

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

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

平成 28 年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 大垣真一郎

平成 29(2017)年 5 月

# 目 次

## I. 総括研究報告

- 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 \_\_\_\_\_ 1  
大垣 眞一郎（公益財団法人 水道技術研究センター）

## II. 分担研究報告

1. 地表水紫外線処理および濁度管理事例等に関する海外文献調査 \_\_\_\_\_ 31  
島崎 大（国立保健医療科学院）
2. 原水条件および処理効果の検証 \_\_\_\_\_ 39  
神子 直之（立命館大学）
3. 紫外線処理における濁度および吸光度による不活化効果  
低減効果の管理方法の検討 \_\_\_\_\_ 43  
大瀧 雅寛（お茶の水女子大学）
4. 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 \_\_\_\_\_ 47  
小熊 久美子（東京大学先端科学技術研究センター）

## III. 研究成果の刊行に関する一覧表 \_\_\_\_\_ 57

### 添付資料

1. 研究体制 \_\_\_\_\_ 59
2. ヒアリング調査記録 \_\_\_\_\_ 61
3. 国内の地表水を水源とする 4 浄水場の紫外線吸光度データ \_\_\_\_\_ 95
4. 研究班会議議事録 \_\_\_\_\_ 107

I. 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、平成28年度は3か年計画の3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た。

平成28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については、本研究の1年目及び2年目（平成26年度及び27年度）において実施済みである。

(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、254 nm 吸光度を用いて平均紫外線量を算定することで可能である（この場合は不活化に有効な散乱紫外線が存在していてもその値は考慮していない）。不活化に有効な散乱紫外線量については、積分球式で測定した吸光度を用いて算定することが可能であった。また、紫外線照射装置の性能評価を行う場合には、できる限り病原微生物と同じ紫外線耐性を持つ微生物を用いて実験を行う必要がある。

(3) 紫外線の照射手法及び設計諸元の検討

濁質による紫外線の吸収・散乱を評価する手法として、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懸濁溶液の可視光散乱特性が評価できることがわかった。可視光の散乱分率とUV光の散乱分率において、両散乱分率には高い相関があるものと考えられた。ただしPSI凝集剤を含有している試料においてはUV光の散乱分率は低下することがわかった。また、X線回折を行った結果、紫外線光の散乱程度が高い物質についてはいずれも石英結晶の存在が認められ、可視光ならびに紫外線光の散乱性を高めていると考えられた。

一方、素材、色、粒径の異なる標準粒子を添加した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結果から、水中に懸濁粒子が存在しても紫外線消毒を阻害しない場合や、粒子による紫外線の散乱で消毒効率が高まる場合のあることが示された。紫外線処理は濁度上昇に対しある程度の頑健性を有しており、浄水処理で想定する濁度変動の範囲では、濁度による紫外線処理性能の低下は無視できる（有意差を検知できない）レベルであると推察された。また、少なくとも現行の地表

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、紫外線透過率 75%以上）を満たす限り、原水の由来によらず、濁質による処理効率の有意な低下は生じないと考えられた。総じて、紫外線処理の適否は、原水の由来ではなく、紫外線を照射する段階の水質で判定することが合理的と考えられた。

#### (4) 維持管理上の留意事項の検討

英国とカナダ国の水道水に由来する過去のクリプトスポリジウムへの集団感染事例を調査した結果、いずれも凝集処理を行うことなく後段の砂ろ過処理に供する場合があります。浄水処理において適切に除去されていなかったことが判明した。また、いずれの場合も水道施設の設計、運転管理、職員の教育等、複層的な問題点が指摘されていた。このような事例から、既存の濁度管理に加えての紫外線処理は、より安全性を高める技術手段と考えられる。

既設の浄水施設に紫外線処理設備を新たに追加する場合の留意点をケーススタディにより抽出した。また、紫外線吸光度の比較的高い地表水を原水とする施設の調査結果によれば、砂ろ過水の紫外線吸光度は、現行の地表水以外への紫外線処理の水質要件の適用範囲内にあることを確認した。

#### 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	東京大学先端科学技術研究センター	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平成19年に策定し、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(平成28年3月末時点で対策施設を検討中のものは、レベル4の4090施設のうち540施設、レベル3の3361施設のうち1787施設)り。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上で、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か年計画で実施した。

## B. 研究方法

平成28年度は、原水条件及び処理効果の検証、照射手法及び設計諸元の検討を昨年度に引続いて行い、新たに維持管理上の留意事項を検討し、成果を取りまとめた。

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。なお、(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、(1)濁度変動に対応する紫外線照射線量と、(2)紫外線処理設備の照射手法及び設計諸元について、それぞれ検討した。

また平成28年度は、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を検討した。

次に、それぞれの具体的な研究方法を示す。

### 1. 原水条件及び処理効果の検証

紫外線照射槽に流入する水には濁質が含まれている可能性があるが、その消毒効果への影響を定量的に明らかにすることを目的とした。また、紫外線照射槽の性能評価において一般的に用いられている生物線量計試験の結果と病原微生物に対する不活化性能の関係を確かめるために、紫外線耐性の異なる微生物を流水式紫外線照射槽に流し、実験的に調べた。

濁度および吸光度を変化させた試料に大腸菌フェージMS2を添加して、紫外線照射前後の生残率により紫外線照射の効果を定量した。懸濁物質による散乱光の影響を明らかにするために、濁度による吸光度と溶存物質による吸光度の和が同じになるように試料を設定した。懸濁物質としては下水処理場の流入下水中の懸濁物質およびカオリンを用いた。溶存物質の吸光度は下水処理場流入水に元来含まれている溶存物質を希釈するかあるいはフェージ定量用液体培地を加えることで調製した。

紫外線光源としては低圧紫外線ランプを用いた。回分式実験においては、試料を内径4.2cm、水深1.7cmのペトリ皿に入れ、石英ガラスで蓋をしてマグネチックスターラーで完全混合の条件で照射を行った。表面照度が約 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ になるように照射距離を調整した。流水式実験においては、12W低圧水銀ランプを1灯装備した、ランプスリーブ外径2.0cm、リアクター内径5.5cmのリアクターを用いた。

この実験においては、MS2とφX174の二種の大腸菌ファージを用いた。

試料の254nmにおける吸光度は分光光度計（SHIMADZU UV2600）を用い、必要に応じて積分球を装着した。懸濁態を含んだ試料に対してそのまま測定した吸光度を総吸光度とし、孔径0.45μmのメンブレンフィルターでろ過をした試料の溶存態吸光度の値を総吸光度から減じることで、懸濁物質に起因する懸濁態吸光度を求めた。

## 2. 照射手法及び設計諸元の検討

### 2.1 濁度変動に対応する紫外線照射線量の検討

紫外線処理において濁質による負の影響として光透過率の低下があるが、紫外光散乱による正の効果の影響も考慮して評価する必要がある。濁質の光散乱特性を適切に評価する指標として二つの異なる濁度測定法（公定法）の比を用いる濁度比と、通常の吸光度測定値と積分球式吸光度測定値から算定される散乱分率の二つの指標を提案し、人工濁質試料において、それらに高い相関性があることを確認し、かつ可視光の散乱特性と紫外光の散乱特性についても相関があることを示してきた。

以上の結果を踏まえ、平成 28 年度は次の 2 点について検討を行った。

- ① 浄水場原水及び浄水汚泥懸濁液を用いて可視光における濁度比と散乱分率の相関を確認し、さらに可視光と紫外光の散乱分率の相関性を検討する。
- ② 人工濁質、浄水場原水、浄水汚泥試料を用いて、X 線回折分析を行い、光散乱特性との関連性について検討する。

#### (1) 浄水場原水及び浄水汚泥懸濁液における散乱分率と濁度比の相関

散乱分率は図 1 に示す原理によって算定される。図 1 において通常の吸光度測定値  $A_1$  は  $\log(I_0/I_1)$  である。また積分球式吸光度値  $A_2$  は

$\log(I_0/(I_1+I_{sc}))$  である。そこで通常の吸光度測定値と積分球式吸光度測定値から、光散乱によって生じる光透過量の減少割合を示すことができると考え、以下の式(1)のように散乱分率を定義した。

$$\text{散乱分率} = \frac{\text{散乱により透過しない光強度}}{\text{透過しない光強度}} \quad \text{式(1)}$$

図 1 に示される値を用いて表すと以下の式(2)となる。

$$= \frac{I_{sc}}{I_0 - I_1} = \frac{I_0 10^{-A_2} - I_0 10^{-A_1}}{I_0 - I_0 10^{-A_1}} = \frac{10^{-A_2} - 10^{-A_1}}{1 - 10^{-A_1}} \quad \text{式(2)}$$

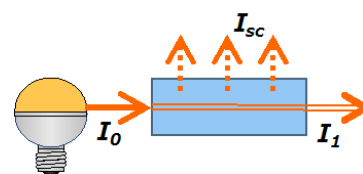


図 1 吸光度測定原理 ( $I_0$  : 入射光強度、 $I_1$  : 透過光強度、 $I_{sc}$  : 散乱光強度)

分光光度計（島津製作所製、UV-2550）にて 660 nm における吸光度を測定し、通常の吸光度測定値  $A_1$  とした。660 nm は濁度測定に用いられる可視光波長である。また同分光光度計に積分球式検出器（島津製作所製、ISR-2200）を付加して、660 nm における吸光度を測定し、積分球式吸光度測定値  $A_2$  とした。それらの測定値を用いて、式(2)により、可視光の散乱分率を求めた。

同様に、254 nm における吸光度を測定し、紫外光の散乱分率を求めた。

懸濁試料の濁度比については、以下の 2 方式にて濁度を測定した。

- ① 透過光測定方式による濁度測定  
吸光度計（島津製作所製、UV-2550）を用いて 660 nm の吸光度を測定し、カオリ

ン標準液において検量線を作成することによって測定した。

## ②透過+90°散乱光方式

濁度系（HACH 社製、100P）を用いて測定した。

濁度比は（②の測定値）／（①の測定値）として求めた。

対象試料には以下の三つの試料を用いた。

i) A 浄水場原水にて 2015 年 12 月に採水した高濁度原水および検証用に 2016 年 2 月に採水した通常濁度の原水

通常濁度の原水においては、凍結乾燥により濁質のみを取り出し、その濁質を Mili-Q 水にて希釈することで 10 倍濃縮の懸濁液を作成した。

ii) C 浄水場汚泥

この浄水汚泥試料には、凝集剤として使用されているポリ塩化アルミニウム(PAC)が含まれている。

iii) D 浄水場浄水原水・浄水汚泥

この浄水汚泥試料には、凝集剤として使用されているポリシリカ鉄(PSI)が含まれている。

上記の試料のうち、C および D の浄水汚泥試料については Mili-Q 水を用いて、透過+90°散乱光方式による濁度値で 50, 70, 80, 100 NTU となるように各段階に希釈した試料を対象とした。

## (2) X 線回折による濁質試料の測定

人工濁質としてカオリン（和光純薬製）、活性炭（和光純薬製）カーボンブラック（東海カーボン社製）、ベントナイト（和光純薬製）を使用した。採水試料としては A 浄水場原水、D 浄水場原水、C 浄水場汚泥の各試料を、100℃にて蒸発乾燥させて得られた固化物を対象とした。X 線回折分析は粉末 X 線回折装置(リガク製、Ultima IV)を用いて行った。

## 2.2 紫外線処理設備の照射手法及び設計諸元の検討

2007 年 3 月に通知された「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」改訂版<sup>2)</sup>では、水道原水に係るクリプトスポリジウムによる汚染の可能性の程度を四段階に分類し、各レベルに応じた措置を示している。指針において紫外線処理の適用が認められるのは、原水中に指標菌（大腸菌又は嫌気性芽胞菌）が検出され地表水以外を原水とする施設（レベル 3）であり、原水中に指標菌が検出され地表水を原水とする施設（レベル 4）は、クリプトスポリジウム汚染の可能性が最も高いと推定される分類であるにもかかわらず、紫外線処理は推奨されていない。その理由のひとつとして、地表水は地下水に比べて土砂等を多く含み、濁度等の水質変動が大きいとの懸念がある<sup>3)</sup>。しかしながら、紫外線を利用した水処理技術が普及している北米では、原水によらず紫外線処理の適用が認められており、アメリカとカナダで紫外線処理を備えた浄水施設 123 箇所を調査した事例<sup>4)</sup>では、地表水（地表水の影響を受ける地下水を含む）を原水とする施設が全体の 76%を占めた。これら北米の施設では、原水水質が極めて良好な特例を除き、地表水を原水とする浄水場ではろ過処理の後に紫外線照射槽を設置しており、豪雨等に伴う原水濁度の急上昇など地表水に特徴的な水質変動は、紫外線照射より上流の処理工程で対応する設計思想が見られる。一方、日本の地表水を水源とする浄水場では、原水および処理工程水の水質変動を紫外線処理の適用可能性という観点から整理した知見は乏しい。

平成 26 年度の地表水を原水とする国内の浄水場 2 施設（いずれも急速ろ過方式）を対象とした調査によれば、原水水質は台風や降雨の後に大きく変動したものの、処理工程水では台風直後を含むすべての試料で水質が安定し、ろ過水では 14 試料すべてが、現行指

針の示す地表水以外に対する紫外線処理適用の水質要件（濁度 2 度以下、色度 5 度以下、253.7 nm 付近の紫外線透過率が 75% を超えること）<sup>2)</sup> を満たした。これにより、国内の地表水を原水とする浄水場でも、ろ過処理の後段であれば、紫外線処理が有効に機能しうることが報告した<sup>5)</sup>。

翻って、地表水を原水とする施設への紫外線処理導入の適否を論じるには、紫外線照射より上流の処理工程で事故が生じるリスクを想定し、それに伴う水質悪化が紫外線消毒効率に及ぼす影響を正しく理解する必要がある。ろ過処理等の機能低下で増加し紫外線処理を阻害しうる物質として、水中の懸濁粒子がある。懸濁粒子は、紫外線の水中への透過を阻害したり、微生物を紫外線から遮蔽したりして、処理効率を低下させる可能性がある<sup>6, 7, 8)</sup>。

上記の背景を踏まえ、本年度の研究目的を以下の通り設定した。

- i) 濁質粒子の特性（素材、色、粒径）が紫外線処理に及ぼす影響について、実験データの解析と知見の整理
- ii) 3 年間の総括として、装置設計や運転方針など実務に資する情報の発信

実験は以下のとおり実施した。平成 27 年度報告書<sup>9)</sup>と一部重複するが、本年度の結論に直接関与する主要な部分について、改めて報告する。

#### (1) 試料の調整

標準粒子として、カーボンブラック粒子（黒、0.1-0.2 $\mu\text{m}$ 、Aqua-Black-001、東海カーボン）、ポリスチレン粒子（白、0.2 $\mu\text{m}$  または 1.0 $\mu\text{m}$ 、Polybead® Microspheres, Polyscience 社製；黒、0.2 $\mu\text{m}$  または 1.0 $\mu\text{m}$ 、Polybead® Black Dyed Microspheres, Polyscience 社製）の 5 種を選定し、粒子の個数濃度（個/mL）で条件を調整した（表 1）。一部の濃度条件については、濁度等の水質分析のみ実施し、微生物試験で

は採用しなかった。なお、選定した 0.2 $\mu\text{m}$ 、および 1.0 $\mu\text{m}$  の粒径は、平成 26 年度に調査した台風・降雨直後の地表水系浄水場原水の粒径分布のピークに相当する<sup>5)</sup>。粒径分布はナノトラック粒度分析計（UPA-EX150、NIKISSO）、粒子濃度は Nano sight（LM10、Malvern）で測定した。

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。表 2 に、微生物添加後の試験水水質を示す。表 2 における粒子濃度 0 とは、標準粒子を添加せずに微生物のみを添加した試料の水質を示す。紫外線透過率、濁度、色度はいずれも後述する分析方法により測定した。

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 <sup>10</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>
カーボンブラック (親水性)	黒	CB	0.12-0.21	○	○	-
				○	○	-
ポリスチレン	白	W0.2	0.2	○	○	-
	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)

#### (2) 紫外線照射

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（GL15、TOSHIBA）を用い、試料表面の紫外線（254nm）線量率を紫外線強度計（UVR-2、TOPCON）

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。実験期間を通じ、表面線量率は概ね0.275mW/cm<sup>2</sup>であった。Bolton and Linden (2003)<sup>10)</sup>に従い、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。

### (3) 分析項目と分析手法

試験水の254 nm吸光度(A<sub>254</sub>[cm<sup>-1</sup>])は分光光度計(UH5300、日立)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色度計(WA6000、日本電色工業)で測定した。大腸菌IFO3301はクロモカルト寒天培地(Merck社)、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、初期濃度について大腸菌は10<sup>6</sup> CFU/mL、MS2は10<sup>7</sup> PFU/mLのオーダーとなるよう調整した。

表2 微生物添加後の試験水の水質(平成27年度報告書<sup>9)</sup>より)

粒子濃度 (個/mL)	紫外線透過率(%)				濁度(度)				色度(度)				
	10 <sup>10</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>	0	10 <sup>10</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>	0	10 <sup>10</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>	0	
大腸菌	CB	1.3	64.0	-		59.9	5.86	-		1640	164	-	
	W0.2	3.7	64.0	-	94.7	32.5	3.48	-	1.69	82.8	12.7	-	0.00
	B0.2	-	68.6	-		-	3.09	-		-	11.8	-	
	W1.0	-	1.2	26.7		-	1820	183		-	50.4	4.13	
CB	0.4	56.0	-			51.7	1.52	-			1690	169	
MS2	W0.2	4.4	69.2	-	97.0	42.9	0.58	-	0.00	69.6	13.8	-	0.74
	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3 地表水を原水とする浄水場の原水の水質変動幅(平成26年度報告書<sup>5)</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

(\* : 統計的外れ値に相当)

### 3. 維持管理上の留意事項の検討

#### 3.1 地表水を原水とする浄水場において濁度管理ならびに紫外線処理を適切に行う上での留意点

現行の「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」では、レベル4施設に対しても「浄水処理の安全性を一層高めるために、ろ過池等の出口の濁度を0.1度以下に維持することが可能なろ過設備と紫外線処理設備を併用することとしてもよい」とされており、適切な濁度管理の下に地表水の紫外線処理を行うことが可能である。むしろ多段階バリアの観点からすれば、耐塩素性病原微生物などによる汚染の恐れが高い原水に対しては、積極的にろ過処理と紫外線処理を併用することが望ましいものである。しかしながら、現在までに国内で地表水に紫外線処理を導入した事例は見受けられない。

ここでは、地表水を対象とした紫外線処理の導入を推進する上での一助とすべく、海外における地表水紫外線処理および濁度管理事例等に関する文献情報を収集し、わが国の地表水を原水とする浄水場において濁度管理ならびに紫外線処理を適切に行う上での留意点について抽出することを目的とした。諸外国における水道水に由来するクリプトスポリジウムへの集団感染事例を収集し、対策として紫外線消毒施設の導入を行った事例<sup>11)</sup>、浄水場における濁度制御・管理が不適切であった事例<sup>12,13)</sup>を選択、各事例における集団感染発生の経緯や要因を抽出した。さらに、世界保健機関(WHO)が公表した水道の濁度管理に関する技術報告<sup>14)</sup>を参照し、濁度管理における目標値を抽出した。

#### 3.2 既設の浄水施設に紫外線処理設備を新たに追加する場合の留意点

今後、紫外線処理が地表水に対しても一般的に実施されることを想定すると、紫外線処理設備は既存の浄水処理設備に追加的に導入

される事例が多いと考えられる。そのような場合の留意点を整理しておくことが望ましいと判断し、ケーススタディを実施した。

紫外線処理設備を追加的に導入するケースを具体的に想定し、どのような課題が生じるかを整理した。例題とする事業体の選定では、次のような条件を設定した；

- i) 地表水を急速ろ過または緩速ろ過で処理している施設がある。
- ii) 紫外線処理設備が既に導入され、紫外線処理設備の運用経験がある。

選定したTm市においてヒアリング調査を行い、紫外線処理が現状では導入されていない合計4施設を事例対象とした。

#### 3.3 地表水を処理する既設の砂ろ過水の紫外線吸光度

紫外線吸光度は水質基準の51項目には含まれていない。このため、地表水を水源とする国内4施設の原水及び砂ろ過水(いずれも急速ろ過)の紫外線吸光度について調査を行った。

#### (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. 原水条件及び処理効果の検証

図2～図4に、回分式における総吸光度を同じに調製したMS2不活化実験の結果を示す。横軸に用いた平均紫外線量とは、試料の総吸光度に応じて紫外線照度が減衰することを仮定した平均紫外線照度に照射時間を乗じたものであり、散乱光が無いことを仮定した算定方法である。

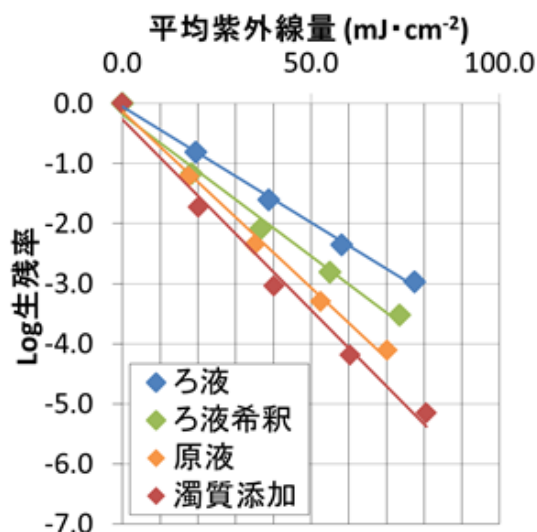


図2 総吸光度1の下水試料におけるMS2不活化実験の結果

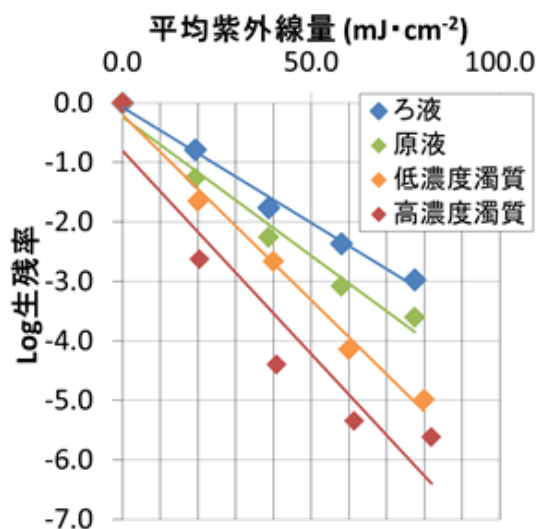


図3 総吸光度2の下水試料におけるMS2不活化実験の結果

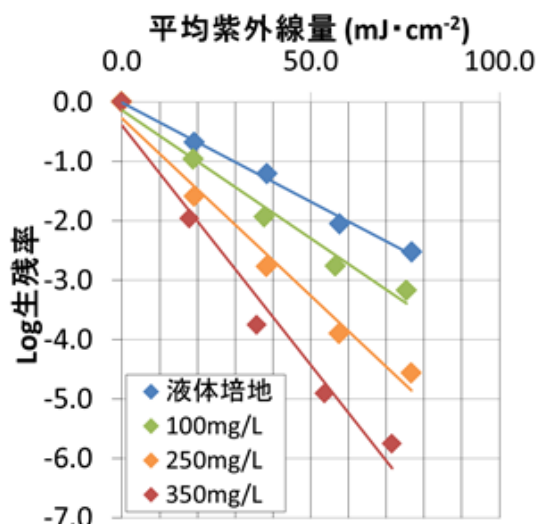


図4 総吸光度1のカオリン添加試料におけるMS2不活化実験の結果

いずれの場合においても、濁質割合および懸濁態吸光度の大きい試料のほうが、不活化速度が大きくなった。

本来は同じ微生物を紫外線によって不活化しているので、同じ平均紫外線量の照射をすることで同じlog不活化になるはずである。ここでは、直進して到達する紫外線量は同じであるにもかかわらず、懸濁態吸光度の大きい方が不活化効果が大きくなっているため、懸濁物質による散乱紫外線による不活化が進行していることが強く示唆される。

そこで、散乱光を評価できる積分球式吸光度計を用いて積分球吸光度を測定した。懸濁態吸光度の大きい試料ほど、積分球吸光度の値は小さくなった。すなわち、試料に入射してから直進せずに散乱する紫外線が顕著であることがわかる。そして、紫外線照度の減衰が積分球吸光度に従う直進光として近似的に表せるのではないかと考え、平均紫外線照度の計算式の吸光度項に積分球吸光度を代入し、照射時間を乗じて積分球式紫外線量を求めた。図2～図4に示したlog生残率の実験結果と積分球式紫外線量の関係を図5に示す。

図2～図4で異なる傾きを持っていたプロットが、ほぼ同じ直線上に乗り、積分球吸光度で算定した吸光度を用いて紫外線量を算定すればその値が log 生残率と線形の関係で表せることがわかった。

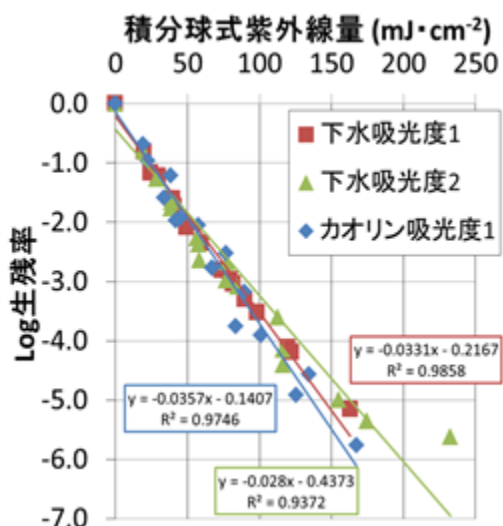


図5 積分球式紫外線量とMS2のlog生残率の関係

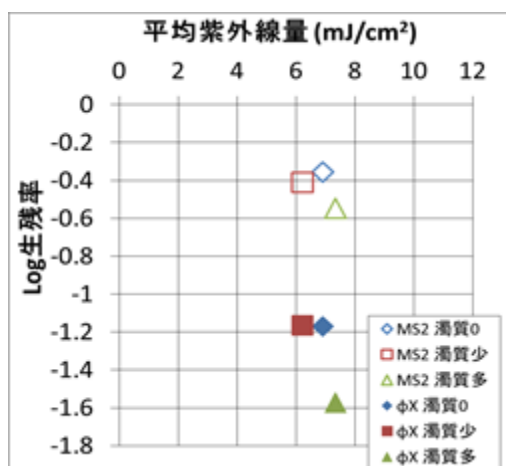


図6 流水式紫外線照射における平均紫外線量とlog生残率の関係

流水式紫外線照射に関しても同様に、図6に示すとおり平均紫外線量で横軸をとった場合には、平均紫外線量とlog生残率の関係は明らかでなかった。

一方、積分球式紫外線量を横軸にした場合には、図7に示すとおり積分球式紫外線量とlog生残率が比例している傾向にあった。

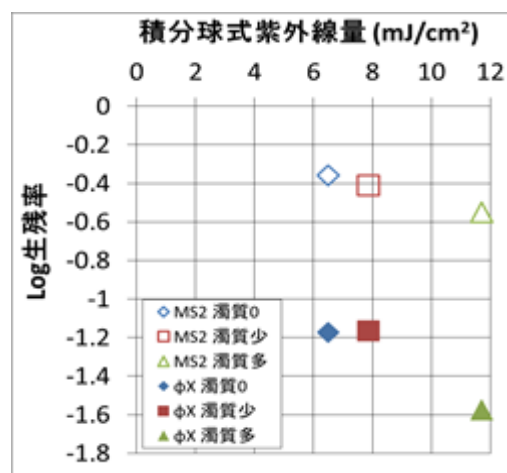


図7 流水式紫外線照射における積分球式紫外線量とlog生残率の関係

図7を、別途実験で求めた各ウイルスの不活化係数を考慮して254nm換算紫外線量を求めて書き直すと図8になった。

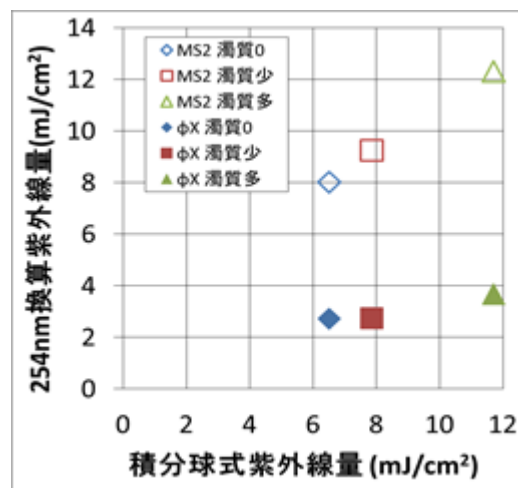


図8 積分球式紫外線量と各ウイルスによって求められた254nm換算紫外線量の関係

この結果より、紫外線耐性の大きいMS2(90%不活化に要する紫外線量 22.47 mJ/cm²)よりも、紫外線耐性の小さいφX174(90%不活化に要する紫外線量 2.336



mJ/cm<sup>2</sup>) の換算紫外線量 (RED) は小さくなることがわかった。

## 2. 照射手法及び設計諸元の検討

### 2.1 濁度変動に対応する紫外線照射線量の検討

#### (1) 浄水場原水及び浄水汚泥懸濁液における散乱分率と濁度比の相関

図9に対象試料の可視光(660 nm)の散乱分率と濁度比(透過光方式/透過+90°散乱光方式)を測定した結果を示す。図には昨年度の研究成果として得られたカオリン、活性炭、カーボンブラック、ベントナイトの各モデル濁質を50, 70, 80, 100 mg/Lの4段階に調整した懸濁溶液について測定した結果も併せて示した。

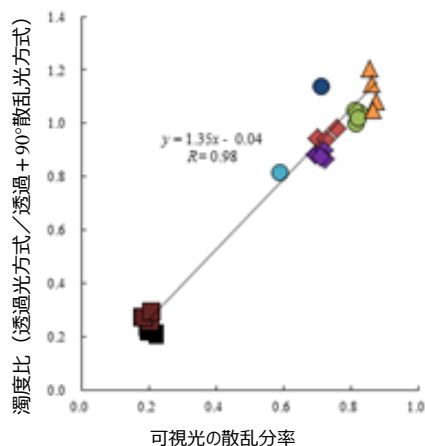


図9 各試料の可視光(660 nm)散乱分率と濁度比

- カオリン, ■ 活性炭, ■ カーボンブラック,
- ▲ ベントナイト, ◆ C 浄水場汚泥,
- ◆ D 浄水場汚泥, ● A 浄水場高濁度原水,
- A 浄水場通常時原水濃縮懸濁液

図10は可視光(660 nm)の散乱分率とUV光(254 nm)の散乱分率との関係について検討した結果を示したものである。

#### (2) X線回折による濁質試料の測定

図11~図17に各試料のX線回折結果を示した。

UV光の散乱程度が高いカオリン、ベントナイト、C 浄水場汚泥、A 浄水場原水において明確なピークが検出された。これらの試料ではいずれも回折角度が  $2\theta=26.4^\circ$  にピークが存在していた。UV光の散乱程度が低い、活性炭、カーボンブラック、D 浄水場汚泥においては明確なピークはみられなかった。

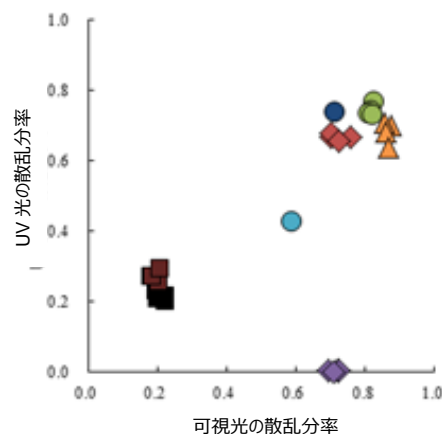


図10 各試料の可視光(660 nm)と紫外光(254 nm)の散乱分率の相関

- カオリン, ■ 活性炭, ■ カーボンブラック,
- ▲ ベントナイト, ◆ C 浄水場汚泥,
- ◆ D 浄水場汚泥, ● A 浄水場高濁度原水,
- A 浄水場通常時原水濃縮懸濁液

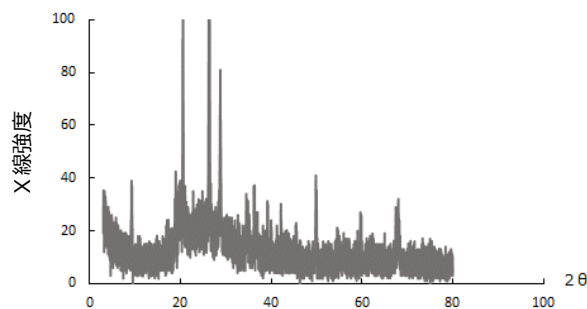


図11 カオリンのX線回折結果

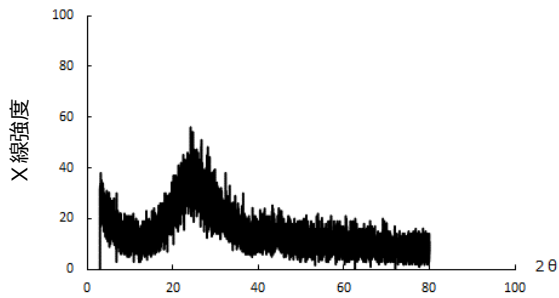


図 12 活性炭の X 線回折結果

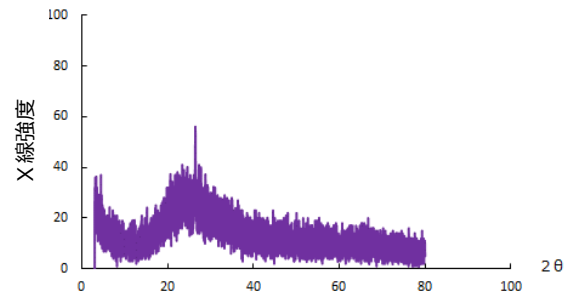


図 16 C 浄水場汚泥の X 線回折結果

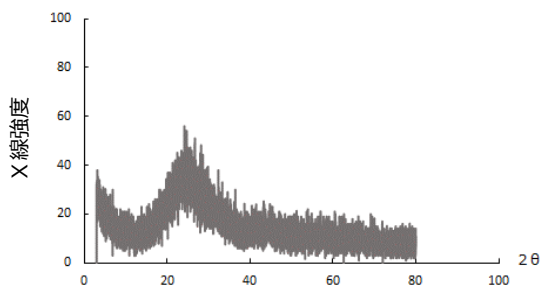


図 13 カーボンブラックの X 線回折結果

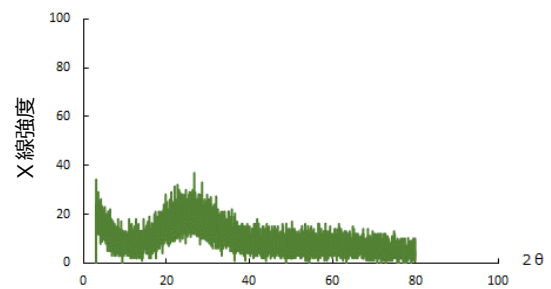


図 17 D 浄水場汚泥の X 線回折結果

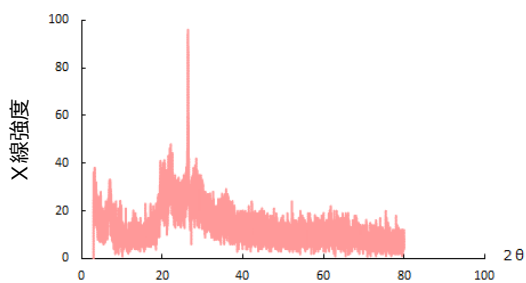


図 14 ベントナイトの X 線回折結果

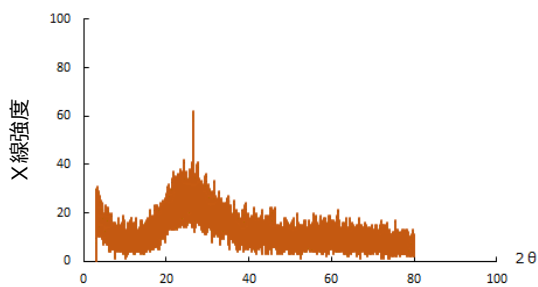


図 15 A 浄水場原水の X 線回折結果

## 2.2 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 2 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、これは試料外観の印象と整合した。

ここで、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<sup>5)</sup>(9 月 - 3 月の毎月 1 回ずつ測定、n=7) を表 3 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著しく不利な水質条件であることが確認された。

## (2) 粒子濃度と紫外線透過率の関係

粒子濃度と紫外線透過率の関係を図18に示す。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(254nm)吸光度を測定し、透過率に換算した。

図18より、 $0.2\mu\text{m}$ の粒子(CB、W0.2、B0.2)は粒子濃度が $10^9\text{--}10^{10}$ 個/mLにかけて、 $1.0\mu\text{m}$ の粒子(W1.0、B1.0)は $10^7\text{--}10^8$ 個/mLにかけて透過率が急低下する閾値が観察された。

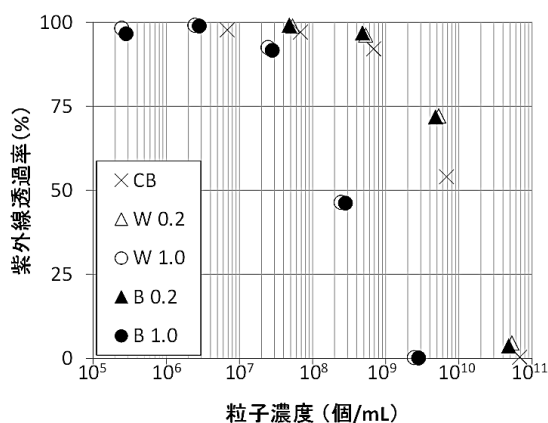


図18 粒子濃度と紫外線透過率の関係

このように、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。

## (3) 不活化実験

大腸菌とMS2の不活化結果について、同一粒径( $0.2\mu\text{m}$ )で異なる粒子を添加した場合の結果を図19に、同一粒子(ポリスチレン白)で粒径を変えた場合の結果を図20に、それぞれ示す。粒子条件ごとに紫外線照射を独立して3回実施し、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19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が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。

一方、図20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試料が最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した可能性が推定された。

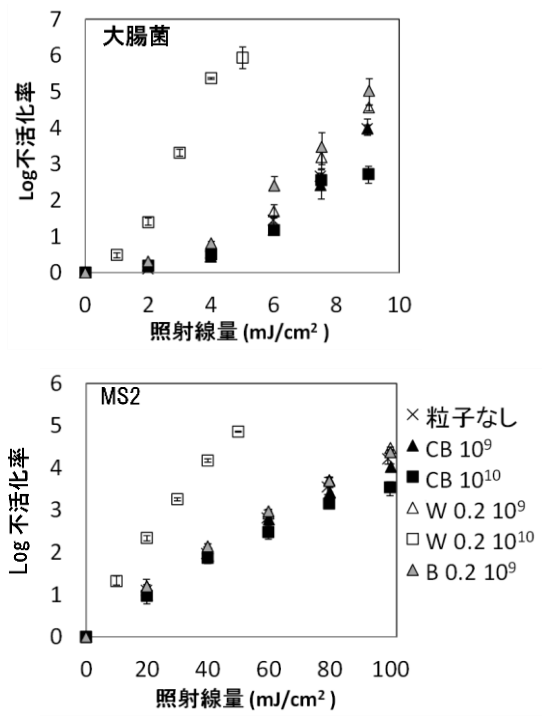


図 19 0.2µm 粒子添加時の不活化

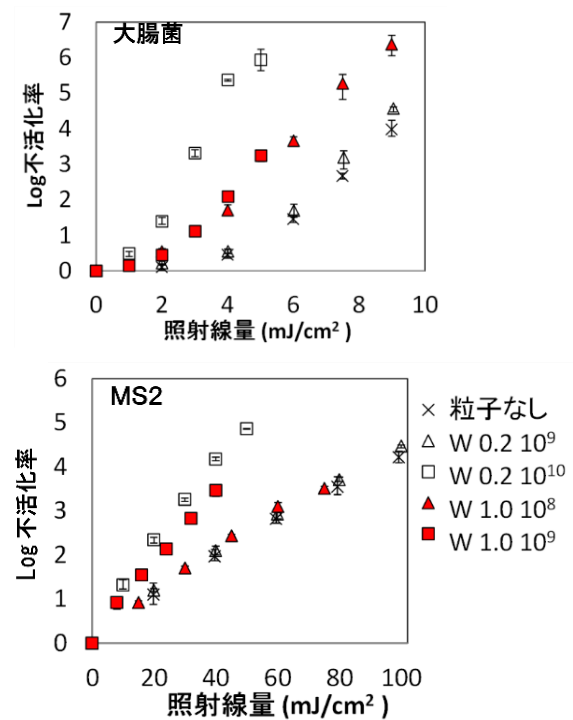


図 20 白色ポリスチレン粒子添加時の不活化

### 3. 維持管理上の留意事項の検討

#### 3.1 地表水を原水とする浄水場において濁度管理ならびに紫外線処理を適切に行う上での留意点

##### (1) 水道に由来するクリプトスポリジウム集団感染および紫外線処理施設の導入事例<sup>11)</sup>

英国 Wales 北西地域において、2005 年秋季を中心としてクリプトスポリジウム感染症の患者が集団発生し、うち 218 名は *Cryptosporidium hominis* への感染が確認された。現地の疫学調査により、水道水との関連が示唆された。当該地域の浄水場は、Llyn Cwellyn 貯水池を水源としており、取水口対岸に下水処理場が、また流域に少なくとも 13ヶ所のセプティックタンクが存在していた。Llyn Cwellyn 貯水池自体は清浄な原水水質であるものの、高濁度の発生時には大腸菌や腸球菌が検出されていた。また、原水水質が良好であるため、浄水処理は圧力砂ろ過および塩素消毒のみでよいとされており、凝集剤は未適用であった。

感染症の発生時において、浄水場の機能には特段の障害は認められなかったものの、水道水中からクリプトスポリジウムが検出された。しかしながら、その濃度は最大 0.08 オーシスト/10L であり、規制値 (1/10 L av./1000 L/24 hrs) 未満であった。

2005 年 11 月 18 日より、現地では免疫不全患者に対する水道水の煮沸勧告を行い、さらに 11 月 29 日より全住民に煮沸勧告を拡大した。当時の規制では、クリプトスポリジウムの物理的な除去によらない対策は認められていなかったが、科学的根拠ならびに短期間での導入が可能な手法として、水道会社に紫外線消毒の導入を勧告した。

紫外線消毒設備の導入が完了した、翌年 1 月 30 日に煮沸勧告が解除された。

##### (2) 水道に由来するクリプトスポリジウム集団感染と浄水場濁度管理との関連に係る事例<sup>12,13)</sup>

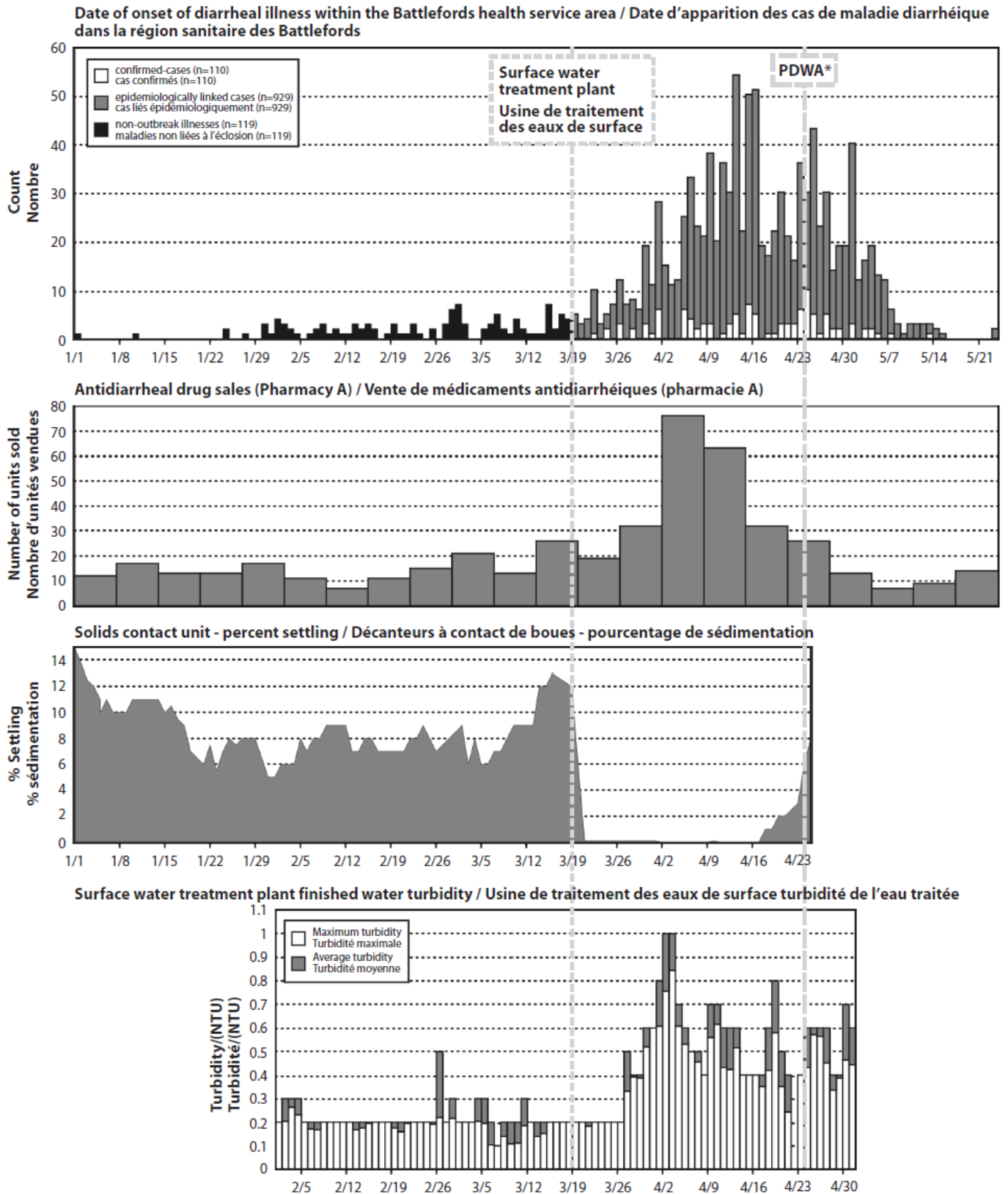
2001 年 3 月下旬から 4 月上旬にかけて、カナダ国 Saskatchewan 州 North Battleford 市 (人口約 14,000) や Battleford 町 (人口約 4,000) を中心に下痢症が集団発生し、患者便から *Cryptosporidium parvum* が検出された。4 月 25 日に州保健部局が同国保健省に対して疫学調査や浄水場調査等の支援を依頼、同日に水道水の予防的 (煮沸) 勧告を発令した。現地調査により下痢症患者 1,907 名が同定され、うち 275 名は *C. parvum* への感染が確定した。当該地域の患者数は 5,800–7,100 名の範囲であると推定された。

なお、医薬品販売数に関する調査により、3 月下旬 – 4 月上旬にかけ、当該地域における市販止瀉薬の販売金額は、前後の時期と比較して 5 倍増に達した。また、多変量解析により当該地域の水道水摂取の機会が増すと感染リスクが増加するとの結果が得られた。

当該地域には Saskatchewan 川地表水を原水とする浄水場、および、同河川流域に点在する井戸の地下水を原水とする浄水場が存在しており、前者の浄水処理は凝集沈殿 – 砂ろ過 – 塩素消毒、後者は塩素消毒 – 砂ろ過 (金属除去) であった。このうち、地表水を水源とする浄水場にて、同年 3 月 20 日以降の高速凝集沈殿池 (SCU: solids contact unit) のメンテナンスに伴う運用停止によって化学凝集が行われない状態となり、砂ろ過前工程水の沈降性が悪化すると共に、浄水の濁度が増加 (0.2→0.5NTU) していることが確認された。当該の浄水場では、残塩濃度ならびに微生物指標は適合しているものの、浄水からクリプトスポリジウムオーシストの検出が確認された。次頁の図 21 (文献 12 から引用) に示すように、下痢症患者数の増加、市販止瀉薬の販売量の増加、砂ろ過前工程水の沈降性の減少、浄水の濁度増加の動向は一致していた。

Figure 2: Temporal comparison of disease burden and water quality data

Figure 2 : Comparaison temporelle des données sur le fardeau de la maladie et la qualité de l'eau



\* Precautionary drinking water advisory (PDWA)

図 21 カナダ国クリプト集団感染事例における患者数・市販止瀉薬販売量・工程水沈降率・浄水濁度<sup>12)</sup>

(3) 水道の濁度管理に関する技術報告

WHO 水・衛生・健康部門は、2017年2月に標記技術報告をウェブサイトにて公開した<sup>14)</sup>。当報告は水道事業の運転管理者と規制者を対象とし、水道原水や浄水処理過程、浄水における濁度管理の有用性と重要性に関する情報提供を行うことを目的としている。濁度目標値を表4に、また要旨の抄訳を以下に示した。

・濁度自体は公衆衛生上の直接的なリスクを意味するものでないが、水供給システム全体において、病原微生物の存在や危害イベント発生の有効な指標である。

- ・濁度は極めて利便性の高い指標であり、迅速、安価、常時重要な情報を得ることができる。濁度の測定は様々な状況に適用できる。
- ・濁度は簡易、正確かつ迅速に測定でき、水安全計画に定める管理措置上の運転モニタリング等にも広く用いられる。また代替水源の比較や、様々な管理措置の効果を評価する基準として使える。
- ・濁度は飲料水の審美的な指標としても重要である。

表4 WHO 水道システムの濁度管理における目標値および汚染指標<sup>14)</sup>

場所・処理工程	濁度目標値・汚染指標	備考
水源	原水濁度の急激な変化	・環境イベントや人為活動に由来する汚染 ・地下水取水施設等における汚染の侵入
	長期的な濁度変化	・流域内の変化、調査により是正措置を勧告
水処理	ろ過	
	[直接ろ過・急速ろ過] 各月のろ過水濁度 95%値<0.3NTU かつ、1NTU を超過しない	以下の除去性能に相当 ・ウイルス 1-2log 除去 ・クリプト、ジアルジア 2.5-3log 除去
	[珪藻土ろ過・緩速ろ過] 各月のろ過水濁度 95%値≤1NTU	以下の除去性能に相当 ・ウイルス 1-2log 除去 ・クリプト、ジアルジア 3log 除去
	[膜ろ過(MF・UF)] <0.1NTU	以下の除去性能を達成可能、膜孔径に依存 ・ウイルス 4-7log 除去 ・クリプト、ジアルジア 1-6log 除去
消毒	理想的には<1NTU [大規模・良好な浄水場] 常時<0.5NTU、平均≤0.2NTU [小規模・資源が限られた浄水場] <5NTU	濁度が 1NTU を超える場合、適切な CT 値を確保するために、消毒剤の注入率または接触時間（紫外線消毒の場合は照射線量）を高める必要がある
配水過程・貯留	予期せぬ濁度上昇	・様々な障害やイベントによって生じうる ・速やかな調査と改善措置を講じる必要がある
給水 末端	審美性	理想的には<1NTU 4NTU 以上で目に見える濁りを生じる
	家庭内 貯留	理想的には<1NTU 困難であれば<5NTU 濁度が 1NTU を超える場合、消毒剤の注入率または接触時間を高める必要がある

### 3.2 既設の浄水施設に紫外線処理設備を新たに追加する場合の留意点

各事例の検討結果を表5にまとめて示した。全般的に、紫外線処理を増設する場合には、浄水池の後段への設置となる可能性が高いことがわかった。具体的には、事例1、事例2及び事例4が該当した。事例1では、ろ過処理の直後には十分なスペースがなく、また紫外線処理施設増設に伴う圧力損失が浄水池の水位を低下させてしまう結果、十分なバッファ容量の確保に対して障害となる恐れがあった。事例1の場合の圧損の概算値を表6に示した。事例2では、ろ過池と浄水池とが直結しているため、また事例4においては既設の建屋との位置関係上の制約のため、それぞれろ過池直後で浄水池前段となる位置への設置は不可能と判断した。事例3については、とくに大きな障害はないと考えられた。

これらの事例1、事例2、及び事例4では、紫外線処理の前段で塩素注入が行われており、残留塩素の存在下での紫外線処理となるため、水質の事前確認が必要である。

### 3.3 地表水を処理する既設の砂ろ過水の紫外線吸光度

全結果は付録3に示したが、一例を図22に示す。いずれの施設においても、ろ過水吸光度の測定値は50mmセル長の値（波長は260nmまたは254nm）であった。地表水以外の紫外線処理における水質要件では、254nmの紫外線吸光度が0.125abs./10mm未満であることとされているが、いずれの施設においてもろ過水の紫外線吸光度は0.125abs./10mm未満であった。

原水中の吸光度が高い施設においては、凝集処理及び活性炭処理によって紫外線吸光度の低減がはかられていた。

表5 紫外線処理装置を追加導入する場合の事例検討結果

事例	浄水場	水源 処理方法, 施設規模概要	検討結果
1	Hh 浄水場	地表水 急速砂ろ過	浄水池のHWLの制約と用地上の制約から、浄水池の後段に設置可能
2	Ik 浄水場	地表水 急速砂ろ過	ろ過池と送水ポンプ井が直接接続のため、その後段で配水池の前段、もしくは配水池直後に設置可能
3	Oy 浄水場	湧水 横流式沈澱+ 緩速ろ過	緩速ろ過池の後段、浄水池の前段に設置可能、水位降下についても問題なし
4	Rd 浄水場	地下水 直接ろ過	浄水池後段に設置可能。場外配水池へ向かう送水管路を用地内で迂回させて設置。



表 6 紫外線処理設備の損失水頭概算値（単位:m）（事例 1, Hh 浄水場）

	配水管口径(mm)	φ800	φ450	φ300	φ200	備考
1	流量	30,700 m <sup>3</sup> /d =0.355m <sup>3</sup> /s	10,000 m <sup>3</sup> /d =0.116 m <sup>3</sup> /s	5,000 m <sup>3</sup> /d =0.058 m <sup>3</sup> /s	2,500 m <sup>3</sup> /d =0.029 m <sup>3</sup> /s	
2	分岐による損失	0.009	0.01	0.012	0.016	
3	曲りによる損失	0.012	0.016	0.012	0.012	2 台
4	弁による損失	0.066	0.082	0.104	0.082	2 台
5	ストレーナーによる損失	1	0.9	1.4	1.4	バケツ ト型 2 台
6	漸縮による損失1	0.003	0.003	0.002	0.005	
		(φ800⇒φ600)	(φ450⇒φ350)	(φ300⇒φ250)	(φ200⇒φ150)	
7	漸縮による損失2	0.005	0.004	0.007	—	
		(φ 600⇒φ 500)	(φ 350⇒φ 300)	(φ 250⇒φ 200)	—	
8	紫外線照射装置による損失	0.95	0.33	0.47	0.2	
		φ 500, 中圧型	φ 300, 中圧型	φ 300, 中圧型	φ 150, 低圧型	
9	漸拡による損失1	0.019	0.05	0.066	0.03	
		(φ 500⇒φ 600)	(φ 300⇒φ 450)	(φ 200⇒φ 300)	(φ 150⇒φ 200)	
10	漸拡による損失2	0.018	—	—	—	
		φ 600⇒φ 800	—	—	—	
11	合流による損失	0.03	0.033	0.041	0.053	
12	配管による損失	0.004	0.001	0.002	0.047	5m 想定
	損失水頭 計	<b>2.116</b>	1.429	2.116	1.845	

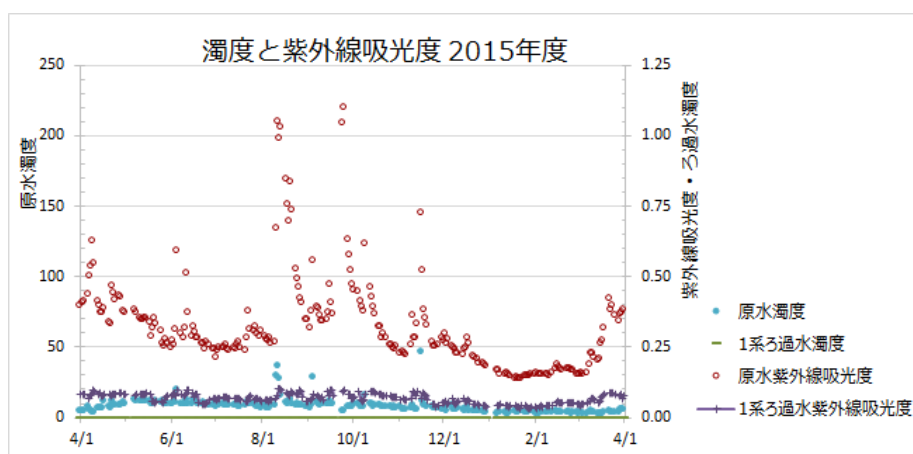


図 22 紫外線吸光度 (Ak 浄水場)

## D. 考察

### 1. 原水条件及び処理効果の検証

濁質を含んだ試料に対する紫外線照射における微生物の不活化効率は、単に濁質が加えられた場合には濁質が無い場合よりも下がる、すなわち同じ消毒効果を得るために照射すべき紫外線量は大きくなる。以上が従来の考え方であり、これは妥当である。しかし、試料内部に到達する紫外線照度を積分球吸光度によって評価することで、回分式においても流水式においても、積分球式紫外線量とlog不活化率が比例していることが明らかとなった。すなわち、総吸光度で算定されるよりも散乱光によって消毒効率が增大し、その程度が定量的に予測可能であるのであれば、運転上の管理項目として考慮することで、消毒効果を損なわないようにできると考えられる。

また、流水式紫外線照射装置の性能評価において、紫外線耐性が既知の微生物を流下させてその生残率から換算紫外線量 (RED) を求めることが行われている。しかし、換算紫外線量は、用いる微生物の紫外線耐性の相違により、同じ紫外線量分布を前提にしたとしても異なる値になることが理論的に示されている。本研究の実験結果においても、異なる微生物を流下させた場合に換算紫外線量の値は異なり、紫外線耐性の大きい微生物の方が換算紫外線量の値が大きくなった。このことは、クリプトスポリジウムのような紫外線耐性の小さい微生物の不活化効果を他の微生物で代替して流下実験をして求めた場合には、換算紫外線量で表される数値は危険側となる可能性がある。そのため、できる限り紫外線照射の対象となる病原微生物と同じ紫外線耐性を持つ微生物を用いて性能評価をすることが望ましいと考えられた。

### 2. 照射手法及び設計諸元の検討

#### 2.1 濁度変動に対応する紫外線照射線量の検討

##### (1) 濁質の散乱特性の評価方法について

図9の結果から濁度比と可視光の散乱分率との間に相関が見られることが分かった。従って濁度測定法による濁度値の違いは光散乱程度によるものであることが示唆された。また、濁度比を可視光の散乱分率を表す指標として利用できることが考えられた。

図10の結果から、D浄水場汚泥以外の試料では可視光(660 nm)と紫外光(254 nm)についての相関性が認められた。D浄水場汚泥では可視光の散乱分率は高いもののUV光の散乱分率は極端に低い。これはD浄水場が凝集剤としてPSI(ポリシリカ鉄)を用いていることが原因と考えられた。そこでC浄水場汚泥(凝集剤としてPACを使用)とD浄水場汚泥およびPSIの吸光スペクトルを測定した結果、C浄水場汚泥は紫外光での吸光ピークは見られなかったが、D浄水場汚泥とPSIではいずれも紫外域で大きく吸光していることがわかった。このことからPSIを凝集剤として用いていることが、紫外光の散乱分率の低下の原因であると考えられた。

##### (2) 濁質のX線回折分析と光散乱特性について

UV光の散乱程度が高い試料において明確なピークが検出された。これらの試料ではいずれも回折角度が $2\theta=26.4^\circ$ にピークが存在していた。

この場合、Braggの法則<sup>15)</sup>より試料に含まれる結晶中の分子間距離は $d = 0.34 \text{ nm}$ であった。文献<sup>16), 17)</sup>により、分子間距離が $0.34 \text{ nm}$ でピークを持つ物質は石英の結晶と推定された。以上のことから濁質中に石英の結晶を含む場合に、可視光ならびにUV光の散乱性が高くなることがわかった。

## 2.2 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、縦軸を常用対数とする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  $k$  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 では濃度が高いほど小さくなり、白のポリスチレン粒子では濃度が高いほど大きくなった。解析の結果、粒子添加なしの試料の  $k$  に比べて、W0.2 の  $10^{10}$  個/mL と W1.0 の  $10^9$  個/mL の  $k$  は有意に大きく ( $p<0.01$ )、これらの試料では散乱光が卓越し不活化に寄与したものと推察された。一方、CB の  $10^{10}$  個/mL では粒子添加なしの試料よりも  $k$  が有意に小さく、消毒効率の低下が認められた ( $p<0.05$ )。

濁質によって不活化速度が有意に低下した試料は、黒色粒子が著しく高濃度で存在する特殊な条件で、濁度 50 度以上の極端な条件に相当し、実務では紫外線処理以前に水質事故 (処理機能の著しい低下) として検出可能なレベルと推察された。すなわち、降雨に伴う原水濁度の急上昇など地表水に特徴的な水質変動は、紫外線照射より上流の処理工程で対応する設計思想が有効と考えられた。一方、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 の各試料と粒子添加なしの試料とで不活化速度に有意な差は無かった ( $p>0.05$ )。このうち、大腸菌では不活化効率が上昇した W1.0 の  $10^8$  個/mL (図 20 参照) を除く 3 試料 (CB の  $10^9$  個/mL、B0.2 の  $10^9$  個/mL、W0.2 の  $10^9$  個/mL) は、濁度 0.6-1.5 度、色

度 13 度以上、紫外線透過率 56-70% と紫外線処理に不利な条件に相当したが、粒子添加なしの試料 (濁度 0.0 度、色度 0.7 度、紫外線透過率 97%) と同等の不活化効率が得られた。よって、少なくとも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と考えられた。

本研究により、水中に懸濁粒子が存在しても紫外線消毒を阻害しない場合や、粒子による紫外線散乱で消毒効率が高まる場合のあることが示された。紫外線処理は濁度上昇に対し一定の頑健性を有しており、浄水処理で想定される濁度変動の範囲では、濁度による紫外線処理性能の低下は無視できる (有意差を検知できない) レベルであると推察された。また、少なくとも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、紫外線透過率 75% 以上) を満たす限り、原水の由来によらず、濁質による処理効率の有意な低下は生じないと考えられた。紫外線による水の消毒は、紫外線 (光子) が水中を透過して微生物に到達し達成される。この原理を考えれば、紫外線処理の適用は、原水の由来が地表水か地下水かではなく、紫外線を照射する段階の水が一定の水質要件を満たすか否かで判断することが合理的である。ここで満たすべき水質要件は別途議論する余地があるが、少なくとも現行の地表水以外に適用される水質要件を満たす限り、紫外線処理が有効に機能することが確認された。

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 <sup>10</sup>	CB 10 <sup>9</sup>	粒子なし	B0.2 10 <sup>9</sup>	W0.2 10 <sup>9</sup>	W1.0 10 <sup>8</sup>	W1.0 10 <sup>9</sup>	W0.2 10 <sup>10</sup>
$k$ (平均) [cm <sup>2</sup> /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**

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

### 3. 維持管理上の留意事項の検討

#### 3.1 地表水を原水とする浄水場において濁度管理ならびに紫外線処理を適切に行う上での留意点

##### (1) 水道に由来するクリプトスポリジウム集団感染および紫外線処理施設の導入事例

文献 11 における英国 Wales の当該の浄水場のうち、圧力砂ろ過は原水中のマンガン除去を主な目的としており、クリプトスポリジウムオーシストの除去はまったく考慮されていなかった。また、原水水質が良好であるため化学凝集は適用できず、仮に適用したとしてもクリプトスポリジウムオーシストの除去性は向上しなかったであろうとの記述があった。水道水源である Llyn Cwellyn 貯水池が低濁度であるため、凝集処理でのフロック形成が困難であるとの認識であったと考えられる。

ろ過処理の運用については、各ろ過池に濁度計を設置して濁度の連続モニタリングを行い、ろ過池の逆洗後にはスロースタートを実施するなど、同国において推奨されるクリプトスポリジウム対策に沿った管理が行われていた。しかしながら、記録によれば再開直後のろ過水濁度は大幅に増加していた。

以上のことから、当該の浄水場における処理プロセスの設計ならびに運転管理は、クリプトスポリジウム等の耐塩素性病原微生物への対処としては、いずれも不適切であったと考えられる。

一方、事後対策ではあるものの、科学的根拠ならびに短期間での導入が可能な手法であることより、紫外線消毒が採用されたことは注目に値する。わが国においても、低濁度原水の濁度管理に苦慮している水道事業者が見受けられており、水源の糞便汚染に対する潜在的リスクが大きいと考えられるため、参考になると思われる。

##### (2) 水道に由来するクリプトスポリジウム集団感染と浄水場濁度管理との関連に係る事例

文献 12 及び 13 におけるカナダ国 Saskatchewan 州の当該の浄水場では、高速凝集沈澱池を 1 系統しか有しておらず、定期清掃等のメンテナンス時には、高速凝集沈澱池をバイパスした（凝集処理を行わない）直接ろ過処理が実施されていた。さらに、ろ過水等の濁度の常時監視は行っていなかったこと、濁度上昇時等の運転管理条件が明文化されていなかったこと、施設の設計上、ろ過池の逆洗浄後における捨水の実施が不可能であったこと、水道事業者職員の濁度管理およびクリプトスポリジウム等対策に関する認識が欠如していたことなど、当該の浄水場における処理プロセスの設計段階での不備、不適切な日常の運転管理、職員の教育不足など、様々な要因が指摘されていた<sup>13)</sup>。

注目すべきは、図 21 に示すように、集団感染の発生状況と、ろ過前水の沈降率、ならびに、浄水中の濁度の推移に明確な関連が見いだせる点である。とりわけ、浄水処理が適切に機能していた時点での浄水中の濁度は 0.2NTU であり比較的安定していたのに対し、浄水処理の不全が生じて以降は 0.5–0.6NTU に上昇し、かつ、0.4–1.0NTU の範囲で大きく変動した。このように、濁度の挙動は浄水処理における凝集沈殿・ろ過プロセスが適切に機能しているか判断する上で重要な管理指標の一つであり、その推移を継続的に監視すべきである。その一方で、濁度の値そのものは、病原微生物の存在状況を必ずしも反映しないため、濁度管理のみに依存した病原微生物リスクの制御には限界がある点には留意する必要があると思われる。

### (3) 水道の濁度管理に関する技術文書

WHO がこれまでに公表している飲料水水質ガイドライン<sup>18)</sup>でも、浄水処理における濁度管理の重要性は指摘されており、当技術文書は、水道事業の実務者に向けて、適切な濁度管理により水道水の微生物リスクを制御できること等を強調する目的でまとめられたものである。過去の水道水を通じた集団感染事例においても、大抵の場合、水道水の濁度上昇を伴うとされており、浄水の濁度を低く保つことは、病原微生物の除去や水道水の安全性を確保する上での指標として実績があるとしている。

ただし、水道水の濁度と特定の地域における胃腸炎の発生状況との間には、明確な相関が見いだされている事例、見いだされない事例ともに報告があり、地域ごとに状況が異なっている。

さらに、表 4 に示されている所定の濁度目標値に対する微生物またはウイルスの除去性能は、いずれも米国およびカナダ国において平常運転時の短期間の試験により得られた値であるため、原水水質の急激な変動や浄水処

理工程の不具合といった異常時には、除去性能は低下しうる点に留意する必要がある。

### 3.2 既設の浄水施設に紫外線処理設備を新たに追加する場合の留意点

地表水の急速砂ろ過処理では、通常、ろ過の直前までに塩素を注入しているため、ろ過直後に紫外線処理装置を設置した場合、その流入水には残留塩素が存在する。用地上の制約から、浄水池の後段に紫外線処理設備を設置する場合も、その流入水には残留塩素が存在する。

実際の浄水場のろ過水を採水し、実験的に紫外線処理を行った結果の例では、一部の化学物質で水質基準値と比較して極めて低濃度ではあるものの増加が認められたという報告がある<sup>19)</sup>。また、地表水以外の場合で、既に消毒後に紫外線消毒を行っている国内の実施例もある。したがって、残留塩素存在下の紫外線処理による副生成物が水質管理上問題となるケースが頻出するとは考えにくい。しかし、クリプトスポリジウム等対策指針と同時に公表された事務連絡の中でも指摘があるように<sup>20)</sup>、残留塩素存在下の紫外線処理は、残留塩素濃度が減少し、さらに臭化物イオンが共存する場合には臭素酸生成の可能性がある。したがって、残留塩素存在下の紫外線処理の導入に際しては、水質要件とともに、水質への影響も確認を行う必要がある。

### 3.3 地表水を処理する既設の砂ろ過水の紫外線吸光度

原水の紫外線吸光度がかなり高い施設においても砂ろ過水の紫外線吸光度は現状の地表水以外に対して実施されている紫外線処理の水質要件を満足していた。砂ろ過までの浄水処理において適切な処理を行えば、紫外線吸光度の高い原水の地表水に対しても現状の地表水以外に対する水質要件は適用可能と考えられる。

#### 4. 濁度管理技術を補完する紫外線処理の適用拡大に向けて

上記の検討結果より、濁質存在下で紫外線処理を行う場合、平均透過率を求めて適切に装置設計を行えば、病原微生物の不活化を適切に行えると考えられる。また、地表水を水源とする浄水処理で濁度管理を補完するため

の紫外線処理を適用しようとした場合、装置設計においては、濁度よりも紫外線透過率（以下、UVT と記載）が重要であることが一連の検証と検討から明らかとなった。

この点について、改めて図 23 を示す。

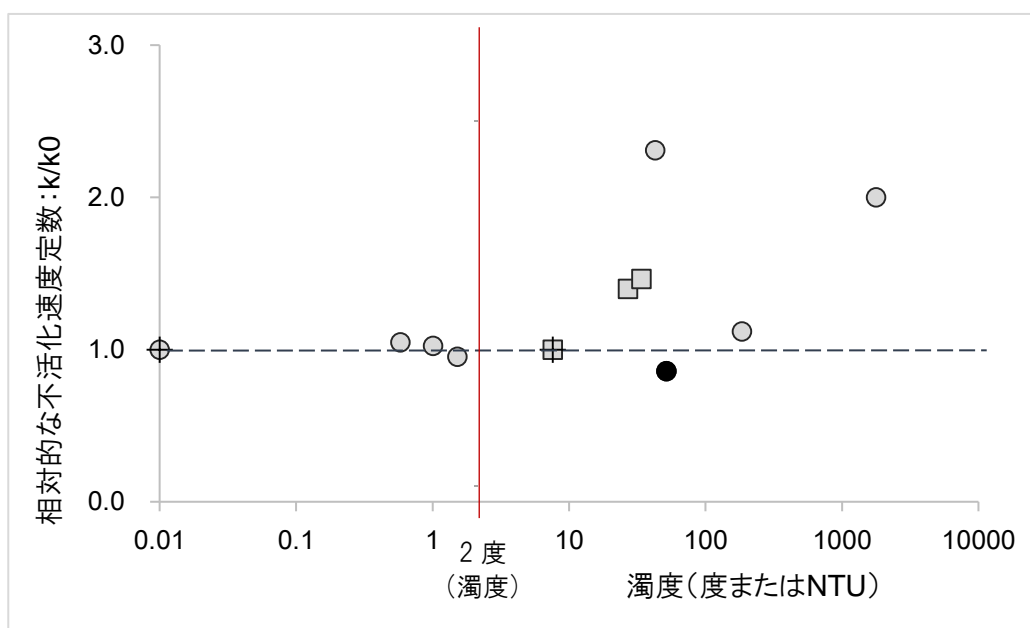


図 23 MS2 を添加した場合の紫外線照射による不活化結果への濁質の影響の有無

- : 図 19 及び図 20 のデータを元にしたデータ系列  
粒子径、色、濃度がそれぞれ異なる場合の相対的な速度定数  $k/k_0$
- ⊕ : 基準、この不活化速度定数  $k$  をこの系列の基準の  $k_0$  として、相対値  $k/k_0$  を算出
- : 5%の有意差で負側へ離れたケース
- : 文献 21 の最初沈澱池出口水に MS2 を添加して紫外線照射を行ったデータ系列における相対的な速度定数  $k/k_0$
- ⊕ : 最初沈澱池出口水最小濁度の場合。この  $k$  をこの系列の基準の  $k_0$  として、相対値  $k/k_0$  を算出

図 23 は図 19 と図 20 の MS2 不活化実験結果及び昨年度の報告書<sup>21)</sup>の最初沈澱池出口水に MS2 を添加して行った不活化実験結果について、それぞれ不活化速度定数を求め、基準とした値を  $k_0$  として相対的な不活化速度定数  $k/k_0$  を示したものである。これらの結果は、試料溶液に吸収されず、また試料溶液中の濁質粒子によって遮蔽されずに試料溶液の深部にまで届く平均紫外線量(すなわち試料溶液の紫外線透過率で補正を行った紫外線量)に対しての結果であり、紫外線ランプから放射している紫外線のうち試料溶液の表面で受け取る紫外線量とは異なる値である。

図 23 では、濁度が約 10 度以下であれば、相対的な不活化速度は常に約 1 であり、濁度による不活化速度への影響がないことを示している。また濁度が 10 度を超えると散乱の影響を受け、逆に不活化速度が大きくなる場合もあることが示されている。したがって、砂ろ過水濁度が 2 度以下(通常、浄水施設における砂ろ過水濁度の管理目標値は 2 度よりもかなり小さい)である場合、適切に設計を行った紫外線処理装置であれば、ろ過水濁度が 2 度程度まで変動しても影響はほとんどなく、不活化は十分に行える。

地表水の場合には、一般的に地下水よりも原水の水質変動が大きい。しかし、この変動は紫外線処理装置の前処理の砂ろ過で吸収することができる(クリプトスポリジウム等のもう一つの対策手段である膜処理についてはここでは対象外とする)。

砂ろ過後には、通常、濁質を除去するような処理は行われないため、砂ろ過水は微生物関係の項目以外の水道水としての水質基準を満足していると考えられる。したがって、地表水を対象として紫外線処理を行うことを想定した場合、砂ろ過水が紫外線処理装置の流入水であれば、紫外線処理設備の流入水質要件は、地表水・地表水以外を問わず同一でよい(濁度 2 度以下、色度 5 度以下、及び紫外線吸光度 0.125 未満 または UVT 75% 超)。

装置設計にあたっては、事前に変動対策として、装置の流入水の UVT を長期実測し、75% 超であることを確認すると同時に紫外線処理装置の設計に反映させることが望ましい。また、とくに地表水においては、紫外線処理の前段までの浄水処理において原水の変動が適切に吸収されていることを確認するために、処理紫外線処理装置への流入水 UVT を常時モニタリングすることが望ましい。

濁度は、紫外線処理を行う場合、その前段までの浄水処理の良否を判断するための指標であり、今後も重要な水質パラメータであり続けるであろう。しかし、D3.1 で指摘されているように、濁度の値そのものは、病原微生物の存在状況を必ずしも反映していない事例も観られる。

今後、地表水を水源とする浄水施設へもクリプトスポリジウム等の対策手段として紫外線処理施設が認められるとするならば、対策の選択肢が一つ増えることになり、現在でも対策が取られていない施設、あるいは対策の取れなかった施設にとっては対策を講じやすくなる可能性がある。

## 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. 原水条件及び処理効果の検証

紫外線照射の効果を減じると考えられていた濁質は、同じ吸光度となる溶存態吸光物質を含んでいる場合よりも不活化効果が向上することから、照射された紫外線を散乱していると考えられた。よって、水の吸光度を測定して不活化効果を算定する場合には安全側の数値となる。また、散乱して不活化に有効である紫外線量については、積分球式吸光度を用いて算定することが可能であり、運転管理上の考慮をすることで適正な紫外線量を照射することが可能であると考えられた。

紫外線耐性が異なる微生物を同じ紫外線照射装置に流下させた場合には、同じ換算紫外線量にならなかった。これは、装置内で照射される紫外線量に分布があることで説明が可能であった。また、紫外線耐性の大きい微生物で性能評価を行うと、それより耐性の小さい病原微生物に対する性能としては危険側になることが実験的に示された。そのため、流水式実験を行って性能評価を行う際には、できる限り病原微生物と同じ紫外線耐性を持つ微生物を用いて実験を行うことが必要である。

## 2. 照射手法及び設計諸元の検討

### 2.1 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浄水場原水および浄水場汚泥懸濁溶液の可視光散乱特性が評価できることがわかった。それらの濁質およびモデル濁質ともに、可視光の散乱分率と UV 光の散乱分率において強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。ただ

し PSI 凝集剤を含有している試料においては UV 光の散乱分率は低下することがわかった。

- (2) UV 光の散乱程度が高いカオリン、ベントナイト、C 浄水場汚泥、A 浄水場原水において明確なピークが検出された。これらの試料ではいずれも回折角度が  $2\theta=26.4^\circ$  にピークが存在しており、濁質中に分子間距離  $d=0.34\text{ nm}$  の石英の結晶を含むと推定された。従って、濁質中に石英結晶を含む場合に、可視光ならびに UV 光の散乱性が高くなると考えられた。

### 2.2 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、当該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の低下傾向が類似しており、紫外線透過率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。白色ポリスチレン粒子による紫外線の散乱が不活化に寄与したものと推定された。



(3) 異なる粒子条件における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 ( $p>0.05$ )。一方、濁質で不活化速度が有意に低下した試料は、濁度50度以上に相当し、実務では紫外線処理以前に水質事故(処理機能の著しい低下)として検出可能なレベルと推察された。

以上より、水中に懸濁粒子が存在しても紫外線消毒を阻害しない場合や、粒子による紫外線の散乱で消毒効率が高まる場合のあることが示された。紫外線処理は濁度上昇に対しある程度の頑健性を有しており、ろ過水で想定する濁度変動の範囲では、濁度による紫外線処理性能の低下は無視できる(有意差を検出できない)レベルであると推察された。また、少なくとも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、紫外線透過率75%以上)を満たす限り、適切に設計された紫外線処理装置であれば、原水の由来によらず、濁質による処理効率の有意な低下は生じないと考えられた。総じて、紫外線処理の適否は、原水が地表水であるかどうかではなく、紫外線を照射する段階の水質で判定することが合理的と考えられた。

### 3. 維持管理上の留意事項の検討

#### 3.1 地表水を原水とする浄水場において濁度管理ならびに紫外線処理を適切に行う上での留意点

諸外国における水道水に由来する過去のクリプトスポリジウムへの集団感染事例を参照したところ、いずれも、凝集処理を行うことなく後段の砂ろ過処理に供する場合があり、クリプトスポリジウム等の病原微生物が、浄水処理の工程において適切に除去されてい

なかったことが判明した。また、いずれの場合も、水道施設の設計、日常の運転管理、職員の教育など複層的な問題点が指摘されていた。

WHOの濁度管理に関する技術文書にもあるように、濁度の挙動は浄水処理における凝集沈殿・ろ過プロセスが適切に機能しているか判断する上で重要な管理指標の一つであり、その推移を継続的に監視すべきである。また、水道原水や給配水における異常を検知する上でも有用な指標である。

一方で、濁度管理のみに依存したクリプトスポリジウム等のリスクの制御には限界がある。この点において、既存の濁度管理技術に加えての紫外線消毒の適用は、有効性が高い技術手法であると考えられる。

#### 3.2 既設の浄水施設に紫外線処理設備を新たに追加する場合の留意点

ケーススタディを実施した事業者では、紫外線処理設備を導入することはいずれも可能であった。しかし、用地上の制約と損失水頭上の制約を理由として、浄水池の後段への設置が多くなる可能性が高いという結果となった。地表水の場合、これは残留塩素の存在下で紫外線処理を実施することになる。その場合は紫外線処理設備の導入前に水質確認が必要である。

#### 3.3 地表水を処理する既設の砂ろ過水の紫外線吸光度

原水の紫外線吸光度が比較的高い施設においても砂ろ過水の紫外線吸光度は現状の地表水以外に対して実施されている紫外線処理の水質要件を満足していた。適切な浄水処理を行えば、紫外線吸光度の高い原水の地表水に対しても現状の地表水以外に対する水質要件は適用可能と考えられた。

## 参考文献

- 1) 厚生労働省. 平成 28 年度第 1 回水道における微生物問題検討会, 配布資料 1 水道における微生物対策の実施状況について.  
[http://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-10901000-Kenkoukyoku-Soumuka/0000079239\\_4.pdf](http://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-10901000-Kenkoukyoku-Soumuka/0000079239_4.pdf)
- 2) 厚生労働省. 2007. 水道水中のクリプトスピリジウム等対策の実施について【健康水発第 0330005 号通知】 .  
<http://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisaku-jouhou-10900000-Kenkoukyoku/ks-0330005.pdf>.
- 3) 厚生労働省パブリックコメント「水道施設の技術的基準を定める省令」の一部改正等に関する意見募集の結果について. 平成 19 年 4 月.  
<http://search.e-gov.go.jp/servlet/Public?ANKENTYPE=3&CLASS-NAME=Pcm1090&KID=495060159&OBJCD=&GROUP>.
- 4) Harold Wright, David Gaithuma, Mark Health, Chris Schulz, Travis Bogan, Alexander Cabaj, Alois Schmalweiser, Marcia Schmelzer and Janet Finegan-Kelly, 2012, UV disinfection knowledge base, Water Research Foundation, Denver, CO. pp.104-106.
- 5) 小熊久美子, 2015. 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.
- 6) Örmeci, B. and Linden, K.G. 2002. Comparison of UV and chlorine inactivation of particle and non-particle associated coliform. *Water Science and Technology: Water Supply* 2(5-6), 403-410.
- 7) Christensen, J. and Linden, K.G. 2003. How particles affect UV light in the UV disinfection of unfiltered drinking water. *Journal American Water Works Association* 95(4), 179-189.
- 8) Mamane, H. 2008. Impact of Particles on UV Disinfection of Water and Wastewater Effluents: A Review. *Reviews in Chemical Engineering* 24(2-3), 67-157.
- 9) 小熊久美子, 2016. 平成 27 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 27 年度研究分担報告書.
- 10) Bolton R.J. and Linden K., 2003. Standardization of Methods for Fluence (UV Dose) Determination in Bench-Scale UV Experiments. *Journal of Environmental Engineering* 129:209-215.
- 11) B. W. Mason, R. M. Chalmers, D. Carnicer-Pont and D. P. Casemorel, 2010. A Cryptosporidium hominis outbreak in North-West Wales associated with low oocyst counts in treated drinking water. *J. of Water and Health*, 8(2).
- 12) Stirling, R., Aramini, J., Ellis, A., Lim, G., Meyers, R., Fleury, M. & Werker, D., 2001. Waterborne Cryptosporidiosis Outbreak, North Battleford, Saskatchewan, Spring 2001. *Canada Communicable Disease Report* 27(22), 185-192.
- 13) Robert D. Laing, 2002. Report of the Commission of Inquiry into matter relating to

the safety of the public drinking water in the City of North Battleford, Saskatchewan.

<http://www.justice.gov.sk.ca/nbwater/final/pdfdocs.html>.

- 14) World Health Organisation, 2017. Water quality and health - Review of turbidity information for regulators and water suppliers.  
[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/turbidity-technical-brief/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/turbidity-technical-brief/en/).
- 15) L.M.Harwood ら, 1999. 有機化合物のスペクトル解析入門, 化学同人.
- 16) 日本粘土学会, 2010. 「粘土科学」誌, 48(4), pp.158-198.
- 17) 須藤俊男, 1974. 粘土鉱物学, 岩波書店.
- 18) World Health Organisation, 2011. Guidelines for drinking-water quality, fourth edition.  
[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/2011/dwq\\_guidelines/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/dwq_guidelines/en/).
- 19) 林宗他, 2016. 「表流水系浄水処理を目的とした紫外線照射装置による水道水質への影響調査」平成 28 年度全国会議(水道研究発表会) 講演集, pp.272-273.  
厚生労働省. 平成 19 年 3 月 30 日事務連絡, 紫外線処理設備について.  
<http://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10900000-Kenkoukyoku/shigaisen-shori.pdf>.
- 20) 神子直之, 2016. 平成 27 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 27 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

- 1) 小熊久美子, 小塩美香, Jenyuk Lohwacharin, 滝沢智, 2017. 「水中の懸濁粒子が紫外線消毒効率に及ぼす影響」, 水環境学会誌 Vol. 40, No. 2, pp. 59-65.

### 2. 学会発表

- 1) Nodoka Kanzaki, Naoyuki Kamiko, 2016. Effect Of Suspended Substances On UV Disinfection During Wastewater Treatment Process. IWA World Water Congress & Exhibition 2016 (Poster Presentation).
- 2) 栗原潮子, 島崎大, 大垣眞一郎ほか, 2016. 「ろ過水濁度管理の実態と課題—濁度管理技術を補完する紫外線処理の適用に向けて—」, 平成 28 年度全国会議(水道研究発表会) 講演集, pp.296-297.
- 3) 神前和, 神子直之, 2017. 「積分球式吸光度を用いた紫外線消毒効率に対する懸濁物質の影響評価」, 第 51 回日本水環境学会年会講演集, p.244.

## 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

該当なし

## 地表水紫外線処理および濁度管理事例等に関する海外文献調査

研究分担者 国立保健医療科学院 島崎 大

**研究要旨** 海外における文献情報を収集し、わが国の地表水を原水とする浄水場において濁度管理ならびに紫外線処理を適切に行う上での留意点を抽出した。過去の集団感染事例では、水道施設の設計、日常の運転管理、職員の教育など複層的な問題により濁度管理が適切に行われていなかった。濁度の挙動は浄水処理における凝集沈殿・ろ過プロセスが適切に機能しているか判断する上で重要な管理指標の一つであるものの、濁度管理のみに依存した病原微生物リスクの制御には限界がある。この点において、既存の濁度管理技術に加えての紫外線消毒の適用は、有効性が高い技術手法であると考えられる。

### A. 研究目的

現行の「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」では、レベル4施設に対しても「浄水処理の安全性を一層高めるために、ろ過池等の出口の濁度を0.1度以下に維持することが可能なら過設備と紫外線処理設備を併用することとしてもよい」とされており、適切な濁度管理の下に地表水の紫外線処理を行うことが可能である。むしろ多段階バリアの観点からすれば、耐塩素性病原微生物などによる汚染の恐れが高い原水に対しては、積極的にろ過処理と紫外線処理を併用することが望ましいものである。しかしながら、現在までに国内で地表水に紫外線処理を導入した事例は見受けられない。

ここでは、地表水を対象とした紫外線処理の導入を推進する上での一助とすべく、海外における地表水紫外線処理および濁度管理事例等に関する文献情報を収集し、わが国の地表水を原水とする浄水場において

濁度管理ならびに紫外線処理を適切に行う上での留意点について抽出することを目的とした。

### B. 研究方法

諸外国における水道水に由来するクリプトスポリジウムへの集団感染事例を収集し、対策として紫外線消毒施設の導入を行った事例<sup>1)</sup>、浄水場における濁度制御・管理が不適切であった事例<sup>2,3)</sup>を選択、各事例における集団感染発生の経緯や要因を抽出した。さらに、世界保健機関（WHO）が公表した水道の濁度管理に関する技術報告<sup>4)</sup>を参照し、濁度管理における目標値を抽出した。

### C. 結果

(1) 水道に由来するクリプトスポリジウム集団感染および紫外線処理施設の導入事例<sup>1)</sup>

英国 Wales 北西地域において、2005 年秋季を中心としてクリプトスポリジウム感染

症の患者が集団発生し、うち 218 名は *Cryptosporidium hominis* への感染が確認された。現地の疫学調査により、水道水との関連が示唆された。当該地域の浄水場は、Llyn Cwellyn 貯水池を水源としており、取水口対岸に下水処理場が、また流域に少なくとも 13 ヶ所のセプティックタンクが存在していた。Llyn Cwellyn 貯水池自体は清浄な原水水質であるものの、高濁度の発生時には大腸菌や腸球菌が検出されていた。また、原水水質が良好であるため、浄水処理は圧力砂ろ過および塩素消毒のみでよいとされており、凝集剤は未適用であった。

感染症の発生時において、浄水場の機能には特段の障害は認められなかったものの、水道水中からクリプトスポリジウムが検出された。しかしながら、その濃度は最大 0.08 オーシスト/10L であり、規制値 (1/10 L av./1000 L/24 hrs) 未満であった。

2005 年 11 月 18 日より、現地では免疫不全患者に対する水道水の煮沸勧告を行い、さらに 11 月 29 日より全住民に煮沸勧告を拡大した。当時の規制では、クリプトスポリジウムの物理的な除去によらない対策は認められていなかったが、科学的根拠ならびに短期間での導入が可能な手法として、水道会社に紫外線消毒の導入を勧告した。

紫外線消毒設備の導入が完了した、翌年 1 月 30 日に煮沸勧告が解除された。

(2) 水道に由来するクリプトスポリジウム  
集団感染と浄水場濁度管理との関連に係る事例<sup>2,3)</sup>

2001 年 3 月下旬から 4 月上旬にかけて、カナダ国 Saskatchewan 州 North Battleford 市 (人口約 14,000) や Battleford 町 (人口約 4,000) を中心に下痢症が集団発生し、

患者便から *Cryptosporidium parvum* が検出された。4 月 25 日に州保健部局が同国保健省に対して疫学調査や浄水場調査等の支援を依頼、同日に水道水の予防的 (煮沸) 勧告を発令した。現地調査により下痢症患者 1,907 名が同定され、うち 275 名は *C. parvum* への感染が確定した。当該地域の患者数は 5,800-7,100 名の範囲であると推定された。

なお、医薬品販売数に関する調査により、3 月下旬-4 月上旬にかけ、当該地域における市販止瀉薬の販売金額は、前後の時期と比較して 5 倍増に達した。また、多変量解析により当該地域の水道水摂取の機会が増すと感染リスクが増加するとの結果が得られた。

当該地域には Saskatchewan 川地表水を原水とする浄水場、および、同河川流域に点在する井戸の地下水を原水とする浄水場が存在しており、前者の浄水処理は凝集沈殿-砂ろ過-塩素消毒、後者は塩素消毒-砂ろ過 (金属除去) であった。このうち、地表水を水源とする浄水場にて、同年 3 月 20 日以降の高速凝集沈澱池 (SCU: solids contact unit) のメンテナンスに伴う運用停止によって化学凝集が行われない状態となり、砂ろ過前工程水の沈降性が悪化すると共に、浄水の濁度が増加 (0.2→0.5NTU) していることが確認された。当該の浄水場では、残塩濃度ならびに微生物指標は適合しているものの、浄水からクリプトスポリジウムオーシストの検出が確認された。次頁の図 (文献 2 から引用) に示すように、下痢症患者数の増加、市販止瀉薬の販売量の増加、砂ろ過前工程水の沈降性の減少、浄水の濁度増加の動向は一致していた。

Figure 2: Temporal comparison of disease burden and water quality data

Figure 2 : Comparaison temporelle des données sur le fardeau de la maladie et la qualité de l'eau

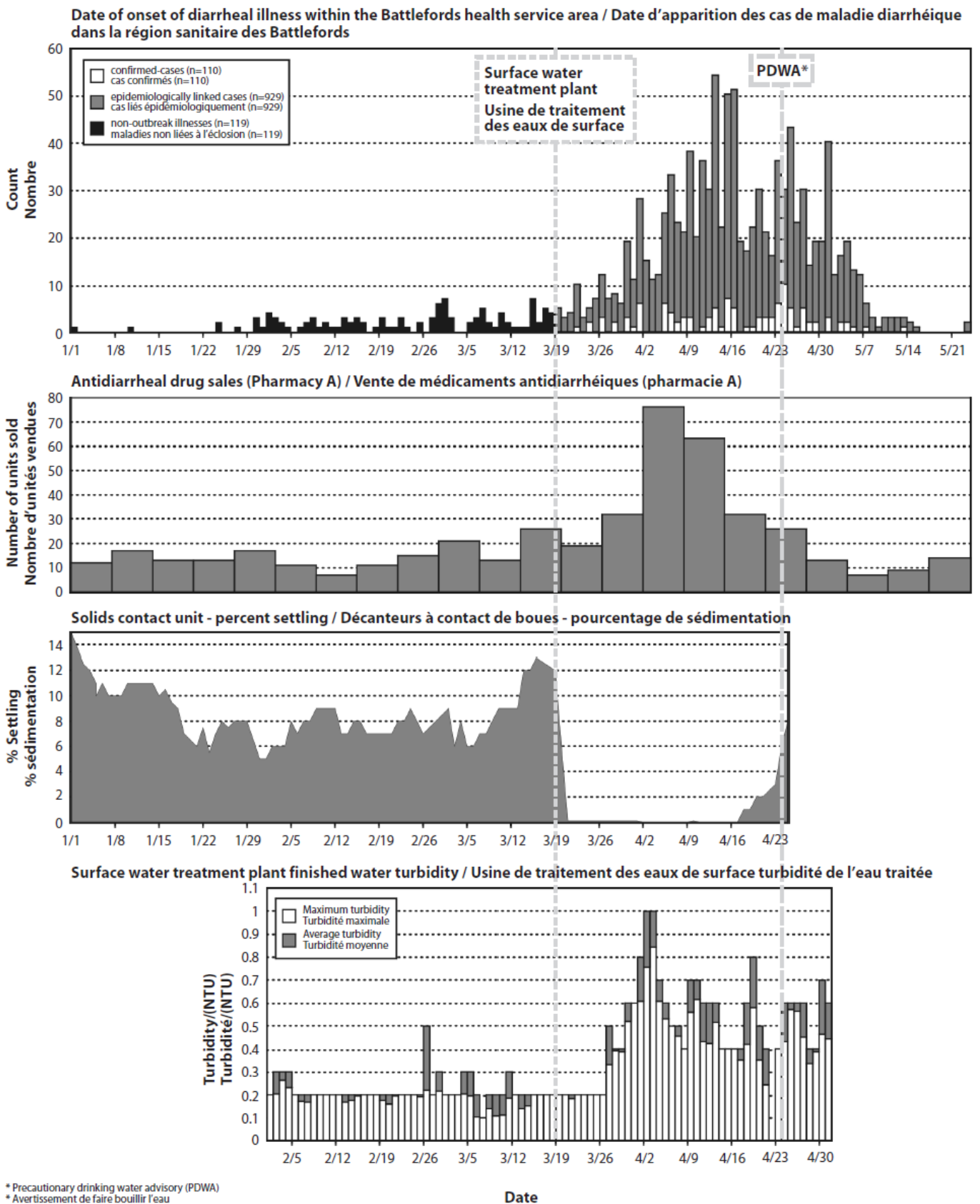


図 カナダ国クリプト集団感染事例における患者数・市販止瀉薬販売量・工程水沈降率・浄水濁度<sup>2)</sup>

(3) 水道の濁度管理に関する技術報告

WHO 水・衛生・健康部門は、2017年2月に標記技術報告をウェブサイトにて公開した<sup>4)</sup>。当報告は水道事業の運転管理者と規制者を対象とし、水道原水や浄水処理過程、浄水における濁度管理の有用性と重要性に関する情報提供を行うことを目的としている。要旨の抄訳と濁度目標値を以下に示す。

・濁度自体は公衆衛生上の直接的なリスクを意味するものでないが、水供給システム全体において、病原微生物の存在や危害イベント発生の有効な指標である。

- ・濁度は極めて利便性の高い指標であり、迅速、安価、常時重要な情報を得ることができる。濁度の測定は様々な状況に適用できる。
- ・濁度は簡易、正確かつ迅速に測定でき、水安全計画に定める管理措置上の運転モニタリング等にも広く用いられる。また代替水源の比較や、様々な管理措置の効果を評価する基準として使える。
- ・濁度は飲料水の審美的な指標としても重要である。

表 水道システムの濁度管理における目標値および汚染指標<sup>4)</sup>

場所・処理工程	濁度目標値・汚染指標	備考
水源	原水濁度の急激な変化	・環境イベントや人為活動に由来する汚染 ・地下水取水施設等における汚染の侵入
	長期的な濁度変化	・流域内の変化、調査により是正措置を勧告
水処理	ろ過 [直接ろ過・急速ろ過]	以下の除去性能に相当
	各月のろ過水濁度 95%値<0.3NTU かつ、1NTU を超過しない	・ウイルス 1-2log 除去 ・クリプト、ジアルジア 2.5-3log 除去
	[珪藻土ろ過・緩速ろ過]	以下の除去性能に相当
	各月のろ過水濁度 95%値≤1NTU	・ウイルス 1-2log 除去 ・クリプト、ジアルジア 3log 除去
消毒	[膜ろ過(MF・UF)]	以下の除去性能を達成可能、膜孔径に依存
	<0.1NTU	・ウイルス 4-7log 除去 ・クリプト、ジアルジア 1-6log 除去
配水過程・貯留	理想的には<1NTU	濁度が 1NTU を超える場合、適切な CT 値を確保するために、消毒剤の注入率または接触時間(紫外線消毒の場合は照射線量)を高める必要がある
	[大規模・良好な浄水場]	
	常時<0.5NTU、平均≤0.2NTU [小規模・資源が限られた浄水場]	
給水末端	理想的には<1NTU	4NTU 以上で目に見える濁りを生じる
	家庭内	濁度が 1NTU を超える場合、消毒剤の注入率または接触時間を高める必要がある
	貯留	困難であれば<5NTU

#### D. 考察

##### (1) 水道に由来するクリプトスポリジウム 集団感染および紫外線処理施設の導入 事例

当該の浄水場のうち、圧力砂ろ過は原水中のマンガン除去を主な目的としており、クリプトスポリジウムオーシストの除去はまったく考慮されていなかった。また、原水水質が良好であるため化学凝集は適用できず、仮に適用したとしてもクリプトスポリジウムオーシストの除去性は向上しなかったであろうとの記述があった。水道水源である Llyn Cwellyn 貯水池が低濁度であるため、凝集処理でのフロック形成が困難であるとの認識であったと考えられる。

ろ過処理の運用については、各ろ過池に濁度計を設置して濁度の連続モニタリングを行い、ろ過池の逆洗後にはスロースタートを実施するなど、同国において推奨されるクリプトスポリジウム対策に沿った管理が行われていた。しかしながら、記録によれば再開直後のろ過水濁度は大幅に増加していた。

以上のことから、当該の浄水場における処理プロセスの設計ならびに運転管理は、クリプトスポリジウム等の耐塩素性病原微生物への対処としては、いずれも不適切であったと考えられる。

一方、事後対策ではあるものの、科学的根拠ならびに短期間での導入が可能な手法であることより、紫外線消毒が採用されたことは注目に値する。わが国においても、低濁度原水の濁度管理に苦慮している水道事業者が見受けられており、水源の糞便汚染に対する潜在的リスクが大きいと考えられるため、参考になると思われる。

##### (2) 水道に由来するクリプトスポリジウム 集団感染と浄水場濁度管理との関連に 係る事例

当該の浄水場では、高速凝集沈澱池を 1 系統しか有しておらず、定期清掃等のメンテナンス時には、高速凝集沈澱池をバイパスした（凝集処理を行わない）直接ろ過処理が実施されていた。さらに、ろ過水等の濁度の常時監視は行っていなかったこと、濁度上昇時等の運転管理条件が明文化されていなかったこと、施設の設計上、ろ過池の逆洗浄後における捨水の実施が不可能であったこと、水道事業者職員の濁度管理およびクリプトスポリジウム等対策に関する認識が欠如していたことなど、当該の浄水場における処理プロセスの設計段階での不備、不適切な日常の運転管理、職員の教育不足など、様々な要因が指摘されていた<sup>3)</sup>。

注目すべきは、図に示すように、集団感染の発生状況と、ろ過前水の沈降率、ならびに、浄水中の濁度の推移に明確な関連が見いだせる点である。とりわけ、浄水処理が適切に機能していた時点での浄水中の濁度は 0.2NTU であり比較的安定していたのに対し、浄水処理の不全が生じて以降は 0.5-0.6NTU に上昇し、かつ、0.4-1.0NTU の範囲で大きく変動した。このように、濁度の挙動は浄水処理における凝集沈殿・ろ過プロセスが適切に機能しているか判断する上で重要な管理指標の一つであり、その推移を継続的に監視すべきである。その一方で、濁度の値そのものは、病原微生物の存在状況を必ずしも反映しないため、濁度管理のみに依存した病原微生物リスクの制御には限界がある点には留意する必要があると思われる。



### (3) 水道の濁度管理に関する技術文章

WHO がこれまでに公表している飲料水水質ガイドライン<sup>5)</sup>でも、浄水処理における濁度管理の重要性は指摘されており、当該技術文章は、水道事業の実務者に向けて、適切な濁度管理により水道水の微生物リスクを制御できること等を強調する目的でまとめられたものである。過去の水道水を通じた集団感染事例においても、大抵の場合、水道水の濁度上昇を伴うとされており、浄水の濁度を低く保つことは、病原微生物の除去や水道水の安全性を確保する上での指標として実績があるとしている。

ただし、水道水の濁度と特定の地域における胃腸炎の発生状況との間には、明確な相関が見いだされている事例、見いだされない事例ともに報告があり、地域ごとに状況が異なっている。

さらに、表に示されている所定の濁度目標値に対する微生物またはウイルスの除去性能は、いずれも米国およびカナダ国において平常運転時の短期間の試験により得られた値であるため、原水水質の急激な変動や浄水処理工程の不具合といった異常時には、除去性能は低下しうる点に留意する必要があるであろう。

### E. 結論

諸外国における水道水に由来する過去のクリプトスポリジウムへの集団感染事例を参照したところ、いずれも、凝集処理を行うことなく後段の砂ろ過処理に供する場合があります。クリプトスポリジウム等の病原微生物が、浄水処理の工程において適切に除去されていなかったことが判明した。また、いずれの場合も、水道施設的设计、日常の

運転管理、職員の教育など複層的な問題点が指摘されていた。

WHO の濁度管理に関する技術文章にもあるように、濁度の挙動は浄水処理における凝集沈殿・ろ過プロセスが適切に機能しているか判断する上で重要な管理指標の一つであり、その推移を継続的に監視すべきである。また、水道原水や給配水における異常を検知する上でも有用な指標である。

一方で、濁度の値そのものは、病原微生物の存在状況を必ずしも反映しないため、濁度管理のみに依存した病原微生物リスクの制御には限界がある。この点において、既存の濁度管理技術に加えての紫外線消毒の適用は、有効性が高い技術手法であると考えられる。

### F. 研究発表

- 1 論文発表  
なし
- 2 学会発表  
なし

### G. 知的財産権の出願・登録状況

該当なし

### 参考文献

- 1) B. W. Mason, R. M. Chalmers, D. Carnicer-Pont and D. P. Casemorel: A *Cryptosporidium hominis* outbreak in North-West Wales associated with low oocyst counts in treated drinking water, *J. of Water and Health*, 8(2), 2010.
- 2) Stirling, R., Aramini, J., Ellis, A., Lim, G., Meyers, R., Fleury, M. & Werker, D.: Waterborne *Cryptosporidiosis*

Outbreak, North Battleford, Saskatchewan, Spring 2001, Canada Communicable Disease Report 27(22), 185-192, 2001.

- 3) The Honourable Justice Robert D. Laing, Commissioner: Report of the Commission of Inquiry into matter relating to the safety of the public drinking water in the City of North Battleford, Saskatchewan, 2002

<http://www.justice.gov.sk.ca/nbwater/final/pdfdocs.html>

- 4) World Health Organisation: Water

quality and health – Review of turbidity information for regulators and water suppliers, 2017

[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/turbidity-technical-brief/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/turbidity-technical-brief/en/)

- 5) World Health Organisation: Guidelines for drinking-water quality, fourth edition, 2011

[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/2011/dwq\\_guidelines/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/dwq_guidelines/en/)

研究分担者 神子 直之 立命館大学教授

### 研究要旨

濁質存在下での微生物不活化効率を回分式および流水式で実験的に求めた。濁質としては、生下水に含まれる有機性懸濁物およびカオリンを用い、添加した大腸菌ファージMS 2の生残率により不活化効率を求めた。回分式の実験により、総吸光度が等しい試料において濁質割合が大きい試料ほど不活化効果が大きくなったことから、散乱光による不活化が示唆された。また、散乱光の不活化への寄与は積分球吸光度を用いた平均紫外線照度で算定できることが明らかになった。流水式においても濁質割合が大きい試料の不活化速度が大きく、散乱光による消毒効果が確認された。紫外線照射槽に濁質が含まれる水が流入したとしても、どのような照射を行えば所定の消毒効果が得られるか、定量的に予測することが可能となった。また、紫外線耐性が異なる微生物に対して流水式で紫外線照射を行うと、微生物毎に求まる換算紫外線量が異なり、生物線量計を用いた紫外線照射槽の性能評価には注意が必要であると確認された。

#### A. 研究目的

紫外線照射槽に流入する水には濁質が含まれている可能性があるが、その消毒効果への影響を定量的に明らかにすることを目的とした。また、紫外線照射槽の性能評価において一般的に用いられている生物線量計試験の結果と病原微生物に対する不活化性能の関係を確かめるために、紫外線耐性の異なる微生物を流水式紫外線照射槽に流し、実験的に調べた。

#### B. 研究方法

濁度および吸光度を変化させた試料に対し大腸菌ファージMS 2を添加して、紫外線照射前後の生残率により紫外線照射の効果を定量した。懸濁物質による散乱光の影響を明らかにするために、濁度による吸光度と溶存物質による吸光度の和が同じになるように試料を設定した。懸濁物質としては下水処理場の流入下水中の懸濁物質およびカオリンを用いた。溶存物質の吸光度は下水処理場流入水に元来含まれている溶存物質を希釈するかあるいはファージ定量用液体培地を加えることで調製した。

紫外線光源としては低圧紫外線ランプを用いた。回分式実験においては、試料を内径4.2cm、水深1.7cmのペトリ皿に入れ、石英ガラスで蓋をしてマグネチックスターラーで完全混合の条件で照射を行った。表面照度は約1mW/cm<sup>2</sup>になるように照射距離を調整した。流水式実験においては、12W低圧水銀ランプを1灯装備した、ランプスリーブ外径2.0cm、リアクター内径5.5cmのリアクターを用いた。この実験においては、MS 2とφX174の二種の大腸菌ファージを用いた。

試料の254nmにおける吸光度は分光光度計(SHIMADZU UV2600)を用い、必要に応じて

積分球を装着した。懸濁態を含んだ試料に対してそのまま測定した吸光度を総吸光度とし、孔径0.45μmのメンブレンフィルターでろ過をした試料の溶存態吸光度の値を総吸光度から減じることで、懸濁物質に起因する懸濁態吸光度を求めた。

(倫理面への配慮) 研究対象者や実験動物を研究において用いていないことから、倫理面の問題は無い。

#### C. 研究結果

Fig. 1~3に、回分式における総吸光度を同じにしたMS 2不活化実験の結果を示す。横軸に用いた平均紫外線量とは、試料の総吸光度に応じて紫外線照度が減衰することを仮定した平均紫外線照度に照射時間に乗じたものであり、散乱光が無いことを仮定した算定方法である。

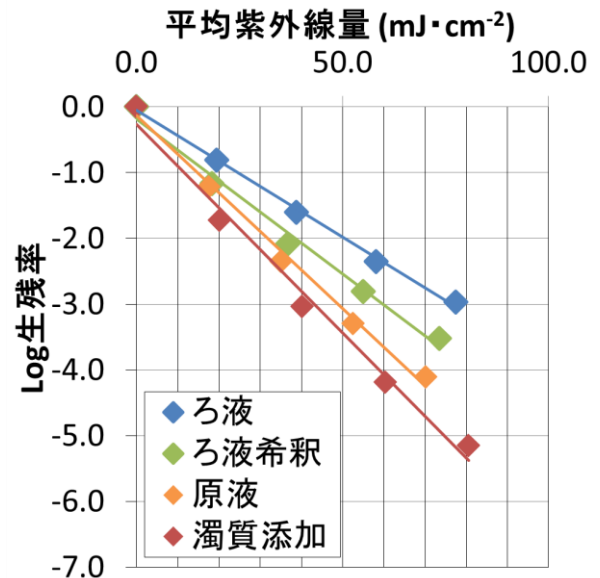


Fig.1 総吸光度 1 の下水試料におけるMS 2不活化実験の結果

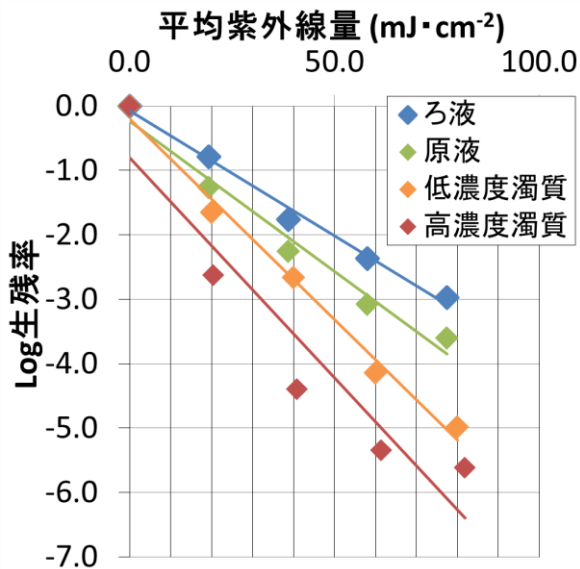


Fig. 2 総吸光度2の下水試料におけるMS 2不活化実験の結果

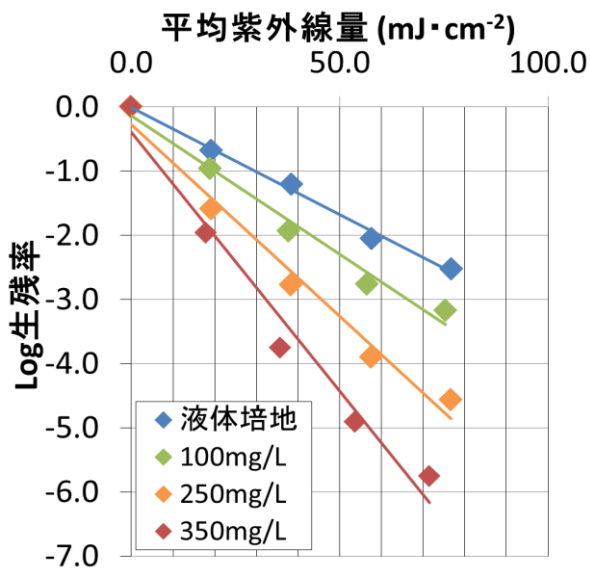


Fig. 3 総吸光度1のカオリン添加試料におけるMS 2不活化実験の結果

いずれの場合においても、濁質割合および懸濁態吸光度の大きい試料のほうが、不活化速度が大きくなった。

本来は同じ微生物を紫外線によって不活化しているので、同じ平均紫外線量の照射をすることで同じlog不活化になるはずである。ここでは、直進して到達する紫外線量が同じであるのに、懸濁態吸光度の大きいほうが不活化効果が大きくなっているため、懸濁物質による散乱紫外線による不活化が進行していることが強く示唆される。

そこで、散乱光を評価できる積分球式吸光度計を用いて積分球吸光度を測定した。懸濁態吸光度の大きい試料ほど、積分球吸光度の値は小さくなった。すなわち、試料に入射してから直進せずに散乱する紫外線が顕著であることがわかる。そして、紫外線照度の減衰が積分球吸光度に従う直進光として近似的に表せるのではないかと考え、平均紫外線照度の計算式の吸光度項に積分

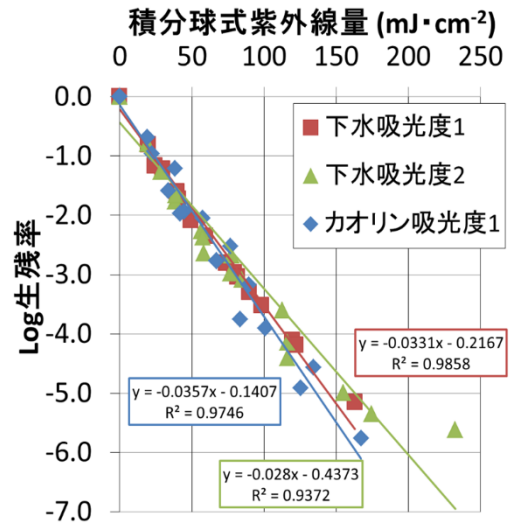


Fig. 4 積分球式紫外線量とMS 2のlog生残率の関係

球吸光度を代入し、照射時間を乗じて積分球式紫外線量を求めた。Fig. 1~3に示したlog生残率の実験結果と積分球式紫外線量の関係をFig. 4に示す。

Fig. 1~3で異なる傾きを持っていたプロットが、ほぼ同じ直線上に乗り、積分球吸光度で算定した吸光度を用いて紫外線量を算定すればその値がlog生残率と線形の関係で表せることがわかった。

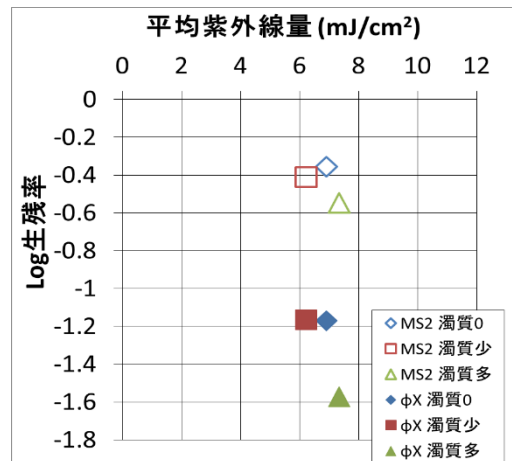


Fig.5 流水式紫外線照射における平均紫外線量と log 生残率の関係

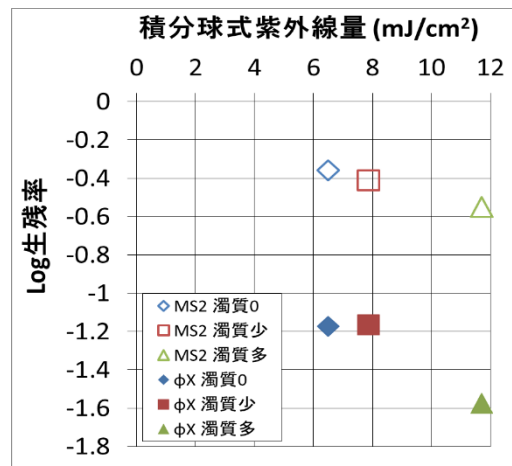


Fig.6 流水式紫外線照射における積分球式紫外線量と log 生残率の関係

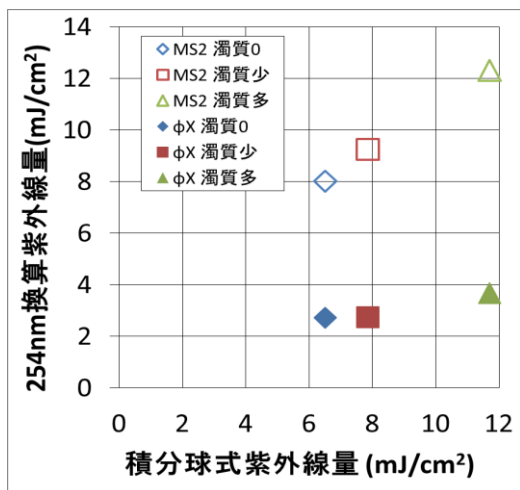


Fig.7 積分球式紫外線量と各ウイルスによって求められた 254nm 換算紫外線量の関係

流水式紫外線照射に関しても同様で、Fig.5 に示す通り平均紫外線量で横軸をとった場合には、平均紫外線量と log 生残率の関係は明らかでなかった。一方で、積分球式紫外線量で横軸にした場合には、Fig.6 に示す通り積分球式紫外線量と log 生残率が比例している傾向にあった。

Fig.6 を、別途実験で求めた各ウイルスの不活化係数を考慮して 254nm 換算紫外線量を求めて書き直すと Fig.7 になった。この結果より、紫外線耐性の大きい MS 2 (90%不活化に要する紫外線量 22.47 mJ/cm) よりも、紫外線耐性の小さい φ X 174 (90%不活化に要する紫外線量 2.336 mJ/cm) の換算紫外線量 (RED) は小さくなることがわかった。

#### D. 考察

濁質を含んだ試料に対する紫外線照射における微生物の不活化効率は、単に濁質が加えられた場合には濁質が無い場合よりも下がる、すなわち同じ消毒効果を得るために照射すべき紫外線量は大きくなる。以上が従来の考え方であり、これは妥当である。しかし、試料内部に到達する紫外線照度を積分球吸光度によって評価することで、回分式においても流水式においても、積分球式紫外線量と log 不活化率が比例していた。すなわち、総吸光度で算定されるよりも散乱光によって消毒効率が増大し、その程度が定量的に予測可能であるのであれば、運転上の管理項目として考慮することで、消毒効果を損なわないようにできると考えられる。

また、流水式紫外線照射装置の性能評価において、紫外線耐性が既知の微生物を流下させてその生残率から換算紫外線量 (RED) を求めることが一般的に行われている。しかし、換算紫外線量は、用いる微生物の紫外線耐性により、同じ紫外線量分布を前提にしたとしても異なる値になること

が理論的に示されている。本研究の実験結果においても、異なる微生物を流下させた場合に換算紫外線量の値は異なり、紫外線耐性の大きい微生物の方が換算紫外線量の値が大きくなった。このことは、クリプトスピリジウムのような紫外線耐性の小さい微生物の不活化を他の微生物で代替して流下実験をして求めた場合には、換算紫外線量で表される数値は危険側となる可能性がある。できるだけ、紫外線照射の対象となる病原微生物と同じ紫外線耐性を持つ微生物を用いて性能評価をすることが望ましいと考えられた。

#### E. 結論

紫外線照射の効果を減じると考えられていた濁質は、同じ吸光度となる溶存態吸光物質を含んでいる場合よりも不活化効果が向上することから、照射された紫外線を散乱していると考えられた。よって、水の吸光度を測定して不活化効果を算定する場合には安全側の数値となる。また、散乱して不活化に有効である紫外線量については、積分球式吸光度を用いて算定することが可能であり、運転管理上の考慮をすることで適正な紫外線量を照射することが可能であると考えられた。

紫外線耐性が異なる微生物を同じ紫外線照射装置に流下させた場合には、同じ換算紫外線量にならなかった。これは、装置内で照射される紫外線量に分布があることで説明が可能であった。また、紫外線耐性の大きい微生物で性能評価を行うと、それより耐性の小さい病原微生物に対する性能としては危険側になることが実験的に示された。そのため、流水式実験を行う性能評価を行う際には、できるだけ病原微生物と同じ紫外線耐性を持つ微生物を用いて実験を行うことが必要であると考えられた。

#### G. 研究発表

1. 論文発表  
なし

2. 学会発表

神前和、神子直之. 積分球式吸光度を用いた紫外線消毒効率に対する懸濁物質の影響評価. 第51回日本水環境学会年会, p244 (2017年3月16日)

#### H. 知的財産権の出願・登録状況

なし



## 研究要旨

紫外線消毒における濁度の影響として光散乱特性を検討した。モデル濁質だけでなく浄水場原水や浄水汚泥懸濁液において、2 種類の濁度測定値から求められる濁度比と積分球式吸光度測定値を利用して求める可視光散乱分率には高い相関性が認められた。このことから濁度測定の違いは濁質の可視光散乱性に起因することがわかった。また可視光散乱分率が高い物質は、紫外光散乱分率も高いことがわかった。浄水場原水においては濁度が高い場合、紫外光散乱が高い濁質が多く含まれ、紫外線消毒への影響は散乱による正の効果が見られると考えられた。

さらに浄水場原水中の濁質、浄水汚泥由来の濁質、モデル濁質を対象として、X 線回折分析を行った結果、UV 光の散乱程度が高いカオリン、ベントナイト、B 浄水場汚泥、A 浄水場原水において明確なピークが検出された。これらの試料ではいずれも回折角度が  $2\theta = 26.4^\circ$  にピークが存在しており、濁質中に分子間距離  $d = 0.34 \text{ nm}$  の石英の結晶を含むと推定された。従って、濁質中に石英結晶を含む場合に、可視光ならびに UV 光の散乱性が高くなると考えられた。

## A. 研究目的

紫外線処理において濁質による負の影響として光透過率の低下があるが、紫外光散乱による正の効果の影響も考慮して評価する必要がある。そこで昨年度までは、濁質の光散乱特性を適切に評価する指標として2つの異なる濁度測定法（公定法）の比を用いる濁度比と、通常の吸光度測定値と積分球式吸光度測定値から算定される散乱分率の2つの指標を提案し、人工濁質試料において、それらに高い相関性があることを確認し、かつ可視光の散乱特性と紫外光の散乱特性についても相関があることを示してきた。

以上の結果を踏まえて、本年度は、

- ① 浄水場原水および浄水汚泥懸濁液を用いて可視光における濁度比と散乱分率の相関を確認し、さらに可視光と紫外光の散乱分率の相関性を検討する。
- ② 人工濁質、浄水場原水、浄水汚泥試料を用いて、X 線回折分析を行い、光散乱特性との関連性について検討する

の2点について検討を行うこととした。

## B. 研究方法

## B.1) 浄水場原水および浄水汚泥懸濁液における散乱分率と濁度比の相関について

散乱分率は図1に示す原理によって算定される。図1において通常の吸光度測定値  $A_1$  は  $\log(I_0/I_1)$  である。また積分球式吸光度値  $A_2$  は  $\log(I_0/(I_1 + I_{sc}))$  である。そこで通常の吸光度測定値と積分球式吸光度測定値

から、光散乱によって生じる光透過量の減少割合を示すことができると考え、以下の式(1)のように散乱分率を定義した。

$$\text{散乱分率} = \frac{\text{散乱により透過しない光強度}}{\text{透過しない光強度}} \quad (1)$$

図1に示される値を用いて表すと以下の式となる

$$= \frac{I_{sc}}{I_0 - I_1} = \frac{I_0 10^{-A_2} - I_0 10^{-A_1}}{I_0 - I_0 10^{-A_1}} = \frac{10^{-A_2} - 10^{-A_1}}{1 - 10^{-A_1}} \quad (2)$$

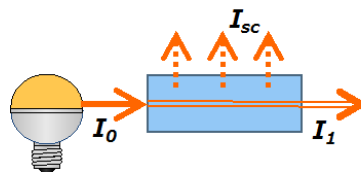


図1 吸光度測定原理 ( $I_0$ : 入射光強度,  $I_1$ : 透過光強度,  $I_{sc}$ : 散乱光強度)

分光光度計（島津製作所製, UV-2550）にて  $660 \text{ nm}$  における吸光度を測定し、通常の吸光度測定値  $A_1$  とした。 $660 \text{ nm}$  は濁度測定に用いられる可視光波長である。また同分光光度計に積分球式検出器（島津製作所製, ISR-2200）を付加して、 $660 \text{ nm}$  における吸光度を測定し、積分球式吸光度測定値  $A_2$  とした。

それらの測定値を用いて式(2)より可視光の散乱分率を求めた。同様に、254 nm の紫外光について測定を行い、紫外光の散乱分率を求めた。

懸濁試料の濁度比については、以下の2方式にて濁度を測定した。①透過光測定方式による濁度測定には、吸光度計（島津製作所製、UV-2550）を用いて660 nmの吸光度を測定し、カオリン標準液において検量線を作成することによって測定した。②透過+90°散乱光方式には濁度系（HACH社製、100P）を用いて測定した。濁度比としては（②の測定値）／（①の測定値）として求めた。

対象試料としては以下の3つの試料を用いた。

- 1) A 浄水場原水にて2015年12月に採水した高濁度原水および検証用に2016年2月に採水した通常濁度の原水を用いた。通常濁度の原水においては、凍結乾燥により濁質のみを取り出し、その濁質をMili-Q水にて希釈することで10倍濃縮の懸濁液を作成した。
- 2) B 浄水場汚泥である。使用した浄水汚泥には凝集剤として使用されているポリ塩化アルミニウム(PAC)が含まれている。
- 3) C 浄水場浄水原水・浄水汚泥使用した浄水汚泥には凝集剤として使用されているPSIが含まれている。

上記の試料のうち、BおよびCの浄水汚泥試料についてはMili-Q水を用いて、透過+90°散乱光方式による濁度値で50, 70, 80, 100 NTUとなるように各段階に希釈した試料を対象とした。

### B.2) X線回折による濁質試料の測定

人工濁質としてカオリン（和光純薬製）、活性炭（和光純薬製）カーボンブラック（東海カーボン社製）、ベントナイト（和光純薬製）を使用した。採水試料としてはA 浄水場原水、C 浄水場原水、B 浄水場汚泥の各試料を、100℃にて蒸発乾燥させて得られた固化物を対象とした。X線回折分析は粉末X線回折装置（リガク製、Ultima IV）を用いて行った。

### C. 研究結果

#### C.1) 浄水場原水および浄水汚泥懸濁液における散乱分率と濁度比の相関について

図2に対象試料の可視光（660 nm）の散乱分率と濁度比（透過光方式／透過+90°散乱光方式）を測定した結果を示す。図には昨年度の研究結果として得られたカオリン、活性炭、カーボンブラック、ベントナイトの各モデル濁質を50, 70, 80, 100 mg/Lの4段階に調整した懸濁溶液について測定した結果も併せて示した。

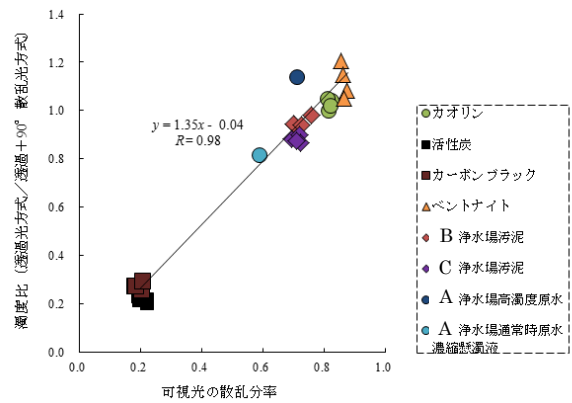


図2 各試料の可視光（660 nm）散乱分率と濁度比

図2は可視光（660 nm）の散乱分率とUV光（254 nm）の散乱分率との関係について検討した結果を示したものである。

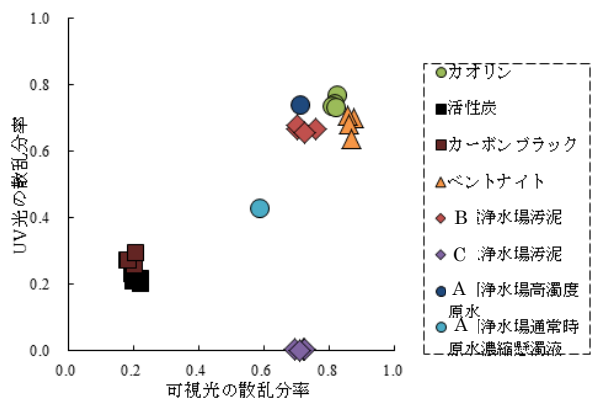


図3 各試料の可視光（660 nm）と紫外光（254 nm）の散乱分率の相関

#### C.2) X線回折による濁質試料の測定

図4～図10に各試料のX線回折結果を示した。

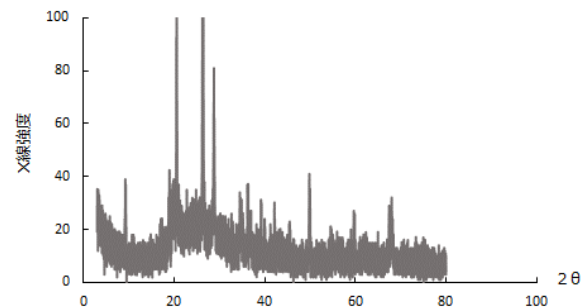


図4 カオリンのX線回折結果

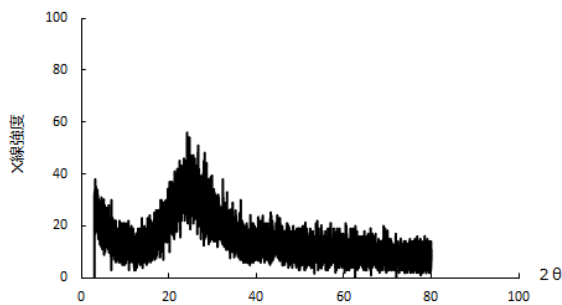


図 5 活性炭の X 線回折結果

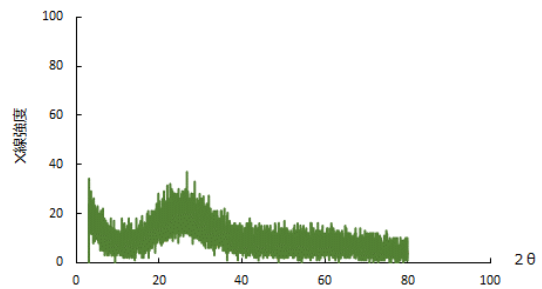


図 10 C 浄水場汚泥の X 線回折結果

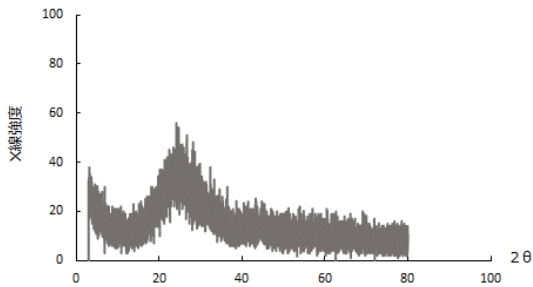


図 6 カーボンブラックの X 線回折結果

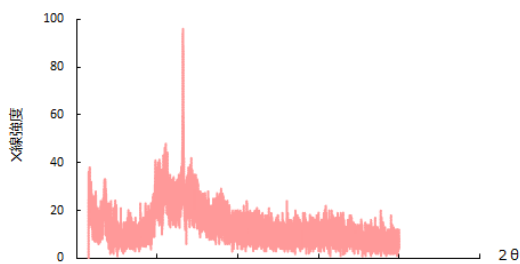


図 7 ベントナイトの X 線回折結果

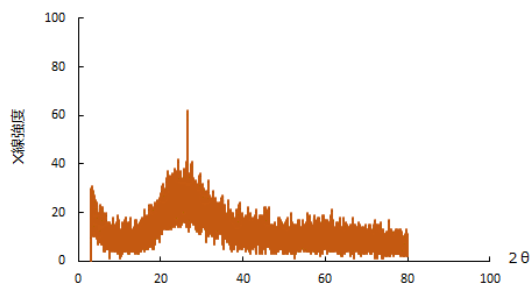


図 8 A 浄水場原水の X 線回折結果

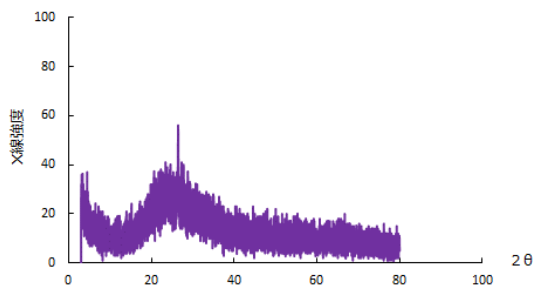


図 9 B 浄水場汚泥の X 線回折結果

UV 光の散乱程度が高いカオリン、ベントナイト、B 浄水場汚泥、A 浄水場原水において明確なピークが検出された。これらの試料ではいずれも回折角度が  $2\theta = 26.4^\circ$  にピークが存在していた。UV 光の散乱程度が低い、活性炭、カーボンブラック、C 浄水場汚泥においては明確なピークはみられなかった。

#### D. 考察

##### 1) 濁質の散乱特性の評価方法について

図 2 の結果から濁度比と可視光の散乱分率との間に相関が見られることが分かった。従って濁度測定法による濁度値の違いは光散乱程度によるものであることが示唆された。また、濁度比を可視光の散乱分率を表す指標として利用できることが考えられた。

図 3 の結果から、C 浄水場汚泥以外の試料では可視光 (660 nm) と紫外光 (254 nm) についての相関性が認められた。C 浄水場汚泥では可視光の散乱分率は高いものの UV 光の散乱分率は極端に低い。これは C 浄水場が凝集剤として PSI (ポリシリカ鉄) を用いていることが原因と考えられた。そこで B 浄水場汚泥 (凝集剤として PAC を使用) と C 浄水場汚泥および PSI の吸光スペクトルを測定した結果、B 浄水場汚泥は紫外光での吸光ピークは見られなかったが、C 浄水場汚泥と PSI ではいずれも紫外域で大きく吸光していることがわかった。このことから PSI を凝集剤として用いていることが、紫外光の散乱分率の低下に原因であると考えられた。

##### 2) 濁質の X 線回折分析と光散乱特性について

UV 光の散乱程度が高い試料において明確なピークが検出された。これらの試料ではいずれも回折角度が  $2\theta = 26.4^\circ$  にピークが存在していた。

この場合、Bragg の法則<sup>1)</sup>より試料に含まれる結晶中の分子間距離は  $d = 0.34 \text{ nm}$  であった。文献<sup>2)3)</sup>により、分子間距離  $d = 0.34 \text{ nm}$  でピークを持つ物質は石英の結晶と推定された。以上のこ



とから濁質中に石英の結晶を含む場合に、可視光ならびに UV 光の散乱性が高くなることがわかった。

#### E. 結論

- 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浄水場原水および浄水場汚泥懸濁溶液の可視光散乱特性が評価できることがわかった。それらの濁質およびモデル濁質ともに、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。ただし PSI 凝集剤が含有している試料においては UV 光の散乱分率は低下することがわかった。
- 2) UV 光の散乱程度が高いカオリン、ベントナイト、B 浄水場汚泥、A 浄水場原水において明確なピークが検出された。これらの試料ではいずれも回折角度が  $2\theta = 26.4^\circ$  にピークが存在しており、濁質中に分子間距離  $d = 0.34 \text{ nm}$  の石英の結晶を含むと推定された。従って、濁質中に石英結晶を含む場合に、可視光ならびに UV 光の散乱性が高くなると考えられた。

#### 参考文献

- 1) L.M.Harwood ら(1999) 有機化合物のスペクトル解析入門, 化学同人
- 2) 日本粘土学会 (2010) 「粘土科学」誌, 48(4),pp.158-198
- 3) 須藤俊男 (1974) 粘土鉱物学, 岩波書店

#### F. 健康危険情報

特になし

#### G. 研究発表

1. 論文発表  
無し
2. 学会発表  
無し

#### H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得  
無し
2. 実用新案登録  
無し
3. その他  
無し

## 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

研究分担者 小熊久美子 東京大学先端科学技術研究センター

### 研究要旨

地表水を原水とする浄水場への紫外線処理導入の可能性を検討するため、性状の異なる標準粒子を添加した試料で大腸菌および大腸菌ファージ MS2 の不活化実験を行った。その結果、カーボンブラック粒子が高濃度で存在すると微生物の不活化効率が低下した一方、白色ポリスチレン粒子が高濃度で存在すると不活化効率が上昇し、白色粒子による紫外線の散乱が不活化に寄与したと推察された。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でも、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な差はなかった ( $p>0.05$ )。逆に、濁質で不活化速度が有意に低下した試料は、濁度 50 度以上の極端な条件に相当し、実務上は紫外線処理以前に水質事故（処理機能の著しい低下）として検知可能なレベルと推察された。すなわち、降雨に伴う原水濁度の急上昇など地表水に特徴的な水質変動は、紫外線照射より上流の処理工程で対応する設計思想が有効と考えられた。

本研究により、水中に懸濁粒子が存在しても紫外線消毒を阻害しない場合や、粒子による紫外線の散乱で消毒効率が上がる場合のあることが示された。紫外線処理は濁度上昇に対して一定の頑健性を有しており、浄水処理で想定される濁度変動の範囲では、濁度による紫外線処理性能の低下は無視できる（有意差を検知できない）レベルであることが示唆された。また、少なくとも現行の地表水以外への紫外線適用要件（濁度 2 度以下、色度 5 度以下、紫外線透過率 75%以上）を満たす限り、原水の由来が地表水か地下水かによらず、濁質による処理効率の有意な低下は生じないと考えられた。紫外線処理の適用は、原水の由来ではなく、紫外線を照射する段階の水質で判定することが合理的と考えられた。

### A. 研究目的

2007 年 3 月に通知された「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」改訂版<sup>1)</sup>では、水道原水に係るクリプトスポリジウムによる汚染の可能性の程度を四段階に分類し、各レベルに応じた措置

を示している。指針において紫外線処理の適用が認められるのは、原水中に指標菌（大腸菌又は嫌気性芽胞菌）が検出され地表水以外を原水とする施設（レベル 3）であり、原水中に指標菌が検出され地表水を原水とする施設（レベル 4）は、

クリプトスポリジウム汚染の可能性がもっとも高いと推定される分類であるにもかかわらず、紫外線処理は推奨されていない。その理由のひとつとして、地表水は地下水に比べて土砂等を多く含み、濁度等の水質変動が大きいとの懸念がある<sup>2)</sup>。しかしながら、紫外線を利用した水処理技術が普及している北米では、原水によらず紫外線処理の適用が認められており、アメリカとカナダで紫外線処理を備えた浄水施設 123 箇所を調査した事例<sup>3)</sup>では、地表水（地表水の影響を受ける地下水を含む）を原水とする施設が全体の 76%を占めた。これら北米の施設では、原水水質が極めて良好な特例を除き、地表水を原水とする浄水場ではろ過処理の後に紫外線照射槽を設置しており、豪雨等に伴う原水濁度の急上昇など地表水に特徴的な水質変動は、紫外線照射より上流の処理工程で対応する設計思想が見られる。一方、日本の地表水を水源とする浄水場では、原水および処理工程水の水質変動を紫外線処理の適用可能性という観点から整理した知見は乏しい。

本研究では、平成 26 年度に地表水を原水とする国内の浄水場 2 施設（いずれも急速ろ過方式）を対象に、原水および処理工程水（凝集沈澱水およびろ過水）における水質の変動幅を調査した<sup>4)</sup>。その結果、原水水質は台風や降雨の後に大きく変動したものの、処理工程水では台風直後を含むすべての試料で水質が安定し、凝集沈澱水では 14 試料中 13 試料、ろ過水では 14 試料すべてが、現行指針の示す地表水以外に対する紫外線処理適用の水質要件（濁度 2 度以下、色度 5 度以下、

253.7nm 付近の紫外線透過率が 75%を超えること）<sup>1)</sup>を満たした。これにより、国内の地表水を原水とする浄水場でも、ろ過処理の後段であれば、紫外線処理が有効に機能しうることを報告した<sup>4)</sup>。

翻って、地表水を原水とする施設への紫外線処理導入の適否を論じるには、紫外線照射より上流の処理工程で事故が生じるリスクを想定し、それに伴う水質悪化が紫外線消毒効率に及ぼす影響を正しく理解する必要がある。ろ過処理等の機能低下で増加し紫外線処理を阻害しうる物質として、水中の懸濁粒子がある。懸濁粒子は、紫外線の水中への透過を阻害したり、微生物を紫外線から遮蔽したりして、処理効率を低下させる可能性がある<sup>5, 6, 7)</sup>。

上記の背景を踏まえ、本年度の研究目的を以下の通り設定した。

- 1) 濁質粒子の特性（素材、色、粒径）が紫外線処理に及ぼす影響について、実験データの解析と知見の整理
- 2) 3 年間の総括として、装置設計や運転方針など実務に資する情報の発信

## B. 研究方法

実験は以下の通り実施した。平成 27 年度報告書<sup>8)</sup>と一部重複するが、本年度の結論に直接関与する主要な部分について、改めて報告する。

### 1. 試料の調整

標準粒子として、カーボンブラック粒子（黒、0.1-0.2 $\mu\text{m}$ 、Aqua-Black-001、東海カーボン）、ポリスチレン粒子（白、

0.2 $\mu\text{m}$  または 1.0 $\mu\text{m}$ 、Polybead® Microspheres, Polyscience 社製; 黒、0.2 $\mu\text{m}$  または 1.0 $\mu\text{m}$ 、Polybead® Black Dyed Microspheres, Polyscience 社製) の5種を選定し、粒子の個数濃度(個/mL)で条件を調整した(表1)。一部の濃度条件については、濁度等の水質分析のみ実施し、微生物試験では採用しなかった。なお、選定した0.2 $\mu\text{m}$ 、および1.0 $\mu\text{m}$ の粒径は、平成26年度に調査した台風・降雨直後の地表水系浄水場原水の粒径分布のピークに相当する<sup>4)</sup>。粒径分布はナノトラック粒度分析計(UPA-EX150, NIKISSO)、粒子濃度はNano sight(LM10, Malvern)で測定した。

表1. 採用した標準粒子の種類と濃度

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。表2に、微生物添加後の試験水水質を示す。表2における粒子濃度0とは、標準粒子を添加せずに微生物のみを添加した試料の水質を示す。紫外線透過率、濁度、色度はいずれも後述する分析方法により測定した。

## 2. 紫外線照射

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(GL15, TOSHIBA)を用い、試料表面の紫外線(254nm)線量率を紫外線強度計(UVR-2, TOPCON)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。実験期間を通じ、表面線量率は概ね 0.275mW/cm<sup>2</sup>であった。Bolton and Linden (2003)<sup>9)</sup>に従い、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。

表 2. 微生物添加後の試験水の水質（平成 27 年度報告書<sup>8)</sup>より）

粒子濃度 (個/mL)	紫外線透過率(%)				濁度(度)				色度(度)				
	10 <sup>10</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>	0	10 <sup>10</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>	0	10 <sup>10</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>	0	
大腸 菌	CB	1.3	64.0	-		59.9	5.86	-		1640	164	-	
	W0.2	3.7	64.0	-	94.7	32.5	3.48	-	1.69	82.8	12.7	-	0.00
	B0.2	-	68.6	-		-	3.09	-		-	11.8	-	
	W1.0	-	1.2	26.7		-	1820	183		-	50.4	4.13	
CB	0.4	56.0	-			51.7	1.52	-			1690	169	
MS2	W0.2	4.4	69.2	-	97.0	42.9	0.58	-	0.00	69.6	13.8	-	0.74
	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 3. 地表水を原水とする浄水場の原水の水質変動幅（平成 26 年度報告書<sup>4)</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

(\* : 統計的外れ値に相当)

### 3. 分析項目と分析手法

試験水の 254nm 吸光度 ( $A_{254}[\text{cm}^{-1}]$ ) は分光光度計 (UH5300, 日立) 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色度計 (WA6000, 日本電色工業) で測定した。大腸菌 IFO3301 はクロモカルト寒天培地 (Merck 社)、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、初期濃度について大腸菌は  $10^6$  CFU/mL、MS2 は  $10^7$  PFU/mL のオーダーとなるよう調整した。

(倫理面への配慮)

本研究は、正規に購入した微生物純粋株を適切に管理された実験室内で試験に供したものであり、倫理面の問題はない。

## C. 研究結果

### 1. 試験水水質の特徴

表 2 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、これは試料外観の印象と整合した。

ここで、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<sup>4)</sup> (9 月 - 3 月の毎月 1 回ずつ測定、 $n=7$ ) を表 3 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、BC, 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著しく不利な水質条件であることが確認された。

### 2. 粒子濃度と紫外線透過率の関係

粒子濃度と紫外線透過率の関係を図 2 に示す。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 (254nm) 吸光度を測定し、透過率に換算した。

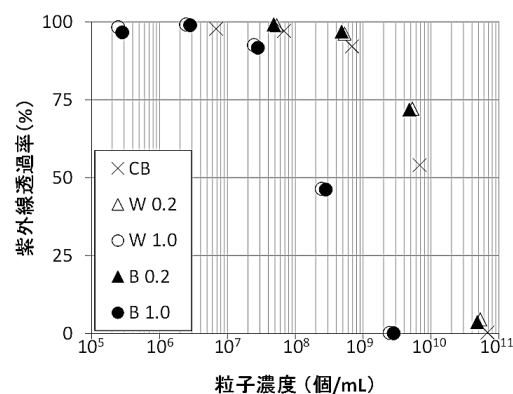


図 2. 粒子濃度と紫外線透過率の関係

図2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。このように、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。

### 3. 不活化実験

大腸菌とMS2の不活化結果について、同一粒径(0.2 $\mu\text{m}$ )で異なる粒子を添加した場合の結果を図3に、同一粒子(ポリスチレン白)で粒径を変えた場合の結果を図4に、それぞれ示す。粒子条件ごとに紫外線照射を独立して3回実施し、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は一次反動的に不活化された。

図3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が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。

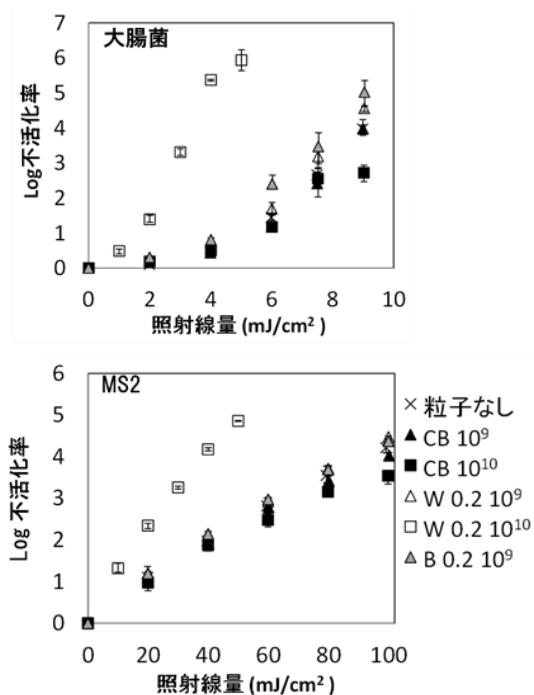


図3. 粒径0.2 $\mu\text{m}$ 粒子添加時の不活化

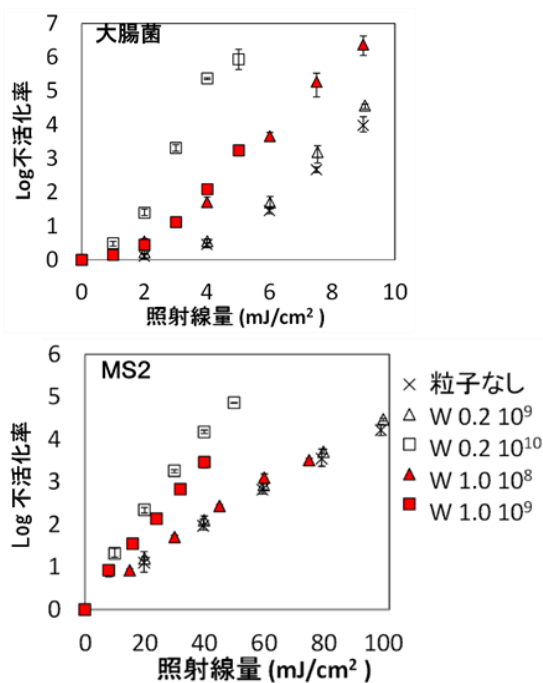


図4. 白色ポリスチレン粒子添加時の不活化

一方、図4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した可能性が推定された。

#### D. 考察

対数直線的に不活化された MS2 について、縦軸を常用対数とする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4に、MS2 の  $k$  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 では濃度が

高いほど小さくなり、白のポリスチレン粒子では濃度が高いほど大きくなった。解析の結果、粒子添加なしの試料の  $k$  に比べて、W0.2 の  $10^{10}$  個/mL と W1.0 の  $10^9$  個/mL の  $k$  は有意に大きく ( $p<0.01$ )、これらの試料では散乱光が卓越し不活化に寄与したものと推察された。一方、CB の  $10^{10}$  個/mL では粒子添加なしの試料よりも  $k$  が有意に小さく、消毒効率の低下が認められた ( $p<0.05$ )。

濁質によって不活化速度が有意に低下した試料は、黒色粒子が著しく高濃度で存在する特殊な条件で、濁度 50 度以上の極端な条件に相当し、実務では紫外線処理以前に水質事故 (処理機能の著しい低下) として検出可能なレベルと推察された。すなわち、降雨に伴う原水濁度の急上昇など地表水に特徴的な水質変動は、紫外線照射より上流の処理工程で対応する設計思想が有効と考えられた。一方、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 の各試料と粒子添加なしの試料とで不活化速度に有意な差は無かった ( $p>0.05$ )。このうち、大腸菌では不活化効率が上昇した W1.0 の  $10^8$  個/mL (図4参照) を除く3試料 (CB の  $10^9$  個/mL、B0.2 の  $10^9$  個/mL、W0.2 の  $10^9$  個/mL) は、濁度

表4. 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)



0.6-1.5 度、色度 13 度以上、紫外線透過率 56-70%と紫外線処理に不利な条件に相当したが、粒子添加なしの試料（濁度 0.0 度、色度 0.7 度、紫外線透過率 97%）と同等の不活化効率が得られた。よって、少なくとも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と考えられた。

本研究により、水中に懸濁粒子が存在しても紫外線消毒を阻害しない場合や、粒子による紫外線散乱で消毒効率が高まる場合のあることが示された。紫外線処理は濁度上昇に対し一定の頑健性を有しており、浄水処理で想定される濁度変動の範囲では、濁度による紫外線処理性能の低下は無視できる（有意差を検出できない）レベルであると推察された。また、少なくとも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、紫外線透過率 75%以上）を満たす限り、原水の由来によらず、濁質による処理効率の有意な低下は生じないと考えられた。紫外線による水の消毒は、紫外線（光子）が水中を透過して微生物に到達し達成される。この原理を考えれば、紫外線処理の適用は、原水の由来が地表水か地下水かではなく、紫外線を照射する段階の水が一定の水質要件を満たすか否かで判断することが合理的である。ここで満たすべき水質要件は別途議論する余地があるが、少なくとも現行の地表水以外に適用される水質要件を満たす限り、紫外線処理が有効に機能することが確認された。

## E. 結論

素材、色、粒径の異なる標準粒子を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、当該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の低下傾向が類似しており、紫外線透過率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。白色ポリスチレン粒子による紫外線の散乱が不活化に寄与したものと推定された。
- (3)異なる粒子条件における 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 ( $p>0.05$ )。一方、濁質で不活化速度が有意に低下した試料は、濁度 50 度以上に相当し、実務では紫外線処理以前に水質事故（処理機能の著しい低下）として検出可能なレベルと推察された。

以上より、水中に懸濁粒子が存在しても紫外線消毒を阻害しない場合や、粒子による紫外線の散乱で消毒効率が高まる場合のあることが示された。紫外線処理は濁度上昇に対しある程度の頑健性を有しており、浄水処理で想定する濁度変動の範囲では、濁度による紫外線処理性能の低下は無視できる（有意差を検知できない）レベルであると推察された。また、少なくとも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、紫外線透過率75%以上）を満たす限り、原水の由来によらず、濁質による処理効率の有意な低下は生じないと考えられた。総じて、紫外線処理の適否は、原水の由来ではなく、紫外線を照射する段階の水質で判定することが合理的と考えられた。

#### (参考文献)

- 1) 厚生労働省. 2007. 水道水中のクリプトスポリジウム等対策の実施について【健康水発第 0330005 号通知】  
<http://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10900000-Kenkoukyoku/ks-0330005.pdf>.
- 2) 厚生労働省パブリックコメント「水道施設の技術的基準を定める省令」の一部改正等に関する意見募集の結果について、平成 19 年 4 月。  
<http://search.e-gov.go.jp/servlet/Public?ANKENTYPE=3&CLASSNAME=Pcm1090&KID=495060159&OBJCD=&GROUP>
- 3) Harold Wright, David Gaithuma, Mark Health, Chris Schulz, Travis Bogan, Alexander Cabaj, Alois Schmalweiser, Marcia Schmelzer and Janet Finegan-Kelly, 2012, UV disinfection knowledge base, Water Research Foundation, Denver, CO. pp.104-106.
- 4) 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.
- 5) Örmeci, B. and Linden, K. G. 2002. Comparison of UV and chlorine inactivation of particle and non-particle associated coliform. Water Science and Technology: Water Supply 2(5-6), 403-410.
- 6) Christensen, J. and Linden, K. G. 2003. How particles affect UV light in the UV disinfection of unfiltered drinking water. Journal American Water Works Association 95(4), 179-189.
- 7) Mamane, H. 2008. Impact of Particles on UV Disinfection of Water and Wastewater Effluents: A Review. Reviews in Chemical Engineering 24(2-3), 67-157.
- 8) 小熊久美子、平成 27 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 27 年度研究分担報告書.

- 9) Bolton R.J. and Linden K., 2003.  
Standardization of Methods for Fluence  
(UV Dose) Determination in Bench-Scale  
UV Experiments. Journal of Environmental  
Engineering 129:209-215.

G. 研究発表

1. 論文発表

小熊久美子, 小塩美香, Jenyuk  
Lohwacharin, 滝沢智. 水中の懸濁粒子  
が紫外線消毒効率に及ぼす影響. 水環  
境学会誌 Vol. 40, No. 2, pp. 59-65. 2017.

2. 学会発表

該当なし

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

該当なし

2. 実用新案登録

該当なし

3. その他

該当なし

### Ⅲ. 研究成果の刊行に関する一覧表

#### 雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年	備考
栗原潮子, 香坂由華, 安積良晃, 溝口真二郎, 富井正雄, 佐々木史雄, 安藤 茂, 島崎 大, 大垣 眞一郎	ろ過水濁度管理の実態と 課題 ー濁度管理技術を補完す る紫外線処理の適用にむ けてー	平成 28 年度全国 会議 (水道研究発 表会) 講演集	—	296-297	2016	
小熊 久美子 小塩 美香 Lohwacharin Jenyuk 滝沢 智	水中の懸濁粒子が紫外線 消毒効率に及ぼす影響	水環境学会誌	Vol. 40, No.2	59-65	2017	
神前 和 神子 直之	積分球式吸光度を用いた 紫外線消毒効率に対する 懸濁物質の影響評価	第51回日本水環境 学会年会講演集	—	244	2017	

添付資料 1

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）による  
「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」

研究体制

（平成 28 年 6 月現在）

研究代表者	大垣 眞一郎（（公財）水道技術研究センター）
研究分担者	安藤 茂（（公財）水道技術研究センター）
同	佐々木史朗（同）
同	富井 正雄（同）
同	島崎 大（国立保健医療科学院）
同	神子 直之（立命館大学）
同	大瀧 雅寛（お茶の水女子大学）
同	小熊 久美子（東京大学）
研究協力者	関山 真樹（神奈川県企業庁）
同	市川 豊（東京都水道局）
同	太田 淳一（岐阜市上下水道事業部）
同	玉野 博士（埼玉県企業局）
同	伊藤 博文（（一社）日本紫外線水処理技術協会）
同	岩崎 達行（同）
同	溝口 真二郎（（公財）水道技術研究センター）
同	中川 遼太郎（同）
同	安積 良晃（同）
同	香坂 由華（同）
同	栗原 潮子（同）

## 会 議 録

平成 28 年 9 月 12 日作成  
作成 富井正雄、溝口真二郎

会議の名称	厚生労働科研究費補助金による「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」の熊本地震発生時の対応状況等の聞き取り調査
開催日時	平成 28 年 9 月 8 日（木）10：00～15：00
開催場所	ヒアリング：熊本市上下水道局 施設調査：一本木水源地、八景水谷水源地、亀井水源地
出席者	熊本市上下水道局 水道技術研究センター：富井浄水技術部長、溝口主任研究員
議 題	1. 趣旨説明 2. アンケートに基づくヒアリング及び施設調査
会議資料	熊本地震発生時の対応状況等に係るアンケート（事前送付資料）
その他必要事項	
会議内容（決定・確認事項、発言者、発言内容、決定理由など）	
<p><b>【議題 1】 趣旨説明等</b> 富井より、本研究と今回の訪問の趣旨について説明した。</p> <p><b>【議題 2】 調査表に基づくヒアリング</b>（アンケートの結果は、別紙）</p> <p><b>1. 地震発生時の状況について</b></p> <p><b>（1）停電の発生について</b></p> <p>① 一本木水源地：発生した。 ② 八景水谷水源地：発生した。 ③ 亀井水源地：発生した。 ※ 3水源地とも、2016/4/14 21:26 の前震（M6.5）では停電は発生しなかったが、2016/4/16 1:25 の本震（M7.3）において、停電が発生した。</p> <p><b>（2）停電時における自家発電設備や無停電電源装置の作動について</b></p> <p>① 一本木水源地：無停電電源装置は機能していたが、停電時間が短時間（約 30 分程度）だったため自家発電設備は作動させなかった。 ② 八景水谷水源地：無停電電源装置は機能していたが、停電時間が短時間（約 30 分程度）だったため自家発電設備は作動させなかった。 ③ 亀井水源地：無停電電源装置は機能していた。自家発電設備は無い。 ※ 一本木水源地及び八景水谷水源地については、配水池の水位に余力があった</p>	

ため、自主的に作動させなかった。復帰よりも現場確認を優先させ、現地にて濁度確認を行いながら、復帰させた。

### (3) 紫外線処理装置の自動停止期間及び停止理由について

#### ① 一本木水源地（処理能力：11,000m<sup>3</sup>/日）

対象設備	自動停止期間	停止・復帰理由
紫外線処理装置 1号	4/14 21:35～	濁度異常で停止
	4/15 10:22	現場強制運転により復帰
	4/16 1:25～21:49	停電により停止 故障リセットにより復帰 (復電は 4/16 1:55)
	4/17 5:34～14:42	処理槽温度異常により停止 処理槽エア抜き・充水により復帰
	4/17 21:31～22:52	処理槽温度異常により停止 処理槽エア抜き・充水により復帰
紫外線処理装置 2号	4/14 21:34～	濁度異常で停止
	4/15 10:18	現場強制運転により復帰
	4/16 1:25～21:49	停電により停止 故障リセットにより復帰 (復電は 4/16 1:55)

※ 4/17 は、処理槽にエアが混入して水が減少し、温度が上昇した。通常時の温度は 20 度程度であったが、40 度まで上昇した。エアの混入理由は不明であるが、エアが取水から入ってきたと考えられたため、震災後にエア弁を設置し、エア抜きを出来るようにした。

#### ② 八景水谷水源地（処理能力：15,000m<sup>3</sup>/日）

対象設備	自動停止期間	停止・復帰理由
紫外線処理装置 1号 (浅井戸1号)	4/14 21:36～ 4:36	濁度異常により停止 濁度異常の故障無効化により復帰
	4/16 1:25～11:13	停電により停止 故障リセットにより復帰 (復電は 4/16 1:52)
紫外線処理装置 2号 (浅井戸2号)	4/14 21:31～ 4:36	濁度異常により停止 濁度異常の故障無効化により復帰
	4/16 1:25～11:13	停電により停止 故障リセットにより復帰 (復電は 4/16 1:52)

※ 濁度の停止条件は 2 度。

③ 亀井水源地（処理能力：6,400m<sup>3</sup>/日）

対象設備	自動停止期間	停止・復帰理由
紫外線処理装置 （浅井戸1号）	4/14 21:28～27:12	濁度異常により停止 現場強制運転により復帰
	4/16 1:25～ 4/22 10:16	停電により停止 故障リセットにより復帰 （復電は4/16 1:52）

（4）勤務時間外での震災発生による対応状況の課題について

- ① 一本木水源地：なし。
- ② 八景水谷水源地：なし。
- ③ 亀井水源地：なし。

※ 前震時には、職員が自主的に参集し、現地確認に向かった。本震は、濁度解消作業中に発生し、現場に職員がいたため、対応できた。

2. 被害の状況について

（1）建屋等の損傷について

- ① 一本木水源地：浅井戸周辺で地盤沈下が発生。（下写真参照）

※ 地表面までの沈下は7月29日に発生。





- ② 八景水谷水源地：運用上支障のない亀裂等が数か所発生（下写真の床面コンクリート上）。



- ③ 亀井水源地：なし。

※ 水源地はいずれも震源から離れた場所に位置していたため、濁度は上昇したが、装置自体に影響を及ぼすことは無かった。

**(2) 紫外線処理装置、機械電気設備、その他管路附属設備の損傷について**

- ① 一本木水源地：なし  
 ② 八景水谷水源地：なし  
 ③ 亀井水源地：なし

※ 配管の損傷も少なかった。なお、部品については、ランプ交換を毎年直営で実施しているため、予備を確保している。

**3. 原水水質の状況について**

**(1) 濁度について**

- ① 一本木水源地

	最大濁度	
	4/14 時点	4/16 時点
浅井戸 1 号井	10.0 (*1)	0.14 (*2)
深井戸 1 号井	0.40	0.01 (*2)
深井戸 2 号井	0.40	0.07 (*2)

② 八景水谷水源地

	最大濁度	
	4/14 時点	4/16 時点
浅井戸 1 号井	10.0 (*1)	5.57 (*2)
浅井戸 2 号井	10.0 (*1)	1.44 (*2)
深井戸 1 号井 *3	8.90	0.35 (*2)
深井戸 2 号井 *3	7.50	0.12 (*2)

③ 亀井水源地

	最大濁度	
	4/14 時点	4/16 時点
浅井戸 1 号井	10.0 (*1)	2.23 (*2)
深井戸 1 号井 *3	10.0 (*1)	10.0 (*1)
深井戸 2 号井 *3	10.0 (*1)	1.95 (*2)
深井戸 3 号井 *3	10.0 (*1)	8.13 (*2)

\*1：計測上限値

\*2：計測ホールド値

(実際には濁度が出ているが、濁度異常により取水ポンプを停止させないよう現場にて濁度計計測値をホールドしたもの)

\*3：紫外線処理対象外の井戸

※ 原水濁度が 2 度以上で取水停止となるため、ホールド状態にして取水を継続させた。

※ 原水色度については測定していない。

※ 深井戸に UV 照射をしているのは一本木水源地のみである（水源から近い上流に北部処理場があり、水源汚染の懸念があるため）。また、水源地は週に 1 回の頻度で点検している。なお、クリプトスポリジウム等や指標菌の検出事例は無い。

(2) 原水水質変化の有無について

① 一本木水源地：アルミニウム、鉄の一時的上昇。

<給水栓測定結果>

・ **アルミニウム** 4/29：0.06mg/L、5/16：0.02mg/L（水質基準値は 0.2mg/L）

※ 通常時は 0.002 mg/L 未満。原水では 0.2 mg/L を超過していた。

・ **鉄** 4/29：0.04mg/L、5/16：0.01mg/L 未満（水質基準値は 0.3 mg/L）

※ 通常時は 0.01 mg/L 未満。停電による影響で赤水が発生していたが、一本木水源地のみ原水から鉄が検出された。

- ② 八景水谷水源地：なし
- ③ 亀井水源地：なし

### (3) 水源の枯渇について

- ① 一本木水源地：なし
- ② 八景水谷水源地：なし
- ③ 亀井水源地：なし

※ 水位が上昇した井戸はあるが、枯れた井戸は無かった。

## 4. 停止期間中の対応について

### (1) 紫外線処理装置の水抜きについて

- ① 一本木水源地：実施せず
- ② 八景水谷水源地：実施せず
- ③ 亀井水源地：実施せず

### (2) ストレーナーやスリーブ等の清掃について

- ① 一本木水源地：実施せず
- ② 八景水谷水源地：実施せず
- ③ 亀井水源地：実施せず

※ 全ての水源地において、再開時にはストレーナー等の清掃や排水を実施。

※ 一本木水源地の紫外線強度計は3点式で、照射槽真下に取り付けてある強度計が、濁度の上昇により下部に汚れが溜まってしまい、紫外線強度計に誤差が発生した。

## 5. 応急給水の状況について

### (1) 膜処理設備等の導入について

- ① 一本木水源地：実施せず
- ② 八景水谷水源地：実施せず
- ③ 亀井水源地：実施せず

### (2) 水質異常時における摂取制限を伴う給水継続について

- ① 一本木水源地：実施
- ② 八景水谷水源地：実施
- ③ 亀井水源地：実施

※ 17日間（4/15～5/1）実施。送水時の最大濁度は30度程度と推定される（未測定）。

※ 取水濁度が異常に高いことを確認した場合は、送水せずに排水運転を半日程度実施した。

※ 紫外線処理装置の清掃頻度等の設定変更は行っていない。

※ 送水残留塩素濃度については、注入率を若干高めにしたが、内規で0.5mg/Lが上限とされているため、その値を超えないようにして送水した。

※ 濁っている場合は飲用不適で生活用水のみの利用とし、給水栓において透明になった場合は、飲用可能である旨の広報を行っていた。

**6. 給水開始時の状況について**

**(1) 起動時のトラブルについて**

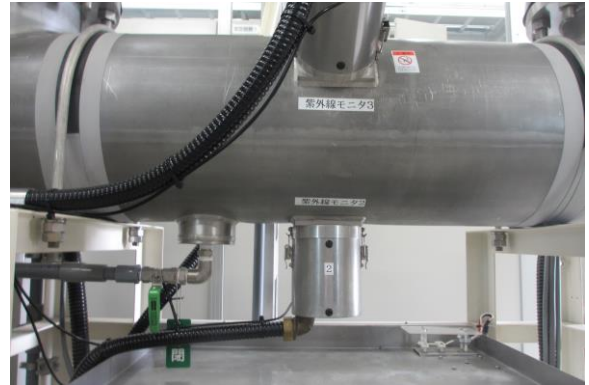
- ① 一本木水源地：なし
- ② 八景水谷水源地：なし
- ③ 亀井水源地：なし

以 上

現地調査写真（一本木水源地）



紫外線処理設備



紫外線強度計（多点式）



建屋

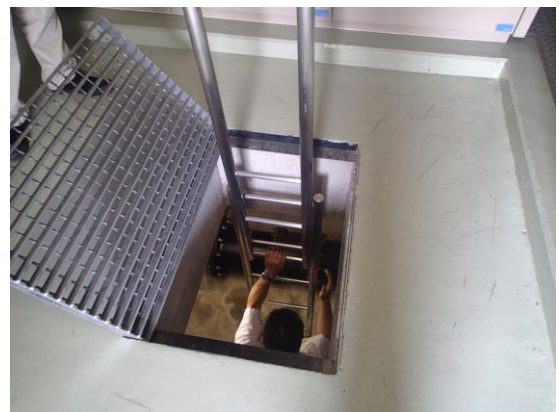


付近が陥没した浅井戸1号井

現地調査写真（八景水谷水源地）



建屋



2階フローアから紫外線処理装置を  
設置したフローアへ





紫外線処理設備（1）



紫外線処理設備（2）

現地調査写真（亀井水源地）



建屋



紫外線処理設備（1）



紫外線処理設備（2）

## アンケートへのご協力をお願い

この度は、平成 28 年度厚生労働科学研究費補助金による「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」の一環としまして、熊本地震発生時の対応状況等のヒアリング調査にご協力頂きまして、厚くお礼申し上げます。

つきましては、今般のヒアリング調査につきまして、限られた時間で効率よく実施したいと考えておりますので、御多用のところ大変恐れ入りますが、以下のアンケートへの事前記入に御協力いただきたく、お願い申し上げます。

### 1. 地震発生時の状況についてお伺いします。

#### (1) -1 停電が発生しましたか？

- ① 一本木水源地 :  はい  いいえ
- ② 八景水谷水源地 :  はい  いいえ
- ③ 亀井水源地 :  はい  いいえ

#### (1) -2 その場合、自家発電設備や無停電電源装置は作動しましたか？

- ① 一本木水源地 :  はい  いいえ  設備が無い
- ② 八景水谷水源地 :  はい  いいえ  設備が無い
- ③ 亀井水源地 :  はい  いいえ  設備が無い

#### (2) -1 紫外線処理装置は自動停止しましたか？

- ① 一本木水源地 :  はい (期間: \_\_\_\_\_)  いいえ
- ② 八景水谷水源地 :  はい (期間: \_\_\_\_\_)  いいえ
- ③ 亀井水源地 :  はい (期間: \_\_\_\_\_)  いいえ

#### (2) -2 その場合、どのような設定により停止しましたか？(加速度、濁度、色度等)

- ① 一本木水源地 : \_\_\_\_\_
- ② 八景水谷水源地 : \_\_\_\_\_
- ③ 亀井水源地 : \_\_\_\_\_

#### (3) 勤務時間外での地震発生ですが、対応に課題はありましたか。

- ① 一本木水源地 :  はい ( \_\_\_\_\_ )  いいえ
- ② 八景水谷水源地 :  はい ( \_\_\_\_\_ )  いいえ
- ③ 亀井水源地 :  はい ( \_\_\_\_\_ )  いいえ

### 2. 被害の状況についてお伺いします。

#### (1) 建屋の損傷はありましたか？

- ① 一本木水源地 :  はい ( \_\_\_\_\_ )  いいえ
- ② 八景水谷水源地 :  はい ( \_\_\_\_\_ )  いいえ
- ③ 亀井水源地 :  はい ( \_\_\_\_\_ )  いいえ

#### (2) 紫外線処理装置の損傷・故障はありましたか？(ランプ、スリーブ等)

- ① 一本木水源地 :  はい ( \_\_\_\_\_ )  いいえ
- ② 八景水谷水源地 :  はい ( \_\_\_\_\_ )  いいえ
- ③ 亀井水源地 :  はい ( \_\_\_\_\_ )  いいえ

#### (3) 計装設備等の機械電気設備に損傷・故障はありましたか？

- ① 一本木水源地 :  はい ( \_\_\_\_\_ )  いいえ
- ② 八景水谷水源地 :  はい ( \_\_\_\_\_ )  いいえ
- ③ 亀井水源地 :  はい ( \_\_\_\_\_ )  いいえ

**(4) その他の管路附属設備に損傷・故障はありましたか？**

- ① 一本木水源地 :  はい ( )  いいえ  
 ② 八景水谷水源地 :  はい ( )  いいえ  
 ③ 亀井水源地 :  はい ( )  いいえ

※ 必要部品の入手等に問題があった場合はご記入下さい。

**3. 原水水質の状況についてお伺いします。**

**(1) 最大濁度は何度まで上昇しましたか？**

**(i) 4月14日時点**

- ① 一本木水源地 : ( ) 度  
 ② 八景水谷水源地 : ( ) 度  
 ③ 亀井水源地 : ( ) 度

**(ii) 4月16日時点**

- ① 一本木水源地 : ( ) 度  
 ② 八景水谷水源地 : ( ) 度  
 ③ 亀井水源地 : ( ) 度

**(iii) その後の推移はどうでしたか？**

- ① 一本木水源地 : ( )  
 ② 八景水谷水源地 : ( )  
 ③ 亀井水源地 : ( )

**(2) 最大色度は何度まで上昇しましたか？**

**(i) 4月14日時点**

- ① 一本木水源地 : ( ) 度  
 ② 八景水谷水源地 : ( ) 度  
 ③ 亀井水源地 : ( ) 度

**(ii) 4月16日時点**

- ① 一本木水源地 : ( ) 度  
 ② 八景水谷水源地 : ( ) 度  
 ③ 亀井水源地 : ( ) 度

**(iii) その後の推移はどうでしたか？**

- ① 一本木水源地 : ( )  
 ② 八景水谷水源地 : ( )  
 ③ 亀井水源地 : ( )

**(3) その他の水質項目や水量（水位）に異常はありましたか？**

- ① 一本木水源地 :  はい ( )  いいえ  
 ② 八景水谷水源地 :  はい ( )  いいえ  
 ③ 亀井水源地 :  はい ( )  いいえ

**(4) 水源の枯渇や原水水質の変化はありましたか？**

- ① 一本木水源地 :  はい ( )  いいえ  
 ② 八景水谷水源地 :  はい ( )  いいえ  
 ③ 亀井水源地 :  はい ( )  いいえ



4. 停止期間中の対応についてお伺いします。

(1) 紫外線処理装置の水抜きは行いましたか？

- ① 一本木水源地 :  はい  いいえ
- ② 八景水谷水源地 :  はい  いいえ
- ③ 亀井水源地 :  はい  いいえ

(2) ストレーナーやスリーブ等の清掃は行いましたか？

- ① 一本木水源地 :  はい ( )  いいえ
- ② 八景水谷水源地 :  はい ( )  いいえ
- ③ 亀井水源地 :  はい ( )  いいえ

5. 応急給水の状況についてお伺いします。

(1) 膜処理設備等は導入されましたか？

- ① 一本木水源地 :  はい  いいえ  検討はした
- ② 八景水谷水源地 :  はい  いいえ  検討はした
- ③ 亀井水源地 :  はい  いいえ  検討はした

(2) -1 摂取制限を設けて給水を継続されましたか？

- ① 一本木水源地 :  はい  いいえ
- ② 八景水谷水源地 :  はい  いいえ
- ③ 亀井水源地 :  はい  いいえ

(2) -2 その場合、何日行いましたか？

- ① 一本木水源地 : ( ) 日
- ② 八景水谷水源地 : ( ) 日
- ③ 亀井水源地 : ( ) 日

(2) -3 その場合、濁度が高い時でも紫外線照射装置を稼働させましたか？

- ① 一本木水源地 :  はい (稼働時最大濁度: \_\_\_\_\_ 度)  いいえ
- ② 八景水谷水源地 :  はい (稼働時最大濁度: \_\_\_\_\_ 度)  いいえ
- ③ 亀井水源地 :  はい (稼働時最大濁度: \_\_\_\_\_ 度)  いいえ

※ 稼働させた場合の注意点があればご記入下さい。

---



---

※ 残塩管理で苦慮された点があればご記入下さい。

---



---

6. 給水開始時の状況についてお伺いします。

(1) 設備は通常どおり起動できましたか？

- ① 一本木水源地 :  はい  いいえ ( )
- ② 八景水谷水源地 :  はい  いいえ ( )
- ③ 亀井水源地 :  はい  いいえ ( )

\*ご協力いただきまして どうもありがとうございました。

会 議 録

平成 28 年 12 月 28 日作成  
作成 富井正雄、栗原潮子

会議の名称	厚生労働科研究費補助金による「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」の高色度原水への対応状況に関する聞き取り調査
開催日時	平成 28 年 12 月 27 日（火）9：30～15：30
開催場所	ヒアリング：Kr 市上下水道部浄水課 施設調査：Ak 浄水場、取水地点、Iw 導水ポンプ場、 Kz 送配水ポンプ場
出席者	Kr 市上下水道部 浄水課課長 ほか 水道技術研究センター：富井浄水技術部長、栗原主任研究員
議 題	1. 趣旨説明 2. 資料に基づきヒアリング及び施設調査
会議資料	高色度原水への対応状況に関する聞き取り調査（事前送付資料）
その他必要事項	
会議内容（決定・確認事項、発言者、発言内容、決定理由など）	
<p>【議題 1】趣旨説明等</p> <p>富井より、本研究と今回の訪問の趣旨について説明した。</p> <p>紫外線処理の水質要件となる原水色度が、浄水処理によって確実に除去されているか、高色度原水を処理対象とする浄水場について調査を行った。</p> <p>【議題 2】 事前調査資料に基づくヒアリング</p> <p>1. Kr 市上下水道部の概況</p> <p>Kr 市上下水道部は、1 上水道、4 簡易水道から構成されている。その上水道である Kr 市上水道の Ak 浄水場は、給水人口 227,000 人、浄水能力 90,915m<sup>3</sup>/日である。浄水方法は、接触高速凝集沈澱方式+急速ろ過（除マンガン）である。</p> <p>①水源水質</p> <p>水源河川は Kr 川の表流水で、延長 154km、流域面積 2,510km<sup>2</sup> の一級河川である。流域には酪農地帯をはじめ、湿原がある。</p> <p>今回の調査対象となった高色度（高有機物）原水は、この湿原からの有機物（フミン質）によるものである。</p> <p>この他、流域にある農畜産業と都市排水（下水処理場）が水質に影響を与える要因となっている。</p>	

## ②浄水処理

資料-1：浄水処理フロー、上水道施設フローシート参照

通常時の浄水処理は、フミン質除去を中心に行うため、硫酸注入で pH を調整する。

夏場：pH 6.5～6.6、冬場：6.8（夏場に比べ高めに設定）

PAC 注入率：冬 40mg/L、夏 60mg/L、降雨時は 110～120mg/L

トリハロメタン及びハロ酢酸の生成抑制のため、中・後塩素処理を行っている（中間塩素注入率：0.5～0.6mg/L、後塩素を用いて送水の残留塩素濃度を 0.45～0.5mg/L とする）。しかし、夏季を中心とした藻類発生時には、湿原でプランクトンが増殖するため、凝集沈澱処理の改善を目的として前塩素処理（注入率 0.5mg/L）を併用している（4月～12月頃に注入、ろ過障害となる原水中の藻類数が 460～500 個程度まで減少すると注入停止）。ただし、濁度が 20 度以上になった場合は濁質に吸収されるので注入を停止するが、ろ抗上昇速度と原水中の藻類濃度を見ながらの対応となる。二段凝集は導入していない。

かび臭物質が生成される時期には粉末活性炭処理の注入で対応する（資料-2 参照：活性炭注入は、着水井で最大 60mg/L、バックアップ用の沈澱池で最大 40mg/L 注入可能）。

降雨時や融雪時等による水質悪化時の対応が最も大変である。降雨により原水 pH が低下するので酸注入は止められるが、PAC 注入率の増加とともにアルカリ度が低下、アルカリ剤の注入を行いながらとなって浄水処理が難しくなる。濁度と色度への対処が必要となる。濁度、色度及びクリプトスポリジウム等への対応は、凝集剤の注入強化（110mg/L～120mg/L）による。有機物及び臭気には粉末活性炭、アンモニア態窒素には主に中塩素で対応している（必要に応じ、活性炭の注入率も高くする）。

沈澱水濁度は通常 0.5～0.7 度程度である。

資料-2：活性炭処理フロー図参照

資料-3：浄水処理フロー（TOC・UV）

資料-4：ジェオスミン、2-MIB

資料-5：アンモニア態窒素（融雪水対応フロー）

有機物対応のため UV 計は導水ポンプ場と沈澱池出口で連続計器にて測定、TOC も沈澱池出口で計測している。これらの計器値をもって薬注のコントロールを行っている。

その他のセンサーは資料-1 に示したとおりである。

## ③ろ過水の紫外吸光度値

資料-3 に示すように沈澱処理水の UV 値は 0.09 以下（セル長 50 mm）に保持するように活性炭等を増強して対応している（現状の地表水以外の UV 処理における水質要件:0.125abs（セル長 10 mm）以下）。

## 2. 紫外吸光度値の管理

原水の紫外吸光度が 0.550abs 以上で管理異常値として活性炭注入を行う。なお、活性炭注入率は TOC の値に連動して管理を行っている。高濁度がなくなった後も、色度は長期にわたり残ることがある。

## 3. 汚泥濃縮

沈澱池からの引抜き汚泥（汚泥濃度 0.1～0.2%）は、濃縮槽で約 2%、ろ過濃縮フィルターで約 5%、その後脱水機で約 40%まで濃縮される。

## 4. その他

- ・アイスジャム対策で、導水渠に赤外線ランプを設置。
- ・トリハロメタンとハロ酢酸対策として配水池に追加次亜設備あり。
- ・寒冷地対策で、沈砂池、沈澱池、ろ過池、排泥池、濃縮槽などが覆蓋化されている。

以 上

現地調査写真



取水口部



アイスジャム対策用導水渠部赤外線ランプ



赤外線ランプ装置



Iw 導水ポンプ場（無人施設）



ポンプ場内：バイオアッセイ（メダカ）



ポンプ場内：水質安全モニタ（バイオセンサ）



導水ポンプ場内：油分モニタ



かび臭自動センサー①



かび臭自動センサー②



導水ポンプ、導水管は2条



導水ポンプ場（非常用発電機）



Ak 浄水場

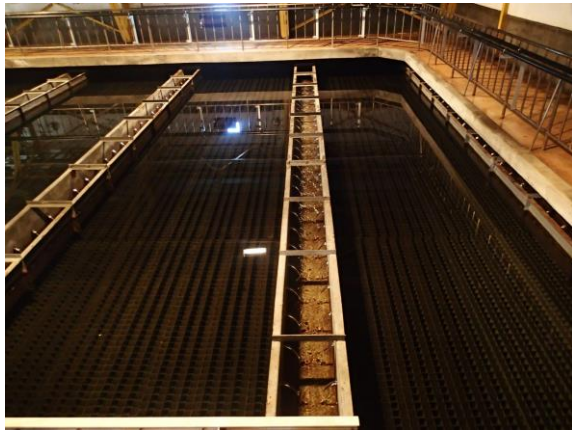




高速凝集沈澱池①



高速凝集沈澱池②



高速凝集沈澱池③（傾斜管有）



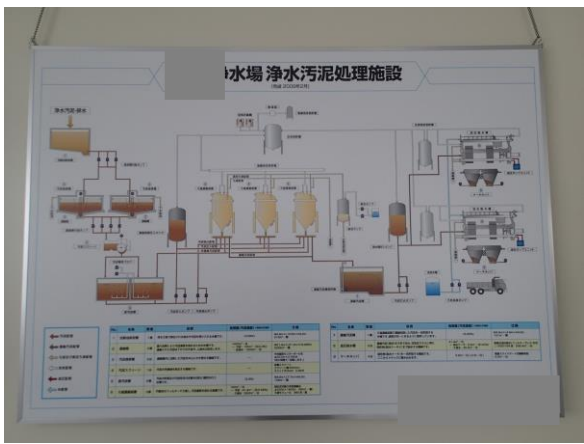
高速凝集沈澱池④（傾斜管なし）



沈澱処理水 TOC 計



UV 計（色度計）



汚泥処理施設①（概要図）



汚泥処理施設②（ろ過濃縮機フィルター）



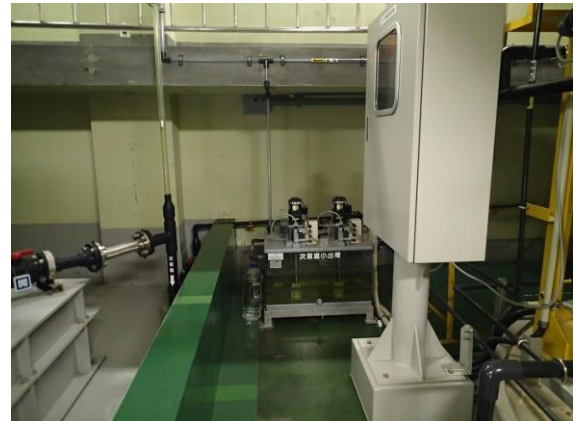
汚泥処理施設③（脱水機：中時間型 8h）



Kz 送配水ポンプ場



送配水ポンプ



追加次亜設備



## 高色度原水への対応状況に関する聞き取り調査

平成 28 年 12 月 27 日

1. 調査対象事業者：Kr 市上下水道部

2. 調査場所：Ak 浄水場

3. 調査の目的

紫外線吸光度あるいは色度が比較的高い原水の場合の浄水処理及び維持管理上の注意点等について、聞き取り調査する。

現状の地表水以外の紫外線処理に対する水質要件は、濁度 2 度以下、色度 5 度以下、紫外線(253.7nm 付近)透過率 75%超 (0.125abs/10mm 未満) となっていますが、地表水への適用を視野にいたした場合の参考とする。

4. 調査内容

1) 原水水質の状況

- ・ 3つの河川と4つの地下水の水源において、高色度（溶存有機物濃度）が高い河川はどの水源か？どの程度か？
- ・ 処理後のろ過水において、色度が5度以上となる恐れがありますか？  
頻度はどのくらいか？

2) 浄水処理方法

紫外線吸光度が大きくなるような色度が上昇する局面での浄水処理強化の方法は？  
Ak 浄水場の酸注入による pH 調整は、どの程度まで下げるのか？

3) 水質データ

紫外線吸光度 (E260)、色度、濁度などの原水とろ過水の度数分布データ  
(3～5 年分、可能であれば)

## 会 議 録

平成 29 年 1 月 13 日作成  
作成 伊藤、富井、栗原

会議の名称	厚生労働科研究費補助金による「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」の紫外線処理設備配置計画検討に係る聞き取り調査
開催日時	平成 29 年 1 月 10 日（火） 9：30～15：20
開催場所	ヒアリング：Tm 市水道事業所 施設調査：Hh 浄水場、My 浄水場、Rd 浄水場
出席者	Tm 市水道事業所： 所長、次長兼水道管理課長ほか 日本紫外線処理技術協会：伊藤博文協会長（研究協力者） 水道技術研究センター： 富井浄水技術部長、栗原主任研究員
議 題	1. 趣旨説明 2. 資料に基づきヒアリング及び施設調査
会議資料	紫外線処理設備配置計画検討に係る聞き取り調査（事前送付資料）
その他必要事項	
会議内容（決定・確認事項、発言者、発言内容、決定理由など）	
<p><b>【議題 1】 趣旨説明等</b></p> <p>富井より、本研究と今回の訪問の趣旨について説明した。</p> <p>地表水に紫外線処理を適用する場合には、現状の処理施設すなわちろ過池等の後に紫外線処理設備を設けることとなる。</p> <p>ろ過水（ろ過池の後）に紫外線処理設備を導入する場合の設計諸元に係る「設備配置計画」を主眼に調査を実施したい。</p> <p>現況のろ過池から浄水池等に至る平面図、縦断図を基に、ろ過池後に紫外線処理設備配置を想定した場合の留意事項等について、聞き取り調査を実施する。</p> <p><b>【議題 2】 事前調査資料に基づくヒアリング（アンケートの結果は、別紙）</b></p> <p>Tm 市水道事業所を調査対象とした理由</p> <p>大規模事業体にあつては、濁度の徹底した管理が行えていることから、中小事業体の中で、表流水を対象とした多様な処理を行っている。急速ろ過、緩速ろ過、及び紫外線処理の設備がある事業体として選定した。</p> <p>調査の結果、濁度管理徹底のための方策（捨水、スローダウン、スロースタート、二段凝集、ろ過池ごとの濁度計設置など）は実施していなかった。高濁度時やろ過開始時のろ過水濁度に幾分の不安を抱えていた。現在、水道事業施設更新計画策定委員会を設け、検討中である。</p>	

## 1. Tm 市水道事業所の概況

Tm 市水道事業所は、給水件数の 85%を給水範囲とする Hh 浄水場をはじめとして、9 か所の浄水場があり、1 日当たりの合計施設能力は 36,931 m<sup>3</sup>である。浄水方法は、急速ろ過（2 か所）、緩速ろ過（1 か所）、膜ろ過（3 か所）、紫外線処理（2 か所）、直接ろ過（1 か所）の多様な処理が行われている。施設を水源別にみると、表流水 5 か所、伏流水 1 か所、浅井戸 2 か所、深井戸 1 か所である。

## 2. ヒアリング対象施設

今回ヒアリングの対象とした施設は、主に地表水を水源とする施設である。つぎの 4 浄水場に紫外線処理を導入することを想定し検討を行った。

- ①Hh 浄水場 : 凝集沈澱砂ろ過、30,700 m<sup>3</sup>/日、表流水
- ②Ik 浄水場 : 凝集沈澱砂ろ過、2,100 m<sup>3</sup>/日、表流水
- ③Oy 浄水場 : 緩速ろ過方式、760 m<sup>3</sup>/日、表流水
- ④Rd 浄水場 : 直接ろ過、110 m<sup>3</sup>/日、深井戸（地下水）

### (1) Hh 浄水場（写真①～⑤）

原水水質：濁度：30 度以下、最大 300 度（過去に 2,000 度有）

アルカリ度：15～35mg/L、通常時アルカリ剤は不要である（ソーダ灰）。

pH：6.7～8.5、高 pH 時の 1.5～2.5 か月間は、炭酸ガス（CO<sub>2</sub>）で 7.2 まで下げる。

浄水処理：上下う流式フロック形成池、普通沈澱池、急速ろ過（グリーンリーフ）

薬品注入：前、中、後の次亜塩素酸ナトリウム、浄水池出口で 0.5～0.7mg/L

凝集剤：PAC

粉末活性炭：平成 26 年に、初めて藻類発生に起因するかび臭発生。臨時で 2 か月間、30～60mg/L を注入。

濁度管理：沈澱池出口水、濁度 0.6 度以下、（通常時 0.2）、

ろ過水 0.05 度以下（通常時 0.02 以下）

濁度管理徹底のための方策：濁度管理徹底のための方策は実施していない（捨水なし、ろ過池洗浄スローダウンなし、ろ過開始時のスロースタートなし、二段凝集なし、ろ過池ごとの濁度計設置なし）。

### (2) Ik 浄水場

注意すべき水質事項：降雨時の濁度上昇、ダム水源の藻類発生等によるかび臭、マンガ

### (3) Rd 浄水場（写真⑧～⑩）

水源が深井戸（15 m）で直接ろ過を実施している。洗浄間隔は 10 時間で、凝集剤として PAC を注入している。元来、簡易水道施設であったが、Tm 市水道に統合された。

(深井戸だが、ろ過を行う必要がある状況からすると伏流水である可能性が高い。)

#### (4) Oy 浄水場

緩速ろ過方式の浄水場。近年砂層表面に不織布を設置し、かき取り作業の軽減化を図っている。

### 3. 紫外線処理設備配置計画検討

#### (1) Hh 浄水場

##### 1) 現状施設における設置位置の検討

- i) ろ過池出口と浄水池（配水池）間に配置はスペースがないため配置不可（写真⑥、図-1.1：△1、図-1.2：△1）
- ii) 配水池出口流量計室後（写真⑦）または駐車場付近の配水管φ800のいずれにも配置可能。自然流下で配水圧力にも余裕がある。（図-1.1：△2、△3、図-1.2：△2、△3）
- iii) 紫外線照射装置を当該浄水場に設置した場合の水理計算結果（別紙参照）によれば、損失水頭は2.011 mとなった。

##### 2) 現状施設更新による設置位置の検討（写真①～⑤）

現在、施設更新時期を迎えており、ブロック形成池からろ過池までの更新が検討されている。沈澱池が普通沈澱池であるため、傾斜板沈澱池に変更した場合は、スペースに余裕ができるため、ろ過池と配水池間に紫外線処理設備の設置が可能となる。

#### (2) Ik 浄水場 (2,100 m<sup>3</sup>/日)

- ・ろ過池と浄水池間については、現状、構造上の問題とロスとを考慮すると設置は不可能である（図-2：△4）。
- ・配水池PCタンク（700 m<sup>3</sup>）、1号配水池（400 m<sup>3</sup>）と2号配水池は直列配置であるためPCタンクの前、あるいは、2号配水池の後ろに配置可能である。もともとこの土地は旧浄水場の跡地であるためスペース的には問題がない。（図-2：△5）

#### (3) Oy 浄水場 (760 m<sup>3</sup>/日)

- ・緩速ろ過池と浄水池（41 m<sup>3</sup>）間に設置可能。もともとこの浄水池（配水池）は公園用水と一部民家用であるため、使用量が少ない。ロスがあっても問題とならない。これ以降の配水には、減圧槽を設けるほどである。（図-3：△6）

#### (4) Rd 浄水場 (110 m<sup>3</sup>/日)

- ・ろ過機と浄水池（13 m<sup>3</sup>）間に紫外線処理設備が設置可能である。（写真⑩、図-4：△7）

#### (5) 紫外線処理設備設置についてのまとめ

Tm市の4浄水場について紫外線処理設備の導入と配置について検討し、いずれの施設においても設置可能という結果を得た。一般に、紫外線処理設備は、他の方式に比較して設備規模も小さく、配置が容易であるといわれているが、今回、改めてその利点を確認した。

### 4. 紫外線処理設備を既存ろ過池等の後に設ける場合の留意事項

- ・現状のろ過池と浄水池間に紫外線処理設備を設けることが理想ではあるが、設置スペー

スと配管による損失水頭を考慮する必要がある（浄水池 HWL が低くなる）。

- ・ 浄水池流出管後の流量計室に近接して紫外線処理設備の設置は可能である。
- ・ 紫外線照射装置の処理水量 3 万  $\text{m}^3/\text{日}$  における設備設置による損失水頭の増加を試算すると、2 m 程度であった。そのため自然流下及びポンプ圧送による揚程が充分ある場合は、設置が可能である（紫外線照射装置本体と前後のバルブ及びストレーナーを設置した時の損失水頭）。
- ・ 送配水施設に紫外線照射装置を設置する場合は、残留塩素濃度の減少に留意して塩素注入率を管理する必要がある。

## 5. その他

### 1) 揚水ポンプ場の工事（東日本大震災の教訓から）

Hh 浄水場は、表流水を水源とし、取水塔方式で取水し、高低差約 100 m を揚水する直送方式を用いていた。東日本大震災の際にこの揚程 100 m の特殊なポンプが故障し、特殊ゆえに復旧に時間を要したことから、直接 100 m 揚水する方式から 2 段階ポンプ場方式に変更して、汎用的なポンプを用いる方式を採用し、現在工事を実施している。

### 2) Nr 水系浄水場（写真⑫）と My 水系浄水場（写真⑬、⑭）

両浄水場とも Oz 川を水源とし、Nr 水系浄水場（880  $\text{m}^3/\text{日}$ ）は、Oz 川のすぐ脇に位置し、伏流水を水源とし浸漬膜による処理を行っている。一方、My 水系浄水場（1,220  $\text{m}^3/\text{日}$ ）は、この同じ Oz 川から道路一つ離れた位置にあり、地下水を水源として紫外線処理を行っている。

極めて近接する浄水場であるが、河川からの離れ具合によって処理方式が異なっている。当然、伏流水を水源とする方が濁度変動は大きい。

My 水系浄水場の地下水は、降雨時に濁度 3～5 度、色度 5～7 度程度まで上昇することが年に 3 回ほどある。取水を停止して対応している。

(別紙)

Tm市 Hh浄水場

紫外線照射装置設置による損失水頭の計算根拠

- 1) 設置場所：配水流量計室後に設置する場合及び下流の空地に設置する場合
- 2) 流量Q（給水能力）＝30,700m<sup>3</sup>/d＝1,278.2m<sup>3</sup>/h＝0.355m<sup>3</sup>/s
- 3) 損失水頭：**2.011m**

(内訳)

①バルブによる損失：0.008m/台×2台＝**0.016m**

- ・紫外線照射装置の前後に設置
- ・口径800mm、Dバタフライ弁
- ・水道施設設計指針2012の損失係数を用いて計算

②ストレーナーによる損失：0.5m/台×2台＝**1m**

- ・紫外線照射装置の前後に設置
- ・口径800mm、バケット型
- ・メーカーカタログ（アイエム株）のグラフより損失を求めた

③漸縮による損失1：0.003m/台×1台＝**0.003m**

- ・紫外線照射装置口径500mmに合わせるために設置。800mmから500mmにするレジューサが無い場合2段階による漸縮。
- ・口径800mm×600mm
- ・水道施設設計指針2012の損失係数を用いて計算

④漸縮による損失2：0.005m/台×1台＝**0.005m**

- ・紫外線照射装置口径500mmに合わせるために設置。800mmから500mmにするレジューサが無い場合2段階による漸縮。
- ・口径600mm×500mm
- ・水道施設設計指針2012の損失係数を用いて計算

⑤紫外線照射装置による損失：0.95m/台×1台＝**0.95m**

- ・口径500mm、中圧型
- ・メーカー技術資料（某社）の値より損失を求めた

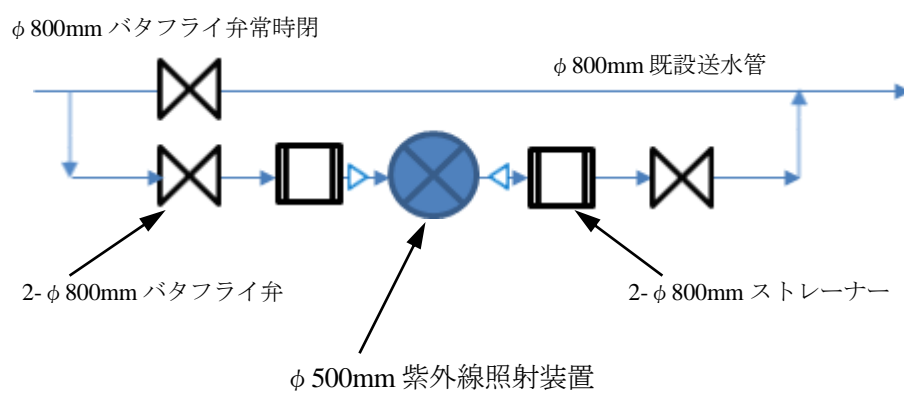
⑥漸拡による損失1：0.019m/台×1台＝**0.019m**

- ・紫外線照射装置口径500mmに合わせるために設置。500mmから800mmにするレジューサが無い場合2段階による漸拡。
- ・口径500mm×600mm
- ・水道施設設計指針2012の損失係数を用いて計算

⑦漸拡による損失2：0.018m/台×1台＝**0.018m**

- ・紫外線照射装置口径500mmに合わせるために設置。500mmから800mmにするレジューサが無い場合2段階による漸拡。
- ・口径600mm×800mm
- ・水道施設設計指針2012の損失係数を用いて計算

4) 概略フロー



以上

現地調査写真



①Hh 浄水場（上下流式フロック形成池）



②Hh（普通沈澱池）下流から撮影



③Hh（沈澱池流出トラフ）



④Hh（ろ過池）



⑤Hh（ろ過池、洗浄中）



⑥Hh（検1）（ろ過池～浄水池間のスペース）





⑦配水池流量計室を出た後（検2）



⑧Rd 浄水場（ろ過機）



⑨Rd 浄水場（井戸マンホール）



⑩Rd 浄水場（薬注室：PAC 及び次亜）



⑪Rd 浄水場（紫外線処理設備設置スペース）



⑫Nr 浄水場浸漬膜



⑬My 水系浄水場-1 (紫外線処理設備)



⑭My 水系浄水場-2 (紫外線処理設備)

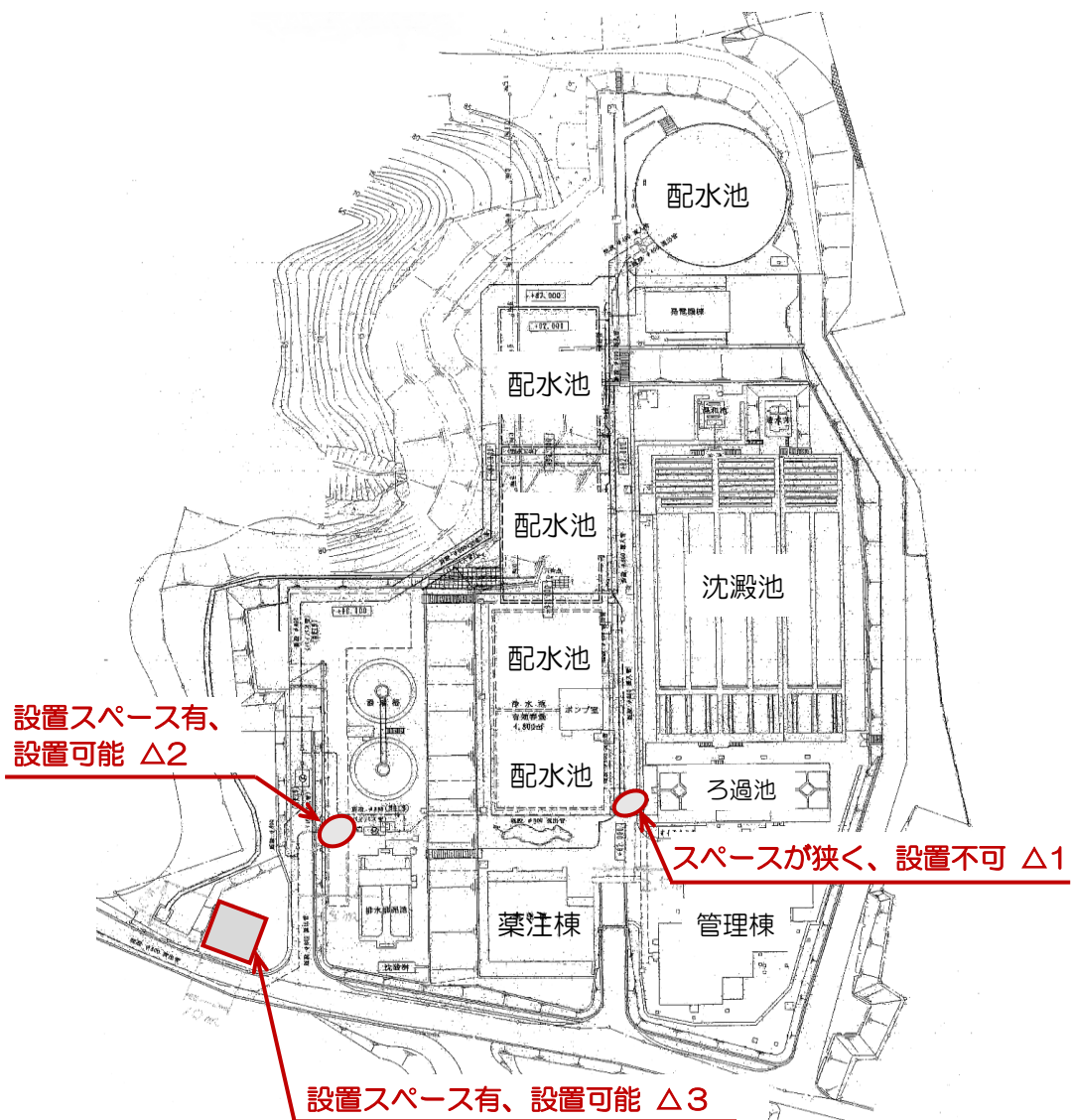


図1 Hh 浄水場設置スペース検討図  
 (設置場所の候補地：2 箇所)

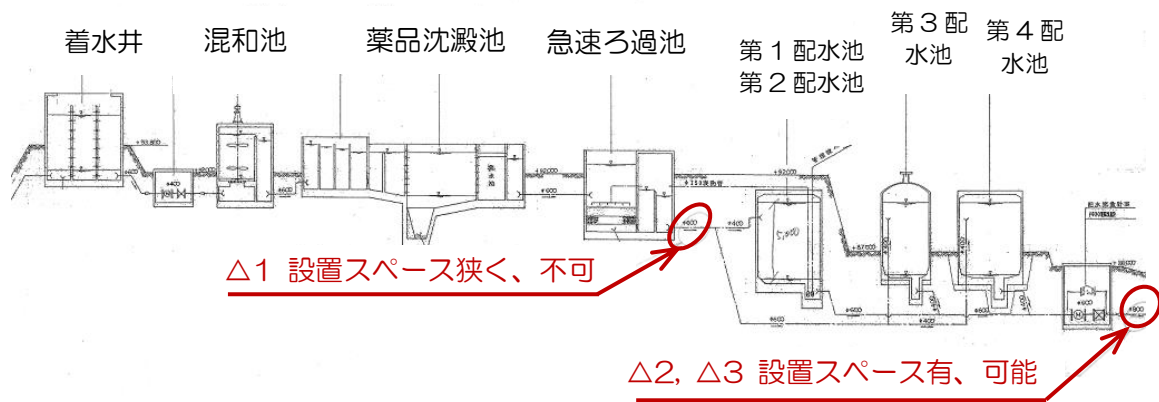


図 1-2 Hh 浄水場設置スペース検討図  
(設置場所の候補地：2 か所)

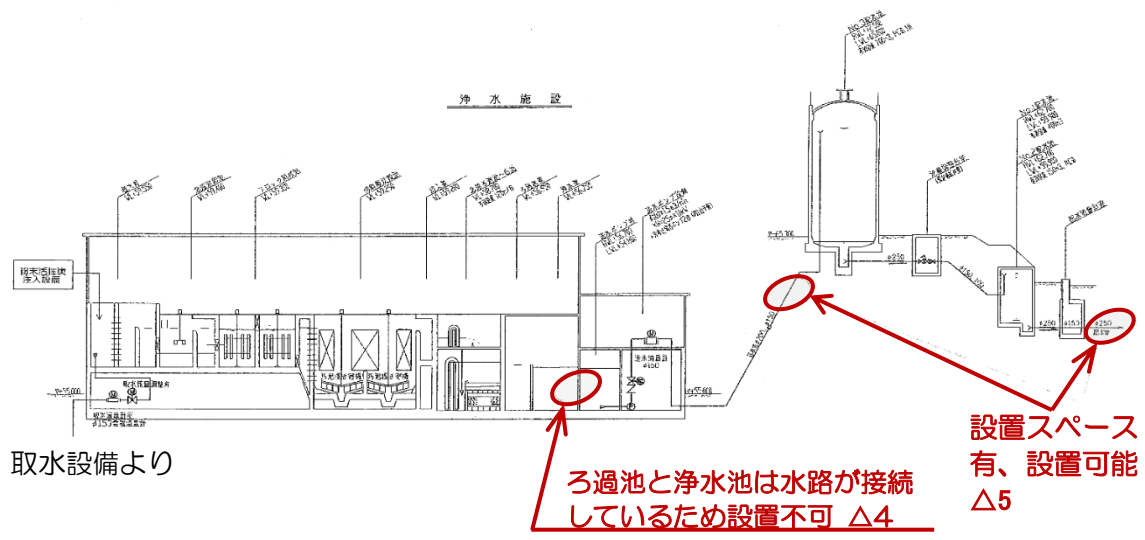


図 2 Ik 浄水場設置スペース検討図

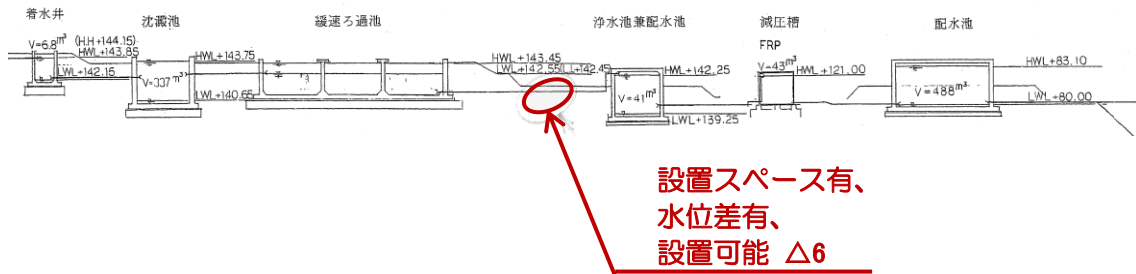
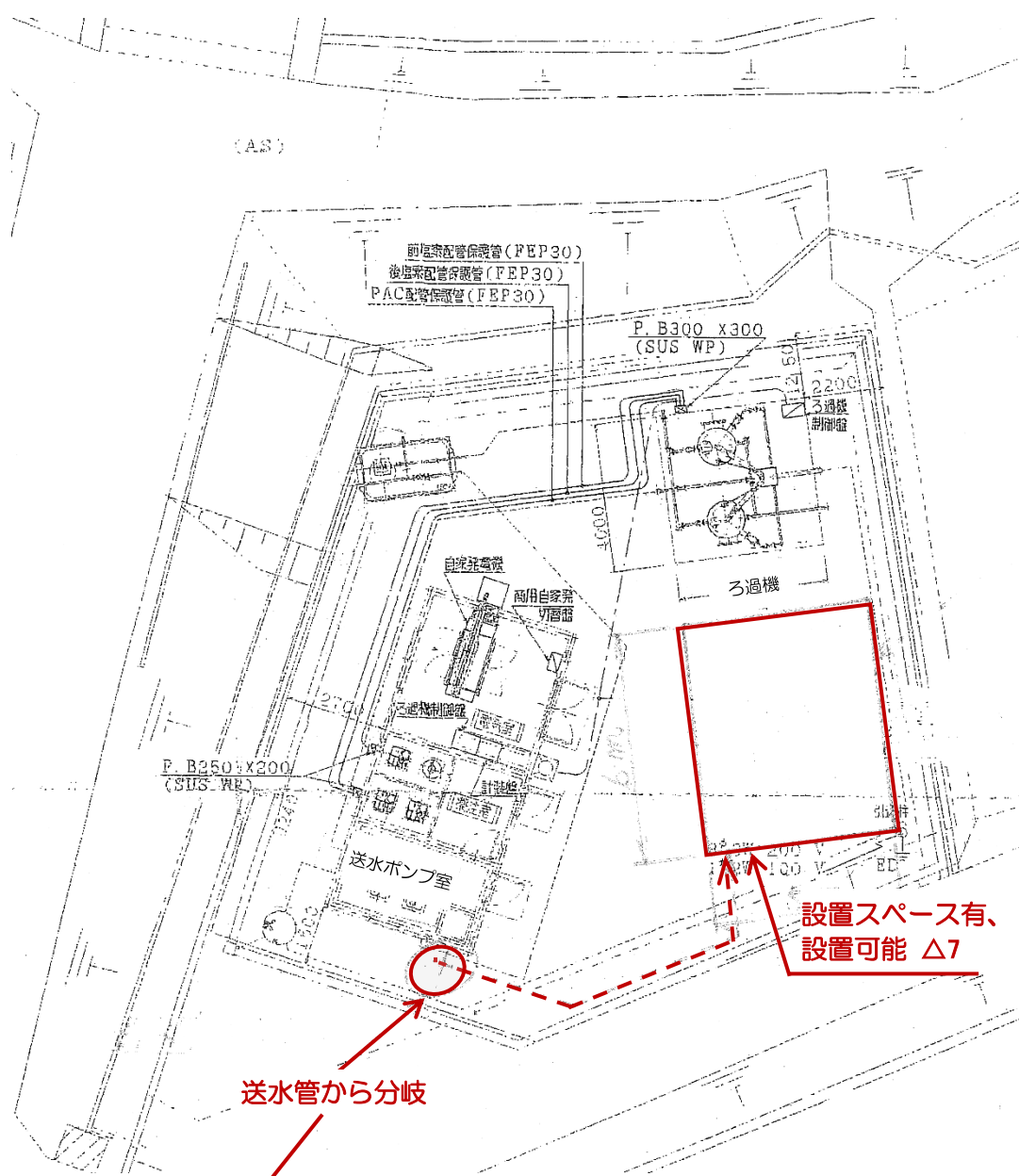


図 3 Oy 浄水場設置スペース検討図





送水管から分岐

設置スペース有、  
設置可能 Δ7

図4 Rd 浄水場設置スペース検討図

### 添付資料 3

#### 国内の地表水を水源とする 4 浄水場の紫外線吸光度データ

##### 1. Kis 浄水場

E260 データ： 50mm セルを使用、手分析値

この浄水場原水の紫外吸光度は高くはない。人口密集地帯である大都市近郊河川の河口近くの水質を反映した事例。なお、調整池は一般の浄水池にほぼ相当する。

##### 2. Chk 浄水場

UV260 データ： 50mm セルを使用、手分析値

有機物濃度の高い水源の例。オゾン・生物活性炭による高度処理を実施している。

なお、2014 年は工事が行われた関係で、一部の連続計器データが収集できなかった。

##### 3. Ak 浄水場

紫外線吸光度のデータ：測定波長は 254 nm、50mm セルを使用、手分析値

腐植質が多く、流域の農畜産業や都市排水等の影響を受けた河川を水源とする事例。夏季には湖沼等におけるプランクトンの発生の影響も受け、異臭味には粉末活性炭で対応している。

##### 4. Khr 浄水場

E260： 50mm セル使用、手分析値 (0.45  $\mu$  m メンブレンフィルターによる、ろ過後の測定値)

色度：積分球式光電高度計による測定値 (測定前のろ過は実施せずそのまま測定)

濁度：積分球式光電高度計による測定値

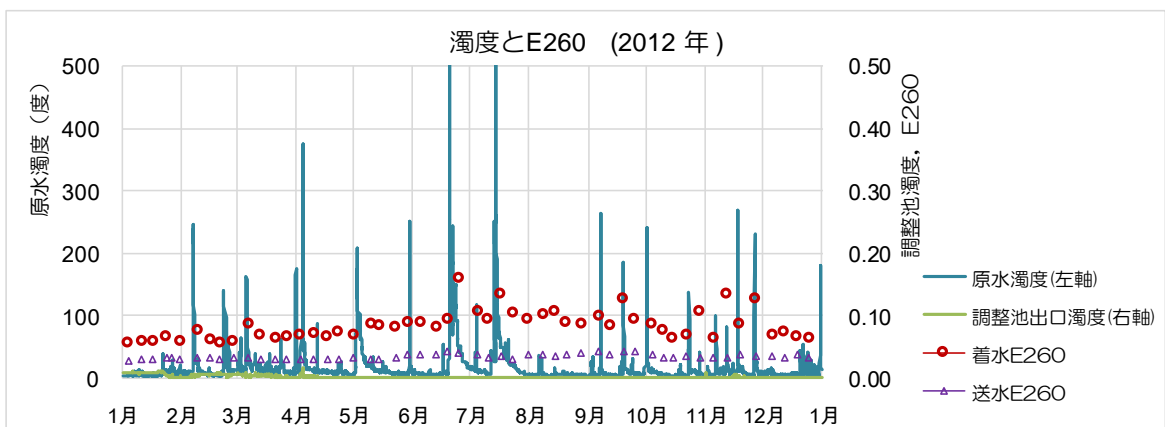
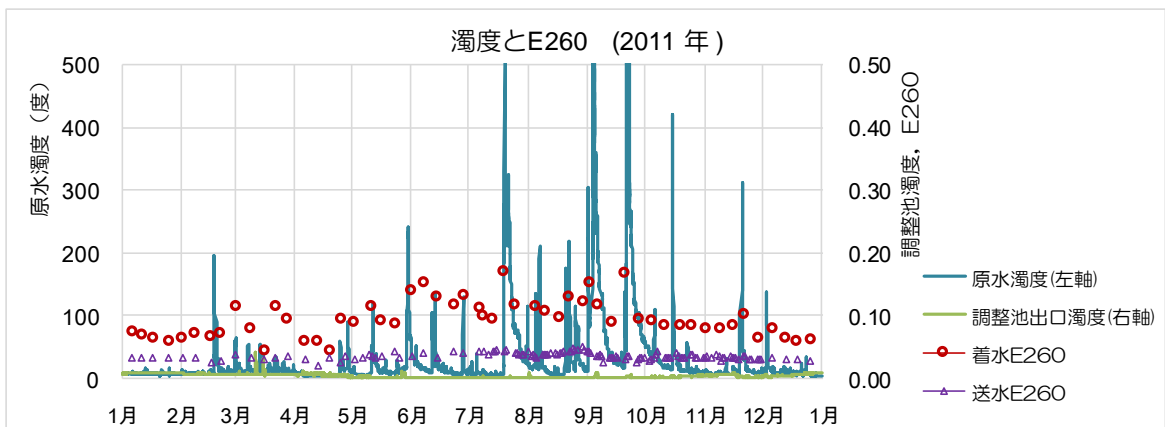
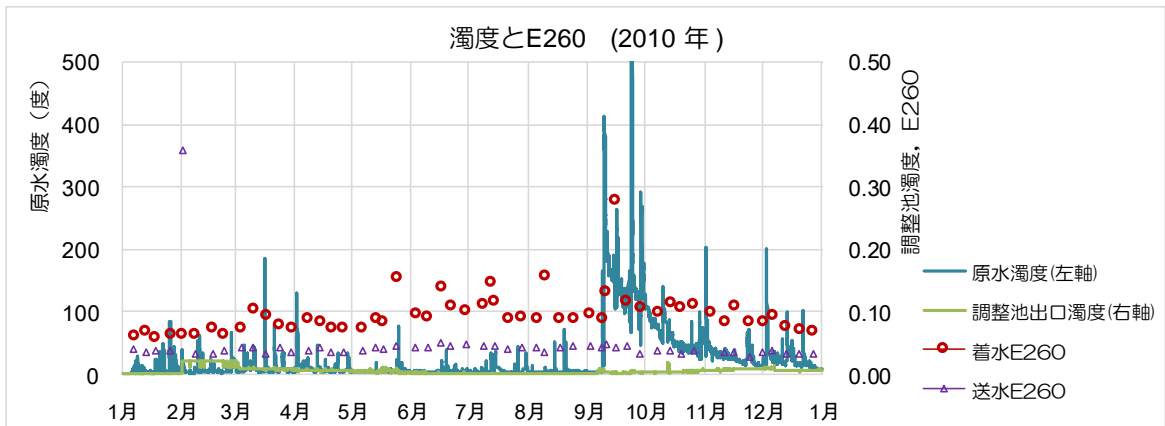
TOC：ガス透過膜式導電率測定法による測定値

腐植質を多く含み、濁度と色度の高い原水を処理している事例。水源河川の流域には酪農地帯も存在する。粒状活性炭による処理を行っている。

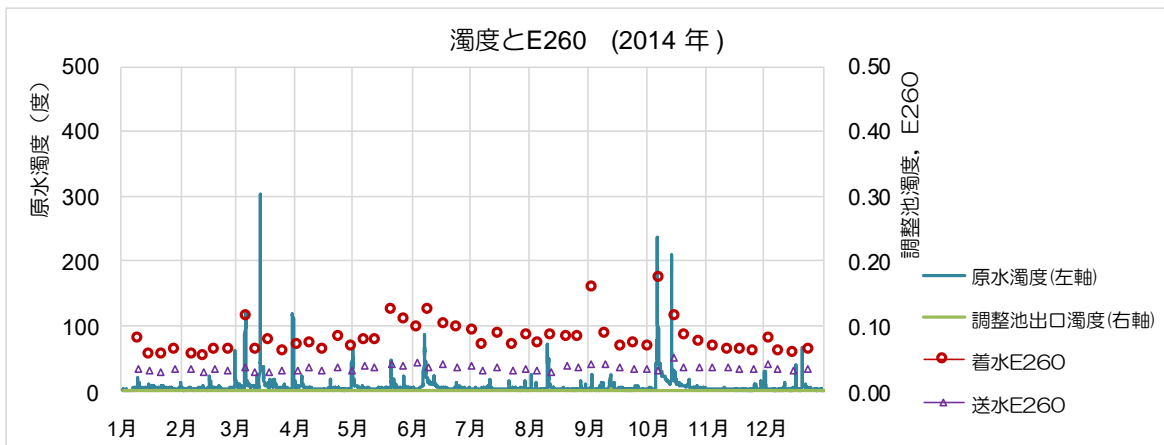
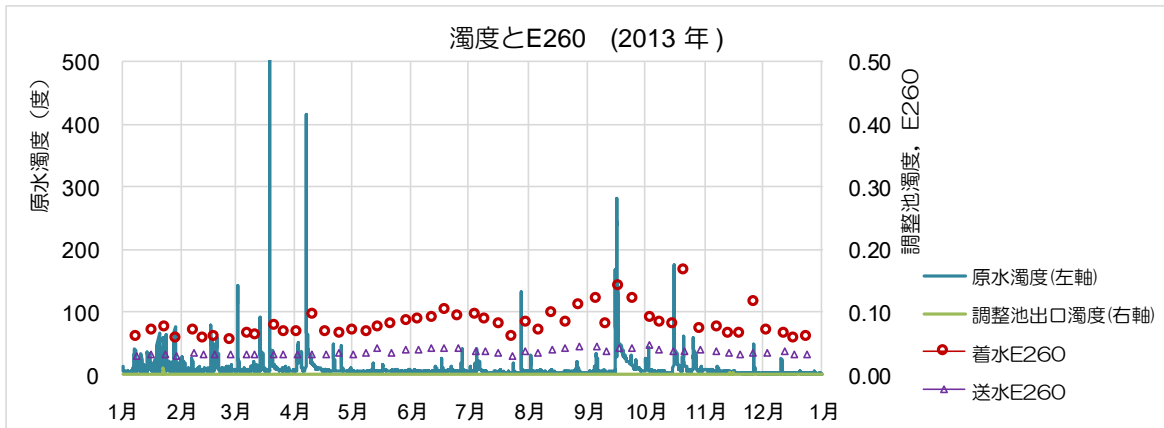
いずれの事例においても、各水源の特徴にあった処理を実施することにより、ろ過水の濁度、紫外線吸光度は現行の紫外線処理における水質要件を満足している。

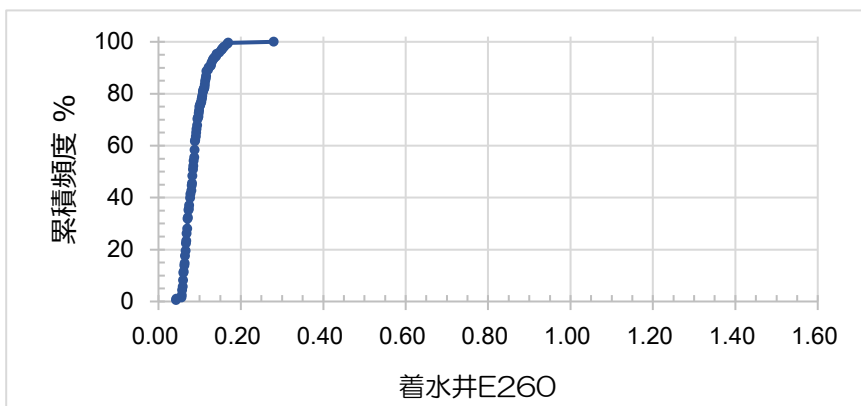
(注) 連続計器データには、メンテナンス等により、正確な値を表示していない時間帯が一部に存在する可能性がある。

# 1. Kis 浄水場

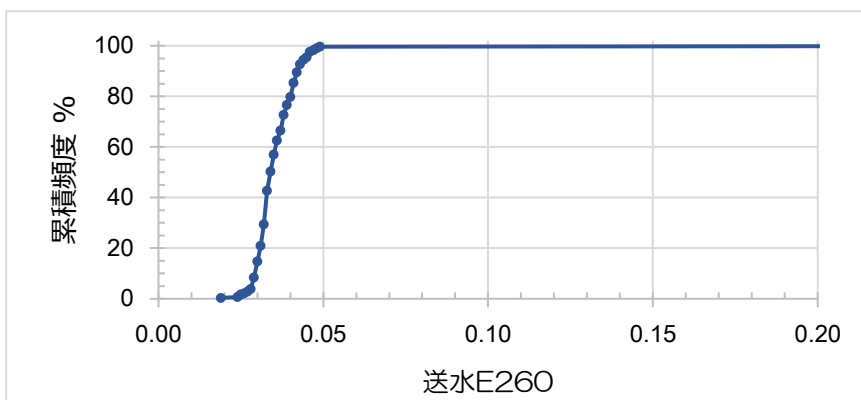






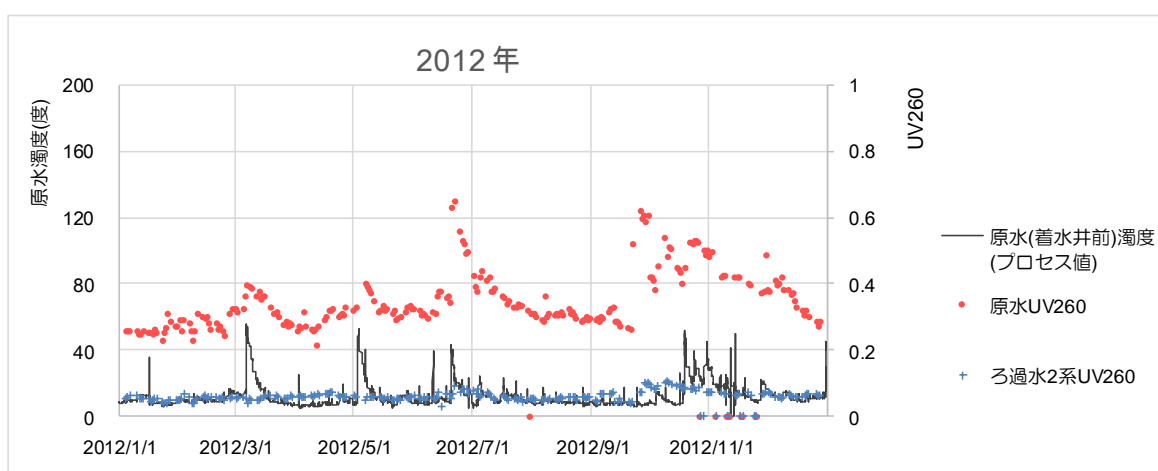
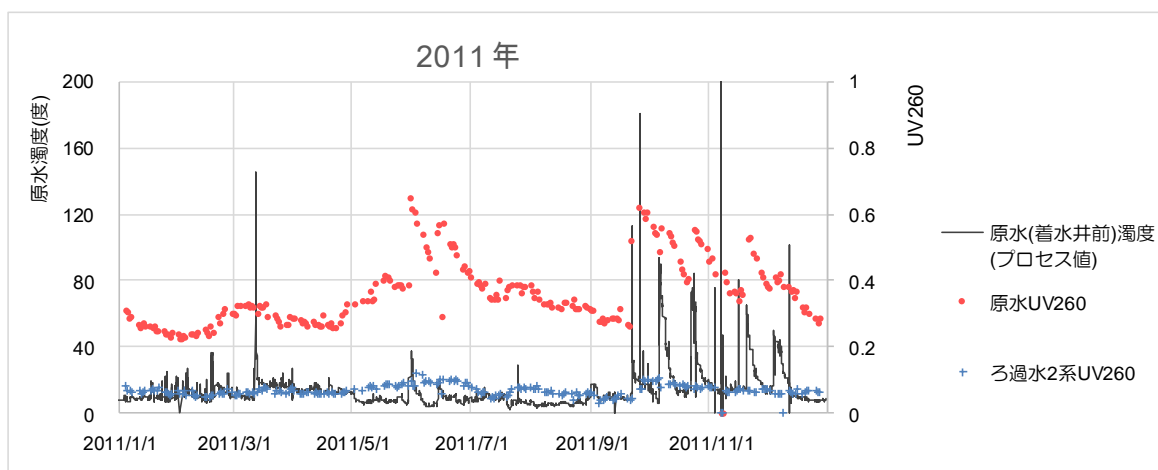
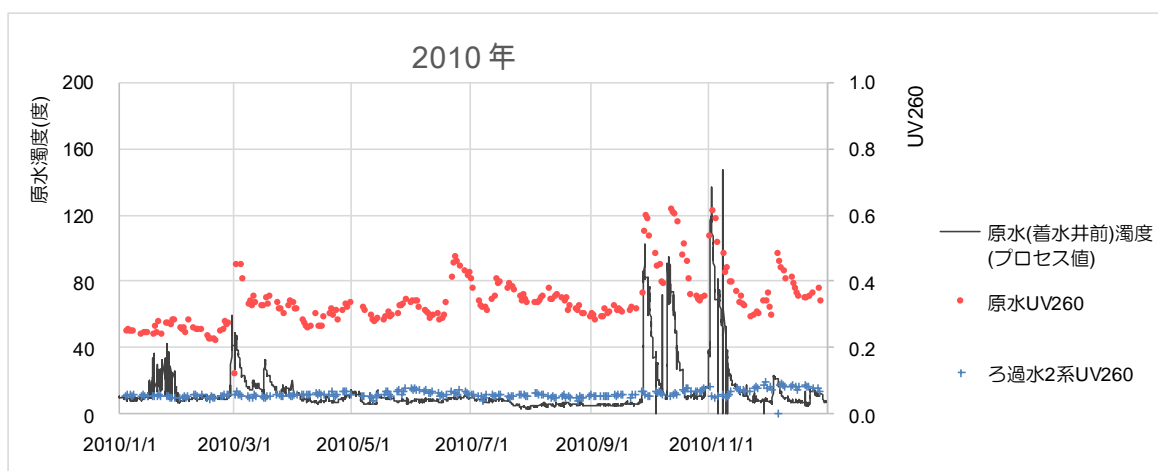


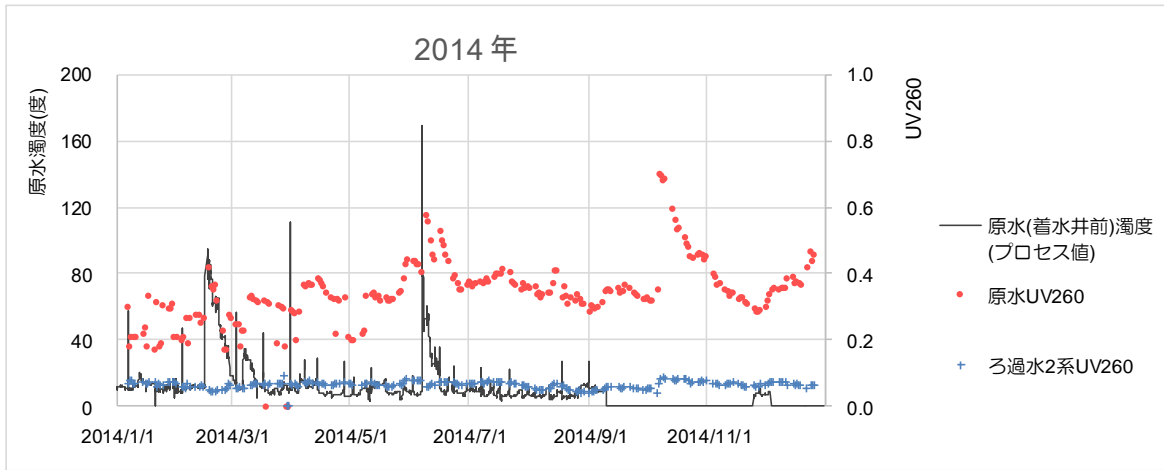
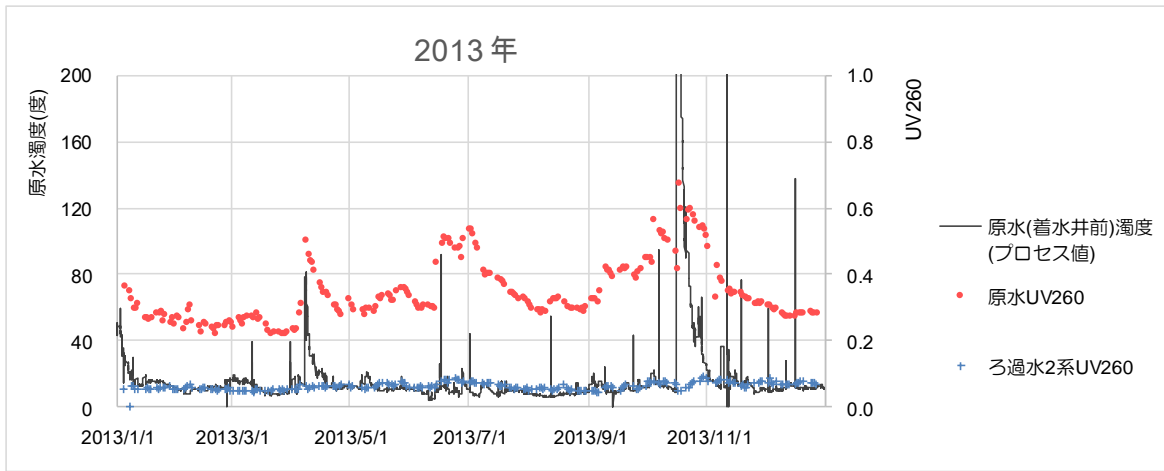
(データ数 : 262)

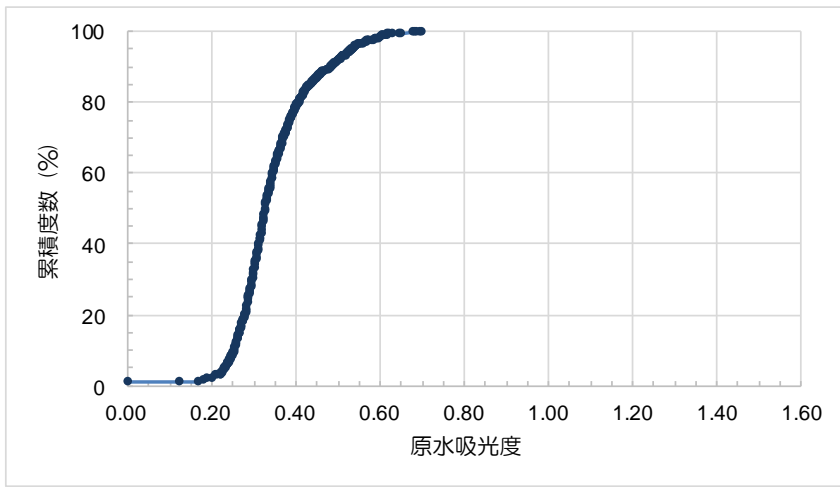


(データ数 : 337)

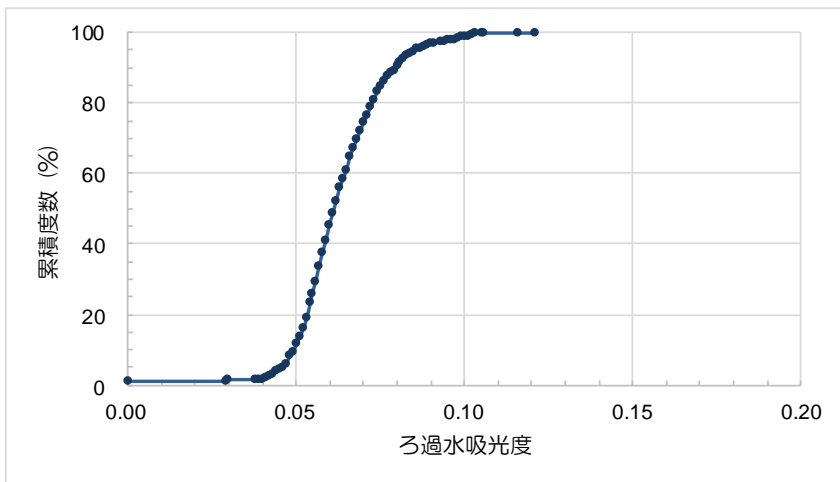
## 2. Chk 浄水場データ





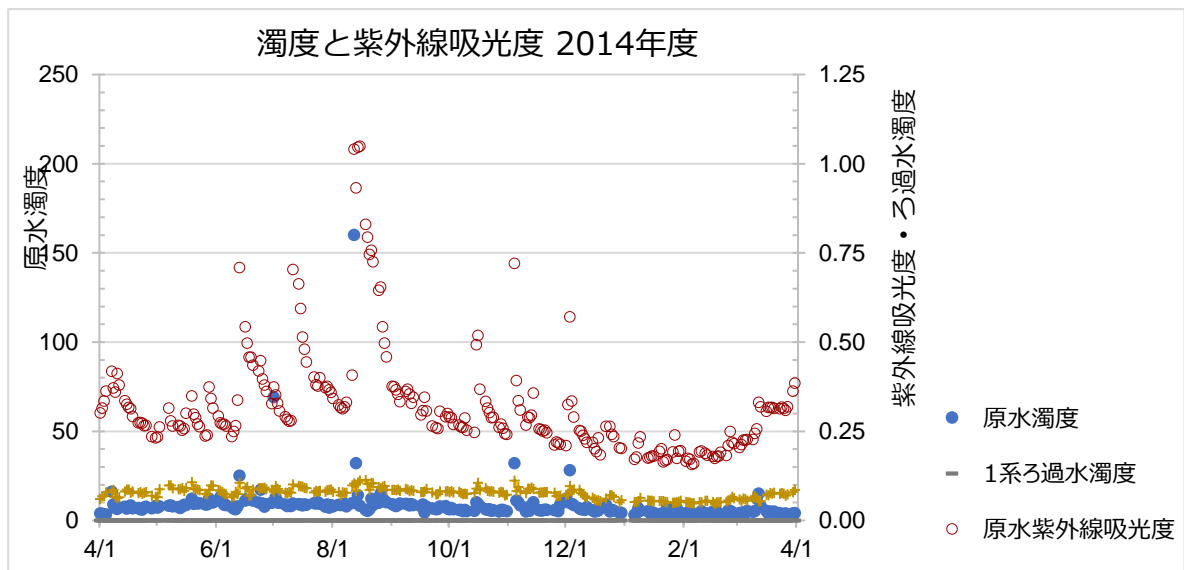
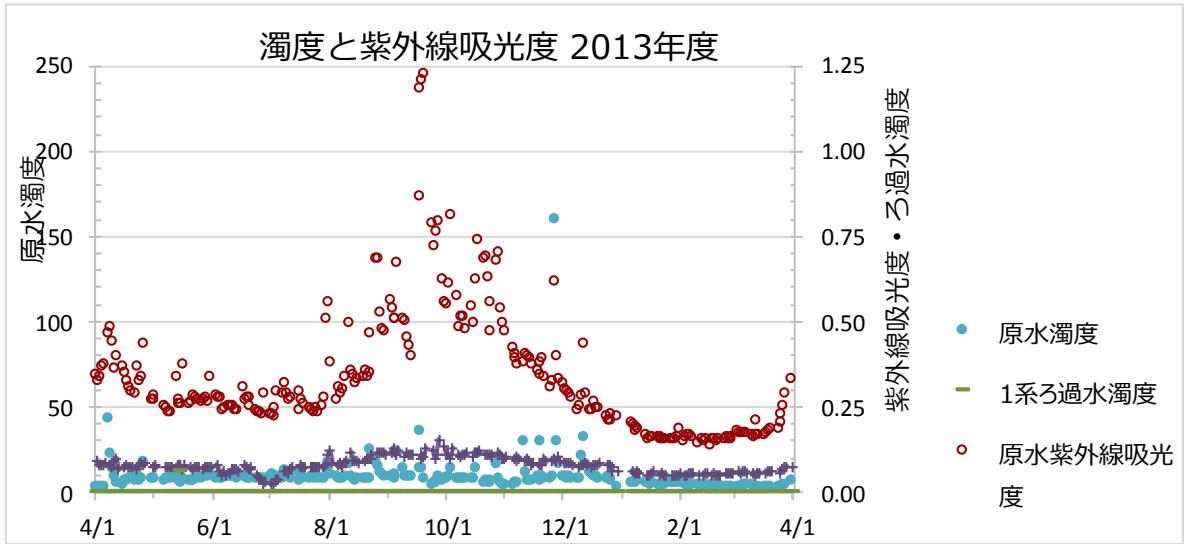


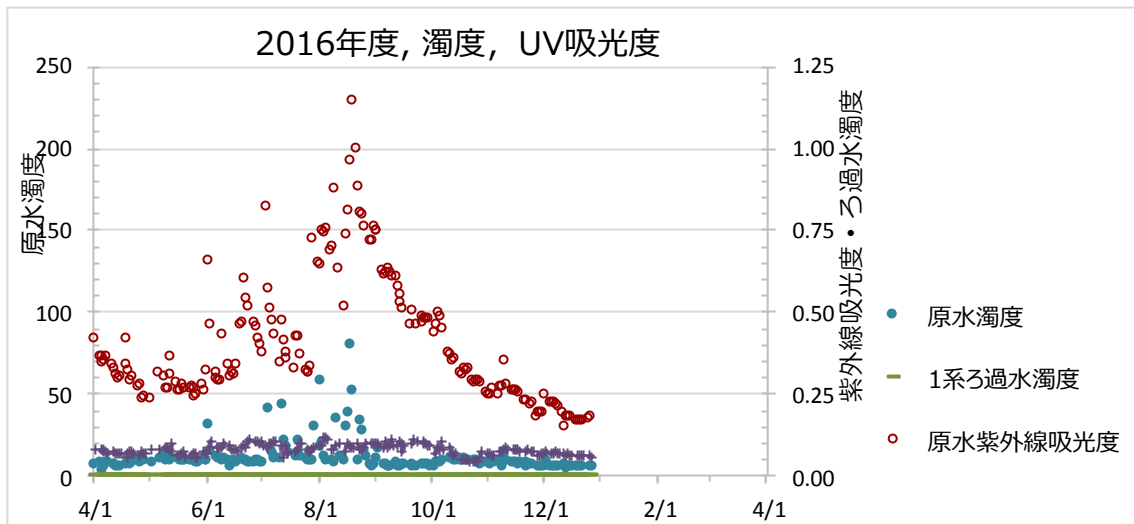
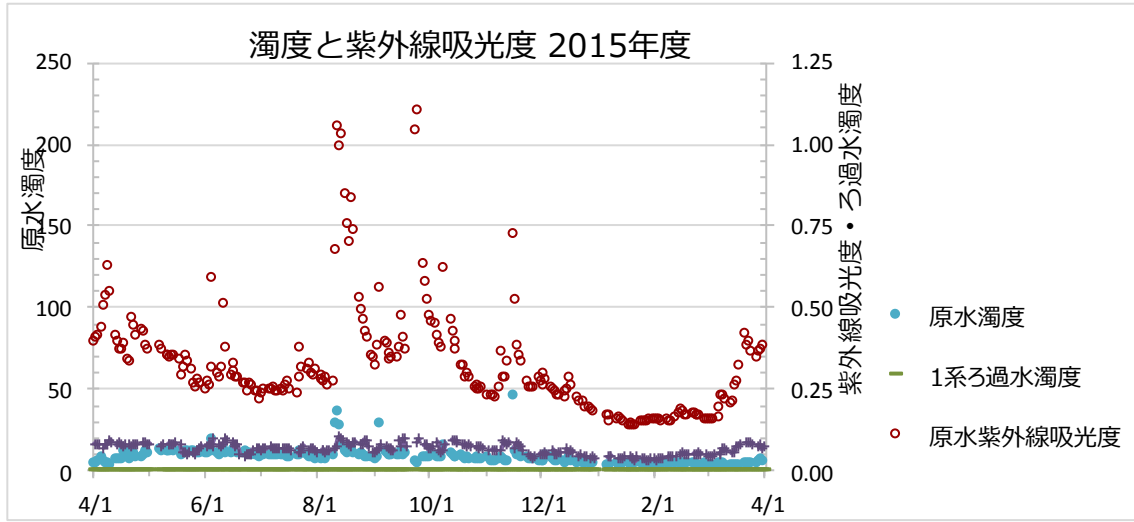
(データ数 : 1214)

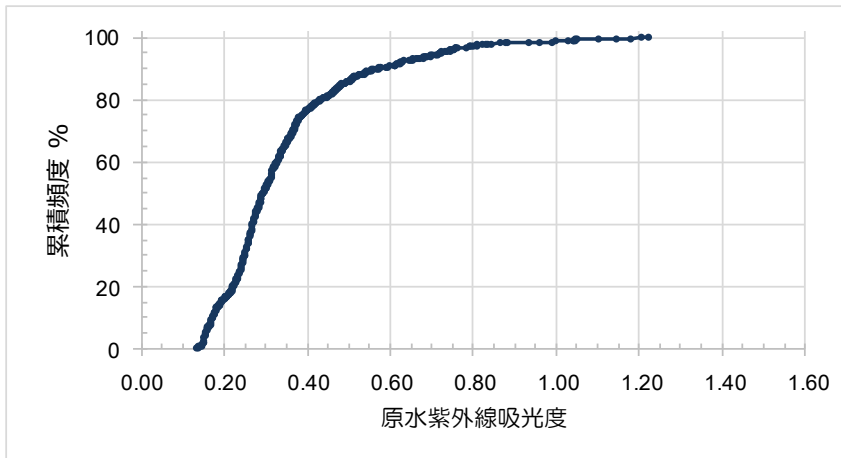


(データ数 : 1219)

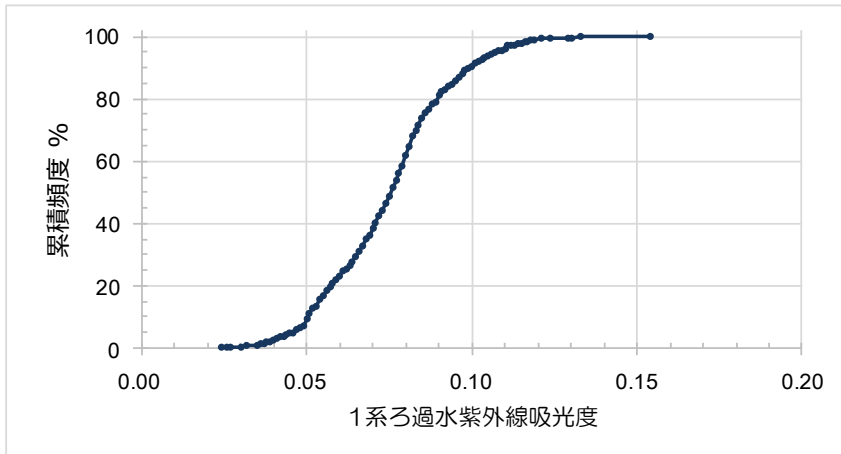
3. Ak 浄水場







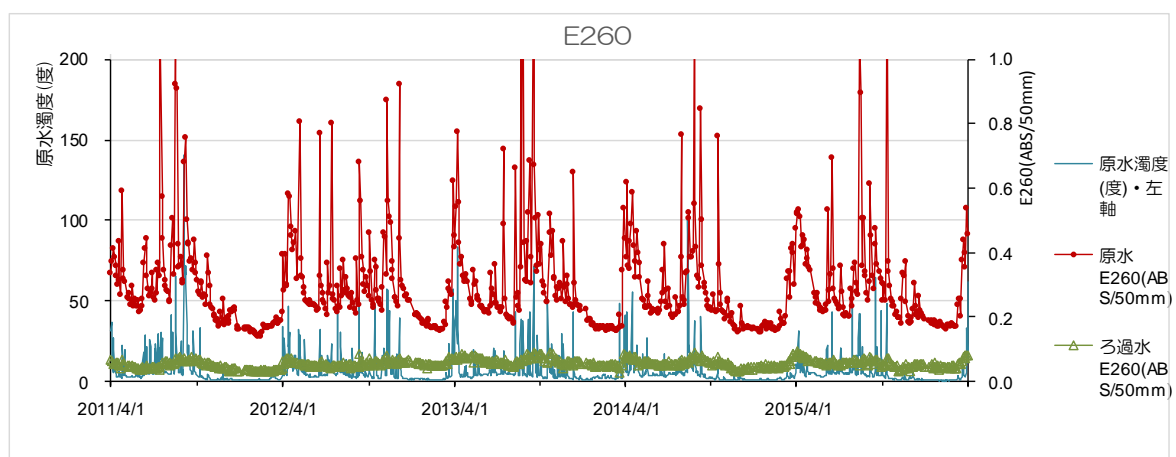
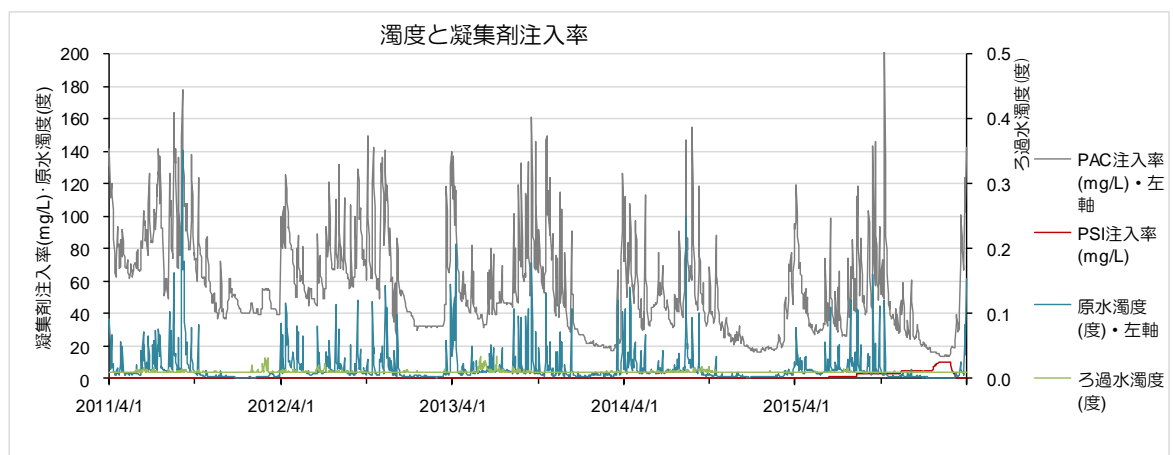
(データ数 : 915)

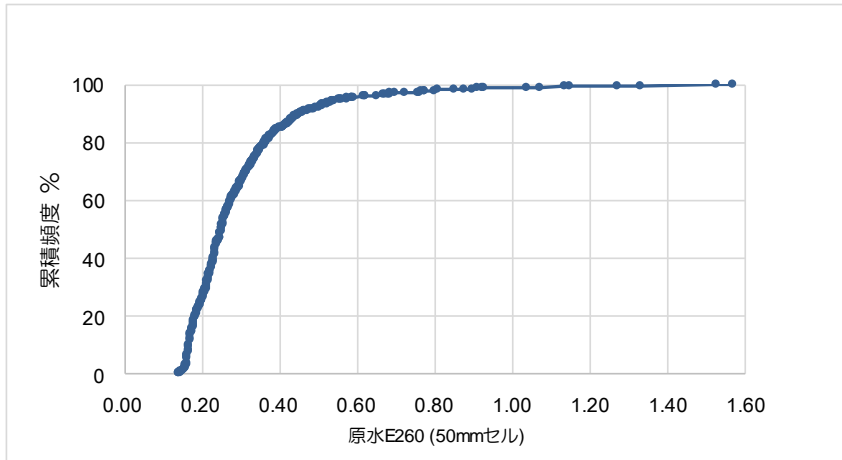


(データ数 : 915)

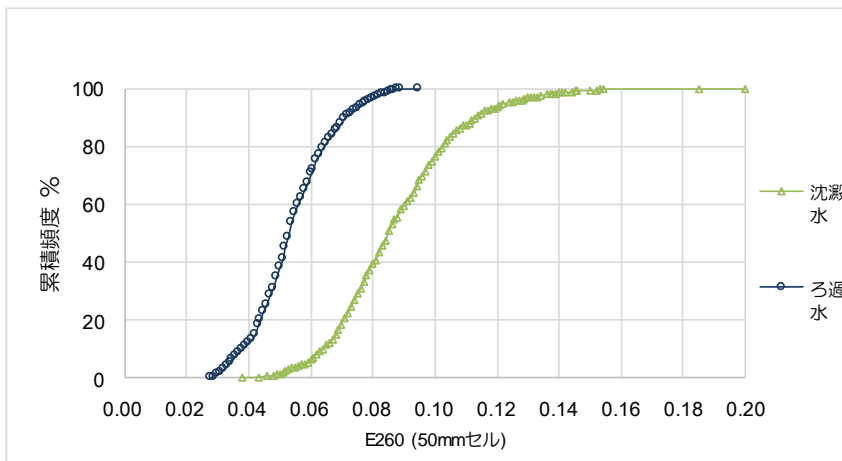


#### 4 Khr 浄水場





(データ数 : 752)



(データ数 : 752)

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」

平成28年度 第1回研究会議 議事録

1. 日 時

平成 28 年 6 月 6 日 (月) 13:00～15:00

2. 場 所

水道技術研究センター 第1・2会議室

3. 出席者（敬称略）

研究代表者	大垣 眞一郎	(水道技術研究センター)
研究分担者	安藤 茂	(水道技術研究センター)
同	佐々木史朗	( 同 )
同	富井 正雄	( 同 )
同	島崎 大	(国立保健医療科学院)
同	神子 直之	(立命館大学)
同	大瀧 雅寛	(お茶の水女子大学)
同	小熊 久美子	(東京大学)
研究協力者	関山 真樹	(神奈川県企業庁)
同	市川 豊	(東京都水道局)
同	太田 淳一	(岐阜市上下水道事業部)
同	玉野 博士	(埼玉県企業局)
同	伊藤 博文	(日本紫外線水処理技術協会、略称 JUVA)
同	岩崎 達行	( 同 )
同	溝口 真二郎	(水道技術研究センター)
同	中川 遼太郎	( 同 )
同	安積 良晃	( 同 )
同	香坂 由華	( 同 )
同	栗原 潮子	( 同 ) (記)

<オブザーバー>

田中 美奈子 (厚生労働省)

(欠席：久保課長補佐 (厚生労働省)、プログラム・オフィサー (国立保健医療科学院))

4. 議事

1) 研究代表者挨拶

最終年度に入った。行政に反映できる形で科学的に整理をしたい。

2) 前回議事録について ----- [資料 1]

事前にメールでコメント等をいただき、反映済み。

3) 各研究分担者の平成 28 年度研究計画 ----- [資料 2]

資料 2-1～2-5 に基づき、各研究分担者が発表し、その後質疑応答を行った。

3) 事前の依頼内容の再確認----- [資料 3]  
資料 3 に基づき、研究;分担者・協力者のコメント・意見等をいただいた。

4) 今後の予定----- [資料 4]  
次回の班会議は 12 月中旬を予定。

## 5. 研究計画及び最終報告のとりまとめ方向に関する意見等

以下のような意見が出された。

### (1) 資料 2-1 について

C1：熊本地震では、厚労省関係の調査が滝沢教授を委員長として本日から開始される。熊本市内には、3 か所の浅井戸に紫外線処理施設がある。国立保健医療科学院の秋葉統括官も参加するので、紫外線処理装置についても確認を依頼した。

C2：装置について、何も問い合わせが来ていないので多分装置そのものは問題なしと思われる。

C3：停電時の対応など維持管理に直接関係する事項について確認したい。一度断水をしていると思われる。

### (2) 資料 2-3 について

C1：濁質存在下では、散乱光があることで不活化が促進される。

C2：2 番目は、センターの認定に係わるもので、どこまで入れるかは議論となる。これを入れることにするならば、認定の適合 RED にどのような意味があるかについても言及する必要があるだろう。

C3：厚労省の規定とそれを担保するセンターの認定とは別なので、どこまでいられるかだろう。先日、リンデン氏が来日した際に伺ったところでは、USEPA のバイアス値は、さまざま装置の多数の CFD の結果から、範囲を決めて導出したとのことである。センターの規定を守っても、厚労省の 3log 除去とはならない装置が出てもおかしくはない、ということが課題である。

### (3) 資料 2-5 について

C1：「照射時の水質で判断するのが妥当と明言」とは言い過ぎではないか。流水式では回文式とは違う結果になりえる。

C2：明言との表現は強すぎたかもしれないが、濁度と UVT のどちらで整理するか、濁度はいくつならいいのか、などの議論に至る前の段階で、そもそも UV 照射の対象となる水の水質を考えるべきではないか、という意図であり、その点はあたりまえだと思っている。あたり前すぎて一般向けにきちんと発信されていないように思うのでこのように記載した。

C3：流水式の装置実験は考えているか。

C4：実施は考えていない。文献調査である程度対応可能と思っている。もちろん神子先生の実験で得られる知見も参照させていただきたい。

- C5：1 オーシストあたりの感染確率が WHO のガイドラインの第3版から第4版でクリプトスポリジウムの感染確率が50倍高く見積もられているため、濁度管理だけでは対応できない可能性がある。7月以降に WHO の” Use of Quantitative Microbial Risk Assessment for Water Safety Management”がオープンされる予定なので確認する予定。
- C6：米国では、原水の濃度に応じて処理が変わる。日本は原水に関係なく0.1度。対応を厳しくするか、というとなかなかそうはならないだろう。
- C7：海外情報として、整理して欲しい。
- C8：日本は定期的に原水のオーシスト数を計っていない。それもあって、濁度管理の方が実施しやすいとなったと思う。

(2) 今後の方向性に関する意見（ランダム）

- C1：紫外線を容認するにあたっての合理的な要件は、地表水、地表水以外の別なく、現状の水質要件でよい。
- C2：小熊先生の資料にあるように、混乱が起きないように、原水ではなく、UV処理装置に入る水の要件であることがわかるように表現する。紫外線処理装置流入水等。
- C3：地表水、地下水の別なく、原水濁度2度以下（色度、UVT、現状と同じ）で紫外線処理を行うか、現状のようにろ過を入れて0.1度以下とするかの選択となる。
- C4：濁度0.1度以下という緊急対策が恒久化している。この際、一から見直してもよい。
- C5：濁度の影響がどこまで許されるか、という議論をしないと意味がないことになる。
- C6：国内は度で問題ないが、海外情報に言及すると、途端に濁度単位としてNTUとの変換が課題になる。海外の基準を参照するならば、海外は紫外線をあてる段階での水質で管理している、という情報だけで十分で、具体的にその数値は不要なのではないか。単位が違うので混乱を避けたほうが良いと思う。
- C7：神子先生の吸光度で計算した以上に悪くなることはない、ということから考えると、課題名から濁度の紫外線への影響となっているが、UVTを基本に設計する、という方がリーズナブルな感じがする。UVT（色度）が第一にあって、濁度はあってもそれに準じて、という方がよいのではないかという気がする。
- C8：もしも（現実的には紫外線処理を適用しないケースであると思われるが）濁度0.1度以下でも、UVTが低ければ、そちらの方が問題となる。
- C9：それで、濁度は低い、色度がおちにくい例を調べてみたい。
- C10：濁度は紫外線が適切な技術となるか、使えるかどうかの判定基準として、装置設計はUVTが基本になると認識している。初年度の原水測定結果の感触では、最も守りやすいのがUVT75%以上で、色度が微妙なところをかすめている。自動運転型のUV照射装置はUVTをモニターして流量やランプ強度を制御する実機がすでに多くあり、UVTをベースに設計するのは既に一般的である。海外だけでなく、日本の装置も、透過率は想定しても濁度を基準に設計はしないのでは。
- C11：濁度を判定基準に使いながらも、紫外線に影響するのは色度、というのが腑に落ちない。
- C12：濁度の変動が怖いから使用している。
- C13：そもそも濁度が重要視されたのはクリプトを粒子として制御するしかない、という発想だったのではないか。つまり、塩素がほとんど効かないならば消毒というアプローチでは対応できず、粒子として取り除くしかない、という考え方に論拠しているのではな

いか。UV がクリプトに有効と判明する以前の段階では懸命で理に適っていたと思う。その後、クリプトは粒子としてふるまうから濁度で管理、という根底の考え方がいつのまにか薄れ、濁度があると UV が効かない、と読み替えられてしまったのではないか。

C14： UVT はあまり測定されていない（問題になっていない）。

C15： 粉末活性炭を使用しているか、等は設計時に気をつけている。（JUVA としては）制度の改正については、ぜひお願いしたい。

C16： 後から紫外線処理が入ったので、ろ過を入れられないところは紫外線でもよい、という感覚があり、なかなか浸透しないのではないか、という意見が4月のシンポジウム後にあった。

C17： 越生町のアウトブレイク時点では、まだ紫外線に関する情報がなかった。

C18： スウェーデンでは2010年にクリプトスポリジウムのアウトブレイクにより2万人以上が感染した事故が起こったという論文が2014年に出ている。結局紫外線を導入している。

C19： 認定の件に関して。95%以上の水に10mJ/cm<sup>2</sup>以上照射されていても、除去率3logを達成できない装置が生じる可能性があるので、その点は改訂すべき。分散数を記述していても、それをスルーする場合がある。

C20：（C19について）分担計画の中で検討をお願いしたい。

C21： 現状の分析方法では、紫外線を照射しても、その後でクリプトスポリジウムは検出されてしまうが。

C22： 測定方法自体の考え方が紫外線に不利である、という話は出ている。

C23： ノロウイルスもPCRで検出されるが、塩素が効いていれば問題ないので、それと同様に知識を普及するしかないのではないか。

C24： もともと消毒とは殺すことではない、とかつて金子先生が言っていた。勉強してもらうしかない。

C25： あるいは、紫外線を入れれば、測定しなくても良い、とするか..

C26：（全体に対して）12月までに整理をお願いする。

### (3) 次回の班会議

12月中旬頃を予定。

（2月の成果報告会の前に、3年間分の報告の概要版の作成が必要になるとのこと）

## 6. 決定事項

とくになし。

以上

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」

平成28年度 第2回研究会議 議事録

1. 日 時

平成 28 年 12 月 14 日（水） 15:00～17:30

2. 場 所

水道技術研究センター 第1・2会議室

3. 出席者（敬称略）

研究代表者	大垣 眞一郎（水道技術研究センター）
研究分担者	佐々木史朗（水道技術研究センター）
同	富井 正雄（同）
同	島崎 大（国立保健医療科学院）
同	神子 直之（立命館大学）
同	大瀧 雅寛（お茶の水女子大学）
同	小熊 久美子（東京大学）
研究協力者	関山 真樹（神奈川県企業庁）
同	市川 豊（東京都水道局）
同	太田 淳一（岐阜市上下水道事業部）
同	玉野 博士（埼玉県企業局）
同	岩崎 達行（日本紫外線水処理技術協会、略称 JUVA）
同	溝口 真二郎（水道技術研究センター）
同	中川 遼太郎（同）
同	安積 良晃（同）
同	香坂 由華（同）
同	栗原 潮子（同）（記）

<オブザーバー>

東水道水質管理官（厚生労働省）、久保課長補佐（厚生労働省）、  
鈴木室長補佐（厚生労働省）

（欠席：安藤 茂（水道技術研究センター）、伊藤 博文（JUVA）、  
プログラム・オフィサー（国立保健医療科学院））

4. 議事

1) 研究代表者挨拶

本日は各研究分担者の発表の後、研究成果とりまとめ骨子案に関して少し時間を使って意見を伺いたい。研究レベルの成果が行政につながるような骨子案としたいので、よろしくお願ひしたい。

2) 前回議事録について ----- [資料1]

- 事前にメールで頂いたコメント等は、反映済み。何か気づいた点があれば事務局へ連絡を。
- 3) 各研究分担者の平成 28 年度研究進捗 ----- [資料 2]  
資料 2-1~2-5 に基づき、各研究分担者が発表し、その後質疑応答を行った。
- 4) 事前の依頼内容の再確認 ----- [資料 3]  
資料 3 に基づき、研究;分担者・協力者のコメント・意見等をいただいた。
- 5) 今後の予定 ----- [資料 4]  
次回の班会議は 3 月 9 日 (木) 10 時~12 時に開催とする。

## 5. 研究の進捗及び成果とりまとめ骨子案に関する意見等

以下のような意見が出された。

### (1) 資料 2-1 について

Q1: 水源について確認したい。

A1: 水源は 3 か所とも浅井戸と深井戸が混存。深井戸においても濁度が上昇し、中には 10 度以上になったところもあった。

### (2) 資料 2-2 について

Q1: 紹介された文献中の施設規模はどれくらいか。

A1: 給水人口は約 6 万人だが、観光客が多い(1 頁目の終わりの部分に記述あり)。

Q2: 濁度管理はどのように行われていたのか。

A2: あまりそのようなことは行われていなかった模様。p.2 左側に水源水質は A1 類型で、非常に水がきれいなため、凝集剤の使用が認められていなかった、とある。

### (3) 資料 2-3 について

Q1: (これまでの実験は水深 1.7cm だったが、今後はより深い場合について確認するという  
ことに対して) 水深が深くなると全部吸収する分が増えるから、ということか。

A1: 次の発表に出てくると思うが、散乱分率も行路長によって変わってくると思われる。  
それをどのように考えるべきか。実際の装置に行く前に見ておく必要がある。

### (4) 資料 2-4 について

Q1: X 線回折で、ピーク数が少ない方が結晶性は高いということだが、活性炭の結晶性は  
ないのか。

A1: 活性炭の結晶性はない。ピークがたくさん出てくると、いろいろな分子間の距離を示  
すことになる。カオリンは非常に結晶性が高い。

Q2: PSI 凝集剤は紫外線を吸収するのか?

A1: 結果が出たばかりなのだが、やらなければならないと思っている。ろ液の吸収があると低くな  
るので、比較してみたところ、Og 浄水場以外のろ液の吸光度はほとんどなかったが、  
Og 浄水場だけはかなり高かった。浄水自体の透過率も 93~94% で、他に比べかなり  
低い。水自体が少し異なるのか、凝集剤の影響を受けているのか、これから調査する。

### (5) 資料 2-5 について



- Q1： 6 頁目、色度 1 度のときの MS2 の結果では、透過率は何%くらいか？ また色度には何を使用したか？
- A1： 透過率はわからない。色度にはフミンを使用。
- Q2： p.3、結論-2 のグラフの紫外線量はどの紫外線量か？ また水深は？
- A2： 透過光の吸光度で補正した紫外線量(つまり中に入った紫外線量)。水深は 1cm くらい。
- Q3： 先ほどの LED の場合の紫外線量は色度で補正していない？
- A3： 補正はしていない。LED は紫外線量という概念は考えていない。
- Q4： アルベドのアルミナ粒子の場合に水深の 4~7 倍の結果とあるが、これは水深に依存して変わると思う。水深の影響をはっきりさせた方がよいのではないか。
- A4： そうですね。これは 1cm、つまり吸光度計の行路長のときの場合。
- Q5： 例えば p.3 で白い粒子を少し入れたほうが不活化率は良い、となっているが、その 10 の 9 乗、10 乗の濃度は濁度でいうといくらくらいに相当するのか？ 言いたいのは、もっと多く入れていくと、本当は不活化効果が下がるという理解でよいのか？
- A5： この段階で既に濁度は 100 度超程度なので、これ以上入れるというのは、あまり本質的ではない。
- Q6： そうなると、p.6 で濁度が上がると不活化率が下がってきているが、これとは？
- A6： こちらの濁度は黒い粒子の結果である。
- Q7： 今の質問で、3 枚目のスライドは、横軸は補正してあるから？
- A7： そうです、吸光度は高くなるので、結果的に線量はこちらの方が少なくなる。
- Q8： LED の場合の波長は？
- A8： 285nm である。
- Q9： ということは色度の中身によって、影響は変わってくる？
- A9： それは有り得るかもしれない。しかし、いわゆる色度物質は深紫外領域の吸光度はあまり影響を受けず、もう少し長い波長で違いが出てくる。

#### (6) 資料 3 についての御意見・コメント

- C1： 1 枚目 2. の表現、「膜ろ過は検討対象としていない」、とあるが、その少し前の「ろ過」という表現を「砂ろ過」とする方が、間違いがないのではないか。p.2 のその他の「ろ過処理」も「砂ろ過処理」とすれば、膜ろ過ではないことがわかるのではないか。
- C2： 膜ろ過は検討対象ではないが、膜ろ過をちゃんとつければ紫外線処理はつけなくてもいい、というコメントくらいは付加するべきではないか。
- C3： その他の意味のコメントですね。
- C4： ろ過、というと事業体では、砂ろ過と膜ろ過という認識になるのか。それ以外（例えば珪藻土ろ過）もあるけれども。
- C5： 普通はろ過というと、膜か砂ろ過という感覚である（二つの大規模事業体からの意見）。
- C6： そうすると、この研究の報告としては砂ろ過が適切な表現か。
- C7： ろ過処理水のモニタリングについての記載があるが、原水はモニタリングする必要はないのか？

- C8 : 直接的には紫外線処理には原水水質は関係ない。しかし、原水水質に応じて凝集剤、活性炭の注入率を変更するなど、あった方がろ過水の吸光度を担保できるようなケースも想定はできる。実際の運用上は、それぞれの判断が必要があればつける、ということだろう。
- C9 : ろ過水濁度を 0.1 度以下に常時維持することに困難を感じている施設が多い、と背景にあるが、資料 2-5 にあるように余計なものをつけることへのインセンティブもあるので、何故、世の中で常時維持することが困難なのか、それはろ過のやり方を工夫することでは対処することが難しい、だからこそ、それにかわって紫外線処理、というストーリーラインで是非書いてもらいたい。  
また、海外の状況の部分で、多くの先進諸国では、地表水と地下水を区別しているところはない、とある。少ない先進諸国例のようにも見えるので、区別している例はない、と書けないか。
- C10 : 報告書としては、調べた国だけ列挙しておく方が、間違いがない。
- C11 : p.2 の導入時の留意点で、「有機物に起因したろ過処理水の..」というのには必要か? 多くは有機物だが、違うこともある。
- C12 : 「有機物に起因した」は削除する。
- C13 : 鉄、マンガン等は?
- C14 : (現行の対策指針で) 望ましい水質条件となっている。水質要件ではない。重ねて言う必要はないのではないか。
- C15 : 濁度 2 度の部分で、厳密に紫外線処理への流入水の安全性を高めるためには、0.3 度とかが必要かどうか、他の国で 0.3NTU というのもあるので、その辺りをどう扱うか、何か御意見は?
- C16 : 実際の(地表水以外の紫外線処理の)管理目標値としては、2 度というのもあれば、0.5 度~1 度あたりで行われているところもある。運用上、安全上はどこがよいのか。
- C17 : そこを検討すべきと書いた方が良いか?
- C18 : そこを検討すべきだと書くと、濁度が 2 度ならいい、何度なら駄目というような考え方になってしまう。濁度が 2 度でも大丈夫な装置にするか、5 度でも大丈夫な装置にするか 0.5 度なら安心できる装置にするか等、紫外線処理装置の組み方によって対応はできるので、紫外線処理の水質要件というのは、基本は世の中の水質基準に適合していることになるのではないか。クリプトスポリジウム等は基準に無いので、クリプトスポリジウムの安全のために。逆にいうとクリプトスポリジウム以外の効果が望めないということであれば、水道水質基準に沿った水であれば、問題はないのではないか。大腸菌等の微生物項目以外、つまり後段の塩素処理によって対処するものを除き、水質基準に準拠。あまりにドラスティックすぎるか?
- C19 : 今回、紫外線の波長 254nm と明記している。昨今の LED 等の他の波長についても全く同じかという、今回その検討はしていない。
- C20 : 中圧は? 皆さんの実験データはすべて低圧か。
- C21 : 今は 254nm で換算して、そこだけ測定している。

- C22 : 中圧は既に実績がある、ということか。
- C23 : すでに低圧に準拠して十分実施しているものがあるので、同じようになれば。
- C24 : 骨子の扱いはどのようになるのか。事業体にとって、どのような利点があるのか。選択肢が広がる、ということになるのか。これらの背景に対する、この研究を行ったことによって、よくなることが明記されていると、更新時の説明等に役立つ。
- C25 : 今濁度 0.1 度をキープしているところが、今後さぼっても良い、というようには書けないだろう。現に 0.1 度を守って欲しいと指針がでていますが、それを守るのが厳しい、これ以上努力しても向上が期待できないような場合、紫外線処理を入れればという意味合い。原水濁度が極端に低い等で凝集の効果が出づらく 0.1 度をキープするのが困難なところでは、なかなか有効な手段がない。膜にすれば 0.1 度以下のキープは楽になるが、費用がかさむ、あるいは砂ろ過が老朽化しておらずまだ使える、というような場合への適用が考えられる。そのような形で世の中に広めていけたら。
- C26 : 既存設備を有効に使える。背景のところを含めわかり易い報告書にしたい。
- C27 : 同じような話だが。急速ろ過の設備では充分 0.1 度キープはうちではできている。今回の研究趣旨は、技術的にどうしても守れない中小規模の事業体を救済するための選択肢の一つである、ということがわかるようなことが背景の趣旨として入るとよい。濁度管理できているところにもつけて下さい、では無く。
- C28 : その議論は正しいのか、疑問がある。ろ過水 0.1 度以下に常時保たれていれば、クリプトスポリジウムのリスクはゼロになる、ということについては、答えられる人はいないと思う。関係があるという論文と関係がないという論文の両方がある。0.1 度以下が常時維持できていれば大丈夫、必要ありません、と科学的にいえるかどうかはわからないと思う。
- C29 : 本当にろ過水 0.1 度を守ればこれから先もよいのかどうか、というのはこの中では検討していないと思うが。
- C30 : 神子 過去、論文の調査研究をレビューした例はあった。楯突くつもりは全くないが、ただ、科学的にみたとき、0.1 度なら大丈夫と背景に書いてしまうのはどうかかなと思う。
- C31 : それはそうだ。深くは書けない。指針の中に書かれているようには対応できないところが多数あり、全国的に国民を守るために、というようなことになる。しかし、0.1 度の議論はここではしない。現行の対策指針があることを前提にする。
- C32 : 現行の対策指針はレベル 1 から 4 まであって、事業体にとってはどれをチョイスすればよいのか判り易い。今回、小さいところでは、濁度管理を補完するという意味合いで、これを必須にするのかどうか事業体にとってはかなり重要である。できるかどうかかわからないが、そこら辺りを匂わせておいた方が良いのではないか。今の話を聞くと、将来的にはこういった管理をしていく方向が望ましい、ということを示すのも良いと思う。
- また、あらたに紫外線処理をいれれば、当然維持管理が必要となるので、どの程度コストがかかるのか、そのコストを下げる努力も必要だし、モニタリングもこれは確実にやらないといけないので必要、などこれらが判りやすく網羅されているような成果

にして欲しい。

- C33： いまの発言の後半部分は設計指針のようなものになるだろう。最終的にはセンターの地表水を含めた紫外線の技術基準などに入れていきたいと思う。必須、というところは書くときに気をつけないといけない。
- C34： モニタリングに関しては、たしかに計器は少ない方が良い。地下水関係ではほとんど安定してクリアできていて、ついでところはない。それで、望まれる、という表現にしている。
- C35： 紫外線処理は濁度ではなくて、基本的に透過率が重要である、ということを強調しているので、そのような書きぶりになっている。
- C36： 事業者にとっては明確なメリットがないと、やはりコストがかかるので導入は難しい。濁度 0.1 度がベースとして生きているのであれば、現場は二段凝集等で必死にやっけていくだけで、費用をかけて紫外線を導入するには至らないだろうと思う。現状は PAC を増量するしかない、と。
- C37： 大規模は大丈夫だが、小規模なところだと、昔のままの設備で、凝集剤を大量に入れていても対応ができていないところがあり、厳しい。データを実際に取りている例もあるが、あまり公開できないので。
- C38： 水質を例えば 99%までなら許容、というように確率的に捉える考え方の流れができれば別だが、日本ではなかなか難しい。  
ところで、4 頁のグラフはこれでよいか？ あえて出す必要はない？
- C39： 例えば、紫外線があれば 0.1 度でなくてもいい、と緩和する方向に踏み込めるのであれば、この図は、ある意味証拠となる。それができないならば、それほど意味がないかもしれない。
- C40： もう一つ皆さんに確認したいのだが、紫外線処理装置を、仮に 2 度の濁度の水がきたとき用に設計した装置であれば、という話で、0.1 度用に設計したものに 2 度の水がきたら、当然減る、ということですよ？
- C41： そのとおり。
- C42： 世の中に今ある装置でそのように低い濁度を想定して設計しているものはあるのか？
- C43： いいえ、設計はあくまで透過率。
- C44： 懸念するのは、濁質は高ければ高いほどいい、という誤解が生まれること。
- C45： 前置きが無いから。
- C46： 補正をしていないものをまず書いて.. となると、あえて入れる必要はないか。誤解されても困る。これも少し相談しながら、最終的にいれるかどうか考える。
- C47： それでもそこを説明する社会的意義は大きいと思う。つまり濁質が入っていても、相対的な不活化速度定数は変わりません、といっているわけだが、これは、濁質が入ると水の吸光度が増えるので、滞留時間を長くするなどの措置をして、微生物に到達する紫外線量がいくらかを計算したうえでの話。実際に、同じ光源で同じ流量を流しているときには、濁度があがると、不活化速度定数は減ってくる。なぜなら、水に対して照射される紫外線量は同じでも、微生物に到達する紫外線量は減るから。で、点線の上に行くのは、濁度の補正をしたあとの場合である、ということを理解してもらった方がいい。
- C48： その補正もあくまで積分形ではなく、直線で、というところ。

- C49 : 補正をしなければ、基本的に点線よりも下に来る。それが2度のところでは、それほど減らない。補正をかけると上に上がる。その2段階にする方がいいのではないか。補正を分解した方がいいのではないか？ 例えば装置を同じにしておいて、この場合濁度が2度になると不活化率が悪くなる。その程度がここに出てくる。それが多分一番素直で判り易い。
- C50 : その2度の水を作って、2度でどの程度下がるのか、というデータが本当はあるとわかりやすくてよいのだが。
- C51 : そのときの横軸の濁度については、本当は、測定方法は何々法、と全部書く方がいい。
- C52 : 細くなるが、背景の最初の2000箇所とあるが、科研の対象数はそこまではない。実際には、「また」以降である。
- C53 : 正確に書くほうが良い、ということか。
- C54 : レベル4の地表水で対策が済んでいないのは(研究の対象となる場所)、残り約500箇所。
- C55 : 500箇所は、水量的には？
- C56 : 大規模は既に対応済みなので、比率的には小さい。

## 6. 決定事項

骨子については本日の御意見を参考にして修正をはかり、報告書とする。

成果発表会用の資料 (ppt で2、3枚) は1月16日10時までに提出願う (各研究分担者)。

次回の班会議 : 3月9日 (木) 10時~12時に開催

以上

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」

平成28年度 第3回研究会議 議事録

1. 日 時

平成 29 年 3 月 9 日 (木) 10:00～12:00

2. 場 所

水道技術研究センター 第1・2会議室

3. 出席者（敬称略）

研究代表者	大垣 眞一郎	(水道技術研究センター)
研究分担者	安藤 茂	(水道技術研究センター)
同	佐々木史朗	( 同 )
同	富井 正雄	( 同 )
同	島崎 大	(国立保健医療科学院)
同	神子 直之	(立命館大学)
同	大瀧 雅寛	(お茶の水女子大学)
同	小熊 久美子	(東京大学)
研究協力者	関山 真樹	(神奈川県企業庁)
同	玉野 博士	(埼玉県企業局)
同	伊藤 博文	(日本紫外線水処理技術協会、略称 JUVA)
同	岩崎 達行	( 同 )
同	溝口 真二郎	(水道技術研究センター)
同	中川 遼太郎	( 同 )
同	安積 良晃	( 同 )
同	香坂 由華	( 同 )
同	栗原 潮子	( 同 ) (記)

<オブザーバー>

東水道水質管理官（厚生労働省）、久保課長補佐（厚生労働省）、  
鈴木室長補佐（厚生労働省）

(欠席：市川 豊（東京都水道局）、太田 淳一（岐阜市上下水道事業部）、  
プログラム・オフィサー（国立保健医療科学院）)

4. 議事

1) 成果発表会について

研究代表者より、成果発表会について報告した。----- [資料1]

2) 各研究分担者の平成28年度研究進捗等 ----- [資料2]

資料2-1～2-5に基づき、各研究分担者が発表した。

3) 質疑応答、コメント・意見等

上記の1)及び2)について、研究;分担者・協力者・オブザーバーからのコメント・意見等をいただいた。

#### 4) 研究分担者への連絡事項

報告書のとりまとめに関する連絡事項を伝達。

### 5. 研究の進捗及び質疑応答、コメント・意見等

以下のような意見が出された。

#### (1) WHO の資料に関して

C1: WHO の報告資料に関して、今回の研究を行っていると思うのは、濁度があれば紫外線照射量を増やさなければならないという点。これはふつうの塩素消毒等の概念がそのまま適用されて考えられているためではないか。

また、濁度の測定方法の相関関係と、日本の濁度単位である度と NTU 等の相関関係は必ずしも一定ではなく、取扱いが難しい。

#### (2) 「紫外線量」という用語について

C2: 資料 2-2b、p.7、段落 4.2.3 の最後にある紫外線(照射線)量と、資料 1-2、p.12 の反応速度定数に関する紫外線量では意味が異なる。前者は、与える線量のことで、濁度上昇とともに吸光度が遮蔽により低下するのでそれだけ多くの紫外線量を必要とすることを示し、後者は水中の紫外線の吸収を考慮して平均的な紫外線照度に換算した後の値である。この用語の使用時には共通の理解と注意が必要である。とくに、「照射線量」の場合には、よく読まない、どちらの意味なのか、わかりづらい場合がある。

#### (3) 今後のまとめ方とろ過池の管理値について

C3: 研究上の課題が多く残っているという印象を与える書き方にならない方がよい(とくに散乱の影響関係)。クリプト対策の観点から見ると、紫外線処理にとって濁度、色度はあまり意味がなく、透過率・吸光度が重要であるということだろう。散乱については、積分球で測れば、安全サイドになる、という表現にしておけばよいのではないか。

C4: 透過率が悪ければ、たくさん紫外線をあてればいいので、紫外線の適用条件としなくてもよいのではないか。

C5: 資料 2-5 は、設計のための紫外線透過率を意味している。クリプトスポリジウム対策全体としてどのような流入水質がどうか、ということはシステム全体でみて決めればよい。資料 1-2 では、現状の対策指針で地下水はこのような基準になっているから、それを転用しても問題はない、という表現にした。紫外線の前処理装置としてのろ過装置の管理の仕方としてはどうなのか、2度でよいのか、というところはある。

C6: 資料 1-2、p.16 に、「地表水の水質変動は、紫外線処理装置の前処理のろ過で吸収する」とある。その効果の判断はこの科研では言及していないが、前処理装置としてのろ



過装置の管理値としての濁度は、0.5 度なのか、1 度なのか、等いろいろな考え方がある。

C7： 世界最大のニューヨークの紫外線処理施設では、紫外線透過率しか見ていない（上流で原水濁度<5NTU となるように凝集剤を投入し、管理は行われている）。濁度、色度はみていない。濁度は水源における事故等の有無の確認程度。紫外線は届くことで効果が決まる。つまり、別途、濁度 2 度の管理は必要だが、濁度 2 度を下回っていいが、それは紫外線が効くかどうかとは別の話である。

(4) 塩素消毒後に紫外線の照射を行うことについて

C8： 残留塩素は一部が分解する。過去に行った実験結果があり、文献もいくつか出ている。臭化物イオンが存在している場合には注意すべきであるが、一般的には水質的に大きな問題はない。既にそのような処理施設も国内に存在している。文献では、塩素注入後の紫外線照射で光ラジカルが生成し、消毒に効果があるというものもあり、あえてそのようにしているケースも海外にはある。

C9： 既存の施設に追加する場合、通常、施設は水理的な面で効率的になるように設計されているため、砂ろ過直後に紫外線処理施設を増設するのは、浄水池の水位との関係で厳しい場合が多い。したがって浄水池の後段に設置するケースが多くなる。

(5) 微生物的な見地からのコメントに対して

C10： 微生物関係の方々に意見聴取をしたところ、濁度 0.1 度は重要な管理指標であり、水中のゴミ（粒子）が減少し、副次的な効果もあるため、せっかく濁度 0.1 度が守られていたのに、ある意味後退してしまうような変更はよろしくない、という御意見がでた。これはどこまで許容できると考えるか。例えば捨水がどうしてもできないときだけはいいか、あるいは 0.1 度は従わなくてもかまわない、というようなことはあるのか。

C11： 紫外線を導入する場合、紫外線の前処理と位置づける場合については、ろ過水濁度 0.1 度にこだわらなくても良いのではないか。それを守るのが大変だという状況の中で、クリプトスポリジウム等の対策をどのように進めていくか、というのがこの科研の位置づけ。濁度 0.1 度というのも、クリプトスポリジウム等の対策を解決しなければならない中で出てきたことであって、水質基準は 2 度である。

ここでの議論は、紫外線を導入する場合にどうするかであって、ろ過池の議論ではない。紫外線のいわば前処理としての議論である。意味合いを変える必要がある。

C12： もともと、0.1 度を守れていないところをどうするか、リスクのある所をリスクのない状態にどのようにもっていくか、ということである。設備投資を行い、膜ろ過をすべてに導入できれば、濁度はおのずと 0.1 度以下になり、対策にもなるが、それができないので、どうすればよいのかということ。あるいは、いろいろな工夫を重ねながら、ろ過池の管理が非常に大変だが、紫外線を導入することによって、それがカバーできるのであれば、ということである。

C13： 濁度を 0.1 度とすることで、クリプトスポリジウム等の対策以外の効果が付帯的にで

ているとしても、それは問題視されていない。クリプトスポリジウムの問題が出てくるまでは、2度でとくに問題はなかった。よりきれいにすればそれに越したことはないかもしれないが、現実的に守られていないところがあるのでは、対策にならない。例えば濁質の中にウイルスが入っているような場合の懸念はあるかもしれない。しかし塩素が効くのであれば、経験的にみて、基本的に問題は生じていない。

C14：全体像を御理解されているかにもよるが、資料1-2、p.2にあるように、クリプトスポリジウム等対策指針への対応が未対策の事業者が未だ存在しており、それをどうするかが課題。濁度0.1度以下をすべてに求めたとしても、現実的には対応するための十分なスペース等がなく対応しきれない。しかし、紫外線を入れればなんとかなる。既存のろ過池だけのところは0.1度以下のままで、紫外線を入れたところだけ、年に何度か超えても紫外線で対応できるようにする。少し発想の仕方を変えてもらわないと議論が噛み合わない。

また、大規模の事業者が管理値を緩めるとは紫外線を入れない限り考えられない。

少なくとも、現在リスクにさらされている施設は紫外線を追加することによってリスクが低減する（日本全体の全施設のリスクをもっと下げるということになると少し意味が変わる）。

C15：少なくともリスク低下のための選択肢が一つ増えるという捉え方をしてもらいたい。濁度管理がゆるくなることへの心配は、水質をきちんとチェックしたうえで、年に数回超えるようなときへの対応を紫外線で行うとすればよい。

C16：今後、濁度0.1度だけに頼って10年20年継続するのは、事業者にとっては体力的に無理になるのではないか。この班会議とは少し離れるが、今後、地表水にも紫外線を導入する方向に政策誘導すべきである。先々、未規制の病原微生物やウイルスに対して、マルチバリアでより幅広く対応できるようになる。

C17：紫外線を導入することで、クリプトスポリジウムのリスクが2log減るのだから、その分だけろ過のリスクが多少増えても大丈夫、といえるのではないか。

#### (6) 伏流水を水源とする施設について

C18：伏流水を水源としているところで、濁度が0.1度を超えているところがある。そこをもう少し強化すべき等の整合性の課題もあるのではないか。

#### (7) 事業者の方々からの御意見

C19：暫定指針制定以前には、年に数回、やむを得ず、0.1度を超過することがあった（多くはピコプランクトンが原因）。紫外線があれば、そのようなときでも安心できる。

C20：小さい事業者が県内にあり、このような問題に直面しているところも多々ある。これから施設更新の時期を迎えるにあたり、このような選択肢があれば、有意義である。

## 6. 決定事項

厚労省の「水道における微生物問題検討会(3月21日開催予定)」において、本科研の報告を島崎先生が行うことになった。

以上