PFAS汚染コンクリートに対する溶出防止対策技術

芳賀 直樹[*1]　太田 匡哉[*2]
林 夕紀子[*1]　後藤 ゆかり[*1]
森川 純[*1]　國井 聡[*1]

要　　旨

近年の全国調査により，PFASによる地下水等の汚染が各地で確認されている．PFASは泡消火薬剤の成分として用いられてきたが，代替化が進み国内の保有量が減少する中，過去に行われた消火訓練や誤作動で環境中へ放出されたPFASによりコンクリート構造物等が汚染され，その汚染に起因する新たな汚染拡大が顕在化している．つまり，PFASはコンクリート内部に浸透・吸着され，表面を洗浄する程度では除去されず，再溶出する可能性が懸念されるため，対処工法として，樹脂系防食被覆による溶出防止対策の検討を行った．本論では，室内試験および実施工への適用事例を通じてその有用性を確認した内容をまとめた．

キーワード　有機フッ素化合物／PFOS／PFOA／PFHxS／コンクリート／溶出対策

目　　次

１．はじめに
２．PFOS等の溶出特性と防止対策
３．施工事例
４．まとめ

COUNTERMEASURE TECHNOLOGIES TO PREVENT PFAS RELEASE FROM CONTAMINATED CONCRETE

Naoki　HAGA　**Masaya　OOTA**
Yukiko　HAYASHI　**Yukari　GOTO**
Jun　MORIKAWA　**Satoshi　KUNII**

Synopsis:
Recent nationwide surveys in Japan have revealed widespread contamination of groundwater and related water bodies by per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). Although PFAS have historically been used as key components of firefighting foams, their replacement with alternative agents has progressed, resulting in a gradual reduction of domestic stockpiles. Nevertheless, PFAS released into the environment in the past through accidental discharges or firefighting training activities have led to the contamination of concrete structures, which has emerged as a new environmental challenge.
PFAS can infiltrate into and adsorb onto the internal matrix of concrete, and may subsequently re-leach into water even after surface cleaning. In facilities that remain in service, demolition and removal of contaminated concrete are often impractical. Therefore, mitigation measures to prevent PFAS leaching are required.
In this study, a resin-based protective coating method was examined as a countermeasure to suppress PFAS leaching by physically isolating contaminated concrete from water. The effectiveness of this method was verified through laboratory-scale experiments and its application to actual construction projects.

＊１本店　ICI 総合センター　ICI テクノロジーセンター　環境技術グループ
＊２本店　土木事業本部　PFAS 対策推進室　施工グループ

1. はじめに

1.1 社会背景

有機フッ素化合物の中で，ペル及びポリフルオロアルキル化合物の総称を PFAS と呼び，代表的な物質としてペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS)，ペルフルオロオクタン酸 (PFOA)，ペルフルオロヘキサンスルホン酸 (PFHxS)，及び炭素数 9～21 の長鎖ペルフルオロカルボン酸(LC-PFCA)等があげられる．これらの物質は化学物質審査規制法において第一種特定化学物質に指定されており，製造・輸入及び使用が規制されている [1]．中でも PFOS と PFOA は水質汚濁防止法における要監視項目に位置付けられており，指針値として合計値 50 ng/L 以下が設定されている [2]．近年，環境省，及び各自治体が実施した全国調査により，日本各地の地下水等において指針値を超過する PFAS 汚染が確認され，その実態が明らかとなっている [3]．

図-1 に PFOS，PFOA 及び PFHxS の分子構造式を示す．PFAS は泡消火薬剤の主要成分の一つとして使用されており，主に液体燃料火災の消火に利用される [4]．これらの物質は疎水性基としてペルフルオロアルキル基を有し，親水性基として PFOS と PFHxS はスルホ基を，PFOA はカルボキシル基を有している．これらアニオン性を示す PFAS は，疎水性基と親水性基を有する両親媒性物質であり，水中でミセル構造を形成することで気液界面の表面張力を低下させる．その結果，液体燃料表面に安定な被膜を形成し，「窒息効果」によって消火性能を発揮するとされている [5]．

泡消火薬剤は，これまで消防機関，空港，自衛隊関連施設，及び石油精製所 [6]において，火災時の消火活動や訓練を目的として広く使用されてきた．しかし，PFOS 及び PFOA に対する規制強化に伴い，これらを含有しない泡消火薬剤への切替えが推奨されている [7]．その結果，日本国内に保管されている PFOS 及び PFOA 含有泡消火薬剤は，全国調査によれば，令和 2 年度時点の 338.8 万 L から令和 4 年度時点では 185.0 万 L まで減少した [6]．一方で，依然として PFAS 含有泡消火薬剤を保管している施設は存在しており，これらの漏えい又は流出に起因する環境汚染が報告されている．

流出事故発生時には，PFAS 含有泡消火薬剤が水質汚濁防止法における指定物質に位置付けられたことにより，事故時の届出が義務付けられている [8]．一方で，これまでの対応は漏えいした泡消火薬剤の回収を中心としており，PFAS 含有泡消火薬剤が接触したコンクリート構造物等への残留影響や二次的な溶出リスク，さらにはその対策手法については十分な検討がなされていない．

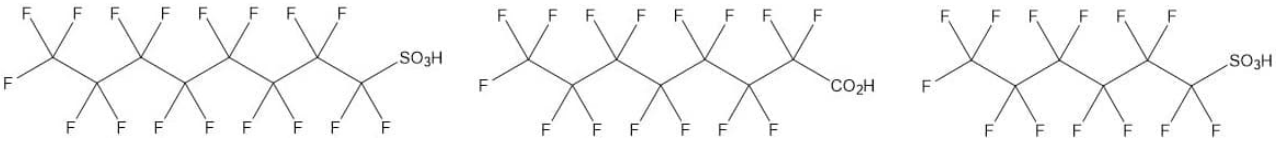
1.2 PFOS 等含有コンクリート

コンクリートは，内部に微細構造を有する材料であり，その材料特性から，外部の液相及び気相成分を内部に拡散・浸透させることが知られている．

海外では，消防訓練場から採取した PFAS 含浸コンクリートコア供試体を対象として長期的な溶出挙動を調査した結果，コンクリート中に含浸した PFAS が雨水等を介して周辺環境へ拡散する可能性を示唆した報告がなされている [9, 10]．また，コンクリート材料と PFAS の吸着・脱着挙動については，両者の物理化学的相互作用や共存物質の影響に起因するとする報告もある [11]．このような知見は，コンクリート中に保持された PFAS が吸着・脱着を繰り返すことで，将来的に周辺環境へ再放出される可能性を有することを示している．

近年，国内において，コンクリート製水槽に泡消火薬剤が流入したことにより，水槽躯体自体が PFAS に汚染された事例が報告されている [12]．当該事例では，水槽内部の洗浄を繰り返し実施したにもかかわらず，再度貯留した水から高濃度の PFAS が検出された．これは，水槽躯体の表面部及び内部に PFAS が付着・浸透し，その後再溶出したためと考えられる．したがって，このような PFAS 汚染コンクリート構造物に対しては，PFAS の再溶出を抑制ための対策を講じる必要がある．

PFAS に汚染されたコンクリートについて，当該施設の供用が終了している場合には，解体後に「PFOS および PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項 [13]」に従い，適切に処理・処分することが望ましい．一方，現在も供用中の施設においては，既設コンクリートの解体・撤去を伴う対策の適用は現実的ではなく，PFAS の溶出防止対策を講じた上で継続利用を図ることが求められる．そこで，本研究では PFAS 溶出防止対策の一手法として防食被覆工法に着目した．本工法は，樹脂系材料をコンクリート表面に被覆することで，コンクリート表層部及び内部に含浸・吸着した PFAS を外部の水と物理的に遮断し，PFAS の再溶出及び周辺環境への拡散を抑制することを目的とするものである．　本論では，PFOS，PFOA，及び PFHxS（以下，「PFOS 等」という．）を含



(a)PFOS　(b)PFOA　(c)PFHxS

図-1　PFOS・PFOA・PFHxS の分子構造式

有するコンクリートからの再溶出現象について確認するとともに，室内試験により明らかにした防食被覆工法の有用性及び実施工事への適用事例についても報告する．

2．PFOS 等の溶出特性と防止対策

2.1 試験概要

PFOS 等を含む水溶液にコンクリート供試体を浸漬した後，風乾することで PFOS 等含有コンクリート供試体を作製した．作製した PFOS 等含有コンクリート供試体を水道水に浸漬し，約 1 ヵ月間静置した．その間，複数回にわたり浸漬水を採取し，水相中の PFOS 等濃度の経時変化を測定することで，コンクリートからの溶出挙動を確認した．また，PFOS 等含有コンクリート供試体の表面に防食被覆工法で用いられる樹脂材料を塗布し，コンクリート内部に含有される PFOS 等の溶出抑制効果を検証した．さらに，防食被覆を施したコンクリート供試体を PFOS 等含有水に浸漬した後，供試体を取り出して水洗浄し，再び水道水に浸漬した．その後，水相中の PFOS 等濃度の経時変化を測定することで，防食被覆後のコンクリート供試体に対する PFOS 等の付着抑制効果について検証をした．

2.2 試験方法

(1) PFOS 等含有コンクリートの作製

水道水に PFOS 等の標準試薬を添加し，それぞれの初期濃度が 100,000 ng/L 程度となる PFOS 等水溶液を調製した．本論で用いたコンクリート供試体は，**表-1** に示す配合条件により作製し，寸法を 300 mm × 300 mm × 60 mm とした．供試体の作製フローを**図-2** に示す．

コンクリート供試体を PFOS 等水溶液に 14 日間浸漬した後，供試体を取り出してバット上で 5 日間風乾した．その後，コンクリート中への PFOS 等の含浸量を測定するため，供試体を粉砕し，メタノール抽出により PFOS 等濃度を測定した．

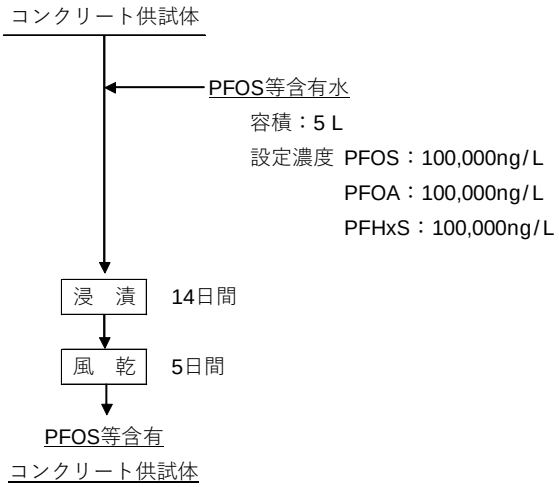


図-2　PFOS 等含有コンクリートの作製フロー

表-1　コンクリート配合条件

項目	記号	条件
水セメント比	W/C	47%
スランプ	Sl	15.0±2.0 cm
空気量	A	1.0±1.0%
粗骨材最大寸法	G_{MAX}	15 mm
塩化物量(塩化物イオン量)	Cl^-	0.30 kg/m^{3}以下

(2) PFOS 等含有コンクリート供試体からの溶出確認試験

PFOS 等含有コンクリート供試体を 5 L の水道水に浸漬し，約 1 か月間静置した．浸漬期間中は定期的に採水を行い，水相中の PFOS 等濃度の経時変化を測定した．その後，供試体を取り出して表面の水滴を除去した後，新たに調製した 5 L の水道水に再度浸漬し，同様の試験を実施した．この操作を計 4 サイクル繰り返し，コンクリート供試体からの PFOS 等の溶出挙動を評価した．
試験フローを**図-3** に示す．

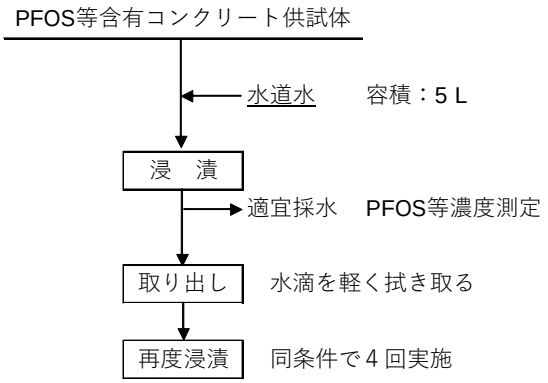
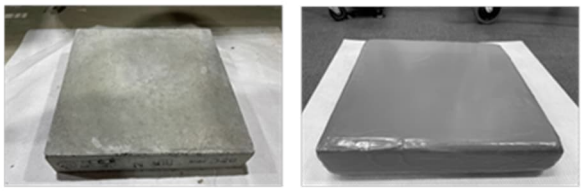


図-3　コンクリート供試体からの再溶出試験

(3) 防食被覆コンクリート供試体の作製

防食被覆コンクリート供試体の作製を行った．

図-4 に防食被覆施工前後の供試体の外観を示す．前述の方法にて作製した PFOS 等含浸コンクリート供試体の表面に防食被覆材を塗布し，1 日間乾燥させた後，裏面についても同様に塗布することで，供試体全面を樹脂で塗装した．本論では，日本下水道事業団の防食被覆工法に



(a)被覆前　　(b)被覆後　※モノクロ

図-4　コンクリート供試体

おける「C 種」相当の塗膜仕様となるように，防食層を 2 回に分けて施工した．また，ウェットゲージを用いて各層の施工膜厚を確認した．さらに，実際の施工を想定し，防食層 1 層目の塗装後にピンホールが発生した場合には，当該箇所の補修を実施した．その後，2 層目の防食層を施工し，防食被覆材を十分に硬化させるため，気中で 2 週間養生した．

(4) PFOS 等溶出抑制効果の確認試験

防食被覆済みのコンクリート供試体を，5 L の水道水を入れた個別容器に浸漬し，14 日間静置した．浸漬期間中は定期に採水し，水相中の PFOS 等濃度を測定した．

図-5 にフロー図を示す．

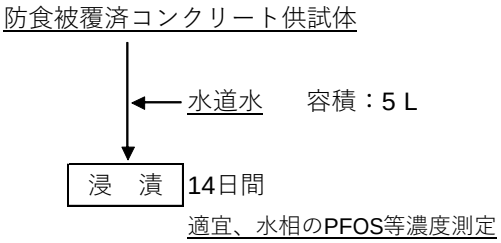


図-5　PFOS 等溶出抑制効果の確認試験

(5) 防食被覆後の PFOS 等付着性の確認

水道水に PFOS 等の標準試薬を添加し，それぞれの濃度が 100,000 ng/L となる PFOS 等水溶液を調製した．防食被覆コンクリート供試体を同水溶液に 5 日間浸漬した後，供試体表面をスポンジにより軽く水洗浄した．次いで，各供試体を 5 L の水道水を入れた個別容器に浸漬し，水相中の PFOS 等濃度の経時変化を測定した．これにより，防食被膜表面に付着した PFOS 等の残留性を評価した．

図-6 にフロー図を示す．

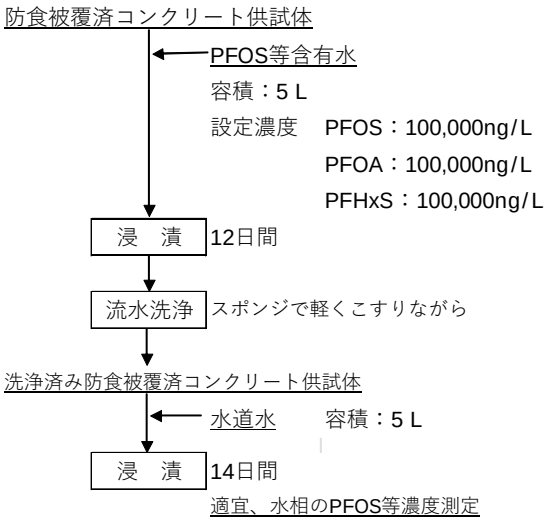


図-6　防食被覆後の PFOS 等付着性確認試験

2.3 分析方法

(1) コンクリート中の含有量測定方法

コンクリート中の PFOS 等含有量については，現時点で公定の測定方法が確立されていない．このため，土壌に対しての測定方法である「土壌中の PFOS，PFOA 及び PFHxS の暫定測定方法について」[14]を参考に分析を実施した．なお，筆者らは既報において，当該方法を適用することでコンクリート中に含有する PFOS 等の濃度を測定可能であることを確認している [15]．

PFOS 等含浸コンクリート供試体を粉砕し，その試料約 5 g を採取した後，0.3 %アンモニア含有メタノール 30 mL を添加して超音波抽出を行った．得られた懸濁液を遠心分離し，上澄み液を 100 mL メスフラスコへ移した．この抽出操作を 3 回繰り返し，得られた抽出液に内標準物質を添加した．さらに前処理による精製を行った後，LC/MS/.MS を用いて PFOS 等濃度を測定した．

(2) 水試料測定方法

測定は，「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（令和 2 年 5 月 28 日環水大水発第 2005281 号 環水大土発第 2005282 号 環境省通知）」[2] を準用して実施した．

採取した水試料に内標準物質を添加し，必要に応じて精製操作を行った後に LC/MS/.MS にて PFOS 等濃度を測定した．

(3) 機器測定条件

LC は Sciex 社製 ExionLC，分離カラムは Phenomenex 社製 Kinetex C18 充填剤粒径 2.6 μm カラムサイズ 50×3.0 mm，MS は Sciex 社製 QTRAP4500 を用いた．**表-2** に測

表-2　測定条件

LC条件			
機器名称	：	SCIEX社製	ExionLC
カラム	：	Phenomenex社製 Kinetex® C18 2.6 μm 50×3.0mm	
注入量	：	15 μL	
カラム温度	：	40℃	
移動相	：	A液：0.02%ギ酸、2mM酢酸アンモニウム含有水	
		B液：メタノール	
	0 ～ 8.25min	A液：80%→2.0%	B液：20%→98%
	8.25 ～ 11min	A液：2.0%	B液：98%
	11 ～ 11.1min	A液：2.0%→80%	B液：98%→20%
	11.1 ～ 15min	A液：80%	B液：20%
流速：	0.6mL/min		

MS/MS条件				
機器名称	：	SCIEX社製	QTRAP4500	
イオン化法	：	ESI Negative		
SRM条件	：	PFOS	499→80(定量用)	499→99(確認用)
		PFOA	413→369(定量用)	413→169(確認用)
		PFHxS	399→80(定量用)	399→99(確認用)
		$^{13}C_8$-PFOS	507→80	
		$^{13}C_8$-PFOA	421→376	
		$^{13}C_3$-PFHxS	402→80	

定条件を示す.

2.4 結果と考察

(1) PFOS 等含有コンクリートの濃度確認結果

作製した PFOS 等含有コンクリートの各 PFOS 等含有濃度を**表-3** に示す．なお，表中の「含有量」は各コンクリート供試体を重量 11.5 kg となるように作製したことから，

表-3 PFOS 等含有コンクリート分析結果

項目(単位)		PFOS	PFOA	PFHxS
含有濃度	(ng/g)	19.0	5.52	8.76
含有量	(ng)	218,500	63,480	100,740
最大溶出濃度	(ng/L)	43,700	12,696	20,148

1 供試体中に含有される PFOS 等の総量を示す．また，「最大溶出濃度」は供試体中に含有する PFOS 等の全量が浸漬水 5 L に溶出すると仮定した場合の理論濃度として算出したものである．

(2) PFOS 等含有コンクリート供試体からの溶出確認試験結果

PFOS 等含有コンクリート供試体を 5 L の水道水に浸漬し，約 1 か月間静置した．浸漬期間中に計 8 回の採水を実施し，水相中の PFOS 等濃度の経時変化を測定した．

結果を**図-7**～**図-9** に示す．

PFOS，PFOA 及び PFHxS ともに類似した濃度推移を示した．溶出濃度が比較的高かった浸漬 1 回目では約 200 時間後，浸漬 2 回目では約 400 時間後に水相中の PFOS 等濃度が概ね平衡に達したと考えられた．一方，溶出濃度が低下した浸漬 3 回目及び 4 回目では，浸漬開始から約 800 時間が経過した時点においても平衡には達していなかった．

以上の結果から，PFOS 等の溶出濃度が高い条件ほど，水相中濃度が平衡に達するまでの時間が短くなる傾向が示唆された．

また，各浸漬サイクルにおける最終採水試料の測定結果を**図-10** に示す．なお，指針値との比較を考慮し，PFOS 及び PFOA の合計濃度（PFOS＋PFOA）により評価を行った．

浸漬回数に対する水相中の PFOS＋PFOA 濃度の測定結果を**図-2.4.**に示す．

この試験結果から近似式[1]が導かれた．

$$y = 20764e^{-0.751x} \qquad [1]$$

ここで，y：水相の PFOS＋PFOA 濃度，x：浸漬回数（水の入れ替え回数）である．

本式より，y が 50 となる x を算出した結果，その値は 8.0 となった．これは，PFOS+PFOA 濃度を指針値である 50 ng/L 以下までに低減するためには，約 8 回の水の入れ替えが必要であることを示している．しかし，コンクリート製水槽に貯留された水の浄化においては，8 回に及ぶ水の入れ替えに要する期間や排水処理・廃棄費用を考慮すると，本手法の適用は効率的とは言い難い．一方，防食被覆工法は，PFAS の再溶出を抑制することで，繰り返しの水の入れ替えを要しないため，施工期間及びコストの両面で有効な対策方法であると考えられた．

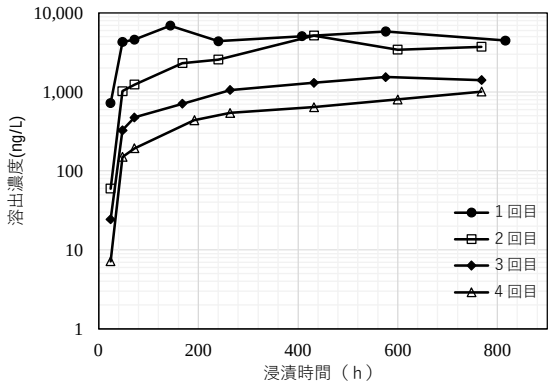


図-7 浸漬試験結果（PFOS）

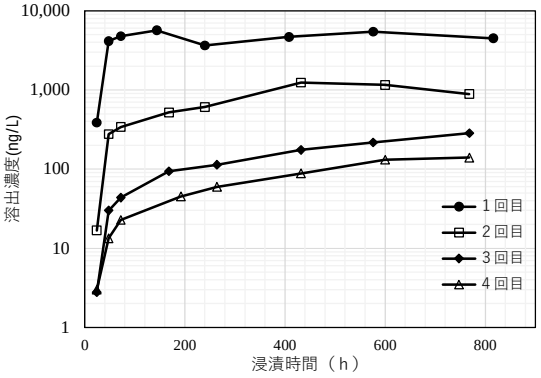


図-8 浸漬試験結果（PFOA）

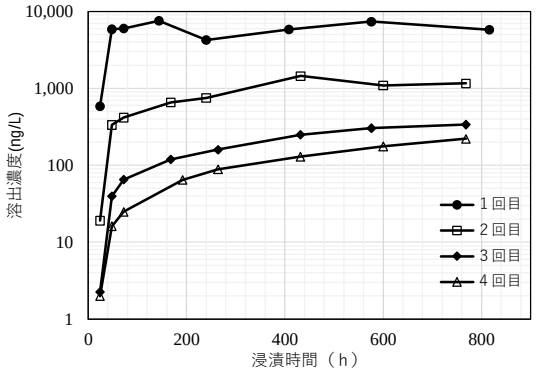


図-9 浸漬試験結果（PFHxS）

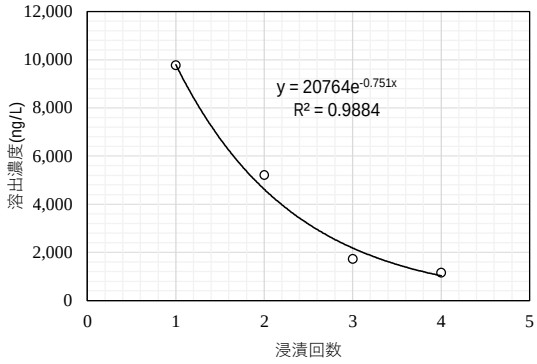


図-10 浸漬試験結果（PFOS+PFOA）

(3) PFOS 等溶出抑制効果の確認試験結果

PFOS 等含有コンクリート供試体に防食被覆を施した供試体を対象として浸漬試験を実施した．その結果を**図-11** に示す.

本試験における各対象物質の定量下限値は 2 ng/L とした．約 380 時間の浸漬期間中，PFOS 及び PFHxS はいずれの採水試料からも検出されなかった．一方，PFOA については，最終採水時の試料から 3 ng/L が検出されたのみであった．また，前節(2)で示した防食被覆未施工の PFOS 等含有コンクリート供試体からの溶出量と比較した結果, PFOS で 99.8%，PFOA で 97.9%，PFHxS で 99.1% の溶出量低減が得られた.

以上の結果から，PFOS 等を含有するコンクリートに防食被覆を施工することで，水相への PFOS 等の溶出を著しく抑制できることが確認された.

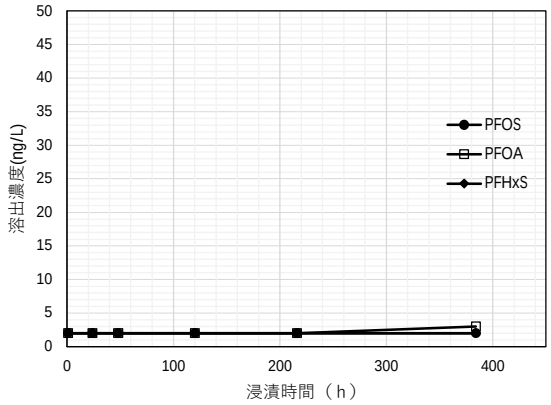


図-11 溶出抑制効果確認結果

(4) 防食被覆後の PFOS 等付着性の確認結果

防食被覆工法の適用性を評価する上では，防食被覆施工後の PFOS 等の付着特性についても確認する必要がある．そこで，防食被覆コンクリート供試体を PFOS 等水溶液に 5 日間浸漬した後，供試体を取り出して水洗浄を行い，その後 5Lの水道水に浸漬した．浸透期間中に採水を行い，水相中の PFOS 等濃度を測定することで，防食被覆面への PFOS 等の付着性及び洗浄による除去性を評価した．試験結果を**図-12** に示す.

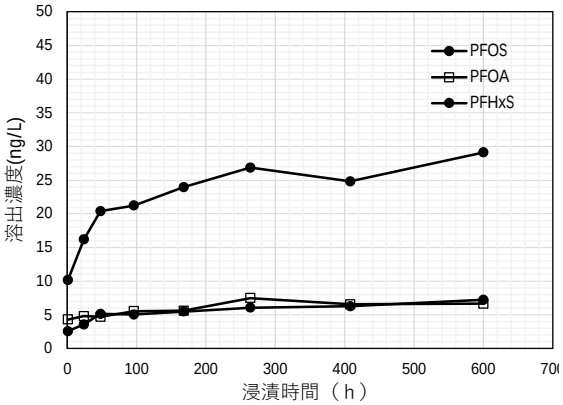


図-12 防食被覆コンクリートに対する付着性確認試験結果

PFOS，PFOA 及び PFHxS のいずれも検出されたものの，その濃度はいずれも 50 ng/L を十分に下回った．また，各物質とも浸漬開始後約 48 時間までは濃度上昇傾向を示したが，その後は概ね横ばいで推移した．この濃度推移から，さらに長時間浸漬した場合においても，PFOS 等濃度が 50 ng/L を超過する可能性は低いものと判断された.

また，本結果で確認された濃度レベル及び濃度推移を踏まえると，検出された PFOS 等は供試体内部へ浸透したものが再溶出したのではなく，防食被覆表面に付着していた PFOS 等が水相に移行したものと考えられた．本検討では，PFOS 等水溶液へ浸漬後の供試体洗浄を，流水下でスポンジを用いて軽く擦る程度の条件で実施した.

一方，実際の施工では高圧洗浄機やブラシ洗浄等によるより十分な洗浄が可能であることから，洗浄後に貯留される水中の PFOS 等濃度はさらに低減できるものと考えられる.

以上の結果より，コンクリートに防食被覆を施工することにで，PFOS 等含有水が再度接触した場合においても，比較的簡単な水洗浄によって付着した PFOS 等を除去できることが確認された.

3．施工事例

3.1 現場概要

本事例は，消火設備に付帯するコンクリート製水槽に貯留された消火用水から PFOS 等が検出された事案である．消火設備の機能を回復するためには，貯留水中の PFOS 等の濃度を低減し，消火用水として利用可能な状態にする必要があった.

対象となる貯水槽は敷地内に 3 箇所あり，それぞれ貯留水量及び PFOS 等濃度が異なっていた．各サイトにおける貯水槽水の分析結果を**表-4** に示す．特にサイト③では PFOS 等濃度が高く，コンクリート製水槽の内壁部に PFOS 等が付着・浸透していることが懸念された.

表-4　浄化対象水の水質及び水量

分析項目		単位	サイト①	サイト②	サイト③
PFAS	PFOS	ng/L	1,100	330	25,000
	PFOA	ng/L	126	20	2,300
	PFHxS	ng/L	500	310	5,200
	合計	ng/L	1,726	660	32,500
陰イオン	硫酸イオン	mg/L	10	7.7	18
	硝酸イオン	mg/L	3.6	1.5	3.8
	塩化物イオン	mg/L	55	67	97
	フッ化物イオン	mg/L	<0.05	<0.05	<0.05
アルカリ度(pH4.8)		mg-$CaCO_3$/L	180	52	150
総溶解固形物（TDS）		mg/L	330	270	320
全有機炭素（TOC)		mg/L	7.8	11	0.7
pH		-	8.8	8.3	8.6
EC		mS/m	51	44	50
貯水量		m^3	94	44	750

一般に，このような PFOS 等を含有する消火用水は焼却処分されることが多い．しかし，そのためには PFAS 含有廃棄物を処理が可能な処分施設まで輸送する必要がある．本事例では処理対象水量が合計 888 m^3に及ぶことから，遠方の処分施設への搬出は現実的ではなかった．また，対象施設の立地条件を考慮すると，水資源の有効利用を図ることも重要な課題であった．

そこで，本事例ではコンクリート製貯水槽内面からの PFOS 等の再溶出を抑制するため，防食被覆工法を適用するとともに，オンサイトでの PFOS 等含有水の浄化処理を実施した．これにより，消火用水を廃棄することなく水質改善を図り，消火設備の機能正常化を目的とした対策工事を実施した．

3.2 施工方法

本事例では，コンクリート製水槽躯体中の PFOS 等含有量の調査は実施していない．しかしながら，貯水槽内壁への PFOS 等の付着及びコンクリート内部への PFOS 等の浸透が生じているものと想定し，対策工事計画を策定した．

図-13 に施工完了時における設備構成の概略イメージ図を示す．

本対策では，PFOS 等含有水の浄化処理により PFOS 及び PFOA の合計濃度を 50 ng/L 以下まで低減するとともに，コンクリート製水槽内面に防食被覆を施工することで，躯体からの PFOS 等の再溶出防止を図った．

コンクリート製水槽内に貯留されていた PFOS 等含有水は，筆者らが開発した浄化装置（De-POP's ION）で浄化しながら仮設水槽へ移送した．吸着浄化の概念図を**図-14** に示す．浄化処理期間中は，定期的に PFOS 等濃度を測定し，その結果に基づいて工程管理を実施した．

貯水槽内の水を移送した後，空となったコンクリート製水槽について，高圧洗浄機等を用いた洗浄及び下地処理を実施した．その後，防食被覆材を施工し，被覆材が十分に硬化したことを確認した後，槽内の洗浄を再度実施した．次いで，仮設水槽に移送していた浄化済みの消火用水を水槽に戻し，一定期間静置した．その後，貯留水を採取して PFOS 等濃度を測定し，PFOS 及び PFOA の合計濃度（PFOS＋PFOA）が 50 ng/L 以下であることを施工完了判定の要件の一つとした．

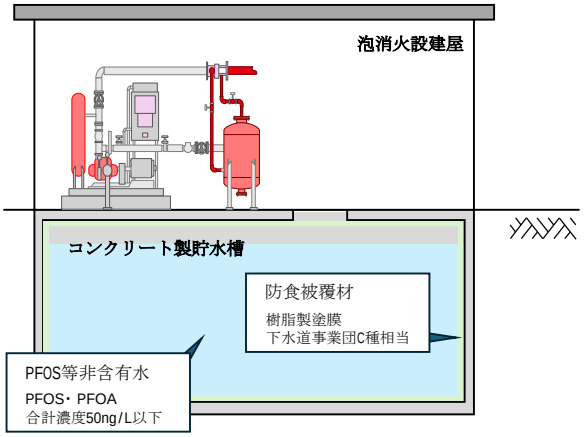


図-13　施工完了後の施設イメージ

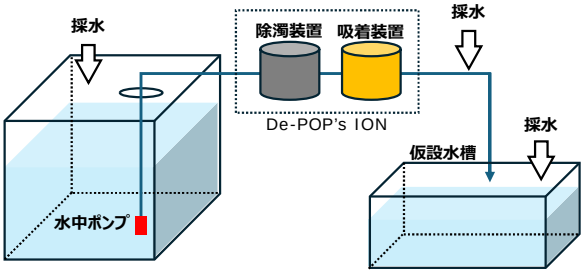


図-14　吸着処理による PFOS 等含有水浄化

3.3 結果と考察

各サイトの消火用水の PFOS 等測定結果を図-15 に示す．なお，浄化処理後に仮設水槽へ貯留した状態の水の分析結果を「吸着処理後」，仮設水槽から防食被覆後の貯水槽に戻した後に採水した結果を「貯水槽内消火用水」として示した．

その結果，いずれのサイトにおいても，「吸着処理後」及び「貯水槽内消火用水」における PFOS 及び PFOA の濃度は定量下限値未満（2 ng/L 未満）であった．

以上の結果から，吸着処理により消火用水中の PFOS 等が除去されるとともに，防食被覆工法によりコンクリート製水槽内壁からの PFOS 等の再溶出が抑制されたものと考えられた．これにより，消火用水の水質改善及び消火設備の機能正常化を達成できたと判断した．

4．まとめ

PFOS 等を含有する泡消火薬剤は過去に広く使用されていたことから，全国各地の消火設備において PFOS 等が付着・残留している可能性がある．特に，消火設備に付帯す

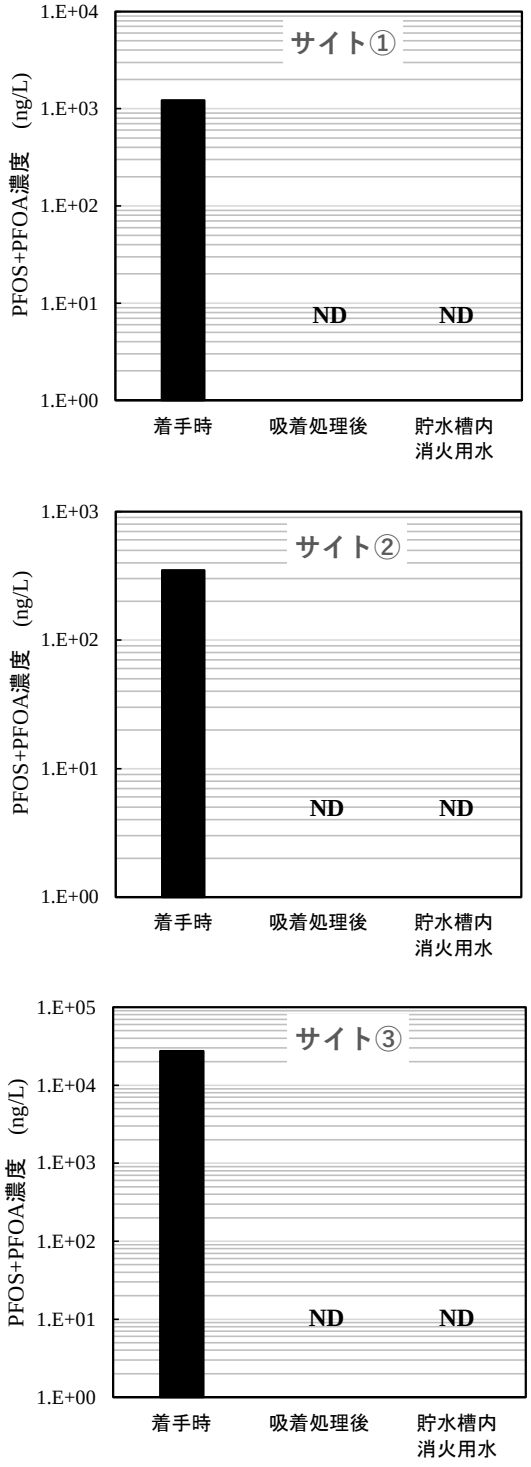


図-15　各サイトにおける PFOS 等浄化結果

る貯水槽では，貯留水から PFOS 等が検出される事例が各地で報告されている．コンクリートに付着又は浸透した PFOS 等は，水との接触により再溶出し，二次的な汚染源となる可能性があるため，その対策が求められている．

本研究においても，コンクリートに付着・浸透した PFOS 等は，清浄な水への浸漬を繰り返した場合であっても，溶出濃度を PFOS 及び PFOA の指針値である 50 ng/L 以下まで低減することが容易ではないことを確認した．

一方，筆者らが検討した防食被覆工法は，コンクリートと水との接触を物理的に遮断することにより，PFOS 等の再溶出を効果的に抑制できることを確認した．また，PFOS 等含有水の処理については，焼却処分に代わる手法として吸着処理が有効であることを確認した．

さらに，実施工事例において，防食被覆工法と吸着処理を組み合わせることで，高濃度の PFOS 等含有水を貯留している，あるいは過去に貯留していたコンクリート製貯水槽に対して，PFOS 等濃度を効果的に低減できることを確認した．

以上より，防食被覆工法と吸着処理の併用は，PFAS 汚染が懸念されるコンクリート製貯水槽における有効な対策手法の一つとなり得るものと考えられた．

参考文献

1) 経済産業省：第一種特定化学物質一覧 https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/kasinhou/about/class1specified_chemicals_list_20250218r.pdf
2) 環境省：環水大水発第 2005281 号，環水大土発第 2005282 号，令和 2 年 5 月 28 日
3) 環境省：令和 5 年度公共用水域水質測定結果，令和 7 年 4 月，https://www.env.go.jp/content/000310475.pdf
4) 環境省：PFOS 等含有泡消火薬剤在庫量調査マニュアル（参考資料）参考資料 - 1, https://www.env.go.jp/content/000388649.pdf
5) 環境省：PFOS 等を含有する消火器・泡消火薬剤等の取り扱い及び処理について
6) 環境省：令和 6 年 11 月 1 日，PFOS 等含有泡消火薬剤全国在庫量調査の結果について https://www.env.go.jp/press/press_03919.html
7) 環境省：令和 8 年 3 月 27 日，PFOS 等含有泡消火薬剤に関する調査への協力について https://www.env.go.jp/press/press_03919.html
8) 環境省：令和 4 年 12 月 23 日，環水大水発第 2212233 号
9) Phong K.Thai：Journal of Hazardous Materials Letters, 3, 2022, Release of perfluoroalkyl substances from AFFF-impacted concrete in a firefighting training ground (FTG) under repeated rainfall simulations
10) Christine Baduel：Journal of Hazardous Materials, 296, 2015, pp.46–53, Perfluoroalkyl substances in a firefighting training ground (FTG),distribution and potential future release
11) G.B. Douglas: Science of the Total Environment, 887 , 2023 , PFAS contaminated asphalt and concrete - Knowledge gaps for future research and management
12) 沖縄県総務部管財課：令和 6 年 2 月 15 日，沖縄県庁泡消火剤流出, https://www.pref.okinawa.lg.jp/kensei/kencho/1014074/10

22967.html
13) 環境省：PFOS および PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項，2022 年 9 月 https://www.env.go.jp/content/000077696.pdf
14) 環境省：土壌中の PFOS，PFOA 及び PFHxS に係る暫定測定方法（溶出量試験） https://www.env.go.jp/content/000150448.pdf
15) 芳賀直樹，林夕紀子，國井聡，森川純：セメント供試体に含まれる PFOS 等の含有量分析に関する基礎的検討，第 33 回環境化学討論会，pp.236‐237，2025