

研究内容紹介

大阪府立大学
工学研究科 量子放射線系専攻
放射線安全管理学研究室
准教授 秋吉 優史

秋吉 優史: akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp

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



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、
タング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

ペルチェ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

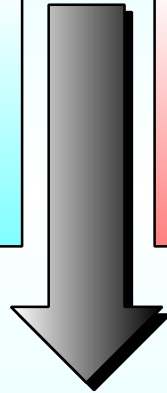
H25-H27 原子カシステム開発・原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ
H30-R2 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業
H29～ JAXA との共同研究契約(主)
H29～ JAEA との共同研究契約(主)

中性子照射による影響

Neutron Irradiation

電子的欠陥の導入
弾き出し損傷の導入
核変換

導入した欠陥の再結合
転位ループやボイド
などへの集合・成長



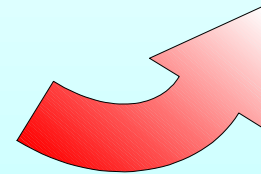
照射欠陥構造

点欠陥(格子間原子, 空孔)
クラスター, 転位ループ,
積層欠陥, ボイド,
バブル, 粒界クラック

微構造変化

巨視的物性変化

- ・ スエリング
- ・ 熱伝導率
- ・ 機械的強度
- ・ 絶縁性
- ・ 耐酸化性
- etc . . .



発現

セラミックスの照射損傷評価

スエリング

点欠陥, ボイド, バブル,
転位ループ, 粒界クラック
などの複合的発現

XRD

点欠陥, 転位ループ
などによる格子歪み
(異方性の検出可)

熱拡散率

フォノン伝導が主の
セラミックスでは
点欠陥, 特に空孔濃度
を選択的に反映

透過電顕観察

ある程度の空間的広がりを持つ
構造か, 規則的な周期構造と
して配列した格子を観察可能
(点欠陥は見る事が出来ない)

相補的な測定による 欠陥導入状態評価

陽電子消滅寿命

主に空孔やその集合体
の導入状態を評価可能。

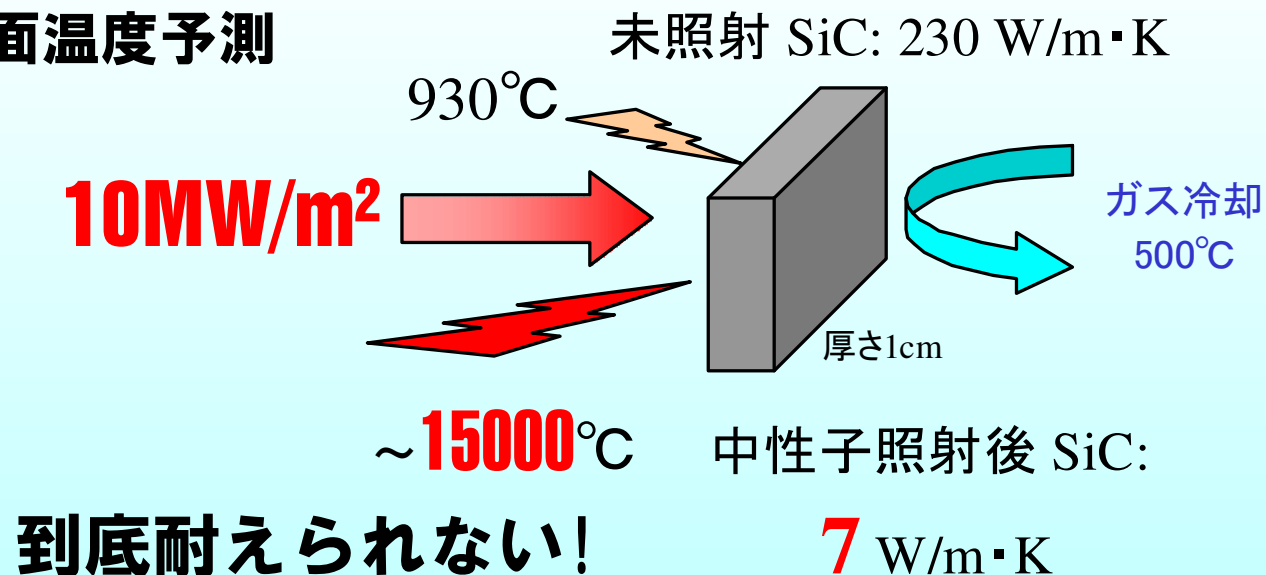
様々な照射条件 (照射量, 照射温度,
照射粒子, エネルギー) の違いによる,
照射直後(As-irradiated)の測定

照射後試料のアニール
(等時アニール, 等温アニール)
に伴う回復挙動評価

特に熱拡散率に注目

熱伝導率（熱拡散率）は核融合炉ダイバーダーの設計上最も重要なパラメーターの一つであるが、照射により欠陥が導入されるとフォノン-格子散乱の増加によりフォノン伝導が阻害され、著しい熱拡散率の低下が報告されている。タングステンは金属であるが1/3程度をフォノン伝導が担っており、さらに核変換で生成するReにより電子伝導が阻害され熱拡散率が低下する。

ダイバーター表面温度予測





核融合炉材料の 照射損傷評価



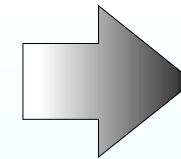
SiCセラミックス、タングステン → 核融合炉ダイバータ候補材

日米科学技術協力事業核融合分野でのプロジェクト

JUPITER → JUPITER II → TITAN →

PHENIX (H25 - H30) → FRONTIER (R1 - R6)

- ・米国 Oak Ridge National Labo (ORNL) の HFIR 炉での中性子照射
- ・プラズマアークランプを用いた高熱負荷試験
- ・電子線 LINACを用いた高エネルギー電子線照射



- ・熱物性評価
- ・陽電子寿命測定
- ・機械的特性評価
- ・微構造観察

- ・ORNL の Yutai Katoh らをはじめとする日米の世界的な照射損傷研究者とのネットワーク構築
- ・日本国内での電子線照射の重要性をアピールしている。特に照射時の液体金属腐食効果の研究は極めて先進的。

- ・平成27年 2月1日-23日、
平成29年 2月26日-3月18日、
平成30年 9月10日-11月15日
令和2年 1月12日-2月7日
の4回の 長期 ORNL派遣。
現地の研究者との強固な信頼関係。

HFIR RB19Jキャプセルにおける Gdシールドによる熱中性子抑制照射

核融合原型炉において問題となる、ダイバータ候補材料の熱負荷特性に及ぼす中性子照射効果を弾き出し損傷及び核変換効果の視点から明らかにすることを本研究の目的としている。

核融合炉ダイバータに於いてタングステン材料中の核変換量と弾き出し損傷量の比は0.08%/dpa と見積られているのに対し、軽水炉であるHFIR のFuel trap region では8.5%/dpaにも達する。核変換により生成される Re,Osの影響を低減するため、比較的熱中性子束の少ないRB*(large Removable Beryllium facility)において、Gdにより熱中性子をシールドした照射を行った (Gd-157(15.7%): 2.5×10^5 barn, Gd-155(14.8%): 6.1×10^4 barn)。

Fuel trap region: $\phi_{\text{fast}} = 1.1 \times 10^{19} \text{ n/m}^2\text{s}$ ($>0.1 \text{ MeV}$), $\phi_{\text{thermal}} = 1.7 \times 10^{19} \text{ n/m}^2\text{s}$ ($<0.5 \text{ eV}$)

Rabit 照射は
こちらで実施

RB*: $\phi_{\text{fast}} = 4.7 \times 10^{18} \text{ n/m}^2\text{s}$ ($>0.1 \text{ MeV}$), $\phi_{\text{thermal}} = 9.5 \times 10^{18} \text{ n/m}^2\text{s}$ ($<0.5 \text{ eV}$) [1]

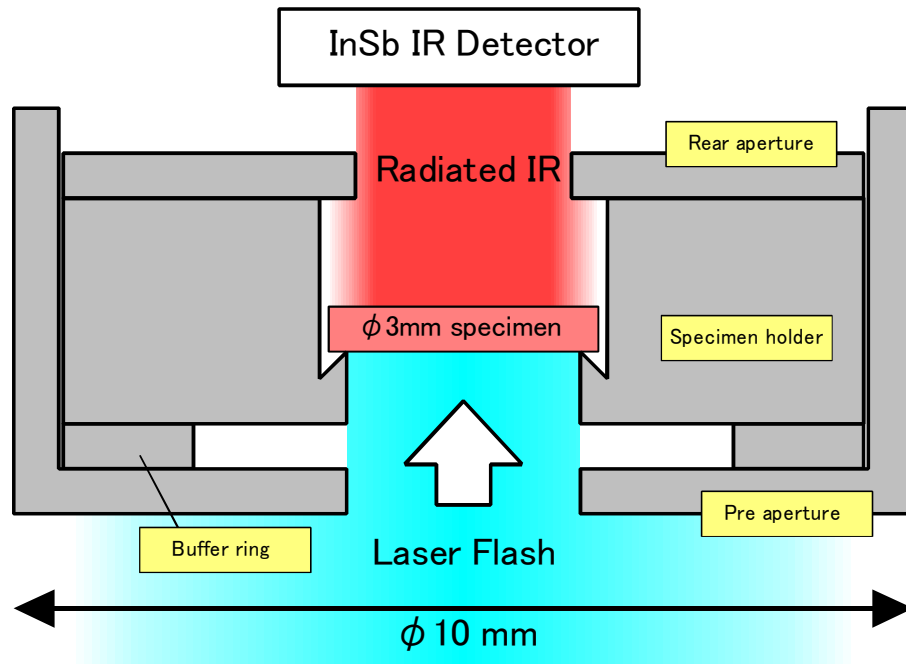
照射は2016/6/14から12/9まで 4サイクル 94日間、出力85MWで実施された。中性子束は試料を装荷したキャプセル中の高さにより異なり、それぞれの試料に対して計算と実測により照射量が評価されている。またタングステン中の弾き出しは高速中性子 ($>0.1 \text{ MeV}$) 10^{25} n/m^2 あたり0.195dpaとして求められる[2]。

[1] T. Daly et al., Proc. of 2012 Advances in Reactor Physics Linking Research, Industry, and Education (PHYSOR 2012).

[2] Mohamed E.Sawan, Fusion Engineering and Design, 87(2012) 551-555.

φ 3試料測定用治具の開発

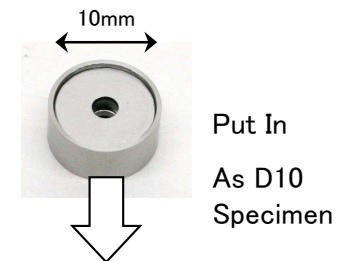
H27 2月の前回派遣時に先方の研究者と共にNETZSCH LFA-457で使用可能なD3試料測定用の治具を作成。この時点では加工しやすい黒鉛製としていたが、H27年度中に1200℃まで耐えられるMo-TEM材を用いたD3試料測定用の治具を作成した。



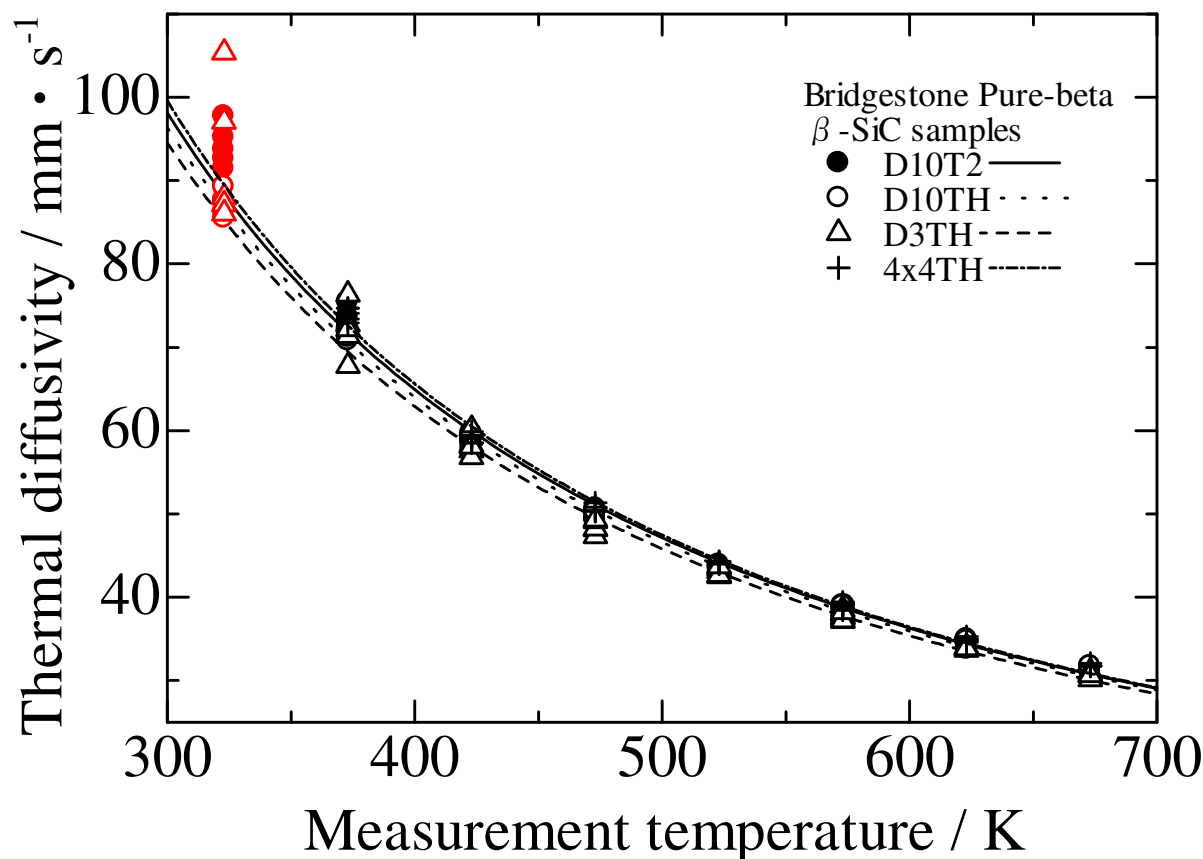
Netzsch LFA-467HT
Standard Specimen Holder
(For 12.7mm specimen,
with 10mm Conversion ring)



D3 Specimen holder manufactured
in Japan using Mo-TEM alloy.



LFA-467HT による異なる試験片サイズでの 熱拡散率測定の実証



ORNL に導入された NETZSCH LFA-467HT を用いて、D10T2, D10TH, D3TH, 4x4TH の異なる試料形状の Bridgestone Pure-beta β -SiC 試験片について、熱拡散率測定を行った。

Cowan Model を用いた解析の結果、100℃以上の測定に於いて**全てのサイズの試験片は非常に高い精度での熱拡散率の一致を見せた。**

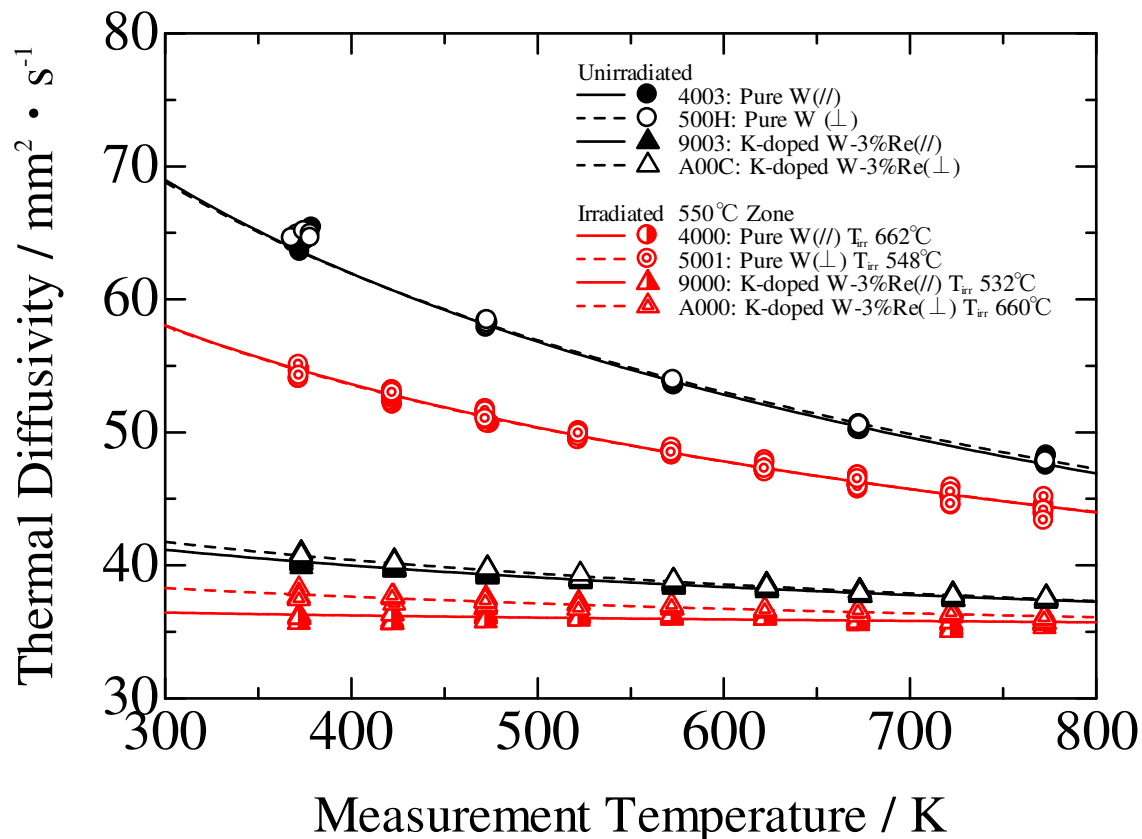
β -SiC 試料ではカーボンコートなどの表面処理を行っていないため、理想的な測定が行えている。グラフェンスプレーの使用によりW材についても同様の測定が可能である。

HFIR 19J 照射後試料の測定結果

・HFIR 19J キャプセル 500°C zone でのD6T2サイズの照射試料に対して
LFA-457により500°Cまでの測定を行った。

Specimen ID	Irradiation temperature (°C)	Neutron fluence (10 ²⁵ n/m ² · s)		Dose (dpa)		Component	Grain Orientation
		Calculated	Measured	Calculated	Measured		
4000	662	2.4	2.0	0.46	0.39	Pure W	//
5001	548	1.3	0.78	0.25	0.15	Pure W	⊥
9000	532	1.1	0.53	0.21	0.10	K-doped W-3%Re	//
A000	660	2.3	2.0	0.45	0.38	K-doped W-3%Re	⊥

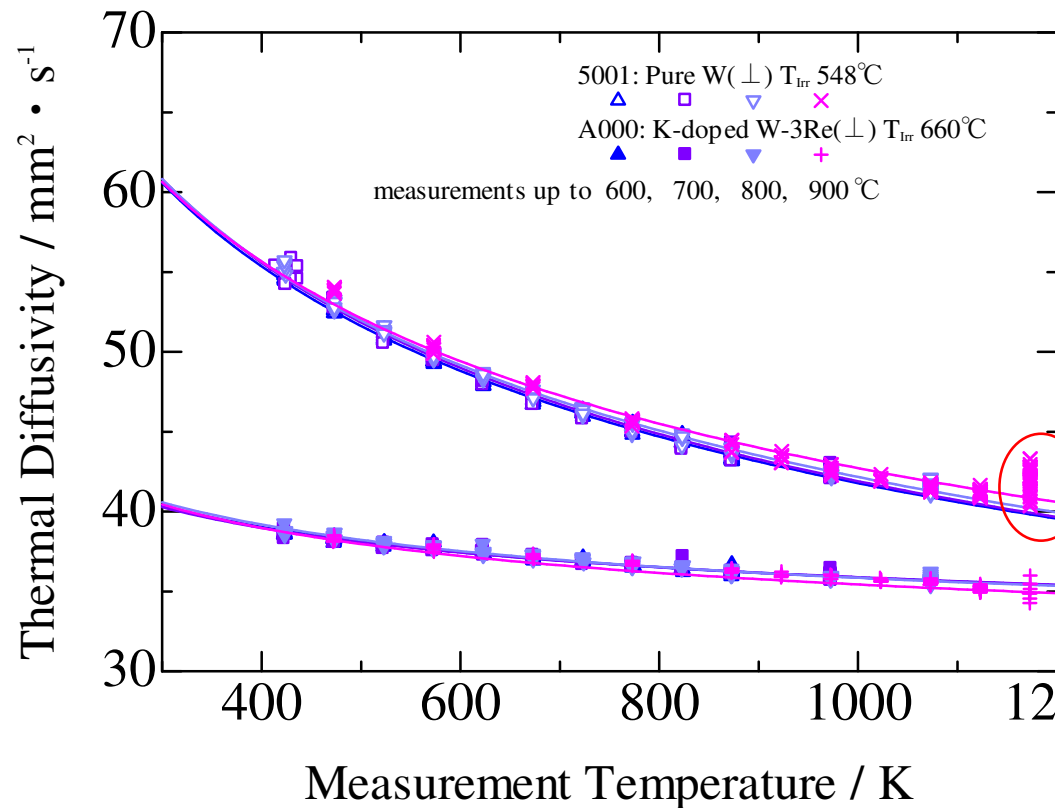
- ・照射後Pure W は未照射3%Re添加材よりも高い熱拡散率を示した。
- ・照射後の試料も高温では未照射試料との差が小さくなった。
- ・未照射試料では結晶方位による差はほとんど見られなかった。
- ・結晶方位の異なる試料は装荷位置が異なり、**損傷量が2倍程度異なるが、それでもほとんど違いが見られなかった。**



**弾き出し損傷による
影響は限定的**

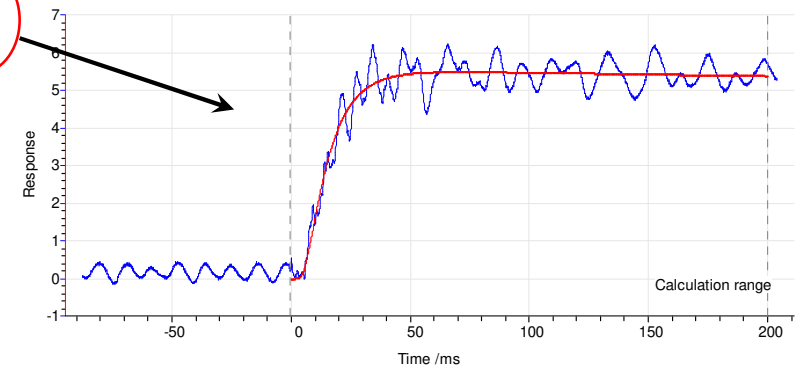
中性子照射後試料のアニール試験結果

前ページと同一の試料に対して、LFA-467HT によりアニール試験を行った。室温～目標温度まで測定を行いながら昇温後、1h以上キープ、降温後に翌日再度室温～昇温しながらの測定を繰り返し、温度依存性変化を評価した(等時アニール試験)。さらに1分ごとの測定を行いながらアニールをすることで等温アニールについても評価可能。



・800°Cまでのアニールで回復挙動は見られなかった。現在、1100°Cまでのアニール操作を継続中。

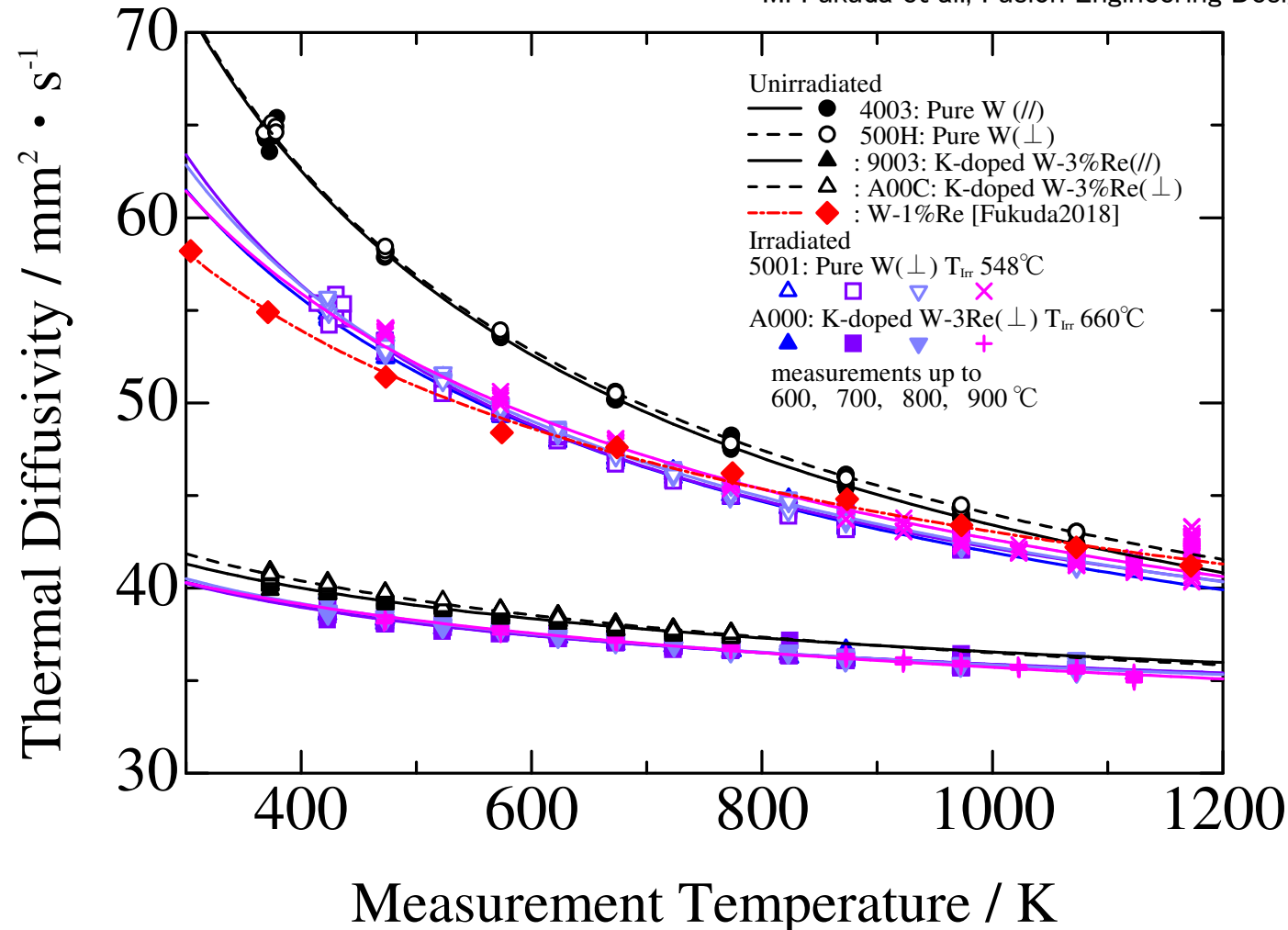
・900での測定に於いて、赤外線信号に周期的なノイズが乗る、Oscillation の問題が顕著となっており、現在それ以上の温度での測定を停止している。



欠陥量が少なく、フォノン伝導に対する寄与が殆ど無ければ、核変換量(及び核変換後の元素の分布状況)によって**照射後の熱伝導が予測可能**となる。

中性子照射後試料と1%Re添加材との比較

M. Fukuda et al., Fusion Engineering Design, 132 (2018) 1–6.



中性子照射後のPure W 試料は、**未照射の W-1%Re 試料と非常に近い熱拡散率を示した**。温度依存性が若干異なるが、点欠陥の影響か、Re分布状態の違いかは不明。

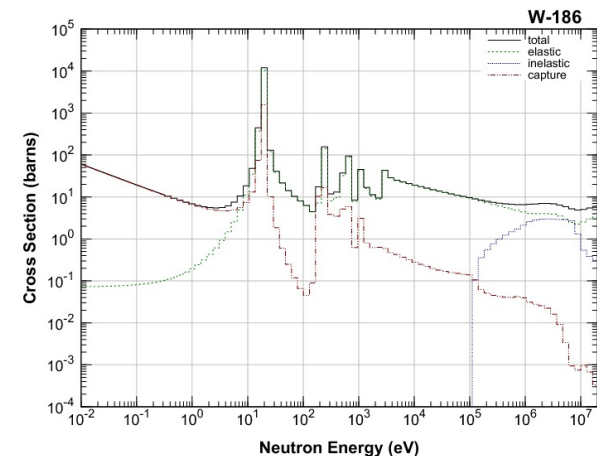
核変換生成量の考察

・RB-19J キャプセル内に設置した中性子線量計の実測により熱中性子束が得られている。残念ながら3本設置した線量計の一本が行方不明であり、2本の線量計から得られた線量でこれまで得られている二次式でのフィッティングを行うと、550°C Zoneでの熱中性子束は負の値となっている。

高さ 2.7cm で熱中性子 ($< 0.5\text{eV}$) は $1.0 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ 、10.3cmで $5.8 \times 10^{23} \text{ n/m}^2$ と評価されており、550°C Zone は 17~25cm の高さであるため、**大まかに $5 \times 10^{23} \text{ n/m}^2$ として計算を行った。**

W-186 (n, γ) W-187 $\rightarrow \beta$ 崩壊(2.37h) $\rightarrow$ Re-187

のみを考慮すると、天然同位体比28.4%, 熱中性子 (0.0253eV) 吸収断面積38.1barn(10^{-28}m^2) から、**核変換量は0.05% 程度**と見積られた。実際には20eV付近で共鳴吸収を示しており0.5eV~10MeVの積分断面積は474barnある。さらにEpithermal 領域の中性子束は熱中性子よりも50倍程度高いため、Dailyらが照射前に行った見積では、550°C Zone の核変換量は **4cycleで 0.52%** となっている。Pure W 照射後試料に対する熱拡散率測定結果は、W-1%Reより若干高い程度の値となっており、**非常に良い一致を示している。**



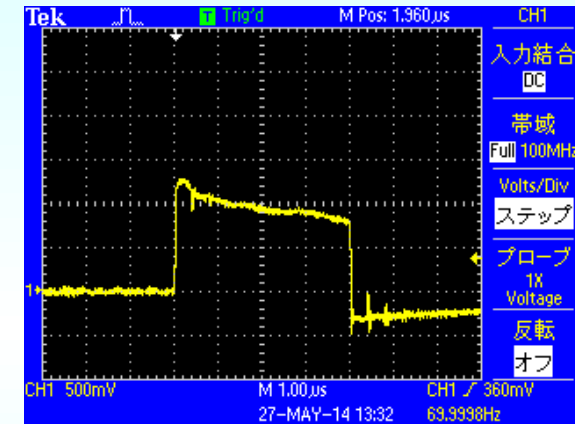
JENDL-4.0 (JAEA) より

電子線照射による欠陥導入

京大複合原子力科学研究所 KURNS-LINAC

尖頭電流 $\sim 500\text{mA}$, パルス幅 $0.1\sim 4\mu\text{s}$,
繰り返し周波数 $\sim 100\text{Hz}$ での照射により、
平均電流 $200\mu\text{A}$ 以上での照射が可能

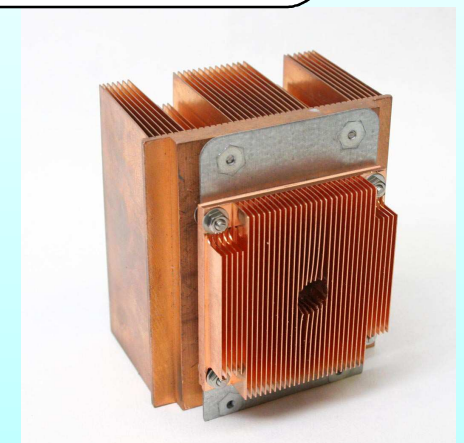
- ・ほぼ点欠陥のみを導入
- ・5cm程度の飛程があり均一に欠陥導入が可能
- ・照射量は $\sim 0.02\text{dpa}$ 程度(一週間泊まり込みで)



- ・30MeV運転では中性子が発生して試料が放射化する
- ・半径数cmに $\sim 7\text{kW}$ が投入されビーム加熱が激しい

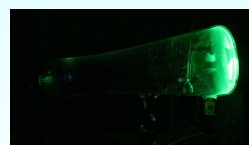


- ・照射ホルダーの工夫で様々な照射温度で照射が可能



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 200mSv/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出来ます。

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のか、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出来ます。詳しくはホームページをご覧ください ↓



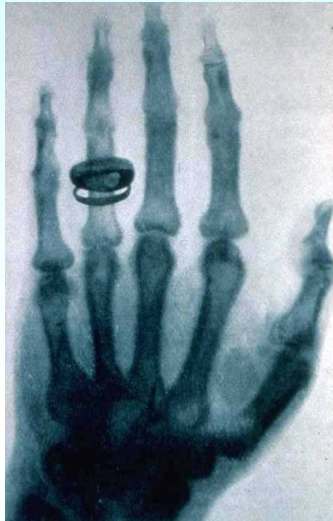
学校教育現場における 放射線安全管理の体系化



Wilhelm Konrad Röntgen

1895年 放電の実験で偶然X線を発見

1901年 第1回ノーベル物理学賞受賞



クルックス管はレントゲンがX線を発見した由緒正しい装置であり、放射線の歴史を語る上で非常に重要だが、これまで中学の教育現場では、電流は電子が運んでいると言ふことの理解のために使われてきた。このため多くの教員はクルックス管から放射線が放出されていること自体を知らない。

放射線安全管理

測定する(線量当量、エネルギースペクトル、空間分布など)
評価する(防護量である実効線量、等価線量の評価)
防護する(装置運用条件の改善、利用方法の改善、遮へい)
規制する(線量拘束値の設定)

放射線教育を行う上での大転換点

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。**

2019年度 教科書検定
2021年度 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。

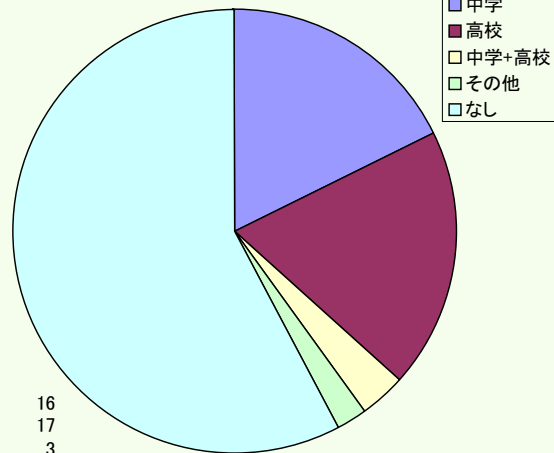
クルックス管自体に関し
ては2008年版の学習指
導要領解説にも記載さ
れていた。

放射線の利用、応用が広く認知されると期待される

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。

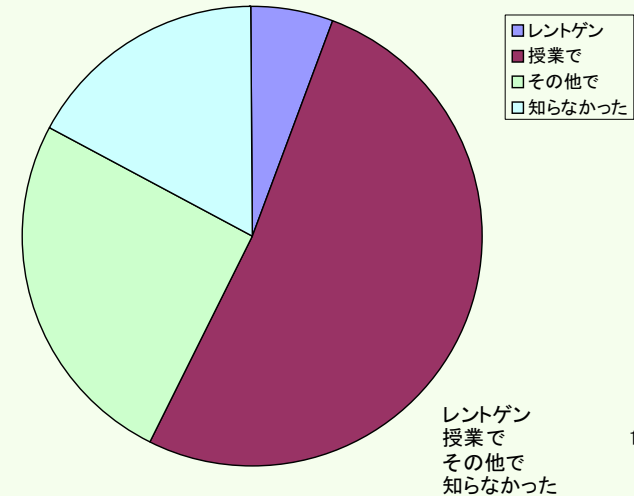
Q1. あなたは今までにクルックス管の実演を見たことがありますか？



中学
高校
中学+高校
その他
なし

16
17
3
2
52

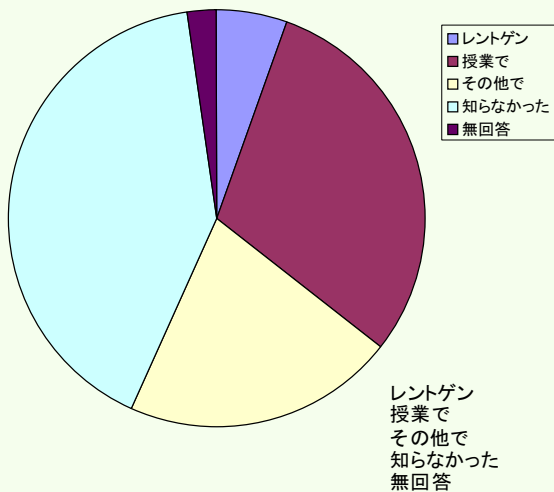
クルックス管を見たことがある見たことがある35人の中で
Q2. クルックス管から X線が出ると言うことは知っていましたか？



レントゲン
授業で
その他
知らなかった

2
18
9
6

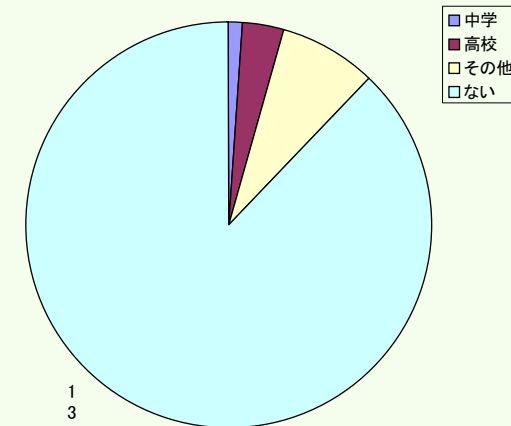
Q2. クルックス管から X線が出ると言うことは知っていましたか？



レントゲン
授業で
その他
知らなかった
無回答

5
27
19
37
2

Q4. あなたは今までに霧箱を見たことがありますか？



中学
高校
その他
ない

1
3
7
79

今そこにあるリスクを低減するために

低電圧駆動
絶対安全の
装置の推奨

経済的要因

ふるさと納税
制度等を用いた
買換え促進

徐々にリプレースしていく

最終的には被ばく
ゼロを目指す

暫定的措置

X線を活用したコンテンツ
を安全に実施するために

ALARAに従い最低限度の被
ばくに留める + 管理目標値

自主的な管理

低エネルギーX線
測定手法の確立

実態調査

線量低減
手段の確立

現場での線量
確認手段の提供

線量低減が難しい装置
は使用停止を勧告

自主的な規制

誘導コイル設定などの運用条件、バイパス
・分配抵抗の使用、クルックス管自体のリフ
レッシュ(アニーリング?)、遮蔽体の使用、
距離・時間の制限

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。

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

IAEA の GSR part3

計画被ばく状況として教育での放射線曝露を明示(3.1(e))

労働者への規制の範疇に16-18歳の**職業訓練**に伴う線量限度を提示(**実効線量** 6mSv/y, 眼の水晶体等価線量 20mSv/y, 末端部等価線量 150mSv/y) クルックス管が使われるのは一般的な理科の授業であり、これらとは切り離されるものとして考える必要がある。

ICRP Pub36 科学の授業に於ける電離放射線に対する防護

1983年の物であり実効線量当量での記載で **0.5mSv/y**、目や皮膚のような単一の臓器・組織の線量当量5mSv/yとなっており、**個々の授業**ではその **1/10** とされている。

ICRP-Pub101a 公衆の防護を目的とした代表的個人の線量評価

教育に伴う放射線曝露での線量評価でも代表的個人の考え方を導入する。

ICRP-Pub64 潜在被ばくの防護: 概念的枠組み 及び IAEA BSS

ICRP 1990年勧告(Pub60)では**免除**の要件として線量が trivial であること、防護が最適化されていることとされており、具体的には個人線量が **10 μ Sv/y** のオーダーとしている。

NCRP Report No.180 “Management of Exposure to Ionizing Radiation: Radiation Protection Guidance for the United States”

無視可能個人線量として線源か行為あたり実効線量で **10 μ Sv/y** を勧告。

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:
 $10 \mu\text{Sv}$



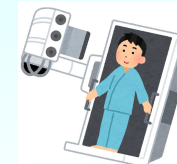
0.01mSv
($10 \mu\text{Sv}$)

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:
 $600 \mu\text{Sv}$

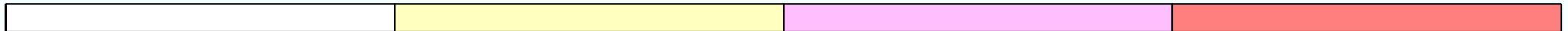


1mSv

CTスキャン1回:
数mSv



ICRP 1990/2007年勧告
一般公衆への追加線量限度
年間 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:
 $100\text{--}200 \mu\text{Sv}$



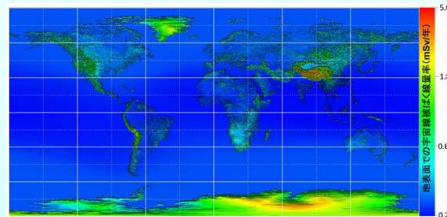
日本人が特有に持っている 20Bq のポロニウム
210 による年間被ばく
線量: $800 \mu\text{Sv}$

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:
 $\sim 10\text{mSv}$

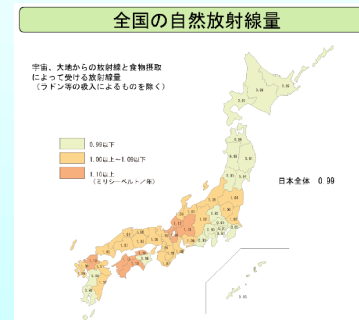


ランタンのマントル* を
1時間体に貼付ける:
 $\text{Hp}(10) 1 \mu\text{Sv}$ (γ 線)
 $\text{Hp}(0.07) 10 \mu\text{Sv}$ (β 線 + γ 線)

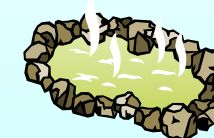
*トリウム使用のサウスフィールド ハイパワーDXマントル



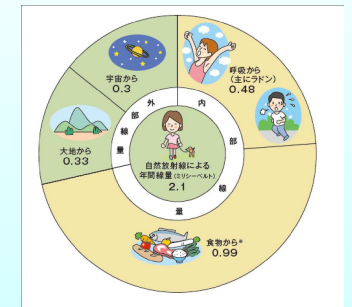
年間の宇宙線量の世界平均と
日本平均の差:
 $50 \mu\text{Sv}$ (日本の方が小さい)



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 2.1mSv
世界平均 2.4mSv

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

教材メーカー

大学研究者、OB

Task1 で開発した評価手法

様々な製品の評価

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

2018年度 第一段実態調査



全国の 38 本のクルックス管について、ガラスバッジを郵送することにより、教員自身の手で**普段の授業の設定**で線量測定を行ってもらった。

38本を測定した。10分間の測定での $70 \mu\text{m}$ 線量当量*:
31本で $< 100 \mu\text{Sv} @ 1\text{m}$ (外挿により評価) *実効線量はさらに1/10以下。
うち、18本で15cmの距離でも検出限界($50 \mu\text{Sv}$)以下

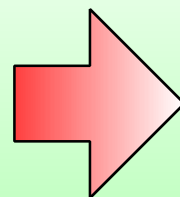
ペットボトルに貼付けたガラスバッジに15, 30, 50cm の距離で10分間X線照射して返送してもらい、線量評価を行った。X線計測専用のタイプFXでは同時にエネルギー評価も出来る。

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 $600 \mu\text{Sv}$ 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、
 $40 \mu\text{Sv/h}$ にまで落ちた。

距離1m、10分間では、 $0.6 \mu\text{Sv}$ に過ぎない

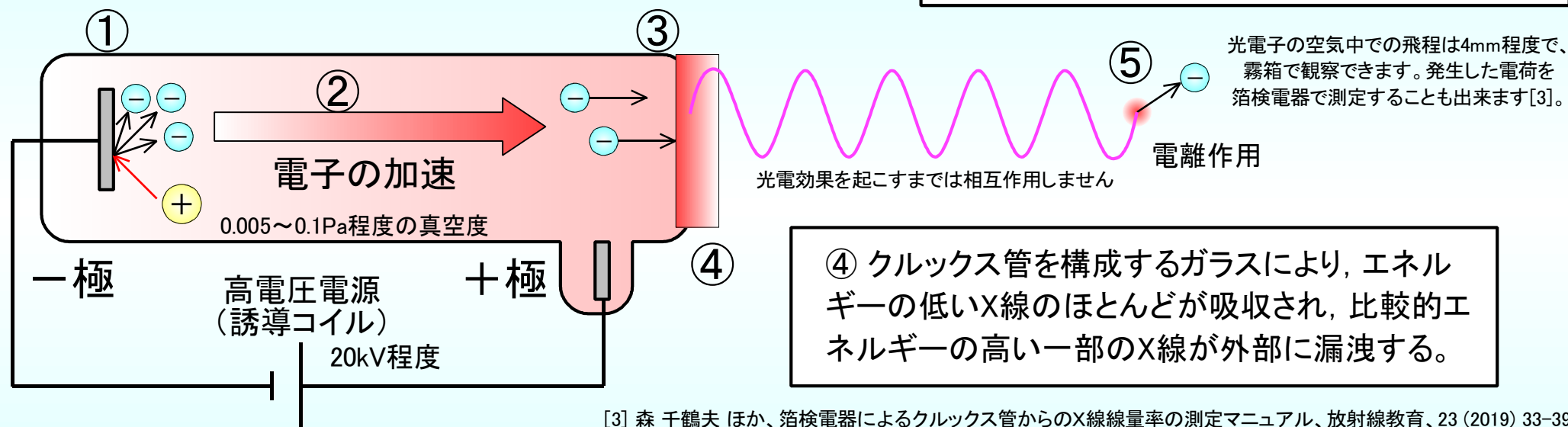
クルックス管のしくみ

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。



[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

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

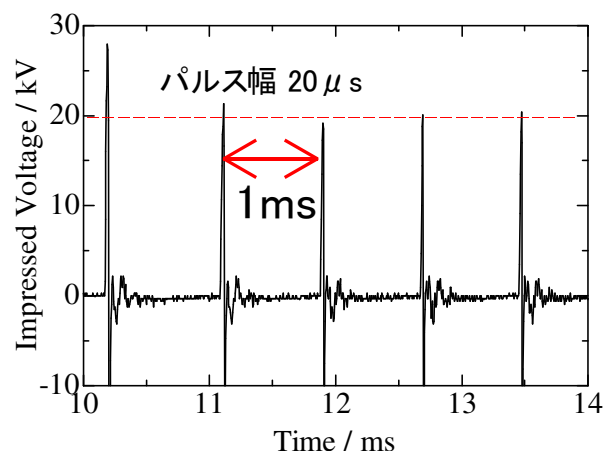
放電出力ダイヤルによりトランスの一次側に印加する電圧を変えることで連続的に出力電圧を変化させることが出来るが、**特定の電圧に設定出来るわけではない。**

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。**

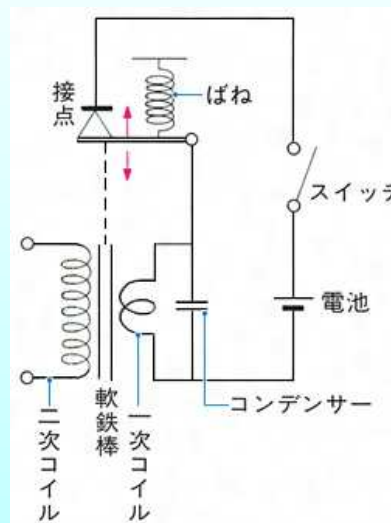
→ 20mm にしておくと 20kV 以上かけようとしても空中放電で電流がクルックス管をバイパスして流れるためそれ以上電圧が上がらない、**安全装置**となる。

PW

放電出力

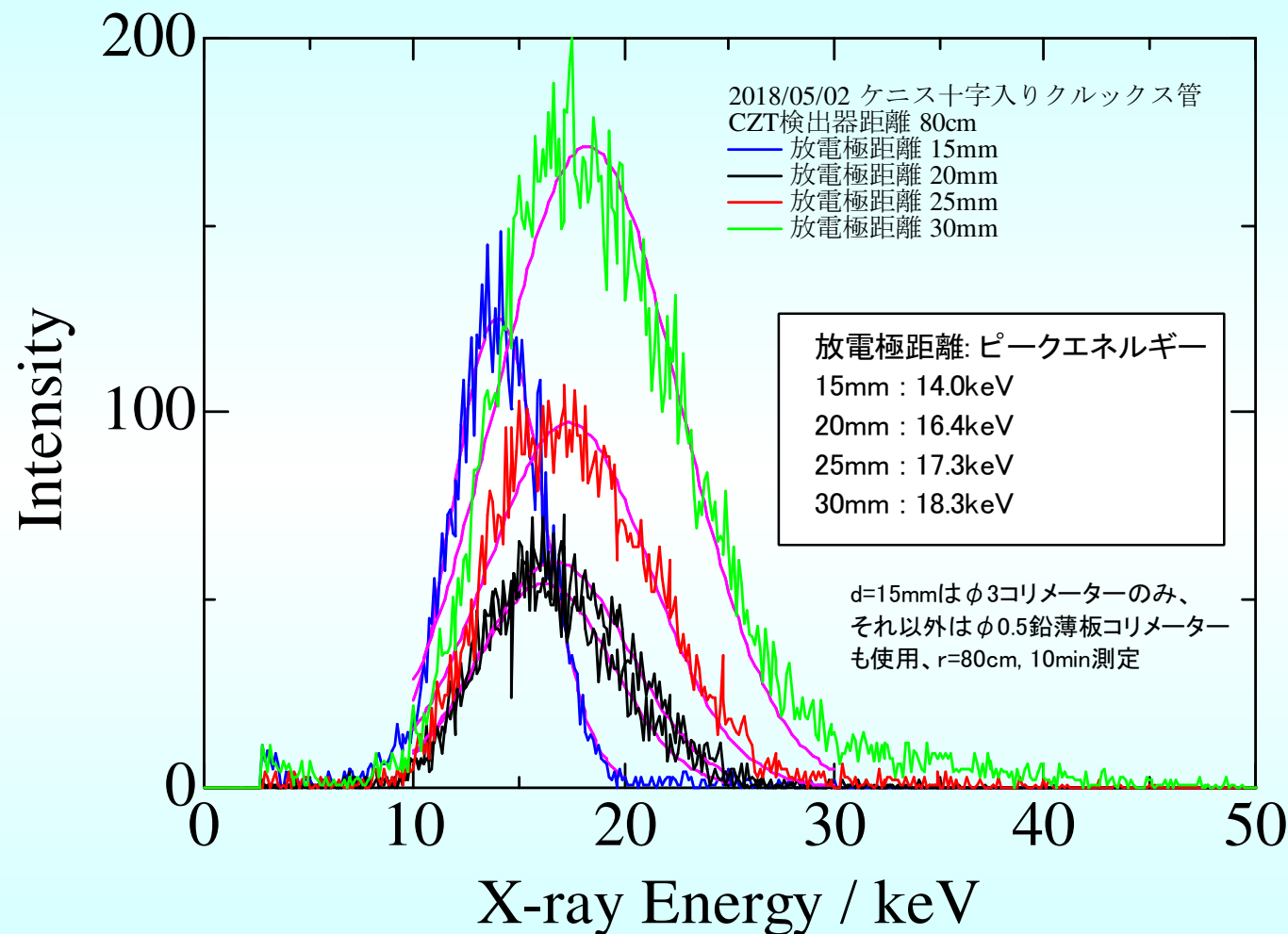


放電極距離 20mm, 放電出力4, 平均電流 80 μ A



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。

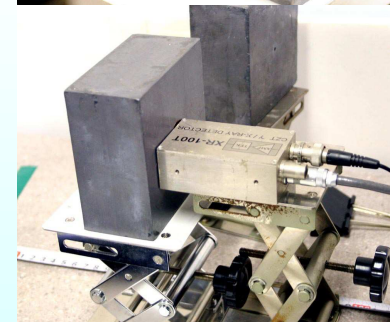
CZT半導体検出器によるスペクトル評価



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



Amptek XR-100T-CZT
CZT(Cd0.9Zn0.1Te)検出器
Be窓、ペルチェ冷却

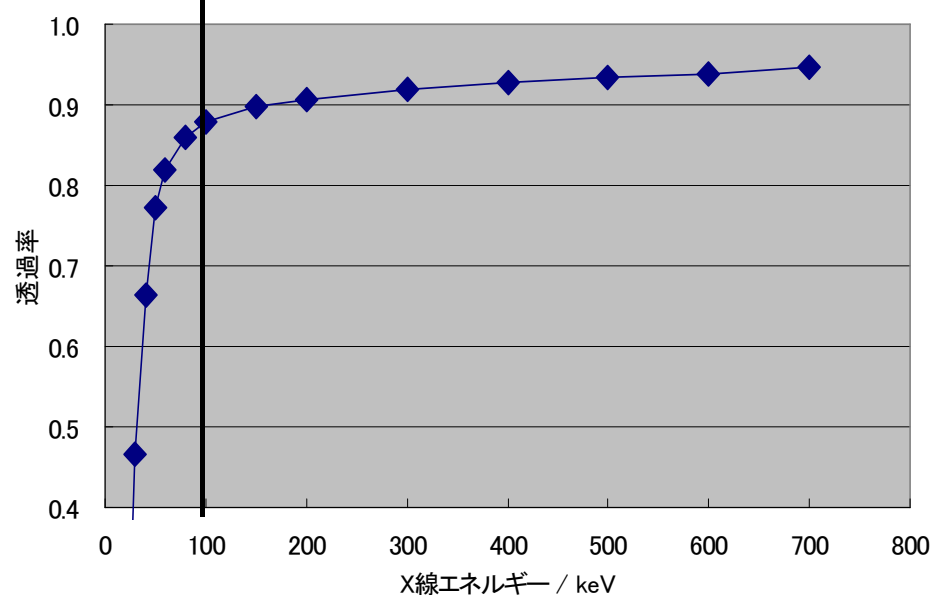


φ3同軸鉛コリメーター
φ2同軸黄銅コリメーター
φ1.0鉛薄板コリメーター
φ0.5鉛薄板コリメーター

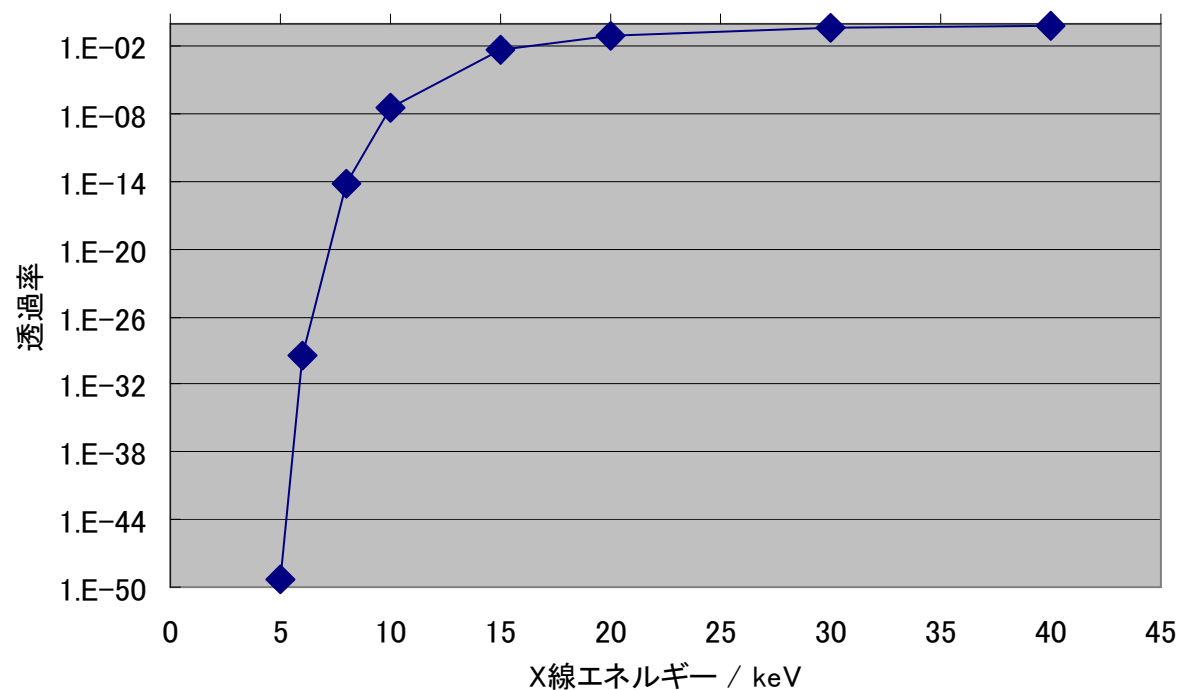
わずかな印加電圧低下での大きな線量の変化

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

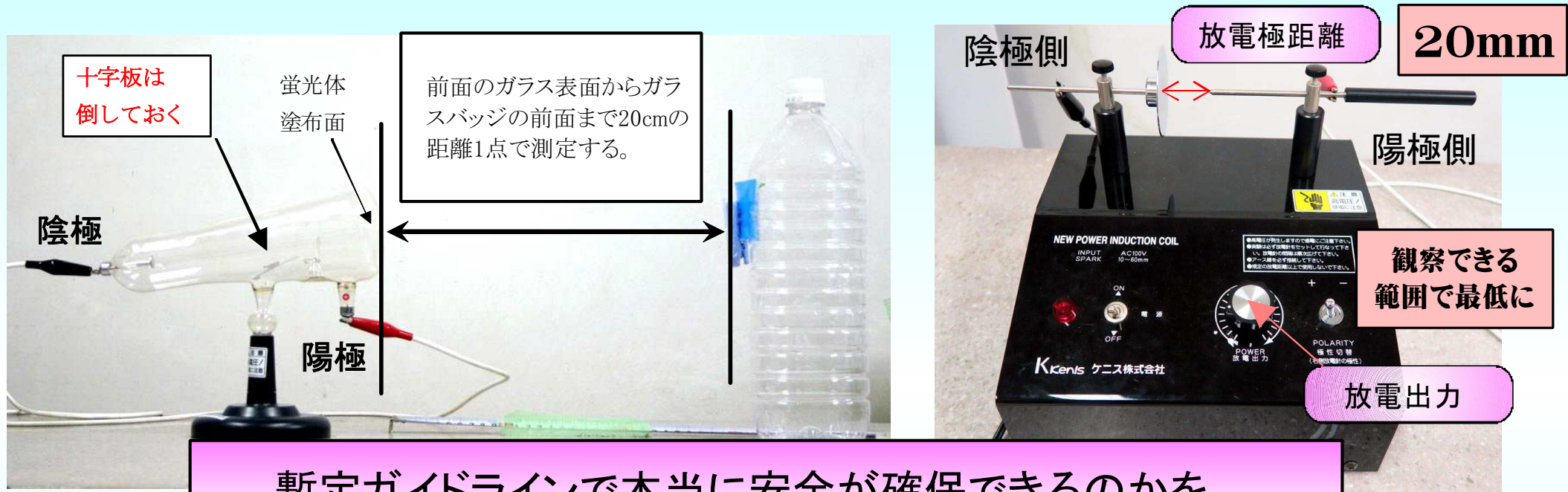


30keV と 15keV で約100倍違う。



3mmのガラスに対するX線の透過率

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。

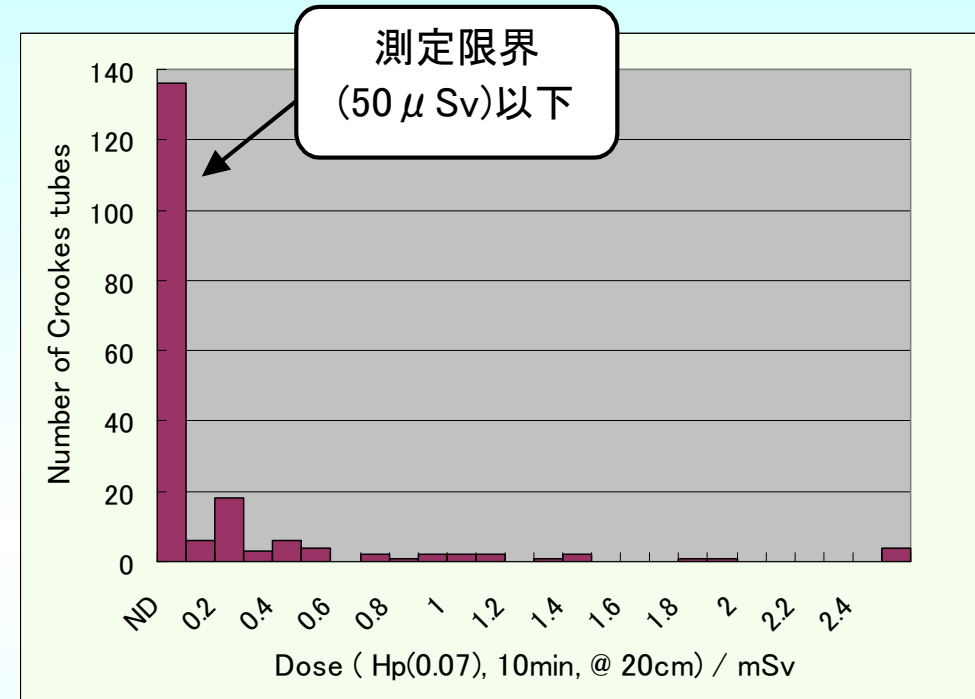
大阪府立大学倫理委員会の承認を得て実験を行っています。

第二期実態調査結果（最終版）

暫定ガイドラインを遵守することでどこまで線量を下げることが出来たのかを検証するために、2019年8月～11月に第二期の実態調査を行った。

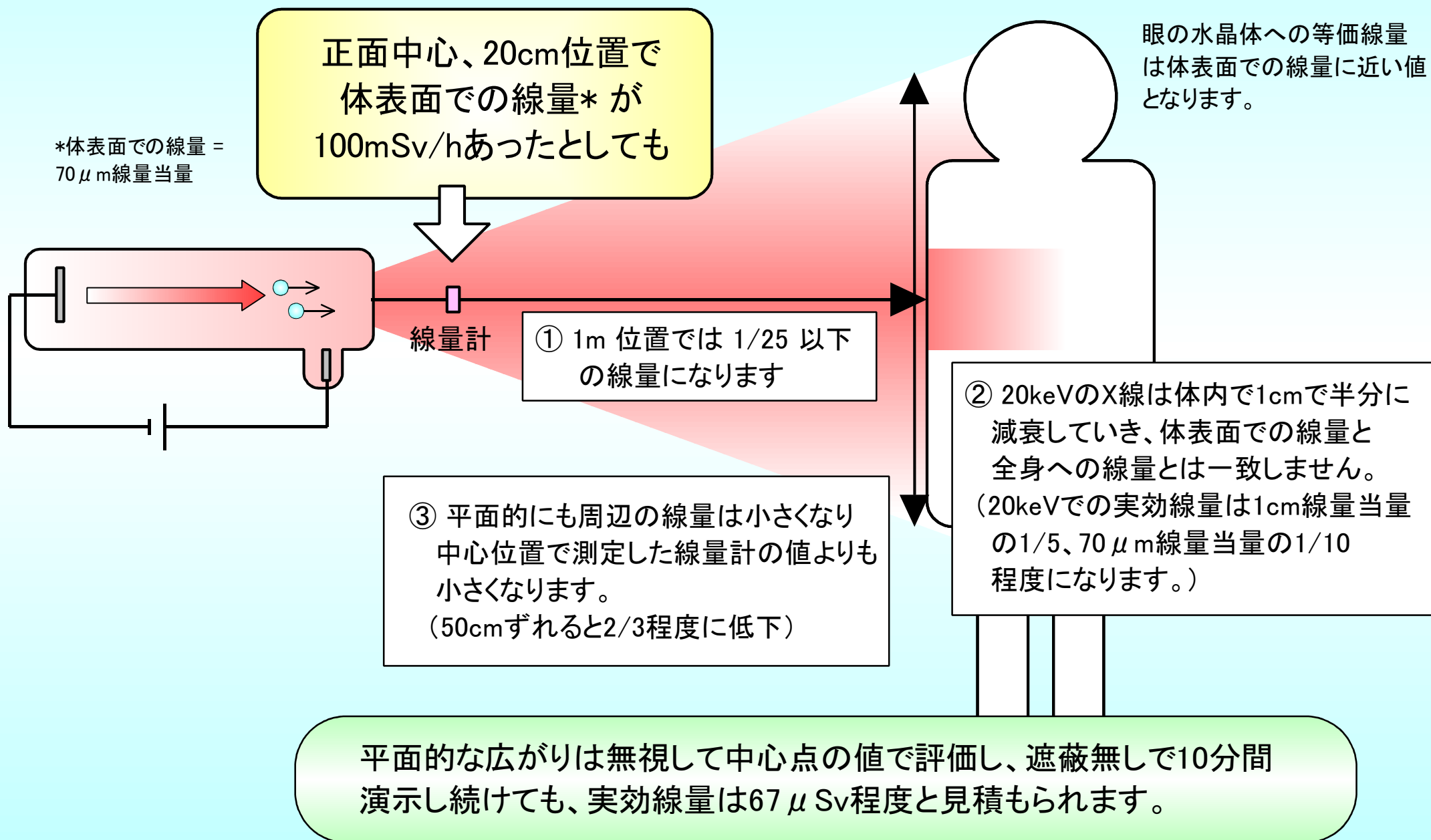
8月期は、27校からの95本、9月期は8校からの18本、10月期は18校からの67本、11月期は4校からの11本、合計191本のクルックス管について「暫定ガイドライン準拠」での測定を行った。

191本中 136本に於いては、距離 20cm 10分の測定で Hp(0.07) が検出限界である $50 \mu\text{Sv}$ を下回っていた。有意な値が出た 55本の装置についても、暫定ガイドライン適用前に比べて低い線量に抑えられているが、最大で 10.4mSv を示した装置も存在した。



10分間、20cm の距離でのガラスバッジによる Hp(0.07) での評価結果で有り、ここから実際の生徒の被ばく量を見積る必要がある。

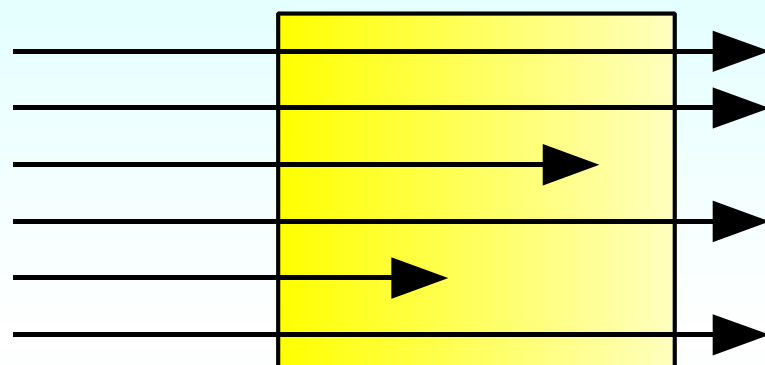
クルックス管からのX線測定値からの実効線量の評価



エネルギー吸収の違い

強透過性放射線

$$H_p(0.07) \leq 10 H_p(10)$$



整列拡張場

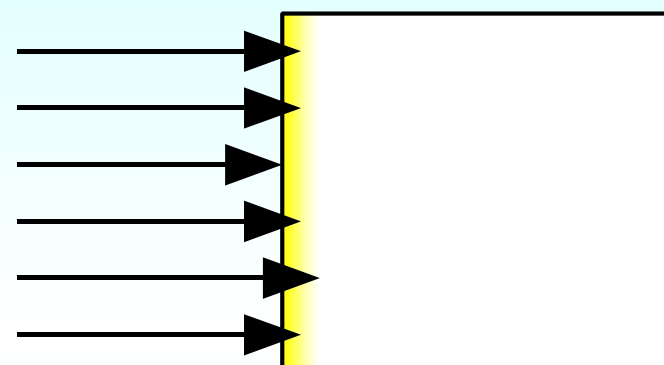
高エネルギーガンマ線などの場合透過力が高く、ほぼ均等にエネルギーを与える。

人体の場合、荷電粒子平衡を考慮して深さ1cmでの点での吸収線量(1cm線量当量)が全体を代表する。対象の厚さが大きいと、指数関数的に徐々に線量は下がっていく。

クルックス管からの20keVの低エネルギー엑스線の場合、 $H_p(0.07) = 2 H_p(10)$ 程度であり、弱透過性と言うほどでは無いが、1cmの深さでの吸収線量は体全体を代表せず、減衰を考慮する必要がある。

弱透過性放射線

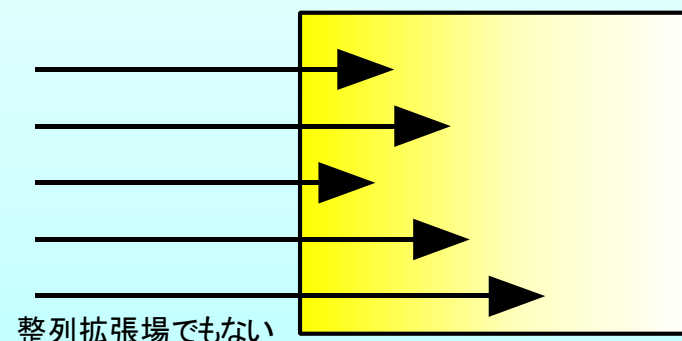
$$H_p(0.07) > 10 H_p(10)$$



整列拡張場

α 線、 β 線などの場合透過力が低く、表面近傍にのみ局所的にエネルギーを与える。

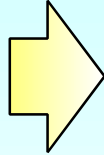
人体の場合、深さ70 μ mでの点での吸収線量(70 μ m線量当量)が皮膚の等価線量を代表する。



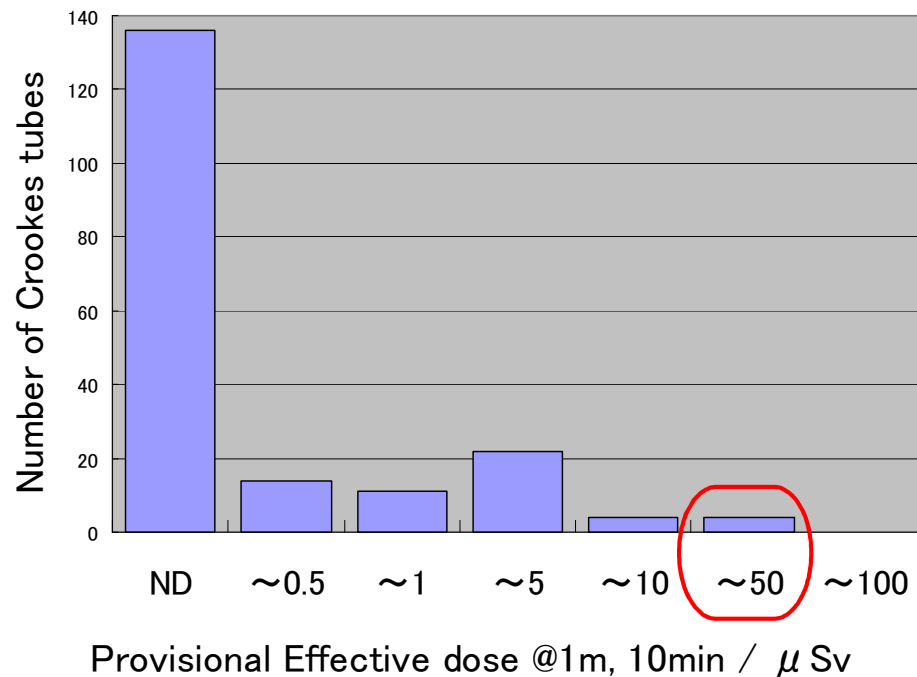
整列拡張場でもない

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 $10\mu\text{Sv}$ (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 $10\mu\text{Sv}$ を超えると評価されたが、3本は $20\mu\text{Sv}$ 以下、1本だけ $42\mu\text{Sv}$ に相当すると評価された。

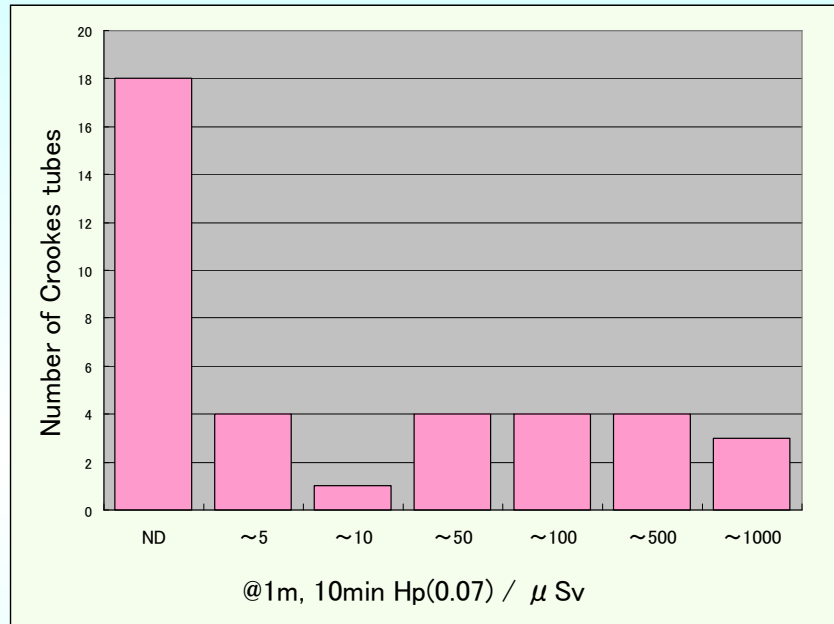
2018年の暫定ガイドライン適用前の実態調査では、37本中6本が距離 1m、10分間での実効線量が $10\mu\text{Sv}$ を超える可能性があり、 $93\mu\text{Sv}$ と評価された装置もあった。

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。
高くなると分かっていたら、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 0.5mSv 、個々の授業ではその $1/10$ ($50\mu\text{Sv}$) 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。

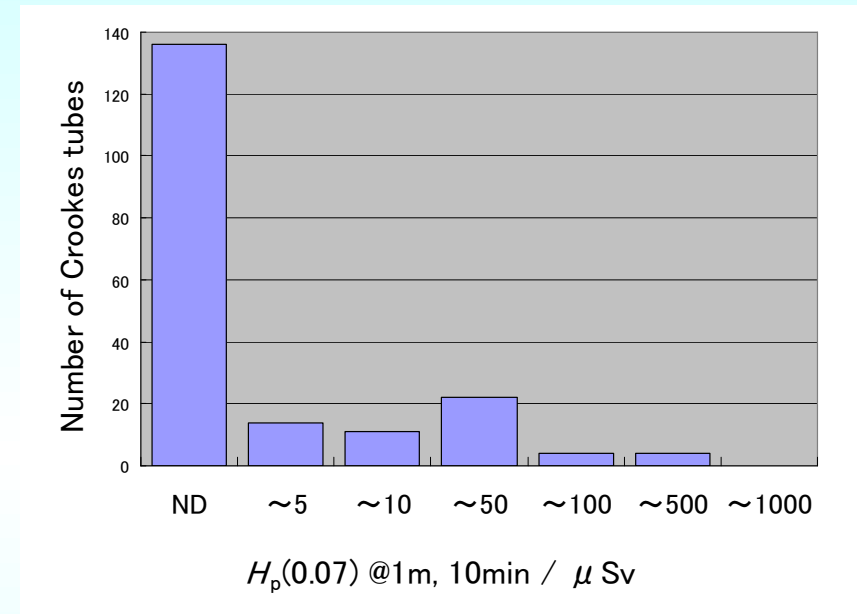
第二期実態調査結果（最終版）

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。

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

中学理科の教科書会社5社中4社の教師向け指導書に実験上の注意点を掲載

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。2022年度を目標として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、大阪府大に2020年度に導入した nanoDot 線量計により信頼できる測定を継続的に行える体制を確立中。



放射線教育 コンテンツ開発



ペルチェ冷却式高性能霧箱



最新のSD型本体ユニット



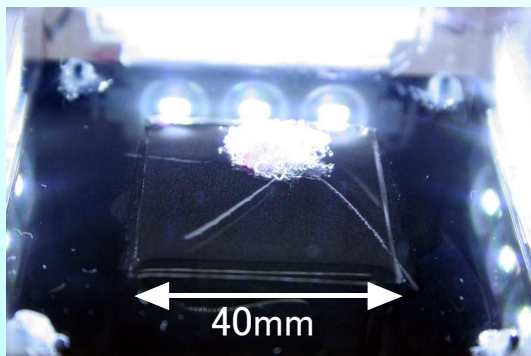
観察面を拡大したEX型



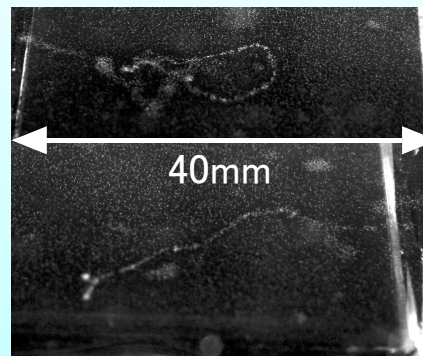
一体化したONE型(開発中)



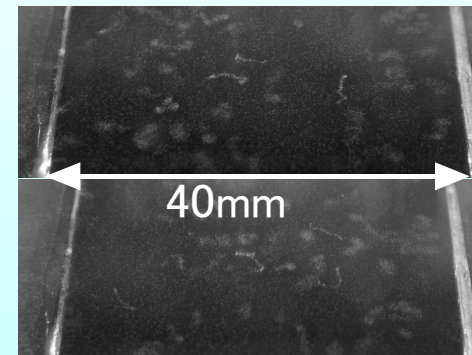
コッククロフト型高電圧ユニット



α線の飛跡



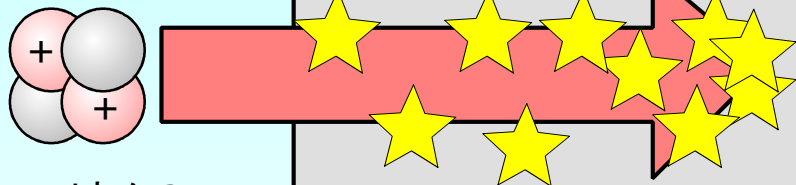
β線の飛跡



クルックス管からのX線により放出された光電子の飛跡

低価格での「販売」
を行う事により
全国に普及。
総出荷台数283台
(2020/12/26)。

アルファ
 α 線



ヘリウムの
原子核

狭い範囲に一気に
エネルギーを放出します

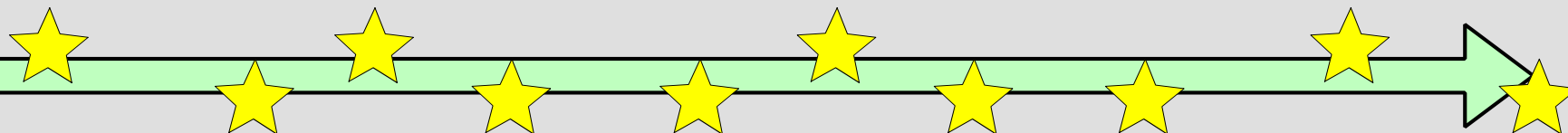
水の中では数十 μ m程度、空気の中でも数cmしか飛ばず、紙一枚で止まてしまいますが、その範囲に一気にエネルギーを放出します。

★
放射線がエネルギーを
物質に与えたところ
(電離、励起など)

ベータ
 β 線

電子

ヘリウムの原子核の7000分の1の重さしか有りません



実際にはまっすぐ進めず、跳ね返されながらジグザグに進みます

所々にぽつぽつとエネルギーを落として行きます

ガンマ
 γ 線

波長の短い
光の仲間

プラスやマイナスの電気を
持っていないため、ほとんど
素通りしていきます

途中ほとんど
素通り

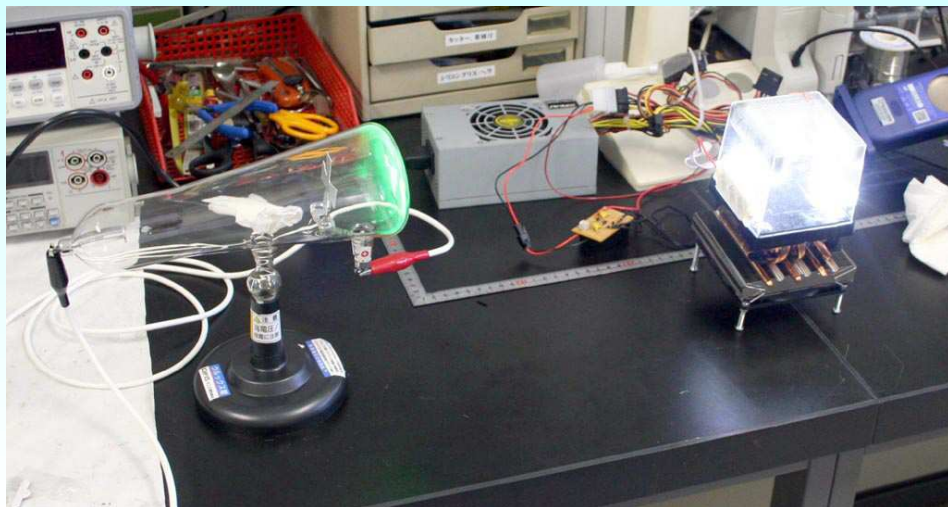
所々で電子を
弾き出す

表面だけでなく、深いところにも
エネルギーを与えます。

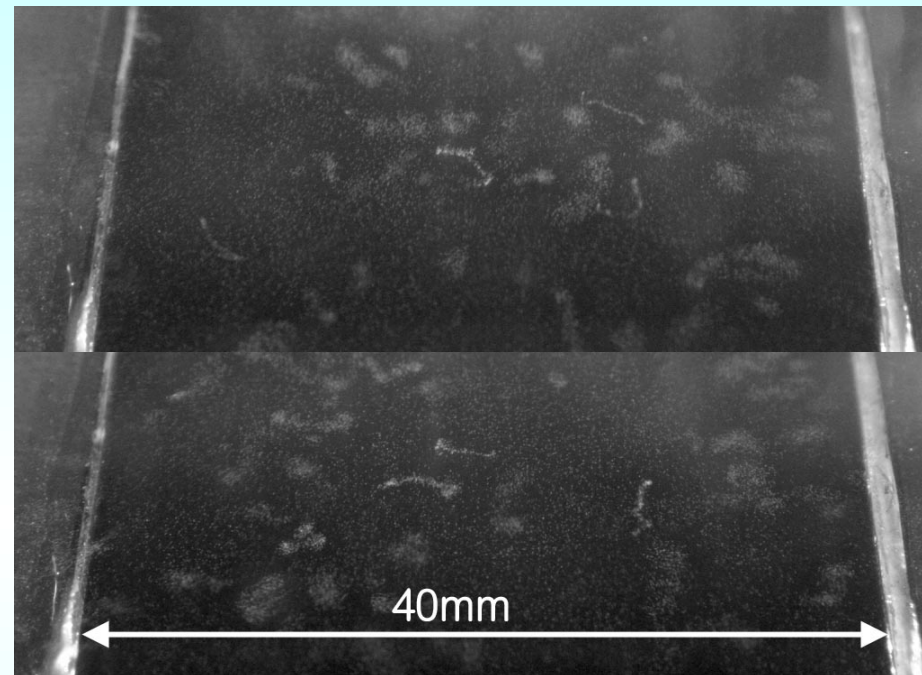
弾き出された電子は、 β 線と同じように振る舞います

水の中でも1cm程度、空気の中では数m飛んでいき、少しずつしかエネルギーを落としません。

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

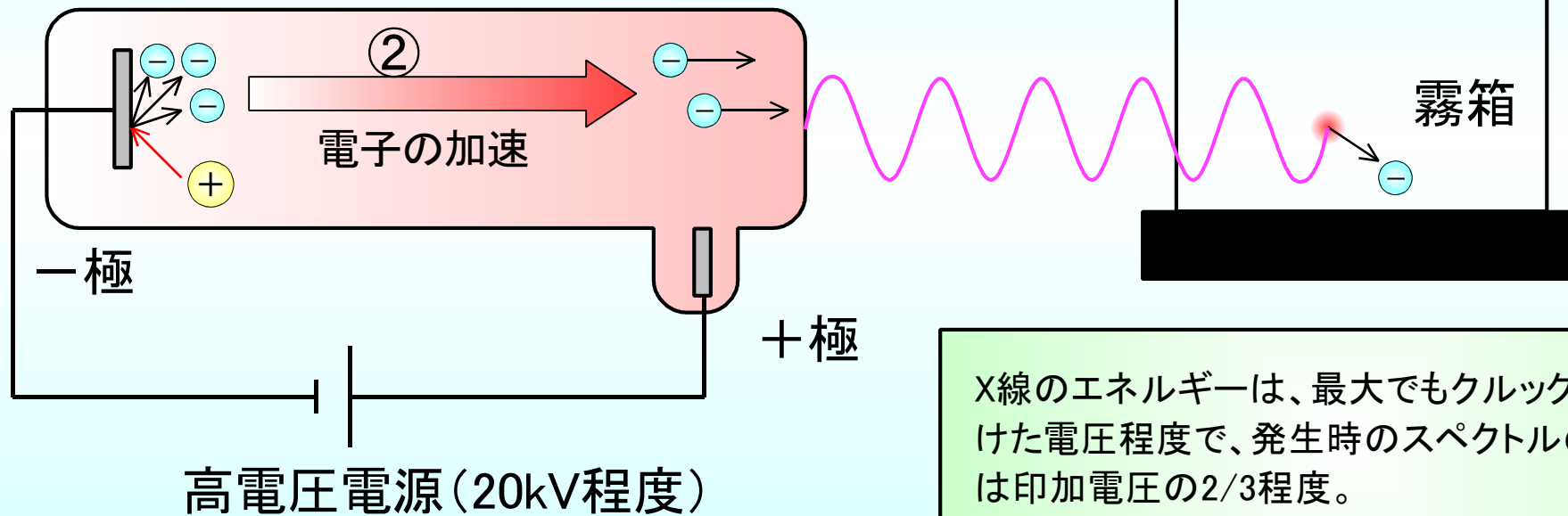
＋のイオンが一極に引きつけられて電子を叩き出す
(二次電子放出)

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

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。

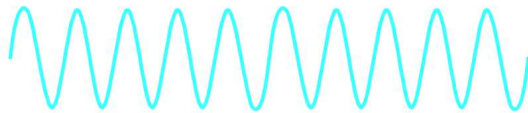


X線のエネルギーは、最大でもクルックス管にかけた電圧程度で、発生時のスペクトルのピークは印加電圧の2/3程度。

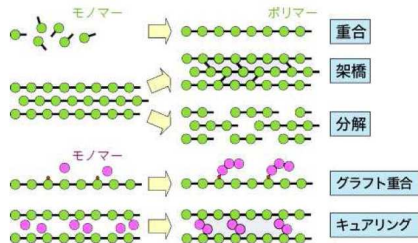
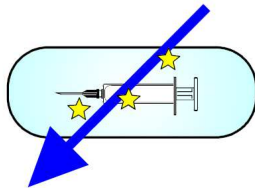
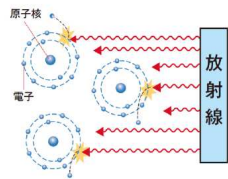
電子を弾き出すという放射線の本質を直感的に理解できる。また、エネルギーの違いを弾き出された電子の飛跡の長さという形で理解できる。

エネルギー 大

ガンマ線、エックス線

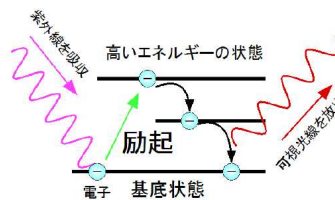
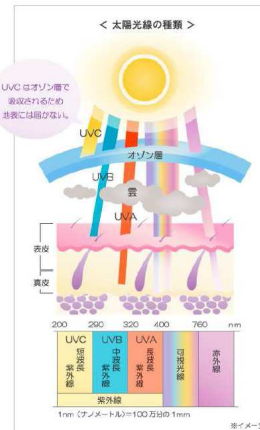
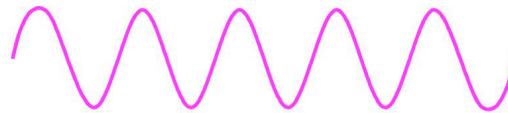


電離作用



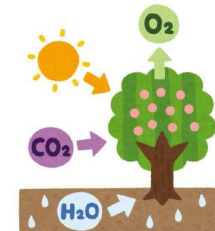
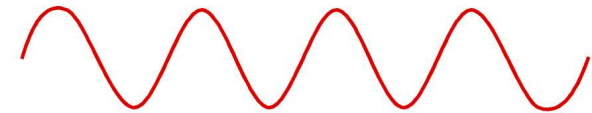
エネルギーの大きいガンマ線やエックス線は、物体の中を突き抜けていき、その途中の原子の周りの電子を弾き飛ばす働きがあります。この力を使って、注射器などの医療用の器具を滅菌したり、様々な機能を持った高分子化合物を作ったりすることが出来ます。

紫外線



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。

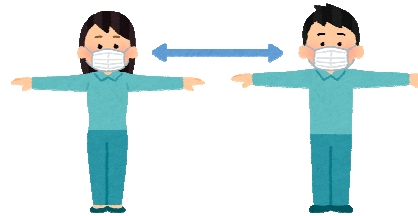
新型コロナウイルスへの工学的対抗策の検討(1)

「感染を広げない」
目的で全員が着用

+フェイスガード、
ゴーグル等
(防御用)



ソーシャルディスタンス

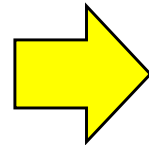


飛沫は2m程度しか飛ばないため、
他人との距離を取ることで飛んでくる
飛沫から身を守る

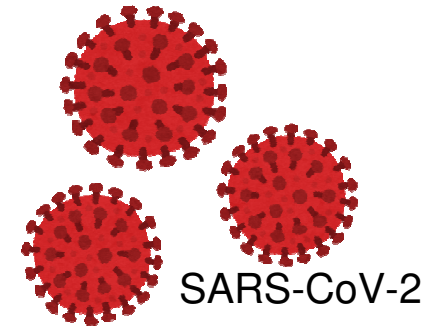


大きな液滴に大量のウイルス

~~密集~~



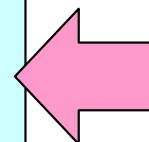
飛沫



小型飛沫除去装置

フィルターと光触媒の組み合
わせで飛沫をキャッチしてウイル
スを酸化分解。

対面する人と人の間、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ため、たく
さんの台数が必要。



口腔から放出される $5\mu\text{m}$ 以上の液滴を飛沫と呼び、
 $120\text{--}150\mu\text{m}$ 程度に分布のピークを持つ。数秒の間
に2m程度までの範囲に飛び散る。咳やくしゃみだけ
で無く、普通にしゃべっているだけでも飛散する。

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出来るが、2割程度は
隙間などから飛散する。また、食事中にマスクは困難。

新型コロナウイルスへの工学的対抗策の検討(2)

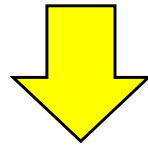


換気しよう

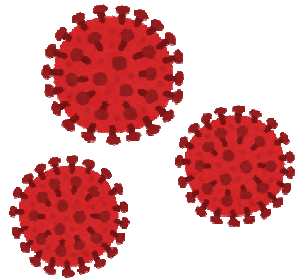
どうしても換気が
悪い場所もある

換気の状態は二酸化炭素濃度
が一つの指標となる。

~~密閉~~



エアロゾル



SARS-CoV-2

5 μ m以下の微粒子で飛沫核と
も呼ばれる。数分間空气中に滞
留し、広い範囲に拡散する。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。長時間滞留するた
め、換気が悪いと徐々に濃度が高
くなる。

高性能空気清浄機

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。

△二酸化塩素・オゾン(刺激臭)

光触媒、紫外線、高性能フィル
ターを使用したものなど、様々な
タイプが販売されており、エアロ
ゾルの捕集、エアロゾルに含ま
れるウイルスの不活化を行う。

高温になる、ファンヒーターやス
トーブでも不活化は可能。(エア
コンでは不可)

長時間飛び回り風に乗って 遠くまで移動する



うがいをしよう

+こまめに水等を飲む

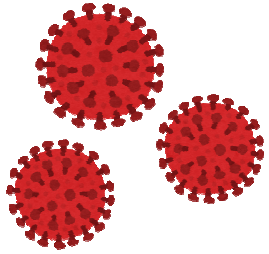
粘膜に付着してから15~20分で感染する
ため、うがいが出来ない状況であればこま
めに飲み込んでしまい胃酸で不活化する
方が better。感染者が居る状況で飲食し
ても大丈夫と言うことでは無い(飲み込む
途中で感染する可能性はゼロでは無く、
鼻や目からの感染は防げない)。

人の居ない空間への紫外線照射

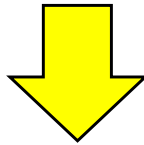
不活化の効果の高い UV-C は人体に対して有害
(眼の角膜、皮膚に強い炎症)であるため、人にあた
らないよう上方の空間に向けて UV-C を照射するこ
とで空気中のウイルスを不活化できる。食品工場な
どでは古くから用いられている。

新型コロナウイルスへの工学的対抗策の検討(3)

SARS-CoV-2



~~密接~~



どこに潜んでいるか分からない
ブービートラップ

物体表面からの接触感染



手を洗おう



消毒しよう

コロナウイルスは脂質の膜、エンベロープを表面に持つタイプであるため、「あぶら」を溶かすことが重要。物理的に洗い流すだけでも効果的。次亜塩素酸なども効果がある。

環境によっては物体表面に付着したウイルスが数日間感染力を保持していることも。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。

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照射を行う事で感染リスクを低下させる。

物体表面へのUV-C照射

短時間でSARS-CoV-2の不活化が可能なが様々な論文で確認されている。
人体に有害なため人が居るところでは使用することが出来ない。(Care222などは極めて人体への影響が小さい製品も存在するが、まだ完全に安全とは認められていない)
距離の二乗に反比例して弱くなる、透過力が極めて低い、斜め照射では弱くなる、有機物を劣化させるなどの様々な問題点を理解して使用する必要がある。

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

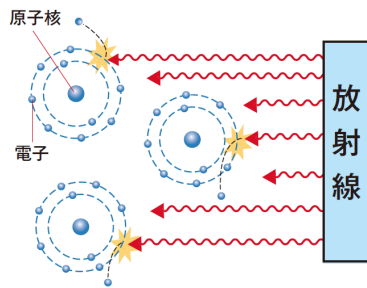
物体表面への塗布により、常に少しずつ不活化の効果を発揮する。蛍光灯と異なりLED照明は紫外線を放出しないため屋内では可視光応答の光触媒が必要。銅などの金属含有の光触媒は暗くなっても一定期間不活化の効力を発揮する物もある。

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ある。

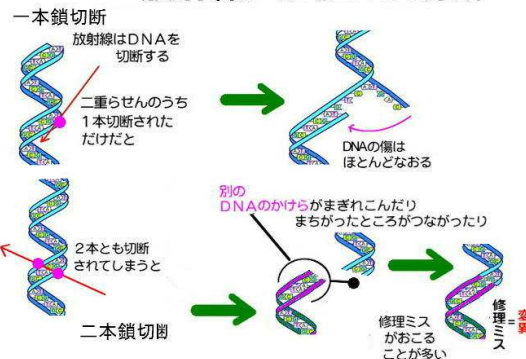
紫外線による遺伝子損傷



電離作用



放射線によるDNA切断



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。

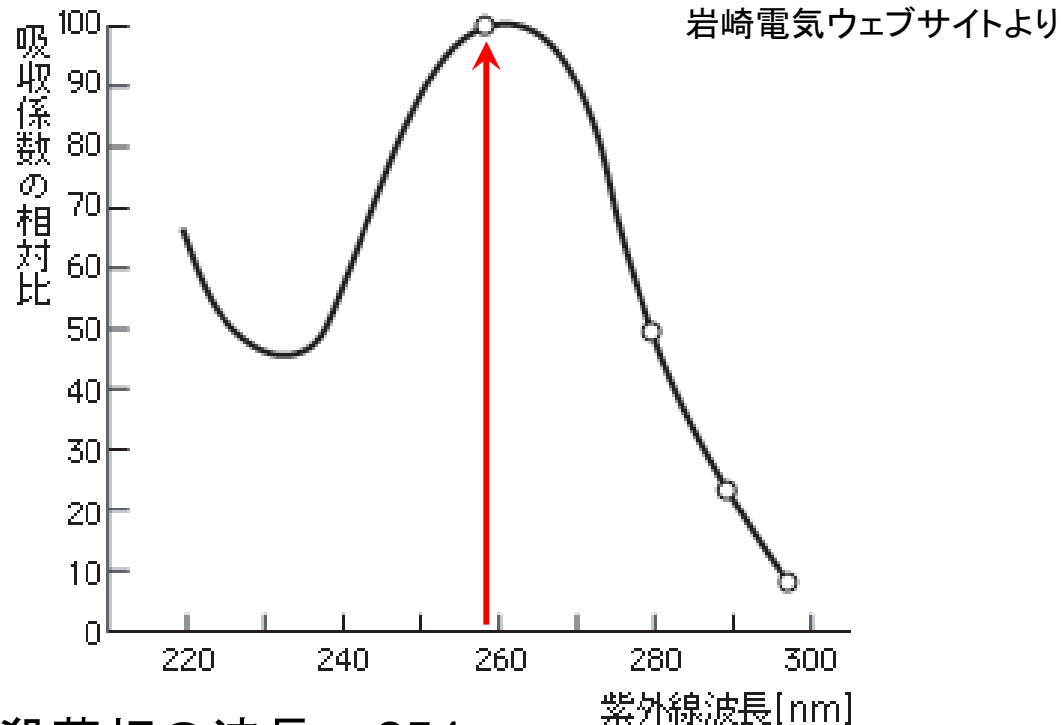
紫外線は電離放射線には分類されず(法令上空気を電離できるエネルギーを有する光子、荷電粒子を電離放射線と呼ぶ)、DNAの主鎖を切るだけのエネルギーは無いが、配列している塩基同士を励起して接合してしまう場合がある。特に、ピリジミン二量体の生成が紫外線による損傷の主たる物と言われており、DNAの複製を妨げる遺伝子損傷となるが、ほとんどの細胞はこれらの損傷を修復する酵素を持っている。

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ウイルスで有り、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ないか、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。

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-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

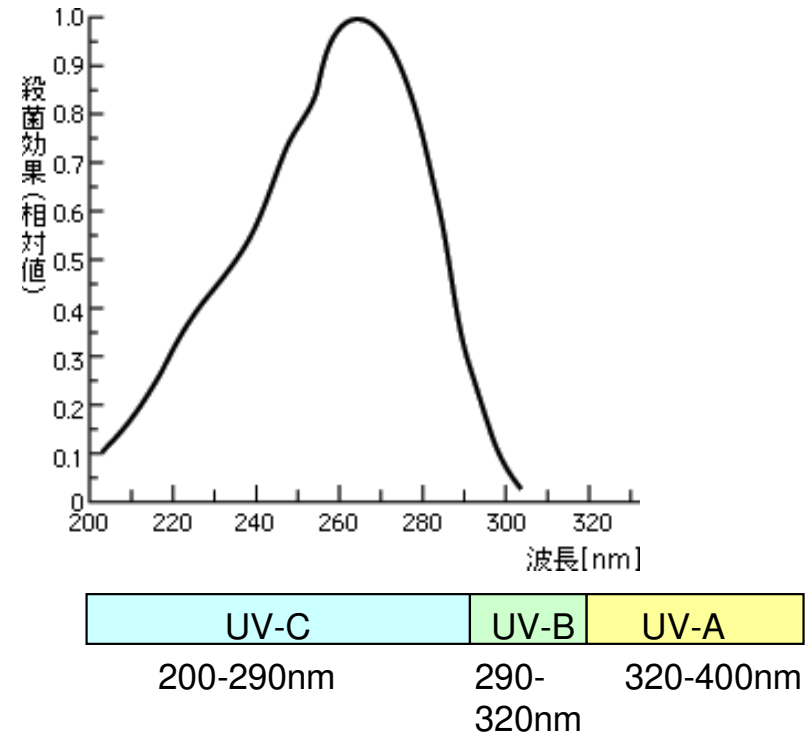


殺菌灯の波長 = 254nm

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。

殺菌作用の紫外線波長依存性



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 $20\mu\text{m}$ 程度の厚さの角質層などで止まってしまう生きている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 $0.1\mu\text{m}$ 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 $1\mu\text{m}$ 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	徳島大学 高橋先生論文	岩崎電気	スタンレー 電気	Panasonic	Wintec
低減率	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	不明
単位	mJ/cm ²	mJ/cm ²	sec	mJ/cm ²	mJ/cm ²
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。

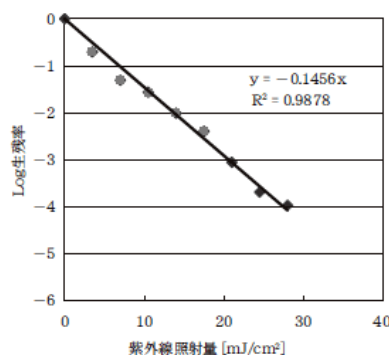
No	1)	2)	3)	4)	5)
グループ	ミラン大 Biasin ら	ボストン大 Stormら	スタンレー電気	宮崎大 Inagakiら	広島大 Kitagawaら
光源	254nm殺菌灯	254nm殺菌灯	265nm LED	280nm LED	222nm エキシマランプ
99.9%まで不活化に 必要な線量 (mJ/cm ²)	3.7	Wet: 5.3 Dry: 4.1	5.1	37.5	3.6
査読	査読済	査読済	査読無し	査読済	査読済

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。

バイオドシメーターの考え方

- ① 評価を行いたい生物種(今回は新型コロナウイルス)に対して、紫外線の積算照度とどの程度殺菌/不活化されたかの割合をプロットした生残曲線を取得する。
- ② 同じ波長の紫外線に対して、安全に取り扱いを行える指標生物種(バクテリオファージ Q β など)についても生残曲線を別途取得しておく。
- ③ 評価を行いたい装置で指標生物種に紫外線照射を行い、どの程度指標生物種が殺菌/不活化されたかを調べる。
- ④ プロセス ② で取得した生残曲線から、紫外線積算照度を求めることが出来る。
- ⑤ プロセス ① で取得した、評価を行いたい生物種に対する生残曲線から、その装置でどの程度殺菌/不活化されるかが評価できる。
- ⑥ 新たな感染症が発生し、別の生物種に対する製品の効果を評価したい場合でも、その生物種に対する生残曲線を信頼できる機関が一度取得すれば、④ のプロセスで既已取得している積算照度を用いてその生物種に対する効果をすぐに評価可能。



生残曲線の例。横軸に紫外線積算照度(mJ/cm²)、縦軸にどれだけ生き残っているかという生存率の対数値(-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。

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)。

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。

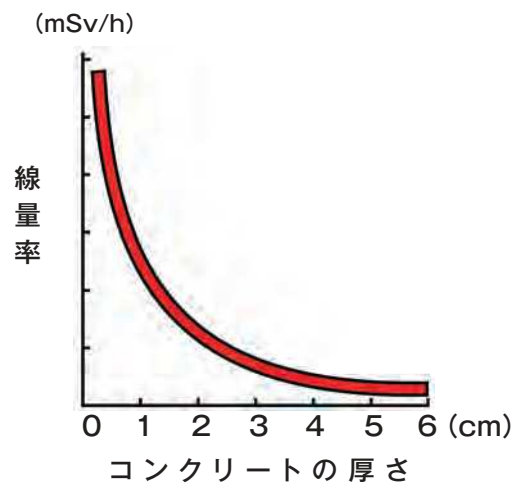
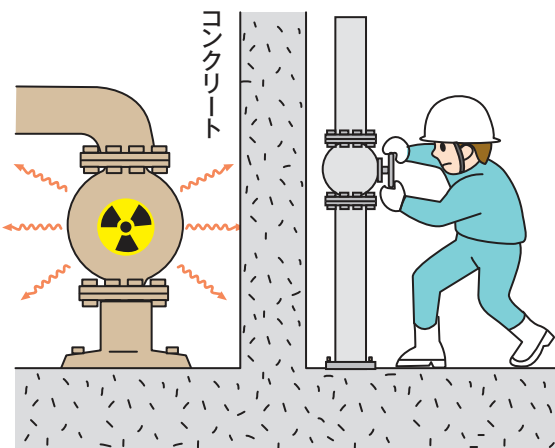
光源の入手が困難

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

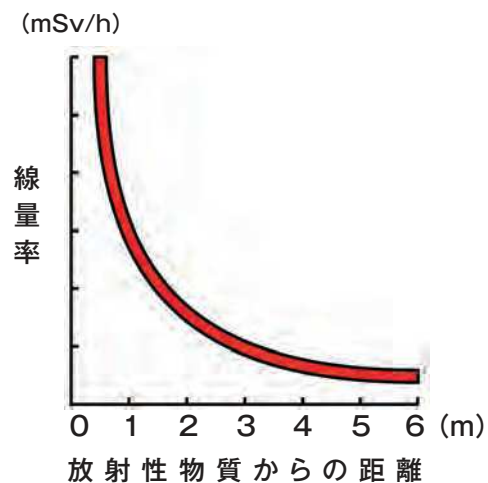
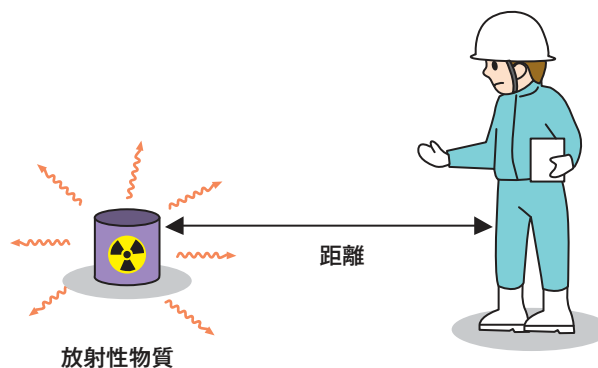
1. 遮へいによる防護

(線量率) = 遮へい体が厚い程低下



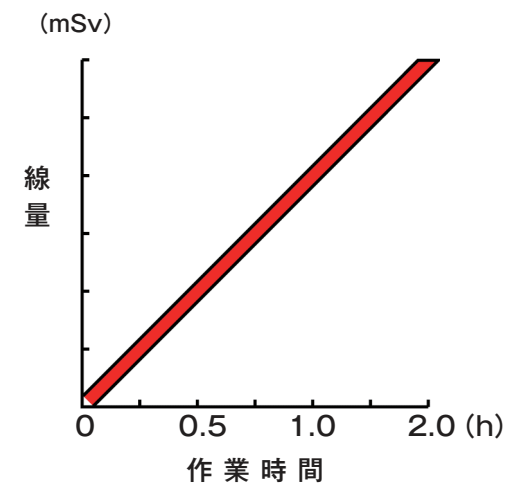
2. 距離による防護

(線量率) = 距離の二乗に反比例



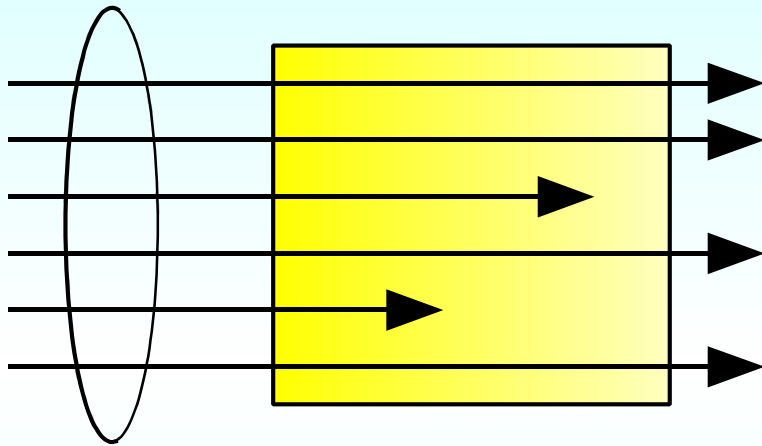
3. 時間による防護

(線量) = (作業場所の線量率) × (作業時間)



「照射量」の意味の違い

強透過性放射線

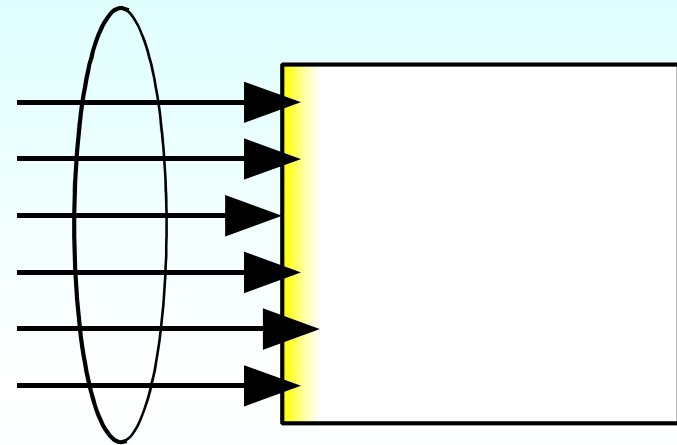


高エネルギーガンマ線などの場合透過力が高く、ほぼ均等にエネルギーを与える。

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($\text{J/kg} = \text{Gy}$)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 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 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なく、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、積算光量を 10mJ/cm^2 とすると、吸収線量は

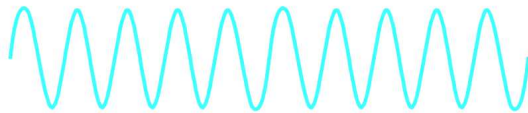
$$10 \times 10^{-3} / 20 \times 10^{-7} \text{ J/kg} = 5 \text{ kGy}$$

と言う、高い線量に相当する。

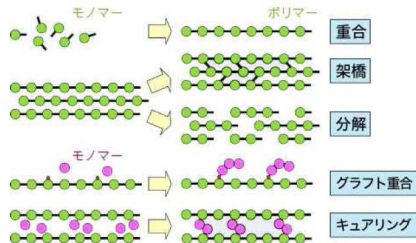
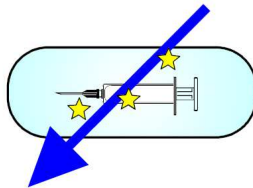
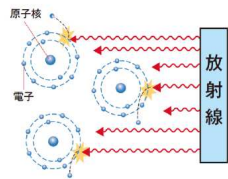
枯草菌などの放射線への耐性の高い菌についても 10^{-6} 以下にまで殺菌を行う「滅菌」の場合で、 25kGy 程度(医療器具などに対しての場合)なので、かなり完全に滅菌とまでは言えないが相当程度の効果があると考えられる。

エネルギー 大

ガンマ線、エックス線

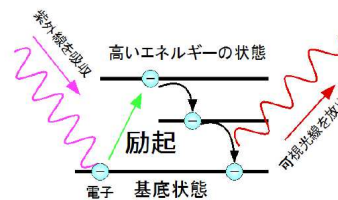
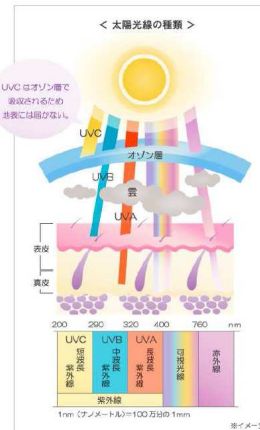
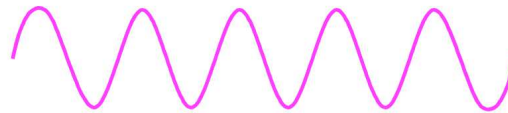


電離作用



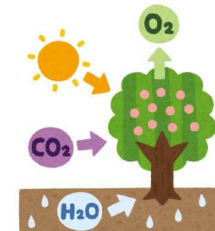
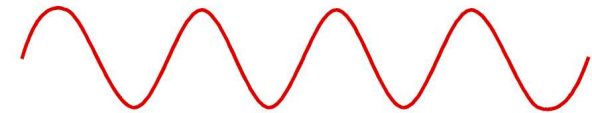
エネルギーの大きいガンマ線やエックス線は、物体の中を突き抜けていき、その途中の原子の周りの電子を弾き飛ばす働きがあります。この力を使って、注射器などの医療用の器具を滅菌したり、様々な機能を持った高分子化合物を作ったりすることが出来ます。

紫外線



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。

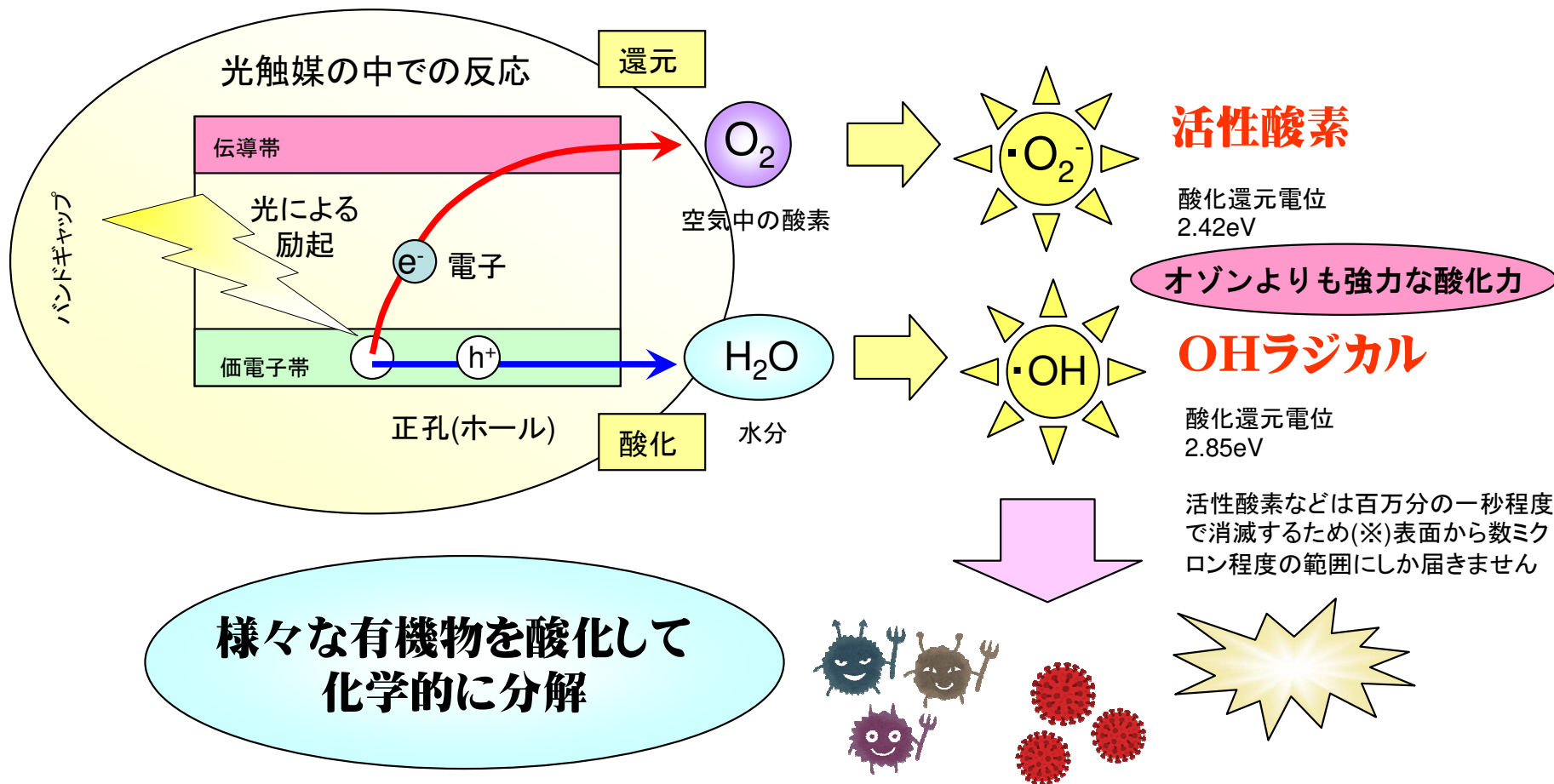
エネルギー 小 可視光線



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。



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)。

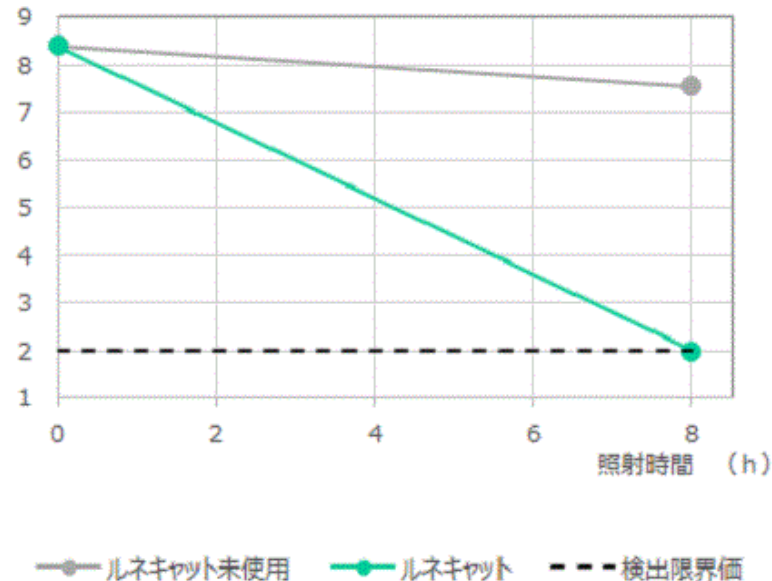
※ 一瞬で大量の有機物を分解するわけではありません

- ・光(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シドアニオンや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。

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 ($\log_{10}$ PFU/試験片)



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

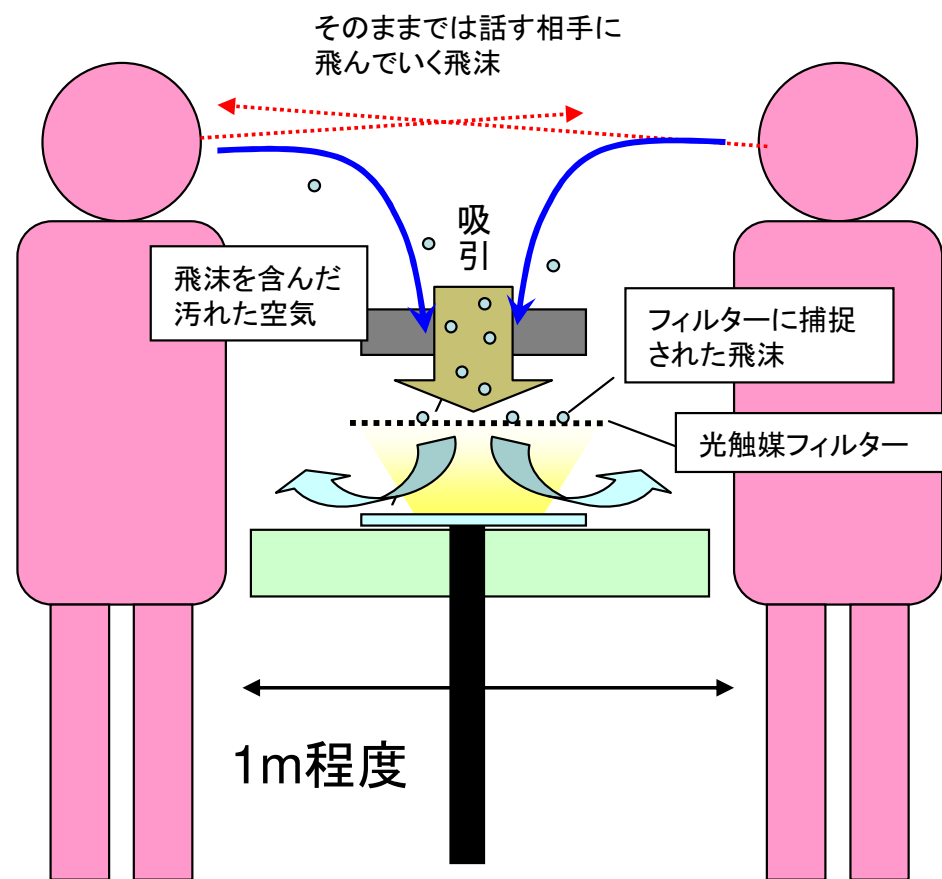
光触媒の塗布量はひかりクリーナーの標準仕様で 727mg/m^2 、 $2.5 \times 5\text{cm}$ に換算すると 0.91mg だが、試作している高性能フィルターでは 27.7g/m^2 で、 $2.5 \times 5\text{cm}$ に換算すると 34.6mg にもなる。

光の強度も全く異なり、ひかりクリーナーでは $68,500\text{ lux}$ 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。

人と人の間を飛び交う「飛沫」の除去に特化した小型飛沫除去装置

5 μ m よりも大きい液滴 → 飛沫

5 μ m より小さい液滴が蒸発して出来た粒子 → 飛沫核、エアロゾル



会話によって放出された飛沫は 1m 程度飛び、マスクをしていても2割程度が漏洩するとの報告もあります。SARSでは主に接触か飛沫が感染の原因とする報告があります。

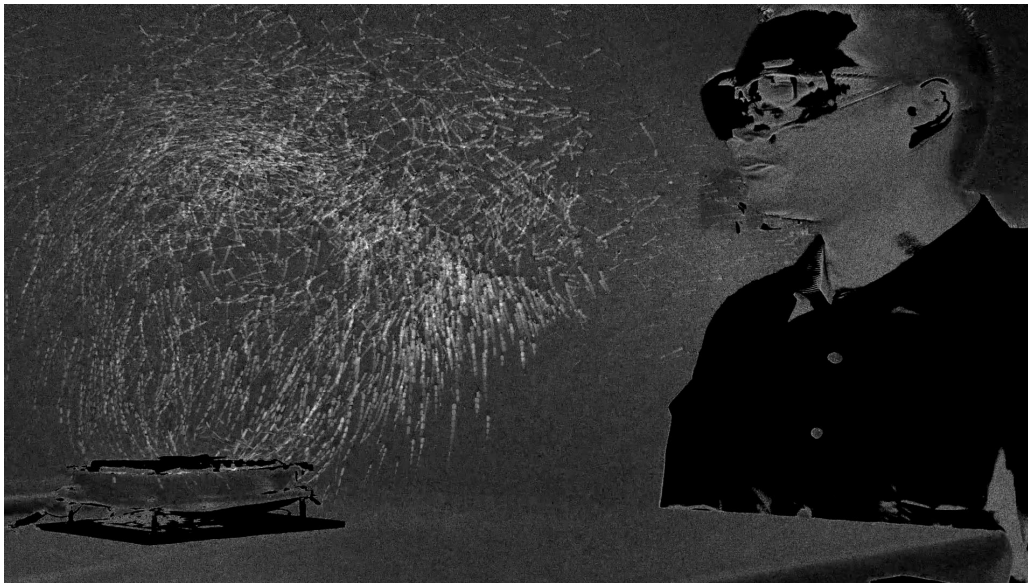
特に**マスクを付けずに近距離で会話をする会食**は、**お互いに飛沫をぶつけ合う**ことになり、感染リスクが高いと言えます。

大型の空気清浄機は部屋の中を漂うエアロゾルには効果がありますが、近距離を短時間で飛び交う飛沫にはほとんど効果は期待できません。

卓上に設置できる小型で静音の空気清浄機であれば、「**人と人の間**」に設置することが可能で、飛び交う飛沫を吸引しフィルターでキャッチすることで、会話の相手に到達する飛沫の数を減らすことが可能です。外付けのマスクと考えることも出来ます。

キャッチした飛沫中に含まれるウイルスは、光触媒により**酸化分解**し、再放出される可能性を減らします。フィルターでキャッチできないエアロゾルに対しても、一定の効果が期待できます(より小さい有機ガスの分子を分解することが確認されています)。

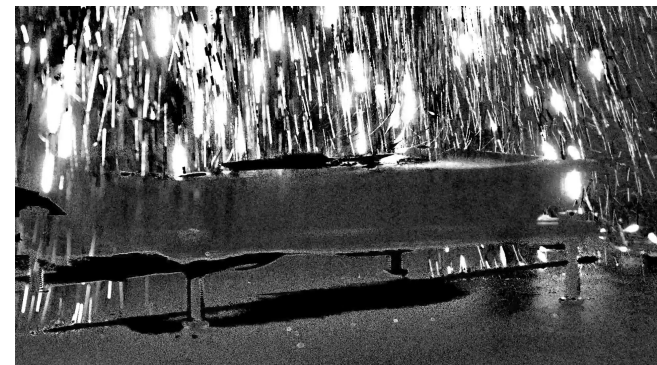
フィルターによる飛沫の捕集



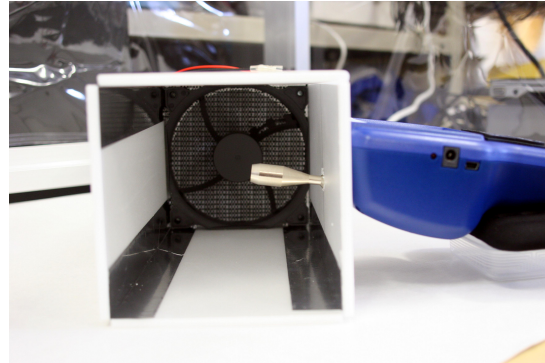
空気中の微粒子を可視化する特殊動画撮影を実施しました。

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 μ m以上の飛沫に関しては、ほぼ完全に捕集**できています。

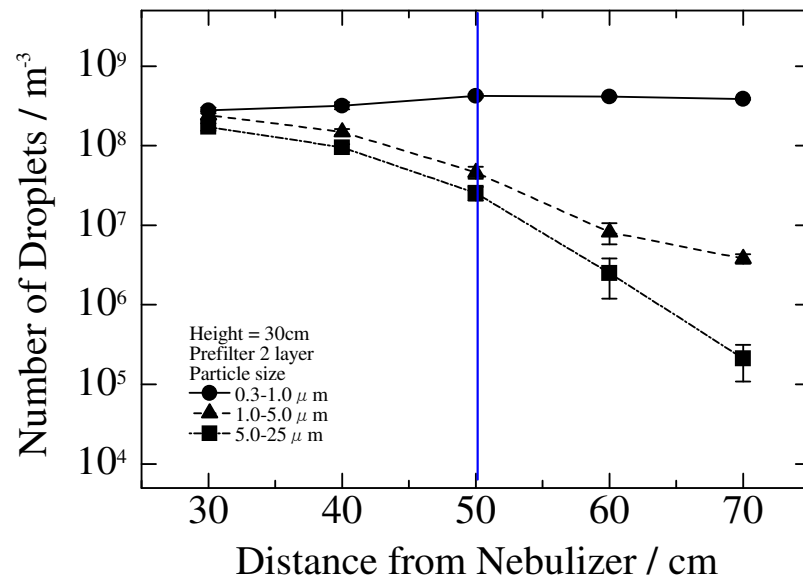
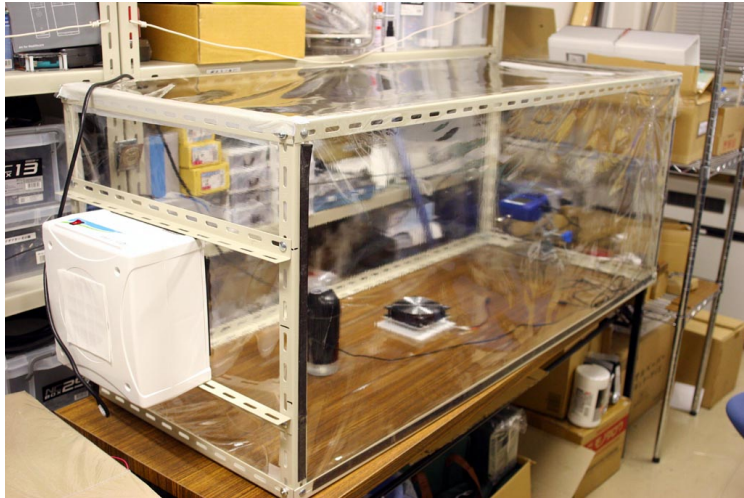
キャッチしてゆっくり分解

一般に**5 μ m以上の液滴**を飛沫、それ以下の物をエアロゾルと呼んでいます。

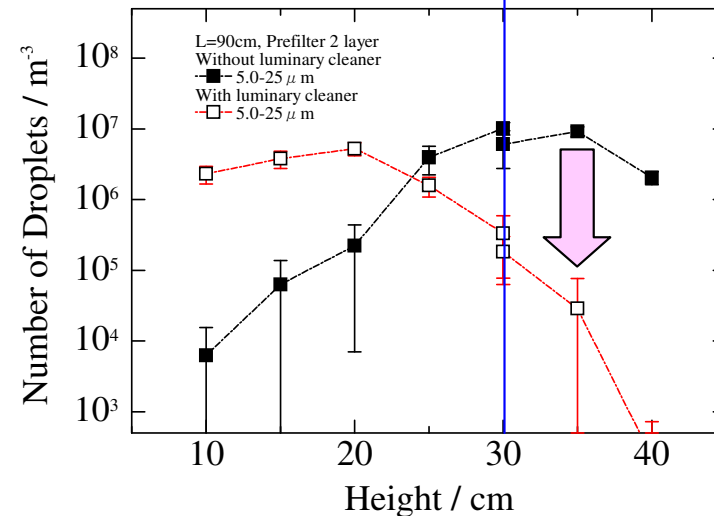
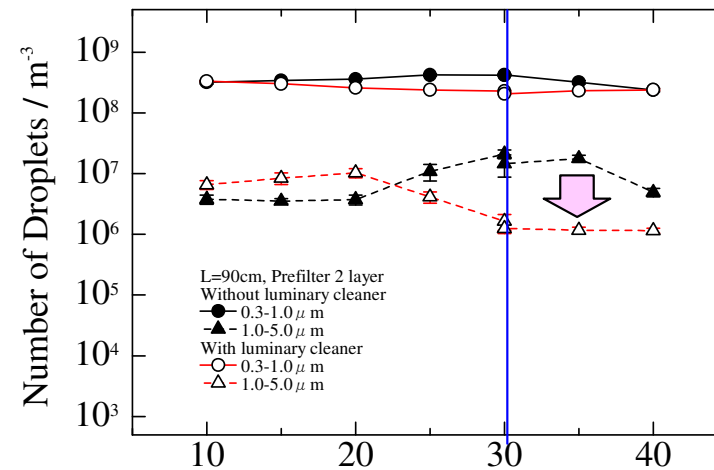
1 μ m以下の液滴は計測可能な濃度を超えており透過率が評価できませんでしたが、空気中の埃は6割以上捕集されており、さらに小さいホルムアルデヒド分子が分解されることから、光触媒による不活化は期待できます(カルテック社の実験で実証されています)。

測定条件	Particle Size	上流側 粒子濃度	下流側 粒子濃度	透過率
	μ m	/m ³	/m ³	
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

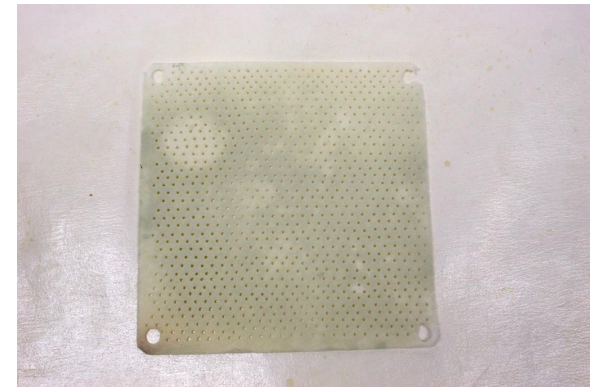
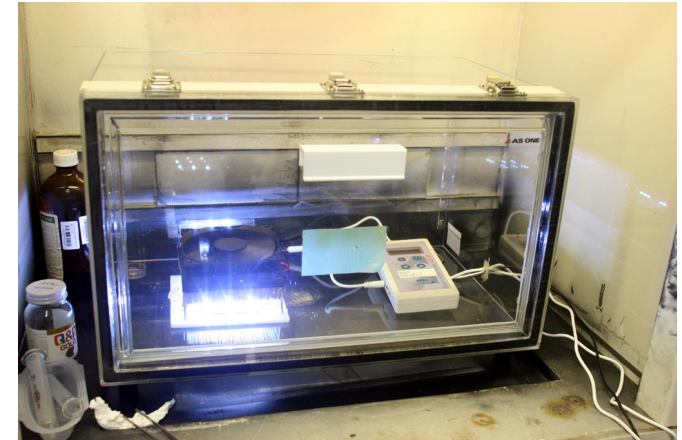
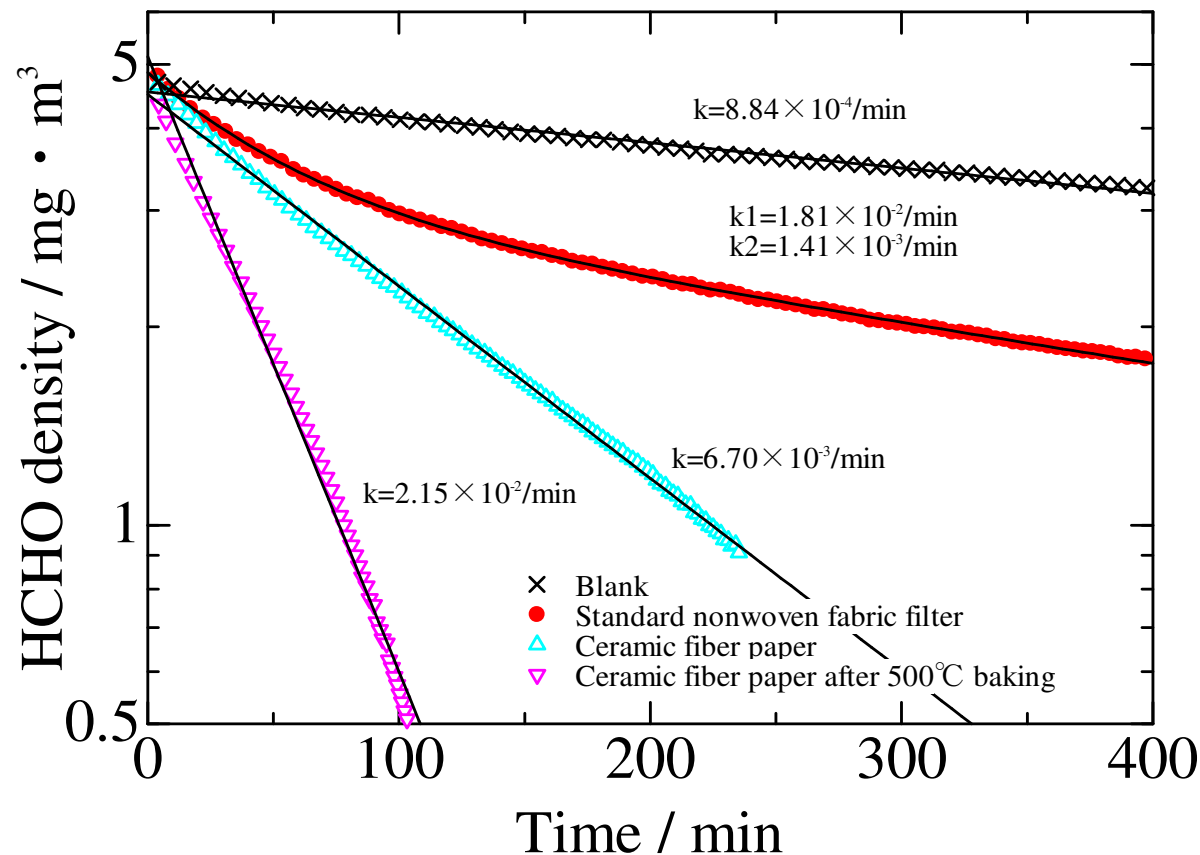


風速0.6m/s程度のクリーンベンチ内での飛沫捕集試験。

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が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。

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標準機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、市販の小型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。

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の状態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。