

2020年 11月 29日
放射線教育フォーラム勉強会 @ Online

**クルックス管プロジェクトの着地点
～新学習指導要領全面実施を前に～**

大阪府立大学 放射線研究センター 秋吉 優史
クルックス管プロジェクト有志各位

秋吉 優史: akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp

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



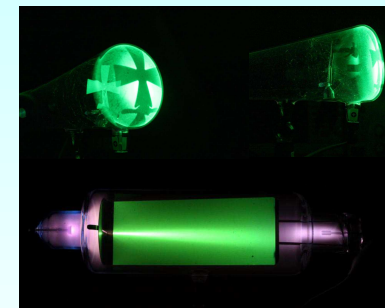
クルックス管を使って安全に実験をするためのお知らせ

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。**

新しく追加されました



クルックス管からX線が放出されていることが、19世紀末にレントゲンによって発見されました。トムソンによる電子の発見にもクルックス管は用いられ、それ以降の科学の発展に重要な役割を果たしました。一方で、製品によっては最大出力に設定して15cmの距離にまで近付くと、10分間の実効線量が3.3mSvに達する場合があります。放射線が漏洩していることを知らずに、不注意に近付いて観察したり、いたずらに出力を高くしたりすると不要な被ばくをする危険性があります。

漏洩するX線のエネルギーは20keV程度と低く、パルス状に放出されるため、電離箱以外の普通のサーベイメーターは実際の線量よりも大幅に小さい値を示し役に立ちません。

しかし、心配はいりません！

簡単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運用ガイドラインを守ることで、劇的に被ばく線量を小さくすることができます。

クルックス管安全運用のためのガイドライン

- ・清浄な放電極を必ず使用し、放電極距離は20 mm以下とする。
- ・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1 m以上とする。
- ・演示時間は年間10分程度に抑える。

連絡先: 大阪府立大学 放射線研究センター 准教授 秋吉 優史
Mail: akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp Website QRコード →
また、放射線教育支援サイト「らでい」<https://www.radi-edu.jp/> では、スクリーニング用の線量計を無料貸出し致します。



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。

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

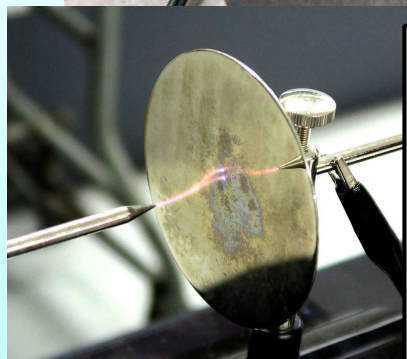
陽極

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！**



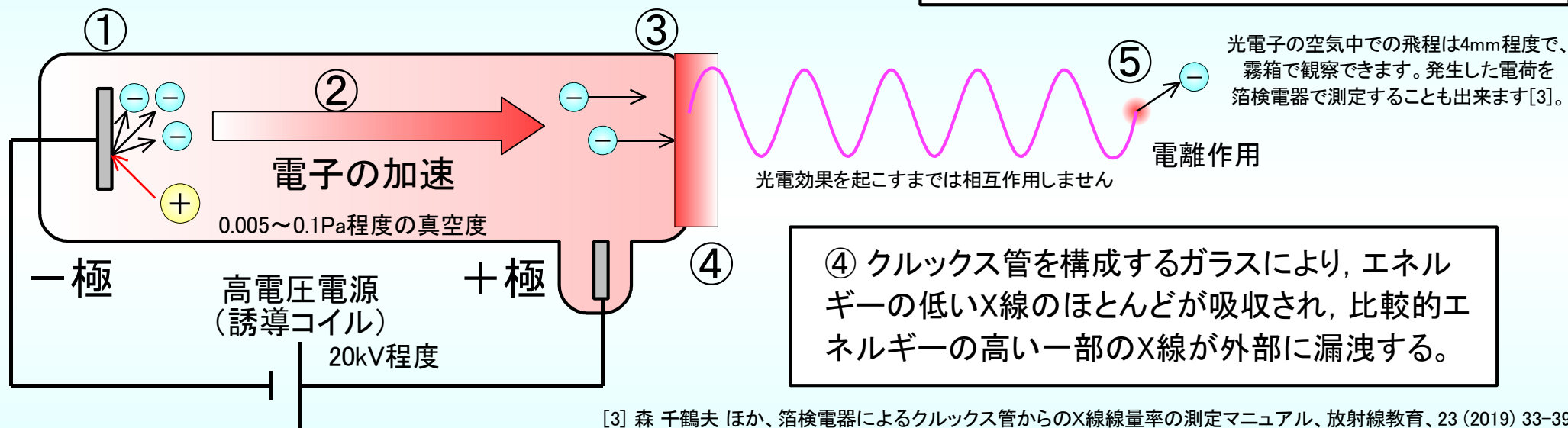
クルックス管のしくみ

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.

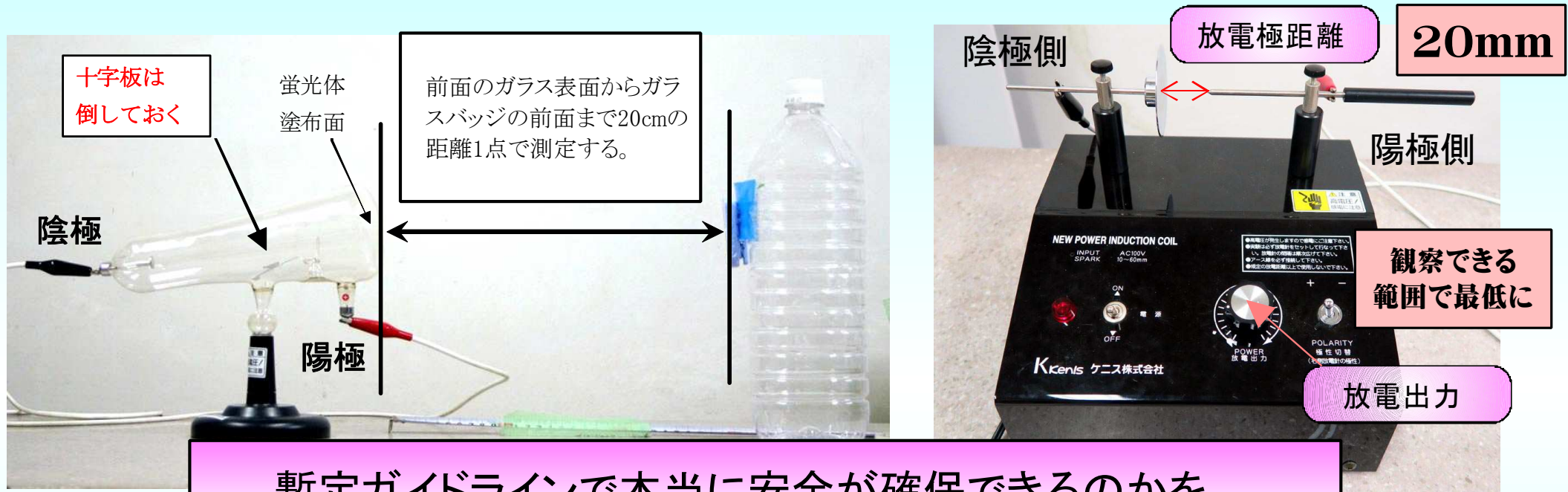
クルックス管に封入されているガスの量がガラスに吸着するなどして少なくなると、①で陰極に衝突するイオンが少なくなるため、二次電子の量が少なくなり、電流が流れにくくなります。その結果十分な二次電子が出てくるまで意図せずして高い電圧が印加されてしまい、④で漏洩する線量が大きくなってしまいます。

→ 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

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。

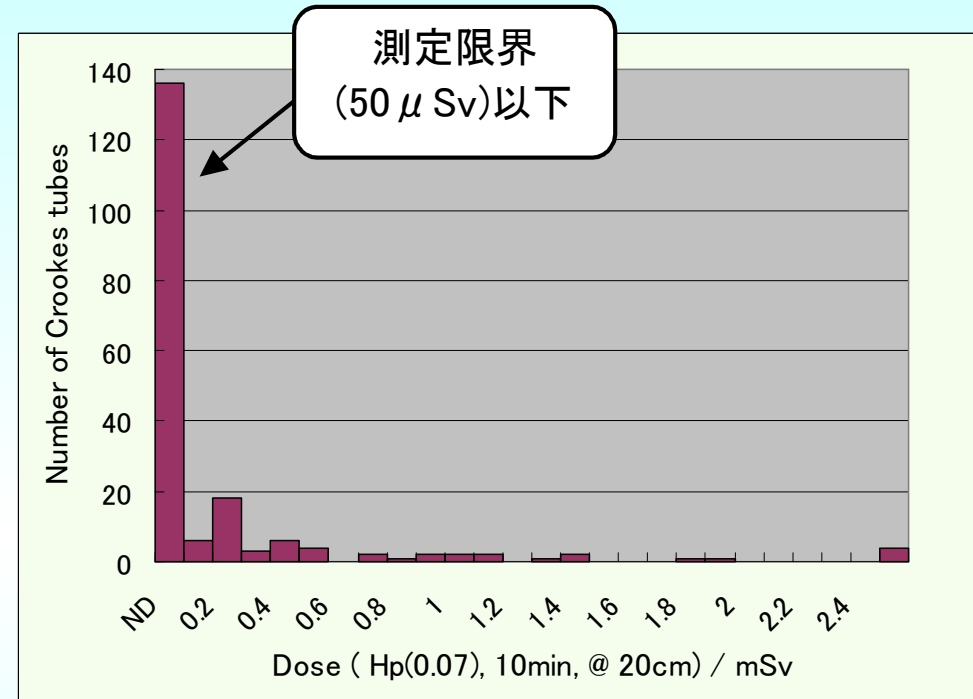
大阪府立大学倫理委員会の承認を得て実験を行っています。

第二期実態調査結果（最終版）

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。

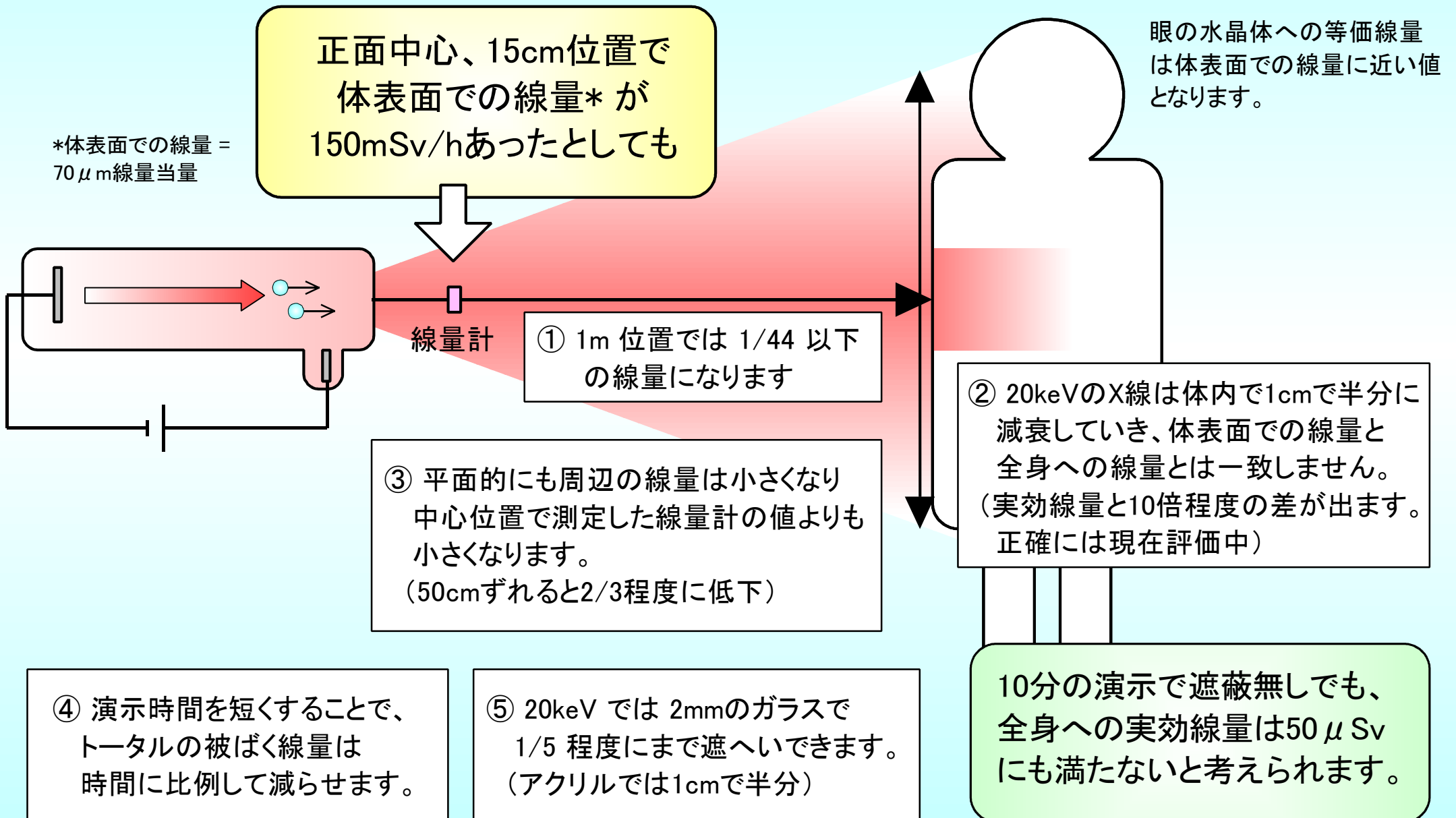
8月期は、27校からの95本、9月期は8校からの18本、10月期は18校からの67本、11月期は4校からの11本、合計191本のクルックス管について「暫定ガイドライン準拠」での測定を行った。

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線の不均一性



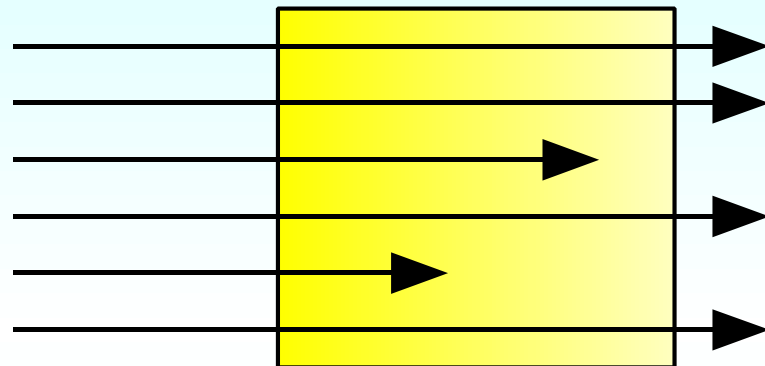
放射線量について

- ・放射線を被ばくしたときの全身への影響を、ICRP等が定めたしきたりに従って評価したのが、「実効線量」。普通、線量と言えばこの実効線量のことを指す。
- ・ベータ線など、透過力の弱い放射線を被ばくした場合、皮膚表面だけが被ばくしていることになる。この時皮膚だけに対する影響を評価するのが、「皮膚等価線量」。最近では、眼の水晶体に対する「水晶体等価線量」も問題となっている。
- ・実効線量の評価は非常に複雑である。このため、体の表面から1cmの深さの一点での吸収線量が全身の線量を代表するという、簡易的な「1cm線量当量」をサーベイメーターは測定している。同様に、皮膚の等価線量は深さ70 μ mの深さの一点での吸収線量である、「70 μ m線量当量」で測定する。
- ・クルックス管からのX線は透過力が中途半端で、皮膚だけ、と言うわけではない一方で、1cm進むと半分程度に減衰するため、「1cm線量当量」では5倍以上の過大評価となり、慎重な評価が必要。現在は表面での線量としての70 μ m線量当量での測定を行っている(あとで実効線量への換算が容易)。20keVでの実効線量はおおよそ70 μ m線量当量の1/10。

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

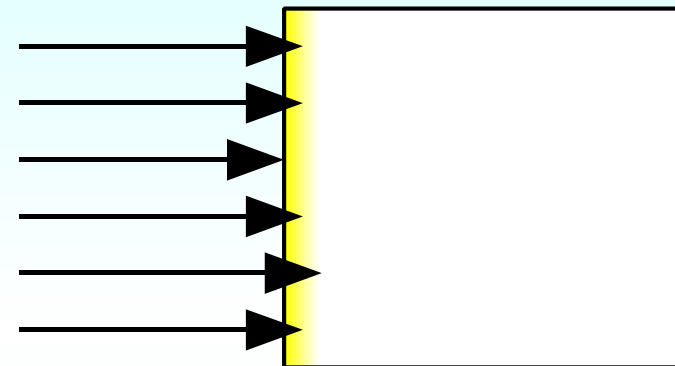
高エネルギーガンマ線などの場合透過力が高く、ほぼ均等にエネルギーを与える。

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

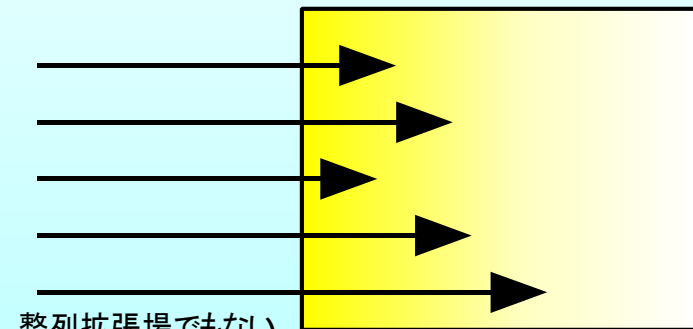
$$H_p(0.07) > 10 H_p(10)$$



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

X線放射方向垂直平面内での空間線量分布

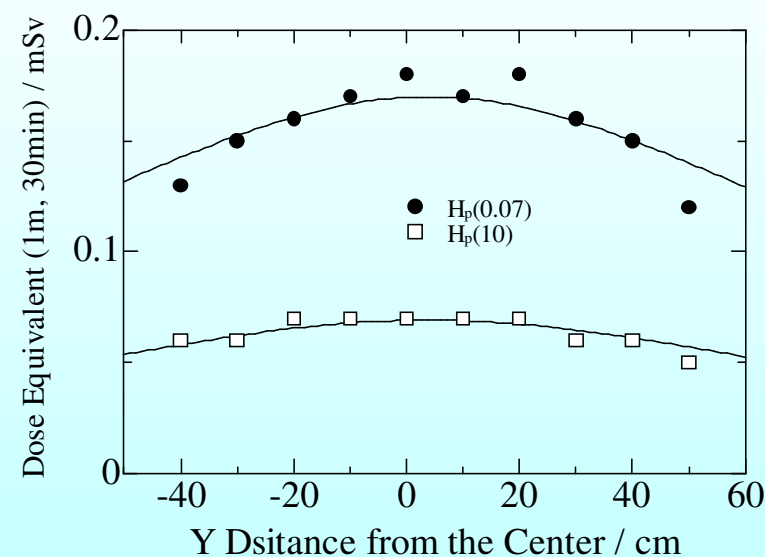
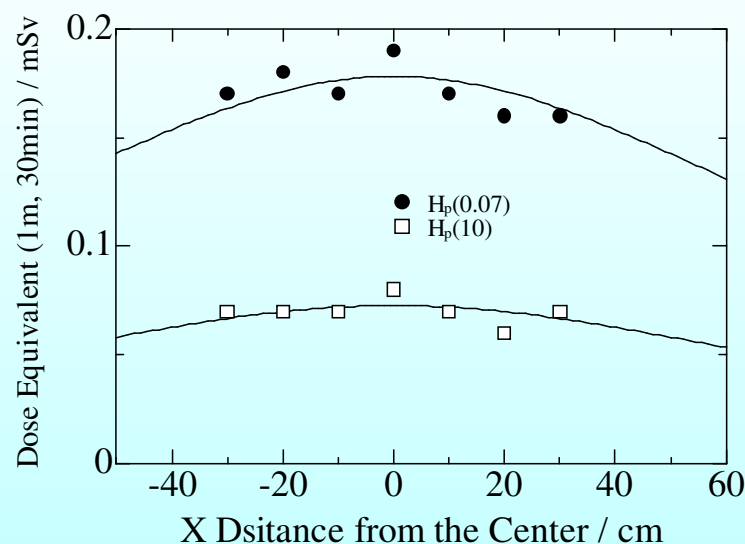
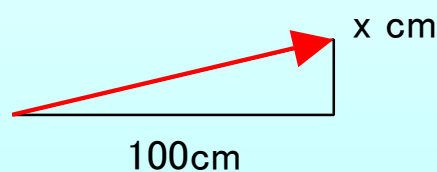
生徒位置(z=1m)での全身への線量を評価するために、平面内での線量分布を測定した。中心から y 方向 60cm 離れた位置でも 70% 程度の線量とかなりブロードな分布となっており、1.5 倍以内の範囲に収まっていた。



以下の式で空間分布を表わすことが出来る

$$H_p = a / (100^2 + x^2 + y^2)$$

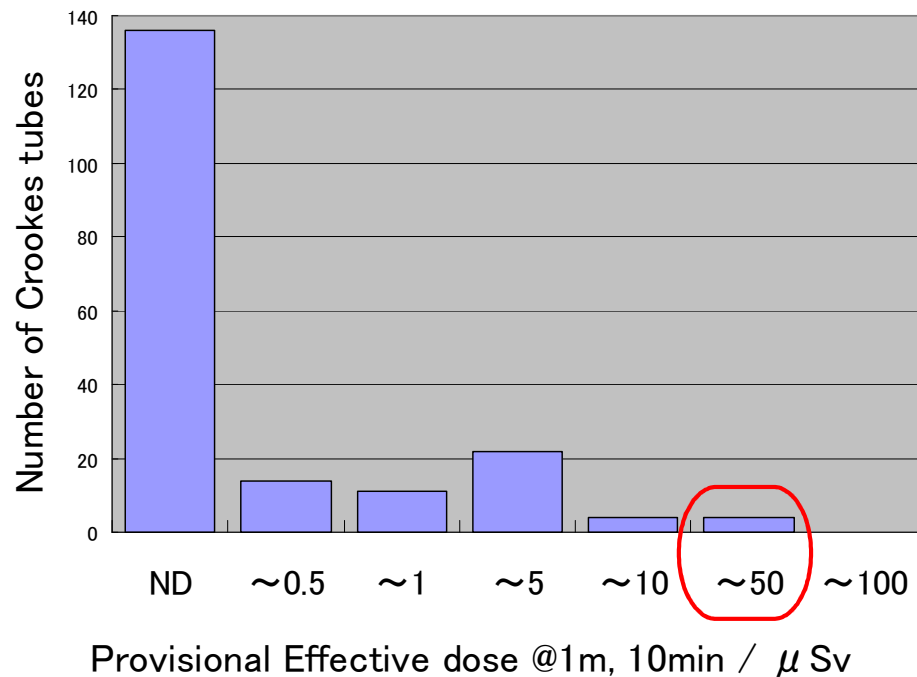
平面方向の変位を含めた直線距離の二乗に反比例



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。

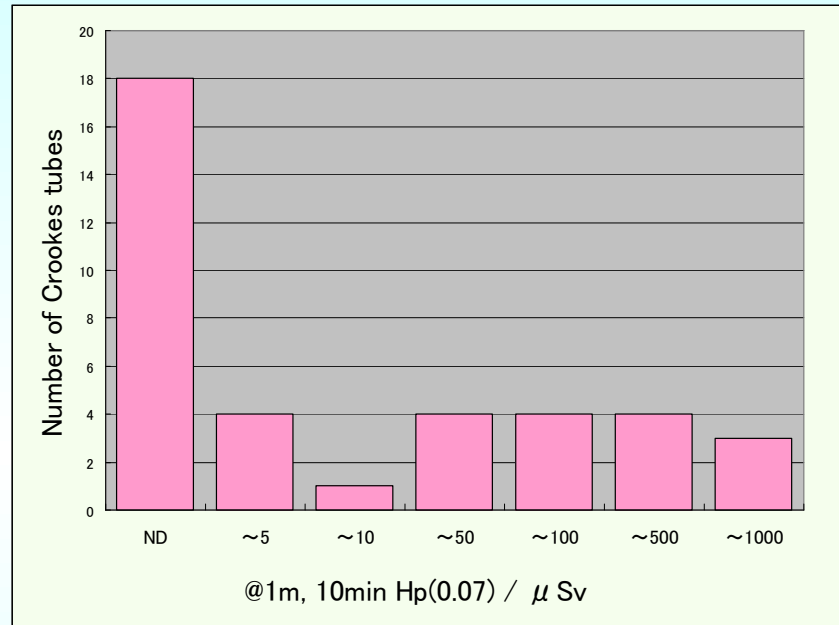
2018年の暫定ガイドライン適用前の実態調査では、37本中6本が距離 1m、10分間での実効線量が 10μ Sv を超える可能性があり、 93μ Sv と評価された装置もあった。

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。

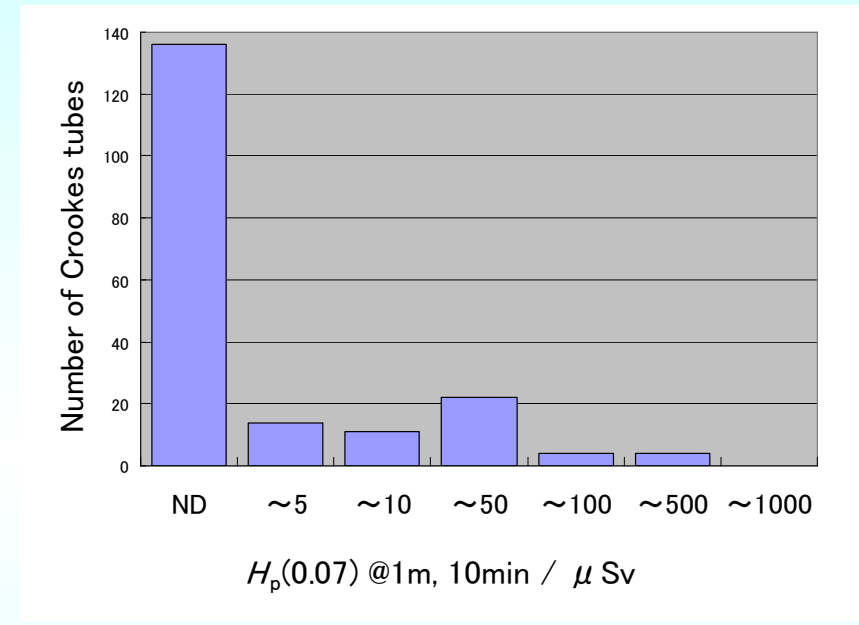
第二期実態調査結果（最終版）

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。

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:
 $10 \mu\text{Sv}$



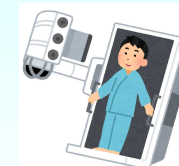
0.01mSv
($10 \mu\text{Sv}$)

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

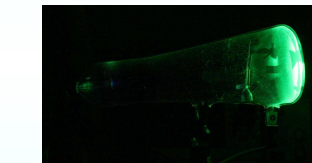
CTスキャン1回:
数mSv



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

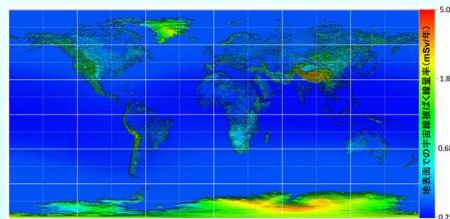


日本人が特有に持っている
 20Bq のポロニウム
 210 による年間被ばく
線量: $800 \mu\text{Sv}$

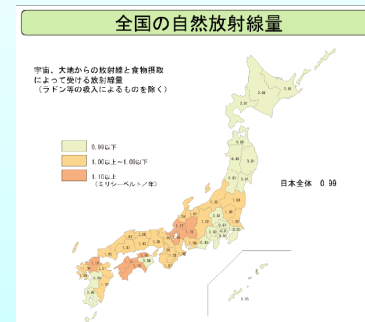
イランのラムサール地方や
インドのケララ地方などでの
大地からの年間被ばく線量:
 $\sim 10\text{mSv}$



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



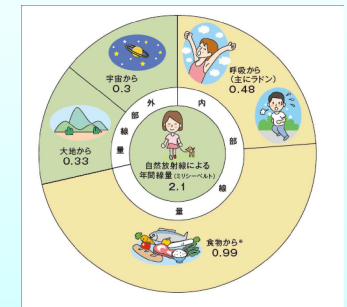
年間の宇宙線量の世界平均と
日本平均の差:
 $50 \mu\text{Sv}$ (日本の方が小さい)



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: $400 \mu\text{Sv}$



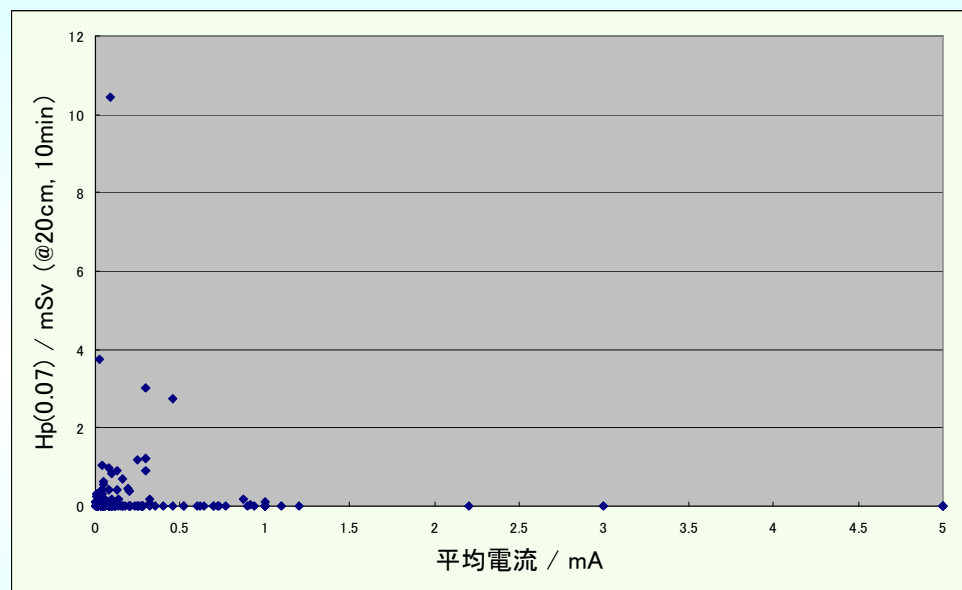
世界平均と日本平均
でのラドンによる年間
被ばく量の差:
 $800 \mu\text{Sv}$
(日本の方が小さい)



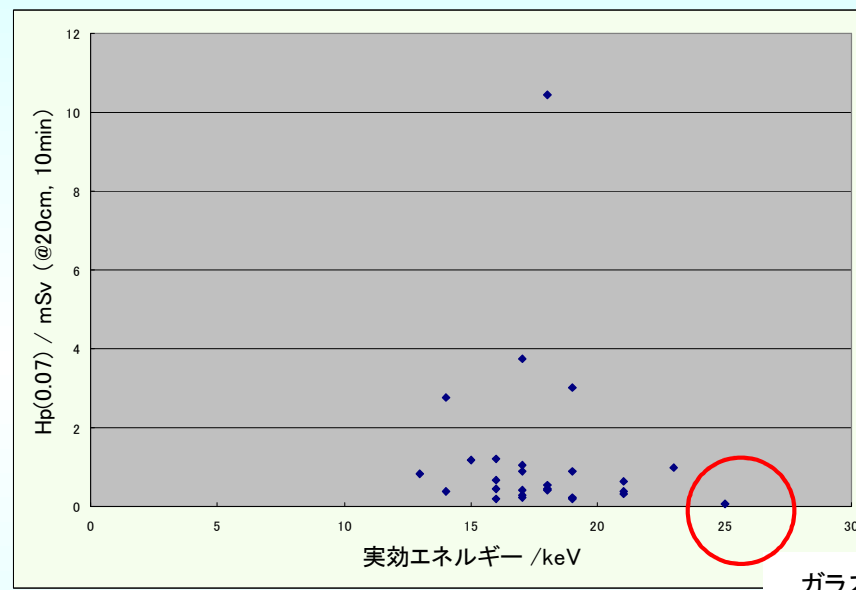
自然放射線による
年間の被ばく線量
日本平均 2.1mSv
世界平均 2.4mSv

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。

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。

様々な測定装置による測定結果

| | 電離箱 | | 蛍光ガラス線量計 | | GM管 |
|------|-------------|-------------|--------------------|----------------|-------------|
| | 日立 ICS-1323 | | 千代田テクノル ガラスバッジ FX型 | | Ranger |
| 距離 r | H*(0.07) | H*(10) | H*(0.07) | H*(10) | 1min scaler |
| cm | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | kcpm |
| 15 | 8.15 | 5.3 | 4.62 | 1.62 | 33.89 |
| 30 | 1.91 | 1.28 | 1.26 | 0.48 | 31.68 |
| 50 | 0.64 | 0.465 | 0.48 | 0 | 27.32 |
| | | | | | |
| | NaI シンチレーター | | プラスチック シンチレーター | CsI シンチレーター | 半導体検出器 |
| | 富士電機 NHC6 | アロカ TCS-172 | Kind-mini | エアーカウンターEX | エアーカウンターS |
| 距離 r | Be窓 | 汎用 | カバー無し | カバー無し | |
| cm | μ Sv/h | μ Sv/h | μ Sv/h | μ Sv/h | μ Sv/h |
| 15 | 1.34 | 0.17 | 118 | 12.6 | <9.99 |
| 30 | 10 | 0.17 | 64 | 12.5 | 0.05点減 |
| 50 | 13.1 | 0.15 | 24.5 | 8.3 | <9.99 |

一般向けに出回っている簡易サーベイメーターはもちろん、空間線量測定で信頼されている TCS-172 などでもほぼ全く測定できない。

箔検電器を用いたX線の線量測定手法の開発

12

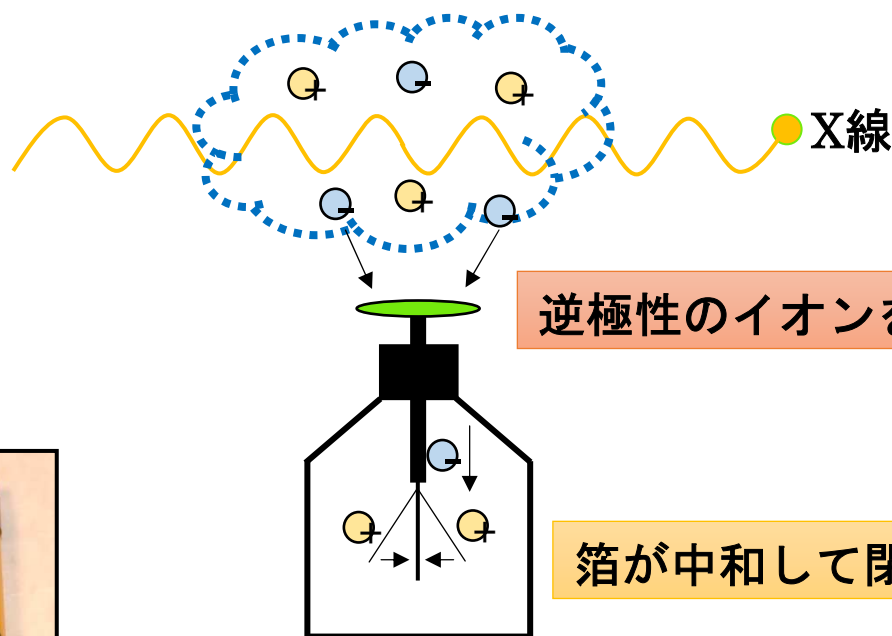
➤ 箔検電器について

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



※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

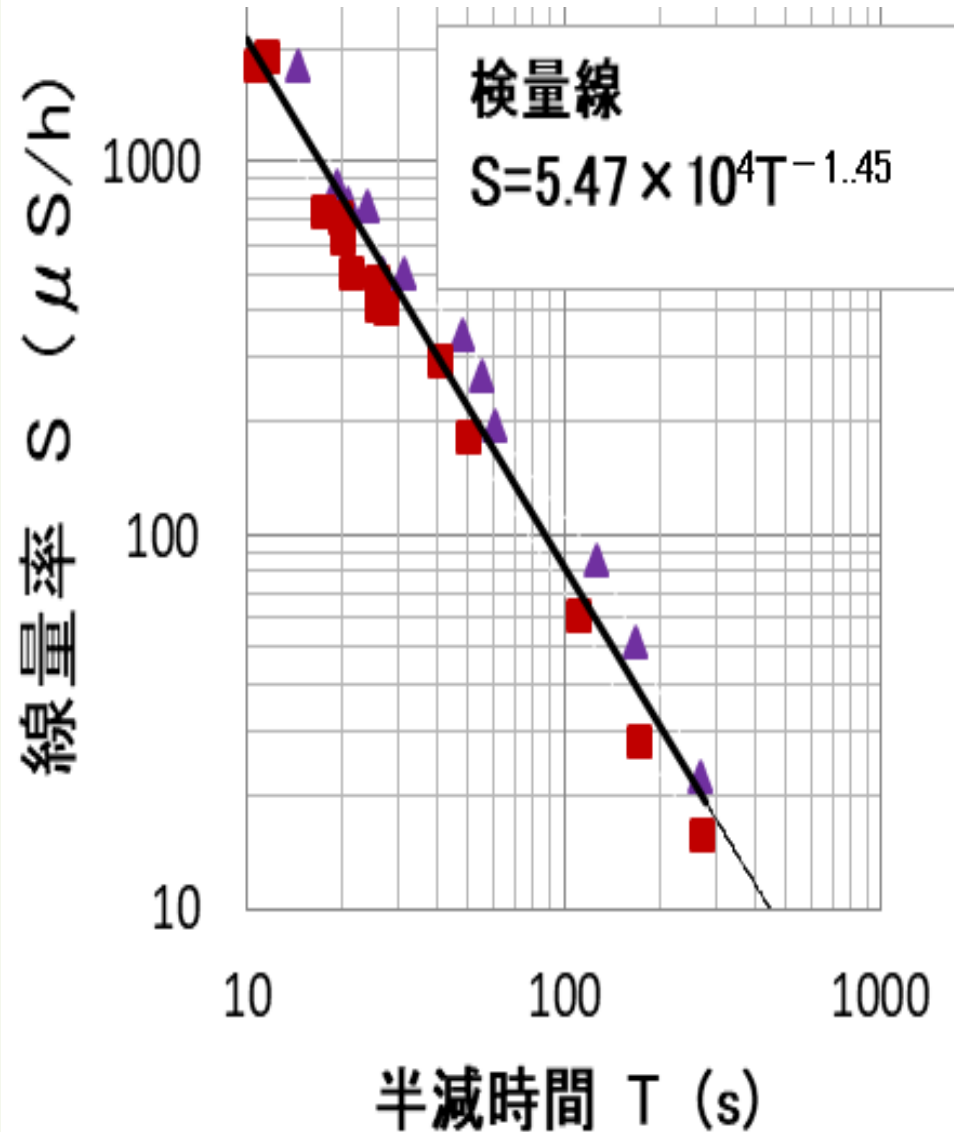
正の電荷を荷電した場合の半減時間(箔の開き角が60度から30度になる時間) T_+ と

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。



箔検電器によるX線の線量率測定の実差

導線の配置や測定ごとによる誤差

約11%

メーカー別や測定ごとによる誤差

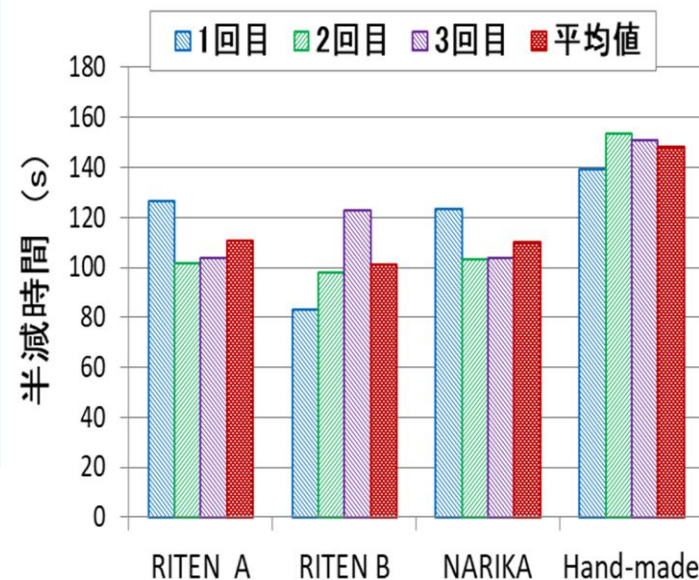
約13%

測定の不慣れさによる誤差

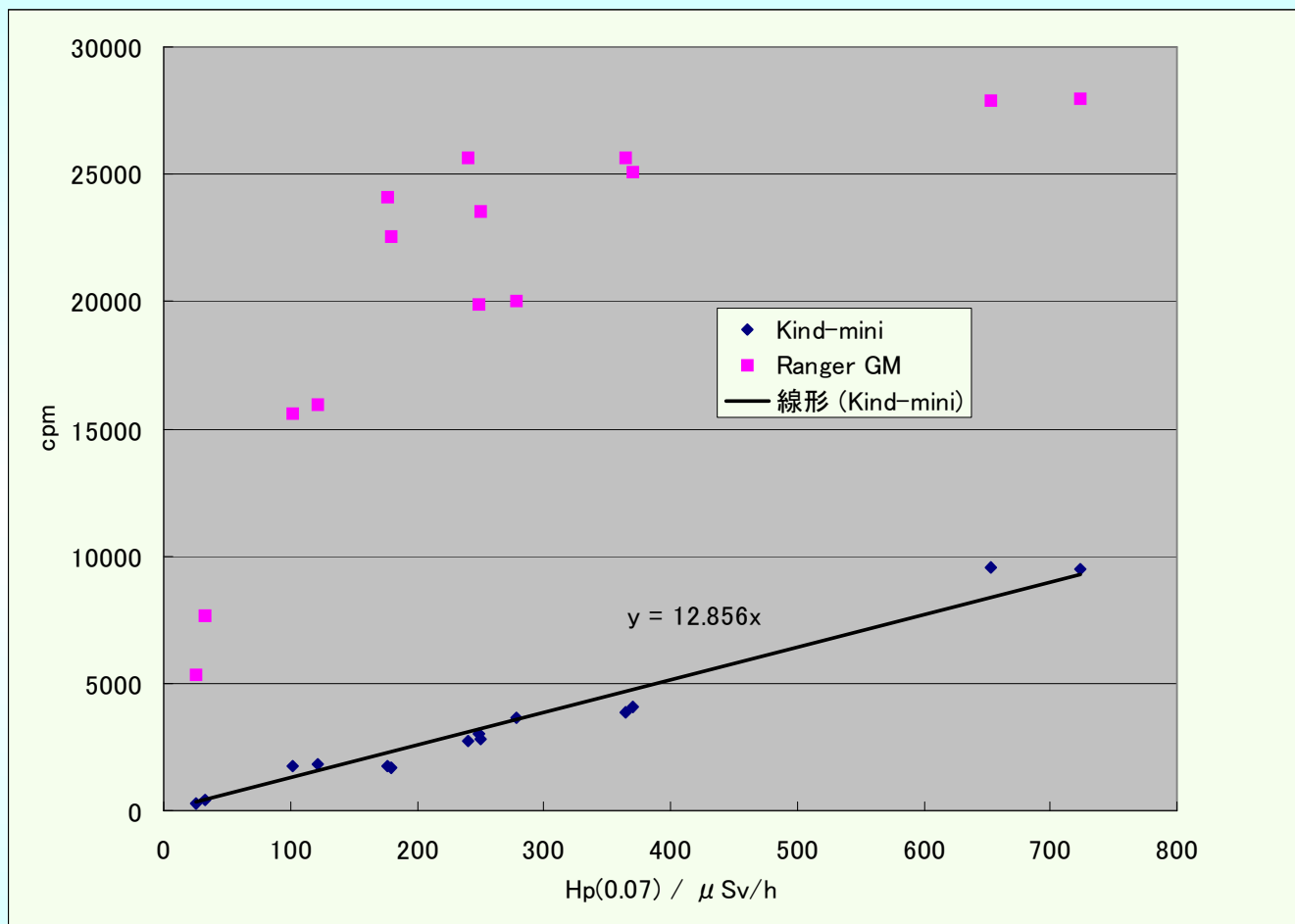
約20%

全誤差 $= (11^2 + 13^2 + 20^2)^{0.5} =$

$\pm 26\%$ 約 $\pm 30\%$



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 μm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。



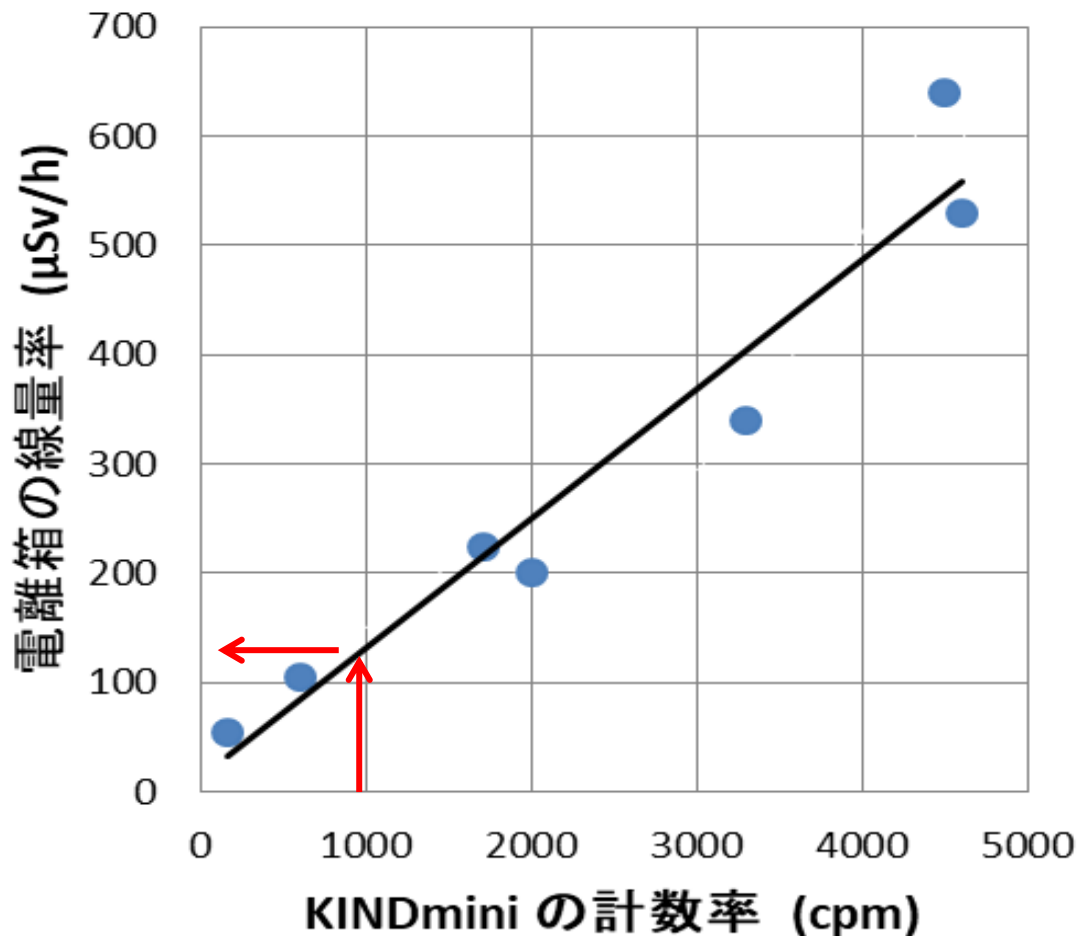
Ranger

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 μs程度であり、理論上の計数率の上限は、600kcpm。

KINDmini の計数率を読み取り、
下図の検量線から線量率を求める
今のところ5000cpm以下(70 μ m線量当量率600 μ Sv/h以下)
で使用できる



スクリーニングに必要な測定感度

免除レベルである年間 $10 \mu\text{Sv}$ (実効線量) 以下に抑える事を目標とする。
(生徒については年間1回の実験、先生方は授業の回数分)

1回の実験: 10min \rightarrow 線量率に直すと $60 \mu\text{Sv/h}$

電離箱やガラスバッジでの評価は $70 \mu\text{m}$ 線量当量で評価しているため、ICRP Pub116 の表A.1 と、水 1cm に対する透過率から、20keV では実効線量と $70 \mu\text{m}$ 線量当量の比はおよそ10程度となる。

★ $\text{Hp}(0.07) < 600 \mu\text{Sv/h}$ である事が確認できれば良い。

さらに、これは実際に生徒が観察を行う 1m 距離での数値であり、測定可能なレンジから外れている場合は、距離を変えて測定する事で、適切な測定を行う事が可能である。

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、電流などだけでは単純に危険性を判断できなかったため、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、nono Dot 線量計などによる本測定を行える体制を確立する。