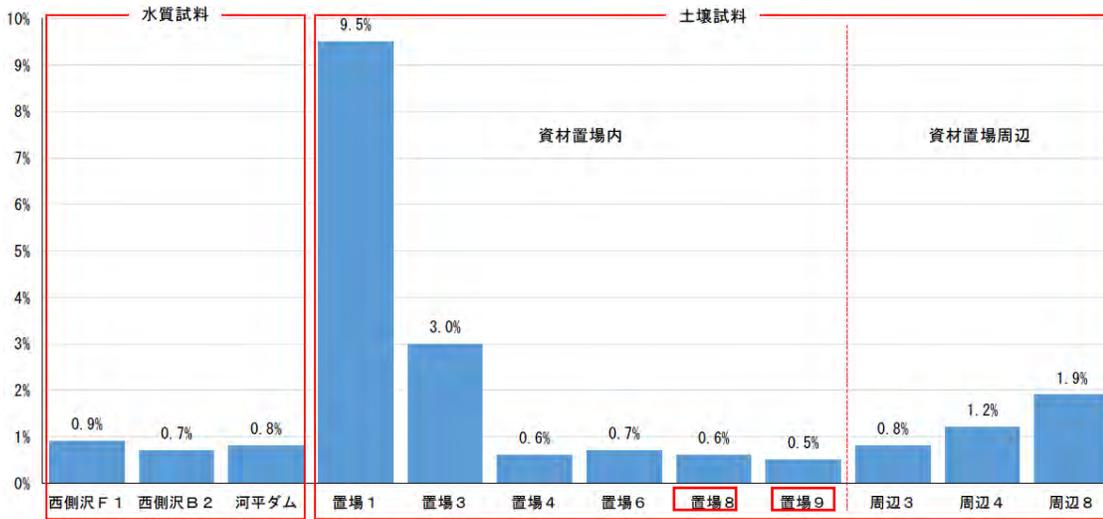


PFOAを含む同族体（PFCAs）の構成比（モル比）



PFOAを除く同族体（PFCAs）の構成比（モル比）

● 水質試料と使用済活性炭No.27付近の土壤試料（置場6、8、9）は分岐異性体が約1%と同程度で、水質試料の西側沢F1と土壤試料の置場8の同族体の構成比が類似  
 ⇒ 下流の河川等のPFAS高濃度事象に対する置場8、9周辺の表層土壌中のPFASの寄与が高く、使用済活性炭から表層へ浸透したPFASが原因と推測された



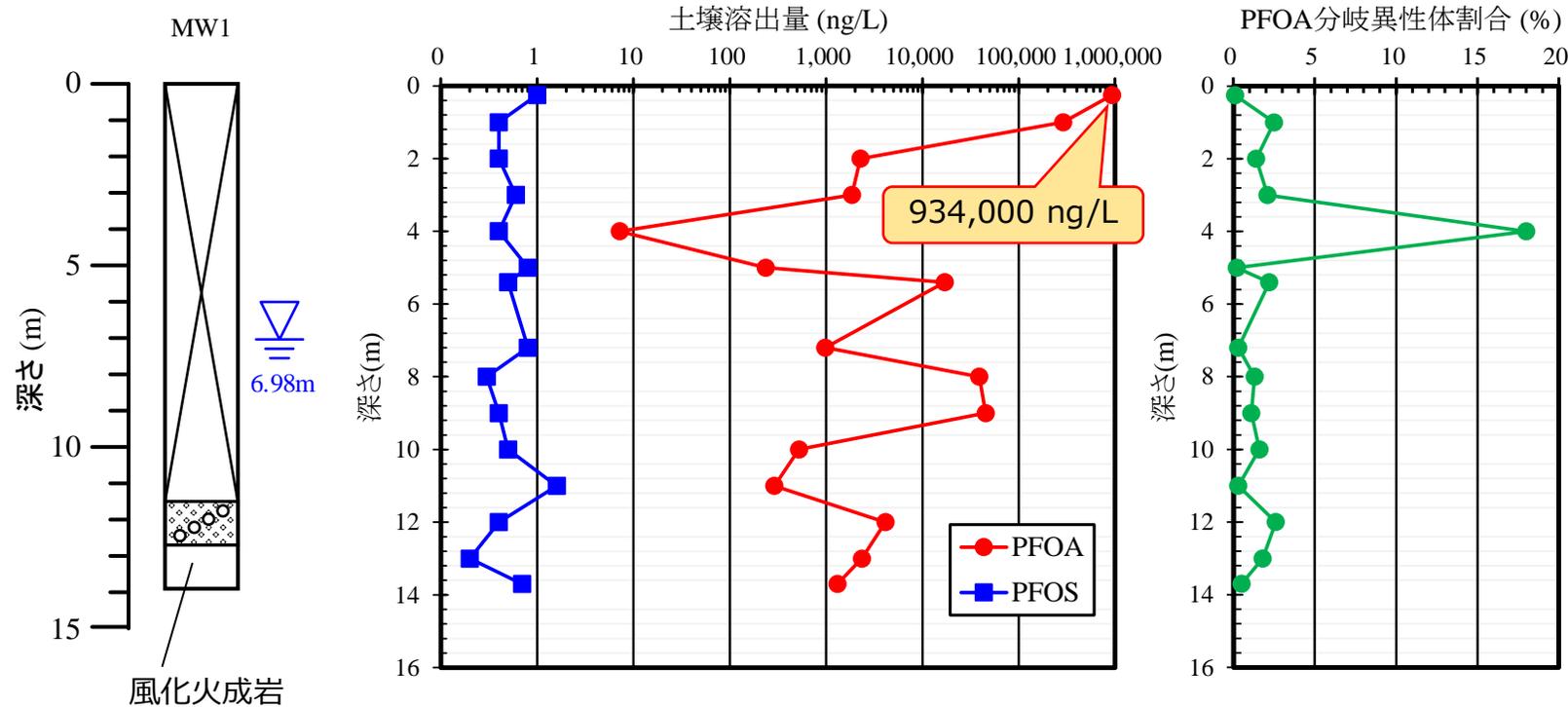
PFOAの分岐異性体の構成割合

# わが国におけるPFASによる土壤汚染状況の事例（吉備中央町） ③



## MW1（資材置場内、置場8近傍）でのボーリング調査結果

- 表層～GL-13.7mまでいずれも上流側（資材置場北側：MW2）よりも高濃度であり、地下水からも高濃度で検出
- 分岐異性体の構成割合が概ね3%以下と同程度
- MW1の地下水流動の上流側（資材置場北側）の地下水ではPFOAが1.0ng/Lと高濃度で確認されず



ボーリング調査結果（MW1、土壤溶出量）

MW1の地下水：PFOS+PFOA 52,000 ng/L (PFOS 1.2 ng/L, PFOA 52,400 ng/L)

吉備中央町原因究明委員会資料をもとに作成

# わが国におけるPFASによる土壤汚染状況の事例（吉備中央町）④



## 原因究明に係る考察

- 本事案の原因について、次のとおりと考えることが妥当
  - 資材置場に置かれていた使用済み活性炭から溶出していた
  - 使用済活性炭から表層土壤へ浸透している
  - 資材置場の土壤から地下水へ混入している
  - 資材置き場の地下水が西側沢へ流出している
  - 発生源は資材置場にあり、その他には発生源は存在しない

## 対策の手法に係る結論

- 本事案における対策としては、次のとおり行うことが妥当
  - ① 資材置場の高濃度で確認されている地点周辺の土壤を掘削除去し、
  - ② 清浄土壤で埋め戻した後、
  - ③ コンクリート等で被覆するとともに、
  - ④ 施工後、継続モニタリングにより、濃度の推移を確認
- なお、資材置場の地下水の浄化等、他の手法を妨げるものではない



## [参考] 汚泥肥料中のPFAS

### 汚泥肥料中のPFOSおよびPFOAの含有量（「肥料等試験法」（2023）8.7の分析法による）

- 86試料（収集した汚泥試料）についての分析結果

物質	平均値 (LB) ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	平均値 (UB) ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	最大値 ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	中央値 ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	< 0.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 試料数
PFOS	4.8	4.9	54	1.5	25
PFOA	16	16	250	1.8	24

・ 平均値は、定量下限値未満を0として算出したもの (LB) と定量下限として算出したもの (UB) をそれぞれ記載

- PFOS、PFOAともに90%以上が50  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 未満
- 現時点での考え方と評価
  - 最も高かった汚泥肥料（250  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ）を長期間適用したほ場で生産された農作物を毎日食べ続けるなど、現在得られている知見を基に保守的に試算しても、食品安全委員会が設定したPFOS、PFOAの耐容一日摂取量（TDI）である20 ng/kg-体重/日を超過することはないと考えられる
- 今後の対応方針
  - 農地土壌から農作物への移行に関する研究や、農地土壌におけるPFASの蓄積性などに係る情報収集を進め、科学的知見をさらに蓄積していく

「汚泥肥料中のPFOS及びPFOAについて」（農林水産省、2024）

# 7

## PFASによる土壌・地下水汚染 の調査方法と留意点

# PFASによる土壌・地下水汚染の調査方法について（検討課題）



## 基本的な調査の方法について考えてみる

・・・現状において、定められた調査方法はない

### ● 土壌汚染の有無の把握・状況

- 表層付近の土壌調査状況の把握 — 表層付近の土壌調査（土壌溶出量）
  - 複数地点混合法によるスクリーニング
    - ✓ 表層～深さ50cmの土壌の濃度が最も高くなるといえるか？
- 深さ方向の土壌汚染状況・範囲の把握（帯水層底面まで）
  - ボーリング調査（深さ別土壌調査）
    - ✓ 掘削用水（清水、泥水）による汚染拡散に注意必要
    - ✓ 汚染地下水の流動による帯水層中での土壌汚染範囲拡大に対する対応（調査地点設定）が必要か？

### ● 地下水汚染の有無・状況

- 地下水調査
  - ✓ 観測井のスクリーン区間の中央部からの採水が妥当か？
  - ✓ 井戸内および周囲（グラベルパック部）でPFASが泡立たないように、**低流量パーージ・サンプリング**や**受動的サンプリング**を推奨すべきか？
  - ✓ 高濃度のPFAS汚染が存在する場合、**孔内水の水面付近の発泡部分を避けて採水すべきか？**

※参考：NGWA(2023)

※試料採取器具、試料容器等について、PFASの溶出・吸着のない材質のもの、または溶出・吸着がないことをあらかじめ確認したものを使用する必要あり（ex. ポリプロピレン製）

# 土壌、地下水のPFAS分析方法（PFOS、PFOA、PFHxS）



## 土壌の汚染状態の測定方法

・・・2023年7月末に環境省から土壌汚染の暫定測定方法が示された

- PFOS、PFOA、PFHxS

- 土壌溶出量

- 「土壌中のPFOS、PFOA、PFHxSに係る暫定測定方法（溶出量試験）」（令和5年7月31日）

- 土壌含有量（全量）

- 「＜参考＞土壌中のPFOS、PFOA、PFHxSに係る暫定測定方法（含有量試験（全量分析））」（令和5年7月31日）
- 他に、幾つかの含有量測定方法が土壌に利用または提案されている
  - ✓ 底質のPFOS・PFOA含有量測定方法（要調査項目調査マニュアル）
  - ✓ 環境試料中（水中、固体中、汚泥中、生体組織中）のPFAS含有量測定方法（EPA method 1633）
  - ✓ 農地土壌（農研機構）のPFAS含有量測定方法

## 地下水の汚染状態の測定方法

- PFOS、PFOA

- 地下水濃度

- 「ペルフルオロオクタンスルホン酸（PFOS）及びペルフルオロオクタン酸（PFOA）の測定方法」（令和2年5月28日付け環水大水発第2005281号、環水大土発第2005282号環境省水・大気環境局長通知「水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準等の施行等について」付表1



# 土壤溶出量の測定方法（PFOS、PFOA、PFHxS）

## 土壤中のPFOS、PFOA、PFHxSの暫定測定方法（溶出量試験）（2023.7.31、環境省）

### 土壤試料採取

### 風乾

風乾（30℃以下）

### 粗砕・ふるい分け

中小礫・木片等除去、粗砕、  
2mm目ふるい分け

### 溶出

**試料60g**に**精製水600mL**を追加  
(液固比 10 : 1)

### 振とう

常温・常圧下で6時間水平振とう  
(200回/分)

### 遠心分離

10～30分静置後、20分間遠心分離  
(3,000重力加速度)

### ろ過

上澄み液を0.45μmメンブレン  
フィルターでろ過

### 内標準添加

サロゲート内標準物質混合液を  
添加・攪拌

### 固相抽出

コンディショニング済み固相抽出管を  
検液が5mL/分で通過

### 脱水

固相抽出管を脱水（遠心分離、  
窒素パージ、吸引など）

### 溶出

0.1%アンモニア-メタノール  
5mLで溶出液捕集容器へ溶出

### 濃縮

窒素気流下で0.1mL程度まで濃縮、  
メタノール/水（1:1v/v）を1mL添加・攪拌

### 測定

HPLC-MS/MSによる測定  
(定量下限値 0.2ng/L目安)



# 土壤の含有量（全量）の測定方法（PFOS、PFOA、PFHxS）

<参考> 土壤中のPFOS、PFOA、PFHxSの暫定測定方法（含有量試験（全量））（2023.7.31、環境省）

土壤試料採取

風乾

風乾（30℃以下）

粗砕・ふるい分け

中小礫・木片等除去、粗砕、  
2mm目ふるい分け

試料

試料5g

内標準添加

サロゲート内標準物質混合液を  
添加・攪拌、30分静置

超音波抽出

0.3%アンモニア-メタノール20mL  
を加えて20分間超音波抽出

遠心分離

10分間遠心分離（3,000rpm）

3  
回

濃縮

0.2mL程度まで濃縮し、精製水  
10mL、4M塩酸20μL添加

固相抽出

コンディショニング済み固相抽  
出管を検液が5mL/分で通過

脱水

固相抽出管を脱水（遠心分離、  
窒素パージ、吸引など）

溶出

1%アンモニア-メタノール5mLで溶出液  
捕集容器へ溶出させ、酢酸25μLを添加・  
攪拌

濃縮

窒素気流下で0.1mL程度まで濃縮、メタ  
ノール/水（1:1v/v）を1mL添加・攪拌

測定

HPLC-MS/MSによる測定  
（定量下限値 0.2ng/L目安）

# 土壌・地下水汚染の調査・対策で必要となるPFAS分析



## ターゲット分析

- 個別PFASそれぞれの濃度を定量

- 固相抽出－液体クロマトグラフ質量分析計 (LC-MS/MS) 分析

※揮発性の高い中性化合物（フッ素テロマーアルコール類（FTOH）など）の場合はGC-MS/MS等での測定が必要

## TOP Assay (Total Oxidizable Precursor Assay: 全酸化可能前駆体分析)

- 試料中の前駆体化合物を対象とするPFASに酸化分解（変換）させて、**対象とするPFASの前駆体化合物の総量**をLC-MS/MSを用いたターゲット分析により定量

## 全有機フッ素 (TOF: Total Organic Fluorine) 分析

- 吸着可能な有機フッ素 (AOF: Adsorbable Organic Fluorine) を活性炭に吸着させて抽出、または溶媒抽出や固相抽出により抽出可能な有機フッ素 (EOF: Extractable Organic Fluorine) を抽出
- 抽出した有機フッ素を900～1,000℃で燃焼させてフッ化水素酸に変換した後、NaOH溶液や緩衝液に吸収させて、イオンクロマトグラフィー (IC)により**フッ化物イオンの総濃度**を測定

## 全有機フッ素分析

吸着・抽出可能  
有機フッ素総量

### TOP Assay

個別PFASの  
前駆体化合物総量

**ターゲット分析**  
個別PFAS濃度

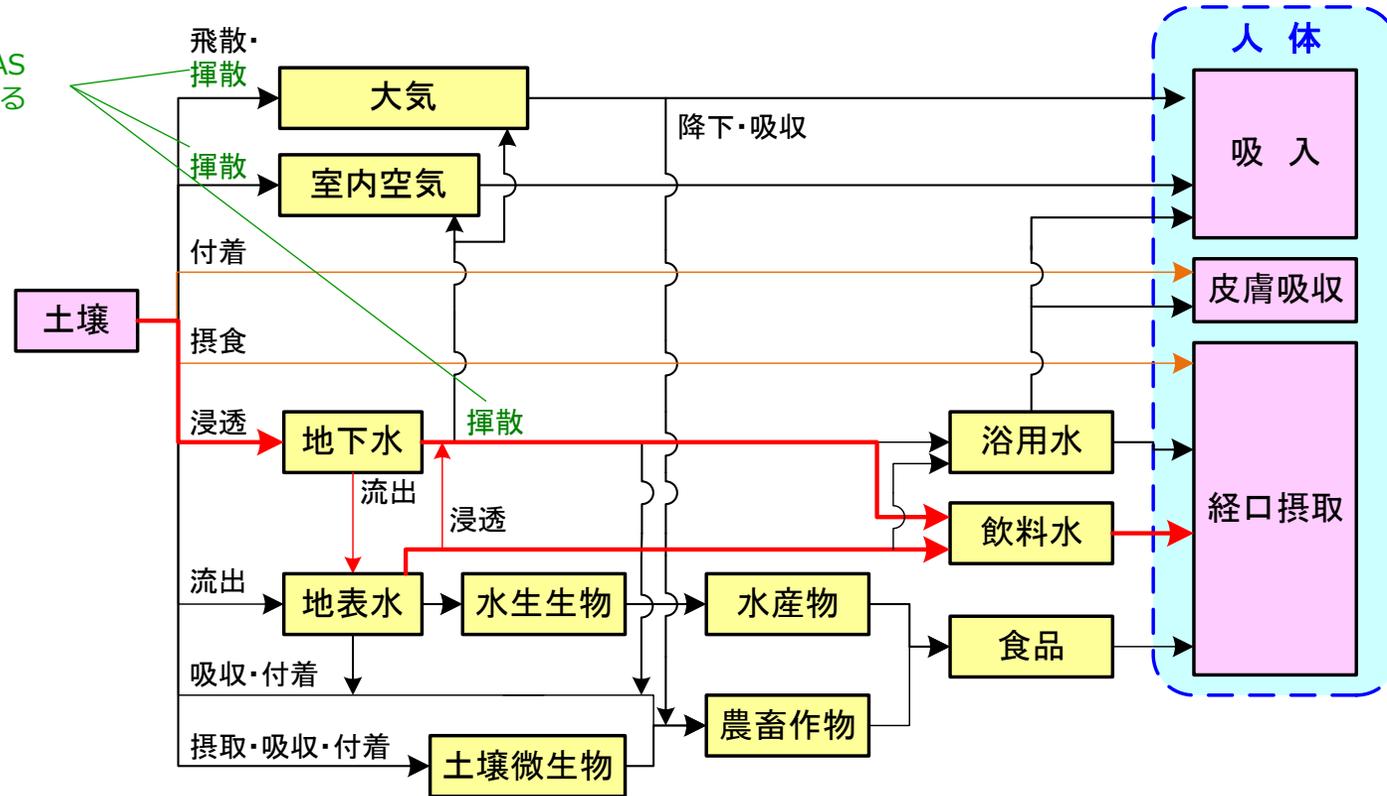
# 8

## PFASによる土壌・地下水汚染 の対策方法・対策技術

# PFASによる土壌汚染についての人の曝露シナリオ



※ 揮散は、揮発性の高いPFAS (ex. FTOH) に想定される



# PFASによる土壌・地下水汚染対策の考え方



## 土壌・地下水汚染に対するリスク管理（人の健康リスクを軽減するための対策）

### ● 曝露管理

- 土壌・地下水汚染に起因する汚染物質を摂取する機会をなくす
  - 地下水の飲用停止、灌漑水などとしての利用停止、地下水の水質の測定（モニタリング）
  - 立入禁止

### ● 曝露経路遮断

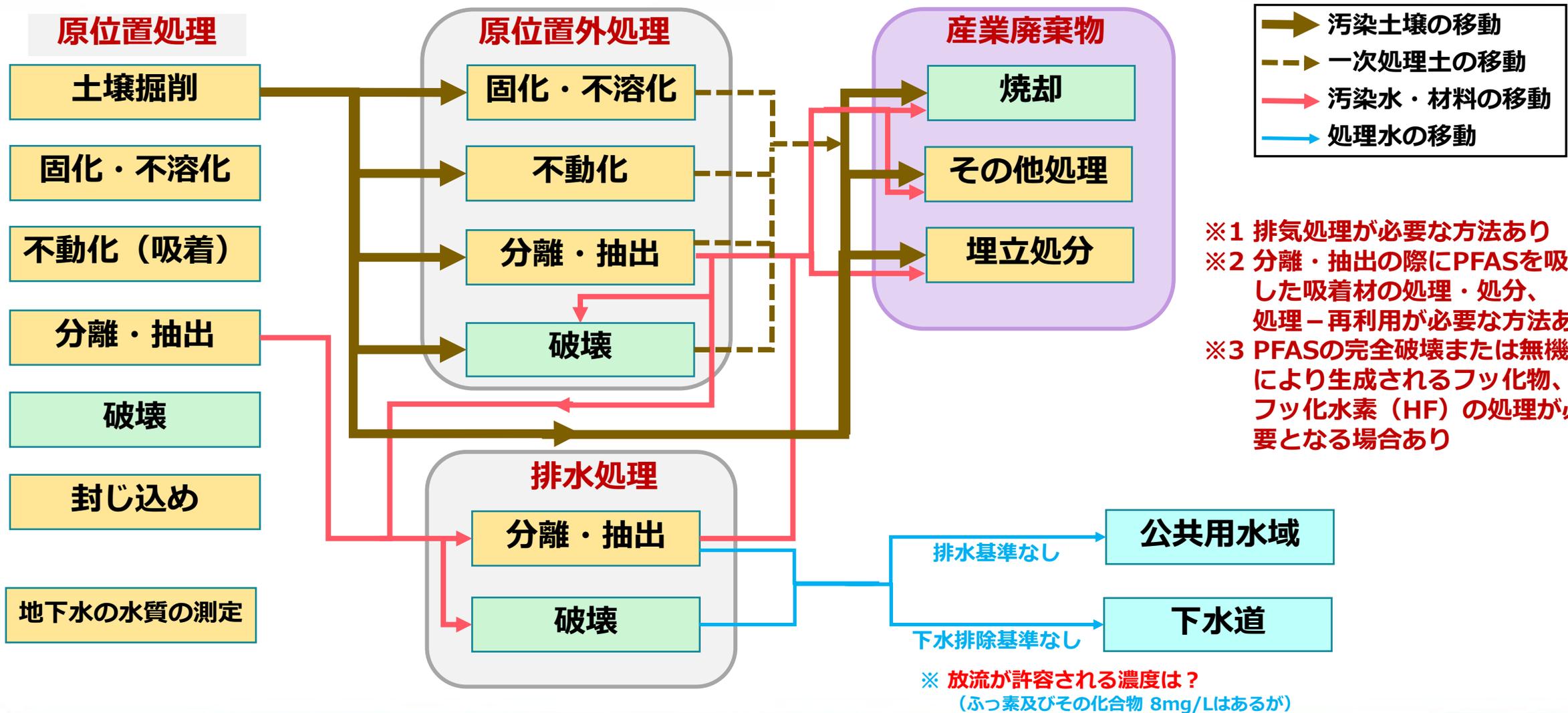
- 土壌・地下水汚染に起因する汚染物質の人が摂取する環境媒体までの移動をなくす
  - 封じ込め、固定化・不溶化、地下水汚染の拡大の防止（透過性地下水浄化壁、バリア井戸）
  - 盛土、被覆、土壌入れ換え

### ● 土壌浄化・地下水浄化

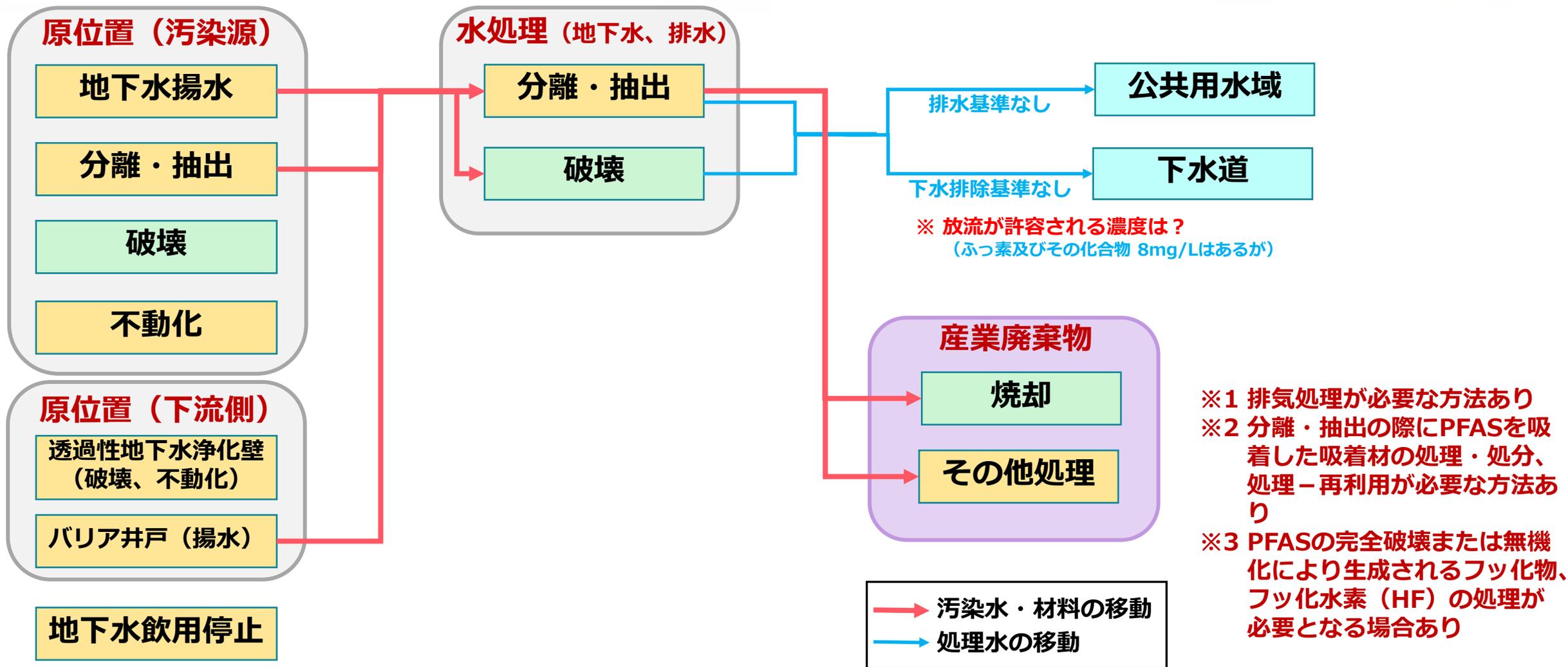
- 人が摂取する段階で環境媒体中の汚染物質濃度が問題のないレベルとなるよう汚染源における土壌・地下水の汚染濃度を低下させる
  - 土壌浄化：分離・抽出、分解（変換）
    - ✓ 原位置処理、原位置外処理（オンサイト処理、オフサイト処理）
  - 地下水浄化：分離・抽出、分解（変換）
    - ✓ 原位置処理、原位置外処理（通常はオンサイト処理）

中島 (2024)

# PFASによる土壌汚染の対策（地下水の摂取等によるリスクに対して）



# PFASによる地下水汚染の対策



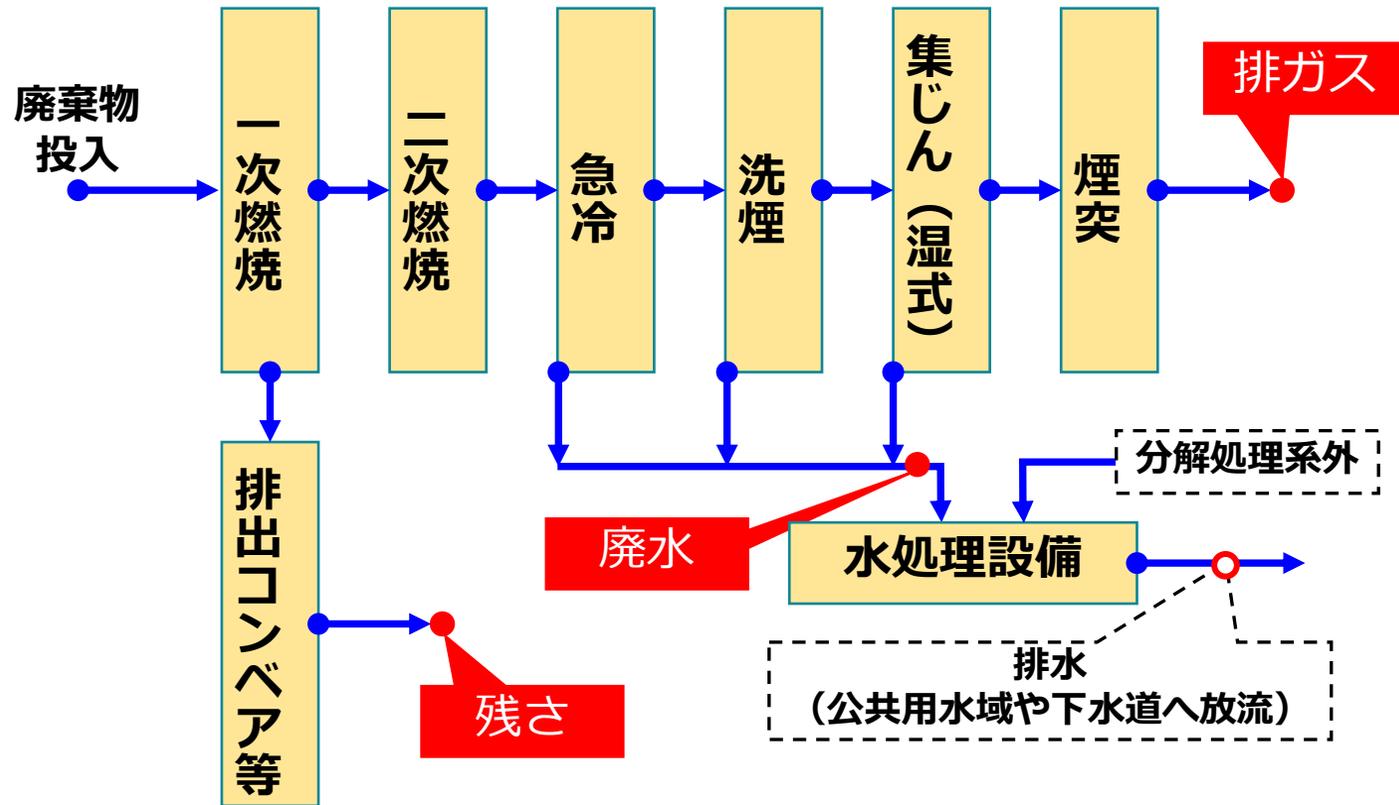
# PFOS・PFOA含有廃物の処理①



## 分解処理

- 分解処理方法
  - PFOS等又はPFOA等が確実に分解される方法で実施すること
    - 現時点では、焼却処理（PFOS含有廃棄物： $\geq$ 約850℃、PFOA含有廃棄物： $\geq$ 約1,000℃（ $\geq$ 約1,100℃以上を推奨））が該当（燃焼ガスの十分な滞留時間の確保が必要）
- 事前確認試験の実施
  - 個々の分解処理施設において実際に処理するPFOS含有廃棄物又はPFOA含有廃棄物を用いた確認試験を行い、PFOS等及びPFOA等の分解効率が99.999%以上であること、及び、管理目標値を達成していることを確認すること
- 分解処理の実施
  - PFOS等及びPFOA等の分解処理が適切に行われたことを確認するため、管理目標値の設定を行うこと。また、事前確認試験の実施後は、定期的に以下の①、②の確認を行うこと
    - ① 分解処理に伴い生じる排ガス、廃水、残さ中のPFOS等及びPFOA等のそれぞれの濃度があらかじめ設定した管理目標値を超えない
      - ✓ 濃度が50mg/kg未満のPFOS含有廃棄物又はPFOA含有廃棄物の場合、処理施設の構造や規模等に起因して分解効率99.999%以上の確認が出来ない場合は、必ずしも要しないこととできる
    - ② 分解処理に伴い生じる排ガス中のフッ化水素（フッ素及びその化合物として）の濃度が、5 mg/m<sup>3</sup>N（CFC破壊処理ガイドライン（H11.3改訂）に基づく排出基準）を超えない  
「PFOS及びPFOA含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項」（2022.9、環境省）

# PFOS・PFOA含有廃物の処理②



焼却炉の構造と廃水、排ガス、残さのイメージ

## 管理目標

- 投入する廃棄物中のPFOS等及びPFOA等の濃度に応じた値の設定を行うことが基本
- 投入する廃棄物中のPFOS等及びPFOA等の濃度を10,000mg/kgとした場合の管理目標値の一例（管理目標参考値）
  - 排ガス 60 ng/m<sup>3</sup>N
  - 廃水 1 µg/L
  - 残さ 5 µg/kg-dry
- 分解処理に伴い生じる排ガス等のフッ化水素の管理目標値
  - 排ガス 1 mg/m<sup>3</sup>N（より低い値が望ましい）
  - 排水 ふっ素及びその化合物の排水基準（8mg/L（海域15mg/L））以下

「PFOS及びPFOA含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項」（2022.9、環境省）

# 土壌中のPFASの浄化技術の比較



修復		位置	メカニズム	長所	短所
分類	仕様				
不動化	活性炭（粒状、粉末）	原位置	静電相互作用、イオン交換、疎水性相互作用	大容量、簡単な操作、低コスト	他の化合物の存在による低効率
	バイオ炭	原位置	静電相互作用、イオン交換、疎水性相互作用	持続可能性、簡単な操作、低コスト	低容量、生物分解
	鉱物	原位置	静電相互作用、疎水性相互作用	持続可能性、低コスト	低容量
分離	土壌洗浄	原位置外	水・有機溶剤中での高PFAS溶解度	高除去効率	高コスト、二次処理必要
	土壌液体分別	原位置	土壌液体分別、泡沫分離	高除去効率	高コスト、二次処理必要
	ファイトレメディエーション	原位置	生物蓄積	混乱の低さ、低コスト、モニタリング容易	二次処理必要、根の深さに依存性、植物種による、低速度
破壊	熱処理	原位置外	燃焼、熱分解	高分解	高コスト、土壌への混乱
	化学的酸化	原位置 原位置外	水中での化学的酸化	幾らかのPFASの高分解、穏やかな操作状態	土壌と薬剤の特性に依存、部分的分解、低速度
	酵素的腐植化	原位置	酵素触媒酸化腐植化反応	混乱の低さ、低コストと大きな処理体積	土壌特性に依存、部分的分解、低速度
	超音波	原位置	ヒドロキシラジカル（ $\cdot\text{OH}$ ）による酸化	高効率	高コスト、化学薬品添加必要、PFASの特性に依存
	ボールミル破壊	原位置外	密閉空間での化学反応	高分解、低コスト	低速度と小さな処理体積

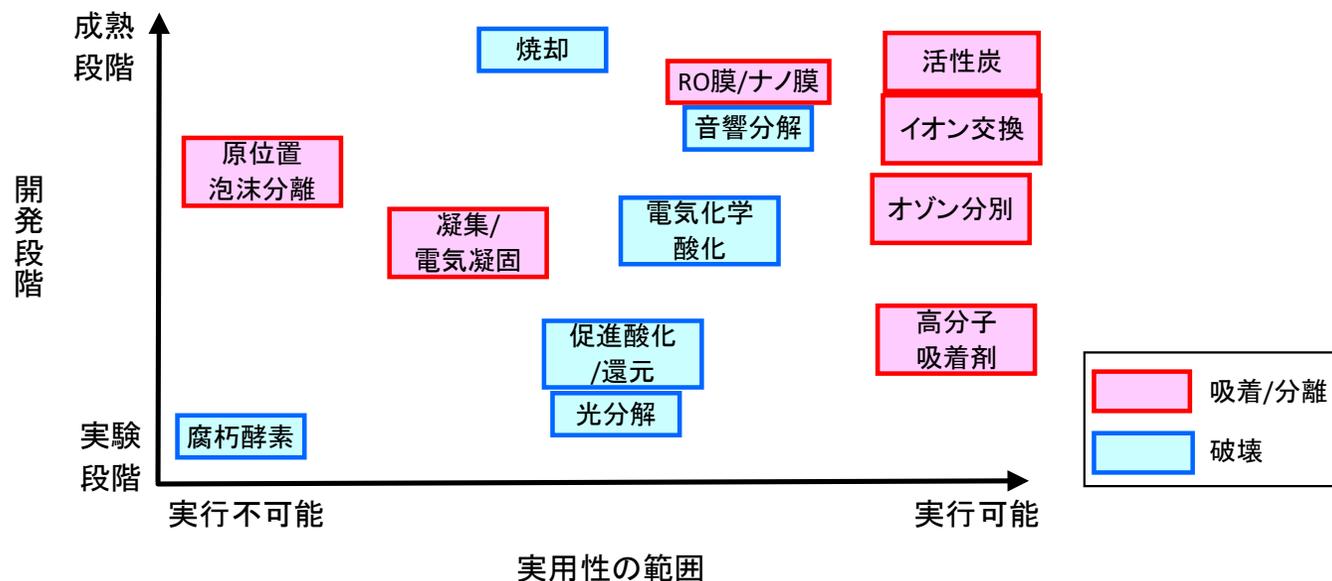
Wang et al. (2023)より一部抜粋・加筆

# 土壌・地下水の新興処理技術

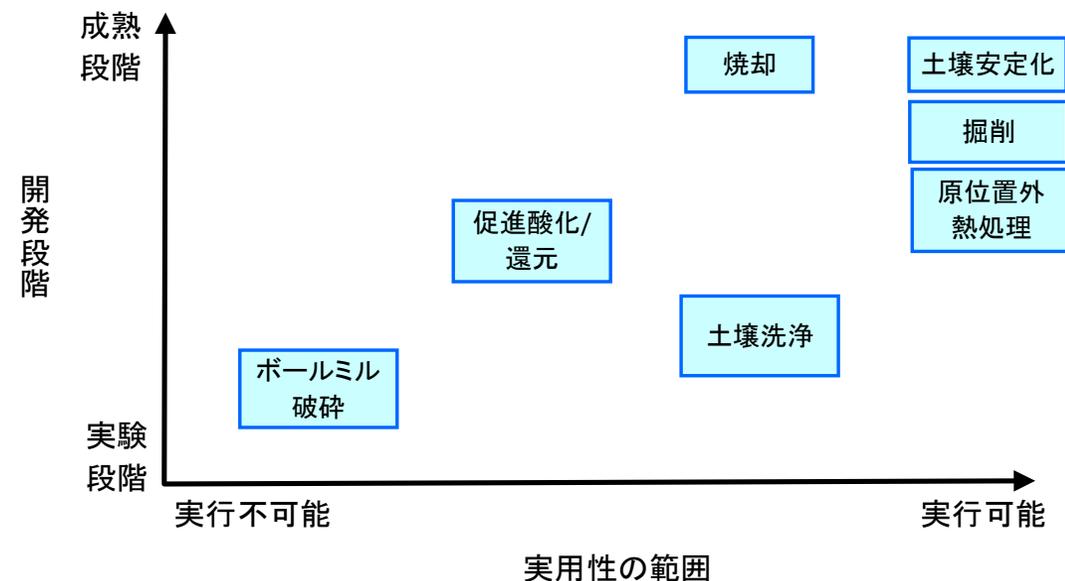


## 技術の実用性と開発段階による散布図 (2018年のレビュー論文)

- 実行可能な成熟段階のPFOA処理技術 (他のレビュー論文でもほぼ同様の評価)
  - 水処理 – 吸着 (活性炭吸着、イオン交換樹脂)、膜分離 (RO膜、ナノ膜)
  - 土壌処理 – 掘削・焼却



### 水のPFAS処理技術



### 土壌・堆積物のPFAS処理技術

Ross et al. (2018)

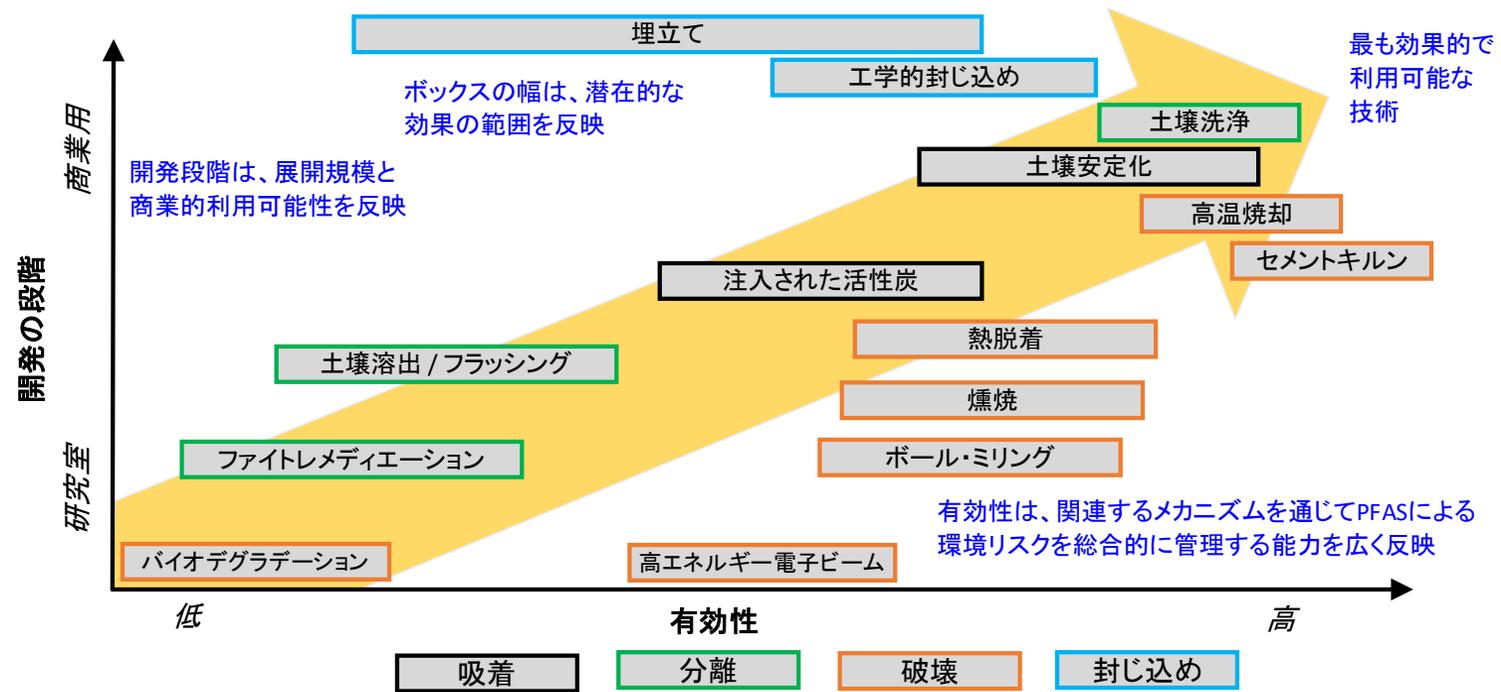
# 土壌のPFAS処理技術



## 最新のレポートにおける技術の有効性と開発段階による散布図（2023年12月までの情報による）

### 現場導入技術と革新的技術

現場に導入された技術	革新的な技術
<b>破壊的なアプローチ</b> 高温焼却 セメントキルン焼却 原位置外熱脱着 燻焼	<b>破壊的なアプローチ</b> ボール・ミリング 高エネルギー電子ビーム ファイトレメディエーション バイオデグラデーション
<b>非破壊的なアプローチ</b> 原位置外土壌洗浄 安定化・固化	<b>非破壊的なアプローチ</b> 原位置土壌洗浄
<b>経路管理アプローチ</b> 埋立て オンサイト工学的封じ込め	



### 土壌のためのPFAS処理技術の有効性と開発段階からの評価

Concawe (2024)

# 国際航業(株)の取り組み (PFAS汚染対策技術の開発・実用化)

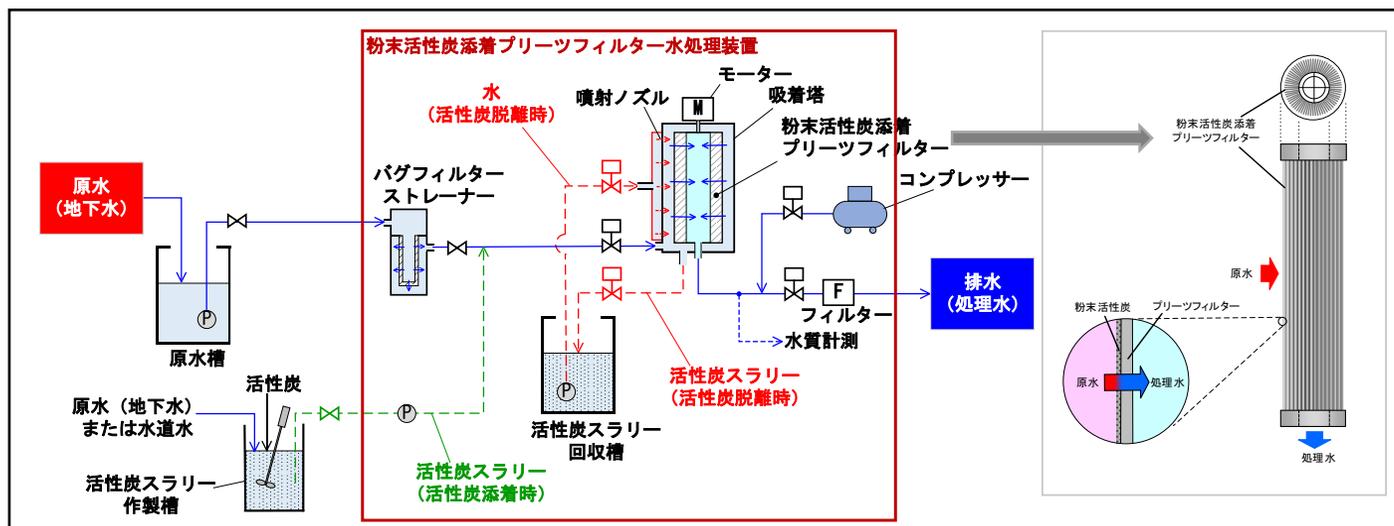


## 原位置浄化 (分解、分離・抽出)

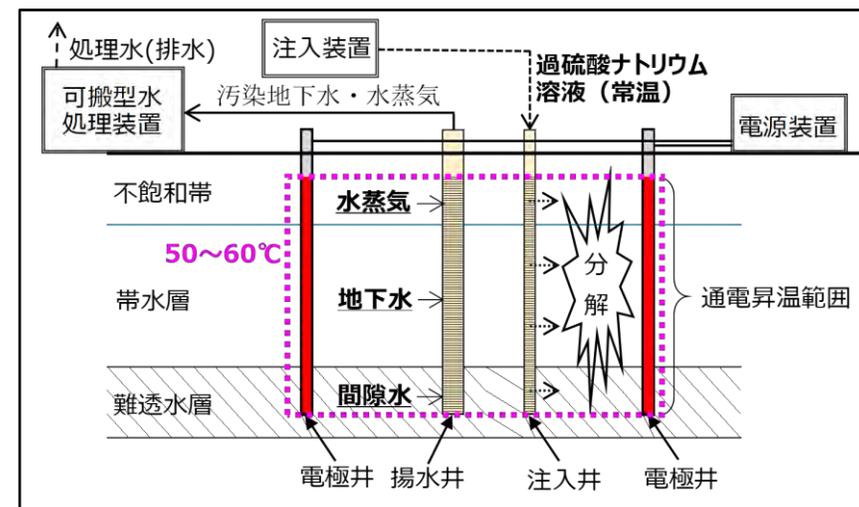
- 原位置化学的酸化分解 (電気発熱法 + 熱活性過硫酸法)
- 原位置土壌洗浄 (注水・揚水法 (+アルカリ水)、電気発熱法 + 注水・揚水)
- 地下水揚水処理 (揚水、溶出促進 + 揚水)

## 地下水処理

- 粉末活性炭吸着 (粉末活性炭添着プリーツフィルター水処理装置)
- 化学的酸化分解 (熱活性過硫酸法、オゾン + 紫外線 etc.)



地下水揚水 (汚染源井戸、バリア井戸) や原位置土壌洗浄における粉末活性炭添着プリーツフィルター水処理装置を用いた水処理の概念図



電気発熱法と熱活性過硫酸による化学的酸化分解の概念図

中島ら (2022, 2023a~c, 2024a・b) , 中島・佐藤 (2024) , 佐藤 (2024) , 佐藤ら (2020, 2021, 2024a・b)

# 9 今後の課題と展望



PFASによる土壌・地下水汚染について、PFASの土壌・地下水中での挙動特性、世界およびわが国で把握されている土壌・地下水汚染の実態について整理するとともに、調査および対策の方法について現状を整理・検討した。

- PFOS、PFOAなどを対象とした全国的な地下水質モニタリングの進捗により、これらのPFASによる地下水汚染の顕在化および汚染状況の変化に関する知見の蓄積がさらに進むことが予想される
- 環境省より土壌中のPFOS、PFOA、PFHxSの暫定測定方法（溶出量試験）が示されたことを受け、土壌の汚染状態に係る調査が行われるようになり、土壌汚染の顕在化が急激に急速で進むことが予想される（PFHxSなど、他のPFASへの対応が検討課題）
- 汚染源付近での地下水、土壌の調査が行われるようになり、これまでに把握・報道されてきたより数オーダー高い土壌や地下水のPFAS濃度が検出されるようになる可能性が高く、落ち着いた対応をとることができるよう、リスクコミュニケーションがより重要になることが予想される
- 地下水汚染機構の解明、土壌・地下水汚染状況の将来予測、土壌・地下水汚染対策における対策方法の選択、浄化効果の評価においては、規制対象となるPFASの前駆物質や変換後の生成物も含めてPFASの測定も行い、総合的に評価することが有効かつ必要であると考えられる
- 土壌・地下水汚染対策においては、汚染源における高濃度の汚染土壌の浄化技術（原位置、原位置外）や高濃度汚染水の浄化・拡散防止技術の国内での実用化が課題となっており、それらの対策により生じる排水・排気・廃棄物の許容レベルの設定や処理技術の整備も必要であると考えられる – 欧米では、実証試験段階から実用化段階に進んだ技術が商業化され始めている

# 4

## 海外のPFAS汚染に対する 対応の状況



# ドイツの地下水汚染への対応①（優先物質、しきい値、健康勧告レベル）

## 地下水汚染への対応

- 地下水に関して13種類のPFASの優先物質リストを設定
  - 7物質：ヒトの毒性学的データに基づき、しきい値 (Insignificance threshold values) を設定
  - 6物質：評価データが不十分なため、健康勧告レベル (HAL: health advisory levels) を定義
- ※ 測定不可能なPFASについては、0.1 µg/Lの値の使用を推奨
- しきい値が設定されているPFASが複数存在する場合は、指数の和を使用

$$Quotient\ sum = \frac{PFC_1}{GFS_1} + \frac{PFC_2}{GFS_2} + \dots + \frac{PFC_n}{GFS_n}$$

ここで、 $PFC_{1\sim n}$ ：PFAS濃度、 $GFS_{1\sim n}$ ：しきい値

- Quotient sum > 1のとき、地下水に有害な変化が生じていると考えられる
- HALはガイドライン値であり、この値を超えると、飲料水評価に有効で、地下水質の有害な変化を示す

	しきい値 (µg/L)	HAL (µg/L)
PFBA	10.0	
PFPeA		3.0
PFHxA	6.0	
PFHpA		0.3
PFOA	0.1	
PFNA	0.06	
PFDA		0.1
PFBS	6.0	
PFHxS	0.1	
PFHpS		0.3
PFOS	0.1	
PFOS		0.1
PFNA		0.1
PFDA		0.1



# ドイツの土壤汚染への対応①（発動値）

## 土壤汚染による地下水経由の影響への対応

- 不飽和帯の土壤の代表試料を用いて、液/固比 = 2:1の溶出試験および浸透試験を実施することを推奨
- 前駆物質からの変換の可能性の評価はしばしば困難。そのようなPFASはリスク評価において考慮する必要あり
- PFASに対する法的拘束力のある発動（trigger）値が施行されるまでは、しきい値が評価地点の浸出水の発動値として適用される
  - 2023/8/1 新しい規制（Mantelverordnung）が発行し、PFASの拘束力ある試験値が導入された（ドイツ土壤連邦法に基づく連邦土壤保護条例（BBodSchV）に導入）
- 複数PFASが存在する場合、指数の和（Quotient sum）による評価は追加されない
- まだ評価されていないPFASについては、ALARA（As Low As Reasonably Achievable：合理的に達成可能な限り低く）の原則により、単一化合物当たり0.1 µg/Lの発動値の使用が提案されている
- 提案された発動値を超えた場合、差し迫ったリスクの決定には至らず、さらなる評価が開始される（連邦土壤法第9条第2項に従い、さらなる調査が必要となる）

	しきい値 (µg/L)
PFBA	10.0
PFPeA	—
PFHxA	6.0
PFHpA	—
PFOA	0.1
PFNA	0.06
PFDA	—
PFBS	6.0
PFHxS	0.1
PFHpS	—
PFOS	0.1
PFOS	—
PFNA	—
PFDA	—



# ドイツの土壤汚染への対応②（土壤の再利用時の取扱い）

## 土壤材料の再利用時の取扱い

- PFAS汚染の兆候または証拠がある地域から搬出される土壤材料は、一般に、化学分析を受ける必要がある
- 土壤材料の回収の無害性に関する一般的な要件が様々な**再利用クラス (Recovery class)** について定められており、再利用クラスには固形分と溶出液の両方の配分値が含まれる
  - 現在までのところ、PFASに対応する配分値は得られていない
- PFASを含む土壤材料の再利用は、**溶出値に基づき**、3つの再利用クラスに分類されている
  - 再利用クラス（VK：Verwertungskategorien）
    - **再利用クラス1（VK1）**：無制限の開放型場所での再利用
    - **再利用クラス2（VK2）**：PFAS濃度が高い地域での開放型場所での再利用
    - **再利用クラス3（VK3）**：安全対策が定められた技術的構造物における再利用
- VK1およびVK2のPFAS汚染土壤材料は、一般的に、同じ分類またはより高い分類のサイトにのみ移動できる（= **再利用先の土壤の汚染状態を悪化させない**）
  - 可能な移動： VK1⇒VK1・VK2・VK3、 VK2⇒VK1・VK2、 VK3⇒VK3



# ドイツの土壤汚染への対応③（土壤の再利用クラス）

再利用クラス	取扱い
<b>VK 1</b> 制限なしの開放型定置	<b>技術構造物の外部および内部で、開放型の定置場所において、制限なく土壤材料を再利用できる</b> <ul style="list-style-type: none"><li>・土壤に有害な変化が生じることを懸念させるものであってはならない</li><li>・土壤材料が<b>しきい値またはHAL値</b>を超えていない場合、土壤のような用途や技術的構造物に組み込むことができる</li></ul>
<b>VK 2</b> PFAS濃度が高い地域での制限された開放型定置	<b>根が侵入可能な土壤層、土壤のような領域、および技術構造物内と同様の範囲において、特定の条件下でPFAS濃度が上昇した範囲でのみ土壤材料を再利用できる</b> <ul style="list-style-type: none"><li>・PFAS濃度が高い地域では、個々のケースで適切かつ安全な回収が実証された場合、溶出液中の汚染物質濃度が<b>しきい値またはHAL値の2倍まで</b>のVK2土壤材料は、制限された開放型の定置で、これらのゾーン内で再利用することができる</li><li>・サイトの条件、特に地質学的・水文地質学的条件、下層土と周辺地域の自然的土壤機能、および既存のPFASレベルが考慮される必要あり</li><li>・再利用する現場の状況を悪化させてはならない</li><li>・予想される地下水位までの距離は、少なくとも1.0 mに安全距離0.5 mを加えたものである必要あり</li></ul>
<b>VK 3</b> 明確な安全対策が行われた技術的構造物での制限された定置	<b>安全策が講じられた技術構造物内でのみ、土壤材料を再利用できる</b> <ul style="list-style-type: none"><li>・短鎖化合物の移動度（<b>5倍</b>を適用）と土壤中の長鎖化合物の上昇遅延（<b>10倍</b>を適用）を考慮</li><li>・予想される地下水位までの距離は、少なくとも1.0 mに安全距離0.5 mを加えたものである必要あり</li></ul>



# ドイツの土壤汚染への対応④ (再利用クラスごとの予備最大許容濃度)

再利用クラスに対する液：固比2:1溶液中の予備最大許容濃度 (μg/L)

(a) しきい値に基づく値

物質	VK 1	VK 2	VK 3
PFBA	≦ 10.0	≦ 20.0	≦ 50
PFHxA	≦ 6.0	≦ 12.0	≦ 30
<b>PFOA</b>	<b>≦ 0.1</b>	<b>≦ 0.2</b>	<b>≦ 1</b>
PFNA	≦ 0.06	≦ 0.12	≦ 0.6
PFBS	≦ 6.0	≦ 12.0	≦ 30
PFHxS	≦ 0.1	≦ 0.2	≦ 1
<b>PFOS</b>	<b>≦ 0.1</b>	<b>≦ 0.2</b>	<b>≦ 1</b>

(b) HALに基づく値

物質	VK 1	VK 2	VK 3
PFPeA	≦ 3.0	≦ 6.0	≦ 15
PFHHPA	≦ 0.3	≦ 0.6	≦ 30
PFDA	≦ 0.1	≦ 0.2	≦ 1
PFHpS	≦ 0.3	≦ 0.6	≦ 3
FTSA	≦ 0.1	≦ 0.2	≦ 1
PFOSA	≦ 0.1	≦ 0.2	≦ 1
Other PFAS	≦ 0.1	≦ 0.2	≦ 1

- **VK2** : VK1の2倍
- **VK3** : 短鎖化合物はVK1の5倍、長鎖化合物はVK1の10倍

# オランダの土壤汚染への対応① (土壤・浚渫土中のバックグラウンド値)



## 土壤、浚渫土中のPFASのバックグラウンド値

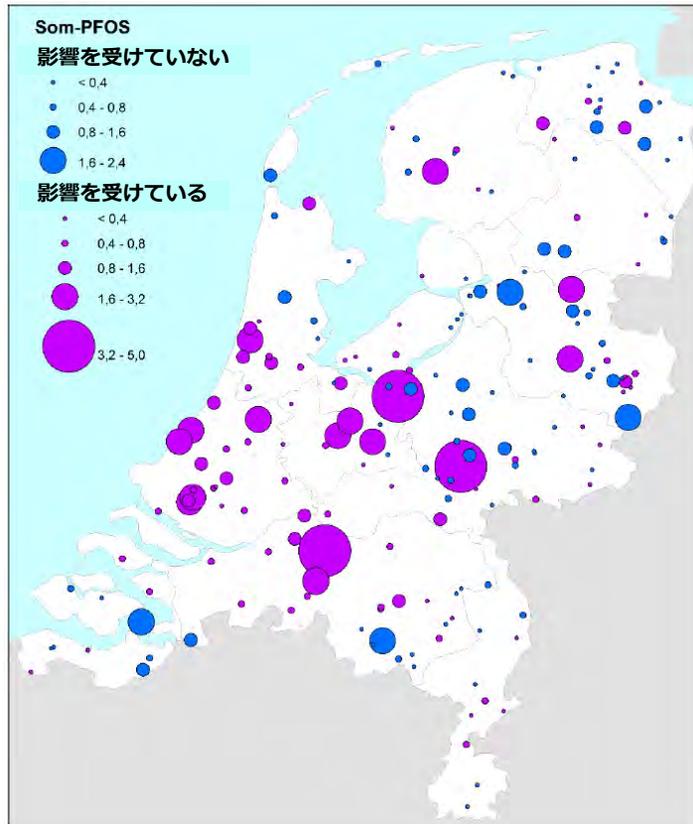
- 土壤や浚渫土中のPFASの濃度がバックグラウンド値を超えない場合、土壤品質法令の原則に従えば、どのような機能にも適しており、どこにでも適用できる（農業地域や自然地域でも利用可能）
  - 2019年 土壤中の暫定バックグラウンド値 PFOS : 0.9 µg/kg、PFOA : 0.8 µg/kg
    - 農業地域・自然地域の土壤
  - 2020年 土壤中のバックグラウンド値 PFOS : 1.4 µg/kg、PFOA : 1.9 µg/kg
    - 農業地域・自然地域100地点、都市部・工業地帯：100地点の深さ0～20 cm、50～100 cmの土壤を調査（PFOS、PFOA）
      - ✓ 調査結果：50～100 cmの土壤 < 0～20 cmの土壤、農業地域・自然地域 < 都市部
    - TOP（酸性前駆体）、GenXについて追加100試料の調査 ⇒他のPFASとの相関性なし

# オランダの土壤汚染への対応②（土壤のPFOS、PFOAの濃度分布）

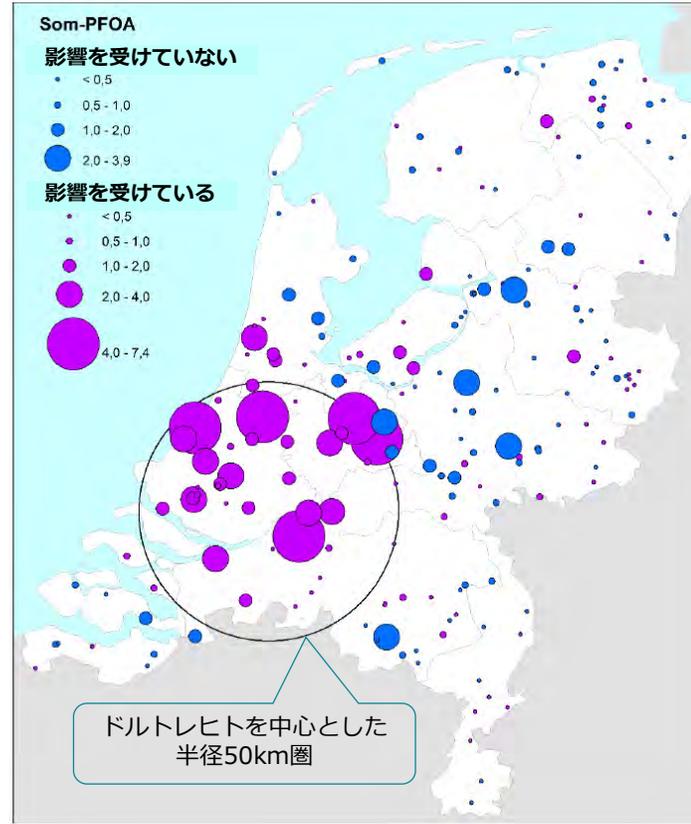


## 土壤、浚渫土中のPFASのバックグラウンド値

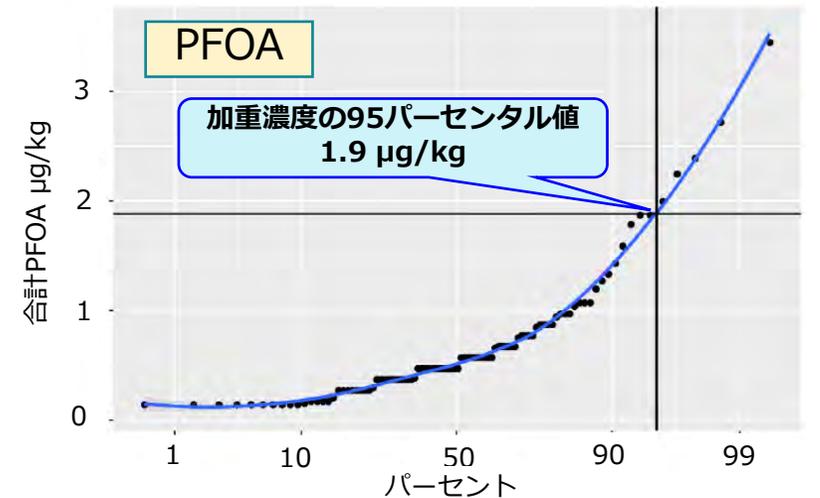
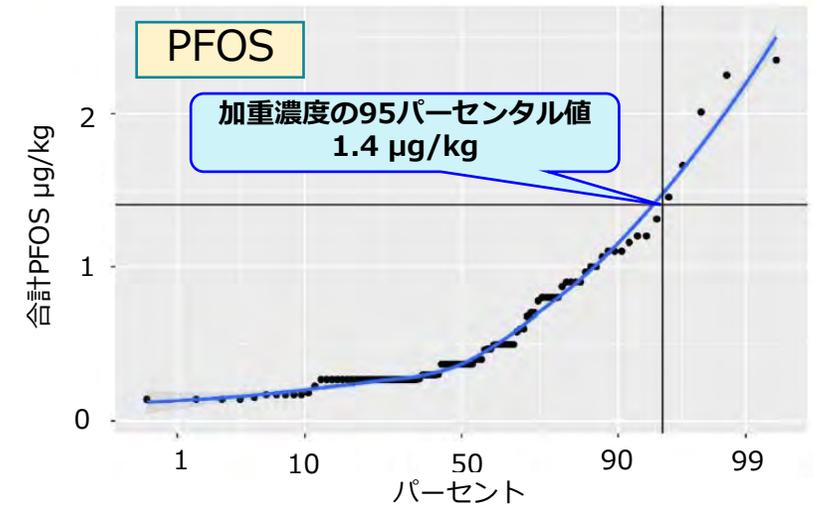
- 土壤や浚渫土中のPFASの濃度



表土の合計PFOS濃度 (µg/kg-乾土)



表土の合計PFOA濃度 (µg/kg-乾土)



バックグラウンド値サイト（表土）濃度分布  
Wintersen, A. et al. (2020)



# 米国、ドイツ、オランダの地下水の基準・ガイダンス値の比較

## 地下水中のPFASのための基準・ガイダンス値 (µg/L) (2024年4月 (RSLは5月) )

	C数	米国 (RSL* <sup>1</sup> )	ドイツ (GFS* <sup>2</sup> )	オランダ (INEV* <sup>3</sup> )		C数	米国 (RSL* <sup>1</sup> )	ドイツ (GFS* <sup>2</sup> )	オランダ (INEV* <sup>3</sup> )
PFBA	4	18	10		HFPO-DA (Gen-X)	5	0.015		140
PFHxA	6	9.9	6		PFODA	18	800		
<b>PFOA</b>	<b>8</b>	<b>2.7×10<sup>-6</sup></b>	<b>0.100</b>	<b>170</b>	PFPrA	3	9.8		
PFNA	9	0.059	0.060		Bis(trifluoromethylsulfonyl) amine TFSI	2	5.9		
PFUnDA	11	6.0							
PFDoDA	12	1.0							
PFTeDA	14	20							
PFBS	4	6.0	6						
PFBS-K	4	6.0							
PFHxS	6	0.39	0.100						
<b>PFOS</b>	<b>8</b>	<b>0.002</b>	<b>0.100</b>	<b>56</b>					
PFOS-K	8	0.002							

\*1 RSL : Regional Screening Level  
 \*2 GFS : Significance Thresholds  
 \*3 INEV : Indicative Levels for Severe Pollution

● **PFOS、PFOAについて**  
 RSL (米国) <<GFS (ドイツ) <<INEV (オランダ)



# 米国の土壌・地下水の地域スクリーニングレベル (RSLs)

米国 U.S.EPAの土壌の地域スクリーニングレベル (RSLs、単位 : mg/kg) (2024年5月改訂版)  
(目標発がんリスク (TR) = 10<sup>-6</sup>、目標ハザード比 (THQ) = 1としたとき)

物質	C数	スクリーニングレベル		地下水SSLsの保護	
		居住地 土壌	工業地 土壌	リスクに基づく SSL <sup>*1</sup>	MCL <sup>*2</sup> に基づく SSL <sup>*1</sup>
PFBA	4	78	1,200	0.0065	
PFHxA	6	32	410	0.0024	
<b>PFOA</b>	<b>8</b>	<b>0.000019</b>	<b>0.000078</b>	<b>0.00000004</b>	<b>0.000061</b>
PFNA	9	0.19	2.5	0.00025	0.000042
PFUnDA	11	19	250	0.045	
PFDoDA	12	3.2	410	0.17	
PFTeDA	14	63	820	9.4	
PFBS	4	19	250	0.003	
PFHxS	6	1.3	16	0.00017	0.0000042
<b>PFOS</b>	<b>8</b>	<b>0.0063</b>	<b>0.058</b>	<b>0.000015</b>	<b>0.00003</b>
HFPO-DA(Gen-X)	5	0.23	3.5	0.000015	0.00001
PFODA	18	2,500	33,000	220	
PFPrA	3	39	580	0.0021	
TFSI	2	23	350	0.0019	

※本ページでは、U.S.EPAによりRSLsが公表されているPFASのうち、地下水のRSLsが公表されている16物質を取り上げ、土壌のRSLsを示した。他に18種類のPFASについても土壌のRSLsが示されている。

RSLには法的な強制力はなく、州ごとに基準項目を設定し、基準値やガイドライン値が定められている

\*1 SSL : Soil Screening Levels for Superfund Sites、\*2 MCL : Maximum Contaminant Level (飲料水の最大汚染レベル)

# 欧州（EC）の地下水質基準（QS）改正案



## 地下水指令（GWD、Directive（指令）2006/118/EC）の改正案（2024年6月19日）

- 欧州委員会（EC）からの改正案の提案（COM(2022) 540 final）が欧州評議会（Council of Europe）で一部変更され、合意されたもの

### ● 地下水質基準

- Sum of PFAS（PFAS合計）： 0.1  $\mu\text{g/L}$ 
  - PFSA: PFBA, PFPA, **PFHxS**, PFHpA, **PFOA**, **PFNA**, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTrDA
  - PFCAs: PFBS, PFPS, PFHxA, PFHpS, **PFOS**, PFNS, PFDS, PFUnDS, PFDoDS, PFTrDS
- Sum of 4 PFAS（4 PFAS合計）： 0.0044  $\mu\text{g/L}$ 
  - **PFHxS**, **PFOS**, **PFOA**, **PFNA**

※ これらの基準項目、基準値は、EU飲料水指令を参照し設定されており、飲料水指令の設定が変更されればそれが反映される

# 米国のCERCLAによる法規制①（PFOA、PFOSの有害物質指定）



## CERCLA（包括的環境対処補償責任法、通称「スーパーファンド法」）

### ● 内容

- 政府が浄化対策を実施する権限をもち、**汚染サイト**に関する**潜在的責任当事者**を特定して、責任を負わせる
- **政府ファンド（スーパーファンド）**を用いて早期に対策を行う
- 汚染責任者が特定されない場合は、汚染に関与したすべての者が**潜在的責任当事者（PRP：Potential Responsible Parties）**に指定され、費用負担が強制される

### ● PFASへの対応

- **PFOA、PFOSおよびそれらの塩および構造異性体**を有害物質に指定（2024/7/8発行）
  - 汚染者の責任を問うツールを提供
  - 費用回収および執行当局の放出への対応が可能（汚染者が調査・浄化費用を確実に支払う）
  - 事業体に対して、**裁量対象量（RQ。規定報告数量として 1ポンド（453.6g） / 24時間が割り当て）**以上のPFOAおよびPFOSの放出を直ち（24時間以内）に報告することを義務付け
  - 財産を譲渡または売却する連邦機関に対し、その財産におけるPFOAまたはPFOSの保管、放出または処分についての通知（その結果生じる汚染を除去したまたは除去することを保証する規約（証書の制約）を含む）を義務付け
  - 運輸省に対して、危険物輸送法に基づく**これらの物質の危険物としてリスト化、規制を要求**

# 米国のCERCLAによる法規制② (PFOS、PFOA汚染サイトの浄化責任)



## CERCLA 第107条(a)

- 以下のカテゴリーに属する者は、CERCLAに基づき、有害物質の浄化費用または浄化の実施について責任を負う可能性がある
  - 有害物質が**存在**することになる施設の現在の所有者および運営者
  - 施設で有害物質が**廃棄**された当時の施設の所有者および運営者
  - 発生源および有害物質の**処分**または**輸送**を手配した関係者
  - 有害物質が持ち込まれた**場所を選択**した有害物質の運搬者

## CERCLAに基づくPFAS執行裁量および和解政策 (2024.4.19)

- EPAは、公平さに基づき、以下の当事者に対してCERCLAに基づくPFAS対応措置や費用を追及するつもりはない
  - 地域水道システムと下水処理場 (POTW)
  - 市町村分離暴風雨下水道システム (MS4)
  - 公有または運営されている都市固形廃棄物処分場
  - 公営空港および地元消防署
  - バイオソリッドを土地に散布する農場



情報をつなげる力で、  
人・社会・地球の未来をデザインする

