

# 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 ↓



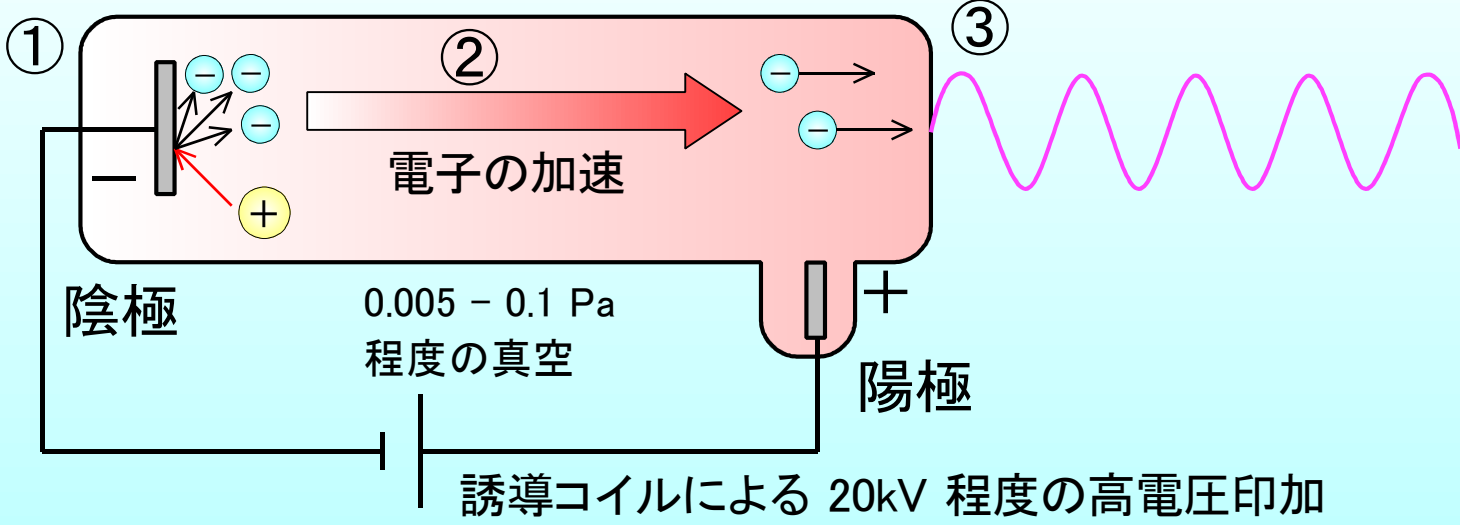
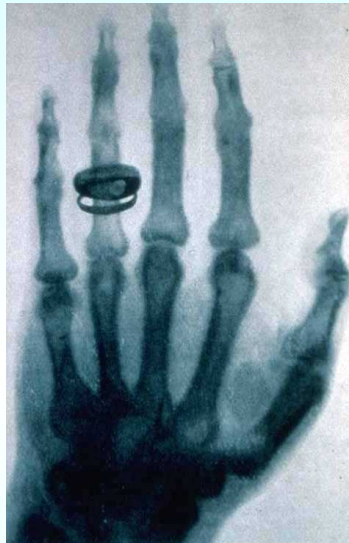
# クルックス管とは？

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。

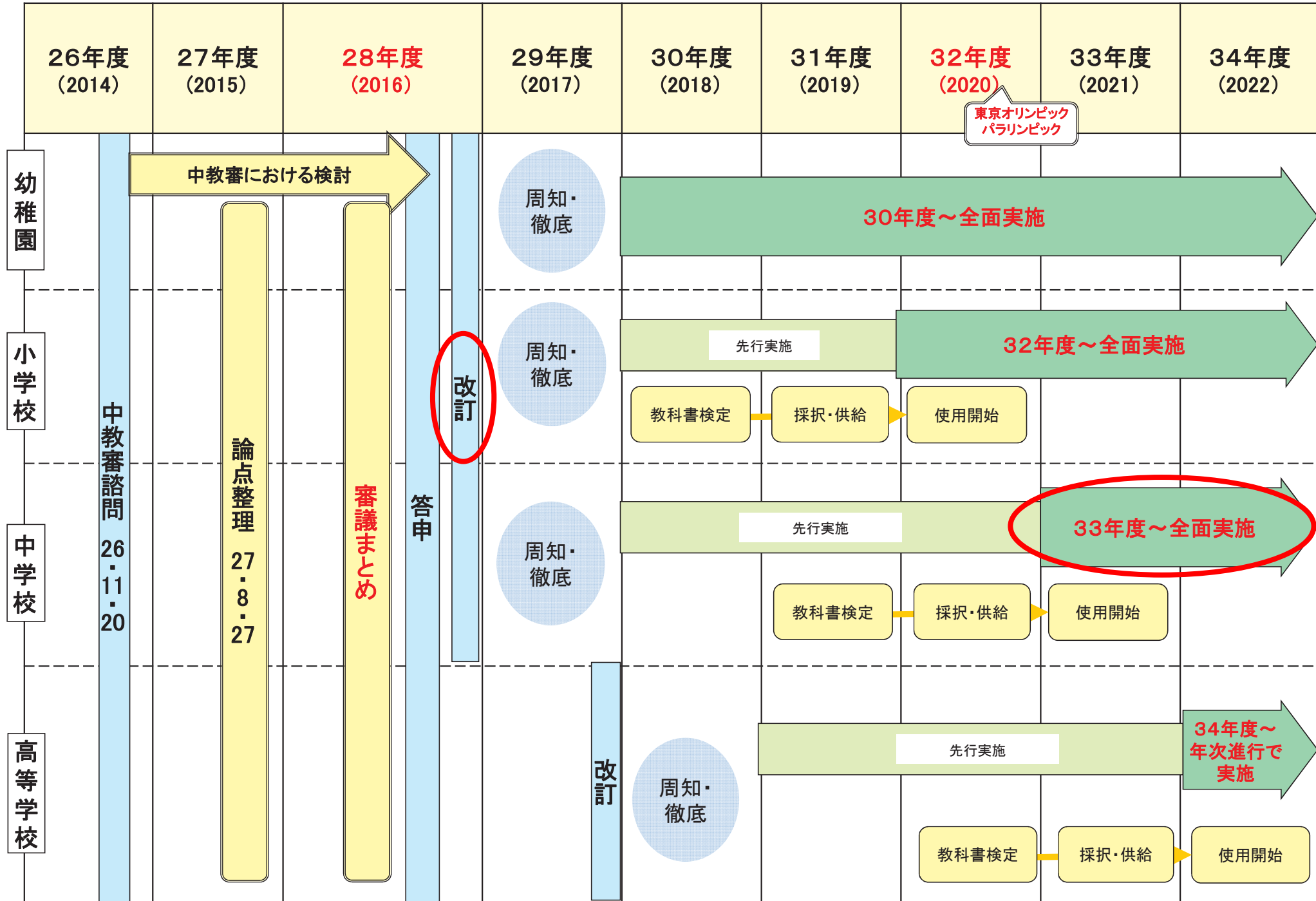
その際、真空放電と関連させて**X線にも触れる**とともに、**X線と同じように透過性などの性質をもつ放射線が存在し、医療や製造業などで利用されていることにも触れる。**

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**

# 今後の学習指導要領改訂スケジュール（現時点の進捗を元にしたイメージ）



東京オリンピック  
パラリンピック

改訂

33年度～全面实施

？ 考えてみよう

- ① 図39の十字板の影のつき方から、電流のもとなるものはA(-)とB(+)<sup>のどちら</sup>から出ていると考えられるか。
- ② 図39や図40から、電流のもとなるものはどのような種類の電気をもっていると考えられるか。

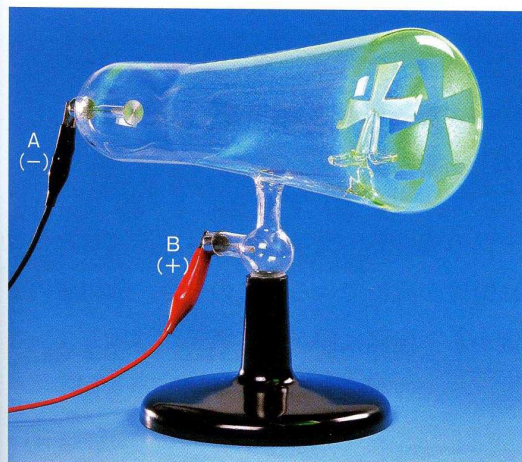


図39 電流のもとなるものを調べる実験①  
 図36)の誘導コイルを使って、AB間に電圧を加える。なお、放電管内の気圧は、図37)の放電管Fと同じぐらいである。



図39)も(図40)も、電気の流れは+のほうに引かれているようだ。

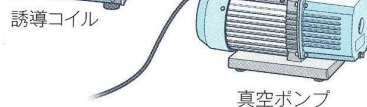
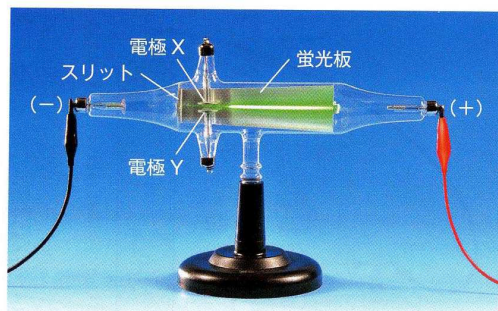
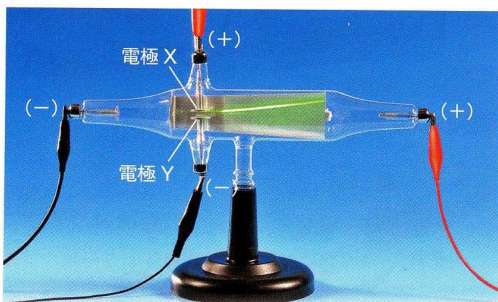


図38 真空ポンプを使って放電のようすを調べる装置



(a) X, Yに電圧を加えないとき



(b) Xを+, Yを-にして電圧を加えたとき

図40 電流のもとなるものを調べる実験②  
 スリットを通りぬけた電流のもとなるものが蛍光板に当たると、まわりよりも明るいすが蛍光板上に現れる。

エネルギー

2章 電流の正体

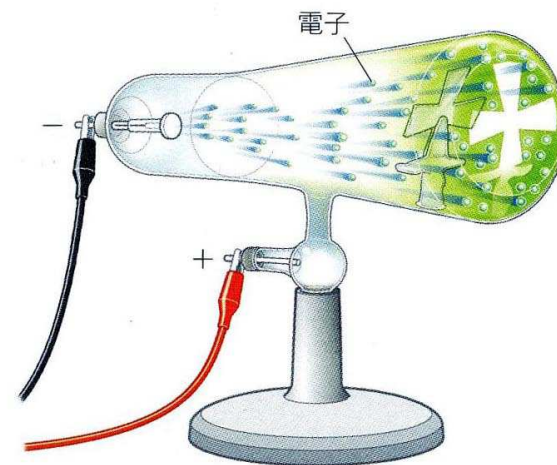


図41 十字板入り放電管と電子のモデル  
 一極側から出た電子が十字板に当たり、そのうしろに影をつくる。ガラス壁に衝突した電子は、+極側に移動していく。

- ① 電池や電源装置の一極と接続した電極を陰極<sup>いんきょく</sup>といい、電流のもとなるものを、はじめは陰極線とよんだ。陰極線は1876年に発見されたが、1897年にその正体が電子であることがわかったので、現在は陰極線のことを電子線とよぶことが多い。

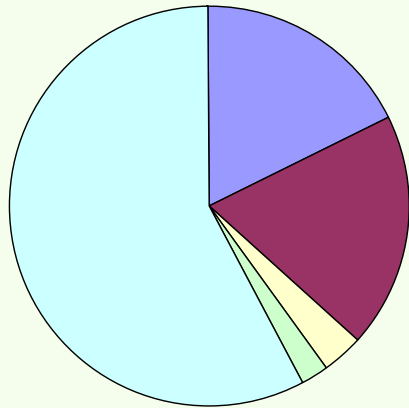
現行の教科書において  
 既に取り上げられている。  
 (2016年啓林館中学2年理科)

現在の学習指導要領では、電流の正体は電子の流れであることの説明に使われている。

# 現在の学生に対する授業の実態調査

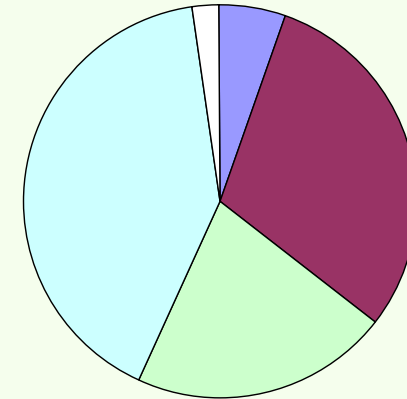
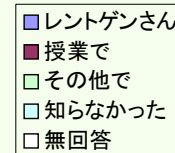
2019年11月に行った大阪府立大学の1回生向け授業でのアンケート。  
工学だけでなく、看護や獣医などの学生がまんべんなく受講。回答数 90。

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？



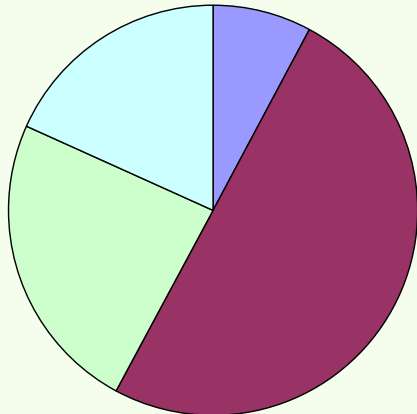
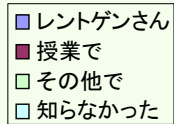
中学 16  
高校 17  
中学+高校 3  
その他 2  
なし 52

クルックス管から X線が出るということは知っていましたか？



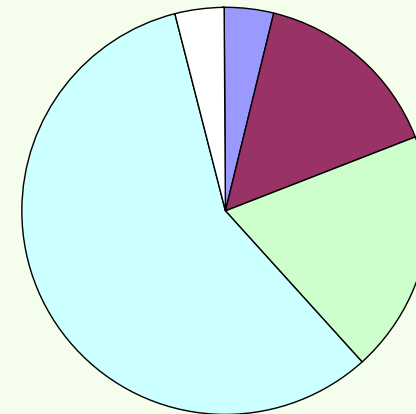
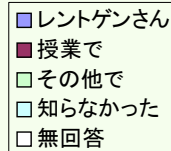
レントゲンさん 3  
授業で 19  
その他で 9  
知らなかった 7

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線が出るとい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線が出るということは知っていましたか？



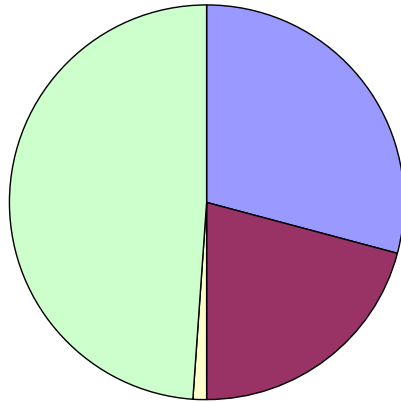
レントゲンさん 2  
授業で 8  
その他で 10  
知らなかった 30  
無回答 2

# 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？

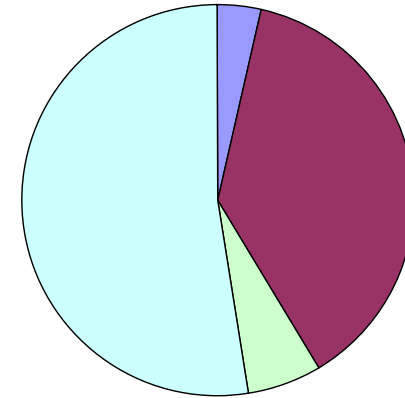
- 中学
- 高校
- その他
- なし



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？

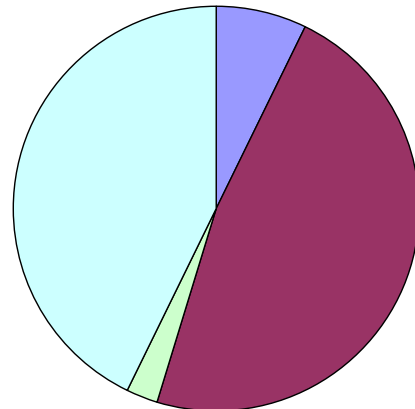
- レントゲンさん
- 授業で
- その他で
- 知らなかった



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？

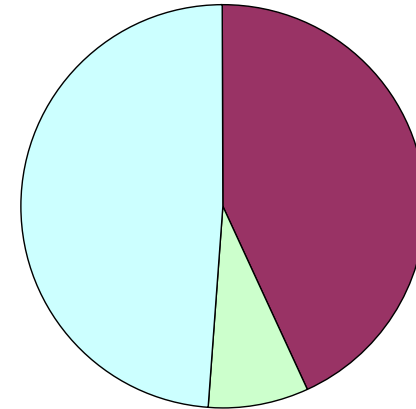
- レントゲンさん
- 授業で
- その他で
- 知らなかった



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、製品によっては 15cmの距離で、70  $\mu$ 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**



# 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。

原発事故など以外での一般公衆の被ばくは想定されておらず、規制もされていないため、子供達の安全を確保するための規準が無い状態。どの程度の線量であればよいと教員が判断できない。

## 20keV 程度とエネルギーが低く測定が困難

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表示される。→ 詳しい教員は手持ちの線量計で測定して、小さい線量を見て安心してしまう

## 装置によって大きく線量が異なる

戦後すぐの頃の装置が問題無く使える場合もある一方で、ごく最近購入した装置でも高い線量を漏洩している場合がある。メーカーでも状態を完全にコントロールできていない。

→ 測定を行わないと自分の使っている装置が危険な物かどうか判別できない

# 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している(**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-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  $\mu$  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  $\mu$  Sv/y** を勧告。

保健物理学会「教育現場における低エネルギーX線を対象とした放射線安全管理に関する専門研究会」において国内外の規制状況について議論を行っている。

# 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。

# 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:  
 $10 \mu\text{Sv}$



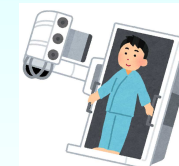
0.01mSv  
( $10 \mu\text{Sv}$ )

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:  
 $600 \mu\text{Sv}$

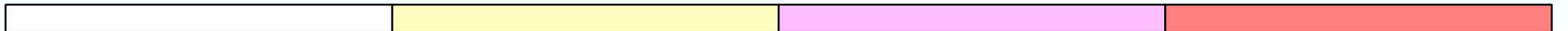


1mSv

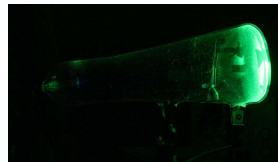
CTスキャン1回:  
数mSv



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



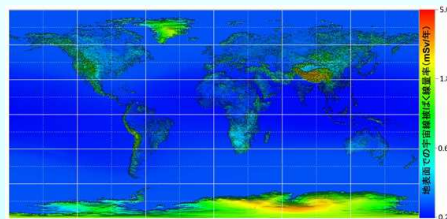
日本人が特有に持っている  
 $20\text{Bq}$ のポロニウム  
 $210$ による年間被ばく  
線量:  $800 \mu\text{Sv}$

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:  
 $\sim 10\text{mSv}$

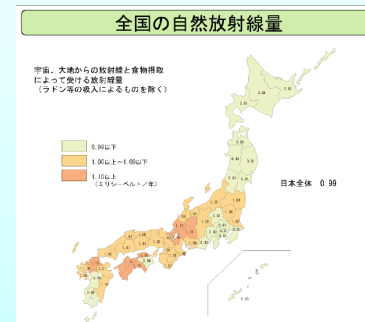


ランタンのマントル\*を  
1時間体に貼付ける:  
Hp(10)  $1 \mu\text{Sv}$  ( $\gamma$ 線)  
Hp(0.07)  $10 \mu\text{Sv}$  ( $\beta$ 線 +  $\gamma$ 線)

\*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



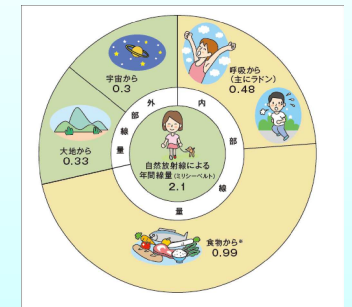
年間の宇宙線量の世界平均と  
日本平均の差:  
 $50 \mu\text{Sv}$  (日本の方が小さい)



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  $2.4\text{mSv}$

# 2018年度 第一段実態調査



全国の 37 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。

37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

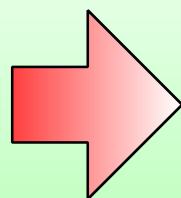
ペットボトルに貼付けたガラスバッジに15, 30, 50cmの距離で10分間X線照射して返送してもらい、線量評価を行った。X線計測専用のタイプFXでは同時にエネルギー評価も出来る。

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:  $2\text{mSv/h}$   
放電極距離50mm:  $30\text{mSv/h}$



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

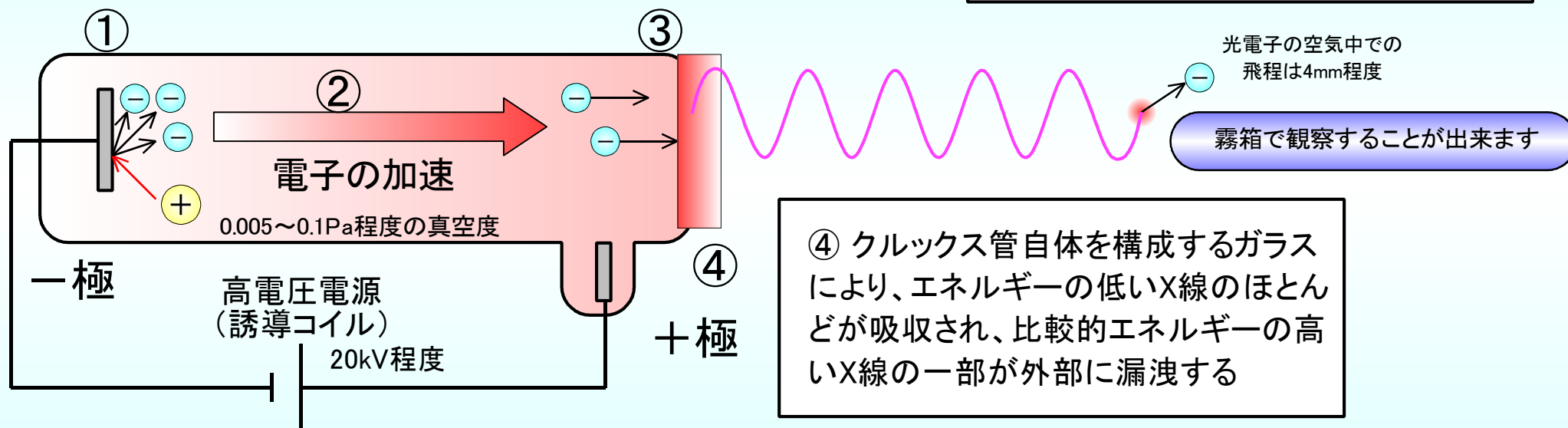
# クルックス管からのX線の漏洩

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

# クルックス管からの被ばく線量を下げるには

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)。

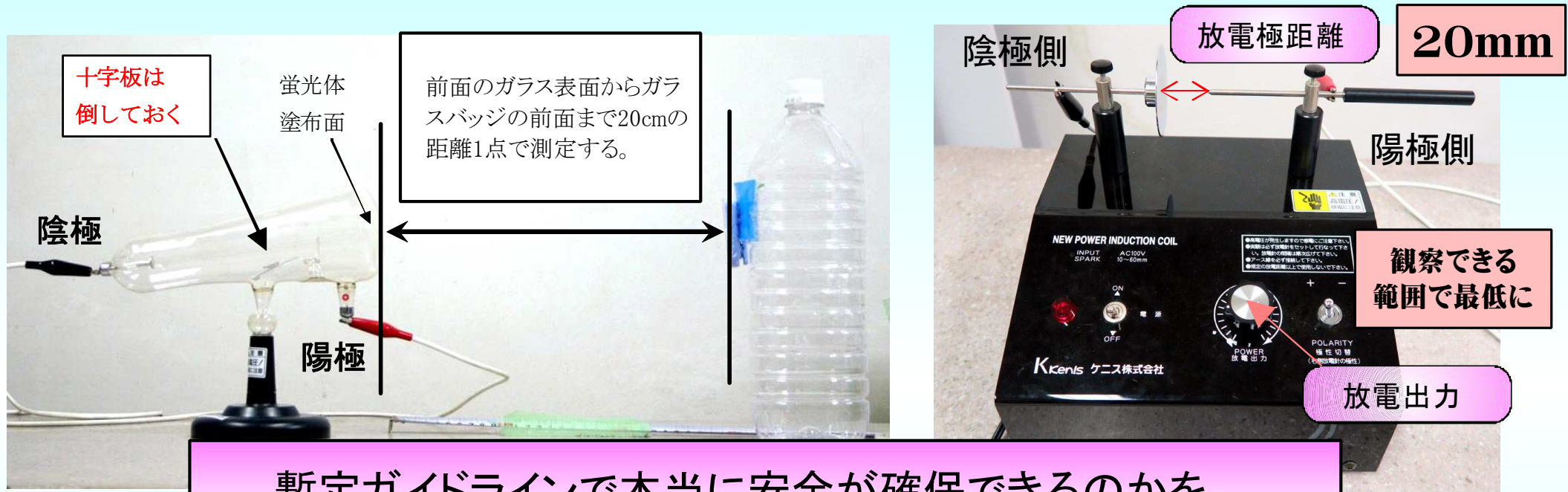
距離を取る: 最も簡単で確実である(距離の二乗に反比例して下がる)。

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

# 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。

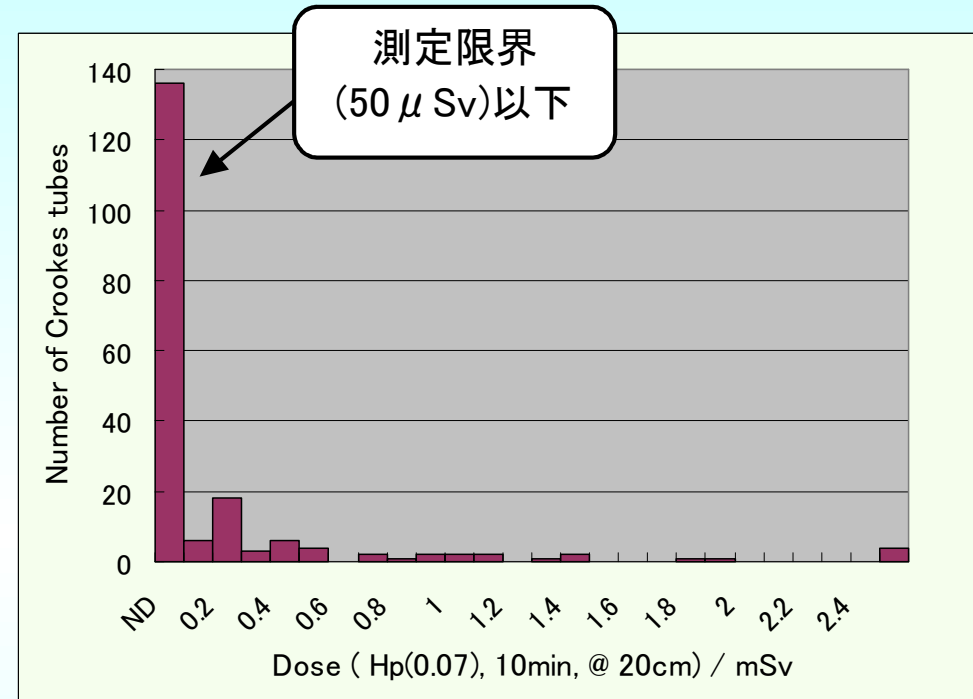


## 第二期実態調査結果（最終版）

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。

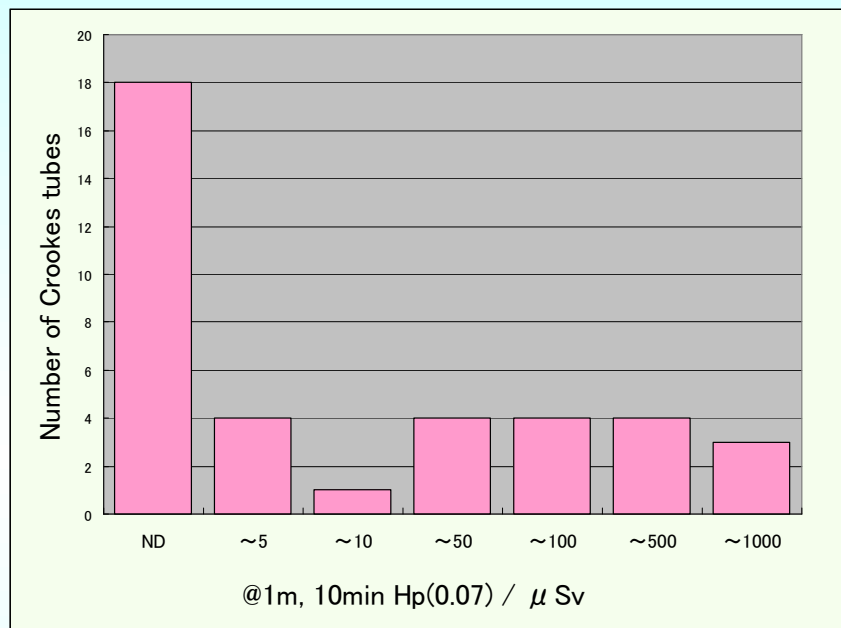
191本中 136本に於いては、距離 20cm 10分の測定で Hp(0.07) が検出限界である  $50 \mu\text{Sv}$  を下回っていた。有意な値が出た 55本の装置についても、暫定ガイドライン適用前に比べて低い線量に抑えられているが、最大で 10.4mSv を示した装置も存在した。



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。

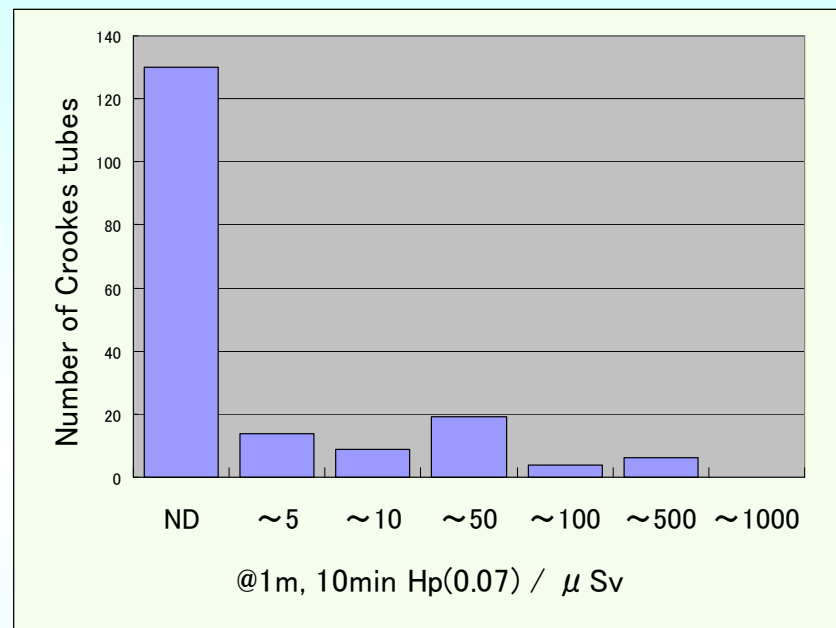
# 第二期実態調査結果（速報）

## 2018年第一期実態調査



これまでの授業での設定

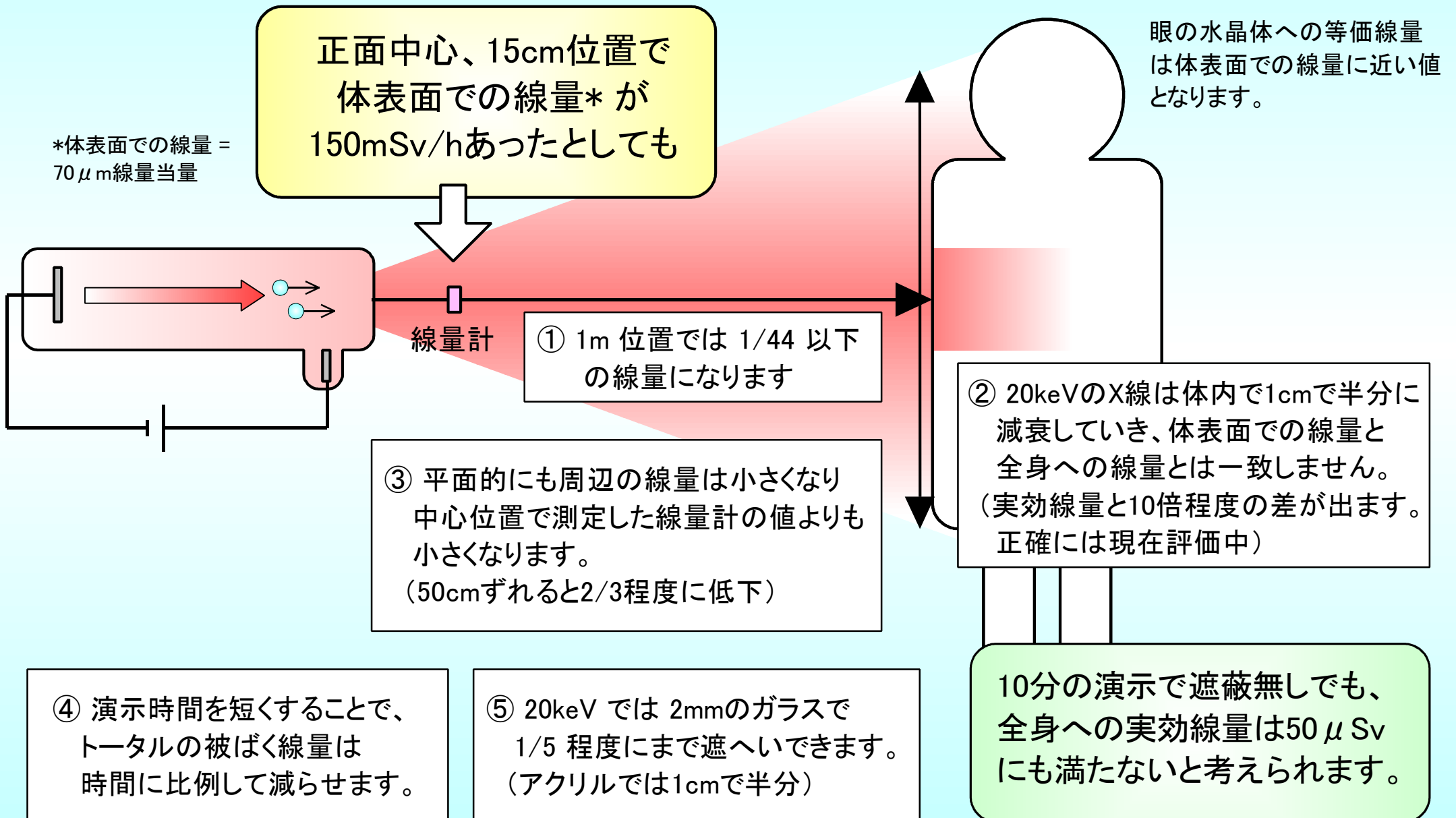
## 2019年第二期実態調査



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。

# クルックス管からのX線の不均一性



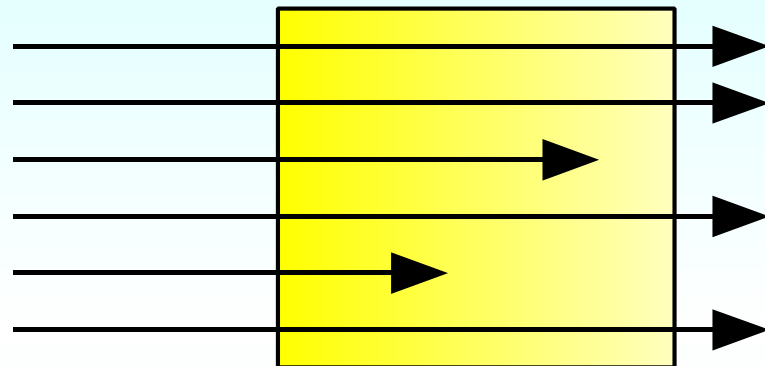
# 放射線量について

- ・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 $\mu$ mの深さの一点での吸収線量である、「70 $\mu$ 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 $\mu$ 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での実効線量はおよそ70 $\mu$ 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

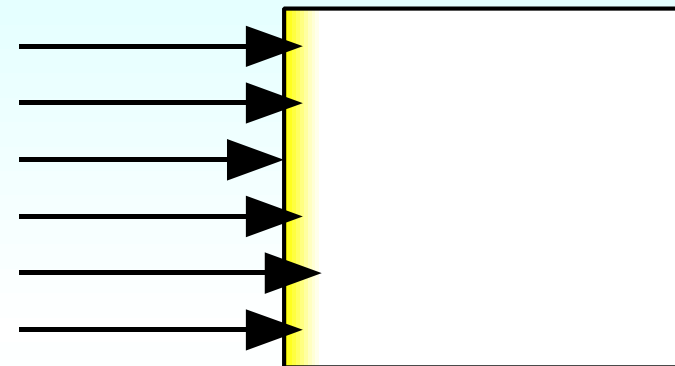
高エネルギーガンマ線などの場合透過力が高く、ほぼ均等にエネルギーを与える。

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

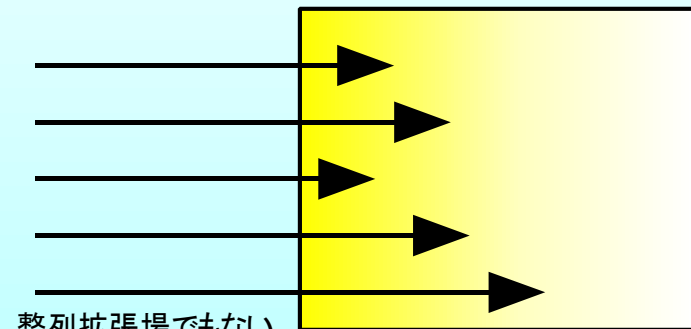
$$H_p(0.07) > 10 H_p(10)$$



整列拡張場

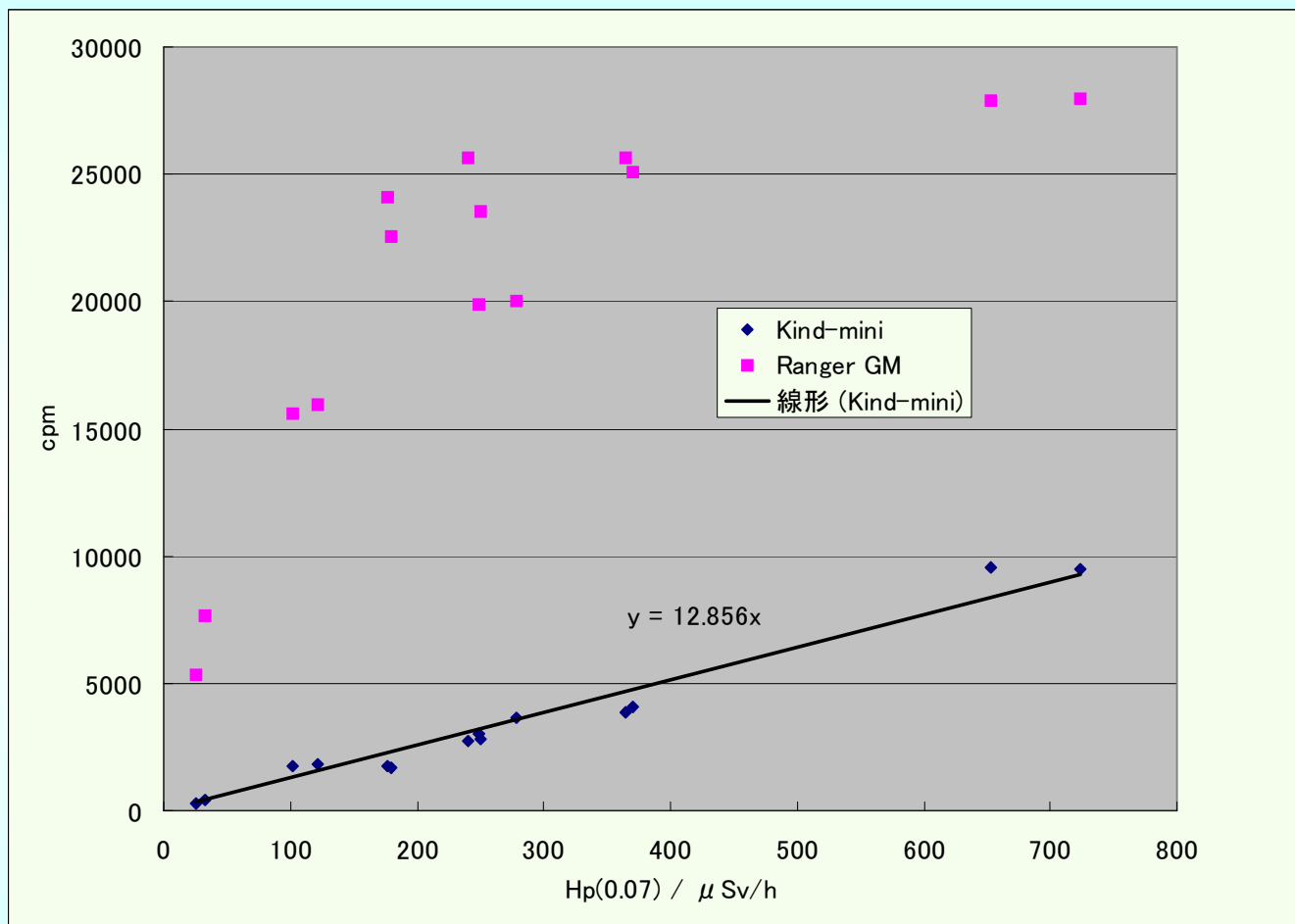
$\alpha$ 線、 $\beta$ 線などの場合透過力が低く、表面近傍にのみ局所的にエネルギーを与える。

人体の場合、深さ70 $\mu$ mでの点での吸収線量(70 $\mu$ 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

# 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。