

冷陰極型クルックス管から漏洩するX線軽減化の試み

Attempt to reduce the leaking X-ray from cold-cathode type crookes tubes

宇藤 茂憲

Shigenori UTOH

福岡教育大学 教育学部 理科教育講座

Science Education Course, Department of Education, University of Teacher Education Fukuoka

(平成30年10月1日受付, 平成30年12月3日受理)

キーワード: クルックス管, 冷陰極管, 漏洩X線, 軽減化, 誘導コイル, 抵抗バイパス, 高電圧印加

冷陰極型クルックス管(以下, Cr管)から漏洩するX線(以下, 漏洩X線)を軽減するため, また漏洩するCr管を非漏洩化する印加電圧の条件を検討するため, 高電圧の発生原理の異なる2種類の電源を用いて, Cr管の非漏洩化実験を試みた。Cr管はメーカーによって製造条件も異なり, 更に保存環境や使用状況によってCr管の状態も違うので, 本報告では漏洩X線の軽減化の方向性を示すことに努めた。尚, 対象とするCr管は標準型および電場印加型に限定した。

1. はじめに

中・高等学校(以下, 教育現場)で使用される冷陰極管(クルックス管・スペクトル管・ガイスラー管など)からの漏洩X線についての報告は, 学会誌および地域理科研究会などで国内では約40年以上前まで遡ることができる。¹⁾しかしながら, 漏洩X線の発生や低線量被曝の有無の確認, 或いは放射線防護の教育現場への周知徹底には至っておらず, 教育現場における生徒たちへの説明も取り残されたままのようである。その上, 数keV~数十keVの低エネルギー放射線の検出, 更にパルス状に発生する放射線の測定は, 実験そのものが特殊なもので, Cr管からの漏洩X線対策の取組みを教育現場のみでおこなうことは容易ではない。

本学近郊の教育現場での漏洩Cr管の実態調査および本現象に関わる理科教師の意識調査などをH27年からH30年にかけて本研究室でおこなってきた。¹⁾これらの結果を踏まえて, 教育現場で生徒や理科教師がより安全に安心して実験できるようなCr管の漏洩X線対策を最優先事項に据えて, 幾つかの試みをこれまでにこなってきた。²⁾これらの取組みで得た成果の概要を報告する。

2. 実験方法

本報告では,

(i) 誘導コイルでパルス状に出力する高電圧をCr管に印加するときの漏洩X線の軽減化
(ii) 一定値で出力する直流(DC)高電圧電源(以下, 平滑高電圧電源)でCr管に印加し, 漏洩X線なしで発光させる適正電圧の検証

をおこなった。(i)は耐高電圧用抵抗をCr管に並列に接続(以下, 抵抗バイパス法)し, Cr管内に流れる電流(加速してガラスや電極に衝突する電子)を減少させて, Cr管からの漏洩X線の強度を抑制する方法である。通常, Cr管の高電圧電源として教育現場では誘導コイルが使われているので, 誘導コイルを使用したCr管の漏洩X線軽減化対策である。(ii)は平滑高電圧電源でCr管に印加したときの電圧値とCr管中の電流値および漏洩するX線強度との関係より, 漏洩X線なしでCr管が発光する適正な印加電圧範囲の検証である。

抵抗バイパス法を写真1(a)に示す。誘導コイルとしてケニス製ID-10を用いた。ID-10の電極間距離を40mmに固定し, 出力増加ダイヤルは最低に設定して測定した。また, 平滑高電圧電源[関西電子製

KEM30-0.33P/24 (出力 10 W で 0~30 kV および 0~0.33 mA 可変) : 以下, KEM30] の出力電圧モニタおよび電流モニタ用に直流電圧計 (横川電機製 2051 と Simadzu 製 MP-41) を接続した (写真 2)。KEM30 の稼働用 DC24V 電源にスイッチング AC アダプタ (Linkman ATS065T-A240-T, 出力 24V/2.7A) を用いた。ここで, KEM30 は回路上の可変抵抗 (5 kΩ) で電圧 [kV] を調整し, 設定した電圧を被測定体に印加したときに流れる電流値もモニタできるコッククロフト・ウォルトン回路タイプの平滑高電圧モジュールである。

Cr 管は, 本学所有 (理科教育教室と物理学教室) のものに加えて近郊の中学校から借受けた。測定に用いた Cr 管は標準型と電場印加型で, 約 40 年前の Cr 管から最近のものまで購入時期は様々である。標準型 Cr 管は電子の流れを観察するのみであるが, 磁石を近づけることで電子線の磁場の影響も測定できる [写真 3(a)]。電場印加型 Cr 管は電子線を流す 2 つの電極以外に, 電子線に電場を印加できる 2 つの電極を備えたものである [写真 3(b)]。Cr 管はガラスとアルミニウム (以下, アルミ) 製電極で構成されていること以外, 製造の詳細 (例, ガラスの種類と厚みおよび電極などへの塗布物および封入ガスや圧力など) は公表されていない。陰極から発生した電子が高電圧で加速され, これがガラスや電極に衝突して X 線が発生する。Cr 管内で生じた X 線はガラスで吸収され, ガラスを透過した X 線が Cr 管外へ放出されて漏洩 X 線となる。ある値以上の高電圧を Cr 管に印加することで, シリコン (Si) とアルミの特性 X 線 (κ_α はそれぞれ 1.74 keV, 1.49 keV) および制動 (連続) X 線が Cr 管から漏洩すると考えられる。

漏洩 X 線の検出には, リガク製 Get Smart

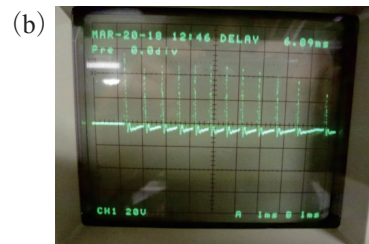
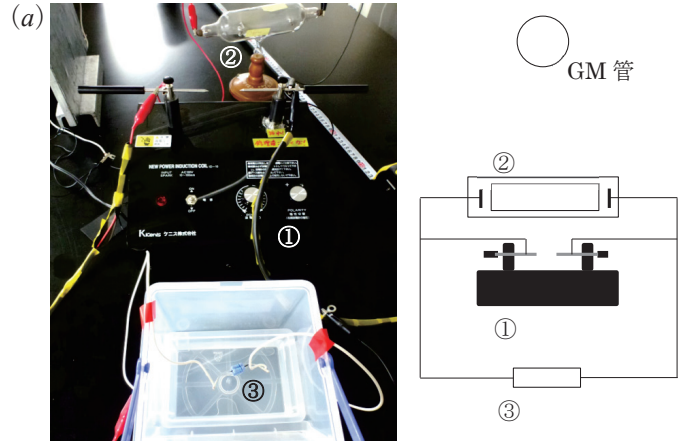


写真 1 (a) 誘導コイルに並列に接続した抵抗バイパス法の測定。右図は概念図。
①誘導コイル, ②Cr 管, ③絶縁 (シリコン) オイル中の耐高電圧抵抗
(b) 誘導コイルパルス発振のオシロスコープ画面 (10³:1 の抵抗分圧で誘導コイル印加電圧を測定)

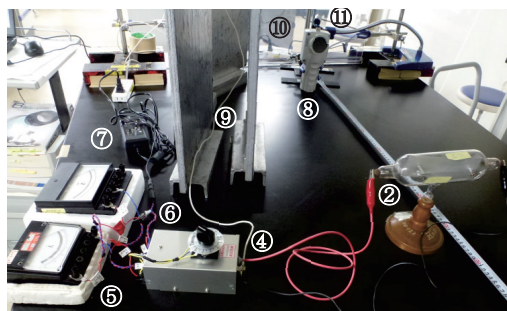


写真 2 平滑高電圧電源 (印加電圧と電流の各モニタ付) による測定

② Cr 管, ④ 高電圧モジュール (ダイヤルは電圧調整用 5kΩ 可変抵抗), ⑤ 印加電圧値をモニタする電圧計, ⑥ 電流値をモニタする電圧計, ⑦ 高電圧モジュール用の DC24V 電源, ⑧ GM 管, ⑨ 1^l mm 鉛板防護壁, ⑩ 鉛入塩化ビニル防護壁, ⑪ 記録用 CCD カメラ

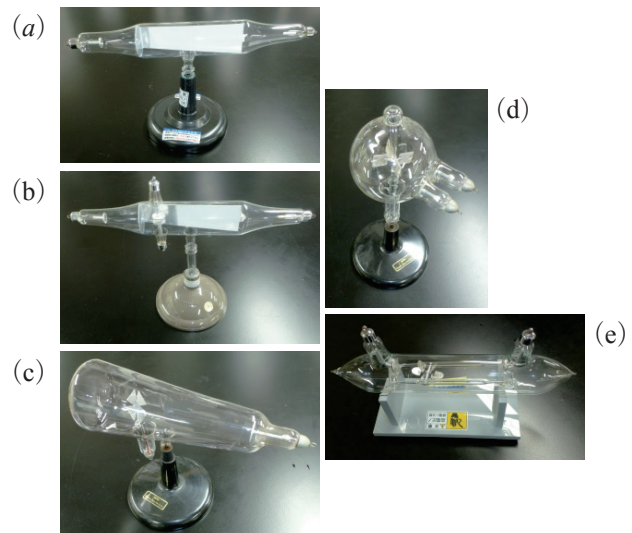


写真 3 各種 Cr 管

(a) 標準型 Cr 管, (b) 電場印加型 Cr 管, (c) 十字 Cr 管, (d) 羽根車回転型 Cr 管, (e) 羽根車移動型 Cr 管

(検出エネルギー幅は 5 keV~3 MeV) のガイガミューラーカウンタ (以下, GM 管) 機能をサーベイメータとして使用した。この Get Smart は, シンチレーション検出部を本体に接続することで, エネルギー分布を検出できるマルチチャンネルカウンタとしても測定できる。X 線の強度は, 人体への影響を反映した 1 cm 線量当量率 (以下, 線量当量率) の単位 (例, $\mu\text{Sv/h}$) で測定した。20 秒間で $\mu\text{Sv/h}$ に変換する設定で測定をおこなった。一定時間を経た後の $\mu\text{Sv/h}$ の値を記録してその再現性を確認した。Cr 管の中央部から GM 管までの距離を 70 cm として測定した。尚, Get Smart の測定精度は, 一般財団法人日本品質保証機構計量計測センター (以下, JQR) の校正証明書で確認した。誘導コイルからはパルス状高電圧 [写真 1(b)] が生じるため, Cr 管からパルス X 線が発生する。このパルス X 線に対して本測定で用いた GM 管の検出効率は低くなるので, 誘導コイルを電源とした測定では定性的な傾向を検証することになる。

高電圧およびインパルス負荷に優れているプレート型抵抗 [高電圧用厚膜抵抗器, 2W10M Ω : 以下, A タイプ] と円柱型抵抗 [塗装絶縁形耐サージ抵抗器, 3W1M Ω : 以下, B タイプ] を測定に用いた。これらの抵抗の組合せで高電圧抵抗の値を合成し (表 1), 絶縁オイル (シリコンオイル TSF451-10) に浸して実験した [写真 1(a)]。

3. 実験結果

誘導コイルによる抵抗バイパス法の結果を図 1(a) (b) に示す。誘導コイルのみで Cr 管に印加したときの漏洩 X 線の線量当量率の値は, 図 1(a) の右端 (実線で囲んだ領域) に示す。抵抗バイパス法で抵抗の値を 20M Ω から表 1 に基づいて減少させていくと, 何れの Cr 管からの漏洩 X 線の線量当量率は徐々に減少 [図 1(a)] した。表 1 の番号 6, 7, 8 の抵抗のときの拡大図を図 1(b) に示す。抵抗値が 0.33M Ω および 0.25M Ω 以下では, 何れの Cr 管も自然放射線の線量当量率 (本報告では, 0.06 $\mu\text{Sv/h}$ とした) 程度となった。^{脚注} これらの結果より, 誘導コイルを使用した Cr 管の非漏洩化対策の方向性を示せたと考えている。尚, GM 管での測定ではあるが, 抵抗バイパス法で自然放射線レベル (エネルギー

表 1 測定に用いた耐高電圧抵抗器の組合せと抵抗値

番号	合成抵抗値 [M Ω]	規格抵抗 [M Ω] の組合せ
1	19.90	Aタイプ10M Ω を2本直列接続
2	9.97	Aタイプ10M Ω を1本接続
3	4.50	Aタイプ10M Ω を2本並列接続
4	2.29	Bタイプ1M Ω を2本直列接続
5	1.00	Bタイプ1M Ω を1本接続
6	0.50	Bタイプ1M Ω を2本並列接続
7	0.33	Bタイプ1M Ω を3本並列接続
8	0.25	Bタイプ1M Ω を4本並列接続

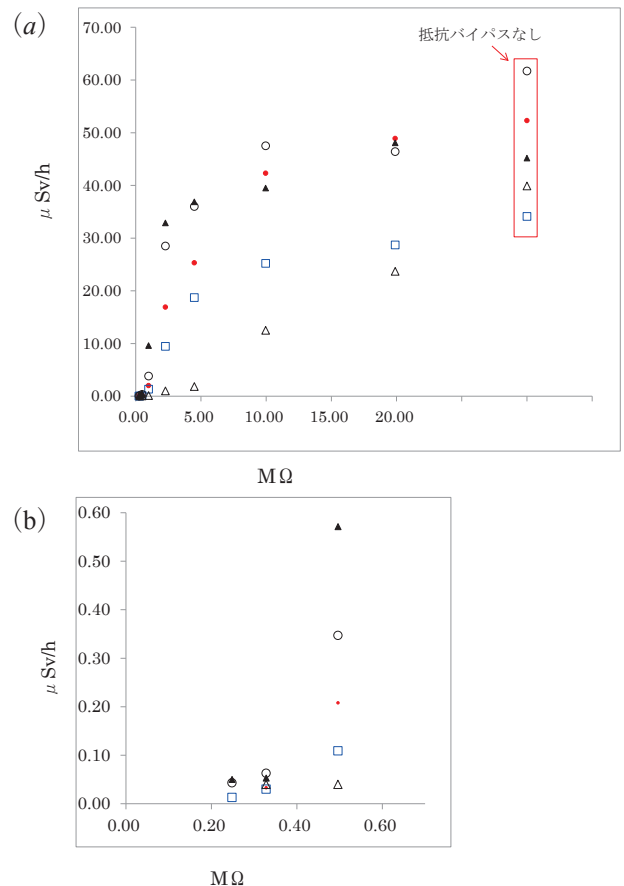


図 1 (a) 誘導コイルに並列に接続した抵抗バイパス法の測定結果。縦軸は漏洩 X 線の線量当量率 [$\mu\text{Sv/h}$] の変化の傾向を示す。横軸は耐高電圧抵抗値 [M Ω]。抵抗の組合せは表 1 に示している。図中の赤線で囲まれた値は, 誘導コイルのみで Cr 管に高電圧印加したデータ。
(b) 図 1(a) に示す 0.5 M Ω 以下の拡大図。縦軸と横軸の単位は (a) と同じ。
ここで, ●: 標準型 Cr 管 (約 40 年前購入), ▲: 標準型 Cr 管 (1 年前購入), □: 電場印加型 Cr 管 (約 10 年前頃購入), △: 電場印加型 Cr 管 (4 年前購入), ○: 標準型 Cr 管 (購入時期不明)。

脚注: 本報告では標準型および電場印加型に Cr 管を限定したが, 羽根車回転型や羽根車移動型 Cr 管 [写真 3(d) (e)] に対しても, 周辺中学校から借受けた Cr 管を調べるとほぼ同様の結果を得ることができた。²⁾ しかし, 十字 Cr 管 [写真 3(c)] に関しては, 0.25M Ω の並列バイパス抵抗法でも脚注の表に示すように自然放射線の線量当量率の約 2 倍から約 50 倍の値 (本報告で用いた GM 管の数値による) を示すこともあった。今後, 更なる検証が必要である。

番号	誘導コイルのみで電圧印加漏洩 X 線 [$\mu\text{Sv/h}$]	0.25M Ω 抵抗バイパス法漏洩 X 線 [$\mu\text{Sv/h}$]	電極間距離 + ダイヤル目盛	減少割合 [%]
1	62.1	0.118	40 mm + 11 目盛	0.19
2	61.3	3.13	40 mm + 6 目盛	5.11
3	62.4	2.51	40mm + 0 目盛	4.02
4	27.4	0.066	40 mm + 0 目盛	0.24

領域は異なる)と同程度(約0.060 $\mu\text{Sv/h}$)まで抑止できているので、0.33M Ω ~0.25M Ω 程度の抵抗値で標準型や電場印加型Cr管の非漏洩化をほぼ実現できていると思われるが、パルスX線の検出に適した測定器を用いた追試が必要である。

次に、Cr管に印加した電圧値およびCr管中を流れる電流値をモニタして、Cr管に適した印加電圧の値を平滑高電圧電源で検討した。実験に用いた標準型および電場印加型Cr管と図1で示したCr管との対応を表2に示す。図1(a)(b)の●印で示すCr管の測定データを表3および図3(a)に示す[表3と図3(a)に記載する番号は対応している]。表3に示すCr管に印加した電圧とCr管からの漏洩X線の線量当量率の変化を図2に示す。図3(a)(b)(c)(d)の横軸はCr管に印加した電圧値[kV]を、縦軸にCr管中を流れる電流値[mA]を示している。図3(a)には、Cr管発光の有無と漏洩X線の有無を記載した。点線四角の(i)領域ではCr管は発光しなかった。実線四角の(ii)領域ではCr管は漏洩X線なしで発光した。矢印で示す領域(iii)ではCr管は漏洩X線を伴って発光した。Cr管が漏洩X線なしで発光する領域(ii)の印加電圧と電流の各条件を、図3(a)(b)(c)(d)よりまとめて表4に示す。ここで、図3の(a)と(b)は昇電圧過程で、また同(c)と(d)は降電圧過程で測定した。(c)と(d)の昇電圧過程の測定では電流が不安定だったので降電圧過程の値を示した。標準型および電場印加型Cr管に限定されるが、漏洩X線を伴わないでCr管を発光させるときの印加電圧の適正な範囲を大まかではあるが示せた。この結果を参考にすると、漏洩X線を伴わないでCr管を発光させる1つの方法として、6.0 kV~12.0 kV(10~50 μA 程度)で平滑高電圧電源を使用する場合、例えば、上限12 kV程度で出力1W以下(表4の3番目の数値を用いて計算すると、 $12 \times 10^3 \text{ V} \times 25 \times 10^{-6} \text{ A} \approx 0.3 \text{ W}$ となる)の平滑高電圧電源でCr管に印加すれば漏洩X線を発生させないなど、測定を目安を得ることができる。この平滑高電圧電源での測定は、昇電圧過程でCr管中の電流値が安定しなくなることもあり、また起動時に一定以上の高電圧をCr管に印加しないとCr管が発光しない場合もあるなど、平滑高電圧電源の選択は出力に余裕のある方が望ましいようである。誘導コイルの電極間距離および誘導コイルに付属する出力調整ダイヤルを用いて、電圧制御を正確に誘導コイルでおこなうことは難しいので、提示した測定条件範囲であれば平滑高電圧電源によるCr管の発光実験で漏洩X線の抑止が可能であることを示せた。この結果は、コッククロフト・ウォルトン回路(特殊電気製TOT920:6.5 kV~10.0 kV)でおこなった以前の測定結果²⁾の再現性を確認したことにもなる。尚、平滑高電圧電源の測定においては、JQRの校正保証書に示す性能でGM管測定がおこなえた。

表2 測定に用いた図1のCr管と図3(a)(b)(c)(d)のCr管の対応関係

図3のグラフ記号	対応する図1の記号	Cr管の型式	図3の測定条件
(a)	●	標準型Cr管(約40年前購入)	昇電圧過程
(b)	▲	標準型Cr管(約1年前購入)	昇電圧過程
(c)	□	電場印加型Cr管(約10年前購入)	降電圧過程
(d)	○	標準型Cr管(購入時期不明)	降電圧過程

表3 標準型Cr管に平滑高電圧を印加した測定結果。表中の番号と、図3(a)の図中の番号は対応する

番号	Cr管印加電圧[kV]	Cr管電流[mA]	漏洩X線 [$\mu\text{Sv/h}$]	Cr管の状態
1	3.0	0.0002	0.036	発光しない
2	4.5	0.0003	0.036	同上
3	6.0	0.0013	0.056	同上
4	7.5	0.0059	0.066	漏洩X線なしで発光
5	9.0	0.0073	0.059	同上
6	10.5	0.0092	0.069	同上
7	12.0	0.0119	0.125	漏洩X線を伴って発光
8	13.5	0.0244	1.04	同上
9	15.0	0.0257	3.74	同上
10	16.5	0.0307	12.5	同上
11	18.0	0.0462	35.2	同上
12	19.5	0.0710	80.9	同上
13	21.0	0.2475	224	同上

表4 図3(a)(b)(c)(d)の(ii)領域に示す漏洩X線なしで発光するCr管に印加する電圧領域とそのときの電流値

図3のグラフ記号	印加電圧[kV]	電流[mA]
(a)	7.5 ~ 10.5	0.006 ~ 0.009
(b)	7.5 ~ 9.0	0.030 ~ 0.050
(c)	7.5 ~ 12.0	0.012 ~ 0.025
(d)	6.0 ~ 10.5	0.005 ~ 0.040

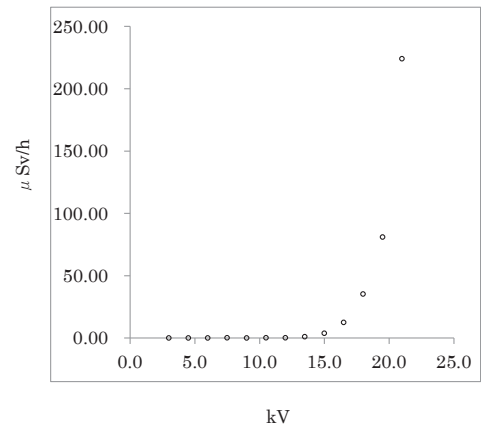


図2 表3に示すCr管に印加した電圧とCr管からの漏洩X線の線量当量率の変化。横軸はCr管への印加電圧、縦軸は漏洩X線の線量当量率を示す。但し、印加電圧の値を変えることでCr管中の電流値も変化する。

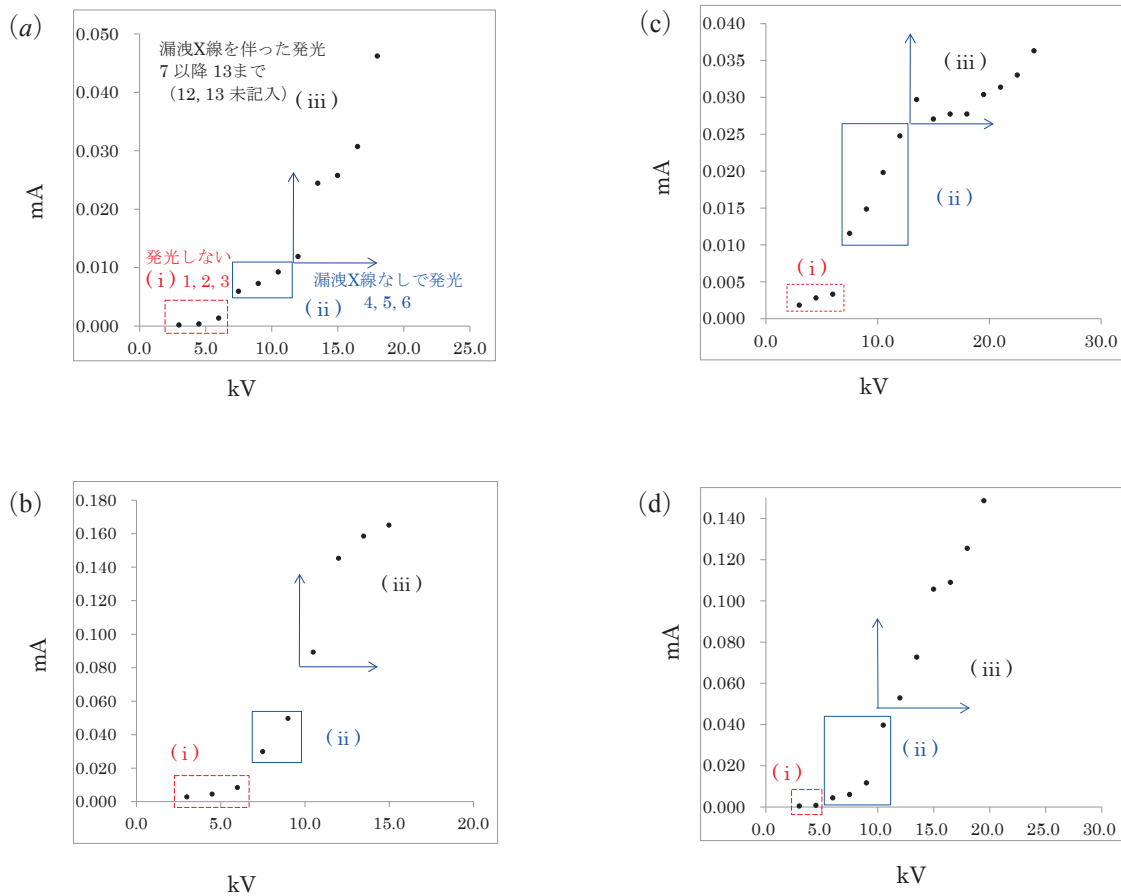


図3 平滑高電圧電源でCr管に印加した電圧およびCr管中の電流を測定したデータ。縦軸はCr管中の電流値 [mA]，横軸はCr管の印加電圧値 [kV]。図中の点線四角で囲んだ領域(i)ではCr管は発光しなかった(暗室においても観察できない)。実線四角で囲んだ領域(ii)は、漏洩X線を生じないでCr管が発光した。矢印の値以上の領域(iii)では、漏洩X線を伴って発光した。(a)標準型Cr管(約40年前購入)を昇電圧過程で測定(表3をグラフにした)、(b)標準Cr管(1年前購入)を昇電圧過程で測定、(c)電場印加型Cr管(約10年前頃購入)を降電圧過程で測定、(d)標準型Cr管(購入時期不明)を降電圧過程で測定。

これらの結果は、X線発生装置の仕組みについての詳しいデータ^{3,4)}、

- (ア) X線発生装置(例、封入管)に一定電圧を印加し、封入管に流れる電流値を変化させて発生するX線強度を測定すると、電流の低下(or上昇)に伴ってX線の強度も低下(or上昇)する。
- (イ) 封入管に流れる電流値を一定にしてCr管に印加する電圧の値を低くすれば、発生する制動(連続)X線の最短波長が長波長側に移動する。つまり、印加電圧の低下に伴って、制動X線のエネルギー値が低下する。

から解釈することができる。(ア)は誘導コイルを用いた抵抗バイパス法の仕組みであり、(イ)は平滑高電圧電源による適正な印加電圧域を示す根拠の1つとなる。Cr管内の電流の低下、或いは印加電圧の低下に伴って、何れもCr管内で発生するX線はガラスを通過し難くなり、漏洩X線の減少や抑止が生じると理解できる。

4. まとめ

Cr管はその種類や製造条件の違いで、また保存環境や使用状況で個々のCr管の状態が異なるため、漏洩X線の制御や抑止の条件を一律的に提示することは難しい。しかし、本報告の結果より、

- (1) Cr管に高電圧を印加する手段として、ほとんどの教育現場で誘導コイルを使用している状況を考えると、抵抗バイパス法による漏洩X線の軽減化の試みは、Cr管を用いた教育をより安全に安心しておこな

う測定の提示となる。

(2) 平滑高電圧電源を用いた測定では、Cr管から漏洩X線を発生させないで測定をおこなう印加電圧範囲の目安を提示できた。

標準型と電場印加型Cr管の制限はあるものの、何れの方法もCr管からのX線の非漏洩化の方向性を示せたと考えている。尚、抵抗バイパス法では、羽根車型Cr管に対しては同じ結果を得たが、十字Cr管の一部は数 $\mu\text{Sv/h}$ 程度（本報告で用いたGM管の数値による）の漏洩X線を観察した（脚注参照）。また、本報告で用いた平滑高電圧電源では、作動しない羽根車型Cr管、或いは十字Cr管で非漏洩の条件を決めにくいものもあったことを付け加えておく。

謝辞

Cr管を快く貸出許可して頂いた北九州市立尾倉中学校と鞍手町立鞍手中学校および本学の理科教育教室に対して、また、測定に協力してくれました研究室の学生に対して、心からお礼を申し上げます。

参考論文等

1) 例えば、

「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

「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 など。その他の報告書については、

「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，九州地区国立大学教育系・文系研究論文集，第5巻（通巻19巻）No.1（2017）pp.1～11 の参考論文を参照

- 2) 「冷陰極管型クルックス管からの漏洩X線の軽減化」，宇藤茂憲，NPO法人放射線フォーラムニュースレター，No.71（2018）pp.8～9
- 3) 「Principles and Practice of X-ray Spectrometric Analysis」のChapter 1のFig. 1.4など，Eugene P. Bertin, Plenum Press.
- 4) 「X線回折要論」の第1章の図1-4など，B. D. Cullity 著，松村源太郎 訳，(株)アグネ