

JAERI-Tech

99-004



JP9950016



放射線測定器の性能試験に用いる
X線校正場の特性評価

1999年2月

清水 滋・高橋史明・澤畠忠広*
當波弘一*・菊池 寛*・村山 卓

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

本レポートは、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。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura; Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

放射線測定器の性能試験に用いるX線校正場の特性評価

日本原子力研究所東海研究所保健物理部

清水 滋・高橋 史明・澤畠 忠広*・當波 弘一*
菊池 寛*・村山 卓

(1999年1月6日受理)

低エネルギー光子に対する放射線測定器の性能試験及び校正には、X線発生装置から発生する連続X線をフィルタでろ過し、スペクトルの広がりを狭くしたX線校正場を使用する。このため、X線校正場では、スペクトルの状態を表す線質指標及び均等度の線質条件を評価しておく必要がある。本報告書では、東海研究所放射線標準施設棟に設置した校正用X線発生装置のX線の線質及び各線質毎のエネルギースペクトル並びに照射野の特性調査の結果を報告する。X線の線質の設定では、各管電圧に対して線質指標を0.6から0.9の4条件とし、管電圧が10kVから350kVの範囲において59線質を設定した。各線質のエネルギースペクトルの評価では、Ge半導体検出器で測定した波高分布に検出効率及び目的線量への換算係数を用いて、照射線量率、1cm線量当量率及びフルエンス率単位等のエネルギースペクトルを求めた。照射野の特性調査では、照射野の線量及びエネルギー分布の変化、並びに室内及び校正台車から寄与する散乱線の測定を実施した。各線質は、目的とする線質指標に対して±2%に設定できた。照射野の線量分布はフィルタのろ過により水平方向に対して大きく変化するため、変化幅が±3%以内の均一な照射エリアを決定した。これらの測定及び特性調査の結果、X線線質等の詳細な特性データが得られ、X線校正場の品質及び校正精度の向上が図られた。

Characteristics of X Ray Calibration Fields for Performance Test of
Radiation Measuring Instruments

Shigeru SHIMIZU, Fumiaki TAKAHASHI, Tadahiro SAWAHATA*,
Kohichi TOHNAMI*, Hiroshi KIKUCHI* and Takashi MURAYAMA

Department of Health Physics
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 6, 1999)

Perfomance test and calibration of the radiation measuring instruments for low energy photons are made using the X ray calibration fields which are monochromatically characterized by filtration of continuous X ray spectrum. The X ray calibration field needs to be characterized by some quality conditions such as quality index and homogeneity coefficient.

The present report describes quality conditions, spectrum and some characteristics of X ray irradiation fields in the Facility of Radiation Standard of the Japan Atomic Energy Research Institute (FRS-JAERI). Fifty nine X ray qualities with the quality index of 0.6, 0.7, 0.8 and 0.9 were set for the tube voltages between 10kV and 350kV. Estimation of X ray spectrum measured with a Ge detector was made in terms of exposure, ambient dose equivalent and fluence for all the obtained qualities. Practical irradiation field was determined as the dose distribution uniformity is within $\pm 3\%$. The obtained results improve the quality of X ray calibration fields and calibration accuracy.

Keywords : X Ray Calibration Fields, X ray Quality Condition, X ray Spectrum,
Uniformity of Dose Distribution.

* Institute of Radiation Measurement

目 次

1. 序 論	1
2. X線発生装置の概要	2
2.1 構成と機能	2
2.2 仕様と性能	3
3. X線照射条件の設定	4
3.1 X線用基準線量測定器の仕様	4
3.2 線質の設定	4
3.2.1 設定方法	4
3.2.2 設定結果及び考察	6
3.2.3 実効エネルギーと基礎フィルタの関係	7
3.3 X線エネルギースペクトルの測定	7
3.3.1 測定方法	7
3.3.2 測定結果及び考察	8
3.4 基準線量率の測定	10
3.4.1 測定方法	10
3.4.2 測定結果及び考察	10
4. 照射野の特性調査	12
4.1 照射野の線量分布の測定	12
4.1.1 測定方法	12
4.1.2 測定結果及び考察	12
4.2 照射野のエネルギースペクトルの測定	13
4.2.1 測定方法	13
4.2.2 測定結果及び考察	14
4.3 照射場の散乱線の測定	14
4.3.1 測定方法	14
4.3.2 測定結果及び考察	15
5. 結 論	17
参考文献	19
付 錄 A	86
付 錄 B	89

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of X Ray Generator	2
2.1 Construction and Function	2
2.2 Specification and Performance	3
3. Characterization of X Ray Irradiation Conditions	4
3.1 Specification of X Ray Standard Measuring Instrument	4
3.2 Characterization of Quality Index	4
3.2.1 Methods	4
3.2.2 Results and Discussion	6
3.2.3 Relationship between Effective Energy and Added Filters	7
3.3 Measurement of X Ray Energy Spectrum for each Condition	7
3.3.1 Measurement Methods	7
3.3.2 Measurement Results and Discussion	8
3.4 Measurement of Reference Dose Rate for each Condition	10
3.4.1 Measurement Methods	10
3.4.2 Measurement Results and Discussion	10
4. Examination of Characteristics of the Irradiation Fields	12
4.1 Measurement of Dose Distribution of the Irradiation Fields	12
4.1.1 Measurement Methods	12
4.1.2 Measurement Results and Discussion	12
4.2 Measurement of Energy Spectrum of the Irradiation Fields	13
4.2.1 Measurement Methods	13
4.2.2 Measurement Results and Discussion	14
4.3 Evaluation of Scattering Effect for the Irradiation Fields	14
4.3.1 Measurement Methods	14
4.3.2 Measurement Results and Discussion	15
5. Conclusions	17
Reference	19
Appendix A	86
Appendix B	89

1. 序　　論

γ (X)線用の放射線測定器を開発する場合には、各測定器毎に日本工業規格（J I S規格）¹⁾～⁶⁾で定められた形式検査（エネルギー特性、方向特性、指示誤差などの性能試験）を実施し、各検査項目に合格していることを確認する必要がある。これらの性能試験及びルーチン化した校正作業に用いる校正場として、光子エネルギー10 keVから300keVの領域についてはX線発生装置を用いたX線校正場を使用し、これを超えるエネルギー領域では¹³⁷Cs 及び⁶⁰Co γ 線源を使用している。

放射線測定器の性能試験及び校正に用いるX線校正場は、X線発生装置から発生する連続X線をフィルタでろ過し、スペクトルの広がりを狭くして使用する。このため、X線校正場は、線質条件として実効エネルギー、均等度及び線質指標（Quality Index: Q I）を評価しておくことがJ I S規格のJIS Z 4511⁷⁾で義務付けられている。

本報告書では、東海研究所放射線標準施設棟に設置した校正用X線発生装置（Pantak社製 HF-420C型）を用いたX線の線質条件の設定及び各線質のエネルギースペクトルを明らかにするとともに、照射野の線量及びエネルギー分布の変化及び散乱線の影響評価を実施したので、その結果について報告する。

国内の標準機関である電子技術総合研究所（E T L）では、医療や放射線防護用の放射線測定器の標準校正を実施するため、Q Iについて0.3から0.9の0.1ピッチで7つの条件を設定している。原研の放射線標準施設棟におけるX線用の校正設備は、放射線防護用の測定器の性能試験及び校正を目的とするため、0.6～0.9の4つのQ Iを設定した。校正場の基準照射線量率は、E T Lにより標準校正された基準線量測定器により値付けしており、国家標準と直接的にトレーサビリティが確保されている。

X線の線質では、X線用の基準線量測定器を用いて、ろ過フィルタの厚さを増やしたときの照射線量率の減弱特性を求め、あるフィルタ（基礎フィルタ）厚さのときの照射線量率が半分の照射線量率に減弱する半価層を求め、光子エネルギーとフィルタ材料の半価層の関係から、その線質の実効エネルギーを導出した。また、スペクトルの広がりの指標である均等度は、第1と第2半価層を測定し両者の比から算出した。線質指標は実効エネルギーと管電圧の比から算出した。X線線質は、管電圧10kVから350kVの範囲で59種類を設定した。

エネルギースペクトルの調査では、各線質毎のスペクトルをコリメータ付Ge半導体検出器を用いて測定し、検出効率及び換算係数を用いて照射線量率、1cm線量当量率及びフルエンス率単位等のエネルギースペクトルを求めた。照射野のエネルギースペクトルの実験では、検出面積の小さなC Z T(Cd+Zn+Te)半導体検出器を用いて照射野のエネルギー分布の変化を求めた。

照射場の散乱線の調査では、室内の床及び空气中から寄与する室内散乱線と校正台車からの散乱線について線量測定を行い、照射場への影響を評価した。

これらの測定結果から、X線校正場の特性及び線質条件の詳細が明らかになり、放射線測定器の性能試験及び校正に関する品質並びに精度の向上が図られた。

2. X線発生装置の概要

2.1 構成と機能

X線校正場の整備に用いたX線発生装置は、Fig. 1に示すように①X線管球、②高圧発生回路、③冷却装置、④X線ビームシャッター、コリメータ、遮へい箱、フィルタ挿入ケース、⑤制御装置、⑥インターロック回路等から構成されている。

X線管球は、ドイツのAEG-TELEFUNKEN製のMB420/1型で、ターゲットはタンゲステン、管球窓の厚さは7mmのベリリウム、さらにその前面には厚さ0.3mmのアルミニウムが装着されて、外筒にはメタルセラミック材を使用している。その断面図をFig. 2に示す。

X線発生部はFig. 3に示すように、校正場における照射精度を高めるため、X線管球を厚さ2.5cmの鉛容器内に設置して漏洩X線を遮へいし、X線管球の窓の前面にシャッターとコリメータを設け、さらにコリメータ前面にフィルター挿入ケースを設けた。このような構造により、シャッターを閉じた状態で、照射する前に管電圧・管電流を安定させることができ、シャッターの開閉だけに依存する安定したX線の照射が可能となる。また、X線管球付近からの散乱X線を遮へいすることができ、質の良いX線の照射ができる。

制御装置は、高圧発生回路、シャッター、インターロック回路及びオイル冷却装置を制御する電子制御盤と管電圧・管電流の設定、照射時間の設定、シャッターの開閉を制御するオペレータ制御盤より構成されている。

高圧発生回路の制御部は、高周波定倍率方式による電圧及び電流の安定な制御機能を有し、また微小な変動を生じた場合に高圧発生回路を停止させる保護機能を有している。シャッター、インターロックの制御部は、エージング操作を実施しない限りシャッターが開かないロック機能や遮蔽ドアと安全装置と連動したシャッターロック機能を有している。

オイル冷却装置は、オイル温度が一定値(35°C)を越えたり、冷却装置自体の故障が発生した時に高電圧、電流の供給を停止する保護機能を有している。

X線管球から発生する制動X線は、Fig. 2の陰極のフィラメントで発生した熱電子が管電圧で陽極方向に加速され、陽極との軸上に設定されたタンゲステンターゲットに衝突して、タンゲステン原子核のクーロン場により制動を受けることにより発生する。この際、ターゲット部は、熱と二次電子を発生する。熱の除去は、オイル循環空冷式の冷却装置により除去している。また、二次電子は、管球内の真密度低下の原因となるので、ターゲットの周りに薄い銅のフードをかぶせ、その広がりを防止している。

制動X線をろ過するために用いるフィルタは、アルミニウム、銅、すず及び鉛の4種類の材質を用意した。純度はそれぞれ99.6%以上、厚さの精度は±1%以内とした。フィルタの大きさはコリメータ角度を30°と大きくしても十分機能するように1辺25cmの正方形(1mm以下の薄いフィルタ: 21cmφ)とした。フィルタの厚さは、0.1mmから30mmまで0.1mm間隔で、任意の厚さに設定できるようにした。

2. 2 仕様と性能

Table 1に装置の仕様と性能を示す。X線管球へ供給する電圧・電流の安定性は、共に±0.02%以下と優れ、線量の安定性は±0.1%である。コリメータ部は、簡単に着脱できる構造としたので、コリメータ角度を任意に変更することが可能となり、コリメータ角度の選択によってビーム広がり角度を変更できる。シャッターは3cm厚の鉛であり、その開閉に要する時間は1.9秒である。

管電圧を300kV、管電流を10mAとし、シャッター閉の状態での遮へい箱の外壁及び外壁から1m離れた点の漏洩線量率を測定した結果、最大で $0.4\mu\text{Sv}/\text{h}$ であった。各管電圧に対する管電流の制御可能範囲を焦点の違い毎にFig. 4に示す。ビーム中心軸の位置合わせは、X線管球の上下方向の微調整により行い、1mにおいてビーム中心軸のずれを左右方向で±2mm、上下方向では±1mmに納めた。コリメートされたビームの広がり角度は、X線管球の前後方向の微調整を行い、X線焦点より1mの距離における照射野のずれを+3mmに納めた。

3. X線照射条件の設定

3.1 X線用基準線量測定器の仕様

X線線質の設定、照射野の線量分布の評価、照射場の散乱線の影響調査並びに校正場の基準照射線量率の測定に用いるX線用の基準測定器の仕様を以下に示す。

X線用の基準線量測定器は、検出器に通気性の円筒形及び球形の空洞電離箱を使用し、検出器で発生した電離電流をデジタル式のエレクトロメータを用いて測定することにより照射線量を精度良く表示する測定器である。

原研の放射線標準施設棟で使用しているX線用の基準線量測定器は、Table 2に示すように、軟X線用(10keV～50keV)が3機種、中硬X線用(30keV～300keV)が5機種である。

これらの測定器のトレーサビリティは、国内の標準供給機関である電子技術総合研究所(E TL)にて直接標準校正を実施するかあるいは基準測定器との置換法により二次的に基準校正することにより確保されている。これらの機種の照射線量に対する校正定数は、±3%の不確かさで光子エネルギー10 keV～300keVの範囲のX線線質について付けられている。

Table 2の中でエネルギー特性が最も優れている測定器としては、軟X線用では KEITHLEY線量計(有効容積: 15mL)がX線実効エネルギー10keV～50keVの範囲で±4%、中硬X線用では EXRA DIN線量計(有効容積: 800mL)がX線実効エネルギー30keV～300keVの範囲で±2%である。

X線線質の設定時の線量減弱特性及び照射野の線量分布の測定では、詳細な分布を求めるため100mL以下の電離箱検出器を用いた。また、単色化したQ I 0.8及び0.9の条件の線量測定では、照射線量率が 2.58×10^{-4} C/kg/h以下の低線量率になるため、300mL以上の電離箱検出器を用いた。

3.2 線質の設定

3.2.1 設定方法

X線発生装置から発生する制動X線のエネルギー分布は、管電圧を最大エネルギーとしたならかな山状のスペクトルを示し、管電圧が増大するに連れて幅の広い連続的なエネルギースペクトルを示すので、放射線測定器の校正にはそのまま使用できない。特に、放射線測定器のエネルギー特性試験にX線を用いるときは、X線エネルギースペクトルの広がりを狭くした線質を設定することが必要である。

この線質は、国内においては電子技術総合研究所(E TL)が推奨する線質指標あるいは均等度で表現されている。線質指標は、(1)式の通り実効エネルギーと管電圧に対応するX線の最大エネルギーとの比で示される。目的に合った実効エネルギーの線質条件を求めるためには、特定のフィルタ材料について任意の厚さを設定し、このフィルタ厚さを初期のフィルタ(以下「基礎フィルタ」という。)として更にフィルタの厚さを変え、ろ過効果によって生じる減弱特性から基礎フィルタ設定時の線量率が半分になるフィルタ厚さ、即ち、第1半価層を求めて線減弱係数を算出する。そして、フィルタ材質の光子エネルギーと線減弱係数の関係から実効エネルギーを

求める。この実効エネルギーと設定目標値である線質指標とX線の最大エネルギーとの積から求めた実効エネルギーとに差異が生じる場合は、基礎フィルタの厚さを変えて上記の方法により再度実効エネルギーを求める。この操作を繰り返し行って目的とする実効エネルギーの基礎フィルタ厚さを決定する。

均等度は(2)式のとおり第1半価層と第2半価層の比で表わされ、第2半価層は第1半価層のときの線量率が半分になるときのフィルタ厚さである。X線がろ過されエネルギー分布幅が狭められるにつれて、この比が1.0に近づくのでスペクトルの単色化の程度を表すことができる。

$$Q\ I = \frac{E_{\text{eff}}}{E_{\text{max}}} \dots \quad (1)$$

$Q\ I$: 線質指標

E_{eff} : 実効エネルギー (keV)

E_{max} : 管電圧に対応するX線の最大エネルギー (keV)

$$H = \frac{t_1}{t_2} \dots \quad (2)$$

H : 均等度

t_1 : 第1半価層 (cm)

t_2 : 第2半価層 (cm)

本装置の線質設定のためには、目標とする線質指標の実効エネルギーに合った基礎フィルタを選定する必要がある。このため、求めようとする実効エネルギーとフィルタ材料の線減弱係数の関係から、予め半価層を算出し、これと実験による減弱特性における第1半価層が一致する基礎フィルタの厚さを選定した。

上記に示す実効エネルギーの算出は、煩雑であるので、半価層から直接的に実効エネルギーが算出できる計算式をTable 3のとおり作成した⁸⁾。この式は、Table 4の各フィルタ材料の半価層と実効エネルギーの関係を最小自乗法によるべき乗回帰で求めたもので、適用エネルギー範囲において±0.6%以内で実効エネルギーを決定できる。Fig. 5は、(3)式で算出した半価層のグラフをフィルタ材質ごとに示したものである。半価層の算出に用いた線減弱係数の基礎データ⁹⁾は、Table 4に示すように全減弱断面積、質量減弱係数への換算係数、物質の密度である。

$$t = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{\ln 2}{N \cdot C \cdot \rho} \dots \quad (3)$$

t : 半価層 (cm)

μ : 線減弱係数 (cm^{-1})

N : 全減弱断面積 (barns)

C : 減弱断面積を質量減弱係数に変換する換算係数 ($\text{cm}^2/\text{g/barns}$)

ρ : 物質の密度 (g/cm^3)

基礎フィルタとしては、アルミニウム、銅、鉛の4種類の材質についてそれぞれ単一又は複数の材質の組み合わせにより使用した。材質の異なるフィルタを組み合わせて使用する場合には、フィルタからの特性X線をより吸収させるため、原子番号の高い方の材質のフィルタを管球側に挿入した。

半価層を求めるためのフィルタとしては、管電圧によって材質を変え、10~50kVの範囲ではアルミニウムを、60~200kVの範囲では銅を、200~350kVの範囲では錫をそれぞれ使用した。減弱特性の実験では、X線領域のエネルギー特性が良好なTable 2に示す空洞型電離箱検出器を使用し、フィルタの厚さに対する照射線量率の減弱特性から第1半価層を求めた。測定器は管電圧60kV以下では0.2ml電離箱(ピクリーン社製30-330型)及び600ml電離箱(ニュークリアンターブライス社製2575型)を照射線量率強度に応じて使い分け、管電圧60kV以上では33ml電離箱(ピクリーン社製550-4型)を使用した。X線管球の焦点と検出器までの距離は、室内散乱線及び検出器固定治具からの散乱線を少なくするため、照射線量率の強度に応じて0.7~2.0mの範囲とした。

3.2.2 設定結果及び考察

線質指標0.6, 0.7, 0.8及び0.9におけるX線線質の設定結果をTable 5~8に示す。各表には、各管電圧に対する基礎フィルタの厚さ、第1半価層、第2半価層、均等度、実効エネルギー及び線質指標を示してある。

各線質の実効エネルギー値は、第1半価層をTable 3の計算式に代入して有効数字3桁で算出した。実験により設定したX線線質の実効エネルギー範囲は、線質指標0.6で17.6~210keV、0.7で13.8~241keV、0.8で11.8~281keV、0.9で9.0~318keVである。

目的とする線質指標の設定のいずれは、線質指標0.6が0.59~0.62、0.7が0.69~0.72、0.8が0.79~0.81、0.9が0.88~0.91でいずれも目標値に対して±2%程度であった。付録Aには、国際標準化機構(ISO)が発行したISO 4037-1¹⁰⁾の4種類の照射条件について、国内の線質条件である実効エネルギーと線質指標の計算結果を示す。各照射条件の線質指標は、Low air-kerma rate seriesが0.82~0.88(QI 0.9相当)、Narrow-spectrum seriesが0.75~0.83(QI 0.8相当)、Wide-spectrum seriesが0.66~0.71(QI 0.7相当)、High air-kerma rate seriesが0.48~0.71(QI 0.5相当)となり、Table A.4の平均エネルギー7.5keVの線質以外では線質指標の設定値に対して-9%から+4%まで変化している。従って、国内の線質条件の設定方法はそれが少ない(±2%)ので、ISO規格への取り入れが望まれる。

連続X線のろ過の程度を示す均等度は、各線質指標における平均値で表すと、0.6で0.77±0.04、0.7で0.85±0.05、0.8で0.93±0.04、0.9で0.97±0.03となり、ISO 4037-1のTable 2(付録B参照)に示されるNarrow spectrum series(QI 0.8相当)の0.75~1.0及びWide spectrum series(QI 0.7相当)の0.67~0.98と比較すると、変化の少ない線質設定ができた。線質指標が0.9の場合はISO 4037-1のLow air-kerma rate seriesの均等度1.0とほぼ同じ値になり単色スペクトルのγ線(均等度:1.0)に近い均等度であることが確認された。このように、

I S O 規格の線質では、線質指標や均等度の変化幅が国内の線質設定に比較して大きく、しかも X 線管球の Be フィルタやその前面の Al フィルタの厚さが管球の型式により微妙に異なるので、 I S O 規格のように同じフィルタを付加しても発生するエネルギースペクトルが多少変化してしまう。このため、線質の指標としては、これらの問題を排除した国内の線質設定の方が明確であると考えられる。

3.2.3 実効エネルギーと基礎フィルタの関係

フィルタ材質毎に実効エネルギーと基礎フィルタの関係を下記のように調査しておくと、新たな照射条件の基礎フィルタの設定を容易に行うことができる。

3.2.2 項で設定した線質指標 0.6, 0.7, 0.8 及び 0.9 の線質ごとの基礎フィルタの厚さと第 1 半価層から求めた実効エネルギーとの関係を銅及びアルミニウムフィルタについて Fig. 6 に示す。この曲線より目的とする線質指標の実効エネルギーに対応した基礎フィルタの厚さを簡単に推定することができる。Fig. 6 より実効エネルギーが 10keV ~ 30keV の各線質には基礎フィルタとしてアルミニウムを用い、基礎フィルタの厚さは 0.1mm ~ 4.0mm の範囲となった。また、同様に銅の基礎フィルタを用いた場合には、実効エネルギーが 30keV ~ 140keV の各線質に使用し、基礎フィルタの厚さは 0.19mm ~ 8.0mm の範囲となった。銅の基礎フィルタの各線質指標の特性は、基礎フィルタの厚さが増すにつれて急激に実効エネルギーが大きくなつた。

3.3 X 線エネルギースペクトルの測定

3.3.1 測定方法

各線質の X 線波高分布の測定は、Fig. 7 及び Fig. 8 に示すように高純度 Ge 半導体検出器 (GMX-08180 型) を 1mm φ, 5mm φ 及び 35mm φ のコリメータを有する鉛遮へい体の中に置いて、波高分析装置 (マルチチャネルバッファー ORTEC-917 型及びエミュレーションプログラム) を用いて実施した。X 線ターゲットと Ge 検出器間の距離は 3.5m とした。

測定した波高分布をきちんとしたエネルギースペクトルに戻すには、検出効率の補正のほかに、検出器応答関数を考慮したアンフォールディングが必要となるが、X 線エネルギー範囲で検出効率が 100 % 近くとなり大きな変化がないこと、Ge 検出器のエネルギー分解能が比較的良好であること、エネルギースペクトルの形状にそれほどの厳密さを求めないことから、X 線波高分布を検出効率で補正することでエネルギースペクトルと見なした。

得られた X 線波高分布に Ge 検出器の検出効率の補正を行い、光子フルエンス率単位のエネルギースペクトルを求めた。さらに、このエネルギースペクトルに照射線量換算係数及び 1cm 線量当量換算係数を用いて、照射線量率単位のエネルギースペクトル及び 1cm 線量当量率単位のエネルギースペクトルを評価した。これらの手順を以下に示す。

高純度 Ge 半導体検出器の検出効率は、光子エネルギーが 6keV から 100keV まで 100% であるが、Ge の K - X 線の吸収端である 11keV 付近及び 100keV 以上になると、検出効率が低下する。そのため、光子フルエンス率単位のエネルギースペクトルを評価するために、検出効率の補正を行つた。また、管電圧が 200kV 以上になると X 線波高分布のピーク面積に検出器内で生じたコント

ン散乱成分が加算されるので、これらのコンプトン散乱成分をピーク面積から分離するため、コンプトン端から最大波高の裾のまで1本の直線を引いて差し引きを行った¹¹⁾。

光子フルエンス率単位のエネルギースペクトル $\Phi(E)$ は、(4) 式により求めた。これをピーク面積の最大エネルギーまで計算して全体のエネルギースペクトルを求めた。

$$\Phi(E) = Nc(E) / S \cdot \eta_E \quad \text{-----} \quad (4)$$

$\Phi(E)$: 光子フルエンス率単位のエネルギースペクトル ($n/cm^2 \cdot sec$)

$Nc(E)$: エネルギー E (keV) における計数率

η_E : エネルギー E (keV) の検出効率

S : コリメータの断面積 (cm^2)

照射線量率単位のエネルギースペクトル $X(E)$ は、(4) 式で求めた光子フルエンス率単位のエネルギースペクトルに照射線量への換算係数を乗じて求めた。なお、ここでは ICRP21¹²⁾ に示されている換算係数を用いた。本スペクトルをピーク面積の最大エネルギーまで計算して全体のエネルギースペクトルを求めた。

$$X(E) = \Phi(E) \cdot K(E) \quad \text{-----} \quad (5)$$

$K(E)$: フルエンスから照射線量への換算係数 ($C/kg \cdot cm^2$)

1 cm 線量当量率単位のエネルギースペクトル $H(E)$ は、(4) 式で求めた光子フルエンス率単位のエネルギースペクトルに 1 cm 線量当量（周辺線量当量）への換算係数を乗じて求めた。換算係数としては、ICRP51¹³⁾ に示される値を用いた。また、管電圧が 50kV 以下の場合は、方向性線量当量の評価に必要な 70 μm 線量当量率単位のエネルギースペクトルも評価した。本スペクトルをピーク面積の最大エネルギーまで計算して全体のエネルギースペクトルを求めた。

$$H(E) = \Phi(E) \cdot f(E) \quad \text{-----} \quad (6)$$

$f(E)$: フルエンスから 1 cm 線量当量（又は 70 μm 線量当量）への換算係数 ($Sv \cdot cm^2$)

3.3.2 測定結果及び考察

管電圧を一定にしたときの各線質の光子フルエンス率単位のエネルギースペクトル評価結果を Fig. 9 に示す。同様に照射線量率単位のエネルギースペクトル評価結果を Fig. 10 に、 1 cm 線量当量率単位のエネルギースペクトル評価結果を Fig. 11 に、 70 μm 線量当量率単位のエネルギースペクトル評価結果を Fig. 12 に示す。各エネルギースペクトルは、管電圧が 20kV 以下の場合を除いて、ターゲットからの距離が 3.5 m で管電流が 1 mA であるとして評価した。また、各エネルギースペクトルの平均エネルギーは、それぞれ下式により算出した。

(1) 光子フルエンス率単位 \overline{E}_t

$$\overline{E}_t = \int_0^{E_{\max}} E \Phi(E) dE / \int_0^{E_{\max}} \Phi(E) dE \quad \dots \quad (7)$$

(2) 照射線量率単位 \overline{E}_x

$$\overline{E}_x = \int_0^{E_{\max}} E X(E) dE / \int_0^{E_{\max}} X(E) dE \quad \dots \quad (8)$$

(3) 線量当量率単位 \overline{E}_{H}

$$\overline{E}_{\text{H}} = \int_0^{E_{\max}} E H(E) dE / \int_0^{E_{\max}} H(E) dE \quad \dots \quad (9)$$

各スペクトルの(7)式から(9)式を用いて計算した平均エネルギーと半価層から求められた実効エネルギーとの比較をTable 9~12に示す。照射線量率単位の平均エネルギーと半価層による実効エネルギーを比較すると、最大のそれはQ Iが0.6及び0.7については管電圧40~300kVの範囲で±5%、Q Iが0.8では管電圧30kV~350kVの範囲で±3%、Q Iが0.9では管電圧15~350kVの範囲で±2%であった。また、管電圧が高くなると、実効エネルギーに対して平均エネルギーが低くなる傾向が見られた。一方、管電圧が低くなると平均エネルギーの方が高くなかった。これは、検出器内の減弱が大きく寄与するためである。

1cm線量当量率単位の平均エネルギーと実効エネルギーを比較すると、上記と同じ管電圧の範囲において、最大のそれはそれぞれ、Q I:0.6の場合は±10%、Q I:0.7の場合は±8%、Q I:0.8の場合は±4%、Q I:0.9の場合は±2%であった。

管電圧が、150kV以上になるとフルエンス率単位のスペクトルの平均エネルギーと比較して、照射線量率単位及び線量当量率単位のスペクトルの平均エネルギーが高くなかった。また、管電圧が60kVより低くなると照射線量率単位のスペクトルの平均エネルギー値が低くなかった。これらは、光子フルエンス率から照射線量率への換算係数値の変化に大きく依存している。

また、各エネルギースペクトルに関して、下式によりISO 4037-1で示されるスペクトル分解能を評価した。結果をTable 13~14に示す。

$$\text{分解能}(\%) = \frac{\text{スペクトル半価幅 } \Delta E(\text{keV})}{\text{平均エネルギー } \overline{E} (\text{keV})} \times 100 \quad \dots \quad (10)$$

線質指標が同じ場合、光子フルエンス率単位、照射線量率単位及び線量当量率単位の各スペクトル分解能は、ほぼ同じ値を示した。線質指標別のスペクトル分解能の平均値は、Q I:0.6が67%、Q I:0.7が55%、Q I:0.8が34%、Q I:0.9が18%であった。連続X線のろ過の程度を表す線質指標をそろえることにより、管電圧が変わってもほぼ同じスペクトル分解能を示した。また、上記の数値よりQ I:0.9のスペクトル分解能と比較すると、Q I:0.8がほぼ2倍に、Q I:0.7

が3倍に、Q I : 0.6が4倍に広くなることを確認した。

3.4 基準線量率の測定

3.4.1 測定方法

線質の設定を行ったすべての条件について線量率の評価を行った。線量率の測定は、管電圧50kV以下では容積が0.2mlで入射面の壁厚さが2.5mg/cm²の電離箱(ピクトリン社製30-330型)及び容積600mlで入射面の壁厚さが4.5mg/cm²の電離箱(ニュークリエント-プライス社製 2575型)を使用し、管電圧60kV以上では中硬X線用の基準電離箱検出器である容積が33mlで壁厚さが170mg/cm²の電離箱(ピクトリン社製 550-4型)を使用した。

照射線量率の測定では、X線ターゲットと検出器間距離を1.5mとして、各管電圧に対して最大の管電流にしたときの照射線量率を最大値として評価した。また、照射距離を5mとし、管電流を1mAとした場合の照射線量率を最小値とした。

線量当量率は、各条件について半価層より算出された実効エネルギーに対応する換算係数をJIS Z 4511の評価式⁷⁾を用いて計算し、照射線量率に乗じて算出した。

3.4.2 測定結果及び考察

各線質条件における最大照射線量率及び最小照射線量率の測定結果をTable 15~18に示す。また、各線質の線量当量率の評価結果も併せて示す。各線質指標毎の照射線量率範囲は、上述の最小値及び最大値で表すと、Q I : 0.6が 58.8 μC/kg/h ~ 104mC/kg/h (3.8~6745mR/min)、Q I : 0.7が 15.5 μC/kg/h ~ 41.7mC/kg/h (1.0~2694mR/min)、Q I : 0.8が 3.10 μC/kg/h ~ 6.84mC/kg/h (0.2~442mR/min)、Q I : 0.9が 25.8nC/kg/h ~ 179 μC/kg/h (0.1~694mR/h) である。同様に1cm線量当量率はQ I : 0.6が0.04~84mSv/min、Q I : 0.7が0.008~32mSv/min、Q I : 0.8が0.001~5.3mSv/min、Q I : 0.9が0.001~7.8mSv/hである。

管電圧・管電流を一定にしたときの各線質の照射線量率及び1cm線量当量率は、線質指標が1に近づくに従ってスペクトルの低エネルギー側が基礎フィルタでろ過されてエネルギー分布の幅が狭められるため低下する。照射線量率では、管電圧100kV、管電流27mAにおいてQ I : 0.6の最大照射線量率が30mC/kg/h (110R/h) であるのに対し、Q I : 0.9になると56 μC/kg/h (0.22R/h) になり約 1/500に減少した。これは、管電圧が異なる線質についてもほぼ同様の割合で減少することを確認した。

測定評価した照射線量率単位及び線量当量率単位のエネルギースペクトルの積分値からスペクトルを基底とした照射線量から線量当量への換算係数(H/X) を下式により算出した。

$$(H/X) = \frac{\int_0^{E_{max}} E H(E) dE}{\int_0^{E_{max}} E X(E) dE} \quad (11)$$

半価層から求めた実効エネルギーの1cm線量当量換算係数(Table 15~18参照) と(11)式で計算したエネルギースペクトルから求めた1cm線量当量換算係数との比較をTable 19~22に示す。

両者の値のずれは、Q I :0. 6では管電圧 40～350kVの範囲で± 5%、Q I :0. 7では管電圧 40～350kVの範囲で± 3%、Q I :0. 8では管電圧 30～350kVの範囲で± 2%、Q I :0. 9では管電圧 40～350kVの範囲で± 1%であった。Q I :0. 7以上の線質指標では± 3%で両者の値が一致したことから、半価層から求めた実効エネルギーに対応する1 cm線量当量率換算係数を用いることで、X線スペクトルの換算係数を評価して良いことが確認された。一方、Q I :0. 6ではスペクトルの広がりが大きく、数%の違いが生じたが、半価層から求めた実効エネルギーの1 cm線量当量の換算係数の方が大きく、線量当量率を過大に評価することが確認された。

また、70 μ m線量当量換算係数について上記と同様の方法で比較した結果をTable 23に示す。実効エネルギーに対する70 μ m線量当量換算係数と(11)式により算出された値のずれは、Q I :0. 6 の線質指標で± 2. 5%、Q I :0. 8～0. 9の線質指標で± 1%で全体的にスペクトルからの評価値の方が大きな値になったが、両者の間に大きな違いは見られなかった。

4. 照射野の特性調査

4.1 照射野の線量分布の測定

4.1.1 測定方法

照射野の水平・垂直方向の線量分布の測定は、フィルタ無し並びに線質指標0.6, 0.7, 0.8, 0.9の各線質条件において、管電圧60kV, 100kV, 200kVに対して実施した。測定に用いた検出器は、フィルタ無し、線質指標0.6及び0.7には30m \varnothing 球形電離箱(EXRADIN社製 A4型)を用い、線質指標0.8及び0.9には 100m \varnothing 球形電離箱(EXRADIN社製A5型)を用いた。検出器はX線発生装置の焦点から1.5m離れた校正台車上にセットし、照射口のコリメータは30°円錐コリメータを使用した。測定点は、Fig. 13に示すようにX線焦点と照射野の測定点との角度が 0°, 5°, 10°, 13° になる位置の垂直方向(c:上側, d:下側)、水平方向(a:左側, b:右側)について実施した。左右方向はX線管球から照射野を見たときの方向であり、X線管球において陽極(Anode)側が左方向、陰極(Cathode)側が右方向となる。線量分布の評価は、0°の照射線量率に対する5°, 10°, 13°の照射線量率の比を相対値として求め、グラフに図示し、グラフより各線質における線量分布の角度依存性を評価した。

4.1.2 測定結果及び考察

照射野の線量分布の線質ごとの測定結果をFig. 14(1)～(5)に示す。図は、X線のビーム中心軸(0°)を1.0とした相対値で示し、図中の計算値は、ビーム中心からの角度の垂直・水平方向の断面に位置する測定点と0°との距離を補正した線量分布の相対値を示している。また、上下・左右方向はFig. 13の管球ターゲットから見た照射野の上下・左右方向である。

Fig. 14(1)に示すフィルタ無しの線質では、(a)の水平方向の線量分布が管電圧を変えて右肩上がりの線量分布で特性が悪く、これに対し(b)の垂直方向は上下の線量分布が対称的で均整がとれており、極めて良好な分布となった。この理由としては、管球ターゲットから角度の違いにより様々なエネルギーのX線が放射され、水平方向の角度によってエネルギー及びフルエンス強度の変化が生じるためである。Fig. 14(1)-(a)の左方向は低エネルギー成分がターゲット自体により吸収を受けるため、比較的高いエネルギー成分が多く、線量率が低い。右方向はターゲットから放出されるX線の角度が大きく、ターゲットによる吸収が少ないため、低エネルギーのX線が左方向よりもかなり多く発生し、線量率が高くなった。この現象を一般にヒール効果^{14), 15)}と言い、この左右のスペクトル分布の違いは清水ら¹⁶⁾によって報告され、線量分布の違いは、清水ら¹⁷⁾及びW. Will¹⁸⁾により報告されている。Fig. 14(1)-(b)の上下方向の分布はX線のターゲットによる吸収の程度が同じため、エネルギースペクトルがほぼ同じX線が発生し、上下の均整がとれていると考えられる。

線質指標0.6の条件では、Fig. 14(2)に示すようにビーム中心軸付近で最大線量率を示し、上下・左右方向の線量率の均整がとれた。これは、基礎フィルタの挿入により右方向の低エネルギーX線が減弱を受け線量率が低下し、結果的に均整がとれたものと考えられる。

線質指標 0.7, 0.8, 0.9の条件では、Fig. 14(3)～(5)に示すように、左右方向の最大線量率を示す位置がビーム中心軸の左側へ移行し、線質指標が0.7から0.9と大きくなるに従って右側の線量強度が大きく減少することが確認できた。これに対し、上下の線量分布は線質指標が変わっても大きな分布の変化は見られなかった。この左右方向の線量分布の変化は、基礎フィルタの厚さが増すに従ってさらに右側の低エネルギーX線の減弱が大きくなるためである。上下方向は、発生しているX線のエネルギー分布がほぼ等しいため、単色化が進んでもビーム中心軸に対して対称的な線量分布を示した。しかし、単色化が進むにつれて、上下方向の線量分布はかなり悪くなつた。

全体的には、単色化の程度（線質指標の違い）により左右方向の線量分布が大きく変化したのに対し、上下方向は極端な変化は見られなかった。また、管電圧の違いによる線量分布の変化は少なく、それぞれの線質指標毎にほぼ同じ分布を示した。

各線質指標でビーム中心に対する線量のずれが ±3%以内になる均一な照射野の角度は、中心軸に対して線質指標0.6が水平方向±5°、垂直方向±7°、線質指標0.7が水平方向±4°、垂直方向±6°、線質指標0.8が水平方向±3.5°、垂直方向±5.5°、線質指標0.9が水平方向±2.5°、垂直方向±5°になり、均一な線量分布を持つ照射エリアは垂直方向に長い分布を示した。

上記の結果から、線質指標0.6～0.9の照射条件を用いて放射線測定器の性能試験及び校正を実施する場合は、検出器が均一な照射エリアに入るよう照射距離を選択することが大切である。また、小型の個人線量計を複数個一度に照射する場合は、均一な照射エリアが垂直方向に長いので、縦長にセットして照射することが重要である。

4. 2 照射野のエネルギースペクトルの測定

4. 2. 1 測定方法

照射野の水平・垂直方向の線量分布は、4.1項で述べたとおり水平方向に対してフィルタによるろ過（線質指標の違い）によって大きく変化することが明らかになった。従って、水平方向の照射角度の違いによる照射線量率単位のエネルギースペクトルを評価し、エネルギー分布がどのように変化するかを調査した。

X線波高分布の測定に用いた検出器は、寸法が3mm×3mm×2mm厚さの CZT (Cd+Zn+Te) 検出器 (AMPTEK社製 XR-100T-CZT型) であり、検出器表面に 0.8mmφのコリメータを取り付け、波高分析装置 (マルチチャンネルアナライザ - APTEC社製S5004型) を用いてX線波高分布の測定を行った。測定点は、X線焦点と検出器との角度が0° 5° 10° 及び13° になる位置の水平(左右)方向について実施した。X線波高分布の測定に用いたX線線質は、管電圧60kVで線質指標が0.6、0.7、0.8及び0.9の条件であり、X線焦点から検出器中心までの距離を4.0mとし、照射口には30° 円錐コリメータを用いた。

照射線量率単位のエネルギースペクトルの評価は、3.2.1 項の(4)式及び(5)式を用い、測定した波高分布の計数率にCZT検出器の光電ピーク検出効率及びコリメータ断面積で補正を行い、光子フルエンス率単位のエネルギースペクトルを求め、次にフルエンスから照射線量への換算係数 (ICRP21¹²⁾ に示される値)を乗じて照射線量率単位のエネルギースペクトルを求めた。

得られた照射線量率単位のエネルギースペクトルをピーク面積の最大エネルギーまで計算して全体のエネルギースペクトルを求めた。また、本スペクトルを積分して各照射角度毎の照射線量率を求め、照射角度の違いによる線量分布を評価し、4.1 項の照射線量計で求めた線量分布との比較を行った。

4.2.2 測定結果及び考察

X線管電圧60kV時の線質指標0.6から0.9の左右方向における照射線量率単位のエネルギースペクトルをFig. 15からFig. 18に示す。線質指標0.6及び0.7の左方向のスペクトルは、照射角度が大きくなるにつれて低エネルギー側の成分が減少し、平均エネルギーが高エネルギー側に移行したが、線質指標が0.8及び0.9になると照射角度の違いによる低エネルギー側の減少は見られず、スペクトルの形状はほぼ同じになった。同様に右方向のスペクトルは、線質指標が大きくなつても（単色化が進行しても）照射角度に依存せずスペクトルの形状にあまり変化が無く、スペクトルの山が低くなる程度であった。

照射角度の違いによる線量分布の比較をFig. 19とFig. 20に示す。Fig. 19は照射線量計で求めた線量分布であり、Fig. 20はスペクトルから求めた線量分布である。両者の線量分布は、どの線質指標に於いてもほぼ同じ傾向を示し、スペクトル分布の評価が正しいことを証明した。スペクトルからの線量分布は、4.1 項と同様に線質指標が大きくなると線量率の最大値が中心より左方向に移行し、右方向では急激に線量率が低下することを確認した。

スペクトル評価のための波高分布測定には、通常Ge半導体検出器が使用されるが、X線発生装置の波高分布の測定に於いては鉛コリメータを必要とし、波高分布の測定が煩雑である。今回波高分布の測定に使用したCZT半導体検出器は、検出面積が小さく線量率に対する感度が低いため、鉛コリメータ無しで測定できる利点があり、波高分布の測定が容易に実施できる。

4.3 照射場の散乱線の測定

4.3.1 測定方法

X線照射場には、必ず一次X線と散乱X線が混在し、この散乱X線の割合を評価しておくことが放射線測定器の校正精度を向上させるために大切なことである。本実験では、散乱線の成分として校正台車のテーブル及び支持台から発生する散乱線と室内の空気及び床材から発生する室内散乱線が照射場に与える影響を下記の方法で評価した。

散乱線の評価では、33mm円筒型電離箱（ピクトリン社製550-4型）と500型エレクトロメータによる照射線量計を用いて散乱線量率を測定し、一次線の照射線量率との比を散乱割合として求めた。一次線の照射線量率の測定は、ある照射距離の自由空気中の照射線量率から、Fig. 21に示すように検出器の前方に検出器が一様に隠れる2cm厚さの鉛吸収板をセットして得られる散乱線量率を差し引いて求めた。

校正台車のテーブル及び支持台からの散乱線の測定は、照射口に30°円錐コリメータを設置し、校正台車を校正台車全体が照射野に入る4mの照射距離に固定し、X線ビームの中心軸に上記照射線量計検出器を水平にセットした。そして、Fig. 22に示すように校正台車上のテーブルの表面中

心がその検出器の中心になるように密着状態にし、その位置から校正テーブルを50cmまで下降したときの線量率を測定し、校正台車が無いときの同一距離における線量率との差から散乱線量率を求め、両者の比から散乱割合を評価した。支持台からの散乱割合は、校正テーブルを下降していったとき、一定の散乱割合に到達する値とし、テーブルからの散乱割合は全体の散乱割合から支持台の散乱割合を差し引いた値とした。照射に用いたX線線質は、Q I : 0.6の実効エネルギー 60keV である。さらに、X線ターゲットからの照射距離を変化させ、校正台車の有無による校正台車支持台からの散乱線の測定を行った。線量率の測定は、照射距離を1.5mから8mまで変化したときの各距離において実施し、シャドウコーン法によって得られた散乱線量率と一次照射線量率との割合を散乱割合とした。照射に用いたX線線質は、Q I : 0.8の実効エネルギー 95、160、240keVである。

X線照射口の円錐コリメータの角度を変化させたときの照射距離に対する散乱線の測定を行った。散乱線量率の測定は、円錐コリメータの角度を15° と30° に変化させて、鉛吸収体を用いたシャドウコーン法により実施し、照射距離の範囲及び測定に用いたX線線質は上記の校正台車支持台からの散乱割合の評価の場合と同様の方法とした。

4. 3. 2 測定結果及び考察

校正台車のテーブル及び支持台からの散乱線の測定結果をFig. 23に示す。校正台車全体（テーブル及び支持台）からの散乱線が照射場に与える影響は、以下の通り散乱割合で評価した。テーブルと検出器間距離が密着状態のときに散乱割合は 約5%であり、検出器からテーブルが遠ざかるに従って減少し、40cmを越える距離になると約1%で平坦となった。この平坦部分に相当する約1%が校正台車の支持台からの散乱成分と考えられ、この成分を除いた斜線部分がテーブルからの散乱割合と考えられる。この支持台からの散乱線は除くことができないが、テーブルからの散乱成分は40cm以上離すことにより零にでき、散乱線の影響をなくすことができることを実証した。

ターゲットからの照射距離を変化させて校正台車の有無による校正台車支持台からの散乱線を測定した結果をFig. 24に示す。同図において、点線が校正台車を使用したときの散乱特性であり、実線が使用しないときの散乱特性である。X線の線質が同じ場合の両者の散乱特性を比較すると、X線エネルギーにあまり関係なく校正台車を用いた方が1~2%高い散乱割合を示した。これが校正台車の支持台からの散乱割合である。この結果は、上記の測定結果（1%）と良く一致した。

円錐コリメータの角度を変化したときのターゲットからの照射距離に対する散乱線の照射場に与える影響の調査結果をFig. 25に示す。図中の各照射距離における散乱割合には、空気及び床材からの散乱線と校正台車の支持台からの散乱線が含まれている。円錐コリメータの角度が15° と30° の散乱割合を比較すると、30° の散乱特性は15° に対してX線エネルギーや照射距離にあまり関係なく約2倍に増加した。このように円錐コリメータの角度が大きくなると、照射立体角の増加により検出器近傍の空気散乱線が発生する領域の容積が増えて散乱割合が増加し、しかも照射距離が遠くなるに従って床材からの散乱線の寄与が増加することにより、散乱割合はさらに増大した。

本X線発生装置は放射線測定器の校正に用いる目的で設置したため、被校正測定器の検出器の

大きさを考慮すると、上記の結果から円錐コリメータの角度を 15° にすることが妥当と考える。また、照射場への散乱線の寄与を5%以下の散乱割合にするためには、照射距離を 6m以内にして使用すれば良いことがわかった。

5. 結 論

本試験では、東海研究所放射線標準施設棟に設置した校正用X線発生装置（Pantak社製HF-420C型）を用いて、放射線防護用の測定器の性能試験及び校正に使用するX線校正場のX線線質の設定及びそのエネルギースペクトルの測定評価を実施した。また、一部のX線線質について照射野の線量分布とエネルギー分布及び散乱線の影響等を調査した。これらの測定及び調査結果より以下の結論を得た。

- (1) X線線質の設定では、線質指標0.6、0.7、0.8及び0.9の4種類について管電圧10kVから350kVの範囲について実効エネルギーの異なる59線質を設定した。これらは、目標とする線質指標に対して±2%以内に納まった。また、線質の指標の一つである均等度の評価では、各線質指標の十数個の均等度の平均値に対して最大で±0.05の範囲に納めることができた。これらをISOの同等の線質条件と比較すると、我々が設定した線質条件の方がずれが少なく、線質条件の高度化が達成できた。
- (2) X線線質のエネルギースペクトルの評価では、上記で設定した全ての線質条件についてフルエンス率、照射線量率及び1cm線量当量率単位（50keV以下の実効エネルギーについては70μm線量当量率も評価）のスペクトルを評価し、その平均エネルギーを明らかにした。照射線量率単位のスペクトル平均エネルギーと実効エネルギーとの比較では、どの線質についても±5%以内で良く一致し、スペクトル評価が妥当であることを確認した。1cm線量当量率単位のスペクトル平均エネルギーと実効エネルギーの比較では、Q I : 0.7以下になると換算係数の光子依存性の影響からずれが±8%以上と大きいが、単色化が進行してスペクトルの広がりが狭くなるQ I : 0.8以上に於いては±4%以下と良く一致した。従って、検出器のエネルギー特性試験及び方向特性試験ではQ I : 0.8が一般的に用いられるので、この場合、実効エネルギーを1cm線量当量のスペクトル平均エネルギーとして用いて差し支えないことが確認できた。
- (3) 線質の線量率は、管電圧及び管電流を一定にしたとき線質指標が1に近づくに従ってスペクトルの低エネルギー側が基礎フィルタでろ過されてスペクトル面積が減少するため、照射線量率及び1cm線量当量率が減少し、Q I : 0.6とQ I : 0.9の同一管電圧、電流に対する照射線量率を比較すると、Q I : 0.9が約1/500に減少することを確認した。これは、管電圧が異なる他の線質についても同様の割合であった。
- (4) 実効エネルギーの1cm線量当量換算係数と各エネルギースペクトルの積分値から求めた1cm

線量当量換算係数の比較では、Q I :0.8以上に於いては両者の違いは ±2%以内であり、この違いを誤差として扱うことで各実効エネルギーに対応する1cm線量当量換算係数を各線質の1cm線量当量換算係数として良いことが確認できた。ただし、Q I :0.7以下では、スペクトルが広いため両者のずれは±3%～±5%のずれとなつたため注意を要する。

(5) 照射線量計を用いた照射野の水平・垂直方向の線量分布は、単色化の程度（線質指標の違い）により垂直方向は極端な変化が見られなかつたが、水平方向の線量分布が大きく変化した。また、これらの分布は、線質指標が同じ場合に管電圧が異なつても分布の変化が少ないことが分かつた。照射野の水平方向の線量分布が線質によって変化する理由を明らかにすると共に、線量が±3%以内で均一な照射エリアを各線質毎に設定し、照射精度の向上を図つた。

(6) 照射場の水平方向のスペクトル分布は、左方向に於いてQ I :0.6及び0.7では照射角度が大きくなるにつれて低エネルギー側の成分が減少し、平均エネルギーが高エネルギー側に多少移行したが、Q I :0.8以上になると照射角度による低エネルギー側の減少は見られず、スペクトルの形状はほぼ同じになつた。同様に右方向では、照射角度及び線質指標が変化してもスペクトルの形状はほとんど変化しなかつたが、スペクトルのピーク値が照射角度が増すに従つて急激に低下した。

スペクトルから求めた線量分布と照射線量計から求めた線量分布は、各線質に於いてほぼ同じ傾向を示し、C Z T半導体検出器によるスペクトル分布の評価結果が正しいことを証明した。

(7) 照射場に与える散乱線の影響調査では、校正台車のテーブル及び支持台からの影響を具体的に明らかにすると共に、検出器と校正テーブル間距離を40cm以上離すことでテーブルからの散乱線の寄与が無視できることを実証した。照射立体角と室内散乱線の発生割合の調査では、照射立体角を15°にすることにより、照射距離 6m以内での校正台車及び室内散乱線の寄与を5%以下に低減できることを明らかにした。

以上の測定及び調査結果により、放射線測定器の性能試験に用いるX線校正場のX線線質の設定に関する詳細なデータが整備できた。また、線質によるエネルギースペクトルの変化や照射野の線量・エネルギー分布並びに散乱線の影響等、X線を用いた測定器校正の品質を高めるためのデータが整備でき、今後、これらのデータを用いることにより、校正精度を一層向上させることができるようになつた。

参考文献

- 1) 日本規格協会 ; JIS Z 4301 「X線用フィルムバッジ」 (1990)
- 2) 日本規格協会 ; JIS Z 4302 「 γ 線及び硬X線用フィルムバッジ」 (1990)
- 3) 日本規格協会 ; JIS Z 4308 「X線及び γ 線用直読式ポケット線量計」 (1991)
- 4) 日本規格協会 ; JIS Z 4312 「X線及び γ 線用個人警報線量計」 (1990)
- 5) 日本規格協会 ; JIS Z 4324 「X線及び γ 線用エリアモニタ」 (1980)
- 6) 日本規格協会 ; JIS Z 4333 「X線及び γ 線用線量当量率サーベイメータ」 (1990)
- 7) 日本規格協会 ; JIS Z 4511 「照射線量測定器及び線量当量測定器の校正方法」 (1997)
- 8) 清水 滋 ; JAERI-Review 94-007「保健物理－管理と研究No. 36」 p. 192～195 (1994)
- 9) WH. J. Veiglo ; Atomic data tables Vol. 5 (1973)
- 10) 國際標準化機構 ; ISO-4037-1(1996)
- 11) Baedecker, P. A; Anal. Chem. 43:405 (1971)
- 12) ICRP ; Publication 21 (1971)
- 13) ICRP ; Publication 51 (1987)
- 14) 日本非破壊検査協会 ; 非破壊検査便覧(1978)
- 15) 日本非破壊検査協会 ; 放射線透過試験A, B(1981)
- 16) S. SHIMIZU and K. MINAMI ; IAEA-SM-330/11. Proceedings of an international symposium on measurement assurance in dosimetry , p. 649～657(1994)
- 17) 清水, 他 ; 日本保健物理学会第23回研究発表会 A. 13(1988)
- 18) W. Will ; Radiation Protection Dosimetry Vol. 48 No. 3 p. 245～249(1993)

Table 1 Performance of the X ray generator

Technical Data	Contents
Inherent filtration	7mm Be (+0.3mm Al)
Tube voltage	10kV ~ 350kV
Tube current	Large focus 0 ~ 30mA Small focus 0 ~ 8mA
Ripple	less than ±0.2%
Voltage stability	±0.013%
Current stability	±0.01 %
Dose stability	±0.1 %
Transit time of shutter	1.9 seconds
Leakage dose rate	less than 0.4 μSv/h
Beam center axis error	less than ±2mm at 1m
Beam expanse angle error	less than ±3mm at 1m

Table 2 Specification of standard measuring instruments for X rays

Type of X Ray (Energy Range)	Electrometer Model (Manufacturer)	Detector Model(Volume) and Manufacturer (Country)
Soft X Rays (10keV~50keV)	2590A(NE)	2575(600ml) NE, LIM(UK)*1
	617(KEITHLEY)	96035(15ml) KEITHLEY, INC(USA)
	500(VICTOREEN)	30-330(0.2ml) VICTOREEN, INC(USA)
Hard X Rays (50keV~300keV)	617(KEITHLEY)	A6(800ml), A5(100ml) EXRADIN, INC(USA)
	500(VICTOREEN)	550-3(330ml), 550-4(33ml) VICTOREEN, INC(USA)
	192(CAPINTEC)	PR-18(1.8l), PM-500(530ml) CAPINTEC, INC(USA)
	2590A(NE)	PM-30(28ml)
		2575(600ml), 2530/1(35ml) NE, LIM(UK)
	1000(TOYO MEDIC)	A6(800ml) EXRADIN, INC(USA)

※ 1 NE, LIM ; NUCLEAR ENTERPRISES, LIM

Table 3 Calculating expression to effective energy for the various filter materials

Filer material	Effective energy calculating expression*	Error (%)	Effective energy range(keV)
Aluminum	$E = 22.03t^{0.341} + 0.1469t^{2.01}$	± 0.4	6 ~ 60
Copper	$E = 76.48t^{0.356} + 2.543t^{2.00}$	± 0.6	15 ~ 200
Tin	$E = 122.5t^{0.369} + 1.660t^{2.05}$	± 0.5	40 ~ 400
Lead	$E = 240.7t^{0.400} + 5.150t^{1.99}$	± 0.6	100 ~ 1000

* E : Effective energy (keV) , t : Half value layer (mm)

Table 4 Relation between the effective energy and the half value layer of X ray for various filter materials

Effective energy (keV)	Al		Cu		Sn		Pb	
	Total ^{*1}	HVL ^{*2}	Total	HVL	Total	HVL	Total	HVL
6.0	5.20+3	0.0222						
8.0	2.26+3	0.0510						
10.0	1.17+3	0.0985						
15.0	3.55+2	0.325	7.29+3	0.0103				
20.0	1.53+2	0.753	3.57+3	0.0229				
30.0	5.03+1	2.29	1.14+3	0.0718				
40.0	2.54+1	4.54	5.04+2	0.162	3.88+3	0.0482		
50.0	1.65+1	6.99	2.70+2	0.303	2.13+3	0.0879		
60.0	1.25+1	9.22	1.65+2	0.496	1.30+3	0.144		
80.0			7.92+1	1.03	5.92+2	0.316		
100			4.78+1	1.71	3.25+2	0.576	1.93+3	0.110
150			2.33+1	3.51	1.17+2	1.60	6.85+2	0.307
200			1.64+1	4.99	6.23+1	3.00	3.38+2	0.623
300					3.14+1	5.96	1.35+2	1.56
400					2.22+1	8.43	7.71+1	2.73
500							5.30+1	3.97
600							4.07+1	5.17
800							2.88+1	7.31
1000							2.30+1	9.15
Conversion factor ^{*3}	2.232E-2		2.232E-2		2.232E-2		2.232E-2	
Density (g/cm ³)	2.6940		8.9400		7.3000		1.133E+1	

*1 Total attenuation cross section (barns)

*2 Half value layer (mm)

*3 Conversion factor (cm²/g/barns)

Table 5 Specification of X-ray beam-quality for the quality index 0.6
(Wide spectrum)

Tube voltage (kV)	Added filter thickness (mm)	Half value layer (mm)						Homogeneity coefficient	Effective energy (keV)	Quality index		
		First			Second							
		A _λ	Cu	Sn	Pb	A _λ	Cu	Sn				
30	0.30				0.513			0.700		0.73		
40	1.69				1.28			1.62		0.79		
50	3.50				2.30			3.00		0.77		
60	0.19				0.130			0.164		0.79		
70	0.29				0.195			0.261		0.75		
75	0.30				0.223			0.307		0.73		
80	0.38				0.290			0.360		0.81		
100	0.59				0.500			0.640		0.78		
120	0.90				0.780			1.030		0.76		
150	1.49				1.300			1.925		0.68		
200	2.50				2.40			3.00		0.80		
250	1.52					1.688			2.262	0.75		
300	2.02						2.433		2.984	0.82		
350		1.01	0.52				3.30		4.10	0.80		

Table 6 Specification of X ray beam-quality for the quality index 0.7
 (Middle spectrum)

Tube voltage (kV)	Added filter thickness (mm)				Half value layer (mm)				Homogeneity coefficient	Effective energy (keV)	Quality index			
					First									
	A _λ	Cu	S _n	Pb	A _λ	Cu	S _n	Pb						
20	0.10				0.253				0.324		0.78			
30	1.60				0.86				0.97		0.88			
40	4.01				1.92				2.14		0.90			
50	0.30				0.120				0.140		0.86			
60	0.39				0.174				0.229		0.81			
70	0.59				0.286				0.366		0.76			
80	0.78				0.420				0.485		0.78			
100	1.39				0.733				0.857		0.86			
120	2.21				1.130				1.310		0.86			
150	3.50				1.84				2.24		0.82			
200	6.07				3.10				3.37		0.92			
250		3.83				2.35				2.65	0.89			
300		1.01	1.00			3.317				3.650	0.91			
350		3.03	1.00			4.25				4.75	0.89			
										241	0.69			

Table 7 Specification of X-ray beam-quality for the quality index 0.8
 (Narrow spectrum)

Tube voltage (kV)	Added filter thickness (mm)	Half value layer (mm)						Homogeneity coefficient	Effective energy (keV)	Quality index		
		First			Second							
		A _λ	Cu	Sn	Pb	A _λ	Cu	Sn				
15	0.10				0.162			0.186		0.87		
20	0.80				0.38			0.43		0.87		
30	4.01				1.26			1.365		0.92		
40	0.30				0.086			0.092		0.93		
50	0.59				0.160			0.166		0.96		
60	1.00				0.279			0.304		0.92		
70	1.38				0.405			0.445		0.91		
80	2.21				0.620			0.640		0.97		
100	3.71				1.025			1.115		0.92		
120	5.88				1.600			1.760		0.91		
150	8.08				2.438			2.462		0.99		
200	2.53	0.52			1.80			2.025	0.89	158		
250	1.01	1.99			2.933			3.284	0.89	197		
300	1.01	2.99			4.25			4.45	0.96	241		
350	4.60	3.50			5.40			5.40	1.00	281		

Table 8 Specification of X-ray beam-quality for the quality index 0.9
(Low air kerma rate spectrum)

Tube voltage (kV)	Added filter thickness (mm)						Half value layer (mm)						Homogeneity coefficient	Effective energy (keV)	Quality index			
	First						Second											
	A _λ	Cu	Sn	Pb	A _λ	Cu	Sn	A _λ	Cu	Sn	A _λ	Cu						
10					0.072			0.072					1.00	9.0	0.90			
15	1.00				0.225			0.225					1.00	13.3	0.88			
20	2.70				0.513			0.513					1.00	17.6	0.88			
30		0.38			1.63			1.70					0.96	26.4	0.88			
40		0.80			0.119			0.123					0.95	35.9	0.90			
50		1.80			0.218			0.225					0.97	44.6	0.89			
60		2.80			0.380			0.410					0.93	54.6	0.91			
70		4.32			0.573			0.647					0.89	63.6	0.91			
80		8.07			0.770			0.790					0.98	71.2	0.89			
100		2.82			1.37			1.38					0.99	90.3	0.90			
120		5.11			2.06			2.12					0.97	110	0.91			
150		3.30	1.00		3.00			3.03					0.99	136	0.91			
200		3.54	2.99			2.38			2.45				0.97	179	0.89			
250		4.31	5.49			3.75			3.75				1.00	224	0.90			
300		3.30	7.08			5.15			5.15				1.00	272	0.91			
350		5.61	11.06			6.40			6.60				0.97	318	0.91			

Table 9 Mean and Effective Energies for X-ray Spectra (1) (QI : 0.6)

Tube Voltage (kV)	Mean Energy (keV)			Effective Energy (keV)			E_{el}/\bar{E}_i	$E_{el}/\bar{E}_{H(10)}$	$E_{el}/\bar{E}_{H(0.07)}$
	$\bar{E}_{i^{+}}$	$\bar{E}_{e^{-}}$	$\bar{E}_{H(10)}^{+3}$	$\bar{E}_{H(10)}^{-4}$	\bar{E}_{el}^{+3}	\bar{E}_{el}^{-4}			
30	20.0	8.4	7.7	7.1	21.2	11.6	1.6	1.000	1.000
40	22.7	10.0	9.7	9.1	22.7	12.6	1.8	0.938	0.938
50	24.4	11.6	10.4	9.8	24.4	13.2	2.0	0.926	0.926
60	26.1	13.2	12.4	11.7	26.1	14.0	2.4	0.920	0.920
70	27.8	14.8	13.6	12.9	27.8	14.8	2.8	0.914	0.914
80	29.5	16.4	15.0	14.3	29.5	15.8	3.2	0.907	0.907
90	31.2	18.0	16.6	15.7	31.2	17.0	3.6	0.899	0.899
100	32.9	19.6	18.2	17.3	32.9	18.2	4.0	0.891	0.891
110	34.6	21.2	19.8	18.8	34.6	19.8	4.4	0.883	0.883
120	36.3	22.8	21.4	20.3	36.3	21.4	4.8	0.875	0.875
130	38.0	24.4	23.0	21.9	38.0	23.0	5.2	0.867	0.867
140	39.7	26.0	24.6	23.5	39.7	24.6	5.6	0.858	0.858
150	41.4	27.6	26.2	25.1	41.4	25.2	6.0	0.849	0.849
160	43.1	29.2	27.8	26.7	43.1	26.7	6.4	0.840	0.840
170	44.8	30.8	29.4	28.3	44.8	28.3	6.8	0.831	0.831
180	46.5	32.4	31.0	29.9	46.5	29.9	7.2	0.821	0.821
190	48.2	34.0	32.6	31.5	48.2	31.5	7.6	0.811	0.811
200	49.9	35.6	34.2	33.1	49.9	33.1	8.0	0.801	0.801
210	51.6	37.2	35.8	34.7	51.6	34.7	8.4	0.791	0.791
220	53.3	38.8	37.4	36.3	53.3	36.3	8.8	0.781	0.781
230	55.0	40.4	39.0	37.9	55.0	37.9	9.2	0.771	0.771
240	56.7	42.0	40.6	39.5	56.7	39.5	9.6	0.761	0.761
250	58.4	43.6	42.2	41.1	58.4	41.1	10.0	0.751	0.751
260	60.1	45.2	43.8	42.7	60.1	42.7	10.4	0.741	0.741
270	61.8	46.8	45.4	44.3	61.8	44.3	10.8	0.731	0.731
280	63.5	48.4	47.0	45.9	63.5	45.9	11.2	0.721	0.721
290	65.2	50.0	48.6	47.5	65.2	47.5	11.6	0.711	0.711
300	66.9	51.6	50.2	49.1	66.9	49.1	12.0	0.701	0.701
310	68.6	53.2	51.8	50.7	68.6	50.7	12.4	0.691	0.691
320	70.3	54.8	53.4	52.3	70.3	52.3	12.8	0.681	0.681
330	72.0	56.4	55.0	53.9	72.0	53.9	13.2	0.671	0.671
340	73.7	58.0	56.6	55.5	73.7	55.5	13.6	0.661	0.661
350	75.4	59.6	58.2	57.1	75.4	57.1	14.0	0.651	0.651
360	77.1	61.2	59.8	58.7	77.1	58.7	14.4	0.641	0.641
370	78.8	62.8	61.4	60.3	78.8	60.3	14.8	0.631	0.631
380	80.5	64.4	63.0	61.9	80.5	61.9	15.2	0.621	0.621
390	82.2	66.0	64.6	63.5	82.2	63.5	15.6	0.611	0.611
400	83.9	67.6	66.2	65.1	83.9	65.1	16.0	0.601	0.601
410	85.6	69.2	67.8	66.7	85.6	66.7	16.4	0.591	0.591
420	87.3	70.8	69.4	68.3	87.3	68.3	16.8	0.581	0.581
430	89.0	72.4	71.0	69.9	89.0	69.9	17.2	0.571	0.571
440	90.7	74.0	72.6	71.5	90.7	71.5	17.6	0.561	0.561
450	92.4	75.6	74.2	73.1	92.4	73.1	18.0	0.551	0.551
460	94.1	77.2	75.8	74.7	94.1	74.7	18.4	0.541	0.541
470	95.8	78.8	77.4	76.3	95.8	76.3	18.8	0.531	0.531
480	97.5	80.4	79.0	77.9	97.5	77.9	19.2	0.521	0.521
490	99.2	82.0	80.6	79.5	99.2	79.5	19.6	0.511	0.511
500	100.9	83.6	82.2	81.1	100.9	81.1	20.0	0.501	0.501
510	102.6	85.2	83.8	82.7	102.6	82.7	20.4	0.491	0.491
520	104.3	86.8	85.4	84.3	104.3	84.3	20.8	0.481	0.481
530	106.0	88.4	87.0	85.9	106.0	85.9	21.2	0.471	0.471
540	107.7	90.0	88.6	87.5	107.7	87.5	21.6	0.461	0.461
550	109.4	91.6	90.2	89.1	109.4	89.1	22.0	0.451	0.451
560	111.1	93.2	91.8	90.7	111.1	90.7	22.4	0.441	0.441
570	112.8	94.8	93.4	92.3	112.8	92.3	22.8	0.431	0.431
580	114.5	96.4	95.0	93.9	114.5	93.9	23.2	0.421	0.421
590	116.2	98.0	96.6	95.5	116.2	95.5	23.6	0.411	0.411
600	117.9	99.6	98.2	97.1	117.9	97.1	24.0	0.401	0.401
610	119.6	101.2	99.8	98.7	119.6	98.7	24.4	0.391	0.391
620	121.3	102.8	101.4	100.3	121.3	100.3	24.8	0.381	0.381
630	123.0	104.4	103.0	101.9	123.0	101.9	25.2	0.371	0.371
640	124.7	106.0	104.6	103.5	124.7	103.5	25.6	0.361	0.361
650	126.4	107.6	106.2	104.9	126.4	104.9	26.0	0.351	0.351
660	128.1	109.2	107.8	106.3	128.1	106.3	26.4	0.341	0.341
670	129.8	110.8	109.4	107.9	129.8	107.9	26.8	0.331	0.331
680	131.5	112.4	111.0	109.5	131.5	109.5	27.2	0.321	0.321
690	133.2	114.0	112.6	111.1	133.2	111.1	27.6	0.311	0.311
700	134.9	115.6	114.2	112.7	134.9	112.7	28.0	0.301	0.301
710	136.6	117.2	115.8	114.3	136.6	114.3	28.4	0.291	0.291
720	138.3	118.8	117.4	115.9	138.3	115.9	28.8	0.281	0.281
730	140.0	120.4	119.0	117.5	140.0	117.5	29.2	0.271	0.271
740	141.7	122.0	119.6	118.1	141.7	118.1	29.6	0.261	0.261
750	143.4	123.6	121.2	119.7	143.4	119.7	30.0	0.251	0.251
760	145.1	125.2	122.8	121.3	145.1	121.3	30.4	0.241	0.241
770	146.8	126.8	124.4	122.9	146.8	122.9	30.8	0.231	0.231
780	148.5	128.4	126.0	124.5	148.5	124.5	31.2	0.221	0.221
790	150.2	130.0	127.6	126.1	150.2	126.1	31.6	0.211	0.211
800	151.9	131.6	129.2	127.7	151.9	127.7	32.0	0.201	0.201
810	153.6	133.2	130.8	129.3	153.6	129.3	32.4	0.191	0.191
820	155.3	134.8	132.4	130.9	155.3	130.9	32.8	0.181	0.181
830	157.0	136.4	134.0	132.5	157.0	132.5	33.2	0.171	0.171
840	158.7	138.0	135.6	134.1	158.7	134.1	33.6	0.161	0.161
850	160.4	139.6	137.2	135.7	160.4	135.7	34.0	0.151	0.151
860	162.1	141.2	138.8	137.3	162.1	137.3	34.4	0.141	0.141
870	163.8	142.8	140.4	138.9	163.8	138.9	34.8	0.131	0.131
880	165.5	144.4	142.0	140.5	165.5	140.5	35.2	0.121	0.121
890	167.2	146.0	143.6	142.1	167.2	142.1	35.6	0.111	0.111
900	168.9	147.6	145.2	143.6	168.9	143.6	36.0	0.101	0.101
910	170.6	149.2	146.8	145.1	170.6	145.1	36.4	0.091	0.091
920	172.3	150.8	148.4	146.7	172.3	146.7	36.8	0.081	0.081
930	174.0	152.4	150.0	148.3	174.0	148.3	37.2	0.071	0.071
940	175.7	154.0	151.6	149.9	175.7	149.9	37.6	0.061	0.061
950	177.4	155.6	153.2	151.5	177.4	151.5	38.0	0.051	0.051
960	179.1	157.2	154.8	153.1	179.1	153.1	38.4	0.041	0.041
970	180.8	158.8	156.4	154.7	180.8	154.7	38.8	0.031	0.031
980	182.5	160.4	158.0	156.3	182.5	156.3	39.2	0.021	0.021
990	184.2	162.0	159.6	158.1	184.2	158.1	39.6	0.011	0.011
1000	185.9	163.6	161.2	159.7	185.9	159.7	40.0	0.001	0.001

Ergonomics in Design • Influence Rate [Unit]

תְּבִיבָה וְעַמְּלֵה

*2 E. : Exposure Rate Unit

3 $\overline{E_{H(10)}}$: 1cm Dose Equivalent Rate, H(10), Unit

*A = $\frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}}} \times 100$ % Dose Equivalent Rate (%)

Unit **Unit** **Unit** **Unit** **Unit**

Table I Mean and Effective Energies for X-ray Spectra (2) (QI: 0.7)

Tube Voltage (kV)	Mean Energy (keV)			Effective Energy (keV) E_{eff}	$E_{\text{el}}/\overline{E}_{\text{el}}$	$E_{\text{el}}/\overline{E}_{\text{el}}$	$E_{\text{el}}/\overline{E}_{\text{el}}$
	$\overline{E}_{\text{el}}^{11}$	$\overline{E}_{\text{el}}^{12}$	$\overline{E}_{\text{el}}^{13}$				
20	15.6	14.8	16.2	14.8	13.8	13.0	13.0
30	23.0	21.7	22.6	21.9	21.6	21.4	21.4
40	33.0	32.8	33.4	32.9	32.7	32.5	32.5
50	44.0	44.0	45.0	44.8	43.7	43.7	43.7
60	55.0	55.0	55.0	54.8	53.7	53.7	53.7
70	67.0	67.0	67.0	67.0	65.0	65.0	65.0
80	78.0	78.0	78.0	78.0	75.0	75.0	75.0
90	89.0	89.0	89.0	89.0	85.0	85.0	85.0
100	100.0	100.0	100.0	100.0	95.0	95.0	95.0
110	115.0	115.0	115.0	115.0	105.0	105.0	105.0
120	120.0	120.0	120.0	120.0	110.0	110.0	110.0
130	130.0	130.0	130.0	130.0	120.0	120.0	120.0
140	140.0	140.0	140.0	140.0	130.0	130.0	130.0
150	150.0	150.0	150.0	150.0	140.0	140.0	140.0
160	160.0	160.0	160.0	160.0	150.0	150.0	150.0
170	170.0	170.0	170.0	170.0	160.0	160.0	160.0
180	180.0	180.0	180.0	180.0	170.0	170.0	170.0
190	190.0	190.0	190.0	190.0	180.0	180.0	180.0
200	200.0	200.0	200.0	200.0	190.0	190.0	190.0
210	210.0	210.0	210.0	210.0	200.0	200.0	200.0
220	220.0	220.0	220.0	220.0	210.0	210.0	210.0
230	230.0	230.0	230.0	230.0	220.0	220.0	220.0
240	240.0	240.0	240.0	240.0	230.0	230.0	230.0
250	250.0	250.0	250.0	250.0	240.0	240.0	240.0
260	260.0	260.0	260.0	260.0	250.0	250.0	250.0
270	270.0	270.0	270.0	270.0	260.0	260.0	260.0
280	280.0	280.0	280.0	280.0	270.0	270.0	270.0
290	290.0	290.0	290.0	290.0	280.0	280.0	280.0
300	300.0	300.0	300.0	300.0	290.0	290.0	290.0
310	310.0	310.0	310.0	310.0	300.0	300.0	300.0
320	320.0	320.0	320.0	320.0	310.0	310.0	310.0
330	330.0	330.0	330.0	330.0	320.0	320.0	320.0
340	340.0	340.0	340.0	340.0	330.0	330.0	330.0
350	350.0	350.0	350.0	350.0	340.0	340.0	340.0
360	360.0	360.0	360.0	360.0	350.0	350.0	350.0
370	370.0	370.0	370.0	370.0	360.0	360.0	360.0
380	380.0	380.0	380.0	380.0	370.0	370.0	370.0
390	390.0	390.0	390.0	390.0	380.0	380.0	380.0
400	400.0	400.0	400.0	400.0	390.0	390.0	390.0
410	410.0	410.0	410.0	410.0	400.0	400.0	400.0
420	420.0	420.0	420.0	420.0	410.0	410.0	410.0
430	430.0	430.0	430.0	430.0	420.0	420.0	420.0
440	440.0	440.0	440.0	440.0	430.0	430.0	430.0
450	450.0	450.0	450.0	450.0	440.0	440.0	440.0
460	460.0	460.0	460.0	460.0	450.0	450.0	450.0
470	470.0	470.0	470.0	470.0	460.0	460.0	460.0
480	480.0	480.0	480.0	480.0	470.0	470.0	470.0
490	490.0	490.0	490.0	490.0	480.0	480.0	480.0
500	500.0	500.0	500.0	500.0	490.0	490.0	490.0
510	510.0	510.0	510.0	510.0	500.0	500.0	500.0
520	520.0	520.0	520.0	520.0	510.0	510.0	510.0
530	530.0	530.0	530.0	530.0	520.0	520.0	520.0
540	540.0	540.0	540.0	540.0	530.0	530.0	530.0
550	550.0	550.0	550.0	550.0	540.0	540.0	540.0
560	560.0	560.0	560.0	560.0	550.0	550.0	550.0
570	570.0	570.0	570.0	570.0	560.0	560.0	560.0
580	580.0	580.0	580.0	580.0	570.0	570.0	570.0
590	590.0	590.0	590.0	590.0	580.0	580.0	580.0
600	600.0	600.0	600.0	600.0	590.0	590.0	590.0
610	610.0	610.0	610.0	610.0	600.0	600.0	600.0
620	620.0	620.0	620.0	620.0	610.0	610.0	610.0
630	630.0	630.0	630.0	630.0	620.0	620.0	620.0
640	640.0	640.0	640.0	640.0	630.0	630.0	630.0
650	650.0	650.0	650.0	650.0	640.0	640.0	640.0
660	660.0	660.0	660.0	660.0	650.0	650.0	650.0
670	670.0	670.0	670.0	670.0	660.0	660.0	660.0
680	680.0	680.0	680.0	680.0	670.0	670.0	670.0
690	690.0	690.0	690.0	690.0	680.0	680.0	680.0
700	700.0	700.0	700.0	700.0	690.0	690.0	690.0
710	710.0	710.0	710.0	710.0	700.0	700.0	700.0
720	720.0	720.0	720.0	720.0	710.0	710.0	710.0
730	730.0	730.0	730.0	730.0	720.0	720.0	720.0
740	740.0	740.0	740.0	740.0	730.0	730.0	730.0
750	750.0	750.0	750.0	750.0	740.0	740.0	740.0
760	760.0	760.0	760.0	760.0	750.0	750.0	750.0
770	770.0	770.0	770.0	770.0	760.0	760.0	760.0
780	780.0	780.0	780.0	780.0	770.0	770.0	770.0
790	790.0	790.0	790.0	790.0	780.0	780.0	780.0
800	800.0	800.0	800.0	800.0	790.0	790.0	790.0
810	810.0	810.0	810.0	810.0	800.0	800.0	800.0
820	820.0	820.0	820.0	820.0	810.0	810.0	810.0
830	830.0	830.0	830.0	830.0	820.0	820.0	820.0
840	840.0	840.0	840.0	840.0	830.0	830.0	830.0
850	850.0	850.0	850.0	850.0	840.0	840.0	840.0
860	860.0	860.0	860.0	860.0	850.0	850.0	850.0
870	870.0	870.0	870.0	870.0	860.0	860.0	860.0
880	880.0	880.0	880.0	880.0	870.0	870.0	870.0
890	890.0	890.0	890.0	890.0	880.0	880.0	880.0
900	900.0	900.0	900.0	900.0	890.0	890.0	890.0
910	910.0	910.0	910.0	910.0	900.0	900.0	900.0
920	920.0	920.0	920.0	920.0	910.0	910.0	910.0
930	930.0	930.0	930.0	930.0	920.0	920.0	920.0
940	940.0	940.0	940.0	940.0	930.0	930.0	930.0
950	950.0	950.0	950.0	950.0	940.0	940.0	940.0
960	960.0	960.0	960.0	960.0	950.0	950.0	950.0
970	970.0	970.0	970.0	970.0	960.0	960.0	960.0
980	980.0	980.0	980.0	980.0	970.0	970.0	970.0
990	990.0	990.0	990.0	990.0	980.0	980.0	980.0
1000	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	990.0	990.0	990.0

Table 1 1 Mean and Effective Energies for X ray Spectra(3) (QI : 0. 8)

Tube Voltage (kV)	Mean Energy (keV)			Effective Energy (keV) E_{ef}	E_{ef}/\bar{E}_t	E_{ef}/\bar{E}_e	$E_{ef}/\bar{E}_{H(10)}$	$E_{ef}/\bar{E}_{H(0.07)}$
	\bar{E}_t^{*1}	\bar{E}_x^{*2}	$\bar{E}_{H(10)}^{*3}$ $\bar{E}_{H(0.07)}^{*4}$					
15	12.5	12.2	13.1	12.2	11.8	0.944	0.967	0.967
20	16.7	16.3	16.9	16.2	15.9	0.952	0.975	0.992
30	24.9	24.2	24.8	24.3	24.1	0.968	0.976	0.985
40	39.1	39.2	39.7	39.5	39.7	0.961	0.971	0.973
50	49.1	49.0	49.0	49.0	48.7	0.968	0.978	0.986
60	55.1	54.7	54.7	54.7	55.5	0.966	0.971	0.976
70	65.1	65.0	65.0	65.0	65.5	0.966	0.971	0.976
80	79.3	79.0	79.0	79.0	79.6	0.966	0.971	0.976
100	113.9	113.9	113.9	113.9	120	0.960	0.966	0.971
120	149	149	149	149	158	0.970	0.976	0.982
150	199	199	199	199	197	0.974	0.979	0.985
200	235	235	235	235	241	0.966	0.971	0.979
250	266	266	266	266	281	0.956	0.961	0.969

Table 1 2 Mean and Effective Energies for X ray Spectra(4) (QI : 0. 9)

Tube Voltage (kV)	Mean Energy (keV)			Effective Energy (keV) E_{ef}	E_{ef}/\bar{E}_t	E_{ef}/\bar{E}_e	$E_{ef}/\bar{E}_{H(10)}$	$E_{ef}/\bar{E}_{H(0.07)}$
	\bar{E}_t^{*1}	\bar{E}_x^{*2}	$\bar{E}_{H(10)}^{*3}$ $\bar{E}_{H(0.07)}^{*4}$					
10	8.8	8.7	8.7	9.0	0.923	1.034	0.978	1.030
15	13.2	13.6	13.2	13.6	1.008	1.008	0.989	1.008
20	17.6	17.8	17.6	17.6	1.000	0.989	0.981	1.000
30	26.0	26.9	26.0	26.0	26.4	0.985	0.997	0.995
40	35.4	35.4	35.4	35.4	35.4	0.982	0.991	0.990
50	45.4	45.4	45.4	45.4	45.4	0.980	0.990	0.989
60	53.0	53.0	53.0	53.0	53.0	0.978	0.989	0.997
70	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	0.976	0.989	0.995
80	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	0.974	0.989	0.994
100	90.2	90.2	90.2	90.2	90.2	0.972	0.989	0.993
120	108	108	108	108	108	0.970	0.989	0.995
150	132	133	132	132	133	0.968	0.989	0.994
200	178	179	178	178	179	0.966	0.989	0.992
250	222	223	222	222	223	0.964	0.989	0.991
350	259	261	261	261	261	0.962	0.989	0.990

Table 1 3 Resolution of X ray spectra(1) (QI:0.6, 0.7)

Tube Voltage (kV)	Resolution (%)							
	f * ¹	X * ²	QI=0.6 H'(10) * ³	H' (0.07) * ⁴	f	X	QI=0.7 H'(10)	H' (0.07)
20					39	48	33	48
30	61	62	58	69	45	51	45	51
40	61	61	59	64	47	52	49	52
50	60	60	60	62	44	49	46	47
60	60	63	63	64	49	54	51	
70	60	66	64		48	54	51	
75	64	68	67					
80	62	70	67		49	55	52	
100	62	72	66		52	58	57	
120	61	69	66		58	61	60	
150	66	74	72		60	64	63	
200	69	78	76		61	64	64	
250	67	72	73		65	63	65	
300	67	77	76		59	52	53	
350	78	74	75		66	61	61	
Mean Value (%)	64±5	69±6	67±6	65±3	53±8	56±6	54±9	50±2

*1 f :Fluence rate spectra

*2 X :Exposure rate spectra

*3 H'(10) :Ambient Dose Equivalent Rate H'(10)

*4 H' (0.07) :Directional Dose Equivalent Rate H' (0.07)

Table 1 4 Resolution of X ray spectra(2) (QI:0.8, 0.9)

Tube Voltage (kV)	Resolution (%)							
	f	X	QI=0.8 H'(10)	H' (0.07)	f	X	QI=0.9 H'(10)	H' (0.07)
10					20	22		21
15	28	32	19	32	18	20	14	19
20	29	33	26	33	18	20	17	19
30	30	35	31	34	15	17	16	16
40	31	36	33	35	16	17	17	17
50	30	34	32	33	14	14	14	14
60	31	34	33		16	16	16	
70	30	31	31		17	19	19	
80	32	33	32		17	17	17	
100	38	38	38		17	17	17	
120	43	39	40		17	16	16	
150	35	32	33		20	18	18	
200	46	42	43		18	17	17	
250	36	33	34		19	18	17	
300	40	37	37		23	22	22	
350	43	40	40		23	22	22	
Mean Value (%)	35±5	35±3	33±6	33±1	18±3	18±2	17±2	18±3

Table 1 5 Range of dose rate for X ray irradiation(1) (Q1 : 0. 6)

Tube Voltage (kV)	Effective Energy (keV)	Dose Rate (mR/min)	Maximum Current (mA)	Exposure Rate Maximum (at 1.5m) (mR/min)	Conversion Coefficient (mSv/R)	Dose Equivalent Rate Maximum (at 1.5m) (mSv/min)	Minimum (at 5.0m) (μSv/min)
30	17.6	292	10.0	1298	11.7	3.95	5.13
40	24.2	166	14.0	1033	6.6	7.47	48.0
50	30.0	1133	17.0	854	4.59	9.52	43.0
60	36.8	985	20.0	871	3.90	11.09	45.0
75	44.7	126	22.0	929	5.00	12.16	66.0
80	49.2	224	23.0	1288	4.66	17.34	67.0
100	60.4	114	24.0	1216	4.17	17.23	64.6
120	71.6	158	27.0	1896	5.28	28.97	96.6
150	88.3	195	29.0	2513	5.36	38.60	119.0
200	119	265	27.0	3180	4.83	47.16	157.2
250	154	455	20.0	4044	3.70	55.40	249.3
300	180	664	16.0	4721	2.82	60.54	340.5
350	210	1084	14.0	6745	4.4	83.57	537.2
		1290	11.0	6307	5.1	75.87	620.0

Current is 1.0mA for minimum values.

Table 1 6 Range of dose rate for X ray irradiation(2) (Q1 : 0. 7)

Tube Voltage (kV)	Effective Energy (keV)	Dose Rate (mR/min)	Maximum Current (mA)	Exposure Rate Maximum (at 1.5m) (mR/min)	Conversion Coefficient (mSv/R)	Dose Equivalent Rate Maximum (at 1.5m) (mSv/min)	Minimum (at 5.0m) (μSv/min)
20	13.8	127	6.0	339	5.1	1.62	0.55
30	21.0	67	10.0	298	2.7	5.75	1.71
40	28.0	51	14.0	331	0.5	8.82	2.80
50	36.0	26	20.0	96	1.45	2.25	4.19
60	44.1	37	22.0	352	1.05	7.33	4.96
70	56.6	33	24.0	469	0.88	4.97	7.03
80	69.1	44	27.0	672	0.97	5.39	10.34
100	83.3	56	29.0	864	2.47	14.02	11.65
120	104	67	27.0	1664	2.99	14.15	20.22
150	139	97	20.0	1538	6.6	14.42	24.19
200	177	173	16.0	1948	1.00	1.42	136.1
250	210	274	14.0	2495	2.64	3.01	193.0
300	241	55	11.0	2694	2.2	1.76	259.2

Table 1 7 Range of dose rate for X-ray irradiation(3) (Q1:0.8)

Tube Voltage (kV)	Effective Energy (keV)	Dose Rate (mR/min · mA)	Maximum Current (mA)	Exposure Rate Maximum (at 1.5m) (mR/min)	Conversion Coefficient (mSv/R) (at 5.0m)	Dose Equivalent Rate Maximum (at 1.5m) (μSv/min)	Minimum (at 5.0m) (μSv/min)
15	1.8	2.9	4.0	51.6	1.2	0.57	29.4
20	1.5	2.4	6.0	64.3	1.0	2.93	18.8
30	1.4	1.2	10.0	53.3	0.4	1.18	3.7
40	1.0	0.9	14.0	55.4	0.22	0.46	5.6
50	0.9	0.7	20.0	42.3	0.00	0.12	2.7
60	0.9	0.6	22.0	38.1	0.00	0.12	2.8
70	0.9	0.5	24.0	38.7	0.00	0.12	2.7
80	0.9	0.4	27.0	59.7	0.00	0.12	3.4
100	0.9	0.3	29.0	12.8	0.00	0.12	3.0
120	0.9	0.2	27.0	12.8	0.00	0.12	3.0
150	0.9	0.1	21.0	12.8	0.00	0.12	3.0
200	0.9	0.0	16.0	12.8	0.00	0.12	3.0
250	0.9	-	14.0	4.4	0.00	0.12	3.0
300	0.9	-	11.0	4.4	0.00	0.12	3.0
350	0.9	-	11.0	4.4	0.00	0.12	3.0

Table 1 8 Range of dose rate for X-ray irradiation(4) (Q1:0.9)

Tube Voltage (kV)	Effective Energy (keV)	Dose Rate (mR/min · mA)	Maximum Current (mA)	Exposure Rate Maximum (at 1.5m) (mR/h)	Conversion Coefficient (mSv/R) (at 5.0m)	Dose Equivalent Rate Maximum (at 1.5m) (μSv/h)	Minimum (at 5.0m) (μSv/h)
10	9.0	8.0	4.0	11.9	2.7	1.33	1.58
15	13.3	6.7	6.0	16.5	1.95	6.53	3.6
20	17.6	6.2	6.0	15.3	1.88	4.34	4.4
30	26.4	1.2	10.0	80.3	1.42	9.24	4.4
40	35.9	1.3	14.0	33.4	1.44	4.52	2.3
50	44.6	5.4	17.0	54.2	1.44	8.02	7.7
60	54.6	6.1	20.0	22.1	1.53	9.03	0.9
70	63.0	6.1	22.0	24.7	1.47	2.29	0.9
80	71.3	1.8	27.0	29.1	1.47	3.18	6.6
100	90.0	1.8	15.0	14.9	1.47	0.67	1.0
120	108.0	1.8	15.0	14.9	1.47	4.44	4.4
150	136.9	1.8	15.0	14.9	1.47	3.44	4.4
200	177.4	2.0	16.0	33.4	2.00	4.44	1.6
250	227.2	2.0	14.0	33.4	2.00	4.44	2.3
300	271.8	2.0	11.0	33.4	2.00	5.07	9.6
350	331.8	2.0	11.0	33.4	2.00	5.45	6.4

Table 19 Conversion coefficients for ambient dose equivalent from exposure obtained with either the effective energy value or the spectrum distribution(1) (Q1:0.6)

Tube Voltage (kV)	Effective Energy (keV)	Conversion coefficient (mSv/R) (a) f_{ef}	Conversion coefficient (mSv/R) (b) f_s	f_{ef} / f_s
30	17.6	3.95	4.42	0.894
40	24.2	7.23	7.50	0.964
50	30.0	9.52	9.79	0.972
60	37.0	11.73	11.07	1.060
70	42.8	13.09	12.44	1.052
75	45.0	13.51	12.93	1.045
80	49.4	14.20	13.53	1.050
100	60.4	15.28	14.66	1.042
120	71.6	15.36	14.86	1.034
150	88.3	14.83	14.62	1.014
200	119	13.70	13.89	0.986
250	154	12.82	13.11	0.978
300	180	12.39	12.75	0.972
350	210	12.03	12.02	1.001

(a) f_{ef} :values calculated with effective energy value

(b) f_s :values calculated from spectral distribution(equation (11) in 3.4)

Table 20 Conversion coefficients for ambient dose equivalent from exposure obtained with either the effective energy value or the spectrum distribution(2) (Q1:0.7)

Tube Voltage (kV)	Effective Energy (keV)	Conversion coefficient (mSv/R) (a) f_{ef}	Conversion coefficient (mSv/R) (b) f_s	f_{ef} / f_s
20	13.8	1.62	2.29	0.707
30	21.0	5.75	5.95	0.966
40	28.1	8.82	8.87	0.994
50	36.0	11.45	11.52	0.994
60	41.1	12.73	12.78	0.996
70	49.2	14.17	13.76	1.030
80	56.6	14.97	14.66	1.021
100	69.8	15.39	15.06	1.022
120	83.1	15.03	14.86	1.011
150	104	14.22	14.30	0.994
200	139	13.15	13.43	0.979
250	177	12.43	12.75	0.975
300	210	12.03	12.06	0.998
350	241	11.76	11.84	0.993

Table 2 1 Conversion coefficients for ambient dose equivalent from exposure obtained with either the effective energy value or the spectrum distribution(3) (Q1:0. 8)

Tube Voltage (kV)	Effective Energy (keV)	Conversion coefficient (mSv/R) (a) f_{eff}	Conversion coefficient (mSv/R) (b) f_s	f_{eff} / f_s
15	11. 8	0. 57	0. 87	0. 655
20	15. 9	2. 93	3. 16	0. 927
30	24. 1	7. 18	7. 16	1. 003
40	32. 0	10. 21	10. 22	0. 999
50	39. 9	12. 46	12. 51	0. 996
60	48. 7	14. 10	13. 79	1. 022
70	55. 9	14. 91	14. 60	1. 021
80	65. 5	15. 40	15. 20	1. 013
100	79. 8	15. 15	15. 05	1. 007
120	96. 9	14. 49	14. 55	0. 996
150	120	13. 67	13. 87	0. 986
200	158	12. 75	12. 90	0. 988
250	197	12. 17	12. 14	1. 002
300	241	11. 76	11. 80	0. 997
350	281	11. 49	11. 57	0. 993

Table 2 2 Conversion coefficients for ambient dose equivalent from exposure obtained with either the effective energy value or the spectrum distribution(4) (Q1:0. 9)

Tube Voltage (kV)	Effective Energy (keV)	Conversion coefficient (mSv/R) (a) f_{eff}	Conversion coefficient (mSv/R) (b) f_s	f_{eff} / f_s
15	13. 3	1. 62	1. 30	1. 246
20	17. 6	3. 95	3. 91	1. 010
30	26. 4	8. 15	8. 27	0. 985
40	35. 9	11. 42	11. 39	1. 003
50	44. 6	13. 44	13. 52	0. 994
60	54. 6	14. 80	14. 66	1. 010
70	63. 6	15. 38	15. 28	1. 007
80	71. 2	15. 37	15. 33	1. 003
100	90. 3	14. 75	14. 75	1. 000
120	110	14. 00	14. 08	0. 994
150	136	13. 22	13. 32	0. 992
200	179	12. 40	12. 41	0. 999
250	224	11. 90	11. 92	0. 998
300	272	11. 54	11. 63	0. 992
350	318	11. 30	11. 37	0. 994

Table 2 3 Conversion coefficients for directional dose equivalent ($H' (0.07)$) from exposure obtained with either the effective energy value or the spectrum distribution

Quality Index	Tube Voltage (kV)	Effective Energy (keV)	Conversion coefficient(mSv/R)		
			(a) f_{eff}	(b) f_s	f_{eff} / f_s
0. 6	30	17. 6	8. 69	8. 89	0. 978
	40	24. 2	9. 48	9. 73	0. 974
	50	30. 0	10. 41	10. 69	0. 974
0. 7	20	13. 8	8. 42	8. 49	0. 992
	30	21. 0	9. 05	9. 20	0. 984
	40	28. 1	10. 10	10. 21	0. 989
	50	36. 0	11. 42	11. 53	0. 990
0. 8	15	11. 8	8. 30	8. 31	0. 999
	20	15. 9	8. 56	8. 60	0. 995
	30	24. 1	9. 47	9. 51	0. 996
	40	32. 0	10. 75	10. 80	0. 995
	50	39. 9	12. 02	12. 09	0. 994
	10	9. 0	7. 96	7. 89	1. 009
0. 9	15	13. 3	8. 39	8. 38	1. 001
	20	17. 6	8. 69	8. 70	0. 999
	30	26. 4	9. 82	9. 89	0. 993
	40	35. 9	11. 40	11. 39	1. 001
	50	44. 6	12. 66	12. 74	0. 994

(a) f_{eff} :values calculated with effective energy value

(b) f_s :values calculated from spectral distribution(equation (11) in 3. 4)

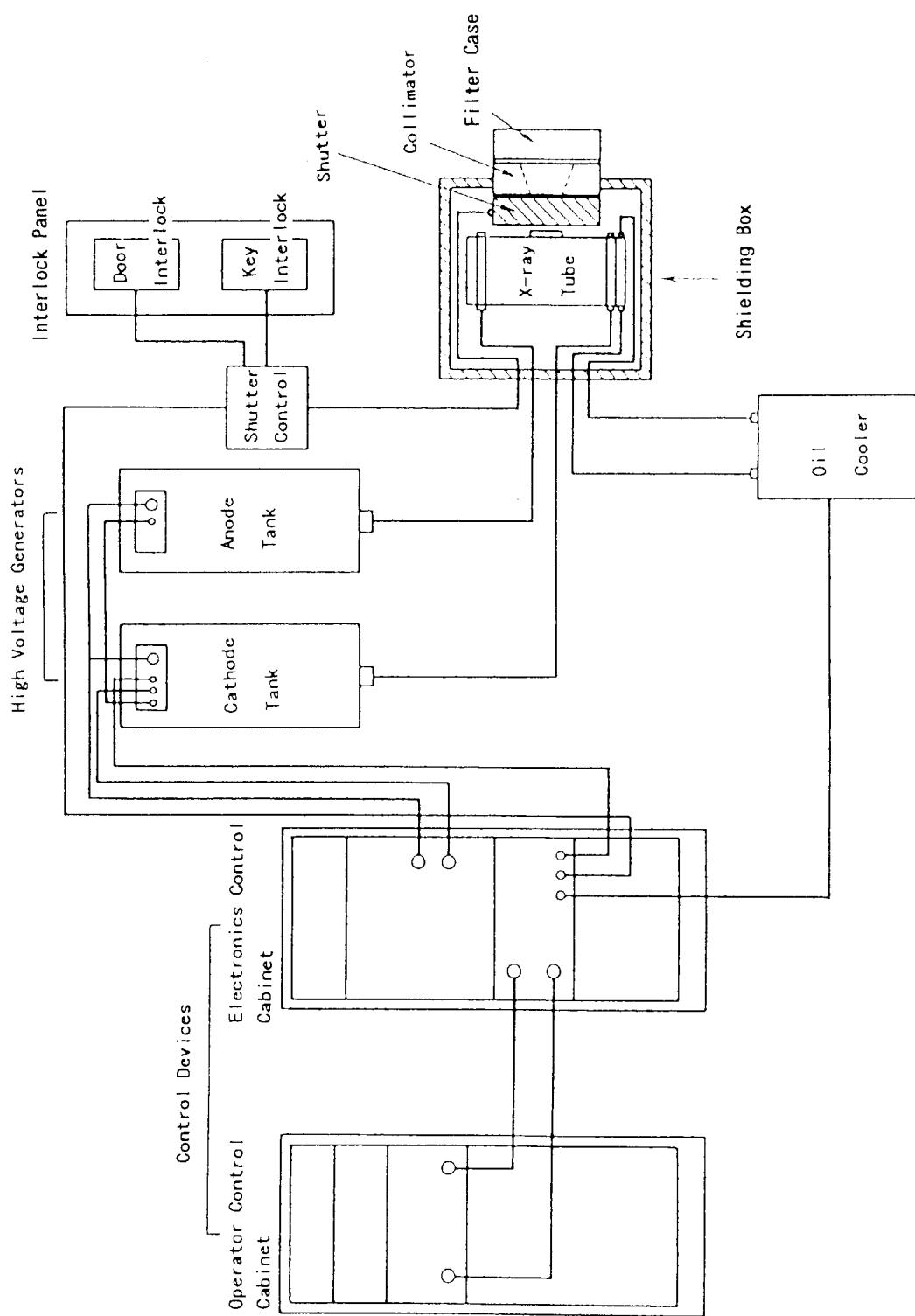


Fig. 1 Diagram of X ray generator

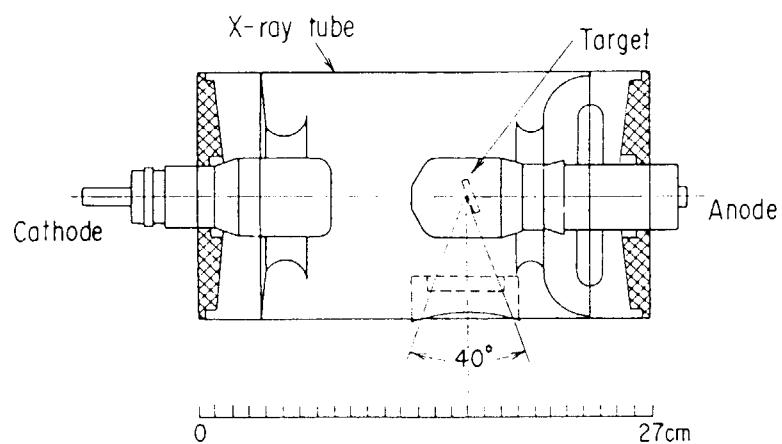


Fig. 2 Conceptional view of X ray tube.

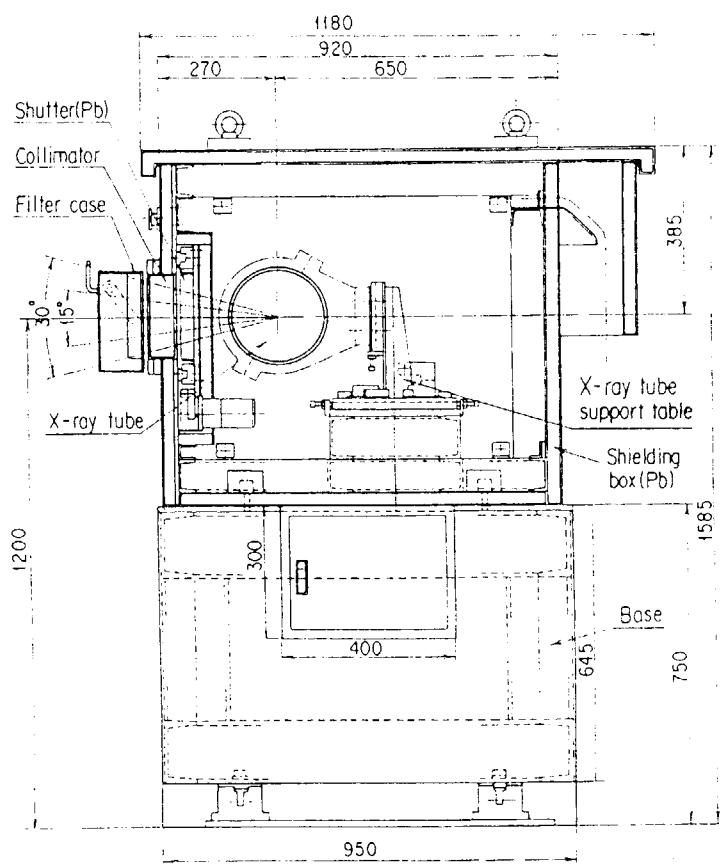


Fig. 3 X ray irradiation apparatus consisting of shutter, collimator and shielding box (dimensions in millimeters).

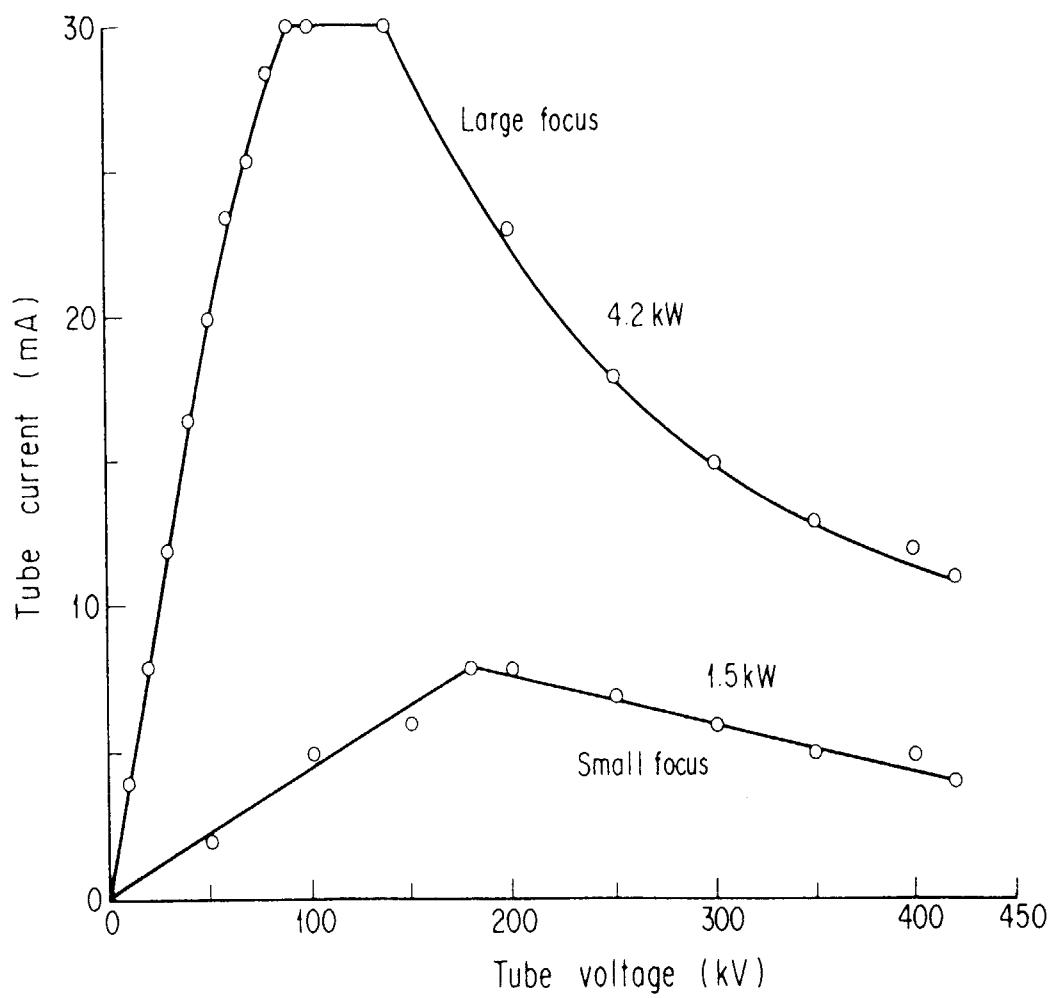


Fig. 4 Relations between tube voltage and maximum tube current for large and small focus.

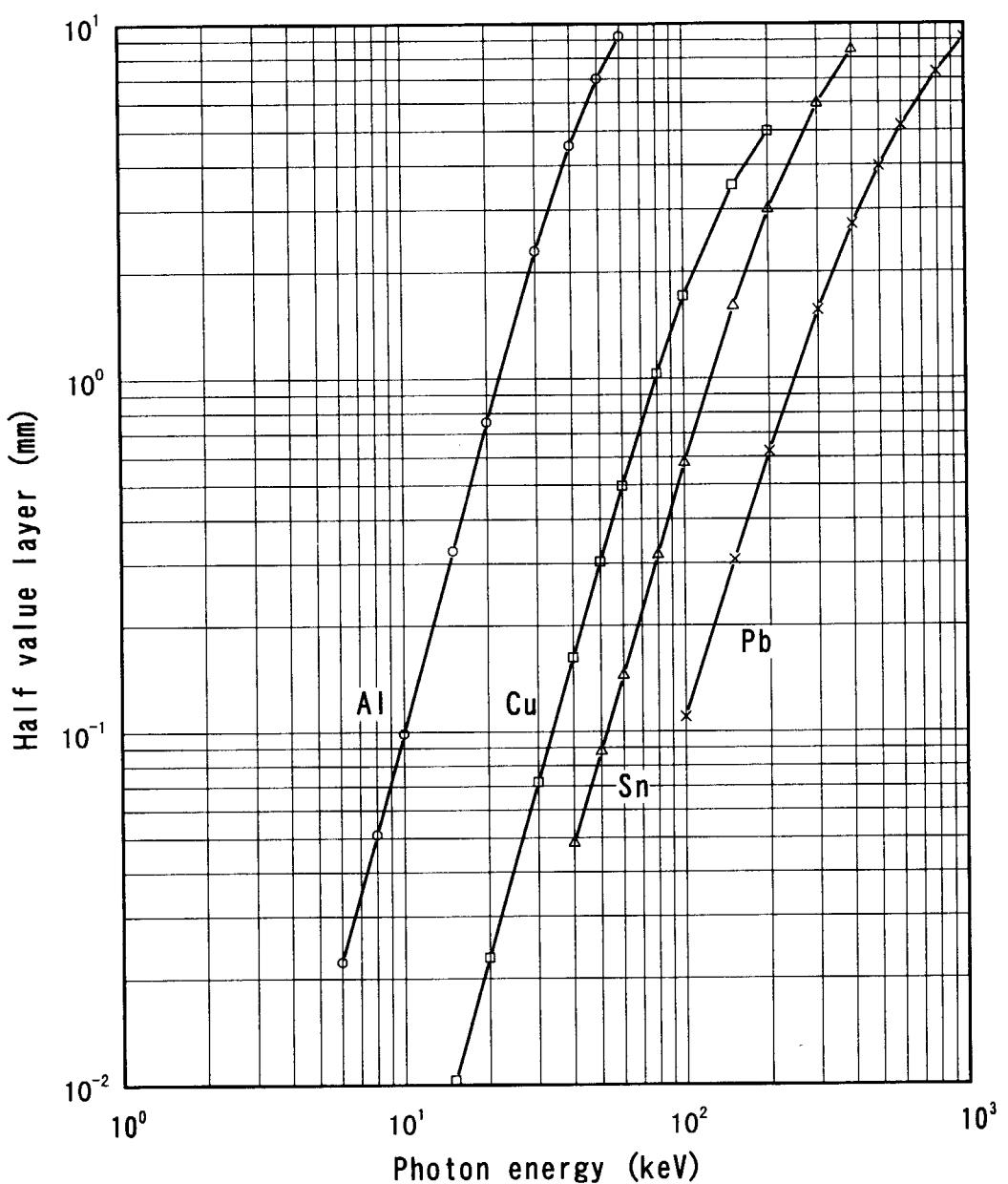


Fig. 5 Relation between photon energy and half value layer for various filter materials

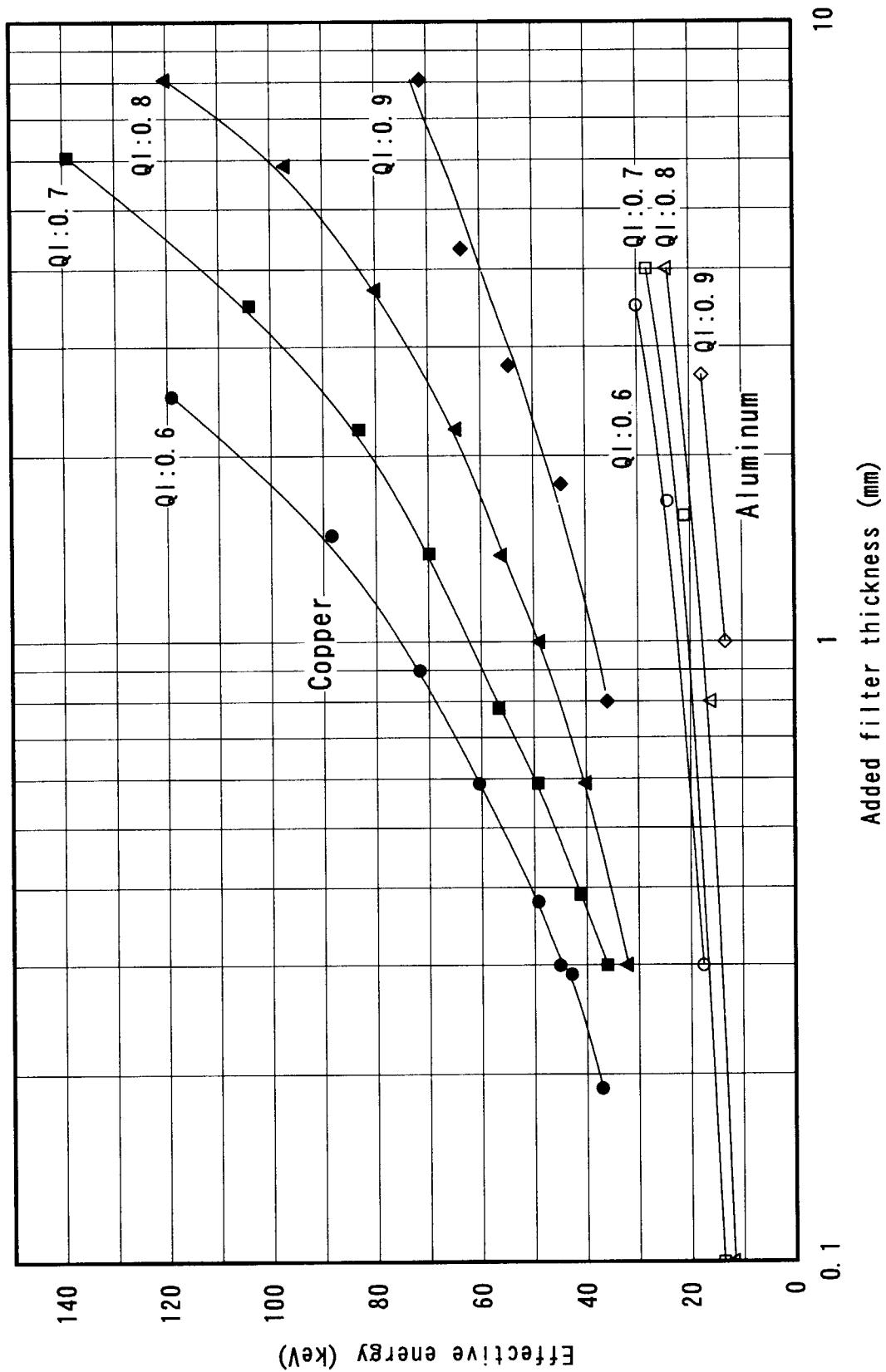


Fig. 6 Relations between added filter thickness and effective energy

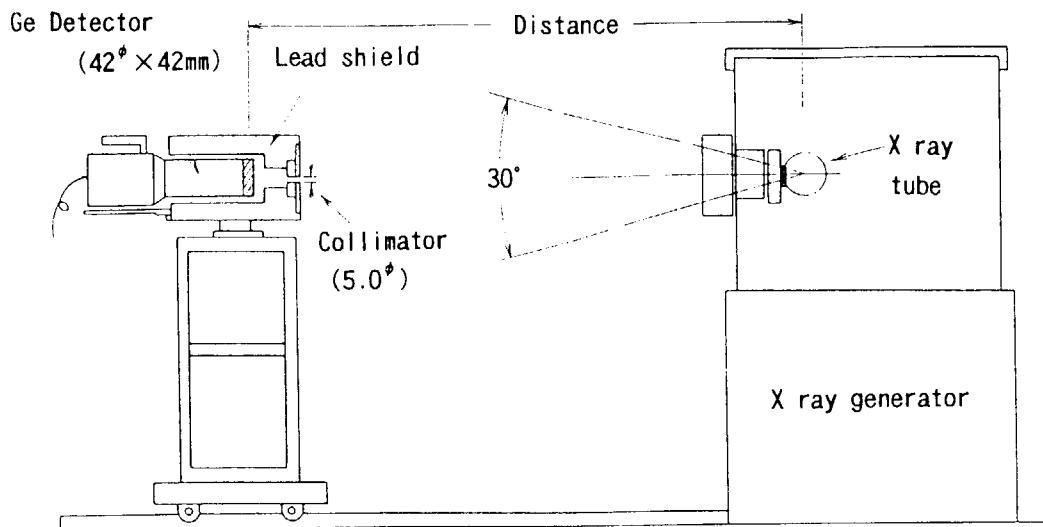


Fig. 7 Schematic view of X ray spectrum measurement.

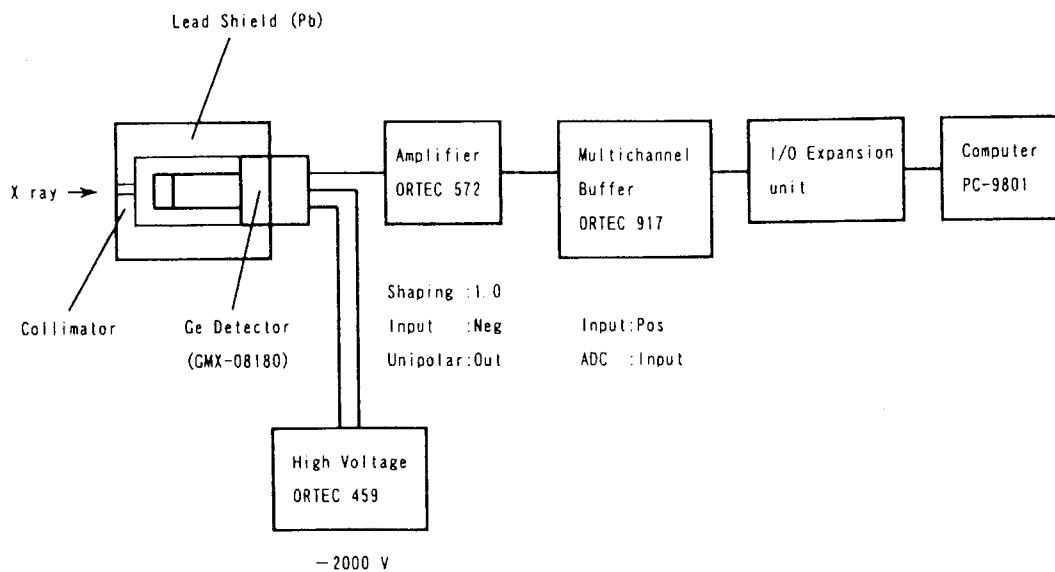


Fig. 8 Diagram of X ray spectrum measurement.

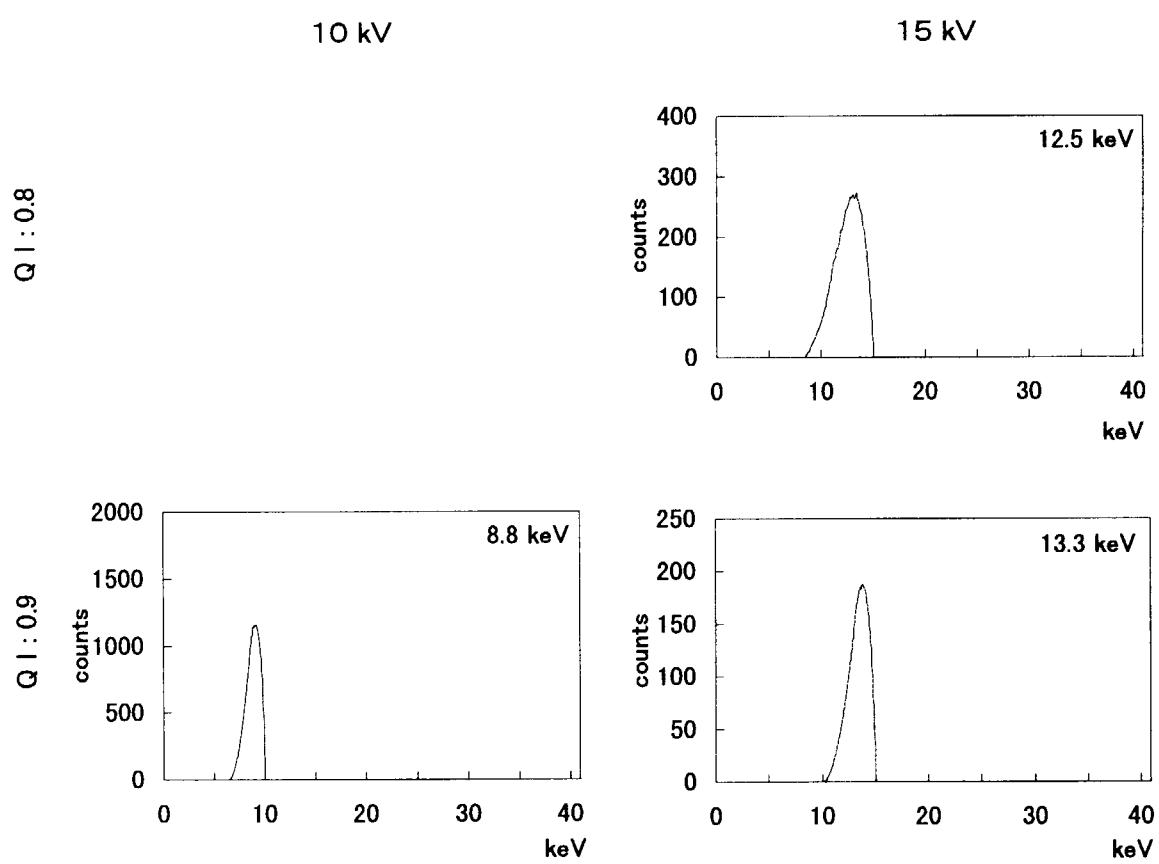


Fig. 9 Estimated spectral distributions of photon fluence rate for each quality index(QI). (Tube voltage:10 kV ~ 350 kV)

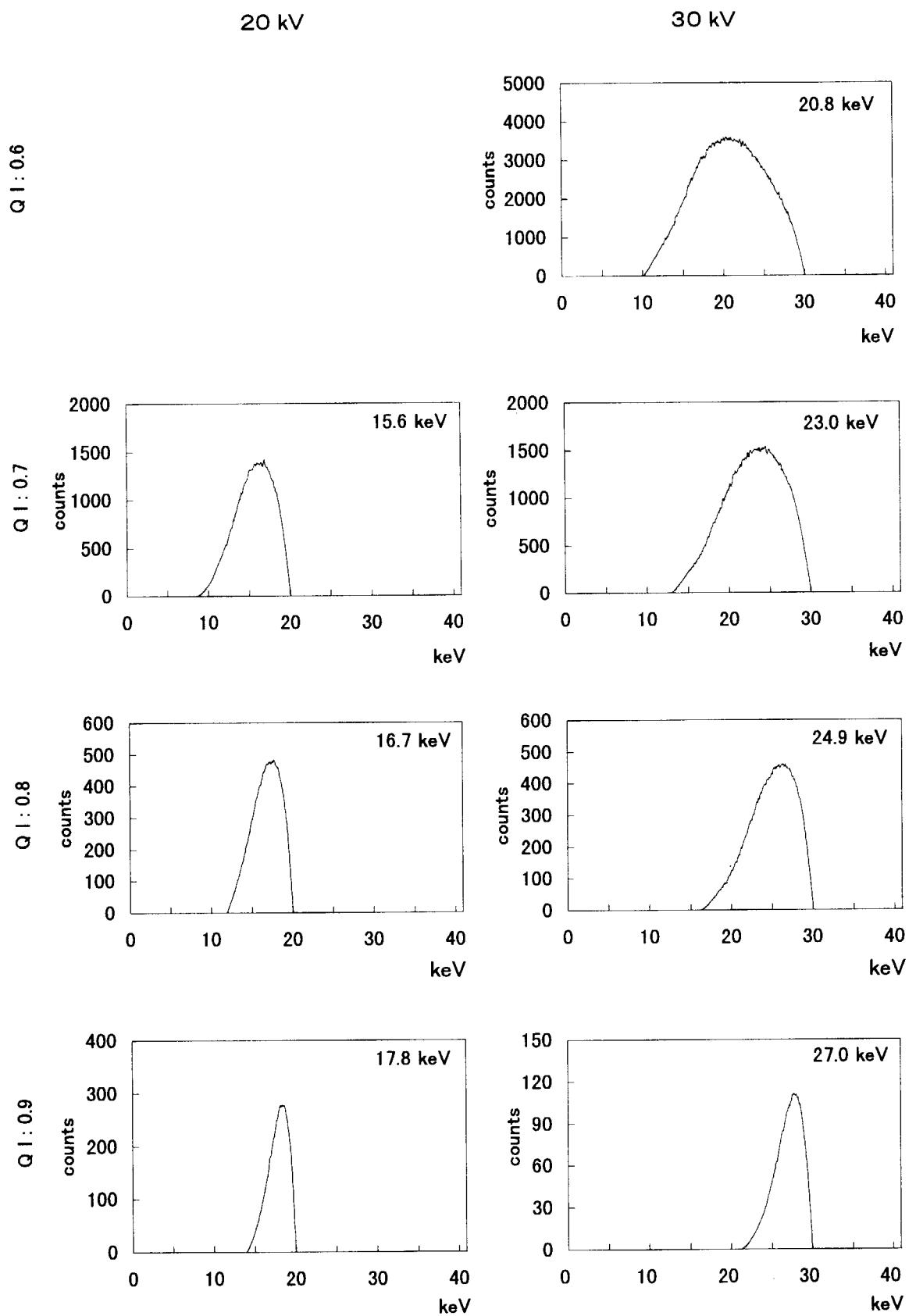


Fig. 9 (Continued)

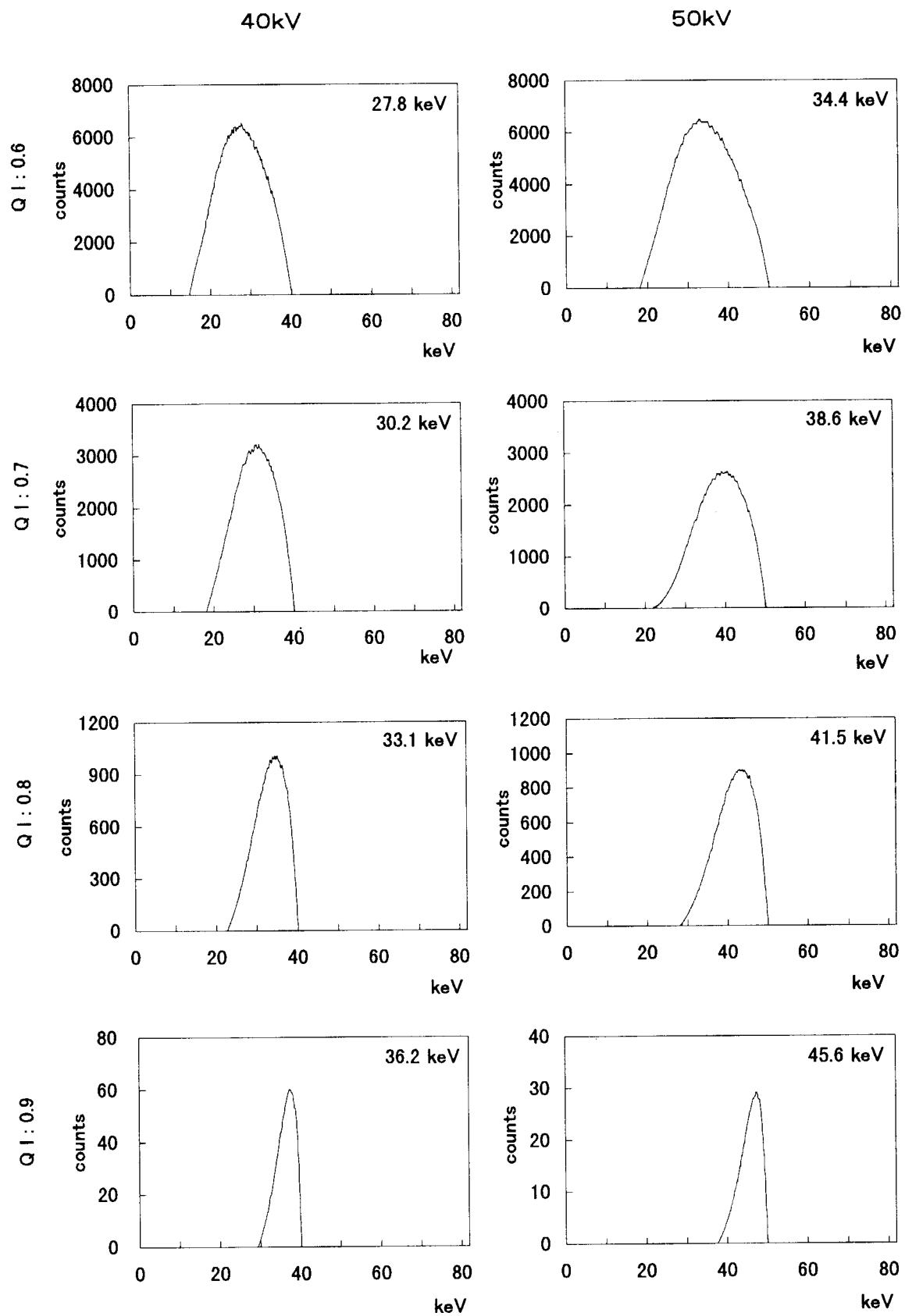


Fig. 9 (Continued)

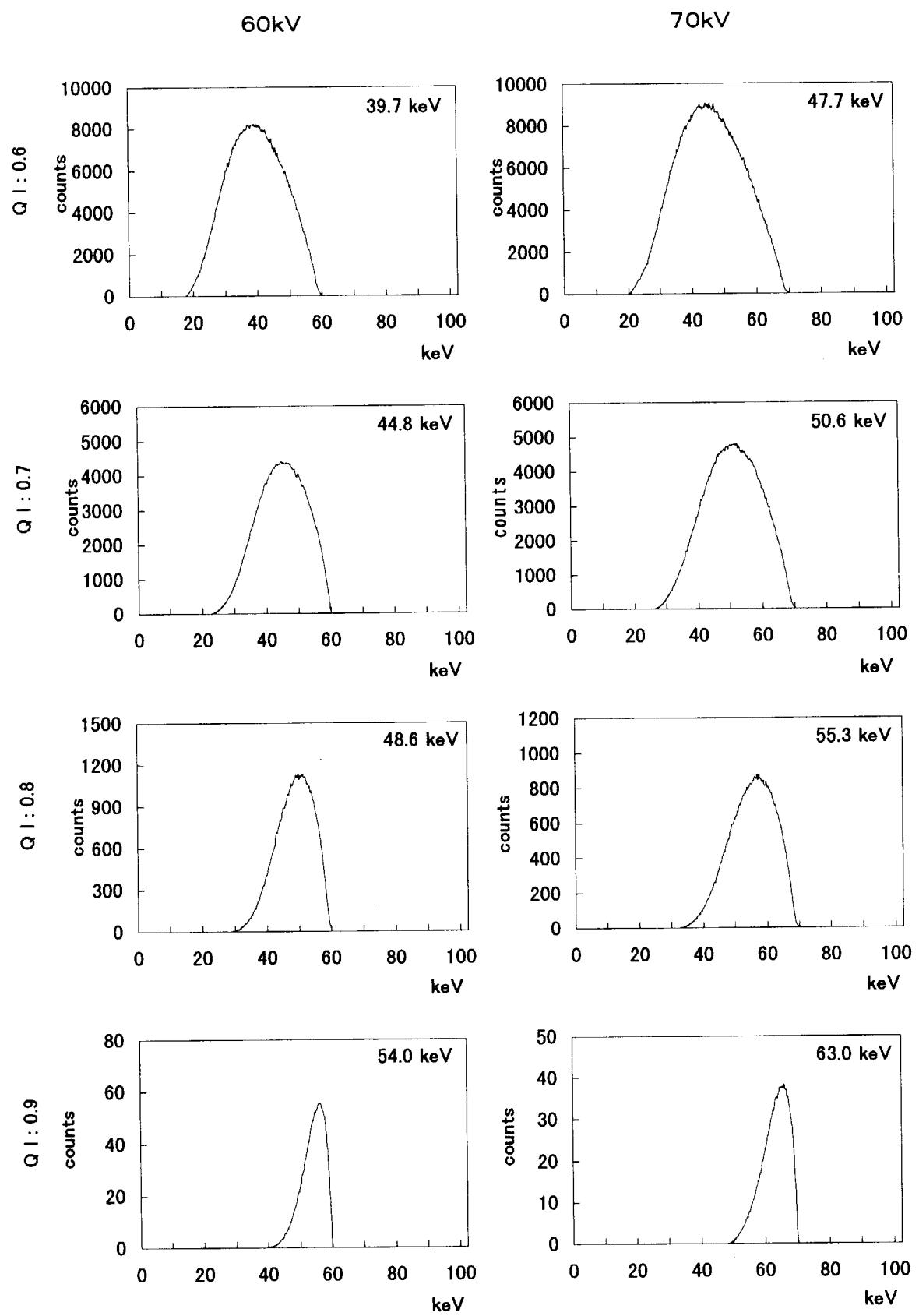


Fig. 9 (Continued)

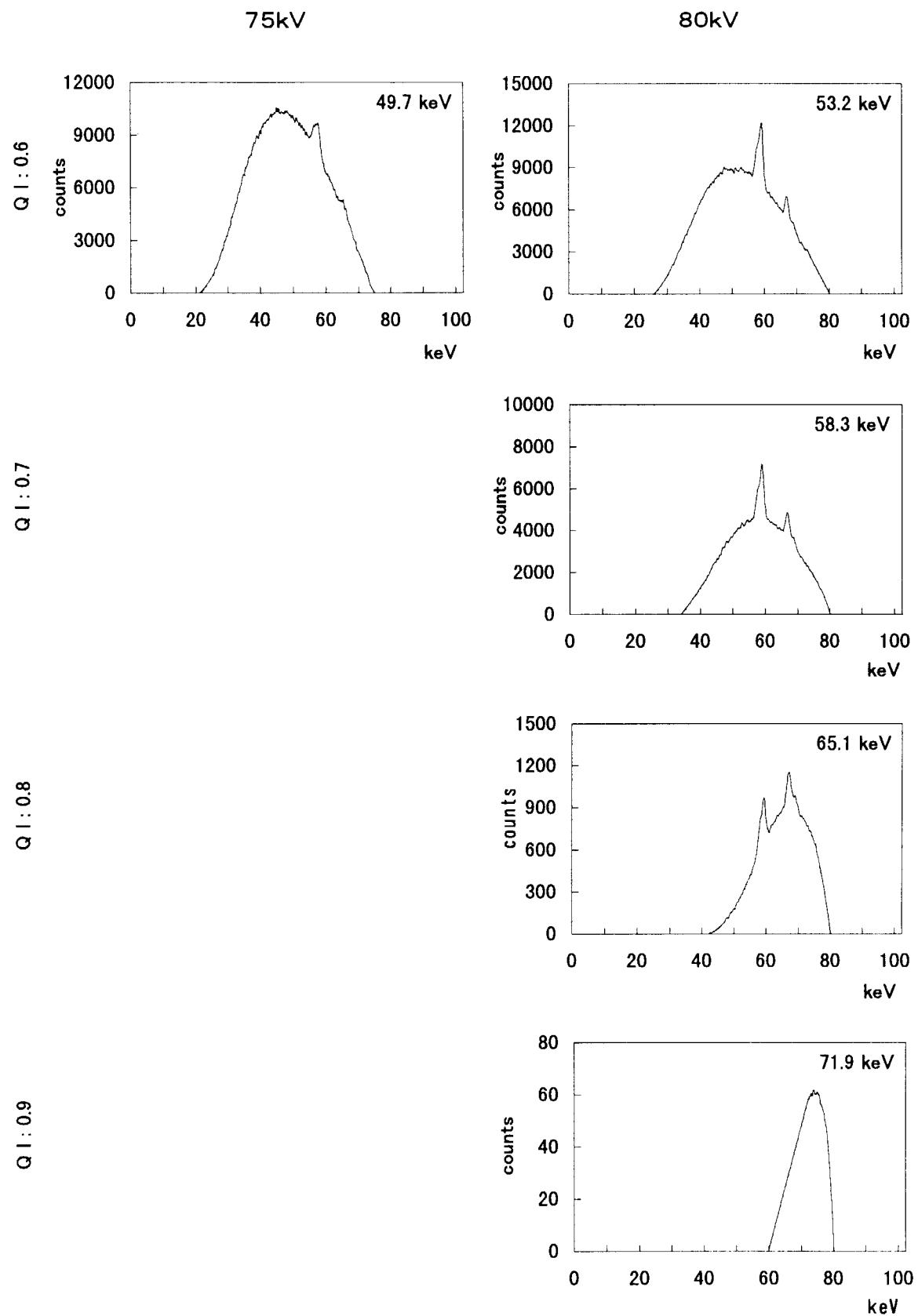


Fig. 9 (Continued)

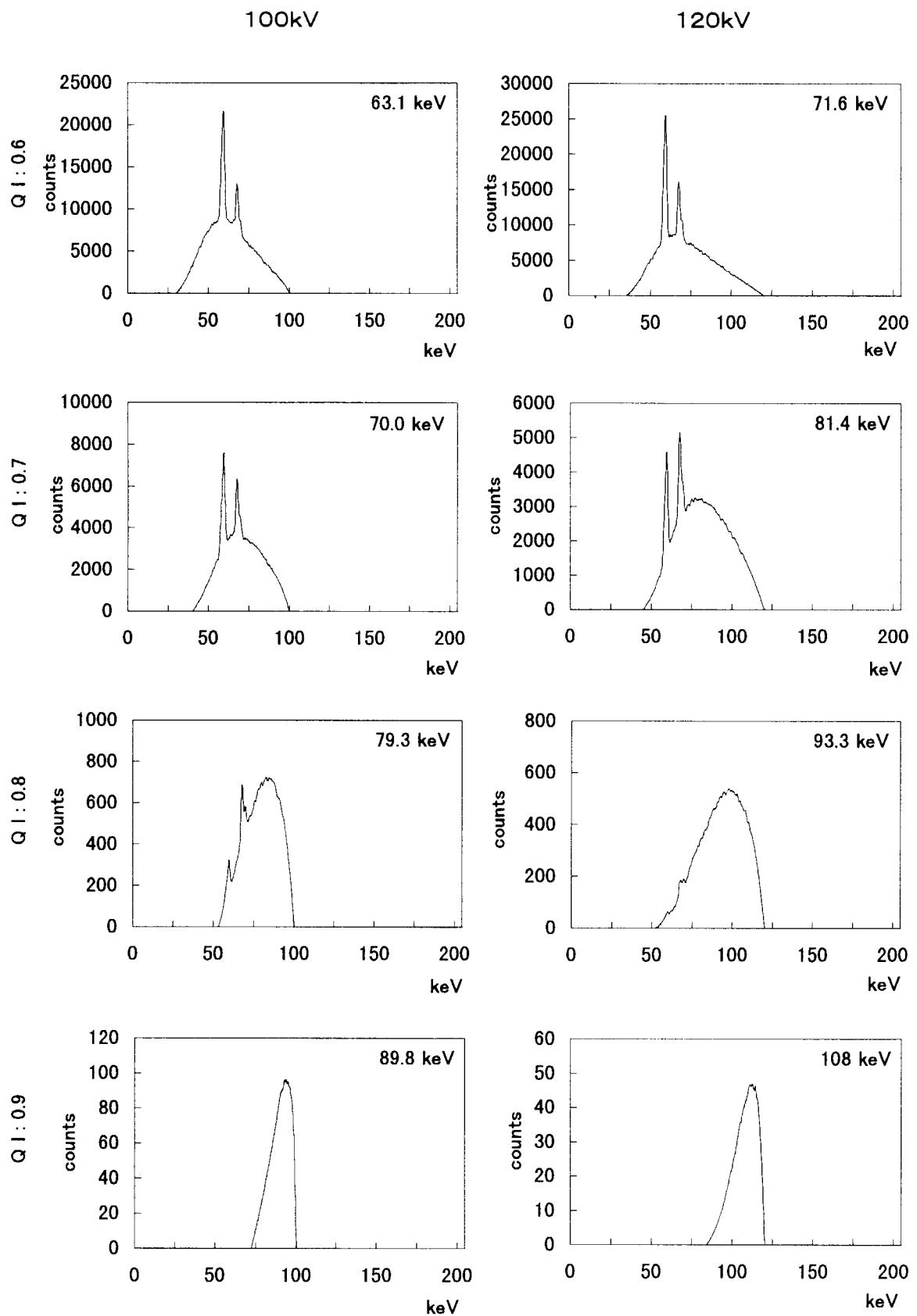


Fig. 9 (continued)

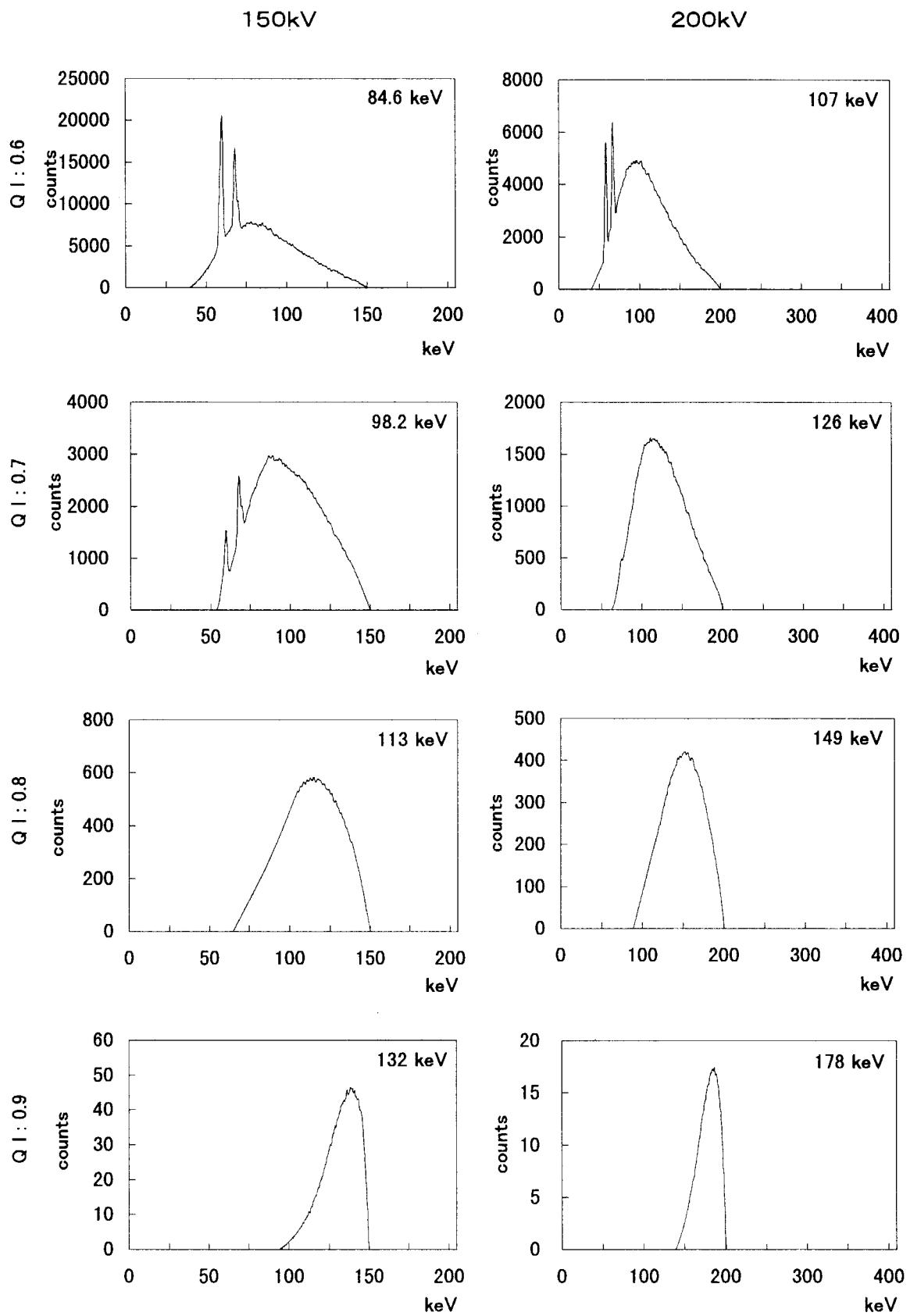


Fig. 9 (Continued)

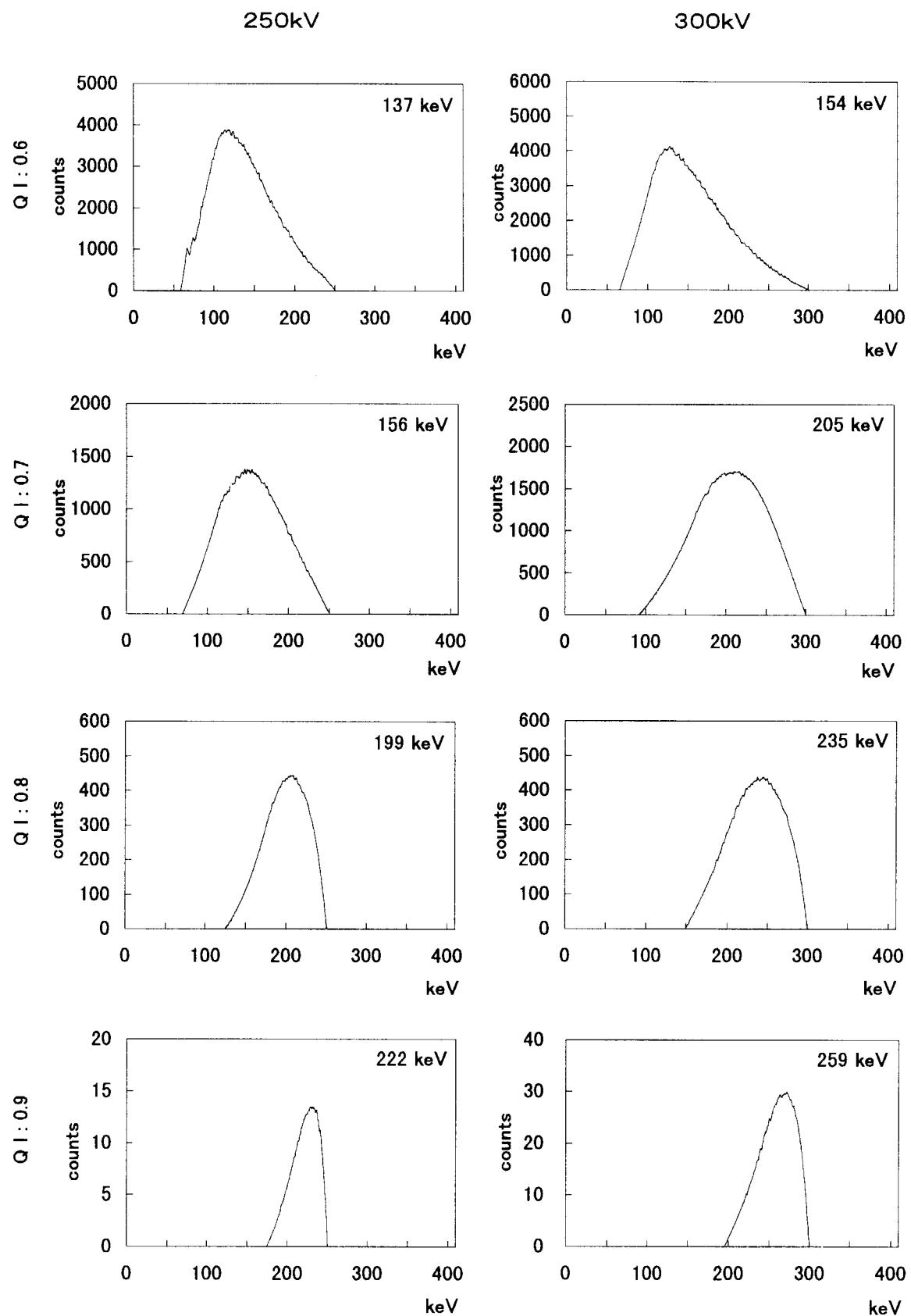


Fig. 9 (Continued)

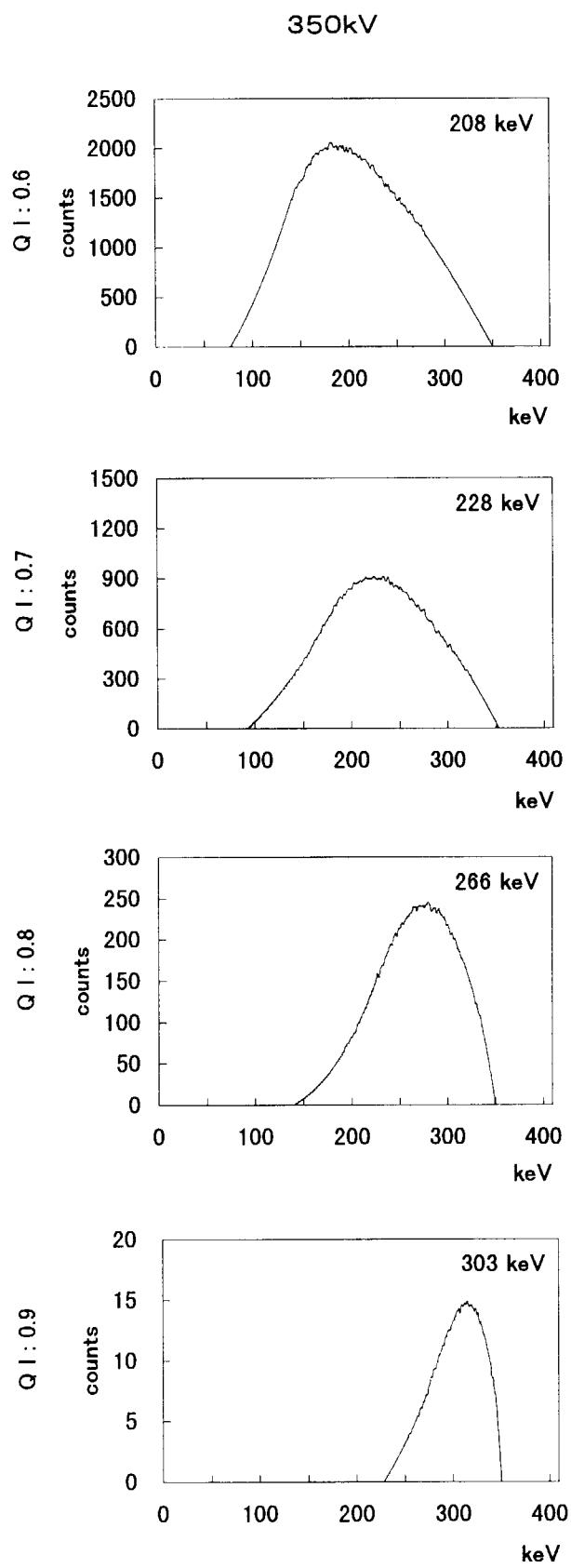


Fig. 9 (Continued)

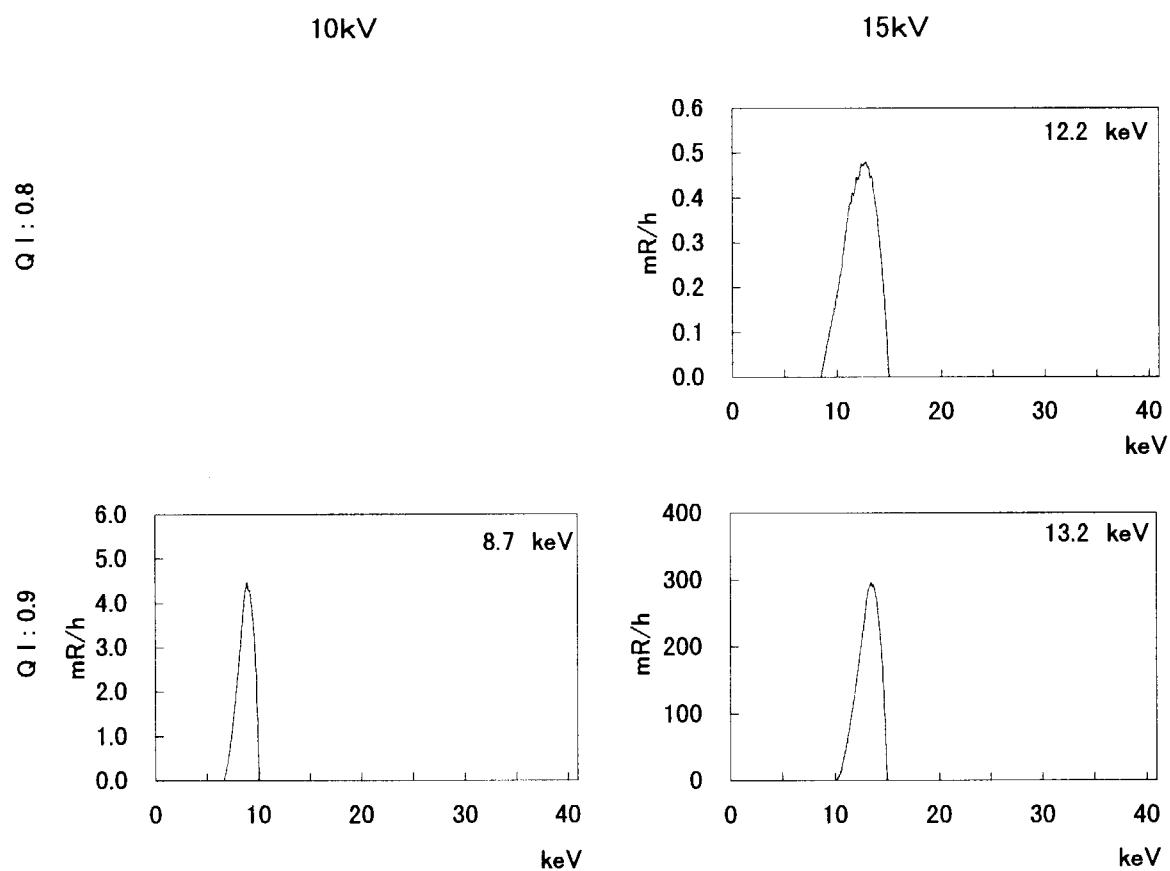


Fig. 10 Estimated spectral distributions of exposure rate for each quality index (QI). (Tube voltage: 10kV~350kV)

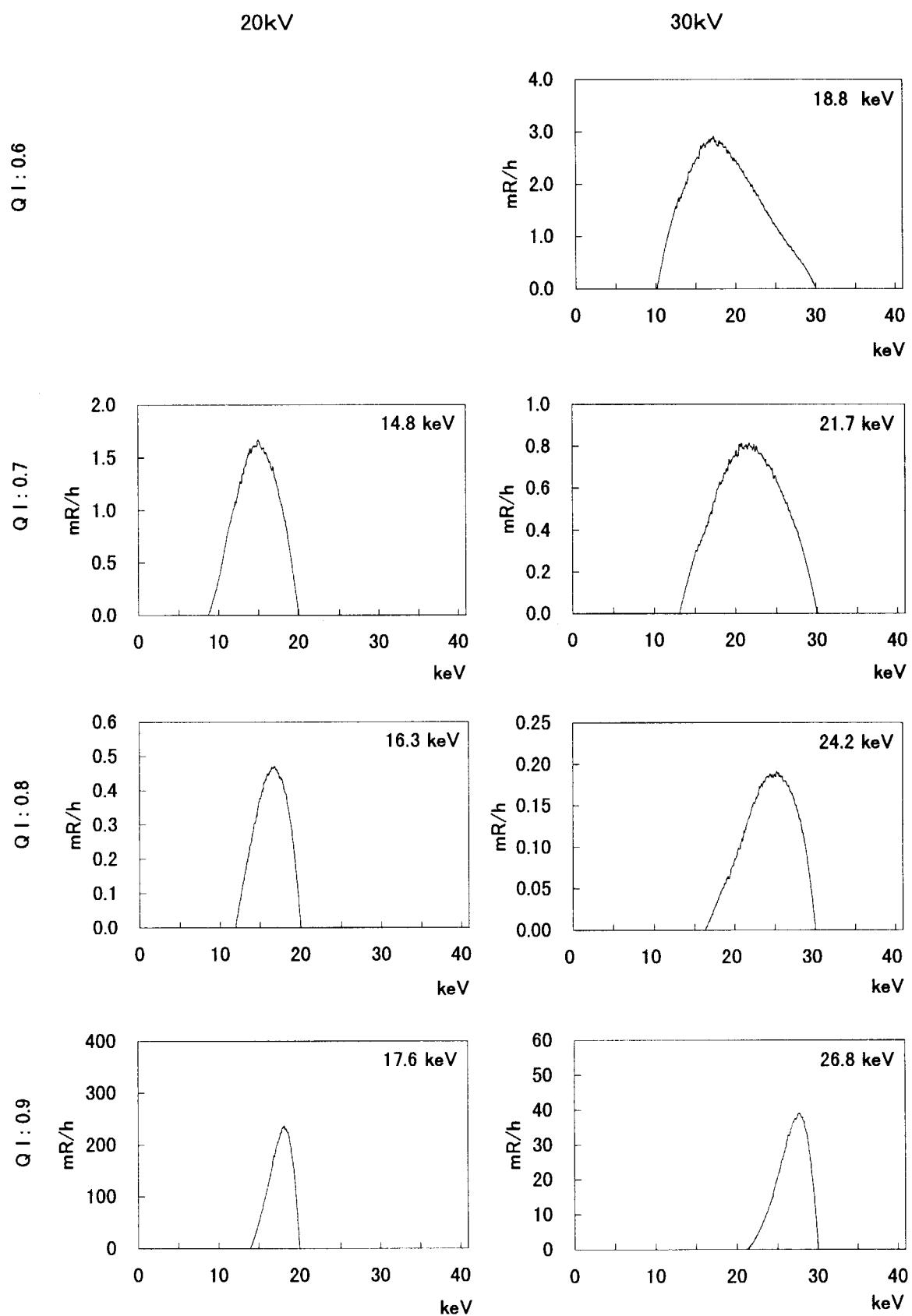


Fig. 10 (Continued)

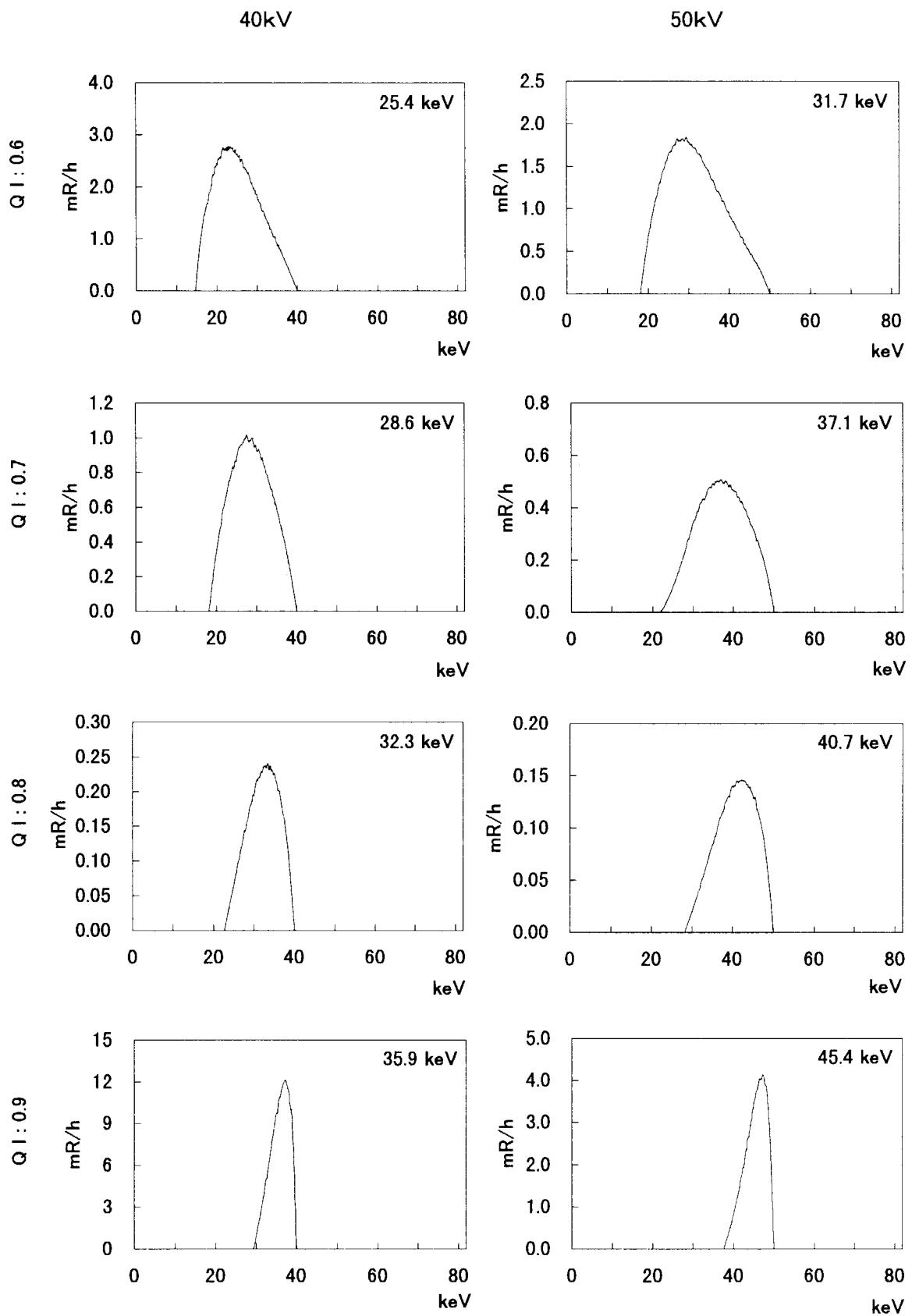


Fig. 10 (Continued)

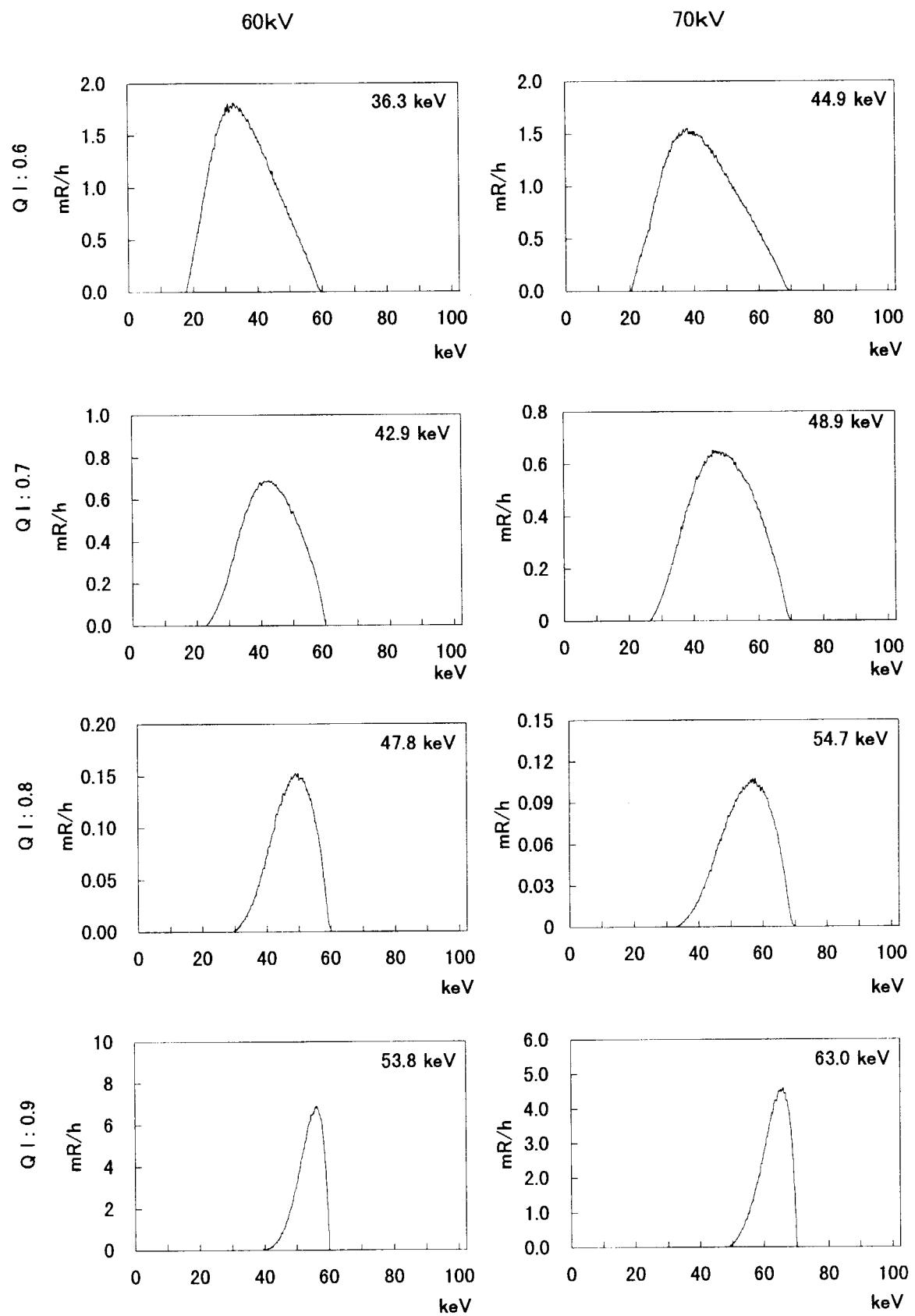


Fig. 10 (Continued)

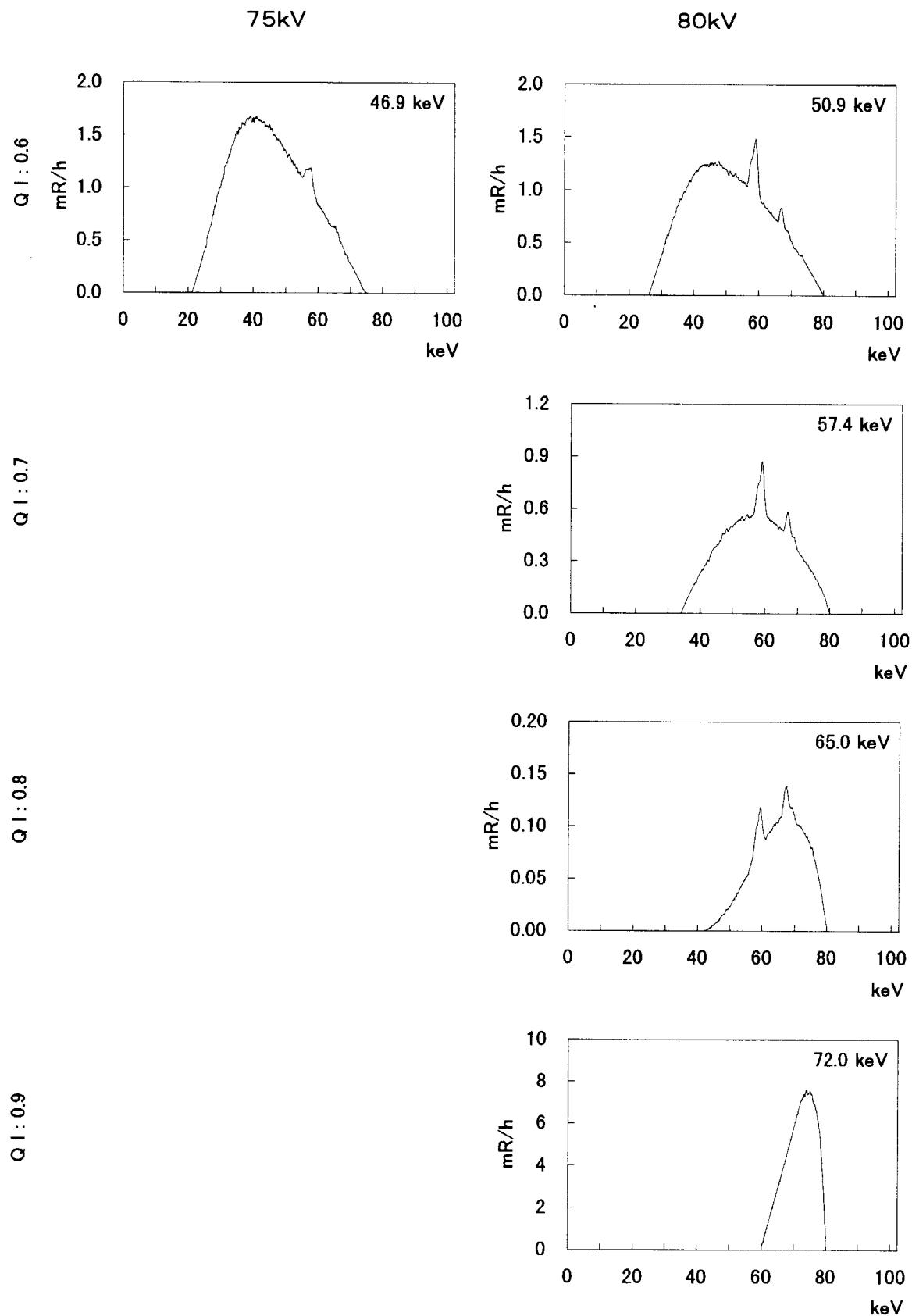


Fig. 10 (Continued)

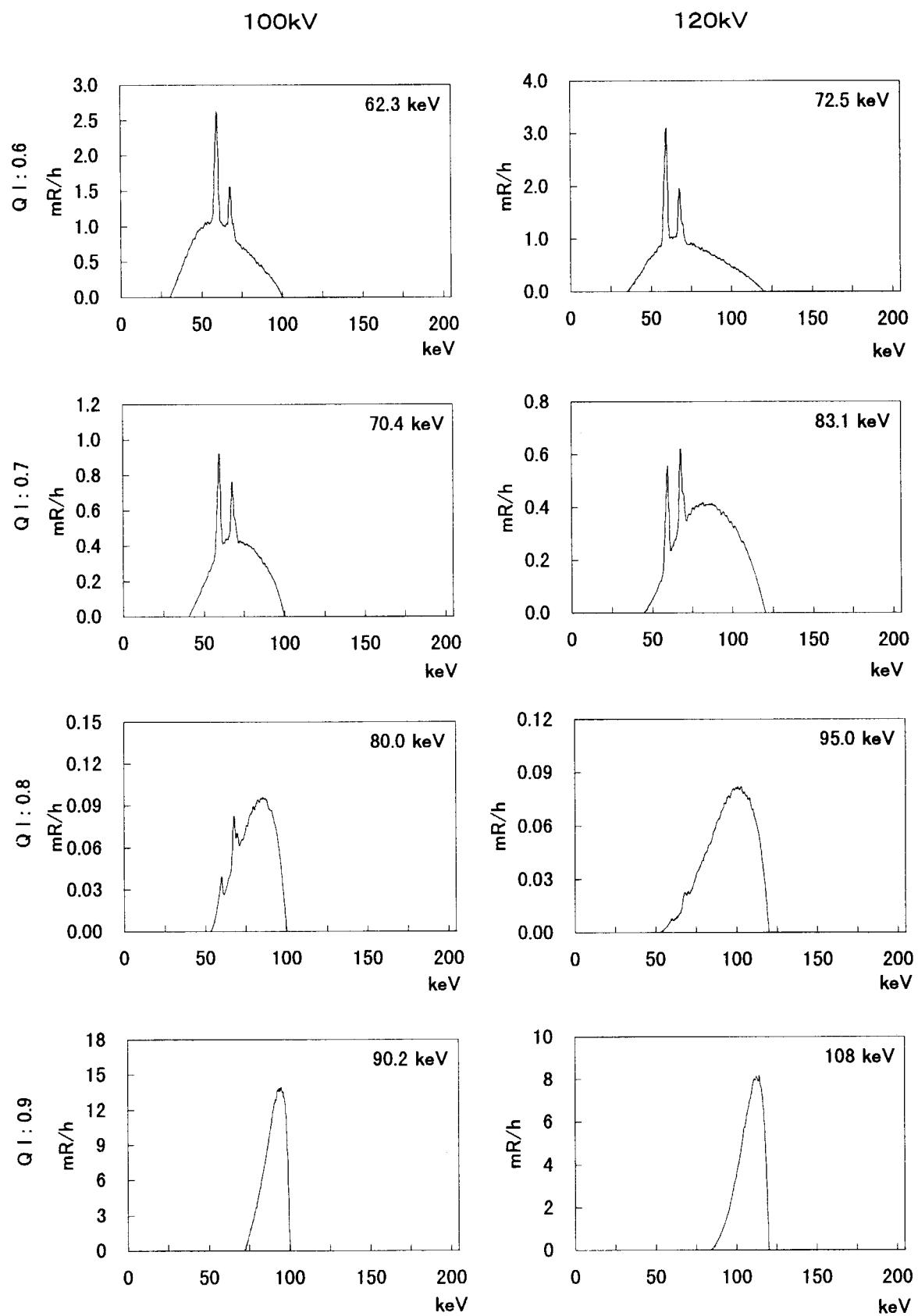


Fig. 10 (Continued)

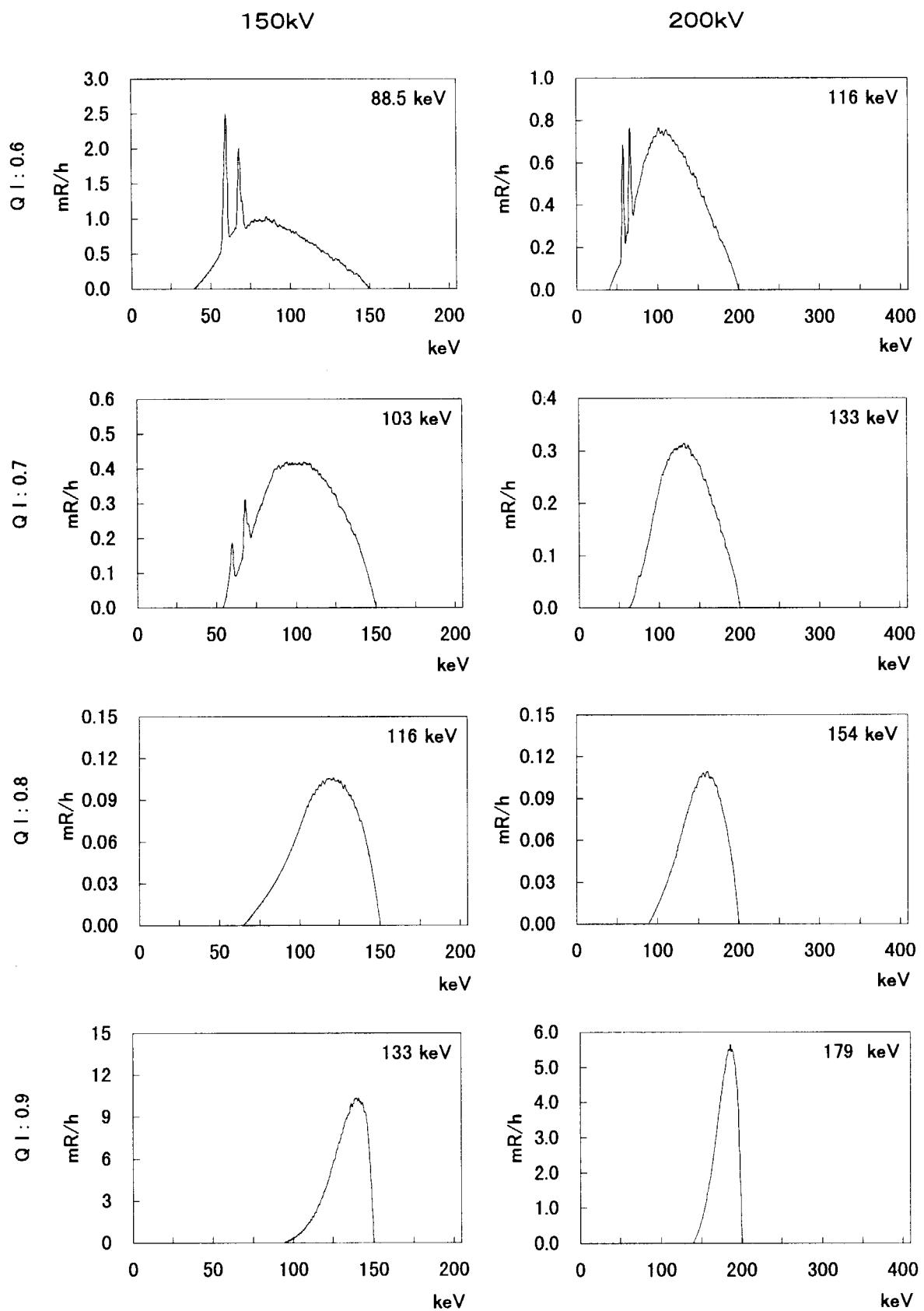


Fig. 10 (Continued)

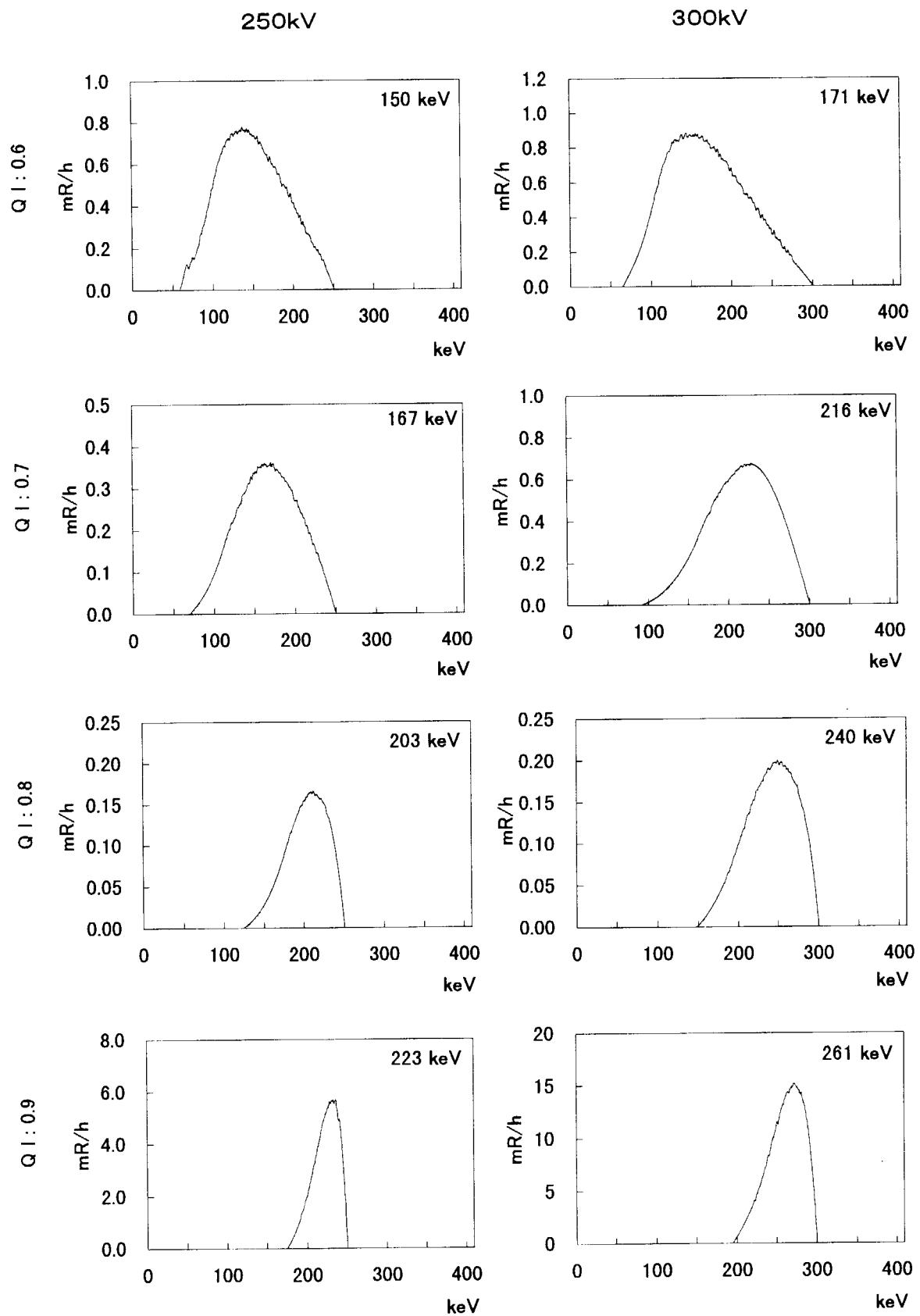


Fig. 10 (Continued)

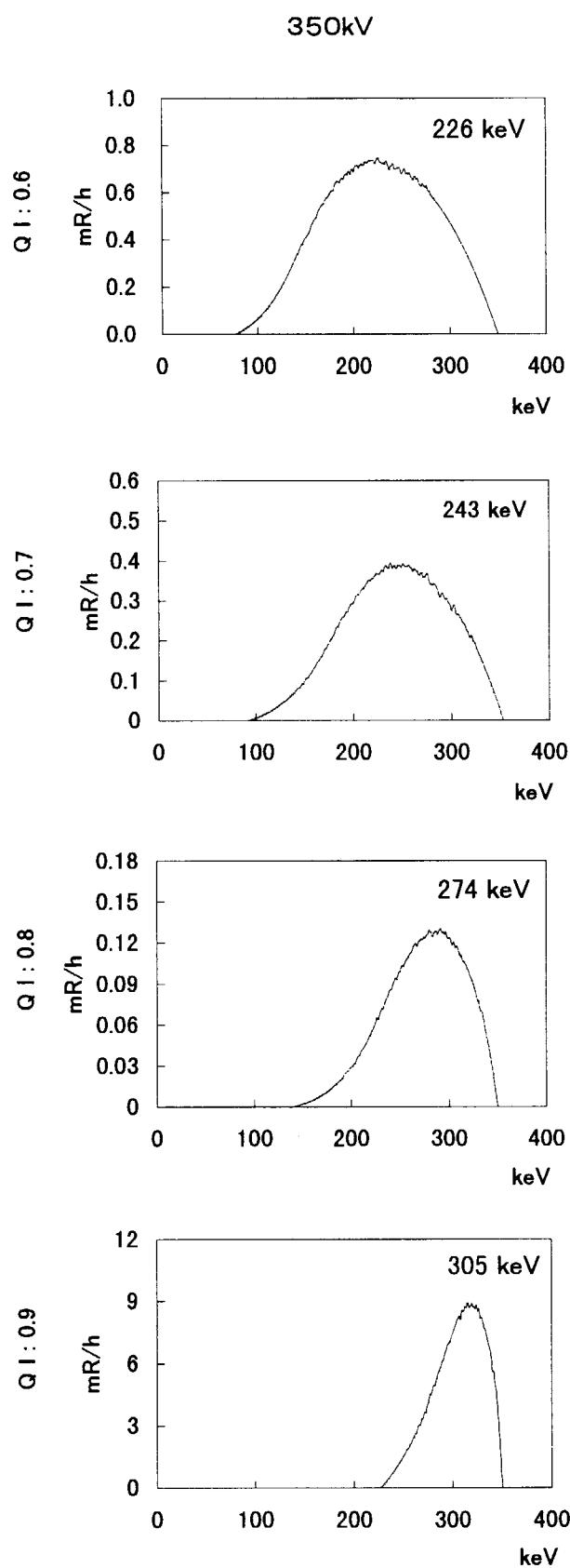


Fig. 10 (Concluded)

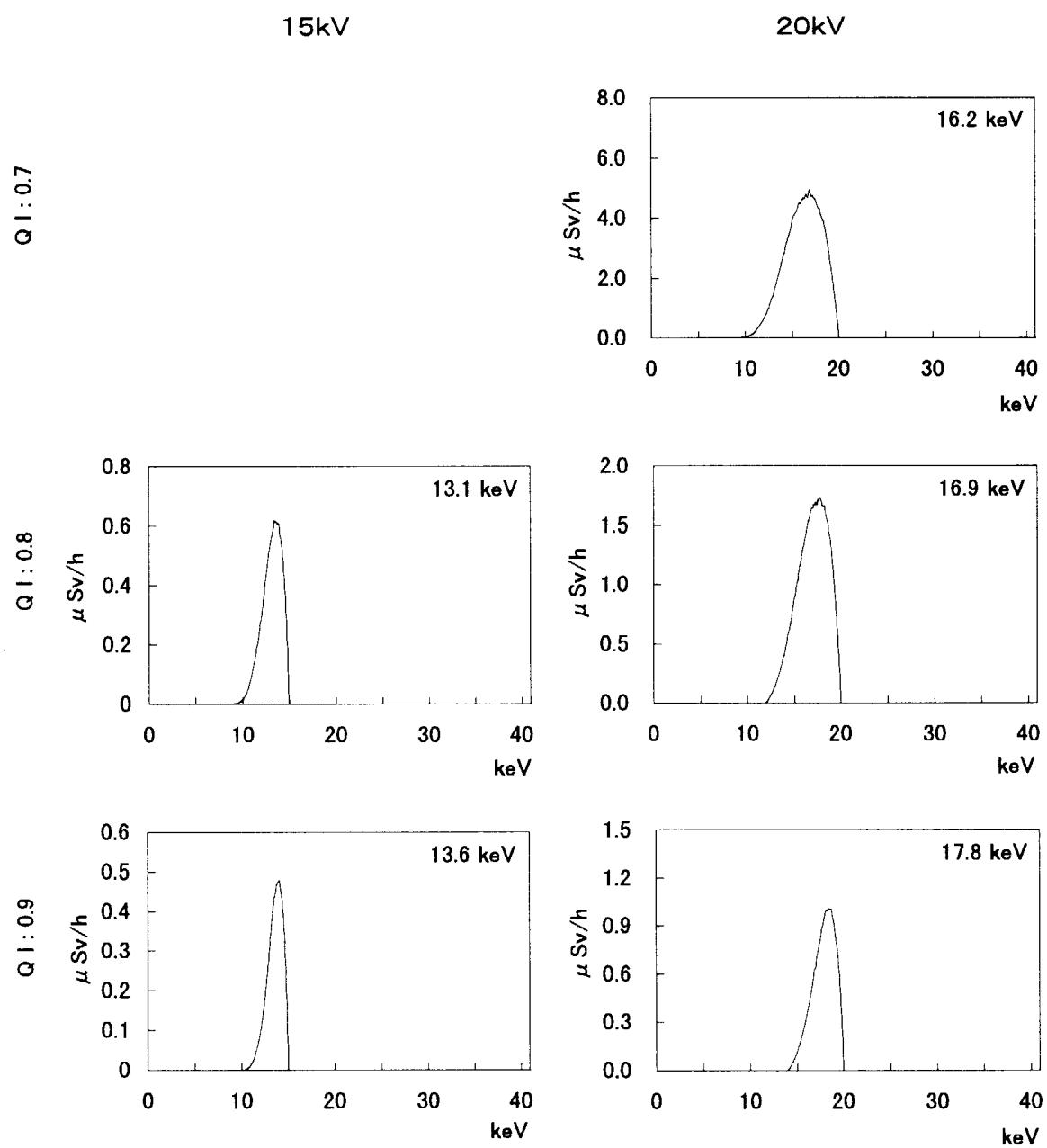


Fig. 1.1 Estimated spectral distributions of ambient dose equivalent for each quality index(QI). (Tube voltage:10 kV ~ 350 kV)

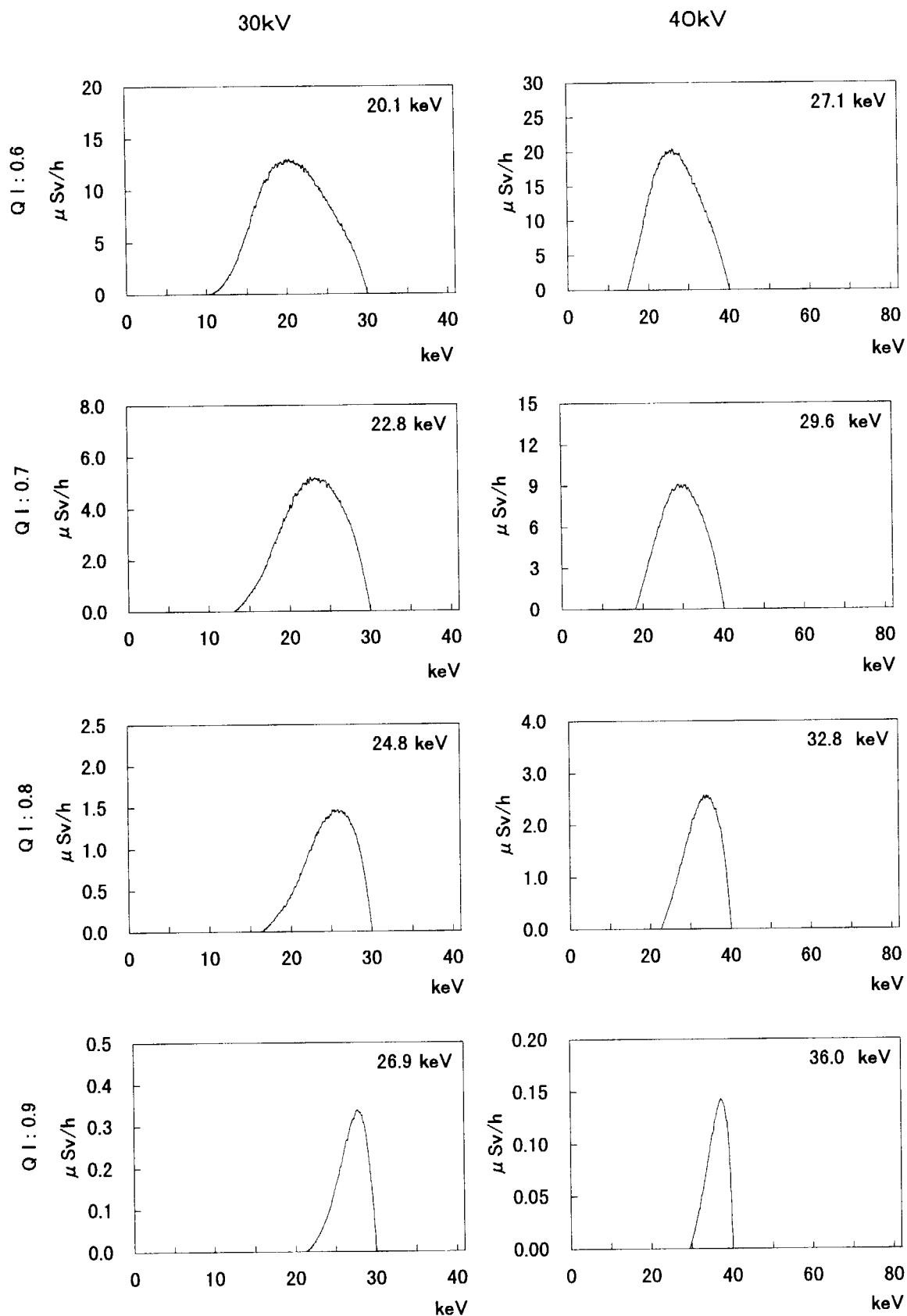


Fig. 11 (Continued)

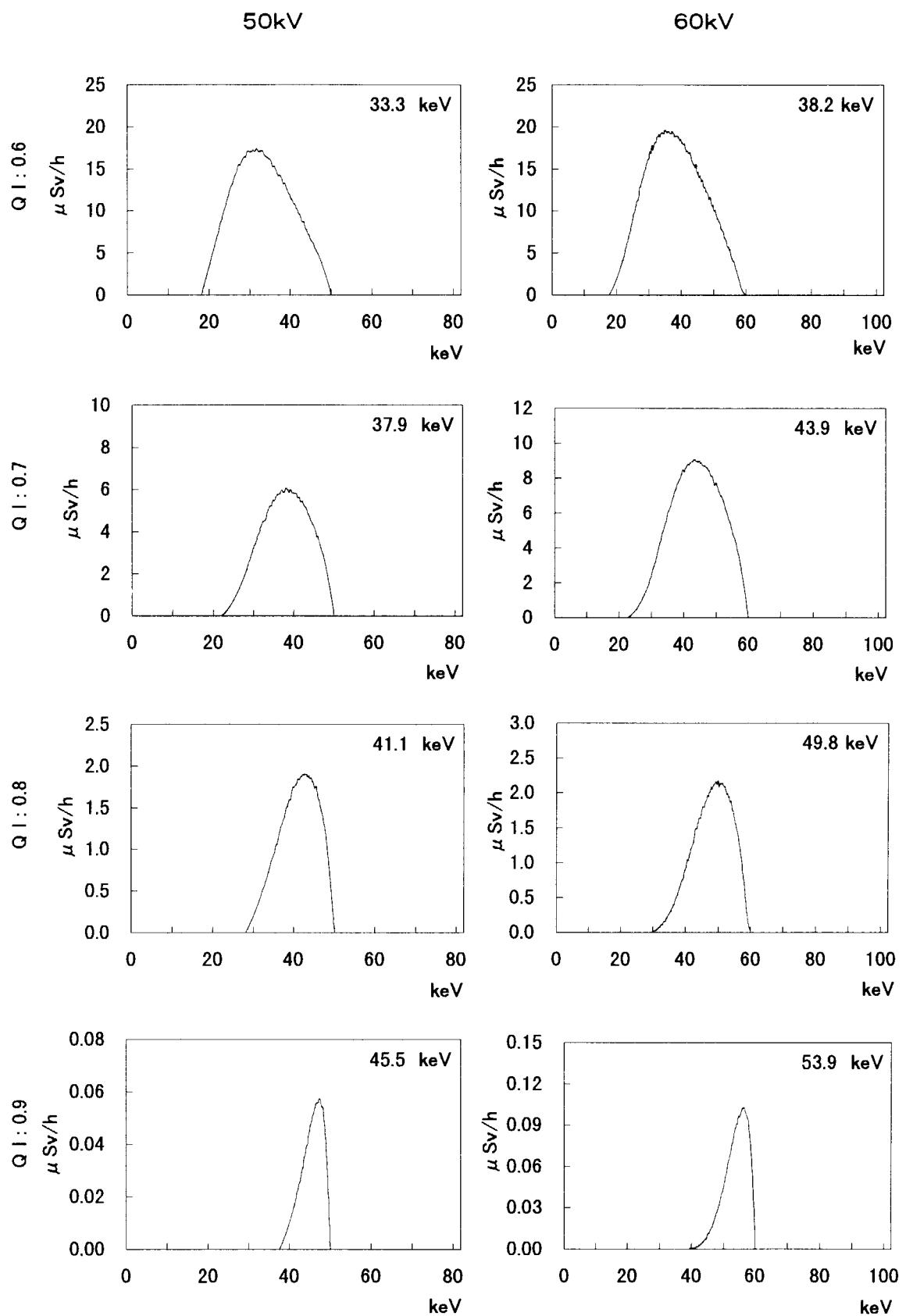


Fig. 11 (Continued)

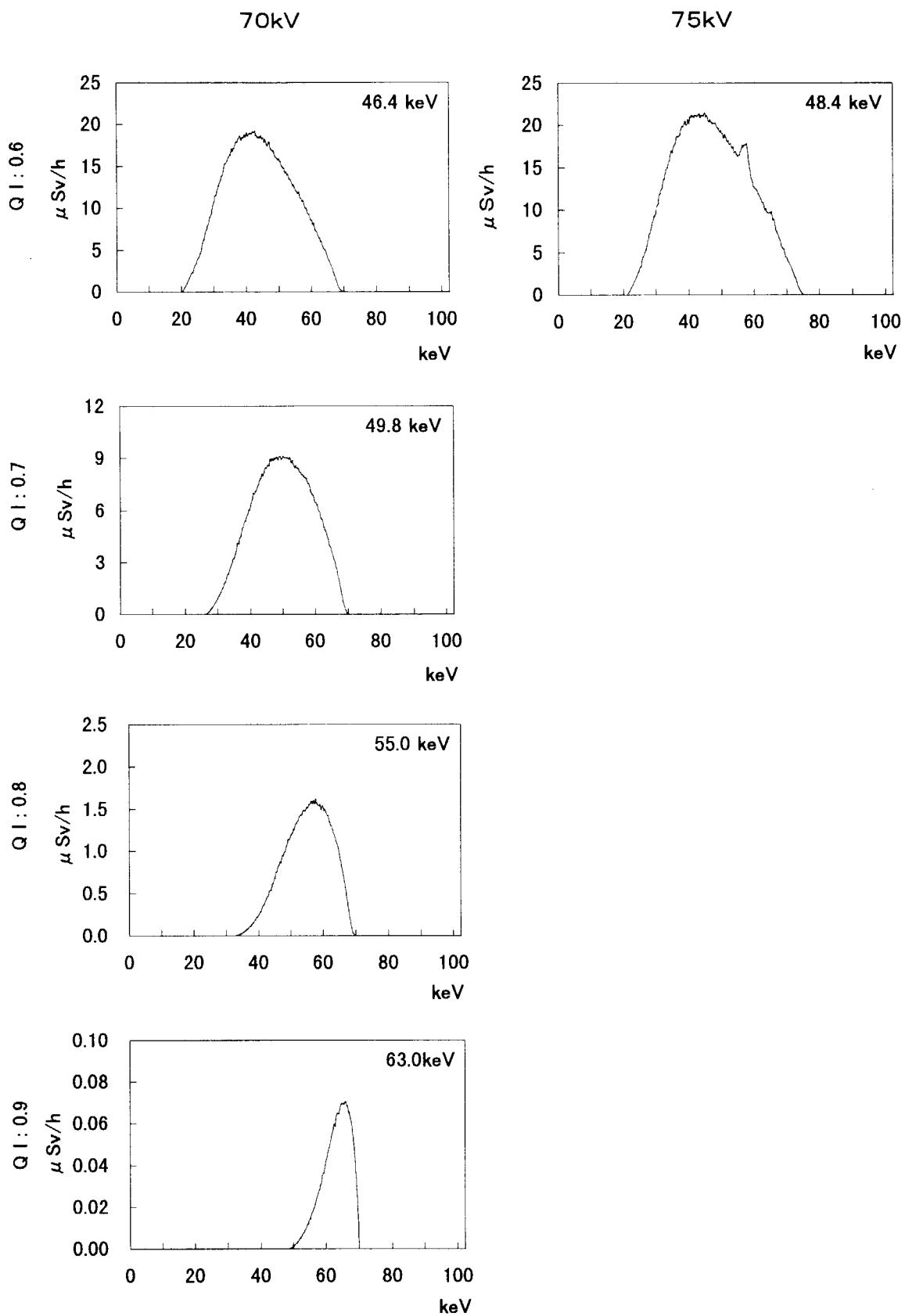


Fig. 11 (Continued)

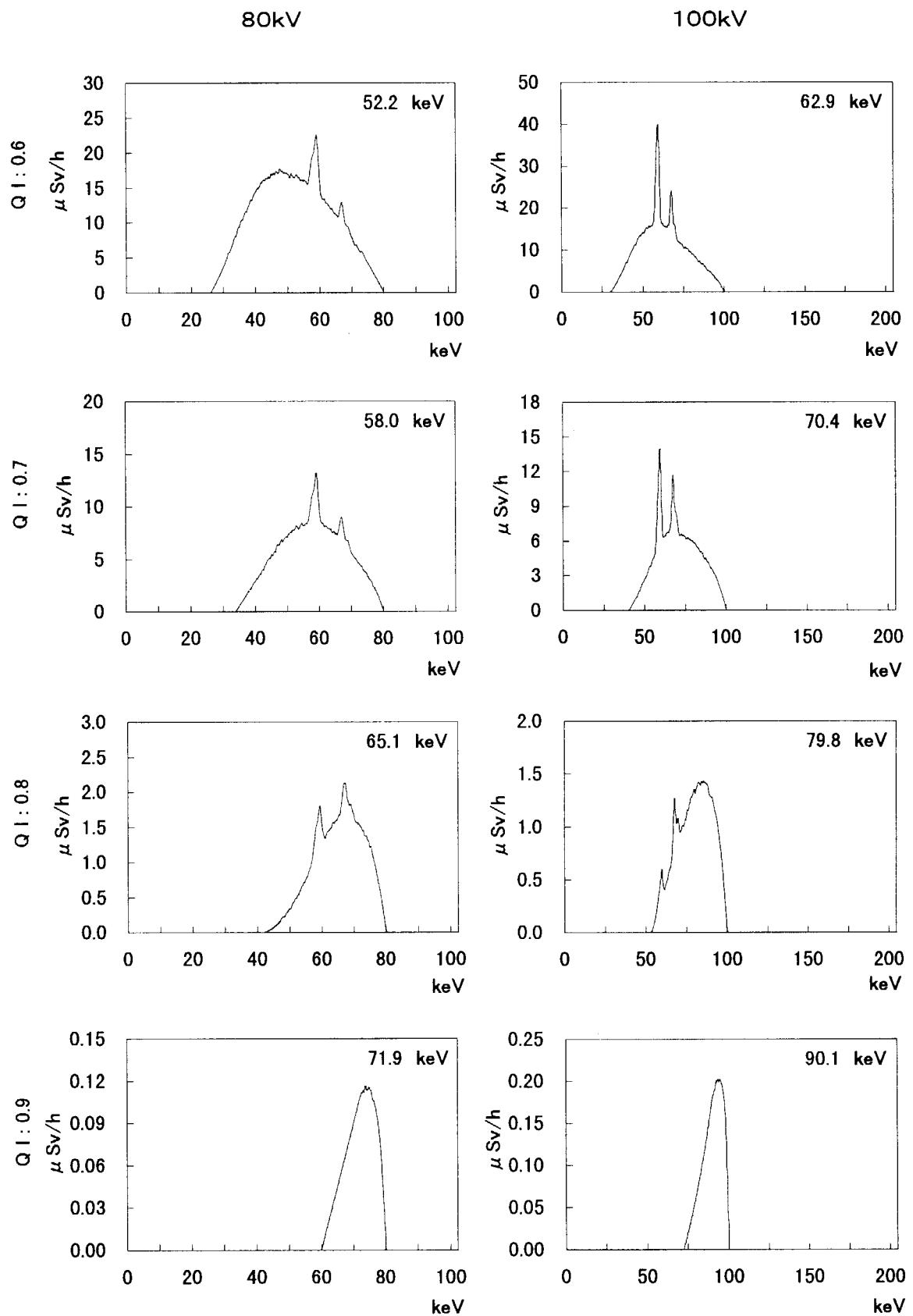


Fig. 11 (Continued)

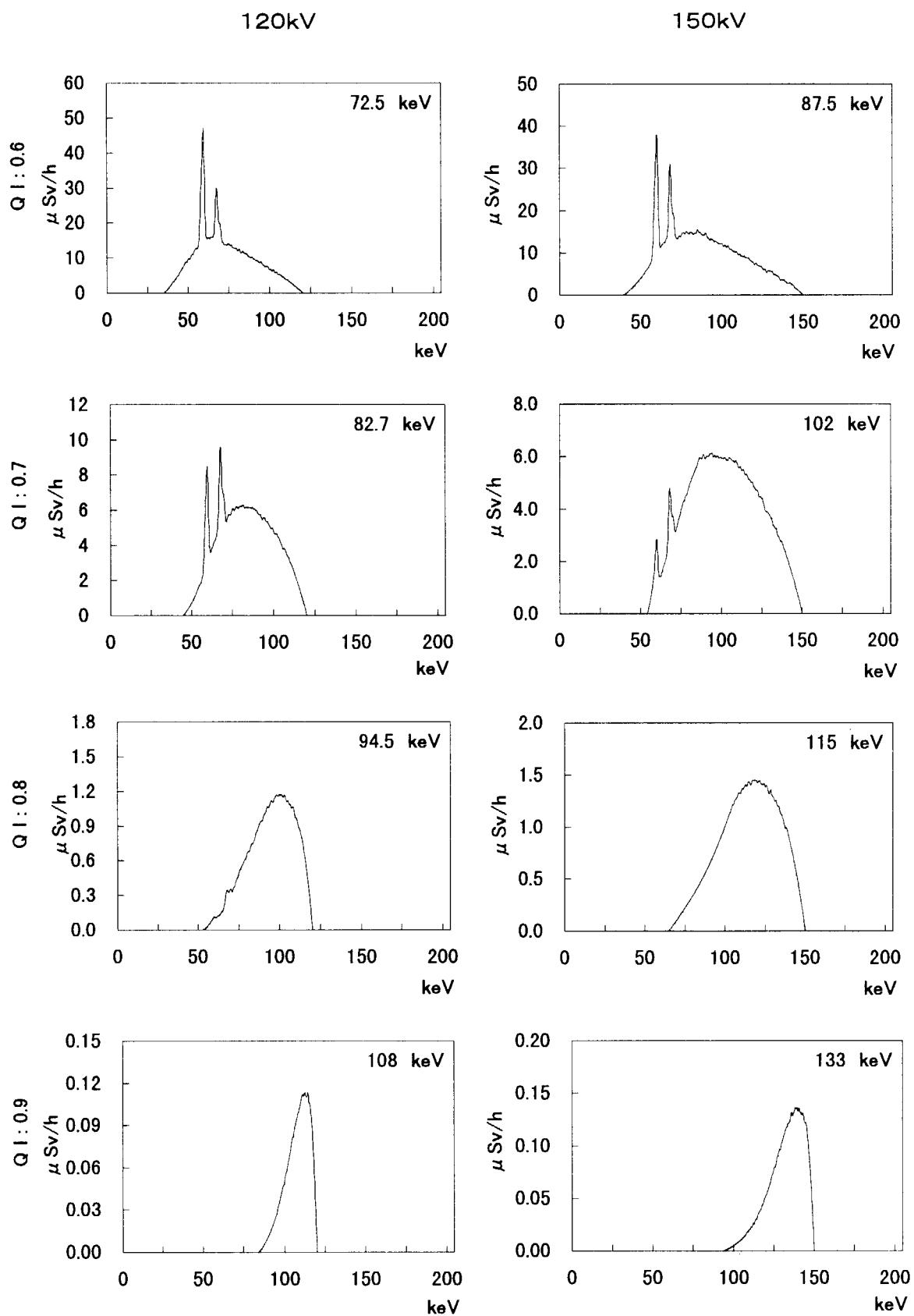


Fig. 11 (Continued)

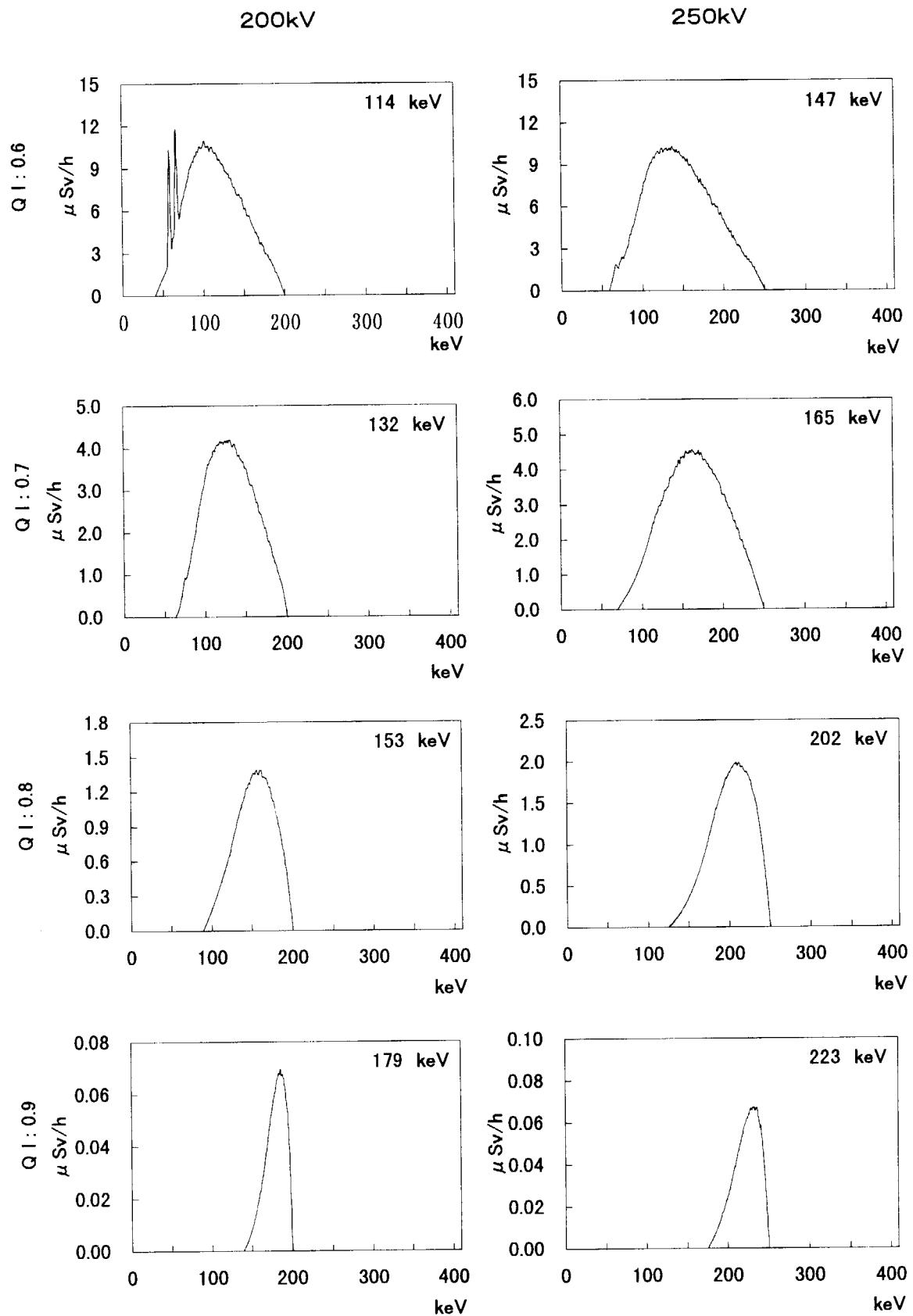


Fig. 11 (Continued)

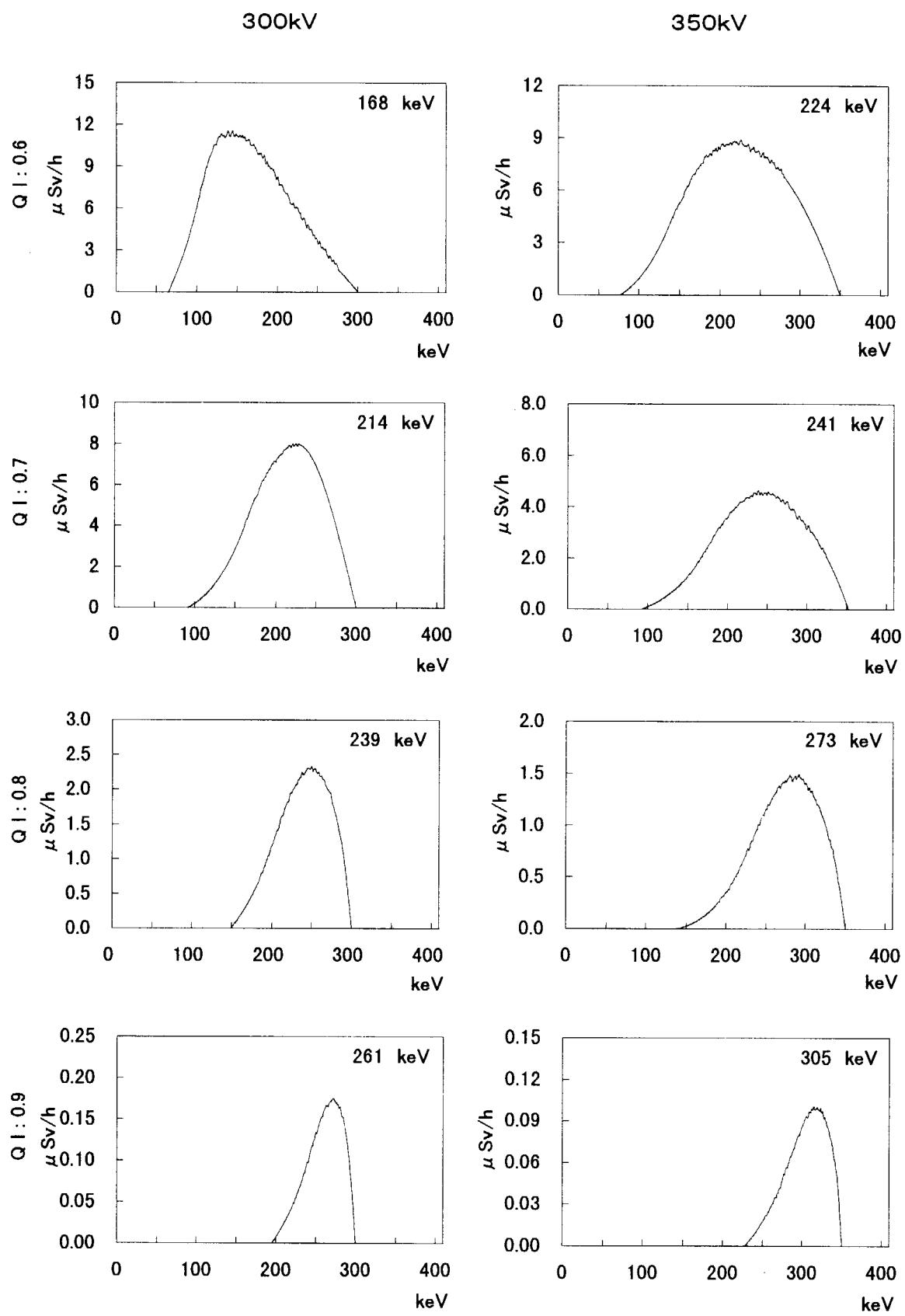


Fig. 11 (Concluded)

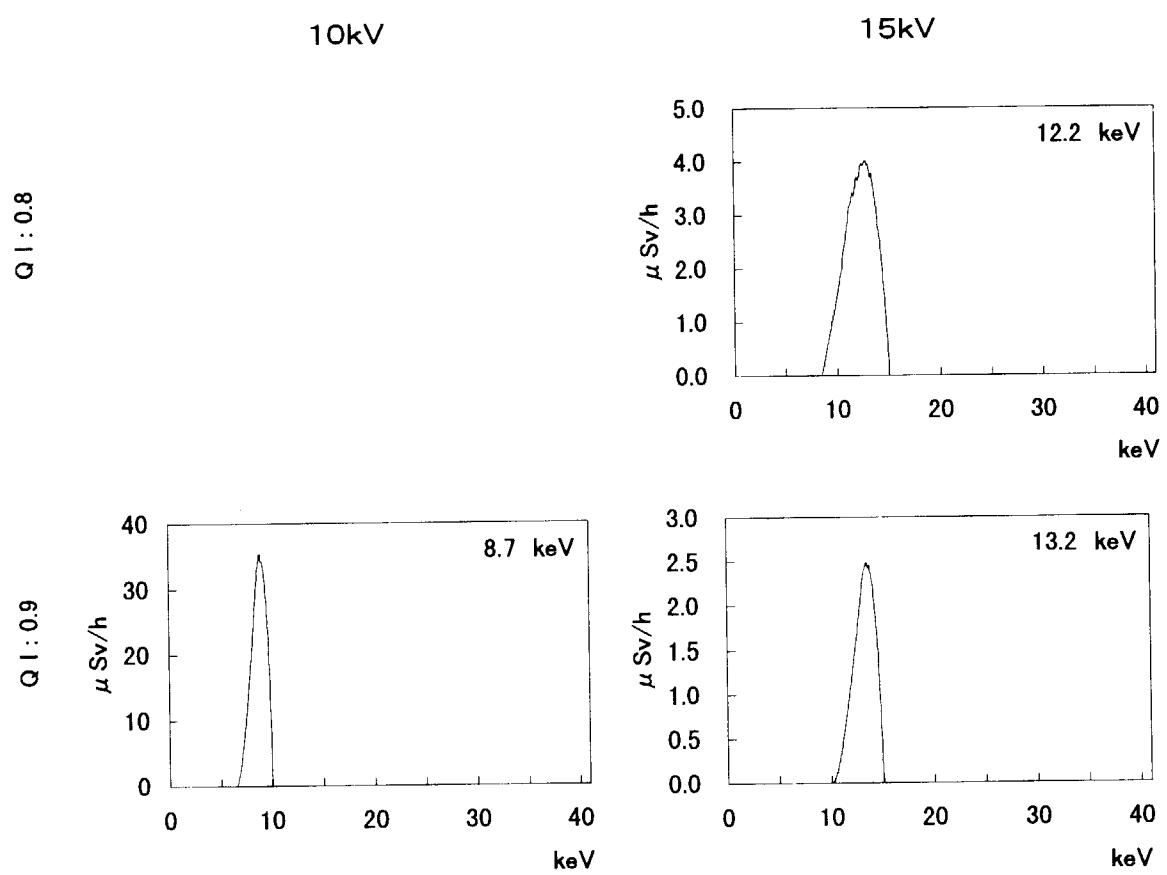


Fig. 12 Estimated spectral distributions of directional dose equivalent (H' (0.07)) for each quality index (QI).
(Tube voltage: 10kV ~ 60kV)

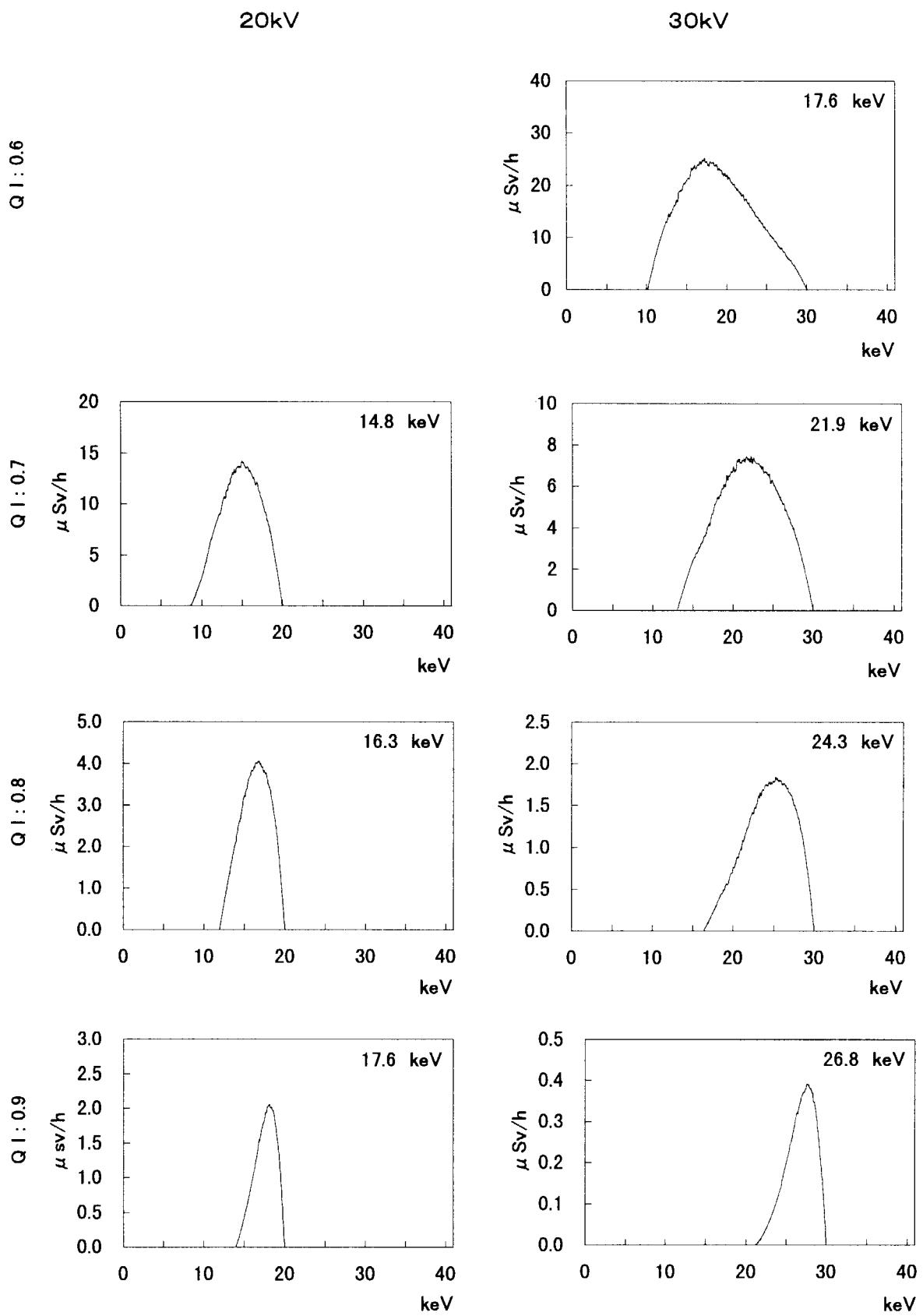


Fig. 12 (Continued)

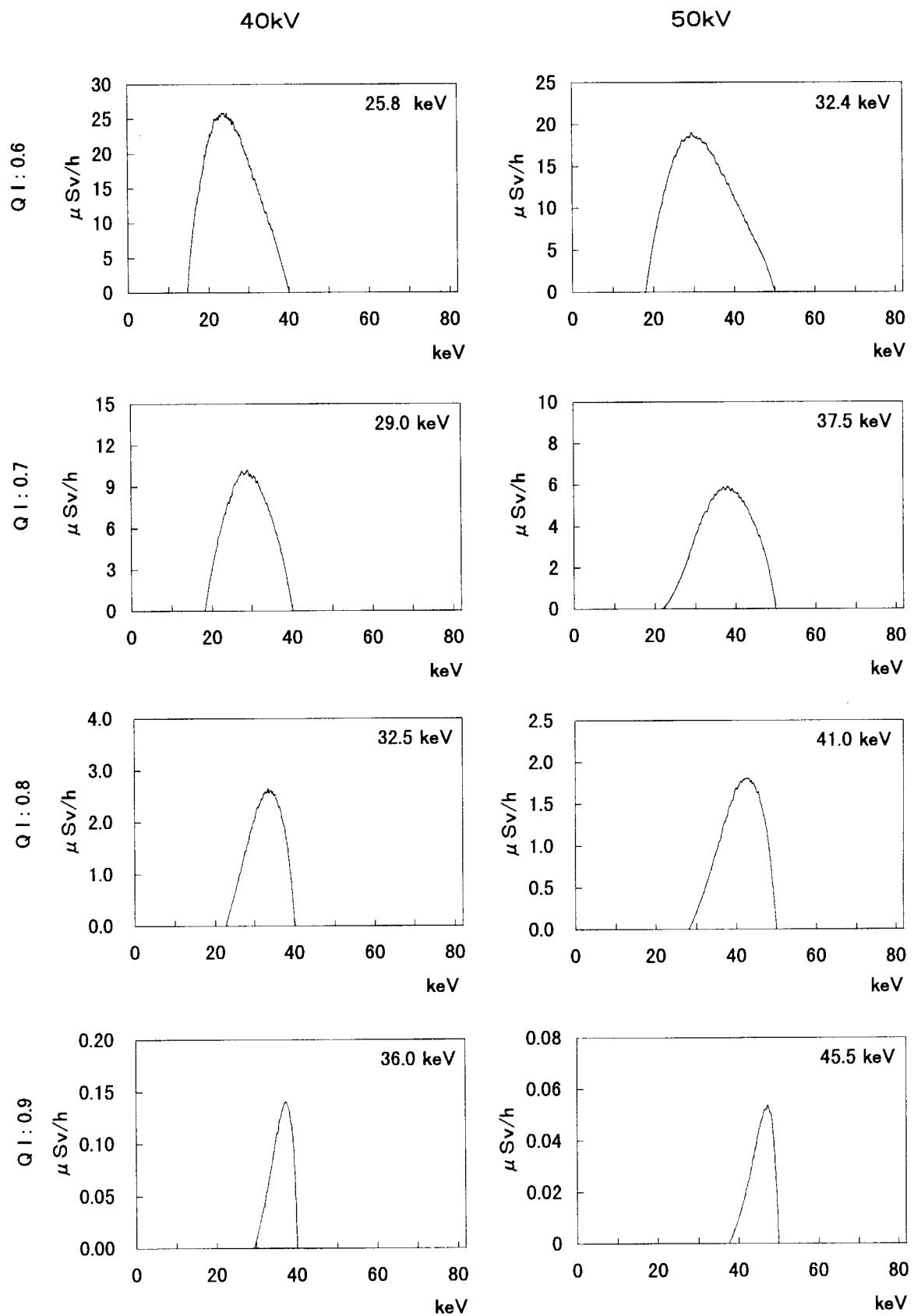


Fig. 12 (Continued)

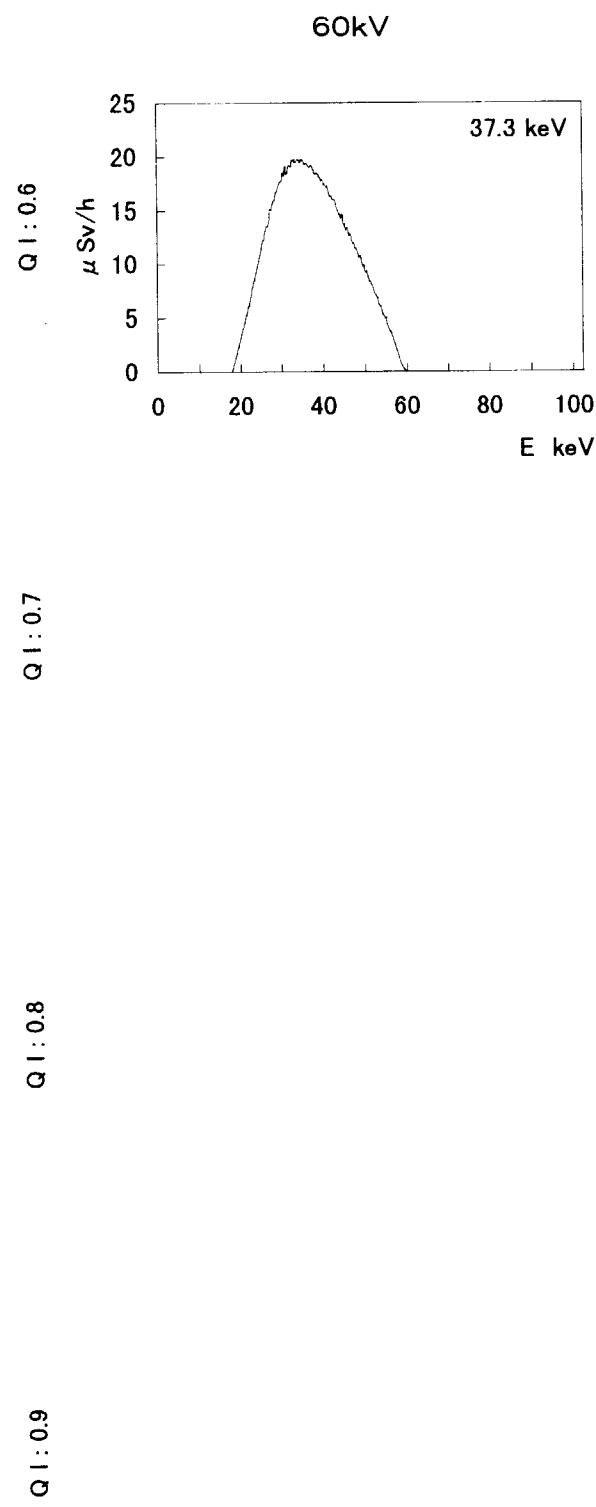


Fig. 12 (Concluded)

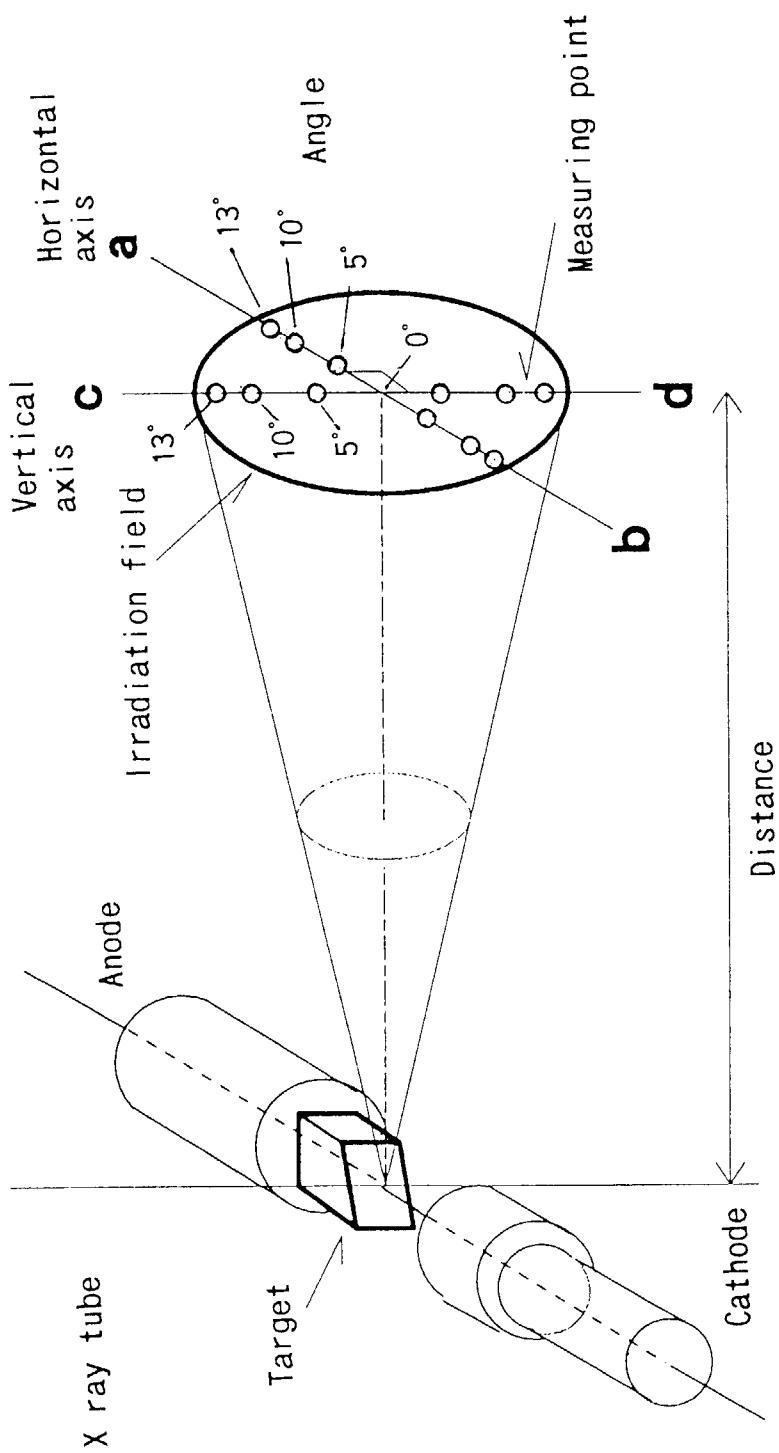
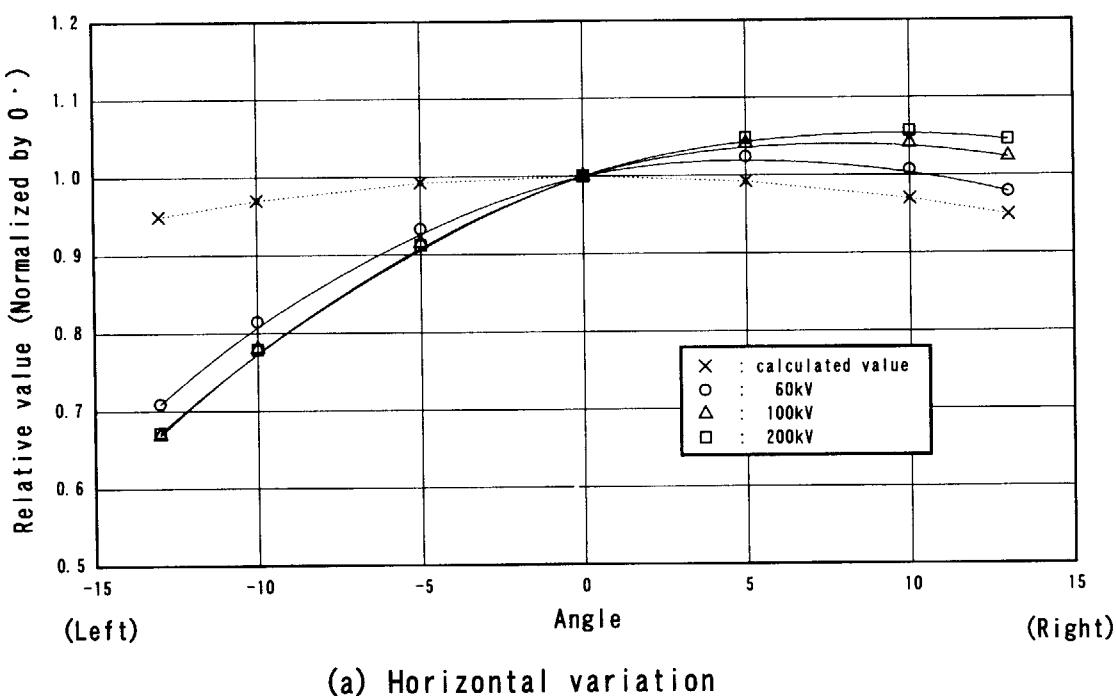
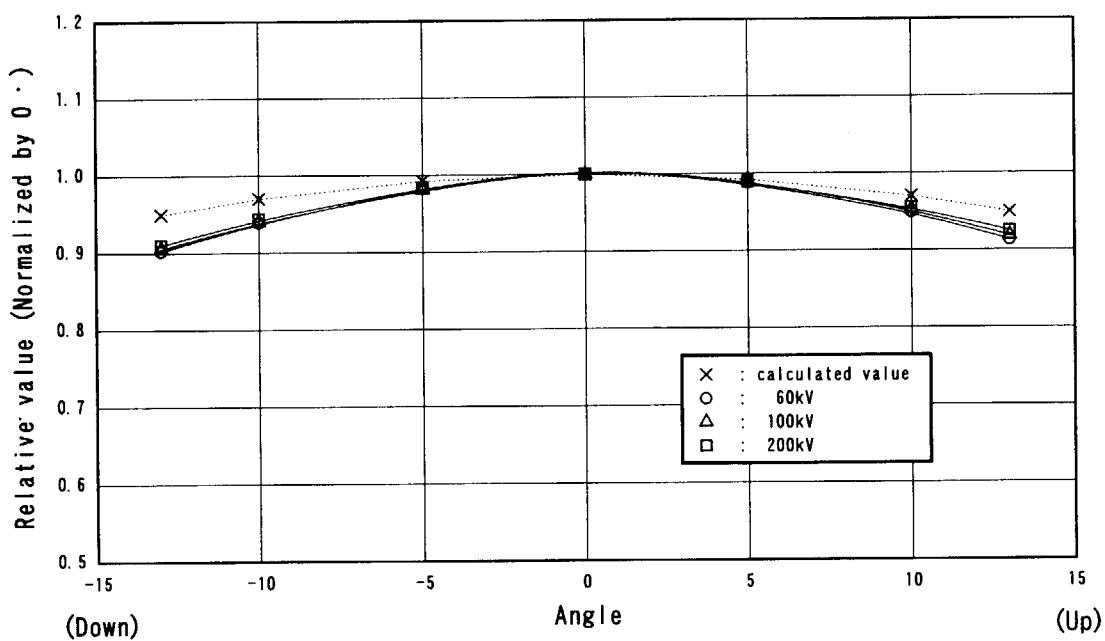


Fig. 1 3 Measuring point of dose distribution and geometrical relationship between the target in X ray tube and the irradiation field.

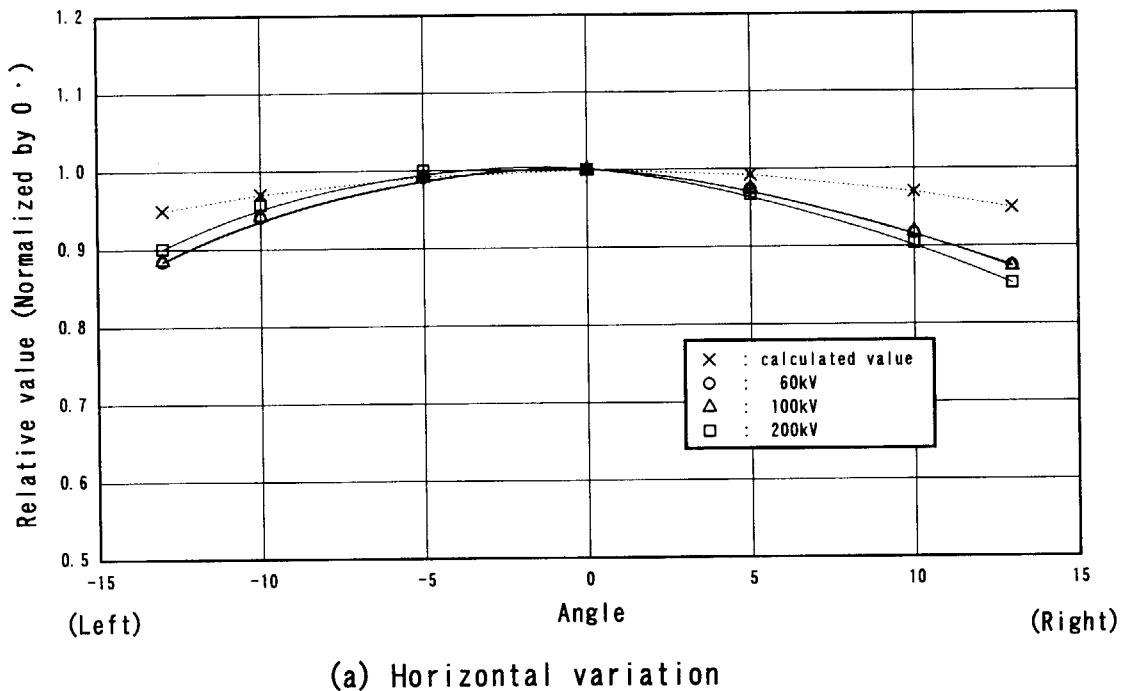


(a) Horizontal variation

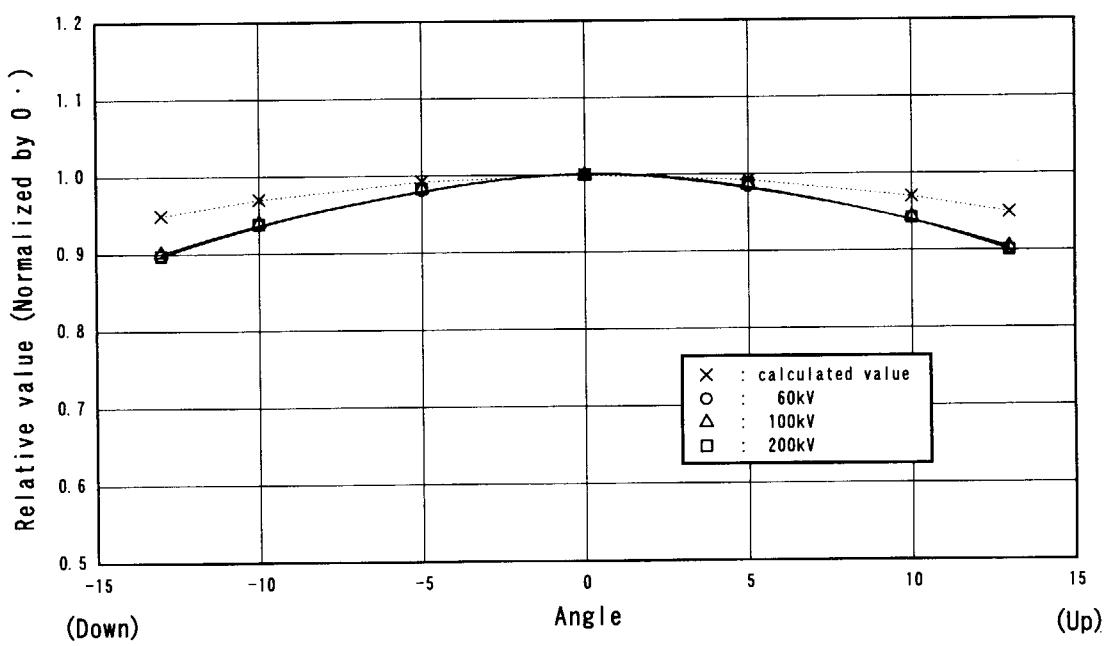


(b) Vertical variation

Fig. 1 4 (1) Distribution of exposure for various angles of irradiation fields (No additional filter)

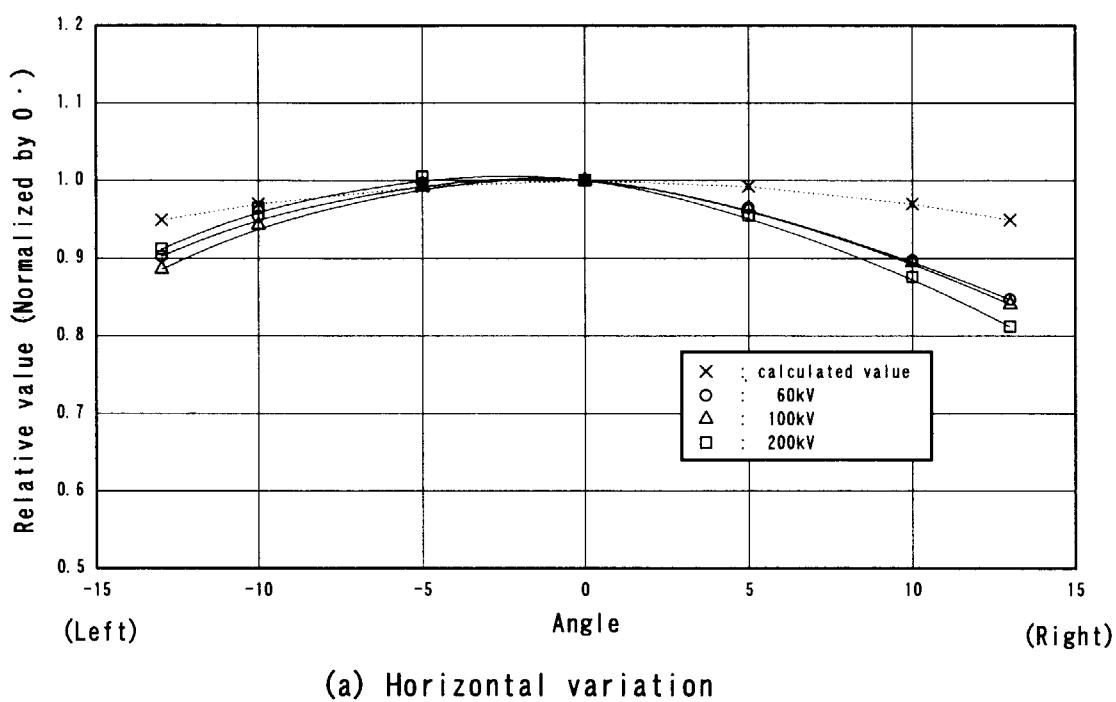


(a) Horizontal variation

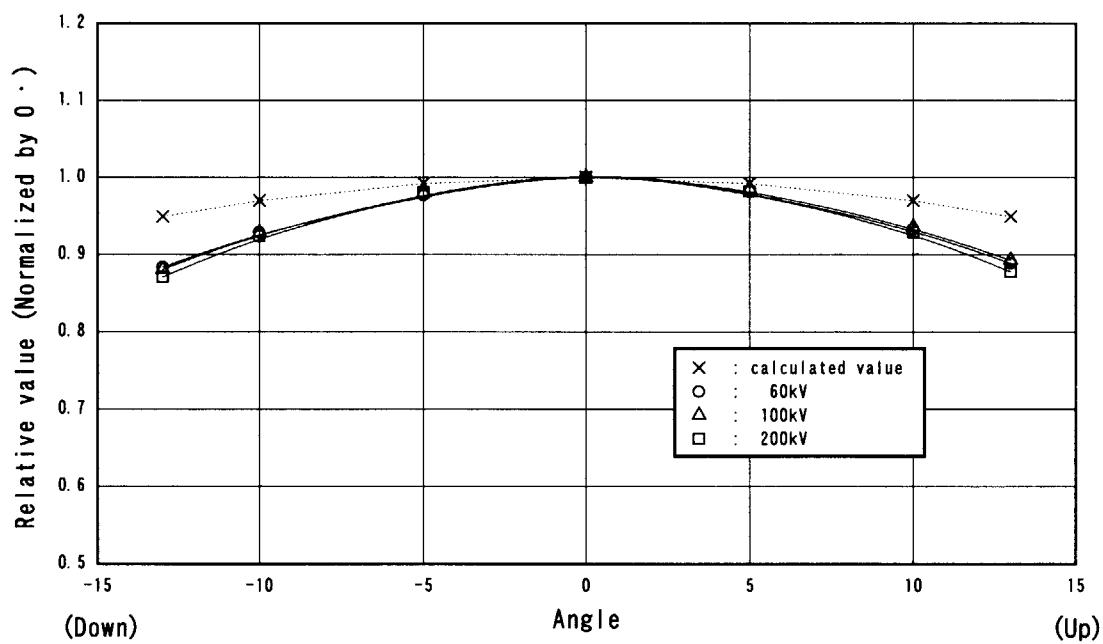


(b) Vertical variation

Fig. 1 4 (2) Distribution of exposure for various angles of irradiation fields (Quality index 0.6)

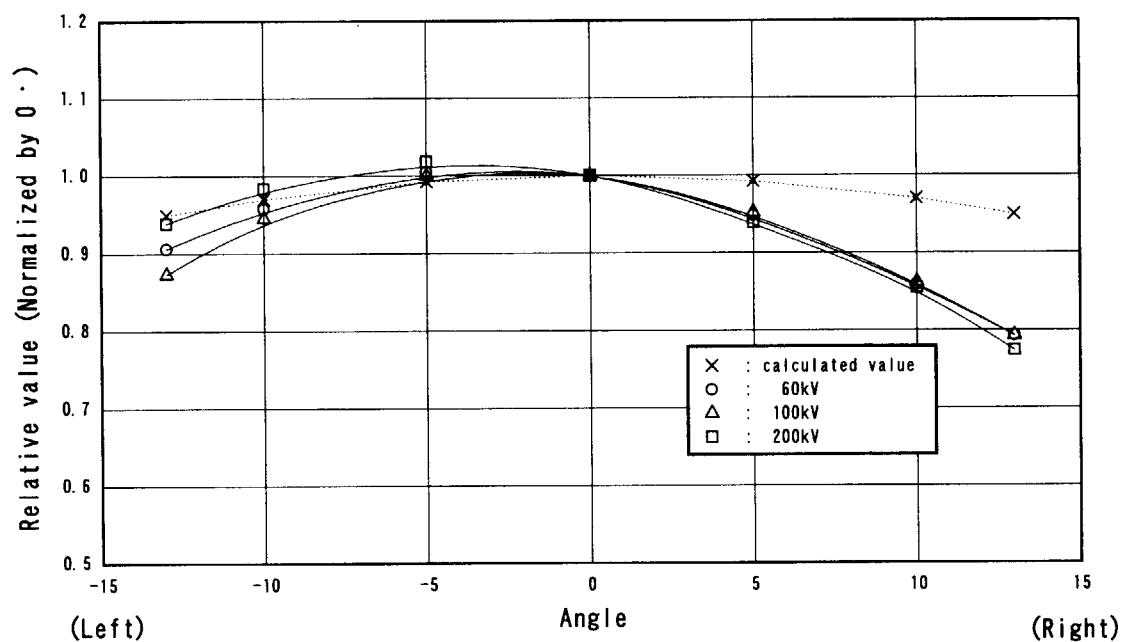


(a) Horizontal variation

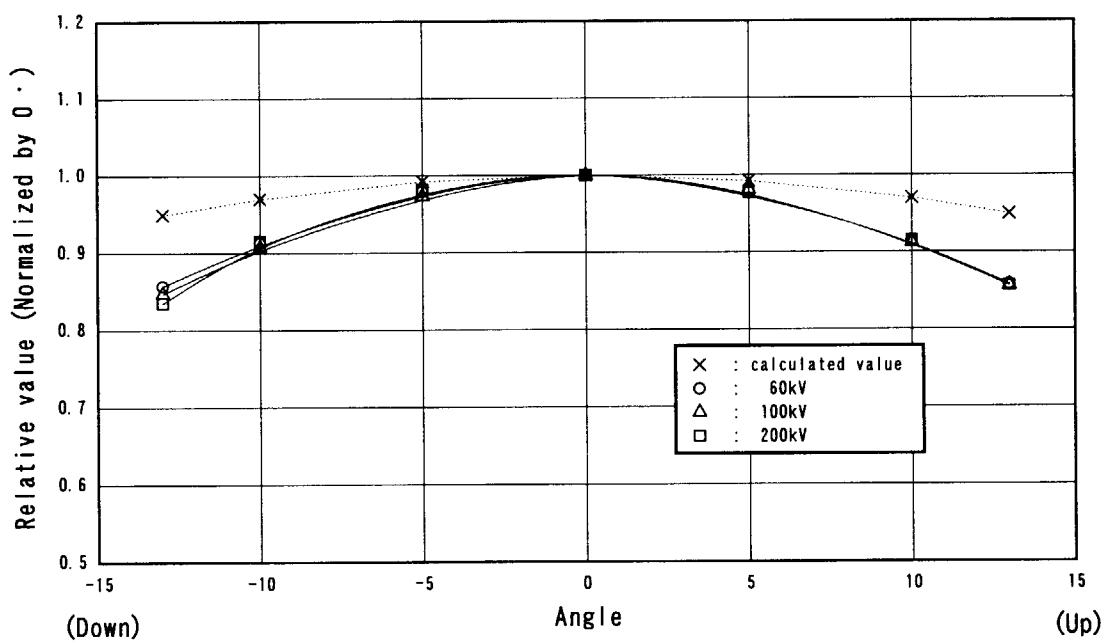


(b) Vertical variation

Fig. 1 4 (3) Distribution of exposure for various angles of irradiation fields (Quality index 0.7)



(a) Horizontal variation



(b) Vertical variation

Fig. 1 4 (4) Distribution of exposure for various angles of irradiation fields (Quality index 0.8)

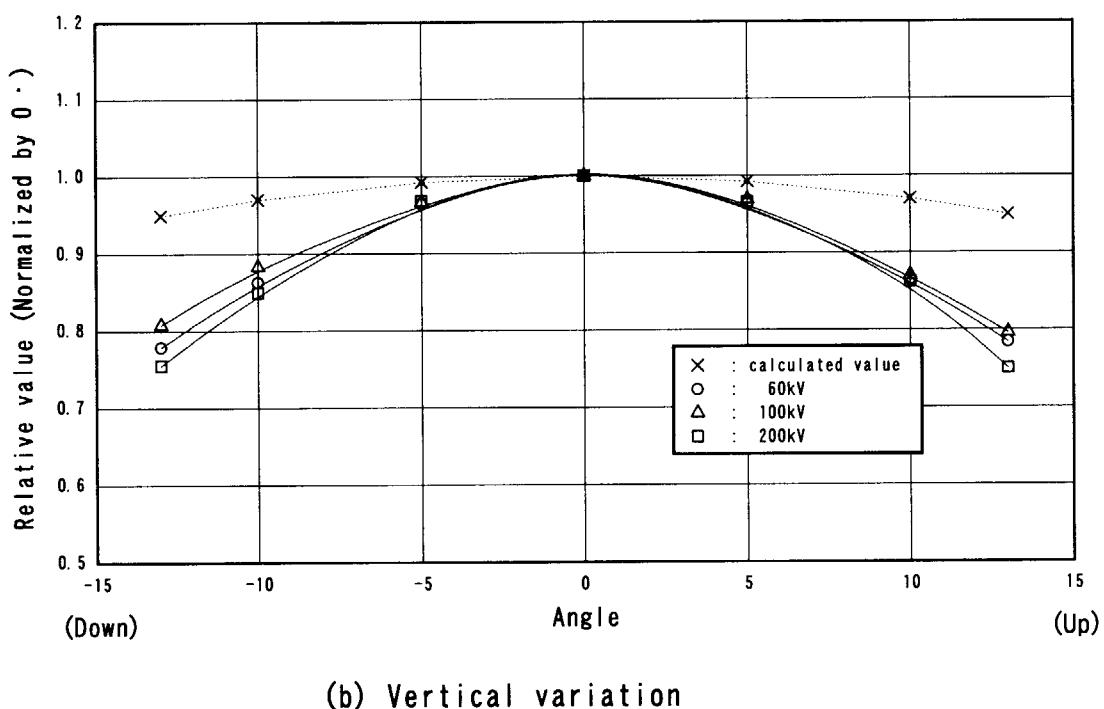
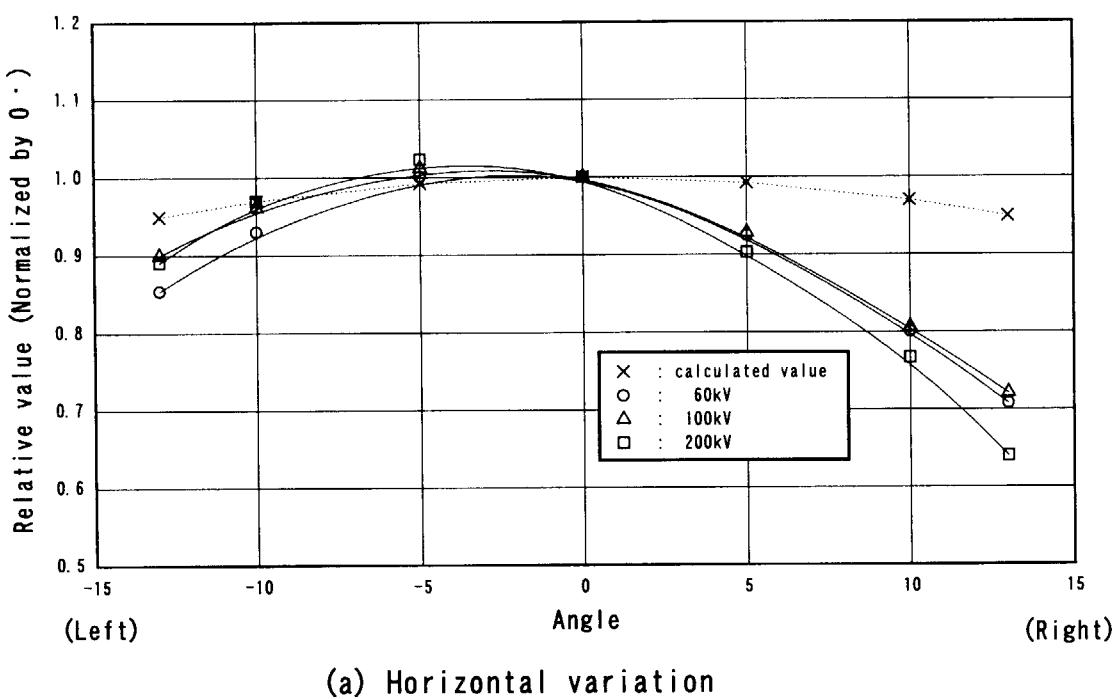


Fig. 1 4 (5) Distribution of exposure for various angles of irradiation fields (Quality index 0.9)

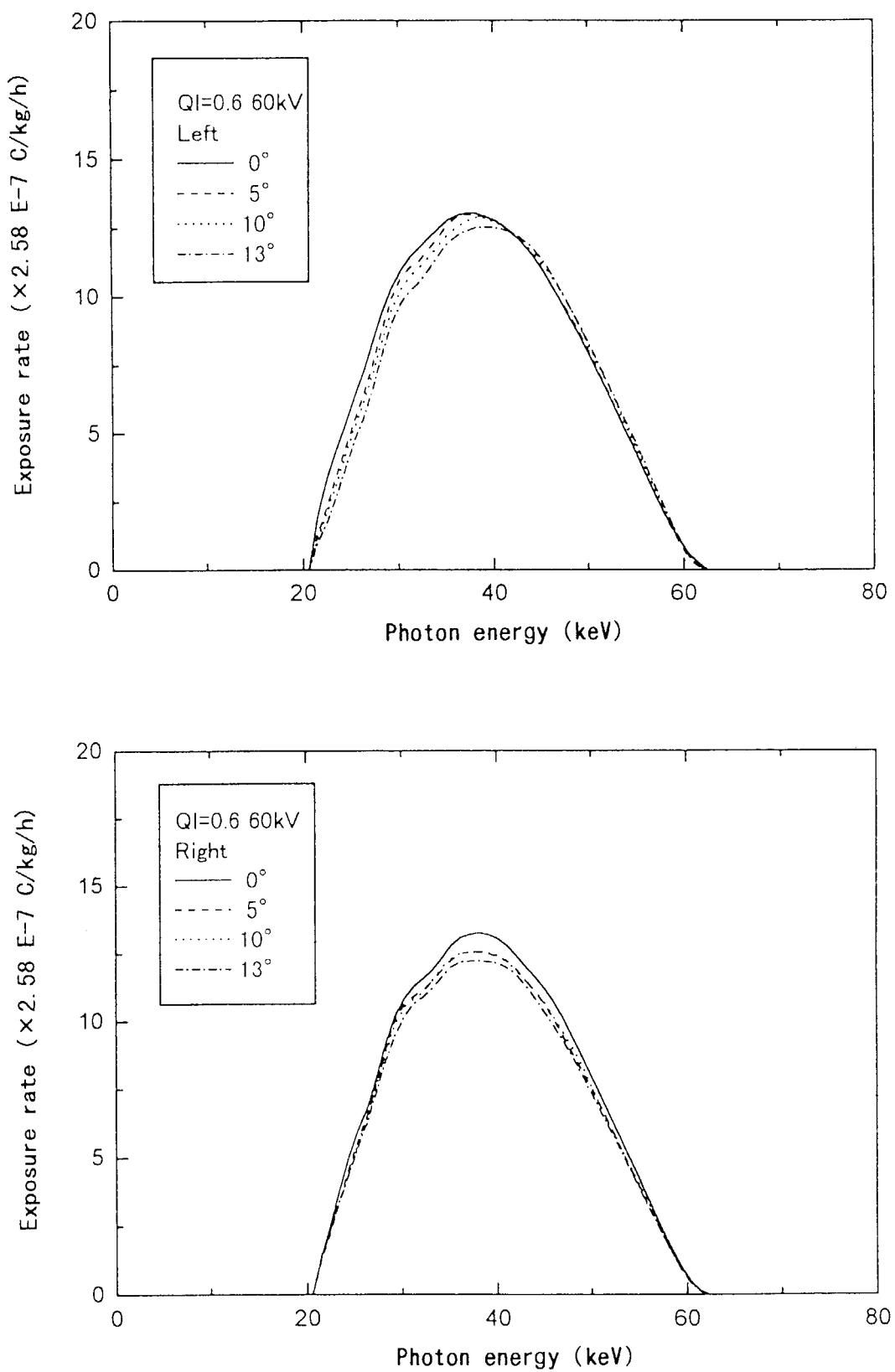


Fig. 1 5 Exposure spectral distributions on the horizontal axis in the irradiation field measured with a Ge detector(quality index 0.6).

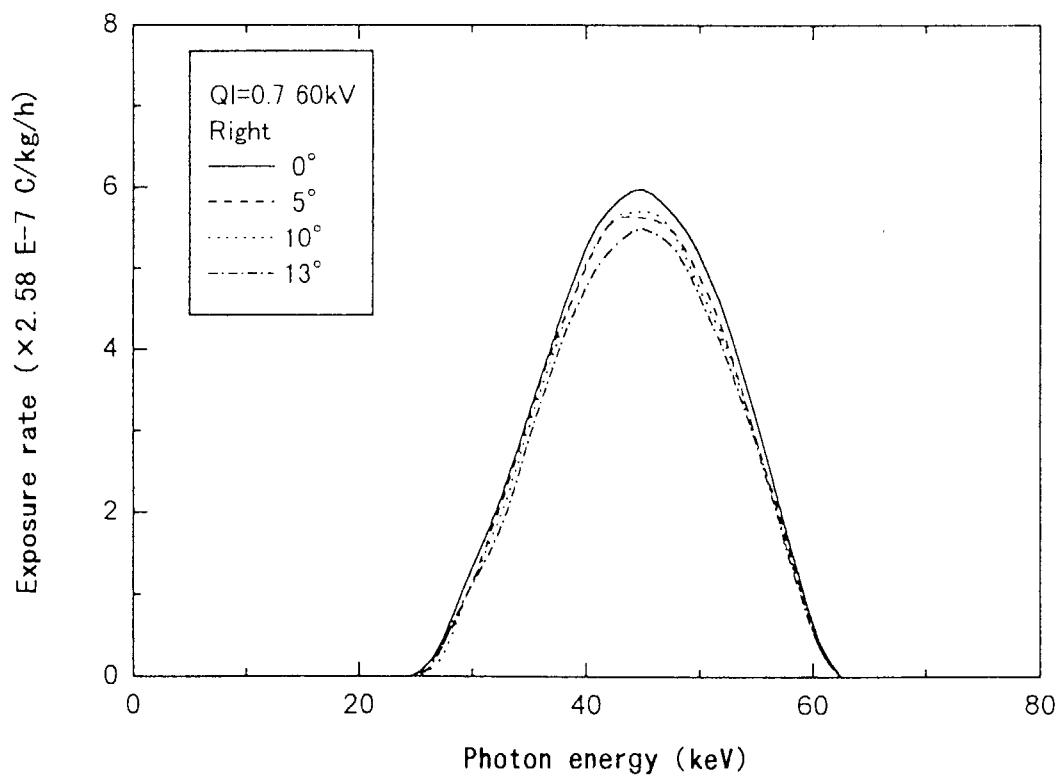
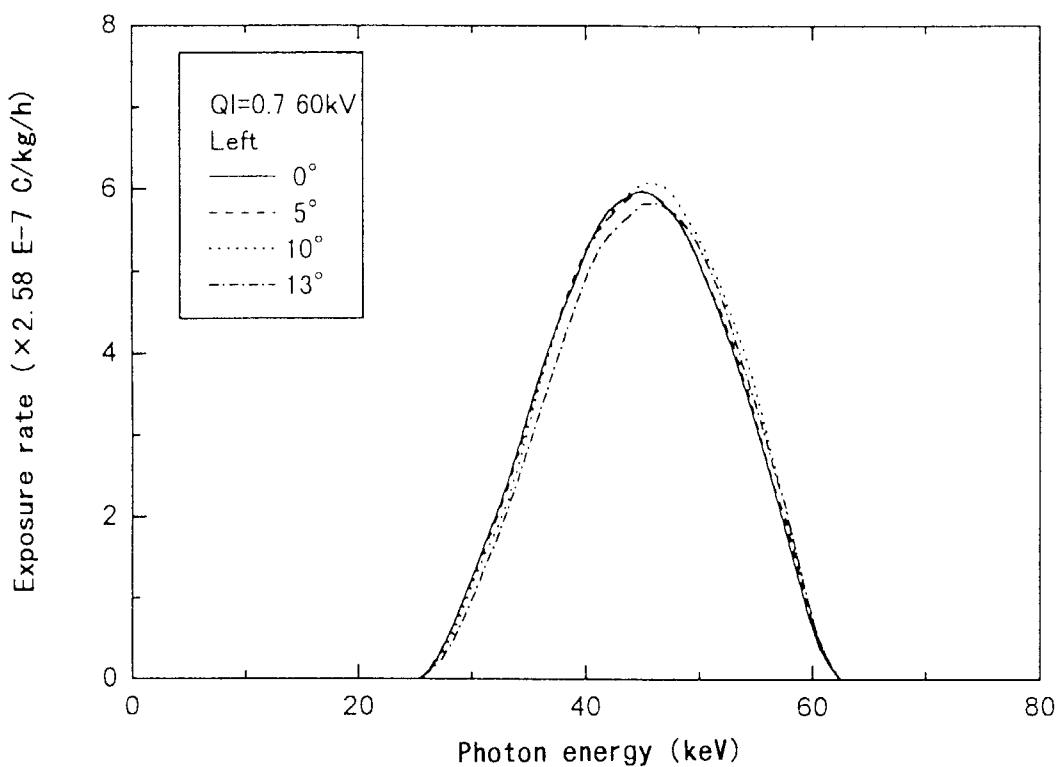


Fig. 1 6 Exposure spectral distributions on the horizontal axis in the irradiation field measured with a Ge detector(quality index 0.7).

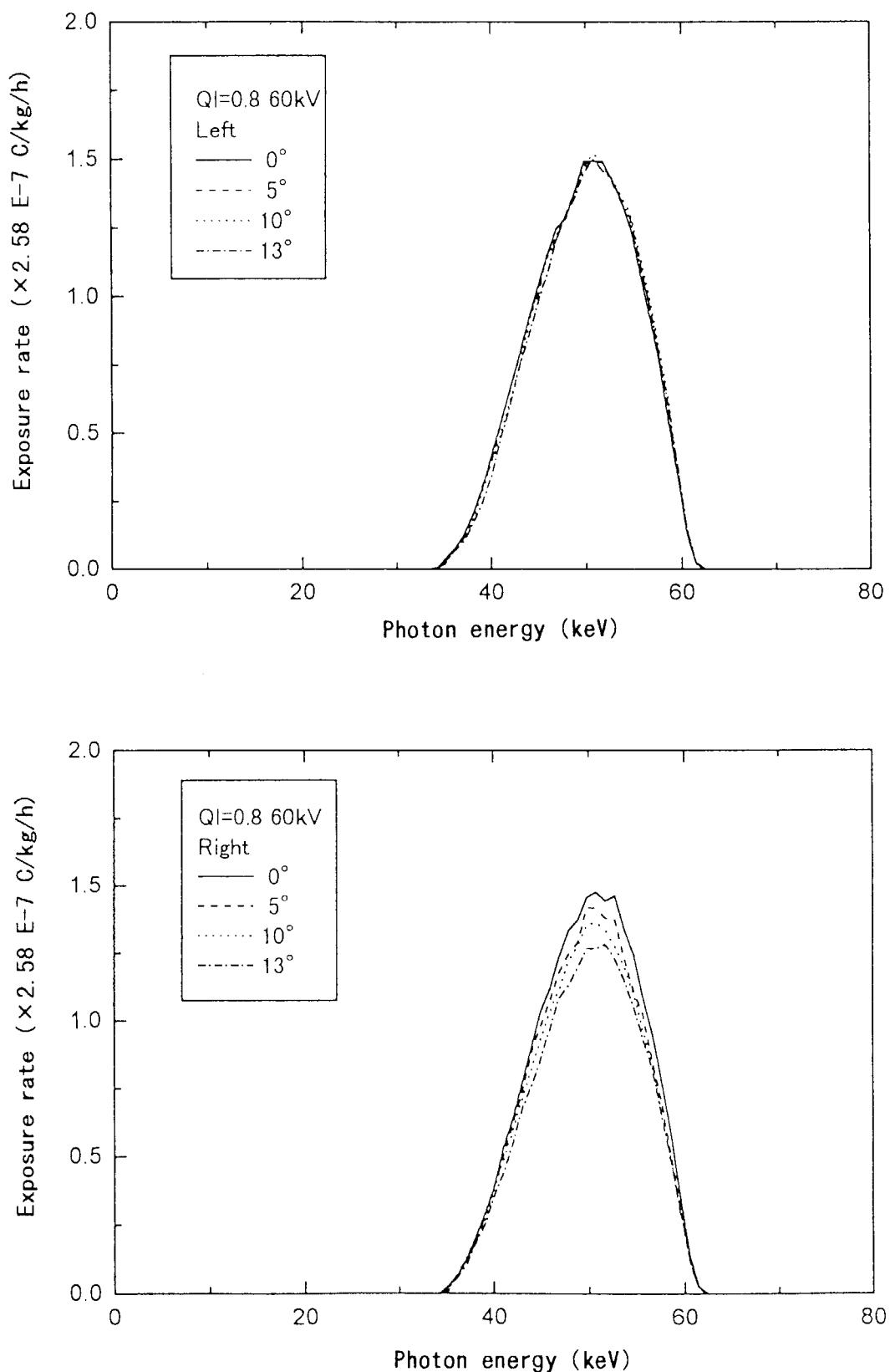


Fig. 1 7 Exposure spectral distributions on the horizontal axis in the irradiation field measured with a Ge detector(quality index 0.8).

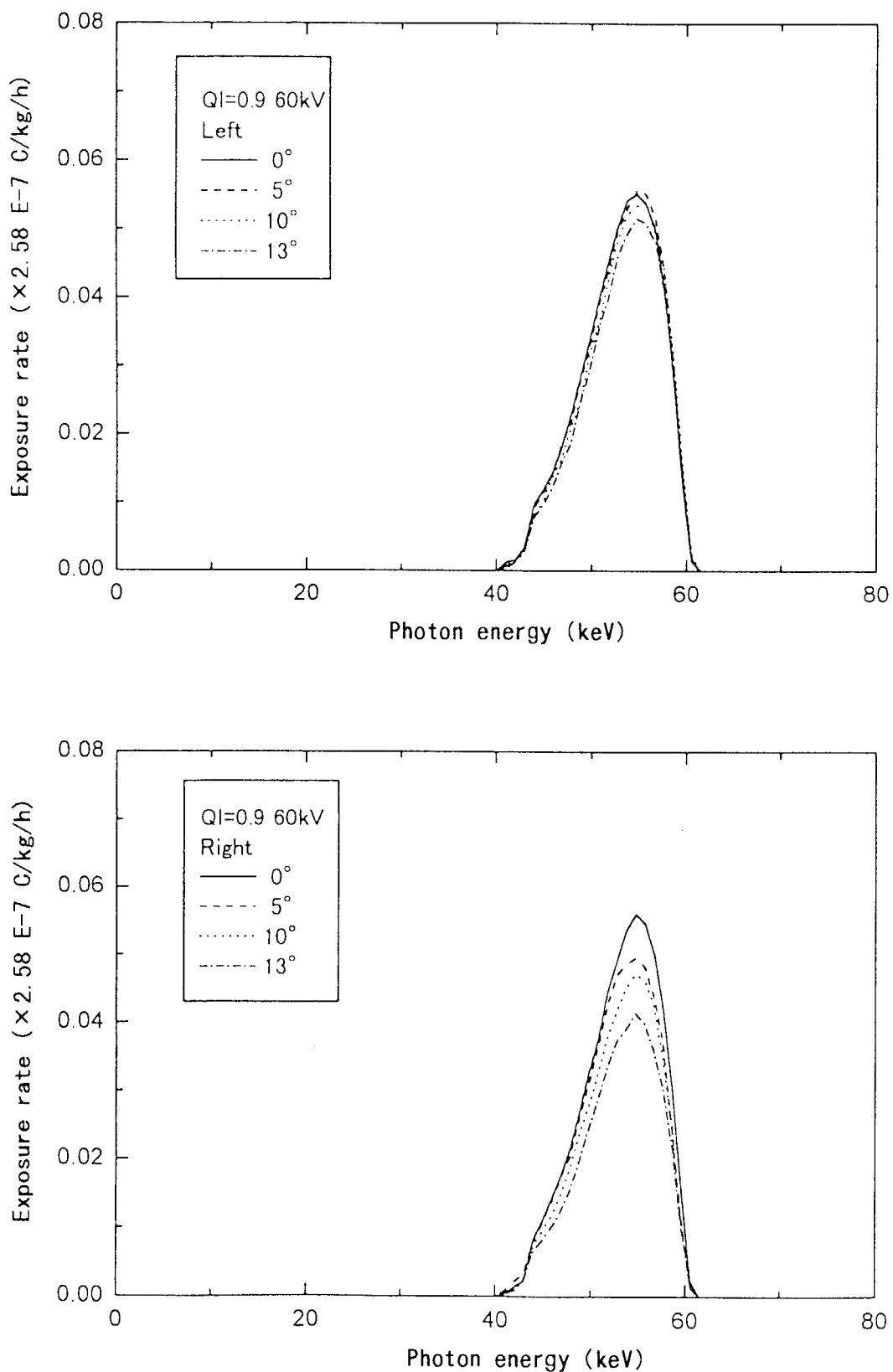


Fig. 1 8 Exposure spectral distributions on the horizontal axis in the irradiation field measured with a Ge detector(quality index 0.9).

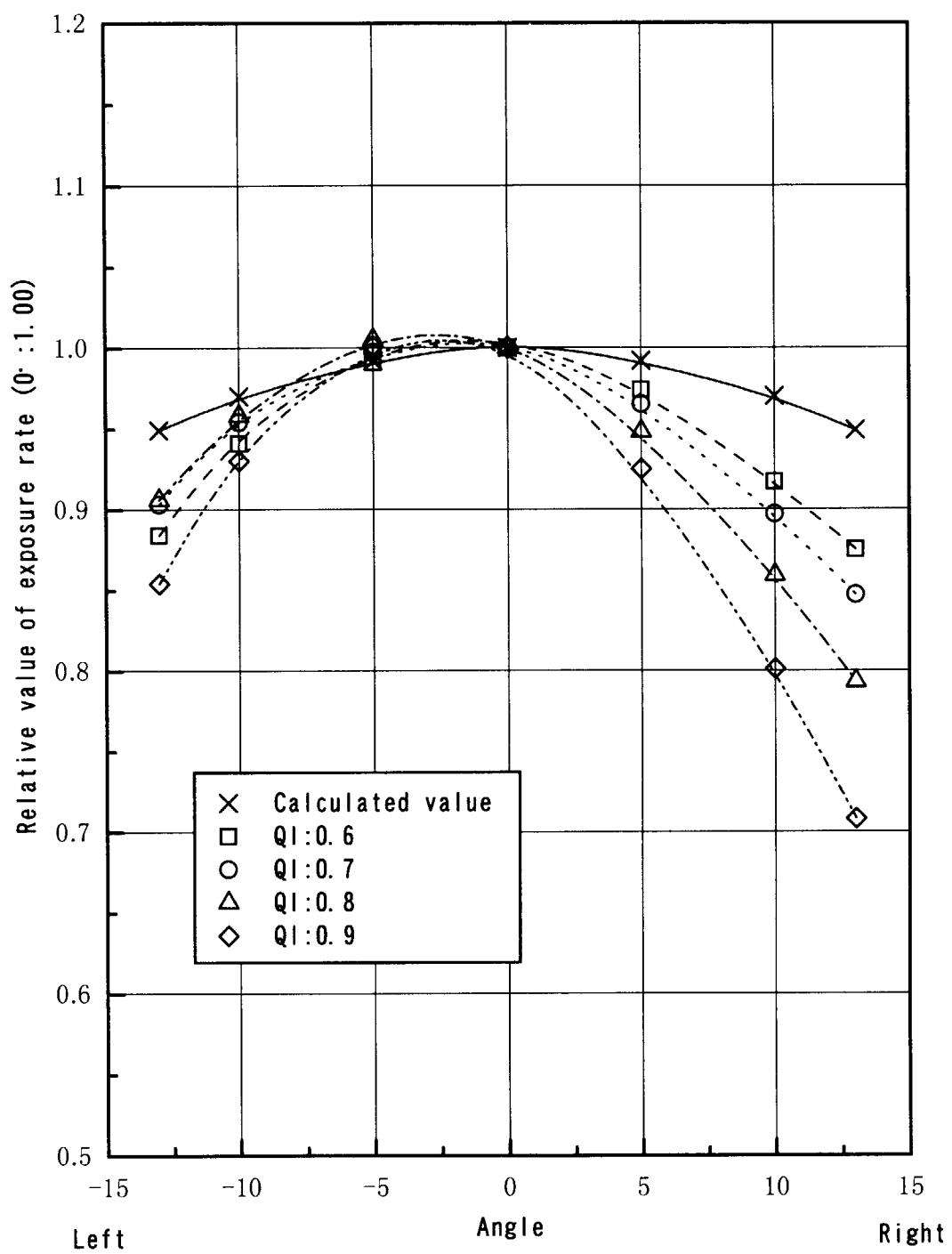


Fig. 1 9 Horizontally dose distributions of exposure rate measured with an ionization chamber for each quality index

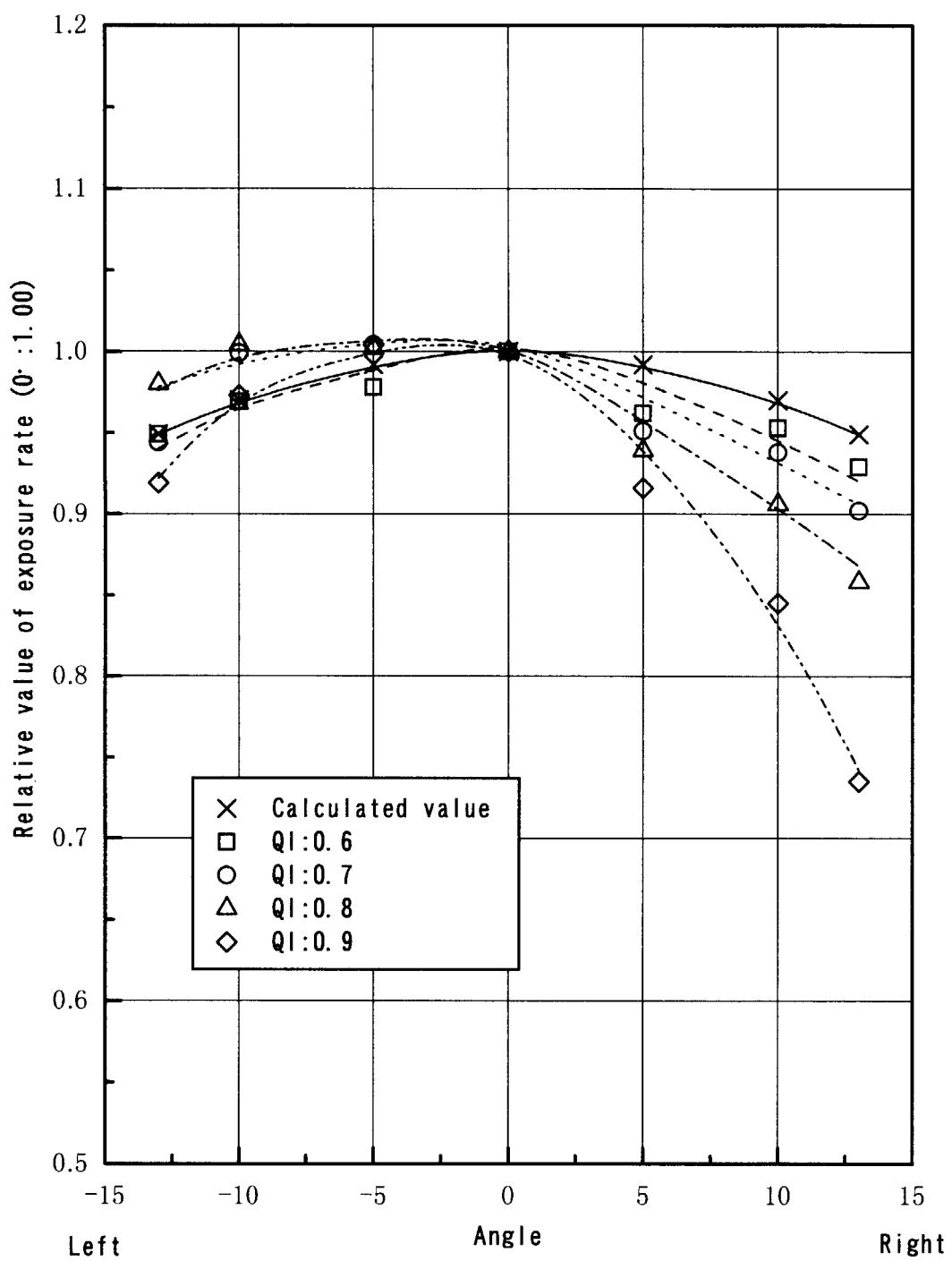


Fig. 2 0 Horizontally dose distributions of exposure rate evaluated with exposure spectrum for each quality index

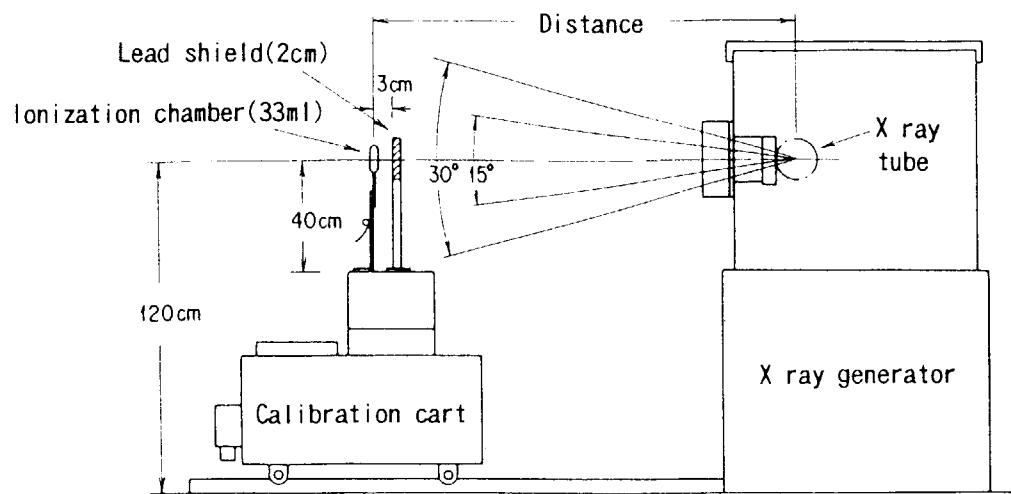


Fig. 2 1 Schematic view of scattering ratio measurement for irradiation field.

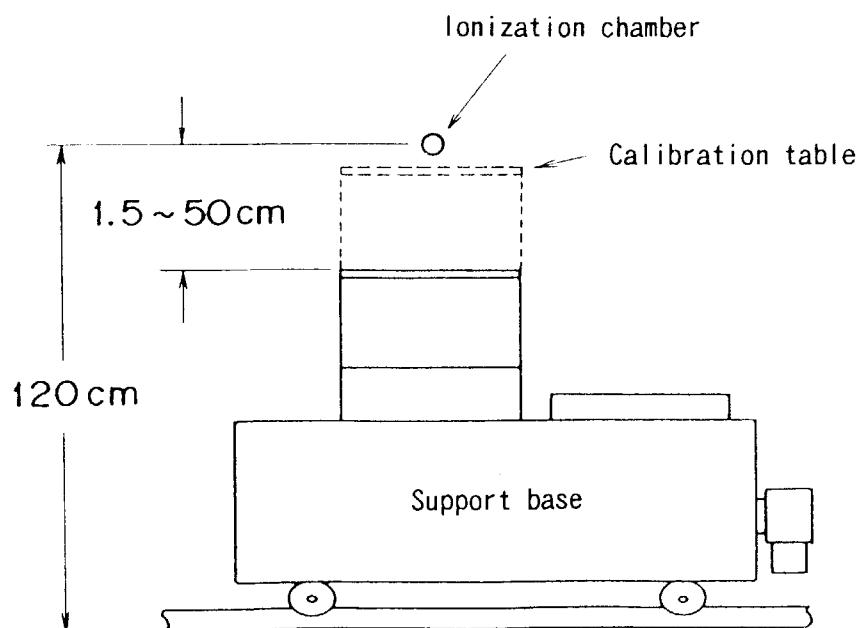


Fig. 2 2 Schematic view of calibration cart.

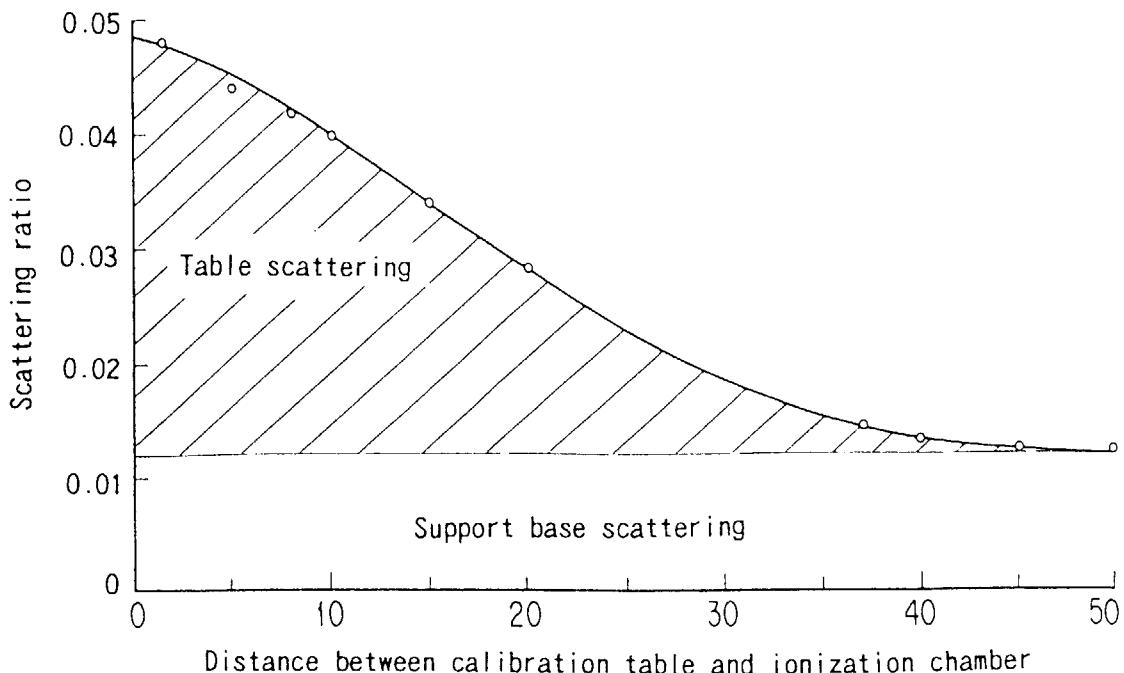


Fig. 2.3 Scattering ratio from calibration cart with change of distance between calibration table and ionization chamber.

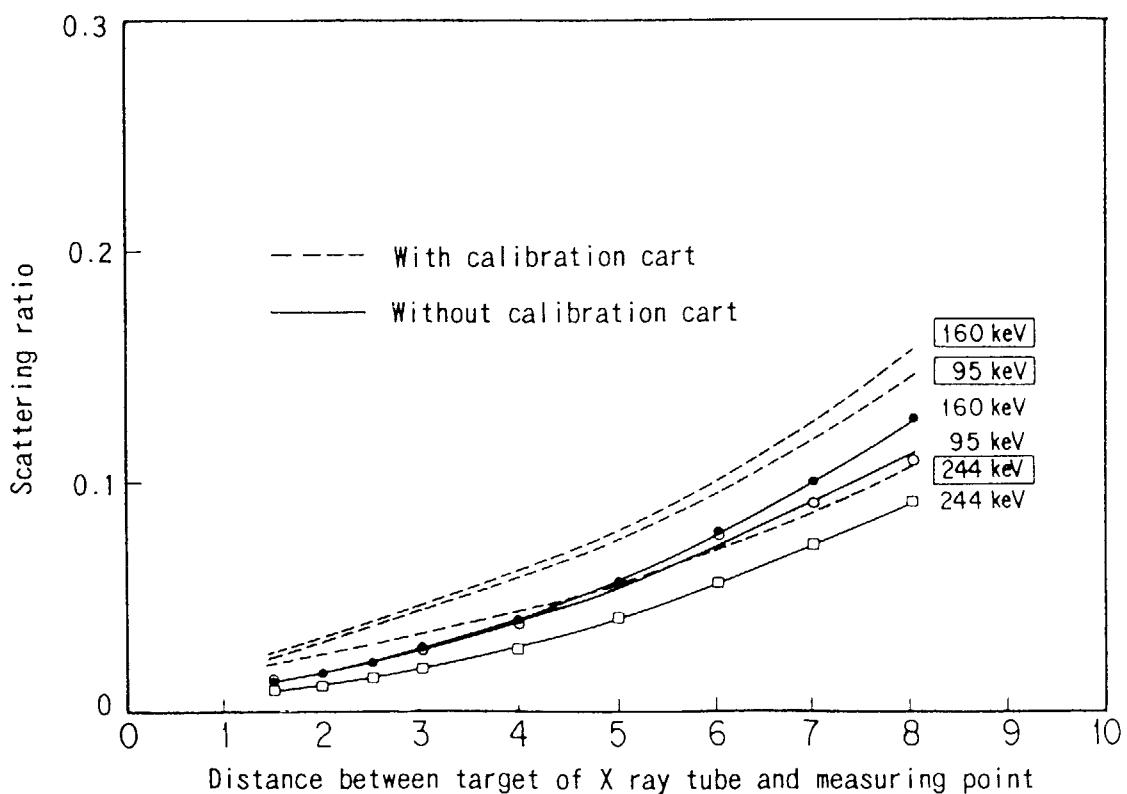


Fig. 2.4 Scattering characteristic of irradiation field between with and without calibration cart for some X-ray energies (collimator angle : 30°).

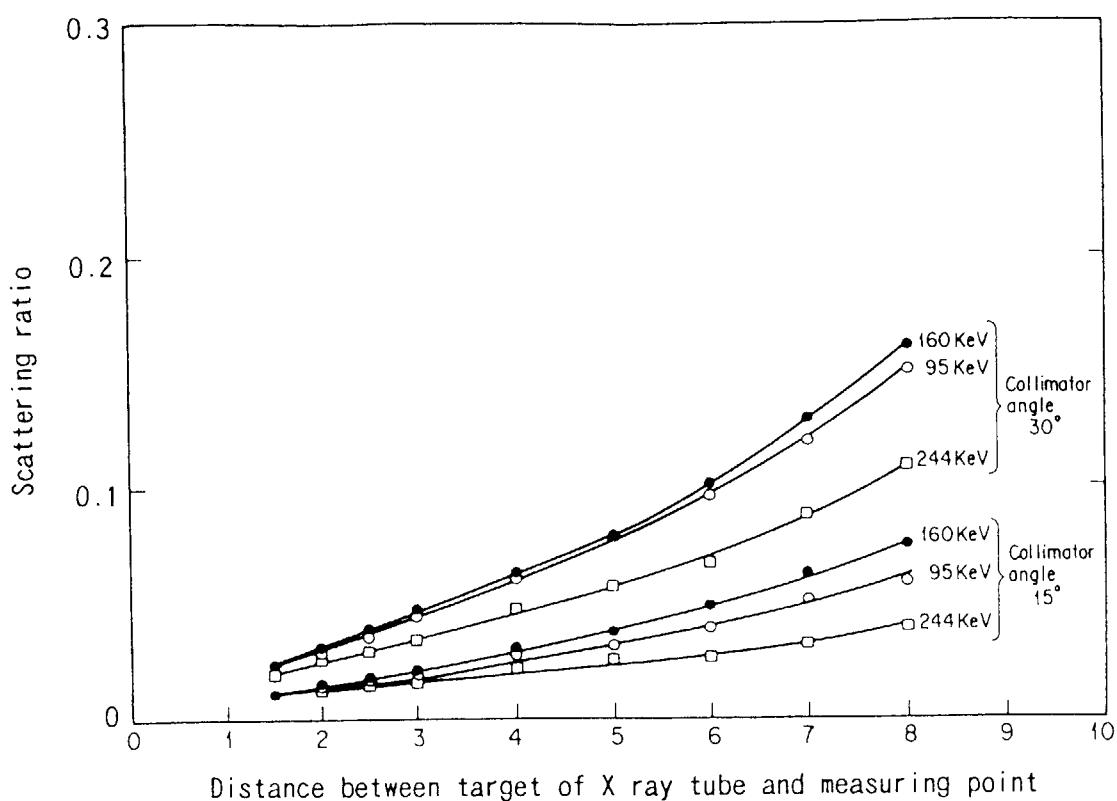


Fig. 25 Variation of Scattering at the irradiation field with change of collimator angle for some X ray energies.

付 錄 A

ISO-4037-1(1996)に記載されているX線の線質条件と日本国内の線質条件である実効エネルギー(E_{eff})及び線質指標値(Quality index)の計算結果を一覧にして下記に示す。なお、実効エネルギーの計算は、本文中のTable 3の評価式を用いた。

A.1 Characteristics of low air-kerma rate series

Table A.1

Mean energy (keV)	Reso-lution (%)	Tube potential ¹⁾ (kV)	Additional filtration ²⁾ (mm)				1st HVL ⁴⁾ (mm)	E_{eff} (keV)	Quality index (QI)
			Pb	Sn	Cu	Al ³⁾			
8.5		10				0.3	0.058 Al	8.3	0.83
17	21	20			2.0		0.42 Al	16.4	0.82
26	21	30		0.18	4.0		1.46 Al	25.4	0.85
30	21	35		0.25			2.20 Al	29.5	0.84
48	22	55		1.2			0.25 Cu	46.8	0.85
60	22	70		2.5			0.49 Cu	59.9	0.86
87	22	100	2.0	0.5			1.24 Cu	86.5	0.87
109	21	125	4.0	1.0			2.04 Cu	109	0.87
149	18	170	1.5	3.0	1.0		3.47 Cu	150	0.88
185	18	210	3.5	2.0	0.5		4.54 Cu	183	0.87
211	18	240	5.5	2.0	0.5		5.26 Cu	210	0.88

1) The tube potential is measured under load.

2) Except for the three lowest energies, the recommended inherent filtration is 1 mm of beryllium, the total filtration consists of the additional filtration plus the inherent filtration, adjusted to 4 mm of aluminium.

3) The recommended inherent filtration is 1 mm Be, but other values may be used provided that the mean energy is within $\pm 5\%$ and the resolution is within $\pm 15\%$ of the values given in the table.

4) The HVLs are measured at 1 m from the focal spot. The second HVL is not included for this series, since it is not significantly different from the first HVL.

A.2 Characteristics of narrow-spectrum series

Table A.2

Mean energy (keV)	Reso-lution (%)	Tube potential ¹⁾ (kV)	Additional filtration ²⁾ (mm)				1st HVL ⁴⁾ (mm)	E... (keV)	Quality index (QI)
			Pb	Sn	Cu	Al ³⁾			
8	28	10			0.1	0.047 Al	7.8	0.78	
12	33	15			0.5	0.14 Al	11.3	0.75	
16	34	20			1.0	0.32 Al	15.0	0.75	
20	33	25			2.0	0.66 Al	19.2	0.77	
24	32	30			4.0	1.15 Al	23.3	0.78	
33	30	40			0.21	0.084 Cu	31.7	0.79	
48	36	60			0.6	0.24 Cu	46.2	0.77	
65	32	80			2.0	0.58 Cu	63.9	0.80	
83	28	100			5.0	1.11 Cu	82.5	0.83	
100	27	120		1.0	5.0	1.71 Cu	100	0.83	
118	37	150		2.5		2.36 Cu	118	0.79	
164	30	200	1.0	3.0	2.0	3.99 Cu	166	0.83	
208	28	250	3.0	2.0		5.19 Cu	206	0.82	
250	27	300	5.0	3.0		6.12 Cu	248	0.83	

1) The tube potential is measured under load.

2) Except for the three lowest energies, the recommended inherent filtration is 1 mm of beryllium, the total filtration consists of the additional filtration plus the inherent filtration, adjusted to 4 mm of aluminium.

3) The recommended inherent filtration is 1 mm Be, but other values may be used provided that the mean energy is within $\pm 5\%$ and the resolution is within $\pm 15\%$ of the values given in the table.

4) The HVLs are measured at 1 m from the focal spot. The second HVL is not included for this series, since it is not significantly different from the first HVL.

A.3 Characteristics of wide-spectrum series

Table A.3

Mean energy (keV)	Reso-lution (%)	Tube potential ¹⁾ (kV)	Additional filtration ²⁾ (mm)				1st HVL Cu ³⁾ (mm)	E... (keV)	Quality index (QI)
			Pb	Sn	Cu	Al			
45	48	60			0.3		0.18	41.6	0.69
57	55	80			0.5		0.35	52.9	0.66
79	51	110			2.0		0.96	77.7	0.71
104	56	150		1.0			1.86	104	0.69
137	57	200		2.0			3.08	138	0.69
173	56	250		4.0			4.22	173	0.69
208	57	300		6.5			5.20	206	0.69

1) The tube potential is measured under load.

2) The total filtration consists, in each case, of the additional filtration plus the inherent filtration, adjusted to 4 mm of aluminium.

3) The HVLs are measured at 1 m from the focal spot.

A.4 Characteristics of high air-kerma rate series

Table A.4

Mean energy (keV)	Tube potential (kV)	Additional filtration ¹⁾ (mm)			HVL ²⁾ (mm)		E _{..} (keV)	Quality index (QI)
		Al	Cu	Air	First	Second		
7.5	10			750	0.036 Al	0.041 Al	7.1	0.71
12.9	20	0.15		750	0.12 Al	0.16 Al	10.7	0.53
19.7	30	0.52		750	0.38 Al	0.60 Al	15.9	0.53
37.3	60	3.2		750	2.42 Al	3.25 Al	30.6	0.51
57.4	100	3.9	0.15	750	6.56 Al	8.05 Al	48.3	0.48
102	200		1.15	2250	1.70 Cu	2.40 Cu	99.7	0.50
122	250		1.6	2250	2.47 Cu	3.29 Cu	121	0.48
146	280		3.0	2250	3.37 Cu	3.99 Cu	147	0.53
147	300		2.5	2250	3.40 Cu	4.15 Cu	148	0.49

1) For tube potentials above 100 kV, the total filtration consists, in each case, of the additional filtration plus the inherent filtration, adjusted to 4 mm of aluminium. For tube potentials at 100 kV and below, the example given above refer to an inherent filtration of approximately 4 mm Be.

2) The HVLs are measured at 1 m from the focal spot.

付 錄 B

ISO-4037-1(1996)に記載されている4種類のX線条件のスペクトル分解能、均等度と日本国内のX線条件である線質指標の計算結果について最小値から最大値までの範囲を一覧にして下記に示す。

B.1 Specifications of filtered X radiation

Table B.1

Name of series	Resolution (%)	Homogeneity coefficient	Quality index
Low air-kerma rate	18 to 22	1.0	0.82 to 0.88
Narrow spectrum	27 to 37	0.75 to 1.0	0.75 to 0.83
Wide spectrum	48 to 57	0.67 to 0.98	0.66 to 0.71
High air-kerma rate	Not specified	0.64 to 0.86	0.48 to 0.71

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$kg\cdot m/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N\cdot m$
功率、放熱束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	$A\cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーケンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	$V\cdot s$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	$cd\cdot sr$
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(-10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{-18}	= 4.184 J(熱化学)
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{-19}	= 4.1855 J(15 °C)	
3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{-25}	= 4.1868 J(国際蒸気表)	
4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{-19}	仕事率 1 PS(仏馬力)	
1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{-21}	= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{-18}	= 735.499 W	
1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1		

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

放射線測定器の性能試験に用いるX線校正場の特性評価