



# 水殺菌におけるUV-C LEDのウォールプラグ効率に関する再考

オーエン・コノリー、ラジュル・ランディブ

UV-C LEDは、殺菌技術に対する関心が高まったことで進歩したが、エネルギーコストと対象微生物を考慮して動作時の光源のWPEを比較し、アプリケーションの性能と予算の関係を理解することを、水殺菌システムのOEMに助言する。

紫外線C波 (UV-C) LEDの性能は、この5年間で急速に進歩した。新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) のパンデミックと、非接触殺菌に対する認識の高まりが相まって、殺菌用UVをめぐる動きが活発になり、UV-C LEDと水銀ランプの比較が多く行われるようになった。最近の議論の1つが、従来の殺菌技術と比較したUV-C LEDのウォールプラグ効率 (Wall Plug Efficiency: WPE) である。WPEは、

エネルギーを光に変換するデバイスの能力を表す。一部の業界関係者は、UV-C LEDの性能が既存の商用水銀ランプと同等になるまでは、殺菌用UV (GUV) におけるその普及は制限されるとの見方を示している。

広範な普及に向けたUV-C LEDの準備体制を疑問視する理由として、かつて議論されていたのは出力と寿命だった。しかし、より多くのOEMがこの技術を評価し、設計の柔軟性とオンデ

マンドの操作に関するその本質的なメリットに注目が集まるにつれて、市場リーダーらは、この技術が実は、特に低流量の水殺菌に対して準備の整った状態にあることに気づいた。LEDの配置、水の流れ、デューティサイクルのパラメータを最適化したインテリジェントな設計により、要件を上回る性能を備えた、UV-C LEDを使用する商用殺菌リアクターの開発が推進されている。

WPEが議論されるのはなぜか。簡単に述べると、UV-C LEDのWPEは3%~10%と、まだ比較的低い。実際、このデバイスに供給されるエネルギーの大半がまだ、熱に変換されている。



しかし、出力や寿命と同様に、UVランプとUV-C LEDのWPEを単体で比較しても意味がない。WPEは重要な指標だが、この技術の進歩を表す単一の指標ではない。

### WPEに影響を与える材料

UV-C LEDの現時点のWPEは1ケタで、ほとんどの商用UV-C LEDで、製品によって3%~6%の範囲である。LED効率の改善は、デバイス内の複数の箇所まで達成可能で、一般的には内部効率または外部効率として分類される。

内部効率は、基板材料のエピ層の欠陥と転位を減らすことによって改善できる。外部効率は、光抽出を高めるようにデバイスを再設計することによって改善できる。

多くのUV-C LEDメーカーが、コストの低い透明な基板であるバルクサファイア上で構造を成長させる。しかしサファイアは、窒化物層との間に格子と熱膨張の不整合があり、材料内の転位数が増加するため、それが、サファイアベースのUV-Cデバイスの内部効率を根本的に制限する。サファイアを

基盤として使用するメーカーは、自社デバイスの全体的なWPEを改善するための手段として、抽出効率の改善に注力している。

バルク窒化アルミニウム (AlN) 基板を使用するメーカーには、内部効率、より具体的には内部量子効率 (Internal Quantum Efficiency : IQE) が本質的に高いというメリットがある。IQEとは、電子が転位欠陥に遭遇する時に、熱が生成されるのではなく、電子と正孔が再結合して光子になる確率である。AlN上に成長させたデバイスは、サファイア基板上に成長させたデバイスと比べて、UV-C波長におけるIQEが2倍以上となる。従って、バルクAlNをUV-C LEDの基盤として使用するメーカーは、内部効率と抽出効率の改善によってWPEを改善することを目指している。

UV光源のWPEに基づく年間運用コストの計算

光源	UVランプ	UV-C LED A	UV-C LED B	UV-C LED C
WPE (%)	30	2.5	5	6
1年あたりのkWh	53	37	20	15
年間運用コスト	\$8.74	\$6.10	\$3.30	\$2.47

出典: クリスタルIS社の計算結果

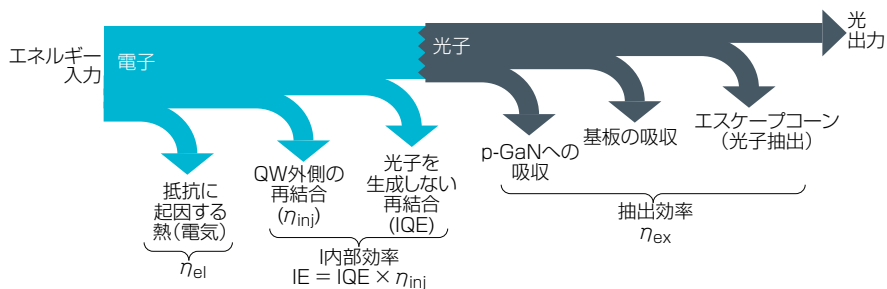


図1 UV-C LEDデバイスの効率損失を表す図(画像提供:クリスタルIS社)

### 現在のWPEにかかわらず、採用は増加

この数年間で、流量が最大5ガロン/分(gpm)の使用ポイント(Point Of Use : POE)の水道システムにおける、UV-C LEDベースの技術の採用は増加している。流量が5~50gpmと一般的に定義される、入口ポイント(Point Of Entry : POE)のシステムについては、低流量システムにおいてUV-C LEDが採用されている。産業用水、廃水、自治体の水処理の流量は、50gpm以上と従来から定義されている。POUとPOEのシステムは通常、低いデューティサイクルで動作するのに対し、高流量のシステムはそれよりも連続的に稼働する。

WPEとデューティサイクルは、密接に関連している。POUとPOEはデューティサイクルが低いため、3%~6%のWPEで十分以上である。流量が高いほど、熱負荷を減らすために高いWPEが望ましくなる。それらのシステムは、適切な殺菌線量の要件を満たすために、より多くのLEDを必要とするためである。

UV-C LEDを使用する製品の開発を検討しているOEMは、一般的に、単に光源をランプからLEDに切り替える以上の作業を、事前に計画する。通常は、サイズが小さい、瞬時にオン/オフ可能、有効波長のみが出力できるといった、LEDのメリットを最大限に

活用するために製品を再設計する。そうした殺菌製品を設計する際には、合計消費エネルギーに対するWPEパラメータの重要性が低下するように、システムの動作を最適化することができる。

### POU水殺菌システムにおけるWPEの影響

家庭用のPOU水殺菌システム設計を基に、WPEと運用コストを比較することができる。消費者向けのPOU製品では、LEDは殺菌時にしか動作しないため、総所有コストが低いことが一般的なメリットである。水銀ランプを使用するシステムは、ランプの始動時間を短縮するために、アイドルモードで動作するか、ランプの点灯と消灯を繰り返しながら動作する。

11Wのランプを使用するあるシステ

ムは、アイドルモードでは5.5Wの電力しか消費しないとみなすことができる。このシステムが、動作時間の10%をフル出力で稼働し、残り90%をアイドルモードで動作すると考える。この場合、このシステムが建物の電源から消費する年間電力量は53kWh強である。米労働省によると、2023年5月の時点で、米国の1kWあたりの平均電気料金は0.165ドルであるため、標準的な年間運用コストは9ドル弱となる。

同じシステムの性能を、LEDを使用する設計で考察すると、WPEがそれぞれ異なる複数のLEDの年間エネルギーコストを見積もることができる(表を参照)。動作時間は同じ(10%稼働/90%アイドル)と仮定できるが、LEDを使用するシステムは通常、アイドル時に光源の消費電力は発生しない。

ランプを使用するシステムからUV-Cシステムに切り替えることで、最終ユーザーのエネルギーコストは30%~70%削減される(使用されるUV-C LEDによって異なる)。一方、WPEが5%から6%に改善しても、年間の削減コストは1ドル未満にしかならない。ランプからLEDへの切り替えは、その他のサステナビリティ上のメリットと合わせて考えると魅力的だが、LED単体のWPEが

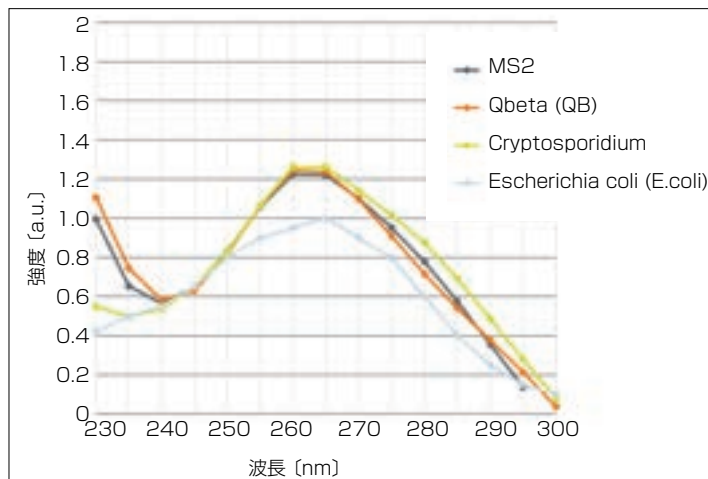
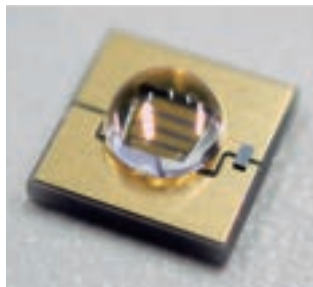


図2 水殺菌における一般的な対象微生物に対する吸収曲線(https://scholar.colorado.edu/download/rn301175tのグラフをクリスタルIS社が改変して作成)





**2016年のUV-C LED**  
 サイズ: 3.5 × 3.5mm  
 出力: 30mW  
 WPE: 0.75%



**2023年のUV-C LED**  
 サイズ: 3.5 × 3.5mm  
 出力: 160mW  
 WPE: 5%

**図3** UV-C LEDのサイズは同じだが、出力とWPEはこの数年間で向上している(画像提供: クリスタルIS社)

最終消費者に与える影響は、特に商用UV-C LEDの現在のWPEのレベルを考えると、取るに足らない。5~12gpmの低流量のPOE市場に対しては、5%のWPEが、市場で広範に普及するためのしきい値と思われる。

WPEに関する設計の議論は、LEDの個数を減らして熱負荷を低減することによって、OEMの全体的なシステムコストを抑えることを軸に展開される場合が多い。そうすると、WPEよりも殺菌出力の効率の方が重要になる。これには、対象微生物に対する対象波長におけるUV-Cの合計出力が影響する。

殺菌システムは、対象微生物、またはGUVシステムの開発に使用されたバイオドシマ(biodosimer)とそのバイオドシマのスペクトル反応に基づく、特定の殺菌性能を満たさなければならない。バイオドシマとは、システムが意図した用途に対して主張されている殺菌性能を提供することを確認するために使用される、試験用の代用微生物である。これらの微生物は通常、米国立科学財団(National Science Foundation: NSF)や米環境保護庁(Environmental Protection Agency)などの業界標準組織によって定義されている。しかし、他の地域の市場要件に基

づいて、特定の微生物を使用することをメーカーが望む場合もある。例えば、NSFはQbetaを、認証取得を目指すシステムの対象微生物として定義しているが、欧州市場をターゲットとするOEMは、緑膿菌(Pseudomonas A)で設計を行う。

表をもう一度参照すると、UV-C LED BとCのWPEは非常に近いため、これらのLEDを使用する2つのシステム設計の殺菌性能とコストを比較することができる。WPEが5%のLED Bの出力は、265nm(一般的に使用されるUV-C殺菌波長)で160mWだが、WPEが6%のLED Cの出力は、275nmで140mWである。大腸菌(E. coli bacteria)を対象とするシステムは、LED Bを使用するシステムと同じ殺菌性能を得るには、出力が20%高いLED Cパッケージが必要である。WPEは高く、最終ユーザーの年間運用コストは低いかもかもしれないが、システム全体のLEDのコストを考えると、LED Bのほうが魅力定な選択肢ということになる。

### 高流量の連続殺菌に規模を拡大するための検討事項

POU、ディスペンスポイント(point

of dispense)、低流量POEの分野の現時点对応可能なアプリケーションについては、既存の商用UV-C LEDの性能は、WPE性能を含めてOEMの要件を満たしている。産業用水処理の分野では、特に断続的に動作する飲料や薬品の処理およびディスペンス装置において、早期導入の事例が存在する。これらの業界では、計画外メンテナンスを低減してシステムコストの増加を相殺するなど、LEDの他の主要なメリットの活用が検討されている。

自治体や廃水処理施設における、高流量のアプリケーションでは、WPEがより重要になる可能性が高い。既存の大規模システムでは、大量のエネルギーを消費する、大量のランプが使用されているため、そうしたシステムの開発では、エネルギー効率が、他のパラメータよりも重視される可能性がある。

業界では、それらのアプリケーションを対象としたUV-C LEDを使用する装置が出現し始めたばかりで、早期導入者は既に、標準的なリアクター設計のあり方を再考している。例えば、新しいLEDシステムには、従来のシステムのように水を処理する代わりに、外部冷却手法が採用されている。この分野のリーダー企業は、従来の廃水施設や自治体用のリアクター設計でUV-C LEDを活用するという課題に今後も挑み続ける。それは、POUやPOEのOEMが現在行っていることと同じだが、この分野のシステムはより多くの人口を対象とするため、さらに大きな効果が期待される。

#### 著者紹介

オーエン・コノリー(OEIN CONNOLLY)は、UV-C LEDを開発する米クリスタルIS社(Crystal IS)の社長兼最高経営責任者(CEO)、ラジュル・ランディブ(RAJUL RANDIVE)は、同社グローバルアプリケーションエンジニアリング担当ディレクター。