

〈研究発表〉

中圧紫外線照射装置の照射性能解析と検証試験の比較

阿部 法光¹⁾, 村山 清一¹⁾, 出 健志¹⁾, 小林 伸次¹⁾, 城田 昭彦²⁾, 相馬 孝浩³⁾

¹⁾ 株式会社 電力・社会システム技術開発センター (〒183-8511 府中市東芝町1, E-mail: noeimitsu1.abe@toshiba.co.jp)

²⁾ 株式会社 社会インフラシステムソリューション部 (〒183-8511 府中市東芝町1, E-mail: akihiko.shirota@toshiba.co.jp)

³⁾ 株式会社 水・環境システム事業部 (〒105-8001 港区芝浦1-1-1, E-mail: takahiro.soma@toshiba.co.jp)

概要

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、同時に紫外線処理設備に対する性能基準が示された。筆者らは、紫外線光源として中圧紫外線ランプを用いた紫外線照射槽を対象に、中圧紫外線ランプの発光波長分布と対象微生物の波長別感受性を考慮した実効照射量解析について、指標菌として大腸菌ファージ *MS2* (NBRC102619) を用いた通水試験よりその妥当性を検証した。

キーワード: 紫外線消毒, クリプトスポリジウム, 紫外線照射量, 紫外線照射量解析, 生物線量

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。これに伴い、財団法人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。

JWRCの適合認定制度では、照射性能が定められた性能以上であることを、指標微生物を用いた消毒性能試験にて示す必要があるが、同一ランプを用いた装置では、CFD (=Computational Fluid Dynamics: 流体解析) 解析モデルによるシミュレーション結果にて照射性能が定められた性能以上であることを示すことで認められる。

一方、紫外線照射装置では、紫外線光源として紫外線ランプが用いられているが、この紫外線ランプは、点灯時の水銀蒸気圧の違いにより、低圧、中圧に分類される。低圧ランプは基本的に253.7nmの単色紫外線を発生させるのに対し、中圧ランプの場合は、動作温度が高く(600~900°C)、水銀原子同士の衝突頻度が増加し広範囲の波長(多波長)の紫外線が高光度で発生する。

また、処理対象である病原性微生物の紫外線感受性は波長により異なるため、中圧ランプを使用する紫外線照射装置のCFDシミュレーションは低圧ランプの場合に比べてより複雑になる。

筆者らは、紫外線光源として中圧ランプを用いた紫外線照射装置を対象に、中圧紫外線ランプの発光波長分布と対象微生物の波長別感受性を考慮した実効照射

量解析について、指標菌として大腸菌ファージ *MS2* を用いた通水試験によりその妥当性を検証したのでその結果を報告する。

2. 中圧紫外線照射装置の検証試験方法

指標菌を用いて紫外線照射量を計測することを生物線量試験といい、紫外線照射装置の換算紫外線照射量 (Reduction Equivalent UV Dose: 以下「RED」と略記する) を求める試験のことである。REDを求める方法は次の2つの試験項目からなる。

(1) 指標微生物の紫外線感受性測定試験

(2) 紫外線照射装置の通水試験

(1)はあらかじめ指標微生物の紫外線感受性を測定する試験、(2)は紫外線照射装置に同一指標微生物を供することによって、その生残率から紫外線照射装置の与えた照射量を求める試験である。

2.1 指標微生物の紫外線感受性測定試験

試験に用いた指標微生物は、病原性がなく安全で第三者機関が追試可能な微生物の中から選択し、*Escherichia coli phage MS2* (以下、大腸菌ファージ *MS2*) とした。以下に菌株の情報を示す。

・大腸菌ファージ *MS2*

Escherichia coli phage MS2 (NBRC102619)

紫外線の照射方法には、コリメート法を用いた。Fig.1に紫外線感受性試験装置概略図を示す。光源は、低圧紫外線ランプとした。

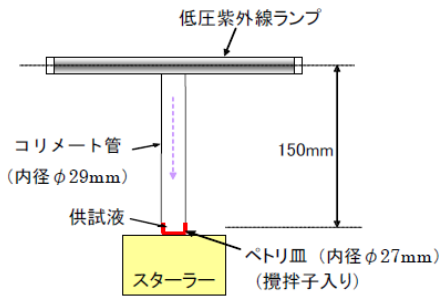


Fig.1: The UV-Sensitivity test apparatus schematic

試験は、所定濃度に調整した *MS2* 供試液をペトリ皿に入れ、所定時間紫外線を照射し、照射前後の *MS2* 数から次式により生残率を求めた。

$$\text{生残率 } S = \frac{N}{N_0} \quad (1)$$

N : 紫外線照射後の生残微生物数

N_0 : 紫外線未照射の供試微生物数

紫外線照射量は、供試液面の紫外線強度と紫外線照射時間の積により算出した。

生残率 S を片対数紙上に紫外線照射量に対してプロットした結果、原点を通る直線で近似できたので、

$$\text{紫外線照射量} = -D_0 \times \ln(S) \quad (2)$$

で表せる不活化速度定数 D_0 (mJ/cm^2) を算出した。

なお、感受性試験は、通水試験と同日に実施した。

2.1 通水試験

Fig.2 に通水試験装置の通水フロー図を示す。本装置は、原水タンク、通水ポンプ、ラインミキサ、供試紫外線照射装置、電磁流量計から成り、バルブ V_1 経由で原水タンクに戻る循環系とバルブ V_2 経由で排水処理タンクへ流れる通水系により構成されている。通水量の把握は、紫外線照射装置の下流側に設置した校正済み電磁流量計にて計測した。

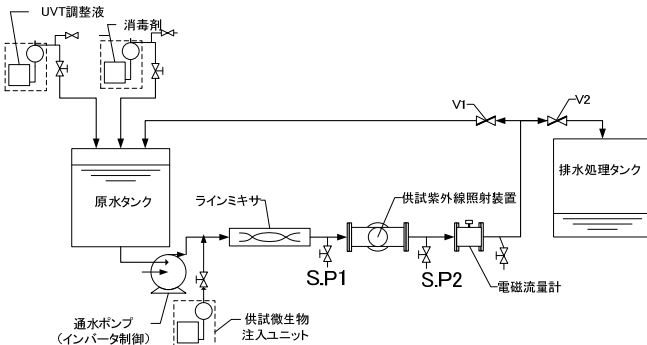


Fig.2: The Hydraulic Flow Diagram of a Bidosimetry Test Equipment

Fig.3 に供試紫外線照射装置の断面図を示す。供試

供試紫外線照射装置は、紫外線ランプを2本設置しているが、そのうち1本 (No.1) を点灯して行った。

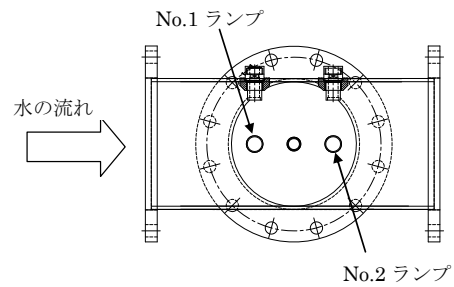


Fig.3: The UV-Reactor Tested

供試水の調整および通水試験手順を以下に示す。

(1) 供試水の調整

配管内の消毒

系内の水に残留塩素濃度が所定の値となるまで次亜塩素酸ナトリウムを注入し循環させることにより配管内、サンプリングバルブ (SP1、SP2) および他の薬品注入タンクから装置への注入配管を消毒する。

透過率 (UVT) の調整

原水タンクに供試水を再注入後、系内を循環させながら UVT 調整液注入ユニットより調整液を注入し、透過率が所定の値となるよう調整する。

(2) 通水試験

循環系で通水しながら中圧紫外線ランプ出力が十分に安定した後、*MS2* 原液注入をスタートした。また、*MS2* 原液の注入点と紫外線照射装置の間には、Fig.2 に示すようにラインミキサを設置し、*MS2* 原液が供試水に十分に混合するよう工夫した。

試験は、以下の手順に従って実施した。

通水開始

一旦ポンプを停止し、循環系から通水系へ系統を切替後、ポンプ再起動した。この時点で目標の流量となるよう調整した。

サンプリング

サンプリングバルブ SP1、SP2 より、各々紫外線照射前、後のサンプルを採水した。

RED計算

紫外線照射前、後のサンプルの *MS2* 数を計量し、(1) 式より生残率 S を計算し、試験に供した *MS2* の紫外線感受性試験で求めた不活化速度定数 D_0 (mJ/cm^2) を用いて、(2) 式の関係から次式にて RED を計算した。

$$\text{RED} = -D_0 \times \ln(S) \quad (3)$$

なお、後述の紫外線照射量解析においては照射槽内の紫外線強度分布を解析する必要があるが、その場合、ランプからの発光状態を正しくモデル化する必要がある

る。代表的な発光モデル²⁾としては①発光点から発せられる光が全ての方向に均一に照射されるとする**透明光モデル**と、②発光点から発せられる光が光軸の垂線と成す角度 θ に対して $\cos \theta$ だけ減少して発光されるとする**拡散光モデル**があり、解析に使用する発光モデルにより解析結果が大きく影響される。

そこで、紫外線強度分布解析に採用する発光モデルとして①, ②どちらのモデルが適切かを評価するため、Fig.4 に示したようにランプ長の半分を被覆し、発光点から斜め方向（光軸の垂線と成す角度 θ ）の光が顕著に影響する条件での RED 測定も実施した。

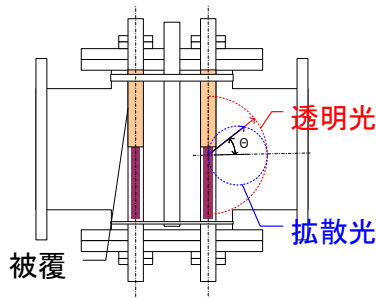


Fig.4: Light Cover Mounting Condition.

3. 紫外線照射量解析

3.1 解析方法

紫外線による微生物の不活化性能は紫外線照射量に依存する。紫外線照射量(mJ/cm^2)は、紫外線照射装置内部を流れる微生物の各位置において微生物が受ける紫外線強度(mW/cm^2)と照射時間(sec)との積の単位面積あたりに照射されるエネルギー量で、微生物のたどった経路（流跡）に沿って積分したものが、微生物が受ける紫外線照射量となる。ただし、微生物の紫外線感受性は、照射される紫外線の波長により異なるため、中圧紫外線ランプのように多波長の光を出す紫外線ランプを用いる場合、発光波長特性と処理対象微生物の波長別感受性を考慮する必要がある。そこで、筆者らは、3次元の流動解析（CFD）と中圧紫外線ランプの発光波長分布と、対象微生物の波長別感受性を考慮した紫外線強度分布解析を組み合わせた紫外線照射量解析技術を開発した。また、本稿の目的である、生物線量試験により紫外線照射量解析の妥当性を検証するため、生物線量試験で得られる RED と直接比較できるように、次式より RED_{CFD} を求めた。

$$RED_{CFD} = -D_{0,254} \times \ln \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \exp \left(- \sum_{j=1}^m \frac{D_{ij} \times K_j}{D_{0,254}} \right) \right] \quad (4)$$

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_{ij} : 粒子 i の波長別照射量

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

K_j : 波長別指標生物紫外線感受性³⁾

3.2 解析条件

Fig.3 に示した基準流量 $5,000\text{m}^3/\text{日}$ の中圧紫外線照射装置をモデル化し、Table.1 の条件で解析した。

Fig.4 に解析モデルを示す。解析においては、照度分布は点光源合計法⁴⁾を用い、境界条件として流入部に所定の流速を与え、固液2相流法にて槽内の微生物の軌跡および照射量を求めた。なお、処理水の流れ解析は有限体積法を用いた定常解析を行い、乱流モデルとしては $k-\epsilon$ モデルを使用した。

Table.1: Analysis Condition

処理水量	2,500~7,000 m^3/d
照射槽長さ/径	500mm/250A
ランプ出力	3kW /本
ランプ本数	点灯 1 本 / 消灯 1 本
保護管汚れ係数	0.95
UVT	85~95%

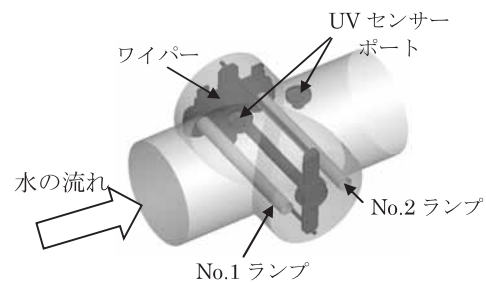


Fig.5: Analytical Model.

4. 結果と考察

4.1 指標微生物の紫外線感受性測定結果

Fig.6 に感受性試験における指標微生物の生残率曲線を示す。

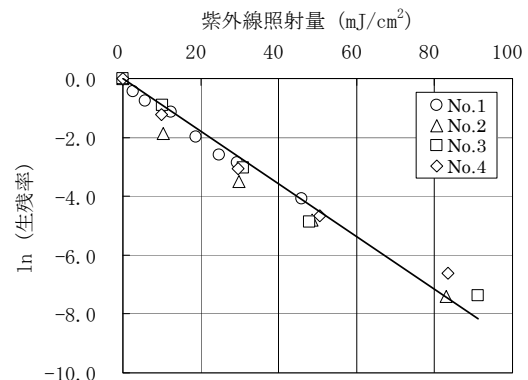


Fig.6: MS2 Sensitive Test for Survival Curves.

紫外線照射量は、紫外線強度と紫外線照射時間の積として求め、 \ln (生残率) は、生残率 (=生残微生物数/紫外線照射時間 0 秒における生残微生物数) の自然対数として求めた。

不活化速度定数 D_0 (mJ/cm^2) は、(2) 式から \ln (生残率) = $-(1/D_0) \times$ 紫外線照射量 における D_0 であることから、図における直線の傾きの絶対から D_0 を計算した。

4.2 通水試験結果

Fig.7 にランプの半分を被覆したときの実験結果を示す。

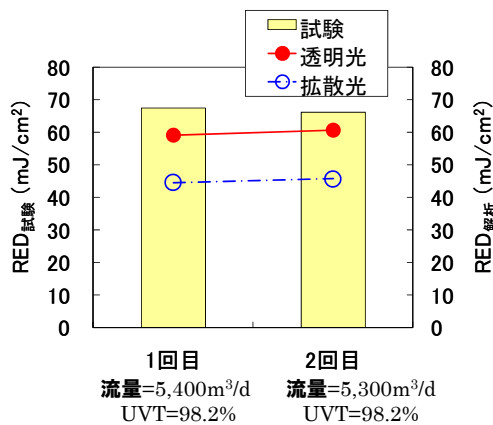


Fig.7: Experimental Results show that Coated Lamps.

図中には、透明光モデルで解析した場合 (●) と、拡散光モデルで解析した場合 (○) の結果も示しているが、透明光モデルの方が試験結果により近い値を示した。よって、以降の解析では紫外線強度分布解析には透明モデルを採用することとした。

Fig.8 に大腸菌ファージ *MS2* を指標菌とした通水試験結果と解析結果を示す。図中 (○) は実験結果を、(●) は解析結果を示しているが両者は非常に良く一致する結果となった。

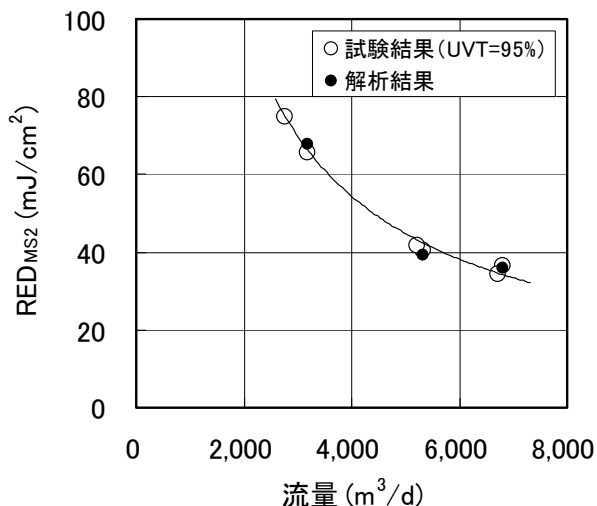


Fig.8: RED Test Results and Analysis (flow characteristics).

Fig.9 には、流量=3,000 m^3/d と 5,000 m^3/d のときの UVT の影響を示す。図中には、実験結果 (○, ◇) と解析結果 (●, ◆) をそれぞれ示しているが、UVT が異なる条件でも両者は良く一致している。

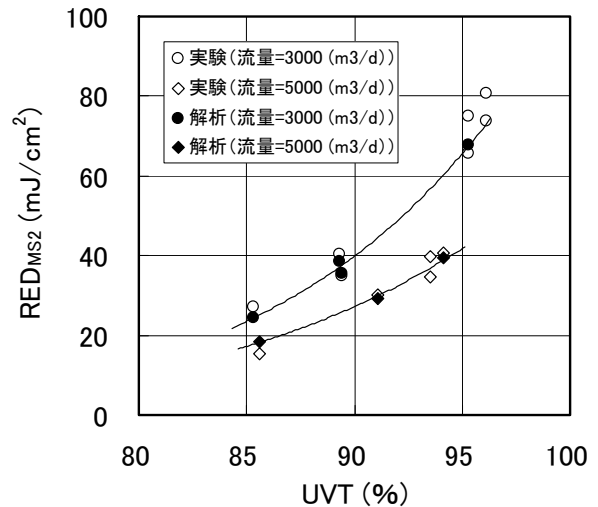


Fig.9: RED Test Results and Analysis (UVT effects)

5. おわりに

紫外線光源として中圧ランプを用いた紫外線照射槽を対象に、中圧紫外線ランプの発光波長分布と対象微生物の波長別感受性を考慮した実効照射量解析について、指標菌として大腸菌ファージ *MS2* を用いた通水試験によりその妥当性を検証した。

その結果、解析における紫外線発光モデルとして、透明光モデルを採用することで、実験値と解析値は非常に良く一致し、筆者らの紫外線照射量解析手法の妥当性を検証することができた。今後は、さらに大規模な紫外線照射装置への適用を検討する。

参考文献

- 1) 「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 (通知)」, 発第 0330005 号, 2007 年 3 月
- 2) 「紫外線照射装置 JWRC 技術審査基準(中圧紫外線ランプ編)」, (財)水道技術研究センター, PP6-40, 2008 年 8 月 1 日.
- 3) K.G.Linden, G.Shin and M.D.Sobsey, Comparative effectiveness of UV wavelengths for the inactivation of *Cryptosporidium* oocysts in water, *Water Science and Tech.*, 43,pp171-174 (2001)
- 4) 横田 他, 「内部照射型光化学反応器の光強度について」, 化学工学論文集, 第 2 巻第 3 号, pp298-303(1976)