

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るべきである。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 (1,900m³/日) から 2,200MGD (8,300,000m³/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 (150,000m³/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。

- ・ どんなどころで 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 モニタを使用する際の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のかということと、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。

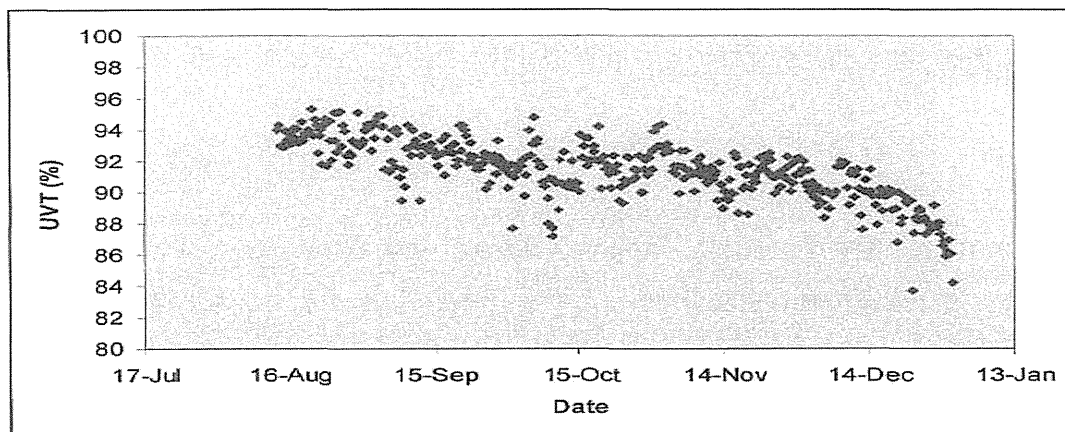


図 1.1 季節による UVT の変化 (カリフォルニア州トレシー)

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のか、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)。

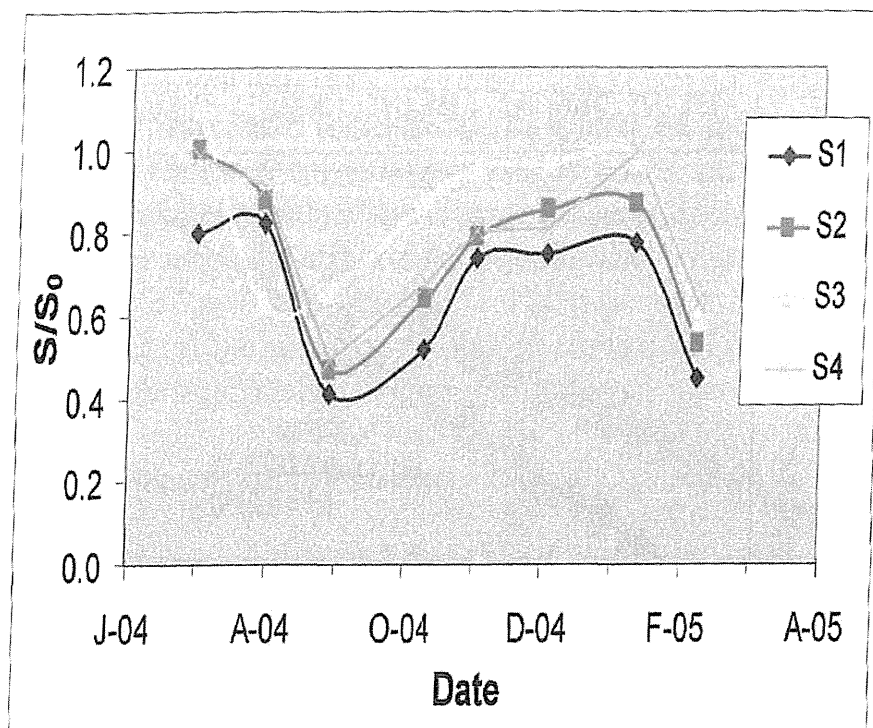


図 1.2 S/S_0 は中圧ランプを装備した UV システムに付属し稼働している 4 つの UV センサで観測された値である。出展： Weight et al. 2009, UV センサシステムのための設計とパフォーマンスガイドライン

RED (mJ/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 (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 はバリデーションデータ (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ンデータ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ンデータ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。

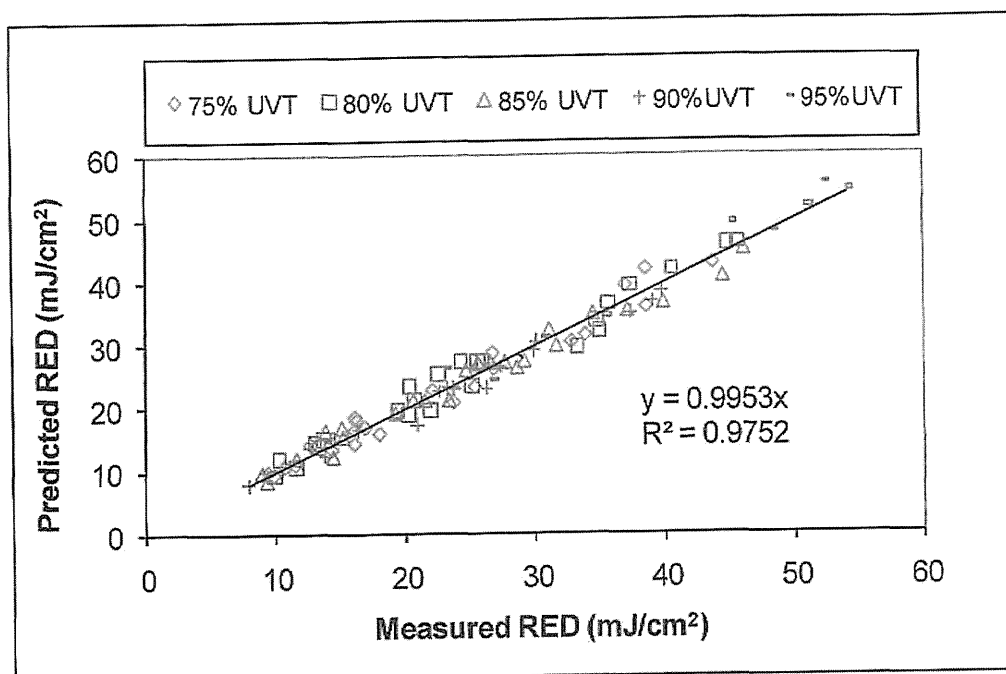


図 1.3 式 (3) を使って算出した RED の予想値とバリデーション中に測定された RED の比較。(データはポートランド UV バリデーション施設で Calgon 36 インチ Sentinel 照射槽を使用して得られたもの)

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（38,000m³/日）、平均流量 5MGD（19,000m³/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関係する事業者の多くは、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、ランプ个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。

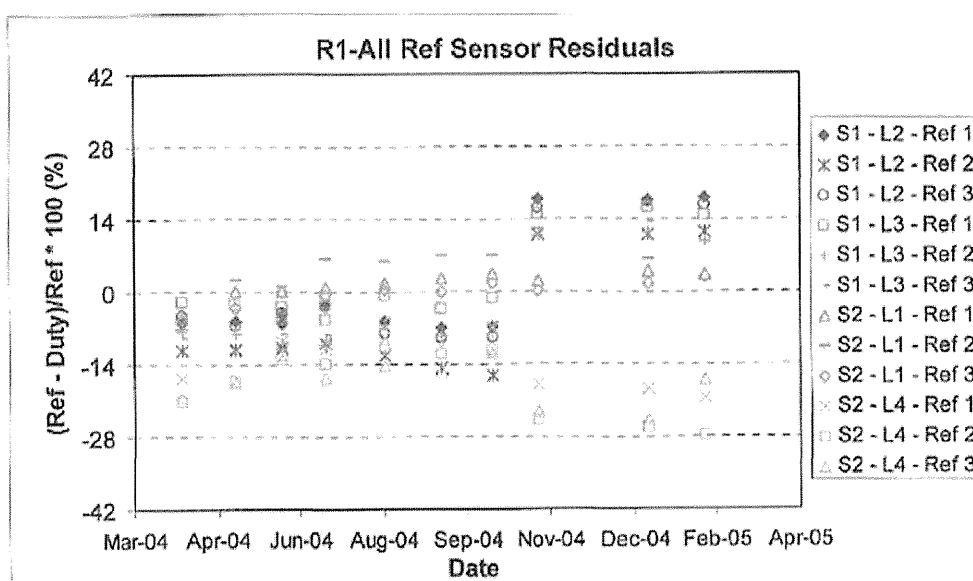


図 1.4 UV センサのチェックデータ(参考)

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てることである。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

プロジェクトの策定は、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、 CaCO_3 、 CaSO_4 、 MgCO_3 、 MgSO_4 、 FePO_4 、 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 CaCO_3 の平衡状態の時の pH との差である。LSI が正の場合、 CaCO_3 は溶液から析出し、LSI が負の場合、 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、日々のあるいは季節ごとに変化する場合があり、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 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/cm² で完全に不活化するのに対し、微粒子共存下では 100 mJ/cm² 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 μ 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°C 付近から 30°C 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 ヶ所の事業体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 m³/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。

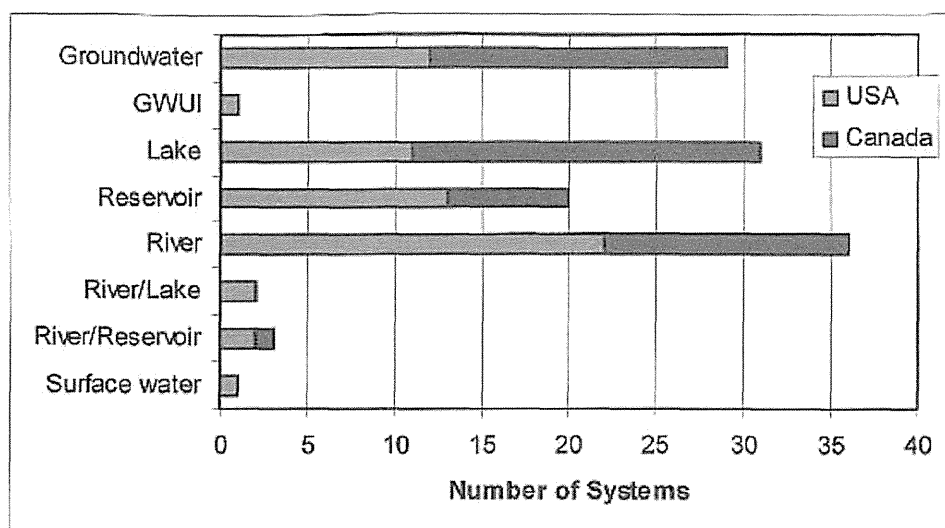


図 4.20 各水源で実施されている UV システムの数

UV システムの設置場所

図 4.21 は 95 ヶ所の事業体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

これらのデータはまた、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)

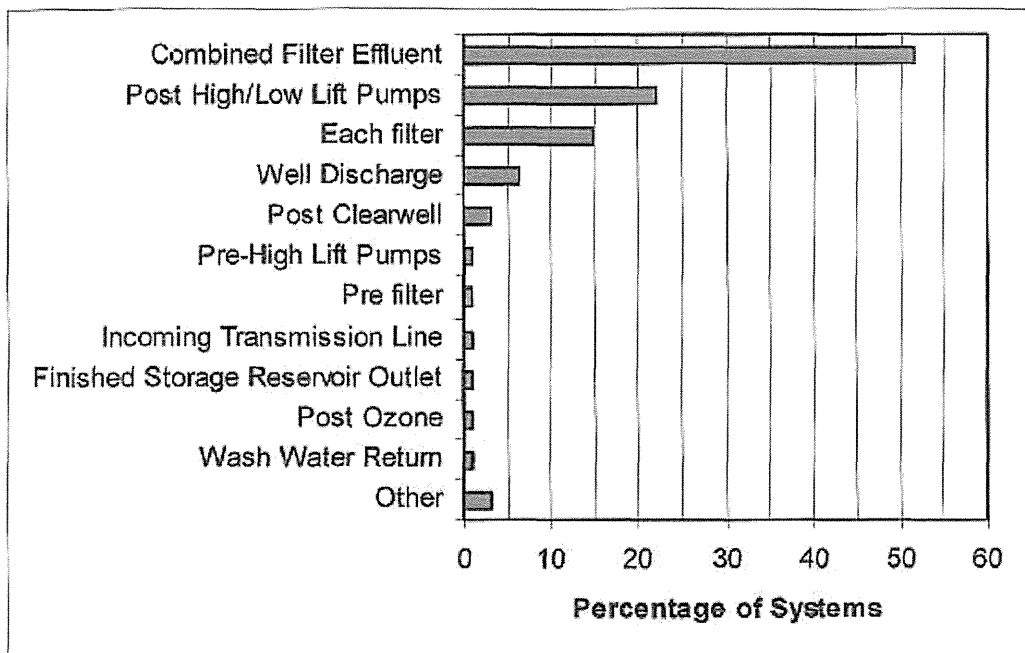
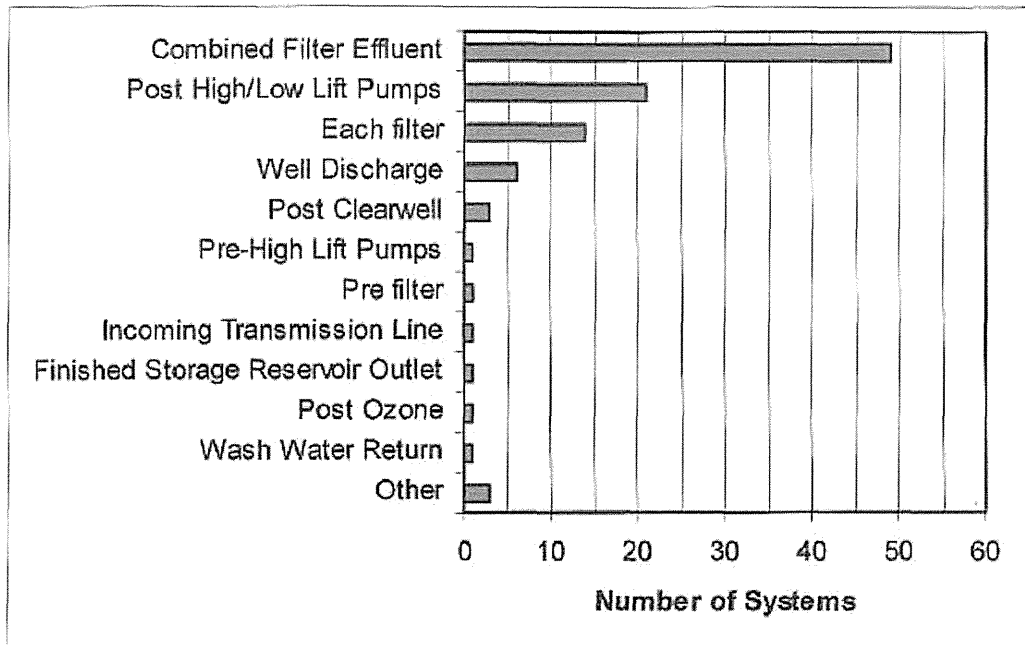


図 4.21 UV システムが設置されている場所

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 Rosedale 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（300,000m³/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。

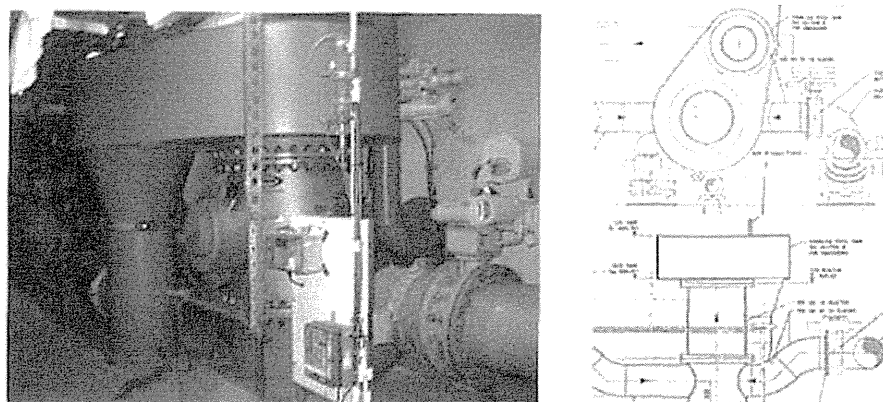


図 4.22 アルバータ州エドモントン（カナダ）の Rosedale 水処理プラントでろ過水配管に設置されている Calgon36“Sentinel。ろ過水を 80MGD（300,000m³/日）まで処理するために 9つの照射槽が使用されている。UV 照射槽は、フィルターギャラリーの厳しい制約内に収まるように垂直に配向されている。

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（98,000m³/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-covered 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。

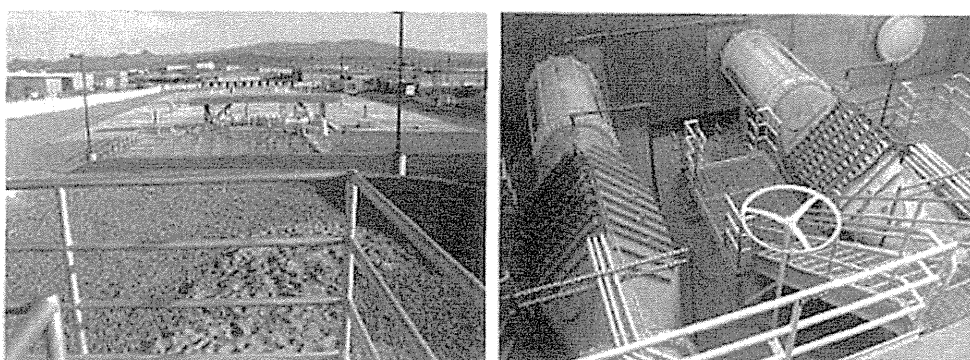


図 4.23 アリゾナ州 Havasu 湖の Havasu 湖水処理プラントに設置している WEDECO K143。UV システムは屋外の地下に置かれ、26 MGD（98,000m³/日）のろ過した地下水を処理している。将来増設のための閉止フランジと複数の照射槽の上の埃に注意が必要。

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 (79,000m³/日) までの未ろ過水を処理している。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。

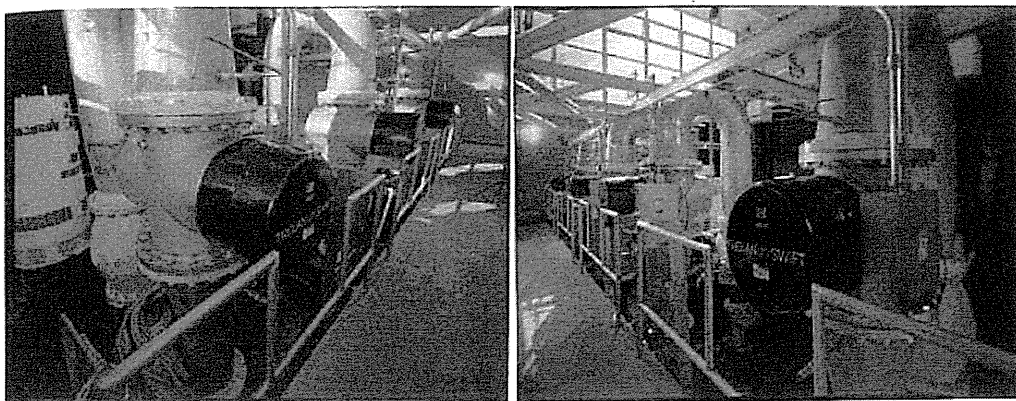


図 4.24 オンタリオ州 North Bay (カナダ) の Trout 湖水処理プラントで未ろ過水 21MGD (79,000m³/日) を処理している Trojan UVSwift™ の照射槽。

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 (45,000m³/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。

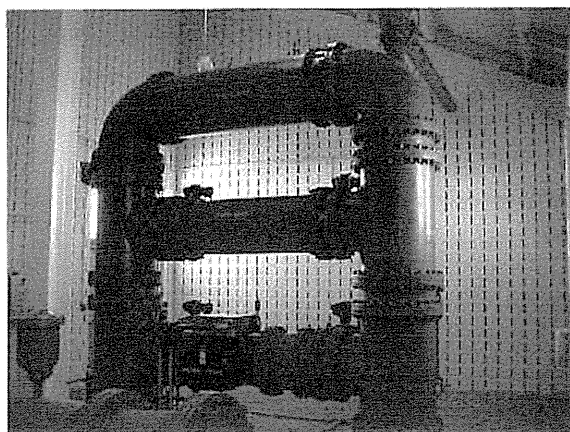


図 4.25 オハイオ州レバノンの Deerfield-Hamilton 水処理プラントでろ過した地下水 12 MGD (45,000m³/日) を処理するために使用されている TrojanUVSwift™24

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