

〈研究発表〉

サイクロン型UVリアクタの実証試験報告

村山 清一¹⁾, 阿部 法光¹⁾, 出 健志¹⁾, 中楯 真澄¹⁾, 城田 昭彦²⁾, 環 省二郎³⁾

㈱東芝 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: seiichi.murayama@toshiba.co.jp)¹⁾

㈱東芝 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)²⁾

㈱東芝 水・環境システム事業部 (〒105-8001 港区芝浦 1-1-1, E-mail: shojiro.tamaki@toshiba.co.jp)³⁾

概要

クリプトスポリジウム等の耐塩素性病原生物対策技術の一つである紫外線消毒装置の浄水処理工程への適用性評価を目的に、サイクロン型UVリアクタ¹⁾²⁾³⁾の実規模連続運転試験を行った。その結果、濁度、鉄分が高めの沈殿水を原水としたためスリーブ表面の洗浄なしでは紫外線照度が低下したが、スリーブ洗浄装置の導入により、照度低下を抑制する効果を確認した。また、サイクロン型UVリアクタの消毒性能は、EPAの紫外線消毒導入マニュアル⁴⁾に推奨されている生物学的線量試験によりREDを求め、流動解析と照度分布解析を組合せた紫外線量解析結果と比較評価を行った。

キーワード: 紫外線、消毒、クリプトスポリジウム、解析、生物学的線量

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」⁵⁾が通知され、地表水以外の水源を原水とする浄水施設における紫外線処理設備の導入が認められた。また、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。これに伴い、国内での紫外線処理設備の導入が始まりつつある。

本研究では、クリプトスポリジウムやジアルジア不活化技術として有効な紫外線消毒装置の浄水処理工程への適用性を評価することを目的とし、(1)水質への影響評価、(2)スリーブ洗浄装置の有効性、(3)サイクロン型UVリアクタの紫外線量評価について、検証した。

本研究は、JWRCの「安全でおいしい水を目指した高度な浄水処理技術の確立に関する研究」(e-Water II プロジェクト)の持込研究として、川崎市水道局との共同研究により実施したものである。

2. 実証試験の概要

2006年9月～2008年3月の期間、川崎市水道局長沢浄水場にて、Fig.1に示す紫外線消毒試験設備にて実証試験を実施した。紫外線消毒装置の浄水処理工程への適用性評価を目的に、本試験設備は4.2m³/h(日量100m³)で連続通水するリアクタIと、20.8m³/h(日量500m³)を循環にて連続通水してランプ破片回収機能付加型紫外線消毒装置(サイクロン型UVリアクタ)の性能を評価するリアクタIIと、高出力低圧アマルガム紫外線ランプを用いたリアクタIIIで構成されている。

原水は、砂ろ過処理後の塩素消毒された浄水池の水(以降、浄水と略記)と工業用水系統の沈殿処理水(以降、沈殿水と略記)を用いた。沈殿処理工程では、通常、凝集剤は注入しないが、濁度が高い場合は凝集剤(PAC)が注入される。連続通水試験の原水には沈殿水を用いた。

3. 試験方法

3.1 水質への影響評価

紫外線照射前後の水質検査結果から水質への影響を評価する。水質検査は、1回/月～4回/月の頻度で実施した。評価対象リアクタは、連続通水で試験したリアクタIとした。

3.2 スリーブ洗浄装置の有効性

紫外線照度低下の特性把握のため、ランプスリーブ表面の汚れ拭き取り前後、未使用ランプスリーブ装着時と使用後のランプスリーブ装着時の紫外線照度を計測した。また、スリーブ洗浄装置の効果確認のため、動作

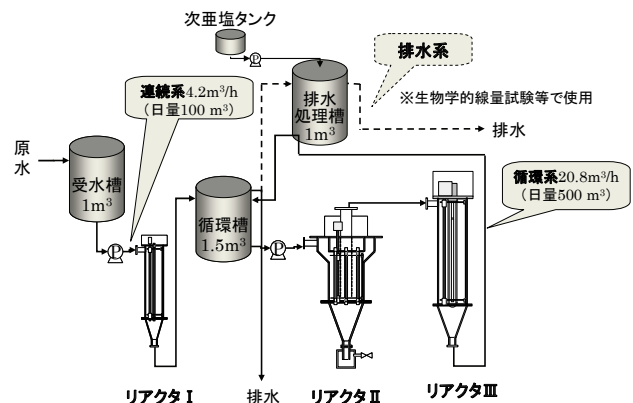


Fig.1: Flow diagram of the UV disinfection test plant

時の紫外線照度変化を評価した。

(1) ランプスリーブ拭き取り洗浄前後の紫外線照度

2007年1月23日より、スリーブ洗浄装置の運転は停止とし、連続運転(連続通水、紫外線ランプの連続点灯)を行った。被処理水は沈澱水とした。1月24日～2月7日の間、沈澱処理工程に凝集剤(PAC)注入があり、それ以外はPAC注入はなかった。2月8日には、リアクタ内部の汚れの様子を確認するため、リアクタ内の水を排水した。2月28日、約1ヶ月の運転後の汚れ付着の影響を把握するため、運転を停止した後、ランプスリーブを取り出し、紙製のウェスによる手動の拭き取り洗浄を実施した。洗浄前後での紫外線照度を計測し、紫外線照度回復量を確認した。

(2) 未使用、及び使用後ランプスリーブ装着時の紫外線照度

(1)でランプスリーブ拭き取り洗浄後、未使用のランプスリーブへの交換前後の紫外線照度を計測し、紫外線照度回復量を確認した。被処理水は沈澱水とした。

(3) スリーブ洗浄装置の洗浄効果

連続通水試験において、ランプスリーブ表面を自動で拭き取り洗浄するスリーブ洗浄装置の効果確認のため、スリーブ洗浄装置稼働時の紫外線照度の変化を確認した。ブラシ材質はSUSとした。

評価期間は、2007年10月16日～11月5日とした。この間、連続通水、紫外線ランプを常時点灯させた状態で、スリーブ洗浄装置を30分に1回1往復の自動運転を実施した。

3.3 サイクロン型 UV リアクタの紫外線量評価

紫外線消毒装置の消毒性能は、紫外線照度(mW/cm²)と照射時間(s)との積である紫外線量(mW/cm²)に依存する。

装置内部の流れの影響を考慮した紫外線量を求めるため、3次元の流れ解析(CFD:Computational Fluid Dynamics)に照度分布解析を融合した紫外線量解析を用いた。Table1に解析の条件を示す。照度分布は点光源合計法を用い、拡散光モデル⁶⁾を採用した。境界条件として流入部に所定の流速を与え、槽内の流跡および照射量を求めた。なお、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-εモデルを使用した。

以下に示す(1)式により、解析で得られた紫外線量分布から、換算等価照射量(RED:生物学的線量試験に基づく紫外線消毒装置の紫外線量)を求めた(以降、RED_{CFD}と表す)。

次に、リアクタの紫外線量を実測する方法として、EPAの紫外線消毒導入マニュアル⁴⁾に推奨されている

Table 1: Calculation condition of CFD-based UV dose modeling

流量	6.5、10、20、42m ³ /h(ランプ3本) 10、20m ³ /h(ランプ2本)
ランプ出力	65W/本
ランプ本数	3本、2本
ランプUV出力	初期性能
ランプスリーブ透過率	80%
水のUV透過率	96%

$$RED_{CFD} = -D_0 \times \ln \left(\sum P_i \times \exp \left(-\frac{D_i}{D_0} \right) \right) \dots (1)$$

(但し、D₀:不活化速度定数 (mJ/cm²)、D_i:紫外線量 (mJ/cm²)、P_i:紫外線量分布率…百分率を100で除した値)

生物学的線量試験を採用し、供試微生物として大腸菌ファージQβ(NBRC 200123)を用いた。

Fig.2に生物学的線量試験のフローを示す。試験対象のリアクタは、リアクタI及びIIとした。浄水を受水槽に貯留し、チオ硫酸ナトリウムにて残留塩素を除去後、大腸菌ファージQβを添加した。この原水を定格流量(リアクタI:4.2m³/h(日量100m³)、リアクタII:20.8m³/h(日量500m³))の1/4倍～1.5倍の流量でリアクタに供給し、紫外線照射前後のQβの量からQβ不活化率を算出し、以下に示す(2)式によりREDを求めた(以降、RED_{Qβ}と表す)。

生物学的線量試験で求めたRED_{Qβ}と紫外線量解析により求めたRED_{CFD}を比較評価した。

$$RED_{Q\beta} = -D_0 \ln(S_0) \dots (2)$$

(但し、S₀:紫外線照射後の生残率)

4. 結果と考察

4.1 水質への影響評価

Fig.3に連続通水試験中のリアクタIの入口(紫外線照射前)と出口(紫外線照射後)の濁度、色度、E260データ、Table2にリアクタI原水のその他水質検査結果

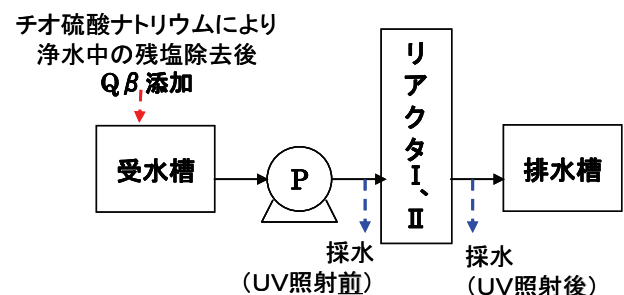


Fig.2: Flow diagram of the biosimetry test

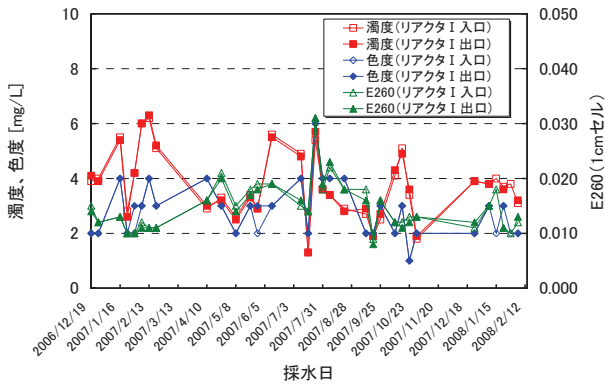


Fig.3: Turbidity, color, UV absorbance at 260nm data in Reactor I

Table 2: Other water quality data of raw water in Reactor I

水質項目	平均値 (mg/L)	最小(mg/L)	最大(mg/L)
TOC	0.8	0.5	1.4
KMnO ₄ 消費量	2.5	1.5	3.9
総トリハロメタン生成能	0.027	0.015	0.057
アルミニウム	0.258	0.065	0.470
亜鉛	0.001	0.000	0.003
鉄	0.145	0.060	0.280
銅	0.001	0.000	0.002
マンガン	0.022	0.007	0.050
ナトリウム	7.3	5.1	9.2
硬度	57.5	43.4	63.4
SS	3.0	1.0	8.0

を示す。試験用原水は、沈澱水であるため濁度が 1.3 ~6.4(度)、鉄分が平均0.145(mg/L)と高めだった。また、その他の原水水質は、Table2 に示す通りだった。

Fig.3より、濁度、色度、E260 は紫外線照射前後における差異は認められなかった。Table2 の水質項目についても、同様に紫外線照射前後における差異は認められなかった。

以上より、本実験のような浄水工程での殺菌を目的とした紫外線照射の程度では、水質に変化をもたらすような影響は無いことが示唆された。

4.2 スリーブ洗浄装置の有効性

(1) ランプスリーブ拭き取り洗浄前後の紫外線照度

Fig.4 にリアクタ I・IIIの紫外線照度の連続データを示す。期間中、被処理水の紫外線透過率は 94%以上であり、本試験スタート時(2007年1月23日)の照度は、リアクタ I は約 2.2mW/cm²、リアクタ III は約 1.3mW/cm²であった。

リアクタ I・III共に、1月24日~2月7日の期間、大きく紫外線照度が低下した。この間は、凝集剤(PAC)の沈澱処理工程前段への注入があり、試験設備の原水として PAC が混入した沈澱処理水が導水されていた。

2月8日、紫外線照度が上昇した。特に、リアクタIIIの照度の回復量が大きい。照度回復要因は、リアクタ内排水によりランプスリーブ表面の汚れの一部が除去された

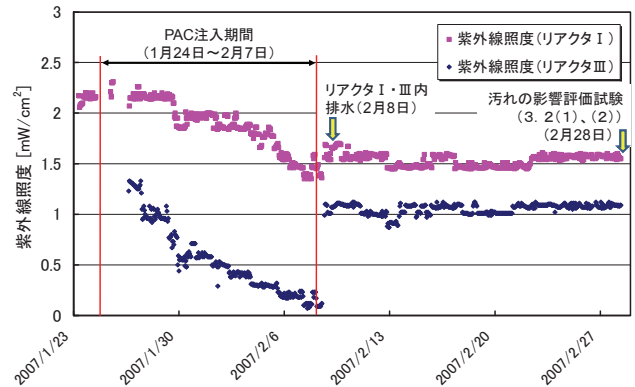


Fig.4: UV Irradiance of Reactor I and III

Table 3: UVT of lamp sleeve before or after wipe

No.	サンプル	被処理水	紫外線照度 [mW/cm ²]
1	ランプスリーブ洗浄前	沈澱水	1.59
2	ランプスリーブ洗浄後	沈澱水	2.00
3	ランプスリーブ交換前	沈澱水	1.89
4	ランプスリーブ交換後	沈澱水	1.89

点にある。また、リアクタIIIの方がリアクタサイズが大きく、排水時の流速が大きいため、排水による汚れ除去効果が大きくなり照度回復量が大きかったと推察される。

2007年1月23日から約1ヶ月運転後の2月28日、ランプスリーブの汚れを確認したところ、共に泥状の汚れが付着していた。また、紫外線照度はリアクタ I は約 1.6mW/cm²、リアクタIIIは約 1.1mW/cm²であり、本試験スタート時(2007年1月23日)と比べて低下していた。

以上より、汚れが原因で紫外線照度が低下することを確認できた。

次に、Table3 にランプスリーブ表面の汚れ拭き取り前後の紫外線照度変化を示す。

Table3のNo.1と2からランプスリーブの汚れ拭き取り後、照度が回復しており、ランプスリーブの物理的な洗浄が有効に機能していることがわかる。

(2) 未使用、及び使用後ランプスリーブ装着時の紫外線照度

Table3のNo.3と4からランプスリーブを未使用のものに変更する前と後で紫外線照度は変化していない。ランプスリーブの拭き取り洗浄で除去できる汚れ以外に紫外線照度に影響を与えているものが無いと推察される。

(3) スリーブ洗浄装置の洗浄効果

Fig.5 にスリーブ洗浄装置稼働時のリアクタ I 及びIIIの紫外線照度を示す。紫外線照度は期間中安定して推移している。スリーブ洗浄装置により、汚れ付着による紫外線照度低下が抑制できていることがわかる。

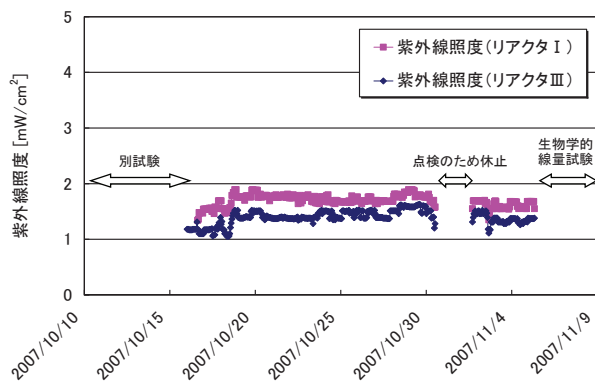


Fig. 5: UV Irradiance of reactor I and III with auto wiping

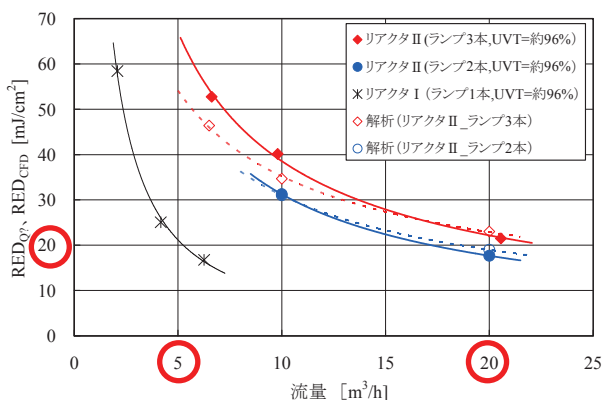


Fig.6: RED from biosimetry test and CFD-based UV dose modeling

4.3 サイクロン型 UV リアクタの紫外線量評価

Fig.6 にリアクタ I・II の生物学的線量試験結果と紫外線量解析結果を示す。リアクタ II については、ランプ本数が 3 本の場合と、2 本の場合について実施した。どちらの場合も試験結果と解析結果が一致していることがわかる。

今回の生物学的線量試験により、リアクタ I は 65W ランプ 1 本で処理流量約 5m³/h (日量約 125m³) の時 RED_{Q8} が 20mJ/cm²、リアクタ II は 65W ランプ 3 本で処理流量約 20m³/h (日量約 500m³) の時 RED_{Q8} が 20mJ/cm² を達成できることを確認できた。

また、リアクタ II、ランプ 3 本、20m³/h の条件での解析結果は、RED_{CFD} が 23mJ/cm²、95%水量達成紫外線量が 14.7mJ/cm²、最低紫外線量は 11.1mJ/cm²であった。水量の 95%以上に対して 10mJ/cm² 以上確保することという厚生労働省の指針⁵⁾をクリアできた。

5. まとめ

本研究の成果を以下にまとめる。

5.1 水質への影響評価

紫外線照射による水質への影響は認められなかったことから、浄水工程での殺菌を目的とした紫外線照射の程度では、水質に変化をもたらすような影響は無いことが示唆された。

5.2 スリーブ洗浄装置の有効性

ランプスリーブに付着した汚れは、固着したり析出したりすることはなく、物理洗浄で十分に除去が可能であり、自動洗浄機構が有効であることを確認した。

5.3 サイクロン型 UV リアクタの紫外線量評価

紫外線量解析により計算した RED_{CFD} と生物学的線量試験により得られた RED_{Q8} がほぼ一致し、紫外線量解析手法が、紫外線消毒装置の設計上有効な手法になり得ることを確認した。

[謝辞]

本研究実施にあたり、原水および実験場所の提供、水質分析等に多大なご協力をいただいた川崎市水道局の皆様には感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 阿部法光, 中楯真澄, 出健志, 村山清一, 森川彰, 相馬孝浩: サイクロン型 UV リアクターの紫外線量解析, 第 57 回全国水道研究発表会講演集, pp.302-303 (2006)
- 2) 村山清一, 阿部法光, 中楯真澄, 環省二郎: 安全対策強化型紫外線消毒システム, 第9回日本水環境学会シンポジウム講演集, pp.99-100(2006)
- 3) 出健志, 中楯真澄, 阿部法光, 村山清一, 森川彰, 相馬孝浩: サイクロン型 UV リアクターの流動解析モデル, EICA 学会誌, Vol.11, No.2/3, pp.101-104(2006)
- 4) ULTRAVIOLET DISINFECTION GUIDANCE MANUAL FOR THE FINAL LONG TERM 2 ENHANCED SURFACE WATER TREATMENT RULE, EPA 815-R-06-007, November 2006
- 5) 厚生労働省: 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
- 6) 横田俊幸, 岩野俊彦, 只木: 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, Vol.2, No.3, pp.298-303(1976)