

歯科用X線スペクトル測定におけるSi(Li)検出器の利用

上原, 周三

長, 哲二

吉村, 厚

吉永, 春馬

<https://doi.org/10.15017/75>

出版情報 : 九州大学医療技術短期大学部紀要. 3, pp.69-73, 1976-03-10. 九州大学医療技術短期大学部
バージョン :
権利関係 :

歯科用 X 線スペクトル測定における Si (Li) 検出器の利用

上原 周三, 長 哲 二, 吉 村 厚, 吉 永 春 馬

Use of an Si(Li) Detector in Dental X-Ray Spectrometry

Shuzo Uehara, Tetsuji Cho, Atsushi Yoshimura and Haruma Yoshinaga

緒 言

歯科用 X 線撮影における患者の被曝が問題となっているが, その被曝線量を軽減する方法としては, 不要な撮影の排除もさることながら, 十分な診断情報を得る限りにおいて最少の被曝線量にとどめ得るような線質の選択も一つの方法である。その基礎資料として使用 X 線の線質分析が要求されるが, 従来シンチレータ法やフィルター法などで波長分布曲線が求められていたものの 50 kVp から 70 kVp 程度の 歯科用 X 線のスペクトル決定にはそれぞれ欠点があり容易ではなかった。

ここ数年, それまでの NaI シンチレーション検出器に代わって, Si(Li) や Ge(Li) などの半導体検出器による X 線スペクトルの研究¹⁻³⁾がなされてきている。半導体検出器は, シンチレーション検出器に比較して数倍高いエネルギー分解能を有しており, とくに Si(Li) 検出器は不感層がきわめて薄いために低エネルギー光子の検出に適している。

歯科においては 100 kVp 以下で撮影がなされているので, 筆者らは Si(Li) 検出器によって 100 keV 以下の X 線のエネルギーと強度を可能な限り高い精度で測定することを試みた。

方 法

X 線発生装置, コリメータおよび検出器系の配置を Fig. 1 に示す。発生装置はモリタ製作所製 X100E S で主な性能は Table 1 に挙げている。ターゲット (1.5 mm × 1.5 mm) から検出器

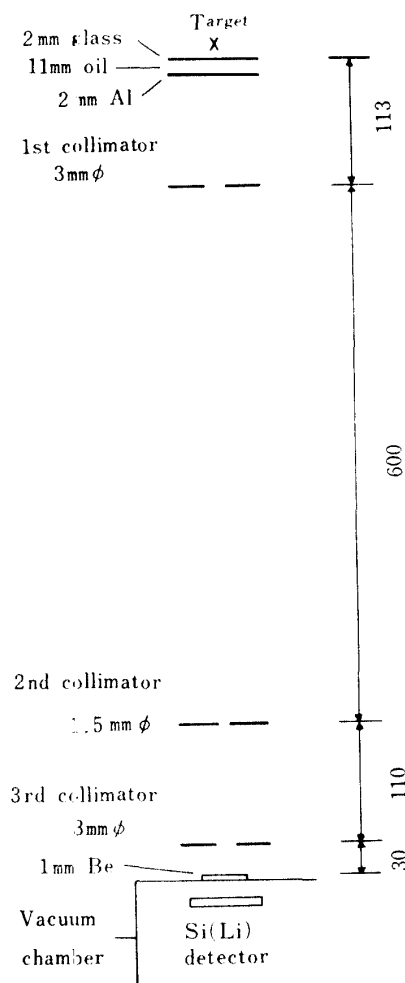


Fig. 1 Experimental setup.

Table 1 Specification of the X-ray unit.

Tube potential	50—100 kVp variable
Tube current	10 mA max
Focus	1.5 × 1.5 mm

までの距離はおよそ85cmで、X線出射口の窓と真空槽の入射窓の間に、厚さ3mmの鉛板にそれぞれ直径3mm, 1.5mm, 3mmの穴をあけた3個のコリメータを置き線束を絞るとともに散乱線の入射を防いだ。

X線スペクトルを高分解能で測定するためには分解能を悪くする要因のひとつである検出器の逆漏洩電流を1nA程度まで減少させなければならない。そのために真空槽中の検出器を銅のコールドフィンガーを通して液体ちっ素(77°K)によって冷却した。真空槽の入射窓はX線の吸収をできるだけ少なくするために1mm厚のベリリウムを用いた。

Simtec社製Si(Li)検出器は空乏層の厚さ2mm, 有効面積100mm²で検出器バイアスは常時300Vで使用した。回路系は前置増幅器—主増幅器—波高分析器という一般的な構成である。前置増幅器としてTennelec社製電荷有感型TC161A, 主増幅器としてNuclear Enterprise社製Research Amp.を使用した。

この測定系では、主増幅器の時定数が3.2μsの場合エネルギースペクトルの分解能が一番よいが、パルスの幅が広くなり計数率が高い場合

に、これらのパルスの重なりによるパイルアップが生じ、Fig. 2(a)に示されるような出力波形となり分解能が悪くなる。時定数を短くすると増幅器雑音の増加により分解能が悪くなるが、パイルアップによるものより悪化が少いので時定数を0.8μsとしパルス幅の小さいところで使用した。またパイルアップは単位時間当りの入射光子数が多い場合にも生じるので管電流をできるだけ押えて1nA程度で測定した。この状態での出力波形をFig. 2(b)に示す。なお異なる実験条件での測定は、管電流を電流積分器によって積分した電荷量を用いて規格化した。

結果と考察

1. 分解能

以上の測定系の性能を²⁴¹Amから放出されるγ線、特性X線のエネルギースペクトルを測定して調べた。検出器から14cm離れた点にある直径1.5mmコリメータ上に²⁴¹Am線源を置き、増幅器の利得、時定数等は連続X線測定の場合と同様に設定してそのスペクトルを測定した。結果をFig. 3(a)に示す。

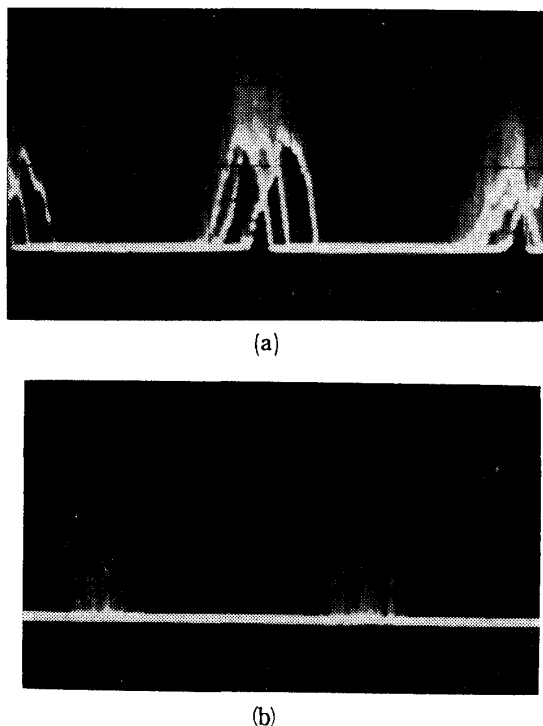


Fig. 2 Waveform obtained on the oscilloscope: (a) pileup; (b) normal.

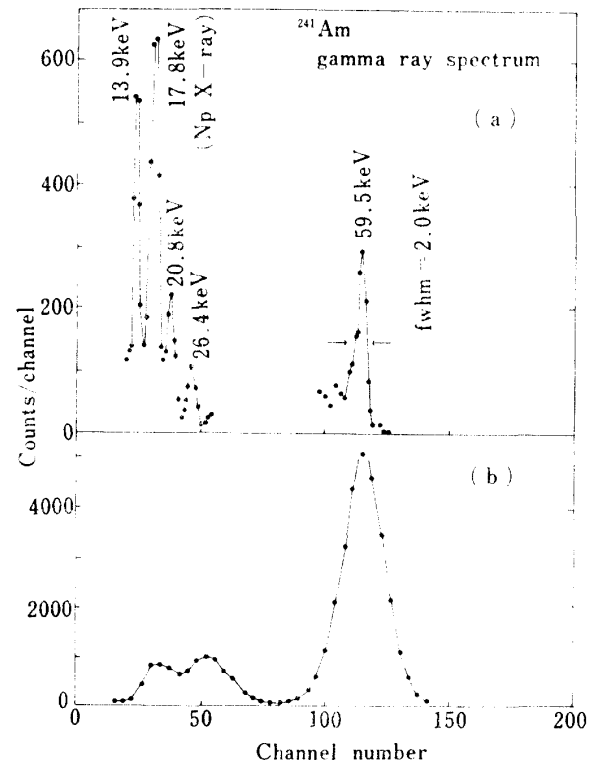


Fig. 3 Photon spectrum following the decay of ²⁴¹Am: (a) measured with Si(Li) detector; (b) measured with NaI(Tl) detector.

59.5 keV γ 線に対して半値幅 2 keV が得られた。半値幅は低エネルギー光子のピークに対してもほぼ 2 keV である。59.5 keV ピークの低エネルギー側の肩に Si の K-X 線エスケープピークがかすかに認められる。低エネルギー側は 13.9 keV の Np-X 線まで明瞭に見えているが、これより低い 11.9 keV の X 線, および 59.5 keV γ 線のコンプトンエッジ (11keV) は観測されなかった。

しかし Si(Li) 検出器は, NaI 検出器よりエネルギー分解能においても低エネルギー光子の検出という点においてもはるかに優れていることがわかる。比較のために Fig. 3 (b) に NaI による ^{241}Am のエネルギースペクトルを示す。

Fig. 3 (a) の ^{241}Am スペクトルは以後の X 線スペクトルのエネルギー決定の基準としても利用された。

2. 検出効率

Table 2 に示されているように ^{241}Am から放出される光子の相対的強度⁴⁾がわかっているので、これと Fig. 3 (a) のスペクトルにおける全エネルギーピークのピーク面積とを比較すれば検出器の全エネルギーピークに対する相対的検出効率を決定することができる。

Table 2 Photon intensities of ^{241}Am source.

Photon energy (keV)	Relative intensity
11.89 NpL ϵ	2.2
13.9 NpL α	37.5
17.8 NpL β	51.2
20.8 NpL γ	13.8
26.35	7.0
59.5	100

26.4 keV に対する効率を 1 とした場合の 13.9, 17.8, 20.8, 26.4 および 59.5 keV 各ピークに対する検出効率を Fig. 4 の黒点で示す。検出効率が 20 keV 以下で落ちているのはベリリウム窓による吸収のためである。

これら 5 つのエネルギーについて求めた検出効率をなめらかな曲線で結んだ実験的効率曲線が Fig. 4 の曲線である。この曲線から任意の光

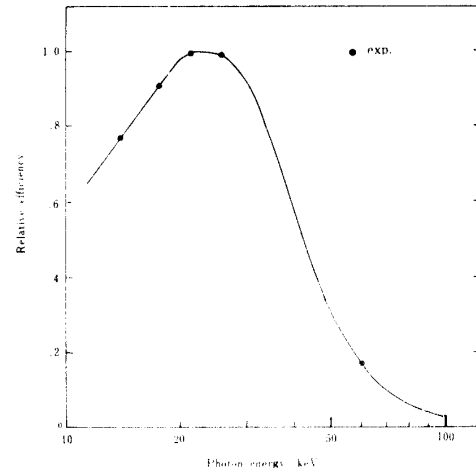


Fig. 4 Full energy peak efficiency for Si (Li) X-ray detector.

子エネルギーに対する検出効率を読みとり連続 X 線スペクトルの補正に用いた。

3. 効率補正

観測された X 線スペクトルは, 入射 X 線に対する検出器のレスポンスを反映しているため真の X 線スペクトルそのものではない。したがって真のスペクトルを求めるには, 観測されたスペクトルに補正をほどこさなければならない。ここでは 2 節で求めた検出効率を使って以下の方法によって補正を行った。

観測されたスペクトルをエネルギーの基準に基づいて 2.35 keV 間隔に分割し, その間隔に含まれる計数を総和し, その総和を間隔の中央のエネルギー値における計数として表わす。つまり 2.35 keV おきに単一エネルギーの光子が入射すると仮定し, そのピーク面積を算出していることになる。こうして求めたあるエネルギーでのデータを, 対応する検出効率で割れば, それは実際に検出器に入射した光子の強度に相当する。但し検出効率は相対値で表わされているので強度も相対値である。補正の一例として, 歯科においてもっとも頻繁に使用されている 70 kVp の場合の付加フィルターなしの条件でのスペクトルを Fig. 5 に示す。この補正法はコンプトン効果や X 線エスケープピークの補正を考慮する必要がなく, 単に全エネルギーピークの検出効率のみに関係している点において簡明な方法

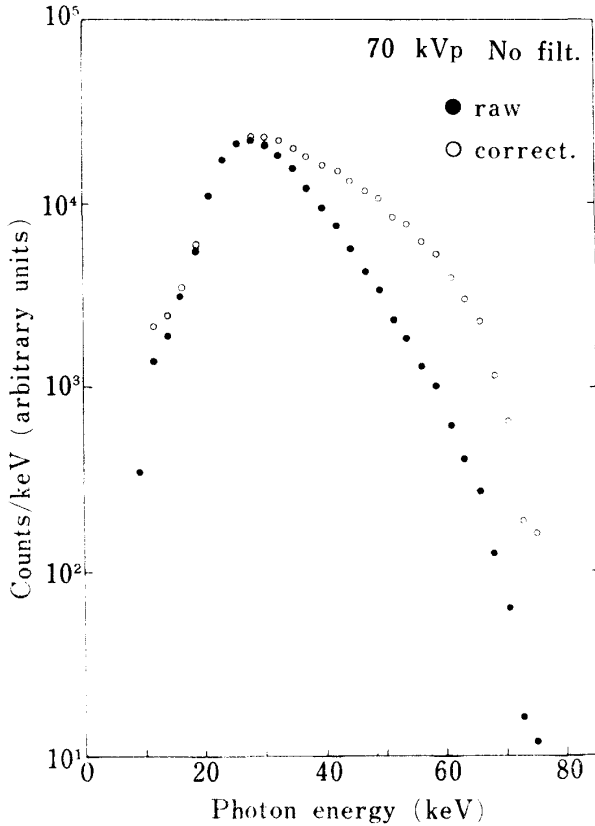


Fig. 5 Comparison of the X-ray spectrum with efficiency correction and without correction.

である。またエネルギー分割の間隔を 2.35 keV と単一のピークに対する半値幅 2 keV より広くとっているため、隣接するピークとの重なりが小さくなり、より正確なピーク面積の算出が可能になっている。

4. レスポンス行列による補正

X線スペクトル測定に、たとえば NaI(Tl) などのシンチレーション検出器を用いた場合、通常シンチレーション検出器の光子に対するレスポンス行列を求め、それによるスペクトルの補正がなされている。^{5,6)} すなわち検出器のレスポンスを行列 P で表わせば

$$P \mathbf{i} = \mathbf{h} \quad (1)$$

ここで \mathbf{h} は観測されたスペクトル、 \mathbf{i} は入射スペクトルをそれぞれ、列ベクトルで表現したものである。もし P の具体的な行列がわかれば

$$\mathbf{i} = P^{-1} \mathbf{h} \quad (2)$$

によって真のスペクトル \mathbf{i} を求めることができる。

これに対し、筆者らの実験においては、分解能の良い半導体検出器によって測定しているこ

と、およびコンプトン効果やエスケープピークを考慮せずに、全エネルギーピークに対する検出効率を見いだせたことの二点によって、正確なレスポンス行列を求めなくても補正を行うことが可能であった。このことを確かめるためにガウス型ピークに対する単純なレスポンス行列を作成し、(2)式による計算値と3節で求めた効率補正值とを比較した。

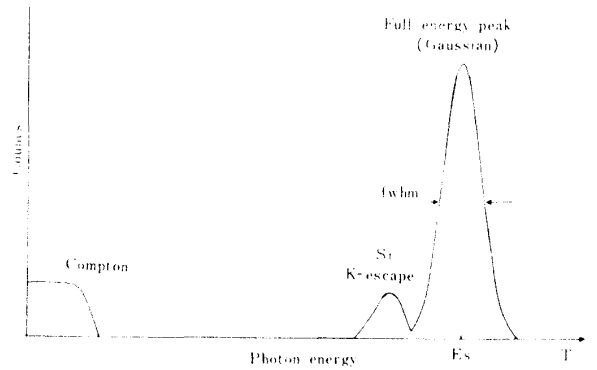


Fig. 6 Schematic diagram of a typical response curve for photons of energy E_s .

単一エネルギー E_s なる光子に対するレスポンスは Fig. 6 のように図示される。コンプトン効果とエスケープピークを無視すれば、 E_s に対するレスポンスは全エネルギーピークの型に対応しており、 T なるエネルギーにおいて

$$P(T, E_s) = \mu_s e^{-(T-E_s)^2 K^2}, \quad (3)$$

と表わされる。ここで μ_s は E_s における検出効率、 K はガウス型ピークの半値幅に依存する値である。Si(Li) 検出器の場合、半値幅は全エネルギー範囲にわたって一定 (= 2 keV) とみなすことができるので

$$P(T, E_s) = \mu_s e^{-0.693(T-E_s)^2}, \quad (4)$$

となる。

行列 P の作成法は、3節と同様 70 kVp の場合を例にとれば、まず E_s を 11.6 keV に固定し T をパラメータとして 11.6 keV から 77.3 keV まで 2.35 keV 間隔で変えて(4)式により P を求め、29 行 × 1 列の行列を作る。以下 E_s を 77.3 keV まで 2.35 keV ずつ増加させ同様の手続きによって 29 × 29 行列を完成させる。

P と観測されたスペクトル h から(2)式によって i を求めると効率補正による値より, すべてのエネルギー範囲にわたって一様に 5% 程度小さくなった。すなわち効率補正值はピークの重なり合う部分を含んでおりその重複分として 5% 程度過大評価していることになる。しかしスペクトル構造は全く同じであり, 相対的な強度の違いは今の場合本質的な問題ではないので効率による補正法は妥当と考えられる。

要 約

ここではもっとも普通に使用されている 70 kVp における測定のみを例に挙げたが, 筆者らはすでに 100 kVp 以下のそれ以外の管電圧での測定を行っており, 100 keV 以下の X 線スペクトルを可能な限り高い精度で測定するという所期の目的をほぼ達成できた。しかしまだいくらかの検討の余地を残している。

1. 主増幅器におけるパイルアップを減少させるために, $0.8\mu\text{S}$ という短い時定数に設定したが, その結果 エネルギー分解能は悪くなった。通常の状態では時定数 $3.2\mu\text{S}$ の場合 1.4keV なる分解能が得られている。したがって高い計数率のもとで分解能を悪化させずにスペクトル測定を行なうには, 短い時定数でも分解能が悪化しないタイムバリアントフィルター増幅器⁷⁾ がよいと思われる。入射ビームがバンチされている X 線の場合, このことはとりわけ重要である。

2. この実験では補正の際に効率のみを考慮しているため, とくに効率を正確に求めることが要求される。この点 20 keV 以下の光子の吸収の割合がかなり大きいこと, また 13 keV 以下の検出効率が得られなかったことなど入射窓による吸収の問題が残されている。容易に入手できたという理由で真空槽の入射窓には 1mm 厚のベリリウムを用いたが, 低エネルギー部のスペクトルをより正確に観測するには, もっと薄い 0.25mm 厚程度¹⁻³⁾ の窓を用いなければならないと考えられる。

文 献

- 1) Campbell, J. L., Goble, R. J. and Smith, H. J.: Nuclear Inst. Meth. 82:183, 1970.
- 2) Israel, H. I., Lier, D. W. and Storm, E.: Nuclear Inst. Meth. 91:141, 1971.
- 3) Campbell, J. L. and McNelles, L. A.: Nuclear Inst. Meth. 101:153, 1972.
- 4) Lederer, C. M., Hollander, J. M. and Perlman, I.: Table of Isotopes (John Wiley & Sons, 1967).
- 5) Skarsgard, L. D., Johns, H. E. and Green, L. E. S.: Radiat. Res. 14:261, 1961.
- 6) Epp, E. R. and Weiss, H.: Phys. Med. Biol. 11:225, 1966.
- 7) Radeka, V.: Nuclear Inst. Meth. 99:525, 1972.