

的の数は、1〜7つの範囲で、平均が2つであった。

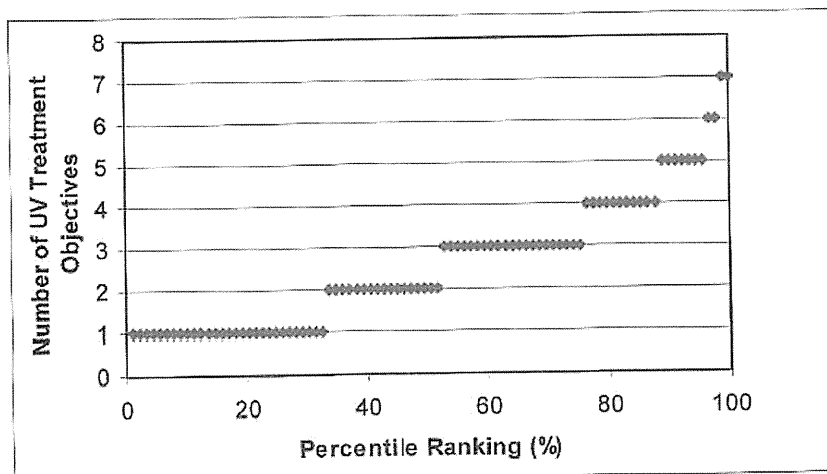


図 4.26 UV システムの処理を採用した目的数のヒストグラム

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。

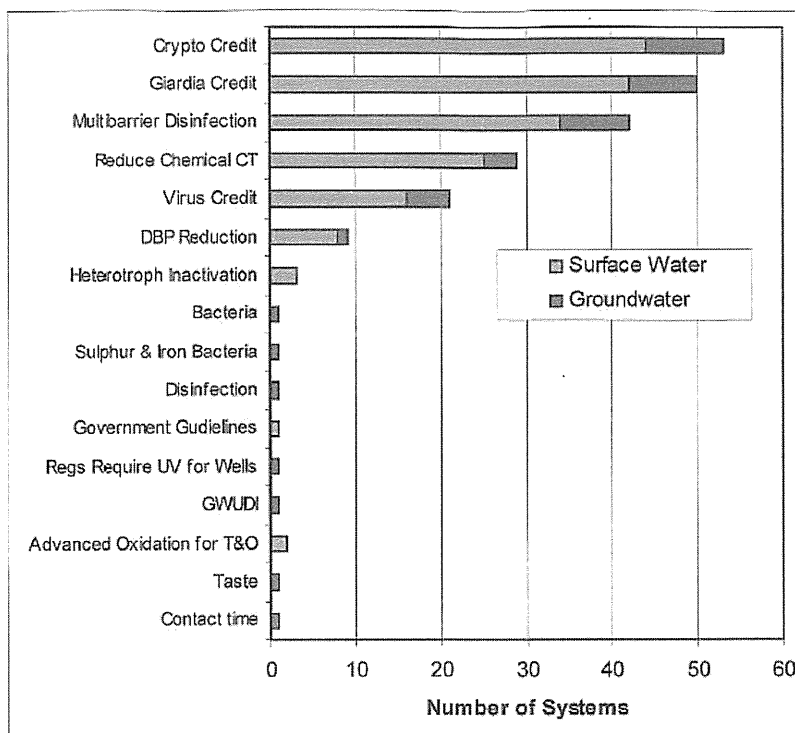


図 4.27 各水源における UV システムの処理を採用した目的数のヒストグラム

## 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 UVDMG、ドイツ DVGW ガイドライン、オーストリア ONORM スタンダード、または NSF スタンダード 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。

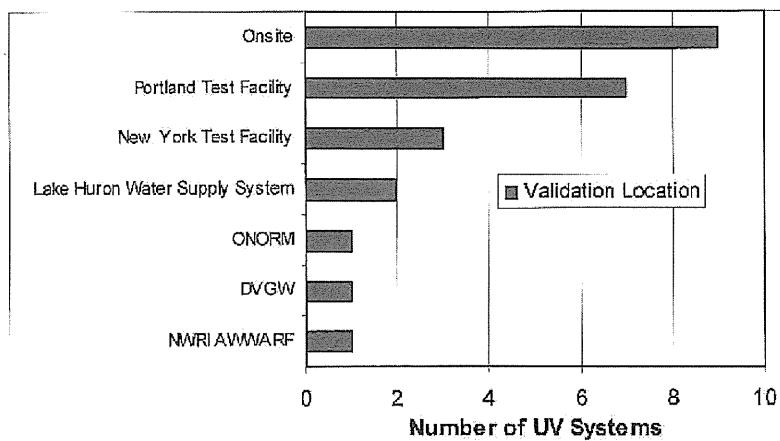


図 4.106 検証場所

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 フェ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 スタンダード 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 フェ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 フェ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 フェ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 フェ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 SuperHumeTM 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。SuperHumeTM 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。

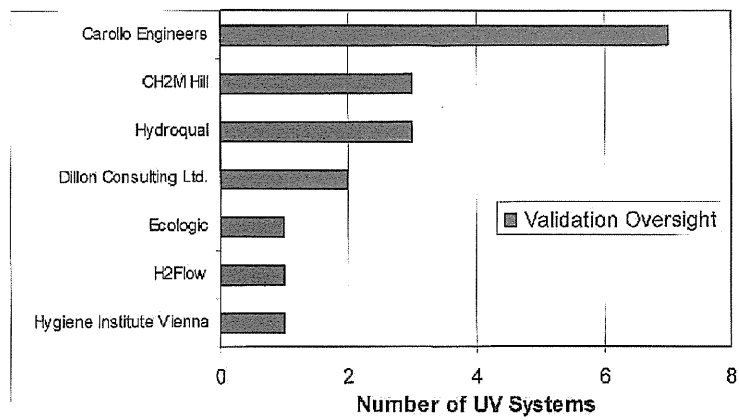


図 4.107 検証を監督した組織

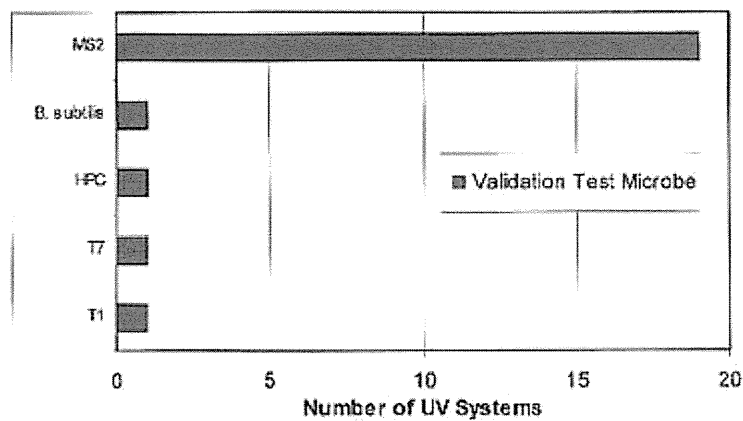


図 4.108 検証で使用了試験微生物

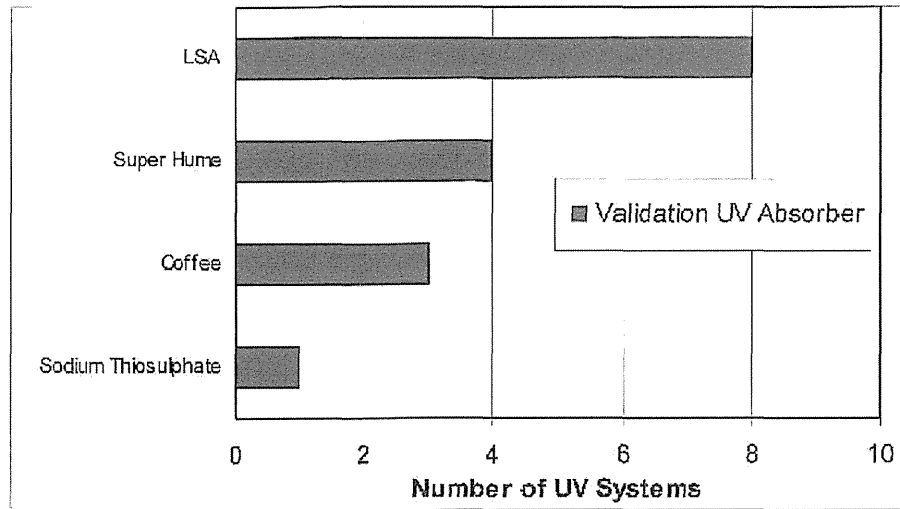


図 4.109 検証中に使用された UV 吸収剤

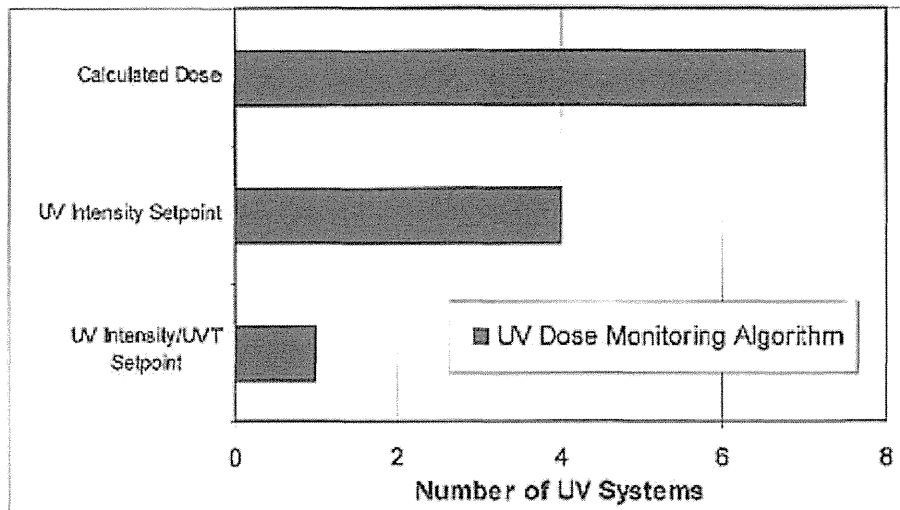


図 4.110 検証データを用いて開発された照射量モニタリングアルゴリズム

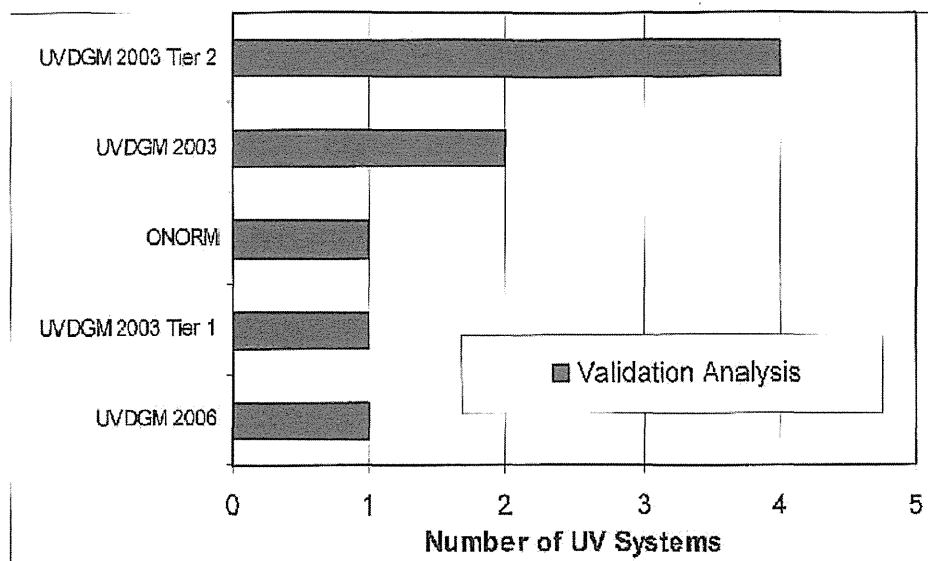


図 4.111 検証解析

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、設計基準は何であるか、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2006 USEPA UVDGM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40 mJ/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のために、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収容されていて、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収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った。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さないと報告した。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体	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%の事業体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%の事業体がオンライン 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%の事業体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%の事業体の実験室用 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体が 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者の数の多さは、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、事業者は 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。

米国内事業者の 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者はなかった。米国内事業者の 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%の事業者が 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者は無かった。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、残りで 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、ウイルス不活化か促進酸化、または NWR/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といった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。

事業者は 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 値で定義している。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  $40 \text{ mJ/cm}^2$  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。あるろ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