

〈ノート〉

UVT 監視が不要な紫外線消毒装置の照射量監視・制御技術の開発

阿部 法光¹⁾, 小林 伸次¹⁾, 出 健志¹⁾藤田 晃治²⁾, 竹内 賢治³⁾¹⁾ ㈱東芝 電力・社会システム技術開発センター

(〒183-8511 東京都府中市東芝町1 E-mail: norimitsu1.abe@toshiba.co.jp)

²⁾ ㈱東芝 府中事業所社会インフラシステムソリューション部

(〒183-8511 東京都府中市東芝町1 E-mail: koji5.fujita@toshiba.co.jp)

³⁾ ㈱東芝 水・環境エンジニアリングセンター

(〒105-8001 東京都港区芝浦1-1-1 E-mail: kenji2.takeuchi@toshiba.co.jp)

概 要

浄水用紫外線消毒装置に使用される中圧ランプは、1本当たりの紫外線出力が非常に大きいため、装置を小型化できるという特長がある。また、1本当たりの処理能力が高いため、被処理水の変動に対応したランプ調光制御が有効になる。従来の調光システムでは、被処理水の紫外線透過率(UVT)の監視が必要だったため、オンラインUVT計の設置に伴う、コストの増加をもたらすなどの課題があった。そこで、筆者らは、UVセンサーの位置を最適化することで、オンラインUVT計が不要な紫外線照射量監視・制御技術を開発した。

キーワード：クリプトスポリジウム、紫外線量、UVセンサー、ランプ制御

原稿受付 2012.4.16 原稿受理 2012.9.5

EICA: 17(2・3) 151-160

1. は じ め に

2007年3月に厚生労働省より「水道水におけるクリプトスポリジウム等対策指針」が通知¹⁾され、地表水以外の水源を原水とする施設において紫外線処理設備の導入が認められた。これを受け、(財)水道技術研究センター(JWRC)では、紫外線照射装置 JWRC 基準適合認定制度²⁾を設けることとし、適合認定の申請受付を2008年4月から開始した。

以来、認定登録は90機種(2012年3月8日時点)に達し、中圧ランプを採用した大規模処理用の登録も増えつつある。中圧ランプは、小型ながら非常に高輝度の紫外線出力が得られることから、使用ランプ数が少なく済み、装置を小型化できるので狭いスペースにも設置できるという特長がある。また、ランプ1本当たりの照射能力が高いため、被処理水の流量や水質の変動に対応してランプ出力を調整する調光制御システムが有効になる。

この調光制御システムに必要な要件は、対象病原性微生物の消毒に必要な紫外線照射量(以降、UV照射量と略記する)を常に維持し、かつ、ランプの出力(消費電力)を必要最小限に抑えることと考えるが、そのためにはUV照射量の監視が重要になる。

紫外線照射装置(以降、UVリアクタと略記する)

のUV照射量に影響する主な因子は、被処理水の流量と紫外線透過率(以降、UVTと略記する)およびランプからの紫外線出力であるが、この他に、UVリアクタの構造に起因するリアクタ内の流動状態の影響も受ける。そのため、米国の環境保護庁(The U.S. Environmental Protection Agency(以降、USEPAと略記する))では、表流水における塩素耐性病原性原虫(*Cryptosporidium*, *Giardia lamblia*, and viruses)対策として適用されるUVリアクタに対し、紫外線消毒ガイダンスマニュアル³⁾(Ultraviolet Disinfection Guidance Manual(以降、UVDGMと略記する))を発行し、実機を用いた生物線量試験による検証を求めている。検証データを基に導出された換算紫外線照射量(以降、REDと略記する)計算式を用いてUV照射量を監視する方法が推奨されている。

したがって、この調光制御システムを実現するためには、RED式が必要になる。

このRED式に関しては、これまでUVDGMに例示されている(1.1)が知られている程度であったが、ここ数年、海外主要メーカーのUVリアクタを用いた検証試験の結果に基づいて導出されたRED式が発表されるケースが増えてきている。

$$RED = 10^a \times UVA^b \times \left(\frac{S}{S_0}\right)^c \times \left(\frac{1}{Q}\right)^d \times B^e \quad \cdots (1.1)$$

ここで、

- RED : 換算紫外線照射量 (mJ/cm²)
 UVA : 被処理水の波長 254 nm 紫外線吸光度 (—)
 S : 紫外線強度 (mW/cm²)
 S₀ : ランプ出力 100% での紫外線強度 (mW/cm²)
 Q : 被処理水流量 (gpm)
 B : 低圧ランプの場合の点灯ランプバンク数
 a, b, c, d, e : 実験データに基づく係数

Heath ら⁴⁾は、カナダ、ブリティッシュコロンビア州アームストロング市の浄水場に UVT ≥ 70% で検証された中圧ランプを用いた UV リアクタが導入されていたが、2006 年以降水源水質が悪化し UVT が 50% 程度まで低下するケースが増えてきたため、対策としてオンサイトで検証試験を実施し、適用範囲を UVT ≥ 50% まで拡張した事例を報告しており、このなかで、RED 式として次式が示されている。

$$RED = 10^a \times UVA^{b \times UVA} \times Q^c \times \left(\frac{S/S_0}{Q} \right)^{d + e \times UVA + f \times UVA^2} \quad \dots (1.2)$$

また、H. Wright ら⁵⁾は、中圧ランプの UV リアクタの RED 式を例に、RED 式の誤差要因分析事例を報告しており、このなかで次の RED 式が示されている。

$$RED = 10^a \times UVA^{b \times UVA} \times \left(\frac{S/S_0}{Q} \right)^{c + d \times UVA + e \times UVA^2} \quad \dots (1.3)$$

さらに、低圧ランプを用いた UV リアクタについては、B. R. Townsend ら⁶⁾による、カナダ Seymour Capilano 浄水場に導入された大規模 UV リアクタの検証試験に関する報告があり、検証試験データに基づき、以下の RED 式が導出されている。

$$RED = 10^a \times \left(\frac{S/S_0}{Q} \right)^{b + c \times UVA + D \times UVA^2} \times UVA^e \times B^f \quad \dots (1.4)$$

以上のように、すべての RED 式に UVA 項が含まれている。

ここで、UVA は次式で UVT に変換できる。

$$UVT = 10^{-UVA} \times 100\% \quad (1.5)$$

なお、UV リアクタでは UVA よりも UVT の方が良く用いられているため、以降 UVT に統一して扱うことにする。

上記の RED 式を用いて UV リアクタの監視制御を行う場合は、被処理水の UVT をオンラインで計測できる UVT 計が不可欠であることが判る。

しかし、一般的に浄水施設に導入される UV リアクタで処理する水の UVT は比較的高いため、より高感度の UVT 計が必要となるが、高感度の計器ほど高価で、設置に伴うイニシャルコストの増加や、日常メ

ンテナンス項目の追加に伴うランニングコストの増加をもたらすなどの課題があり、UVT 計が不要なシステムが望まれる。

一方、UVT 計を無くすることができる条件については、UVDGM に例示されており、UV リアクタに取り付ける UV センサーで、ランプの紫外線出力の変化と被処理水の UVT の変化を同時に検出し、検出された紫外線強度（以降、UV 強度と略記する）と UV 照射量の間で 1 次線形相関が成り立つ位置に UV センサーを取り付ける必要があるとされており、これまで J. Bandy ら⁷⁾により、低圧ランプ 1 本の UV リアクタで UV センサー位置を最適化し、UVT 計が不要な UV 照射量監視を実現している事例が報告されているものの、中圧ランプを用いた UV リアクタの事例はない。

そこで、本研究は、中圧ランプを用いた UV リアクタにおいて、オンライン UVT 計が不要な調光制御システムを実現するための、UV センサー適正位置の探索と検証および RED 式の導出を目的とする。

2. UV センサー適正位置の探索

2.1 探索方法

UV センサーの適正位置を調べるためには、UV センサーで測定される UV 強度と、RED の関係に対する、UVT およびランプ出力の影響を知る必要がある。

そのため、UV 強度に対する UV センサー位置（ランプとセンサー間距離）、UVT およびランプ出力の関係は実験により評価することとし、RED に対する流量、UVT およびランプ出力の影響は数値流体力学解析 (Computational Fluid Dynamics, 以後、CFD と略記する) を行い評価する。

(1) UV 強度に対する UV センサー位置の影響

UV 強度に対する UV センサー位置、UVT およびランプ出力の影響を調べるため、UV 強度測定用リアクタを **Fig. 1** に示した通水試験装置に設置し循環通水しながら UV 強度を測定した。UV 強度測定用リアクタは、**Fig. 2** に示すようにランプと UV センサーの距離の異なる A、B、C の 3 点測定できるようになっている。**Table 1** に実験条件を示す。

ここで、ランプは 3 kW の中圧ランプを使用し、UV 強度の測定は、DVGW 認定のリファレンスセンサーを用いて行った。**Fig. 3** に UV センサーの波長別

Table 1: UV Intensity Measurement Setting Conditions

Symbol	Item	Unit	Setting range
L	Lamp- UV Sensor Distance	mm	50~260
UVT	UV transmittance	%	83~99
P	Lamp Power ^{*1}	%	50~100

^{*1} Percentage for 100% of lamp power

感度を示す。また、供試験水は地下水をベースとしてコーヒー液で UVT を調整した。

試験は、以下の手順で行った。

- 1) ポンプを起動し、供試水を系内に循環する
- 2) 全ランプを点灯し、安定させる
- 3) 供試水タンクに UVT 調整剤を注入し、UVT を所定の値に設定する。
- 4) A, B, C の順に UV 強度を測定する。

供試水の UVT スペクトル例を **Fig. 4** に示す。

(2) UV 照射量に対する UVT とランプ出力の影響

UV 照射量は、JWRC 技術審査基準²⁾に準じて妥当性が検証されている^{8,9)} CFD 解析を活用して、各 UVT およびランプ出力における RED を計算する。

解析対象 UV リアクタを **Fig. 5** に、解析モデルを **Fig. 6** に示す。流量、UVT、ランプ出力をそれぞれ設定して解析した。解析手法を **Table 2** に、解析条件と範囲を **Table 3** に示す。なお、ランプ点灯条件は後

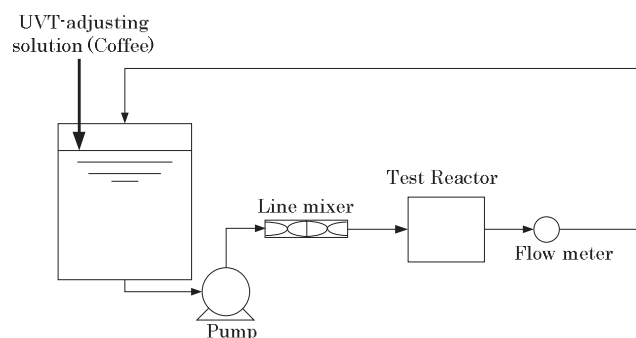


Fig.1: Process Flow Diagram for the UV Reactor Water flow test facility

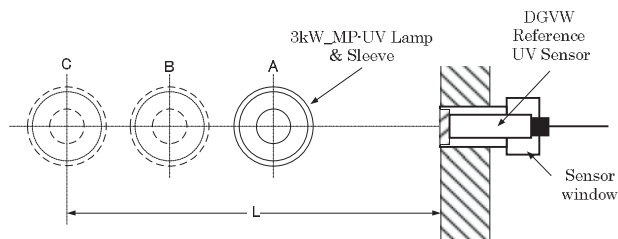


Fig.2: Schematic Test Reactor

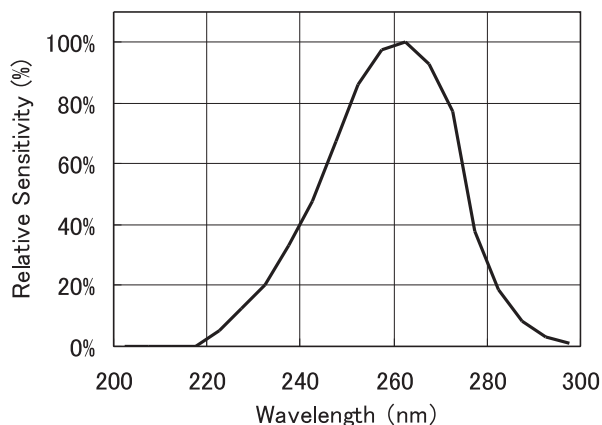


Fig.3: Relative spectral sensitivity of UV sensor

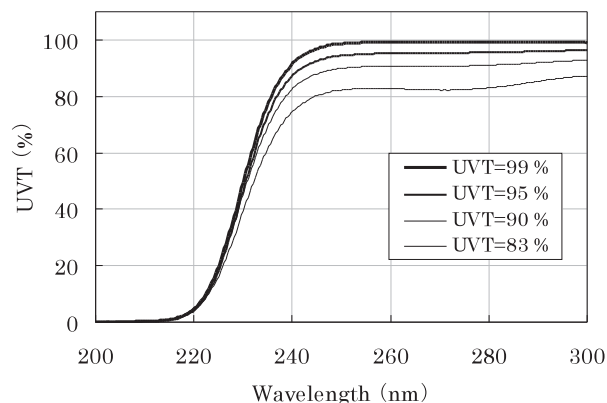


Fig.4: The Supply water sample UVT spectrum

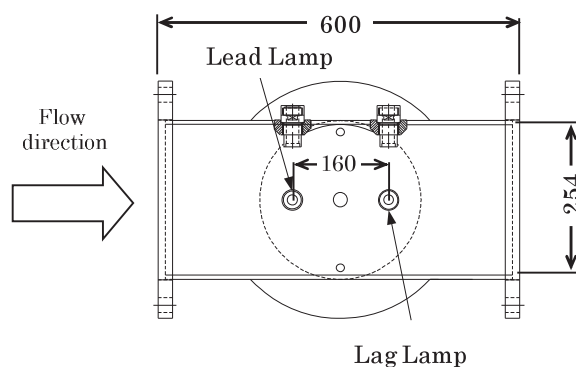


Fig.5: UV Reactor for CFD Simulation

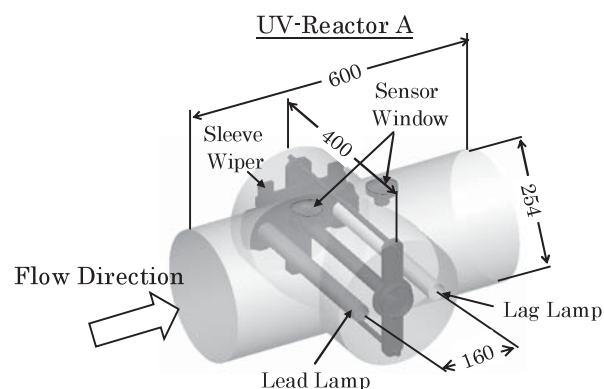


Fig.6: CFD Simulation model

Table 2: The CFD Simulation method

Item	Method
Solution	Steady-state analysis
Discretization method	1st Order Upwind Scheme
Turbulence Models	K - ε
Dose Calculation	Particle Trajectory Integration Scheme
Emission model	Point source model
RED conversion biological indicator	MS2

Table 3: Range of CFD Simulation Conditions

Symbol	Item	Unit	Setting range
Q	Flowrate	m ³ /h	10.4~417
UVT	UV transmittance	%	85~100
P	Lamp Power	%	50~100

方側ランプの1本点灯とした。

解析は、Table 2 に示すとおり粒子軌跡法で行い、RED を次式で計算した。

$$RED_{CFD} = -D_{0,254} \times \ln \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \exp \left(-\sum_{j=1}^m (D_{ij} \times K_j) / D_{0,245} \right) \right) \quad \dots(2.1)$$

ここで、

i : 粒子番号

n : 総粒子数

j : 分割波長番号

m : 波長分割数

D_{0j} : 指標生物の波長別不活化速度定数 (mJ/cm^2)

D_{ij} : 粒子 i の波長別照射量 (mJ/cm^2)

$D_{0,254}$: 低圧紫外線ランプ光 (波長 254 nm 付近) に対する指標生物の不活化速度定数 (mJ/cm^2)

K_j : 波長別指標微生物の紫外線感度

指標微生物は、MS2 とし波長別感度は Linden ら¹⁰⁾ の文献値を用いた。

また、解析においてランプ波長分布は実測値、保護管透過率はメーカーカタログ値を用い、被処理水は、UV 強度測定条件に合わせ地下水を想定した。

Fig. 7 に波長 254 nm の値を基準としたランプの波長相対出力と、保護管の波長別透過率を示す。

Linden ら¹⁰⁾ は、MS2 とクリプトスポリジウムの波長別感受性の比較を行っており、240 nm より短波長側で MS2 の波長感受性がクリプトスポリジウムよりも大きくなることを示しているが、Fig. 7 に示したとおり保護管の紫外線透過率は、240 nm 以下の紫外線透過率を減少させる材質の物を使用しているため、この差異による影響は無視できる。

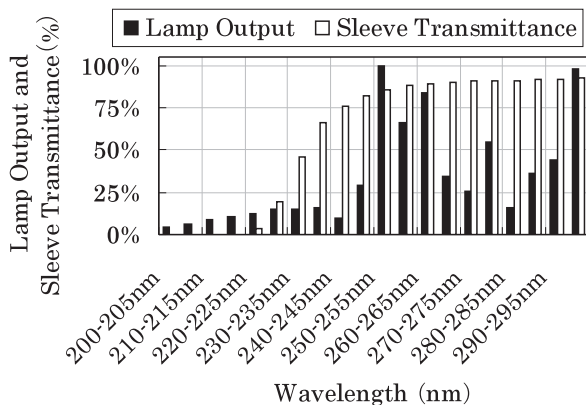


Fig.7: Lamp Output and Sleeve Transmittance

2.2 UV センサー適正位置の確認

(1) UV 強度測定結果

UV 強度測定結果を Fig. 8, Fig. 9 に示す。Fig. 8 は、UVT と相対 UV 強度の関係、Fig. 9 は、UVT = 95% のときのランプ出力と相対 UV 強度の関係を示している。

Fig. 8 において、UVT = 90% ~ 100% の範囲で UV センサーの位置による違いが顕著に現れており、ランプと UV センサーが離れるほど UVT の変化に対する

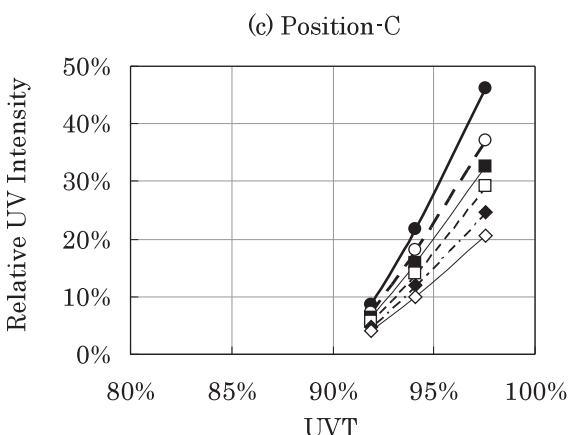
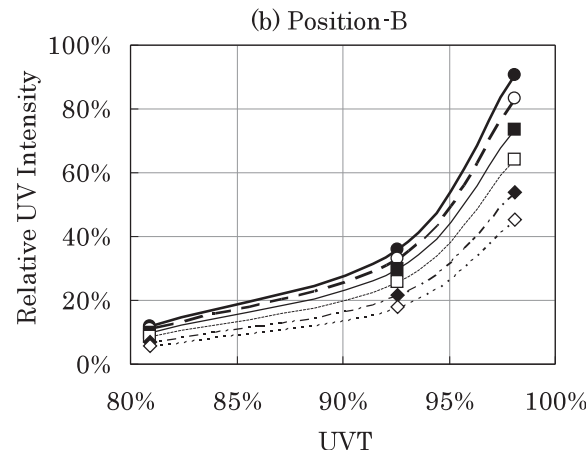
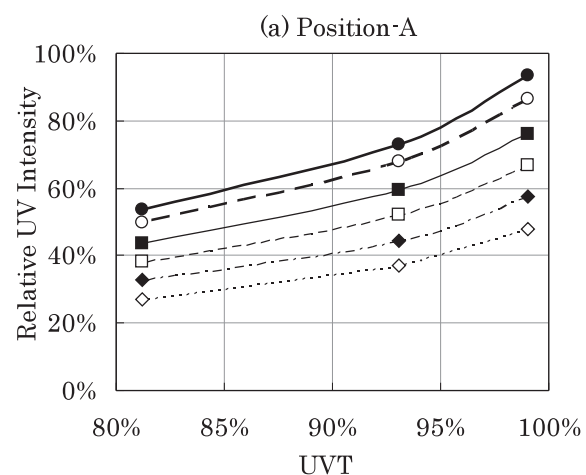
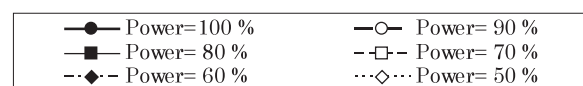


Fig.8: Relation between UVT and UV Intensity ; (a) Position-A. (b) Position-B. (c) Position-C

UV強度の変化が大きくなっており、より強くUVTの変化の影響を受けるようになることが示唆されている。

一方、Fig. 9からはランプ出力に比例して変化し、ランプとUVセンサーの距離が広がるのに伴い傾きが小さくなることが判る。

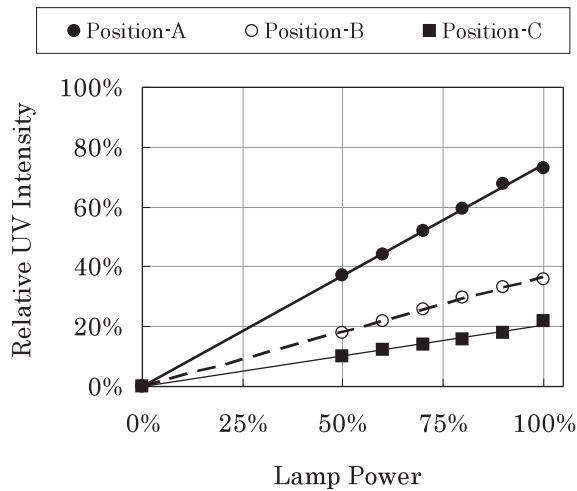


Fig.9: Relation between Lamp Power and UV Intensity

(2) 紫外線照射量解析結果

Fig. 10 (a)～(c)にREDの解析結果をUVT別に示す。さらに、Fig. 11にUVTとREDの関係、Fig. 12にランプ出力とREDの関係を示す。

これらの図より、REDは、UVTに対してはべき乗

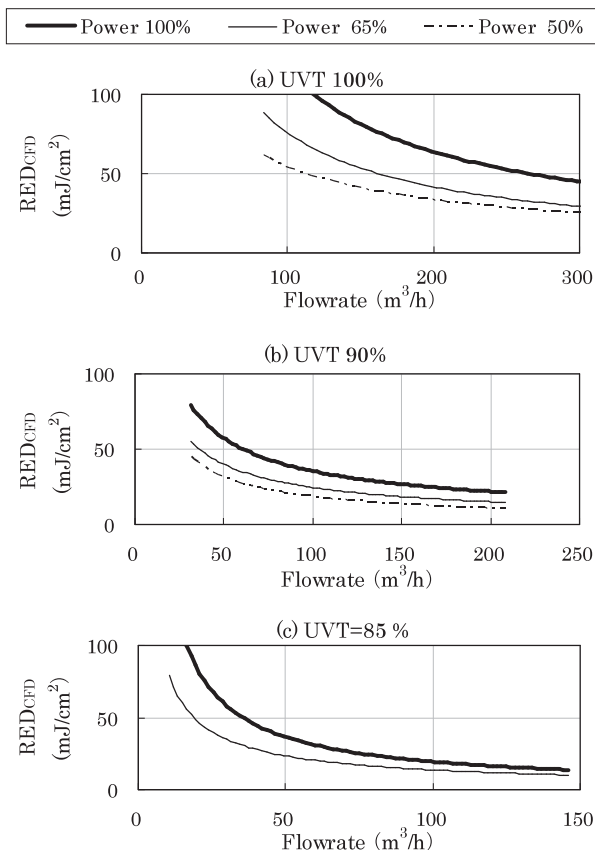


Fig.10: CFD simulation results; (a) UVT=100%, (b) UVT=90%, (c) UVT=85%

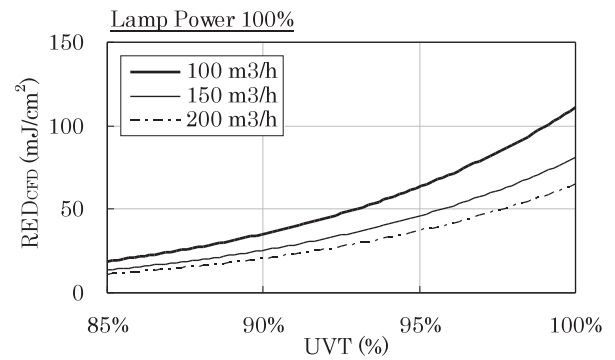


Fig.11: CFD simulation results; Relation between UVT and RED

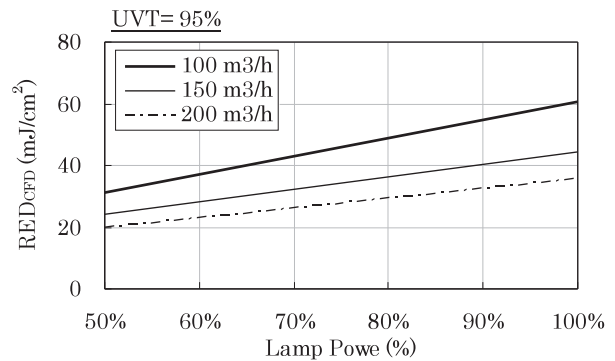


Fig.12: CFD simulation results; Relation between Lamp Power and RED for UV-Reactor A

関数的に、ランプ出力に対しては線形関数的に変化することが判る。

(3) UVセンサー適正位置確認

前述のとおり、UVT計を不要とするためには、ランプの紫外線出力変化と、被処理水のUVT変化を同時に検出し、検出されたUV強度とREDが線形相関する関係が成り立つ位置にUVセンサーを設置するのが理想的とされている。そこで、各センサー位置別にUV強度測定値とREDの関係を調べる。

Fig. 13に流量208 m³/hでのUVセンサー位置毎のUV強度とREDの関係を示す。

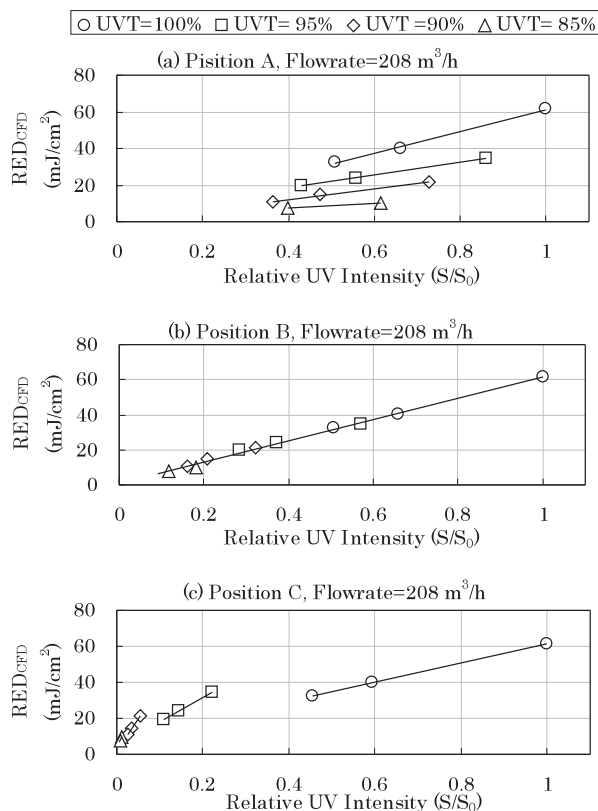
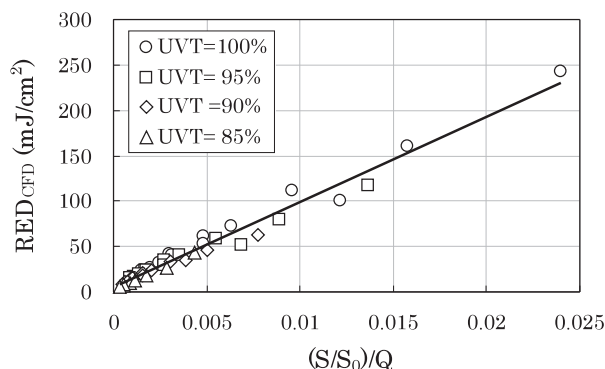
UVセンサーがランプに最も近いA点と最も離れているC点では、UVT毎に異なる線に分かれているのに対し、B点ではREDと (S/S_0) の関係が全ての条件で1本の直線上にまとまる結果が示されている。

このことから、B点がUVセンサー位置として適していることが示唆される。

次に、流量が異なる場合でも、B点が適していることを確認するために、Fig. 14の横軸を $((S/S_0)/Q)$ に変更し、流量41.7～333 m³/hの結果を整理してみる。

結果をFig. 14に示したが、全てのデータが1本の相関曲線上にまとまることが確認できる。

以上の結果から、B点がUVセンサー位置として適していると評価できるとともに、UVTの情報が無くても、UVセンサーにより測定された紫外線強度Sと、

Fig.13: Relation between (S/S_0) and REDFig.14: Relation between $(S/S_0)/Q$ and RED_{CFD} for UV-Reactor A

流量が判れば RED が計算できることが示唆された。

2.3 UV センサー適正位置の適用範囲確認 (UV リアクタ形状が異なる場合)

UV センサー適正位置 (B 点) の適用範囲を確認するため, Fig. 5 に示した UV リアクタと同系列として JWRC 認定取得済みの 2 機種につて B 点の適正を評価した。Fig. 15 に 2 機種の解析モデルを示す。

UV-Reactor B は, JIS 350A の通水胴に 3 kW の中圧ランプ 4 本, UV-Reactor C は, JIS 450A の通水胴に 3 kW の中圧ランプ 6 本が, それぞれ流れ方向と直交する向きに水平に設置されており, そのうち半数のランプを常時点灯とし, ランプの期待寿命到達時に切替えて運転を継続することの特徴としている。

したがって, 解析は両機種とも第 1 ランプセットを

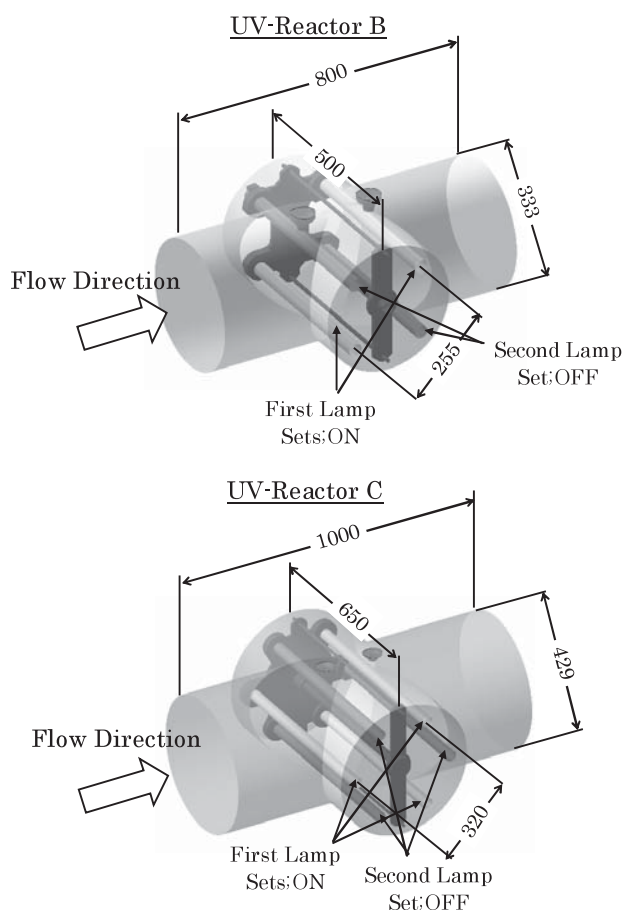


Fig.15: CFD Simulation model; UV-Reactor B and C

Table 4: Range of CFD Simulation Conditions for UV-Reactor B

Symbol	Item	Unit	Setting range
Q	Flowrate	m^3/h	62.5~1,250
UVT	UV transmittance	%	85~95
P	Lamp Power	%	50~100

Table 5: Range of CFD Simulation Conditions for UV-Reactor C

Symbol	Item	Unit	Setting range
Q	Flowrate	m^3/h	104~2,083
UVT	UV transmittance	%	85~95
P	Lamp Power	%	50~100

点灯, 第 2 ランプセットを消灯した場合について行った。

解析範囲はそれぞれ機種毎に Table 4, Table 5 に示した範囲とした。

解析結果は, UV 強度を 2.2(1) 項で示した測定結果を用い, Fig. 14 と同様 $(S/S_0)/Q$ と RED_{CFD} の関係で整理し B 点の適正を評価した。

Fig. 16, Fig. 17 にそれぞれの結果を示す。

両リアクタとも Fig. 14 と同様, 1 つの曲線上にまとまる結果となった。このことから, 少なくとも同一ランプを用いた同系列の UV リアクタであれば, UV センサーの適正位置は同じになる可能性が示された。

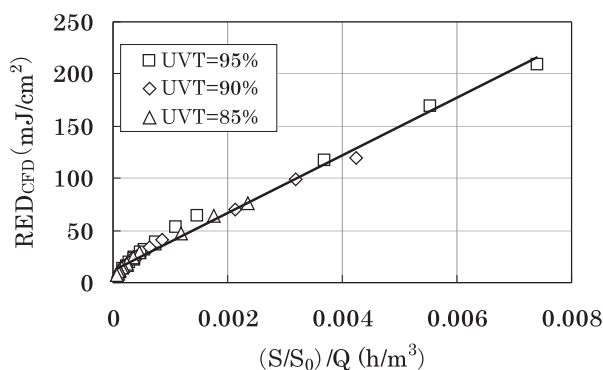


Fig.16: Relation between $(S/S_0)/Q$ and RED_{CFD} for UV-Reactor B

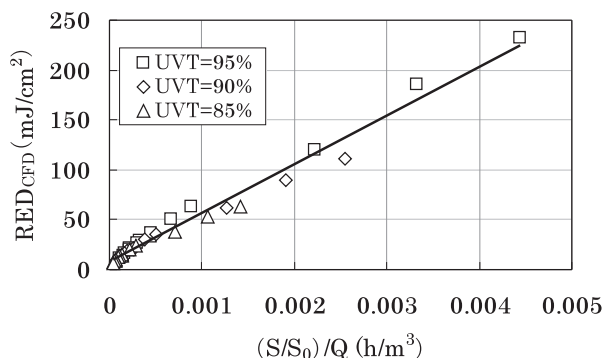


Fig.17: Relation between $(S/S_0)/Q$ and RED_{CFD} for UV-Reactor C

3. 実験による検証

前章の結果の妥当性を実験により検証した。実験は、UV リアクタの能力検証と合わせ、UV 照射量の監視精度もより厳しく評価される USEPA UVDGM³ 準拠試験として、米国の第三者機関に委託し実施した。

3.1 実験方法

UV センサーを B 点に設置した UV リアクタを試作し、生物線量試験を行った。Fig. 18 に試験に供した UV リアクタの構造図を示す。UV センサーは、波長別感度が Fig. 3 と同じものを使用し、ランプとの間隔が前章の B 点と同じになる位置に設置した。

なお、前章の解析では後方側ランプのみ点灯の条件

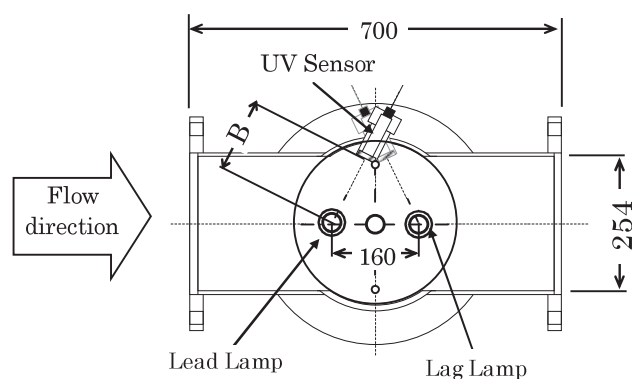


Fig.18: Drawing for the Test UV Reactor

で行ったが、本試験を開始する前に予備試験を行い、前方側ランプのみ点灯した場合と、後方側ランプのみを点灯した場合について比較したが、両者に有意な差はなかったため、前方側ランプが代表ランプとして選択された。

生物線量試験は、以下の2つの主要な試験により構成されている。

- ①指標微生物の紫外線照射量－不活化応答特性の検量
- ②通水試験による指標微生物の不活化結果に基づく RED の定量。

なお、試験は UVDGM³ 準拠試験であることから、供試水は地表水のろ過処理水とし、UVT 調整剤は、地表水の試験用として推奨されているリグニンスルホン酸を用いた。

(1) 指標微生物

生物線量試験では、指標微生物として大腸菌ファージ MS2 (ATCC 15597-B1) を使用し、*E. coli* (ATCC 23631) を宿主として使用した。なお MS2 の培養、検出、計数方法は、ISO10705-1 (ISO, 1995) および UVDGM_ Appendix A の F-特異性 RNA バクテリオファージの増殖、検出および計数方法に準じて行った。

(2) UV 照射量－不活化応答試験

UV 照射量－不活化応答試験は、平行ビーム試験装置を使用して行った（以降、平行ビーム試験と称する）。

供試水には、通水試験時に採水した流入サンプル水を用いた。したがって、UV 照射量－不活化応答データは、通水試験条件における供試水の UVT と MS2 濃度が反映されている。

Table 6: Test Conditions

Symbol	Item	Unit	Setting range
Q	Flowrate	m ³ /h	24.4~350
UVT	UV transmittance	%	80~98
P	Lamp Power	%	35~100

少なくとも1種類の流入サンプル水を、通水試験日毎に採水し、その日の内に平行ビーム試験を行い RED の定量に使用した。1回の不活化応答試験は、2つの未照射サンプルと、6個の照射サンプルで構成した。

UV 照射量条件は、10, 40, 80, 100, 140 および 160 mJ/cm²とし、同一のサンプルについて3回繰り返して行った。そして、一つの照射サンプルに対して、それぞれ2つの倍率で希釈し、それぞれ寒天プレートに播種して現れた1プラーク形成単位 (pfu) が指標菌1個に対応することを前提に計数した。一方、UV 強度は NIST 規格の UV 強度計を2台使用して測定した。

すべてのサンプルは、事前に洗浄された平底のペトリ皿に入れて紫外線照射した。平行ビーム管の照射領

域は、ペトリ皿全体をカバーするのに十分な幅を有している。また、サンプル表面の反射率は 2.5% で、サンプルの深さは 0.658 cm であった。

UV 照射量は、UVDGM³⁾に記載の方法に従い、(3.1) 式を用いて計算した。

$$D_{CB} = E_s P_f (1 - R) \frac{L}{(d + L)} \frac{(1 - 10^{-UVA \cdot d})}{UVA \cdot d \cdot \ln(10)} t \quad \dots (3.1)$$

ここで、

D_{CB} : 紫外線照射量 (mJ/cm^2)
 E_s : 平均 UV 強度 (mW/cm^2)
 P_f : ペトリ係数
 R : サンプル液面の 254nm 反射率
 L : ランプ中心から液面までの距離 (cm)
 d : サンプル深さ (cm)
 UVA : 波長 254nm の紫外線吸光度 (cm^{-1})
 t : 照射時間 (s)

(3) 通水試験

Fig. 19 に試験フローを、Table 6 に実験条件を示す。

指標微生物と UVT 調整剤は、UV リアクタの十分手前で注入し十分な混合時間を確保した。また、UVT 調整にはリグニンスルホン酸を使用し、ランプは 100 時間のフルパワー点灯済みのランプを用いた。

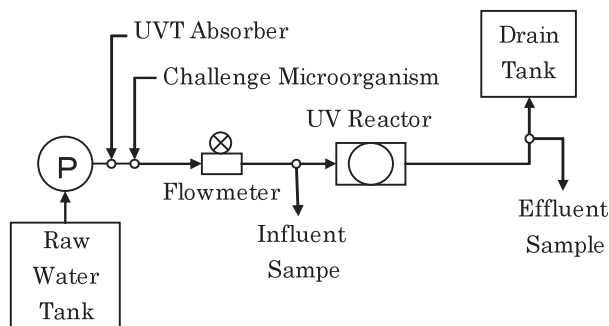


Fig.19: Process Flow Diagram for the UV Reactor Test Stand

以下に、試験手順を簡単に示す。

- 1) 動作条件（流量、ランプ出力と UVT）に設定し安定させる。
- 2) 供試水での濃度が、 1×10^6 pfu/mL となる流量で指標菌を注入する。
- 3) UV リアクタの容量の 5 倍以上の水を排水する。
- 4) 定常条件確立後、流入水と流出水を 3 サンプルずつ採水する。
- 5) UVT 分析と、平行ビーム試験用のサンプルを採水する。
- 6) UV リアクタに装着した UV センサーにより測定された UV 強度を記録する。

3.2 実験結果

(1) UV 強度測定

Fig. 20 に生物線量試験中に UV センサーによって測定された UV 強度と (a) UVT の関係、(b) ランプ出力の関係を示す。

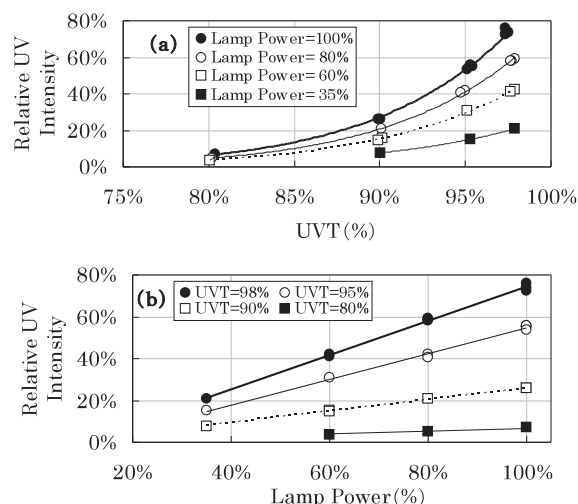


Fig.20: UV intensity measurement result ; (a) Relation between UVT and UV Intensity , (b) Relation between Lamp Power and UV Intensity

図示したように UVT と UV 強度の関係はべき乗、ランプ出力と UV 強度の関係は線形の関係にあることが確認された。

(2) 生物線量試験結果

Fig. 21 に生物線量試験結果例として、UVT=95%、ランプ出力 100% での通水試験の結果を示す。

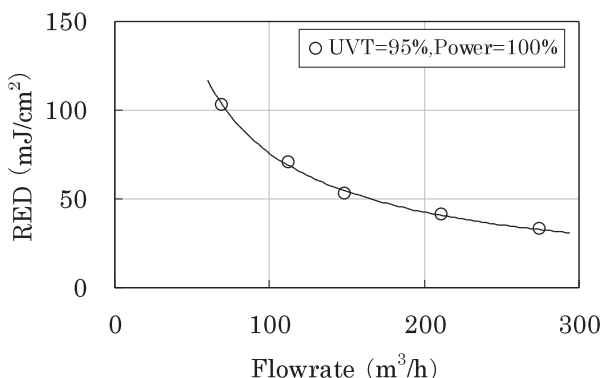


Fig.21: Observed RED at UVT=95%, Lamp Power=100%

Fig. 22 に前方側ランプのみを点灯した場合と、後方側ランプのみを点灯した場合の比較を示したが、両者に有意な差は認められなかった。

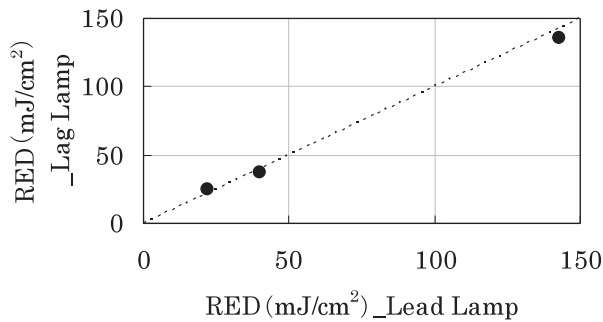


Fig.22: Comparison of Lead and Lag Lamp

3.3 UV センサー位置の適正評価

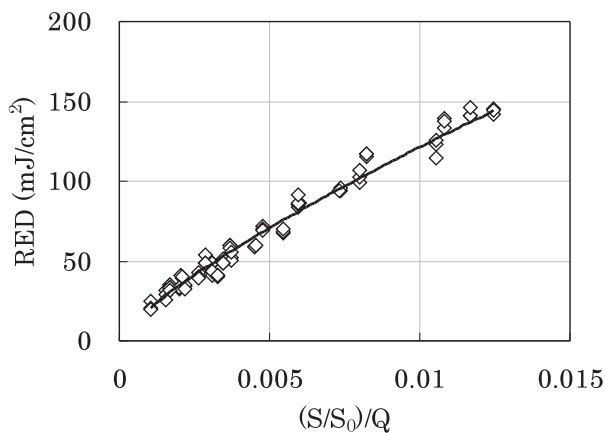
次に、UV センサー位置の妥当性を確認する。

前章の解析で、UV センサーの適正位置では、RED と相対 UV 強度 (S/S_0) を流量 Q で除した $(S/S_0)/Q$ との間に相関関係が成り立つことを確認した。

そこで、検証試験で得られた RED と $(S/S_0)/Q$ の関係を調べ、UV センサー位置の適正を評価する。

結果を Fig. 23 に関係を示す。

図示したように、解析の場合 (Fig. 14) と同様に全データが、1本の相関曲線上にまとまる結果が得られた。このことから、UV センサー位置は妥当であったと評価できる。

Fig.23: Relation between (S/S_0) and RED; Experiment

4. RED 式の提案

Fig. 23 で RED と $((S/S_0)/Q)$ 間に相関が成り立つことが確認された。この関係を用いれば、RED 式は従来式と比較して非常に簡単な方程式で表すことができる。

$$RED = a \times \left(\frac{S/S_0}{Q} \right)^b \quad \dots (4.1)$$

ここで、

RED : 換算紫外線照射量 (mJ/cm^2)

S : 紫外線強度 (mW/cm^2)

S_0 : ランプ出力 100% での紫外線強度

(mW/cm^2)

Q : 被処理水流量 (m^3/h)

a, b : 実験データに基づく係数

Fig. 24 に RED の (4.1) 式による計算値と実験値の比較を示す。計算値と実験値は良く一致し、(4.1) 式で RED を十分に推定できることが確認できる。

以上のことから、UV センサーを適切な位置に設置することで、UVT 計が無くても UV 照射量の監視が可能であることが実験的にも証明された。

また、この結果からクリプトスポリジウム等病原性微生物の消毒目標レベルに従い、必要な RED を設定しておけば、その時の流量と UV センサー出力情報から運転中の UV リアクタにおける RED を監視できるとともに、予め設定した必要 RED に対する過不足を判断し、必要 RED になるようにランプ出力を制御することも可能になることが示唆された。

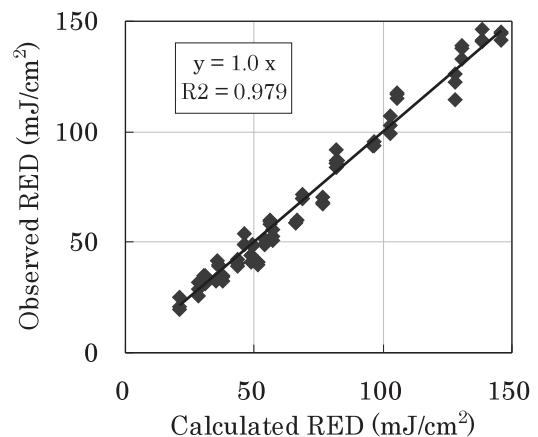


Fig.24: Observed vs. Calculated RED Using Equation (4.1)

5. 結 論

中圧ランプを用いた UV リアクタにおいて、オンライン UVT 計が不要な調光制御システムを実現するための、UV センサー適正位置を解析により探索するとともに、UVDGM³⁾ 準拠試験により検証した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 中圧ランプの場合も、UVT 監視を不要とできる UV センサーの適正位置が存在する。
- 2) UV センサーを適正位置に設置すれば、RED と $(S/S_0)/Q$ の間に相関関係が成り立つ。
- 3) 1) の適正位置は、同一ランプを用いた同系列の UV リアクタにも適用可能である。
- 4) 被処理水の原水が異なる (地下水、地表水) 場合でも同一の適正位置が適用できる可能性が示唆された。

6. ま と め

中圧ランプを用いた UV リアクタにおいて、オンライン UV 計が不要な調光制御システムを実現するため、UV センサー適正位置の見極めと、検証を目的に、UV 強度と UV センサー位置（ランプとセンサー間距離）、UVT およびランプ出力の関係を実験により把握するとともに、流量、UVT およびランプ出力が変化した場合の RED を CFD 解析で推定し、UV センサーの適正位置を見出した。また、この結果を反映した UV リアクタを試作し、実規模通水による生物線量試験で、その妥当性を検証した。さらに、生物線量試験の結果から、RED 式を導出した。

以上の結果により、クリプトスポリジウム等の病原性微生物の消毒目標レベルに従い、流量と UV センサーで測定される UV 強度情報に基づくランプの調光システムが実現可能であるとの見通しを得た。

今後、本研究で得た UV センサーの適性位置の、適用範囲や一般性については、理論的アプローチも含め継続して検討していく。

参考文献

- 1) 厚生労働省水道課通知，発第 0330005 号：水道水中のクリプトスポリジウム等対策の実施について，(2007)
- 2) 財水道技術研究センター：紫外線照射装置 JWRC 技術審査基準（中圧紫外線ランプ編），(2008)
- 3) US EPA: ULTRAVIOLET DISINFECTION GUIDANCE MANUAL FOR THE FINAL LONG TERM 2 ENHANCED SURFACE WATER TREATMENT RULE, EPA 815-R-06-007, (2006)
- 4) M. Heath, H. Wright, J. Bandy, I. Gehlen and M. Forsyth: On-Site Testing Extends Validated Range for Year-Round Operation of a Medium Pressure UV Disinfection System, IOA IUVA World Congress & Exhibition, pp IV. 2. 2-1-2. 2-15, (2011)
- 5) H. Wright, J. Bandy, M. Heath and K. Bircher: Defining UV Dose Monitoring Equations, IOA IUVA World Congress & Exhibition, pp IV. 3. 5-1-3. 5. -7, (2011)
- 6) B. R. Townsend, T. Phelan, R. Fiorante, I. Singh, and O. Lawal: UV System Performance Validation for the Seymour Capilano Filtration Plant UV Disinfection Facility, IOA IUVA World Congress, pp 374-pp 398, (2007)
- 7) J. Bandy, H. Wright, D. Gaithuma, O. Lawal, S. Lerner: Drinking Water UV Operation Without On-Line UVT Monitoring: The Default UVT and Sensor Setpoint Approaches to Validation, IOA IUVA World Congress & Exhibition, pp IV. 2. 4-1-2. 4-6, (2011)
- 8) 出健志，阿部法光，村山清一，小林伸次，城田昭彦，相馬孝浩：中圧紫外線照射装置の照射性能解析技術，第 61 回全国水道研究発表会，pp. 190-191 (2010 年)
- 9) 阿部法光，村山清一，出健志，小林伸次，城田昭彦，相馬孝浩：中圧紫外線照射装置の照射性能解析と検証試験の比較，環境システム計測学会誌，Vol. 15, No. 2, 3, pp. 51-54 (2010)
- 10) Kael G. Linden, Gwy-Am Shin and Mark D. Sobsey: Comparison of Monochromatic and Polychromatic UV Light for Disinfection Efficacy, AWWA Water Quality Technology Conference Proceedings, (2000)

Development of Dose Monitoring & Control technology of UV-Disinfection Equipment Without Online UVT Monitor

Norimitsu Abe¹⁾, Shinji Kobayashi¹⁾, Takeshi Ide¹⁾, Koji Fujita²⁾ and Kenji Takeuchi³⁾

¹⁾ Power and Industrial System R&D Center, Toshiba Co.

²⁾ Public Use Systems Solution Dept., Toshiba Co.

³⁾ Water & Environmental Engineering Center, Toshiba Co.

Abstract

When medium pressure lamps are used for the UV disinfection equipment, the power consumption per lamp is very large. Therefore, the lamp power control corresponding to change of water flow and quality is effective. However, in the conventional systems, as monitoring UV transmittance (UVT) of water is necessary, installation of an online UVT monitor makes capital and maintenance costs increase. The authors have developed a technique to monitor and control UV dose without online UVT monitor by optimizing the position of the UV monitor.

Key words : UV disinfection, Cryptosporidium, UV dose, UV monitor, Lamp control