

本山浄水場での MF 膜モジュールの新規薬品洗浄法の検討と膜の長寿命化実証

Study of Combined Chemical Cleaning and Verification of Life Time Extension for Micro-Filtration Membrane Module of Motoyama Drinking Water Treatment Plant



田中裕大*
Yasuhiro Tanaka



隅 晃彦*
Akihiko Sumi
技術士 (上下水道部門)



三浦雅彦*
Masahiko Miura
農学博士



長谷川進**
Susumu Hasegawa
工学博士・技術士 (上下水道部門)



松山秀人**
Hideto Matsuyama
工学博士

膜ろ過による浄水システムにおいて、新規薬品洗浄法による膜の長寿命化に関する検討を行った。従来クエン酸のみで洗浄していたところを、次亜塩素酸ナトリウムとクエン酸の組合わせによる新規薬品洗浄をした結果、従来法のクエン酸のみの場合と比して膜ろ過抵抗の低減効果が高まった。さらに、洗浄廃液を分析した結果、有機物と無機物の両方が膜に付着していることが分かり、その両方が新規薬品洗浄法では除去できていたことが分かった。これらのことから、新規薬品洗浄法が膜の長寿命化に有効であることが示された。

In this study, we have investigated the combined chemical cleaning method for the micro-filtration membrane. The conventional cleaning method only used citric acid to remove inorganic matter but this combined cleaning method added sodium hypochlorite to remove organic matter. As a result, inorganic and organic foulants that covered the membrane were removed from the membrane by the cleaning. Hence, it can be shown that the combined chemical cleaning was more effective for life time extension of the membrane than the previous one.

Key Words :

浄水	Water purification
生物接触ろ過	Biological contact filter
精密ろ過	Microfiltration
膜ファウリング	Membrane fouling

【セールスポイント】

- ・薬品洗浄として次亜塩素酸ナトリウムを併用することで MF 膜における膜ファウリングが軽減されることが明らかとなり、MF 膜が長寿命化した。

まえがき

浄水方式としての膜ろ過法は、従来の急速ろ過法に比べ、設置面積が小さい、処理水質が良好であるといった特長を有し、近年浄水場への採用件数が増加しており¹⁾、今後のさらなる普及にも期待が寄せられている。浄水分野における膜ろ過では、精密

ろ過 (Microfiltration : 以下, MF) 膜をはじめとする多孔膜を用いるのが一般的である。

膜ろ過設備の運転における最大の課題は、運転に伴い発生する膜ファウリング (目詰まり) であり²⁾、これへの対応としては、逆圧洗浄 (以下, 逆洗) やエアバブリングに代表される物理洗浄を定期的に実

施するのが一般的である。物理洗浄で解消することができない膜ファウリングについては薬品洗浄で対応しており、膜ファウリングを抑制し膜の交換頻度を低下させることで膜交換費を下げるような技術開発が求められている。本検討の対象とした本山浄水場では、薬品洗浄として無機物の除去を目的としてクエン酸による酸洗浄が行われてきた。膜ファウリングを引起す要因について、近年、バイオポリマー*（以下、BP）と呼ばれる画分の溶解性高分子有機物が注目を集めている^{3, 4)}。クエン酸のみで洗浄した実施設の使用済み膜モジュールに対して膜ファウリングに関する検討をした結果、有機物と無機物の両方が堆積しており、その両方が膜ファウリングに影響を及ぼすことが分かっている⁵⁾。

そこで、本検討ではクエン酸による薬品洗浄に加えて、有機物を除去するために次亜塩素酸ナトリウムによる薬品洗浄を併用した新規薬品洗浄法を実施することとし、その膜ろ過抵抗の低減効果と、長寿命化について試算した結果を報告する。

1. 検証方法

1.1 対象設備と運転方法

本検討で対象とした神戸市本山浄水場（処理量：2 000 m³/d、水源：住吉川表流水）の処理フローを図1に示す。取水された原水は調整池を經由し、生物接触ろ過（BCF[®]; Bio Contact Filter）、MF膜ろ過が行われる。その諸元と洗浄方法を表1に示す。BCF[®]は臭気やアンモニア性窒素の除去を目的として前処理として設置されている。

薬品洗浄について、クエン酸は無機物の除去、次亜塩素酸ナトリウムは有機物の除去を目的として用い、各薬液を13時間浸漬させて静置した後、薬液を排出している。

本設備では、膜の逆圧洗浄時に配管の殺菌を目的として逆洗水に次亜塩素酸ナトリウムを注入しているが、結果的に膜も次亜塩素酸ナトリウムによって洗浄されることになるため、定期的な薬品洗浄として無機ファウラントの除去を目的としたクエン酸洗浄を実施していた。しかしクエン酸洗浄のみでは膜

表1 本山浄水場 MF 膜諸元と洗浄方法

項目	仕様	
材質	ポリフッ化ビニリデン (PVDF)	
形状	中空糸	
孔径	0.1 μm	
ろ過形式	外圧式	
物理洗浄	30分ごとに1回 逆洗（次亜 3 mg/L）+エアバブリング	
簡易薬品洗	頻度	2週間に1回
	薬品種	①クエン酸0.3%×13時間浸漬 ②次亜塩素酸ナトリウム 500 mg/L×13時間浸漬
	従来法	①のみ サイクル（①, ①, ①, ①, ①, ①…）
新規法	①と②を併用 サイクル（①, ①, ②, ①, ①, ②, …）	

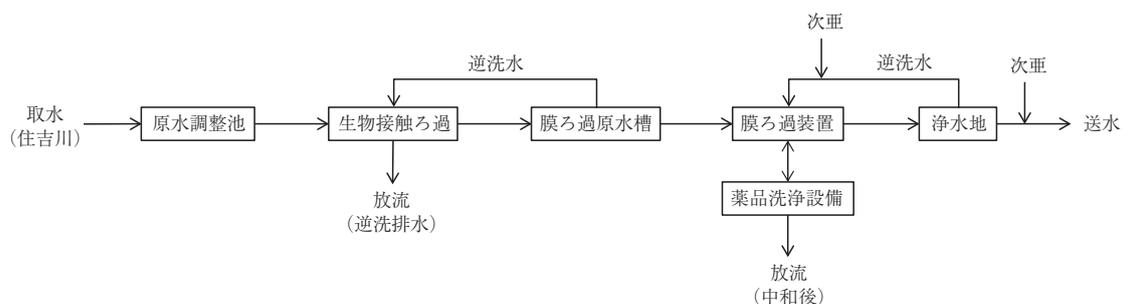
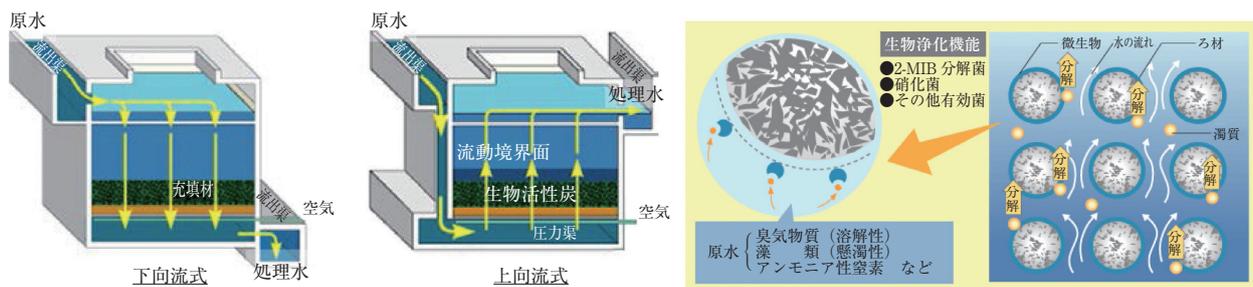


図1 BCF[®]概略図（上部）および本山浄水場の処理フロー（下部）

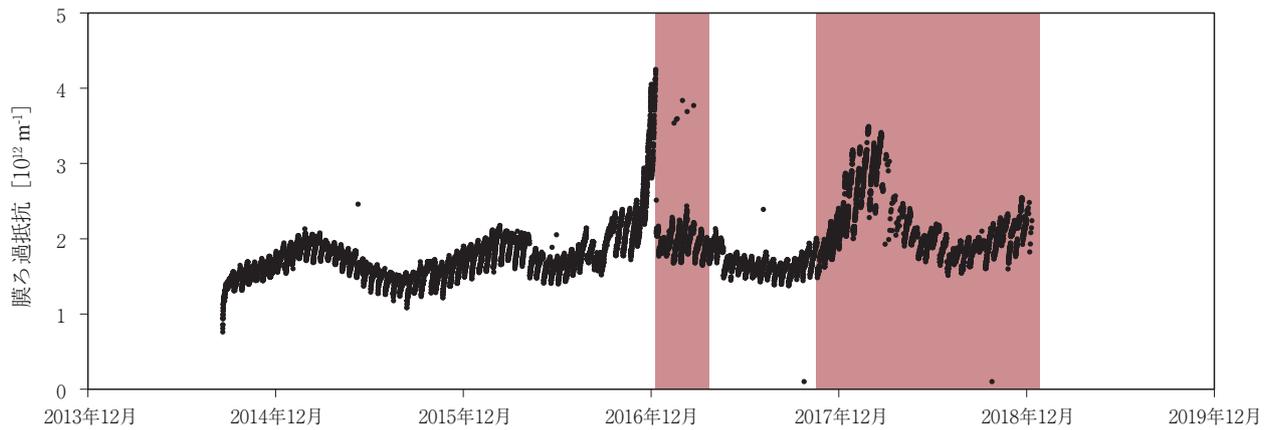


図2 (2)膜の膜ろ過抵抗の推移と次亜洗浄追加の効果

表2 本山浄水場使用膜の洗浄履歴

系列		2013	2014	2015	2016	2017	2018
1系	(1-a)膜	----->					
	(1-b)膜				----->	----->	----->
2系	(2)膜		----->	----->	----->	----->	----->

-----> : 夏季、冬季にともにクエン酸洗浄のみ
 -----> : 夏季はクエン酸のみ、冬季はクエン酸+次亜洗浄
 (2)膜は2018年度より夏季もクエン酸+次亜洗浄

ろ過抵抗が徐々に上昇する傾向が認められたため、膜表面に付着するファウラントを分析したところ⁵⁾、有機ファウラントの蓄積が明らかとなり、逆洗の次亜塩素酸ナトリウムでは有機物の除去が不十分と推察された。そこで、薬品洗浄に次亜塩素酸ナトリウムによる洗浄を追加した。詳細な各系列の洗浄履歴を表2に示す。

1.2 膜ファウリング進行の評価方法

水温による粘度の変動によって膜間差圧が受ける影響を排除するために、膜間差圧ではなく膜ろ過抵抗 R を指標として検討した。膜ろ過抵抗値は以下の式により算出した。

$$R = \frac{\Delta P}{\mu \cdot J} \quad (1)$$

ここで、 R : 膜ろ過抵抗 [m^{-1}]、 ΔP : 膜間差圧 [Pa]、 J : ろ過流速 [m/s]、 μ : 粘度 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] である。

膜ファウリング物質の堆積度合いと膜ファウリングの進行度合いは、それぞれ薬品洗浄後の膜ろ過抵抗 R_{base} [m^{-1}] と日当たりの膜ろ過抵抗の上昇速度 r [m^{-1}/day] によって評価した。

1.3 膜ろ過抵抗のシミュレーション方法

クエン酸のみまたは次亜塩素酸ナトリウム併用洗浄方法に対して薬品洗浄後の膜ろ過抵抗と膜ろ過抵抗の上昇速度を各運転年に応じて整理した上で、関係式をそれぞれ線形近似、指数近似にて整理した。各運転年毎の膜ろ過抵抗の計算値は下記のようにして求めた。

$$R = R_{\text{base}} + dr \quad (2)$$

ここで、 d : 薬品洗浄までの運転日数 [day] であり $d = 13$ である。さらに、季節変動による膜ろ過抵抗の変化を表現するために、各月ごとの関係式の係数は、もっとも膜ろ過抵抗が大きくなる季節である2月と小さくなる8月における係数を算出の上、線形で補完した値を用いた。

2. 実験結果および考察

2.1 新規薬品洗浄による洗浄効果の検証

図2に2014年8月から2018年12月までの(2)膜(4年間運転)の各期間の膜ろ過抵抗を示す。薬品洗浄について着色部の期間はクエン酸と次亜塩素酸ナトリウムを併用した場合、その他はクエン酸のみを使用した場合を示している。

クエン酸のみで洗浄している場合、3年目の2016年12月に急激な膜ろ過抵抗の上昇が見られた。そこで、クエン酸のみではBPなどの有機物の除去が不十分であると考え、薬品洗浄3回につき1回を次亜塩素酸ナトリウムにて洗浄する新規薬品洗浄を実施したところ膜ろ過抵抗の低減効果が見られた。さらに4年目運転となる2017年度冬季においても同様に新規薬品洗浄を継続したことで従来の本山浄水場の実績の3年を超えて4年運転を達成し、現在5年目の運転を継続中である。

さらに、図3でもっとも膜ろ過抵抗が高くなる2月について、表2に記載の膜の運転年数と膜ろ過抵抗 R_{base} 、上昇速度 r の関係を整理した。薬品洗浄後の膜ろ過抵抗と膜ろ過抵抗の上昇速度は、次亜塩素酸ナトリウムを併用した場合、クエン酸のみの場合と比較して低く抑えられた。この理由としては、クエン酸によって無機物は十分に洗浄されていたが、逆洗水に含まれる次亜塩素酸ナトリウムだけでは有機物の除去が不十分であったため、次亜塩素酸ナトリウムによる簡易薬品洗浄を併用することで十分に有機物が除去できたためであると考えられる。

2.2 膜ろ過抵抗のシミュレーションによる膜寿命の予測

新規洗浄法による膜寿命（膜交換頻度）の延長効果について検討するために、クエン酸のみの従来法

と次亜塩素酸ナトリウムを併用する新規法の膜ろ過抵抗の予測を行った。その結果を図4に示す。(1)式の薬品洗浄後膜ろ過抵抗 R_{base} と上昇速度 r についてはそれぞれ図3の関係をを用いた。従来法の薬品洗浄では、

- ① (1-a) 膜はクエン酸のみで3年間の運転実績
 - ② (2) 膜は3年目の冬期（2017年2月）に、膜ろ過抵抗が膜交換の目安に達した（図4）
- といったことから膜寿命は3年と推定された。

一方で、次亜塩素酸ナトリウムを併用する新規洗浄法では、

- ③ 実設備での4年間運転を達成した（図2）
 - ④ 5年目の冬期2019年2月に、膜ろ過抵抗の計算値が膜交換の目安に達する（図4）
- といったことから膜寿命は5年と推定された。

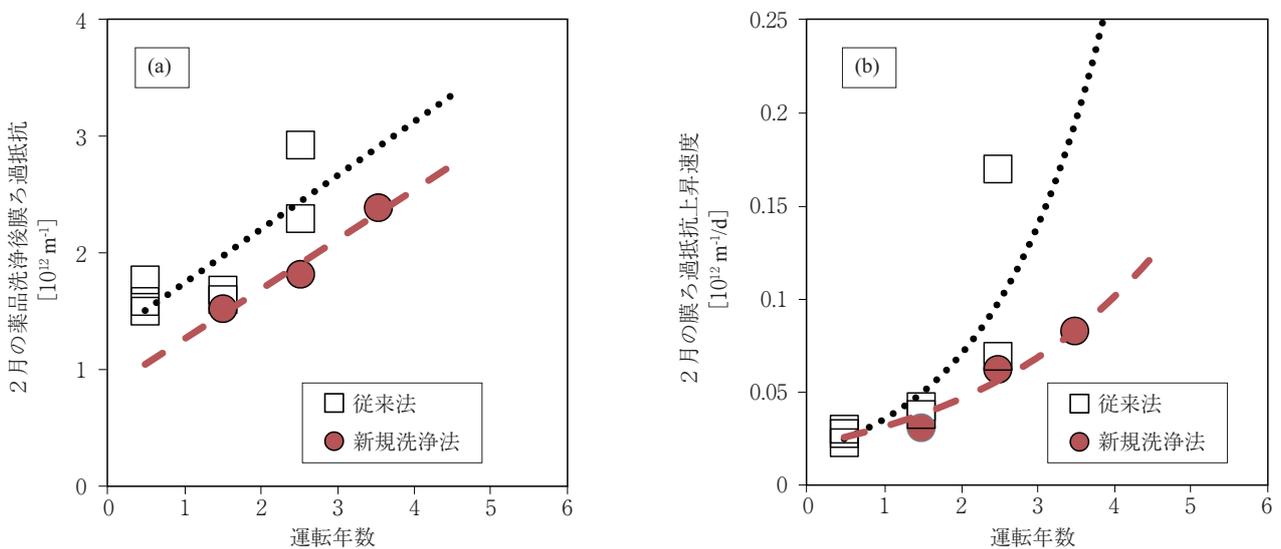


図3 2月度における運転年数ごとの薬品洗浄後の膜ろ過抵抗と膜ろ過抵抗の上昇速度

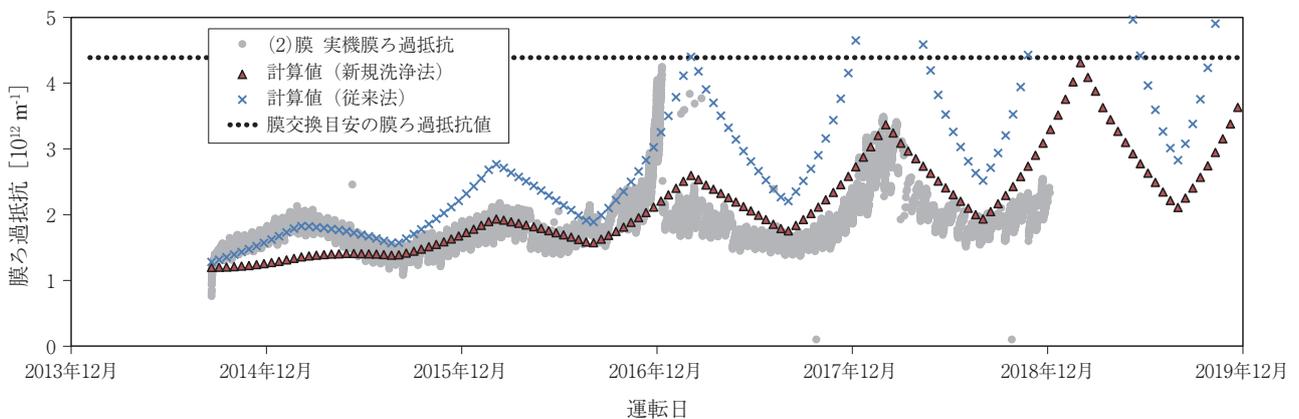


図4 実機の膜ろ過抵抗と各薬品洗浄ごとの膜ろ過抵抗の計算値との比較

これらのことから、次亜塩素酸ナトリウムによる洗浄を併用することで膜寿命を3年から5年に延ばす見込を得て、膜交換費用の低減が可能という結果となった。

さらに、冬季のみの次亜塩素酸ナトリウム併用洗浄法から推定した計算値よりも、2018年度冬季において(2)膜実機膜ろ過抵抗が小さくなっていることが読み取れる(図4)。これは、2018年度は夏季にも次亜塩素酸ナトリウムを併用して洗浄したことで、膜の洗浄効果が高まったためと考えられる。本報より、冬季のみの次亜塩素酸洗浄の併用で膜寿命は5年と推定されるが、夏季にも次亜塩素酸ナトリウムを併用して洗浄することで、さらなる膜の延命が期待できる。

むすび

次亜塩素酸ナトリウムを併用する新規薬品洗浄法が膜寿命に与える影響を評価することを目的とし、実設備による洗浄効果の検証、膜寿命推定のための膜ろ過抵抗のシミュレーションを実施し、以下の結果が得られた。

- 1) 3年目の膜ろ過抵抗の急上昇に対しても膜ろ過抵抗の低減効果が見られ、洗浄の継続により従来の実績を上回る4年間運転を達成した。
- 2) 膜モジュールには有機物と無機物の両方が付着していると考えられるが、逆洗水に含まれる次亜

塩素酸ナトリウムだけでは有機物が除去しきれっていないことが明らかとなった。このことから、次亜塩素酸ナトリウムの薬品洗浄を併用することで有機物の除去効果が高まることが示唆された。

- 3) 膜寿命について推定したところ、クエン酸のみの従来法では3年であるのに対し、冬季のみ次亜塩素酸ナトリウムを併用する新規洗浄法では5年と約1.7倍に増加する試算結果となり、膜交換頻度低減に効果があることが分かった。

今後は、ファウラントの詳細、薬品洗浄の頻度などを追究することで膜寿命のさらなる延長を目指し、BCF[®]と膜処理を組合わせた浄水システムの安定運転に資する知見を蓄積してゆく所存である。

最後に、本検討は、神戸市水道局よりご提供いただいたサンプルと運転データを用いて実施いたしました。関係各位に深く感謝いたします。

[参考文献]

- 1) 水道技術研究センター,
<http://www.jwrc-net.or.jp/jigyuu/gijyutsu-shien.html>
- 2) 中尾真一, 日本海水学会, 62 (2008) p.234-237.
- 3) Huber ほか, *Water Res.*, 45 (2) (2011) p.879-885.
- 4) 木村克輝ほか, *Water Res.*, 49 (2014) p.434-443.
- 5) 小野田草介ほか, 神鋼環境ソリューション技報, 14 (1) (2017) 2-7.

* LC-OCD 分析で検出される分子量約10 kDa 以上の溶解性高分子有機物の総称。