

教育現場における冷陰極管の漏洩X線について

宇藤 茂 憲

福岡教育大学 教育学部

(平成29年 9月 1日受理)

On the leaking X-ray from cold cathode-ray tube used at junior high- and high schools

Shigenori UTOH

Department of Education, University of Teacher Education Fukuoka

キーワード：冷陰極管，クルックス管，ガイスラー管，漏洩X線強度分布，GM管，線量当量率，ICRP，電離則，防護ボックス，X線簡易検出

概要

1966年に国際放射線防護委員会（International Commission on Radiological Protection：以下、ICRP）が「18才までの生徒に対しての学校における放射線防護」を発表し、放射線から生徒を防護する勧告¹⁾が初めて示された。冷陰極管のX線の漏洩現象に関して、国内では約40年以上前から報告²⁾されており、その後も幾度となく冷陰極管の漏洩X線は取り上げられてきた。³⁾2012年に中学校理科で「放射線教育」が約35年振りに復活し、折しも東日本大震災での原子力発電所事故（2011年）と重なったため、教育現場の放射線教育への認識が改められた。⁴⁾このような状況で、本研究室では3年程前から、県教育センター主催の教員研修（中学校理科教師対象）で放射線に関わる課題を取り扱い、また、冷陰極管のX線の漏洩現象を示して注意喚起をおこなうなど、冷陰極管からの漏洩X線の検証と啓発を研究室活動の一環として取り組んできた。本報告では、これまでに公表されてきた冷陰極管からの漏洩X線に関する内容を踏まえて現象を再検証し、研究室で得たデータを基に、対称性の良いクルックス管の漏洩X線の強度分布を定量的に明らかにした。また、教育現場で漏洩X線を生じる冷陰極管をどのように取り扱うべきかを考慮して、ICRP勧告および国内法規との対応について、漏洩X線防護について、漏洩X線の簡易検出について、を取りまとめた。

1. はじめに

クルックス管、スペクトル管やガイスラー管は、電子の特性、原子の発光および真空放電などの現象を検証するため、中・高等学校の理科の実験で使用されている教育用電子管である。ヒータを加熱して陰極から熱電子を放出し、陰・陽極間の印加電圧（0.5～0.6 kV程度）で電子を加速するタイプの電子管を熱陰極管という。これに対して、陰・陽極間に高電圧（数kV～25 kV程度）を掛けて、陰極から電子を放出して加速するタイプの電子管は冷陰極管と総称されている。一部のクルックス管を除くと教育現場で使用する教育用電子管のほとんどがこの冷陰極管である。国内においては40年程前から中・高等学校の教育現場における冷陰極管からの漏洩X線現象が報告され、漏洩X線の放射線の強さのデータ提示および注意喚起が繰り返されてきた。^{2,3)}しかし、冷陰極管からの漏洩X線に関する認識は教育現場では今でも低い。本学所有および本学近郊の中学校4校から借用したクルックス管の漏洩X線調査の結果を表1に示す。25台のクルックス管の内、1台は熱陰極管（漏洩X線を発生しないタイプ）で、残りの冷陰極管24台の75%で漏洩X線を検出した。ここで、冷陰極管の使用によって自然放射線（本学の実験室では約0.05 $\mu\text{Sv/h}$ ）を超える

表1 調査したクルックス管 25 台の種類と漏洩 X 線の有無

電子管タイプ	クルックス管機能	漏洩量 X ($X > 20 \mu\text{Sv/h}$)	漏洩量 X ($X < 20 \mu\text{Sv/h}$)	非漏洩	計(台数)
冷陰極管型	標準型	3	3	0	6
	電場印加型	2	2	1	5
	十字型	2	3	2	7
	羽根車型	1	2	3	6
	計	8	10	6	24
	% (24台中) →	33.3	41.7	25.0	
	% (24台中) →	75.0		25.0	
熱陰極管型	電場印加型	0	0	1	1

X線を漏洩X線とみなした。これらクルックス管の購入時期を図1に示す。横軸は10年区切りで購入時期を示している。近郊の中学校が所有するクルックス管は購入した時期に関わらず、放射線の強さに差はあるものの漏洩X線を発生させるクルックス管が非漏洩のものよりも上回っていた。クルックス管から $20 \mu\text{Sv/h}$ (この値については後述)以上の漏洩X線の値を示すものは33.3% (8台/24台)で、誘導コイルでクルックス管に印加した電圧値の平均は約19.3 kVである。 $20 \mu\text{Sv/h}$ 未滿の漏洩X線を示すクルックス管は41.7% (10台/24台)で、印加電圧平均値は約17.1 kVである。これに対して、漏洩X線を検出できなかったクルックス管は25.0% (6台/24台)で、印加電圧の平均は約11.5 kVであった。但し、クルックス管から約0.8 m離れた位置で測定をおこなった。放射線の強さの単位については次の項で概説する。

クルックス管の貸出に応じてくれた中学校理科教師にこれらの事実を告げると、理科教師のほとんどはこのことを認識していなかった。本報告では、

- ・漏洩X線強度の距離依存性
 - ・十字クルックス管の漏洩X線の定量的強度分布
 - ・漏洩X線の取り扱い (ICRP 勧告と国内法規)
 - ・漏洩X線被曝対策としての防護ボックス
 - ・教育現場での漏洩X線の簡易検出法
- の各観点で、測定データに基づいて提示する。

2. サーベイメータについて

リガク(株)製サーベイメータ(写真1) Get Smartで漏洩X線を測定した。本サーベイメータはガイガー・ミュラー管(以下、GM管)としての機能と、シンチレーションカウンタを本体に接続して使用するマルチチャンネルアナライザ(以下、MCA)としての機能を兼ね備えている。GM管測定では放射線の種類は特定できないが、MCA機能を用いると5 keV~3 MeV範囲のエネルギーをもつ α 線、 β 線、 γ 線およびX線を検出できる。更に、これまでの漏洩X線関連の論文等で使用されていたサーベイメータよりも低いエネルギーの放射線を検出できた。放射線の物理的特性に関する測定では、GM管で検出される放射線の単位時間当たりの個数を放射線の強さとしてcounts per second(以下、cps)の単位で、或いはcounts per minuteで測定した。また、人体への影響に関する測定では1 cm線量当量率(以下、線量当量率)^{5,6)}の単位 $\mu\text{Sv/h}$ で、或いはmSv/hで測定した。ここで、-/hは1時間あたりの線量当量率を、また、-/yは1年あたりの線量当量率を示す。写真1のGM管画面左下0.040 $\mu\text{Sv/h}$ の値はリアルタイムの線量当量率を示し、中央表示0.040 $\mu\text{Sv/h}$ の値は指定した条件(例、換算時間

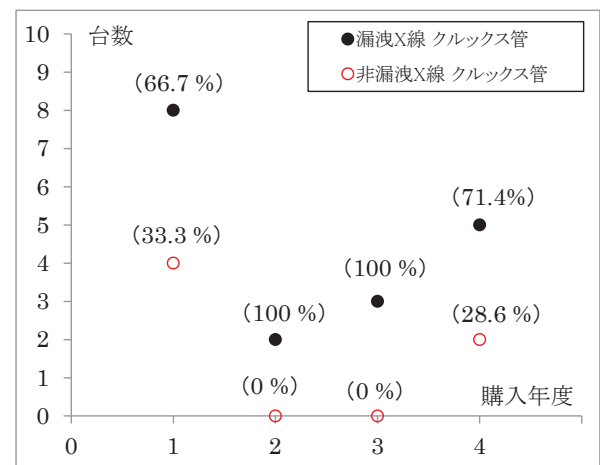


図1 クルックス管を購入時期で区分して、漏洩X線を生じるもの(●)と生じないもの(○)に分けたグラフ。グラフの縦軸はクルックス管の台数を示す。横軸の番号は、1:現在から10年前に購入、2:10年前から20年前に購入、3:20年前から30年前に購入、4:30年前から40年前に購入、を示す。

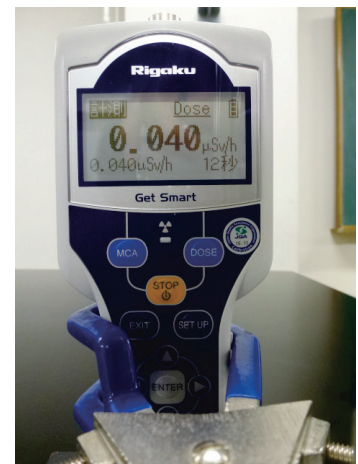


写真1 測定に使用したGM管

等)で測定した線量当量率の平均値を示す。画面右下12秒の値は換算に要する残時間を示している。測定では、20秒換算時間に設定し、それぞれ5回同じ測定をしてその平均値をデータとして用いた。ここで、 μSv や mSv は線量当量である。

3. 測定の手順と実験結果について

3-1. 冷陰極管の測定について

ガイスラー管は本学所有 [サンバック(株), 型式0019] のものを, またクルックス管は本学 (6台) と近郊の4中学校 (19台) から借用して測定した。クルックス管の型式は, 標準型 (6台), 電場印加型 (5台), 十字型 (7台), 羽根車型 (6台) の冷陰極管と1台の熱陰極管 (電場印加型) である。クルックス管の購入先は6~7社であったが, 製造元までは確認できなかった。各冷陰極管の購入時期はおおまかに図1の通りである。

冷陰極管の高電圧の印加には誘導コイル (島津理化, MK-100N) を用いた。誘導コイルで印加電圧の正確な調節はできなかった。印加電圧の値は図2に示す回路を絶縁オイルに浸し, デジタルストレージオシロスコープ (TEXIO, DCS-7040) を用いて分圧した電圧を測定し, 冷陰極管の印加電圧値の目安を得た (写真2)。熱陰極管では, ヒータに直流電圧約15V (KIKUSUI, PMC18-5A) を印加し, 陰極と陽極間には高圧電源 (SHIMADZU, VH-500) で約600Vを印加した。

写真3に示すように, 鉛入ガラス (厚み10mm, 以下 10^1mm) と鉛板 (1^1mm) および鉄板 (1^1mm) を漏洩X線の測定の際に防護壁として使用した。尚, 誘導コイルに接続するケーブルでの放電を防ぐため, ゴム板 ($1\sim 5^1\text{mm}$) を使用した。

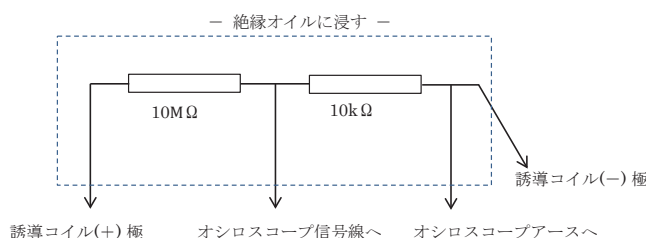


図2 クルックス管に印加する高電圧を分圧して測定する回路図。放電を防ぐため, 回路全体を絶縁オイルに浸して測定した。

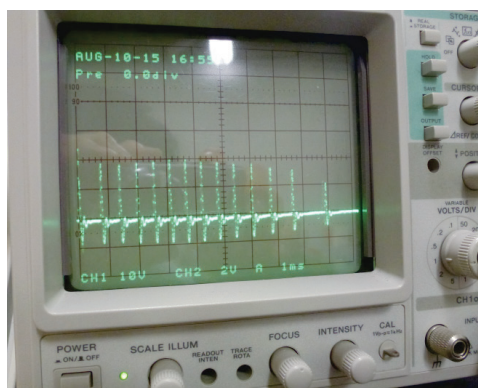


写真2 クルックス管に印加した高電圧 (分圧値) のオシロスコープ測定画面

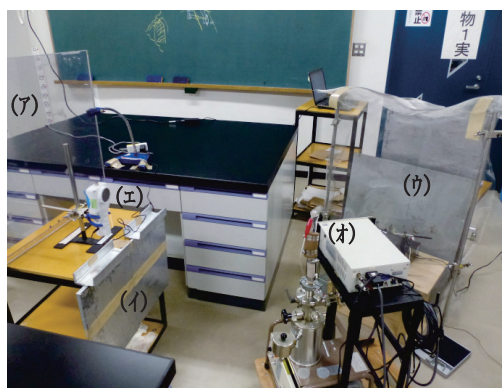


写真3 ガイスラー管からの漏洩X線を測定するときの放射線防護。(ア) 10^1mm 鉛ガラス, (イ) 1^1mm 鉛板, (ウ) 1^1mm 鉄板, (オ)GM管, (オ)ガイスラー管。

3-2. 漏洩X線の強度分布について

放射線源を点とみなして (以下, 線源), 放射線が空気中に一様に放出されると仮定する。単位面積・単位時間に通過する放射線の個数 [cps] を粒子フルエンス率というが, 本報告ではこれを“放射線強度”とする。線源から一様に放出される放射線のイメージを図3の矢印のように考える (線源は球の中心)。半径 r_i の球において, 球の中心を頂点とするような円錐を考えると, この円錐によって切り取られる球面の面積 S_i を用いると, 立体角は $\omega = S_i/r_i^2$ と定義される。同一立体角内では放射線の矢印の数は同じである (図5の $i=1, 2, 3$ 参照)。ここで, 放射線強度に面積を掛けた値をその面積での“放射線総量”と名付ける。全立体角 [$4\pi (=4\pi^2/r^2)$] の放射線総量を A_0 [cps] とすると, 任意の立体角 ω での放射線総量は $A_0\omega/4\pi$ となる。GM管の円形ウインド (直径 $2a$) の面積を S_0 とすれば, GM管で測定する放射線強度は, $a^2 < r^2$ の条

件を満たせば、近似的に、

$$A_0 \omega / 4\pi \cong (A_0 S_0 / 4\pi) / r_2 \propto 1/r^2 \quad (1)$$

となり、GM管で測定する放射線強度は線源からの距離の2乗に反比例（以下、逆2乗則）することが理解できる。但し、実験で用いたGM管ウインドの直径 $2a = 1.4 \text{ cm}$ であり、測定距離 $r = 0.30, 0.60, 1.20, 2.20, 3.20, 4.20, 5.20, 6.20, 7.20, 8.20 \text{ m}$ である。測定では、線源として漏洩 X 線を生じるガイ斯拉ー管（誘導コイルで高電圧を印加）を用いた [図 6(a)]。測定値から自然放射線 (0.92 cps) 差引後の値をデータとした。図 4 に実験の概念図を示す。各距離 r_i ($i = 1, 2, 3 \dots 10$) における立体角は、 $\omega = 2\pi(1 - \cos\alpha_i)$ (計算①) で示すことができる。但し、 $\alpha_i = \tan^{-1}(a/r_i)$ である。また、近似式 (1) より、 $\omega \cong \pi a^2 / r_i^2$ (計算②) で示せる。測定値および計算値を比較するため、0.3 m の位置での各強度を 1 として、それぞれの値を規格化した。これらの計算①と②と、GM管による測定結果を示したのが図 5 である。横軸を放射線源からの距離 r の 2 乗の逆数で示し、縦軸の値は規格化した値である。計算① (○印) と計算② (□印) および実験 (●印) の各データを、1 次関数を用いた最小自乗法で解析した。図 5 より計算①の切片は 0.00001、計算②はゼロ、および測定では 0.00640 となった。計算①と②では、1 次関数の切片がほぼ 0 で、前出した距離の逆 2 乗則をグラフで確認したが、測定では、計算①と②に比べて切片の値が 2 桁程大きくなり厳密には原点を通過していない。測定上の不備^{脚注1}は残るが、放射線源からの距離と放射線強度の逆 2 乗則の傾向を提示した。

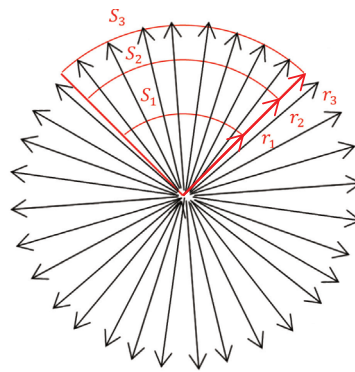


図 3 円の中心の線源から一様に放出する放射線を矢印で示した。本文参照。

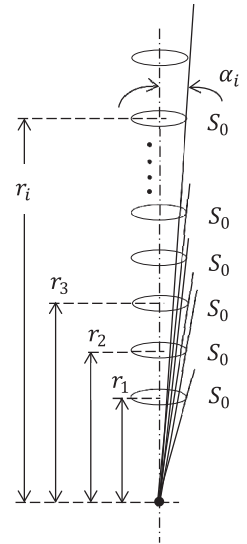


図 4 GM 管の円形ウインド面積 S_0 、線源からの距離 r_i と α_i を示す。

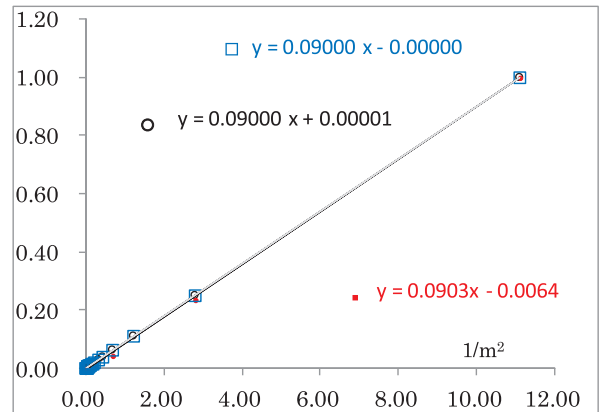


図 5 GM 管の測定値と立体角の計算①と計算②の値を、それぞれ規格化して比較した。縦軸は規格値、横軸は線源からの距離の 2 乗の逆数 [$1/m^2$] を示す。図中の式は各データを 1 次関数の最小自乗法でもとめたものである。

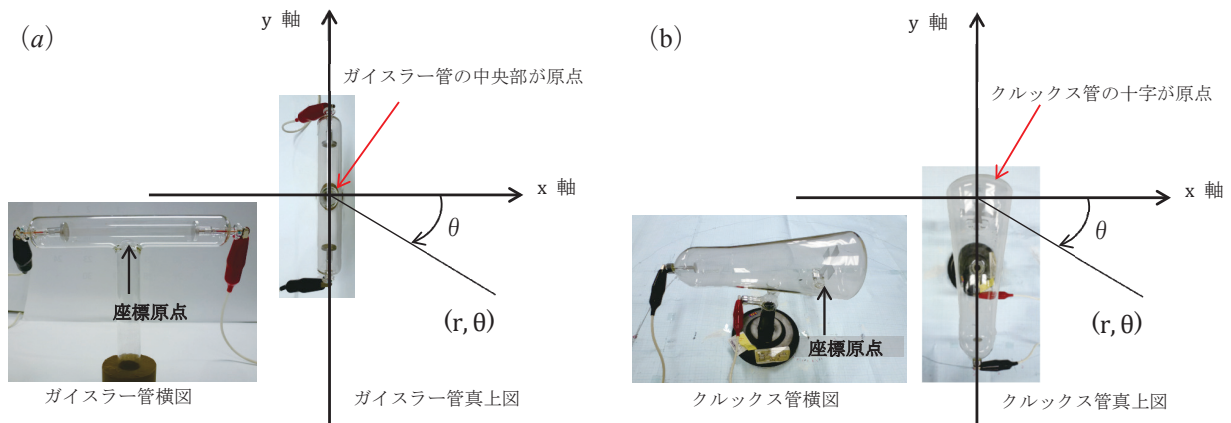


図 6 (a)ガイ斯拉ー管の中央部からの距離を変えて漏洩 X 線の強度を測定するときの位置関係、(b)十字クルックス管周辺の漏洩 X 線の強度分布 (等強度曲線) を測定するときの座標を示す。十字部分を座標の原点とし、時計回りで θ を定義した。

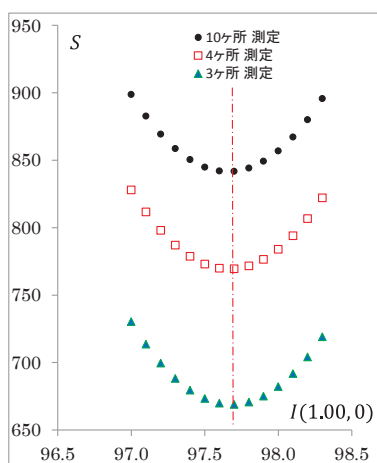


図7 最小自乗法によるデータ解析で、 $I_0(1.00, 0)$ を決定 (本文参照) した。●：10ヶ所測定、□：4ヶ所測定、▲：3ヶ所測定。縦軸は(2)式で示す S であり、横軸は $I(1.00, 0)$ [cps] である。

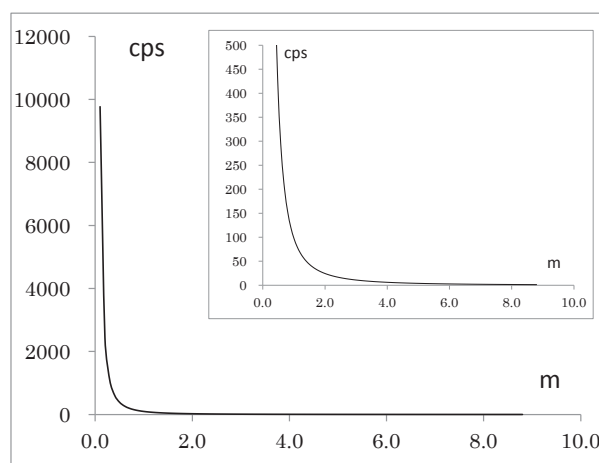


図8 $I_{cal}(r, 0) = I_0(1.00, 0)/r^2$ のグラフ。横軸は距離 [m]、縦軸は強度 [cps] を示す。グラフの中に拡大図を示す。

同じガイスラー管を放射線源として、ガイスラー管中央部からみて $\theta=0^\circ$ 方向で距離 r [m] の任意の位置 [図6(a)] における漏洩X線の強度 (以下、強度) $I(r, 0)$ をもとめてみた。検出の位置分解能を上げるため、GM管の測定ウインドに幅4.0 mmの鉛製のスリットを取り付けて測定した。但し、スリットの縦の長さはウインド直径と同じである。 $\theta=0^\circ$ 方向の10ヶ所 ($r_1=0.30, r_2=0.60, r_3=1.20, r_4=2.20, r_5=3.20, r_6=4.20, r_7=5.20, r_8=6.20, r_9=7.20, r_{10}=8.20$ m) で強度を測定し、これらのデータを最小自乗法で処理して、 $r=1.00$ mの位置における強度の最適値 $I_0(1.00, 0)$ を決定^{脚注2}した。 r_i の位置での測定値 $I_{exp}(r_i, 0)$ と計算値 $I_{cal}(r_i, 0) = I(1.00, 0)/r_i^2$ との差を2乗した値を、 $i=1, 2, 3, \dots, 10$ の総和

$$S = \sum_{i=1}^{10} [I_{cal}(r_i, 0) - I_{exp}(r_i, 0)]^2 \quad (2)$$

でもとめる (図7の縦軸)。このとき、 $I(1.00, 0)$ の値 (図7の横軸) を変化させて S が最小値を示すときの $I(1.00, 0)$ を $I_0(1.00, 0)$ とする。図7の (●) 印のグラフより、 $\theta=0^\circ$ 方向の $r=1.00$ mでの強度の最適値は $I_0(1.00, 0) = 97.7$ cps となった。この値を用いて

$$I_{cal}(r, 0) = I_0(1.00, 0)/r^2 \quad (3)$$

をもとめると、放射線源から8 m以上離れた位置までの強度を連続的に示せた (図8)。

$\theta=10^\circ$ 間隔で測定方向を設定し、特定の方向 θ [°] の $I_0(1.00, \theta)$ を最小自乗法より実験でもとめる場合、各 θ [°] 方向あたり10ヶ所の測定では多くの時間を要するため、何ヶ所の測定で実験の正確さを保持できるかを確認した。(ア)10ヶ所、(イ)4ヶ所、(ウ)3ヶ所と測定する箇所数を変えて、前出のガイスラー管測定のデータを用いて解析した。結果を図7に示す。何れの場合も $I_0(1.00, 0) = 97.7$ cpsの値を得ることができた。これより、4ヶ所 ($r_1=0.30, r_2=0.50, r_3=0.80, r_4=1.10$ m) の測定で θ [°] 方向の距離1.00 mでの強度 $I_0(1.00, \theta)$ [cps] の値を最小自乗法で決定し、 $I_{cal}(r, \theta)$ を強度分布の解析に用いることとした。

形状的に対称性の良い十字クルックス管周囲の漏洩X線の強度分布を実験データに基づいて評価した。但し、実験値は自然放射線差引後の値である。座標の原点とクルックス管の十字を一致させて、電子を放出する陰極部を直角座標の y 軸 (-) 方向の軸上に設置した [図6(b)]。x軸の (+) 方向を $\theta=0.0^\circ$ として、時計回りに $\theta=10.0^\circ$ 刻みで測定した。但し、十字型クルックス管は対称性を考慮して、 $\theta=-90.0^\circ \sim 90.0^\circ$ の角度領域を測定した。クルックス管周囲における強度 $I_{cal}(r, \theta)$ が1000 cpsとなる各 θ 方向での距離 r を計算して、 $I_{cal}(r, \theta) = 1000$ cpsの漏洩X線の強度分布 (等強度曲線) をもとめた。同様にして、

脚注1：図5の測定値の切片が厳密に0とならなかった理由は、ガイスラー管から生じる漏洩X線を点線源とみなしてデータ処理したこと、或いはガイスラー管の両極の中心を点線源とみなして原点としたことやガイスラー管に高電圧を印加した誘導コイルの不安定さなど、測定上の不備に起因する。

脚注2： θ [°] 方向で $r=1.00$ mの位置における強度を直接測定することで、任意の距離での強度 $I(r, \theta)$ の計算は可能だが、精度を上げるため、複数の測定データから最小自乗法で $I_0(1.00, \theta)$ をもとめた。

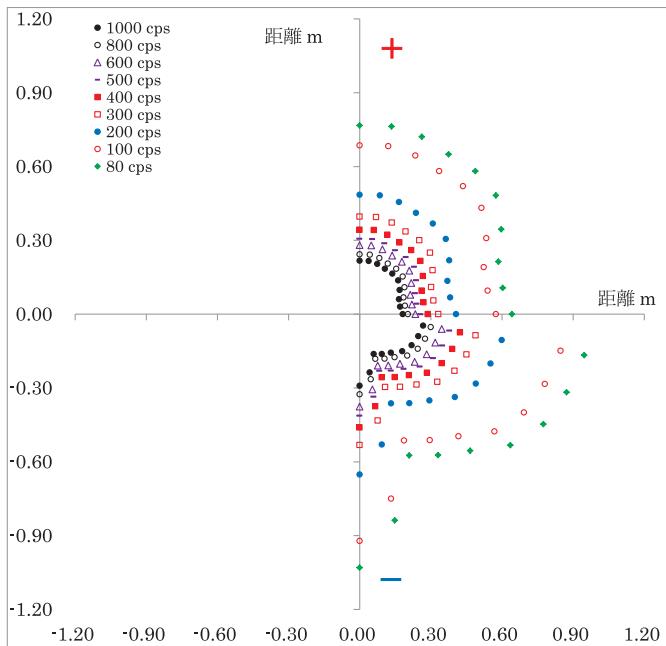


図9 十字クルックス管周辺の漏洩 X 線強度分布。図 6(a) に対応させて表示した。●：1000 cps，○：800 cps，△：600 cps，—：500 cps，■：400 cps，□：300 cps，●：200 cps，○：100 cps，◆：80 cps である。縦軸と横軸はクルックス管十字からの距離 [m] を示す。

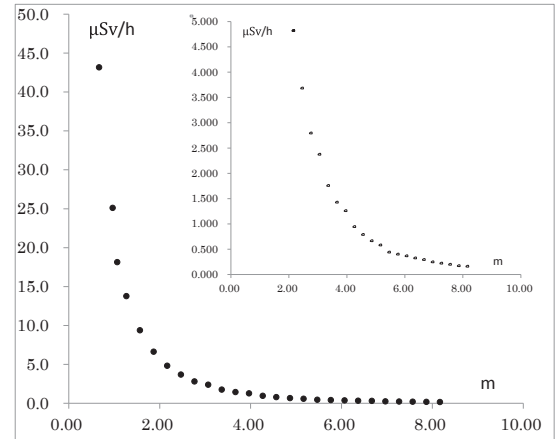


図10 GM管の測定単位を $\mu\text{Sv/h}$ としてガイ斯拉ー管の漏洩 X 線を距離の関数で測定した。グラフの中に拡大図を示す。縦軸は線量当量率 [$\mu\text{Sv/h}$]，横軸は線源からの距離 [m] を示す。

$I_{cal}(r, \theta) = 800, 600, 500, 400, 300, 200, 100, 80$ cps の各強度分布をもとめたものが図9である。アルミニウム（以下、アルミ）製十字の裏側は $\theta = -30.0^\circ$ 近傍の等強度曲線に屈曲点を見出すが、 $-40.0^\circ \leq \theta \leq -90.0^\circ$ の範囲ではほぼ同心円状で等強度であることをモニターできた。 $10.0^\circ \leq \theta \leq 30.0^\circ$ 領域でもほぼ同心円状の強度分布であるが、 $40.0^\circ \leq \theta \leq 70.0^\circ$ 領域では y 軸の同一値でほぼ同じ強度を示した。また、 $80.0^\circ \leq \theta \leq 90.0^\circ$ 領域では突出した極値（強度が高い領域）を見出した。十字クルックス管の漏洩 X 線の強度分布（等強度曲線）を定量的に検証することができた。十字型クルックス管は形状的に、図9の y 軸にほぼ対照的であるので $90.0^\circ < \theta < 270.0^\circ$ の領域も対称的な特徴を示すものと推測するが、測定した領域のみを提示した。

次に、人体への影響を考慮し、単位を線量当量率の $\mu\text{Sv/h}$ に設定して、ガイ斯拉ー管を用いて GM 管による測定をおこなった（図10）。約 1.0 m 離れた地点での漏洩 X 線が約 $20 \mu\text{Sv/h}$ であり、約 7 m 離れれば測定値（自然放射線差引後）で $0.23 \mu\text{Sv/h}$ 程度の値となった。

4. 電離放射線防護の規則について

専門家の立場から電離放射線被曝の防護に関する勧告をおこなっている ICRP の記録⁷⁾をたどると、ICRP publication 13 (1966 年) で教育現場と直接関わる「18 才までの生徒に対しての学校における放射線防護」を公表し、^{脚注3} また、この改訂版として ICRP publication 36 (1982 年) では「科学の授業における電離放射線に対する防護」が提示された。^{脚注4}

脚注3：Publication13には、「学校被曝 (school exposure)」とでもよぶべきこと…、…個々の生徒が受ける年線量が公衆の構成員に対し勧告される線量限度の1/10を越えることはほとんどないであろうような状況をつくることである (pp.3より抜粋)」と記載がある。また、「特定の勧告の望まれない X 線を出す線源」の項で「電子が 5kV 以上の電位で加速される真空管および放電管は、遮蔽を必要とするほどの量の X 線を放出するかもしれないので、サーベイすべきである (pp.10より抜粋)」と勧告している。

脚注4：Publication36では、「B. 生徒に関する線量限度」の項で、「実効線量当量は1年につき 0.5 mSv、目や皮膚のような単一の臓器・組織の線量当量は1年につき 5 mSv」と勧告 (pp.3より抜粋) している。また、「…個々の授業での実験に由来する線量当量は年限度の1/10、すなわち、実効線量当量 0.05 mSv、単一の臓器・組織に対する線量当量 0.5 mSv を越えるべきでない (pp.4より抜粋)」と勧告している。

その後、ICRP publication 60 (1990年)で勧告の内容と構成が大幅に変更され、更には、ICRP publication 103 (2007年)では(序文から抜粋)、

- ・生物学及び物理学の新しい情報と、放射線安全基準の設定の傾向を考慮する
- ・勧告の示し方を改善し、合理化する

これらの主要目的に留意しての勧告がおこなわれた。^{脚注5} この勧告の国内法規への取組み検討に関しては、文部科学省の諮問機関「放射線審議会基本部会」が2010年に中間報告⁸⁾をおこない、この勧告に基づいた国内制度等への採り入れについての案が同基本部会資料第41-2号で公表⁹⁾されている。

漏洩X線を生じる冷陰極管を教育現場で使用して被曝する線量当量の値と、自然放射線被曝や医療行為に伴う被曝、或いは公衆被曝限度の線量当量の値を単純計算で比較してみた。例として、「1m離れた位置で測定した漏洩X線が60 μ Sv/hのクルックス管(以下、Crookes TubeA)」を用いた授業で、Crookes TubeAから1m離れて生徒に15分間観察させたとする。生徒の受講するこの15分間(以下、被曝時間帯)の生徒の被曝線量当量は15.0(=60 \times 15/60) μ Svとなる。但し、教師は器具を操作する必要から、Crookes TubeAにもっと近づいているので被曝線量当量はこれよりも多くなるものと推測する。年間の時間(525,600min.)からみれば、教育現場のこの被曝時間帯は瞬間的な時間帯として捉えることも出来、この被曝がある場合と無い場合での被曝線量当量の単純比をとれば約250[(0.06+15)/0.06]倍となり、避けたいものである。ここで、日常的に生徒が受ける自然放射線[環境庁のデータ¹⁰⁾より、宇宙線0.3mSv/y、食物0.99mSv/y、大地放射線0.33mSv/y、吸入(空気中のラドン等)0.48mSv/yの計2.10mSv/y]を被曝時間帯に換算すると0.060[=2.10 \times 1000 \times 15/(365 \times 24 \times 60)] μ Svとなる。しかし、健康被害の目安の一つとなる年間積算許容量の視点から、例えば、放射線業務従事者に対する線量限度を取り上げて考えると、例えば、放射線業務従事者の中でも被曝を極力避けなければならない妊婦中の女子の2mSv/y(腹部表面)の値と教育現場での被曝時間帯の被曝線量当量を比較すると、0.0075(=15/2000)の微小値となる。一般人の場合、医療診断などによる被曝を年間で積算した値が許容量(例えば、上記の放射線業務従事者の場合、2mSv/y)を越えなければ、健康的には問題はないと経験的に考えられる。故に、教育現場での被曝時間帯での被曝が直ちに健康被害をもたらすとは考え難いと言える。また、医療診断で受ける放射線被曝¹⁰⁾と比較すると、例えば、胸部X線0.06mSvの0.25倍[=15/(0.06 \times 1000)]、歯科X線撮影0.002mSvの7.5倍[=15/(0.002 \times 1000)]、或いはバリウム胃検診3mSvの0.005倍[15/(3 \times 1000)]である。^{脚注6}

冷陰極管(例、クルックス管やガイスラー管)の実験は電子の流れや放電のようすを観察するので、Crookes TubeAを使用すれば、目の水晶体や皮膚への被曝が顕著であると考えられる。次の仮定に基づいて、公衆被曝限度の値を用いた単純計算で概算してみた。特定の臓器の線量限度[ICRPの2007年Publication103勧告(一般公衆)]の①水晶体15mSv/yおよび②皮膚の等価線量50mSv/yと比較すると、

- 仮定1：①毎日、ある環境下で被曝が続いたとする。水晶体の年間被曝限度15.0mSv/yを単純計算して、この被曝限度の時間換算は1.71[=15 \times 1000/(365 \times 24)] μ Sv/hとなる。受講時間帯に対応したこの被曝線量当量とCrookes TubeAの被曝とを比較すれば、約35[=15/(1.71 \times 15/60)]倍となる。
- ②毎日、ある環境下で被曝が続いたとする。皮膚の年間被曝限度50.0mSv/yを単純計算して、この被曝限度の時間換算は5.71[=50 \times 1000/(365 \times 24)] μ Sv/hとなる。受講時間帯に対応したこの被曝線量当量とCrookes TubeAの被曝とを比較すれば、約2.6[=15/(5.71 \times 15/60)]倍となる。

- 仮定2：①水晶体の放射線被曝が授業の、例えば、Crookes TubeAを用いた実験の被曝時間帯(15 μ Sv)だけであった場合、線量当量限度値の約0.0010[=15/(15 \times 1000)]倍となる。
- ②皮膚の放射線被曝が授業の、例えば、Crookes TubeAを用いた実験の被曝時間帯(15 μ Sv)だけであった場合、線量当量限度値の約0.0003[=15/(50 \times 1000)]倍となる。

仮定1および仮定2は通常の生活と比較すれば、共に両極端な設定で現実的ではない。特に、仮定1では何らかの放射線源に日々さらされていることになるので、生徒の生活環境から考えると現実的にはあり得ない。仮定2は、放射線診断或いは放射線治療等の医療行為を一切受けず、また不確定な要素が一切発生しない場合であるが、これも現実的には考え難い。例えば、胸部X線撮影および歯科X線撮影をそれぞれ年1回、生徒が受けたとすれば、医療行為による放射線被曝の線量当量は0.06mSv+0.002mSv=62 μ Svとなるので、Crookes TubeAを用いた実験の被曝時間帯(15 μ Sv)の被曝を足した値77 μ Svと皮膚の線量当量限度とを比較して、0.0015[=77/(50 \times 1000)]倍となる。

脚注5：Publication60において、実効線量当量の値が1.00mSvに変更(pp.56,表6)され、Publication103では、「特別な事情の下では、単年における実効線量のより高い値が許容されることもあり得るが、ただし5年間にわたる平均が年に1mSvを超えないこと(pp.60,表6「計画被ばく状況において勧告された線量限度の値」より抜粋)になった。また、単一の臓器・組織に対する線量当量の値を「目の水晶体15mSv、皮膚50mSv」とした(Publication60のpp.56,同103のpp.60)。

脚注6：医療診断の各検査装置による被曝量は代表的な値を用いた。

放射線被曝限度の医学的に許容されている値と比較すれば、Crookes TubeAによる実験で被曝する線量当量は問題がないかのように感じられる。しかし、ICRP Publication36の「教育現場における生徒たちの放射線被曝に対する考え方」、つまり、

(8) 生徒は正当な理由がないかぎり、電離放射線に被曝すべきでない。被曝を伴う講義実験および生徒実験は、教育課程に適したものであるべきである [Publication36, pp.3の(8)より抜粋]。

(13) 線量当量を年限度以内に保つ確実な方法は、ありうる被曝状況それぞれにおける線量当量を年間を通じて制限することである。それゆえ、個々の授業での実験に由来する線量当量は年限度の1/10、すなわち、実効線量当量0.05 mSv、単一の臓器・組織に対する線量当量0.5 mSv^{脚注5}を超えるべきでないことを勧告する [Publication36, pp.4の(13)より抜粋]。

これら教育における放射線被曝を避けるICRPの基本的な精神を遵守すると、Crookes TubeAのような陰極管による被曝はのぞましいこととは決して考えられないし、この被曝は無視できるものではない。

Crookes TubeAを使用するような実験・観察を国内法令・規則と照らし合わせてみると、厚生労働省「電離放射線障害防止規則（電離則）」¹¹⁾の第15条（放射線装置室）に違反することが指摘できる。つまり、漏洩X線の強度が高い値（例、60 μ Sv）を示すCrookes TubeA（第十五条 二 荷電粒子を加速する装置に相当）のような冷陰極管を使用する場合、電離則で定める20 μ Sv/hの値を超えているので、電離則に基づいた取り扱いが必要である。管理区域に指定し、しかるべき放射線防護に対する措置を実施しなければならない。しかし、教育現場で使用されている一部のクルックス管やスペクトル管、およびガイスラー管のこのような漏洩X線の実態を知らず、また、電離則に基づいた措置もできていないのが実情である。これら教育用冷陰極管の使用に対する教育現場での対策は急務である。

5. 漏洩X線被曝対策の防護ボックスについて

本研究室での放射線防護対策については、例えば、学生実験における β 線の吸収係数実験や粉末X線回折実験において、前者は鉛入りガラス（10¹ mm）および鉛板（1¹ mm）を用いて、後者はX線回折装置そのものがインターロック制御^{脚注7}の安全機構が備わった装置であるので、放射線被曝を受けることはほとんどない。教育実習の予備実験などで冷陰極管を学生が使用する場合、GM管で漏洩X線の有無を確認し、漏洩X線が生じているときは、鉛入りガラスや鉛板を用いて、漏洩X線を完全に遮蔽して実験をおこなっている。しかし、中・高等学校での教育現場ではこのように防護する器具を準備することは予算の面で難しそうである。

放射線の防護の方法として、距離、時間、遮蔽の3原則¹²⁾がある。距離に関しては、既に実験データで提示しているように、例えば、約1.0 m離れた位置で20 μ Sv/h程度の漏洩X線を生じるガイスラー管を使用する場合（図10）、冷陰極管から約7 m離れた位置での観察であれば、0.23 μ Sv/h程度に減衰するので問題はないといえる。時間に関しては、例えば、このガイスラー管を使用（約1.0 m離れた位置で観察）する場合、40秒程度の観察であれば、0.22 μ Sv程度の被曝となり、問題はなさそうである。しかし、約7 m以上離れた位置ではその詳細を観察するにはあまりにも離れすぎた距離であり、また、40秒程度の短時間では1クラス全員が注視して観察はできない。漏洩X線を防護でき、かつ観察できる鉛入りガラスの使用は、観察に相応しいものであるが、高価（例、200×300×12¹ mm、1.5¹ mmのPb板相当で、約16,000円）である。或いは、1.0¹ mm程度の鉛板を用いて漏洩X線を生じる冷陰極管の四方を完全に遮蔽し、この中にCCDカメラで撮影した映像をテレビモニターで観察する方法等が考えられるが、実際の現象を直接観察することにはならない。

防護ボックスとしてこれまでに市販されていたものを試してみた。防護ボックスを使用しないときの漏洩X線が52 μ Sv/h程度（約0.17 m離れた位置で測定した自然放射線差引後の値）のクルックス管を用いた場合、例えば、某メーカーの市販品である10¹ mmの防護ボックス（材質はアクリル樹脂、透明で冷陰極管の様子を観察できるもの）を用いて測定すると、10%程度しか遮蔽（クルックス管とGM管の距離は約0.17 m）していなかった。約47 μ Sv/hが漏れており、その機能を果たしていないことが分かった。そこで試みに、1.0¹ mmの鉛板と鉛ガラス（200×300×12¹ mm、1.5¹ mmPb板相当）を用いて漏洩X線を概ね防護可能な

脚注7：X線回折装置の試料設置室を開放するときはX線発生が「OFF」の状態になり、測定中のみX線発生が「ON」となる制御装置。

教育用防護ボックスを製作した。3^l mm で 25 mm 幅の鉄製アングルを溶接して組立て、正面の窓に鉛ガラスをはめ込んで、その他の壁は 1^l mm の鉛板を用いた（本学の技術センター金工室で製作、写真4）。このX線防護ボックスの中にクルックス管を設置して鉛ガラス窓の外側を測定すると、クルックス管とGM管の距離が約 0.17 m の位置で約 0.21 $\mu\text{Sv/h}$ であった（表2）。このX線防護ボックスを中学校の実際の授業で使用してもらった。電子レベルの物理を学ぶ導入でクルックス管による電子線とその特性現象を、安全に直接観察でき、教育効果が高まった、と好評であった。教育現場での生徒用観察教具として使用できることを示すことができた。

6. 教育現場での簡易な漏洩X線のモニターについて

教育現場において理科の授業で使用できる予算は限られており、高価なサーベイメータを中・高等学校で購入することは実現し難い。そこで、教育現場で使用されている教材を活用して、冷陰極管からの漏洩X線の有無を簡便に検出する方法¹³⁾を確認できたので提示する。使用するものは、箔検電器、塩化ビニル製パイプ（以下、塩ビパイプ）とフェルト布およびアルミ箔である。箔検電器の構造だと金属板が天井を向いているので検出効率が低くなるので、アルミ箔を成形し、箔検電器の金属板に取り付けて検出効率を高めた（写真5, 6, 7）。金属板とアルミ箔を密着させて両者間に隙間ができないようにした。実験に用いたクルックス管は約 0.4 m 離れた位置で測定して約 47 $\mu\text{Sv/h}$ の漏洩X線を示したものを使用した。写真5に示すように、このクルックス管と箔検電器を配置し、両者間の距離を約 0.4 m とした。放射線の線量当量率はGM管で測定した。測定手順は次の通りである。

- i) アルミ箔を写真5, 6のように成形して箔検電器の金属部分に密着する。アルミ箔がガラス部分に接しないように注意する。
- ii) 塩ビパイプをフェルトで摩擦して、塩ビパイプに（-）電荷を付着する。
- iii) この塩ビパイプを箔検電器の金属板およびアルミ箔部分に接触させて、箔検電器の2枚の箔が開くようにする。箔検電器内は（-）電荷のみである [写真6(a)]。

表2 防護壁の性能についての測定値

条件	5回測定平均 $\mu\text{Sv/h}$	自然放射線差引後 $\mu\text{Sv/h}$	遮蔽率 %
自然放射線	0.049		
遮蔽無し	52.0	52.0	
某市販防護ボックス	46.9	46.9	9.9
製作した防護ボックス	0.205	0.156	99.7

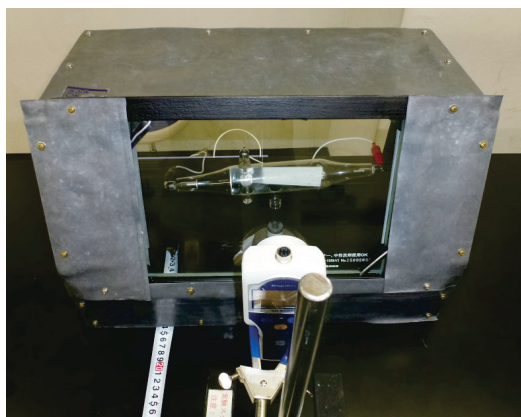


写真4 製作した防護ボックス

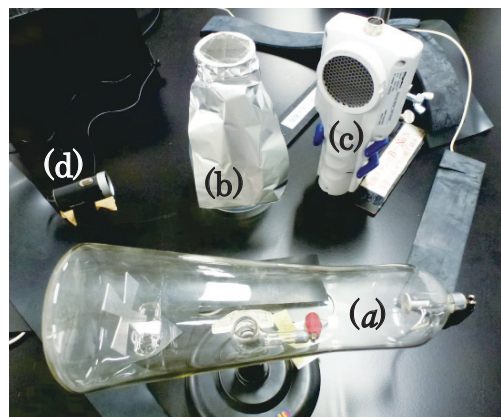


写真5 冷陰極管からの漏洩X線の有無を測定する簡易検出。(a)十字クルックス管、(b)箔検電器にアルミ箔を取り付けた検出器、(c)GM管。(d)CCDカメラ。

iv) この状態の箔検電器を検出するクルックス管の前に設置する。

v) 誘導コイル等でクルックス管に高電圧を印加 (スイッチ ON) する。

写真 6(a) (b) が (-) 電荷を箔検電器に帯電させたときの 2 枚の箔の開きを示している。自然放射線 (約 $0.05 \mu\text{Sv/h}$) のみでは 120 秒経過してもこの状態に変化はなく 2 枚の箔は開いた状態のままであった。しかし、漏洩 X 線を生じるクルックス管では写真 5 のように約 40cm 程度離れた位置で、クルックス管を作動させると、2 枚の金属箔は徐々に閉じてくるようすが観察できた。約 120 秒経過すると写真 7(a) (b) のように 2 枚の箔は閉じた状態となった。ここで、i) の箔検電器の金属板に密着させるアルミ箔の成形、或いは金属板の密着の仕方、この時間は異なる。この現象は光電効果の一種で、光電子が金属から放出されて現象が生じると考えられる。漏洩する放射線の線量当量率を定量的に測定できるものではないが、漏洩 X 線が発生しているか、否か、の目安を簡単に得ることができる方法であることを確認できた。

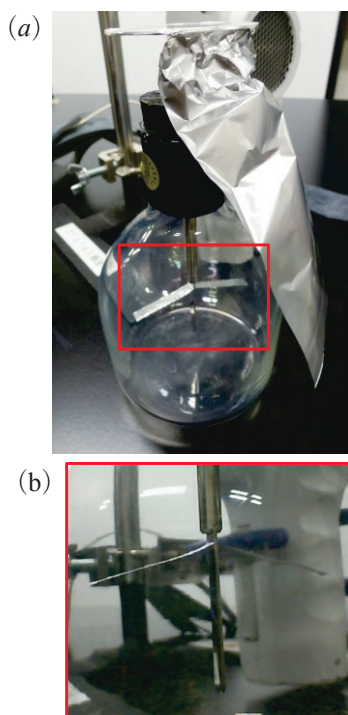


写真 6 (a)測定前の箔検電器。
□を拡大した写真が(b)である。
(b)箔検電器の 2 枚の箔が開いた状態の拡大写真。

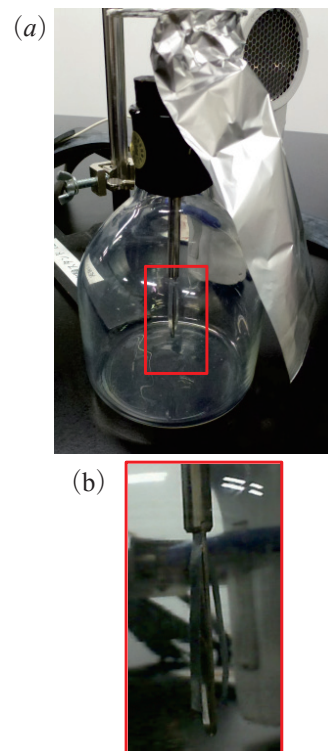


写真 7 (a)測定後の箔検電器。
□を拡大した写真が(b)である。
(b)箔検電器の 2 枚の箔が閉じた状態の拡大写真。

7. まとめ

教材を提供している会社の中には、最近、漏洩 X 線を生じない工夫を施した冷陰極管を販売しているところもある。しかし、各学校で理科の教材に費やせる予算に限りがあるため、旧式の冷陰極管を使用せざるを得ない事情がある。冷陰極管の中には漏洩 X 線を生じさせるものがあり、この漏洩 X 線を生じる教具で実験をおこなっている実情が教育現場にはある。理科教師がこの漏洩現象を知らないで教育をおこなっている現状が、また、生徒たちに対してこのような現象の説明が全くなされていないことが問題であり、教育現場での改善がとめられる。

身の周りの環境では自然からの放射線および食物に含まれる放射線など [例、大地放射線、宇宙放射線、吸入 (空気中のラドン、或いは花火や肥料等の同位体 ^{40}K など) の放射線等]、日常的に放射線被曝にさらされていること、更には医療行為における被曝など、日常生活では常に放射線と深い関わりがあることを、生徒たちに理解させる必要がある。これを前提として、冷陰極管から生じる漏洩 X 線で被曝する可能性があることを生徒たちに正確に伝え、この被曝を防護する手段も実験で示すことが、この問題の解決につながるものと考えられる。ICRP が勧告で示しているように、将来ある子供たちへの放射線被曝は可能な限り回避することが最も大切であることを理科の教育の基本理念に据えて、教育実践することが必要である。

謝辞

冷陰極管を快く貸出許可して頂いた北九州市立吉田中学校、同 木屋瀬中学校、志免町立志免東中学校、同 志免中学校に対して、また、本学の理科教育教室に心からお礼を申し上げます。また、卒業論文の課題として取り組み、データ収集や解析の一部をおこなった研究室の南大都君と潟上陽平君に、また実験に協力してくれた研究室の嶋田開君と古川智彬君に感謝します。尚、文部科学省平成 24 年度国立大学法人施設設備費補助金「質の高い理科教育支援システムの整備」の補助を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) ICRP (国際放射線防護委員会) Publication 13 (1966)
<http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP+Publication+13>
- 2) 公表年度の古い報告書は、例えば、
「放電管からの制動放射」保健物理, 河野宗治, 越島得三郎, 第 10 巻 (1975) pp.87
「理科教育における放射線障害防止に関する研究 (予報)」新潟県立教育センター研究報告, 豊原久夫, 第 9 号 (1976) pp.1
- 3) 例えば,
「学校教育における放電管の使用状況と放射線の管理のあり方」物理教育, 草間朋子, 第 35 巻 第 3 号 (1987) pp.150
「クルックス管から漏洩する X 線の実態とその対策」神奈川県立教育センター研究収録, 大森 儀郎, (1994) pp.21-24
「放射線の影響と防護を理解するために」物理教育, 草間朋子, 第 44 巻第 4 号 (1996) pp.419
「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」日本放射線安全管理学会誌, 第 10 巻, 第 1 号, (2011) pp.40 など
- 4) 首相官邸 東日本大震災への対応～首相官邸災害対策ページ～
http://www.kantei.go.jp/saigai/senmonka_g60.html
放射線教育支援サイト (公益財団法人 日本科学技術振興財団)
<http://www.radi-edu.jp/>
- 5) 例えば,
<http://www.env.go.jp/chemi/rhm/kisoshiryo/attach/201510mat1-01-40.pdf>
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=09-04-02-06
- 6) 例えば,
「医療被曝における Gy と Sv の考え方」日本放射線技術学会雑誌, 加藤和明, Vol.62, No.8, (2005) pp.1073
「実効線量を理解しよう」日本放射線技術学会雑誌, 五十嵐隆元, Vol.67, No.3, (2011) pp.260
「被ばく線量と個人線量計」日本放射線技術学会雑誌, 松本進, Vol.69, No.7, (2013) pp.795
- 7) 公益社団法人日本アイソトープ協会のホームページに日本語版 PDF で公開されている
<http://www.jrias.or.jp/books/cat/sub1-01/101-14.html>
- 8) http://www.inaco.co.jp/isaac/shiryo/pdf/ICRP2007kankoku_Pub103_shingi.pdf
- 9) <http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000001w5ek-att/2r9852000001w5ss.pdf>
- 10) 例えば, 環境庁データ (自然放射線被曝)
<http://www.env.go.jp/chemi/rhm/kisoshiryo/attach/201510mat1s-01-6.pdf>
- 11) <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S47/S47F04101000041.html>
- 12) 例えば,
<http://www.020329.com/x-ray/bougo/contents/chapter2/2-1.html>
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=09-04-01-09
- 13) 例えば, 3) の 2 番目の文献およびその中の参考文献

附記：本論文は、福岡教育大学紀要第 66 号, 第 3 分冊 (2017) pp.1 ~ 11 に記載されたものを, リポジット
り編集の査読を経て新たに掲載されるものである。

