

# 修士学位論文

## 診療用 X 線装置を用いた 電離箱式サーベイメータの校正の検討

(西暦) 2021 年 1 月 7 日 提出

東京都立大学大学院

人間健康科学研究科 博士前期課程 人間健康科学専攻

放射線科学域

学修番号 : 19897712

氏 名 : 鈴木 克直

(指導教員名 : 加藤 洋 )

## (西暦) 2020 年度 博士前期課程学位論文要旨

学位論文題名 (注: 学位論文題名が英語の場合は和訳をつけること)

診療用 X 線装置を用いた電離箱式サーベイメータの校正の検討

学位の種類: 修士 (放射線学)

東京都立大学大学院

人間健康科学研究科 博士前期課程 人間健康科学専攻 放射線科 学域

学修番号 19897712

氏名: 鈴木 克直

(指導教員名: 加藤 洋)

サーベイメータが示した値は必ずしも正確な値ではなく、正確な値とするために校正定数を求めておかなければならない。サーベイメータについては、医療法施行規則の通達等によって1年毎に校正することを求められている。

1 cm線量当量の測定には電離箱式サーベイメータが有用であるが、線量校正では $^{137}\text{Cs}$  (662 keV)  $\gamma$ 線源を用いているため、診断用X線領域での線質依存性は必ずしも保証されない。そのため、漏えいX線などのエネルギー領域の線量測定には、診断領域X線エネルギーによる校正が必要である。先行研究では工業用X線装置を用いて $\gamma$ 線標準場と同等の精度の校正定数が得られることが明らかにされている。JIS Z 4511より校正用のX線線源として推奨されているNシリーズを各医療施設に設置されている診療用X線装置で再現することができれば、線量計校正認定事業者等で既に校正されているサーベイメータを自施設で確認校正ができるのではないかと考えた。また、診断用X線装置は撮影時間が非常に短時間であるため、漏えい線量の評価が正確にできていない可能性がある。本研究では、各医療施設に設置されている診療用X線装置を用いて電離箱式サーベイメータの校正が可能か検証すること、短時間撮影時の漏えい線量測定の方法を見出すことを目的とした。

実験として、①診療用 X 線装置の性能評価 ②連続 X 線標準場の評価 ③サーベイメータの校正 ④短時間撮影時の漏えい線量の測定方法の検討 を行った。診療用 X 線装置の性能評価では、管電流変化による管電圧波形への影響および短時間特性の評価のため撮影時間の変化による蛍光量への影響を調べる。連続 X 線標準場の評価では、診療用 X 線装置に N-80 (N-100) の規格を満たすよう付加フィルタに銅板とアルミ板を貼り付けて、そこからさらに銅板を重ねていき第一半価層、第二半価層、均等度、実効エネルギー、線質係数を算出して N-80 (N-100) の値と比較する。サーベイメータの校正では、N-80 (N-100) の線質でサーベイメータを校正し、工業用 X 線装置での校正定数と  $^{137}\text{Cs}$  線源での校正定数と比較する。短時間撮影時の漏えい線量の測定方法の検討では、診療用 X 線装置を用いて実際の漏えい線量測定を想定した体系で測定をおこない、サーベイメータの時定数を算出する方法を見出す。

実験の結果診療用 X 線装置は装置毎に、また装置の使用状況によって経年劣化の度合いが蛍光量の違いに現れることが明らかになったため、サーベイメータの校正する際には波形や蛍光量が安定している装置を用いる必要があると明らかになった。また、診療用 X 線装置でも N-80 (N-100) の線質を作ることができ、その線質を用いてサーベイメータの校正ができることが明らかになった。さらに実際の漏えい線量測定を想定した実測値の結果から時定数を算出することができると明らかになった。

以上のことから、診療用 X 線装置を用いて電離箱式サーベイメータを校正することができ、また時定数を算出して短時間撮影時の漏えい線量の測定ができるということが明らかになった。

# 目次

## 第1章 序論

1.1 外部放射線の計測	1
1.2 サーベイメータの校正の現状および問題点	3
1.3 先行研究による報告	4
1.4 本研究の目的	6
1.5 本論文の構成	6

## 第2章 電離箱式サーベイメータの特性

2.1 電離箱	7
1) 電離箱の測定原理	7
2) 直流電離箱	8
2.2 電離箱式サーベイメータ	9
1) 電離箱式サーベイメータの規定値と特徴	9
2) 電離箱式サーベイメータのエネルギー特性および方向特性	10
2.3 時定数	11

## 第3章 連続X線標準場

3.1 線質	12
3.2 連続X線標準場の仕様	12
1) 線質の分類とNシリーズについて	12
2) 低エネルギーX線の $H_p(10)$ および $H^*(10)$ の取決め真値の決定 (30 kV以下)	14
① 一般	14
② 管電圧	14
③ フルエンススペクトルおよび換算係数	15
3.3 装置の性能および操作方法	15
1) X線装置	15
2) 管電圧	15
3) フィルタ	
① 一般	16
② 固定フィルタの構成	16
③ 固有フィルタの決定	16
④ 付加フィルタの構成	17
4) 他の方法を用いた線質評価	19

① 基準	19
② 装置	19
③ 測定方法	19
3.4 照射野の均一性および散乱線の評価他	19
1) 照射野の直径	19
2) 照射野の均一性	19
3) 散乱線	19

## 第4章 実験方法

4.1 使用機器	20
4.2 診療用X線装置の性能の評価	20
4.2.1 管電流の変化による影響の評価	21
4.2.2 撮影時間の変化による影響の評価	21
4.3 連続X線標準場の評価	21
4.4 電離箱式サーベイメータの校正	23
4.5 短時間撮影における漏えい線量の測定方法の検討	25

## 第5章 実験結果および考察

5.1 診療用X線装置の性能の評価	26
5.1.1 管電流の変化による影響の評価	26
5.1.2 撮影時間の変化による影響の評価	30
5.2 連続X線標準場の評価	33
5.2.1 N-80線質	33
5.2.2 N-100線質	34
5.3 電離箱式サーベイメータの校正	35
5.4 短時間撮影における漏えい線量の測定方法の検討	36

## 第6章 結論および今後の検討

6.1 結論	39
6.2 今後の展望	39

参考文献	40
------	----

謝辞	41
----	----

# 第1章 序論

## 1.1 外部放射線の計測

外部放射線の計測ではX線、 $\gamma$ 線、中性子線の測定が主な対象である。外部放射線の測定は医療法施行規則や放射性同位元素等の規制に関する法律などの法令によって義務づけられている。法令によって外部放射線の測定が必要な場所をTable 1-1に、測定回数をTable 1-2に示す。そのほかに外部放射線の測定は、作業空間での線量や線量率の確認、管理区域の設定や遮へいの確認などに必要である。法令に示されている線量限度をTable 1-3に示す。

Table 1-1 外部放射線の測定が義務づけられている場所

放射性同位元素等の規制に関する法律	医療法施行規則
使用施設	X線診療室
廃棄物詰替施設	診療用高エネルギー放射線発生装置使用室
貯蔵施設	診療用粒子線照射装置使用室
廃棄物貯蔵施設	診療用放射線照射装置使用室
廃棄施設	診療用放射線照射器具使用室
管理区域の境界	放射性同位元素装備診療機器使用室
事業所内の人が居住する区域	診療用放射性同位元素使用室
事業所の境界	陽電子断層撮影診療用放射性同位元素使用室 貯蔵施設 廃棄施設 放射線治療病室 管理区域の境界 病院または診療所の人々が居住する区域 病院または診療所の敷地の境界

Table 1-2 外部放射線の測定の回数

測定の種類	回数
作業開始前	1回
密封線源や装置等を固定して使用し 遮へい壁等が一定している場合	1回/6か月
上記以外	1回/1か月
下限数量の1000倍以下の密封線源のみ	線源交換時および6か月に1回

Table 1-3 法令に定める線量限度

区分	線量	1時間当りの線量
放射線作業者が 常時立ち入る場所	1 mSv/週	25 $\mu$ Sv/h (1週間=40時間)
管理区域の境界	1.3 mSv/3月	2.6 $\mu$ Sv/h (3か月間=500時間)
居住区域および 事業所の境界	250 $\mu$ Sv/3月	0.11 $\mu$ Sv/h (3か月間=2184時間)
病院・診療所の病室	1.3 mSv/3月	0.60 $\mu$ Sv/h (3か月間=2184時間)

外部放射線の測定は各種サーベイメータによっておこなわれることが一般的である。一般に使用されている各種サーベイメータについてTable 1-4に示す。これらのサーベイメータから測定対象となる放射線の線質や線量率に応じた選択が適切になされなければならない。GM管式やシンチレーション式、半導体式なども表示として $\mu$ Sv/hrを使用している場合があるが、基本的には測定機に入射してくる放射線をパルスとして計測しているためある程度の誤差を含むことになる。そのため、1 cm線量当量の計測には電離箱式サーベイメータが使用されている (Fig.1-1) <sup>1)</sup>。

Table 1-4 各種サーベイメータの特性

検出器	測定放射線	表示	その他の特性
電離箱	X、 $\gamma$	mSv、 $\mu$ Sv/h、mSv/h	測定エネルギー範囲 (30 keV~2 MeV)、測定レンジは数段階の切替え式、Gy表示のものもある。 積算型の品種は少ない。
GM管式	$\beta$ ( $\gamma$ )	$\mu$ Sv/h、cpm	測定エネルギー範囲は $\gamma$ 線で40 keV以上、測定レンジは数段階の切替え式、ハロゲン消滅型GM管用
NaI (Tl) シンチレーション式	X、 $\gamma$	$\mu$ Sv/h、cpm	測定レンジは50 keV以上、測定レンジは数段階の切替え式、Gy表示のものや <sup>125</sup> I測定用もある
半導体式	$\gamma$ (X)	$\mu$ Sv/h、mSv/h	測定エネルギー範囲 (40 keV~2 MeV)、シリコン半導体を使用
中性子用	熱中性子~ 速中性子	$\mu$ Sv/h、mSv/h	測定エネルギー範囲 (0.025 MeV~15 MeV)、 <sup>3</sup> He比例係数使用



Fig.1-1 電離箱式サーベイメータ

## 1.2 サーベイメータの校正の現状および問題点

サーベイメータが示した値は必ずしも正確な値ではない。正確な値とするために校正定数を求めておかなければならない。校正は一般には校正機関において求め、国家標準とのトレーサビリティがとれていることが必要である。測定値は校正定数を乗ずることによって正しい値となる。サーベイメータ等については、医療法施行規則の通達等によって1年毎に校正することを求めている<sup>1)</sup>。サーベイメータの校正には基準線源としてエネルギーが662 keV の<sup>137</sup>Cs線源が用いられているが、これはサーベイメータが高エネルギー用の線量測定を想定して作られているためである。<sup>137</sup>Cs線源は線スペクトルであり診断領域とはエネルギーやスペクトルが異なるため、<sup>137</sup>Cs線源で校正されたサーベイメータを用いて診断領域の漏えいX線を測定してもエネルギー特性は必ずしも保証されない<sup>2)</sup>。以上のことから、診断領域の線量測定を行うためには診断領域のエネルギーにより校正する必要があると言われている。

### 1.3 先行研究による報告

JIS Z 4511<sup>3)</sup>にはγ線標準場のほかに連続X線標準場を用いて測定器を校正する方法が記されている。そして若月らによると、連続X線標準場として規定されている線質指標シリーズ(QIシリーズ)においてQIが0.8となるX線線源を用いることで撮影室の漏えい線量を測定するサーベイメータの校正が可能となり、QIが0.8となるX線線源で得られた校正校正定数は、<sup>57</sup>Coを線源としたγ線による校正定数と大きな差は見られないことから、同等の精度の校正定数が得られたとされている<sup>2)</sup>。しかし、QIシリーズは日本独自に定められた連続X線標準場であり、世界的には狭スペクトルシリーズ(Nシリーズ)での校正を行うことが推奨されている。また、この先行研究<sup>2)</sup>は工業用X線装置を用いているが、現在の日本において線量計校正認定事業者はTable 1-5に示す4施設のみである。診断領域におけるX線の実効エネルギーは20～60 keVであり、各認定事業者で行えるエネルギー範囲を考えると、一般撮影領域で使用するエネルギーでサーベイメータを校正できる施設は放射線計測協会(Institute of Radiation Measurements; IRM)および日本品質保証機構(Japan Quality Assurance organization; JQA)の2施設に限られる<sup>4)</sup>。現在、基準線量計を備えた補助的機関(以下、線量標準センターと示す)が学会レベルで行われている(Table 1-6)<sup>5)6)</sup>。しかし、線量標準センターも現在12施設しかなく全国にある医療施設は8,000余有り<sup>4)</sup>であることから、全てのサーベイメータの校正を行うことは難しいと考えられる。

Table 1-5 計量法に基づく本邦の線量計校正認定事業者

認定事業所の名称	主要な事業範囲	
	光子エネルギー	照射線量
千代田テクノル	660～1250 keV	0.6 μC/kg～23 mC/kg
日本アイソトープ協会	50～200 keV	0.1 μC/kg～10 μC/kg
	200～1250 keV	0.1 μC/kg～40 μC/kg
放射線計測協会	30～200 keV	1.2 μC/kg～0.13 C/kg
	200～1250 keV	26 nC/kg～0.13 C/kg
日本品質保証機構	10～30 keV	0.1 μC/kg～30 mC/kg
	30～200 keV	0.1 μC/kg～60 mC/kg



Table 1-6 全国の線量標準センターおよび校正可能 X 線源

センター名	一般撮影領域	乳房撮影領域	サーベイメータ	RQA 線質 <sup>*1</sup>
北海道大学医学部保健学科	○	○	×	×
東北大学医学部保健学科	○	○	○	○
新潟医療福祉大学医療技術学部	○	○	○	×
茨城県立医療大学保健医療学科	○	○	○	○
駒澤大学医療健康科学部	○	○	○	○
東京都立大学健康福祉学部	○	○	○	○
金沢大学医薬保健学域保健学類	○	○	×	×
名古屋大学大学院	○	○	×	×
京都医療科学大学医療科学部	○	○	○	○
広島大学大学院医歯薬保健学研究院	○	○	×	×
徳島大学医学部保健学科	○	○	×	×
九州大学大学院	○	○	×	×

\*1 Radiation Qualities based on a phantom made up of an aluminum Added filter (RQA) 線質は現在設定に向け協議中

#### 1.4 本研究の目的

先行研究<sup>2)</sup>より、工業用X線装置を用いて $\gamma$ 線標準場と同等の精度の校正定数が得られることが明らかになっている。JIS Z 4511<sup>3)</sup>よりQIが0.8となるX線線源のX線線源はNシリーズと線質が近いことから、Nシリーズにおいて同様に検証することが必要である。またNシリーズのX線線源を各医療施設に設置されている診療用X線装置で再現することができれば、線量計校正認定事業者や線量標準センターで既に校正されているサーベイメータを自施設で確認校正することができるのではないかと考えた。本研究では、各医療施設に設置されている診療用X線装置を用いて電離箱式サーベイメータを校正することができるか検証することを目的とした。

#### 1.5 本論文の構成

本論文は全6章から成り、各章では以下の内容について述べる。

- 第1章 本研究の背景、目的
- 第2章 電離箱式サーベイメータの特性
- 第3章 連続X線標準場について
- 第4章 行った実験の方法
- 第5章 各実験の結果と考察
- 第6章 結論および今後の展望

## 第2章 電離箱式サーベイメータの特性

### 2.1 電離箱<sup>1)</sup>

#### 1) 電離箱の測定原理

電離性放射線が気体中に入り、その原子・分子を電離すると多数の陽イオンと電子の対が生じる。これら気体中に生じたイオンを収集するため、Fig.2-1に示すように正負の電極に電圧 $V$ を印加する。この電場により陽イオン（正電荷を持った分子または原子）と電子（あるいは陰イオン）はそれぞれ負・正の電極方向へ加速され、それらイオンの移動によってイオンの収集が行われる。そして、イオン収集方法には電離電流 $i$ として取り出す方式（電流モード）と、電極に誘起される電圧変化をパルスとして取り出す方式（パルスモード）とがある。検出器への印加電圧 $V$ と収集イオン数（波高値に相当）の関係、すなわち、電圧特性を求めるとFig.2-2のようになる。どの領域の電圧を選ぶかによってパルス高に大きな違いが見られる。それぞれの電圧範囲により、I：イオン再結合領域、II：電離箱領域、III：比例計数（管）領域、IV：空間電荷制限（あるいは境界）領域、V：GM計数（管）領域、VI：持続（連続）放電領域と名付けられている。

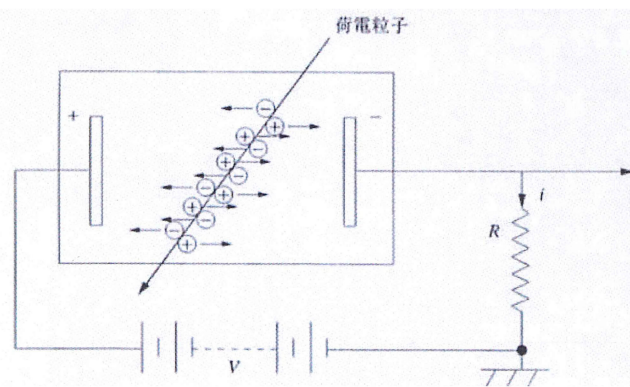


Fig.2-1 気体の電離による放射線の検出

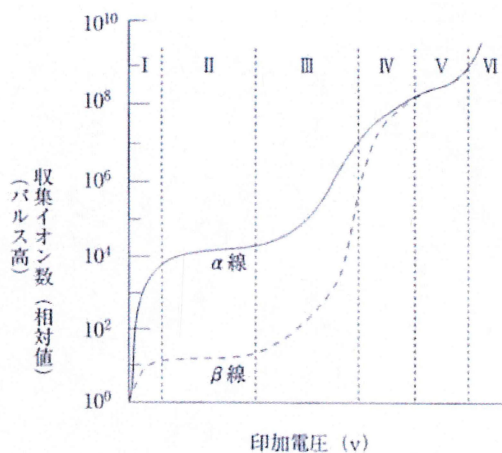


Fig.2-2 印加電圧と収集イオン数の関係

Fig.2-2の特性から明らかとなり、印加電圧Vが低い場合には気体中で生じたイオン対が正・負の電極方向へ互いに移動する間にイオンの再結合を起し、折角生成されたイオン対の一部が中性分子・原子に戻る結果、収集イオン数は減少する（イオン再結合領域）。印加電圧Vをある程度高くすると、気体中で生じたイオン対はすべて電極に到達するようになり、ほぼ飽和値（一定数）のイオンが収集される（電離箱領域）。電離箱はこの領域で使用する測定器であり、電流モードで動作させた場合に印加電圧と電離電流の関係を求めるとFig.2-3のようになる。低い印加電圧ではイオン再結合のため電離電流は小さいが、印加電圧が高くなるにつれほぼ一定値を示すようになる。このときの電流を飽和電離電流といい、印加電圧に影響されない状態で測定できる。この種の電離箱を直流電離箱というが、飽和に達する電圧は電離箱の構造（形状、気体の種類・圧力等）、測定放射線の種類・強度（線量率）等によって異なり、特に比電離あるいは強度の大きい放射線ほど飽和になりにくい。電離箱には直流電離箱とパルス電離箱があるが、電離箱式サーベイメータには直流電離箱が用いられている。

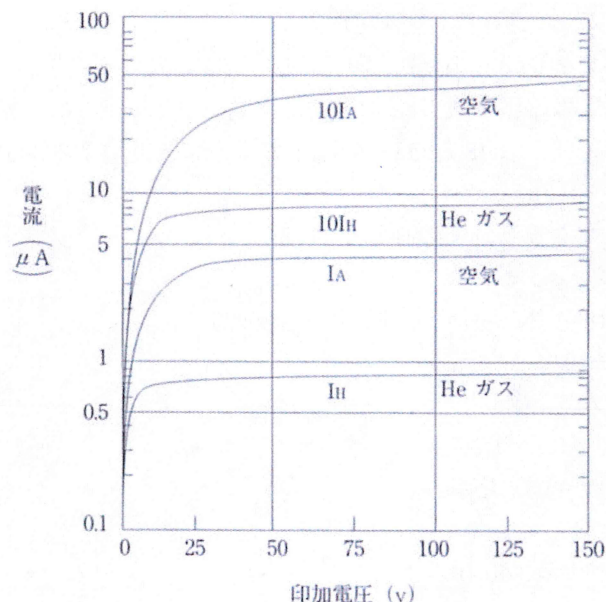


Fig.2-3 印加電圧と電離電流の関係

## 2) 直流電離箱

測定する電離電流は測定内容によって  $10^{-6}$  A 程度の比較的大きい電流から  $10^{-12}$  A 程度の微小電流までかなりの幅がある。大きい電流の場合は高感度電流計で直接測定も可能であるが、微小電流の場合は電流計による直接測定は難しく、一般には  $10^9 \sim 10^{12} \Omega$  の高抵抗に電離電流を流してその両端の電位差を測定するか、高絶縁性のコンデンサに一定時間充電して、その端子間の電荷を測定する方法がとられている (Fig.2-4)。また、さらに微弱な電流を測定する場合は増幅する必要があり、高入力インピーダンスの増幅器として FET (電界効果形トランジスタ) を用いた差動直流増幅器・OP アンプ、振動容量形増幅器などが使用される。

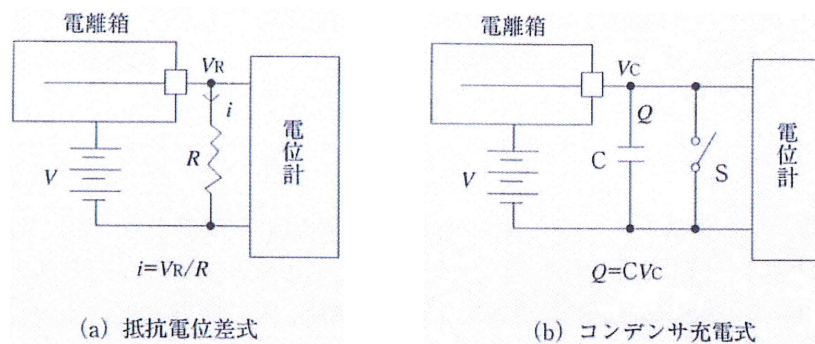


Fig.2-4 電離電流の測定法

## 2.2 電離箱式サーベイメータ

### 1) 電離箱式サーベイメータの規定値と特徴<sup>2)</sup>

可搬型の電離箱はモニタリング用サーベイメータとして広く使用されている。動作は通常、直流電離箱で封入気体体積は数百 $\text{cm}^3$ である。X線および $\gamma$ 線の1 cm線量当量率を測定する電離箱式サーベイメータはJIS Z 4333<sup>3)</sup>で以下のように規定されている。

- ① 基準線量当量率に対する百分率の許容範囲
  - 直線目盛： $\pm 10\%$
  - 対数目盛： $\pm 0.04 \times N$  (N：指示範囲のデガード数)
  - デジタル目盛： $\pm 10\%$
- ② エネルギー依存性の許容範囲
  - 30 keV～1.5 MeV： $0.8 \sim 1.2$
- ③ 方向依存性、指示値変動、応答時間
  - 方向依存性： $\pm 20\%$
  - 指示値変動：変動係数が0.10以下
  - 応答時間：30秒以下
- ④ 温度依存性の許容範囲
  - 5～35 $^{\circ}\text{C}$ ： $\pm 10\%$

電離箱式サーベイメータで壁厚に比較して入射放射線のエネルギーが高いとき、電子平衡が成り立たず正確な測定がおこなえず、さらに感度が低下することがある。Table 2-1に電子平衡を成立させるために必要な空気等価壁厚を示す。ただし、電子平衡壁厚の半分の壁厚の電離箱で測定しても影響は数%である。高いエネルギーの光子を測定するときは、電子平衡厚を考慮したビルドアップキャップを電離箱に付加する必要がある。

Table 2-1 電子平衡を成立するために必要な空気等価壁厚

光子エネルギー [ MeV ]	壁厚 [ g/cm <sup>2</sup> ]
0.02	0.0008
0.05	0.0042
0.1	0.014
0.2	0.044
0.5	0.17
1	0.43
2	0.96
5	2.5
10	4.9

2) 電離箱式サーベイメータのエネルギー特性および方向特性<sup>1)</sup>

Fig.2-5 は各サーベイメータについてγ線エネルギーに対する照射線量[ R ]当たりの応答感度を示したもので、点線は 1 cm 線量当量に対応したエネルギー特性である。<sup>137</sup>Cs 線源で校正してあるが、この曲線と電離箱式での曲線を比較すると、30 keV 以下では過大評価になるが 30~600 keV では過小評価になる。GM 管式、シンチレーション式と比較すると、特に 100 keV 以下のエネルギー領域でのエネルギー特性は良好である。感度の方向特性は電離箱の後方にメータ、回路基板等存在するため、後方からの感度低下を認めるが、前方±90° の範囲での感度特性は非常に優れている (Fig.2-6)。

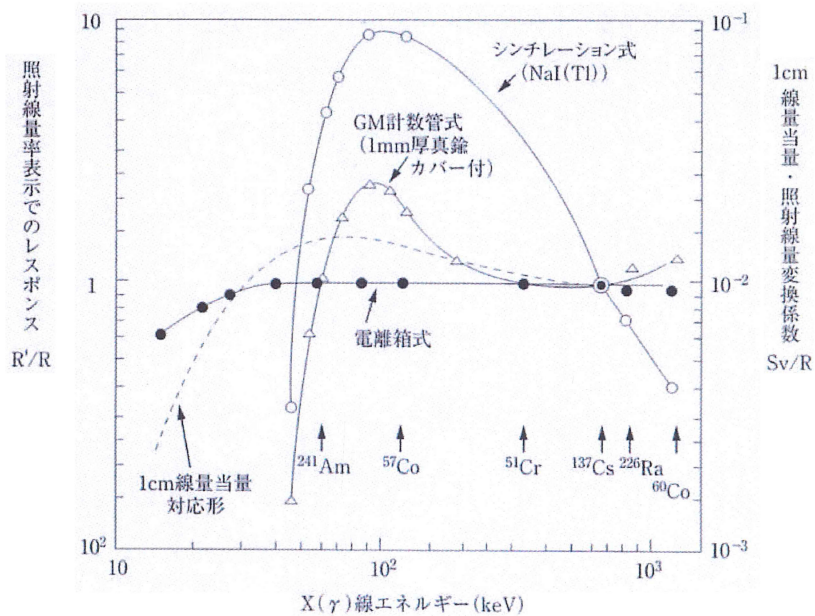


Fig.2-5 各種サーベイメータの光子エネルギー応答特性

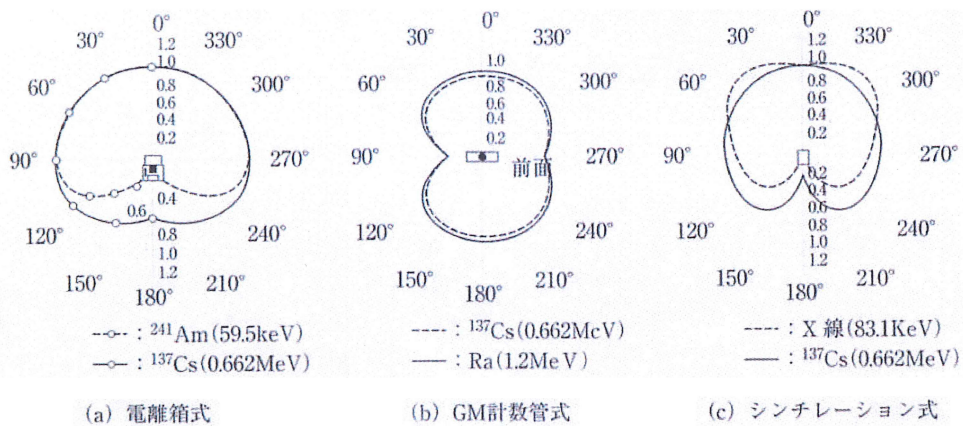


Fig.2-6 各種サーベイメータの方向特性

### 2.3 時定数<sup>2)</sup>

サーベイメータは計数率計 (rate meter) であり、必ず時定数を持っている。短い時定数では測定値に対する応答は早いですが、指針の振れが大きく定まった測定値として読み取りにくい。長い時定数では応答は遅いが指針の振れは小さく、測定値も読みやすい。一般に数秒～10数秒のものが多く、低計数率では長く、高計数率では短く設定されている。種類によっては3、10、30秒の切替え式のものもある。測定に際して注意することは、時定数 (CR) 10秒の場合には、1CR=10秒後では指針は最終指示値の63%しか示さない。2CR=20秒で86%、3CRで95%、4CRで98%を示すことになる。したがって、正確な測定のためには3CR～4CRの測定時間が経過した後に指針を読み取る必要がある。

## 第3章 連続X線標準場

### 3.1 X線線質

連続X線標準場<sup>1)</sup>で用いるX線線質は、次のパラメータを用いて特徴付ける。

- a) 平均エネルギー  $\bar{E}$  [keV]
- b) 分解能 RE [%]
- c) 半価層 HVL アルミニウム（以下、Al）や銅（以下、Cu）などを用い、単位は mm で表す。
- d) 均等度 h
- e) 実効エネルギー  $E_{\text{eff}}$
- f) 線質指標 QI 線質指標QI は、次式による。 $QI = E_{\text{eff}}/E_{\text{max}}$

ここで、 $E_{\text{max}}$  : X線スペクトルの最大エネルギー

X線線質は、X線管の高電圧、全フィルタの厚さ・組成およびターゲットの材質・角度に依存する。

### 3.2 連続X線標準場の仕様

#### 1) 線質の分類とNシリーズについて

連続X線標準場の線質は、次の5つに分類する。

- a) 低空気カーマ率シリーズ (Lシリーズ)
- b) 狭スペクトルシリーズ (Nシリーズ)
- c) 広スペクトルシリーズ (Wシリーズ)
- d) 高空気カーマ率シリーズ (Hシリーズ)
- e) 線質指標シリーズ (QIシリーズ)

Table 3-1およびTable 3-2にそれぞれの線質の仕様を規定する。Nシリーズの線質の詳細は、Table 3-3による。

Nシリーズは分解能が高く、検出器のエネルギー特性の評価に適している。Nシリーズの平均エネルギーはTable 3-1に規定するそれぞれの値の±3%、分解能は±10%であることをスペクトル測定によって確認することが望ましい。Nシリーズの線質で30 kV以下の線質についても、スペクトル測定によって平均エネルギーが±5%、分解能が±15%であることを確認することが望ましい。ただし、30 kV以下の線質における $H_p(10)$ および $H^*(10)$ による校正を行う場合の確認方法は、3.2の2)で述べる内容にて規定する。

Nシリーズの中でAlの付加フィルタで厚さが1 mm未満を用いた時の線質では、X線管のターゲット角度、試験点までの空気層などによって、平均エネルギー、分解能、半価層などが大きな影響を受ける。スペクトル測定によって線質の確認を行わない場合は、3.3の4)で述べる内容で規定する方法によって線質の確認を行わなければならない。



Table 3-1 連続 X 線場の概要 (L、N、W 及び H シリーズ)

線質	分解能 $R_E$ [%]	均等度 $h$ (概算値)	空気カーマ率 <sup>a), b)</sup> [Gy · h <sup>-1</sup> ]
Lシリーズ	18～22	1.0	$3 \times 10^{-4}$ <sup>c)</sup>
Nシリーズ	27～37	0.75～1.0	$10^{-3} \sim 10^{-2}$ <sup>c)</sup>
Wシリーズ	48～57	0.67～0.98	$10^{-2} \sim 10^{-1}$ <sup>c)</sup>
Hシリーズ	規定せず	0.64～0.86	$10^{-2} \sim 0.5$

注 a) 距離1 m、管電流1 mA

b) 荷電粒子平衡状態では空気カーマは、空気吸収線量と同等である。

c) 実効エネルギーが30 keV以下の場合、これらの線量率と異なる場合がある。

Table 3-2 連続 X 線場の概要 (QI シリーズ)

線質	分解能 $R_E$ [%]	均等度 $h$ (概算値)	空気カーマ率 <sup>a)</sup> [Gy · h <sup>-1</sup> ]
QI 0.6	60～74	0.70～0.82	$6 \times 10^{-2} \sim 2.4 \times 10^{-1}$
QI 0.7	47～58	0.81～0.92	$2 \times 10^{-2} \sim 1.2 \times 10^{-1}$
QI 0.8	30～38	0.89～0.95	$4 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-2}$
QI 0.9	15～19	0.96～0.99	$7 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-4}$

注記 QIの区分に対する分解能、均等度および空気カーマ率は、管電圧20 kV～300 kVの13の線質での範囲で示す。

注a) X線装置の管電流が1 mAで、各管電圧での線質のときの、X線焦点から距離1 mの試験点における空気カーマ率を示す。

Table 3-3 Nシリーズの特徴

平均エネルギー $\bar{E}$ keV	分解能 $R_E$ %	管電圧 <sup>a)</sup> kV	付加フィルタ <sup>b)</sup> mm				第一半価層 <sup>d)</sup> mm	第二半価層 <sup>d)</sup> mm
			Pb	Sn	Cu	Al		
8	28	10				0.1 <sup>c)</sup>	0.047 Al	0.052 Al
12	33	15				0.5 <sup>c)</sup>	0.14 Al	0.16 Al
16	34	20				1.0 <sup>c)</sup>	0.32 Al	0.37 Al
20	33	25				2.0 <sup>c)</sup>	0.66 Al	0.73 Al
24	32	30				4.0 <sup>c)</sup>	1.15 Al	1.30 Al
33	30	40			0.21		0.084 Cu	0.091 Cu
48	36	60			0.6		0.24 Cu	0.26 Cu
65	32	80			2.0		0.58 Cu	0.62 Cu
83	28	100			5.0		1.11 Cu	1.17 Cu
100	27	120		1.0	5.0		1.71 Cu	1.77 Cu
118	37	150		2.5			2.36 Cu	2.47 Cu
164	30	200	1.0	3.0	2.0		3.99 Cu	4.05 Cu
208	28	250	3.0	2.0			5.19 Cu	5.23 Cu
250	27	300	5.0	3.0			6.12 Cu	6.15 Cu

注 a) 印加される管電圧。

b) 管電圧10 kV、15 kV、20 kV、25 kVおよび30 kVについては、Be1 mm厚を固有フィルタとする。それ以外の管電圧は、固有フィルタとしてAl4 mm厚相当となるよう調整する。

c) 固有フィルタ厚は、Be1 mm厚であるが、平均エネルギーが±5%、分解能が±15%以内であれば、異なる固有フィルタを用いてもよい。

d) X線焦点から1 mの位置での測定。

## 2) 低エネルギーX線のHp(10)およびH\*(10)の取決め真値の決定 (30 kV以下)

### ① 一般

低エネルギーX線標準場の線量率の取決め真値の決定方法には、手法Iおよび手法IIがある。手法Iは、スペクトロメータによるスペクトル測定によって換算係数を評価し、線量率を決定する方法である。手法IIは、Hp(10)およびH\*(10) に対してエネルギー特性がよい電離箱などを用いて線量率を決定する方法である。

### ② 管電圧

Hp(10)およびH\*(10)は、空気カーマと比べて管電圧の影響が大きくなる。Table 3-4に、換算係数が2%変化する管電圧の変化量を示す。管電圧は、Table 3-4の変化量を超えてはならない。

③ フルエンススペクトルおよび換算係数

空気カーマから線量当量への換算には、スペクトル情報が必要である。フルエンスー空気カーマ換算係数を用いてフルエンススペクトルを空気カーマスペクトルに変換し、さらに、Hp(10)およびH\*(10)へ換算する。ここで用いる換算係数は、スペクトル測定時における空気密度だけに限定して用いることができる。

Table 3-4 管電圧 30 kV 以下における換算係数が 2 % 変化する管電圧の変化量

線質	管電圧 U kV	平均エネルギー keV	換算係数が 2 % 変化する 管電圧の変化量 ΔU		ΔU/U	
			V		%	
			h <sub>p,k</sub> (10,0° ) h* <sub>k</sub> (10)	h <sub>p,k</sub> (10,60° )	h <sub>p,k</sub> (10,0° ) h* <sub>k</sub> (10)	h <sub>p,k</sub> (10,60° )
L-10	10	9.2	12	5.4	0.12	0.054
L-20	20	17.4	150	79	0.74	0.4
L-30	30	26.7	450	320	1.5	1.1
N-10	10	8.9	10	5.6	0.1	0.056
N-15	15	12.7	41	22	0.28	0.15
N-20	20	16.5	130	67	0.63	0.33
N-25	25	20.4	250	150	0.99	0.61
N-30	30	24.7	450	300	1.5	0.99
H-10	10	8.7	9	4.6	0.09	0.046
H-20	20	14	83	41	0.41	0.21
H-30	30	20.1	300	180	1	0.59

3.3 装置の性能および操作方法

1) X線装置

X線は、管電圧が10%以下のリップルのX線装置によって発生されなければならない。管電圧を表示する機器は、±1%の変動が計測できなければならない。

X線管のターゲットはタングステン製の反射型のものであって、電子の進行方向との角度は20°以上とする。照射中の管電圧は、平均値から±1%で安定でなければならない。

2) 管電圧

管電圧を表示する機器は、実際に用いる測定環境に応じて校正されていない。その校正は、校正された分圧抵抗を用いる方法または高分解能のスペクトロメトリを用いた最大光子エネルギーの測定による。スペクトロメトリによる方法を用いる場合は、高エネルギー領域については、エネルギースペクトルをエネルギー軸へ外挿して最大光子エネ

ルギーを求めてよい。管電圧の取決め真値は、±2%の範囲で既知でなければならない。ただし、Table 3-3の線質を3.3の4)によって設定する場合、または管電圧30 kV 以下について、3.2の2)によって設定する場合には、分圧抵抗を用いる方法またはスペクトロメトリによる方法によって管電圧を評価しなくてもよい。

### 3) フィルタ

#### ① 一般

フィルタは、固定フィルタおよび付加フィルタから構成される。固定フィルタは、それぞれのX線管、透過形電離箱の膜などの固有フィルタおよび調整用Alフィルタで構成される。

#### ② 固定フィルタの構成

固定フィルタの構成は、次のように定められている。

- a) 固定フィルタは、X線管の固有フィルタ、モニタに透過形電離箱を使っている場合のその膜厚およびAlフィルタを含み、管電圧60 kVに対してAl フィルタ4 mm厚相当とする。Alフィルタは、付加フィルタからの特性X線を減弱させるために、付加フィルタの後に配置する。
- b) X線管の固有フィルタは、様々な組成（ガラス、オイル、窓など）から構成されることから、3.3の3) ③に規定するように、第一半価層を測定することによって、その厚さを推定することができる。固有フィルタは、Al等価厚で3.5 mm以下であることが望ましい。
- c) 固有フィルタは、その厚さが変化していないかどうか定期的に確認し、固定フィルタの厚さで調整する。

#### ③ 固有フィルタの決定

固有フィルタの測定は、純度99.9 %以上のAlフィルタを用いて、管電圧60 kV、付加フィルタなしの状態で行うように測定する。

- a) 半価層の測定方法は、ICRU Report 10bによることが望ましい。
- b) モニタに透過形電離箱を用いる場合は、Alフィルタからの後方散乱を低減させるために、二つのコリメータの間に設置することが望ましい（Fig.3-1参照）。また、Alフィルタは、コリメータの後ろに設置することが望ましい。
- c) 第一半価層の測定は、エネルギー特性が既知の電離箱を用いなければならない。スペクトルの変化による電離箱のレスポンスの変化は、必要に応じて補正しなければならない。
- d) 固有フィルタの測定では、Alフィルタからの散乱が無視できるように測定する。100 kVを超える管電圧の放射線では、無限に小さな照射野に外挿した値を用いることが望ましい。

- e) Alフィルタは、X線焦点と電離箱との中間点に設置することが望ましい。電離箱の設置位置における照射野は、電離箱全体に放射線を均一に照射できる十分な大きさでなければならない。Alフィルタから検出器までの距離は、検出器位置での照射野直径の5倍以上が望ましい。
- f) 固有フィルタの厚さは、Alの減衰曲線を作成して第一半価層を決定し、Table3-5を用いて推定する。結果は0.1 mm単位で丸める。連続X線標準場では、付加フィルタに比べて固有フィルタが薄いため、60 kVで求めた固有フィルタの値を他の電圧で用いてもよい。  
注記：固有フィルタは、その組成に対してエネルギーの関数として変化する。

#### ④ 付加フィルタの構成

付加フィルタの構成はTable 3-3に規定する鉛（以下、Pb）、すず（以下、Sn）、CuおよびAlの付加フィルタを用いる。

付加フィルタは、厚さの精度が±5 %で、孔、ボイド、ひびなどがない均質なものとし、Table 3-6に規定する純度であることが望ましい。付加フィルタは、X線管側から原子番号が大きい順に設置しなければならない。

Table 3-5 固有フィルタ

60 kVにおける第一半価層 [ mmAl ]	固有フィルタ [ mmAl ]
0.33	0.25
0.38	0.3
0.54	0.4
0.67	0.5
0.82	0.6
1.02	0.8
1.15	1
1.54	1.5
1.83	2
2.11	2.5
2.35	3
2.56	3.5
2.75	4
2.94	4.5
3.08	5
3.35	6
3.56	7

Table 3-6 付加フィルタの仕様

材質	純度	密度 [ g·cm <sup>-3</sup> ]
Al	99.9 %	2.70
Cu	99.9 %	8.94
Sn	99.9 %	7.28
Pb	99.9 %	11.3

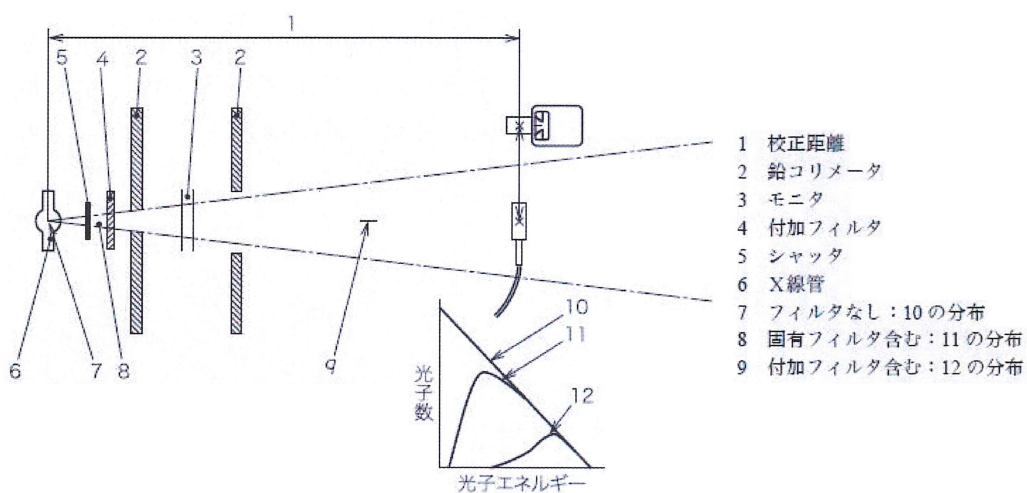


Fig.3-1 モニタを用いた X 線装置の幾何学的配置及び各位置での X 線スペクトルの例

#### 4) 他の方法を用いた線質評価

##### ① 基準

測定した第一半価層および第二半価層がTable 3-3に規定する値と±5%で一致している場合は、線質が同一とみなす。管電圧が100 kVを超える線質では、半価層は照射野直径を無限小(0 mm)に外挿して求めなければならない。

##### ② 装置

半価層測定用の空気カーマ(率)測定器は、繰返し性が0.3%以下の検出器および測定器によって構成する。測定対象のエネルギー領域において、空気カーマに対するエネルギー特性がよく、かつ既知の検出器を用いなければならない。照射中の空気カーマ率の変動を補正する必要がある場合には、モニタを用いる。

##### ③ 測定方法

Table 3-3に対応した線質について、次の方法によって評価しなければならない。空気カーマ率 $I_d$ およびフィルタ厚 $d$ に対して、 $\log_e(I_d) = f(d)$ として減衰曲線を作成する。この減衰曲線によって第一、第二半価層を評価する。これらの半価層がTable 3-3と±5%で一致していればNシリーズとみなす。

#### 3.4 照射野の均一性および散乱線の評価他

##### 1) 照射野の直径

照射野直径は、試験点に設置した検出器全体を一様に照射する大きさとする。試験点は、X線の焦点から50 cm以内に近づけてはならない。

##### 2) 照射野の均一性

試験点に設置した検出器の有感領域における空気カーマ率の均一性は、±5%とする。

##### 3) 散乱線

次の二つの方法によって散乱線の割合の測定を行い、その影響が空気カーマ率に対して5%以下でなければならない。これらの測定は、エネルギー特性および方向特性のよい電離箱を用いる。低エネルギー線質についても均一性および散乱線の影響は、次の項目による。ただし、試験1は空気による減弱補正が大きいいため、スペクトル測定と併用して行わなければならない。

試験1 ビーム軸上で照射距離を変えて空気カーマ率の測定を行い、空気による減弱補正、および必要に応じて、照射野の均一性に対する補正を行い、線源-検出器間における距離の逆二乗則に対して±5%であることを確認する。この場合の線源は、X線管焦点とする。

試験2 試験1における各照射距離において、ビーム軸に垂直な平面内で、照射野半径の2倍に等しい距離だけ検出器を移動させた後、空気カーマ率を測定する。直接ビームの外側にある散乱線の空気カーマ率は、中心軸上に対応する空気カーマ率の5%以下であることを確認する。

## 第4章 実験方法

### 4.1 使用機器

全実験に共通して診療用X線装置はUD150B-40（島津）、電離箱式サーベイメータはICS-313（HITACHI）S/N R05433を使用した。また、診療用X線装置の性能評価には蛍光量計：EY-1002D（トーレック株式会社）とオシロスコープ：DS-5105B（IWATSU）を、連続X線標準場の評価には電位計：EMF520R（EMFジャパン）0005、1リットルチャンバー：TN32002（PTW）000715、銅板およびアルミ板を、電離箱式サーベイメータの校正には発泡スチロール（硬質、軟質）を、短時間撮影における漏えい線量の測定方法の検討には散乱体としてPMMAファントムを使用した。

### 4.2 診療用X線装置の性能の評価

JIS Z 4511<sup>1)</sup>によると「X線は、管電圧が10 %以下のリプル百分率のX線装置によって発生されなければならない。」と定められている。診療用X線装置がこの規格を満たすことを確認するため、蛍光量計とオシロスコープを用いてFig.4-1～4-2のように蛍光量計とオシロスコープを接続し蛍光量計～X線管の距離を2 mとした実験体系を立てて、管電圧80 kV（付加フィルタあり、なし）と100 kV（付加フィルタあり、なし）それぞれの場合におけるオシロスコープの波形を観察する。

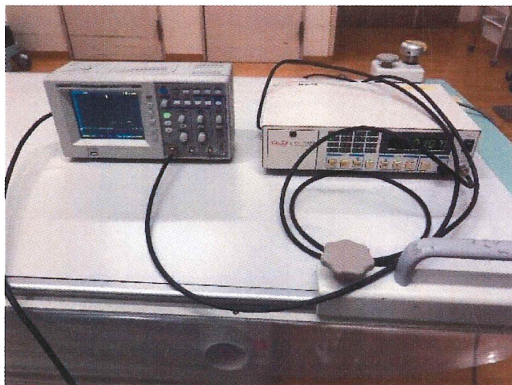


Fig.4-1 蛍光量計とオシロスコープ

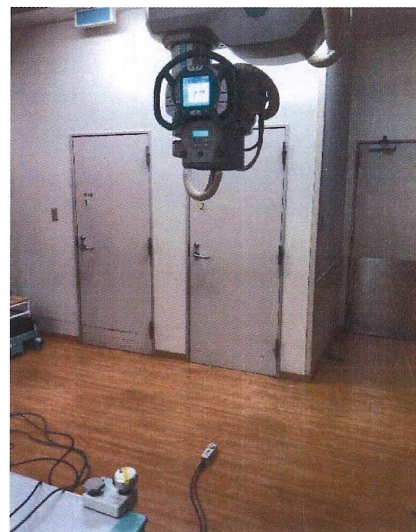


Fig.4-2 蛍光量計の配置



#### 4.2.1 管電流の変化による影響の評価

管電流の変化によってリップル百分率に影響があるのか評価するために、管電流を100、200、320、400 mAと変化させて波形に変化が生じるか検証する。このとき照射時間は0.20 s一定とする。なお、診療用X線装置は装置ごとに機器調整の精度が異なる可能性があるため、本研究は同一型式の3台の装置を用いて確認をおこなう。

#### 4.2.2 撮影時間の変化による影響の評価

診療用X線装置を用いてサーベイメータの校正を行うためには、極めて短い時間でもX線の出力が安定することが求められる。診療用X線装置での短時間特性を評価するために、照射時間を0.02、0.05、0.10、0.14、0.20 sと変化させて蛍光量に比例関係があるか検証する。蛍光量計の測定値は、測定誤差を少なくするため5回測定を行った平均値を用いることとした。

#### 4.3 連続X線標準場の評価

診療用X線装置でNシリーズの線質を作ることができるのか検証するために、JIS Z 4511<sup>1)</sup>を参考に Fig.4-3～4-6 のような実験体系を立てる。使用した診療用X線装置固有の総ろ過が2.6 mmAlのためN-80 (N-100) の規格に準じて、1.4 mmAl+2.0 mmCu (5.0 mmCu) を張り付ける (Fig.4-4)。この状態を基準として銅板を順次追加し、測定値から減弱曲線を作成し第一半価層および第二半価層 [mmCu] を求める。このときの照射条件は管電圧 80 kV、管電流 100 mA、照射時間 2.0 s、大焦点とし、測定値は測定誤差を少なくするため5回測定を行った平均値とする。第一半価層の算出には式 (4.1)<sup>2)</sup>を用いて、第二半価層は基準の状態を1とした相対値の減弱曲線を作成し、その値が0.25になる銅板の厚さとする。この第一半価層と第二半価層の値を用いて均等度を求める。さらに第一半価層から線源弱係数[cm<sup>-1</sup>]および質量減弱係数 [cm<sup>2</sup>・g<sup>-1</sup>] を求め、求めた質量減弱係数に近い個所を光子減弱係数データブック<sup>3)</sup>から抽出して近似曲線と近似式を作成し、その近似式に質量減弱係数を代入して実効エネルギー [keV] を求める。なお、このときの銅の密度は JIS Z 4511<sup>1)</sup>より 8.94 [g・cm<sup>-3</sup>] を用いている。そして求めた実効エネルギーから線質係数 (QI) を求め、これらの値を N-80 (N-100) で定義されている値と比較する。

$$\text{HVL} = \frac{t_b \ln(2I_a / I_0) - t_a \ln(2I_b / I_0)}{\ln(I_a / I_b)} \quad \dots (4.1)$$

$I_0$  : 銅板がない状態で照射したときの測定値

$t_a, I_a$  : 測定値の値が50%よりも僅かに大きく測定されたときの銅板の厚さとそのときの測定値

$t_b, I_b$  : 測定値の値が50%よりも僅かに小さく測定されたときの銅板の厚さとそのときの測定値

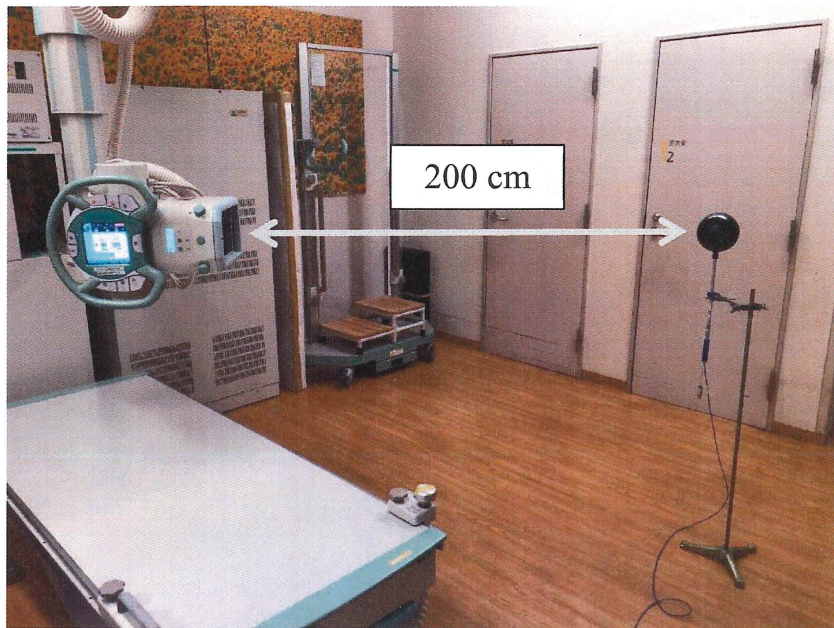


Fig.4-3 横方向から見た実験体系

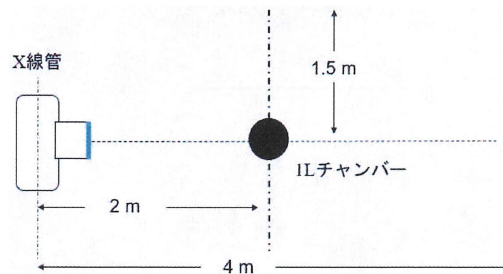
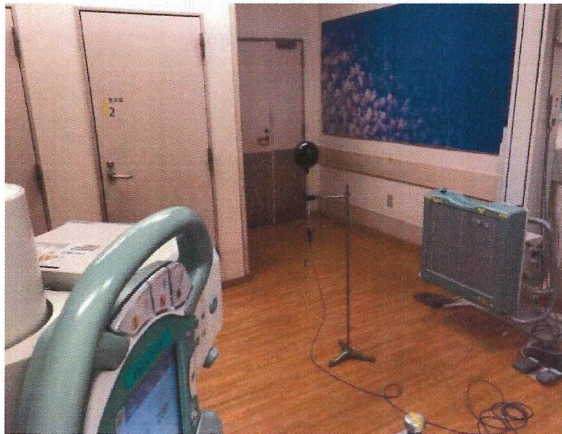


Fig.4-4 縦方向から見た実験体系

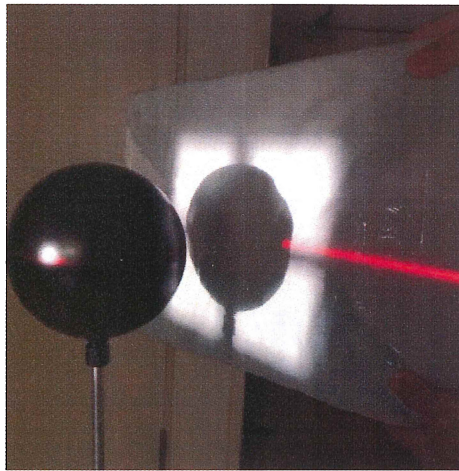


Fig.4-5 照射野の設定

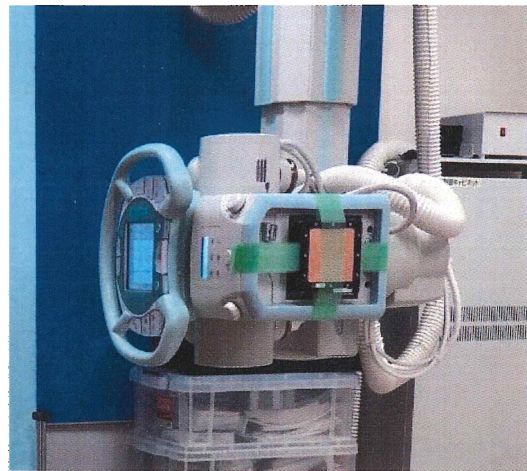


Fig.4-6 付加フィルタの取付

#### 4.4 電離箱式サーベイメータの校正

診療用 X 線装置で電離箱式サーベイメータの校正ができるのか検証するために、実験 1 と同様に Fig.4-7~4-8 のような実験体系を立てる。サーベイメータの校正の方法はいくつかあるが、校正の不確かさを低減させるために、本研究は置換法を用いて校正をおこなっている<sup>4)</sup>。実験 1 と同じ照射条件を用いて、測定値は測定誤差を少なくするため 5 回測定をおこなった平均値とする。この結果と実験 1 の結果から校正定数を算出し、校正機関での校正定数と比較する。なお、ICS-313 は 2019 年 11 月に工業用 X 線装置および  $^{137}\text{Cs}$  線源を用いて茨城県立医療大学で校正がおこなわれている (Table 4-1~4-2)。

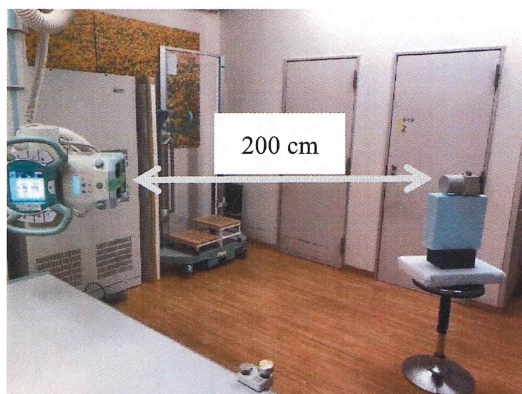


Fig.4-7 横方向から見た実験体系

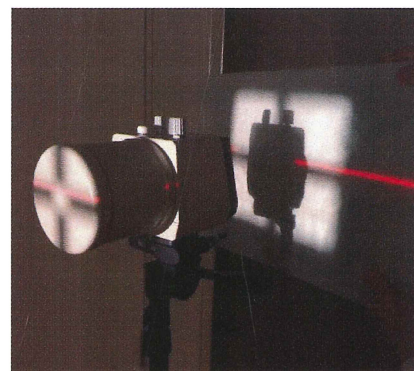


Fig.4-8 照射野の設定

Table 4-1 ICS-313 校正内容（工業用 X 線装置）

X 線線質	線量当量率 [ mSv/h ]	表示値 [ mSv/h ]	校正定数
N-80	0.21	0.25	0.84

## 校正の条件

- |                 |   |
|-----------------|---|
| (1) 校正の基準点      | 電離箱の中心線   |
| (2) 照射方向        | 電離箱の中心軸に対して垂直   |
| (3) キャップは装着     |   |
| (4) 校正の不確かさ     | 12.1 %  |
| (5) 基準として使用した機器 | 電位計 EMF520R (EMF ジャパン) 0005<br>電離箱 TN32002 (PTW) 000635 |

備考 校正結果は、JIS Z4511-2018 表 B.5 による H\*(10)への線量当量換算係数で求めた。

## 校正の不確かさ

校正の不確かさは拡張不確かさであり、包含係数 k=2 から決定され、約 95 %の信頼水準を持つと推定される区間を定める。

Table 4-2 ICS-313 校正内容（<sup>137</sup>Cs 線源）

線源	線量当量率 [ μSv/h ]	表示値 [ μSv/h ]	校正定数
<sup>137</sup> Cs	5.86	5.89	0.99

## 校正の条件

- |                 |                              |
|-----------------|------------------------------|
| (1) 校正の基準点      | 電離箱の中心線                      |
| (2) 照射方向        | 電離箱の中心軸に対して垂直                |
| (3) キャップは装着     |                              |
| (4) 校正の不確かさ     | 9.5 %                        |
| (5) 基準として使用した機器 | ICS-323 (HITACHI) S/N R05433 |

## 校正の不確かさ

校正の不確かさは拡張不確かさであり、包含係数 k=2 から決定され、約 95 %の信頼水準を持つと推定される区間を定める。

#### 4.5 短時間撮影における漏えい線量の測定方法の検討

サーベイメータで正確な測定を行うためには、時定数の3~4倍の測定時間をおこなうことが望ましいとされている。しかし、診断領域におけるX線撮影は短時間撮影であり、それゆえに漏えいX線の測定も非常に短時間で測定しなければならず、時定数の3~4倍の測定時間を確保することは不可能である。

そこで、計算により時定数を算出する方法を考案した。サーベイメータの指示値は測定時間を $t$ 、時定数を $T$ とすると最終指示値に対して $1-\exp(-t/T)$ なので時間 $t$ における測定値を $x$ 、最終指示値を $X$ とすると、

$$\frac{x}{X} = 1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \quad \dots (4.2)$$

となる。ここで $t=t_1$ のときの指示値を $x_1$ 、 $t=t_2$ のときの指示値を $x_2$ とすると

$$\frac{x_1}{X} = 1 - \exp\left(-\frac{t_1}{T}\right) \quad \dots (4.3)$$

$$\frac{x_2}{X} = 1 - \exp\left(-\frac{t_2}{T}\right) \quad \dots (4.4)$$

と表すことができる。式(4.3)および(4.4)から時定数 $T$ は、

$$T = \frac{t_2 - t_1}{\ln(x_2 - x_1) - \ln(x_1 - x_1)} \quad \dots (4.5)$$

となる。式(4.5)から時定数を求めて漏えい線量の測定をおこなうには、測定点を2点抽出する必要があるが、どの2点をとればいいのか、また計算から求めた時定数を用いた計算値と実測値は一致するのか、ということを検証するために、実際の漏えいX線の測定を想定したFig.4-9のような体系を立てる。この体系で管電圧80kV(付加フィルタなし、あり)、100kV(付加フィルタなし、あり)にて撮影時間を変化させて実測値を計測し、その実測値から時定数を求め計算値を算出し実測値と比較する。



Fig.4-9 漏えい線量測定を想定した実験体系

## 第5章 実験結果および考察

### 5.1 診療用X線装置の性能の評価

#### 1) 管電流の変化による影響の評価

Fig. 5-1～5-16に管電圧80 kV（付加フィルタなし、あり）および100 kV（付加フィルタなし、あり）における管電流400、320、200、100 mA、照射時間0.20 sで照射したときの波形を示す。傾向として管電流が大きいとリップル百分率の変動が大きく、管電流を小さくしていくとリップル百分率の変動が小さくなることが明らかになった。また、Fig. 5-1とFig. 5-2、Fig. 5-9とFig. 5-10を比較するとわかるように、特に大きい管電流においてはこの傾向は付加フィルタの有無によらないことも明らかになった。本研究は漏えいX線のような微小なX線を計測したいので、管電流は100 mAを用いることとした。

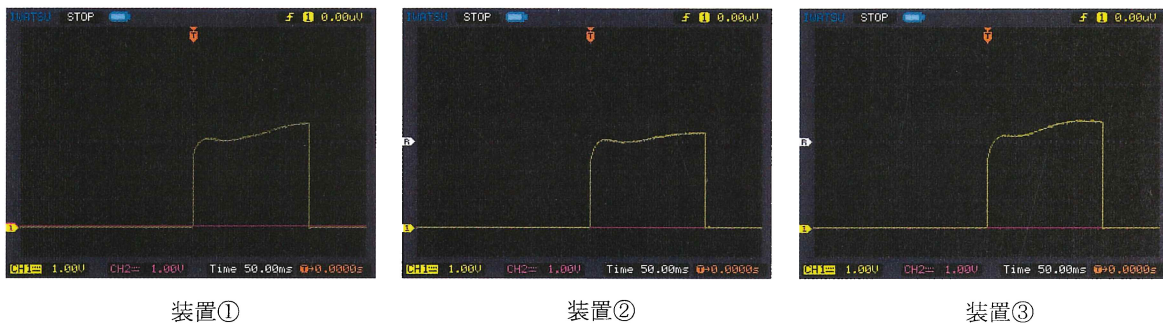


Fig.5-1 80 kV 400 mA（付加フィルタなし）

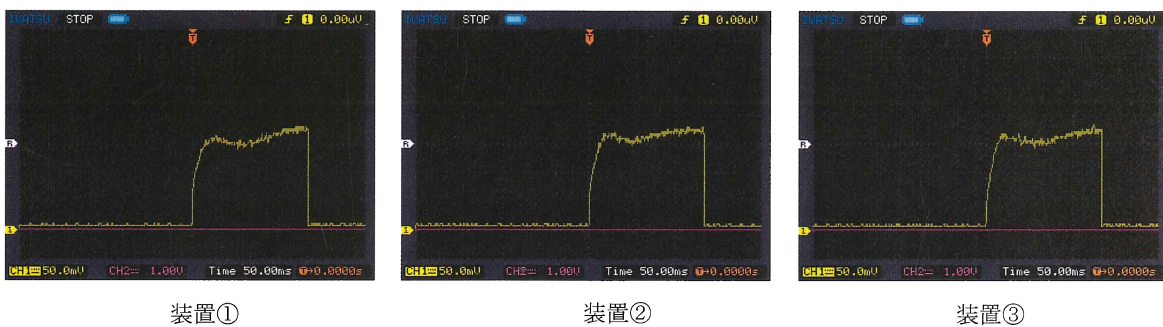


Fig.5-2 80 kV 400 mA（付加フィルタあり）

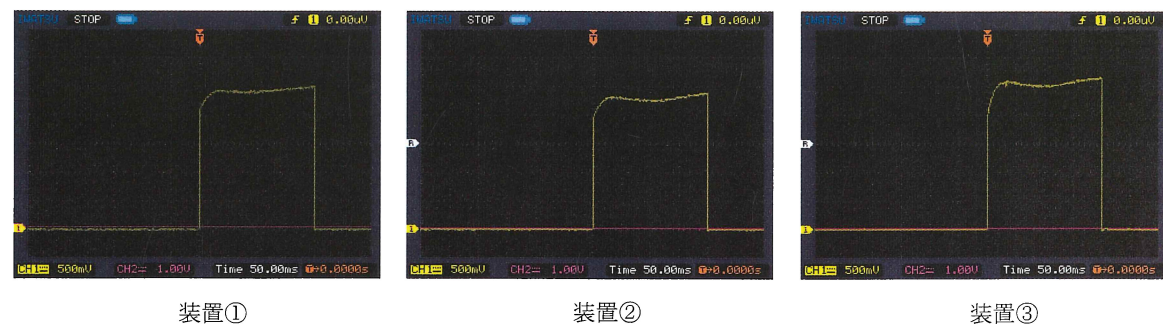
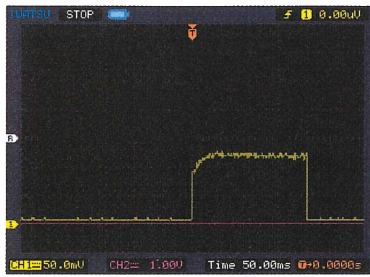
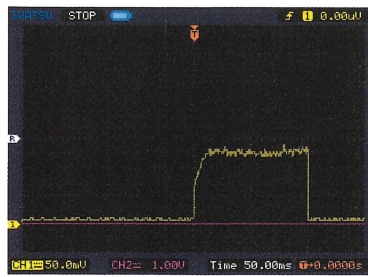


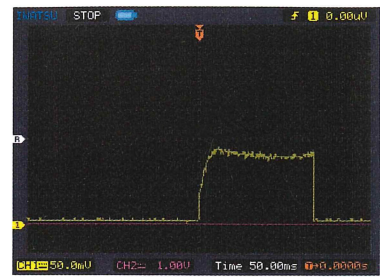
Fig.5-3 80 kV 320 mA（付加フィルタなし）



装置①



装置②

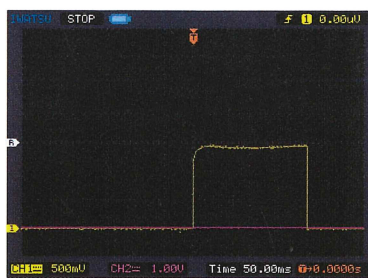


装置③

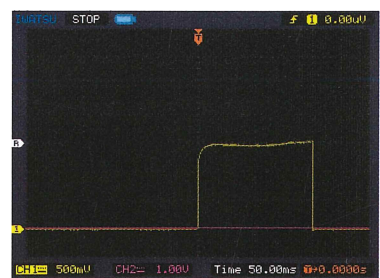
Fig.5-4 80 kV 320 mA (付加フィルタあり)



装置①

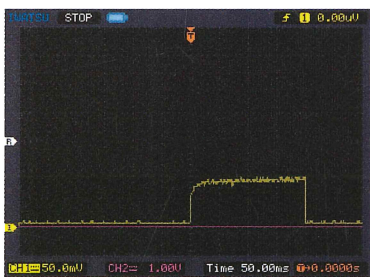


装置②



装置③

Fig.5-5 80 kV 200 mA (付加フィルタなし)



装置①

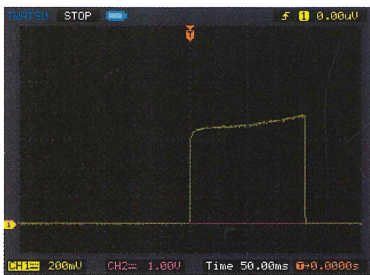


装置②

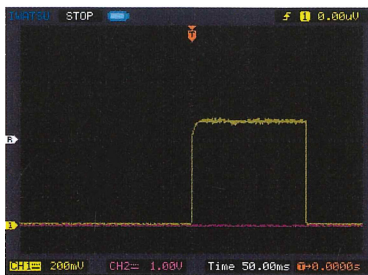


装置③

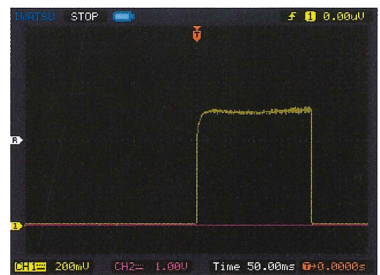
Fig.5-6 80 kV 200 mA (付加フィルタあり)



装置①



装置②



装置③

Fig.5-7 80 kV 100 mA (付加フィルタなし)



装置①

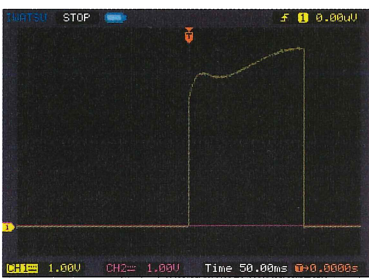


装置②

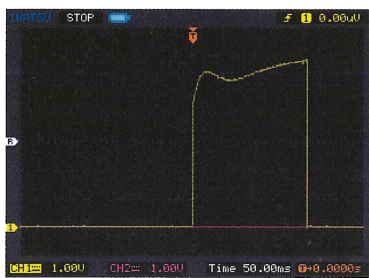


装置③

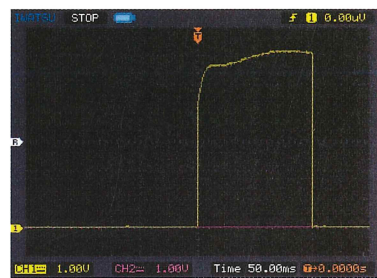
Fig.5-8 80 kV 100 mA (付加フィルタあり)



装置①



装置②

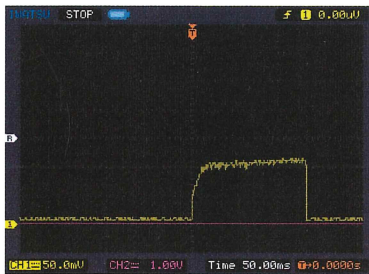


装置③

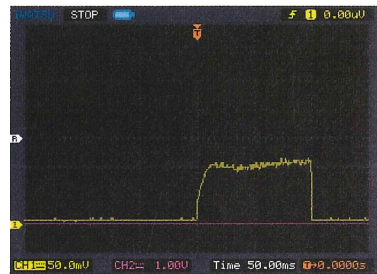
Fig.5-9 100 kV 400 mA (付加フィルタなし)



装置①



装置②

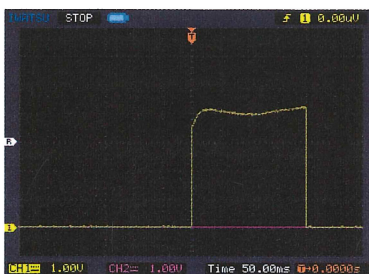


装置③

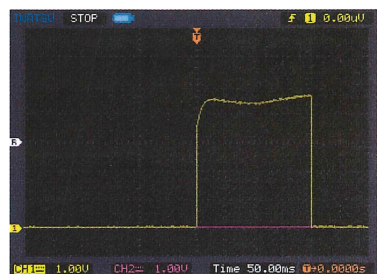
Fig.5-10 100 kV 400 mA (付加フィルタあり)



装置①



装置②



装置③

Fig.5-11 100 kV 320 mA (付加フィルタなし)



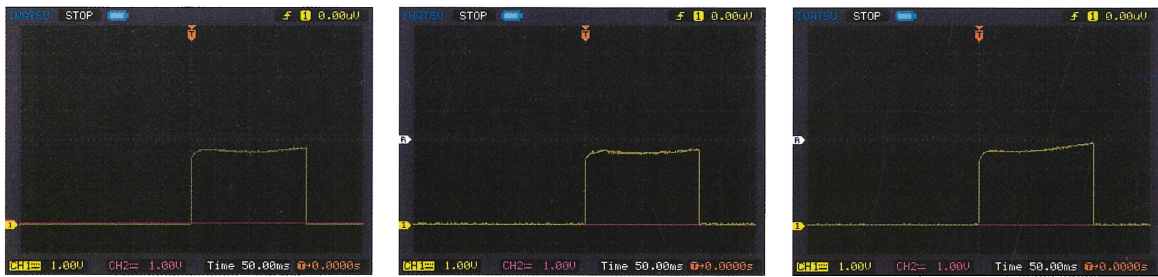


装置①

装置②

装置③

Fig.5-12 100 kV 320 mA (付加フィルタあり)

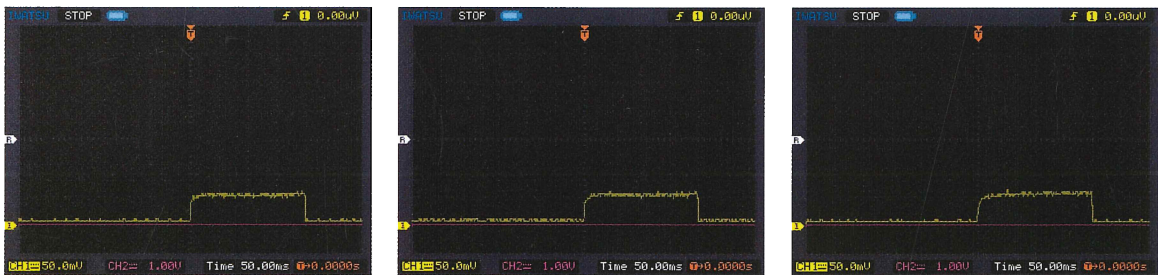


装置①

装置②

装置③

Fig.5-13 100 kV 200 mA (付加フィルタなし)

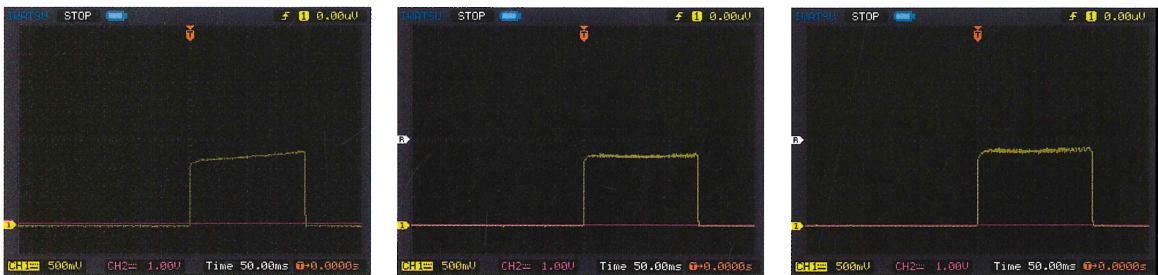


装置①

装置②

装置③

Fig.5-14 100 kV 200 mA (付加フィルタあり)

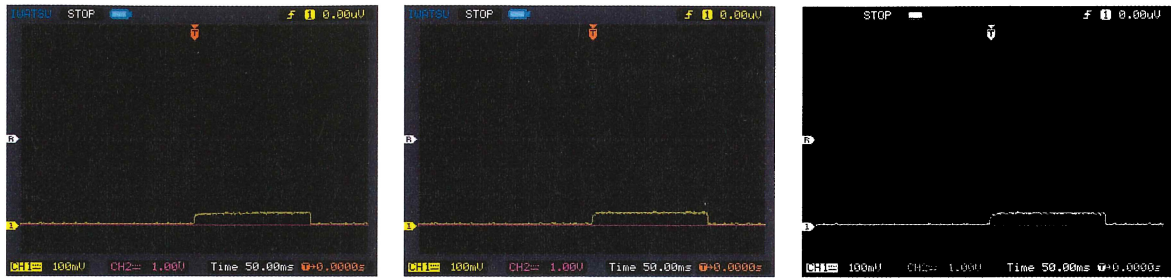


装置①

装置②

装置③

Fig.5-15 100 kV 100 mA (付加フィルタなし)



装置①

装置②

装置③

Fig.5-16 100 kV 100 mA (付加フィルタあり)

## 2) 撮影時間の変化による影響の評価

Fig.5-17～5-20に蛍光量と照射時間の関係のグラフを示す。付加フィルタなしのときは装置間の値の違いはほぼ見られないが、付加フィルタありのときは80 kV、100 kVどちらも小さい管電流になるほど装置③と装置①、装置②の値に違いが見られた。これは装置③は装置①、装置②に比べ使用頻度がかかなり低くX線管の経年劣化の影響が小さいため、また機器調整の精度が最もよいためと思われる。本研究は漏えいX線のような微小なX線を計測したいので、1)の結果と合わせて波形が安定し小管電流において最も出力が高い装置③を用いて以下の実験をおこなった。

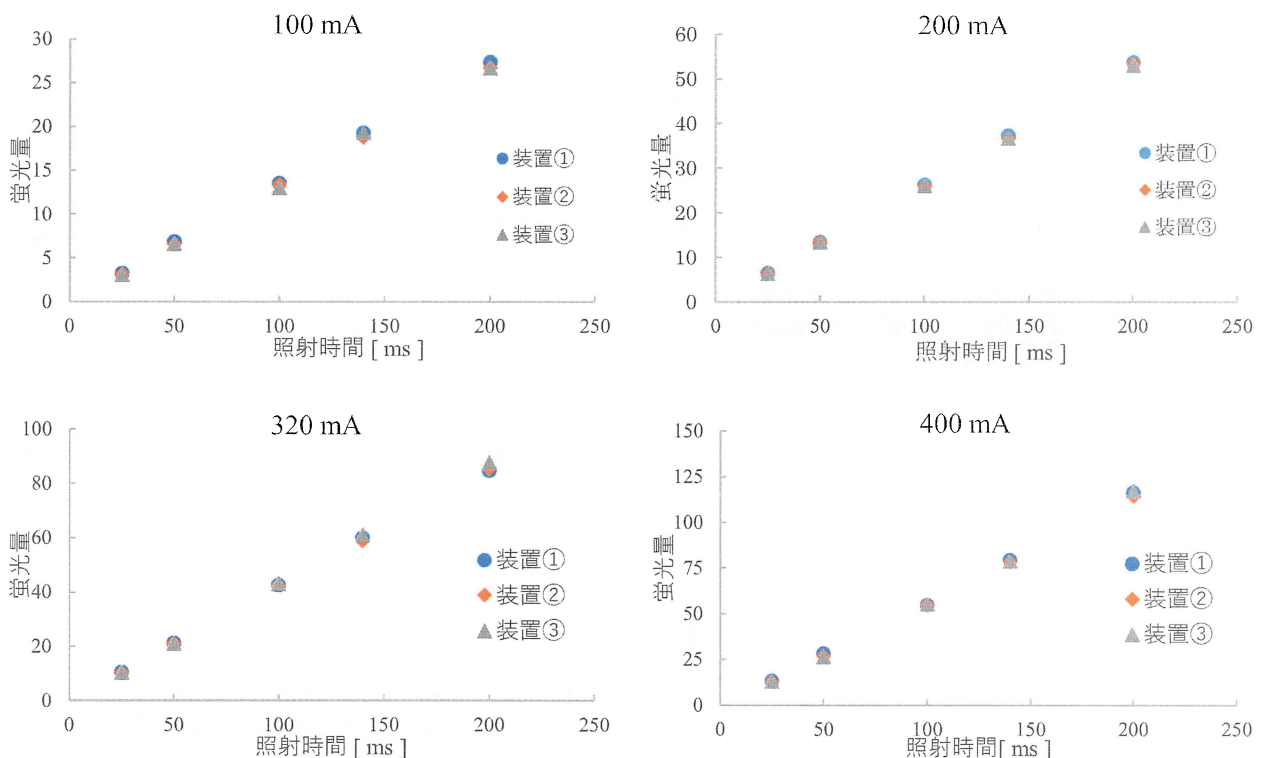


Fig.5-17 蛍光量と照射時間の関係 (80 kV、付加フィルタなし)

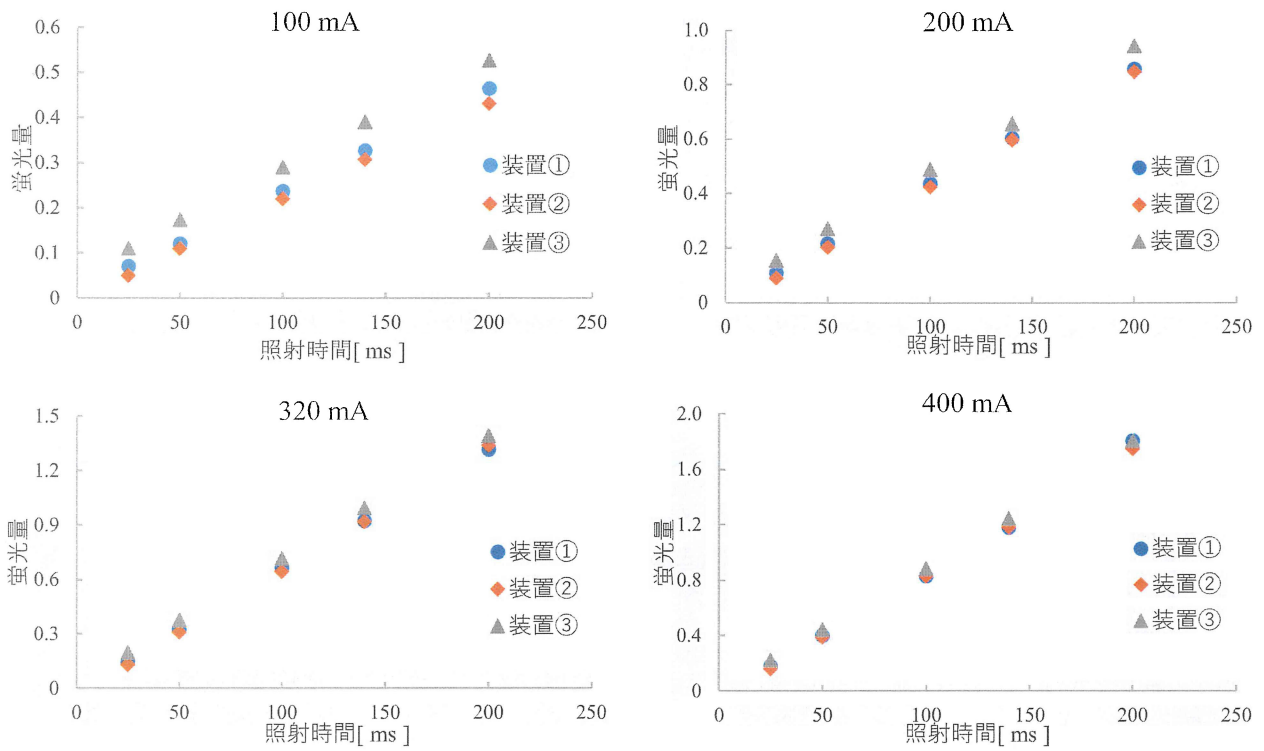


Fig.5-18 蛍光量と照射時間の関係 (80 kV、付加フィルタあり)

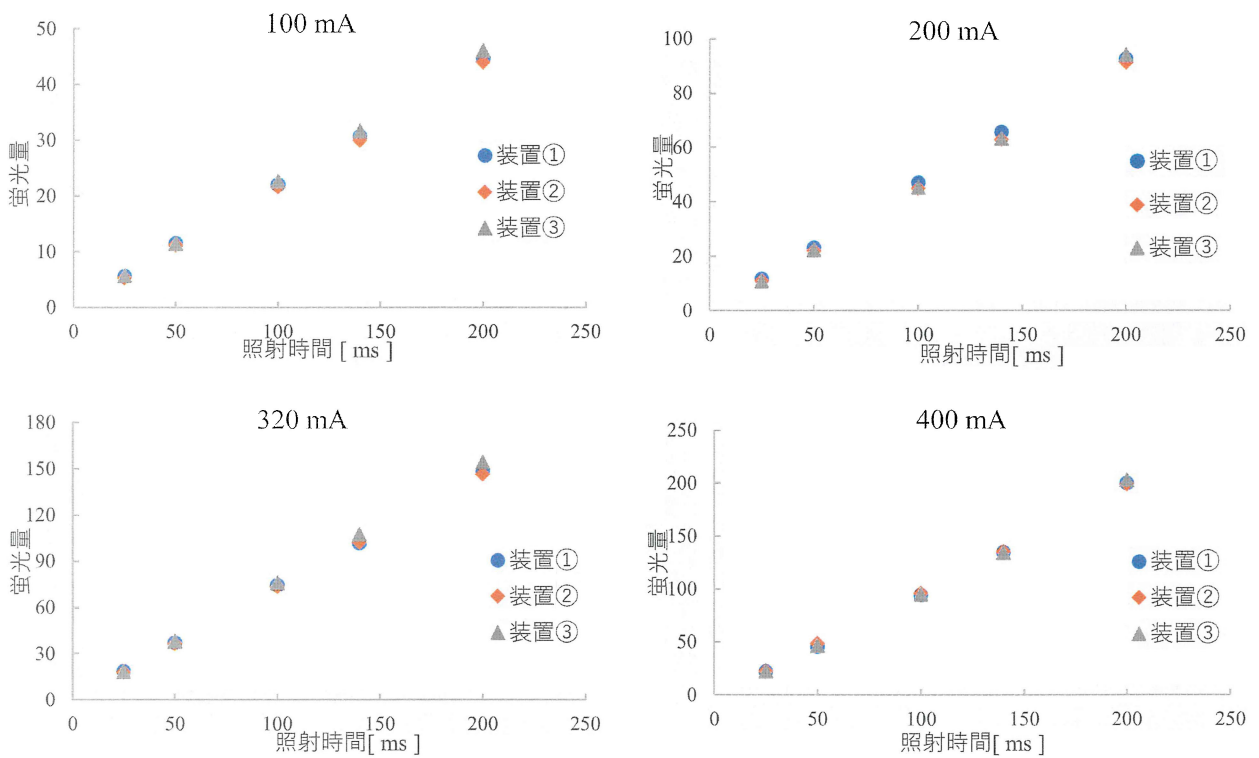


Fig.5-19 蛍光量と照射時間の関係 (100 kV、付加フィルタなし)

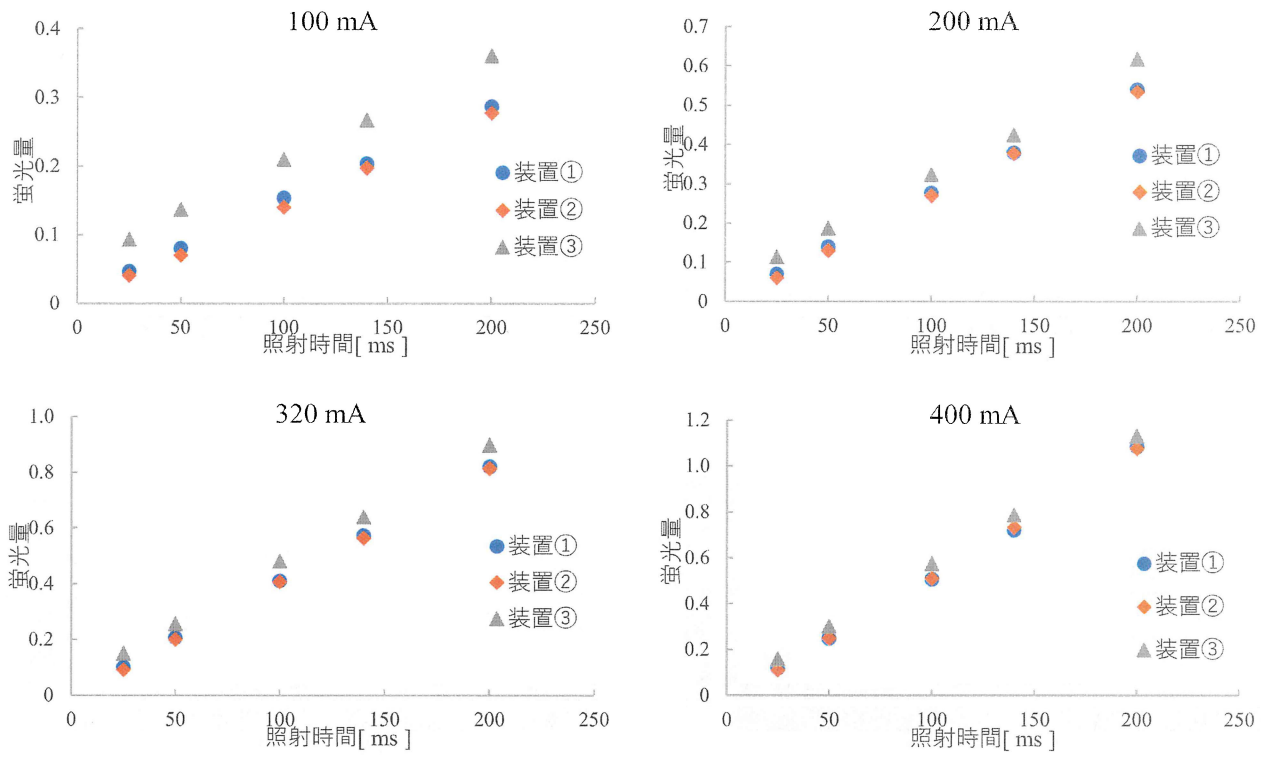


Fig.5-20 蛍光量と照射時間の関係 (100 kV、付加フィルタあり)

## 5.2 連続X線標準場の評価

### 5.2.1 N-80線質

測定値とその平均値、相対値の結果をTable 5-1に、相対値の結果をグラフにしたものをFig.5-21に、本研究の実測値とN-80の値を比較したものをTable 5-2に示す。Table 5-2の結果より本研究の実測値はN-80として定められている値とほぼ同じであることから、診療用X線装置を用いてN-80の線質を作ることはできると明らかになった。

Table 5-1 測定値と平均値、相対値の関係 (N-80)

mmCu	mGy					平均値	相対値
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目		
0	0.0336	0.0336	0.0336	0.0335	0.0334	0.034	1.000
0.5	0.0184	0.0183	0.0183	0.0184	0.0183	0.018	0.547
0.6	0.0164	0.0164	0.0164	0.0163	0.0165	0.016	0.489
0.7	0.0146	0.0146	0.0146	0.0146	0.0146	0.015	0.435
1.1	0.0093	0.0094	0.0094	0.0094	0.0093	0.009	0.279
1.2	0.0084	0.0084	0.0084	0.0084	0.0084	0.008	0.250
1.3	0.0075	0.0075	0.0075	0.0075	0.0075	0.008	0.224

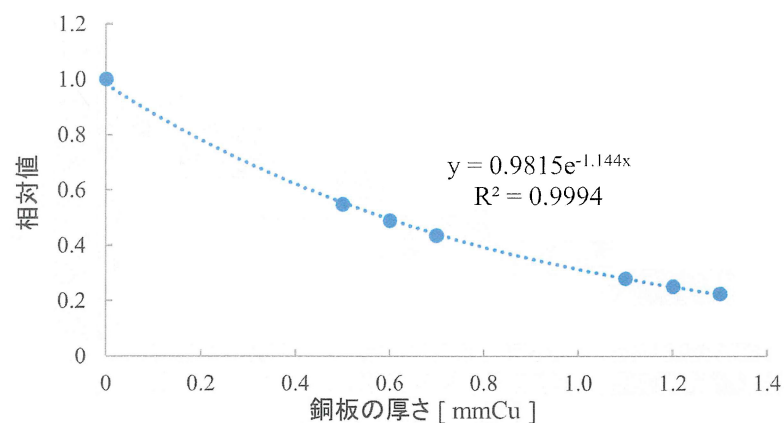


Fig.5-21 銅板の厚さと相対値の関係 (N-80)

Table 5-2 実測値と N-80 の比較

	実測値	N-80
第一半価層 [ mmCu ]	0.58	0.58
第二半価層 [ mmCu ]	0.62	0.62
均等度	0.93	-
実効エネルギー [ keV ]	64.8	65*
線質係数(QI)	0.81	-

\* : 平均エネルギー

### 5.2.2 N-100線質

測定値とその平均値、相対値の結果をTable 5-3に、相対値の結果をグラフにしたものをFig.5-22に、本研究の実測値とN-80の値を比較したものをTable 5-4に示す。Table 5-4の結果より本研究の実測値はN-100として定められている値と第一半価層および第二半価層でわずかに異なるが、その誤差は±5%以内であるため同一の線質とみなすことができる<sup>1)</sup>。したがって、N-80の線質と同様に診療用X線装置を用いてN-100の線質を作ることとはできると明らかになった。

Table 5-3 測定値と平均値、相対値の関係 (N-100)

mmCu	mGy					平均値	相対値
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目		
0	0.0150	0.0150	0.0151	0.0151	0.0151	0.015	1.000
1.0	0.0079	0.0080	0.0079	0.0080	0.0080	0.008	0.527
1.1	0.0075	0.0074	0.0075	0.0074	0.0074	0.007	0.495
1.2	0.0070	0.0070	0.0070	0.0070	0.0070	0.007	0.465
2.1	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.004	0.273
2.2	0.0039	0.0039	0.0039	0.0039	0.0039	0.004	0.257
2.3	0.0036	0.0037	0.0037	0.0036	0.0036	0.004	0.242

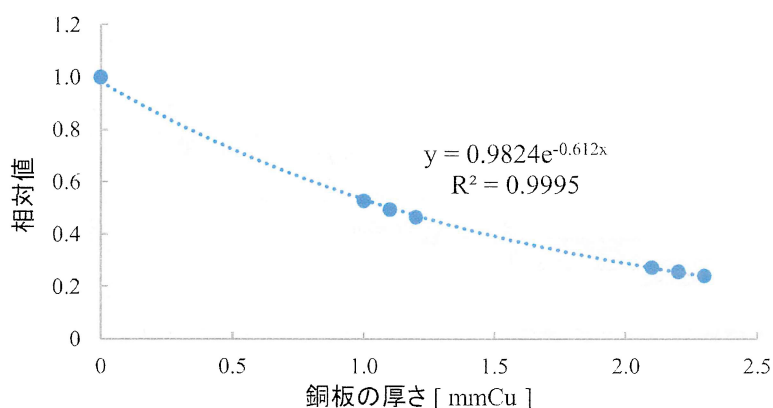


Fig.5-22 銅板の厚さと相対値の関係 (N-100)

Table 5-4 実測値と N-100 の比較

	実測値	N-100
第一半価層 [ mmCu ]	1.08	1.11
第二半価層 [ mmCu ]	1.16	1.17
均等度	0.94	-
実効エネルギー [ keV ]	83.1	83*
線質係数(QI)	0.83	-

\* : 平均エネルギー

### 5.3 サーベイメータの校正の評価

Table 5-5にサーベイメータの校正結果を示す。校正定数はN-80で0.88、N-100で0.92となり、N-80の値と比較すると2019年11月に校正したときよりもわずかに校正定数は高くなった。しかし、サーベイメータの測定誤差は20%程度の不確かさがあると言われている<sup>2)</sup>ことから、この違いは測定誤差の範囲内と考えることができる。よって診療用X線装置を用いて工業用X線装置とほぼ同等の精度で校正ができると明らかになった。またN-80とN-100の校正定数を比較すると、N-100の線質のほうが校正定数が高い値になることが明らかになった。これは、N-100はN-80と比較して付加フィルタが厚い<sup>1)</sup>ことから、より硬質のX線になり軟線成分が除去されたため<sup>3)</sup>だと思われる。

本研究の実験から、サーベイメータの校正定数はX線装置を用いた場合と<sup>137</sup>Cs線源を用いた場合で異なることが明らかになったので、使用用途に応じて校正線源も使い分ける必要があるということが明らかになった。

Table 5-5 サーベイメータの校正結果

線質	測定値 [mSv/h] (1Lチャンバー)	測定値 [mSv/h] (サーベイメータ)	校正定数
N-80	104.49*	119.2	0.88
N-100	46.34* <sup>2</sup>	50.4	0.92

\* : GyをSvにするために周辺線量当量換算係数の1.73を、/2sを/hにするために1800を乗じて換算している。

\*<sup>2</sup> : GyをSvにするために周辺線量当量換算係数の1.71を、/2sを/hにするために1800を乗じて換算している。

#### 5.4 短時間撮影における漏えい線量の測定方法の検討

管電圧 80 kV（フィルタなし、あり）、100 kV（フィルタなし、あり）のそれぞれの測定値の結果を Table 5-6～5-7 に、またその結果から時定数を算出し計算値と実測値を比較したグラフを Fig.5-23～5-26 に示す。

時定数の算出は様々な 2 点を用いて求めたところ、立ち上がりの最初と線量率がほぼプラトーになり始めたところの 2 点で計算すると、本研究で使用したサーベイメータの仕様<sup>3)</sup>と一致しその時定数から求めた計算値もほぼ一致することが明らかになった。また付加フィルタがない場合は実測値と計算値が一致しないのは、付加フィルタがある場合にはフィルタによって除去されている軟線成分が含まれてしまっているため<sup>4)</sup>だと思われる。

このことから、付加フィルタを取り付けて硬い X 線で何点か線量を測定し、立ち上がりの最初とプラトーになり始めた箇所を明らかにすることで時定数を算出することができ、短時間撮影における漏えい線量の測定をより正確におこなうことができることが示唆された。

Table 5-6 80 kV

照射時間 [ s ]	付加フィルタなし			付加フィルタあり		
	測定値 [ mSv/h ]	B.G [ mSv/h ]	正味測定値 [ mSv/h ]	測定値 [ mSv/h ]	B.G [ mSv/h ]	正味測定値 [ mSv/h ]
0.2	8.5	0.02	8.48	0.12	0.02	0.1
0.28	11	0.02	10.98	0.15	0.02	0.13
0.36	13	0.02	12.98	0.19	0.02	0.17
0.5	13.5	0.02	13.48	0.25	0.02	0.23
0.63	13.5	0.02	13.48	0.28	0.02	0.26
0.8	13.5	0.02	13.48	0.33	0.02	0.31
1	13.5	0.02	13.48	0.38	0.02	0.36
1.2	13.5	0.02	13.48	0.39	0.02	0.37
1.6	13.5	0.02	13.48	0.42	0.02	0.4
2	13.5	0.02	13.48	0.46	0.02	0.44
2.5	13.5	0.02	13.48	0.46	0.02	0.44
3.2	13.5	0.02	13.48	0.46	0.02	0.44
	測定レンジ : 30 mSv/h			測定レンジ : 1 mSv/h		
	時定数 (計算値) : 0.38 [ s ]			時定数 (計算値) : 0.70 [ s ]		



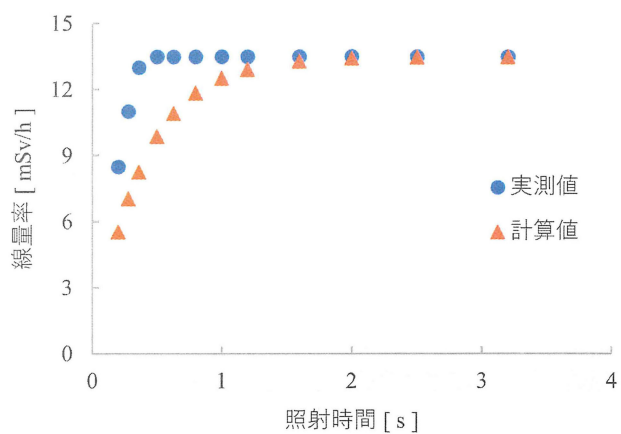


Fig.5-23 実測値と計算値の比較  
(80 kV 付加フィルタなし)

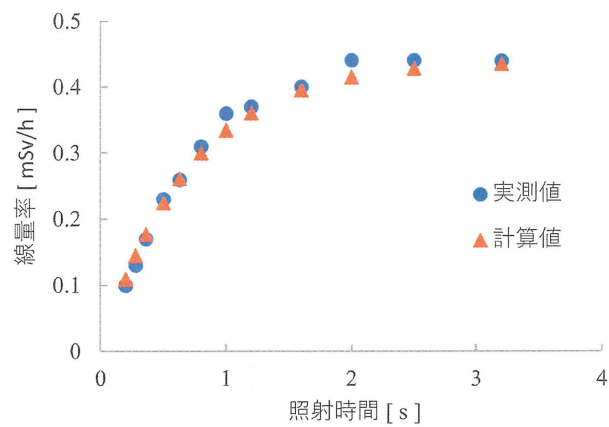
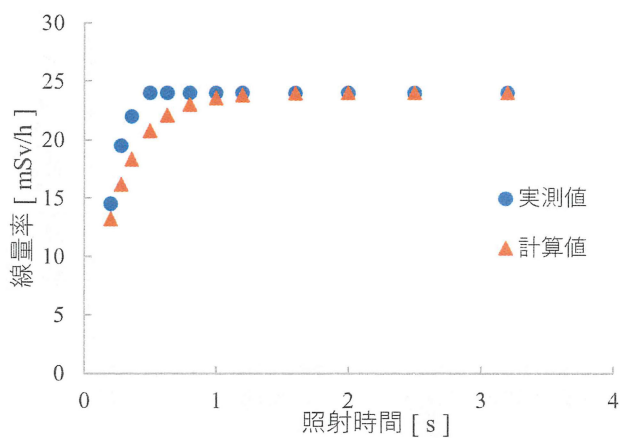
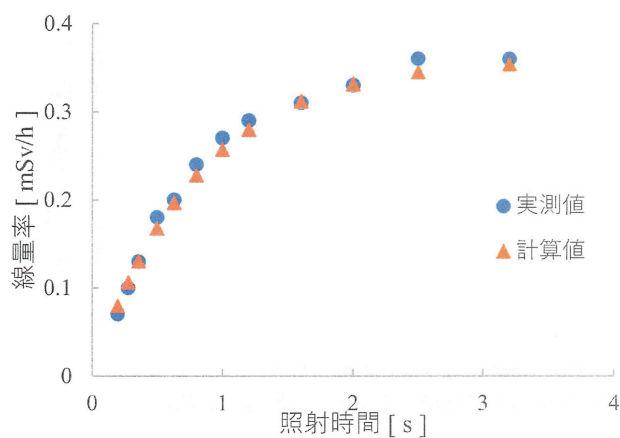


Fig.5-24 実測値と計算値の比較  
(80 kV 付加フィルタあり)

Table 5-7 100 kV

照射時間 [s]	付加フィルタなし			付加フィルタあり		
	測定値 [mSv/h]	B.G [mSv/h]	正味測定値 [mSv/h]	測定値 [mSv/h]	B.G [mSv/h]	正味測定値 [mSv/h]
0.2	14.5	0.02	14.48	0.09	0.02	0.07
0.28	19.5	0.02	19.48	0.12	0.02	0.1
0.36	22	0.02	21.98	0.15	0.02	0.13
0.5	24	0.02	23.98	0.2	0.02	0.18
0.63	24	0.02	23.98	0.22	0.02	0.2
0.8	24	0.02	23.98	0.26	0.02	0.24
1	24	0.02	23.98	0.29	0.02	0.27
1.2	24	0.02	23.98	0.31	0.02	0.29
1.6	24	0.02	23.98	0.33	0.02	0.31
2	24	0.02	23.98	0.35	0.02	0.33
2.5	24	0.02	23.98	0.38	0.02	0.36
3.2	24	0.02	23.98	0.38	0.02	0.36
	測定レンジ : 30 mSv/h			測定レンジ : 1 mSv/h		
	時定数 (計算値) : 0.25 [s]			時定数 (計算値) : 0.80 [s]		

Fig.5-25 実測値と計算値の比較  
(100 kV 付加フィルタなし)Fig.5-26 実測値と計算値の比較  
(100 kV 付加フィルタあり)

## 第6章 結論および今後の検討

### 6.1 結論

診療用X線装置を用いてN-80およびN-100の線質を再現すること、その線質を用いて電離箱式サーベイメータを工業用X線装置と同等の精度で校正することができた。本研究の実験体系は各医療施設のX線撮影室で再現できるため、基準線量計や付加フィルタを用いることでサーベイメータの校正が自施設でできることが示唆された。

またサーベイメータで漏えい線量の測定をする際には、サーベイメータの時定数を考慮しなければ正確な測定をおこなうことができない。しかし、従来のサーベイメータでは時定数が測定レンジによって自動的に調整されてしまったり、装置の仕様にも正確な時定数が記載されていなかったりすることもある。そのような場合でも測定するエネルギーに合わせた線質を用いて、本研究で考案した方法で時定数を算出することができる。その結果、短時間撮影時における漏えい線量測定を正確におこなう方法を確立することができた。

### 6.2 今後の検討

本研究にはいくつかのLimitationがある。①本研究で用いた診療用X線装置は全て同一の医療機器メーカーであったため、他社の装置での検討はできていない。②使用した電離箱式サーベイメータはアナログ表示で測定方法も線量率モードしかない機器であったため、積算モードでの検討はできていない。③管電圧の波形の確認や蛍光量計によって診療用X線装置の性能評価を行い最も良い結果となった装置で実験を行った。しかし、完全な矩形波と比較してどのような波形であればいいのか、装置の導入時から比較してX線の照射回数がどの程度までであればいいのかなどを明確にできていない。④計算により時定数を算出する方法は、線量率がプラトーになる時間までX線を照射する必要がある。本研究の実験結果からN-80およびN-100の線質ではプラトーになるまで2秒程度かかるため、短時間しかX線を照射できない装置では今回提唱する方法を用いることができない。これらのことは今後検討していく必要がある。

そして今後はGMサーベイメータやNaI (TI) シンチレーション式サーベイメータ、半導体式サーベイメータでも本研究の方法により校正することができるのか検討をおこなう必要がある。これらのサーベイメータは電離箱式サーベイメータに比較してエネルギー依存性が強いいためより詳細な検討が必要となり、これらの機器でも校正することができれば有用であると思われる。

## 参考文献

### 第1章

- 1) 西谷源展, 山田勝彦, 前越久他: 放射線計測学: 日本放射線技術学会, 2013.
- 2) 若月佑介, 関本道治, 加藤二久他: X線校正場による電離箱サーベイメータの校正方法の検討: 駒澤大学医療健康科学部紀要第10号: 17-23, 2013.
- 3) 日本規格協会編集: JIS Z 4511 照射線量測定器および線量当量測定器の校正方法: 日本規格協会, 2018.
- 4) Katoh T, Nishitani N, Koyama S, et al. Recent Attempt for the Establishment of Traceable System of Diagnostic X-ray Dosimeters: JSRT, 57(12): 1438-1442, 2001.
- 5) 関本道治: 医療用X線診断測定に用いる線量計の校正: 首都大学東京大学院博士論文, 2016.
- 6) JSRT: 医療被ばく測定テキスト(改訂2版): JSRT, 放射線医療技術学叢書(25), 2012.

### 第2章

- 1) 三枝健二, 入船寅二, 福士政広他: 放射線基礎計測学: 医療科学社, 2013.
- 2) 西谷源展, 山田勝彦, 前越久他: 放射線計測学: 日本放射線技術学会, 2013.
- 3) 日本規格協会編集: JIS Z 4333 X線,  $\gamma$ 線および $\beta$ 線用線量当量(率)サーベイメータ: 日本規格協会, 2014.

### 第3章

- 1) 日本規格協会編集: JIS Z 4511 照射線量測定器および線量当量測定器の校正方法: 日本規格協会, 2018.

### 第4章

- 1) 日本規格協会編集: JIS Z 4511 照射線量測定器および線量当量測定器の校正方法: 日本規格協会, 2018.
- 2) 根岸徹他: 診断X線領域における吸収線量の標準測定法: オーム社, 2013.
- 3) 前越久, 他: 光子減弱係数データブック: 日本放射線技術学会, 1995.
- 4) 渡部洋一, 他: 医用放射線計測学: 医療科学社, 2007.
- 5) 西谷源展, 山田勝彦, 前越久他: 放射線計測学: 日本放射線技術学会, 2013.

### 第5章

- 1) 日本規格協会編集: JIS Z 4511 照射線量測定器および線量当量測定器の校正方法: 日本規格協会, 2018.
- 2) 藤田稔, 他: 放射線防護用機器X III.放射線の測定と関連機器の使用法: RADIOISOTOPES, 41(2): 1425-134, 1992.
- 3) 日立アロカメディカル: 電離箱式サーベイメータ ICS-313 取扱説明書.

- 4) Martin CJ. : The importance of radiation quality for optimization in radiology : Biomed Imaging Interv J, 3(2) : e38, 2007.

#### 謝辞

本論文を作成するにあたり、親身にご指導ならびにご支援頂きました東京都立大学大学院 人間健康科学研究科 加藤洋 教授に深く御礼申し上げます。また、本論文に多大なご指導ならびにご支援を頂きました新潟医療福祉大学 医療技術学部 診療放射線学科 関本道治 講師に深く御礼申し上げます。

大学院に行ける機会を与えていただきました昭和大学統括放射線技術部 加藤京一 統括放射線技術部長ならびに、昭和大学横浜市北部病院 放射線技術部の診療放射線技師の皆様に深く御礼申し上げます。

多くのご指摘・建設的なご意見を頂きました東京都立大学 加藤研究室の皆様に深く御礼申し上げます。

最後に、自分がここまでたどり着く事ができたのは、両親、兄弟、そして自分を温かく見守ってくれた人達のおかげです。深く感謝申し上げます。

令和3年 鈴木 克直