

# PFAS処理技術の — 最新動向 —

各国規制の現状、分離・分解・除去・回収・吸着・浄化技術、  
分析法、今後の課題

# 執筆者紹介

## 序章

堀 久男 神奈川大学 理学部 教授／工学博士

## 第1章

### 第1節

#### 第1項

玉虫 完次 エンバイロメント・ジャパン株式会社 代表取締役  
／米国Ph.D. (化学)

#### 第2項

後藤 嘉孝 株式会社みずほ銀行 総合研究所 マネジャー

### 第2節

#### 第1項

後藤 嘉孝 株式会社みずほ銀行 総合研究所 マネジャー

#### 第2項

西 秀樹 西包装専士事務所 代表  
日本包装専士会 元会長

## 第2章

### 第1節

今野 大輝 東邦大学 理学部 生命圏環境科学科  
東邦大学大学院 理学研究科 環境科学専攻 准教授  
／博士 (工学)

大河 佑貴 東邦大学大学院 理学研究科 環境科学専攻

## 執筆者紹介

### 第2節

#### 第1項

- 古田 絢姿 室町ケミカル株式会社 化学品開発部 化学品技術2課  
前原加奈子 室町ケミカル株式会社 化学品開発部 担当部長  
島村 宗孝 室町ケミカル株式会社 化学品開発部 部長／博士（工学）  
出水 丈志 室町ケミカル株式会社 化学品1部 担当部長

#### 第2項

- 日高 次彦 三菱ケミカル株式会社 分離材事業部 イオンビジネスグループ  
マネジャー  
日本イオン交換学会 理事を兼任／博士（理学）

#### 第3項

- 横田 治雄 オルガノ株式会社 機能商品事業部 機能材料統括部 次長

#### 第3節

- 松本 道明 同志社大学 理工学部 教授／工学博士

#### 第4節

- 山内 仁 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 室長  
西村 章 株式会社流機エンジニアリング 取締役会長

#### 第5節

- 青山 章 WEF技術開発株式会社 代表取締役  
令和4年4月 旭日単光章 受章

#### 第6節

- 長縄 弘親 株式会社エマルションフローテクノロジーズ  
取締役C S O（Chief Science Officer）  
日本イオン交換学会・理事、レアメタル資源再生技術研究会・  
理事を兼任／理学博士

## 執筆者紹介

### 第7節

#### 第1項

山内 仁 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 室長

西村 章 株式会社流機エンジニアリング 取締役会長

#### 第2項

國井 聡 前田建設工業株式会社 ICI総合センター 環境技術グループ 主査

林 夕紀子 前田建設工業株式会社 ICI総合センター 環境技術グループ 担当

森川 純 前田建設工業株式会社 ICI総合センター 環境技術グループ 主査

芳賀 直樹 前田建設工業株式会社 ICI総合センター 環境技術グループ 主幹

## 第3章

### 第1節

#### 第1項

相浦 良徳 ウシオ電機株式会社 技術本部 研究開発部門  
新事業開発部 環境対策技術プロジェクト  
チーフエンジニア

大岩 正人 ウシオ電機株式会社 技術本部 技術戦略部門  
イノベーション・サポート部  
マーケティンググループ リーダー

大塚 優一 ウシオ電機株式会社 技術本部 研究開発部門  
新事業開発部 環境対策技術プロジェクト  
リーダー

## 執筆者紹介

### 第2項

竹内 希 東京科学大学 工学院 准教授／博士（工学）

### 第3節

小林 洋一 立命館大学 生命科学部 教授／博士（理学）

### 第2節

滝本 大裕 琉球大学 理学部 准教授／博士（工学）

## 第4章

### 第1節

古川 浩司 一般財団法人 三重県環境保全事業団 科学分析部 部長  
三重大学 非常勤講師を兼任／博士（工学）

### 第2節

柳澤 博幸 SGSジャパン株式会社 経営戦略部 主任技師  
東京科学大学（客員講師）を兼任／博士（工学）

# 目次

<b>序章 PFAS の定義・分類、規制、分解技術（総論）</b>	001
	神奈川大学 堀 久男
はじめに	002
1. PFASと有機フッ素化合物	002
2. 生体蓄積性の発見と規制の経緯	004
3. Legacy PFAS類の除去・分解技術	006
4. 先端PFAS類の分解・再資源化技術	008
4.1 亜臨界水とは	008
4.2 フッ素エラストマー	010
4.3 テトラフルオロエチレン・ヘキサフルオロプロペン共重合体（FEP）	011
4.4 PTFE	013
4.5 中性PFAS類	013
おわりに	014
<b>第1章 PFAS における各国規制と産業別に見た今後の展望</b>	019
<b>第1節 国別規制の動向</b>	020
<b>第1項 米国におけるPFAS 規制の動向</b>	020
	エンバイロメント・ジャパン株式会社 玉虫 完次
はじめに	020
1. 米国における化学物質関連規制の概要	020
1.1 連邦と州の役割分担と、成文法・コモンローの関係	020
1.2 連邦法と州法の関係	020
1.3 米国輸出時に対応すべき主な製品関連規制	021
1.4 環境・安全・衛生関連の主な連邦法規制	022
1.5 主な州法	023
2. PFAS規制の動向	024
2.1 米国連邦政府によるPFAS対応の概要	024
2.2 米国連邦法における主なPFAS規制動向	024
2.3 米国州法における主なPFAS規制動向	025
おわりに	026

<b>第2項 欧州PFAS規制</b>		029
	株式会社みずほ銀行 後藤 嘉孝	
はじめに		029
1. REACH規則におけるPFAS制限提案		029
1.1 加盟国におけるPFAS制限提案		029
1.1.1 対象物質		029
1.1.2 対象となる濃度		030
1.1.3 適用除外		030
1.1.4 用途ごとの適用除外		030
1.2 REACH規則におけるPFAS制限提案に対するRAC/SEAC案		034
1.3 今後の動向		036
2. 飲料水指令 (Directive (EU) 2020/2184)		036
<b>第2節 産業別マーケット</b>		039
<b>第1項 PFAS規制の最新動向と半導体業界への影響</b>		039
	株式会社みずほ銀行 後藤 嘉孝	
はじめに		039
1. 半導体産業におけるPFASの使用		039
2. 業界の対応		040
3. 半導体業界におけるPFASの環境排出		041
4. 欧州におけるPFAS規制の影響		042
5. 代替物質開発		043
<b>第2項 容器包装に使用されるPFASと国内外規制の最新動向</b>		047
	西包装専士事務所 西 秀樹	
はじめに		047
1. 容器包装に使用されるPFAS		047
1.1 PFASの概要		047
1.2 食品容器包装とPFAS		048
1.2.1 米国の報告例		048
1.2.2 フッ素系ポリマー		048
2. PFASの発がん性に関するリスク評価と日本の見解		049
2.1 国際がん研究機関 (IARC) の評価		049
2.2 日本の食品安全委員会の見解		049
3. 欧州連合 (EU) の規制動向		050
3.1 包装・包装廃棄物規則の公布		050
3.2 欧州化学品庁のPFAS規制案審議状況 (2023年2月)		050

3.2.1	当初の提案	050
3.2.2	パブコメ結果	051
3.2.3	一法) 日本弗素樹脂工業会のパブコメ	052
3.2.4	EU首脳の手簡	052
3.2.5	ECHAの再提案 (2025.08)	052
4.	米国の動向	054
4.1	高額和解訴訟と撥水紙への影響	054
4.2	米国環境保護庁 (EPA: Environmental Protection Agency)	054
4.3	州により異なる規制議論	055
5.	日本の規制	055
5.1	水道水の基準値	055
5.2	日本と欧米の対応の違い	055
6.	PFAS代替材料の開発例	056
	おわりに	057
<b>第2章 PFASにおける分離・回収技術と各種除去技術</b>		059
<b>第1節 金属有機構造体 (MOF) のPFAS吸着剤として可能性</b>		060
	東邦大学 今野 大輝・大河 佑貴	
	はじめに	060
1.	PFAS吸着剤としてのMOF	060
1.1	水処理用吸着剤として利用可能なMOF	060
1.2	MOFのPFAS吸着特性に及ぼす要因	061
1.3	MOFのPFAS吸着特性を向上させる手段	062
2.	欠損を生じさせたMOFのPFAS吸着剤としての応用	062
2.1	欠損形態の異なるUiO-66の合成と特性評価	062
2.2	欠損形態の異なるUiO-66のPFAS吸着特性評価	066
	おわりに	069
	謝辞	070
<b>第2節 イオン交換樹脂</b>		077
<b>第1項 PFAS除去を目的としたイオン交換樹脂の基礎と特長、最新のPFAS処理技術</b>		077
	室町ケミカル株式会社 古田 絢姿・前原 加奈子・島村 宗孝・出水 文志	
	はじめに	077
1.	実験手法	078
1.1	試薬	078
1.2	吸着材	078
1.3	分配係数試験	079

1.4	ライフ試験①	079
1.5	ライフ試験②	080
1.6	再生試験	080
2.	試験結果	081
2.1	分配係数試験	081
2.2	ライフ試験①	081
2.3	ライフ試験②	082
2.4	再生試験	083
3.	考察	083
	おわりに	084

## 第2項 イオン交換樹脂によるPFAS除去技術 087

三菱ケミカル株式会社 日高 次彦

	はじめに	087
1.	イオン交換樹脂の種類と特徴	087
1.1	物理構造による分類	087
1.2	化学構造による分類	088
2.	イオン交換樹脂によるPFAS除去メカニズム	089
3.	アニオン交換樹脂によるPFAS除去	089
3.1	強塩基性アニオン交換樹脂の物理構造によるPFAS吸着への影響	089
3.2	カラム通液によるPFAS除去性能の比較	090
3.3	アニオン交換樹脂によるPFAS除去まとめ	091
3.4	アニオン交換樹脂によるPFAS除去におけるPFAS構造の影響	091
4.	イオン交換樹脂を用いたPFAS除去の現状と課題	093
4.1	イオン交換樹脂によるPFAS除去の現状	093
4.2	イオン交換樹脂によるPFAS除去の課題	093
	おわりに	095

## 第3項 PFAS対応アニオン交換樹脂を用いた水処理設備 097

オルガノ株式会社 横田 治雄

	はじめに	097
1.	PFAS除去に適したイオン交換樹脂	097
1.1	イオン交換樹脂の分類	097
1.2	イオン交換樹脂によるPFAS除去メカニズム	098
1.3	PFAS除去に特化したイオン交換樹脂	098
2.	イオン交換樹脂を用いたPFAS除去設備	099
2.1	配慮すべきイオン交換樹脂特性	099

2.1.1	酸化剤	100
2.1.2	液温	100
2.1.3	懸濁物質	100
2.1.4	圧密	100
2.1.5	初期溶出	100
2.2	イオン交換樹脂の再生要否	100
2.3	管理と保守	101
2.4	PFAS除去を目的としたイオン交換樹脂設備運用例	101
	おわりに	101
 <b>第3節 イオン液体：イオン液体および深共晶溶媒を用いた PFAS の分離</b>		103
	同志社大学 松本 道明	
	はじめに	103
1.	抽出溶媒としてのイオン液体と深共晶溶媒	103
2.	イオン液体を用いたPFASの抽出分離	104
2.1	イオン液体生成反応を用いる均一液液抽出法	104
2.2	イオン液体を用いた液液抽出法	105
2.3	深共晶溶媒を用いた液液抽出法	108
	おわりに	108
 <b>第4節 MF膜・機能性粉体添着法（LFP法）—PFAS水処理のための新規吸着方式—</b>		111
	株式会社流機エンジニアリング 山内 仁・西村 章	
	はじめに	111
1.	PFAS水処理を取り巻く技術課題	111
1.1	規制強化と処理対象の拡大	112
1.2	短鎖PFAS、DOM、媒体差に起因する処理課題	112
2.	活性炭吸着法の運用構造	112
2.1	GAC固定床法	112
2.2	PAC混和法	113
2.3	LFP法の位置付け	113
3.	LFP法の構造と運転設計	113
3.1	膜上薄層添着による固定化吸着層の形成	113
3.2	添着・通水・洗浄・再添着による更新型連続運転	114
4.	試験概要および評価指標	114
5.	試験結果と考察	115
5.1	PAC混和法とのPFAS除去特性比較（BVに基づく比較）	115
5.2	競合吸着特性（複数PFAS種、DOMの影響）	116

5.3	吸着挙動の整理（Weber-Morrisモデルによる考察）	117
5.4	LFP法におけるPFAS除去メカニズムの特徴	118
6.	カートリッジ型LFP法とトリートメント・トレインへの接続 おわりに	118 120
<b>第5節</b>	<b>活性イオン凝集法（TERRAST）と活性酸素触媒法を組み合わせた PFAS分離・分解プロセスの処理特性評価</b>	<b>123</b>
	WEF技術開発株式会社 青山 章	
	はじめに	123
1.	活性イオン凝集法によるPFAS除去	123
1.1	処理原理（TERRAST技術）	123
1.2	凝集機構の考察	124
1.3	PFAS抽出試験方法	126
1.4	処理結果	126
2.	活性酸素触媒法によるPFAS分解	127
2.1	AOS（Advanced Oxidation System）Technology説明	127
2.1.1	背景と世界的課題	127
2.1.2	AOS技術の概要と革新性	127
2.1.3	既存技術との比較	128
2.1.4	各種活性酸素発生装置「AOS」	128
2.1.5	販売中の活性酸素利用装置	128
2.2	活性酸素生成機構（水中有機物処理の場合）	129
2.3	W-Gaiaによる水中有機物分解のイメージ	130
2.4	処理試験方法	130
2.5	処理結果	131
2.6	W-Gaia処理考察	131
3.	分離・分解2段階プロセスの提案	132
4.	今後の課題	132
	おわりに	132
<b>第6節</b>	<b>エマルションフローを利用したPFASの回収技術</b>	<b>133</b>
	株式会社エマルションフローテクノロジーズ 長縄 弘親	
	はじめに	133
1.	PFAS問題の本質と論点	134
1.1	工業排水と浸出水	134
1.2	短鎖PFASの問題	135
2.	エマルションフローとは	136

2.1	エマルションフロー現象	136
2.2	排水処理への溶媒抽出の適用（油水分離機能の付加）	138
3.	溶媒抽出が持つ革新性	139
3.1	高いロバスト性	139
3.2	適用できるPFAS濃度範囲（極低濃度から極高濃度まで）	139
3.3	適用できるPFASの種類（原理と実証）	140
4.	エマルションフローゆえの革新性	140
4.1	排水処理に利用できる環境調和性	140
4.2	PFASの高濃縮（PFAS分解での“鍵”）	140
5.	技術実証	141
6.	まとめ	142
	おわりに	144
<b>第7節 その他</b>		147
<b>第1項 MF膜・機能性粉体添着法（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</b>		147
	株式会社流機エンジニアリング 山内 仁・西村 章	
	はじめに	147
1.	土壌・地下水および処分場浸出水におけるPFAS浄化の技術課題	147
1.1	土壌・地下水汚染を対象とした技術上の課題	147
1.2	処分場浸出水を対象とした技術上の課題	147
2.	EUにおけるPFAS浄化の動向と本稿の位置づけ	148
3.	実機運転および実証試験の概要と評価方法	148
3.1	対象水の特性および運転・試験条件	148
3.2	評価指標	149
4.	地下水を対象としたPFAS実機運転・実証試験の結果と考察	149
4.1	実機運転と洗浄・再添着による更新	149
4.2	PFAS除去結果	150
4.3	除去挙動と影響因子の考察	151
5.	処分場浸出水を対象としたPFAS浄化実証試験の結果と考察	152
5.1	前処理条件とPFAS除去結果	152
5.2	除去挙動と影響因子の考察	152
6.	前処理・除去濃縮・破壊を連結したトリートメント・トレイン	153
6.1	システム構成とLFP法の位置づけ	153
6.2	前処理の構成	153
6.3	破壊技術への接続	153
6.4	実装・運用上の課題と対応策	154

おわりに	154
<b>第2項 PFOS 水処理技術の開発と現場力を活かした社会実装</b>	157
前田建設工業株式会社    國井 聡・林 夕紀子・森川 純・芳賀 直樹	
はじめに	157
1. 室内試験	157
1.1 振とう吸着試験	157
1.1.1 試験方法	157
1.1.2 吸着等温線による比較	159
1.2 循環式浄化方法の検討	160
1.2.1 試験方法	160
1.2.2 試験結果	161
2. 浄化工法検討	162
2.1 浄化装置構成	162
2.2 実機スケールでの循環浄化の検討	163
2.2.1 試験方法	163
2.2.2 試験結果	163
3. 社会課題の解決	165
3.1 可搬型水処理装置を用いた消火用貯水槽の浄化	165
3.1.1 「防衛省泡消火設備専用水槽水等PFOS等処分役務」での事例	165
3.1.2 「横須賀教育隊防火防水実習場防火用水槽水等PFOS等処分」での事例	167
3.2 漏出事故への緊急対策事例	167
3.3 水処理装置と現場力の融合事例	168
おわりに	169
<b>第3章 PFAS における分解・浄化技術</b>	171
<b>第1節 酸化還元</b>	172
<b>第1項 光分解 ～真空紫外光（エキシマランプ）を用いた PFAS 分解技術～</b>	172
ウシオ電機株式会社    相浦 良徳・大岩 正人・大塚 優一	
はじめに	172
1. エキシマ光、エキシマランプについて	172
2. エキシマランプによるPFAS分解	174
2.1 分解装置	174
2.2 PFOAの吸収スペクトル	176
2.3 分解メカニズム	176
2.4 各種PFASのUPDRでの分解挙動	177
2.5 不純物による分解速度低下要因	178

2.6 濃縮との組み合わせによる分解性能向上	178
おわりに	179
<b>第2項 プラズマを用いた PFOS およびその他 PFAS の高速分解技術</b>	181
	東京科学大学 竹内 希
はじめに	181
1. PFASの処理技術	181
2. 水中気泡内プラズマによるPFAS分解	182
3. PFAS濃縮による分解効率の向上	185
おわりに	186
<b>第3項 可視光線照射による PFAS、フッ素樹脂の分解</b>	189
	立命館大学 小林 洋一
はじめに	189
1. 既存のPFAS分解技術と課題	189
1.1 深紫外 (UVC) および真空紫外 (VUV) 光照射	189
1.2 超臨界水分解 (SCWO)	190
1.3 気泡プラズマ法	190
1.4 強塩基・加熱分解	190
2. 半導体ナノ結晶を用いたPFAS分解	190
2.1 反応設計の考え方	190
2.2 実験	191
2.3 結果と考察	192
2.3.1 PFOSの脱フッ素化挙動	192
2.3.2 ナノ結晶の繰り返し使用	194
2.3.3 分解メカニズムの考察	195
2.3.4 光誘起配位子交換と非線形光化学反応	196
2.4 ペルフルオロアルキルポリマーへの適用	197
おわりに	198
<b>第2節 ナノ空間材料を用いた流動電極による PFAS 電解技術の開発</b>	201
	琉球大学 滝本 大裕
はじめに	201
1. PFASの電気分解における反応機構	201
2. 電極材料の設計指針	203
2.1 酸化物材料を用いた電極開発	203
2.2 炭素ナノ材料を用いた電極開発	204

3. ナノ空間材料を利用した流動電極の着眼点	204
4. 流動電極を用いたPFAS電解	205
おわりに	206
<b>第4章 PFASにおける分析技術</b>	<b>211</b>
<b>第1節 製品・材料および環境中におけるPFAS分析の実務と留意点</b>	<b>212</b>
一般財団法人 三重県環境保全事業団 古川 浩司	
はじめに	212
1. PFASの構造特性と測定装置の選択	212
2. PFAS分析に用いられる試薬及び器具	214
2.1 試薬	214
2.1.1 精製水	214
2.1.2 メタノール	214
2.1.3 アセトニトリル	214
2.1.4 酢酸アンモニウム	214
2.2 器具	215
2.2.1 遠沈管、捕集容器	215
2.2.2 凍結粉碎装置	215
2.2.3 超音波抽出装置、遠心分離機、濃縮装置	215
2.2.4 固相カラム	215
2.2.5 標準品およびサロゲート	215
3. 製品、環境中のPFAS分析（前処理工程）	215
3.1 製品試料に対するPFAAおよびPFAEA分析の前処理方法	215
3.2 水試料（水道水、環境水、排水）に対するPFAS分析の試料採取と前処理方法	218
3.3 廃棄物に対するPFAS分析の試料採取と前処理方法	219
3.3.1 固形廃棄物の前処理方法	220
3.3.2 液状廃棄物の前処理方法	221
3.4 排ガス試料に対するPFOS及びPFOA測定の試料採取と前処理方法	221
3.5 作業環境中のPFAS測定の試料採取と前処理方法	222
4. 試験液の測定	224
4.1 LC/MS/MS測定	224
4.2 GC/MS/MS測定	228
4.3 測定結果の信頼性確保	230
4.3.1 装置及び操作ブランク試験	230
4.3.2 サロゲート物質回収率	231
4.3.3 検量線の直線性と真度	231
4.3.4 測定装置の安定性	231

4.3.5 低濃度標準液の併行精度	231
5. 実務上特に注意すべき事項	231
おわりに	231
<b>第2節 PFAS 規制強化時代における分析技術の現状と課題</b>	
<b>一 包括的管理に向けた新たなアプローチ</b>	235
	SGSジャパン株式会社 柳澤 博幸
はじめに	235
1. PFASの構造的特徴および規制における「塩・異性体・関連物質」の取扱い	235
1.1 ペルフルオロアルキル物質 (PFAS) の基本構造	236
1.2 塩 (Salts)	236
1.3 異性体 (Isomers)	237
1.4 関連物質 (Related Compounds)	237
2. 世界的な規制強化の流れ (EU・米国・日本)	238
3. LC/MSとLC-MS/MSの位置づけ	239
4. LC-MS/MSによるPFAS分析の限界と補完手法の紹介	240
5. 新たなアプローチとしての熱分解GC/MSの着想に至った経緯	241
6. 熱分解 GC/MS を用いたPFASの定性・定量分析法の検討	241
7. 熱分解 GC/MS に濃縮技術を組み合わせた微量 PFAS 分析法の開発	243
おわりに	245

# 序章

PFASの定義・分類、規制、  
分解技術（総論）

## はじめに

ここ数年、各地の環境水や基地、工場周辺の地下水などからPFASと呼ばれる有機フッ素化合物が検出されている。報道ではPFOS、PFOA、さらにはPFHxSなどの単語も出てきて、それらの単語がごちゃごちゃして、さらにはng/L（nはナノ、10億分の1）とか、一般人には途方もない数字の記号も出てきて混乱している。有機フッ素化合物 = PFASと表現している報道もある。これは間違いで、PFASをかなり広くとらえている2021年の経済協力開発機構（OECD）の定義でさえもPFASとは見なされない有機フッ素化合物が多数存在する。例えばベンゼン環にフッ素原子が結合したような化合物とか、テトラフルオロエチレン（ $\text{CF}_2=\text{CF}_2$ ）はPFASではない。もっとも定義は国際機関や国によって異なり、しかも時期によって変化しているので混乱するのは当然である。そこで本稿ではまず、PFASとはどういう化合物を意味するのか、有機フッ素化合物との違いは何なのかということから解説したい。

## 1. PFASと有機フッ素化合物

有機フッ素化合物とは何だろうか。これは炭素・フッ素結合（C-F）を持つ化合物で、この結合が一つでもあれば有機フッ素化合物となる。この中にPFASが含まれるのであるが、PFASという単語が現在のようなPer- and polyfluoroalkyl substances（荒っぽく言うとフッ素原子をたくさん持つ有機化合物）の略称として使用され始めたのは意外に新しく2010年代以降である。もちろん、それ以前からPFASの代表的な化合物であるペルフルオロオクタンスルホン酸（ $\text{C}_8\text{F}_{17}\text{SO}_3\text{H}$ , PFOS）や、ペルフルオロオクタノ酸（ $\text{C}_7\text{F}_{15}\text{COOH}$ , PFOA）が環境中に広く残留し、人間をはじめとする生物の体内に蓄積していることは知られていたのであるが、これらは界面活性剤として使用されていたことから、こういう化合物を総称する場合はFluorochemical surfactants（フッ素系界面活性剤）、Perfluorocarbons（PFCs）、あるいはPFOS, PFOA related chemicals（PFOS, PFOA関連物質）のように呼ばれていた。ただしPFCsという単語は1997年の京都議定書でテトラフルオロメタン（ $\text{CF}_4$ ）などの温室効果ガスの意味で使われていたのでガス状化合物と混同される懸念があった。また、当時PFASは多くの学術文献やOECDの報告書ではペルフルオロアルキルスルホン酸（ペルフルオロアルカンスルホン酸とも言い、こちらの方が正しい）の陰イオンの部分（Perfluoroalkyl sulfonate,  $\text{C}_n\text{F}_{2n+1}\text{SO}_3^-$ , ここでnは正の整数）の意味で使われており<sup>1)</sup>、著者も論文を執筆する際にはそうしていた。いろいろ調べたところ2003年に発行されたHecksterらの論文でPFASをPerfluoroalkylated substancesの略称として用いていたので、PFASを現在に近い意味で使い始めたのは著者の知る限りこの論文である<sup>2)</sup>。もっとも当時はそれぞれの論文の著者が連続している英単語の頭文字を適当に選んで略称を付けていたので深い意味はない。我々も例えばNonafluoro-3,6-dioxahheptanoic acid（ $\text{CF}_3\text{OC}_2\text{F}_4\text{OCF}_2\text{COOH}$ ）の頭文字をとってNFDOHAと勝手に略していたが<sup>3)</sup>、その後他の論文でも使われていた。早い者勝ちの世界である。

2011年に産業界や環境分析の研究者が合同でPerfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment: Terminology, Classification, and Originsと題した論文を発行した<sup>4)</sup>。これはPFASを構造に基づいて定義しようとした初めての試みであり、PFASという単語はそれ以降、普及したと思われる。ただ、この論文は題名の通り環境中での有機フッ素化合物を主に記述している。従ってPFASはPFOA、PFOS、あるいは環境中でそういう化合物に変化するもの（前駆体という。例えばフルオロテロマーアルコール（FTOH）の一種である $C_8F_{17}CH_2CH_2OH$ ）のような、分子構造の中にペルフルオロアルキル基（ $C_nF_{2n+1}$ ）を持つ化合物という意味で使われている。

転機を迎えたのはOECDが2013年6月に出した報告書である<sup>5)</sup>。そこでの分類を図1に示す。

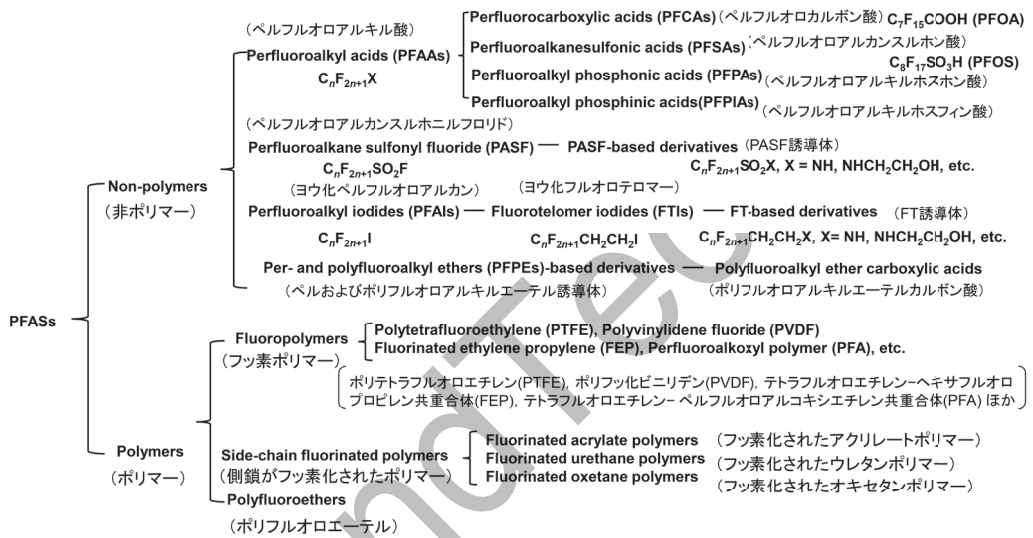


図1 OECDによるPFASの分類（2013年時点）（OECD発行、参考文献5、Figure 1より一部改変）

PFASが非ポリマー（Non-polymers）とポリマー（Polymers）に分類されている。非ポリマーにはペルフルオロカルボン酸類（PFCA類）やペルフルオロアルカンスルホン酸類（PFSA類）があり、ポリマーにはフッ素ポリマーや側鎖がフッ素化されたポリマー、およびポリフルオロエーテルがある。この時、初めてPFASにフッ素ポリマーが含まれることになり、環境中で問題となっている化合物、あるいは環境中で分解してしてそういうものになる化合物という範囲から拡大することになった。OECDは2018年にさらに報告書を発行し、市場に出回っている可能性があるPFASとして $-C_nF_{2n}-$  ( $n \geq 3$ ) あるいは $-C_nF_{2n}OC_mF_{2m}-$  ( $n, m \geq 1$ ) という構造に焦点をあて、4730種類の化合物が存在すると指摘している<sup>6)</sup>。OECDは2021年7月に再度定義を変えた<sup>7)</sup>。その定義は一部の例外を除いてペルフルオロメチレン基（ $-CF_2-$ ）もしくはペルフルオロメチル基（ $CF_3-$ ）を一つでも持つ化合物である。ただしその基にH, Cl, Br, またはI原子が結合する場合を除いている。こうなると対象化合物は産業界での使用の有無を問わず700万種あると言われている<sup>8)</sup>。米国環境保護庁（EPA）も2021年にPFASの定

義を発表した<sup>9)</sup>。その定義は「 $R-(CF_2)_n-C(F)(R_1)R_2$ 、ここで $CF_2$ と $CF$ 部分の炭素原子は飽和しており $R$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ は水素原子ではない」というユニットを持つ化合物である。こちらの方がOECDの定義より対象物の範囲は狭い。例えばトリフルオロ酢酸 ( $CF_3COOH$ , TFA) はOECDの定義ではPFASに入るが、EPAの定義ではPFASに入らない。2023年に欧州化学品庁 (ECHA) はPFAS包括規制案を発表したが、そこでの対象化合物は2021年のOECDの定義に準じている<sup>10)</sup>。ただし全く同じという訳ではなく、「 $CF_3-X$ または $X-CF_2-X'$ において、 $X$ が $-OR$ または $-NRR'$ で、 $X'$ がメチル基、メチレン基、芳香族、カルボニル基、 $-OR''$ 、 $-SR''$ または $-NR''R''$ で、 $R$ 、 $R'$ 、 $R''$ 、 $R'''$ は水素、メチル基、メチレン基、芳香族またはカルボニル基の場合を除く」とある。規制当局の定義は必ずしも構造だけで決めているわけではなく、不安定なものや、産業上大事なものは除くとか、いろいろ判断があると思われる。

## 2. 生体蓄積性の発見と規制の経緯

各国別の規制の詳細については本書の別の章で専門家が執筆されるのでここでは経緯の概要だけ紹介したい。人工化学物質である有機フッ素化合物が生体内に存在していることは意外に古くから知られていた。人間の血清中に存在していることを初めて明らかにしたのはロチェスター大学のTavesで、1968年のことである<sup>11)</sup>。当時は1975年に世界で初めてDionex社よりイオンクロマトグラフが販売される前だったため、イオン電極法で試料中のフッ化物イオンの濃度を測定している。その結果、試料を灰化させるとフッ化物イオンの濃度が増加したためフッ化物イオンとは異なる”別のFluoride”が含まれていることを指摘した。さらに1976年には<sup>19</sup>F NMRを用いてこの”別のFluoride”のスペクトルがPFOAのスペクトルと類似していることを報告した<sup>12)</sup>。しかし、このような事実は一部の専門家の間でしか知られることはなかった。巷間に知られるようになったのはTavesの報告から30年以上経た2000年である。2000年5月16日に当時世界のPFOSの生産量の9割を製造していた3M社が、生体蓄積性の懸念から2003年以降その製造を中止すると発表し、その決定の判断材料となった内容が2001年になって学術誌に公表された。まずHansenらが高速液体クロマトグラフ・タンデム質量分析法 (LC-MS/MS) を用いて人間の血清中のPFOS、PFOA、およびPFHxSを定量した結果、試料中にこれらが数~数十ng/mLの濃度で含まれていることを報告した<sup>13)</sup>。これらの化合物に含まれるフッ素原子の濃度は (例えばPFOA 1分子はフッ素原子を15個持っているので1モルのPFOA中のフッ素原子は15 molとなる)、前述のTavesの報告値とオーダーが一致するため、古典的な方法で求めたTavisらの値は正しかったと言える。さらにミシガン州立大学のGiesyとKannanによりPFOSが極地の動物や鳥類の体内に存在していることや<sup>14)</sup>、トロント大学のMartinらによりPFOAやペルフルオロノナン酸 ( $C_8F_{17}COOH$ , PFNA) も野生生物に蓄積していることが報告された<sup>15)</sup>。そこでEPAは2002年4月にPFOS および関連した13物質についてsignificant new use rule (SNUR, 重要新規利用規制)の適用を開始した<sup>16)</sup>。SNURとは有害性がまだ解明されていない一方で、人や環境にリスクをもたらす恐れがあると判断された化学物質の製造や輸入を制限する規則である。著者の知る限り、これが世界で最初のPFOS規制であり、有機フッ素化合物の生体蓄積性の発見と規制は米国で始まったわけである。2003年1月には続いてPFOS関連 75 物質<sup>17)</sup>、2007年11月にはさらに183 物質<sup>18)</sup> について