

博士學位論文

工業用 X 線装置を用いた NaI(Tl) シンチレーション式サーベイメータの 校正の検討

(西暦) 2024 年 1 月 10 日 提出

東京都立大学大学院

人間健康科学研究科 博士後期課程 人間健康科学専攻

放射線科学域

学修番号 : 21997704

氏名 : 鈴木 克直

(指導教員名 : 根岸 徹)

(西暦) 2023 年度 博士後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)

工業用 X 線装置を用いた NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの校正の検討

学位の種類: 博士 (放射線学)

東京都立大学大学院

人間健康科学研究科 博士後期課程 人間健康科学専攻 放射線科 学域

学修番号 21997704

氏名: 鈴木 克直

(指導教員名: 根岸 徹)

外部放射線の測定は本邦においていくつかの法令により義務づけられていて、測定には各種サーベイメータを用いることが一般的である。

NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータは感度が高く、微小な放射線である漏えい X 線の測定に有用と考えられている。その一方で低エネルギー側のエネルギー依存性も強く、漏えい X 線の測定に用いるには診断領域のエネルギーを使用して校正する必要がある。ISO4037-1 には γ 線標準場のほかに連続 X 線標準場に関する記載があり、サーベイメータのエネルギー特性の評価には狭スペクトルシリーズ (N シリーズ) を用いることが世界的に推奨されている。そして、診断領域の漏えい X 線は 60~80 keV 程度のエネルギーの寄与が大きいことから、N シリーズの N-80 および N-100 線質に相当する。NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータは測定可能な線量率が低線量域に限定されているため、工業用 X 線装置を用いて管電流や線源-検出器間距離を調整して校正がおこなわれている。しかし、工業用 X 線装置が設置されている施設は非常に少なく、診断領域における漏えい X 線のエネルギーでサーベイメータを校正できる施設は、現在の日本において線量計校正認定事業者で 3 施設、学会レベルで実用校正されている線量標準センターで 5 施設に限られる。全国にある医療施設は 8000 余有りであることから、全てのサーベイメータの校正をおこなうことは困難である。そこで、ISO 4037-1 に規定されている規格を満たし線量率を大きく減弱できる付加フィルタの組み合わせを求めることができれば、各医療施設に設置されている診療用 X 線装置を用いて、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可能と考えた。そのため基礎検討として、工業用 X 線装置で再現可能か検証する必要があると考えた。本研究では工業用 X 線装置を用いて N-80 および N-100 線質と比較して同一の線質を再現し、NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの校正が可能か検討した。

検討項目として 1.シミュレーションによる付加フィルタの算出 2.実測による線質の評価 3.NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの校正を行った。シミュレーションによる付加フィルタの算出では、Sdec-V17 および PHITS を用いて N-80 および N-100 線質とほぼ同一の線質となる付加フィルタの組み合わせを算出した。実測による線質の評価では、工業用 X 線装置を用いてシミュレーションと実測値が一致することを確認した。次に実測値が N-80 および N-100 線質の参考値を満たしていることを検証した。サーベイメータの校正では、工業用 X 線装置での校正定数と ^{137}Cs 線源での校正定数と比較した。また、その校正定数がサーベイメータのエネルギー特性と一致しているか検証した。

実験の結果管電圧 80 kV においては 2.5 mm Al+1.0 mm Cu+1.0 mm Ta、管電圧 100 kV においては 2.5 mm Al+2.0 mm Cu+2.0 mm Pb の付加フィルタを設定することで、N-80 および N-100 線質と比較して線量率を大きく減弱できほぼ同一の線質を再現できることが明らかに

別紙様式 3 (課程博士申請者用)

なった。また、その線質を用いてサーベイメータを校正した結果、校正定数もサーベイメータのエネルギー特性とほぼ一致した。

以上のことから、工業用 X 線装置を用いて上記の付加フィルタを組み合わせることで、NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータを校正できる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 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの特性

2.1 シンチレーション検出器の概要	7
2.2 シンチレータ	7
1) シンチレータの種類	7
2) 無機シンチレータの発光機構	7
3) シンチレータの効率	9
4) シンチレータの特性	9
5) 無機シンチレータ	10
2.3 光電子増倍管	12
1) 構造および特性	12
2) シンチレータと光電子増倍管の結合	14
3) 回路構成	14
2.4 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ	15
1) NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの特徴	15
2) NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータのエネルギー特性および方向特性	15
3) 時定数	15

第3章 連続X線標準場

3.1 線質	17
3.2 連続X線標準場の仕様	17
1) 線質の分類とNシリーズについて	17
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 (30kV以下)	19
① 一般	19
② 管電圧	19
③ フルエンススペクトルおよび換算係数	20
3.3 装置の性能および操作方法	20

1) X線装置	20
2) 管電圧	20
3) フィルタ	
① 一般	21
② 固定フィルタの構成	21
③ 固有フィルタの決定	21
④ 付加フィルタの構成	22
4) 他の方法を用いた線質評価	13
① 基準	24
② 装置	24
③ 測定方法	24
3.4 照射野の均一性及び散乱線の評価他	24
1) 照射野の直径	24
2) 照射野の均一性	24
3) 散乱線	24

第4章 モンテカルロシミュレーション

4.1 モンテカルロシミュレーションとは	25
4.2 放射線分野でのモンテカルロシミュレーションの利用	26
4.3 PHITS	27
4.4 Surface Dose Evaluation Code	28
1) Surface Dose Evaluation Code (以下、SDEC) の概要	28
2) SDECのプログラムソフト	29

第5章 Nシリーズ線質に鉛を付加したときの線質の検討

5.1 はじめに	31
5.2 使用機器	31
5.3 高圧の印加による電位計の測定値への影響の検討	31
5.4 線量率を減弱するための鉛の厚さの計算	31
5.5 鉛を付加したときの線質の検討	32
5.6 結果と考察	34
1) 高圧の印加による電位計の測定値への影響	34
2) 線量率を減弱するための鉛の厚さの評価	35
3) 鉛を付加したときの線質の評価	37
5.7 小括	38

第6章 異なる付加フィルタを用いての校正の検討

6.1 使用機器	39
6.2 シミュレーションによる最適な付加フィルタの検討	39
6.3 実測による連続X線標準場の評価	40
6.4 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの校正	42
6.5 結果および考察	43
6.5.1 シミュレーションによる最適な付加フィルタの評価	43
6.5.2 実測による連続X線標準場の評価	44
1) 80 kV	44
2) 100 kV	45
3) 線量率の比較	47
6.5.3 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの校正の評価	48
6.5.4 考察	49

第7章 結論および今後の検討

7.1 結論	50
7.2 今後の展望	50

参考文献	51
------	----

謝辞	54
----	----

本論文に関連する学会発表	55
--------------	----

本論文に関連する学術論文	55
--------------	----

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、 γ 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、測定頻度をTable 1-2に示す¹⁾。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¹⁾。

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 μ Sv/h (1週間=40時間)
管理区域の境界	1.3 mSv/3月	2.6 μ Sv/h (3か月間=500時間)
居住区域および 事業所の境界	250 μ Sv/3月	0.11 μ Sv/h (3か月間=2184時間)
病院・診療所の病室	1.3 mSv/3月	0.60 μ 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行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。サーベイメータにはいくつかの種類（電離箱式、GM管式、半導体式など）があるが、その中でも光子に対してシンチレーション式サーベイメータは最も感度が高く、管理区域に漏えいする微量な放射線の測定に有用と考えられているが、他のサーベイメータに比べて低エネルギー側のエネルギー依存性は最も強い。そのため、近年はエネルギー補償型のサーベイメータも開発されている（Fig.1-1）¹⁾。

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、 γ	mSv、 μ 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	β (γ)	μ Sv/h、cpm	測定エネルギー範囲は γ 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 (TI) シンチレーション式	X、 γ	μ 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 ¹²⁵ I測定用もある
半導体式	γ (X)	μ 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	μ Sv/h、mSv/h	測定エネルギー範囲（0.025 MeV～15 MeV）、 ³ He比例係数使用



Fig.1-1 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ

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。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¹⁾。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¹³⁷Cs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。¹³⁷Cs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、¹³⁷Cs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²⁾。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る校正を行う必要があると言われている。診断領域のエネルギーを持つ放射性同位元素には²⁴¹Am線源 (59 keV) があるものの、現在の日本において²⁴¹Am線源は主に厚さ計等の工業ゲージ用の線源として用いられており、医療機関にはほとんど供給されていないのが現状である³⁾。

1.3 先行研究による報告

古渡らによると、 γ 線源に鉛板を付加して低線量率の γ 線標準場を生成することで校正を行ったという報告がされている⁴⁾。また、修士課程の研究では、診療用X線装置にNシリーズの規格を満たすように付加フィルタを追加することで、Nシリーズの線質を再現することができ、そしてその線質を用いて電離箱式サーベイメータの校正を行ったところ、工業用X線装置を用いたときと同等の校正定数が得られることが明らかになった⁵⁾。

ISO4037-1およびJIS Z 4511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⁶⁾。連続X線標準場にはいくつか種類があるが、サーベイメータの校正には狭スペクトルシリーズ（以下、Nシリーズ）を用いることが世界的に推奨されている⁵⁾。そして、NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータは測定可能な線量率が低線量率領域に限定されているため、連続X線標準場で校正するためには工業用X線装置を用いて管電流、線源-検出器間距離を調整する必要がある。しかし、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。診断領域における漏えいX線は60～80 keV程度であり、各認定事業者で行えるエネルギー範囲を考えると、診断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日本アイソトープ協会、放射線計測協会（Institute of Radiation Measurements; IRM）、日本品質保証機構（Japan Quality Assurance organization; JQA）の3施設に限られる⁸⁾。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）⁹⁾¹⁰⁾。しかし、線量標準センターも現在12施設でそのうちサーベイメータの校正が可能な施設は5施設しかなく全国にある医療施設は8,000余有り⁸⁾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困難だと考えられる。

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 μ C/kg～23 mC/kg
日本アイソトープ協会	50～200 keV	0.1 μ C/kg～10 μ C/kg
	200～1250 keV	0.1 μ C/kg～40 μ C/kg
放射線計測協会	30～200 keV	1.2 μ C/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 μ C/kg～30 mC/kg
	30～200 keV	0.1 μ C/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	サーバイメータ	RQA 線質*1
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	○	○	○	×
群馬県立県民健康科学大学 診療放射線学部	○	○	×	×
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

ISO 4037-1およびJIS Z 4511に規定されているNシリーズの参考値を満たしつつ、線量率を大きく減弱できる付加フィルタの組み合わせを求めることで、将来的に各医療施設に設置されている診療用X線装置を用いて、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（以下、校正）できると考える。本研究では、X線診断領域の校正場の参考線質として考えられているN-80およびN-100と比較して、ほぼ同一の線質となり線量率を大きく減弱できる付加フィルタの組み合わせを算出し、工業用X線装置を用いてNaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの校正が可能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7章から成り、各章では以下の内容について述べる。

第1章 序論（本研究の背景、目的）

第2章 NaI(Tl)シンチレーション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 モンテカルロシミュレーション

第5章 Nシリーズ線質に鉛を付加したときの線質の検討

第6章 異なる付加フィルタを用いての校正の検討

第7章 結論および今後の検討

第2章 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの特性

2.1 シンチレーション検出器の概要

放射線が固体、液体あるいは気体のいずれかの物質中を通過すると、それらの原子・分子はエネルギーを貰って電離励起を起こすが、蛍光物質（または蛍光体）の場合は原子・分子が励起状態から基底状態に戻る際、余分なエネルギーを可視光として放出する¹⁾。この光をシンチレーション（蛍光）と呼ぶが、この蛍光は非常に微弱であり、肉眼で観察することは困難である。古くはE. Rutherford（1911年）が α 線の検出に硫化亜鉛（ZnS）の蛍光体（シンチレータ）を利用して、それから出る閃光を肉眼で数えたといわれているが、その方法には限界があり現実的ではない。そのため、微弱な光を検出できる光電子増倍管が開発されるまでは、光利用の検出器はあまり進展が見られなかった。光電子増倍管は1935年Zworykin（アメリカ）により発表され、1940年代後半に実用化されそこから広く利用されるようになった²⁾。光電子増倍管はシンチレータからの蛍光を電気信号に変えるもので、放射線検出器として重要な役割を果たしている。

2.2 シンチレータ

1) シンチレータの種類

シンチレータはその化学組成により、無機、有機、液体、およびプラスチックの4種に分類できる。このうち、液体シンチレータは有機シンチレータを適当な溶媒に溶かして使用する。プラスチックシンチレータは有機シンチレータを溶媒に溶かした後、これを高分子化して固溶体として使用する。いずれも有機シンチレータの一種と見なすことができる。また、無機シンチレータの中でもタリウム活性化ナトリウム（NaI(Tl)）結晶は γ 線の検出効率が高く、最も広く利用されているシンチレータのひとつである¹⁾³⁾。

2) 無機シンチレータの発光機構

放射線がシンチレータに吸収された場合、それが α 線、 β 線といった荷電粒子線であれば、その運動エネルギーはほとんどシンチレータに与えられる。ただし、 β 線（電子線）では制動放射線の発生を伴うので、その発生を少なくするために低原子番号のシンチレータの使用が推奨される¹⁾。X(γ)線の場合は光電効果、コンプトン効果、電子対生成により二次電子が生じ、中性子線の場合は原子核との衝突で、 α 粒子、陽子、光子などが生じて、最後にはいずれかの荷電粒子が結晶中の電子を励起する。

無機結晶中での電子は離散的なエネルギー帯しか入り得ない。Fig.2-1で下方のエネルギー帯を価電子帯（または充満帯）と呼び、そこにある電子は結晶格子上の位置に束縛されている。また、上方のエネルギー帯は伝導帯と呼び、ここでは電子が結晶中を自由に移動できるだけの十分なエネルギーを有する。これら両エネルギー帯の間に禁止帯と呼ばれるエネルギーギャップがあり、純粋な結晶ではこのギャップ内に電子が入り得ない。価電子帯にある電子がエネルギーを吸収すると、電子はその定常位置から禁止帯を越えて伝導帯に移行する。一方、価電子帯にあった電子が伝導帯に移ると、その空席が正孔として残る

り。純粋結晶の場合、伝導帯にある電子が光子を放出して価電子帯に戻るが、この過程による光子放出は能率が悪く、かつ、禁止帯のエネルギーギャップが大きいため、放出される光子エネルギーも高く、可視光よりも短波長側の光子となり適当でない。そのため、無機結晶に少量の不純物（activator:活性化物質または活性剤という）を加えて結晶格子内に特別な位置を作り、それによって純粋結晶のエネルギー帯の構造が少し変わり、禁止帯内に新たなエネルギー状態を形成する。このエネルギー準位は禁止帯のエネルギーギャップ幅よりも小さく、可視光の放出確率を高める。すなわち、その中の最低準位がこの系列中の基底準位で、価電子帯のすぐ上にある。その基底準位の上に励起準位（蛍光中心）がある。さらに、伝導帯のすぐ下に捕獲準位（捕獲中心）がある。捕獲中心には、通常電子は取り込まれないが、電子が励起されて伝導帯に上がると、一時的に電子を捕らえる。この過程をFig.2-1で説明すると①放射線が無機結晶中に入射すると、②価電子帯にある電子は十分なエネルギーを得て伝導帯に上がり③この電子は伝導帯内を自由に動き回り、④ときには、捕獲中心に捕らえられ、それが熱励起により再び伝導帯へ上がったりする。⑤また、正孔は価電子帯内を動き回り、⑥すぐ上の基底準位の束縛電子を奪って結合し、そこに空位が生じる。そして、⑦伝導帯にある自由電子は蛍光中心に下がり、⑧さらに空位の基底準位に遷移する。その際、⑨余分なエネルギーが蛍光として放出される。なお、捕獲中心に捕獲された電子は、その捕獲エネルギー準位によって異なるが、一部の電子は室温でエネルギーを吸収して捕獲中心から上の励起準位に移り、さらに、基底準位あるいは価電子帯に下がる。このとき、やはり光子を放出するが、この光子は燐光と呼ぶ。

以上、結晶に格子欠陥を作る活性剤の添加は、蛍光を能率よく放出させるための重要な役割を果たしている。タリウム(Tl)は無機結晶によく用いられている活性剤である。

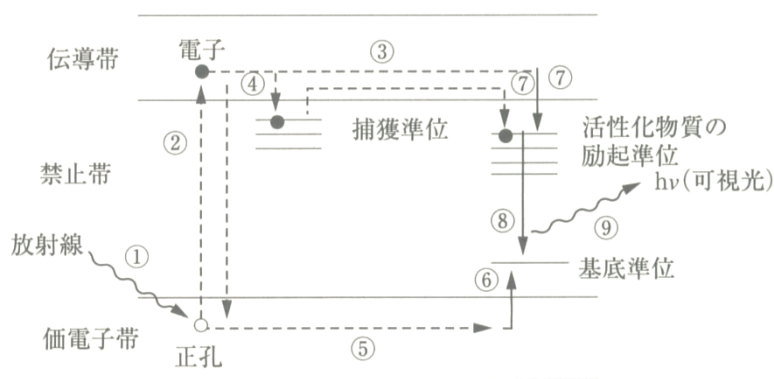


Fig.2-1 無機シンチレータの発光機構¹⁾

3) シンチレータの効率

シンチレータに吸収された放射線エネルギーは100%光に変換されるわけではなく、10~15%程度しか変換されないと言われている。例えば、NaI(Tl)シンチレータの場合変換効率は約13%であり、100 keVの放射線エネルギーを吸収した場合、 1.3×10^4 eVの光子エネルギーが放出される。1光子の平均エネルギーを3 eVとすれば、これは 4.3×10^3 個の光子数に相当する。一方、1組の電子・正孔対を作り出すのに約20~25 eVの放射線エネルギーが費やされるので、約 $4 \sim 5 \times 10^3$ 個の電子・正孔対ができる計算になる。このことは、1組の電子・正孔対当たりほぼ1光子が放出されることを示している。

4) シンチレータの特性

シンチレータの特性はその組成、密度、屈折率、融点など、物理的性質・化学的性質に依存するため、すべてに優れた特性のシンチレータはない。そのため、使用目的に応じて適切なシンチレータを選ぶ必要がある。シンチレータの特性として重要な因子は、①蛍光効率、②蛍光波長分布、③蛍光減衰時間である¹⁴⁾。以下、これらの因子について簡単に説明する。

①蛍光効率 ϵ :放射線がシンチレータ中で一定のエネルギー損失があるとき、生ずる蛍光量で表す。ただ、 β 線（電子線）の場合ほどのシンチレータでも、そのエネルギー損失と蛍光量が比例関係にあるので、感度は β 線の一定エネルギー損失当たり生ずる蛍光量で表す。通常、有機結晶のアントラセン（ $C_{14}H_{10}$ ）の感度を基準（1.00）とし、その相対比率を蛍光効率 ϵ としている。

②蛍光波長分布:シンチレータが発する蛍光の波長分布は、光電子増倍管光電陰極の分光感度分布と大いに関係がある。光電子増倍管の感度は、波長領域300~650 nm（最大感度約370~420 nm）にわたって分布している。したがって、シンチレータの蛍光波長分布がこの感度分布に合致すれば、最も理想的な組み合わせとなる。NaI(Tl)結晶は415 nm付近で最大発光効率を示すが、いずれにしても、通常使用する光電子増倍管の分光感度分布が大きく変化することはないので、できるだけシンチレータ側の蛍光波長分布を変えて光電子増倍管側に合わせるように工夫する。

③蛍光減衰時間 τ :放射線によりシンチレータが励起され、基底状態に戻る際に発する蛍光強度は時間と共に減衰するが、蛍光強度が最大から $1/e$ に減衰するまでの時間を τ という。高計数率の測定には τ の短いシンチレータがよいが、その点では有機シンチレータの方が無機シンチレータよりも一般には短い。

5) 無機シンチレータ

Table 2-1に主な無機シンチレータの特性を示す⁴⁾が、発光機構のところでも述べたとおり、 ϵ を高めるため、大部分の結晶に少量の不純物を加え活性化している。最も広く用いられているNaI(Tl)結晶は、NaIにTlがごく少量（モル比率で 10^{-3} 程度）添加されており、これが発光中心となって ϵ をかなり高めている。無機シンチレータは一般に密度が大きく、実効原子番号が高いので、特にX(γ)線の測定に適している。

また、有機シンチレータに比べ ϵ は大きい、 τ がやや長い（ μs 程度）という特徴がある。NaI(Tl)結晶は $0.23 \mu\text{s}$ と短い方で、かつ、大きな単結晶が製作できるため、X(γ)線の測定に広く利用されている。なお、NaI(Tl)結晶は潮解性(吸湿性)があるので、空気に触れないようAlの容器に封入（air tight）して使用しなければならないが、蛍光を取り出す窓部分には透明度の良いガラスが張ってある。 ^{125}I のような低エネルギーX(γ)線測定の場合は、Alによる吸収を考慮する必要がある（ $\geq 5 \text{ keV}$ で 0.15 mm Be 、 $\geq 10 \text{ keV}$ で 0.03 mm Al 、 $\geq 25 \text{ keV}$ で 0.8 mm Al 、 $\geq 35 \text{ keV}$ で 2.0 mm Al ）。Fig.2-2(a)に円柱形NaI(Tl)結晶の構造を示すが、内面にMgO（酸化マグネシウム）または Al_2O_3 （酸化アルミニウム）の反射材を塗布して光の収率を高めている。形状は円柱状の他、井戸（ウエル）形、スルーサイドホール形（Fig.2-2(b), (c)）平板形等がある。NaI(Tl)結晶以外ではCsF（フッ化セシウム）も潮解性があり、 ϵ が低い反面、 τ が著しく短いという特徴を有する。また、タリウム活性化ヨウ化セシウム（CsI(Tl)）結晶は潮解性がほとんどないため、容器の吸収を考慮する必要はないが、重荷電粒子の測定では特に、低エネルギー領域における放射線エネルギーと発光量（出力波高）の比例性が損なわれることがある。これは荷電粒子の飛跡の単位長さ当たりのエネルギー損失（線阻止能）が関係し、線阻止能が大きいほど発光効率が低下するためである（出力波高抑制効果と言われている）。ZnS(Ag)（銀活性硫化亜鉛）は発光効率がよく、蛍光板として古くから使用されてきたシンチレータであるが、多結晶の粉末として入手できるのみで、透明度が劣り厚く塗布できない。そのため、光電子増倍管の前面に薄い膜（約 25 mg/cm^2 以下）を着けて、 α 粒子、その他の重荷電粒子の測定、あるいは粉末をルサイトなどに混入し、中性子の検出に利用されている。この他、 $^6\text{LiI}(\text{Eu})$ 結晶は熱中性子の測定（ $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ ）に用いられる。また、BGO（ $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$:ゲルマニウム酸ビスマスの単結晶）は密度、実効原子番号共NaI(Tl)結晶よりも大きく、潮解性もなく、 τ も比較的短い（ 300 ns ）等、NaI(Tl)に比べ γ 線の測定に適した特性を有するが、 ϵ がNaI(Tl)の10%程度しかないという欠点がある⁵⁾。

Table 2-1 無機シンチレータの特性¹⁾⁴⁾

シンチレータ	密度 ρ (g/cm ³)	実効原子 番号 \bar{Z}	屈折率	蛍光量最大の 波長 λ (nm)	傾向効率 ϵ^{**}	蛍光減衰 時間 τ (ns)	潮解性	備考*
CaF ₂ (Eu)	3.17	12.7	1.44	435	1.1	1000	なし	
ZnS(Ag)	4.09	27	2.36	450	3.0	200	〃	α 、熱中性子 (B, ⁶ Li)
CdS(Ag)	4.8	44	2.5	760	2.0	1000	〃	
KI(Tl)	3.13	49	1.68	410	~0.5	1000	あり	γ 線
NaI(Tl)*	3.67	50	1.77	413	2.3	230	〃	γ 線、 F=4.6×10 ⁸
LiI(Eu)	4.06	52	1.95	475	0.75	1200	〃	γ 線、中性子重 要
CsF*	4.64	52	1.48	390	0.11	2.8および 4.4	〃	τ 短い、 F=2.3×10 ⁹
BaF ₂ *	4.88	53	1.51 1.5	220 310	0.13 0.37	0.8 620	なし	τ 短い、 F=1.9×10 ¹⁰
CsI(Na)	4.51	54	1.79	420	1.5~1.9	650	あり	
CsI(Tl)	4.51	54	1.79	580	0.95	1100	なし	α 線、 γ 線
CaWO ₄ *	6.06	59	1.92	430	1.0	1000	〃	F=5.9×10 ⁷
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	7.13	72	2.15	480	0.23	300	〃	BGOと略、 F=6.3×10 ⁸

* 備考にPET用シンチレータとしての性能指数Fを示した。

**アントラセンを1.00とした相対値。

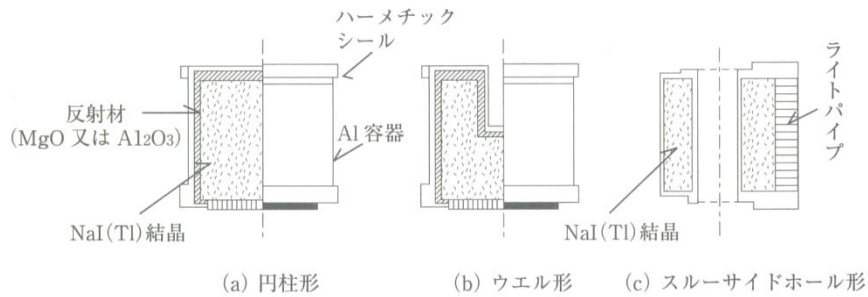


Fig.2-2 NaI(Tl)シンチレータの構造および形状¹⁾

2.3 光電子増倍管

1) 構造および特性

シンチレータからの蛍光を電氣的パルスに変換するために光電子増倍管が使用されている。光電子増倍管の構造はFig.2-3に示すとおり、円形集束形、直線集束形、ベネチアンブラインド形、そしてグリッド付箱形と各種方式のものがあるが、いずれも光電陰極（受光面）、ダイノード（二次電子放出電極）、および陽極（コレクタ）からなる。

蛍光が光電陰極に入射すると光電子が放出され、これが加速されて第1ダイノードの電極表面を衝撃する。ここから複数個の二次電子（このエネルギーは通常2~3 eVと非常に小さい）が放出され、これら二次電子がさらに加速されて第2ダイノードに進み、ここでまた次の二次電子を放出するという具合に、二次電子数はねずみ算的に増大する。通常的光電子増倍管でダイノード数は10~12段程度であり、これによって陽極に集められる最終二次電子総数は相当多くなる。いま、仮に光電子1個が第1ダイノードに衝突し、そこから二次電子が δ 個放出するとしてダイノード数N段の場合、総電子数（全利得または増幅率）は δ^N として計算できる。仮に、 $\delta=4$ 個、 $N=10$ 段とすると、全利得は 4^{10} （ $\approx 10^6$ ）になる¹⁴⁾。光電子増倍管の全利得は印加電圧の変動に敏感な影響を受ける。

シンチレーション検出器用光電子増倍管には半透明の光電陰極が広く用いられている。一般には入射窓の内側にCsと他の金属元素を蒸着し、適当に酸化させながら薄膜を形成させて作るが、その材質によって分光感度特性は異なる。古くから使用されているものにS-11(Cs-O-Sb)があるが、現在はS-11よりも熱電子放出の低いバイアルカリ（K-Cs-Sb）、トライアルカリ（Na-K-Cs-Sb）などが多く使われている。また、ダイノードには二次電子放出能（増倍係数）の高い材料として、トリセチオアンチモン（Cs₃Sb）、酸化ベリリウム（BeO）、MgO等が一般的であるが、最近では負の電子親和性物質が非常に優れた性質を有することからガリウム燐（GaP (Cs)）が使用されている。

光電子増倍管はFig.2-3に示すとおり、光電陰極が側面にあるサイドオン形(a)と頭部にあるヘッドオン形(b)、(c)、(d)があるが、放射線測定で使用するのは後者のヘッドオン形である。光電面の寸法も各種あるが、直径5~12.7 cm (2~5 inch)程度が一般的である。最近では特殊な型の光電子増倍管も試作され、多方面に応用されている。

①磁場の影響：光電子増倍管内でダイノード間を移動する二次電子は100 eV程度の低いエネルギーのため、当然磁場の影響を受けやすい。漏れ磁場あるいは地磁気による影響を受けた場合、増倍管の利得の変動を避けるため磁気遮へいを行う⁶⁾。一般によく使用される磁気遮へい材料はミューメタルで、ガラス壁の表面に薄く巻き、これを光電陰極の電位（通常は接地電位）に保っておく。また、パーマロイ（Fe78%、Ni22%の合金）製磁気遮へいケースも使用されている。これは光電陰極と第1ダイノード間の静電場の乱れを避けるためである。

②特性：ダイノードからの二次電子を加速するため、各ダイノード間に50~150 V程度の直流電圧を印加して使用する。したがって、光電陰極と陽極間の全印加電圧はこの10倍以上となる。印加電圧の変動は二次電子増倍係数を変化させるので、結局、光電子増倍管の増幅率を大きく変化させることになる。増幅率は 10^5 ~ 10^7 程度であるが、印加電圧が1%変動すると増幅率は8~10%程度変化するので、精度よく測定するには安定度の高い高圧直流電源（電圧変動率0.01%以下）の使用が要求される。Fig.2-4は光電子増倍管に印加する電圧

回路図であるが、通常は(a)の光電陰極接地法が使われる。

③暗電流：光電子増倍管の光電陰極に光が全く入射しない状態でも、陽極電流がごくわずかに流れる。これを暗電流（dark current）というが、この主な原因は光電陰極および最初の1~2段のダイノードが熱エネルギーを吸収して、熱電子を放出するためである。したがって、光電陰極を冷却することにより、熱雑音源はある程度除去できる。蛍光量の少ない低エネルギー放射線（3H、14Cなどのβ線）を測定する場合、暗電流によるS-N比の低下が問題で冷却して使用していた。しかし、現在では光電陰極にバイアルカリなどの材料が使用され、熱電子の放出が著しく軽減された。その結果、冷却しなくても十分使用できるようになっている。

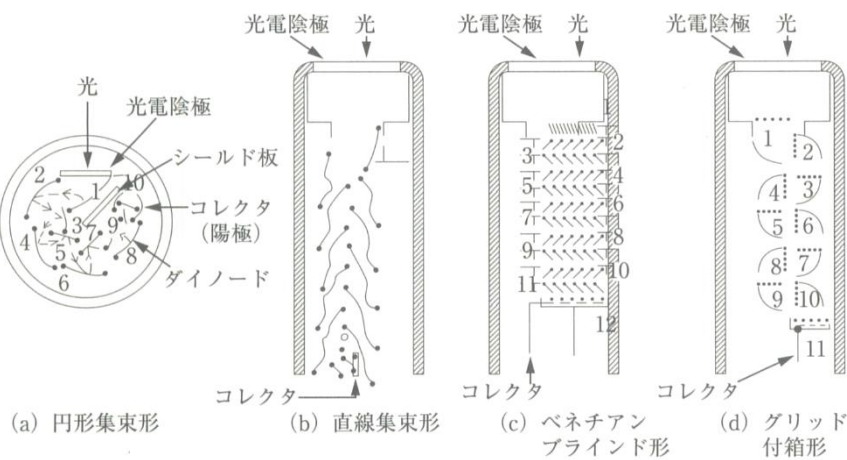


Fig.2-3 各種光電子増倍管の構造 1)

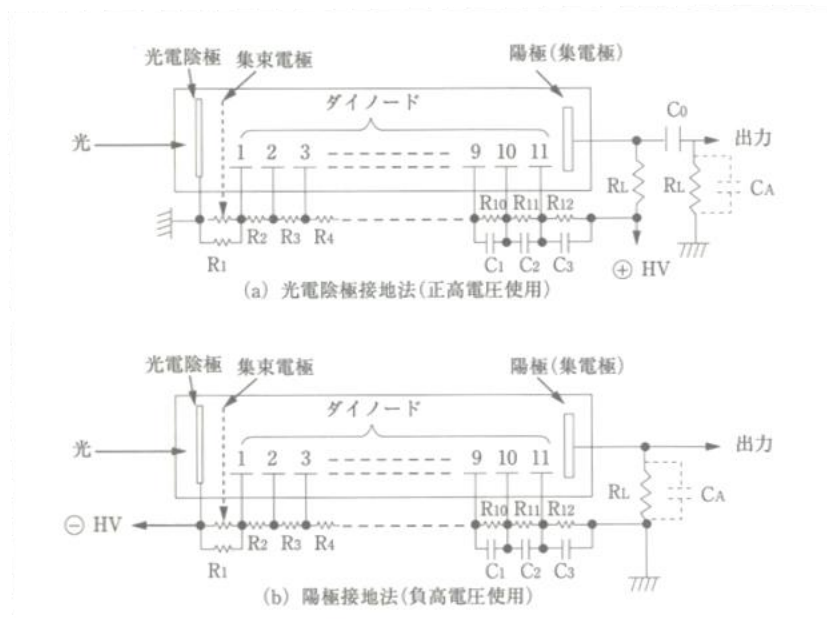


Fig.2-4 光電子増倍管の各ダイノードへの電圧印加 1)

2) シンチレータと光電子増倍管の結合

例えば無機シンチレータを光電子増倍管の前面に結合させる場合、蛍光がシンチレータ側面から逃げたり、あるいは光電子増倍管の窓(前面ガラス)で反射して一部の光が失われる。シンチレータ側面での光の損失は反射材の塗布 (Fig.2-2) により軽減されるが、光電子増倍管前面での光の反射は、透明で粘着性のある物質 (シリコングリースなど) を両者の間に挟み、そこでの屈折率の変化を減らすことにより小さくできる。さらに、シンチレータと光電子増倍管を直接結合させることが難しい場合は、この両者の間に光パイプ (光ガイドともいう) を使用する。光パイプは光に対して透明で、かつ、内部全反射の臨界角を最小にするよう、比較的大きな屈折率を持つ物質 (ルサイト、石英、パイレックスなど) が選ばれる。

3) 回路構成

シンチレーションカウンタはシンチレータと光電子増倍管を組み合わせることにより放射線を検出できるので、一般には波高分析できる回路が含まれる。Fig.2-5にシンチレーションスペクトロメータの基本回路構成を示す。

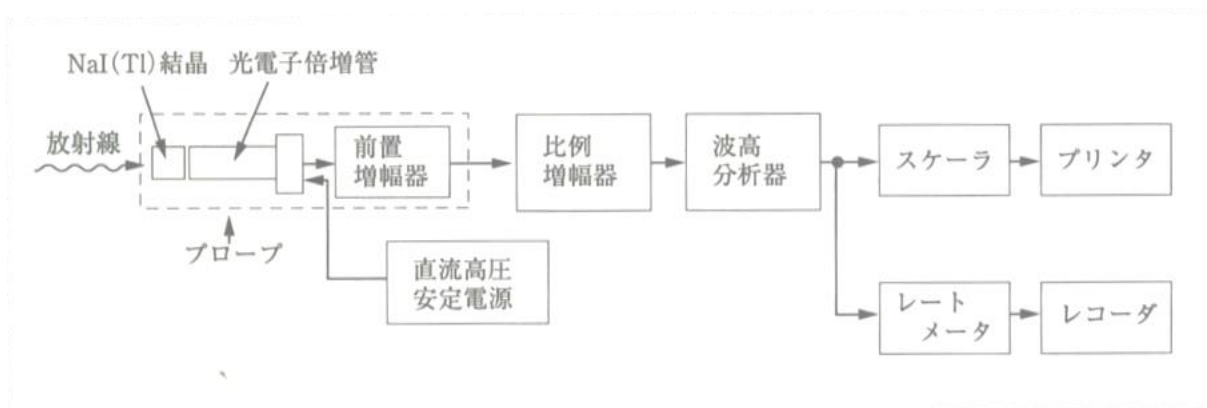


Fig.2-5 シンチレーションカウンタの基本構成¹⁾

2.4 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ

1) NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの特徴

X(γ)線用にはNaI(Tl)シンチレータと光電子増倍管を組み合わせた検出器が使われるが、シンチレータの大きさは一般に円柱状で、直径2.54 cm程度のものが多い¹⁾。X(γ)線に対する感度は、シンチレータの大きさおよびX(γ)線エネルギーなどが関係する。また、エネルギー特性が劣るため、¹³⁷Cs等の基準線源により校正されている場合、その目盛付けに使用した線源と同一エネルギーの γ 線を測定するなら問題ないが、異なるエネルギーの γ 線 (X線) を測定するときは指示値に校正定数を乗ずる必要がある¹⁷⁾。

2) NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータのエネルギー特性および方向特性

Fig.2-6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]あ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。X(γ)線に対する検出効率は電離箱式、GM計数管式に比べて高いが、エネルギー特性が一番悪い。エネルギー50 keV以下ではシンチレータのAlカバーによる吸収、蛍光効率の低下のため感度は低下するが、150 keV付近で最高感度を示す。さらにエネルギーが高くなると、感度は逆に低下する。方向特性はGM計数管に比べ、やや良いように見受けられるが、後方は光電子増倍管、回路基板等が存在していることから、電離箱式と同様に感度は低下している (Fig.2-7(c))¹⁷⁾。なお、シンチレーション式では光電子増倍管の熱雑音、その他の低バックグラウンドを除くため、波高弁別回路により設定レベル以下の信号パルスは除去されている。したがって、この設定レベル (半固定) によって50~100 keV程度のX(γ)線が計測されないこともあるので注意が必要である⁷⁾。

3) 時定数

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。その一方で、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。時定数は一般には数秒~10 数秒のものも多く、低計数率では長く、高計数率では短く設定されている。3、10、30 秒といったように切替え式になっている機器もある⁸⁹⁾。測定の際の注意点としては、例えば時定数 (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⁷⁾。したがって、正確に測定をするためには、3CR~4CRの測定時間が経過した後に指針を読み取ることが必要である。

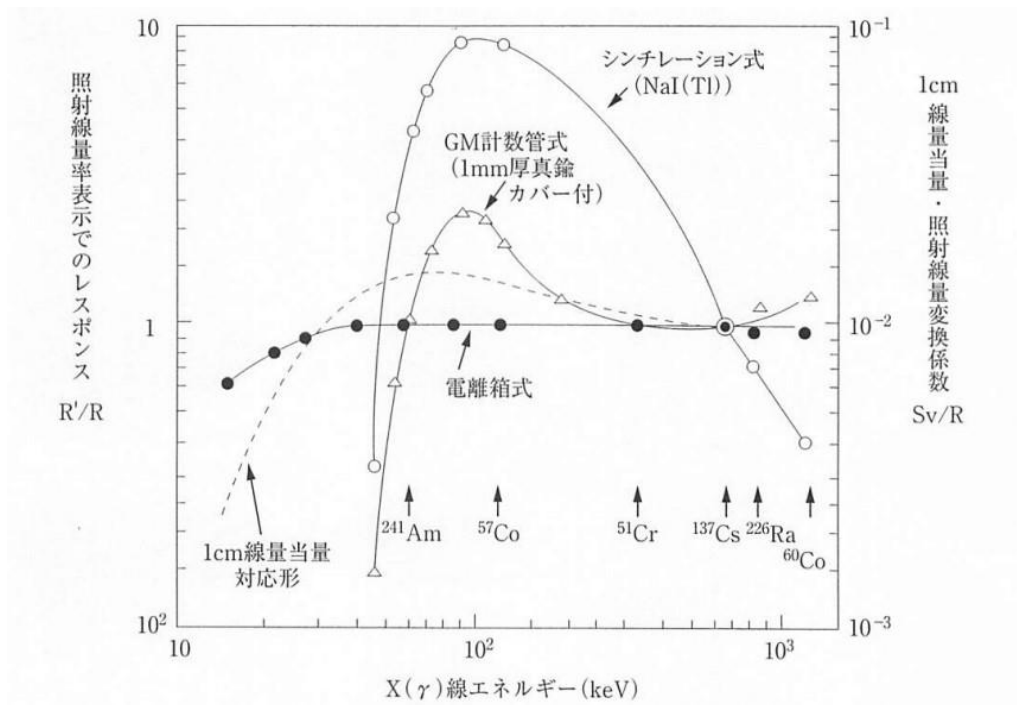


Fig.2-6 各種サーベイメータの光子エネルギー応答特性⁷⁾

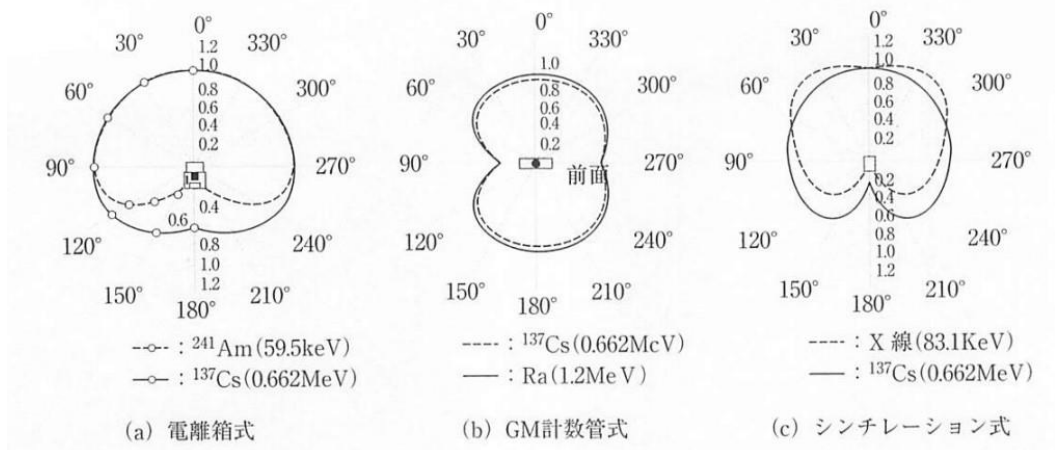


Fig.2-7 各種サーベイメータの方向特性¹⁾

第3章 連続X線標準場

3.1 X線線質

連続X線標準場で用いる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_{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_{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 ^{a), b)} [Gy · h ⁻¹]
L シリーズ	18~22	1.0	3×10^{-4} ^{c)}
N シリーズ	27~37	0.75~1.0	$10^{-3} \sim 10^{-2}$ ^{c)}
W シリーズ	48~57	0.67~0.98	$10^{-2} \sim 10^{-1}$ ^{c)}
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 以下の場合は、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 ^{a)} [Gy · h ⁻¹]
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 ^{a)} kV	付加フィルタ ^{b)} mm				第一半価層 ^{d)} mm	第二半価層 ^{d)} mm
			Pb	Sn	Cu	Al		
8	28	10				0.1 ^{c)}	0.047 Al	0.052 Al
12	33	15				0.5 ^{c)}	0.14 Al	0.16 Al
16	34	20				1.0 ^{c)}	0.32 Al	0.37 Al
20	33	25				2.0 ^{c)}	0.66 Al	0.73 Al
24	32	30				4.0 ^{c)}	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 $H_p(10)$ 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II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、 $H_p(10)$ 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

$H_p(10)$ 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			
			V		%	
			hp,k(10,0°) h*k(10)	hp,k(10,60°)	hp,k(10,0°) h*k(10)	hp,k(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ければならない。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、次による。

- 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。

- 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のフィルタを用いる。

フィルタは、厚さの精度が±5%で、孔、ポイド、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。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 フィルタの仕様

材質	純度	密度 [g·cm ⁻³]
Al	99.9 %	2.70
Cu	99.9 %	8.94
Sn	99.9 %	7.28
Pb	99.9 %	11.3

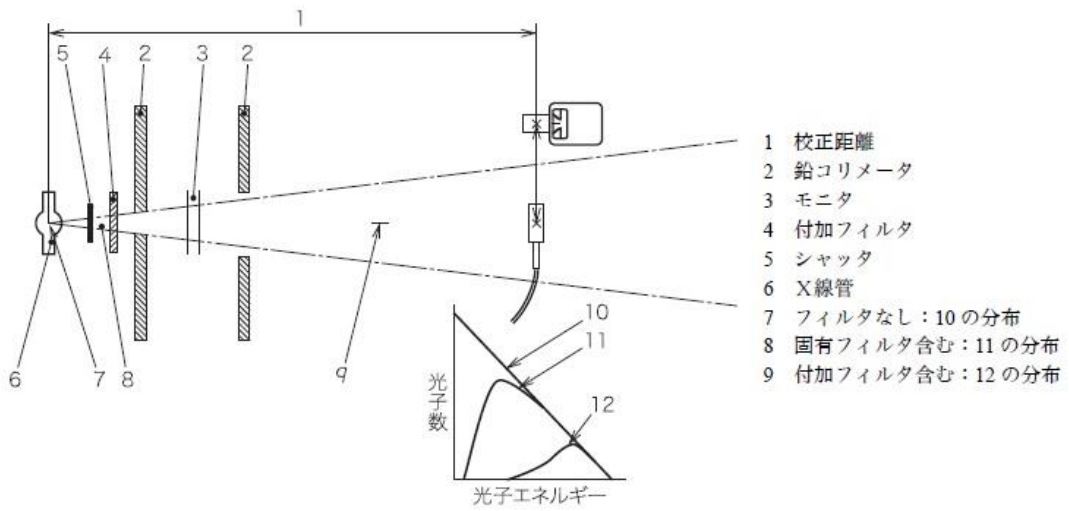


Fig.3-1 モニタを用いた X線装置の幾何学的配置及び各位置での X線スペクトルの例

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100kVを超える線質では、半価層は照射野直径を無限小(0mm)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50cm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 モンテカルロシミュレーション

4.1 モンテカルロシミュレーションとは

モンテカルロシミュレーションは乱数を利用して種々の確率現象をシミュレートする確率論的数値実験法であり、主に複数の確率的要素を含んだ事象を対象としており、電気や水道などのライフラインの信頼性評価や交通システムの予測をはじめとした工学分野をはじめとして様々な分野に応用されている。放射線分野においては1950年代から放射線の物質透過計算に利用する提案がなされ、コンピュータの発達に伴い脚光を浴びている。

放射線と物質との間で起こる相互作用はすべて量子力学的な確率分布に従っている。放射線の物質中における振る舞いは、複数の確率的要素を含んだ事象である。モンテカルロシミュレーションでは、多くの数の放射線粒子の一個一個の振る舞いを観察することにより、求めようとする放射線輸送に関する物理量を評価が可能になる。

モンテカルロ法では、計算効率を向上させるため、放射線粒子に物理現象を識別可能なウェイト W （便宜上、粒子にラベルした任意の実数値）を定義し、粒子に物理現象の整合性が成立するような人為的操作を行っている。モンテカルロ法による放射線の輸送計算では、まず個々の過程で乱数を発生させ、線源のどの位置から、どのくらいのエネルギーとウェイトを持った粒子をどの方向に発生させるかを決定している。その後媒質中のどの核種と反応し、どのようなエネルギーとウェイトを持った粒子がどの方向に散乱するかも個々に発生させて決定している。粒子の発生から消滅ないし体系の外へ漏れ出るまでのひとつの過程をヒストリといい、統計精度を上げるためにこの過程を何度も繰り返す。

4.2 放射線分野でのモンテカルロシミュレーションの利用

放射線の物理特性や放射線量の測定・評価には電離箱検出器や半導体検出器をはじめとして種々の測定装置および測定技術が応用されている。しかし測定対象とする放射線の物理的性質や線量によっては測定が不可能な場合がある。例として、人体内の吸収線量を1次成分と散乱線成分に分離できれば吸収線量の高精度評価に非常に有用であるが、実際にこれらを分離して測定・検出することは物理的に不可能である。仮に可能であっても放射線と検出器との相互作用などの特性により、測定装置から直接出力されるデータだけでは正確に評価できない場合がある。このように実測定が非常に困難な問題に対してはモンテカルロシミュレーションを利用して解決法を見出すことが非常に有効な手段となる。

モンテカルロシミュレーションでは次々におこる放射線と物質との相互作用の結果を確率分布に従う乱数をサンプリングすることで決定しながら、物質中での挙動を数値からたどることができる。これを照射条件に合わせて多数回繰り返すことで実際の放射線照射で起こる物理現象をコンピュータ上で再現できる。また、任意の位置に理想的な検出器(カウンタ)を自由に設定できるため、実際の照射では測定が不可能な物理量をも予測することが可能になる。

放射線分野で用いられている例として、ICRPが採用している線量当量換算係数は、人体組織を模したICRU球に種々のエネルギーを持った光子および中性子線が照射された場合を想定し、モンテカルロシミュレーションによって算出された数値である。他にも放射線医療に関してモンテカルロシミュレーションを利用した様々な解析・研究が報告され、放射線分野においてモンテカルロシミュレーション技術は不可欠なものとなっている。

4.3 PHITS

粒子・重イオン輸送計算コード（Particle and Heavy Ion Transport code System:PHITS）は任意の体系中におけるさまざまな放射線の挙動を、核反応モデルおよび核データを用いて模擬するモンテカルロ計算コードであり、日本原子力研究開発機構（Japan Atomic Energy Agency:JAEA）で開発された。加速器工学、放射線医療、宇宙工学など多くの分野の研究に使用されている²⁾。特徴として以下の項目があげられる³⁾。

- ・ 入力データ形式が任意フォーマットのASCIIコントロール
- ・ ユーザーがFortranプログラムを書く必要がない
- ・ 幅広いエネルギー範囲のすべての放射線の挙動を解析可能

また、核反応と核データを組み込んでいることからより正確な放射線輸送解析が可能であるが、解析対象の形状が複雑な場合は形状作成が容易でなく、高精度の数値解を得るためには大量の粒子の挙動を追跡する必要があることから計算時間が非常に長くかかり、日常的に発生する多くの解析対象に手軽に使用することが難しい欠点がある⁴⁾。Table 4.1に他のモンテカルロ計算コードとの比較を示す³⁾。

Table 4-1 モンテカルロ計算コードの比較

コード名	開発機関	使用目的	言語	特徴
GEANT4	GEANT Etc.	高エネルギー物理、 医療、宇宙	C++	オブジェクト指向。世界中で開発した様々な核反応モデルやツールを統合するプラットフォーム。
FLUKA	CERN、 INFN	加速器、医療、宇宙	FORTRAN	加速器の遮へい設計で実験多数。ヨーロッパを中心に普及。
EGS	KEK、SLAC	医療	FORTRAN	電磁カスケード計算専用コード。医学物理分野で実績多数。
Super MC	FDS	核融合、医療	C++	ITERが主目的。CADとの親和性や可視化ソフトウェアに優れる。
PHITS	JAEA、 RIST、KEK	加速器、医療、宇宙	FORTRAN	加速器、医療、意中分野で幅広い実績。

開発機関: Geant(Geometry And Tracking)、CERN(European Organization for Nuclear Research)、INFN(National Institute for Nuclear Physics)、SLAC(SLAC National Accelerator Laboratory)、KEK(High Energy Accelerator Research Organization)、JAEA(Japan Atomic Energy Agency)、RIST(Research organization for Information Science & Technology)

4.4 Surface Dose Evaluation Code

1) Surface Dose Evaluation Code (以下、Sdec) の概要

医療行為による患者被ばくには法的線量限度は設けられていないが、2015年に医療被ばく研究情報ネットワーク (J-RIME) によって診断参考レベルが策定され、各放射線検査で被ばくの最適化を図るよう勧告している。診断参考レベルが提示している数値は、一般撮影領域においてはX線の入射表面における吸収線量である⁵⁾。入射表面における吸収線量の評価法として、日本放射線技術学会計測分科会が提案した方法 (以下、従来法) が広く利用されている。これは、X線管から出力された空中における照射線量の実測値から計算により入射皮膚表面の吸収線量を求めるものである。しかし、この方法において計算に使用する後方散乱係数、吸収線量変換係数は実効エネルギー (もしくはアルミニウム半価層厚) のパラメータで与えられているため、空中照射線量とは別に、同じX線束の実効エネルギー (半価層厚) を同時に測定する必要があり、かなり煩雑な作業手順となる。

そこで、加藤らによって照射条件を基に近似的に求めたX線スペクトルデータを利用して後方散乱係数および吸収線量変換係数を計算し、入射表面線量を自動計算するプログラムソフトがSdecである。Sdecは従来法に準じているが、照射条件等から導出したX線スペクトルデータを基にして各係数を算出するため、半価層および実効エネルギーの測定が不要であり、非常に簡便な評価方法である⁶⁾。

2) Sdecのプログラムソフト

Sdecの画面をFig.4-1に示す。1枚目の画面は、照射条件等の入力および計算結果やスペクトルを表示する領域で、2枚目の画面は結果の読込や保存、印刷などを行う領域である。入力(選択)する項目は、次のとおりである。

(1)X線装置の高電圧整流方式 (選択)

- ・定電圧インバータ (定電圧およびインバータ式X線装置)
- ・三相12ピーク (三相12ピーク形X線装置)
- ・単相全波 (単相2ピーク形X線装置)

から選択する。

(2)焦点から1 mの距離の照射線量 (選択)

“実測値を直接入力”を選択すると、実測した照射線量を入力できる。

“デフォルト出力データを利用”を選択すると、あらかじめ作成された出力データを基にして、入力された照射条件に合致した照射線量が計算に用いられる。

(3)X線管ターゲット角度

(4)X線管の固有ろ過 (Al当量) [mm]

(5)X線管の付加フィルタ (Al、Cu) [mm]

(6)任意フィルタ (Ag、Sn、Ta、W、Pb他) [mm]

(7)X線管電圧 [kV]

(8)X線管電流 [mA]

(9)照射時間 [s]

(10)焦点-受像器間距離 FFD [cm]

(11)焦点-入射表面間距離 FSD [cm]

(12)被写体厚 [cm]

(13)受像器面での照射野サイズ (FPDサイズで選択)

“その他”を選択した場合、任意の長軸方向短軸方向の照射野サイズを入力できる。

すべての照射条件を入力した後、“この条件で計算する”ボタンをクリックすると計算が開始され、画面右部分に以下に示す計算結果が表示される。

(a)第1アルミニウム半価層 [mm]

(b)実効エネルギー [keV]

(c)ATR-Index

(d)後方散乱係数 (軟部組織吸収線量、皮膚組織吸収線量、空気カーマ (吸収線量))

(e)照射線量-吸収線量変換係数[Gy/C/kg] (軟部組織、皮膚組織)

(g)入射表面線量[mGy] (軟部組織吸収線量、皮膚組織吸収線量、空気カーマ)

ただし、(a)～(c)はスペクトルから算出された参考値であり、本ソフト内での入射表面線量の計算には用いられてはいない⁶⁾。

Sdec-V17 診断X線の入射表面線量計算

2023-12-30 です

高電圧整流方式

- 定電圧・インバータ
- 三相12ピーク 単相全波

焦点から1mの距離の照射線量

- 実測値を直接入力
- デフォルト出力データを利用

照射線量 at 1 m C/kg

出力データ

出力データ編集 出力データ選択

X線管ターゲット角度	12	度	
固有フィルタ (Al当量)	2.5	mm	
付加フィルタ (アルミ)	1.0	mm	
付加フィルタ (銅)	0	mm	
任意フィルタ	—	0	mm

照射部位	追加・削除	腹部正面	
X線管電圧	75	kV	
X線管電流	透視	200	mA
照射時間	0.05	sec	
焦点-受像器間距離	100	cm	
被写体厚	20	cm	
焦点-入射表面間距離	80	cm	
受像面での照射野サイズ	半切サイズ	縦	
長軸方向サイズ	43.2	cm	
単軸方向サイズ	35.6	cm	

後方散乱係数 算出方法

- 平面として計算
(微分後方散乱係数を用いて計算)
- 非平面として計算
(円柱, 楕円柱, レーストラック
モデルで直接モンテカルロ計算)
(被射体はICRU軟部組織)

頭部以外 頭部

参考データ

半価層	<input type="text"/>	mmAl	ATR-Index
Eeff	<input type="text"/>	keV	

実測した半価層または ATR-Index と近似するように

後方散乱係数

軟部組織吸収線量	
皮膚組織吸収線量	
空気カーマ (吸収線量)	

照射線量 - 吸収線量 変換係数

軟部組織		Gy/C/kg
皮膚組織		Gy/C/kg

入射表面線量

軟部組織吸収線量		mGy
皮膚組織吸収線量		mGy
空気カーマ		mGy

Sdec-V
Since 2001

Copyright (c) Hideki Kato

Sdec-V17

K.S

Calculated by Sdec-V17

K.S

Fig.4-1 SDEC の操作画面

第5章 Nシリーズ線質に鉛を付加したときの線質の検討

5.1 はじめに

TCS-172Bは測定可能な線量率が $< 30 \mu\text{Sv/h}$ と低線量域に限定されるため、線量率を減弱させる必要がある。X線の遮へいには鉛が広く用いられていることから、N-80およびN-100線質に鉛を付加することで線量率が減弱され校正が可能になるのではと考えた。第5章ではN-80およびN-100線質に鉛を付加したときの線量率と線質の変化について報告する。

5.2 使用機器

工業用X線装置はISOVOLT Titan E (GE Sensing & Inspection Technologies)、付加フィルタはアルミニウム板、銅板、鉛板 (各物質の純度99.9%以上)、電位計はEMF520R (EMF ジャパン)、基準線量計は1Lチャンバー: TN32002 (PTW) を使用した。

5.3 高電圧の印加による電位計の測定値への影響の検討

本研究で用いたTCS-172Bは測定可能な線量率が $< 30 \mu\text{Sv/h}$ と低線量域であり、測定する電荷も非常に微弱である。そのため、高電圧の印加によって基準線量計内に残存する電荷が測定値に影響を及ぼす可能性がある。そこで、予備実験として高電圧の印加が電位計の測定値にどの程度影響を与えるのか検証を行った。EMF520とTN32001を接続した状態で電源を入れ、装置が起動したら実際に測定するときと同様に高電圧 (400 V) を印加する。そして、電位計に高電圧を印加した直後、30、60、90、120、150分後のEMF520の測定値を求めた。電位計の測定時間は60 s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。なお、先行研究によると電離箱のレスポンスは前回の照射からの照射間隔や線量によって変化を示すことがあると報告があるため²⁾、測定は2日間行った。

5.4 線量率を減弱するための鉛の厚さの計算

N-80およびN-100線質に付加する鉛をどの程度の厚さにすればTCS-172Bの測定可能範囲まで減弱できるか検証した。最終的に診療用X線装置で校正をすることを考えると、先行研究での線量率は管電流100 mA、X線管焦点から2 mの距離においてN-80線質で120 mSv/h、N-100線質で50 mSv/hである³⁾。距離を3 mにすると距離の逆2乗則によってN-80線質は53 mSv/h、N-100線質は22 mSv/hになるので、この線量率を $< 30 \mu\text{Sv/h}$ にできる減弱率を算出した。また、アイソトープ手帳⁴⁾から40 keV~88 keVにおける鉛の質量減弱係数 μ/ρ [$\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$] を抽出して近似曲線と近似式を作成し、その近似式に実効エネルギー E_{eff} [keV] を代入して μ/ρ を求めた。 μ/ρ はエネルギーによって変わるものの、X線を鉛で遮へいしたときの直接線の線質と E_{eff} は、鉛の厚さに依存せずに

$$E_{\text{eff}} = V \times 0.9 \text{ [keV]} \quad (V \leq 88) \quad (V: \text{管電圧 [kV]})$$

$$E_{\text{eff}} \doteq 80 \text{ [keV]} \quad (V > 88)$$

という先行研究による報告があることから⁵⁾、実効エネルギーは管電圧80 kVでは72 keV、管電圧100 kVでは80 keVとして計算した。さらに、求めた μ/ρ に鉛の密度を乗じて線減弱係数 μ [cm⁻¹] を求めた。このとき、鉛の密度はアイソトープ手帳より11.34 g・cm⁻³ を用いることとした⁴⁾。そして減弱率と μ の結果から、鉛の厚さを算出した。

5.5 鉛を付加したときの線質の評価

5.4 で算出した厚さの鉛を付加したときに線質にどのような影響が出るか検証するために、ISO 4037-1⁶⁾および JIS Z 4511⁷⁾を参考にして構築した実験体系を Fig.5-1 および Fig.5-2 に示す。N-80 線質および N-100 線質で規定されている付加フィルタに 5.4 で算出した厚さの鉛を付加して、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（以下、 HVL_1 ） [mm Cu] を求めた。工業用 X線装置の照射条件は管電圧 80 kV および 100 kV、管電流 10 mA、照射時間 60 s 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した。

HVL_1 は式 (1) を用いて算出した⁸⁾。さらに HVL_1 から μ [cm⁻¹] および μ/ρ [cm²・g⁻¹] を求め、National Institute of Standards and Technology⁹⁾から 40 keV～150 keV における銅の μ/ρ を抽出して近似曲線と近似式を作成し、その近似式に μ/ρ を代入して E_{eff} [keV] を求めた。このとき、銅の密度は ISO 4037-1⁶⁾より 8.94 g・cm⁻³ を用いている。そして求めた E_{eff} から線質係数 (QI) を求め、これらの値を N-80、N-100 の参考値と比較した。

また、Fig.5-1 の実験体系から TN32002 を外し、TCS-172B を設置して N-80 線質および N-100 線質に鉛を付加したときの線量率を計測した。TCS-172B は X線管焦点から 200 cm の位置に設置した。

$$HVL_1 = \frac{t_1 \ln(2I_2/I_0) - t_2 \ln(2I_1/I_0)}{\ln(I_1/I_2)} \quad \dots \quad (1)$$

I_0 : 銅板がない状態で照射したときの測定値

I_1 : $I_0/2$ よりもわずかに大きい測定値

I_2 : $I_0/2$ よりもわずかに小さい測定値

t_1 : I_1 を測定したときの銅板の厚さ

t_2 : I_2 を測定したときの銅板の厚さ

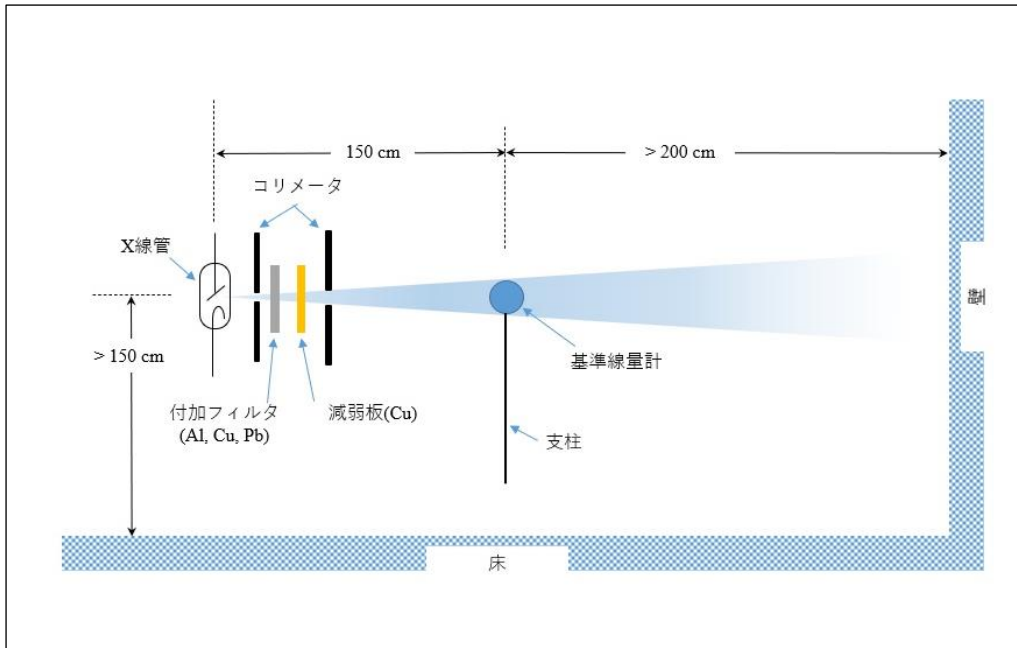


Fig.5-1 半価層測定における実験体系

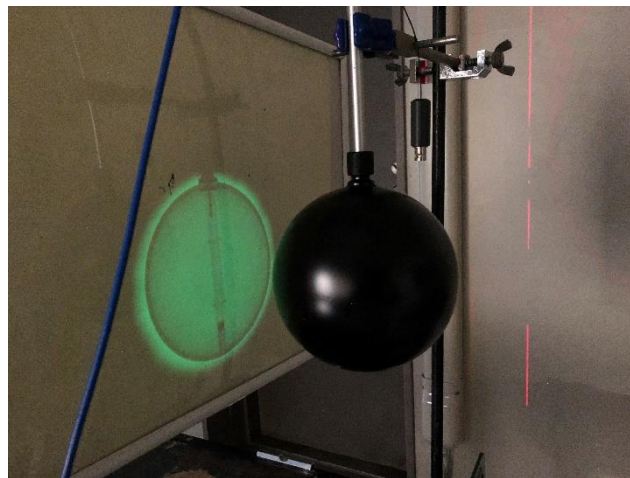


Fig.5-2 照射野の設定 (1L チャンバー)

5.6 結果と考察

1) 高電圧の印加による電位計の測定値への影響

高電圧印加後の時間と電位計の測定値の結果をTable 5-1および5-2に示す。また、Table 5-1およびTable 5-2をグラフにしたものをFig.5-3に示す。グラフより高電圧印加から120分程度時間が経過すると、測定値はほぼ一定になることがわかった。しかし、ほぼ一定になるまでの測定値は照射間隔によって異なったり、途中でわずかに測定値が上昇したりとばらつきが見られた。

Table 5-1 高電圧印加後の時間と電位計の測定値 (2022.2 (照射間隔 : 約 2 週間))

高電圧印加後の 時間[分]	電荷量[nC]					平均値
	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	
0	0.00653	0.00653	0.00655	0.00624	0.00657	0.00648
30	0.00558	0.00577	0.00554	0.00557	0.00546	0.00558
60	0.00488	0.00493	0.00504	0.00504	0.00469	0.00492
90	0.00441	0.00429	0.00421	0.00446	0.00418	0.00431
120	0.00350	0.00381	0.00356	0.00384	0.00372	0.00369
150	0.00368	0.00378	0.00380	0.00374	0.00373	0.00375

Table 5-2 高電圧印加後の時間と電位計の測定値 (2022.3 (照射間隔 : 約 1 か月半))

高電圧印加後の 時間[分]	電荷量[nC]					平均値
	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	
0	0.00591	0.00533	0.00548	0.00551	0.00535	0.00552
30	0.00486	0.00482	0.00472	0.00477	0.00466	0.00477
60	0.00423	0.00413	0.00402	0.00414	0.00421	0.00415
90	0.00443	0.00433	0.00425	0.00432	0.00419	0.00430
120	0.00375	0.00383	0.00414	0.00405	0.00397	0.00395
150	0.00381	0.00408	0.00395	0.00378	0.00383	0.00389

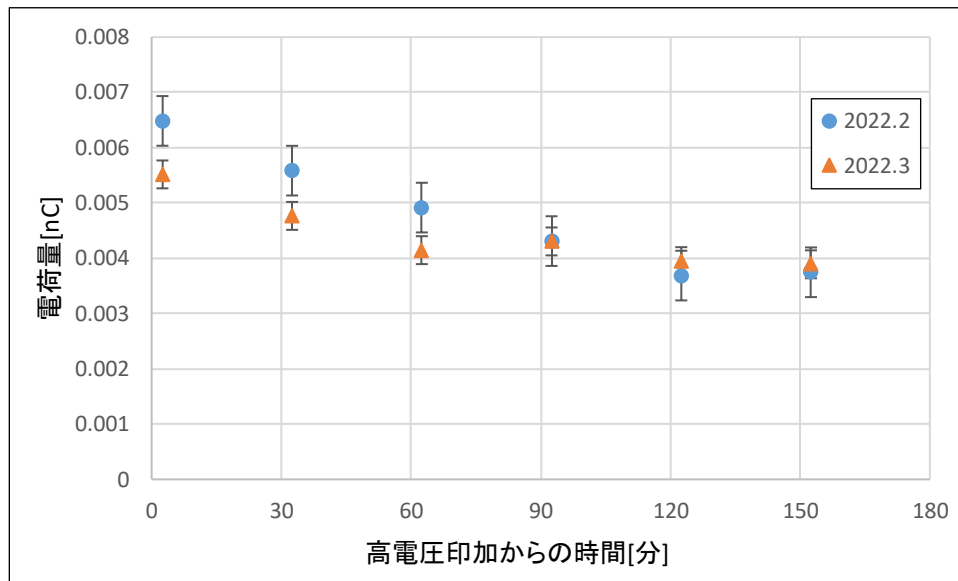


Fig.5-3 異なる照射間隔における電位計の測定値の比較

2) 線量率を減弱するための鉛の厚さの評価

N-80線質、N-100線質をTCS-172Bの測定可能範囲に減弱するための式は、N-80線質の減弱率を α 、N-100線質の減弱率を β とすると式(2)、式(3)のように表すことができる。

$$\text{N-80線質} : 53 [\text{mSv/h}] \times 1000 [\mu\text{Sv/mSv}] \times \alpha < 30 [\mu\text{Sv/h}] \quad \dots (2)$$

$$\text{N-100線質} : 22 [\text{mSv/h}] \times 1000 [\mu\text{Sv/mSv}] \times \beta < 30 [\mu\text{Sv/h}] \quad \dots (3)$$

$$\text{式(2)、式(3)を変形すると、} \alpha < 5.7 \times 10^{-4} \doteq 1/1770 \quad \beta < 1.4 \times 10^{-3} \doteq 1/730$$

この結果より、N-80線質においては線量率を1/1800、N-100線質においては1/750に減弱することのできる鉛の厚さを求めた。X線の減弱は物質を透過する前の線量率を I_0 、物質を透過した後の線量率を I 、線減弱係数を μ 、物質の厚さ x とすると

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \dots (4)$$

で表すことができる¹⁰⁾。式(4)を変形すると、

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \quad \dots (4)'$$

$$\frac{1}{1800(750)} = e^{-\mu x} \quad \dots (4)''$$

$$\ln(1800(750)) = \mu x \quad \dots (4)'''$$

となる。また、鉛の μ/ρ とエネルギーの関係をFig.5-4に示す。 E_{eff} をN-80線質においては72 KeV、N-100線質においては80 keVとしてFig.5-4の近似式に代入すると μ/ρ は2.79 [$\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$] (N-80線質)、2.11 [$\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$] (N-100線質)となり、鉛の密度 $11.34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ を乗ずると μ は31.6 [cm^{-1}] (N-80線質)、23.9 [cm^{-1}] (N-100線質)となった。求めた μ を式(4)'''に代入すると鉛の厚さは2.37 mm (N-80線質)、2.77 mm (N-100線質)となった。しかし、鉛の厚さが厚すぎるとスペクトルへの影響も大きいと考えたため、まずは鉛2.0 mmを付加して線質の評価を行うこととした。

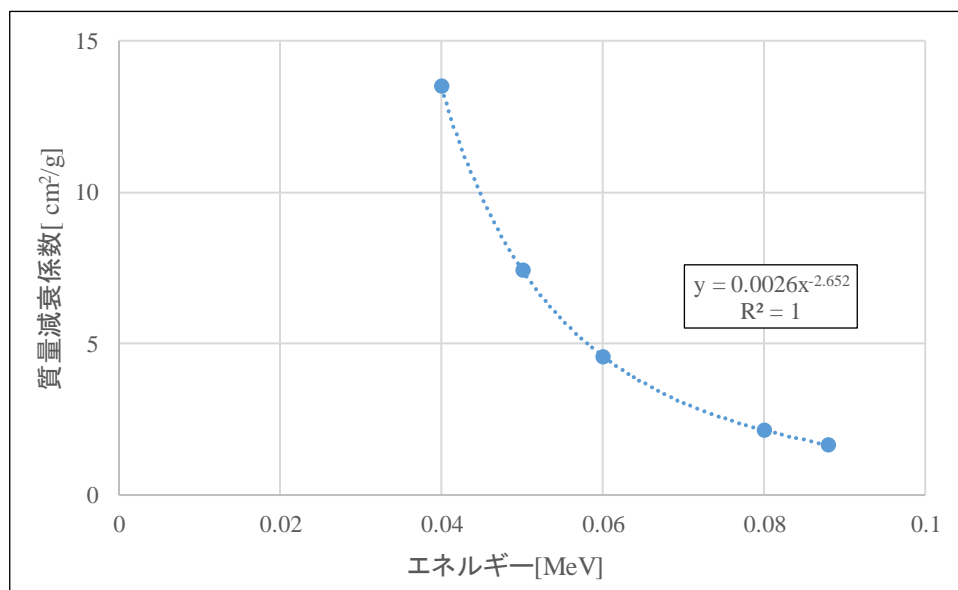


Fig.5-4 鉛の質量減弱係数とエネルギーの関係

3) 鉛を付加したときの線質の評価

本研究の実測値とN-80およびN-100の参考値を比較したものをTable 5-3およびTable 5-4に示す。Table 5-3およびTable 5-4の結果より HVL_1 の差違は30.2%と36.1%でありN-80およびN-100の参考値と大きく乖離のある結果となってしまった。これはアルミニウム板および銅板で線質を硬くしていたところに鉛板を加えたことで、線質がさらに硬くなったためだと考えられる。また、 HVL_1 が大きく乖離してしまっただのは、鉛板を付加したことで銅板の減弱効果が弱くなってしまったためだと考えられる。

その一方で、N-80線質およびN-100線質に鉛2.0 mmを付加したときの線量率はN-80線質で9.51 [$\mu\text{Sv/h}$]、N-100線質で23.5 [$\mu\text{Sv/h}$]であり、鉛を付加することで線量率を大きく減弱できることが明らかになった。

Table 5-3 半価層の実測値と N-80 における参考値の比較

	実測値	N-80	誤差[%]
HVL_1 [mm Cu]	0.76	0.58	30.2
E_{eff} [keV]	71.9	65*	-
QI	0.90	0.83	-

* : 平均エネルギー

Table 5-4 半価層の実測値と N-100 における参考値の比較

	実測値	N-100	誤差[%]
HVL_1 [mm Cu]	1.51	1.11	36.1
E_{eff} [keV]	94.8	83*	-
QI	0.95	0.83	-

* : 平均エネルギー

5.7 小括

高電圧の印加によって基準線量計内に残存する電荷が測定値に影響を及ぼす可能性がある。そして、高圧の印加による影響は時間の経過とともに減少することがわかった。しかし、明確な傾向は見られなかったため、正確な測定を行うためには測定毎に補正をかける必要がある。

また、N-80およびN-100線質に鉛を付加することで、線量率をTCS-172Bの測定可能な範囲まで減弱させることができた。しかし、第一半価層や実効エネルギー、 QI がISO4037-1およびJIS Z 4511の参考値と大きく乖離してしまった⁵⁹⁾。検出器のエネルギー特性の評価や校正にはNシリーズの線質を用いることが推奨されていることから⁵⁹⁾、線量率を減弱できかつNシリーズの参考値を満たす付加フィルタの組み合わせを求める必要がある。

次の第6章では、第5章の結果を踏まえて検討を行った。

第6章 異なる付加フィルタを用いての校正の検討

6.1 使用機器

工業用X線装置はISOVOLT Titan E (GE Sensing & Inspection Technologies)、NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータはTCS-172B (HITACHI、2021年1月に¹³⁷Cs線源を用いて校正済)、付加フィルタはアルミニウム板、銅板、タンタル板、鉛板(各物質の純度99.9%以上)を使用した。また、シミュレーションによる最適な付加フィルタの検討にはSdec-V17 (医用放射線技術学研究室) およびPHITS (日本原子力研究開発機構) を、実測による連続X線標準場の評価には電位計: EMF520R (EMFジャパン)、1Lチャンバー: TN32002 (PTW)、半導体式サーベイメータ: RaySafe452 (Fluke Biomedical、2021年10月に¹³⁷Cs線源およびN-100線質を用いて校正済) を、NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの校正には発泡スチロールを使用した。

6.2 シミュレーションによる最適な付加フィルタの検討

ISO4037-1¹⁾およびJIS Z 4511²⁾に記載されているN-80およびN-100の参考線質とほぼ同一の線質となり、線量率を減弱することができる付加フィルタの組み合わせを求めるためにSdec-V17³⁾でシミュレーションを行った。付加フィルタの組み合わせは、将来的に診療用X線装置で校正を行うことを想定して、X線管装置の総ろ過として規定されている2.5 mm Alは固定し、それ以外の付加フィルタを加えることとした。なお、Sdec-V17で算出できるHVL₁はアルミニウムでの半価層であり、ISO4037-1およびJIS Z 4511に記載されている半価層は銅の半価層である¹²⁾。そのため、Sdec-V17にて最適と考えられる付加フィルタが得られたら、PHITS⁴⁾を用いて銅のHVL₁ [mm Cu] および銅の第二半価層 (以下、HVL₂) [mm Cu] を求めた。なお、Sdec-V17およびPHITSで用いたパラメータはTable 6-1に示す通りである。

Table 6-1 シミュレーションで用いたパラメータ

高電圧整流方式	定電圧・インバータ
X線管ターゲット角度	24°
X線管電圧	80 kV、100 kV
X線管電流	10 mA
照射時間	3600 s
焦点-受像器間距離	100 cm
受像面での照射野サイズ	15 cm×15 cm

6.3 実測による連続X線標準場の評価

6.2で算出したシミュレーションの結果と実測値が一致するか検証するために、ISO 4037-1¹⁾およびJIS Z 4511²⁾を参考に、Fig.6-1およびFig.6-2に示す実験体系を立てる。6.2で算出した付加フィルタを線束上に挿入して、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 HVL_1 [mm Cu] および HVL_2 [mm Cu] を求めた。工業用X線装置の照射条件は管電圧80 kVおよび100 kV、管電流10 mA、照射時間30 s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した。なお、本研究では測定値が非常に微弱であるため、バックグラウンド値や測定系のリーク電流の影響を受けることが考えられる。そのため、正味の測定値を算出するために以下の補正をすることとした。①各銅板の厚さの測定前にバックグラウンドを測定し、照射時間のバックグラウンド値 b を求め、②工業用X線装置のシャッタの開閉時間の影響を考慮して、電位計の計測開始2秒後にシャッタを開き、シャッタが閉じた2秒後に電位計の計測を終了し、電位計の計測時間中の積算値を I とする。シャッタを開く前の2秒間の計測値 a の2倍の値を求め、式(1)により正味の測定値 N を算出する⁵⁾。

$$N = I - 2a - b \quad \dots (1)$$

HVL_1 は式(2)を、 HVL_2 は式(3)で算出した⁶⁾。この第一半価層と第二半価層の値を用いて均等度 $h = HVL_1 / HVL_2$ を求める。さらに第一半価層から線源弱係数 μ [cm^{-1}] および質量減弱係数 μ/ρ [$\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$] を求め、National Institute of Standards and Technology⁷⁾から40 keV～150 keVにおける銅の質量減弱係数を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 E_{eff} [keV] を求めた。このとき、銅の密度はISO 4037-1¹⁾より $8.94 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 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PHITSのシミュレーションの結果およびN-80、N-100の参考値と比較した。

また、管電流を0.1、0.5、1、5、10 mAと変化させたときの線量率を計測し、N-80およびN-100の参考線量率と比較した。このとき管電流は装置に自己校正があるため、表示値を用いる。TCS-172Bを用いて線量率の計測をおこなったところ管電流によってはレンジオーバーとなったため、RaySafe452を用いて計測することとした。なお、RaySafe452はX線管焦点から3 mの距離に設置し計測した。

$$HVL_1 = \frac{t_1 \ln(2I_2/I_0) - t_2 \ln(2I_1/I_0)}{\ln(I_1/I_2)} \quad \dots (2)$$

$$HVL_2 = \frac{t_3 \ln(4I_4/I_0) - t_4 \ln(4I_3/I_0)}{\ln(I_3/I_4)} - HVL_1 \quad \dots (3)$$

- I_0 : 銅板がない状態で照射したときの測定値
- I_1 (I_3) : $I_0/2$ ($I_0/4$)よりもわずかに大きい測定値
- I_2 (I_4) : $I_0/2$ ($I_0/4$)よりもわずかに小さい測定値
- t_1 (t_3) : I_1 (I_3)を測定したときの銅板の厚さ
- t_2 (t_4) : I_2 (I_4)を測定したときの銅板の厚さ

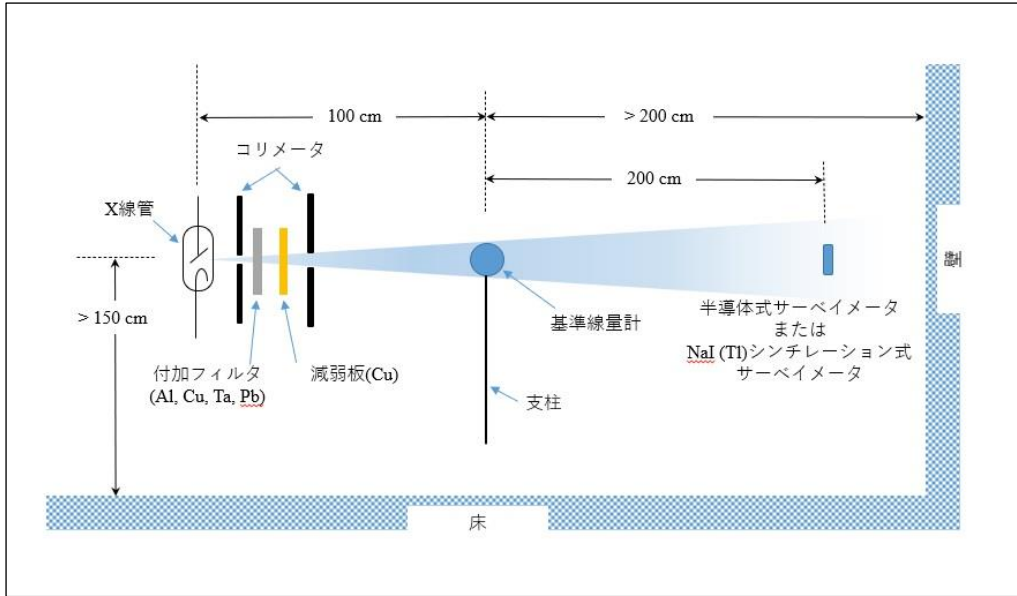


Fig.6-1 半価層測定における実験体系

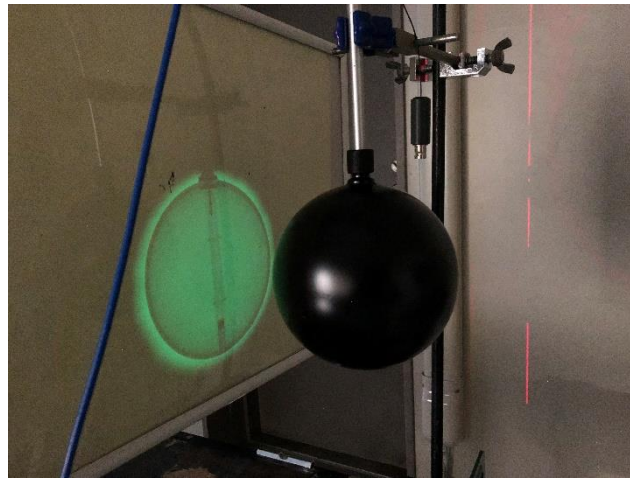


Fig.6-2 照射野の設定 (IL チャンバー)

6.4 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの校正

工業用 X 線装置で NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの校正が可能かを検証するために、Fig.5-1 の実験体系から TN32002 を外し、TCS-172B を設置した。TCS-172B の測定レンジが $<30 \mu\text{Sv/h}$ ⁸⁾ であるため、6.3 の結果より距離と管電流を調整して測定可能となるように調整した。TCS-172B の時定数は 30 s として、照射時間は時定数を考慮して 120 s とした。なお、TCS-172 の検出部は TN32001 と比較して小さいので、Fig.6-3 に示すように照射野の大きさを調整した。TCS-172B の測定値と 6.3 の 1L チャンバーの測定値から式(4)にて校正定数 (以下、 CF (Calibration factor)) を算出し、 ^{137}Cs 線源での CF と比較した。なお、1L チャンバーの測定値は $\mu\text{Gy}/30\text{s}$ であるため、TCS-172B の測定値の単位である $\mu\text{Sv/h}$ に換算した^{2,9)}。また、それぞれにおける校正の相対拡張不確かさを算出した^{10,11)}。

$$CF = \frac{N_A \cdot 120 \cdot h^*_K}{N_B \cdot \left(\frac{C_A}{C_B}\right)} \times \left(\frac{D_A}{D_B}\right)^2 \quad \dots (4)$$

N_A : 1L チャンバーの測定値

N_B : TCS-172B の測定値

h^*_K : 方向性線量当量換算係数

C_A : 1L チャンバー測定時の管電流

C_B : TCS-172B 測定時の管電流

D_A : 1L チャンバー測定時の線源・測定器間距離

D_B : TCS-172B 測定時の線源・測定器間距離

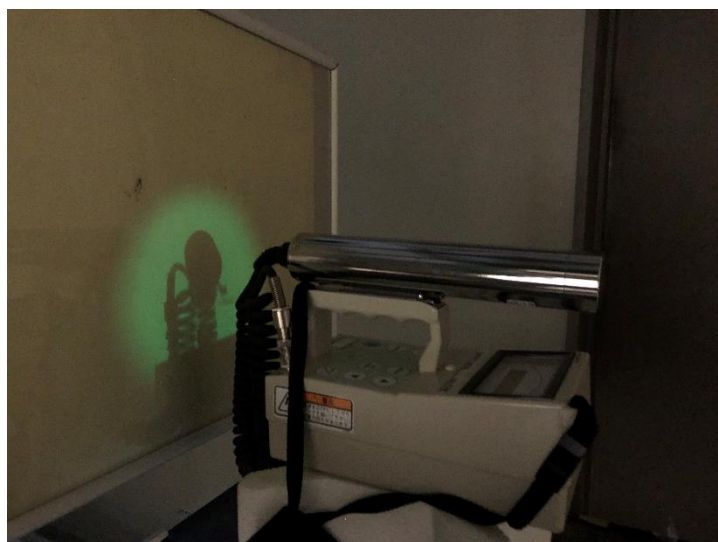


Fig.6-3 照射野の設定 (NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ)

6.5 結果

6.5.1 シミュレーションによる最適な付加フィルタの評価

Sdec-V17を用いたシミュレーションの結果をTable 6-2に示す。管電圧80 kVでは2.5 mm Al+2.0 mm Ta、管電圧100 kVでは2.5 mm Al+3.0 mm Pbの付加フィルタを設定することで、N-80およびN-100の参考値とほぼ同一の線質になり、線量率も大きく減弱できることが明らかになった。また、PHITSによるシミュレーションをおこなった結果、 HVL_1 、 HVL_2 ともにN-80およびN-100の半価層の参考値に近い結果になることも明らかになったり (Table 6-3)。

Table 6-2 Sdec-V17 によるシミュレーション結果

管電圧[kV]	付加フィルタ	HVL_1 [mm Al]	E_{eff} [keV]	空気カーマ[mGy]
80	4.0 mm Al+2.0 mm Cu (N-80)	9.92	63.21	45.60
	2.5 mm Al+2.0 mm Ta	10.19	64.59	0.01
100	4.0 mm Al+5.0 mm Cu (N-100)	13.02	82.14	19.99
	2.5 mm Al+3.0 mm Pb	13.06	82.47	0.12

Table 6-3 PHITS によるシミュレーション結果

管電圧[kV]	付加フィルタ	HVL_1 [mm Cu]	HVL_2 [mm Cu]
80	4.0 mm Al+2.0 mm Cu (N-80)	0.58	0.62
	2.5 mm Al+2.0 mm Ta	0.62	0.62
100	4.0 mm Al+5.0 mm Cu (N-100)	1.11	1.17
	2.5 mm Al+3.0 mm Pb	1.15	1.16

6.5.2 実測による連続X線標準場の評価

6.2で求めた付加フィルタの組み合わせで実測をおこなったところ、管電圧80 kVにおいては測定値が50%減弱される前に指数関数的な減弱が見られなくなった。また、管電圧100 kVにおいては HVL_1 がN-100の参考値よりも10%以上異なる結果となってしまった。そのため、再度Sdec-V17を用いてシミュレーションをおこなった結果をTable 6-4に示す。管電圧80 kVにおいては2.5 mm Al+1.0 mm Cu+1.0 mm Ta、管電圧100 kVにおいては2.5 mm Al+2.0 mm Cu+2.0 mm Pbにすることで、6.2で求めた付加フィルタと比較して線量率の減弱率は低下するもののN-80、N-100の参考線質に近いことから、付加フィルタを変更して再度実測をおこなうこととした。

Table 6-4 Sdec-V17 による再シミュレーション結果

管電圧[kV]	付加フィルタ	HVL_1 [mm Al]	E_{eff} [keV]	空気カーマ[mGy]
80	4.0 mm Al+2.0 mm Cu (N-80)	9.92	63.21	45.60
	2.5 mm Al+2.0 mm Ta	10.19	64.59	0.01
	2.5 mm Al+1.0 mm Cu+1.0 mm Ta	9.89	63.07	0.43
100	4.0 mm Al+5.0 mm Cu (N-100)	13.02	82.14	19.99
	2.5 mm Al+3.0 mm Pb	13.06	82.47	0.12
	2.5 mm Al+2.0 mm Cu+2.0 mm Pb	12.95	81.60	0.42

1) 80 kV

再シミュレーションによる付加フィルタでの実測値とその平均値、相対値の結果をTable 6-5に、銅板の厚さと測定値の相対値の結果をグラフにしたものをFig.6-4に、本研究の実測値とN-80の参考値を比較したものをTable 6-6に示す。Table 6-6の結果より HVL_1 および HVL_2 の差は-0.52%と-5.16%でありN-80の参考値とほぼ同じであることから、上記の付加フィルタの組み合わせを用いてN-80と同等の線質を作ることができると明らかになった。

Table 6-5 電離箱線量計による実測値と平均値、相対値の関係

mm Cu	mGy					平均値	相対値
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目		
0	0.00375	0.00375	0.00376	0.00375	0.00376	0.00376	1.000
0.5	0.00204	0.00204	0.00204	0.00204	0.00204	0.00204	0.543
0.6	0.00182	0.00182	0.00182	0.00182	0.00182	0.00182	0.485
0.7	0.00161	0.00161	0.00161	0.00161	0.00162	0.00161	0.429
1.1	0.00101	0.00101	0.00101	0.00101	0.00101	0.00101	0.269
1.2	0.00090	0.00090	0.00090	0.00090	0.00090	0.00090	0.239
1.3	0.00080	0.00080	0.00080	0.00080	0.00080	0.00080	0.213

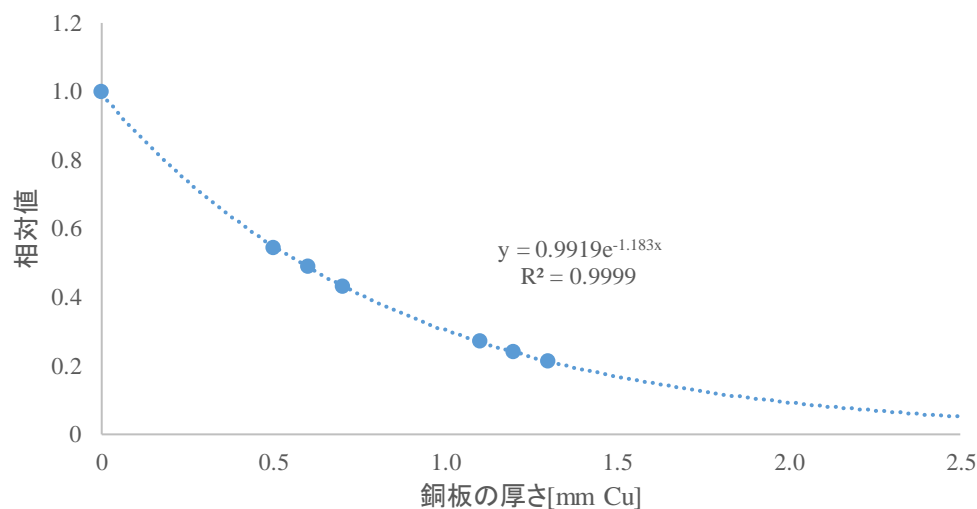


Fig.6-4 銅板の厚さと測定値の相対値の関係 (80 kV)

Table 6-6 半価層の実測値と N-80 における参考値の比較

	実測値	N-80	誤差[%]
HVL_1 [mm Cu]	0.58	0.58	-0.52
HVL_2 [mm Cu]	0.59	0.62	-5.16
h	0.98	0.75~1.0	-
E_{eff} [keV]	64.7	65*	-
QI	0.81	0.83	-

*: 平均エネルギー

2) 100 kV

再シミュレーションによる付加フィルタを用いたときの実測値とその平均値、相対値の結果をTable 6-6に、銅板の厚さと測定値の相対値の結果をグラフにしたものをFig.6-9に、本研究の実測値とN-100の参考値を比較したものをTable 6-7に示す。Table 6-7の結果より HVL_1 および HVL_2 の差は4.32%と6.41%でありN-100の参考値とほぼ同じであることから、上記の付加フィルタの組み合わせを用いてN-100と同等の線質を作ることができると明らかになった。

Table 6-7 電離箱線量計の実測値と平均値、相対値の関係

mm Cu	mGy					平均値	相対値
	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目		
0	0.00389	0.00390	0.00390	0.00390	0.00390	0.00390	1.000
1.1	0.00205	0.00204	0.00205	0.00205	0.00204	0.00205	0.525
1.2	0.00193	0.00192	0.00193	0.00192	0.00192	0.00192	0.493
1.3	0.00182	0.00182	0.00182	0.00182	0.00181	0.00182	0.466
2.2	0.00114	0.00113	0.00112	0.00113	0.00113	0.00113	0.289
2.3	0.00108	0.00107	0.00107	0.00107	0.00107	0.00107	0.275
2.4	0.00102	0.00101	0.00101	0.00101	0.00101	0.00101	0.260
2.5	0.00096	0.00097	0.00097	0.00096	0.00097	0.00097	0.248

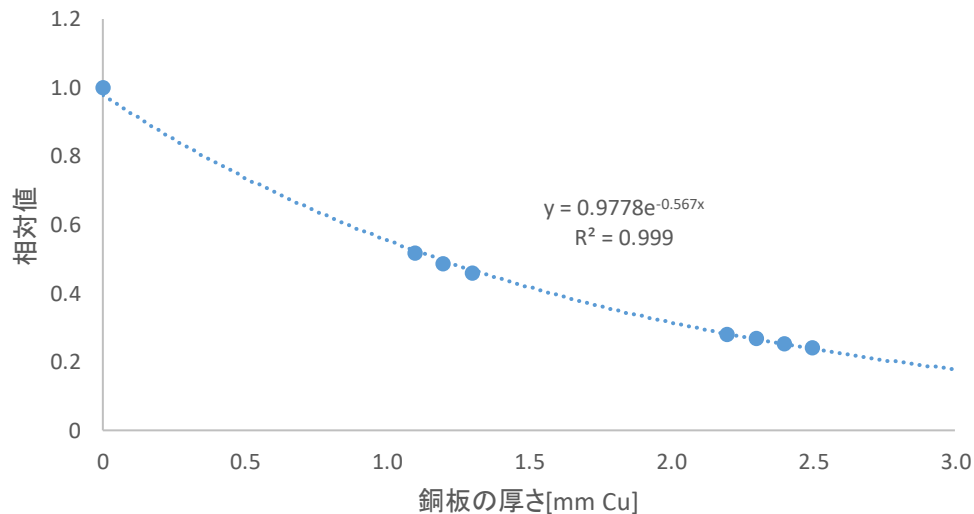


Fig.6-5 銅板の厚さと測定値の相対値の関係 (100 kV)

Table 6-8 半価層の実測値と N-100 における参考値の比較

	実測値	N-100	誤差[%]
HVL_1 [mm Cu]	1.16	1.11	4.32
HVL_2 [mm Cu]	1.25	1.17	6.41
h	0.93	0.75~1.0	-
E_{eff} [keV]	85.3	83*	-
QI	0.85	0.83	-

* : 平均エネルギー

3) 線量率の比較

本研究で提唱する付加フィルタにおいて管電流を変化させたときの線量率と N-80、N-100 の参考線量率との比較を Fig.6-6 および Fig.6-7 に示す。本研究で提唱する付加フィルタの組み合わせは管電流が 10 mA でも 100 $\mu\text{Sv/h}$ よりも低い線量率となり、線量率も大きく減弱できることが明らかになった。

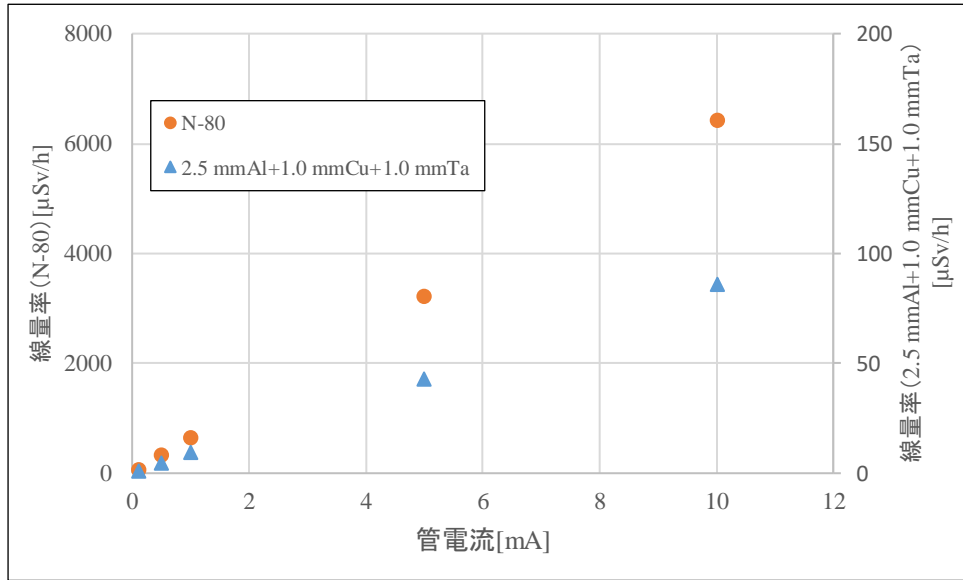


Fig.6-6 付加フィルタの違いによる線量率の比較 (80 kV)

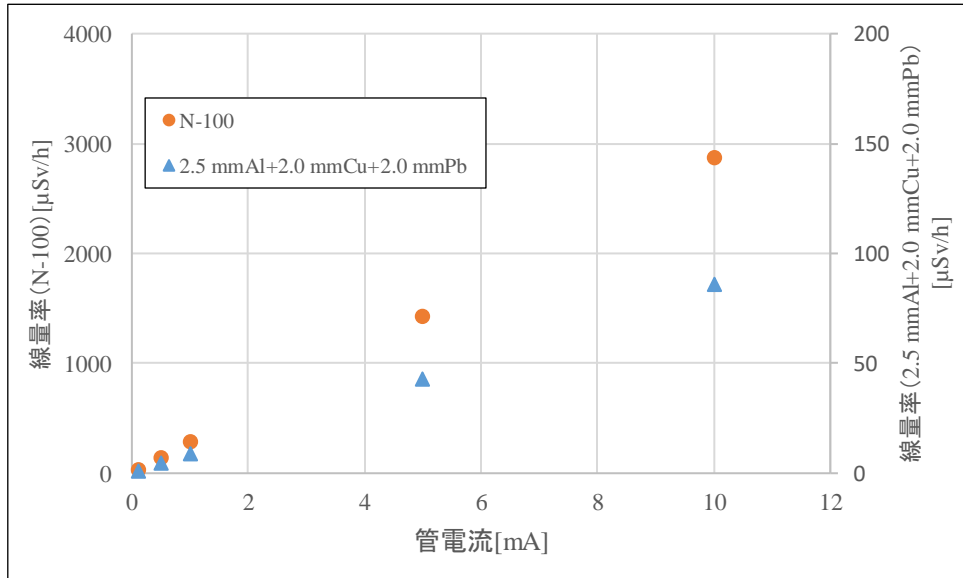


Fig.6-7 付加フィルタの違いによる線量率の比較 (100 kV)

6.5.3 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの校正の評価

6.5.2の結果より、TCS-172Bの測定時の照射条件は線源検出器間距離を200 cm、管電流を1 mAで行うこととした。Table 6-9にサーベイメータの校正結果および校正の相対拡張不確かさを示す。CFは80 kVで1.31、100 kVで1.10となった。また、¹³⁷Cs線源で校正したときのCFは1.10であり、この数字を1として80 kVおよび100 kVのCFを換算しTCS-172Bのエネルギー特性と比較したグラフをFig.6-8に示す。本研究における校正結果は、TCS-172Bのエネルギー特性とほぼ一致することが明らかになった⁸⁾。

Table 6-8 サーベイメータの校正結果

X線質	CF	不確かさ[%]
N-80相当	1.31	8.66
N-100相当	1.10	8.67

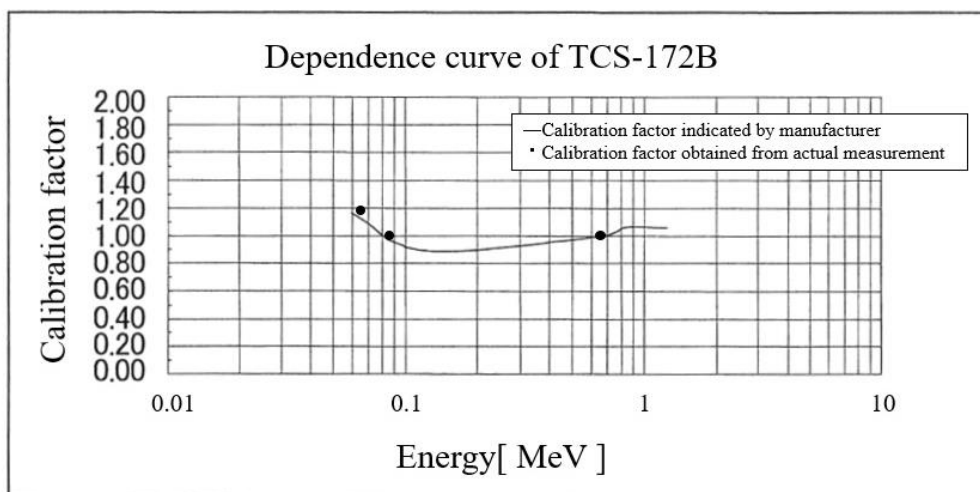


Fig.6-8 校正定数とTCS-172Bのエネルギー特性の比較

6.5.4 考察

シミュレーションの結果、管電圧80 kVでは2.5 mm Alに加えて2 mm Ta、管電圧100 kVでは3 mm Pbを加えることで、N-80およびN-100とほとんど同一の HVL_1 および HVL_2 が得られることが明らかになった。これは、Taは67.8 keV、Pbは88.4 keVにエネルギー吸収端を持つことから、エネルギー吸収端によって線質が硬くなるためだと考えられる⁷⁾。しかし、実測においては積算線量の指数関数的な減弱が見られず半価層測定が困難であり、第一半価層がシミュレーションおよび参考値と大きく乖離のある結果となった。ISO 4037-1に規定されているN-80およびN-100は、アルミニウム板と銅板の組み合わせで構成されているため銅板0.1 mmの違いでも減弱に有意な違いが現れるが、シミュレーションで付加フィルタとして有用と思われた2 mm Ta、3 mm PbはN-80およびN-100のエネルギー領域においてアルミニウム板、銅板と比較して非常に強い減弱効果がある。そのため、半価層測定のために銅板を順次追加しても0.1 mm程度の厚さの違いでは減弱にほとんど影響がなくなったためだと考えられる。また、本研究はNaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの校正を目的としているため、測定値が非常に微小である。そのため実測値に対してリーク電流の補正をかけて正味の測定値を算出しているものの、電位計や基準線量計の分解能の限界に達した可能性が考えられる¹²⁾¹³⁾。再度シミュレーションをして得られた付加フィルタの組み合わせ（80 kVでは2.5 mm Al+1.0 mm Cu+1.0 mm Ta、100 kVでは2.5 mm Al+2.0 mm Cu+2.0 mm Pb）においては HVL_2 において±5%を超えているものの、その差はわずかでありその他の結果ではN-80およびN-100の参考値を満たす結果が得られたためN-80およびN-100とほぼ同等の線質を再現することができたと考えられる。

本研究におけるTCS-172Bの校正定数は、メーカーの仕様書⁸⁾のエネルギー特性とほぼ同じ値となった。これは、付加フィルタの組み合わせが異なってもN-80およびN-100とほぼ同等の線質が再現されていることに加えて、基準線量計の正味の測定値を求めるための補正ができていること、サーベイメータの時定数を考慮した十分な照射時間を設定していることから、安定した値を計測しているためだと考えられる。本研究の実験体系は工業用X線装置が設置されている施設において再現可能であり、ISO 4037-1において規定されているN-80およびN-100の参考空気カーマ率を大きく減弱できることから、本研究で提唱する付加フィルタの組み合わせは測定可能レンジが低線量域に限定されるNaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータにおいて、診断領域のエネルギーで校正をする際に有用だと考えられる。

第7章 結論および今後の検討

7.1 結論

NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの測定可能範囲が30 $\mu\text{Sv/h}$ 未満であるため、線量率を減弱させる必要がある。Pbなどの高原子番号物質を使って付加すれば線量率を下げることはできるが、規定された線質にならない。そのため、本研究では工業用X線装置を使用してNaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータを校正するための付加フィルタの組み合わせを計算した。その結果、管電圧80 kVでは2.5 mm Al + 1.0 mm Cu + 1.0 mm Ta、管電圧100 kVでは2.5 mm Al + 2.0 mm Cu + 2.0 mm Pbの付加フィルタを設定することで、N-80線質およびN-100線質とほぼ同等の線質が得られることがわかった。また、線量率はNaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの測定可能範囲まで大幅に減弱できることが明らかになった。さらに、この線質を用いてNaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータを校正できることがわかった。NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの校正には、 ^{137}Cs 線源（エネルギー662 keV）を基準線源として使用するものの、漏えいX線を測定するためにはX線診断領域のエネルギーを用いて校正する必要があるとされている。本研究では、X線診断領域のエネルギーを利用してNaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータを校正する方法を提案することができた。

7.2 今後の検討

本研究では線量率を減弱させるために管電圧80 kVにおいてTa板、管電圧100 kVにおいてPb板を使用した。本研究とは異なる付加フィルタの組み合わせでもN-80およびN-100に近い線質を再現できる可能性があること、本研究で使用したTCS-172Bはエネルギー補償型のサーベイメータであるため、エネルギー補償のないサーベイメータでの検討はできていないことがlimitationとして挙げられる。また、本研究で算出した付加フィルタを用いたときの線量率は管電流10 mA、線源検出器間距離300 cmにおいて管電圧80 kVでは86.0 $\mu\text{Sv/h}$ 、管電圧100 kVでは86.3 $\mu\text{Sv/h}$ である。診療用X線装置は長時間照射ができないので、NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータを校正する際は時定数を考慮する必要がある。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 $1 - \exp(-t/T)$ なので測定時間 t 後の指示値を x 、最終指示値を X とすると、 $x = X(1 - \exp(-t/T))$ となる。ここでX線の照射時間を2秒間、時定数を30秒に設定すると計算上の指示値は管電圧80 kVでは5.5 $\mu\text{Sv/h}$ 、管電圧100 kVでは5.6 $\mu\text{Sv/h}$ となる。電離箱式サーベイメータでは可能であった時定数の補正により算出した最終指示値が本研究の線量率と一致することや、診療用X線装置の特性によるサーベイメータの校正の可否を確認するなどさらなる検討が必要となる。

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) 提言「我が国における放射性同位元素の安定供給体制について」日本学術会議 基礎医学委員会・総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会，2008.
- 4) Kowatari M, Yoshitomi H, Nishino S, et al. ESTABLISHMENT OF A LOW DOSE RATE GAMMA RAYCALIBRATION FIELD FOR ENVIRONMENTAL RADIATION MONITORING DEVICES. Radiation Protection Dosimetry, 2019.
- 5) 鈴木克直：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：東京都立大学大学院修士論文，2021.
- 6) ISO. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1: Radiation characteristics and production methods. ISO 4037-1, 1996.
- 7) 日本規格協会編集：JIS Z 4511 照射線量測定器及び線量当量測定器の校正方法：日本規格協会，2018.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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，2008.
- 2) BRUINING, Hajo. Physics and Applications of Secondary Electron Emission: Pergamon Science Series: Electronics and Waves—a Series of Monographs. Elsevier, 2016.
- 3) HOFSTADTER, Robert. Alkali halide scintillation counters. Physical Review, 1948, 74.1: 100.
- 4) 岡部哲夫、小倉敏裕、大畑秀穂他：新・医用放射線科学講座 診療画像機器学：医薬出版株式会社，2008.
- 5) 高木一正、大井徹、秋山清吉他. 信頼性の高い高感度 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 単結晶シンチレータの開発. 日本金属学会会報, 1982, 21.4: 257-259.
- 6) 戸塚博美. 光電管, 光電子増倍管とその使い方. 照明学会雑誌/照明学会 [編], 1974, 58.11: 598-604.
- 7) 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.
- 8) HITACHI：TCS-172B Users Manual.
- 9) HITACHI：TCS-173C Users Manual.

第3章

- 1) 日本規格協会編集：JIS Z4511 照射線量測定器及び線量当量測定器の校正方法：日本規格協会，2018.

第4章

- 1) 加藤秀起:モンテカルロシミュレーション法による医用放射線のスペクトル分布および吸収線量の評価に関する研究：1、2. <http://doi.org/10.11501/3180733>
- 2) Tatsuhiko Sato、Yosuke Iwamoto、Shintaro Hashimoto、et al. Features of Particle and Heavy Ion Transport code System(PHITS)version3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55:684～690、2018.
- 3) PHITS講習会資料(2019年11月9日配布)：イントロダクション.
- 4) 大森敏明、加藤信介、金敏植 他：モンテカルロシミュレーションによる放射線量の簡易計算法—建物内放射線量の簡易計算法(その1)—:日本建築学会環境系論文集 第81巻 第727号:836、2016. https://www.jstage.jst.go.jp/article/aije/81/727/81_835/_pdf/-char/ja
- 5) 診断参考レベル医療被ばく研究情報ネットワーク. 最新の国内実態調査結果に基づく診断参考レベルの設定. <http://www.radher.jp/J-RIME/report/DRLhoukokusyo.pdf> (2023年12月30日確認) .
- 6) 加藤秀起、藤井茂久、吉見勇治：診断用 X 線領域における入射表面線量計算ソフト SDEC の開発. 日本放射線技術学会雑誌 65.10 (2009): 1400-1406.

第5章

- 1) HITACHI：TCS-172B Users Manual.
- 2) 下野哲範、南部秀和、松原孝祐 他：電離箱形状や使用頻度の違いによる事前照射の測定値への影響. 日本放射線技術学会雑誌, 2012, 68.8: 986-996.
- 3) 鈴木克直：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：東京都立大学大学院修士論文，2021.
- 4) (社)日本アイソトープ協会，アイソトープ手帳11版 (2011) .
- 5) 藤本信久，大釜昇，西谷源展 他：漏洩X線の実効エネルギー計測に関する研究. 日本放射線技術学会雑誌, 1997, 53.3: 373-379.
- 6) ISO. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1: Radiation characteristics and production methods. ISO 4037-1, 1996.
- 7) 日本規格協会編集：JIS Z4511 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.
- 8) 根岸徹，浅田共生，落合幸一郎 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.
- 9) National Institute of Standards and Technology. X-ray form factor, attenuation, and scattering tables. Disponivel em. Available on <http://physics.nist.gov/PhysRefData/FFast/html/form.html> (2024年1月閲覧).

10) 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6章

- 1) ISO. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1: Radiation characteristics and production methods. ISO 4037-1, 1996.
- 2) 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.
- 3) 加藤秀起、藤井茂久、吉見勇治 : 診断用 X 線領域における入射表面線量計算ソフト SDEC の開発. 日本放射線技術学会雑誌 65.10 (2009): 1400-1406.
- 4) 日本原子力研究開発機構 : PHITS
- 5) Katsunao Suzuki, Toru Negishi, Yoh Kato, et al. Calibration of NaI (Tl) Scintillation Survey Meter Using Industrial X-ray Equipment. Sensors & Materials, 2023, 35.
- 6) 根岸徹, 浅田共生, 落合幸一郎 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.
- 7) National Institute of Standards and Technology. X-ray form factor, attenuation, and scattering tables. Disponivel em. Available on <http://physics.nist.gov/PhysRefData/FFast/html/form.html> (2024年1月閲覧).
- 8) HITACHI : TCS-172B Users Manual.
- 9) ISO. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence. ISO 4037-3, 1999.
- 10) ISO/IEC Guide 98-3 : 2008, Uncertainty of measurement —Part 3 : Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement(GUM), 1995.
- 11) 不確かさの見積もりに関するガイド, 独立行政法人製品評価技術基盤機構認定センター (JCSS) , 認定一部門—JCG217S11-01, 2012.
- 12) PTW : PTW32002 Specification.
- 13) EMF Japan Co.,Ltd. : EMF521R Series Catalog.

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 根岸徹 准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 准教授、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。

職務上のご協力を頂きました刈谷豊田総合病院放射線技術科 河野泰久 部長、中川達也 副部長、福岡秀彦 リーダーならびに、刈谷豊田総合病院放射線技術科の診療放射線技師の皆様にご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 根岸研究室の皆様にご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6年 鈴木 克直

本論文に関連する学会発表

- 1) 関本 道治、織部 祐介、鈴木 克直、加藤 洋、小山 修司：第76回日本放射線技術学会総会学術大会「医療用 X 線装置を用いた電離箱式サーベイメータ校正の検討」
- 2) 鈴木 克直、根岸 徹、加藤 洋、河野 泰久、関本 道治：第33回日本保健科学学会学術集会「診療用 X 線装置を用いた半導体式サーベイメータの基礎的検討」

本論文に関連する学術論文

- 1) 鈴木 克直：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. 東京都立大学修士論文, 2021.
- 2) Suzuki K, Negishi T, Kato Y, Kono Y, Sekimoto M. Calibration of NaI (Tl) Scintillation Survey Meter Using Industrial X-ray Equipment. *Sensors & Materials*, 2023, 35.
- 3) Suzuki K, Negishi T, Kato Y, Kono Y, Sekimoto M. Functional confirmation using a medical X-ray system of a semiconductor survey meter. *Open Journal of Radiology*, 2024.