



Title	X線のエネルギー分析 第1報 一次X線
Author(s)	竹井, 力
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1959, 19(6), p. 1266-1271
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/15662
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

特別掲載

X線のエネルギー分析

第1報 一次X線

長崎大学医学部放射線医学教室（主任 玉木正男教授）

竹 井 力

（昭和34年7月31日受付）

緒 言

X線による診療に際して、X線のエネルギー分布についての知識を得ることは物理学的に重要であるばかりでなく、放射線生物学的にも意義が大きい。

測定技術の急速な発達により、X線及び γ 線のエネルギー分析も scintillation spectrometer (single channel 又は multi-channel pulse height analyzer) を用いて割合に簡単に実行できるようになった。

X線或は γ 線の energy spectrum を求める方法としては、古くから行われてきた結晶法（波長一強度を energy 一強度に書き換える）、強度減弱曲線から数学的な解析を行う法、及び scintillation spectrometry がある。結晶法は低 energy では高精度を期待できるが高 energy においては良い精度を得ることは困難であり、又測定が非常に繁雑があるので一般性がない。数学的解析法は測定は簡単であるが、高精度を望むことはできないし、複雑な spectrum の解析に対しては計算が大変面倒で有効ではない。scintillation 法は非常に微細な spectrum の分析はできないが、energy の広い範囲にわたって精度の良い測定法である。即ち scintillation spectrometry は前二者に比べて信頼度も高く、しかも手軽に実施できるので優れている。

scintillation spectrometer を用いて連続X線の energy spectrum の測定を行つたのは Johansson が始めである。彼の方法を Lidén and

Starfelt¹⁾ は改良して、1 MeV 以下の連続X線及び γ 線測定法についての基礎的な問題を詳細に検討している。Cormack 等²⁾は 280kVp, 半価層 : 1.7, 2.5, 3.1mmCu のX線について energy spectrum を測定した。Hettinger and Starfelt³⁾ は 45～250kV について附加濾過板のない場合とある場合のX線のエネルギー分析を報告している。Helle⁴⁾ は 60, 80, 100kV (濾過板 : 0.21 mmCu + 1.0mm plexiglas) 及び 150kV (濾過板 : 0.21mmCu + 1.0mmAl + 1.5mm plexiglas) についての spectrum 測定からX線の energy-dose 曲線を計算によって求めている。

著者は治療用X線装置について 90, 120, 160, 180kVp の各電圧において、濾過板のない場合と治療用濾過板のある場合のX線のエネルギー分布を比較した。測定装置は NaI (1" $\phi \times 1"$) を用いる single channel pulse height analyzer による scintillation spectrometer である。

本邦において、治療用X線の energy spectrum を scintillation spectrometry によつて測定したものは未だ文献に見出せない。

実験装置

X線発生装置としてはグライナツヘル回線の治療用装置（東芝製 KXC-17）を用いた、その最高使用電圧は 200kVp, X線管電流は 6mA で、X線管のターゲットはタンクスチンである。使用した光電子増倍管は Du Mont K 1186 である。実験装置の配置図を Fig. 1 に示した。NaI(Tl)

Fig. 1. Experimental arrangement of the scintillation spectrometry

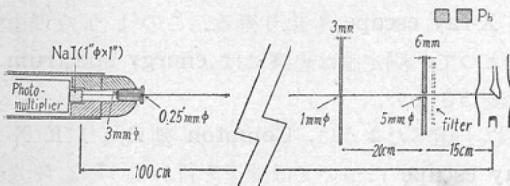
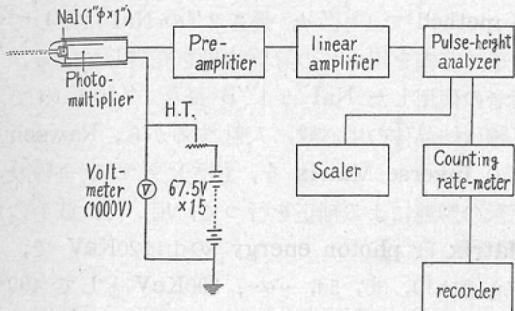


Fig. 2. Block-diagram of the instrument



結晶のX線及びγ線に対する感度は非常に高いので、spectrometer の分解能を考慮して結晶に入射するX線束を非常に小さくする必要がある、結晶の前のスリットの大きさは Pb: 0.25mmφとした。これは、注射針のマンドリン (0.25mmφ) を垂直に立てた箱の中に Pb を流し込んで後、マンドリンを抜いて作った。X線管焦点と結晶間距離は 100cm とし、X線束と scintillation head は水平で、床から 99cm の高さである。

spectrometer の block diagram を Fig. 2 に示した。spectrometryにおいては光電子増倍管からの pulse height は光電子増倍管にかける高電圧の約 6 乗に比例するので、この高電圧の安定性と再現性がきびしく要求される。著者は 67.5 V の乾電池 12 個を直列につなぎバリオームを加減して精密級電圧計 (0.5 級, 1000 V, mirror 付) を用いて 900 V に調整した。この高電圧は 1000 V につき 0.5 V 以下の変動におさえる必要がある。

NaI 結晶は直径 1", 長さ 1" のもので、180 KeV の X 線ではその energy の 98.3% が吸収される。scintillation head と pre-amp. とは測定台の上におき、linear-amp. 以下の測定器は X

線操作室内においていたから、従つて pre-amp. と linear-amp. とは約 8 m の shield wire でつながりなのでこの間の静電容量は相当に大きくなり、pulse の減衰も大きいと思われる。このためか、或は光電子増倍管の dark current の大きいためか、~15KeV 以下の X 線では信号と真空管雜音との比即ち S/N 比が小さくなつて分析できなかつた。

用いた spectrometer は single channel で、その分解能は 1 μ sec. 以下であり、測定中は channel width を 0.5 V とした。

測 定

NaI scintillator を用いた spectrometry において考慮すべき二三の技術的問題について述べよう。

1) energy calibration

photon は NaI 結晶に入射してその energy を失い結晶体中で光電子を生じ、この光電子のために螢光を発する。その螢光は光電子増倍管の光電面において光電子を生じ、これは更に二次電子を増倍して pulse を生ずる。pulse は更に pre-amp. 及び linear-amp. によつて pulse analyzer で検出できる程度に増幅される。

若し入射 X 線あるいは γ 線の energy がすべて結晶体中で吸収されて一定波長の螢光に変換されば、その energy は発生した螢光の量、即ち取出される pulse height に比例する筈である。従つて pulse height と X 線あるいは γ 線の energy とは直線的に比例することになり、pulse height を知ることによりその入射 photon の energy を知ることができる。

著者の用いた spectrometer の pulse height と photon energy との関係を調べて energy calibration を行い、その結果を Fig. 3 に示した。既知 energy の photon source としては、I (28.5KeV), Ba (32KeV), W (59KeV), Pb (74KeV) の二次螢光 X 線及び I¹³¹ (80KeV) の γ 線を用いたが、~15KeV 以上では直線性は良好である。上記の二次螢光 X 線は K-series であるが、K_{α1}, K_{α2} の分離はできなかつた。

Fig. 3. Energy calibration of the spectrometer

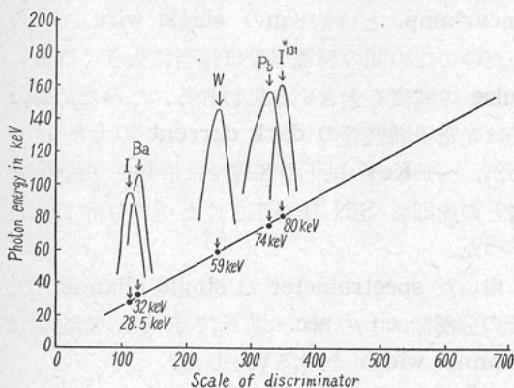
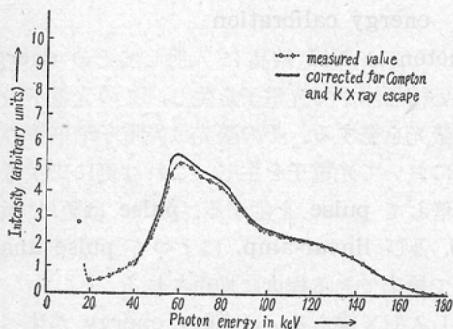


Fig. 4. Energy spectrum correction for Compton electron and K X-ray escape. 180kVp (filter: 0.5 mmCu+1.0 mmAl)



2) Compton electron と K X-ray escapeについての補正

一定の energy をもつた photon が NaI 結晶体に入射すると、結晶体中で光電子を生じ、そしてこの光電効果によって photon の energy に相当する pulse height を得る。これ以外にも、又 Compton 効果のために入射 photon よりも低い energy の Compton electron と Compton X 線を生ずるが、この Compton electron は吸収されて pulse を作り Compton X 線も再び吸収されて pulse を生ずる。更に 1.02 MeV 以上の photon に対しては electron pair creation も起ることになり、spectrum は一層複雑になる。ここでは 180KeV 以下の X 線について検するので electron pair creation は考え

なくてよい。他方、又 NaI 結晶中のヨード原子による K X-ray が生じて結晶から逃げ去る所謂 K X-ray escape も起り得る。このような理由によつて、測定値は忠実には energy spectrum を表わさない。

以上述べたように、Compton 効果及び K X-ray escape については補正を行わねばならない。この補正是極めて重要であるが、これについては Rawson and Cormack⁵⁾ が Monte Carlo method で $1\frac{3}{4}'' \phi$ 、長さ 2" の NaI に対して電子計算機を用いての計算結果を発表している。著者の使用した NaI は $1\frac{3}{4}'' \phi$ 長さ 1" のもので X 線は結晶体の中心線に入射するから、Rawson 等の Inverse Matrix を、長さに対する全吸収係数の影響による補正を行つて、用いた。彼等の Matrix は photon energy の巾は 20KeV で、中心値は 10, 30, 50, ……, 390KeV として 400 KeV までの photon energy に対して計算されたものである。

ここでは、後述するように scaler での count 数を energy に対してプロットして曲線を書き、10, 30, 50, ……, 170KeV の各点における Compton electron と K X-ray escape に対する補正を行い、他の点は内挿して energy spectrum を求めた。この補正の一例を Fig. 4 に示した。これは 180kVp (濾過板: 0.5mmCu+1.0 mmAl) についてのもので、実験値と補正曲線との関係を示した。

3) Gaussian distribution

光電子増倍管から実測で得られる photo peak は数学的に Gauss の分布をする。Motz⁶⁾ は 2 MeV 以下の一定 energy の photon に対して、photon energy を k, pulse height を h として、横軸に $(h/k - 1)\sqrt{k}$ を単位にとり縦軸に counting rate をとつて、横軸の原点 ($h=k$) での counting rate を 1 とした場合に、Co⁶⁰ (1.33 MeV), Cs¹³⁷ (0.66MeV), Hg²⁰³ (0.28MeV), Cd¹⁰⁹ (0.089MeV) についての曲線は Gauss 分布をなし、しかもこれらの曲線は良好な一致を示したこと報告している。

ここで測定では、低い energy の方での count は多いために Gauss 分布の拡がりの影響が現われるが、高い energy においては count は非常に少ないのでこの影響は殆んど無視してよい。著者は低 energy の γ 線 source を有しないために Gauss 分布の測定は行えなかつたが、實際には低い energy においても Compton electron と K X-ray escape の補正を行えば Gauss 分布の端は殆んど消えてしまう。この様子は Fig 4 で明らかである。従つて Gauss 分布の影響は低い energy 部分において或る程度の誤差として現われることになる。

4) Pb スリットからの二次蛍光X線

Pb の二次蛍光X線の K-series は 72~85 keV にあるので、これを除去するだめに Lidén 等¹⁾は NaI の前に 1.5mmSn + 0.5mmCu の濾過板をおいて測定実験を行つた。しかし Cormack 等²⁾はこの影響を調べたところ、Sn 板を置いて測つたときと置かないときとの spectrum は殆んど変わらないことを報告している。著者の実験においても Pb スリットによる二次蛍光X線除去フィルターはおかなかつたが、spectrum には鉛の二次蛍光X線は殆んど現われなかつた。

5) spectrometer の安定性

spectrometer は switch on して一定時間経つと測定器中の温度は一定となり、真空管、抵抗及び静電容量は定安になる。この時間は約30分であつた。

光電子増倍管からの pulse height は電圧の変動に非常に鋭く左右されるので、高電圧には高い安定度が要求される。光電子増倍管の高電圧は安定性を保つために電池としたが、経時的な電圧降下が現われ、これは約10分まで急速に降下し、それ以後は約50分間で 0.5 V/1000 V 程度の電圧降下を示した。このために高電圧は約20分毎に調整した。

測定成績

測定に使用したX線管電圧は 90kVp (no filter, 1.0mmAl), 120kVp (no filter, 0.3mmCu + 0.5mmAl), 160kVp (no filter, 0.5mmCu +

Table 1. Half Value Layer (in mm of Copper) of measured X-rays

tube voltage kVp	filter mm	H.V.L. mmCu
90	no	0.17
	1.0Al	0.21
120	no	0.25
	0.3Cu + 0.5Al	0.70
160	no	0.33
	0.5Cu + 1.0Al	1.05
	1.0Cu + 1.0Al	1.45
180	no	0.35
	0.5Cu + 1.0Al	1.15
	1.0Cu + 1.0Al	1.65

Fig. 5. 90 kVp energy spectrum

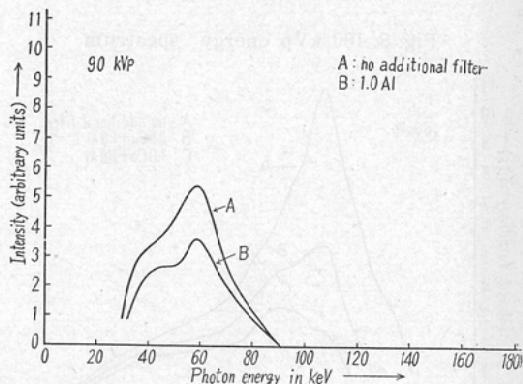
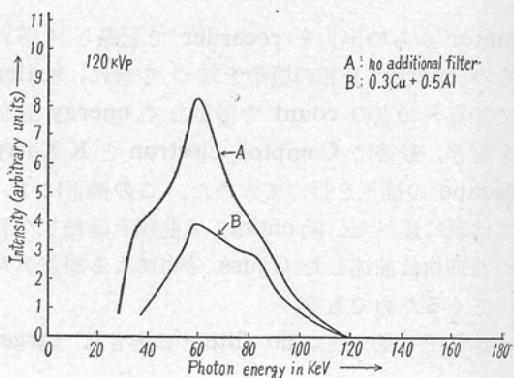


Fig. 6. 120 kVp energy spectrum



1.0mmAl 1.0mmCu + 1.0mmAl), 180kVp (no filter, 0.5mmCu + 1.0mmAl, 1.0mmCu + 1.0mmAl) である。それぞれの線質について、その半価層を Table 1 に掲げた。Fig. 5, 6, 7, 8 にそれぞれのX線について得られた spectrum を示す。これらの曲線は、始めに rate-

Fig. 7. 160 kVp energy spectrum

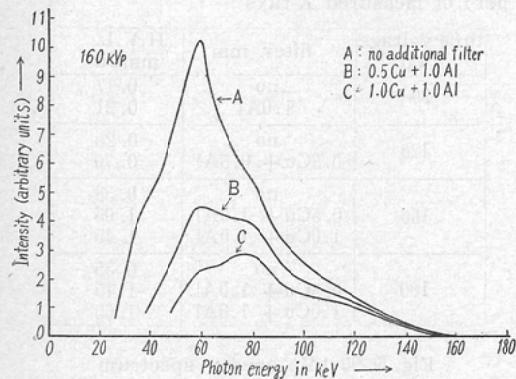
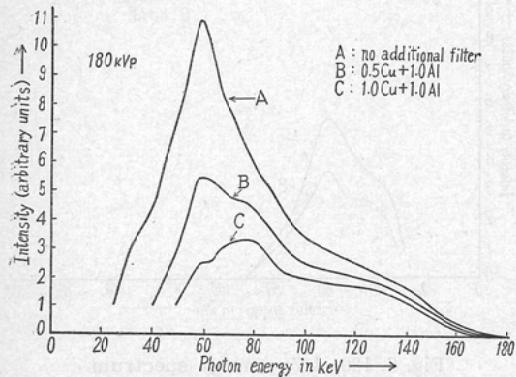


Fig. 8. 180 kVp energy spectrum



meter からの出力を recorder で記録して 予めその energy 分布の概形を知つて後に、 scaler で 30 点～40 点の count を計数して energy 分布を書き、最後に Compton electron と K X-ray escape の補正を行つて求めた。この補正については既に述べた。低 energy で曲線を延長しなかつた理由は前述した Gauss 分布による誤差が入つてくるためである。

各電圧において、no filter のときは target

のタングステンの特性 X 線 (59 keV) が強い peak となつて現われる。filter が厚くなると低い energy の部分は高い energy の部分に比較して大巾に減少して X 線の平均 energy は高 energy 部に移動する、即ち filter が厚くなると X 線の実効 energy は高くなる。

結語

著者は single channel pulse height analyzer を用いた NaI scintillation spectrometer を使用して、治療用 X 線の energy spectrum が濾過板のないときと治療用濾過板のある場合とでどのように変るかを調べた。

X 線の生物学的効果を論ずる場合には、一般には線質 (例えば、半価層)、線量についてだけ考慮されているが、最も基本的なものはその energy spectrum である。即ち X 線の energy spectrum が得られれば、始めて正確な空中線量の計算が可能となり、また種々物質一例えば骨、軟部組織一中の相対的吸収線量の決定も可能となる。

尚、本論文の要旨は日本医学放射線学会第30回九州地方会（昭和33年10月）において発表した。

本研究の対して、多大の御援助をいただいた当教室前主任立入弘教授、御校閲いただいた玉木正男教授に深く感謝の意を表わす。

文献

- 1) K. Lidén and N. Starfelt: Arkiv for Fysik, 7 ; 427, 1954.
- 2) D.V. Cormack, J.E. Till, G.F. Whitmore and H.E. Johns: Brit. J. Radiol., 28 ; 605, 1955.
- 3) G. Hettinger and N. Starfelt: Acta Radiol., 50 ; 381, 1958.
- 4) P. Heile: Journ. de Radiol., 39 ; 335, 1958.
- 5) E.G. Rawson and D.V. Cormack: Nucleonics, 16 ; 92 (No. 10), 1958.
- 6) J.W. Motz: Phys. Rev., 100 ; 1560, 1955.

Measurement of the X-ray Spectrum with
Scintillation Spectrometry
(I. Primary X-rays)

By
Chikara Takei

Department of Radiology, Nagasaki School of Medicine
(Director: Prof. M. Tamaki)

By means of a scintillation spectrometer employing a sodium iodide crystal (1 in. diameter, 1 in. long) and a single channel pulse height analyzer, the author has measured the spectral distribution of primary x-rays from tungsten target of a 200 kVp therapy machine of Greinacher circuit.

The half value layer of the measured x-rays is shown in Table 1. The measured distributions have been corrected for Compton-scattered radiation and K x-ray escape.

The effect of secondary fluorescent radiation from the lead slit was negligible. The spectral distributions thus corrected are illustrated in Figs. 5-8.