

# 資源循環・廃棄物管理と脱炭素社会構築

## 連載 (7) PFAS 管理の方向性と資源循環・ 廃棄物管理

### 酒井 伸一

京都高度技術研究所・京都大学名誉教授  
SAKAI SHINICHI

専門は環境システム工学。2001年より国立環境研究所循環型社会形成推進・廃棄物研究センター長、2005年より京都大学教授、2021年より現職、および大阪工業大学客員教授。中央環境審議会循環型社会部会長。廃棄物資源循環学会 2010～2012年会長。Journal of Material Cycle and Waste Management (JMCWM), Springer 編集担当。著書に『ゴミと化学物質』(岩波新書)、『循環型社会をつくる』(中央法規)など。



### 1. PFAS の定義と国際動向

JW センター情報の連載講義には、研究や政策の直近の動きを意識しつつ、大きな変革期にある資源循環や廃棄物管理の動きを、学術的視点と政策展開を紐付けた記事として準備させていただくということで、2023年の4月と7月には発生抑制と廃棄物管理に焦点をあてた小論を提供してきた。今回は、環境汚染物質として強い関心をもたれつつある有機フッ素化合物、PFAS に焦点をあてて、この物質群の定義から国内外の取組み、そして当面の制御対象となる物質群とその管理方策について整理展望してみたい。

PFAS (Per- and polyfluoroalkyl substances) とは、有機フッ素化合物のうち、ペルフルオロアルキル化合物およびポリフルオロアルキル化合物の総称である。PFAS の定義について、経済協力開発機構 (OECD) の報告では約 4,700 物質が特定されていたが、2021年に定義が改訂され、「少なくとも1つの完全にフッ素化されたメチル又はメチレン基 (フッ素が結合している炭素原子に H、Cl、Br、I 原子が結合していないもの) を含むフッ素化合物」とされた<sup>1)</sup>。つまり、ペルフルオロメチル基 (-CF<sub>3</sub>) か、ペルフルオロメチレン基 (-CF<sub>2</sub>-) を少なくとも一つを含む化学物質である。この定義に沿って、Schymanski らが PubChem データベースからの対象物質検索に関する研究を進めている<sup>2)</sup>。その報告

によれば、PubChem 対象の 1.15 億物質のうち、700 万物質が PFAS に該当する可能性があるとされている。フッ素化合物は約 2100 万物質とされていることとの整合性などが確認されていくこととなるが、これまでの PFAS 対象リストより、数桁は対象数が多いということになる。こうした膨大な数の化学物質を対象とした研究や管理のあり方を再考しなければならない問題であるともいえる。

有機フッ素化合物は、撥水撥油性があり、熱的に化学的に安定な特性を示すことから、撥水撥油剤、界面活性剤、半導体用反射防止剤、金属メッキ処理剤、泡消火剤、殺虫剤、および調理用器具のコーティング剤などの幅広い用途で使用されてきた。残留性有機汚染物質 (POPs) に関するストックホルム条約において規制対象となっている PFAS 類を **表 1** に示した。POPs は、残留性、濃縮性、長距離移動性、毒性を有することから国際的に規制されている有機物質であるが、PFAS の中の PFOS (ペルフルオロオクタンスルホン酸) とその塩が 2009年に指定され、2019年には PFOA (ペルフルオロオクタン酸) とその塩が指定された。その後、2022年の第10回締約国会議でペルフルオロヘキサンスルホン酸 (PFHxS) とその塩及び PFHxS 関連物質が同条約の附属書 A の廃絶対象に追加することが決定された<sup>3)</sup>。さらに、POPs 条約による規制対象物質について検討を行う「残留性有機汚染物質

1) OECD. Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance; OECD Series on Risk Management; No. 61; OECD Publishing: Paris, 2021; p45. <https://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals/terminology-per-and-polyfluoroalkyl-substances.pdf> (accessed 2023-9-24) .

2) Emma L. Schymanski, Jian Zhang, Paul A. Thiessen, Parviel Chirsir, Todor Kondic, Evan E. Bolton, Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in PubChem: 7 million and growing, 2023, chemRxiv, DOI: 10.26434/chemrxiv-2023-j823z

表 1 スtockホルム条約 (POPs 条約) が対象とする物質と PFAS

締約国会議採択年月	条約採択 2001.5	COP4 2009.5	COP5 2011.5	COP6 2013.5	COP7 2015.5	COP8 2017.5	COP9 2019.5	COP10 2022.6	POPRC18 2022.9
POPs 農業	アルドリン クロルデン DDT ディルドリン エンドリン ヘプタクロル マイレックス トキサフェン	クロルアコン HCH リンテン	エンドス ルファン		PCP とその塩 及びエステル類		ジコホル		
フッ素系 PFAS 類		PFOS と その塩 及び PFOSF					PFOA とその塩 及び関連物質	PFHxS とその塩 及び関連物質	長鎖ヘルフル オロカルボン酸 (LC-PFCA) 炭素数 9~21
臭素系 難燃剤		HBB POP-BDEs		HBCD		デカ BDE			
塩素系 製剤	HCB PCB	PeCB			HCB, PCN, PCP	SCCP			
非意図的 生成物	HCB, PCB PCDD/DF	PeCB			PCN	HCB, D			

検討委員会」(POPRC) の第 18 回会合 (2022 年) において、長鎖ヘルフルオロカルボン酸 (PFCA) とその塩及び関連物質について、リスク管理に係る評価を検討する段階に進めることが決定された<sup>4)</sup>。POPs 条約の附属書 A に指定された PFAS は、製造・輸入・使用の原則禁止の措置が講じられることとなっている。

## 2. 日本の PFAS 対策の現状<sup>5,6)</sup>

POPs 条約において 2009 年に PFOS 又はその塩が追加指定されてから、日本の PFAS 対策が始まった。その後、日本では化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律 (化審法) で、2010 年に PFOS が第一種特定化学物質に指定され、製造・輸入の原則禁止、使用の制限や届出などの規制措置が講じられた。そして、2019 年に指定された PFOA とともに、水環境中の暫定目標値の設定や曝露防止に係る「PFOS 及び PFOA に関する対応の手引き」の策定、廃棄物の適正処理の推進に向けたガイダンスといった取り組みが行われてきた。つまり、水道水や地下水について、2020 年に PFOS と PFOA の合算値で 50 ng/L 以下とする暫定目標値を定め、この目標値の超過が確認された場合には、水源を切り

替えることや井戸水を飲用に供さないように対処することが要請されている。消火器用の消火薬剤や泡消火薬剤は PFOS の主たる用途の一つであったが、代替物質が既に存在したので、新たな PFOS の使用は取り止めることとされた。ただ、既に相当の数量が全国に配備されていることから、それらを短期間で代替製品に取り替えることが非常に困難であるとされ、当分の間、厳格な管理の下で取り扱われるよう取扱い上の基準などを定められた。「PFAS に対する総合戦略検討専門家会議」から 2023 年に発出された「PFAS に関する今後の対応の方向性」では、PFOS や PFOA への対応充実策として、正確な市中在庫量の把握などの管理の強化、泡消火薬剤の更なる代替促進、環境中への流出防止などを進めるとされている。暫定目標値等を超えて PFOS や PFOA が検出されている地域等においては、対応の手引きの充実による飲用ばく露防止を徹底するとされている。

こうした専門家会議での議論の論点の一つには、規制対象とする物質の基準展開の観点がある。総合戦略の議論とは別に、水質の目標値等について水質基準改正に関する専門家会議が厚生労働省と環境省で設置され、また食品安全委員会における検討が別

3) UNEP Stockholm Convention, All POPs listed in the Stockholm Convention, <https://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/AllPOPs/tabid/2509/Default.aspx> (accessed 2023-10-1)

4) Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, Risk profile for long-chain perfluorocarboxylic acids, their salts and related compounds, 15 March 2023, UNEP/POPs/POPRC. 18/11/Add. 4

5) PFAS に対する総合戦略検討専門家会議：PFOS、PFOA に関する Q&A 集、2023 年 7 月

6) PFAS に対する総合戦略検討専門家会議：PFAS に関する今後の対応の方向性、2023 年 7 月

に進められており、また国際機関や各国での基準検討の動きも多く、目が離せない。こうした検討の結果から基準値が策定されてくれば、さまざまな政策や対策の目安として機能することになる。ヒトの曝露状況を知る血液などの濃度調査の進め方は、今一つの重要な論点であった。総合戦略の専門家会議では、血中濃度のみを測定しても健康影響を把握することができない、地域における存在状況の環境モニタリングの強化で対応することが妥当としつつも、血中濃度調査を推進するバイオモニタリングを強化する方向性も示唆された。バイオモニタリング結果に関する学術報告（たとえば原田ら<sup>7)</sup>）がなされてきていることもふまえ、一般的な国民の化学物質への曝露量を把握するための調査規模の拡大や自治体との連携といった調査の実施に向けた検討を進めることが必要とされたのである。PFOSやPFOA以外の多くのPFASへの取組みも重要な論点であったが、この方向性については次章で述べる。

### 3. PFAS 管理に向けた方向性

#### 3.1 当面の検討対象物質リスト

PFOSやPFOA以外のPFASへの対応も専門家会議報告で謳われている。基本的姿勢として、PFOSやPFOA以外のPFASについては、非常に数が多く、個別の有害性や環境中での存在状況に関する知見が不足しているものが多いため、更なる科学的知見等の充実を図りながら対応するとされている。その一方、POPs条約で廃絶対象とすることが決定している物質PFHxS（ペルフルオロヘキサスルホン酸）や検討中の物質群である長鎖PFCA（長鎖ペルフルオロアルキルカルボン酸）の一つであるペルフルオロノナン酸（PFNA）などを対象として優先的に取り組むことが適当であるとした。これらの物質を含めて環境モニタリングの強化やヒトの曝露モニタリング調査が進められていくことにな

ろう。PFOS、PFOA、PFHxS、PFNA以外のPFASについては、分析可能性や国内法令における取扱状況、科学的知見を考慮して数十物質程度とし、随時見直しや追加を行うことが考えられるとしている。以上の専門家会議の議論、世界各国や国際機関の取組み、そして最近の研究動向をふまえて、PFASとしての当面の検討対象物質を **図1** のように整理してみた。ペルフルオロカルボン酸の関連物質、ペルフルオロスルホン酸の関連物質、その他のPFAS関連物質に分けて、代表例の物質名とその化学構造を例示している。ペルフルオロカルボン酸類の代表物質としてPFOAとPFNAを示し、PFNAからさらに長鎖側のペルフルオロカルボン酸とPFOAの短鎖側のカルボン酸を示している。ペルフルオロスルホン酸類としては、PFHxSとPFOSを代表例として例示し、さらに炭素数の異なるスルホン酸を取り上げている。さらに、焦点になりつつあるフルオロテロマーアルコール類の一例として8:2 FTOH (2-(Perfluorooctyl) ethanol)、カルボン酸エーテル類の一例としてHFPO-DA (Hexafluoropropylene oxide dimer acid, Gen X) を示している。

#### 3.2 EUの規制対象24物質とRPF (Relative Potency Factor) について

EUでは、PFASに対してグループアプローチを適用した規制を行う方針が示されており、**表2** にその規制対象物質リストを示した<sup>8,9)</sup>。対象となる24物質は毒性情報、物理化学的性状、分析方法、相対効力係数の利用可能性に基づいて選定したとされているが、相対効力係数（RPF）を用いた相対毒性アプローチを採用していることが大きな特徴である。つまり、PFOAに対する係数を1とした毒性等価係数を採用している。これは、Bilらのin vivoのリスクアセスメント研究成果<sup>10)</sup> などに基づいている。Behnischらは、in vitro ベースの甲状腺ホ

7) Harada, K. H., Hitomi, T., Niisoe, T., Takanaka, K., Kamiyama, S., Watanabe, T., Moon, C-S, Yang, H-R, Hung, N. N., Koizumi, A., Odd-numbered perfluorocarboxylates predominate over perfluorooctanoic acid in serum samples, Environment International 37 (2011) 1183-1189

8) JRC "PFAS\_Final EQS Dossier after SCHEER final opinion", 2022, <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-10/Response%20to%20Comments%20Document%20on%20the%20Draft%20Fifth%20Contaminant%20Candidate%20List%20%28> (accessed 2023-10-2)

9) PFASに対する総合戦略検討専門家会議参考資料4：PFOS、PFOA以外のPFASに係る国際動向、2023年7月

10) Bil, W., Zeilmaker, M., Fragki, S., Lijzen, J., Verbruggen, E., Bokkers, B., 2021. Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) Mixtures: A Relative Potency Factor Approach. Environ. Toxicol. Chem. 40 (3), 859-870.

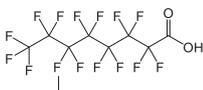
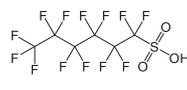
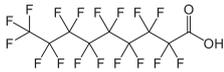
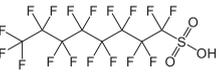
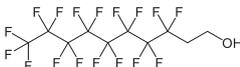
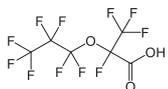
分類	ペルフルオロカルボン酸の関連物質	ペルフルオロスルホン酸の関連物質
代表物質	ペルフルオロオクタン酸 (PFOA) (2019POPs指定) 	ペルフルオロヘキサンスルホン酸 (PFHxS) (2022POPs指定) 
代表物質の長鎖側の例	ペルフルオロノナン酸 (PFNA) (2022POPRC提案) 	ペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS) (2009POPs指定) 
関連物質の例	Perfluorobutanoic acid (PFBA) C4 Perfluoropentanoic acid (PFPeA) C5 Perfluorohexanoic acid (PFHxA) C6 Perfluoroheptanoic acid (PFHpA) C7 Perfluorodecanoic acid (PFDA) C10 Perfluoroundecanoic acid (PFUnDA) C11 Perfluorododecanoic acid (PFDoDA) C12 Perfluorotridecanoic acid (PFTTrDA) C13 Perfluorotetradecanoic acid (PFTeDA) C14 Perfluorohexadecanoic acid (PFHxDA) C16 Perfluorooctadecanoic acid (PFODA) C18	Perfluorobutane sulfonic acid (PFBS) C4 Perfluoropentane sulfonic acid (PFPeS) C5 Perfluoroheptane sulfonic acid (PFHpS) C7 Perfluorodecane sulfonic acid (PFDS) C10
<b>他のPFAS関連物質</b>		
関連物質の例	フルオロテトラマーアルコール類の一例  8:2 FTOH 2-(Perfluorooctyl)ethanol	カルボン酸エーテルの一例  HFPO-DA (Gen X) Hexafluoropropylene oxide dimer acid

図1 PFAS としての当面の検討対象物質 (PFOA と PFNA、PFHxS と PFOS を含めて)

ルモン攪乱ポテンシャルを用いたリスクアセスメントにおいて、Bil らの結果と比較可能な相対影響が得られたとしている<sup>11)</sup>。そして、欧州食品安全機関 (EFSA) の設定した耐容週間摂取量 (TWI) に基づき、PFOS、PFOA を含む PFAS24 物質の合計で、表流水の PFOA 等量 4.4 ng/L、生物体の含有量として PFOA 等量 77 ng/kg wet weight が提案されている。環境情報や毒性情報に関して未知の領域の科学研究を進める観点から、また効果的に環境政策を展開する観点から、この PFOA 等量 (PFOA-EQ) アプローチの有効性の検討が望まれる。

### 3.3 資源循環・廃棄物分野の PFAS 管理

PFAS の水系検出への対応は、国内で続く検出事例や曝露報告で待ったなしという状況になりつつある。廃棄物管理との関係では、埋立処分場廃水の報告が始まっている。Kameoka らは、ペルフルオロカルボン酸やペルフルオロスルホン酸の 17 物質について、40 処分場で測定した結果として、<3.0~27,000 ng/L であったことを報告している<sup>12)</sup>。浸出水処理工程での削減効果を確認した結果として、逆浸透膜や活性炭の使用によって 95% 以上の除去効果があったことも併せて報告しており、今後の参考になる。廃棄物に含有される水分に由来する浸出水の PFAS 濃度が、21,400~682,000, mg/L であった

11) Behnisch, PA., Basselink, H., Weber, R., Willand, W., Huang, J., Brouwer, A., Developing potency factors for thyroid hormone disruption by PFASs using TTR-TRβCALUX® bioassay and assessment of PFASs mixtures in technical products, Environment International 157 (2021) 106791  
 12) Kameoka, H., Ito, K., Ono, J., Banno, A., Matsumura, C., Haga, Y., Endo, K., Mizutani, S., Yabuki, Y.: J., Investigation of perfluoroalkyl carboxylic and sulfonic acids in leachates from industrial and municipal solid waste landfills, and their treated waters and effluents from their closest leachate treatment plants, Mater. Cycles Waste Manag., 24, 287-296 (2022).  
 13) Liu, S., Zhao, S., Liang, Z., Wang, F., Sun, F., Chena, D., Perfluoroalkyl substances (PFASs) in leachate, fly ash, and bottom ash from waste incineration plants: Implications for the environmental release of PFAS, Science of the Total Environment 795 (2021) 148468

表2 欧州における PFAS 規制対象 24 物質<sup>8,9)</sup>

	炭素数	物質名	略称	CAS 番号	PFAS 分類	RPF※
1	4	Perfluorobutanoic acid	PFBA	375-22-4	カルボン酸系 (Carboxylic acid)	0.05
2	5	Perfluoropentanoic acid	PFPeA	2706-90-3		0.03
3	6	Perfluorohexanoic acid	PFHxA	307-24-4		0.01
4	7	Perfluoroheptanoic acid	PFHpA	375-85-9		0.505
5	8	Perfluorooctanoic acid	PFOA	335-67-1		1
6	9	Perfluorononanoic acid	PFNA	375-95-1		10
7	10	Perfluorodecanoic acid	PFDA	335-76-2		7
8	11	Perfluoroundecanoic acid	PFUnDA (PFUnA)	2058-94-8		4
9	12	Perfluorododecanoic acid	PFDoDA (PFDoA)	307-55-1		3
10	13	Perfluorotridecanoic acid	PFTriDA	72629-94-8		1.65
11	14	Perfluorotetradecanoic acid	PFTeDA	376-06-7		0.3
12	16	Perfluorohexadecanoic acid	PFHxDA	67905-19-5		0.02
13	18	Perfluorooctadecanoic acid	PFODA	16517-11-6		0.02
14	4	Perfluorobutane sulfonic acid	PFBS	375-73-5		スルホン酸系 (Sulfonic acid)
15	5	Perfluoropentane sulfonic acid	PFPeS	2706-91-4	0.3005	
16	6	Perfluorohexane sulfonic acid	PFHxS	355-46-4	0.6	
17	7	Perfluoroheptane sulfonic acid	PFHpS	375-92-8	1.3	
18	8	Perfluorooctane sulfonic acid	PFOS	1763-23-1	2	
19	10	Perfluorodecane sulfonic acid	PFDS	335-77-3	2	
20	8	2-(Perfluorohexyl) ethyl alcohol	6:2 TOH	647-42-7	テロマーアル	0.02
21	10	2-(Perfluorooctyl) ethanol	8:2 TOH	678-39-7	コール系	0.04
22	6	Ammonium perfluoro (2-methyl-3-oxahexanoate)	HFPO-DA (Gen X)	62037-80-3	カルボン酸エ ーテル系 (Ether carboxylic acid)	0.06
23	7	Propanoic Acid/Ammonium 2,2,3-trifluoro-3-(1,1,2,2,3,3-hexafluoro3-(trifluoromethoxy) propoxy) propanoate	ADONA	958445-44-8		0.03
24	6	Acetic acid/2,2-difluoro-2-((2,2,4,5-tetrafluoro-5-(trifluoromethoxy)-1,3-dioxolan-4-yl)oxy)-	C604	1190931-41-9		0.06

※RPF: Relative Potency Factor、相対効力係数、PFOA に対する相対毒性等価係数

とする報告もある<sup>13)</sup>。実態の一端の報告がなされはじめたところであり、処分場や処理施設の廃水処理過程を丁寧に調査のうえで、技術上の指針などを定めていくという手順をふむのであろう。

今一つのポイントは、廃 PFAS や PFAS 含有廃棄物を適切に分解処理するための条件整備である。環境省は、2011 年に「PFOS 含有廃棄物の処理に関する 技術的留意事項」を定め、2022 年には「PFOS 及び PFOA 含有廃棄物の処理に関する 技術的留意事項」<sup>14)</sup> に改定して分解処理に伴う要件を定めている。この留意事項においては、PFOA 廃棄物の焼却処理条件として、約 1,000℃ 以上（約 1,100℃ 以上を推奨）とされ、管理目標参考値として、排ガス 60 ng/m<sup>3</sup>N、廃水 1 µg/L、残渣 5 µg/kg-dry が定められている。焼却処理法以外にセメントキルンを用いた処理の報告<sup>15)</sup> もあり、今後、進められる新処理技術を含めた性能確認や処理実装に向けた取り組みに期待したい。

梶原と松神は、PFAS の分析法の開発から含有製

品の特定、含有廃棄物・循環資源に関する実態把握、廃棄処理における分解挙動の把握などが求められることを指摘している<sup>16)</sup>。そして、PFAS の環境移動の過程に適切な制御機能を用意することができるか、的確な廃棄物管理機能をどのように用意していくかなど、これからの重要な課題である。こうした課題の参考になる研究成果<sup>17)</sup> が始めているところであるが、PFAS に関わるフロー把握と制御ポイントの探索ははじまったばかりである。

2023 年 4 月の JW センター情報の連載記事においては、社会のラストリゾート機能となる重要な廃棄物管理機能として、有害化学物質対策としての分解制御機能があることを強調した。ポリ塩化ビフェニル (PCB) やアスベストなど、ヒトの健康に重篤な影響をもたらす物質を含む廃棄物を適切に分解することや制御することのできるシステムが社会に用意され、適切に運用されねばならないとしたものである。PFAS 対策が、こうした文脈で語らねばならない場面が近づいているのかもしれない。

14) 環境省環境再生・資源循環局廃棄物規制課：PFOS 及び PFOA 含有廃棄物の処理に関する 技術的留意事項、令和 4 年 9 月

15) Kuepouo, G., Jelinek, N., Bell, L., Petrik, J., Grech, V., Trials of Burning PFASs Containing Wastes in a Waste Incinerator and Cement Kiln Assessed against Stockholm Convention Objectives, DIOXIN2022, REM5

16) 梶原夏子、松神秀徳：新規／候補 POPs (PCNs, HCB, HBCDD, PFAS) 含有廃棄物処理の現状と今後の課題、廃棄物資源循環学会誌, 32 [1], 8-26, 2021

17) Kuramochi, H., Motoki, T., Kuribara, I., Takahashi, Y., Matsukami, H., Development of a Screening Method for Estimating Emission Potential of PFAS during Two Waste Recycling Processes Using Pyro-GC/MS, Dioxin2023, TUE-PM1-A5