

## PFAS 対策方針のシナリオ分析による検討手法の提案

株式会社日水コン ○尾川 裕紀、榊原 康之

近年、本邦では水道水源における PFAS（有機フッ素化合物）の存在実態が懸念されており、一部の水道事業者では PFAS 対策方針の検討が必要となってきた。

本稿では、実際に水道水源において PFAS の一種である 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）に加え、クリプトスポリジウムの存在が懸念される事業者 A で対策方針を検討した事例を示す。本事例では、目標浄水水質、計画原水水質、計画水量、導入する処理技術・導入箇所ごとに計 120 パターンの水運用シナリオを作成し、水質、コスト、敷地条件の観点からシナリオ分析した。その結果、PFOS、PFOA 対策として用水供給から受水し、クリプトスポリジウム対策として UV（紫外線）処理を導入することが水質、コスト、敷地条件から最も現実的であると判断された。本手法は複数水源を有し、複合的な水質課題を抱える水道事業者において、合理的な対策方針を検討するための有効なアプローチになると考えられる。

*Key Words* : 有機フッ素化合物 (PFAS)、活性炭、クリプトスポリジウム、シナリオ分析、配置検討

### 1. はじめに

PFAS（有機フッ素化合物）は難分解性・残留性・生体蓄積性を有する物質群であり、環境水中におけるその存在状況は世界的な課題となっている。

近年、本邦でも水道水源における PFAS の存在実態が懸念されてきている。特に、PFAS の一種である 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）については、従前より水質管理目標設定項目として、その合算値で目標値 50 ng/L 以下とされていたが、2025 年 6 月 30 日の水質基準に関する省令及び水道法施行規則の一部改正に伴って、水質基準項目となり、基準値（合算値で 50 ng/L 以下）が定められた。また、2026 年 4 月には本改正が施行され、水道事業者等に対して PFOS、PFOA の水質検査が義務づけられる。そのため、現在、水道水源において PFOS、PFOA の存在が懸念される一部の水道事業者では、PFOS、PFOA 対策方針の検討が急務となっている。

このような背景の中、主に地下水（深井戸及び浅井戸）を水道水源として活用している事業者 A では、過去に一部の地下水源で PFOS、PFOA の濃度が 100 ng/L 程度に達したことがあった。現在は当該井戸の取水を停止し、用水供給からの受水の増量により対応しているが、他の地下水源でも PFOS、PFOA が検出されている。加えて、一部の水源では大腸菌や嫌気性芽胞菌が検出されており、クリプトスポリジウムの存在も懸念される。

本稿では、事業者 A の地下水源における PFOS、PFOA 及びクリプトスポリジウムの両者を同時に考慮した、最適な対策方針をシナリオ分析により検討した事例を示す。

## 2. 方法

### 2.1. 事業体 A の水道システムの概要

事業体 A の水道システムの模式図を図-1 に示し、各水源の PFOS、PFOA の合算値及びクリプトスポリジウムの懸念有無を表-1 に示す。

事業体 A の水道は、複数の地下水源（深井戸及び浅井戸）と用水供給からの受水により構成される。用水供給からの受水比率は約 20 % であり、水源 G、F、H が主要な取水施設である。水源 H では PFOS、PFOA の濃度が過去 100 ng/L を超過したことがあり、現在、取水を停止している。一方で、その他の水源では PFOS、PFOA の検出が懸念されるものの、自己水比率確保のため一定量の取水が行われている。

配水構成は、配水場 A、B、C を経て給水区域へ送水される形態であり、複数水源が系統的に連携している点が特徴的である。また、取水場 A については老朽化が進んでおり、将来的な更新を見込む場合、今後、費用面での負担が想定される。

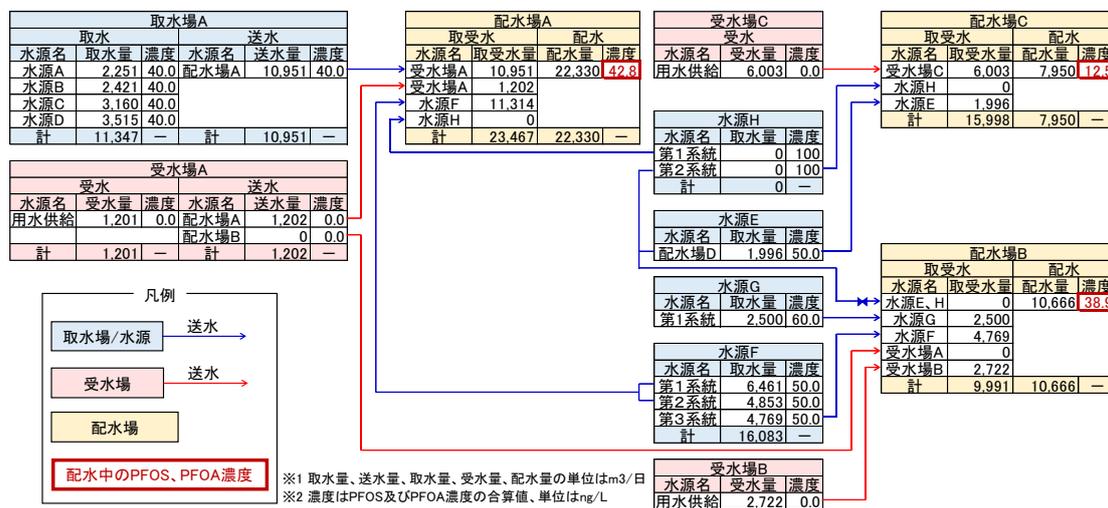


図-1 事業体 A 水道システムの模式図

表-1 各水源の PFOS、PFOA の合算値及びクリプトスポリジウムの懸念有無

項目		水源A	水源B	水源C	水源D	水源E	水源F	水源G	水源H
PFOS、PFOAの 合算値 (ng/L)	過去最大	40	40	40	40	50	50	60	100
	過去1か年最大	21	21	21	21	23	22	26	72
クリプトスポリジウム		-	-	-	-	-	懸念あり	懸念あり	-

### 2.2. PFOS、PFOA 及びクリプトスポリジウム対策の方向性

#### (1) PFOS、PFOA 対策

PFOS、PFOA 除去には GAC（粒状活性炭）及び IX（イオン交換樹脂）が有効とされている。また、用水供給からの受水の増量等による希釈も有効な対策である。GAC は国内外で広く実績があり、設計や運用ノウハウも蓄積されている。一方、IX は PFOS、PFOA 除去に特化し、高い除去性能を有するものの、現在（2025 年 10 月）、国内での導入事例がなく、設計条件や維持管理手法の整理が十分ではない。そのため本検討では IX は検討対象外とし、

GAC と用水供給による希釈を PFOS、PFOA 対策として検討した。

GAC を適用する場合、活性炭からの線虫やワムシ等の微小後生動物や微粉炭の漏出防止の観点から、後段にろ過（急速ろ過又は膜ろ過）を設ける構成が望ましい。そのため、本事例における配置検討では、GAC の設置を検討するパターンでは GAC+膜ろ過の配置を想定した。GAC の設置箇所は現地踏査で確認した状況を踏まえ、敷地制約や維持管理性を考慮し、PFOS、PFOA を含む原水の流入が想定される取水場 A、配水場 A、B を候補とした。

(2) クリプトスポリジウム対策

水源 E、F では指標菌の検出実績があるため、クリプトスポリジウム等の対策が必要である。想定される処理方式は、ろ過（急速ろ過又は膜ろ過）及び UV（紫外線）である。そのため、PFOS、PFOA 除去を目的として GAC を設置するケースでは、後段に設置する膜ろ過によってクリプトスポリジウム対策も同時に実施できると考えられる。なお、クローズドシステムの場合、クリプトスポリジウムの濃縮が懸念されるため、オープンシステムを前提とする。そこで、本事例で対象とする水源においては、降雨時でも濁度上昇が軽度（概ね 2 度以下）であったことを踏まえ、GAC を設置しないパターンでは UV の設置を想定した。UV の導入箇所は現地踏査で確認した状況を踏まえ、敷地制約や維持管理性を考慮し、クリプトスポリジウムを含む原水の流入が想定される配水場 A、B を候補とした。

2.3. 水運用シナリオの作成

水運用シナリオの一覧を図-2 に示す。水運用シナリオの作成に際して、まず、PFOS、PFOA の計画原水水質（過去最大 or 過去 1 か年最大）、配水量（計画値 or 実績値）、PFOS、PFOA の目標浄水水質（5 or 10 or 25 ng/L）に応じて、シナリオ A～L の 12 シナリオを作成した。

次に、GAC、UV の導入箇所に応じて 10 パターンの対策方針を作成し、それぞれに対して、水運用を検討することで計 120 パターン（12 シナリオ×10 パターン/シナリオ）の水運用シナリオを作成した。

計画原水水質		過去最大		過去1か年最大		計画値: 計画一日最大配水量 実績値: 実績一日平均配水量 ※計画原水水質、目標浄水水質は いずれもPFOS、PFOAの合算値
配水量		計画値	実績値	計画値	実績値	
目標 浄水 水質 (ng/L)	5	シナリオA	シナリオB	シナリオG	シナリオH	
	10	シナリオC	シナリオD	シナリオI	シナリオJ	
	25	シナリオE	シナリオF	シナリオK	シナリオL	

シナリオごとに10パターンの対策方針を作成  
(12シナリオ×10パターン/シナリオ=120パターン)

対策方針 パターン	処理技術の種類・導入箇所					運転状況	
	取水場A	配水所A		配水所B		取水場A	水源H
	粒状活性炭 +ろ過	粒状活性炭 +ろ過	紫外線	粒状活性炭 +ろ過	紫外線		
1-1	-	-	○	-	○	運転	停止
1-2	-	-	○	-	○	停止	停止
1-3	-	-	○	-	○	運転	運転
2	-	○	-	-	○	運転	停止
3	-	-	○	○	-	運転	停止
4	○	-	○	-	○	運転	停止
5	-	○	-	○	-	運転	停止
6	○	○	-	-	○	運転	停止
7	○	-	○	○	-	運転	停止
8	○	○	-	○	-	運転	停止

図-2 水運用シナリオの一覧

## 2.4. 水運用シナリオの評価

水運用シナリオは水質、コスト、敷地条件の観点から評価した。

### (1) 水質

水質は配水場 A～C の配水における PFOS、PFOA 濃度の目標浄水水質の達成可否で評価した。PFOS、PFOA の濃度は各配水場への流入水の水量を基準とした PFOS、PFOA の濃度の加重平均により算出した。クリプトスポリジウムはいずれの水運用シナリオにおいても、ろ過又は紫外線処理による対策を想定するため、問題ないものとした。

### (2) コスト

コストは動力費、受水費、活性炭交換費、建設費を算出し、これを基に 1 日当たりの費用を算出し、比較することで評価した。

#### (a) 動力費

動力費は各送水系統の実績に基づく電力費の単価と送水量より算出される電力量を乗ずることで算出した。

#### (b) 受水費

受水費は各受水系統の受水単価と受水量を乗ずることにより算出した。

#### (c) 活性炭交換費

本事例では活性炭交換費算出のために、RSSCT（迅速小型カラム試験）を実施した。その後、実験により得られた PFOS、PFOA の原水濃度、活性炭処理水濃度、活性炭ライフの実験値を重回帰分析に供し、原水濃度と活性炭処理水濃度（目標値）により、活性炭ライフを推計する重回帰式を作成した。RSSCT では実際の原水を用い、通水条件  $SV=10 \text{ h}^{-1}$  で運転した。作成した重回帰式による推計結果の検証を図-3 に示す。検証の結果、活性炭ライフの実験値と活性炭ライフの重回帰式による推計結果間の決定係数は  $R^2=0.9241$  であり、作成した重回帰式は妥当であると判断された。したがって、本事例ではこれに基づき活性炭交換費用を算出した。なお、作成した重回帰式を用いて活性炭ライフを算出するにあたっては、PFOS、PFOA の活性炭処理水濃度は原水濃度に依存せず、 $10 \text{ ng/L}$  と仮定した。

#### (d) 建設費

建設費は各シナリオ・施設ごとの処理水量を基に費用関数で算出したほか、一部項目についてはメーカー見積を処理水量で補正することにより算出した。1 日当たりの費用の算出時には、工種別の法定耐用年数に応じて、減価償却費を算出した。なお、取水場 A の更新費用は更新時期等が未定であることから、本事例では見込まなかった。

### (3) 敷地条件

敷地条件は配置検討による処理施設の平面的な配置可否により評価した。

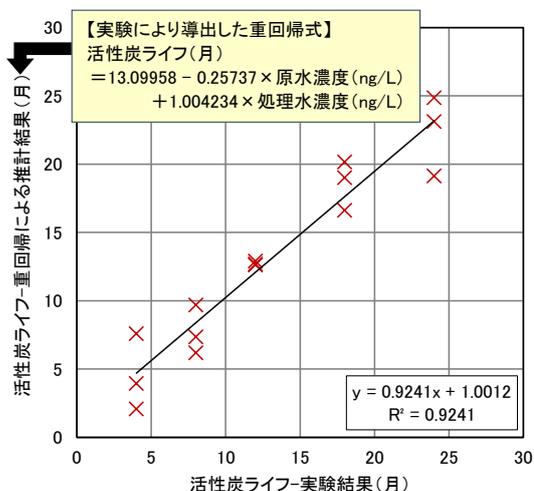


図-3 作成した重回帰式による推計結果の検証

### 3. 結果

#### 3.1. シナリオ分析の結果

一例として、計画原水水質、配水量が最も現状に近い、かつ、目標浄水水質が十分に高いシナリオ H（計画原水水質：過去一か年最大、配水量：実績値、目標浄水水質：5 ng/L）の評価結果を表-2 に示す。

シナリオ H において、現況の水運用では PFOS、PFOA の目標浄水水質の基準が満たされない。一方で、何らかの対策を講じた場合には、いずれの対策方針パターンでも目標浄水水質の基準が満たされた。

ただし、PFOS、PFOA 及びクリプトスポリジウム対策として、GAC+膜ろ過の配置を想定するパターン（パターン 2～8）は、PFOS、PFOA 対策として用水供給からの受水、クリプトスポリジウム対策として紫外線処理を導入するパターン（パターン 1-1～1-3）と比較して、1 日当たりの費用が 1.5 倍以上となった。図-4 にシナリオ H における各対策方針パターンの 1 日当たりの費用及びその構成比率を示す。1 日当たりの費用の構成比率の大部分は建設費によるものであった。

また、配置検討の結果から、いずれの施設においても GAC+膜ろ過の現状の敷地内での整備は容易ではないと考えられ、敷地条件の観点から、実現性に乏しいと判断された。一例として、配水場 A における配置検討の結果を図-5 に示す。配水場 A において、GAC+膜ろ過の配置は困難であると判断された。一方で、紫外線処理の配置は可能であると判断された。配水場 B、取水場 A においても同様であった。

表-2 シナリオ H における各対策方針パターンの評価結果

対策方針パターン	処理施設の設置場所	PFOS、PFOA 対策			クリプトスポリジウム対策		運転状況		受水比率 (%)	配水中のPFOS、PFOA濃度 (ng/L)			費用 (円/日)	評価			
		粒状活性炭	膜ろ過	紫外線	取水場A	水源H	取水場A	取水場B		取水場C	水質	コスト		敷地条件	総合		
現況	配水場A 配水場B 取水場A	—	—	—	運転	停止	23.4	20.0	17.8	6.3	476,000	×	○	—	—		
1-1	配水場A 配水場B 取水場A	—	—	○	運転	停止	77.7	4.8	4.8	4.8	829,000	○	○	○	○		
1-2	配水場A 配水場B 取水場A	—	—	○	停止	停止	78.3	4.8	4.8	4.8	952,000	○	○	○	○		
1-3	配水場A 配水場B 取水場A	—	—	○	運転	運転	77.7	4.8	4.8	4.8	829,000	○	○	○	○		
2	配水場A 配水場B 取水場A	○	○	—	運転	停止	64.7	4.8	4.8	4.8	1,532,000	○	×	×	×		
3	配水場A 配水場B 取水場A	○	○	—	運転	停止	70.5	4.8	4.9	4.8	1,316,000	○	×	×	×		
4	配水場A 配水場B 取水場A	○	○	—	運転	停止	64.1	4.9	4.8	4.8	1,582,000	○	×	×	×		
5	配水場A 配水場B 取水場A	○	○	—	運転	停止	57.5	4.8	4.9	4.8	2,019,000	○	×	×	×		
6	配水場A 配水場B 取水場A	○	○	—	運転	停止	64.7	4.8	4.8	4.8	1,532,000	○	×	×	×		
7	配水場A 配水場B 取水場A	○	○	—	運転	停止	56.9	4.9	4.9	4.8	2,070,000	○	×	×	×		
8	配水場A 配水場B 取水場A	○	○	—	運転	停止	57.5	4.8	4.9	4.8	2,019,000	○	×	×	×		

※配水中のPFOS、PFOA濃度において、ピンク地に赤字の地点では目標浄水水質の基準を超過

### 3.2 対策方針の設定

前節の結果を踏まえ、PFOS、PFOA 対策として用水供給からの受水の増量、クリプトスポリジウム対策として紫外線処理を導入するパターンが最も現実的な対策方針と判断された。特に、老朽化懸念がある取水場 A の更新を不要とするパターン 1-2 が有力な対策方針である。他方、本対策方針では、用水供給からの受水比率については現況の 23.4 %から 78.3 %へ増加しており、受水依存度の増加に伴う、災害時の供給安定性の低下等の懸念がある。用水供給からの受水については、PFOS、PFOA 対策として採用していることから、目標浄水水質とのトレードオフとなる。そのため、事業体 A における自己水の活用方針と目標浄水水質との妥協点を探り、今後の対策方針を決定していく必要があると考えられる。

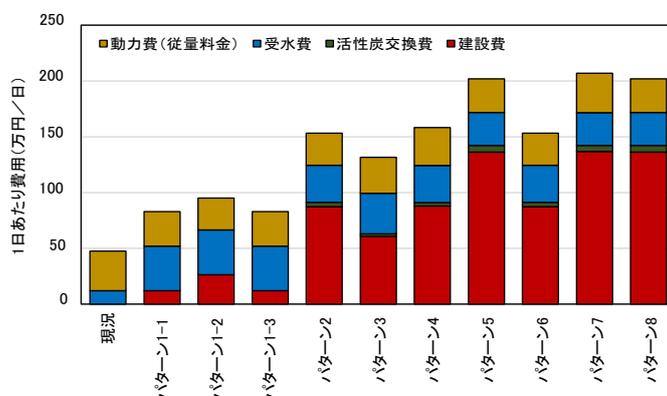


図-4 シナリオ H における各対策方針パターンの 1 日当たりの費用及びその構成比率

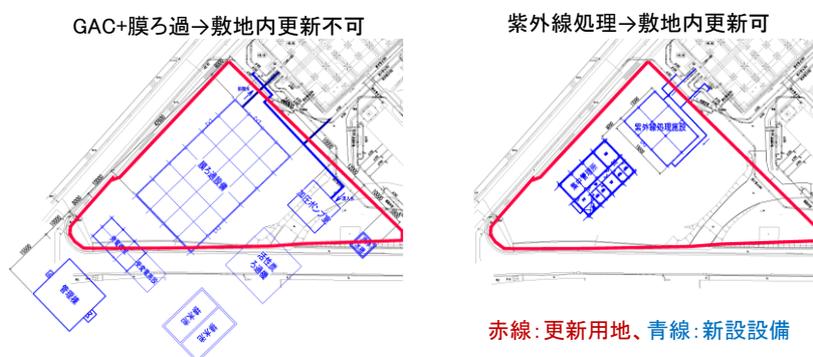


図-5 配水場 A における配置検討の結果(左:GAC+膜ろ過、右:紫外線処理)

### 4. 結論

本稿では、事業体 A の水道を対象として、PFOS、PFOA 及びクリプトスポリジウム対策を統合的に検討するシナリオ分析を実施した事例を示した。検討の結果、PFOS、PFOA 対策として用水供給からの受水の増量、クリプトスポリジウム対策として紫外線処理を導入するパターンが最も現実的な対策方針であると判断された。本稿で示したシナリオ分析は、①対策方針の設定、②水運用シナリオの作成、③水質、コスト、敷地条件による評価の 3 段階からなる。本手法は複数水源を有し、複合的な水質課題を抱える水道事業体において、合理的な対策方針を検討するための有効なアプローチになると考えられる。