

特集 生活の中の化学物質を問う

04

PFOS、PFOAなど
有機フッ素化合物に関する課題

橋本 淳司（水ジャーナリスト・武蔵野大学客員教授）



橋本 淳司 氏

PFOS、PFOA とは何か、
どのように使用されているか

近年、河川、地下水、土壌などの環境中から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）などの有機フッ素化合物が検出され、懸念が広がっている。環境省が2019～2021年度に延べ1477地点の水質（公共用水域、地下水）の調査を行ったところ、139地点から暫定目標値を上回る濃度のPFOSとPFOAが検出された。一方、東京・多摩地域や沖縄県などでは、市民団体が地域住民に血液検査を実施し、血中からPFOSとPFOAが検出されるなど、人体への蓄積も懸念されている。検出された地域の自治体や地元住民からは、健康に対する不安などから規制の強化などを求める声も上がる。さらにPFOSやPFOA以外のPFAS全般についても、各国で管理のあり方が議論されている。現状を整理し、課題や対応策について考えていきたい。

有機フッ素化合物のうち、ペルフルオロアルキル化合物、ポリフルオロアルキル化合物を総称してPFASと呼ぶ。OECDの報告（2018年）では約4700物質が特定されていたが、2021年に定義が「完全にフッ素化されたメチル又はメチレン炭素原子を少なくとも1つを含むフッ素化合物」と改訂され、1万種以上の化学物質がリストアップされている。

PFASは、1950年ごろ、人工的に開発された。水や油をはじき、熱、薬品に強く、光を吸収しないという性質を持ち、20世紀半ばから世界中で多くの製品に使用されてきた。なかでもPFOSは半導体用のレジスト、金属メッキ処理剤、泡消火薬剤などに、PFOAはフッ素ポリマー加工助剤、界面活性剤などに使用されてきた。

PFOS、PFOA の規制

一方で、難分解性、高蓄積性、長距離移動性という性質があるため、現時点では北極圏なども含め世界中に広く残留している。そして環境への排出が継続する場合には、分解が遅いために地球規模で蓄積され、環境や食物連鎖を通じて人の健康や動植物の生息・生育に影響を及ぼす可能性が指摘されている。

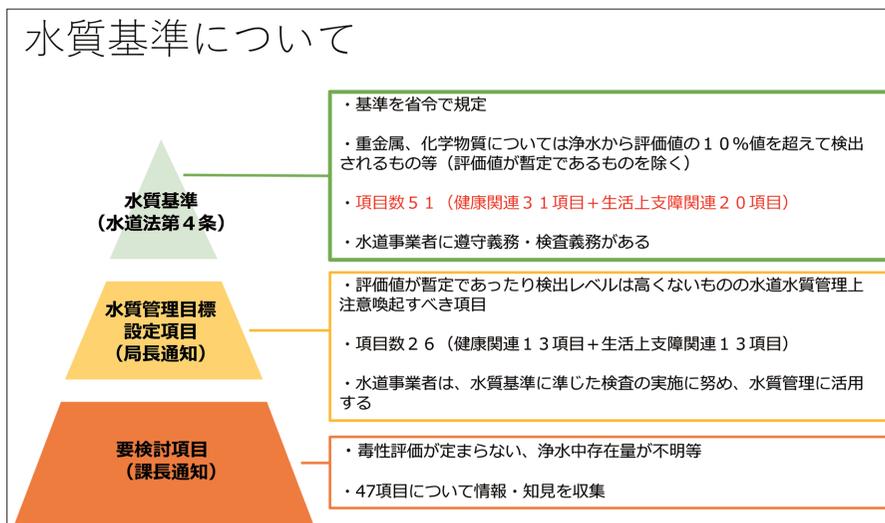
アメリカのデュポン社は 1995 年ごろから、自社の製品に使う PFAS について研究報告を行っており、労働者の血中に PFAS が高濃度で検出されることが分かってきた。日本では、小泉昭夫京都大学名誉教授が各地の河川で PFOS の濃度を調査し、2003 年に論文で発表している。東京多摩地域の濃度が高く、PFOS が米軍が航空機火災に備え、全国に配備した泡消火剤に含まれることから、汚染源として近隣の横田基地が考えられた。小泉教授は 2019 年に沖縄の普天間飛行場に近い宜野湾市と、そこから遠く離れた南城市の住民の血中濃度を比較した。すると南城市の平均が

血液 1 mL 中 6.6ng だったのに対し、宜野湾市は 13.9ng だった。

PFOS は、2009 年 5 月、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）で使用制限の対象物質に登録された。国内では化審法（化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律）の第 1 種特定化学物質（難分解性、高蓄積性及び長期毒性又は高次捕食動物への慢性毒性を有する化学物質）に指定され、2010 年 4 月以降は特定の用途を除き、製造・輸入・使用等が禁止されている。PFOA についても、2019 年の POPs 条約で、特定の用途を除き廃絶することが決定され、2021 年に化審法の第 1 種特定化学物質に指定された。PFOS や PFOA の代替物質である PFHxS（ペルフルオロヘキサンスルホン酸）についても同様の措置が取られている。

日本の水質基準、環境基準

さらに各国で水中の基準値が設定される動きがあり、これに呼応して日本でも検討



「水質基準について」厚生労働省 HP

が進んでいる。水道水は、水質基準というルールがあり、水道法により水道事業者などには検査の責任が課せられている。水質基準だけでなく、水質管理に留意すべき項目を「水質管理目標設定項目」、毒性が評価しきれない物質や水道水中での検出が不透明な項目を「要検討項目」として位置づけ、必要な情報や知見の収集が行われている。水質基準、水質管理目標設定項目、要検討項目の関係はP58図のようにまとめられている。

厚生労働省は2020年4月に、PFOS、PFOAを水質管理目標設定項目に位置づけ、暫定目標値をPFOSとPFOAの合計で50ng/L以下（ng/Lは、水1リットルあたり10億分の1グラムの物質が溶解している）と設定した。その後、環境省も同

じくPFOSとPFOAの水中濃度について、環境基準の要監視項目として、50ng/L以下と指針を示した。環境基準について要監視項目の暫定指針値として同じく50ng/Lと設定した。さらに2021年4月にはPFHxSも水道水の要検討項目として、新たに追加された。

一般的な有害性評価では、動物実験から得られた無影響用量（NOAEL）を、不確実係数（UF、通常は種差10×個体差10=100）で割り、耐容1日摂取量（TDI）とする。計算式は、

$$\text{TDI (ng/kg/day)} \times \text{体重 (kg)} \times \text{寄与率} / \text{水の摂取量 (L/day)} = \text{基準値 ng/L}$$

で、たとえば体重50kgの人が1日に水道水から摂取する水が2Lで、その水から

諸外国におけるPFOS、PFOAの飲料水の目標値

	設定年	PFOS	PFOA	備考	毒性評価
カナダ（カナダ保健省）	2018	600ng/L	200ng/L		動物実験からPFOSの耐容1日摂取量（Tolerable Daily Intake: TDI）を60ng/kg体重/日、PFOAのTDIを21ng/kg体重/日とし、これと体重70kg、飲料水の割当率20%、1日当たり摂取量1.5Lから、PFOSは600ng/L、PFOAは200ng/Lと計算。
オーストラリア（オーストラリア・ニュージーランド食品基準機構）	2017	70ng/L	560ng/L	PFOSはPFHxSとの合計	動物実験からPFOSのTDIを20ng/kg体重/日、PFOAのTDIを160ng/kg体重/日とし、PFHxSについては、TDIを設定するには不十分であったものの、PFHxSにPFOSと同一のTDIを仮定し、リスク評価の際にはこれら2つの物質の濃度を足し合わせることを推奨。これと体重70kg、飲料水の割当率10%、1日当たり摂取量2Lから、PFOS/PFHxSは70ng/L、PFOAは560ng/Lと計算。
米国（環境保護庁/EPA）	2016	70ng/L	70ng/L	PFOS,PFOAの合計	動物実験から、PFOS、PFOAともに参照用量として0.00002mg/kg/日が示されている。これと、一日当たり摂取量0.054L/kg-日、飲料水の割当率20%から、70ng/Lと計算される。飲料水中にPFOA及びPFOSの両方が認められる場合、PFOA及びPFOSの総濃度を70ng/Lと比較するべきとしている
デンマーク	2015	100ng/L	300ng/L		
イタリア	2015		500ng/L		
スウェーデン	2014	90ng/L	90ng/L	PFOS,PFOAを含む11物質の合計	
オランダ	2011	530ng/L			
英国	2010	300ng/L	10000ng/L		
ドイツ	2006	300ng/L	300ng/L		

「水質基準等の改正方針について（案）」（厚生労働省／<https://www.mhlw.go.jp/content/10901000/000597714.pdf>）より作成

の PFOS と PFOA の曝露が全体の 10% だと仮定すると以下ようになる。

$$20 \text{ (ng/kg/day)} \times 50 \text{ (kg)} \times 0.1 / 2 \text{ (L/day)} = 50 \text{ ng/L}$$

この時点では日本の 50ng/L が最も低い設定だった。

世界各地で基準値が厳しく

しかし、その後、各国の基準は一段と厳しくなった。米国の飲料水の基準値は PFOS、PFOA の合算で 70ng/L だったが、2022 年 6 月に「暫定健康勧告」として PFOS で 0.02ng/L、PFOA で 0.004ng/L と提案された（規制値ではない）。その理由は、有害性評価を見直したことにある。新たな影響として「免疫力」に注目した。疫学調査による血中の PFOS 濃度が高いほど、①子供にジフテリアワクチンを打った際の抗体の増加量が少ない、②子供に破傷風ワクチンを打った際の抗体の増加量が少ないという結果が注目された。ところが、2023 年 3 月には第 1 種飲料水規則案の規制値として PFOS、PFOA それぞれ 4ng/L が提案された。これは、本来はもっと厳しい基準を設けたかったが、濃度を正確に測定するのが難しいため、現実的な限界として 4ng/L が基準となった。

そのほかの国々でも厳しい基準値が出された。デンマークは、2021 年 6 月に、PFOA、PFOS、PFNA、PFHxS の 4 物質の合算の基準値として 2ng/L 以下が公表され、すでに 2022 年 2 月 23 日から適用されている。同様に、スウェーデンは、2026 年 1 月 1 日から適用される PFAS4 (PFOA、PFOS、PFNA、PFHxS) の 4 物質の合算

の基準値として 4ng/L が公表された。

厳しい国がある一方で、ニュージーランドは 2022 年に PFOS および PFHxS は 70ng/L、PFOA は 560ng/L としており、国によって基準値はまちまちだ。

WHO の水質ガイドライン

では、WHO はどうか。WHO は各国が飲料水の安全基準を策定する際の基礎資料を 1984 年から提供している。2022 年 9 月、WHO は水質ガイドライン作成のための背景文書「飲料水中の PFOS 及び PFOA」のパブリックレビュー版を公表し、暫定のガイドライン値として PFOS、PFOA それぞれ 100ng/L を提案している。同文書のなかでは PFOS および PFOA の高い曝露が報告されているもの、人間への健康影響を評価するのが難しいとしている。ワクチン接種後の抗体価減少は確認されているが、感染の割合の上昇との関連性は不確かであり、臨床的な意味合いも明確でないとして、判定するにはさらなる研究が必要としている。また、動物実験は通常、ヒトのデータが不足している場合に使用されるが、PFOS および PFOA のヒトへの健康影響を評価するための動物実験には不確実性があるとしている。

科学的な知見が日々進化しているため、現実的な解決策としては暫定ガイドライン値を提案することが重要とし、現状の水中濃度が高くても 1000ng/L 程度であること、浄水処理技術で 90% 以上を取り除けること、現在の各国の基準値が 100ng/L 前後であることなどを総合的に判断して 100ng/L という数字になったと見られる。

2023 年 12 月になって WHO 傘下の国際ガン研究機関は PFOS、PFOA の発がん

性に対する評価を引き上げた。PFOA を4段階中最も高い「発がん性がある」グループに、PFOSを下から2番目の「可能性がある」グループにそれぞれ分類した。PFOAと同じ分類にはアスベストやたばこの煙などが含まれる。今後のガイドラインの変更も考えられる。

PFOS、PFOA 対策について考えること

① どんなリスクに対しどれだけ守るか

人についてコレステロール値の上昇、発がん、免疫系等との関連が報告されているが、どの程度の量が身体に入ると影響が出るかについては確定的な知見はない。最新の科学的知見に基づき、暫定目標値の取扱いを慎重に決める必要がある。この決め方によって後述するモニタリングや浄水コストに影響が出る。

② PFOS、PFOA の増減をどう考えるか

PFOS、PFOA はすでに世界中で製造が禁止されており、規制措置が終了している。この点に着目すると、これ以上濃度や摂取量が増えることはないとも考えられる。環境省は自治体と連携して2009年以降、同一の測定点において水質（河川等の公共用水域）、底質、生物及び大気中のPFOS、PFOAの環境中の濃度を測定しているが、全体的な傾向として、水質、底質及び大気については、経年的な濃度の減少傾向だ。また、生物については、おおむね検出率が経年的に減少していることが統計的に有意と判定され、一般環境中におけるPFOS、PFOA濃度の減少傾向が示唆されている。その一方で、環境中で分解されないことから過去に不当に埋設されたり、処理されたりしたPFOS、PFOAが環境に影響を与え

る可能性はある。吉備中央町にある円城浄水場が取水していた河平ダムやダムに流れ込む川や沢の上流部では、PFOS、PFOAの合計値が暫定目標値を大幅に超過した。さらに、浄水場に流れ込む川の上流付近に置かれていた使用済み活性炭から、新たに450万ngを検出したと発表した。検出した活性炭は梱包されず野ざらしになっていた。

③ 水質規制強化ではリスクは減らせない

水質だけではなく環境中や土壌中のPFOS、PFOAについても考える必要がある。基準値の根拠では、飲み水からの寄与率は10%という仮定が入っており、90%は大気や食品から取り込まれる。

④ 対策した場合の影響

WHOは対策として、モニタリングとその公表、浄水処理などを求めているが、いずれもコストを伴う。誰がいつ排出したかが特定できないケースもあり、この費用を誰がどのように負担するか議論が必要だ。米国環境保護庁（EPA）は、飲料水中18種のPFASを分析する方法として2018年にEPA method 537.1を開発し公開しており、2019年には飲用水中の化合物リストを25種としたEPA method 533を発表した。2023～2025年には全米で飲用水中の29種のPFASの実態調査を予定しており、その分析方法としてEPA method 533およびEPA method 537.1が使用される予定だ。分析の技術は著しく進歩しているが、その一方で分析にはコストがかかることをWHOは指摘している。

浄水方法について、WHOは「凝集沈殿ろ過、オゾン処理、消毒処理のような共通して使われている浄水プロセスではPFAS除去は効果的でない」としている。それは浄水処理に変更や追加的な処理の必要性を意味し、WHOは「高圧膜処理、活性炭吸

着やイオン交換で 90% 以上の除去が可能」としている。

膜のなかでも期待されているのが、逆浸透（以下 RO = Reverse Osmosis）膜による分離だ。RO 膜は原子力潜水艦の中での飲料水確保、スペースシャトルで生活排水をリサイクルして飲み水にする場合などにも活用されている。浄水処理のほか、半導体や液晶ディスプレイなど電子部品の製造に使う超純水や、下水の再生利用にも使用される。RO 膜の穴は 1 nm ほどの粒子も通さない。ふつう水分子は、溶液の濃度の薄いほうから濃いほうへ移動するが、この膜で双方を隔てて濃いほうに高圧をかけると、水分子だけが薄いほうに移動する。海の水を真水に変える技術にも使用され、このしくみによって海水に含まれるナトリウムやカルシウムなどの金属イオン、塩素や硫酸などの陰イオンなどを分離する。現在 RO 膜を利用したプラントで生成される水は、全世界で 1 日 6550 万トンに達し、海水淡水化の 69% を占めるまでになった。だが、2 つの課題がある。1 つはエネルギー使用量が大きいこと。

もう 1 つはブラインの問題だ。海の水から淡水を除くと濃い海水（ブライン）が残る。国連の報告書によると、淡水 1 リットルをつくったときのブラインの発生量は平均 1.5 リットルと推定される。

PFAS の処理においても同じ課題が残る。高圧膜処理にはかなりのエネルギーと水が必要になる。100 の水があった場合、膜処理後の水は 80 ~ 85 に減り、PFAS を含んだ 15 ~ 20 の濃縮水が発生する。濃縮水はさらなる処理が必要で費用がかかり、廃棄は難しい。沖縄県では予防原則に基づき県民の安心・安全のため、高機能活性炭浄水処理を行うが、北谷浄水場では年間 4 億円の費用がかかっている。規制が強化

された場合、現在よりも高精度の水処理技術が必要になる。

地下水マネジメントと PFOS、PFOA

東京多摩地域で市民団体と京都大の研究室が 2023 年 12 月 1 日、地下水などに含まれる PFAS の独自調査の結果を発表した。その結果、暫定指針値の 62 倍を検出した。地下水から PFOS、PFOA が検出された地域では、地下水盆全体のマネジメントを行う必要がある。まず、既存の井戸データを組み合わせ、おおまかに地下水の流動を把握する必要があるだろう。地下水の流動を明らかにする方法は主に 3 つある。

- ① 既存の井戸やピエゾメーターを用いて、地下水のポテンシャル分布を直接観測する
- ② 安定同位体、水温、水質などを追跡して地下水の流れを推定する
- ③ 数値シミュレーションによって地下水の流動方程式を境界値問題として解き、地下水のポテンシャル分布を得る

これらの方法を併用し、結果を相互にクロスチェックすることにより、正確な地下水の流動を把握することができる。

もちろん地下水は同一自治体内に止まるわけではない。地下水の流れの上流部で大量にくみ上げられれば地下水は減るし、上流の土壌が汚染されれば流れてくる水は汚染される。地下水がどこをどのように流れるかということと、地下水汚染には重要な関係がある。

地下水は地表水に比べて賦存量が多く、安定した水源であるが、地表からの汚染物質の侵入に対しては極めて弱い。浅い所を流れる地下水は土壌汚染の影響を受けやす

いが、対策すれば回復も早い。深い所を流れる地下水は土壤汚染の影響を受けにくい、ひとたび汚染されると回復はむずかしい。

また地下水の流れる速度も把握できる。代表的な方法は、水温、安定同位体、放射性同位体、不活性ガスなどを追跡することである。ある観測ポイントで地下水の温度や水質を常時測定しておき、その上流部に温度や水質の著しく異なる水を浸透させ、異なる水が観測ポイントまで到達する時間を計る方法だ。こうすることで地下水の源となる雨が、地下水面まで到達し、そこから帯水層を流れて、ある時点で到達するまでの時間を把握することができる。地下水は「ゆっくり流れる」というイメージがあるが、実際には、地質条件や地下水の量によって変わる。日本は降水量が多く、地形が急勾配であるため、相対的に地下水の流速も早い。

こうすることで、あるポイントで発生した土壤汚染が、どのように地下水に影響を与えるのかがわかる。汚染物質がどのように地下を流れていくか、その速度はどのくらいかがわかる。地下水の流れる速度から逆算すれば、土壤汚染がはじまった時期がおおまかにわかる。

熊本市では近年、水道水の原水となる地下水のなかに、硝酸・亜硝酸性窒素が増加したことが問題になっている。地下水の流動や速度を解析したところ、熊本市の北東にある別の自治体の農地で過剰に用いた窒素肥料や畜産の排水が地下水に影響を与えたことがわかった。さらにそれが20数年前のものであることも推定できた。整理すると1990年代に大量の肥料や畜産の排水が農地にまかれた。それが土壤に浸透し、地下の帯水層にたどりつき、帯水層を流れ、熊本市の井戸に到達するまでに20数年か

かったことがわかっている。

地下水の問題は点（自分がくみあげる井戸の水量や水質）で考えるべきではない。地下水が時空を超えることを念頭におき、地下水盆の問題として考えるべきだ。地下水がどこをどのように流れるか、どのくらいのスピードで流れていくかを把握し、それを「見える化」する。そのうえで汚染の問題に対処すべきだ。地下水の流動を細かく調べていけば、どの地点の土壤汚染が原因かがわかるだろう。

PFAS 全体の規制動向

現在、各国の規制はPFOS、PFOAからそれ以外のPFAS全体に広がっている。特に欧州では予防原則による（リスク評価を伴わない）PFAS排除の動きが進んでいる。

欧州のPFAS制限案は、2023年1月にデンマーク、ドイツ、オランダ、スウェーデン、ノルウェーの5カ国が規制の意思登録を欧州化学品庁（ECHA）に提出し、これを受けECHAが3月に最終版の制限提案を公開した。その内容は、OECDの新しい定義を満たす10000種類以上のPFASについて原則一律に製造、使用、販売を禁止するというものだ。欧州委員会が2025年に採択し、議会および理事会の承認を受けると、早ければ2026年後半に規制案が採択される。その後18か月の移行期間を経て、猶予期間が設けられた製品を除き規制が始まる。

2023年9月25日までに行われたパブリックコメントの締め切りでは、最終的な提出件数が50か国から5,642件に上った。国別では、ドイツが1228件で最も多く、次いで日本が924件という結果になった。提出されたパブコメに共通するのは、個別

の物質のリスク (有害性×暴露量) が確認されないまま、難分解性を持つという一点のみで全ての PFAS を規制しようとすることへの懸念だ。

PFAS はリスクの観点から①ペルフルオロアルキル化合物 (以下、ペルフルオロ)、②ポリフルオロアルキル化合物 (以下、ポリフルオロ)、③フッ素樹脂に分類できる。リスクが最も高いのは①ペルフルオロで、PFOS や PFOA もこのグループに含まれる。これらは水に溶けやすい。PFOS や PFOA 以外にも、PFHxS や PFCA、PFNA などリスクが高いため禁止が検討されている。②ポリフルオロに含まれるフルオロテロマーというグループは PFOS、PFOA などより高分子で、環境中で分解してペルフルオロに変化することが指摘されている。ポリフルオロ自体に問題があるというよりは分解物が問題となる。

③フッ素樹脂はフライパンのコーティングなどでよく使われている。これらは分解してペルフルオロやポリフルオロに変化することはない。環境中での難分解性はあるものの、そのままでは有害な性質を持っていないが、OECD の定義によると PFAS に含まれるため、禁止措置がとられようとしている。通常はリスク評価を行い、リスクの懸念のある場合にその物質を規制するが、PFAS の場合はリスク評価のプロセスが省かれ、しかも 10000 種類を超える物質群として例外なく禁止措置がとられる可能性がある。フッ素樹脂は、熱や紫外線に強く、耐熱性、耐候性、耐薬品性があり、水も油もはじく性質で、撥水撥油性と滑り性があり、電気を通さない絶縁性も備える。これらの性質により、自動車エンジン部品や消防活動の保護具、化学プラント、半導体製造などで活用されている。特に、建築資材や屋根、太陽光パネルなどの製品では、

太陽光 (紫外線) から守るコーティングに最適な素材とされている。医療分野でも手術着や医療器具に使われ、滑らかな操作感のあるスマホやタブレットのタッチパネルにも利用されている。懸念のある物質と無害な物質が同じくくりで規制されると有用な材料も失われる可能性があり、それでいいのかを考える必要はあるだろう。

いずれにしても知見を集めることが急務だ。2024 年度には厚生労働省から水道行政の国土交通省、環境省に移管される。国交省は水道事業に関する基本方針の策定や事業の認可、老朽化対策、耐震化などの施設整備や経営、災害時の復旧支援、渇水対応など、環境省は水質・衛生に関する業務を行う。そもそも、なぜ水道事業を厚労省が管轄していたかといえば、水道と健康が密接なものだから。戦後に施行された日本国憲法には、「すべて国民は、健康で文化的な最低限度の生活を営む権利を有する」「国は (中略) 公衆衛生の向上及び増進に努めなければならない」(第 25 条) と明記されている。

この理念の基に 1957 年に「水道法」が制定され、全国の水道が急速に布設・拡張され、これを厚生省 (当時) が担当した。1950 年に 26.2% だった水道普及率は、高度経済成長期に飛躍的な拡張をとげ、現在では 98.2% (2021 年末) に達している。水道普及とともに水系消化器系伝染病の患者数は激減している。「水道と健康」の関係は水道事業の一丁目一番地であることは変わらない。環境省は本格的な研究を進め、健康影響を未然に防ぐ対策を講じる必要がある。