

【解説】

学校教育現場におけるクルックス管の安全管理とその活用

秋吉 優史

大阪府立大学 放射線研究センター

〒599-8570 大阪府堺市中区学園町 1-2

(2020 年 2 月 23 日受理)

1. クルックス管とは

クルックス管は真空放電管の一種であり、1870 年頃にウィリアム・クルックスなどによって発明され、19 世紀末のヴィルヘルム・レントゲンによる X 線の発見、J.J. トムソンによる電子の発見の際に用いられた装置である¹⁾。現在では、教育現場に於ける陰極線の演示にしか使われていないが、放射線、素粒子物理の歴史の上で非常に重要な役割を果たした装置であり、加速器、放射線発生装置の元祖と言って良い。ただ単に電流は電子の流れであるという学習に留まらず、スリット付きのクルックス管による磁場、電場による電子ビームの偏向は、ブラウン管や電子顕微鏡、電子線描画装置、そして加速器と言った日常生活や研究・産業の場で用いられている装置の動作原理を学習する事が出来る。さらには、冷陰極に於ける陽イオンの衝突に伴う二次電子の放出や、ガラス管面に於ける制動放射 X 線の放出と、ガラス管自身による遮蔽、放出された X 線に対する遮蔽能が遮蔽する物質及び X 線のエネルギーにより大きく異なること、霧箱を用いた光子による電離の可視化など、放射線と物質の相互作用を学習する上でまたとない素晴らしい教材となり得る。

その構造は極めて単純であり、 $0.1 \text{ Pa} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 程度に真空引きされたガラス管内に、金属製の陽極と陰極が配置されているだけである。通常の電子線発生装置はフィラメントや、電界放出型の電子源を備えており、より高い真空度が要求されるが、クルックス管はそれほど高い真空度ではなく、電極に 20 kV 程度の高電圧を印加するだけで電子線を発生させることが出来る。高電圧を印加された陰極付近では、自然放射線などによって電離された残留気体の陽イオンが加速されて電極の金属板に衝突する。この時のイオンのエネルギーが高いほど放出される二次電子の収率は大きくなり、20 keV 程度で収率（二次電子電流／陽イオン電流）は 1 を超える²⁾。放出された二次電子は電界によって加速されるが、陰極と陽極の間の電界強度は均一では無く、陰極のごく近傍でのみ加速されそれ以降ほぼ等速で電子は運動する。このことは、スリット付きのクルックス管において、陰極近傍にスリット及び金属で出来た蛍光板が置かれていても電子ビームが観察できていることから理解できるであろう。これは電離した残留気体の陽イオンと電子の移動度の差により空間電荷が生じて陰極付近にのみ強い電界が存在することによる。このため、陽極は陰極と向かい合った位置に設置する必要は無く、ガラス管面に塗布した蛍光体に電子を当てて光らせることが出来る。ガ

ラス管面に衝突した電子は表面電流として陽極に流れ込んでいると考えられる。

2. 学校教育現場に於けるクルックス管の取扱い

中学校の理科の授業において、平成 20 年 3 月に行われた学習指導要領の改訂³⁾では第一分野の「(7)科学技術と人間」の単元に於いて、エネルギー教育の一環として原子力が取り上げられており、内容の取扱いに於いて「放射線の性質と利用にも触れること」との記述が新しく追加され、30 年ぶりに放射線教育が復活している。しかしながら当該の単元は 3 年生の最後に学習する内容であり、また「触れること」という表現は学習指導要領の記述の中では最も軽い扱いに留まっている。このため、入試問題として取り上げられないなどから実際に放射線教育を実施している学校はそれほど多くはなかった。

一方で、同じく平成 20 年 3 月の学習指導要領解説理科編⁴⁾に於いては電子・電流に関する単元においてクルックス管による電子線の観察をすることが記載されており、それに則った現行の教科書の「(3)電流とその利用」の単元に於いて、調査を行った 5 社全ての中学 2 年生理科の教科書でクルックス管による電子線の観察が既に取り上げられている。2019 年に行われた大阪府立大学の 1 回生向けの授業（工学のみ対象では無く、全学から受講される）では、回答数 90 名のうち中学校でクルックス管を観察したことのある生徒は 19 名と 2 割以上にのぼり、高校、その他と合わせると 4 割以上の学生がクルックス管を観察したことがあるという結果が得られた。これは、放射線教育を行う上で最もよく使われるであろう霧箱を見たことのある学生が 11 名しか居なかったことと比べると、非常に高い割合である。

しかしながら放射線に関する取扱いについては、啓林館と東京書籍の教科書では、レントゲンによる X 線発見の歴史的経緯が 2 年生の当該単元で取り上げられているが、大日本図書と学校図書については 2 年生の当該単元では放射線に関する記述はなく、3 年次のエネルギーに関する単元で触れられているが上述のように必ずしも学習されるわけでは無い。教師向けの指導書についても、学校図書、教育出版の 2 社については放射線に関する注意は行われていなかった。

ところが、平成 29 年 3 月に公布された中学校の新学習指導要領⁵⁾では同じく第一分野の「(3)電流とその利用」の単元に於いて、その内容の取扱いで「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。」という内容が新しく追加されている。さらに平成 29 年 6 月に

表 1 2016 年版 中学理科教科書に於けるクルックス管の取扱い

出版社	啓林館	東京書籍	大日本図書	学校図書	教育出版
教科書					
クルックス管自体の取扱い	○	○	○	○	○
クルックス管に関連させた放射線に関する記述	2 年	2 年	3 年	3 年	×
指導書					
放射線に関する注意	○	○	○	×	×

された学習指導要領の解説理科編⁶⁾では、「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。」と、かなり詳細な内容が記載されている。当該単元は2年生で取り扱う内容であり、放射線については「触れること」ではあるが、クルックス管については観察を求めている。必ずしも実際に実験を行うことを求めているわけでは無いが、今後より多くの中学校に於いてクルックス管を用いた実験が行われる可能性がある。教科書でクルックス管からの放射線についても触れられているわけであり、保護者も含めて実演の際の放射線安全管理に今まで以上に関心が集まると考えられる。

高校の教科書については、啓林館、実教出版、数研出版、第一学習社、東京書籍の5社について調査を行ったが、高校3年生の物理の教科書の、原子について取り扱った単元において一番始めに取り扱われる「電子と光」という章でガイスラー管などの真空放電に続く陰極線の説明、トムソンの比電荷の実験に続いてローレンツ力の説明のためにスリット入りクルックス管が登場する。しかしながら啓林館を除いてX線の発生については触れられていない。

3. クルックス管からのX線漏洩の認識

クルックス管からX線が放出されていること自体は、レントゲンによって発見されており最も古くから放射線を放出していることが知られていた装置であると言える事ができるが、現在の教育現場の教員が必ずしも認識しているわけでは無い。上述のアンケートの結果では、クルックス管を見たことがある35名の学生のうち、放射線が放出されていることを知っていた学生は18名と半数程度に留まっていた。さらに具体的にどの程度の量が漏洩しているかという事になると、一部の専門家を除いてこれまでほとんど知られていなかった⁷⁾。我が国に於いては、1994年に一部の製品では表面からの距離5 cmでの70 μ m線量当量が250 mSv/hに達することが報告されているが⁸⁾、残念ながら広く認識されるには至らなかった。我々の研究においても、15 cmの距離における10分間の測定で70 μ m線量当量が32.6 mSv (196 mSv/hに相当) という高い線量を漏洩する装置が見つかった。このため、放射線が放出されていることを知らずに不注意な取扱いを行うと大きな線量を被ばくする恐れがある。多忙な学校教員に過度の負担を強いることなく、不要な被ばくを子供達に与えず安全に安心して実験を行うことが出来るガイドラインの確立が強く望まれる。

4. クルックス管プロジェクト

このため、2017年度からクルックス管から漏洩するX線に関する安全管理を目的とした「クルックス管プロジェクト」が線量計測、放射線教育、放射線安全管理など各方面の有志により立ち上げられた⁹⁾。

4.1 漏洩する X 線の線量測定法確立

クルックス管から漏洩するのは 20 keV 程度と低エネルギーかつパルス状に放出される X 線であり、通常のサーベイメーターでは正しく測定できないため当初は線量の測定もままならない状態であったが、2017 年度中に基礎的な線量評価手法の確立を行い、電流モードでの測定を行う電離箱か、積算量を評価する蛍光ガラス線量計や OSL 線量計などの固体線量計により信頼できる線量評価が可能となった。印加電圧の測定も、抵抗値の大きい(100 M Ω 以上)ガラス抵抗器などと、100 k Ω 程度の小さな抵抗器を直列に繋いだ分圧器とオシロスコープによって測定を行った。線量だけでなく、CZT (Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te) 検出器を用いたエネルギースペクトルの測定も行い、それぞれの印加電圧との相関なども明らかとなった^{10,11)}。

4.2 第一期実態調査

2018 年度には低エネルギー X 線の測定に特化したガラスバジ FX 型を 21 校の中学校に郵送することで、実際の教育現場での実態調査を行った。その際、調査対象の学校の紹介など、放射線教育フォーラム、日本科学技術振興財団など様々な関係者からの協力を頂いた。測定に際しては、普段の授業で行っている誘導コイルの設定での実演を依頼した。生徒が観察を行う 1 m 位置での評価を行うのに、実際に 1 m 位置での測定を行うと線量が低すぎて検出限界である 50 μ Sv を下回ると考えられたため、クルックス管表面から 15, 30, 50 cm の距離で測定して 1 m 位置に外挿することで 1 m 距離での線量を評価した。測定時間は教員の負担を考慮して 10 分間とした。その結果、後述するようにほとんどの装置で十分に低い値に留まっていたが、1 本だけ、誘導コイルの放電出力を最低に設定しているにもかかわらず 1 m の距離 10 分間で 70 μ m 線量当量が 600 μ Sv に達する装置が見いだされた。実効線量は後述するように 60 μ Sv 以下と見積られており、この線量自体は医療被ばくや航空機に搭乗した際の被ばく線量と比べても必ずしも大きな線量とは言えないが、現場によってはより近い距離での観察を行っている例も見られ、発生源自体の線量を低減する方法の提供と、観察を行う際の距離、時間などの目安を提示する必要性が明らかとなった。

4.3 意図しない電圧上昇

誘導コイルの放電出力を最低に設定しているにもかかわらず高い線量が漏洩していたという結果は、印加電圧を下げれば線量を抑えることが可能であると考えていた我々には衝撃的であり、その後現地に赴いての追跡調査を行った。



図 1 ガス圧の調整器（赤丸で示す）の付いた島津製作所製のクルックス管。

その結果、装置によっては封入ガス圧低下などの影響により冷陰極を叩く陽イオンが足りず電子ビームとして電流が流れにくくなっていると考えられた。クルックス管内のガス圧は管内への吸着などにより変化することはクルックスが装置を発明した時代から知られており、ガス圧を調整する調整器(softener, エネルギーが高くなると透過力の高い「硬い」X線となることを防ぐという意味だと考えられる)が設けられていた。国内でも非常に古い装置では調整器が付いている例が確認されており、古い装置であっても安定したビーム電流が得られている(図1)。しかし、現在市販されている装置には調整器は付いておらず、経時変化などによって装置の状態が変化しうる。ビーム電流が流れにくくなった装置では、誘導コイルにエネルギーが蓄積され電圧が上昇していき、冷陰極での二次電子放出効率が高くなり電流が流れるようになるまで意図せず高い電圧が印加されることで、結果として高い線量が漏洩するという事が考えられた。なお、このようにガス圧が小さくなり電流が流れにくくなるのは必ずしも古いクルックス管に限らない。現在販売されている製品については製造時に検査が行われており安全で有ると考えられるが、15年程度しか経過していない製品でも高い線量を漏洩する例が見られた。

4.4 暫定ガイドラインの検討

意図しない電圧上昇を防ぐために、クルックス管と並列に接続された放電極が空中放電により電流を流す、安全弁としての役割が極めて重要であり、暫定的に20 mmと言う放電極間距離をガイドラインとして設定した。

暫定ガイドラインに於いてはクルックス管から観察者の距離についても規定しており、クルックス管の電子線自体がきちんと観察可能であり、実際の運用上無理なく達成可能である1 mとした。観察時間については実際には1本あたり数十秒で、4種類(十字入り、磁場偏向用及び電場偏向用のスリット入り、羽根車)のクルックス管を観察してもせいぜい2分程度であるという意見もあったが、教員については複数回実演を行う事から、10分という数値を目安とした。測定値からの線量評価はこの条件を元に計算している。なお、現在国内で販売されている装置には、日本理科教育振興協会から出された目安として電極間距離4 cm、放電時間10秒以内、クルックス管と先生・生徒の距離1.5 m以上、という注意書が添付されている。今回出した暫定

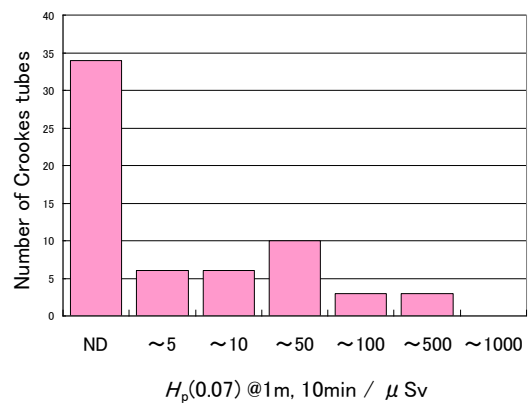


図2 2018年度に実施した暫定ガイドライン設定以前の実態調査結果。NDは検出限界(50 $\mu\text{Sv}@20\text{ cm}$)以下。

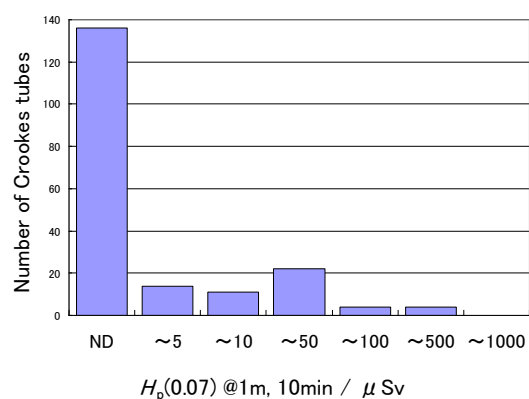


図3 2019年度に実施した暫定ガイドライン準拠(放電極距離20 mm)での実態調査結果。NDは検出限界(50 $\mu\text{Sv}@20\text{ cm}$)以下。

ガイドラインは、距離・時間による防護よりも、より発生源からの漏洩量自体を抑えることに重きを置いていると言える。

4.5 暫定ガイドライン有効性の検証

2019年度は、この暫定ガイドライン(放電極距離 20 mm 以下、距離 1 m 以上、10 分間以内)を遵守することにより、本当に生徒達の安全を確保出来るのか、と言う暫定ガイドラインの実効性を検証する調査を日本全国の 57 校の中学・高校において実施した。測定はクルックス管表面から 20 cm の距離のみで行い、1 m では距離の二乗に反比例して 1/25 になるとして線量を評価した。調査対象の学校の紹介においては大阪府教育委員会経由で大阪府物理研究会にも協力を頂いた。

また、2019 年度からは任意団体としてではなく、日本保健物理学会において「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」¹²⁾ として活動がオーサライズされており、主に計算による実効線量評価と、国内外の規制状況の調査などを行っており、第2回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会に於いて企画セッションとして 6 件の発表を行った。

5. 教育現場での漏洩線量調査結果

2018 年度の実態調査の結果を図 2 に示す。調査を行った 37 本中 31 本で、クルックス管表面から 1 m の距離 10 分間での $70 \mu\text{m}$ 線量当量は $100 \mu\text{Sv}$ 未満であった。

ここで、通常の高エネルギーの高い γ 線であれば線量計によって 1cm 線量当量の測定を行い、その値を実効線量とみなすが、クルックス管から漏洩する X 線は極めてエネルギーが低く、体内では 1 cm で半分程度に減衰していくため、1 cm の深さでの吸収線量は全身の実効線量を代表せず、大幅な過大評価となる。また、測定の際に検出限界の関係から 1cm 線量当量では $70 \mu\text{m}$ 線量当量の半分程度の値となってしまう評価が行えなくなるため ($70 \mu\text{m}$ 線量当量での評価においても、37 本中 18 本は 15 cm の距離で測定しても検出限界 ($50 \mu\text{Sv}$) 以下であった)、測定結果の評価は全て $70 \mu\text{m}$ 線量当量で行っている。

現在のところ空間的に一様ではないクルックス管からの漏洩 X 線に対して、生徒や先生が受ける全身の被ばく量を評価する実効線量評価手順は確立しておらず、専門研究会に於いて PHITS コードを用いたシミュレーションにより評価を行っているが、暫定的に保守的に見積って最も線量が高い中心点で測定された線量が均一に照射されるとして、観察する生徒はクルックス管に正対しているとした場合で実効線量評価を行った。1cm 線量当量から実効線量への換算が ICRP Pub116 Fig.5.2 ¹³⁾ により与えられており、20 keV では実効線量は 1cm 線量当量の約 1/5 である。さらに水中 1 cm で約半分に減衰することから、1cm 線量当量は $70 \mu\text{m}$ 線量当量の約半分となり、実効線量は $70 \mu\text{m}$ 線量当量の約 1/10 となる。また、眼の水晶体の等価線量についても専門研究会に於いて検討を行っているが、 $70 \mu\text{m}$ 線量当量が保守的な評価を与える。

2019 年度の暫定ガイドライン遵守での測定結果を図 3 に示す。測定を行った 191 本中 187 本の装置については 1 m 距離、10 分間の実効線量が国際的な免除レベルである $10 \mu\text{Sv}$ 以下に抑制されていることが確認された (ICRP Pub-64 ¹⁴⁾ 潜在被ばくの防護: 概念的枠組み、及び IAEA BSS ¹⁵⁾ に於いて免除レベルについて、NCRP Report N0.180 ¹⁶⁾ では無視可能

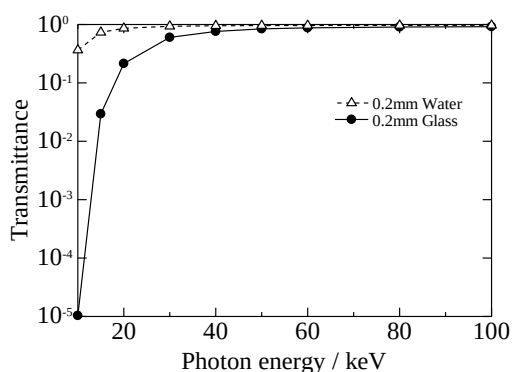


図4 2mm厚のガラス及び水に対する光子の透過率のエネルギー依存性。エネルギーが高いほど透過率は上昇するが、100keV 付近からそれほど大きく変化しないことが分かる。また低エネルギーでは物質による透過率の差が大きくなる。

個人線量について記載)。

暫定ガイドライン遵守での最も線量の高い装置では上記の条件で実効線量が $40 \mu\text{Sv}$ 程度と評価されている。ICRP Pub36¹⁷⁾「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 $1/10$ 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。

一方で、2019 年度の多数の装置に対する実態調査において、想定していなかった装置の仕様(放電極を 20 mm まで近

づけることが出来ない)も明らかとなったため、より現実的なガイドラインとするための検討が必要である。今後は、線量が高くなる装置は、何故線量が高くなってしまったのか、その原因の追及とスクリーニング手法の確立を目指す。原因としては、放電極表面に酸化皮膜などが張ること、放電が起こりにくくなっていると言うことが考えられる。スクリーニング手法は、後に述べる電離箱や簡易型のサーベイメーターによる直接的な線量測定に加えて、中高の理科室で入手可能な電圧計や電流計、放電極での放電距離などである程度の危険性の診断が可能とならないかを検討している。

実効エネルギーが印加電圧と良い一致を示すことが確認されているため¹¹⁾、実態調査におけるガラスバッジ FX 型による X 線実効エネルギーの評価により印加電圧を見積ることが出来る。この印加電圧及びアナログ電流計で測定した電流と線量の相関のデータを検討しているが、2019 年度に測定した多くの装置(136/191)で検出限界以下であったため、未だ十分ではなく、より多くのサンプルの評価を行う必要がある。このため、2020 年度も引き続き実態調査を継続する予定である。これにより、クルックス管による電子線の観察という本来の目的の範囲内であれば、実際の線量測定を行わなくても十分な安全が確保出来ることを目指す。

6. クルックス管を活用した放射線教育

現在の教育現場ではクルックス管は電子の流れの説明に用いられているが、クルックス管から放出される X 線は放射線教育を行う上で極めて有用であり、安全を十分に確保した上で活用されることが望ましい。

クルックス管から漏洩する X 線は、そのエネルギーの低さから遮蔽材の原子番号に非常に敏感であり、図4に示すように材質の違いを明確に区別することが可能である。数 10 keV 前後の X 線はほぼ全てが光電効果によりエネルギーを失うのに対して、数 100 keV 程度のガンマ線はコンプトン効果が支配的であり、前者は原子番号 Z の $4 \sim 5$ 乗に比例して大きく変化するのに対して、後者は Z に比例しており同じ重さの遮蔽体ではほとんど遮蔽効果に差がなくなる。難しい遮蔽実験を行わなくても、ガラスの水槽に装置を入れて天板は同程度の厚さの亚克力板で遮蔽すると、ガラスで遮蔽された側面と天板では大きく透過率が異なることが理解できる。

この簡単な実験から、レントゲン写真は数 10 keV 程度の X 線を用いることで、軟組織と硬組織の差を透過線量の濃淡として画像化していると言う事が理解可能である。

また、図 4 に示すとおり光子のエネルギーが 100 keV 以下の領域では、わずかなエネルギーの違いにより大きくガラス管に対する透過力が異なる。クルックス管の誘導コイルの設定によりエネルギーを変化させると、線減衰係数が変化することを、複数の 0.5 mm 厚のアルミ板とクランプ、GM サーベイメーターなどで簡単に測定可能である。

さらに、クルックス管からの X 線を霧箱に入射することにより、光子が電子を弾き出す電離作用を観察することが出来る。20 keV 程度の X 線で叩き出された 20 keV 程度の光電子は空気中で 5 mm 程度の飛程しか無く、電子として遠くまで飛ぶことは出来ない。その一方で X 線は距離の二乗に従って弱くなっていくが、相当の距離を飛んでからアクリル製のチャンバーであれば透過して光電子を叩き出すことが出来る。この光子と荷電粒子の挙動の違い、さらには図 5 に示すように、元々電子線がガラス管にぶつかって X 線が発生して、最後にはまた電子として物質と相互作用するという課程は、放射線と物質の相互作用の本質を理解する上で非常に素晴らしい教材となり得る。

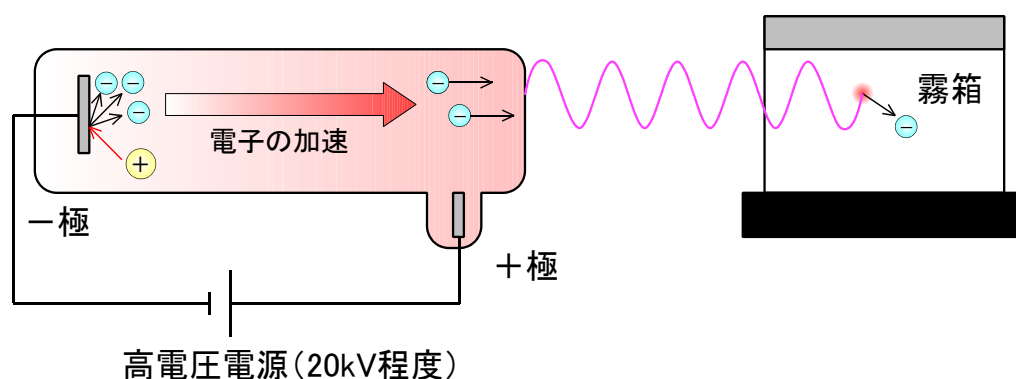


図 5 クルックス管の模式図と、電子から X 線、再び光電子に変化する様子。冷陰極において陽イオンが加速されて二次電子を叩き出し、陰極付近の電界によって加速されて電子ビームとなる。陰極ごく近傍以外では電界は弱く等速直線運動した後、ガラス管にぶつかり制動放射 X 線を放出し、電子は止まる (20 keV 程度では電子自体はガラス管を透過できない。特性 X 線も放出されるがエネルギーが低いとやはりガラス管を透過できない)。ガラス管を透過した制動放射 X 線は、2 π 方向に拡散していき、距離の二乗に従って強度が小さくなる。最終的に空気原子にぶつかり光電効果を起こし、光電子を叩き出す。霧箱を用いると、空気中での飛程 5 mm 程度のこの光電子を観察することが出来る。

7. 教育現場での線量の確認

上記の特徴からクルックス管は放射線の性質の理解に大変優れた教材となり得るが、漏洩 X 線の管理はより厳格である必要があり、遮蔽体などにより測定者の安全を担保出来ていることを確認する必要がある。このため、箔検電器を用いた線量測定の可能性が検討されている^{18,19)}。箔検電器は電子式の個人線量計が普及する以前にポケットチェンバーという直読式の線量計として活用されていた歴史が有る(図 6)。理科室にある箔検電器は、あらかじめ電極に与えた電荷によって箔が開き、放射線の電離作用によって空気中に発生した電荷のうち電極とは反対の極性の電荷を収集するにつれて箔が閉じていく、開放型の電離箱として捉えることが出来る。また、電離作用という、最も重要な放射線と物質の相互作用を体感的に学習する事の出来る教材となり得る。

プラスチックシンチレーターを用いた測定機である Kind-mini の感度は、クルックス管からの X 線測定に適しており、比較対象とした GM サーベイメーター（米国 S.E.International 社製, Ranger）は 200 $\mu\text{Sv/h}$ 程度から飽和傾向が見られているのに対し、比較的広い範囲で線量率と計数率が線形性を示している（図 7）。線量率は低エネルギーでの校正を行った電離箱 ICS-1323（日立）を用いて測定した。この GM サーベイメーターでもコリメーターを用いることにより（フィルターを用いるとエネルギースペクトルが変化するためコリメーターの方が適している）、適切な感度に調整可能で有と考えられるが機種により元々の感度が異なるため、線量率への対応を取ることは容易ではない。それに対して Kind-mini は公益財団法人 日本科学技術振興財団の放射線教育支援サイト「らでい」²⁰⁾ から無料で貸出しを行っており、感度についても校正されていることから、スクリーニングを行うには十分な精度での測定が可能で有と考えられる。今後、X 線エネルギーに対する感度の違いなどを測定していく予定である。

スクリーニングによりある程度高い線量が検出された装置に対しては、固体線量計を用いた測定を学校単位で直接依頼可能とする商業サービスを検討していく。以下にまとめた安全運用ガイドラインの遵守に加えて様々な方法で直接的に学校教育現場に於ける線量を測定可能とする手段を提供することで、安全に、教育効果の高いコンテンツを活用して頂くことを期待している。



図 6 米国製ポケットチェンバー、CDV-750 ‘civil defense dosimeter’。高電圧を印加して泊を開き、被ばくした線量増加と共に箔が閉じていくのをクリップの側のレンズから光源を見ることにより、直読することが出来る。

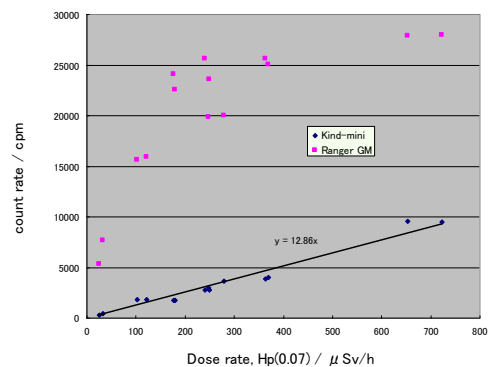


図 7 プラスチックシンチレーターを用いた簡易型サーベイメーター Kind-mini とパンケーキ型 GM サーベイメーター Ranger を用いた線量率と計数率の相関。線量率は電離箱を用いて測定した。

クルックス管安全運用ガイドライン

- 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。

参考文献

- 1) 柴田誠一, X 線発見から原子構造の解明へークルックス管による放電研究がもたらした現代科学の基礎ー, 放射線教育, **23** (2019) 3-12.
- 2) 内池平樹, イオン衝撃による二次電子放射と絶縁物の電子状態, 応用物理, **50**, 1171-1180 (1981).
- 3) 中学校学習指導要領, 平成 20 年 3 月, 文部科学省
- 4) 中学校学習指導要領解説理科編, 平成 20 年 7 月, 文部科学省
- 5) 中学校学習指導要領, 平成 29 年 3 月, 文部科学省
- 6) 中学校学習指導要領解説理科編, 平成 29 年 6 月, 文部科学省
- 7) 藤淵俊王 ほか, イメージングプレートを用いたクルックス管からの漏洩線量分布測定, 放射線安全管理学会誌, **10**, 40-45 (2011).
- 8) 大森儀郎, クルックス管から漏洩する X 線の実態とその対策, 神奈川児立教育センター研究集録, **13**, 21-24 (1994).
- 9) 秋吉優史研究教育紹介サイト、クルックス管プロジェクトのご紹介,
<http://bigbird.riast.osakafu-u.ac.jp/~akiyoshi/Works/CrookesTubeProject.htm>
- 10) 秋吉優史, 谷口良一, 松浦寛人, 宮丸広幸, Do Duy Khiem, 神野郁夫, 濱口拓, 野村貴美, 谷口和史, 小林育夫, 川島紀子, 佐藤深, 森山正樹, 宮川俊晴, クルックス管からの低エネルギーX線評価手法の開発, 放射線化学, **106**, 31-38 (2018).
- 11) Do Duy Khiem, H. Ando, H. Matsuura, M. Akiyoshi, Investigation of Low-energy X-ray Radiated from the Crookes Tube Used in Radiological Education, Radiation safety management, **18**, 9-15 (2019).
- 12) 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, 日本保健物理学会ホームページ, <http://www.jhps.or.jp/cgi-bin/info/page.cgi?id=61>
- 13) Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures, ICRP Publication 116, Annals of the ICRP **40**(2-5) (2010).
- 14) Protection from Potential Exposure: A Conceptual Framework, ICRP Publication 64, Annals of the ICRP **23**(1) (1993).
- 15) Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna (2014)
- 16) Management of exposure to ionizing radiation: radiation protection guidance for the United States, National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP Report No. 180 (2018).
- 17) Protection against Ionizing Radiation in the Teaching of Science, ICRP Publication 36, Annals of the ICRP **10**(1) (1983).
- 18) 森千鶴夫, 緒方良至, 秋吉優史, 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.
- 19) 森 千鶴夫, 緒方良至, 秋吉優史, 臼井俊哉, 村上浩介, 羽澄大介, 中村嘉行, 渡辺賢一、瓜谷 章、神谷 均, 宮川俊晴, 田中隆一, 掛布智久, 箔検電器によるクルックス管からの X 線の測定, Radioisotopes, **69**, 1-12 (2020).
- 20) 放射線教育支援サイト「らでい」 <https://www.radi-edu.jp/>