

2023年 11月 10日 日本保健物理学会第56回大会
2C4-3 @ グランドニッコー東京台場ホテル

OSL線量計を用いた クルックス管からの 低エネルギーX線測定サービス

大阪公立大学 放射線研究センター
秋吉 優史

Special thanks: クルックス管プロジェクトにご協力頂いた皆様

E-Mail: akiyoshi-masafumi@omu.ac.jp

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

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

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

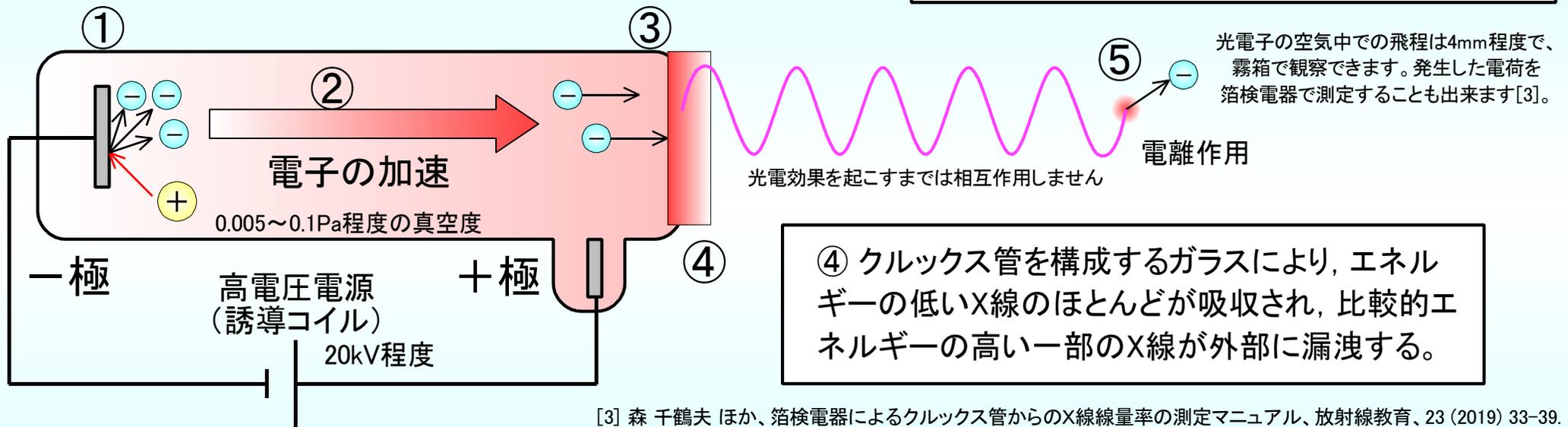
クルックス管のしくみ

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

クルックス管安全取扱のガイドライン（暫定）

・低電圧駆動の製品に買い換える

絶対安全なので
何も考えなくても良い

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

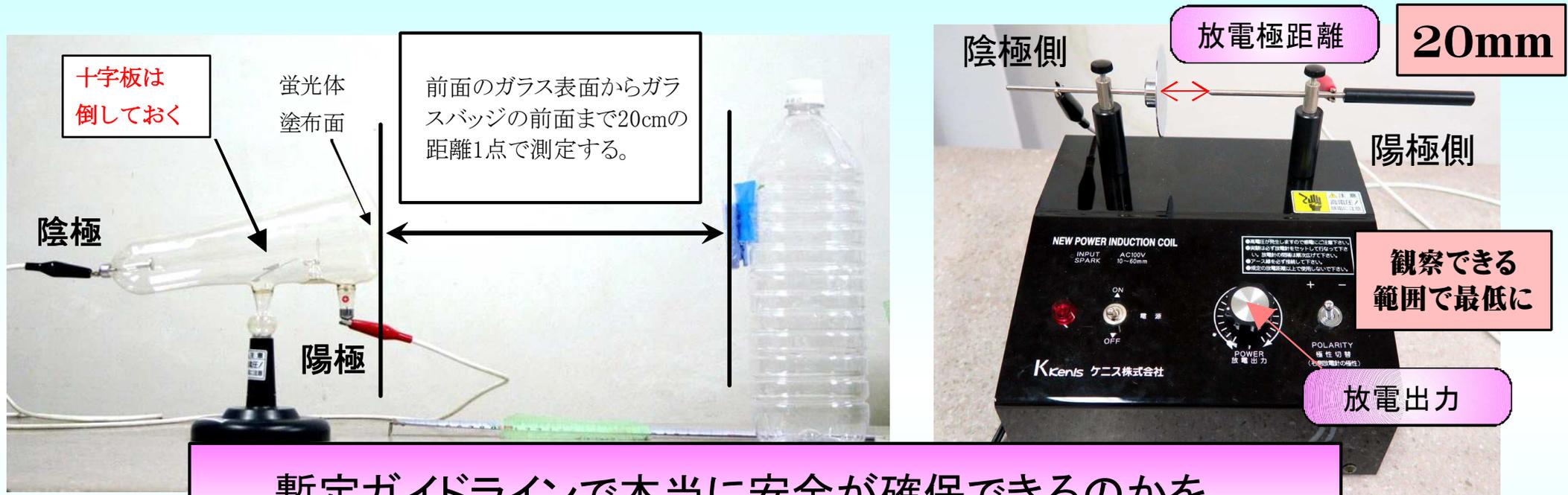
- ・放電極を必ず使用し、放電極距離は20mm以下とする。
- ・放電極表面は清浄にした上で、円板電極側を-極にする
- ・誘導コイルの放電出力は、電子線の観察ができる範囲で最低に設定する。
- ・できる限り距離を取る。生徒への距離は 1m以上とする。
- ・演示時間は年間10分程度に抑える。

より詳しくは、クルックス管プロジェクトのウェブサイト

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



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。

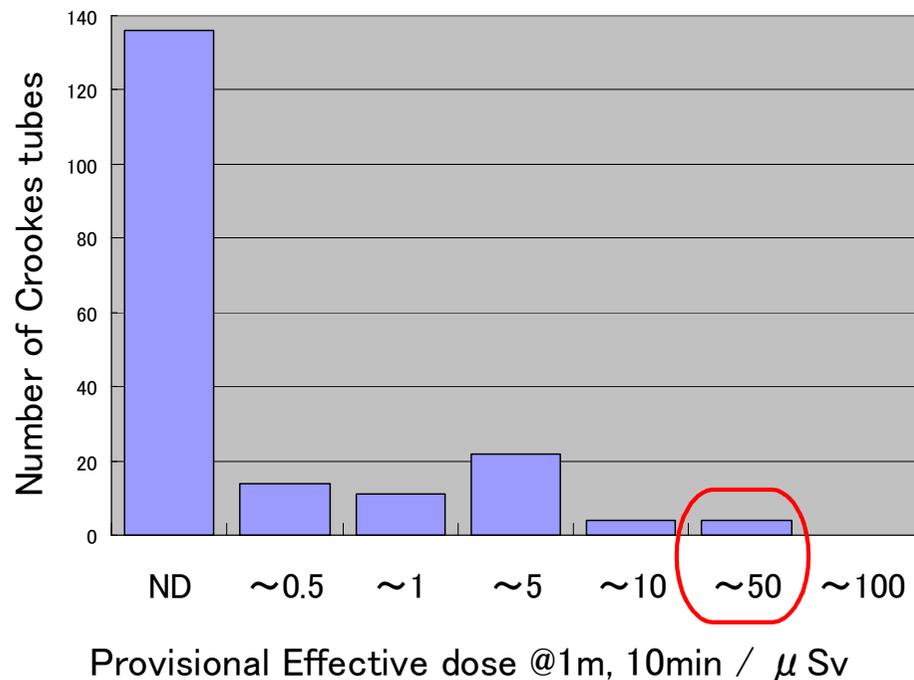
- ・クルックス管から 20cm の位置で、測定は10分間など統一したプロトコルで測定。
- ・ガラスバッジは大阪府大と各学校とを郵送でやりとりし、現場の先生の手により測定。BGの影響を抑えるために1月ごとに取りまとめて評価を行う。

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 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。

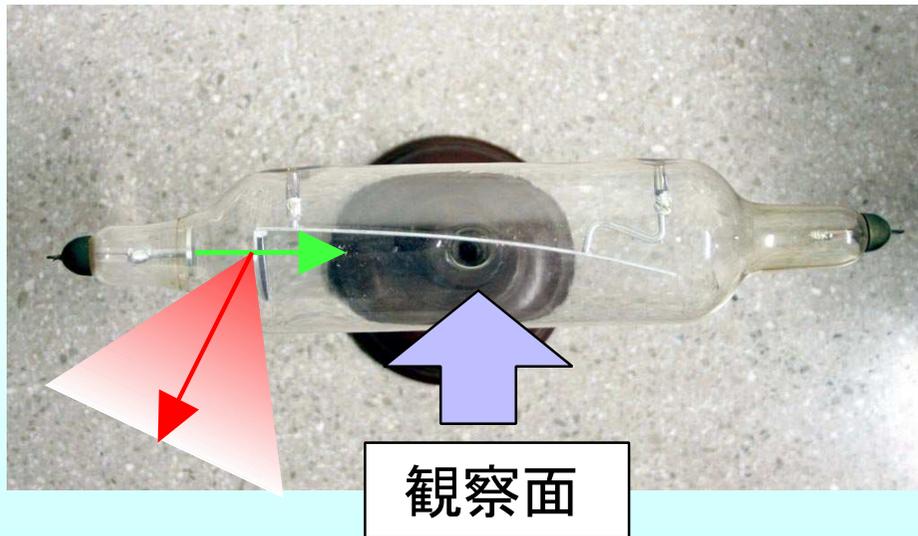
遮へいの有効性



○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) (μ 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>

箔検電器を用いたX線の線量測定手法の開発

12

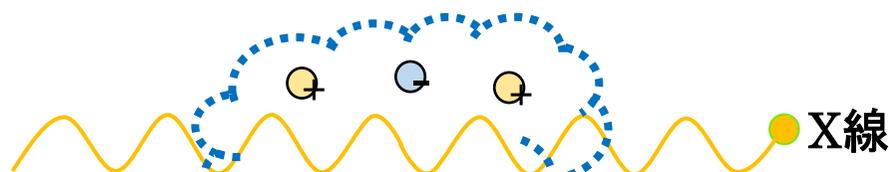
➤ 箔検電器について

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。

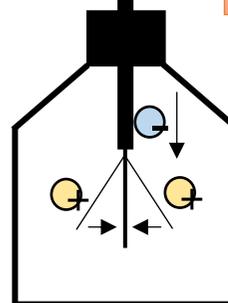


使用した箔検電器
(はく検電器EA)

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



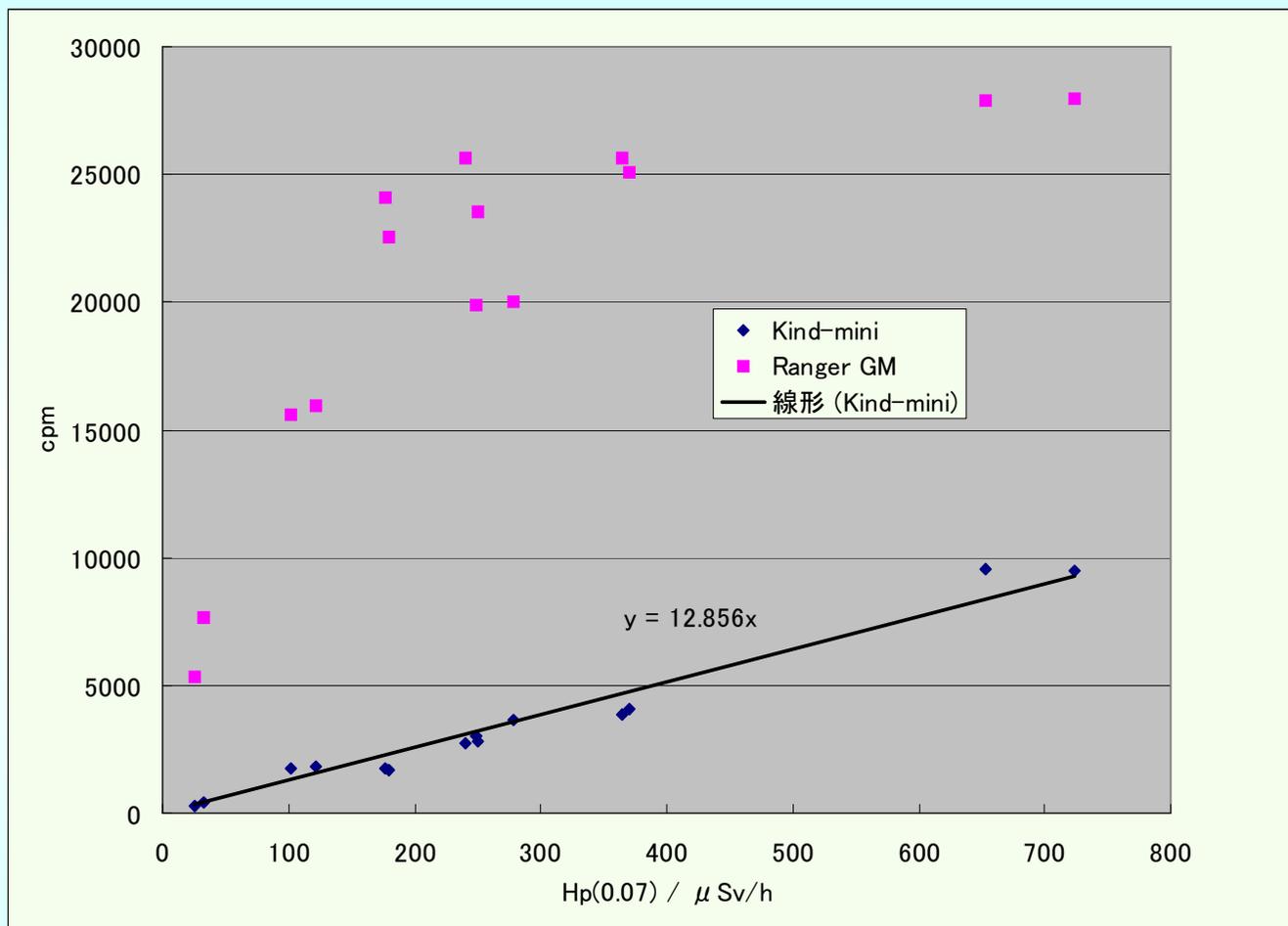
箔が中和して閉じていく



※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。

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

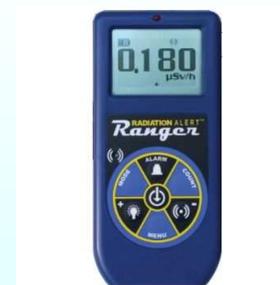


横軸は低エネルギー測定対応の電離箱 日立 ICS-1323 で測定した70 μm 線量当量。時間変動があるため、簡易測定器での測定の前後で測定し、平均を取った。



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。

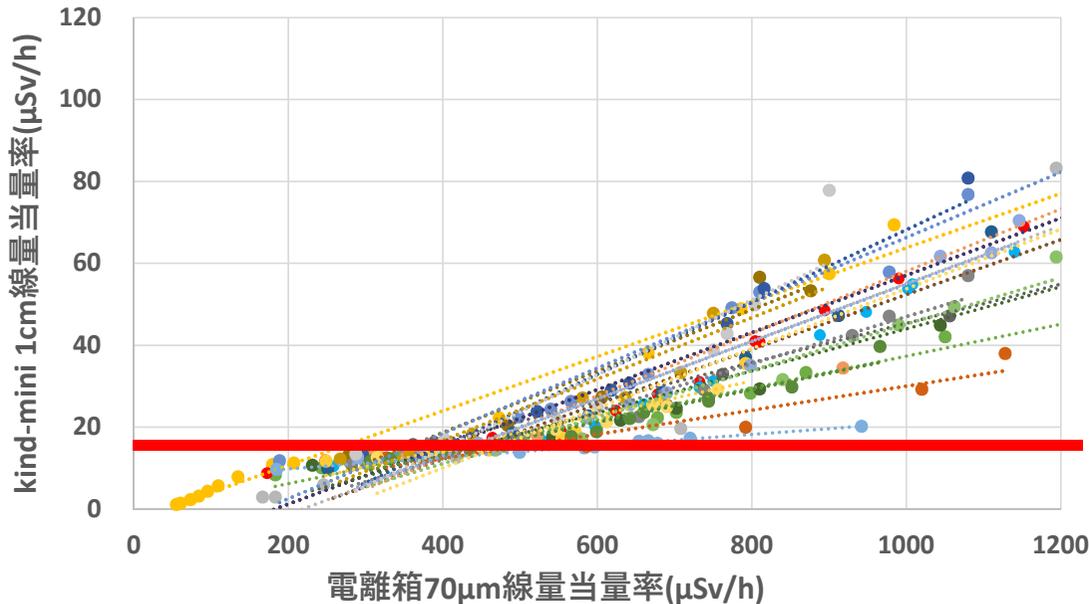


Ranger

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。

Kind-miniが表示する線量率によるスクリーニングレベルの平均と標準偏差

放電極の距離20mm



平均値	26.7 $\mu\text{Sv/h}$
σ	5.4 $\mu\text{Sv/h}$
2σ	10.8 $\mu\text{Sv/h}$

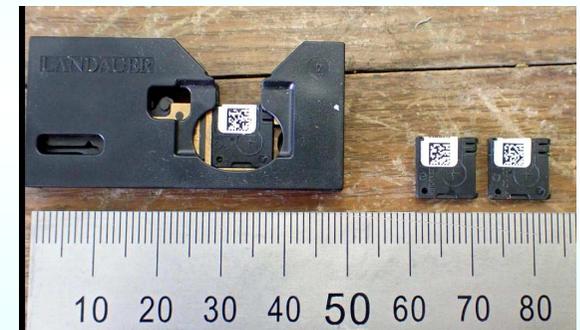
- 一つ前のグラフで600 $\mu\text{Sv/h}$ の時の kind-miniが表示する1cm線量当量値が極端に大きいもの3点を除くことで、平均値は小さくなり、**分散を小さくすることが出来る**。(スクリーニングレベルが低い方が安全側)
- 2σ で約95%の標準偏差は16.0～37.5 $\mu\text{Sv/h}$ の範囲となり、kind-miniが表示する1cm線量当量値が**16 $\mu\text{Sv/h}$** 以下の時安全だといえる。

nanoDot 線量計を用いたX線測定サービス

○ 簡単な実験上の注意点を遵守し、さらにガラスの水槽などで遮蔽する事で大幅に線量を低減可能であると期待できるが、全国全ての装置の組み合わせ、様々な気象条件などの状況で確実に安全を保証する事は出来ない。

○ 確実な測定を行うには低エネルギーで校正された電離箱や、蛍光ガラス線量計、OSL線量計、TLD線量計などの固体測定素子による測定が必要でありが、計測システムの導入は非常に高価であり、ガラスバッジやルミネスバッジなどの測定サービスは契約が必要などでハードルが高い。

○ 簡易な計測器や箔検電器を用いたスクリーニング法も開発されているが、測定にはそれなりの技術と時間が必要であり、精度についても十分ではない。



→ 固体測定素子である OSL 線量計による計測を可能としたパッケージである microStar システム(長瀬ランダウア社)を、ふるさと納税を活用した大阪公立大学つばさ基金での「放射線教育振興プロジェクト」によって 2021年に導入。

1cm角にも満たない小さな nanoDot 線量計を郵送し、第二次実態調査時と同じプロトコルで測定、線量計を返送してもらう事により、安価で継続的な線量評価が可能。

大阪公立大学のつばさ基金制度を活用した放射線教育振興プロジェクト

全国の教育現場での放射線教育の実施
(委託)

寄附金額の半額分程度を上限に貸与
10万円の寄付で、5万円分の物品

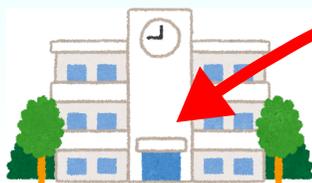
放射線教育用の物品

残額から全国のクルックス管からのX線量測定に要する諸経費や、放射線教育イベントに要する費用などを拠出



寄付者に寄附金で購入した物品を直接提供する事は寄附金取扱規程により出来ないため、指定して頂いた教育機関に無償貸与させていただきます。

教育機関



教育者



ふるさと納税
(寄付)

放射線教育振興プロジェクト:
1627200700 に寄付する旨連絡

大阪府

プロジェクト
への分配

13%は大学へ

大阪公立大学
「放射線教育振興
プロジェクト」

物品購入

寄付者の地元
自治体

自己負担2000円以外は翌年の税金控除で
全額(*)帰ってきます

*所得により上限金額があり、独身で年収600万円の場合¥77,000の寄付が可能です。自己負担額は、他にもふるさと納税をしている場合年間総額で2000円だけです。

利益相反の問題で秋吉式ペルチェ霧箱は公費で購入する事が出来ないため、寄付頂いた全額を様々な放射線教育振興に使わせて頂き、それとは別に秋吉個人の提供でペルチェ霧箱を希望する教育機関に提供致します。それ以外の物品は、公費対応でない通販業者などでも、立替払いで対応可能です。

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。