

( 1 ) UV Disinfection Knowledge Base 抄録

ISBN: 9781605731773

Author: Harold Wright, David Gaithuma, Mark Heath, Chris Schulz, Travis Bogan,  
Alexander Cabaj, Alois Schmalweiser, Marcia Schmelzer, Janet Finegan-Kelly

Publisher: Water Research Foundation

Publication date: 2012

## 要約

### 目的

本プロジェクトの目的は水道の紫外線消毒の実務に関する知識情報集積集（ナレッジベース）を作成することである。

### 背景

ここ 10 年ほどでの規制・学術的・技術的見地からの水道水紫外線消毒の適用における変化は目覚ましいものがあった。その結果、水道事業者、技術者、政府関係者から、さまざまな疑問が生まれている。すなわち、誰が UV を導入しているのか、設計条件は何か、UV 照射量モニタリングと照射量調整は効果があるか、UV 装置の信頼性はどの程度か、UV 装置の維持管理にはどの程度の手が必要か、UV 導入後どのようなことがわかったか、である。

### アプローチ

このプロジェクトは次のような内容で構成されている。

- ・ 事業体、規制当局者、コンサルタントからの水道の UV 消毒に関する課題と疑問の収集
- ・ 導入事業体への調査と導入システムの現場調査による UV システムに関するデータの収集と解析
- ・ 低圧高出力ランプと中圧ランプの破損による水銀の漏出の評価と工学的対策の立案

### 結果 / 結論

2008 年春に収集された調査データによれば、処理流量 0.5MGD（1,900m<sup>3</sup>/日）以上の飲料水の UV 消毒が導入済み、または現在導入中である事業体が、カナダで 161 事業体、米国で 148 事業体ある。78%の UV システムはクリプトスポリジウムまたはジアルジアの不活化のために導入され、12%は 40mJ/cm<sup>2</sup> の“UV 照射量”に基づくウイルスの不活化のため、9%は従属栄養細菌、大腸菌群、または細菌の不活化のために導入されていた。24%の UV システムは地下水を、76%は地表水を処理していた。設計流量範囲は 0.03MGD（114m<sup>3</sup>/日）から 2,200MGD（8,300,000m<sup>3</sup>/日）であり、合計設計流量は 6.1BGD（23,000,000m<sup>3</sup>/日）である。設計 UVT（UV 透過率）は 70～98%の範囲で中央値は 90%であった。設計 UVT のヒストグラムは 85%、90%、95%でそれぞれ明瞭なピークを示しており、このことから、各事業体は設計 UVT を推定したか、もしくは測定 UVT データを切り上げ/下げしこれらの数値に合うようにしたか、のどちらかであることが示唆された。この限定されたデータからは、ランプエイジングとファウリングファクターは 60%から 90%の範囲で設定されていることが示された。52%の UV システムは濾過水を一括処理しており、一方 14%の UV システムは濾過池毎に個別に処理していた。

中圧 UV システムの損失水頭は 0.8 から 30 インチ、中間値 5.9 インチの範囲であった。低圧高出力 UV システムの損失水頭は 6 から 30 インチ、中間値 15 インチの範囲であった。73%のシステムは中圧 UV ランプ、27%のシステムは低圧高出力 UV ランプまたは低圧高出力アマルガムランプが使用されていた。標準的な出力範囲は、低圧高出力 UV ランプが 240 ~ 427W、中圧 UV ランプが 2.4 ~ 21.6kW であった。アマルガムランプと中圧 UV ランプの平均比（システム当たりランプ本数比）は 10 対 1 であった。中圧 UV システムは一般的に自動ワイパが装備されており、一方低圧高出力 UV システムは機械式または物理化学式の自動ワイパ、オフライン酸洗浄、あるいは手動洗浄が用いられていた。オフライン酸洗浄の薬剤にはリン酸やクエン酸が含まれていた。低圧高出力システムの 25%、および中圧システムの 53%の浄水場では、追加の手動洗浄が必要であったことが示された。

UV システムには DVGW または ONORM に準拠した、または独自の UV センサが用いられていた。ONORM センサは低圧高出力システムでより多く使用されており、一方 DVGW センサは中圧システムでより多く使用されていた。基準 UV センサで設置 UV センサをチェックしていた事業体はわずか 69%であり、その大半の事業体ではたった 1 台の基準 UV センサしか所有していない状態であったことが報告された。48%の事業体ではそれぞれの照射槽毎に流量計を使用していたが、一方 40%の事業体では複合流量に対して 1 つの流量計を使用していた。オンライン UVT モニタを使用していた事業体は 63%であり、UVT モニタのチェックを実施していた事業体はわずか 52%であることが報告された。このデータは UV システムの運用における QA/QC による改善の必要性を示している。

米国の 40%とカナダの 25%のシステムはオフスペック要件（UV 施設が性能確認を受けた範囲外の運転条件で運転していること、たとえば流量や UVT @LT2\_UVDGM）を持っている。米国のシステムに関する報告では、UV 照射量と流量（78%）、UV センサの測定値と確認データ（55%）、UVT と確認データ（44%）、そして性能（33%）のオフスペックが含まれている。対照的に、カナダの報告では、UV 照射量と流量（90%）、UV センサのデータ（10%）、UV センサと UVT モニタの確認データ（5%）、そして性能に関するオフスペックは無かった。米国とカナダのシステムにおけるこの違いは、おそらく LT2ESWTR と UVDGM の影響を反映しており、それは米国においてより顕著である。

UV 照射槽の設置台数は、低圧高出力システムが 1 ~ 56 台、中圧システムが 1 ~ 15 台の範囲であった。驚くべきことに、低圧高出力システムの 18%、中圧システムの 34%において、1 台のみで使用されていた（すなわち、予備の照射槽が無い）。全ての低圧高出力システムは 1 系列につき 1 台設置されていたが、一方中圧システムの 5%では、到達 UV 照射量がより高いか NWRI-UV ガイドラインに合致するかのどちらかの為、1 系列につき 1 台以上が設置されていた。1 台以上を使用している UV システムの 62%では流量調整バルブを使用し、残りはパッシブフロープリッタを使用していた。ほとんどの低圧高出力システムは水平設置されていたのに対して、中圧システムの 79%は水平設置であり 21%は垂直設

置であった。低圧高出力システムの 25%と中圧システムの 35%では、UV 試験研究が実施された。

10%から 90%の範囲に入る一か月あたりのメンテナンス作業に要する時間は、低圧高出力システムで月あたり 1 から 20 時間、中圧システムで 1 から 10 時間であった。低圧高出力システムの 50%および中圧システムの 41%ではスリーブおよび UV センサ受光窓のファウリングが観察された。予備ランプ、スリーブ、バラスト、UV センサの中央値の比は、低圧高出力システムでは 12:2:3:1、中圧システムでは 4:2:1:1 であった（比率は予備品として保有している数の比）。事業体では UV 消毒に関して問題を観察しているが、総じて UV システムは効果的で運転と維持管理がシンプルであり、また UV 部品は保証期間以上の期間で性能を発揮し、ベンダは良好なサービスを供していると報告している。また、8 つの導入された UV システムの性能が評価された。その中の多くのシステムはバリデーションレポートへのアクセスがなく、どのようなアルゴリズムで UV 照射量をモニタリングしているかの理解がなかった。1 つのシステムは正当でないアルゴリズムを使用していた。不要な安全係数の使用、UV センサの設定値監視手法の非効率な実施、あるいは照射槽の減量運転の制限による過剰照射が顕著であった（たとえば 2 章から 3 章）。

UV センサの式を使って予測された数値と UV センサによって実際に読み取られた数値の比として計算されたランプエージングとファウリング指数の組み合わせは、ランプエージングとファウリングを定量化するために使われた。データはランプエージングが設計基準内にあることを示した。ファウリングは設置場所に特有であり、いくつかの場所では中圧ランプを使用していたとしてもファウリングは殆どなく、一方別の場所では時間とともに著しいファウリングを示した。ファウリングが観察された場所において、中圧ランプに対して機械式自動洗浄または物理化学ワイパを使用したことでスリーブと UV センサ受光窓は清澄に保たれた。しかしながら、スリーブ内側のファウリングは中圧システムにおける問題であった。オフライン酸洗浄を使用した低圧高出力システムにおいて著しいファウリングが観察された。PLC が UV 照射槽が要求する UV 照射量を供給していると示していれば、ファウリングが運転・維持管理コストに多大な影響を与えていても、オペレータは照射槽を洗浄しようとは思わない様である。

現場訪問は、オンライン UVT モニタの精度とキャリブレーションに関する重要な問題を明らかにした（誤差 2%以上を示す）。UV 照射量モニタリングにおける UVT モニタのエラーの影響は、照射槽のバリデーションレポートによって与えられる UV 照射量モニタリングアルゴリズムを使用して決定することができる。もし影響が許容できない場合、実験室の分光光度計によって測定した UVT を PLC に入力してモニタリングのために使用することができる。

中圧システムに対して使用する UV センサは低圧高出力システムで使用するものに比べてより変動性を示した。基準強度計との比較による中圧 UV センサの現場キャリブレーションは、UV センサの変動性を低減した。“湿式”UV センサ（センサが水と直接接触するも

の)をチェックすることは照射槽をドレンしなければならないために手間と時間がかかる。これらの UV センサは、受光窓を使用する“乾式”UV センサに改造することができる。

ランプ破損事故に伴う水銀漏出は、試験照射槽を使用して評価され、この結果、ランプ破損による水銀の移動はランプタイプと設置方向に依存することが示された。ランプが破損している間、気相水銀は水中に溶解して照射槽の下流に運ばれる一方、液体とアマルガム状態の水銀は照射槽の底に沈降する。運転中の低圧ランプと低圧高出力ランプによる気相水銀の質量は、運転中の中圧ランプに比べて桁違いに小さい。なぜなら前者は運転温度が後者に比べて極めて低いからである。

水銀の減災計画は、予防、ランプ破損の検出、水銀の漏出と輸送のモデリング、補足と封じ込め、サンプリング、汚染水の処理と廃棄、そして UV 照射槽の浄化と運転再開を含むものでなければならない。UVDGM では言及されていないが、スリーブの振動による共振はランプ破損の原因である。ランプ破損によるパイプ内や配水の下流域の水銀濃度は、移流拡散方程式、CFD モデリング、そしてトレーサー試験から得られた滞留時間分布によって予測することができる。このモデルは、低圧ランプまたは低圧高出力ランプの破損により分散した水銀濃度が最大許容濃度以下に低減することを予測する。中圧ランプの破損による分散も、長い配管、槽、あるいは配水池において最大許容値以下まで濃度減少すると予測される。もし希釈が不十分であった場合、水銀の漏出は下流のバルブや迂回路によって封じ込めが可能であり、その設置場所は破損事故検知からの応答時間及びバルブの閉止時間によって決定される。バルブの閉止動作時間は、スリーブ破壊圧力を超える水圧の原因となりうるウォーターハンマーによって制限される。

ランプ破損事故の対応計画には、採水場所、サンプリング頻度、汚染水の処理と廃棄、そして照射槽内部に残留している液体水銀またはアマルガム水銀と石英ガラス破片の浄化について記述しなければならない。照射槽下流のサンプリング場所は、輸送モデルを使用して予測された濃度分布に基づいて選択されなければならない。サンプルは USEPA Methods 1631E と 245.7 (検出限界 5ng/L 以下) を用いて分析しなければならない。照射槽内部残留水を含め、水銀が混入した水は硫黄添着活性炭を通過させて処理することができる。米国の多くの州では水生生物保護のため水銀の最大濃度を 12ng/L と指定しており、配水地域特定 TMDLs (日最大全負荷) では 1ng/L 以下と指定されている。

## 推奨

プロジェクトチームと参加した事業者は UV 消毒の実施を計画する事業者に対する膨大な推奨を特定した。UV 消毒を実施する事業者は、最適化されたバリデーションテストに基づく UVDGM2006 で指定された必要 UV 照射量、すなわち指標微生物 MS2 による換算紫外線照射量 40mJ/cm<sup>2</sup>、を考慮しなければならない。事業者は、設計基準を定義するための UVT が設定されたしっかりとしたデータを収集しなければならない。設計に使用するため

のランプエージングとファウリング係数もまた、設計チームによって明確に定義されなければならない。

UV 設計推奨は、メンテナンスのための予備照射槽の提供、照射槽系列数の最小化のための高流量照射槽の使用、大型照射槽への大排水ラインの使用、上流および下流の直管長要求に対する建設費用のバランスの考慮、モーター駆動式自動遮断弁の使用、オフスペック水は取水側に戻すこと、低い鉄濃度の水であってもワイパを搭載した中圧システムの完備、予備部品およびメンテナンス作業のための専用スペースの確保、そして設計と建設のすべての段階におけるオペレータとプラント職員の参加を含む。オフサイトバリデーションは、流量と UVT の取得が必要な試験のため、また試験水を排水できるため、オンサイトバリデーション以上に推奨された。

事業体は、自分の UV システムを使用して PLC 内部プログラムのアルゴリズムと提供されたバリデーションレポートとが一致するかを確認し、UV 照射量モニタリングのアルゴリズムを明確な文書によって記述すべきである。事業体は、過剰照射とそれに付随する運転・維持管理コストの低減のため、UV 照射量の監視と制御の効率を評価し改善すべきである。

事業体は、UV センサと UVT モニタのチェックを含む UV システムの運転における QA/QC を改善する必要がある。湿式 UV センサは推奨されていない。また基準 UV センサは照射槽から独立した電子回路を使用すべきである。UVT モニタの精度のための基準は UV 照射量モニタリングのエラーの影響に基づくべきである。UV システムのオペレータは照射槽の CAF インデックスを毎週計算し、その結果を使用して手動洗浄やランプ交換といった UV システムの運転と維持管理の最適化を図らなければならない。オペレータはスリーブの内側のファウリングを検査しなければならない。

事業体は、UV 消毒は定期的なメンテナンスを必要とし、メンテナンスが簡易な技術ではないと報告している。事業体は十分なオペレーティングスタッフ雇用の計画がなく、専任の維持管理技術者を持つことを推奨している。総じて、プロジェクトは UV システムオペレータのトレーニングによる改善が必要であると結論付けている。

事業体は、低圧高出力ランプと中圧ランプによる水銀の拡散予測に基づいた水銀対策計画を用意しなければならない。この計画は、スリーブの振動による共振の防止、ランプとスリーブの破損場所の検出、バルブとウォーターハンマーの応答時間、サンプリング場所とサンプリング方法の検出限界、そして水銀含有排水の処理の必要性と排出規制、について用意しなければならない。

## **マルチメディア**

このプロジェクト報告書は、参加事業体の飲料水 UV システムから収集されたデータが収録された Microsoft Access のデータベースを含んでいる。

## 第1章

### 概論

飲用水処理としての UV による消毒は、ヨーロッパでは 1950 年代から、下水処理としては北米で利用されて以来 20 年近くになる。実績を見る限り、UV 消毒とはすでに確立された技術のような印象を与えるが、UV 消毒の実践はここ 10 年間にわたって大きな発展を遂げている。1990 年代後半に、ある研究により UV 光がクリプトスポリジウムとジアルジアを低い UV 照射量で不活性化されることが立証された( Bukhari et al. 1998 )。この研究は、アメリカ合衆国環境保護庁 ( USEPA ) の第二次地表水強化規則 ( LT2ESWTR この規則には UV 消毒をクリプトスポリジウムとジアルジアとウイルスの消毒を実現するものとしてのリストに入っている ) を発展させ、北米の州や地方の規制における UV による消毒が広く採用されることとなった。結果として、米国とカナダにおける地表水原水の浄水場では 0.5MGD ( 1,900m<sup>3</sup>/日 ) から 2,200MGD ( 8,300,000m<sup>3</sup>/日 ) を処理する設備に UV 消毒をすでに導入しているか、取り入れることを計画している。

UV 消毒の新しい機会を前に、UV 装置製造会社は新しい飲用水処理装置を開発してきた。たとえば Trojan 社の UVSwift™ や Calgon 社の Sentinel™ UV 照射槽シリーズなどである。ここ 10 年におけるその他の顕著な進展は水銀アマルガムと低圧高出力 UV ランプ、高出力中圧 UV ランプ ( 例えば 20kW )、物理的-化学的洗浄システム、UV センサシステム、UV 照射モニタシステム、UV 照射量調節アルゴリズム、そして流量 40MGD ( 150,000m<sup>3</sup>/日 ) 以上を処理できる UV 照射槽が挙げられる。UV 消毒の科学と実践におけるその他の発展としては、バリデーションテストと数値流体力学 ( CFD ) に基づいた、新しい UV 照射量モデリング手法がある。規制面においては、UV バリデーションのための手順と実験施設、そして飲用水用の UV 消毒システムの設計と運用のための UV ガイダンスマニュアル ( UVDGM ) の進展がある。

迅速に発展する水処理技術についてはどの分野についても言えることだが、各公益企業、技術者、州の監督官は UV の消毒について以下のような疑問や懸念を持っている。

- ・ どんなところで UV 消毒装置を設置するのか。処理の目標は何か。設計基準は何か。業界の成長ぶりはどうか。
- ・ UV 消毒装置の運用においてランプの劣化と汚れの付着はどの程度起きるか。洗浄システムはどのくらい有効か。オフラインの酸洗浄はどれくらいの頻度で行わなければならないか。
- ・ UV 製造販売業者が見積もる装置部品の寿命は現実的か。
- ・ UV 照射量の監視と調節機能はどのくらい効率的か。過剰照射はどのくらいの規模で発生するか。
- ・ 設置された UV 照射槽によってどの程度のクリプトスポリジウム、ジアルジア、ウイルスの消毒が達成されるのか。

- ・地表水処理プラントにおいて、流量と UVT は経時的にどう変化するか。現在の UV 装置設計のアプローチはどのくらい保守的か。
- ・UV システムは、バリデーションで確認された限度外での運用、警報、供給電力不良に対してどのように反応するのか。設計仕様から逸脱した挙動をどう監視し、報告するのか。どんな周期でこれらの事象は起こるのか。
- ・UV システム部品の信頼性はどうか（例えば、ランプ、安定器、石英管、洗浄システム、センサ）。
- ・地表水処理プラントにおいて、ランプの破損と水銀の漏出は発生するか。その様な事象に対応する為にどのような予防策が取られているか。またその成果はどうか。
- ・水処理業界は UV 規制とガイダンスへの順守に対してどのくらいの経験を持っているのか。特に認可（バリデーション）、照射量監視、そして流出入口の配管に対して。
- ・UV システムを運用・維持するために、どの程度の労働力が必要とされるのか。設計時の想定とはどの様に比較されるか。
- ・基準 UV センサと UVT モニタを使用する点検はどのように行うのか。
- ・UV 消毒システムの設計、設置運用からどんなことが学べるのか。

水研究財団（Water Research Foundation）のプロジェクト 3117 のためのものとして執筆された本稿は、UV 消毒知識情報集積集を作成することにより、上記の質問に対して回答するものである。

## 問題の核心

入手可能な情報への大きな隔たりがあり、それは公益企業、技術者、監督官が UV 消毒技術をどのように導入・運用するかに限界を設けている。この情報の隔たりを埋めることで、UV 消毒を利用する上でのリスクとコストを顕著に減少させることができるだろう。

## UVT と流量の設計

流量と UVT は UV システムの大小、維持管理コスト、設計仕様外での性能に重大な影響を与える。しかし、多くの公益企業が持つ季節ごと及び年度ごとの UVT の変異性、上流のユニットプロセスや原水がその変異性に対して与える影響に関して持っているデータは限られている（たとえば図 1.1）。あるケースにおいては、夏季の流量は最大、UVT は最小になり、別のケースにおいては、その逆になる。もし技術者がこうした傾向を考慮しないのならば、UV システムは大きすぎるか小さすぎるかになってしまう。最悪の場合、UVT が設計基準を下回り、その UV システムに要求されている UV 照射量を確保できない。

公共施設関係者は、地表水処理プラントにおいて、いかにして UVT と流量が時間に応じて変化するかということと、こうした傾向が UV システムのサイズにどのように影響を



与えるかについての、より良いデータが必要である。上述の問題に対する、当プロジェクトの第一の目標は処理前、処理後の水質（流量と UVT を含む）についてのデータベースを構築し、季節ごとの流量と UVT の変化が UV システムの大小と運用に如何に影響を与えるかについての評価をすることである。

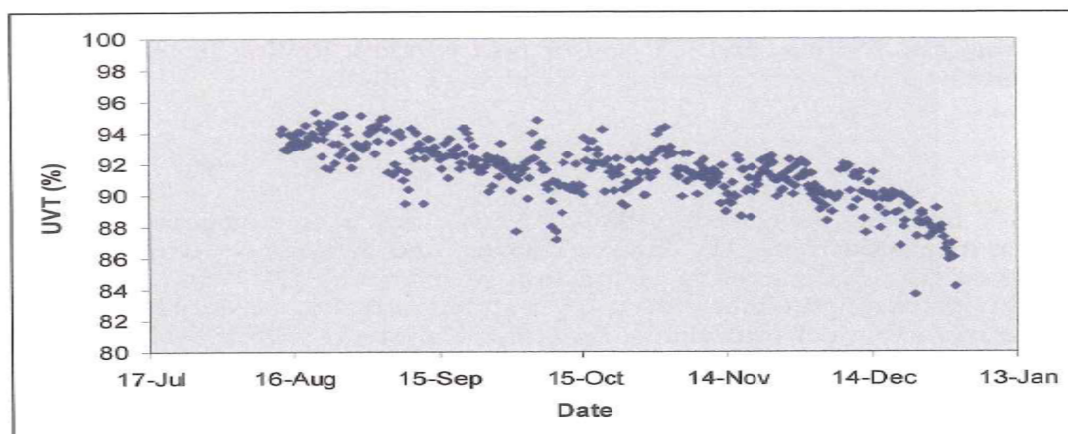


図 1.1 季節による UVT の変化 (カリフォルニア州トレーシー)

### ランプの劣化とファウリング

UV システムは、ランプの劣化と石英管のファウリングを考慮したうえで、要求される UV 照射量を供給できるように設計される。このパラメータは UV システムの大小と維持管理コストに大きな影響を与えるのだが、施設関係者はそのような、UV システムの規模決定と選択を行うためのランプ劣化とファウリングについての信頼できるデータを持っていることはほとんどない。その代わりに、彼らは UV 装置製造販売会社の言うことを信頼する。しかしそれは根拠に欠けるものか、研究室内の理想的なコンディションで得られたものかのどちらかである。UV システムは、多くの場合、予算と維持管理コストに基づいて選定されるので、UV 装置製造販売会社は、受注のチャンスを高める様なランプの劣化及びファウリングに関する係数を主張するように動機付けられる。ひとたび浄水場に UV システムが据え付けられると、ランプの過度の劣化とファウリングは、UV システムにランプの点灯もしくはランプ出力の増大によっての埋め合わせを必要とさせ、その結果、その施設の電力とランプ交換コストを高めることにつながる。施設は往々にして、現場でのランプ劣化とファウリング測定のための適切なツールと方法を持っていないため、彼らは多くの場合過度のコストを払っていることに気づかない。

施設は UV 消毒に関して、異なるランプのタイプまたは UV 装置製造販売会社技術においてどのように劣化具合が変化するか、水質（たとえば、硬度、pH、鉄分）の変化とランプ技術の違いによってファウリングの程度がどのように違ってくるのか、どれ程効果的にワイパはファウリングを除去するのかについての信頼できるデータが必要である。なぜなら石英管は 5 年から 20 年間保証されていて、施設では石英管が回復の見込みがない UVT

の低下を引き起こすかどうかを知る必要がある。彼らはまた、UV センサ受光窓のファウリングが UV 照射量の監視と UV システムの運用に顕著な影響を与えるのかも知る必要がある。

ランプの劣化、石英管の劣化とファウリング、そして UV センサ受光窓のファウリングを統合した影響のオンライン測定を提供する為のシンプルなアプローチは、測定された UV センサの実測定値と想定計算値の比を計算するものである。(Heath et al. 2008):

$$S/S_0 \quad (1.1)$$

ここで  $S$  とは、UV センサによって測定された UV 強度であり、 $S_0$  とは UV ランプ、石英管、センサ受光窓が新しく清潔であった場合に測定されたであろう UV 強度の計算値である。 $S_0$  の値は、UV バリデーションテストもしくは UV システムのスタートアップ時に決定される関係性を利用した、UVT とランプパワーの関数として求められる。たとえば、 $S_0$  と中圧ランプ使用の UV システムの計算式は一般的には下記の形式である：

$$S_0 = A \times e^{B \times UVT} \times P_L^C \quad (1.2)$$

UVT は 254nm での UV 透過率の測定値であり、 $P_L$  はランプパワー、そして  $A, B, C$  はバリデーション時あるいは起動時に測定されたデータに方程式を当てはめることによって決定された実験定数である。 $S/S_0$  をモニタリングしてゆくことで(図 1.2 参照) 浄水場のオペレータはランプの劣化とファウリングを簡易に評価でき、いつメンテナンスをすれば良いのかを決定できることになり、維持管理コストの暴騰を防ぐことができる。メンテナンスには、ランプ交換、ランプ管の交換またはクリーニング、そして UV センサ受光窓の交換またはクリーニングが含まれる。

以上を前提として、当プロジェクトの第二の目的は、 $S/S_0$  の現場での測定、及び現場もしくは現場外でのランプの劣化・石英管の劣化とファウリング・UV センサ受光窓の劣化とファウリングの測定を利用した UV ランプの劣化とファウリングについてのデータベースを構築することである。当プロジェクトの成果物は、施設が UV システムのサイズについてのより良い選択ができるデータと、施設が導入された UV システムの維持管理コストを最適化できる方法の提供である。

## UV 照射量モニタリング

米国の第二次地表水強化規則は、様々な流量域、UVT、ランプのオン/オフ状態、ランプ出力、に対して有効な UV 照射監視システムを装備することを UV システムに求めている。理想的な UV 監視システムはわかりやすく、使いやすく、あらゆる範囲の流量、UVT、UV 強度に対して効率的であり、病原体の高レベルの不活性化を可能にする幅広い用途のも

のである( Wright et al. 2005a )。監視システムはバリデーションで確認された流量域、UVT、ランプ状態から逸脱した動作に対して適切に反応しなければならない。残念ながら、近年設置されている UV システムの UV 照射量監視システムの多くは、こうした要求に見合うものにはなっていないのが現状である。たとえば、UV 製造販売者によって用いられる測定点は、場所によっては 100% 以上の過剰照射をもたらし、これにより UV システムの電力消費と維持管理コストを著しく高めることにつながる。

ポートランドバリデーション試験施設 ( Portland Validation Test Facility ) で実施された UV バリデーション作業において、市場で入手可能な UV 照射槽が放出する照射量は一般的な方程式：

$$RED = A \times UVA^B \times Q^C \times (S/S_0)^D \times Banks^E \quad (1.3)$$

によって監視できることを発見した ( Wright et al. 2005a, Rennecker et al. 2005 )。

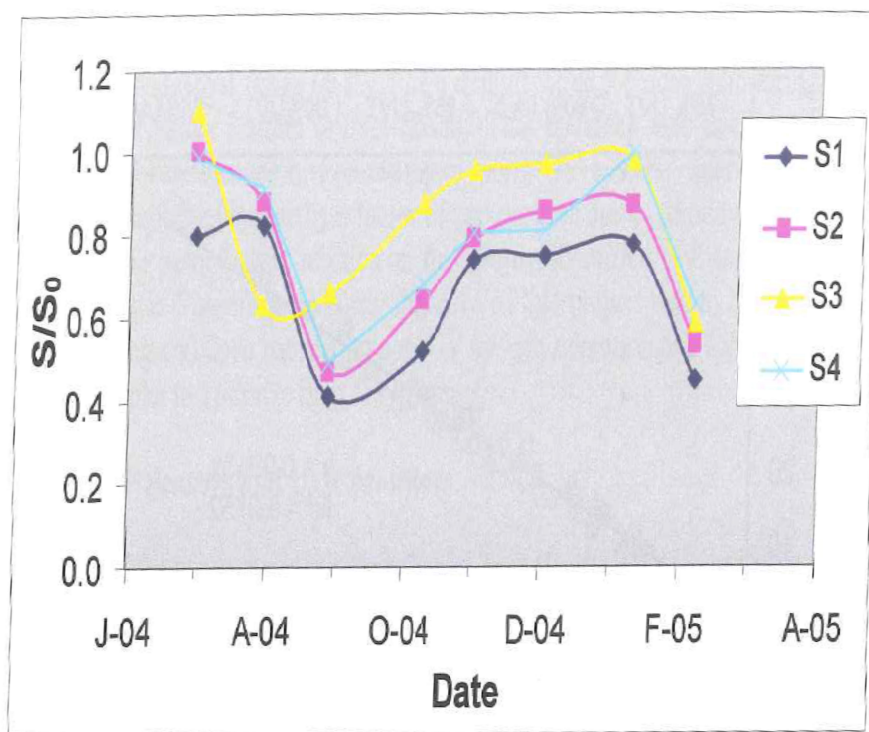


図 1.2 S/S<sub>0</sub> は中圧ランプを装備した UV システムに付属し稼働している 4 つの UV センサで観測された値である。出展： Weight et al. 2009, UV センサシステムのための設計とパフォーマンスガイドライン

RED ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ) は UV 照射槽によって届けられる換算等価紫外線照射量、UVA ( $\text{cm}^{-1}$ ) は、計測された UVT (%) によって求められた UV 吸光度、Q (MGD) は UV 照射槽を通る流量、Banks は照射槽内で稼働している UV ランプ群の数、そして A, B, C, D, E はバリデーショndata (図 1.3) に方程式を当てはめて導き出される実験定数である。ひとたびバリデーショndata を用いて校正を行うと、その方程式を UV 照射量の監視のための UV システムの規模を導き出すのに使え、また UV システムあるいは産業制御システム (SCADA) にプログラム化が可能になる。

UV 消毒システムを導入している公共施設は UV 照射量監視システムの効率について理解する必要がある。照射量監視では不十分な場合、公共施設は彼らが現在保持しているバリデーショndata ベースを使っていかに有効なアプローチを行うことができるのかを知る必要がある。UV 消毒を導入しようとしている施設や、UV 消毒システムを認可する州監督官は、さまざまな照射量監視システムを比較して、それらにはどのくらいの差異があるのかを理解する必要がある。したがって、本プロジェクトの第三の目的は、据付済みの UV システムによって使われる UV 照射量監視アプローチについての、その効率性をも含めたデータベースを構築することである。

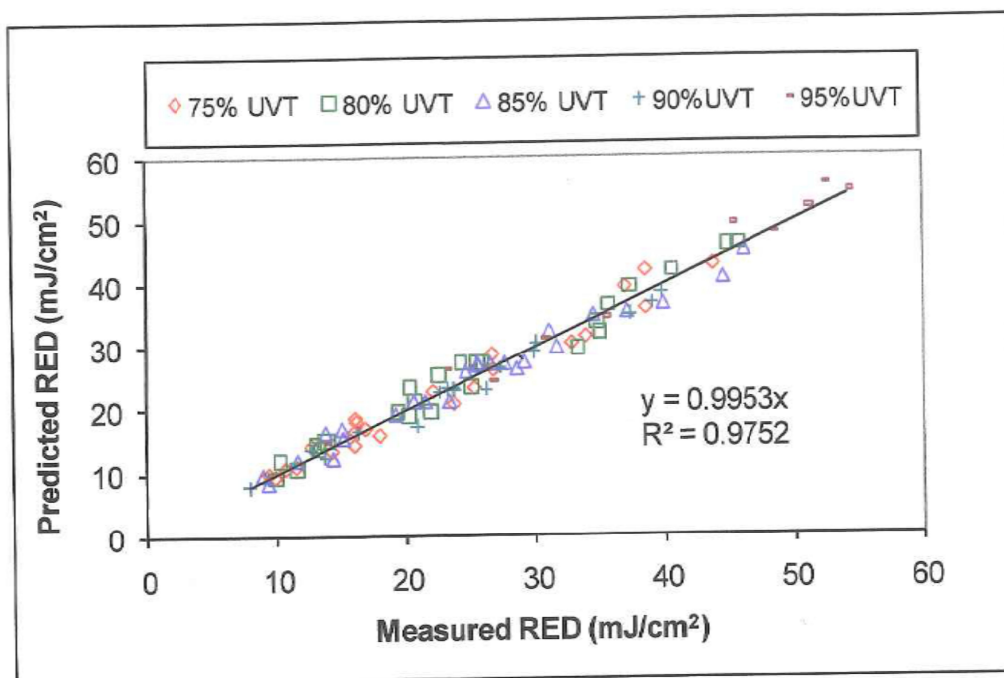


図 1.3 式 (3) を使って算出した RED の予想値とバリデーショndata 中に測定された RED の比較。(データはポートランド UV バリデーショndata 施設で Calgon 36 インチ Sentinel 照射槽を使用して得られたもの)

## UV 照射量調整

通常運転中、UV システムの PLC (プログラマブルロジックコントローラ ; プログラム可能論理回路) は、ランプを断続的に ON 又は OFF とすることで、ランプの設定電力を調整し、UV 照射量を過剰に照射せずに必要量だけを供給する。この『UV 照射量の調整』には、電気代と交換部品コストに大きく影響する。UV メーカーを選定する際、技術者は、各社の UV システムの初期費用と維持管理費用を比較する。技術者はしばし、UV 照射量調整についての維持管理コストの計算について、運転時のランプ本数は平均流量に作用すると仮定し、次のように説明する。

$$\text{平均ランプ本数} = \text{全ランプ本数} \times \frac{\text{平均流量}}{\text{設計流量}}$$

例えば、浄水場 (WTP) において設計流量 10MGD (38,000m<sup>3</sup>/日)、平均流量 5MGD (19,000m<sup>3</sup>/日) でランプ 100 本を備えた UV システムが設置された場合、維持管理コストの計算はランプ 50 本での運転を基本とする。この方法は単純であり、照射量調整が維持管理コストに及ぼす影響について明確に説明していない。この方法は、UVT、ランプの老朽化、ファウリングが運転時のランプ本数に影響する事を示していない。

例えば、一般的な飲料用の UV システムでは、UVT が 90% から 95% に上がった場合、必要とされるランプ本数と電気費用は約 50% 削減される。また、この方法は、UVT が有効範囲を超えた場合、あるいは流量が有効範囲を下回った場合に UV システムをどのように運転すべきかを示していない。例えば、多くの UV システムにおいて、UVT が既定値を越えて過剰に照射されたとしても、通常は、その値を上限としたまま運転が行われている。

また、この方法は UV 照射槽の低流量運転を行った時の下限値についても説明していない。一般的な UV システムは、安定器の最低の電力設定にて運転を行うが、流量を制限した運転を行った場合、2 倍又は 3 倍の過剰照射となる。このプロジェクトに係る事業者の多くは、効率的な UV 照射が重要な課題である事を認識している。

したがって、第 4 章の目的は、UV 照射量のモニタリングや調整が UV システムの運転と維持管理コストにどのような影響を与えるのかを理解し、事業者がそれらの UV システムを最適化するための方法を特定することにある。

## UV センサと UVT モニタの不確実性

事業者、技術者及び監督機関は、UV 消毒にとっての安全要素を適用させる為、UV センサ、オンライン UVT モニタ、ランプ個体差の精度に関する良質なデータを必要とする。

The Water Research Foundation (米国水研究財団) は、UV センサのシステム設計・ガイ

ドランを企画している。彼らは、UV システムの依存によって UV センサの測定誤差が $\pm 7 \sim \pm 40\%$ 変動する事を報告している(図 1.4 参照)。また、この章では、オンライン UV モニタが 1~4%高い表示を行う可能性がある事を報告している。上記に記載された誤差は、アメリカ合衆国環境保護庁 (USEPA) の UV 消毒指導マニュアル (UVDGM) (2006a) に記載されている UV センサおよび UV モニタの精度基準を超過している。変動誤差が小さいと公衆衛生による健康被害の危険性を及ぼす一報で、変動誤差が大きいと維持管理コストは増加する。その為、事業者は上記のような誤差を低減させる為、誠実に取り組んでいる。したがって、第 5 章では、UV センサシステム及び UVT モニタの精度に関するデータベースを構築し、UV 照射量のモニタリングが UVDGM の制度基準を満たしているかを確認する為、浄水場で使用されている品質保証/品質管理 (QA/QC) 手順について評価を行う事を目的とする。

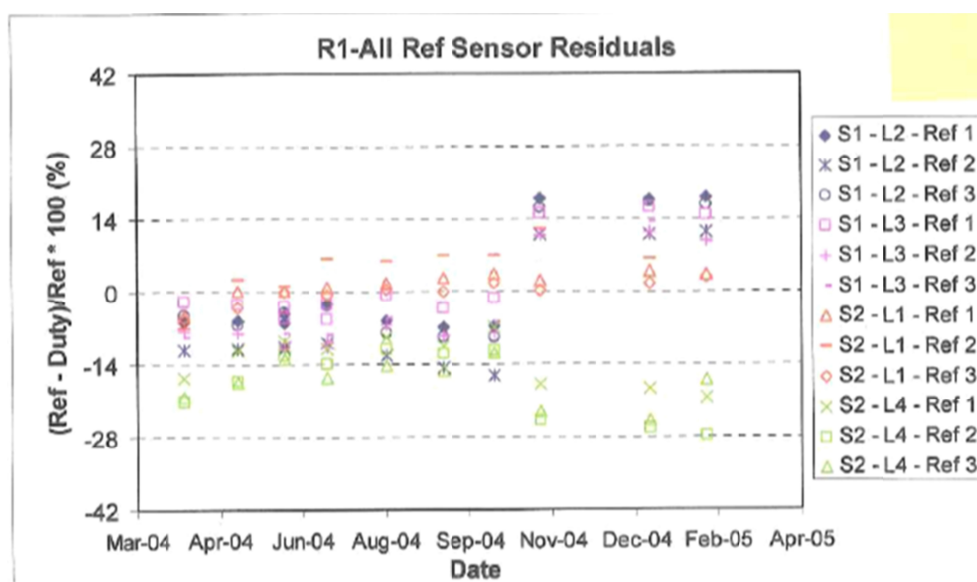


図 1.4 UV センサのチェックデータ(参考)

ある商用 UV 照射槽の UV センサは、 $-28 \sim +20\%$ の精度範囲を示していた。

## ランプ破損

事業者は、UV ランプスリーブが破損し、処理水中に水銀が流出されてしまう事を懸念している。USEPA の UVDGM は、ランプ破損時の対処方法について説明をしているが、その情報の殆どは憶測によるものである。北米の飲料用の浄水場で、UV システム運転中にランプが破損したが、破損の原因及び影響に関しては何も公表はされなかった。したがって、第 6 章の目的としては、ランプ破損時における水銀流出についての理解を深め、浄水場でのランプ破損時におけるリスクを最小限に抑える為の対処方法を構築し、これらの事故が発生した時は適切な対処を行う。

## 第2章

### プロジェクト・アプローチ

このプロジェクトの最優先目標は、事業者、技術者、及び監督機関が飲料水の UV 消毒に関する基礎知識を構築し、この技術を適用することによるリスクとコストの低減に役立つことである。この目標を満たすために実施される具体的な課題は以下の通りである：

- ・ 飲料水の UV 消毒を実施する事業者、技術者、及び監督機関にこの技術の問題や課題を特定する。
- ・ 設計基準、UV 照射槽と構成（部品）のデータ、性能試験、コスト、教訓を含めて、飲料水の UV 消毒に関する定量的及び定性的なデータを収集するためのデータベースを構築する。
- ・ 飲料水の UV 消毒に関する代表的なデータ（地形、水質、容量、処理目標、商業用技術を含む）を収集する。
- ・ ランプ寿命特性とファウリング、UV センサと UVT モニタの精度、照射量効率のモニタリングと制御、消費電力、及び規格外の性能評価を定量化する為、現地に設置した UV システムの評価を行う。
- ・ 問題や課題を処理するために収集したデータを分析する。
- ・ 事業者、技術者、監督機関がデータベースにアクセスするために使用できるソフトウェアツールを開発する。
- ・ 低圧高出力ランプと中圧ランプの破損に伴う水銀放出の評価を行う。防止、輸送モデリング、封じ込み、採取、清掃を含む、水銀流出を軽減するための工学的なアプローチを策定する。

プロジェクトのアプローチは、以下の課題と一緒に 3 つの段階にまとめられる。

#### 第 1 段階

- 文献レビュー
- 研究課題の特定
- 調査・データベース開発
- 初期データ収集
- 現場試験計画の開発
- 第 1 段階の QA/QC レビュー

#### 第 2 段階

- 現地評価
- 水銀流出・制御の評価
- データベース解析ツールの開発
- インターネット調査ツールの開発
- 事業者連絡計画
- 第 2 段階の QA/QC レビュー

### 第 3 段階

- UV 設備調査
- 分析、提案、及びレポート

## 水質が UV 消毒に及ぼす影響

水質パラメータは、UV 照射槽の性能に強い影響を与えることができる。硬度、アルカリ度、温度及び pH は、スリーブと UV センサ窓のファウリングに影響を与えるだけでなく、UV 照射量やモニタリングにも影響を与える。水の UVA (紫外線吸光度) は、目標 UV 照射量を照射するために必要な UV ランプ本数に影響を与え、それに伴い、イニシャルコストと運転コストにも影響を与える。水中に存在する粒子は、紫外線による不活化効果に影響を与える可能性がある。一部、UVA が増加するであろう水処理用の化学薬品を使用しているところもあるが、多くは前処理過程において、UVA を改善し、粒子濃度を低下させている為、水処理に必要な UV ランプの本数は減少している。

水温は、低圧ランプを使用するシステムによって照射される UV 照射量に影響を与える可能性があり、中圧ランプを使用する UV 照射槽内では藻類が繁殖する可能性がある。

## ファウリング

UV 照射槽内の接液部は時間の経過とともに汚れていく。ランプスリーブの外面に付着したファウリングはスリーブを通過する UV 光の透過率を低下させ、UV 照射量を低減させる。UV センサ窓のファウリングは UV センサが読み取る値を低下させ、その結果、UV 照射槽のオンラインモニタリングシステムによって UV 照射量が過小に予測される。UV 照射槽の内面にファウリングが付着すると、これらの面から反射する UV が減少し、UV 照射量が低下する。Wright ら (2009a) は、高い UVT において磨かれた鋼材表面のファウリングが UV 照射槽による UV 照射量に大きな影響を与える事を、UV 照射量モデルを用いた CFD により示した。このモデルは、内壁面での反射は UV 照射量を 10~40%増加させる一方、UV センサの読み値には殆んど影響しないと予測した。この UV 照射槽が清潔な表面反射で検証されたならば、UV 照射槽を浄水場に設置した際に表面反射のファウリングは、UV 照射量を過剰に予測するかもしれない。

ファウリングとは複雑で、部位特異的なものであり、予測することは困難である。Karim と Gehr (2001 年) らは、ファウリングが進む過程は、減速又は加速させるかのどちらか一方の生物学的要素と化学的要素との間の複雑な相互作用であることに気付いた。ファウリングは、温度が上昇すると溶解度が低下する析出化合物(例えば、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{FePO}_4$ 、 $\text{FeCO}_3$ 、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )、溶解度が低い析出化合物 ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ )、及び比重による沈降と誘発した乱流の影響によって生じた粒子の堆積 (Lin 他、1999 年) に起因している。水にとって、ファウラント物質の割合が最も高い鉄でさえも、ファウラント量と水中の鉄濃度との間の相互関係を単純に示すことは不可能であった (Karim と



Gehr、2001年)。

析出物は、水の温度、pH、アルカリ度、カルシウム濃度、総硬度及び粒子濃度に依存する。ファウリングは、ランプの周りに沿って空間的に変化する。点灯温度がより高くなるランプは、溶解度が温度とともに減少する化合物の析出を加速させる(例えば、中圧ランプ、SheriffとGehr、2001年)。粒子の比重沈降は、垂直方向ではなく水平方向に配向されているランプで顕著に見られる。UV照射槽が長時間にわたって中断され、水で満たされているときに、有機系のファウリングが発生する可能性がある(Toivanen、2000年)。ランゲリア飽和指数(LSI)は、特定の水のファウリングの可能性を示すのに使用することができる。

LSIとは、水のpHと、カルシウム及び炭素が溶解する $\text{CaCO}_3$ の平衡状態の時のpHとの差である。LSIが正の場合、 $\text{CaCO}_3$ は溶液から析出し、LSIが負の場合、 $\text{CaCO}_3$ は溶液に溶存している。LSIは、温度、pH、カルシウム硬度及びアルカリ度の測定値から計算される。UV消毒の場合、ランプスリーブの表面温度は、ランプスリーブがファウリングする可能性を示すために使われるべきである。LSIは、日々あるいは季節ごとに変化する場合があります、pH調整及び石灰軟化のように上流の処理過程に依存する。

ランプスリーブのファウリング率は、最初の誘導期間後、一次速度論に従うことが報告されている(Lin他、1995年)。著しいファウリングは、水質やUVランプの種類に応じて、数時間又は数ヶ月にわたって起こり得るのかもしれない。ファウリング率は部位特異的かつ装置固有のものであるため、パイロット実験では、特定の水でファウリングの可能性を定量化するべきである。DerrickとBlatchley III(2005年)は、数カ所の現場でパイロット規模の低圧高出力UV照射槽を用いて、複数の流動条件下及び多様な地下水源における、ファウリングの原因、ファウリング率、及び挙動を調べた。彼らは、陽イオンと陰イオンの濃度、及びランプ温度の情報だけでは、ファウリング率を予測することが出来ないことに気付いた。SunとBlatchley(2009年)は、運動量、熱、カルシウムと鉄の物質移動の挙動を利用した3-Dモデルを開発し、石英；水の境界面で蓄積する $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 及び $\text{CaCO}_3$ のシミュレートを行った。その結果、実験値とシミュレーション値は80~100%合致した。

ワイパは、ファウリング防止に必ずしも成功しているわけではない。Waitら(2006年)は、15カ月間オゾンで予備酸化された通常の浄水場で稼動している4kW中圧UV照射槽にてファウリングを観察した。自動ワイパをもってしても、石英スリーブの外部及び内部に顕著なファウリングが観察され、スリーブのUVTは92%から10%にまで低下した。外部のファウリングは水質や運転条件によって引き起こされるが、内部のファウリングは、スリーブ材料、設置中の取り扱い、及び運転中の向き(垂直VS水平)に依存することが理論的に想定される。ファウリングの一部は、洗浄後でさえも取り除くことが出来なかった。ファウラントを分析すると、高い濃度のカルシウム、マグネシウム、硫黄及びリン酸イオンが示された。

対照的に、Fonsecaら(2008年)によって行われたファウリング実験では、自動ワイパ

が中圧 UV ランプと低圧高出力 UV ランプの両方の UV 照射槽で有効であることがわかった。彼らは、ファウリングが低い金属濃度にもかかわらず、中圧 UV ランプの場合ワイパが使用されていない時は、1 日又は 2 日以内に著しいファウリングが水中で発生し得ることを観察した。流れに対して平行に配向されたランプを有する UV 照射槽の場合、スリーブの長手方向に沿ってファウリングが減少した。流れに対して垂直に配向されたランプを有する UV 照射槽の場合には、ファウリングはランプ中央が最大となった。

水道水中の重曹（重炭酸ナトリウム）、炭酸ソーダ（無水炭酸ナトリウム、ソーダ灰）、塩化カルシウム、及び塩化第二鉄を含む人口水を用いて、Yang ら（2009 年）はワイパの設計と運転の最適化について報告した。1 日 2 回ワイパ洗浄することで、スリーブの UVT は 87%に維持された。これは、ワイパによる洗浄を行なわなかった際に測定されたスリーブの UVT37%を大幅に上回る。

著しいファウリングは、水中で一見可能性の低いファウリングから発生し得る。Heath ら（2008 年）は、低アルカリ度、低硬度（10mg/L 未満）のろ過されない水を処理する低圧高出力及び中圧のパイロット規模の UV 照射槽にて、自動ワイパ無しの条件で、600～700 時間の間にファウリングは、UV センサの読み値を 10～95%減少させる事を報告した。フルスケールの UV 照射槽を用いてファウリングの経過観測実験を行ったところ、ファウリングが機械的・物理化学的自動ワイパによって制御されたことがわかった（Sebastiani 他、2009 年）。

UV システムは、最悪のファウリング条件下でも目標 UV 照射量を照射する必要があるため、ファウリングの程度（具合）は UV システムの装置設計に影響を与える。ファウリングが最悪の場合は、スリーブの洗浄が開始される前のファウリングの最大許容量に依存する。ファウリング係数は、水中のファウリングの最悪の条件下で出力されるランプの割合として定義され、UV システムの装置設計に用いられる。ファウリング係数は、手動洗浄システムでの 70%から自動ワイパでの 95%まで変動する。

### 第3章: 文献レビュー

#### 照射槽の性能

#### UV 消毒への水質影響

#### UV 吸光度

水の UV 吸光度はランプからの光の水中での透過率に影響する。UV 吸光度が増えれば、照射槽内の UV 照度（強度）が低下し、照射量が減少する。

原水中で UV を吸収する物質は、フミン酸、リグニンスルホン酸、芳香族有機化合物（フェノールなど）、金属（鉄など）、陰イオン（硝酸塩、スルホン酸など）の可溶性粒子である（Yip and Konasewich 1972, Snider et al. 1991, DeMers and Rennre 1992）。UV 吸光度はこれらの化合物の濃度変化とともに時間的に変化する。その変化は大きな湖沼や配水池に比べ、河川や小さな湖沼の方が大きい。UV 吸光度は、特定の季節の降雨（雨季）や生物活性により季節的に変化し、また春の雪解け水、嵐、湖沼の反転作用などにより短期間で変化する。地下水は一般的に UV 吸光度が低い。UV 吸光度の履歴データが不足している場合は、UV 吸光度と TOC の相関を UV 吸光度の予測に用いる。

水処理施設での単位操作により水の UV 吸光度は向上する。凝集沈殿（Coagulation, flocculation, and sedimentation）により可溶性粒子を除去することができる。Schulz ら（2005）はろ過水 UVT が凝集、酸化、吸着の処理プロセスで向上するかを評価するためにベンチスケールの研究を行った。硫酸バンドを用い凝集を促進させることで UVT が一貫して 80% を超える水を供給できることを報告した。この改善により、UV システムの設計基準に影響を与え、UV 設備費を減少させることができた。

オゾンと塩素による酸化は、溶解金属と（金属）沈殿物を減少させる。UV の維持管理費の削減につながる最適なオゾン量に起因する UV 吸光度の減少には、消毒とエネルギー消費の両方で、オゾンと UV の間に強い相乗関係があることがいくつかの研究で実証されている（Cushing et al. 2003a, Cushing et al. 2003b, Edwards et al. 2003）。Hargy と Landry（2007）はオゾンが紫外線消毒に対する効果的な前処理技術であることを、パイロットテストで実証した。前オゾン処理は、0 から 50NTU の濁度の水に対して UVT を 8% 程度増加させた。粒状活性炭（GAC）の吸収も溶解有機物を除去する。一般に、水処理フローの最後の UV 吸光度が最も低いので、UV 消毒はフローの最後に設置すればコスト削減に最も効果的である。

飲料水には水の UVT に影響を与えるのに十分な濃度の化学物質が添加されている可能性がある。表 3.5 に一般的な水処理後の化学物質の UV 吸収係数を示す。これらの化学物質のうち、鉄イオン、オゾン、過マンガン酸塩、塩素は水の UV 吸光度に影響を与える可能性が大きい。

表 3.5 水処理後に含まれている一般的な化学物質の UV 吸光度特性

Compound	Molar absorbance ( $M^{-1} \text{ cm}^{-1}$ )	Mass-based absorbance ( $L/\text{mg cm}^{-1}$ )
Ozone ( $O_3$ ) (aqueous)	3,250	0.0677
Ferric iron ( $Fe_3^+$ )	2,360	0.042
Permanganate ( $MnO_4^-$ )	657	0.0055
Hypochlorite ( $ClO^-$ )	73.4	0.0014
Hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ )	18.7	0.0006
Ferrous iron ( $Fe_2^+$ )	28	0.0005
Sulfite ( $SO_3^-$ )	16.5	0.0002
Zinc ( $Zn_2^+$ )	1.7	0.0000
Ammonia ( $NH_3$ )	NSA	NSA
Ammonium ( $NH_4^+$ )	NSA	NSA
Calcium ( $Ca_2^+$ )	NSA	NSA
Hydroxide ion ( $OH^-$ )	NSA	NSA
Magnesium ( $Mg_2^+$ )	NSA	NSA
Manganese ion ( $Mn_2^+$ )	NSA	NSA
Phosphate species	NSA	NSA
Sulfate ( $SO_4^-$ )	NSA	NSA

NSA – No significant absorbance

## 微粒子

水中の微粒子は UV 光を吸収、散乱し、UVT に影響を与える。微粒子が及ぼす UVT への影響は、積分球などを備えた分光光度計を用いて効果的に特性を明らかにすることができる。

微粒子は病原体を包み込んでおり、消毒などから保護している可能性がある。下水中の微粒子は指標微生物の不活化速度（UV 照射量と log 生残率の関係）に対して 3 から 4log を越えたあたりでテーリングする原因となる。飲料水中の標的病原体の消毒における微粒子の影響を評価することは困難である。なぜなら病原体の濃度を測定するのに現在使用されている方法では検出限界に満たないためである。飲料水中の微粒子が UV 不活化に及ぼす影響を調査するために、微生物を添加する方法が使われた。微粒子を含んだ水に MS2 のような微生物を添加し、スターラーで混合する。微生物と微粒子を十分な時間混合した後、不活化速度を測定する。Malley ら (2000) は濁度 2 NTU の飲料水において、添加した MS2 を 2 log 不活化するために必要な UV 照射量が増加したことを報告した。Petri ら (2000) は、凝固した鉄によって MS2 フェージの耐 UV 性と濁度が増加することを観察した。Christensen と Linden (2000) は、UV 照射量に及ぼす懸濁粒子の影響を評価するためにベンチスケールでテストを行った。その結果、コリメートビーム（平行光）で UV 照射したところ、濁度 1 ~ 10 NTU の原水でそれぞれ 5 ~ 30% UV 照射量が減少した。ウイルスを

十分凝集させるため、硫酸バンドを用いてカオリン粘土粒子に捕捉させた MS2 は、凝集させていない MS2 より約 1.1 log 不活化が減少した(Templeton ら 2003)。Örmeci と Linden (2003) は、微粒子非共存下での大腸菌が照射量 50 mJ/cm<sup>2</sup> で完全に不活化するのに対し、微粒子共存下では 100 mJ/cm<sup>2</sup> まで照射しても大腸菌は生存したことから、微粒子共存下での大腸菌が微粒子非共存下での大腸菌に比べて耐 UV 性が高くなることを明らかにした。

Passantino と Malley は、微生物を添加した水といくつかの未ろ過飲料水を用いてコリメートビーム(平行光)のテストを行った。その結果、濁度 12 NTU まで UV の性能に影響を与えなかった。その原因として、濁度成分である粘土粒子に、添加した微生物が付着しなかったため、という可能性がある。Oppenheimer ら(2002) は、クリプトスポリジウムとジアルジアを不活化できる低圧および中圧ランプを使った実験で、病原体を未ろ過原水に添加すると UV 照射量が濁度 7 NTU まででは影響されないことを明らかにした。同様に、Wobma ら(2003) は低圧および中圧ランプのパイロットテスト機に未ろ過水を通水し、14 か月の高濁度試験を行った。その結果 UV 照射量は、4 NTU までの濁度に影響されなかった。

原水中の粒子は、組成、サイズが多様であり、大きな分子、微生物、粘土粒子、およびフロックを含んでいる。微粒子の発生源には、下水放流水、浸食、雨水、微生物の増殖、および動物からの排泄物が含まれている。微粒子中のそれらの濃度は季節的にも一時的にも変化する。嵐、湖沼の反転作用、春の雪解け水は、微粒子の濃度を増加させる。

微生物への UV 照射に及ぼす微粒子の影響を考慮すると、飲料水の UV 消毒はろ過後に設置することが最適である。Linden ら(2002) は 12 ヶ所の現場からのろ過水で MS2 の不活化実験を行った。その結果、UVT(70 から 97%)、濁度(0.05 から 0.3 NTU)、微粒子総数(>10 $\mu$ m の微粒子 1000 c/mL まで)で不活化効果が影響されなかったことを明らかにし、外的要因による病原体の UV 感受性の変化を減少させるには UV の前段で適切な前処理を行うことを示唆した。

## 水温

低圧ランプの UV 出力はそのランプ動作温度に依存し、次にスリーブを通して水への熱伝導に依存する。熱伝導は水温に影響され、地理的位置と水源に依存して 0 付近から 30 超に変化する。低圧 UV ランプを用いた照射槽は、ランプ出力が最小となる水温で目的の照射量を確保するように設計する必要がある。低圧高出力ランプもまた水温に依存する可能性がある。中圧ランプの UV 出力は水温で変化しない。

## 第4章: UV 消毒に関する情報のデータベース解析

### 水源の種類別 UV システムの消毒

図 4.20 にカナダとアメリカに納入された UV システムの数を、水源の種類別に示す。データは 123 ヶ所の事業者から入手したものである。水源は地下水、地表水の影響を受ける地下水 (GWUI) 湖沼、配水池、河川、またはこれらを組合せたもので分類した。0.5 MGD (1,900 m<sup>3</sup>/日) 超の UV システムの約 24%が地下水、76%が地表水を処理している。

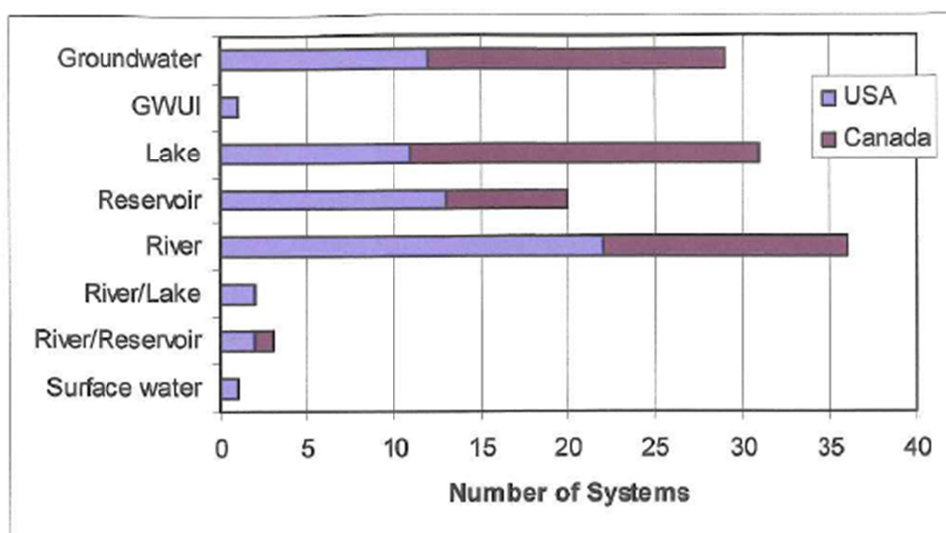


図 4.20 各水源で実施されている UV システムの数

### UV システムの設置場所

図 4.21 は 95 ヶ所の事業者からの回答をもとに、UV システムが稼働している位置を示している。

- ・ 52%が通常の専用 UV 装置でろ過水を
- ・ 14%がフィルターギャラリー中の個々のろ過水を (フィルターギャラリーとは?)
- ・ 15%が高または低揚水ポンプの後段に
- ・ 6%が井戸水を直接

このデータはまた、UV システムが一般的でない位置に配置されていることをも示している。

- ・ ろ過の逆洗水の処理 (1 か所)
- ・ ろ過の前処理 (1 か所)
- ・ 浄水池 (clearwell) の後段 (3 か所)
- ・ 配水池 (Finished storage reservoir) の水の処理 (1 か所)

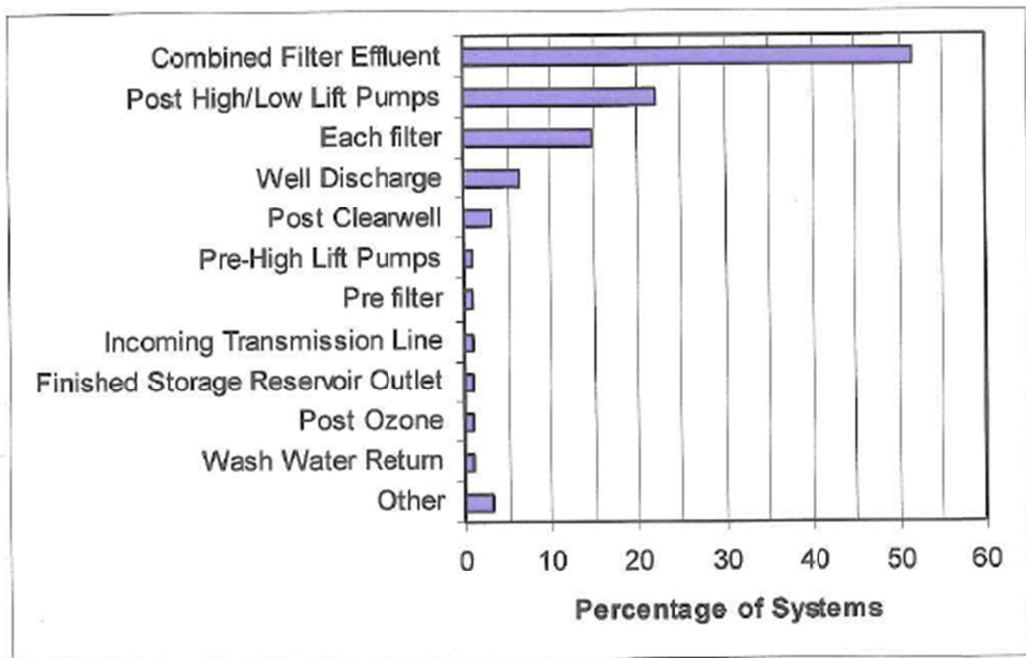
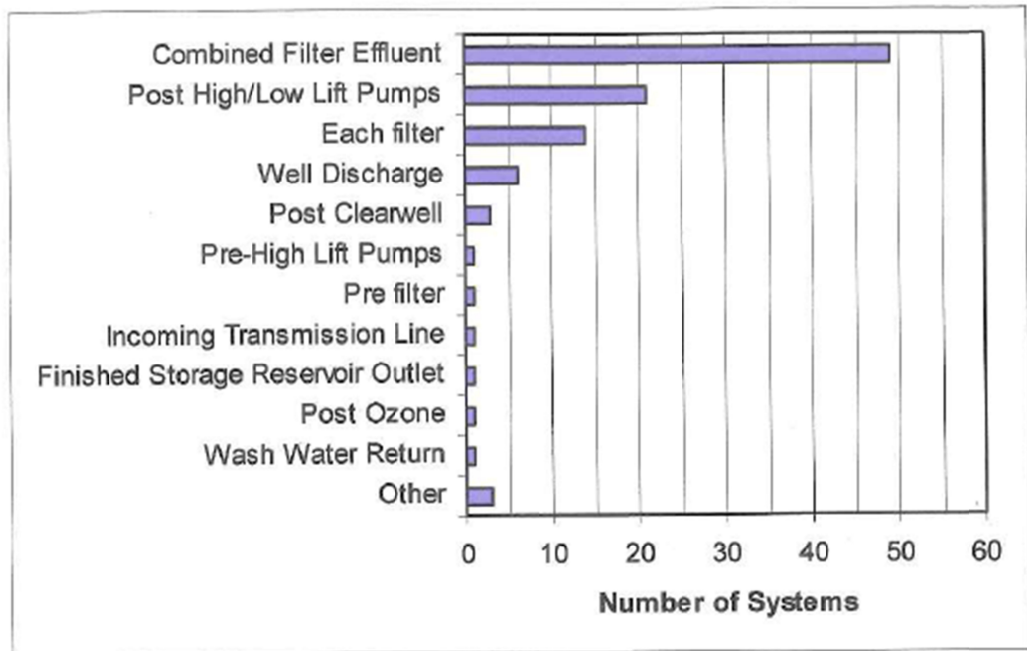


図 4.21 UV システムが設置されている場所

図 4.22 から 4.25 に、UV システムの設置およびレイアウトの特殊な例を示す。図 4.22 は、アルバータ州エドモントン（カナダ）の Rossdale 水処理プラントでフィルターギャラリーに設置されている Calgon36“Sentinel である。ろ過水を 80MGD（300,000m<sup>3</sup>/日）まで処理するために 9 つの照射槽が使用されている。UV 照射槽は、フィルターギャラリーの

厳しい制約内に収まるように垂直に配向されている。水は UV 照射槽の下部から入って上部の密閉構造に抜ける。その密閉構造は自由水面とオーバーフロー堰を持ち、接続されているろ過水配管に水を運ぶ。普通の形状でないため、まったく同じ配管形状を使用した UV 照射層をポートランド試験施設で検証した。

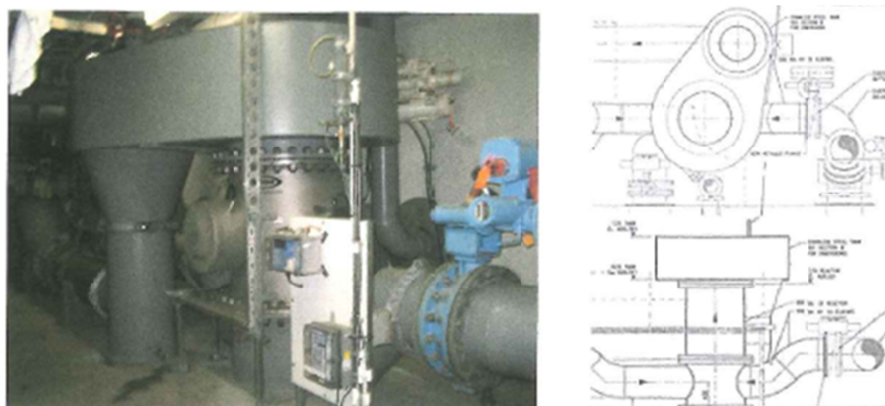


図 4.22 アルバータ州エドモントン（カナダ）の Rossdale 水処理プラントでろ過水配管に設置されている Calgon36“Sentinel”。ろ過水を 80MGD（300,000m<sup>3</sup>/日）まで処理するために 9 つの照射槽が使用されている。UV 照射槽は、フィルターギャラリーの厳しい制約内に収まるように垂直に配向されている。

図 4.23 に、アリゾナ州 Havasu 湖の Havasu 湖水処理プラントに設置された WEDECO K143 を示す。UV システムは屋外の地下に置かれ、26 MGD（98,000m<sup>3</sup>/日）までのろ過水を処理している。それらは天井のない地下室（trap-coverd vault）に配置されているので、UV 照射槽の環境は夏暑く、一年中埃っぽい。一方、下水のシステムは一般的に屋外に設置されているが、埃の多い環境が電氣的故障や照射層の制御盤の冷却障害を引き起こしていると事業者は感じている。



図 4.23 アリゾナ州 Havasu 湖の Havasu 湖水処理プラントに設置している WEDECO K143。UV システムは屋外の地下に置かれ、26 MGD（98,000m<sup>3</sup>/日）のろ過した地下水を処理している。将来増設のための閉止フランジと複数の照射槽の上の埃に注意が必要。



図 4.24 に、オンタリオ州 North Bay (カナダ) の Trout 湖水処理プラントにある Trojan UVSwift™ システムを示す。この UV システムは Trojan UVSwift™8L24 照射槽を 4 つ垂直の向きで使用し、21MGD (79,000m<sup>3</sup>/日) までの未ろ過水进行处理している。照射槽はランプ、ランプスリーブ、UV センサ、その他部品を運転管理者が容易に保守点検できるように設置している。



図 4.24 オンタリオ州 North Bay (カナダ) の Trout 湖水処理プラントで未ろ過水 21MGD (79,000m<sup>3</sup>/日) を処理している Trojan UVSwift™ の照射槽。

図 4.25 は TrojanUVSwift™ であり、オハイオ州レバノンの Deerfield-Hamilton 水処理プラントでろ過した地下水 12 MGD (45,000m<sup>3</sup>/日) までを処理している。UV システムのバイパスと将来増設する配管設計になっている。



図 4.25 オハイオ州レバノンの Deerfield-Hamilton 水処理プラントでろ過した地下水 12 MGD (45,000m<sup>3</sup>/日) を処理するために使用されている TrojanUVSwift™24

### UV 水処理システムの目的

処理場に UV 照射槽を採用した理由を参加した調査対象の事業体に質問した。各事業体が UV システムを採用するに至った処理目的の数を図 4.26 に示す。事業体が示した処理目

的の数は、1～7つの範囲で、平均が2つであった。

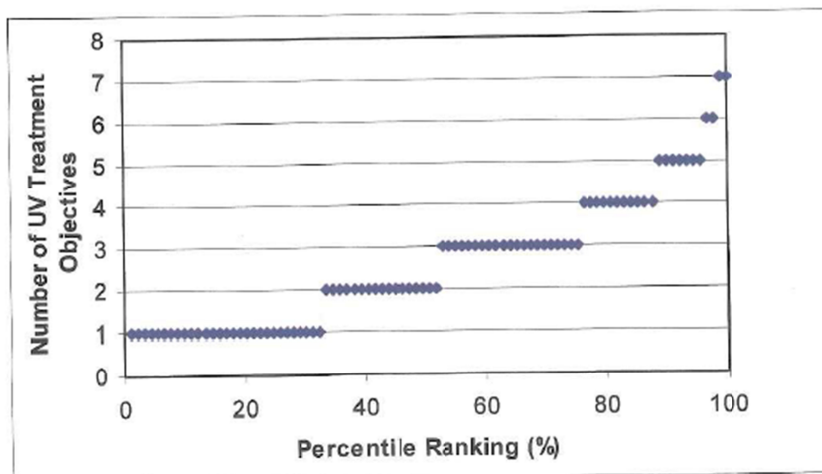


図 4.26 UV システムの処理を採用した目的数のヒストグラム

図 4.27 は地下水と地表水を水源とする事業者が述べた UV システムによる処理目的のヒストグラムである。最も一般的な目的は、クリプトスポリジウムとジアルジアの不活化で、続いてマルチバリアの消毒、薬品消毒の CT 削減、DBP（消毒副生成物）削減であった。5 つの事業者は、処理目的として HPC（従属栄養細菌）及び有害な細菌の不活性化を挙げ、2 つは UV 光と過酸化水素を用いた促進酸化を挙げた。

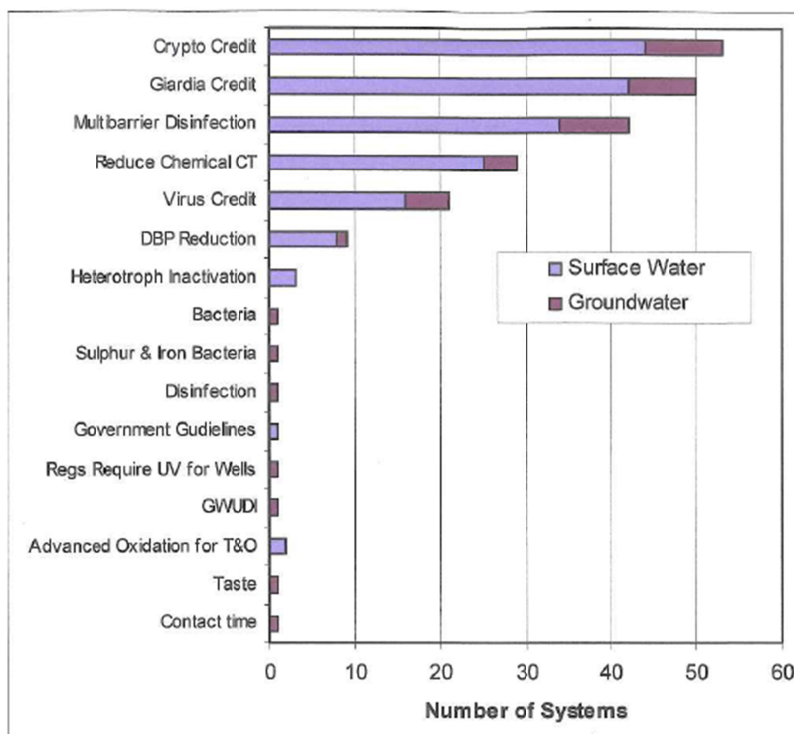


図 4.27 各水源における UV システムの処理を採用した目的数のヒストグラム

## 検証

世界中の多くの監督管轄機関は、水道施設が照射量モニタリングのアルゴリズムを検証した UV システムを使用することを要求している。UV の検証は、UV 照射槽による照射量と流量、UVT、UV センサ読み取り値、およびランプの動作状態との関係の特徴づけている。検証期間中、紫外線照射槽の実機の一つを専用の試験施設または構築された設備に設置する。

照射槽は各種の流量、UVT 及びランプ電力設定で動作している。各 UVT は、照射槽の上流側に紫外線吸収剤を注入することによって得られる。また、試験微生物の log 不活化は、照射槽の上流側のフローに注入され、照射槽の入口と出口の試料を用いて測定される。試験微生物の UV 照射量応答もまた、コリメートビーム装置を用いて実験室で測定される。UV 照射量応答曲線は換算紫外線照射量または RED と呼ばれる UV 照射量の値に、試験微生物の測定された log 不活化が関連付けられる。

収集されたデータは、UV 照射量監視アルゴリズムを定義するために分析され、照射槽、一連の試験、収集されたデータ、分析、紫外線照射量監視アルゴリズム、および消毒の想定について報告書に記録される。通常は、飲料水へ適用する場合の UV の検証は USEPA UVDGM、ドイツ DVGW ガイドライン、オーストリア ONORM スタンド、または NSF スタンド 55 に従って行われる。

図 4.106 は、今回の調査において設備で使用される UV システムの製品ラインがすでに検証されていたということを示すヒストグラムである。検証の半分は専用の試験で実施されており、ポートランド UV 検証施設（オレゴン州ポートランド）、ニューヨーク紫外線検証と研究所（ニューヨーク州ジョンズタウン）、ドイツ DVGW 試験設備、およびオーストリアにある ONORM の施設で実施された。UV システムが導入された施設のうち、38%の検証は導入時にオンサイトで行われ、8%は地元の施設側で設定された一連のテストを用いて UV メーカーによって実施された。

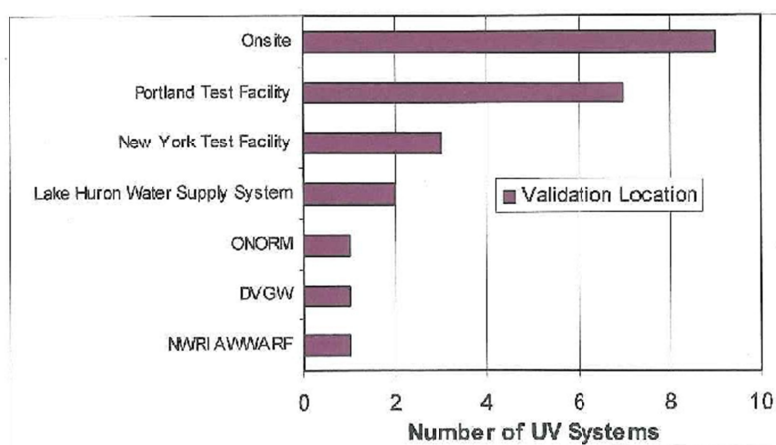


図 4.106 検証場所

図 4.107 は、供給している検証を監督し、検証データを分析し、検証レポートを作成した組織のリストである。オレゴン州ポートランドに拠点を持つ Carollo Engineers およびニュージャージー州マーワールの Hydroqual 社は、それぞれ、ポートランド、ニューヨーク試験施設で行われた試験を監督した。CH2M Hill はオンサイトとニューヨークの施設で行われた検証について監督をしている。オンタリオ州ロンドンの Dillon Consulting は、ヒューロン湖の試験施設で Trojan 社が実施した検証作業の監督をしている。カリフォルニア州ストックトンの Eco:Logic は、カリフォルニアにある Trojan 社システムのオンサイトでの検証を提供した。オーストリアのウィーン衛生研究所は、オーストリアの ONORM 基準に従った検証を提供した。ドイツのジークブルクの UV システム向け DVGW 試験研究所ではドイツ DVGW ガイドライン（図 4.106）に従って検証が行われた。

施設は UV システムの検証範囲に関するデータを提供するように要請されている。UV 照射槽は最小流量が 0.066 ~ 20 MGD (250 ~ 76,000m<sup>3</sup>/日) の範囲で検証され、最大流量が 0.29 ~ 60 MGD (1,100 ~ 227,000m<sup>3</sup>/日) の範囲で検証されたことを報告した。最小 UVT は 70 ~ 95% の範囲であり、最大 UVT は 90 ~ 98% の範囲であった。最小 UV 照射量は、5 ~ 41 mJ/cm<sup>2</sup> で、最大照射量は 34 ~ 127 mJ/cm<sup>2</sup> の範囲であった。

UV 製品の検証に使用した試験微生物のヒストグラムを図 4.108 に示す。示されているように、検証の 83% は、試験微生物として MS2 ファージを使用していた。DVGW ガイドラインと ONORM 規格は、試験微生物として枯草菌胞子の使用を指定している。NSF スタンドアード 55 の古いバージョンでも枯草菌胞子の使用が指定されていたが、最新のバージョンでは MS2 ファージを指定している。USEPA の UVDGM は、いずれの試験微生物の使用も指定していないが、試験微生物の標的病原体の UV 感受性の比較に基づいて、検証に不確実係数を適用している。2003 年草稿版の UVDGM では、検証の不確実性を説明した MS2 ファージに基づいたターゲット REDs を提供している。2006 年の UVDGM では、試験微生物の紫外線感受性を考慮して、不確実係数にバイアスをかけた RED を提供している。

2006 年の UVDGM の前に北米で実施された検証作業の多くは、MS2 ファージを用いたものだったが、2006 年の UVDGM の出版により、多くの UV 販売会社はクリプトスポリジウムやジアルジアの想定に、紫外線システムをより費用対効果の高い活用方法として実現するために、MS2 と T1 または T7 ファージの組み合わせを使用している。

図 4.109 に検証中に使用された紫外線吸収剤のヒストグラムを示す。半数の UV システムは、LSA またはリグニンスルホン酸を使用して検証され、1/4 はフミン酸及びフルボ酸の濃縮液である SuperHume<sup>TM</sup> を使用して検証された。残りはコーヒーとチオ硫酸ナトリウムを使用して検証された。LSA はポートランド、ニューヨーク、DVGW 試験設備で使用された。SuperHume<sup>TM</sup> は AwwaRF プロジェクトの一部として、紫外線吸収剤として開発された (Wright ら 2007) もので、ポートランドの UV 検証施設で使用された。チオ硫酸ナトリウムは、低圧用 UV システムを検証するために ONORM が使用していた。コーヒー

は、北米で検証を行った早い時期に Trojan 社や他のユーザーによって使用された。

図 4.110 は、検証データを用いて開発された照射量モニタリングアルゴリズムの種類ヒストグラムを示す。北米の施設で検証の大部分（58%）は「計算された照射量」アルゴリズムを開発するために行われ分析された。また RED は数式を用いて、流量、UVT、UV 強度およびランプ動作状態の関数として定義される。検証の 33%は「UV 強度設定値」アルゴリズムを開発するために行われ、分析された。UV 強度設定アルゴリズムは、必要な UV 照射量を照射するために、所定の流速で必要な最小 UV センサの読み取り値を定義している。UV 強度設定値アルゴリズムは、最新の DVGW ガイドラインと ONORM 規格で使用できる唯一のアルゴリズムである。アルゴリズムの 1 つの利点は、それがオンライン UVT モニタを導入する必要がなくなり、UVT の入力を必要としないことである。一つの検証が行われ、「UV 強度/ UVT 設定値」アルゴリズムを定義するために分析された。 UV 強度/ UVT 設定値アルゴリズムは、必要な UV 照射量を照射するために所定の流速で必要な UV 強度及び UVT を定義している。

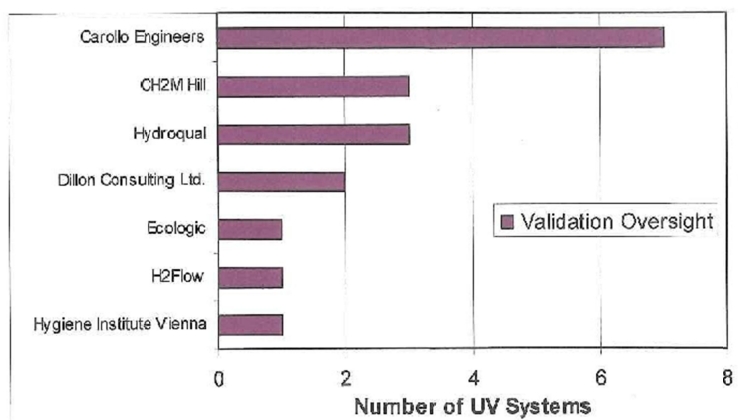


図 4.107 検証を監督した組織

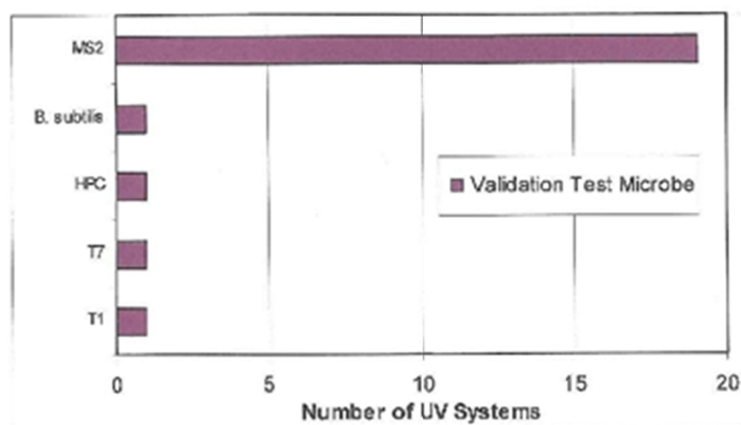


図 4.108 検証で使用了した試験微生物

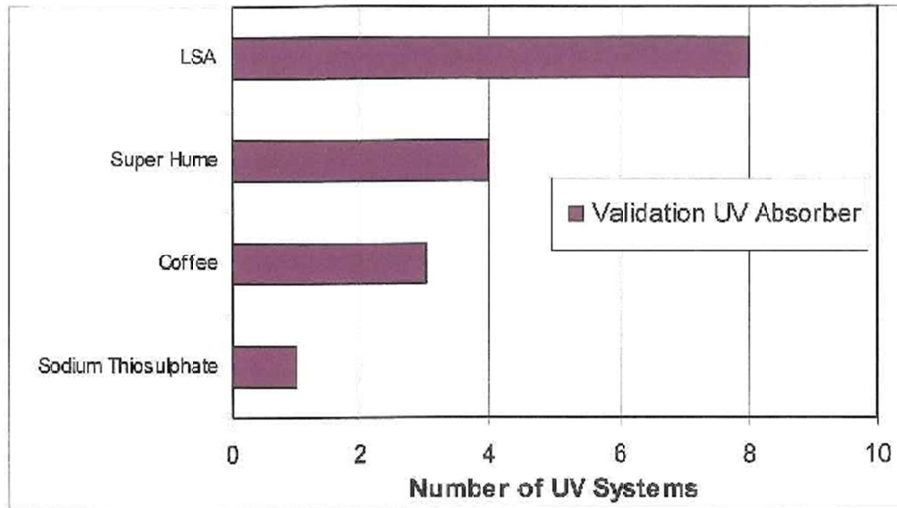


図 4.109 検証中に使用された UV 吸収剤

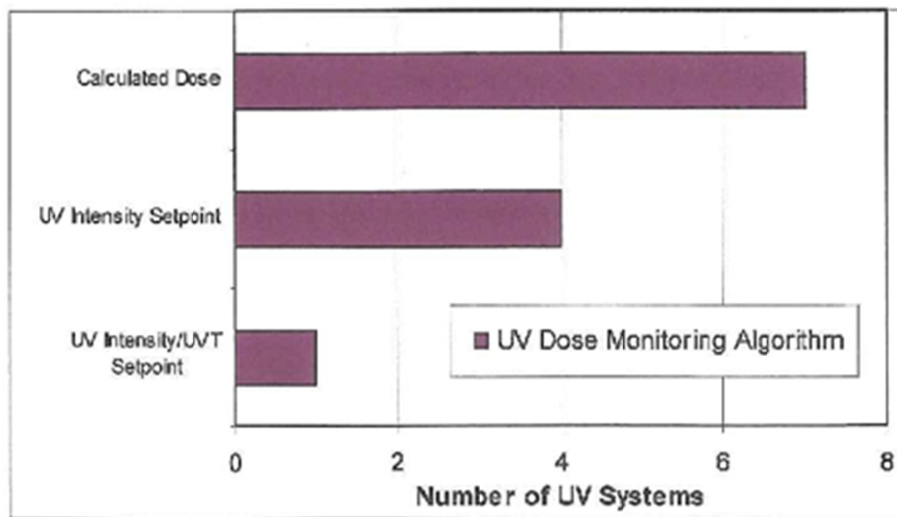


図 4.110 検証データを用いて開発された照射量モニタリングアルゴリズム

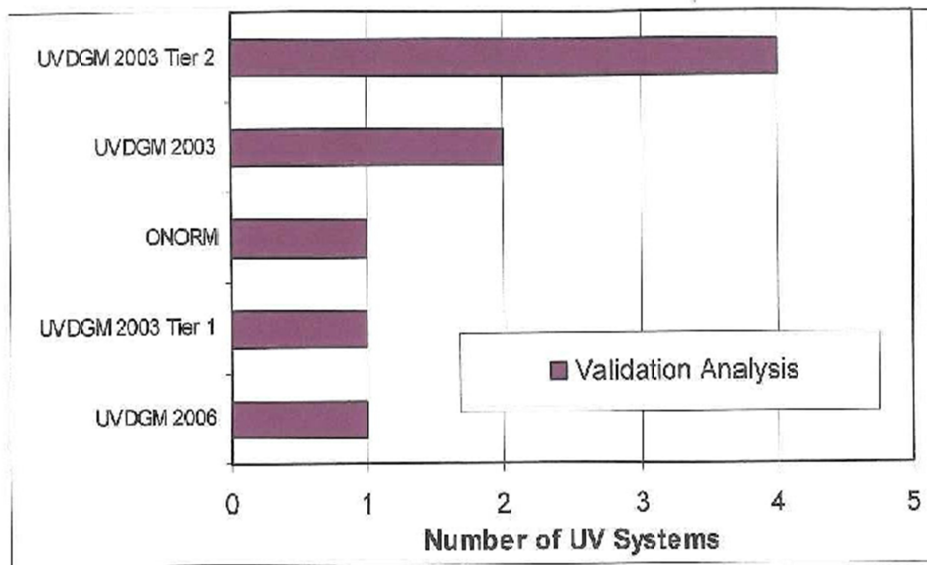


図 4.111 検証解析

図 4.111 は検証試験において病原体の log 不活化を定義するために使用される手法を示す。9 件のうち 7 件の検証は 2003 年の UVDGM に従って分析されており、その多くは不活化の想定のために必要である MS2 REDs を定義した Tier 1 の手法を用いて分析された。1 件の検証は 2006 年の UVDGM に沿って分析されており、もう 1 件は ONORM の基準に準拠して分析された。検証の大部分は 2003 年の UVDGM に従って分析されたという調査は驚くべきことではないが、それは多くの参加した調査対象の UV システムが 2006 年以前に設計され、導入されていたからである。

## 第9章

### プロジェクト要旨

紫外線消毒は、1950年代からヨーロッパで、飲料水を処理するために使用されており、ここ二十年では北米の排水処理でも使用されている。この実績は紫外線消毒が確立された技術であることを示しているが、紫外線消毒の実施は過去10年で規制や科学技術の面で大幅に進化している。

その結果、水道事業者、技術者、政府関係者から、紫外線消毒に関して様々な問いが生まれている。すなわち、誰が紫外線消毒を導入しているのか、設計基準が何であるか、UV照射量の効率的なモニタリング方法や照射量一定制御は何であるか、信頼性の高いUVシステムの要素はどのようなものか、UVシステムの維持管理にどのくらい手間がかかるのか、UV導入後どのようなことがわかったのか、などである。

このプロジェクトの目標は、これらの質問に答えるために飲料水へのUV消毒の知見の基礎を開発することであった。この目標を達成するには、プロジェクトチームを集め、参加施設、監督機関、コンサルタントからのUV殺菌に関する質問を、参加施設のUVシステムの調査データや、導入現場での評価を集めて分析し特定した。そして低圧高出力と中圧ランプの破損による水銀漏出の評価についても実施した。

### 調査データの概要

2008年春の間に収集した調査データは、飲用水への紫外線消毒が導入または実施中の0.5MGD(1,900m<sup>3</sup>/日)以上の流量の施設についてのもので、カナダの161の施設と米国の148の施設を示している。米国の紫外線消毒を実施しているトップ5の州は、ニューヨーク、マサチューセッツ、コロラド、カリフォルニア、アリゾナであった。紫外線消毒を実施しているカナダのトップ3の州はオンタリオ、ブリティッシュコロンビア、アルバータであった。導入されたUVシステムの数、2000年から2003年に増加したが、2004年がピークで、2004年から2005年に低下した。おそらく2006USEPAUVDGMの発行を待っていた施設があったことに関連している。これらのシステムのうち、オンタリオ州ロンドンのTrojan Technologies、ペンシルベニア州ピッツバーグのCalgon Carbon Corporation、ノースカロライナ州シャーロットのWEDECO/ITTはそれぞれ約54%、17%、16%の市場シェアを持っていた。その他のUVベンダはAquionics Inc、Berson UVTechniek、Hanovia Ltd、Infilco Degremont Inc、R-Can Environmental、およびSiemens USAが含まれていた。

### UV設計基準

UVシステムの78%は、クリプトスポリジウムとジアルジア不活化のため設置されており、ウイルス不活化のためが12%でそれは40mJ/cm<sup>2</sup>の「UV照射量」に基づいている、そして9%は従属栄養生物、大腸菌群または細菌の不活化のためである。クリプトスポリジウム



とジアルジアの両方を不活化するために紫外線消毒を使用する施設は、典型的には、3log 不活化の処理目標を挙げている。施設は通常、ジアルジアで 0.5、1.0、または 4.0 log 不活化、ウイルスでは 4.0 log 不活化、細菌では 2.5 から 4.0 log 不活化を処理目標として挙げている。調査した 2 つの施設では促進酸化処理ために、UV 光と過酸化水素を使用した。

ターゲットとする log 不活化の基準は三つのカテゴリに分類することができる。最初のカテゴリは従来または直接ろ過システムに紫外線消毒を用いたもので、ジアルジアでは 0.5 または 1.0 log 不活化としており、それは薬品消毒の CT を軽減することができる。第 2 のカテゴリは長期第 2 強化表流水処理規定 (LT2ESWTR) の不活化の要件に基づいて、2.5 または 3.0 log 不活化のために紫外線消毒を使用するシステムである。第 3 のカテゴリはクリプトスポリジウム、ジアルジア、ウイルスや細菌に対して 4.0 log 不活化のために紫外線消毒を使用するシステムであり、これは 40 mJ/cm<sup>2</sup> の UV 照射量が病原体へ 4.0 log 不活化を与える見込みに基づいている。システムの大半 (78%) は設計「UV 照射量」を挙げており、一般的には MS2 RED で 40 mJ/cm<sup>2</sup> としている。残りは 5~120 mJ/cm<sup>2</sup> の範囲の設計照射量を挙げている。

UV システムの約 24% は地下水、76% は地表水を処理している。設計流量は 0.03 ~ 2,200 MGD (120 ~ 8,300,000m<sup>3</sup>/日) の範囲であり、総設計容量は 6.1 BGD (23,000,000m<sup>3</sup>/日) であった。

0.5MGD (1,900m<sup>3</sup>/日) より大きい UV システムの 59% は 0.5 MGD ~ 5 MGD (1,900 ~ 19,000m<sup>3</sup>/日) で設計され、37% が 5~50 MGD (19,000 ~ 190,000m<sup>3</sup>/日)、4.7% が 50 ~ 500MGD (190,000 ~ 1,900,000m<sup>3</sup>/日) で設計され、0.7% が 500 MGD (1,900,000m<sup>3</sup>/日) 以上の設計流量で設計されていた。

設計 UVT の範囲は 70~98% で中央値は 90% である。設計 UVT のヒストグラムは 85, 90, 95% でそれぞれピークを示し、設計 UVT 値から推測されているか、測定 UVT が四捨五入されている施設があることを示している。UVT は簡単に分光光度計を用いて測定することができ、UV システムの規模に重要な影響を有している。したがって、施設は常に正確に測定されたデータ設定に基づいて、設計 UVT を決定する必要がある。

多くの施設は、設計流量と UVT のデータを提供していながら、設計ランプ寿命や汚れ係数に関するデータについて提供しなかった。これは多くの施設が UV システムの規模を定める際に使用した設計ランプ寿命や汚れ係数に気が付いていなかったことが推測される。この限られたデータより、UV システムの規模決定に使われたランプ寿命と汚れ係数は 60 ~ 90% の範囲であることを示している。

UV システムの 52% はろ過水を処理しており、一方 14% は複数ろ過池において個々のろ過水を処理している。システムの 15% は、高または低揚程のポンプの後に位置しており、6% は井戸の放流側に直接設置されていた。いくつかの UV システムが通常とは異なる場所に位置していた、ろ過の逆洗水を処理するシステムが 1 つあり、ろ過の前に配置されたシステムも 1 つあった、浄水池の後に処理しているシステムが 3 つあり、配水池の水を処理

するシステムが1つあった。

導入された中圧システムの損失水頭は、0.8～30 インチの範囲であり中央値は5.9 インチであった。導入された低圧高出力システムの損失水頭は、6～30 インチの範囲で14.5 インチの中央値であった。データでは中圧システムが一般的に低圧高出力システムよりも低い損失水頭を有することを示している。地下水を処理している69%のUVシステムでは、ポンプによる揚水を必要としている。これとは対照的に、地表水を処理している69%のUVシステムではポンプによる揚水が不要であった。

## UV システムの構成

UV 照射槽は UV ランプを備えており、UV ランプは石英保護管に收容されていて、電子/電磁安定器により電力の供給や制御を受けている。209 の UV システムのうち73%は中圧ランプを使用し、27%は低圧高出力ランプまたはアマルガム低圧高出力ランプを使用していた。表9.1にUVランプ、スリーブ、安定器に関する情報をまとめる。

低圧高出力ランプの定格電力は240～427 Wの範囲、中圧ランプの定格電力は2.4～21.6 kWの範囲だった。中圧照射槽あたりのランプ数は2～9本、システムあたりでは2～120本だった。低圧高出力照射槽あたりのランプ数は6～240本、システムあたりでは6～13,440本だった。システムあたりのランプ本数平均の比はアマルガムランプ10：中圧ランプ1だった。中圧照射槽あたりの定格消費電力は9.3～194 kWの範囲、システムあたりでは5.6～1,284 kWの範囲だった。低圧高出力照射槽あたりの定格消費電力は1.9～58 kWの範囲、システムあたりでとしては1.9～3,226 kWの範囲だった。UV システムのうち65%では非常用電源を利用（うち89%がディーゼル/ガス発電）、55%で主にシステムの PLC（訳者注\_Programmable logic control：プログラム可能論理回路）のために UPS（訳者注\_uninterruptible power supply：無停電電源）を利用しているとの報告だった。

UV 照射槽は経時的にランプを收容する石英スリーブやUV強度計ポートの石英窓の濡れ面上に無機化合物が析出/蓄積することにより汚損することもありうる。汚損物質を取り除くには UV 照射槽を定期的に洗浄する。中圧 UV 装置では通常自動ワイパを備えていたのに対し、低圧高出力 UV 装置では機械/物理化学 自動ワイパ、オフライン酸洗浄、手動洗浄などを利用していた。オフライン酸洗浄での使用薬品にはリン酸やクエン酸があった。手動洗浄での使用薬品には CLR（訳者注\_calcium lime rust：家庭用洗浄剤）や Lime-A-Way（訳者注\_リン酸系浴室洗剤）のようなスケール除去剤、NSF/ANSI 飲料水処理薬品基準60の適合リスト外の市販のスケール除去剤が含まれた。事業体によると低圧高出力システムの25%および中圧システムの53%では追加で手動洗浄が必要となったとのことだ。表9.1にはUVシステムの洗浄に関する情報も示す。

UV 照射槽には UV 強度計があって、照射槽内のある地点の UV 強度を監視している。UV システムは DVGW 適合品か ONORM 適合品または独自開発の UV 強度計を使用していた。ONORM 適合強度計は低圧高出力システムでよく使われており、DVGW 適合強度計

は中圧システムでよく使われていた。69%の事業者が設置 UV 強度計をチェックするための基準強度計を使用していると回答した。UVDGM では事業者に基準強度計を 2 つ以上所有するよう推奨しているが、多くの事業者は基準 UV 強度計を一つしか有しないと報告した。表 9.2 に設置 UV 強度計と基準 UV 強度計に関する情報をまとめて示す。

表 9.1 UV ランプ、スリーブ、安定器について

	中圧システム	低圧高出力システム
ランプ寿命	5,000 時間	12,000 時間
ランプ 1 本あたり交換労力	20 分 (5-60 分)	10 分 (2-17 分)
照射槽内ランプ全交換労力	1 時間 (0.5-4 時間)	1.5 時間 (0.5-3 時間)
ランプ交換費用	428 ドル (286-1,500 ドル)	190 ドル (148-252 ドル)
スリーブ寿命	5 年	20 年
スリーブ 1 本あたり交換労力	30 分 (6-120 分)	5 分 (5-22 分)
照射槽内スリーブ全交換労力	2 時間 (0.5-14 時間)	1 時間 (0.5-2 時間)
スリーブ交換費用	286 ドル (103-900 ドル)	95 ドル
安定器タイプ	55% 電子 45% 電磁	100% 電子
安定器寿命	5 年 (5-10 年)	5 年
安定器 1 体あたり交換労力	53 分 (5-132 分)	5 分 (2-30 分)
照射槽内安定器全交換労力	1 時間 (18 分-4 時間)	45 分 (2-30 分)
安定器交換費用	1,850 ドル (655-7,065 ドル)	350 ドル (250-550 ドル)
自動ワイパ頻度	10 分おき-10 時間おき	1 時間おき
オフライン酸洗浄頻度	1 回/月-1 回/年	3-12 ヶ月おき
照射槽あたりオフライン酸洗浄労力	4 時間 (2-24 時間)	3 時間 (30 分-10 時間)
洗浄システム メンテ	1 回/週-15 ヶ月おき	
メンテ労力	3 時間 (1-9 時間)	

表 9.2 UV 強度計について

設置 UV 強度計のチェック間隔	4.5 ヶ月 (1-12 ヶ月)	
設置 UV 強度計のチェック労力	1 時間 (2 分-3 時間)	
設置 UV 強度計チェックの合否基準	5-20%	
設置 UV 強度計を現場で校正する事業者	中圧システムの 54% 低圧高出力システムの 25%	
設置 UV 強度計の現場校正間隔	1 週間-1 年	
設置 UV 強度計のオフサイト校正間隔	1 回/年	
	中圧	低圧高出力
UV 強度計のオフサイト校正の費用	500 ドル (400-1,200 ドル)	-
UV 強度計寿命	4 年 (1-5 年)	4-10 年
UV 強度計交換労力	2 分-2 時間	2-5 分
設置 UV 強度計費用	1,500 ドル (150-3,000 ドル)	650-689 ドル
基準 UV 強度計費用	2,000-3,000 ドル	

UV システムの照射量モニタリングのアルゴリズムは概して流量と UVT を入力データとしている。48%の事業者が照射槽系列ごとに流量計を用いている一方、40%は流量計を合流部で 1 台だけ用いていた。69%の UV システムで電磁流量計を使用し、14%ではベンチュリ管を、その他では挿入式電磁流量計、挿入式/ベルト固定式超音波流量計、プロペラ式流量計、タービン流量計を使用していた。

63%の事業者がオンライン UVT モニタを使用していると報告し、66%が実験室用 UV 分光計を使用していると報告した。52%の事業者はオンライン透過率モニタを定期的 (2 回/日 ~ 1 回/6 ヶ月) にチェックしていると報告した。34%の事業者が実験室用 UV 分光計を所有せず、48%がオンライン透過率モニタのチェックを行っていないとは驚くことであった。先行調査によると UVT モニタの精度は UVDGM が推奨する 2%の基準を著しく超えることがある。UVT の予測値が 2%過不足すると、照射量の予測値に著しい過不足が生じうる。実験室用分光光度計は比較的低価格であること、UVT の測定がごく簡単であることを考慮すると、UV 消毒を行うすべての事業者が UV 分光光度計を所有してオンライン透過率モニタのチェックをするべきである。

### 規制と性能確認

米国内システムの 21%、カナダ国内システムの 69%で *Cryptosporidium* の不活化認定

を得るため、米国内システムの 29%、カナダ国内システムの 80%で Giardia の不活化認定を得るため、米国内システムの 25%、カナダ国内システムの 71%でウイルスの不活化認定を得るために UV システムを使用しているとの報告だった。

データでは米国よりもカナダ国内の方が、より高い割合で不活化認定を獲得していることになる。ウイルス不活化認定を求める事業体の数の多さは、UVDGM のアデノウイルスに対する要求照射量 (4 log 不活化に 186 mJ/cm<sup>2</sup>) を考えると驚異的である。おそらく、事業体は DVGW か ONORM 基準または NSF 基準 55 で認められる log 不活化率に基づいて 4log のウイルス不活化を求めているのだろう。

米国内事業体の 43%が off spec となる要件を定めていて、42%が off spec 時の性能を計算していると報告した。しかしカナダ国内では 25%だけが off spec となる要件を定めていて、off spec 時の性能を計算している事業体はなかった。米国内事業体の 78%が UV 照射量と流量を監督機関に報告し、55%が UV 強度計の読み値とチェックデータを、44%が UVT とチェックデータを、33%が off spec 時の性能を報告している。対照的に、カナダでは 90-95%の事業体が UV 照射量と流量を監督機関に報告し、60%が UVT を、10%が UV 強度計データを、5%が UV 強度計と UVT のチェックデータを報告し、off spec 時の性能を報告している事業体は無かった。米国とカナダの違いは、UV システム運転に対する LT2ESWTR と UVDGM の影響度合いを反映しているのだろう。LT2ESWTR には off spec の基準が明記されており、UVDGM には UV 強度計と UVT モニタのチェックが明記されている。

UV システムの検証の半分は専用実験施設 (オレゴン州ポートランドの Portland UV Validation Facility、ニューヨーク州ジョンズタウンの New York UV Validation and Research Center、ドイツの DVGW 試験施設、オーストリアの ONORM 施設) で実施された。検証の 38%は UV システムが納入された現地で、8%は UV 業者で実施された。検証の 83%で MS2 ファージを、残り T1 ファージ、T7 ファージ、B. subtilis 芽胞、HPC (従属栄養細菌) を試験微生物とした。検証時に使用された UV 吸収剤には LSA (リグニンスルホン酸)、Super Hume、コーヒー、チオ硫酸ナトリウムなどがあつた。検証の 58%は計算照射量アルゴリズムを開発するために実施され、33%は UV 強度設定値アルゴリズムを開発するために実施され、残りは UV 強度/UVT 設定値アルゴリズムを開発するために実施された。

## 設計

低圧高出力システムの照射槽系列数は 1-56 の範囲で、Metro Vancouver と New York の UV システムがそれぞれ 24 系列、56 系列で設計されていた。中圧システムの照射槽系列数は 1-15 の範囲だった。驚くことに、低圧高出力システムの 18%と中圧システムの 34%では 1 系列しか使っていなかった。これらのシステムには予備用のもう 1 系列がなかった。

低圧高出力システムはすべて 1 系列 1 照射槽となっていた。しかしながら、112 の中圧シ

システムのうち、106 システムで 1 系列 1 照射槽、5 システムで 1 系列 2 照射槽、1 システムで 1 系列 3 照射槽だった。1 系列複数照射槽とした事例は、ウイルス不活化が促進酸化、または NWRI/AwwaRF ガイドラインに適合させるにあたり照射量を高めるなどの目的に使用されていた。

照射槽 2 系列以上を有する UV システムのうち 62%で流量調整バルブを用い、残りでは受動分流を使っていた。低圧高出力システムの多くは水平配置で、中圧システムでは 79%で水平配置、21%で垂直配置になっていた。

低圧高出力システムの 25%、中圧システムの 35%でパイロット研究を行っていた。パイロット研究が実施された目的は、水質や上流側での塩素処理が UV システムの運転に及ぼす影響の評価、ランプ寿命やファウリングや UV 照射量の評価、電源の質が UV システム運転に及ぼす影響の評価、維持管理コストや課題、運転員育成等の定量化、UV 設計基準の開発であった。

## 維持管理

低圧高出力システムに従事する運転員の数は 1~6 人の範囲で中央値は 4 人であった。中圧システムに従事する運転員の数は 1~15 人の範囲で中央値は 3 人であった。月当たりの労働時間の 10%タイム~90%タイムをとると、低圧高出力システムでは 1~20 時間、中圧システムでは 1~10 時間であった。

低圧高出力システムの 33%、中圧システムの 21%で UV 照射槽稼働中にランプスリーブが破損したことがあり、また低圧高出力システムの 70%、中圧システムの 27%で UV システムメンテ中に UV ランプが破損したことがあったと報告している。そして低圧高出力システムの 22%、中圧システムの 27%で照射槽稼働中にランプが破損したことがあったと報告している。このデータより、スリーブおよびランプの破損は起こるものであり、適切な水銀対応計画とともに正しく管理されるべきだと示唆される。

低圧高出力システムの 50%、中圧システムの 41%で、スリーブや UV 強度計窓のファウリングが観察された。53%の事業者は洗浄頻度を UV 業者の推奨にしたがって選定し、25%はファウリングが UV 強度計読み値や照射量に及ぼす影響の大きさで選定し、6%は目視で選定し、3%はただ洗浄機構を使うためだけに洗浄を実施していた。

予備部品点数の中央値は、低圧高出力システムではランプ 12 : スリーブ 2 : 安定器 3 : UV 強度計 1 の比だったのに対し、中圧システムではランプ 4 : スリーブ 2 : 安定器 1 : UV 強度計 1 の比だった。低圧高出力システムの 7%で予備のスリーブの用意がなく、低圧高出力システムの 33%および中圧システムの 22%で予備の安定器の用意が無く、低圧高出力システムの 44%および中圧システムの 19%で予備の UV 強度計の用意が無いということが分かった。

## 教訓と提言

UV システムの設計についての提言は

- 1) メンテナンスのため、予備の照射槽を用意すること
- 2) 照射槽系列数を最小化するためにできるだけ高流量照射槽を活用すること
- 3) 大きな照射槽には大きなドレンラインを使うこと
- 4) 建築資本と上流側・下流側の直線配管必要長さのバランスをとること
- 5) 自動電動遮断弁を使うこと
- 6) Off spec 水は取水側に戻すこと
- 7) 中圧システムでは、水の鉄濃度が低い場合でも必ずワイパを備えること
- 8) 予備部品やメンテ作業のための専用スペースを設けること
- 9) 運転員やプラント職員を設計・建設の全工程に参加させること

事業体は設計プロセスの早い段階で監督機関を巻き込み、不要な不活化認定を求めないように薦めている。事業体は、現地での検証は難しいし、予算を使い切るのが早いと指摘した。課題の中には必要な流量を得ることや、試験後の水の排出などが含まれる。

調達に関する提言は

- 1) 初期費用に予備品費用を見込むこと
- 2) 維持管理コストを見込む際は UV 照射量に影響するあらゆる条件を考慮すること
- 3) 業者サービスや機器点数のようなお金以外の要素も考慮すること
- 4) 調達に運転員を関わらせること

器具類と制御に関する提言は

- 1) 過剰照射を最小にするため、より良い turndown を提供すること
- 2) 照射槽のそばに HMI ( 訳者注: Human Machine Interface ) を入れること
- 3) 一日あたりのランプの on-off サイクルや、どのランプが切れたかを表示すること
- 4) オンサイト校正しながら、UV 強度計のキャリブレーションの変化を表示する
- 5) 対象とする病原微生物に対する log 不活化率を計算する

事業体は UV 業者にはソフトウェアの更新を通知してほしいと述べている。

多くの事業体が、所有する UV システムについてもっと教育を受けたいようで、1 日講習と相談窓口では不十分だと回答している。教育訓練に関する提言は

- 1) UV システムの構成機器、理論、設計、維持管理
- 2) UV 照射量モニタリングと薬品消毒はどのように異なるのか
- 3) 異なる対象病原微生物に対して必要な UV 照射量がどのように決まっているのか
- 4) UV 強度計の精度、校正、交換に関する基準

- 5) UVT と透過率モニタ校正が照射量に重要ということ
- 6) ランプが保証期間を超えても良好に稼動するという前提で、いつ交換すべきか
- 7) 照射効率をできる限り良くするためには新しいランプと古いランプを照射槽内にどのように配置すべきか
- 8) ランプ寿命やファウリングを定量化する方法、洗浄頻度を決める方法
- 9) 破損した UV ランプと水銀放出にどう対応したらよいか

UV システム立ち上げに関する提言は

- 1) UV 照射量モニタリングアルゴリズムが PLC にプログラムされていることを確かめること
- 2) 論理プログラムの制御の妥当性を確認すること
- 3) 運転員に、立ち上げ期間中に試運転員と一緒に過ごさせること

多くの事業者が著しく過剰に照射して電力消費が過剰になったり塩素が分解されたりしたことを報告している。ファウリングは予測が難しく、アルカリ度や硬度や鉄濃度が低い水でも、ファウリングがひどくなることがあった。運転員にはスリーブの内側/外側のファウリングを定量化してメンテナンスのきっかけとする良い方法がないし、UV 強度計窓のファウリングは見落としやすい。ファウリングがほとんど無くて洗浄頻度を下げるような提言をした事業者もあった。

事業者が報告した運転上の問題は

- 1) 中圧ランプの変形、変色、低出力
- 2) 石英スリーブのブラシワイパによる損傷
- 3) ブラシワイパでファウラントが取れない
- 4) ワイパ停止
- 5) ワイパモータ反転防止のためのワイパ接点スイッチの不良
- 6) ワイパモータの過電流警報が出て照射槽停止
- 7) 安定器不良の率が比較的高い
- 8) UV 強度計がもろい

全体的に、これらの運転上の問題の多くは、UV 装置の品質向上と保守手順の微調整により減ってきている。

事業者の報告では UV 消毒には定期的な保守が必要だ、つまりメンテナンスのかからない技術というわけではないとのことだ。事業者の計画では保守要員、UV 強度計窓の洗浄、ワイパ保守が不足していたとのこと。事業者は専用の保守技術者を配置することを薦めている。保守向上の方法としては、予備部品在庫を保守して不良部品の適時交換を確実にす



ること、予備部品を照射槽ごとに持つこと、ランプを毎年点検交換してランプ稼働の信頼性を高めること、などがある。

事業体は UV 消毒にはいくつかの課題を見出しているものの、総じて言えば、UV 機器は保証値を上回る性能を発揮し、業者のサービスは良く、UV システムは効果的かつ使用や保守が容易だという報告であった。

## 設置済み UV システムの評価の概要

このセクションでは、8 か所の既に設置された UV システムのオンサイト評価をまとめている。

### 紫外線照射量モニタリング

飲料水の UV システムでは、PLC にプログラムされた監視アルゴリズムによって示される紫外線照射量に基づいて消毒が担保（クレジット）される。オンサイト評価では、PLC にプログラムされた UV 照射量アルゴリズムは、検証レポートによって予測された UV 照射量と、表示された UV 照射量を比較することによって評価される。PLC によって予測された UV 照射量は、照射装置を通過する流量、水の UVT、電源の電力設定値を物理的に修正するか、もしくは流量と UVT を入力してこれらの変化をシミュレーションすることによって、流量、UVT、UV センサ読み値の関数として評価される。

初期世代の UV システムは、文書化されてもおらず、UV 検証データにも基づいてもない UV 照射量モニタリングアルゴリズムによって評価していた。あるケースでは、アルゴリズムは、平均的な UV 強度と理論的滞留時間の積として定義される理論的な UV 照射量計算に基づいていた。これらのアルゴリズムは、照射装置を通る理想的な栓流（プラグ流）を想定していたため、検証によって開発したアルゴリズムと比較して、より高い UV 照射量を予測する。

2 つの UV システムを評価すると、PLC にプログラムされた UV 照射量アルゴリズムは、PLC プログラムに不必要な安全率を組み込んでいたり（UVT の切り捨てなど）、非効率的な UV 強度セットポイントアプローチを実装していたために、かなり低い UV 照射量を予測していた。低く予測された UV 照射量によって、UV システムの維持管理コストが大幅に増加し、文書化されたいかなる利益も得られなかった。例えば、セットポイントアプローチを用いた UV システムは、2～3 倍過剰に照射していた。UV 照射量監視の効率性は、UV 照射量モニタリングアルゴリズムを更新することによって改善することができる。改良されたアルゴリズムは、元の検証データを再解析することによって、または、より最近の検証レポートからのアルゴリズムを使用することによって得ることができる。

評価された UV システムのうちの 2 つは、入力として、オンライン UVT 測定を使用しない UV 照射量アルゴリズムを使用していた。このアプローチでは、アルゴリズムは実際の水の UVT に関係なく保守的な照射量監視を与える UVT 値で定義されている。他の 2 つのシ

システムでは、HMI によって表示される UV 照射量が、検証レポートを用いて予測した RED とほぼ一致した。

事業者は UV システムで使用される UV 照射量監視アルゴリズムを記述した明確な資料を持っている必要がある。資料には、測定された入力流量、UVT、および UV センサの測定値を関連付けて UV 照射量を予測する数式を指定する必要がある。事業者は、照射装置の PLC にプログラムされた UV 照射量監視アルゴリズムが、検証報告書で提供されたアプローチと一致していることを確認する必要がある。2003 draft UVDGM の目標に基づいて 40 mJ/cm<sup>2</sup> または Tier 1 UV 照射量を使用している事業者は、2006 UVDGM に基づいた目標に変更し、UV システムの維持管理コストの削減を検討すべきである。

### **UV 照射量調整と消費電力**

UV システムは、過剰照射することなく必要な UV 照射量を提供するように、ランプを ON , OFF したり、ランプ電源の電力を調整することによって照射量調整を行っている。本研究で多くの UV システムが、ランプの on/off や照射量をさげるための低電力運転ができないため、2 倍以上の過剰照射と評価された。電磁安定器に使用されるコンデンサーをランプ電流が制御できるものに変更したり、電磁安定器を電力設定範囲が広い電子安定器に置き換えることにより、消費電力を大きく下げることができる。複数のランプを消灯して UV 照射装置を運転したり、大きな流量で運転することにより、より大きな消費電力低減を達成することができる。ある事業者では、照射装置の最大流量を検証において評価された最大流量よりも著しく低い設計流量によって定義されている例があった。損失水頭による制約や、検証範囲による制限以外に、UVT や相対的なランプ出力（ランプの老化や汚れによる）が設計基準内であれば、照射装置を設計流量よりも多い流量で運転できない理由はない。

照射装置の消費電力は検証レポートと良く一致する傾向があった。低圧高出力ランプを用いた UV システムでは、50% 電力設定での相対的な電力消費、UV ランプ出力はそれぞれ、約 67 及び 78% であり、UV ランプの電力削減量は電力設定で示された値よりも少なかった。中圧ランプを用いた UV システムでは、安定器（バラスト）の違いにより電力消費に大きな差があった。事業者は、電力設定に基づいて予想されるよりも少ない電力を供給している安定器を識別するために、個々の安定器の消費電力を年に一度評価する必要がある。

### **ランプの劣化とファウリング**

フィールドデータから、ランプの劣化は設計基準の範囲内であった。5,000 時間後の維持率 0.80 で設計されたある現場では、10kW の中圧ランプの出力が最初の 2,000 時間は増加し、その後減少、14,500 時間後の維持率が 0.92 となった。低圧高出力ランプを使用した別の現場では、運用開始後 6,000 時間までで、維持率が 0.88 ~ 1.08 の範囲をとり、平均値は 0.99 であった。

ファウリングは現場毎で特有の現象であり、同じ中圧ランプが入っている現場でも、殆ど起きない現場もあれば、早く進行する現場もあった。中圧ランプが納入されているある現場では、洗浄用ワイパを停止させた状態で、運用後 175 日でのファウリングファクターが 0.97 であった。この結果に基づき、この施設では、維持管理費を削減するために自動洗浄機構を停止させた。

ファウリングが観察された現場において、機械的・物理化学的な自動洗浄ワイパにより、中圧ランプのスリーブやセンサ窓は汚れなく保たれていることが分かった。ある中圧ランプ UV 照射装置では、洗浄ワイパの届かないスリーブ末端で顕著なファウリングが確認されたが、スリーブの洗浄された部分のファウリングファクターは 0.97 以上であった。

スリーブ内部へのファウリングという深刻な事例が中圧ランプで 2 例あった。1 例目は、スリーブ内部の UV センサの監視地点におけるファウリングファクターが 0.7 ~ 0.97 となり、それ以外の地点では 0 ~ 1.0 であった。スリーブ内部のファウリングは、ランプの破裂によって生じる残渣によって引き起こされるが、スリーブ内部を手動で洗うことで取り除くことができた。2 例目は、スリーブ内部のファウリングファクターが 0.70 ~ 0.90 であった。これら 2 つのスリーブ内部のファウリングは、スリーブの長手方向に沿って不均一で、末端の方がひどく、UV 照射量のモニタリング性能と運用コストに対して極めて大きな影響を与えた。

低圧高出力ランプを使用した UV 装置では、石英スリーブと UV センサポートの深刻なファウリングが確認された。設置後 3 年以上も洗浄されていない現場もあった。UV センサの測定値から、スリーブのファウリングの有無が分かる。UV センサポートのファウリングにより、UV 強度が 40 ~ 70% 減少した。ファウリングの成分はスケールというよりはシルト系の沈着物であった。ランプの外周方向では不均一で、スリーブの両端で大半が沈着していたことから、沈着メカニズムにより発生したものと思われる。UV リアクタはオフラインで洗浄される。棒状の管が容器内に挿しこまれ、そこからリン酸が散布されてリアクタ内面を洗浄する。スリーブの洗浄効果にはばらつきがあり、洗浄液の散布管と近接したスリーブはよく洗浄されるが、散布管から離れた場所のスリーブの洗浄効果は悪い。特に、散布管の上側にあるスリーブは洗浄されにくい。このような UV リアクタは、手動で検査・洗浄することが望ましい。

オフラインで酸洗浄を行う低圧高出力ランプ UV 装置においては、UV 照射量が要求値どおりであればオペレータによる洗浄はあえて行う必要はない。UV 装置は設計上、流速、UVT、ランプの劣化、ファウリングファクターにおいて安全率をとっているため、UV 照射装置がファウリングにより要求値を満たせなくなるということは、装置自身が相当深刻なファウリングを受けた状態になっていると思われる。ファウリングは UV システムの運転管理費用に大きな影響を与える。

## ランプ劣化とファウリングを組み合わせた指標（CAF インデックス）

CAF インデックスは UV 装置の運用におけるランプの劣化とファウリングの程度を定量的に評価する為の有効な手法である。CAF インデックスは UV センサ読み値と UV センサ式を使った予測値との比で算出される。CAF インデックスに影響を及ぼす要因として、安定器の性能、スリーブ内外のファウリング、UV センサ窓のファウリング、センサの精度があげられる。

CAF インデックスの算出に使用される UV センサ式は、UV 装置の検証報告書または、新品ランプ、新品で汚れのない石英スリーブと UV センサ窓、校正済の UV センサを用いたオンサイト試験によって、UV センサ読み値を安定器出力電力と UVT との関数として表すことで得られる。検証報告書に基づく CAF インデックスは検証試験時と実設備に相違があるため、オンサイトで得られた UV センサ式を用いた方が CAF インデックスとしてより良好な結果が得られる。例えば、低圧高出力ランプシステムでは、検証試験時と実設備での水温の違いによって UV センサ読み値と安定器出力設定値の関係式が異なる場合がある。中圧システムでは、検証試験時と実設備での水の UVT スペクトルの違いが UV センサ式に影響する。

今回、4 つの現場において、一週間の CAF インデックスの詳細モニタリング・評価を実施した。CAF インデックスデータは、UV システムの最適な運用方法に影響を与える重要な傾向の有無を明らかにした。あるる過設備が無い現場では、CAF データはファウリングの影響をほとんど示さなかったため、事業者は自動洗浄システムの動作頻度を減らすことができた。別の現場では、ランプ運転時間 13,000 時間以上で得られた CAF データは、およそ 15% のランプ出力低下を示した。

長期の CAF データは、UV センサ値を計算するための正確な UVT 測定の重要性を示した。オンライン UVT モニタと UVT 真値の間の微小な測定誤差は、CAF インデックスの計算に使われる UV センサ予測値に大きな誤差を引き起こす。例えば、ある現場では、オンライン UVT 計を使って算出された CAF インデックスでは明確な傾向は現れなかったが、ラボ試験で得られた UVT 値で計算した CAF インデックスでは、375 日以上でのモニタリング期間において、約 60% のランプ出力減少を示した。

このプロジェクトでは、CAF インデックスは全ての現場において週単位で計算することを強く推奨する。その結果は、手動清掃や、ランプ交換といった UV システム維持管理の最適化に利用されるべきである。

## UVT モニタ

現地調査の結果、オンライン UVT モニタの正確さと校正の重要性が示された。UVDGM の基準精度（誤差 2%）を満たす UVT モニタを備えた UV 照射装置が設置されている現場は 3 ヶ所のみであった。欠陥のある UV センサを用いたことにより、UVT モニタ指示値が 5~12% 高く表示されていた現場が 2 ヶ所、いずれも、オンライン UVT モニタの個別の特

徴により、現地調査および原因究明が困難であった。別のある現場では、被処理水と校正に用いた水の温度の違いにより、UVT モニタ指示値が 4.4%異なっていた。この誤差は、被処理水と同じ温度まで水温を下げた蒸留水で校正を行うことにより、2%以内に改善された。UVT の計測誤差は UV 照射量モニタリングに大きく影響を与える。その影響度合いは、リアクタ検証試験レポートに示される UV 照射量算出アルゴリズムで決定される。その影響が許容できない場合は、実験室で分光光度計を用いて測定した UVT を PLC に入力し、モニタリングに用いることも可能である。

## UV センサ

評価した UV システムは、UV システム製造者独自の UV センサ、もしくは、DVGW、ONORM UV ガイドラインに適合した UV センサのいずれかを使用していた。

ある UV システムは“湿式センサ”を採用していた。“湿式センサ”は照射槽中を流れる処理水に直接接触するタイプのセンサである。基準 UV センサを用いてこのタイプの UV センサの確認を行うためには、照射槽を排水しなければならず、作業が煩雑で、時間を要する特徴がある。UV センサの読値も、センサ校正、ランプ出力、スリーブ汚損、ランプ配線による光の障害を引き起こすスリーブ内のランプ配置、等の要因により、2 倍も異なっていた。現場訪問した際、DVGW に適合した湿式 UV センサを、乾式 UV センサのポートに設置するといった検証が行われていた。

調査を行った 3 箇所の UV システムは、スリーブ内に配置された“乾式センサ”を採用していた。1 箇所目のサイトでは、参照 UV センサに対し、装置付属 UV センサ読み値が平均で 15%大きい値を示し、8 台の内 2 台の装置付属 UV センサが UVDGM 基準の 20%に適合していなかった。2 箇所目のサイトでは、8 台の装置付属 UV センサの内、1 台が UVDGM 基準に適合していなかった。3 箇所目のサイトでは、全ての装置付属 UV センサと参照 UV センサとの差が 8%以下であり、UVDGM 基準に適合していた。

ある中圧 UV 装置は、DVGW に適合した装置付属 UV センサを備え、PLC により係数を調整し、UV センサの mA 出力を紫外線強度に変換することによって、校正を行っていた。係数の調整は装置付属 UV センサと、参照 UV センサの読み値の比較より算出されていた。この装置付属 UV センサの“オンサイト校正”は、オフサイト校正の頻度を削減すると共に、UV センサドリフトにより引き起こされる紫外線照射量モニタリング(照射量制御)エラーを最小化する。

3 箇所の低圧 UV 装置では、装置付属 UV センサと、参照 UV センサとが概ね一致しており、それぞれの差は 5%以下、11%以下、3%以下を示し、UVDGM 基準の 20%に適合していた。あるサイトでは、UV センサの mV 出力を 4-20mA 信号に変換する電子ボードで、21%の紫外線強度モニタリングエラーが発生していた。これは、紫外線照射量モニタリングのアルゴリズムによる UV センサ読み値の精度が、UV センサの精度のみならず、センサ出力を PLC に送る際に用いられる電子機器の精度にも起因することを示している。この結果

より、参照 UV センサは、照射槽の電子機器と独立したハンディタイプを採用することが、重要であると考えられる。

## その他

評価対象の、ある UV システムは、布製のアーチ型構造物（ 補足：半円筒状で、扉のない車庫のイメージと思われる ）内に設置されていた。ゴミが制御盤のエアフィルターを閉塞し、制御盤の電子機器の上に堆積していた。猛暑時の気温は制御盤の冷却能力を上回っており、制御盤内の温度は 48.9 近かった。アクチュエーターによる多くの動作が開閉に必要な流出入バルブを手動式としていた。開閉動作に多くの労力が必要なため、装置は常時全号機稼働状態であった。さらに、当該サイトでは維持管理時に照射槽底部の排水バルブで水を抜くが、床排水ポンプの能力が不足しているため、床が水浸しになっていた。

## 水銀放出の低減検討 概要

### 予備実験の成果

ランプ破損時の水銀放出についてパイロット試験機を用いて評価すると共に、ランプ種類、運転状態毎のランプ破損時水銀移動について確認した。

低圧水銀ランプ、非アマルガム低圧高出力ランプは液体状の水銀を含んでいるのに対し、アマルガム低圧高出力ランプは固体状の水銀 - インジウム合金がランプ内に封入されている。これらのランプが点灯中、一部の水銀が気体状となり、紫外線を発している。気体状になった水銀量は理想気体則で近似され、ランプ中に含まれる全水銀量に対して一桁少ない。ランプ破損時、気体状の水銀は水中に溶解し、照射槽の下流側に運ばれる。一方、液体状の、またはアマルガムの水銀は、照射槽底部に沈降する。気体状の水銀量は少ないため、照射槽内に滞留した水中の水銀濃度は飲料水最大許容濃度である  $2\mu\text{g/L}$ （ 補足：国内水道水質基準= $0.5\mu\text{g/L}$ ）より 1 桁小さい。低圧水銀ランプ、低圧高出力ランプ破損時は、バルブを閉め、沈降した水銀を封じ込める。照射槽内の水は、液状水銀、アマルガム水銀が溶解しているものとして、排出前に処理が必要である。アマルガム低圧高出力ランプ破損後の清掃は、水銀がアマルガム内にあるため、比較的容易である。低圧水銀ランプ、非アマルガム低圧高出力ランプ破損後の清掃は、液体状水銀のしずくを見つけだし、除去する必要がある。

中圧水銀ランプは、非点灯時、液体状水銀を含んでいる。中圧水銀ランプはおよそ 600 ~ 800 の高温で点灯するため、点灯中は水銀のほとんどが気体状になる。点灯中の中圧水銀ランプ、スリーブが破損した場合、気体状の水銀は水中に放出され、過飽和の溶液となるか、コロイド状水銀を含む溶液となる。水銀は流れに乗って下流に運ばれ、沈降はしない。気体状水銀の量は比較的多いため、照射槽内に滞留した水中の水銀濃度は飲料水最大許容濃度を超える。それ故、浄水場で中圧水銀ランプが破損した場合、下流側の配水池、配水システムへの水銀混入を防止するため、バルブや、迂回路が必要となる。その代り、水銀

は配水系統に送られる以前に、配水池、配管内で希釈される。

UVDGM では、ランプとスリーブの破損により放出された水銀は、低流量ゾーンで捕捉されるとしている。実用目的の観点から、低圧水銀ランプ、非アマルガム低圧高出力ランプ、アマルガム低圧高出力ランプと、点灯状態にない中圧水銀ランプでは、この説は真実と言える。しかしながら、今回の検討より、UVDGM の仮説は点灯中の中圧水銀ランプには適用できないことが示された。

## 水銀放出の軽減

水銀放出の低減計画は、予防、ランプ破損検知、水銀放出と移送のモデリング、捕捉、封じ込め、サンプリング、処理、汚損水の廃棄、清掃、UV 装置の再調整からなる。

USEPA の紫外線消毒ガイダンスマニュアルでは、ランプ破損の原因として、スリーブへの破片衝突、高温状態のスリーブへの冷水接触、中圧 UV ランプの破裂、負圧、ウォーターハンマー等があることを示している。大流量時、スリーブを通過した渦流の周波数が、スリーブの共鳴周波数と等しくなった際に起こる共鳴スリーブ振動については、触れられていない。共鳴スリーブ振動は照射槽を通過する最大流量を制御する事により、防ぐことができる。

ランプとスリーブの破損は、湿気センサを用いることにより直接的に、ランプ故障、または漏電アラームを用いることにより間接的に、検知することが可能である。ただ、ランプ故障、漏電アラームはランプ、スリーブの破損検知に用いられる一方で、別の要因によっても起き得るアラームである。よって、別の要因でアラームが起きる頻度が高い場合には、ランプ故障、漏電アラームを水銀放出防止のためのバルブ閉止の条件とすることは不適當である。

ランプ破損後の照射槽下流部の配管、槽内水銀濃度は『移流分散』式、CFD モデリング、トレーサー検討より得られた滞留時間分布を用いることで、予測することができる。モデルに入力される水銀量はランプ破損時の気体量として見積もられる。モデル予測の結果、低圧水銀ランプ、低圧高出力ランプの破損後の水銀分散によって、水銀濃度は最大許容濃度より 1 桁少ない値まで低下するとされている。中圧水銀ランプの破損後の水銀分散においても、配水経路、槽、配水池にて最大許容濃度以下に低下するとされる。もし、希釈が不十分な場合、水銀放出は下流部へのバルブ設置、迂回路により抑制されるべきであるが、設置位置はランプ破損検知とバルブ閉止所要時間を考慮した位置としなければならない。

バルブ閉止時間はウォーターハンマーにより制限される。ウォーターハンマーはバルブの上流、下流配管の長さ、比較的速いバルブ閉止時間に起因する事象で、スリーブの破損圧を超える負圧を引き起こす。計算では、石英スリーブは正圧 5.2MPa、負圧 0.55MPa まで耐え得るとされている。

一方、UV システム下流の低流量ゾーンは、水銀液滴、石英片の捕捉に用いられる。但し、初期段階で水中に溶解した気体状の水銀は捕捉されない。本検討では、水銀液滴と石英片

が沈降する流速を見積もっている。解析によると、ランプ破損後の水銀液滴、石英片捕捉に垂直配管は効果的でないとされた。これらの粒子の捕捉には、オーバーフロー時の流速がより細かい粒子を捕捉可能な沈降速度以下となる様に設計された沈降槽（もしくは類似構造物）が必要である。

ランプ破損時の対応計画として、サンプリング箇所、サンプル頻度、汚染水の処理と廃棄、照射槽内に残った液体状水銀、アマルガム水銀、石英片の清掃が挙げられる。水のサンプリングにより、破損後の水銀汚染の拡大状況把握と、廃棄前清掃の必要性評価ができる。照射槽下流の配管、槽におけるサンプリング箇所は、移送モデルにより予想された濃度データに基づいて選択されるべきである。もし、水銀がほとんど拡散しない小さな水塊として振る舞うとモデル予測されているのであれば、あるサンプリング箇所では検出されなかったとしても、他のサンプリング箇所では検出される結果となるかもしれない。以上より、サンプルは多数の場所で行い、モデル予測の不確かさを補完すべきである。USEPA メソッド 1631E、及び、245.7（それぞれの検出限界 5ng/L、0.5ng/L）が、ランプ破損後の水銀放出を明らかにする手法として推奨されている。

ランプ破損後の清掃範囲、及び、処理方法は、水中の測定された水銀濃度、予想された水銀濃度、及び、廃棄濃度限界に依存する。多くの州が水生生物保護のため、水銀 12ng/L の水質基準を規定している一方で、配水地域の 1 日当たり総合最大許容負荷量は 1ng/L 以下とされている。照射槽の中に捕捉された水銀汚染水は、硫黄添着炭のカラムを通すことにより処理される。照射槽をドレンした後、石英片、アマルガム、液状水銀は手作業、もしくは、掃除機により除去できる。照射槽は酸性の液体（例えば、2%塩酸）で洗い流し、その後、清澄な水で再度洗い流すべきである。

清掃に従事する職員は、国立安全衛生センター（OSHA）または、国立労働安全衛生研究所（NIOSH）の勧告に従うべきである。UV 照射槽をドレンした際、照射槽内の空間は残存した液体状、固体状アマルガム水銀の揮発により汚染されている。そのため、清掃中は、適正な換気と、保護マスクの使用が必要である。照射槽内に作業者がいる間、照射槽への水の流入やランプの点灯を防ぐため、制御盤、上流下流のバルブが作動しないようにロックしなければならない。清掃作業中は、ゴム製、ニトリル製、ラテックス製の手袋と、ゴーグル、保護服を使用すべきである。破損したランプ、スリーブ、照射槽内を拭き取るのに用いた吸着剤はコンテナの中に密閉し、有害廃棄物として処理すべきである。