

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

地表水を対象とした浄水処理の濁度管理技術を補完する紫外線処理の適用に関する研究

研究代表者 大垣 眞一郎 公益財団法人水道技術研究センター理事長

研究要旨

我が国の水道水源の多くは地表水であるが、耐塩素性病原微生物の汚染が懸念されている。厚生労働省は、クリプトスポリジウム等対策指針を策定し、その対策を求めているが、特に小規模水道においては、未対応の施設が残っている。また、クリプトスポリジウム等対策の目標であるろ過水濁度 0.1 度以下を常時維持することに困難を感じている水道事業者も見受けられ、近年、急激な濁度上昇等の増加と相俟って懸念が増している。一方、これまで国内で地表水を対象とした紫外線処理の導入例はなく、関連する研究も少ない。

このような背景から、本研究では、濁度管理を補完する技術としての地表水を対象とした紫外線処理の適用に関し、以下の具体的な検討課題を設定して取り組んでいる。

- (1) 濁度管理等における課題の抽出
- (2) 原水条件及び処理効果の検証
- (3) 紫外線の照射手法及び設計諸元の検討
- (4) 維持管理上の留意事項の検討

なお、本研究の実施予定期間は平成 26～28 年度であり、本年度（平成 27 年度）は 3 か年計画の 2 年目である。研究体制は大垣眞一郎（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職員を研究分担者とするとともに、水道事業者・民間企業の技術者を研究協力者としている。

平成 27 年度は、濁度管理等における課題の抽出のための調査を継続し、また異なるアプローチ方法で、濁質の存在が、紫外線処理効果に与える影響を評価した。平成 27 年度の研究結果の概要は次のとおりである。

(1) 濁度管理等における課題の抽出

地表水の浄水処理においては、小規模事業者において、ろ過池ごとの濁度管理が予算や人員確保の面等から困難であることがあらためて浮き彫りになった。紫外線処理装置は個々の概ね期待どおりの効果をあげていた。また欧米 5 か国について文献調査を行い、紫外線処理の適用条件として地表水と地表水以外との区分は見られず、濁度の規定は我が国よりも穏やかであること等が明らかとなった。

(2) 原水条件及び処理効果の検証

濁質を含む水における紫外線照射の効果を算定する場合には、254nm 吸光度を用いて平均紫外線量を算定することで安全側の対応が可能である。紫外線耐性の異なる 2 種の微生物を同時に流水式紫外線装置に流した場合、その生物の紫外線耐性に応じて、異なる換算紫外線量が算出されることを確認した。流水式紫外線装置の性能評価時に、生物線量計としての単一微生物の不活化実験の結果だけでは病原微生物に対する効果を厳密には予測できないおそれがあることを示している。

(3) 紫外線の照射手法及び設計諸元の検討

平成 27 年度は、地表水の濁度変動に対応する紫外線照射量の検討を行うために、濁質による紫外線の吸収・散乱を評価する手法の研究を継続した。具体的には、透過光のみによる測定方式と透過光と透過+90 度散乱光による測定方式とによる二種類の異なる測定法で測定した濁度の比によって、紫外線処理の効果への影響を評価できる可能性があることを示した。また校正用標準液の種類による測定値への影響を測定したところ、カオリンを基準とすると、特にホルマジン溶液を標準液とした場合、測定値は透過光方式では 1.8 倍、積分球方式では 2 倍以上の値となった。

さらに平成 27 年度は、地表水への紫外線処理導入の適用を検討するため、標準粒子を添加し濁度等の水質を調整した試料を用いて微生物不活化実験を行った。粒子の性状（素材、色、大きさ）が不活化効率に及ぼす影響を調べたところ、同一粒径・同一粒子濃度で粒子の種類を変えた場合、カーボンブラック粒子では不活化率が低下しテーリングが発生したが、白のポリスチレン粒子では不活化率が向上し、紫外線の反射・散乱が生じた可能性が示唆された。また別の実験から粒子と微生物の相対的なサイズが影響する可能性が示唆された。これらの実験結果から、現行の地表水以外の紫外線処理適用要件を満足すれば、濁質による処理効率の有意な低下は生じない可能性が大きいことが示唆された。

(4) 維持管理上の留意事項の検討

留意事項は平成 28 年度にかけて 2 年度にわたり検討を行い、取りまとめる。今年度は整理に着手したところである。

研究分担者氏名

安藤 茂	水道技術研究センター	専務理事
佐々木 史朗	水道技術研究センター	常務理事
富井 正雄	水道技術研究センター	浄水技術部長
島崎 大	国立保健医療科学院	上席主任研究官
神子 直之	立命館大学	教授
大瀧 雅寛	お茶の水女子大学	教授
小熊 久美子	東京大学	准教授

## A. 研究目的

我が国の水道水源の多くは地表水であり、耐塩素性病原微生物の汚染が懸念されている。厚生労働省は、クリプトスポリジウム等対策指針を策定し、その対策を求めているが、特に小規模な水道において、対策のとられていない水道施設が残っているという指摘がある。また、クリプトスポリジウム等対策の目標であるろ過水濁度0.1度以下を常時維持することに困難を感じている水道事業者も見受けられ、近年の異常気象等に伴う急激な濁度上昇等の増加と相俟って懸念が増している。一方、これまで国内で地表水を対象とした紫外線処理の導入例はなく、関連する研究も少ないのが現状である。

このような背景から、本研究では、濁度管理を補完する技術としての地表水を対象とした紫外線処理の適用に関し、濁度管理等における課題を明確化し、地表水の原水水質特性が処理に与える影響を評価したうえで、紫外線照射方法と処理装置の設計諸元、及び維持管理上の留意事項について具体的な提案を行うことを目指している。

なお、本研究は、平成26年度から平成28年度までの3か年計画で実施することとしている。

## B. 研究方法

平成27年度は、1.濁度管理等における課題の抽出、2.原水条件及び処理効果の検証、3.照射手法及び設計諸元の検討、及び4.維持管理上の留意事項の検討の4課題に取り組んだ。

濁度管理等における課題の抽出では、平成26年度に引続き、地表水の浄水処理における濁度管理等の実態把握及び課題をヒアリング等により抽出した。地表水以外を対象とした紫外線処理設備の維持管理の実態についても、昨年同様、地表水を対象とした場合の維持管理上の留意事項の提案に反映するためにヒアリング等を実施した。また、海外における紫外線処理の適用条件、ろ過水の濁度管理水準について、海外情報を収集し、我が国と比較した。

原水条件及び処理効果の検証では、1)国

内における地表水の濁度成分等の分析及び2)地表水の水質特性が紫外線処理の効果に及ぼす影響評価についての検討及び検証を継続したが、1)の国内における地表水の濁度成分等の分析は、次項の照射手法及び設計諸元の検討の中で一括して実施した。

照射手法及び設計諸元の検討では、濁度として計測されている水中の懸濁物質が紫外線照射時に紫外光を散乱及び吸収する影響を評価するための簡易指標に関する評価試験を継続した。また、平成27年度は、模擬濁質粒子を用いた濁質評価実験を行い、紫外線処理設備における照射手法及び設計諸元の検討を行った。

さらに、地表水を対象とした紫外線処理設備の運転・維持管理における留意事項の検討を開始した。

次に、具体的な個別の研究方法を示す。

### 1. 濁度管理等における課題の抽出

地表水を対象とした濁度管理等の実態調査、及び地表水以外を対象とした紫外線処理設備の維持管理の実態把握及び課題の抽出を今年度も継続した。両者の調査先は、今年度も水道統計等を基に、地域、施設規模、水源、水質、処理方法等を判断基準として選択した。どちらの調査も、まず調査先へ調査票（添付資料）を送り、事前に調査票に記入・返却後、ヒアリング調査と調査対象の一部施設について現地調査を行った。

また、欧米5カ国における文献を収集し、紫外線照射量、原水種別、紫外線の適用可能水質要件を抽出した。さらに、紫外線処理全般についての海外情報を得るため、有用と思われる海外文献を入手した。

### 2. 原水条件及び処理効果の検証

#### 1) 濁質存在下での紫外線照射の効果

下水処理場の最初沈澱池出口水を孔径8 $\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターでろ過し、さらに孔径5 $\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターでろ過することで、濁度を調整した3種類の試料を得た。それぞれの濁度および254nm吸光度を測定した後に大腸菌ファージMS2を添加し、試料を満たし石英ガラス板で封をした水深1.7cmのペトリ皿の上部よ

り 254nm の紫外線を照射し、照射した紫外線量と MS2 生残率の関係を調べた。

また、下水処理場の最初沈澱池出口水を孔径 5 $\mu\text{m}$  のメンブレンフィルターでろ過して濁度を減じて大腸菌を含む試料を得た。ろ過前後の濁度および 254nm 吸光度を測定した後に、試料を満たし石英ガラス板で封をした水深 1.7cm のペトリ皿の上部より 254nm の紫外線を照射し、照射した紫外線量と大腸菌生残率の関係を調べた。

## 2) 流水式紫外線照射槽の性能評価

塩化ビニルで覆って出力を低下させた低圧紫外線ランプを装備した一灯式紫外線照射槽(内径12cm、照射容積400mL)を用い、大腸菌ファージMS2と $\phi$ X174を同時に流下させ、理論的滞留時間と両ファージ生残率の関係を調べた。

## 3. 照射手法及び設計諸元の検討

### 3.1 濁度変動に対応する紫外線照射線量の検討

#### 1) 濁度比による紫外線の散乱評価

紫外線処理に影響を与える因子として濁質の影響が重要視されるが、光透過率の低下とともに濁質による紫外光の散乱影響もある。濁質による紫外線の吸収・散乱を評価する手法の検討を行った。平成 26 年度は濁度比として二種類の異なる測定法で測定した濁度の比によって紫外線処理の効果への影響を評価できる可能性を示した。

平成 27 年度は、透過+90°散乱光方式で測定した濁度を透過光方式で測定した濁度で除した値を濁度比とする方がよいことがわかった。東京近郊の 2 か所の浄水場(A 浄水場および B 浄水場)から原水を月に一度の頻度で採水し、透過光方式及び透過+90°散乱光方式にて濁度を測定し、濁度比を求めた。

#### 2) 濁度測定法、校正用標準液の違いによる濁度値への影響

濁度計を校正する 3 種類の標準液(カオリン懸濁液、ポリスチレン懸濁液、ホルマジン懸濁液)を 3 種類の濁度測定方法(透過光式、透過+90°散乱光方式、積分旧方式)について、～ の濁度標準液で

校正した場合の濁度値の相対値を算出した。カオリン標準液にて校正した装置にて、ポリスチレン標準液、及びホルマジン標準液の濁度を測定した。用いた各標準液は 0.5、1、5、10 度とした。

### 3.2 紫外線処理設備の照射手法及び設計諸元の検討

紫外線処理の適用性という観点から原水、沈澱水、ろ過水の水質変動について整理された知見が我が国では乏しい。このため、平成 26 年度は地表水由来の浄水場試料の特性の把握と変動幅の整理を行った。その結果、高濁度時には粒径の大きい粒子が増加することを確認し、粒径変化が紫外線に及ぼす影響について検討する必要が示された。

平成 27 年度は、標準粒子を用いて濁度と紫外線透過率を調整した試料を微生物不活化実験に供し、標準粒子の特性(素材、色、サイズ)が不活化特性に及ぼす影響を実験的に調査した。実験に使用した粒子の種類と濃度を表 1 に示す。

表 1 採用した標準粒子の種類と濃度表

素材	色	略称	公称粒径( $\mu\text{m}$ )	粒子濃度(個/mL)		
				$10^{10}$	$10^9$	$10^8$
カーボンブラック(親水性)	黒	CB	0.12 - 0.21	○	○	-
	白	W0.2	0.2	○	○	-
ポリスチレン	黒	B0.2		△	○	-
	白	W1.0	1.0	-	○	○
	黒	B1.0		-	△	△

(○ : 微生物試験実施、  
△ : 水質分析実施、微生物試験は実施せず、  
- : 試験せず)

滅菌済みリン酸緩衝液(1/15 mol/L、pH 7.2)に、いずれかの標準粒子を表 1 にしたがって調整した後、微生物(大腸菌 K12 IFO3301 又は大腸菌ファージ MS2)を添加して試験水とした。

試験水 35mL をボルテックスで 2 分間攪

拌し粒子や微生物を均質化したのち、内径 85mm のシャーレに入れて攪拌子で混合しながら回分式で照射した。照射は独立して 3 回実施した。光源として低圧水銀ランプを用い、試料表面の紫外線 (254nm) 線量率を紫外線強度計で 6 回測定し、その平均値を当該試験日の表面線量率とした。

表面線量率に、試験水の吸光による深さ方向の減衰、試料表面での反射、シャーレ表面の線量率分布の各ファクターを考慮して試料内平均線量率を算出した。表面線量率と吸光度は、試験日ごとの測定値を使用した。試料内平均線量率に紫外線照射時間 を乗じ、試料内に到達した平均紫外線量を算出した。

試験水の 254nm 吸光度 ( $A_{254}[\text{cm}^{-1}]$ ) は分光光度計で測定し、紫外線透過率に換算した。濁度と色度は積分球式濁度色度計で測定した。大腸菌 IFO3301 はクロモカルト寒天培地、大腸菌ファージ MS2 は大腸菌 K12A/λ(F+) を宿主とした重層寒天培地で測定し、コロニー形成能 (colony forming unit/mL、以下 CFU/mL) またはプラーク形成能 (plaque forming unit/mL、以下 PFU/mL) により生残率を算出した。なお、微生物の初期濃度は大腸菌で  $10^6$  CFU/mL、MS2 で  $10^7$  PFU/mL のオーダーとなるよう調整した。

(倫理面への配慮)

本研究においては、研究対象者の人権擁護を必要とする調査又は人権への不利益を生ずる調査は行わず、また実験動物を用いる実験を実施しないことから、倫理面への問題は生じない。

## C. 研究結果

### 1. 濁度管理等における課題の抽出

平成 26 年度の結果をふまえ、今年度は、近畿、四国、及び関東地方の中・小規模事業体を主な調査先とした。平成 27 年度に調査した施設数を、表 2 と表 3 に示す。なお、水源水質や施設の特性が異なる系列は、それぞれ独立した浄水施設として扱い、また同一事業体内で上水道事業と水道用水供給事業を行っている場合もそれぞれ別

個の事業体として扱った。さらに、伏流水のろ過施設と紫外線処理設備を両方もつ、いわゆるマルチバリア処理を行っている施設は平成 27 年度調査では 1 か所だった。

表 2 濁度管理の調査先の地域と施設規模

地域	事業体数	施設数	施設能力*		
			大	中	小
東北	1	1		1	
関東	3	10	7	2	1
中部	2	2	1	1	
近畿	2	14		1	13
四国	2	10		3	7
合計	10	37	8	8	21

\* 施設の規模 大:50,000m<sup>3</sup>/d 以上、中:5000~50,000m<sup>3</sup>/d、小:5,000m<sup>3</sup>/d 未満とした

表 3 紫外線処理設備の調査先の地域と施設規模

地域	事業体数	施設数	施設能力*		
			大	中	小
東北	1	15			15
関東	3	3	1	2	
中部	1	1	1		
近畿	2	6		1	5
四国	2	7		1	6
合計	9	32	2	4	26

\* 施設の規模 大:50,000m<sup>3</sup>/d 以上、中:5000~50,000m<sup>3</sup>/d、小:5,000m<sup>3</sup>/d 未満とした

### 1.1 地表水の浄水処理における濁度管理等の実態把握及び課題の抽出

平成27年度は、急速ろ過方式(凝集沈澱+急速ろ過)の19浄水場(9事業体)、緩速ろ過の18浄水場(5事業体)を調査した(添付資料)。平成26年度と平成27年度の調査で明らかとなった点を示す。

#### 1) 急速ろ過においてろ過水濁度が上昇しやすい原因

調査対象となった急速ろ過池方式の浄水施設は全 35 施設 (17 事業体) で、ろ過水濁度が上昇しやすい原因として最も多かった回答は、『原水高濁度時』だった。つぎに多かったのが、『ろ過池洗浄後のろ過再開時』と『ピコプランクトンの発生』が同数だった。原水濁度が急上昇する際に、凝集の失敗あるいは薬品注入管理のミスを生じやすいという趣旨の意見もあった。浄水場規模によらず、およそ半数の施設で高濁度原水の発生がみられ、また中・大規模浄水場ではピコプランクトンが発生し

ていたが、一方でろ過水濁度が『上昇しない』という回答も7施設(6事業体)であった。

## 2) ろ過水濁度の監視

調査対象35施設のうち34施設では、全ろ過池の集合水(浄水池出口に至る過程での測定を含む)を測定対象とする場合も含めて、ろ過水濁度の連続監視を行っていた。1施設のみ『週に1回の点検の際に測定』とのことであった。また、ろ過池ごとに濁度計を設置している浄水場は中・大規模浄水場に限られた。

全ろ過池への濁度計整備については、サンプリング配管の切り替えによりろ過池ごとの濁度監視を行っている施設と合わせると、今回の調査においては約4割の浄水施設でろ過池ごとの濁度監視が可能であるという結果となった。一方、ろ過池ごとの濁度監視が不可能な21施設(調査対象の6割)のうち、7施設で系列ごとの監視が可能であったが、13施設の監視点は全ろ過池の集合水(浄水池出口に至る過程での測定を含む)のみであった。

ろ過池ごとの濁度監視を実施しない理由としては、人員不足が課題となっている状況下で維持管理の負担(サンプリング配管の洗浄、校正、クロスチェック)が大きい濁度計の台数を増やすことは考えられない、あるいはろ過水濁度がほとんど上昇しない、という回答があった。また回答にはなかったものの、整備費用の負担が大きいことも、ろ過池ごとの濁度計整備が進みにくい背景要因であると推察される。

## 3) ろ過水濁度の低減化方法

実施済みの方法として最も多かったのは洗浄スローダウン(19施設;調査対象の54%)であり、次いで、捨水(16施設;調査対象の46%)、ろ過スロースタート(15施設;調査対象の43%)であった。捨水時間は事業体やその浄水施設によって様々であり、5分から40分程度までの時間に設定されていた。

二段凝集を導入している浄水施設は、大規模浄水場の5施設(調査対象の14%)のみだった。その中には、一部浄水場で導入した洗浄スローダウンとろ過スロースタートの効果は低いと判断し、効果が高いことを確認した二段凝集を導入していくという

ところもあった。

ろ過水濁度の低減化方法を実施しておらず整備予定もないと回答した8施設について、実施しない理由は、構造上、改造ができない、現状のろ過水濁度が低いため必要がない、常時低濁度であり、紫外線処理施設が導入されているため必要がない、という回答だった。一部の施設では、設計時の前提条件よりも高水準の管理が要求されているという現状がうかがえる。

## 4) ろ過水濁度の管理目標値と目標値超過時の対応

ろ過水濁度の管理目標値として最も多かったのは、13浄水施設(6事業体)の0.05度であり、次いで、10浄水施設(7事業体)の対策指針で求められる0.1度であった。一方で、対策指針値の1/10である0.01度に設定する浄水施設もあった。なお、複数の浄水場を管理する事業体においては、管理目標値を統一している場合が多い。

水源が表流水以外(伏流水、浅井戸)の場合、ろ過水濁度の管理目標値を0.1度に設定する浄水場が多く、特に定めていない施設もあった。

ろ過水濁度が管理目標値を超過した場合の対応で最も多かったのは、『ろ過池洗浄』の20浄水施設(11事業体)、次いで、『ろ過速度の調整』の12浄水施設(5事業体)であった。

『処理強化等』と回答した11施設(5事業体)について、具体的には次の回答があった。

- 凝集剤による凝集強化(凝集剤の注入率見直し)
- 他水源による希釈
- 原因物質の特定と薬品注入

また、施設の規模別にみると以下の特徴があった。

- 浄水施設規模によらずおよそ半数の施設でろ過池洗浄を実施していた。
- ろ過速度の調整及びろ過水排水を実施している施設は中・大規模浄水施設のみであった。

## 5) 緩速ろ過における濁度管理

調査対象となった緩速ろ過池方式の浄水施設は全26施設(8事業体)である。緩速ろ過の場合、十分に養生された後のろ過水濁度は安定するが、ろ過水濁度が上昇する

場合は、ろ過速度の低下、あるいは取水停止が講じられている。

ろ過池ごとに濁度計を設置し、ろ過水濁度を連続監視している浄水場は、大規模事業体のみであった。その事業体では、緩速ろ過水には塩素が含まれておらず濁度計内部が汚れやすいため、自動洗浄設備も濁度計ごとに設けている。また、サンプリング配管は人手による洗浄をしており、その作業が負担になっているとのことだった。その他の事業体はろ過池ごとにろ過水濁度を監視していない。主な理由として、濁度計の設置やその管理が財政的に厳しい、廃止予定の浄水場である、ということが挙げられた。

## 1.2 地表水以外を対象とした紫外線処理設備の維持管理等の実態把握及び課題の抽出

平成27年度は、9事業体32施設について調査を行い、2年間で合計16事業体、48施設について調査した。次項で紫外線処理の実情及び課題を列挙するが、全体としてみれば、初期コストが比較的安価であり、中には、故障・トラブルが予想外に少ないという意見も見受けられ、概ね問題なく稼働していた。

### 1) 結露

幾つかの施設で結露が課題として挙げられた。比較的軽微なものから、床が水浸しとなるほどのケースまで状況は様々である。機種によってはスリーブ内に乾燥剤を入れて対策としていた。解決には、空調機の導入が最善策と思われるが、換気扇、家庭用除湿剤あるいは除湿機で何とかしているということもあった。後付けで空調を設置した例も複数あったが、電気代が高いと感じている事業体もある。導入コストと電気代を考え空調機は設置せず、ドライエアを使用しているところもあった。どの程度の結露になるのかが簡単には予測できず、対策をとらずに想定外だったと感じているところが多いように見受けられた。

### 2) 日常点検

目視等による現場の点検頻度は毎日から月に1回までのばらつきがあったが、遠

隔監視が行われており、警報等は随時確認され対応がとられている。今回の調査では、全体の2/3の施設で、取水停止等の対策をとる濁度管理値を1.8度~2度としており、それ以外は0.5度~1度だった。

### 3) 定期保守点検

点検頻度は年数回~6年に1回まで様々だが、1事業体を除き、なんらかの形で委託点検を実施していた。年に数回実施しているところは、装置の清掃、ストレーナの日詰まり清掃等の依頼も含まれている。約半数の施設は1年に1回以上の頻度だったが、一方で、ランプ交換を含め、可能な限り直営で行う、あるいは4年~6年に1回、メーカーに点検あるいは部品交換の依頼を予定しているとする事業体が4か所あった。

### 4) 消毒剤の注入が紫外線処理装置の前段にあるケース

調査した中の7施設が該当した。紫外線処理による残留塩素の減少の程度は、2施設から回答があり、常に10%以下(絶対値で0.01~0.04mg/L程度)と、0.05mg/L程度であった。いずれも配水への著しい影響はなく、それ以外の水質への影響については特に述べられていないため、ないものと思われた。

### 5) ランプの寿命、交換時期、ストック

ランプ寿命の延命化をはかるため、装置を常用・予備という使用法ではなく、原則常時2台運転にして、ランプを常時点灯としているところがあった。配水ポンプが止まってもランプは点灯のままにする施設も多いが、常時点灯で待機時間が長引くと、その結果、水温上昇の警報が発報される可能性もある。その警報が出ないように工夫をしている施設もあった。延命化を図ることで、ランプ交換は毎年ではなく、2年に1度を想定しているとする施設もあった。

また、ランプは推奨点灯時間を経過しても紫外線強度が十分ならば、使い続けるケースが多い一方で、点灯時間、照射量、強度は把握していても、交換時期の見極めに苦慮している施設もあった。実際にランプを交換する場合には、装置の調整が必要となるため、直営で交換している施設もある

が、製造メーカへ依頼しているところもかなりある。ランプ切れになる前の交換が必要となるが、交換依頼から実施までには時間を要するうえ、費用も高額であることにより、判断が難しいとのことであった。

ランプが高額で納品に時間がかかるという複数の意見、ランプの使用日限(保存期間)はあまり長くないので、予備品で保存しておくも未使用でも3年程度で寿命となるのが課題という意見、さらに、ランプ、安定器など外国製の部品が多いので、故障時の原因究明に時間がかかることが課題とする意見もあった。

#### 6) 色度の増加による照射量の減少

紫外線照射量の減少が発生し、どちらの場合も色度が原因と推測される事例が2か所であった。紫外線処理装置は水質の安定している地表水以外の水に適用されており、透過率を連続的に測定する連続計器を備えている施設は今回の調査で見られなかった。

#### 7) 紫外線処理施設に必要な初期費用

紫外線処理設備の導入時に要する初期費用の概算値を図1に示す。費用内訳について記載がない回答もあったため、総額を施設能力との関係で整理した。

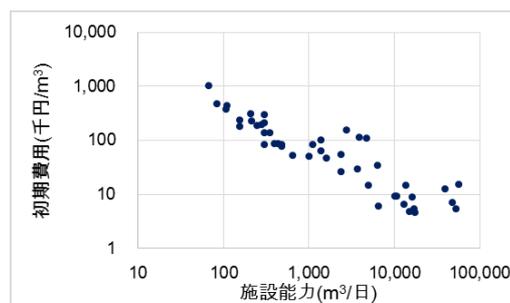


図1 導入時に要する初期費用の概算値

#### 1.3 海外における地表水紫外線処理の適用条件等に関する文献調査

各国における紫外線処理に係わる原水水質の要件と紫外線照射量を表4に示す。

表4 各国における紫外線処理に係る紫外線照射量および原水水質の要件

	日本		米国	オーストリア	ドイツ	英国	フランス
原水種別	地下水	地表水	-	-	-	-	-
濁度	2度	0.1度	5NTU	-	0.3FNU	1NTU	0.5FNU
紫外線照射量	10mJ/cm <sup>2</sup> [水量の95%に対して]	12mJ/cm <sup>2</sup> [クリプト等 3log不活化] 183mJ/cm <sup>2</sup> [ウイルス 4log不活化]	40mJ/cm <sup>2</sup> [枯草菌胞子 RED値]	40mJ/cm <sup>2</sup> [枯草菌胞子 RED値]	(米国に 同じ)	40mJ/cm <sup>2</sup> [RED値]	
紫外線透過率	> 75%	-	-	70.8%	-	80%	
色度	5度	-	-	-	-	-	
硬度	140mg/L	-	-	-	-	-	
鉄	0.1mg/L	-	-	0.05mg/L	-	0.05mg/L	
マンガン	0.05mg/L	-	-	0.02mg/L	-	0.02mg/L	

## 2. 原水条件及び処理効果の検証

### 1) 濁質存在下での紫外線照射の効果

大腸菌ファージ MS2 を添加した最初沈澱池出口水における紫外線照射実験の結果を図 2 及び図 3 に示す。図 2 は照射時間と MS2 濃度との関係を、図 3 は平均紫外線量と log 生残率の関係を示している。

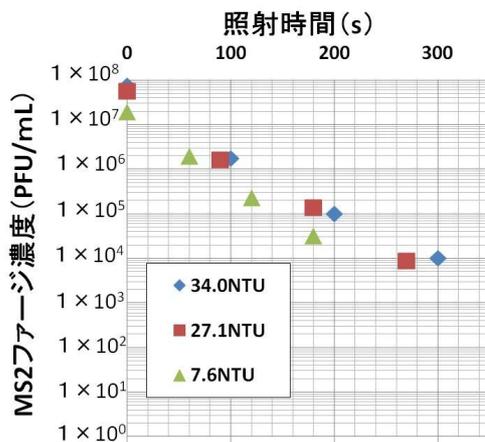


図 2 大腸菌ファージ MS2 を添加した最初沈澱池出口水における照射時間とファージ濃度の関係

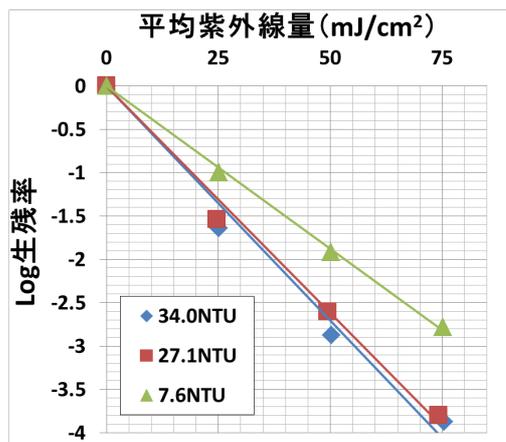


図 3 大腸菌ファージ MS2 を添加した最初沈澱池出口水における平均紫外線量と log 生残率の関係

図 2 より、同じ濃度まで不活化するのに必要な照射時間は、濁度が小さい試料ほど少なくなっていることがわかる。濁度が大きい試料ほど 254nm 吸光度が大きく、水深方向での紫外線照度の減衰が大きいため

あると考えられる。しかし、254nm 吸光度を用いて水深方向の平均紫外線照度を算出して照射時間を乗じた平均紫外線量に対して log 生残率をプロットすると、濁度が 34.0NTU と 27.1NTU の結果には差が見られなくなり、濁度が一番小さい 7.6NTU の試料においては不活化速度が小さくなった。濁度が大きい場合に生じた散乱光による不活化が示唆された。

最初沈澱池出口水のろ過前後での大腸菌の 254nm 紫外線による不活化実験の結果を図 4 および図 5 に示す。

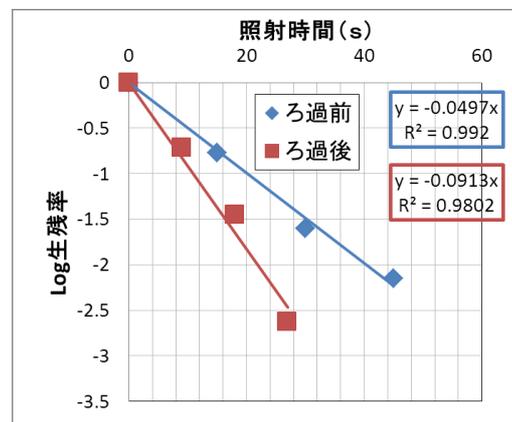


図 4 ろ過前後の最初沈澱池出口水に対する紫外線による大腸菌不活化過程における照射時間と log 生残率の関係

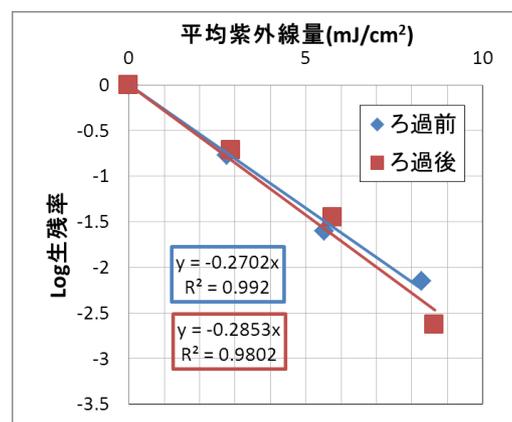


図 5 ろ過前後の最初沈澱池出口水に対する紫外線による大腸菌不活化過程における平均紫外線量と log 生残率の関係

図4より、照射時間当たりの不活化速度はろ過後(8.57NTU)の試料の方がろ過前(33.2NTU)よりも大きかった。濁質による遮蔽で水深方向の紫外線の減衰が原因と考えられる。一方、図5に示すように横軸を平均紫外線量として整理すると、ろ過前後で大腸菌の不活化効率に大きな差が見られなかった。すなわち、ここで用いた濁質の異なる水における紫外線照射による不活化速度の差は、濁度による遮蔽効果のみであり、それを254nm吸光度で把握することが可能であることが明らかになった。

## 2) 流水式紫外線照射槽の性能評価

図6に、二種の大腸菌ファージを同時に流した流水式紫外線照射装置における理論的滞留時間とRED(換算紫外線量)との関係を示す。この図より、MS2(1log不活化に要する紫外線量22.94mW/cm<sup>2</sup>)の生残率から求めたREDの値は、φX174(1log不活化に要する紫外線量2.18mW/cm<sup>2</sup>)の生残率から求めたREDの値の2.3~3.0倍であった。これは、紫外線照射装置を通過する際に水塊ごとに様々な線量を照射されていること、すなわち、紫外線量分布があることを示している。

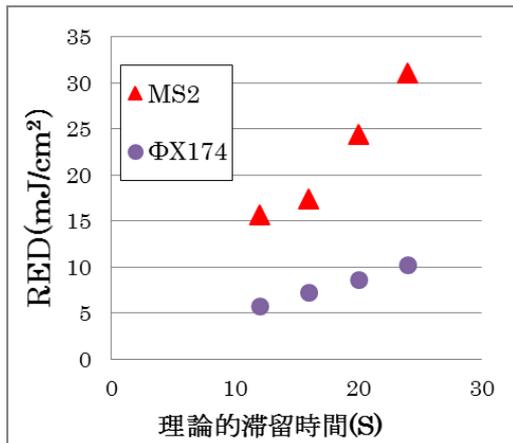


図6 二種の大腸菌ファージを同時に流した流水式紫外線照射装置における理論的滞留時間とREDとの関係

## 3. 照射手法及び設計諸元の検討

### 3.1 濁度変動に対応する紫外線照射線量の検討

#### 1) 濁度比による紫外線の散乱評価

図7にA浄水場とB浄水場における2方式の濁度測定結果を示す。B浄水場においては、2015年6月に定期採水日以外にも、台風によって原水の濁度が上がったために行った緊急採水の試料も合わせて測定結果として示した。

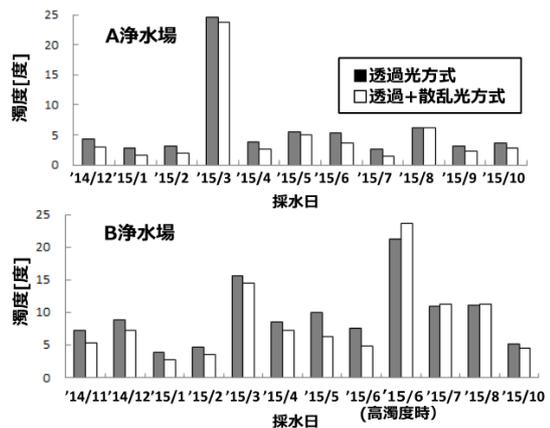


図7 浄水場原水における2つの方式による濁度測定結果

#### 2) 濁度測定法、校正用標準液の違いによる濁度値への影響

濁度計の校正用濁度標準液を3種類用意して、カオリン標準液にて校正した濁度計を用いて同じ濁度数のポリスチレン、ホルマジン標準液を測定した結果から、各々の標準液を用いた場合の濁度値を算定した。図8は、カオリン標準液を用いて校正した場合の濁度値を100%とした場合の、その他の標準液を用いた場合の濁度値の相対比で示した。濁度測定法は透過光方式、透過+90°散乱光方式、積分球式の3方式である。

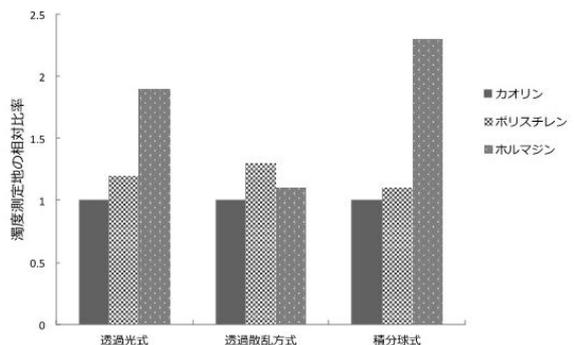


図8 各濁度標準液にて校正した場合の濁度値の相対比(カオリン標準液の場合を100%とした)

### 3.2 紫外線処理設備の照射手法及び設計諸元の検討

#### 1) 試験水水質の特徴

表 5 より、不活化実験に供した試料はいずれも紫外線透過率が 75%を下回っており、紫外線消毒には不利な条件であった。W1.0 の濁度は突出して高く、同一の粒子濃度で比較すると、粒子が大きいと濁度は著しく高くなった。色度は、CB が突出して高く、これは外観の印象と整合した。

ここで、平成 26 年度の成果として報告した、地表水を原水とする浄水場 A、B における原水水質の変動幅(9月 - 3月の毎月 1 回ずつ測定、n=7) を表 6 に示し、試験水の水質を比較する。

原水水質の変動幅として四分位範囲(25%値~75%値の範囲)と比較すると、本実験の試験水の濁度は、CB、W0.2、B0.2 の  $10^9$  個/mL は概ね原水水質の四分位範囲に入るが、 $10^{10}$  個/mL になると高濁度で範囲外に相当した。また、原水色度の変動幅と比較すると、W0.2、B0.2 の  $10^9$  個/mL と W1.0 の  $10^8$  個/mL は概ね四分位範囲に入るが、それ以外は色度が高く範囲外であった。紫外線透過率の変動幅と比較すると、すべての試験水が原水水質の四分位範囲よりも低い透過率に相当し、すなわち紫外線処理にとって不利な条件であることが確認された。

表5 微生物添加後の試験水の水質

粒子濃度 (個/mL)	紫外線透過率(%)				濁度(度)				色度(度)				
	$10^{10}$	$10^9$	$10^8$	0	$10^{10}$	$10^9$	$10^8$	0	$10^{10}$	$10^9$	$10^8$	0	
大腸菌	CB	1.3	64.0	-		59.9	5.86	-		1640	164	-	0.00
	W0.2	3.7	64.0	-	94.7	32.5	3.48	-	1.69	82.8	12.7	-	
	B0.2	-	68.6	-		-	3.09	-		-	11.8	-	
	W1.0	-	1.2	26.7		-	1820	183		-	50.4	4.13	
MS2	CB	0.4	56.0	-		51.7	1.52	-		1690	169	-	0.74
	W0.2	4.4	69.2	-	97.0	42.9	0.58	-	0.00	69.6	13.8	-	
	B0.2	-	68.7	-		-	1.01	-		-	16.4	-	
	W1.0	-	0.8	38.3		-	1780	185		-	64.5	7.62	

(- : 不活化試験を実施せず)

表 6 地表水を原水とする浄水場原水の水質変動幅 (H26 報告<sup>7)</sup>より)

	濁度(度)		色度(度)		紫外線透過率(%)	
	浄水場 A	浄水場 B	浄水場 A	浄水場 B	浄水場 A	浄水場 B
最大値	* 42.10	10.00	* 54.70	25.20	96.2	91.6
75%値	9.08	6.35	17.33	18.67	95.8	88.1
中央値	1.97	3.83	4.83	10.50	95.1	87.1
25%値	1.30	2.35	3.58	9.58	82.7	80.9
最小値	0.70	1.77	3.17	5.50	* 63.1	77.9

## 2) 粒子濃度と紫外線透過率の関係

図9に粒子濃度と紫外線透過率の関係を示す。紫外線透過率は、粒子原液を段階的にリン酸緩衝液で希釈した試料の紫外線吸光度を測定し、透過率に換算した。図9より、0.2 $\mu\text{m}$ の粒子(CB、W0.2、B0.2)は粒子濃度が $10^9 - 10^{10}$ 個/mLにかけて、1.0 $\mu\text{m}$ の粒子(W1.0、B1.0)は $10^7 - 10^8$ 個/mLにかけて透過率が急低下する閾値が観察された。粒径が同じ粒子は紫外線透過率低下の傾向が類似しており、紫外線透過率の低下に支配的な因子は粒子の素材や色よりも粒径であることが示唆された。

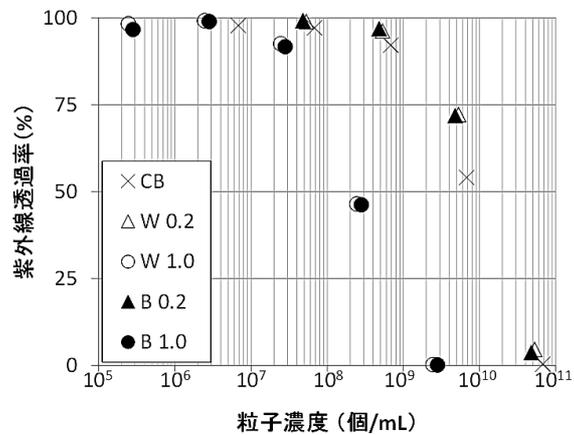


図9 粒子濃度と紫外線透過率の関係

## 3) 不活化実験

図10に、同一粒径(0.2 $\mu\text{m}$ )で粒子を変えた場合の不活化結果を、図11に同一粒子(ポリスチレン白)で粒径を変えた場合の不活化結果をそれぞれ示す。照射は独立して3回実施し(n=3)、プロットはその平均値、エラーバーは最大値と最小値を意味する。いずれの条件でも、大腸菌は肩のある不活化曲線を示し、MS2は一次反応的に不活化された。

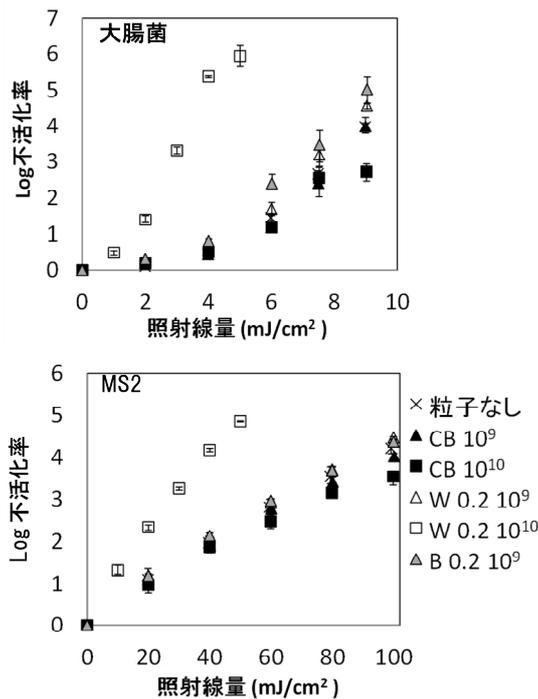


図10 0.2 $\mu\text{m}$ 粒子添加時の不活化曲線

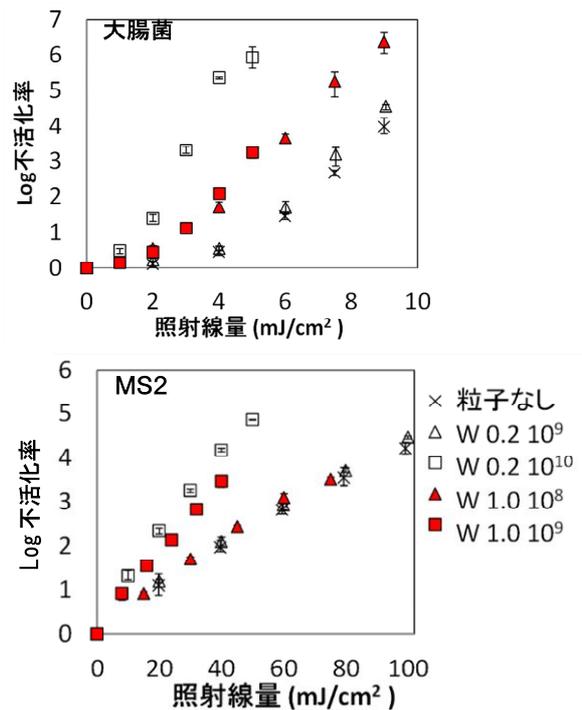


図11 白色ポリスチレン粒子添加時の不活化曲線

図 10 より、粒径  $0.2\mu\text{m}$  の  $10^9$  個/mL では、不活化傾向に粒子の素材や色による差はみられないが、 $10^{10}$  個/mL では粒子によって顕著に差が現れた。すなわち、CB は粒子により不活化効率の低下とテーリングがみられた一方、W0.2 は粒子により不活化効率が向上した。これら試料の紫外線透過率や濁度に大差はないが、CB の黒色表面が紫外線を吸収した一方、ポリスチレン粒子は CB に比べて紫外線反射率が高いと推定され、反射や散乱が不活化に寄与した可能性が示唆された。次に、図 11 より、同じ白色ポリスチレンで粒径と濃度が異なる場合を比較すると、実験条件の範囲では W0.2 の  $10^{10}$  個/mL 試料がもっとも不活化効率が高く、概して小さい粒子が高濃度で存在するほど散乱光の寄与が大きい可能性が示唆された。また、 $0.2\mu\text{m}$  粒子による影響の程度は大腸菌と MS2 で同等であったが、 $1.0\mu\text{m}$  粒子の影響は両者で異なる傾向があり、粒子と微生物の相対的なサイズが影響する可能性が示唆された。大腸菌はおよそ  $0.4\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$  程度の桿菌で、MS2 はおよそ  $27\text{nm}$  の球形ウイルスであり、添加した標準粒子の粒径との比較から検討する余地がある。例えば、大腸菌は散乱光によって、MS2 は透過光によって不活化される割合が高いという仮説を立て、検証することが今後の課題である。

## D. 考察

### 1. 濁度管理等における課題の抽出

#### 1) 地表水の浄水処理における濁度管理等の実態把握及び課題の抽出

濁度が上昇しやすいのは、高濁度時における凝集剤の注入管理、ピコプランクトンの流入時、及び洗浄時であった。適切な処理設備が整備されていないか、あるいは浄水処理の状況判断と対応を的確に行える技量をもつ人材不足の状況がうかがえる。クリプトスポリジウム等対策指針に沿った設備改造については、とくに小規模事業体において厳しい状況であるように見受けられた。財政的な制約とともに、処理設備の導入当時には想定されていなかった運用が求められ、改造が構造上不可能な施

設も散見されるが、対応の先送りは、将来に向けての懸念である。

#### 2) 地表水以外を対象とした紫外線処理設備の維持管理等の実態把握及び課題の抽出

本調査中に、クリプトスポリジウム等対策指針の直後に、耐塩素性病原生物対策の方針を紫外線処理に変更した事業体、あるいは同一事業体内の紫外線を含む異なる対策処理方法と比較検討した結果として、以降の整備は紫外線処理を選択した事業体が数件あった。その後、特に大きな問題なく、稼動を継続している。

#### 3) 海外事例調査

調査対象とした 5 か国においては、我が国とは異なり、紫外線処理の適用条件として地表水および地下水の区分は見られなかった。濁度についての規定は、紫外線処理に特化して定められている場合（ドイツ、フランス）あるいは、紫外線に限らず消毒処理前の要件として定められている場合（英国、米国）があり、前者のほうが厳しい要件であった。最も厳しい濁度条件は、我が国の  $0.1$  度以下を除けば、ドイツの  $0.3\text{FNU}$  ( $0.33\sim 0.36$  度) であった。

紫外線照射量について、最低照射量を定めているのはオーストリア、ドイツ、フランスの 3 か国であり、いずれも  $40\text{mJ}/\text{cm}^2$  以上であった。ただし、各国とも所定の指標微生物を生物線量計として用いた RED 値として規定されており、オーストリアおよびドイツは枯草菌胞子を用いることを明示している（フランスは不明）。RED 値は当該の指標微生物の紫外線に対する感受性に依存し、微生物種によって異なる値をとることが知られているため、このように RED 算定の根拠となる指標微生物を明示することが望ましいと言える。また、米国においては各水道施設の原水水質モニタリングならびに現行の浄水処理の運転管理状況に応じてクリプトスポリジウム等の除去能力や不活化能力を決定することとしており、一律の紫外線照射量は規定していない。このことは、紫外線処理設備の処理能力が適正となる（過大な処理能力

とはならない) 利点はあるものの、各水道施設における原水および処理工程の適切かつ定期的なモニタリングが大前提であると言えよう。

紫外線透過率について規定している国は、ドイツおよびフランスの2か国であった。フランスは透過率が80%以上であることを求めており、これは我が国の「75%を超えること」よりも厳しい値であった。また、他の水質項目のうち、ランプスリーブ表面への付着による紫外線照射量低下を防ぐ観点から、ドイツおよびフランスの2か国において鉄およびマンガンの上限濃度が定められており、各国とも鉄0.05mg/L以下、マンガン0.02mg/L以下であった。各値は、いずれも我が国の半分以下と厳しい値であった。なお、硬度や色度の規定は見受けられなかったものの、硬度については、紫外線照射量やランプスリーブへの付着といった面から留意すべきとの記載が複数の国において見られた。

## 2. 原水条件及び処理効果の検証

### 1) 濁質存在下での紫外線照射の効果

図2と図4の結果より、濁質が多く存在している方が、同じ生残率を達成する際に多くの照射時間を必要とした。これらの結果を、被照射試料の254nm吸光度を用いて試料中における紫外線の減衰を考慮して平均紫外線量で整理すると、同じ生残率となるのは同じ平均紫外線量の時であること(図5に示す大腸菌の場合)あるいは、平均紫外線量で整理すると濁質表面による散乱光を考慮していないため、濁度の高い方が不活化速度が増大すること(図3に示す大腸菌ファージMS2の場合)が示された。これは、濁質が存在している場合に予見される、濁質内部への微生物の吸着あるいは取り込みによる遮蔽効果が実験を行った範囲では見られず、すべての結果において、254nm吸光度に基づく平均紫外線量で設計を行うことで安全側の効果が得られることを示している。

### 2) 流水式紫外線照射槽の性能評価

図6の実験結果より、同じ装置に同時に二種の微生物を流下させて換算紫外線量を求めると微生物種により換算紫外線量の値

が異なることが示された。これは、紫外線照射装置における紫外線量分布が存在する場合に生じる現象であり、それを実験的に示したことになる。

2種の大腸菌ファージを同一の流水式紫外線装置に流した結果(図6)は、紫外線線量分布を性能評価にどのように組み込むべきか考察する良いデータとなる。特に、日本の水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針の表記である「紫外線照射槽を通過する水量の95%以上に対して、紫外線(253.7nm付近)の照射量を常時10mJ/cm<sup>2</sup>以上確保できること」について、このデータとシミュレーションにより、分担研究報告書に今年度の検討結果が示されている。さらに、現行の対策指針や各国の指針を詳しく検討する必要がある。平成28年度も引き続き、検討を進める。

## 3. 照射手法及び設計諸元の検討

### 3.1 濁度変動に対応する紫外線照射線量の検討

#### 1) 濁度比による紫外線の散乱評価

図6に示した浄水場原水における濁度値から濁度比を算定し、横軸として各試料における濁度値(透過+90°散乱光方式)として、プロットした図を図12に示す。

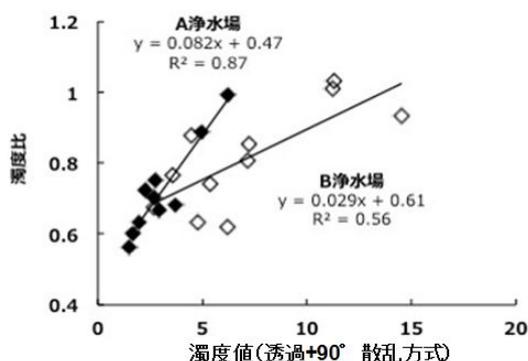


図12 浄水場原水の透過+90°散乱光方式濁度と濁度比の相関

どちらの浄水場原水においても、濁度が上がるに伴い濁度比が大きくなっていった。これは散乱特性が大きくなることを意味している。従って浄水場原水における濁度の増減は、可視光を散乱する特性をもつ物質

の増減によるものと示唆される。先に示した濁度比とUV光散乱との相関を考えれば、浄水場原水の濁度が高くなり、浄水への濁質混入が懸念される場合でも、その増大はUV光散乱の高い物質の増加によるものであるため、UV消毒への負の効果は大きくなるのではないかと考えられた。

## 2) 濁度測定における測定法、校正用標準液の影響

図8に示されるように、校正用標準液としてはカオリンを用いる場合が最も低い濁度測定となることがわかった。またポリスチレン、ホルマジンともに標準液として使用する場合は、濁度値が高くでることがわかった。特に透過光方式と積分球方式においてはホルマジン標準液で校正した場合の違いが最も大きく、この点濁度測定において留意すべき点と考えられる。

## 3.2 紫外線処理設備の照射手法及び設計諸元の検討

対数直線的に不活化されたMS2について、不活化曲線を最小二乗法で直線回帰し、その傾きを不活化速度定数 $k$  [ $\text{cm}^2/\text{mJ}$ ]と定義した。各条件下で独立に3回ずつ照射を繰り返して $k$ を算出し、その平均値の差を一元配置の分散分析 (Analysis of Variance, ANOVA) に供し、Scheffeテストによる多重比較で有意差を判定した。有意水準は5%および1%とした。

表7に、MS2の不活化速度定数 $k$ の平均値 ( $n=3$ ) を左から小さい順に整理し、併せて、粒子添加なしの条件で得られた $k$ に対する $p$ 値を示す。不活化速度定数 $k$ は、CBの濃度が高いほど小さくなり、白のポリスチレン粒子は濃度が高いほど大きくなった。ANOVAの結果、粒子なしの試料で観察された $k$ 値に比べて、CBの $10^9$ 個/mL、B0.2の $10^9$ 個/mL、W0.2の $10^9$ 個/mL、W1.0の $10^8$ 個/mLの各試料の $k$ 値は有意差が無かった。一方、CBの $10^{10}$ 個/mLでは $k$ 値が粒子添加なしに比べて小さく(5%有意)、また、W1.0の $10^9$ 個/mLとW0.2の $10^{10}$ 個/mLでは $k$ 値が粒子添加なしに比べて大きかった(1%有意)。粒子添加なしと有意に $k$ 値が異なる条件は、濁度42度以上、色度64度以上、透過率5%以下の極端な条件に相当した。一方、粒径 $0.2\mu\text{m}$ 粒子を $10^9$ 個/mLオーダーで添加した試料は、濁度0.5-1.5度、色度13度以上、紫外線透過率56-70%程度と紫外線処理に不利な条件に相当するにもかかわらず、粒子添加なしの場合(濁度0.0度、色度0.7度、紫外線透過率97%)と不活化速度に有意差はなかった。特に、CBの $10^9$ 個/mL試料は、色度169度と著しく高いにもかかわらず、粒子なしと有意差は無かった。よって、現行の地表水以外への紫外線処理適用要件(濁度2度以下、色度5度以下、透過率75%以上)を満たす限り、濁質による処理効率の有意な低下は生じない可能性が示唆された。

表7 MS2の不活化速度定数 $k$ と粒子添加なしに対する有意差検定結果

	CB $10^{10}$	CB $10^9$	粒子なし	B0.2 $10^9$	W0.2 $10^9$	W1.0 $10^8$	W1.0 $10^9$	W0.2 $10^{10}$
$k$ (平均) [ $\text{cm}^2/\text{mJ}$ ]	0.036	0.040	0.042	0.043	0.044	0.047	0.084	0.097
「粒子なし」との $p$ 値	.020*	.955	-	.999	.970	.125	.000**	.000**

(繰り返し回数  $n=3$ , \* : 5%有意、\*\* : 1%有意)

## E. 結論

当初計画どおりに各種の調査・実験等を行い、研究を進めた。

### 1. 濁度管理等における課題の抽出

- 1) ろ過水濁度が上昇しやすいのは、『高濁度時』、ついで『ろ過池洗浄後のろ過再開時』と『ピコプランクトンの発生』であった。

ろ過池ごとの濁度管理及びろ過池洗浄後の濁度低減化対策については、大規模浄水場を中心に整備が進み、中・小規模の事業体においては費用と労力の面から厳しい状況にあることが再認識された。

紫外線処理においては、施設ごとに小さな課題が全くない訳ではないが、概ね初期の目的を期待どおりに達していた。

- 2) 欧米5か国の調査によれば、紫外線処理の適用条件として地表水と地表水以外との区分は見られなかった。また、濁度についての規定は我が国よりも穏やかであり、紫外線照射量として所定の生物線量に基づく RED 値または浄水場の原水及び運転条件に応じて設定されていること、紫外線透過率や紫外線照射効率の低下を防ぐ観点から、鉄、マンガン、硬度等の水質要件に留意することといった相違点が見られた。

### 2. 原水条件及び処理効果の検証

- 1) 実験を行った範囲において、濁質の存在により紫外線消毒の効果は減じられ、濁質が無い場合よりも大きな照射時間を要した。しかし、濁質による紫外線照射効果の低減は吸収よりも大きなものは無く、254nm 吸光度を測定して得られる平均紫外線量を用いれば、濁質の無い試料における不活化率と同じ不活化率を濁質の存在する試料で得るには同じかあるいはより少ない照射時間を必要とした。濁質による紫外線の散乱が不活化効率を増大させているものと考えられた。よって、濁質による紫外線照射の効果を算定する場合には、254nm 吸光度を用いて平均紫外

線量を算定することで安全側の対応が可能である。

- 2) 紫外線耐性の異なる二種の微生物を同時に流水式紫外線照射装置に流した場合には、その微生物の紫外線耐性に依りて、異なる換算紫外線量が算出されることが実験的に確認できた。これは、流水式紫外線照射槽の性能を評価する場合に、単一の微生物の不活化実験の結果だけでは病原微生物に対する効果を予測できないことを表している。
- 3) 紫外線照射槽の性能評価において、水量の95%以上に対して10mJ/cm<sup>2</sup>以上という表記は、常識的な紫外線量分布においてクリプトスポリジウム99.9%不活化を達成できていることが計算により示された。しかし、極端な装置においてはそれを達成できない可能性があり、さらに要件を付加する必要があるのではと考えられた。

### 3. 照射手法及び設計諸元の検討

#### 3.1 濁度変動に対応する紫外線照射線量の検討

- 1) 吸光度値と積分球式吸光度値から求める散乱分率によって濁質の散乱特性が評価できることがわかった。またモデル濁質においては可視光の散乱分率と UV 光の散乱分率において良い関係性が見られており、両散乱分率には高い相関があるものと考えられた。
- 2) 一年間にわたって2か所の浄水場原水の散乱特性評価に、この濁度比を用いたところ、原水濁度値と濁度比に正の相関が見られた。即ち濁度が増すのは散乱特性が高い濁質の増加によるものと示唆された。上記、1)の結果を併せて考察すると、浄水場原水の濁度が高い場合でも UV 光散乱が高い濁質が多く含まれることとなるため、紫外線消毒への負の影響は紫外透過率で評価されるよりも低くなると考えられた。
- 3) 校正用標準液の種類によって濁度測定値への影響があるのか検討した結果、カオリン標準液を基準と考えると、特にホ

ルマジン溶液を標準液とすると測定値は透過光方式では 1.8 倍、積分球方式では 2 倍以上の値となることがわかった。

- 4) 2 種類の濁度測定法、即ち透過光方式と透過+90° 散乱光方式による測定値の比（濁度比）を用いれば、散乱分率の代替指標として利用できると考えられた。

### 3.2 紫外線処理設備の照射手法及び設計諸元の検討

素材、色、粒径の異なる標準粒子を任意濃度で添加した試料について、濁度、色度、紫外線透過率の変化を分析した。また、標準粒子試料に大腸菌または大腸菌ファージ MS2 を添加し、紫外線不活化実験を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 粒子濃度と紫外線透過率の関係について、0.2 $\mu\text{m}$  の粒子は粒子濃度  $10^9 - 10^{10}$  個/mL にかけて、1.0 $\mu\text{m}$  の粒子は  $10^7 - 10^8$  個/mL にかけて、紫外線透過率が急低下する閾値が観察された。粒径が同じ粒子は紫外線透過率低下の傾向が類似しており、紫外線透過率の低下に支配的な因子は粒子の素材や色よりも粒径であることが示唆された。
- 2) カーボンブラック粒子（粒径 0.1 - 0.2 $\mu\text{m}$ ）を添加すると微生物不活化効率が低下した一方、白色ポリスチレン粒子（粒径 0.2 $\mu\text{m}$ ）を添加すると不活化効率が向上した。ポリスチレン粒子は紫外線反射率が高く、反射光や散乱光が不活化に寄与したものと推定された。
- 3) 粒径 0.2 $\mu\text{m}$  の粒子による不活化効率への影響の程度は大腸菌と MS2 で同等であったが、粒径 1.0 $\mu\text{m}$  の粒子の影響は両者で異なる傾向があり、粒子と微生物の相対的なサイズが不活化効率に影響する可能性が示唆された。
- 4) 異なる粒子条件で実施した MS2 の不活化速度定数を比較した結果、濁度 0.5-1.5 度、色度 13 度以上、紫外線透過率 56-70% 程度と紫外線処理に不利な条件下でも、粒子添加なしの場合と不活化速度に有意差はなかった (ANOVA,  $p > 0.05$ )。よって、現行の地表水以外への紫外線処理適用要件を満たす限り、濁質による処理効率の

有意な低下は生じない可能性が示唆された。

### 参考文献

- 1) 厚生労働省健康局水道課 (2007) 水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針。
- 2) 米国環境保護庁 (2006) Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule.
- 3) オーストリア規格協会 (2001) ÖNORM M5873-1: Plants for the disinfection of water using ultraviolet radiation -Requirements and testing - Part 1: Low pressure mercury lamp plants.
- 4) ドイツガス水道協会 (2006) DVGW Standard W 294-2: UV Devices for the Disinfection for Drinking Water Supply.
- 5) 英国水道水検査官事務所 (2010) Guidance on the use of Ultraviolet (UV) irradiation for The Disinfection of Public Water Supplies.
- 6) フランス共和国官報 (2012) 公衆衛生法 R.1321-50 条 (I および II) を適用した人用飲料水の処理に用いられる紫外線ランプを備えるリアクタの販売及び使用条件に関する 2012 年 10 月 9 日のアレテ。
- 7) 小熊久美子、平成 26 年度厚生労働科学研究費補助金「地表水を対象とした浄水処理の濁度管理技術を補完する紫外線処理の適用に関する研究」(H26-健危-一般-004, 代表: 大垣眞一郎) 平成 26 年度研究分担報告書。

### F. 健康危険情報

特になし

### G. 研究発表

1. 論文発表  
該当なし

## 2. 学会発表

- 1) Kumiko Oguma(2015.7) Small water systems in Japan: current status and technical challenges for the future: The 10th International Symposium on Water Supply Technologies (第10回水道技術国際シンポジウム、神戸).
- 2) Akihiro Ishida and Naoyuki Kamiko (2015.12) Inactivation and photoreactivation of E.coli in secondary treated wastewater by various UV light sources: The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015.
- 3) Nodoka Kanzaki and Naoyuki Kamiko (2016.2) Ultraviolet resistance of indigenous coliphages and their DNA found in wastewater: IUVA 2016 World Congress & Exhibition.
- 4) 島崎大、田中美奈子、石新一憲、知念光、鐘井豊、白坂威出矢、飯島卓、伊藤雅喜、「高濁度原水の処理不良時における二段凝集処理による濁度およびクリプトスポリジウムの除去効果ならびに感染リスク評価」、平成27年度全国会議(水道研究発表会)講演集、pp.622-623、2015年10月、さいたま.
- 5) 中村栄希、神子直之、「流水式紫外線装置における微生物を用いた性能評価に関する検討」、第50回日本水環境学会年会講演集、P.364、2016年3月、徳島.
- 6) 石田晃啓、神子直之、「指標細菌の不活化速度に対する紫外線波長ごとの濁質による影響の把握」、第50回日本水環境学会年会講演集、P.401、2016年3月、徳島.
- 7) 木下由紀子、大瀧雅寛、島崎大、「濁質の光散乱特性を考慮したUV消毒への影響評価」、第50回日本水環境学会年会講演集、p.362、2016年3月、徳島.
- 8) 小塩美香、小熊久美子、Jenyuk Lohwacharin、滝沢智、「懸濁粒子の特性が紫外線の微生物不活化効果に及ぼす影響」、第50回日本水環境学会年会講演集、P.363、2016年3月、徳島.

## H. 知的財産権の出願・登録状況(予定を含む)

### 1. 特許取得

該当なし

### 2. 実用新案登録

該当なし

### 3. その他

第50回日本水環境学会年会優秀発表賞(クリタ賞)受賞(上記学会発表8)(2016年3月、徳島)