

薬品の種類や濃度によっては希釈時に発熱を伴うものもあるので、温度の自動計測や警報設定などにより十分な対策を施す。

②混合手順

原薬品に希釈水を加えると急激な反応が起こる場合がある。また、固体では溶解不良となることもある。そのため、希釈水に原薬品を徐々に加えることが必要である。所定量の希釈水が準備できた状態で原薬品を供給し、所定量の洗浄薬品が調製できた時点で停止するようにレベル計などを設置する。

③供給量確認

原薬品などを定量ポンプなどで供給する場合は、洗浄薬品調整の際には事前に安定した供給量であることを確認する。また、供給量の変動がないかを確認できるように流量計などの設置も考慮する。

④薬液の水質確認

洗浄工程に移る前に調製した薬液の水質確認を行う。

水質測定方法には、

- ・手分析：採水した対象水をポータブル計器により水質確認を行う方法、
- ・自動分析：オンラインにて自動で採水から水質確認まで行う方法、

がある。採用にあたっては、計器の精度、使用頻度、維持管理性などを考慮し選択する。

2) 洗浄工程

洗浄工程およびリンス工程は数種の洗浄薬品、リンス水などを順次切替える必要があり、循環・浸漬時間を含めるとかなりの工数を必要とする。従って、一連の工程を自動化することを考慮する。

洗浄工程の自動化の検討にあたっては、以下の点に留意する。

①弁動作

膜ろ過ライン・洗浄ラインなどの切替え、洗浄薬品の混合などを防止するため、弁の開閉動作は確実にを行う必要がある。弁切替えが完了した後に次工程に移るような運転制御ができるシステムとすることを考慮する。また、開閉状態の表示、異常時の警報発信などの対策を施す。

②圧力（膜差圧）

薬品洗浄開始時は、ファウリングのため、洗浄薬品通水時の膜差圧が高くなっている。膜によって耐圧（耐膜差圧）が決まっているので、供給圧や膜差圧を一定以上に上がらない対策を施す。

また、循環洗浄では時間経過にともない、膜が洗浄されて圧力（膜差圧）が下がってくるので、圧力（膜差圧）調整を行える制御とすることを、必要に応じて考慮する。

③流量（薬液透過流量）

薬品洗浄開始時は、膜閉塞のため、流量（薬液透過流量）は少なく、時間経過にともない、膜が洗浄されて流量（薬液透過流量）が多くなっていくので、流量（薬

液透過流量) 調整を行える制御とすることを、必要に応じて考慮する。

④温度

膜によって耐熱温度が決まっているので、必要以上に液温を上げると膜劣化が生じることもあるため十分に注意する。循環洗浄では循環時間が長くなると液温が高くなることもあるので、温度の自動計測や警報設定などにより十分な対策を施す。

⑤循環薬液量

循環薬液量は膜のファウリングなどの影響をほとんど受けないが、適量でないと、ろ過圧が高くなったり、逆に膜のファウリングの原因となったりすることもあるため、適正量に調整できるようにしておく必要がある。

3) リンス工程

前述のようにリンス工程は洗浄工程と一連の工程として自動化を考慮する。リンス工程では、膜ろ過水の水質に大きく影響するリンス効果の確認については万全を期する必要がある。

リンス工程の自動化の検討にあたっては、以下の点に留意する。

①弁動作

洗浄工程の留意点に準ずる。

②リンス効果の確認

リンス効果の確認とは、洗浄薬品が膜ろ過設備内から除去されたことを確認するために、水質確認を行うことである。

水質測定方法には薬液の水質確認同様、手分析による方法と自動分析による方法がある。採用にあたっては、確実性、計器の精度、信頼性により十分に検討して決定する。

自動分析装置により自動化する際は、分析装置の維持管理を厳密に行う必要がある。

4) 立ち上げ工程

膜ろ過開始直後の膜ろ過水を採水し水質確認を行い洗浄薬品が除去されたことを再度確認する。水質測定方法はリンス効果の確認と同様にして行う。

薬品洗浄を行った膜ろ過装設備を閉回路にして水質確認を行った後、膜ろ過ラインに流すようにし、膜ろ過水の水質異常を起こさないよう対策を施す。

異常が認められた場合は、当該膜ろ過設備を直ちに停止し、リンス操作を再度実施する。

5) 廃液処理工程

洗浄廃液は、膜ろ過装置から排出された後は独立して扱うことができる。

公共用水域あるいは下水へ放流するためには、中和処理、還元処理を行えばよい場合が多く、自動化することを考慮する。

廃液処理工程の自動化の検討にあたっては、以下の点に留意する。

①温度、圧力対策

中和処理や還元処理により発熱や発泡を伴うものもあるので、温度の自動計測や

安全弁などの設置、警報設定などにより十分な対策を施す。

②弁動作、ポンプ動作

pH の低い酸廃液と次亜塩素酸ナトリウム廃液を混合すると有毒ガスが発生するなどして人的被害が発生する場合もあるので、廃液処理工程の異常対策として、洗浄工程と同様の安全装置を設ける。

③放流水質

廃液処理水が放流基準を満たしているか確認する。薬液の水質確認の留意点に準ずる。

なお、上記留意点はオンライン洗浄を基準としたものであるが、オンサイトオフライン洗浄においても、自動化に対する留意点はオンライン洗浄に準ずると考えて問題はない。

5. 3 膜モジュールの損傷

膜ろ過システムにおいては、膜供給水と膜ろ過水が膜によって完全に仕切られていること、すなわち膜の健全性を確保することが重要である。最近では、クリプトスポリジウムやジアリジアなどの塩素耐性原虫類対策を主目的として膜ろ過設備を導入する例も多くあり、膜の健全性を常に監視して膜損傷などの事故への対策を講じることは膜ろ過設備において重要な課題である。

日本では膜損傷検知に関する基準がなく、水処理プラントメーカーや膜供給メーカーなどで個別に対応しているのが現状である。大規模膜ろ過施設では、膜モジュールは大容量化・多量化が予想されるため、膜1本の損傷は検知し難くなると考えられる。また、原水水質や膜ろ過処理フローによって膜供給水の水質が多様となるため、膜損傷時のリスクも異なることになる。

いずれにしても、膜ろ過は高い除濁性能を有する優れた水処理技術である反面、膜素材の寿命や事故などによる損傷の危険を併せ持っている。常に安全な処理性を保つためには、信頼される検知手法による適切な運転管理が求められる。

5. 3. 1 膜損傷検知システムに関する技術

(1) 膜の健全性を損なわせる要因

膜損傷検知システムは、膜ろ過設備にとって必要不可欠なものであり、膜の健全性の確認をオンラインで実施することが求められている。

膜の健全性が失われる主な要因としては、膜の損傷が考えられる。この他、装置として接続部や保持部などの水密性が失われたり、破損したりした場合にも起こりうる。これら欠陥の要因は、工場での製作段階や据付段階における初期故障の他、運転時の予想困難な事故による偶発故障、また経年劣化による磨耗損傷などが考えられる。

(2) 膜損傷検知試験

膜の健全性を確認する方法としては、大きく分けて直接法と間接法の2つがある。

1) 直接法

膜の健全性が保たれていることを直接的に測定する方法であり、圧力保持試験、拡散空気量試験、バブルポイント試験、振動音感知法などがある。これらの方法は、膜の片側に加圧空気を供給し、膜の損傷部分から正常時以上に空気が漏れているかどうかを測定するものである。膜の欠陥を確実に測定できる方法として広く利用されているが、装置停止を伴って行う必要がある。測定方法とその特徴を表5-14に示す。

表5-1-4 膜損傷検知試験（直接法）²⁾

試験名	試験方法	連続監視	オンライン監視	自動化	系列監視	感度	特記
圧力保持試験 (PDT法) Pressure Hold Test or Pressure Decay Test	<ol style="list-style-type: none"> 1. 膜の片側（主に内側）から水抜き 2. 水を抜いた側から、完全に濡れた膜に空気により加圧 3. 約10分間保圧し圧力衰退を監視 4. 空気拡散による衰退（通常0.7～3.4kPa/分）よりも速い衰退を欠陥と判断 	不可	不可	可	可	<p>検知感度良好 モジュール本数に比例して感度低下膜が十分濡れていないと誤差発生</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・広く採用され、米国当局に認められた方法 ・本数が増えると感度の高い圧力変換器が必要 ・自動化が進んでいる
拡散空気量試験 (DAF法) Diffusive Air Flow Test	<ol style="list-style-type: none"> 1. 圧力保持試験と同様の原理に基づく 2. 拡散によるエア流量よりも多く流量の空気漏れ→欠陥と判断 	不可	不可	可	可	<p>PDTより感度良好 モジュール本数に比例して感度低下膜が十分濡れていないと誤差発生</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・米国当局に認められた標準法ではない。 ・世界でも実用プラットフォームでの採用はまれ。 ・拡散流量の温度依存性が問題
バブルポイント試験 Bubble Point Test	<ol style="list-style-type: none"> 1. モジュールを取り外しの外側セルの水抜き 2. 膜のバブルポイントよりも低圧で加圧（外圧） 3. モジュール端面開放側に界面活性剤水溶液を使用 4. 気泡の発生により欠陥糸を特定 	不可	不可	不可	不可	<p>（欠陥モジュールのモジュールの特定に使用）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・モジュールを取り外して行う労働集約型 ・モジュールを特定するのにのみ有効な方法
振動音感知法 Sonic Sensing Analysis	<ol style="list-style-type: none"> 1. 個々のモジュールの空気漏れによる振動を振動加速度計をあててヘッドホンで振動音を聞く 2. 熟練した測定者が振動音から欠陥モジュールを判断する。 	現状 不可	現状 不可	現状 手動	現状 不可	<p>感度は測定者の熟練による。 通常、PDT/DAF法との併用で欠陥モジュールの特定に使用。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・実用例は少ない ・大規模プラットフォームでは労力が必要

連続監視・・・稼動状態での常時（連続）監視が可能 オンライン監視・・・稼動状態での監視が可能

自動化・・・タイマーなどによる自動検査が可能 系列監視・・・複数のモジュールを有する系列単位での監視が可能

表 5-1-15 膜損傷検知試験（間接法）²⁾

試験名	試験方法	連続監視	オンライン監視	自動化	系列監視	感度	特記
微粒子数測定 (PC法) Particle Counting	原理：レーザー光の散乱を測定 出力：サイズ別の微粒子数 [個/ml]	可	可	可	可	小さなろ過水質変化に敏感。 間接法3方式の中では最も高感度。	<ul style="list-style-type: none"> ・産業界で広く使用 ・検量困難、器差有り、 ・複数粒子同時カウント誤差 ・センサー詰まり、気泡誤差
微粒子監視 Particle Monitoring	原理：光の障害(測定原理はPC法と類似) 出力：微粒子水質の無次元相対値	可	可	可	可	一般の濁度計よりも高感度。	<ul style="list-style-type: none"> ・めったに使用されない ・PC法同様の誤差要因あり
濁度監視 Turbidity Measurements	原理：光の散乱を測定。最近開発された精密濁度計は従来品よりも2桁感度上昇。 出力：濁度 [NTU]	可	可	可	可	従来品は3方式の中で最も低感度。 精密濁度計はPC法並の感度	<ul style="list-style-type: none"> ・産業界で広く使用 ・測定値に一貫性あり ・水質の絶対値評価が出来る ・気泡巻き込み誤差

基本的思想 ①膜モジュールの欠陥は、そのろ過水水質への影響や微生物除去への影響の大小に関わらず、すみやかに修復する。

②通常、直接法と間接法の両方が膜の健全性の監視法として採用される。間接法は、オンライン連続測定のできない直接法を補完する役割を果たす。

2) 間接法

膜ろ過水の水質の異常を検知することにより膜ろ過設備に欠陥が生じたことを間接的に確認する方法である。検知する水質によって、濁度監視、微粒子測定、微粒子監視、生物監視（オフライン）などの方法がある。間接法は、直接法では不可能なオンラインによる連続監視が可能であり、設備での常時監視の方法として使われることが多い。間接法の測定方法とその特徴を表5-15に示す。

直接法と間接法にはそれぞれ長所と短所があり両者を併用することで、それぞれの長所を生かしたシステムを作ることができる。5.3.3 膜損傷（切断）試験で詳しく述べるが、多くの実プラントでは間接法でオンラインによる常時監視を行い、異常時に直接法でオフラインにて膜の健全性を試験する方法を採用しているケースが多い。

5. 3. 2 国内外の浄水プラントにおける膜損傷監視システム（調査結果）

国内外の膜ろ過設備に採用されている膜損傷検知システムについて、調査結果を以下に示す。国内の事例は、主として2002年度に実施した水処理プラントメーカーおよび膜供給メーカー22社からのアンケート回答をまとめたものである。国外の事例は、アメリカにおけるETV(Environmental Technology Verification Program Package Drinking Water Treatment System Pilot Project)の試験報告書からの抜粋、およびアメリカ水道協会主催「膜ろ過技術に関する研究集会講演集 2001年版」(Proceedings of AWWA 2001 Membrane Technology Conference)からの引用である。

(1) 国内の事例（アンケート調査結果）

水処理プラントメーカーおよび膜供給メーカー22社から24設備について回答を得た。この結果は国内すべての膜ろ過設備を網羅しているわけではないが、国内の膜損傷監視システムの現状をほぼ把握できたものとする。

1) 膜の種類、材質、膜モジュール形式

使用膜の種類はUF膜52%、MF膜44%、NF膜が4%であった。膜材質はセルロース35%、ポリエチレン15%、ポリフッ化ビニリデン15%、ポリアクリロニトリルなどが15%である。無機膜については1設備4%である。膜モジュールの形式はケーシング型が84%と多く、浸漬型は16%であった。膜損傷監視システムに関して、UF膜とMF膜の膜ろ過設備とでは大きな差は認められなかった。

2) 出荷前の膜モジュール検査状況

水処理プラントメーカーの場合、膜モジュールの購入先である膜供給メーカーにおいて実施しているとの回答がほとんどである。水処理プラントメーカー側で実施するという回答も一部ある。出荷前の検査は膜モジュール全数について行われていた。

3) 膜損傷のオンライン監視状況

24設備すべてにおいて、間接法による膜損傷オンライン監視を実施しており、内87%が膜ろ過水の濁度監視によっている。濁度監視よりも感度が高いとされる微粒子計を使用

している設備は2例ある。NF膜ろ過設備においては膜差圧や電気伝導率を利用している例もある。

監視する系列の規模は膜面積で500～1,000m²の範囲が最も多く、最大は膜面積で3,600m²であった。1,000m²を超える設備が5例ある。

4) 装置停止を伴う膜損傷検知

オンライン監視で異常が認められた場合のみという例も含め、87%で直接法による膜損傷検知を実施している。定期的に行っている例も50%以上あるが、膜モジュールの薬品洗浄時に実施するという回答が多い。直接法の一つである圧力保持試験がオンライン自動化されているため、1～2日に1回実施するという設備が2例ある。その他、手動オンライン、オンサイトオフライン、オフサイトがほぼ同数である。

直接法で監視する系列の規模は膜面積で50～100m²の範囲が最も多く、最大は膜面積で1,800m²である。1,000m²を超える設備は2例のみで、オンライン監視に比べて規模が小さい。

5) 異常検知時の対処

オンライン監視による異常を検知した後、該当系列の運転を停止し、直接法により損傷膜モジュールを特定して補修または交換するという例が多い。

6) 膜ろ過原水の種類とフロー

今回のアンケートでは、膜供給水の種類およびフローの違いによる膜損傷検知方法明確な差異を示す結果は得られなかった。

7) まとめ

- ・ 膜モジュールの出荷前検査は全数について実施されている。
- ・ オンライン膜損傷監視の方法は膜ろ過水の濁度監視によるものがほとんどである。濁度監視は微粒子計による監視に比べて感度が低いとされており、少数の膜の損傷を検知することは難しいと考えられる。塩素耐性原虫類などの対策としての膜ろ過の役割に鑑みて、濁度計のみによるのが監視方法として適切かどうか、リスク管理の点から慎重に見極める必要がある。
- ・ 直接法によりオンラインで定期的に膜損傷を監視している設備も少数あるが、ほとんどは異常検知時や薬品洗浄時に実施するものであり自動化も進んでいない例が多い。今後、大規模浄水場へ膜ろ過を適用するにあたっては、浄水処理の安全・安定性の確保、維持管理性の向上の点から、自動オンライン膜損傷監視システムの構築により、膜の健全性を常時確保する必要がある。
- ・ 膜損傷時の設備への影響の度合いと監視システムに要する費用とを勘案して、監視対象の合理的な系列規模を検討する必要がある。

(2) 膜損傷検知に関する海外の事例（資料調査結果）

1) ETVの試験報告書

ETVは前述のEPAが定める「膜損傷検知試験方法」（表5-14、15参照）に準じた試験の実施を義務づけている。この試験方法には直接法と間接法とがあるが、直接法による

実施での試験条件を確立することを求めている。以下、ETV の試験報告書から、膜損傷検知方法を要約する。試験の対象とした膜損傷検知試験方法の抜粋を表5-16に示す。

各膜供給メーカーとも、圧力保持試験(Pressure Hold Test)を実施しており、圧力降下速度の判定基準は7kPa/5分以下で同一である。試験時の圧力降下速度がこの値を超えた場合、膜に異常有り判定する。この判定基準値は、試験装置に組み込む圧力計の精度や拡散空気流量による精度上の限界などの理由から設定されていると考えられる。なお、圧力保持試験での試験開始圧力は膜面積、孔径、ろ過方式によって異なっている。

表5-16 試験対象膜モジュールの膜損傷検知試験条件
(ETV の試験報告書から一部追加・修正)

	ポール社	アクアソース社	アイオニクス社	ゼノン社
膜材質・種類 形状	PVDF MF 中空糸膜	セルロース化合物 UF 中空糸膜	PAN UF 中空糸膜	特許高分子
中空糸径 (外径/内径)	1.4/0.8mm	内径 0.93mm	0.68/0.4mm	1.95/0.75mm
エレメント当 り中空糸本数	1,800 本	2,060 本	3,600 本	~4,700 本
公称孔径 分画分子量	0.1 μm	0.01 μm 100,000	0.01 μm 100,000	120,000
膜モジュール 寸法	3 インチ 長さ 1.12m	φ 114mm 長さ 1.12m	18 インチ 長さ 1.6m	2m×0.75m ×0.3m
エレメント 当り膜面積	約 7.5m ²	約 7.2m ²	約 20m ²	43m ²
ろ過方式	外圧式 加圧ろ過	内圧式加圧ろ過	外圧式加圧ろ過	外圧式吸引 ろ過
圧力保持試験 開始圧力	100 kPa	200 kPa	100 kPa	28kPa
圧力降下速度 判定基準	7kPa/5 分 以下	7kPa/5 分 以下	7kPa/5 分 以下	7kPa/5 分 以下

PVDF：ポリフッ化ビニリデン PAN：ポリアクリロニトリル

2) アメリカ水道協会「2001 年度膜ろ過技術研究集会」講演集

アメリカの大手コンサルタントである CH2M Hill が、US フィルター、ポール、ゼノンの3社の膜モジュールを対象として、圧力保持試験、高感度濁度計による濁度監視、微粒子計による粒子数測定による結果を比較して報告している。

各社とも、圧力保持試験、濁度測定、微粒子数測定のいずれによっても1本の膜損傷を検知することが可能であるとしている。しかし、濁度監視による方法は微粒子測定に比べて感度が劣ること、また、濁度監視、微粒子測定とも間接法であるため、圧力保持試験のような直接法に比べて信頼性が劣ることが指摘されている。各膜供給メーカーとも、膜が損傷した場合には、損傷が特定された中空糸端面からの金属製ピンの打込みや、樹脂の注入などの補修方法を確立していることが報告されている。

5. 3. 3 膜損傷（切断）試験

現状、日本では、膜損傷に関する標準的な試験方法や評価方法は確立されていない。そこで、フィールドにおいて典型的な膜ろ過運転条件を想定した膜損傷（切断）実験を実施し、膜損傷監視システムのあり方について検討することとした。

(1) 実験概要

1) 実験目的

濁度の異なる膜供給水を用いて、人工的に膜を切断した膜モジュール（外圧式中空系）で膜ろ過を行い、膜ろ過水濁度、微粒子数の挙動を調査する。実験結果はシミュレーション結果とも比較して評価し、大規模膜ろ過施設における膜損傷監視システムを検討する上での基礎データとする。

2) 実験場所・期日

阪神水道企業団猪名川浄水場内、高度浄水処理実証プラントにて、2003年10月と2004年1月の2回に分けて実施した。

3) 実験装置・方法

阪神水道企業団猪名川浄水場高度浄水処理実証プラント（日処理量 2,000m³）内に設置された e-Water 持込実験装置を利用した。実証プラントより本試験用の原水（淀川表流水、凝集沈澱水、活性炭処理水、急速ろ過処理水）を取水して膜供給水とした。図5-5に高度浄水処理実証プラントフロー、図5-6に膜損傷（切断）実験フロー、表5-17に膜の仕様、運転条件、表5-18に実験で使用した測定機器の仕様を示す。

実験に使用した膜モジュールは、外圧式中空系型 MF 膜（0.1μm, PVDF）である。膜供給水は実証プラントの各浄水工程から取水し、膜ろ過装置内の原水槽に一旦受けてから定流量全量ろ過方式による膜ろ過を行った。設定膜ろ過流束は、1.5m³/m²・日であり、回収率は95%である、物理洗浄は、逆圧水洗浄（塩素注入無）+エアスクラビングを30分に1回の頻度で実施した。

膜の切断には市販のカッターを用い、モジュールの円周に沿ってポッディングより5cmの位置で完全に切断した。切断本数は全中空系膜本数1,900本の約1%にあたる15本である。切断した中空系膜は、透過側からステンレス製のピンで止水し、実験条件に応じてピンを抜いて実験を行った。

原水、膜ろ過水ともに、オンラインで濁度、微粒子数を測定した。原水濁度は透過散乱光方式で、膜ろ過水濁度はレーザー透過散乱光方式である。微粒子数は、光遮断（半導体レーザ）方式である。

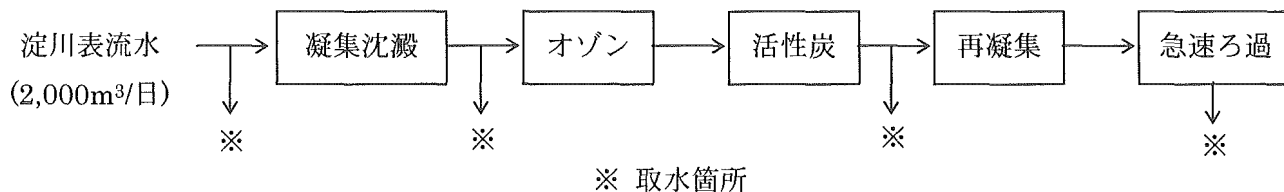


図5-5：高度浄水処理実証プラントフロー

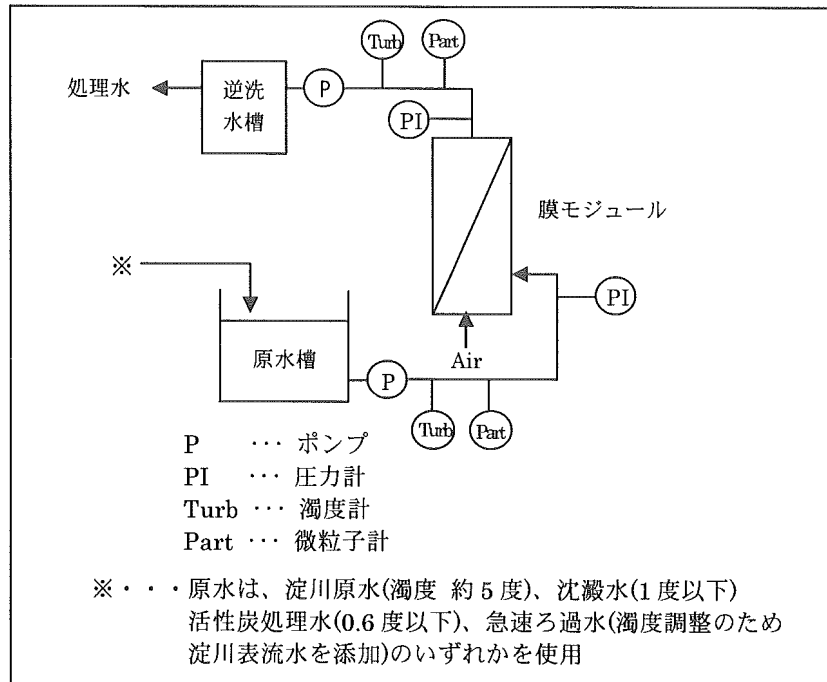


図5-6 膜損傷実験フロー

表5-17 膜モジュール仕様, 運転条件

膜の種類	MF膜
膜材質	PVDF
膜形状	外圧式中空糸膜
有効膜面積	7.0m ²
中空糸内径/外径	700/1,200 μm
中空糸膜本数	1,900本
ろ過方式	全量ろ過方式
処理水量	約10m ³ /日
回収率	95%

表5-18 測定機器 仕様

検出機器	測定原理	測定範囲
濁度計	透過散乱光方式	0.001~[度]
	レーザー透過散乱光方式	0.0001~2.0000 [度]
	レーザー透過散乱光方式	0.0001~2.0000 [度]
微粒子計	光遮断(半導体レーザー)方式	0.1~15,000 (>2 μm) [個/ml]

4) 評価方法

①漏洩率

膜損傷の評価には漏洩率を使用した。漏洩率の定義は以下のとおりである。

漏洩率の定義

- ・漏洩率（シミュレーション値）= $\{D(Q_B / Q_N)\} / D = Q_B / Q_N$
Q_B…損傷した膜から流出する原水流量
Q_N…正常な膜から流出するろ過水流量
D …膜ろ過原水微粒子数
- ・漏洩率（実測値）=切断後ろ過水濃度（個数）/膜ろ過原水濃度（個数）

②膜損傷（切断）シミュレーション

膜損傷（切断）時の漏洩シミュレーションは、予め膜モジュールの膜ろ過流束を測定し、膜損傷（切断）時にはその膜ろ過流束における圧力が損傷（切断）部分にかかるという仮定で計算した。当然ながら、その場合には損傷（切断）本数が増えると圧力に変化が生じるためシミュレーションと実測との間に乖離が生ずる。

そこで、以下に示す修正したシミュレーションを実施することにより、損傷（切断）本数が増えた場合にも乖離無く対応することができる。ただし、実際の膜損傷（切断）の本数は本実験のように非常に少なく、実用上は修正シミュレーションとの乖離はほとんど生じないと考える。

表5-20 中空糸膜1本損傷(切断)の実験結果(濁度)

原水の種類	膜供給水濁度(度)	損傷(切断)前膜ろ過水濁度(度)	損傷(切断)後膜ろ過水濁度(度)	漏洩率(-)	損傷(切断)前除去指数(log) ^{※2} (-)	損傷(切断)後除去指数(log)(-)
原水(表流水)	2.3	0.0000	0.0049~0.0085	0.002~0.004	4.36	2.43~2.67
凝集沈澱水	0.5	0.0000	0.0039~0.0056	0.008~0.012	3.69	1.95~2.07
凝集沈澱水	1.6	0.0000	0.0079~0.0090	0.005~0.008	4.20	2.26~2.36
活性炭処理水	0.5	0.0000	0.0027~0.0038	0.006~0.008	3.69	2.12~2.23
活性炭処理水	1.5	0.0000	0.0051~0.0057	0.003~0.007	4.17	2.42~2.47
急速ろ過+原水(表流水) ^{※1}	0.1	0.0000	0.0005	0.004	3.00	2.30

※1: 実証プラント急速ろ過処理水濁度が0.1度以下のため急速ろ過処理水に淀川原水添加した。

※2: 損傷(切断)前膜ろ過水濁度を0.0001度とした。

表5-21 中空糸膜1本損傷(切断)の実験結果(微粒子数)

原水の種類	膜供給水微粒子数 ^{※3}	損傷(切断)前膜ろ過水微粒子数 ^{※3}	損傷(切断)後膜ろ過水微粒子数 ^{※3}	漏洩率(-)	損傷(切断)前除去指数(log) ^{※4} (-)	損傷(切断)後除去指数(log)(-)
原水(表流水)	16,302	<0.1	88	0.005	5.20	2.27
凝集沈澱水	2,733	<0.1	17	0.006	4.40	2.21
凝集沈澱水	4,758	<0.1	26	0.005	4.68	2.26
活性炭処理水	3,375	<0.1	29	0.009	4.53	2.06
活性炭処理水	7,516	<0.1	52	0.007	4.88	2.16
急速ろ過+原水(表流水) ^{※1}	630	<0.1	5	0.009	3.80	2.07

※3: 単位=個/mL, 2μm以上

※4: 損傷(切断)前膜ろ過水微粒子を0.1個/mLとした。

これらの結果から

- ・ 膜供給水濁度にかかわらず、漏洩率はシミュレーション結果とほぼ一致した。
- ・ 膜供給水濁度にかかわらず、濁度の除去指数は損傷(切断)前の3.00log~4.36logから損傷(切断)後1.95log~2.67logへと減少した。
- ・ 膜供給水微粒子数の場合も同様に、除去指数は損傷(切断)前の3.80log~5.20logから、損傷(切断)後2.06log~2.27logへと減少した。
- ・ 精密微粒子計で低濁度原水(濁度0.1度)に対しても、モジュールあたり1本の膜の損傷(切断)検知が可能であった。ただし、施設での採用には配管からの微粒子発生などの可能性が考えられるため、今後さらなる検討を要する。

2) 膜ろ過水濁度が0.1度となる膜損傷（切断）本数

膜供給水濁度が異なる膜供給水について、膜ろ過水濁度が0.1度となる膜損傷（切断）本数を求めた実験結果を図5-7に示す。また、各膜供給水における膜損傷（切断）本数と微粒子数除去指数の関係を図5-8に示す。

これらの結果から

- 損傷（切断）本数と膜ろ過水濁度との間には直線関係が認められ、膜損傷（切断）本数の増加に伴って膜ろ過水濁度が増加している。
- 膜損傷（切断）本数の増加に伴い微粒子除去指数は著しく減少している。
- 今回の実験系（損傷（切断）本数/総中空糸膜数=15/1,900、切断率 0.8%）では、膜1本の損傷（切断）で微粒子数除去指数は2logまで減少する。ただし、それ以上膜損傷（切断）本数が増えても除去指数は急激には減少せず、最大15本の膜損傷（切断）本数でも除去指数は1log程度であった。

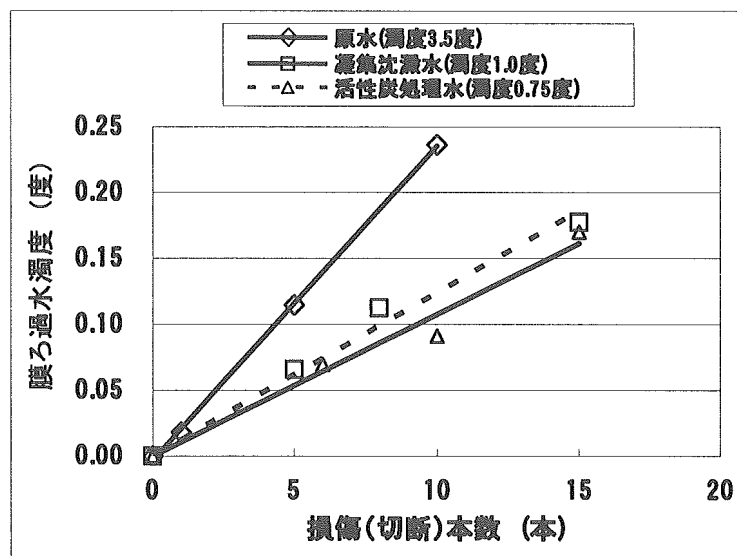


図5-7 損傷（切断）本数と膜ろ過水濁度との関係

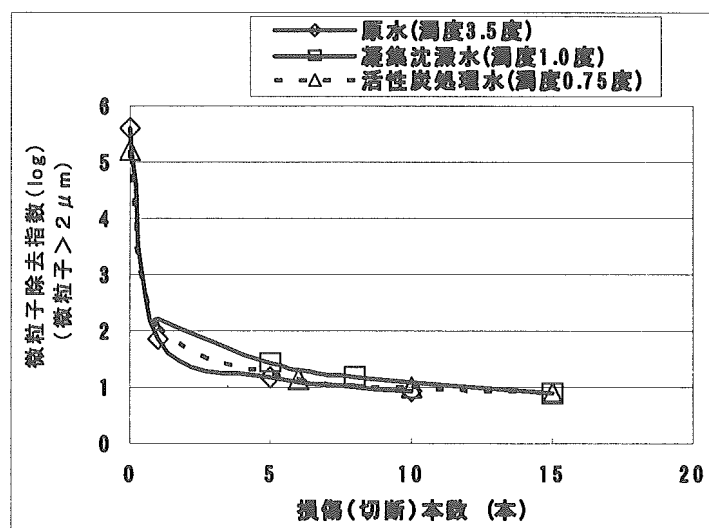


図5-8 損傷（切断）本数と微粒子除去指数との関係

3) 損傷（切断）本数と漏洩率，膜ろ過水濁度の関係（実測値とシミュレーションの比較）

図5-9に、損傷（切断）本数と漏洩率の関係について実測値とシミュレーション結果を示す。両者の傾向は概ね一致している。ただし、損傷（切断）本数が増えるに従い、両者の差が大きくなっていく傾向が見られる。

図5-10に、膜損傷（切断）本数と膜ろ過水濁度の関係を示す。膜供給水濁度が1度程度以下であれば、実測値とシミュレーション結果はほぼ一致している。これ以上の膜供給水濁度の場合にはシミュレーション方法の補正が必要となる。

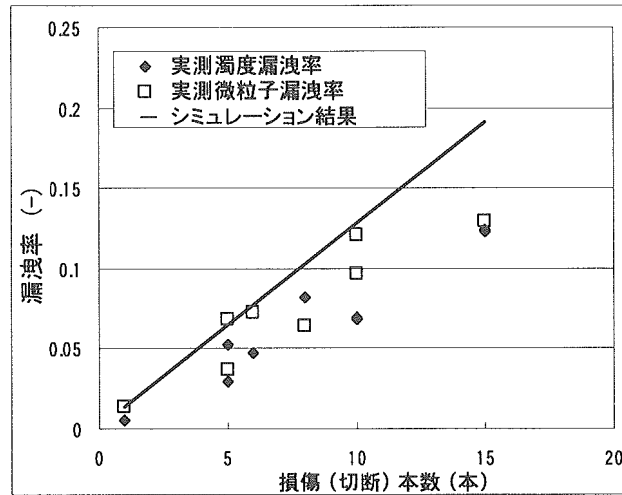


図5-9 損傷（切断）本数と漏洩率との関係（実測値とシミュレーション結果）

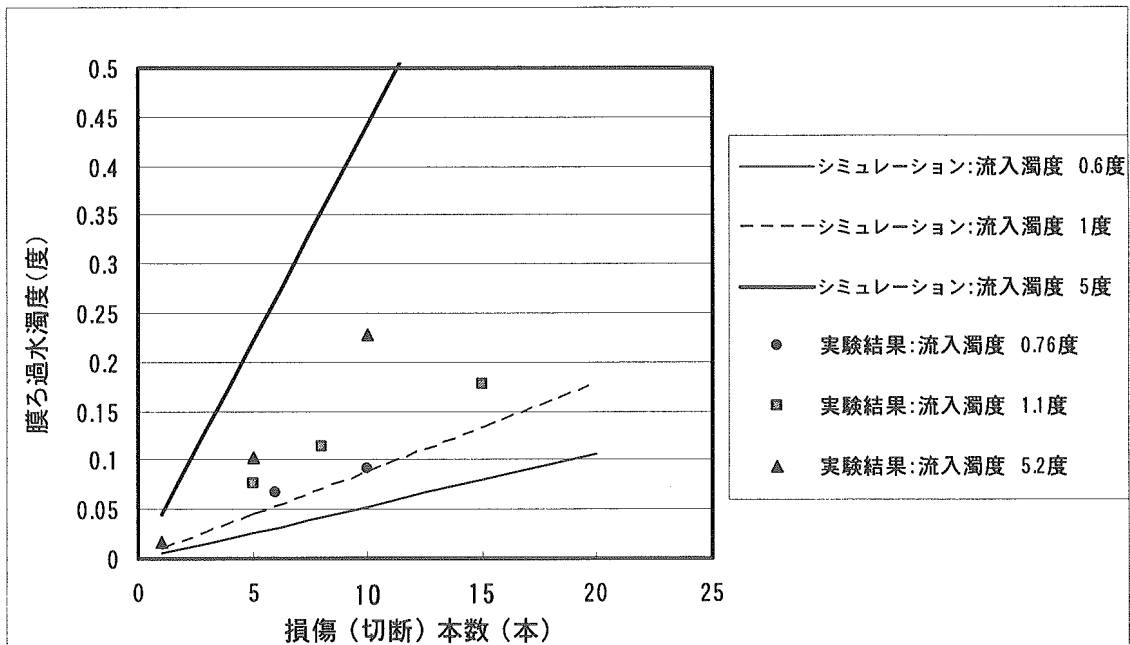


図5-10 損傷（切断）本数と膜ろ過水濁度との関係（実測値とシミュレーション結果）

4) 損傷（切断）本数と圧力保持との関係

図5-11により、膜損傷（切断）本数と保持圧力の関係を示す。圧力保持試験（直接法）により、膜1本の損傷（切断）が検知可能であることがわかる。また、今回使用した膜モジュールでは、圧力降下速度から損傷（切断）本数の推量も可能である。

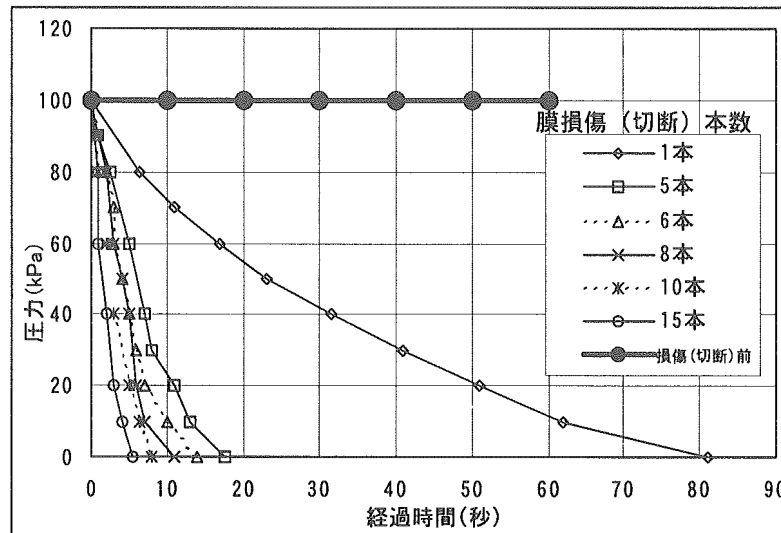


図5-11 損傷（切断）本数と圧力保持との関係（実測値）

(3) 結果

- ① 精密濁度計または微粒子計による間接法で、膜モジュール中空糸1,900本あたり1本の膜損傷（切断）を検知可能であった。
- ② 1本の膜損傷（切断）により、濁度、微粒子数はともに切断前の3log~5logの除去から2log程度の除去まで減少した。
さらに、今回の実験系において膜供給水濁度が1.0度程度までの場合、最大15本切断（切断率0.8%）により微粒子除去指数は1logの除去となった。なお、微粒子除去指数は膜損傷（切断）本数にあまり依存しなかった。
- ③ 圧力保持試験による直接法によって、1本の膜損傷（切断）を短時間で精度よく検知することができた。

5. 3. 4 膜ろ過施設における膜損傷検知システム

現状では、大規模膜ろ過施設における膜損傷（切断）検知システムを明確に提示することは難しく、損傷（切断）のシミュレーションを行うことによって検知システムのあるべき姿を検討することとした。

(1) 100,000m³/日の膜ろ過施設における損傷シミュレーション

1) シミュレーション条件

シミュレーションの対象とする中空糸膜は、5.3.3の膜損傷（切断）試験で用いたものと同じとした。ただし、大型のモジュールを意識し、中空糸の有効長は2,000mmとしてシミュレーションを実施した。

前提条件を以下に示す。

- ① 対象は中空糸膜モジュールとする
- ② 損傷部位はポッティング近傍とし、損傷は100%切断とする
- ③ 損傷した膜の抵抗値は膜内の流路抵抗のみとし、流出入損失や屈曲損失は無視できるとする
- ④ 流量は一定とする。
- ⑤ 損傷により圧力が低下する。
- ⑥ 透過係数を実測データより算出する。

計算は以下の条件で実施した。シミュレーションの方法は5.3.3の(1)のとおりである。

表5-22 シミュレーションの計算条件

施設能力	100,000m ³ /日	
膜モジュール 仕 様	膜面積	50 m ²
	内径/外径	700/1,200 μm
	膜本数	6,650 本
	有効長	2,000 mm
	ポッティング	100 mm
	透過係数	8.52881×10 ⁻¹⁰ m/Pa/秒
運転条件	膜ろ過流束	1.5 m ³ /m ² ・日
	モジュール本数	1,334 本
	総膜面積	66,700 m ²
	総膜本数	8,871,100 本

※膜本数ほかの数値は想定であり、実際の設計数値とは異なる。

2) シミュレーション

全モジュール（100,000m³/日膜ろ過施設）に対する損傷本数と濁度（微粒子）除去指数、漏洩率の関係についてのシミュレーション結果を以下に示す。

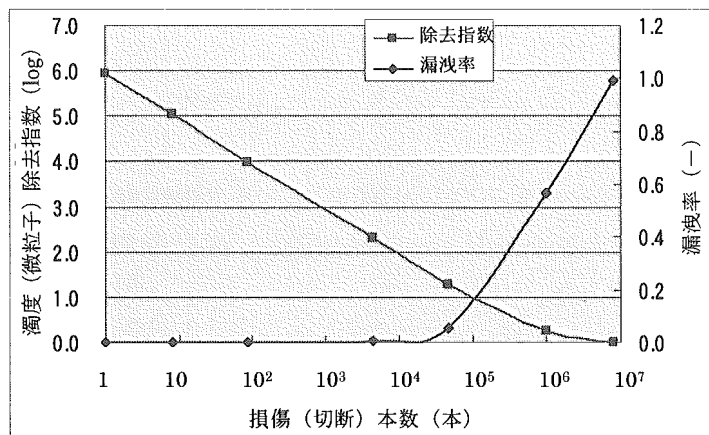


図5-12 濁度（微粒子）除去指数、漏洩率と切断本数の関係

次に、膜供給水濁度を0.5度、1度、5度、の3段階に想定し、ろ過開始初期および膜透過係数が1/2（ファウリングが進み膜差圧が2倍になった時点を想定）の状態の2ケースについて、膜損傷時の漏洩シミュレーションを実施した。結果を以下に示す。

なお、流量を一定としたシミュレーションであるため、膜の差圧上昇時はモジュール全体にかかる圧力が高くなり、損傷膜内の流速が増加するので、許容損傷膜本数は少ない方向へシフトする。

表5-23
モジュール1本当たりの膜損傷本数と濁度、微粒子との関係（ろ過開始初期）

膜供給水濁度	膜供給水濁度		
	0.5度	1度	5度
膜ろ過水濁度 0.1度以下となる 損傷(切断)本数	<158本	<72本	<14本
膜ろ過水濁度 0.01度以下となる 損傷(切断)本数	<14本	<7本	<2本
濁度(微粒子)除去 3log以上となる 損傷(切断)本数	<1本	<1本	<1本
濁度(微粒子)除去 4log以上となる 損傷(切断)本数	<1本	<1本	<1本
濁度(微粒子)除去 5log以上となる 損傷(切断)本数	<1本	<1本	<1本

表5-24
100,000m³/日における膜損傷本数と濁度、微粒子との関係（ろ過開始初期）

膜供給水濁度	膜供給水濁度		
	0.5度	1度	5度
膜ろ過水濁度 0.1度以下となる 損傷(切断)本数	<210,334本	<94,730本	<17,553本
膜ろ過水濁度 0.01度以下となる 損傷(切断)本数	<17,553本	<8,697本	<1,727本
濁度(微粒子)除去 3log以上となる 損傷(切断)本数	<864本	<864本	<864本
濁度(微粒子)除去 4log以上となる 損傷(切断)本数	<87本	<87本	<871本
濁度(微粒子)除去 5log以上となる 損傷(切断)本数	<9本	<9本	<9本

表5-25
モジュール1本当たりの膜損傷本数と濁度、
微粒子との関係（膜差圧2倍上昇時）

膜供給水濁度	0.5度	1度	5度
膜ろ過水濁度 0.1度以下となる 損傷(切断)本数	<80本	<36本	<7本
膜ろ過水濁度 0.01度以下となる 損傷(切断)本数	<7本	<4本	<1本
濁度(微粒子)除去 3log以上となる損 傷(切断)本数	<1本	<1本	<1本
濁度(微粒子)除去 4log以上となる損 傷(切断)本数	<1本	<1本	<1本
濁度(微粒子)除去 5log以上となる損 傷(切断)本数	<1本	<1本	<1本

表5-26
100,000m³/日処理における膜損傷本数と濁度、
微粒子との関係（膜差圧2倍上昇時）

膜供給水濁度	0.5度	1度	5度
膜ろ過水濁度 0.1度以下となる 損傷(切断)本数	<106,429本	<47,619本	<8,785本
膜ろ過水濁度 0.01度以下となる 損傷(切断)本数	<8,785本	<4,351本	<864本
濁度(微粒子)除去 3log以上となる損 傷(切断)本数	<432本	<432本	<432本
濁度(微粒子)除去 4log以上となる損 傷(切断)本数	<44本	<44本	<44本
濁度(微粒子)除去 5log以上となる損 傷(切断)本数	<5本	<5本	<5本

(2) 結果

- 1) 有効長 2,000mm、膜面積 50 m² (内外径 700/1,200 μm) の中空糸膜モジュールを用いて膜損傷シミュレーションを行った結果、モジュール1本を考えた場合には、1本の膜損傷によって濁度（微粒子）は 3log 以下の除去となる。
- 2) 100,000m³/日で膜ろ過流束 1.5m³/m²・日、モジュール 1,334 本の膜ろ過施設を想定した場合、濁度（微粒子）の 5log 以上の除去を確保するには施設全体で 5~9 本程度までの膜損傷が許容できる。また、同じ条件で膜ろ過水濁度 0.1 度以下を確保しようとした場合には、原水濁度 5 度の場合で約 17,000 本の膜損傷が許容できる。同様に、膜ろ過水濁度 0.01 度以下を確保する場合には約 1,700 本の膜損傷が許容できる。

これらの結果は、今回の実験およびシミュレーションに使用した中空糸膜における結果であり、中空糸膜の内、外径および膜ろ過流束、膜モジュール構成などによって大きく変化する。

膜損傷検知には、濁度計などによる間接法と圧力保持試験などによる直接法がある。上述のように、膜ろ過水濁度 0.1 度以下もしくは 0.01 度以下を保持するための膜の許容損傷本数を予測することは可能である。しかし、許容損傷本数は原水濁度により大きく変わり、かつ本来確保すべきであろう濁度（微粒子）除去指数（3log~5log 除去）から考えた損傷許容本数とはかなり乖離している。膜損傷検知システムとして濁度計による管理は、オンラインでの常時監視項目として実施し、直接法を適正な間隔で実施していくことが膜ろ過システムの健全性管理に繋がると考える。