

## 安心・安全なUV-LEDを光源とした流水殺菌装置

Flowing-Water Sterilization Equipment Using Environmentally Friendly Deep-UV LEDs

櫻井 公人 SAKURAI Naoto 加藤 剛雄 KATO Takeo 田内 亮彦 TAUCHI Akihiko

水の殺菌用途では、いまだに塩素処理や水銀ランプを使ったUV（紫外線）処理が主流になっており、塩素や水銀ランプ破損による水銀の流出など環境への悪影響が懸念されている。UV発光のLED（発光ダイオード）（以下、UV-LEDと呼ぶ）は、発光効率が低いものの、水銀フリーのUV光源としての安全性と小型化により、装置設計の自由度が広がることから、既存水銀ランプからの置き換え需要のほか、新たな市場への応用展開も期待されている。

東芝ライテック（株）は、安心・安全への要求が高まっている食品・医療分野を対象に、波長280 nmのUV-LEDを光源とする流水殺菌装置を開発した。流体に効率良くUVを照射できる独自の流路設計を採用することで、流量10 L/minの1パス殺菌処理で、大腸菌殺菌率99.9%以上を実現できた。

The mainstream methods for water sterilization still require either treatment with chlorine or irradiation with ultraviolet (UV) light emitted by mercury lamps. The environmental effects of chlorine itself and of mercury spilled from broken lamps have become a critical issue in recent years. In this context, attention is being increasingly focused on a deep-UV light-emitting diode (LED) as a mercury-free UV light source with high safety and increased design flexibility due to its small size despite its low luminous efficiency, not only as a replacement for current mercury lamps but also for various applications in new markets.

Toshiba Lighting & Technology Corporation has developed flowing-water sterilization equipment using 280 nm deep-UV LEDs to satisfy the requirements of the food and medical fields for high levels of safety and security. Through the application of our proprietary flow path design method that makes it possible to effectively irradiate flowing water with deep-UV light, this equipment has achieved an *Escherichia coli* sterilization ratio of more than 99.9% by means of one-path sterilization treatment at a water flow rate of 10 L/min.

### 1. まえがき

近年、一般照明分野の照明機器に搭載されている、可視光波長域LEDの高効率・高出力化が進むとともに、UV波長域のLEDも、印刷市場を中心に硬化・乾燥用途での産業利用が拡大している。しかし、より短波長のUVを必要とする水の殺菌用途では、いまだに塩素殺菌や水銀ランプのUVによる殺菌が主流であり、その高い殺菌力の反面、安全性の問題が懸念されている。例えば、塩素殺菌では、残留塩素による配管の腐食や、それに伴う水質への悪影響など、また、低圧水銀ランプを使用するUV殺菌でも、水銀を使用するという環境面への懸念や、放電の安定化に一定時間を要するなどの性能面の問題が挙げられる。

一方、殺菌用の新たな光源として注目されているUV-LEDは、発光効率が低いものの短波長化や高出力化が図られており、将来更なる発光効率の向上も期待できる。また、その光源の安全性と小型化により、装置設計の自由度が広がることから、既存水銀ランプからの置き換え需要のほか、従来の水銀ランプでは採用されなかった、新たな市場への応用展開も期待されている。

東芝ライテック（株）は、安心・安全への関心が高まっている食品・医療分野の要求に対応するため、水道管に直接接続でき、各種の業務用殺菌装置での使用を想定した流量10 L/minの流水殺菌装置を開発した。ここでは、開発した流水殺菌装置の仕様と性能について述べる。

### 2. 流量10 L/minの流水殺菌装置の仕様

#### 2.1 装置構造

流量10 L/minの流水殺菌装置の外観と構造を図1に、主な仕様を表1に示す。流路構成として、処理水は、入り口からUV-LEDが4個搭載された出口側のフランジに向かって石英ガラスから成る流路管内を進み、UV-LED前面に設置しているガラス窓に到達した後、UV-LED背面に回り込んで流出する1パス殺菌処理の構成としている。同時に、処理水がUV-LEDを搭載したフランジを冷却する構造を採用することで、放熱によるUV-LEDの高効率化と長寿命化を実現している。流路である石英ガラス管の外周にはアルミニウムなどの高反射率の反射板を設け、UV-LEDから出射したUVが反射を繰り返すことで処理水の殺菌性能を高めている。また、筐体（きょうたい）などの構成部品には金属（ス

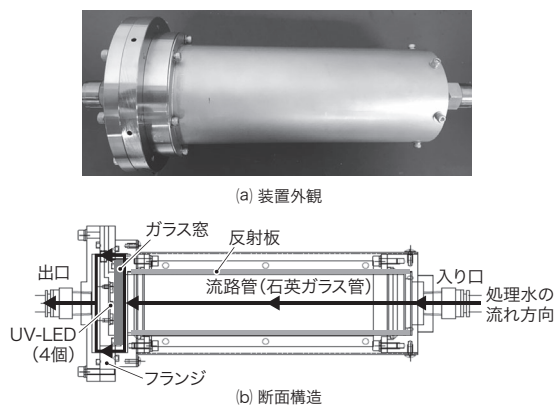


図1. 流水殺菌装置

UV-LEDを光源とした流量10 L/minの流水殺菌装置である。

Flowing-water sterilization equipment

表1. 流水殺菌装置の主な仕様

Main specifications of flowing-water sterilization equipment

項目	仕様
光源	UV-LED
UV-LED搭載数	4個
大腸菌殺菌率	99.9%以上
最大使用圧力	1 MPa
外形寸法(継ぎ手含まず)	110(直径)×229(長さ)mm
質量	2.7 kg

ステンレス)と石英ガラスを使用して樹脂材を用いない構造にすることで、耐水圧性能を確保するとともにUVによる経時劣化を防止し、信頼性の向上を図っている。

### 2.2 UV-LEDの仕様

UV-LEDの発光部は、窒化物半導体のAlGaIn(窒化アルミニウムガリウム)から構成され、AlN(窒化アルミニウム)とGaN(窒化ガリウム)の組成比により、220～350 nmの範囲で発光波長を調整することができる。

殺菌のメカニズムは、細胞中のDNA(デオキシリボ核酸)がUVを吸収し、一部のピリミジン(主にチミン)がピリミジン二量体を形成することで遺伝子の転写制御が滞り、死滅に至るとの説が一般的である<sup>(1)</sup>。そこで、DNAの吸収スペクトルのピーク波長である260 nm付近に発光波長を持ち、高出力仕様であるピーク波長280 nm、全放射束40 mWのUV-LEDを採用した。このUV-LEDを流水殺菌装置に搭載することで、目標とする殺菌性能の実現を図った。搭載したUV-LED素子の仕様を表2に、分光分布を図2に示す。

### 2.3 殺菌に必要な照射光量の算出

開発した流水殺菌装置の殺菌性能が有効であることの判断基準は、UV殺菌装置の性能を確認する指標菌である大

表2. UV-LED素子の仕様

Specifications of deep-UV LED element

項目	仕様
ピーク波長	280±5 nm
全放射束	40 mW
順方向電圧	5.8 V
指向半値角	120°
パッケージ寸法	3.5×3.5 mm

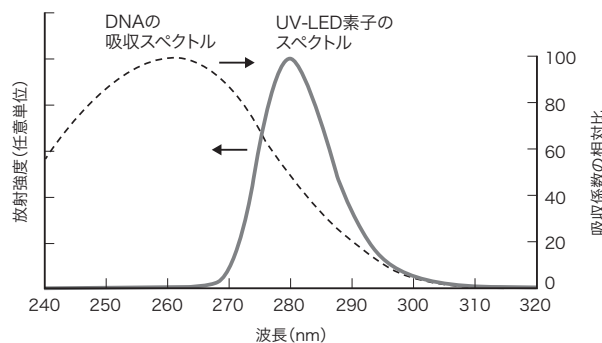


図2. UV-LED素子の分光分布

光源であるUV-LED素子のスペクトルは、ピーク波長が280 nmで、DNAの吸収スペクトル<sup>(1)</sup>に近接している。

Spectral distribution of deep-UV LED element

腸菌の殺菌率が99.9%以上であることと定義し、定格流量の10 L/minでこれを達成することを目標とした。目標達成に必要な照射光量は、シャーレに滴下した菌液へのUV照射時間とその殺菌率から、15.9 mJ/cm<sup>2</sup>と算出された。そこで、設計した流水殺菌装置の必要照射光量を、米国シノプシス社製の照明設計解析ソフトウェアであるLightToolsを用いて検証した。殺菌率99.9%以上を達成している先行開発品の定格流量2 L/minの流水殺菌装置では、UV-LED搭載数1個で2 L/min時におけるこのシミュレーションによる流路内の平均放射照度が8.03 mW/cm<sup>2</sup>となる。この値に流体がUVを受ける時間に相当する流路内での滞留時間を乗じた照射光量は15.8 mJ/cm<sup>2</sup>であり、菌液滴下による実測結果とほぼ一致している。

今回開発した流量10 L/minの流水殺菌装置のシミュレーションモデルを図3に、流路内の各位置における平均放射照度のシミュレーション結果を表3に示す。シミュレーションで算出した流路内①、②、③の平均放射照度の平均値は、10.7 mW/cm<sup>2</sup>となった。また、流路寸法と流量から算出した滞留時間は1.49 sとなり、平均放射照度と滞留時間を乗じて算出した照射光量は15.9 mJ/cm<sup>2</sup>と算出され、殺菌に必要な光量が得られていることが確認できた。

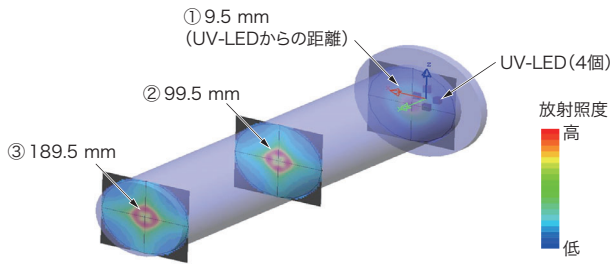


図3. 光学シミュレーションモデル

流水殺菌装置の設計検証のため、装置をモデル化した光学シミュレーションによって、流路内の各位置での平均放射照度を算出した。

Optical simulation model of flowing-water sterilization equipment

表3. 流路内の各位置における平均放射照度のシミュレーション結果  
Results of simulations of average irradiance at each position in water flow path

流路内の位置	①	②	③	①、②、③ の平均値
平均放射照度 (mW/cm <sup>2</sup> )	10.8	10.6	10.6	10.7

### 3. 殺菌性能の検証

#### 3.1 検証方法

殺菌性能は、タンク、ポンプ、及び流量計に、開発した流水殺菌装置を接続した1パスの殺菌試験系を用い、殺菌前後の菌液中の大腸菌の数を測定する方法で検証した(図4)。菌液濃度は、大腸菌(NBRC 3972)で $10^6$  CFU(注1)/mLに調整した。試験は、まず、殺菌試験系の流路内を次亜塩素酸で殺菌し、チオ硫酸ナトリウムで中和した後、温度を20～25℃に調整した菌液をタンクに投入する手順とした。その後、流水殺菌装置を稼働させ、あらかじめ決定した流量の菌液を流し、流量が安定した後、流水殺菌装置を通過した後の菌液を採取した。目標殺菌率99.9%以上となる流量のしきい値が10 L/min以上であることを確認するため、流量は3条件(5 L/min, 7.5 L/min, 10 L/min)とし、各々の条件で殺菌率を確認した。未処理の条件は、殺菌装置を通過した後の、未照射の菌液を採取した。生菌数は、採取した菌液を混釈平板培養法に準じて測定用培地で培養した後に測定した。ここで、菌液の調整と菌数の測定は、一般財団法人日本食品分析センターに委託した。

#### 3.2 試験結果

試験結果を表4に示す。殺菌率は、式(1)に示すように、死滅した菌数の割合で算出される。

(注1) Colony Forming Unit (単位体積当たりの菌集落数)。

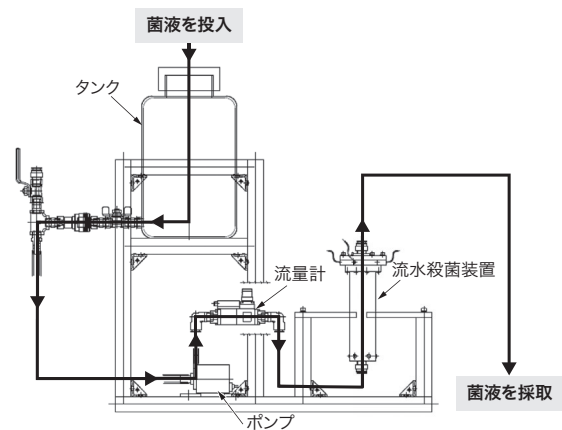


図4. 殺菌試験系

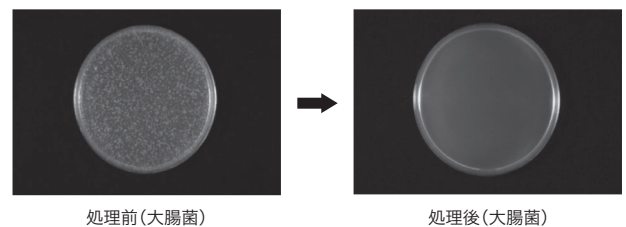
タンクへ菌液を投入し、流水殺菌装置から排出される菌液を採取して、菌数を測定した。

Configuration of sterilization tests

表4. 殺菌試験結果

Results of sterilization tests at various water flow rates

項目	流量条件		
	5	7.5	10
流量 (L/min)	5	7.5	10
$N_0$ (CFU/mL)	$5.3 \times 10^6$	$5.3 \times 10^6$	$5.3 \times 10^6$
$N$ (CFU/mL)	< 1	2	640
殺菌率 (%)	99.99以上	99.99	99.98



$$\text{殺菌率}(\%) = (1 - N / N_0) \times 100 \quad (1)$$

ここで、 $N_0$ はUV照射前の生菌数、 $N$ はUV照射後の生菌数である。

殺菌率は、5 L/min, 7.5 L/min, 10 L/minの流量条件で、それぞれ99.99%以上、99.99%、99.98%であり、10 L/minで目標殺菌率99.9%以上を達成している。一般的に照射光量の低下に伴い、殺菌率は指数関数的に減少する<sup>2)</sup>。そこで、ここでの照射光量が流量に依存すると仮定して、目標の殺菌率99.9%以上を確保できる流量のしきい値を算出すると、10.9 L/minとなる。

これらより、定格流量2 L/minの流水殺菌装置と同様にシミュレーションで事前に算出した必要照射光量が得られていることから、殺菌率99.9%以上を実現できたと考えられる。

定格流量2 L/minの流水殺菌装置に対し、今回の定格流量10 L/minの流水殺菌装置では流量が5倍となるが、流路長を1.13倍、流路幅を1.86倍にすることで、UV-LED搭載数が4個でも目標の殺菌率を達成した。これは、光学設計の最適化によりUV-LED1個当たりの殺菌処理への光利用効率が向上したためと考えられる。

## 4. 耐水圧性能の検証

### 4.1 検証方法

開発した流水殺菌装置は、食品・医療分野で使用される水道管への設置を想定しているため、JIS S 3200-1 (日本産業規格 S 3200-1)「水道用器具-耐圧性能試験方法」で規定されている耐水圧性能(静水圧1.75 MPaを1 min)を達成することを目標とし、図5に示す耐水圧試験系で実験を行った。試験は流水殺菌装置内の空気を除去した後、常温の水を満たして1.75 MPaの静水圧を加え、1 min放置した。試験後に水漏れや、変形、破損、そのほかの異常の有無を圧力計の変化及び目視で確認した。

### 4.2 試験結果

試験の結果、流路管である石英ガラス管とフランジの密封部からの水漏れ発生や、流路管とガラス窓に使用している石英ガラスの破損などがないことを確認した。また、金属で成形しているフランジやカバーも水圧による変形はなく、試験後のUV-LED点灯検査でも電気特性の変化や点灯の不具合はなかった。このことから、水道管に直接設置しても問題のない最大使用圧力1 MPa以上の性能を備えており、食品・医療分野への用途拡大を見込めることが確認できた。

これらの検証結果により、流量10 L/minの流水殺菌装置の目標性能である大腸菌殺菌率99.9%以上、及び最大使用圧力1 MPaの耐水圧を実現した。

## 5. 大流量対応への展開

流水殺菌の市場では、浄水場や、工場プラント、パラスト水処理用などで、水銀ランプを搭載した装置が導入さ

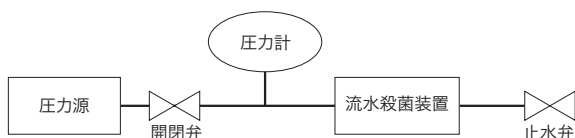


図5. 耐水圧試験系

流水殺菌装置の流入側側に圧力計を介して圧力源を接続し、流出口側に止水機構を取り付けたものであり、JIS S 3200-1に準拠した耐水圧試験系である。

Configuration of water pressure resistance tests

れている。それらの市場に参入、展開するためには、更なる大流量化に向けた対応が必要になる。現在のUV-LEDの発光効率やコストから考えると、大流量対応装置のUV-LED化は数年後と見込まれるが、水銀規制やUV-LEDの発光効率の向上により加速することも予測される。

そこで、当社は、100 L/minの大流量対応装置の開発も行っており、今回の流量10 L/minタイプの基本構成を基に、LED搭載数、流路長、流路幅を変更することで、大腸菌よりもUVに対する耐性が高い枯草菌で、殺菌率99.9%以上を実現している。今後の市場展開を見据えて、更なる小型・高効率化の検討を進めている。

## 6. あとがき

UV光源としてピーク波長280 nmのUV-LEDを使用し、独自の流路設計を採用した流水殺菌装置において、流量10 L/minの1パス殺菌処理で、大腸菌殺菌率99.9%以上を実現した。この基本構成を応用して、流量10 L/minまで対応可能な流水殺菌装置をラインアップし、現在、医療・食品用途を中心に用途拡大を推進している。

今後、UV-LEDの発光効率の更なる向上が見込まれるため、殺菌性能を更に高めた大流量対応の殺菌装置が求められる。当社は、UV-LEDの発光効率や出力の向上に合わせ、装置の最適な設計開発に取り組むことで、100 L/minを超える大流量に対応した流水殺菌装置の実現を推進していく。

## 文献

- (1) 岩崎電気，“紫外線による殺菌・不活化”. 紫外線殺菌. <<https://www.iwasaki.co.jp/chishiki/uv/02.html>>, (参照2019-02-25).
- (2) パナソニック，“殺菌灯”. 照明設計資料. <<http://www2.panasonic.biz/es/lighting/plam/knowledge/document/0320.html>>, (参照2019-02-25).



櫻井 公人 SAKURAI Naoto  
東芝ライテック (株)  
産業デバイス事業部 産業光源技術部  
照明学会会員  
Toshiba Lighting & Technology Corp.



加藤 剛雄 KATO Takeo  
東芝ライテック (株)  
産業デバイス事業部 産業光源技術部  
Toshiba Lighting & Technology Corp.



田内 亮彦 TAUCHI Akihiko, Ph.D.  
東芝ライテック (株)  
産業デバイス事業部 産業光源技術部  
博士 (工学) 日本水環境学会会員  
Toshiba Lighting & Technology Corp.