

AQSEV®膜ろ過装置の開発と実施例

Development and Application of AQSEV® Membrane Filter



櫻井 正伸 Masanobu Sakurai ①
伊藤 隆 Takashi Ito ②

あらまし

当社では膜ろ過技術をベースとしたコンパクトで、装置単独で膜ろ過と消毒工程を完結できる一体型のAQSEV®膜ろ過装置を開発した。逆流洗浄の動力に圧縮エアを用いることで、逆洗ポンプを省略し、装置の小型化、省エネを実現した。また、膜モジュールの保守点検が容易な構造とし、通常のろ過以外の膜モジュール損傷試験や薬液洗浄なども自動プログラムで実施することができる。さらに、遠隔で運転監視、操作ができるため、災害時の応急浄水装置としての対応も可能である。2016年9月、小型機種AMF-180S（平均浄水量180m³/日）を用いたC町向け災害支援の結果、その性能が評価され、同年10月、同町H浄水場に中型機種AMF-1000Sを納入した。現在、2施設で稼動中である。

Abstract

Hitachi Zosen has developed the AQSEV® membrane filter, a standalone apparatus based on membrane filtration technology that can complete both membrane filtration and disinfection processes. The apparatus uses compressed air for backwashing, thereby omitting the tank and pump, achieving a compact body, and saving energy. It has a structure designed to facilitate maintenance of the membrane modules, and programs for automatically executing routine filtration and chemical cleaning. A remote monitoring and operating system enables use as an emergency water purification apparatus in the wake of a natural disaster. In efforts to assist disaster recovery, Hitachi Zosen presented the small-sized model AMF-180S (average capacity 180 m³/day) to Town C in September 2016. The performance was highly welcomed and led to the delivery of the medium-sized model AMF-1000S to the town's Purification Plant H that October. The AQSEV® membrane filter is currently employed at two facilities.

1. 緒言

水源となる原水から大腸菌等の指標菌が検出された場合、塩素に耐性をもつ病原性原虫の混入リスクがあるため、ろ過による浄水濁度を0.1度以下とすることが「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針／厚生労働省」に定められている。膜ろ過では、これらの病原性原虫を確実に除去することができ、自動化により運転管理が容易となる。特に山間部や離島など、設置スペースに制約があり、運転技術者が不足している地域では、遠隔管理が容易な膜ろ過に優位性があり、よりコンパクトな装置が求められている。また、近年、地震や豪雨などにより浄水施設が被災した場合や、給水人口の減少に伴

うダウンサイジングに備えて、移設可能な浄水装置の提案もされている。今回、コンパクトなAQSEV®膜ろ過装置を開発し、2.5年間の実液試験で、全期間で処理水濁度0.1度以下の安定した運転を達成した事例を以下に報告する。また、こうした性能が評価され、災害時のバックアップ用施設として導入された事例、豪雨被害で緊急に設置した設備の運転例もあわせて報告する。

2. AQSEV®膜ろ過装置 (AMF-275S)の開発

2.1 装置の概要

AQSEV®膜ろ過装置AMF-275Sの外観を図1に示す。AQSEV®膜ろ過装置は、洗浄水槽、空気貯槽、次亜塩素酸ナトリウム注入装置を一体で装備し、圧縮空気による物理洗浄や次亜塩素酸ナトリウムによる浸漬洗浄を自動で行うことが可能で、制

① 環境事業本部 水処理ビジネスユニット 水処理技術部 上下水設計第2グループ 技術士(上下水道部門)

② 環境事業本部 水処理ビジネスユニット 水処理技術部 上下水設計第2グループ

御装置、遠隔監視装置も標準装備している。

装置には、オートストレーナ（目開き0.3mm）と外圧式中空糸膜モジュール（公称孔径 0.1 μ m、膜面積23m²）6本を装着している。原水はオートストレーナ通過後に膜ろ過され、洗浄槽を経由し膜ろ過水として装置外に供出される。



図1 AMF-275S外観

2.2 圧縮エアによる洗浄方式の確立 膜ろ過においても膜の洗浄が運転継続上重要であるが、圧縮エアの動力で必要な洗浄流量を得る方法を試験により確立した。

(1) 圧縮エアによる送水試験 膜ろ過装置では、濁質などによる膜の閉塞を解消するため、膜の透過側（2次側）から処理水による逆流洗浄（以下、逆洗）を行うが、通常、逆洗ポンプが必要となる。この逆洗用の動力をコンプレッサの圧縮エアとして逆洗ポンプを省略し、装置の中央に処理水槽兼洗浄水槽を配置することで装置のコンパクト化を図った。なお、コンプレッサのエアは逆洗時のエアスクラビングや膜モジュールの損傷を検知する圧力保持試験、エアリーク試験でも使用するため、これらと共通化した。図2に送水試験装置の写真を示す。



図2 送水試験装置

(2) 結果 表1に逆流流量調節弁のCV値を1.0、4.0として得られた試験結果、実機での最終採用値を示し、図3に最終採用値の結果が得られた試験のグラフを示す。

洗浄に必要な洗浄水流量Q2は、洗浄空気供給圧Pと逆流流量調節弁のCV値および開度を調整することにより、目標流量（1.2m³/min）が一定の流量で得られることがわかった。

表1 送水試験結果

項目	2012.3.8 [※]	2012.3.27 [※]	最終採用値	
MV1:逆流流量調節弁	CV値	1.0	4.0	(5.0~6.0)
	開度 [%]	100	70~85	(50~70)
Q1: 洗浄用空気流量	[Nm ³ /min]	0.8~1.2	1.72~2.25	1.72
Q2: 洗浄水流量	[m ³ /min]	0.62~0.92	1.1~1.3	1.2
V: 空気貯槽容量	[L]	280	280	280
P: 洗浄用空気供給圧	[MPa]	0.3~0.5	0.3~0.45	0.4
P1: 洗浄水槽圧力	[kPa]	150~200	52~68	61
T: 物理洗浄時間	[sec]	50~62	31~40	31

※ 2012.3.8, 2012.3.27は試験実施日。

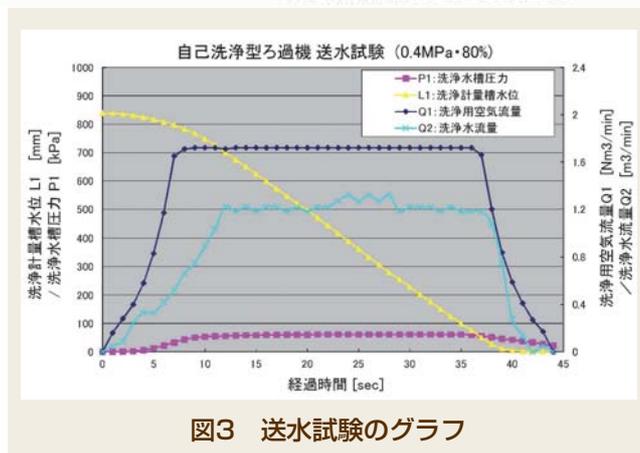


図3 送水試験のグラフ

3. AMF-275S による実液試験

圧縮エアによる洗浄試験結果などをもとにAQSEV[®]膜ろ過装置の試作機AMF-275S（図1）を製作し、2012年12月から北海道A町浄水場で実液試験を実施した。

3.1 実液試験の目標 一般に、膜ろ過装置のみで適用できる原水水質には制約があり、水質変動のある表流水を水源とする場合、凝集沈殿や一次ろ過などの前処理が必要とされている。特に、通常は無人で自動運転が行われる小規模浄水場では、前処理設備により、使用する薬品の増加、薬品注入量の調整や補充といった維持管理の手間が増え、ランニングコストの増大につながる。

そこで、原水が表流水でも「膜ろ過のみで浄水処理を継続でき、濁度0.1度以下を達成すること」を目標に、A町浄水場にて実液試験を実施した。

3.2 試験機を用いた実液試験 実液試験のフローを図4に示す。本試験では、着水井の上流側に設置した原水ポンプから原水を送水して浄水処理を行った。なお、膜ろ過水は着水井の下流側に返送することで浄水場の取水量を確保した。

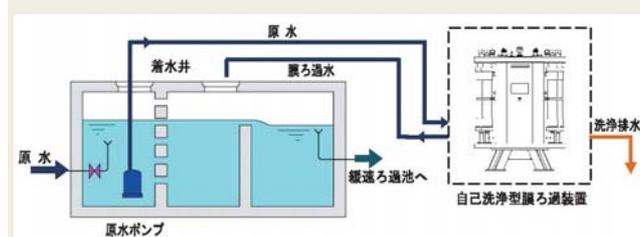


図4 試験実施フロー

膜モジュールの洗浄は、自動で実施する物理洗浄と浸漬洗浄、手動で行う薬品洗浄を併用して実施した。

試験期間中、物理洗浄ならびに浸漬洗浄で用いる次亜塩素酸ナトリウムは、膜ろ過装置に装備する注入ポンプで注入し、凝集剤は使用せずに浄水処理を継続した。以下に膜モジュールの洗浄方法を述べる。

(1) **物理洗浄** 物理洗浄は、ろ過工程を一定時間継続した後に実施する。本装置では、逆流洗浄とエアスクラビングの後にリンス洗浄とフラッシングを行った。(図5参照。図中の各工程設定時間は標準値。)



図5 物理洗浄工程

(2) **浸漬洗浄** 膜間差圧の増大時に、有機物に起因するファウリング（分離対象物質などが膜表面や細孔内に付着・堆積する現象）対策に有効な「次亜塩素酸ナトリウムによる浸漬洗浄」（以下 浸漬洗浄）を自動で行うものとした。

「浸漬洗浄」では、高濃度次亜塩素酸ナトリウム液（1,500～2,000mg/L）を膜モジュール内に一定時間（4～8hr）充滿浸漬する。その後、排液とリンス洗浄を行い、洗浄を終了する。

(3) **薬品洗浄** 運転の継続に伴い、浸漬洗浄では除去しきれないファウリングの除去を目的に、酸とアルカリ洗浄剤を用いた薬品洗浄を手動で行う。

薬品洗浄では、アルカリ洗浄剤として高濃度次亜塩素酸ナトリウム液（2,500mg/L）を膜モジュール内に一定時間（10hr）充滿浸漬する。また、酸洗浄剤としてクエン酸溶液（1%）を膜モジュール内に一定時間（2hr）充滿浸漬する。それぞれ浸漬後に、排液とリンス洗浄を行い、薬品洗浄を終了する。

(4) **運転条件** 本試験での運転条件を表2に示す。試験1では、最適な運転条件を見いだすため、膜ろ過条件を変更し、各条件での膜ろ過性能を把握した。

試験2では、試験1の結果から選択したろ過条件で、膜ろ過流束（Flux）、ろ過継続時間を一定として運転を継続し、長期連続運転の適用性と外的要因による膜ろ過処理への影響を評価、検証した。

試験3では、低膜ろ過流束（1.0m³/（m²・日））で運転を行い、試験1,2で得られたデータと比較、検証した。

3.3 試験結果 本試験を2012年12月24日から2015年5月6日まで延べ864日間実施した。試験2での主たる期間2013年9月から2014年10月までの気象データを図6に、運転データを図7に示す。

全試験期間において、膜ろ過水水質は水道法で定める水質基準値を達成した。また、膜ろ過水濁度は「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」で示された

「ろ過膜の出口の濁度を0.1度以下に維持する」についても達成した。

表2 試験での運転条件

	試験1	試験2	試験3
試験期間	2012.12.24 ～2013.8.7	2013.8.30 ～2015.2.28	2015.3.1 ～2015.5.6
膜ろ過流束 [m ³ /（m ² ・日）]	1.65～2.5	2	1
ろ過継続時間[min]	20～40	40	50
凝集剤注入率	無注入		
次亜塩素酸 ナトリウム注入率	無注入(物理洗浄逆流時 3mg/L)		



図6 試験2期間中 気象データ

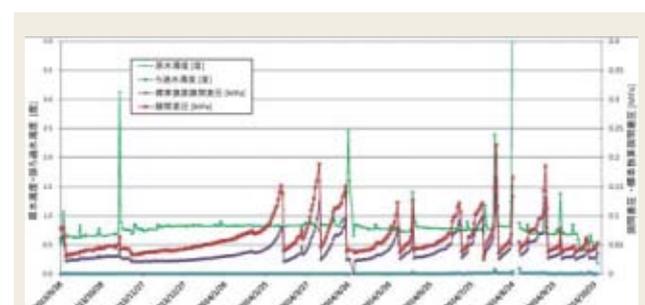


図7 試験2期間中 運転データ

3.4 試験結果に基づく考察

3.4.1 適正な運転圧力 標準換算膜間差圧（実際の差圧を標準温度で運転した時の圧力に換算）が低い条件で運転することで膜間差圧上昇を抑制し、浸漬洗浄なしに膜ろ過を継続できることを確認した。標準換算膜間差圧が0.1MPaになると急激に変化量が大きくなることから、0.05～0.1MPa以下で運転することで、濁度の一時的な上昇が生じていても、膜ろ過の継続が可能と判断した。

原水水質が良好な冬期間（12月から翌2月）において、標準換算膜間差圧変化量は小さく、浸漬洗浄を行わずに長期間の運転継続が出来た。これは、降雪により取水源の流れが乱されず、原水への無機物の混入が減少し、生物由来の有機物混入も減少して水質が安定したこと、および、低水温による膜透過性の減少を相殺したためと考えられる。

3.4.2 原水性状と運転条件による洗浄の効果

(1) **浸漬洗浄** 冬期間以外では、水温の上昇に伴い、浸漬洗浄の頻度が徐々に増し、2014年8月以降で

は、最大10日に1度の頻度となった。原水中に一般細菌の増加が確認されたことと、次亜塩素酸ナトリウムによる浸漬洗浄で膜ろ過性能が回復したことから、生物由来のファウリングと推定した。10日ごとに浸漬洗浄を行うプログラムに設定変更した結果、運転が安定した。

(2) 薬品洗浄 原水に鉄、マンガン成分が検出される期間においては、ファウリングが徐々に進行し、次亜塩素酸ナトリウムによる浸漬洗浄のみでは洗浄回復性が徐々に低下した。

試験1では、浸漬洗浄のみで洗浄回復性が81%迄低下したが、酸による洗浄で92%迄回復した。また、試験2では浸漬洗浄による洗浄回復性は65%以下となったが、酸を併用した薬品洗浄で100%の洗浄回復性が確認された。

酸洗浄の目安を検討し、試験2のろ過条件(膜ろ過流速 $2.0\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{日})$ 、ろ過継続時間40min)においては、次亜塩素酸ナトリウム浸漬洗浄による洗浄回復性が80%以下となった時の洗浄が望ましいと判断した。

(3) 原水水质変動時の対応 2014年の夏期においては、降雨量50mm/日以上が3回記録され、その都度、原水濁度上昇により膜間差圧が上昇し浸漬洗浄が必要となった。7月以降では、洗浄を必要とする頻度が増したことから、9月以降は10日ごとに浸漬洗浄を行った。その結果、標準換算膜間差圧の上昇は0.05MPa以下となり、運転が安定した。原水水质が悪化する夏期から秋期においては、浸漬洗浄の頻度を増やすことで、安定した運転が確認された。

3.4.3 低膜ろ過流速における運転の安定性

試験3(膜ろ過流速 $1.0\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{日})$ 、ろ過継続時間50min)において、標準換算膜間差圧変化量は、試験2のおおよそ1/10の値であった。このことから、この条件では、浸漬洗浄を実施せずに運転を継続できる日数が大幅に増加できることが確認された。

4. 安全性とメンテナンス性

本装置は山間部や離島など運転員が常駐しない場所で自動運転を目指している。有機膜の膜ろ過装置で懸念される重故障は膜損傷による濁質のリークであり、それに伴う膜ろ過水水质の悪化である。これを防止するため、自動で膜の損傷を検知する方法を確立した。

4.1 従来の膜損傷検知 図8に膜モジュールメーカーの膜損傷時検査手順を示す。従来の膜ろ過装置においては、膜ろ過水の濁度を監視し、異常時には系列ごとに装置を停止したうえで、損傷した膜モジュールを特定して取り外し、専用の器具を用いて補修するか、あるいは、メーカーへ送付して検査、補修することが一般的である。そのため、補修費としてメーカースタッフの派遣や予備の膜モジュールの費用を見込む必要があり、相応の維持管理費がかかる。

また、流入する原水が低濁度の場合や膜の損傷が小さい場合、膜ろ過水濁度の上昇が顕著ではなく、膜損傷が検出されないことも懸念されている。



図8 圧力保持試験とエアリーク試験の手順

4.2 オンサイト・オンラインでの膜損傷検知

本装置での膜損傷検知対策は、膜モジュールは取り外さずにオンサイト・オンラインで、「圧力保持試験」と「エアリーク試験」を行うことで対応する。

4.2.1 圧力保持試験 圧力保持試験は、膜の2次側にエアを吹き込み、設定圧まで昇圧し、保持できるかを確認するもので、膜に損傷がない場合、圧力は一定時間以上保持され、正常と判断できる。(膜は孔径が小さいため、溶解していないエアは通過できない。)一方、1次側にエアが抜け、圧力が保持できない場合は、膜が損傷していると判断できる。

圧力保持試験で圧力が保持できなかった場合、エアリーク試験に移行する。

4.2.2 エアリーク試験 エアリーク試験は、満水とした膜モジュールの1次側にエアを吹き込み、漏出の有無を確認するもので、膜に損傷がある場合は、2次側にエアが漏出する。各膜モジュールの上部点検蓋には、フロート式の膜損傷検出器(図9①)が装着されており、漏出したエアがエア溜りをつくれれば、これを検出し、損傷した膜モジュールを特定する。本装置ではさらに、特定した膜モジュールを緊急遮断弁(図9②)で遮断することにより、損傷の無い正常な膜モジュールのみでの運転が可能である。



図9 ①膜損傷検出器 ②緊急遮断弁

4.3 オンサイトでの膜の修復

4.3.1 損傷した中空糸の特定 エアリーク試験により損傷を特定した膜モジュールの上部点検蓋(図10②)を取り外した状態(図10③)では、1次側にエアを吹き込むと損傷した中空糸の箇所から気泡が生じるのが確認できる。

4.3.2 損傷箇所の修復 この中空糸（内径0.7mm）に補修釘を打ち込み、この中空糸を遮断する。その手順を図10①～⑦に示す。

中空糸は1モジュールで7000本あり、仮に70本が損傷し、補修釘を打ち込んでも膜面積は1%減少するだけである。



図10 膜損傷修繕

4.3.3 損傷の検知と修復の作業性 実機を納入した2現場では膜損傷は発生していないが、試験的に人為的に膜を損傷させて、自動運転にて膜の破断が検知できるかを確認した。その結果、圧力保持試験からエアリーク試験に移行し、損傷した膜モジュールを特定した。

また、水道事業体で実施したデモンストレーションでは、損傷した膜の補修を上記の手順で実演し、その結果、作業が短時間で簡単にでき、かつ、専門的なスキルが不要であることを理解いただいた。

従来は濁度異常があった場合、損傷した膜の特定ができなければ、膜メーカーなどの専門スタッフの派遣を要し、損傷膜の特定と交換まで浄水処理が停止してしまう。また、山間部や離島では派遣にも時間を要する。しかし、本装置では、自動で損傷した膜モジュールを特定遮断し、他の膜モジュールで浄水処理を継続できる。また、損傷膜の補修は容易で、復旧も短時間でできることが確認された。

5. 導入事例と今後の展望

5.1 導入事例

上述の試験や結果を踏まえて

装置的な改良を行いAQSEV®膜ろ過装置を5機種標準化した（表3）。現時点で2件の導入事例がある。

表3 AQSEV®膜ろ過装置のラインナップ

型 式	膜面積	標準処理水量
AMF-180S	92 m ²	170m ³ /日
AMF-275S	138 m ²	260m ³ /日
AMF-600S	300 m ²	580m ³ /日
AMF-1000S	500 m ²	970m ³ /日
AMF-1600S	800 m ²	1550m ³ /日

5.1.1 B法人への導入事例 既存の水道が、災害などにより断水した場合のバックアップとしても使用できるよう、新たに井戸を設置し、専用水道として2014年4月に稼動した。原水にはマンガンが含まれており、前処理で除マンガンろ過を行ない、膜ろ過（AMF-600S: 膜面積300m²）としている。稼動後3年を経過しているが、処理水濁度0.1度以下で運転を継続している。

5.1.2 C町への導入事例 水源として利用する湖に、大雨による土砂流入があり、原水濁度が上昇し、既存の急速ろ過設備では対応できなくなった。当初、給水車により応急給水していたが、水量が大幅に不足していた。支援要請を受け、図11に示す車載型デモ試験機AMF-180S型を現地に派遣し、応急浄水支援を行った。この時の運転性能が評価され、既存浄水施設の代替設備として、膜ろ過装置AMF-1000S（膜面積500m²）が2016年10月に導入された。その外観を図12、稼動から8ヶ月間の気象データを図13に、運転データを図14に示す。

(1) 運転特性 図14に示すように、膜のファウリングの程度を示す膜間差圧は、運転開始から2ヶ月間で徐々に上昇した。この間、膜ろ過流束を1.0m³/(m²・日)としていたが、年始休暇も控えていることから、早めに膜の薬品洗浄を行ったところ、膜間差圧は回復した。その後、膜ろ過流束を0.75m³/(m²・日)に設定変更し、7ヶ月以上運転を継続したが、膜間差圧の顕著な上昇はない。

この事例のように、他の施設で使用していた装置を移設してすぐに使用できるため、災害対応や施設統廃合にも活用できる。

(2) 濁度など処理特性 図13、14に示すように、原水濁度は当初は4度程度であったが、気温、水温の上昇とともに徐々に濁度が上昇し、現状では20度を超過している。これは水温上昇により湖内で対流が起こって底部の濁質が巻き上がり、濁度が上昇しているものと思われる。しかし、原水濁度が上昇していても、膜ろ過水濁度は0.1度以下を継続しており、膜間差圧の上昇もない。冬季の低水温期でも、処理に影響はなかった。

5.2 今後の展望 水道水源は、河川水、湖沼水、地下水とさまざまに、水温や水質も異なる。また、運転条件によっても膜ろ過特性は異なるため、顧客の要望に応じて、デモ試験機による実液試験で、膜ろ過性能を検証している。

膜ろ過は、濁質の除去が目的であるが、原水には鉄やマンガン、色度などの溶解性成分を含むものもある。



図11 C町 膜ろ過による応急浄水支援(AMF-180S)



図12 C町 納入膜ろ過装置(AMF-1000S)

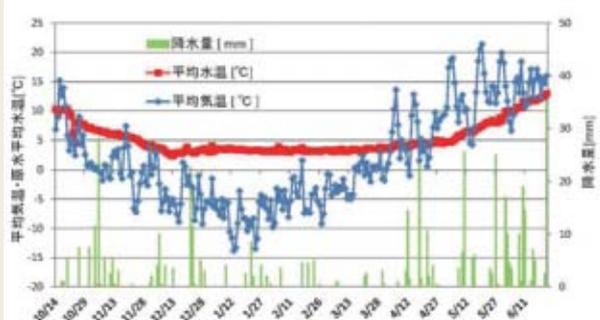


図13 C町 気象データ

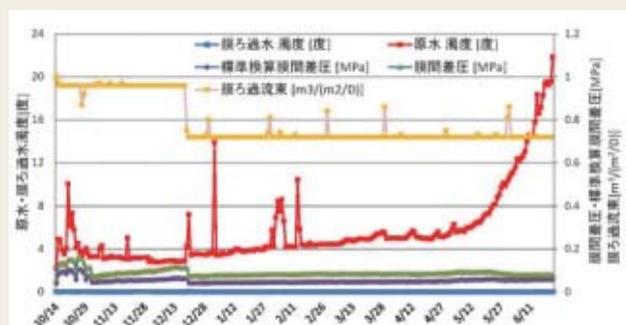


図14 C町 膜ろ過装置の運転データ

こうした河川原水に対応するため、凝集→除鉄・除マンガン→膜ろ過のハイブリッド型フローで2016年2月から8ヶ月間の実液試験を行い、濁度や一般細菌だけでなく、鉄、マンガン、色度などの溶解性成分の除去も検証した。また、期間中、降雨により原水濁度が200程度に上昇し8日間つづいたが、問題なく運転を継続した。

さまざまな原水に最適なフローを提供するため、高速凝集沈殿、前ろ過（繊維ろ過）、除鉄・除マンガンなどの前処理装置と本膜ろ過装置の組みあわせを提案している。また、提案する基本フローは圧力保持式とし、水位差やポンプ圧を有効利用した省エネにも配慮したものとしていく。

6. 結 言

濁度を確実に0.1度以下とすることができ、自動運転、遠隔監視・操作が容易な本膜ろ過装置は、人口減少で運転技術者確保が困難な中小の水道事業体にとっては有効な装置である。移設可能な本装置を導入することで、災害時の対応や、浄水施設のダウンサイジングにも有効である。また、必要に応じて除鉄、除マンガンなどのプロセスを組みあわせ、顧客にとって最適な浄水システムを提案していく。

参考文献

- 1) (公財) 水道技術研究センターホームページ
URL : <http://www.jwrc-net.or.jp/>
- 2) 藤田賢二, 山本和夫, 滝沢智: 急速濾過・生物濾過・膜濾過, 技報堂出版 (1994).
- 3) 旭化成マイクロザ UNA-620A 取扱説明書.

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 環境事業本部
水処理ビジネスユニット
水処理技術部 上下水設計第2グループ
櫻井正伸
Tel : 03-6404-0826 Fax : 03-6404-0865
e-mail : sakurai_m@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Environment Busiess Headquarters
Water Treatment Business Unit
Masanobu Sakurai
Tel : +81-3-6404-0826 Fax : +81-3-6404-0865
e-mail : sakurai_m@hitachizosen.co.jp



櫻井正伸



伊藤隆