JAEA-Technology
2010-005

放射線測定器の性能試験に用いる国内規格に準拠した軟X線標準場の整備

Establishment of Soft X-ray Reference Fields for Performance Tests of Radiation Measuring Instruments Based on National Standard

清水 滋　藤井 克年　川崎 朋克

Shigeru SHIMIZU, Katsutoshi FUJII and Tomokatsu KAWASAKI

東海研究開発センター
原子力科学研究所
放射線管理部

Department of Radiation Protection
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

June 2010

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

JAEA-Technology 2010-005

放射線測定器の性能試験に用いる国内規格に準拠した軟Ｘ線標準場の整備

日本原子力研究開発機構
東海研究開発センター　原子力科学研究所　放射線管理部
清水　滋・藤井　克年・川崎　朋克 ＋

（2010 年 1 月 26 日受理）

国内規格 JIS Z 4511 では、国内での放射線防護用測定器の性能試験に用いるＸ線標準場の設定条件が示されている。原科研放射線標準施設棟の軟Ｘ線照射装置を用いて、この設定条件に準拠した線質指標 0.6、0.7、0.8、0.9 の４つのシリーズのＸ線標準場を整備した。本論文では、Ｘ線管電圧 6kV～100kV の軟Ｘ線領域において、Ｘ線場の線質設定、各線量単位のＸ線スペクトル、空気カーマから線量当量への換算係数等の評価を行い、国内規格に準拠した軟Ｘ線標準場を 42 の線質について設定した。この結果、本Ｘ線標準場は、国内の設定条件に良く適合し、空気カーマから各種線量当量への換算係数が精度良く設定されると共に、各線質のスペクトルの健全性も確認した。これにより、各種放射線測定器の軟Ｘ線領域に対するエネルギー特性試験、方向特性試験等の性能試験に対して、精度の良い線量当量基準量の供給、幅広い試験エネルギー点の供給、幅広い線量率に対応した線質の供給ができることになり、これらの詳細なデータを明らかにした。

原子力科学研究所：〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4
＋：大洗研究開発センター　安全管理部

JAEA-Technology 2010-005

Establishment of Soft X-ray Reference Fields for Performance Tests of Radiation Measuring Instruments Based on National Standard

Shigeru SHIMIZU, Katsutoshi FUJII and Tomokatsu KAWASAKI [+]

Department of Radiation Protection
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 26 , 2010)

In the Japanese Industrial Standard, JIS Z 4511 sets the condition of X-ray reference fields to be used for the performance test of radiation measuring instruments for radiation protection. With the soft X-ray generator installed in the Facility of Radiation Standards in Nuclear Science Research Institute, we have established four series of soft X-ray reference fields with quality index of 0.6, 0.7, 0.8 and 0.9 based on JIS Z 4511. In this article, quality of the X-ray fields, X-ray spectra, conversion coefficients to the dose equivalents from Air-Kerma were evaluated in the soft X-ray fields produced with X-ray tube voltage ranging from 6kV to 100kV, and set soft X-ray reference fields based on Japanese Industrial Standard about 42 qualities. As a result, this X-ray reference fields met a domestic setting condition well and precision was good for conversion factors to various dose equivalents from Air- Kerma and we confirmed the soundness of the spectrum of each X-ray quality. By this, it is found that dose equivalent standard with good precision and wide range of test energy points and dose rates can be provided, for the performance tests such as the energy characteristic and the direction characteristic for various radiation instruments.

Keywords : X-ray Reference Field, Radiation Measuring Instrument, JIS Z 4511, Half Value Layer, Quality Index, X-ray Energy Spectra, Calibration, Effective Energy, National Standard,

＋ : Health and Safety Department, Oarai Research and Development Center

目　　次

1. 序　論 ---------- 1
2. 標準場の設定に用いた装置の仕様 ---------- 2
2.1 X線照射装置の仕様 ---------- 2
2.2 半価層測定用の電離箱式線量計の仕様 ---------- 4
3. X線標準場の設定 ---------- 6
3.1 線質の設定方法 ---------- 6
3.2 設定結果及び考察 ---------- 7
4. 線質に対するX線エネルギースペクトルの評価 ---------- 11
4.1 測定方法 ---------- 11
4.2 結果及び考察 ---------- 14
5. 線質に対する線量当量換算係数の評価 ---------- 53
5.1 評価方法 ---------- 53
5.2 結果及び考察 ---------- 53
6. X線スペクトルの空気層による減弱の評価 ---------- 65
6.1 評価方法 ---------- 65
6.2 結果及び考察 ---------- 66
7. 結　論 ---------- 69
謝　辞 ---------- 71
参考文献 ---------- 72

Contents

1. Introduction ---------- 1
2. Specification of Devices used for Characterization of Reference Fields ---------- 2
2.1 X-ray Generator ---------- 2
2.2 Ionization Chamber used for Measurement of Half Value Layer ---------- 4
3. Characterization of X-ray Reference Fields ---------- 6
3.1 Characterization Methods of Radiation Quality ---------- 6
3.2 Results and Discussion ---------- 7
4. Estimation of X-ray Energy Spectra for Reference Feilds ---------- 11
4.1 Measurement Methods ---------- 11
4.2 Results and Discussion ---------- 14
5. Estimation of Dose Equivalent Conversion Coefficients for Reference Fields ---------- 53
5.1 Estimation Method ---------- 53
5.2 Results and Discussion ---------- 53
6. Estimation of Attenuation by Atmospheric Layer for X-ray Energy Spectra ---------- 65
6.1 Estimation Method ---------- 65
6.2 Results and Discussion ---------- 66
7. Conclusions ---------- 69
Acknowledgements ---------- 71
References ---------- 72

This is a blank page.

１．序　　論

1999 年に、現在の原子力科学研究所の放射線標準施設棟に米国パンタック社製 HF-100 型軟Ｘ線照射装置を設置し、原研－理研が共同で建設した SPring 8 の加速器施設[1]や関西光科学研究所のＸ線レーザー施設等で発生する低エネルギー光子(5keV～30keV)の方向性線量当量 H'(0.07)及び個人線量当量 H_p(0.07)を測定する各種放射線測定器のエネルギー特性試験及び方向特性試験に利用するための二次標準場の整備を 1999 年～2002 年にかけて実施し、運用してきた。本報告は、これら標準場の実験データを基に、Ｘ線質の設定、設定場のＸ線波高分布から各種Ｘ線スペクトルの評価、Ｘ線質の空気カーマから各種線量当量への換算係数の評価、Ｘ線スペクトルの空気層による減弱の評価について詳細にまとめ、公開資料としたものである。

Ｘ線質の設定は、国家標準機関である(独)産業技術総合研究所(AIST)が推奨する日本国内の設定方法により行い、日本工業規格 JIS Z 4511[2]で規定されている半価層、実効エネルギー、均等度及び線質指標(Quality index : QI)を評価した。半価層の測定では、国家標準とトレーサビリティが確保された電離箱式線量計を使用して行った。半価層から実効エネルギーの評価は、WM.J.Veigele ら[3]の線減弱係数のデータからフィッティング関数を決定し、計算により行った。各Ｘ線標準場は、Ｘ線スペクトルの広がりを段階的に規定する線質指標について、QI0.6、QI0.7、QI0.8、QI0.9 の４つのシリーズを設定し、管電圧 6kV から 100kV の範囲で実効エネルギー5.0keV から 90.5keV において全体で 42 の線質を構築した。

これらの線質について高純度 Ge 検出器で測定した波高分布に検出効率などの補正を行ってフルエンススペクトルを求め、スペクトルの健全性を確認すると共に、ICRP Publication 74[4]及び B.Grosswendt[5]等の換算係数を用いて空気カーマスペクトル(Ka(E))、周辺線量当量スペクトル(H*(10)(E))、方向性線量当量スペクトル(H'(0.07)(E))、個人線量当量スペクトル(H_p(10)(E)及び H_p(0.07)(E))をそれぞれ評価し、その平均エネルギーを求めた。

Ｘ線質の空気カーマから各種線量当量への換算係数の評価は、上記の空気カーマスペクトルと各種線量当量スペクトルの比による換算係数、各スペクトルの平均エネルギーでの換算係数及び各線質の実効エネルギーでの換算係数をそれぞれ求め、相互の比較を行った。

Ｘ線スペクトルの空気層による減弱の評価として、設定した線質のエネルギースペクトルが照射距離の違いにより、その空気層による減弱を受けて、平均エネルギーや空気カーマへの換算係数が大きく変化する領域を調査し、線質の設定距離と異なる距離における影響を考察した。

これらの実験結果から、各シリーズのＸ線質は、国内の設定条件に良く適合していること及び各線質のスペクトルの健全性も確認した。また、空気カーマから各種線量当量への換算係数が精度良く設定された。これらにより、本標準場を使用して各種放射線測定器の軟Ｘ線領域におけるエネルギー特性試験、方向特性試験等の性能試験に対して、精度の良い線量当量基準量の供給、幅広い試験エネルギー点の供給、幅広い線量率に対応した線質が供給できる詳細な基礎データ等を明らかにした。

２．標準場の設定に用いた装置の仕様

２．１　Ｘ線照射装置の仕様

原子力科学研究所の放射線標準施設棟に設置されている軟Ｘ線照射装置は、米国パンタック社製HF-100 型であり、制御装置、操作ラック、高電圧装置、冷却装置及びＸ線管球等を装荷した照射器で構成され、Ｘ線を照射する部分にはコリメータ、シャッター、フィルタケースを具備している。本装置の照射器の断面図を Fig.2－1 に示すと共に、各部を構成する装置を Photo.2－1 に示す。

Fig.2－1 の拡大図に示すＸ線管球は、MXR-160 型で、ターゲットにはタングステン、管球窓の厚さは 1mm のベリリウムが装着され、外筒にはセラミック材を使用している。また、Ｘ線管球の窓の前面にシャッターと 15 度円錐コリメータを設け、さらにコリメータ前面にフィルタケースを設け、Ｘ線管球の焦点から遮蔽箱表面までの距離は 86mm である。照射器は Fig.2－1 の側面図に示すように、Ｘ線管球を厚さ 5ｍｍの鉛容器内に設置してシャッター開時以外の漏洩Ｘ線を遮へいし、照射器の上部にはシャッター開閉時の表示灯を、下部にはシャッター開閉用の空気圧供給装置を設置した。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線の照射ができる。Photo.2－1 に示す操作ラックには、制御装置を内蔵し、操作パネルの管電圧・管電流の４桁表示値をより精密に監視して、Ｘ線発生量の再現性の精度を良くするために、６桁表示のディジタルボルトメータを設置している。

Ｘ線管球へ供給する管電圧･管電流は、管電圧が 5kV～100kV で、管電流の上限は Fig. 2－2 に示すように管電圧によって異なるが、最大値で表すと大焦点で 70mA、小焦点で 18mA である。また、管電圧・管電流の安定性は、共に±0.1%以下と優れ、線量率の安定性も ±0.1%である。このようにＸ線の安定性が優れているため、Ｘ線発生部にモニタ検出器は使用していない。コリメータ部は、簡単に着脱できる構造でありコリメータ角度を 15 度以下で任意に変更することが可能である。また、シャッターは、空気圧による開閉を行い、その開・閉時間は共に 0.1 秒以下である。

Ｘ線をろ過する基礎フィルタ(Additional filter)及び半価層測定フィルタには、ベリリウム(Be)、アルミニウム(Al)及び銅(Cu)の３種類の材質を用意し、純度は Be が 99.0%、Al 及び Cu が 99.9%で、厚さの精度は厚さ 0.1mm 以下で ±0.001mm である。フィルタの構造は Photo.2－2 に示すように、管球とフィルタケース間を近接させた構造にしたため、15°コリメータ角度で十分機能する 8cm×10cm の小形な直方形（1mm 未満の薄いフィルタは中央に 4cmφの穴のあいた額縁に収めた）とした。なお、フィルタの最小径を 4cmφとした理由は、Fig.2－1 のフィルタケース位置で最大照射径が 3.7cmφであることによる。フィルタの厚さは、基礎フィルタと半価層測定用フィルタに対して、必要な厚さを供給できること及び各シリーズの線質設定(実効エネルギーの設定)精度を向上させることから、Be が 0.25mm から 3.75mm まで 0.25mm 間隔で、Al が 0.010mm から 13mm まで 0.01mm 間隔で、Cu が 0.05mm から 15mm まで 0.05mm 間隔で、任意の厚さに設定できるようにした。

安全装置は、照射器のＸ線シャッターを開けるためには、照射室入口の扉が閉で、制御室の 5 個の安全キーが全て ON の状態(インターロック状態)で機能し、これらが１つでも OFF の時はＸ線シャッターが開かない。このことから、作業者は安全キーを所持して照射室に入域して設定作業を行い、制御室に退室後に入口扉を閉めて、5 個の安全キーがすべて揃ってインターロックが掛かった

時点で、安全にX線を発生できる。また、X線管球の冷却は水循環空冷式で、循環水の温度が 35℃以上になるとX線の発生が自動停止する仕組みになっている。

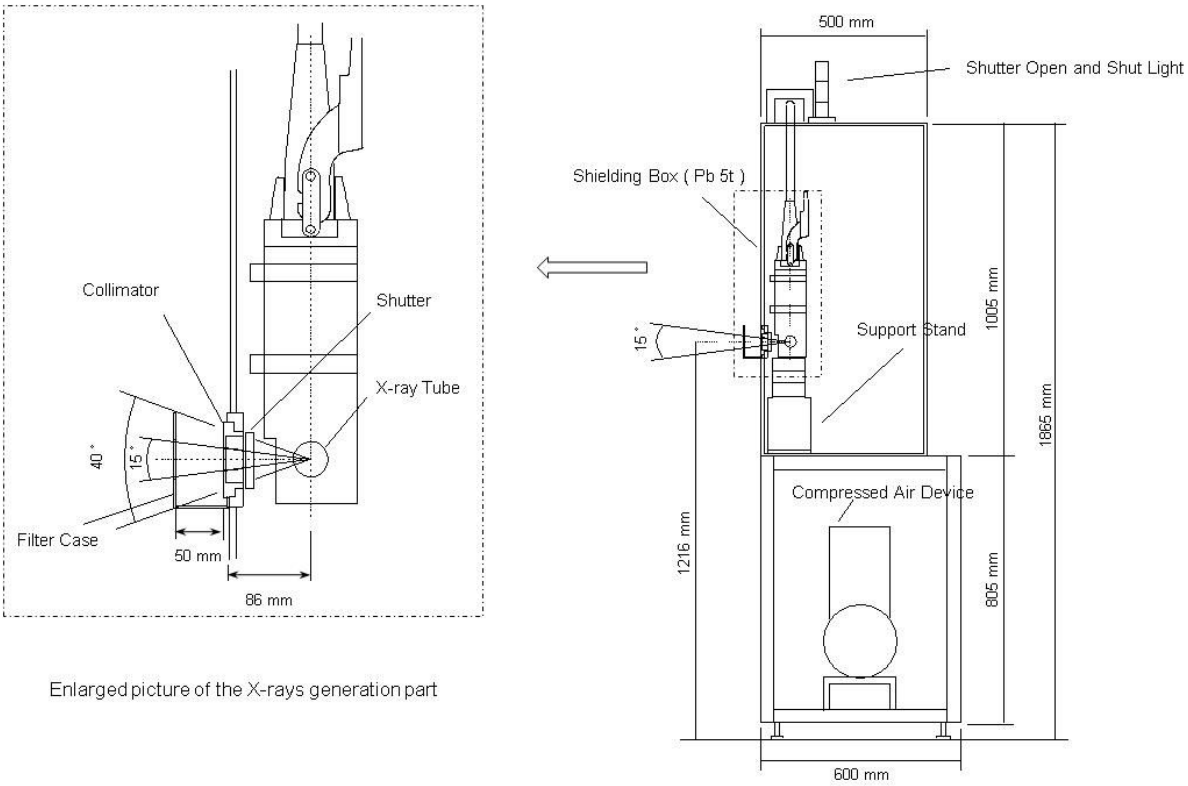


Fig. 2－1 Cross section of the soft X-ray generator

Photo.2－1 Photograph of each component of X-ray irradiation device

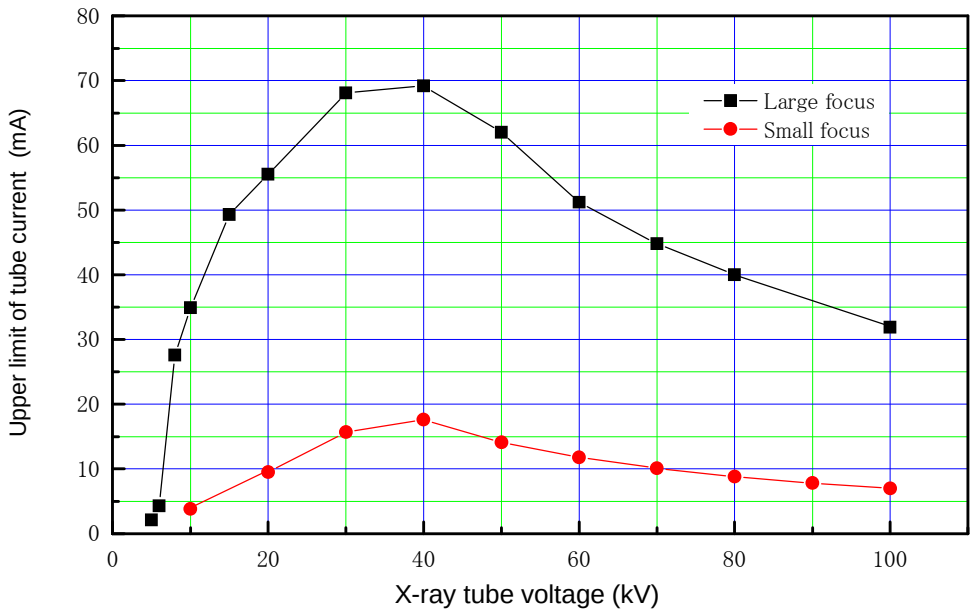


Fig. 2－2 Upper limit of tube current as a function of tube voltage

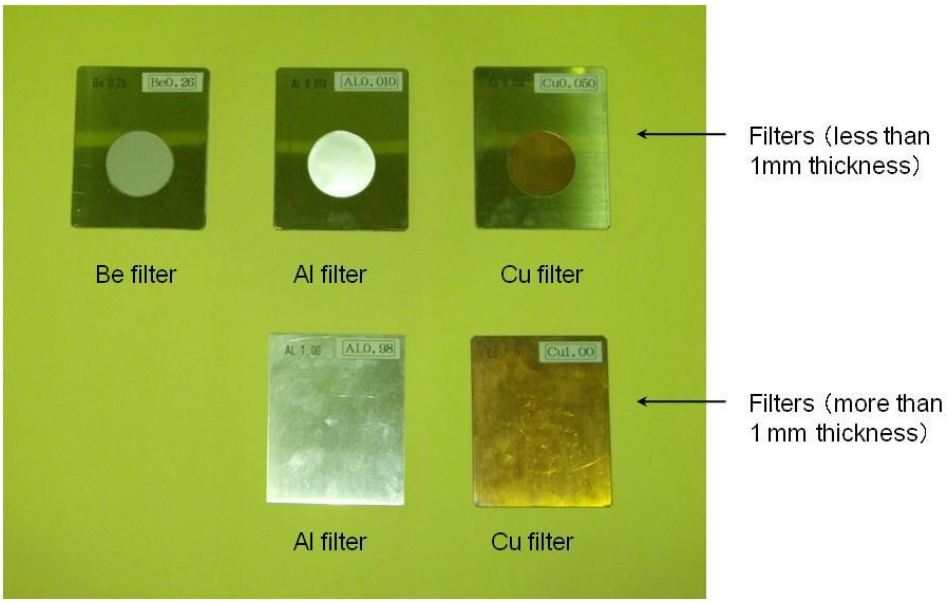
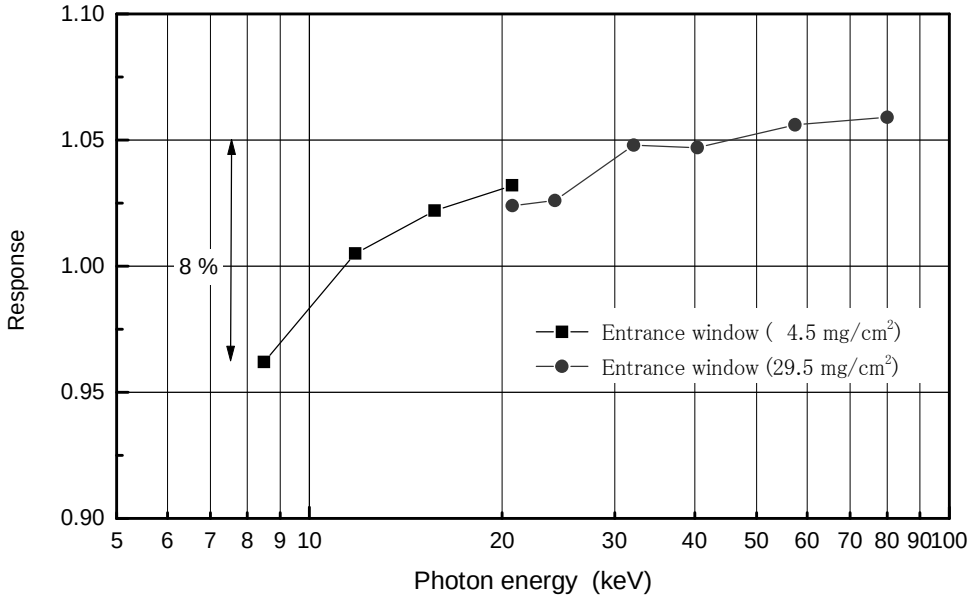


Photo.2－2 Photograph of filters used for the additional filter and half-value layer measurement

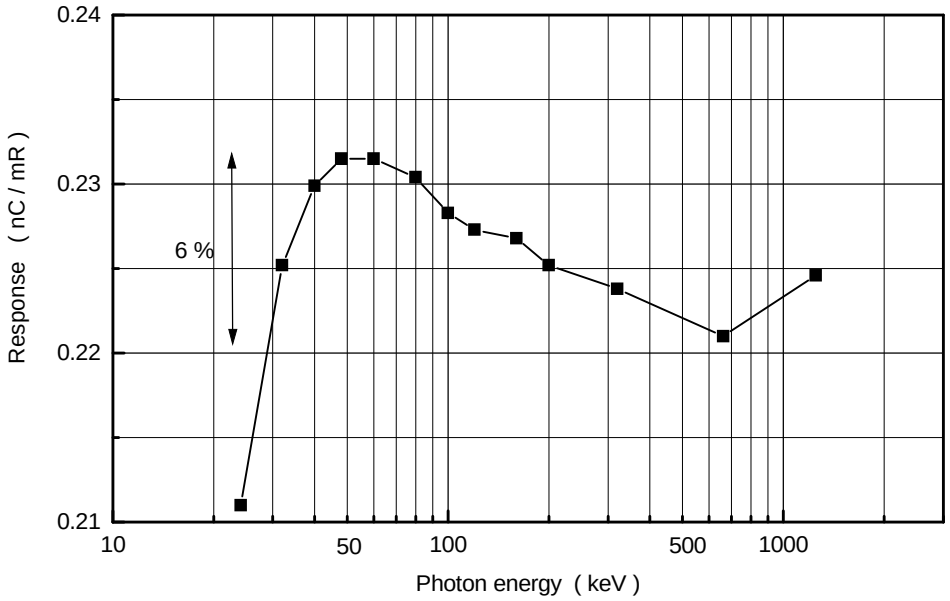
2.2 半価層測定用の電離箱式線量計の仕様

X線線質の第１半価層、第２半価層の測定には、Fig.2－3 に示すエネルギー特性を有する Ionex 2575(600ml)、EXRADIN A6(800ml)の２つの通気型空洞電離箱検出器を使用した。前者の検出器は、エネルギー領域によって入射窓の厚さを変更して利用することにより、X線スペクトルが軟X

線領域の 5keV～50keV に分布している場合に使用し、感度幅は概ね±4%と良好である。後者の検出器は 30keV～100keV に分布している場合に使用し、このエネルギー領域における感度幅は概ね±3%と良好である。これらの検出器の信号は、専用のエレクトロメータに接続し、電離電流又は照射線量の単位でディジタル表示される。これらは、国内の標準機関(AIST)とのトレーサビリティが確保された標準測定器である。



(a) Ionex 2575(600ml) ionization chamber



(b) EXRADIN A6 (800ml) ionization chamber

Fig. 2－3 Energy characteristics of reference ionization chambers used for the measurement of half-value layer

３． Ｘ線標準場の設定

３．１　線質の設定方法

日本工業規格の JIS Z 4511 に示される国内の線質条件には、第１半価層から求める実効エネルギー(Effective energy)、第１半価層と第２半価層の比による均等度(Homogeneity coefficient)、実効エネルギーと最大エネルギーの比による線質指標(Quality index : QI)が規定されている。従って、本設定では、国内の線質条件を満足するように各データを取得し、線質指標(QI)0.6、0.7、0.8、0.9 の４つのシリーズにまとめた。

半価層の測定では、Ｘ線管電圧が 6kV～100kV の範囲における線質指標(QI)0.6、0.7、0.8、0.9 の４つのシリーズに対して、2.2 項に示す Ionex2575 と EXRADIN A6 検出器を Fig.2－3 に示すエネルギー特性から、場のＸ線エネルギー領域でのレスポンスの変化が少ない検出器を選択して使用した。

標準場の設定距離は、30kV 以下の管電圧ではＸ線管球の焦点と標準場の距離による空気層の減衰が顕著であるため、照射距離を 1.0m に固定した。また、40kV 以上の管電圧では、６章及び Fig.6－3 に示すように空気層の減衰が少ないため、照射距離を 2.0m とした。

半価層は、基礎フィルタを装荷したときの線量が 1/2 になる厚さを第１半価層(t_1)とし、1/4 になる厚さから第１半価層を差し引いた厚さを第２半価層(t_2)として求めた。この第１半価層から線質の実効エネルギー(E_{eff})を求める評価式は、半価層フィルタのＢｅ，Ａｌ，Ｃｕに対して WM.J.Veigele らの線減弱係数のデータからフィッティング関数を決定し、計算により求めた。これらの関数を(1)式～(3)式に示す。また、Ｘ線スペクトルの単色化の程度を表す均等度 H(1.00：単色エネルギー)及びＸ線スペクトルの幅の比率を表す線質指標 QI は、各々(4)式及び(5)式により算出した。

QI 値を精度良く設定するための第１半価層の測定では、各シリーズに対応するＸ線場の実効エネルギーの半価層を予め(1)式～(3)式により算出し、この半価層になるための基礎フィルタの厚さを調整して求める。フィルタ厚さの調整精度及びフィッティング関数の精度等の要因により、目的の実効エネルギーに対して若干のずれが生じるが、各シリーズの QI 値に対して±0.01 の範囲に設定することを目標とした。

$$E_{eff} = 5.129\, t_1^{0.323} + 0.0330\, t_1^{1.84} \quad \text{(Be: 1.5keV to 15keV)} \quad (1)$$

$$E_{eff} = 22.03\, t_1^{0.341} + 0.1469\, t_1^{2.01} \quad \text{(Al: 6keV to 60keV)} \quad (2)$$

$$E_{eff} = 76.48\, t_1^{0.356} + 2.543\, t_1^{2.00} \quad \text{(Cu: 15keV to 200keV)} \quad (3)$$

$$H = \frac{\text{第１半価層}(t_1)}{\text{第２半価層}(t_2)} \quad (4)$$

$$QI = \frac{\text{実効エネルギー}(E_{eff})}{\text{最大エネルギー}(E_{max})} \quad (5)$$

３．２ 設定結果及び考察

Ｘ線管電圧が 6kV～100kV の範囲における線質指標(QI)0.6、0.7、0.8、0.9 の４つのシリーズに対するＸ線質の設定結果を Table3－1 から Table3－4 に示す。15kV 以下の管電圧では、Ｘ線管の Be 窓(1mm 厚さ)やＸ線場までの空気層によるろ過効果によりスペクトルがすでに硬くなっているため、シリーズによっては標準場が得られない線質があった。以下に結果及び考察を示す。

(1) 各シリーズの実効エネルギーの範囲は、Table3－1～Table3－4 に示すように、QI0.6 シリーズが 9.0keV～60.8keV、QI0.7 シリーズが 7.4keV～70.5keV、QI0.8 シリーズが 5.0keV～80.0keV、QI0.9 シリーズが 7.2keV～90.5keV であり、これらの全体のエネルギー範囲は 5.0keV～90.5keV となった。

(2) 各シリーズの線質指標の設定では、QI0.6 シリーズが 9 の設定に対して 0.59～0.62、QI0.7 シリーズが Be 窓のろ過効果がある 10kV の線質を除く 9 の設定に対して 0.69～0.71、QI0.8 シリーズが 6kV の線質を除く 11 の設定に対して 0.79～0.81、QI0.9 シリーズが 11 の設定に対して 0.88～0.91 であり、ほとんどの標準場が設定目標値の±0.01 以内に設定できた。

(3) 各シリーズの均等度の範囲では、QI0.6 シリーズが 0.69～0.89、QI0.7 シリーズが 0.77～0.97、QI0.8 シリーズが 0.84～0.99、QI0.9 シリーズが 0.88～0.99 であり、QI0.9 シリーズが 1.0 に近くフィルタによるろ過効果がほとんど完了していると言える。

(4) 各シリーズの標準場 1m での 1mA 当たりの空気カーマ率の範囲は、QI0.6 シリーズが 0.75～6.9 mGy/min、QI0.7 シリーズが 0.32～1.3 mGy/min、QI0.8 シリーズが 2.7～16 mGy/h、QI0.9 シリーズが 45～184 μGy/h であった。各標準場の上限の空気カーマ率は、上記の値と Fig.2－2 に示す管電圧と上限管電流の特性より求めることができる。従って、10kV 以上の線質では 30mA 以上の照射ができるため、個人線量計のように積算照射を行う性能試験では、数 mSv の照射が短時間で実施できることになる。一方、下限の空気カーマ率は、下限管電流を 0.1mA として、上記の値の 1/10 程度となるため、サーベイメータのように線量率照射を行う性能試験では、10mGy/h 程度で QI0.7 又は QI0.8 の標準場を推奨し、10μGy/h 程度の環境用の線量率測定器で QI0.9 を推奨する。

(5) 各シリーズの基礎フィルタ厚さと実効エネルギーの関係を Cu、Al フィルタ毎に表した特性を Fig.3－1 に示す。図より、各シリーズの設定点は、曲線から外れることなくスムーズな特性を示し、実効エネルギーの設定に間違いがないことが確認できた。また、本特性を利用することにより、新たな線質の実効エネルギーに対する基礎フィルタの厚さが予測でき、その基礎フィルタの設定が容易にできる。

Table 3－1 Characteristics of QI 0.6 series

Tube voltage (kV)	Irradiation distance (m)	Additional filter (mm)			Half-value layer (mm)		Homogen. coefficient	Effective energy (keV)	Quality index QI	Dose rate (mGy/min・mA at 1m)
			Al	Cu	First	Second				
15	1.00		0.010		Al 0.0731	Al 0.0819	0.89	9.0	0.60	6.9
20	1.00		0.251		Al 0.172	Al 0.211	0.82	12.1	0.61	2.8
30	1.00		0.800		Al 0.550	Al 0.750	0.73	18.0	0.60	2.1
40	2.00		1.890		Al 1.230	Al 1.610	0.76	23.9	0.60	1.6
50	2.00			0.150	Cu 0.080	Cu 0.105	0.76	31.1	0.62	0.75
60	2.00			0.190	Cu 0.122	Cu 0.164	0.74	36.2	0.60	1.0
70	2.00			0.250	Cu 0.180	Cu 0.262	0.69	41.6	0.59	1.1
80	2.00			0.350	Cu 0.283	Cu 0.377	0.75	49.0	0.61	1.2
100	2.00			0.600	Cu 0.510	Cu 0.665	0.77	60.8	0.61	1.5

Table 3－2 Characteristics of QI 0.7 series

Tube voltage (kV)	Irradiation distance (m)	Additional filter (mm)			Half-value layer (mm)		Homogen. coefficient	Effective energy (keV)	Quality index QI	Dose rate (mGy/min・mA at 1m)
			Al	Cu	First	Second				
10	1.00				Al 0.040	Al 0.046	0.87	7.4	0.74	1.3
15	1.00		0.200		Al 0.113	Al 0.117	0.97	10.5	0.70	1.2
20	1.00		0.600		Al 0.256	Al 0.328	0.78	13.9	0.70	0.80
30	1.00		1.890		Al 0.845	Al 1.015	0.83	20.9	0.70	0.64
40	2.00			0.150	Cu 0.057	Cu 0.072	0.79	27.6	0.69	0.35
50	2.00			0.250	Cu 0.110	Cu 0.142	0.77	34.9	0.70	0.32
60	2.00			0.390	Cu 0.182	Cu 0.228	0.80	41.8	0.70	0.34
70	2.00			0.600	Cu 0.287	Cu 0.340	0.84	49.2	0.70	0.35
80	2.00			0.800	Cu 0.415	Cu 0.505	0.82	56.4	0.71	0.42
100	2.00			1.400	Cu 0.750	Cu 0.820	0.91	70.5	0.71	0.53

Table 3－3 Characteristics of QI 0.8 series

Tube voltage (kV)	Irradiation distance (m)	Additional filter (mm)			Half-value layer (mm)		Homogen. coefficient	Effective energy (keV)	Quality index QI	Dose rate (mGy/h·mA at 1m)
		Be	Al	Cu	First	Second				
6	1.00	0.260			Be 0.900	Be 1.000	0.90	5.0	0.83	0.57
8	1.00		0.015		Al 0.027	Al 0.028	0.96	6.4	0.80	13
10	1.00		0.100		Al 0.050	Al 0.051	0.98	7.9	0.79	16
15	1.00		0.551		Al 0.165	Al 0.167	0.99	11.9	0.79	11
20	1.00		1.190		Al 0.370	Al 0.440	0.84	15.7	0.79	12
30	1.00		4.110		Al 1.220	Al 1.260	0.97	23.8	0.79	7.9
40	2.00			0.350	Cu 0.089	Cu 0.090	0.99	32.3	0.81	2.7
50	2.00			0.600	Cu 0.155	Cu 0.159	0.97	39.4	0.79	3.2
60	2.00			1.000	Cu 0.277	Cu 0.296	0.94	48.6	0.81	3.0
70	2.00			1.300	Cu 0.415	Cu 0.460	0.90	56.4	0.81	4.5
80	2.00			1.800	Cu 0.590	Cu 0.625	0.94	64.3	0.80	5.6
100	2.00			3.300	Cu 1.030	Cu 1.140	0.90	80.0	0.80	6.2

Table 3－4 Characteristics of QI 0.9 series

Tube voltage (kV)	Irradiation distance (m)	Additional filter (mm)			Half-value layer (mm)		Homogen. coefficient	Effective energy (keV)	Quality index QI	Dose rate (μGy/h·mA at 1m)
			Al	Cu	First	Second				
8	1.00		0.231		Al 0.0375	Al 0.0381	0.98	7.2	0.90	81
10	1.00		0.451		Al 0.071	Al 0.072	0.99	8.9	0.89	184
15	1.00		1.690		Al 0.230	Al 0.240	0.96	13.4	0.89	158
20	1.00		4.210		Al 0.540	Al 0.585	0.92	17.9	0.90	105
30	1.00			0.350	Al 1.640	Al 1.760	0.93	26.5	0.88	149
40	2.00			0.800	Cu 0.119	Cu 0.121	0.98	35.9	0.90	114
50	2.00			1.600	Cu 0.225	Cu 0.257	0.88	45.1	0.90	75
60	2.00			2.800	Cu 0.365	Cu 0.385	0.95	53.8	0.90	62
70	2.00			4.200	Cu 0.566	Cu 0.574	0.99	63.3	0.90	73
80	2.00			6.680	Cu 0.800	Cu 0.820	0.98	72.3	0.90	45
100	2.00			11.49	Cu 1.375	Cu 1.400	0.98	90.5	0.91	60

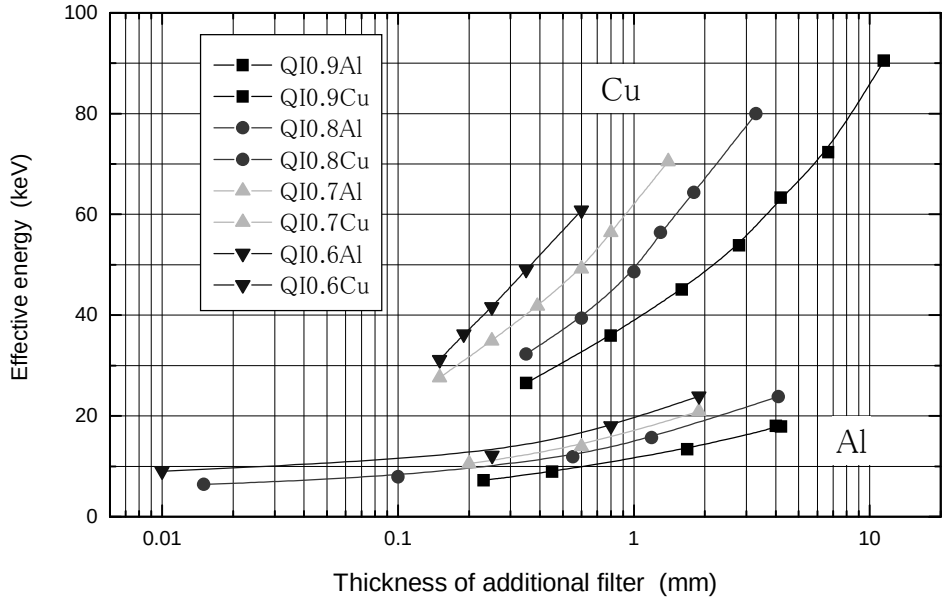


Fig. 3－1 Relationship between thickness of additional filter and effective energy

４．線質に対するＸ線エネルギースペクトルの評価

４．１ 測定方法

各線質のＸ線波高分布の測定は、Fig.4－1 に示すダイヤグラムで構成する高純度 Ge 検出器、パルス波高分析装置及びコリメータ付鉛遮蔽体を用いて実施した。図に示す鉛遮蔽体のコリメータは高純度 Ge 検出器(セイコーEG&G 社製 LOAX-36300 型)の前面に設置し､放射線の入射コリメータの直径は 1mmφ、測定距離は 1m で実施した。測定に用いた Ge 検出器は、36.4mmφ×14.6mm の結晶に Be0.5mm の窓を有する HP-Ge で､Fig.4－2 のピーク検出効率特性に示すように､12keV 付近の Ge-K 吸収端の影響を除く 7keV～100keV の範囲でほぼ 100%の効率に対し、100keV 以上で急激に効率が低下する。今回利用した Ge 検出器の検出効率は、今回設定したＸ線エネルギー範囲が 5keV から 100keV であり、この領域の検出効率がメーカー値で 80%～100%と良好であることから、Ge 検出器固有の検出効率の変化が少ないと判断し、γ標準線源による検出効率の実験を行わずメーカー値を利用することにした。また、測定した波高分布からエネルギースペクトルを精度良く求める場合は、検出効率の補正の他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、今回設定したＸ線エネルギー範囲で、検出効率が 100%近くで良好なこと、Ge 検出器のエネルギー分解能が良好なことから、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線波高分布のピークエネルギーにおける計数率に(6)式によるピーク検出効率の補正、コリメータ断面積の補正を行い、各距離におけるフルエンススペクトルφ(E)を評価した。

$$\phi(E) = N_c(E) / (S \cdot \eta_E) \qquad (6)$$

$\phi(E)$ ：フルエンスに対するエネルギースペクトル(cm^{-2})
$N_c(E)$ ：ピークエネルギーE(keV)における計数率
η_E ：ピークエネルギーE(keV)の検出効率
S ：コリメータの断面積(cm^2)

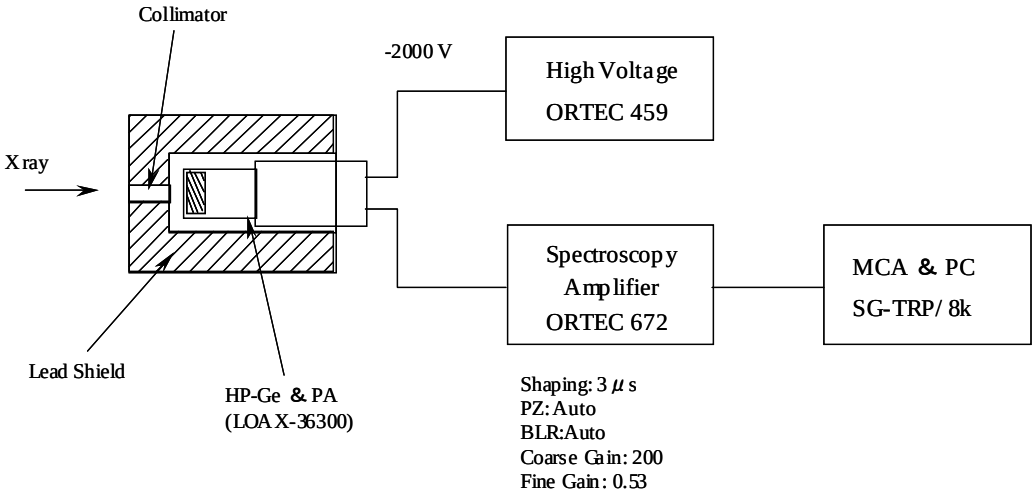


Fig. 4－1 Diagram for the measurements of pulse height spectra

ピーク検出効率(η_E)の評価は、Fig.4－2 のメーカー値の検出効率を(7)式～(9)式のエネルギー範囲で分割して最小二乗法によるフィッティング関数を決定し、これにより補正を行った。(7)式は 2keV～12keV のエネルギーに対応し、(8)式は 12keV～31keV の Ge-K 吸収端の変化に対応し、(9)式は 87keV～400keV に対応する。31keV～87keV のピーク検出効率は 1.0 とした。これらのフィッティング関数の特性を Fig.4－2 に実線で示す。

$$\eta_E = 10^{(-65.491(\log E)^5 + 216.20(\log E)^4 - 264.72(\log E)^3 + 141.22(\log E)^2 - 26.058(\log E) - 1.169)} \quad \text{---------} \quad (7)$$

(2keV～12keV)

$$\eta_E = 10^{(-2.1927(\log E)^3 + 8.3826(\log E)^2 - 10.200(\log E) + 3.8400)} \quad \text{----------} \quad (8)$$

(12keV～31keV)

$$\eta_E = 10^{(-6.0806(\log E)^4 + 56.9046(\log E)^3 - 199.836(\log E)^2 + 309.938(\log E) - 178.53)} \quad \text{--------} \quad (9)$$

(87keV～400keV)

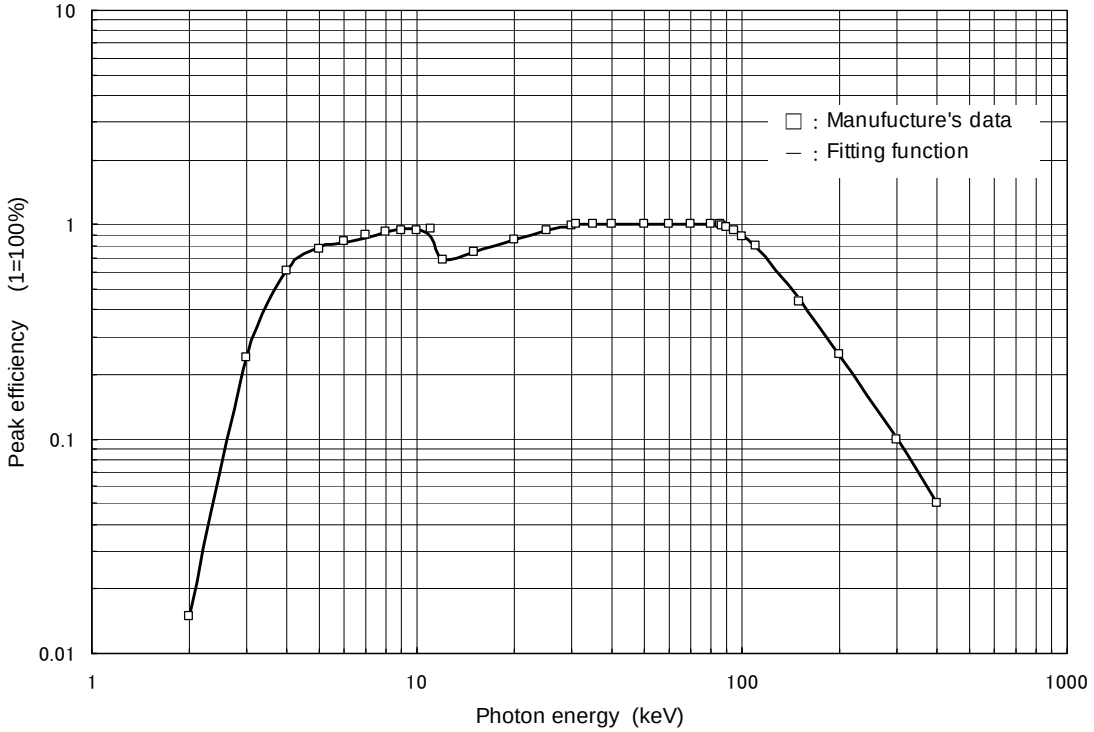


Fig. 4－2 Peak efficiency of the HP-Ge detector（LOAX-36300）

線量スペクトルとして、空気カーマスペクトル(Ka(E))、周辺線量当量スペクトル(H*(10)(E))、方向性線量当量スペクトル(H'(0.07)(E))、個人線量当量スペクトル(H_p(10)(E)及び H_p(0.07)(E))を評価した。各線量スペクトルは、得られたフルエンススペクトルに ICRP 74 及び ICRU47[6] の各線

量に係る換算係数を乗じて求めた。また、5keV 未満のフルエンスから空気カーマへの換算係数は、文献 6)の A.1 式と文献 7)の Hubbell の質量エネルギー吸収係数(μ_{en}/ρ)を用いて計算した。2keV～5keV の個人線量当量換算係数($H_p(0.07)$／Ka)は、文献 5)の B.Grosswendt のデータを用いた。この際、ICRP 74 が推奨するラグランジュの補間公式(三次、四点近似)を用いて、フルエンススペクトルのエネルギーチャンネルに対応した各換算係数の内挿を行い、このフィッティング関数で換算を行った。

各線量への評価式を(10)式～(14)式に示す。なお、方向性線量当量(H'(0.07))及び個人線量当量($H_p(0.07)$)スペクトルの評価は、スペクトル最大エネルギーが 60keV 以下の線質について行った。

$$Ka(E) = \int \phi(E) \cdot C_K(E)\, dE \quad (10)$$

$C_K(E)$ ：フルエンスから空気カーマへの換算係数 (Gy・cm²)

$$H^*(10)(E) = \int Ka(E) \cdot C_{H^*}(E)\, dE \quad (11)$$

$C_H(E)$：空気カーマから周辺線量当量 H*(10)への換算係数 (Sv/Gy)

$$H'(0.07)(E) = \int Ka(E) \cdot C_{H'}(E)\, dE \quad (12)$$

$C_{H'}(E)$：空気カーマから方向性線量当量 H'(0.07,0°)への換算係数 (Sv/Gy)

$$H_p(10)(E) = \int Ka(E) \cdot C_{p10}(E)\, dE \quad (13)$$

$C_{p10}(E)$：空気カーマから個人線量当量 $H_p(10)$への換算係数 (Sv/Gy)

$$H_p(0.07)(E) = \int Ka(E) \cdot C_{p0.07}(E)\, dE \quad (14)$$

$C_{p0.07}(E)$：空気カーマから個人線量当量 $H_p(0.07)$への換算係数 (Sv/Gy)

得られたスペクトルから(15)式～(20)式を用いて各平均エネルギーを求め、半価層から求めた実効エネルギー(E_{eff})に対してどの程度変化しているかの比較を行った。

$$E_F = \int E \cdot \phi(E)\, dE \,/\, \int \phi(E)\, dE \quad (15)$$

$$E_K = \int E \cdot Ka(E)\, dE \,/\, \int Ka(E)\, dE \quad (16)$$

$$E_{H(10)} = \int E \cdot H^*(10)(E) dE \,/\, \int H^*(10)(E)\, dE \quad (17)$$

$$E_{H(0.07)} = \int E \cdot H'(0.07)(E)\, dE \,/\, \int H'(0.07)(E)\, dE \quad (18)$$

$$E_{p(10)} = \int E \cdot Hp(10)(E)\, dE \,/\, \int Hp(10)(E)\, dE \quad (19)$$

$$E_{p(0.07)} = \int E \cdot Hp(0.07)(E)\,dE \;/\; \int Hp(0.07)(E)\,dE \qquad (20)$$

線量当量への換算係数の算出に用いたラグランジェ内挿法に基づくフィッティング関数を Fig.4－3 に示す。図より、H*(10)／Ka 及び Hp(10)／Ka の換算係数は 10keV 以上であるため、Fig.4－4～Fig.4－7 の各シリーズのフルエンススペクトルで 10keV 未満に分布している線質は平均エネルギーの評価の対象から外した。また、H'(0.07)／Ka 及び H_p(0.07)／Ka の換算係数は、法令による現場の放射線管理での線量当量測定の規定(70μ線量当量は1cm線量当量の10倍になる場合に測定評価を行う)があること、Fig.4－3 に示すように 40keV 以上で 70μ線量当量と 1cm 線量当量の換算係数がほぼ同じになること及び 70μm の皮膚透過の線量当量率の校正をする場合に標準場の二次電子平衡が 70keV 以上で成立しないために校正精度の低下の問題が生じることから、Fig.4－4～Fig.4－7 の各シリーズのフルエンススペクトルで 60kV 以下の線質を評価の対象とした。

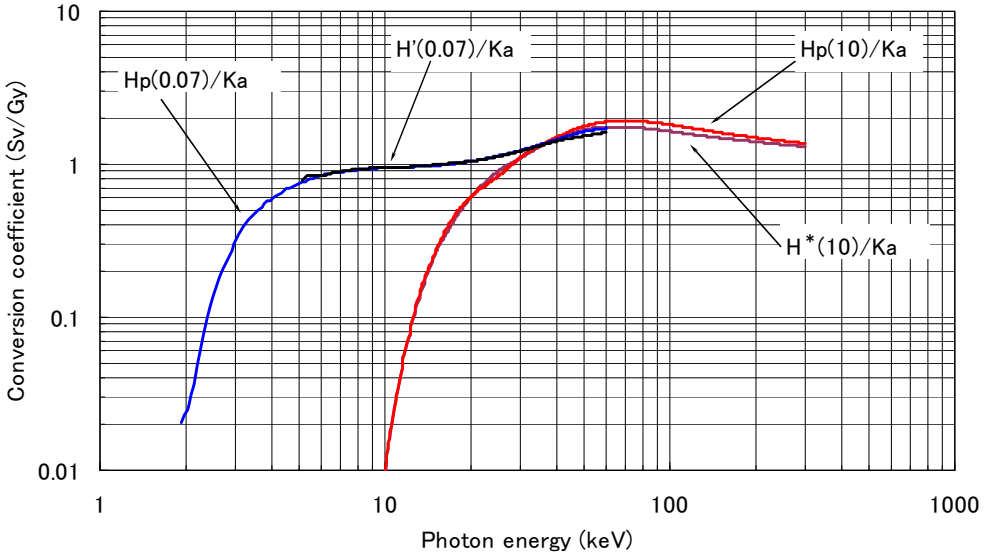


Fig.4－3 Characteristics of conversion coefficients of dose equivalents for photons

４.２ 結果及び考察

各シリーズに対応した、標準場のフルエンススペクトル、空気カーマスペクトル及び各種線量当量スペクトルの評価結果を Fig.4－4～Fig.4－27 に示す。また、各スペクトルの図中にはそれぞれの平均エネルギーを示す。

実効エネルギーとフルエンススペクトル、各線量スペクトルの平均エネルギーを比較した表を各シリーズ毎に Table 4－1～Table 4－4 に示す。表中の E_F はフルエンス平均エネルギー、E_K は空気カーマ平均エネルギー、$E_{H(10)}$ は周辺線量当量平均エネルギー、$E_{H(0.07)}$ は方向性線量当量平均エネルギー、$E_{P(10)}$ と $E_{P(0.07)}$ は個人線量当量の H_p(10)及び H_p(0.07)に対する平均エネルギーを表す。以下にこれらの評価結果及び考察を示す。

(1) QI0.6 及び QI0.7 シリーズの 20kV 以下の各スペクトルでは、8.4keV、9.9keV 及び 11.7keV の特性X線が発生している。これは、X線管のターゲットに用いているタングステン(W)焦点から発生する L 軌道特性X線($L_{\alpha 1}$ 8.40keV,$L_{\alpha 2}$ 8.34keV,$L_{\beta 1}$ 9.67keV,$L_{\beta 2}$ 9.96keV,$L_{\gamma 1}$ 11.29keV,$L_{\gamma 2}$

11.61keV,$L_{\gamma 3}$ 11.67keV)やレニウム(Re)L 軌道特性X線($L_{\alpha 1}$ 8.7keV)によるものである。また、QI0.8 及び QI0.9 シリーズの 20kV 以下の各スペクトルでは、基礎フィルタのろ過効果により上記の特性X線はほとんど発生していない。

(2) 各シリーズ共通で 80kV 以上の各スペクトルでは、58keV 及び 67keV 付近に２本ずつ特性X線が発生している。これは、W 焦点から発生する K 軌道特性X線($K_{\alpha 1}$ 59.3keV,$K_{\alpha 2}$ 58.0keV,$K_{\beta 1}$ 67.2keV)やレニウム(Re)K 軌道特性X線($K_{\beta 1}$ 69.3keV) によるものである。なお、80kV 以上の一部の波高分布の測定では、1mmφの鉛コリメータから発生した鉛の特性X線が発生したため、これらを削除した。また、各シリーズ共通で 30kV から 70kV の各スペクトルでは、特性X線は発生しておらず、きれいなスペクトルを示した。

(3) 実効エネルギーE_{eff}とフルエンス平均エネルギーE_Fの比較(E_{eff}／E_F)では、QI0.9 で 0.98～1.03 と±3%で両者がほぼ同じ値を示したが、QI0.8 で 0.94～1.01、QI0.7 で 0.90～0.99、QI0.6 で 0.86～0.94 となり、フルエンス平均エネルギーは数パーセントから十パーセント程度大きな値を示した。フルエンススペクトルが標準場のスペクトルを表しているのに対し、実効エネルギーは半価層フィルタの挿入により標準場のフルエンススペクトルをろ過しつつ評価するため、ろ過効果が多い線質では実効エネルギーが低い値を示した。これに対し、半価層フィルタ装荷時にスペクトルのろ過がかなり大きい(均等度が１に近い)QI0.9 シリーズでは両者が良く一致した。

(4) 実効エネルギーと空気カーマの平均エネルギーの比較(E_{eff}／E_K)では、QI0.9 で 8kV を除く線質で±1%で両者が良く一致したが、QI0.8 で 0.96～1.00、QI0.7 で 0.95～1.00、QI0.6 で 0.93～0.97 となり、フルエンス平均エネルギーでの比較と同様の結果となった。

(5) 実効エネルギーと周辺線量当量 H*(10)の平均エネルギーの比較(E_{eff}／$E_{H(10)}$)では、最大の違いが QI0.6 シリーズで－15%、QI0.7 シリーズで－9%、QI0.8 シリーズで－6%、QI0.9 シリーズで－2%であったが、高エネルギーの線質になるにつれて両者は近い値になった。

(6) 周辺線量当量 H*(10)と個人線量当量 $H_p(10)$の平均エネルギーは、各シリーズの全線質について±0.3keV でよく一致した。また、方向性線量当量 H'(0.07)と個人線量当量 $H_p(0.07)$の平均エネルギーも±0.3keV でよく一致すると共に、これらの各線質のエネルギーは空気カーマの平均エネルギーともよく一致した。

以上の結果から、評価したX線エネルギースペクトルの平均エネルギーの比較では、周辺線量当量 H*(10)と個人線量当量 $H_p(10)$が全線質について良く一致し、方向性線量当量 H'(0.07)、個人線量当量 $H_p(0.07)$とこの線質に対応する空気カーマの３種類の平均エネルギーも全線質において良く一致した。また、各シリーズの各種スペクトルには目的外の特性X線等の発生が認められず、良好であることを確認した。

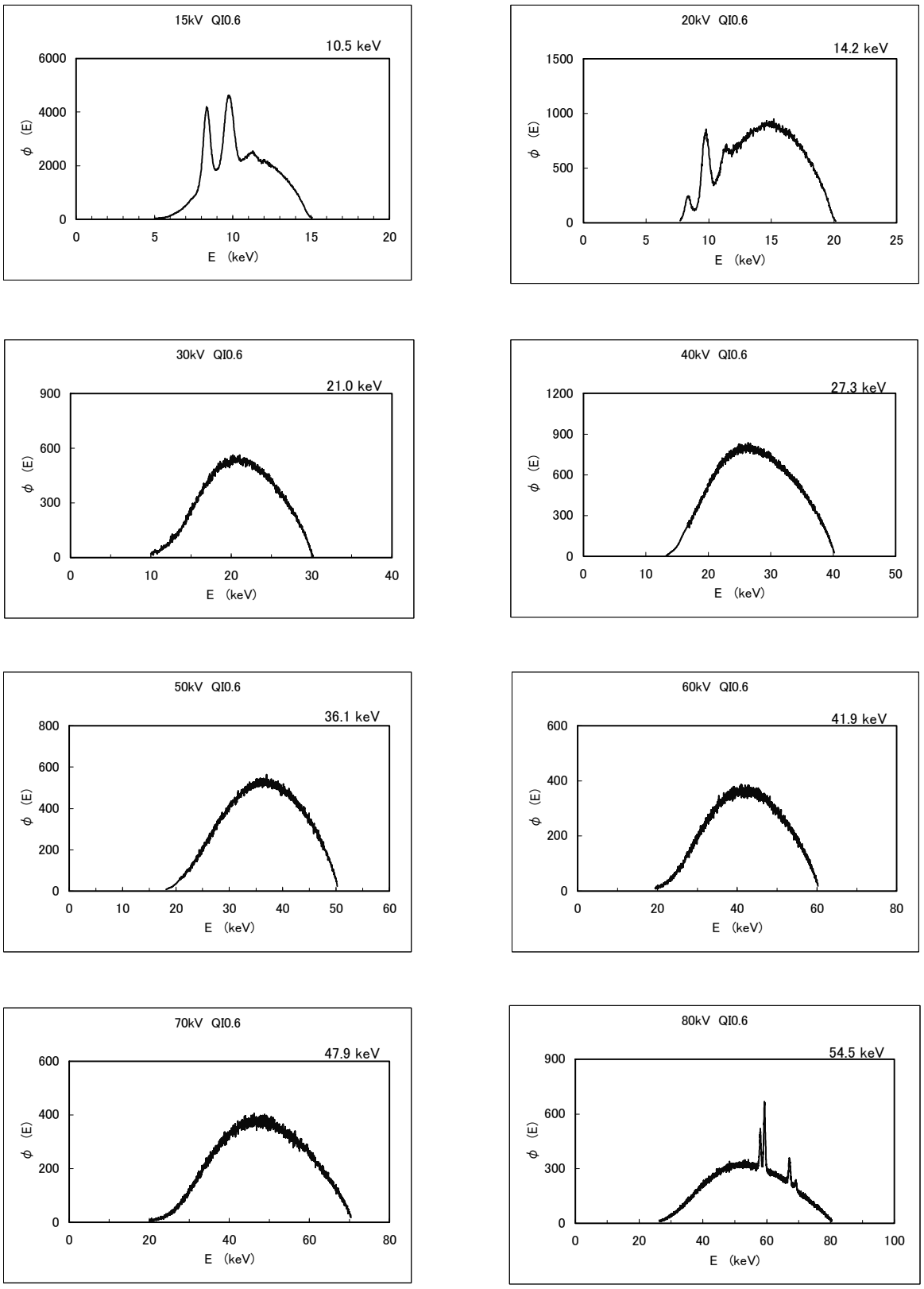


Fig.4－4 Fluence spectra of QI 0.6 series

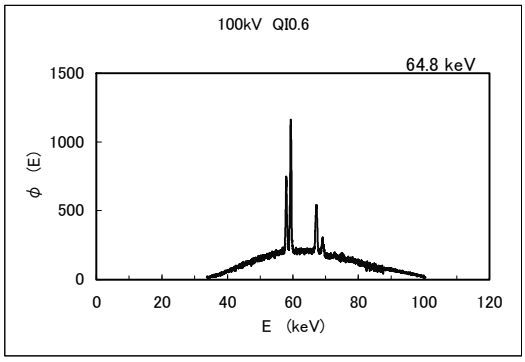


Fig.4－4 Countinued

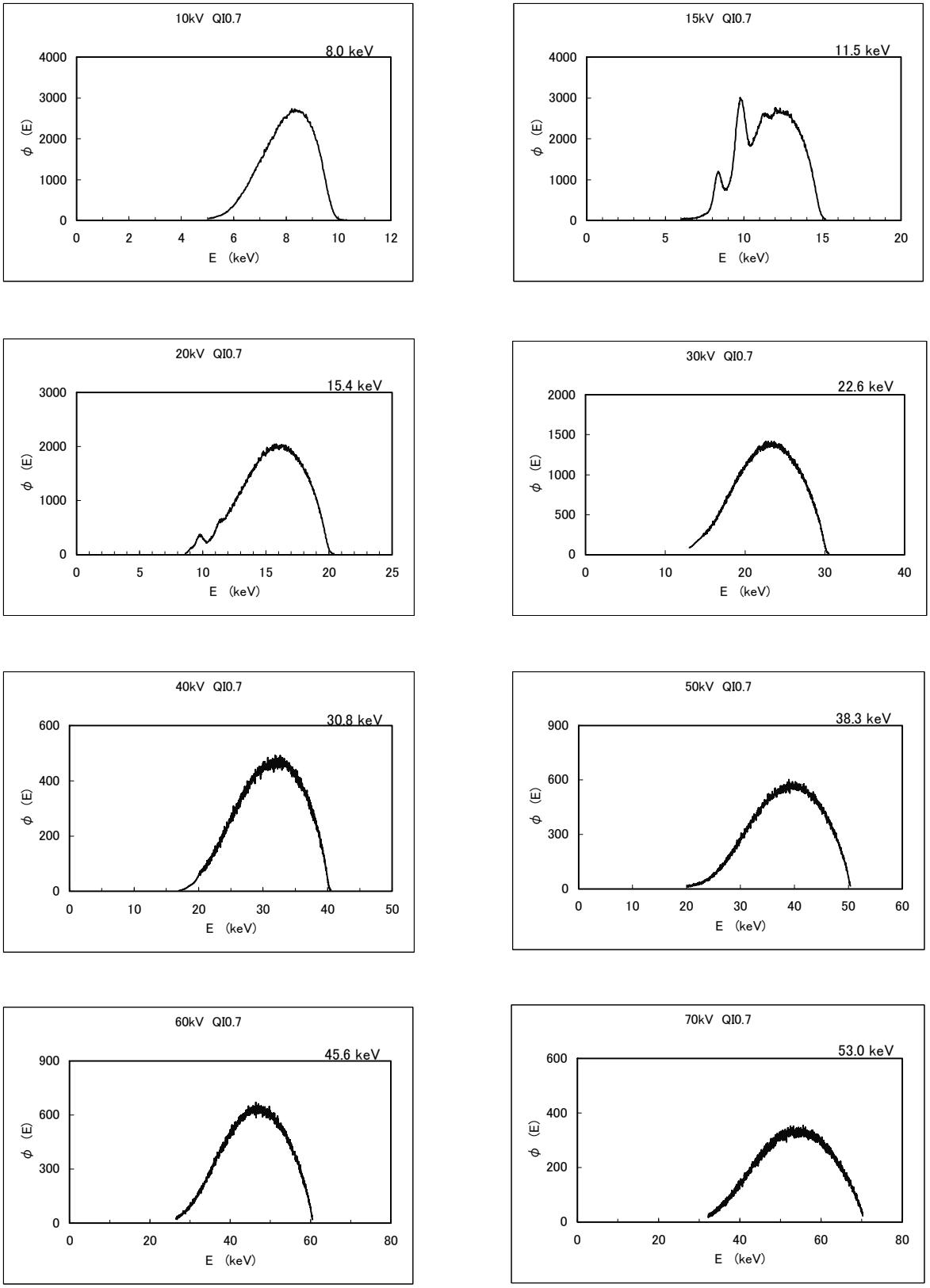
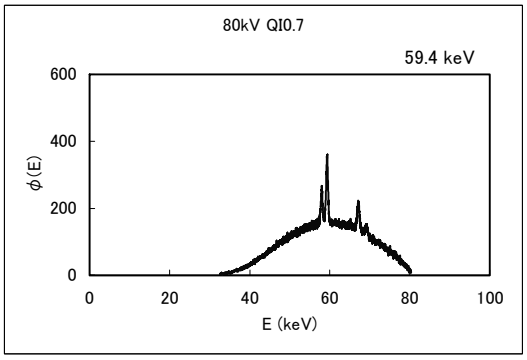


Fig.4－5 Fluence spectra of QI 0.7 series



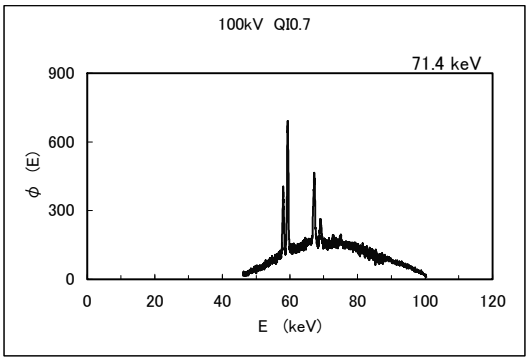


Fig.4－5 Countinued

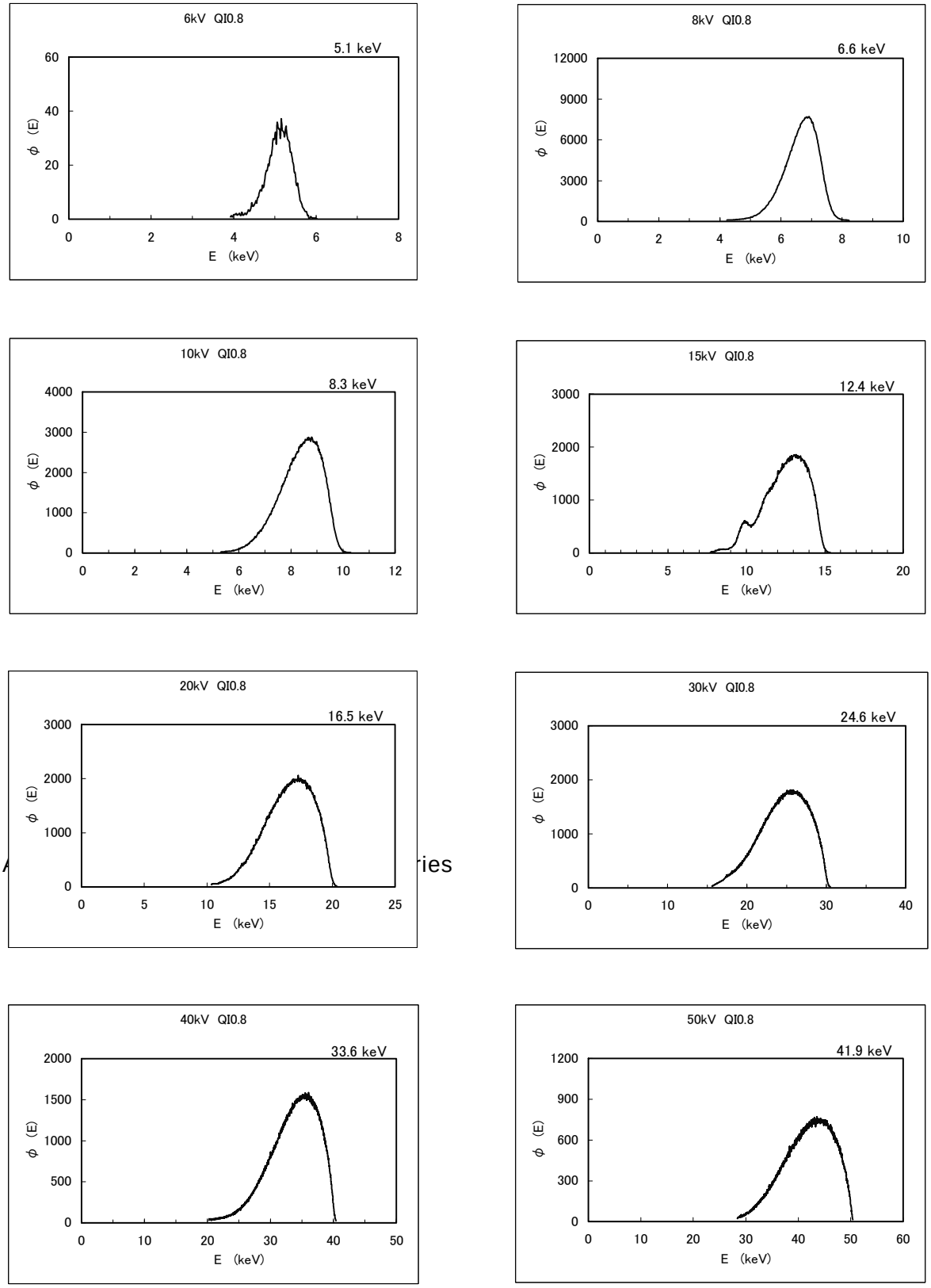
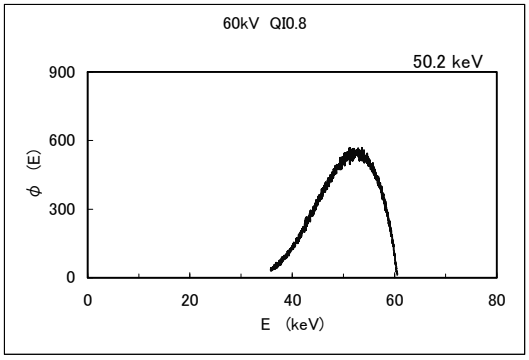
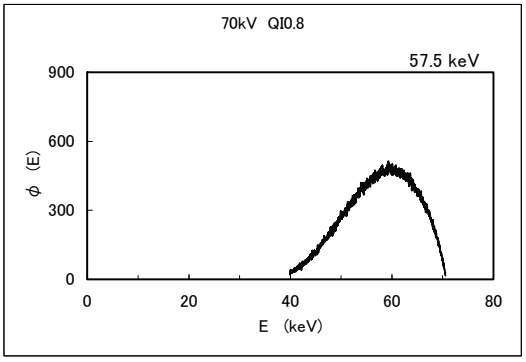
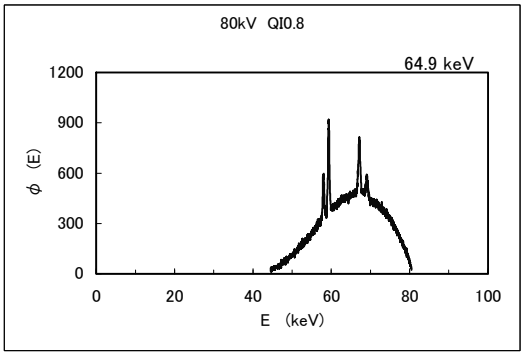


Fig.4－6 Fluence spectra of QI 0.8 series







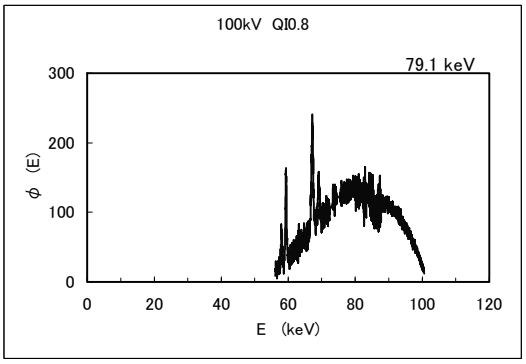


Fig.4－6 Countinued

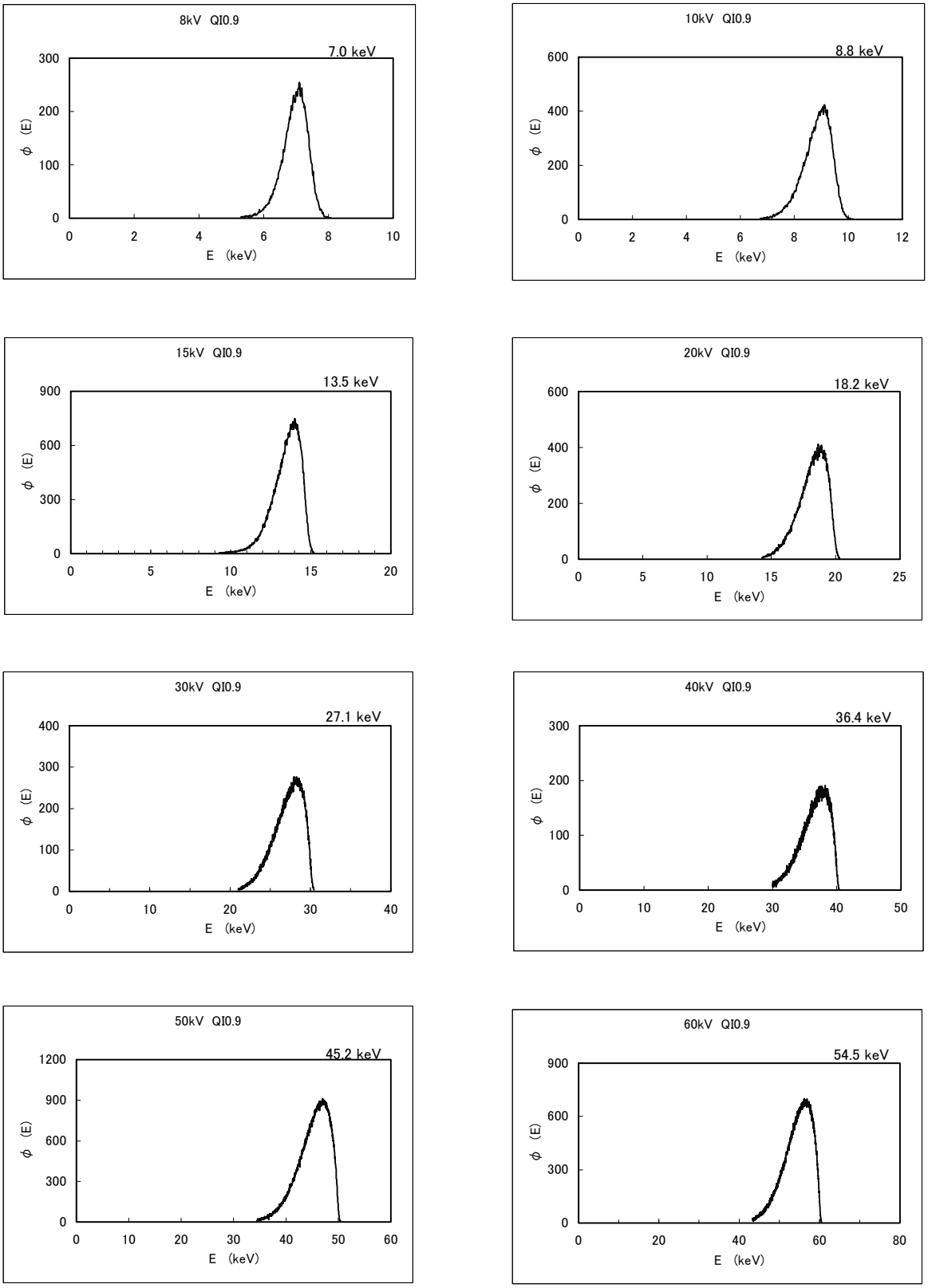
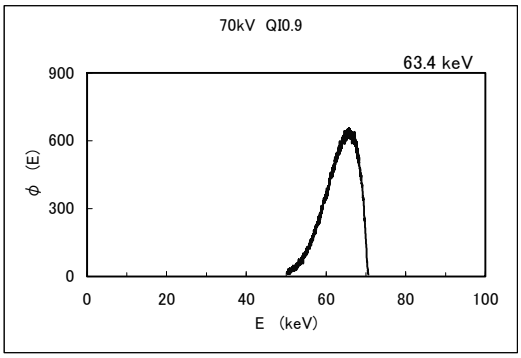
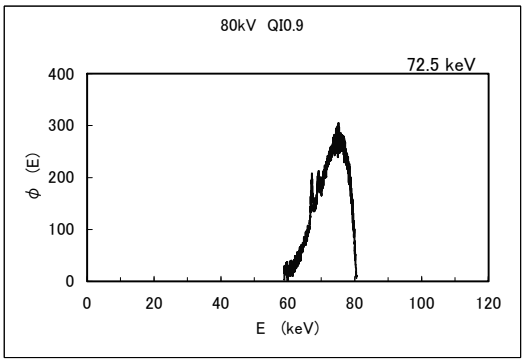


Fig.4－7 Fluence spectra of QI 0.9 series





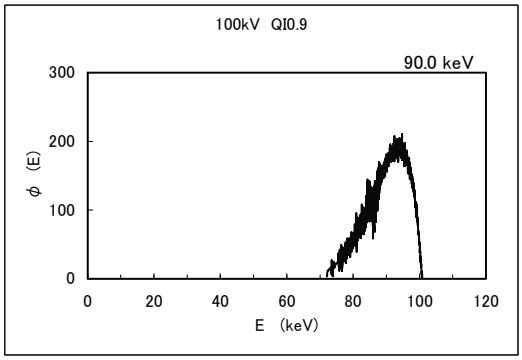


Fig. 4－7 Countinued

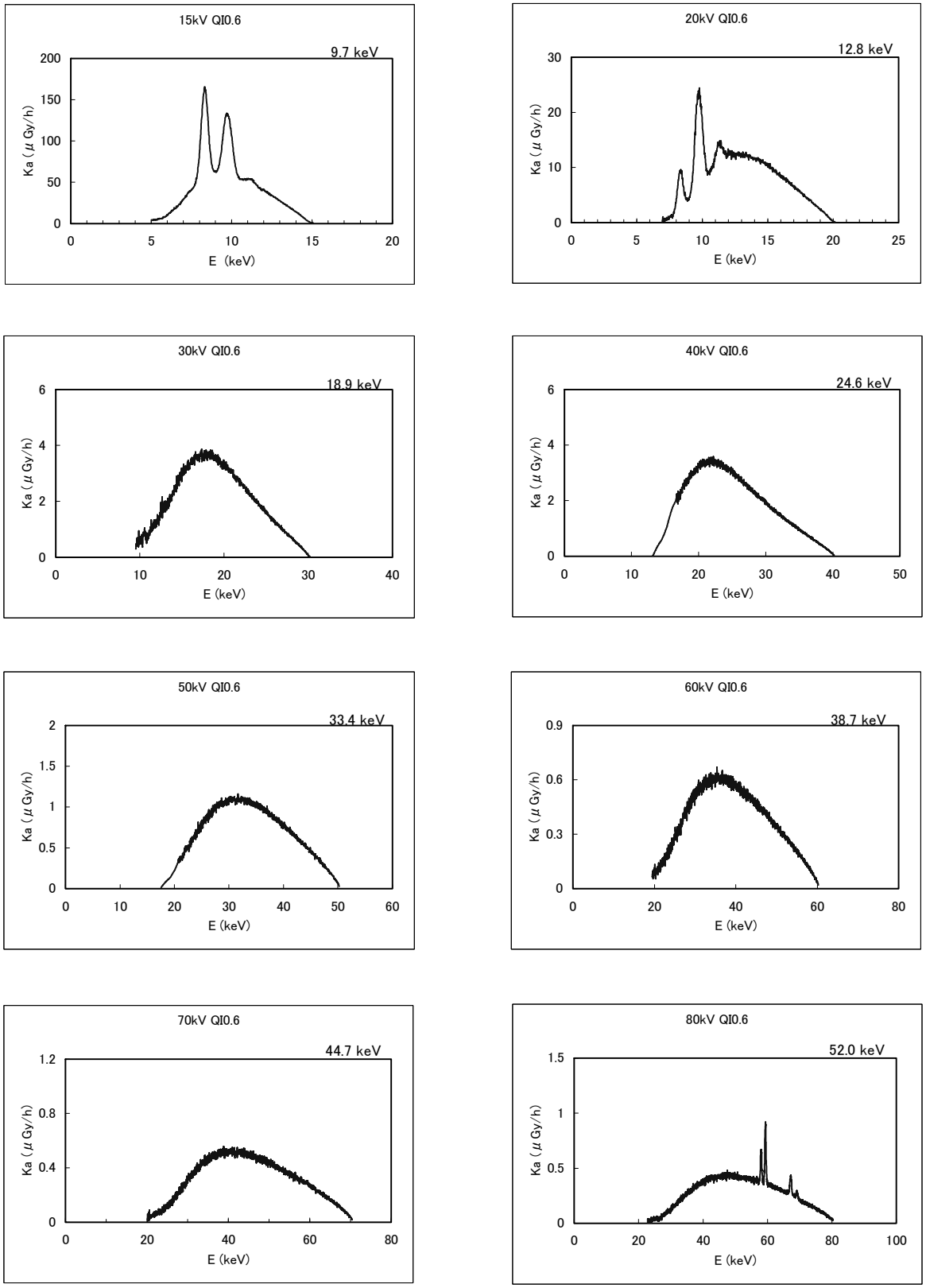


Fig.4－8 Air-kerma spectra of QI 0.6 series

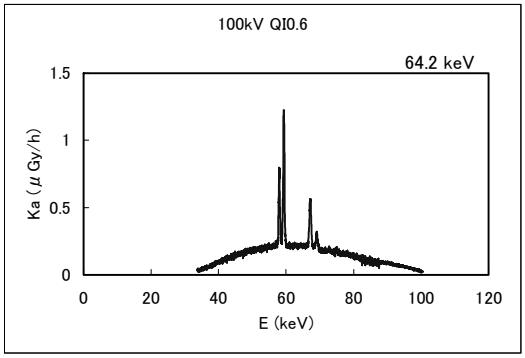


Fig. 4－8 Countinued

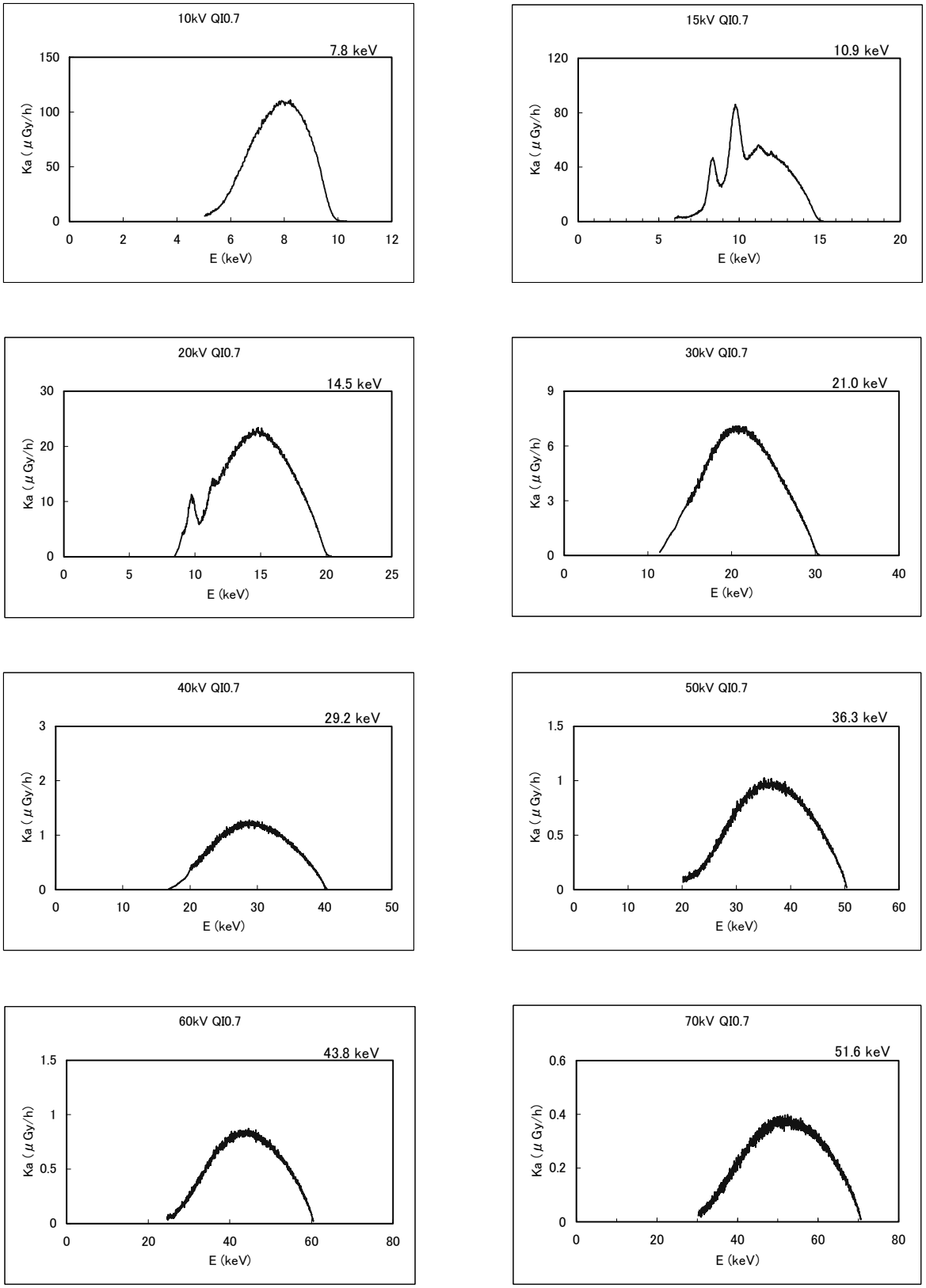
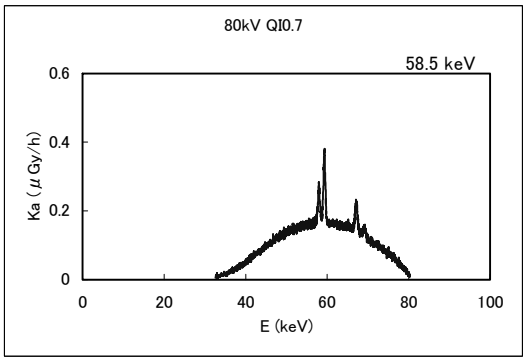


Fig.4－9 Air-kerma spectra of QI 0.7 series



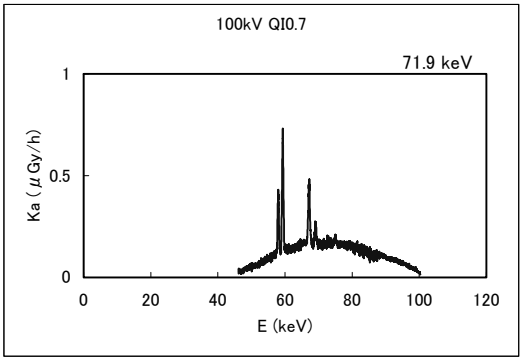


Fig. 4－9 Countinued

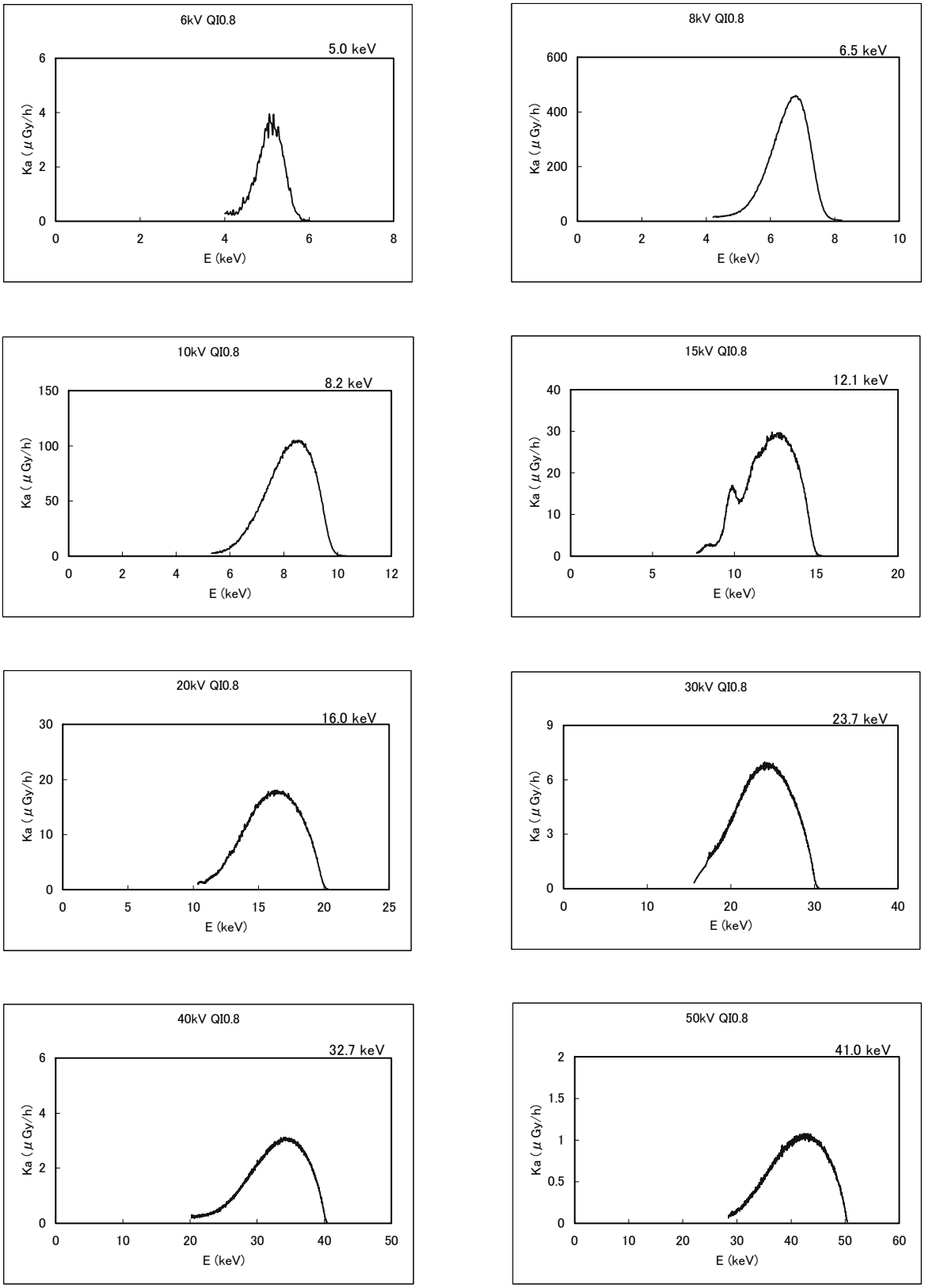


Fig.4－10 Air-kerma spectra of QI 0.8 series

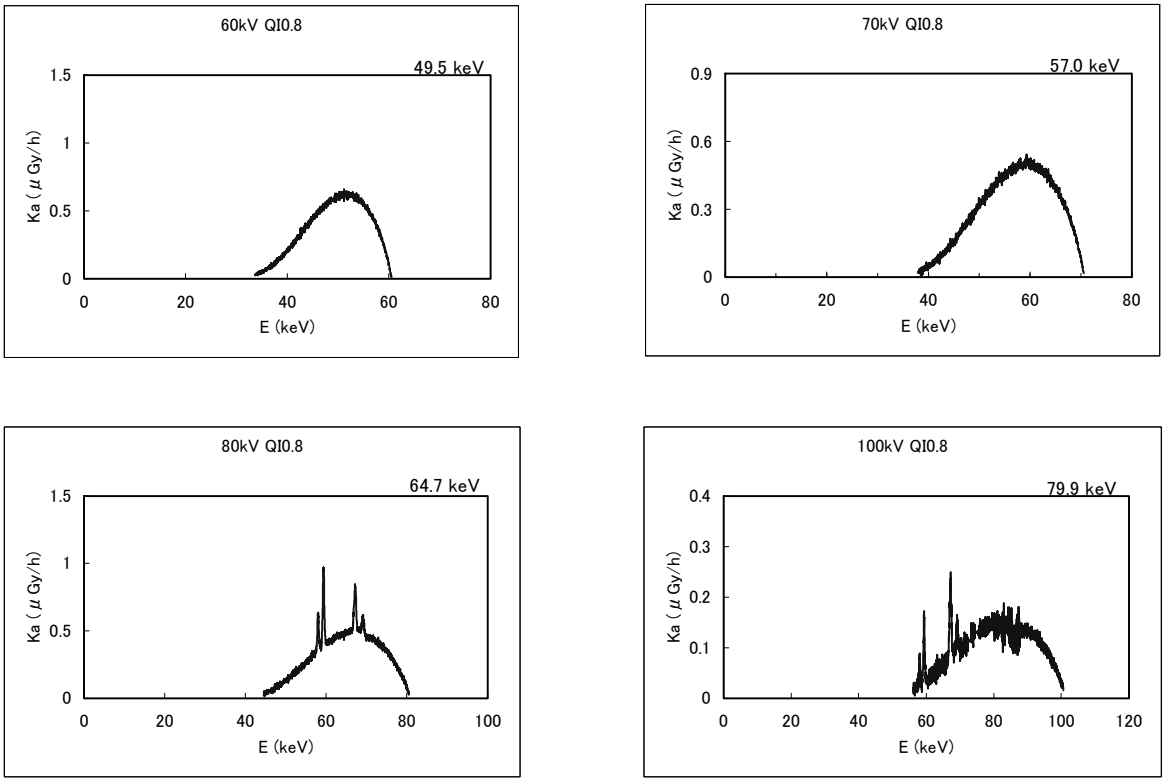


Fig. 4－10 Countinued

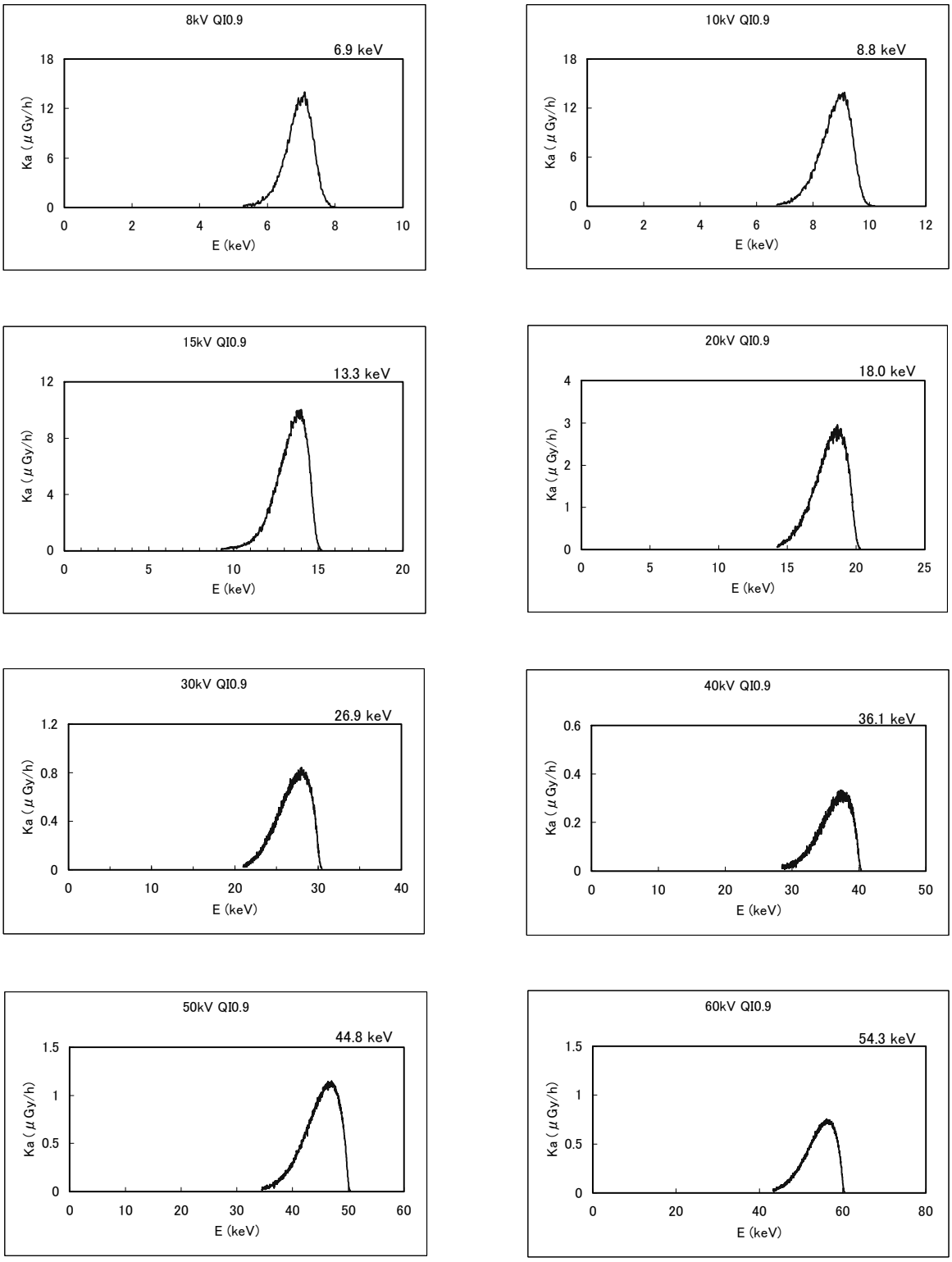
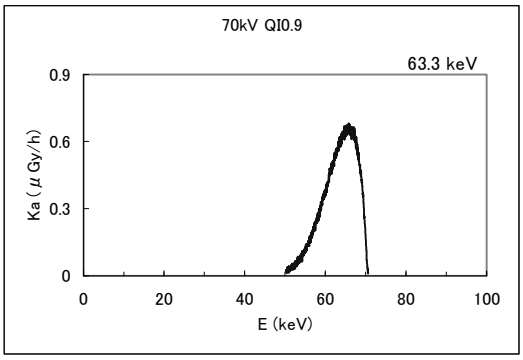
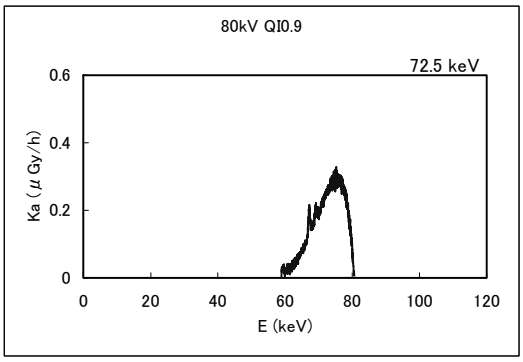


Fig.4－11 Air-kerma spectra of QI 0.9 series





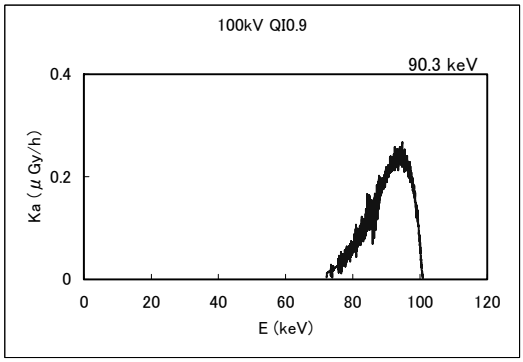


Fig. 4－11 Countinued

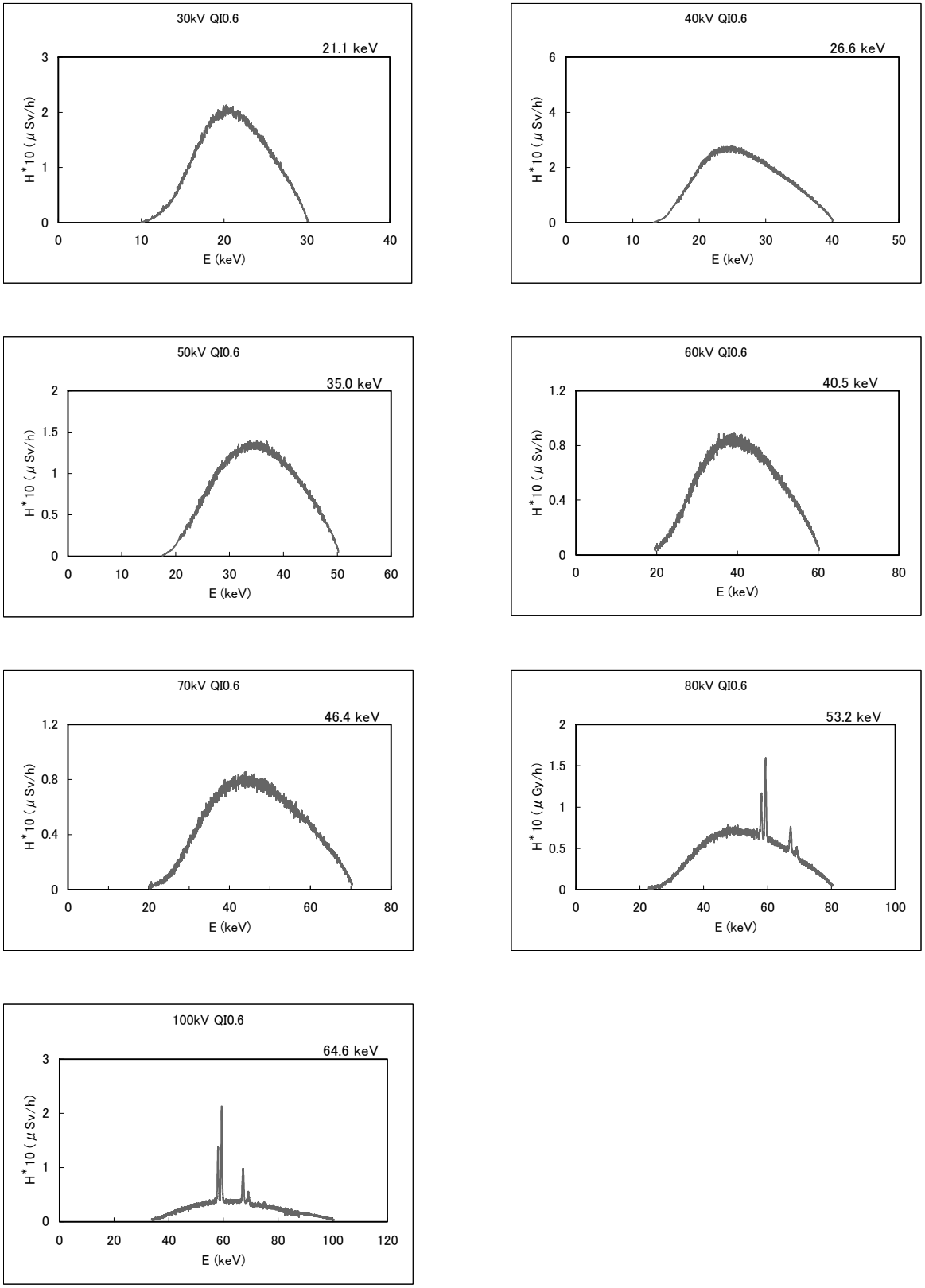


Fig.4－12　Ambient dose equivalent spectra of QI 0.6 series (H*(10))

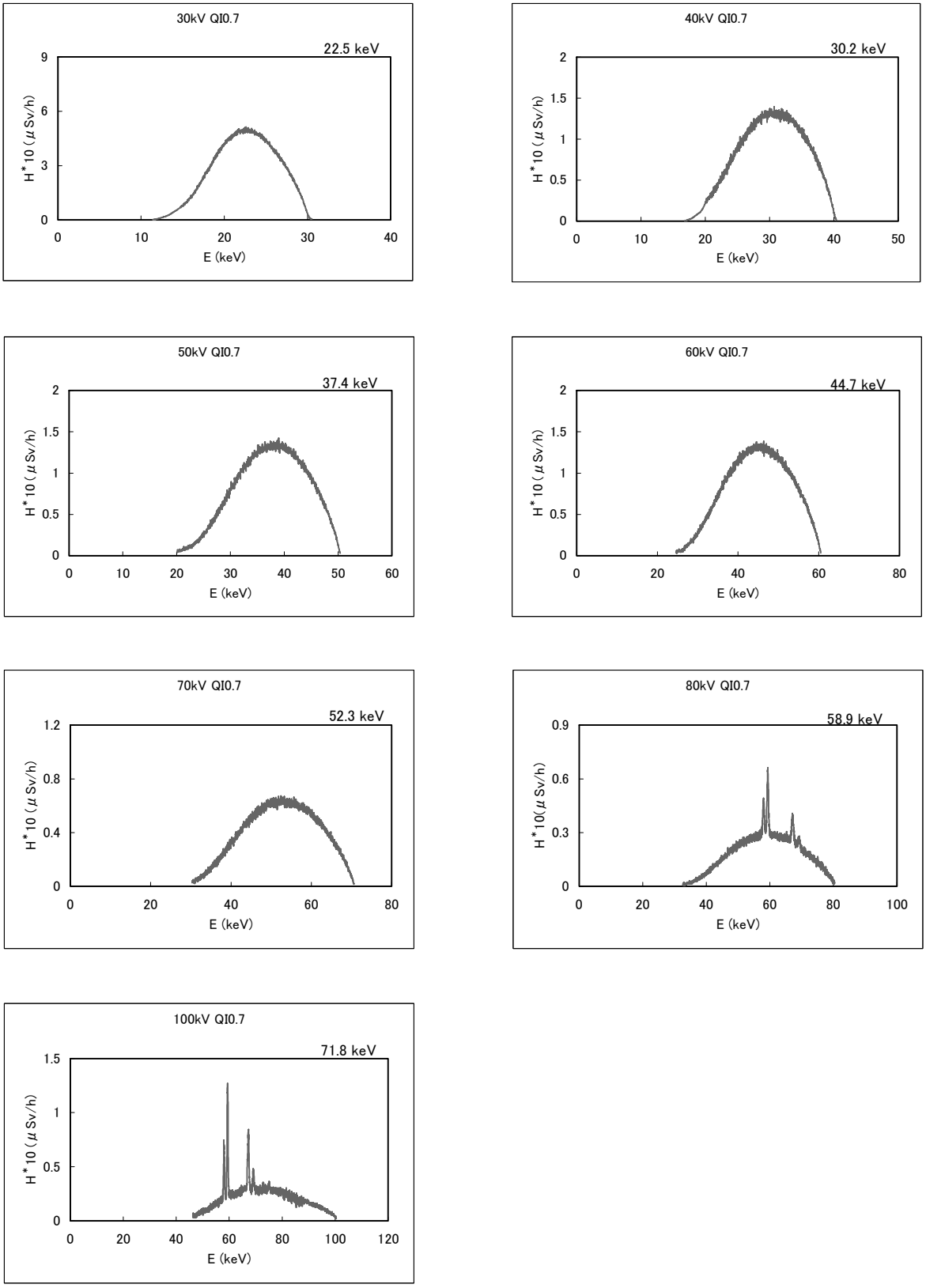


Fig.4－13　Ambient dose equivalent spectra of QI 0.7 series (H*(10))

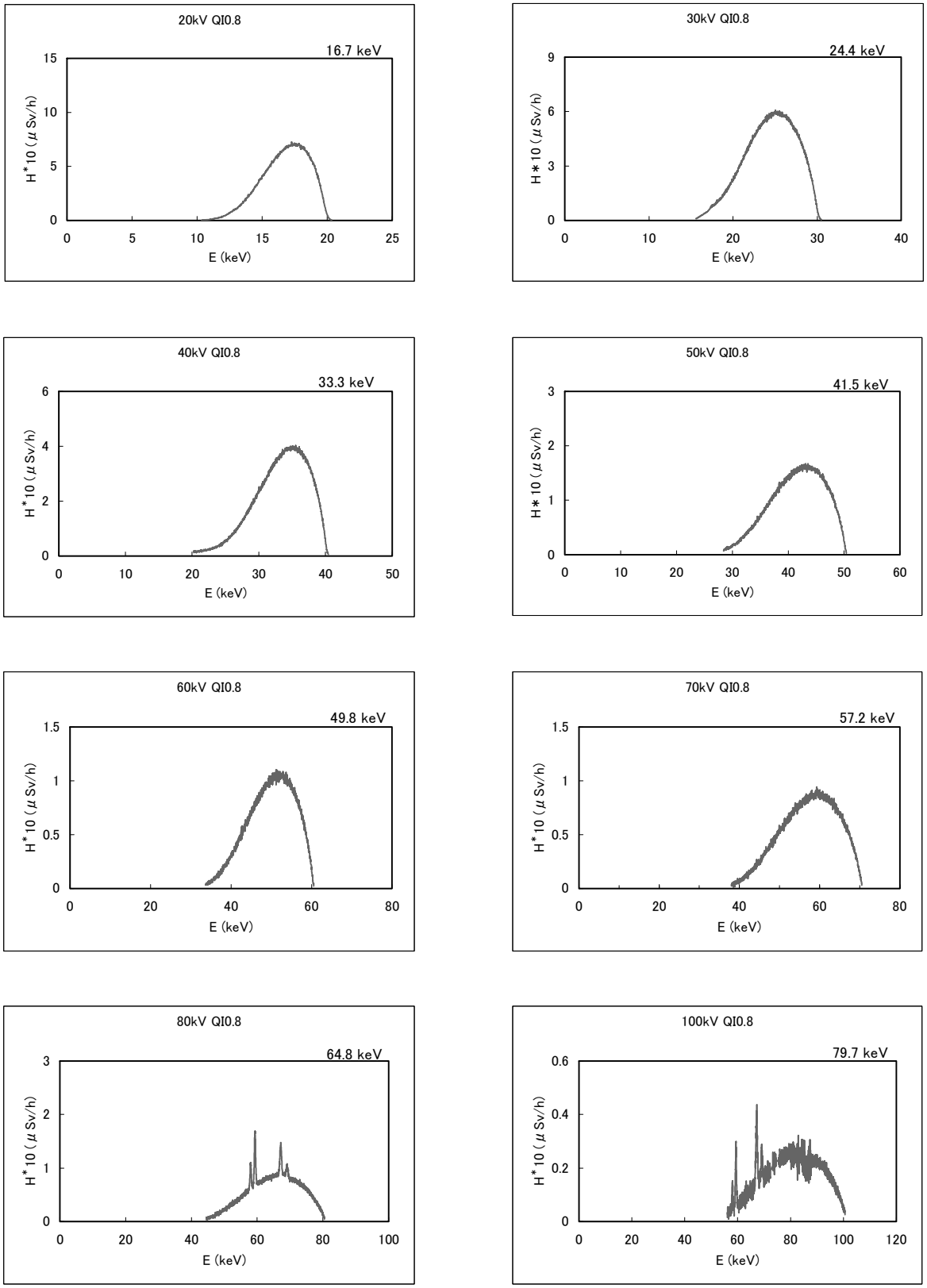


Fig.4－14　Ambient dose equivalent spectra of QI 0.8 series (H*(10))

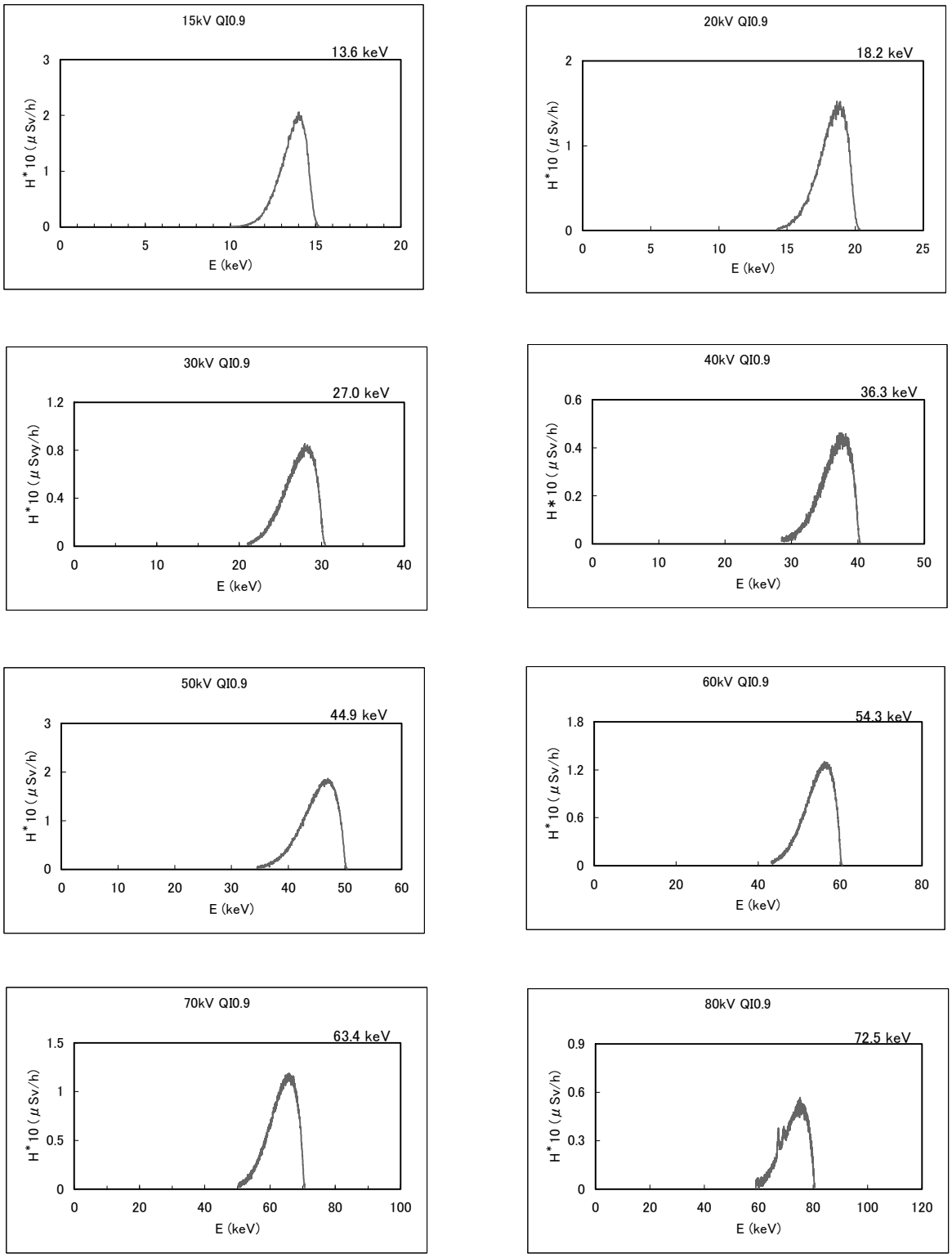


Fig.4－15　Ambient dose equivalent spectra of QI 0.9 series (H*(10))

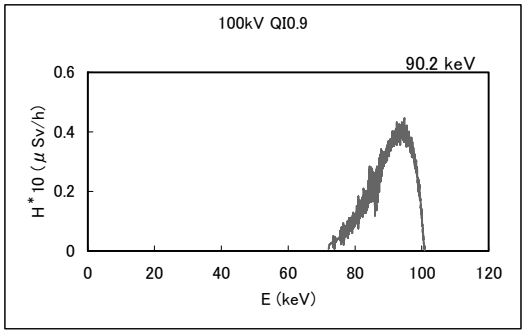


Fig. 4－15 Countinued

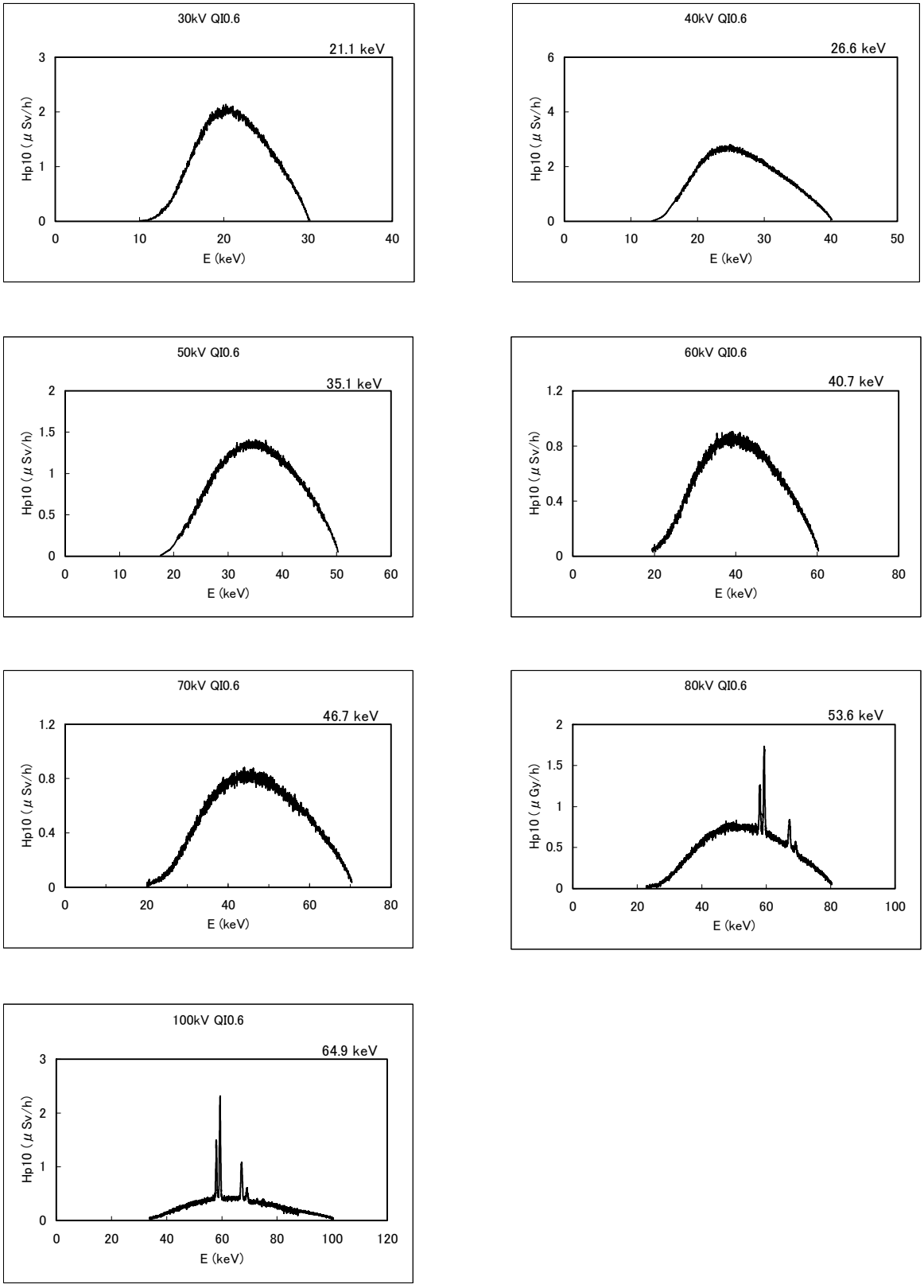


Fig.4－16 Personal dose equivalent spectra for QI 0.6 series ($H_p(10)$)

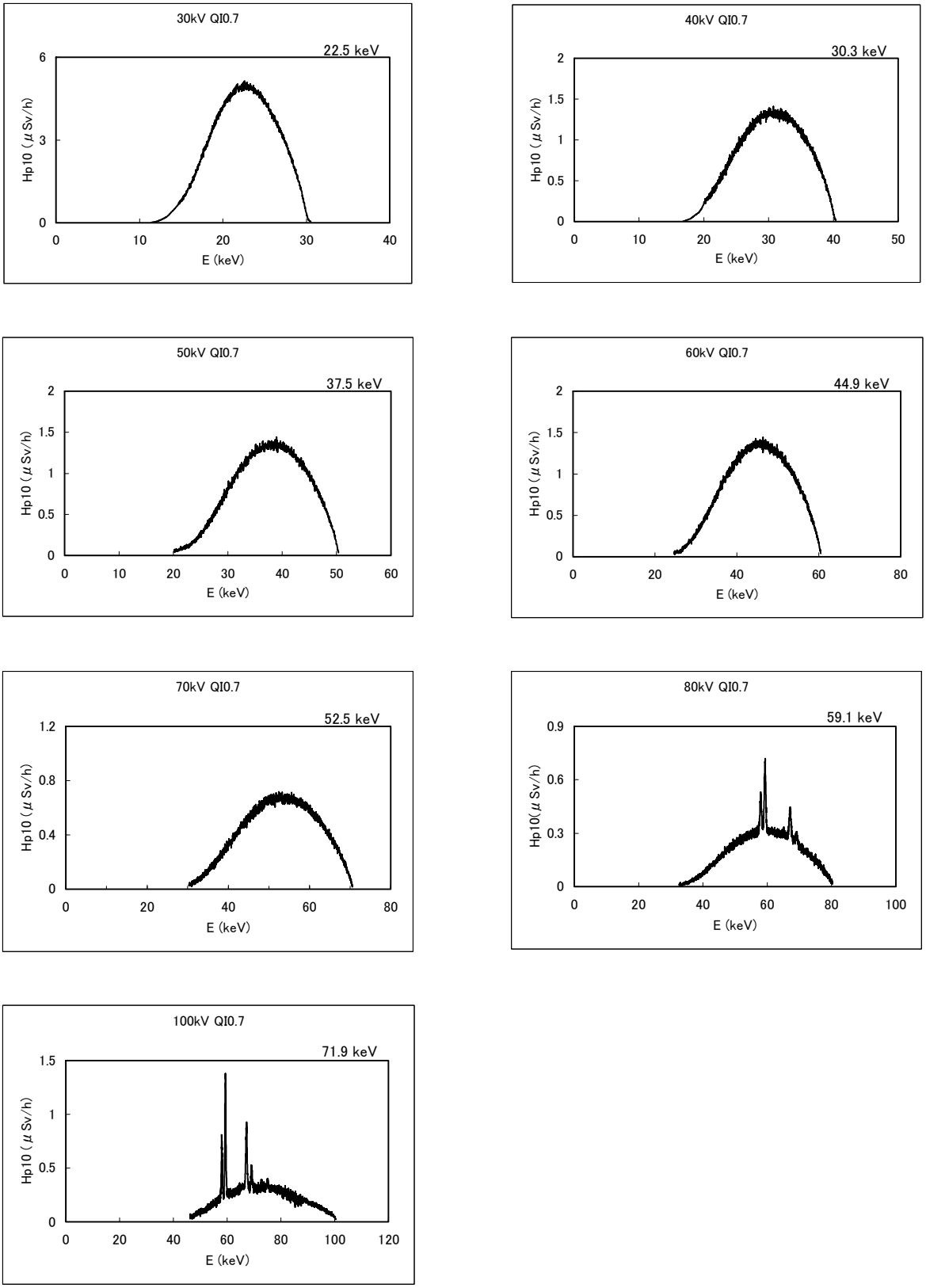


Fig.4－17 Personal dose equivalent spectra for QI 0.7 series ($H_p(10)$)

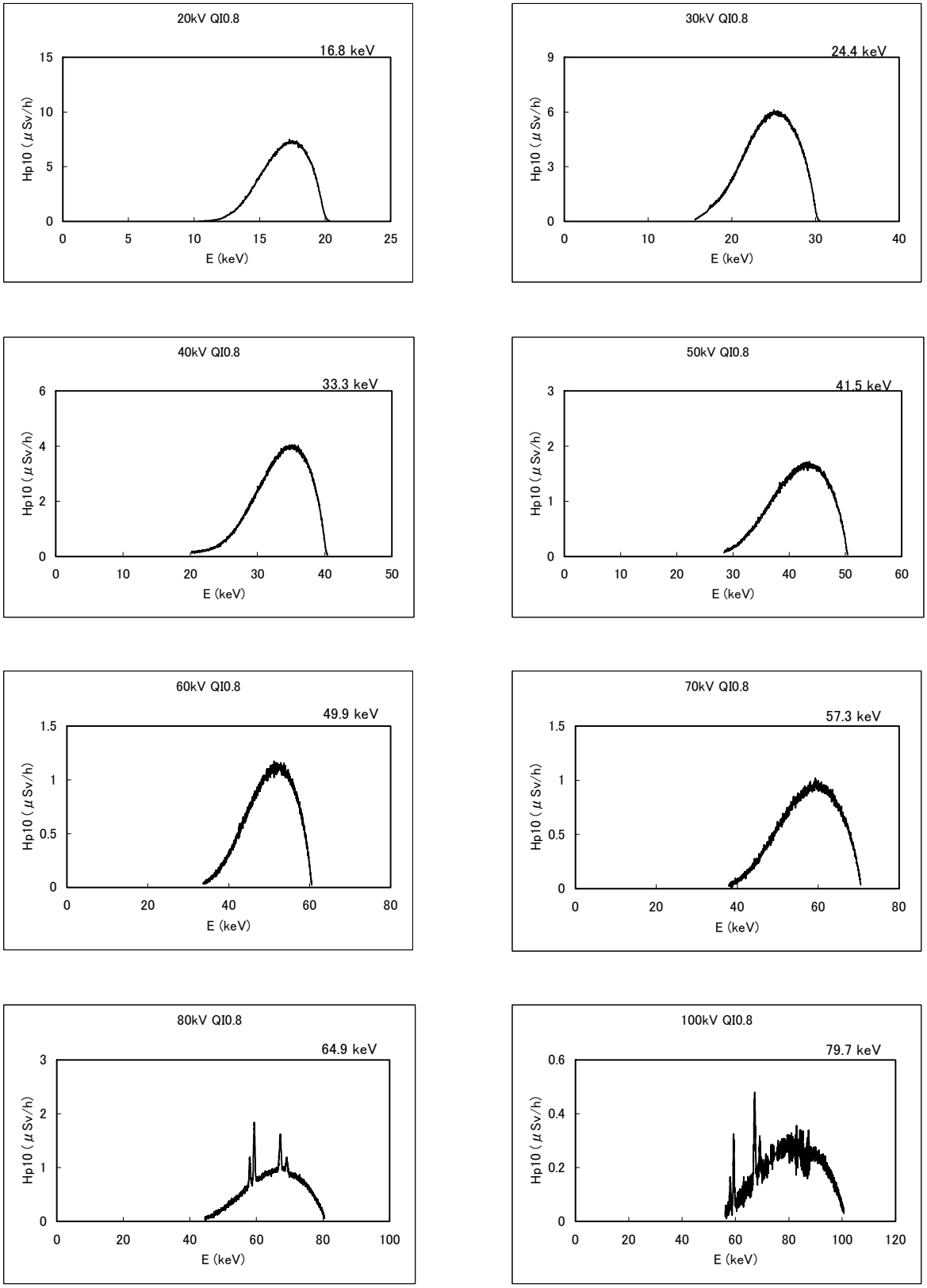


Fig.4－18 Personal dose equivalent spectra for QI 0.8 series (H_p (10))

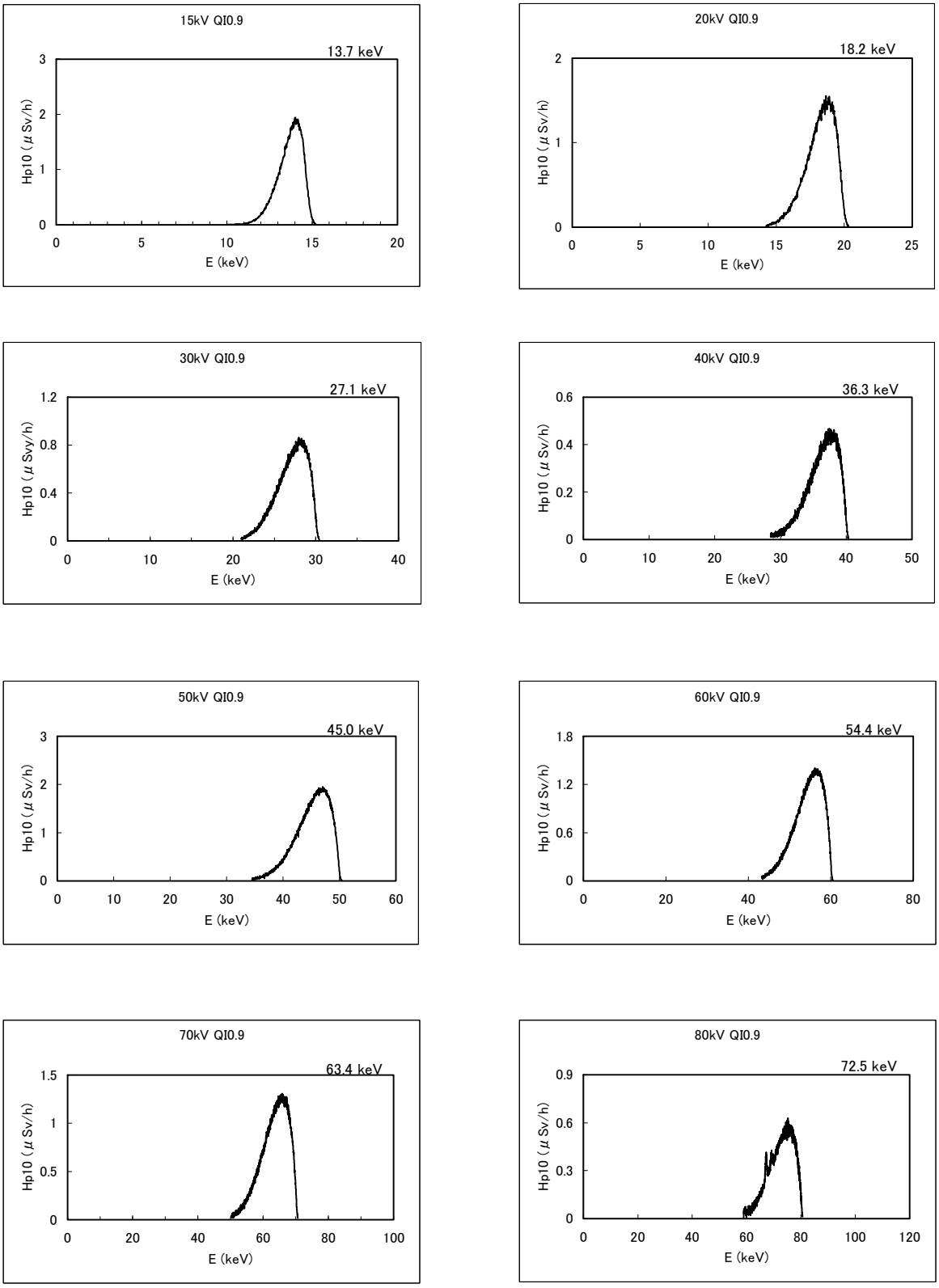


Fig.4－19 Personal dose equivalent spectra for QI 0.9 series ($H_p(10)$)

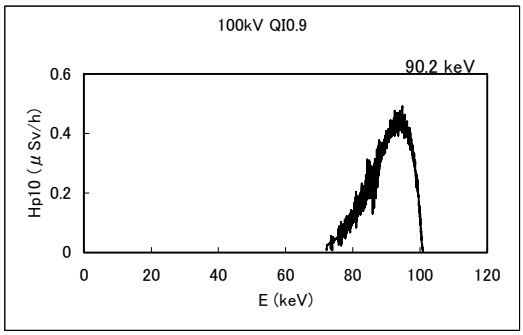


Fig.4－19 Countinued

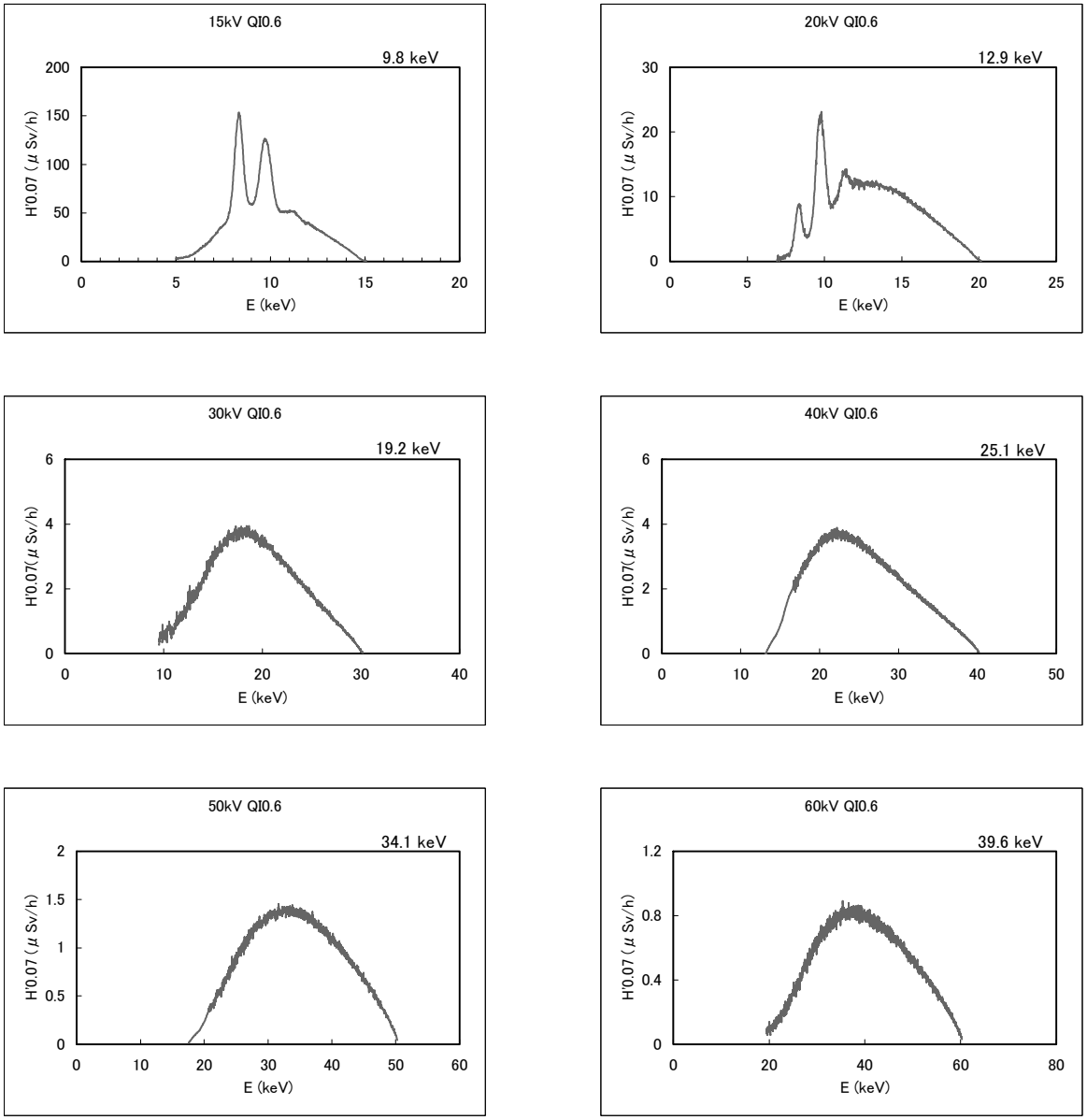


Fig.4－20 Directional dose equivalent spectra of QI 0.6 series (H'(0.07))

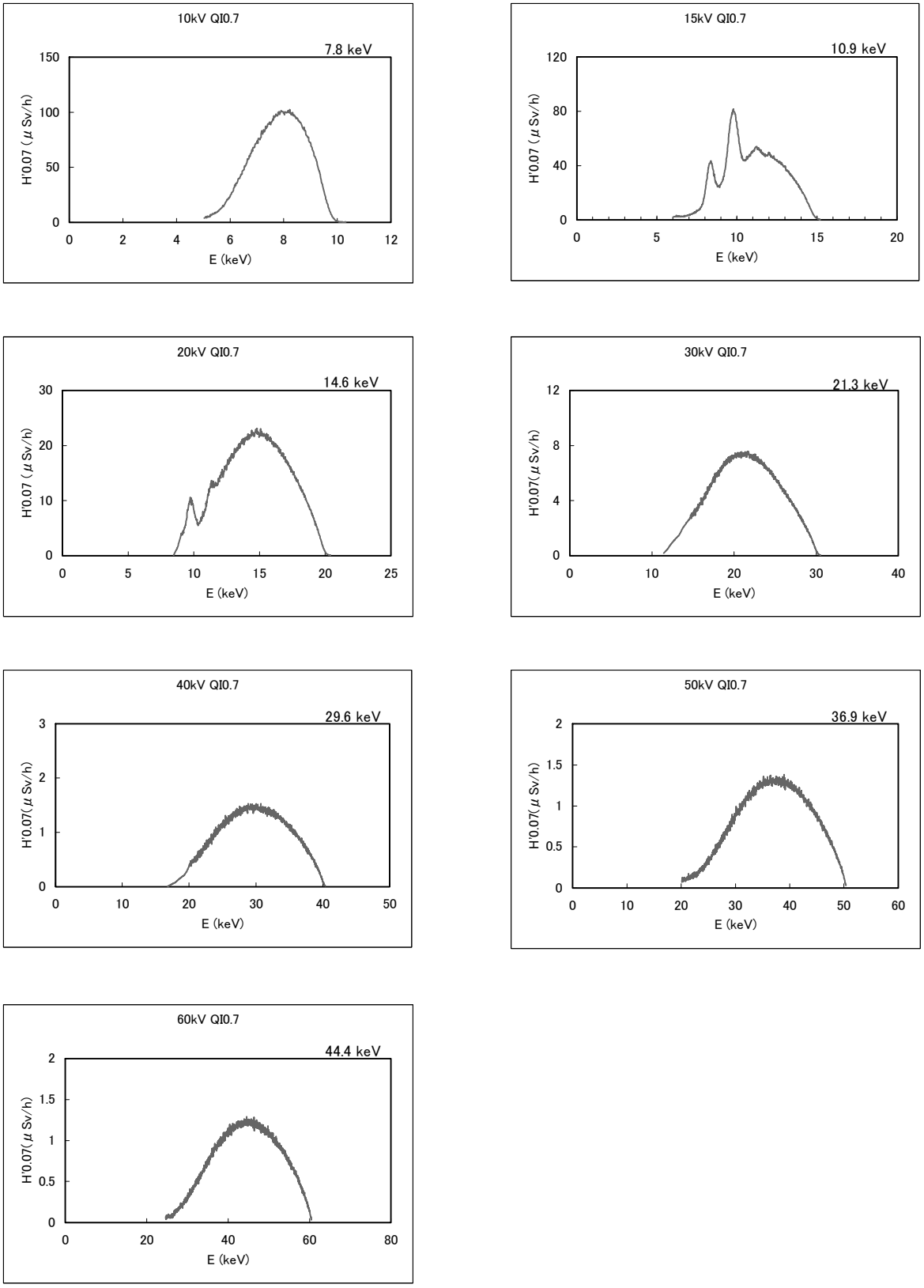


Fig.4－21 Directional dose equivalent spectra of QI 0.7 series (H'(0.07))

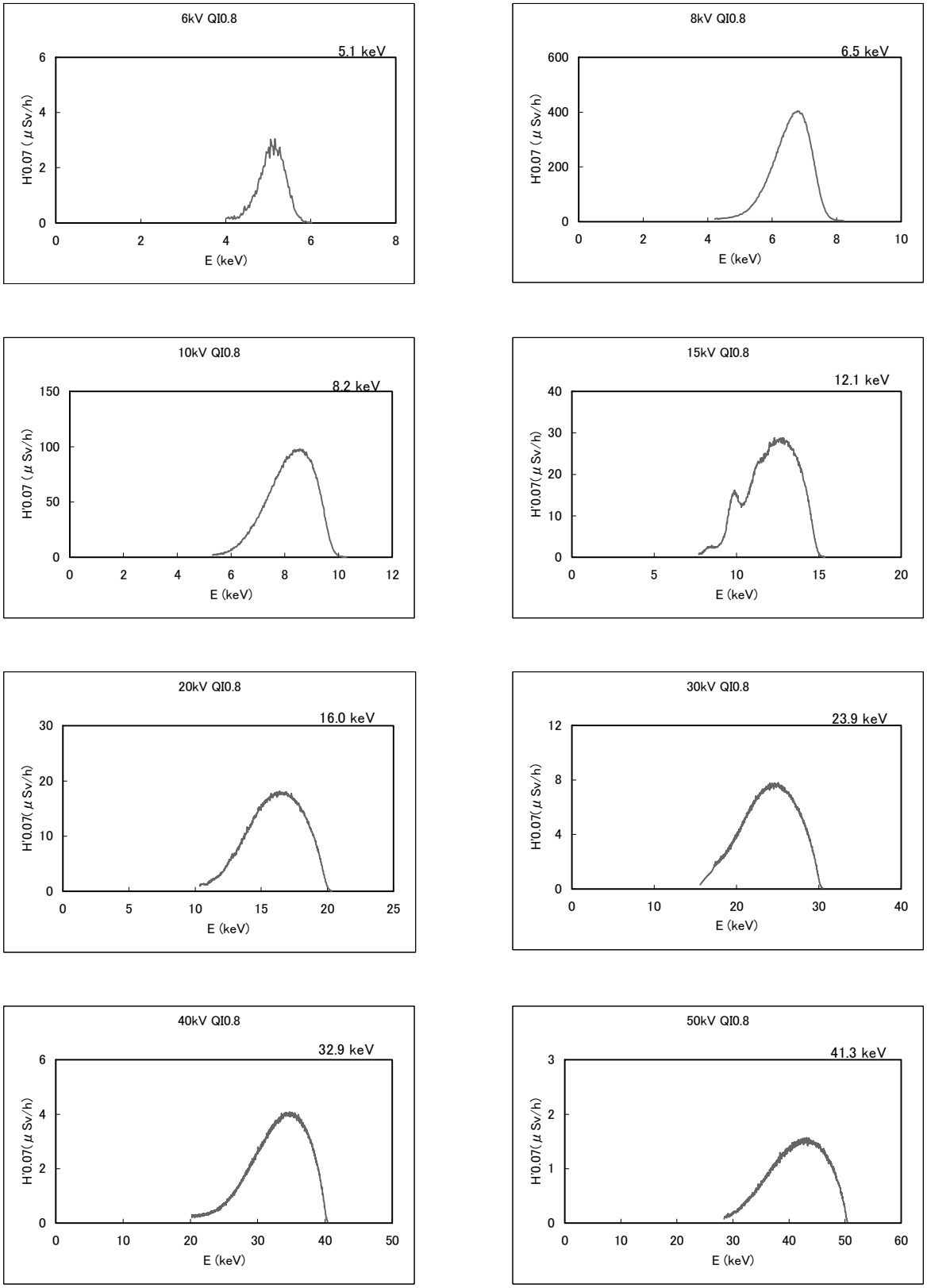


Fig.4－22 Directional dose equivalent spectra of QI 0.8 series (H'(0.07))

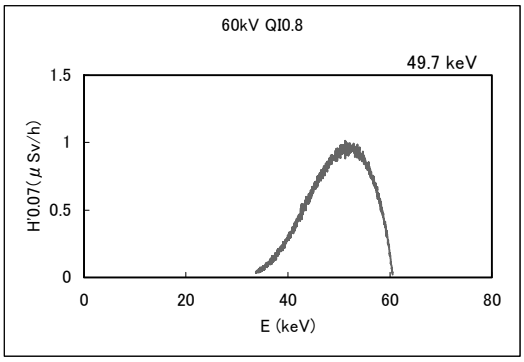


Fig.4－22 Countinued

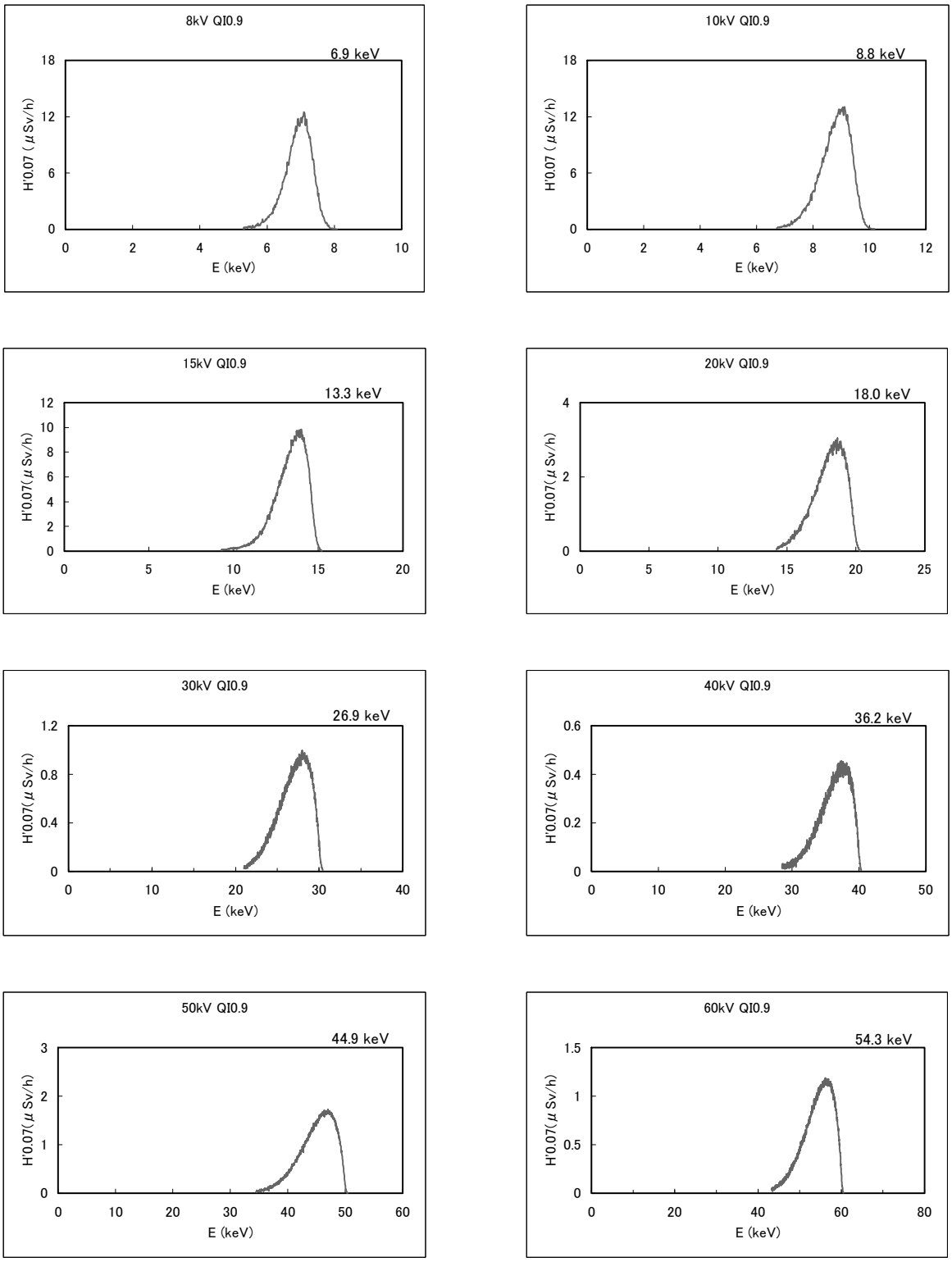


Fig.4－23 Directional dose equivalent spectra of QI 0.9 series (H'(0.07))

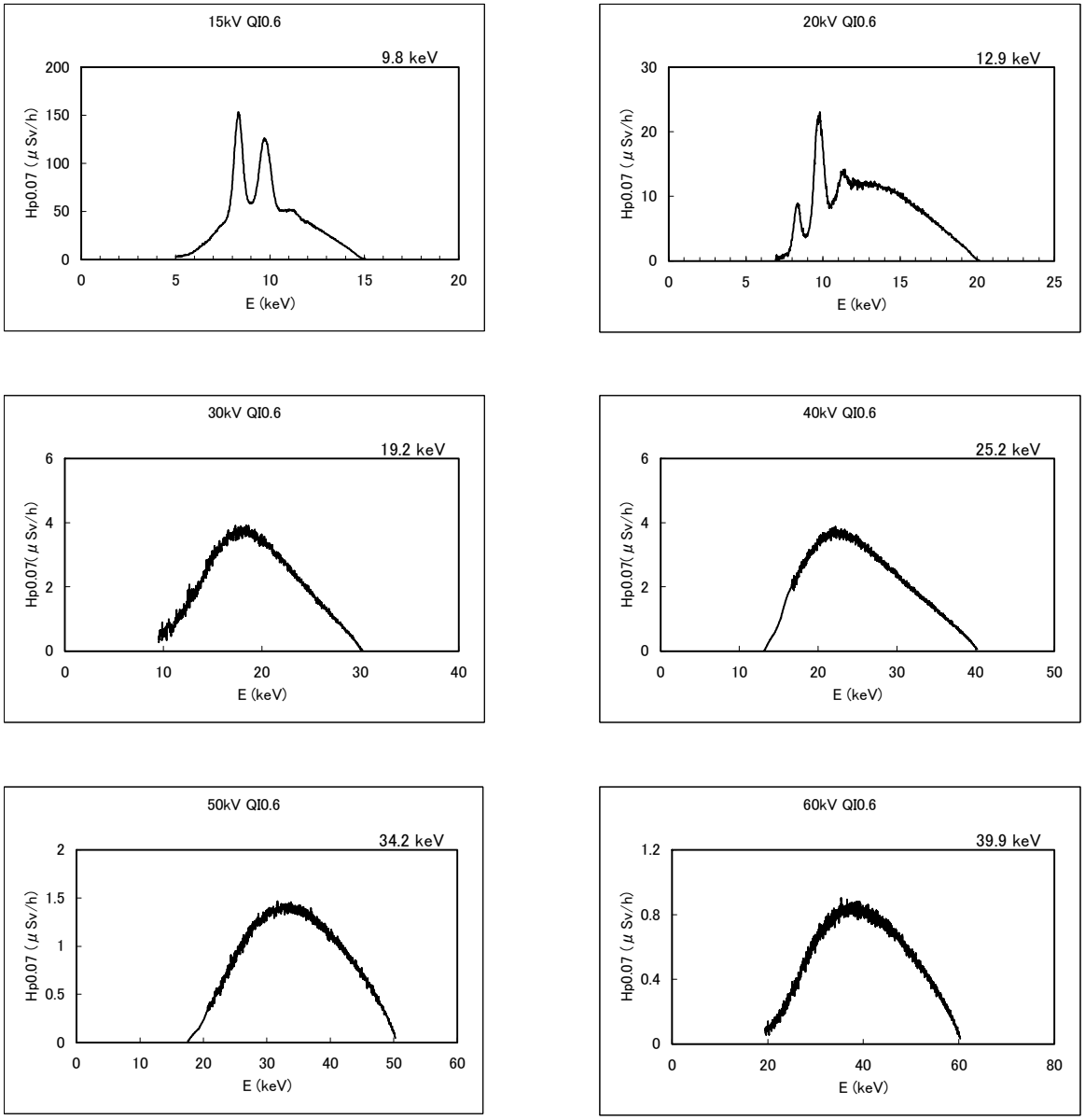


Fig.4－24 Personal dose equivalent spectra of QI 0.6 series ($H_p(0.07)$)

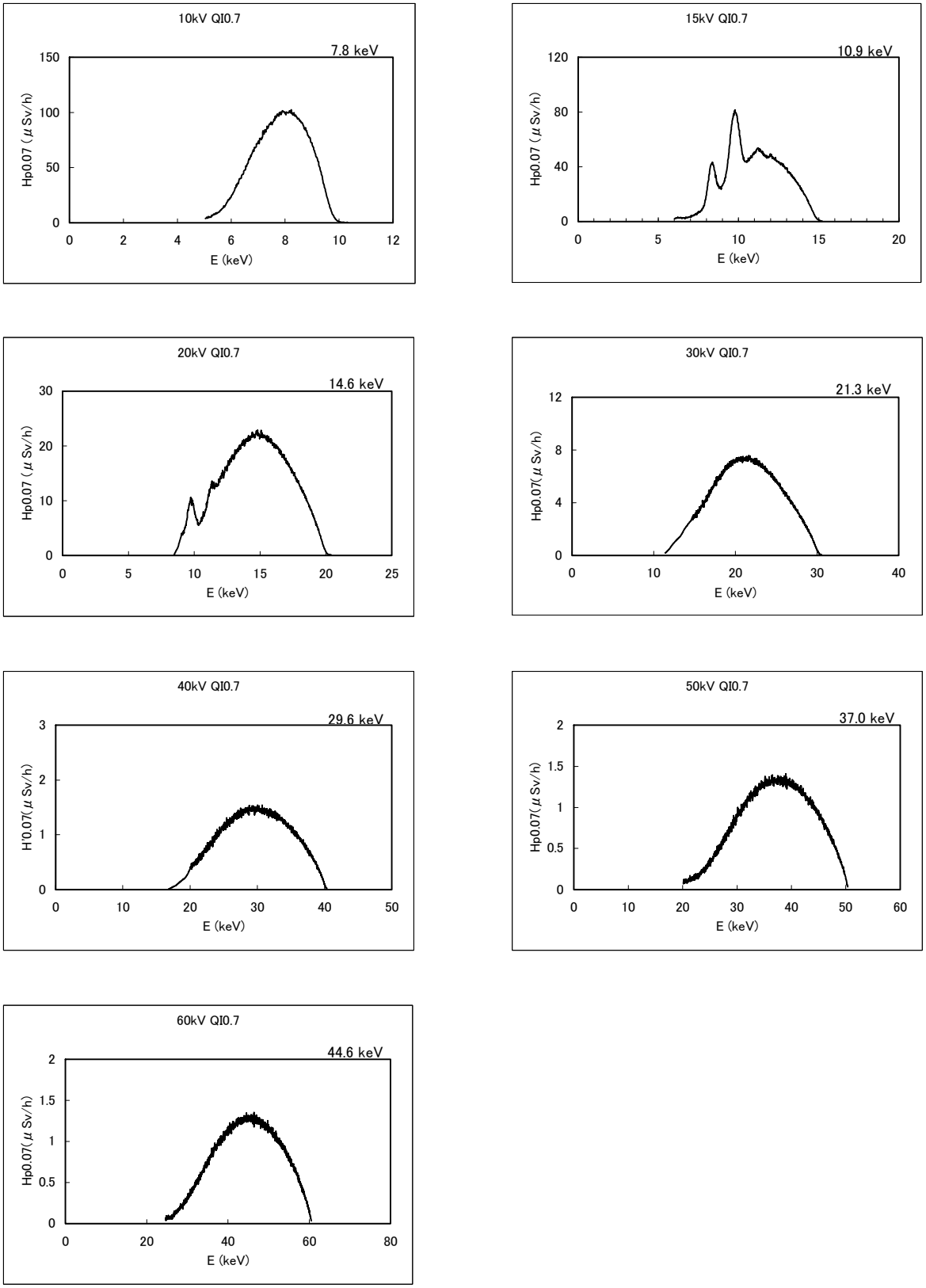


Fig.4－25 Personal dose equivalent spectra of QI 0.7 series ($H_p(0.07)$)

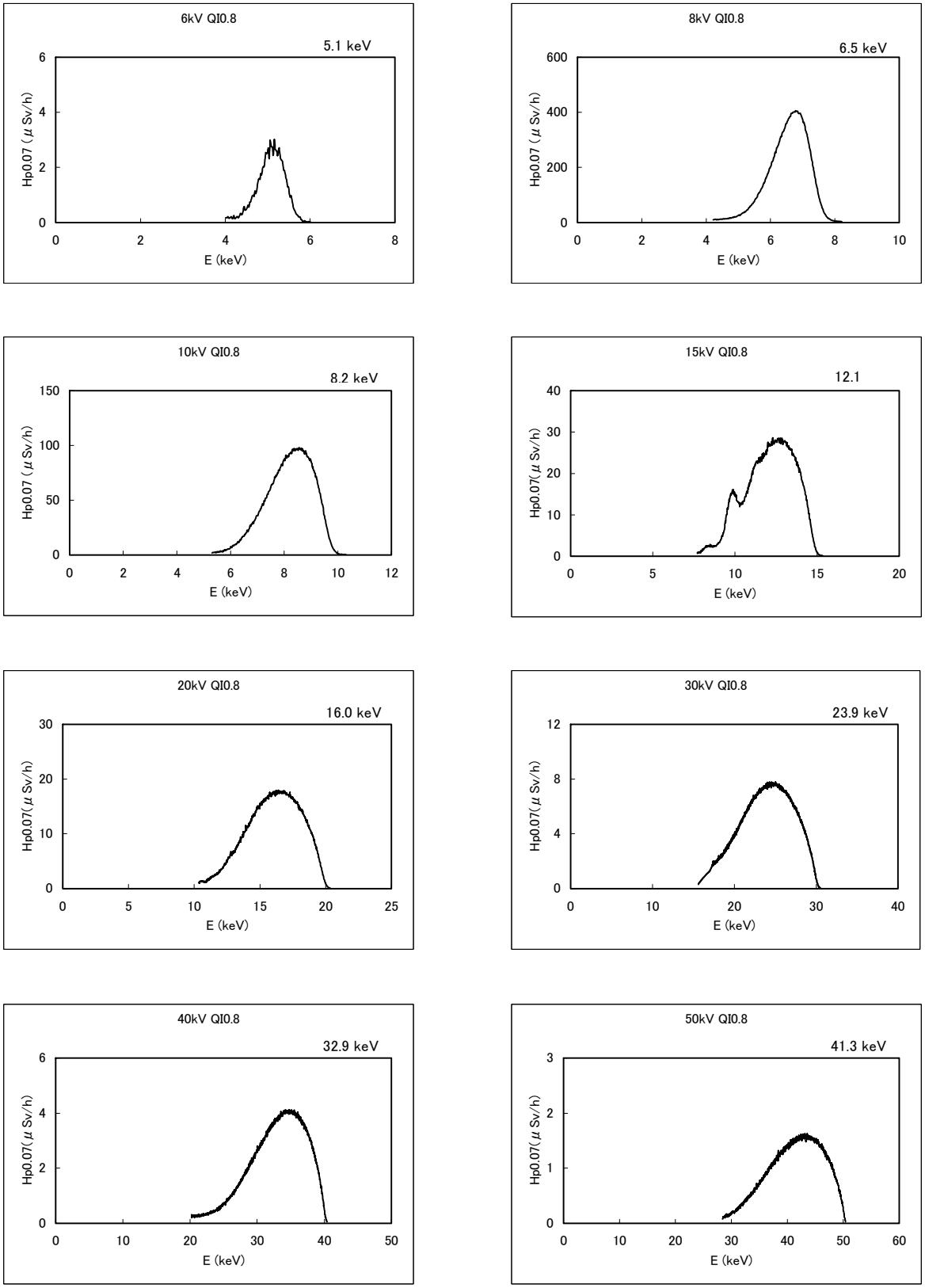


Fig.4－26 Personal dose equivalent spectra of QI 0.8 series ($H_p(0.07)$)

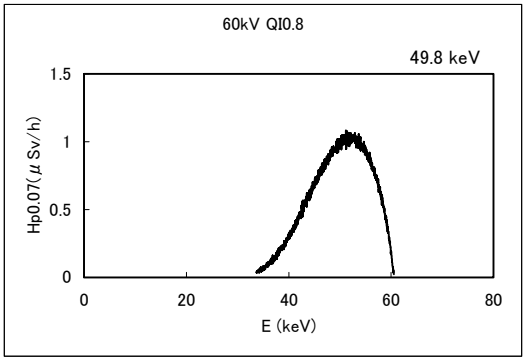


Fig.4－26 Countinued

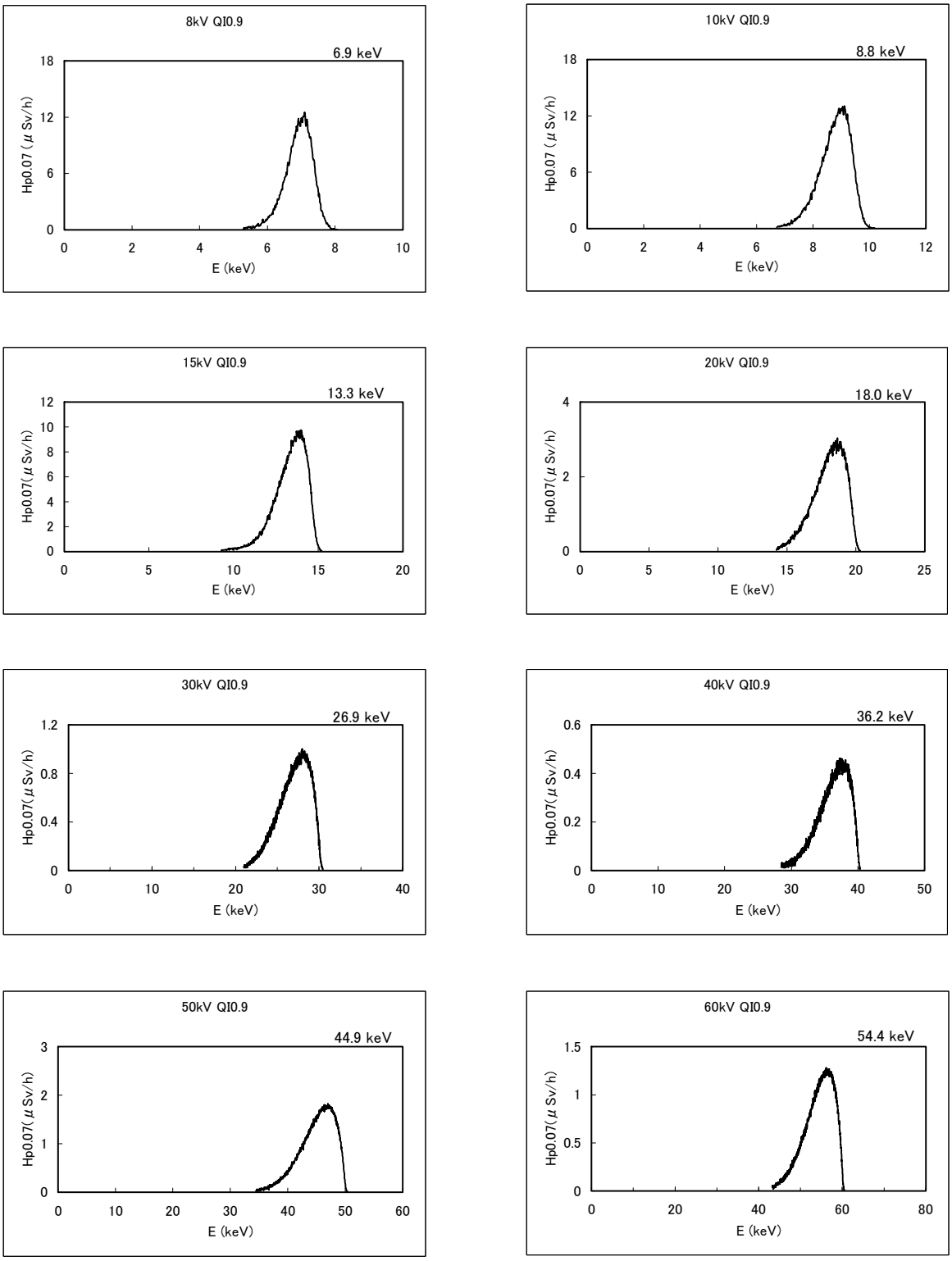


Fig.4－27 Personal dose equivalent spectra of QI 0.9 series ($H_p(0.07)$)

Table 4－1 Relationship between effective energy and mean energy for QI 0.6 series

Tube Voltage (kV)	Effective energy (E_{eff}) and mean energy (keV)							Ratio of E_{eff} to mean energy					
	E_{eff}	E_F	E_K	$E_{H(10)}$	$E_{H(0.07)}$	$E_{p(10)}$	$E_{p(0.07)}$	E_{eff}/E_F	E_{eff}/E_K	$E_{eff}/E_{H(10)}$	$E_{eff}/E_{H(0.07)}$	$E_{eff}/E_{p(10)}$	$E_{eff}/E_{p(0.07)}$
15	9.0	10.5	9.7	－	9.8	－	9.8	0.86	0.93		0.92		0.92
20	12.1	14.2	12.8	－	12.9	－	12.9	0.85	0.95		0.94		0.94
30	18.0	21.0	18.9	21.1	19.2	21.1	19.2	0.86	0.95	0.85	0.94	0.85	0.94
40	23.9	27.3	24.6	26.6	25.1	26.6	25.2	0.88	0.97	0.90	0.95	0.90	0.95
50	31.1	36.1	33.4	35.0	34.1	35.1	34.2	0.86	0.93	0.89	0.91	0.89	0.91
60	36.2	41.9	38.7	40.5	39.6	40.7	39.9	0.86	0.94	0.89	0.91	0.89	0.91
70	41.6	47.9	44.7	46.4	－	46.7	－	0.87	0.93	0.90		0.89	
80	49.0	54.5	52.0	53.2	－	53.6	－	0.90	0.94	0.92		0.91	
100	60.8	64.8	64.2	64.6	－	64.9	－	0.94	0.95	0.94		0.94	

Table 4－2 Relationship between effective energy and mean energy for QI 0.7 series

Tube Voltage (kV)	Effective energy (E_{eff}) and mean energy (keV)							Ratio of E_{eff} to mean energy					
	E_{eff}	E_F	E_K	$E_{H(10)}$	$E_{H(0.07)}$	$E_{p(10)}$	$E_{p(0.07)}$	E_{eff}/E_F	E_{eff}/E_K	$E_{eff}/E_{H(10)}$	$E_{eff}/E_{H(0.07)}$	$E_{eff}/E_{p(10)}$	$E_{eff}/E_{p(0.07)}$
10	7.4	8.0	7.8	－	7.8	－	7.8	0.93	0.95		0.95		0.95
15	10.5	11.5	10.9	－	10.9	－	10.9	0.91	0.96		0.96		0.96
20	13.9	15.4	14.5	－	14.6	－	14.6	0.90	0.96		0.95		0.95
30	20.9	22.6	21.0	22.5	21.3	22.5	21.3	0.92	1.00	0.93	0.98	0.93	0.98
40	27.6	30.8	29.2	30.2	29.6	30.3	29.6	0.90	0.95	0.91	0.93	0.91	0.93
50	34.9	38.3	36.3	37.4	36.9	37.5	37.0	0.91	0.96	0.93	0.95	0.93	0.94
60	41.8	45.6	43.8	44.7	44.4	44.9	44.6	0.92	0.95	0.94	0.94	0.93	0.94
70	49.2	53.0	51.6	52.3	－	52.5	－	0.93	0.95	0.94		0.94	
80	56.4	59.4	58.5	58.9	－	59.1	－	0.95	0.96	0.96		0.95	
100	70.5	71.4	71.9	71.8	－	71.9	－	0.99	0.98	0.98		0.98	

Table 4－3 Relationship between effective energy and mean energy for QI 0.8 series

Tube Voltage (kV)	Effective energy (E_{eff}) and mean energy (keV)							Ratio of E_{eff} to mean energy					
	E_{eff}	E_F	E_K	$E_{H(10)}$	$E_{H(0.07)}$	$E_{p(10)}$	$E_{p(0.07)}$	E_{eff}/E_F	E_{eff}/E_K	$E_{eff}/E_{H(10)}$	$E_{eff}/E_{H(0.07)}$	$E_{eff}/E_{p(10)}$	$E_{eff}/E_{p(0.07)}$
6	5.0	5.1	5.0	－	5.1	－	5.1	0.98	1.00		0.98		0.98
8	6.4	6.6	6.5	－	6.5	－	6.5	0.97	0.98		0.98		0.98
10	7.9	8.3	8.2	－	8.2	－	8.2	0.95	0.96		0.96		0.96
15	11.9	12.4	12.1	－	12.1	－	12.1	0.96	0.98		0.98		0.98
20	15.7	16.5	16.0	16.7	16.0	16.8	16.0	0.95	0.98	0.94	0.98	0.93	0.98
30	23.8	24.6	23.7	24.4	23.9	24.4	23.9	0.97	1.00	0.98	1.00	0.98	1.00
40	32.3	33.6	32.7	33.3	32.9	33.3	32.9	0.96	0.99	0.97	0.98	0.97	0.98
50	39.4	41.9	41.0	41.5	41.3	41.5	41.3	0.94	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95
60	48.6	50.2	49.5	49.8	49.7	49.9	49.8	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97	0.98
70	56.4	57.5	57.0	57.2	－	57.3	－	0.98	0.99	0.99		0.98	
80	64.3	64.9	64.7	64.8	－	64.9	－	0.99	0.99	0.99		0.99	
100	80.0	79.1	79.9	79.7	－	79.7	－	1.01	1.00	1.00		1.00	

Table 4－4 Relationship between effective energy and mean energy for QI 0.9 series

Tube Voltage (kV)	Effective energy (E_{eff}) and mean energy (keV)							Ratio of E_{eff} to mean energy					
	E_{eff}	E_F	E_K	$E_{H(10)}$	$E_{H(0.07)}$	$E_{p(10)}$	$E_{p(0.07)}$	E_{eff}/E_F	E_{eff}/E_K	$E_{eff}/E_{H(10)}$	$E_{eff}/E_{H(0.07)}$	$E_{eff}/E_{p(10)}$	$E_{eff}/E_{p(0.07)}$
8	7.2	7.0	6.9	－	6.9	－	6.9	1.03	1.04		1.04		1.04
10	8.9	8.8	8.8	－	8.8	－	8.8	1.01	1.01		1.01		1.01
15	13.4	13.5	13.3	13.6	13.3	13.7	13.3	0.99	1.01	0.99	1.01	0.98	1.01
20	17.9	18.2	18.0	18.2	18.0	18.2	18.0	0.98	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99
30	26.5	27.1	26.9	27.0	26.9	27.1	26.9	0.98	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99
40	35.9	36.4	36.1	36.3	36.2	36.3	36.2	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
50	45.1	45.2	44.8	44.9	44.9	45.0	44.9	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00
60	53.8	54.5	54.3	54.3	54.3	54.4	54.3	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
70	63.3	63.4	63.3	63.4	－	63.4	－	1.00	1.00	1.00		1.00	
80	72.3	72.5	72.5	72.5	－	72.5	－	1.00	1.00	1.00		1.00	
100	90.5	90.0	90.3	90.2	－	90.2	－	1.01	1.00	1.00		1.00	

５．線質に対する線量当量換算係数の評価

５．１ 評価方法

Ｘ線標準場を放射線防護用測定器の性能試験に用いる場合の基準線量率は、測定のための実用量である周辺線量当量率や個人線量当量率が一般的に使用される。このため、放射線測定器に照射する標準場の基準線量当量率は、まず、標準場の照射線量率を測定して空気カーマ率に変換し、この値に実効エネルギーに対応した空気カーマから各線量当量への換算係数(H*(10)／Ka、H'(0.07)／Ka、Hp(10)／Ka、H_p(0.07)／Ka など)を乗じて算出することが JIS Z 4511 で述べられている。これは、Ｘ線標準場のＸ線エネルギースペクトルは広がりをもっているが、基礎フィルタによるろ過効果が進み実効エネルギー付近のスペクトル強度が高いことから、実効エネルギーに対応する換算係数がスペクトルの荷重平均の換算係数とほぼ等価であるとしている。また、文献 8)では、実効エネルギーの換算係数と各線量当量スペクトルと空気カーマスペクトルの積分比から求められる換算係数が±2%で一致したこと、スペクトルの積分比から求めた換算係数が文献 9)(ISO 4037-3)で同様に示される換算係数と良く一致したことが報告されている。このため、文献 8)と同様の方法を用いて、今回設定したＸ線標準場の各線量当量スペクトルと空気カーマスペクトルの積分比から求められる換算係数と、線量当量スペクトルの平均エネルギーに対する換算係数及び実効エネルギーに対する換算係数とを、それぞれ比較して、その違いを検討した。

線量当量換算係数の評価は、各線量当量スペクトル(H*(10)、H'(0.07)、Hp(10)、H_p(0.07))と空気カーマスペクトルの積分値の比から、線量当量換算係数($f_{H(10)Total}$：Sv/Gy 等)を求め、線量当量平均エネルギーに対する換算係数(f_{EH}：Sv/Gy 等)及び実効エネルギーに対する換算係数(f_{eff}：Sv/Gy)との比較を行い、その違いを考察すると共に、使用する換算係数を決定した。

各シリーズの H*(10)／Ka 及び Hp(10)／Ka の換算係数の評価は、当該換算係数が 10keV 以上であるため、各シリーズのスペクトルで 10keV 未満に分布している線質は評価の対象から外した。また、H'(0.07)／Ka 及び H_p(0.07)／Ka の換算係数の評価は、4.1 章で述べた理由から、各シリーズのスペクトルで 60kV 以下の線質を評価の対象とした。

５．２ 結果及び考察

周辺線量当量換算係数(H*(10)/Ka)及び個人線量当量換算係数(Hp(10)/Ka)の比較結果を Table5－1～Table5－8 に、方向性線量当量換算係数(H'(0.07)/Ka)及び個人線量当量換算係数(H_p(0.07)/Ka)の比較結果を Table 5－9～Table 5－16 に示す。また、各シリーズ毎に利用する換算係数をまとめた表を Table 5－17～Table 5－20 に示す。以下に比較結果及び考察を示す。

(1) 周辺線量当量換算係数 H*(10)／Ka についてのスペクトル同士から求めた換算係数と平均エネルギーに対する換算係数の比較では、Table5－1～Table5－4 に示すように QI0.9 シリーズの 30kV 以上の線質、QI0.8 シリーズの 50kV 以上の線質及び QI0.7 シリーズの 80kV 以上の線質において±2%と両者はよく一致した。しかし、上記以外の線質で低い管電圧になるにつれて、両者の換算係数には±3%～±30%と大きな違いが生じた。一方、実効エネルギーに対する換算係数との比較では、Fig.5－1 に示すように、QI0.9 シリーズの全線質、QI0.8 シリーズの 30kV 以上の線質、QI0.7 シリーズの 40kV の線質以外及び QI0.6 シリーズの 40kV,60kV,70kV の線質にお

いて±2%と両者はよく一致し、他の線質は+3%～−10%の範囲となった。実効エネルギーに対する換算係数は、多くの線質でスペクトルから求めた換算係数と良く一致していたが、一部の線質でずれが大きいことが判明した。従って、標準場の周辺線量当量を空気カーマから求める場合は、原則として国内規格の JIS Z 4511 に準じた実効エネルギーの換算係数を利用する。ただし、40kV 以下の低エネルギー線質では Fig.4－3 のように換算係数が急激に低下するため、この領域の線質に対して、スペクトル同士の換算係数と実効エネルギーの換算係数に大きな違いを確認したことから、この領域では ISO 4037-3 に準じてスペクトル同士の比較から算出した換算係数 $f_{H(10)Total}$(Sv/Gy)を用いることにする。

(2) 個人線量当量換算係数 Hp(10)／Ka は、Table5－5～Table5－8 及び Fig.5－2 に示すように平均エネルギーに対する換算係数との比較及び実効エネルギーに対する換算係数との比較で、(1)とほぼ同様の結果となった。従って、標準場の個人線量当量 Hp(10)を空気カーマから求める場合は、(1)と同様の判断により求めた各線質の換算係数を用いることにする。

(3) 方向性線量当量 H'(0.07)及び個人線量当量 H_p(0.07)の換算係数は、Table5－9～Table5－16 に示すようにスペクトル同士から求めた換算係数とスペクトル平均エネルギーに対する換算係数の比較では、ほとんどの線質で±2%で一致した。同様に、実効エネルギーの換算係数との比較でも、Fig.5－3～Fig.5－4 に示すように、ほとんどの線質で±2%で一致した。このため、標準場の基準線量当量を空気カーマから求める場合は、国内規格に準じた実効エネルギーの換算係数を用いることにする。

以上の結果から、空気カーマから各線量当量へ変換する換算係数は、H*(10)及び Hp(10)の 40kV 以下の低エネルギー線質を除いて、スペクトルの比から算出した値と実効エネルギーの換算係数が文献 8)と同様に良く一致した。このことから、原則として 50kV 以上の線質では、国内規格に準じた実効エネルギーの換算係数を用いることにした。ただし、H*(10)及び Hp(10)の 40kV 以下の低エネルギー線質の換算係数は、文献 9)の国際規格の手法であるスペクトル同士の比から算出した換算係数を用いることにした。今後は、これらを反映した Table 5－17～Table 5－20 の各種換算係数を利用することとする。

Table 5－1 Comparison of conversion coefficients from air kerma to ambient dose equivalent for QI 0.6 series（f: $H^*(10)$ / Ka）

Voltage (kV)	$E_{H(10)}$ (keV)	$f_{H(10)Total}$ (Sv/Gy)	f_{EH} (Sv/Gy)	$\frac{f_{EH}}{f_{H(10)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(10)Total}}$
30	21.1	0.521	0.677	1.30	18.0	0.468	0.90
40	26.6	0.828	0.954	1.15	23.9	0.827	1.00
50	35.0	1.210	1.304	1.08	31.1	1.148	0.95
60	40.5	1.366	1.484	1.09	36.2	1.348	0.99
70	46.4	1.496	1.615	1.08	41.6	1.512	1.01
80	53.2	1.604	1.702	1.06	49.0	1.656	1.03
100	64.6	1.694	1.747	1.03	60.8	1.742	1.03

$f_{H(10)Total}$: $H^*_{(10)}$ spectrum / Kerma spectrum

f_{EH} : Conversion coefficient for energy $E_{H(10)}$

f_{eff} : Conversion coefficient for energy E_{eff}

Table 5－2 Comparison of conversion coefficients from air kerma to ambient dose equivalent for QI 0.7 series（f: $H^*(10)$ / Ka）

Voltage (kV)	$E_{H(10)}$ (keV)	$f_{H(10)Total}$ (Sv/Gy)	f_{EH} (Sv/Gy)	$\frac{f_{EH}}{f_{H(10)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(10)Total}}$
30	22.5	0.648	0.755	1.17	20.9	0.664	1.02
40	30.2	1.052	1.106	1.05	27.6	0.998	0.95
50	37.4	1.319	1.389	1.05	34.9	1.300	0.99
60	44.7	1.517	1.583	1.04	41.8	1.517	1.00
70	52.3	1.640	1.694	1.03	49.2	1.660	1.01
80	58.9	1.694	1.736	1.02	56.4	1.725	1.02
100	71.8	1.722	1.741	1.01	70.5	1.744	1.01

Table 5－3 Comparison of conversion coefficients from air kerma to ambient dose equivalent for QI 0.8 series（f: $H^*(10)$ / Ka）

Voltage (kV)	$E_{H(10)}$ (keV)	$f_{H(10)Total}$ (Sv/Gy)	f_{EH} (Sv/Gy)	$\frac{f_{EH}}{f_{H(10)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(10)Total}}$
20	16.7	0.334	0.375	1.12	15.7	0.306	0.92
30	24.4	0.804	0.852	1.06	23.8	0.822	1.02
40	33.3	1.203	1.238	1.03	32.3	1.197	1.00
50	41.5	1.476	1.509	1.02	39.4	1.453	0.98
60	49.8	1.640	1.667	1.02	48.6	1.651	1.01
70	57.2	1.706	1.729	1.01	56.4	1.725	1.01
80	64.8	1.733	1.747	1.01	64.3	1.747	1.01
100	79.7	1.714	1.721	1.00	80.0	1.720	1.00

Table 5－4 Comparison of conversion coefficients from air kerma to ambient dose equivalent for QI 0.9 series（f: $H^*(10)$ / Ka）

Voltage (kV)	$E_{H(10)}$ (keV)	$f_{H(10)Total}$ (Sv/Gy)	f_{EH} (Sv/Gy)	$\frac{f_{EH}}{f_{H(10)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(10)Total}}$
15	13.6	0.173	0.185	1.07	13.4	0.176	1.02
20	18.2	0.468	0.483	1.03	17.9	0.461	0.99
30	27.0	0.963	0.972	1.01	26.5	0.949	0.99
40	36.3	1.340	1.351	1.01	35.9	1.336	1.00
50	44.9	1.575	1.587	1.01	45.1	1.591	1.01
60	54.3	1.705	1.711	1.00	53.8	1.707	1.00
70	63.4	1.742	1.746	1.00	63.3	1.746	1.00
80	72.5	1.737	1.740	1.00	72.3	1.740	1.00
100	90.2	1.685	1.686	1.00	90.5	1.685	1.00

Table 5－5 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for QI 0.6 series（f: $H_p(10)$ / Ka）

Voltage (kV)	$E_{Hp(10)}$ (keV)	$f_{Hp(10)Total}$ (Sv/Gy)	f_{EHp} (Sv/Gy)	$\frac{f_{EHp}}{f_{Hp(10)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{Hp(10)Total}}$
30	21.1	0.521	0.676	1.30	18.0	0.480	0.92
40	26.6	0.835	0.959	1.15	23.9	0.829	0.99
50	35.1	1.227	1.318	1.07	31.1	1.160	0.95
60	40.7	1.404	1.514	1.08	36.2	1.360	0.97
70	46.7	1.562	1.692	1.08	41.6	1.544	0.99
80	53.6	1.703	1.824	1.07	49.0	1.745	1.02
100	64.9	1.835	1.915	1.04	60.8	1.897	1.03

$f_{Hp(10)Total}$: $H_{p(10)}$ spectrum / Kerma spectrum

f_{EHp} : Conversion coefficient for energy $E_{Hp(10)}$

Table 5－6 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for QI 0.7 series（f: $H_p(10)$ / Ka）

Voltage (kV)	$E_{Hp(10)}$ (keV)	$f_{Hp(10)Total}$ (Sv/Gy)	f_{EHp} (Sv/Gy)	$\frac{f_{EHp}}{f_{Hp(10)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{Hp(10)Total}}$
30	22.5	0.651	0.755	1.16	20.9	0.665	1.02
40	30.3	1.060	1.122	1.06	27.6	1.005	0.95
50	37.5	1.341	1.405	1.05	34.9	1.311	0.98
60	44.9	1.574	1.644	1.04	41.8	1.550	0.98
70	52.5	1.740	1.808	1.04	49.2	1.750	1.01
80	59.1	1.825	1.885	1.03	56.4	1.860	1.02
100	71.9	1.887	1.921	1.02	70.5	1.921	1.02

Table 5－7 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for QI 0.8 series（f: $H_p(10)$ / Ka）

Voltage (kV)	$E_{Hp(10)}$ (keV)	$f_{Hp(10)Total}$ (Sv/Gy)	f_{EHp} (Sv/Gy)	$\frac{f_{EHp}}{f_{Hp(10)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{Hp(10)Total}}$
20	16.8	0.336	0.388	1.15	15.7	0.315	0.94
30	24.4	0.808	0.854	1.06	23.8	0.823	1.02
40	33.3	1.214	1.249	1.03	32.3	1.209	1.00
50	41.5	1.513	1.540	1.02	39.4	1.471	0.97
60	49.9	1.730	1.764	1.02	48.6	1.736	1.00
70	57.3	1.837	1.869	1.02	56.4	1.860	1.01
80	64.9	1.892	1.915	1.01	64.3	1.913	1.01
100	79.7	1.888	1.904	1.01	80.0	1.903	1.01

Table 5－8 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for QI 0.9 series（f: $H_p(10)$ / Ka）

Voltage (kV)	$E_{Hp(10)}$ (keV)	$f_{Hp(10)Total}$ (Sv/Gy)	f_{EHp} (Sv/Gy)	$\frac{f_{EHp}}{f_{Hp(10)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{Hp(10)Total}}$
15	13.7	0.153	0.167	1.09	13.4	0.154	1.01
20	18.2	0.478	0.494	1.03	17.9	0.473	0.99
30	27.1	0.970	0.983	1.01	26.5	0.955	0.98
40	36.3	1.353	1.363	1.01	35.9	1.348	1.00
50	45.0	1.632	1.646	1.01	45.1	1.649	1.01
60	54.4	1.826	1.836	1.01	53.8	1.828	1.00
70	63.4	1.902	1.910	1.00	63.3	1.909	1.00
80	72.5	1.916	1.920	1.00	72.3	1.920	1.00
100	90.2	1.858	1.860	1.00	90.5	1.858	1.00

Table 5－9 Comparison of conversion coefficients from air kerma to directional dose equivalent for QI 0.6 series（f: H'(0.07) / Ka）

Voltage (kV)	$E_{H(0.07)}$ (keV)	$f_{H(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	$f_{EH'}$ (Sv/Gy)	$\frac{f_{EH'}}{f_{H(0.07)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(0.07)Total}}$
15	9.8	0.940	0.948	1.01	9.0	0.938	1.00
20	12.9	0.973	0.973	1.00	12.1	0.967	0.99
30	19.2	1.043	1.039	1.00	18.0	1.023	0.98
40	25.1	1.131	1.134	1.00	23.9	1.112	0.98
50	34.1	1.285	1.307	1.02	31.1	1.243	0.97
60	39.6	1.365	1.404	1.03	36.2	1.344	0.98

$f_{H(0.07)Total}$: $H'_{(0.07)}$ spectrum / Kerma spectrum

$f_{EH'}$: Conversion coefficient for energy $E_{H(0.07)}$

Table 5－10 Comparison of conversion coefficients from air kerma to directional dose equivalent for QI 0.7 series（f: H'(0.07) / Ka）

Voltage (kV)	$E_{H(0.07)}$ (keV)	$f_{H(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	$f_{EH'}$ (Sv/Gy)	$\frac{f_{EH'}}{f_{H(0.07)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(0.07)Total}}$
10	7.8	0.907	0.915	1.01	7.4	0.903	1.00
15	10.9	0.955	0.958	1.00	10.5	0.955	1.00
20	14.6	0.986	0.985	1.00	13.9	0.981	0.99
30	21.3	1.071	1.069	1.00	20.9	1.063	0.99
40	29.6	1.209	1.211	1.00	27.6	1.176	0.97
50	36.9	1.336	1.358	1.02	34.9	1.320	0.99
60	44.4	1.443	1.471	1.02	41.8	1.437	1.00

Table 5－11 Comparison of conversion coefficients from air kerma to directional dose equivalent for QI 0.8 series（f: H'(0.07) / Ka）

Voltage (kV)	$E_{H(0.07)}$ (keV)	$f_{H(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	$f_{EH'}$ (Sv/Gy)	$\frac{f_{EH'}}{f_{H(0.07)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(0.07)Total}}$
6	5.1	0.759	0.770	1.01	5.0	0.760	1.00
8	6.5	0.863	0.868	1.01	6.4	0.862	1.00
10	8.2	0.919	0.924	1.01	7.9	0.917	1.00
15	12.1	0.966	0.967	1.00	11.9	0.966	1.00
20	16.0	1.002	1.000	1.00	15.7	0.997	1.00
30	23.9	1.111	1.112	1.00	23.8	1.110	1.00
40	32.9	1.275	1.280	1.00	32.3	1.268	0.99
50	41.3	1.416	1.429	1.01	39.4	1.401	0.99
60	49.7	1.515	1.527	1.01	48.6	1.517	1.00

Table 5－12 Comparison of conversion coefficients from air kerma to directional dose equivalent for QI 0.9 series（f: H'(0.07) / Ka）

Voltage (kV)	$E_{H(0.07)}$ (keV)	$f_{H(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	$f_{EH'}$ (Sv/Gy)	$\frac{f_{EH'}}{f_{H(0.07)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(0.07)Total}}$
8	6.9	0.884	0.885	1.00	7.2	0.897	1.01
10	8.8	0.933	0.935	1.00	8.9	0.937	1.00
15	13.3	0.976	0.976	1.00	13.4	0.977	1.00
20	18.0	1.024	1.023	1.00	17.9	1.022	1.00
30	26.9	1.164	1.164	1.00	26.5	1.156	0.99
40	36.2	1.341	1.345	1.00	35.9	1.339	1.00
50	44.9	1.472	1.477	1.00	45.1	1.480	1.01
60	54.3	1.558	1.561	1.00	53.8	1.558	1.00

Table 5－13 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for QI 0.6 series（f: $H_p(0.07)$ / Ka）

Voltage (kV)	$E_{Hp(0.07)}$ (keV)	$f_{Hp(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	f_{EHp} (Sv/Gy)	$\frac{f_{EHp}}{f_{Hp(0.07)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{Hp(0.07)Total}}$
15	9.8	0.937	0.945	1.01	9.0	0.937	1.00
20	12.9	0.967	0.965	1.00	12.1	0.960	0.99
30	19.2	1.038	1.033	1.00	18.0	1.016	0.98
40	25.2	1.133	1.135	1.00	23.9	1.111	0.98
50	34.2	1.307	1.322	1.01	31.1	1.254	0.96
60	39.9	1.408	1.442	1.02	36.2	1.365	0.97

$f_{Hp(0.07)Total}$: $H_{p(0.07)}$ spectrum / Kerma spectrum

f_{EHp} : Conversion coefficient for energy $E_{Hp(0.07)}$

Table 5－14 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for QI 0.7 series（f: $H_p(0.07)$ / Ka）

Voltage (kV)	$E_{Hp(0.07)}$ (keV)	$f_{Hp(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	f_{EHp} (Sv/Gy)	$\frac{f_{EHp}}{f_{Hp(0.07)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{Hp(0.07)Total}}$
10	7.8	0.908	0.916	1.01	7.4	0.905	1.00
15	10.9	0.950	0.953	1.00	10.5	0.951	1.00
20	14.6	0.979	0.976	1.00	13.9	0.972	0.99
30	21.3	1.068	1.066	1.00	20.9	1.059	0.99
40	29.6	1.218	1.220	1.00	27.6	1.182	0.97
50	37.0	1.366	1.381	1.01	34.9	1.337	0.98
60	44.6	1.507	1.541	1.02	41.8	1.484	0.98

Table 5－15 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for QI 0.8 series（f: $H_p(0.07)$ / Ka）

Voltage (kV)	$E_{Hp(0.07)}$ (keV)	$f_{Hp(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	f_{EHp} (Sv/Gy)	$\frac{f_{EHp}}{f_{Hp(0.07)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{Hp(0.07)Total}}$
6	5.1	0.751	0.761	1.01	5.0	0.750	1.00
8	6.5	0.864	0.871	1.01	6.4	0.866	1.00
10	8.2	0.919	0.924	1.01	7.9	0.918	1.00
15	12.1	0.960	0.960	1.00	11.9	0.959	1.00
20	16.0	0.994	0.992	1.00	15.7	0.988	0.99
30	23.9	1.111	1.111	1.00	23.8	1.109	1.00
40	32.9	1.289	1.293	1.00	32.3	1.280	0.99
50	41.3	1.464	1.473	1.01	39.4	1.432	0.98
60	49.7	1.607	1.628	1.01	48.6	1.611	1.00

Table 5－16 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for QI 0.9 series（f: $H_p(0.07)$ / Ka）

Voltage (kV)	$E_{Hp(0.07)}$ (keV)	$f_{Hp(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	f_{EHp} (Sv/Gy)	$\frac{f_{EHp}}{f_{Hp(0.07)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{Hp(0.07)Total}}$
8	6.9	0.886	0.888	1.00	7.2	0.899	1.01
10	8.8	0.932	0.934	1.00	8.9	0.935	1.00
15	13.3	0.968	0.967	1.00	13.4	0.968	1.00
20	18.0	1.017	1.016	1.00	17.9	1.015	1.00
30	26.9	1.168	1.168	1.00	26.5	1.160	0.99
40	36.2	1.362	1.365	1.00	35.9	1.358	1.00
50	44.9	1.541	1.547	1.00	45.1	1.551	1.01
60	54.3	1.672	1.677	1.00	53.8	1.673	1.00

Table 5－17 Conversion coefficient of dose equivalent to air kerma for QI 0.6 series（Summary）

Voltage (kV)	Distance (m)	E_{eff} (keV)	$H^*(10)/Ka$ (Sv/Gy)	H'(0.07)/Ka (Sv/Gy)	Hp(10)/Ka (Sv/Gy)	Hp(0.07)/Ka (Sv/Gy)
15	1.00	9.0	－	0.938	－	0.937
20	1.00	12.1	－	0.967	－	0.960
30	1.00	18.0	0.521	1.023	0.521	1.016
40	2.00	23.9	0.828	1.112	0.835	1.111
50	2.00	31.1	1.148	1.243	1.160	1.254
60	2.00	36.2	1.348	1.344	1.360	1.365
70	2.00	41.6	1.512	－	1.544	－
80	2.00	49.0	1.656	－	1.745	－
100	2.00	60.8	1.742	－	1.897	－

Table 5－18 Conversion coefficient of dose equivalent to air kerma for QI 0.7 series（Summary）

Voltage (kV)	Distance (m)	E_{eff} (keV)	$H^*(10)/Ka$ (Sv/Gy)	H'(0.07)/Ka (Sv/Gy)	Hp(10)/Ka (Sv/Gy)	Hp(0.07)/Ka (Sv/Gy)
10	1.00	7.4	－	0.903	－	0.905
15	1.00	10.5	－	0.955	－	0.951
20	1.00	13.9	－	0.981	－	0.972
30	1.00	20.9	0.648	1.063	0.651	1.059
40	2.00	27.6	1.052	1.176	1.060	1.182
50	2.00	34.9	1.300	1.320	1.311	1.337
60	2.00	41.8	1.517	1.437	1.550	1.484
70	2.00	49.2	1.660	－	1.750	－
80	2.00	56.4	1.725	－	1.860	－
100	2.00	70.5	1.744	－	1.921	－

Table 5－19 Conversion coefficient of dose equivalent to air kerma for QI 0.8 series（Summary）

Voltage (kV)	Distance (m)	E_{eff} (keV)	$H^*(10)/Ka$ (Sv/Gy)	H'(0.07)/Ka (Sv/Gy)	Hp(10)/Ka (Sv/Gy)	Hp(0.07)/Ka (Sv/Gy)
6	1.00	5.0	－	0.760	－	0.750
8	1.00	6.4	－	0.862	－	0.866
10	1.00	7.9	－	0.917	－	0.918
15	1.00	11.9	－	0.966	－	0.959
20	1.00	15.7	0.334	0.997	0.336	0.988
30	1.00	23.8	0.804	1.110	0.808	1.109
40	2.00	32.3	1.203	1.268	1.214	1.280
50	2.00	39.4	1.453	1.401	1.471	1.432
60	2.00	48.6	1.651	1.517	1.736	1.611
70	2.00	56.4	1.725	－	1.860	－
80	2.00	64.3	1.747	－	1.913	－
100	2.00	80.0	1.720	－	1.903	－

Table 5－20 Conversion coefficient of dose equivalent to air kerma for QI 0.9 series（Summary）

Voltage (kV)	Distance (m)	E_{eff} (keV)	$H^*(10)/Ka$ (Sv/Gy)	H'(0.07)/Ka (Sv/Gy)	Hp(10)/Ka (Sv/Gy)	Hp(0.07)/Ka (Sv/Gy)
8	1.00	7.2	－	0.897	－	0.899
10	1.00	8.9	－	0.937	－	0.935
15	1.00	13.4	0.173	0.977	0.153	0.968
20	1.00	17.9	0.468	1.022	0.478	1.015
30	1.00	26.5	0.963	1.156	0.970	1.160
40	2.00	35.9	1.340	1.339	1.353	1.358
50	2.00	45.1	1.591	1.480	1.649	1.551
60	2.00	53.8	1.707	1.558	1.828	1.673
70	2.00	63.3	1.746	－	1.909	－
80	2.00	72.3	1.740	－	1.920	－
100	2.00	90.5	1.685	－	1.858	－

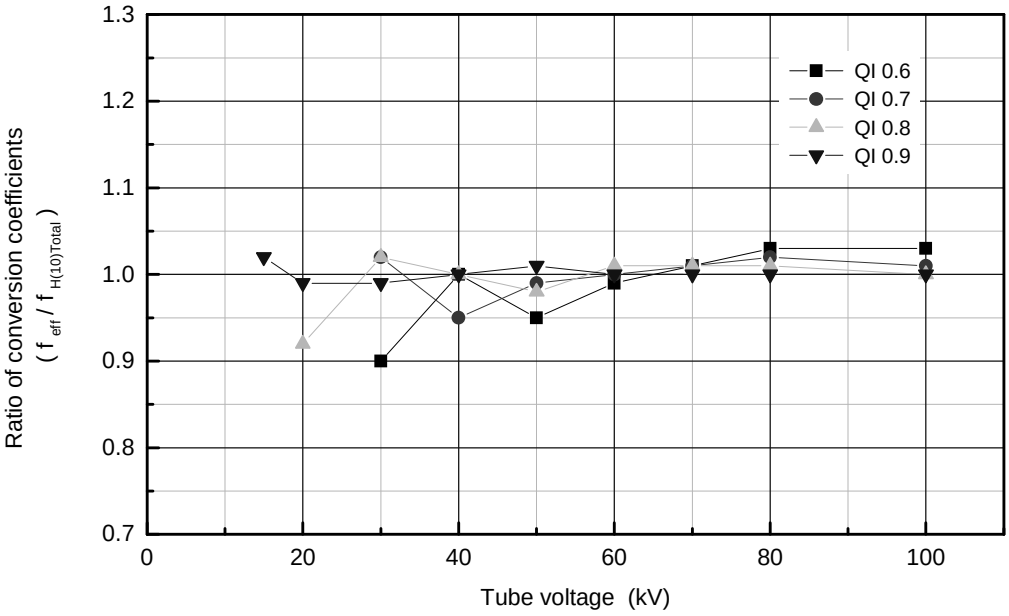


Fig.5－1 Comparison of the ratio of f_{eff} to $f_{H(10)Total}$ for $H^{*}(10)$ /Ka

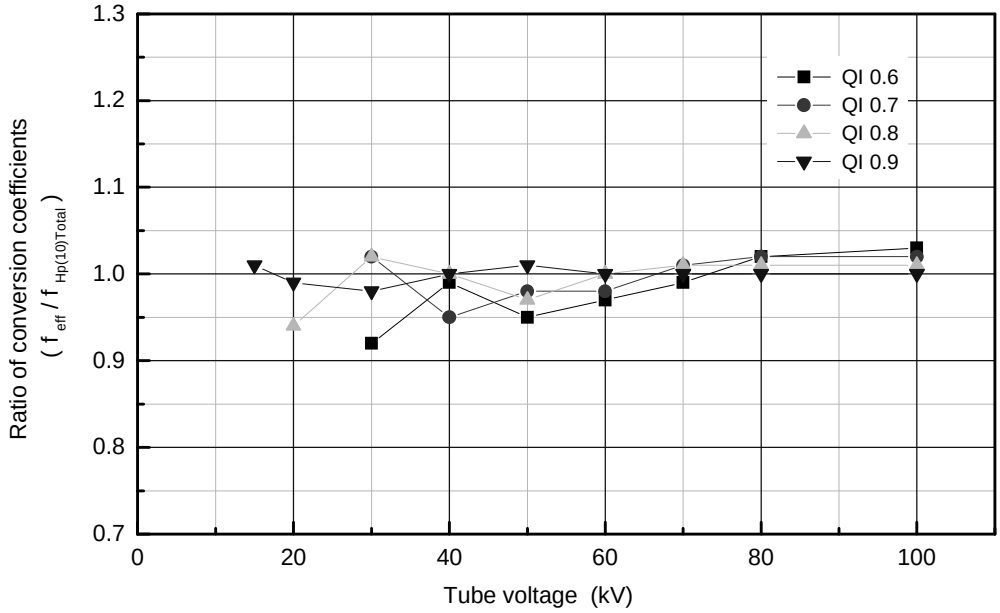


Fig.5－2 Comparison of the ratio of f_{eff} to $f_{Hp(10)Total}$ for $H_p(10)$ /Ka

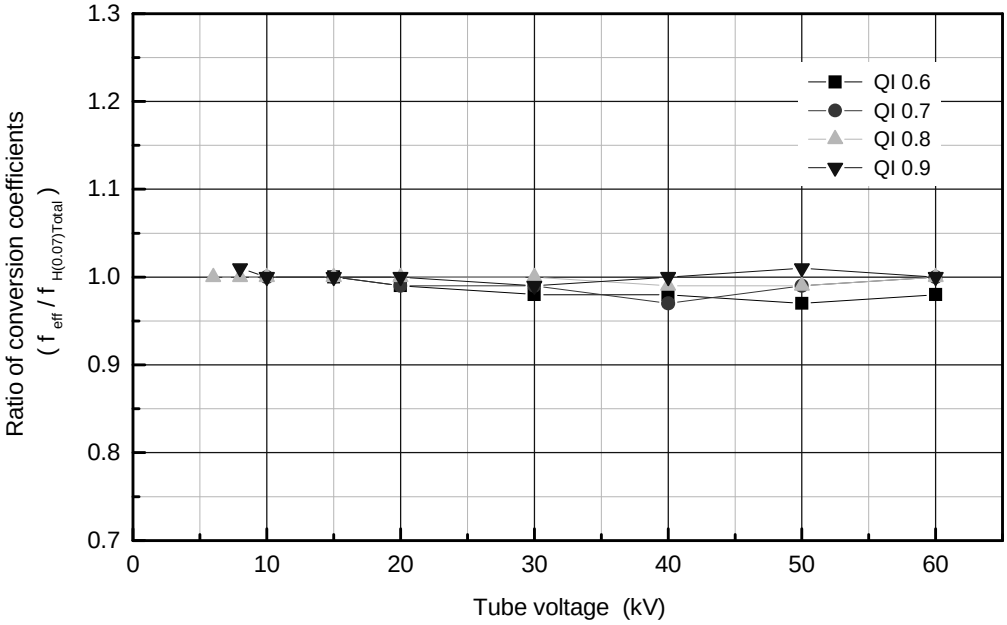


Fig.5－3 Comparison of the ratio of f_{eff} to $f_{H(0.07)Total}$ for H' (0.07) /Ka

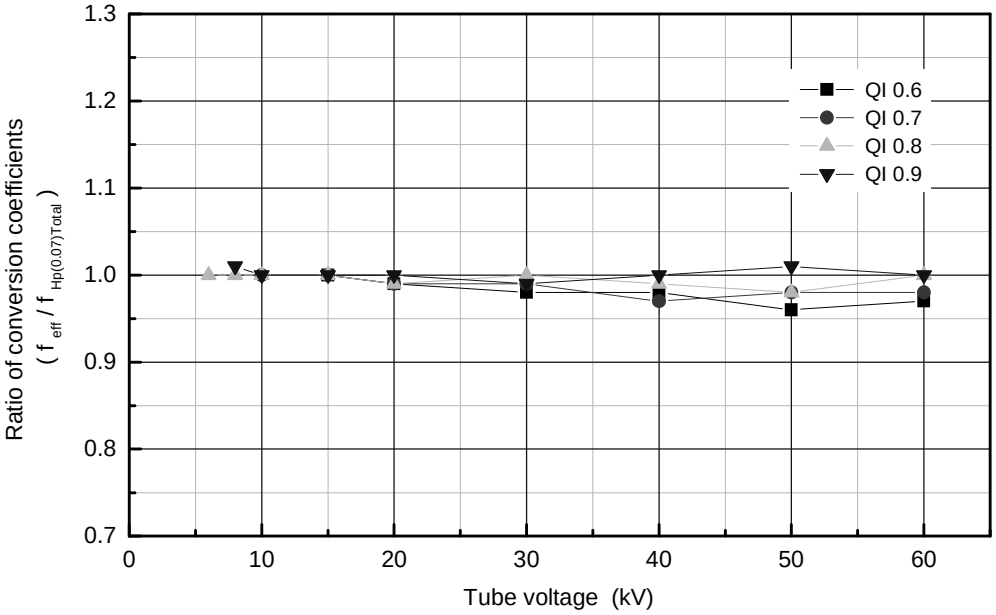


Fig.5－4 Comparison of the ratio of f_{eff} to $f_{Hp(0.07)Total}$ for H_p(0.07) /Ka

６．Ｘ線スペクトルの空気層による減弱の評価

６．１ 評価方法

本評価では、設定した線質のエネルギースペクトルが照射距離の違いにより、その空気層による減弱を受けて、平均エネルギーや空気カーマへの換算係数が大きく変化する領域を調査し、線質を設定した距離と異なる距離を用いる場合における影響を考察した。

空気層の減弱特性は、J.H.Hubbell による文献 7）の質量減弱係数(μ/ρ ：$cm^2 g^{-1}$)のデータを用いて、2keV～10keV と 10keV～150keV の光子エネルギー領域に対するフィッティング関数を(21)式、(22)式で作成(E：keV)し、(23)式により 1m、2m、3m での 20℃における空気の減弱割合を求めた。これらの結果を Fig.6－1 に示す。

評価に用いたＸ線質は、Fig.6－1 に示す空気層に対する減弱割合の特性から、エネルギースペクトルの領域が、空気層の影響を受けやすい 5keV～15keV の低エネルギー領域のスペクトル(15kV QI0.6)と空気層の影響が少なくなると予測される 10keV～30keV 領域のスペクトル(30kV QI0.6)及び 15keV～40keV 領域のスペクトル(40kV QI0.6)を選択した。試験では、基礎フィルタを標準場と同じにして、Ｘ線管焦点からの距離 1m のＸ線波高分布を Fig.4－1 に示す 1mmφコリメータ付のパルス波高分析装置で測定し、Ｘ線フルエンススペクトルを求めた。次に、(23)式の減弱割合から 2m、3m 距離のＸ線フルエンススペクトルを計算で求め、1m のスペクトルに対する減弱の度合いを、スペクトルの変化、平均エネルギーの変化、空気カーマへの換算係数の変化について評価することによって、空気層の影響を考察した。

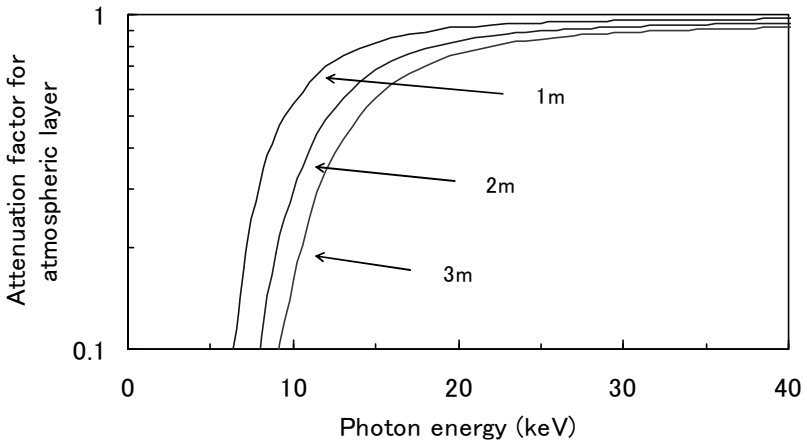


Fig.6－1 Attenuation factor by air as a function of photon energy

$$\mu/\rho\,(E) = 10^{(-12.1396(\log E)^5 + 47.3216(\log E)^4 - 70.4447(\log E)^3 + 49.5074(\log E)^2 - 19.0905(\log E) + 5.5483)} \quad \text{---------} \quad (21)$$

(2keV～10keV)

$$\mu/\rho\,(E) = 10^{(1.92008(\log E)^5 - 16.4869(\log E)^4 + 54.7221(\log E)^3 - 86.2307(\log E)^2 + 61.9074(\log E) - 15.1317)} \quad \text{---------} \quad (22)$$

(10keV～150keV)

$$I / I_0 = \exp(-\mu / \rho \cdot \rho_{air20℃} \cdot d) \quad (23)$$

ここで、 $\rho_{air20℃}$：20℃の空気密度

d：照射距離

６．２ 結果及び考察

QI 0.6 15kV、QI 0.6 30kV 及び QI 0.6 40kV の各距離における平均エネルギー、スペクトルから求めた換算係数の相対比較を Table6－1、Table6－2 に示す。また、距離を変化したときのフルエンススペクトルは、QI 0.6 15kV を Fig.6－2 に、QI 0.6 30kV を Fig.6－3 に、QI 0.6 40kV を Fig.6－4 に示し、以下に結果及び考察を示す。

(1) Fig.6－2 の QI0.6 15kV のフルエンススペクトルでは、全体的に大きな減弱が認められ、Table6－1 より、フルエンス平均エネルギーで距離 1m が 10.5keV に対して 2m が 11.1keV、3m が 11.4 keV と変化した。8.4keV 及び 9.9keV の特性X線ピークが大きく変化するため、空気カーマへの換算係数が 1m の値に対して 2m で 12%、3m で 19%小さな値となり、フルエンススペクトルから空気カーマスペクトルへ変換した際に空気カーマ基準量への影響が大きいことを確認した。但し、空気カーマスペクトルから H'(0.07)スペクトルへ変換した際は、Fig.4－3 の H'(0.07)/Ka の換算係数が平坦なため、線量当量基準量への影響は 2%以下であった。これは、H_p(0.07)スペクトルとの比較でも同様のことが言える。

(2) Fig.6－3 の QI0.6 30kV のフルエンススペクトルでは、距離により若干の減弱が認められ、Table6－1 より、フルエンス平均エネルギーで距離 1m が 21.0keV に対して 2m が 21.2keV、3m が 21.4keV と変化が少なかった。フルエンススペクトルから空気カーマスペクトルへ変換した際には、空気カーマへの換算係数が 1m に対して 2m で－3%、3m で－6%となり、2m を超えると空気カーマ基準量への影響が大きいことを確認した。フルエンススペクトルから H'(0.07)スペクトルへ変換した際も、同様の影響を確認した。

(3) Fig.6－4 の QI0.6 40kV のフルエンススペクトルでは、距離による減弱が少なく、Table6－2 より、フルエンス平均エネルギーで距離 1m が 27.2keV に対して 2m が 27.4keV、3m が 27.5keV と変化が少なかった。フルエンススペクトルから空気カーマスペクトルへ変換した際には、空気カーマへの換算係数が 1m に対して 2m で－2%、3m で－3%となり、空気カーマ基準量への影響が少ないことを確認した。また、空気カーマスペクトルから H*(10)スペクトルへ変換した際は、Fig. 4－3 の H*(10)/Ka の 15keV～40keV の換算係数の変化が大きいが、1m に対して 2m 及び 3m での線量当量基準量への影響は＋3%以下と少なく、フルエンススペクトルから H*(10)スペクトルへ変換した際は、空気カーマ及び線量当量への変換の影響量が打ち消し合い、影響がほとんどないことを確認した。これは、Hp(10)スペクトルとの比較でも同様のことが言える。

これらのことから、線量当量(H'(0.07)及び H_p(0.07))基準量に対しても、Fig. 4－3 の換算係数が平坦なため、照射距離 3m 以内では更に影響が少ないと言える。また、40kV 以上の線質では、Fig. 4－3 の換算係数が平坦であることから、照射距離 3m 以内では同様に影響が少ないと言える。

上記の結果から、30kV 以下の線質では、照射距離が 1m 変化すると空気カーマ(Ka)及び線量当量(H'(0.07)及び $H_p(0.07)$)の基準量に大きな影響を及ぼすので、Table 3－1～Table 3－4 の標準場の設定距離で利用する必要がある。一方、40kV 以上の線質では、照射距離が 1m～3m で空気カーマ(Ka)や H'(0.07)及び $H_p(0.07)$の線量当量の基準量、並びに H*(10)及び Hp(10)の線量当量の基準量にほとんど影響を及ぼさないため、3m 以内の任意の距離で利用できることが判明した。

Table 6－1 Comparison of mean energy and ratio of dose conversion coefficient at various distance for 15kV and 30kV QI 0.6 series

Quality	Distance	Mean energy (keV)			Relative ratio of conversion coefficient		
		E_F	E_K	$E_{H(0.07)}$	Ka/φ	H'(0.07)/Ka	H´(0.07)/φ
QI 0.6 15kV	1m	10.5	9.8	9.9	1.00	1.00	1.00
	2m	11.1	10.5	10.5	0.88	1.01	0.89
	3m	11.4	10.9	11.0	0.81	1.02	0.82
QI 0.6 30kV	1m	21.0	18.9	19.2	1.00	1.00	1.00
	2m	21.2	19.3	19.5	0.97	1.00	0.97
	3m	21.4	19.6	19.8	0.94	1.01	0.94

Table 6－2 Comparison of mean energy and ratio of dose conversion coefficient at various distance for 40kV QI 0.6 series

Quality	Distance	Mean energy (keV)			Relative ratio of conversion coefficient		
		E_F	E_K	$E_{H(10)}$	Ka/φ	H＊(10)/Ka	H＊(10)/φ
QI 0.6 40kV	1m	27.2	24.4	26.5	1.00	1.00	1.00
	2m	27.4	24.6	26.7	0.98	1.01	1.00
	3m	27.5	24.8	26.8	0.97	1.03	1.00

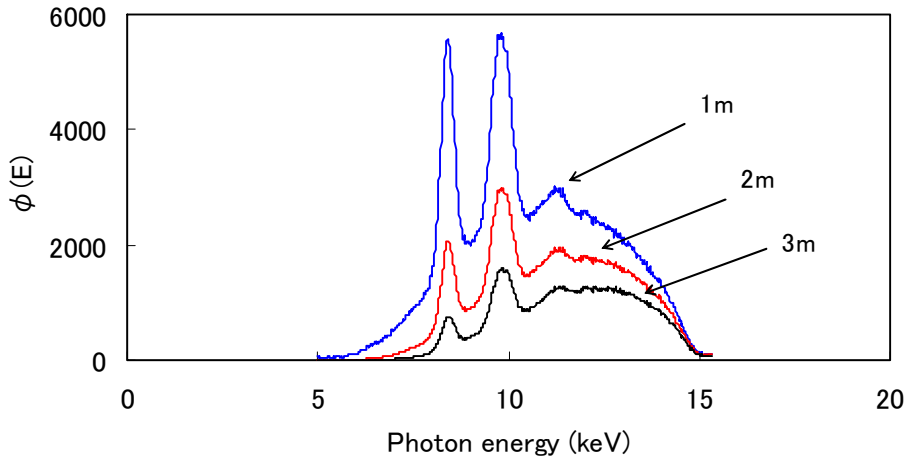


Fig.6－2 Comparison of fluence spectra at various distance for 15kV QI 0.6 series

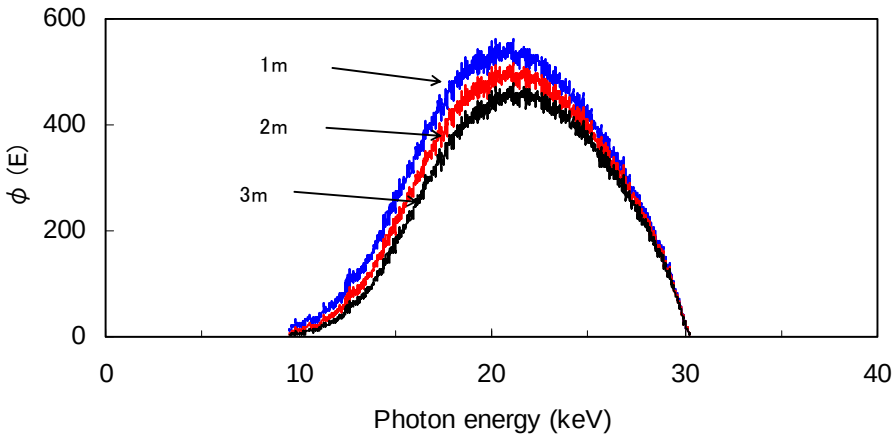


Fig.6－3　Comparison of fluence spectra at various distance for 30kV QI 0.6 series

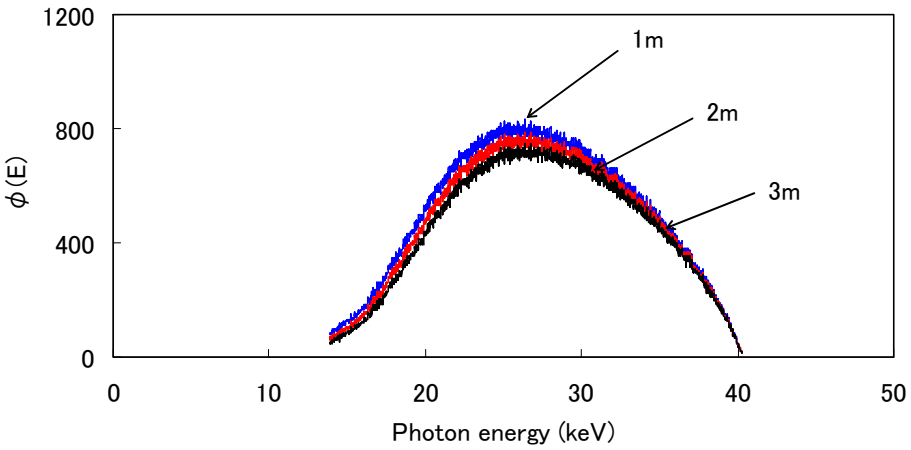


Fig.6－4　Comparison of fluence spectra at various distance for 40kV QI 0.6 series

7．結　　論

原子力科学研究所放射線標準施設棟に設置されている軟X線照射装置(米国パンタック社製HF-100型)を用いて、放射線防護用測定器の軟X線領域に対する性能試験及び校正に使用するための、国内規格のJIS Z 4511が推奨する4つのシリーズに対応したX線二次標準場を42の線質について設定した。各標準場の基礎データとして、フルエンススペクトル、空気カーマスペクトル及び各種線量当量スペクトルを評価するとともに、実際の照射に用いる各種線量当量換算係数の評価及びX線スペクトルの空気層による減弱について考察した。これらの設定結果及び評価・検討結果より以下の結論を得た。

(1) X線標準場の線質の設定では、線質指標(QI)0.6、0.7、0.8、0.9の4つのシリーズに対して、この基準値の±0.01以内に設定できた。また、各シリーズの実効エネルギーの範囲は、QI0.6が9.0keV～60.8keVの9の線質、QI0.7が7.4keV～70.5keVの10の線質、QI0.8が5.0keV～80.0keVの12の線質、QI0.9が7.2keV～90.5keVの11の線質で、合計42の線質を設定した。これらの標準場を性能試験等で利用する場合は、国家標準機関とのトレーサビリティが確保された二次標準測定器により基準空気カーマ率の値付けが行われるが、国家標準機関が現在供給しているX線場の下限実効エネルギーが8.0keVであるため、このエネルギー未満であるQI0.7の7.4keV、QI0.8の5.0keV及び6.4keV、QI0.9の7.2keVの4つの標準場はトレーサビリティが確保されていない。

(2) 各シリーズの標準場1mでの1mA当たりの空気カーマ率は、およそQI0.6が1～7 mGy/min、QI0.7が0.3～1 mGy/min、QI0.8が3～16 mGy/h、QI0.9が50～180 μGy/hであり、各標準場の上限の空気カーマ率は、管電圧により上記の値の10倍から70倍まで照射することができる。従って、個人線量計のように積算照射を行う性能試験では、数mSvの照射が短時間で実施できることになる。また、下限の空気カーマ率は、下限管電流を0.1mAとして、上記の値の1/10程度となるため、サーベイメータのように線量率照射を行う性能試験では、10mGy/h程度でQI0.7又はQI0.8の標準場を推奨し、環境用の線量率測定器に対しては10μGy/h程度のQI0.9を推奨する。

(3) 各シリーズのスペクトルの評価では、QI0.6及びQI0.7シリーズの20kV以下の各スペクトルで8.4keV、9.9keV及び11.7keVの特性X線が発生した。これは、タングステン(W)焦点から発生するL軌道特性X線($L_{\alpha 1}$ 8.40keV,$L_{\alpha 2}$ 8.34keV,$L_{\beta 1}$ 9.67keV,$L_{\beta 2}$ 9.96keV,$L_{\gamma 1}$ 11.29keV,$L_{\gamma 2}$ 11.61keV,$L_{\gamma 3}$ 11.67keV)やレニウム(Re)L軌道特性X線($L_{\alpha 1}$ 8.7keV)によるものである。また、QI0.8及びQI0.9シリーズの20kV以下の各スペクトルでは、基礎フィルタのろ過効果により上記の特性X線はほとんど発生していない。

また、各シリーズ共通で80kV以上の各スペクトルで58keV及び67keV付近に2本ずつ特性X線が発生した。これは、W焦点から発生するK軌道特性X線($K_{\alpha 1}$ 59.3keV,$K_{\alpha 2}$ 58.0keV,$K_{\beta 1}$ 67.2keV)やレニウム(Re)K軌道特性X線($K_{\beta 1}$ 69.3keV)によるものである。各シリーズ共通で30kVから70kVの各スペクトルでは、特性X線は発生しておらず、きれいなスペクトルを示した。

(4) 実効エネルギーE_{eff}と各スペクトル平均エネルギーの比較を以下に示す。

① E_{eff}とフルエンス平均エネルギー(E_F)の比較では、QI0.9 が±3%でほぼ同じ値を示したが、QI0.8 で－6%、QI0.7 で－10%、QI0.6 で－14%の最大のずれが生じた。このずれは、フルエンススペクトルが標準場のスペクトルを表しているのに対し、実効エネルギーは半価層フィルタの挿入により標準場のフルエンススペクトルをろ過しつつ評価するためであり、ろ過効果が多い線質では実効エネルギーが低い値になった。これに対し、スペクトルのろ過がかなり大きい QI0.9 シリーズでは均等度が 1 に近いため、両者は良く一致した。

② E_{eff}と空気カーマ平均エネルギー(E_K)の比較では、QI0.9 が 8kV を除く線質で±1%で両者は良く一致したが、QI0.8 で－4%、QI0.7 で－5%、QI0.6 で－7%の最大のずれが生じ、フルエンス平均エネルギーでの比較とほぼ同様の結果となった。

③ E_{eff}と周辺線量当量 H*(10)平均エネルギー($E_{H(10)}$)の比較では、最大の違いが QI0.6 シリーズで－15%、QI0.7 シリーズで－9%、QI0.8 シリーズで－6%、QI0.9 シリーズで－2%であったが、エネルギーの高い線質になるにつれて両者は近い値になった。

④ 周辺線量当量 H*(10)と個人線量当量 Hp(10)の平均エネルギーの比較では、各シリーズの全ての線質について±0.3keV でよく一致した。また、方向性線量当量 H'(0.07)と個人線量当量 H_p(0.07)の平均エネルギーも±0.3keV でよく一致すると共に、これらの各線質のエネルギーは空気カーマの平均エネルギーともよく一致した。

(5) 各シリーズの H*(10)／Ka 及び Hp(10)／Ka の線量当量換算係数の評価では、スペクトルの積算比から算出した換算係数($f_{H(10)Total}$又は$f_{Hp(10)Total}$)が実効エネルギーに対応する換算係数(f_{eff})と±3%程度で良く一致した。一方、スペクトルから求めた換算係数と線量当量スペクトルの平均エネルギーに対応する換算係数(f_{EH}又はf_{EHp})との比較では+10%の違いが生じた。このため、使用する換算係数は、原則として国内規格の JIS Z 4511 に準じた実効エネルギーの換算係数を用いることにした。ただし、40kV 以下の低エネルギー線質ではスペクトルから求めた換算係数と実効エネルギーの換算係数に大きな違いを確認したことから、この領域では ISO 4037-3 に準じてスペクトル同士の比較から算出した換算係数($f_{H(10)Total}$又は$f_{Hp(10)Total}$)を用いることにした。なお、対象とした線質は、換算係数の下限エネルギーを考慮して、10keV 以上に分布する各シリーズのスペクトルとした。

(6) 各シリーズの H'(0.07)／Ka 及び H_p(0.07)／Ka の線量当量換算係数の評価では、スペクトルの積算比から算出した換算係数($f_{H(0.07)Total}$又は$f_{Hp(0.07)Total}$)が実効エネルギーに対応する換算係数(f_{eff})と線量当量スペクトル平均エネルギーに対応する換算係数(f_{EH}又はf_{EHp})の両者と±3%で良く一致した。このため、使用する換算係数は、国内規格の JIS Z 4511 に準じた実効エネルギーの換算係数を用いることにした。なお、対象とした線質は、換算係数の下限エネルギーを考慮して、4keV から 60keV に分布する各シリーズのスペクトルとした。最大エネルギーを 60keV とした理由は、①標準場の照射線量率が二次電子平衡を成立し、被校正測定器との校正精度が良い領域であること、②国内の放射線防護の法令等に従った線量当量率の測定では、70μm 線量当量は 1cm 線量当量の 10 倍を超える場合に評価することから、この対象となるエネルギーは概ね 30keV 以下であることが理由である。

(7) 照射距離までの空気層が変化したときのX線スペクトルの減弱の評価では、①5keV～15keV に分布するスペクトル(Fig.6－2 参照)で、フルエンスから空気カーマへの換算係数が空気層 1m での値に対して 2m で－12%、3m で－19%小さい値となり、空気層の減弱が大きく影響すること

を確認した。また、空気カーマから H'(0.07)/Ka 及び H_p(0.07)/Ka への換算係数の変化は、＋2%以下と影響が少なかった。②10keV～30keV に分布するスペクトル(Fig.6－3 参照)で、フルエンスから空気カーマへの換算係数が空気層 1m の値に対して 2m で－3%、3m で－6%小さくなり、2m 以上で空気層の減弱が大きく影響することを確認した。③15keV～40keV に分布するスペクトル(Fig.6－4 参照)で、フルエンスから空気カーマへの換算係数が空気層 1m の値に対して 2m で－2%、3m で－3%小さくなり、空気層の影響が小さいことを確認した。また、空気カーマから H*(10)/Ka 及び Hp(10)/Ka への換算係数の変化も＋3%以下と影響が少なく、フルエンスから H*(10)及び Hp(10)への換算は、両者が打ち消し合って影響がないことを確認した。

上記の結論より、日本原子力研究開発機構原子力科学研究所の軟Ｘ線標準場の詳細な基礎データを明らかにした。これにより、日本工業規格で制定されている放射線防護に用いるサーベイメータ、モニタ及び個人線量計等の低エネルギー光子に対するエネルギー特性試験及び方向特性試験等の性能試験にこれらの基礎データが利用できることになった。

謝　辞

軟Ｘ線照射装置(米国パンタック社製 HF-100 型)の製作に当たり、（株）島津製作所の関係各位には多大なご尽力を頂き、安全で安定したＸ線を発生させるために必要な数多くの特殊設備及び要望を具体化して頂き、深く感謝致します。また、軟Ｘ線照射装置の必要性や低エネルギー光子に対する放射線管理上の課題及び問題点について貴重な意見を頂いた、現在 J-PARC センター放射線安全セクションリーダーの宮本幸博氏に深く感謝致します。更に、本論文をまとめるに当たり、貴重な助言を頂いた原科研放射線管理部放射線計測技術課長の吉澤道夫氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

1) 宮本幸博、植田久男、原田康典：“SPring-8 における高エネルギー加速器の放射線管理の現状と問題点” JAERI-Tech 98-039 (1998)

2) 日本規格協会：“照射線量測定器及び線量当量測定器の校正方法”, JIS Z 4511 (2005)

3) WM.J.Veigele：Atomic data table Vol.5 (1973)

4) ICRP Publication 74 ：“Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation” (1996)

5) B.Grosswendt：“The Angular dependence and irradiation geometry factor for the dose equivalent for photons in slab phantoms of tissue-equivalent material and PMMA”Radiation Protection Dosimetry Vol.35 No.4 P.221-235 (1991)

6) ICRU Report 47 ：“Measurement of dose equivalents from external photon and electron radiations”(1992)

7) J.H.HUBBELL：“Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1keV to 20keV”Int.J.Appl.Radiat.Isot.Vol.33 p.1269-1290 (1982)

8) 清水滋、Qingli ZHANG、梶本与一、川崎朋克、藤井克年：“国際規格(ISO 4037-1)に準拠した放射線測定器の性能試験に用いるＸ線照射場の整備” JAERI-Tech 2003-095 (2004)

9) ISO 4037-3 ：“X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy”Part3：Calibration of area and personal dosemeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence (1999)

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の） 1	1
比透磁率[b]	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（Ｘ線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=1l=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St\ =1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています