

# 海中設置型高速繊維ろ過装置 SuRFF® の開発

## Development of Submerged Rapid Fiber Filtration (SuRFF®) System



乾	真規	Masaki Inui	①
新	里英幸	Hideyuki Niizato	②
来	住宜剛	Yoshitaka Kishi	③
藤	田哲朗	Tetsuro Fujita	③
井	手幹夫	Mikio Ide	④
大	地佐智子	Sachiko Ochi	⑤

### あらまし

当社は繊維束ろ材を用いて高速に海水を取水できる海中設置型高速繊維ろ過装置SuRFF® (Submerged Rapid Fiber Filtration) を開発した。実機と同じ繊維束ろ材をφ317mmカラム実験装置に設置してろ過および逆洗実験を実施し、最適なる材配置や逆洗条件について検討を行った。ろ過実験では、ろ過速度1000 m/日の条件にてろ材配置を最適化し、濁度除去率95%を達成した。逆洗実験およびサイクル実験では、水と空気による逆洗を8分以上実施すれば繊維束ろ材を完全に洗浄でき、ろ過性能が維持できることを確認した。これらの実験結果より、SuRFF®の設計指標を確立した。

### Abstract

Hitachi Zosen has developed a Submerged Rapid Fiber Filtration (SuRFF®) system, which can collect seawater at high speed using fiber bundle media. For studying the optimal arrangement of fiber bundle media and backwash conditions, we conducted filtration and backwashing tests using φ 317mm column experiment apparatus with practical fiber bundle media. In the experiment, we optimized the arrangement of fiber bundle media and achieved 95% turbidity rejection under filtration speed conditions of 1,000 m/day. We also confirmed that air and water backwashing for over 8 minutes cleaned the fiber bundle media perfectly and maintained filtration performance in cycle operation. Based on these results, we established a design guideline for SuRFF®.

## 1. 緒言

中東地域、中国、米国を中心として海水淡水化の市場は拡大しており、特に逆浸透 (RO) 膜を用いて淡水を得るRO膜法による海水淡水化プラントの建設が増加している。このため、RO膜に高品質な海水を供給できる取水・前処理設備の需要が今後拡大すると予測されている。海水を取水する前処理設備に関して、近年、ビーチウエルや浸透取水などの間接取水方式が注目されている。これらは取水段階で藻類やプランクトンの無い清澄な海水を取水できるが、海底の砂層を海水が通過するた

め取水速度が遅い〔線速度 (LV) 6m/日〕。このため、大量の海水を必要とする場合に取水面積が巨大化し、イニシャルコストである建設費や海洋土木工事費が増加するという問題を抱えており、普及が進んでいない。

当社は従来の間接取水方式より高速に海水を取水でき、かつ同等の機能を持つ新しい取水装置として、海中設置型高速繊維ろ過装置SuRFF® (Submerged Rapid Fiber Filtration) を開発した。これは図1に示すように、取水ユニット内部に下端部が装置と固定された繊維束ろ材が充填されており、取水による下向流でそれを圧密することで空隙を極小にし、懸濁物質を捕捉しながら海水を取水する装置である。ろ過抵抗の小さい繊維束ろ材を使用しているため、LV 1000m/日の速度で取水が可能である。また、取水速度が高速であるため、取水面積や取水構造物を縮小でき、イニシャルコストを低減できる。さらに、ろ材が装置に固定されているため、潮流や波浪によるろ材の流出が無く、設置場所が限定されない。

- ① 事業企画・技術開発本部 環境エンジニアリング研究センター 技術士(機械)  
 ② 事業企画・技術開発本部 環境エンジニアリング研究センター 博士(工学)、技術士(船舶・海洋)  
 ③ 環境事業本部 エンジニアリングビジネスユニット 環境プラント計画部  
 ④ 環境事業本部 開発センター  
 ⑤ 環境事業本部 開発センター 技術士(上下水道)

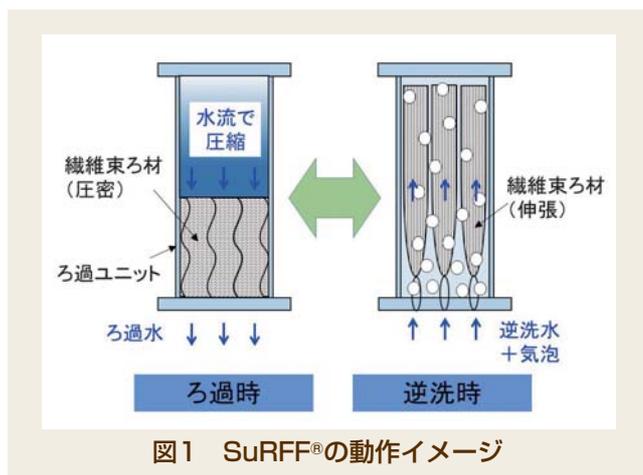


図1 SuRFF®の動作イメージ

ろ過に伴って繊維束ろ材に蓄積される懸濁物質については、定期的に逆流洗浄（以降、逆洗と呼称）を実施して系外に排出する。逆洗では、装置下部から空気を含んだ逆洗水を供給し、繊維束ろ材を伸長させて、気泡により繊維に付着した懸濁物質を振るい落として排除する。このようなろ過および逆洗のプロセスにより、SuRFF®は清澄な海水を安定して供給し続けることが可能である。

近年、中東地域でも環境アセスメントが厳しくなっており、薬品使用量やその廃液処理について関心が高まっている。また、取水海水への次亜塩素酸ナトリウムの注入がRO膜のバイオフィウリング（微生物付着による膜閉塞）の発生要因の一つとも言われており<sup>1)</sup>、無薬注の前処理技術のニーズは高い。これに関して、当社は既に無薬注RO海水淡水化システムを提案<sup>2), 3)</sup>しており、RO膜に発生するバイオフィウリングの抑制と、膜寿命の延命化を可能としている。SuRFF®もろ過および逆洗には一切薬品を使用しないため無薬注前処理技術であり、RO膜への同様の効果が期待できる。

SuRFF®の特長をまとめると次の通りとなる。

- LV 1000m/日で取水可能なため、従来の間接取水方式と比較して取水面積を縮小できる。このため、設備をコンパクトにでき、イニシャルコストである建設費や海洋土木工事費を低減できる。
- SuRFF®により海生生物やその卵を除去できるため、SuRFF®以降の取水配管に海生生物は付着しない。
- 取水配管への海生生物の付着が無く、付着防止用の殺菌剤の薬注や、配管清掃および配管交換作業が不要となり、薬品代やメンテナンスコストを低減できる。
- 運転時に凝集剤やpH調整剤等の薬剤を必要としないため、薬品代をさらに低減できる。
- 無薬注で清澄な海水を取水できるため、RO膜のバイオフィウリングの抑制が期待でき、環境への負荷も小さい。

本報では、SuRFF®実機的设计指標を確立することを目的として、実機と同じ繊維束ろ材をφ317mmカラム実験装置に設置してろ過および逆洗実験を実施し、ろ過性能および逆洗性能について検討した内容を述べる。

## 2. ろ過実験

ろ過実験では、繊維束ろ材の充填密度や配置が濁度除去率や損失水頭に及ぼす影響を調査するために計12ケースの実験を実施し、最良のろ過性能が得られる充填密度とろ材配置について検討した。

**2.1 実験装置** 図2に、ろ過実験時のフローを示す。実験に用いたカラム実験装置は、内径φ317mmの透明PVC製パイプをフランジにより原水供給部、中間部、ろ層部、散気管部、集水管部の5つの部分に分割できる構造となっている。図3に示す繊維束ろ材は、ろ材支持床に配置・固定され、ろ材支持床はろ層部と散気管部のフランジで挟み込むことで装置に固定される。ろ過実験では、上方から原水を供給して静水圧により原水をろ過する。装置最下部の集水管部にはPVC製の多孔管が設置されており、そこを通じて処理水が装置外部へ排出される。

**2.2 実験方法および測定項目** 実験用の原水として大量の実海水を準備することが困難であったため、水道水にマリンシルトを海水と同程度の濃度（約10ppm）で添加したものを模擬原水とした。また、ろ過時間は1時間とした。

ろ過実験の手順として、まず、処理水バルブを閉にして水中ポンプにより原水をカラム上部に供給した。カラム内部に所定の水位まで模擬原水が溜まった後、処理水バルブを開け、ろ材の圧密を開始した。ろ材の圧密が完了後、原水供給量をLV 1000m/日に調節して実験を開始した。

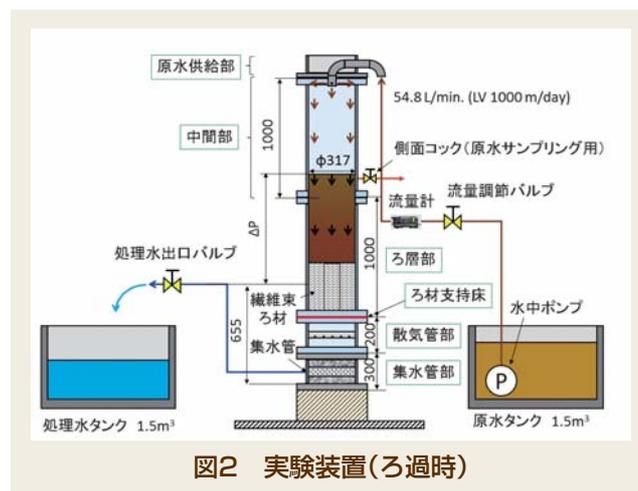


図2 実験装置(ろ過時)



図3 繊維束ろ材

表1 測定項目

測定項目	方法	測定場所	測定間隔
原水濁度	積分球式濁度計	側面コック	5分
原水SS	JIS K0102 記載の分析法	側面コック	適時
処理水濁度	積分球式濁度計	処理水出口	5分
処理水SS	JIS K0102 記載の分析法	処理水出口	適時
損失水頭	メジャー	カラム側面	5分

ろ過実験中、表1に示す条件で各項目の測定を実施した。濁度と浮遊物質(SS)は、原水をカラム側面コック、処理水を処理水出口から採水して分析した。損失水頭はカラム内水位と処理水出口の高低差をメジャーで測定した。実験で得られたデータから濁度除去率を計算し、損失水頭も考慮しながら最もろ過性能が良いろ材配置について検討した。

**2.3 実験結果** ろ過実験結果の一部について説明する。図4に繊維束ろ材の各充填密度における粒径別濁度分布の結果を示す。図4(a)に示す繊維束ろ材の充填密度が54kg/m<sup>3</sup>の場合では、原水濁度は20.6度、処理水濁度は1.87度で濁度除去率は90.9%となった。粒径別の濁度では、処理水で粒径10μm以上の粒子による濁度が検出されている。一方で、カンザシゴカイ類やイガイ類などの海生生物の卵径は約40～50μmと言われており<sup>4)・5)</sup>、10μm以上の粒子が処理水側に漏えいしていることから、この充填密度では海生生物の卵がろ層部を通

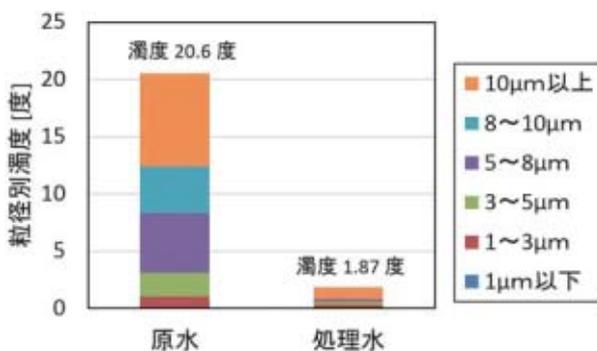
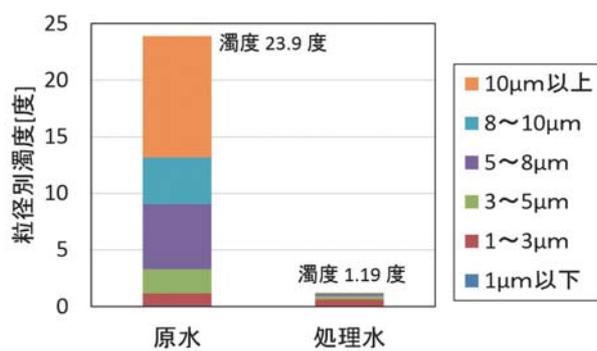
(a) 充填密度 54kg/m<sup>3</sup>(b) 充填密度 71kg/m<sup>3</sup>

図4 各充填密度における粒径別濁度分布

過する可能性がある。一方で、図4(b)に示す繊維束ろ材の充填密度が71kg/m<sup>3</sup>の場合では、原水濁度は23.9度、処理水濁度は1.19度で濁度除去率は95.0%であり、10μm以上の粒径別濁度も殆ど検出されていない。よって、海生生物の卵がろ層部を通過する可能性は殆ど無いと考えられる。

図5に損失水頭と繊維束ろ材の充填密度の関係を示す。充填密度が大きくなるほど損失水頭が増加した。一方で、SuRFF®は海中に設置し、ポンプにより海水を吸引するため、ろ過時の損失水頭が高いとポンプ吸込側圧力が負圧となり、キャビテーション等のトラブルが発生する。このことから、最も低い損失水頭で10μm以上の粒子を除去できる充填密度71kg/m<sup>3</sup>を最適な繊維束ろ材の設置量として採用した。

繊維束ろ材の配置に関して、格子状配置、最密配置、同心円状配置の3つについてろ過実験を行い、各配置における濁度除去率を調査した。その結果、配置の違いによる濁度除去率の差は小さいことが判明した。繊維の圧密時には繊維束ろ材間の隙間に流れが集中し、そこに繊維が吸引されて隙間が塞がる。このため、繊維が移動して均一なる層が形成されるため、配置の影響が出なかったと考えられる。以上より、繊維束間の距離や繊維束と壁面との距離を均一にできる同心円状配置を採用した。

### 3. 逆洗実験

逆洗実験では、第2章で決定したろ材配置にて繊維束ろ材を濁質で意図的に汚した後逆洗を行い、最適な逆洗空気流量や逆洗時間について検討した。

**3.1 実験方法** 繊維束ろ材を汚染させる濁質としてメタン発酵汚泥を採用した。メタン発酵汚泥を採用した理由は、有機質で粘性があり、マリンシルトより繊維束ろ材に強固に付着するためである。実海水では、シルトなどの無機質以外に、海藻や藻類、魚類の排泄物等の有機質の濁質も含まれている。海水由来の濁質を大量に準備することが難しいため、メタン発酵汚泥を用いることで有機質の除去性能について定性的に評価した。

図6に逆洗実験時のフローを示す。繊維束ろ材の逆洗には、空気と水を併用した。SuRFF®の製品コンセプトの一

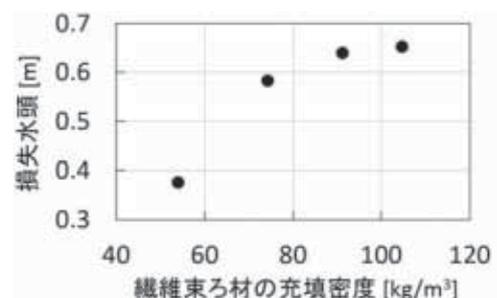


図5 損失水頭と繊維束ろ材の充填密度の関係

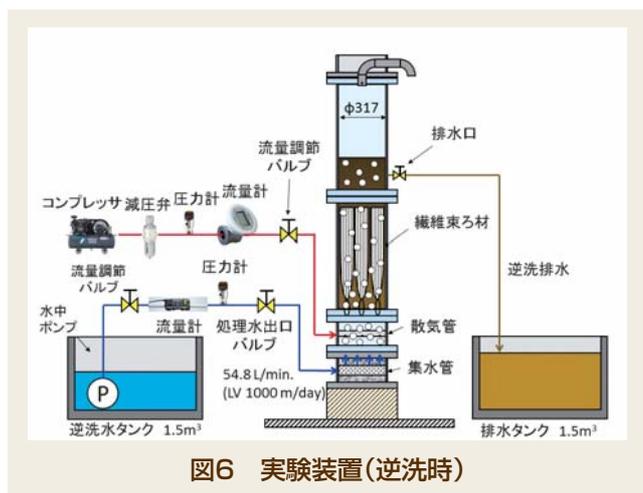


図6 実験装置(逆洗時)

つは、取水配管内への海生生物の付着防止であり、逆洗時にも海生生物の卵や幼生、成体が処理水側に混入しないようにする必要がある。このため、逆洗中は常時、処理水側からろ過時と同じLV 1000m/日の流速で処理水を逆流させ、処理水側への逆洗排水の混入を防ぐと共に、散気管から気泡を噴出させて繊維束ろ材に付着した濁質を洗浄した。逆洗水LVを1000m/日とした理由は、取水流速と同一とすることで配管を共通化できるためである。これは、取水地点が地理的条件や海水性状によって施設から遠くなり、取水管が長くなる場合において大きな利点となる。

逆洗実験の手順として、まず、メタン発酵汚泥をSS濃度で100ppm(実海水SS濃度の約30倍)となるように水道水と混合して原水を作製した。次に、ろ過実験と同様の手法で原水を20分ろ過して繊維束ろ材に濁質を付着させた。その後、ろ過時に発生した処理水を逆洗水として集水管から逆流させ、屈曲した繊維束ろ材を伸張させた後に散気管より空気を吹き込み、繊維束ろ材を洗浄した。逆洗排水はカラム上部の排水口から排水タンクへ排水した。

表2に逆洗実験の測定項目と測定間隔を示す。逆洗水流量と逆洗空気流量のデータはデータロガーで収集した。逆洗性能を評価するために1～2分毎に逆洗排水を採水し、逆洗排水の濁度の低下率も分析した。

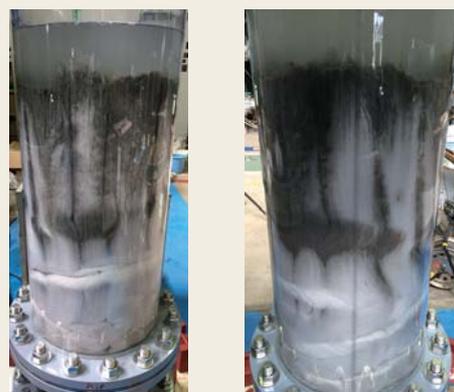
表2 測定項目

測定項目	方法	測定場所	測定間隔
逆洗水流量	超音波流量計	逆洗水供給ライン	0.5秒
逆洗空気流量	超音波流量計	逆洗空気供給ライン	0.5秒
逆洗水濁度	ポータブル濁度計	逆洗排水出口	1～2分

3.2 実験結果 図7に逆洗前のろ層の写真を、図8に逆洗後のろ層の写真をそれぞれ示す。本実験はろ過後に約17時間静置して、汚泥を繊維束ろ材に固着させた後に逆洗を行った結果である。また、この際の逆洗空気LVは5.94m/minである。図8に示すように、繊維束ろ

材に目視可能な付着物は無く、逆洗により全ての濁質を除去できたことがわかる。図9に逆洗後に取り出した繊維束ろ材の写真を示す。ろ層の中央部や繊維束ろ材の中心部に目視で確認できるサイズの付着物は無いことから、洗浄不良が無いことが確認できる。これは、同心円状配置としたことにより、繊維束間の距離や繊維束と壁面との距離が均一となり、ろ層全体に逆洗水や気泡が均等に分散し良好な洗浄効果が得られたためと考えられる。洗浄不良が無く、目視できる濁質もほぼ除去できたことから、繊維束ろ材への海生生物の付着を回避できると考えられる。

表3に逆洗排水濁度の測定結果を、図10に逆洗時間と逆洗排水濁度および洗浄率の関係をそれぞれ示す。逆洗水には処理水を使用しているため、測定した逆洗排水の濁度値から処理水の平均濁度値を引いて実質的な排水濁度の値を算出している。また、メタン発酵汚泥入り原水における濁度とSSの関係を求め、それを用いて逆洗排水中のSS濃度と各区分でのSS排出量を推定した。そして、SS排出量の総和を求め、ろ過時にろ層に捕捉されたSSの推定値との比から洗浄率を計算した。ここで、ろ過時にろ層に捕捉されたSSの推定値は、ろ過時の原



(a) 正面 (b) 左側面

図7 逆洗前のろ層



(a) 正面 (b) 左側面

図8 逆洗後のろ層

水の平均濁度値から処理水の平均濁度値を引き、それをSSに変換して処理水量を掛けることで算出している。

表3および図10より、逆洗開始から3分後までにろ層に捕捉された濁質の90%以上が排出されていることがわかった。また、逆洗開始から5分後以降は排水濁度の変化も小さくなり、殆ど濁質が排出されていないことも確認できた。

以上の結果より、繊維束ろ材に付着した濁質の殆どは逆洗開始から5分までの間に除去されていることが判明した。



(a) 全体 (b) 拡大  
図9 逆洗後の繊維束ろ材

表3 測定結果

逆洗時間 [min]	排水濁度 [NTU]	SS (推定) [mg/L]	総 SS 排出量 [g]	洗浄率 [%]
0	1083.3	1056.7	0.0	0.0
1	297.3	290.0	37.2	68.6
2	84.0	81.9	47.5	87.5
3	26.9	26.2	50.5	93.0
4	13.4	13.1	51.6	95.0
5	8.1	7.9	52.2	96.1
6	3.4	3.3	52.5	96.6
7	2.0	2.0	52.6	96.9
8	2.0	2.0	52.7	97.1

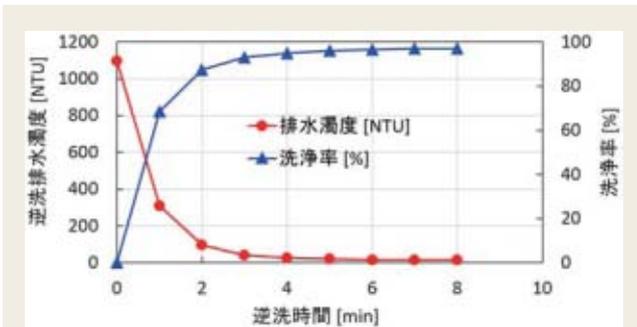


図10 逆洗排水濁度と洗浄率の経時変化

### 4. サイクル実験

SuRFF®を製品化するためには、ろ過と逆洗を繰り返した際に、処理水の水質や濁度除去率、ろ過開始時の

損失水頭が逆洗後に初期の値に戻ることを確認する必要がある。そこで、ろ過と逆洗を繰り返すサイクル実験を実施した。

4.1 実験方法 実験方法については、第2章および第3章で説明したろ過・逆洗実験の手法と同様である。各サイクルのろ過時間は20分とし、その後に逆洗を実施した。サイクル実験に使用した原水は、逆洗実験時と同じである。サイクル実験では、逆洗時に発生した逆洗排水を次のろ過運転時の原水として再利用し、複数回ろ過と逆洗を繰り返した。逆洗時の逆洗空気LVは6.0～8.0 m/minである。逆洗条件として、逆洗時間を5分、8分、16分とした3ケースの実験を行い、逆洗時間の違いによるろ過時の濁度除去率やろ層の初期損失水頭の変化を確認した。濁度はポータブル濁度計でろ過開始から5分毎に測定した。

4.2 実験結果 図11に各逆洗時間でのサイクル実験におけるろ過時の原水濁度、処理水濁度、濁度除去率および損失水頭の経時変化をそれぞれ示す。図11中の各プロットは、それぞれのサイクルにおいてろ過開始

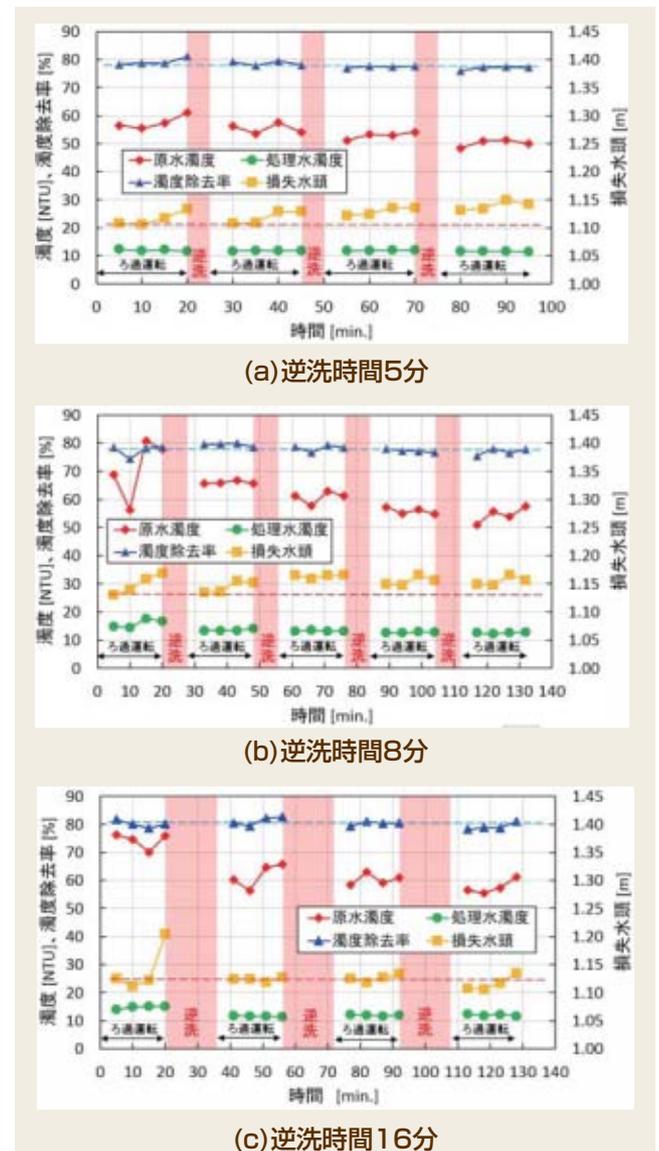


図11 サイクル実験結果

から5分、10分、15分、20分経過後に計測した値を示している。以降、初期損失水頭と呼ぶものは、ろ過開始から5分後の損失水頭である。ろ過開始直後の計測値を使用しない理由は、ろ過開始から5分後までは繊維の圧密が徐々に進行しており、損失水頭の値が安定しないからである。図11 (a) に示すように、逆洗時間が5分の場合では、逆洗回数(サイクル数)の増加に伴い濁度除去率は微減し、初期損失水頭は増加した。これは、繊維束ろ材の洗浄が十分でないことによるものと推測される。図11 (b) に示す逆洗時間が8分の場合では、逆洗回数(サイクル数)の増加に伴って濁度除去率は微減し、初期損失水頭は3回目のろ過時までは増加するが、それ以降は増加しなかった。図11 (c) に示す逆洗時間が16分の場合では、逆洗回数(サイクル数)の増加に伴って濁度除去率は微減し、初期損失水頭は1回目の値から増加しなかった。いずれの実験結果に関しても、原水濁度が初回ろ過時から減少している理由は、繊維束ろ材に濁質成分の一部が吸着したためと推測される。第3章では、逆洗開始から5分までの間に濁質の殆どが除去されていると結論付けたが、逆洗時間を8分以上にしないと初期損失水頭の増加を抑えることができなかった。表3より、逆洗開始から5分後以降でも微小ながら逆洗排水の濁度が検出されていることから、5分後以降でも繊維に付着した微小な粒子や有機物が排出されており、これらが初期損失水頭の増加に関与していると考えられる。

図12に逆洗時間を8分とした場合の実験終了時(5回目逆洗後)に装置を分解して、繊維束ろ材を観察した際の写真を示す。図12より目視可能な付着物は無く、綺麗に洗浄されているのがわかる。一方で、繊維束ろ材の一部の領域において変色が確認されたが、これは数ミクロン単位の細かい粒子や色素成分が繊維部分に吸着・残留したものと推測している。前述した逆洗開始から5分後以降でも排出され続けている物質はそれらと考えられる。逆洗時間を8分とした場合で一部に変色部分が残っているが、初期損失水頭の増加が抑えられており、濁度除去率も維持できていることから、実用上は問題ないと考えられる。

以上より、逆洗時間を8分以上とすればろ過性能を維持できると考えられる。具体的な検討として、逆洗時間



図12 サイクル実験後の繊維束ろ材  
(左: 繊維全体、右: 拡大)

を8分とした場合に逆洗前の繊維の伸張時間を30秒、逆洗後に繊維に捕捉された空気抜き時間を30秒とすると、逆洗水を通水する時間は9分となる。ろ過時間3時間毎に1日8回逆洗すると仮定すれば、ろ過水の回収率は95%となり、一般的な砂ろ過設備と同等となる。

## 5. 実証試験計画

実海域実証試験として、取水量550m<sup>3</sup>/日に対応した直径900mmのSuRFF®を製作し、SuRFF®を実際に海中に設置して取水を行う実証試験を計画している。本試験では、約1年間の連続運転を行い、実海水によるろ過性能、逆洗性能、装置の信頼性、繊維束ろ材の経時変化を確認するが、その事前検討として、大型水槽内にSuRFF®を沈設して実証機の動作確認及び運転時のろ材の状況を確認するための陸上試験を実施した。

図13に陸上試験時の写真を示す。実証試験向けSuRFF®は、前章までに報告した知見よりろ材配置や逆洗条件を決定している。図13に示す通り、ろ過運転時に付着した濁質は、逆洗により全て除去されていることを目視で確認した。

現在、陸上試験により得られた結果をもとに実証試験装置を改良しており、今後、実海域に設置して試験を進めていく予定である。



(a) ろ過直後 (b) 逆洗後  
図13 SuRFF®実証機陸上試験時の写真

## 6. 結 言

ろ過実験、逆洗実験、サイクル実験の各種実験結果から次の結論を得た。

- (1) 繊維束ろ材の配置について、ろ過および逆洗性能を両立できる最適な配置を確立した。
- (2) マリンシルトを混入した原水を用いたろ過実験結果より、最適なるろ材配置では、ろ過速度LV 1000m/日で濁度除去率95%を達成できる。
- (3) 最適なるろ材配置では、逆洗時に気泡がろ層内に均一に分散することで繊維束ろ材の洗浄不良が発生しない。
- (4) 逆洗時の逆洗空気LVが6.0m/min以上、逆洗水LVが1000m/日の条件で8分以上の逆洗を実施すれば、ろ過性能(濁度除去率およびろ過開始時の圧力損失)を維持することが可能である。
- (5) 逆洗水を通水する時間を9分とし、1日8回(ろ過時間3

時間ごとに) の逆洗を行うと仮定すると、ろ過水の回収率は95%となる。

以上より、SuRFF®のろ過性能や逆洗性能が明らかとなり、設計指標を得ることができた。

今後、SuRFF®実証試験機を実際の沿岸海域に沈設して長期間の実海域実証試験を行い、SuRFF®の信頼性を高めて早期に初号機受注を行う予定である。

## 参考文献

- 1) Ito, Y. et al, CLARIFICATION OF IMPACT OF BIOFOULING TRIGGERED BY CHEMICAL ADDITION FOR DESIGNING OF MEGA-TON SWRO PLANT, In proceedings of the International Desalination Association World Congress on Desalination and Water Reuse **2013** Tianjin, China, REF: IDAWC/TIAN13-062.
- 2) Niizato, H. et al, INNOVATIVE SWRO DESALINATION TECHNOLOGY INTRODUCING HIGH-SPEED SEABED INFILTRATION SYSTEM (HiSIS) , In proceedings of the International Desalination Association World Congress on Desalination and Water Reuse **2013** Tianjin, China, REF: IDAWC/TIAN13-033.
- 3) 乾真規, 新里英幸ほか：アラブ首長国連邦アブダビ首長国でのHiSIS Pilot Plant 実証試験, Hitz技報, **2016**, 77 (1) , 20-26.
- 4) Cecelia M. Miles et al, Life history trade-offs and response to selection on egg size in the polychaete worm *Hydroides elegans*, *Genetica*, **2009**, 135, 289-298.
- 5) 劉海金ら, ミドリイガイの生物学的知見, 海生研研報, **2002**, 第4号, 67-75.

### 【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 事業企画・技術開発本部  
技術研究所 環境エンジニアリング研究センター  
海洋環境グループ  
乾 真規  
Tel : 06-6551-9196 Fax : 06-6551-9906  
e-mail : inui\_m@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation  
Business Planning & Technology Development  
Headquarters  
Technical Research Institute  
Masaki Inui  
Tel : +81-6-6551-9196 Fax : +81-6-6551-9906  
e-mail : inui\_m@hitachizosen.co.jp



乾 真規



新里 英幸



来住 宜剛



藤田 哲朗



井手 幹夫



大地 佐智子