

紫外線殺菌システムの設計に多大な影響を与える照射量

パメラ・リー、マーヴィン・ラフィン

UV照射は、適切に適用すれば、抗微生物薬耐性を持つ病原菌に対する強力な殺菌及び保護効果を発揮する。有効な設計を行うには、光源の特徴と限界を完全に理解することが必要である。

「日光は最高の消毒剤」という古い格言があるが、実際に消毒効果があるのは、日光の中の目には見えない紫外線(UV)成分である。UV光には殺菌力があるという150年前の初期発見が、無数の危険な病原菌を死滅させる現代の紫外線殺菌照射(ultraviolet germicidal irradiation: UVGI)システムの開発につながった。過去のパンデミックでは、この殺菌技術はまだ利用できなかったが、感染症が世界中に拡大するペースはもっと緩やかだった。その当時の最も高速な移動手段が、感染拡大ペースの限界になるためである。現代的な飛行機旅行が可能な今、新型コロ

ナウイルス感染症(COVID-19)のパンデミックはほんの数日で世界中に拡大していった。スペイン風邪からCOVID-19までは約100年の期間があるが、感染症の流行はそれよりもはるかに頻繁に起きている。この20年間で、豚インフルエンザ、鳥インフルエンザ、SARSなど、それに近い状況を世界は何度か経験している。

UVGIのニーズを促すもう1つの要因は、抗微生物薬耐性(Antimicrobial Resistant: AR)を持つ病原菌(薬剤耐性菌)がますます進化していることである。すべての微生物が何らかの薬剤耐性を持つように進化可能で、その最

も一般的なものが抗生物質耐性である。メチシリン耐性黄色ブドウ球菌(MRSA)など、抗生物質耐性を持つ病原菌は、抗生物質に対する化学的耐性を取得しているため、一般的な抗生物質治療の有効性は低くなる。UVGIは、環境におけるそれらの微生物を、耐性菌を生成することなく死滅させる。UV光源に関する継続的な技術革新は、拡大し続けるUV殺菌市場における同技術の安全な適用の促進に貢献している(<http://bit.ly/2SIIJhU>)。本稿では、さまざまな殺菌用UV光源について解説し、UVGIソリューションの有効性を判断する際に、どの要素が

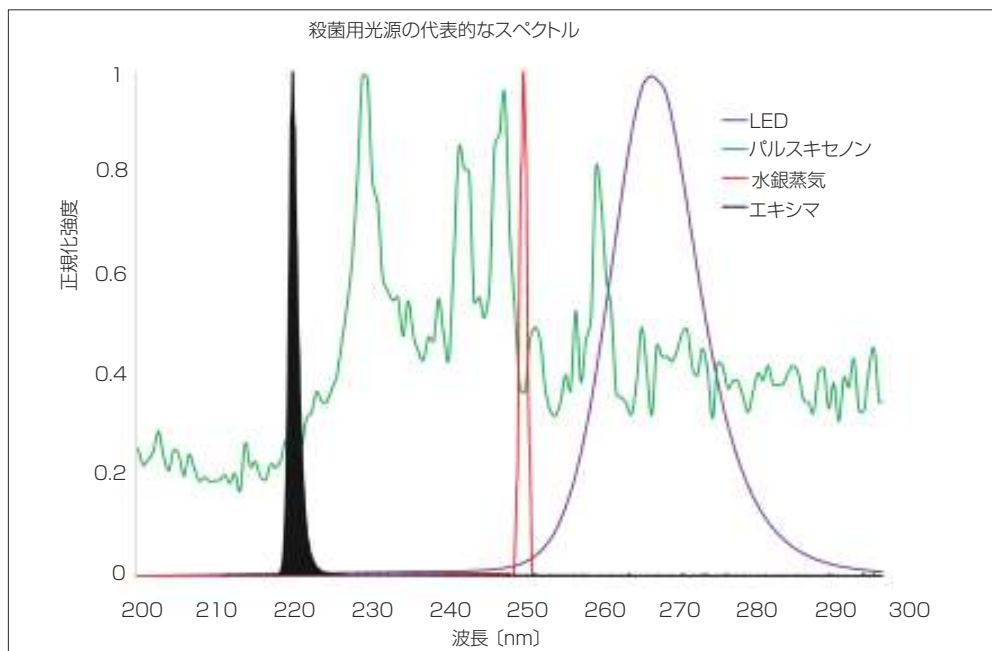


図1 殺菌用光源の代表的なスペクトル。(提供:エクセリタス社)



図2 エクセリタス社のUV-C LED紫外線空気殺菌製品は、人がいる部屋の上部4分の1の空間にUV-Cエネルギーを放射することによって、居室者が空中に浮遊する病原菌に曝露するリスクを低減する、コンパクトで堅牢な機器である。(提供：エクセリタス社)

最も重要かという点について、その背景となる情報を示したいと思う。

UV波長と照射量の重要性

紫外線エネルギーは、100～400nmの波長の電磁放射の総称で、次の4つのバンドに分類される。

- ・UV-V (100～200nm) – 光線は真空中でのみ移動可能*
- ・UV-C (200～280nm) – DNA/RNAに対して最も有害
- ・UV-B (280～320nm) – 硬化や日焼けの用途で一般的に使用
- ・UV-A (320～400nm) – LED硬化の用途で最も一般的に使用

*編集者注記：IEC規格では、真空UV (UV-V)はUV-Cのサブバンドとみなされる。

UV光は、微生物を直接死滅させるものではない。UV-C光子(200～280nm、特に260nm付近)は、病原菌の再生を妨げるピリミジン二量体をDNAとRNAの塩基対に形成する(<http://bit.ly/3nSF8uA>)。UV-B放射(280～320nm)にもその効果があるが、UV-Cよりも程度が低い(図1)。

ほとんどの微生物が遺伝子の自己修復メカニズムを持つため、UVGIシス

テムは、その防御力を上回って再生を防ぐために十分な量のUVを照射する必要がある。「UV照射量」は、光エネルギー強度と曝露時間の積(UV放射照度[W/cm²]×時間[秒])として定義することができる。通常は、J/cm²の単位で表される。殺菌用のUV-Cは、病原菌の再生の不活性化に有効で、照射量の有効性は、感染性微生物の対数減少値で測定される。100万分の1に減少すれば、対数減少値は6となり、1000分の1に減少すれば、対数減少値は3となる。例えば、米ミシガン州デトロイトにあるヘンリーフォード病院(Henry Ford Hospital)の最近の研究では、254nmの光を1J/cm²の照射量で照射すると、医療用保護マスクの表面に付着したH1N1インフルエンザウイルスが1000分の1に減少(対数減少値は3)することが示されている。

UVGIシステムは、見通し線上にある透明な液体や硬い表面(テーブル/カウンター、壁、ベッドフェンス、キーボード表面など)の殺菌にしか効果を発揮しない。何かに遮られてUV-C光源に直接曝露しない部分は殺菌されないため、複数の光源、反射性の表面、動きに対応する光源の使用を検討する

必要がある。UVGIは、HVACシステム内の空気や、医療施設や教育施設の部屋の上層の空気中の病原菌の殺菌に使われるが、カーペットや布のような多孔質物質に対する効果はそれよりも低い(教育環境における潜在的用途については、p.10の記事を参照のこと)。

ランプベースのUV-C光源と設計時の検討事項

UVGIシステムの設計には、UV-C光の取り扱いに関する課題が伴う。ほとんどの物質が、UV-Cエネルギーを十分に反射または透過させないためである。熔融シリカ、石英、その他の特殊ガラスでできたUV対応のレンズを使用して、UV-C光を配向する必要がある。反射性材料としては、テフロン、PTFE(ポリテトラフルオロエチレン)、UV強化アルミニウムなどがある。UV-C光は、皮膚や目に深刻な損傷を与える可能性があるため、人体への安全対策に関する配慮が極めて重要である。UVGIシステムは通常、生体組織に触れる可能性のない場所で稼働するが、システムの構築や使用に携わる技術者に対する保護策が必要である。

UVGIシステムの中心にあるのが、

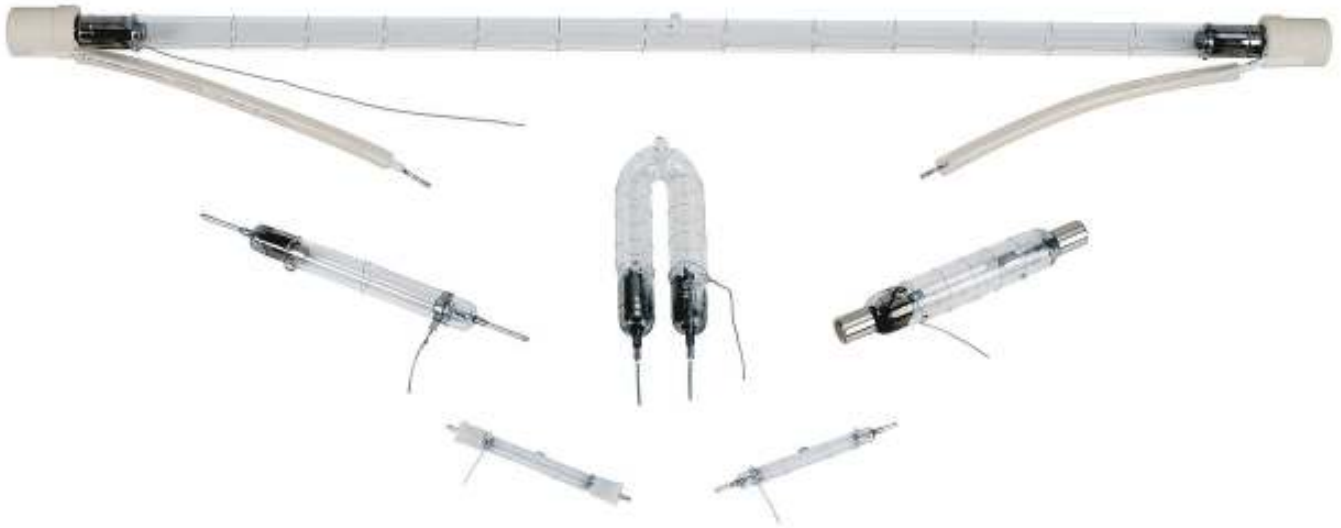


図3 キセノンを充填して、パルスモードで動作するフラッシュランプは、UV-C 消毒及び殺菌用途に適している。(提供:エクセリタス社)

UV-C光源である。殺菌用の一般的なUV-C光源としては、低圧水銀蒸気ランプ、パルスキセノンランプ、エキシマランプ、UV発光ダイオード(Light Emitting Diode:LED)などがある(図2)。

ピーター・クーパー・ヒューイット(Peter Cooper Hewitt)は、1901年に最初の量産向け低圧水銀蒸気ランプの特許を取得し、この技術は現在でも使用されている。低圧水銀(Hg)蒸気ランプは、日常的に用いられる蛍光灯に似ているが、紫外線エネルギーを可視光に変換するための内部蛍光体コーティングを持たない。UVを吸収するホウケイ酸ガラスを使用する代わりに、溶融石英やチタン(Ti)添加の石英を使用して、オゾンを生成する低圧水銀からの185nm放射を遮断する。

比較的寿命が長く、電気から光への変換効率が30%弱と高いことから、低圧水銀ランプは今でも、多くのUVGIシステムに対して費用対効果の高いソリューションである。しかし、水銀ランプは他のソリューションと比べて物理的に堅牢ではなく、破損時や

廃棄時に有毒となる危険性がある。また、温度が低いと液体水銀の気化が妨げられるため、40°F(4.4°C)未満の環境での効果的な動作が難しい。

一方、パルスキセノンランプは、200~300nmの広帯域のUV-C照射が可能で、水銀などの有毒物質を含まない。熱をほとんど生成することなく、1kW/cm²以上の高い放射照度を提供するため、人がいないときに広い空間を消毒する場合に理想的である(図3)。しかし、パルスキセノンランプは、不要な波長を除去するためのフィルタが必要となる場合がある他、比較的高価なサポート電子部品も使用するため、システム全体のコストが増加する可能性がある。

UVGI光源のさらなる選択肢として、エキシマランプがある。エキシマランプには、高い電子状態では安定しているが、低い電子状態では不安定な状態に遷移して、207nmまたは222nmのUV-C光子を放出する、臭化カリウム(KBr)や塩化カリウム(KCl)のような二原子分子が含まれている。エキシマ

ランプは、一般的には金属電極を持たないため、水銀ランプやパルスキセノンランプよりも機械的に堅牢である。人間の皮膚の最外層は、死細胞からなり、エキシマランプが生成する短いUV波長を直ちに吸収する。この効果に着目して、222nmのエネルギーに殺菌効果があるか、また、長時間にわたる人体曝露に対して安全であるかを見極めるための新しい研究が行われている。

UVGI用のUV-C LED光源

半導体設計の進歩により、214nm、26nm、275nm付近のUV-C光を放射する、窒化アルミニウムガリウム(AlGaN)に基づくLEDが誕生している(<http://bit.ly/3kgb2i3>)。UV-C LEDはコンパクトで、使用場所設置型のUV殺菌装置用のシステムに非常に簡単に組み込むことができ、起動時遅延がないため、電源を入れるとほぼ瞬時に起動する。このことから、人がいないときにだけ起動する、散発的なオン/オフ動作に最適である。また、LEDは比較的低い電圧で動作するた

表 一般的な殺菌用UV-C光源の特徴

光源	UV LED	パルスキセノン	水銀蒸気	エキシマ
コスト	\$\$\$	\$\$	\$\$	\$\$\$\$
波長	約265～280nm	200～300nm	254nm	207～222nm(フィルタ使用の場合)
メリット	サイズが小さい 低電圧 SMDパッケージ 取り付けが容易	水銀フリー 広帯域光源	低コスト 高効率	他の光源よりも「安全」である可能性がある (フィルタ使用の場合)
デメリット	単位エネルギーあたりのコストが高い	サポート電子部品が高額	水銀を含む 他の光源よりも堅牢性が低い	サプライヤーが限られている メリットが未実証 サイズが限られている

め、電池や太陽電池によって給電される、小型機器や携帯型機器にも簡単に組み込むことができる。

UV-C LEDは、単位電力あたりのコストがランプベースの光源よりも高いが、ほとんどの照射量要件や用途に対して、十分な能力を発揮する。コロラド大とノースカロライナ大による2016年の研究では、260nmのLEDが、大腸菌と細菌胞子の不活性化に対して、少なくとも低圧水銀システムと同程度に有効であることが示されている (<http://bit.ly/38IiFKKe>)。UV-C LEDのある主要メーカーは、新型コロナウイルス(SARS-CoV-2)の不活性化に成功しており (<http://bit.ly/3hIGnKv>)、その他にも、他のヒトコロナウイルスの不活性化に成功した研究が存在する。より最近では、波長が280nm付近のLEDによって37.5mJ/cm²という低用量で、試験管内のSARS-CoV-2が急速に不活性化することが、宮崎大の研究者らによって示されている (<http://bit.ly/3rBcvnG>)。

LED出力を高めるためのプロセス改良が進行している。新しい結晶成長技術は、AlNベースの半導体とそのサファイア基板との間の界面付近の転位によって引き起こされる損失を低減する。サファイアの代わりに炭化ケイ素

(SiC)を使用することにより、性能が改善されることも、カリフォルニア大サンタバーバラ校の研究者らによって実証されている。設計改良により、半導体からの光をより効率的に配向することが可能になる。カラーディスプレイ用の青色LEDの性能が、1990年代から2000年代初頭にかけて大幅に向上したのと同じように、UV-C LEDの性能が進化し続けて、この技術が次世代のUVGIシステムにとってさらに魅力的なものになることが期待される。

UVGI光源の選択

ここで、どの光源が理想的なのかという疑問が残る。この疑問に直接回答することはできないが、特定用途に対するソリューションに関する洞察を提供することができる(各光源の特徴の比較については、表を参照のこと)。一般的に、10W以上のUV-C光出力が必要な場合は、水銀蒸気光源またはパルスキセノン光源が、最も高い費用対効果を発揮する。UV-C LEDの電力変換効率(Wall Plug Efficiency: WPE)は高まっているが、水銀蒸気光源やパルスキセノン光源の現時点の効率や低いコストには太刀打ちできない。必要なUV-C光出力が10W未満であれば、UV-C LEDに軍配が傾く。単位光エネ

ルギーあたりのコストは高いが、実装面積が小さく、設計が堅牢で、低電圧であるために組み込みが容易だからである。エキシマレーザは、222nm以下のUVの曝露時間を延長できる可能性があるが、コストが高く、寿命が短いことから、適用範囲が制限される。コストと寿命のいずれかが改善されない限りは、この光源の利用は、装置のコストよりも効果が高いことの方がはるかに重要とされる、病院関連の用途に限られる可能性が高い。

結論

紫外線は長い間、病原菌と闘うための強力な手段として利用されてきた。UV光の殺菌力に対する新たな関心が、UV-C光源の継続的な技術革新を促進しており、それによってUVGIは、さまざまな状況において、SARS-CoV-2や抗生物質耐性菌といった、危険性の高い新たな病原菌と闘うための手段として、さらに優れた効果を発揮することになると期待される。

著者紹介

パメラ・リー (PAMELA LEE)は、米エクセリタス・テクノロジーズ社(Excelitas Technologies)のシニア製品マネージャー、マーヴィン・ラフィンは同社UV事業開発マネージャー。

URL: <https://www.excelitas.com/>

LEDJ