

JAERI - M
84-232

校正用 X 線の線質を表わす諸量の測定

1985年1月

山口 恭弘・三原 明・千田 徹・南 賢太郎

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 株式会社高野高速印刷

校正用 X 線の線質を表わす諸量の測定

日本原子力研究所東海研究所保健物理部

山口 恭弘・三原 明・千田 徹・南 賢太郎

(1984年11月30日受理)

放射線管理用として使用される γ 線線量計や線量率計の校正およびエネルギー特性試験には、X 線装置から発生する連続 X 線をろ過することによりエネルギー分布幅を狭めたものがしばしば用いられる。この方法では単色 X 線は得られないが、厳密な単色性が要求されない試験・校正においては、簡便かつ十分に有効な方法である。この方法を用いて測定器の試験・校正を行うときには、X 線のエネルギー代表値および単色化の程度を表わす X 線の線質を明確にする必要がある。

本報告においては、50～120 kV X 線装置について、X 線の線質を表わす諸量を測定し、従来の表記法と ISO-4037 による表記法との比較・検討を行った。また、X 線のエネルギースペクトルから定義される Resolution に基づき、X 線の線質を Wide, Middle, Narrow, および Extra-narrow spectrum series に分類した。

Measurement of specifications of X-ray quality for calibration

Yasuhiro YAMAGUCHI, Akira MIHARA, Toru CHIDA

and Kentaro MINAMI

Department of Health Physics, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 30, 1984)

The filtered continuous X-rays are often used for the calibration and measurement of the energy response of γ -ray dosimeter and dose ratemeter. These X-rays are easily made and sufficiently available for the measurement which does not require the strictly monoenergetic X-ray beam. It is necessary for the employment of continuous X-rays to specify the X-ray qualities such as representative energy and degree of filtration.

This report describes a measurement of some specifications of the X-ray quality for a X-ray generator with 50 ~ 120 kV of tube potential and a comparison between existing and ISO-4037 proposing expressions on the X-ray quality. According to the resolution of X-ray spectrum, we made four different X-ray quality sets : Wide, Middle, Narrow, and Extra-narrow spectrum series. The information described here about the filtered X-rays will be of use for the calibration and measurement of energy response of the health physics instruments.

Key words : Filtered X-ray, X-ray Quality, Calibration, γ -dosimeter,
Energy Response, Energy Spectrum, Accuracy

目 次

1. 序 論	1
2. X線の線質を表わす諸量	1
3. 実 験	3
3.1 X線装置	3
3.2 エネルギースペクトルの測定	4
3.3 実効エネルギー等の測定	4
4. 結 果	5
4.1 エネルギースペクトル	5
4.2 実効エネルギー等	5
5. 検 討	6
5.1 エネルギースペクトル	6
5.2 X線の線質を表わす諸量の比較	6
6. 結 論	7
謝 辞	7
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Specifications of X-ray quality	1
3. Experimental	3
3.1 X-ray generator	3
3.2 Measurement of energy spectrum	4
3.3 Measurement of effective energy etc.	4
4. Results	5
4.1 Energy spectrum	5
4.2 Effective energy etc.	5
5. Discussion	6
5.1 Energy spectrum	6
5.2 Comparison of specifications of X-ray quality	6
6. Conclusion	7
Acknowledgement	7
References	8

1. 序 論

放射線管理用として使用される γ 線線量計や線量率計の校正およびエネルギー特性試験には、一般にエネルギーの異なる何種類かの γ 線源が用いられる。たとえば ^{241}Am (59.5 keV), ^{137}Cs (662 keV), ^{226}Ra + 娘核種 (800 keV)*, および ^{60}Co (1170, 1330 keV) などの核種が γ 線源として最もよく利用されている¹⁾。しかし、多くの γ 線検出器は、300 keV以下のエネルギーの γ 線に対して応答が変化するものが多いので、このエネルギー領域について特性試験をおこなうための γ 線源がしばしば要求される。このエネルギー領域には、 ^{57}Co (122 keV), ^{51}Cr (320 keV) 等の γ 線放出核種があり利用可能であるが、半減期が1年未満であるため、日常の校正業務に使用するには経済的な点に問題がある。

そこでこのエネルギー領域における γ 線線量計等の試験・校正には、X線装置が一般に用いられる。これには蛍光X線を用いるものと、連続X線を用いるものの2通りの方法がある²⁾。前者は、X線管球から発生する一次X線により放射体 (Radiator) を励起し、この放射体からの蛍光X線を用いる方法である^{3), 4)}。この方法では、単色X線が得られる利点があるが、X線強度が弱く装置が複雑になる難点があるために、一般には普及していない。後者は、X線管球から発生する連続X線を適当なフィルタを用いて口過し、エネルギー分布幅を狭めたものを用いる方法である⁵⁾。この方法は、単色X線を供給することはできないが、X線の厳密な単色性が要求されない場合 (たとえば、エネルギー特性がX線のエネルギー分布幅内で急激に変化しない線量計等の試験) では、強度を適度に調整できるX線が得られ、しかも装置が簡便であるために非常によく利用されている。しかし、フィルタを用いて口過されたX線はあるエネルギー分布を持っているので、これを用いて試験・校正を行う場合には、連続X線の線質、すなわちエネルギーの代表値および単色化の程度を明確にする必要がある。

本報告においては、50~120 kV X線装置について、X線の線質を表わす諸量を測定し、従来の表記法とISO-4037による表記法の比較・検討をおこなった。これにより、両表記法の間の関係を知ることができた。また、ISO-4037が提唱しているX線のWideおよびNarrow spectrum seriesに加え、新たにMiddleおよびExtra-narrow spectrum seriesを追加し、X線利用法の充実を計った。

2. X線の線質を表わす諸量

フィルタ口過法により得られるX線は、エネルギー分布幅が狭められているが厳密には単色ではない。したがって、このX線について最も知らねばならぬ量は、エネルギー代表値および単色化の程度である。

これらの量を表わすために、従来から実効エネルギー (Effective Energy) および均等度 (Homogeneity Coefficient) が用いられてきた⁶⁾。実効エネルギーは、フィルタと電離箱等の線

* 厚さ0.5 mmの白金フィルタ付きで、放射平衡が成立している場合。

1. 序 論

放射線管理用として使用される γ 線線量計や線量率計の校正およびエネルギー特性試験には、一般にエネルギーの異なる何種類かの γ 線源が用いられる。たとえば ^{241}Am (59.5 keV), ^{137}Cs (662 keV), ^{226}Ra + 娘核種 (800 keV)*, および ^{60}Co (1170, 1330 keV) などの核種が γ 線源として最もよく利用されている¹⁾。しかし、多くの γ 線検出器は、300 keV以下のエネルギーの γ 線に対して応答が変化するものが多いので、このエネルギー領域について特性試験をおこなうための γ 線源がしばしば要求される。このエネルギー領域には、 ^{57}Co (122 keV), ^{51}Cr (320 keV) 等の γ 線放出核種があり利用可能であるが、半減期が1年未満であるため、日常の校正業務に使用するには経済的な点に問題がある。

そこでこのエネルギー領域における γ 線線量計等の試験・校正には、X線装置が一般に用いられる。これには蛍光X線を用いるものと、連続X線を用いるものの2通りの方法がある²⁾。前者は、X線管球から発生する一次X線により放射体 (Radiator) を励起し、この放射体からの蛍光X線を用いる方法である^{3), 4)}。この方法では、単色X線が得られる利点があるが、X線強度が弱く装置が複雑になる難点があるために、一般には普及していない。後者は、X線管球から発生する連続X線を適当なフィルタを用いて口過し、エネルギー分布幅を狭めたものを用いる方法である⁵⁾。この方法は、単色X線を供給することはできないが、X線の厳密な単色性が要求されない場合 (たとえば、エネルギー特性がX線のエネルギー分布幅内で急激に変化しない線量計等の試験) では、強度を適度に調整できるX線が得られ、しかも装置が簡便であるために非常によく利用されている。しかし、フィルタを用いて口過されたX線はあるエネルギー分布を持っているので、これを用いて試験・校正を行う場合には、連続X線の線質、すなわちエネルギーの代表値および単色化の程度を明確にする必要がある。

本報告においては、50~120 kV X線装置について、X線の線質を表わす諸量を測定し、従来の表記法とISO-4037による表記法の比較・検討をおこなった。これにより、両表記法の間の関係を知ることができた。また、ISO-4037が提唱しているX線のWideおよびNarrow spectrum seriesに加え、新たにMiddleおよびExtra-narrow spectrum seriesを追加し、X線利用法の充実を計った。

2. X線の線質を表わす諸量

フィルタ口過法により得られるX線は、エネルギー分布幅が狭められているが厳密には単色ではない。したがって、このX線について最も知らねばならぬ量は、エネルギー代表値および単色化の程度である。

これらの量を表わすために、従来から実効エネルギー (Effective Energy) および均等度 (Homogeneity Coefficient) が用いられてきた⁶⁾。実効エネルギーは、フィルタと電離箱等の線

* 厚さ0.5 mmの白金フィルタ付きで、放射平衡が成立している場合。

量計の間に吸収板 (Absorber) を置いて測定される第一半価層 (First Half Value Layer : X線の照射線量を半減させる吸収板の厚さ) に基づき、対応する単色X線のエネルギーとして定義される。均等度は、第一半価層の第二半価層 (Second Half Value Layer : X線の照射線量をさらに半減させる吸収板の厚さ) に対する比として定義される。均等度は、口過による単色化が進むにつれて1に近づき、単色X線または γ 線に対しては1である。

この他に単色化の程度を表わす量として、線質指標 (Quality Index)⁷⁾ および不均等度⁵⁾がある。線質指標は、実効エネルギーのX線管電圧に対する比で定義される。また、不均等度は、X線管電圧の実効エネルギーに対する比で定義され、線質指標とは逆数の関係にある。均等度を含むこれら3つの単色化の程度を表わす量は、単色化が進むにつれ1に近づくという共通の特徴を持ち、単色化の程度を示す指標として大切である。

近年、ISO (the International Organization for Standardization) は、 γ 線線量計または線量率計の校正法について新たな規格を設けた²⁾。この中で、フィルタ口過法によって得られるX線エネルギーの代表値および単色化の程度をそれぞれ以下のように表示した。

$$\bar{E} = \frac{\int_0^{E_{\max}} \phi_E \cdot E \, dE}{\int_0^{E_{\max}} \phi_E \, dE} \quad (1)$$

ここで、

\bar{E} : X線の平均エネルギー (keV)

E : X線のエネルギー (keV)

E_{\max} : X線の最大エネルギー (keV)

ϕ_E : 単位エネルギー当りのX線束密度 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{keV}^{-1}$)

および、

$$Re = \frac{\Delta E}{\bar{E}} \cdot 100 \quad (2)$$

ここで、

Re : X線の Resolution (%)

ΔE : エネルギースペクトルの半価幅 (keV)

このような解析的手法は従前より知れていたが⁸⁾ X線エネルギースペクトルを簡単に測定することが困難であったため連続X線の線質を実効エネルギー、均等度などで表現していた。しかし、Ge検出器の普及により、今日ではこれらの定義量は容易に測定可能なものとなった。

また、ISOは(2)式で定義される Resolution に基づき、2つのX線の線質シリーズを提唱している。すなわち、 $Re \approx 50\%$ の Wide spectrum series および $Re \approx 30\%$ の Narrow spectrum series である。前者は、X線の単色性をあまり要求しないが比較的大きな照射線量率が必要な試験・校正に適している。一方後者は、その逆にあまり大きな照射線量率を要求しないがある程度の単色性が必要な試験・校正 (例えばエネルギー特性試験) に適している。

(1)式中のX線エネルギースペクトルの概念をさらに進めて、X線エネルギーの違いによる照射線量への寄与の差を考慮し、次式で表わされる照射線量スペクトル (Exposure Spectrum) を考える

ことができる。

$$D(E) = A \cdot \phi_E \cdot E \cdot \mu_{en}^{air}(E) \quad (3)$$

ここで、

$D(E)$: 照射線量スペクトル ($C \text{ kg}^{-1} \text{ keV}^{-1}$)

A : 定数

ϕ_E : 単位エネルギー当りのX線束密度 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{keV}^{-1}$)

E : X線エネルギー (keV)

$\mu_{en}^{air}(E)$: 空気の質量エネルギー吸収係数 ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$)

$D(E)$ は、X線のどのエネルギー成分が照射線量にどれだけ寄与するかを示す。さらに、(1)式で示される平均エネルギーに対応するものとして、次式で表わされる照射線量に関する平均エネルギー (Exposure Mean Energy) を決めることができる。

$$\bar{E}_{EX} = \frac{\int_0^{E_{max}} D(E) \cdot E \, dE}{\int_0^{E_{max}} D(E) \, dE} \quad (4)$$

ここで、 \bar{E}_{EX} は照射線量に関する平均エネルギー (keV) である。

X線管電圧とフィルタの種々の組み合わせに対する以上挙げた諸量は、それぞれ各校正機関またはX線装置について図や表にまとめられており、^{2), 5), 8), 9), 10), 11)} フィルタろ過法を用いる時の手引きとされている。これらの諸量に影響を与える因子には、X線管電圧やフィルタの材質および厚さの他に、X線管陽極の材質および角度、X線管球の窓による固有ろ過 (Inherent Filtration)、X線管電圧波形等があり、これらはX線装置により異なる。したがって、フィルタろ過法を用いてX線線量計等を試験・校正する場合には、用いるX線装置について線質を表わす量を明確にしておく必要がある。

3. 実 験

3.1 X線装置

本報告書において対象とするX線装置は、東芝 KXO-2050 特型である。本装置は、診断用X線装置を放射線管理用測定器の試験・校正用に一部仕様変更したものである。装置のブロック図を Fig. 1 に示す。装置は、高電圧発生器、テトロード管、X線管球、および制御部から構成される。高電圧発生器は、一次電圧を昇圧した後三相12ピーク整流を行い、リップル率3.4%の高電圧を発生する。高電圧発生器にはテトロード管 (特殊五極真空管) が接続されており、このテトロード管の内部電圧降下効果を利用してシリーズレギュレーションをおこなう。さらに、テトロード管出力を分圧・検出し、この信号を光ファイバーを用いた高周波変調伝送方式にてテトロード管のグリッドにフィードバックする。また、X線管球フィラメントの加熱は直流加熱方式である。これらの対策により、X線管電圧をリップル率0.5%以下の完全直流とすることができた。X線管電圧およびX線管電流の制御範囲は、50~125 kV および0.2~4.0 mA である。

ことができる。

$$D(E) = A \cdot \phi_E \cdot E \cdot \mu_{en}^{air}(E) \quad (3)$$

ここで、

$D(E)$: 照射線量スペクトル ($C \text{ kg}^{-1} \text{ keV}^{-1}$)

A : 定数

ϕ_E : 単位エネルギー当りのX線束密度 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{keV}^{-1}$)

E : X線エネルギー (keV)

$\mu_{en}^{air}(E)$: 空気の質量エネルギー吸収係数 ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$)

$D(E)$ は、X線のどのエネルギー成分が照射線量にどれだけ寄与するかを示す。さらに、(1)式で示される平均エネルギーに対応するものとして、次式で表わされる照射線量に関する平均エネルギー (Exposure Mean Energy) を決めることができる。

$$\bar{E}_{EX} = \frac{\int_0^{E_{max}} D(E) \cdot E \, dE}{\int_0^{E_{max}} D(E) \, dE} \quad (4)$$

ここで、 \bar{E}_{EX} は照射線量に関する平均エネルギー (keV) である。

X線管電圧とフィルタの種々の組み合わせに対する以上挙げた諸量は、それぞれ各校正機関またはX線装置について図や表にまとめられており、^{2), 5), 8), 9), 10), 11)} フィルタロ過法を用いる時の手引きとされている。これらの諸量に影響を与える因子には、X線管電圧やフィルタの材質および厚さの他に、X線管陽極の材質および角度、X線管球の窓による固有ロ過 (Inherent Filtration)、X線管電圧波形等があり、これらはX線装置により異なる。したがって、フィルタロ過法を用いてX線線量計等を試験・校正する場合には、用いるX線装置について線質を表わす量を明確にしておく必要がある。

3. 実 験

3.1 X線装置

本報告書において対象とするX線装置は、東芝 KXO-2050 特型である。本装置は、診断用X線装置を放射線管理用測定器の試験・校正用に一部仕様変更したものである。装置のブロック図を Fig. 1 に示す。装置は、高電圧発生器、テトロード管、X線管球、および制御部から構成される。高電圧発生器は、一次電圧を昇圧した後三相1.2ピーク整流を行い、リップル率3.4%の高電圧を発生する。高電圧発生器にはテトロード管 (特殊五極真空管) が接続されており、このテトロード管の内部電圧降下効果を利用してシリーズレギュレーションをおこなう。さらに、テトロード管出力を分圧・検出し、この信号を光ファイバーを用いた高周波変調伝送方式にてテトロード管のグリッドにフィードバックする。また、X線管球フィラメントの加熱は直流加熱方式である。これらの対策により、X線管電圧をリップル率0.5%以下の完全直流とすることができた。X線管電圧およびX線管電流の制御範囲は、50~125 kV および0.2~4.0 mA である。

X線管陽極はタングステン製で、その角度は 12° である。X線管球窓の固有口過は、アルミニウム 1.1 mm 当価である。装置には、X線管球に直列にX線管電流計が、また並列にX線管電圧計が接続されており、運転時における正確なX線管電圧および電流を知ることができる。

本装置は、上記条件で定出力運転することができる他に、単一パルスおよび連続パルス運転の機能を有する。この時の最大定格は、X線管電圧 150 kV 、X線管電流 1000 mA であり、X線パルス幅は $0.3\sim 10^4\text{ msec}$ である。

3.2 エネルギースペクトルの測定

測定装置の概略を Fig. 2に示す。X線管球—付加フィルター—コリメーター—検出器の順に配置されている。フィルタの材質は、銅および錫である。フィルタによって口過されたX線は強度が大きく、そのままでは検出器のパイルアップ効果により波高分布が乱れる。そのため、検出器前面に $0.5\text{ mm}\phi$ のコリメータを設置し、検出器に入射するX線光子数を制限した。コリメータは、3層から構成され、X線管球側から鉛(4 mm t)、カドミウム(2 mm t)、銅(1 mm t)である。これらは、それぞれ前コリメータ層中で発生する蛍光X線の影響を取り除くために設けられている。

使用した検出器は、厚さ 0.5 mm Be窓を持つ高純度 Ge 検出器($4.2\text{ cm}\phi\times 4.2\text{ cm}$)である。検出器のエネルギー分解能は、 32 、 59.5 、 122 keV γ 線に対して、それぞれ 0.89 、 1.0 、 1.1 keV である。検出器は、部屋の壁等からの散乱X線を遮蔽するために、鉛により側面を覆ってある。検出されたX線は、 1 kch 波高分析器で波高分析され、磁気テープに収録される。また、データの処理等は大型計算機(FACOM M-380)にて行った。

3.3 実効エネルギー等の測定

2章に記したように、X線の実効エネルギーは、半価層から決定される量である。したがって、決められたX線管電圧とフィルタの組み合わせにより得られるX線に対して、吸収板(アルミニウム板または銅板)による照射線量率の減衰の様子を測定する必要がある。

測定装置の概略を Fig. 3に示す。X線管球—付加フィルター—吸収板—検出器の順に配置されている。X線は、頂角 17° の円錐状に放射される。照射野は、ツープス先端で約 80 cm^2 である。X線管球と検出器の間には鉛を含む衝立てを設置し、X線管球からの漏洩X線が測定に影響しないように遮蔽した。吸収板は、この衝立ての前面に設置した。

使用した検出器は、Victreen社製550-4型電離箱式照射線量計である。電離箱の内容積は 32.6 cm^3 であり、エネルギー依存性は $21\sim 520\text{ keV}$ で $\pm 6\%$ である。

X線のエネルギーが低い場合、X線管球—検出器間の空気層によるX線の散乱効果が顕著であり、実効エネルギー値に影響する可能性がある。そこで本測定においては、実際に照射線量計等を試験・校正する時に最も一般的な距離であるX線管球陽極から 2 m の位置に検出器を設置した。

異なる厚さの吸収板を設置し、一定時間内の照射線量の測定値から減衰率を求めた。照射時間中のX線出力の安定をX線管電圧および電流により確認しながら測定をおこなった。

4. 結 果

4.1 エネルギースペクトル

付加フィルタを使用しない時のX線のエネルギー分布をX線管電圧50, 60, 80, 100および120 kVについて Fig. 4.1 ~ Fig. 4.5に示す。X線管球窓の固有透過(アルミニウム1.1mm等価)および空気層の吸収により10 keV以下の低エネルギーX線は現われず、結果的に連続X線は緩やかなピークを持ったものになっている。X線管電圧が80, 100および120 kVにおいては、タングステンの $K\alpha_1$, $K\alpha_2$, $K\beta_1$ および $K\beta_2$ の各特性X線の鋭いピークが見られる。

付加フィルタを使用した時のX線のエネルギースペクトルを Fig. 5 ~ Fig. 8中に実線により示す。これらは、厳密には検出器の応答の波高分布であるが、次章で述べる理由により、エネルギースペクトルと考えてもさしつかえない。これらのエネルギースペクトルは、2章において記した Resolution に基づき分類されている。すなわち、wide spectrum series ($Re \approx 50\%$: Fig. 5.1 ~ Fig. 5.5), Middle spectrum series ($Re \approx 40\%$: Fig. 6.1 ~ Fig. 6.5), Narrow spectrum series ($Re \approx 30\%$: Fig. 7.1 ~ Fig. 7.5), および Extra-narrow series ($Re \approx 20\%$: Fig. 8.1 ~ Fig. 8.5) の4シリーズである。この中の Wide および Narrow spectrum series は、ISOが提唱するX線シリーズに相当するものである。X線管電圧が同一の各シリーズのスペクトルを比較すると、フィルタの厚さが増すにつれ単色化が進んでいく様子が顕著に見られる。

4.2 実効エネルギー等

X線管電圧50 ~ 120 kVについて測定した吸収板によるX線の減衰率を吸収板の厚さの関数として Fig. 9 ~ Fig. 13に示す。グラフより、一般的にフィルタによる単色化が進まない線質のX線程(フィルタが薄い程)、X線の減衰が速やかであると言える。

Fig. 9 ~ Fig. 13 から、各X線について第一半価層および第二半価層を求めた。また、Fig. 14に示す半価層と実効エネルギーの関係から¹²⁾、実効エネルギーを決定した。さらに、第一および第二半価層から均等度を、X線管電圧および実効エネルギーから線質指標を求めた。求められたこれらの諸量を Table 1 ~ Table 4に示す。これらの表は、エネルギースペクトルの場合と同様に Resolution に基づいて分類されている。すなわち、Wide spectrum series ($Re \approx 50\%$: Table 1), Middle spectrum series ($Re \approx 40\%$: Table 2), Narrow spectrum series ($Re \approx 30\%$: Table 3), および Extra-narrow spectrum series ($Re \approx 20\%$: Table 4) である。

5. 検 討

5.1 エネルギースペクトル

高純度 Ge 検出器により測定されるものは、厳密にはX線に対する検出器の応答の波高分布である。しかし、検出器のエネルギー分解能がX線のエネルギー分布幅に比べて十分に良く、加えて入射X線が検出器内で全吸収されかつX線のエネルギー分布範囲内でピーク効率が一定と見なされる条件下では、上記波高分布をX線のエネルギースペクトルと見なすことができる。Fig. 2 に示す幾何学的条件において、120 keV以下の十分にコリメートされたX線を測定する場合は、上記条件を満たしており、Fig. 5～Fig. 8の実線は(1)式中の ϕ_E を表わすと言える。

次に、(3)式によりエネルギースペクトルから照射線量スペクトルを求めた。結果をFig. 5～Fig. 8中に破線で示す。各スペクトルはエネルギースペクトルにピーク値を合わせてある。また、この時に用いた $E \cdot \mu_{en}^{air}(E)$ をFig. 15に示す。 $E \cdot \mu_{en}^{air}(E)$ は、光子エネルギーが増加するにつれて、50 keVまでは急激に減少するが60 keV以上では緩やかに増加し、また50～80 keVの範囲においてはほぼ一定であると思わせる。 $E \cdot \mu_{en}^{air}(E)$ は、エネルギースペクトルを照射線量スペクトルに変換する時に、荷重関数の役割を持っているので、この値の変化は照射線量スペクトルのシフトを引き起こす。つまり、50 keV以下の領域では、照射線量スペクトルはエネルギースペクトルより低エネルギー側に位置し、一方80 keV以上の領域ではこの逆の傾向となる。また、 $E \cdot \mu_{en}^{air}(E)$ がほぼ一定である50～80 keVの範囲においては、両スペクトルの間に目立ったずれは見られない。

(1)式および(4)式を用いて、X線の平均エネルギーと照射線量に関する平均エネルギーを計算した。結果をTable 1～Table 4に示す。先に述べたエネルギースペクトルと照射線量スペクトルのいずれの特徴を反映し、平均エネルギーに関しても同様の傾向を示す。すなわち、60 keVを境に低エネルギー側では照射線量に関する平均エネルギーの方が低く、高エネルギー側ではその逆に高い。しかし、この特徴はフィルタによる単色化が強まるにつれ（つまりX線のエネルギー分布幅が狭まるにつれ）薄れていき、Extra-narrow series ($Re \approx 20\%$; Table 4)において両平均エネルギーは1 keV以内で一致する。

5.2 X線の線質を表わす諸量の相互比較

前節までの測定および検討により、X線の線質を表わす諸量を得た。すなわち、エネルギー代表値に関するものとして実効エネルギーおよび平均エネルギー、また単色化の程度に関するものとして均等度、線質指標およびResolutionである。Table 1～Table 4に示すこれらの量から、相互の関係を定量化することは困難であるが、定性的な説明は可能である。

エネルギー代表値として従来から用いられてきた実効エネルギーとISOが提唱する平均エネルギーとの差は、40～80 keVの領域において、3 keV程度の範囲内で一致する。90 keV以上では両者の差は大きくなり、最大7 keV程度である。全体的に見て、両者は一致していると言える。

照射線量に関する平均エネルギーの方が、より実効エネルギーに近い値を示す。これは、実効エネルギーが照射線量の測定値から決められる量であることによると考えられる。

単色化の程度を表わす3つの量のまとめを Table 5 に示す。ISO が提唱する Wide spectrum series に対して均等度 0.80 ~ 0.86 および線質指標 0.62 ~ 0.70 が対応し、Narrow spectrum series に対して均等度 0.88 ~ 0.97 および線質指標 0.76 ~ 0.84 が対応する。また Table 5 より、X線の単色化が進み Resolution が小さくなるにつれ、均等度および線質指標が1に近づく傾向を確認することができる。

最後に、各X線管電圧とフィルタによって得られるX線の出力の代表的な値についても Table 1 ~ Table 4 の最右欄に挙げる。これらの値は、実際に γ 線線量計または線量率計を試験・校正する時に、照射線量率の目安として有益であると考ええる。

6. 結 論

X線装置を用いて γ 線線量計または線量率計を試験・校正する時に、明確にしなければならない線質を表わす諸量をX線管電圧50 ~ 120 kV の範囲について測定した。X線エネルギースペクトルから平均エネルギーおよび Resolution を、また、半価層から実効エネルギー、均等度および線質指標をそれぞれ求めた。これらの諸量を Resolution を基に分類し、Wide, Middle, Narrow および Extra-narrow spectrum series にまとめた。現在、X線の線質の表示法については、従来より用いられてきたものと ISO が提唱する表示法への移行期にある。したがって、両表示法による相異がどの程度であるかを明らかにしておくことが望ましく、本調査により、以下のことが明らかになった。

- (1) 40 ~ 80 keV の範囲においては、実効エネルギーは平均エネルギーと3 keV 以内で一致する。
- (2) 90 keV 以上では、実効エネルギーと平均エネルギーの差は最大で7 keV 程度である。
- (3) 対象とするエネルギー範囲全体について、照射線量に関する平均エネルギーの方が、単なる平均エネルギーよりも実効エネルギーに近い値を示す。
- (4) Resolution, 均等度および線質指標の相互関係を得ることができた。

本報告においては、ISO が提唱する Wide および Narrow spectrum series に加え、Middle および Extra-narrow spectrum series を導入した。新しく追加した Middle spectrum series は、ISO が提唱する2シリーズの中間に当たり、Extra-narrow spectrum series はさらに単色化が進んだものである。200 keV 以下の領域において、感度が高くかつ大きく変化するGM計数管、NaI (Tl) 検出器、フィルムおよび TLD のエネルギー特性試験等においては、最も単色に近い Extra-narrow spectrum series が有効である。

最後に、X線装置を用いた放射線測定器の校正法における今後の課題は、ISO が提唱する線質の表示法による国家標準とのトレーサビリティの確立であろうと考える。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、有益な助言をいただいた加藤 朗放射線計測協会技術顧問に感謝いたします。

照射線量に関する平均エネルギーの方が、より実効エネルギーに近い値を示す。これは、実効エネルギーが照射線量の測定値から決められる量であることによると考えられる。

単色化の程度を表わす3つの量のまとめを Table 5 に示す。ISO が提唱する Wide spectrum series に対して均等度 0.80 ~ 0.86 および線質指標 0.62 ~ 0.70 が対応し、Narrow spectrum series に対して均等度 0.88 ~ 0.97 および線質指標 0.76 ~ 0.84 が対応する。また Table 5 より、X線の単色化が進み Resolution が小さくなるにつれ、均等度および線質指標が1に近づく傾向を確認することができる。

最後に、各X線管電圧とフィルタによって得られるX線の出力の代表的な値についても Table 1 ~ Table 4 の最右欄に挙げる。これらの値は、実際に γ 線線量計または線量率計を試験・校正する時に、照射線量率の目安として有益であると考ええる。

6. 結 論

X線装置を用いて γ 線線量計または線量率計を試験・校正する時に、明確にしなければならない線質を表わす諸量をX線管電圧50 ~ 120 kV の範囲について測定した。X線エネルギースペクトルから平均エネルギーおよび Resolution を、また、半価層から実効エネルギー、均等度および線質指標をそれぞれ求めた。これらの諸量を Resolution を基に分類し、Wide, Middle, Narrow および Extra-narrow spectrum series にまとめた。現在、X線の線質の表示法については、従来より用いられてきたものと ISO が提唱する表示法への移行期にある。したがって、両表示法による相異がどの程度であるかを明らかにしておくことが望ましく、本調査により、以下のことが明らかになった。

- (1) 40 ~ 80 keV の範囲においては、実効エネルギーは平均エネルギーと3 keV 以内で一致する。
- (2) 90 keV 以上では、実効エネルギーと平均エネルギーの差は最大で7 keV 程度である。
- (3) 対象とするエネルギー範囲全体について、照射線量に関する平均エネルギーの方が、単なる平均エネルギーよりも実効エネルギーに近い値を示す。
- (4) Resolution, 均等度および線質指標の相互関係を得ることができた。

本報告においては、ISO が提唱する Wide および Narrow spectrum series に加え、Middle および Extra-narrow spectrum series を導入した。新しく追加した Middle spectrum series は、ISO が提唱する2シリーズの中間に当たり、Extra-narrow spectrum series はさらに単色化が進んだものである。200 keV 以下の領域において、感度が高くかつ大きく変化するGM計数管、NaI (Tl) 検出器、フィルムおよび TLD のエネルギー特性試験等においては、最も単色に近い Extra-narrow spectrum series が有効である。

最後に、X線装置を用いた放射線測定器の校正法における今後の課題は、ISO が提唱する線質の表示法による国家標準とのトレーサビリティの確立であろうと考える。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、有益な助言をいただいた加藤 朗放射線計測協会技術顧問に感謝いたします。

照射線量に関する平均エネルギーの方が、より実効エネルギーに近い値を示す。これは、実効エネルギーが照射線量の測定値から決められる量であることによると考えられる。

単色化の程度を表わす3つの量のまとめを Table 5 に示す。ISO が提唱する Wide spectrum series に対して均等度 0.80 ~ 0.86 および線質指標 0.62 ~ 0.70 が対応し、Narrow spectrum series に対して均等度 0.88 ~ 0.97 および線質指標 0.76 ~ 0.84 が対応する。また Table 5 より、X線の単色化が進み Resolution が小さくなるにつれ、均等度および線質指標が1に近づく傾向を確認することができる。

最後に、各X線管電圧とフィルタによって得られるX線の出力の代表的な値についても Table 1 ~ Table 4 の最右欄に挙げる。これらの値は、実際に γ 線線量計または線量率計を試験・校正する時に、照射線量率の目安として有益であると考ええる。

6. 結 論

X線装置を用いて γ 線線量計または線量率計を試験・校正する時に、明確にしなければならない線質を表わす諸量をX線管電圧50 ~ 120 kV の範囲について測定した。X線エネルギースペクトルから平均エネルギーおよび Resolution を、また、半価層から実効エネルギー、均等度および線質指標をそれぞれ求めた。これらの諸量を Resolution を基に分類し、Wide, Middle, Narrow および Extra-narrow spectrum series にまとめた。現在、X線の線質の表示法については、従来より用いられてきたものと ISO が提唱する表示法への移行期にある。したがって、両表示法による相異がどの程度であるかを明らかにしておくことが望ましく、本調査により、以下のことが明らかになった。

- (1) 40 ~ 80 keV の範囲においては、実効エネルギーは平均エネルギーと3 keV 以内で一致する。
- (2) 90 keV 以上では、実効エネルギーと平均エネルギーの差は最大で7 keV 程度である。
- (3) 対象とするエネルギー範囲全体について、照射線量に関する平均エネルギーの方が、単なる平均エネルギーよりも実効エネルギーに近い値を示す。
- (4) Resolution, 均等度および線質指標の相互関係を得ることができた。

本報告においては、ISO が提唱する Wide および Narrow spectrum series に加え、Middle および Extra-narrow spectrum series を導入した。新しく追加した Middle spectrum series は、ISO が提唱する2シリーズの中間に当たり、Extra-narrow spectrum series はさらに単色化が進んだものである。200 keV 以下の領域において、感度が高くかつ大きく変化するGM計数管、NaI (Tl) 検出器、フィルムおよび TLD のエネルギー特性試験等においては、最も単色に近い Extra-narrow spectrum series が有効である。

最後に、X線装置を用いた放射線測定器の校正法における今後の課題は、ISO が提唱する線質の表示法による国家標準とのトレーサビリティの確立であろうと考える。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、有益な助言をいただいた加藤 朗放射線計測協会技術顧問に感謝いたします。

References

- 1) Ronald L. Kathren : Health Phys.,29,143 (1975)
- 2) International Organization for Standardization : ISO-4037-1979 (E)
- 3) Ronald L. Kathren et al. : Health Phys.,21,285 (1971)
- 4) Toyofuku F. et al. : 日本医放会誌 ,44,1091 (1984) (in Japanese)
- 5) Minami K. : JAERI 5002,243 (1960) (in Japanese)
- 6) International Commission on Radiological Units and Measurements : Report 10b (1962)
- 7) Matsumoto T. and Naoi J. : 電総研彙報 ,47 [9, 10], 822 (1983) (in Japanese)
- 8) Takahashi K. : X線物理実験法 2章, 丸善 (1941) (in Japanese)
- 9) W.W.Seelentag et al. : GSF-Bericht S 560 (1979)
- 10) L.H.J.Peaple and A.K.Burt : Phys. Med. Biol.,14,73 (1969)
- 11) A.K.Burt : Phys. Med. Biol.,14,131 (1969)
- 12) E.Storm and H.I.Israel : LA-3753 (1967)

Table 1 Specifications of X-ray quality for the "wide spectrum series"

Tube Voltage (kV)	Added Filter Thickness (mm)	Half-Value Layer (mm)		Effective Energy (keV)	Homogeneity Coef.	Quality Index	Spectrum			X-Ray Output at 1 m (Rh ⁻¹ /mA)		
		First	Second				Mean Energy(keV)		Fig. No			
							Photon	Exposure			Resolution (%)	
50	Cu 0.1	Al 2.55	Al 2.95	3.10	0.86	0.62	35.7	32.6	53.1	Fig. 5.1	6.1	
60	Cu 0.3	Cu 0.170	Cu 0.205	4.15	0.83	0.69	44.0	41.9	52.7	"	5.2	3.0
80	Cu 0.5	Cu 0.340	Cu 0.430	5.30	0.80	0.66	55.4	53.7	52.0	"	5.3	5.4
100	Cu 1.0	Cu 0.610	Cu 0.720	6.65	0.85	0.67	67.1	67.7	54.8	"	5.4	6.5
120	Cu 2.0	Cu 1.120	Cu 1.310	8.45	0.86	0.70	85.1	87.8	50.8	"	5.5	5.9

Inherent filtration: 1.1mmAl equivalent

Table 2 Specifications of X-ray quality for the "Middle spectrum series"

Tube Voltage (kV)	Added Filter Thickness (mm)	Half-Value Layer (mm)		Effective Energy (keV)	Homogeneity Coef.	Quality Index	Spectrum			X-Ray Output at 1 m (mRh ⁻¹ /mA)		
		First	Second				Mean Energy(keV)		Fig. No			
							Photon	Exposure			Resolution (%)	
50	Cu 0.3	Al 3.60	Al 3.92	3.58	0.92	0.72	39.2	37.6	38.8	Fig. 6.1	522	
60	Cu 0.5	Cu 0.210	Cu 0.231	4.45	0.91	0.74	46.3	45.0	39.7	"	6.2	537
80	Cu 1.0	Cu 0.448	Cu 0.492	5.90	0.91	0.74	59.9	59.5	42.7	"	6.3	753
100	Cu 3.0	Cu 0.980	Cu 1.045	8.00	0.94	0.80	76.6	78.0	40.7	"	6.4	854
120	Cu 5.0	Cu 1.550	Cu 1.690	9.60	0.92	0.80	90.8	93.2	39.6	"	6.5	574

Inherent filtration: 1.1mmAl equivalent

Table 3 Specifications of X-ray quality for the "Narrow spectrum series"

Tube Voltage (kV)	Added Filter Thickness (mm)	Half-Value Layer (mm)		Effective Energy (keV)	Homogeneity Coef.	Quality Index	Spectrum				
		First	Second				Mean Energy (keV)		Resolution (%)	Fig. No.	
							Photon	Exposure			Photon
50	Cu 0.5	Al 4.11	Al 4.42	38.0	0.93	0.76	41.6	41.0	29.8	Fig. 7.1	262
60	Cu 1.0	Cu 0.260	Cu 0.295	48.0	0.88	0.80	49.5	48.9	29.1	" 7.2	170
80	Cu 2.0	Cu 0.578	Cu 0.630	64.5	0.92	0.81	64.4	64.6	32.3	" 7.3	247
100	Cu 5.0	Cu 1.165	Cu 1.205	84.0	0.97	0.84	80.9	82.0	28.7	" 7.4	94
120	Cu 7.0	Cu 1.720	Cu 1.810	100.0	0.95	0.83	93.8	95.7	33.3	" 7.5	166

Inherent filtration : 1.1mmAl equivalent

Table 4 Specifications of X-ray quality for the "Extra-narrow spectrum series"

Tube Voltage (kV)	Added Filter Thickness (mm)	Half-Value Layer (mm)		Effective Energy (keV)	Homogeneity Coef.	Quality Index	Spectrum				
		First	Second				Mean Energy (keV)		Resolution (%)	Fig. No.	
							Photon	Exposure			Photon
50	Cu 1.0	Al 4.90	Al 5.30	41.0	0.93	0.82	45.1	45.4	20.4	Fig. 8.1	33
60	Cu 2.0	Cu 0.325	Cu 0.350	52.5	0.93	0.88	53.4	54.0	18.7	8.2	34
80	Cu 4.0	Cu 0.690	Cu 0.694	68.5	0.99	0.86	68.2	68.8	22.8	8.3	27
100	Cu 7.0	Cu 1.280	Cu 1.305	88.0	0.98	0.88	83.5	84.5	23.0	8.4	29
120	Sn 4.0	Cu 1.925	Cu 2.015	106.0	0.96	0.88	101.8	102.8	22.0	8.5	32

Inherent Filtration : 1.1mmAl equivalent

Table 5 Comparison of specifications for the degree of X-ray filtration

X-ray series	Resolution	Homogeneity Coefficient	Quality Index
Wide spectrum series	~ 50%	0.80 ~ 0.86	0.62 ~ 0.70
Middle spectrum series	~ 40%	0.91 ~ 0.94	0.72 ~ 0.80
Narrow spectrum series	~ 30%	0.88 ~ 0.97	0.76 ~ 0.84
Extra-narrow spectrum series	~ 20%	0.93 ~ 0.99	0.82 ~ 0.88

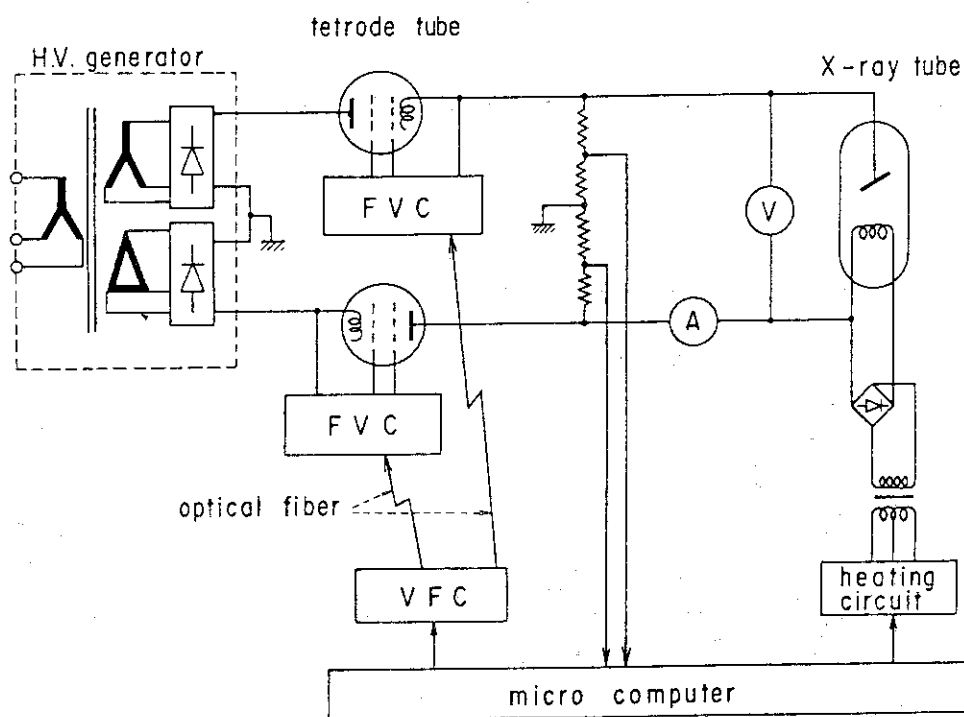


Fig. 1 Blok diagram of X-ray generator

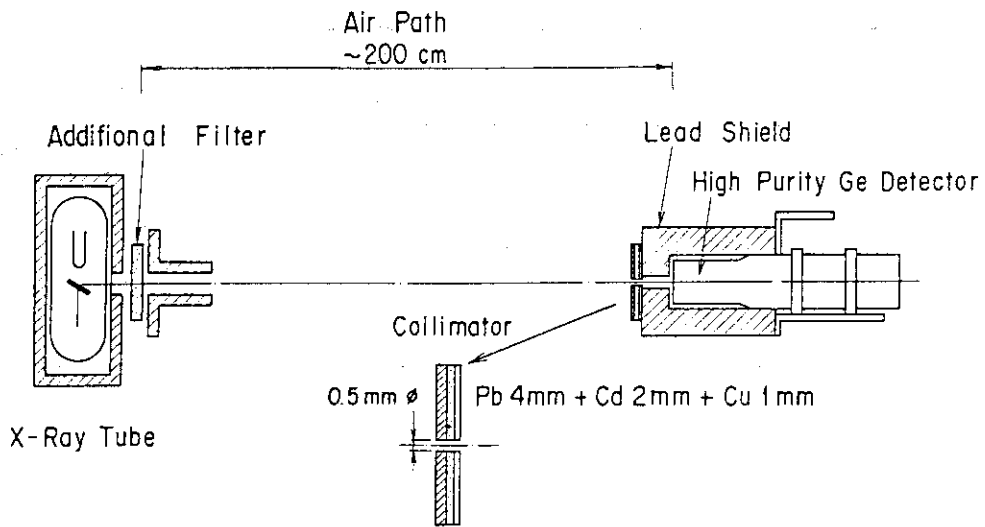


Fig. 2 Schematic diagram of experimental system for X-ray energy spectrum

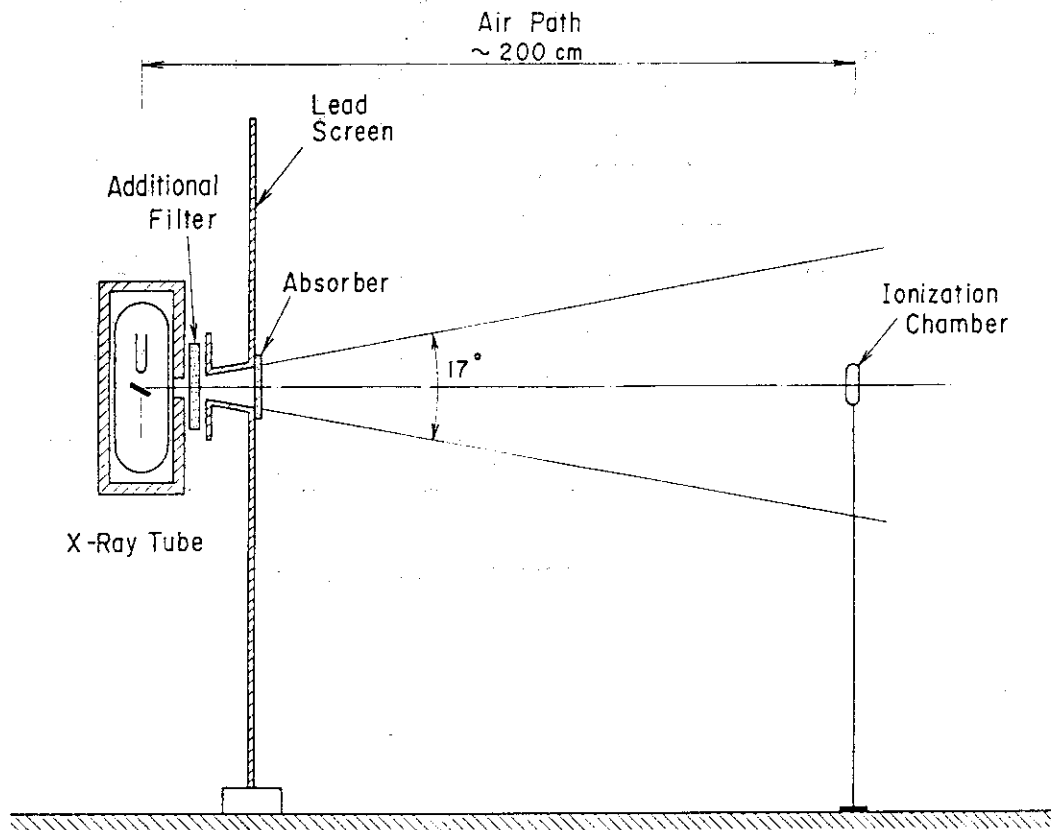


Fig. 3 Schematic diagram of experimental system for half value layer

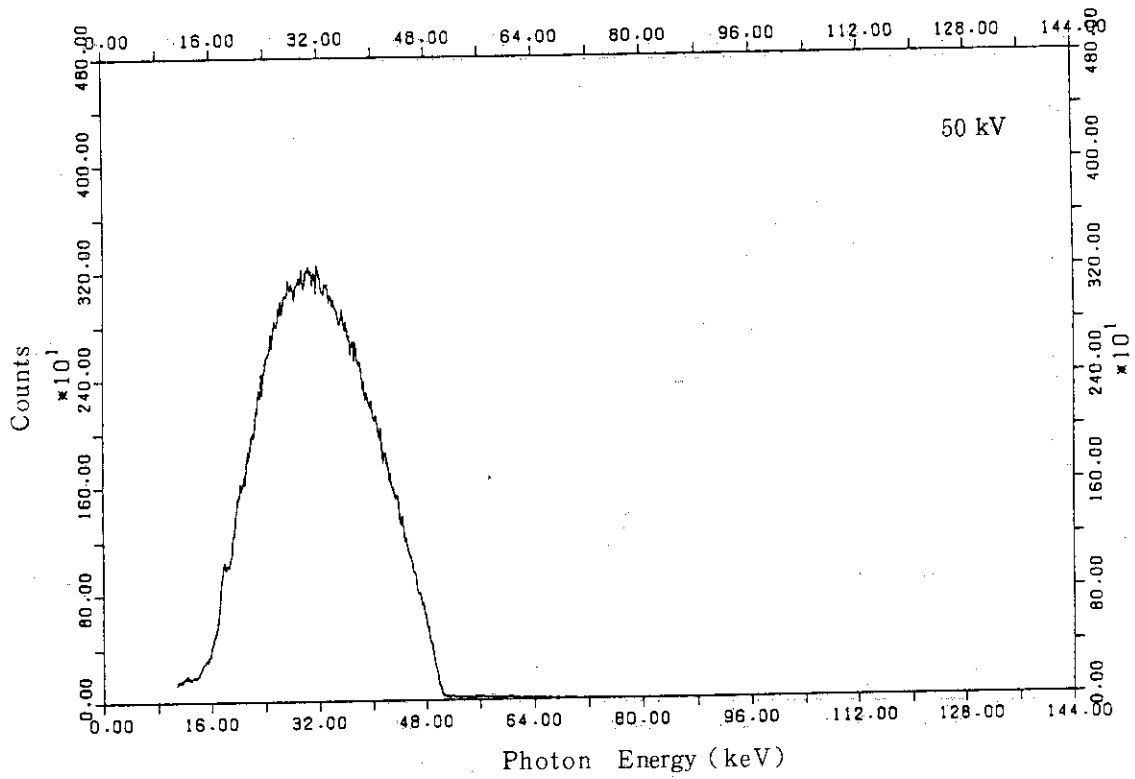


Fig. 4.1 Energy distribution of X-ray at 50 kV of X-ray tube potential

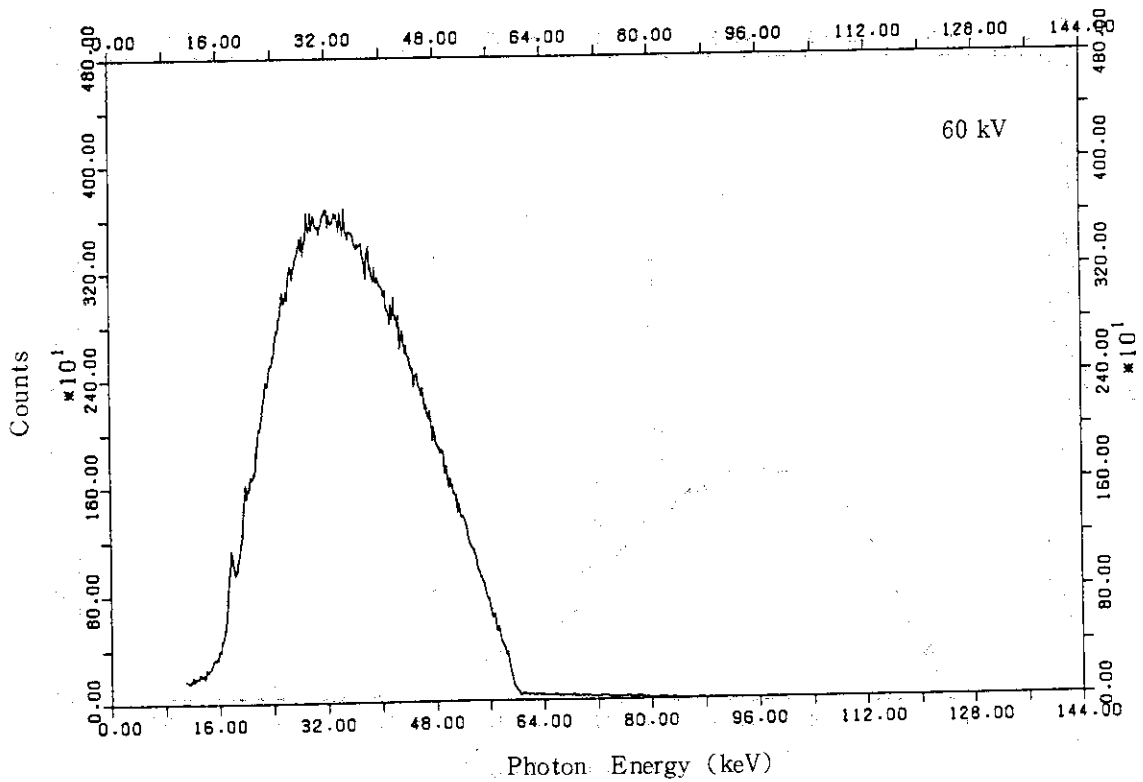


Fig. 4.2 Energy distribution of X-ray at 60 kV of X-ray tube potential

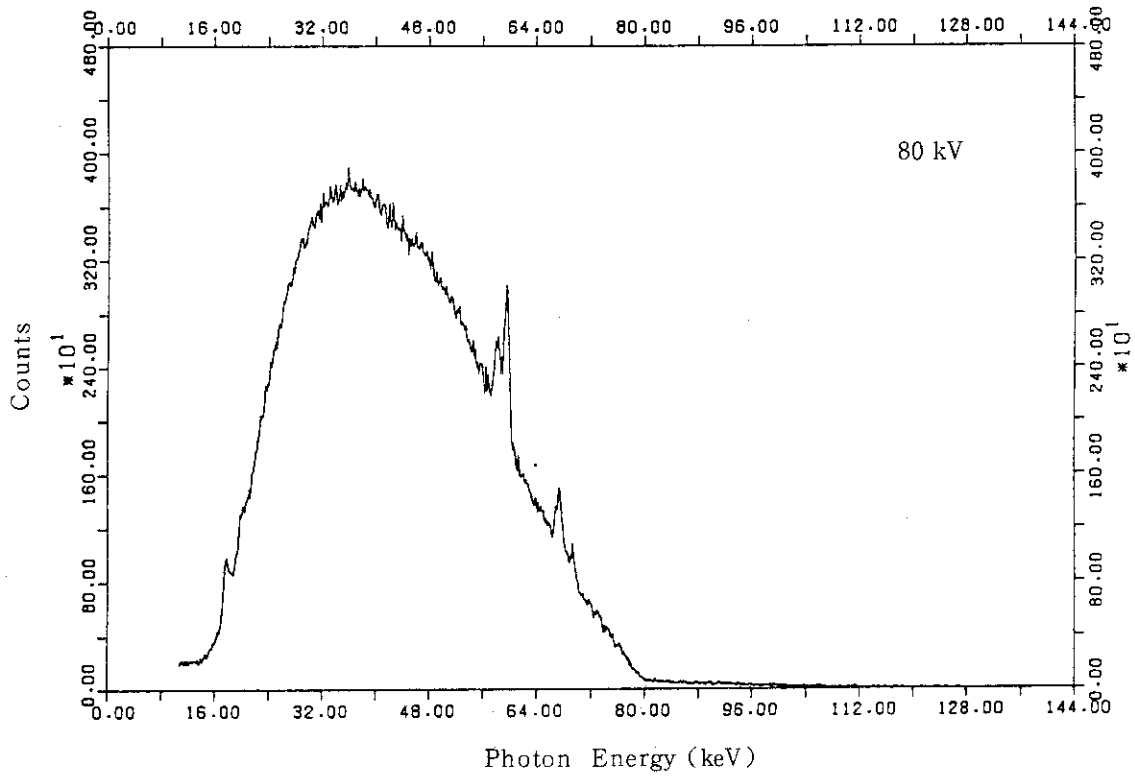


Fig. 4.3 Energy distribution of X-ray at 80 kV of X-ray tube potential

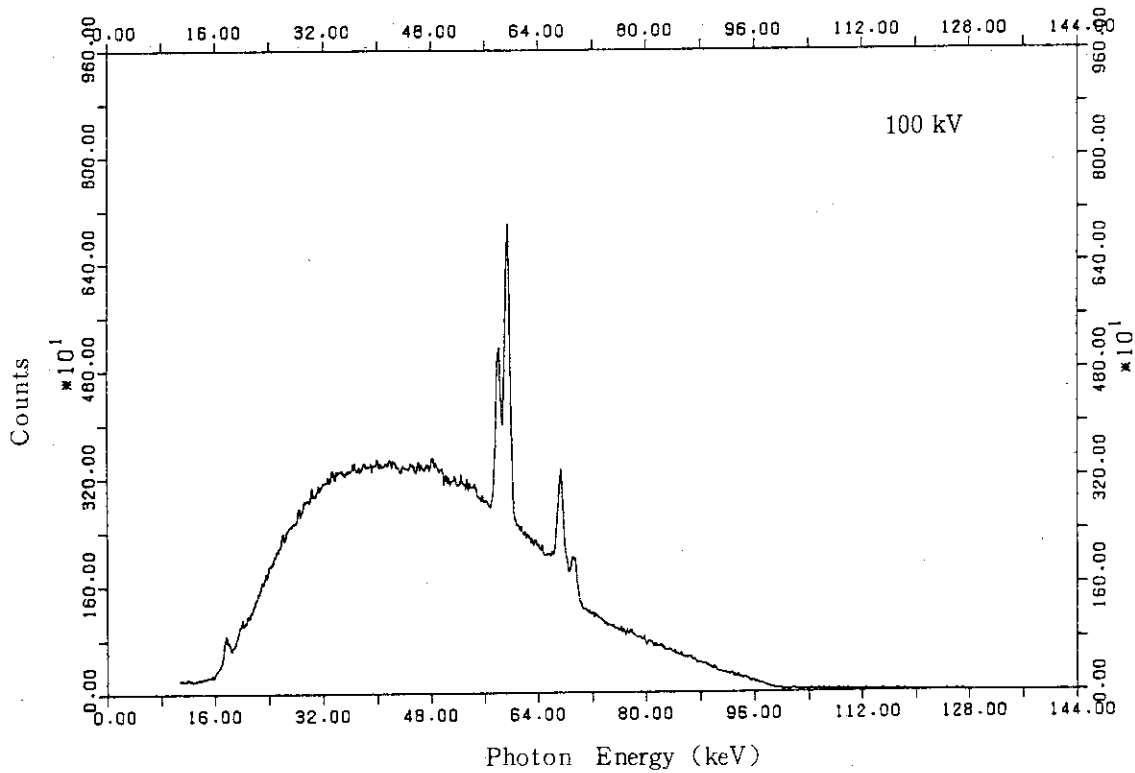


Fig. 4.4 Energy distribution of X-ray at 100 kV of X-ray tube potential

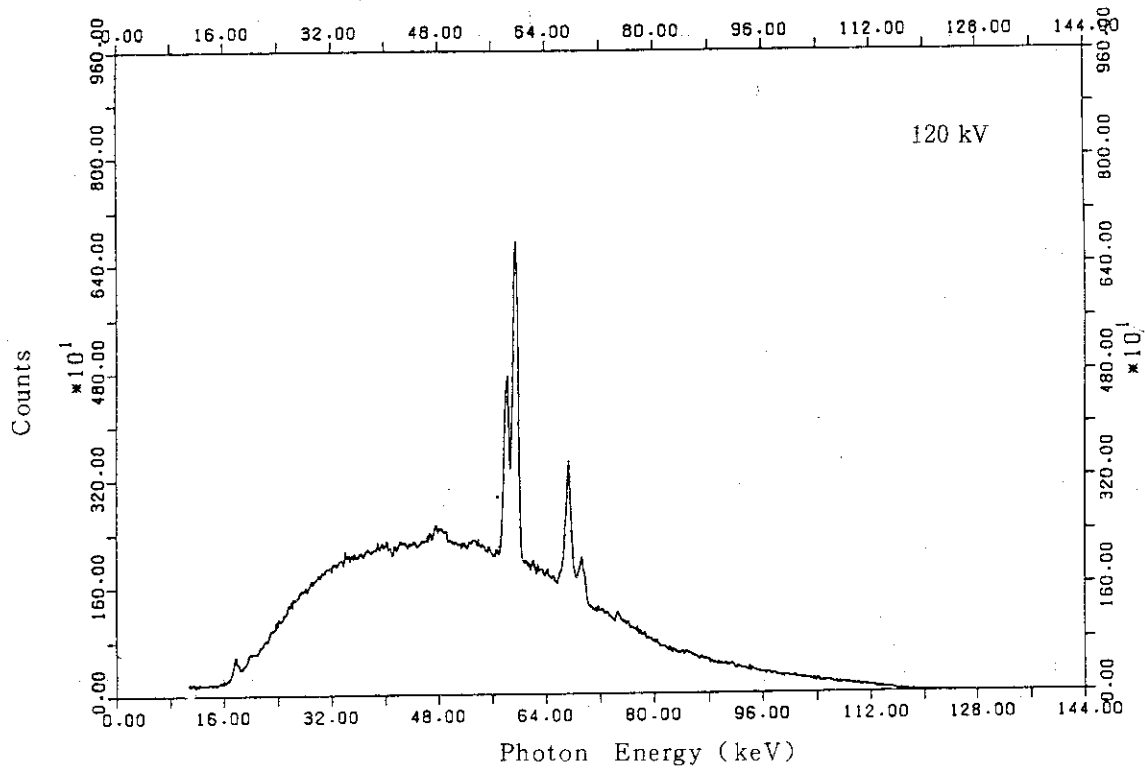


Fig. 4.5 Energy distribution of X-ray at 120 kV of X-ray tube potential

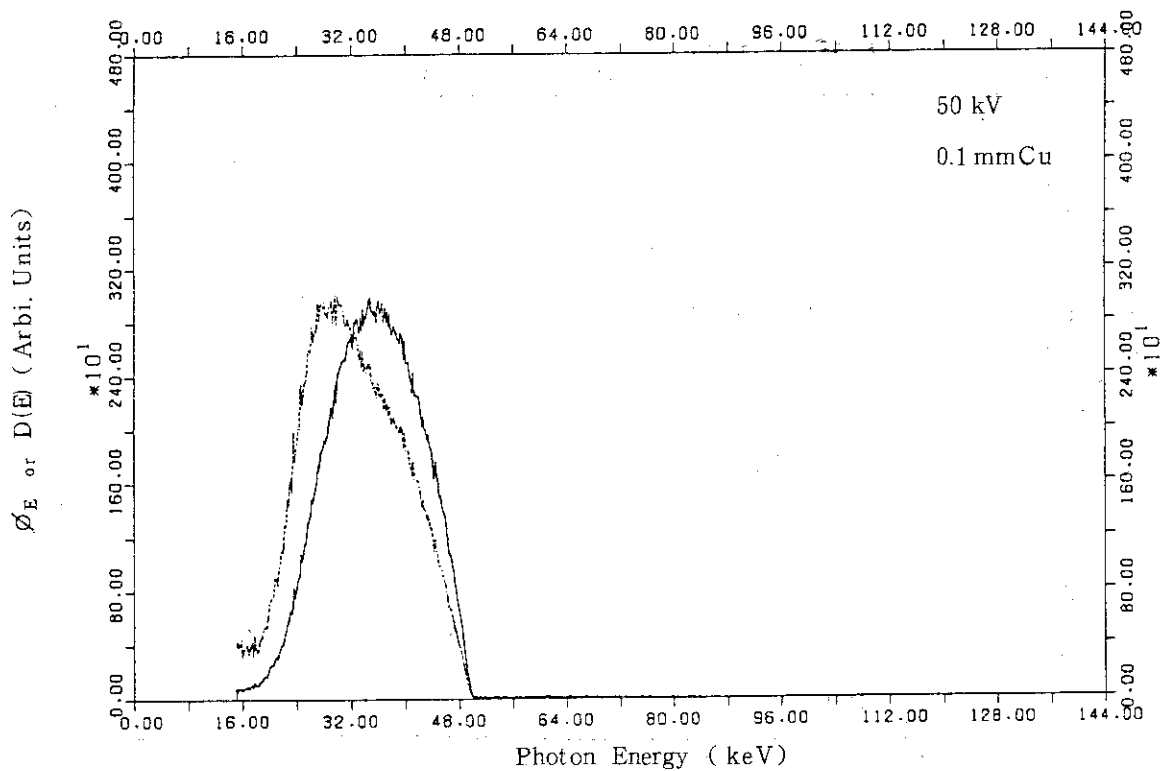


Fig. 5.1 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Wide spectrum series".

X-ray tube potential : 50 kV
 Additional filter : 0.1 mm Cu

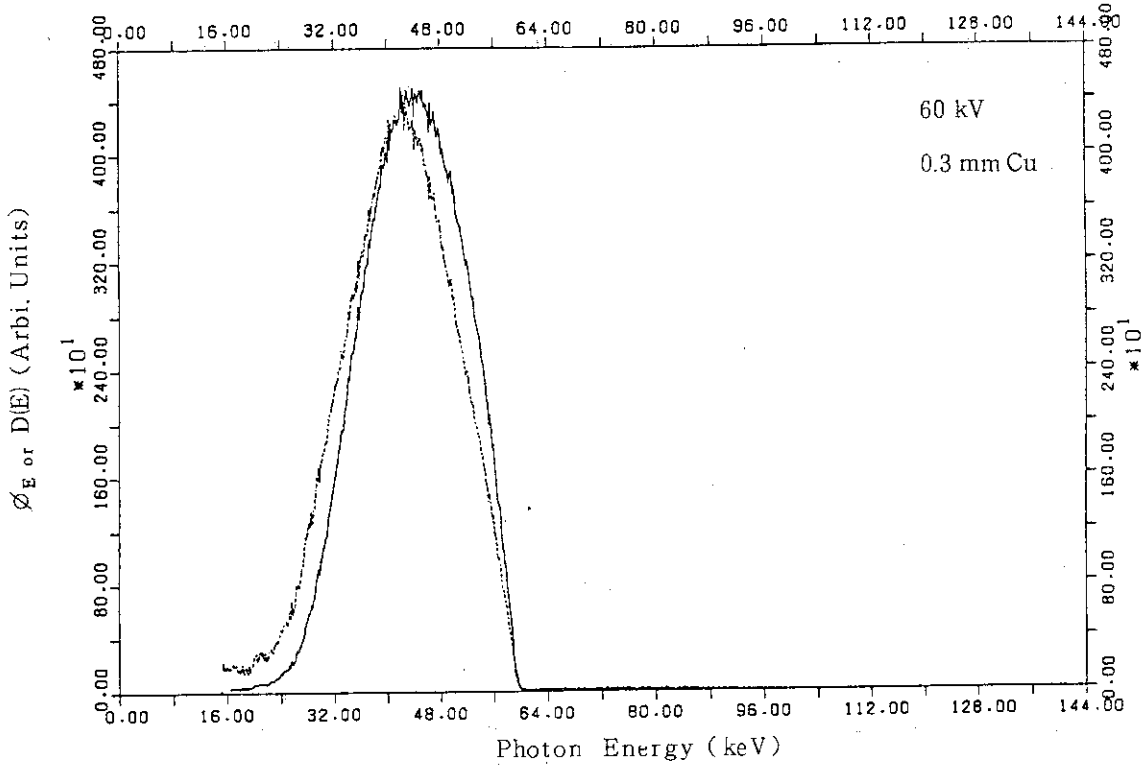


Fig. 5.2 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Wide spectrum series".
 X-ray tube potential : 60 kV
 Additional filter : 0.3 mm Cu

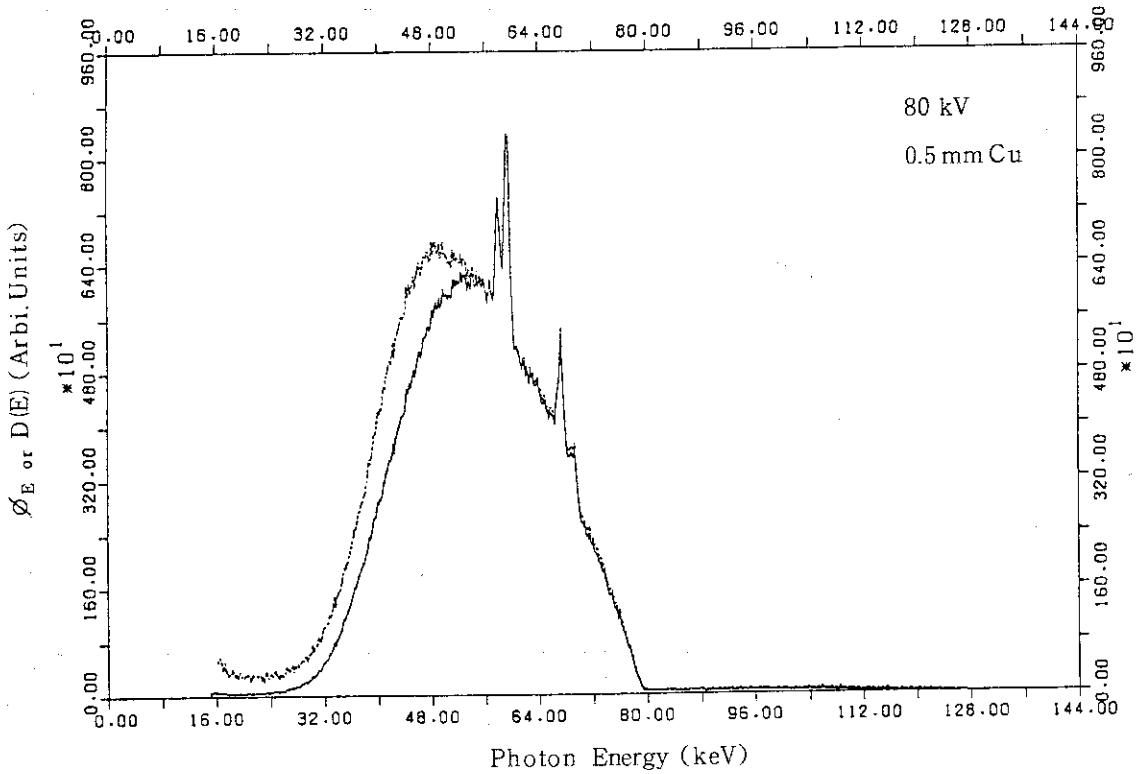


Fig. 5.3 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Wide spectrum series".
 X-ray tube potential : 80 kV
 Additional filter : 0.5 mm Cu

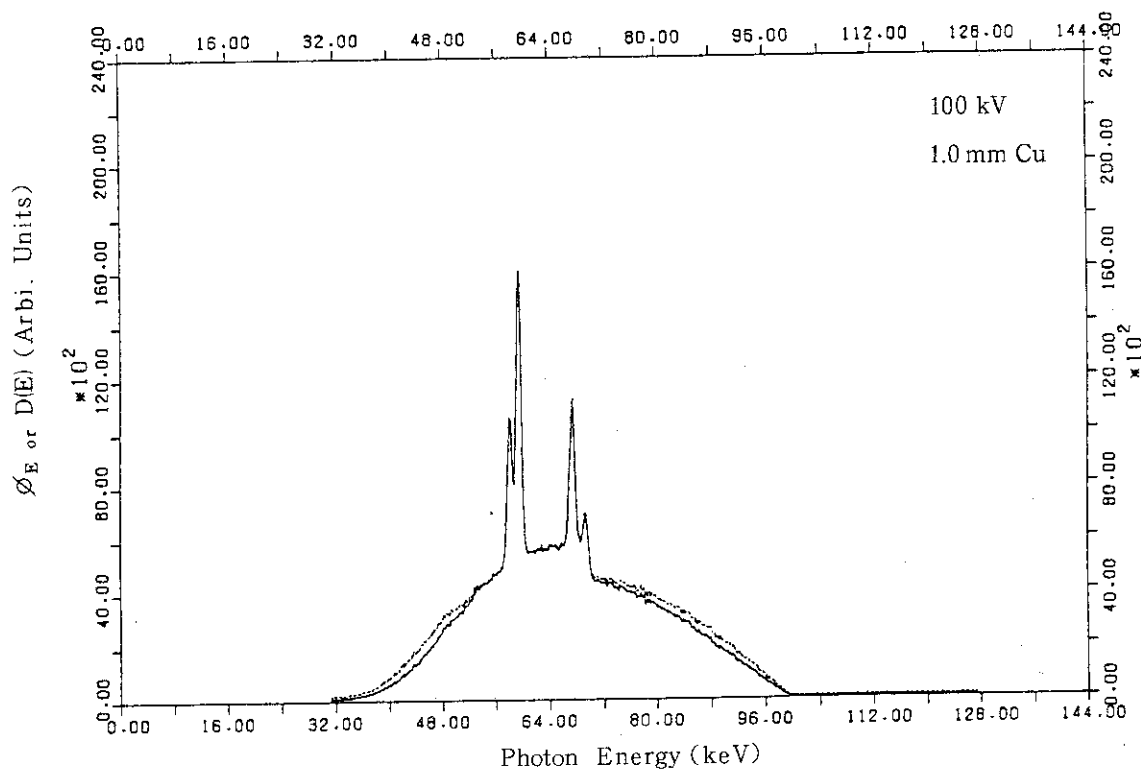


Fig. 5.4 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Wide spectrum series".

X-ray tube potential : 100 kV
 Additional filter : 1.0 mm Cu

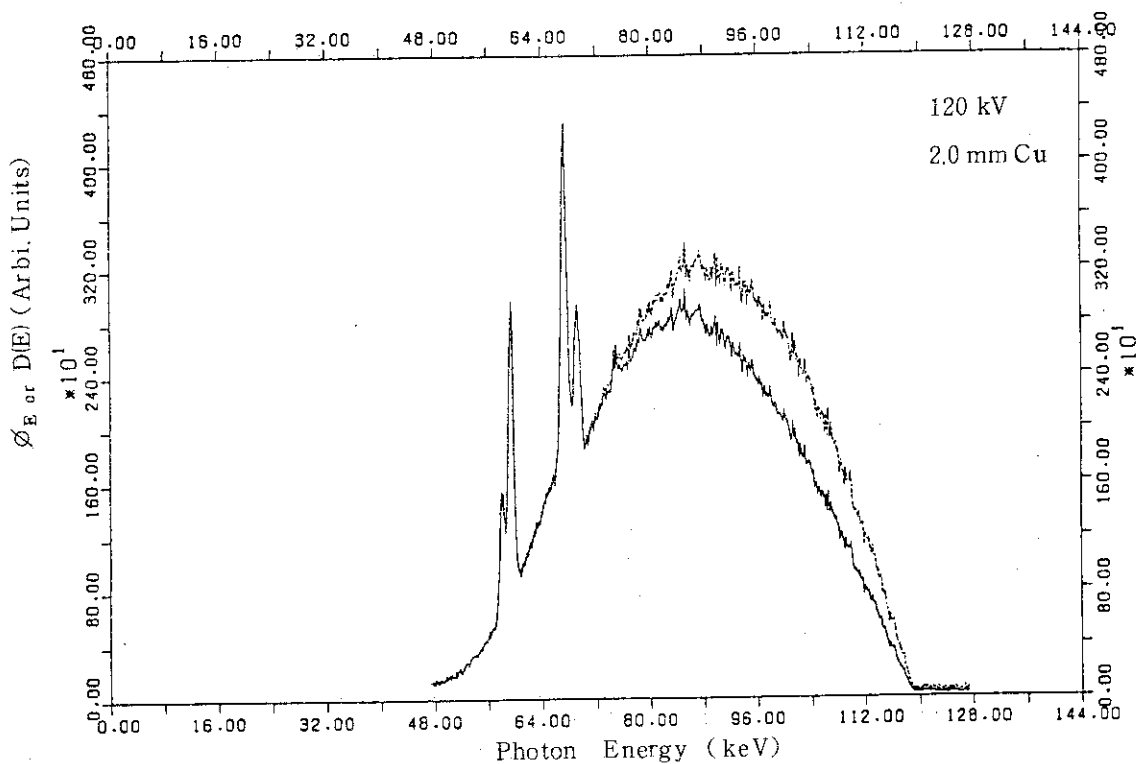


Fig. 5.5 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Wide spectrum series".

X-ray tube potential : 120 kV
 Additional filter : 2.0 mm Cu

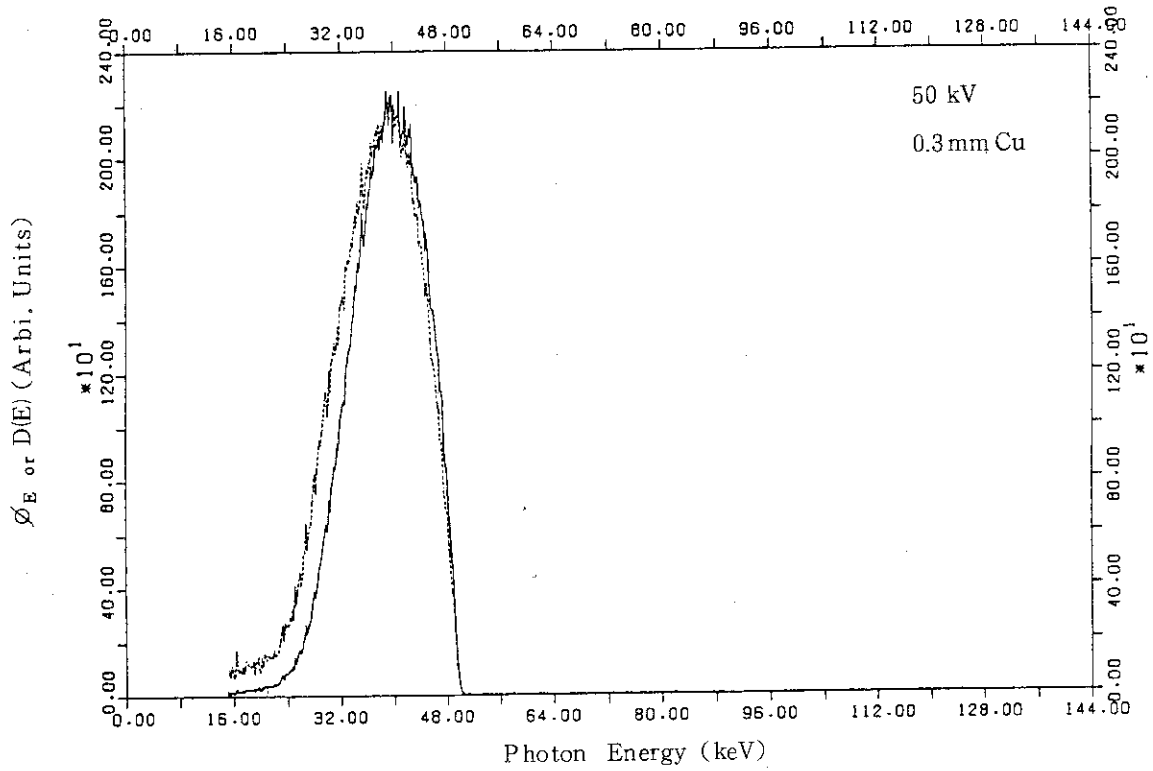


Fig. 6.1 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Middle spectrum series".

X-ray tube potential : 50 kV
Additional filter : 0.3 mm Cu

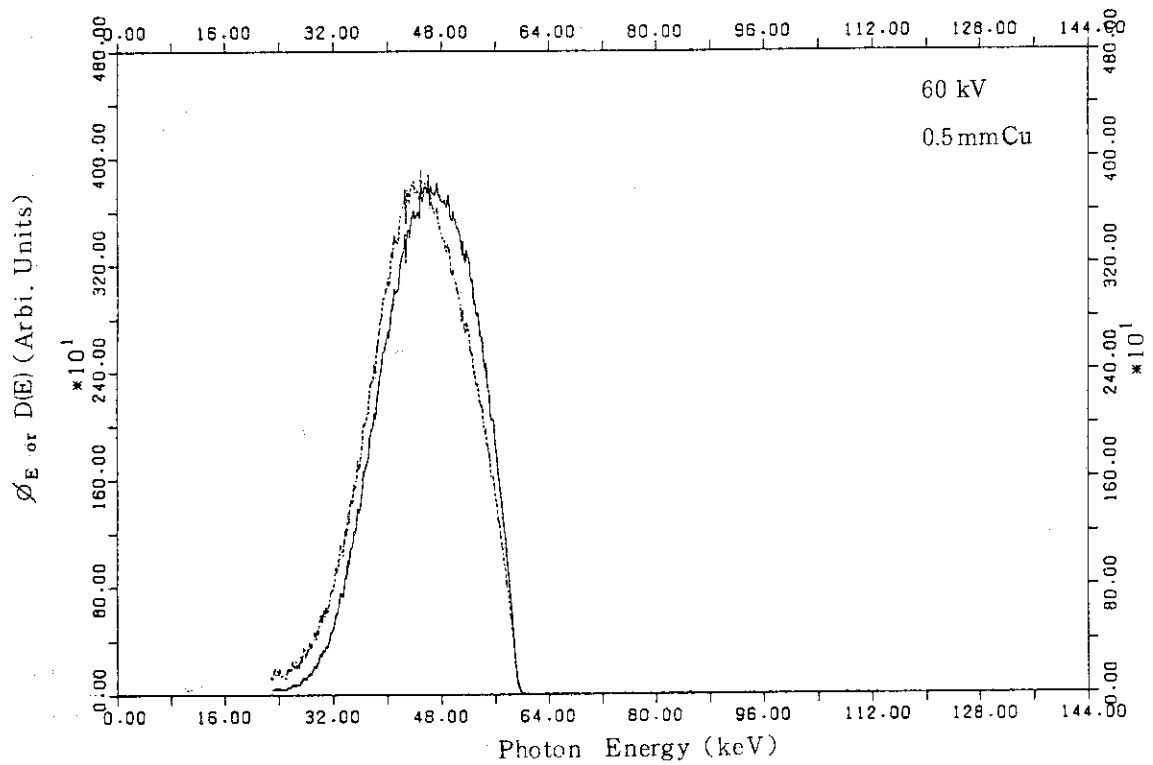


Fig. 6.2 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Middle spectrum series".

X-ray tube potential : 60 kV
Additional filter : 0.5 mm Cu

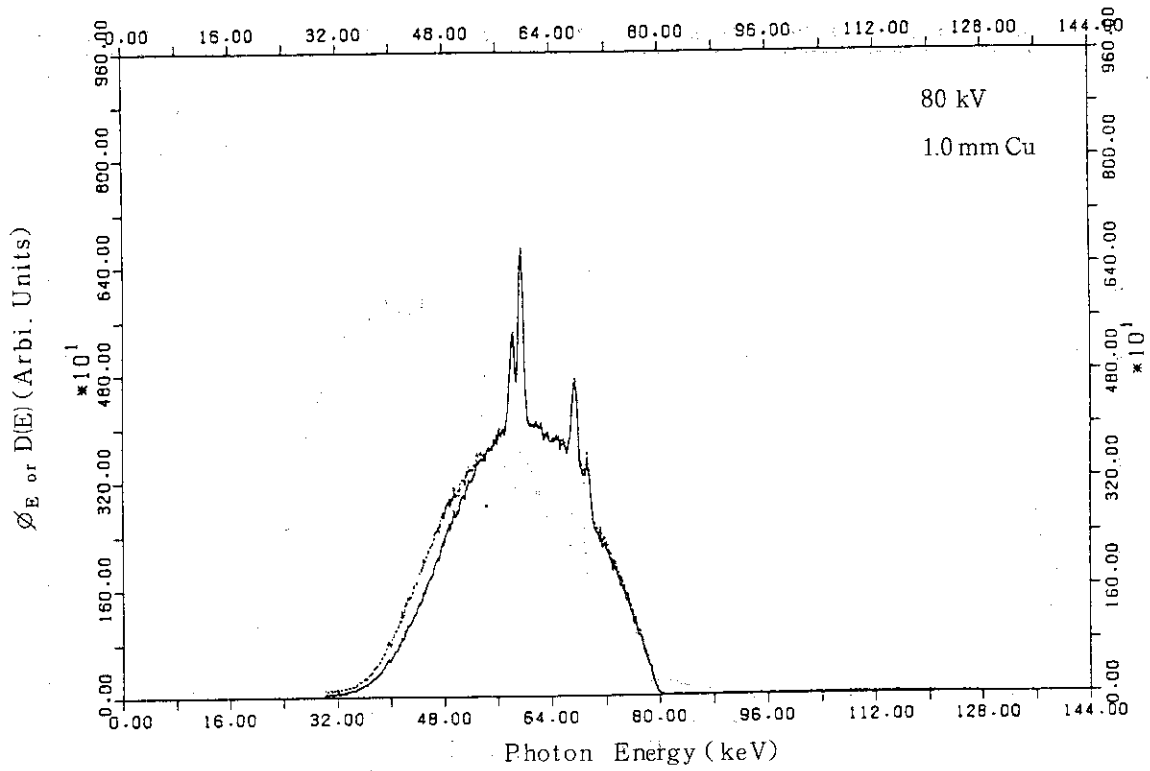


Fig. 6.3 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Middle spectrum series".
 X-ray tube potential : 80 kV
 Additional filter : 1.0 mm Cu

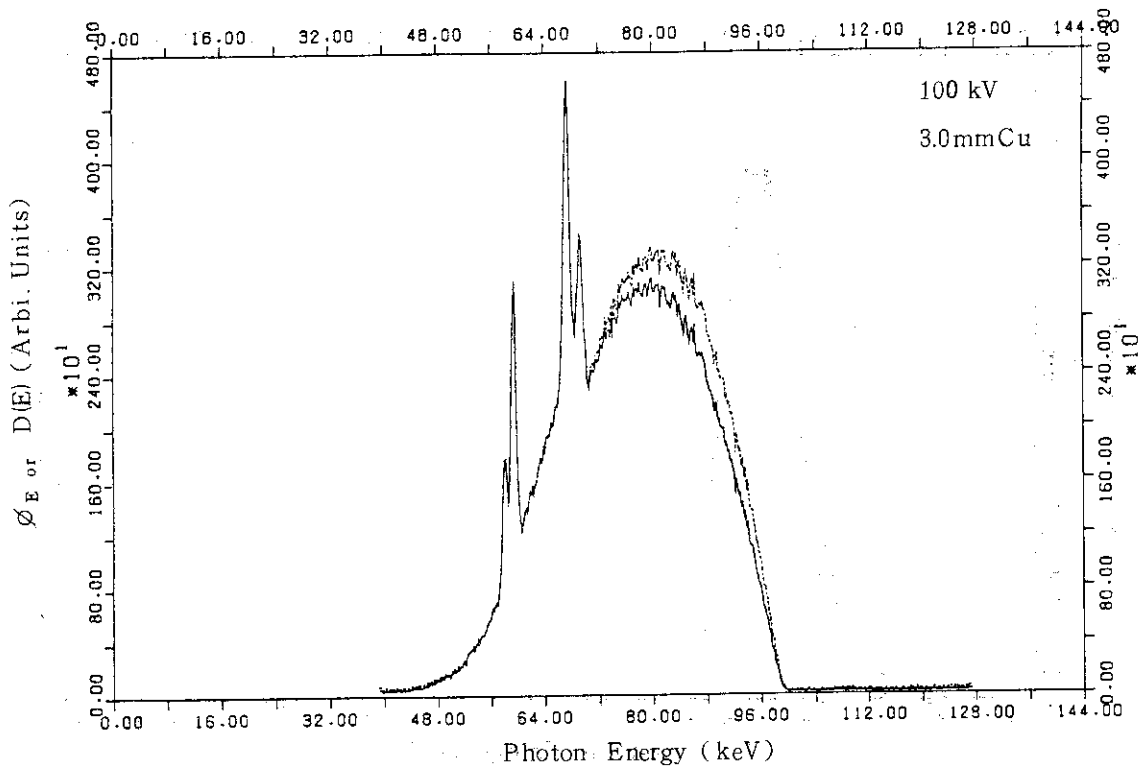


Fig. 6.4 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Middle spectrum series".
 X-ray tube potential : 100 kV
 Additional filter : 3.0 mm Cu

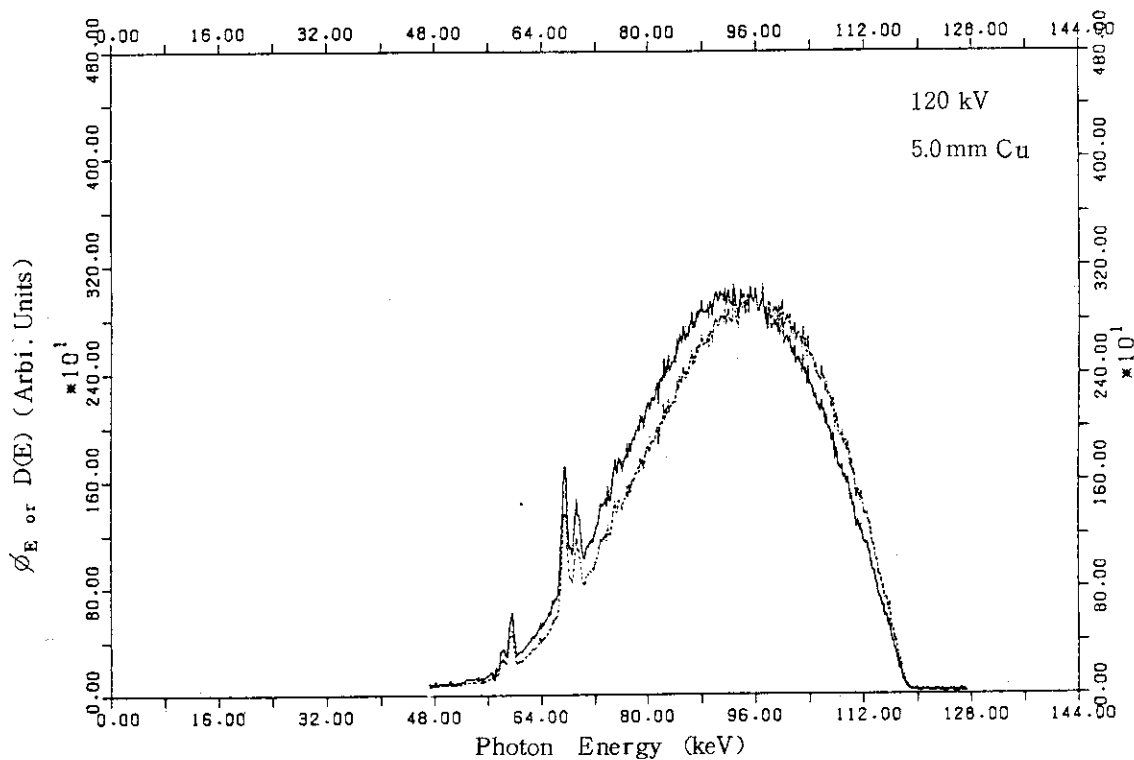


Fig. 6.5 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Middle spectrum series".

X-ray tube potential : 120 kV
 Additional filter : 5.0 mm Cu

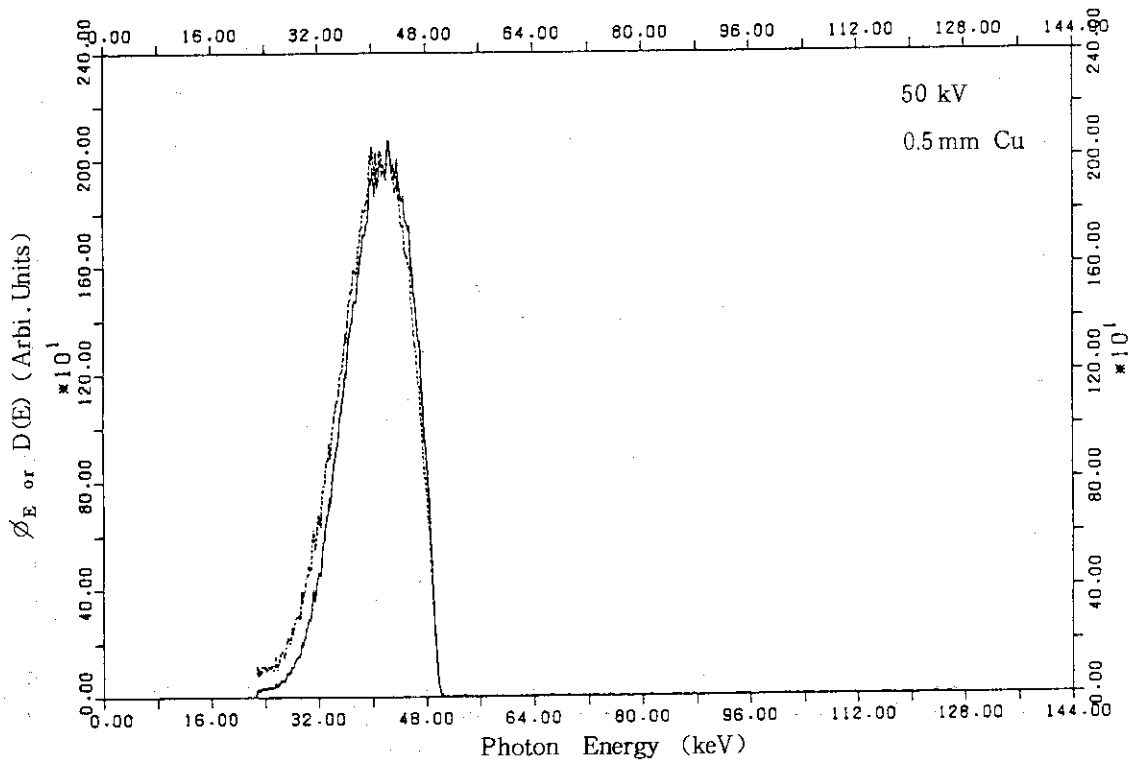


Fig. 7.1 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Narrow spectrum series".

X-ray tube potential : 50 kV
 Additional filter : 0.5 mm Cu

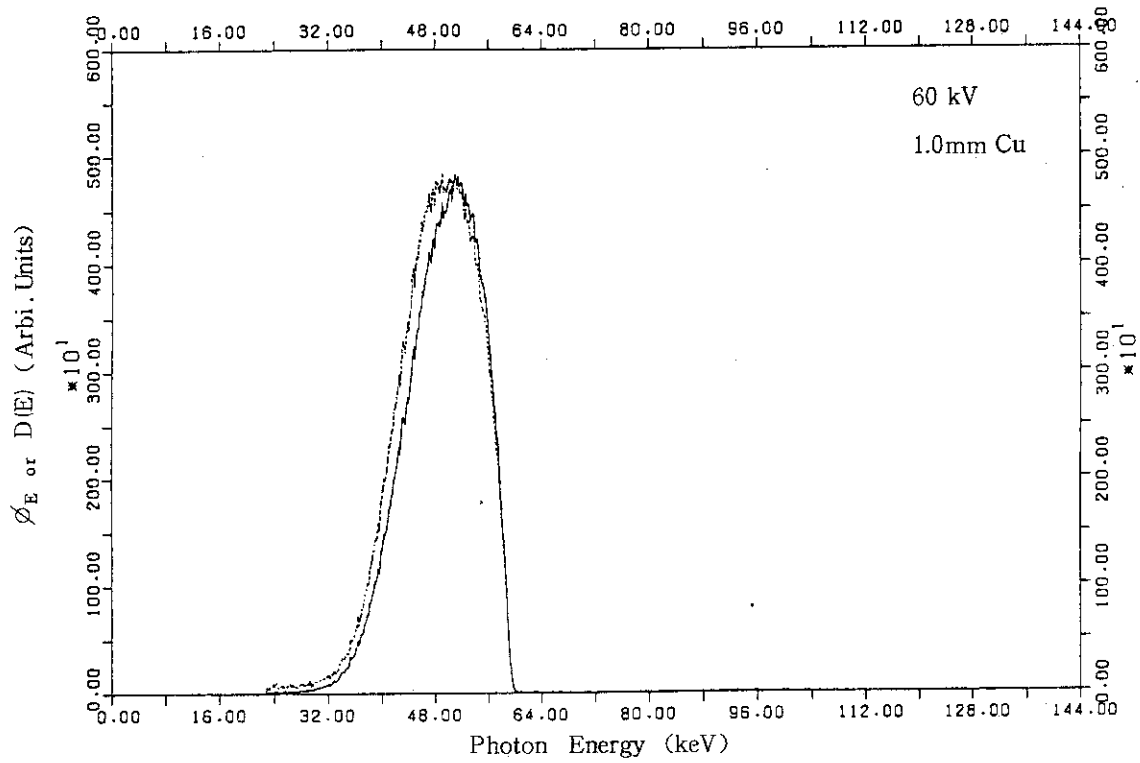


Fig. 7.2 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Narrow spectrum series".

X-ray tube potential : 60 kV
Additional filter : 1.0 mm Cu

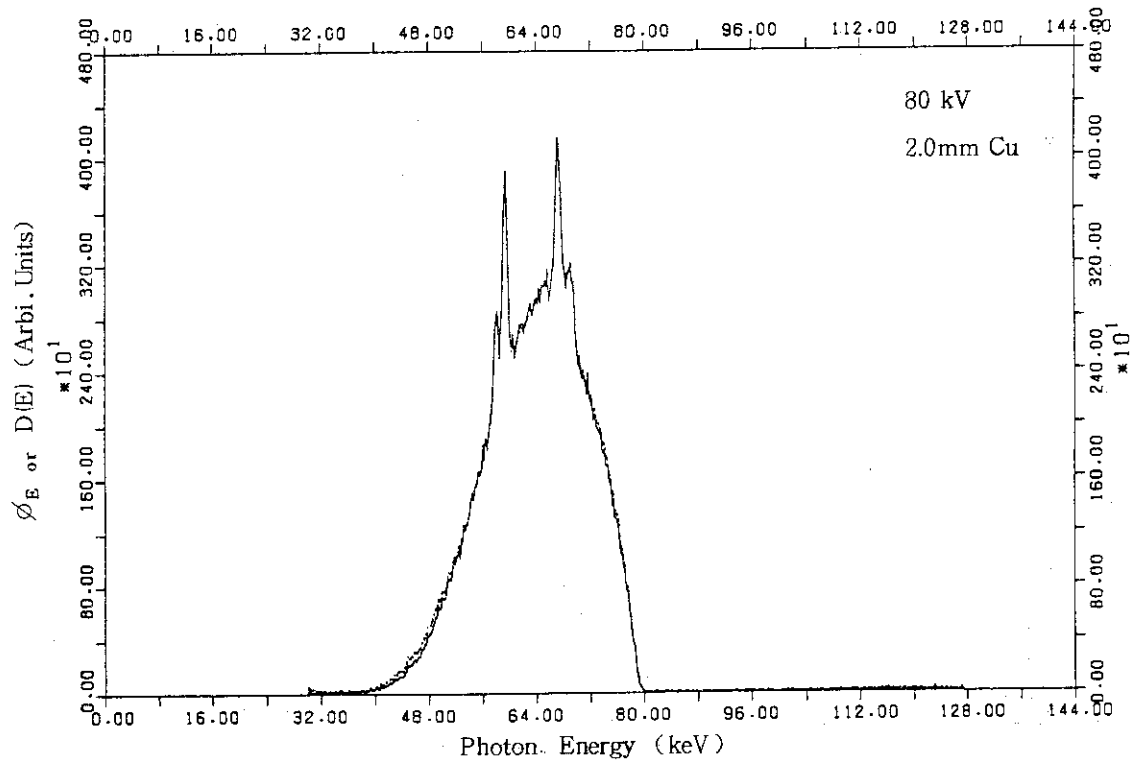


Fig. 7.3 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Narrow spectrum series".

X-ray tube potential : 80 kV
Additional filter : 2.0 mm Cu

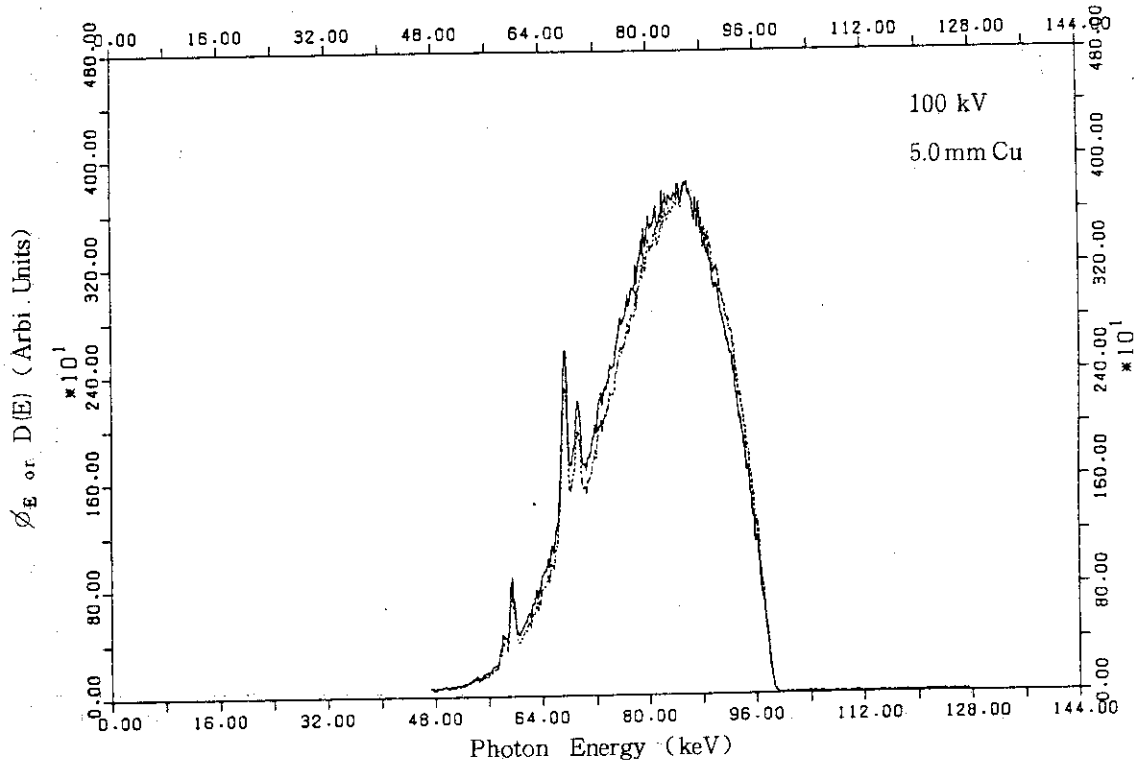


Fig. 7.4 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Narrow spectrum series".
X-ray tube potential : 100 kV
Additional filter : 5.0 mm Cu

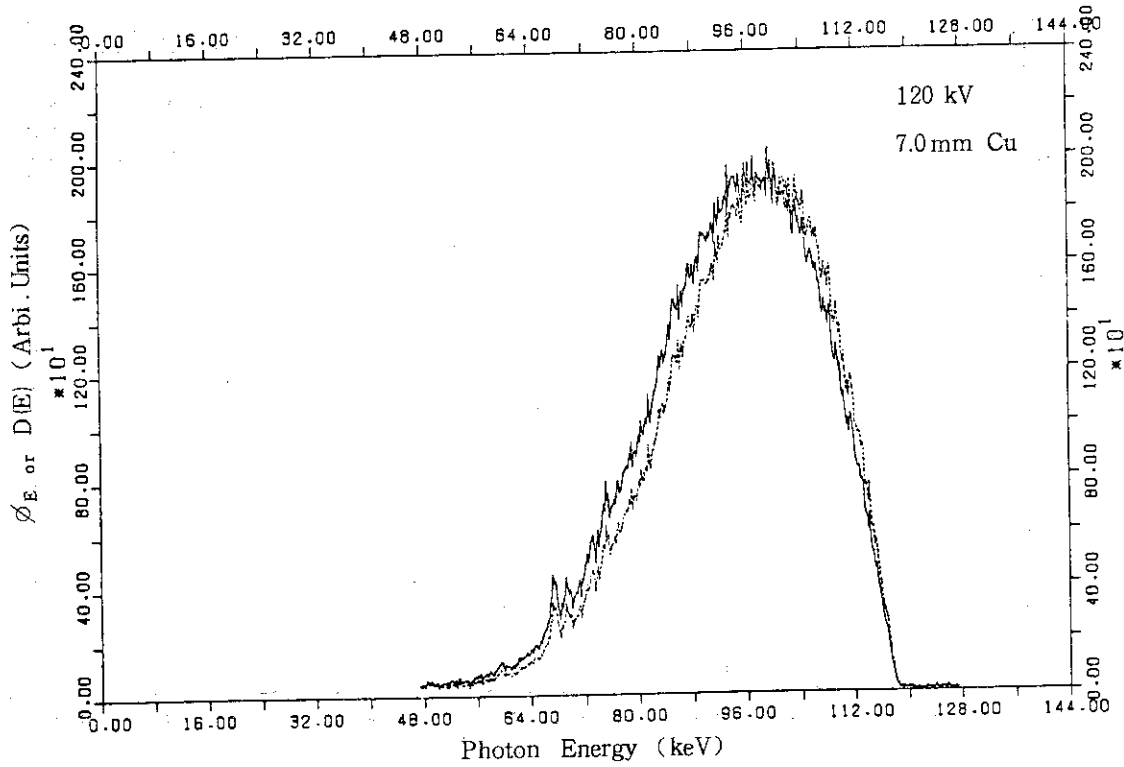


Fig. 7.5 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Narrow spectrum series".
X-ray tube potential : 120 kV
Additional filter : 7.0 mm Cu

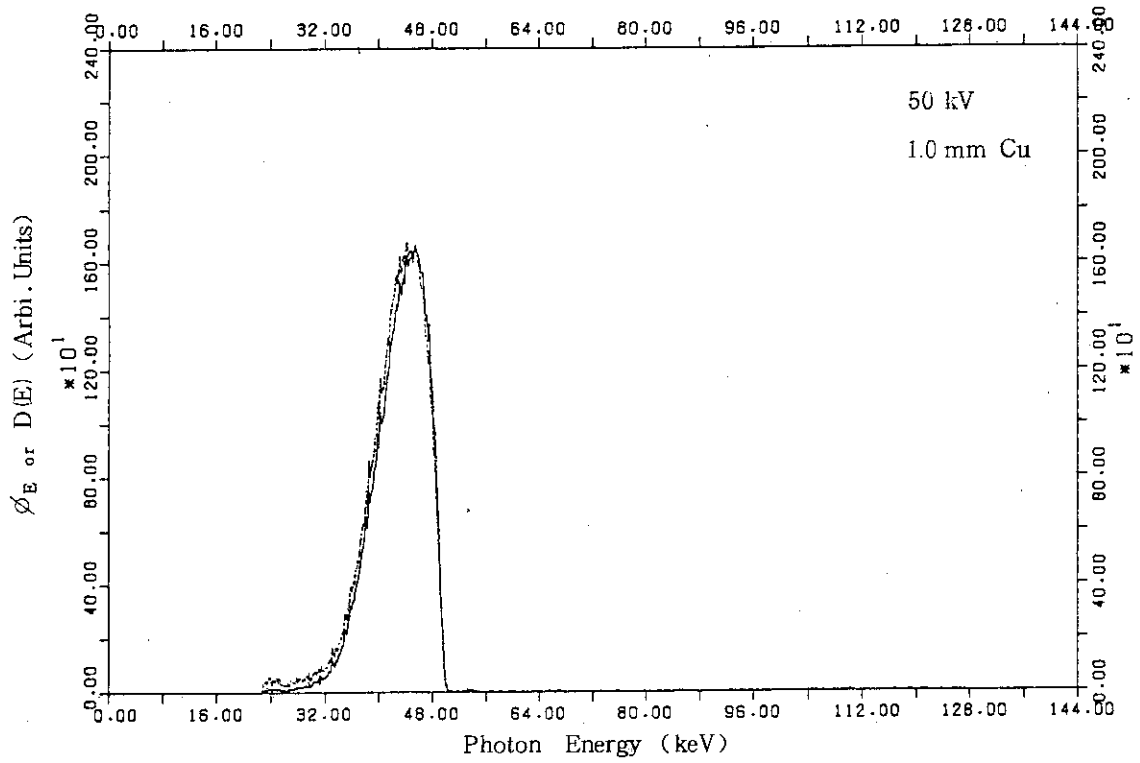


Fig. 8.1 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Extra-narrow spectrum series".

X-ray tube potential : 50 kV
Additional filter : 1.0 mm Cu

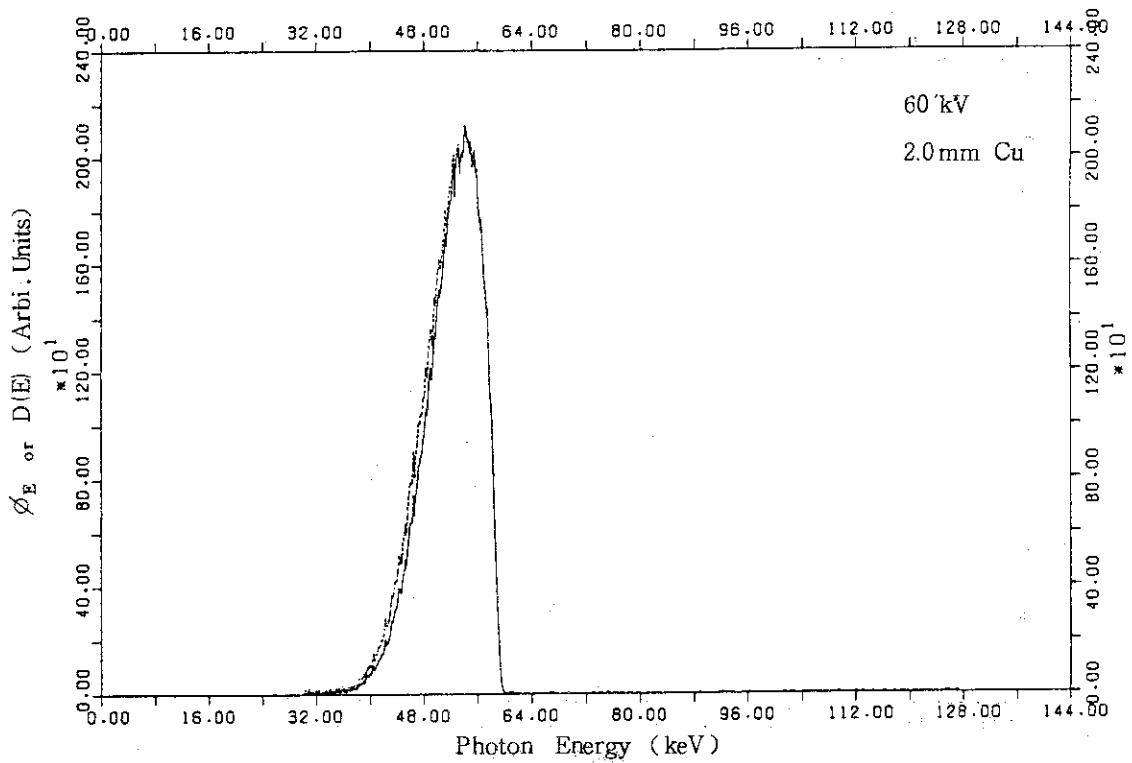


Fig. 8.2 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Extra-narrow spectrum series".

X-ray tube potential : 60 kV
Additional filter : 2.0 mm Cu

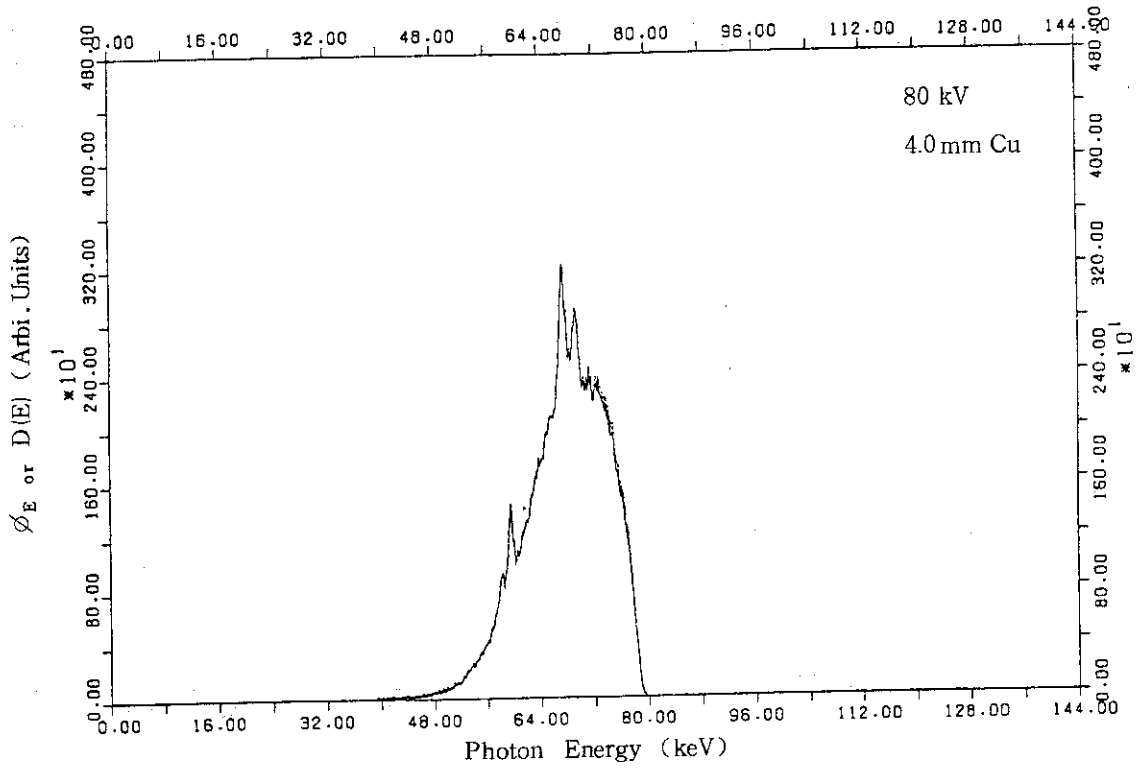


Fig. 8.3 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Extra-narrow spectrum series".
X-ray tube potential : 80 kV
Additional filter : 4.0 mm Cu

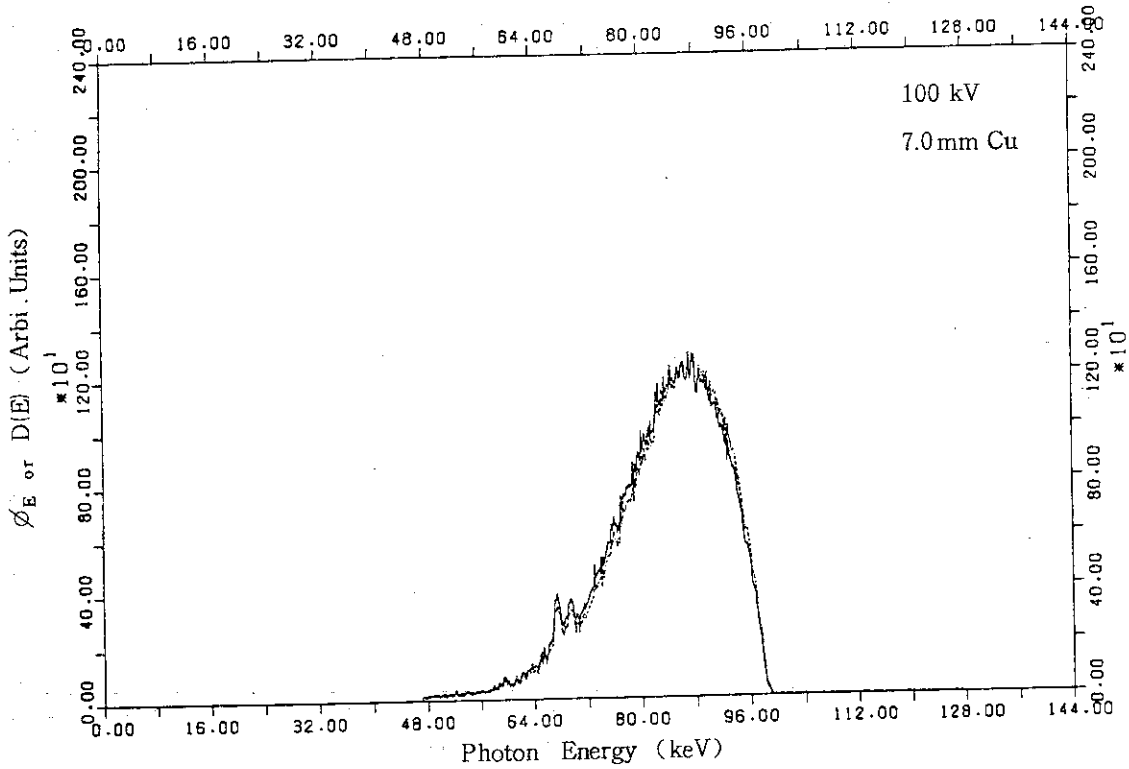


Fig. 8.4 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Extra-narrow spectrum series".
X-ray tube potential : 100 kV
Additional filter : 7.0 mm Cu

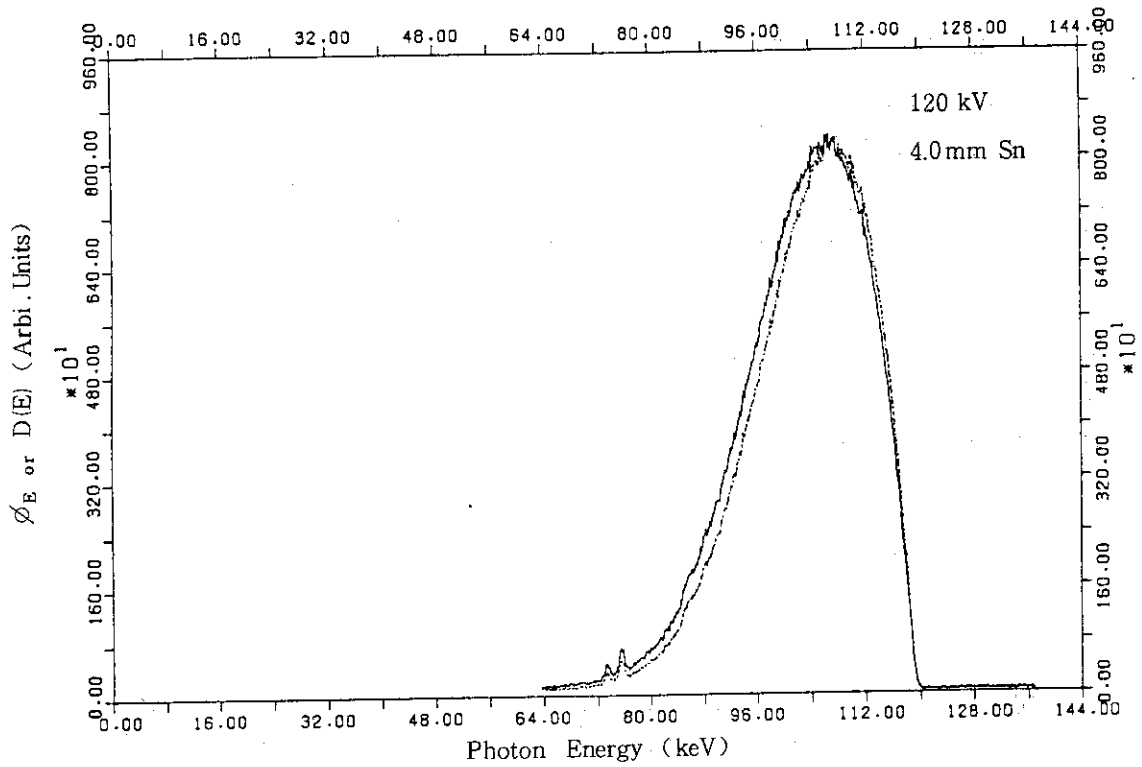


Fig. 8.5 Energy(solid line) and exposure(dotted line) spectra of the "Extra-narrow spectrum series".
X-ray tube potential : 120 kV
Additional filter : 4.0 mm Sn

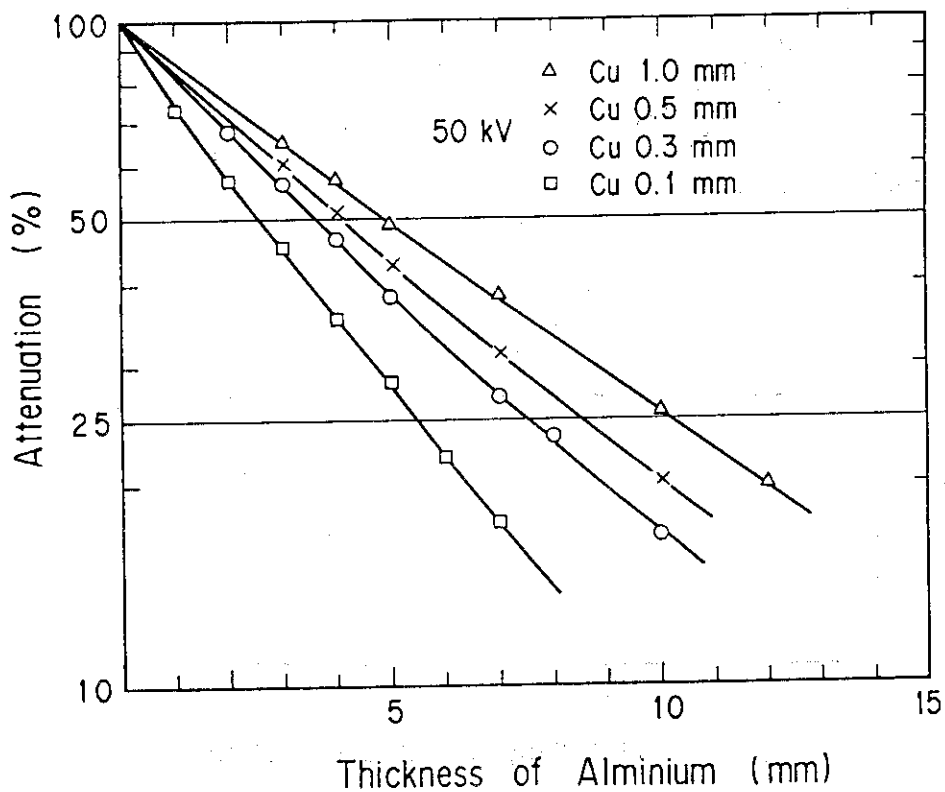


Fig. 9 Exposure attenuation of X-rays at 50 kV of X-ray tube potential by aluminium absorber.

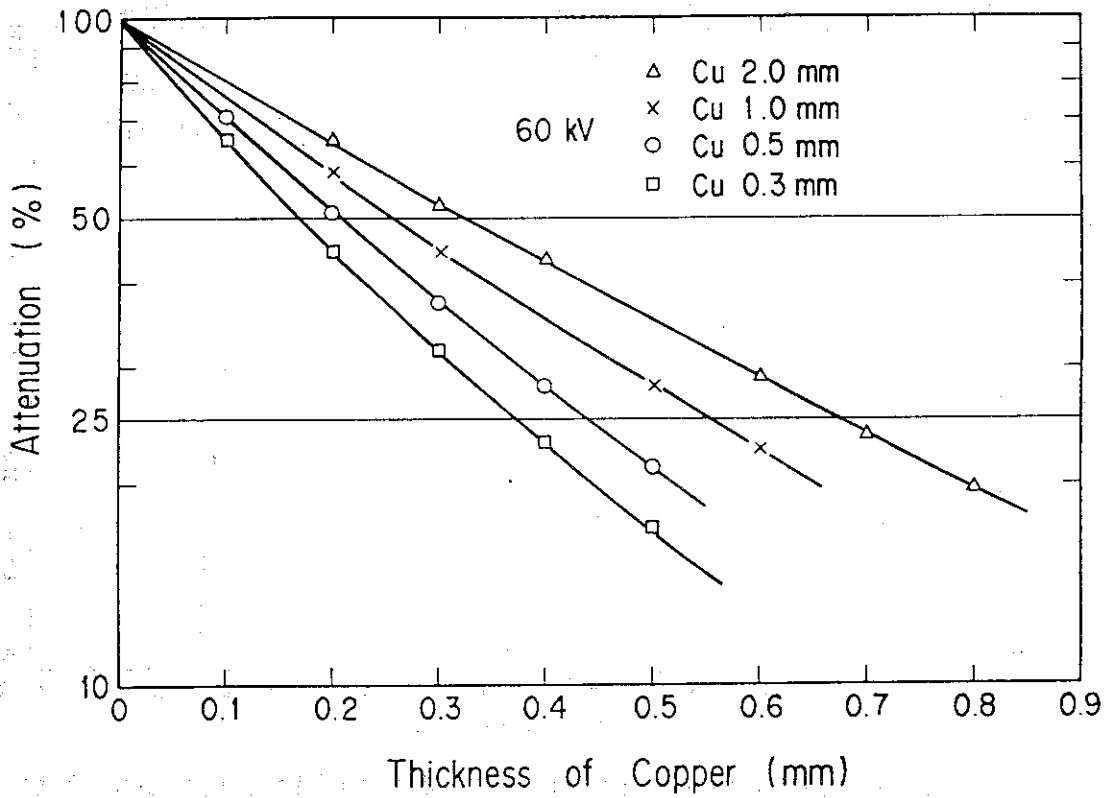


Fig. 10 Exposure attenuation of X-rays at 60 kV of X-ray tube potential by copper absorber.

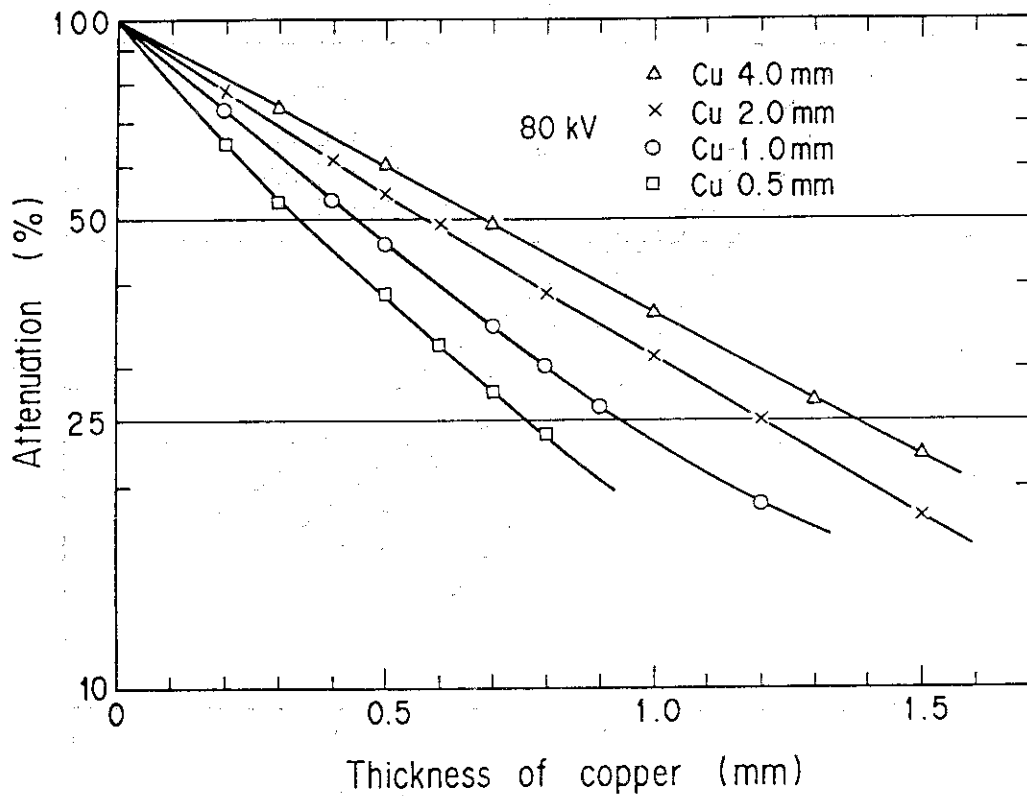


Fig. 11 Exposure attenuation of X-rays at 80 kV of X-ray tube potential by copper absorber.

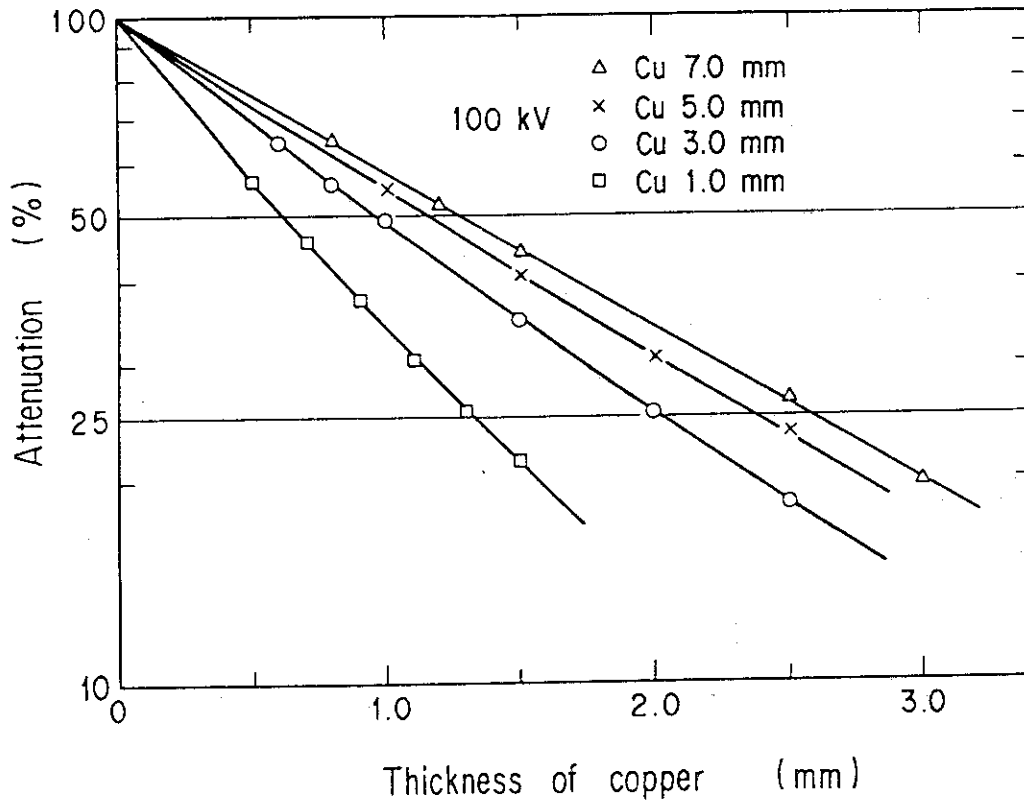


Fig. 12 Exposure attenuation of X-rays at 100 kV of X-ray tube potential by copper absorber.

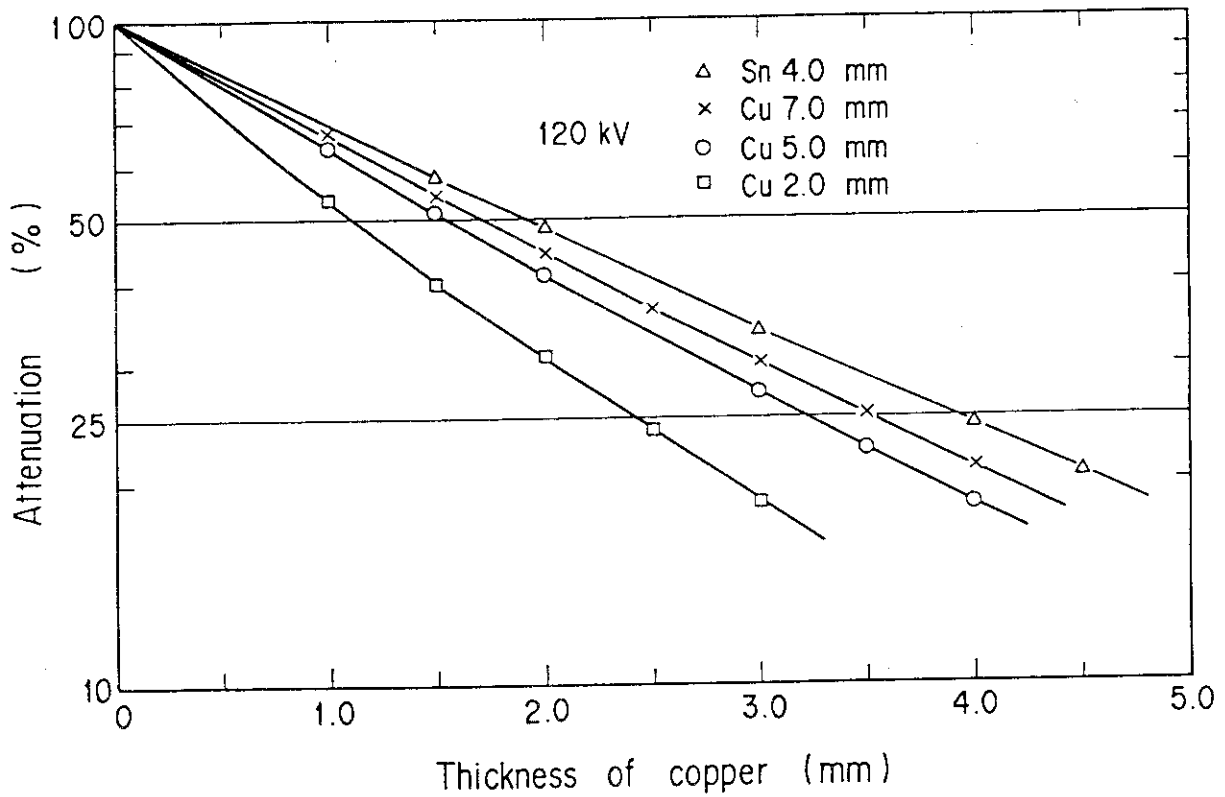


Fig. 13 Exposure attenuation of X-rays at 120 kV of X-ray tube potential by copper absorber.

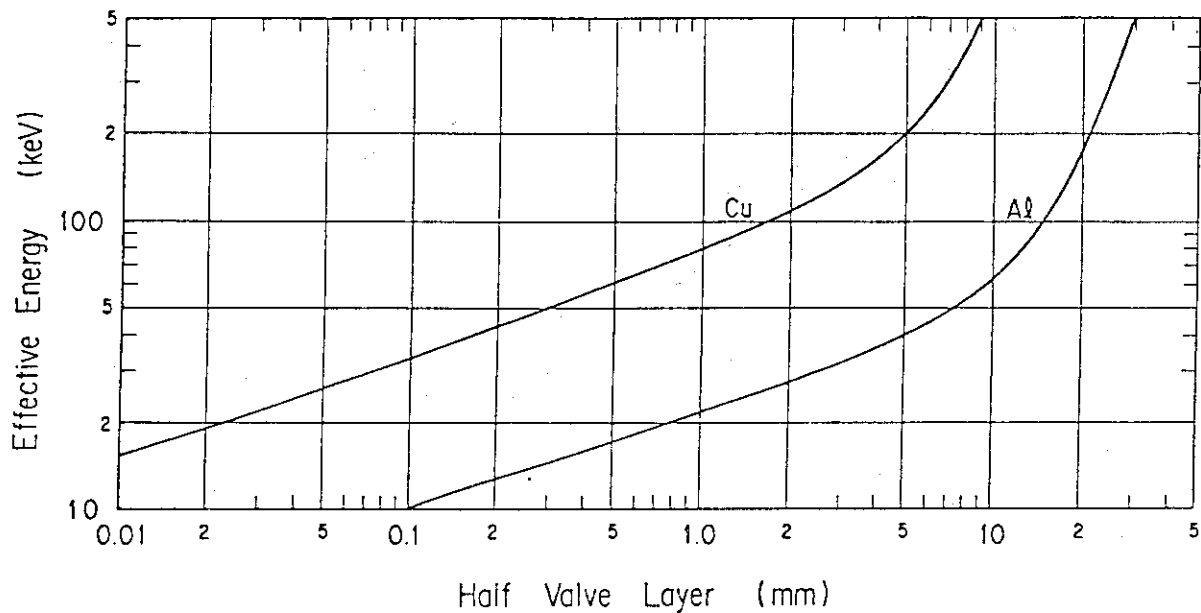


Fig. 14 Effective energy of X-ray as a function of half value layer

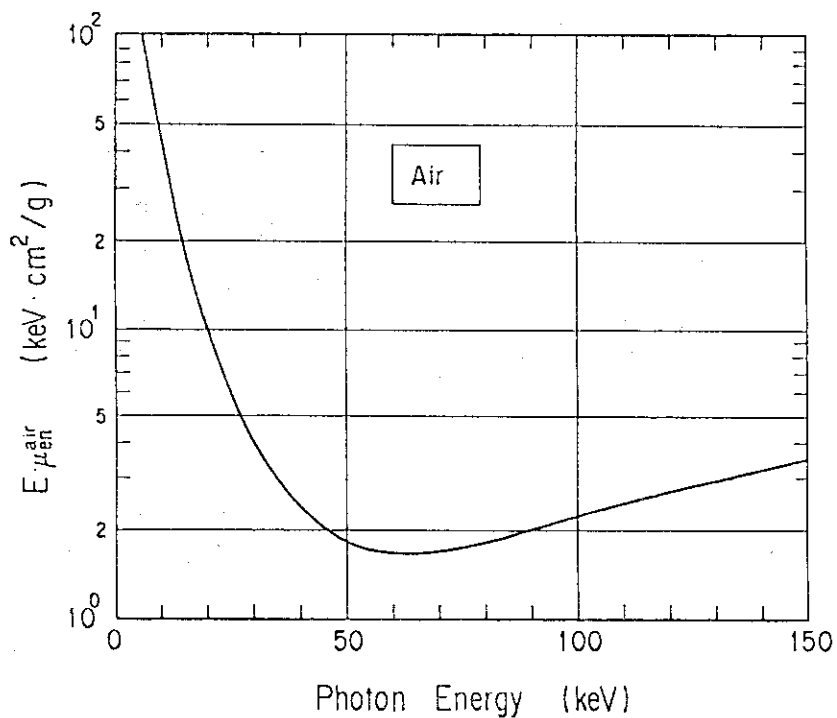


Fig. 15 Value of $E \cdot \mu_{en}^{air}$ as a function of photon energy