

冷陰極型クルックス管を放射線源とする実験準備の試み

Attempt of experiment preparation using cold-cathode type crookes tubes as a radiation source

宇藤 茂 憲

永吉 将 人

Shigenori UTOH

Masato NAGAYOSHI

福岡教育大学教育学部理科教育ユニット

福岡市立城南中学校

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

Fukuoka City Jonan Junior High School

(令和元年9月30日受付, 令和元年12月12日受理)

キーワード: クルックス管, 漏洩X線, 抵抗バイパス法, 誘導コイル, 平滑高電圧電源, 放射線源, 透過力

冷陰極型クルックス管(以下, Cr管)から漏洩するX線そのものを軽減化して低線量被曝を回避する「電子線観察」の教材として, Cr管を用いる実験の可能性を提示した。また, 漏洩X線を教育現場で「放射線源」として利用するような場合, 中・高等学校における教育現場での実験設備や環境においてどのような手立てが必要か, 或いは実現の可能性など, 実験の準備を試行的におこなって, Cr管の教材として検討すべき点を示した。

1. はじめに

中学校および高等学校の理科の実験で用いる冷陰極型放電管[例, Cr管, スペクトル管, ガイスラー管など]から発生するX線(以下, 漏洩X線)については, 約45年以上も前から学会および地域の理科教育研究会などで指摘され, また報告されてきた。^{1,2)} 本研究室でも, H26年頃から本学所有および本学近郊の中学校から各種Cr管を借受けて, 漏洩X線の検証および教育現場でのCr管の使用状況などを調べ, 公表してきた。³⁾ 更に, Cr管からの漏洩X線による低線量被曝を回避する方法, つまり鉛板や鉛入ガラス, 或いは鉄板などで遮蔽してCr管からの漏洩X線を防護するのではなく, Cr管から発生するX線の強度そのものを軽減化する試みをおこなった。⁴⁾

① 誘導コイルでパルス状高電圧をCr管に印加して作動(教育現場でのCr管汎用実験)する場合, 耐高電圧抵抗をCr管に並列接続(以下, 抵抗バイパス法)し, Cr管内で加速する電子の数(電流値)を減少させて漏洩X線の強度を減らすことができる。Cr管の種類や状態にも依存するので一律的には言えないが, 標準型および電場印加型Cr管では抵抗の値が0.25 MΩ~0.33 MΩ程度で効果的に軽減できた。漏洩X線を生じないCr管に対してもCr管は正常に作動した。

② 平滑高電圧電源(10 W出力)で高電圧を印加してCr管を作動する場合, Cr管に印加する高電圧値およびCr管内の電流値を調整することで漏洩X線の強度を軽減できた。但し, 10 W出力では作動するCr管の種類が限定され, 10 W電源の出力不足によるCr管の動作不安定, 或いはCr管が作動しないものもあった。

熱陰極型クルックス管, 或いは最近では漏洩X線が生じないCr管も市販(例, 高電圧電源の改良など)されており, 旧来からのCr管の使用を避けてこれらを使用すれば, 電子線観察の実験で漏洩X線は生じない。しかし, Cr管を放射線源として理科の実験で利用することはできない。本報告では,

(i)漏洩X線の発生そのものを軽減化したCr管を「電子線観察の教材」とする

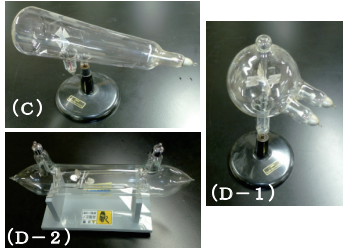
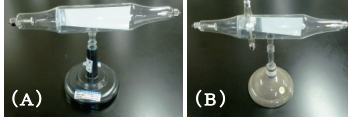
(ii)遮蔽板で漏洩X線を防護したCr管を「放射線源」として利用する実験を準備する

と, 1台のCr管を(i)と(ii)で使い分ける手立てを模索した。教育現場にあるすべてのCr管に対して一律的な有効性の確認にまでには至っていないが, 理科教師や生徒が安全かつ安心して理科の実験をおこなうこ

表1(a) 誘導コイルでCr管に高電圧印加する抵抗バイパス法

抵抗バイパス法の抵抗値を変えてCr管の種類別に漏洩X線の線量当量率を測定した。表中の「%」表示は、測定で用いたGM管の「抵抗バイパス法での線量当量率」を「抵抗バイパス法なしでの漏洩X線の線量当量率」で除した割合を示す。Cr管の種類を (A)標準型, (B)電場印加型, (C)十字型, (D-1)羽根車回転型, (D-2)羽根車移動型 の写真で示す。

標準型Cr管 (A)				電場印加型Cr管 (B)				十字型Cr管 (C)				羽根車型Cr管 (D-1) (D-2)			
Cr管No	[μSv/h]	観察条件	%	Cr管No	[μSv/h]	観察条件	%	Cr管No	[μSv/h]	観察条件	%	Cr管No	[μSv/h]	観察条件	%
11	35.4	α★	100	4	57.0	α★	100	10	53.3	α★	100	6	53.1	α(発光・動作)★	100
1	12.5	α	35	1	31.8	α	56	1	34.8	α	65	1	14.4	α(発光・動作)	27
2	1.12	α	3	2	2.18	α	4	2	2.15	α	4	2	0.576	γ(発光したが動作しない)	1.1
3	0.093	α○	0.3	3	0.114	α○	0.2	3	0.100	α	0.2	3	0.111	γ(発光したが動作しない)	0.21
4	0.043	α○	0.1	4	0.049	α○	0.09	4	0.045	γ	0.08	4	0.038	γ(発光したが動作しない)	0.07
8	45.3	α★	100	9	49.3	α★	100	14	42.4	α★	100	12	0.029	α(発光・動作)	—
1	17.3	α	38	1	2.48	α	5	1	9.63	α(うすい)	23	1	0.043	α(発光・動作)	—
2	0.966	α○	2	2	0.048	γ(点滅)Δ	0.1	2	0.632	γ○	1	2	0.042	α(発光・動作)	—
3	0.080	α○	0.2	3	0.040	γ(点滅)	0.08	3	0.063	γ(うすい)	0.1	3	0.045	α(発光・動作)	—
4	0.042	α(うすい)γ(はっきり)○	0.09	4	0.044	γ(点滅)	0.09	4	0.039	η	0.09	4	0.041	α(発光・動作)	—
5	52.7	α★	100	1	47.9	α★	100	3	53.5	α(うすい)γ(はっきり)★	100	18	5.77	α(発光・動作)	100
1	0.644	γ○	1	1	9.44	α	20	1	18.1	γ	34	1	0.281	α(発光・動作)	5
2	0.065	γ(点滅)Δ	0.1	2	0.414	α(うすい)	0.9	2	0.709	γ(うすい)○	1	2	0.057	α(発光・動作)	1
3	0.049	η	0.09	3	0.048	γ○	0.1	3	0.048	η	0.1	3	0.042	α(発光・動作)	0.7
4	0.032	η	0.06	4	0.044	γ○	0.09	4	0.036	η	0.07	4	0.042	α(発光・動作)	0.7
16	16.6	α	100	15	51.9	α★	100	2	52.4	α(うすい)γ(はっきり)★	100	19	0.054	α(発光・動作)	—
1	9.90	α	60	1	17.44	α	34	1	47.9	γ	91	1	0.042	α(発光・動作)	—
2	0.397	γ○	2	2	0.864	α○	2	2	5.39	γ(うすい)	10	2	0.046	α(発光・動作)	—
3	0.045	γ(うすい)○	0.3	3	0.067	α(うすい)○	0.1	3	0.346	η	0.7	3	0.042	α(発光・動作)	—
4	0.040	γ(極めてうすい,点滅)	0.2	4	0.049	α(うすい)○	0.09	4	0.055	η	0.1	4	0.038	α(発光したが動作しない)	—
7	46.4	α★	100	7	1.41	α(うすい)	3	18	53.5	α(うすい)γ(はっきり)★	100	17	54.1	γ★	100
1	1.41	α(うすい)	3	1	0.129	γ○	0.3	1	34.4	γ(うすい)	64	1	27.0	γ	50
2	0.129	γ○	0.3	2	0.040	γ(うすい)	0.09	2	3.82	γ(うすい)	7	2	2.09	γ(うすい)	4
3	0.040	γ(うすい)	0.09	3	0.035	η	0.08	3	0.178	γ(うすい)Δ	0.3	3	0.194	γ(極めてうすい)Δ	0.2
4	0.035	η	0.08	4	0.035	η	0.08	4	0.043	γ(極めてうすい)Δ	0.1	4	0.043	η	0.1



※参照 <観察条件>
 α 天井照明ONでみえる
 β 天井照明ONでみえない
 γ 天井照明OFFでみえる
 η 天井照明OFFでみえない
 ☆印：放射線源可 ○印：電子線観察可 Δ：電子線観察可だが、見難い
 ここで、%は「バイパス抵抗」なしを100とした各線量当量率の割合

と、つまり低線量被曝を極力回避することを最優先事項に据えて取り組んだ。脚注1

2. 実験方法

本学で所有するCr管と本学近郊の3中学校から借受けたCr管の計19台(標準型4台, 電場印加型5台, 十字型6台, 羽根車型4台)を測定に用いた[表1(a)(b)]。個々のCr管の製造会社(例えば, 製造法や設定条件)や状態(例えば, 経年・使用・管理の各状況)を特定するのは難しい。Cr管の一般的な型

表1(b) 平滑高電圧電源(10W出力)でCr管に高電圧印加電子線観察のCr管および放射線源のCr管としての漏洩X線の線量当量率を検出した。○印：使用可, ×印：使用不可。(新)は5年以内, (中)は6年~約10年以内, (古)は約11年以上を示す。

Cr管No	Cr管型式	[kV]	[mA]	[μSv/h]	電子線観察	電子線観察条件	放射線源	[kV]	[mA]	[μSv/h]
11	標準型(新)	7.5	0.009	0.041	○	α	○	20	0.13	181
8	標準型(中)	7.5	0.005	0.046	○	α(うすい)γ	×	—	—	—
16	標準型(古)	11.4	0.002	0.056	○	γ	▽(不安定)	19	0.11	198
5	標準型(古)	12.0	0.005	0.425	○	γ	○	18	0.28	207
4	電場印加型(中)	6.0	0.027	0.037	○	α	×	—	—	—
9	電場印加型(中)	3.8	0.052	0.040	○	α(点滅)	×	—	—	—
1	電場印加型(古)	9.0	0.009	0.042	○	α	×	—	—	—
15	電場印加型(中)	11.4	0.002	0.102	○	α(うすい)γ	○	25	0.01	151
7	電場印加型(中)	—	—	—	×	動作不安定	×	—	—	—
10	十字型(中)	7.5	0.048	0.041	○	α	×	—	—	—
14	十字型(中)	7.6	0.019	0.046	○	α(うすい)γ	×	—	—	—
3	十字型(中)	11.7	0.033	1.02	○	γ	○	15	0.11	60
17	十字型(古)	15.0	0.005	6.29	×	γ(うすい)	○	25	0.01	238
2	十字型(古)	12.0	0.056	10.4	×	γ	×	—	—	—
13	十字型(中)	—	—	—	×	—	○	23	0.01	208
19	羽根車移動型(不明)	3.5	0.330	0.043	×	β発光するが発動しない	×	—	—	—
18	羽根車回転型(古)	3.9	0.330	0.048	○	α(発光も回転もする)	×	—	—	—
6	羽根車回転型(古)	—	—	—	×	発光も回転もしない	×	—	—	—
12	羽根車移動型(不明)	—	—	—	×	発光も回転もしない	×	—	—	—

脚注1：Cr管からの漏洩X線の調査を地域的に拡げて、実態把握・啓発的活動や改善策の検討などの取り組みもおこなわれている。⁵⁾しかし、未だCr管からの漏洩X線を知ることのない理科教師がいること、またCr管の実験で低線量被曝回避への改善も進んでいない。非漏洩Cr管が漏洩化するメカニズムなどの探求、或いは漏洩X線強度の正確な測定を目指すことに軸足を置くのではなく、本活動はCr管の教材としての在り方を模索することにある。

式と購入したおよその時期を表1(b)に示す。

Cr管に高電圧を印加する電源に、誘導コイル(ケニスID-10)と平滑高電圧電源[関西電子工業KEM30-0.33P/24(出力10Wで0~30kVおよび0~0.33mA可変)]を使用した。^{脚注2}誘導コイルの電極間距離は全ての実験で40mmとし、^{脚注3}強度増加ダイヤルを最低に設定して測定した。KEM30はコッククロフト・ウォルトン回路タイプの平滑高電圧モジュール電源で、可変抵抗5kΩを用いてCr管に印加する高電圧の値を調整し、この電圧値をCr管に印加したときのCr管内に流れる電流値もモニタできる。直流電圧計(横川電機2051 class1.0)で計測(写真1)し、印加電圧値とCr管内の電流値を換算した。KEM30の稼働用DC24V電源にスイッチングACアダプタのLinkman ATS065T-A240-T(出力24V/2.7A)を用いた。

ガイガミューラカウンタ機能を有するリガク製のサーベイメータGet Smart(検出エネルギー幅は5keV~3MeV:以下,GM管)で漏洩X線の強度を計測した。このGM管は、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の測定も可能である。X線の強度は、人体への影響を反映した1cm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秒間の変換設定で $\mu\text{Sv/h}$ の平均値をもとめ、それらの再現性を確認した。各種Cr管の正面中央からGM管までの距離を30cmに統一して漏洩X線を測定した。尚,GM管の測定精度は、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)で校正済みである。平滑高電圧電源でCr管に高電圧を印加して得た線量当量率はJQRで保障された値を示す。しかし、誘導コイルはパルス状高電圧を発生するので、Cr管からはパルス状のX線が生じる。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。誘導コイルを電源としたCr管の測定では参考値として提示し、定性的な傾向を示した。

耐高電圧およびインパルス負荷に優れている厚膜平面抵抗(2W1MΩ)、或いは塗装絶縁形酸化金属被膜抵抗(3W1MΩ)を測定に用いた。この抵抗の並列接続の組合せで抵抗値を合成した(表2,写真2)。放電を防ぐため、耐高電圧抵抗を絶

表2 耐高電圧抵抗

抵抗バイパス法で用いる3W1MΩ抵抗を4ヶ、3ヶ、2ヶ、1ヶをそれぞれ並列接続して合成した。

合成抵抗値[MΩ]	耐高電圧規格抵抗(3W1MΩ)の並列接続個数[ヶ]
0.997	1
0.496	2
0.328	3
0.248	4

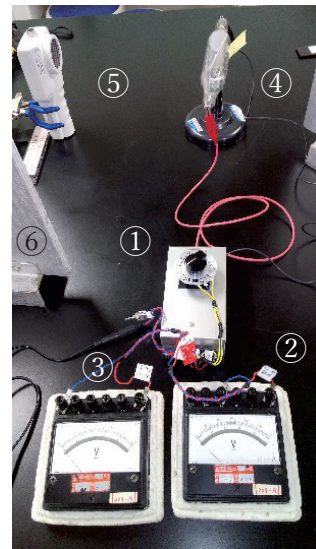


写真1 ①平滑高電圧電源モジュール、②高電圧出力値モニタ用DC電圧計、③電流値モニタ用DC電圧計、④Cr管、⑤GM管、⑥X線遮蔽用鉛板。但し、測定するときは、①と④の間に遮蔽板⑥を設置した。

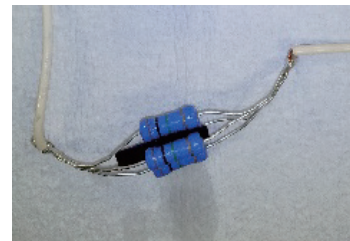


写真2 抵抗バイパス法で用いた耐高電圧抵抗。塗装絶縁形酸化金属被膜抵抗(3W1MΩ)を4ヶ並列接続し、Cr管に並列に接続して漏洩X線を軽減化した。絶縁用ゴム板(黒色)を抵抗の間にはさんだ。

脚注2: 教育現場で購入する誘導コイルの価格と同程度であれば、平滑高電圧電源の教育現場への導入も可能と想定し、また放射線源として教育現場で用いるような場合、必要以上のX線出力をもとめないことも考慮して、10W(max.30kVおよびmax.0.33mA)出力電源で実験した。出力電圧値や電流値表示付きの完成品では価格があるため、電源パーツ(モジュール)を実験に用いた。10W出力電源では、Cr管が動作不安定になったりCr管が作動しない場合も生じた。20Wや30W出力、或いはこれ以上の出力電源では測定結果が異なる、と考えている。

脚注3: 誘導コイルの電極間距離を同じにしても、Cr管の種類、或いはCr管の状態によって、Cr管に掛かる高電圧の値は同じではない。またCr管から漏洩するX線強度には分布があるので、Cr管から計測器までの距離を一定にしても、種類の異なるCr管では単純には比較できない。しかし、本研究室では、現象の把握およびCr管の教材としての是非の目安を得ることを優先したため、厳密な条件設定での測定はおこなわず、誘導コイルの電極間距離を40mmの一定とした。

縁オイル（シリコンオイル TSF451-10）に浸して実験した（写真3）。^{脚注4} 誘導コイルでCr管に高電圧を印加する場合，“抵抗バイパス法”でCr管からの漏洩X線の軽減化をおこなうため，写真2に示すように，3W1MΩの耐高電圧抵抗を2ヶ，3ヶ，4ヶに並列に接続したものを準備してCr管と並列に誘導コイルに接続して実験した。

Cr管を放射線源とした実験のようすを写真4(a)(b)に示す。(a)はCr管とX線フィルムとの位置関係を示す。X線フィルムはCr管正面中央に最接近させて設置し，X線を照射して測定した。(b)は測定するときのCr管の蛍光発光を遮蔽する厚紙製暗箱をCr管に取付けた状態を示す。X線の透過力を実験するときのサンプル（乾物小魚，回路基板，アルミニウム製矢形圧着端子と鉄製ワッシャー）を写真5(a)に示す。保護パッ

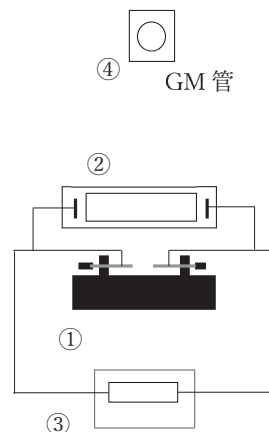
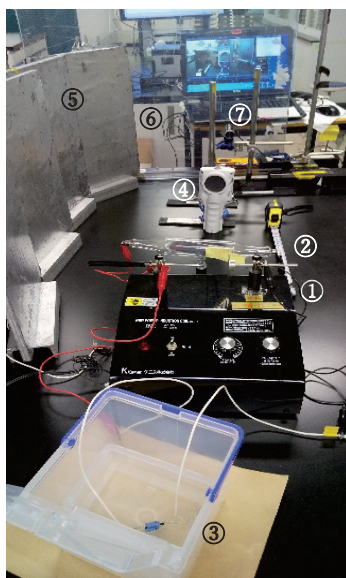
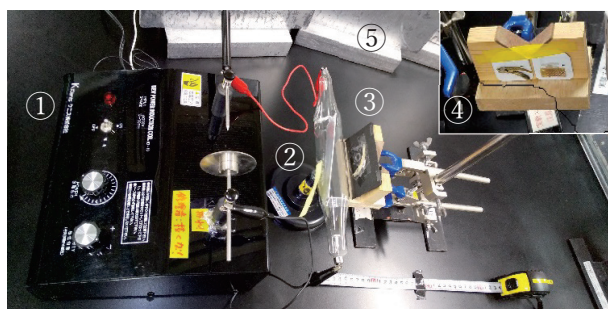
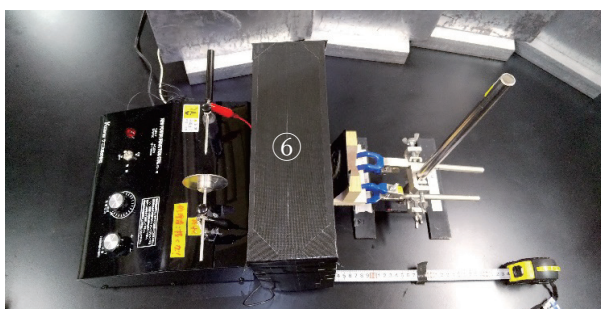


写真3 抵抗バイパス法

①誘導コイル，②Cr管，③絶縁オイルに浸した耐高電圧抵抗（Cr管と並列接続），④GM管，⑤鉛板，⑥鉛入塩化ビニル（透明），⑦CCDカメラとPC映像。画面左側の測定者用の防護壁が⑤と⑥である。測定中，写真右側領域は立入禁止とした。写真の右図は，①から④の概略図である。



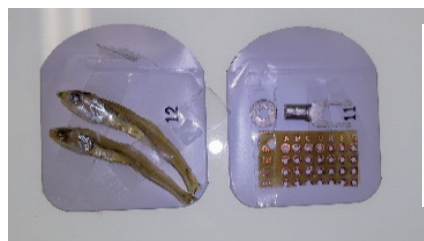
(a)



(b)

写真4 X線フィルムおよびインスタント写真の撮影

- (a) X線照射前のようす：①誘導コイル，②標準型Cr管，③黒紙写真封筒（可視光フィルム）上のサンプル，右上④はX線フィルム保護パッケージ上のサンプル（③の位置に設置する），⑤鉛板製X線防護壁
 (b) X線照射のときのようす：Cr管からの蛍光発光を遮蔽するためCr管を⑥の暗箱で覆った。



(a)



(b)

写真5 X線フィルム保護パッケージ上のサンプルと現像後のX線フィルム

(a) X線フィルム保護パッケージとサンプル

(b) 現像後のX線フィルム

但し，複数枚の撮影をおこなったため，干物小魚のパッケージの番号とフィルム番号は異なっている。

脚注4：写真3に示すように，鉛板・鉄板および透明な鉛入塩化ビニル板で漏洩X線を防護した。測定者は写真左側に居る。⑦のCCDカメラでGM管の数値をパソコンの画面（写真では，鉛入塩化ビニル板を通して透けて見えている）で確認した。Cr管を放射線源として使用する場合，X線フィルムにX線を照射するときは，例えば，1 mm程度の鉛板で防護壁を作る必要がある。

ケージ（X線フィルムはこの中）上にサンプルをセロハンテープで貼り付けた。

X線フィルムおよび簡易現像は、阪神技術研究所のD感度インスタント（X線）フィルム DIC100とインスタント現像液（DQD 現像液およびDIP 処理液定量注入器）を用いた。フィルムの装填や現像で暗室の必要がなく、専用処理液でX線フィルムを、照明のついたままの実験室で現像および定着できる。専用処理液を保護パッケージ内に注入し、例えば、液温25℃では15秒以上の攪拌処理で、X線フィルムを短時間で簡易に現像できた。尚、付属

のIX-L硬膜剤（ミョウバン溶液）にX線フィルムを数秒間浸した。

更に簡便に、X線の透過力を示す実験として、通常フィルム（以下、可視光フィルム）での測定もおこなった。X線は透過力が高いため、可視光フィルムではフィルム面に入射したX線が写真乳剤の感光に寄与する割合は低い。X線に対して十分な感度とコントラストを得るため、X線フィルムはフィルムベースの両面に乳剤を厚く塗布したうえでハロゲン化銀の含有率を高めている。これらが可視光フィルムとの基本的な構造の違いである。X線フィルムと比べてX線照射時間は長くなるが、廉価かつ簡便に可視光フィルムでもX線の存在を検証できる。暗室での現像の手間を省くため、インスタント写真（富士フィルムのチェキカメラと白黒用カセット、写真6①と②）を使用した。ここで、Cr管の漏洩X線の線量当量率に依存するが、X線の透過力を確認するだけであれば、X線フィルムでは数十秒から1分程度でおこなえる。インスタント写真（以下、「隔離された現像液付1枚の印画紙」を現像前印画紙）では5分から8分程度の照射時間が必要であった。写真6の③に示すように、厚黒紙で作製した黒紙写真封筒の外側にサンプル（乾物小魚、鉄製ワッシャーおよび鉛製矢印）をセロハンテープで貼った。カセット内に現像前印画紙が10枚1組で格納されている。暗室内^{脚注5}でカセットから1枚の現像前印画紙を取出し、黒紙写真封筒（写真6の③）内に封入する。X線照射後、X線を照射した現像前印画紙に現像液を均一に塗布するため、暗室内で照射済みの現像前印画紙をカセットに戻して、インスタントカメラ本体での現像プロセスをおこない、現像前印画紙を現像した。この過程で、X線を照射した現像前印画紙を露光しないように、カメラレンズ部分（カメラ中央部）を黒色ガムテープで遮光した（写真6の①）。



写真6 インスタントカメラ

①インスタントカメラ本体、②現像前印画紙（込、現像液）10枚が入っているカセット、③黒紙写真封筒（表面に被写体の乾物小魚、鉄製ワッシャーと鉛製矢印を貼りつけている）、④X線照射後、現像したインスタント写真



写真7 簡易暗室

暗幕とスタンドでつくった簡易暗室。天井照明OFFで作業すれば暗室となる。

3. 実験結果

実験方法の項で示した条件で、次の手順に従ってCr管の状態を検証（線量当量率の測定）した。

1. 誘導コイルで高電圧をCr管に印加して測定する。
2. 誘導コイルの抵抗バイパス法で、3W1MΩの耐高電圧抵抗の4ヶ、3ヶ、2ヶ、1ヶをCr管に並列接続して測定する。

脚注5：写真7のように、スタンドを支柱にして暗幕を張って簡易暗室をつくり、天井照明「OFF」で作業をおこなった。

3. 平滑高電圧電源で高電圧（DC一定値）をCr管に印加して測定する。但し、GM管に設定した上限値（例、 $400\ \mu\text{Sv/h}$ ）を超えない程度に高電圧の値を調整して、漏洩X線を発生させる。
4. 平滑高電圧電源で高電圧の値を調整して、Cr管からX線を発生させないで「電子線観察」ができるように出力調整して測定する。

4種類19台のCr管を測定して得た結果を表1(a)(b)に示す。(a)は誘導コイルを用いた場合（上記の1と2）、(b)は10W出力の平滑高電圧電源を用いた場合（上記の3と4）である。ここで、(a)と(b)に示す「Cr管No」は対応している。表1(a)は「標準型」、「電場印加型」、「十字型」、「羽根車型」のCr管種類別に示している。電子線観察条件の項のギリシャ文字は、 α :実験室天井照明を全て「ON」にしてCr管の動作（発光や動き）がみえる、 β :「ON」条件でみえない、 γ :天井照明を全て「OFF」としてCr管の動作がみえる、 η :「OFF」条件でもみえない、を意味する。Cr管の台数は多くはないが、「電子線観察（非漏洩化）」および「放射線源」としてCr管を用いる傾向が、以下のように読みとれる。

表1(a)の「観察条件」の欄の「バイパス無し」に☆印が付いているCr管は「放射線源」として使用できることを示している（ウェブ版ではピンク色の欄）。本測定で用いたGM管の測定値で約 $35\ \mu\text{Sv/h}$ 以上の漏洩X線を発生させるものである。本測定で用いた羽根車型を除いたCr管の15台中の14台（93%以上）が相当する。放射線源として使用できるCr管の内、非漏洩化できたCr管は、標準型3台中の3台（ α 条件は2台、 γ 条件は1台）、電場印加型5台中の5台（ α 条件は3台、 γ 条件は2台）、十字型6台中の5台（ α 条件は1台、 γ 条件は4台）ある。ここで、「観察条件」欄に示す○や△印（ウェブ版では薄緑色の欄）は「電子線観察」としてCr管を使用する目安を示す。表1(a)の○や△印は $1\ \mu\text{Sv/h}$ 以下を示したものを指定した。^{脚注6}表1(a)より、2ヶ並列の抵抗バイパスで、漏洩X線を $1\ \mu\text{Sv/h}$ 以下にできないものもあるので、4ヶ並列と3ヶ並列の抵抗バイパスを有効とした。

「標準型」および「電場印加型」Cr管に限定した場合、Cr管が破損していなければ高い確率（本測定では、9台中8台のCr管）で両目的としたCr管実験がおこなえる傾向がみえる。「十字型」Cr管は、放射線源としての使用には向いているようだが、抵抗バイパス法では発光が薄くなるので、電子線の観察には、特に大人数生徒の居るクラスでは推奨できない。また、「羽根型」Cr管も両方に用いることは向いていないようである。本測定での結果であり、すべてのCr管に適用できるものではないが、本測定での傾向を提示した。

表1(b)に、10W出力の平滑高電圧電源でCr管に高電圧を印加し、「電子線観察」する場合と「放射線源」として使用する場合とに分けて結果を示している。10W出力平滑高電圧電源でCr管に印加する電圧を調整した場合、標準型と電場印加型では9割近いCr管は漏洩X線を生じることなく電子線測定が可能であった。十字型ではその割合が約5割である。羽根車型では4台の内、1台のみ正常に動作（発光および羽根車回転や移動）した。電源の出力不足による動作不安定のため、印加電圧値と電流値を制御できないCr管もあった。これらの測定から、確実に漏洩X線を回避するには10W程度の平滑高電圧電源の使用では、「標準型」や「電場印加型」Cr管に限定せざるを得ない。一方、放射線源としてCr管に高電圧を加えた場合、羽根車型を除いた15台のCr管の内、安定して高電圧を印加できたのは6台（内訳：標準型2台、電場印加型1台、十字型3台）であった。表1(b)に示すように、平滑高電圧電源を使用した測定では、電子線観察と放射線源との両方に活用できるCr管は計4台であった。20Wや30W出力の平滑高電圧電源では、本測定とは異なる結果を得ると推測する。必要とする以上のX線（線量当量率）を発生させないため、10W出力電源での実験でとりまとめた。^{脚注2}

表1(a)(b)に示すCr管No5を平滑高電圧電源で印加（約24kV、約0.13mA）して得たX線フィルムの映像を、写真5(b)に示す。「乾物小魚2匹」と「回路基板、ワッシャーと矢形圧着端子」をフィルム保護パッケージにセロハンテープで取付けたものにCr管からの漏洩X線（約 $220\ \mu\text{Sv/h}$ で、照射時間の目安は

脚注6：測定に用いたGM管は、パルス状X線の検出率が低いので、例えば、このGM管が1/5のパルス状X線の検出率と仮定して計算すると、10分間の電子線観察の実験をした場合、GM管に表示する $1\ \mu\text{Sv/h}$ の線量当量率は、 $1 \times 5 \times 10 / 60 = 0.83\ \mu\text{Sv}$ の被曝量となる。

文部科学省が「学校において『年間1ミリシーベルト以下』を目指すことについて」（H23年7月20日公表）で提示する1mSvに対して、 $0.083\%[(100 \times 0.83 / 1000) / 1]$ となる。医学的検証データに基づいたものではないが、教育現場で早急に対応可能な措置例の1つとして示した。

フィルム No.11 は3分間、フィルム No.18 照射時間は5分間)を照射した。No.11 はコントラストの良い映像を得た。尚、Cr 管からの漏洩 X 線は強度分布(十字型の場合、例えば、参考文献3)があるので、X 線フィルム保護パッケージをどの位置に固定するかによって、照射時間に差が生じる。

表1(a)のCr 管 No.6, 11, 10 を誘導コイルで高電圧印加して得た X 線フィルム(照射時間は全て1分間)の映像を写真8(b)に示す。被写体はワッシャーと矢形圧着端子である。フィルム番号19はCr 管 No.6 (GM 管測定値 $\approx 58 \mu\text{Sv/h}$)、フィルム番号20はCr 管 No.11 (GM 管測定値 $\approx 52 \mu\text{Sv/h}$)、フィルム番号22はCr 管 No.10 (GM 管測定値 $\approx 53 \mu\text{Sv/h}$)に対応する。明暗およびコントラストに違いがみえる。実験に用いるCr 管によって異なるが、実験準備の段階であらかじめ最適条件を決めて手順良く実験をおこなえば、撮影から現像まで10～15分程度で示すことができる。X 線の照射時間は誘導コイルの高電圧印加で1分間もあれば、X 線の透過力を示すには充分である。

現像液の処理などの煩雑さを考慮して、X 線フィルムではなくインスタント写真で X 線の透過力を試した結果を写真6の④に示す。誘導コイルで高電圧印加したCr 管 No.11 (GM 管測定値 $\approx 52 \mu\text{Sv/h}$)で X 線を照射した時間は約8分間である。照射時間は X 線フィルムに比べて掛かるものの、より簡便に X 線の透過力を実験で提示できる、と考えている。

放射線防御の3原則を前提とした実験を心掛けても、サーベイメータなどで放射線の漏洩を確認しながらでなければ、Cr 管を放射線源とする予備実験を躊躇する、と推測する。単独(1教師、或いは1学校)での実験準備が難しいと考えるので、地域の理科教育研究会などで複数人の教師が集まっておこなうのも一つの方法である。但し、「放射線源」の実験では、鉛板(例、1¹ mm)などの X 線防護壁の準備が必要である。中・高等学校でCr 管を放射線源として実験を準備する場合、大学の放射線の専門家や経験者と連携することが望ましい。誘導コイルでCr 管を高電圧印加し、低線量被曝を回避して「電子線観察」ができ、かつ「放射線源」としてCr 管を実験する準備の例を、次のページ図1(a)(b)に示す。

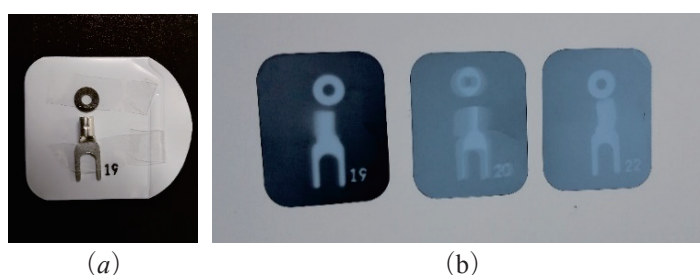


写真8(a) 鉄製ワッシャーとアルミニウム製矢形圧着端子のサンプルを貼り付けた X 線フィルム保護パッケージ
(b) 誘導コイルで各種 Cr 管に高電圧印加(X 線照射時間は約1分間)したときの X 線フィルム。左側から、フィルム番号19:羽根車回転型 Cr 管、フィルム番号20:標準 Cr 管、フィルム番号22:十字型 Cr 管である。

4. まとめ

放射線の特徴である電離作用や透過力、取り分け、透過力の実験を検証する手段として、X 線フィルムの使用、或いは蛍光板を暗視カメラや高感度カメラなどを使用する実験が一般的と考えられる。過去にもその報告はある。^{1,2,6)} 医療や工業界に浸透しているレントゲン撮影などとイメージを結びつけ易い「写真」を、実験の経費をできるだけ抑えたうえで、かつ特殊な器具や熟練技を要しない簡便な実験例として提示した。誘導コイルでCr 管を高電圧印加した場合、X 線フィルムに照射する時間は60秒以下で撮影は可能である。Cr 管を高電圧を印加する前に放射線防護や放射線実験のようすを説明しながら観察させれば、Cr 管から X 線発生中は、鉛板などで X 線を防御することが必要であるため、X 線フィルムに照射している時間帯でCr 管が見えなくても放射線実験として問題はない。

しかし、電子線観察の実験では、電子線観察の外に電場や磁場の作用など複数の実験をおこなうため、しかもCr 管に近づいて直接見る必要から、低線量被曝からの回避は必要と考えている。^{脚注7} Cr 管そのものから漏洩する X 線の軽減が廉価な費用で実現できれば、電子線観察の効果的な実践が可能である。低線量被曝を回避することを最優先事項として、抵抗バイパス法の実験例も具体的に提示した。これらの試みが低線量被曝回避の処置の1つとして検討されれば、と考えている。^{脚注8}

脚注7: 医学的見地からのデータに基づいた議論は、その専門の研究者に委ねたい。

脚注8: 教育現場での放射線源の取り扱いについては、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)に関して、しかるべき機関での議論が必要である。

図1(a)

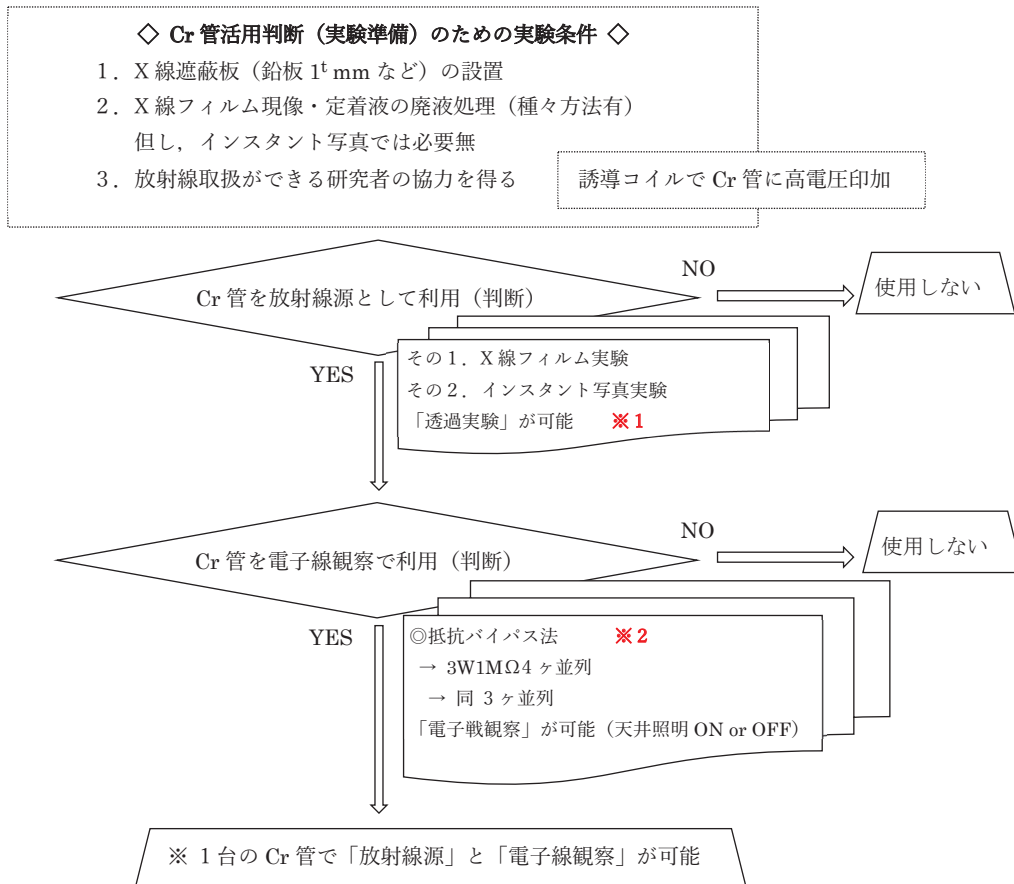


図1(b)

※1

<その1> X線フィルム (誘導コイルで Cr管に高電圧印加) でおこなう場合

- ・X線フィルムの保護パッケージに被写体を貼り付けて、Cr管の正面ガラス表面に最接近して設置
- ・約60秒間の照射後、保護パッケージの被写体を外して、現像・定着をおこなう
- ・現像してサンプルが写っていないければ、放射線源としてのCr管の使用を断念する
但し、現像・定着過程にミスが生じないことを前提とする

<その2> インスタント写真 (誘導コイルで Cr管に高電圧印加) でおこなう場合

- ・Cr管からの発光を遮蔽する (例、Cr管を黒箱で覆う)
- ・現像前印画紙1枚を暗室で、カセットから取出して黒紙写真封筒に入れる
- ・黒紙写真封筒の外側に被写体をセロハンテープで貼り付けて、黒紙写真封筒をCr管に最近接させて設置する
- ・5分~8分程照射後、簡易暗室で黒紙写真封筒から現像前印画紙を取り出してカセットに入れ直す
- ・カメラ本体にカセット (カメラ本体のレンズは遮光) を装着して、現像プロセスをおこなう
- ・現像してサンプルが写っていないければ、放射線源としてのCr管の使用を断念する
但し、現像・定着過程にミスが生じないことを前提とする

※2 — 抵抗バイパス法は「標準型 Cr管」と「電場印加型 Cr管」の使用を推奨 —

- ・実験室天井照明「OFF」で、「耐高電圧抵抗 1MΩ を4ヶ並列接続」の抵抗バイパスをCr管に並立に接続し、電子の流れ (Cr管が作動) が見えるようであれば、これで実験を試みる
更に、実験室天井照明を「ON」にしても見える (Cr管が作動) ようであれば、これで実験を試みる
- ・耐高電圧抵抗4ヶ並列接続でCr管が作動しない場合、3ヶ並列接続でおこなう
電子の流れ (Cr管が作動) が見えるようであれば、これで実験を試みる
更に、実験室天井照明を「ON」にしても見える (Cr管が作動) ようであれば、これで実験を試みる

注意1 2ヶ並列接続はしない。

注意2 漏洩X線を発生しないCr管も、抵抗バイパス法で観察できる

図1(a) 実験準備の流れ図 (b) 流れ図の※1と※2の説明

この種の放射線実験を学校単位（1学校単独）でおこなうことは好ましいこととは考えていない。放射線を取扱う研究者を交えたうえで、Cr管からの低線量被曝の回避を確実にして、例えば複数の学校で、或いは理科教育研究会等の地域単位で、可能であればこの種の放射線取扱をおこなっている大学などの研究機関との連携でおこなうことを勧めたい。尚、本報告でおこなった放射線測定では、測定者以外を立ち入り禁止にしたうえでサーベイメータを用いて常にX線の線量当量率をモニタした。放射線防護板（例、約1^t mm鉛板遮蔽板や鉛入塩化ビニル製遮蔽板などを組み合わせて使用）を用いてX線を防護して測定した。測定者の居る領域において自然放射線以下の値で測定した。

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、鞍手町立鞍手中学校、福岡市立城南中学校および本学の理科教育教室に対して心からお礼を申し上げます。

5. 参考文献

- 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
「3. 学校教育における被ばく」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。
- 2) 「クルックス管から漏洩するX線の実態とその対策」大森 儀郎，物理教育 第43巻 第1号（1995）pp.29～32
- 3) 「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
- 4) 「冷陰極型クルックス管から漏洩するX線軽減化の試み」宇藤 茂憲，福岡教育大学紀要，第68巻 第3分冊（2018）pp.21～26
- 5) 例えば，放射線教育フォーラムニュースレター No71，2018年6月 など
- 6) 例えば，「クルックス管を利用した簡易なX線透過装置」杉本 憲広（高校物理）
http://www.toray-sf.or.jp/activity/science_edu/pdf/h15_05.pdf（掲載雑誌名など詳細不明）

