

**福井県高教研理科部会 物理化学分科会**  
**2021年 2月 16日 嶺南地区オンライン学習会**

# **教育現場に於ける放射線安全管理と コロナウイルスへの工学的対抗策**

**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://anticovid19.starfree.jp/>



# 先生、ご存じですか？

理科の授業で使っているクルックス管からは  
高い強度のX線が漏洩している場合があります！



現行の教科書にも記載されているクルックス管は、製品によっては 15cmの距離で、 $70\mu\text{m}$ 線量当量率が  $200\text{mSv/h}$  にも達する高い線量率の低エネルギーX線が放出されている場合があります。知らないで近付いたりすると非常に危険です。

・20keV程度とエネルギーが低いので普通のサーベイメーターは役に立ちません

**でも、心配はいりません！**

・ごく基本的な誘導コイルの設定と、距離を取って時間を短くするなどの簡単な運用法の改善で、劇的に線量を小さくすることができます。

本当に大丈夫なのか心配・・・

暫定ガイドラインで本当に問題無いか、実証試験を行っています。ガラスバッジを用いた簡単な測定を各学校で行うことができます。詳しくはホームページをご覧ください ↓



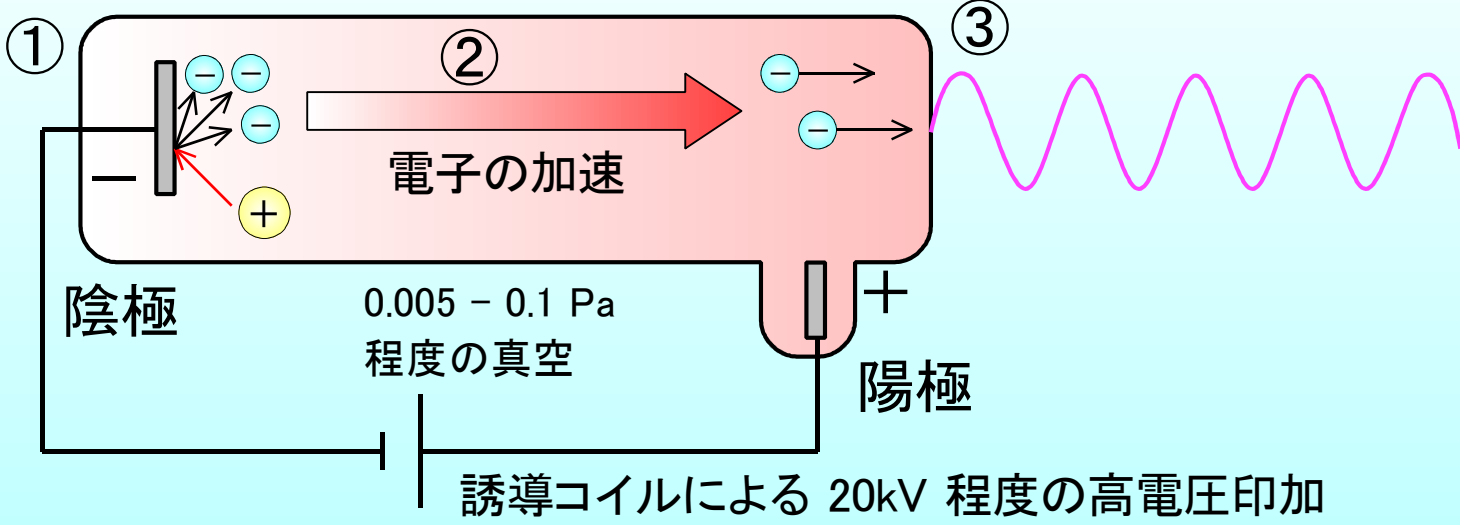
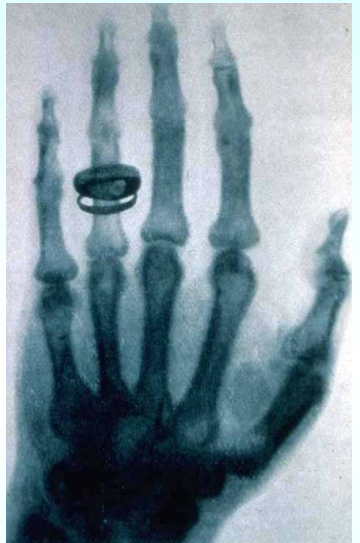
# クルックス管とは？

Wilhelm Konrad Rontgen  
1895, 真空放電管の研究中にX線を発見  
1901, 第一回ノーベル物理学賞を受賞

その後の放射線研究の先駆けとなった歴史的に極めて重要な装置



William Crookes



- ① 管内の気体が電離されて出来た + のイオンが一極に引きつけられて電子を叩き出す (二次電子放出)
- ② 印加電圧に従ったエネルギーに加速される
- ③ ガラス管壁に電子がぶつかり制動放射X線を放出する。20keV程度の電子はガラス管を透過できず、特性X線もエネルギーが低いので遮蔽される。

# 本発表の背景

## 2017年3月に改正告示が公示された新・中学校学習指導要領

p65 (3) 電流とその利用 ア(ア)電流 ○エ 静電気と電流

「異なる物質同士をこすり合わせると静電気が起こり、帯電した物体間では空間を隔てて力が働くこと及び静電気と電流には関係があることを見いだして理解すること。」

↓「内容の取扱」

p71 アの(ア)の ○エ については、電流が電子の流れに関係していることを扱うこと。また、**真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用にも触れること。**

H31 教科書検定  
H33 全面実施

## 2017年6月に告示された中学校学習指導要領解説 理科編

雷も静電気の放電現象の一種であることを取り上げ、高電圧発生装置（誘導コイルなど）の放電や**クルックス管などの真空放電の観察**から電子の存在を理解させ、電子の流れが電流に関係していることを理解させる。

その際、真空放電と関連させて**X線にも触れる**とともに、**X線と同じように透過性などの性質をもつ放射線が存在し、医療や製造業などで利用されていることにも触れる。**

放射線に関する記述は2008年3月に公布された旧・中学校学習指導要領には記載がなかった。

クルックス管に関しては2008年版の学習指導要領解説にも記載されていた。

**クルックス管を用いた実験を行う際の安全評価が必要**

# 現行の中学理科教科書に於けるクルックス管の取扱

出版社	啓林館	東京書籍	大日本図書	学校図書	教育出版
教科書					
クルックス管自体の取扱い	○	○	○	○	○
クルックス管に関連させた放射線に関する記述	2年	2年	3年	3年	×
指導書					
放射線に関する注意	○	○	○	×	未確認

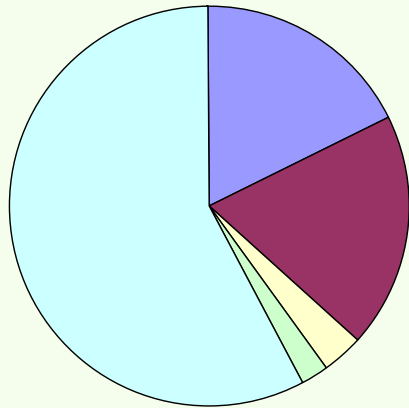
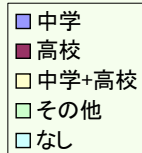
## 指導書

- ・啓林館: 放射線に関する注意あり。2012年版では、放電管から1mも離れれば漏洩X線の影響はほとんどないとしているが、2016年版では「X線の影響に配慮し、**演示は行わず**、教科書の写真や図のみでの説明にとどめる」と保守的。
- ・東京書籍: 放射線に関する注意あり。誘導コイルの設定(電極間隔は4cm以下)、1m以上はなれた場所から観察をする、観察時間は10秒以下にするなど、**具体的な運用方針が記載**されている。
- ・大日本図書: 放射線に関する注意あり。生徒を1m以内に近づけない。
- ・学校図書: 放射線に関する記述なし(誘導コイルの説明は非常に詳細)
- ・教育出版: 未確認

# 現在の学生に対する授業の実態調査

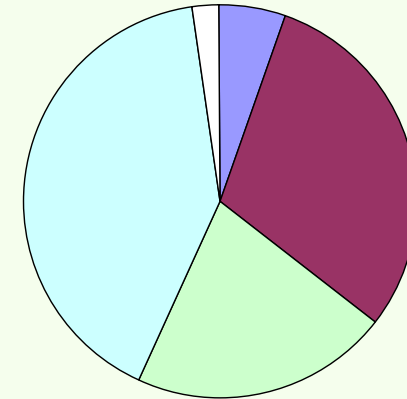
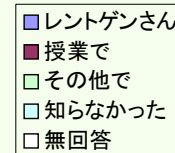
2019年11月に行った大阪府立大学の1回生向け授業でのアンケート。  
工学だけでなく、看護や獣医などの学生がまんべんなく受講。回答数 90。

あなたは今までにクルックス管の実演を見たことがありますか？



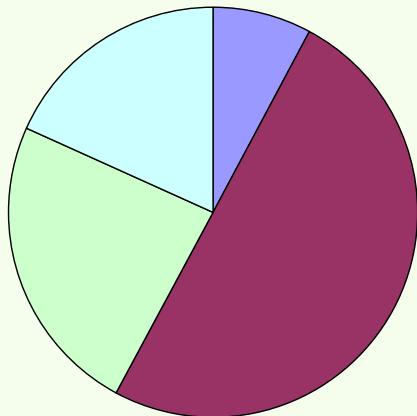
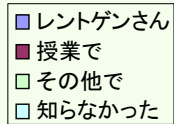
中学 16  
高校 17  
中学+高校 3  
その他 2  
なし 52

クルックス管から X線が出ると言うことは知っていましたか？



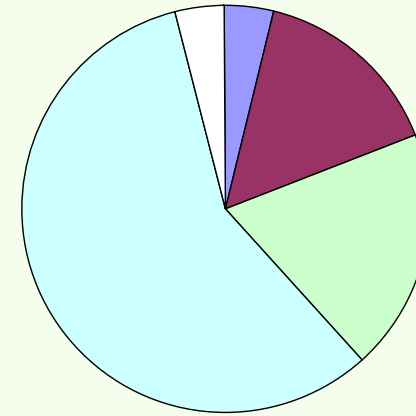
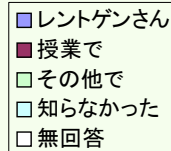
レントゲンさん 3  
授業で 19  
その他で 9  
知らなかった 7

クルックス管を見たことがある見たことがある38人の中で  
クルックス管から X線が出ると言うことは知っていましたか？



レントゲンさん 3  
授業で 19  
その他で 9  
知らなかった 7

クルックス管を見たことがある見たことがない52人の中で  
クルックス管から X線が出ると言うことは知っていましたか？



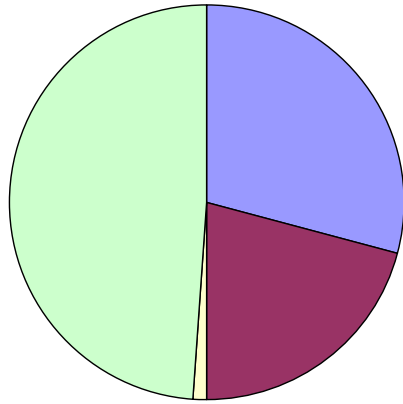
レントゲンさん 2  
授業で 8  
その他で 10  
知らなかった 30  
無回答 2

# 現在の学生に対する授業の実態調査

2020年12月に行った大阪府立大学の1回生向け授業でのアンケート。  
工学だけでなく、看護や獣医などの学生がまんべんなく受講。回答数 82。

あなたは今までにクルックス管の実演を見たことがありますか？

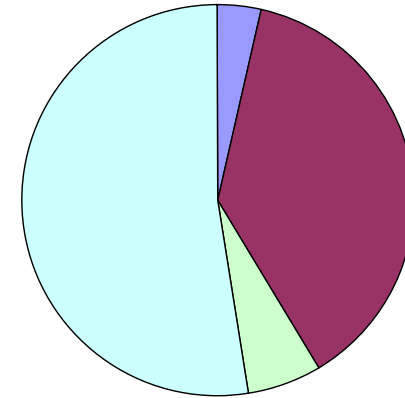
- 中学
- 高校
- その他
- なし



中学 24  
高校 17  
その他 1  
なし 40

クルックス管から X線が出るということは知っていましたか？

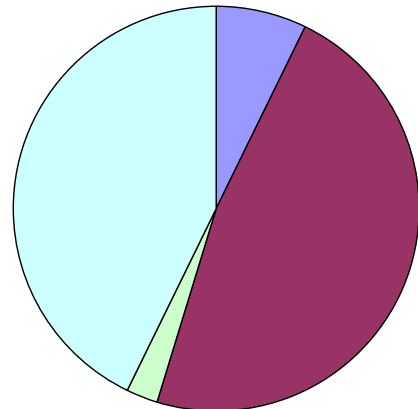
- レントゲンさん
- 授業で
- その他で
- 知らなかった



レントゲンさん 3  
授業で 31  
その他で 5  
知らなかった 43

クルックス管を見たことがある見たことがある42人の中で  
クルックス管から X線が出るということは知っていましたか？

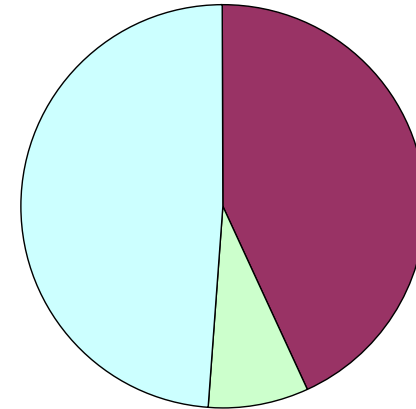
- レントゲンさん
- 授業で
- その他で
- 知らなかった



レントゲンさん 3  
授業で 20  
その他で 1  
知らなかった 18

クルックス管を見たことがない見たことがない40人の中で  
クルックス管から X線が出るということは知っていましたか？

- レントゲンさん
- 授業で
- その他で
- 知らなかった



レントゲンさん 0  
授業で 22  
その他で 4  
知らなかった 25

# クルックス管を安全に使用出来ないか？

クルックス管は現在既に理科教育現場で用いられているが、場合によっては 5cmの距離では、 $70\mu\text{m}$ 線量当量率が  $200\text{mSv/h}$  にも達する低エネルギーのX線が放出される。しかし、放射線が出ていることを知らずに使用している教員も居る。

熱陰極を用いた数100V程度で駆動される装置や、冷陰極を用いても5kV程度の低電圧で動作し、外部には一切X線の漏洩のないクルックス管が本体 22,000円、電源も18,000円と手軽な金額で発売されている。



5kV で動作中のクルックス管



9V電池駆動の  
5kV CW高圧電源

**中高の教育現場には、  
買い換える資金がない！**

## Basic Plan

5kV程度の低電圧駆動クルックス管を用いることで、X線の放出は全く考慮せずに済み、学習指導要領の要求を満たす安全な実験体系を極めて簡単に構築可能。

ここで話は完結する

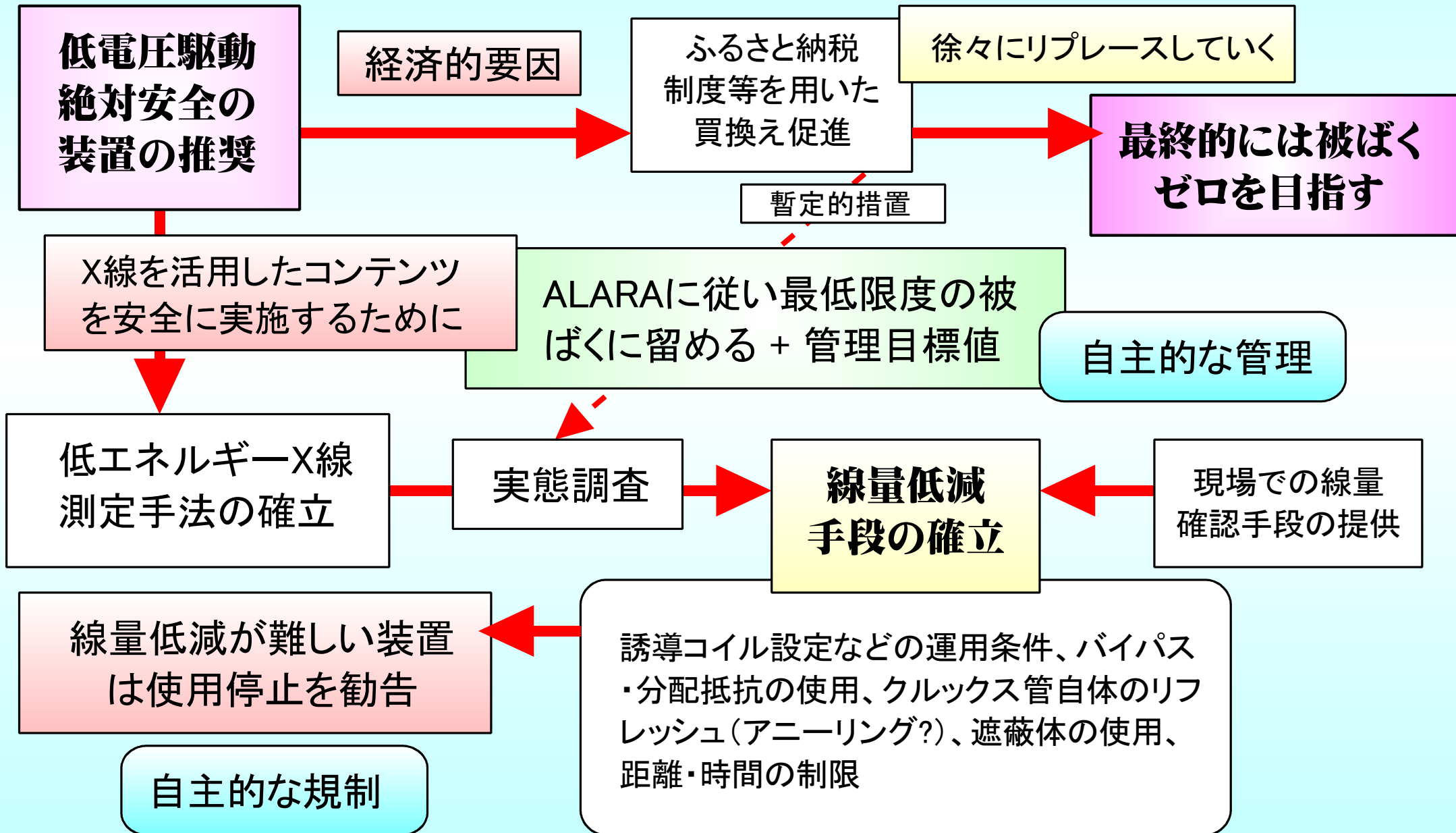
## Advanced Plan

- 1) 経済的理由により古い装置を用いざるを得ない
  - 2) 放出されるX線を活用した発展的な実習を実施
- いずれの場合も最低限度のX線量に抑えて、安全に実験を行える実験体系を構築する必要がある。

**本研究の目的**



# 今そこにあるリスクを低減するために



# ICRP 放射線防護の基準を決める三つの原則からの検討

**正当化** Justification: リスクを上回る利益がなければならない

→ クルックス管を用いた実演は極めて教育的効果が高く、将来的な放射線教育コンテンツとしても非常に価値が高い。

**防護の最適化** Optimization:

できるだけ被ばくを抑える(経済、社会的な要因の考慮)

**ALARA**(as low as reasonably achievable)の原則

→ 電子線の観察だけであれば低電圧駆動の絶対安全の装置を使うことで被ばくをゼロに出来るためこれを推奨する。が、経済的要因により直ちに全ての学校に要求するのは困難であるため、コンテンツ毎に必要なX線のエネルギーを把握し、出来る限り電圧を抑えて実験を行い被ばくを最小化する。必要に応じて遮蔽などの防護措置も行う。

**線量限度** Dose Limit: 線量限度を超えてはならない

→ 放射線取扱業務従事者ではない教員や、さらに労働者でもない生徒に対する被ばく管理目標値を、国内外の規制状況から議論する。低エネルギーX線による不均等被ばくと水晶体への等価線量についても考慮する。

# クルックス管からのX線管理に於ける問題点

## 一般公衆に対する線量限度が法体系に取込まれていない

ICRP 1990/2007年勧告での一般公衆に対する線量限度は我が国の法体系に取込まれておらず、実効線量 1mSv/年という値も事業所境界での線量限度から導かれた値。

## X線装置の定義が明確ではない

厚労省 全国規模での規制改革要望に対する見解の確認  
<http://www8.cao.go.jp/kisei/siryo/030919/09-2.pdf>

RI法では1MeV以下のX線は対象外であり、定義されている放射線発生装置にも該当しない。電離則においては特定X線装置の定義からは外れるが、「X線装置」の免除レベルが規定されておらず、放射線安全を確保するための法令根拠が明確ではない。

## 不均等被ばくであり実効線量評価が困難

20keV X線 は水での半価層が 1cm程度であるため、体表からの深さによって線量が大きく変化する。またブロードなエネルギースペクトルを持ち運用条件によってピークエネルギーも変わるが、低エネルギーではわずかなエネルギー変動で大きく透過率が変化する。平面的にも一様ではない。このため、防護量である実効線量の評価は容易ではない。

# 免除レベルの $10 \mu\text{Sv}$ はどれぐらいの値なのか

歯科レントゲン撮影1回:  
 $10 \mu\text{Sv}$



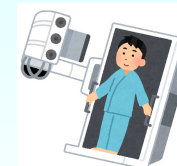
0.01mSv  
( $10 \mu\text{Sv}$ )

胸部レントゲン撮影1回:  
 $50 \mu\text{Sv}$



0.1mSv  
( $100 \mu\text{Sv}$ )

胃がん検診1回:  
 $600 \mu\text{Sv}$



ICRP 1990/2007年勧告  
一般公衆への追加線量限度  
年間 1mSv

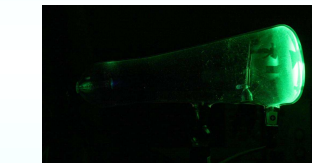
CTスキャン1回:  
数mSv



1mSv



国内線の飛行機1回:  
 $3 \mu\text{Sv}$ 程度



クルックス管プロジェクトの  
到達目標:  $10 \mu\text{Sv}/\text{年}$

1ヶ月のBG線量:  
 $50 \mu\text{Sv}$   
( $0.07 \mu\text{Sv}/\text{h}$ の場合)



国際線の飛行機での  
欧米への旅行1回:  
 $100\text{--}200 \mu\text{Sv}$



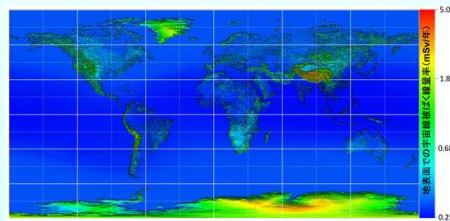
日本人が特有に持っている  
 $20\text{Bq}$ のポロニウム  
 $210$ による年間被ばく  
線量:  $800 \mu\text{Sv}$

イランのラムサール地方や  
インドのケララ地方などでの  
大地からの年間被ばく線量:  
 $\sim 10\text{mSv}$

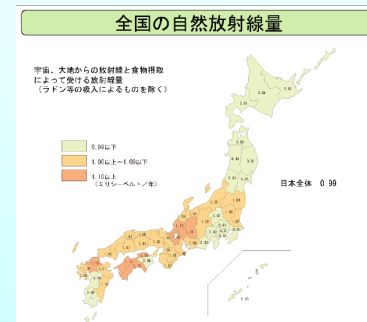


ランタンのマントル\*を  
1時間体に貼付ける:  
Hp(10)  $1 \mu\text{Sv}$  ( $\gamma$ 線)  
Hp(0.07)  $10 \mu\text{Sv}$  ( $\beta$ 線 +  $\gamma$ 線)

\*トリウム使用のサウスフィールド ハイパワーDXマントル



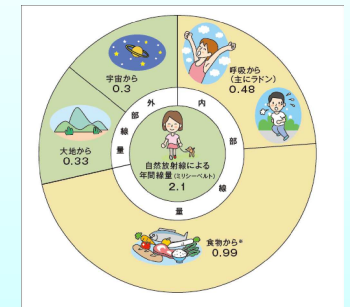
年間の宇宙線量の世界平均と  
日本平均の差:  
 $50 \mu\text{Sv}$  (日本の方が小さい)



年間の平均外部線量が最も  
高い岐阜県と最も低い神奈  
川県の差:  $400 \mu\text{Sv}$



世界平均と日本平均  
でのラドンによる年間  
被ばく量の差:  
 $800 \mu\text{Sv}$   
(日本の方が小さい)



自然放射線による  
年間の被ばく線量  
日本平均  $2.1\text{mSv}$   
世界平均  $2.4\text{mSv}$

# クルックス管からのX線評価に於ける問題点

## 20keV 程度とエネルギーが低い

一般向けに普及している半導体素子を用いた簡易サーベイメータはおろか、放射線計測で信頼されている NaI シンチレーション式サーベイメータもエネルギーが低すぎて実態とかけ離れた値が測定される。

## パルス状に放出されている

Be窓を用いた低エネルギーX線用 NaI シンチレーション式サーベイメータなども販売されているが、パルス場であるためパイルアップしてしまい非常に小さい値しか示さない。Be窓のGe検出器や、CdTe(CZT)検出器での測定も、非常に小さなコリメーターを使いカウントレートを落とす必要がある。

## 電源装置（誘導コイル）が不安定である

同じ装置を同じ設定で動作させても測定結果が大きく異なる事がある。機械的な動作を含む誘導コイルはその日、その時の状況で出力電圧が変動するため、系統的な比較を行うには何らかの方法でモニタしながらの測定が必要。

# クルックス管プロジェクトについて

## Task 1: 線量計測

放射線計測の専門家

大学・国研

ユーザーとしての学校教員

中・高

教材・測定手段の提供者

民間企業

実際に現場で使えるシステムの開発

低エネルギーX線  
測定技術の標準化

## Task 2: 運用方法の検討

学校教育現場の教員

Task1 で開発した評価手法

様々な製品の評価

教材メーカー

大学研究者、OB

開発した教育コンテンツの評価

実態評価に伴う問題点の抽出

遮蔽体など  
解決策の提示

## Task 3: 線量評価とガイドライン

保健物理・放射線防護の専門家

低エネルギーX線による  
(実効・等価)線量評価モデルの構築

Task1で測定  
した線量・  
スペクトル情報

国内外の規制実態を踏まえた  
上限線量の検討

Task2で検討  
した運用方法

教育現場における放射線安全管理  
ガイドラインの作成

学会標準化

## Task 4: 放射線教育プログラム普及

放射線教育の専門家

新規放射線教育プログラムの開発

全国の拠点でのシンポジウム、オープンスクール、  
モデル校での授業、教育学部での講義など  
での放射線教育プログラム普及

小中高大民国 オールジャパンの  
放射線教育ネットワークの形成

放射線知識の  
国民的普及

# 誘導コイルを用いた高電圧印加について

放電極距離

Distance of  
Discharge  
Electrodes  
DDE

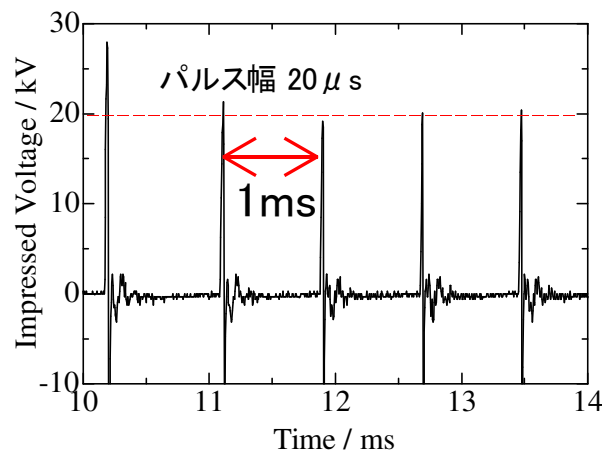
放電出力ダイヤルによりトランスの一次側に印加する電圧を変えることで連続的に出力電圧を変化させることができるが、**特定の電圧に設定出来るわけではない。**

空気中での絶縁破壊電圧が 1kV で 1mm 程度であることから、放電極間の距離を変えることで印加する**最大電圧を規定できる。**

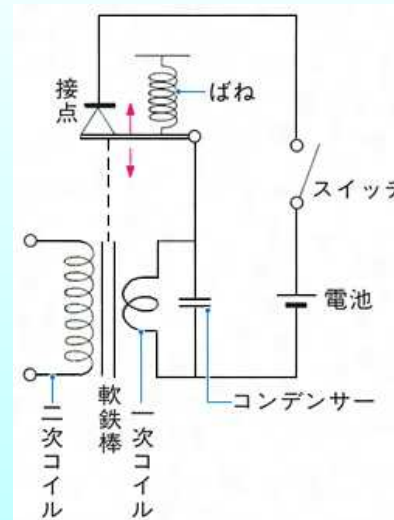
→ 20mm にしておくと 20kV 以上かけようとしても空中放電で電流がクルックス管をバイパスして流れるためそれ以上電圧が上がらない、**安全装置**となる。

PW

放電出力

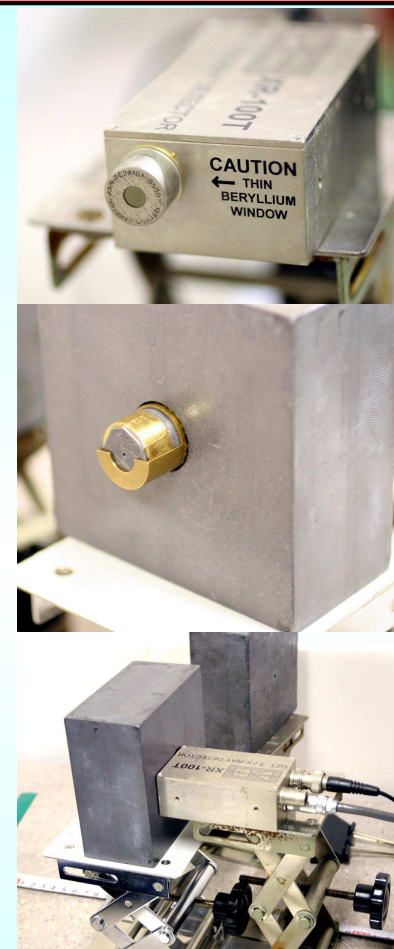
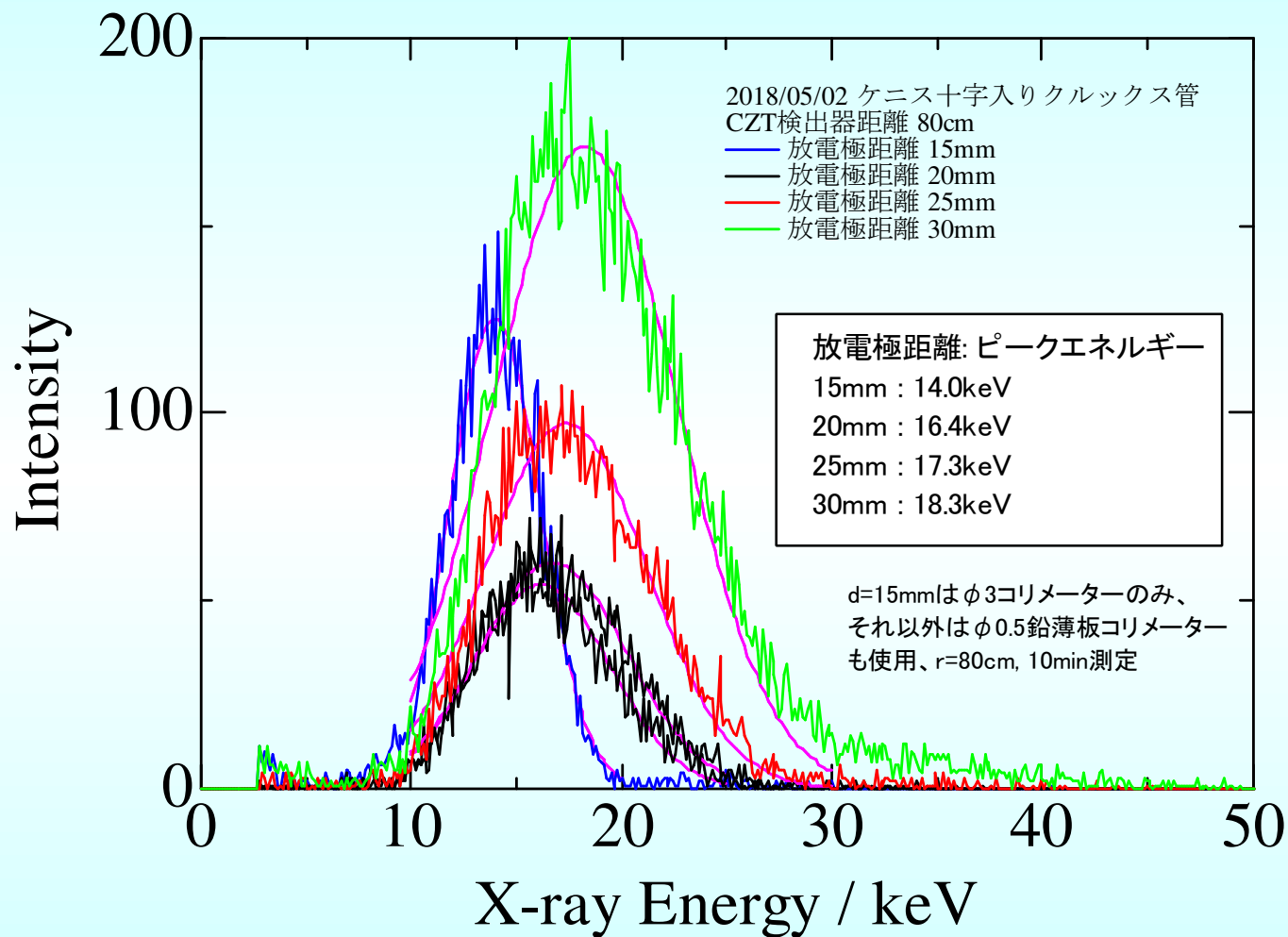


放電極距離 20mm, 放電出力4, 平均電流  $80 \mu A$



ブザーの回路で、一次側に断続的な電圧のパルスが発生させ、トランスで二次側に高圧を出力する。一次側の電圧を変化させると二次側の電圧も変化する。半導体回路で一次側のパルスが発生している装置もある。

# CZT半導体検出器によるスペクトル評価



Amptek XR-100T-CZT  
CZT(Cd<sub>0.9</sub>Zn<sub>0.1</sub>Te)検出器  
Be窓、ペルチェ冷却

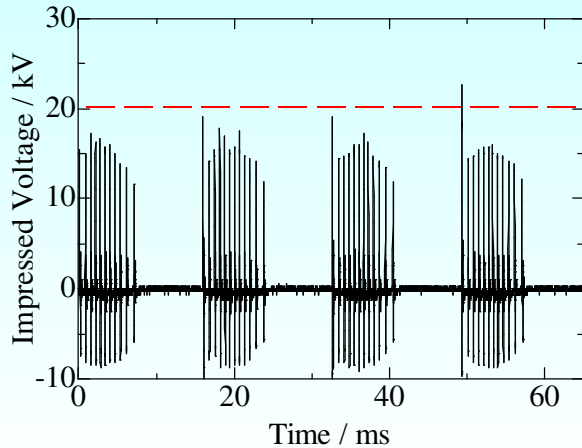


φ3同軸鉛コリメーター  
φ2同軸黄銅コリメーター  
φ1.0鉛薄板コリメーター  
φ0.5鉛薄板コリメーター

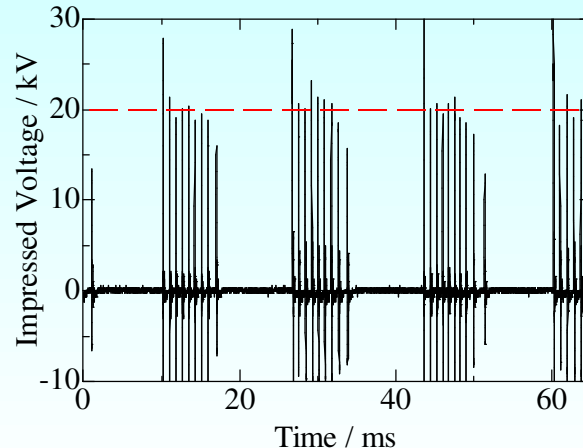
φ0.5mm鉛コリメーターにより数cps程度まで下げること、  
ようやくパイルアップせずに測定できるようになった



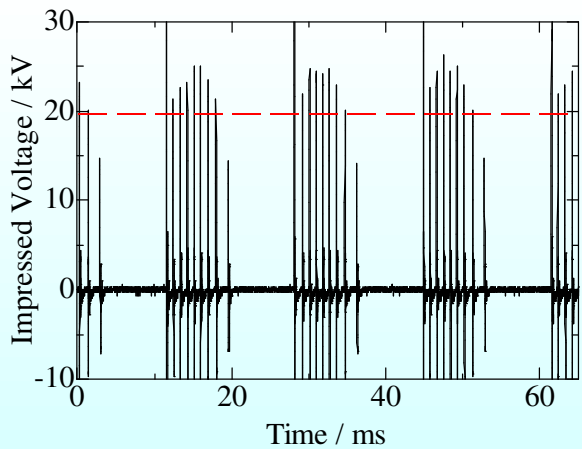
# 誘導コイル設定による出力パルスの変化



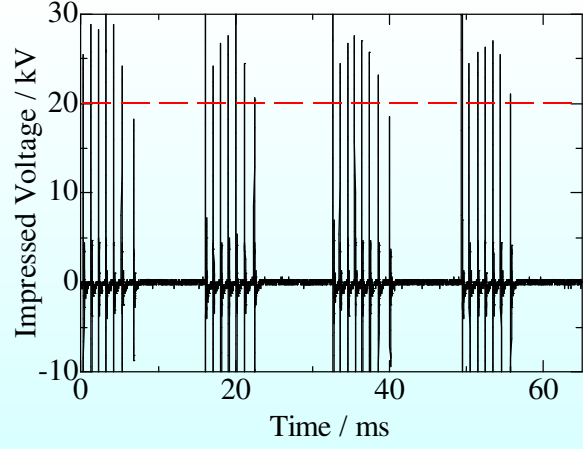
DDE=20mm, PW0, 40  $\mu$  A, 120  $\mu$  Sv/h



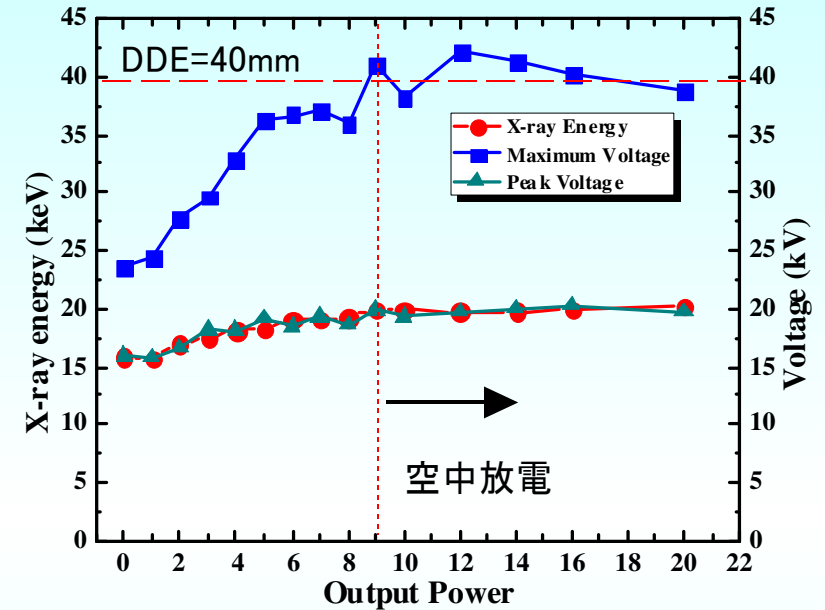
DDE=20mm, PW4, 80  $\mu$  A, 1.25mSv/h



DDE=30mm, PW4, 80  $\mu$  A, 1.56mSv/h



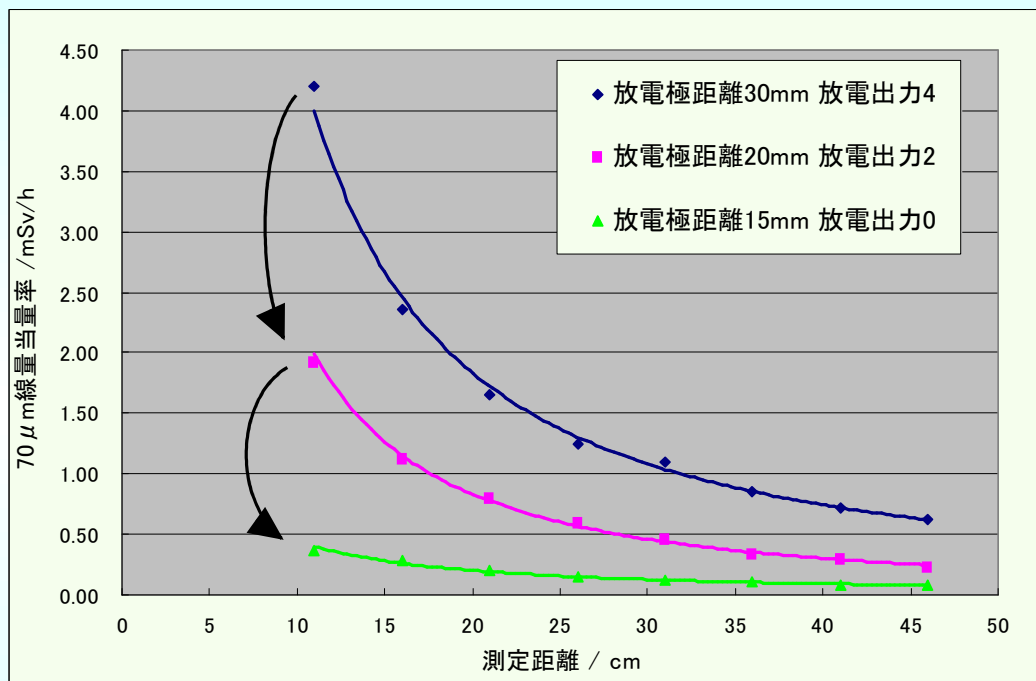
DDE=30mm, PW7, 96  $\mu$  A, 3.50mSv/h



- ・放電出力を上げていくと次第に出力電圧が上昇し、電圧のヒストグラムのピークと、X線エネルギースペクトルのピークは良い一致を示した。
- ・放電極距離によって規定される以上の電圧に上げようと放電出力を上げても、空中放電によって電流が流れて電圧がドロップし、それ以上クルックス管に印加される電圧が上がらなくなる。

# 漏洩線量の印加電圧、電流、距離依存性

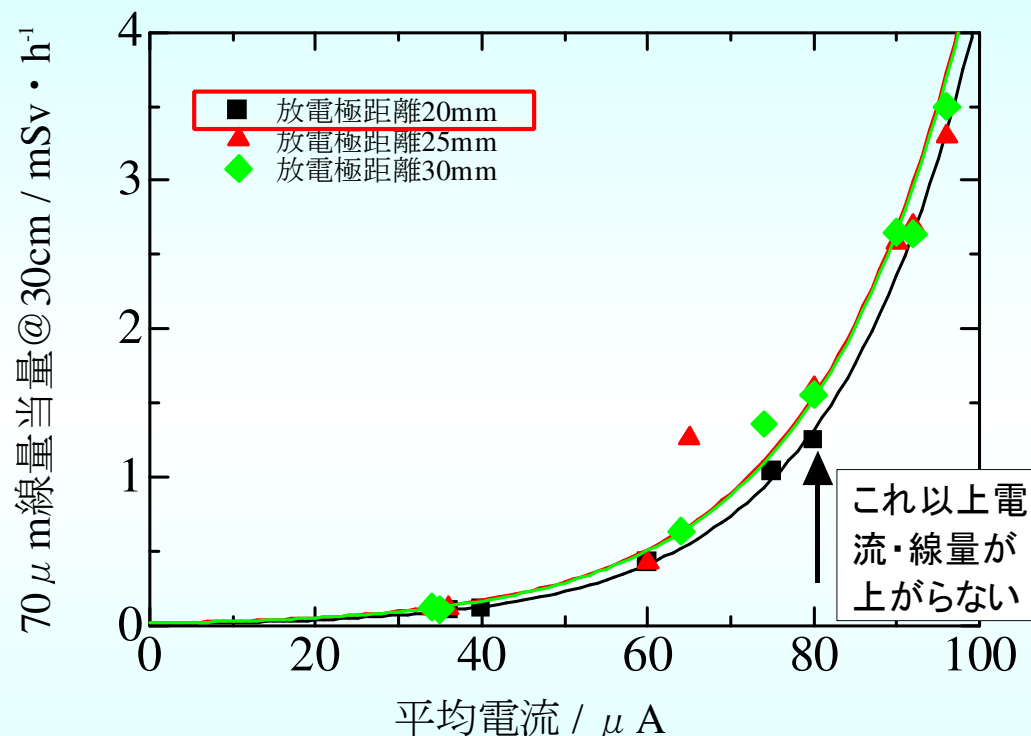
放電極距離 30, 20, 15mm でギリギリ  
放電が起こる出力に合わせて測定



・電圧を低く抑えると極端に線量は小さくなる  
放電極距離は20mm以下に留めて下さい。

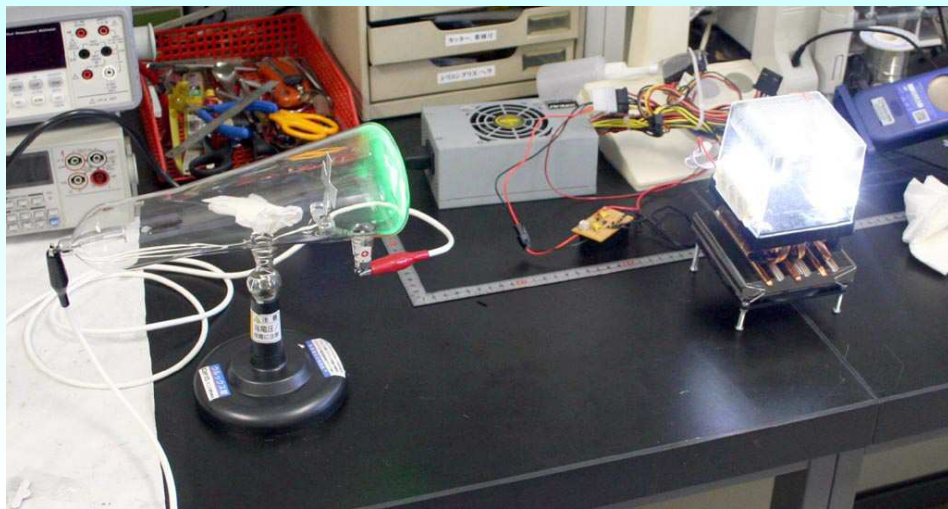
・距離の二乗に反比例して線量は小さくなる  
1mの距離では10cmの距離での線量の1/100になります。  
逆に、1mから50cmに近付いただけで線量は4倍になります。

放電出力変化に伴う平均電流を  
アナログ電流計で測定

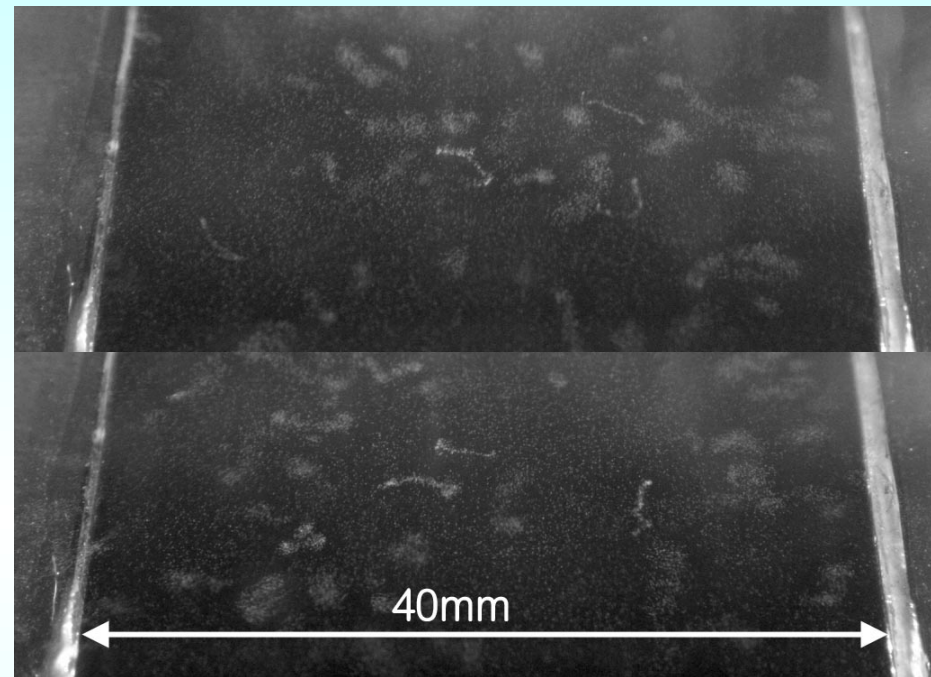


・電流上昇に従い指数関数的に線量が上昇  
放電出力上昇で電圧も電流も同時に上昇するため、  
電子線が観察できる必要最小限の出力に留めて下さい。  
その上で、放電極は一定以上に電圧を上げないための  
安全弁の役割を果たしています。

# クルックス管を利用したX線のエネルギー評価



飛跡の長さは4mm程度であり、空気中での20keV電子線の飛程6mm程度より若干短い  
→制動放射X線のピークは入射電子線エネルギーの  $\frac{2}{3}$  で、良く一致。



クルックス管からのX線によって弾き出された光電子の霧箱観察結果(放電針距離20mm)。

エネルギー既知のX線を入射して飛跡の長さのヒストグラムを作成し、エネルギーに拡がりを持つX線のスペクトルが評価できないか？

**霧箱を用いた低エネルギーX線の  
エネルギースペクトル評価の可能性**

# 霧箱によるクルックス管からのX線の観察

①

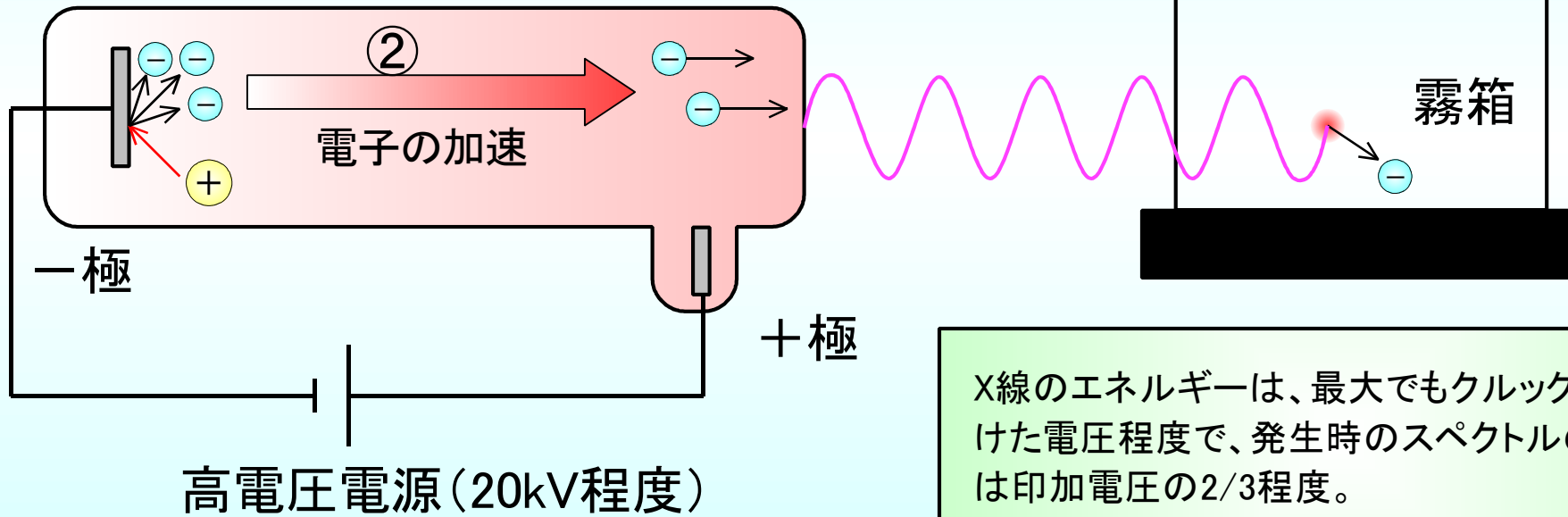
＋のイオンが－極に引きつけられて電子を叩き出す  
(二次電子放出)

③

電子がガラス管の壁に衝突するときに、制動放射X線を放出する

④

X線は最終的に原子の周りを回る電子を光電効果などで弾き飛ばして(電離作用)、弾き飛ばされた高速の光電子はβ線と同じように振る舞う。



X線のエネルギーは、最大でもクルックス管にかけた電圧程度で、発生時のスペクトルのピークは印加電圧の2/3程度。

電子を弾き出すという放射線の本質を直感的に理解できる。また、エネルギーの違いを弾き出された電子の飛跡の長さという形で理解できる。

# 実際の現場での事例



全国の37本のクルックス管について、ガラスバッジという線量計を配布することにより教員の手で線量測定を行ってもらった。

37本を測定した。10分間の測定での70  $\mu$ m線量当量\*:  
25本で < 50  $\mu$ Sv @ 1m (外挿により評価) \*実効線量はさらに1/10以下。  
18本で < 50  $\mu$ Sv @ 15cm (検出限界以下)

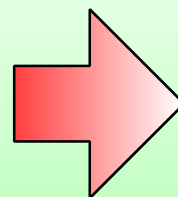
ペットボトルに貼付けたガラスバッジに15, 30, 50cmの距離で10分間X線照射して返送してもらい、線量評価を行った。X線計測専用タイプの物で、同時にエネルギー評価も出来る。

その一方で高い線量を示した装置も存在した

放電出力最低で距離1mでも600  $\mu$ Sv以上が検出された装置を現地調査。

管内のガスが枯れていて電流が流れにくい個体であった

最低出力、30cmの距離で  
放電極距離30mm: 2mSv/h  
放電極距離50mm: 30mSv/h



放電極距離を20mmに縮めると、  
40  $\mu$ Sv/h にまで落ちた。

距離1m、10分間では、0.6  $\mu$ Svに過ぎない

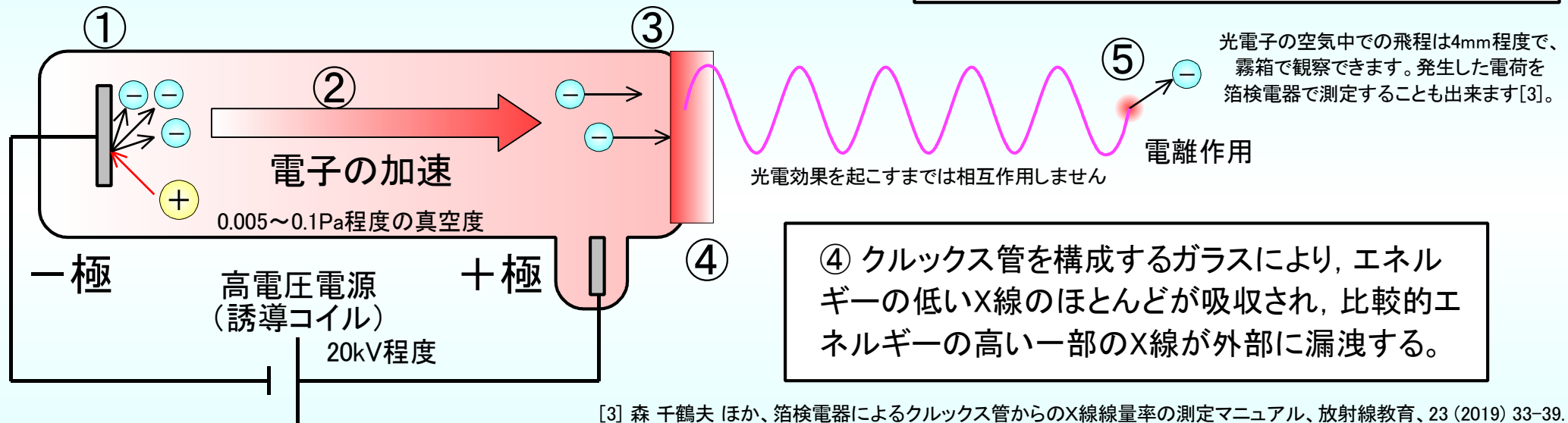
# クルックス管のしくみ

① +のイオンが一極に引きつけられて電子を叩き出す(二次電子放出)。

③ 電子がガラス管の壁に衝突するときに、制動放射X線を放出する。

電子自体は完全に遮蔽され外に出てきません。

⑤ X線は最終的に原子の周りを回る電子を光電効果で弾き飛ばす(電離作用)。弾き飛ばされた光電子はβ線と同様であり、体内ではラジカルの生成、DNA鎖の直接切断などにより放射線障害の原因となりうる。



④ クルックス管を構成するガラスにより、エネルギーの低いX線のほとんどが吸収され、比較的エネルギーの高い一部のX線が外部に漏洩する。

[3] 森 千鶴夫 ほか、箔検電器によるクルックス管からのX線線量率の測定マニュアル、放射線教育、23 (2019) 33-39.

クルックス管に封入されているガスの量がガラスに吸着するなどして少なくなると、①で陰極に衝突するイオンが少なくなるため、二次電子の量が少なくなり、電流が流れにくくなります。その結果十分な二次電子が出てくるまで意図せずして高い電圧が印加されてしまい、④で漏洩する線量が大きくなってしまいます。

→ 20keV前後ではわずかなエネルギーの違いで透過率が大きく異なるためです (15keV→30keVで100倍大きくなる)

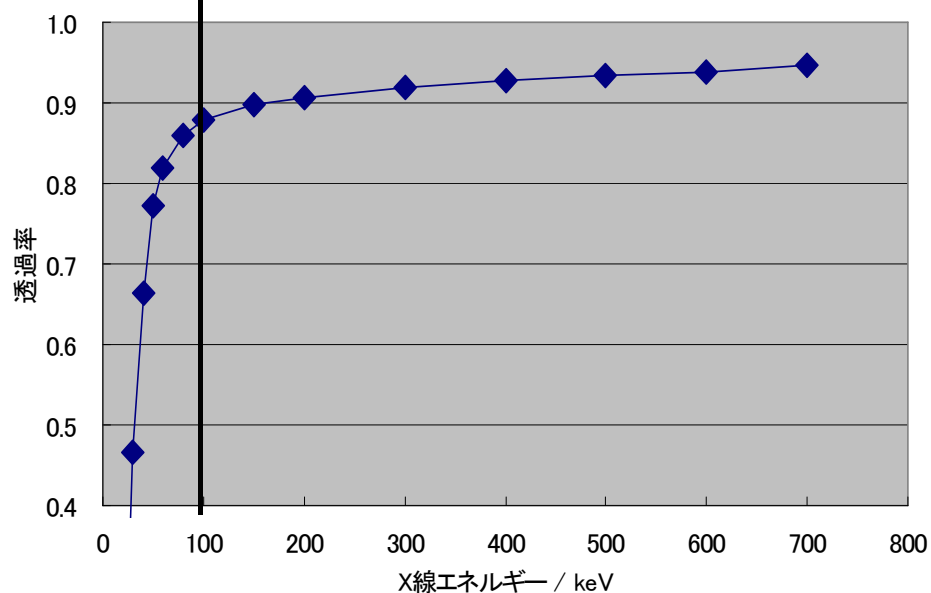
この状態となったクルックス管は、放電極距離を20mmにすると空中放電が激しい一方で、クルックス管に流れる電流は少なく観察が困難です。放電極距離を広げると高い線量が漏洩するため、買い換えが推奨されます。

**放電極で最大電圧を抑えることが重要**

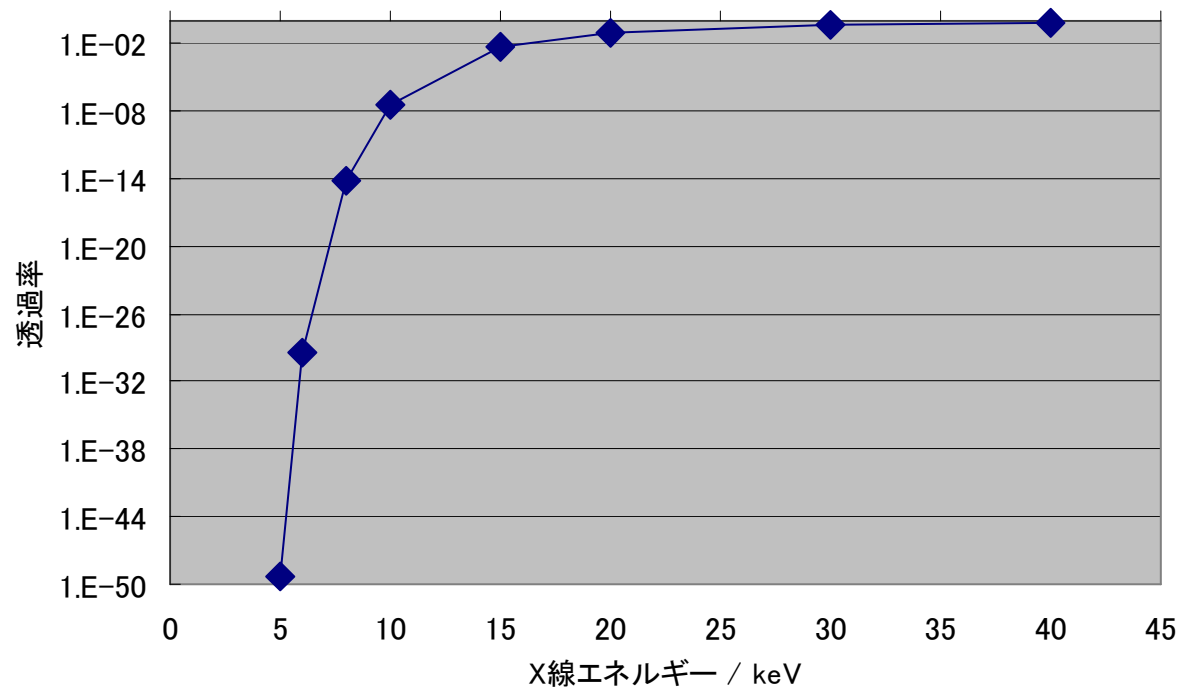
# わずかな印加電圧低下での大きな線量の変化

20keV 前後のX線は僅かなエネルギー変動により、クルックス管自体を構成するガラス管の透過率が何桁も変わる。

100keV 以上のエネルギーでは  
余り大きく変わらない



30keV と 15keV で約100倍違う。



3mmのガラスに対するX線の透過率

# クルックス管からの被ばく線量を下げするには

最も確実なのは

## ・低電圧駆動の製品に買い換える

固有安全性を持ち  
対策を行う必要がない

経済的理由などで困難な場合は ↓ 以下の点に注意を払う必要がある

- 1) 印加する電圧を下げる
- 2) 流れる電流を下げる
- 3) 距離を取る
- 4) 遮蔽をする
- 5) 時間を短くする

発生するX線量  
自体を下げる

放射線防護の  
三原則

**印加電圧を下げる:** X線のエネルギーが下がり、劇的に漏洩するX線量を下げることが出来る。クルックス管自体がガラスで出来ており、このガラスに対する透過率が15keVと30keVでは100倍程度異なるためである。

**遮蔽:** アクリルでは1cmの厚さでも半分程度にしかならないため、軽量型のガラスの水槽を用いるとよい(2mmで1/20~1/50にまで下がる)。

**距離を取る:** 最も簡単で確実である(距離の二乗に反比例して下がる)。

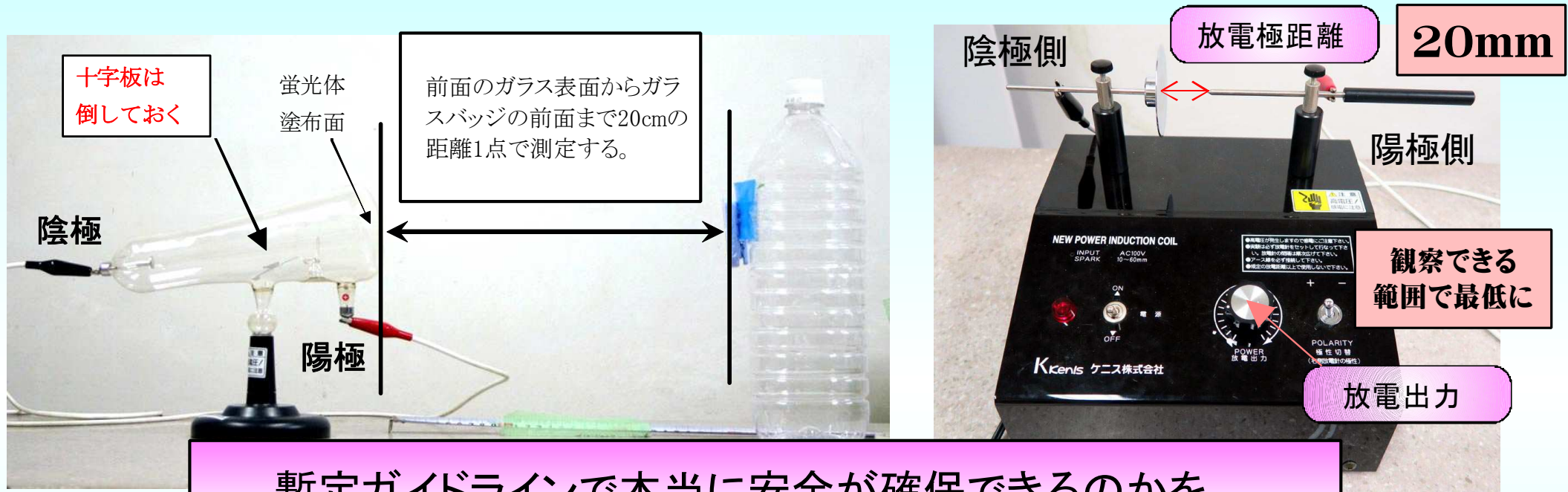
## 暫定ガイドライン

保健物理学会標準化委員会に於いて、学会標準とする事を目標としている。

- ・放電極を必ず使用し、放電極距離は20mm以下とする。
- ・放電極表面は清浄にした上で、円板電極側を-極にする
- ・誘導コイルの放電出力は、電子線の観察ができる範囲で最低に設定する。
- ・できる限り距離を取る。生徒への距離は1m以上とする。
- ・演示時間は年間10分程度に抑える。



# 暫定ガイドラインの検証



暫定ガイドラインで本当に安全が確保できるのかを、全国の教育現場の実際に使われる様々な装置で検証。

・放電極距離 20mm、放電出力は観察できる範囲で最小という暫定ガイドライン準拠の条件で線量測定を行ってもらう。

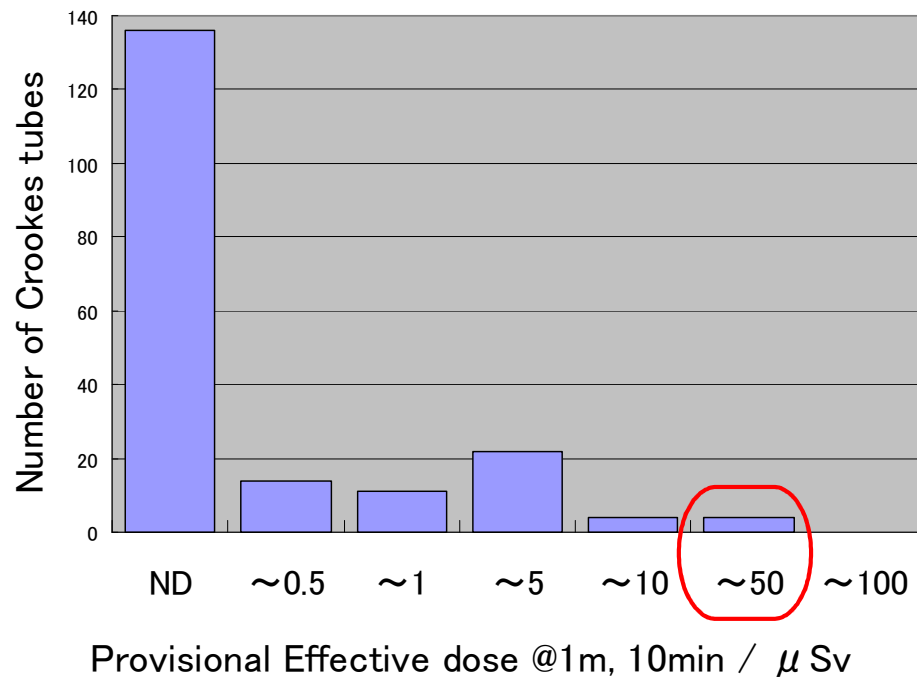
- ・クルックス管から 20cm の位置で、測定は10分間など統一したプロトコルで測定。
- ・ガラスバッジは大阪府大と各学校とを郵送でやりとりし、現場の先生の手により測定。BGの影響を抑えるために1月ごとに取りまとめて評価を行う。

大阪府立大学倫理委員会の承認を得て実験を行っています。

# 第二期実態調査結果（最終版）

GBでの測定  
生データ

- 測定を行った距離 20cm → 実際の生徒は 1m 以上離れるため 1/25 に減衰,
- Hp(0.07) @ 20keV → 実効線量への換算は暫定値で 1/10
- 観察時間は年間で10分としているためそのまま



測定を行った 191本中 187本の装置については 1m 距離、10分間の実効線量が国際的な免除レベルである  $10 \mu$  Sv (IAEA BSS など) 以下に抑制されていることが確認された。4本だけ  $10 \mu$  Sv を超えると評価されたが、3本は  $20 \mu$  Sv 以下、1本だけ  $42 \mu$  Sv に相当すると評価された。

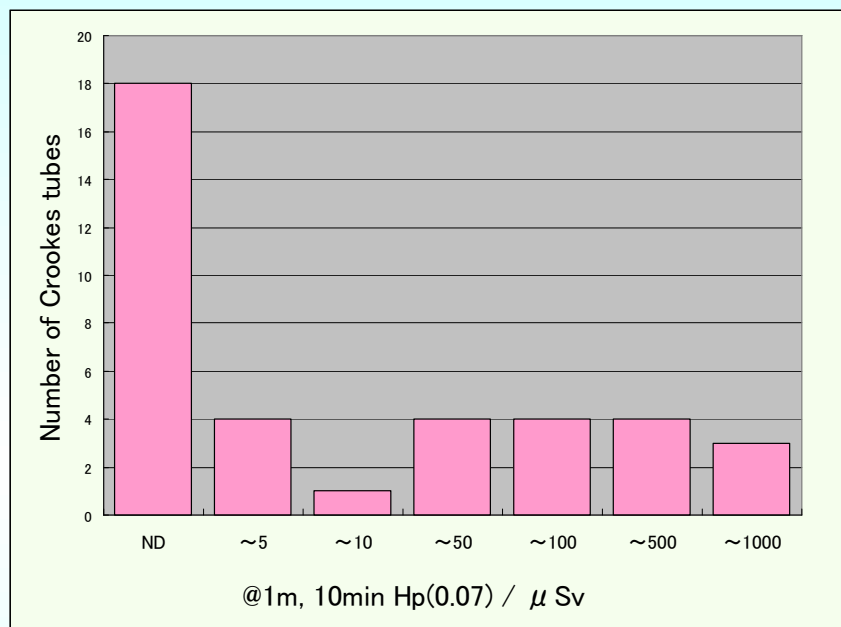
2018年の暫定ガイドライン適用前の実態調査では、37本中6本が距離 1m、10分間での実効線量が  $10 \mu$  Sv を超える可能性があり、 $93 \mu$  Sv と評価された装置もあった。

やや高い値を示した装置については、何故高くなったのかの調査を行うため実機を借用中。  
高くなると分かれば、観察時間や距離、ガラスの水槽での遮蔽などで十分防護が可能。

ICRP Pub36「科学の授業に於ける電離放射線に対する防護」では、古い単位である実効線量当量での記載であるが年間の線量限度を  $0.5 \text{ mSv}$ 、個々の授業ではその  $1/10$  ( $50 \mu$  Sv) としており、観察時間の考え方から最も線量の高かった装置についても十分にこの指標を下回っていると言える。

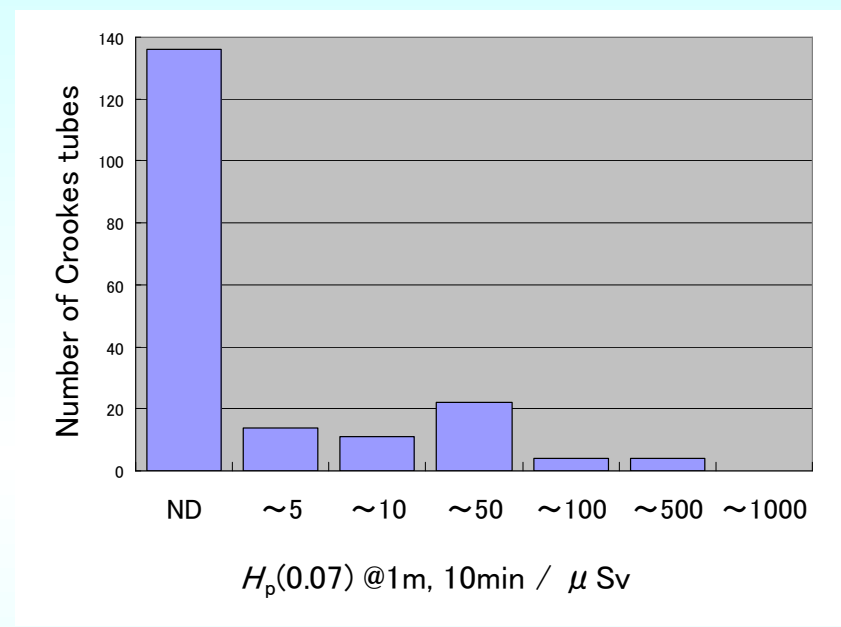
# 第二期実態調査結果（最終版）

## 2018年第一期実態調査



これまでの授業での設定

## 2019年第二期実態調査



暫定ガイドライン準拠

暫定ガイドラインの適用により、これまで授業で行っていた誘導コイルの設定での線量よりも低線量側に分布がシフトしている。  
また、従来は装置と生徒の距離が1mよりも近かったという学校も多かったため、実際の被ばく線量の差はさらに大きい。

# 印加電圧を下げるにはどうしたら良いの？

**必ず放電極を  
取り付ける。**

ケーブルが外れた場合などの電氣的な安全上も必須です。単体での販売もされています。

**放電極距離は20mm  
以下にする。**

空気中では1kVで約1mm放電します。表面が汚れていると放電しにくくなるので、サビなど無いように清浄に保ちます。

**放電出力、発振周期を  
出来る限り下げる。**

トランスの一次側に印加する電圧、周期を変化させることで、二次側の出力電圧、電流をコントロールします。調節できる装置では、電子線を観察できる範囲で下げて下さい。

陰極

放電極距離

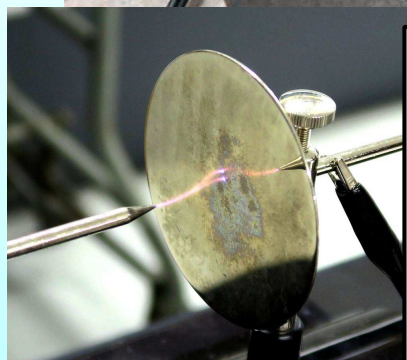
陽極

円板側が陰極、  
針状の方が陽極  
とした方が火花放電が  
起こりやすくなります。

極性切替スイッチ

放電出力

放電極はクルックス管と並列に接続されており、一定以上の電圧がかかると空中放電してそれ以上電圧が上がらないようにする、**安全装置です！**



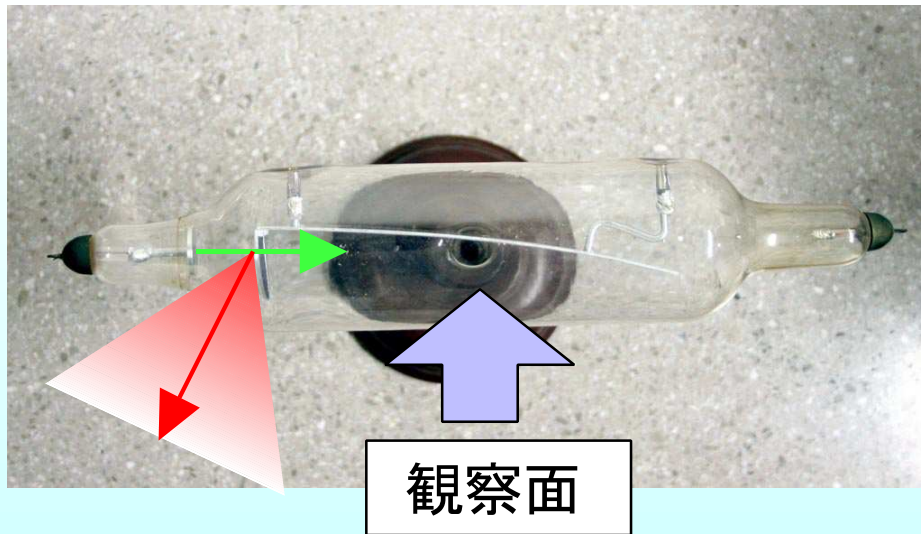
# 遮へいの有効性



○計算上20keVではアクリル1cmで半分に、5mmのガラスで1/50程度に減衰しますが、重くて安全な運用が困難と考えていました。

○実際はもう少しエネルギーが低いため、アクリル3mmで約半分、1cmで1/3に減衰しました。

厚さ1.9mm程度の軽量(1.5kg)のガラスの水槽でも、1/20 ~ 1/50程度に減衰しました。軽くて取り回しが良く、持った感じがガラスとは思えないほどであったため、実際の教育現場でも十分実用的に運用可能であると考えられます。



スリット入りのクルックス管は、スリットより陰極側(ビームの上流側)が最も線量が高いため、この部分を適当な金属板などで遮蔽すると効果的です(ここは観察しないため)。

暫定ガイドラインの遵守で十分安全だと考えていますが、さらに少しでも線量を下げたい場合のオプションとして非常に有効です。

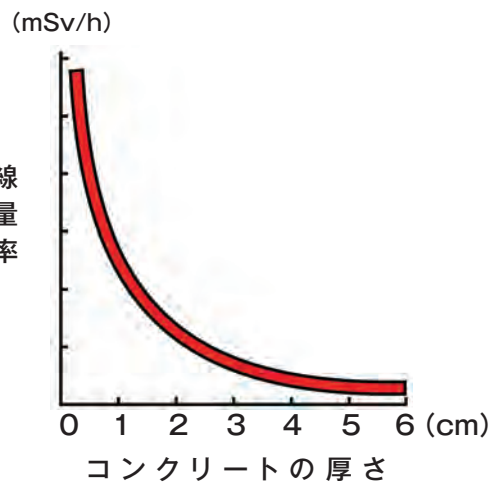
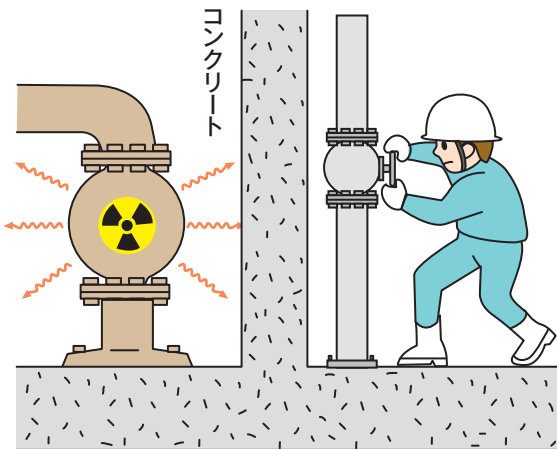
放電出力	Hp(0.07) ( $\mu\text{Sv/h}$ )		透過率 (%)
	遮へい前	遮へい後	
0	600	11	1.8
1	620	12	1.9
2	1300	60	4.6
3	3000	160	5.3

測定距離 15cm, 放電極距離 20mm  
厚さ1.9mm ガラス製水槽で遮へい。わずか1356円でした。  
<https://www.amazon.co.jp/gp/product/B00W5DSU0C>

# 放射線防護の基本

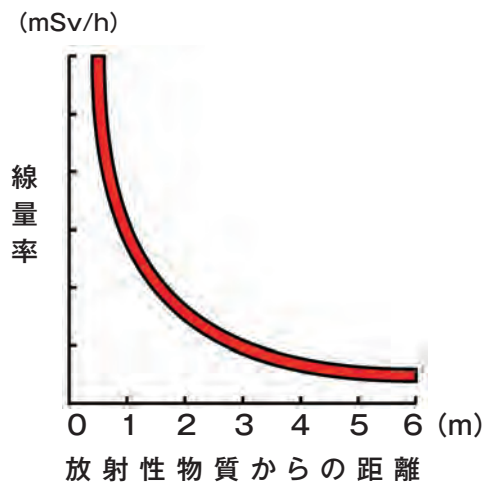
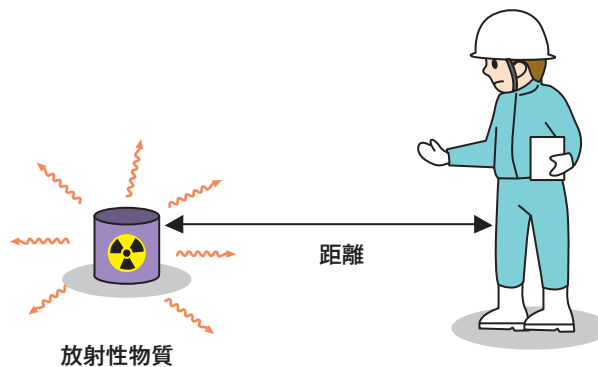
## 1. 遮へいによる防護

(線量率) = 遮へい体が厚い程低下



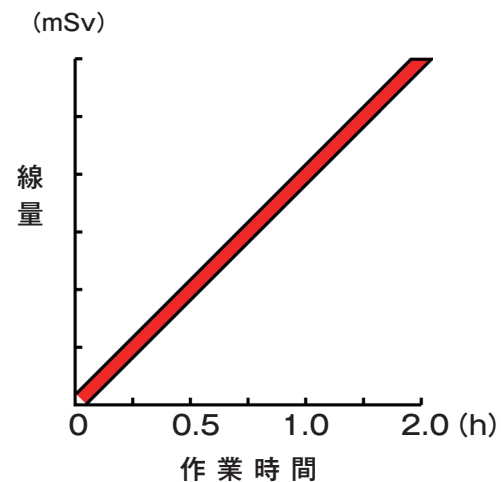
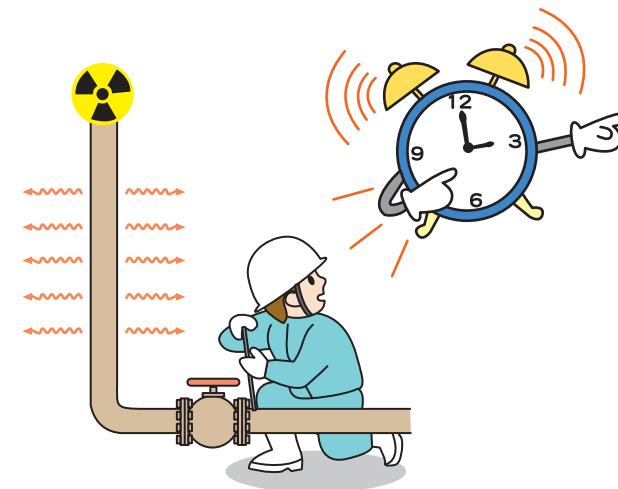
## 2. 距離による防護

(線量率) = 距離の二乗に反比例



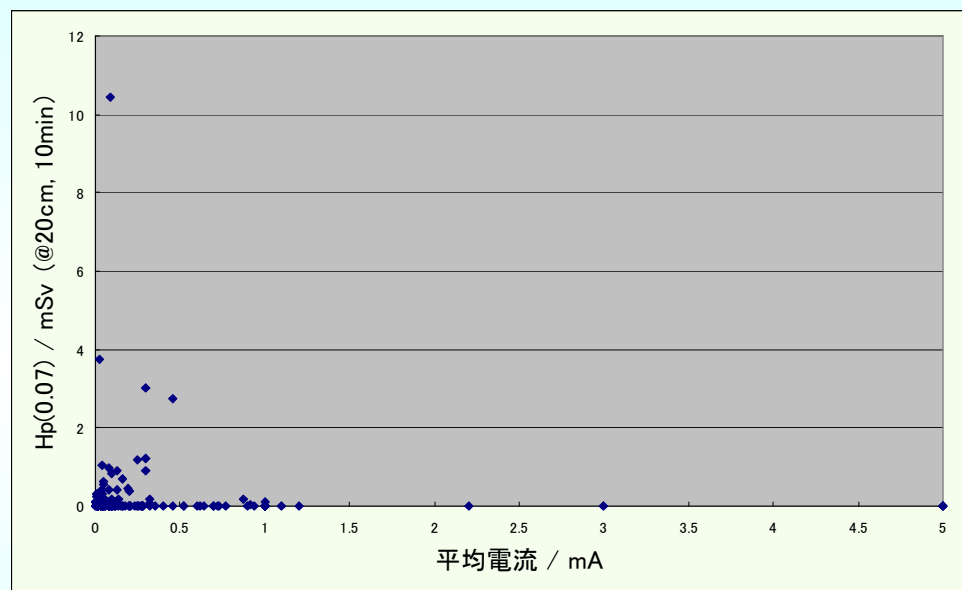
## 3. 時間による防護

(線量) = (作業場所の線量率) × (作業時間)

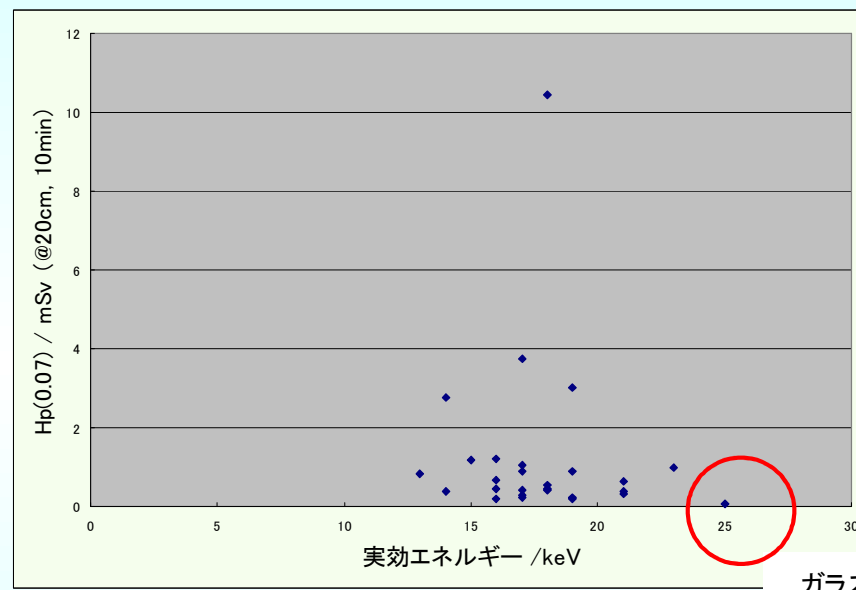


# 電流、電圧から危険な装置をスクリーニングできないか？

2019年第二期実態調査(全測定データ)



電流が小さくても安全な装置もあるが、線量の高い装置は電流が流れにくいとは言えそう。



ガラスの水槽で  
フィルタリングされたため

実効エネルギーと線量の関係からは、あまり明確な傾向は得られていない。

学校の理科室にある程度の測定器ではスクリーニングは困難。  
何らかの方法で線量評価を行う手段を提供する必要がある。

# 箔検電器を用いたX線の線量測定手法の開発

12

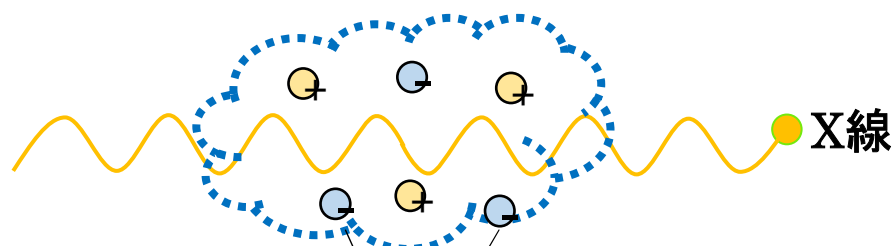
## ➤ 箔検電器について

箔検電器の箔の閉じる時間は、放射線が空気を電離することによって生成されるイオンの量に依存する。

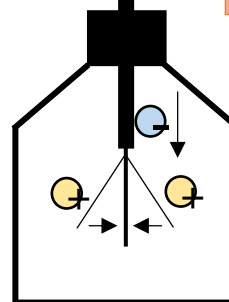


使用した箔検電器  
(はく検電器EA)

X線が空気を電離してイオンを生成



逆極性のイオンを収集



箔が中和して閉じていく



※箔検電器と同様の原理を用いた線量計として、ポケットチェンバーという携帯型の線量計が

古くから使われていた。



## 箔検電器に

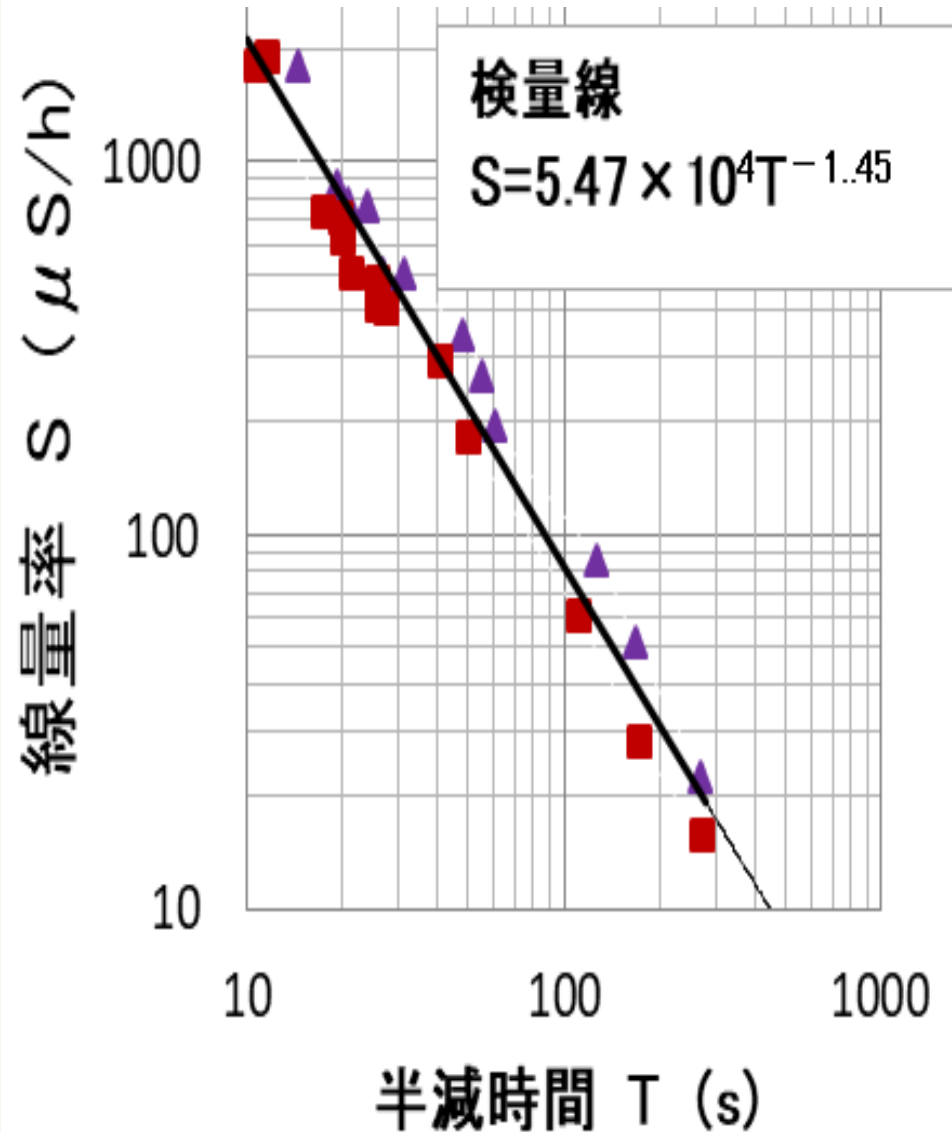
正の電荷を荷電した場合の半減時間(箔の開き角が60度から30度になる時間) $T_+$ と

負の電荷を荷電した場合の半減時間 $T_-$ の幾何平均値 $T$ を求める。

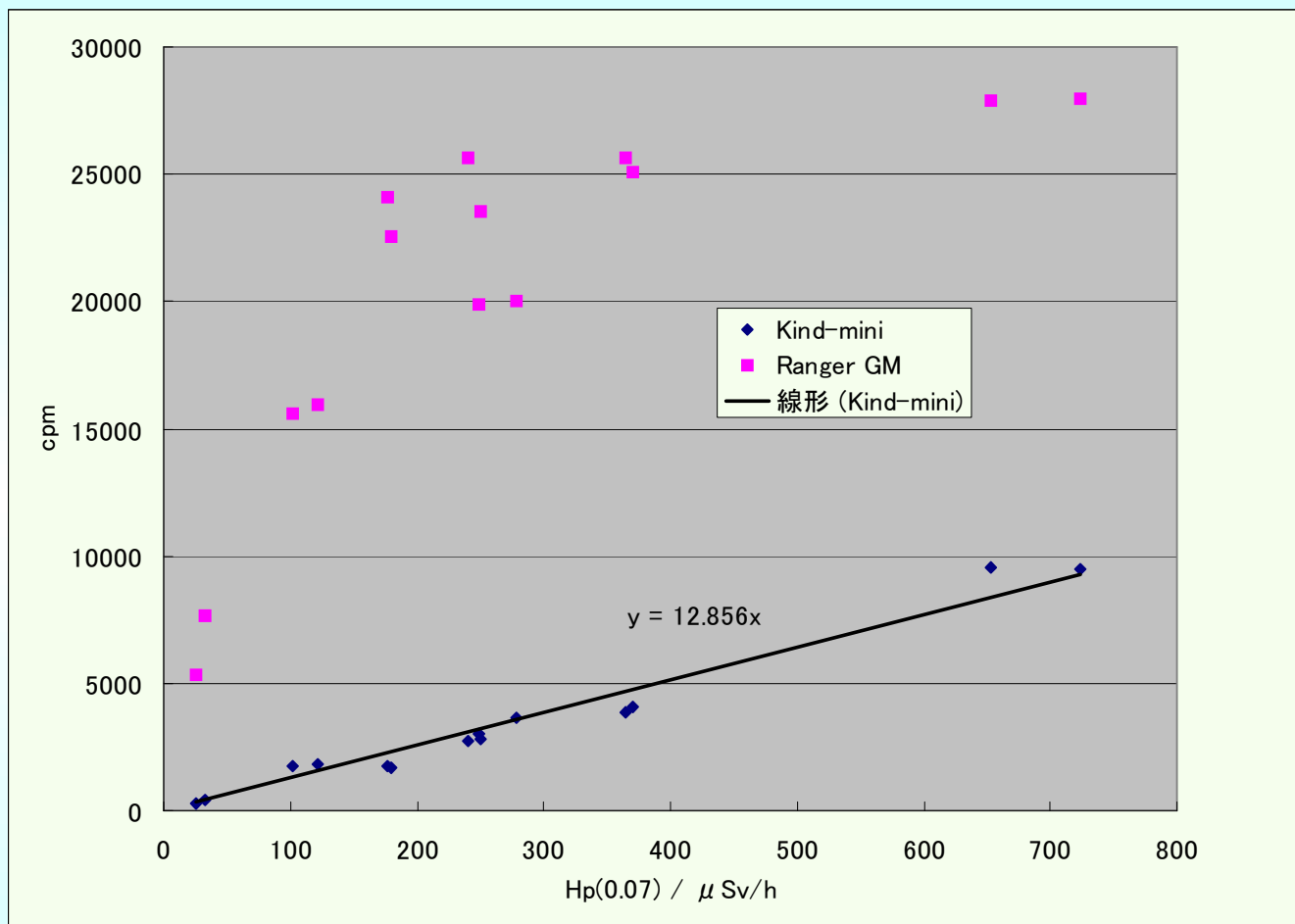
$$T = (T_+ \times T_-)^{0.5}$$

右図の検量線から線量率を求める。

検量線は電離箱で校正している。



# 簡易なサーベイメーターによるスクリーニングの可能性



横軸は低エネルギー測定対応の電離箱 日立 ICS-1323 で測定した  $70 \mu\text{m}$  線量当量。時間変動があるため、簡易測定器での測定の前後で測定し、平均を取った。



Kind-mini

プラスチックシンチレーターを用いた簡易測定機。放射線教育支援サイト「らでい」から借りることが出来る。



Ranger

米国 S.E.International 社製のパンケーキ型広窓GMサーベイメーター。

Inspector USB の後継機。

不感時間  $100 \mu\text{s}$  程度であり、理論上の計数率の上限は、 $600\text{kcpm}$ 。

# プロジェクトの着地点

## Task 1: 線量計測

研究室では低エネルギーで校正された電離箱を用いて、また教育現場においてはガラスバッジを郵送しての測定により、正確な測定が可能。  
箔検電器及び Kind-Mini の貸出しによる教員自身によるスクリーニング法を開発。

## Task 2: 運用方法の検討

2018年夏に実際の教育現場における漏洩線量の実態調査を実施し、かなり高い線量を漏洩する装置が発見された。追加の検証により暫定ガイドラインを策定し、2019年度の実態調査でほとんどの装置で安全な事を確認できた。

## 暫定ガイドラインの策定

暫定ガイドラインを遵守した場合の安全性の更なる検証(今後も継続)

## Task 3: 線量評価とガイドライン

日本保健物理学会において、専門研究会を設立(2019-2020年度)。法令上の問題点やエネルギーが低く透過力の小さい低エネルギーX線の実効線量評価を行う。研究会終了後に、学会標準として運用ガイドライン、測定法、Q&A等を取りまとめる。

電圧、電流などの測定だけでは単純に危険性を判断できなかった。このためスクリーニング手法の開発を行い、ある程度高い線量が漏洩している恐れがある場合はガラスバッジ、nanoDot 線量計などによる信頼できる測定を行える体制を確立する。

# 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。

## 非密封RIの取り扱い

目に見えない放射性物質の管理、取り扱いの注意点と、ウイルス対策、特に接触感染対策は非常に良く似ている。1F などでおなじみのタイベックスーツは医療用・BSL3 実験室などで使用されている物と同じで、その調達で昨年4月頃の状況に貢献出来た。

## 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。

## 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。

## 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)

# 新型コロナウイルスへの工学的対抗策の検討



紫外線 or 光触媒などで  
滅菌・不活化して再利用

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。



密閉容器内での  
紫外線照射式  
空気清浄機

光触媒式空気清浄機

~~密閉~~

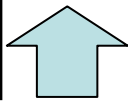
飛沫をキャッチして分解

~~密集~~

エアロゾル

数分間空气中に滞留し、  
広い範囲に拡散しうる。  
喋るだけでも飛散する。  
マスクを付けていても  
50%程度が飛散する。

世界的な  
供給不足



飛沫

感染者から2m程度の範囲。  
マスクを付けていても20%程度が飛散する。

SARS-CoV-2

マスク表面への光触媒塗布

~~密接~~

表面の接触

光触媒は、可視光線での活性の高い  
タングステン系の触媒が望ましい

金属含有の光触媒は暗くなくても  
一定期間不活化の効力を発揮

どこに潜んでいるか分からないトラップ  
材質によっては数日間感染力を持った  
まま付着している

表面への紫外線照射

人体の皮膚、眼に紫外線  
が入らないように注意する  
必要あり

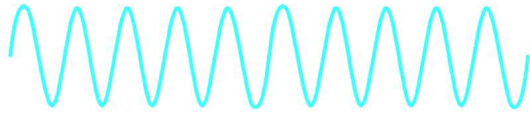
共有物品表面への  
光触媒の塗布

手袋、衣類への  
光触媒塗布

光触媒も紫外線も、特定の菌・ウイルスに対して効果が無いという事は報告されていないが、対象によって効果の程度が異なる。

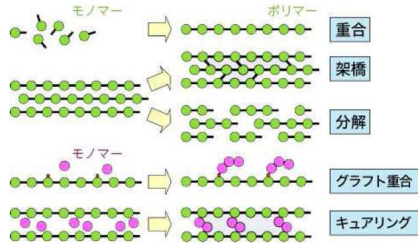
# エネルギー 大

## ガンマ線、エックス線



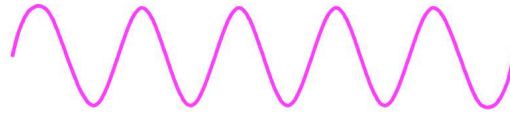
**電離作用**

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



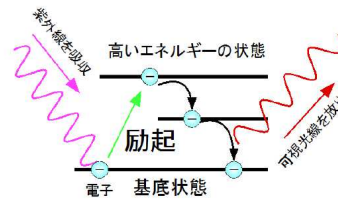
< 太陽光線の種類 >

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

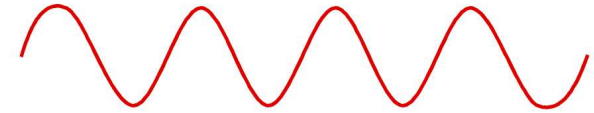
※イメージ図



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



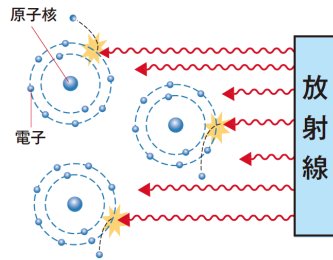
目で見える光、可視光線は波長が長くエネルギーの低い赤から、波長が短くエネルギーの高い紫までの間で、虹の七色のように見え方が異なります。光も電磁波の一種ですから少し電子を励起して、写真フィルムを感光させたり、太陽光発電を行ったり、植物の葉緑体の中で光合成を行うなどのパワーを持っています。波長(波の長さ)と位相(波の位置)の揃った光のことを、レーザー光線と言い、強度(波の高さ)がとても強く、遠くまでまっすぐ飛ぶなどの性質があります。

# 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。 $\gamma$ 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。

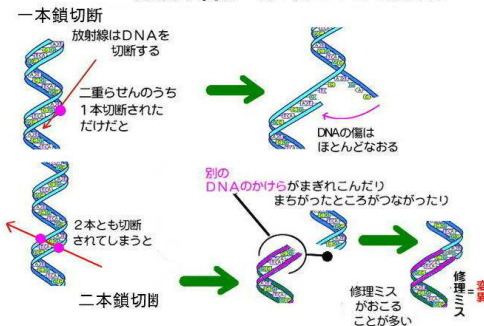
電離作用



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。



# 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。

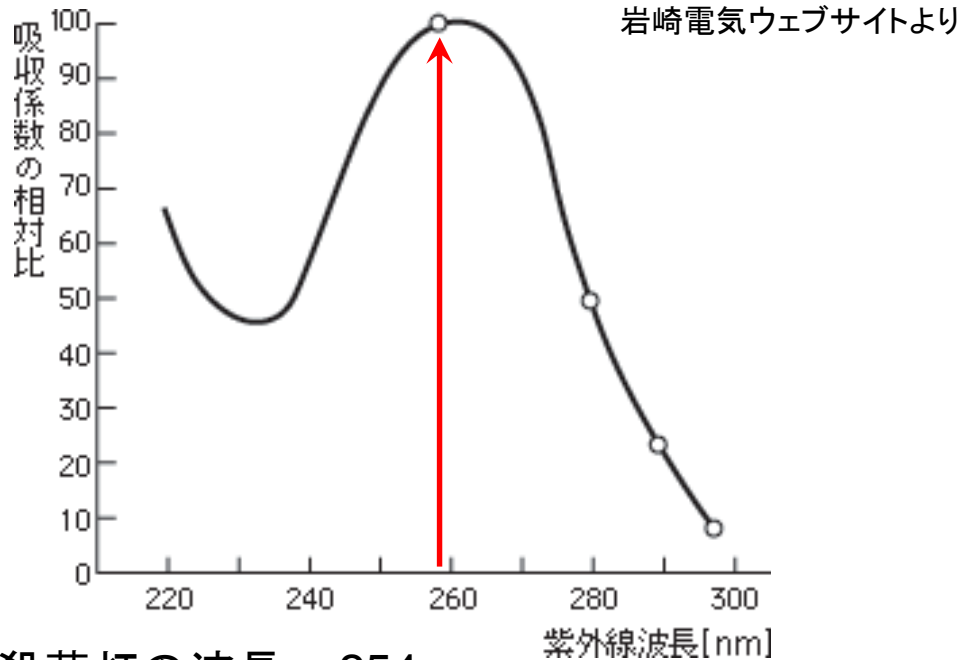
安全側に考え、 $10\text{mJ}/\text{cm}^2$  で 1/10,000 まで不活化出来るとして暫定的な指標とすることを提唱している。

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。

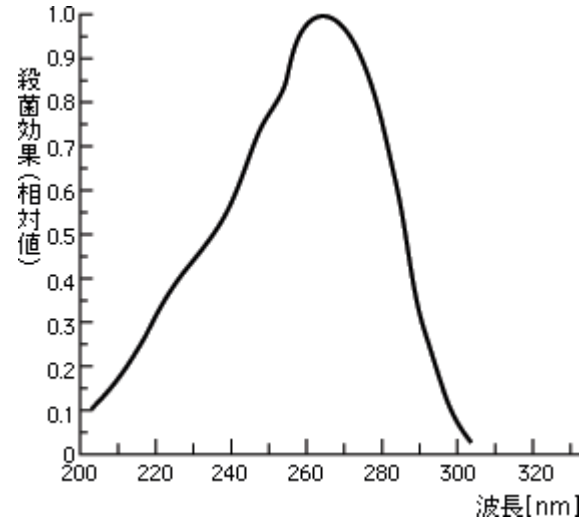
本研究では、このコロナウイルスを用いた実験と同一のセットアップで、大腸菌やバクテリオファージQ $\beta$  など既存のデータが得られている対象についてのUV-Cでの実験を行い、実験セットアップの妥当性を検証する。

# 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	UV-B	UV-A
200-290nm	290-320nm	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と生きていた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

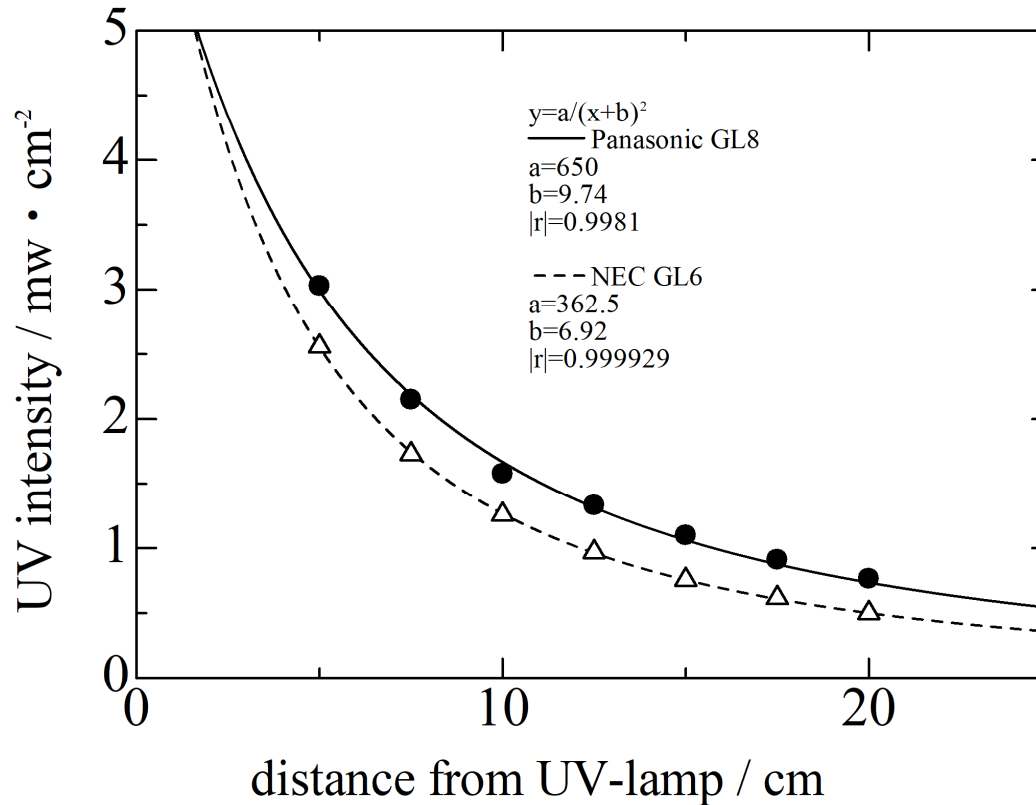
既に世界中で研究が進められており、SARS-CoV-2 に対しても複数の研究者からデータが出てきている。2), 3), 5) については査読が終了しています。

No	1)	2)	3)	4)	5)
グループ	イタリア Biancoら	ボストン大 Stormら	スタンレー電気	宮崎大 Inagakiら	広島大 Kitagawaら
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	Wet: 5.3 Dry: 4.1	5.1	37.5	3.6
査読	査読中	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/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**と言える。

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、10倍程度殺菌灯波長よりも積算照度が必要と、整合性が取れている。

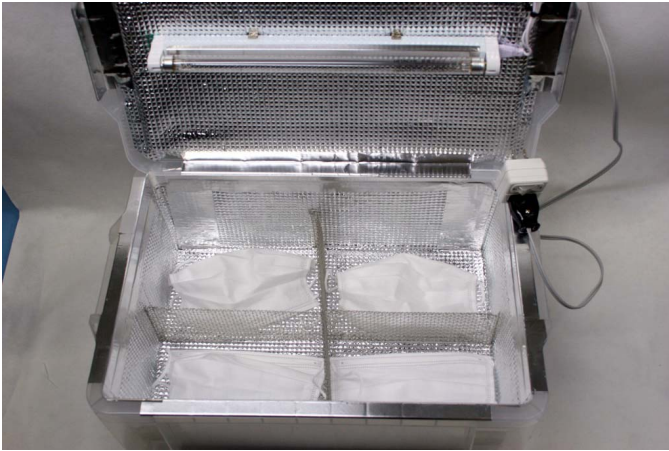
# 紫外線強度の評価



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。

# マスククリーン4

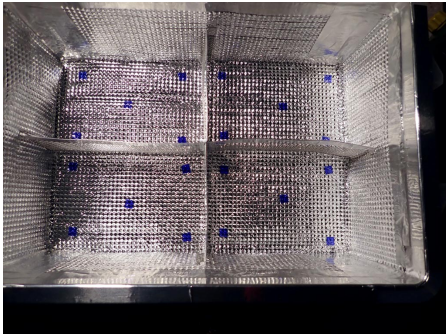


マスクが極度に不足していた時期に、医療機関で安全にマスクを再利用するために開発したのがマスククリーン4。殺菌灯をアルミシート貼りした箱に入れただけのものであるが、当時殺菌灯用の蛍光灯器具の入手もままならなかった。大量に輸入した中華製の製品は極めて品質が不安定であったが、ランプを国産の物に変えることで概ね安定した値を示すことが判明。さらに、ラジオクロミック線量計などを用いて、照射強度(線量率)を評価、10mJ/cm<sup>2</sup>照射するのに必要な時間を安全側に評価して保証した(マスククリーン4では20秒)

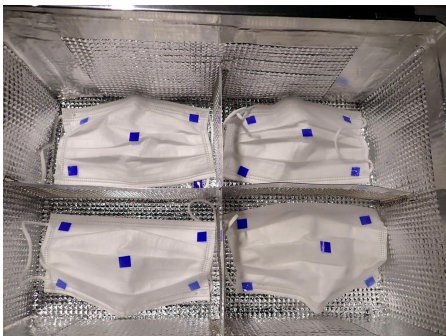
単位はmW/cm<sup>2</sup>

底面での測定。

複雑形状のマスク表面での測定。



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



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

# 市販されている様々な紫外線グッズ(1)

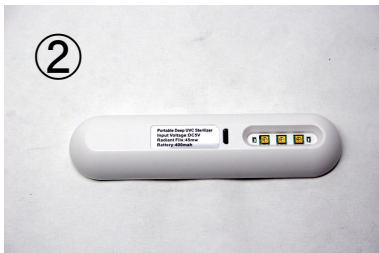
7月頃にイベント関係の音響担当大手S社から担当者が訪問してマイクなどの紫外線滅菌について相談を受け、いくつかの製品の評価を行った。その中で、市販されているLEDを使った製品は非常に照射強度が弱かったり(マスクリーンSの1/100程度)、場合によってはUV-Aも含めて紫外線が検出限界(0.001 mW/cm<sup>2</sup>)以下となる製品もあつたりするなど、極めて悪質であることが明らかになった。

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。



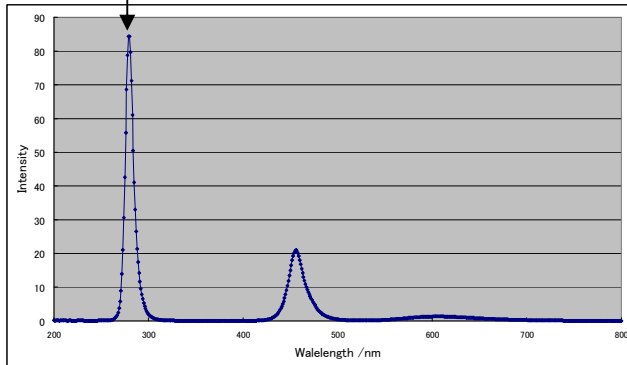
## 市販されている様々な紫外線グッズ(2)



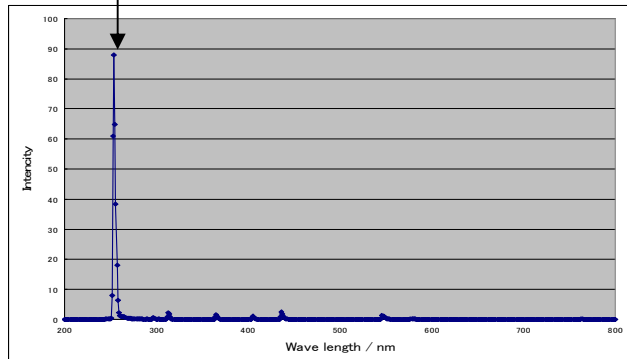
以前はUV-C光源として低圧水銀ランプについてのみ考えれば良かったが、近年260nm程度までの波長のLED光源が販売されるようになった。しかし、多くの製品で使用されている280nmでは不活化の効果は254nmの場合の1/10程度であり、分光放射照度計での測定、補正が必要。

UVのピーク波長は  
280nmでやや幅が広い

# そもそもこういったUV-C LEDを使用した製品は絶対的な強度が弱く、使い物にならない。



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)

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。

分光放射照度計  
USHIO USR45 で測定

## 市販されている様々な紫外線グッズ(3)

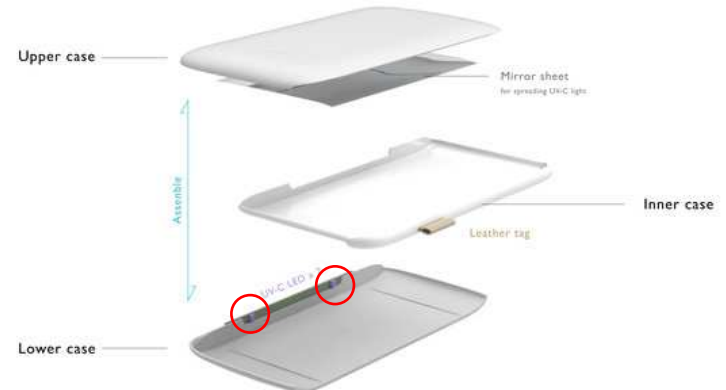


蛍光管式の物ならば大丈夫かという、左の商品は蛍光管を謳っているがユーザーのレビューによると実測値がゼロとのこと。サイズの的にGL8 だと思われるのでランプを交換すれば使えるかも知れないが、写真はどう見ても蛍光管では無く、仮にちゃんと出ていたとすると非常に危険な持ち方をしている。



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。



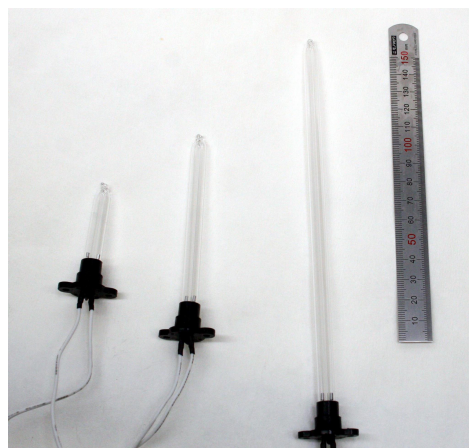
## 市販されている様々な紫外線グッズ(4)



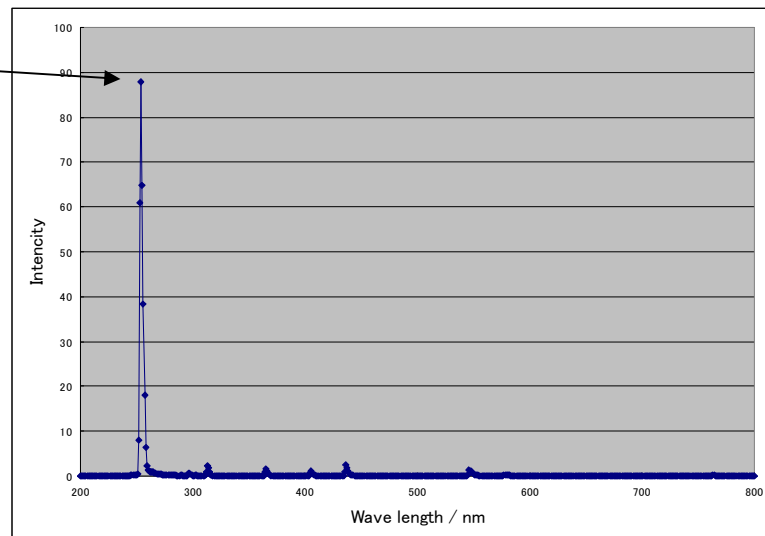
この製品はCCFL(冷陰極管)を使用した製品であり、熱陰極を利用した蛍光灯同様に水銀からの254nm殺菌線を出している。蛍光灯よりも水銀使用量が少ないとの事で現在でも製造が続けられている。12V電源などでインバータ回路を駆動するため、バッテリーでの利用も現実的で、左の写真のようなポータブルな製品も売られている(CCFL管の部分が100mm)。

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。



# 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。

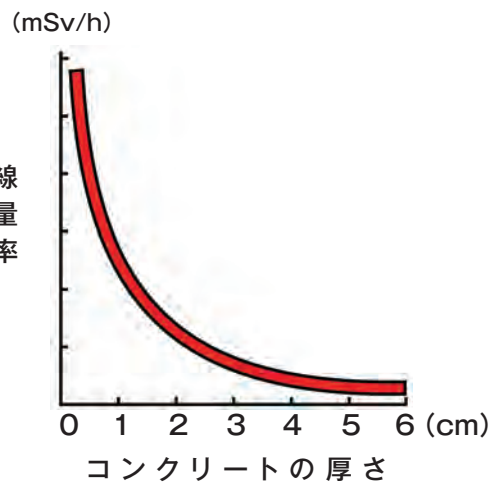
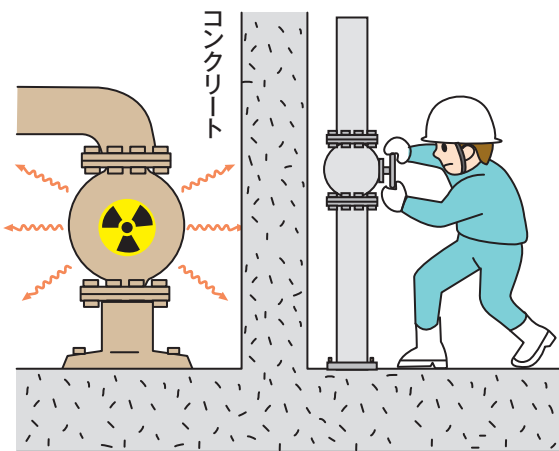
## 殺菌灯の入手が困難

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。

# 放射線防護の基本

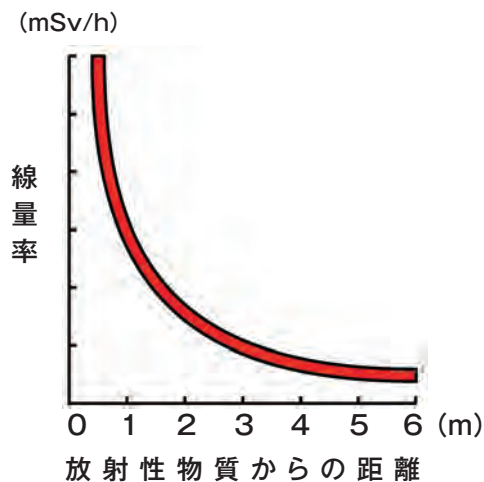
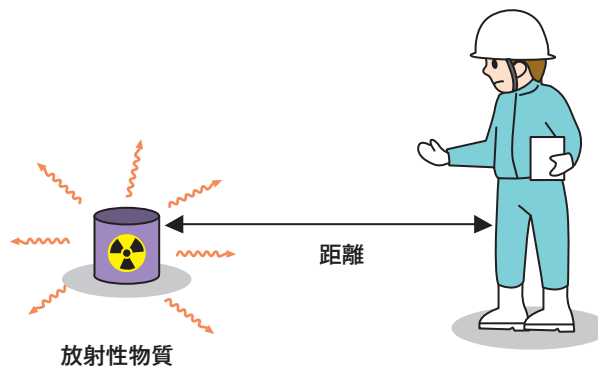
## 1. 遮へいによる防護

(線量率) = 遮へい体が厚い程低下



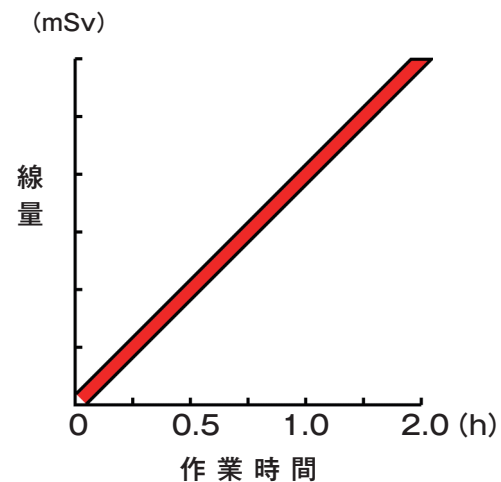
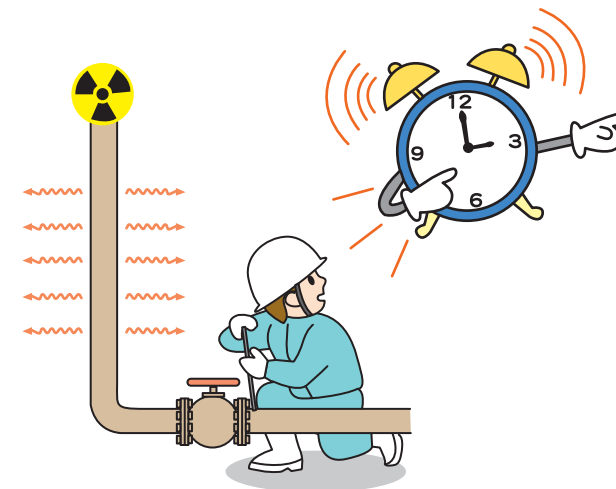
## 2. 距離による防護

(線量率) = 距離の二乗に反比例



## 3. 時間による防護

(線量) = (作業場所の線量率) × (作業時間)



# リスクの考え方

放射線に関しても同様であるが、一般公衆のリスクの捉え方は実態からかなり乖離している場合が多い。安全か危険かの、0か1で考えている例が多く見られる。

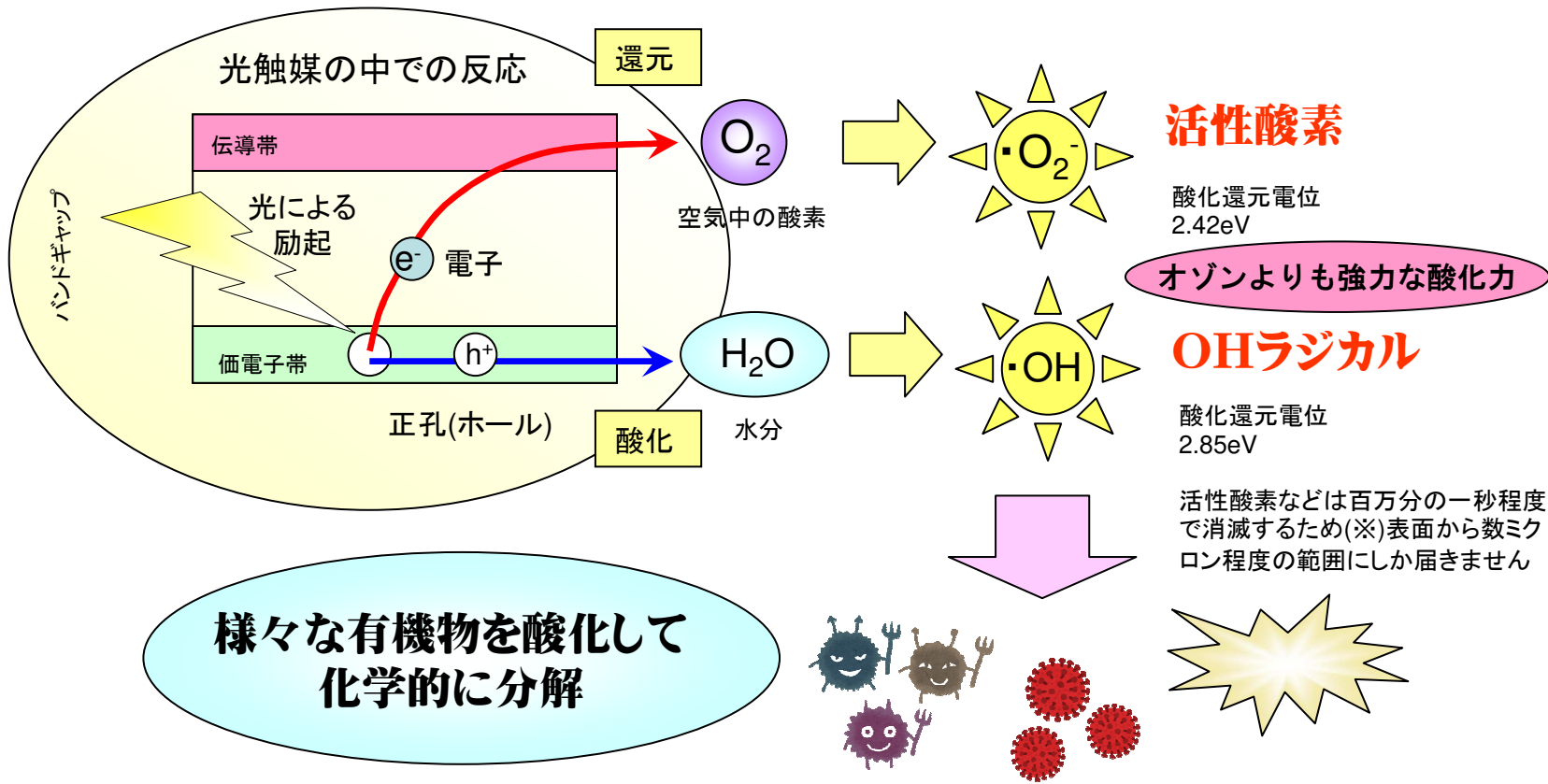
しかしながら当然絶対の安全も危険も存在せず、程度の問題に帰結する。コロナウイルスの場合、個人から見ると感染するかしないかの0か1と言うこともできるが、社会全体で考えると個々人がわずかでも感染するリスクを下げることが重要である。小さいことの積み重ねでも、一人の感染者が何人の次の感染者を生み出すかという実効再生算数が少し下がるだけで系全体の感染者数の動向は大きく左右される。

紫外線でも、光触媒でも、空気清浄機などはその効果を定量的に示すことは非常に困難であり、実際に使われる環境の換気状況や人の配置などで効果は大きく左右される。当然完全に感染リスクを0にする製品というのは絶対に存在し得ない。しかし少しでもリスクを低減する措置を積極的に進めていくべきである。もちろん、より性能の高い製品、コストの低い製品の開発を進め、それを何らかの指標で評価することも必要である。

- ・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



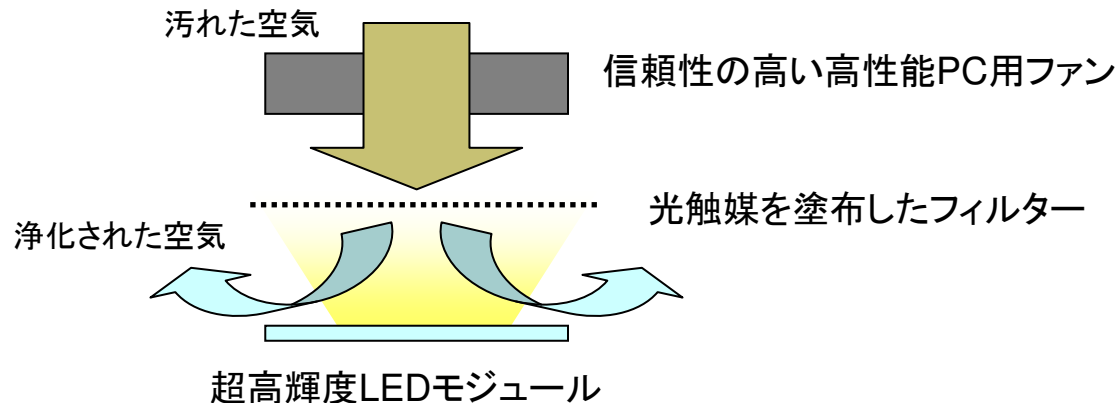
最終的には水と二酸化炭素にまで分解される(完全分解)。

※ 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。

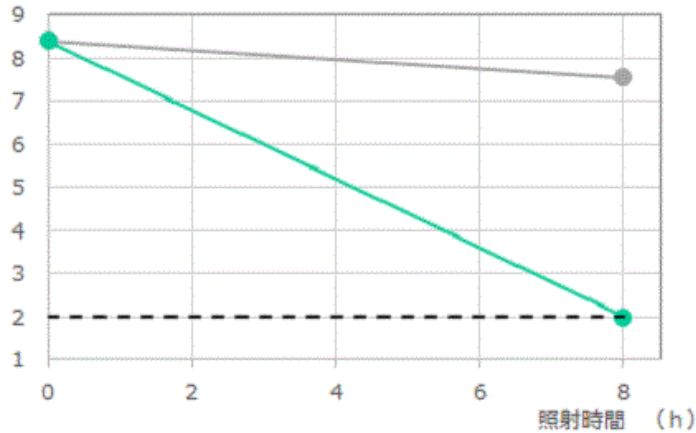


ひかりクリーナー

# 可視光応答光触媒 不活化

東芝

ウイルス力価 (log<sub>10</sub>PFU/試験片)



●—ルネキヤット未使用    ●—ルネキヤット    - - - 検出限界値

**A型**

**H1N1**

抗性試方法	密着法 JIS R 1756 2013 参考 実施
光源	白色蛍光灯 2000lx 400nm 紫外光
作用時	8h
試料塗布	5mg/2.5 5cm

試験機関：北里環境科学センター

光触媒	塗布	標準仕様	727mg/m <sup>2</sup> 2.5x5cm	換算	0.91mg	
		試作	27.7g/m <sup>2</sup> 2.5x5cm	性能	34.6mg	
換算						

標 光 強度 全 異  
68,500 lux  
速 速度 不活化

上記 条件 考

## フィルターによる飛沫の捕集

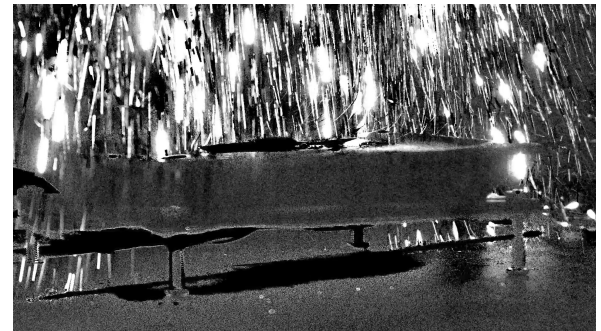


空気中の微粒子を可視化する特殊動画撮影を実施しました。

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。



## フィルターによる飛沫の捕集(2)



HEPAフィルターを使用したクリーンブース内にダクトを設置し、フィルターによる口腔からの飛沫を模擬した超音波加湿器ミスト捕集率を評価しました。**5 $\mu$ m以上の飛沫に関しては、ほぼ完全に捕集**できています。

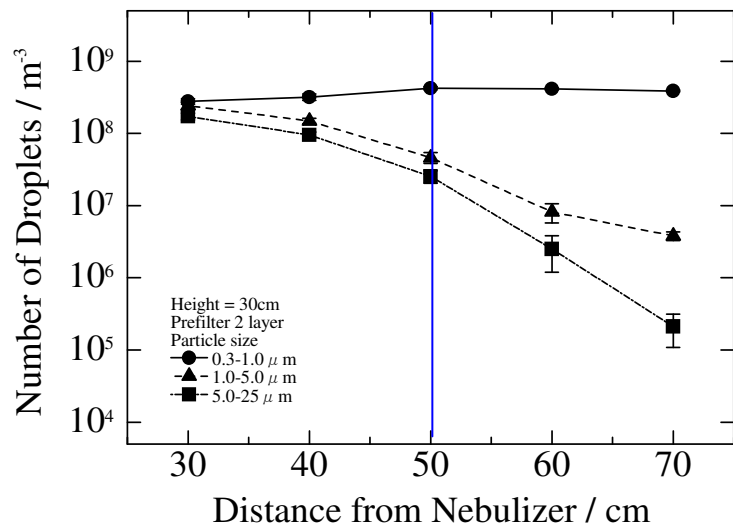
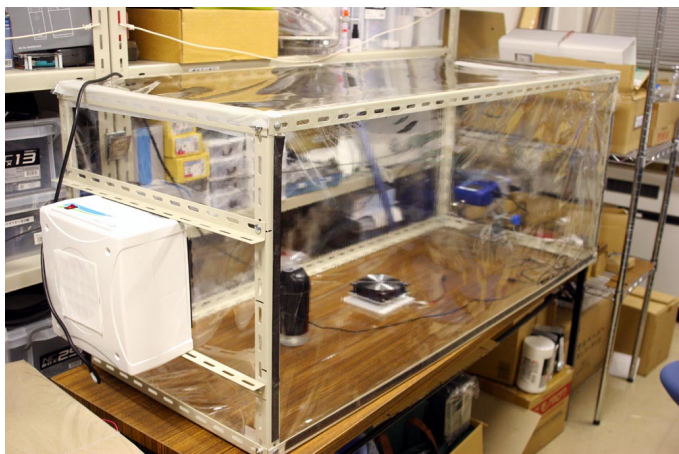
### キャッチしてゆっくり分解

一般に5 $\mu$ m以上の液滴を飛沫、それ以下の物をエアロゾル(飛沫核)と呼んでいます。噴霧器からの液滴と、空気中を漂う固体のダストでは形状が異なり、捕集率も大きく異なります。

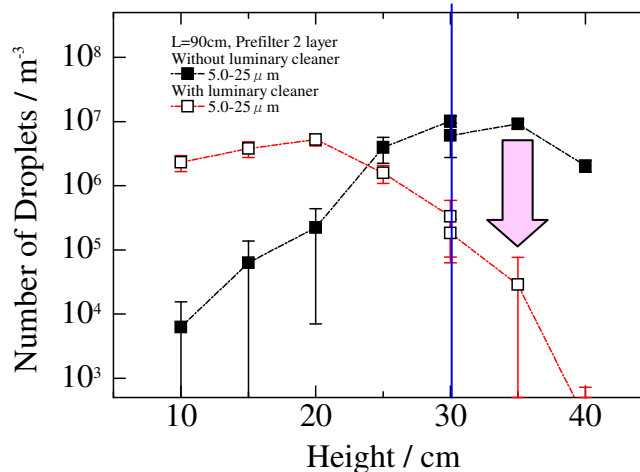
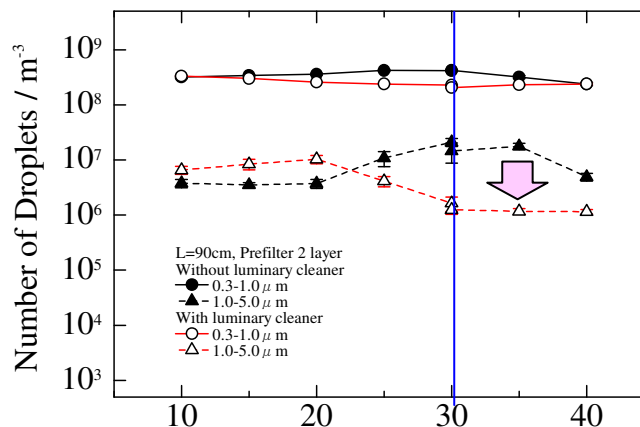
1 $\mu$ m以下の液滴はほとんど捕集されませんでした。さらに小さいホルムアルデヒド分子が分解されることから、光触媒による不活化は期待できません(カルテック社の実験で実証されています)。

測定条件	Particle Size	上流側 粒子数	下流側 粒子数	低減率
	$\mu$ m	/m <sup>3</sup>	/m <sup>3</sup>	
目張り無しクリーンベンチ内	0.3~1	7.4E+06	2.7E+06	0.37
	1~5	5.1E+04	1.7E+04	0.34
	5~25	9.0E+02	1.8E+02	0.20
目張りしたクリーンベンチ内	0.3~1	1.2E+04	6.7E+03	0.54
	1~5	1.4E+02	1.8E+01	0.13
	5~25	2.0E+01	0.0E+00	0
目張りしたクリーンベンチ内 加湿器使用(1回目)	0.3~1	4.1E+08	4.6E+08	1.14
	1~5	1.2E+07	3.6E+06	0.30
	5~25	3.7E+06	2.1E+02	5.76E-05
目張りしたクリーンベンチ内 加湿器使用(2回目)	0.3~1	2.8E+08	2.5E+08	0.87
	1~5	2.6E+06	1.0E+06	0.40
	5~25	3.0E+05	1.8E+01	5.99E-05
目張りしたクリーンベンチ内 加湿器使用(3回目)	0.3~1	2.7E+08	2.7E+08	0.99
	1~5	2.0E+06	1.5E+06	0.76
	5~25	1.1E+05	5.3E+01	4.73E-04

# フィルターによる飛沫の捕集(3)



粒径毎の飛沫数の飛距離依存性



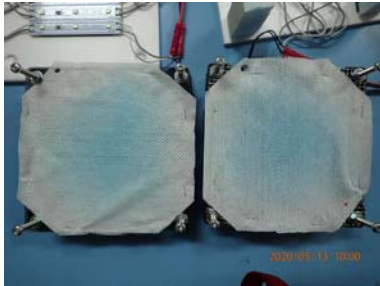
風速0.6m/s程度のクリーンベンチ内での飛沫捕集試験。

大きな粒子は距離と共に数が減少した。重力で落下するのと蒸発による縮小の双方が考えられる。50cm離れた位置での垂直分布はミストが立ち上げる高さ付近で最大であったため、余り下に落ちてはいないらしい。

ひかりクリーナー作動で、着席時顔の高さの40cm程度の飛沫は大幅に減少することが確認できた。

## ひかりクリーナーでの有機色素分解実験

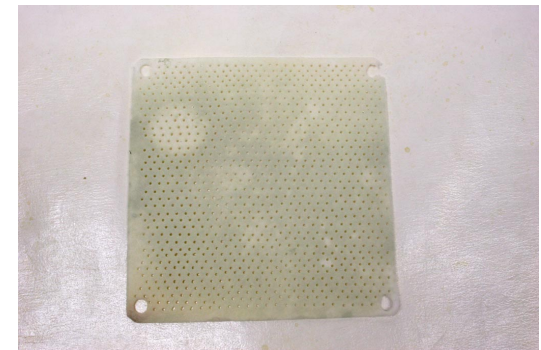
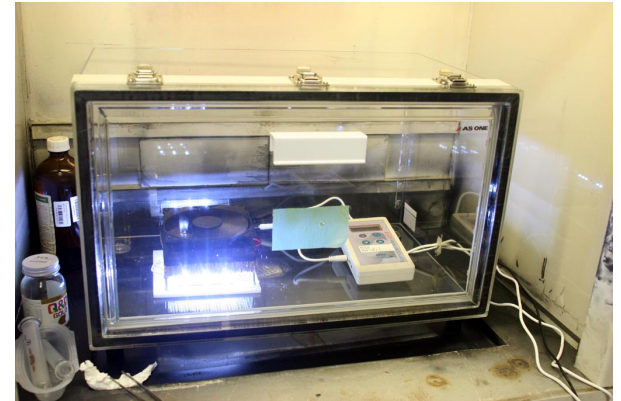
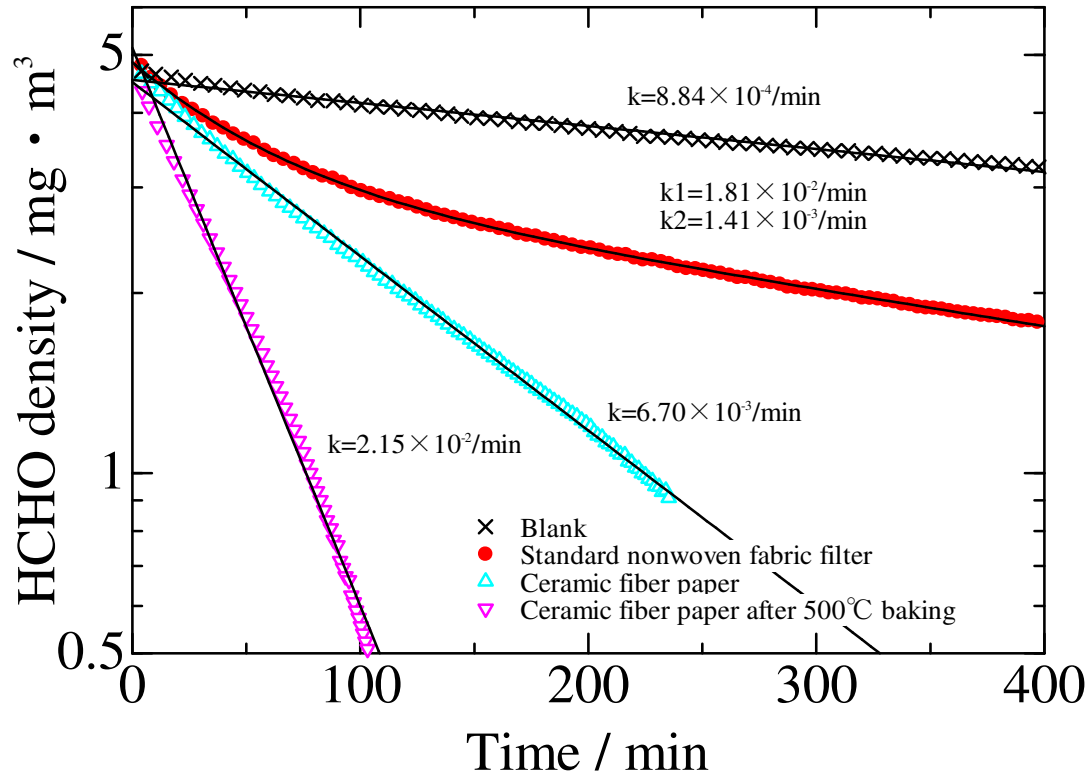
・メチレンブルーという有機色素を用いて、ひかりクリーナーの光源と光触媒フィルターを用いての実験では、 $30\mu\text{g}$ 程度の有機色素が3時間程度で分解されていることが確認され、光の量によって分解の程度が異なることも確認できました。



・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



38L サイズのアクリルデシケーターを使用して、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ー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と無機系の材料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速度は対象物の濃度と反応速度定数に比例する、**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言えません。今回の標準機の結果を考えると、 $4.8\text{mg}/\text{m}^3$  から1時間で  $3.3\text{mg}/\text{m}^3$  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  $0.8\text{mg}/\text{m}^3$  の減少です。アクリルデシケーターの容積は38Lですから、絶対量に換算すると  $30\mu\text{g}$  が分解された計算になり、メチレンブルーでの数値と一致します。

コロナウイルスを  $5.2 \times 10^{-7} \mu\text{g}$  とすると、5,800万個に相当します。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、実際にはもっと少ないと思われませんが、**完全に分解しなくても不活化**されてしまいます。無機材質の特別仕様フィルターは、15倍以上の反応速度定数となっており、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いのですが、カルテック社が日本大学、理化学研究所と共同で行った実験では、**噴霧されたSARS-CoV-2 ウイルスに対して光触媒は明確な効果を示しています**。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、大腸菌のみに感染する安全なマクロファージQ $\beta$  ウイルスなどを指標とした試験が光触媒工業会などで推奨されています。