

**紫外線／光触媒によるウイルス不活化技術と対策**  
**2020年12月 9日 オンラインセミナー**

# **紫外線と光触媒の 「工学的ウイルス対策」**

**大阪府立大学 放射線研究センター**  
**秋吉 優史**

E-Mail: [akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp](mailto:akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp)

<http://bigbird.riast.osakafu-u.ac.jp/~akiyoshi/Works/Anti-Covid-19.htm>



# 放射線安全管理とウイルス対策

何故放射線安全管理の専門家が、ウイルス対策の研究などを始めたのか？

## 線量計測

様々な研究を実施する上で、放射線計測、特に低エネルギーX線測定について深く追求してきたことにより、深さ方向で異なるフォトンの吸収エネルギーという観点から紫外線照射量を捉えることが出来た。

## もの作り

より高度な放射線教育のために、圧倒的に高性能なペルチェ冷却式霧箱を開発。普及のために極限まで構造を簡略化、コストを落とした製品開発を行ってきた。ひかりクリーナーは初期の頃の霧箱から派生した構造で、すぐに量産に入ることが出来た。

## 放射線生物学の基礎知識

近藤宗平先生の著書などを始めとした一般向けの資料からの基礎知識と、本センターの古田雅一教授らの放射線による殺菌・滅菌の専門的な議論に接していたため、紫外線による殺菌、不活化について容易に理解することが出来た。

## 市民への説明

子供向けのオープンスクールや、保護者向けセミナー、そして学校教育現場での「クルックス管」に関する安全管理について一般の教員に説明してきた経験から、一般市民への説明と、情報公開に慣れていた。

## 核融合炉材料の 照射損傷評価

核融合炉ダイバータ候補材料のセラミックス、  
タンゲステン材料などへの照射後物性評価

微小試験片を用いた熱拡散率及び陽電子寿命測定技術開発、  
京大ライナックによる高エネルギー電子線照射、米国 ORNL  
HFIR 中性子照射材評価、液体金属による照射時腐食挙動評価

H17-19 JST原子カシステム研究開発事業(主)  
H17~ KUR 共同研究拠点共同研究(主)  
H25-H30 PHENIXプロジェクト  
H29~ 京都大学 ZE研究拠点共同研究(主)  
H31-R6 FRONTIERプロジェクト  
H31 NIFS 原型炉共同研究

## 学校教育現場における 放射線安全管理の体系化

クルックス管から漏洩する低エネルギーX線の測定と防護  
線量評価、線量低減指針の策定、管理目標値の設定

電離箱、ガラスバッジ、TLDバッジなどを用いた線量評価と、CZT検出器などによ  
るエネルギースペクトル評価、電圧-電流特性などの電気特性評価、教育現場に於  
ける実態調査、実際の照射パラメーターからの実効線量 等価線量計算、一般公衆  
に対する線量拘束値の社会的議論

H29~ クルックス管プロジェクト(主)  
H30-R2 関西原子力懇談会学術振興奨学金(主)  
H30 日本放射線安全管理学会  
放射線安全規制研究の重点テーマ提案(主)  
H31-H32 日本保健物理学会 専門研究会(主)

共通キーワード

## 放射線影響の評価

## 放射線教育 コンテンツ開発

いつでも確実に簡単に観察できる霧箱の開発、クル  
ックス管からのX線を活用した教育コンテンツの開発

ペルチエ冷却式霧箱の開発と高度化、塩と氷を用いた寒剤式霧箱の  
高度化、名大F研霧箱の改良、霧箱による低エネルギーX線の観察、  
低エネルギーX線による透過像観察/遮へい実験

H28~ つばさ基金による放射線教育振興プロジェクト(主)  
H29-H30 マツダ研究助成 青少年育成関係(主)  
H30-R2 科研費 基盤C(主)  
H30~ 日本科学技術振興財団 放射線に関する教職員セミナーWG委員

## 太陽電池の照射損傷評価と、 放射線計測技術開発

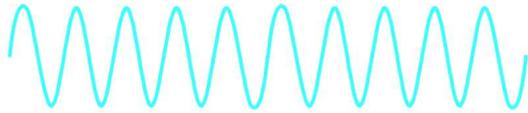
宇宙環境で使用する太陽電池への照射損傷評価、  
廃炉作業に必要な大線量測定用システムの開発

CW加速器による低エネルギー電子線照射での弾き出ししきいエネル  
ギー評価、放射線による起電力のその場評価と大線量照射に対する耐  
性評価

H25-H27 原子カシステム開発・原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ  
H30-R2 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業  
H29~ JAXA との共同研究契約(主)  
H29~ JAEA との共同研究契約(主)

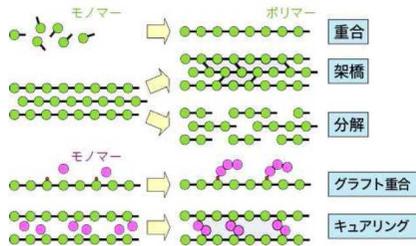
# エネルギー 大

## ガンマ線、エックス線



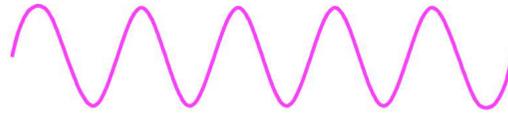
**電離作用**

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

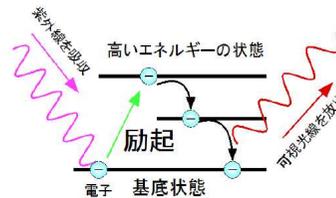


< 太陽光線の種類 >

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

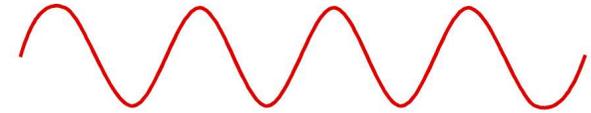
1nm (ナノメートル)=100万分の1mm



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



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。

# 新型コロナウイルスへの工学的対抗策の検討(1)



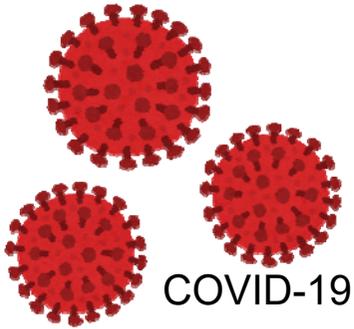
UV-C 殺菌灯 or  
光触媒 + UV-Aランプ or  
100°C 5分などの加熱処理  
で滅菌・不活化して再利用

マスクリーン

高性能フィルターにきちんと  
紫外線を照射できるかが問  
題となる

世界的な  
供給不足

~~密集~~



「感染を広げない」  
目的で全員が着用

飛沫

感染者から2m程度の範囲に飛び散る。咳  
やくしゃみだけでなく、普通にしゃべってい  
るだけでも飛散する。

+フェイスガード、  
ゴーグル等  
(防御用)

光触媒空気清浄機

フィルターと光触媒の組み合  
わせでキャッチして分解。  
飛沫の飛ぶ距離の範囲に設  
置されていないと意味が無い

サージカルマスクには、防御の力はほぼ無い  
(フィルター以外の隙間がふさげないため)。

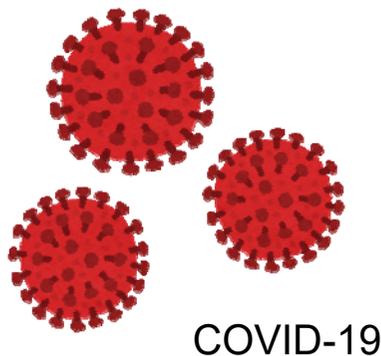
自分からの飛沫を防ぐだけならば布マスクでも十  
分で、いずれも8割程度を止めることができるが、  
2割程度は隙間などから飛散する。

# 新型コロナウイルスへの工学的対抗策の検討(2)



どうしても換気が悪い場所もある

~~密閉~~



COVID-19

**エアロゾル**

5 $\mu$ m以下の微粒子で数分間空気中に滞留し、広い範囲に拡散しうる。喋るだけでも飛散する。

マスクをしていても、繊維の間や顔との隙間から半数近くのエアロゾルは飛散している。

**光触媒空気清浄機**

△二酸化塩素・オゾン(刺激臭)

部屋の空気を攪拌するとエアロゾルが拡散してしまう恐れも。発生源の近くに設置する小型機によるネットワークの必要性。

光触媒に光を当てると発生する活性酸素の強力な酸化力で様々な有機物を分解



+こまめに水等を飲む

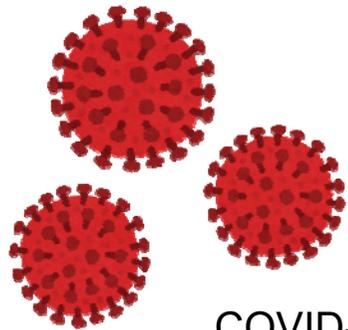
粘膜に付着してから15~20分で感染するため、うがいが出来ない状況であればこまめに飲み込んでしまい胃酸で不活化する方が better。感染者が居る状況で飲食しても大丈夫と言うことでは無い(飲み込む途中で感染する可能性はゼロでは無く、鼻や目からの感染は防げない)。

**マスク表面への光触媒塗布**

光触媒は、可視光線での活性の高い酸化タングステン系の製品などが望ましい

LED照明では紫外線が出ていない

# 新型コロナウイルスへの工学的対抗策の検討(3)



COVID-19

# ~~密接~~

最もリスクが高く、対策が難しい。

## 物体表面への接触

どこに潜んでいるか分からない  
ブービートラップ

手袋、衣類への  
**光触媒塗布**

防護具への**UV-C照射**

感染症対策の医療現場では、防護具を脱装する際のリスクが高い。ため、Cold エリアへの境界で防護具に対してUV-C照射を行う。

共有物品表面への**光触媒**や、**銅・銀**などの金属微粒子の塗布

定期的な**UV-C照射**

距離の二乗に反比例して弱くなるためロボット技術の活用などで広い範囲に照射する必要性

金属含有の光触媒は暗くなっても一定期間不活化の効力を発揮

最も簡単には、銅箔テープの貼付けなどでも一定の効果が。

脂質の膜、エンベロープを溶かすことが重要。物理的に洗い流すだけでも効果的。



手を洗おう



消毒しよう

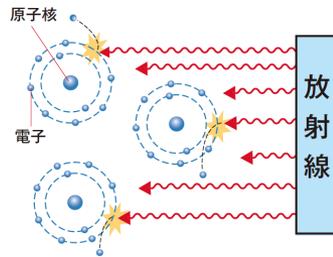
手にウイルスが付着しただけでは感染しないが、口腔、鼻腔や目の粘膜に存在するACE2受容体から感染。

# 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。 $\gamma$ 線や $\beta$ 線では**一本鎖切断**が主であるが、LETの大きい $\alpha$ 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。

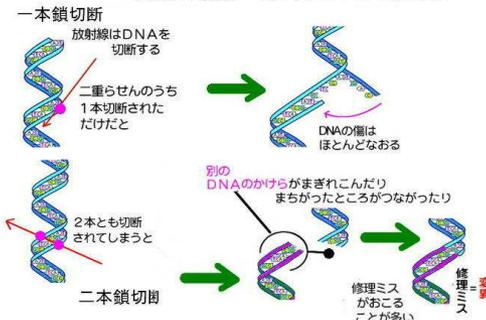
電離作用



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。

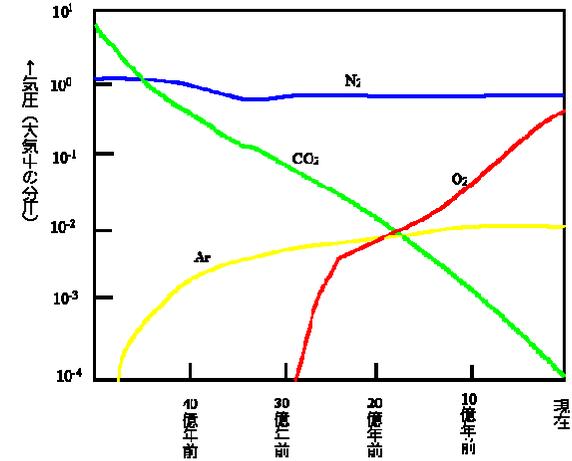
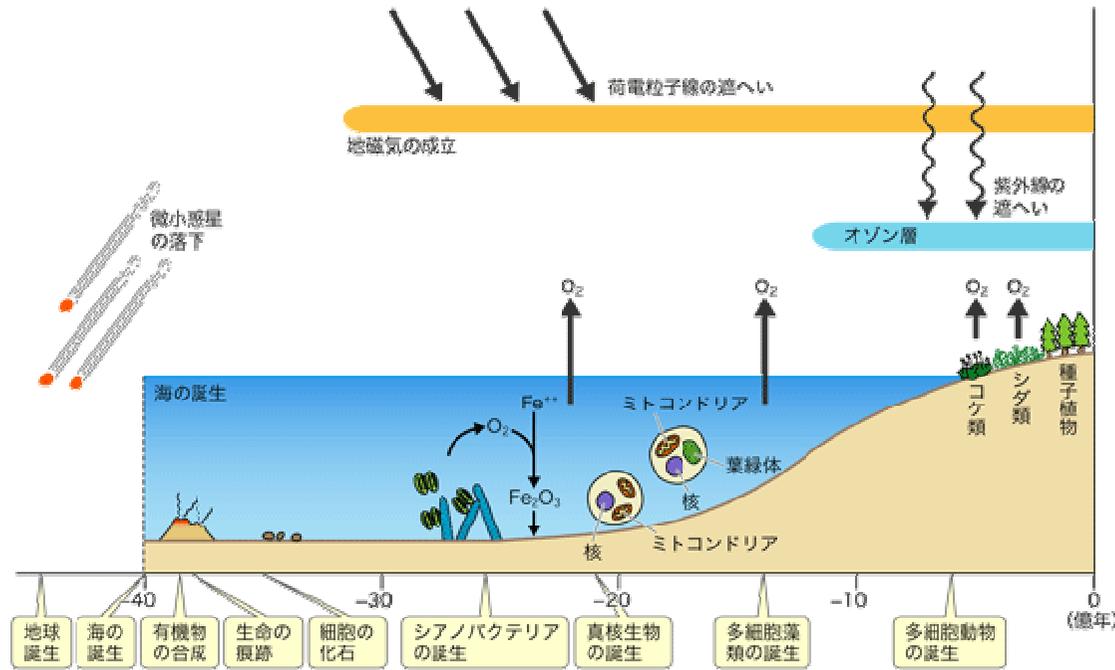
ところがウイルスは自分自身では生命活動を行えず、これらの損傷は感染先の細胞に入って初めて修復される。また、コロナウイルスは**1鎖RNA**ウイルスであり、バックアップを持つ二重鎖では無い。このため比較的紫外線に弱いのでは無いか、と言うのが研究を始めたきっかけ。結局、1鎖RNAタイプのウイルスが系統的に紫外線に弱いというようなことは無いようだが、吸収線量の正確な評価など更なる検討が必要。

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。

# 生物進化と紫外線



出展: 実験医学 online 生物の多様性と進化の驚異  
[https://www.yodosha.co.jp/jikkenigaku/mb\\_lecture\\_ex/vol2n1.html](https://www.yodosha.co.jp/jikkenigaku/mb_lecture_ex/vol2n1.html)

生物が誕生した当初、有機物のスープからエネルギーを嫌氣的(酸素を使わず)に取りだしていた生物はやがて光合成を行うようになり、酸素を放出しました。

酸素濃度が高くなると生物は酸素呼吸により効率的にエネルギーを取り出すことが出来るようになり、やがて大気上層でオゾンが作り出されると紫外線が遮蔽され、陸上に進出して爆発的な進化を遂げました。

# UV-A / UV-B による滅菌・不活化

私の知っている限りで UV-A/UV-B によるウイルス不活化のデータは、徳島大学の高橋先生のインフルエンザウイルスに対する論文のみです。この論文のデータ元に、太陽光線によるウイルスの不活化にどれぐらい時間がかかるかを計算してみました。

**UV-A のみの場合** (高橋先生は365nmのLEDで実験)

UV-A では 1/100 に減らすのに  $50\text{J}/\text{cm}^2$  が必要です。紫外線強度が一番強い場合でおおよそ  $2.5\text{mW}/\text{cm}^2$  ですので、 $50 / 2.5 \times 10^{-3} = 20,000\text{sec}$ 、**5.5時間ほど必要**です。12月では(日照時間を一日として) 1.4日ほどかかる計算になります。

**UV-B のみの場合** (高橋先生は310nmのLEDで実験)

UV-B では 1/100 に減らすのに、 $0.45\text{J}/\text{cm}^2$  が必要です(UV-A のおおよそ1/100)。7-8月では、 $25\text{kJ}/\text{m}^2/\text{day}$  となっており、0.18day, ピーク時であれば**1.6時間程度**で済みます。が、UV-B は UV-A よりも吸収されやすく冬場は 1/5 程度に大きく落ち、ほぼ丸一日必要、と言う計算になります。

## UV-Cによるウイルスの不活化

インフルエンザウイルスのデータを元によると、 $4.4\text{mJ}/\text{cm}^2$  で 1/100に (UV-B の 1/100の照射量)、 $6.6\text{mJ}/\text{cm}^2$  で  $99.9\% = 1/1,000$ 、 $8.8\text{mJ}/\text{cm}^2$  で 1/10,000 まで不活化が可能。

国産の殺菌灯及び器具を使用すると、8 W のランプではトータルの紫外線出力は 2.5 W 程度であり、計算からも実測からも、15 cmの距離ではおよそ  $0.9\text{mW}/\text{cm}^2$  となる。この紫外線強度では、およそ10秒で 1/10,000 までインフルエンザウイルスの不活化が可能。新型コロナウイルスについても既に査読の済んだ論文が出てきており、インフルエンザウイルスよりも不活化されやすいと考えられる。

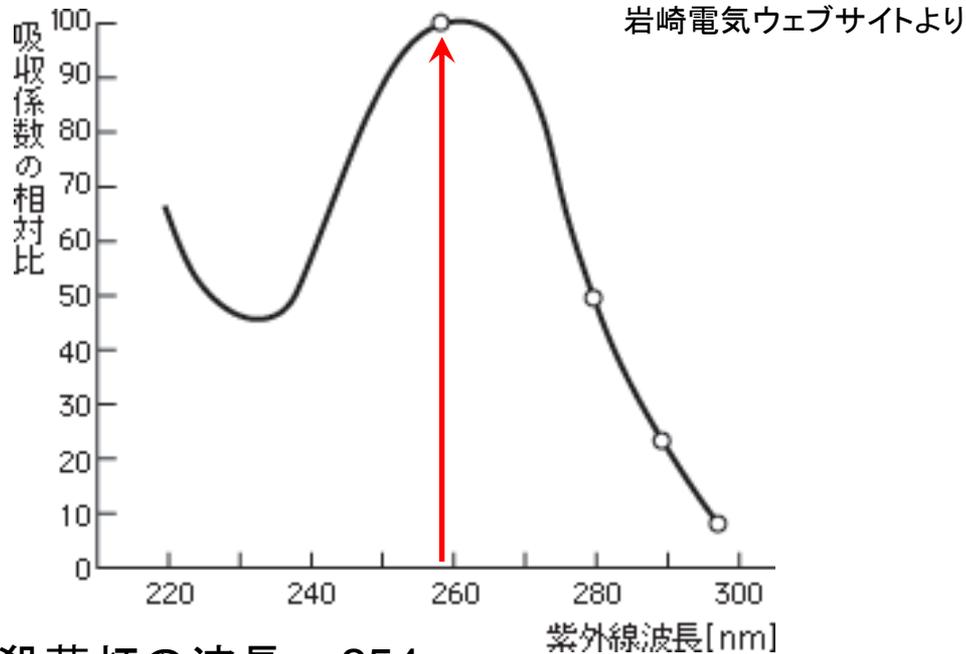
安全側に考え、 $10\text{mJ}/\text{cm}^2$  で 1/10,000 まで不活化出来るとして暫定的な指標とすることを提唱している。

なお、現在大阪府立大学りんくうキャンパスにあるBSL3 実験室により新型コロナウイルスを用いた実験が予定されている。新型コロナウイルスに対する 254 nm UV-C 殺菌灯による不活化影響を定量的に評価する予定である。また同様にUV-B, UV-A についても影響を評価する予定である。

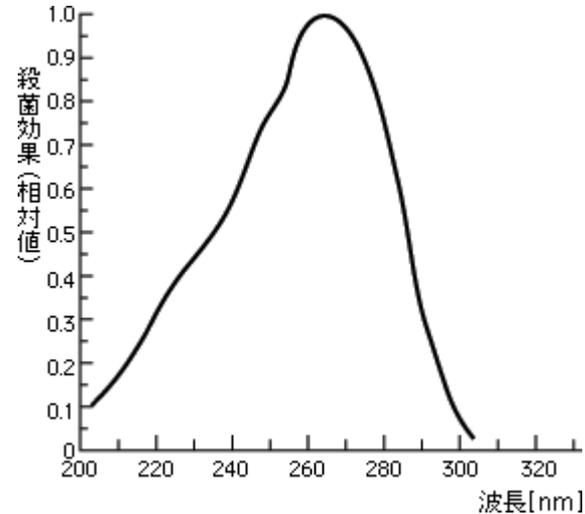
本研究では、このコロナウイルスを用いた実験と同一のセットアップで、大腸菌やバクテリオファージQ $\beta$  など既存のデータが得られている対象についてのUV-Cでの実験を行い、実験セットアップの妥当性を検証する。

# 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 $\mu$ m程度の厚さの角質層などで止まってしまう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 $\mu$ 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 $\mu$ 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。

# UV-Cによるウイルスの不活化

様々なデータソースによる紫外線による不活化に必要な照射量の比較。

紫外線は表面ごく近傍で吸収されるため、単位面積あたりのエネルギー束という単位で照射量を表わす。

特定の殺菌灯を規定距離での比較実験値

ソース	<a href="#">徳島大学 高橋先生論文</a>	<a href="#">岩崎電気</a>	<a href="#">スタンレー 電気</a>	<a href="#">Panasonic</a>	<a href="#">Wintec</a>
低減率	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	不明
単位	mJ/cm <sup>2</sup>	mJ/cm <sup>2</sup>	sec	mJ/cm <sup>2</sup>	mJ/cm <sup>2</sup>
大腸菌		5.4	4.7	10.8	6.6
緑膿菌		16.5	4.8	16.5	10.5
レジオネラ菌		7.5	3.3		7.6
インフルエンザ	75	6.6	6.3		8
ヒトコロナ			1.7		

280nm のUV-C LED  
を使用

コロナウイルスは3倍  
以上感受性が高い？

実験条件によって倍・半分  
程度値が変化する。

# 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。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	イタリア	ボストン大	スタンレー電気	宮崎大	広島大
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 <sup>2</sup> )	3.7	3.9	5.1	37.5	3.6
査読	査読中	査読中	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/cm<sup>2</sup> 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**と言えます。

査読が完了している280nmLED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/cm<sup>2</sup> (最新の論文では 60mJ/cm<sup>2</sup>) となっており、整合性が取れています。

# 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。

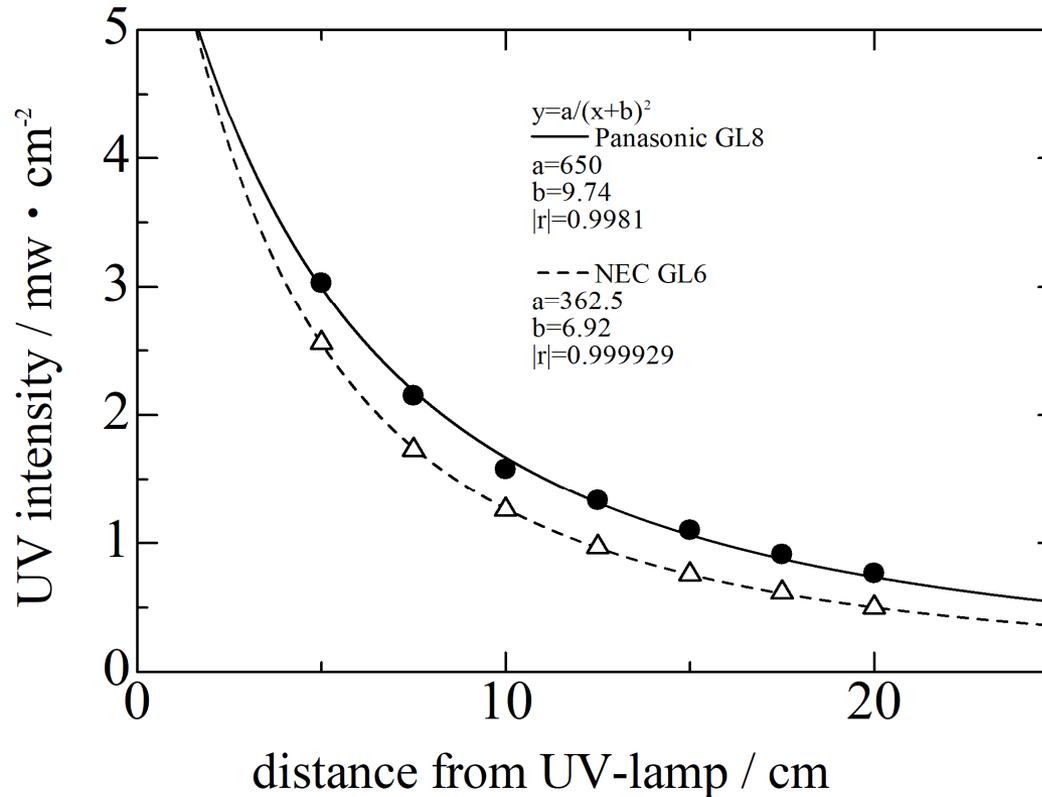
## 皮膚や目に強い炎症を起こし、人体に有害

波長が短くエネルギーの高いUV-Cは皮膚や目に強い影響を与えます。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。

## 殺菌灯の入手が困難

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。その一方でUV-C波長のLEDは出力が $100\text{mW}$ 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、代換できていません。

# 紫外線強度の評価



紫外線の強度は、放射線と全く同様に距離の二乗に反比例して減衰する。

ランプの出力のみでは照射量を決定することが出来ず、対象物との距離、時間を考慮して積分された照射量の評価が必要。

# 色々な物質に対する透過力

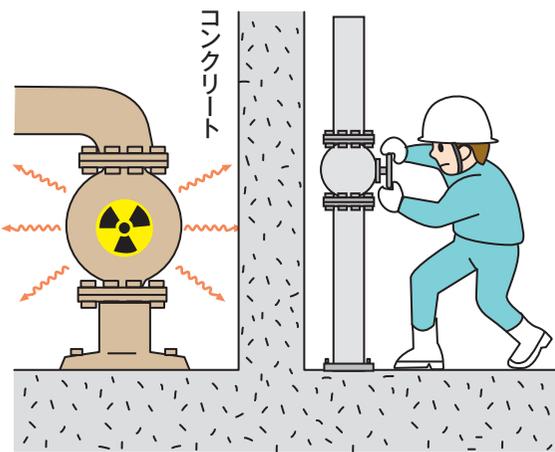
透明なプラスチックであってもほとんど紫外線は透過しない。ポリプロピレンは若干透過したため、マスクリーン4はきっちりと目張りをする必要があった。ガラスは非常に透過率が低いですが石英ガラスは透過率が高いため、殺菌灯に用いられている。通常は天然の水晶を溶解した熔融石英が使われるが、化学的に合成したSiO<sub>2</sub>で作成した合成石英はさらに透過率が高く、185nmの成分も一部透過してオゾンが発生させる。

遮蔽物	遮蔽前 I <sub>0</sub>	遮蔽後 I	透過率
	mW/cm <sup>2</sup>	mW/cm <sup>2</sup>	%
メガネ(プラレンズ)	1.10	0.000	0.0
ペットボトル横置き(空)	1.10	0.000	0.0
ポリスチレン(1.4mm厚コレクションケース)	1.10	0.000	0.0
ポリプロピレン(1.5mm厚コンテナケース)	1.11	0.288	25.9
コンテナ遮蔽用アルミシート	1.12	0.003	0.3
サージカルマスク(平面)	1.10	0.080	7.3
サージカルマスク(プリーツ開いて)	1.10	0.140	12.7
塩ビラップ 6μm厚 1枚	1.11	0.952	85.8
塩ビラップ 6μm厚 2枚	1.11	0.900	81.1
塩ビラップ 6μm厚 4枚	1.11	0.660	59.5
ニトリル手袋(モノタロウ、青)生地1枚	1.70	0.000	0.0
クアラテック手袋(アズワン)生地1枚	1.70	0.000	0.0
コピー用紙(再生紙)	0.70	0.000	0.0
コピー用紙(高白色)	0.70	0.000	0.0

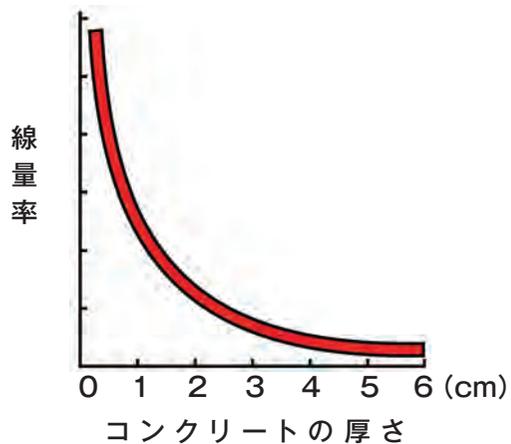
# 放射線防護の基本

## 1. 遮へいによる防護

(線量率) = 遮へい体が厚い程低下

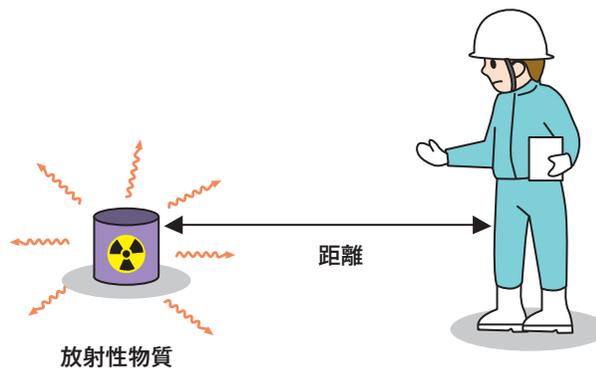


(mSv/h)

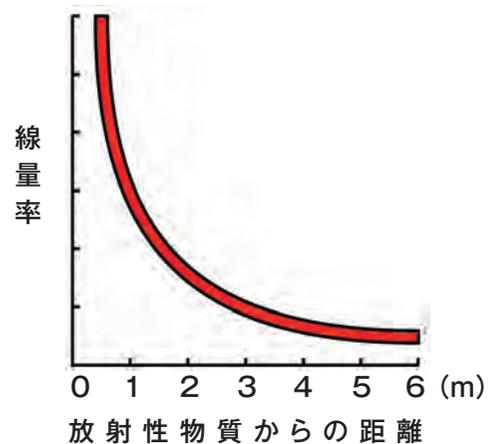


## 2. 距離による防護

(線量率) = 距離の二乗に反比例

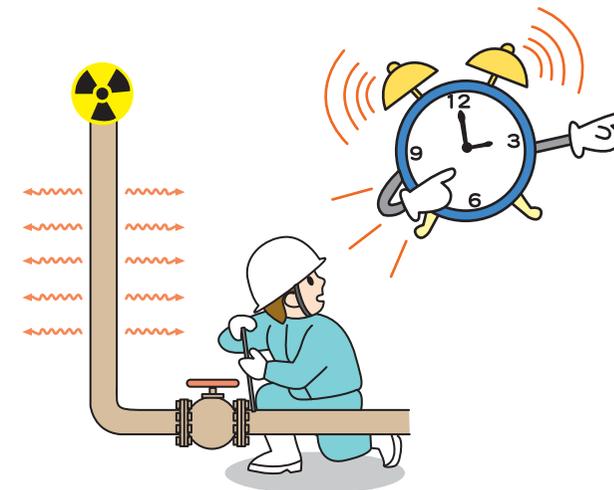


(mSv/h)

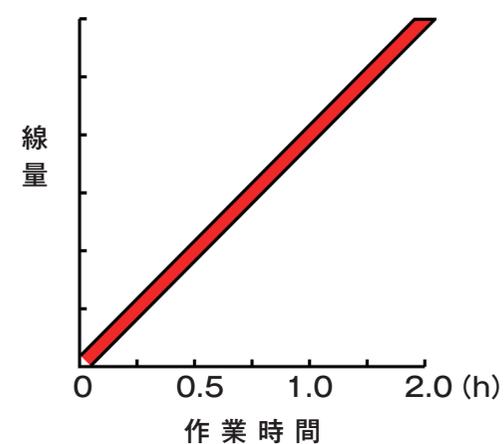


## 3. 時間による防護

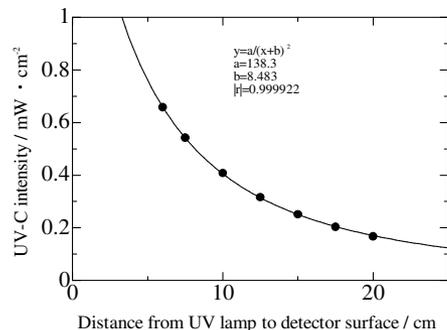
(線量) = (作業場所の線量率) × (作業時間)



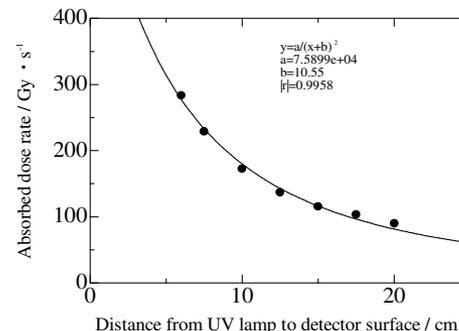
(mSv)



# ラジオクロミックフィルムによる積算照度の測定



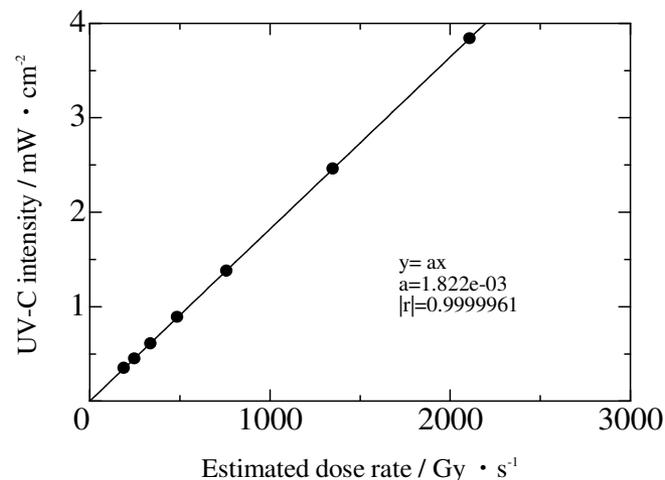
紫外線強度計で測定した、光源から検出器表面までの距離と紫外線強度の相関。



ラジオクロミック線量計で測定した、光源からフィルムまでの距離と、吸収線量として評価された値の相関。

γ線、電子線などの放射線計測で用いられるラジオクロミックフィルムは、吸収線量に応じて吸光度が変化し、吸光度計により吸収線量が評価出来る。校正された紫外線強度計と、ラジオクロミックフィルムにより評価された吸収線量率の距離依存性の相関から、吸収線量  $I$  (kGy) と、紫外線の積算照度  $D$  (mJ/cm<sup>2</sup>) の間で  $D = 1.8 I$  という簡単な校正式を導いた。透過試験から、45 μmフィルム内で完全にUV-Cは吸収されており、18 μmまでの範囲で均等に吸収されたとするとこの校正式が説明出来る。

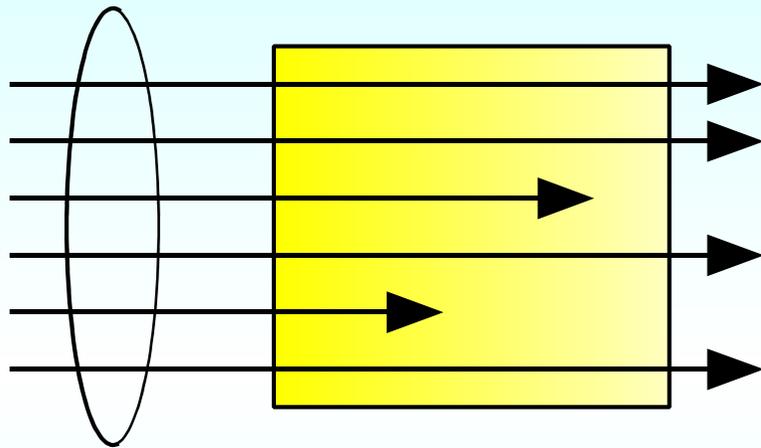
この薄く小さなフィルムにより、立体形状の物体表面への積算照度を実験的に評価可能となる。



ラジオクロミック線量計で求めた吸収線量率と紫外線強度の相関。距離依存性のオフセットを排除して評価する必要がある点に注意。

# 「照射量」の意味の違い

強透過性放射線

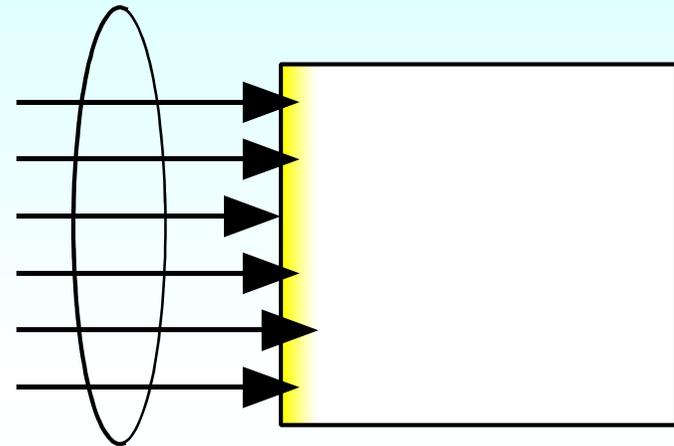


高エネルギーガンマ線などの場合透過力が高く、ほぼ均等にエネルギーを与える。

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」として取扱う。

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  $\mu m$  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( $mJ/cm^2$ )」。

# 紫外線の吸収線量

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  $\text{J/m}^2$  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  $1\text{g/cm}^3$  の物質  $20\ \mu\text{m}$  の層に均一に吸収されたとすると、 $1\text{cm}^2$  あたりの質量は、 $20 \times 10^{-4}\ \text{g}$  で、積算光量を  $10\text{mJ/cm}^2$  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。

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、 $25\text{kGy}$  程度(医療器具などに対しての場合)なので、かなり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。

## 吸収線量をよく考えてみる

$$\text{吸収線量 (Gy)} = \frac{\text{吸収された放射線のエネルギー量 (J)}}{\text{物質の質量 (kg)}}$$

### 分子

荷電粒子の場合はそのまま、光子の場合はエネルギーが光電子(荷電粒子)となりその運動エネルギーが吸収される。高エネルギーでは再び輻射により系から出て行く寄与がある。吸収する物質が空気なのか、水なのか、鉛なのかで異なり、また入射する光子のエネルギーによって異なる。

### 分母

高エネルギーの光子では物質に均等にエネルギーを与えるが、荷電粒子や低エネルギーの光子では不均一なエネルギー付与をする。このとき、「対象物」をどの範囲で取るかによって吸収線量は異なる。等価線量を考える場合は、「臓器全体」で考える。

# マスククリーン4



マスクが極度に不足していた時期に、医療機関で安全にマスクを再利用するために開発したのがマスククリーン4。殺菌灯をアルミシート貼りした箱に入れただけのものであるが、当時殺菌灯用の蛍光灯器具の入手もままならなかった。大量に輸入した中華製の製品は極めて品質が不安定であったが、ランプを国産の物に変えることで概ね安定した値を示すことが判明。さらに、ラジオクロミック線量計などを用いて、照射強度(線量率)を評価、10mJ/cm<sup>2</sup>照射するのに必要な時間を安全側に評価して保証した(マスククリーン4では20秒)



0.198	0.350	0.376	0.194
0.552		0.340	
0.454	0.860	0.688	0.268
0.420	0.890	0.604	0.334
0.470		0.492	
0.194	0.184	0.240	0.178

単位はmW/cm<sup>2</sup>

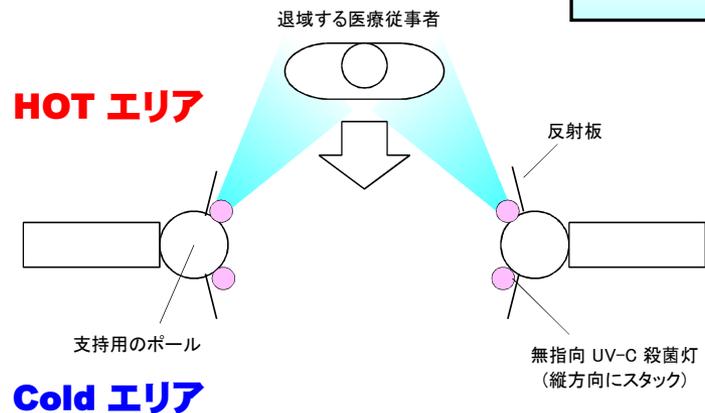
底面での測定。



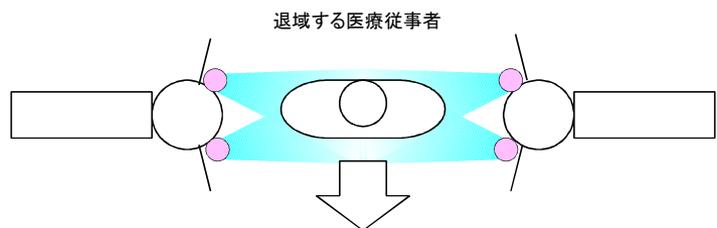
0.154	0.274	0.396	0.200
0.718		0.368	
0.414	0.926	0.492	0.272
0.312	0.810	0.814	0.328
0.502		0.532	
0.236	0.400	0.480	0.384

複雑形状のマスク表面での測定。

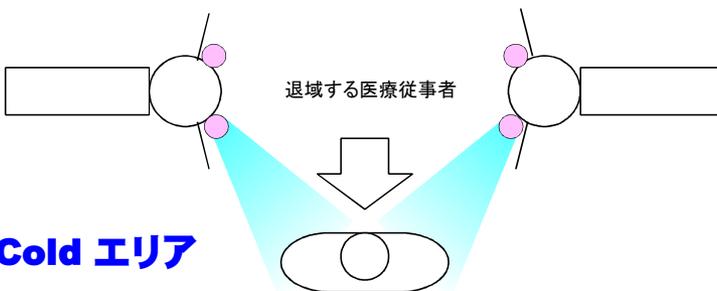
# 退域用UV-Cシャワーゲート



**Cold エリア**



**Cold エリア**



殺菌灯を多数配置することで、退域ゲートを通過するだけで全身の防護着全体に十分な量のUV-Cを照射して、脱装を行う時点での感染リスクを低減する。

移動しながら照射を行うため、距離が刻々と変化し、デジタル照度計などでは積算照射量の評価が困難。さらに立体形状のタイベックスーツ表面での紫外線量評価が必要。

足の裏については塩素消毒マット、手指については別途手先専用の不活化BOXを使用することで、Coldエリアを極力汚染しないようにする。脱衣エリアは使用後にタイマー式のUV-Cランプ及び可視光応答光触媒により安全性を確保。

# 手先用不活化BOX



マグネットでスチール製ロッカーなどに貼付け、下から手を入れて両面を同時に不活化。ランプから手指の距離は3cm以下であり、現在使用している器具・ランプの組み合わせ(5 cm で  $1.5 \text{ mW/cm}^2$  以上を保証)では、**5秒以下**で1/10,000まで不活化が可能。手を上げていくと手首部分の不活化も可能。

フットスイッチにより手を触れずに ON/OFF を行う。



# 市販されている様々な紫外線グッズ(1)

7月頃にイベント関係の音響担当大手S社から担当者が訪問してマイクなどの紫外線滅菌について相談を受け、いくつかの製品の評価を行った。その中で、市販されているLEDを使った製品は非常に照射強度が弱かったり(マスクリーンスの1/100程度)、場合によってはUV-Aも含めて紫外線が検出限界(0.001 mW/cm<sup>2</sup>) 以下となる製品もあつたりするなど、極めて悪質であることが明らかになった。

そもそもの程度照射すれば良いのかというガイドラインが存在しない事も問題。

(ケニス SDカード式紫外線強度計 YK-37UVSD で測定)



この製品は、BOX 底面中央では全く紫外線を検出できませんでした。LED にベタ付けで測定すると、UV-C 3mW/cm<sup>2</sup> 程度が測定されるが、実際にBOXに物品を入れて謳い文句の通り表面のウイルスを99.9% 不活化するとしたら、7.5mJ/cm<sup>2</sup> 必要であり、仮に0.001 mW/cm<sup>2</sup> としても7500秒ほどかかり、非現実的。



ウェブサイトでの謳い文句

距離5cm での照射強度

- |   |                         |
|---|-------------------------|
| ① 僅か10分間 殺菌率は99.99%に達します。 →                   | 検出限界以下                  |
| ② 10秒即効 99.9%細菌消滅(距離の記載無し) →                  | 0.03 mW/cm <sup>2</sup> |
| ③ 10秒以内に 99.99%の滅菌率(距離の記載無し) →                | 0.02 mW/cm <sup>2</sup> |
| ④ 10秒快速殺菌、99%細菌消滅、推奨距離は2cm →                  | 0.04 mW/cm <sup>2</sup> |
| ⑤ 「紫外線は、99%殺菌機能を科学的に証明されています。」<br>距離、時間記載無し → | 検出限界以下                  |



④の製品は「推奨距離は2cmで、照射範囲は直径4cmで、最大距離は5cmを超えないでください、5cmの場合、照射範囲は直径10cmです」と謳っていて、比較的良心的だが実測とは乖離が有り、至近距離で長時間照射し続けるのは非現実的。

## 市販されている様々な紫外線グッズ(2)



ウェブサイトでの謳い文句

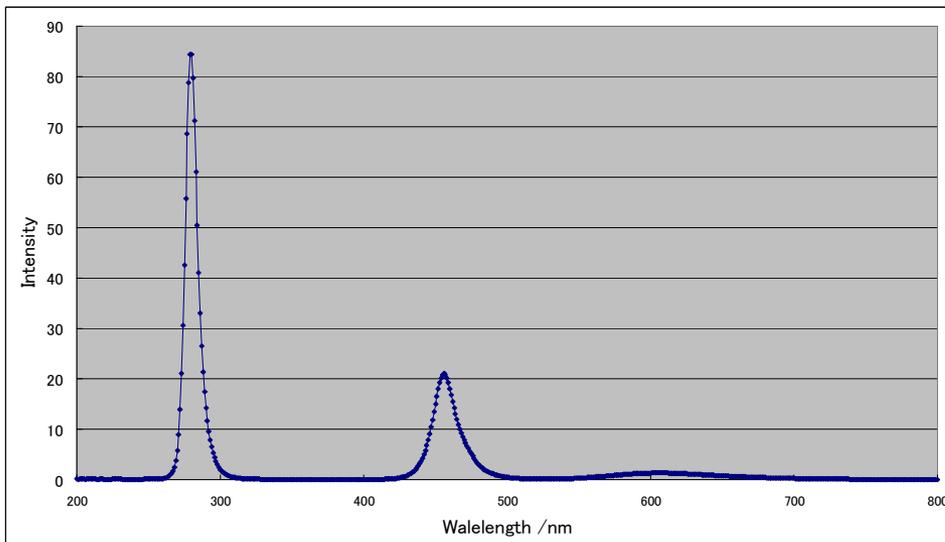
距離5cm での照度

④ 10秒快速殺菌、99%細菌消滅、推奨距離は2cm →  $0.04 \text{ mW/cm}^2$   
(ケニス SDカード式紫外線強度計 YK-37UVSD で測定)

そもそもの紫外線照度が低い事に加えて、放出される紫外線波長は殺菌灯の254nmよりも長い、280nm程度の場合がほとんど。

インフルエンザウイルス、さらに新型コロナウイルスに於いて、280nmの紫外線の効果は、殺菌灯の場合の1/10程度と評価されており、さらに大幅に効果が小さい製品と言える。

UV のピーク波長は 280nm



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。ウイルスに対しては、徳島大学高橋先生などのグループが、 $R_{AE}$  と言う指標を提唱。

USHIO USR45 で測定

## 市販されている様々な紫外線グッズ(3)

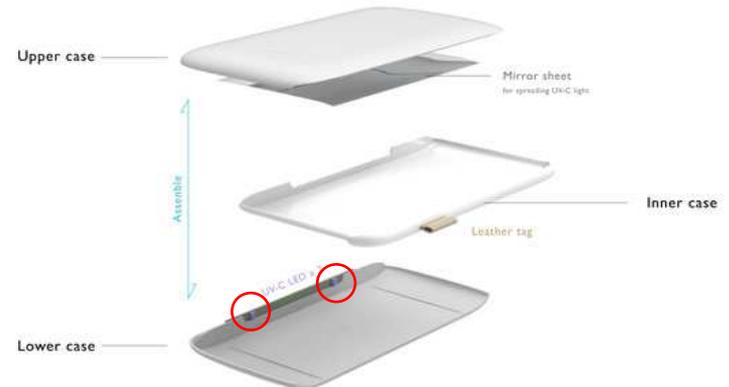


蛍光管式の物ならば大丈夫かという、左の商品は蛍光管を謳っているがユーザーのレビューによると実測値がゼロとのこと。サイズの的にGL8 だと思われるのでランプを交換すれば使えるかも知れないが、写真はどう見ても蛍光管では無く、仮にちゃんと出ていたとすると非常に危険な持ち方をしている。



左の写真のように、衣類などを詰め込んだ状態で殺菌している例も見受けられるが、UV-Cは透過率が低いため表面近傍しか殺菌されず、ほとんど意味が無い。

右の写真2枚はマスク用の薄型の除菌器だが、上の製品は中央部に2灯、下の製品はケース側面に2灯のLEDを配しているが、どう見ても全面に紫外線が当たらない構造になっている。また、「0.5Wの超強力UV-C LED」など、LEDの性能を消費電力で表記しているようである。



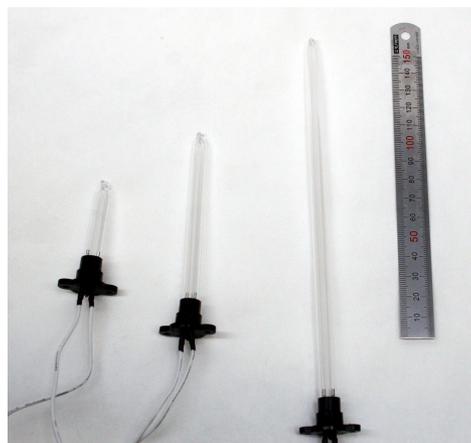
## 市販されている様々な紫外線グッズ(4)



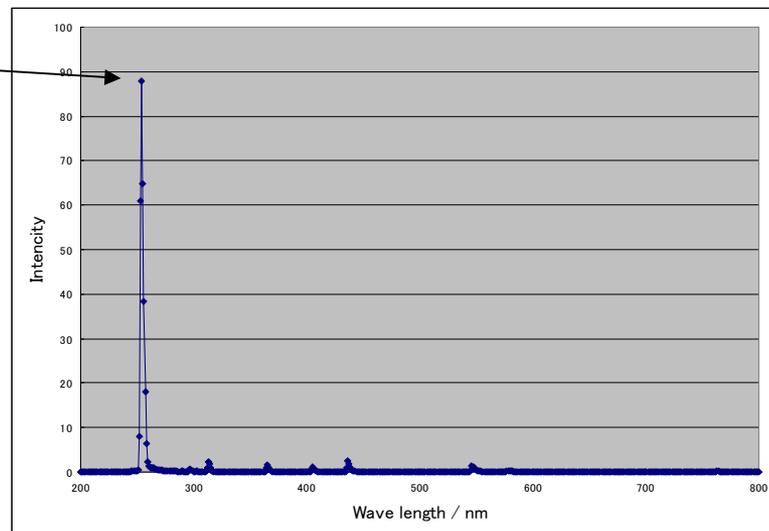
この製品はCCFL(冷陰極管)を使用した製品であり、熱陰極を利用した蛍光灯同様に水銀からの254nm殺菌線を出している。蛍光灯よりも水銀使用量が少ないとの事で現在でも製造が続けられている。12V電源などでインバータ回路を駆動するため、バッテリーでの利用も現実的で、左の写真のようなポータブルな製品も売られている(CCFL管の部分が100mm)。

5cmの距離でランプと平行な面に  $0.5\text{mW}/\text{cm}^2$  の照度があり、LEDと比べると出力が高く十分実用的。逆に、人体に当たると危険であるため、タイマーをセットして10秒後に点灯、15分後に自動消灯するようになっている。

ピークは 254nm



50mm, 100mm, 200mm  
のランプ長さの製品が  
販売されている。水銀  
使用量が少なく、規制  
対象外で現在でも生産  
されている。



## 深紫外線と遠紫外線

ウシオ電機のCare222 が話題になった当初、何故か私の所に取材が殺到しており、ウシオ電機側に情報照会しても返答が無かったため、基本的な知識から、「260nm波長域の通常のUV-C殺菌灯よりも相互作用が大きい分透過力が低く、**皮膚表面の角質層で止まるため安全**」と説明していたが、後日の打ち合わせでそれで合っている、とのことで安心している。

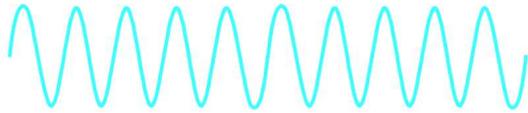
このCare222を説明する際にテレビなどで使われている「遠紫外線C波」という用語だが、遠紫外線とUV-C がごっちゃになったような言葉で、余り一般的な用語では無い。遠紫外線については、ウシオ電機のサイトによると、空気による吸収が始まる波長域から軟X線波長域までの紫外線のこと、波長範囲についてはさまざまな用例があるが、10nmから200～220nmの間までの波長域とすることが多い、とのこと。今回の222nmの紫外線を指す場合は単純に**遠紫外線**が良い。(200nm以下になると空気中で吸収されてしまい真空中で無いと使えないため、真空紫外と呼ばれる。)

その一方で、「波長250、300、350nm以下の紫外放射を深紫外放射またはディープUV (Deep-UV、DUV)と呼ぶこともある。この言葉は、もともとIBMのDr.Linが使った言葉で、彼の概念では200～300nmの波長域であった。」とのことで、「**深紫外線**」と言った場合は注意が必要。

実際にテレビ朝日でとある製品に対して「**深紫外線・遠紫外線とも言われますが、波長の短い部分を使うので人に対しても害が少なく、LEDでも出せるそうで、これから色々な場面で使われる可能性があります。**」とコメントしている大学の先生が居たが一般的な殺菌灯波長の物であり、色々な意味で間違っている。**深紫外線と遠紫外線を混同すると、危険**であるため、注意喚起が望まれる。

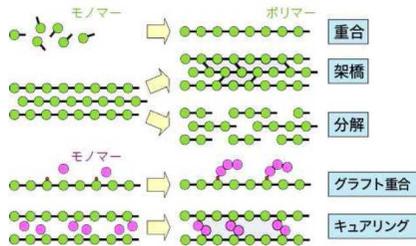
# エネルギー 大

## ガンマ線、エックス線



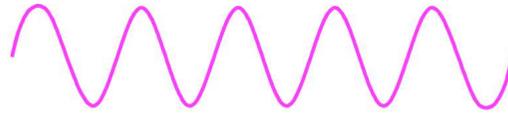
**電離作用**

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。

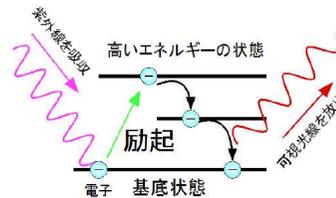
## 紫外線



< 太陽光線の種類 >

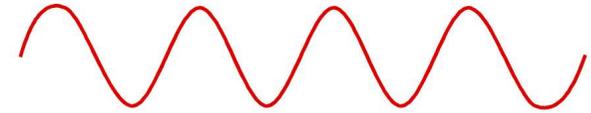
200	280	320	400	760	nm
UVC	UVB	UVA	可視光線	赤外線	
短波長紫外線	中波長紫外線	長波長紫外線	可視光線	赤外線	
殺菌作用	皮膚炎の原因	皮膚老化の原因	目覚まし	暖房	

1nm (ナノメートル)=100万分の1mm



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



CO<sub>2</sub> → O<sub>2</sub>  
H<sub>2</sub>O

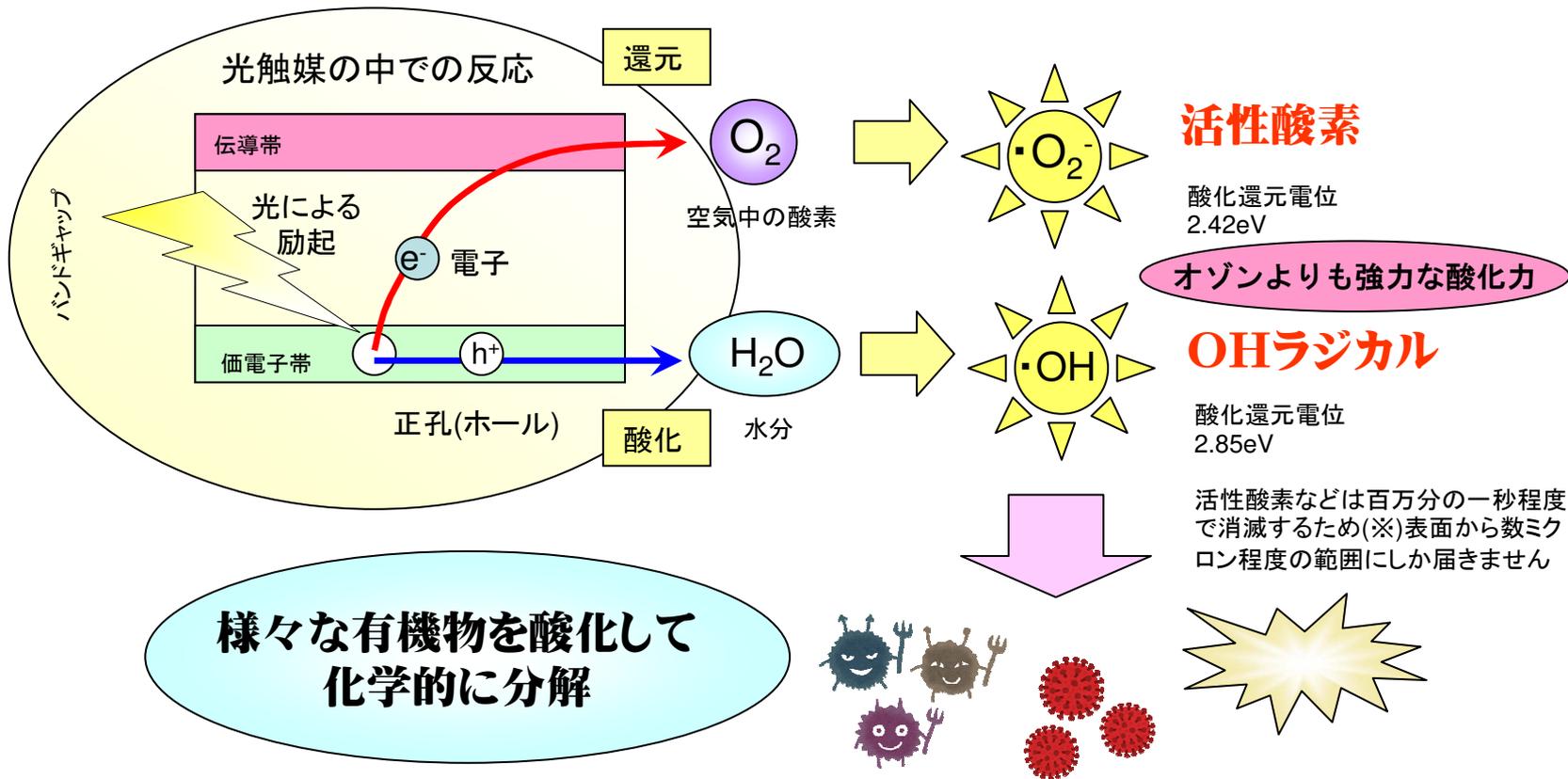
目で見える光、可視光線は波長が長くエネルギーの低い赤から、波長が短くエネルギーの高い紫までの間で、虹の七色のように見え方が異なります。光も電磁波の一種ですから少し電子を励起して、写真フィルムを感光させたり、太陽光発電を行ったり、植物の葉緑体の中で光合成を行うなどのパワーを持っています。波長(波の長さ)と位相(波の位置)の揃った光のことを、レーザー光線と言い、強度(波の高さ)がとても強く、遠くまでまっすぐ飛ぶなどの性質があります。

- ・光(Photon)には、目に見える光(可視光)の他に、目に見えない赤外線、紫外線、さらにはX線やガンマ線などの、様々なエネルギーの物があります。それぞれが、様々な相互作用で身の回りの役に立っています。
- ・赤外線はエネルギーは低いですが熱を運ぶ働きをし、紫外線やガンマ線などエネルギーの高い光は殺菌に使われたり、化学合成などに使われています。
- ・目に見える光、可視光も、植物の光合成や太陽電池による発電など、とても大きな役割を果たしています。
- ・1967年に本多・藤嶋効果によって水が酸素と水素に分解することが発見されて以降、日本発の技術して「光触媒」が注目され、開発が続けられています。
- ・光触媒は半導体の一種で、光が当たることで小さな太陽電池のように電気エネルギーが発生します。そのエネルギーを電流として取り出すのではなく、小さな粒子の表面でスーパーオキサイドアニオンやOHラジカルなどの活性酸素を作り出し、非常に強い酸化力によって有機物を水と二酸化炭素にまで完全に分解します。ウイルスや菌も不活化、殺菌され分解され、これまで効果が無かったという報告は成されていません。
- ・二酸化チタンを使用した光触媒では、既に新型コロナウイルスに対する効果が実証されています。



光(Photon)  
目に見える可視光線

光触媒粒子

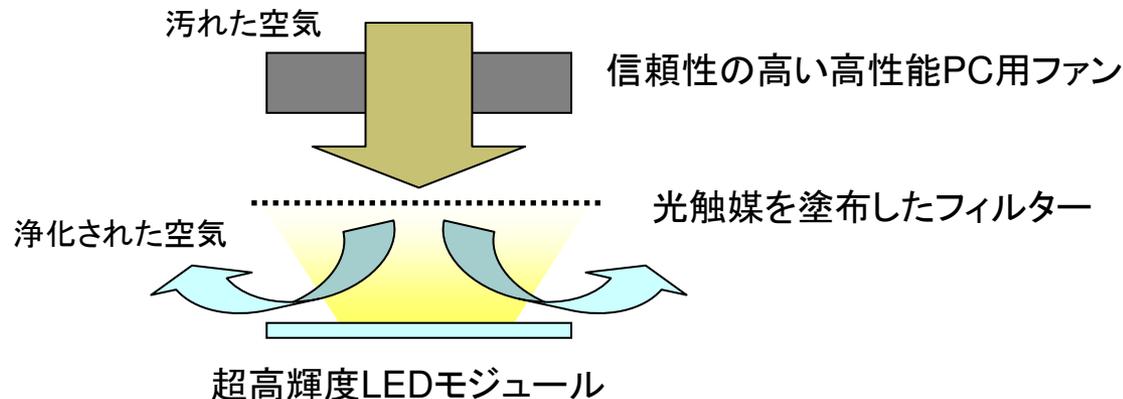


最終的には水と二酸化炭素にまで分解される(完全分解)。

※ 一瞬で大量の有機物を分解するわけではありません

# 光触媒の応用

- ・光触媒の一番分かりやすい応用例が**脱臭**です。空気中の様々な臭いの元になる物質や、ホルムアルデヒドなどのシックハウス症候群の元になる有害物質などを、酸化分解してしまいます。光の当たるカーテンなどに塗布すると効果的です。部屋干しの臭いの付いたタオルなども、繊維の奥まで脱臭されます。
- ・ドアノブやつり革、机などの物品の表面や、マスクや上着に塗布する事で付着したウイルスを徐々に不活化する事が出来るため、接触感染を抑制することが出来ます。
- ・光触媒自体は反応の前後で変化しないため、粒子が洗い流されたりしない限り**半永久的に使用出来ます**。
- ・フィルターに塗布して強い光を当て、そこに空気を流し込むことで空気清浄機を作ることが出来ます。活性酸素は寿命がマイクロ秒オーダーで、一瞬で反応して消滅するため、活性酸素がまき散らされることはありません。

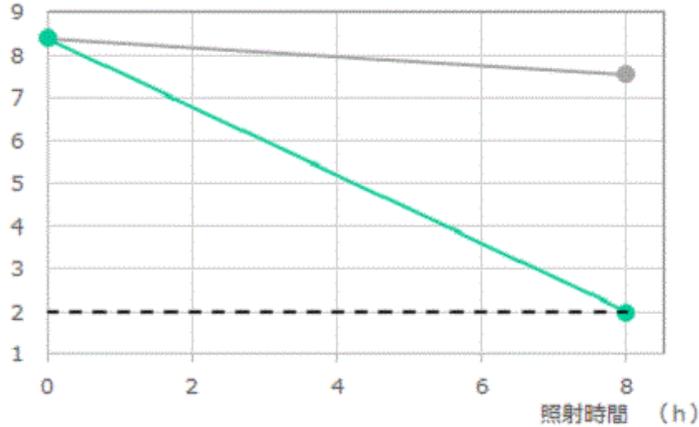


ひかりクリーナー

# 可視光応答光触媒によるウイルスの不活化

東芝ルネキャットウェブサイトより

ウイルス力価 (log<sub>10</sub>PFU/試験片)



●—ルネキャット未使用 ●—ルネキャット ---検出限界値

## A型インフルエンザウイルス(H1N1)

抗ウイルス性試験方法	フィルム密着法 (JIS R 1756:2013を参考に実施)
光源	白色蛍光灯 2000lx (400nmの紫外光はフィルターでカット)
作用時間	8h
試料塗布量	5mg/2.5 × 5cm

試験機関：北里環境科学センター

光触媒の塗布量はひかりクリーナーの標準仕様で 727mg/m<sup>2</sup>、2.5x5cm に換算すると0.91mgだが、試作している高性能フィルターでは27.7g/m<sup>2</sup> で、2.5x5cm に換算すると34.6mgにもなる。

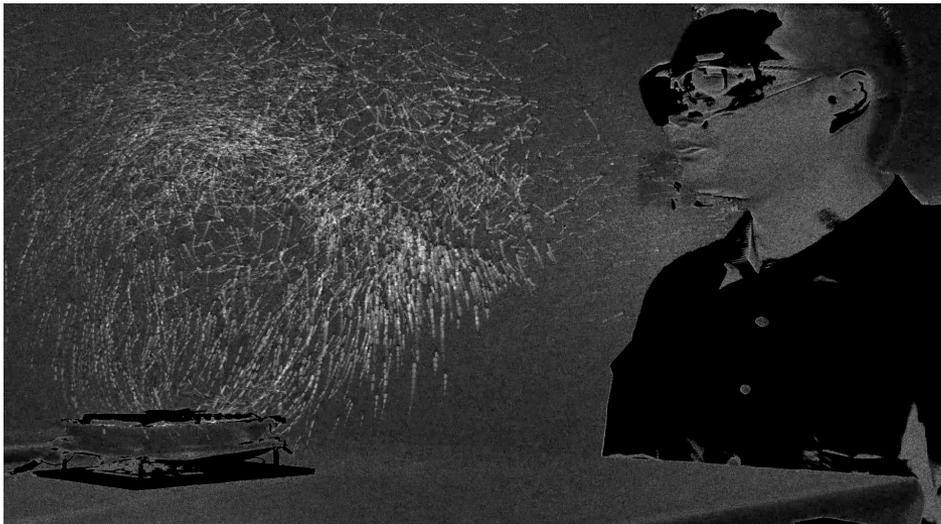
光の強度も全く異なり、ひかりクリーナーでは 68,500 lux にもなる。このため、ひかりクリーナーでは上記の条件よりも速い速度で不活化すると考えられる。

## フィルターによる飛沫の捕集

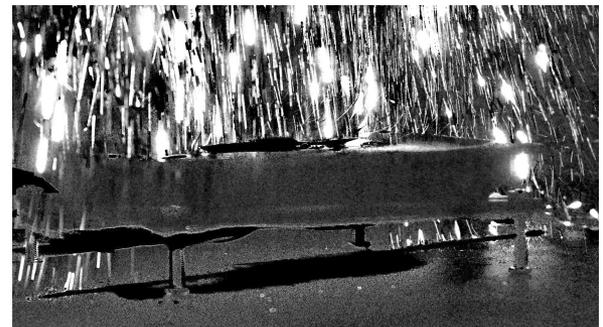


空気中の微粒子を可視化する特殊動画撮影を実施しました。

1m 程度の範囲に於いて、口から発声に伴って出た飛沫や、スプレーからの模擬飛沫、エアロゾルを模した電子タバコのベーパーなどが吸い込まれていき、なおかつフィルターによってマスクと同じように止められていることが確認出来るかと思っています。



発声に伴う飛沫の撮影に際しては、「ブーブー」と言う破裂音により意図的に大量の飛沫を出しています。



## ひかりクリーナーでの有機色素分解実験

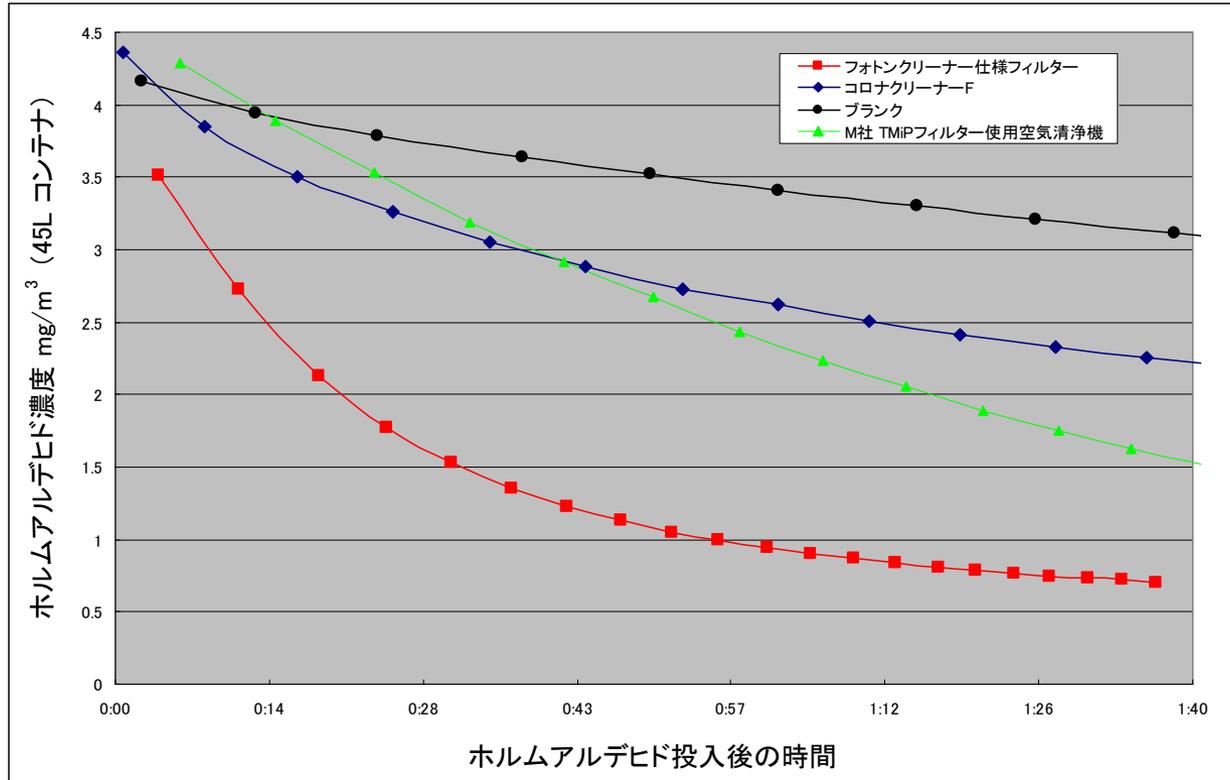
・メチレンブルーという有機色素を用いて、ひかりクリーナーの光源と光触媒フィルターを用いての実験では、 $30\mu\text{g}$ 程度の有機色素が3時間程度で分解されていることが確認され、光の量によって分解の程度が異なることも確認できました。



・コロナウイルスは直径  $100\text{nm}$  程度の大きさで、密度をざっくりと  $1\text{g}/\text{cm}^3$  とすると、 $5.2 \times 10^{-7}\mu\text{g}$  しかないため、単純に重さで比較すると上記と同じ時間で1億個程度のウイルスを分解出来ることになります。不活化するだけであればさらに短時間で済むはずですが、もちろん、物質によって酸化のされやすさなども異なるため単純に色素とウイルスを比較することは出来ませんが、桁(オーダー)レベルで考えて比較を行います。

・くしゃみ1回でまき散らされるウイルスは200万個程度で、通常の会話などでエアロゾルとして空気中を漂うウイルスの数はずっと少なく、マスクを着用していればさらに少なくなります。残念ながらどの程度の数を摂取すると感染するのかというデータが見当たらないのですが、ノロウイルスはわずか100個程度で感染するとして恐れられているため、それよりずっと沢山取込まないと感染しないと思われれます。

# ホルムアルデヒド分解実験



45L サイズの密閉コンテナを使用して、有機ガスの一種であるホルムアルデヒド (HCHO)濃度の変化をホルムアルデメータ htV-m を使用して測定しました。

簡易な構造かつ低価格で、教育現場などでの自作による普及を検討しているひかりクリナーでも確実な分解性能が確認されると共に、さらに高濃度の光触媒を使用したフィルターを用いた試作機は、市販の空気清浄機をはるかに凌ぐ性能を発揮しました。現在、さらに高性能のフィルターを開発中です。

## ホルムアルデヒド分解量

光触媒による分解反応は、対象物の量に依存する、分解物の濃度律速になっていますので、単位時間あたりの分解量は簡単には出せませんが、今回の標準機の結果を考えると、 $4.3\text{mg}/\text{m}^3$  から1時間で  $2.6\text{mg}/\text{m}^3$  まで下がりました。ブランクでも  $0.7\text{mg}/\text{m}^3$  程度下がっていますから、正味  $1\text{mg}/\text{m}^3$  の減少です。テナサイズは45L ですから、絶対量に換算すると  $45\ \mu\text{g}$  が分解された計算になります。

コロナウイルスを  $5.2 \times 10^{-7}\ \mu\text{g}$  とすると、 $8.7 \times 10^7$  (8700万)個に相当します。もちろん、ホルムアルデヒドガスとウイルスは分解のされ方が違います。ホルムアルデヒドは還元性を示し、酸化されやすい化合物ですので、メチレンブルーの時よりも大きい数字になっています。

フォトンクリーナー用の特別仕様のフィルターは、さらに倍近い量を分解しており、紫外線と二酸化チタンを使用した高性能フィルターTMiPを使用したM社の小型空気清浄機をはるかに凌ぐ性能を示しています。

実際のウイルスを噴霧しての実験は極めてハードルが高く、現在BSL3実験室が様々な研究で全く余裕が無い現在、検証は当分の間不可能ですが、光触媒自体が様々なウイルスを不活化するデータは各社から公開されており、酸化分解というウイルスの微妙な違いに関わらない反応では、それらのデータが参考になります(特に、インフルエンザウイルスは、エンベロープ付きのRNA-鎖ウイルスと構造が大変似ているため、良い指標となります)。