

クルックス管からの低エネルギーX線 評価手法の開発

秋吉 優史, 谷口 良一, 松浦 寛人, 宮丸 広幸, Do Duy Khiem (大阪府立大学), 神野 郁夫, 濱口拓 (京都大学), 野村 貴美 (首都大学東京), 谷口 和史 (千代田テクノル), 小林 育夫 (長瀬ランダウア), 川島 紀子 (文京区立文林中学校), 佐藤 深 (札幌市立北栄中学校), 森山 正樹 (北海道札幌市立白石中学校), 宮川 俊晴 (放射線教育フォーラム)



Fig.1 A Crookes tube in operation with a Maltese cross plate

1 はじめに

平成29年3月に公布された中学校の新学習指導要領では、2年生で学習する「(3)電流とその利用」の単元に於いて「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。

クルックス管 (Fig. 1) は従来から中学校の学校教育現場で電流と電子の流れの教材として広く用いられているが、古くはレントゲンがX線の発見のきっかけとなったように、運用条件によっては非常に高い強度のX線を放出する製品が存在する。放射線作業従事者ではなくまた労働者でもない若年層の「生徒」に対して高い線量の被ばくの可能性が検討されていないことは、放射線安全管理上の問題が懸念される。特に近年、眼の水晶体に対する被ばくが問題になっており、線源を見つめる必要があるクルックス管の特性上、詳細な検討が必要である。

しかしながら、クルックス管から放出されるX線はエネルギーが低いため、一般的なサーベイメーターでは全く検出できない例もあり、学校教育現場で負担無く安全に実験を行うための運用上のガイドラインを提供する必要がある。

そのためには、クルックス管からのX線について特性評価を行い、実際にどの程度の被曝線量となるかの評価と、運用条件によってそれらがどのように変化するかを検討が不可欠である。クルックス管からのX線は、低エネルギーであるだけでなく、パルス場であり、空間的にも不均一、時間的にも誘導コイルからの出力の揺らぎのため不均一であるなど、評価が極めて困難である。本稿ではこれまでに明らかになったクルックス管からのX線の特性と、その評価手法について報告を行う。

2 背景

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年生の一番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、受験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。

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。さらに学習指導要領の解説では、「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。」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おり、全ての中学校に於いてクルックス管の放射線安全管理が必要となる。

実は、平成20年3月の学習指導要領（真空放電についても何も記載されていない）に則った、現行の教科書に於いても「(3)電流とその利用」の単元に於いて、調査を行った5社全ての教科書でクルックス管による電子線の観察は既に取り上げられており、特に、合わせて60%程度のシェアを持つ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。（残りの3社は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）

クルックス管などの放電管からの放射線の漏洩は以前から報告されているが [1, 2, 3, 4]、これまで余り大きく取り上げられることはなかった。これらの報告によると、クルックス管からは、製品によっては、また使用条件によっては、ガラス管表面から5cm位置で1cm線量当量が100mSv/hを大きく超える、非常に高い強度のX線が放出されている [2]。

しかしながら、20keV以下の低エネルギーのX線は学校教育現場で用いられる一般向けのサーベイメーターで線量を測定する事が不可能である。さらに、誘導コイルからの高電圧出力がパルス状であるため発生するX線についてもパルス状であり、半導体検出器などではパイルアップにより正常な計測を行う事が専門家でも非常に困難である。また、ごく僅かな印加電圧の変動によっても大きくクルックス管自体を構成するガラス管壁の透過率が変わり、装置の経年変化によって電子線を出すのに必要な印加電圧が上昇していくなどするために、放出される線量を一律に保証することが出来ない。一方で、これまで報告された論文では、測定上や線量評価上の問題点がある。2002年に文科省からエックス線装置に関する通知が出ているが、これはX線照射装置の不適切な利用による事故を受けた通知であり、クルックス管を念頭に置いていない [5]。なお、電離放射線障害防止規則における「エックス線装置」とは、第十条に定義されている通り「エックス線を発生させる装置」であり、エックス線を発生させることを目的としない装置は規制の対象外であるとの見解が厚生労働省から示されている [6]。

このため、現在日本全国の放射線計測、線量評価、放射線安全管理の専門家と、現場の学校の先生方、これまで放射線教育に携わってきた様々な先生方有志による、「教育現場など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体制の確立」プロジェクト、通称クルックス管プロジェクトを立ち上げ、教育現場における放射線安全管理ガイドラインの作成と標準化を目指している。

3 様々な線量計を用いた線量測定

まず、様々なサーベイメーターを用いてクルックス管からの漏洩X線量測定を行った結果をTable1に示す。使用したのはケニス製の十字板入りのクルックス管3C-Bと、ニューパワー誘導コイルID-6である。放電針側を陰極、放電円板側を陽極側に接続し（以降全て同様）、放電極間距離は25mm、放電出力のダイヤルは、20目盛までであるうちの6目盛まで上げ、若干の大気中放電が発生している状況で測定を行った。クルックス管と直列に繋いだアナログ電流計の読みは40 μ Aであった。なお、電離箱ICS-1323は前面のフタを付けた場合1cm線量当量(H*(10))を、フタを外した場合70 μ m線量当量(H*(0.07))に対応するが、低エネルギーでの補正は行っておらず、70 μ m線量当量に関しては目安程度に留まる。また、1cm線量当量についても表示値そのままでありエネルギーによるレスポンスの補正は行っていない。

NaIシンチレーターのうち、富士電機のNH6は8keVから測定可能な最新鋭のサーベイメーターであるが、正常な評価を行うことは出来なかった。同様にBe窓を使用しており5keVからの測定が可能なりガクGet Smart XUについても、非常に低い値を示しており正常な評価は出来なかった。これは、クルックス管からのX線が単に低エネルギーであるだけではなく、誘導コイルからのパルス状の高電圧印加に対応したパルス場であるために、短時間に入射する高線量率のX線を時間分解できず、パイルアップしてしまうことに依る物であると考えられる。広く放射線管理業務で一般的に用いられているTCS-172は、ステンレスのハウジングによる遮蔽と、50keV以下はカットする補償回路により、ほとんど測定できなかった。ごく僅かにバックグラウンド(0.07 μ Sv/h程度)よりも高く出ているのは、パイルアップしたパルスを計数している物と思われる。

一般の家庭に普及しているエアーカーンターSはそもそも9.99 μ Sv/hまでしか測定できないが、0.05 μ Sv/hで点滅状態にもなり正常な測定を行えなかった。CsIシンチレーターを使用したやや高級機のエアーカーンターEXについても、実際の線量からかけ離れた値となった。プラスチックシンチレーターを使用したKind-Miniは同様に値自体はかけ離れているが、距離に対する依存性は拾えており、校正の仕方によっては使えるようになる可能性も存在する。

様々な検出器を評価した中で、汎用の測定器で現場での安全管理に使用出来る可能性のあるのは、現在のところGMサーベイメーターのみである。ただし測定可能なのはあくまでもcpmなどの計数値であり、実効

線量に換算するためにはそれぞれの機体に対して校正を行う必要がある。医療用の X 線装置などについて同様の評価を行った例が大久保、野村らによって報告されている [7]。ただし、GM サーベイレーターは一般に 50keV 以下の光子に対しては極端に検出効率が落ちることが知られており、さらに 100 μ s 程度の不感時間に対する数え落としの補正を行う際に、パルス場に対する補正を行う必要があるため、定量的な評価は簡単ではない。しかし一度ガラスバッジなどで測定した場に対して、同じ条件で測定を行っておけば、それよりも上がったのか下がったのかなどの定性的な評価には使うことが出来る。

最後に、測定に使用した蛍光ガラス線量計は千代田テクノルが評価を行うガラスバッジサービスを利用した。様々なタイプがある中で、低エネルギー X 線を取り扱う環境で個人線量計として用いられている FX 型を使用した。対象とするエネルギー範囲は 10 keV~80 keV であり、2 Sv までの評価が可能である。通常は 0.1 mSv 単位での評価であるが、0.01 mSv 単位での報告を行うオプションを使用している（下限値は 0.05 mSv）。パルス場かどうかによらず積算線量を評価することが出来るため、他のサーベイレーターに比べて信頼性が高く、内部の複数のフィルターに対するレスポンスの違いから実効エネルギーを評価することが出来るため、クルックス管からの X 線評価に極めて適しているが、測定後に郵送でバッジを返送して結果が帰ってくるまでに数週間を要するため、迅速な評価は出来ない。また、今回使用している FX 型は個人線量計であり、人間が装着することを前提としているため、On Phantom での測定を行う必要があるが、20 keV 前後での測定では Free Air での測定でもほとんど差がない（後方散乱の影響が殆ど無い）と言うデータがあり、現在検証中であるが、差があった場合でもあとで補正を行うという考え方で Free Air での測定を行っている。なお、長瀬ランダウアが提供している OSL 線量計を用いたルミネスバッジサービス（2017 年度よりクイクセルバッジから変更）でも同様の評価が可能である。

4 様々な条件での線量評価

ガラスバッジ及び電離箱を用いて様々な条件で測定した結果を報告する。なお、ここで報告する線量はあくまでもあるクルックス管と誘導コイルの組み合わせで得られる値であり、他の装置では同様の設定で実験を行っても全く異なる値となる可能性が高く、絶対値についてはあくまでも一例として捉えて頂きたい。

まず、誘導コイルからの出力電圧を制御するために、放電極間の距離を 15 mm, 20 mm, 30 mm と変えて、ギリギリ大気放電する放電出力として線量の測定を行った結果を Fig. 2 に示す。陽極側の正面ガラス端面から正面方向に 15 cm, 30 cm, 50 cm 位置でそれぞれ 10 分間測定（X 線照射）を行い、1 時間あたりの線量率に換算した上で距離の二乗に反比例するとしてフィッティングした。クルックス管は点線源ではないが、点線源同様に概ね距離の逆二乗で線量が下がっていくことが分かる。また、放電極の距離を狭くすることで、大幅に線量率を低くすることが出来る事が分かる。ただし、放電極距離 15 mm では天候によっては大気放電が激しく起こりすぎるため、いつでもこの距離に設定できるわけではないギリギリの距離である点に注意を要する。

次に、放電極距離 20 mm, 25 mm, 30 mm で放電出力を 0 目盛から 8 目盛まで変化させ、平均電流と 30 cm 位置での線量率（フタ無しでの測定値を 70 μ m 線量当量率として示した）を測定した。Fig. 3 に放電出力と平均電流の相関を、Fig. 4 に放電出力と線量率の相関をそれぞれ示し、さらにこれらから Fig. 5 に平均電流と線量率との相関を求めた。なお、放電極距離 20 mm では放電出力 4 で大気放電が激しくなったためそれ以上上げていない。これらの結果は放電が起こらなければ放電極距離は電流や線量率に影響せず、放電出力と共に電流、線量率は上昇する。Fig. 5 では指数関数を用いてフィッティングを行っているが、二次関数を用いてもほぼ同等の精度でフィッティングできている（頂点はゼロにならない）。電流の二乗の電力量で線量が決まるのか、わずかに電圧上昇することにより透過率が指数関数的に変わるのか、現在のところ明らかになっておらず、より高い放電出力までの測定を今後行っていく。

5 クルックス管から漏洩した X 線のエネルギー評価

まず GM サーベイレーターと遮蔽体を用いた応答から大まかなエネルギーを評価した。サーベイレーターとクルックス管の間に 0.5 mm ピッチでアルミ板を入れていき、対数プロットした際の傾きから、線減衰係数を求めた。Fig 6 は放電極距離 20, mm, 50 cm 位置で SE International 社の Ranger GM サーベイレーターで測定を行った結果である。その結果、放電極距離 20 mm で僅かに放電が起こる放電出力の場合、一成分でフィッティングを行うと線減衰係数は 7.85 cm^{-1} となり、20 keV でのアルミ中での線減衰係数が 8.85 cm^{-1} , 30 keV で 2.82 cm^{-1} であることから、20 keV 強の実効エネルギー

Table 1 Measurement results of low-energy X-ray radiated from Crookes tube using various type survey meters

Detector	Product name	Note	Dose rate			
			15cm	30cm	50cm	Unit
Ion chamber	Hitachi ICS-1323	without cover	8.15	1.91	0.64	mSv/h
		with cover	5.3	1.28	0.47	mSv/h
Fluoroglass dosimeters	Chiyoda Technol Glass Badge type-FX	H _p (0.07)	4.62	1.26	0.48	mSv/h
		H _p (10)	1.62	0.48	0	mSv/h
NaI scintillator	Fuji Electric. NHC6	Be window	1.34	10.0	13.1	μSv/h
	Aloca TCS-172		0.17	0.17	0.15	μSv/h
GM tube	SE International Ranger	1min scaler	33.9	31.7	27.3	kcpm
Plastic scintillator	Kind-mini	no cover	118	64	24.5	μSv/h
CsI scintillator	Air Counter EX	no cover	12.6	12.5	8.3	μSv/h
Si Semiconductor	Air Counter S		<9.99	0.05blinc	<9.99	μSv/h

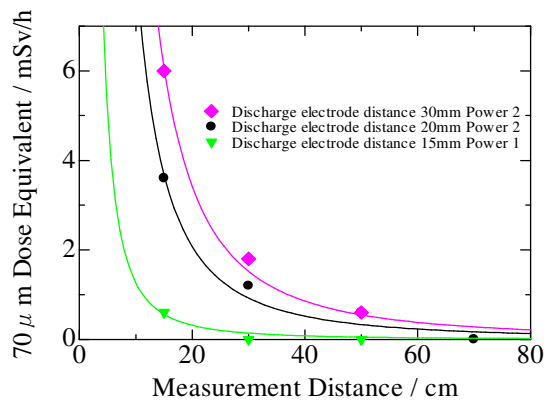


Fig. 2 Correlation between the measurement distance and the dose rate. The dose rate was changed with discharge distance significantly.

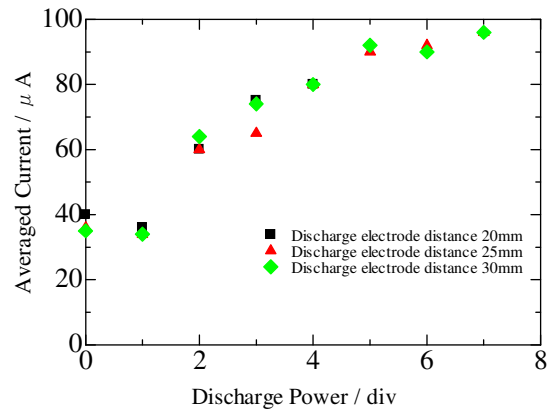


Fig. 3 Correlation between discharge power and averaged current.

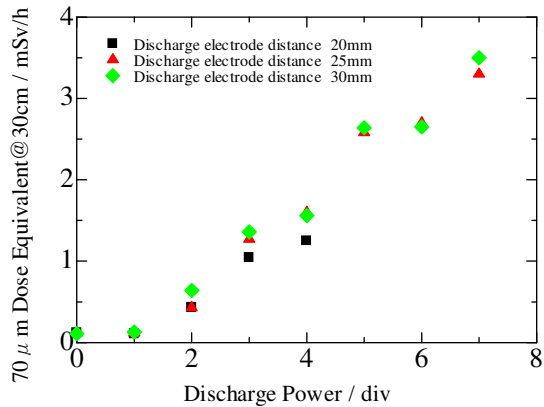


Fig. 4 Correlation between discharge power and dose rate.

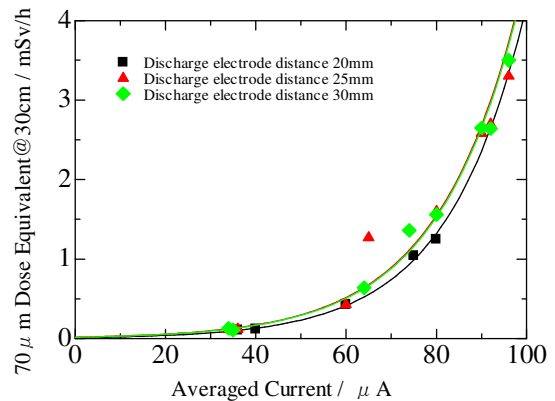


Fig. 5 Correlation between averaged current and dose rate

一であることが確認できた。

ガラスバッジは内部に複数のフィルターが入っているため、同様にそれらに対する応答からエネルギー評価が可能であり (FX 型の場合)、同様の条件での測定では実効エネルギーは 18 keV 前後と評価された。

本研究ではそれらの測定に加えて、CZT(Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te) 検出器や、Be 窓の Ge 半導体検出器を用いてスペクトル計測を行った。測定を行う上で、数十 cps 程度の低い計数率に於いてもパイルアップが起こってしまい、高エネルギー側に長く尾を引くスペクトルとなった。これは、クルックス管からの X 線がパルス状に放出されていることに起因する。半値幅 20 μs 程度のパルスが 10 ms に平均で 5 パルス程度放出されているため、実際に X 線が放出されているのは Live Time の 1% 程度の時間に過ぎず、計数率を 100 倍程度多く考えて測定を行う必要がある。

このため、φ19 mm×10 mm 内径 φ3 mm の円筒状の鉛アパーチャーを黄銅製のスリーブ内に複数並べるコリメーターシステムに、φ0.5 mm の穴開けをした 1 mm 厚の鉛薄板を用いたコリメーターを追加することにより、入射 X 線量を極端に減らして 10 cps 以下での測定を行い、パイルアップの少ないスペクトルを取得した。コリメーターの向きなどによって大きく線量やスペクトルが異なるため、非常に測定は困難であったが、慎重な測定により誘導コイルの設定によって僅かにスペクトルがシフトしていることが確認された。

CZT 検出器により測定されたスペクトルを Fig. 7 に、ガウシアンフィッティングによるピーク位置の変化を Table 2 に示す。なお、CZT 検出器からのスペクトルは歪みがあることが知られているが [8]、補正は行っておらず、測定されたままのスペクトルを使用している。

印加電圧のパルスは誘導コイルの設定によって一定の電圧が出力されているのではなく一定のばらつきを有していたため、パルス波高のヒストグラム評価を今後行う予定である。また、パルス波高のヒストグラムから制動放射により発生する X 線のスペクトルを計算し、さらにそれぞれのエネルギーの X 線がガラス管壁により遮蔽されることを考慮して求めた放出 X 線スペクトルと、実際に測定されたスペクトルと比較検証を行う予定である。

6 今後の展開

電離箱や CZT 検出器による線量、スペクトル測定は、中学校の教育現場で実施する事は不可能であり、より簡便な線量評価法の開発が必要である。GM サーベイ

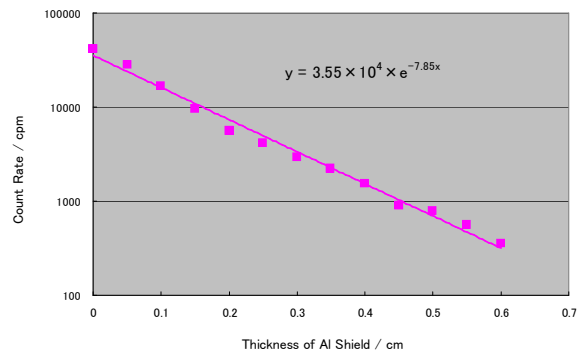


Fig. 6 An estimation attempt of linear attenuation coefficient using a GM survey meter.

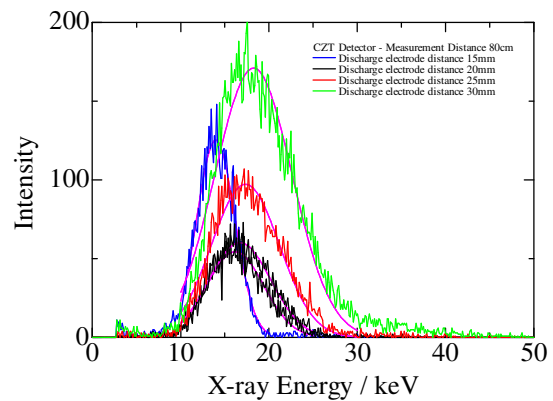


Fig. 7 An energy spectrum of X-ray radiated from Crookes tube obtained by CZT detector

Table 2 X-ray spectrums that was shifted by setting of an induction coil.

Discharge electrode distance	Discharge Power	Averaged Current	Peak Energy
mm	div	μA	keV
15	2	8	14.0
20	4	28	16.4
25	6	30	17.3
30	8	45	18.3

メーター程度であれば入手可能とすると、一度ガラスバッジなどで測定を行った条件で校正を行うことで、ある程度の線量の目安を得ることは可能であるし、前節の方法でエネルギーも評価可能である。ただし、クルックス管からのX線は不均一なパルス場であり、線量率、不感時間に対する数え落としの補正を行う必要がある。このあたりの手順について今後検討を行う必要がある。

エネルギースペクトルに関しては、放射線教育で良く用いられている霧箱を用いることで評価可能である可能性がある。20 keV 程度の電子線は空中で 6 mm 程度しか飛ばず、その飛程を画像解析することでエネルギースペクトルを求めることが出来る可能性がある。特に、ペルチェ冷却式霧箱は過飽和層が薄く平面的に飛んだ飛跡のみを観察できるため、この評価に適している [9]。

また、電気と電流の単元で静電気の可視化によく使われる箔検電器は、どこの中学校の理科室にもある物だが、一旦電荷をチャージした箔検電器は、周辺の空气中で放射線により生成した逆の電荷を吸い寄せて次第に箔が閉じていく。この閉じる速度は線量率に依存しており、一種の開放型の電離箱として機能し、湿度などの影響を余り受けないことが明らかになってきている [10]。

さらに、化学線量計の一種としてヨウ化カリウムを用いた KI 線量計 (PVA ゲルを入れたものも含めて) が最近注目されているが、100 mSv 程度の照射が必要でありそのままではほとんど色の変化を確認できない。しかしより低温で測定したり、濃度の調整やろ紙に染みこませるなど使用条件を調整することで使える可能性も残されており、現在検討を進めているところである。

このような測定上の要素技術開発と、いかに電流、電圧を抑えるかというクルックス管運用上の技術開発、空間的に不均等な放射線からの実効線量評価、法令と国際機関等の勧告などの文献調査、さらに社会的受容性などの公衆審査を経て、教育現場における放射線安全取扱のガイドラインを 2019 年冬までには策定する方針である。

謝辞

日本全国の放射線教育関係者、放射線計測の専門家、線量評価の専門家、そして実際の学校現場の数多くの先生方の協力による、「クルックス管プロジェクト」として本研究は行われた。この場を借りて深く感謝を表明したい。

参考文献

- [1] 田原隆志, 新見克彦, 草間朋子, 吉澤康雄, 学校教育における放電管の使用状況と放射線管理のあり方, 物理教育 35 (1987) 150-153.
- [2] 大森儀郎, 学校教育における被ばく, 第 22 回放射線環境セミナー「生活と放射線」NIRS-M-105 (1995) 107-112.
- [3] 藤淵俊王, 井上創, 小原哲, 加藤英幸, 小林育夫, 細田正洋, 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 10 (2011) 40-45.
- [4] 宇藤茂憲, 教育現場における冷陰極管の漏洩 X 線について, 福岡教育大学紀要 66 (第 3 分冊) (2017) 1-11.
- [5] 学校におけるエックス線装置を使用した実験等について, 初初等中等教育局教育課程課長・文部科学省スポーツ・青少年局学校健康教育課長通知 (2002).
- [6] 電離放射線障害防止規則における x 線装置にかかる届出義務の簡素化, 全国規模での規制改革要望に対する見解の確認 <http://www8.cao.go.jp/kisei/siryo/030919/09-2.pdf> (2003).
- [7] 大久保徹, 府川和弘, 野村貴美, エックス線発生装置管理のための低線量評価法, 日本放射線安全管理学会誌 15 (2016) 66-73.
- [8] 加藤秀起, 中村光一, 津坂昌利, CdZnTe 半導体放射線検出器の X 線光子エネルギー吸収レスポンス特性, 電気学会論文誌 C 120 (2000) 1774-1780.
- [9] 秋吉優史, 放射線教育におけるペルチェ冷却式高性能霧箱の活用, 日本放射線安全管理学会誌 16 (2) (2017) 72-78.
- [10] 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, 神谷均, 宮川俊晴, クルックス管からの漏洩 x 線測定の試み ー 箔検電器による測定の提案 ー, 日日本アイソトープ協会 第 55 回アイソトープ・放射線研究発表会 ID: 3a-II-01 (2018).