水環境学会誌　Journal of Japan Society on Water Environment　Vol.40, No.3, pp.145–152（2017）
〈調査論文 ― Survey Paper〉

焼却施設解体時の除染排水に適用した水処理システムによる有害物質の除去特性

柳　橋　寛　一[1),¶]　　小　林　幹　佳[2)]

Removal Characteristics of Water Treatment Systems Applied to Deconstruction Effluents

Tomokazu YANAGIBASHI[1),¶] and Motoyoshi KOBAYASHI[2)]

[1)] Penta-Ocean Institute of Technology, Yonkucho 1534–1, Nasushiobara-shi, Tochigi 329–2746, Japan
[2)] Faculty of Life and Environment Sciences, University of Tsukuba, Tennodai 1–1–1, Tsukuba, Ibaraki 305–8572, Japan

Abstract

In this study, we applied a water treatment system comprising the coagulation precipitation, membrane filtration, and advanced oxidation processes to the wastewater discharged by the wet decontamination process of incineration plants. As a result, heavy metals and dioxins included in the discharged wastewater were removed to below the environmental standards. In this process, the floc formation process by the coagulation of submicron-sized particles is important as this process affects the decomposition of dioxins in the advanced oxidation process. The existence of large flocs formed from submicron-sized particles might remove the need for the advanced treatment process from the water treatment system. However, it is important to consider the various conditions related to all processes, such as the nature of the target raw water, the constraints of the site, the type of by-product waste, and the cost, to build the optimum water treatment system.

Keywords: Coagulation process; Membrane filtration; AOP; Decontamination wastewater; Dioxins

1. はじめに

2000年代に入り環境法令が整備・強化され環境浄化の工事が増えている[1)]。土壌汚染対策法を背景とした土壌汚染の浄化工事[2)]やダイオキシン類特別措置法に基づく焼却施設解体工事[3)]，また埋設廃棄物対策[4)]などは，人への健康被害のリスクを積極的に取り除く代表的な環境浄化対策である。これらの工事は汚染源に対する直接的な働きかけであり，浄化の過程において多種の有害物質を高濃度に含む濁水を発生する。一般的な建設工事において発生する濁水は，その水量や水質，濃度が工事の種類や工法，地質，水文などによって相当に異なる。濁水処理の設計では，これらの濁水の性状を与条件として目標処理水質を確保できる処理方法を検討し，処理によって発生する二次廃棄物の処分までを含めた経済的なシステムを構築する[5)]。環境浄化対策における水処理の設計では，有害物質をさらに厳しい環境基準まで処理することが求められる。実際の施工段階では，目標処理水質を達成するための費用やエネルギーが，当初の設計段階よりも多大になることがある。これは処理に投入される費用やエネルギーは処理対象物質の種類や濃度によって一義的に決められるものではなく，共存物質の性状や濃度によって有害物質の除去特性が大きく左右されるためだと考えられる。しかし，設計段階においてこれら共存物質の性状や濃度を事前にすべて把握し，設計に反映することは難しい。

焼却施設解体工事を例にとると，解体前に実施される焼却設備の洗浄過程（除染工程）において，各設備に付着している灰に起因するダイオキシン類（以下，DXNsと表記）や重金属類などの有害物質を含む除染排水が発生する。これらの有害物質はSSに吸着されたり，コロイド粒子や溶存態として水中に存在しており，おもに凝集沈殿による処理が適用されている[6, 7)]。しかし，凝集沈殿のみで基準値以下へ有害物質を除去することは困難なことが多く，実際には膜分離による固液分離操作や促進酸化法などの分解処理技術，活性炭による吸着処理などの高度処理が併用されている。焼却灰に由来する水中DXNsの除去特性の知見としては，田路ら[8)]や野馬ら[9)]が最終処分場の浸出水処理施設においてDXNsの除去特性を調査し，凝集沈殿処理によって高い除去効果が得られることを示している。また堤ら[10)]は，焼却炉スクラバ排水を対象とした凝集沈殿処理において，凝集剤の添加量を最適化して粒径画分が0.1 μm未満の浮遊性物質を除去することにより，DXNsを排水基準値以下まで除去で

1）五洋建設株式会社技術研究所　〒329–2746　栃木県那須塩原市四区町1534–1
2）筑波大学生命環境系　〒305–8572　茨城県つくば市天王台1–1–1
¶　連絡先：tomokazu.yanagibashi@mail.penta-ocean.co.jp

きることを示唆している。膜処理については，焼却施設解体工事排水に含まれるDXNsの除去効果が田中ら[11]によって示されており，実工事の適用事例も紹介されている[12]。促進酸化処理については，溶存するDXNsや難分解性有機化合物を分解する処理技術として，浸出水処理施設でも適用されている[13]。

焼却施設解体工事で発生する除染排水の水質や濃度は，未燃分の有機物，機器に付着する鉄分や油，灰分や土砂などの粒子状物質などが混入するため，各サイトや除染工程によって変動すると考えられる。したがって処理対象物質の除去特性は様々な共存物質との相互作用を踏まえた上で検討される必要がある。しかし，このような条件下において統一された標準設計例は示されていない。そのため処理能力の安全率や事業コストの最適化を判断する実務における計画段階では，過去の事例に頼らざるを得ない。したがって，さまざまな適用事例を蓄積し公表していくことは重要である。

本論文では，焼却施設解体工事が行われた某サイトに適用された凝集沈殿処理，膜ろ過処理，促進酸化処理からなる水処理システムについて，有害物質の除去特性を検討した事例を報告する。検討においては，2系統の凝集操作による処理実験をおこない，凝集操作が他の処理プロセス（膜処理，促進酸化処理）の除去特性に与える影響について考察した。処理対象となる原水は除染工程に影響を受けることから，焼却設備に残留している灰のDXNs濃度の調査と，除染工程での原水水質の調査も実施した。また，いくつかの解体工事現場において，除染排水中の有害物質（DXNs）濃度を調査した結果と，環境浄化対策工事に適用される水処理のコストを調査した結果についても報告する。

2. 調査方法

2.1 除染排水の有害物質濃度の実態調査

解体工事がおこなわれている焼却施設において発生した除染排水を採取し，工業用水・工業排水中のダイオキシン類の測定方法（JIS K 0312）に基づき，DXNs濃度を測定した。4施設（Y, K, O, Hと表記）を調査対象に選定し，各施設の電気集塵機の除染期間内に発生する排水を採取した。そのうちH施設については，焼却炉や煙突などの5設備の除染排水も採取した。また，これらの測定結果と環境省が平成11年に実施した最終処分場の実態調査[14]で示されている浸出水のDXNs濃度（47事例）の最大値とを比較した。

2.2 汚染サイトに適用される水処理費用の実態調査

平成15年から平成24年にかけて環境浄化対策（焼却施設解体工事，土壌汚染対策工事など）に水処理設備を適用，または適用を検討した事例について水処理費用を調査した。処理費用は，汚染サイトにおける処理対象物質，処理能力，運転期間，処理目標値の条件を設定し，水処理業者が算出する価格の中から設置工事費，機器損料，運転管理費，薬剤費を抽出し，これらを合計したものとした。処理対象物質の初期濃度は各汚染サイトによって異なるものの，処理目標値は排水基準で統一されている。得られた結果は，処理対象物質ごとにSS（10件），DXNs（5件），VOCおよび油（11件），重金属類（4件）の4グループに分類した。

2.3 焼却施設解体工事への水処理システムの適用事例

適用サイトは**2.1**で示したY施設である。まず**2.3.1**および**2.3.2**で工事の概要を示し，**2.3.3**に調査内容を示す。

2.3.1 除染排水の発生過程

本適用事例における除染排水は，高圧水による洗浄で発生したものである。**Fig. 1**（**b**）に，排水処理設備の運転時時間における除染工程を示す。除染工程で発生した排水は，地下浸透防止のために既設建屋内に打設された底版コンクリートをつたい，旧排水処理室内にある集水ピットに一旦貯留される（**Fig. 1**（**a**））。ここで，砂礫分が沈降した上層水を水中ポンプで回収した水が，処理対象とした原水である。

2.3.2 適用された処理システムの概要

今回適用した処理システムは，「(1) 凝集沈殿処理→(2) 膜ろ過処理→(3) 促進酸化処理」で構成されている。処理水を除染水として循環再利用すること，コンパクトな設備であること，また最終的に産業廃棄物として排出される二次汚染物を低減することを条件に構築された。設備の仕様を**Table 1**，処理フロー図を**Fig. 2**に示す。

(1) 凝集沈殿処理

鉛，カドミウム，砒素，水銀，セレンといった重金属類，およびDXNsを対象として処理を実施した。まず，エマルジョン化した機械油と低濁度による凝集不良を防ぐために，活性白土（フロナイト）を添加した。つぎに，

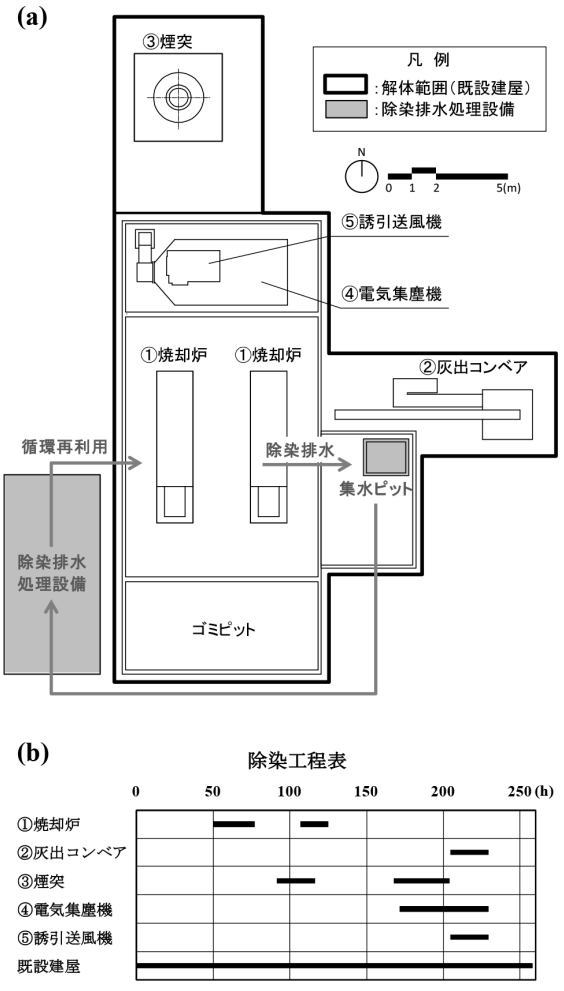


Fig. 1 （**a**）焼却施設の配置図および除染排水の回収経路，（**b**）除染工程表；横軸は**Fig. 5**と同じ運転時間を示す。

Table 1　適用された処理システムの仕様

処理能力	2 m^3 h^{-1}
設備内容積※	12.5 m^3
平均滞留時間	6.25 h
促進酸化処理設備の運転条件	H_2O_2/O_3/UV 併用型，H_2O_2 注入量：10 mg L^{-1}，O_3 注入率：55 mg L^{-1}，UV 出力：500 W，反応時間：30 min

※運転に要する最低限の水量

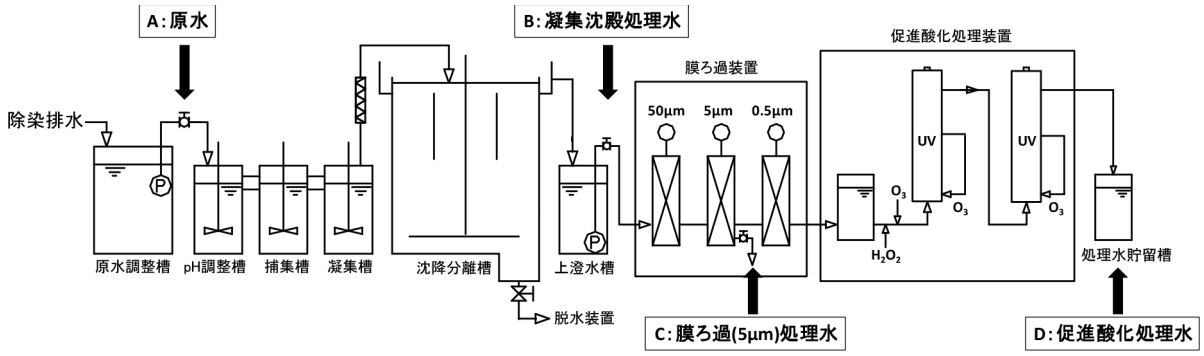


Fig. 2　処理システムのフローと採水位置

重金属類の捕集を目的として，pH 7～10 において重金属類を選択吸着する液体キレート樹脂（UML8100A，ユニチカ）を添加した。これらの濁質成分に，無機凝集剤（第二塩化鉄，ポリ塩化アルミニウム）および高分子凝集剤（A103，多木化学）を添加してフロックを形成させ，沈降分離槽で沈殿により濃縮させて有害物質を除去した。液体キレートおよび無機凝集剤の反応時間はそれぞれ 10 分以上確保した。高分子凝集剤は，沈降分離槽へ送水する前にラインミキサーで添加して反応させた。沈降分離槽の設計上の分離限界粒子径は 50 μm であった。

(2)　膜ろ過処理

沈降分離の上澄水に含まれるフロックを，50 μm のフィルターで粗分離したのちに，5 μm，0.5 μm の孔径を有する精密ろ過膜（MF 膜）で分離した。各モジュールは，使い捨てできる円筒状のカートリッジフィルター（膜エレメント）を円筒型の鋼製容器に複数基設置して構成されている。全量ろ過方式により一定流量でろ過するため，モジュール内の圧力が 0.3 MPa を越えた時点でカートリッジを随時交換した。

(3)　促進酸化処理

膜（0.5 μm）を透過する溶存態の DXNs の分解を目的として，促進酸化処理をおこなった。適用した処理方式（H_2O_2/O_3/UV 処理）は，O_3/H_2O_2 法との比較において，高塩素有機化合物ほど分解率が高いことが報告されている[13]。しかし H_2O_2/O_3/UV 処理は，経済的な設計条件の確立が困難などの理由により，実証データが少ない。本システムでは，**Table 1** の運転条件で固定し処理をおこなった。

2.3.3　残留する灰の DXNs 濃度および運転期間中の水質調査

除染実施前に，対象となる設備内に残留している灰を採取し，特別管理一般廃棄物及び特別管理産業廃棄物にかかる基準の検定方法（平成 4 年 7 月厚生省告示第 192 号）に基づき，DXNs 濃度を測定した。除染中は，原水（除染排水）および処理水の SS 濃度，水温，pH，電気伝導率を測定した。SS 濃度測定用の原水は，原水貯留槽から調整槽への流入口で採水し（**Fig. 2** の A），同処理水は，促進酸化処理設備から処理水槽への流入口（**Fig. 2** の D）で採水した。採水した水の SS はガラス繊維ろ紙（GS25，ADVANTEC）で吸引ろ過した後，105 ℃の乾燥炉中で 2 時間乾燥させ，放冷後に質量を測定することで得た。水温，pH，電気伝導率は，採水した水をポリ容器内に貯留し，測定器（W22XD, HORIBA）を浸漬させて測定した。電気伝導率は温度係数を 2% $℃^{-1}$ として 25 ℃における換算値とした。処理水量は凝集反応槽と沈降分離槽の間に設置した電磁流量計で計測し，循環水量は処理水量と処理水槽における 1 日ごとの水位変動から算出した。脱水ケーキの発生質量は，脱水処理設備からケーキが排出されるごとに記録した。

2.4　有害物質の除去特性の検討

有害物質の除去特性を調べるために，凝集操作時の薬剤の種類と添加量を変化させ（Run1，Run2），各プロセス後の処理水（**Fig. 2** の A～D）を採取して有害物質の濃度を測定した。実験ケースを **Table 2** に示す。事前のビーカーテストでフロックの形成状況を目視で確認し，いずれも良好であることを確認している。実験は，**Fig. 1（b）**の 180～210 h（電気集塵機の除染期間）に実施した。採水位置は，原水（**Fig. 2** の A），凝集沈殿処理後の上澄水（**Fig. 2** の B），膜処理水（**Fig. 2** の C），促進酸化処理水（**Fig. 2** の D）の 4 箇所である。膜処理水については，機器の都合上 0.5 μm フィルターによる膜処理と促進酸化処理の間に採水位置を設定できなかったため，5 μm のフィルター（D-PPPB，3M）透過後の水を膜処理水とした（以下，膜ろ過（5 μm）処理水と表記）。採水前には，原水および処理水の水質（濁度，水温，pH，電気伝導率）が安定していることを確認した。測定項目は，DXNs，カドミウム，鉛，砒素，水銀，SS および pH である。Run1 において，分析値が定量下限値未満となった重金属類については，以降の採水位置での分析を実施していない。また Run2 においては，凝集操作の改善

Table 2　実験における凝集沈殿処理の薬剤添加条件

使用薬剤	Run1	Run2
活性白土	2000 mg L^{-1}	2000 mg L^{-1}
重金属捕集剤	60 mg L^{-1}	180 mg L^{-1}
塩化第二鉄	280 mg L^{-1}	120 mg L^{-1}
ポリ塩化アルミニウム	0 mg L^{-1}	180 mg L^{-1}
高分子凝集剤	3 mg L^{-1}	3 mg L^{-1}

による膜処理と促進酸化処理への影響を確認する目的で，採水位置 C および D におけるサンプルについて測定を実施した。DXNs の分析は，工業用水・工業排水中のダイオキシン類の測定方法（JIS K 0312）に基づき測定した。その他の項目は，工場排水試験方法（JIS K 0102）に基づき測定した。

3. 結果および考察

3.1　除染排水の有害物質濃度の調査結果

最終処分場の浸出水中の DXNs と除染排水に含まれる DXNs の濃度の比較を **Fig. 3** に示す。除染排水の DXNs の毒性等量（TEQ）は，WHO 1998 TEF[15] で示される毒性等価係数（TEF）で算出された値である。一方浸出水の DXNs の毒性等量（TEQ）は，ダイオキシン類対策特別措置法が制定される以前の調査であり，ポリ塩化ジベンゾ-パラ-ジオキシン（PCDDs）とポリ塩化ジベンゾフラン（PCDFs）の毒性等量が示され，コプラナー PCB が含まれていない。したがって比較には留意が必要であるが，最終処分場浸出水に比べて除染排水の DXNs 濃度は高い。

一般的に水中の DXNs は，懸濁物質に吸着された粒子状の懸濁態と，水中に溶存する溶存態で存在しており，水に対する溶解度が低いためその多くが懸濁態で存在すると考えられている。したがって浸出水中の PCDDs＋PCDFs のうち径の大きい粒子に吸着しているものは，最終処分場の埋立層内を浸透する際に間隙で捕捉されると考えられる。その結果，浸出水中の PCDDs＋PCDFs は，間隙を通り抜けた微粒子に吸着しているものや溶存態として浸出してきたと考えられる。一方の除染排水では，機器洗浄の過程で灰の残留物がそのまま水中へ強制的に混入されたため，浸出水よりも高い毒性を示したと考えられる。

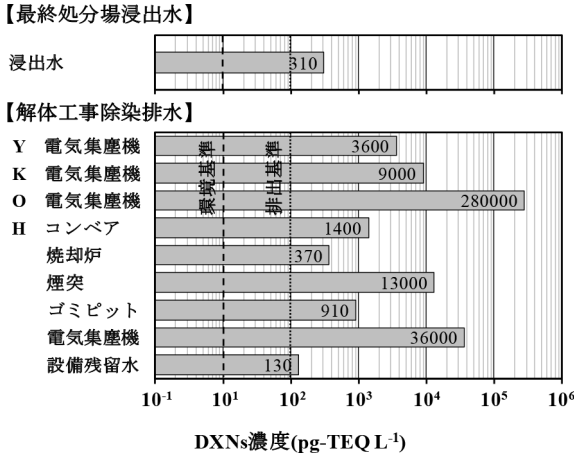


Fig. 3　除染排水の DXNs 濃度の調査結果
除染排水の DXNs 濃度は 4 現場 9 設備の調査結果である。比較のために，上段には文献値[14] から引用した最終処分場浸出水の DXNs 濃度の最大値を示す。

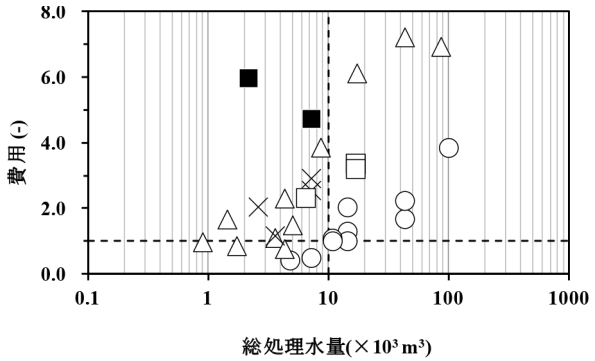
3.2　汚染サイトに適用される水処理費用の調査結果

SS, DXNs, VOC および油，重金属類の処理費用を **Fig. 4** に示す。横軸には設備の処理能力（$m^3\ h^{-1}$）と総稼働時間（h）の積である総処理水量（m^3）を示す。縦軸には，濁水処理（SS 除去）において，総処理水量 10,000 m^3 にかかる費用を「1」としたときの相対費用を示す。費用には電気代や汚泥等の処理費用は含まれていない。電気代については排水処理システムに係わる部分の費用を抽出することが困難であること，また汚泥については，地理的条件や施工方法によって大きく変動することから今後の課題とした。**Fig. 4** によれば，技術の進歩や知見の蓄積を受けて年々低コスト化が図られている点や条件の設定によって算出される費用が変動する点はあるものの，通常の濁水（SS）処理に比べ，DXNs 対策や重金属類対策，VOC および油対策にかかる水処理コストは，同一の総処理水量において 3～5 倍程度高くなる傾向がある。また DXNs 対策において，環境基準値（1 pg-TEQ L^{-1}）以下までの処理コストは，10 pg-TEQ L^{-1} 以下までの処理に比べて 2～3 倍に増加していることがわかる。

汚染源に対する直接的な対策では，有害物質を人為的に取り出す作業が処理対象原水の性状に影響する。焼却施設の解体工事においては，除染作業に起因する除染排水の水質変動を考慮した上で処理システムが構築される必要がある。処理システムの能力は当然安全側に設定されるが，一般的な処理コストと比較して明らかに高くなる場合には，事業全体での最適なコストを見出す必要があると考えられる。

3.3　残留する灰の DXNs 濃度および水質調査結果

除染対象設備に残留する灰中の DXNs の毒性等量を **Table 3** に示す。焼却炉および灰出コンベアではそれぞれ 2300 pg-TEQ g^{-1}，1700 pg-TEQ g^{-1}，電気集塵機では 46000 pg-TEQ g^{-1} の値を示した。焼却炉に投入された廃棄物のうち，燃焼により残った灰分および不燃物は



【凡例および処理方法の組み合わせ】
○：SS除去　･･･凝集沈殿
□：DXNs除去(<10pg-TEQ L^{-1})　･･･凝集沈殿，砂ろ過，活性炭
■：DXNs除去(<1pg-TEQ L^{-1})　･･･凝集沈殿，膜ろ過，活性炭，促進酸化
△：VOCまたは油除去　･･･曝気，凝集沈殿，油水分離，活性炭
×：重金属類の除去　･･･塩素分解，紺青法，酸化還元，凝集沈殿
（対象とした重金属類はシアン，六価クロム，鉛，砒素である。）

Fig. 4　水処理にかかる費用の調査結果
横軸の総処理水量（m^3）は，処理能力（$m^3\ h^{-1}$）と総稼働時間（h）の積である。縦軸は，SS 除去のうち総処理水量 10,000 m^3 に要する費用を基準とした相対値を示す。

Table 3　設備内に残存する灰中の DXNs 濃度（最大値）

対象設備	DXNs 濃度
①焼却炉	2300 pg-TEQ g^{-1}
②灰出コンベア	1700 pg-TEQ g^{-1}
③煙突	31000 pg-TEQ g^{-1}
④電気集塵機	46000 pg-TEQ g^{-1}
⑤誘引送風機	11000 pg-TEQ g^{-1}

灰出コンベアから排出され（焼却灰），燃焼時に飛散する一部の灰分や重金属類は排ガスとして電気集塵機で捕集される（飛灰）。したがって焼却炉や灰出コンベアに付着しているものは焼却灰であり，電気集塵機や誘引送風機，煙突に付着しているものは飛灰であると考えられる。除染工程では，事前に設定された除染スピード（例えば 35 $m^2\ h^{-1}$ など[7]）で高圧洗浄機（吐出量 20 L min^{-1}）による設備の洗浄がおこなわれる。したがって，除染排水中の有害物質の濃度は除染する設備に付着している灰中の有害物質の濃度に依存すると考えられる。**Fig. 1**（**b**）の除染工程によれば，電気集塵機を除染している 170～230 h において，高い DXNs 濃度の除染排水が発生すると予想される。

Fig. 5 には，原水および処理水の SS, pH，電気伝導率，温度を運転時間（0～258 h）に対してプロットしている。原水の SS 濃度は，初期の 100 h までは 10～100 mg L^{-1} であったが，100 h を超えたあたりから 100～1000 mg L^{-1} へ上昇した。運転の初期における除染対象設備は主に焼却炉であり，150 h 以降の主な除染対象設備は電気集塵機である。飛灰の粒径は焼却灰と比較して小さく（焼却灰の平均粒径：3 mm，飛灰の平均粒径：15～70 μm[16]），150 h 以降の除染排水では，回収時に懸濁物質が沈降せず高い SS 濃度を示したと考えられる。一方の運転初期には，粒径の大きい焼却灰が集水ピットや原水調整槽で沈降し，SS 濃度の上昇が抑えられたと考えられる。pH は運転期間を通じて 7 程度で，原水・処理水ともに一定であった。運転直後の電気伝導率は，原水・処理水ともに 0.1 S m^{-1} 未満の低い値を示していたが，運転期間中には最大で 0.91 S m^{-1} まで上昇した。当該システムで除去されない金属類や塩類などが，運転時間とともに蓄積していったと考えられる。処理水の循環利用が長期間となる場合，凝集沈殿処理における凝集阻害や促進酸化処理の妨害物質の析出，高圧洗浄機の閉塞といった施工上の阻害要因の発生に対する配慮が必要と考えられる。

運転一日ごとの除染水量と処理水量，およびそれらの累積値を **Fig. 6**（**a**）に示す。図より，除染には開始直後からほぼ一定の水量を使用しているが，処理水量はそれよりも少ないことがわかる。**Fig. 6**（**b**）には，運転一日ごとの脱水ケーキ発生量を示す。18 日（150 h）以降にフィルタープレスへの打ち込みが可能となり，脱水ケーキが発生し始めた。SS の濃度増加に連動し，運転後期に排水処理設備への負荷が増大したことがわかる。そのほかにも，沈降分離槽で一定量のスラッジの堆積が必要であることや，焼却炉や煙突（耐火レンガ）の除染排水が各設備や既設建屋内に滞留したことで排水の回収が遅れたことが考えられる。このように，除染工程と除染排水の回収に時間差を生じることは安定した運転管理をおこ

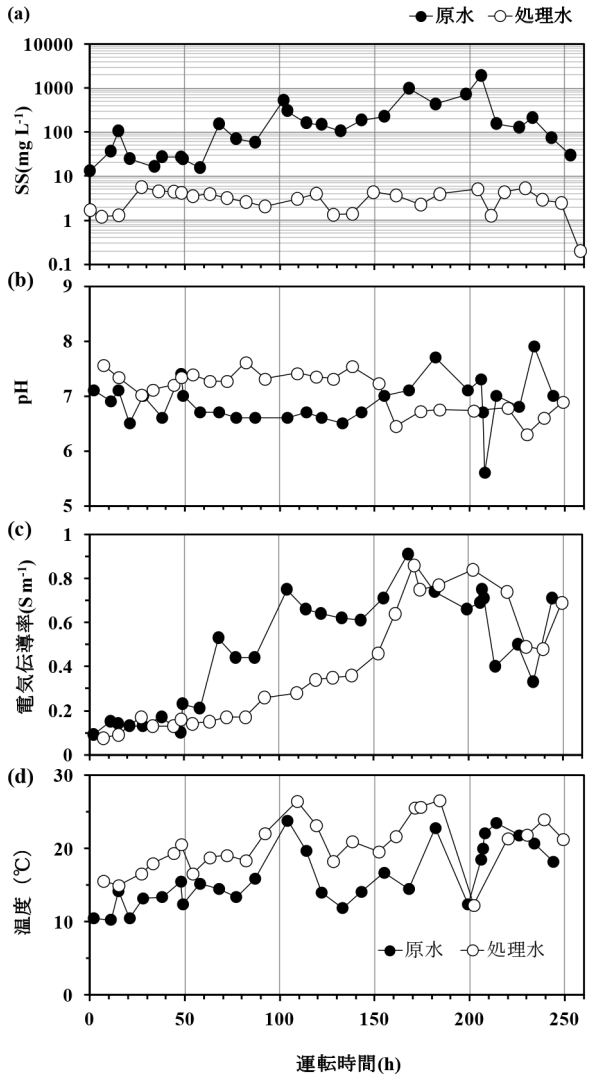


Fig. 5　除染排水処理設備に流入する原水および処理水の（**a**）SS，（**b**）pH，（**c**）電気伝導度，（**d**）水温の経時変化。横軸の運転時間は **Fig. 1** と対応している。

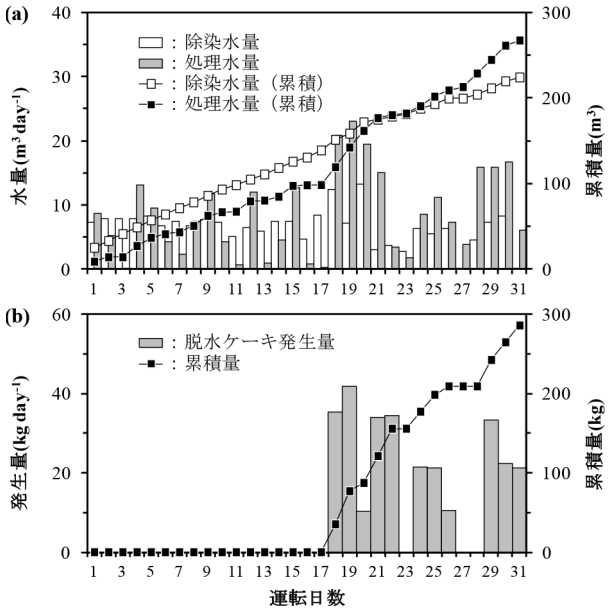


Fig. 6　（**a**）一日あたりの除染水量および処理水量，（**b**）一日あたりの脱水ケーキ発生量。運転日数 31 日は **Fig. 5** における運転時間 258 h と同一期間である。

なう上で望ましくない。除染排水の回収については，除染工程と時間差が生じないような，例えば除染箇所から除染排水を原水貯留槽へ直接送り出すといった工夫が必要であると考えられる。

3.4 有害物質の除去特性

Run1 ついて，各位置（A～D）で採水したサンプルの重金属類の濃度を **Table 4** に示す。鉛を除くカドミウム，砒素，水銀は，凝集沈殿処理のみにより定量下限値を下回った。鉛については，凝集沈殿処理＋膜ろ過（5 μm）処理により定量下限値未満まで除去された。

Run1 および Run2 について，各位置（**Fig. 2 の** A～D）で採水したサンプルの DXNs 濃度の測定結果を **Fig. 7**（**a**）に示す。また，原水中の DXNs 濃度から各採水位置での DXNs 濃度を差し引いた値を原水中の DXNs 濃度で除して算出した除去率の結果を **Fig. 7**（**b**）に示す。なお Run2 は，Run1 と同じ電気集塵機の除染期間中（180～210 h）に実験しており，Run1 と同濃度の原水として算出した。Run1 における DXNs の除去率を見ると，凝集沈殿処理により原水の 95.6%，凝集沈殿処理＋膜ろ過処理（5 μm）により原水の 99.1%，凝集沈殿処理＋膜ろ過処理＋促進酸化処理により原水の 99.5%の DXNs が除去されている。採水位置 D における DXNs 濃度は 18 pg-TEQ L^{-1} であり，10 pg-TEQ L^{-1} までに低下させるには原水の 99.7%の DXNs が除去されなければならず，さらに 4.1%（95.6%→99.7%）の DXNs の除去が必要である。一方 Run2 では，塩化第二鉄の使用量を減らし，ポリ塩化アルミニウムを添加した（**Table 2**）。これは塩化第二鉄で形成されるフロックの沈降性よりも，アルミニウムの加水分解時に微粒子をフロックへ取り込む効果を期待したものである[17]。その結果，採水位置 D では，原水中の DXNs の 99.99%が除去され，濃度は 0.059 pg-TEQ L^{-1} まで低下した。

採水位置 C から D の間の除去率の変化を見ると（**Fig. 7**（**b**）拡大図），Run1 よりも Run2 の除去率が向上していることがわかる。Run1 の SS 濃度は（**Table 4**），6.0 mg L^{-1}（採水位置 C）から 3.9 mg L^{-1}（採水位置 D）へ低下したのに対し，別途測定した Run2 の SS 濃度は，4.7 mg L^{-1}（C）から 0.2 mg L^{-1}（D）へと大きく低下した。促進酸化処理で生成されるヒドロキシラジカル［・OH］は，DXNs との反応速度が大きく[18]選択性がないことを考慮すれば，Run2 における除去率の向上は，膜処理（0.5 μm）により SS に吸着していた DXNs がより多く除去される効果と，妨害物質が除去されて促進酸化処理の分解能が向上する効果が同時に得られたと考えられる。

Fig. 8 は，Run2 の採水位置 C における懸濁物質の粒度分布をレーザ回折式粒子径分布測定装置（SALD-2100，SHIMADZU）で測定した結果であり，粒径は 0.3～4 μm に分布している。堤ら[10]は，焼却炉スクラバ排水を対象として凝集沈殿処理をおこない，処理水の DXNs 濃度を 0.1 μm 未満，0.1～1 μm，1 μm 以上の 3 つの粒径画分で測定した。その結果，凝集操作により 0.1 μm 未満に存在する DXNs が 0.1～1 μm または 1 μm の画分に取り込まれることを示している。以上のことから，Run2 における除去性能の向上は，0.3 μm 未満の微粒子に吸着していた DXNs が凝集過程で 0.3 μm 以上のフロックに取り込まれ，膜処理（0.5 μm）によって懸濁態の DXNs が除去された，と推定できる。後段では，妨害物質が取り除かれた効果も相乗し，促進酸化処理による分解能が向上し，0.5 μm 未満の懸濁態および溶存態の DXNs が環境基準以下まで分解された。

今回の結果は，凝集操作を適切におこなうことにより，膜ろ過処理と促進酸化処理の組み合わせで DXNs の高い除去効果が得られることを示すものである。

設計段階において合理的な処理システムを構築するには，排水の発生過程と原水の性状，処理システム全体での除去特性を踏まえた検討が必要である。例えば山田[19]らは，最終処分場の浸出水中に含まれる様々な微量有機成分の存在を明らかにしている。大迫ら[20]は，高 pH 下

Table 4 各採水位置における水中の有害物質濃度（Run1）

対象物質		採水位置 A	B	C	D
Cd	(mg L^{-1})	0.041	<0.005	−	−
Pb	(mg L^{-1})	0.75	0.02	<0.01	−
As	(mg L^{-1})	0.021	<0.005	−	−
Hg	(mg L^{-1})	0.0021	<0.0005	−	−
SS	(mg L^{-1})	978	18.5	6	3.9
濁度	(NTU)	850	20	16	16

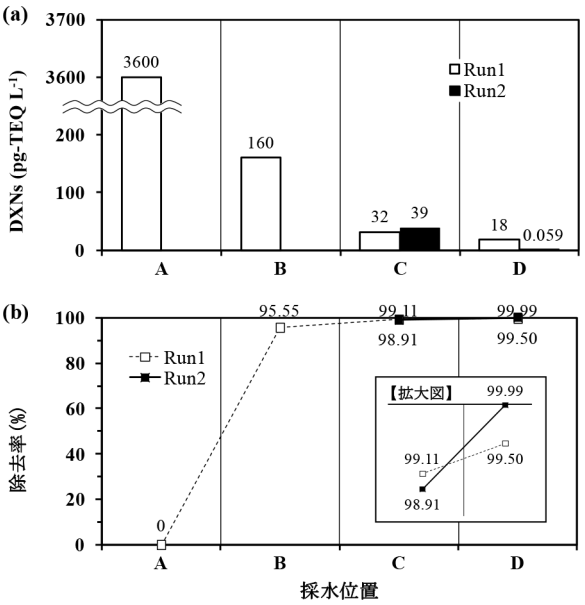


Fig. 7 （**a**）各採水位置における水中の DXNs 濃度の低下傾向，（**b**）原水（採水位置 A）に対する DXNs の除去率。

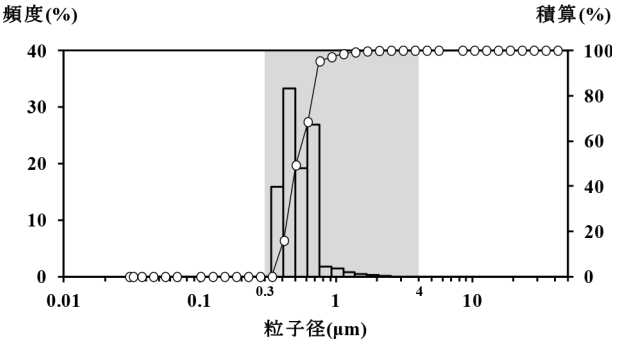


Fig. 8 採水位置 C の水中に含まれる懸濁物質の粒子径分布（Run2）

で溶解しやすい溶存性フミン物質の存在下で，PCDDs とPCDFs の高塩素化物の溶解度が急激に増加することを指摘している。このような共存物質の存在下で適切な処理システムを構築するには，除去対象物質と共存物質の相互作用を踏まえた上で除去特性が検討される必要がある。同じ焼却灰由来である除染排水の処理についても，共存物質が除去対象物質に与える影響を考慮した上で，処理システムが構築されることが望ましい。しかし，各施設や各設備で除染排水の性状が大きく異なり，除去対象物質と共存物質の相互作用を逐一紐解くことは多大な時間を要する。そのため，実務においては様々な処理事例に基づいて合理的な処理システムを検討していく必要があると考えられる。

他の環境浄化対策に目を向けると，難分解性溶存有機物や新たに排水基準に加えられた 1,4-ジオキサンといった物質への対応が求められており，それらの除去プロセスとして促進酸化処理の適用が期待されている。物質の動態や機能の解明が求められると同時に，実施工で適用できる分解技術が求められており，促進酸化処理の処理性能はもちろんのこと，他の有害物質や共存物質との相互作用を踏まえた上での除去性能，他の処理プロセスとの相互関係を踏まえたシステム全体の除去特性など，実践データの蓄積が今後益々重要になってくると思われる。

4. まとめ

有害物質として重金属類やダイオキシン類（DXNs）を含む高濃度の汚染排水が排出される焼却施設解体工事において，凝集沈殿処理，膜ろ過処理，促進酸化処理の工程で構成される排水処理システムが適用された事例について，有害物質の除去特性の検討をおこない，以下の結果が得られた。

1） 除染排水には，重金属類（鉛，水銀，砒素，カドミウム）が高濃度に含まれており，当該処理システムでは凝集沈殿処理と膜ろ過（5 μm）処理により，すべて定量下限値未満まで除去可能であった。
2） 除染排水には DXNs が高濃度に含まれており，当該処理システムでは凝集沈殿処理により 95.6%，凝集沈殿処理＋膜ろ過（5 μm）処理により 99.1%，凝集沈殿処理＋膜ろ過（0.5 μm）処理＋促進酸化処理で 99.5%まで除去可能であった（Run1）。
3） 凝集操作を適切におこなうことで，膜ろ過（0.5 μm）処理＋促進酸化処理による DXNs の除去率が向上し 99.99%（環境基準値以下）まで除去可能であった（Run2）。

（原稿受付　2016 年 6 月 24 日）
（原稿受理　2017 年 1 月 16 日）

参 考 文 献

1）早川清，2009. §1 はじめに．地盤工学会編，建設工事における環境保全技術．丸善，東京，pp. 1-3.
2）環境省土壌汚染対策法（平成十四年法律第五十三号）.
3）環境省ダイオキシン類対策特別措置法（平成十一年法律第百五号）.
4）財団法人土木研究センター，2008. 廃棄物混じり土への対応方策検討業務報告書．URL. http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/pdf/recyclehou/manual/majirido_REPORT01.pdf（2016 年 9 月時点）.
5）小林勲，岩崎光美，今野昭三，1978. 建設工事における濁水・泥水の処理工法．鹿島出版会，東京.
6）炭田光輝，2003. §8.1 土木工事とコロイド．足立泰久編，土のコロイド現象．学会出版センター，東京，pp. 293-303.
7）厚生労働省労働基準局安全衛生部化学物質調査課編，2003. 廃棄物焼却施設解体作業マニュアル．日本保安用品協会，東京.
8）田路明宏，楠田哲也，2003. 凝集沈殿処理によるダイオキシン類の除去特性．廃棄物学会論文誌 14(5)，239-247.
9）野馬幸生，松藤康司，八木美雄，高田光康，宮地和夫，酒井伸一，2002. 浸出水処理施設におけるダイオキシン類の挙動．廃棄物学会論文誌 13(3)，151-160.
10）堤かおり，劔持由紀夫，有川彰浩，府中裕一，2003. 凝集沈殿処理によるダイオキシン類の形態別除去特性．水環境学会誌 26(5)，301-306.
11）田中俊至，浦瀬太郎，浅田素之，2004. 焼却炉解体工事排水に含まれる有害物質の固液間の分配と膜分離による処理特性．土木学会論文集 769(7-32)，27-34.
12）西島克久，2003. ダイナミックろ過膜と限外ろ過膜を使用したダイオキシン類の除去．膜（MEMBRANE）28(1)，41-43.
13）葛甬生，二見賢一，中川創太，田中俊博，伊藤三郎，1998. AOP 法による浸出水中ダイオキシン類の分解除去．用水と廃水 40(7)，590-599.
14）環境省中央環境審議会，1998. ダイオキシン類対策特別措置法に基づく廃棄物の最終処分場の維持管理基準の設定等について．URL. http://www.env.go.jp/press/files/jp/1394.pdf（2016 年 6 月時点）.
15）環境省水・大気環境局総務課ダイオキシン対策室，2012. ダイオキシン類. URL. https://www.env.go.jp/chemi/dioxin/pamph/2012.pdf（2016 年 9 月時点）.
16）廃棄物研究財団編，1993. 特別管理一般廃棄物ばいじん処理マニュアル．化学工業日報社，東京，pp. 72-78.
17）丹保憲仁，小笠原紘一，1985. 浄水の技術．技報堂出版，東京.
18）山田春美，2002. 促進酸化法による難分解性物質の処理特性．環境技術 31(2)，102-106.
19）山田和哉，浦瀬太郎，松尾友矩，鈴木規之，1999. 異なる形式の廃棄物処分場の浸出水中の微量有機成分の計測とその浸出水処理過程での挙動．水環境学会誌 22(1)，40-45.
20）大迫政浩，金容珍，田中勝，1998. 焼却残渣主体埋立処分層内のダイオキシン類の挙動に関する一考察，第 9 回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp. 909-912.

［論　文　要　旨］

汚染源を対象とする浄化対策へ水処理システムを適用する場合，水質変動への安全率や事業コストを考慮した合理的なシステムが求められる。合理的なシステムを構築するためには，様々な実践データの蓄積が重要である。本論文では，焼却施設解体工事の除染工程から発生する排水に対し，現場において凝集沈殿処理，膜ろ過処理，促進酸化処理からなる水処理システムが適用された事例について報告する。当該処理システムにおいて，重金属類は凝集沈殿処理および膜ろ過処理によって環境基準以下まで除去可能であった。ダイオキシン類については，微粒子の凝集操作を適切におこなうことにより，膜ろ過および促進酸化処理による除去性能が向上する傾向が見られ，環境基準以下まで除去可能であった。合理的な水処理システムを適用するためには，排水の発生過程と性状，処理システム全体での除去特性を考慮して検討する必要があることを示した。

キーワード：凝集沈殿処理；膜処理；促進酸化処理；焼却施設除染排水；ダイオキシン類