

研究課題 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

課題番号 H26－健危－一般－004

研究代表者 大垣 眞一郎（水道技術研究センター 理事長）

要約

本研究では、地表水を対象とした紫外線処理の適用に関して、地表水の水質特性に対応した具体的な施設要件や維持管理要件等を提案することを目的として情報・データを収集した。得られた実験的解析等の結果も含め、紫外線処理装置の設計諸元、運転管理に関する知見を得た。

1. 研究目的

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、特に小規模な水道において、対策のとられていない水道施設が残っているという指摘がある。また、クリプトスポリジウム等対策の目標であるろ過水濁度 0.1 度以下を常時維持することに困難を感じている水道事業者も見受けられ、近年の異常気象等に伴う急激な濁度上昇等の増加と相俟って懸念が増している。一方、これまで国内で地表水を対象とした紫外線処理の導入例はなく、関連する研究も少ないのが現状である。

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

2. 研究方法

1) 濁度管理等における課題の抽出

国内の地表水を対象として濁度管理の実態をヒアリング等により把握した。また、地表水以外を原水とする紫外線処理設備の維持管理の実態についてもヒアリング等を行い、地表水を対象とした維持管理上の留意事項の提案に反映させた。

2) 原水条件及び処理効果の検証

地表水の原水・ろ過水について分析し、地表水の水質特性が紫外線照射の効果に与える影響を実験等により明らかにした。得られた結果は、設計諸元及び維持管理上の留意事項の提案に反映させた。

3) 照射手法及び設計諸元の検討

原水条件及び処理効果の検証で得られた結果を基に、地表水を対象とした浄水プロセスへの紫外線処理の導入における原水条件を検討した。

4) 維持管理上の留意事項の検討

地表水以外の紫外線処理設備の維持管理の実態、地下水と地表水との水質特性の相違及び濁度変動に対応する紫外線照射量の実験等に基づき、地表水を対象とした場合の運転・維持管理上の留意事項を検討した。

(倫理面への配慮)

本研究に係わる実験は、ヒトや動物への影響を及ぼすことはなく、倫理面への問題は生じない。

3. 研究結果・考察

1) 濁度管理等における課題の抽出

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体の実態を全国にわたり現地調査した。特に中小規模事業体においては、既存施設に濁度管理徹底のための方策を整備することが、不可能である施設も存在すること、ろ過池ごとにろ過水濁度を計測する濁度計の設置は費用及び維持管理の面から厳しい状況にあること、がわかった。また、米、独、英、仏、オーストリアの紫外線処理適用事例について文献調査を行い、紫外線処理の適用条件に、地表水、地下水の種別を導入している国は、存在しないことを明らかにした。

2) 原水条件及び処理効果の検証

地表水の水質特性が紫外線処理効果に与える影響を明らかにするため、地表水の濁質粒径分布の影響を不活化実験により解析した。実験には大腸菌、バクテリオファージを用い、濁度の影響は吸光度により説明できることを確認した。

3) 設計諸元の検討

地表水の濁度変動、水質特性が紫外線処理に与える影響を評価するため、濁質の紫外線吸収・散乱特性を考慮した指標を開発し、モデル濁質による実験に加え、実浄水場の原水等についてもデータの収集、解析を行った。

また、カーボンブラックやポリスチレンビーズなどのモデル粒子添加による大腸菌、バクテリオファージの不活化実験を行い、白色系粒子の散乱効果の存在などを示した。

4. 結論

1) 濁度管理等における課題の抽出

地表水の浄水処理において、ろ過池ごとに濁度管理を行い、ろ過水濁度を常時 0.1 度以下に維持することに対して困難を感じている事業体が多いことを明らかにした。

2) 原水条件及び処理効果の検証

国内の地表水を対象として、原水・ろ過水の分析を行い、水質特性を把握した。またこれらの水質特性が、紫外線照射の効果に与える影響を微生物不活化実験により評価した。地表水の場合には、地下水・伏流水等を水源とする場合よりも水質の変動が大きいいため、紫外線処理に影響を及ぼす濁度、紫外線吸光度の変動は、紫外線処理の前処理となるろ過等で吸収することが必要であることを明らかにした。

3) 照射手法及び設計諸元の検討

上記 1) 及び 2) の結果に基づき、濁度変動、濁質及び色度成分の相違を考慮した適切な紫外線照射線量を微生物不活化実験により検証した。最終的に、地表水へ紫外線処理設備を導入する場合の具体的な設計諸元として、次のようにとりまとめた：

- ・紫外線処理の設計を行うには、紫外線透過率が濁度よりも重要である。
- ・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。

4) 維持管理における留意事項の検討

上記 1)、2) 及び 3) の結果を基に、地表水を対象とした紫外線処理設備の維持管理上の留意事項をとりまとめた：

- ・紫外線処理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。
- ・原水水質変動対策として、紫外線透過率を長期に実測して紫外線処理システムの設計に反映する必要がある。
- ・紫外線処理装置の流入水の紫外線透過率を常時モニタリングすることが望ましい。

分野	水安全対策
研究課題	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)
研究期間	平成26年度～平成28年度
研究代表者	大 垣 眞一郎 水道技術研究センター理事長
研究分担者	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生活環境研究部 席主任研究官 神 子 直之 立命館大学理工学部環境システム工学科教授 大 瀧 雅寛 お茶の水女子大学基幹研究院自然科学系教授 小 熊 久美子 東京大学先端科学技術研究センター准教授

研究の背景と目的

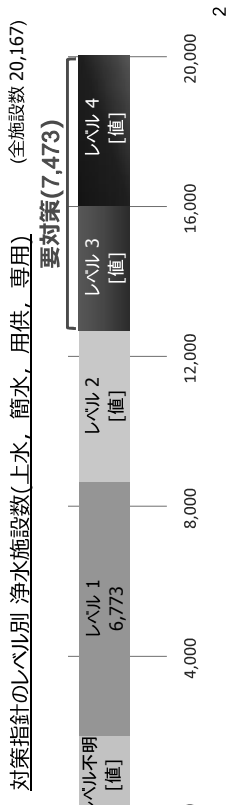
【背景】 我が国の多数の水道水源は地表水であるが、地表水にはクリプトスポリジウム等の水系感染症の懸念がある。

平成19年にクリプトスポリジウム等対策指針（以下、「対策指針」という）が策定された。地表水を水源としてクリプトスポリジウム等の汚染が懸念される場合には、ろ過を行い、そのろ過水濁度は常時 0.1度以下とすることとされている。

しかし、この指針に沿った対策がとられていない水道施設（検討中を含む）は、平成25年3月末現在で、対策が必要とされる施設数の約33%（2,380施設）に達する。

地表水を水源とする浄水施設へのアンケート結果によれば、ろ過水濁度を常時0.1度以下とする濁度管理に困難を感じる割合は 47% にのぼる。

【目的】 日本の地表水の水質に即した具体的な紫外線処理の施設要件、維持管理要件等について、実際の原水を対象とし、実務に即した提案を行う。これにより水道水に起因する健康リスクの低減に資する。



研究課題とスケジュール

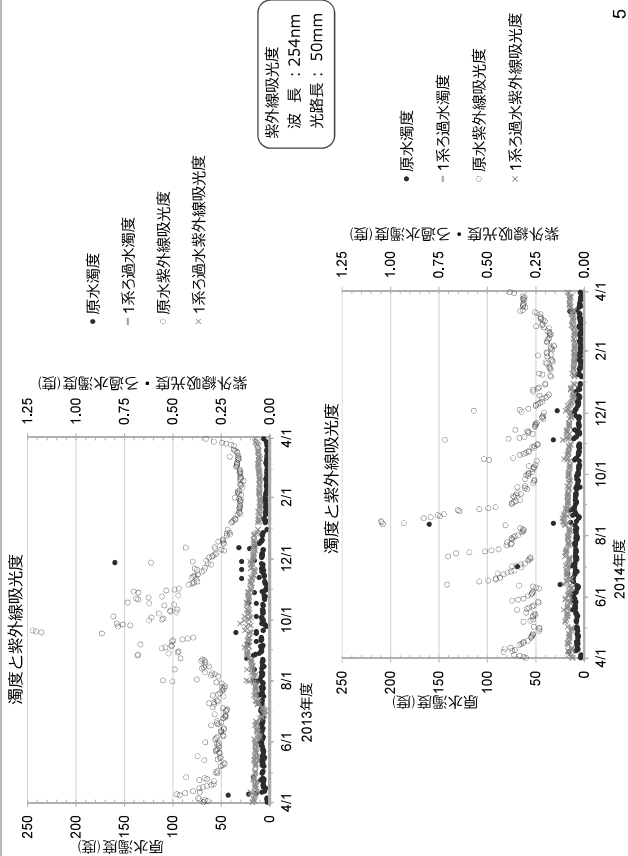
課 題	H26年度	H27年度	H28年度	期待される成果
1. 濁度管理 等における 課題の抽出	地表水の浄水処理における濁度管理 等の実態把握及び課題の抽出	地表水以外を対象とした紫外線処理設備 の維持管理の実態把握及び課題の抽出		
2. 原水条件 及び処理 効果の検証	国内における地表水の濁度成分等の分析	地表水の水質特性が紫外線処理の効果に及ぼす影響評価		地表水を対象とした紫外線処理の導入により、水道水に起因する健康リスクを低減化
3. 照射手法 及び設計諸 元の検討	濁度変動に対応する紫外線照射線量の検討	紫外線処理設備の導入における照射手法及び設計諸元の検討		
4. 維持管理 上の留意 事項の検討	地表水を対象とした紫外線処理設備の 運転・維持管理における留意事項の検討			
5. 研究成果の とりまとめ	地表水を対象とした紫外線処理の適用 に係る導入・設計及び運転・維持管理 に関する研究成果のとりまとめ			

クリプトスポリジウム等対策を実施するうえでの現状の課題

- (1) 濁度管理の難しさ
ろ過池洗浄時の一時的な濁度上昇の抑制
捨水、スロースタート等が必要とする。
- (2) 対策指針前に設計された浄水施設
捨水、スロースタート等が困難である。
- (3) 原水濁度がもともと低い施設
多量の凝集剤注入が必要、それに伴い
スラッジも増大する（脱水性が悪い）。



1. 地表水の原水濁度と紫外線吸収光度の変化の実態（北海道く市）



2. 海外における地表水紫外線処理の適用条件等に関する文献調査

各国の地表水紫外線処理の適用条件

日本		米国	ドイツ	オーストリア	英国	フランス
原水種別	地下水	地表水	—	—	—	—
濁度	≤2度	≤0.1度	≤0.3FNU	—	≤1NTU	≤0.5FNU
紫外線照射量	≥10mj/cm ² [水量の95%に 対して]	≥22mj/cm ² [クリプト等 4log不活化] ≥183mj/cm ² [ウィルス 4log不活化]	≥40mj/cm ²	≥40mj/cm ²	米国に 同じ	≥40mj/cm ²
紫外線透過率	>75%	—	≥70.8%	—	—	≥80%
色度	≤5度	—	—	—	—	—
硬度	≤140mg/L	—	—	—	—	—
鉄	≤0.1mg/L	—	≤0.05mg/L	—	—	≤0.05mg/L
マンガ	≤0.05mg/L	—	≤0.02mg/L	—	—	≤0.02mg/L

- 外国における適用条件には地表水、地下水の区別は見受けられない
- 日本を除いて最も厳しい濁度条件はドイツの0.3FNU（0.33～0.36度）
- 最も厳しい紫外線透過率の条件はフランスの80%以上
- 鉄およびマンガンの条件はドイツ、フランスにおいて日本の半分以下

クリプトスポリジウムによる水道由来の水系感染症発生における海外の事例

- ・ 2005年秋季にウェールズで218名の患者が発生
- ・ 原水水質が良好であるため、処理は圧力砂ろ過＋塩素消毒のみ、凝集処理は適用せず
- ・ 水道水中からクリプトスポリジウムが検出されたがその濃度は最大0.08オーシスト/10Lであり規制値（1/10L av./1000 L/24 hrs）未満
- ・ 当時の規制ではクリプトスポリジウム除去以外の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、水道会社に紫外線処理の導入を勧告

出典

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.

クリプトスポリジウムによる水道由来の水系感染症発生における海外の事例

追加スライド

- ・ 2005年秋季にウェールズで218名の患者が発生
- ・ 原水水質が良好であるため、処理は圧力砂ろ過＋塩素消毒のみ、凝集処理は適用せず
- ・ 水道水中からクリプトスポリジウムが検出されたがその濃度は最大0.08オーシスト/10Lであり規制値（1/10L av./1000 L/24 hrs）未満
- ・ 紫外線処理を導入後、2006年1月30日に
a public advice notice of boil water (BWN)（煮沸勧告）を解除。

出典

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.

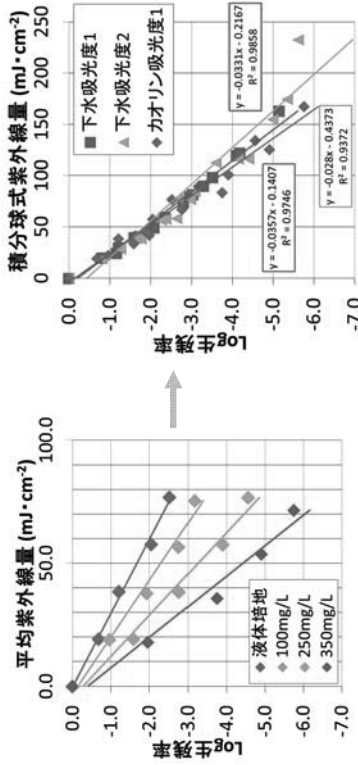
3.1 濁度変動に対応する紫外線照射量の検討

3.1 濁度変動に対応する紫外線照射量の検討

追加スライド

平均紫外線量を求める式の吸光度項に、積分球吸光度を代入して求めた平均紫外線量（積分球式紫外線量）を用いれば、MS2の不活化速度を様々な模擬濁質の影響を統一的に説明できることがわかった。

平均紫外線量を求める式の吸光度項に、積分球吸光度を代入して求めた平均紫外線量（積分球式紫外線量）を用いれば、MS2の不活化速度を様々な模擬濁質の影響を統一的に説明できることがわかった。

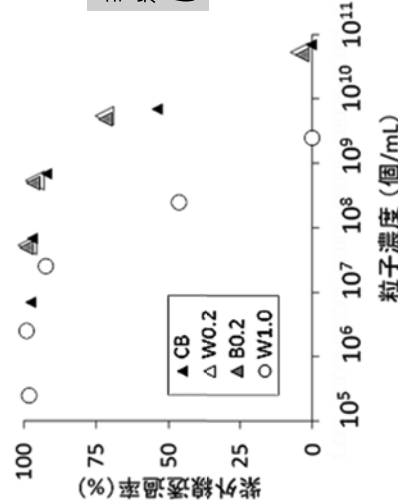


積分球式紫外線量を用いた平均紫外線量とMS2生残率の関係

積分球式紫外線量を用いた平均紫外線量とMS2生残率の関係

3.2 地表水の水質変動幅を考慮した紫外線処理の解析

模擬粒子による紫外線透過率の低下



CB: カーボンブラック粒子 (0.1-0.2μm)
W0.2: 白色ポリスチレン (PS) 粒子 (0.2μm)
B0.2: 黒色PS粒子 (0.2μm)
W1.0: 白色PS粒子 (1.0μm)

粒子添加による紫外線処理効果への影響の解析

大腸菌ファージ MS2 の不活化定数を比較した結果、濁度 0.6-1.5 度、紫外線透過率 56-70 % の条件で、粒子添加なしの場合と不活化効率に有意な差はなかった ($p > 0.05$)。

大腸菌ファージMS2の不活化定数k

kは独立照射3回の平均値±標準偏差, *は $p < 0.05$, **は $p < 0.01$

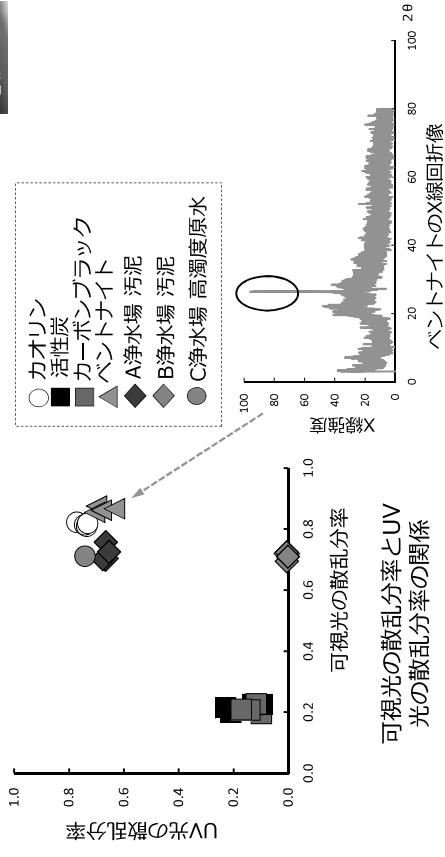
粒子濃度 (個/mL)	CB 10 ¹⁰	CB 10 ⁹	粒子 なし	B0.2 10 ⁹	W0.2 10 ⁹	W1.0 10 ⁸	W1.0 10 ⁹	W0.2 10 ¹⁰
k (cm ² /ml)	0.036* ±0.0004	0.040 ±0.001	0.042 ±0.001	0.043 ±0.0003	0.044 ±0.0002	0.047 ±0.001	0.084** ±0.002	0.097** ±0.001

統計的有意差なし

水中に様々な懸濁粒子が存在しても、紫外線吸光度を考慮して算定を行えば、不活化速度への影響はない。粒子による紫外線散乱で不活化効率が上がる場合もある。

3.3 地表水の水質特性が紫外線処理の効果に及ぼす影響の評価

追加スライド

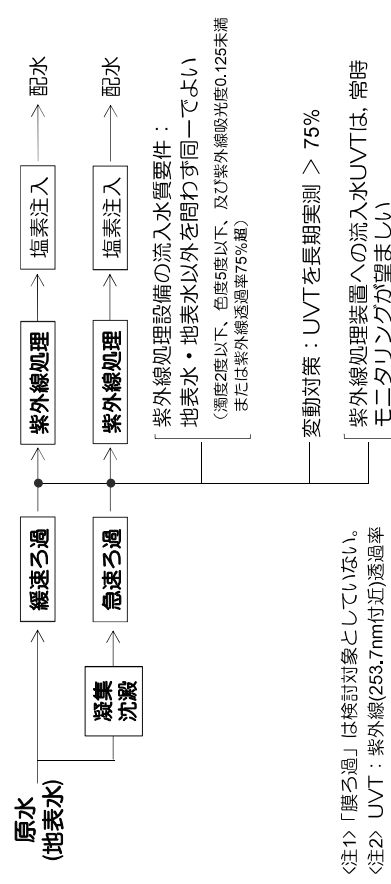


可視光散乱分率と紫外線散乱分率の比により、濁質の分類が可能である。紫外線散乱特性が大きい濁質は、石英結晶構造と関係していることが明らかとなった。

14

[結論] 地表水への紫外線処理の適用の要件について

紫外線処理の設計を行うには、紫外線透過率が濁度よりも重要である。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。



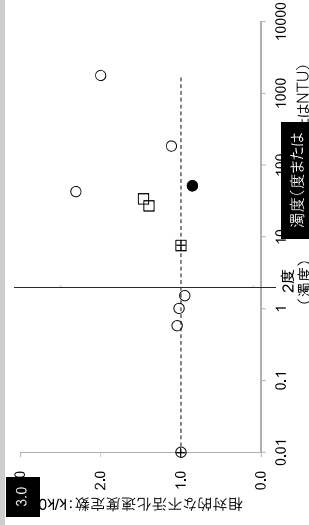
〈注1〉「膜ろ過」は検討対象としていない。
 〈注2〉UVT：紫外線(253.7nm付近)透過率

- ① 変動対策：UVTを長期実測＞75%

紫外線処理装置への流入水UVTは、常時モニタリングが望ましい

16

濁質を含む試料の場合、清澄な水で得られた紫外線不活化速度定数を基準とした相対的な不活化速度定数は、濁度2度程度以下であれば影響を受けない。



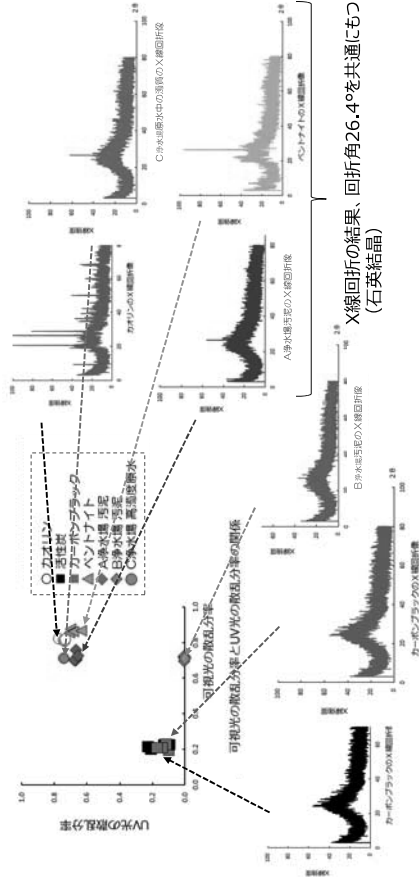
MS2を添加した場合の紫外線照射による不活化結果への濁質の影響の有無

- 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を A 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

- 最初沈澱池出口水の場合の相対的な速度定数 k/k_0
 - 田 最初沈澱池出口水最小濃度の場合。これは B 系列の基準の k_0 として、相対値 k/k_0 を算出

13

3.3 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



可視光散乱分率と紫外線散乱分率の比により、濁質の分類が可能である。紫外線散乱特性が大きい濁質は、石英結晶構造と関係していることが明らかとなった。

15

1. 発表済み

- ① 公益社団法人日本水道協会が主催し、全国の水道関係者が一堂に会する全国水道研究発表会で本研究の成果を発表（平成27年10月に1編、平成28年11月に1編）
- ② 日本紫外線水処理技術協会主催の技術セミナー（平成28年3月）
- ③ 日本水環境学会（平成27年3月に1編、平成28年3月に4編）
- ④ 国際紫外線協会・東京シンポジウム（平成28年4月、2編）
- ⑤ 国際紫外線協会 世界会議（平成28年2月、バンクーバー）
- ⑥ 国際水協会(IWA)世界大会（平成28年10月、ブリスベン）

2. 今後の予定

- ① 平成29年度に予定されている全国水道研究発表会
- ② 水道技術研究センターが主催しているセミナーおよび講習会