

201036004B

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20年度～22年度 総合研究報告書

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20年度～22年度 総合研究報告書

研究代表者 藤原正弘

平成23(2011)年5月

目 次

I. 総合研究報告

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. 研究成果の刊行に関する一覧表 （該当なし）

III. 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 将来に望まれる膜の性能・仕様等についてのアンケート調査結果
 - 1.2 膜処理現地調査結果
 - 1.3 膜ろ過維持管理アンケート調査結果
 - 1.4 膜プラントメーカー・水道事業者への実態調査結果
 - 1.5 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 紫外線処理設備維持管理状況調査結果
 - 2.2 地表水以外の水への適用における紫外線処理設備維持管理マニュアル
 - 2.3 紫外線照射試験結果（その1）
 - 2.4 紫外線照射試験結果（その2）
 - 2.5 米国環境保護庁 紫外線消毒ガイダンスマニュアル 第3章（抜粋）
 - 2.6 ドイツガス水道技術科学協会（DBGW）技術規則 実施規則 w290/2005 年2月
水道の消毒 - 運転上及び必要条件のクライテリア
 - 2.7 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
 - 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
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の手引き（案）
6. 研究体制

I. 総合研究報告

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

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、本研究は平成 20 年度から平成 22 年度までの 3 か年間に実施したものである。

本研究では、以下の具体的な検討課題に取り組んだ。

(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) 水道事業者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、水道事業者・民間企業の技術者等を研究協力者として、本研究を実施した。

平成 20 年度から平成 22 年度の 3 か年で実施した本研究の主な成果は以下のとおりである。

(1) 浄水部門

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

低ファウリング特性を持つ浄水膜の開発に関する基礎的知見を得るための研究を行った。膜のファウリング発生機構の検討では、逆洗により回復しない膜の不可逆的ファウリングの要因物質を明らかにした。膜構造及び膜素材におけるファウリング抑制効果の検討では、ファウリング抑制効果の高い膜構造と、耐ファウリング性に優れた膜素材の改質について明らかにした。ろ過流束、逆洗流束とファウリングの進行に関する検討では、ファウリング抑制に効果的な逆洗流束や膜モジュール構造についての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

膜ろ過施設を導入している水道事業者に対して維持管理の実態調査を行い、課題を抽出した。重要性の高い課題である膜損傷試験の検出感度及び薬品洗浄が膜劣化に与える影響について検討を行い、水道事業者の維持管理実務に資する知見を蓄積した。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

紫外線処理に関し、紫外線処理設備導入事業者へのアンケート調査、現地調査及び既存の知見から、維持管理面での留意事項・対応策を取りまとめ、「地表水以外の水道原水に係る紫外線処理設備維持管理マニュアル(案)」を作成した。また、紫外線照射に伴う副生成物について、照射試験により確認した。紫外線処理の地表水への適用については、海外の基準等の情報収集や照射試験によって、濁質と紫外線照射効果の関係について確認した。塩素代替消毒・マルチバリア消毒への適用については、照射試験により、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効果について確認した。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確認した。

(2) 管路部門

1) 基幹水道施設の機能診断手法の検討

平成17年4月に刊行した「厚生労働省委託 水道施設機能診断の手引き」をベースとし、事業規模の異なる9水道事業体によるケーススタディを通じてその改善を図るとともに、新たに管路の機能診断手法を開発し、小規模事業体においても使いやすく、また取水から配水までのすべての水道施設を対象とする機能診断手法を確立した。この手法は「水道施設機能診断マニュアル」としてまとめるとともに、診断作業を容易にする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

水道事業体から被害予測手法のニーズをアンケート等により収集し、その対応策を検討するとともに、近年の地震による管路被害及び管網データを収集し、データベースを作成した。さらに、これらの管路被害データを管種・継手・口径別に整理した上で、当該地域における微地形データ及び地震動データ等との相関を把握した。これらの調査結果から管路属性データごとに被害率を算出し、被害予測式における管種・継手・口径等に係る補正係数について分析を進め、新たな地震被害予測手法を提案するとともに、水道事業体が簡易に被害予測を行えるように、被害予測式を組み込んだ計算ソフトを作成した。

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。

このような実態を踏まえ、本研究では、水道事業体等への維持管理実態調査により現状の課題を把握し、明らかになりたい重要課題について実験的研究により知見を蓄積する。また、この知見を基に「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。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へ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、地表水や膜ろ過洗浄排水等は、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十分な検討が必要である。

また、塩素消毒と紫外線処理を併用することによって、従来よりも塩素注入量を低減し、副生成物による健康リスクがより少なく一層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・実験を行った。

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

ファウリング要因物質、膜構造及び膜素材におけるファウリング抑制効果、逆洗流束とファウリングとの関係を明らかにするため、以下の4つの実験的研究を実施した。

1.1 膜ファウリング発生機構に関する知見の集積

特徴の異なる実水源原水を日本全国4か所から採集して有機物回収及び疎水性、親水性の分画を行い、それぞれ中空糸膜によるろ過によりファウリング性を検討した。

1.2 浄水処理に適した膜の材質、製造法等の検討

任意の断面構造を持つ中空糸膜を製作し、ファウラントを添加した試験水を用いてファウリング特性を検討した。

1.3 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

ベースの膜素材に親水性ポリマーをブレンドした中空糸膜を製作し、ファウリング特性、強度等について検討した。

1.4 中空糸膜の逆洗効果に関する研究

実設備相当の長さの中空糸膜を用いて、異なるろ過流束、逆洗流束で人工河川水のろ過を行い、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分割してファウリングの進行度合いを調査した。

2. 膜ろ過施設の維持管理の高度化等

水道事業体の維持管理に関する課題の把握と、重要課題である膜損傷検出及び薬品洗浄に関する知見を得るため、以下の2つの研究を実施した。

2.1 維持管理の実態調査

膜ろ過施設を導入している水道事業体に対して維持管理に関するアンケート調査を実施し、実態把握及び課題抽出を行った。

2.2 膜損傷及び薬品洗浄に関する検討

1) 膜損傷の程度と損傷検出感度との関係

人為的に擦過、裂傷、切断等の損傷を施した膜モジュールに対して、間接法(ろ過水濁度の計測)及び直接法(圧力保持試験)を実施し、それぞれの損傷検出の感度について検討した。

2) 薬品洗浄が膜の劣化に及ぼす影響

実設備の薬品洗浄で一般的に用いられる薬液に膜モジュールを一定期間浸漬し、ろ過性能劣化の検討を行った。

3. 浄水プロセスへの紫外線処理の適用

3.1 地表水以外の水への適用における紫外線処理設備維持管理マニュアルの作成

当センターで把握している紫外線処理設備導入済みの19件の施設のうち13件に対しアンケート調査を実施し、そのうち3件の施設の現地調査を実施した。また、米国環境保護庁の「紫外線消毒ガイダンスマニュアル」、当センターがとりまとめた「紫外線消毒ガイドライン」等の既存の文献を参考にし、「地表水以外の水への適用における紫外線処理設備維持管理マニュアル」を作成した。

3.2 紫外線照射試験

既往の研究では、紫外線照射による副生成物として臭素酸等が報告されている。浄水処理において紫外線処理を適用する上で安全なレベル(前駆物質濃度、紫外線照射量)を把握するために紫外線照射試験を実施した。

3.3 紫外線処理による地表水への適用に関する研究

紫外線処理を地表水へ適用する上での水質面、設置面の課題について、米国環境保護庁の「紫外線消毒ガイダンスマニュアル」、ドイツガス水道技術科学協会の消毒に関する実施規則、諸外国の水道水質基準等からの情報を収集した。

紫外線処理の効果に及ぼす濁質の影響について、大腸菌ファージMS2をモデルウイルスとして用い、回分式及び流水式の紫外線照射装置により実験を行い、そのモデル化を試みた。

様々な濁度の水に対する紫外線処理の効果調べるため、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によって消毒効果の評価を行った。

3.4 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

蛍光分析法を用いることにより、UV照射に応じた有機物の変化を測定した。また粒

径の異なる二酸化チタン製光触媒粉末（径5nm～5μm）を共存させ、有機物の反応を促進させることも試みた。

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、低圧及び中圧ランプの導入の際に、水質が変動する対象水に対する消毒効果を、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。

3.5 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る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 膜ファウリング発生機構に関する知見の集積

清澄な河川として豊平川(北海道)、富栄養化の進行した湖沼として印旛沼(千葉県)、泥炭地の河川として釧路川(北海道)、下水処理水の影響がある河川として淀川(大阪府)をそれぞれ選定し、これらから採水して回収した有機物を疎水性、親水性に分画した。それぞれの分画をろ過したときの膜差圧の変化を図1、図2に示す。

図1の疎水性分画のろ過では、いずれの水源についても膜差圧上昇はほとんどみられなかった。一方、図2に示すとおり、親水性分画のろ過では、いずれの水源についても著しい膜差圧上昇が見られた。

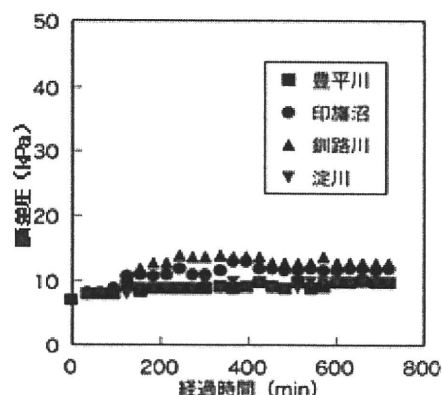


図1 疎水性分画のろ過における膜差圧の変化

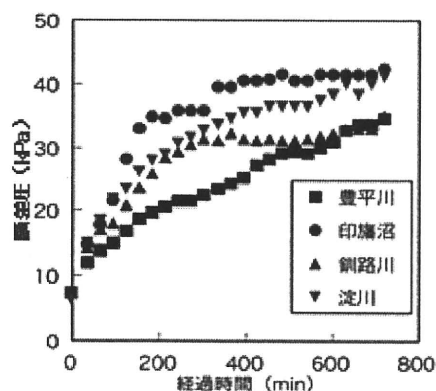


図2 親水性分画のろ過における膜差圧の変化

1.2 浄水処理に適した膜の材質、製造方等の検討

膜素材としてPVDF(ポリフッ化ビニリデン)を用い、製膜法としてTIPS法(熱誘起相分離法)、NIPS法(非溶媒誘起相分離法)により、異なる断面構造を有する外圧式中空糸膜を製作した。これらの中空糸膜は、中空糸の外側(原水流入面)に緻密層(膜細孔径が小さい)、内側(ろ過水流出面)に多孔構造(膜細孔径が大きい)を持つTIPS1、外側と内側に多孔構造を持つTIPS2、外側と内側に緻密層を持つNIPS1、外側に多孔構造、内側に緻密層を持つNIPS2の4種類である。膜の断面構造モデルを図3、膜の外側表面及び内側表面のSEM(走査型電子顕微鏡)画像を図4に示す。

次に、これらの中空糸膜でファウラント(アルギン酸ナトリウム)を添加した試験水をろ過し、ファウリング特性を評価した。図5は、ろ過初期の透水量に対する一定時

間後の透水量の割合を表す相対透水率の変化を示したものであるが、TIPS1 が最大となり、最もファウリングが抑制されたことを確認した。

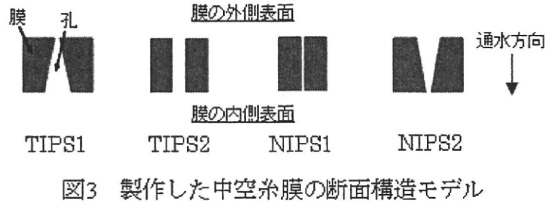


図3 製作した中空糸膜の断面構造モデル

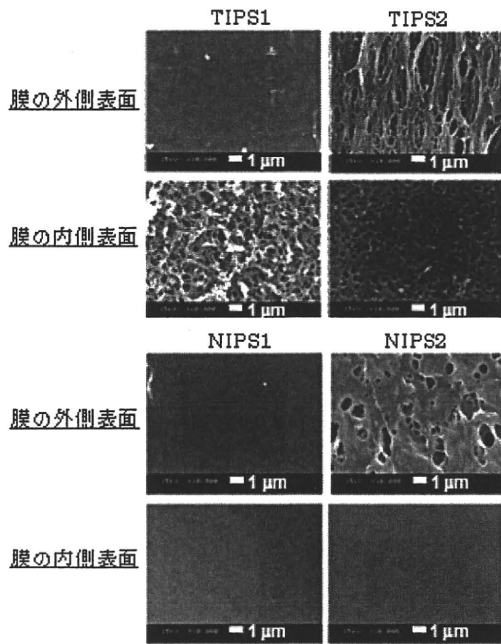


図4 製作した中空糸膜の内側及び外側表面SEM画像

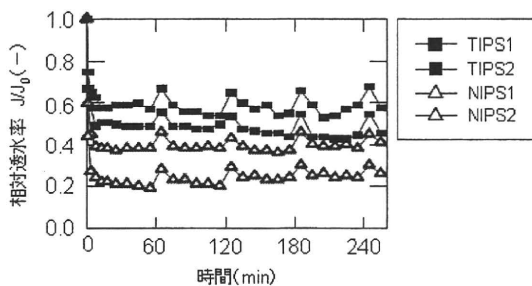


図5 製作した中空糸膜の相対透水率の変化

1.3 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

ベースの膜素材を PVDF とし、親水性ポリマーである PVP (ポリビニルピロリドン) を

ブレンドして TIPS 法により中空糸膜を製作した。TIPS 法は、市販の膜では一般的な NIPS 法に比べて高い強度が得られることが知られている。製作した中空糸膜の断面 SEM 画像を図 6 に示す。

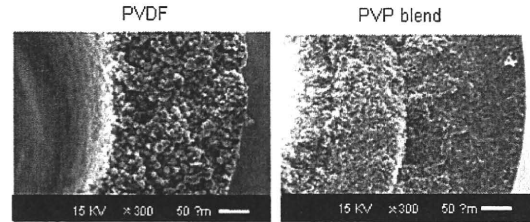


図6 製作した中空糸膜の断面SEM画像

凝固浴温度 0 °C で製作した PVDF 膜と PVP ブレンド膜の破断強度を図 7 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。PVP ブレンド膜の破断強度は PVDF 膜に近い値を示した。

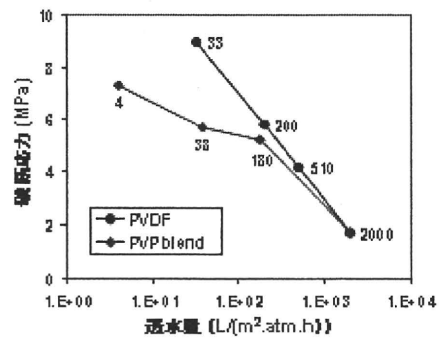


図7 PVDF膜及びPVPブレンド膜の破断応力に対するポリマー濃度の影響 (凝固浴温度: 0 °C)

ファウラントとして牛血清アルブミンを添加した試験水のろ過による相対透水率の変化を図 8 に示す。PVP ブレンド膜はろ過開始から 3 時間経過後でもろ過初期の 70 % 程度の値を示した。

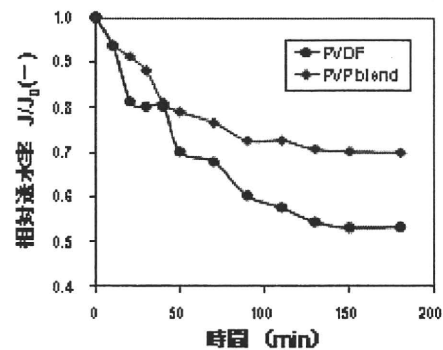


図8 PVDF膜及びPVPブレンド膜の相対透水率の変化(ファウラント: BSA)

1.4 中空糸膜の逆洗効果に関する研究

人工河川水のろ過による膜差圧の経時変化を図9に示す。ろ過流束が2.0 m³/日、3.0 m³/日と高い場合には、流束が低い場合（0.5 m³/日、1.0 m³/日）と比べて明らかな膜差圧上昇が見られた。また、ろ過流束が低い場合には逆洗流束の違いによる膜差圧上昇の変化は見られないものの、ろ過流束が高い場合には逆洗流束を変えることによって膜差圧の上昇に違いが生じたほか、必ずしも逆洗流束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。

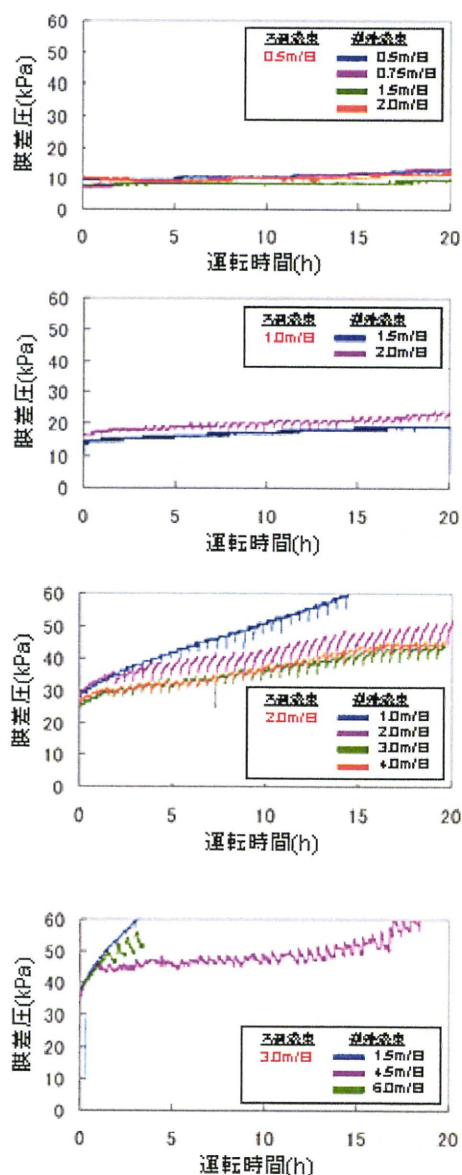


図9 膜差圧の経時変化

ろ過終了後の中空糸膜を4つに分割し、ファウリングの進行度合いを調べた。図10に、それぞれの中空糸におけるろ過抵抗値を示す。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、ろ過流束、逆洗流束にかかわらず、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。

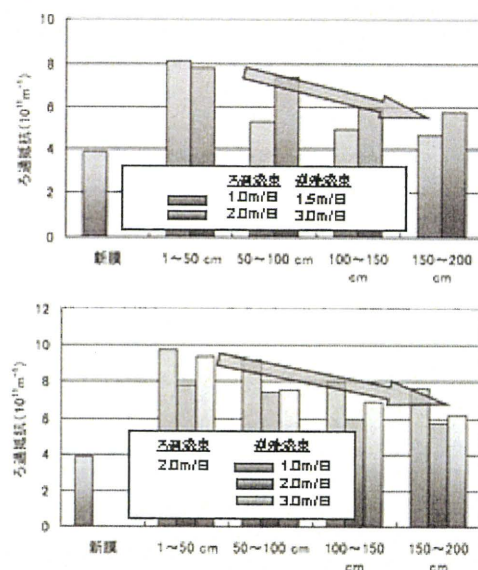


図10 中空糸膜の長さ方向におけるろ過抵抗値の分布

2. 膜ろ過施設の維持管理の高度化等

2.1 維持管理の実態調査

施設能力500 m³/日以上の中空糸膜ろ過浄水施設を導入している全国160の水道事業体に対してアンケート調査を行った。その結果、浄水の安全管理上重要な膜損傷試験は、図11に示すとおり、アンケート回答数の61%の施設で間接法のみを実施しており、直接

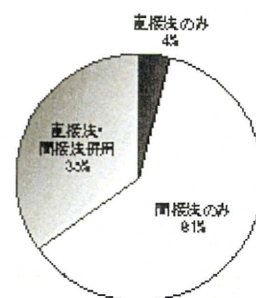


図11 膜損傷試験方法の内訳 (アンケート回答数77件)

法と間接法を併用している施設は 35 %、直接法のみが 4 %という状況であった。

また、薬品洗浄の実施頻度は図 12 に示すとおり年 1 回程度が最も多く、次いで 2 年に 1 回、半年に 1 回の順となった。このように、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、それに基づいた施設の設計や運転管理が行われているためと推察された。

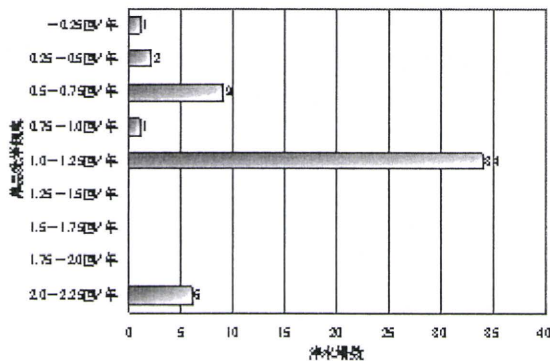


図12 薬品洗浄の頻度
(アンケート回答数53件)

2.2 膜損傷及び薬品洗浄に関する検討

1) 膜損傷の程度と損傷検出感度との関係

損傷を施した PVDF 膜のモジュールで濁度 5 度、500 度の試験水をろ過したときのろ過水濁度を図 13 及び図 14 に示す。

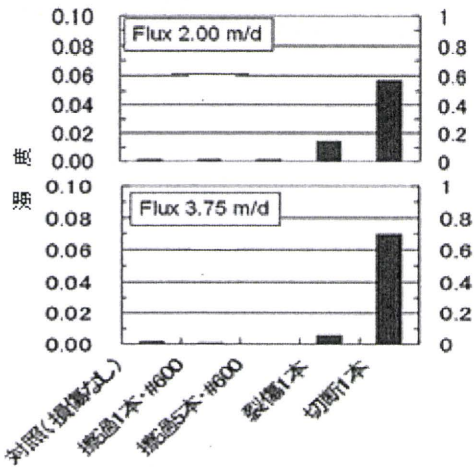


図13 PVDF膜(加圧ろ過)のろ過水濁度
(試験水濁度: 5 度)

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、裂傷、刺し傷、切断を施した場合には明らかな濁度上昇が見られた。

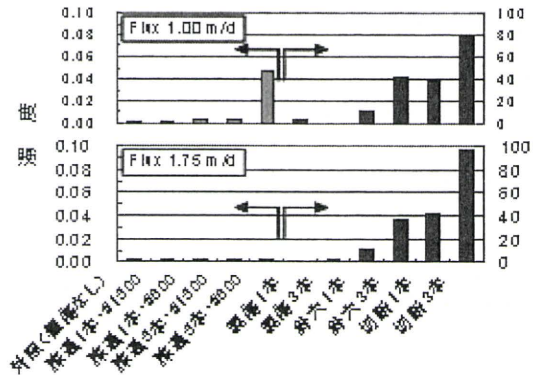


図14 PVDF膜(吸引ろ過)のろ過水濁度
(試験水濁度: 500 度)

次に、損傷を施した PVDF 膜及びセラミック膜のモジュールに対して行った圧力保持試験の判定結果を表 1 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 1 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	
	吸引ろ過	擦過 5本・#1500	3 kPa/5 min	
		擦過 5本・#600	3 kPa/5 min	
		裂傷 1本	測定不能	検出
		裂傷 3本	測定不能	検出
吸引ろ過	針穴 1本	32 secで圧力ゼロ		
	針穴 3本	11 secで圧力ゼロ		
吸引ろ過	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)

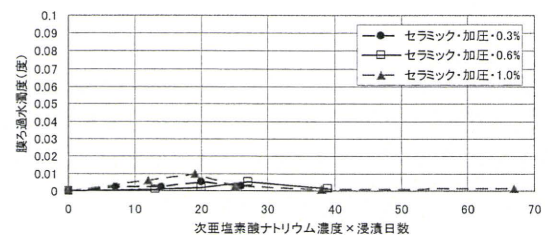
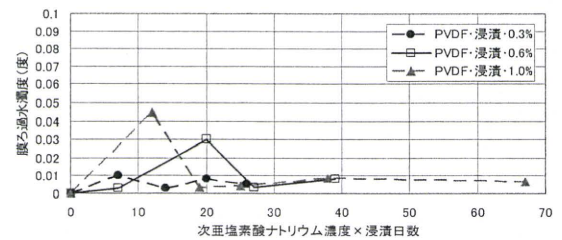


図 15 薬液浸漬後のろ過水濁度
(PVDF 膜・セラミック膜)

%, 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。

3. 浄水プロセスへの紫外線処理の適用

3.1 地表水以外の水への適用における紫外線処理設備維持管理マニュアルの作成

紫外線処理設備を導入済みの 13 施設に対しアンケート調査を実施し、そのうち 3 件に対して現地調査を実施した結果、次のことが分かった。

- 日常点検は 1 回/週から 1 回/日程度、1 人から 2 人で実施されており、漏れや異常な振動の有無等の目視点検、紫外線強度計等の計器の作動確認等を点検表に基づいて実施している。装置内点検清掃は年に 1~2 回実施している施設が多い。
- ランプ寿命は 1~2 年程度、ランプスリーブの寿命は 3~5 年程度を予定している施設が多い。
- 設計面での不具合事例として、ランプスリーブ内の結露による紫外線照射強度不足、装置内への異物混入による自動洗浄装置の動作不良が挙げられている。
- ランプスリーブへのスケール付着については現状では問題となっていない。ただし運用後間もない施設が多く、今後とも注意が必要である。

上述の維持管理状況調査結果や既存の文献を参考に、水道事業体の実務担当者が設備を適切に維持管理するための「地表水以外の水への適用における紫外線処理設備維持管理マニュアル」を作成した。本マニュアルの構成は次のとおりである。

1. 基本的事項
1.1 本書の目的
1.2 紫外線による不活化の特徴
1.3 紫外線とは
1.4 紫外線による不活化の機構
2. 紫外線照射装置
2.1 対策指針で必要とされる機器
2.2 対策指針で望ましいとされる機器
3. 地表水以外の水への適用における紫外線処理設備
3.1 紫外線照射量
3.2 適用水質
3.3 設計上の留意点
4. 維持管理
4.1 基本事項
4.2 日常管理
4.3 定期点検
4.4 異常時の対応
4.5 予備品
4.6 紫外線ランプの廃棄及び回収
4.7 安全管理

3.2 紫外線照射試験

表 2 に照射試験の条件を示す。調査対象とする副生成物は既往の研究等からトリハロメタン(以下、THM)、アルデヒド、臭素酸、亜硝酸態窒素とした。

表 2 紫外線照射試験条件

項目	条件
試験方法	循環照射式
紫外線ランプ	低圧、中圧
照射量	0mJ/cm ² 、1,000mJ/cm ² 、10,000mJ/cm ²
条件 1	残留塩素: 2mg/L、臭化物イオン: 1,000 μg/L、TOC: 10mg/L 以下、pH: 7.0
条件 2	残留塩素: 2mg/L、臭化物イオン: 1,000 μg/L、TOC: 0mg/L、pH: 7.0、硝酸態窒素: 10mg/L

図 16~図 19 に紫外線照射試験の結果を示す。なお、図中の対照 1 時間及び 5 時間は、紫外線を照射しない場合の試験結果である。

紫外線照射試験の結果から、対象水中の前駆物質濃度が今回の試験条件のように高い場合には、クリプトスポリジウム等対策で用いる照射量よりも非常に高い 1,000mJ/cm²、10,000mJ/cm² といった照射量で紫外線照射を行うと、臭素酸、亜硝酸態

窒素、アセトアルデヒド及びホルムアルデヒドが生成され、THM は分解されることが分かった。

臭素酸については、水道水質基準を超えていたが、今回の試験条件は、前駆物質である臭化物イオンの濃度が通常の水道原水の数倍～十倍程度と非常に高いことによるものと考えられる。

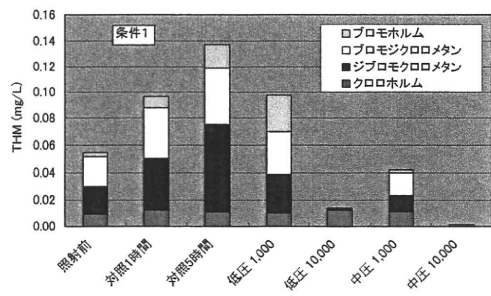


図 16 UV 照射による THM の挙動

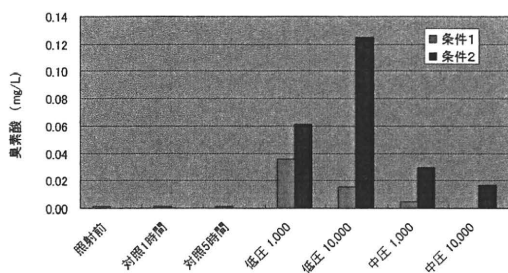


図 17 UV 照射による臭素酸の生成

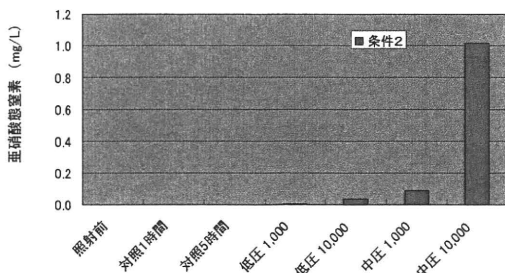


図 18 UV 照射による亜硝酸態窒素の生成

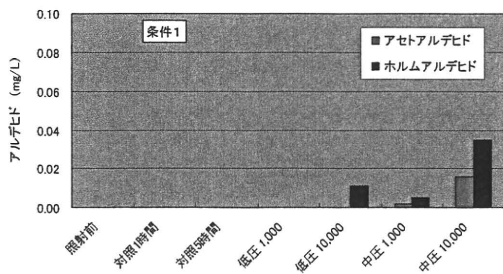


図 19 UV 照射によるアルデヒドの生成

また、THM、臭素酸及び塩素酸について表 3 のような条件で照射試験を行った。試験水は 2 条件とし、条件 1 は THM、臭素酸及び塩素酸の生成、条件 2 は臭素酸及び塩素酸の生成を確認するために設定した。

表 3 紫外線照射試験条件

項目	条件
試験方法	循環照射式
紫外線ランプ	低圧、中圧
照射量	0、50、100、200、500 mJ/cm ²
試験水	条件 1 残留塩素:1 mg/L 臭化物イオン:0.5 mg/L TOC:3 mg/L pH:7.0
	条件 2 残留塩素:1 mg/L 臭化物イオン:0.5 mg/L TOC:0 mg/L pH:7.0

図 20～図 23 に紫外線照射試験の結果を示す。なお、図中の対照とは、紫外線を照射せずに、低圧紫外線ランプの照射時間と同じ時間で装置内を循環させたときの結果である。

臭化物イオンと残留塩素の共存下で紫外線を照射すると臭素酸が生成される。臭素酸の生成量は、臭化物イオン濃度、残留塩素濃度、紫外線照射量、pH に依存する。本試験では、TOC 3 mg/L との共存下では臭素酸は生成しないという結果が得られた。浄水処理として実際に導入される紫外線照射装置（以下、実装置）における照射量の最大値は 30～40 mJ/cm²程度と考えられるが、本試験の結果から、実装置において臭素酸に係る水道水質基準を十分満足できる。

紫外線照射によって THM の生成が促進される。THM の生成が進み、残留塩素が消費された後は、THM は紫外線照射によって分解され、濃度が下がる。本試験では、照射量 50 mJ/cm² の場合、総 THM に係る水道水質基準 0.1 mg/L を超過していないが、非常に高い値であった。この理由として、紫外線照射前つまり塩素添加 30 分後の段階で既に総 THM が生じていること、紫外線透過率は 70%程度と紫外線照射に適さない条件であったことが挙げられる。

TOC と残留塩素が存在すると、塩素酸は紫外線照射によってごくわずかに増加するが、実装置における照射量では、次亜塩素

酸ナトリウムの品質管理が適切に行われていけば、問題となるレベルにはならない。

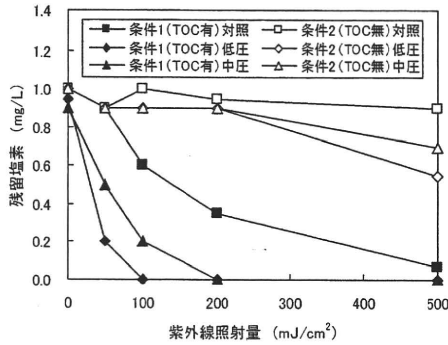


図 20 紫外線照射による臭素酸の生成

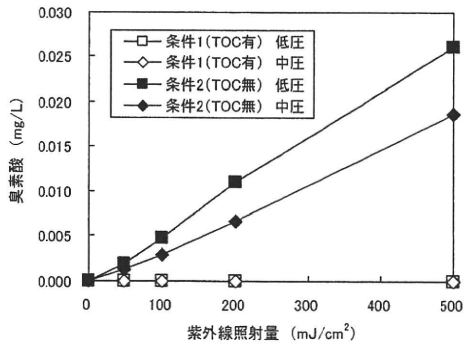


図 21 紫外線照射時の残留塩素の挙動

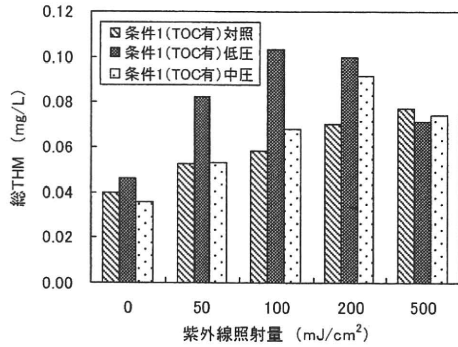


図 22 紫外線照射時の総 THM の挙動

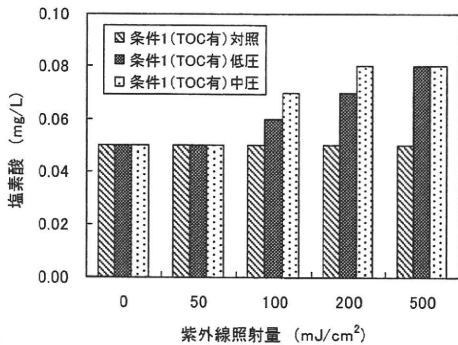


図 23 紫外線照射による塩素酸の生成
※定量下限値 (0.05 mg/L) 以下は 0.05 として図示

3.3 紫外線処理による地表水への適用に関する研究

1) 紫外線処理の適用位置

米国環境保護庁の「紫外線消毒ガイダンスマニュアル」では、ろ過を行っている水道システムにおける紫外線処理の一般的な適用位置として、個別ろ過水の配管部分(浄水池の上流側)、集合ろ過水の下流側(浄水池の上流側)、浄水池の下流側の3箇所を挙げている。それぞれの適用位置の特徴を表4に示す。

表 4 紫外線処理の適用位置と特徴

設置場所	特徴
個別ろ過水の配管部分(浄水池の上流側)	<p>長所</p> <ul style="list-style-type: none"> 建物の新設が不要であり、建設費が低減することとなる。 追加の損失水頭は紫外線反応槽によるものだけであり水理学的な影響は少ない。 <p>短所</p> <ul style="list-style-type: none"> ろ過池ギャラリーの多くは、紫外線反応槽等を設置するための十分なスペースを有していない。また環境条件(例えば、湿気)が適切ではない場合がある。 浄水処理施設の操作が複雑となり操作上の柔軟性を制限する。 ろ過池の数が紫外線反応槽の数を支配する。
集合ろ過水の下流側(浄水池の上流側)	<p>長所</p> <ul style="list-style-type: none"> 紫外線反応槽の操作は、個別ろ過の操作からほとんど独立しており、設計及び操作に柔軟性がある。 膜ろ過、加圧ろ過又は中間増圧ポンプが用いられていなければ、一般に、サージ及び圧力変動の配慮はいらない。 <p>短所</p> <ul style="list-style-type: none"> 追加の建物と空間が必要となる。 ほかの方法より、管及び管継手による損失水頭が大きくなり、中間増圧ポンプを必要とすることがある。
浄水池の下流側	<p>長所</p> <ul style="list-style-type: none"> ろ過池と浄水池の間で紫外線装置を設置する空間又は水頭が十分でない場合であっても、紫外線反応槽の設置が可能である。 <p>短所</p> <ul style="list-style-type: none"> 流速は需要の変化により密接に関連していることから、流速の変動が大きい。 高圧送水ポンプの近傍に設置することとなり、ウォーターハンマーの懸念がある。 ランプ破損が生じた場合、破損による水銀及び石英を回収する能力に欠ける(配水システムの構成に依存する)。

2) 紫外線処理前の濁度条件

「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」では、ろ過池等の出口濁度を0.1度以下に維持することとしているが、地表

水を原水とする場合における紫外線処理の適用に当たっては、紫外線処理の効果が支障がない範囲で濁度要件を定めることが考えられる。そこで、海外における「濁度に係る水質基準」及び地表水を対象とした紫外線処理が既に導入されている国における「浄水処理に係る濁度要件」について調査し、整理を行った（表5及び表6）。

表5 濁度に係る水質基準

	基準値等
WHO 水道水質ガイドライン	5NTU 未満であれば、通常は消費者に受け入れられる。効果的な消毒のためには、濁度の中央値は0.1NTU 未満であるべき。
EU 飲料水水質指令	消費者に受け入れられ、異常な変化がないこと。 注：地表水を処理する場合にあっては、前処理において1.0NTU を超えない値を目指さなければならない。
日本	水道水質基準：2度以下。 水質管理目標設定項目：1度以下。

表6 浄水処理に係る濁度要件

	濁度要件
米国環境保護庁 地表水処理規則 (SWTR)	在来型ろ過又は直接ろ過を用いるシステムは、如何なるときも濁度が1NTU を超えてはならず、また、少なくともサンプルの95%は0.3NTU 以下でなければならない。在来型ろ過又は直接ろ過以外のろ過を用いるシステムは、如何なるときも濁度は5NTU 以下でなければならない。
ドイツガス水道科学技術協会 実施規則 w290 水道水の消毒	地表水を使用する場合、微粒子分離ステージの流出水における濁度値の範囲は0.1~0.2FNU を目標とし、可能であればその値より低く抑えるべき。 湧水及び地下水を用いる場合、濁度の範囲が明らかに1.0 FNU を下回っているなら、濁質の処理、微粒子の除去は、一般には必要としない。
日本 クリプト等対策指針	ろ過池等の出口の濁度を0.1度以下に維持。

※1度≒0.7NTU、NTU≒FNU

3) 紫外線照射における濁質成分の影響

紫外線処理を、膜ろ過洗浄の返送水・排水、又は地表水を原水として急速ろ過を採用している施設等へ適用する場合には水に含まれる様々な共存物質の影響が不可避である。

本研究では、大腸菌ファージMS2をモデルウイルスとして用い、紫外線処理の効果

に及ぼす濁質の影響を調べ、そのモデル化を試みた。ここでは、一例として、濁質としてカオリンを用いた回分式紫外線照射における実験結果を図24に示す。

また、浄水場逆洗水に対してMS2ファージを添加して紫外線照射を行い、照度比（＝生残率と試料吸光度から計算される紫外線照度÷紫外線照度の実測値）を求めた結果を図25に示す。なお、図中のプロットが浄水場逆洗水において得られた不活化速度から求められた結果であり、図中の破線がカオリンを用いた結果の例である。

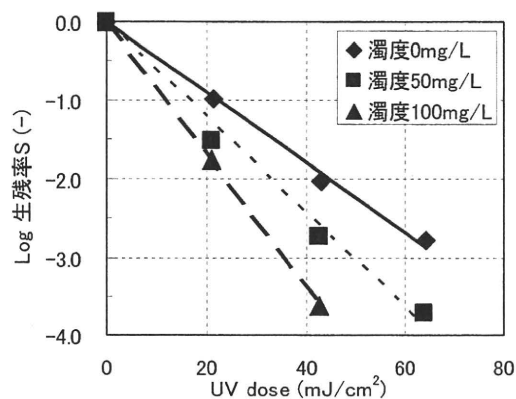


図24 濁度を含む試料に対する紫外線照射の結果の一例

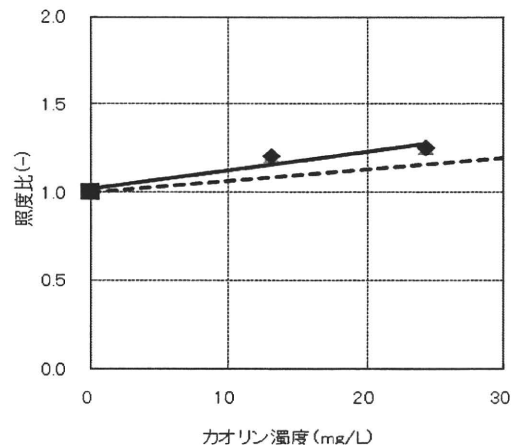


図25 浄水場逆洗水に対する紫外線消毒の結果

4) 様々な水に対する紫外線照射実験

本研究で用いた試料水の濁度は表7のとおりである。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業用水（工水）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7 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

従属栄養細菌の不活化実験結果を図26～29に示す。すべての試料で15mJ/cm²程度までは一次反動的に不活化した。その傾きは試料ごとに異なり、例えば草津川①は11log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、11log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。

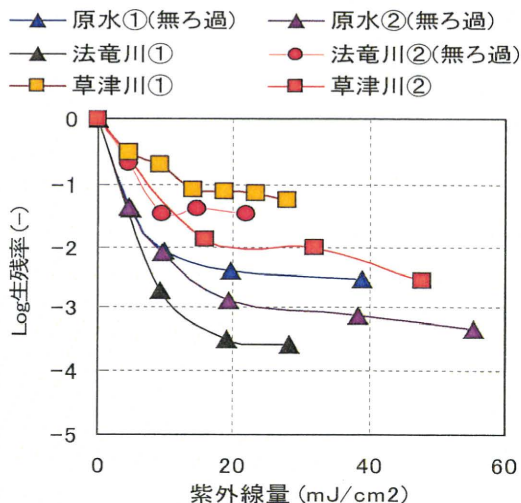


図26 環境水(無ろ過)における紫外線照射の効果

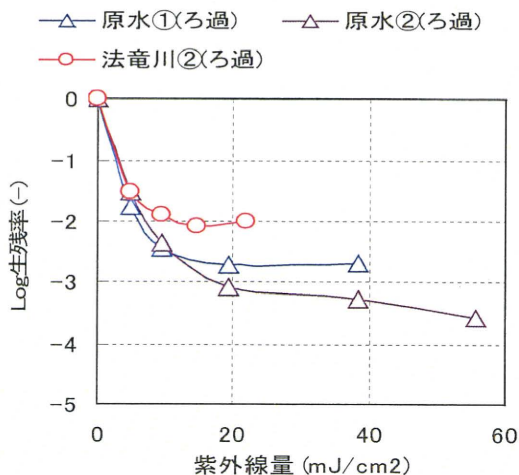


図27 環境水(ろ過)における紫外線照射の効果

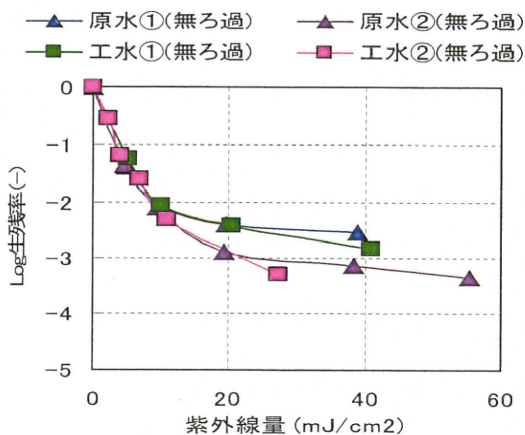


図28 浄水場水(無ろ過)における紫外線照射の効果

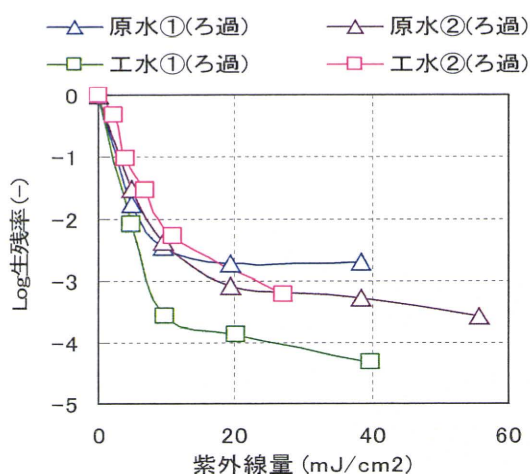


図 29 浄水場水(ろ過)における紫外線照射の効果

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 30 に示す。生残菌は一次反応的に減少した。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。

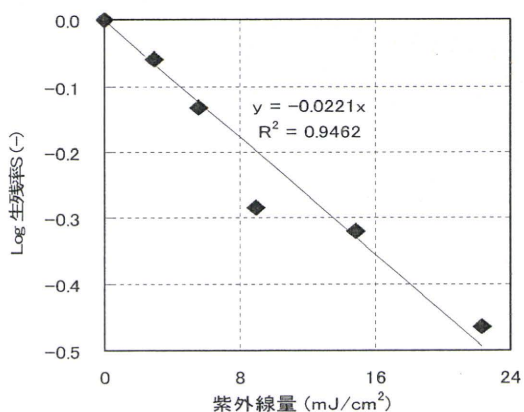


図 30 紫外線照射生残菌の紫外線耐性

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。

様々な水に対する紫外線照射実験結果を整理すると、①細孔径 5μm 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 15mJ/cm²程度までは一次反応的に不活化された、③15mJ/cm²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、紫外線照射で生残し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。

3.4 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) UV 照射によるフミン溶液の蛍光相対強度変化

対象水として地下水、河川水、湖沼水、フミン質溶液を用いた実験結果、いずれの場合も紫外光照射によって蛍光強度には変化が見られなかった。また、水道水においては蛍光強度が増加する傾向が見られたが、その反応は一定ではなかった。続いて二酸化チタン光触媒粉末を共存させた場合、蛍光強度の変化が観察され、共存濃度が高くなれば、変化量も増えていた。また粒径 5 μm の二酸化チタン粉末を用いた場合、最も高い効果を示した。(図 31 参照)

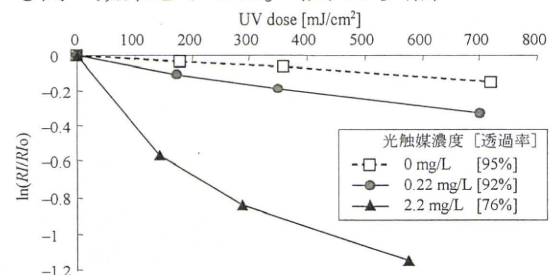


図 31 UV 照射によるフミン溶液の蛍光相対強度変化 (光触媒 (粒径 5 μm) 共存下)

2) 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 32 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。

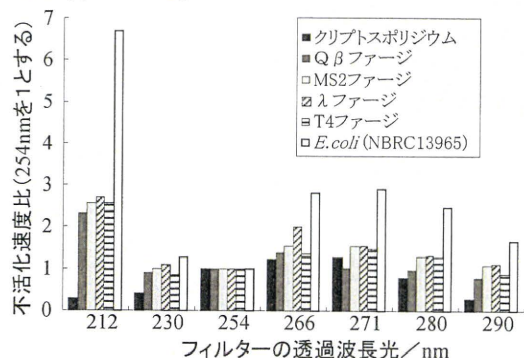


図 32 *Cryptosporidium parvum*、MS2、Q β 、 λ 、T4、及び大腸菌(NBRC 13965)の各バンドパスフィルタ透過光における相対不活化率分布 (*C. parvum* の値のみ USEPA ガイドライン参照)

3) 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 32、図 33 に示す。図 33 は、図 32 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。

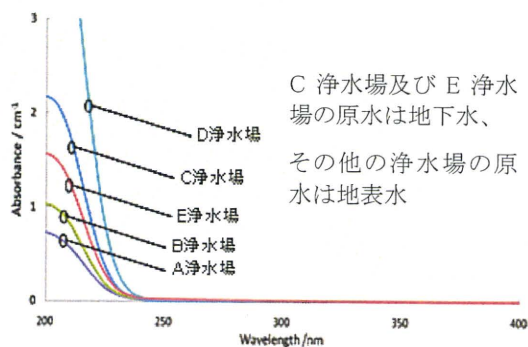


図 3 浄水場浄水の吸光スペクトル (2009 年 11 月採水分)

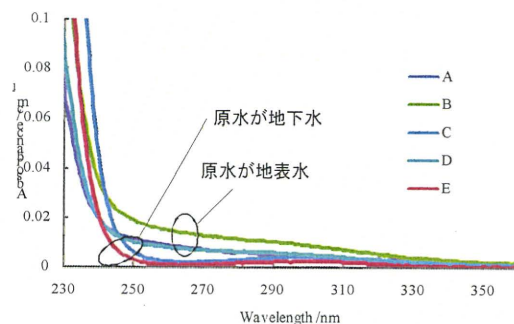


図 33 浄水場浄水の吸光スペクトル (254 nm 付近) (2009 年 11 月採水分)

4) 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。3) 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 34 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 34 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。

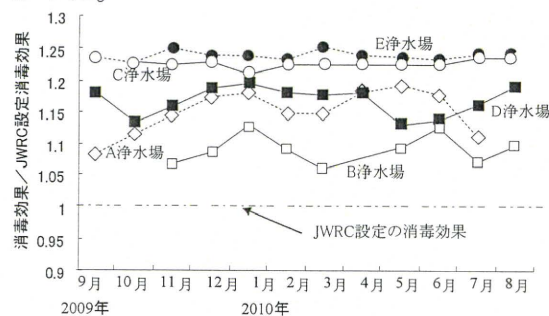


図 34 各浄水の消毒効果の推定値 (低圧) (JWRC 技術審査基準との比較)

5) 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 $\infty \text{ cm}^{-1}$ (=透過率 0%)、240 nm 以上の吸光度は 0.022 cm^{-1} (=透過率 95%) を仮定している。3) 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 35 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。

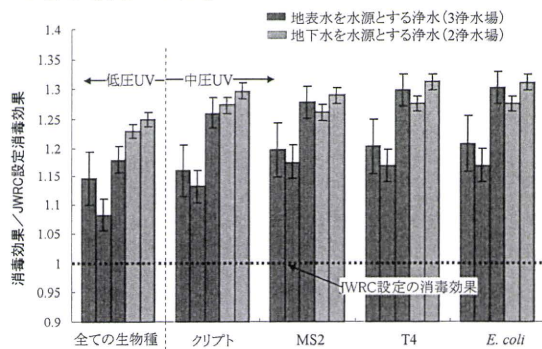


図 35 各浄水の消毒効果の推定値 (中圧) (JWRC 技術審査基準との比較)

6) 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 10^6 CFU/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 6.2 mJ/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 8 を用いる。

表 8 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 36、併用処理の結果を図 37 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。

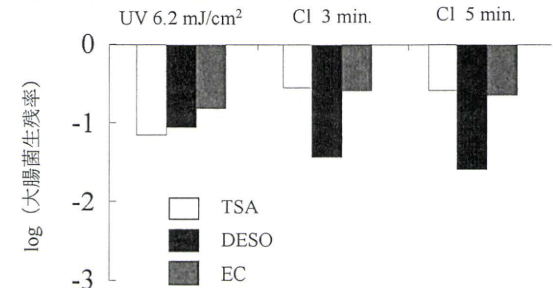


図 36 培地ごとの大腸菌生残率 (単独処理)

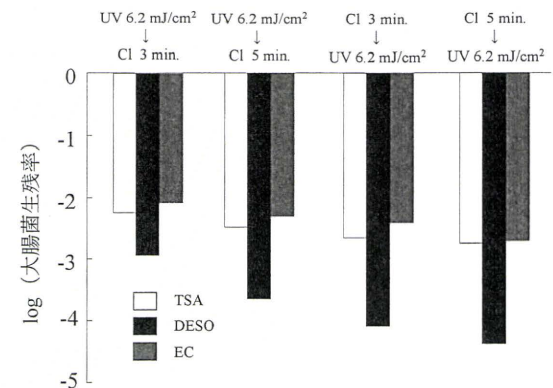


図 37 培地ごとの大腸菌生残率 (併用処理)

単独処理の和と併用処理の不活化率の比較を図 38 に示す。(図 38 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。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。