

# トリハロメタン低減を目的とした U-BCF<sup>®</sup> の運用事例

## An Operation Case of U-BCF<sup>®</sup> to Reduce Trihalomethane



林 祥一\*  
Shoichi Hayashi



森藤昭博\*  
Akihiro Morito  
技術士（上下水道部門）



佐藤良太\*  
Ryota Sato  
技術士（上下水道部門）



藤本瑞生\*  
Mizuki Fujimoto



石丸 豊\*  
Yutaka Ishimaru  
技術士（総合技術監理  
部門，上下水道部門）

明石市鳥羽浄水場では、上向流式生物活性炭接触ろ過設備（以下 U-BCF）納入翌年以降、本装置によるトリハロメタン生成能除去率が減少した。そこで、本装置の各池活性炭の一部を交換しトリハロメタン生成能除去率改善を試みた。結果、トリハロメタン生成能除去率改善に加え、浄水場内各地点でのトリハロメタン生成能・トリハロメタン濃度の推移等、給水栓末端トリハロメタン濃度を抑制していくための新しい知見が得られた。

The removable rate of Trihalomethane by U-BCF at Toba water treatment plant in Akashi city has decreased since one year after U-BCF installed. Therefore, a part of activated carbon in each volume was exchanged to improve the removal rate. As a result, the removal rate was improved and some new knowledge, the shift of Trihalomethane and Trihalomethane forming potential on each point in water treatment plant etc., was discovered.

### Key Words :

U-BCF

生物活性炭

トリハロメタン

消毒副生成物

Up-Flow Bio-Contact Filter

Biological-Activated carbon

Trihalomethane

Disinfection by-product

### 【セールスポイント】

- ・マンガン、カビ臭物質等の溶解性物質を原水段階で U-BCF により処理することで、これら物質を効率的に抑制。
- ・粒状活性炭の一部（20 %）のみを交換することで、新炭相当のトリハロメタン前駆物質除去率を確保。
- ・粉末活性炭の使用量の低減および、物理吸着と生物処理の併用による相乗効果が期待できる。

### まえがき

明石市鳥羽浄水場は、表流水（貯水池）および地下水（深井戸）を主な水源とし、昭和46年10月から共用開始したが、近年の水源水質悪化、地下水塩化等により水質管理に苦慮している。とくに給水末端での総トリハロメタン低減に注力しており、オゾン・活性炭、活性炭吸着処理との比較実証実験を行

い、処理性改善を検討した。原水の特徴として有機物や臭化物イオンが含まれる。有機物の処理には活性炭吸着やオゾン・活性炭が適しているが、オゾン処理による臭素酸生成の懸念があった。そこで、近年総トリハロメタン低減の有効性が確認され、採用する事業者も出てきた生物活性炭接触ろ過処理をこれらと比較検討した結果、優位性が確認された

め、これまでアンモニアやカビ臭対策として原水処理に適用されていた U-BCF を導入、平成22年10月より運用を開始した。トリハロメタン生成能の除去率が2年目以降低下傾向を示したことから、夏場上昇する総トリハロメタンおよびトリハロメタン生成能の抑制、粉末活性炭注入量低減のため、平成28年に U-BCF のろ層（粒状活性炭）の一部を新炭へ交換し、効果の検証を行った。その結果、運用開始時程度まで除去率が改善し、他の知見も得られたため以下に報告する。

## 1. 施設概要

明石市鳥羽浄水場フローを図1、同浄水場施設諸元を表1に示す。原水は河川（明石川）から導水され、一旦貯水池（野々池）に貯留される。その後導水ポンプで浄水場へ送られ、U-BCF に流入する。生物処理に必要な溶存酸素が夏場に低下するため流入側で曝気を行っている。U-BCF 処理後に別水源の地下水が着水井で混合され、凝集沈殿・急速ろ過

にて浄水処理後、浄水池へ送られる。給水末端の総トリハロメタン濃度は0.07 mg/L を上限として管理されているが、夏場上昇する傾向があり、粉末活性炭を注入して総トリハロメタン除去率の維持を図っている。回収率を上げるため、U-BCF の洗浄排水は上澄水を U-BCF 流入側へ、沈殿池汚泥の濃縮後の上澄水および急速ろ過池洗浄排水は U-BCF 後の混和池へ返送している。

## 2. 施設の特徴

### (1) 水源水質

U-BCF 処理を行う河川原水は、河川から導水された後、一旦貯水池に貯留される。濁度や鉄、マンガン、有機物などは低く安定した挙動を示すが、pH は8～9と若干高い。塩化物イオン、臭化物イオン（トリハロメタン構成成分）は実証実験時と比べ大きな変化はないものの年々微増している。U-BCF の後に流入する地下水は原水量の約40%を占め（平成28年度実績）、鉄およびその化合物濃度

表1 施設諸元

設備全体	計画浄水量	51 000 m <sup>3</sup> /d
	水源	表流水, 地下水
生物活性炭接触ろ過設備	仕様	上向流式
	池数	4池
	通水速度	358 m/d (26 050 m <sup>3</sup> /d)
	ろ材構成	石炭系粒状活性炭（破碎炭）
	洗浄方法	水, 空気による洗浄
凝集沈殿池	仕様	脈動式高速凝集沈殿（傾斜管付）
	池数	3池
急速ろ過池	仕様	自己逆流洗浄式
	池数	24池
排水処理設備	設備構成	排水槽（1池）, 排泥池（1池）, 濃縮槽（1次, 2次）, 脱水機（1台）
薬品注入設備	注入薬品	PAC, 次亜塩, 粉末活性炭

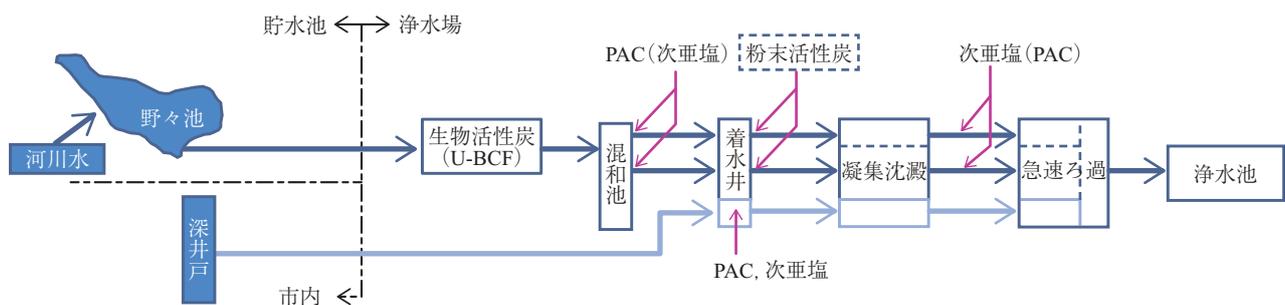


図1 浄水場フロー

表2 原水水質

項 目		生物活性炭 (U-BCF) 入口 (H28~H29)			地 下 水 (H28~H29)			水質基準
		平均	最大	最小	平均	最大	最小	
濁度	度	4.1	6.2	2.6	6.4	9.1	3.1	2
鉄およびその化合物	mg/L	0.2	0.5	0.1	8.6	9.8	7.7	0.3
マンガンおよびその化合物	mg/L	0.05	0.12	0.02	0.70	0.93	0.56	0.05
塩化物イオン	mg/L	29	39	25	146	190	110	200
臭化物イオン	mg/L	0.37	0.46	0.31	0.53	0.78	0.39	—
電気伝導率	μS/cm	283	309	261	600	766	510	—
全有機炭素 (TOC)	mg/L	2.50	2.90	2.00	0.25	0.30	0.20	3
トリハロメタン生成能	mg/L	0.092	0.108	0.076	0.008	0.008	0.007	—

注) 地下水トリハロメタン生成能は実証実験時の値

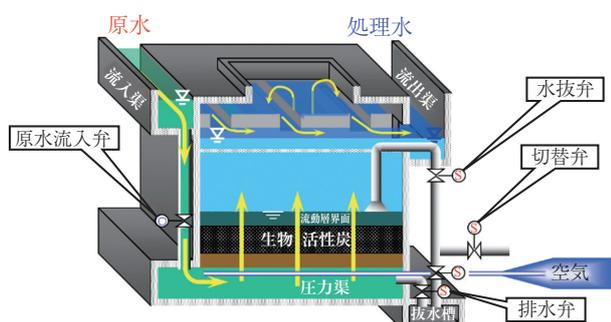


図2 U-BCFの構造

が高い。塩化物イオン、電気伝導率は塩水化の影響で増加傾向にあるが、トリハロメタン生成能は表流水より低い(表2)。

(2) U-BCF (上向流式生物活性炭接触ろ過設備)

鳥羽浄水場に採用された当社のU-BCFは、一般に浄水施設の活性炭吸着設備で使用される粒状活性炭をろ層(微生物担体)として用い、原水に含まれるカビ臭、アンモニア態窒素、溶解性金属(鉄、マンガン)等を、微生物による自然浄化作用を用いて上向流で処理するものである。原水を処理するため、微生物の生息に必要な栄養成分は常に補給され、ろ層内は自然界の川床のような状態が維持される。また上向流のため、ろ層は常に展開し、濁質負荷による閉塞を避けることができる。さらにU-BCFでは、水・空気およびその併用により、ろ層および支持層の洗浄効果を高めている。

ろ層に用いる粒状活性炭は多孔質であり、表面積が大きいため、粒状活性炭の物理吸着能は通水に従い低下するが、微生物は繁殖・維持されやすく、効率的な処理が行える。図2にU-BCFの構造を示す。

また粒状活性炭は微生物担体の位置付けとしており、基本的に交換不要と考えていたが、鳥羽浄水場

に採用されたU-BCFを経過観察したところ、運用開始1年程維持されていたトリハロメタン生成能除去率が、2年目以降低下傾向を示したため、とくに夏場のトリハロメタン生成能を抑制する目的で活性炭の一部交換を行い、この交換の効果検証を行った。

3. 活性炭一部交換の効果検証

(1) 検証の条件

U-BCF内活性炭の交換量は、費用対効果を考慮し15%とした。ただ、設置基準高さ以上を確保した結果、既設の目減りもあり最終的に約20%となった。活性炭は既設と同仕様とし、交換時期はトリハロメタン生成能濃度および総トリハロメタン濃度が夏場に上昇傾向を示すことを踏まえ、5月に交換を実施した。交換後は通常運転を行い、1回/週の採水データを元に効果の検証を行った。

(2) 活性炭一部交換の効果

交換前後におけるU-BCF入出口トリハロメタン生成能濃度を図3に示す。運用開始の平成22年度は20%程度の除去率だったが、約1年後から低下、以降10~20%で推移した。平成28年5月に一部活性炭交換後、平均除去率は運用開始時の20%程度まで改善、交換直後の6~8月は23%程度となり(新炭吸着効果と想定)、一部交換した効果が見られた。また、入口濃度が上昇すると除去率も上昇する傾向が見られた。

一般にトリハロメタン生成能の指標とされる紫外線吸光度について図4に示す。トリハロメタン生成能と同様に活性炭一部入れ替えにより平成28年度以降は低減率が向上、また入口濃度が上昇すると、低減率も向上する傾向があった。

(3) トリハロメタン生成能各成分の傾向

入口の成分比率は年度通じて大きな変化はなく、クロロホルム・ブロモジクロロメタン生成能(塩素

系とする)：プロモホルム・ジブロモクロロメタン生成能(臭素系とする) = 5 : 5~7 : 3で推移している。塩素系トリハロメタン生成能の除去率が比較的高く、臭素系は低い。プロモホルム生成能の除

去率をもっとも低く、一部微増している(表3)。また年度により変動はあるが、塩素系は夏場に濃度が高く、冬場に低い。臭素系は夏場に低く、冬場に高い傾向があった。

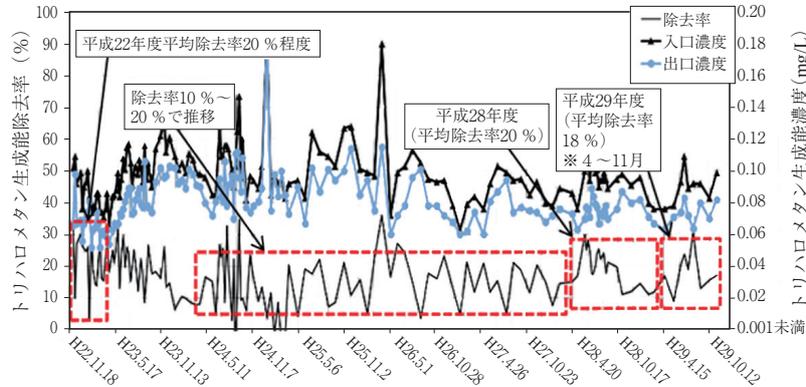


図3 U-BCF 入出口のトリハロメタン生成能濃度

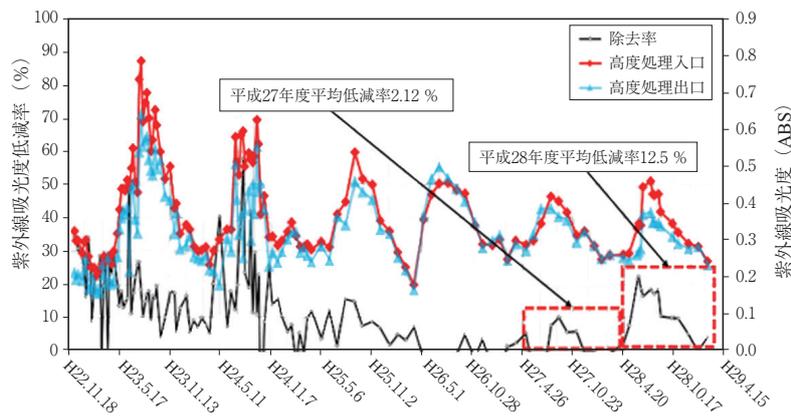


図4 U-BCF 入出口の紫外線吸光度

表3 年度別 THMPF の各成分 (平均値)

	平成22年度		平成23年度		平成24年度		平成25年度		平成26年度		平成27年度		平成28年度		
	濃度 (mg/L)	除去率	濃度 (mg/L)	除去率	濃度 (mg/L)	除去率	濃度 (mg/L)	除去率	濃度 (mg/L)	除去率	濃度 (mg/L)	除去率	濃度 (mg/L)	除去率	
臭素系	プロモホルム生成能	0.009	—	0.008	—	0.008	—	0.004	—	0.007	—	0.006	—	0.006	—
	ジブロモクロロメタン生成能	0.033	—	0.033	—	0.035	—	0.026	—	0.031	—	0.030	—	0.031	—
	プロモジクロロメタン生成能	0.028	—	0.035	—	0.038	—	0.037	—	0.033	—	0.033	—	0.035	—
	クロロホルム生成能	0.017	—	0.025	—	0.025	—	0.036	—	0.027	—	0.020	—	0.023	—
	塩素系 計	0.087	—	0.101	—	0.106	—	0.103	—	0.098	—	0.089	—	0.095	—
生物活性炭入口	プロモホルム生成能	0.008	8%	0.008	-16%	0.008	-1%	0.005	-33%	0.008	-6%	0.006	-19%	0.007	-10%
	ジブロモクロロメタン生成能	0.027	19%	0.030	7%	0.031	11%	0.025	1%	0.031	-47%	0.028	4%	0.028	7%
	プロモジクロロメタン生成能	0.021	25%	0.027	23%	0.031	15%	0.031	17%	0.027	18%	0.028	19%	0.027	23%
	クロロホルム生成能	0.013	24%	0.017	29%	0.021	11%	0.026	26%	0.013	32%	0.016	29%	0.014	36%
	計	0.069	22%	0.082	19%	0.091	12%	0.087	15%	0.079	18%	0.078	15%	0.076	20%

※除去率は、上表の平均値を用いたものではなく、各年度の各データそれぞれの“除去率の年平均値”を示す。

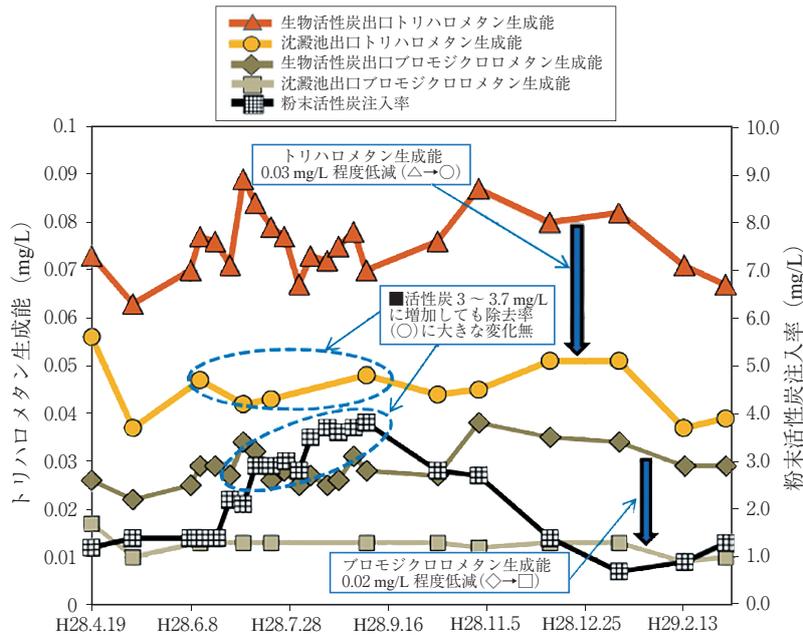


図6 沈殿池出口トリハロメタン生成能と粉末活性炭注入率の関係

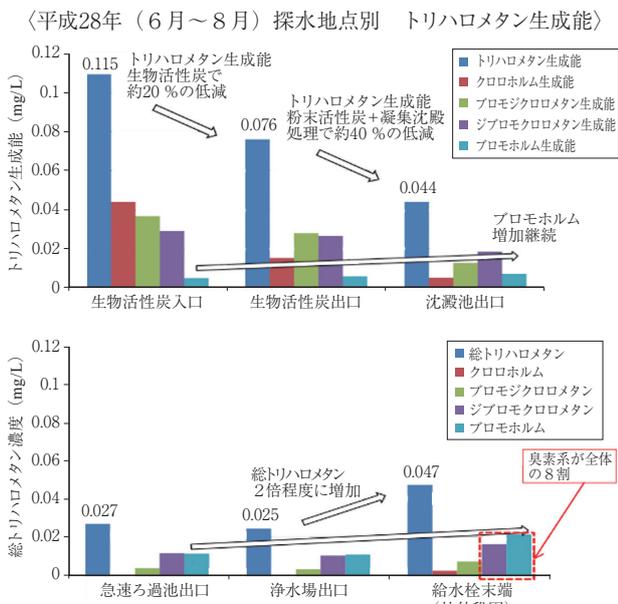


図5 各地点の総トリハロメタンおよび生成能の処理状況 (平成28年度)

(4) 各地点の総トリハロメタンおよびトリハロメタン生成能濃度

活性炭一部交換後の総トリハロメタンおよびトリハロメタン生成能の処理状況を図5に示す(平成28年6~8月)。U-BCF入口から浄水場出口まで、総トリハロメタンおよびトリハロメタン生成能は減少する。これはU-BCF出口で残留(0.069~0.091 mg/L)するトリハロメタン生成能濃度が、凝集沈殿、急速ろ過でも除去されていることを示す。しかし浄水場出口から給水末端に至る間に、配管内で滞留す

ることによって反応が進み、2倍程に増加していた。各トリハロメタン成分別に見てみると、塩素系に比べ臭素系の増加率が高い。とくにブromoホルムは浄水場入口(U-BCF入口)から給水末端まで増加し続けている。これらの結果、U-BCF入口から給水栓末端までを俯瞰すると、塩素系トリハロメタン濃度と臭素系トリハロメタン濃度の大小関係が逆転するという現象が生じた。

(5) 粉末活性炭注入との関係(沈殿池出口)

U-BCF処理後の平成28年度のデータでは、U-BCF後段に粉末活性炭を注入することで、沈殿池出口のトリハロメタン生成能は0.03 mg/L程度除去、とくにプロモジクロロメタン生成能が0.02 mg/L程度除去されており、トリハロメタン生成能低減に寄与している。また夏場に粉末活性炭を増量してもトリハロメタン生成能除去率に大きな変化はなかった(図6)。その他、浄水場出口において、粉末活性炭注入率を増加(1→3 mg/L程度)すると総トリハロメタンのピークが下がったが、その後夏場3 mg/L→3.7 mg/Lに増やしても大きな変化はなかった。冬場に向け注入率を下げてもプロモジクロロメタンの低減率はほぼ変化がないため、粉末活性炭よりも凝集沈殿による除去効果が高い可能性がある。

(6) 粉末活性炭との関係(浄水場出口)

トリハロメタン生成能濃度および総トリハロメタン濃度は、浄水場出口および給水栓末端で夏場に高い傾向を示す。粉末活性炭は着水井へ注入されているが、平成23年、24年の注入率1 mg/Lから平成27

年に5 mg/Lへ増加した結果、大幅な低減はないがピークは抑えられた。また、総トリハロメタンはブロモホルムの増減に連動する傾向があった。

粉末活性炭の増減に関わらずクロロホルムはほぼ0 mg/Lとなり、浄水場においておおむね除去されていることが分かった(図7)。これはU-BCF出口で残留(0.013~0.026 mg/L)するクロロホルムが後段の粉末活性炭だけでなく、凝集沈殿、急速ろ過でも除去されていることを示す。

#### (7) 給水末端の管理手法

給水末端の総トリハロメタン濃度には水温との相関が見られ、水温20度以上で0.05 mg/Lを超えることがあった。また、原水における表流水の割合が大きくなると、総トリハロメタン濃度がやや高くなる傾向があった。また、浄水場出口におけるジブロモクロロメタン濃度と水温を掛けた値が0.18 (°C・mg/L)を超えると総トリハロメタン濃度が0.05 mg/Lを超える傾向があった(図8)。給水末端の総トリハロメタンの管理値としての適用が検討できる。また、本グラフを見たところ、給水栓末端のトリハロメタン濃度が一定値に向かって収束しているように見える。これは、実際の原水のトリハロメタン生成能濃度にはある程度の幅があるため、給水栓末端のトリハロメタン濃度の上限収束が発生したものと考えられる。本グラフを用いた予測方法は、水温と給水栓末端のトリハロメタン濃度との単純な比例関係による予測に比べ、より精度の高い原水水質の変動に追従可能な予測方法となりうる。

### 4. 保全計画

平成28年5月に活性炭の一部交換後、1年後(H29年度)においてもトリハロメタン生成能濃度除去率は18%程度(4~11月)、夏場(6~8月)は23%程度を維持している(図3)。この結果から、

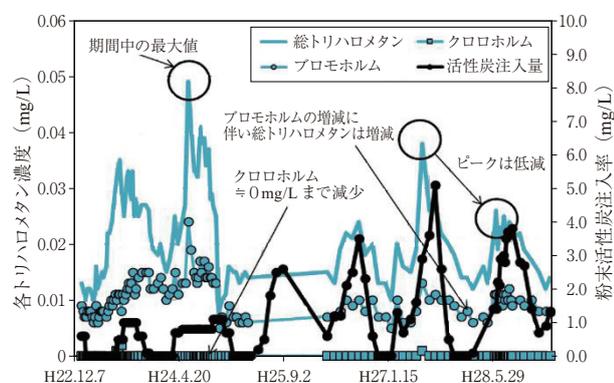


図7 浄水場出口総トリハロメタン濃度と粉末活性炭注入率

活性炭は2年周期で20%交換するとした。また毎年6月より水温が上昇し、給水末端の総トリハロメタン濃度も上昇するため、5月末までに交換作業を完了し、新炭による吸着能によって夏場のトリハロメタン生成能濃度低減を図ることとした。

### 5. 検証の継続

さらなるデータ収集・水質改善・コスト削減に向けた取組みとして、平成30年5月に4池中2池のみを20%交換し、その効果を検証中である。図9に平成28, 30年の夏季6~8(9)月におけるトリハロメタン生成能、総トリハロメタンの処理状況を示す。平成28, 30年度ともトリハロメタン生成能、総トリハロメタンの各地点での除去状況は同等、また平成30年度については、4池中2池のみ活性炭を交換したが、4池交換した平成28, 29年度と同等の除去率を示している。平成30年度の夏場のU-BCF運用は、給水末端の総トリハロメタン抑制のため野々池処理を減らし4池中2池を通水、かつ活性炭交換の有無各1池ずつとしたため、活性炭交換率は10%と仮定した。図10に活性炭交換有無の差によるU-BCFでのトリハロメタン生成能の除去率の差異を示す。活性炭を20%交換した池の方がおおむねトリハロメタン生成能の除去率が高く、活性炭一部交換が寄与していると考えられる。

ただし、平成28年と平成30年の6月1日から9月15日の生物接触ろ過池前後での水質データを比較する場合、運転池数、活性炭交換の有無により、処理水質への活性炭入替の影響が変わることに留意する必要がある。運転条件が平成28年度と異なるため、給水栓末端トリハロメタン濃度抑制をしながら更なる活性炭交換頻度の抑制を図るには、平成30年度の検証に加えて今後とも検証を続けていく必要がある。

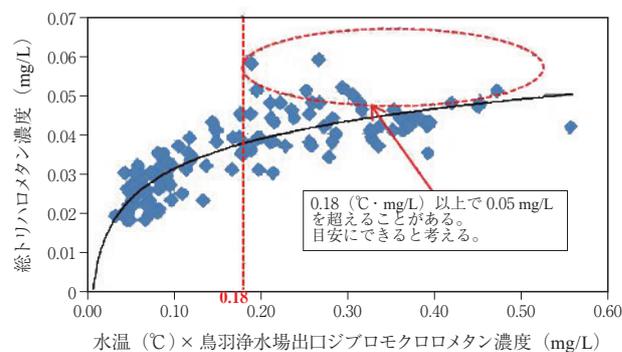


図8 浄水場出口の水温・ジブロモクロロメタン濃度と給水栓末端総トリハロメタン濃度

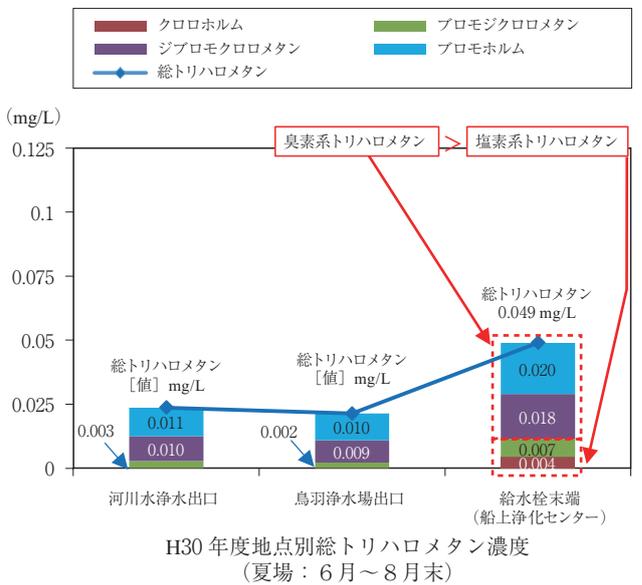
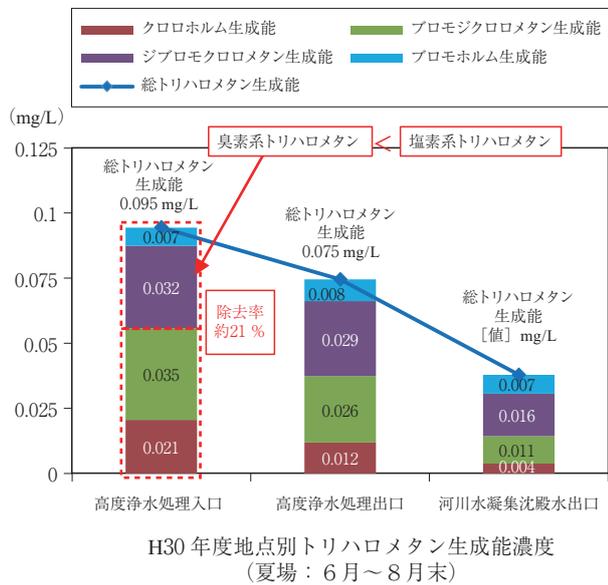
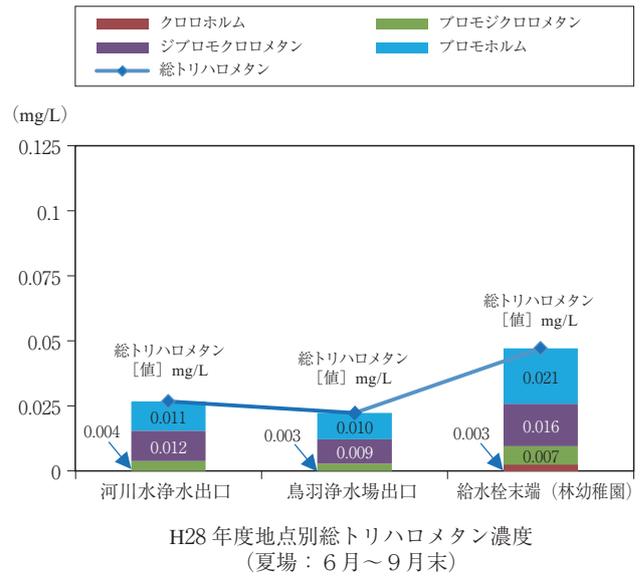
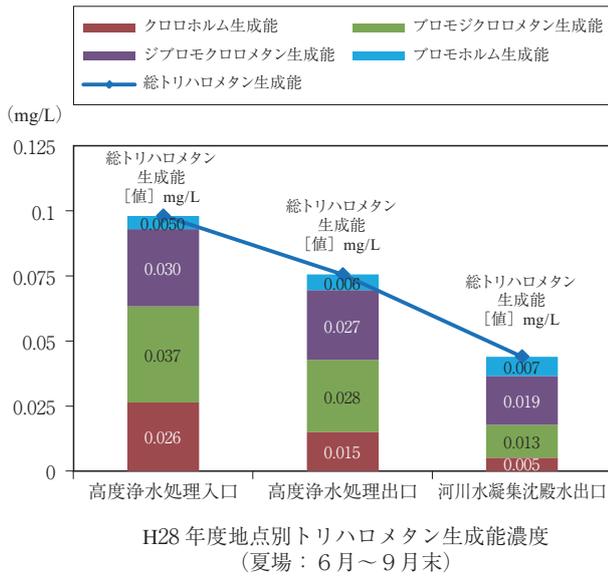


図9 採水地点別のトリハロメタン生成能、総トリハロメタンの推移 (平成28、30年)

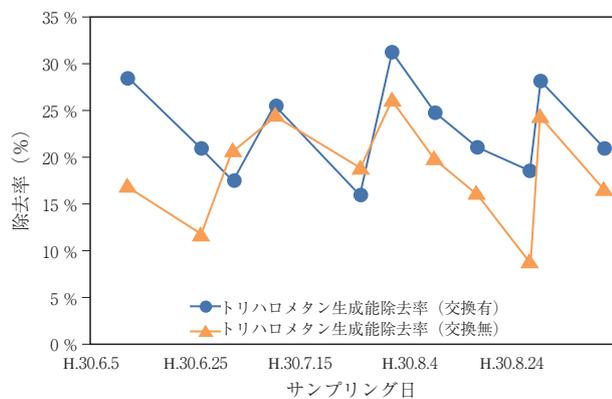


図10 活性炭交換有無の差による THMFP 除去率の比較

## 6. 保全計画の見直し

平成30年度夏場のデータを踏まえ、平成28年度に提案した保全計画について以下のとおり見直しを検討している。

- ・活性炭交換量：20% (平成28年度と同じ)
- ・活性炭交換頻度：4池を対象に1回/2年 または2池を対象に1回/年
- ・交換時期：5月末までに実施 (平成28年度と同じ)  
 なお、冬場を含む通年データが取れ次第、改めて見直す予定である。

## 7. 今後の課題

### (1) ハロ酢酸濃度

本検証ではトリハロメタンに焦点を絞り、活性炭一部交換により U-BCF によるトリハロメタン生成能除去率の改善という成果を上げることができた。しかしながら、トリハロメタンと同様に消毒副生成物となるハロ酢酸に関しては、本検証においてはデータを収集していない。ハロ酢酸もトリハロメタンと同様に発がん性物質として注視すべき項目であり、水道法に基づく水質基準にも定められている。今後、ハロ酢酸についても検討していきたい。

### (2) 浄水場における迅速な給水栓末端トリハロメタン濃度把握手法の模索

浄水場出口におけるジブロモクロロメタン濃度を迅速に把握することができれば、本検証にて導出した給水栓末端トリハロメタン濃度予測方法をより簡便に用いることが可能となる。本予測方法が実際に使用可能となれば、より柔軟な給水栓末端トリハロメタン濃度制御に繋がる可能性がある。そのためにも、浄水場出口におけるジブロモクロロメタン濃度を迅速に把握する手法の模索についても今後検討していきたい。

## むすび

U-BCF でのトリハロメタン生成能除去については、まだ不明確な点も多い。しかし、本検証においては定期的交換を前提とする粒状活性炭による吸着処理や、ランニングコストが高み臭素酸など副生成物の懸念があるオゾン処理の代わりに、生物活性炭による効率的なトリハロメタン生成能の除去と給水末端の総トリハロメタンの抑制を行える見通しが得られたと考えている。

明石市においては、今後も本検証業務を継続するとしている（次回で3年度目）。当社が引き続き協力することで、今回得られた知見を元に検証を深化し、原水を生物活性炭接触ろ過設備（U-BCF）を用いて処理することによるトリハロメタン生成能の抑制、給水末端の総トリハロメタン抑制手法を見極めていきたい。

## 謝辞

本検証を行うにあたり、データ提供や運転管理に配慮頂いた明石市水道局関係者の皆様に謝意を表します。

## 【参考文献】

- 1) 「平成28年度鳥羽浄水場水質保全支援業務委託」平成29年3月31日 明石市水道部／神鋼環境ソリューション 編