

最新技術 光学フィルター付き 222 nm 紫外光源を用いた殺菌技術について

ウシオ電機株式会社
大橋広行、厚井融、五十嵐龍志

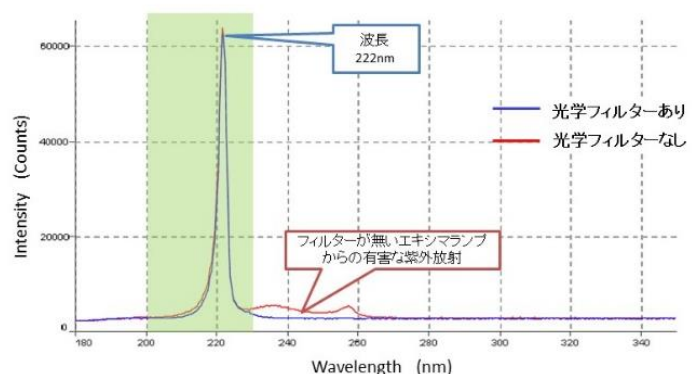
はじめに

紫外放射を用いた殺菌やウイルスの不活化においては、波長 254 nm 紫外放射が広く用いられてきました。波長 254 nm 紫外放射は、ウイルス・細菌を効率的に不活化することが出来ますが、人体に照射すると皮膚がんや白内障を発症させる恐れがあることから、有人環境下での使用に関しては、避けられてきました。一方、昨今、注目を集めている波長 222 nm 紫外放射は、従来の波長 254 nm 紫外放射と同様に、殺菌・ウイルスに対して高い不活化効果がありますが、安全性に関しては、これまでの波長 254 nm 紫外放射と比較して、はるかに高いことが複数の医療機関や大学等で確認されています。人体に害の無い紫外放射であれば、病院や学校、オフィスなど、あらゆる公共・商業施設で人が社会活動を行いながら、殺菌やウイルスの不活化を行う事が出来、パンデミックの抑制と、社会・経済活動の両立が期待されます。

1. 人体への安全性が高い波長 222 nm 光源について (図)

ウシオ電機は、1993年に世界で初めてエキシマランプを製品化しています。波長 222 nm 紫外放射の光源も KrCl エキシマランプです。KrCl エキシマランプの中心波長は、222 nm ですが、他の波長の光もわずかながら放出しています。基本的に、地上に到達する太陽放射に含まれない波長 300 nm から短波長側の紫外放射のうち、波長 230 nm から波長 300 nm の紫外放射は特に人体に有害ですので、有人空間に照射できるようにするには、この波長域の紫外放射 (有害光) を除去しなければなりません。これを実現する為、コロンビア大学の David Brenner 教授は、KrCl エキシマランプと光学バンドパスフィルターを組み合わせる事で人体に有害な波長域の紫外放射を除去し、ウイルス・細菌の不活化効果のみを選択的に活用する事に成功しています¹⁾。ウシオ電機は、この技術に関する基本特許の全世界における独占実施権を 2015

図 人体への安全性が高い波長222 nm光源のスペクトル



年に取得しており、世界で唯一、安全性の高い波長 222 nm エキシマランプを提供することが可能な企業となっています。

2. 波長 222 nm の安全性について

一般に、UV-B や UV-C 領域の紫外放射は DNA や RNA に損傷を与え、人体に照射すると皮膚がんや角膜炎・白内障等の障害を発症の原因となると考えられてきました。一方、波長 222 nm の紫外放射は、これまでいくつかの動物実験やヒト臨床試験が行われており、従来使われてきた波長 254nm の紫外放射と比較すると、はるかに安全性が高いことが報告されています。例えば、神戸大学の黒田教授らのグループの報告では、健康者ボランティアを対象として、波長 222 nm 紫外放射照射の安全性と、皮膚殺菌作用を検討する事を目的として試験を行い、50-500 mJ/cm²を照射終了後 24 時間での皮膚紅斑の有無を調べたところ、全ての被験者において、波長 222 nm 紫外放射照射による紅斑（紫外放射による急性障害）を認めませんでした²⁾。一方、波長 254 nm 紫外放射照射による最小紅斑量（Minimum erythema dose）は、10 mJ/cm²と報告されています。波長 222 nm 紫外放射が生体に障害を与えなかった大きな理由は、波長 222 nm 紫外放射の生体に対する深達度の浅さによるものであることが、神戸大学の錦織教授らのグループの研究によって明らかになっています³⁾。通常、皮膚においては、従来の紫外放射が皮膚の表皮の基底層という一番下層にまで到達し、細胞や DNA を損傷させてしまうのに対し、波長 222 nm 紫外放射は死んだ細胞である角質層という極めて表層の部分までしか到達しないため、表皮細胞の DNA をほとんど損傷させないことが、明らかとなりました。

また、眼への波長 222 nm 紫外放射の安全性に関しても、島根大学の谷戸教授らのグループから論文が報告されています⁴⁾。この論文では、アルビノラットにおける波長 222 nm 及び波長 254 nm の紫外放射によって引き起こされる、紫外照射 24 時間後の急性角膜損傷を評価しています。波長 254 nm の紫外放射では、30-150 mJ/cm²のエネルギーに曝された場合、表在性の点状角膜炎が発症し、600 mJ/cm²では角膜のびらんが観察されました。また、ヘマトキシリンおよびエオシン染色においても、波長 254 nm 紫外放射に曝された眼では、角膜上皮欠損という重度な症例が観察されました。一方で、波長 222 nm 紫外放射においては、600 mJ/cm²のエネルギーに曝された場合でも、角膜にびらんは全く認められませんでした。

さらに、生体に対する長期的な影響に関しても報告されています³⁾。医療現場等では人体に対して直接、かつ繰り返し照射する可能性があるため、発がん性などその安全性についての検証となります。紫外放射に対して非常に感受性が高く、野生型マウスに比べて約 10,000 倍皮膚がんになりやすいとされる色素性乾皮症 A 群モデルマウスに対して、波長 222 nm 紫外放射を繰り返し照射し（2 x 100 mJ/cm²/週、10 週間照射後、15 週間観察）、皮膚と眼についての安全性の検証を行ったところ、波長 222 nm 紫外放射照射群マウスでは皮膚がんが全く発生せず、また眼に関しても、顕微鏡での観察レベルでも全く異常が確認されませんでした³⁾。

3. 波長 222 nm の殺菌・ウイルス不活化効果について (表)

波長 254 nm 紫外放射と同様に、波長 222 nm 紫外放射は広範囲の病原体を不活化することが、弘前大学の中根教授らの研究グループによって報告されています⁵⁾。また、一般的に不活化し難いとされる芽胞に関しては、波長 254 nm 紫外放射と比較し、波長 222 nm 紫外放射の方がより効果的な傾向が報告されています⁵⁾⁶⁾。さらに、波長 222 nm 紫外放射は、エアロゾル中のヒトインフルエンザやヒトコロナウイルスに対しても、高い不活化効果を示す事も報告されています⁷⁾⁸⁾。この事から、感染経路としてエアロゾルが疑われる新型コロナウイルスに関する、波長 222 nm による不活化効果があると考えられます。波長 222 nm の生体に対する高い安全性と、広範囲の細菌やウイルスに対する不活化効果は、本技術が様々な場面において応用が可能である事を示しています。人々の活動を制限する事無く、ウイルス・細菌を不活化できる波長 222 nm 技術が、パンデミック抑制や医療崩壊の抑制、社会経済活動の維持等、切迫する社会的な要求に対して、貢献できることを期待しています。

波長 222 nm の殺菌・ウイルス不活化効果について

Domain	Species	Dose for 3 log reduction (mJ/cm ²)		
		波長 222 nm	波長 254 nm	
Bacteria	MRSA (Methicillin-Resistant <i>Staphylococcus aureus</i>)	15	10	
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	8	4	
	<i>Escherichia coli</i> O157	9	5	
	<i>Salmonella</i> Typhimurium	10	4	
	<i>Campylobacter jejuni</i>	4	4	
	<i>Bacillus subtilis</i>	Vegetative cell	7	8
		Spore	19*	26*
	<i>Bacillus cereus</i>	Spore	44	90
<i>Clostridium difficile</i>	Spore	32*	>86*	
Fungi and Yeasts	<i>Candida albicans</i>	24	40	
	<i>Penicillium expansum</i>	50	50	
	<i>Aspergillus niger</i>	Hypha	>1000	>700
		Spore	>500	>700
Virus	Bacteriophage MS2	23	50	
	Feline calicivirus	24	24	
	Influenza A H1N1, pdm09 strain A/Michigan/45/2015	<6	<6	
	Influenza A, H1N1, A/PR/8/34 ATCC VR-1469	3 **	-	
	Influenza A, H1N1, A/PR/8/34	2 ***	-	
	Alphacoronavirus, Feline enteric coronavirus, WSU 79-1683	2 **	-	
	Human coronavirus, 229E VR-740	1.7 ****	-	
	Betacoronavirus Human coronavirus, OC43 VR-1558	1.3 ****	-	

Data without a note were obtained from studies conducted at Hirosaki University.⁵⁾

* Data cited from Figures in Taylor, *et al.* (2020).⁶⁾

** Data obtained from studies conducted at the Kitasato Research Center for Environmental Science in 2019 and 2020.

*** Welch, *et al.* (2018) indicate a very low dose of 2 mJ/cm² of 222-nm light inactivates >95% of aerosolized Influenza A H1N1 virus in a particle size distribution similar to the natural distribution from human coughing and breathing.⁷⁾

**** Data cited from in Buonanno, *et al.* (2020). The data show the dose of 222-nm light to inactivate aerosolized human coronaviruses.⁸⁾

参考文献

- (1) Buonanno, M. *et al.*:sd 207-nm UV Light - A promising tool for safe low-cost reduction of surgical site infections, I : In Vitro Studies,f PLoS One 8(10), e76968 (2013).
- (2) Fukui, T. *et al.*: Exploratory clinical trial on the safety and bactericidal effect of 222-nm ultraviolet C irradiation in healthy humans, PLoS One (2020).
- (3) Yamano, N. *et al.* Long-term Effects of 222-nm ultraviolet radiation C sterilizing lamps on mice susceptible to ultraviolet radiation, Photochem, Photobiol, 96(4), 853-862 (2020).
- (4) Kaidzu, S. *et al.*: Evaluation of acute corneal damage induced by 222-nm and 254-nm ultraviolet light in Sprague-Dawley rats, Free Radic, Res. 53, 611-617 (2019).
- (5) Narita, K. *et al.*: 222-nm UVC inactivates a wide spectrum of microbial pathogens, J. Hosp. Infect, 150, 459-467 (2020). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.03.030>.
- (6) Taylor, W. *et al.*: DNA damage kills bacterial spores and cells exposed to 222-Nanometer UV radiation, Appl. Environ. Microbiol, 86, 1–14 (2020).
- (7) Welch, D. *et al.*: Far-UVC light: A new tool to control the spread of airborne-mediated microbial diseases, Sci. Rep. 8, 2752 (2018).
- (8) Buonanno, M., Welch, D., Shuryak, I. and Brenner, D. J.: Far-UVC light efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses, Sci Rep. 24;10(1), 10285 (2020).