

201036004A

厚生労働科学研究費補助金
健康安全・危機管理対策総合研究事業

健康リスク低減のための新たな浄水プロセス
及び管路更新手法の開発に関する研究

平成22年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 藤原正弘

平成23(2011)年5月

厚生労働科学研究費補助金
健康安全・危機管理対策総合研究事業

健康リスク低減のための新たな浄水プロセス
及び管路更新手法の開発に関する研究

平成22年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 藤原正弘

平成 23 (2011)年 5月

目 次

I. 総括研究報告

健康リスク低減のための新たな浄水プロセス及び管路更新手法の開発に関する研究
藤原正弘（財団法人 水道技術研究センター）

II. 分担研究報告

1. ポリマーブレンドによる水処理用中空糸膜への耐ファウリング性付与に関する研究
松山秀人（神戸大学大学院工学研究科 教授）
2. 逆洗効果の膜長さ方向分布に関する研究
木村 克輝（北海道大学大学院工学研究院 准教授）
3. 膜の損傷と性能及び薬品洗浄による膜の劣化に関する研究
伊藤 雅喜（国立保健医療科学院 水道計画室長）
4. 紫外線照射の地表水への適用に関する研究
神子 直之（立命館大学 教授）
5. 紫外線処理による塩素代替消毒法およびマルチバリア消毒法に関する研究
大瀧 雅寛（お茶の水女子大学 准教授）
6. 地震による管路被害の予測等に関する研究
宮島 昌克（金沢大学 教授）

III. 研究成果の刊行に関する一覧表 （該当なし）

IV. 研究成果の刊行物・別刷 （該当なし）

添付資料

健康リスク低減のための新たな浄水プロセスに関する研究【浄水部門】

1. 膜ろ過施設の維持管理の高度化等
 - 1.1 膜ろ過浄水施設維持管理高度化マニュアル(案)
2. 浄水プロセスへの紫外線処理の適用
 - 2.1 浄水場の濁度管理についてのアンケート調査結果
3. 研究体制

基幹水道施設の機能診断及び地震による管路被害の予測等に関する研究【管路部門】

4. 基幹水道施設の機能診断手法の検討
 - 4.1 水道施設機能診断マニュアル（平成 22 年度研究成果のみ抜粋）
 - 4.2 水道施設機能診断評価点自動計算ソフト「これは楽々機能診断」説明書
 - 4.3 機能診断（カルテシート-3）の検討（抄）
 - 4.4 機能改善方策選定（カルテシート-4）の検討（抄）
5. 地震による管路被害の予測等
 - 5.1 地震による管路被害予測式 精度検証結果
6. 研究体制

I. 総括研究報告

厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）
総括研究報告書

健康リスク低減のための新たな浄水プロセス及び管路更新手法の開発に関する研究

研究代表者 藤原 正弘 財団法人水道技術研究センター理事長

研究要旨

水道は社会基盤施設として重要な役割を果たしているが、多くの基幹施設が大規模な更新時期を迎えつつある。また、水系感染症の発生等の防止や地震等による断水の防止・軽減に関する手法の確立が求められており、以下の課題に取り組むことにより安全・安心な水道水の安定供給に資するものである。なお、本研究の実施期間は平成 20 年度から平成 22 年度であり、本年度（平成 22 年度）は 3 か年計画の 3 年目である。

本研究では、以下の具体的な検討課題に取り組んでいる。

(1) 健康リスク低減のための新たな浄水プロセスに関する研究【浄水部門】

- 1) 水道事業体のニーズに合った浄水膜の性能・仕様等の検討
- 2) 膜ろ過施設の維持管理の高度化等
- 3) 浄水プロセスへの紫外線処理の適用

(2) 基幹水道施設の機能診断及び地震による管路被害の予測等に関する研究【管路部門】

- 1) 基幹水道施設の機能診断手法の検討
- 2) 地震による管路被害の予測等

また、研究体制は、藤原正弘（水道技術研究センター理事長）を研究代表者とし、学識者及び水道技術研究センター役職員を研究分担者とするとともに、学識者、水道事業体・民間企業の技術者等を研究協力者として本研究を実施している。

平成 22 年度の研究成果の概要は次のとおりである。

(1) 浄水部門

1) 水道事業体のニーズに合った浄水膜の性能・仕様等の検討

強度に優れた膜素材の PVDF（ポリフッ化ビニリデン）に親水性ポリマーの PVP（ポリビニルピロリドン）等をブレンドして改質した中空糸膜を製作し、ファウリング特性を検討した結果、強度と耐ファウリング性に優れた膜素材に関する基礎的な知見を得た。また、浸漬型膜モジュールを用いて膜の逆洗流束とファウリングの進行との関係及びファウリング発生部位を検討・調査し、ファウリングを抑制して膜の性能を発揮するための効果的な逆洗流束や膜モジュール構造に関する基礎的な知見を得た。

2) 膜ろ過施設の維持管理の高度化等

膜損傷の程度と膜損傷試験の検出感度及び検出方法の関係について検討を行った結果、膜損傷試験には少なくとも直接法の適用が必要であることが分かった。また、薬品洗浄の膜劣化への影響について検討した結果、薬品洗浄は損傷が生じるような膜の劣化に直接影響しないことが分かった。これらの知見を基に「膜ろ過浄水施設維持管理高度化マニュアル(案)」をとりまとめた。

3) 浄水プロセスへの紫外線処理の適用

紫外線処理の地表水への適用について、濁質による紫外線照射の効果に及ぼす影響を確認した。塩素代替消毒・マルチバリア消毒への適用について、実際の水道原水における病原微生物に対する紫外線照射の効果を確認した。また、中小規模の浄水場における濁度管理の実態についてアンケート調査により把握した。

(2) 管路部門

1) 基幹水道施設の機能診断手法の検討

平成 21 年度に作成した「浄水施設等機能診断マニュアル(案)」及び「管路機能診断マニュアル(案)」を用いて、大中小規模水道事業体におけるケーススタディを実施し、両案

の課題抽出及び記載内容改善等を行うとともに両マニュアルを統合し、「水道施設機能診断マニュアル」としてとりまとめた。また、診断作業を簡便化するための評価点自動計算ソフト及び使用説明書を併せて作成した。

2) 地震による管路被害の予測等

平成21年度に行った地震被災水道事業体における管路被害及び管網データの解析結果及び既存の知見等から、新たな地震による管路被害予測式を提案するとともに、予測式の精度検証を行い、式の妥当性の確認を行った。また、予測式を活用した計算ソフトを作成するとともに、「地震による水道管路被害予測の手引き（案）」を作成した。

研究分担者氏名

安藤 茂	水道技術研究センター	常務理事兼技監
武内 辰夫	水道技術研究センター	常務理事
谷口 元	水道技術研究センター	技術顧問
鈴木 泰博	水道技術研究センター	主幹
松山 秀人	神戸大学	教授
木村 克輝	北海道大学	准教授
伊藤 雅喜	国立保健医療科学院	水道計画室長
神子 直之	立命館大学	教授
大瀧 雅寛	お茶の水女子大学	准教授
宮島 昌克	金沢大学	教授

※ A. 研究目的、B. 研究方法、C. 研究結果、D. 考察については、【浄水部門】【管路部門】のそれぞれに分けて記述し、E. 結論、F. 健康危機情報、G. 研究発表、H. 知的財産権の出願・登録情報については合わせて記述する。

【浄水部門】

A. 研究目的

水道は社会基盤施設として重要な役割を果たしているが、より安全・安心な水道水の供給が求められていることから、水系感染症の発生等を防止するための、安定的・効果的な除去・不活化技術の確立及び維持管理の高度化等、健康リスク低減のための手法の確立を目的とし、研究活動に取り組んだ。

具体的な研究活動は以下に述べる研究テーマについて実施し、平成20年度から平成22年度の3か年計画で実施した。

1. 水道事業体のニーズに合った浄水膜の性能・仕様等の検討

水道では多様な水源原水に対する大量の浄水処理が求められるが、膜ろ過の適用においては膜のファウリングによる処理効率の低下が大きな課題の一つである。このような実態を踏まえ、本研究では、種々の水質の原水に対して低ファウリング特性を有する浄水膜の開発に資するべく、その基礎的な知見を得るための検討を行う。

2. 膜ろ過施設の維持管理の高度化等

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。こうしたことから、本研究では水道事業体の維持管理実務に資するべく、膜損傷試験及び薬品洗浄に関する知見を蓄積する。また、得られた知見を基に、「膜ろ過浄水施設維持管理高度化マニュアル(案)」をとりまとめる。

3. 浄水プロセスへの紫外線処理の適用

紫外線処理は、平成19年4月に地表水以外を原水とする施設へのクリプトスポリジウム等対策として位置付けられ、導入が進んでいるが、クリプトスポリジウム等を安定的に不活化するためには、設備を適切に維持管理することが必要不可欠である。

一方、紫外線処理を、地表水を原水とし急速ろ過を採用している施設や膜ろ過洗浄排水等に適用することによって、より確実性の高いクリプトスポリジウム等の処理ができる可能性がある。しかし、地表水は、紫外線照射を阻害する物質の濃度も高いと想定され、紫外線処理の適用性についての十分な検討が必要である。

また、塩素消毒と紫外線処理の併用によって、塩素注入量と塩素副生成物を低減し、健康リスクを抑え、より安全性の高い水道水を供給できる可能性がある。

本研究ではこのような課題を受け、紫外線処理の適用拡大に向けた検討を行う。

B. 研究方法

研究代表者、研究分担者のもと、学識者、水道事業体、民間企業の技術者等で構成される研究協力者により浄水研究班を設置し、そのもとに研究課題に応じて、2つのワーキンググループ（膜処理ワーキンググループ、紫外線処理ワーキンググループ）を設け、3つのテーマについて研究を進めた。

以下、テーマごとに具体的な研究方法を示す。

1. 水道事業体のニーズに合った浄水膜の性能・仕様等の検討

膜のファウリング抑制について、膜素材及び逆洗効果に関する知見を得るために、以下の2つの実験的研究を行った。

1.1 ポリマーブレンドによる中空糸膜への耐ファウリング性付与に関する研究

膜の親水性が高いほど耐ファウリング性に優れることが一般的に知られており、中空糸膜の親水化手法には、グラフト(重合)、コーティングによる膜表面の改質や、膜素材へ親水化剤をブレンドすることによる素

材自体の改質がある。

本研究では、これらの手法のうち、膜の製作過程において表面処理の工程が不要な親水剤のブレンドによる膜素材の改質について検討した。ベースとなる膜素材には機械的強度、耐薬品性に優れる PVDF を、ブレンドする親水剤には親水性ポリマーである PMMA、PVP を用いた。また、膜の製作方法には、TIPS 法(熱誘起相分離法)を用いた。TIPS 法は、市販の膜では一般的な NIPS 法(非溶媒誘起相分離法)に比べ、高い強度を得られることが知られている。

表1 中空糸膜の製作条件

加熱温度	190℃
フィード液吐出速度	0.09 ml/s
内液吐出速度	0.13 ml/s
巻き取り速度	0.12 m/s
エアージェット	5 mm
水浴温度	0.45℃

実験では、膜素材として PVDF のみ、PVDF に PMMA をブレンド、PVDF に PVP をブレンド

した 3 種類の膜を TIPS 法により製作し、SEM(走査型電子顕微鏡)による膜構造の評価、透水量、強度、親水性及びファウリング特性の評価を行った。膜の製造条件を表 1 に示す。

膜の製作に用いた PVDF は重量平均分子量 $M_w=322,000$ とし、溶媒には DEP(ジエチルフラレート)を用いた。透水量の評価では、製作した中空糸膜の外側から $\Delta P=0.05$ MPa、流速 16.6 ml/min で純水を供給し、膜を透過する水の速度から透水量を測定した。ファウリング試験では、ファウラントとしてタンパク質の一種である BSA(牛血清アルブミン)を用い、緩衝液としてリン酸水素二ナトリウムとリン酸二水素ナトリウム(共に 0.1 mol/l)を用いて BSA 濃度 1,000 ppm、pH 7 となるよう調製した試験水を用いた。また、ファウラント阻止率は、分光光度計を用いた透過液の UV(波長 280 nm)の測定結果から算定した。

1.2 中空糸膜の逆洗効果に関する研究

MF/UF 膜による膜ろ過で定期的実施される逆洗は多くの場合、経験的に流束が設定されているが、ファウリング抑制に最適な逆洗流束が存在すると考えられる。また、逆洗が 1 本の中空糸膜の全域で効果的に行われているかについてはほとんど研究されていない。

本研究では、実設備相当の長さの中空糸

膜を用いた実験用浸漬型膜モジュールにより人工河川水のろ過実験を行い、逆洗流束とファウリングの進行との関係を検討した。また、実験終了後の中空糸膜を長さ方向に 4 分割して膜モジュールを製作し、それぞれ純水を透過したときのろ過抵抗値を測定して中空糸膜の長さ方向における逆洗効果を評価した。

浸漬型膜モジュールには長さ 2 m の中空糸 MF 膜(PVDF 膜)を用い、実験室内に設置した水槽の中へ浸漬して 30 分に 1 回の頻度で 30 秒間の逆洗を実施しながら定流量ろ過を行った。ろ過水の吸引側及び逆洗水の供給は中空糸の片端で行った。人工河川水にはフミン酸 10 mg-TOC/L、カオリン 20 mg/L、カルシウム 20 mg-Ca/L を混合し、pH7.0 に調整したものを用いた。ろ過実験では、表 2 に表す範囲で、ろ過流束、逆洗流束を変化させ、20 時間のろ過における膜差圧の経時変化を記録してファウリングの進行を評価した。

表2 ろ過流束及び逆洗流束の条件

ろ過流束($m^3/m^2 \cdot 日$)	0.5	1.0	2.0	3.0
逆洗流束($m^3/m^2 \cdot 日$)	0.5~2.0	1.5~2.0	1.0~4.0	1.5~6.0

2. 膜ろ過施設の維持管理の高度化等

膜損傷試験及び薬品洗浄に関する知見を蓄積するための実験的研究を行った。

1) 膜損傷の程度と損傷検出感度との関係

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 つである。膜損傷の可能性は直接法及び間接法に分類される膜損傷試験によって判定される。

本研究では、実験用膜モジュールの膜に人為的な損傷を施し、直接法及び間接法の検出感度について検討を行った。

実験は、表 3 に示すとおり、人為的に擦過、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)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。

表3 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
損傷の程度		対照(損傷なし)	対照(損傷なし)
		擦過 1本・#1500	—
		擦過 1本・#600	擦過 1本・#600
		擦過 5本・#1500	—
		擦過 5本・#600	擦過 5本・#600
		裂傷 1本	裂傷 1本
		裂傷 3本	—
		針穴 1本	—
		針穴 3本	—
		切断 1本	切断 1本
	切断 3本	—	

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。また、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。

2) 薬品洗浄が膜の劣化に及ぼす影響

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、薬品洗浄の実施が膜の劣化に影響を与える可能性が指摘されている。

本研究では、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検討した。

実験では、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、薬液の濃度として、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 3 段階を準備し、実験用膜モジュールを一定期間浸漬したのち、膜のろ過性能として純水に濁度 5 度又は 500 度となる量のカオリンを添加した試験水をろ過したときの、ろ過水濁度を評価した。

3. 浄水プロセスへの紫外線処理の適用

3.1 紫外線処理による地表水への適用に関する研究

様々な濁度の水に対する紫外線処理の効果を調べるため、河川水、水道原水、沈澱池出口水、及びそれぞれの水をメンブランフィルターでろ過した水にに対し、紫外線

照射実験を行った。環境中における濁質と微生物との関係を現実に近いものとするため、原水中に存在する従属栄養細菌を用いて消毒効果の評価を行った。

3.2 紫外線処理による塩素代替消毒法及びマルチバリア消毒法に関する研究

病原原虫以外の病原細菌・ウイルスを対象とする一般消毒処理の適用を考えた場合の消毒効果と浄水水質の関係について、文献調査及び実験研究を通じて検討した。具体的には、水質が変動する原水に対する低圧及び中圧ランプの消毒効果について、生物種ごとの波長依存性と対象水の吸光スペクトルを考慮しつつ検討した。また、塩素→紫外線、紫外線→塩素の処理を行った際に、細菌へ与える損傷部位について検討した。

3.3 浄水場の濁度管理についてのアンケート調査及びヒアリング調査

厚生労働省のクリプトスポリジウム等対策指針の「原水が表流水で、指標菌が検出されたことがある場合、ろ過池又はろ過膜の出口濁度を 0.1 度以下に維持することが可能なろ過設備を整備すること」は、特に中小事業体において、財政面・人材面において困難な場合があると推察される。こうしたことから、濁度管理の実態を把握するために全国の水道事業体に対しアンケート調査及びヒアリング調査を行った。

C. 研究結果

1. 水道事業体のニーズに合った浄水膜の性能・仕様等の検討

1.1 ポリマーブレンドによる中空糸膜への耐ファウリング性付与に関する研究

1) SEM による膜構造の評価

製作した中空糸膜の断面 SEM 画像を図 1 に示す。PVDF 膜、PMMA ブレンド膜では、膜の内側(画像の左側)が外側(画像の右側)まで、ほぼ対称であったのに対し、PVP ブレンド膜では非対称の構造であることが確認された。

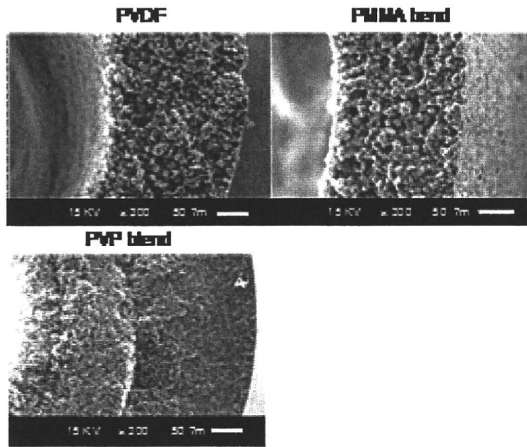


図1 中空糸膜の断面SEM画像

2) 透水量の評価

PVDF 濃度を 25 wt%、30 wt%、35 wt%とした PVDF 膜、PVDF 濃度を 25 wt%に固定した PMMA ブレンド膜及び PVP ブレンド膜について、凝固浴温度 0 °C、45 °Cで製作した中空糸膜の透水量をそれぞれ図 2、図 3 に示す。図中のプロット近傍に示す数値は透水量(L/(m² atm 時間))である。

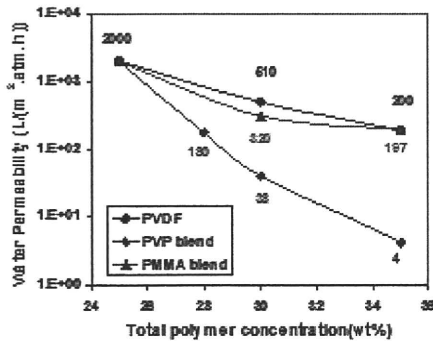


図2 PVDF膜及び親水性ポリマーブレンド膜の透水量に対するポリマー濃度の影響 (凝固浴温度: 0 °C)

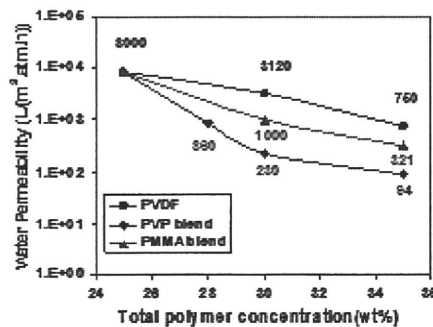


図3 PVDF膜及び親水性ポリマーブレンド膜の透水量に対するポリマー濃度の影響 (凝固浴温度: 45 °C)

凝固浴温度にかかわらず、ポリマー濃度の増加とともに透水量が減少する結果となり、透水量の傾向は PVDF 膜>PMMA ブレンド膜>PVP ブレンド膜の順となった。また、凝固浴温度を 45 °Cとした場合には、親水性ポリマーのブレンドによる透水量への影響の傾向は同じであるものの、比較的大きな透水量が得られた。

3) 強度の評価

2)と同様の条件で製作した中空糸膜の破断強度を図 4、図 5 に示す。図中のプロット近傍に示す数値は透水量(L/(m² atm 時間))である。凝固浴温度にかかわらず、PVDF 膜は非常に高い強度を示したのに対し、PVP ブレンド膜は 0 °Cで製作した場合には高い強度を示したものの、45 °Cでは約 2 MPa と強度が低下した。一方、PMMA ブレンド膜はいずれの場合にも他の中空糸膜より低い強度を示した。

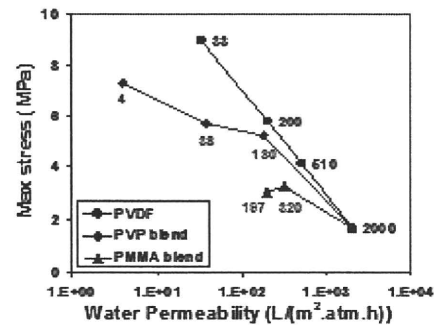


図4 PVDF膜及び親水性ポリマーブレンド膜の破断応力に対するポリマー濃度の影響 (凝固浴温度: 0 °C)

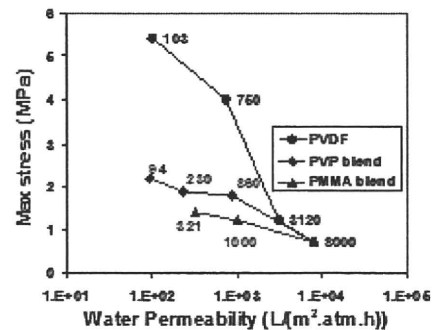


図5 PVDF膜及び親水性ポリマーブレンド膜の破断応力に対するポリマー濃度の影響 (凝固浴温度: 45 °C)

4) 親水性の評価

製作した中空糸膜外表面における接触角の測定結果を図 6 に示す。図中のプロット

近傍に示す数値は透水量(L/(m² atm 時間))である。この評価では接触角が小さいほど親水性が高いことを示すが、PVDF膜に比べて親水性ポリマーブレンド膜では接触角の減少が見られた。

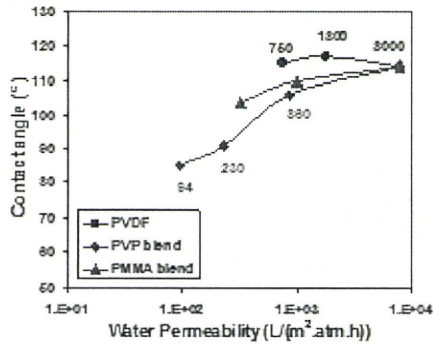


図6 PVDF膜及び親水性ポリマーブレンド膜の接触角に対するポリマー濃度の影響(凝固浴温度: 45℃)

5) ファウリング特性の評価

製作した中空糸膜の透水量及び阻止率の変化をそれぞれ図7、図8に示す。

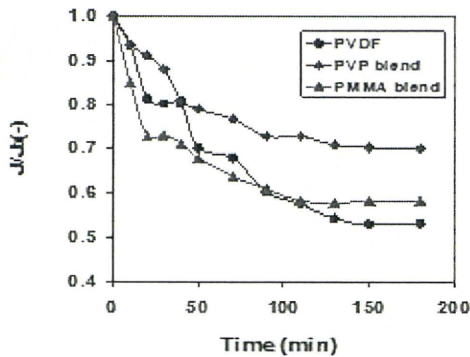


図7 PVDF膜及び親水性ポリマーブレンド膜の相対透水性の変化(ファウラント: BSA)

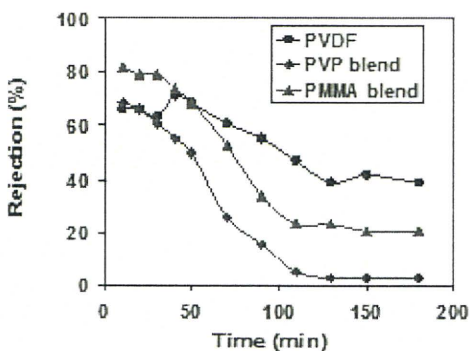


図8 PVDF膜及び親水性ポリマーブレンド膜のファウラント阻止率の変化(ファウラント: BSA)

これらの膜の初期透水量はほぼ同じ値に

統一されている。透水量の変化では、PVDF膜とPMMAブレンド膜ではほぼ同じ傾向を示したのに対し、PVPブレンド膜では透水量の低下が抑制され、実験開始から3時間経過後も初期透水量の70%程度の高い透水量を示した。一方、阻止率の変化では、実験開始から2時間程度まで減少し、その後一定の値を示した。

1.2 中空糸膜の逆洗効果に関する研究

1) 逆洗流束とファウリングの進行との関係

ろ過実験による膜差圧の経時変化を図9に示す。

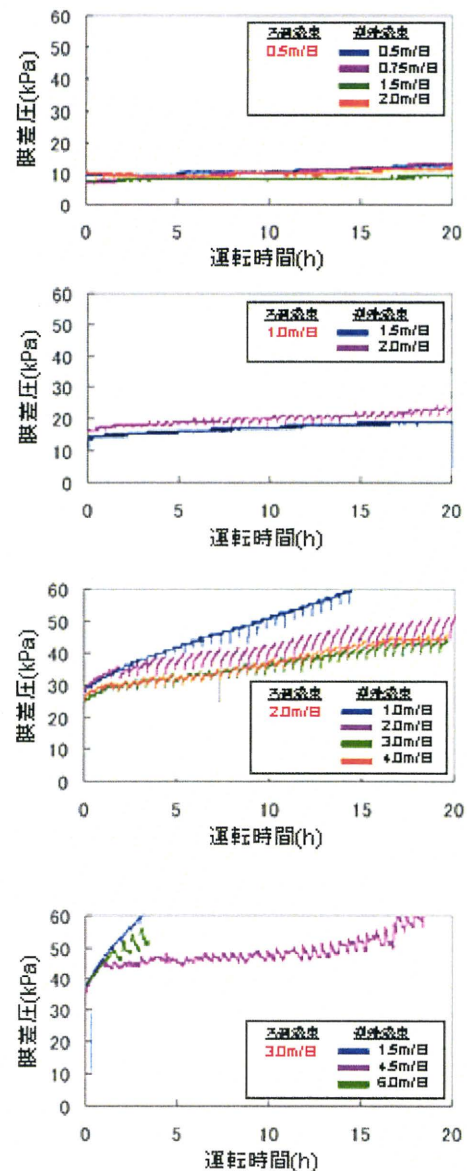


図9 膜差圧の経時変化

ろ過流速が 2.0 m/日、3.0 m/日と高い場合には、低い場合 (0.5 m/日、1.0 m/日) に比べて明らかな膜差圧上昇が見られた。また、ろ過流速が低い場合には逆洗流速の違いによる膜差圧上昇の違いは見られなかったが、ろ過流速が高い場合には逆洗流速を変えることによって膜差圧の上昇に違いが生じた。ろ過流速 2.0 m/日では逆洗流速を上昇させることによって膜差圧の上昇は抑制されたが、ろ過流速 3.0 m/日では逆洗流速が 6.0 m/日の場合よりも 4.5 m/日の方が膜差圧上昇を低く抑えられる結果となった。したがって、ろ過流速が高い場合においては必ずしも逆洗流速の高さに応じてファウリング抑制有効効果が高くなるわけではないという結果が示された。

2) 中空糸膜の長さ方向における逆洗効果

ろ過実験に使用した中空糸膜を分割し、それぞれのファウリング状況を評価した結果を図 10 に示す。図の横軸の数値は、ろ過水吸引及び逆洗水の供給を行った中空糸膜の片端からの距離である。図に示すとおり、ろ過流速、逆洗流速の値にかかわらず、ろ過水吸引及び逆洗水の供給を行う片端に近いほど、ろ過抵抗値が高くなりファウリングが大きく進行していたことが分かった。

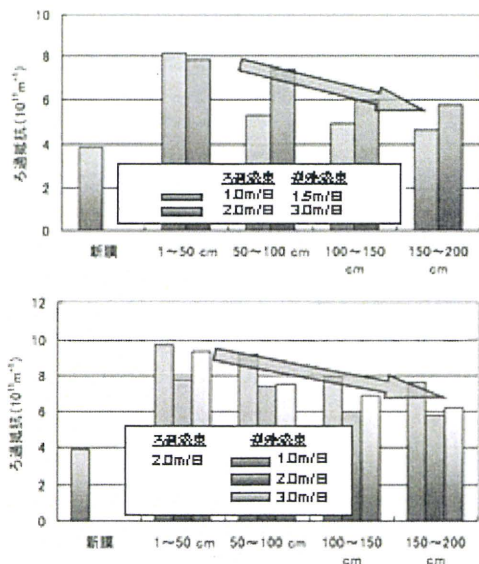


図10 中空糸膜の長さ方向におけるろ過抵抗値の分布

2. 膜ろ過施設の維持管理の高度化等

1) 膜損傷の程度と損傷検出感度との関係

(1) 間接法の検出感度

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 11~13 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。

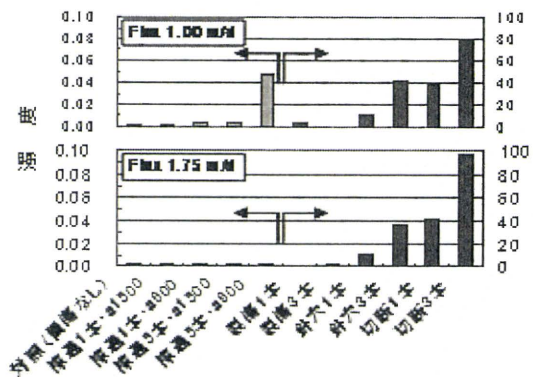


図12 PVDF膜(吸引ろ過)のろ過水濁度(試験水濁度: 500 度)

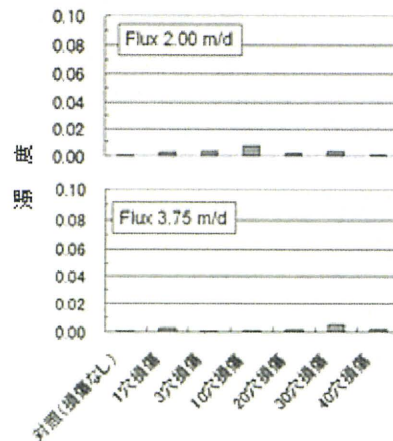


図13 セラミック膜(加圧ろ過)のろ過水濁度(試験水濁度: 5 度)

(2) 直接法の検出感度

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 14

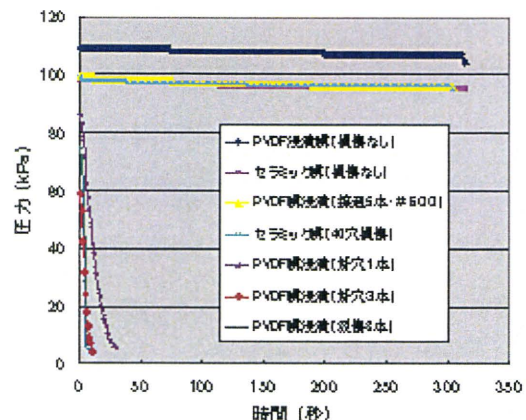


図14 圧力保持試験における圧力の変化

に、損傷の可能性の判定結果を表4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。

表4 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	
PVDF膜	加圧ろ過	切断 1本	測定不能	検出
		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	検出
		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

2) 薬品洗浄が膜の劣化に及ぼす影響

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図15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、いずれの膜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。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%)に浸漬させた場合でも、薬品浸漬後のろ過水濁度の上昇は見られなかった。

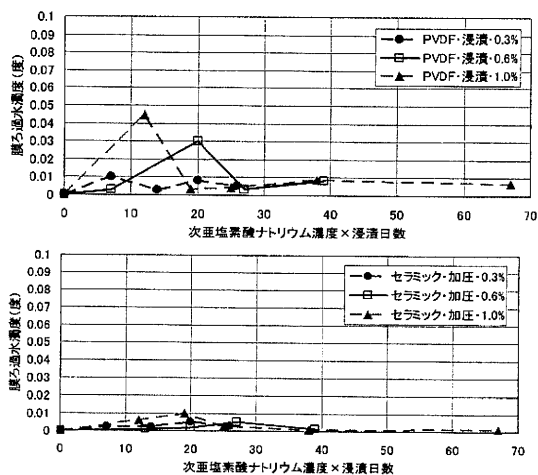


図15 薬液浸漬後のろ過水濁度 (PVDF膜・セラミック膜)

3. 浄水プロセスへの紫外線処理の適用

3.1 紫外線処理による地表水への適用に関する研究

1) 各試料の濁度の測定

今回の研究で用いた試料水の濁度を測定した。その結果を表5に示す。草津川、法竜川、原水はいずれも地表水であり、濁度は3.92~41.10度で、ろ過による濁度の除去率は46~67%であった。浄水場内で濁質の除去がある程度進んだ工水(工業用水)の濁度は1度未満であり、ろ過による除去率は低かった。

表5 各試料の濁度の測定結果(単位:度)

試料	無ろ過	ろ過
草津川①	41.10	—
草津川②	5.59	—
法竜川①	12.15	—
法竜川②	9.20	4.94
原水①	5.22	2.36
工水①	0.65	0.66
原水②	3.92	1.28
工水②	0.70	0.62

2) 紫外線照射の効果への濁質の影響

従属栄養細菌の不活化実験結果を図16~19に示す。すべての試料で15mJ/cm²程度までは一次反応的に不活化した。その傾きは試料ごとに異なり、例えば草津川①は1log不活化に15mJ/cm²程度を要したが、原水や工水では5mJ/cm²未満であった。また、15mJ/cm²程度以上では不活化に要する紫外線量が大きくなり、傾きが小さくなるテーリングと呼ばれる傾向が見られた。例えば原水と工水は、テーリング後は、1log不活化に要する紫外線量がテーリング前の約13倍となった。

また、ろ過前後で生残率が大きく異なったのは、法竜川②と工水①だけであり、その他は、大きな差は見られなかった。このことは、同じ試料であれば、濁度がある程度の値であったとしても、紫外線照射の効果に濁質が影響しないことを示唆していると考えられる。

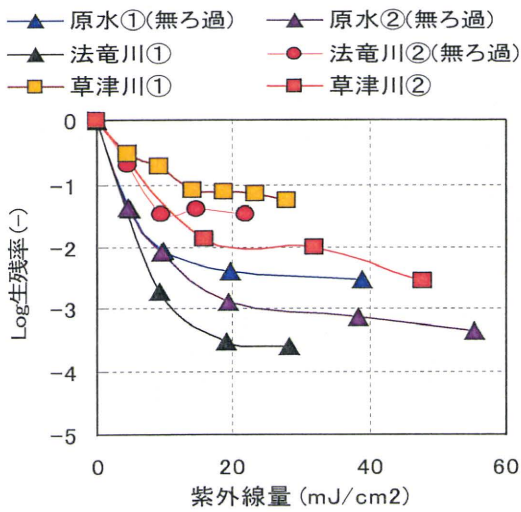


図 16 環境水(無ろ過)における紫外線照射の効果

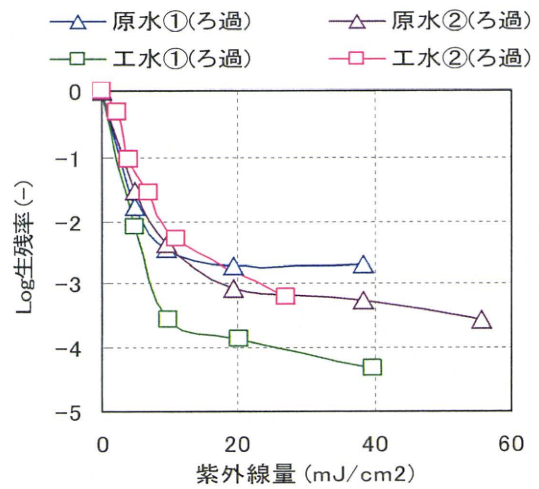


図 19 浄水場水(ろ過)における紫外線照射の効果

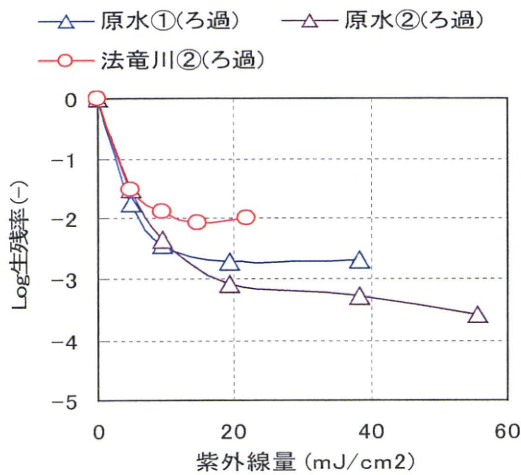


図 17 環境水(ろ過)における紫外線照射の効果

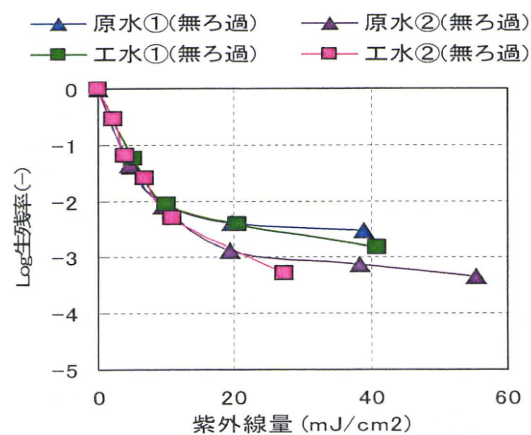


図 18 浄水場水(無ろ過)における紫外線照射の効果

3) テーリング現象の原因の明確化

ろ過前後で紫外線照射の効果が変化しないことが分かったが、15mJ/cm²程度以上でテーリングが生じた。この理由を明らかにするための実験を行った。

まず、テーリングの原因が紫外線耐性細菌によるものと仮定し、テーリング後の生残菌の紫外線耐性を測定した。その結果を図 20 に示す。生残菌は一次反動的に減少した。ここで 1log 不活化に要する紫外線量は 45mJ/cm²と計算され、高い紫外線耐性を持つという結果が得られた。

この結果から、今回の研究で用いた試料水には、5mJ/cm²未満で 1log 不活化する細菌が大部分を占めているが、45mJ/cm²程度必要な紫外線耐性菌が 0.1~1%程度存在していたことが分かる。

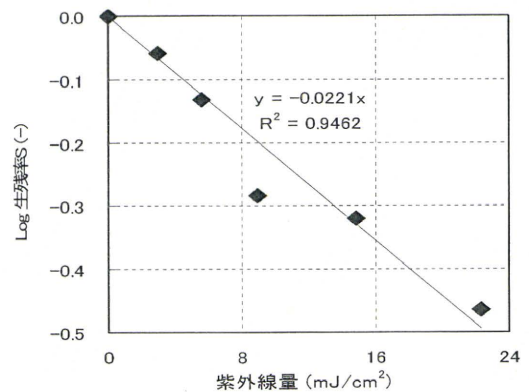


図 20 紫外線照射生残菌の紫外線耐性

今回の実験結果を整理すると、①細孔径 $5\mu\text{m}$ のフィルターでろ過した同じ試料における HPC (従属栄養細菌) の不活化には大きな差が無かった、②HPC は $15\text{mJ}/\text{cm}^2$ 程度までは一次反応的に不活化された、③ $15\text{mJ}/\text{cm}^2$ より大きい紫外線量では不活化速度が減少するテーリングという現象が見られた、④テーリングの原因は 0.1~1%程度存在する紫外線耐性菌によるものであった、ということになる。ここで重要なのは、紫外線照射で生残り増殖した紫外線耐性菌の 1 log 不活化に要する紫外線量が、各試料の実験結果から得られたテーリング後の不活化速度にほぼ一致していることである。これは、紫外線照射生残菌は徐々にではあるが不活化が進行している、つまり照射された紫外線が濁度を含んだ試料においても微生物に到達していることを示している。不活化速度が遅い紫外線耐性菌に紫外線が到達しているということは、クリプトスポリジウムのように紫外線耐性が小さいものは、到達した紫外線量に応じて一次反応的に不活化が進行することを強く示唆している。

3.2 紫外線処理による塩素代替消毒法及びマルチバリア消毒法に関する研究

1) 種々の微生物の波長依存性

本実験の広波長域光源として用いたパルス Xe ランプを用いて波長を絞った場合の不活性化効果について細菌 1 種類 (大腸菌)、ウイルス 4 種類 (大腸菌ファージ: Q β 、MS2、 λ 、T4) の結果を図 21 に示す。ここでは、254nm の不活化率を 1 とした相対不活化率を算出した。クリプトスポリジウムと他の微生物では、波長依存性の傾向が異なることが分かった。

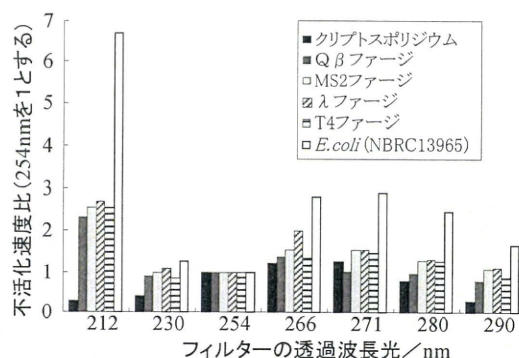


図 21 *Cryptosporidium parvum*、MS2、Q β 、 λ 、T4、及び大腸菌(NBRC 13965)の各バンドパスフィルタ透過光における相対不活化率分布 (*C. parvum* の値のみ USEPA ガイドライン参照)

2) 全国 5 か所の吸光スペクトル

全国 5 か所の浄水場の吸光スペクトルの一例として 2009 年 11 月採水分のデータを図 22、図 23 に示す。図 23 は、図 22 の 254nm 付近を拡大表示したグラフである。地表水は地下水に比べ、254nm 吸光度が比較的高く、230nm 以下は低いという傾向であることが分かった。

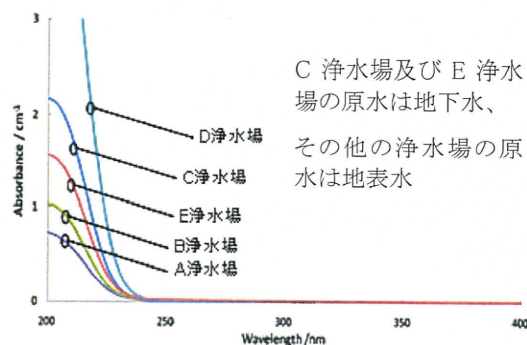


図 22 浄水場浄水の吸光スペクトル (2009 年 11 月採水分)

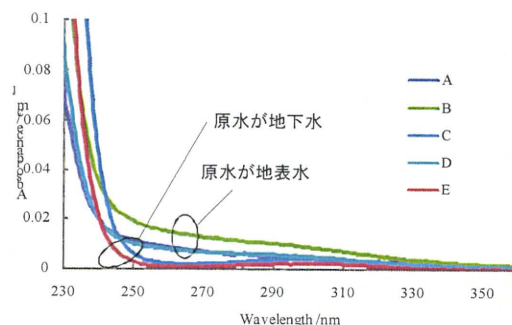


図 23 浄水場浄水の吸光スペクトル (254 nm 付近) (2009 年 11 月採水分)

3) 低圧ランプの適用性の検討

(財) 水道技術研究センターの紫外線照射装置技術審査基準 (JWRC 技術審査基準) では、低圧 UV ランプの場合、対象水の吸光度を 0.022cm^{-1} (=透過率 95%) と仮定している。すなわち、対象水が透過率 95%より悪い状況になると設定 UV 量が保証できないということになる。2) で用いた浄水の 1 年間の 254nm 透過率データを用いて、JWRC 技術審査基準の水で得られる消毒効果に対し何倍の効果が保証されるかについて計算した結果を図 24 に示す。その結果、5 か所の浄水場とも、1 年間にわたり 254nm の透過率が 95%を下回ることがなく、図 24 が示すとおり消毒効果が JWRC 設定消毒効果を上回り、設定 UV 量が保証されることが分かった。

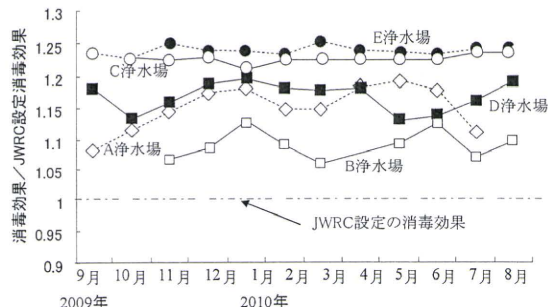


図 24 各浄水の消毒効果の推定値 (低圧) (JWRC 技術審査基準との比較)

4) 中圧ランプの適用性の検討

低圧 UV ランプと異なり中圧 UV ランプの消毒効率の低減は、各対象微生物の波長依存性、対象水の吸光スペクトル、ランプの照射スペクトルの 3 つに依存するため、微生物ごとに低減効果が変わることになる。

JWRC 技術審査基準では、中圧 UV ランプの場合、240 nm 未満の吸光度は ∞cm^{-1} (=透過率 0%)、240 nm 以上の吸光度は 0.022cm^{-1} (=透過率 95%) を仮定している。2) で用いた浄水の 1 年間のデータを用いて、JWRC 技術審査基準の水で得られる消毒効果に対し何倍の効果が保証されるかについて計算した結果を図 25 に示す。その結果、5 か所の浄水場とも、年間を通して JWRC 設定消毒効果を上回り、設定 UV 量が保証されることが分かった。

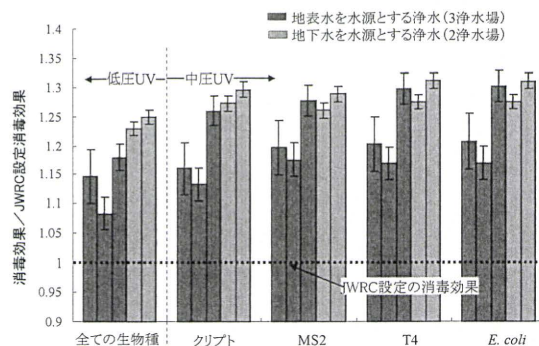


図 25 各浄水の消毒効果の推定値 (中圧) (JWRC 技術審査基準との比較)

5) 塩素と紫外線の併用処理における大腸菌の損傷部位の推定

大腸菌溶液 (初期濃度約 10^6CFU/mL) に対して塩素単独 (接触時間 3 分、5 分)、紫外線単独 (照射量 6.2mJ/cm^2)、塩素→紫外線、紫外線→塩素の 4 パターンの消毒方式により不活化処理を行った後、TSA、DESO、EC の 3 種類の培地により培養させ、溶液中の大腸菌濃度を測定した。これらの測定結果の差から、大腸菌の損傷部位を推定する。推定に当たっては表 6 を用いる。

表 6 各測定培地の検出の有無と推定損傷箇所

	必須代謝損傷 遺伝子損傷	特定酵素損傷	細胞膜損傷
TSA	×	○	○
EC	×	×	○
DESO	×	×	×

× : 不検出, ○ : 検出

単独処理の場合の結果を図 26 に、併用処理の結果を図 27 に示す。塩素処理においては、膜損傷が主な不活化機構となるために、DESO 培地測定から得られる不活化率が最も高くなる。また紫外線処理においては、遺伝子損傷が主な不活化機構となるために、3 つの培地測定から得られる不活化率に差が生じないという結果が得られた。また併用処理の場合は、いずれも DESO 培地測定から得られる不活化率が最も高くなった。

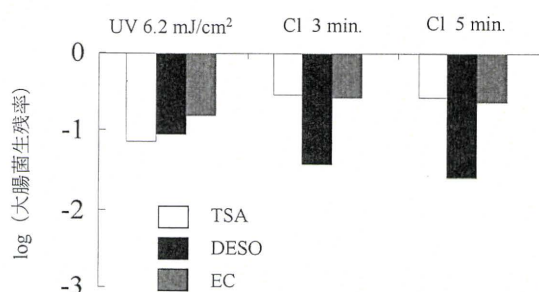


図 26 培地ごとの大腸菌生残率(単独処理)

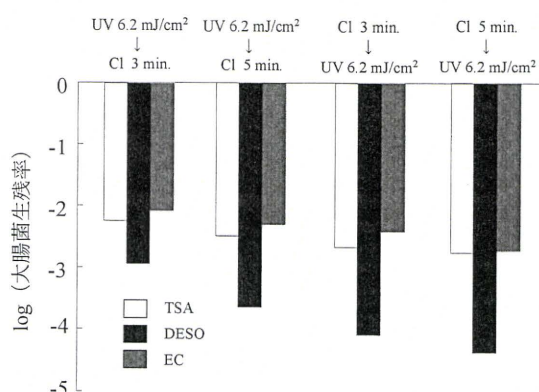


図 27 培地ごとの大腸菌生残率(併用処理)

単独処理の和と併用処理の不活化率の比較を図 28 に示す。(図 28 は、塩素接触時間が 3 分の場合の図であるが、5 分の場合も、ほぼ同様の結果であった。) 単独処理の不活化率の和に比べて、併用処理の不活化率の方が高くなっていることが分かる。すなわち、併用処理による相乗効果が確認された。

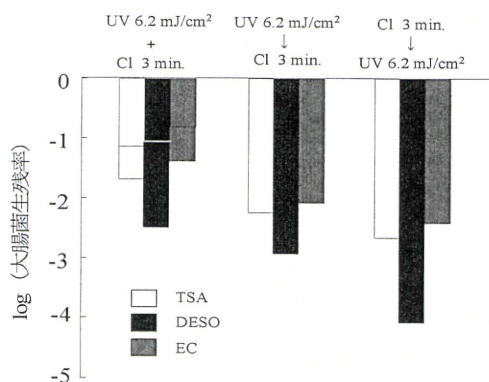


図 28 単独処理の和と併用処理の比較

しかし大腸菌の損傷部位の推定という視点から見ると、併用処理における培地間の比率の差は観察されなかった。塩素→紫外線処理の場合、残留塩素がある中での紫外線照射処理であるため、塩素ラジカルによ

り大腸菌に対しより致命的な損傷を与えることが期待されたが、今回の結果からは、致命的な損傷が増したとは考えにくく、損傷部位に関しては、単独の場合と変わらないのではないかと考えられる。以上のことから、併用処理により不活化効果は高くなるが、不活化機構は変わらないということが分かった。

3.3 浄水場の濁度管理についてのアンケート調査及びヒアリング調査

1) アンケート調査

原水が表流水、処理能力が、101m³以上、10,000m³以下の浄水場を所有する 274 事業体に対し濁度管理に関するアンケート調査を実施した結果、216 事業体 (234 浄水場) から回答を得た。

その結果、指標菌が検出されたことがある浄水場が 191 か所 (全体の 82%) であり、その内、ろ過池出口濁度が 0.1 度を超えることがある浄水場が 34 か所 (18%)、0.1 度を越えないにしても管理に困難・苦勞している浄水場が 56 か所 (29%)、合わせて 90 か所 (47%) の浄水場で、濁度管理が難しいという結果であった。(図 29)

難しさの理由を回答の多い順に挙げると、「凝集剤注入制御が困難」、「沈殿・ろ過施設の能力不足」、「無人であり監視不十分」、「凝集剤単独での対応が困難」、「遠方監視であり適切な管理が困難」、「故障トラブル」、「専門技術者がいない」であった。

2) ヒアリング調査

アンケート調査に回答した事業体のうちの 2 事業体に対しヒアリング調査を行った結果、「濁度 0.1 度を基本と考えるが、その数値に対しては柔軟性をもたせてもよいのではないか」、「原水が溜池であり付近に酪農等もなく、クリプト等のリスクが低い」、「緩速ろ過のため濁度管理が難しい」などの意見があった。

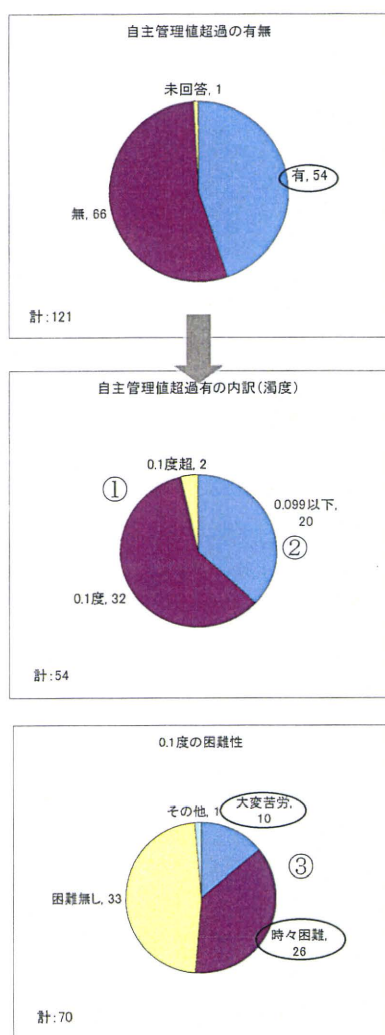


図 29 濁度管理の実態

自主管理値超過*有：54 か所

その内

- ・自主管理値が、0.1 度以上：34 か所 …①
- ・自主管理値が、0.1 度未満：20 か所 …②

自主管理値を設定していない浄水場の中で、ろ過池出口濁度管理(0.1 度以下の管理)に困難・苦勞：36 か所 …③

以上の結果から、

- ・「0.1 度を越えることがある」(①)：
34 か所 (18%) = (34/191)
- ・「0.1 度を越えないにしても、管理に困難・苦勞している」(②+③)：
56 か所 (29%) = (56/191)
- ・「濁度管理が難しい」
(①+ (②+③))：
90 か所 (47%) = (90/191)

*自主管理値：各浄水場で独自に定めているろ過池出口濁度の管理値

D. 考察

1. 水道事業者のニーズに合った浄水膜の性能・仕様等の検討

1.1 ポリマーブレンドによる中空糸膜への耐ファウリング性付与に関する研究

1) SEM による膜構造の評価

PVDF への PVP ブレンドによって非対称構造の膜が形成されたのは、親水性の PVP が製作時に凝固浴(水)と接する中空糸膜外側に拡散する一方、内側表面には溶媒を流しているため相対的に PVDF 濃度の高い部分が形成されたためと考えられる。

2) 透水量の評価

親水性ポリマーをブレンドした中空糸膜ではブレンドしないものより透水量が減少する傾向が確認された。これは親水性ポリマーのブレンドによって膜を構成する球晶構造が崩れ、球晶の間隙として形成されていた膜細孔が小さくなったことに起因している。透水量は、PVDF 膜>PMMA ブレンド膜>PVP ブレンド膜の順であり、製作時の凝固浴温度が高い場合にはいずれの膜においても透水量が大きくなった。この理由として、凝固浴温度が高い場合には冷却速度が遅くなり、結果としてより大きな膜細孔が形成されたものと考えられる。

3) 強度の評価

いずれの中空糸膜においても低い凝固浴温度で製作した方が高い強度を示した。この理由として、凝固浴温度が高い場合には冷却速度が遅くなり、結果として粗く弱い膜構造が形成されたことが考えられる。PMMA ブレンド膜は凝固浴温度にかかわらず、いずれの中空糸膜より低い強度を示したことから中空糸膜には不相当と考えられる。また、PVP ブレンド膜で高い強度を得るには低い凝固浴温度が好ましいと考えられる。

4) 親水性の評価

親水性ポリマーをブレンドした中空糸膜では、いずれも接触角の減少がみられ、親水性向上の効果が確認された。特に PVP ブレンド膜では大きく接触角が低下しており、PVDF 膜の改質に成功したと考えられる。

5) ファウリング特性の評価

ファウラント阻止率の変化において、ろ過初期の阻止率の減少過程は膜表面及び膜細孔内にファウラントが吸着することによ

り見かけ上の阻止率として現れたものと考えられる。その後、それぞれの中空糸膜での阻止率が異なる値で一定に近い挙動を示した理由としては、親水性が高い膜ほどファウラントが吸着しにくいのに対し、親水性の低い膜では吸着しやすくケーキ層もより多く堆積し、その結果、ケーキ層自身によりファウラントが阻止された結果、阻止率が向上する効果が得られるものと考えられる。親水性はPVPブレンド膜>PMMAブレンド膜>PVDF膜の順であることからケーキ層はPVDF膜>PMMAブレンド膜>PVPブレンド膜の順に多く堆積すると考えられ、ケーキ層によるファウラントの阻止も同様の傾向となる。親水性の低い膜ほどファウリングが進行し阻止率が高くなると想定されるが、実験結果もこの傾向に合致している。

以上のことから、PVDFに親水性ポリマーをブレンドした中空糸膜では、ろ過初期の透水量が低下するものの、PVPブレンド膜ではPVDF膜と遜色ない強度を示し、親水性の向上によって高い耐ファウリング性を得られることが分かった。

1.2 中空糸膜の逆洗効果に関する研究

1) 逆洗流束とファウリングの進行との関係

ろ過流束が高い場合に明らかな膜差圧上昇が見られた要因として、高いろ過流束によって原水中に存在する微粒子の膜細孔内への進入がより促進され、閉塞が著しく進行したことが考えられる。

また、ろ過流束 3.0 m³/日において逆洗流束の高さとファウリングの進行との間に明らかな関連性が認められなかった要因として、逆洗流束によっては、ろ過の過程で膜表面に堆積して微粒子を補足するファウリング層の多くが除去されたことにより微粒子が膜細孔内へ侵入しやすくなり、閉塞が進行することがあるものと考えられる。

2) 中空糸膜の長さ方向における逆洗効果

中空糸膜においてファウリングの進行に分布が見られた要因が逆洗効果の偏りによるものか、ろ過によるファウリング発生の偏りによるものかについては明らかにすることができなかった。しかし、このようなファウリングの進行の分布が実設備での膜ろ過運転においても生じるのであれば、中

空糸膜のろ過水吸引及び逆洗水供給側付近でのファウリング抑制を目的とした、新たな膜モジュール設計への展開が期待できる。

2. 膜ろ過施設の維持管理の高度化等

1) 膜損傷の程度と損傷検出感度との関係

(1) 間接法の検出感度

裂傷、刺し傷、切断を施した中空糸膜では明らかなろ過水濁度の上昇がみられたものの、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」を始め、直接法を補完する試験方法として位置づけられている。また、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。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。

(2) 直接法の検出感度

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有効な膜損傷試験方法と考えられる。したがって、浄水処理の安全管理の点から、膜損傷試験には少なくとも直接法の適用が必要であるとえられる。

2) 薬品洗浄が膜の劣化に及ぼす影響

実験結果から、膜の種類に対応した一般的な薬品の種類、薬液濃度を用い、膜のライフサイクルで想定される薬品洗浄の延べ回数、延べ時間以上の浸漬を行っても、膜の性能には変化が見られないことが分かった。したがって、実設備で運用されている薬品洗浄方法では、損傷が生じるような膜の劣化に直接影響することがないとえられる。

3. 浄水プロセスへの紫外線処理の適用

3.1 紫外線処理による地表水への適用に関する研究

浄水場の原水及び沈殿池出口水を試験水とする HPC の不活化実験を行った結果、紫外線量が 15mJ/cm² 程度までは一次反応的に不活化したが、それ以上の紫外線量においてはテーリングが見られた。この理由を実験的に検討した結果、濁質の影響ではなく、紫外線耐性の高い細菌の存在であることが分かった。実験を行った範囲で、水の種類、ろ過の有無によって紫外線照射の効果に大きな差が見られなかったことから、実験を行った範囲の濁度では、紫外線照射効果に影響しないということが分かった。これらのことから、濁度が 5 度程度以下又は水道水質基準である 2 度を満たしていれば、水中の微生物に紫外線が到達し、耐塩素性生物の不活化に効果的に適用できると考えられる。浄水プロセスにおいて紫外線照射は最終段階で適用されるため、通常の除濁処理が良好に行われている場合においては、その水源種別を問わず良好に紫外線照射の効果が得られるものと考えられる。

3.2 紫外線処理による塩素代替消毒法及びマルチバリア消毒法に関する研究

数種の病原細菌・ウイルスの波長依存性、及び国内複数の浄水場浄水の 1 年間の吸光スペクトルを測定した結果、中圧及び低圧 UV ランプの適用に際し、一般的な消毒性能が担保できることが分かった。ただし、中圧 UV ランプの正確な評価のためには、254 nm 吸光度だけでなく対象水のスペクトルデータを把握しておくことが重要であると考えられる。また塩素と紫外線の併用処理によって大腸菌に与える損傷部位が、単独処理と異なるかどうかを検証した結果、併用処理によって不活化率は高まるものの、作用機構に関しては単独処理と異なることが分かった。

3.3 浄水場の濁度管理についてのアンケート調査及びヒアリング調査

中小水道事業者の多くが、ろ過池出口濁度 0.1 度の管理に困難を来しており、その原因の多くが、施設能力や人材の不足であることから、比較的安価で維持管理性もよい紫外線処理に対する期待が大きいことが分かった。

【管路部門】

A. 研究目的

水道は社会基盤施設として重要な役割を果たしており、より安全・安心な水道水の供給が求められている。このような背景の中、老朽化に伴う更新が必要となる基幹水道施設への対策や、近年頻発する地震等への対策が急務である。具体的には、老朽化や地震被害による断水・漏水等のリスクを防止・軽減するための手法の確立が求められており、これらを実現すべく、基幹水道施設の機能診断手法、地震による管路被害の予測手法等の確立を目的として、研究活動に取り組んだ。

具体的な研究活動は以下に述べる研究テーマについて実施し、平成 20 年度～平成 22 年度の 3 年計画で実施した。

1. 基幹水道施設の機能診断手法の検討

国内の基幹水道施設（取水・導水・浄水・送水・配水施設）は、高度成長期にその多くが整備され、以後 40 年余りが経過して現在に至っている。こうした中、多くの基幹水道施設において老朽化が顕在化し、更新を迫られている。一方、水道事業者の経営環境は、給水人口減少による料金収入の減少、少子化に伴う人的資源の減少等、厳しい状況が続いており、このような背景の下、老朽化した基幹水道施設の機能について効果的な診断を行い、シビルミニマムを満たしかつ効率的な更新構想を立案できる手法が求められているところである。

こうしたことから、本研究は、大規模から中小規模のすべての水道事業者において利用可能な水道施設の機能診断手法の検討を行うことにより、水道事業者における確実かつ効果的な更新構想立案を支援することを目的とする。

2. 地震による管路被害の予測等

兵庫県南部地震における水道施設の甚大な被害を契機に、水道施設における地震対策の重要性が再認識されることとなったが、この地震以後も、新潟県中越地震、能登半島地震、新潟県中越沖地震等、各地で地震が頻発しており、その重要性はますます高