

第3回日本放射線安全管理学会
日本保健物理学会合同大会
2021/12/01 講演番号: 1C2-1

紫外線消毒の有用性と 放射線安全管理的に見た 紫外線安全管理

大阪府立大学 放射線研究センター、
大阪国際感染症研究センター（兼任）

秋吉 優史

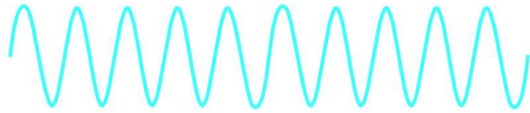
E-Mail: akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp

<http://anticovid19.starfree.jp/>



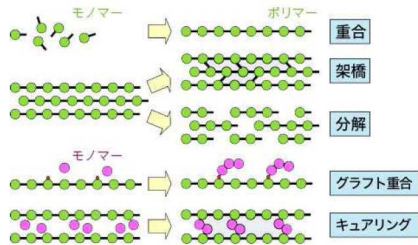
エネルギー 大

ガンマ線、エックス線



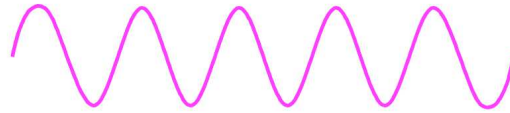
電離作用

原子核
電子
放射線



エネルギーの大きいガンマ線やエックス線は、物体の中を突き抜けていき、その途中の原子の周りの電子を弾き飛ばす働きがあります。この力を使って、注射器などの医療用の器具を滅菌したり、様々な機能を持った高分子化合物を作ったりすることが出来ます。

紫外線



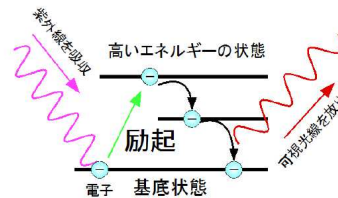
< 太陽光線の種類 >

UVC はオゾン層で吸収されるため地表には届かない。

200 280 320 400 760 nm

1nm (ナノメートル)=100万分の1mm

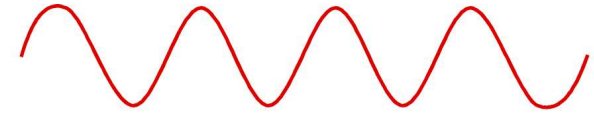
※イメージ図



可視光線よりも少しエネルギーの高い紫外線は、目には見えませんが、物体の中の電子に少しだけエネルギーを与えて「励起(れいき)」させることが出来、日焼けの原因になったり、「UVレジン」と言う接着剤を固めてアクセサリーを作ったり、ウランガラスなどの蛍光体を光らせることが出来ます。

エネルギー 小

可視光線



CO₂ → O₂

H₂O

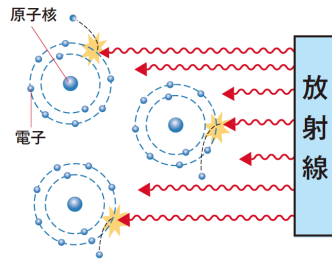
目で見える光、可視光線は波長が長くエネルギーの低い赤から、波長が短くエネルギーの高い紫までの間で、虹の七色のように見え方が異なります。光も電磁波の一種ですから少し電子を励起して、写真フィルムを感光させたり、太陽光発電を行ったり、植物の葉緑体の中で光合成を行うなどのパワーを持っています。波長(波の長さ)と位相(波の位置)の揃った光のことを、レーザー光線と言い、強度(波の高さ)がとても強く、遠くまでまっすぐ飛ぶなどの性質があります。

紫外線による遺伝子損傷



放射線を被ばくすることにより細胞中のDNAの鎖が切断されてしまう場合がある。 γ 線や β 線では**一本鎖切断**が主であるが、LETの大きい α 線では二本とも切断してしまう**二本鎖切断**が起こる場合がある。いずれの場合もバックアップデータから修復が行われるが二本鎖切断ではより困難であり、修復ミスが最終的に発がんにつながる。

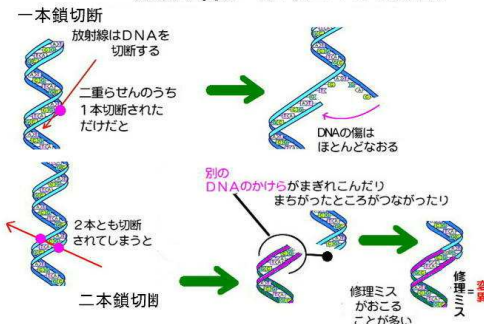
電離作用



紫外線は電離放射線には分類されず(法令上空気を電離できるエネルギーを有する光子、荷電粒子を電離放射線と呼ぶ)、DNAの主鎖を切るだけのエネルギーは無いが、配列している塩基同士を**励起**して接合してしまう場合がある。特に、**ピリジミン二量体**の生成が紫外線による損傷の主たる物と言われており、DNAの複製を妨げる遺伝子損傷となるが、ほとんどの細胞はこれらの損傷を修復する酵素を持っている。

ところがウイルスは自分自身では生命活動を行えず、これらの損傷は感染先の細胞に入って初めて修復される。また、コロナウイルスは**1鎖RNA**ウイルスであり、バックアップを持つ二重鎖では無い。このため比較的紫外線に弱いのでは無いか、と言うのが研究を始めたきっかけ。結局、1鎖RNAタイプのウイルスが系統的に紫外線に弱いというようなことは無いようだが、吸収線量の正確な評価など更なる検討が必要。

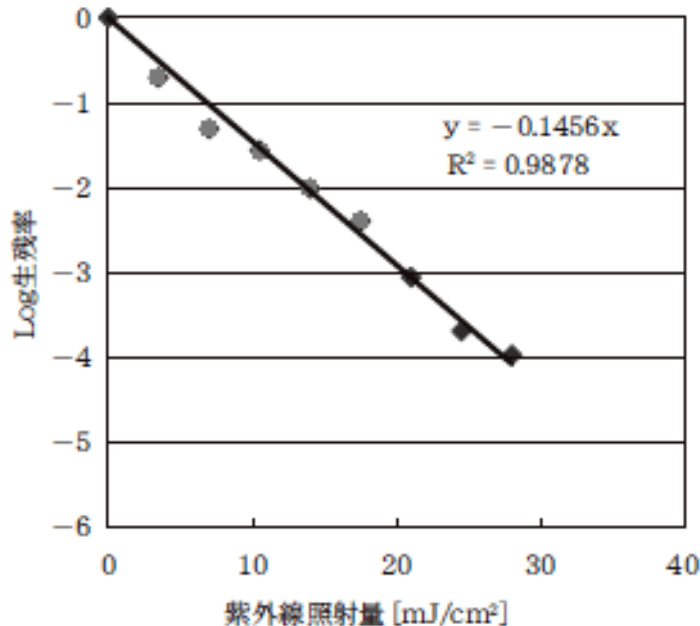
放射線によるDNA切断



さらに、波長 254 nm の紫外線は 4.9 eV 程度のエネルギーを持ち、酸化還元電位 2.42 eV のスーパーオキシドや同じく 2.85 eV のOHラジカルなどの活性酸素を生成可能で、間接作用も起こりうる。

紫外線積算照度と生残曲線

放射線の場合は吸収線量(Gy)などの単位で、どの程度照射を行うとどの程度影響が出るかを評価します。同様に、紫外線の場合は単位面積に単位時間あたり与えるエネルギーを**照度**(SI単位系では W/m^2 、慣例的に mW/cm^2 が良く用いられる)と呼び、照射時間で積分したトータルのエネルギーを**積算照度**(J/m^2 、 mJ/cm^2)と呼び、積算照度が増えるに従って、殺菌や不活化されずに生き残っている菌やウイルスの数は、指数関数的に減少していきます。この様子を**生残曲線**と呼びます。効果が有る/無しではなく、**照射する量によって効果が変わります**。

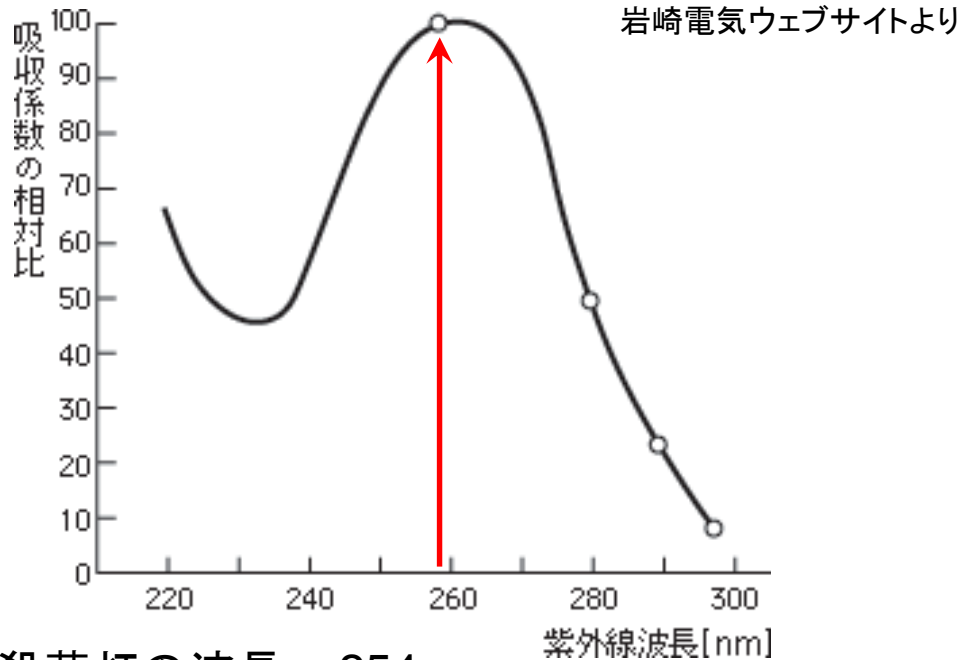


生残曲線の例。横軸に紫外線積算照度(mJ/cm^2)、縦軸にどれだけ生き残っているかという生存率の**対数值**(-3で $10^{-3} = 0.1\%$ で、99.9%まで殺菌/不活化されたことを意味する)をプロットした物。必ずしも直線的になるわけではなく、最初なかなか下がらない、肩を持つ場合も多い。また、対象となる微生物によってこの曲線の傾きが異なり、どの程度照射すれば良いかが変わってくる。

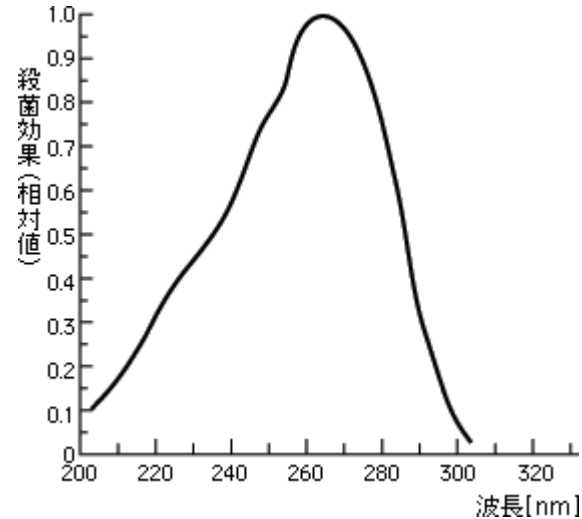
なお、高い照度で短時間照射も、低い照度で長時間照射も、**積算照度が同じであれば効果は同じ**である(極端に高い照度の場合を除く)。

UV-C によるウイルスの不活化

DNAに対する紫外線吸収の波長依存性



殺菌作用の紫外線波長依存性



UV-C

200-290nm

UV-B

290-320nm

UV-A

320-400nm

殺菌灯の波長 = 254nm

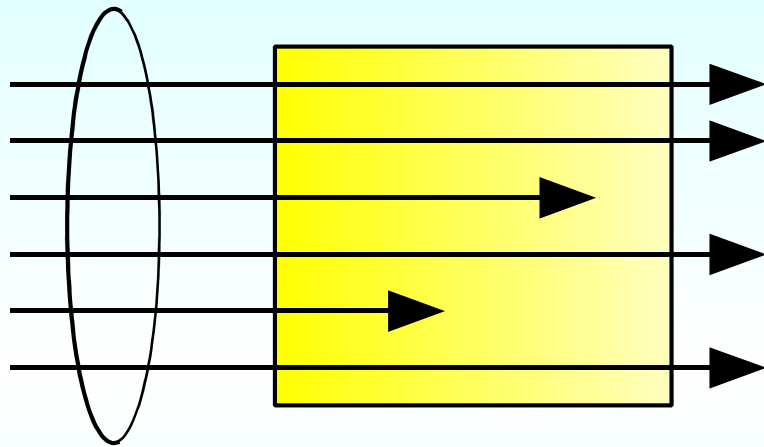
紫外線に対する殺菌、ウイルスの不活化の研究はほぼ全てが波長254nmの殺菌灯について行われている。様々な菌、ウイルスについて横断的なデータが存在する。

太陽光に含まれるUV-Bについては古くから殺菌効果が知られているが、定量的研究は極めて限られている。

近年話題になっている222nmの遠紫外光は、透過力が極めて小さく、皮膚ごく表面の20 μ m程度の厚さの角質層などで止まってしまうに生きて細胞にまで到達せず、炎症や皮膚癌などを引き起こさない。その一方で物体の表面に付着した直径0.1 μ m程度のウイルスの中までは届くため、遺伝子に損傷を与えて不活化できる。ウイルスよりも大きい菌(直径1 μ m程度)の場合細胞質の中のDNAまで到達する量が少なくなるため効果は小さくなる。

「照射量」の意味の違い

強透過性放射線

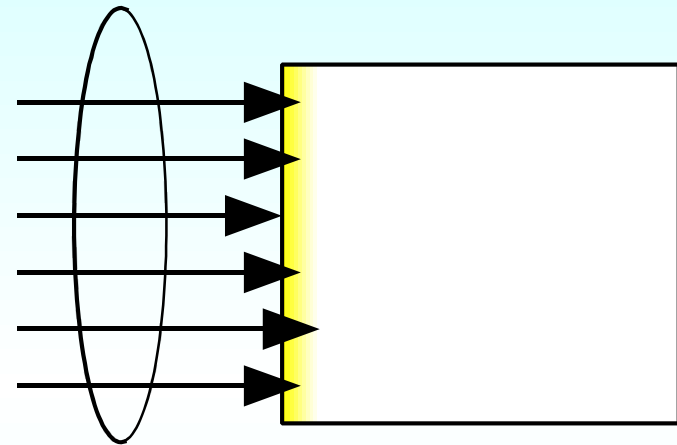


高エネルギーガンマ線などの場合透過力が高く、ほぼ均等にエネルギーを与える。

ほとんどの光子は素通りしていくため、単位面積あたりの入射エネルギー量(エネルギーフルエンス)を求める事は困難で、単位質量あたりに吸収されるエネルギー($J/kg = Gy$)を、物質の側から見た「照射量」として扱う。

正確には、「吸収線量」。

紫外線



表面ごく近傍(殺菌灯からの UV-C を皮膚に照射して数十 μm 程度のオーダー)で全てのエネルギーが吸収される。

照射する対象によって、また波長(エネルギー)によって大きく透過力が異なり、局所的な微小体積への吸収エネルギーを求める事は困難で、単位面積へのエネルギーフルエンスとしての、 mJ/cm^2 などの量が光源の側から見た「照射量」として用いられる。正確には、「照度(mW/cm^2)・積算光量(mJ/cm^2)」。

紫外線の積算照度を吸収線量に換算してみる

紫外線は極めて透過力が弱く、表面からごく浅い層に全量が吸収される。このため、対象とする物体によらず、照射した光子全体のエネルギーのフルエンスを J/m^2 などの単位で取り扱っている。

ガンマ線などの強透過性の放射線は照射する対象物にほぼ均等にエネルギーを与え、また入射した光子のほとんどは透過して吸収されない。このため、エネルギーフルエンスで取り扱う事は現実的では無く、単位質量の物体に吸収されたエネルギー ($\text{J/kg} = \text{Gy}$) で照射量を取り扱う。

紫外線を同様の考え方で、吸収されたごく浅い層の質量に対するエネルギー吸収を考える。密度 1g/cm^3 の物質 $20\ \mu\text{m}$ の層に均一に吸収されたとすると、 1cm^2 あたりの質量は、 $20 \times 10^{-4}\ \text{g}$ で、積算照度を 10mJ/cm^2 とすると、吸収線量は

$$10 \times 10^{-3} / 20 \times 10^{-7}\ \text{J/kg} = 5\ \text{kGy}$$

と言う、高い線量に相当する(実際には吸収線量は電離放射線に対して定義される量)。

枯草菌などの放射線への耐性の高い菌についても 10^{-6} 以下にまで殺菌を行う「滅菌」の場合で、 25kGy 程度(医療器具などに対しての場合)なので、完全に滅菌とまでは言えないが相当程度の効果があると考えられる。

UV-Cによるウイルスの不活化

既に世界中で研究が進められており、SARS-CoV-2 に対しても複数の研究者からデータが出てきている。2), 3), 5) については査読が終了しています。

No	1)	2)	3)	4)	5)
グループ	ミラン大 Biasinら	ボストン大 Stormら	スタンレー電気	宮崎大 Inagakiら	広島大 Kitagawara
光源	254nm殺菌灯	254nm殺菌灯	265nm LED	280nm LED	222nm エキシマランプ
99.9%まで不活化に必要な線量 (mJ/cm ²)	3.7	Wet: 5.3 Dry: 4.1	5.1	37.5	3.6
査読	査読済	査読済	査読無し	査読済	査読済

インフルエンザウイルスの 254nm 殺菌灯 6.6mJ/cm² で 99.9% まで不活化、よりも低い値となっており、**新型コロナウイルスの紫外線耐性は低い**と言える。

280nm LEDに対しても、高橋先生のインフルエンザに対する実験では99.9% まで不活化に75mJ/cm²(最新の論文では 60mJ/cm²)となっており、10倍程度 254nm での照射よりも積算照度が必要で、上記のSARS-CoV-2の結果と整合性が取れている。

紫外線の弱点

距離の二乗に反比例して強度が下がる

広い範囲に照射するために光源を遠くに設置すると、強度が非常に弱くなり、同じ量を照射するのに必要な時間が長くなります。

ほとんどの物質に対して透過力が非常に小さい

石英ガラスや水などの一部の物を除いて、数 $10\mu\text{m}$ 程度しか透過できません。ゴム手袋や紙一枚で完全に止まります。照射できるのは表面に付着している物に限られますし、光源から影になる部分には効果がありません。

皮膚や目に強い炎症を起こし、人体に有害

波長が短くエネルギーの高いUV-Cは皮膚や眼の角膜に強い炎症を与えます。その場ですぐには気が付かず後になって皮膚癌や失明を引き起こす可能性があります。このため、人がいる場所での使用が基本的に出来ません。JIS Z8812では、UV-Cに対する許容限界値基準は $6\text{mJ}/\text{cm}^2$ となっています。また、プラスチックや繊維、塗料などの有機物も大量の照射により次第に劣化していきます。

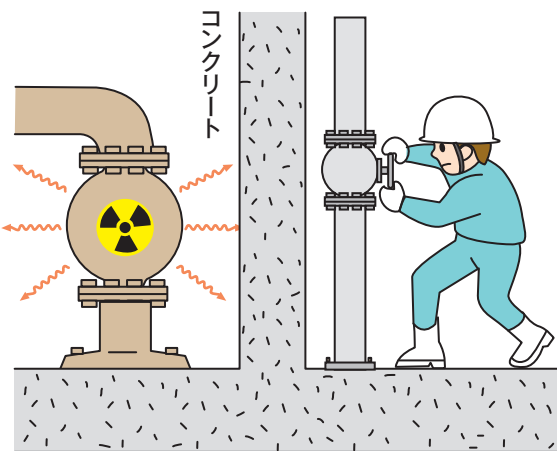
光源の入手が困難

2019年4月以降、省エネと水銀に対する規制のために蛍光灯器具の販売がほとんどのメーカーで終了しています(ランプは販売されています)。その一方でUV-C波長のLEDは出力が 100mW 以下と小さく、エネルギー変換効率も数%程度で高価であり、まだ代換できていません。

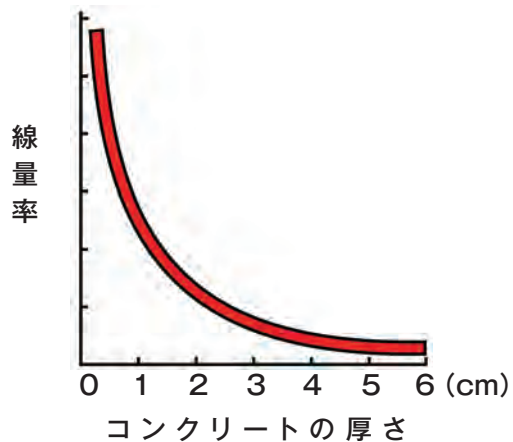
放射線防護の基本

1. 遮へいによる防護

(線量率) = 遮へい体が厚い程低下

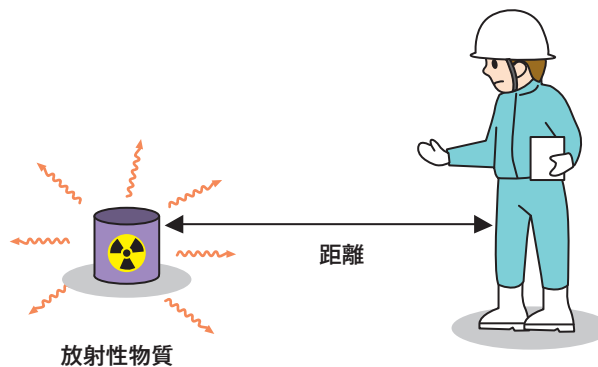


(mSv/h)

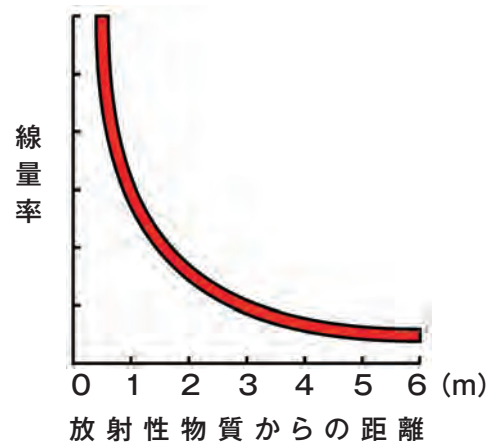


2. 距離による防護

(線量率) = 距離の二乗に反比例

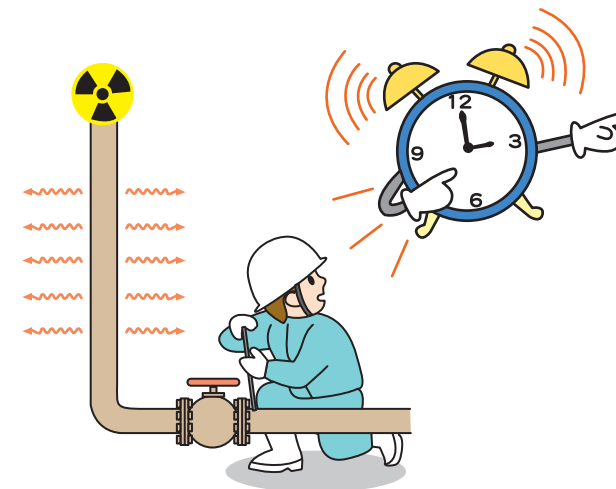


(mSv/h)

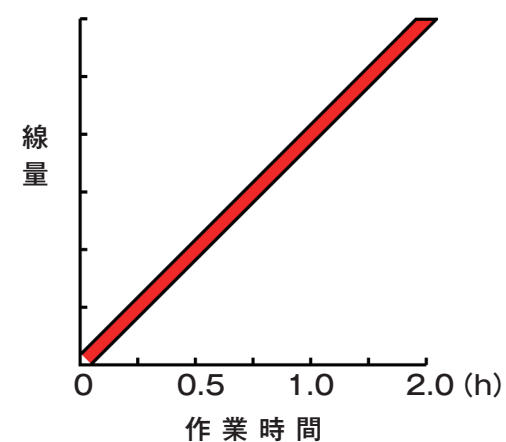


3. 時間による防護

(線量) = (作業場所の線量率) × (作業時間)



(mSv)



事件事例

2020/12/31 にモデルのアリスムカイデ氏が飲食店で非常に重度の紫外線被ばく事故被害に遭いました。当該の飲食店はコロナ対策のつもりでUV-C 紫外線を放出する殺菌灯を、客席のテーブルの下や、トイレの洗面所に設置しており、「直接見ないで下さい」との説明はあったようですが、余りにも当然のように至近距離に置かれていたため、それほど危険な物だとは思わなかった、とのこと。
特に足下の至近距離(15 cm程度)の場所に設置されていた殺菌灯により2時間半もの間、素足に照射され続け、概算で $3,600 \text{ mJ/cm}^2$ という、許容限界値基準(254nmでは 6 mJ/cm^2)の600倍にもなる被ばくとなります。それでも照射時には症状は現れず、数時間後の夜中に痛み、赤みが出てきたとのことです。

紫外線による皮膚及び角膜に対する炎症は、その場ですぐには現れず、数時間程度経ってから現れ、目に見えないため被ばくしている自覚が無く、症状が重篤化してしまうという特徴があります。



← アリスムカイデ氏の事故から2日後の症状。右足の白い部分は足を組んでいて陰になっていたとのこと。

→ アリスムカイデ氏の事故から14日後の症状。別の部分に日光を浴びたところ水ぶくれのような症状が出たとのこと。これまでUV-Cでは報告されていないが、光線過敏症を誘発している可能性がある。



学協会からの公式なオーサライズ

紫外線殺菌

ご利用上の注意

(一社) 日本照明工業会
(一社) 照明学会

2021/08 に、東海大学の竹下 秀先生と、照明工業会加盟各社の皆様のWGに秋吉も参加を行い、一般人向けに「紫外線殺菌 ご利用上の注意」という形でパンフレットの作成を行いました⁽¹⁾。

紫外線の有用性の周知だけでなく、紫外線による事故について取り上げると共に、透過力が低い等の弱点や、いい加減な製品も存在することなど、上手に使用すれば有用な紫外線利用上の注意点についての周知を行っています。

このパンフレットは科学的な論文を元に記述されており、学会公認のパンフレットとすることで「**厚労省 医療機関における院内感染対策について(H26)**」における、「**紫外線照射等については、効果及び作業者の安全に関する科学的根拠**並びに想定される院内感染のリスクに応じて、慎重に判断すること」という記述における**科学的根拠**と捉えることが出来ます。

また米国疾病予防管理センター、CDCでは公式サイト⁽²⁾で Upper-room Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) をエアロゾル対策として推奨しています。

(1) https://www.jlma.or.jp/siryu/pdf/pamph/notice_UV-light-emitting.pdf

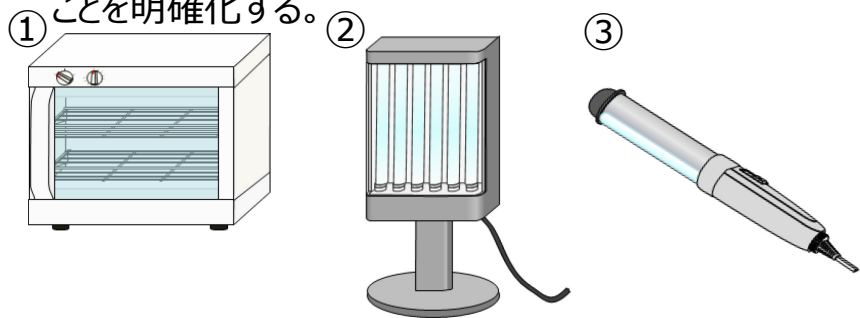
(2) <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/ventilation/uvgi.html>

電気用品安全法の「技術基準解釈（別表第八）」及び「電気用品の範囲等の解釈について」の一部改正（殺菌灯を有する電気消毒器の安全対策）

殺菌灯を有する電気消毒器について、器体外に直接殺菌灯の光線を照射する構造のものが急速に普及しつつあるため、電気消毒器の安全上必要な技術基準を技術基準解釈※¹に追加するとともに、器体外に照射する電気消毒器が電気用品安全法の規制対象であることを明確化※²する。

1. 本改正の背景

- 殺菌灯を有する電気消毒器について、現行の技術基準解釈では、「庫内の対象物に殺菌灯の光線を照射する構造のもの」（下図①）を想定しているが、近年、器体外に直接照射する構造のもの（下図②③）が急速に普及しつつある。
- 殺菌灯は、目や皮膚等に傷害を及ぼす紫外線を放射するため、器体外に直接照射する構造の電気消毒器について、安全上必要な技術基準を技術基準解釈に追加するとともに、電気用品安全法の規制対象であることを明確化する。



2. 改正の概要

- 技術基準解釈の別表第八の2(21)電気消毒器の項に、器体外に直接照射するものについて、次の旨の要求事項を追加。
 - a JIS C 7550（ランプ及びランプシステムの光生物学的安全性）に規定の「目及び皮膚に対する紫外放射傷害」リスクが免除グループ※³であること。
 - b 器体に見やすく、容易に消えない方法で、かつ、理解しやすい用語により、JIS C 7605（殺菌ランプ）の箇条9.1に規定の警告表示をすること。
- 電気用品の範囲等の解釈に、「電気消毒器」とは殺菌灯が組み込まれるものであって、器体の内外部に殺菌灯の光線を照射することによって消毒の用に供されるものである旨を追加。

3. 改正の時期

改正・施行：令和3年12月末頃予定

（ただし、技術基準解釈については、施行日から1年間は、なお従前の例によることができる。）

※1 技術総括・保安審議官通達「電気用品の技術上の基準を定める省令の解釈について」

※2 技術総括・保安審議官通達「電気用品の範囲等の解釈について」

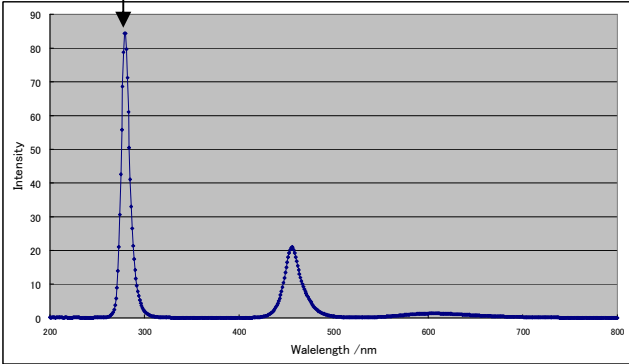
※3 免除グループ：何らの光生物学的傷害も起こさないもの（JIS C 7550:2011 箇条4.4.1aより）

波長の異なる紫外光源への対応

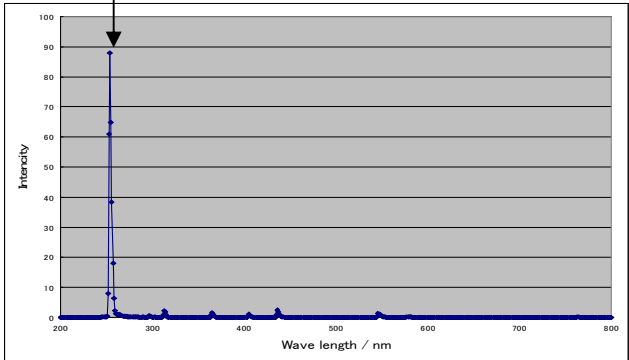


以前はUV-C光源として低圧水銀ランプについてのみ考えれば良かったが、近年260nm程度までの波長のLED光源が販売されるようになった。しかし、多くの製品で使用されている280nmでは不活化の効果は254nmの場合の**1/10程度**であり、紫外分光放射照度計での測定、補正が必要。

UV のピーク波長は
280nmでやや幅が広い



低圧水銀ランプのピーク
波長は 254nmでシャープ



Σ 各波長毎の照度 × 不活化効果相対値

と言う形で表わされる、放射線と言うところの実効線量のような指標が必要。

菌に対しては、JIS Z8811 (1968) で既に与えられている (G-ワットという名称) が、ウイルスに対しては公式な物が与えられていない。

ハンディな放射照度計は、254nmを前提に校正されているが、それすら製品規格が存在せず、メーカーにより値が異なる。トレーサビリティの取れた紫外放射分光照度計で波長ごとの照度を評価する必要がある。

← 紫外分光放射照度計 USHIO USR45 で測定