

## 2. 膜損傷検出

### 2. 1 膜損傷検出の実施状況

#### 1) 膜損傷試験の採用状況

##### (1) アンケート調査結果

###### ① 直接法・間接法の内訳

膜損傷試験について、直接法・間接法の内訳を図2-1に示す。61%の施設では間接法のみ採用しており、直接法と間接法を併用している施設は35%である。

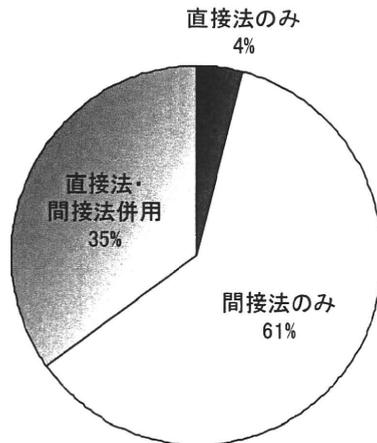


図2-1 直接法・間接法の内訳(回答数 77 件)

###### ② 直接法の内訳

直接法による試験方法の内訳を図2-2に示す。76%の施設で加圧法による圧力保持試験を採用している。また、10%の施設では圧力保持試験とバブルポイント試験を併用している。

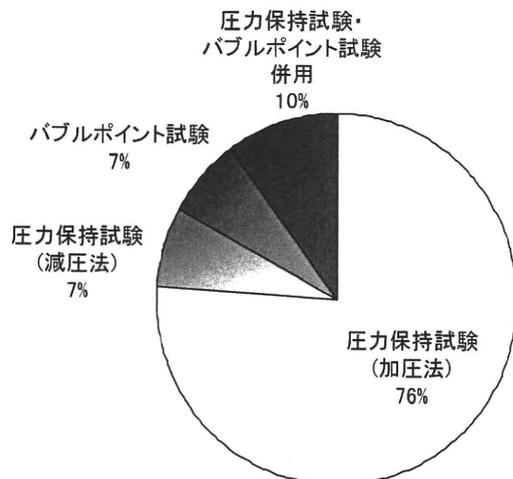


図2-2 直接法の内訳(回答数 29 件)

### ③ 間接法の内訳

間接法による試験方法の内訳を図2-3に示す。78%の施設で濁度モニタリングのみを採用しており、濁度モニタリングと微粒子カウントを併用している施設は14%である。

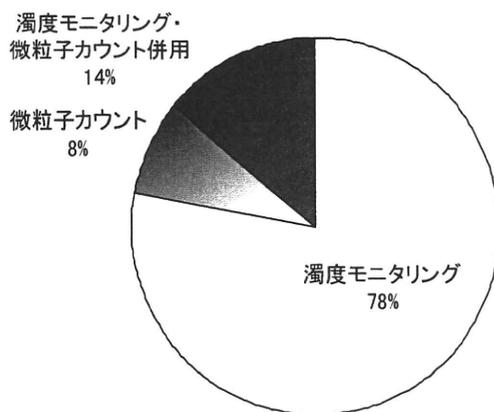


図2-3 間接法の内訳(回答数74件)

### (2) ヒアリング調査結果

施設での事例を表2-1、企業の標準を表2-2に示す。表2-1の事業体Bでは、6施設で、間接法として濁度モニタリングと微粒子カウントを併用している。これは、施設で膜交換を実施した際、膜交換の前後で膜ろ過水の微粒子数が明らかに変化する事例があったことから、微粒子カウントが膜損傷検出に有効な手段となるのではないかとの考察による。なお、この施設では、濁度モニタリングで膜ろ過水濁度の変化が認められないものの、直接法によって膜損傷が検出されている。濁度モニタリングと微粒子カウントを併用している施設での運用上の位置づけは、濁度モニタリングを主、微粒子カウントを従としている。

表2-1 膜損傷試験方法(施設での事例)

	膜種類	膜素材	膜モジュール形式	膜モジュール構造	膜損傷検知の採用状況	直接法の種類	直接法の種類	採用施設数
事業体A	UF	PAN	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	拡散空気量試験	濁度モニタリング	1
	MF	セラミック	モリス型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	圧力保持試験	濁度モニタリング	3
	UF	PAN	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	圧力保持試験	濁度モニタリング	2
	UF	PVDF	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	圧力保持試験	濁度モニタリング	1
	MF	PVDF	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	圧力保持試験	濁度モニタリング	1
事業体B	UF	PAN	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	バブルポイント試験	濁度モニタリング	1
	UF	CA	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	バブルポイント試験	濁度モニタリング・微粒子カウント併用	2
	UF	CA	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	圧力保持試験・バブルポイント試験併用	濁度モニタリング・微粒子カウント併用	3
	MF	PVDF	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	圧力保持試験	濁度モニタリング	1
	MF	PVDF	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	圧力保持試験	濁度モニタリング・微粒子カウント併用	1
事業体C	MF	PVDF	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	電気抵抗測定を用いたエアリーク検出	濁度モニタリング・微粒子カウント併用	1
事業体D	MF	セラミック	管状型	浸漬型	直接法・間接法併用	圧力保持試験	濁度モニタリング	1

表 2-2 膜損傷試験方法(企業の標準)

膜種類	膜素材	膜モジュール形式	膜モジュール構造	膜損傷検知の採用状況	直接法の種類	間接法の種類	採用企業数
MF	PVDF	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	圧力保持試験	濁度モニタリング	2社
MF	PVDF	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	圧力保持試験	濁度モニタリング・ 微粒子カウント併用	2社
UF	PVDF	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	圧力保持試験	濁度モニタリング	1社
UF	CA	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	圧力保持試験	濁度モニタリング・ 微粒子カウント併用	1社
UF	CA	中空系型	ケーシング収納型	間接法	—	濁度モニタリング	1社
UF	PAN	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	圧力保持試験	濁度モニタリング・ 微粒子カウント併用	1社
UF	PES	中空系型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	圧力保持試験	濁度モニタリング・ 微粒子カウント併用	1社
MF	PTFE	中空系型	槽浸漬型	間接法	—	濁度モニタリング	1社
MF	セラミック	モノリス型	ケーシング収納型	直接法・間接法併用	圧力保持試験	濁度モニタリング	1社
MF	セラミック	管型	槽浸漬型	間接法	—	濁度モニタリング	1社

## 2) 膜損傷試験の運用状況

### (1) 直接法

#### ① 実施頻度

##### a) アンケート調査結果

表 2-3 に示すとおり、46%の施設では 24 時間に 1 回以上の頻度で直接法による膜損傷試験を実施している。また、頻度が年 1 回を上回る施設は 23%である。

表 2-3 直接法の実施頻度(回答数 22 件)

実施間隔	浄水場数	比率	
10 時間	1	5 %	} 46%
12 時間	1	5 %	
24 時間	8	36 %	
7 日	4	18 %	
14 日	1	5 %	
6 ヶ月	2	9 %	
12 ヶ月	4	18 %	} 23%
2 年	1	5 %	
合計	22	100 %	

## b) ヒアリング調査結果

施設での事例を表2-4、企業の標準を表2-5に示す。

表2-4 直接法の実施頻度(施設での事例)

	直接法の種類	実施頻度	採用施設数
事業体A	圧力保持試験(加圧法)	浄水系と回収系の膜ろ過ユニットに対し、1日に1回実施	1
	圧力保持試験(減圧法)	1週間に1回実施(当初は1日に1回実施)	2
	バブルポイント試験	6か月に1回	1
事業体B	バブルポイント試験	2年に1回(膜のオフサイト薬品洗浄にあわせてメーカーの工場で実施)	2
	バブルポイント試験・ 圧力保持試験(加圧法)	6か月に1回	1
	バブルポイント試験・ 圧力保持試験(加圧法)	1年に1回	2
事業体C	電気抵抗測定を用いた エアリーク検出	20~40分に1回行う逆洗後に実施	1

表2-5 直接法の実施頻度(企業の標準)

直接法の種類	実施頻度	採用企業数
圧力保持試験(加圧法)	1日に1回(海外基準に準拠)	1社
圧力保持試験(加圧法)	間接法で異常が認められた場合に実施	1社
圧力保持試験(加圧法又は減圧法)	浄水場の運転状況により決定	1社
圧力保持試験(加圧法)	浄水場の運用方針により決定	1社

## ② 管理値

管理値とは、膜損傷試験において膜損傷の可能性があるかを判定する基準であり、数値によるものが多い。施設での事例を表2-6、企業の標準を表2-7に示す。

表2-6 直接法の管理値(施設での事例)

事業体	直接法の種類	管理値	採用施設数
事業体A	圧力保持試験(加圧法)	膜モジュールの原水側を100kPaに空気加圧し、10分後に6kPa以上減衰した場合、膜損傷ありと判定	1
事業体B	バブルポイント試験	膜モジュールの原水側を50kPaに空気加圧し、ろ過水側で気泡が発生した場合、膜損傷ありと判定	1
	圧力保持試験(減圧法)	膜モジュールのろ過水側を-60kPaまで減圧し、240秒後に20kPa以上上昇した場合、膜損傷ありと判定	2

表2-7 直接法の管理値(企業の標準)

直接法の種類	管理値	採用企業数
圧力保持試験(加圧法)	膜モジュール加圧後の圧力減衰速度から、理論上クリプトスポリジウム除去率5logを保証する値を設定して判定	1社

## (2) 間接法

ヒアリング調査から得られた間接法の運用状況を以下に示す。

### ① 実施頻度

施設での事例及び企業の標準として、濁度モニタリング、微粒子カウントによる間接法では、現場での測定機器による膜ろ過水の連続監視が行われている。

### ② 管理値

施設での事例を表2-8、企業の標準を表2-9に示す。表2-8の事業体Bでは、微粒子カウントにおいて微粒子サイズ0.5~1 $\mu$ mの監視を重視している。これは、小さいサイズの微粒子数監視によって、初期の異常を検出し、早期対応することを目的としている。また、事業体Cでの微粒子カウントは、クリプトスポリジウムのサイズである3~5 $\mu$ mの微粒子を監視する目的で、2 $\mu$ m以上の微粒子数をカウントしている。

表2-8 間接法の管理値(施設での事例)

事業体	間接法の種類	管理値	採用施設数
事業体A	濁度モニタリング	膜ろ過水の濁度が0.05度以上となり、その10分後においても0.05度以上の場合、膜損傷ありと判定(ろ過水濁度管理値である0.1度より低い値を設定)	8
	濁度モニタリング	膜ろ過水の濁度が0.1度を越えた場合、異常と判定(「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針(案)」を遵守)	1
事業体B	濁度モニタリング	膜ろ過水の濁度が0.07度を越えた場合、異常と判定(濁度0.1度以下を遵守するために、0.1度より低い値を設定)	1
	濁度モニタリング・微粒子カウント併用	濁度モニタリング : 膜ろ過水の濁度が0.1度を越えた場合、異常と判定 微粒子カウント : 膜ろ過水の0.5~1 $\mu$ mの微粒子数を重視して監視	6
事業体C	濁度モニタリング・微粒子カウント併用	濁度モニタリング : 膜ろ過水の濁度0.01度で警報発報 微粒子カウント : 膜ろ過水の2 $\mu$ m以上の微粒子数10個/ml/minで警報発報	1

表2-9 間接法の管理値(企業の標準)

間接法の種類	管理値	設定根拠	採用企業数
濁度モニタリング	膜ろ過水の濁度が0.05度を越えた場合、異常と判定	膜損傷が発生して膜ろ過水濁度が0.05度を超える場合、損傷の加速的な進行を示すことが社内実験によって判明したため	1社
濁度モニタリング	膜ろ過水の濁度が0.1度を越えた場合、異常と判定	「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針(案)」に従う	1社
濁度モニタリング	膜ろ過水の濁度が0.01度を越えた場合、異常と判定	濁度計の精度を考慮	1社
濁度モニタリング	現場の状況により設定	—	2社
濁度モニタリング・微粒子カウント併用	現場の状況により設定	—	2社

### 3) 膜損傷検出時の運用事例

膜損傷試験によって膜損傷の可能性ありと判定された場合の運用事例について、ヒアリング調査から得られた結果を以下に示す。

#### (1) 事業体 A

間接法で異常が検出された場合、該当する膜ろ過ユニットを停止させ、直接法を実施する。直接法によって膜損傷ありと判定された場合、該当する膜ろ過ユニットを停止させ、エアリーク試験を実施する。エアリーク試験は、膜モジュール上部のヘッダー管を外した後、原水側から空気加圧し、ろ過水側の空気噴出(漏れ)を観察することによって、損傷している膜モジュール及び損傷個所の特定を行う試験である。エアリーク試験によって損傷個所が特定され、中空糸の損傷である場合には補修を行う。補修は、損傷のある中空糸端にピンを打ち込み、通水しない状態とする。なお、膜損傷試験後のほか、薬品洗浄後にもエアリーク試験を実施するが、これはファウリングの除去によって膜損傷が検出されやすくなることを考慮したものである。

#### (2) 事業体 B

間接法で異常が検出された場合、該当する膜ろ過ユニットを停止させ、直接法を実施する。膜モジュールの損傷個所が特定され、中空糸の損傷である場合には補修を行う。補修は、損傷のある中空糸端にピンを打ち込み、通水しなくなる状態にするか、損傷個所を削り、樹脂を注入して紫外線を用いて硬化させる。

#### (3) 事業体 C

直接法で異常が検出された場合、該当する膜モジュールを運転から切り離す。直接法には電気抵抗測定を用いたエアリーク検出を用いており、センサーを各膜モジュールに設置し、膜モジュール単位での膜損傷検出を可能としている。運転から切り離れた膜モジュールは上部の配管を取り外し、ろ過水側に水を充填した状態でエアバブル試験(気泡の目視確認)を行い、損傷のある中空糸を特定する。特定された中空糸は、中空糸端にピンを打ち込んで補修する。

## 2. 2 膜損傷の程度と検出に関する実験

我が国では膜ろ過の導入から10年以上が経過しているものの、これまで維持管理に関する研究はほとんど行われておらず、実務に活用できる具体的な情報は少ない。このような状況を踏まえ、膜ろ過浄水施設の維持管理実務に関する具体的な情報を水道事業体へ提供することを目的として、膜の使用状況が性能に与える影響についての検討を行った。

### 1) 実験の目的

膜損傷検出は膜ろ過浄水施設における浄水の安全管理上重要な維持管理項目の1つであり、直接法及び間接法に分類される膜損傷試験によって損傷の可能性が判定される。本実験では膜表面の物理的劣化状況(最悪の場合、断裂)と処理性能及び検出手法についての評価を行い、膜損傷試験の有効性に関する知見を得ることとした。

### 2) 実験方法

表2-10に示すとおり、人為的な擦過、裂傷、刺し傷(針による穴あけ)、切断を施したPVDF膜(中空糸MF膜)及び膜表面に掻き傷を施したセラミック膜(モノリス型MF膜)の実験用モジュールを用い、間接法として一定の濁度の試験水をろ過したときのろ過水側における濁度の変化を評価し、直接法として圧力保持試験による膜損傷の判定を行った。損傷を施した実験用膜モジュールの仕様を表2-11に示す。また、損傷を施す方法を図2-4に示す。

表2-10 人為的に損傷を施した膜モジュール

膜種	PVDF膜		セラミック膜
	ろ過方式	浸漬ろ過	加圧ろ過
		対照(損傷なし)	対照(損傷なし)
		擦過 1本・#1500	1穴損傷
		擦過 1本・#600	3穴損傷
		擦過 5本・#1500	10穴損傷
		擦過 5本・#600	20穴損傷
損傷の程度		裂傷 1本	30穴損傷
		裂傷 3本	40穴損傷
		針穴 1本	—
		針穴 3本	—
		切断 1本	—
		切断 3本	—

表 2 - 1 1 実験用膜モジュールの仕様

膜種	有機膜	無機膜
材質	ポリフッ化ビニリデン(PVDF)	セラミック
公称孔径( $\mu\text{m}$ )	0.1	0.1
膜形状	中空糸	モノリス型
膜面積( $\text{m}^2$ )	0.04	0.04
長さ(mm)	200	100
外径(mm)	1.2	2.5(セル径)
内径(mm)	0.7	—
中空糸本数又はセル数	53本	55穴

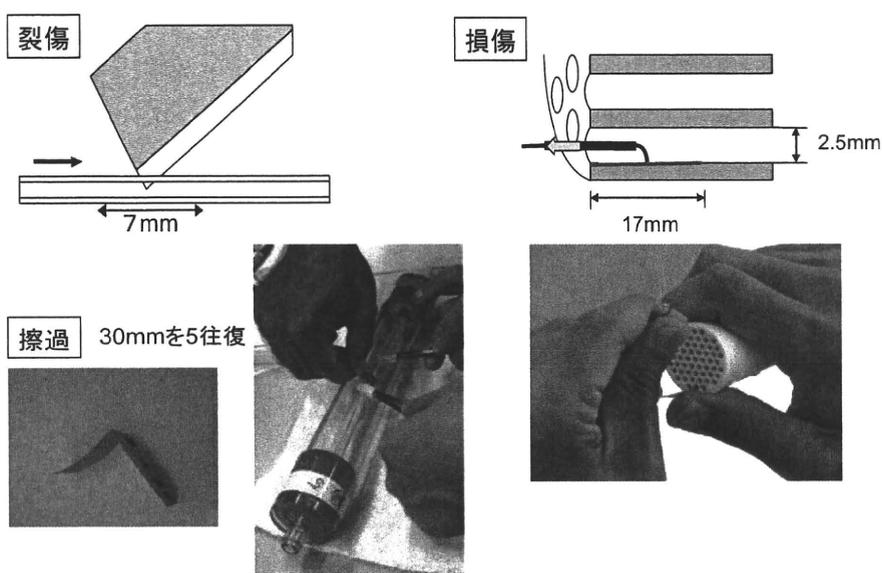


図 2 - 4 損傷を施す方法

間接法の実験では、純水に濁度 5 度又は 500 度となる量のカオリンを添加した試験水を用いた。間接法の実験装置の概要を図 2 - 5 に示す。

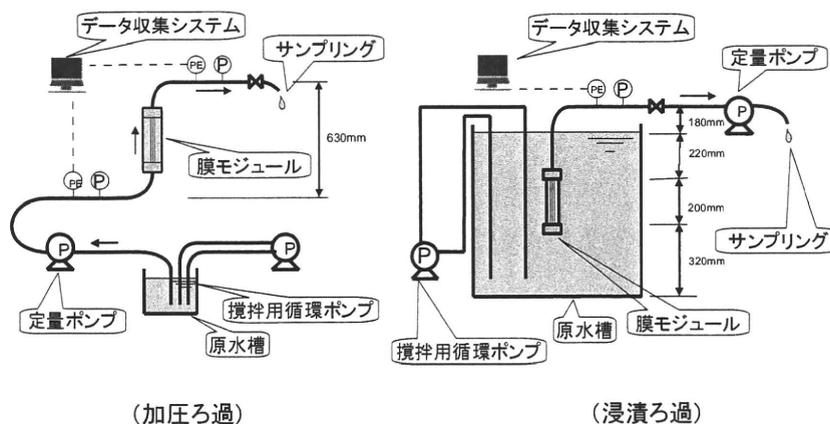


図 2 - 5 間接法の実験装置概要

直接法の実験では、コンプレッサーを用いて膜モジュールを 100 kPa まで空気加圧し、その後の圧力降下が 5 分間で 7 kPa 以上となる場合に膜損傷の可能性ありと判定するものとした。実験に用いた装置の概要を図 2-6 に示す。

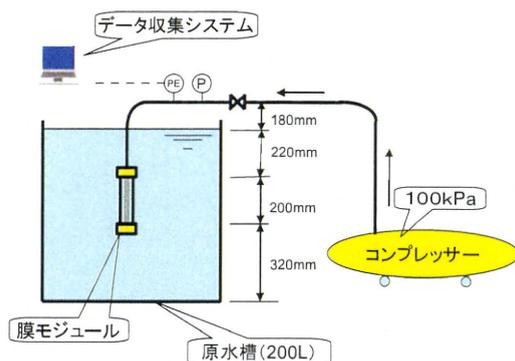


図 2-6 直接法の実験装置概要

### 3) 実験結果

間接法の実験において、損傷を施した膜モジュールを用いて濁度 5 度、500 度の試験水をろ過したときのろ過水濁度を図 2-7~2-9 に示す。擦過ではいずれの膜においても濁度上昇が見られなかったが、PVDF 膜では裂傷、刺し傷、切断を施した膜に明らかな濁度上昇が見られた。

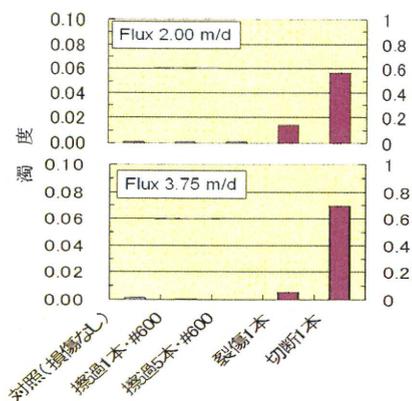


図 2-7 PVDF 膜(加圧ろ過)のろ過水濁度 (試験水濁度 : 5 度)

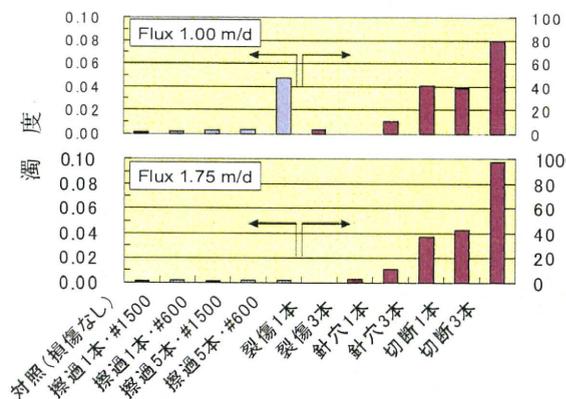


図 2-8 PVDF 膜(吸引ろ過)のろ過水濁度 (試験水濁度 : 500 度)

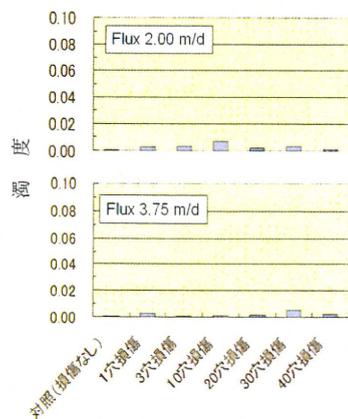


図 2-9 セラミック膜(加圧ろ過)のろ過水濁度 (試験水濁度 : 5 度)

次に、直接法の実験において、損傷を施した膜モジュールに対して圧力保持試験を行ったときの圧力の変化を図2-10、損傷の可能性の判定結果を表2-12に示す。PVDF膜、セラミック膜ともに擦過では損傷が検出できず、PVDF膜の裂傷、切断では検出が可能であった。

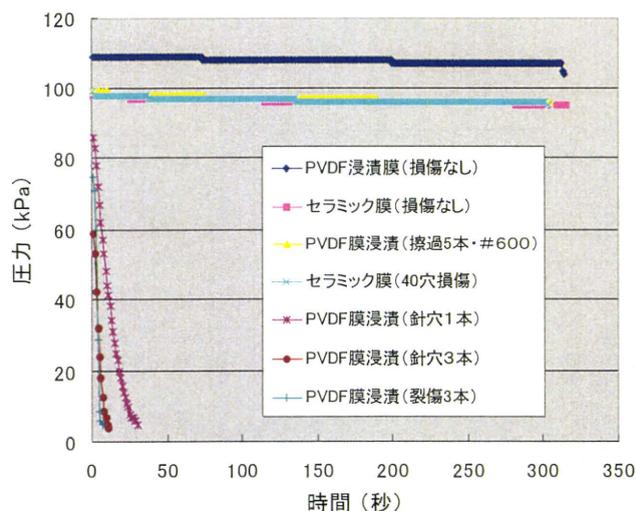


図2-10 圧力保持試験における圧力の変化

表2-12 圧力保持試験による判定結果

膜種	ろ過方式	損傷の程度	圧力降下速度	判定
セラミック膜	加圧ろ過	対照(損傷なし)	3 kPa/5 min	
		40穴損傷	2 kPa/5 min	
	※1, 3, 10, 20, 30穴損傷エレメントは省略			
	加圧ろ過	対照(損傷なし)	3 kPa/5 min	
		擦過 1本・#600	3 kPa/5 min	
		擦過 5本・#600	3 kPa/5 min	
裂傷 1本		測定不能	検出	
	切断 1本	測定不能	検出	
PVDF膜	加圧ろ過	対照(損傷なし)	2 kPa/5 min	
		擦過 1本・#1500	4 kPa/5 min	
		擦過 1本・#600	3 kPa/5 min	
		擦過 5本・#1500	3 kPa/5 min	
		擦過 5本・#600	3 kPa/5 min	
		吸引ろ過	裂傷 1本	測定不能
		裂傷 3本	測定不能	検出
		針穴 1本	32 secで圧力ゼロ	
		針穴 3本	11 secで圧力ゼロ	
		切断 1本	測定不能	検出
	切断 3本	測定不能	検出	

#### 4) 考察

間接法の実験では、裂傷、刺し傷、切断を施した中空糸膜において明らかなろ過水濁度の上昇が見られた。しかし、実設備の規模においては処理水量に対して原水のリークによる濁度の割合が小さいため、膜損傷としての検出は困難と考えられる。一方、ろ過水濁度の計測による間接法では膜損傷を検出する感度が認められなかったものの、USEPA(米国環境保護庁)の「Membrane

Filtration Guidance Manual」では、間接法は連続的なモニタリングが可能であることから直接法を補完する試験方法として位置づけている<sup>1)</sup>。また、間接法として微粒子カウントを採用している浄水場において、損傷が確認された膜モジュールの交換後、ろ過水中の1 μm以下の微粒子数が明らかに減少した事例があり、ろ過水の微粒子監視が膜損傷検出の一つの目安となりうるものと考えられている<sup>2)</sup>。したがって、間接法については、ろ過水の濁度や微粒子数データの分析による膜損傷検出の指標確立が今後期待される。また、直接法の実験では、中空糸膜において、膜を貫通するような損傷の検出が可能であったことから、直接法は浄水の汚染リスクが高い膜損傷の検出に有効な試験方法であると考えられる。

以上のことから、浄水処理の安全管理上、膜損傷試験には少なくとも直接法の適用が必要であると考えられる。

## 5) 結論

膜損傷の程度とその検出方法の評価に関する実験を行った。膜表面のみに生じた擦過等では直接法、間接法のいずれの試験方法でも損傷検出は困難であり、裂傷、切断のような膜を貫通する損傷については直接法でのみ検出が可能であることがわかった。したがって、浄水安全管理の点から、膜損傷試験には少なくとも直接法の適用が望ましいと考えられる。

## 2. 3 膜損傷検出に関する海外の指針

我が国では、これまでに膜損傷検出の技術に関する多くの研究報告がなされているものの、運用に関する基準等については整備されていない。そこで本書では、膜損傷検出の運用事例として USEPA によるガイドラインの概要を中心に述べることにする。

### 1) 「Membrane Filtration Guidance Manual」の概要

USEPA の編修による「Membrane Filtration Guidance Manual」は、2006 年 1 月に公示された膜ろ過システムに関するガイドラインであり、クリプトスポリジウム等による病原生物対策の強化を目的とした規則である LT2ESWTR に準拠している。そのため、クリプトスポリジウム属の除去手段として用いることを前提とした膜ろ過システムの要件について記載されている。

LT2ESWTR は 2006 年 1 月に公示された規則であり、地表水又は地表水の影響を直接受ける地下水を用いる公共水道システムに対して適用される。この規則では、原水中の病原性生物に関するモニタリング(平均濃度測定)の実施、クリプトスポリジウムの除去や不活化処理、覆蓋のない配水池からの流出水の処理等について規定している<sup>3)</sup>。このうち、膜ろ過システムをクリプトスポリジウム属の除去手段として用いるための要件は、以下のとおりである。

- ・直径 1 $\mu$ m を超える粒状物質を除去するために、加圧又は減圧吸引により駆動される分離過程であり、主として粒子サイズによる分離を目的とした人工的に作られたバリアを通過する過程で目的とする有機体が効果的に除去され、直接完全性試験(Direct Integrity Testing)の適用により、その除去効率を評価可能なシステムであること(MF、UF、NF 及び RO に適用)。
- ・膜ろ過プロセスにおける除去効率が、水質に応じた性能試験(Challenge Testing)及び直接完全性試験によって確認されていなければならない。なお、除去効率とは膜ろ過プロセス単独ではなく、システムの性能として評価されるべきものである。
- ・膜ろ過システムは定期的に直接完全性試験を実施しなければならず、かつ運転中には連続的間接完全性モニタリング(Continuous Indirect Integrity Monitoring)を実施しなければならない<sup>1)</sup>。

性能試験とは、膜ろ過プロセスが特定の有機体をどの程度除去できるかを実証するものであり、この試験によって、膜ろ過供給水量と膜ろ過水へ流出する除去対象物の量との比の対数値である LRV が設定される。LRV は、膜ろ過プロセスの認定を(米国の)州当局から受ける際、当該膜ろ過プロセスの性能を示すデータとなる。また、試験にはクリプトスポリジウム等の微生物の代わりにマーカー(代替微粒子)を用いることができる。直接完全性試験とは、本書の別項で示す直接法に相当し、連続的間接完全性モニタリングは間接法に相当するものである。「Membrane Filtration Guidance Manual」に記載されている直接完全性試験及び連続的間接完全性モニタリングの概要を以下に示す。

#### (1) 直接完全性試験の概要

直接完全性試験とは、「膜ろ過ユニットの完全性の破綻を他の要因とは切り離して特定することのできる物理的試験」と定義され、膜ろ過ユニット全体の物理的要素(膜モジュール、シール、埋め込み部材、バルブや配管、その他の要素を含み、完全性が損なわれた状態で使用した場合、ろ

過水の汚染につながるおそれのあるすべての要素)に適用される。極めて感度が良く、高いLRVの検証が可能であるが、実施に際しては対象とする膜ろ過ユニットを運転から切り離す必要があり、膜ろ過システムの休止時間を最低限に抑えるには定期的な実施にならざるを得ない。

直接完全性試験は圧力を基準とする方法とマーカ―を使用する方法に大別されるが、試験の分解能と感度及び適用頻度について一定の性能基準を満たしていれば、試験方法は問われない。したがって、性能基準を満足し、州当局の認定を取得できる方法であれば、圧力、マーカ―、その他の手段による任意の方法を採用することができる。直接完全性試験の運用に関する要件を以下に示す。

#### ① 分解能

膜に生じた3 μm以下の大きさの欠陥(損傷)に応答する分解能を持たなければならない。この基準値はクリプトスポリジウムのオーシストのサイズ範囲から決められたものである。

#### ② 感度

膜ろ過プロセスに認定されたLRVと同等もしくはより高い除去率を検証できるだけの感度を持たなければならない。直接完全性試験の感度が性能試験によるLRVと同等もしくはそれ以下の値であることが実証された場合、州当局による膜ろ過プロセスの認定では、LRVの最大値が直接完全性試験の感度によって決定される。たとえば、性能試験におけるLRVが5.5 log、直接完全性試験の感度が4.5 logの場合、当該膜ろ過プロセスの除去率の最大値は4.5 logとして認定を受けることになる。また、現在適用されている多くの直接完全性試験の感度は4 logを超えているが、最終的には膜メーカーの情報と「Membrane Filtration Guidance Manual」を基に、状況に応じて決定する。

#### ③ 実施頻度

膜ろ過ユニットごとの稼働期間を通して1日に1回を下回らない頻度で実施しなければならない。ただし、クリプトスポリジウム除去に有効な複数段階のバリアや信頼性の高い安全対策が付加されている場合、さらに低い頻度での実施を州当局が認定することがある。また、運転上の諸条件が許すならば、試験の実施間隔をほぼ等しく保つために毎日ほぼ同じ時間帯に実施することを推奨する。

#### ④ 管理限界

管理限界とは完全性試験の応答に適用されるしきい値であり、これを超えた場合には何らかの処置が必要となる値と定義される。直接完全性試験では、管理限界を超えた場合、当該膜ろ過ユニットを運転から切り離して診断試験及び修理を行う。当該膜ろ過ユニットの再稼働は、直接完全性試験が終了し、膜ろ過システムの完全性が確認されてからでなければならない。管理限界は、損なわれた完全性のレベルに応じて複数の段階に分けて設定する方法もある。

#### ⑤ 診断試験の実施

診断試験は直接完全性試験の一種であり、完全性を損なう損傷が検出されたときに、その特性と位置を明らかにすることを目的とした試験である。診断試験の感度や分解能に関しては基準がないが、完全性を損なう損傷が検出できる分解能を備えていなければならない。MF膜またはUF

膜を用いた膜ろ過システムの場合、診断試験には、目視検査、バブルポイント試験、音響試験、単一モジュール試験が一般的に使用されている<sup>1)</sup>。

## (2) 連続的間接完全性モニタリングの概要

連続的間接完全性モニタリングは、膜モジュールや膜ろ過ユニットに直接適用される物理的な試験法ではなく、ろ過水の水質をモニタリングすることにより、ある種の特性を膜ろ過プロセスの完全性を表す指標に用いる方法である。完全性が損なわれたことを検出する感度の点では直接完全性試験に及ばないが、膜ろ過を停止することなくリアルタイムのモニタリングが可能であること、膜の種類や装置構成を問わず、あらゆる膜ろ過システムに適用できるメリットがある。

連続的間接完全性モニタリングの運用に関する要件を以下に示す。

### ① モニタリングの対象

モニタリングの対象は、ろ過水の濁度とする。ただし、州当局の認可を受けることができれば、濁度モニタリングに代わる方法を用いることが可能である。その代表的な方法は微粒子カウントである。

### ② 分解能及び感度

分解能及び感度の基準値はない。

### ③ 実施頻度

モニタリングは、個々の膜ろ過ユニットごとに独立して連続的に実施しなくてはならない。なお、「連続的」とは 15 分に 1 回の頻度を下回らないモニタリングを示す。

### ④ 管理限界

管理限界は、膜ろ過システムの完全性を損なう損傷が発生した可能性を示す指標である。ろ過水の濁度モニタリングにおいて、連続した 2 回の測定値がいずれも 0.15 NTU(1.0 NTU は濁度約 0.7 度に相当<sup>4)</sup>)以上を示した場合には、直ちに直接完全性試験を実施する(濁度モニタリング以外の方法は除く)。ほとんどの膜ろ過システムでは、ろ過水の濁度が 0.15 NTU を下回ることから、0.15 NTU を超える濁度が持続する場合には、膜ろ過システムの完全性に重大な問題が生じていると考えられる。なお、システムの完全性が損なわれた場合のリスクをより低減するために、水道事業者の自主的な判断又は州当局の裁量によって、さらに厳格な管理限界(例えば 0.10 NTU)を設定することも可能である。また、管理限界を複数の段階に分けて設定し、ある段階に到達した場合、より高いモニタリング頻度を適用して管理のレベルを上げていく方法もある。

### ⑤ 微粒子カウントによるモニタリング

濁度モニタリングのメリットは、濁度計が広く普及していること、測定値が水質の絶対的な尺度を与えること等であるが、濁度は完全性を損なう損傷の程度(ろ過水へ漏洩する微粒子のサイズ)についての具体的な指標にはならない。一方、微粒子カウントは、分解能として 3 $\mu$ m を超えるサイズの微粒子検出が可能であり、感度としては実験によって中空糸を人為的に損傷させ、ろ過水中の微粒子数と関連づけることが実験的に可能である。ISO と ASTM では、微粒子カウントによるモニタリングに関連する規格を策定している。微粒子カウントをモニタリングに用いる際の

注意点を以下に示す。

- ・濁度モニタリングと同様に、感度は膜ろ過システムの形式、1 台の測定装置に接続される膜モジュール数、膜モジュール当たりの中空糸本数、水理学的な条件、膜ろ過システム固有のパラメータから影響を受ける。
- ・測定装置によって測定値が大きく異なることがあるため、管理限界は膜ろ過システムごとに設定する必要がある。
- ・ろ過水中への気泡の巻き込みによって、微粒子数を過大に評価することがある。特に逆洗工程後にはこの状態を生じやすい<sup>1)</sup>。

なお、国内では、膜損傷試験の間接法として微粒子カウントを採用している浄水場において、損傷が確認された膜モジュールの交換後、ろ過水中の1 μm以下の微粒子数が明らかに減少した事例があることから、ろ過水の微粒子監視が膜損傷検出の一つの目安となりうるものと考えられ、今後のさらなる研究が期待される<sup>2)</sup>。

## 2) 膜損傷試験の種類と特徴

現在、膜損傷検出に用いられている試験方法の概要を表2-13に示す。表はAWWAジャーナル「Monitoring the integrity of low-pressure membranes」にまとめられた内容を抜粋したものである。

直接法のうち、圧力保持試験(加圧法)は最も多く採用されており、感度の良い試験方法である。バブルポイント試験及び音響試験は、直接法によって膜損傷の可能性が認められた場合に実施する診断試験としてさらに分類される。診断試験にはこれらのほか、目視検査、単一モジュール試験が一般的に用いられている。音響試験を除く、圧力を用いる直接法では、水温、膜ファウリング、膜損傷以外の原因によるシステム内の漏洩、膜の湿潤状態、膜の表面積に影響を受けるため注意が必要である。水温は膜を透過する空気量に直接影響し、水温が低い場合には膜損傷の検出を妨げる可能性がある。膜ファウリングが検出感度に与える影響については明らかにされていないが、膜ファウリングの進行が膜損傷か所を部分的に覆い隠す可能性が報告されており、今後の検証が必要である。

間接法のうち、微粒子カウントは最も感度の良い試験方法であることが報告されているが、感度は原水中の微粒子濃度、膜の表面積に依存し、ろ過水量に対する膜損傷か所から漏洩する水量の割合に大きく影響されることが指摘されている。また、ろ過水中の微細気泡や配管内の微粒子をカウントしてしまうため注意が必要である。濁度モニタリングはUSEPAの「Membrane Filtration Guidance Manual」において標準的な間接法として位置づけられているが、感度が悪く、また、レーザー方式の濁度計の感度は良いが、小規模(実証実験)施設での比較調査では、微粒子カウントの方が損傷検出に効果的であったことが報告されている。間接法は、原水の水質、膜差圧、膜ろ過流量、ろ過方式(全量ろ過/クロスフロー、内圧式/外圧式)、中空糸内径、膜ファウリング、膜の表面積のほか、測定機器の感度、校正状態、使用方法に影響を受ける可能性がある<sup>5)</sup>。

表 2-13 膜損傷試験の種類と特徴

試験方法	長所	短所	
直接法	圧力保持試験(加圧法)	<ul style="list-style-type: none"> <li>感度が良い</li> <li>一度に複数の膜モジュールに対して試験が可能</li> <li>自動化が進んでいる</li> <li>試験に要する時間が短い</li> </ul>	水温、膜ファウリング、膜損傷以外の漏洩等に影響される
	圧力保持試験(減圧法)	圧力保持試験(加圧法)に類似した長所がある	圧力保持試験(加圧法)に類似した短所がある
	拡散空気量試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>圧力保持試験(加圧法)に類似した長所がある</li> <li>圧力保持試験(加圧法)よりも精度が高いとの報告がある</li> </ul>	圧力保持試験(加圧法)と類似した短所がある
	バブルポイント試験*	<ul style="list-style-type: none"> <li>感度が良く、結果が評価しやすい</li> <li>損傷のある中空糸の特定が可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験の適用範囲が局所的である</li> <li>自動化が進んでいない</li> </ul>
	音響試験*	損傷のある膜モジュールの特定が可能	<ul style="list-style-type: none"> <li>周囲の音や運転工程に影響されることがある</li> <li>結果の評価が困難である</li> <li>自動化されていない</li> <li>浸漬型膜モジュールには適用できない</li> </ul>
間接法	濁度モニタリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>レーザー方式では感度が良い</li> <li>機器費は微粒子カウンターより安価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>微粒子の数やサイズのデータは得られない</li> <li>定期的なセンサーの保守が必要</li> </ul>
	微粒子カウント	<ul style="list-style-type: none"> <li>感度が他の間接法より良いとの報告がある</li> <li>数段階の微粒子サイズについて測定可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>原水中の微粒子数の影響を受ける(基準値の設定が困難)</li> <li>ろ過水中の気泡や配管内の微粒子を測定する可能性がある</li> <li>測定結果が機器の分解能に依存する</li> <li>定期的なセンサーの保守が必要</li> </ul>
	微粒子モニタリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>機器費が微粒子カウントより安価</li> <li>センサーの校正が不要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>感度が微粒子カウントより悪い</li> <li>ろ過水中の気泡や配管内の微粒子を測定する可能性がある</li> <li>微粒子の数やサイズのデータは得られない</li> <li>測定値の評価が微粒子カウントより難しい</li> </ul>

※診断試験に分類される。

出典： Khosrow Farahbakhsh, Samer S. Adham, Daniel W. Smith. Monitoring the integrity of low-pressure membranes. p.103, Journal - American Water Works Association vol.95, June 2003

### 3) 新しい膜損傷検出技術

表 2-13 に前述のほか、新しい技術を用いた膜損傷試験方法が開発されている。その一つが、電気抵抗測定によるエアリーク検出を用いた試験方法であり、すでに実施設において、直接法としての採用事例がある。この試験方法は、膜モジュールの原水側を空気加圧し、損傷か所からろ過水側へ漏洩した気泡がセンサーを覆うことによって生じる電気抵抗の変化を検出するものである<sup>6)</sup>。この試験方法は、センサーを各膜モジュールに設置することにより、膜モジュール単位での検出が可能である。

また、膜損傷によってろ過水側へ漏洩した濁質を検出する小型センサーを膜モジュール単位に設置する試験方法も開発されている<sup>7)</sup>。

### 3. 薬品洗浄

#### 3. 1 薬品洗浄の実施状況

##### 1) 実施形態

アンケート調査から得られた実施形態を図3-1に示す。膜モジュール構造がケーシング収納型の膜ろ過装置を導入している施設の実施形態を示したものであるが、施設規模5千m<sup>3</sup>/日より大きい規模ではオンサイト洗浄、小さい規模ではオフサイト洗浄が多くの割合を占めている。オンサイト洗浄では、オンサイトオンライン洗浄が多くの割合を占めている。図以外では、浸漬型の膜ろ過装置を導入している5施設で、全てオンサイトオンライン洗浄であった。

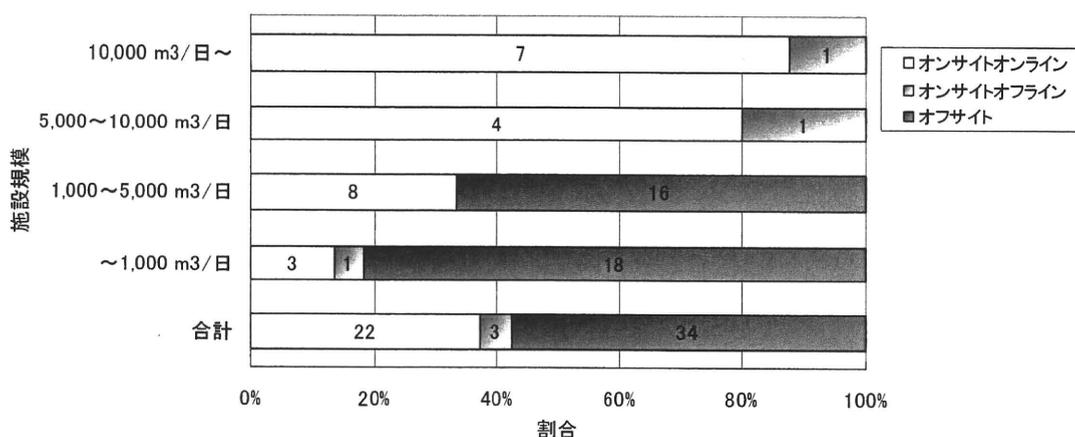


図3-1 薬品洗浄の実施形態(回答数 59 件、ケーシング収納型のみ)

##### 2) 実施頻度

アンケート調査から得られた実施頻度を図3-2に示す。実施頻度は、年1回程度が最も多く、次いで2年に1回程度、1年に2回程度が多い。このように、いくつかの実施頻度に明らかな偏りが見られるのは、多くの施設において薬品洗浄の頻度をあらかじめ設定し、それに基づいた膜ろ過流速等の設計や運転が行われているためと考えられる。

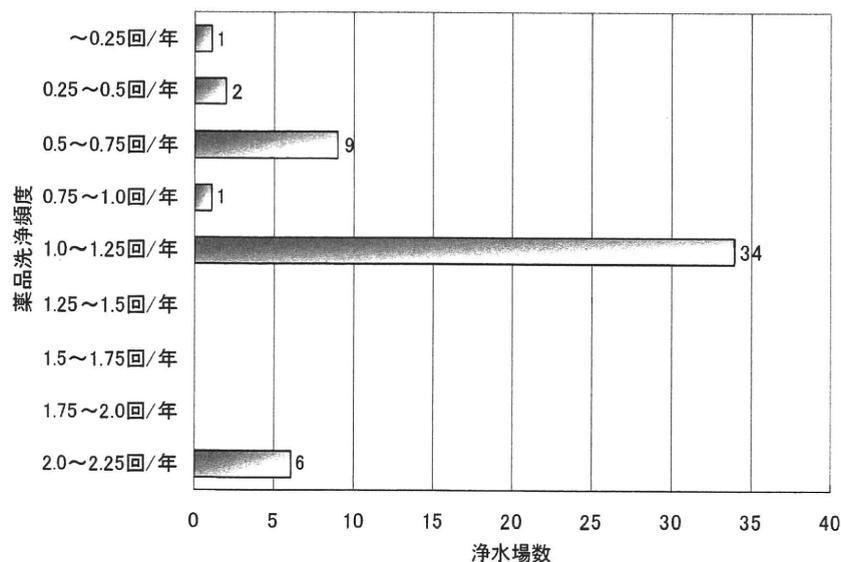


図3-2 薬品洗浄の実施頻度(回答数 53 件)

### 3) 実施の判断条件

ヒアリング調査から得られた事例では、膜ろ過流束の状況と膜差圧の管理値(しきい値)到達を実施時期の判断条件としている施設がある。また、別の事例では、実施時期の選択として、秋季に実施している施設がある。これは、水需要が多い夏季を避けるとともに、原水水温が0.1℃程度に低下する冬季及び融雪水が原水に流入し、膜差圧が上昇傾向を示す春季を避けるためである。

### 4) 洗浄に用いる薬品

アンケート調査から得られた洗浄に用いる薬品に関する状況を以下に示す。図3-3は施設で用いる薬品の種類を示す。ファウリングには有機成分、無機成分等が含まれ、これらの成分を除去するために複数の薬品を用いることが多いことからアンケートは複数回答形式とした。図に示すとおり、有機成分の除去には次亜塩素酸ナトリウム、無機成分の除去にはクエン酸が主な薬品である。

次に、膜素材に対応した薬品の種類を表3-1に示す。薬品洗浄は、膜モジュールメーカーの推奨方法をベースに、ファウリングの成分や施設の運用に適した方法で実施されることが多く、表に示すとおり、1種類の膜素材に対して多数の薬品を使用している。

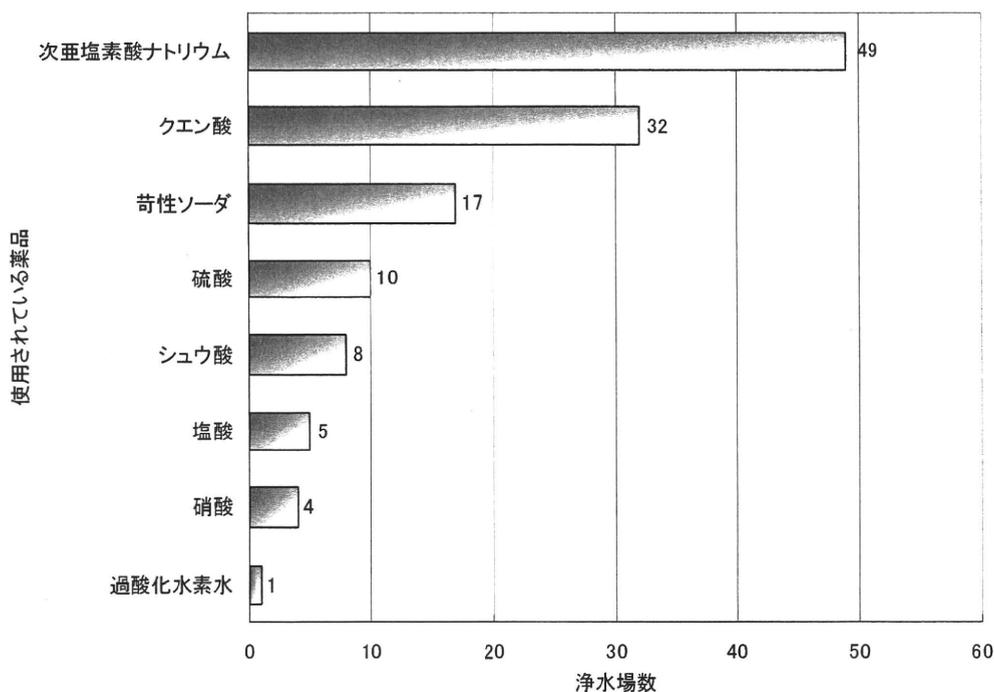


図3-3 洗浄に用いる薬品の種類(56施設での回答数126件)

表 3 - 1 膜素材に対応した薬品の種類

膜素材	苛性ソーダ	次亜塩素酸 ナトリウム	塩酸	硫酸	クエン酸	シュウ酸	硝酸	過酸化 水素水
PVDF	○	○	○	○	○	○	○	○
CA		○			○	○		
PP	○			○	○			
PES	○	○				○		
PAN	○	○	○		○	○	○	
セラミック(モノリス型)		○		○	○			
セラミック(管型)	○	○		○				

5) 薬品洗浄での留意事項(オンサイトオンライン洗浄の場合)

ヒアリング調査から得られた施設での事例及び企業の標準的な留意事項をまとめて表 3 - 2 に示す。

表 3 - 2 薬品洗浄での留意事項(オンサイトオンライン洗浄の場合)

薬液と浄水との混合防止	膜モジュールへの原水供給ライン及び膜ろ過水ラインに手動バルブを2つ設置して、薬液の漏洩を二重に防止する
	原水の流入、膜ろ過水の流出、逆洗水の流入及び流出側に薬液ラインとの隔離用手動バルブを設け、薬品洗浄時には全閉を確認する
薬品の取り扱い・保管	薬液の rinse(洗い流し)後、膜ろ過ユニット内に薬品が残留していないことを確認する
	薬品洗浄に関連しないバルブが意図した状態になっていることを検出し、薬品洗浄工程移行へのインターロックとする
	薬品洗浄の前後では、膜ろ過ユニットから薬品洗浄関連の配管を切り離す
	薬液投入時の安全対策を行う
薬品の取り扱い・保管	薬液タンクには、次亜塩素酸ナトリウムと塩酸やクエン酸等の薬液が混合しないよう、防液堤を設ける
	次亜塩素酸ナトリウムのタンクは、屋外への排気を考慮する
	配管内の液溜まりが最小限となるようにする
	膜の耐薬品性を考慮した薬品濃度の調整を行う
薬品の取り扱い・保管	安全性を考慮した廃液処分方法とする

### 3. 2 薬品洗浄と膜劣化に関する実験

2. 2 項と同様に、膜の使用状況が性能に与える影響についての検討として以下の実験を行った。

#### 1) 実験の目的

膜ろ過浄水施設では、逆洗によって回復しない不可逆的ファウリングの除去を目的とした膜の薬品洗浄が行われる。しかし、薬品は膜を変質させる要因にもなることから、薬品洗浄が膜の劣化に影響を与える可能性が指摘されている<sup>8)</sup>。本実験では膜を一定濃度の薬液に一定期間浸漬させ、薬品洗浄が膜の劣化に及ぼす影響についての知見を得ることとした。

#### 2) 実験方法

薬品として PVDF 膜には次亜塩素酸ナトリウム及び硫酸、セラミック膜には次亜塩素酸ナトリウム及びクエン酸を用い、濃度として、実設備での薬品洗浄で用いられる濃度からその 3 倍程度までの薬液を準備した。それらの薬液に実験用膜モジュールを一定期間浸漬したのち、純水に濁度 5 度又は 500 度となる量のカオリンを添加した試験水を用いてろ過し、膜のろ過性能評価のために、ろ過水濁度を測定した。

#### 3) 実験結果

次亜塩素酸ナトリウムの薬液(濃度 0.3 %、0.6 %、1.0 %)に PVDF 膜、セラミック膜のモジュールを浸漬させ、試験水をろ過したときのろ過水濁度をそれぞれ図 3-4、図 3-5 に示す。試験水の濁度は PVDF 膜では 500 度、セラミック膜では 5 度とした。図に示すとおり実験条件において、薬品浸漬後のろ過水濁度の上昇は見られなかった。また、PVDF 膜を硫酸の薬液(濃度 3.0 %、6.0 %、10.0 %)、セラミック膜をクエン酸の薬液(濃度 1.0 %、2.0 %、3.0 %)に浸漬させ、同様の試験水をろ過したときのろ過水濁度をそれぞれ図 3-6、図 3-7 に示す。これらの条件においても、薬品浸漬後のろ過水濁度の上昇は見られなかった。

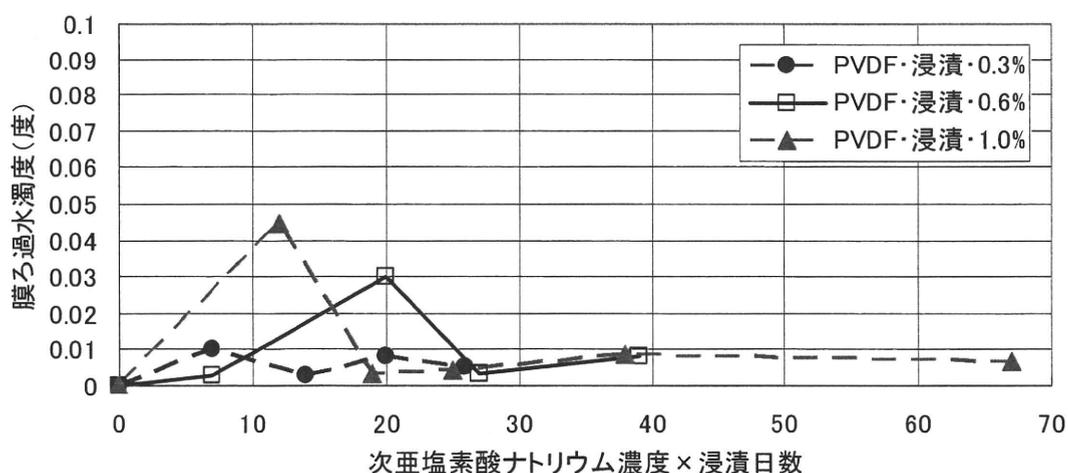


図 3-4 次亜塩素酸ナトリウムの薬液浸漬後におけるろ過水濁度(PVDF 膜・浸漬ろ過)