

# 上水向け紫外線処理装置

Ultraviolet (UV) Disinfection System for Drinking Water Treatment

## 流動解析による紫外線照射量の評価と実証試験



平井友希子\*  
Yukiko Hirai



村上吉明\*\*  
Yoshiaki Murakami



三浦雅彦\*  
Masahiko Miura  
(農学博士)



奥西孝浩\*\*\*  
Takahiro Okunishi



森藤昭博\*\*\*  
Akihiro Morito

クリプトスポリジウムなど耐塩素性病原微生物への対策としてろ過処理に加えて紫外線処理が認められ、浄水処理への導入が進んでいる。当社でも、紫外線処理装置をラインナップし、財団法人水道技術研究センター（以下、水道技術研究センター）の装置認定を取得した。

本報では、装置認定を取得した紫外線処理装置について流動解析により紫外線照射量を算出し、微生物実験による消毒性能と流動解析結果との整合性を評価した。さらに、その計算結果をもとにした処理条件において装置の安定運転と処理性能の実証実験をおこなった。

その結果、流動解析による紫外線照射量の評価が妥当であることが確認できた。また、実証試験では、十分な消毒性能があることと安定した運転が可能であることが確認できた。流動解析を基に紫外線処理装置を設計することは、浄水処理に適用する際に有効な手段となると考えられる。

Recently, ultraviolet (UV) radiation system is approved for disinfection treatment of chlorine resistant pathogenic microbes, such as cryptosporidium, for drinking water treatment. In this report, we calculate the UV dose of UV radiation reactor using computational fluid dynamics (CFD). Furthermore, we performed the verification test for evaluation of disinfection capability and operation stability of UV disinfection system in the running conditions based on the CFD calculation. The results of verification test show that the system has reliable disinfection and stable operation capability.

### Key Words :

紫 外 線  
クリプトスポリジウム  
紫 外 線 照 射 量  
実 証 試 験  
流 動 解 析

Ultraviolet radiation  
Cryptosporidium  
Ultraviolet dose  
Verification test  
Computational fluid dynamics (CFD)

### まえがき

近年、クリプトスポリジウム（写真1）やジアルジアといった耐塩素性病原微生物が水道水源を汚染し、世界各国で多数の水系集団感染を引き起こしている。感染した場合、水様性下痢、吐き気、腹痛などの症状を発症する。我が国でも、1996年に埼玉県越生町で水道水が直接の感染経路となった約9 000

人の発症が報告されている。<sup>1)</sup>

その対策として、厚生労働省は、1996年に「水道におけるクリプトスポリジウム暫定対策指針」を策定し、水道水源に上記微生物の汚染の恐れがある場合にはろ過設備を設け、濁度管理の指導をおこなった。しかしながら、2005年度末時点での全国の浄水施設21 609施設のうち、6 045施設がクリプトスポリジウ

ム等による汚染の恐れがあると判断されているが、2677施設では未だ対策が実施できていない状況であった。<sup>2)</sup> また、このような施設の77%は簡易水道などの地下水を水源とした小規模施設であり、膜ろ過などの施設整備が財政的に困難な事業所が多い。

このような背景のなか、厚生労働省は2007年4月1日に「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」を策定し、限定的ではあるが紫外線処理をク

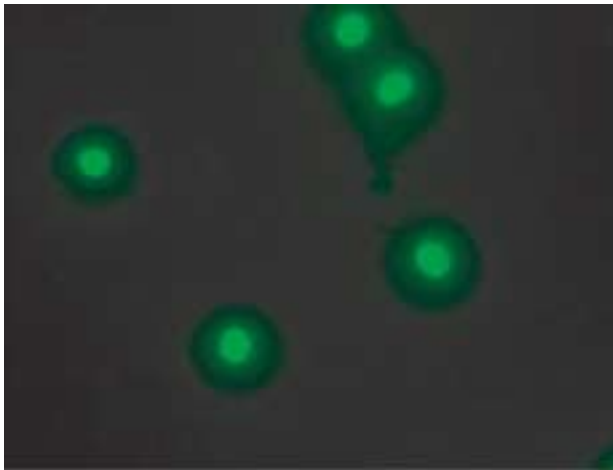


写真1 クリプトスポリジウム (600倍)

リプトスポリジウム等対策の処理として位置付けたことから、今後、浄水場への紫外線処理の導入が拡大していくものと考えられる。

紫外線処理、オゾン処理および膜ろ過の比較を表1に示す。紫外線処理は、消毒副生成物の懸念が少なく、維持管理も容易であるという特長を有している。この消毒機構は、照射された250~270 nm付近の紫外線のエネルギーがDNAに吸収され傷つけることにより、DNAの相補的複製が不可能となり、微生物の感染性、増殖能力が失われることにより説明されている。

本報では、水道技術研究センターの装置認定取得を進めている当社の紫外線処理装置のラインアップを紹介する。さらに、そのなかの1機種についての流動解析による紫外線照射量の評価および、消毒性能と安定運転確認のための実証試験結果を報告する。

### 1. 紫外線処理装置

当社の紫外線処理装置の特長を以下に記すとともに各装置の仕様を表2に示す。

- ・消毒効率が高い、低圧高出力アマルガムランプを使用している
- ・高い紫外線反射率を確保するため、照射槽内に鏡面仕上げを施している

表1 紫外線処理、オゾン処理、膜ろ過の比較

|       | 消毒(除去)機構          | 長 所                          | 短 所              |
|-------|-------------------|------------------------------|------------------|
| 紫外線処理 | UV吸収によるDNA損傷(不活化) | ・小型<br>・低コスト<br>・副生成物なし      | ・高濁度水不可          |
| オゾン処理 | 細胞膜損傷<br>DNA損傷    | ・臭気除去<br>・鉄・マンガンの酸化          | ・操作性<br>・副生成物の生成 |
| 膜ろ過   | 物理的除去             | ・クリプトスポリジウムそのものを除去<br>・高濁度水可 | ・大型<br>・高コスト     |

表2 試験装置仕様

| 横置型   |                   | SPW-2 | SPW-3 | SPW-5 ** | SPW-8 ** | SPWL-8 * |
|-------|-------------------|-------|-------|----------|----------|----------|
| 処理水量  | m <sup>3</sup> /d | 2 510 | 4 980 | 8 580    | 14 315   | 30 000   |
| ランプ本数 | 本                 | 2     | 3     | 5        | 8        | 8        |
| 消費電力  | kW                | 0.75  | 1.01  | 1.55     | 2.3      | 2.9      |

| 縦置型   |                   | SPM-1 ** | SPM-2 ** | SPM-3 ** | SPM-5 * |
|-------|-------------------|----------|----------|----------|---------|
| 処理水量  | m <sup>3</sup> /d | 700      | 1 325    | 1 830    | 6 000   |
| ランプ本数 | 本                 | 1        | 2        | 3        | 5       |
| 消費電力  | kW                | 0.4      | 0.55     | 0.7      | 1.0     |

処理水量：水道技術研究センター基準適合認定値 \*SPWL-8およびSPM-5は、現在申請準備中

\*\*SPW-5、-8およびSPM-1、-2、-3は、現在変更申請準備中(処理水量増加)

- ・砂噛みなどが無い、水平押出自動ワイパ（電動シリンドラ式）を使用している
- ・複数のワイパ設置により、整流効果を確保している
- ・複数のワイパ設置により、ストロークが短く、ブレード寿命が長くなるよう考慮している
- ・ランプ寿命：9 000時間（3 回未満/日の ON/OFF の場合）
- ・どのランプが劣化しているか特定しやすいように、UV センサーを2 個、別々の石英管内に設置している
- ・UV センサーを石英管内に設けることで、石英管内がランプで加熱されているため、結露による UV センサーへの影響を低減している

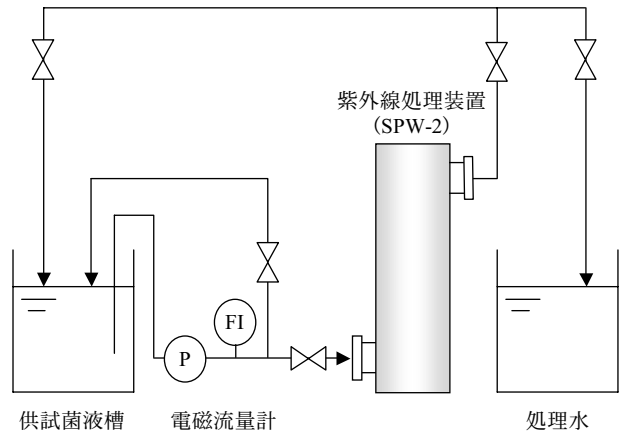


図1 微生物試験フロー

## 2. 流動解析による紫外線照射量の評価

### 2.1 評価方法

同一系列中で処理水量の少ない SPW-2 をもちいで微生物試験から算出する紫外線有効照射量（以下 RED）と流動解析から算出する RED 比較し、流動解析の妥当性を確認した。なお、RED の算出は紫外線照射装置 JWRC 技術審査基準<sup>3)</sup>に従った。その上で、実証試験に使用する装置（SPW-3）の紫外線照射量が、水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針の基準である  $10 \text{ mJ/cm}^2$  以上を確保するかを評価した。

#### 2.1.1 微生物試験

試験フローを図1に示す。試験は、以下の手法で実施した。

- ・脱塩した水道水に、菌液を添加し、定量可能な濃度（ $5 \times 10^6 \text{ PFU/mL}$ ）に調整した。
- ・紫外線処理消毒装置（SPW-2）に供試菌液を通過して紫外線照射をおこない、生物線量計により RED を測定した。
- ・供試微生物として、大腸菌ファージ Q $\beta$  をもちいた。
- ・試験は3回おこなった。

#### 2.1.2 流動解析

解析には、汎用熱流体解析コード FLUENT6.3（ANSYS 社）をもちいた。乱流モデルは、標準 k- $\epsilon$  モデルを使用し、流入口から一様な流速をもった水を流入させた。解析は、以下の手法で実施した。解析条件は、表3のとおりとした。

- ・定常計算によって流れ場を作り、収束確認後、非定常計算に切り換え、その時刻を  $t = 0$  として装置入口にトレーサーを模擬した粒子を流入させた。
- ・非定常計算では、模擬粒子を流入させ、時間間隔

表3 解析条件

|      |  | SPW-2                 | SPW-3                 |
|------|--|-----------------------|-----------------------|
| 物性条件 | 水                                      |                       |                       |
|      | 密度 ( $\text{kg/m}^3$ )                 | 998.2                 |                       |
|      | 粘性係数 ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ )    | 0.001003              |                       |
|      | トレーサー                                  |                       |                       |
|      | 密度 ( $\text{kg/m}^3$ )                 | 1 550                 |                       |
|      | 粒径 (m)                                 | $1.0 \times 10^{-6}$  |                       |
| 装置条件 | 流量 ( $\text{m}^3/\text{d}$ )           | 2 510                 | 4 600                 |
|      | ランプ本数 (本)                              | 2                     | 3                     |
|      | UVC 出力 (W/本)<br>(波長254 nm)             | 84                    |                       |
| 流入条件 | k ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )          | $3.35 \times 10^{-4}$ | $1.52 \times 10^{-4}$ |
|      | $\epsilon$ ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ ) | $1.00 \times 10^{-2}$ | $2.08 \times 10^{-3}$ |
|      | トレーサー粒子数 (個)                           | 139                   | 627                   |

を  $5 \times 10^{-3}$  秒として10秒間計算をおこない、各時刻での粒子の座標を求めた。

- ・槽内の各地点における照射強度は、拡散光モデルをもちいて求め、各粒子の座標を基に、RED および紫外線照射量を求めた。

## 2.2 結果および考察

### 2.2.1 流動解析の妥当性

SPW-2において、微生物試験による RED は、平均値33.1 (35.6~31.1)  $\text{mJ/cm}^2$  となり、流動解析による RED は26.9  $\text{mJ/cm}^2$  となった。流動解析の RED は、微生物試験の RED と比較して低い値を示した。同装置では、紫外線照射槽内面に鏡面仕上げを施していることから、紫外線の壁面反射効率により微生物試験結果が流動解析を上回ったと考えられる。こ

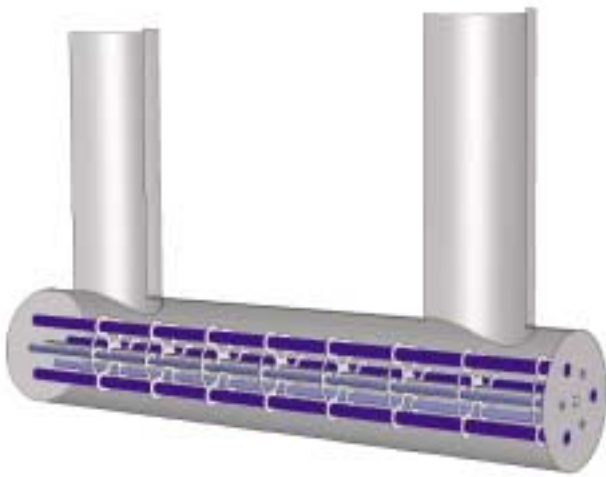


図2 解析モデル (SPW-3)

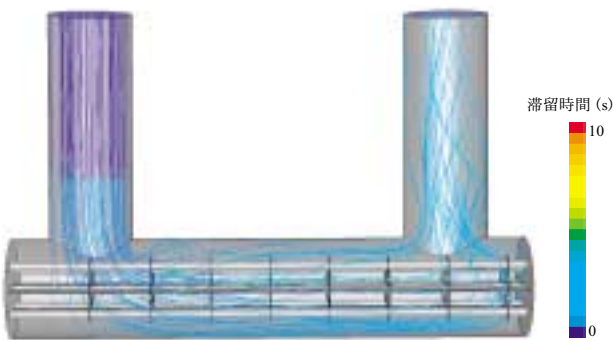


図3 流線図 (SPW-3)

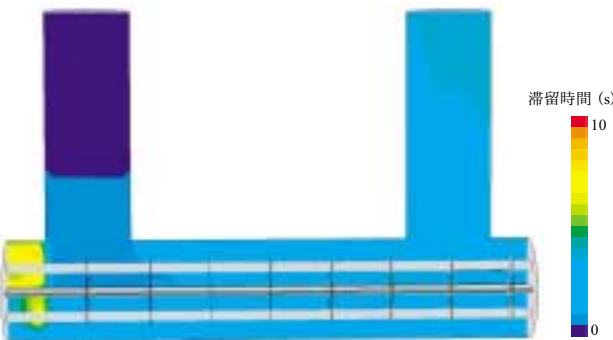


図4 滞留時間コンター図 (SPW-3)

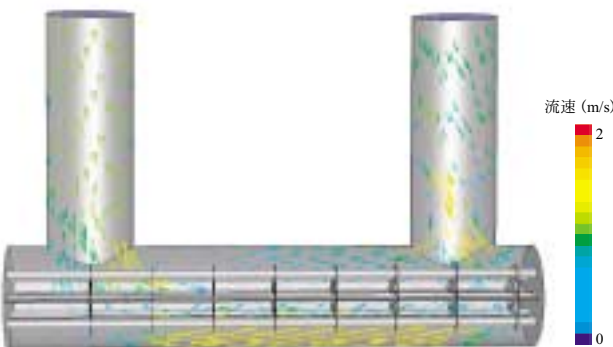


図5 ベクトル図 (SPW-3)

のことから、流動解析による紫外線照射量の評価は、実装置に対して安全側の評価となり、この値が基準を満たしていれば、実装置においてはより基準を満たすと考えられる。また、流動解析により、単位水量あたりの紫外線照射量が全処理量の95%の処理水に対して22.8 mJ/cm<sup>2</sup>以上となり、10 mJ/cm<sup>2</sup>以上を確保することが確認できた。

以上より、本流動解析による紫外線照射量の評価は、妥当であると判断された。

### 2.2.2 実証装置の紫外線照射量の評価

SPW-3の解析モデルを図2に示す。また、流動解析によりえられた流線図、滞留時間コンター図およびベクトル図を、図3～5に示す。



写真2 実証装置写真 (SPW-3)

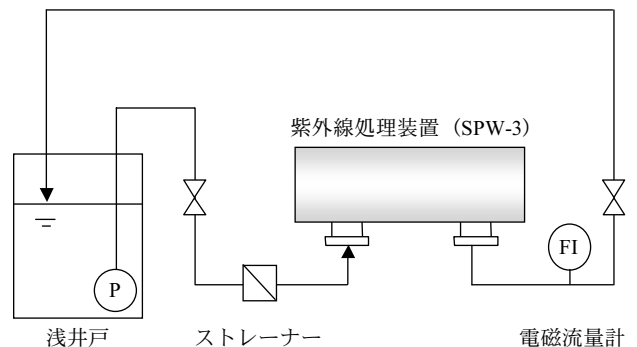


図6 実証試験フロー

流入した水は、噴流となって照射槽内に流入するため、流入口の対面の壁側では流速が大きくなる。その後、石英管および8枚のワイパが整流板となり、滞留時間がほぼ一様となっていることが確認できる。今回の装置および配管径の条件におけるREDは23.2 mJ/cm<sup>2</sup>であった。また、単位水量あたりの紫外線照射量については、全処理量の95%の処理水に対して、16.6 mJ/cm<sup>2</sup>以上となり、基準の10 mJ/cm<sup>2</sup>以上を確保することが確認できた。

### 3. 実証試験

#### 3.1 運転条件と評価

装置写真を写真2に、試験フローを図6に示す。原水は井戸水とし、処理水量は4600 m<sup>3</sup>/dとした。ランプのON/OFF頻度は20回/日程度とし、実運転での設定回数よりも負荷をかけた条件とした。

装置面ではランプ寿命を、性能面では消毒性と副生成物について評価した。ランプ寿命の目標は、9000時間後に10 mJ/cm<sup>2</sup>を上回る設計値を超えることとした。消毒性の目標は大腸菌と芽胞菌が検出されないこととした。副生成物の目標は、臭素酸が検出されないこととした。

#### 3.2 運転状況

現時点での運転時間は、2900時間である。

ランプの紫外線強度維持率曲線（設計値）および連続測定している装置内の紫外線強度（実測値）を図7に示す。2900時間経過時点での紫外線強度は、

94%であり、著しい低下は認められなかった。ランプ寿命としては、設計値と同等以上の紫外線強度を維持しており、9000時間以上となると推測する。また、4600 m<sup>3</sup>/d 処理時における紫外線照射量としては、運転開始直後で75 mJ/cm<sup>2</sup>であったのに対し、2900時間経過時点で70 mJ/cm<sup>2</sup>であった。ON/OFFの頻度が多い運用環境で安定した能力維持ができているのは、本装置がプレヒート回路（OFF時に常時微小出力にして常に点灯させる）を有しており、ON/OFF動作にともなう紫外線ランプへの負荷を低減させていることと、石英管の汚れの洗浄機能が十分であるためと考えられる。

#### 3.3 水質

紫外線照射の消毒性の評価として、原水および紫外線照射処理水の大腸菌および芽胞菌の分析を実施

表4 水質分析結果 (n=3)

|       |          | 原水     | 処理水    |
|-------|----------|--------|--------|
| 濁度    | 度        | 0.1    | —      |
| 色度    | 度        | <1     | —      |
| E-254 | /cm      | 0.004  | 0.003  |
| 大腸菌   | 個/100 mL | 0      | 0      |
| 芽胞菌   | CFU/L    | 0      | 0      |
| 臭酸イオン | mg/L     | <0.10  | —      |
| 臭素酸   | mg/L     | <0.001 | <0.001 |

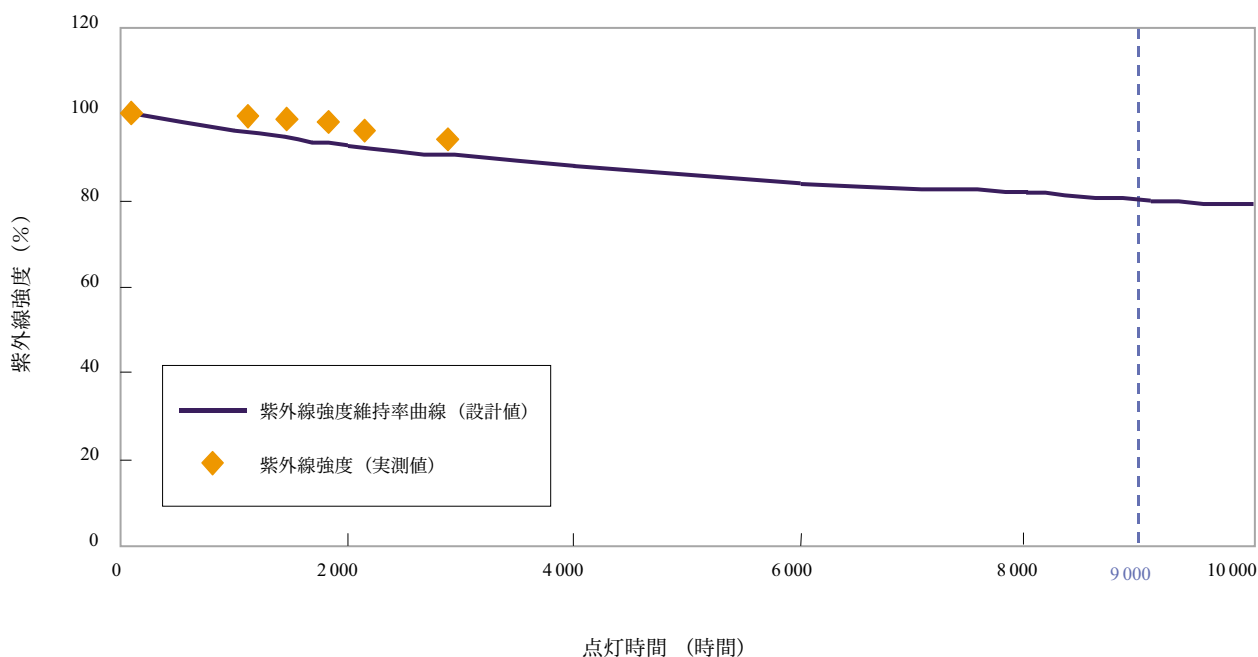


図7 紫外線強度維持率曲線（設計値）と紫外線強度（実測値）

したが、原水中にもこれらの微生物が検出されなかった。また、紫外線照射の副生成物の評価として、原水中の臭素イオンおよび処理水中の臭素酸の分析を実施したが、規定流量での紫外線照射では臭素化合物の変化が認められなかった。以上より、この原水への紫外線処理は問題ないと判断できる。

## む す び

本実験は、現在も継続している。今回の試験結果より、流動解析による実装置の紫外線照射量評価が妥当であることが確認できた。また、本流動解析を基に設計した紫外線処理装置の実証試験をおこない、ランプ ON/OFF の頻度が多くなる設備においても、安定した運転が可能であることが確認できた。

流動解析を基に紫外線処理装置を設計することは、浄水プロセスに導入する際に有効な手段となると考えられる。

最後に、本実証実験を実施するにあたり、上郡町上下水道課の関係各位に多大なご助言、ご協力をいただきました。記して深謝申し上げます。また、微生物試験では、お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科 大瀧雅喜准教授の多大なご指導、ご協力をいただきました。記して深謝申し上げます。

## [参考文献]

- 1) 藤原正弘・近藤博幸・中村洋：環境技術（上水道への紫外線処理導入の背景と現状 紫外線処理導入の背景）、Vol.37, No.3（2008）、p.197-201
- 2) 塚田源一郎：水道協会雑誌（水道におけるクリプトスポリジウム対策に係る紫外線照射の導入について）、Vol.76, No.11（2007）、p.2-4
- 3) 財団法人水道技術研究センター：紫外線照射装置 JWRC 技術審査基準（低圧ランプ編）