

<研究発表>

サイクロン型UVリアクターの流動解析モデル

出 健志¹, 中楯 真澄², 阿部 法光³, 村山 清一⁴, 森川 彰⁵, 相馬 孝浩⁶

- ¹ (株)東芝 電力社(〒183-8511 府中市東芝町1 E-mail:takeshi2.ide@toshiba.co.jp)
- ² (株)東芝 電力社(〒210-0862 川崎市川崎区浮島町 2-1 E-mail:masumi.nakadate@toshiba.co.jp)
- ³ (株)東芝 電力社(〒183-8511 府中市東芝町1 E-mail:norimitsu1.abe@toshiba.co.jp)
- ⁴ (株)東芝 電力社(〒183-8511 府中市東芝町1 E-mail:seichi.murayama@toshiba.co.jp)
- ⁵ (株)東芝 社会社(〒183-8511 府中市東芝町1 E-mail:akira2.morikawa@toshiba.co.jp)
- ⁶ (株)東芝 社会社(〒105-8001 港区芝浦 1-1-1 E-mail:takahiro.soma@toshiba.co.jp)

概要

紫外線消毒は複雑な薬品注入管理が不要で、有害な消毒副生成物を発生しないことから有望な代替消毒技術として注目されている。上水向けとして国内では、2005年8月に(財)水道技術研究センター(JWRC)より紫外線消毒ガイドラインが発行され、塩素消毒の補完技術、特に塩素で消毒が困難なクリプトスポリジウム等の病原性原虫の不活化技術として位置付けが明確に示された。著者らは、万が一、紫外線ランプが破損した場合でもガラス片や水銀片が処理水へ混入するのを防止できるサイクロン型リアクターを考案し、本リアクター内部の照度分布解析および流動解析により処理水の紫外線量を解析するとともに、ランプが破損した場合のガラス片の挙動を明らかにしたので報告する。

キーワード: 上水、紫外線消毒、リアクター、サイクロン、CFD

1.はじめに

紫外線消毒は複雑な薬品注入管理が不要で、有害な消毒副生成物を発生しないことから有望な代替消毒技術として注目され、米国では病原微生物対策技術として紫外線消毒技術のガイドラインマニュアルが公開されている¹⁾。また、我が国においても(財)水道技術研究センター(JWRC)より紫外線消毒ガイドライン²⁾が発行され、塩素消毒の補完技術、特にクリプトスポリジウム等の病原性原虫の不活化技術として位置付けが明確に示された。

紫外線消毒装置(以後、UV リアクターと略記)を浄水処理工程へ適用する場合の、利点と欠点を以下に示す。

- 利点: 消毒副生成物を発生しない、低コスト、メンテナンスが容易、薬品管理不要、完全自動化可能
- 欠点: 水質変動の影響を受ける、ランプスリーブの汚れにより性能が低下する、ランプ破損によるガラス片や水銀漏出の危険がある。(低圧水銀ランプ、中圧水銀ランプ、アマルガムランプの場合)

筆者らは、紫外線ランプが破損した場合でもガラス片や水銀片が処理水へ混入するのを防止できるサイクロン型UVリアクターを考案した。本報告は、サイクロン型UVリアクター内部の照度分布解析および流動解析により処理水の紫外線量を解析し、また、ランプが破損した場合のガラス片の挙動を明らかにしたものである。

2.サイクロン型 UV リアクター

サイクロン型 UV リアクターの基本構成を Fig.1 に示す。サイクロン型 UV リアクターは、流入管、流入ヘッダ、照射部、破片分離部、流出管で構成され、流入管は、流入ヘッダの円筒形容器断面の接線方向に取り付けられ、被処理水が容器内を旋回するようになっている。照射部には、UV ランプが挿入されている保護管が複数本容器軸と平行に配置されており、被処理水は容器内を旋回することにより各々のランプの近傍を流れ、さらに、逆円錐状の破片分離部の内壁に沿って回転運動しながら下降し加速される。次いで分離部の内側の空間を回転しながら再び上昇して、容器軸に配置された流出管より、リアクター外に排出される。その結果、すべてのランプから均一に紫外線が照射され消毒効率が向上するとともに、故障により一部のランプが消灯しても消毒性能を維持できる。また、分離部ではランプの保護管やランプ自体が

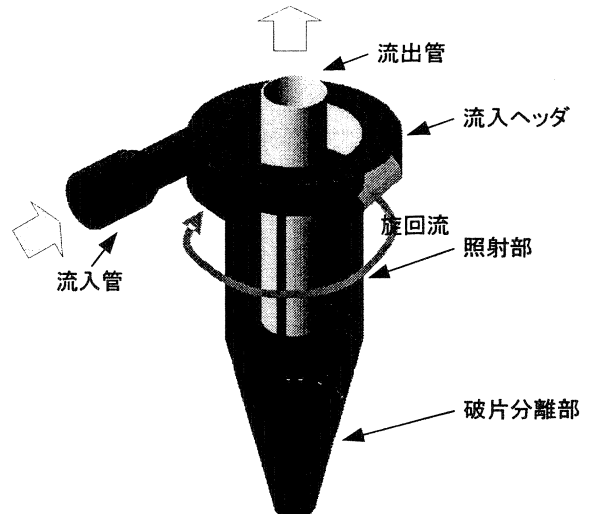


Fig.1 Cyclone Type UV Reactor

破損した場合、ガラス片や水銀片は、逆円錐状の破片分離部を被処理水とともに回転し遠心力を受けて壁面に向かって分離される。その後は、壁面に沿って下方へ移動して円錐部の下端で回収され、処理水への混入を防ぐことができる。

3. 解析および可視化流動試験

UVリアクターの病原微生物不活化性能は、水がリアクター内を通過する間に受ける紫外線量(=照度(mW/cm²)×照射時間(s))に依存する。しかし、紫外線の照度はランプ表面からの距離に依存し、水の流れも同様では無いため線量の評価は難しい。そこで、3次元の流動解析に照度解析を組み合わせたシミュレーション技術を開発し、紫外線量を求めた。また、ランプが破損した場合のリアクター内部でのガラス片の挙動を解析で明らかにした。なお、これらの解析結果に影響する流動解析の精度を確認するため、サイクロン型 UV リアクターの可視化模型を用いて、リアクター内部の水の流れと流動解析結果を比較した。

3.1 照度解析

実際の紫外線消毒装置の設計に当たっては、その処理水量や消毒レベルが所定の値を満たすように各紫外線ランプの設置本数や配置間隔等を定める必要がある。各紫外線ランプから照射された紫外線がリアクター内部でどのような照度分布を構成するかにより、装置としての病原微生物不活化性能が決定される。理想的には均一な照度分布を形成する事が望ましいが、実際には以下の要因から、消毒装置内部で紫外線照度分布を生じる。

- ①紫外線照度(I)は、照射原理に従ってランプからの距離(Z₁)の二乗に反比例して低下する。

$$I = \frac{S}{4\pi Z_1^2} \quad (1)$$

I: 紫外線照度 [mW/cm²]
S: ランプの紫外線出力 [mW]
Z₁: 光源との距離 [cm]

- ②紫外線照度(I)は、被処理水中を透過するにつれて被処理水中の溶解成分や浮遊物質に吸収され、透過距離(Z₂)に応じて指数的に減衰する。

$$I = I_0 \exp[-\alpha Z_2] \quad (2)$$

I: 紫外線照度 [mW/cm²]
I₀: 光源側に透過距離(Z₂)だけさかのぼった地点の紫外線照度 [mW/cm²]
 α : 被処理水の紫外線吸収係数 [cm⁻¹]
Z₂: 被処理水の透過距離[cm]

通常、紫外線透過率としては、253.7nmの紫外線に対する光路長1cm当たりの透過率 T[%]を測定しているが、 α はTから以下のように求められる。

$$\alpha = -\ln\left(\frac{T}{100}\right) \quad (3)$$

また、実際の紫外線消毒装置における紫外線照度の算出に当たっては紫外線ランプの光路長や装置内に配置される複数の紫外線ランプの影響を考慮する必要がある。本報では、照度分布の計算手法としてランプを長さ方向に分割して各々を点光源とみなす Jacob & Dranoff の「点光源合計法(Point Source Summation Method)³⁾により、各々のランプからの照度を計算し、すべてのランプからの照度を合計して紫外線照度を算出した。

(下水道事業団「最近の消毒技術の評価に関する報告書」⁴⁾平成9年7月参考)

3.2 流動解析および紫外線量解析

非構造格子・汎用熱流体解析プログラムに照度解析プログラムを組み合わせてUVリアクター内部の被処理水の流れおよび UV ランプより照射される紫外線量を解析した。解析は、境界条件として流入部に所定の流速を与え、UVリアクター内部の流速および圧力分布を計算して、リアクター内の処理水の流れを明らかにするとともに、リアクター内各地点の処理水の通過時間と照度から紫外線量を解析した。なお、流動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。

3.3 破片回収解析

UVリアクターの設計に当たっては、紫外線ランプの破損を防止するための対策を十分に行うことが重要である。但し、想定外の事故等により、万が一破損した場合のリスクと対策を予め考慮する必要がある。そこで、流動解析により、サイクロン型UVリアクターにおいて、ランプが破損した場合に汚染物質として発生するガラス片のリアクター内部での挙動を明らかにし破片分離部での破片回収率を計算した。本報では、ランプの上部、中央、下部での破損を想定し、初期条件として直径2mmのガラス粒子(密度 2.2g/cm³)を Fig.2 のように36個配置し、解析によりリアクター内部のガラス粒子の挙動を明らかにした。

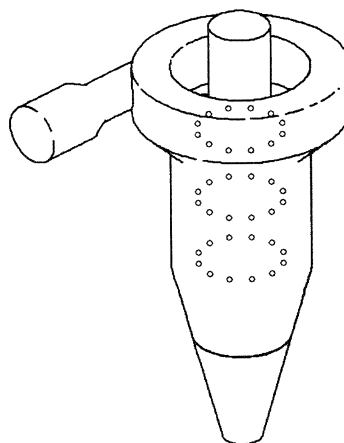


Fig.2 Initial Position of Glass Particles in UV Reactor

3.4 可視化流動試験

透明塩ビ製のサイクロン型 UV リアクター可視化流動試験装置に、水とほぼ同じ比重の蛍光粒子を混入した試験水を流して、UV リアクター内部における水の流れを観察した。50 Hz のフラッシュ光により蛍光粒子を発光させ、その移動距離から照射部下部の流速を計算し、流動解析結果と比較した。

4. 結果および考察

4.1 照度解析結果および考察

Fig.3 および Fig.4 に照度解析の結果を示す。Fig.3 は、リアクターの照射部中央における半径方向の断面、すなわちランプ中央でのリアクター水平断面の照度分布を示している。Fig.4 は、垂直方向のリアクター中心断面の照度分布を示している。

紫外線強度は、照射原理に従いランプからの距離(Z1)により減衰し、また、被処理水中を透過するにつれて被処理水中の溶解成分や浮遊物質による吸収で透過距離(Z2)により減衰する。そのため、ランプから離れるに従って照度は低下し、また、ランプ中央の照度がランプ上端や下端より強いのが確認できた。

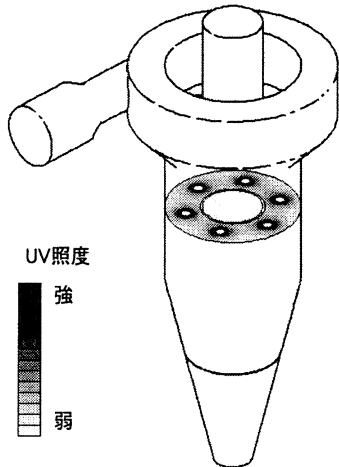


Fig.3 Distribution of UV Irradiance in UV Reactor(horizontal section)

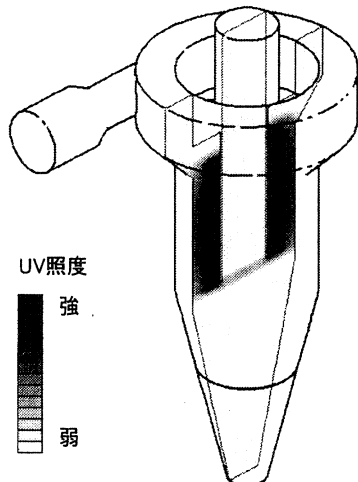


Fig.4 Distribution of UV Irradiance in UV Reactor(vertical section)

4.2 流動解析および紫外線量の解析結果と考察

Fig.5 から Fig.7 に流動解析および紫外線量の解析結果を示す。Fig.5 は、リアクター内の流速(ベクトル)分布、Fig.6 は、流出管出口の圧力を0kPaとした場合の圧力分布、Fig.7 は、処理水の流線を、受けた紫外線量に応じて色分け表示した。サイクロン型UVリアクターは、流入管が流入ヘッダの接続方向に接続されているため、流入した大部分の水がリアクターの外周側に沿って流れ、旋回流が形成されることが Fig.5 の流速ベクトルおよび Fig.7 の流線より判る。結果、被処理水が

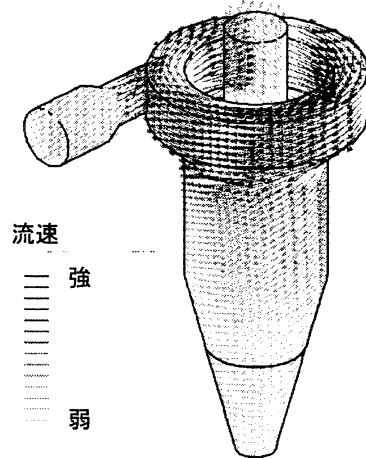


Fig.5 Distribution of Velocity Magnitude in UV Reactor

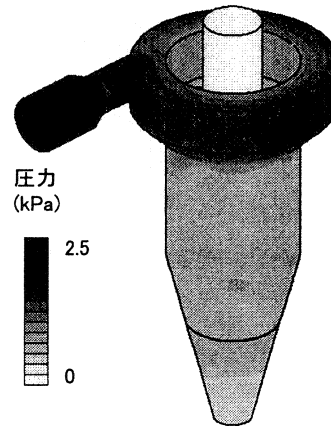


Fig.6 Distribution of Pressure in UV Reactor

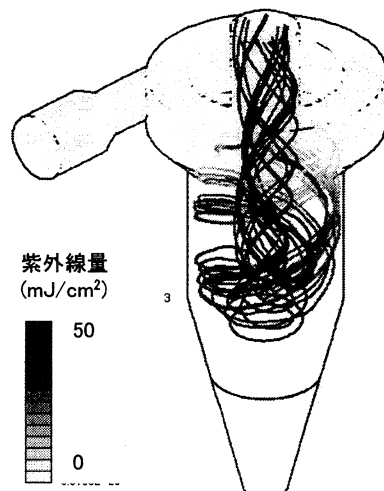


Fig.7 Flow and UV Dose of Water in UV Reactor

各々のランプ(保護管)の近傍を流れて紫外線照射効率が向上するとともに、旋回流の遠心力によりランプ破損時の破片を分離回収(4.3章参照)できることが確認できる。また、紫外線量は、流れに沿って徐々に増加し流出部では、病原微生物の不活化に必要な紫外線量 $40(\text{mJ}/\text{cm}^2)$ に達していることが確認できた。なお、今回解析したリアクターの圧力損失は、 2.5kPa と小さい事が Fig.6 より確認できた。

4.3 破片回収解析結果および考察

Fig.8 に破片回収解析の結果を示す。Fig.8 は、直径 $2.0(\text{mm})$ のガラス粒子のガラス粒子がランプ(照射部)の上部、中央、下部にあった場合の処理水の流れによるリアクター内のガラス粒子の挙動を示している。ガラス粒子の挙動は、Fig.7 に示した処理水の流れに沿って移動し、遠心力により粒子が分離し、全量が破片分離部の内壁に沿って下降している。粒子径 $2.0(\text{mm})$ 以上のガラス粒子を 100% 回収できることが確認できた。

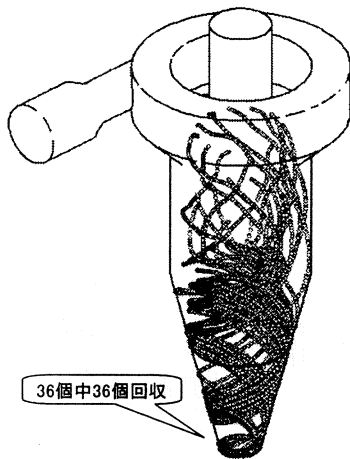


Fig.8 Glass Particles Motion in Cyclone Type UV Reactor

4.4 可視化流動試験結果および考察

Fig.9 に可視化流動試験装置およびランプ下端部での流れを撮影した写真を示す。リアクターの流入管と接続されている反対側の側面を撮影し、その水平方向をx成分、高さ方向をz成分とし、流入管軸方向をy成分とした。写真より蛍光粒子の移動距離を求め流れの各ベクトル成分を計算した。Table 1 に今回撮影した場所における流速と、流動解析結果による流速の各成分値を示す。なお、今回の撮影方向のみではy成分は判らないが、流動解析結果と可視化試験で求めたx成分とz成分がほぼ一致したことから、紫外線量の計算、破片回収解析の結果に影響する流動解析結果は、実際の流れを再現できていることが確認できた。

Table 1 Flow Velocity at Lower Irradiation Area in UV Reactor

	x成分 (m/s)	y成分 (m/s)	z成分 (m/s)
可視化試験	0.424	—	0.047
解析	0.447	0.117	0.045

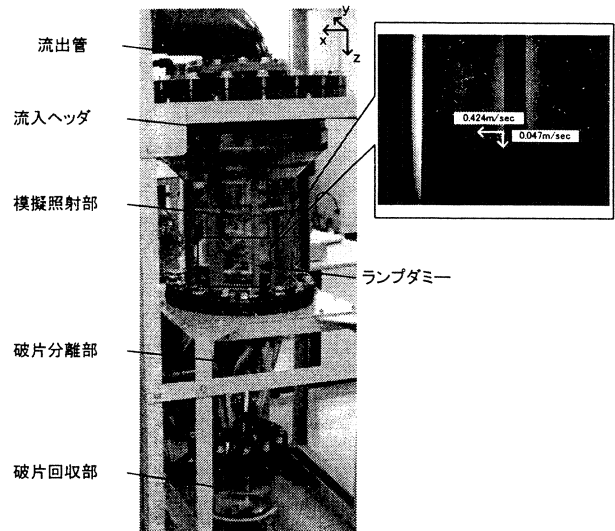


Fig.9 Visualization Model and Flow Image in UV Reactor

5.おわりに

筆者らは、UVランプの保護管やそれ自体が割れた場合でもガラス片や水銀片が処理水へ混入するのを防止できるサイクロン型リアクターを考案した。本報では、リアクター内部の照度分布解析および流動解析により処理水の紫外線量を解析し、また、ランプが破損した場合のガラス片の挙動を明らかにした。流動解析と照度分布解析から、流入した水はリアクターの外周側に沿って旋回流を形成し、流れながら紫外線量が徐々に増加し、流出部では病原微生物の不活化に必要な紫外線量に達していることが確認できた。さらに、破片回収解析によりランプが破損しても 2mm 以上のガラス片は 100% 破片を回収できることが確認できた。また、流動解析結果は、実際の流れを再現できていることが可視化流動試験により確認できた。今後は、可視化装置を用いた破片回収試験により解析の精度を確認した上で、紫外線ランプの破損を防止するための構造改善と、破片回収性能の向上を目指し、リアクター構造を改善する予定である。また、サイクロン型UVリアクターの病原微生物の不活化性能を実験により検証する。

参考文献

- 1) 「LONG TERM 2 ENHANCED SURFACE WATER TREATMENT RULE:TOOLBOX GUIDANCE MANUAL」, EPA 815-D-03-009 (2003)
- 2) 「環境影響低減化浄水技術開発研究(e-Water)ガイドライン集」, pp276-334 (2005)
- 3) Jacob, S.M., J.S.Dranoff, 「Intensity Profiles in a Profiles in a Perfectly Mixed Photoreactor」, Journal AIChE, 16(3) (1970)
- 4) 「最近の消毒技術の評価に関する報告書」, 下水道事業団, pp56-59 (1997)
- 5) 村瀬 他, 「食品工学基礎講座」⑦固液分離, 光琳社, pp.129-132 (1998)