

クルックス管からの低エネルギー X 線評価手法の開発

大阪府立大学 放射線研究センター

秋吉 優史*, 谷口 良一, 松浦 寛人, 宮丸 広幸

大阪府立大学 量子放射線系専攻

Do Duy Khiem

京都大学 原子核工学専攻

神野 郁夫, 濱口 拓

首都大学東京 アイソトープセンター

野村 貴美

国立保健医療科学院 生活環境研究部

山口 一郎

千代田テクノロ株式会社

谷口 和史

長瀬ランダウア

小林 育夫

文京区立文林中学校

川島 紀子

札幌市立北栄中学校

佐藤 深

札幌市立白石中学校

森山 正樹

放射線教育フォーラム

宮川 俊晴

公益財団法人 日本科学技術振興財団

掛布 智久

Development of evaluation techniques for low energy X-rays from a Crookes tube

Masafumi AKIYOSHI*, Ryoichi TANIGUCHI, Hiroto MATSUURA and Hiroyuki MIYAMARU (*Radiation Research Center, Osaka Prefecture University*), Do DUYKHIEM (*Department of Quantum and Radiation Engineering, Osaka Prefecture University*), Ikuo KANNO and Takumi HAMAGUCHI (*Department of Nuclear Engineering, Kyoto University*), Kiyoshi NOMURA (*Radioisotopes Centre, Tokyo Metropolitan University*), Ichiro YAMAGUCHI (*National Institute of Public Health, Department of Environmental Health*), Kazufumi TANIGUCHI (*Chiyoda Technol Corp.*), Ikuo KOBAYASHI (*Nagase Landauer Ltd.*), Noriko KAWASHIMA (*Bunkyo-ku Bunrin Junior High School*), Shin SATO (*Sapporo Hokuei Junior High School*), Masaki MORIYAMA (*Sapporo Shi-roishi Junior High School*), Toshiharu MIYAKAWA (*Radiation Education Forum*), Tomohisa KAKEFU (*Japan Science Foundation*),

〒599-8570 大阪府堺市中区学園町 1-2

TEL: 072-254-9852, E-mail: akiyoshi@riast.osakafu-u.ac.jp

Crookes tube is widely used for science education in Japanese junior-high school to learn about the electric current and the cathode rays. Some Crookes tubes radiate quite strong X-rays, however, the energy of the X-rays are about 20 keV, then the most commercial dose survey meters are unuseful. Therefore, it is required to establish a guide line for the radiological safety in the education field to achieve safety experiment without overload to teachers.

In this study, ion chamber and fluoroglass dosimeters are used to measure the X-rays from Crookes tube correctly. The dose change was estimated depend on the setting of an induction coil that was used for high-voltage supply. The energy spectrum was evaluated using a CZT detector and a Be window Ge detector, and also the linear attenuation coefficient was analyzed using a GM survey meter.

X-rays are emitted in pulse when a Crookes tube is driven using an induction coil. To prevent a pile up, X-rays must be collimated using a very thin aperture, and the counting rate needed to be suppressed to several cps.

Keywords: radiological education, Crookes tube, measurement of low-energy X-ray, dose estimation

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」の単元において「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



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

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の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、評価がきわめて困難である。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」の単元において、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、内容の取扱において「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とどまっている。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」の単元において、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、全ての中学校においてクルックス管の放射線安全管理が必要となる。

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

Detector	Product name	Note	Dose rate			
			15 cm	30 cm	50 cm	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	70 μm dose equivalent rate	4.62	1.26	0.48	mSv/h
		1 cm dose equivalent rate	1.62	0.48	0	mSv/h
NaI scintillator	Fuji Electric. NHC6	Be window	1.34	10.0	13.1	μSv/h
	Aloka TCS-172		0.17	0.17	0.15	μSv/h
GM tube	SE International Ranger	1 min. 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	0.05 blinc	<9.99	μSv/h

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、現行の教科書においても「(3) 電流とその利用」の単元において、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すで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¹⁻⁴⁾、これまであま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 5 cm 位置で 1 cm 線量当量が 100 mSv/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、20 keV 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、ごくわず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てい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さまざま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、さまざま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 Table 1 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 25 mm、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 $40\ \mu\text{A}$ であった。なお、電離箱 ICS-1323 は前面のフタを付けた場合 $1\ \text{cm}$ 線量当量 ($H^*(10)$) を、フタを外した場合 $70\ \mu\text{m}$ 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、 $70\ \mu\text{m}$ 線量当量に関しては目安程度にとどまる。また、 $1\ \text{cm}$ 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 NHC6 は $8\ \text{keV}$ 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 $5\ \text{keV}$ 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よ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、 $50\ \text{keV}$ 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。ごくわずかにバックグラウンド ($0.07\ \mu\text{Sv/h}$ 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ウンター S はそもそも $9.99\ \mu\text{Sv/h}$ までしか測定できないが、 $0.05\ \mu\text{Sv/h}$ 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ウンター 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。

さまざま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 サーベイメーターは一般に $50\ \text{keV}$ 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 $100\ \mu\text{s}$ 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。さまざま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 $10\ \text{keV}$ – $80\ \text{keV}$ であり、 $2\ \text{Sv}$ までの評価が可能である。通常は $0.1\ \text{mSv}$ 単位での評価であるが、 $0.01\ \text{mSv}$ 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 $0.05\ \text{mSv}$)。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、他のサーベイメ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 線評価にきわめて適しているが、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、 $20\ \text{keV}$ 前後での測定では Free Air での測定でもほとんど差がない (後方散乱の影響がほとんど無い) というデータがあり、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 さまざまな条件での線量評価

ガラスバッジおよび電離箱を用いてさまざま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とらえていただきたい。

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 $15\ \text{mm}$, $20\ \text{mm}$, $30\ \text{mm}$ 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 $15\ \text{cm}$, $30\ \text{cm}$, $50\ \text{cm}$ 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わかる。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ことがわかる。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。Figure 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。Figure 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

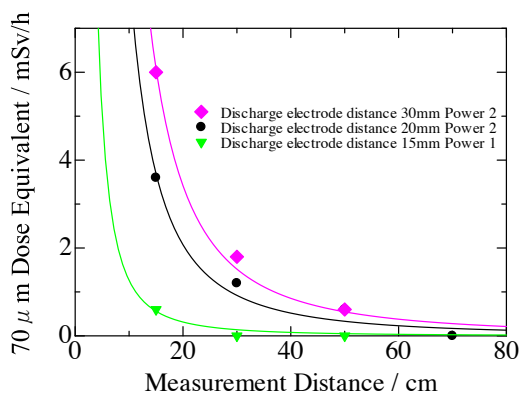


Figure 2. Correlation between discharge distance and dose rate.

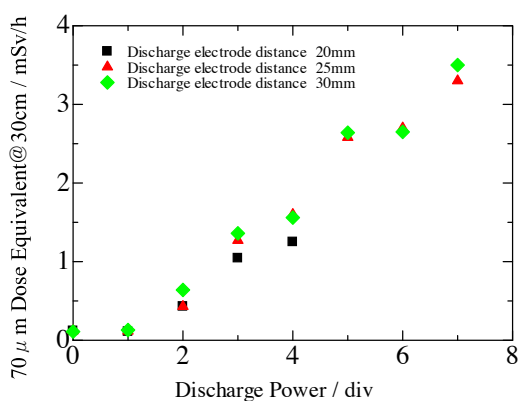


Figure 4. Correlation between discharge power and dose rate.

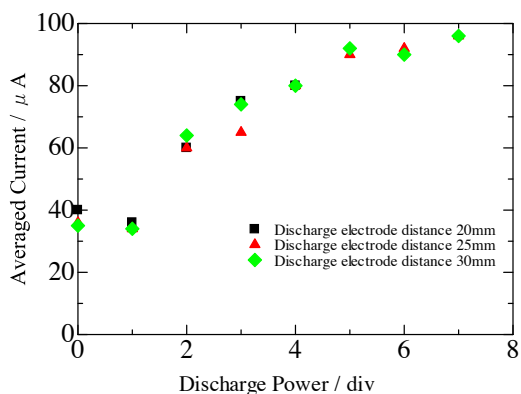


Figure 3. Correlation between discharge power and averaged current.

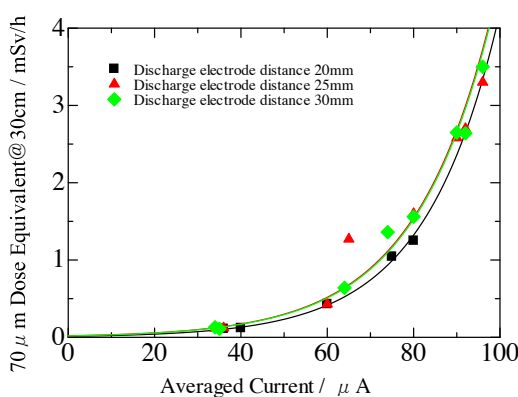


Figure 5. Correlation between averaged current and dose rate.

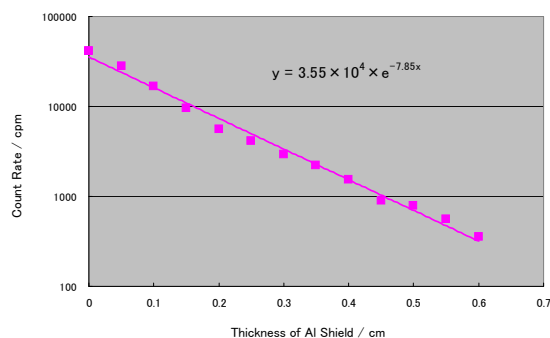


Figure 6. An estimation attempt of linear attenuation coefficient using a GM survey meter.

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 サーベイメ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。サーベイメ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。Figure 6 は放電極距離 20 mm, 50 cm 位置で SE International 社の Ranger GM サーベイメ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 でわず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であることが確認できた。

ガラスバ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 ($\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$) 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お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

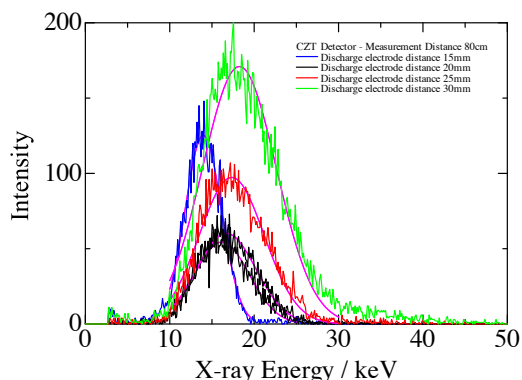


Figure 7. An energy spectrum of X-ray radiated from Crookes tube obtained by CZT detector.

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

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, $\phi 19 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 内径 $\phi 3 \text{ mm}$ 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, $\phi 0.5 \text{ mm}$ 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わず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、周辺の空気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、湿度などの影響をあま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, 物理教育, 35 (1987) 150.
- 2) 大森儀郎, 第 22 回放医研環境セミナー「生活と放射線」, NIRS-M-105 (1995) 107.
- 3) 藤淵俊王, 井上創, 小原哲, 加藤英幸, 小林育夫, 細田正洋, 日本放射線安全管理学会誌, 10 (2011) 40.
- 4) 宇藤茂憲, 福岡教育大学紀要, 66 (第 3 分冊) (2017) 1.
- 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/siryu/030919/09-2.pdf>.
- 7) 大久保徹, 府川和弘, 野村貴美, 日本放射線安全管理学会誌, 15 (2016) 66.
- 8) 加藤秀起, 中村光一, 津坂昌利, 電気学会論文誌 C, 120 (2000) 1774.
- 9) 秋吉優史, 日本放射線安全管理学会誌, 16 (2017) 72.
- 10) 森千鶴夫, 緒方良至, 秋吉優史, 白井俊哉, 村上浩介, 羽澄大介, 中村嘉行, 神谷均, 宮川俊晴, 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).

〈著 者 略 歴〉

秋吉 優史: 2001 年 3 月 東京工業大学大学院理工学研究科原子核工学専攻 博士 (工学) 取得, 2001 年 4 月 東京工業大学原子炉工学研究所 講師, 2002 年 3 月

University of Virginia, School of Engineering and Applied Science, Research Associate, 2002 年 10 月 核燃料サイクル開発機構大洗工学センター燃料材料試験部 博士研究員, 2004 年 4 月 京都大学工学研究科原子核工学専攻 助手, 2015 年 4 月 大阪府立大学地域連携研究機構 准教授, 現在に至る.