

一般社団法人 日本紫外線水処理技術協会

ニュースレター No.16

Japan UV Water Treatment Technology Association

JUVA

16

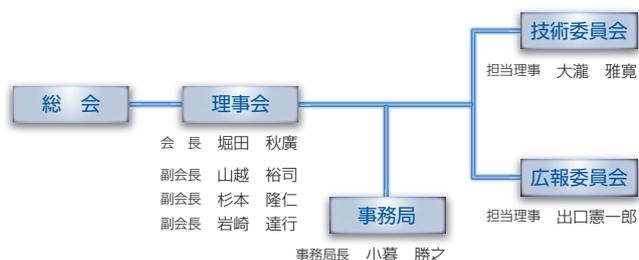
Newsletter

JUVA

16

Newsletter

協会組織図



顧問・役員 (令和5年度)

顧問	大垣眞一郎 (東京大学名誉教授)
会長	堀田 秋廣 (フナテック株式会社 顧問)
副会長	山越 裕司 (株式会社日本フォトサイエンス 理事)
副会長	杉本 隆仁 (メタウォーター株式会社 技師長)
副会長	岩崎 達行 (スタンレー電気株式会社 主任技師)
事務局長	小暮 勝之 (岩崎電気株式会社 課長)
理事 (技術担当)	大瀧 雅寛 (お茶の水女子大学 教授)
理事 (広報担当)	出口憲一郎 (千代田工販株式会社 部長)
理事	神子 直之 (立命館大学 教授)
理事	小熊久美子 (東京大学 教授)
理事	相馬 孝浩 (東芝インフラシステムズ株式会社 部長)
理事	大隅 昌平 (株式会社ウォーターテック 支店長)
理事	恩田 建介 (水ing エンジニアリング株式会社 部長)
監事	今川 洋介 (月島JFE アクアソリューション株式会社 副参事)

もくじ

顧問・役員

●巻頭言

- 01 協会の歩みとこれから
一般社団法人 日本紫外線水処理技術協会
会長
堀田 秋廣

●特別寄稿

- 02 水道整備・管理行政の移管に向けた取り組み
国土交通省水管理・国土保全局
上下水道企画課 上下水道国際室
事業連携係長
(元 水道整備・管理行政移管準備
チーム事務局)
別府 篤人

●技術資料

- 06 日本 - ドイツ - チェコ国際共同研究
- 小規模水施設における UV-LED 消毒装置実証 -
東京大学 大学院工学系研究科
都市工学専攻 教授
小熊 久美子

- 09 UV 消毒と今後の UV LED 技術を中心とした
ドイツの飲料水処理と消毒の理念
Philosophy of drinking water treatment
and disinfection in Germany with a focus
on UV disinfection and upcoming UV LED
technology
TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser
Jutta Eggers & Tim Schwarzenberger

- 15 都市下水排水リサイクルのための
UV LED のパイロット試験
Pilot testing of UV LED for recycling
of municipal wastewater
Main authors:
Lucie Bláhová and Luděk Bláha
With contributions from
Michal Bittner, Kateřina Bočková,
Kumiko Oguma, Tim Schwarzenberger,
Jutta Eggers, Jaroslav Lev, Michaela
Majčinová

- 21 紫外線照射装置の認定取得と導入の状況
公益財団法人 水道技術研究センター
浄水技術部 主任研究員
渡部 太士

- 23 静岡市小規模水道施設見学会報告
千代田工販株式会社
UV システム事業部 UV 技術開発部
リサーチセンター 課長
堀江 和峰

●会員紹介

- 25 会員リスト

編集・発行

一般社団法人 日本紫外線水処理技術協会 広報委員会



協会の歩みとこれから

一般社団法人 日本紫外線水処理技術協会 会長 堀田 秋廣

協会設立の経緯を振り返るとさまざまなステージがあり、その時々苦難や喜びも数多くありました。

紫外線処理は民間企業の水処理プロセスで、飲料・食品・医薬業・電子産業等に幅広く使用され現在に至っております。

民間企業での導入は、要求・用途に応じた製品をUV装置メーカーが選定・提案し、設備を施行するプラントメーカーやエンドユーザーが最終的に採択する形態で完結し、全ての責任範囲は企業間で負うことで成り立っています。それではクリプトスポリジウム等の耐塩素性病原生物対策として導入される紫外線処理装置の位置づけはどうであろうか。我々が日常的に使用している生活用水である水道水はどうであろうか。

勿論、装置を供給する企業、施工する企業、水道水を供給する水道事業者関係者の方々の責任は重く、水道水の安全確保は利用者である住民の方々にも及び事になり、社会的責任は民間企業への供給に比べ、より重くなると考えられます。これらの事を踏まえたとき、技術的基準を明確にした紫外線処理装置の導入が求められました。

平成18年8月「厚生科学審議会」に於いて紫外線処理導入許可の方向性が見えた段階で、大垣眞一郎東京大学大学院教授を顧問に迎え、複数の国内UV装置メーカーと海外からUV装置を導入しているプラントメーカー数社が参加し協会設立の準備に入りました。

当時の茨城大学教授神子直之先生のご尽力があって、設立準備参加企業が紫外線処理に不可欠な技術分野を各々が分担し、京都市某所で技術基準作りの合宿を実施する事が出来ました。

この活動を通して平成18年12月に任意団体として日本紫外線水処理技術協会設立の運びとなりました。

(財)水道技術研究センター(以下JWRC)の紫外線照射装置技術審査基準(低圧ランプ編)の作成に技術面で

協力する事が出来、その後の中圧ランプ編、UV-LED編等の技術審査基準作りの技術的サポートを実施してまいりました。紫外線処理設備は地下水源に限定して適用が認められておりましたが、令和元年5月に省令が改正され、地表水を含む水源に対して適切なる過設備の後段に紫外線処理の導入が可能となりました。この改定に伴いJWRCの紫外線処理装置の適合認定制度も改訂され現在に至っております。令和6年4月から水道行政の所掌変更に伴い、厚生労働省から国土交通省と環境省に所掌業務が分かれましたが、我々協会参加企業の重責は従来と変わる事はありません。協会が実施してまいりました技術セミナーや広報活動を通して、紫外線処理の技術的有用性、安全性を示し、水道事業者、学識経験者、会員企業の協力・努力が紫外線処理設備導入の後押しに成ったものと自負しております。海外に於いての大規模導入事例もニュースレターを通して紹介してまいりました。他にも世界的に求められている水資源の有効活用の一環として、下水の再利用等を目的とした「ISO/TC282水の再利用」の紫外線ワーキンググループに参加、国際規格作りに取り組みISOの基準作りに貢献致しました。

任意団体の設立を経て一般社団法人となり、今年で18年を迎え、設立当時の理事や学識経験者の面々も徐々に入れ替わり、世代交代が進んでまいりました。これから協会をどのように方向付けて運営して行くか、クリプト対策のみにとどまる事無く、欧米で導入されている先進的事例等を鑑みて、次世代を担う方々の新たな考えに沿って紫外線処理の用途拡大に繋げて行くことを期待する処であります。

今後とも協会の活動・発展に関係各位の皆様には、ご指導ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。



水道整備・管理行政の移管に向けた取り組み

国土交通省水管理・国土保全局 上下水道企画課 上下水道国際室 事業連携係長
 (元 水道整備・管理行政移管準備チーム事務局) **別府 篤人**

1. はじめに

はじめに、この度の令和6年能登半島地震で亡くなられた方々のご冥福をお祈りするとともに、ご遺族の皆様にお悔やみ申し上げます。国土交通省としても早期復旧に向けて引き続き全力で取り組んでいく。

令和6年4月に「生活衛生等関係行政の機能強化のための関係法律の整備に関する法律」（令和5年法律第36号）が施行され、水道整備・管理行政が厚生労働省から国土交通省及び環境省に移管された。昭和32年に上水道を厚生省に、下水道を建設省に、工業用水道を通産省に所管させることとした水道整備・管理行政3分割以来、67年ぶりの行政機構の転換となる。本稿では、新しい組

織体制や法律・予算制度の変更点及び令和6年能登半島地震への対応等について紹介する。

2. 組織体制について

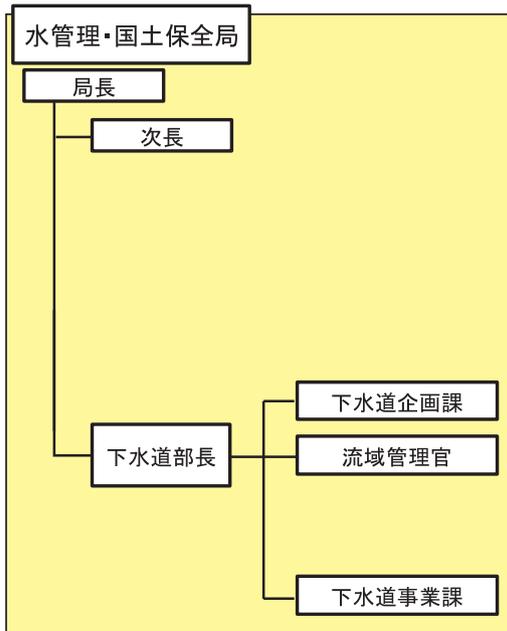
1) 組織概要

国土交通省組織令（平成12年政令第255号）、国土交通省組織規則（平成13年国土交通省令第1号）、地方整備局組織規則（平成13年国土交通省令第21号）、北海道開発局組織規則（平成13年国土交通省令第22号）、国土技術政策総合研究所組織規則（平成13年国土交通省令第79号）が改正され、令和6年4月1日に施行し、国土交通省の組織体制は図1～3の通り変更された。

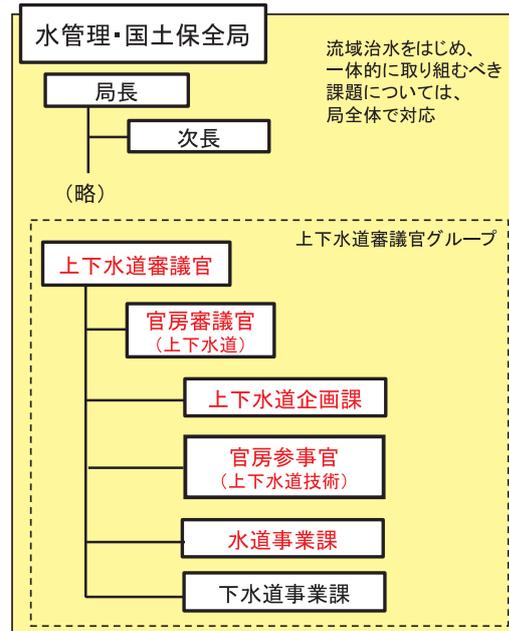
水道整備・管理行政の移管後の国土交通本省の体制(R6.4～)

- 国土交通本省に局長級の上下水道審議官及び官房審議官(上下水道)を新設。
- 上下水道審議官グループとして、3課1官体制で上下水道一体の組織体制を整備。

◆移管前の体制(下水道部)



◆現行の体制(上下水道審議官グループ)

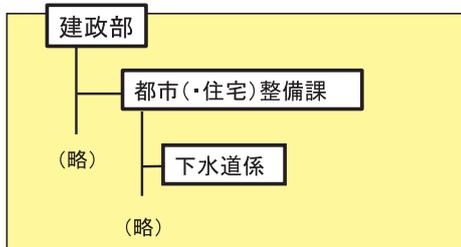


図－1 水道整備・管理行政の移管後の国土交通本省の体制 (R6.4～)

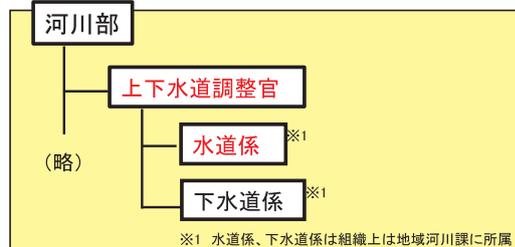
地方整備局及び北海道開発局における体制（R6.4～）

- 地方整備局では、河川部に上下水道調整官や水道係等を新設するとともに、建政部が所管する下水道行政を河川部に移管。
- また、北海道開発局では、建設部に上下水道調整官や水道係等を新設するとともに、事業振興部が所管する下水道行政を建設部に移管し、上下水道一体の組織体制を整備。

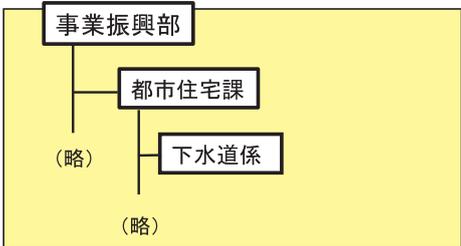
◆地方整備局 移管前の体制



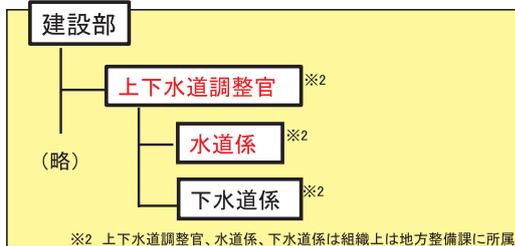
◆現行の体制



◆北海道開発局 移管前の体制



◆現行の体制

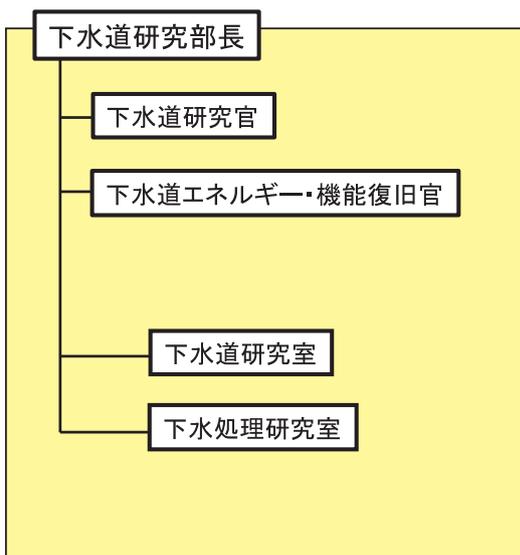


図－2 地方整備局及び北海道開発局における体制（R6.4～）

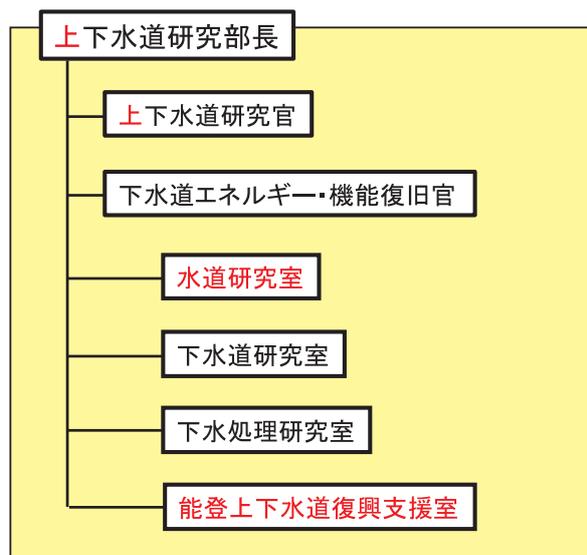
国土技術政策総合研究所における体制（R6.4～）

- 国土技術政策総合研究所に水道研究室を新設し、水道に係る研究を新たに実施。
- さらに、令和6年能登半島地震を受け、被災自治体が行う上下水道の復興に対して技術的な支援を行うため、能登上下水道復興支援室を新設。

◆国土技術政策総合研究所 移管前の体制



◆現行の体制



※ R6年度中は国立保健医療科学院の水道関係の組織は引き続き科学院に存在

図－3 国土技術政策総合研究所における体制（R6.4～）

2) 新組織の特徴

本省の組織について、下水道部が廃止され、上下水道審議官グループが新たに立ち上がり、新設された局長級の上下水道審議官が上下水道行政をリードしている。経営・官民連携については上下水道企画課管理企画指導室において、海外展開・国際協力については同課上下水道国際室において上下水道一体で担当している。技術開発及び上下水道予算の総括は官房参事官（上下水道技術）が担当している。このように、水道整備・管理行政の移管を受け、上下水道一体で相乗効果を発現させるための体制を整備している。また、水道事業者の指導・監督については水道事業課において実施している。

地方整備局等の組織については、自治体との窓口を担う水道係を河川部地域河川課等に配置し、上下水道調整官の指揮のもと、水道法に基づく届出受理や補助金に関わる業務を行う。令和6年能登半島地震への対応など、既に災害対応等で地方整備局等が水道事業者と関係を構築しているが、平時から水道事業者とコミュニケーションをとり、水道整備・管理行政の機能強化に資する取り組みを実施していく。

国土技術政策総合研究所についても上下水道研究部が新たに設けられた。新設された水道研究室では、水道に関する調査研究を行うこととしており、水道事業の効率化等に資する取り組みを行っていくこととしている。加えて、能登上下水道復興支援室を石川県七尾市内に設置し、能登半島地震からの復旧・復興を支援することとしている。

3. 法令・予算等制度の変更点

1) 水道法等の改正

水道整備・管理行政のうち、水質基準の策定等の水質又は衛生に関する事務については、厚生労働大臣から環境大臣に移管された。今後は、水道法に関する事務について、国土交通省と環境省が連携し、対応することとなる。例えば、水道事業の認可に関する事務については、国土交通省が環境省に意見聴取を行い、環境省が水質基準を新たに定める場合は、国土交通省に意見聴取を行うこととなる。

今般、水道事業における災害対応の機能強化を図るた

め、公共土木施設災害復旧事業費国庫負担法に基づく国庫負担の対象となる施設に水道が追加された。これにより、水道についても河川、道路、下水道などと同率の国庫負担がなされるようになった。また、激甚災害に対処するための特別の財政援助等に関する法律に基づく激甚災害の際の特別の財政援助の対象にも追加された。なお、令和6年能登半島地震における対応では、早期復旧を支援するため、本法律の補助率を前倒して適用しているところ。

2) 令和6年度水道事業予算の概要

令和6年度予算では、「上下水道一体効率化・基盤強化推進事業」の創設が認められた。施設の老朽化、切迫する大地震への対応などの課題を抱える上下水道について、上下水道一体での効率化・基盤強化の取組みを推進していくことが重要であり、官民連携、新技術の活用等の取組みへの支援を可能とする制度となっている。

また、老朽化や耐震化、経営基盤の強化などの課題解決に資する革新的技術の開発・実装を推進するため、水道事業調査費を拡充し、水道分野における革新的技術実証事業であるA-JUMP（Aquatic Judicious & Ultimate Model Projects）を立ち上げ、国が主体となって革新的技術の実証等を行うことにより、各地方公共団体における革新的技術の導入を促進していく。

4. 能登半島地震における対応について

1) 国土交通省による支援の概要

国土交通省では発災直後から、石川県の現地対策本部に職員を派遣するとともに、各地方整備局からTEC-FORCEを集結し、関係団体の皆様にも協力いただきながら、総力を挙げて対応にあたってきた。延べ2万人・日を超えるTEC-FORCEを派遣し（令和6年3月1日時点。この数字の大きさは東日本大震災に次いで歴代2位。）、24時間体制の応急対策作業を可能とする照明車の派遣、照明車を活用した避難所等への電源供給支援や給水機能付散水車による給水支援等を実施した。

また、今回は上下水道の復旧に向けた支援を担当する職員（以下、上下水道TEC）を現地に派遣した。上下水道TECは日本水道協会の自治体職員及び復旧工事にあた

る管工事業者に同行し、被災道路の啓開に向けた調整など行うなど、国土交通省の強みを活かして上下水道施設の早期復旧に向けた取組みを実施した。

現在も被災地で復旧工事あたっている関係の皆様敬意を表するとともに、国土交通省としても引き続き復旧支援にあたっていく。

2) 上下水道地震対策検討委員会

国土交通省では、令和6年3月に「上下水道地震対策検討委員会」を設置した。委員会では、①上下水道施設の被害をふまえた今後の地震対策のあり方、②被災市町の復興に向けた上下水道の整備の方向性（地域への助言）、③上下水道一体での災害対応のあり方について検討を行うこととしている。

現地に設置した国土技術政策総合研究所 能登上下水道復興支援室も含め、本格的な復旧・復興に向け、しっかりと支援を行っていく。



図-4 給水機能付散水車による給水支援
(石川県能登町)

5. 最後に

今般の水道行政移管を踏まえ、「清浄にして豊富低廉な水の供給を図り、もつて公衆衛生の向上と生活環境の改善とに寄与すること」という水道法第一条に掲げる目的を果たし続けるとともに、水道整備・管理行政の一層の機能強化を図っていくため、皆様のご理解・ご協力をお願いしたい。



日本 - ドイツ - チェコ国際共同研究 - 小規模水施設における UV-LED消毒装置実証 -

東京大学 大学院工学系研究科 都市工学専攻 教授 小熊 久美子

日本科学技術振興機構（JST）の戦略的国際共同研究プログラム（SICORP）では、日本と欧州諸国で多国間共同研究を推進するEIG CONCERT-Japanという枠組みがある。この枠組みにおいて、2019年に「持続可能な社会のためのスマートな水管理（Smart Water Management for Sustainable Society）」分野における国際共同研究の公募があり、筆者は日本-ドイツ-チェコの3か国チームを編成してチャレンジし、採択を頂いた。2020年度にスタートを切った当該プロジェクトは、開始早々にコロナ禍に見舞われるという想定外の展開となったが、3か国で密に連携しながら当初の研究計画を完遂し、2024年3月に4年間の事業を修了した。

共同研究事業は「Innovative UV-LED applications to drinking water and wastewater treatment systems for sustainable water management in future communities（集落規模の持続的水マネジメントを可能にする革新的水処理技術の提案と実証）」と題し、日本は東京大学（代表：小熊久美子）、ドイツはDVGW-TZW（代表：Jutta Eggers）、チェコはマサリク大学（代表：Ludek Blaha）が参画した。ここで、東大小熊研はUV-LEDの水処理応用に関する知見が多く、装置をフィールドで長期運転する実証研究の経験が豊富である。また、DVGW-TZWはドイツガス水協会（Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches）の水技術部門（Technologiezentrum Wasser）であり、紫外線の分野ではドイツおよび欧州の紫外線水処理装置の認証機関として学術界および産業界で国際的に広く認知されている。一方、マサリク大学はチェコ第二の規模を誇る総合大学で、参画メンバーは環境毒性研究センター（Research Centre for Toxic Compounds in the Environment、RECETOX）に所属し、環境中の微量汚染物質（農薬、医薬品、環境ホルモン等）の分析を専門とする毒性学の専門家である。このように、専門性

の異なる3か国のチーム（日本：装置実証、ドイツ：装置性能評価、チェコ：処理水毒性評価）が「紫外線を利用した水処理」という軸のもとに集まり、それぞれの視点から役割を遂行したのが本研究の特徴であった。

本事業の研究体制と各チームの役割を図1に示す。研究目的は、集落水道など小規模な施設でも実装可能な技術の選択肢として、紫外発光ダイオード（UV-LED）による水の消毒を提案することとした。研究期間全体を通して、日本が主導して装置実証を、ドイツが主導して装置性能評価（バリデーション）を、チェコが処理水の毒性評価（微量汚染物質の変化）を行うこととした。この体制により、「中長期的な実証データの獲得」「装置性能評価法の確立」「処理水の安全性評価」を一気に集約し、これを国際社会に発信することを目指した。研究実施に当たり、協力企業数社からUV-LED装置の提供と技術サポートを得られたことは大きな後押しとなった。また、研究の進捗に伴い当初の研究計画を超える取り組みにチャレンジする好機を得て、日本とチェコの間で装置をやり取りし、チェコの現地企業が参画して下水再生処理のパイロット施設でUV-LEDの装置実証を行った。

本共同研究事業で得られた成果として、ドイツDVGW-TZWメンバーが中心となって開発したUV-LED装置性能評価法が、ドイツ国家規格DIN（Deutsches Institute für Normungの略、German Institute for Standardizationの意）として成立する見込みであることは重要である。当該規格は本共同研究の開始以前から慎重に準備されてきたものではあるが、本研究の装置性能評価でこの規格を実際に適用し、手法の合理性の検証や実務的な作業負荷の確認が行われたことは、共同研究参画者の一人として誇らしく思う。なお、当該規格は、年内をめどに最終ドラフトを国の規格審査委員会に提出し、最終承認へ向けた手続きに移ると聞いている。ドイツのDIN開発のプロセスを間近に見て特に印象的だった

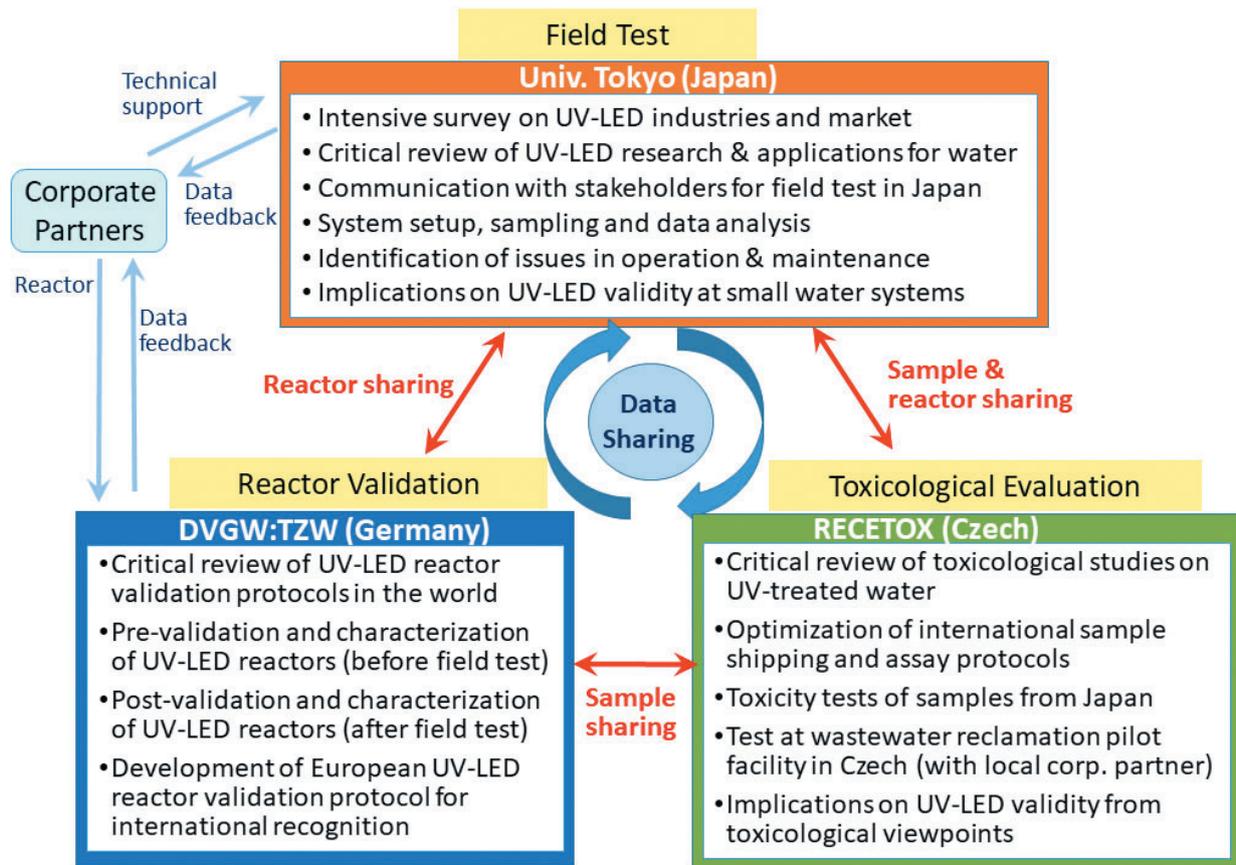


図1. 研究体制と各国および協力企業の役割

のは、開発者（DVGW-TZW）がある程度の「案」をまとめた段階で、関係企業（過去に紫外線装置の性能評価をDVGW-TZWに依頼したことがある企業、今後の依頼に興味を示している企業など）に広く声をかけて公開でのワークショップを開き、そこで指摘された企業の意見を「案」の修正に反映するプロセスを丁寧にとっている点である。日本のパブリックコメント制度と同様の趣旨と思われるが、対面での公開説明会、その場（および事後書面）での質疑、質疑を踏まえた規格案の修正などは、「新技術をいかに社会実装するか」という命題を審査機関と企業が共有し、両者がともに汗を流すイメージそのものであった。

また、共同研究で得られた知見を国際発信したことも、本研究の重要な成果である。UV-LED技術と応用に関する国際会議2023（ICULTA 2023, ベルリン）や、国際紫外線協会世界会議（IUVA 2023, ドバイ）でのメンバーからの口頭発表は、成果を紫外線の研究者や実務者に知らせる好機となった。また、日本が担当した

実証研究の成果は、すでに国内外の学術誌に発表しており（Oguma 2023; 小熊 2024），その一例として大腸菌濃度（CFU/100mL）の経時変化を図2に示す。図2において、原水（河川水）の大腸菌陽性率は96%（26試料中25試料が陽性）で、突発的に高濃度になる現象などが観測されたが、UV-LED処理水では大腸菌は不検出または低濃度（最大で4 CFU/100mL）となり、1年間の試験期間中に観測された大腸菌不活化率の最大値は2.3log超であった。なお、この論文（Oguma 2023）は当該学術誌の月間論文閲覧数で一位を獲得するなど、国際的な耳目を集めた。なお、現在は、3カ国メンバーが共同執筆者となる国際共著論文の発表へ向けて準備を進めている。

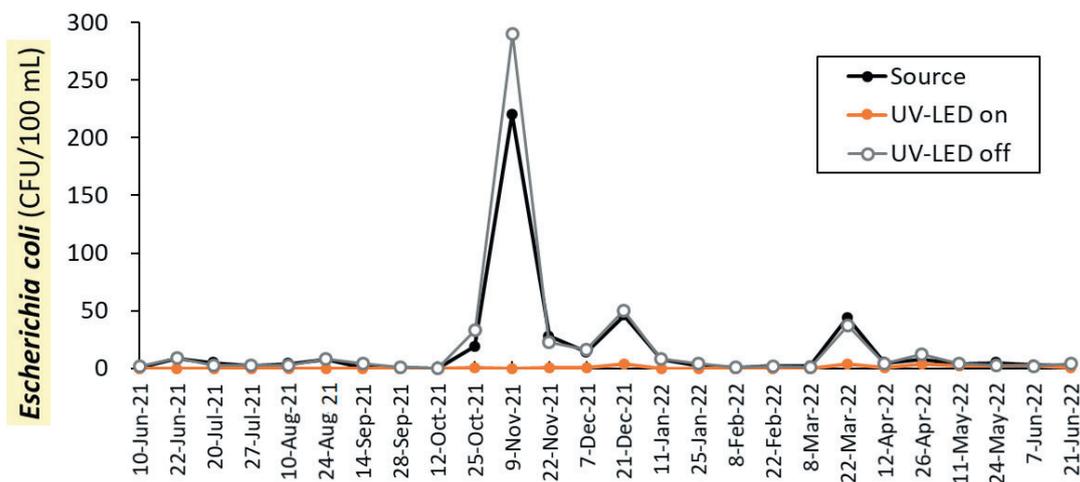


図2. UV-LED照射による大腸菌濃度の変化
 (Source: 未処理原水、UV-LED on: UV-LED処理水、UV-LED off : 対照試料)
 (Oguma 2023のSite Aの結果を一部改変)

以上、日本-ドイツ-チェコ国際共同研究の概要と成果の一部を紹介した。本研究を通じて、小規模水施設の処理水質や維持管理に関する問題意識が欧州でもとても高いことを実感した。さらに、小規模水施設に適した技術としてUV-LEDを提案することに、国際社会から予想以上の共感を得た。

公共水道にアクセスできない地域や、水道インフラの維持が将来的に社会的合理性を失う地域は、先進国と途上国の別なく、また洋の東西を問わず存在する。そのような地域で紫外線技術が安全な水供給の実現に資することを心から願う。

参考文献

Kumiko Oguma, Field demonstration of UV-LED disinfection at small and decentralized water facilities. *Journal of Water & Health*, jwh2023192, 2023.

小熊久美子. 紫外発光ダイオードを用いた水の消毒-小規模な水供給施設における実証と実装-. *水環境学会誌* Vol. 47(A), No. 3, 95-98, 2024.



UV消毒と今後のUV LED技術を中心としたドイツの飲料水処理と消毒の理念 Philosophy of drinking water treatment and disinfection in Germany with a focus on UV disinfection and upcoming UV LED technology

TZW: DVGW-Technologiezentrum
Wasser

Jutta Eggers & Tim Schwarzenberger

Multi-barrier Principle

In Europe, and particularly in Germany, it has become clear over the past decades that ensuring a hygienically safe drinking water supply requires not only technically flawless extraction and treatment of drinking water but also the consistent protection of drinking water resources. These three pillars are referred to as the "Multi-Barrier Principle." In the Multi-Barrier Principle, the catchment area for water sources (groundwater, spring water, reservoirs, lakes) serves as the first barrier. It is crucial to consistently protect the resources intended for drinking water extraction within these catchment areas. Alongside the stringent protection of catchment areas, ensuring the quality of drinking water also relies significantly on proper extraction, treatment, storage, transportation, and distribution based on generally recognized engineering standards. It is essential that the correct products and procedures are chosen at all stages of the drinking water supply, from extraction to distribution, constituting the second barrier. The responsibility of the water supplier ends at the transfer point in the house, typically at the main shut-off valve in the water meter system. At this transfer point, it is crucial to ensure that water of drinking quality is provided to the consumer. Thus, the house installation represents the third barrier, ensuring that the drinking water delivered by the water supplier reaches consumers consistently in the same quality. The materials used for pipes, pipe fittings, and fixtures are of particular importance in this regard.

In Germany, nearly 7,000 water supply companies ensure the supply of 80 million German citizens. On average, each person consumes 135 liters of drinking water per day. Groundwater (including spring water) accounts for approximately 70 percent of

drinking water production in Germany, while surface water resources (reservoirs, bank filtrate, recharged groundwater, direct abstraction from rivers and lakes) account for around 30 percent.

Disinfection Practice

In the international context, Germany stands out as one of the few countries where disinfection of drinking water is not mandatory, neither during treatment nor distribution. While the German Drinking Water Ordinance (DWO) does not mandate disinfection, raw waters contaminated with microorganisms must undergo treatment and disinfection. About half of German water utilities distribute drinking water without any disinfection measures, as their raw water sources, such as deep groundwater from confined aquifers, are not microbially contaminated. However, other sources, such as surface water require efficient treatment and disinfection. In such cases, chlorine, chlorine dioxide, ozone, or UV with type-tested UV disinfection devices must be used for disinfection according to the German DWO.

In Germany, it is not obligatory to maintain disinfectant residuals within the distribution systems. Therefore, many distribution systems of German drinking water utilities, or at least significant portions of them, are free from disinfectant residuals. The use of chemical disinfectants such as chlorine, chlorine dioxide, and ozone, with the known issue of generating health-hazardous disinfection by-products, has been declining for years. UV treatment, a physical disinfection method, is increasingly being used for drinking water disinfection, eliminating the need for chemical additives. More than half of German water suppliers that perform disinfection already use UV devices. The availability of type-tested and certified UV devices,

which have demonstrated a disinfection efficacy of at least 400 J/m² and ensure safe disinfection of drinking water, has significantly contributed to this trend.

UV Disinfection

The fundamental requirements for UV devices were established in the DVGW (German Technical and Scientific Association for Gas and Water) guideline W 293 in 1994 and in the testing standard W 294 in 1997. The revised version of the DVGW guideline W 294 "UV Devices for Disinfection in Water Supply" was published in 2006, defining requirements not only for testing UV devices but also for their operation. In recent years, comprehensive revisions of the guideline W 294 have been carried out. The requirements and testing of UV LP devices have been harmonized in Germany and Austria, resulting in the publication of DIN 19294-1 and the new ÖNORM M 5873-1 in Austria in 2020.

Currently, work is underway to define requirements for UV MP devices, which will be published in the same series of standards as DIN 19294-2. The publication of this draft standard is scheduled for 2024.

As part of the type testing, components essential for monitoring and generating UV radiation (duty sensors, UV lamps and electronic ballasts) are characterized. A central part of each type test is the biosimetric testing of the disinfection efficacy of the UV device. This involves determining the inactivation rate of a test organism with known UV sensitivity at different water flow rates, irradiances, and water qualities (variation of the UV transmission of the test water). Based on these data, the suitability and operational characteristics of the UV device are determined, requiring a minimum reduction equivalent fluence of 400 J/m² (based on a wavelength of 254 nm) to achieve at least 4-log reduction (99.99%) of hygienically relevant bacteria, viruses, and protozoa, ensuring safe disinfection.

In Germany, more than 150 tested and certified types of UV devices are available on the market, capable of safely disinfecting flows of up to 5,000 m³/h. Only mercury vapor lamps are used as radiation sources in

UV devices, which have been established as technically mature and cost-effective products for many decades.

UV LEDs

While UV disinfection offers many advantages, the drawbacks of the lamp types used should not be overlooked, including the risk of breakage, the high operating temperatures (leading to thermally induced deposits), required warm-up time, and especially the highly toxic heavy metal mercury contained therein. In this context, the Minamata Convention on Mercury, ratified in 2017, imposes global bans and restrictions on the manufacturing, trade, and sale of mercury-containing products, including mercury vapor lamps. In this context, the development and application of mercury-free radiation sources such as UV LEDs are becoming increasingly important.

UV LEDs possess properties that are immensely advantageous for drinking water disinfection. They exhibit relatively narrowband emissions with a bandwidth of approximately 10 to 12 nm and can be tailored to the disinfection process without emitting side peaks. UV LEDs contain no toxic substances, including mercury. Compared to the lamp types described earlier, they are very compact, robust, and shatterproof, eliminating the need for additional protection against glass breakage.

Long-lasting and maintenance-free UV LEDs achieve their performance in nanoseconds and can be regulated promptly over a wide power range. They are on-demand ready, allowing for energy-efficient, cost-optimized control and extended lifetime of components. The new technology is more environmentally friendly and more economical than conventional radiation sources. As a result, the use of UV LEDs is moving into focus for water disinfection in the public sector, driven by technical progress and the potential ban on mercury.

The path to a standard for UV LED-based disinfection devices

As mentioned earlier, biosimetric testing and

technical characterization by an accredited testing laboratory, followed by certification, are prerequisites for the use of UV devices. However, both the aforementioned DVGW guideline W 294 and DIN 19294-1 for ND lamps exclusively consider mercury-containing UV lamps as radiation sources. These regulations are not directly applicable to UV LED disinfection devices. Consequently, this technology is currently not permitted for drinking water disinfection in Germany. The development of a corresponding standard for UV LED-based disinfection devices is therefore essential for the development, type testing, approval, and market introduction for drinking water disinfection.

In Germany, research and application of UV LEDs have been ongoing for years. The TZW: DVGW Water Technology Center is involved in various joint research projects in this regard and is contributing to the development of LED-based solutions for UV disinfection of drinking water. Following the completion of these research projects and driven by significant political and industrial interest in replacing mercury vapor lamps with mercury-free UV LEDs, corresponding standardization activities have commenced.

The findings of these research projects will be directly incorporated into the DIN standard for UV LED-based disinfection devices. Open questions will be clarified in a joint project (DINoLED) funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, which was launched in May 2021 and is co-financed by the DVGW.

The standard, which is currently still under development, will be based on DIN 19294-1 (UV devices with LP lamps), which is to be modified in all requirements for the UV sources and the resulting consequences for UV LED based disinfection devices. Various monitoring and testing concepts are being evaluated and tested on a dedicated disinfection reactor equipped with UV LEDs. Detailed considerations and investigations include the technical characterization of components, permissible tolerances, LED aging and

failure scenarios. Another key aspect of the work is determining the spectral sensitivity of *Bacillus subtilis* spores, which are used as test organisms for assessing disinfection efficacy. The results will contribute to the development of a biosimetric test concept for UV LED-based water disinfection devices.

The central outcome of the project is to establish a normative basis for the regulated area of application of UV drinking water disinfection and to minimize the consequences of a future mercury ban in the EU. The new test standard enables reliable development, testing and certification of LED-based UV devices, which will also gain international acceptance and implementation in drinking water treatment. Water suppliers will have access to innovative, energy-efficient, and secure technology for future-proof drinking water disinfection. This means that in future a disinfection process will be available that does not require the addition of chemicals containing chlorine and does not use mercury vapor discharge lamps, making it significantly more environmentally sustainable. The standardization work of this project will contribute to the provision of globally standardized methods for characterizing and monitoring UV LED-based drinking water disinfection for the national and international water sector.

マルチバリア原則

ヨーロッパ、特にドイツでは、衛生的に安全な飲料水の供給を確保するためには、技術的に完璧な飲料水の取水と浄水処理だけでなく、飲料水源の一貫した保護が必要であることが、過去数十年の間に明らかとなった。これら3つの柱は、「マルチバリア原則」と呼ばれている。

「マルチバリア原則」では、水源（地下水、湧水、貯水池、湖沼）の集水域が第一のバリアとなる。これらの集水域内で飲料水を取水するための資源を一貫して保護することが極めて重要である。集水域の厳格な保護と並んで、飲料水の水質確保もまた、一般に認められた工学的基準に基づく適切な取水、浄水、貯水、配水、および給水に大きく依存している。取水から給水までの飲料水供給のすべての段階において、正しい製品と手順が選択されることが不可欠であり、これが第2のバリアとなる。水道事業者の責任は、家屋までの給水地点、一般的には水道メーターシステムの止水栓で終わる。この給水地点では、飲用に適した品質の水を確実に消費者に供給することが重要である。したがって、配水および給水は第3のバリアとなり、水道事業者から供給される飲料水が一貫して同じ水質で消費者に届くことを保証する。この点で、配管、管継手、器具に使用される材料は特に重要である。ドイツでは、約7000の給水事業者が8000万人のドイツ国民の給水を確保している。平均して、一人一人が一日に135リットルの飲料水を摂取する。ドイツでは、地下水（湧水を含む）が飲料水源の約70%を占め、地表水（貯水池、堤防ろ過水、涵養された地下水、河川や湖沼からの直接取水）が約30%を占めている。

消毒の実施

国際的に見ても、ドイツは飲料水の処理中も配水中也消毒が義務付けられていない数少ない国のひとつである。ドイツの飲料水条例（DWO）は消毒を義務付けていないが、微生物に汚染された原水は浄水処理と消毒を受けなければならない。ドイツの水道事業者の約半数は、原水が微生物汚染されていない閉鎖帯水層からの深層地下水などであるため、消毒なしで飲料水を配水している。しかし、地表水などの他の水源では、効率的な浄水処理と消毒が必要である。このような場合、塩素、二酸

化塩素、オゾン、またはドイツDWOによる型式試験済みのUV消毒装置を使用したUV、のいずれかの消毒方法を使用しなければならない。

ドイツでは、配水系統内の残留消毒剤を維持する義務はない。そのため、ドイツの飲料水事業者の配水システムの多く、あるいは少なくともそのかなりの部分には、消毒剤が残留していない。塩素、二酸化塩素、オゾンなどの化学消毒剤の使用は、健康に有害な消毒副生成物の発生という問題が知られているため、ここ数年減少している。物理的な消毒法であるUV処理が飲料水の消毒に使われるようになってきており、化学添加物の必要性がなくなっている。消毒を行っているドイツの水道事業者の半数以上が、すでにUV装置を使用している。少なくとも40mJ/cm²の消毒効果を実証し、飲料水の安全な消毒を保証する、型式試験済みで認証済みのUV装置が利用できるようになったことが、この傾向に大きく寄与している。

UV消毒

UV装置の基本的な要件は、1994年にDVGW（ドイツガス・水技術科学協会）のガイドラインW 293で規定され、1997年に試験規格W 294で確立された。2006年にはDVGWガイドラインW 294「水道における消毒のためのUV装置」の改訂版が発行され、UV装置の試験だけでなく、その運用に関する要件も定義された。近年、ガイドラインW 294の包括的な改訂が行われた。ドイツとオーストリアでは、低圧UV装置の要件と試験が調和され、2020年にオーストリアでDIN 19294-1と新しいÖNORM M 5873-1が発行された。

現在、中圧UV装置の要件を定義する作業が進行中であり、同シリーズの規格DIN 19294-2として2024年に発行される予定である。

型式試験の一環として、UV照射の監視と生成に不可欠な構成機器（設置UV強度計、UVランプ、電子安定器）の特性評価が行われる。各型式試験の中心的な部分は、UV装置の消毒効果を確認するための生物線量計試験である。これは、異なる試験流量、UV照度、水質（試験水のUV透過率の変化）において、UV感受性が既知の供試微生物の不活性化率を測定することが含まれる。これらの

データに基づいて、衛生的に関連する細菌、ウイルス、原虫の少なくとも4 log (99.99%) 不活化を達成するために必要な40mJ/cm² (波長254nmに基づく) の最小換算UV照射量 (REF) に対するUV装置の適合性と動作特性が決定され、安全な消毒が保証される。

ドイツでは、最大5000m³/h (120,000m³/日) の処理水量を安全に消毒することができる150種類以上の試験・認証済みUV装置が市販されている。UV装置のUV光源として使用されているのは水銀ランプのみであり、何十年も前から技術的に成熟し、費用対効果の高い製品として確立されている。

UV LED

UV消毒には多くの利点がある一方で、ランプが破損する危険性、動作温度の高さ (熱による析出物の発生)、ウォームアップ時間が必要なこと、特に毒性の高い重金属である水銀がランプに含まれること、などの欠点も見落とされるべきではない。この文脈において、2017年に批准された「水銀に関する水俣条約」は、水銀ランプを含む水銀含有製品の製造、取引、販売を世界的に禁止・制限している。こうした中、UV LEDのような水銀を含まないUV光源の開発および応用はますます重要になっている。

UV LEDは、飲料水の消毒に非常に有利な特性を持っている。波長帯域幅が約10~12nmと比較的狭いため、サイドピークを発生させることなく消毒プロセスに適合させることができる。UV LEDは、水銀などの有害物質を含まず、前述のランプタイプに比べ非常にコンパクトで堅牢、飛散防止機能を備えているため、ガラスの破損に対する追加の保護が不要である。

長寿命でメンテナンスフリーのUV LEDは、ナノ秒単位でその性能を発揮し、広い出力範囲で迅速に調整可能である。オンデマンドで使用できるため、エネルギー効率に優れ、コストを最適化した制御が可能で、構成機器の寿命延長が可能となる。この新技術は、従来のUV光源よりも環境にやさしく経済的である。このため、UV LEDの使用は、技術的進歩と水銀の潜在的禁止により、公共部門の水消毒において注目されつつある。

UV LEDを用いた消毒装置の標準化への道

前述したように、認定試験所による生物線量計試験と技術的特性評価、それに続く認証が、UV装置を使用するための前提条件である。しかしながら、前述のDVGWガイドラインW 294およびNDランプに関するDIN 19294-1は、いずれも水銀含有UVランプをUV光源としてのみ考慮している。これらの規制はUV LED装置には直接適用されない。そのため、この技術は現在ドイツでは飲料水消毒には使用できない。したがって、UV LEDを使用した消毒装置の開発、型式試験、承認、および飲料水消毒市場への導入には、対応する規格の策定が不可欠である。

ドイツでは、UV LEDの研究と応用が長年にわたって続けられている。TZW : DVGW水技術センターは、この分野における様々な共同研究プロジェクトに参加し、飲料水のUV消毒のためのLEDベースのソリューションの開発に貢献している。これらの研究プロジェクトが完了し、水銀ランプから水銀フリーのUV LEDへの置き換えに対する政治的・産業的関心が高まったことから、対応する標準化活動が開始された。これらの研究プロジェクトの成果は、UV LEDベースの消毒装置のDIN規格に直接組み込まれる。2021年5月に発足したドイツ連邦経済エネルギー省の資金提供およびDVGWの共同出資による共同プロジェクト (DINoLED) において、未解決な問題が解明される。

現在開発中のこの規格は、DIN 19294-1 (低圧UVランプを使用したUV装置) をベースとしたもので、UV光源に関するすべての要求事項が修正され、その結果、UV LEDを使用した殺菌装置規格に変更される予定である。UV LEDを搭載した消毒専用リアクターでは、さまざまな監視と試験の方法が評価・試験されている。詳細な検討と調査には、構成機器の技術的特性、許容公差、LEDの経年変化、故障シナリオなどが含まれる。この研究のもう一つの重要な側面は、消毒効果を評価するための供試微生物として使用される枯草菌芽胞の波長感受性を決定することである。この結果は、UV LEDを使用した水消毒装置の生物線量計試験方法の開発に貢献する。

このプロジェクトの中心的な成果は、飲料水UV消毒の規制適用分野の規範的基礎を確立し、EUにおける将来の

水銀禁止の影響を最小限に抑えることである。この新しい試験規格により、LEDベースのUV装置の信頼性の高い開発、試験、認証が可能となり、飲料水処理における国際的な受け入れと導入が実現する。水道事業者は、革新的でエネルギー効率に優れ、安全性の高い技術を利用することで、将来にわたって飲料水消毒を行うことができるようになる。つまり、将来的には塩素を含む化学物質を添加する必要がなく、水銀放電ランプを使用しない消毒プロセスが利用可能となり、環境的に大幅に持続可能なものとなる。このプロジェクトの標準化作業は、UV LEDを用いた飲料水消毒の特性評価と性能監視のための世界的に標準化された方法を、国内外の水部門に提供することに貢献する。



都市下水リサイクルのためのUV LEDのパイロット試験 Pilot testing of UV LED for recycling of municipal wastewater

Main authors:

Lucie Bláhová¹ and Luděk Bláha¹

With contributions from

Michal Bittner¹, Kateřina Bočková¹, Kumiko Oguma², Tim Schwarzenberger³, Jutta Eggers³, Jaroslav Lev⁴, Michaela Majčinová⁴

¹ Masaryk University, Faculty of Science, RECETOX

² Department of Urban Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

³ TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser (German Water Centre)

⁴ ASIO tech, s.r.o.

Introduction

Water scarcity is becoming a major problem for many parts of the world, and there are clear needs to advance technologies allowing for reuse or recycling of waste waters. In the European Union, new regulation on water reuse sets criteria for indicators including microbial (fecal contamination) and hazardous micropollutants (Council of the EU 2020; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1598957517761&uri=CELEX:32020R0741>). To achieve high quality of recycled wastewater, innovative technologies should be validated such as advanced oxidation processes (AOPs) including UV irradiation. UV technologies have primarily been used for final treatment of drinking water, namely for inactivation of bacteria and viruses (Malayeri et al. 2016). But the anti-bacterial efficiencies were also shown in final purification steps of wastewaters (US EPA 2006; <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=901T0000.txt>). However, the currently used devices use mercury (Hg), which is being banned globally under the United Nations Minamata Convention (<https://minamataconvention.org/>) The mercury-free alternatives are based on light-emitting diodes (LED) with flexible UV systems, and have been implemented for high UV transmission applications such as drinking waters (e.g. <https://aquisense.com/uvc-led-technology/>). The unique properties of UV LED technology make them a viable option for disinfection at small or decentralized drinking water systems as shown in the USA (Hull et al., 2019) and Japan (Oguma and Watanabe 2020; Oguma, 2023). UV LED might also serve for final

treatment of wastewaters intended for recycling but the characterization of UV LED performance in the complex matrix containing high organic material load, large numbers of microbiota or elevated micropollutant levels, needs research. Here we report outcomes of one of the first pilot testing of UV LED reactors at the wastewater treatment plant (WWTP) and comparison with conventional mercury-based UV lamp, which was performed within the international project InLEDApp supported by the EIG CONCERT Japan programme.

Experimental design

Two commercially available UV LED modules were investigated including bench-top-sized, 55 cm long UV LED reactor (Nikkiso) and a handy size with a total length of 9 cm POU device (Asahi-Kasei/Crystal IS, Klaran). The UV LED reactors were installed at the WWTP Modrice, Brno, Czech Republic, which is treating municipal wastewater from about 640 thousand equivalent inhabitants. The conventionally treated effluent (i.e. mechanical-biological treatment with nitrification and denitrification processes and phosphorus removal by chemical precipitation) was further with AZUD Helix 2 (mechanical filter with discs filtering elements, 130 µm pores, low pressure, self-cleaning, in-line), and the outlet was then connected to the two UV LED modules and a conventional low pressure mercury UV lamp installed in parallel (Figure 1, panel A). This setup allowed direct comparison of the performance using the same inlet wastewater. Both UV LED systems underwent a biosimetric testing approach at TZW Karlsruhe,

Germany, to determine the disinfection performance and thus enable prediction of log removal for pathogens during operation. Samples of wastewaters prior and after UV treatments were collected from the inlet (Valve V0, cf Fig. 1A) and outlets (Valves V1, V2, V3) in periods 1-168 h after the installation while the flow rates were different for different UV reactors. Water samples were analyzed for microbiological parameters and micropollutant levels. The microbiological parameters included total cultivable bacteria at 22 °C

and 36 °C, *Escherichia coli*, thermotolerant and other coliforms, *Pseudomonas aeruginosa* and Enterococci using the methods respected the Regulation 2020/741 of the European Parliament and the Czech Standard ČSN 757143. The inactivation of microorganisms in the effluent after UV and UV LED treatments was determined as a negative log of ratio of bacterial concentrations (UV output /input). In addition, the effects of UV on indicator pharmaceuticals as representatives of micropollutants were studied using

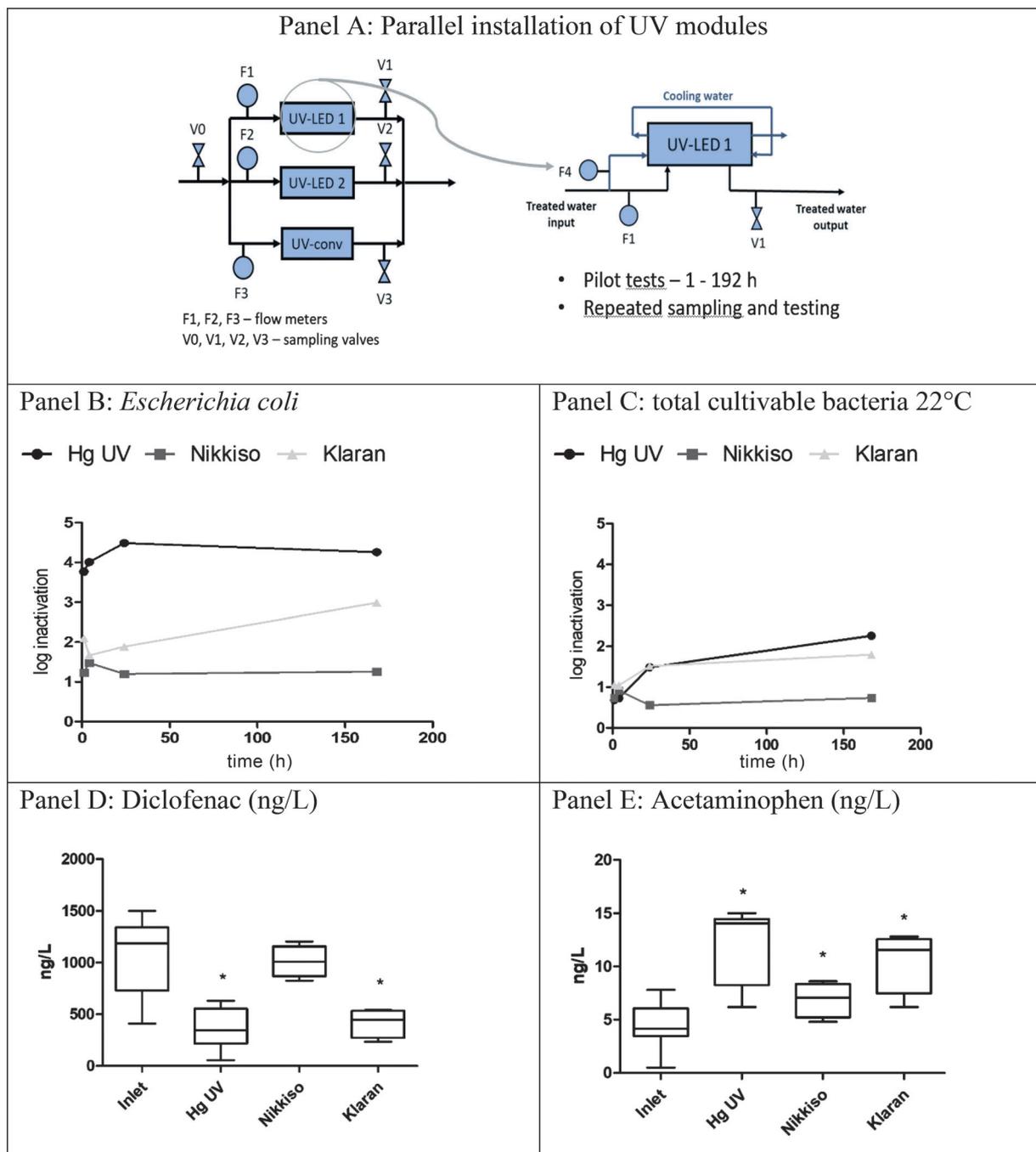


Figure 1

the multitarget LC-MS/MS (UPLC Acquity with mass spectrometer Xevo TQS, Waters, Milford, MA, USA) following pre-concentration on solid phase extraction cartridges (SPE Oasis HLB, Waters).

Results and discussions

As shown in Figure 1, the conventional low pressure Hg UV reactor had high potency to inactivate bacteria in specific sub-groups (i.e. species) such as *E. coli* (see example Figure 1B) with log inactivation ranging up to 4.8. The lowest log inactivation after Hg-UV irradiation was observed for *Pseudomonas aeruginosa* (data not shown). For UV LED, log inactivation ranged between maximum 4.6 (Nikkiso, coliform bacteria, 1-24 h) to minimum 0.1 (Nikkiso, *Pseudomonas aeruginosa*, 1-24h). However, when comparing the total anti-bacterial effectiveness of UV irradiation (effects on all cultivable microorganisms), both Hg UV and Klaran UV LED reactors showed comparable anti-bacterial efficiency (Figure 1, panel C) with log inactivation around 2. These findings correspond to previous study that showed similar inactivation of *E. coli* around 3 logs in batch laboratory experiments with wastewaters (Zhou et al., 2017). Overall, the pilot testing at WWTP confirmed anti-microbial efficiencies of UV LED despite of elevated levels of microorganisms (up to 10^4 CFU/mL total cultivable microorganisms), which is several orders of magnitude higher in comparison with drinking waters, for which UV LED devices were previously introduced.

In addition, our study further investigated changes in micropollutant concentrations. From total 13 micropollutants, concentration of 8 compounds did not significantly change after UV (data not shown). For 4 pharmaceuticals, we observed a significant decrease of concentrations after UV (diclofenac – shown in Fig. 1D; sulfamethoxazole, ciprofloxacin and naproxen). This corresponds to some previous studies that described UV-induced degradation of micropollutants at WWTP (Pereira et al., 2007, Wang et al. 2014). Interestingly, our study also revealed an opposite trend for acetaminophen (Fig. 1, panel E) with

systematic and significant increase of concentrations after UV. This might be explained by the release of acetaminophen from its conjugated forms, i.e. the metabolites naturally released in human excreta. Recent studies indicate that conjugates reach WWTP and may pass through treatment processes (Zonja et al. 2016; Gewurtz et al. 2022). Thus, the hypothesis that UV might cause deconjugation and release of active hazardous micropollutants requires further research attention to allow for full risk assessment of the advanced wastewater treatment technologies.

Figure 1: Comparison of conventional Hg UV reactor and two UV LED modules during one week-long pilot testing at WWTP (sampling times 0-168h after installation). (A) Parallel installation of UV modules for pilot testing. The UV-induced inactivation of *E. coli* (B) and total bacteria at 22°C (C), degradation of diclofenac (D), and increase in concentrations of acetaminophen (E, linked to the UV-release from metabolic conjugates)

Conclusions

The present study documents one of the first UV LED testing at WWTP providing, thus, solid data for initial assessment of this innovative technology for wastewater treatment. Our study showed good efficiency of UV LED against microorganisms, which was well comparable with the conventional mercury low pressure UV module. The effects of UV on micropollutants were documented and included both photolysis (degradation) as well as increase of concentrations (release of parent pharmaceuticals from their metabolites – conjugates). In summary, despite of a complex nature of the wastewater matrix (elevated organic matter, colloids and particles which affect UV transmittance; high concentrations of microorganisms), the results of the present pilot testing showed good efficiencies opening the way for future potential applications of UV LED technologies.

Acknowledgements

Supported by the EIG CONCERT Japan project

InLEDApp (2020-2024) “Innovative UV-LED applications to drinking water and wastewater treatment systems for sustainable water management in future communities”.

References

- Gewurtz, S.B., Teslic, S., Hamilton, M.C., Smyth, S.A., 2022. Influence of Conjugation on the Fate of Pharmaceuticals and Hormones in Canadian Wastewater Treatment Plants. *ACS Environ. Sci. Technol. Water* 2, 329–338. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.1c00376>
- Hull, N.M., Herold, W.H., Linden, K.G., 2019. UV LED water disinfection: Validation and small system demonstration study. *AWWA Water Sci.* 1, 1–11. <https://doi.org/10.1002/aws2.1148>
- Malayeri, A. H., Mohensi, M. C., & Bolton, J. R. (2016). Fluence (UV Dose) Required to Achieve Incremental Log Inactivation of Bacteria, Protozoa, Viruses and Algae. *IUVA News* Vol. 18, Issue 3 Fall 2016, S. 4-6.
- Oguma, K. & Watanabe, S. 2020 Field test of ultraviolet light-emitting diode (UV-LED) citace vložena Tim a Jutta) apparatuses as an option of decentralized water treatment technologies (in Japanese). *Journal of Japan Society on Water Environment* 43 (4), 119–126. <https://doi.org/10.2965/jswe.43.119>.
- Oguma, K., 2023. Field demonstration of UV-LED disinfection at small and decentralized water facilities. *J. Water Health* 21, 1369–1384. <https://doi.org/10.2166/wh.2023.192>
- Pereira, V.J., Linden, K.G., Weinberg, H.S., 2007. Evaluation of UV irradiation for photolytic and oxidative degradation of pharmaceutical compounds in water. *Water Res.* 41, 4413–4423. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.05.056>
- Wang, D., Sui, Q., Lu, S.G., Zhao, W.T., Qiu, Z.F., Miao, Z.W., Yu, G., 2014. Occurrence and removal of six pharmaceuticals and personal care products in a wastewater treatment plant employing anaerobic/anoxic/aerobic and UV processes in Shanghai, China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 21, 4276–4285. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2363-9>
- Zhou, X., Li, Z., Lan, J., Yan, Y., Zhu, N., 2017. Kinetics of inactivation and photoreactivation of *Escherichia coli* using ultrasound-enhanced UV-C light-emitting diodes disinfection. *Ultrason. Sonochem.* 35, 471–477. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.028>
- Zonja, B.; Pérez, S.; Barceló, D. Human metabolite lamotrigine-N2-glucuronide is the principal source of lamotrigine-derived compounds in wastewater treatment plants and surface water. *Environ. Sci. Technol.* 2016, 50, 154–164

はじめに

水不足は世界の多くの地域で大きな問題となっており、下水の再利用やリサイクルを可能にする技術の進歩が強く求められている。欧州連合では、水の再利用に関する新しい規制が設定され、微生物（糞便汚染）や有害微量汚染物質などの指標について基準が定められている（EU理事会2020年）。高品質の再生水を実現するためには、UV照射を含む促進酸化処理（AOP）などの革新的な技術を検証する必要がある。UV技術は、主に飲料水の最終処理として、細菌やウイルスの不活化に用いられてきた（Malayer et al., 2016）。一方、UV技術による微生物不活化効果は下水処理の最終段階でも示されている（米国環境保護庁2006）。しかしながら現在使用されているUV装置は、国連水俣条約で世界的に禁止されている水銀(Hg)を使用している。水銀フリーの代替品は発光ダイオード（LED）をベースとした柔軟なUVシステムであり、飲料水のようなUV透過率の高い用途に実装されている。UV LED技術の独特の特性により、米国（Hull et al., 2019）および日本（Oguma and Watanabe, 2020, Oguma, 2023）で示されているように、小型または分散型の飲料水システムの消毒技術として導入可能な選択肢である。UV LEDは、リサイクルを目的とした下水の最終処理にも役立つ可能性があるが、有機物質負荷が高く、微生物群が多数存在し、高レベルの微量汚染物質を含む複雑な条件下におけるUV LED装置の性能評価には研究が必要である。ここでは、EIG CONCERT Japanプログラムの支援を受けた国際プロジェクトInLEDAppの中で実施された、下水処理施設（WWTP）でのUV LED装置の最初のパイロット試験の結果と、従来の水銀ベースのUVランプ装置との比較について報告する。

実験計画

全長55cmの卓上型UV LED装置（日機装）と全長9cmのハンディサイズUV LED装置（旭化成／クリスタルIS、クララン）の2つの市販UV LED装置を調査した。UV LED装置は、約64万人の住民からの都市下水を処理しているチェコ共和国ブルノのモディライス下水処理施設に設置された。従来処理された流出水（すなわち、

硝化および脱窒プロセスによる機械的生物学的処理および化学的沈殿によるリン除去）は、さらに、AZUDヘリックス2（ディスクフィルター、130mm孔、低圧、自己洗浄、インラインを有する機械的フィルター）で処理され、出口は、2つのUV LED装置および並列に設置された従来の低圧UVランプ装置に接続された（図1、パネルA）。この設定により、同じ下水を使用した性能を直接比較することができた。両UV LED装置は、ドイツのTZW Karlsruheで生物線量試験を実施したことにより、消毒性能を判定しパイロット試験における病原微生物のlog不活化率を予測することが可能となった。UV処理前後の下水試料を、注入口（バルブV0、cf図1A）および排出口（バルブV1、V2、V3）から、設置後1～168時間で採取した。水試料の微生物分析および微量汚染物質分析を行った。微生物分析は、22℃および36℃における全培養可能細菌、大腸菌、糞便性大腸菌および他の大腸菌群、緑膿菌および腸球菌を、欧州議会の規則2020/741およびチェコ標準ČSN 757143に準拠した方法を用いて実施した。低圧UVランプおよびUV LED処理後の流出水中の微生物の不活化率を、細菌濃度の負の対数（UV装置流出/流入）として測定した。加えて、微量汚染物質の代表としての指示薬製剤に対するUVの効果、固相抽出カートリッジ（SPE Oasis HLB, Waters）上での予備濃縮後に、マルチターゲットLC-MS/MS（質量分析計Xevo TQS, Waters, Milford, MA, USA）を用いて分析した。

結果と議論

図1に示すように、従来の低圧UVランプ装置は、大腸菌（図1B参照）のような特定のサブグループ（すなわち種）の細菌を不活化する能力が高く、log不活化率は4.8までの範囲であった。低圧UV照射後の最低のlog不活化率は、緑膿菌で観察された（データは示されていない）。UV LEDについて、log不活化率は最大4.6（日機装、大腸菌群、1～24時間）から最小0.1（日機装、緑膿菌、1～24時間）の範囲であった。しかし、UV照射の総不活化効果（全培養可能細菌に対する効果）を比較すると、低圧UVランプ装置とカルランUV LED装置の両方は、log 不活化率が約2と同等の効果を示した（図1、

パネルC)。これらの結果は、下水を用いた回分試験において、大腸菌の3log程度の不活化を示した以前の研究と一致している (Zhouら、2017)。全体として、下水処理施設におけるパイロット試験では、微生物濃度の上昇 (104 CFU/mLまでの全培養可能細菌、これは従来UV LED装置が導入されてきた飲料水に比べて数桁高い) にもかかわらず、UV LED装置の不活化効果が確認された。

さらに、著者らの研究は微量汚染物質濃度の変化についても調査した。全13の微量汚染物質から、8化合物の濃度はUV後に有意に変化しなかった (データは示されていない)。4つの医薬品について、UV後の濃度の有意な低下を観察した (図1Dに示すジクロフェナク、スルホメトキサゾール、シプロフロキサシンおよびナプロキセン)。これは、下水処理施設でUV誘発性の微量汚染物質の分解を記述したいくつかの以前の研究に対応する (Pereira et al., 2007, Wang et al., 2014)。興味深いことに、著者らの研究はまた、アセトアミノフェンについての逆の傾向を明らかにし (図1、パネルE)、UV後の濃度の系統的かつ有意な増加を伴った。これは、アセトアミノフェンの抱合体からの放出、すなわちヒトの排泄物中に自然に放出される代謝産物によって説明できる。最近の研究は、抱合体が下水処理施設に到達し、処理プロセスを通過する可能性があることを示している (Zonja et al., 2016, Gewurtz et al., 2022)。したがって、UVが活性有害微量汚染物質の脱抱合および放出を引き起こす可能性があるという仮説は、高度な下水処理技術の完全なリスク評価を可能にするために、さらなる研究が必要である。

図1: 下水処理施設における1週間のパイロット試験中の、従来型の低圧 UVランプ装置と2つのUV LED装置の比較 (設置後0~168hのサンプリング時間)

(A) パイロット試験用UV装置の並列設置、大腸菌 (B) および全細菌の22°CでのUVによる不活化 (C)、ジクロフェナク (D) の分解、アセトアミノフェン (E; UVによる代謝物抱合体からの放出に関連付けられる) の濃度上昇。

結論

本研究は、下水処理施設における最初のUV LED試験の一つであり、下水処理におけるこの革新的技術の初期評価のための確かなデータを提供するものである。我々の研究では、UV LED装置の微生物に対する良好な効果が示され、これは従来の低圧UVランプ装置に匹敵するものであった。微量汚染物質に対するUVの効果については、光分解 (分解) と濃度上昇 (親医薬品の代謝物-抱合体からの放出) の両方が記録された。要約すると、下水成分の複雑な性質 (UV透過率に影響を与える有機物、コロイド、粒子の増加、高濃度の微生物) にもかかわらず、今回のパイロット試験の結果は良好な効果を示し、UV LED技術の将来的な応用の可能性を開いた。

謝辞

EIG CONCERT JapanプロジェクトInLEDApp (2020-2024) 「未来社会における持続可能な水管理のための飲料水・下水処理システムへの革新的なUV-LEDアプリケーション」により支援された。



紫外線照射装置の認定取得と導入の状況

公益財団法人 水道技術研究センター 浄水技術部 主任研究員 渡部 太士

1. はじめに

2007年3月、厚労省は「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」を策定し、非地表水を原水とする施設において、紫外線照射をクリプトスポリジウム等対策（以降、「クリプト等対策」）として位置づけた。その後得られた知見を踏まえて2019年5月にこの指針は改正され、地表水を原水とする施設においても、ろ過処理後であれば紫外線照射がクリプト等対策として認められることになった。現在はこの指針に基づいた対策が進められている。

（公財）水道技術研究センター（以降、「JWRC」）は、有識者で構成される浄水技術支援委員会を設置し、厚労省指針に対応した紫外線照射装置の技術適合認定審査を行っている。

その審査基準として、JWRCは2008年に低圧・中圧ランプを対象とした「紫外線照射装置JWRC技術審査基準」（以降、「旧基準」）を定め、2018年にUV-LEDにおける基準を追加した。

2019年の厚労省指針改正を受けて、JWRCも技術審査基準の改訂を行い、2020年3月に「紫外線照射装置JWRC技術審査基準2019年度版」（以降、「新基準」）を定めた。これ以降は、この基準に従った審査を行っている。

本稿では、旧基準及び新基準に基づく紫外線照射装置の認定状況、及び、日本国内における装置の導入状況について解説する。併せて、紫外線処理技術の適用拡大に向けたJWRCの活動について紹介する。

2. 審査基準改定に伴う取り扱い

旧基準では装置の紫外線照射能力を「通水量の95%以上に10mJ/m²以上」としていたが、新基準では「クリプトスポリジウムが浴びる換算紫外線照射量が12mJ/m²以上」としている。

新基準での審査開始以降、旧基準であらたな認定を取得することはできないが、旧基準で認定を取得した装置（以降、「既認定機種」）の認定は無効になるわけではなく、旧基準の認定品として使用することができる。

既認定機種は新基準で認定を再取得することができる。ただし、新旧の基準で要求される性能は異なるため、新基準で認定を取得するためには新たに審査を行う

必要がある。

既認定機種の認定を新基準で改めて申請する場合には、JWRCのホームページを参照されたい。

3. 紫外線照射装置認定取得状況

2023年度末時点の紫外線照射装置の認定取得件数の推移を図1に示す。なお、認定取得件数には、既認定機種の認定を新基準で再取得したのものも含んでいる。累計で153件であり、2023年度の認定取得件数は19件となっている。

2021年度以降急激に増加しているが、そのほとんどが既認定機種の認定を新基準で再取得したものである。

認定取得件数を光源別に分類すると、低圧ランプについては20企業が認定を取得し、その件数は123件になる。中圧ランプについては6企業24件、UV-LEDについては2企業6件である。

一つの認定で複数の装置を登録できるため、認定取得装置の型式総数は、低圧ランプが189型式、中圧ランプが38型式、UV-LEDが3型式である。なお、型式数については、既認定機種が新基準で認定を再取得したもののについては、重複計上しない。

図2に2023年度末時点の光源別、処理水量別の認定取得装置型式数を示す。出力は小さいが電力消費効率に優れた低圧ランプの装置は小～中処理水量の範囲に、効率は劣るが高出力で省スペース性に優れた中圧ランプの装置は中～大処理水量の範囲に多いことが分かる。

UV-LEDはまだ出力が小さく小処理水量の装置しか認定されていない。効率もまだ低い、無水銀、ウォームアップ不要等の長所があるため、今後の技術的進歩に期待したい。

4. 国内における紫外線照射装置の導入状況

JWRCは、（一社）日本紫外線水処理技術協会（JUVA）の会員企業等の協力を得て、日本国内の浄水プロセスにおける紫外線照射装置の設備単位（複数の照射装置からなるものも1件として計上）の導入状況の調査を実施している。

2022年度末時点の調査結果を図3及び図4に示す（2023年度末の調査結果は2024年9月に公表予

定)。なお、この集計結果は契約済み段階及び工事中の設備を含んでいる。

図3は紫外線照射装置の総設備数と総計画処理水量の推移を示したものである。総設備数は454件（対前年度比2.5%増）、総計画処理水量は1,468千 m^3 /日（対前年度比2.3%増）となっている。

図4に紫外線照射装置の計画処理水量別の設備数を示した。紫外線処理が地表水へと適用拡大となって間もないこともあって、非地表水を原水とする処理水量の小さい設備がほとんどであり、454件中225件（49.6%）と、約半数が1,000 m^3 /日未満となっている。

5. 適用拡大に向けたJWRCの取組み

2019年5月の厚労省指針改正を受け、JWRCは、水道における紫外線処理技術の適用拡大を主な目的として、同年6月から2021年3月まで、UV-ACE（Ultraviolet Application Combination and Extension）プロジェクトを実施した（第一期）。紫外線処理設備の導入と維持管理上の留意事項等の検討及び整理を実施し、「水道における紫外線処理設備導入及び維持管理の手引き」を2021年1月に発刊した。

しかし、クリプト等対策は未だ十分とは言えず、厚労省の調査によれば、2022年3月時点で、対策が必要な国内8,005施設のうち、対策済み施設の割合は5,769施設とその割合は72%に留まっている¹⁾。

このような状況を踏まえ、2022年10月から2024年の3月まで、同第二期プロジェクトを実施した。このプロジェクトでは、実際にクリプト等対策が必要とされている浄水場をモデルにした紫外線処理設備の設置計画を検討し、また、設備導入の際に必要な法令上の申請手続き等の整理を行った。

成果物として「水道における紫外線処理設備導入に関する実務の手引き～基本設計例と申請手続き解説～」を2024年中に発刊する予定である。

紫外線処理設備の導入には「変更認可」を要するなど、未だに手続き上の障壁が高い。一方、紫外線照射がクリプト等対策として位置付けられてから17年が経過し、その技術的実績は積み上げられている。膜ろ過設備と同様に「軽微な変更」として届出で済むようになり、紫外線処理技術の普及がより一層進むことを期待したい。

参考文献

- 1) 水道におけるクリプトスポリジウム等対策の実施状況について（国土交通省HP）<https://www.mlit.go.jp/common/830005178.pdf>



図1 紫外線照射装置の認定取得件数の推移 (2023年度末時点)

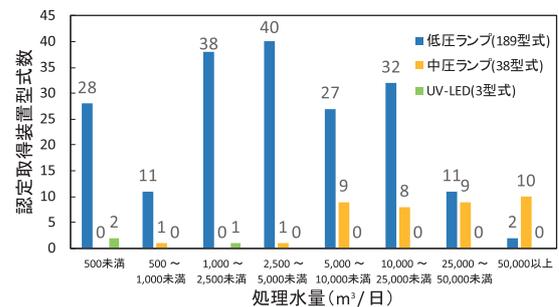


図2 ランプ種類別、処理水量別の認定取得装置型式数 (2023年度末時点)



図3 紫外線照射装置の総設備数と総計画処理水量の推移 (2022年度末時点)

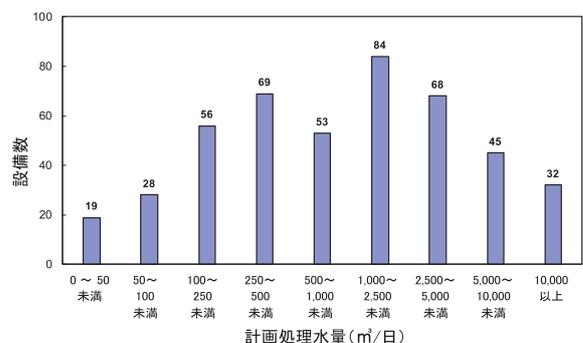


図4 紫外線照射装置の計画処理水量別設備数 (2022年度末時点)



静岡市小規模水道施設見学会報告

千代田工販株式会社 UV システム事業部 UV 技術開発部
リサーチセンター 課長 堀江 和峰

1. はじめに

JUVAでは紫外線技術に関する規格化・標準化の推進、および新技術の広報のため、協会内に専門委員会として技術委員会を設けている。技術委員会では技術力向上を目的として、紫外線水処理施設が設置された施設の見学会を年に一度行っており、昨年度はUV-LED水処理装置が先進的に導入された簡易水道施設を含む2か所の静岡市小規模水道施設を見学した。

2. 静岡市の小規模水道施設の現況概要

静岡市の面積は1,411.93平方キロメートルであり全国で5番目に大きい行政面積である。人口の約98%は市面積の8%に満たない市街地に集積しており市面積のうち約8割は森林である。令和4年3月31日現在で水道法の適用を受ける上水道、簡易水道、専用水道の普及率はそれぞれ97.1%、1.5%、0.4%である。見学した山内浄水場、室野浄水場は共に清水区由比地区山間にあり地元住民組合により運営されている。前者は簡易水道施設、後者は水道法の適用を受けない飲料水供給施設である。

平成28年に発生した由比地区の断水事故を契機に静岡市では174か所の小規模水道施設の現状・課題の調査が実施され、以後整備が進められた。山水を使用するため取水口が詰まりやすい、大雨後の濁水といった内容が多くの施設より挙げられた課題であり、解消のため取水装置を導入しメンテナンスの負担軽減が図られた。整備についての優先事項は維持管理の容易性、低コストであること、であった。

3. 浄水処理方法

水道原水に係るクリプトスポリジウム等の汚染のおそれの判断については上記の通り山水利用する点から多施設においてリスクレベル4のケースが想定された。見学した施設の山内浄水場では図1に示す通り急速ろ過、UV-LED水処理装置による紫外線消毒が行われ、その後塩素

消毒を経て給水栓に配水されている。

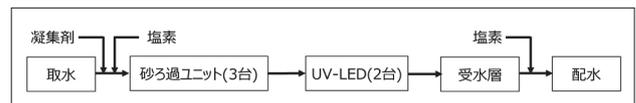


図1 山内浄水場処理フロー図

急速ろ過処理では砂ろ過ユニット3台が設置され、濁度20度以下の原水に凝集剤、塩素を注入し急速攪拌し形成された細かなフロックそのままをろ過するマイクロフロック法にて処理される(図2)。



図2 ユニット型ろ過装置

処理流量は1~2m³/h/台である。濁度2度以下となった処理水が後段の発光ピーク波長280nmのUV-LED搭載の水処理装置で紫外線消毒される。UV-LED水処理装置は2台設置され処理流量は20~30L/min/台とのことであった(図3)。



図3 UV-LED水処理装置

飲料水供給施設の室野浄水場では図4に示す通り、取水された原水は整流された後にプレフィルタを通過した後に限外ろ過膜装置(図5)で膜ろ過処理され、その後塩素消毒が加えられる。降雨後の濁度上昇に留意し自主管理目標値として600秒以上に渡り濁度35度以上を示した際は通水処理を停止するシステムになっている。

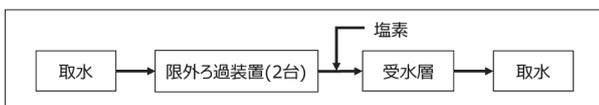


図4 室野浄水場処理フロー図



図5 限外ろ過装置

4. おわりに

都市部から離れた小規模水道施設の多くは経営基盤が脆弱であり、人口減少に伴う更なる経営悪化が危惧される。必然的にクリプトスポリジウム等への対策は遅れがちであり安全性の向上は課題の一つと考えられる。紫外線による消毒は、有害な副生成物を作らない、薬剤の輸送、貯蔵、注入などの管理が不要、設備の維持管理が比較的容易で低コストといったメリットがある。昨今実用化されつつある小型UV-LED水処理装置は水銀紫外線ランプ以上に長寿命の特徴を有することから運営上の負担も少なく小規模水道施設への導入が将来的に進められる可能性がある。一方で水道技術研究センター(JWRC)技術審査基準によるUV-LEDを光源とする認定装置は現時点で僅か3機種である。山内浄水場に設置されたUV-LED水処理装置は認定取得装置ではなかったが、今後は小規模水道施設における紫外線水処理装置の性能・品質保証の在り方についても議論を深めていくことが望まれる。

会員リスト

令和6年4月現在（五十音順）

正会員

岩崎電気株式会社	〒103-0004 東京都中央区東日本橋 1-1-7 野村不動産東日本橋ビル TEL 03-5846-9010
株式会社ウォーターテック	〒108-0023 東京都港区芝浦 3-16-1 中野興産ビル TEL 03-3456-0795
株式会社神鋼環境ソリューション	〒651-0072 兵庫県神戸市中央区脇浜町 1-4-78 本社 TEL 078-232-8115 大阪支社 TEL 06-6206-6746
水道機工株式会社	〒156-0054 東京都世田谷区桜丘 5-48-16 TEL 03-3426-2953（営業統括課）
水ingエンジニアリング株式会社	〒105-0021 東京都港区東新橋 1-9-2 汐留住友ビル 27 階 TEL 03-6830-9055
スタンレー電気株式会社	〒225-0014 神奈川県横浜市青葉区荏田西 2-14-1 横浜技術センター TEL 045-912-9222（UV 事業部）
セン特殊光源株式会社	〒561-0891 大阪府豊中市走井 1-5-23 TEL 06-6845-5111
千代田工販株式会社	〒104-8115 東京都中央区京橋 1-10-7 KPP 八重洲ビル 8 階 TEL 03-3564-5525
月島JFEアクアソリューション株式会社	〒104-0053 東京都中央区晴海 3-5-1 TEL 03-5560-6540（水環境事業本部 事業統括部）
東芝インフラシステムズ株式会社	〒212-8585 神奈川県川崎市幸区堀川町 72-34 TEL 044-331-0808
ドリコ株式会社	〒103-0027 東京都中央区日本橋 2-13-10 日本橋サンライズビルディング 3 階 TEL 03-6262-1421
株式会社西原環境	〒108-0022 東京都港区海岸 3-20-20 ヨコソーレインボータワー 3 階 TEL 03-3455-4441
日機装株式会社	〒105-6022 東京都渋谷区恵比寿 4-20-3 恵比寿ガーデンプレイスタワー 22F TEL 03-3443-3732
株式会社日本フォトサイエンス	〒193-0832 東京都八王子市散田町 5-8-3 TEL 042-667-5641
株式会社フソウ	〒103-0022 東京都中央区日本橋室町 2-3-1 室町古河三井ビルディング 17F（コロド室町 2） TEL 03-6880-2110
フナテック株式会社	〒134-0085 東京都江戸川区南葛西 2-6-22 TEL 03-5679-2700
前澤工業株式会社	〒322-8556 埼玉県川口市仲町 5-11 TEL 048-253-0907（環境ソリューション事業部 第一部）
メタウォーター株式会社	〒101-0041 東京都千代田区神田須田町 1-25 JR 神田万世橋ビル TEL 03-6853-7340（営業本部 営業企画室）
株式会社ヤマト	〒371-0844 群馬県前橋市古市町 118 番地 TEL 027-290-1821（環境事業部）
理水化学株式会社	〒530-0054 大阪府大阪市北区南森町 1-4-10 理水ビル TEL 06-6365-0691

特別会員：民間企業

旭化成株式会社
ヒメジ理化学株式会社

特別会員：団体

特定非営利活動法人 日本オゾン協会
一般財団法人 千葉県薬剤師会検査センター

特別会員：個人

浅見真理 大瀧雅寛 神子直之
石倉 證 小熊久美子

入会を希望される場合は、当協会のホームページ（<http://www.juva.jp/>）の入会申込書 PDF をダウンロードしていただき、必要事項をご記入のうえ事務局までお送りください。

〔セミナー・講演会へ〕 の講師派遣を随時受付

本協会では、紫外線水処理装置・技術の啓蒙活動を積極的に行っており、その一環として紫外線水処理装置および技術に関する講師の派遣を行っております。お申し込みは、メールにて承ります。
(メールアドレス：info@juva.jp)



JUVA 技術セミナー



Japan UV Water Treatment Technology Association

一般社団法人 日本紫外線水処理技術協会
HPアドレス <http://www.juva.jp/> メールアドレス info@juva.jp