

2020年 11月 18日
みんなのくらしと放射線展 オンライン講座

X線の発見とクルックス管

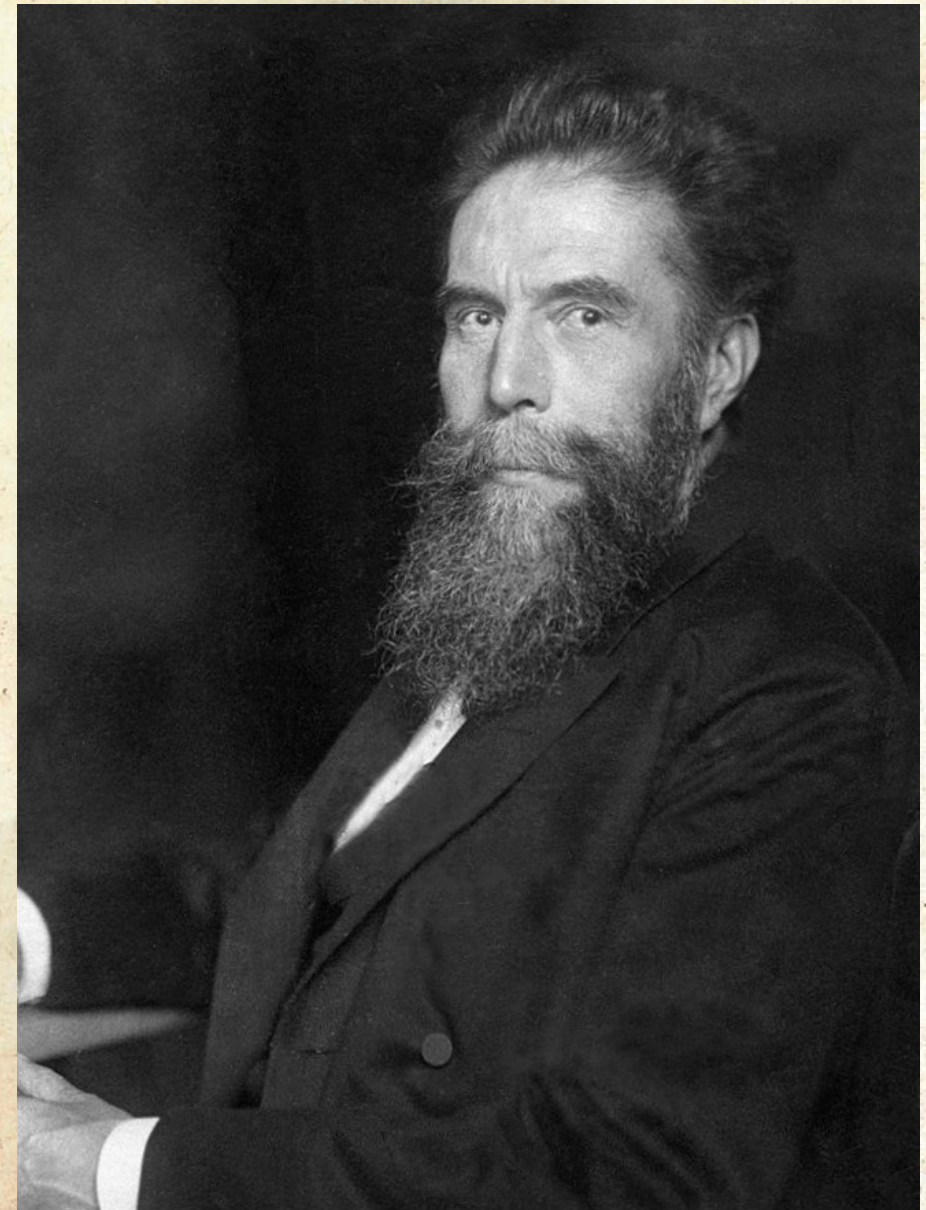
大阪府立大学 放射線研究センター
秋吉 優史

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

せん せん はっ けん
エックス線の発見

1895年、エックス線は、
レントゲン博士に
よって発見されました。

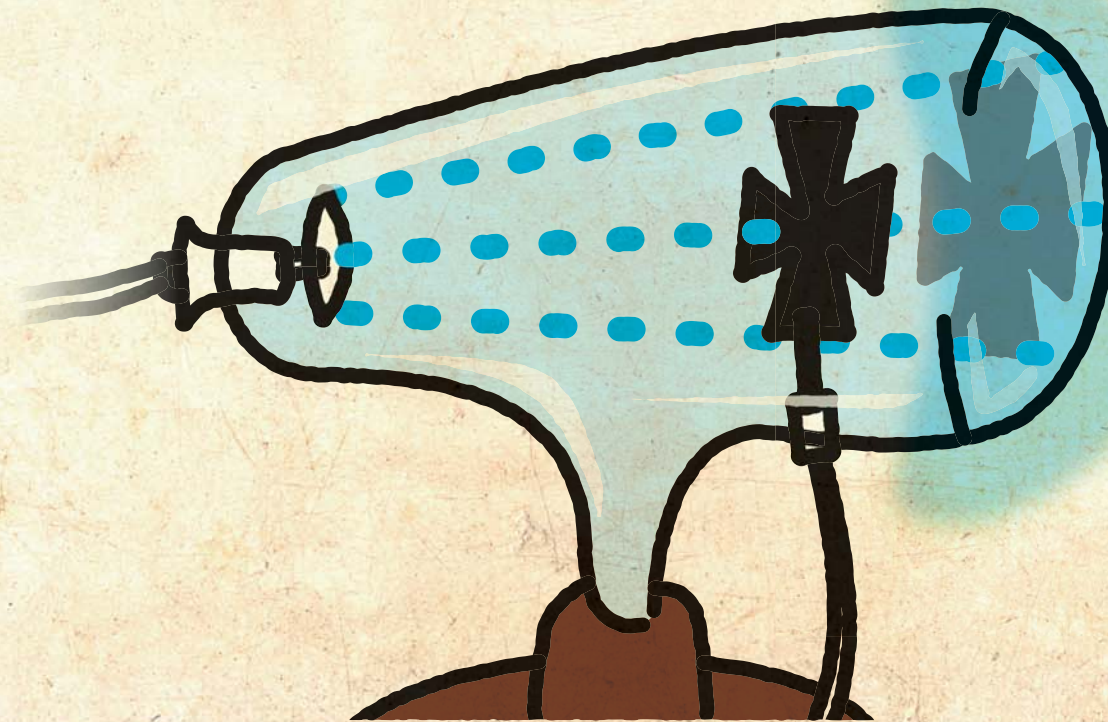
レントゲン博士
(1845 - 1923)



Wikimedia Commons

ここにテキストを入力

とう じ はか せ ほう でん かん
当時、レントゲン博士は、放電管という
かん ない ぶ ひか じっ けん ねっ しん
ガラス管の内部を光らせる実験を熱心
おこな
に行っていました。



そしてある日、^ひ光が^{ひかり}外に^{そと}漏れ^もないよう、
^へ部屋を^ま真っ暗^{くら}にし、^{かん}ガラス管^{くろ}を黒い
^{かみ}紙^じでおおい、^{けん}実験^{おこな}を行いました。

すると、
^ふ不思議^しな^ぎことが^お起きました。

ガラス管のすぐそばにある**蛍光板**(光に反応する板)が

暗闇の中でぼんやりと光りました。

つまり、**目に見えない光線**が、

黒い紙を貫通したのです。



それに気がついた、レントゲン博士は、

目に見えない
不思議な光線は
ガラス管から
出てるに違いない



と考えました。

しかし、^{とう} ^じ当時レントゲン^は ^は ^か ^せ博士は、
その^{こう} ^{せん}光線が^{なに}何かわかりませんでした。

そこで、その^{こう} ^{せん}光線を
“^{しょう} ^{たい}正体のわからない^{こう} ^{せん}光線”という^い ^み意味で
「^{せん}エックス線」と^な ^づ名付けました。

これが最初に発見された
放射線です。

その後、レントゲン博士は
エックス線の存在を証明
するために数々の実験を
重ねました。

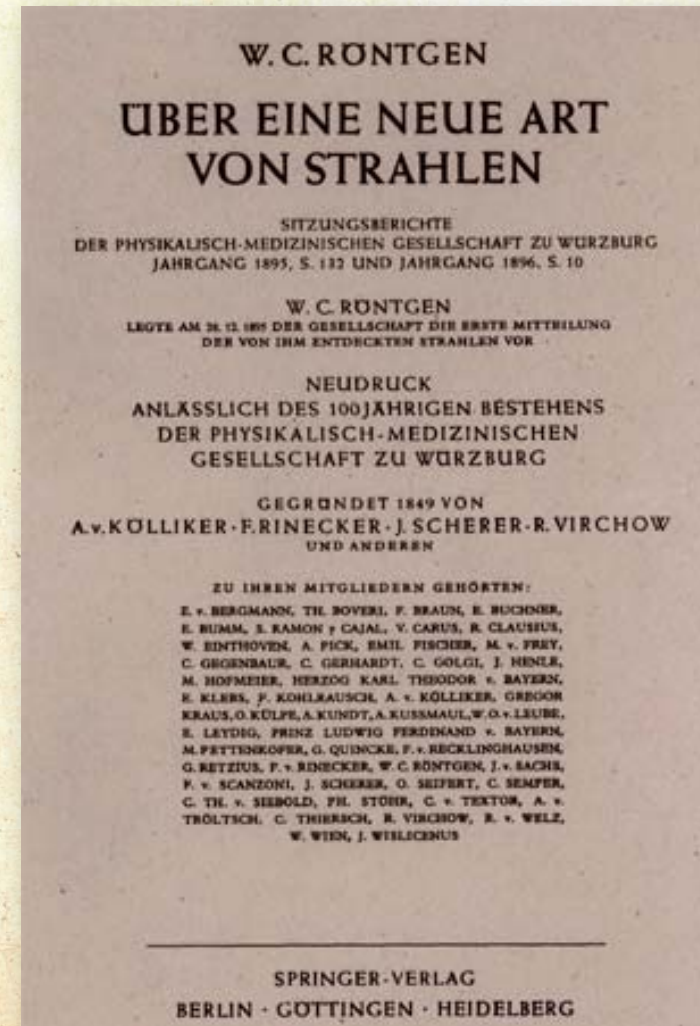
1896年1月23日に
レントゲン博士が撮影した手のエックス写真



Wikimedia Commons

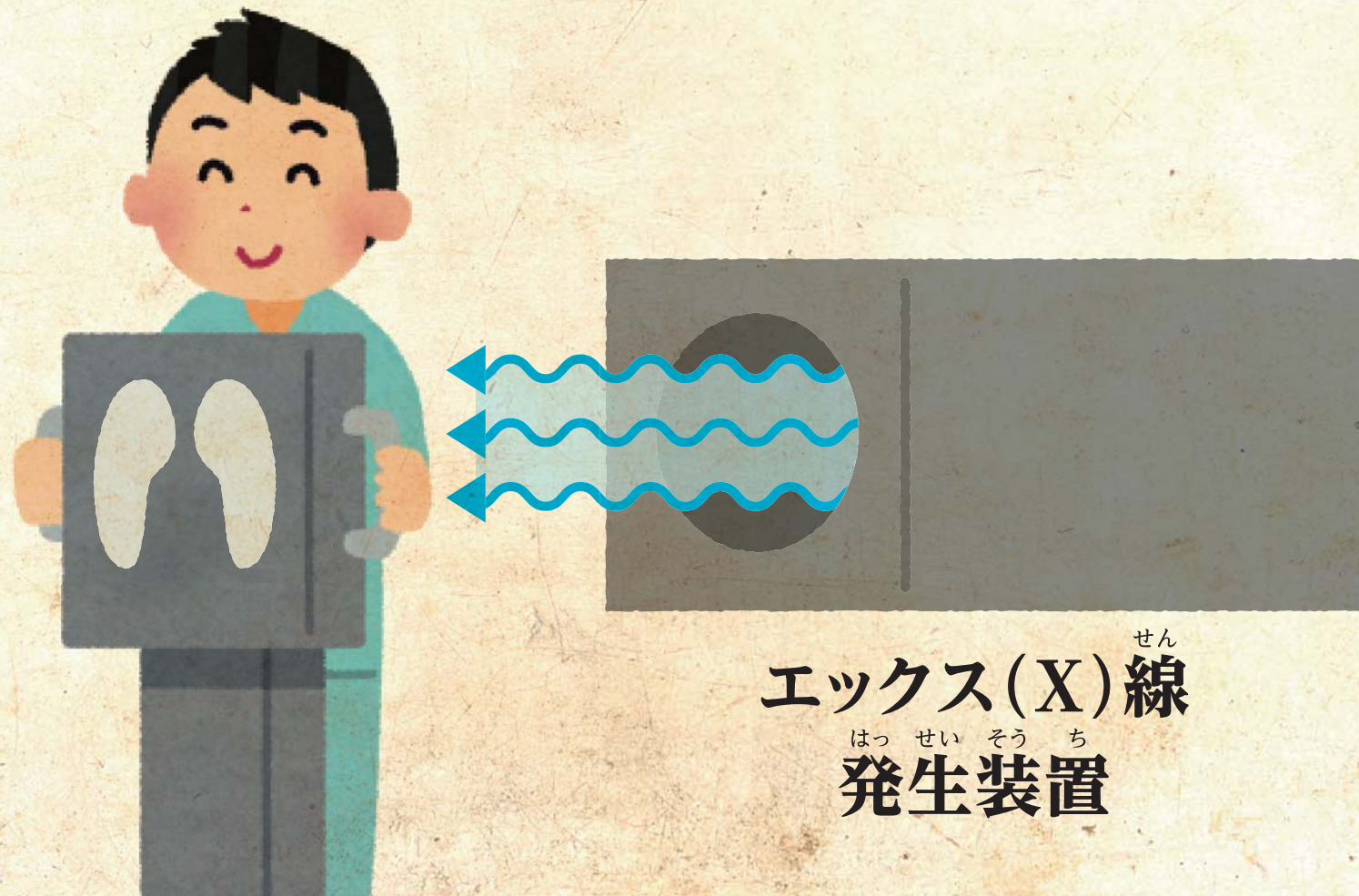
そして、
論文が発表されると
世界中にエックス線が
知れ渡りました。

エックス線の発見を紹介した論文



Springer

その後、病^{びょう}気^きやケガの診^{しん}断^{だん}などへ
エックス線^{せん}の利用^{りよう}が始^{はじ}まりました。



エックス(X)線
発生装置

後に、エックス線を利用した写真を
レントゲン博士が発見したことから、
「レントゲン写真」と呼ばれるよう
になり、私たちのくらしの中で広く
普及しています。

1. 中学校学習指導要領の変遷

改訂年	クルックス管・電子	原子の構造	放射線
S44年改訂 (教育内容の一層の向上)	○放電、陰極線、電子	○原子核、陽子、中性子、電子	○原子の壊変、放射線
S52年改訂 (ゆとりある充実した学校生活)	○放電、陰極線、電子	×	×
H元年改訂 (心豊かな人間の育成)	○(真空)放電、陰極線、電子	×	×
H10年改訂 (生きる力)	×	×	×
H20年改訂 (指導内容の充実・授業時数増)	○(真空)放電、陰極線、電子 R2年度まで	○原子核、陽子、中性子、電子	○原子力発電、放射線の性質と利用
H30年改訂 (資質・能力の育成)	○(真空)放電、陰極線、電子、放射線の性質と利用 R3年度より	○原子核、陽子、中性子、電子、同位体	○原子力発電、放射線

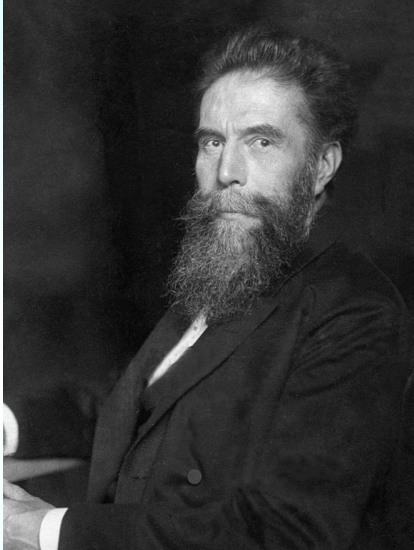
↑↓ 10年間

↑↓ 30年間

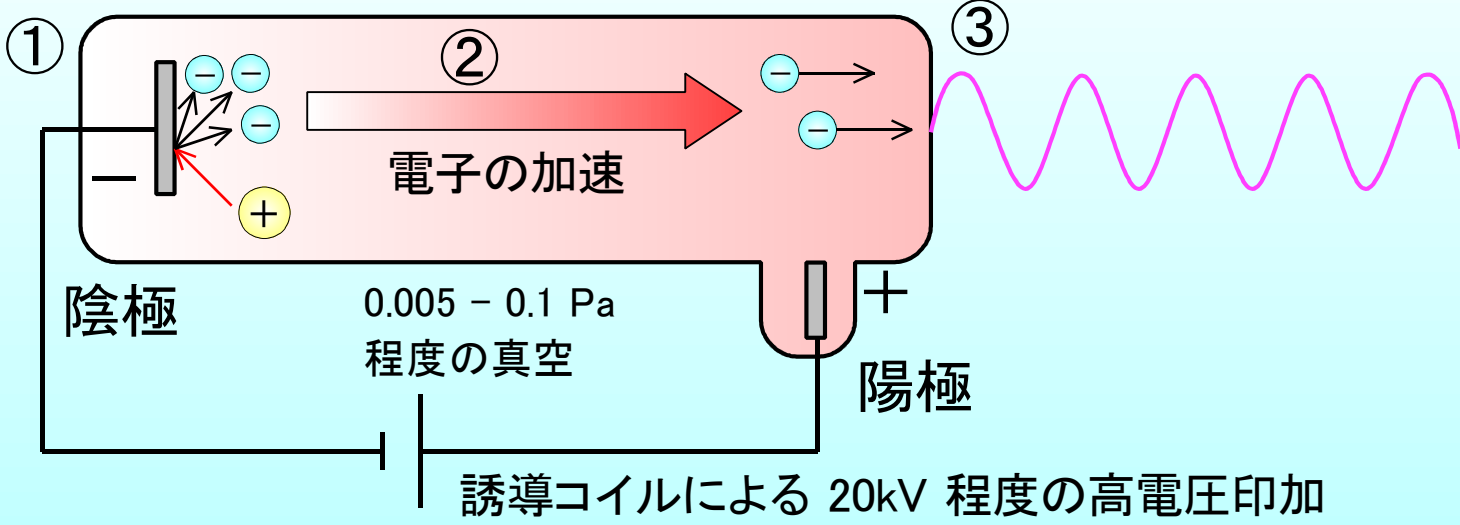
クルックス管とは？

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



Wikimedia Commons : 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とため遮蔽される。

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、製品によっては 15cmの距離で、70 μ 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。

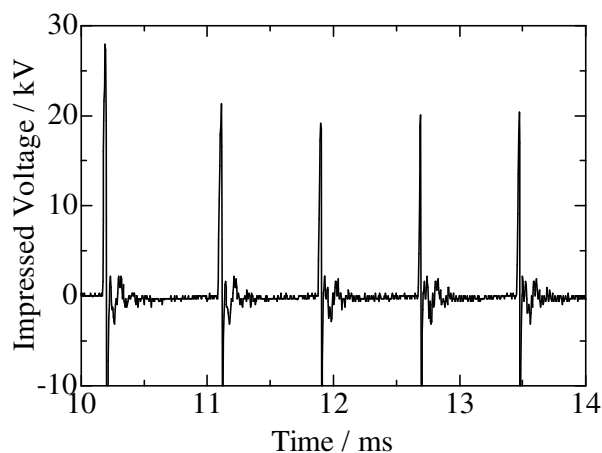
クルックス管プロジェクトの目的

誘導コイルを用いた高電圧印加について

放電極距離

空気中での絶縁破壊電圧が 1kV で 1mm 程度であることから、放電極の距離を変えることで印加する最大電圧を規定できる。放電電圧以下では、放電出力を変えることで連続的に電圧をコントロール可能。放電電圧以上に出力を上げると無駄に放電が激しくなるので、目的の電圧を出力するためには丁度放電が起こり出す出力程度にコントロールする必要がある。

放電出力

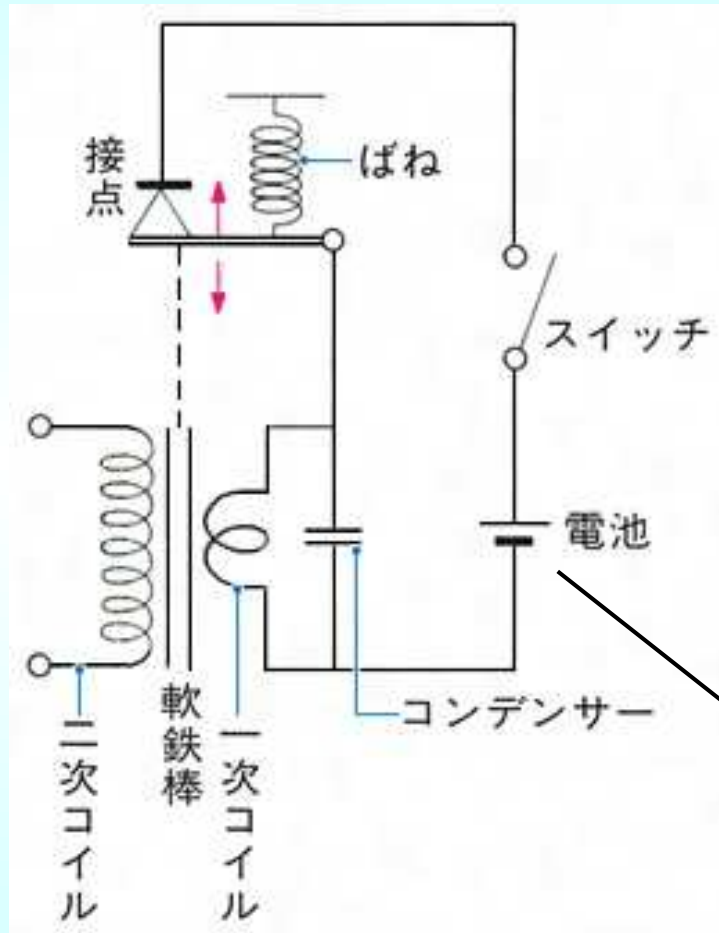


放電極距離 20mm, 放電出力4, 平均電流 80 μ A



電圧測定時にはガラス抵抗体などの物理的にもサイズの大きい、100M Ω 以上の抵抗と、100k Ω 程度の抵抗を組み合わせた分配器を用いて測定するが、アースを取っていないとカソード側も高電圧をパルス的に出しているため、2chのオシロスコープでアノード側との差分を取る必要がある(フローティング測定)。

誘導コイルを用いた高電圧生成について



誘導コイル(Induction Coil)は、極端に巻き線の数の異なるトランス(実際には同軸上に巻かれている)の一次側の電流を、ベルやブザーなどと同様の機械的な接点を含めた回路で連続的にON/OFFすることでパルス状に変化させて、二次側に大きな電圧のパルスを生成する。

プラス側だけでなくマイナス側にもパルスが出るが、接点切断時の一番最初のプラス側のパルスの方が大きい。

放電出力などと書かれている調整用のダイヤルは、可変抵抗などで一次側に印加する電圧を変化させている。

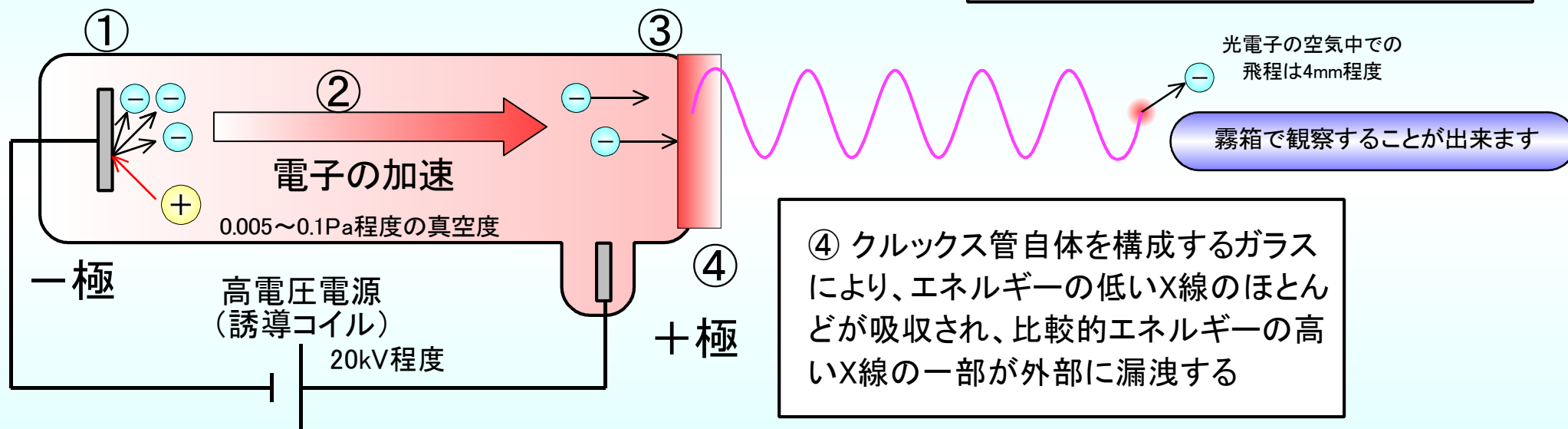
クルックス管からのX線の漏洩

① ガラス管内の空気が電離して出来た+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)

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。

X線は最終的に原子の周りを回る電子を光电効果などで弾き飛ばして(電離作用)、弾き飛ばされた光電子は低エネルギーのβ線と同じように振る舞う。



④ クルックス管自体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X線の一部が外部に漏洩する

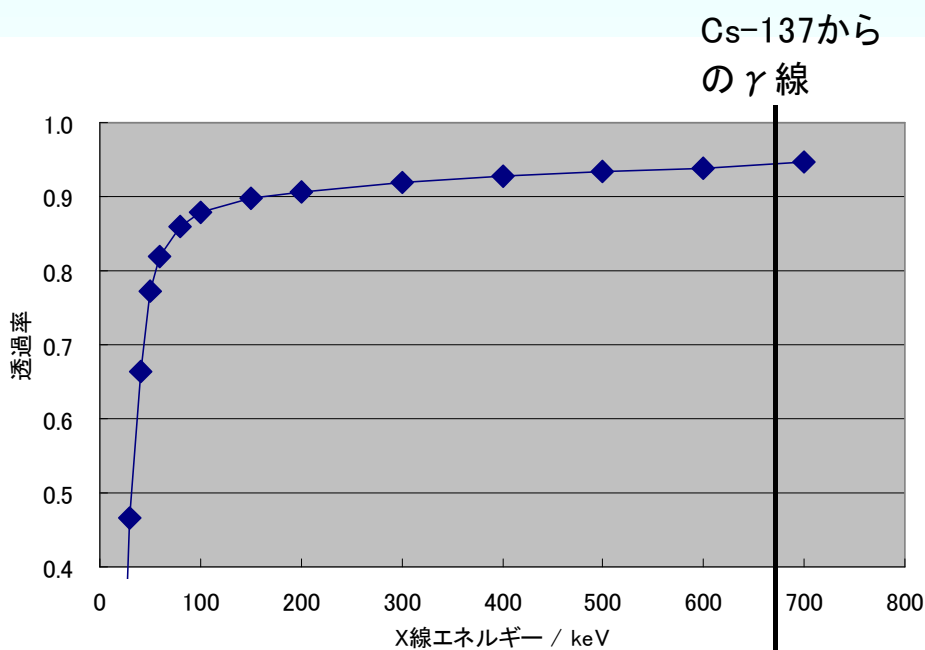
クルックス管に封入されているガスの量が少ない(ガラスに吸着するなどして少なくなる)と、①で陰極を叩くイオンが少なくなるため、電子が飛び出しにくくなり、電流が流れにくくなります。その結果誘導コイルに電磁エネルギーが蓄積され高い電圧が印加されてしまい、電流は小さいが④で漏洩する線量が大きくなってしまいます。(低エネルギーではわずかなエネルギーの違いで透過率が大きく異なる(15keV→30keVで100倍違う)ため)

放電出力最小でも高い線量が測定されたクルックス管はこの状態でした。放電極距離を20mmに縮めると空中放電が非常に激しい一方、クルックス管に流れる電流は少なく観察が困難でした。こうなってしまった製品は、買い換えが推奨されます。

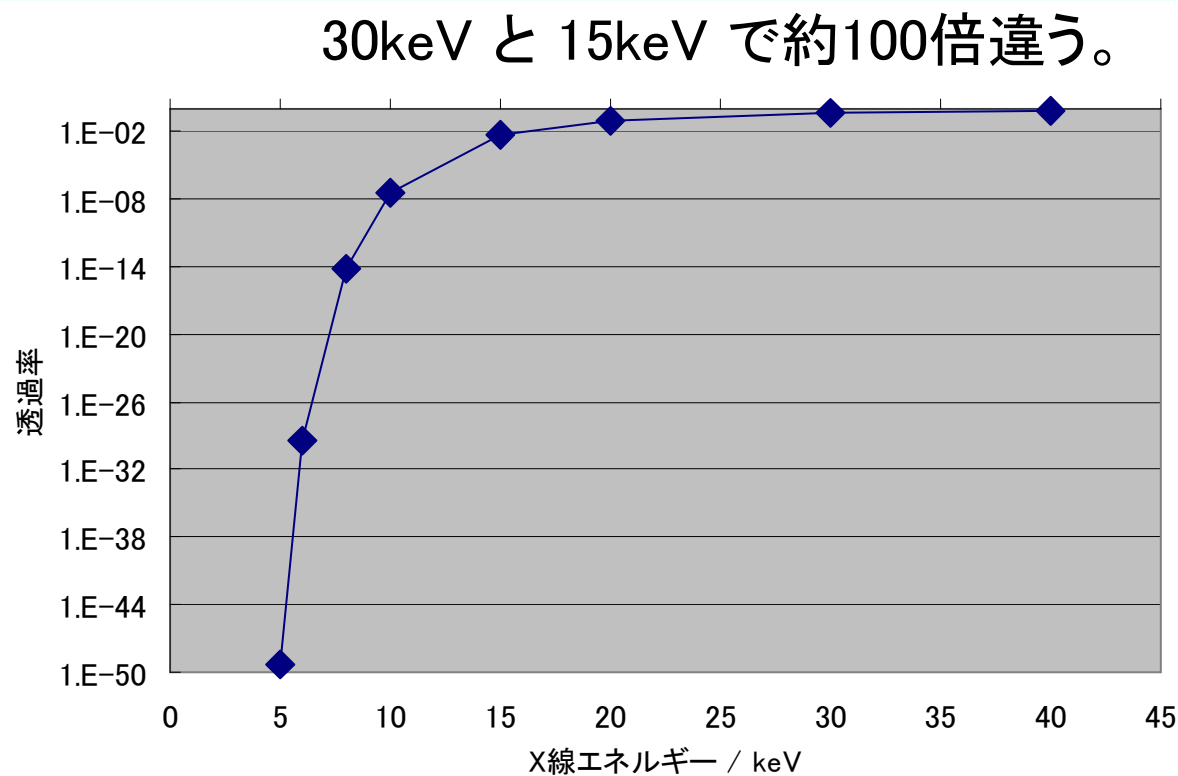
放電極で最大電圧を抑えることが重要

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



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
何も対策する必要がない

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)。

過去の研究から策定
した暫定ガイドライン

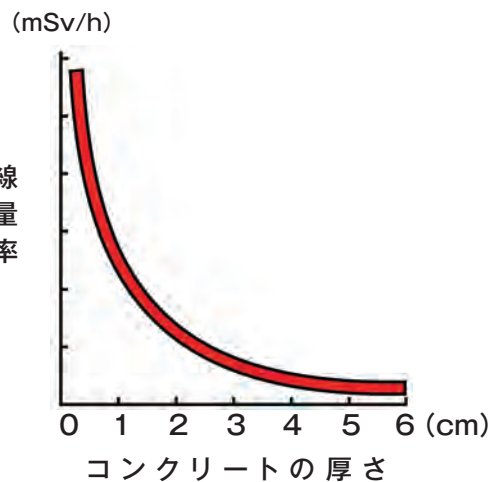
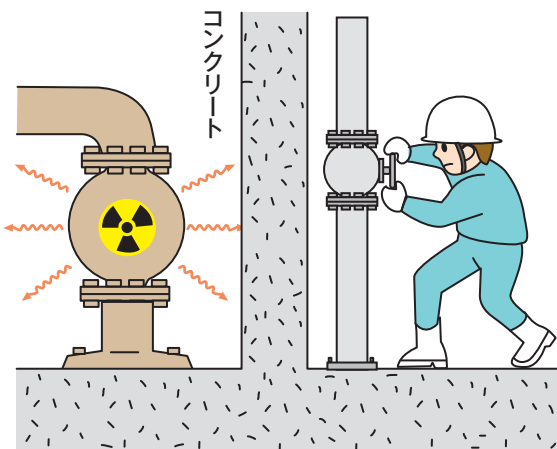
- ・誘導コイルの放電出力は電子線の観察が出来る範囲で最低に設定する
- ・放電極を必ず使用し、放電極距離は20mm以下とする。
- ・出来る限り距離を取る。生徒への距離は1m以上とする。
- ・演示時間は10分程度に抑える

本当にこれで安全か
全国規模の実証試験
が必要

放射線防護の基本

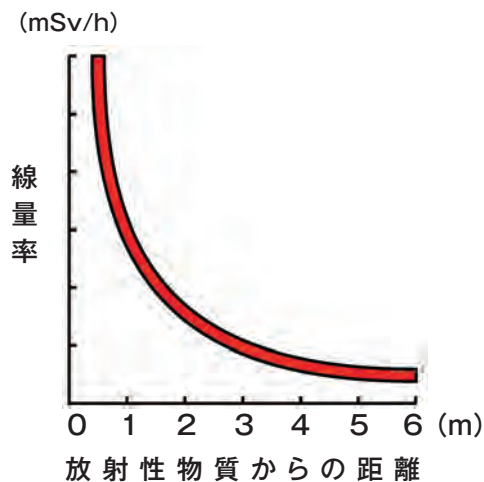
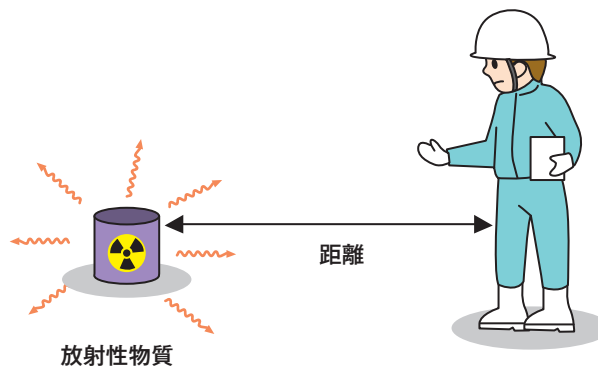
1. 遮へいによる防護

(線量率) = 遮へい体が厚い程低下



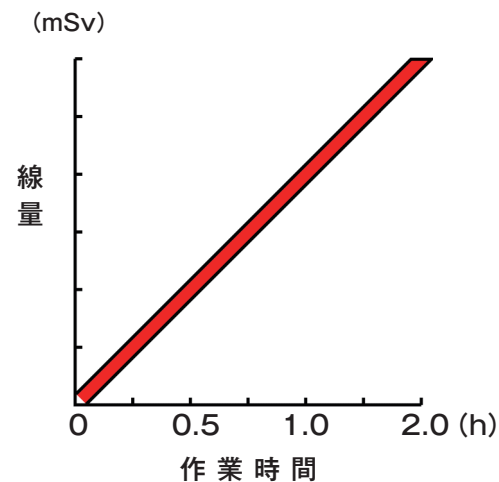
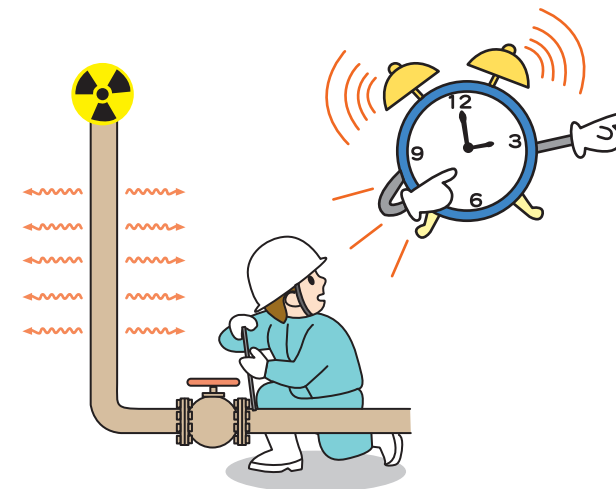
2. 距離による防護

(線量率) = 距離の二乗に反比例

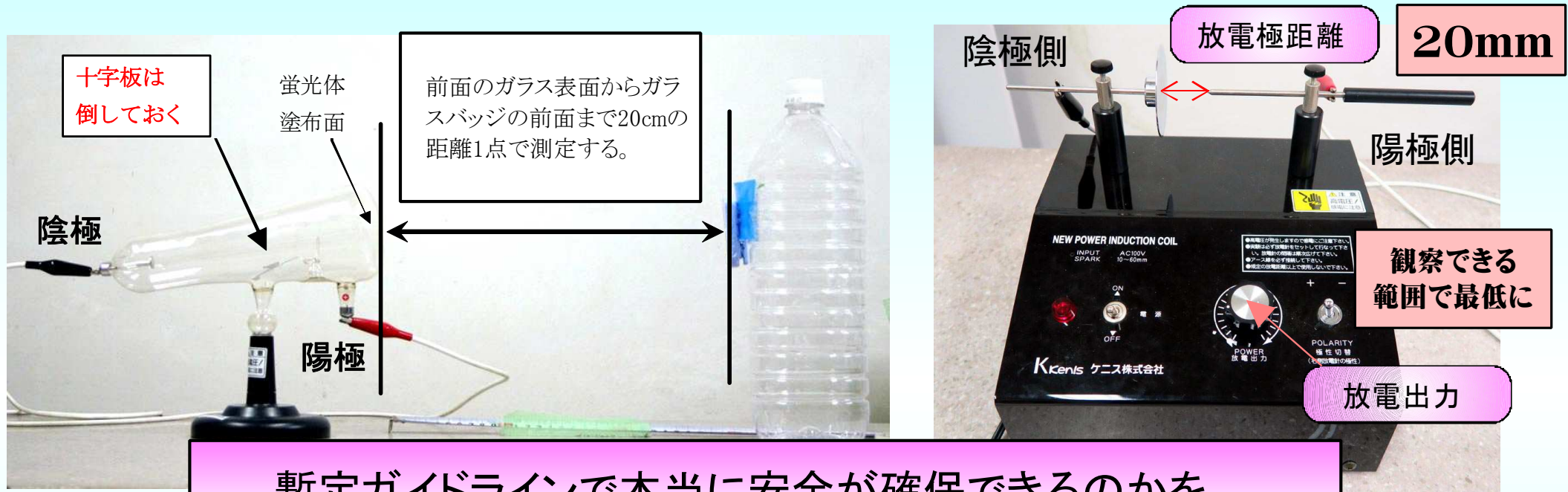


3. 時間による防護

(線量) = (作業場所の線量率) × (作業時間)



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。

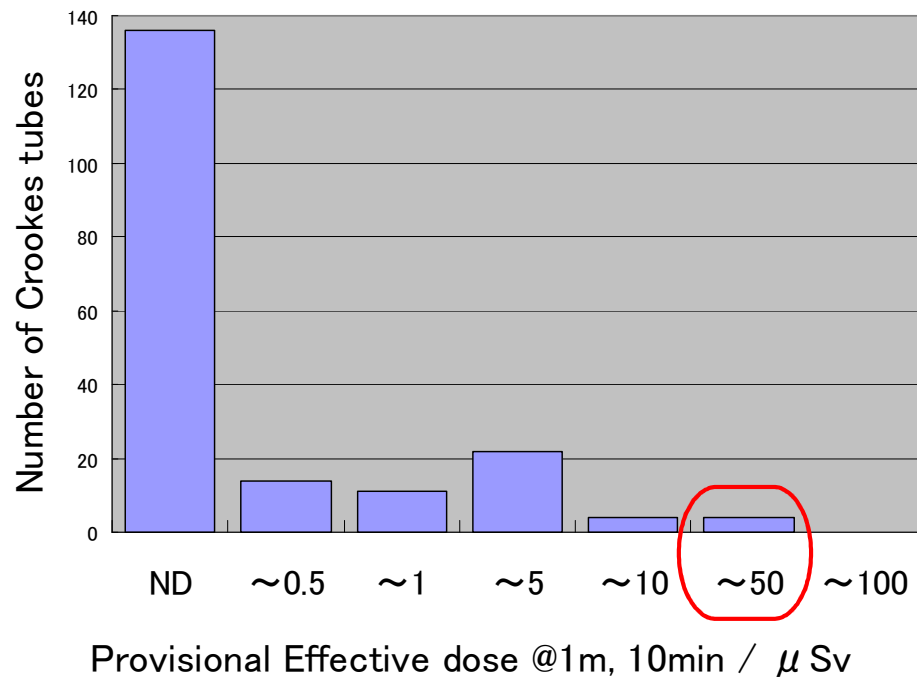
- ・クルックス管から 20cm の位置で、測定は10分間など統一したプロトコルで測定。
- ・ガラスバジは大阪府大と各学校とを郵送でやりとりし、現場の先生の手により測定。BGの影響を抑えるために1月ごとに取りまとめて評価を行う。

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）

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 10μ 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 10μ Sv を超えると評価されたが、3本は 20μ Sv 以下、1本だけ 42μ 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 10μ Sv を超える可能性があり、 93μ 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 mSv、個々の授業ではその 1/10 (50μ 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。

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:
 $600 \mu\text{Sv}$

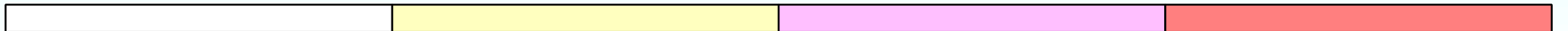


1mSv

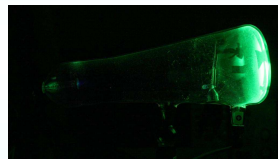
CTスキャン1回:
数mSv



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:
 $100\text{--}200 \mu\text{Sv}$



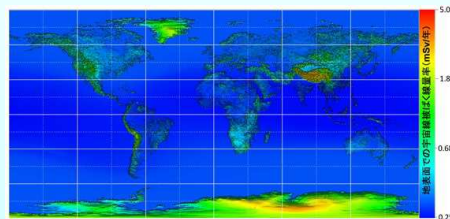
日本人が特有に持っている
 20Bq のポロニウム
 210 による年間被ばく
線量: $800 \mu\text{Sv}$

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:
 $\sim 10\text{mSv}$

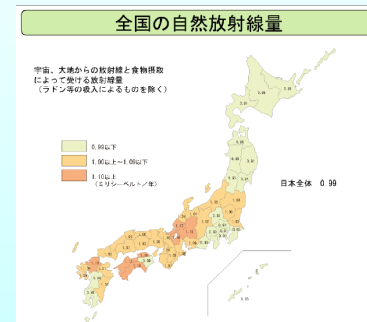


ランタンのマントル*を
1時間体に貼付ける:
Hp(10) $1 \mu\text{Sv}$ (γ 線)
Hp(0.07) $10 \mu\text{Sv}$ (β 線 + γ 線)

*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



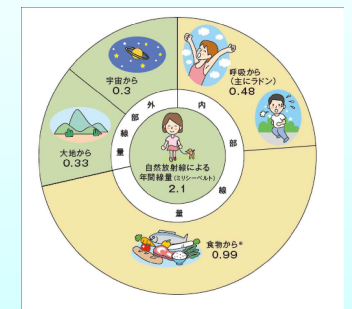
年間の宇宙線量の世界平均と
日本平均の差:
 $50 \mu\text{Sv}$ (日本の方が小さい)



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: $400 \mu\text{Sv}$

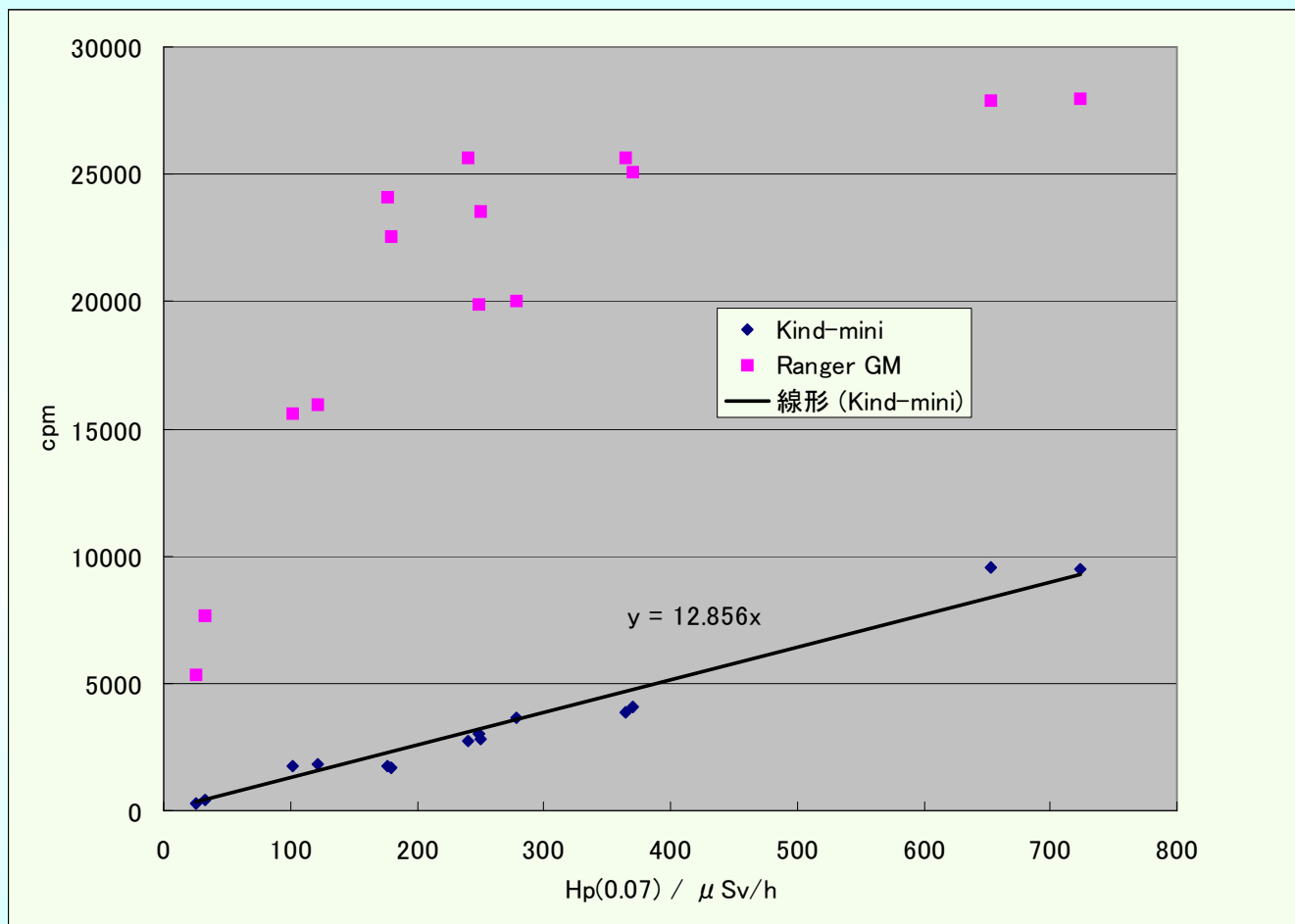


世界平均と日本平均
でのラドンによる年間
被ばく量の差:
 $800 \mu\text{Sv}$
(日本の方が小さい)



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

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。



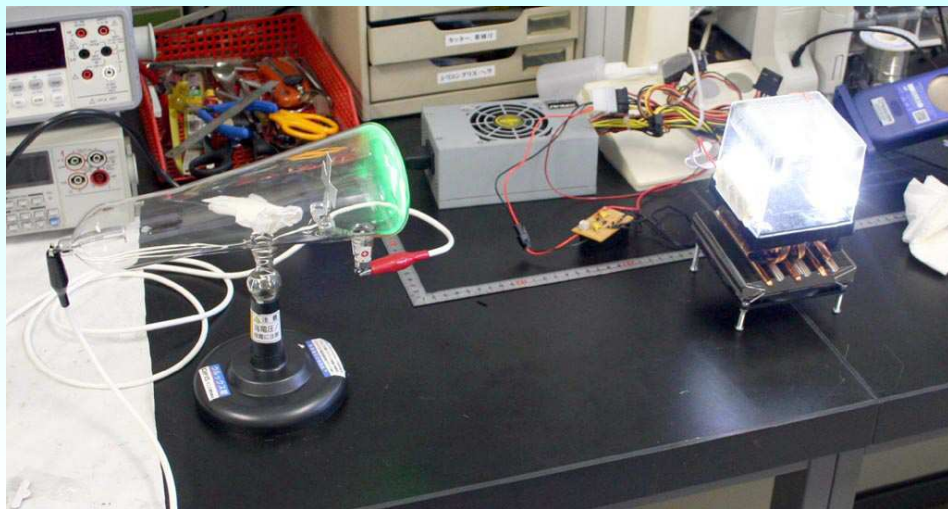
Ranger

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。

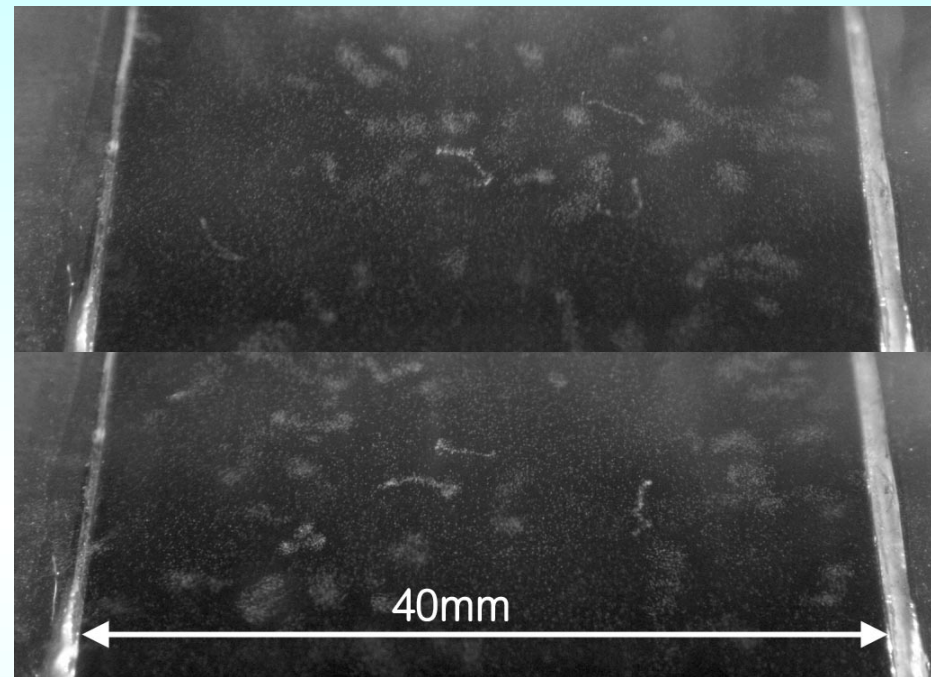
Inspector USB の後継機。

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

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。

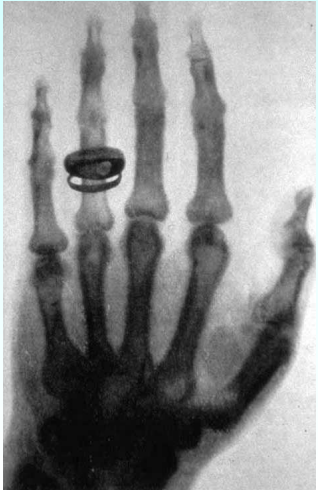


クルックス管からのX線によって弾き出された光電子の霧箱観察結果(放電針距離20mm)。

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**

レントゲン写真が何故撮れるのか？



X線は物を透過する能力が強いため、体の中の骨などを写す事が出来ます。しかし、ただ単に透過力が強いだけでは、全部突き抜けてしまって何も見えません。筋肉や内臓などの組織と、骨組織、場合によっては造影剤を入れた組織とで、透過率が異なりコントラストが付いて始めて像として見る事が出来ます。これは、影絵のように単純に密度が高い物が透過率が低いと言うだけで無く、鉄や鉛などの原子番号の大きい元素では、原子番号の4~5乗に比例して急激に透過率が小さくなります。(光電効果が支配的なエネルギー領域に限る)

カルシウムなどを含む骨は、水素、炭素、酸素などで出来ている筋肉よりもずっと透過率が小さくなります。

例えばクルックス管から放出される 20keV の X線では、1cm の水の透過率は 58% 程度ですが、1cm のコンクリートでは 0.2% 程度しか透過しません。実際のレントゲン写真の撮影では、撮影する対象によってエネルギーを調整して、丁度良い明るさ(透過率)で、コントラストが高くなるようにしています。

クルックス管で実験してみよう!

ガラスの水槽の蓋として周りのガラスと同じくらいの厚さのプラスチック板を載せて、ガラス越しに測定した場合と、プラスチック板越しに測定した場合、線量の違いがどうなるか、音が鳴るガイガーカウンターなどで測定してみましょう。



組成による透過率の違いが、直感的に学習できます。

- ・クルックス管からの距離が同じ程度になるようにして距離を取って測定しましょう
- ・天板側の測定はごく短時間にしましょう
- ・測定器はガイガーカウンター以外にもプラスチックシンチレーターを用いた物などが使えますが、シリコンフォトダイオードや NaI シンチレーターを使用した物などでは上手く行きません。