JAEA-Technology
2010-009

放射線測定器の性能試験に用いる国内規格に準拠した中硬X線標準場の整備

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

清水 滋　澤畠 忠広　梶本 与一　志風 義明　吉原 泰明　立部 洋介

Shigeru SHIMIZU, Tadahiro SAWAHATA, Yoichi KAJIMOTO
Yoshiaki SHIKAZE , Yasuaki YOSHIHARA and Yosuke TATEBE

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 2010-009

放射線測定器の性能試験に用いる国内規格に準拠した中硬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・澤畠 忠広※・梶本 与一・志風 義明・吉原 泰明 *・立部 洋介

（2010 年 3 月 2 日受理）

国内の日本工業規格 JIS Z 4511 では、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中硬Ｘ線照射装置のＸ線管球の破損交換に伴い、新たな機種のＸ線管球を設置したため、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 20kV～300kV の中硬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中硬Ｘ線標準場を 52 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、各種放射線防護用測定器の中硬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
※：出向職員
＊：(財)放射線計測協会

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

Shigeru SHIMIZU, Tadahiro SAWAHATA※, Yoichi KAJIMOTO
Yoshiaki SHIKAZE , Yasuaki YOSHIHARA＊and Yosuke TATEBE

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

(Received March 2 , 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. We renewed a X-ray tube of the medium-hard X-ray irradiation device that was damaged in the Facility of Radiation Standards in Nuclear Science Research Institute. Therefore, we established four series of medium-hard 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 medium-hard X-ray fields produced with X-ray tube voltage ranging from 20kV to 300kV, and set about 52 qualities of medium-hard X-ray reference fields based on JIS Z 4511. These X-ray reference fields were well adapted to a setting condition of JIS and precision of conversion factors to various dose equivalents from Air-kerma was good. We also confirmed the soundness of the spectrum of each X-ray quality. As a result, medium-hard X-ray reference fields were established that can provide the dose equivalent standard with good precision and wide range of test energy points and dose rates, for the performance tests such as the energy characteristic and the direction characteristic for various radiation measuring instruments. We clarified these detailed data.

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

---

※ : Research Staff on Loan
＊ : Institute of Radiation Measurement

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 照射野の線量分布の確認 ---------- 4
2.3 半価層測定用の電離箱式線量計の仕様 ---------- 5
3. X線標準場の設定 ---------- 7
3.1 線質の設定方法 ---------- 7
3.2 設定結果及び考察 ---------- 8
4. 線質に対するX線エネルギースペクトルの評価 ---------- 12
4.1 測定方法 ---------- 12
4.1.1 フルエンススペクトルの評価 ---------- 12
4.1.2 線量スペクトルの評価 ---------- 14
4.1.3 スペクトル分解能の評価 ---------- 15
4.2 結果及び考察 ---------- 16
5. 線質に対する線量当量換算係数の評価 ---------- 60
5.1 評価方法 ---------- 60
5.2 結果及び考察 ---------- 60
6. X線スペクトルの空気層による減弱の評価 ---------- 71
6.1 評価方法 ---------- 71
6.2 結果及び考察 ---------- 72
7. 結　論 ---------- 75
謝　　辞 ---------- 77
参考文献 ---------- 78

Contents

1. Introduction ---------- 1
2. Specification of Devices used for Characterization of Reference Fields ---------- 2
2.1 X-ray Generator ---------- 2
2.2 Confirmation of Dose Distribution for Irradiation Fields ---------- 4
2.3 Ionization Chamber used for Measurement of Half Value Layer ---------- 5
3. Characterization of X-ray Reference Fields ---------- 7
3.1 Characterization Methods of Radiation Quality ---------- 7
3.2 Results and Discussion ---------- 8
4. Estimation of X-ray Energy Spectra for Reference Fields ---------- 12
4.1 Measurement Methods ---------- 12
4.1.1 Evaluation of Fluence Spectrum ---------- 12
4.1.2 Evaluation of Dose Spectrum ---------- 14
4.1.3 Evaluation of Spectrum Resolution ---------- 15
4.2 Results and Discussion ---------- 16
5. Estimation of Dose Equivalent Conversion Coefficients for Reference Fields ---------- 60
5.1 Estimation Method ---------- 60
5.2 Results and Discussion ---------- 60
6. Estimation of Attenuation by Atmospheric Layer for X-ray Energy Spectra ---------- 71
6.1 Estimation Method ---------- 71
6.2 Results and Discussion ---------- 72
7. Conclusions ---------- 75
Acknowledgements ---------- 77
References ---------- 78

1．序　　論

原子力科学研究所放射線標準施設棟で長年使用してきた米国パンタック社製 HF-420C 型中硬Ｘ線照射装置のＸ線管球(ドイツ･AEG-TELEFUNKEN 社製MB420/1 型)が平成20年2月に破損し、平成 21 年 1 月に別機種のＸ線管球(スイス・コメット社製 MXR-350/26 型)に交換を行った。このため、10 年以上前に設定して利用してきたＸ線標準場[1)]が利用できないことから、新たな実験・評価により新Ｘ線管球に対する 20kV～300kV の管電圧の範囲におけるＸ線標準場を設定した。

本論文は、Ｘ線質の設定、設定場のＸ線波高分布からフルエンス、空気カーマ、各種線量当量に対応したスペクトルの評価、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及びＸ線スペクトルの空気層による減弱について、実験データに基づいてまとめたものである。また、Ｘ線管球の交換に伴い、上記の標準場設定の実験の前に、管電流の上限値の試験及び照射野の線量分布の実験を行い、いずれも良好であることを確認した。

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)が推奨する日本独自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、JIS Z 4511 の線質指標(QI)で規定される QI0.6、QI0.7、QI0.8、QI0.9 の４つの線量強度が異なるシリーズを設定し、管電圧 20kV から 300kV の範囲で実効エネルギー12.1keV から 266keV において全体で 52 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線量当量への換算係数の評価では、上記の空気カーマスペクトルと各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、相互に比較した。

Ｘ線スペクトルの空気層による減弱の評価は、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が平均エネルギーや線量当量への換算係数にどの程度影響を及ぼすかを調査した。

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防護用測定器の中硬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

放射線標準施設棟の中硬Ｘ線照射装置は、米国パンタック社製 HF-420C 型であり、制御装置、操作ラック、陽極・陰極の高圧発生器、冷却装置及びＸ線管球で構成され、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。

今回交換した新たなＸ線管球は、スイス・コメット社製 MXR-350/26 型で、ターゲットにはタングステン、管球窓には厚さ 3mm 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、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た。照射器は Fig.2－1 の側面図に示すように、Ｘ線管球を厚さ 25mm 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、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た。

Ｘ線管球へ供給する電圧･電流は、電圧が 8kV～320kV で、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、最大値で示すと大焦点で 20kV～140kV の範囲で 30mA、小焦点で 30kV～40kV の範囲で 30mA 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 30 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、電動による開閉を行い、その開・閉に要する時間は 0.7 秒である。

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、アルミニウム(Al)、銅(Cu)、すず(Sn)及び鉛(Pb)の 4 種類の材質を用意し、純度は Al が 99.4%以上でその他の材質が 99.9%以上、厚さの精度は ±1%以内である。フィルタの大きさは Photo.2－2 に示すように、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 未満の薄いフィルタ及び Pb フィルタは中央に 22cmφの穴のあいた 25cm 角の額縁に収めた）とした。なお、フィルタの最小径を 22cmφ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 21.7cmφであることによる。フィルタの厚さは、Al 及び Cu については 0.05mm から 30mm まで 0.05mm 間隔で、任意の厚さに設定できるようにした。しかし、Sn 及び Pb のフィルタは厚さの間隔が 0.5mm である。

安全装置(インターロック)については、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 の状態でなければ照射器のＸ線シャッターが開かない構造になっている。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、オイル循環空冷式による循環オイルの温度が 35℃以上になるとＸ線の発生が自動停止する保護機能を有している。

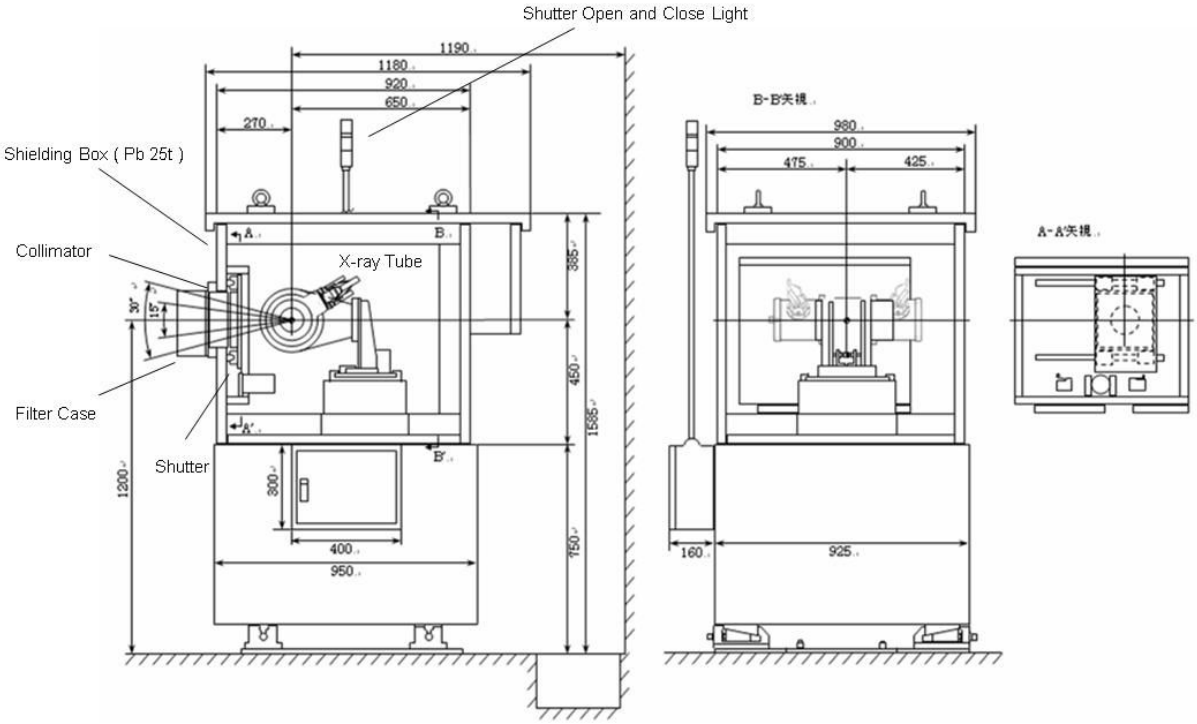


Fig. 2－1 Cross section of the medium-hard X-ray generator

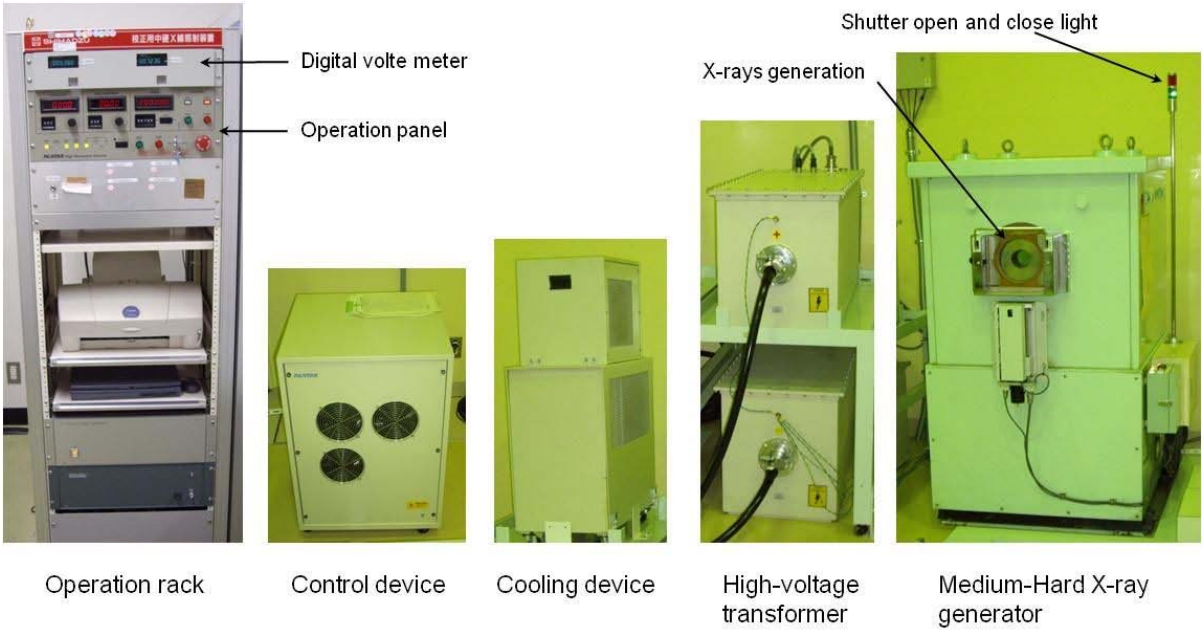


Photo.2－1 Photograph of each component of X-ray irradiation device

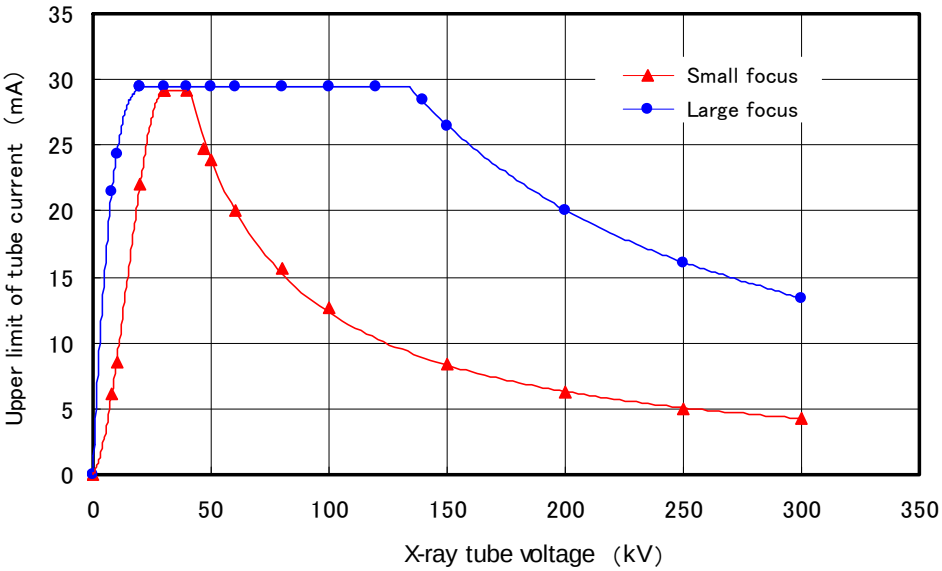


Fig. 2－2 Upper limit of tube current as a function of tube voltage

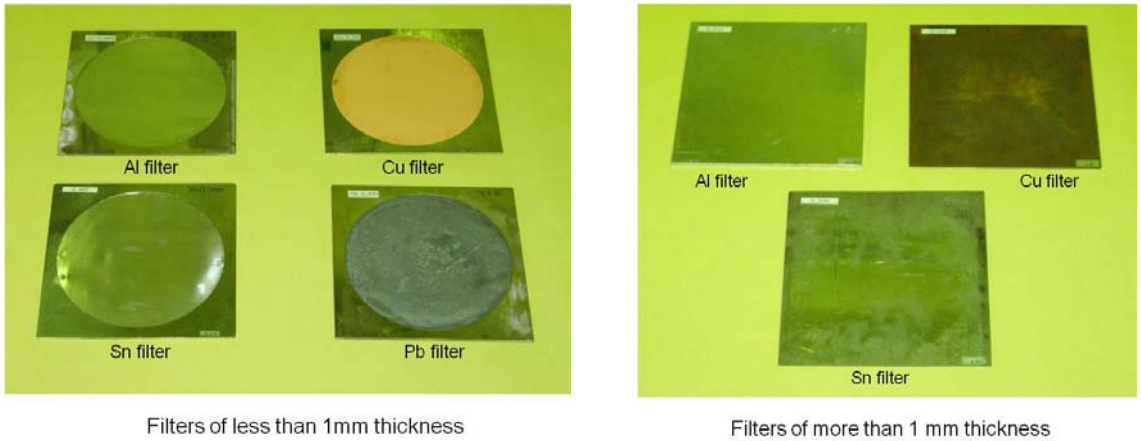


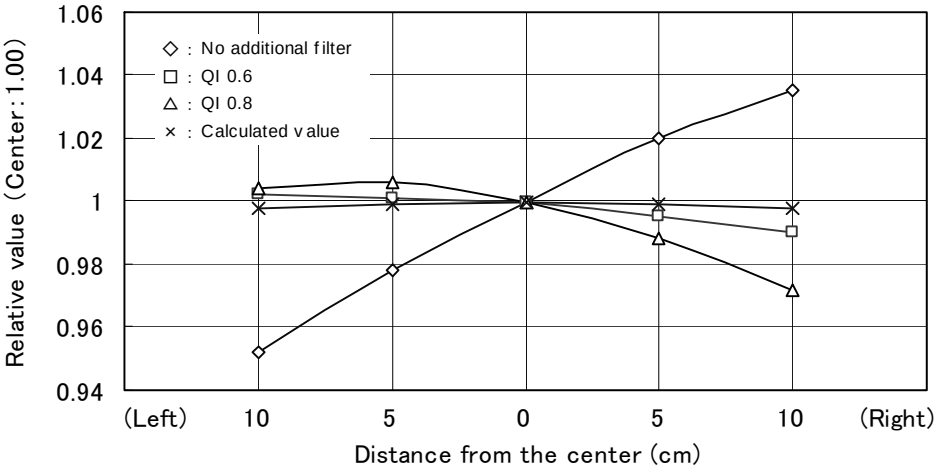
Photo.2－2 Photograph of filters used for the additional filter and half-value layer measurement

２．２ 照射野の線量分布の確認

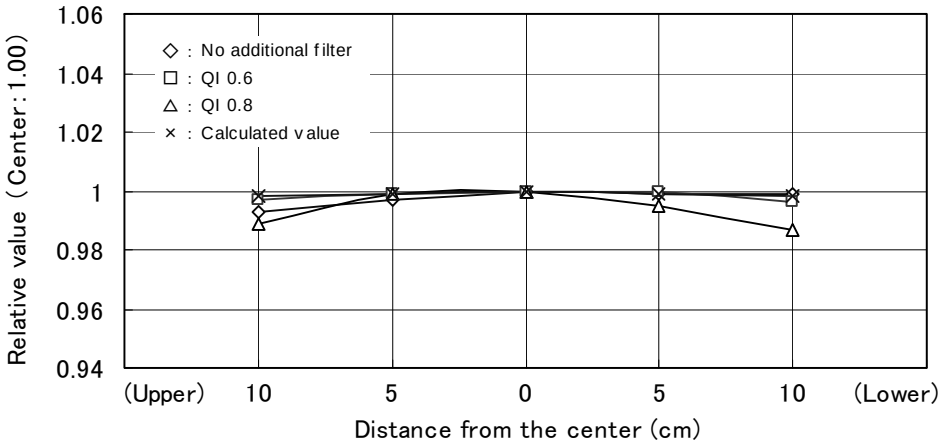
X線管球の変更に伴い、照射野の上下・左右の線量分布の確認を 2.3 項の EXRADIN A6 電離箱検出器で行い、文献 6)に示す旧X線管球(ドイツ　AEG-TELEFUNKEN 製 MB420/1 型)の特性と比較を行った。

照射野の上下・左右の線量分布の確認では、管電圧 60kV でフィルタ無し、QI0.6、QI0.8 の３つの条件において照射距離 2m の照射野の中心から上下・左右に 5cm、10cm 移動させて最大 20cm の領域の測定を行い、Fig.2－3 に示す結果が得られた。図中の計算値は、立体角による距離の変化を水平軸及び垂直軸の線量強度に補正したものである。水平方向は、フィルタ無しで右側が高く左側が低く、QI0.6 では左右の均整が取れ、QI0.8 では左側がやや高く右側が低くなった。一方、垂直方向は、フィルタ無し、QI0.6 及び QI0.8 共に上下の均整が取れ、線量分布が良好であることを確認した。この結果、QI0.6 及び QI0.8 の照射野の線量分布が±1%となる領域は、照射距離 2m の

ビーム中心点に対して水平方向で±5cm、垂直方向で±10cm となり、水平・垂直の比率が 1：2 となった。本結果は、文献 6)に示される旧Ｘ線管球の同様の測定結果（照射距離 3m のビーム中心点に対して水平方向で±10cm、垂直方向で±20cm）と相似関係でほぼ一致した。このことから、放射線検出器を当該標準場で校正する場合は、この均一な領域で実施することを推奨する。また、本Ｘ線管球は、均一に照射する領域が文献 6)と同様となり、タングステン焦点への電子の加速や焦点の角度、放射されるＸ線のエネルギー分布が物理的に同様であると考察できる。



(a) Horizontal direction



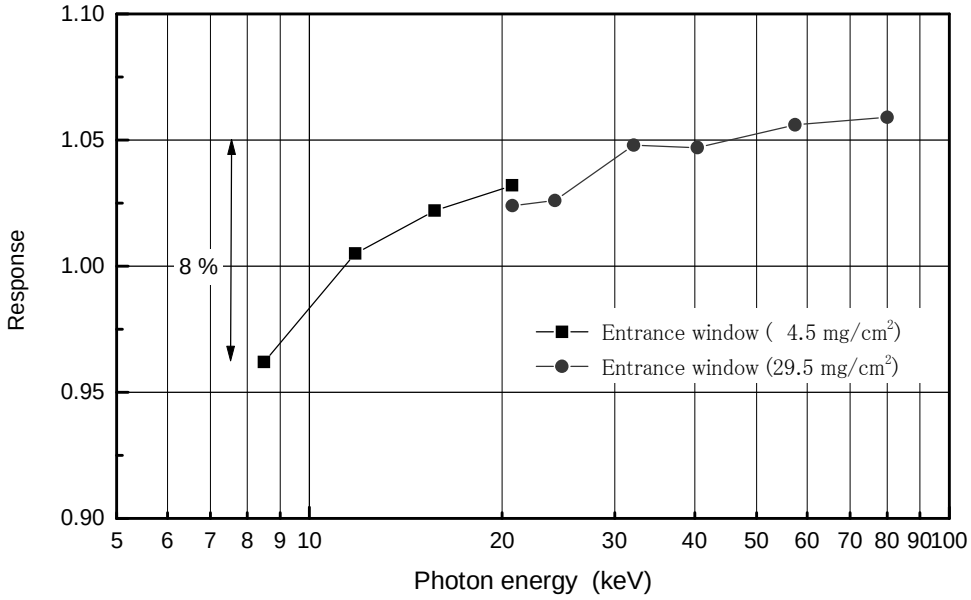
(b) Vertical direction

Fig.2－3 Result of dose distribution in irradiation field（Tube voltage：60kV）
（Dose distribution was measured on horizontal and vertical axis that watched an irradiation field from the X-rays focus.）

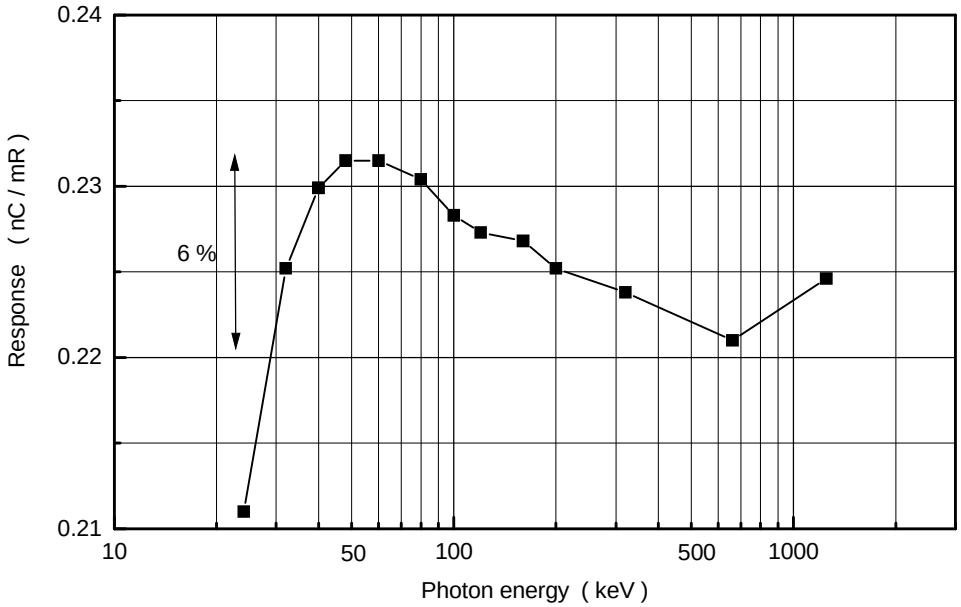
２.３ 半価層測定用の電離箱式線量計の仕様

Ｘ線質の第１半価層、第２半価層の測定には、Fig.2－4 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 8keV～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～300keV 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. 2－4 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 では、線質条件として、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)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 20kV～300kV の範囲における線質指標(QI)0.6、0.7、0.8、0.9 の 4 つの種類に対して、2.3 項に示す Ionex2575 と EXRADIN A6 検出器を Fig.2－4 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、QI0.9 の 60kV～70kV を除く線質を 1.5m、QI0.9 の 60kV～70kV を含めた他のシリーズを 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Ａｌ，Ｃｕ，Ｓｎ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(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、各線質指標に対応する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、各線質指標の目標値に対して±0.01 の範囲に設定するようにした。

$$E_{eff} = 22.03\, t_1^{0.341} + 0.1469\, t_1^{2.01} \quad \text{(Al: 6keV to 60keV)} \quad \text{----------} \quad (1)$$

$$E_{eff} = 76.48\, t_1^{0.356} + 2.543\, t_1^{2.00} \quad \text{(Cu: 15keV to 200keV)} \quad \text{----------} \quad (2)$$

$$E_{eff} = 122.5\, t_1^{0.369} + 1.660\, t_1^{2.05} \quad \text{(Sn: 40keV to 400keV)} \quad \text{----------} \quad (3)$$

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

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

３．２ 設定結果及び考察

Ｘ線管電圧が 20kV～300kV 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。以下に結果及び考察を示す。なお、20kV 未満の線質は、管電圧の設定精度が悪くなること、軟Ｘ線照射装置により線質が設定されていることから、本装置での設定は行わなかった。

(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 12.1keV～178keV、QI0.7 シリーズが 13.8keV～209keV、QI0.8 シリーズが 16.0keV～237keV、QI0.9 シリーズが 17.8keV～266keV であり、これらの全体のエネルギー範囲は 12.1keV～266keV となった。

(2) 各シリーズの線質指標の設定では、各線質の 13 の設定に対して、QI0.6 シリーズが 0.59～0.61、QI0.7 シリーズが 0.69～0.71、QI0.8 シリーズが 0.79～0.81、QI0.9 シリーズが 0.89～0.91 であり、全て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は、Table3－1～Table3－4 より、QI0.6 シリーズが 0.69～0.83、QI0.7 シリーズが 0.79～0.92、QI0.8 シリーズが 0.89～0.98 、QI0.9 シリーズが 0.95～0.99 であった。

(4) 各シリーズの標準場 1m での管電流 1mA 当たりの空気カーマ率の範囲は、QI0.6 シリーズが 0.8～8.1 mGy/min、QI0.7 シリーズが 0.4～3.3 mGy/min、QI0.8 シリーズが 3.6～37 mGy/h、QI0.9 シリーズが 0.07～1.6 mGy/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、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 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、1mGy/h～5mGy/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は QI0.9 を推奨する。

(5) 各シリーズの基礎フィルタの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図を Fig.3－1 に示す。図より、各シリーズの設定した厚さは、曲線に良くフィットしてスムーズな増加を示し、実効エネルギーの設定に間違いがないことを確認した。また、本特性を利用することにより、各シリーズの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 Characteristic of QI 0.6 series

Tube voltage (kV)	Additional filter (mm)				Half-value layer (mm)		Homoge. coefficient	Effective energy (keV)	Quality index QI	Dose rate (mGy/min ･mA at1m)
	Al	Cu	Sn	Pb	First	Second				
20	0.202				Al 0.173	Al 0.248	0.70	12.1	0.61	1.6
30	0.6525				Al 0.539	Al 0.684	0.79	17.9	0.60	1.5
40	1.885				Al 1.247	Al 1.706	0.73	24.0	0.60	1.4
50	3.500				Al 2.277	Al 2.822	0.81	29.9	0.60	1.2
60	6.507				Al 3.566	Al 4.330	0.82	35.9	0.60	0.77
70		0.270			Cu 0.191	Cu 0.254	0.75	42.5	0.61	1.0
80		0.370			Cu 0.265	Cu 0.386	0.69	47.8	0.60	1.1
100		0.570			Cu 0.487	Cu 0.648	0.75	59.8	0.60	1.5
120		0.900			Cu 0.770	Cu 1.005	0.77	71.2	0.59	1.8
150		1.600			Cu 1.337	Cu 1.807	0.74	89.4	0.60	2.3
200		2.516			Cu 2.415	Cu 2.909	0.83	120	0.60	3.9
250			1.138		Sn 1.634	Sn 2.021	0.81	151	0.60	6.7
300			2.122		Sn 2.375	Sn 2.959	0.80	178	0.59	8.1

Table3－2 Characteristic of QI 0.7 series

Tube voltage (kV)	Additional filter (mm)				Half-value layer (mm)		Homoge. coefficient	Effective energy (keV)	Quality index QI	Dose rate (mGy/min ･mA at1m)
	Al	Cu	Sn	Pb	First	Second				
20	0.397				Al 0.253	Al 0.308	0.82	13.8	0.69	0.73
30	1.885				Al 0.840	Al 1.065	0.79	20.9	0.70	0.40
40	3.890				Al 1.883	Al 2.181	0.86	27.9	0.70	0.50
50		0.204			Cu 0.106	Cu 0.123	0.86	34.4	0.69	0.51
60		0.400			Cu 0.178	Cu 0.221	0.81	41.5	0.69	0.37
70		0.600			Cu 0.285	Cu 0.354	0.81	49.1	0.70	0.36
80		0.770			Cu 0.410	Cu 0.490	0.84	56.1	0.70	0.45
100		1.500			Cu 0.751	Cu 0.890	0.84	70.5	0.71	0.48
120		2.220			Cu 1.158	Cu 1.377	0.84	84.0	0.70	0.63
150		3.216			Cu 1.867	Cu 2.163	0.86	104	0.69	1.0
200		6.261			Cu 3.130	Cu 3.402	0.92	140	0.70	1.5
250			3.938		Sn 2.309	Sn 2.569	0.90	176	0.70	2.3
300			1.059	1.006	Sn 3.290	Sn 3.622	0.91	209	0.70	3.3

Table3－3 Characteristic of QI 0.8 series

Tube voltage (kV)	Additional filter (mm)				Half-value layer (mm)		Homoge. coefficient	Effective energy (keV)	Quality index QI	Dose rate (mGy/h ・mA at1m)
	Al	Cu	Sn	Pb	First	Second				
20	1.096				Al 0.393	Al 0.401	0.98	16.0	0.80	8.9
30	3.891				Al 1.237	Al 1.328	0.93	23.9	0.80	5.7
40		0.370			Al 2.794	Al 3.089	0.90	32.4	0.81	4.8
50		0.570			Cu 0.162	Cu 0.175	0.93	40.1	0.80	3.9
60		0.970			Cu 0.271	Cu 0.300	0.90	48.2	0.80	3.6
70		1.300			Cu 0.403	Cu 0.453	0.89	55.8	0.80	4.9
80		2.016			Cu 0.600	Cu 0.653	0.92	64.7	0.81	4.4
100		3.616			Cu 1.047	Cu 1.138	0.92	80.5	0.81	5.2
120		5.561			Cu 1.605	Cu 1.722	0.93	97.1	0.81	6.6
150		8.077			Cu 2.425	Cu 2.561	0.95	120	0.80	12
200			2.879	0.470	Sn 1.848	Sn 1.949	0.95	160	0.80	25
250			1.043	1.918	Sn 2.996	Sn 3.185	0.94	199	0.80	28
300			1.098	2.988	Sn 4.115	Sn 4.381	0.94	237	0.79	37

Table3－4 Characteristic of QI 0.9 series

Tube voltage (kV)	Additional filter (mm)				Half-value layer (mm)		Homoge. coefficient	Effective energy (keV)	Quality index QI	Dose rate (mGy/h ・mA at1m)
	Al	Cu	Sn	Pb	First	Second				
20	3.101				Al 0.531	Al 0.549	0.97	17.8	0.89	0.40
30		0.370			Al 1.710	Al 1.769	0.97	26.9	0.90	0.13
40		0.770			Cu 0.117	Cu 0.120	0.98	35.7	0.89	0.19
50		1.700			Cu 0.232	Cu 0.236	0.98	45.6	0.91	0.07
60		2.800			Cu 0.382	Cu 0.391	0.98	54.7	0.91	0.07
70		3.516			Cu 0.551	Cu 0.578	0.95	62.6	0.89	0.19
80		6.061			Cu 0.801	Cu 0.821	0.98	72.3	0.90	0.08
100			2.811		Cu 1.372	Cu 1.402	0.98	90.4	0.90	0.21
120			4.644		Cu 2.051	Cu 2.097	0.98	109	0.91	0.30
150			3.216	1.006	Cu 2.995	Cu 3.106	0.96	136	0.91	0.38
200			3.428	2.982	Sn 2.351	Sn 2.453	0.96	178	0.89	0.37
250			4.287	5.500	Sn 3.692	Sn 3.822	0.97	223	0.89	0.46
300			3.946	7.073	Sn 4.989	Sn 5.052	0.99	266	0.89	1.6

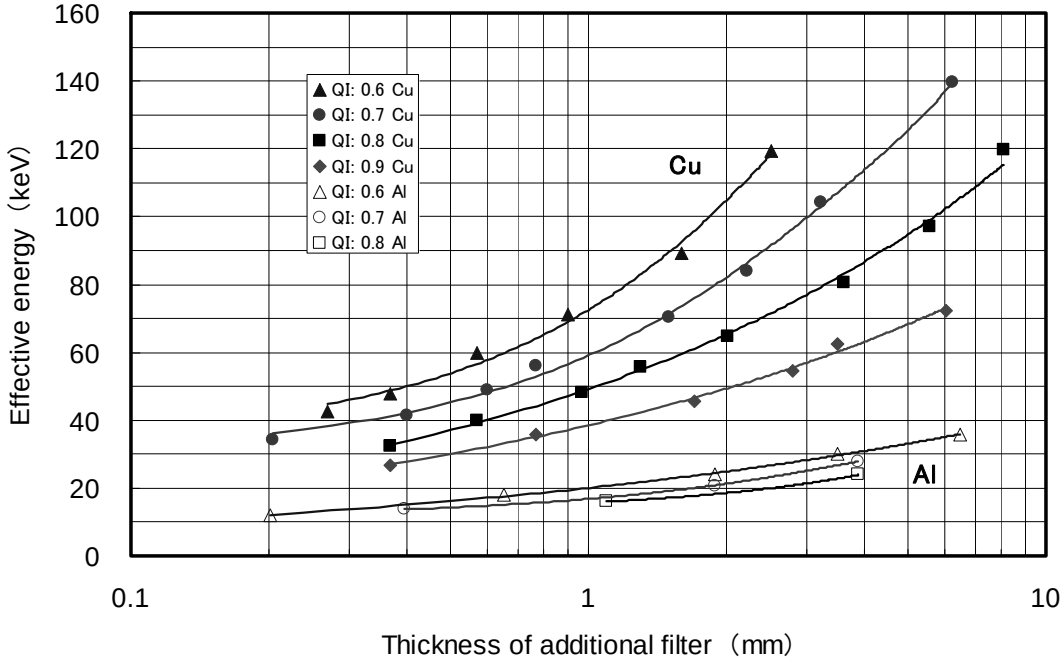


Fig.3－1 Relationship between thickness of additional filter and effective energy

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

4.1.1 フルエンススペクトルの評価

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(ORTEC 社製 GMX-10180 型)の前面に設置し、Ｘ線入射のコリメータの直径を 80kV 以下が 1mmφとし、100kV 以上はコリメータ孔の散乱線の影響を低減させるため 5mmφ～35mmφを選択し、測定距離はデッドタイムの影響を考慮して 120kV 以下が 3m、150kV 以上が 6m で実施した。測定に用いた Ge 検出器は、47.9mmφ×55.3mm の結晶に Be0.5mm の窓を有する高純度 Ge である。その効率は、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 5keV～80keV の範囲でほぼ 100%の効率に対し、80keV 以上でコリメータの口径に依存して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、設定したＸ線エネルギー範囲が 8keV から 300keV であり、80keV 以下の検出効率はメーカー値で 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てメーカー値を利用することにし、80keV 以上では検出効率が急激に低下するため、γ標準線源を用いて Fig.4－2 に示すコリメータ口径の検出効率を実験により評価して利用した。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 80keV 以下のＸ線エネルギー範囲で検出効率が 100%近くと良好なこと、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
$\eta(E)$ ：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)

ピーク検出効率($\eta(E)$)の評価は、Fig.4－2 の 80keV 以下はメーカー値を使用し、80keV 以上は各コリメータについて点状標準γ線源を用いて実験で評価し、これらの曲線の検出効率をコリメータ口径とエネルギー範囲に分けて(7)式～(11)式の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 9keV～30keV の Ge-K 吸収端の変化に対応し、(8)式～(11)式はコリメータ口径が 5mmφ、10mmφ、20mmφ、35mmφの 81keV～662keV に対応する。31keV～81keV 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を Fig.4－2 に示す。

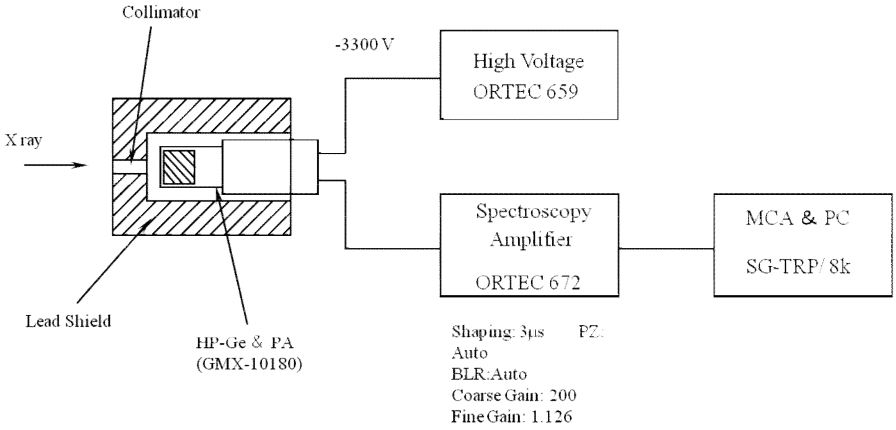


Fig. 4－1 Diagram for the measurements of pulse height spectra

$$\eta(E) = \exp(1.3392(\ln E)^4 - 15.632(\ln E)^3 + 68.145(\ln E)^2 - 131.32(\ln E) + 98.774) / 100 \quad \text{---------} (7)$$

(9keV～30keV)

$$\eta(E) = \exp(0.1700(\ln E)^3 - 2.8235(\ln E)^2 + 14.124(\ln E) - 17.365)/100 \quad \text{----------} (8)$$

(コリメート 5mmφ：81keV～662keV)

$$\eta(E) = \exp(0.1370(\ln E)^3 - 2.404(\ln E)^2 + 12.552(\ln E) - 15.752)/100 \quad \text{----------} (9)$$

(コリメート 10mmφ：81keV～662keV)

$$\eta(E) = \exp(-0.03623(\ln E)^3 + 0.3777(\ln E)^2 - 1.6588(\ln E) + 7.675)/100 \quad \text{----------} (10)$$

(コリメート 20mmφ：81keV～662keV)

$$\eta(E) = \exp(0.01603(\ln E)^3 - 0.5321(\ln E)^2 + 3.6516(\ln E) - 2.528) / 100 \quad \text{----------} (11)$$

(コリメート 35mmφ：81keV～662keV)

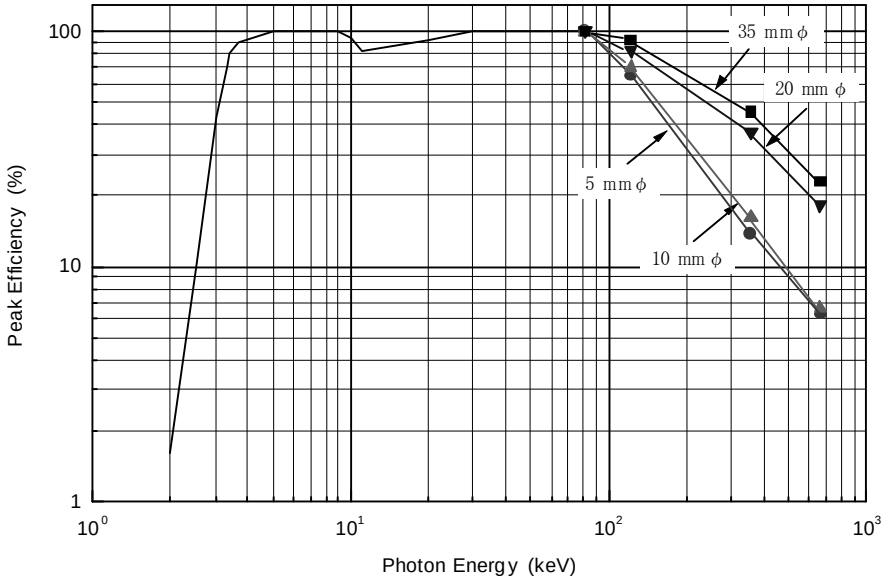


Fig. 4－2 Peak efficiency of the HP-Ge detector（GMX-10180）

4.1.2 線量スペクトルの評価

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 ICRP74 及び ICRU47[7] の各線量に係る換算係数を乗じて求めた。また、QI0.6 及び QI0.7 シリーズの 20kV 線質における H'(0.07)及び H_p(0.07)スペクトルの 10keV 未満を評価するため、10keV 未満のフルエンスから空気カーマへの換算係数は、文献 7)の A.1 式と文献 8)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。この際、ICRP74 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。

各線量スペクトルへの評価式を(12)式～(16)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。

$$Ka(E) = \int \phi(E) \cdot C_K(E)\, dE \quad (12)$$

$C_K(E)$ ：フルエンスから空気カーマへの換算係数 (Gy・cm^2)

$$H^*(10)(E) = \int Ka(E) \cdot C_{H^*}(E)\, dE \quad (13)$$

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

$$H'(0.07)(E) = \int Ka(E) \cdot C_{H'}(E)\, dE \quad (14)$$

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

$$H_p(10)(E) = \int Ka(E) \cdot C_{p10}(E)\, dE \quad (15)$$

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

$$H_p(0.07)(E) = \int Ka(E) \cdot C_{p0.07}(E)\, dE \quad (16)$$

$C_{p0.07}(E)$：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(17)式～(22)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。

$$E_F = \int E \cdot \phi(E)\, dE \,/\, \int \phi(E)\, dE \quad (17)$$

$$E_K = \int E \cdot Ka(E)\, dE \,/\, \int Ka(E)\, dE \quad (18)$$

$$E_{H(10)} = \int E \cdot H^*(10)(E)dE \ / \int H^*(10)(E)\,dE \quad \text{----------} \quad (19)$$

$$E_{H(0.07)} = \int E \cdot H'(0.07)(E)\,dE \ / \int H'(0.07)(E)\,dE \quad \text{----------} \quad (20)$$

$$E_{p(10)} = \int E \cdot H_p(10)(E)\,dE \ / \int H_p(10)(E)\,dE \quad \text{----------} \quad (21)$$

$$E_{p(0.07)} = \int E \cdot H_p(0.07)(E)\,dE \ / \int H_p(0.07)(E)\,dE \quad \text{----------} \quad (22)$$

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$H_p(10)$／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。

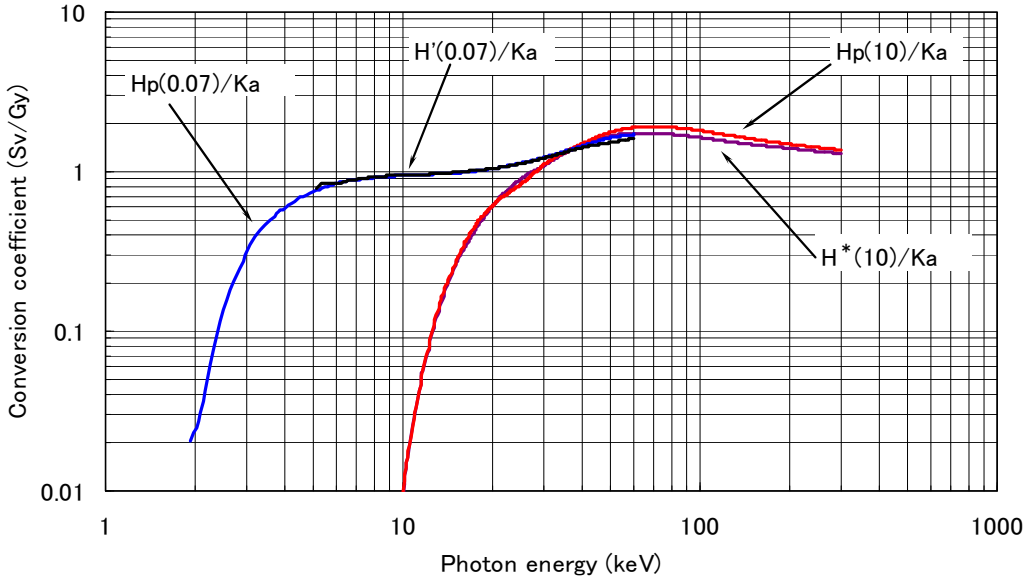


Fig.4－3 Conversion coefficients from air-kerma to various dose equivalents for photons

4.1.3 スペクトル分解能の評価

4.1.1及び4.1.2で評価したフルエンススペクトル及び各線量スペクトルについて、ISO 4037-1の定義で示される方法によりスペクトル分解能(R_E)を評価した。評価方法は、スペクトルの縦座標の最大値の半分になる値のエネルギー幅をΔEとし、そのスペクトル平均エネルギー((17)式～(22)式の値)で除したパーセントで表され、(23)式で評価した。但し、スペクトルに特性X線が存在する

場合のΔEは、ISO 4037-1 の記述と同様に、特性X線スペクトルを含めない連続分布の縦座標の最大値の半分になる値のエネルギー幅を用いることにした。

$$R_E = \frac{\Delta E}{\text{平均エネルギー}} \times 100 \qquad \text{----------} \quad (23)$$

４.２ 結果及び考察

各 QI 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及び$E_{P(10)}$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。また、シリーズ毎の各スペクトルに対するスペクトル分解能を Table4－5～Table 4－6 に示す。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 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 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) 80kV～250kV 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、QI シリーズのスペクトルのろ過効果が大きくなるに連れてその発生領域が狭くなっている。この特性X線は、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 以上の波高分布の測定では、1mmφの鉛コリメータから小角散乱線や鉛の特性X線が発生するため、Fig.4－2 のようにコリメータ口径を大きくして実施した。また、各シリーズ共通で 30kV から 70kV 及び 300kV 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、QI0.8 と QI0.9 で 0.96～1.05 と±5%で両者がほぼ同じ値を示したが、QI0.7 で 0.90～1.06、QI0.6 で 0.83～1.06 となり、100kV 以下でフルエンス平均エネルギーが数パーセントから十パーセント程度大きな値を示し、100kV を超える線質でフルエンス平均エネルギーが数パーセント低くなった。この変化は、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、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) QI0.8 と 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、QI0.8 と QI0.9 で±2%で両者が良く一致したが、QI0.7 で 0.95～1.01、QI0.6 で 0.90～0.97 となり、フルエンス平均エネルギーでの比較よりも 5%～7%変化が減少した。

(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－14%、QI0.7 シリーズで－8%、QI0.8 シリーズで－5%、QI0.9 シリーズで＋3%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 120kV 以下の線質について±0.3keV、150kV 以上の線質で±1keV 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±0.2keV 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。

(7) 各シリーズのスペクトル分解能は、QI0.6 及び QI0.7 のシリーズでは概ね 100kV 以下の線質で基礎フィルタのろ過効果による影響で徐々に小さな値を示したが、基礎フィルタのろ過効果が少なく均等度が 1.0 に近い QI0.8 及び QI0.9 のシリーズでは全線質で同様の値を示した。これらについてシリーズ毎の 6 種類のスペクトル分解能の平均値で表すと、QI0.9 が 17%、QI0.8 が 34%、QI0.7 が 52%、QI0.6 が 64%となり、QI0.9 に対する相対比で表すと、QI0.8 が 2 倍、QI0.7 が 3 倍、QI0.6 が 4 倍に増加した。この結果は、文献 1)で報告された旧Ｘ線管球の評価値とほぼ同様となった。

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。更に、スペクトル分解能は、各 QI シリーズのそれぞれのスペクトルでほぼ同じ値となり、QI 値が低くなるに連れて乗数倍で増加した。これは、QI シリーズの線質の設定がスペクトル幅を一様にする手法であることを示し、線質の設定条件として極めて良いことを証明した。

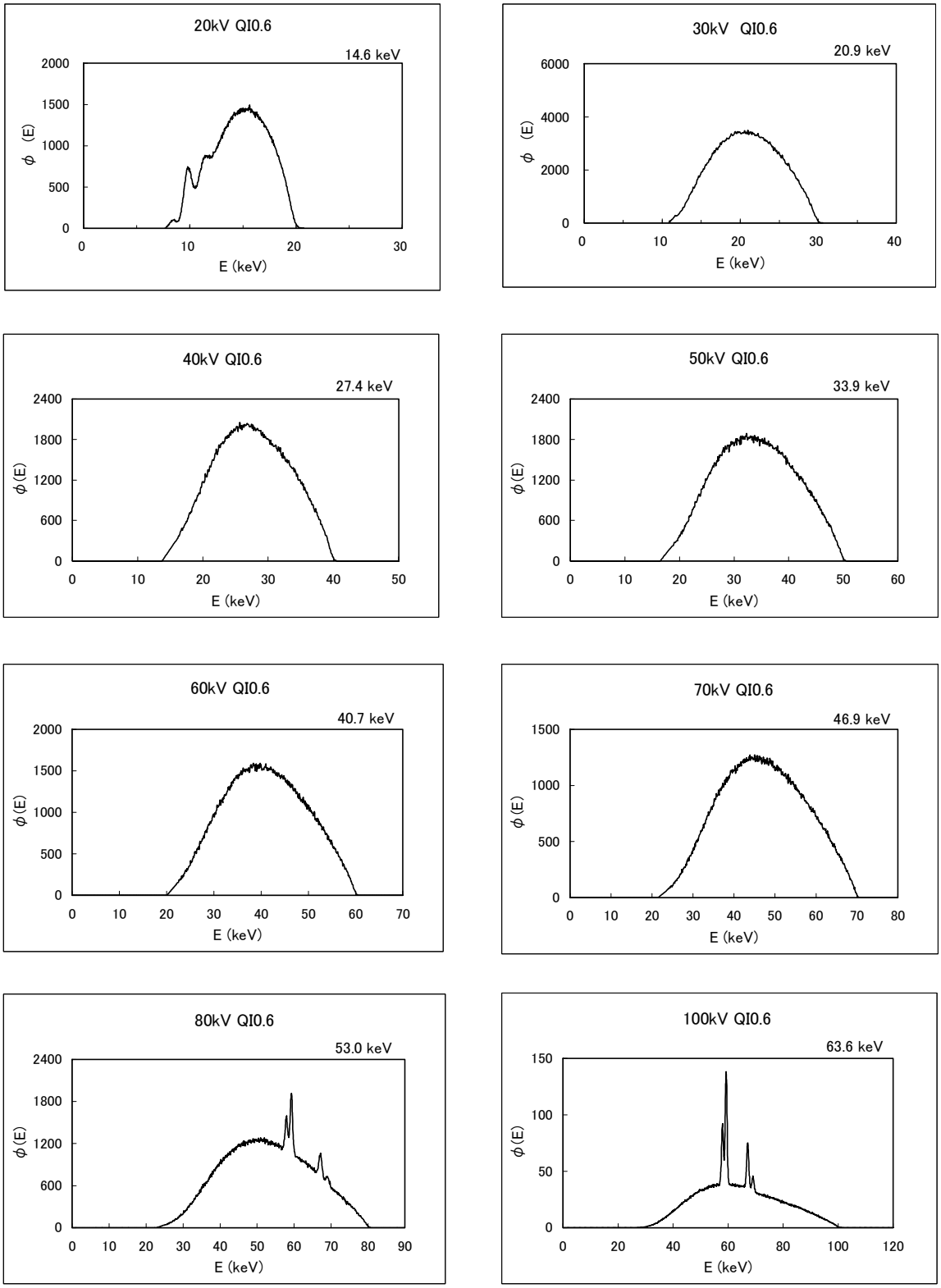
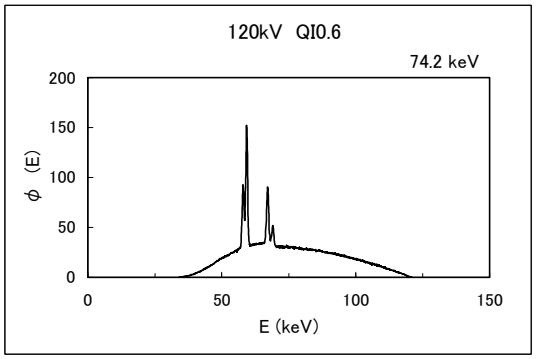
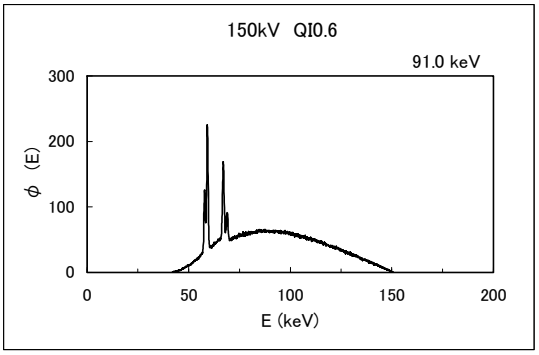
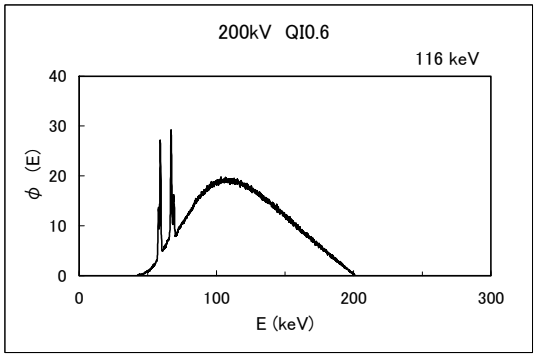
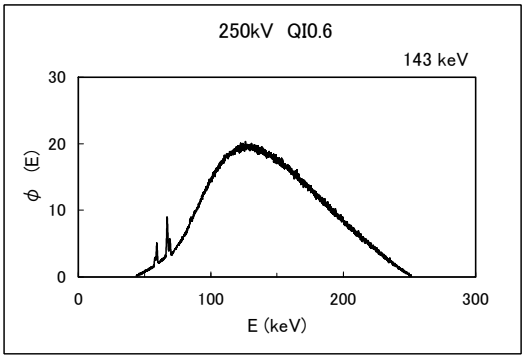


Fig.4－4 Fluence spectra of QI 0.6 series









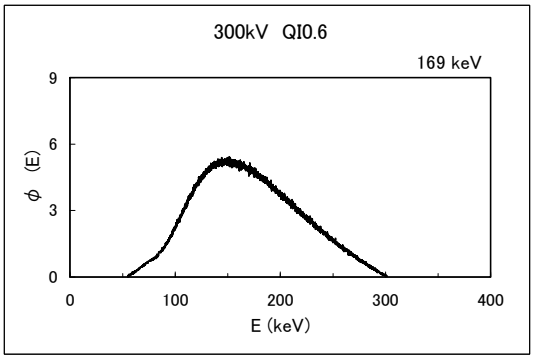


Fig.4－4 Countinued

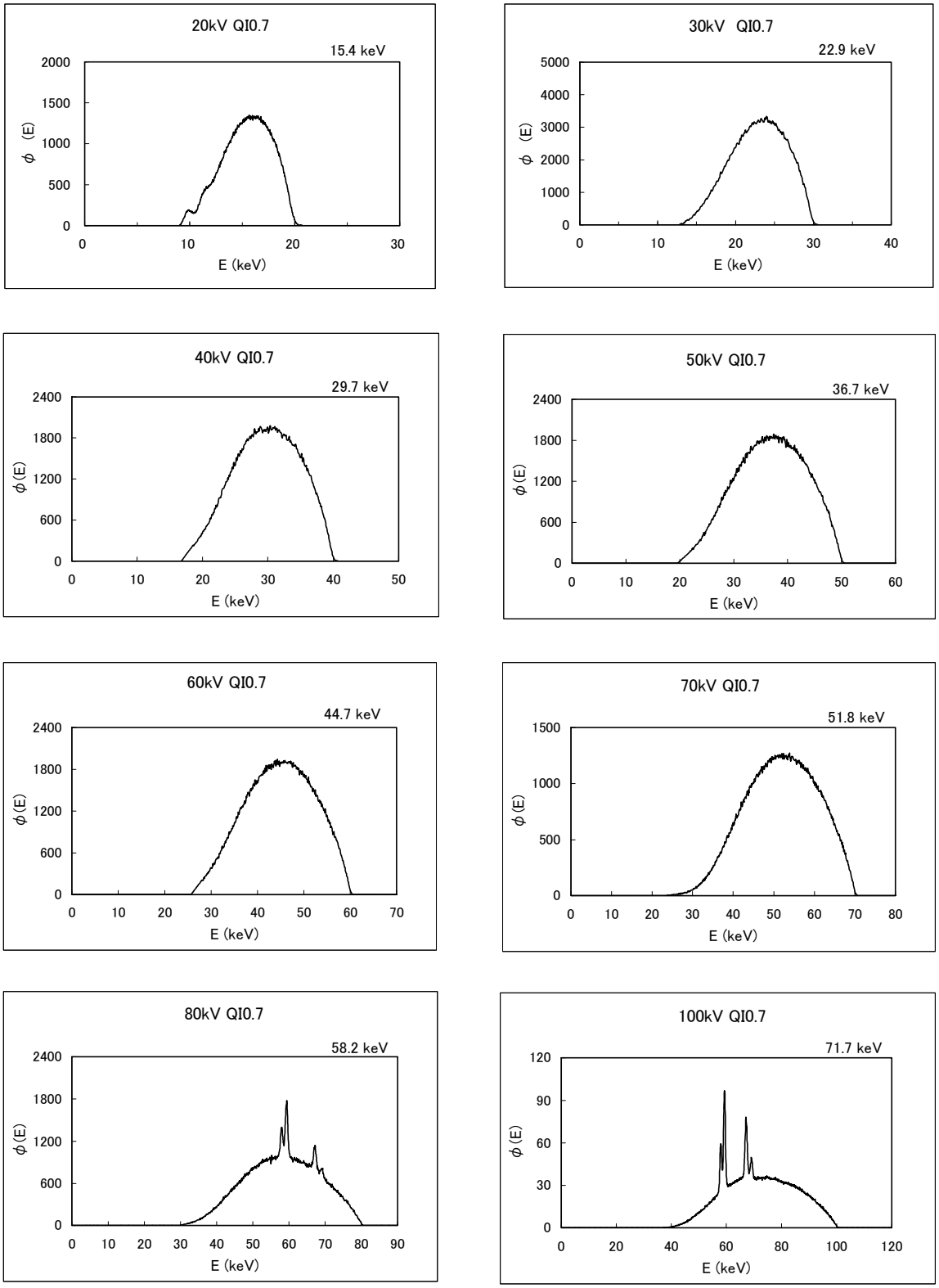
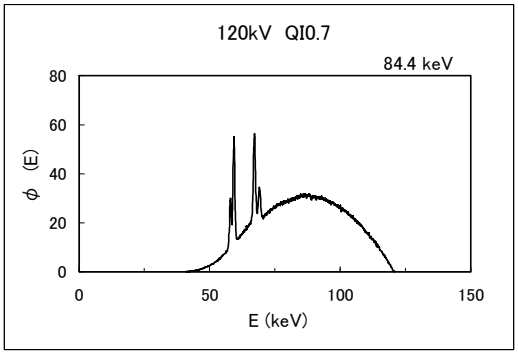
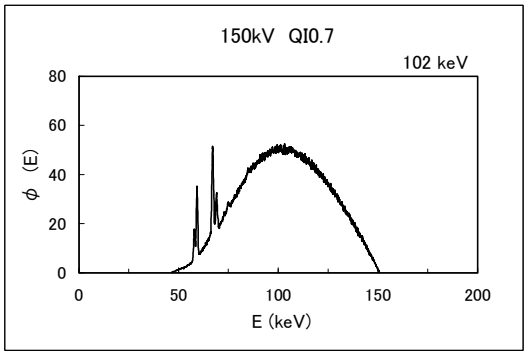
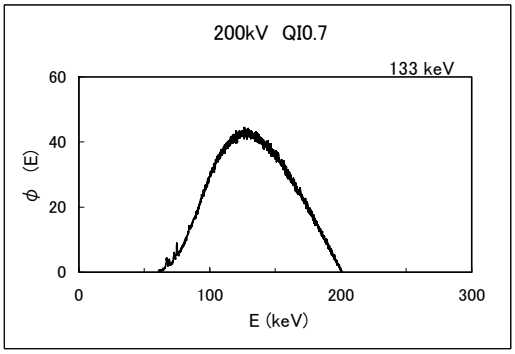
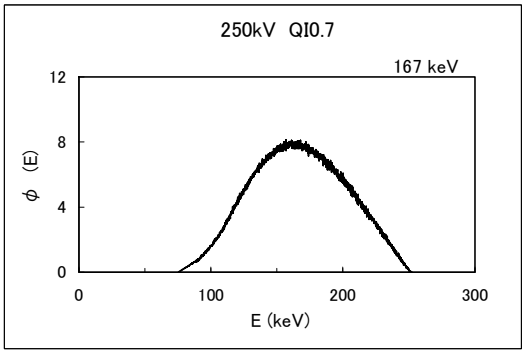


Fig.4－5 Fluence spectra of QI 0.7 series









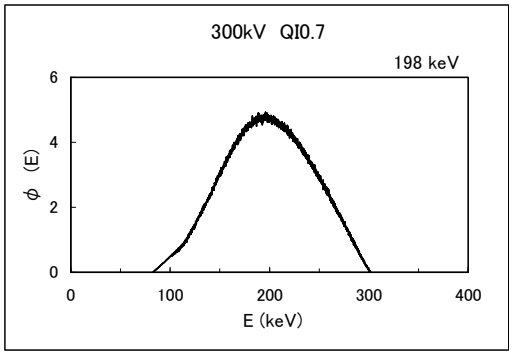


Fig.4－5 Countinued

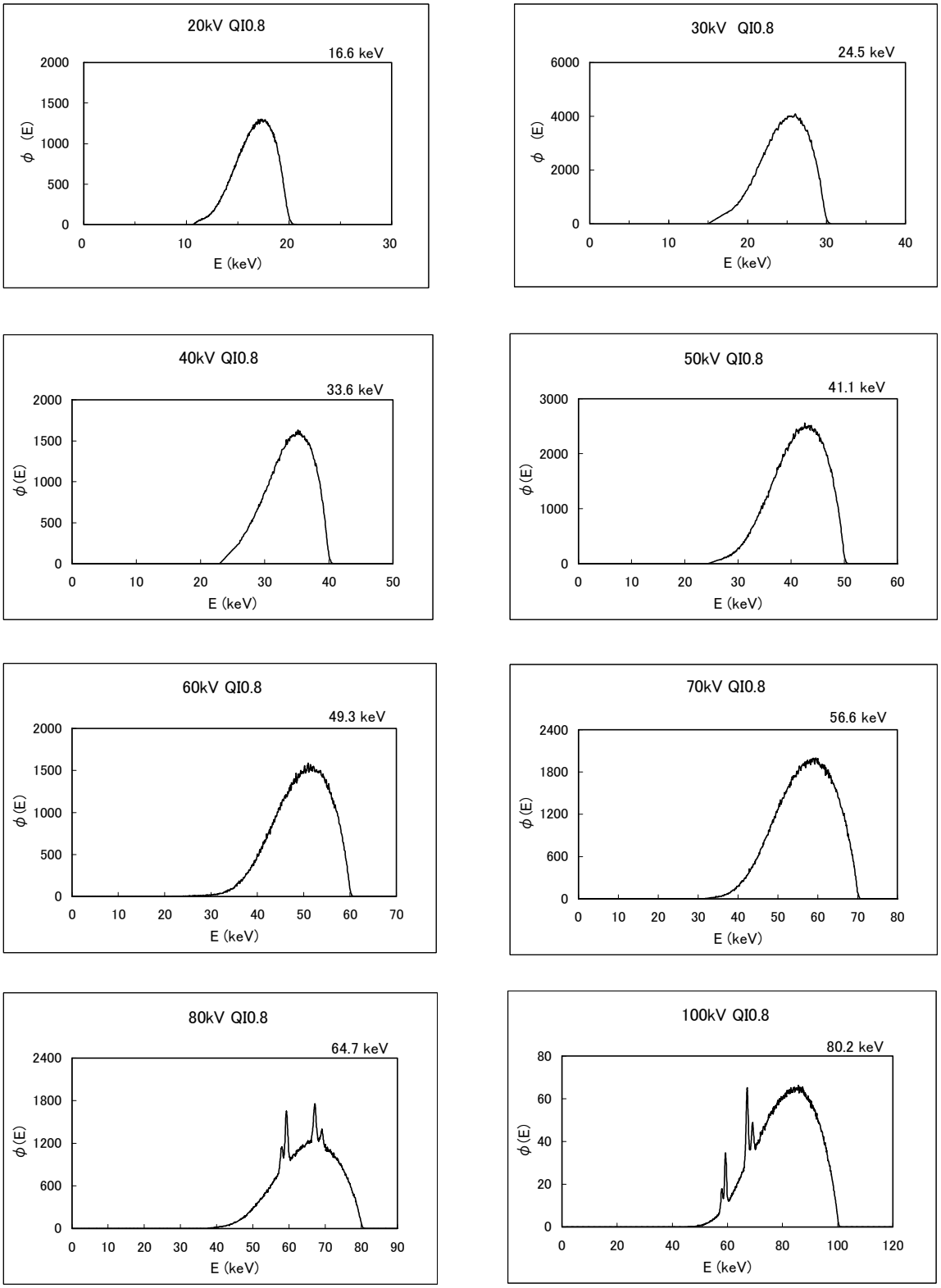
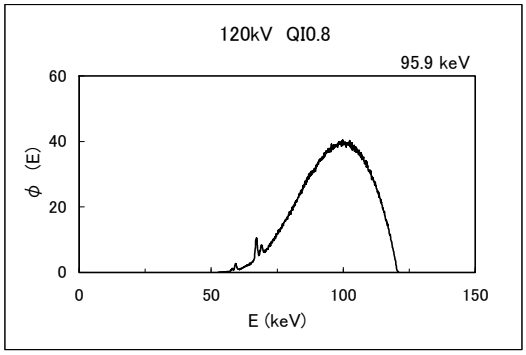
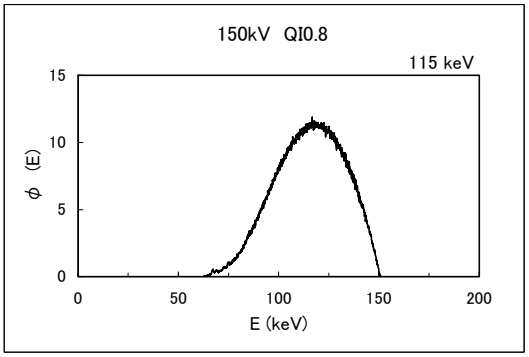
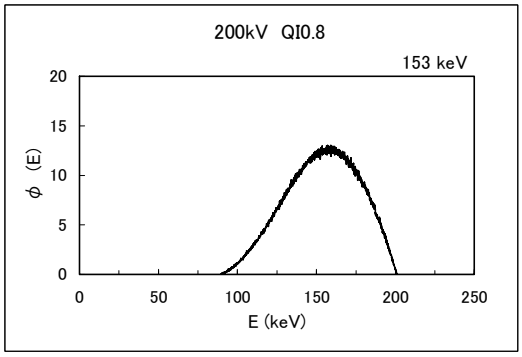
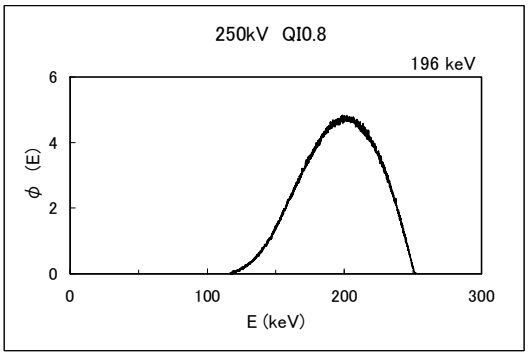


Fig.4－6 Fluence spectra of QI 0.8 series









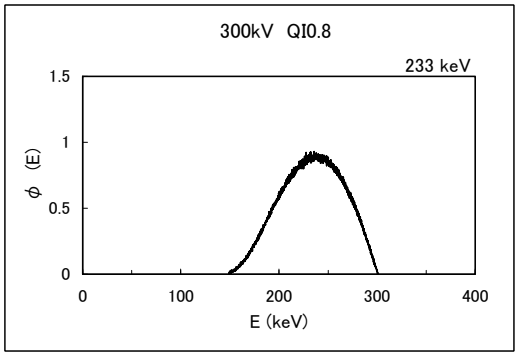


Fig.4－6 Countinued

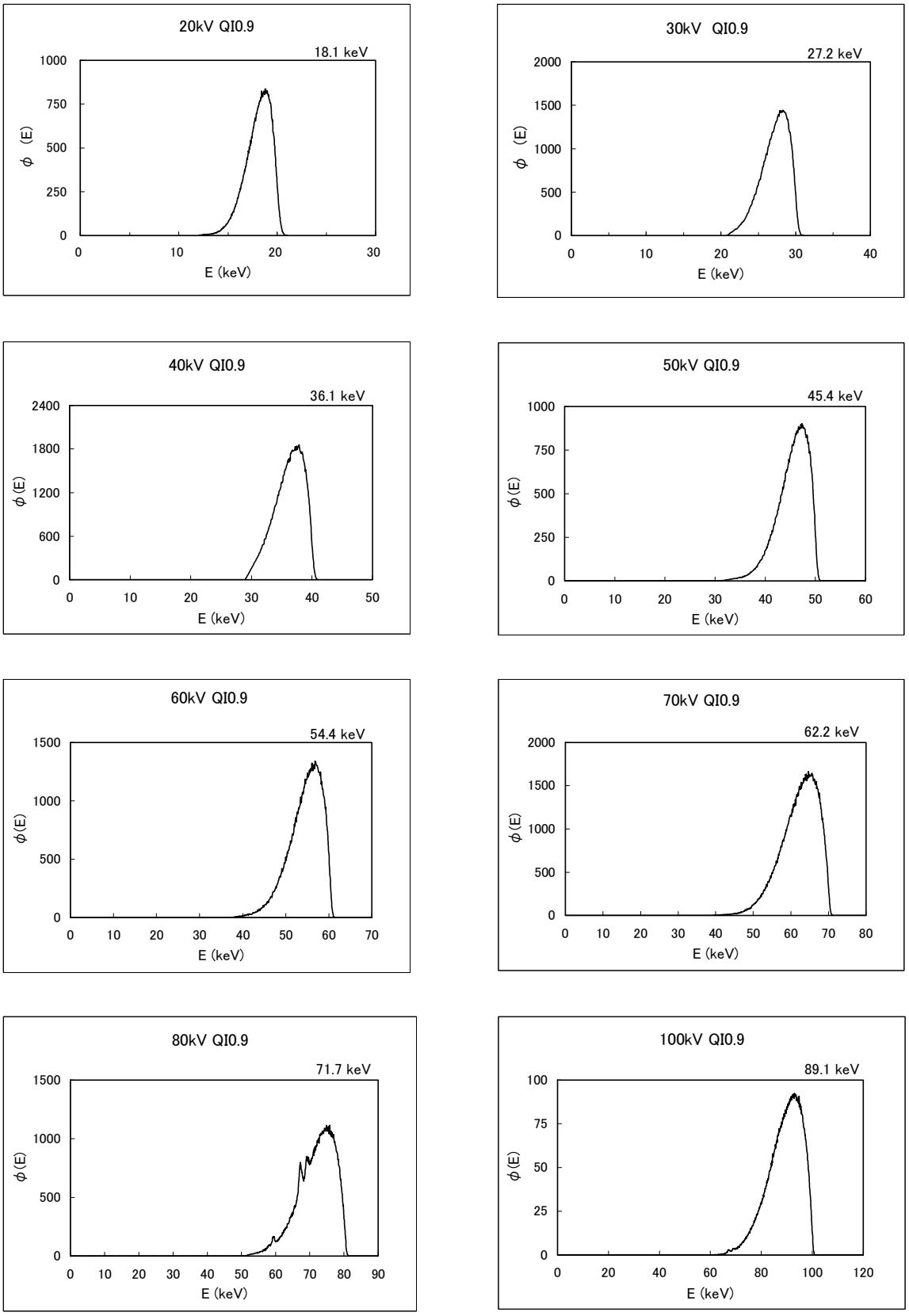


Fig.4－7 Fluence spectra of QI 0.9 series

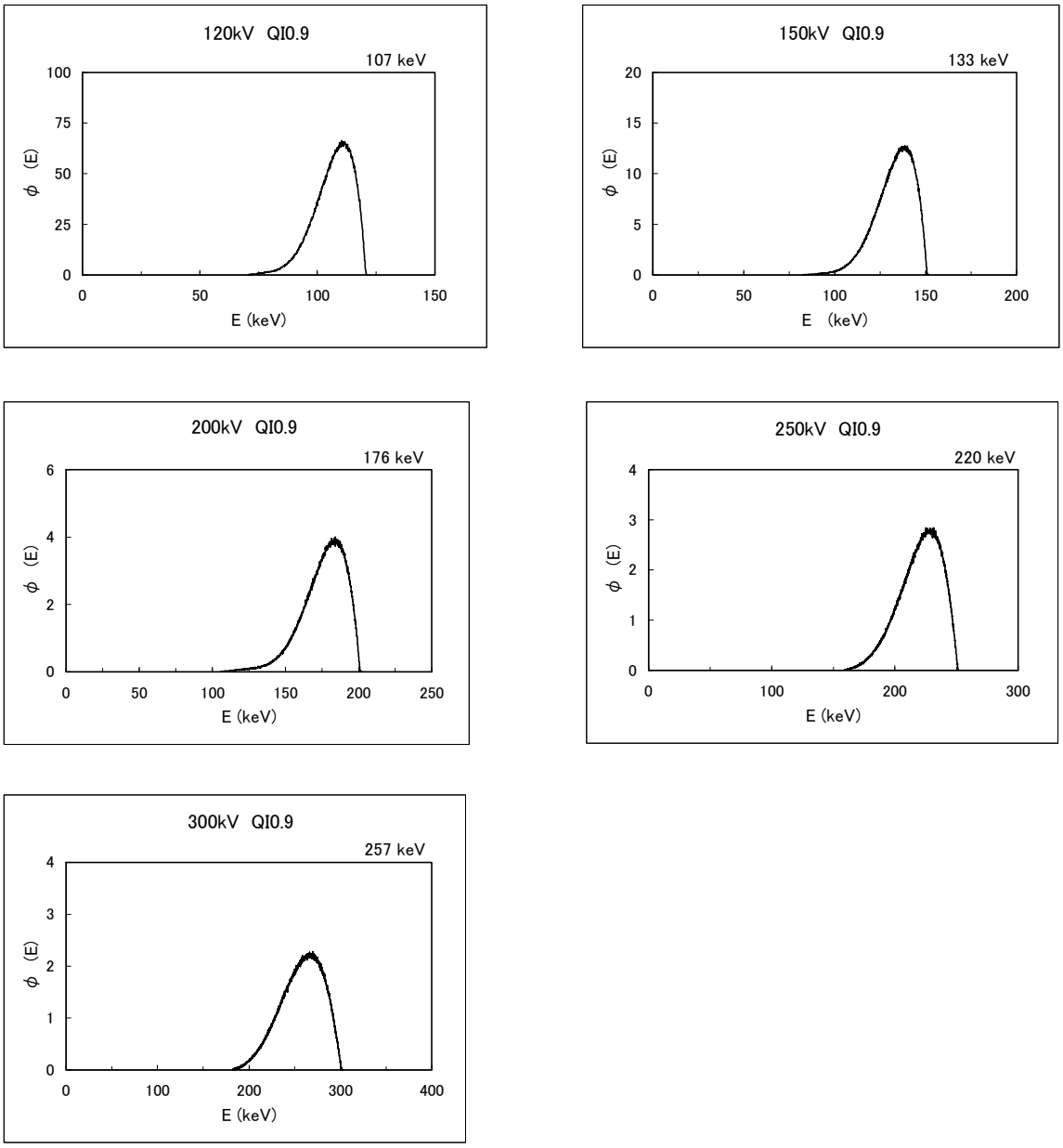


Fig. 4－7 Countinued

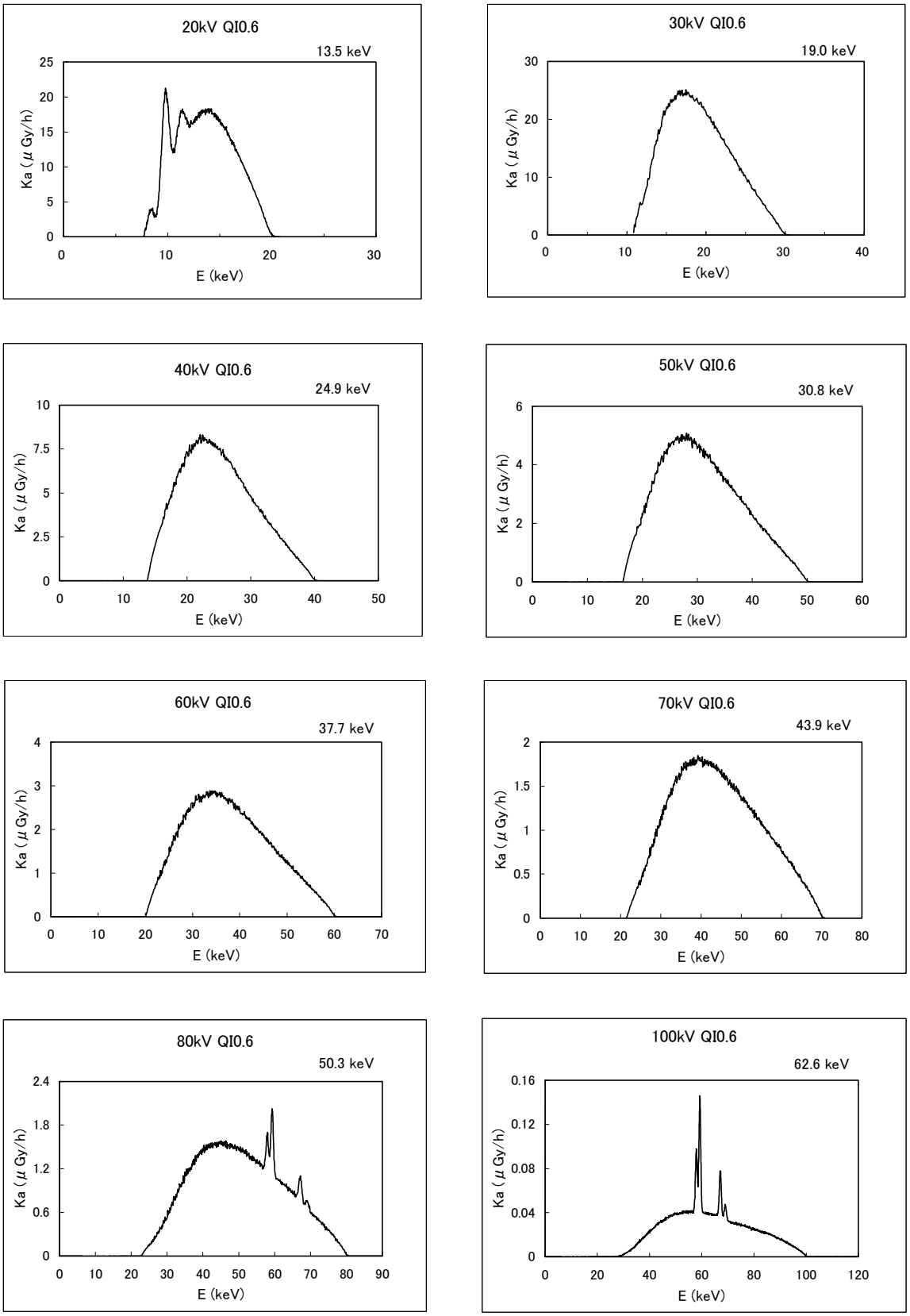
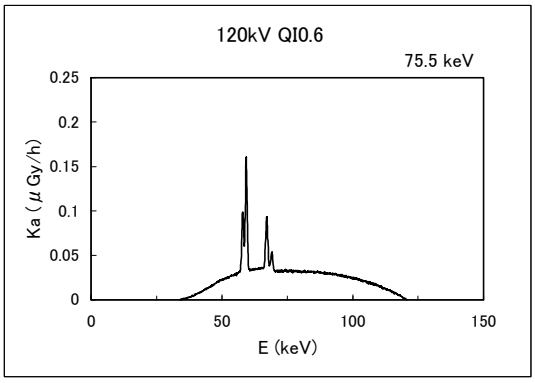
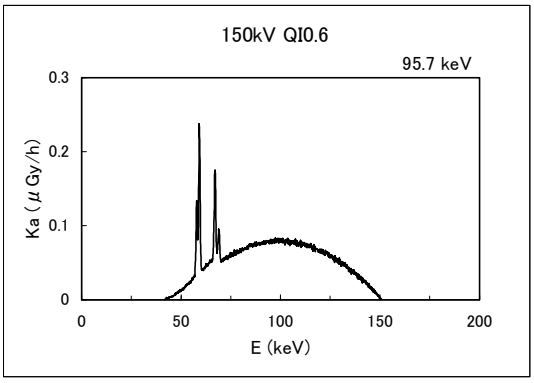
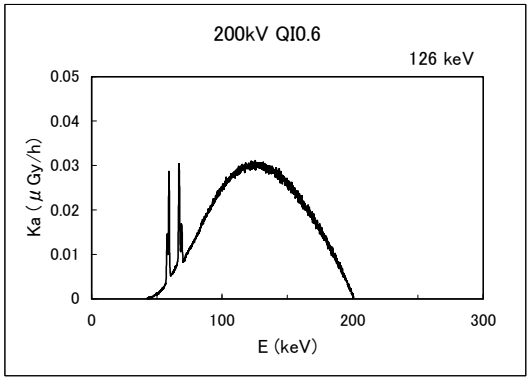
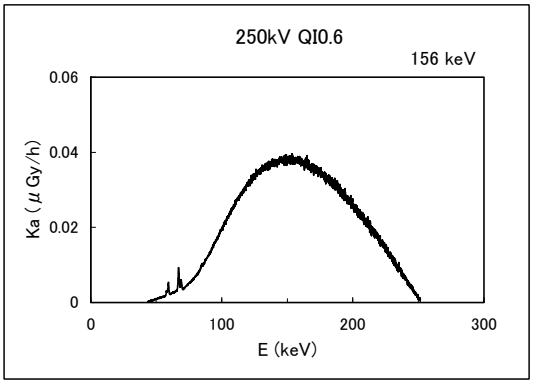


Fig.4－8 Air-kerma spectra of QI 0.6 series









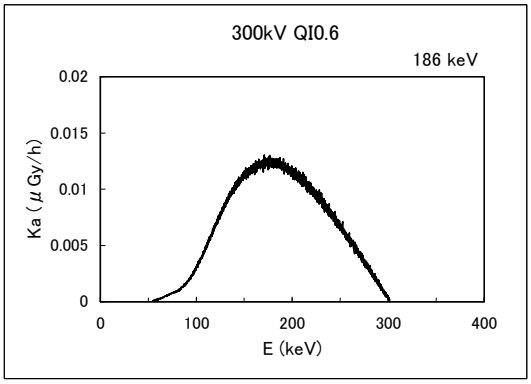


Fig. 4－8 Countinued

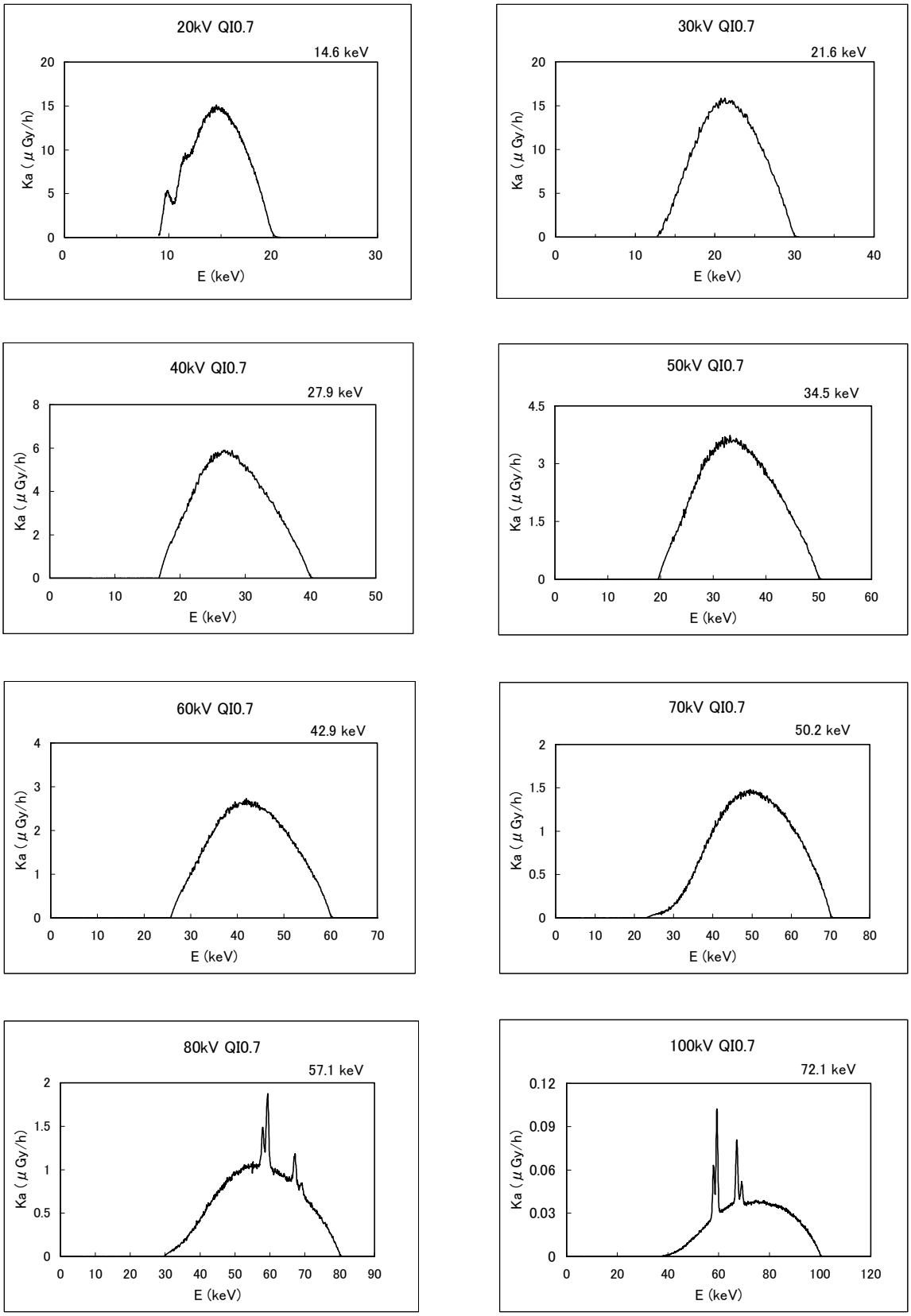
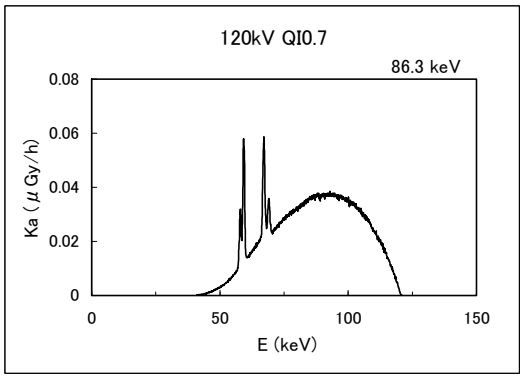
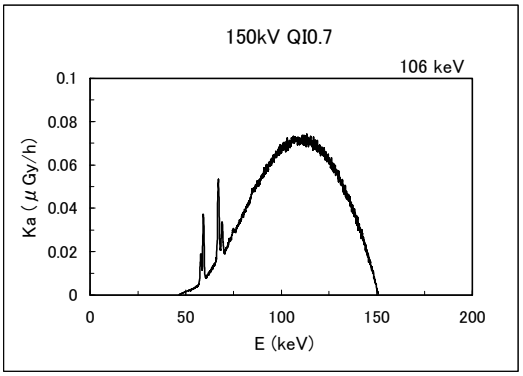
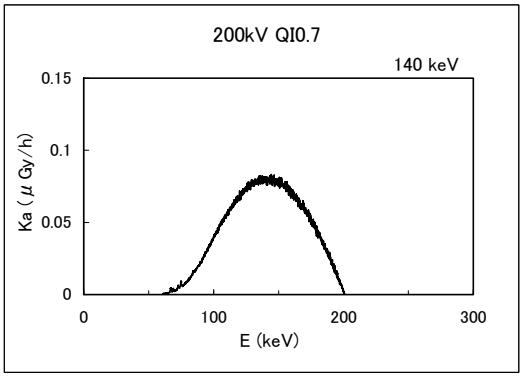
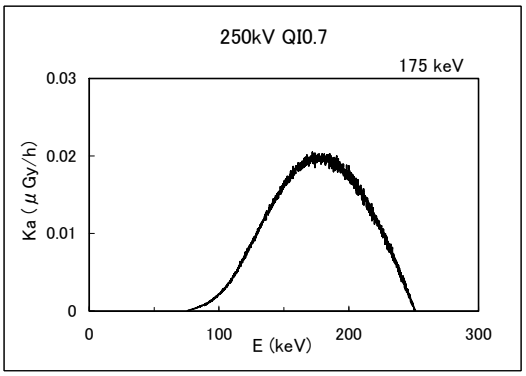


Fig.4－9 Air-kerma spectra of QI 0.7 series









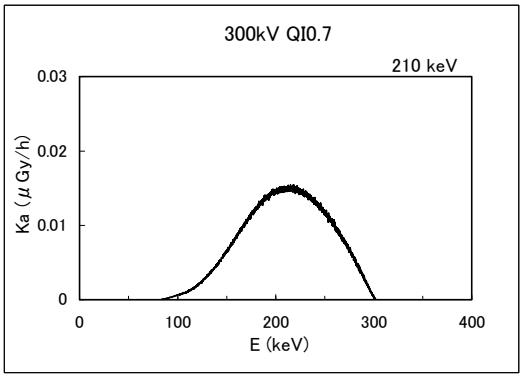


Fig. 4－9 Countinued

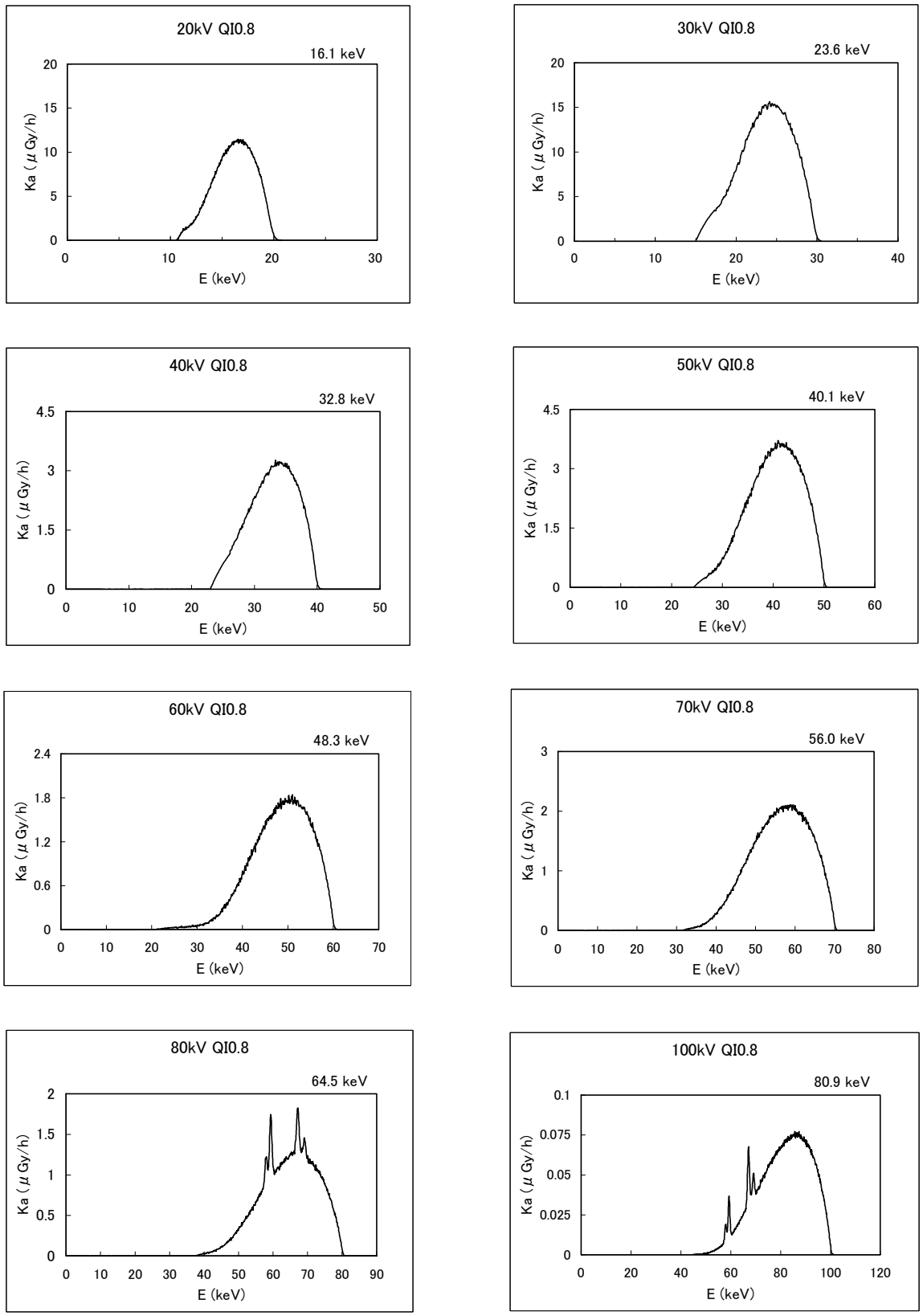
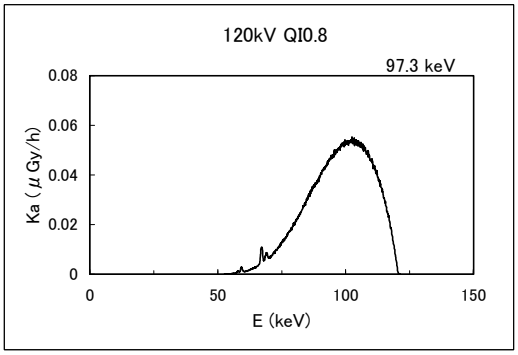
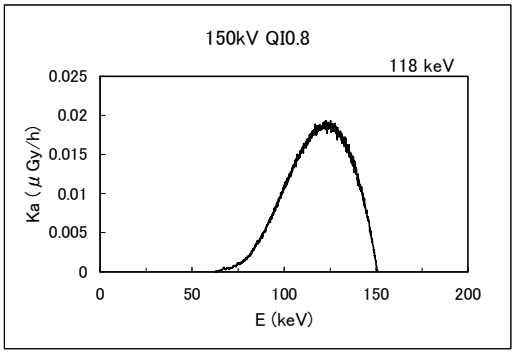
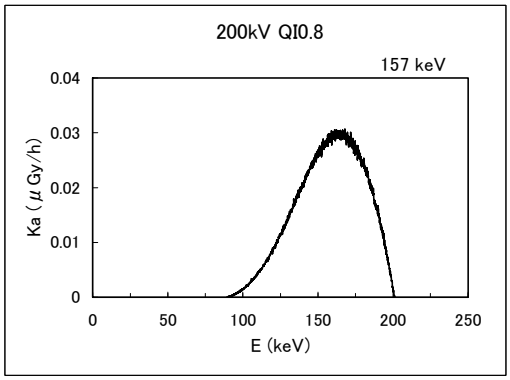
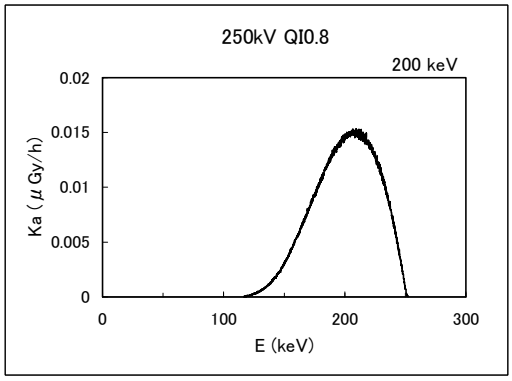


Fig.4－10 Air-kerma spectra of QI 0.8 series









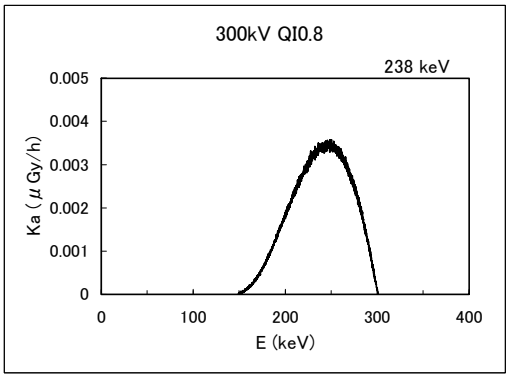


Fig. 4－10 Countinued

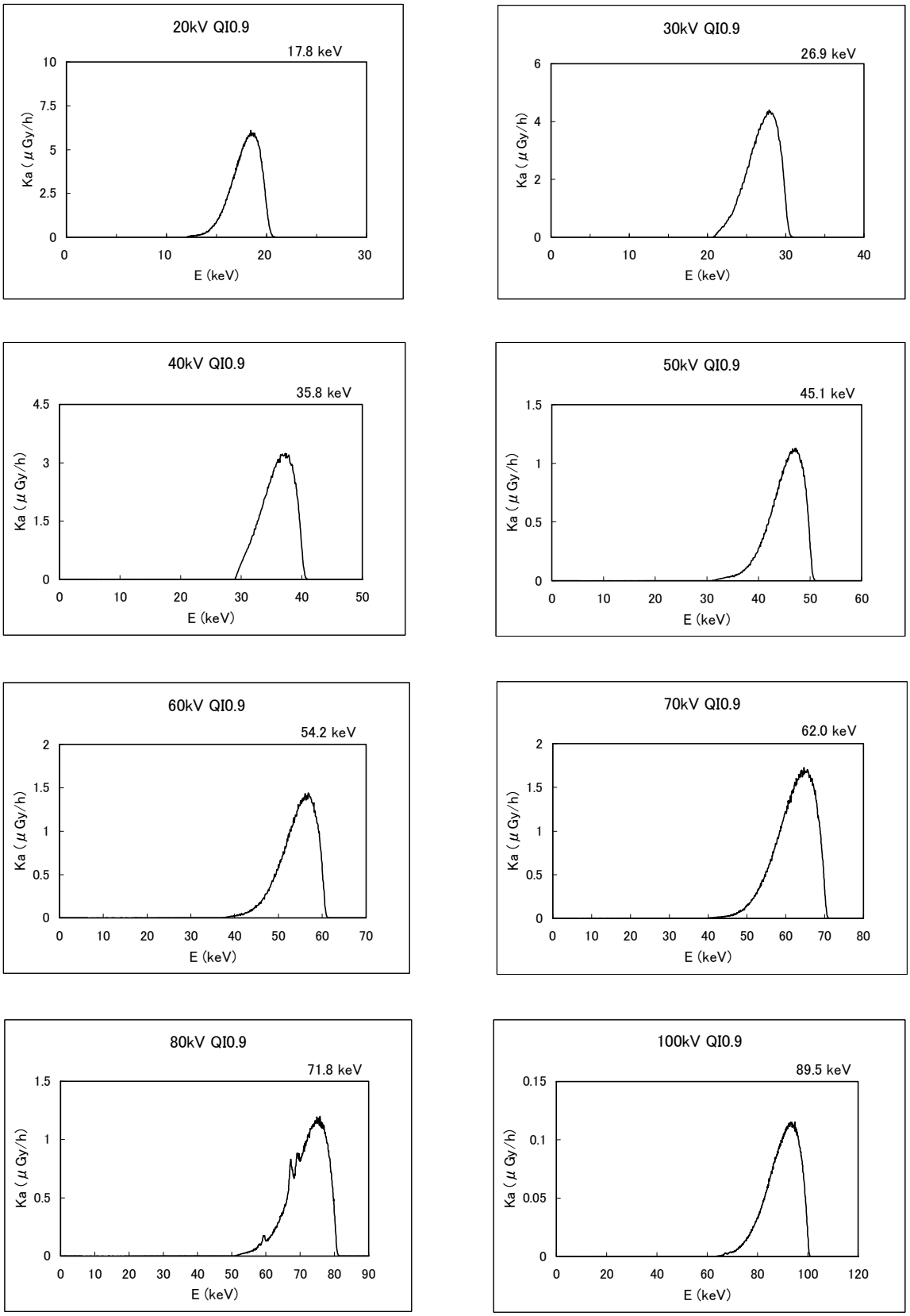
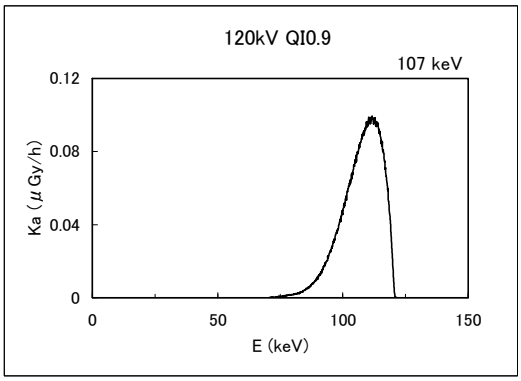
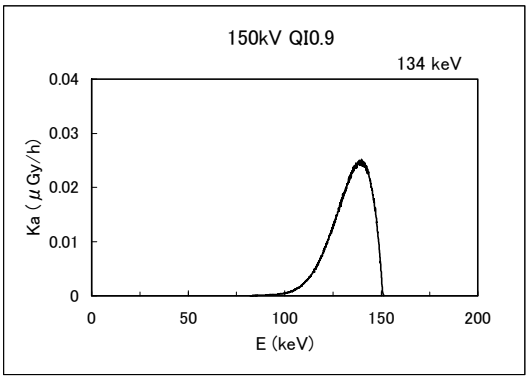
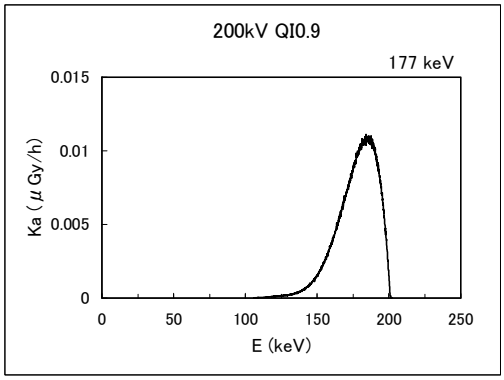
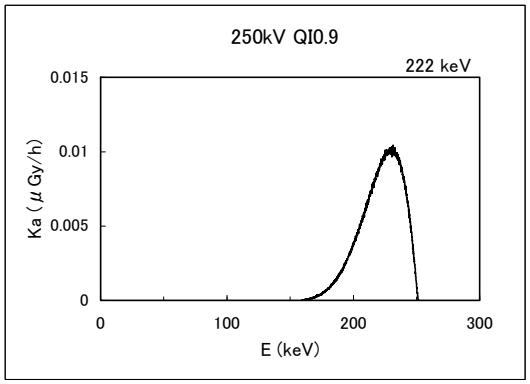


Fig.4－11 Air-kerma spectra of QI 0.9 series









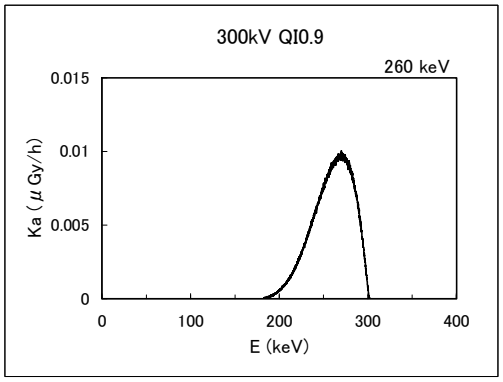


Fig. 4－11 Countinued

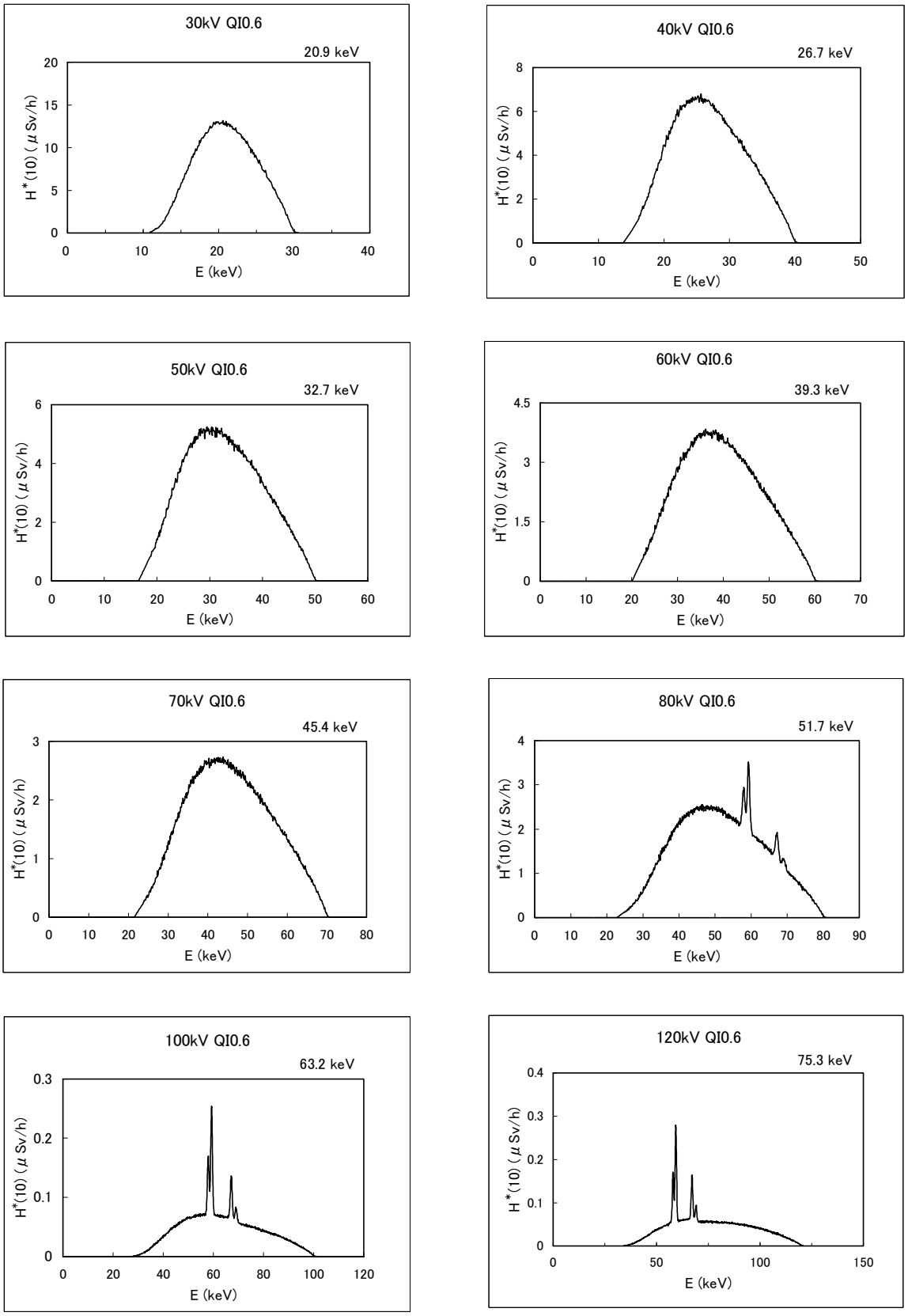


Fig.4－12　Ambient dose equivalent spectra of QI 0.6 series (H*(10))

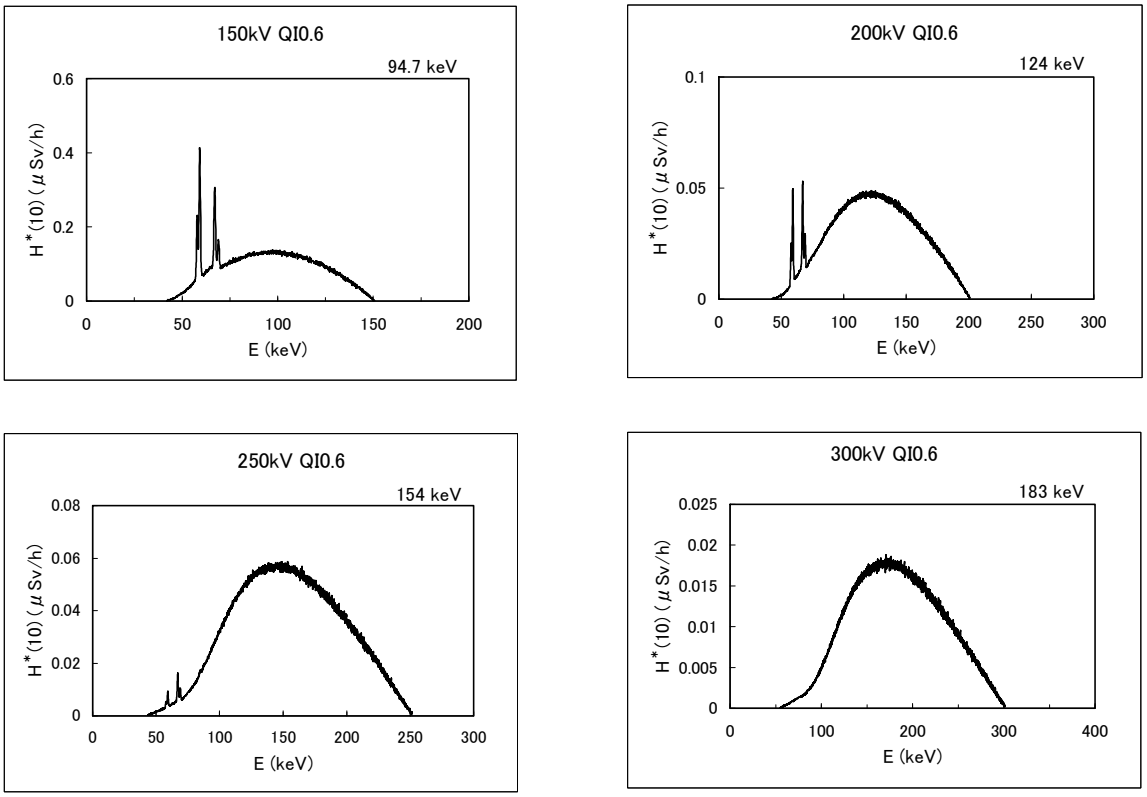


Fig. 4－12 Countinued

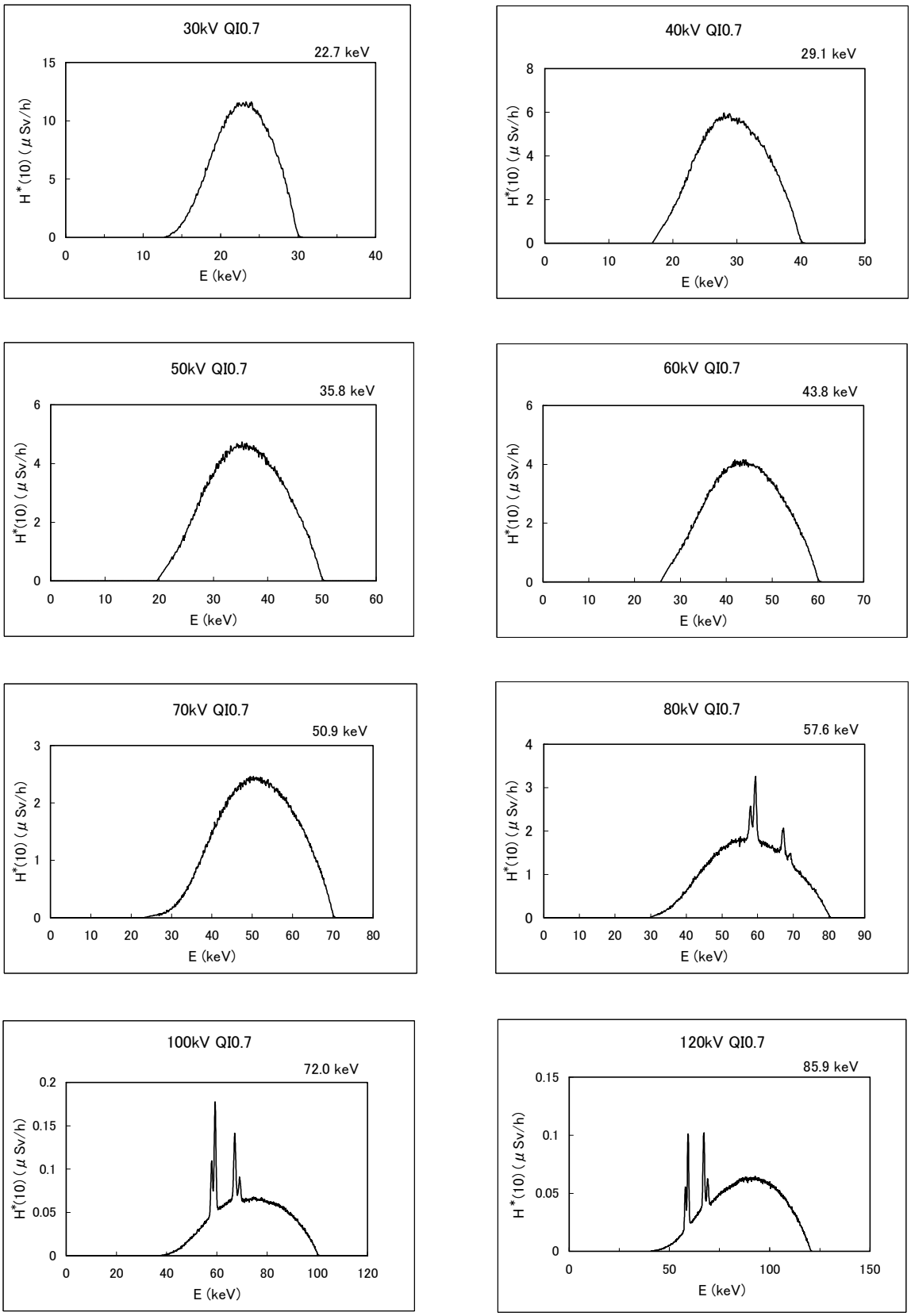


Fig.4－13　Ambient dose equivalent spectra of QI 0.7 series (H*(10))

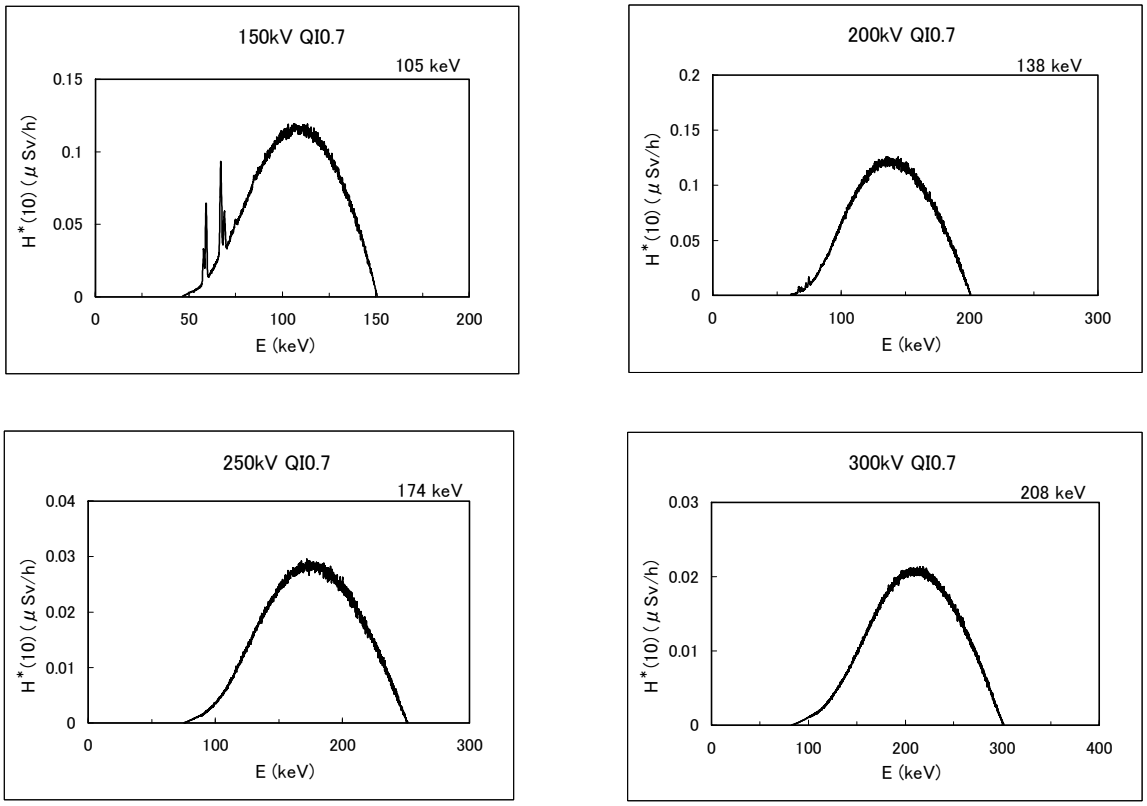


Fig. 4－13 Countinued

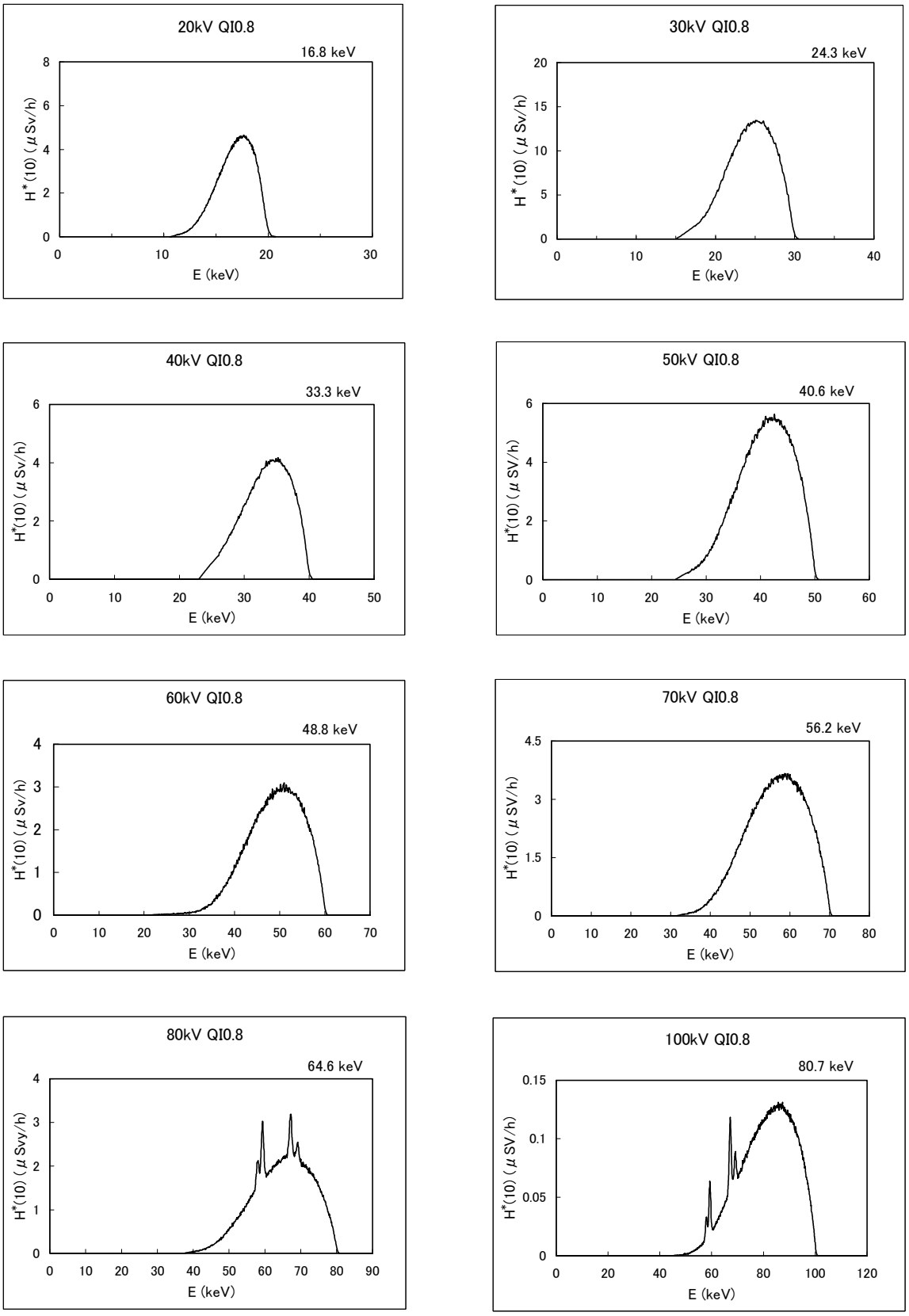
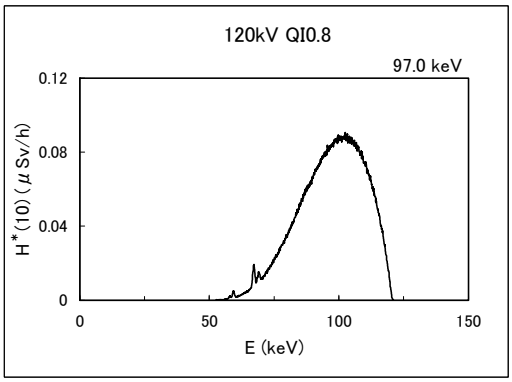
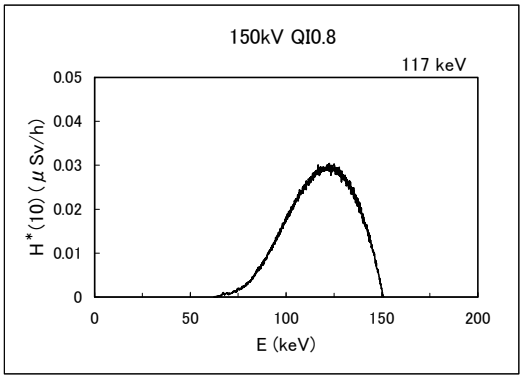
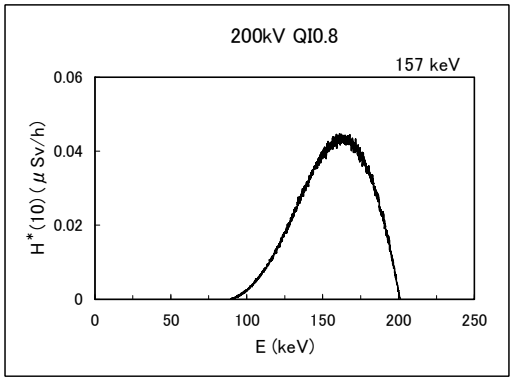
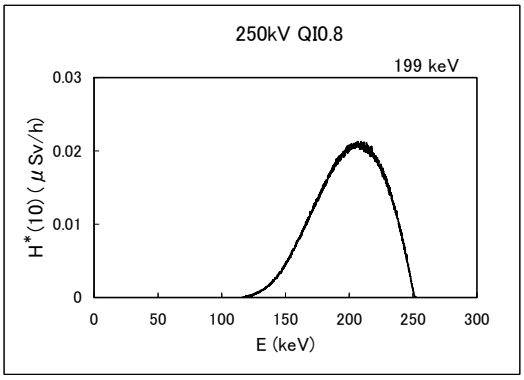


Fig.4－14　Ambient dose equivalent spectra of QI 0.8 series (H*(10))









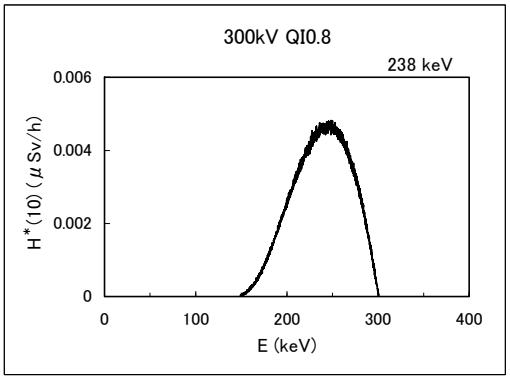


Fig. 4－14 Countinued

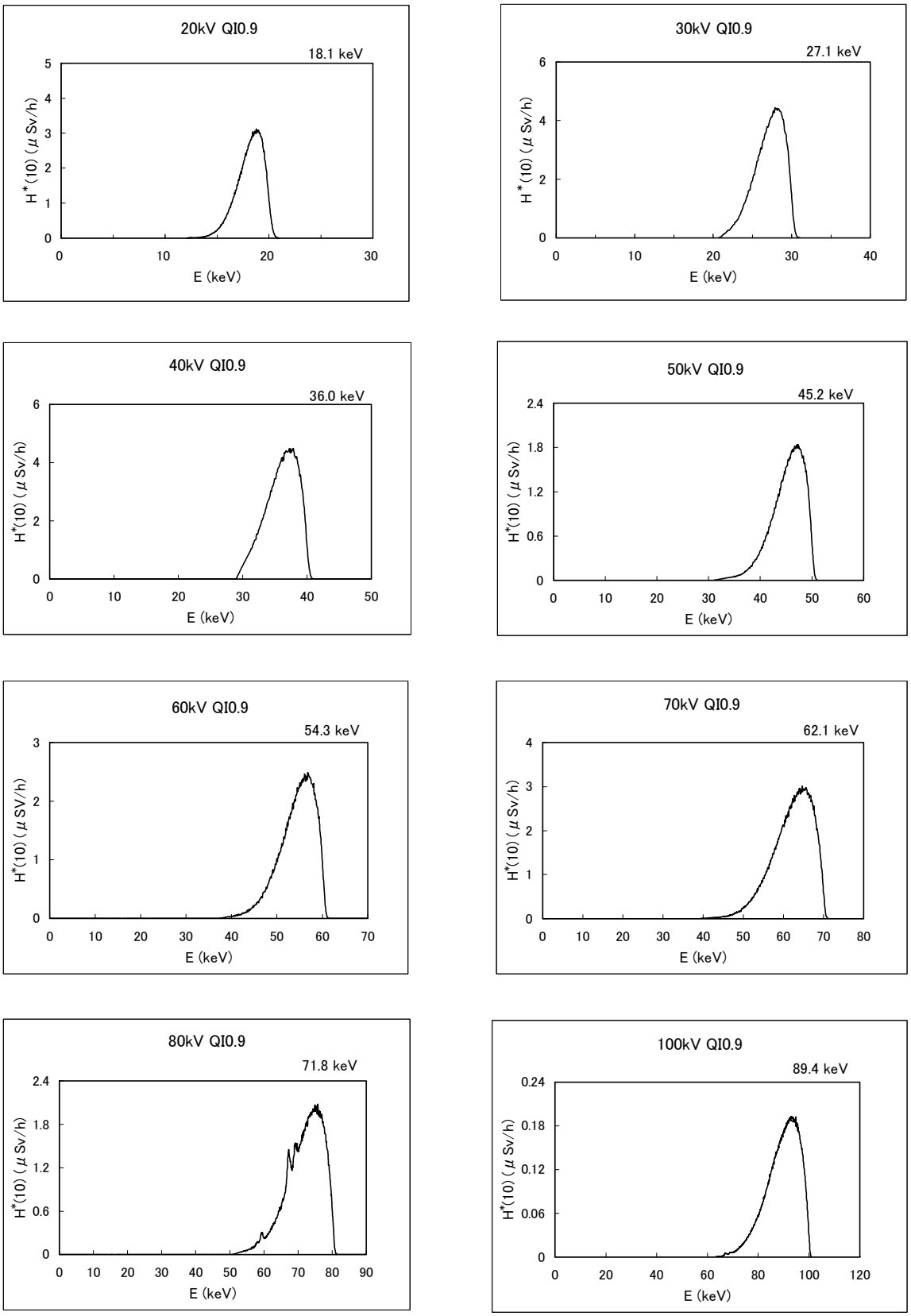
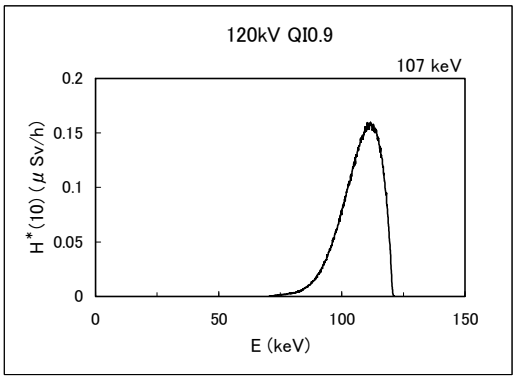
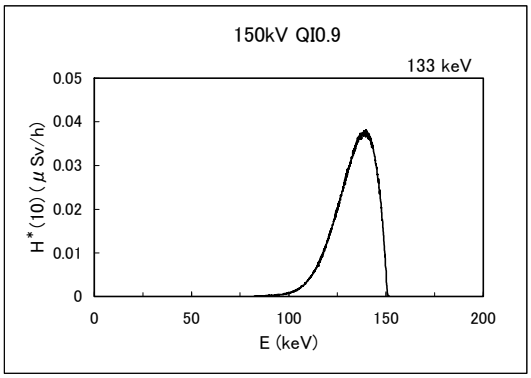
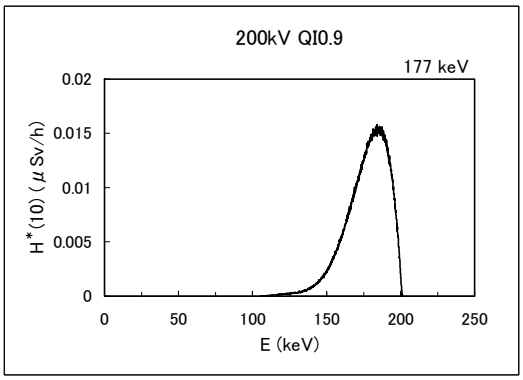
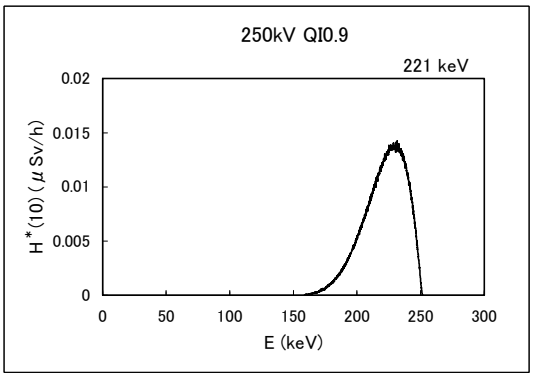


Fig.4－15　Ambient dose equivalent spectra of QI 0.9 series (H*(10))









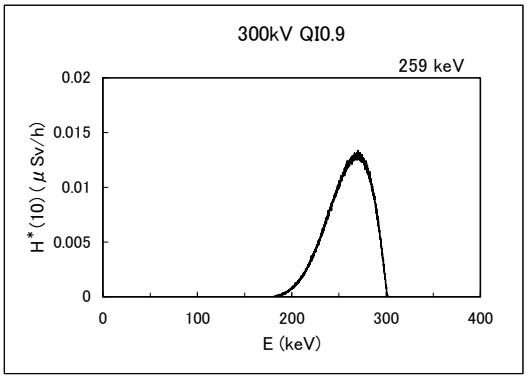


Fig. 4－15 Countinued

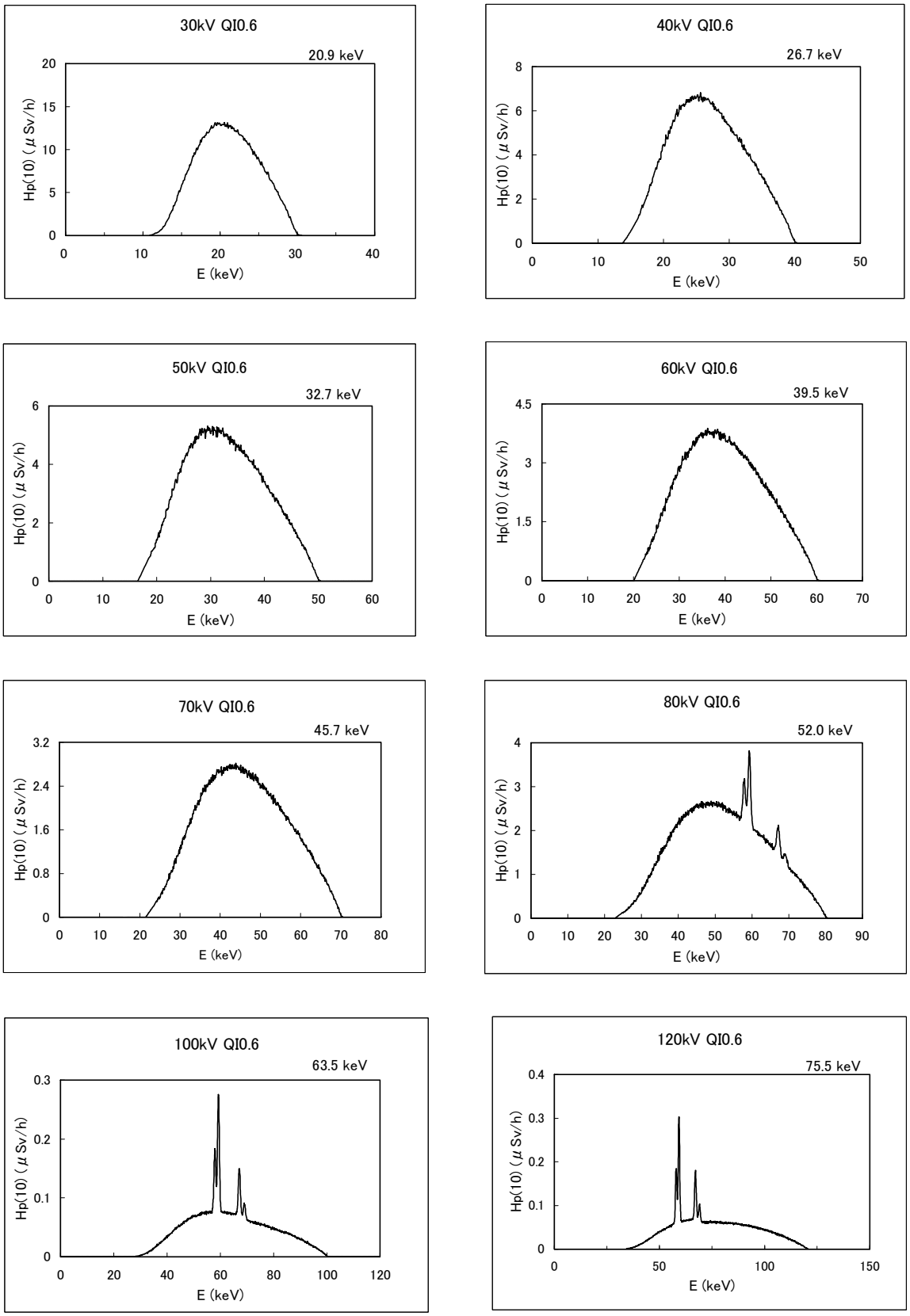


Fig.4－16 Personal dose equivalent spectra for QI 0.6 series ($H_p(10)$)

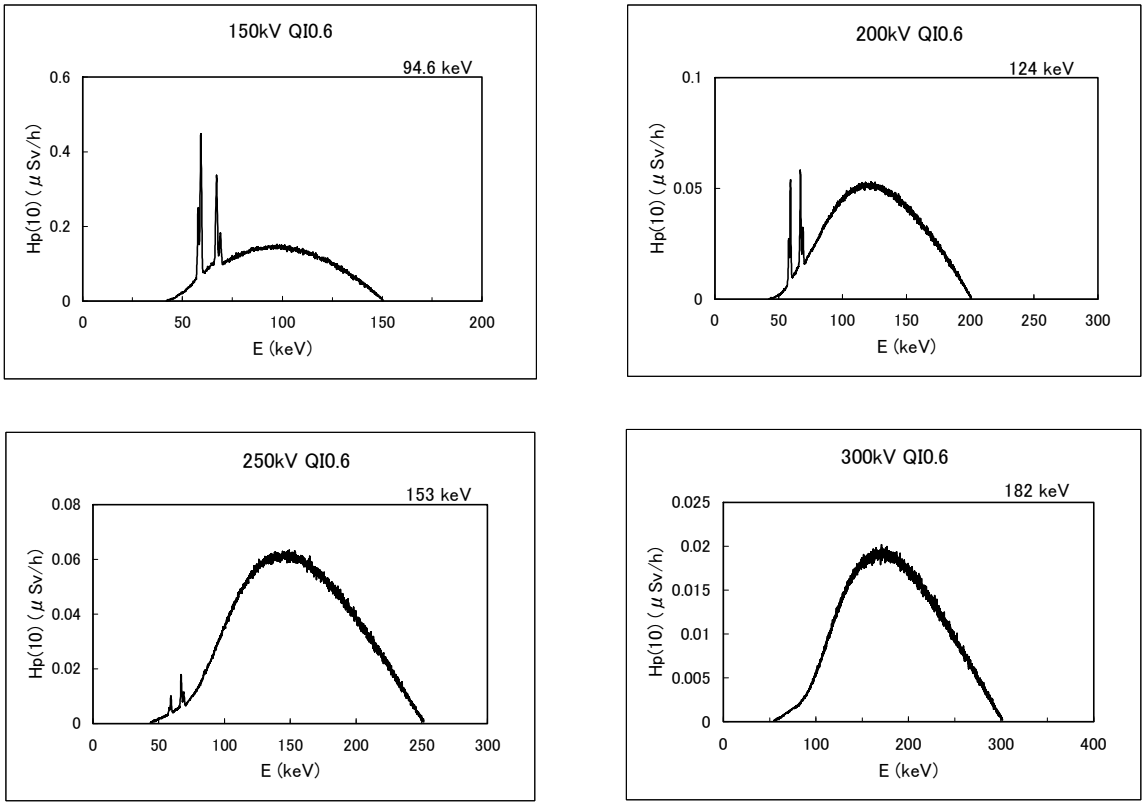


Fig. 4－16 Countinued

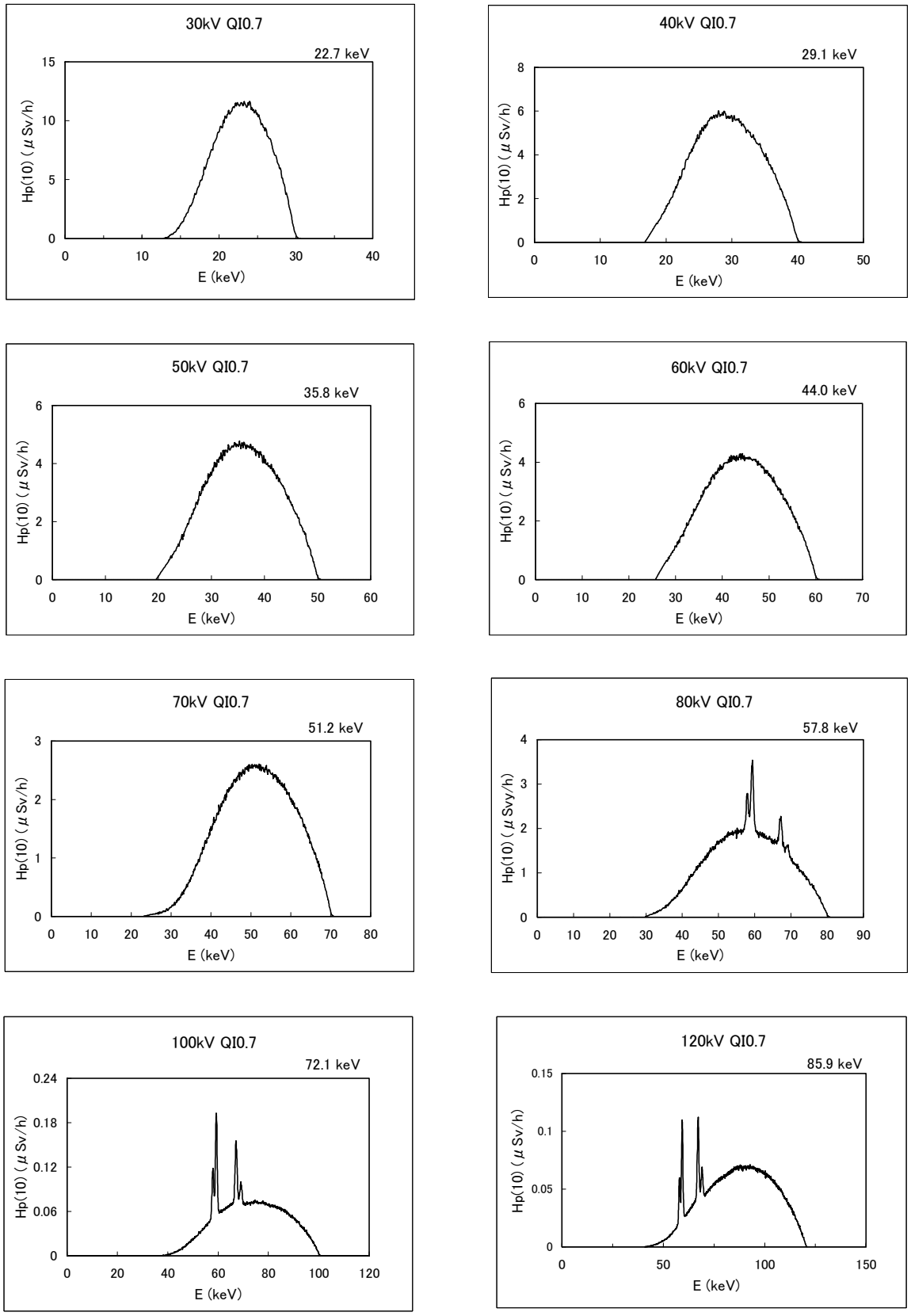
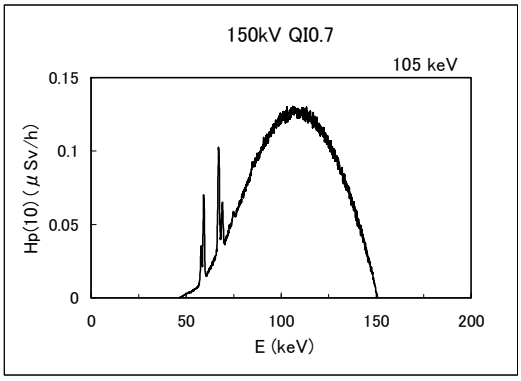
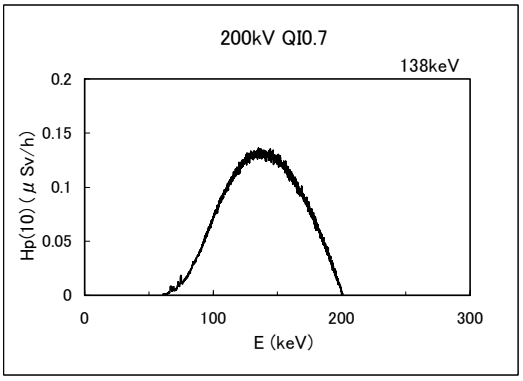
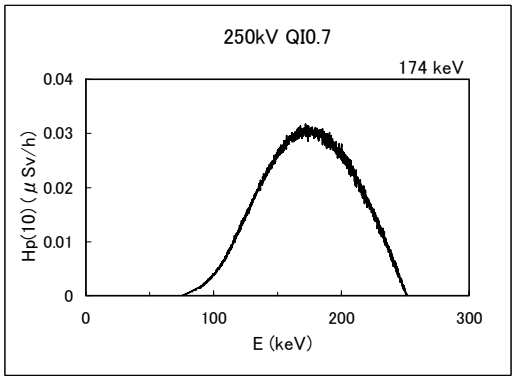


Fig.4－17 Personal dose equivalent spectra for QI 0.7 series ($H_p(10)$)







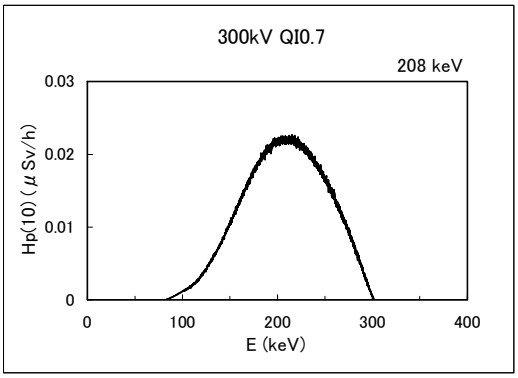


Fig. 4－17 Countinued

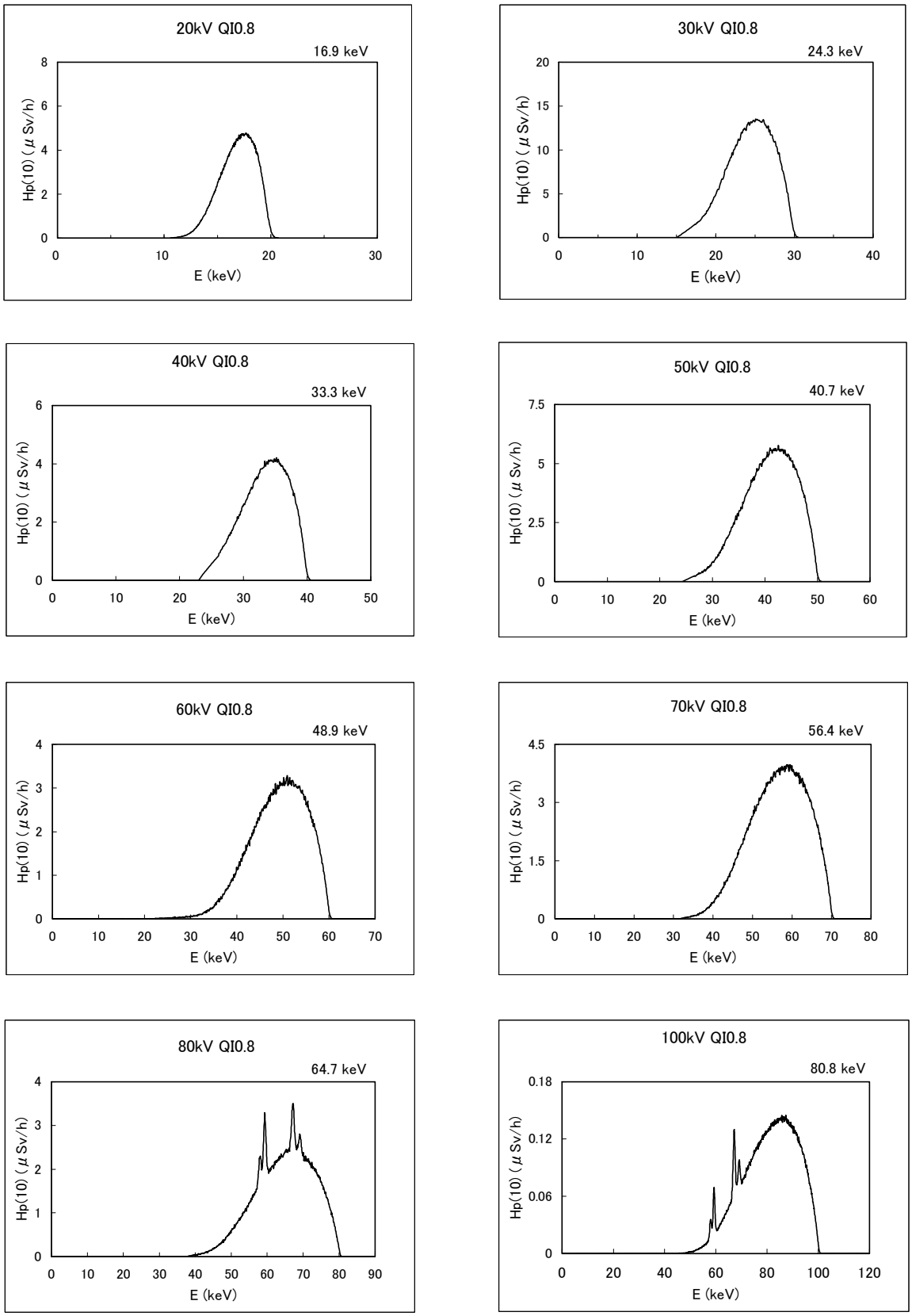
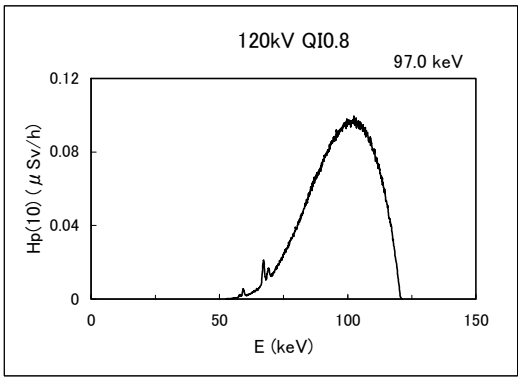
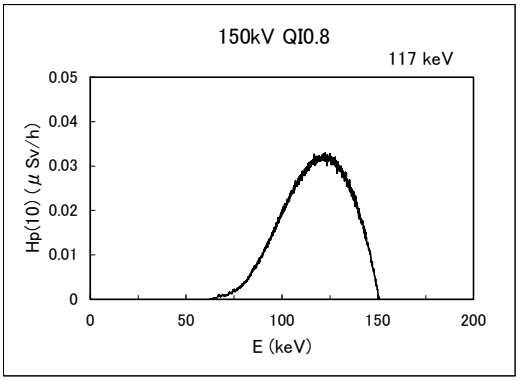
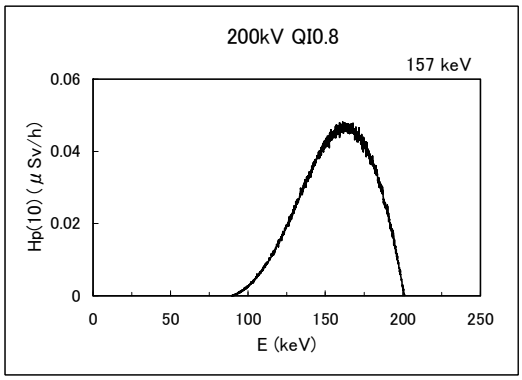
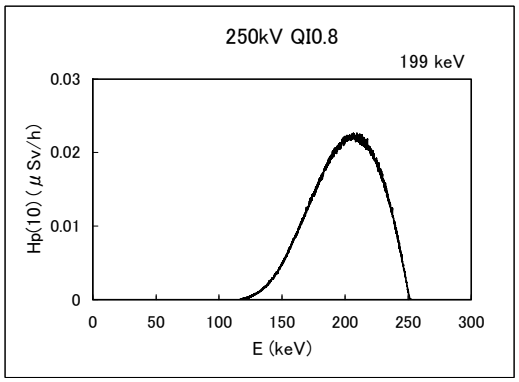


Fig.4－18 Personal dose equivalent spectra for QI 0.8 series ($H_p(10)$)









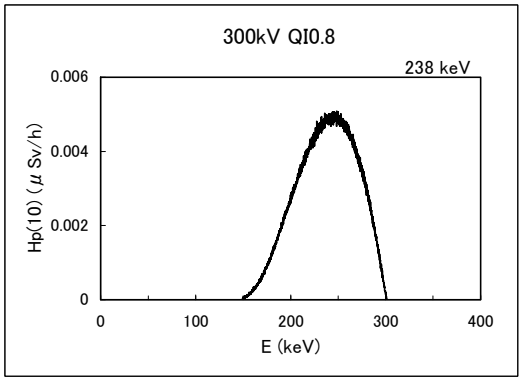


Fig. 4－18 Countinued

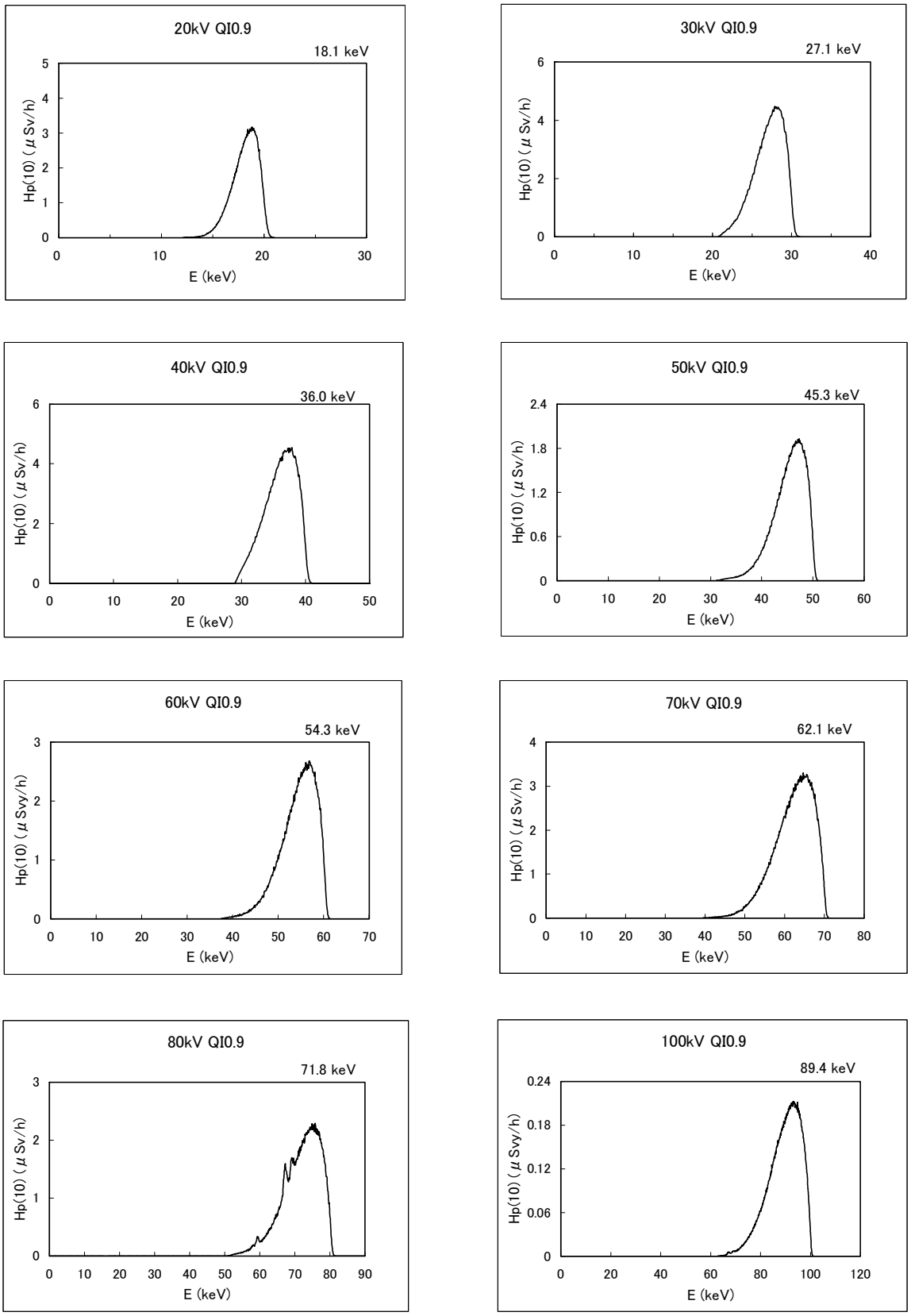
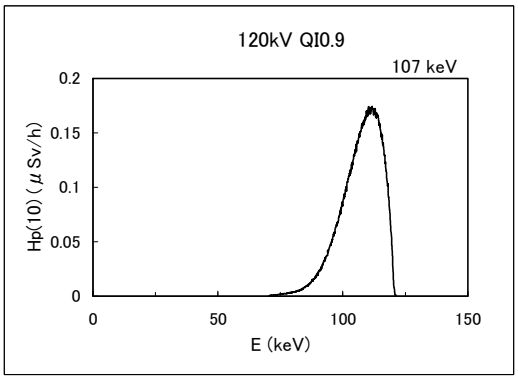
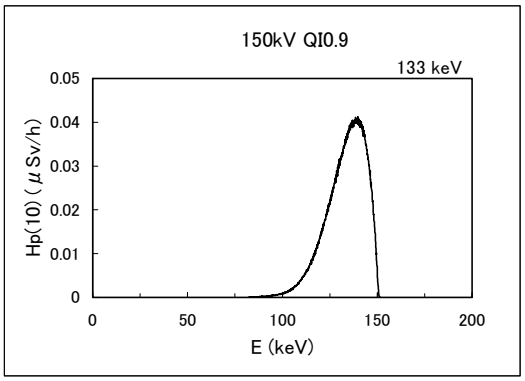
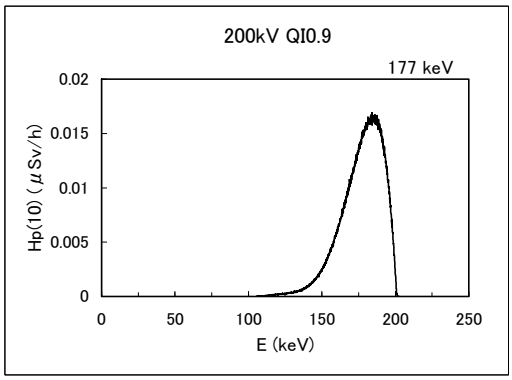
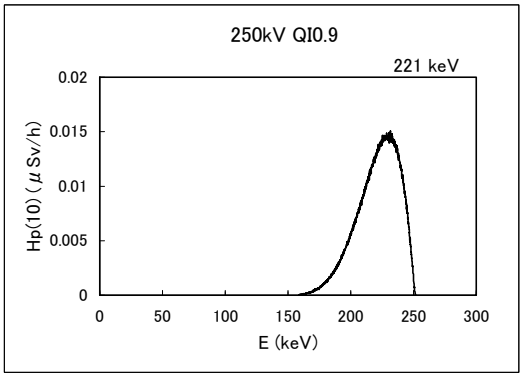


Fig.4－19 Personal dose equivalent spectra for QI 0.9 series ($H_p(10)$)









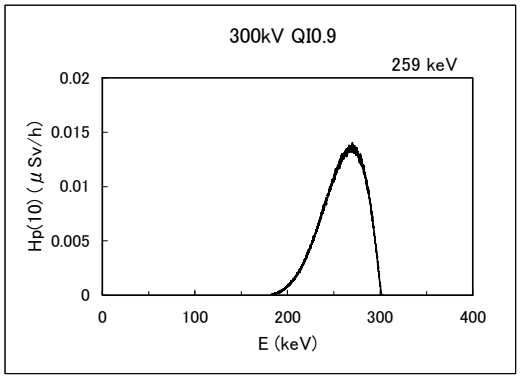
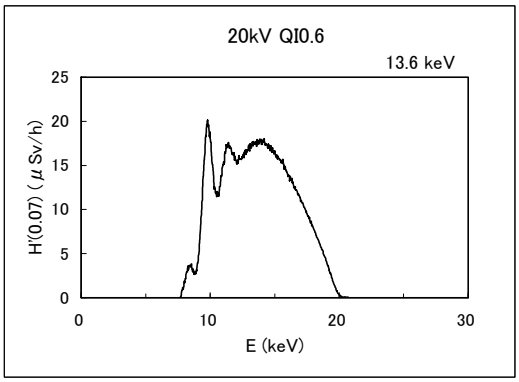
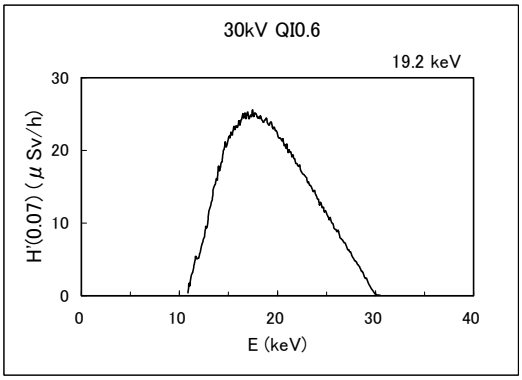
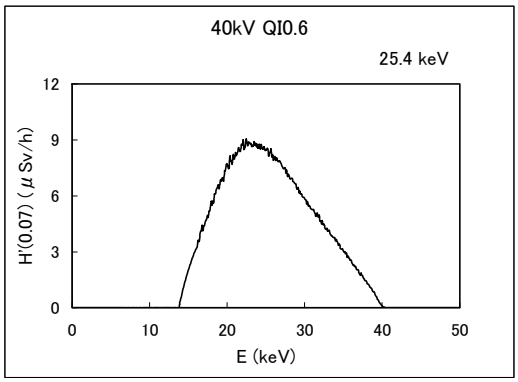
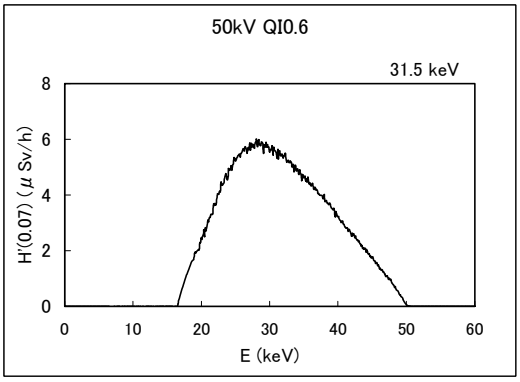


Fig. 4－19 Countinued









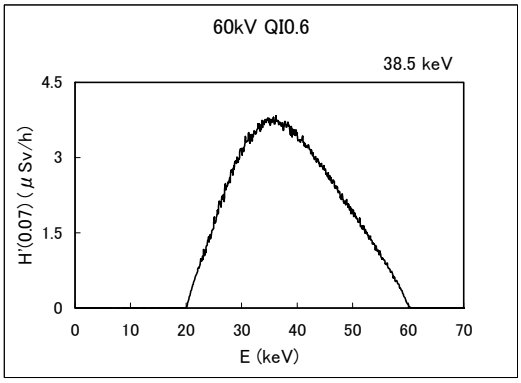


Fig.4－20 Directional dose equivalent spectra of QI 0.6 series (H'(0.07))

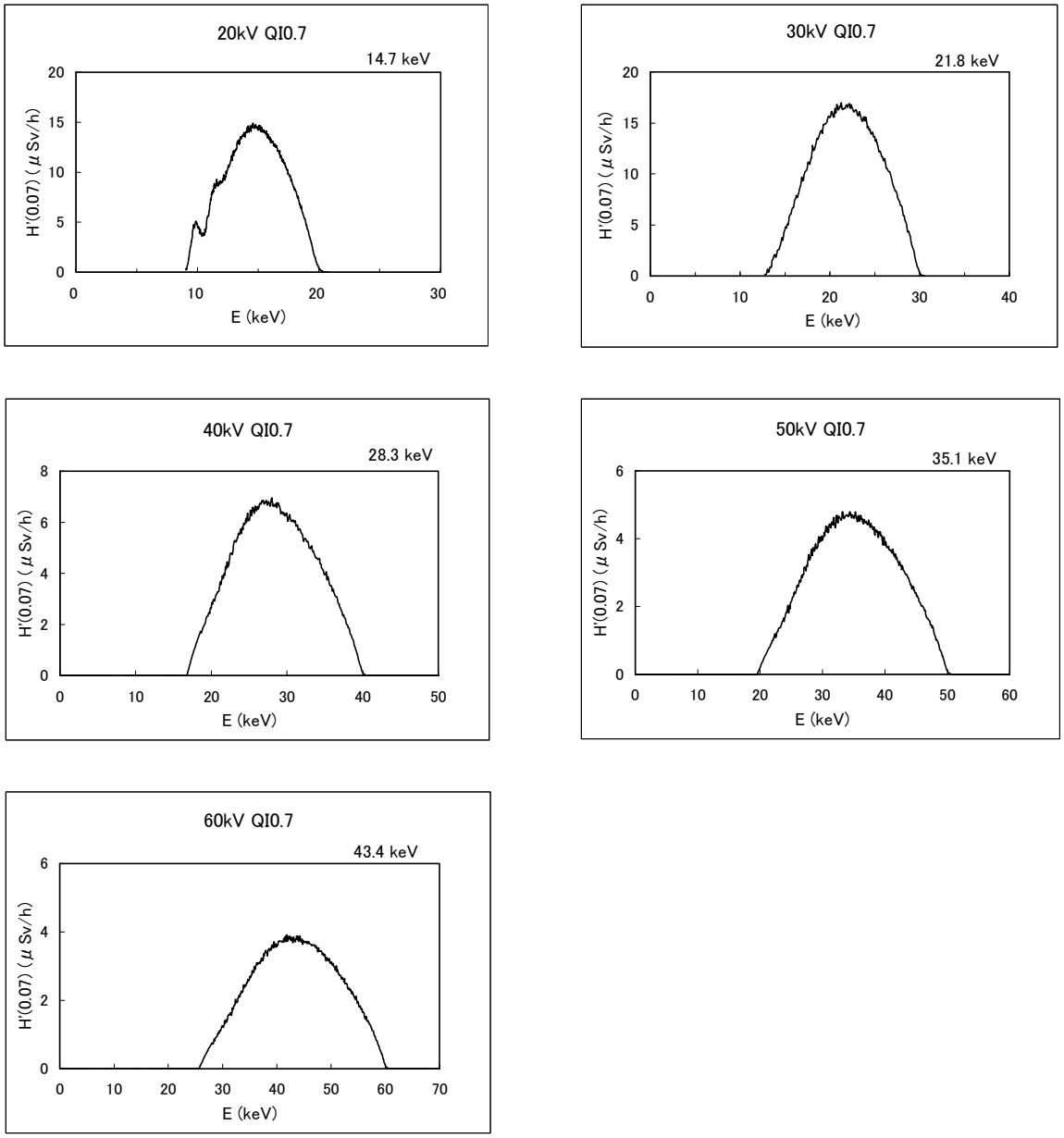


Fig.4－21 Directional dose equivalent spectra of QI 0.7 series (H'(0.07))

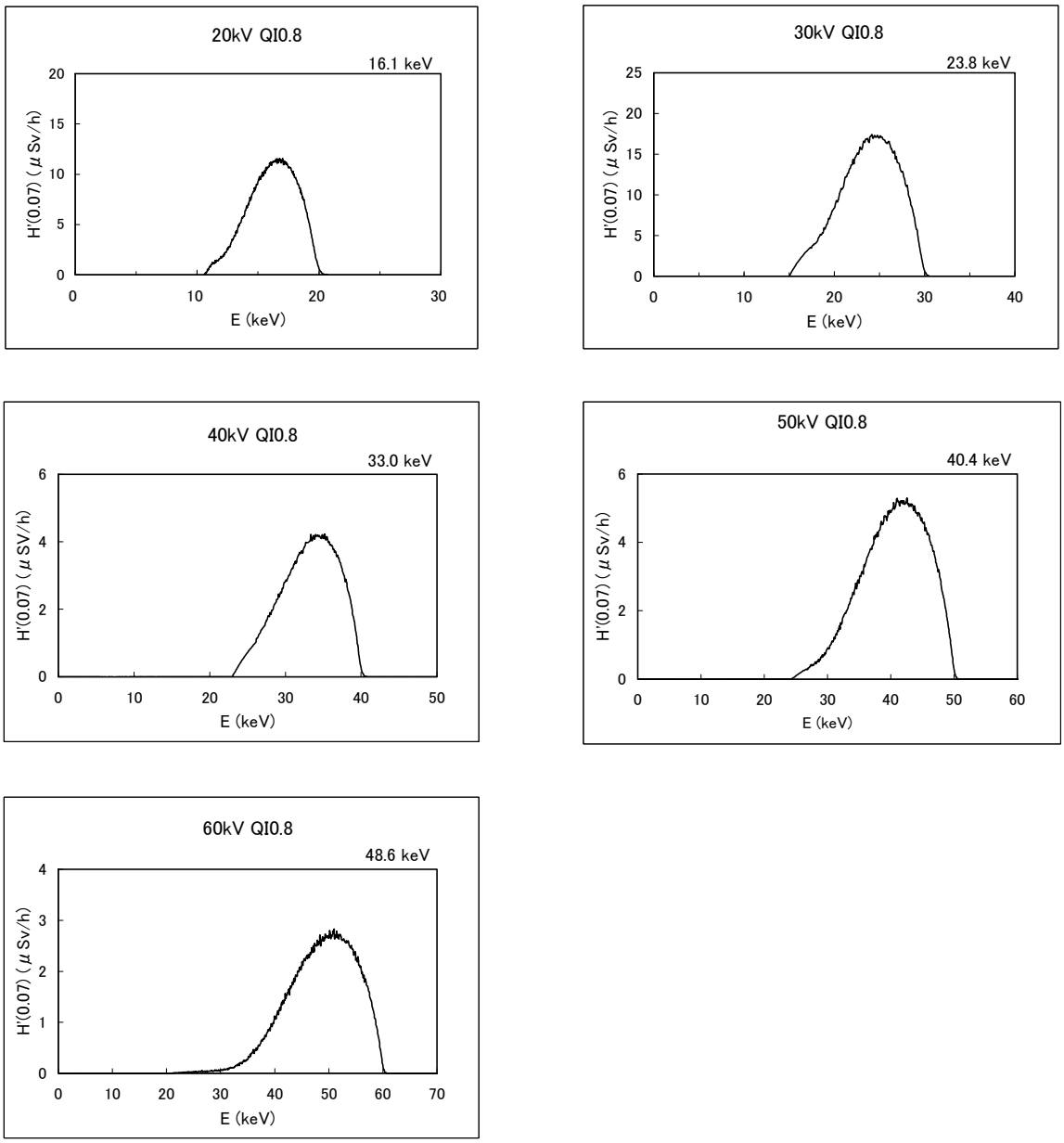


Fig.4－22 Directional dose equivalent spectra of QI 0.8 series (H'(0.07))

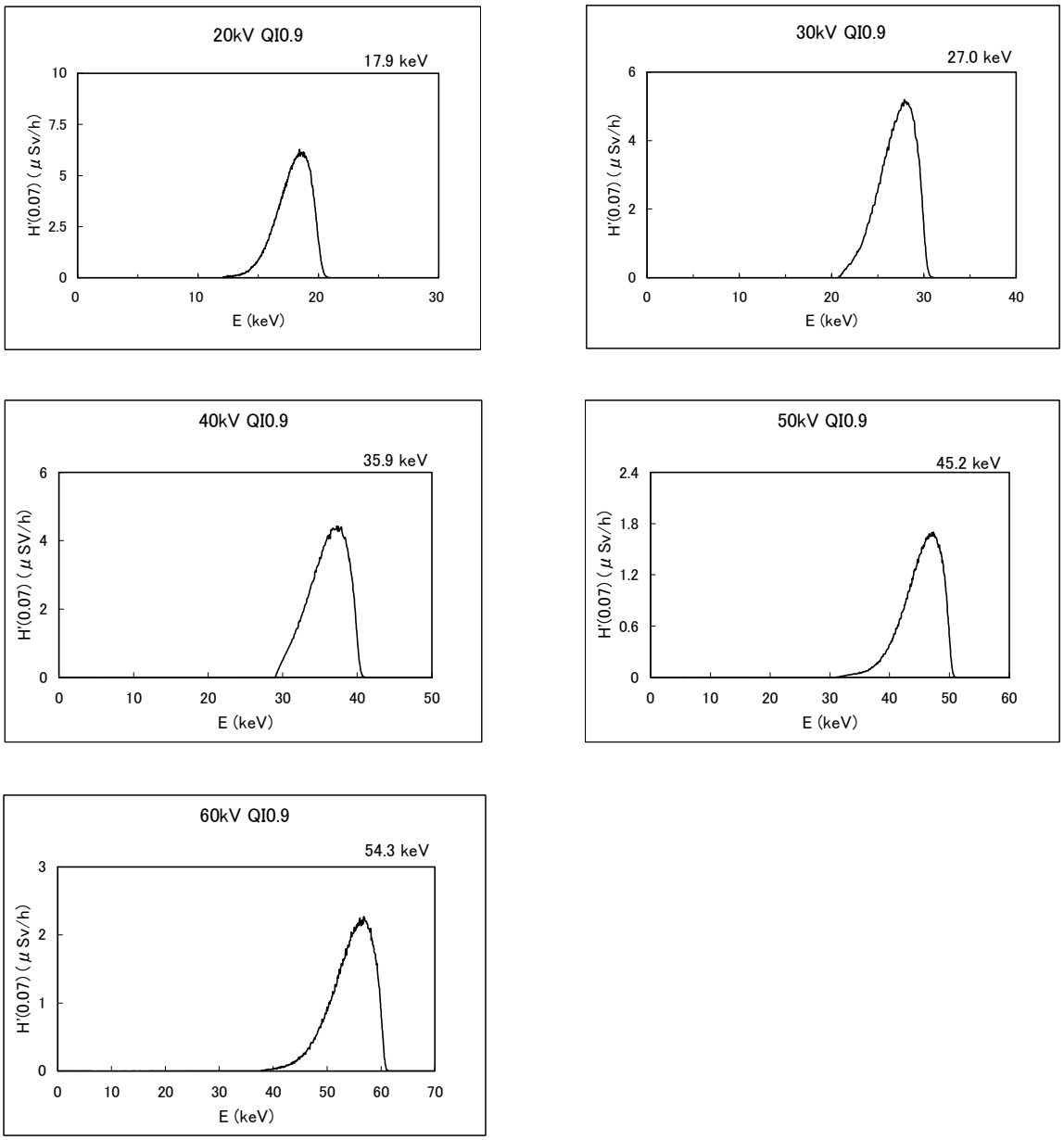


Fig.4－23 Directional dose equivalent spectra of QI 0.9 series (H'(0.07))

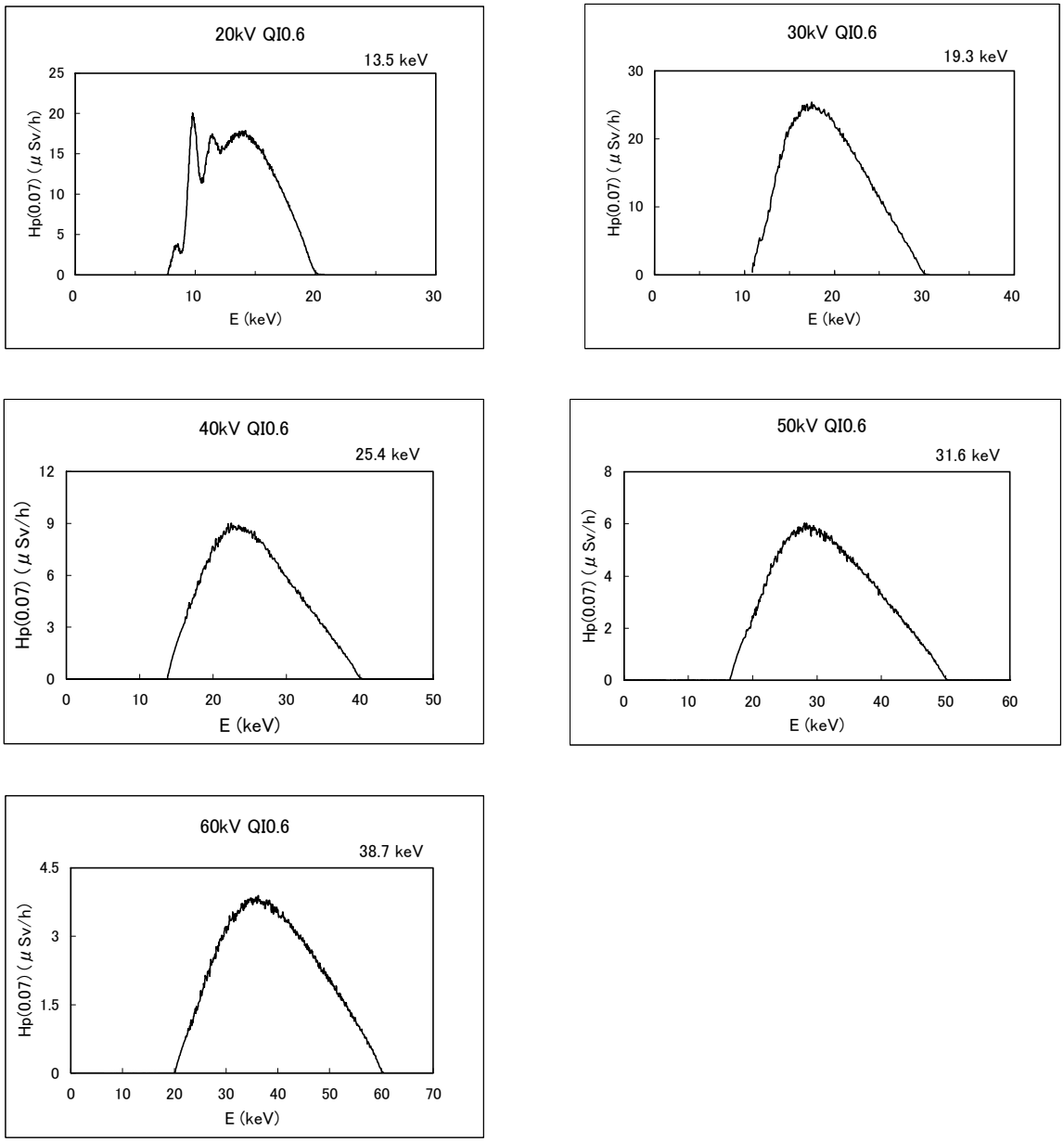


Fig.4－24 Personal dose equivalent spectra of QI 0.6 series ($H_p(0.07)$)

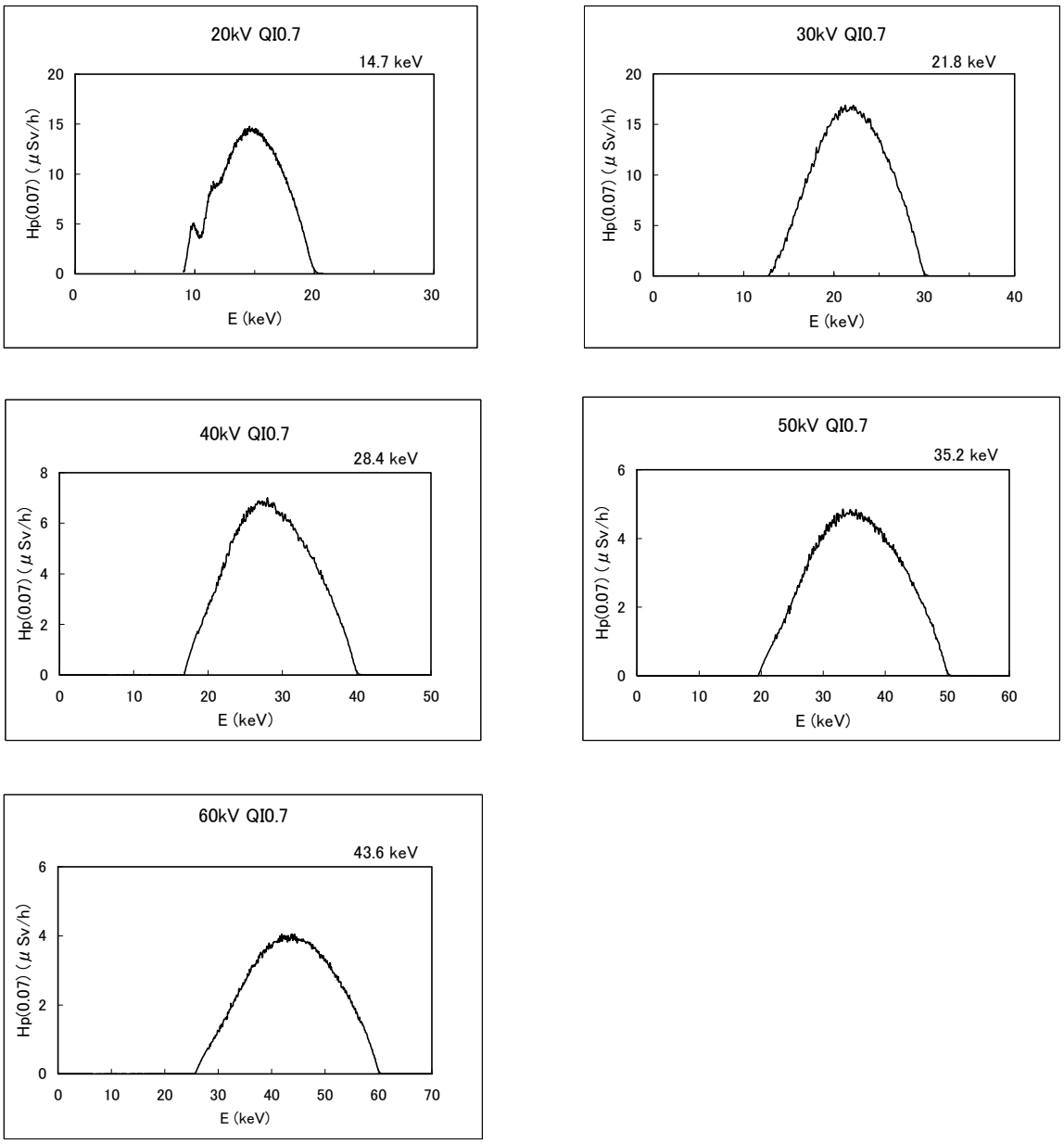


Fig.4－25 Personal dose equivalent spectra of QI 0.7 series ($H_p(0.07)$)

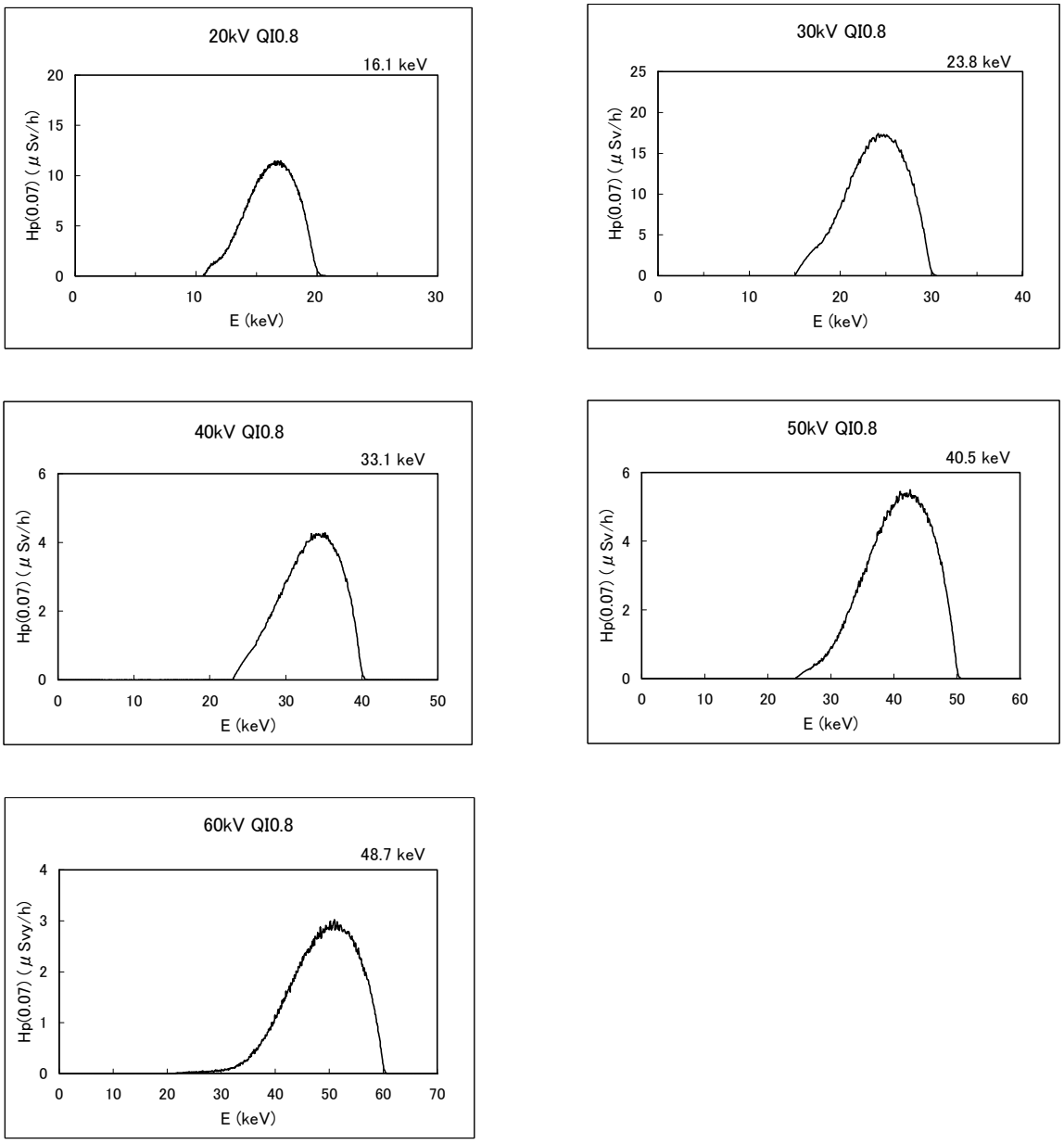


Fig.4－26 Personal dose equivalent spectra of QI 0.8 series ($H_p(0.07)$)

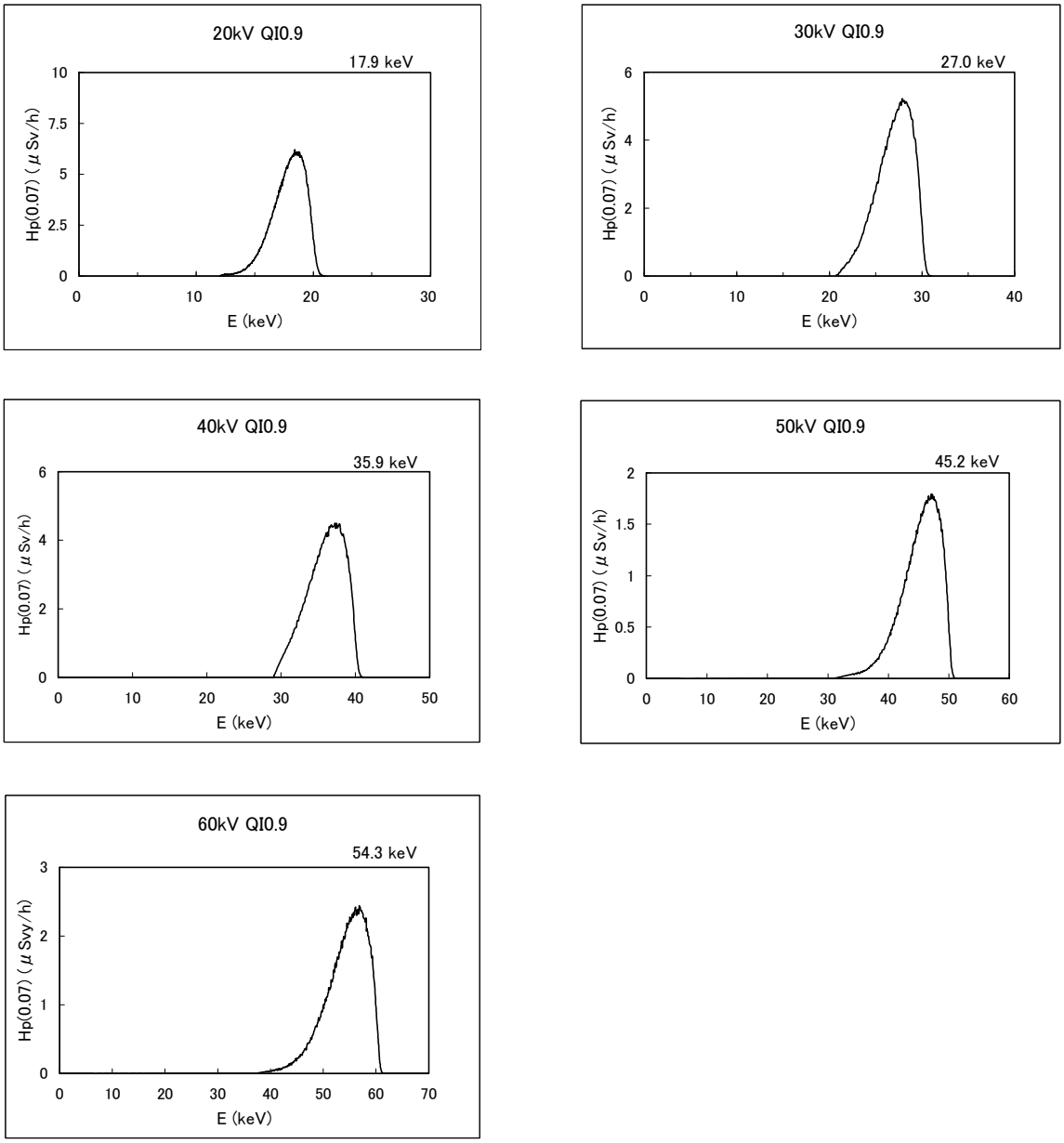


Fig.4－27 Personal dose equivalent spectra of QI 0.9 series ($H_p(0.07)$)

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	$E_{eff}/E_{H(10)}$	$E_{eff}/E_{H(0.07)}$	$E_{eff}/E_{p(10)}$	$E_{eff}/E_{p(0.07)}$
20	12.1	14.6	13.5	—	13.6	—	13.5	0.83	0.90	—	0.89	—	0.90
30	17.9	20.9	19.0	20.9	19.2	20.9	19.3	0.86	0.94	0.86	0.93	0.86	0.93
40	24.0	27.4	24.9	26.7	25.4	26.7	25.4	0.88	0.96	0.90	0.94	0.90	0.94
50	29.9	33.9	30.8	32.7	31.5	32.7	31.6	0.88	0.97	0.91	0.95	0.91	0.95
60	35.9	40.7	37.7	39.3	38.5	39.5	38.7	0.88	0.95	0.91	0.93	0.91	0.93
70	42.5	46.9	43.9	45.4	—	45.7	—	0.91	0.97	0.94		0.93	
80	47.8	53.0	50.3	51.7	—	52.0	—	0.90	0.95	0.92		0.92	
100	59.8	63.6	62.6	63.2	—	63.5	—	0.94	0.96	0.95		0.94	
120	71.2	74.2	75.5	75.3	—	75.5	—	0.96	0.94	0.95		0.94	
150	89.4	91.0	95.7	94.7	—	94.6	—	0.98	0.93	0.94		0.95	
200	120	116	126	124	—	124	—	1.03	0.95	0.97		0.97	
250	151	143	156	154	—	153	—	1.06	0.97	0.98		0.99	
300	178	169	186	183	—	182	—	1.05	0.96	0.97		0.98	

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	$E_{eff}/E_{H(10)}$	$E_{eff}/E_{H(0.07)}$	$E_{eff}/E_{p(10)}$	$E_{eff}/E_{p(0.07)}$
20	13.8	15.4	14.6	—	14.7	—	14.7	0.90	0.95	—	0.94	—	0.94
30	20.9	22.9	21.6	22.7	21.8	22.7	21.8	0.91	0.97	0.92	0.96	0.92	0.96
40	27.9	29.7	27.9	29.1	28.3	29.1	28.4	0.94	1.00	0.96	0.99	0.96	0.98
50	34.4	36.7	34.5	35.8	35.1	35.8	35.2	0.94	1.00	0.96	0.98	0.96	0.98
60	41.5	44.7	42.9	43.8	43.4	44.0	43.6	0.93	0.97	0.95	0.96	0.94	0.95
70	49.1	51.8	50.2	50.9	—	51.2	—	0.95	0.98	0.96		0.96	
80	56.1	58.2	57.1	57.6	—	57.8	—	0.96	0.98	0.97		0.97	
100	70.5	71.7	72.1	72.0	—	72.1	—	0.98	0.98	0.98		0.98	
120	84.0	84.4	86.3	85.9	—	85.9	—	1.00	0.97	0.98		0.98	
150	104	102	106	105	—	105	—	1.02	0.98	0.99		0.99	
200	140	133	140	138	—	138	—	1.05	1.00	1.01		1.01	
250	176	167	175	174	—	174	—	1.05	1.01	1.01		1.01	
300	209	198	210	208	—	208	—	1.06	1.00	1.00		1.00	

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	$E_{eff}/E_{H(10)}$	$E_{eff}/E_{H(0.07)}$	$E_{eff}/E_{p(10)}$	$E_{eff}/E_{p(0.07)}$
20	16.0	16.6	16.1	16.8	16.1	16.9	16.1	0.96	0.99	0.95	0.99	0.95	0.99
30	23.9	24.5	23.6	24.3	23.8	24.3	23.8	0.98	1.01	0.98	1.00	0.98	1.00
40	32.4	33.6	32.8	33.3	33.0	33.3	33.1	0.96	0.99	0.97	0.98	0.97	0.98
50	40.1	41.1	40.1	40.6	40.4	40.7	40.5	0.98	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99
60	48.2	49.3	48.3	48.8	48.6	48.9	48.7	0.98	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99
70	55.8	56.6	56.0	56.2	—	56.4	—	0.99	1.00	0.99		0.99	
80	64.7	64.7	64.5	64.6	—	64.7	—	1.00	1.00	1.00		1.00	
100	80.5	80.2	80.9	80.7	—	80.8	—	1.00	1.00	1.00		1.00	
120	97.1	95.9	97.3	97.0	—	97.0	—	1.01	1.00	1.00		1.00	
150	120	115	118	117	—	117	—	1.04	1.02	1.03		1.03	
200	160	153	157	157	—	157	—	1.05	1.02	1.02		1.02	
250	199	196	200	199	—	199	—	1.02	1.00	1.00		1.00	
300	237	233	238	238	—	238	—	1.02	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	$E_{eff}/E_{H(10)}$	$E_{eff}/E_{H(0.07)}$	$E_{eff}/E_{p(10)}$	$E_{eff}/E_{p(0.07)}$
20	17.8	18.1	17.8	18.1	17.9	18.1	17.9	0.98	1.00	0.98	0.99	0.98	0.99
30	26.9	27.2	26.9	27.1	27.0	27.1	27.0	0.99	1.00	0.99	1.00	0.99	1.00
40	35.7	36.1	35.8	36.0	35.9	36.0	35.9	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99
50	45.6	45.4	45.1	45.2	45.2	45.3	45.2	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
60	54.7	54.4	54.2	54.3	54.3	54.3	54.3	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
70	62.6	62.2	62.0	62.1	－	62.1	－	1.01	1.01	1.01		1.01	
80	72.3	71.7	71.8	71.8	－	71.8	－	1.01	1.01	1.01		1.01	
100	90.4	89.1	89.5	89.4	－	89.4	－	1.01	1.01	1.01		1.01	
120	109	107	107	107	－	107	－	1.02	1.02	1.02		1.02	
150	136	133	134	133	－	133	－	1.02	1.01	1.02		1.02	
200	178	176	177	177	－	177	－	1.01	1.01	1.01		1.01	
250	223	220	222	221	－	221	－	1.01	1.00	1.01		1.01	
300	266	257	260	259	－	259	－	1.04	1.02	1.03		1.03	

Table 4－5 Resolution of each energy spectra for QI 0.6 and QI 0.7 series

Tube Voltage (kV)	Resolution（%）											
	QI 0.6 series						QI 0.7 series					
	Fluence	Ka	$H^*_{(10)}$	$H'_{(0.07)}$	$H_{p(10)}$	$H_{p(0.07)}$	Fluence	Ka	$H^*_{(10)}$	$H'_{(0.07)}$	$H_{p(10)}$	$H_{p(0.07)}$
20	48	52	－	53	－	53	40	45	－	45	－	44
30	60	57	53	57	53	57	43	49	42	49	43	49
40	59	58	57	59	57	60	48	51	49	52	49	52
50	62	60	62	63	62	63	50	55	52	55	53	55
60	60	61	61	62	62	64	47	52	50	50	50	51
70	61	65	64	－	65	－	47	53	51	－	51	－
80	61	68	64	－	63	－	49	54	52	－	52	－
100	65	74	70	－	70	－	53	56	54	－	54	－
120	74	81	79	－	78	－	54	54	54	－	54	－
150	70	72	73	－	72	－	57	55	56	－	57	－
200	74	74	74	－	73	－	59	57	58	－	58	－
250	71	72	74	－	74	－	58	55	56	－	56	－
300	71	71	72	－	73	－	59	54	56	－	55	－
Average	64±8	67±8	67±8	59±4	67±8	59±4	51±6	53±3	53±4	50±3	53±4	50±4

Table 4－6 Resolution of each energy spectra for QI 0.8 and QI 0.9 series

Tube Voltage (kV)	Resolution（%）											
	QI 0.8 series						QI 0.9 series					
	Fluence	Ka	$H^*_{(10)}$	$H'_{(0.07)}$	$H_{p(10)}$	$H_{p(0.07)}$	Fluence	Ka	$H^*_{(10)}$	$H'_{(0.07)}$	$H_{p(10)}$	$H_{p(0.07)}$
20	29	33	26	32	26	32	16	18	16	18	16	18
30	31	36	32	35	32	35	16	18	16	17	17	17
40	27	32	29	31	29	31	17	18	18	18	17	18
50	31	35	32	33	32	33	15	16	15	16	15	15
60	31	34	33	33	32	32	15	16	16	16	16	16
70	34	37	35	－	35	－	18	19	19	－	19	－
80	33	34	34	－	34	－	17	17	17	－	17	－
100	34	33	33	－	33	－	18	17	17	－	17	－
120	35	33	34	－	34	－	18	17	17	－	17	－
150	40	38	38	－	39	－	19	17	18	－	18	－
200	41	38	38	－	38	－	19	17	18	－	18	－
250	38	35	35	－	35	－	19	18	18	－	18	－
300	38	35	36	－	36	－	23	21	22	－	22	－
Average	34±4	35±2	33±3	33±1	33±4	33±1	18±2	18±1	17±2	17±1	17±2	17±1

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である。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、H_p(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により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ことを前提としている。また、文献 9)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 10)(ISO 4037-3)で同様の方法で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 9)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)、H_p(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 H_p(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、4.1.2 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(H_p(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。これらのデータから、実効エネルギーの換算係数とスペクトル積分比の換算係数の比を比較した図を Fig.5－1～Fig.5－4 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 40kV 以上の線質、QI0.7 シリーズの 80kV 以上の線質及び QI0.6 シリーズの 120kV 以上の線質において±3%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 4%～27%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 シリーズの全線質及び QI0.6 シリーズの 70kV を除く 40kV 以上の線質において±3%と両者はよく一致し、他の 20kV,30kV の線質はスペクトルのろ過効果の影響で＋4%～－13%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 $H_p(10)$／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 $H_p(10)$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±3%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 $H_p(10)$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 9)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 $H_p(10)$の 40kV 以下の低エネルギー線質の換算係数は、文献 10)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	20.9	0.526	0.666	1.27	17.9	0.460	0.87
40	26.7	0.845	0.960	1.14	24.0	0.831	0.98
50	32.7	1.103	1.212	1.10	29.9	1.097	0.99
60	39.3	1.338	1.450	1.08	35.9	1.337	1.00
70	45.4	1.483	1.597	1.08	42.5	1.535	1.04
80	51.7	1.584	1.688	1.07	47.8	1.639	1.03
100	63.2	1.681	1.746	1.04	59.8	1.739	1.03
120	75.3	1.697	1.734	1.02	71.2	1.742	1.03
150	94.7	1.656	1.670	1.01	89.4	1.689	1.02
200	124	1.569	1.568	1.00	120	1.583	1.01
250	154	1.496	1.481	0.99	151	1.486	0.99
300	183	1.441	1.422	0.99	178	1.429	0.99

$f_{H(10)Total}$: $H^*_{(10)}$ 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	22.7	0.684	0.768	1.12	20.9	0.663	0.97
40	29.1	0.998	1.063	1.07	27.9	1.010	1.01
50	35.8	1.255	1.332	1.06	34.4	1.282	1.02
60	43.8	1.497	1.564	1.04	41.5	1.509	1.01
70	50.9	1.617	1.681	1.04	49.1	1.658	1.03
80	57.6	1.681	1.731	1.03	56.1	1.723	1.02
100	72.0	1.718	1.741	1.01	70.5	1.744	1.02
120	85.9	1.688	1.701	1.01	84.0	1.708	1.01
150	105	1.628	1.631	1.00	104	1.635	1.00
200	138	1.529	1.524	1.00	140	1.519	0.99
250	174	1.450	1.437	0.99	176	1.433	0.99
300	208	1.399	1.390	0.99	209	1.388	0.99

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	16.8	0.343	0.383	1.12	16.0	0.329	0.96
30	24.3	0.800	0.847	1.06	23.9	0.827	1.03
40	33.3	1.212	1.238	1.02	32.4	1.203	0.99
50	40.6	1.449	1.488	1.03	40.1	1.472	1.02
60	48.8	1.617	1.653	1.02	48.2	1.645	1.02
70	56.2	1.697	1.724	1.02	55.8	1.721	1.01
80	64.6	1.731	1.747	1.01	64.7	1.747	1.01
100	80.7	1.711	1.718	1.00	80.5	1.718	1.00
120	97.0	1.659	1.661	1.00	97.1	1.661	1.00
150	117	1.590	1.590	1.00	120	1.582	0.99
200	157	1.479	1.473	1.00	160	1.466	0.99
250	199	1.404	1.401	1.00	199	1.401	1.00
300	238	1.361	1.358	1.00	237	1.359	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)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(10)Total}}$
20	18.1	0.457	0.477	1.04	17.8	0.453	0.99
30	27.1	0.965	0.975	1.01	26.9	0.966	1.00
40	36.0	1.330	1.341	1.01	35.7	1.329	1.00
50	45.2	1.582	1.593	1.01	45.6	1.600	1.01
60	54.3	1.702	1.711	1.01	54.7	1.714	1.01
70	62.1	1.737	1.745	1.00	62.6	1.745	1.00
80	71.8	1.737	1.741	1.00	72.3	1.740	1.00
100	89.4	1.688	1.689	1.00	90.4	1.685	1.00
120	107	1.625	1.625	1.00	109	1.617	1.00
150	133	1.539	1.539	1.00	136	1.531	0.99
200	177	1.434	1.431	1.00	178	1.430	1.00
250	221	1.375	1.374	1.00	223	1.373	1.00
300	259	1.340	1.339	1.00	266	1.334	1.00

Table 5－5 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for QI 0.6 series（f: Hp(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	20.9	0.527	0.667	1.27	17.9	0.472	0.90
40	26.7	0.851	0.966	1.14	24.0	0.832	0.98
50	32.7	1.116	1.225	1.10	29.9	1.109	0.99
60	39.5	1.371	1.474	1.08	35.9	1.348	0.98
70	45.7	1.544	1.666	1.08	42.5	1.573	1.02
80	52.0	1.675	1.801	1.08	47.8	1.719	1.03
100	63.5	1.816	1.910	1.05	59.8	1.891	1.04
120	75.5	1.852	1.915	1.03	71.2	1.921	1.04
150	94.6	1.810	1.838	1.02	89.4	1.864	1.03
200	124	1.704	1.701	1.00	120	1.719	1.01
250	153	1.613	1.597	0.99	151	1.603	0.99
300	182	1.544	1.525	0.99	178	1.533	0.99

$f_{Hp(10)Total}$: $H_{p(10)}$ 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: Hp(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	22.7	0.688	0.767	1.11	20.9	0.663	0.96
40	29.1	1.005	1.074	1.07	27.9	1.019	1.01
50	35.8	1.273	1.346	1.06	34.4	1.293	1.02
60	44.0	1.549	1.617	1.04	41.5	1.539	0.99
70	51.2	1.709	1.787	1.05	49.1	1.748	1.02
80	57.8	1.806	1.874	1.04	56.1	1.856	1.03
100	72.1	1.882	1.920	1.02	70.5	1.921	1.02
120	85.9	1.854	1.880	1.01	84.0	1.888	1.02
150	105	1.778	1.786	1.00	104	1.790	1.01
200	138	1.655	1.646	0.99	140	1.640	0.99
250	174	1.555	1.543	0.99	176	1.538	0.99
300	208	1.489	1.479	0.99	209	1.476	0.99

Table 5－7 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for QI 0.8 series（f: Hp(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	16.9	0.346	0.400	1.16	16.0	0.340	0.98
30	24.3	0.803	0.849	1.06	23.9	0.829	1.03
40	33.3	1.223	1.249	1.02	32.4	1.214	0.99
50	40.7	1.482	1.514	1.02	40.1	1.493	1.01
60	48.9	1.700	1.743	1.03	48.2	1.728	1.02
70	56.4	1.822	1.859	1.02	55.8	1.852	1.02
80	64.7	1.889	1.914	1.01	64.7	1.914	1.01
100	80.8	1.886	1.900	1.01	80.5	1.901	1.01
120	97.0	1.822	1.826	1.00	97.1	1.826	1.00
150	117	1.730	1.729	1.00	120	1.718	0.99
200	157	1.593	1.587	1.00	160	1.579	0.99
250	199	1.497	1.493	1.00	199	1.493	1.00
300	238	1.439	1.435	1.00	237	1.436	1.00

Table 5－8 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for QI 0.9 series（f: Hp(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	18.1	0.466	0.489	1.05	17.8	0.466	1.00
30	27.1	0.971	0.982	1.01	26.9	0.973	1.00
40	36.0	1.343	1.353	1.01	35.7	1.340	1.00
50	45.3	1.641	1.653	1.01	45.6	1.663	1.01
60	54.3	1.823	1.835	1.01	54.7	1.839	1.01
70	62.1	1.892	1.904	1.01	62.6	1.906	1.01
80	71.8	1.914	1.921	1.00	72.3	1.920	1.00
100	89.4	1.861	1.864	1.00	90.4	1.859	1.00
120	107	1.777	1.777	1.00	109	1.765	0.99
150	133	1.664	1.663	1.00	136	1.654	0.99
200	177	1.538	1.536	1.00	178	1.535	1.00
250	221	1.459	1.458	1.00	223	1.456	1.00
300	259	1.411	1.409	1.00	266	1.401	0.99

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)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(0.07)Total}}$
20	13.6	0.979	0.978	1.00	12.1	0.967	0.99
30	19.2	1.043	1.040	1.00	17.9	1.022	0.98
40	25.4	1.136	1.137	1.00	24.0	1.113	0.98
50	31.5	1.238	1.252	1.01	29.9	1.219	0.98
60	38.5	1.350	1.386	1.03	35.9	1.339	0.99

$f_{H(0.07)Total}$: $H'_{(0.07)}$ 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)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(0.07)Total}}$
20	14.7	0.989	0.987	1.00	13.8	0.980	0.99
30	21.8	1.079	1.077	1.00	20.9	1.063	0.99
40	28.3	1.187	1.190	1.00	27.9	1.181	0.99
50	35.1	1.305	1.324	1.01	34.4	1.311	1.00
60	43.4	1.432	1.459	1.02	41.5	1.432	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)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(0.07)Total}}$
20	16.1	1.003	1.002	1.00	16.0	1.001	1.00
30	23.8	1.110	1.110	1.00	23.9	1.112	1.00
40	33.0	1.278	1.283	1.00	32.4	1.271	0.99
50	40.4	1.402	1.416	1.01	40.1	1.411	1.01
60	48.6	1.502	1.517	1.01	48.2	1.514	1.01

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)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(0.07)Total}}$
20	17.9	1.022	1.022	1.00	17.8	1.021	1.00
30	27.0	1.164	1.165	1.00	26.9	1.163	1.00
40	35.9	1.336	1.340	1.00	35.7	1.335	1.00
50	45.2	1.475	1.480	1.00	45.6	1.485	1.01
60	54.3	1.557	1.561	1.00	54.7	1.564	1.00

Table 5－13 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for QI 0.6 series（f: Hp(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)	$\frac{f_{eff}}{f_{Hp(0.07)Total}}$
20	13.5	0.972	0.969	1.00	12.1	0.960	0.99
30	19.3	1.038	1.034	1.00	17.9	1.015	0.98
40	25.4	1.138	1.139	1.00	24.0	1.113	0.98
50	31.6	1.253	1.265	1.01	29.9	1.229	0.98
60	38.7	1.388	1.417	1.02	35.9	1.358	0.98

$f_{Hp(0.07)Total}$: $H_{p(0.07)}$ 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: Hp(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)	$\frac{f_{eff}}{f_{Hp(0.07)Total}}$
20	14.7	0.981	0.978	1.00	13.8	0.971	0.99
30	21.8	1.076	1.075	1.00	20.9	1.059	0.98
40	28.4	1.194	1.197	1.00	27.9	1.187	0.99
50	35.2	1.328	1.343	1.01	34.4	1.327	1.00
60	43.6	1.491	1.522	1.02	41.5	1.476	0.99

Table 5－15 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for QI 0.8 series（f: Hp(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)	$\frac{f_{eff}}{f_{Hp(0.07)Total}}$
20	16.1	0.995	0.993	1.00	16.0	0.992	1.00
30	23.8	1.109	1.109	1.00	23.9	1.111	1.00
40	33.1	1.292	1.297	1.00	32.4	1.283	0.99
50	40.5	1.445	1.455	1.01	40.1	1.446	1.00
60	48.7	1.588	1.614	1.02	48.2	1.606	1.01

Table 5－16 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for QI 0.9 series（f: Hp(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)	$\frac{f_{eff}}{f_{Hp(0.07)Total}}$
20	17.9	1.015	1.014	1.00	17.8	1.014	1.00
30	27.0	1.169	1.169	1.00	26.9	1.168	1.00
40	35.9	1.357	1.359	1.00	35.7	1.353	1.00
50	45.2	1.546	1.553	1.00	45.6	1.560	1.01
60	54.3	1.670	1.678	1.00	54.7	1.681	1.01

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

Voltage (kV)	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)
20	12.1	－	0.967	－	0.960
30	17.9	0.526	1.022	0.527	1.015
40	24.0	0.845	1.113	0.851	1.113
50	29.9	1.097	1.219	1.109	1.229
60	35.9	1.337	1.339	1.348	1.358
70	42.5	1.535	－	1.573	－
80	47.8	1.639	－	1.719	－
100	59.8	1.739	－	1.891	－
120	71.2	1.742	－	1.921	－
150	89.4	1.689	－	1.864	－
200	120	1.583	－	1.719	－
250	151	1.486	－	1.603	－
300	178	1.429	－	1.533	－

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

Voltage (kV)	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)
20	13.8	－	0.980	－	0.971
30	20.9	0.684	1.063	0.688	1.059
40	27.9	0.998	1.181	1.005	1.187
50	34.4	1.282	1.311	1.293	1.327
60	41.5	1.509	1.432	1.539	1.476
70	49.1	1.658	－	1.748	－
80	56.1	1.723	－	1.856	－
100	70.5	1.744	－	1.921	－
120	84.0	1.708	－	1.888	－
150	104	1.635	－	1.790	－
200	140	1.519	－	1.640	－
250	176	1.433	－	1.538	－
300	209	1.388	－	1.476	－

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

Voltage (kV)	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)
20	16.0	0.343	1.001	0.346	0.992
30	23.9	0.800	1.112	0.803	1.111
40	32.4	1.212	1.271	1.223	1.283
50	40.1	1.472	1.411	1.493	1.446
60	48.2	1.645	1.514	1.728	1.606
70	55.8	1.721	－	1.852	－
80	64.7	1.747	－	1.914	－
100	80.5	1.718	－	1.901	－
120	97.1	1.661	－	1.826	－
150	120	1.582	－	1.718	－
200	160	1.466	－	1.579	－
250	199	1.401	－	1.493	－
300	237	1.359	－	1.436	－

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

Voltage (kV)	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)
20	17.8	0.457	1.021	0.466	1.014
30	26.9	0.965	1.163	0.971	1.168
40	35.7	1.330	1.335	1.343	1.353
50	45.6	1.600	1.485	1.663	1.560
60	54.7	1.714	1.564	1.839	1.681
70	62.6	1.745	－	1.906	－
80	72.3	1.740	－	1.920	－
100	90.4	1.685	－	1.859	－
120	109	1.617	－	1.765	－
150	136	1.531	－	1.654	－
200	178	1.430	－	1.535	－
250	223	1.373	－	1.456	－
300	266	1.334	－	1.401	－

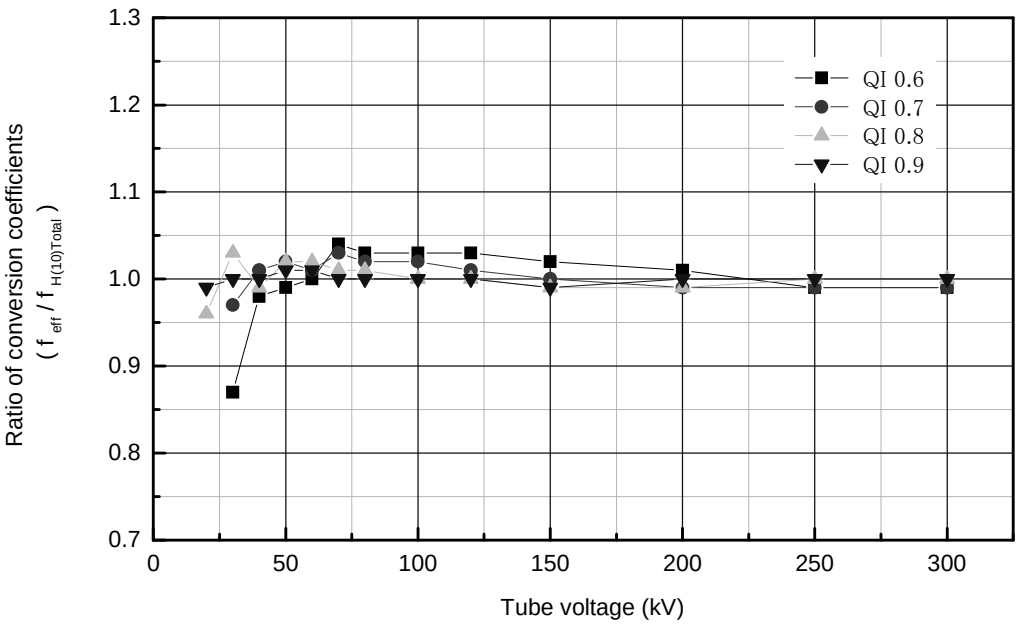


Fig.5－1 Comparison of the ratio of f_{eff} to $f_{H(10)Total}$ for $H^{*}(10)$ /Ka

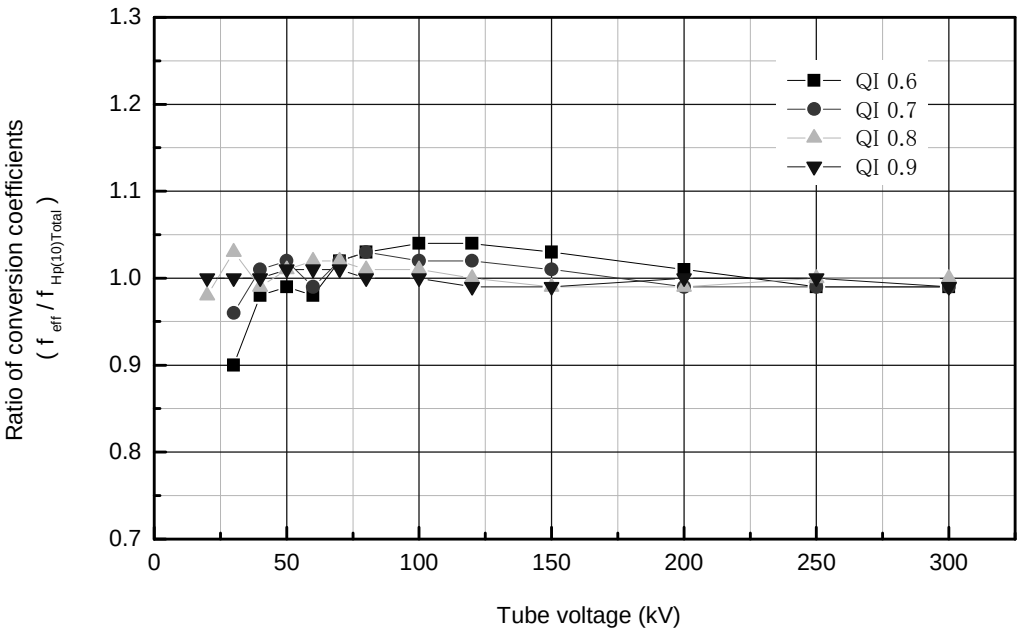


Fig.5－2 Comparison of the ratio of f_{eff} to $f_{Hp(10)Total}$ for $H_p(10)$ /Ka

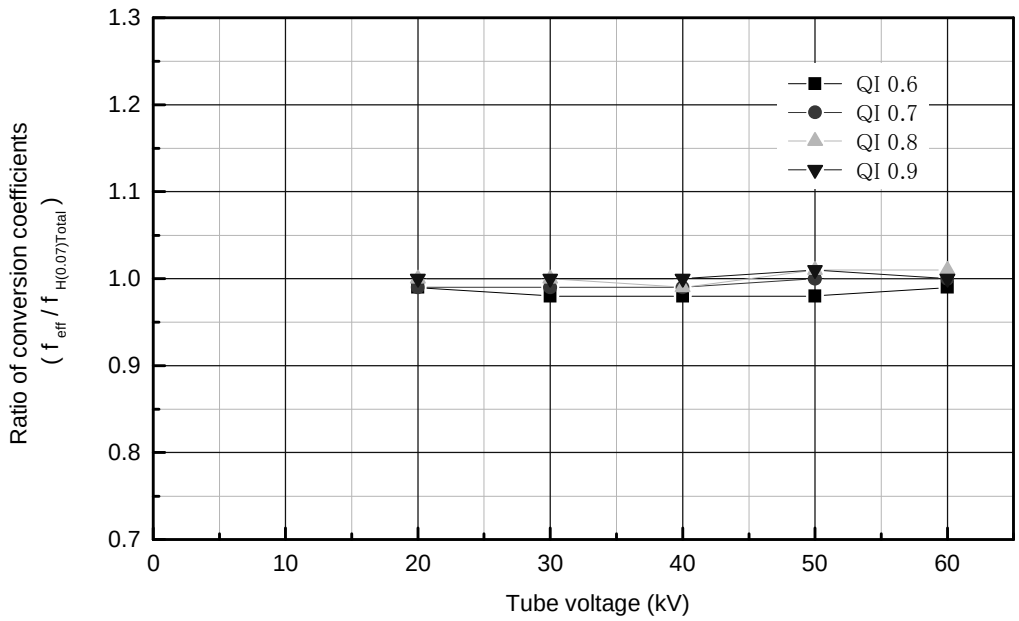


Fig.5－3 Comparison of the ratio of f_{eff} to $f_{H(0.07)Total}$ for H′ (0.07) /Ka

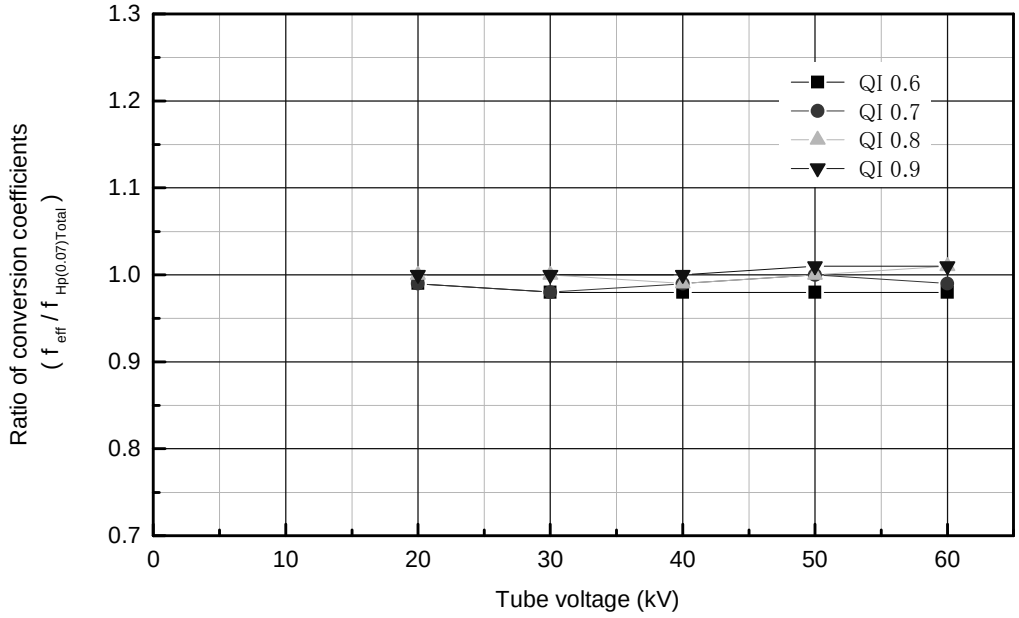


Fig.5－4 Comparison of the ratio of f_{eff} to $f_{Hp(0.07)Total}$ for $H_p(0.07)$ /Ka

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Ｘ線スペクトル測定を行う場合に、エネルギースペクトルが測定距離の違いにより、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における影響を考察した。なお、空気散乱線は、Ｘ線スペクトル測定時に小口径のコリメータを用いたことから、影響がほとんど無いと判断し、評価の対象としなかった。

空気層の減弱特性は、J.H.Hubbell による文献 8)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(24)式、(25)式のように作成(E : keV)し、(26)式により 2m、3m、6m 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、QI0.6 シリーズの 40kV、60kV、80kV、120kV、150kV の５つを選択した。計算評価は、4 章で測定した Fig.4－4 に示すフルエンススペクトルを用いて、スペクトル測定を行っていない距離のフルエンススペクトルを(26)式の減弱割合から求め、空気カーマスペクトル及び周辺線量当量スペクトルを評価し、それぞれのスペクトルの積分値を比較して、2m 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、線量当量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。

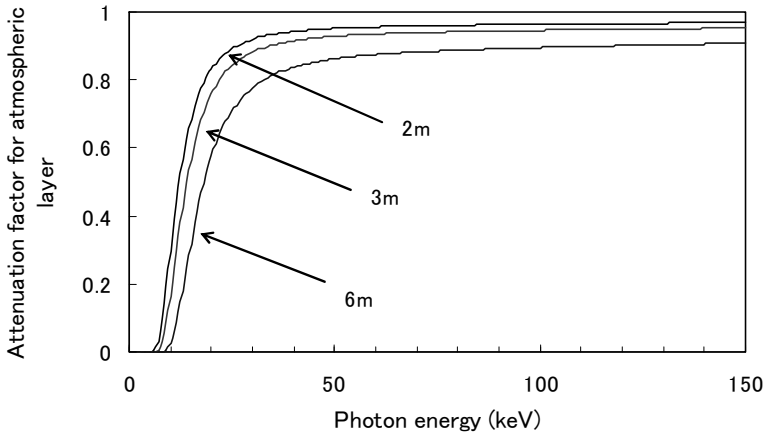


Fig.6－1 Attenuation factor by air as a function of photon energy

$$\mu/\rho\,(E) = 10\text{^}(-12.1396(\log E)^5 + 47.3216(\log E)^4 - 70.4447(\log E)^3 + 49.5074(\log E)^2 - 19.0905(\log E) + 5.5483) \quad \text{---------} (24)$$

(2keV～10keV)

$$\mu/\rho\,(E) = 10\text{^}(1.92008(\log E)^5 - 16.4869(\log E)^4 + 54.7221(\log E)^3 - 86.2307(\log E)^2 + 61.9074(\log E) - 15.1317) \quad \text{---------} (25)$$

(10keV～150keV)

$$I/I_0 = \exp(-\mu/\rho \cdot \rho_{air20℃} \cdot d) \quad \text{----------} (26)$$

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 シリーズの 40kV～150kV の５つの線質における距離を 2m、3m、6m と変化したときのフルエンススペクトルを Fig.6－2～Fig.6－6 に示す。また、当該線質の各距離の平均エネルギー、スペクトルから求めた換算係数の相対比較を Table6－1 に示し、以下に結果及び考察を示す。

(1) Fig.6－2 の QI0.6 40kV のフルエンススペクトルは、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 2m が 27.3keV に対して 3m が 27.4keV、6m が 27.8keV と変化した。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 2m に対して 3m で－1%、6m で－5%となり、2m と 3m では空気カーマ基準量への影響がほとんど無いことを確認した。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、2m と 3m では 1%でよく一致し、6m で＋4%となった。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、6m の距離でも影響がほとんどないことを確認した。これは、$H_p(10)$スペクトルとの比較でも同様のことが言える。

(2) Fig.6－3～Fig.6－6 に示す 60kV～150kV のフルエンススペクトルは、2m、3m、6m の各距離において、フルエンス平均エネルギーが 0.2keV で一致し、フルエンススペクトルから空気カーマスペクトル及び H*(10)スペクトルへの換算係数、並びに H*(10)/Ka 換算係数が 1%以下でよく一致し、この管電圧の領域の線質で 2m～6m で変化がないことが明らかになった。これは、$H_p(10)$スペクトルとの比較でも同様のことが言える。

上記の結果から、X線スペクトル測定から H*(10)/Ka 及び Ka/φの換算係数を求める場合、40kV 以下の線質では測定距離が 2m～3m の範囲で変化がないこと、60kV 以上の線質では測定距離が 2m～6m の範囲で変化がないことを明らかにした。これは、場のフルエンススペクトルから空気カーマスペクトルを評価する場合や空気カーマスペクトルから H*(10)及び $H_p(10)$の線量当量スペクトルを評価する場合に影響を及ぼさない照射距離となる。一方、H*(10)/φの換算係数は、40kV 以上の線質では測定距離が 2m～6m の範囲で変化がないことを明らかにした。これは、場のフルエンススペクトルから H*(10)及び $H_p(10)$の線量当量スペクトルを評価する場合に影響を及ぼさない照射距離となる。

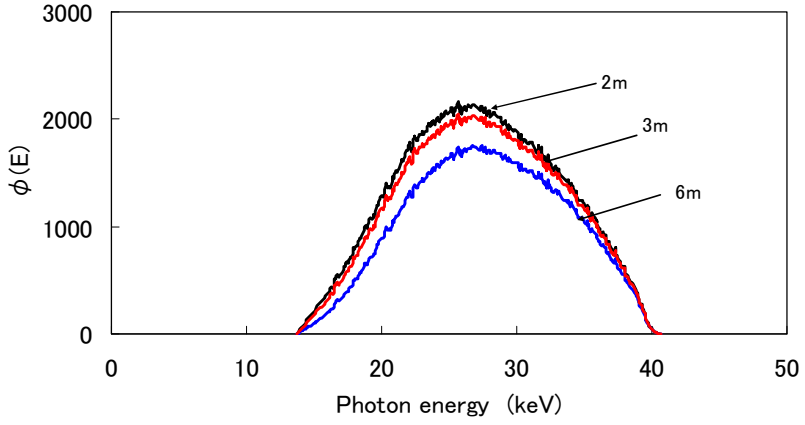


Fig.6－2 Comparison of fluence spectra at various distance for 40kV QI 0.6 series

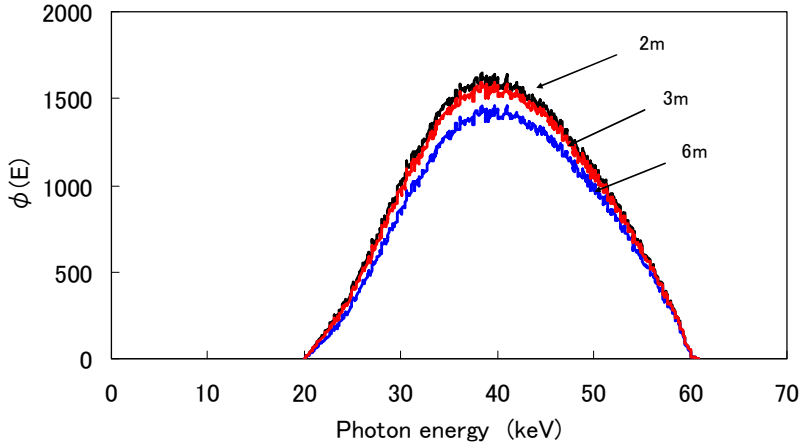


Fig.6－3　Comparison of fluence spectra at various distance for 60kV QI 0.6 series

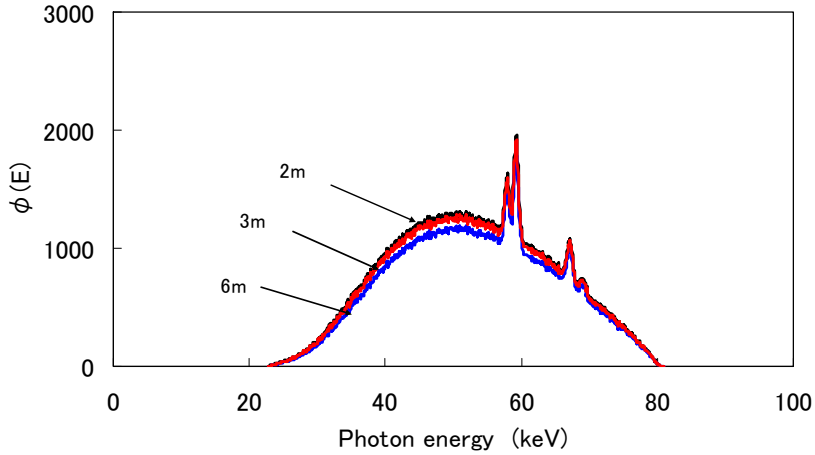


Fig.6－4　Comparison of fluence spectra at various distance for 80kV QI 0.6 series

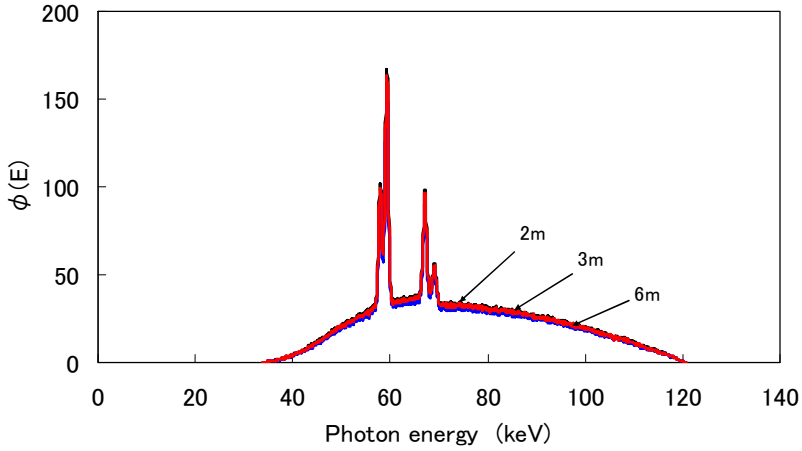


Fig.6－5　Comparison of fluence spectra at various distance for 120kV QI 0.6 series

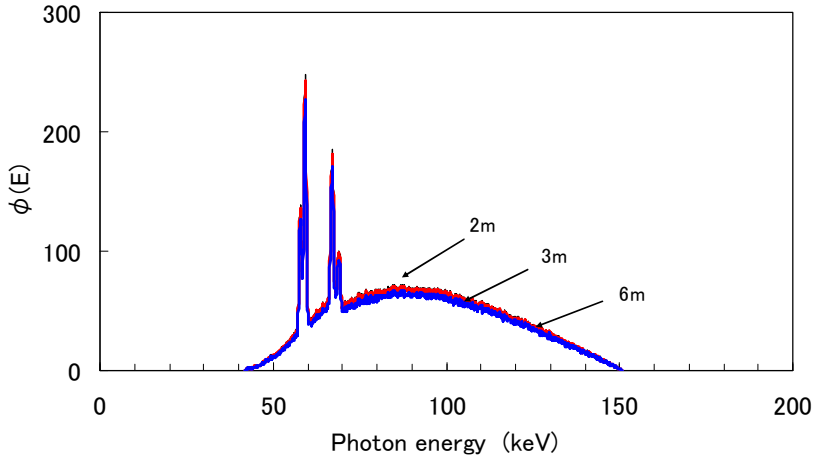


Fig.6－6 Comparison of fluence spectra at various distance for 150kV QI 0.6 series

Table 6－1 Comparison of mean energy and ratio of dose conversion coefficient at various distance from 40kV to 150kV 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	2m	27.3	24.7	26.6	1	1	1
	3m	27.4	24.9	26.7	0.99	1.01	1.00
	6m	27.8	25.4	27.1	0.95	1.04	0.99
QI 0.6 60kV	2m	40.7	37.6	39.3	1	1	1
	3m	40.7	37.7	39.3	1.00	1.00	1.00
	6m	40.9	37.9	39.5	0.99	1.01	0.99
QI 0.6 80kV	2m	52.9	50.3	51.6	1	1	1
	3m	53.0	50.3	51.7	1.00	1.00	1.00
	6m	53.1	50.5	51.8	0.99	1.00	1.00
QI 0.6 120kV	2m	74.1	75.3	75.1	1	1	1
	3m	74.1	75.3	75.2	1.00	1.00	1.00
	6m	74.2	75.5	75.3	1.00	1.00	1.00
QI 0.6 150kV	2m	90.8	95.5	94.5	1	1	1
	3m	90.9	95.5	94.5	1.00	1.00	1.00
	6m	91.0	95.7	94.7	1.00	1.00	1.00

7．結　　論

原子力科学研究所放射線標準施設棟において、新たなＸ線管球を装荷した中硬Ｘ線照射装置(米国パンタック社製 HF-420C 型)を用いて、放射線防護用測定器の中硬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 52 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 12.1keV～178keV の 13 線質、QI0.7 が 13.8keV～209keV の 13 線質、QI0.8 が 16.0keV～237keV の 13 線質、QI0.9 が 17.8keV～266keV の 13 線質で、合計 52 の線質を設定した。

(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 1～8 mGy/min、QI0.7 が 0.4～3 mGy/min、QI0.8 が 4～30 mGy/h、QI0.9 が 0.07～2 mGy/h 程度であり、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 30 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、1mGy/h～5mGy/h で QI0.7 又は QI0.8 の標準場が、10μGy/h 程度の環境用の線量率測定器では QI0.9 の標準場が推奨される。

(3) 各シリーズのフルエンススペクトルの評価では、70kV 以下の標準場で、タングステン(W)焦点から発生する 8.4keV、9.9keV 及び 11.7keV の L 軌道特性Ｘ線がほとんど発生しなかった。一方、80kV 以上～150kV の標準場で 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。QI0.7 及び QI0.8 の 200kV 以上の標準場では、基礎フィルタのろ過効果により K 軌道特性Ｘ線はほとんど発生しなかった。

(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、QI0.8 と QI0.9 で±5%とほぼ一致し、QI0.7 で－10%～＋6%、QI0.6 で－17%～＋6%と低い値となった。この違いは、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照射線量スペクトルをろ過しつつ評価するため、フルエンス当たりの照射線量換算係数が影響し、80kV 以下でフルエンスエネルギーが大きく、80kV 以上でフルエンスエネルギーが小さい傾向を示した。

② E_{eff}と空気カーマ平均エネルギー(E_K)の比較では、QI0.8 と QI0.9 で±2%で両者は良く一致したが、QI0.7 で－5%、QI0.6 で－10%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で 5%～7%変化が少なかった。

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－14%、QI0.7 シリーズで－8%、QI0.8 シリーズで－5%、QI0.9 シリーズで＋3%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 $H_p(10)$の平均エネルギーの比較では、各シリーズの120kV 以下の線質について±0.3keV、150keV 以上の線質で±1keV 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±0.2keV 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) 各シリーズのスペクトル分解能は、QI0.6 及び QI0.7 のシリーズでは概ね 60kV 以下の線質で基礎フィルタのろ過効果の影響で 70kV 以上の線質より小さな値を示したが、基礎フィルタのろ過効果が少なく均等度が 1.0 に近い QI0.8 及び QI0.9 のシリーズでは全線質で同様の値を示した。これらについてシリーズ毎の 6 種類のスペクトル分解能の平均値で表すと、QI0.9 が 17%、QI0.8 が 34%、QI0.7 が 52%、QI0.6 が 64%となり、QI0.9 に対する相対比で表すと、QI0.8 が 2 倍、QI0.7 が 3 倍、QI0.6 が 4 倍に増加した。この結果は、文献 1)で報告された旧X線管球の評価値とほぼ同様となった。

(6) 各シリーズの $H^*(10)$／Ka 及び $H_p(10)$／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求めた換算係数($f_{H(10)Total}$ 又は $f_{Hp(10)Total}$)と実効エネルギーに対応する換算係数(f_{eff})の比較で、30kV 以下の線質を除く全ての線質が±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 20kV～50kV の線質で+1%～+27%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有意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。

(7) 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 $f_{Hp(0.07)Total}$)に対する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})の比較で、実効エネルギーに対して±2%、平均エネルギーに対して±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、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。

(8) X線スペクトル測定において、測定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、①QI0.6 の 40kV の線質でフルエンス平均エネルギーが 2m と 3m はよく一致し、6m で 0.5keV の違いが生じた。また、スペクトルの積分比から求めた Ka/φ及び $H^*(10)$/Ka の換算係数に変化があったが、$H^*(10)$/φの換算係数が 2m～6m でよく一致した。これにより、40kV の線質では、線質を設定した距離と実験に用いる距離が 2m～3m の範囲であれば平均エネルギーや線量当量換算係数への影響がほとんど無いことを明らかにした。②QI0.6 の 60keV～150keV の線質では、2m、3m、6m の測定距離に対して、フルエンス平均エネルギーが 0.2keV 以内でよく一致し、各換算係数も 1%以内でよく一致し、空気層の減弱がほとんど影響しないこ

とを確認した。これにより、60kV 以上の線質では、線質を設定した距離と実験に用いる距離が 2m～6m の範囲であれば平均エネルギーや線量当量換算係数への影響がほとんど無いとを明らかにした。

上記のように、原子力科学研究所の中硬Ｘ線照射装置のＸ線管球の交換に伴う、新たな中硬Ｘ線標準場の詳細な基礎データを明らかにした。これらにより、当該標準場は、日本工業規格で制定されている放射線防護用測定器のサーベイメータ、モニタ及び個人線量計等の中硬Ｘ線領域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

中硬Ｘ線照射装置のＸ線管球の交換作業を実施するに当たり、仕様書の作成、発注及び検収に至る全般を実施して頂いた、当時の原科研放射線管理部放射線計測技術課校正設備係の小沼勇氏、川崎克也係長及び係員に深く感謝すると共に、Ｘ線管球の選定・交換作業、設置時の性能試験を実施して頂いた（株）島津製作所の関係各位には多大なご尽力を頂き、深く感謝致します。また、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) 清水滋、高橋史明、澤畠忠広、當波弘一、菊地寛、村山卓：“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” JAERI-Tech 99-004 (1999)

2) 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”(2005)

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

4) 国際放射線防護委員会 : 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) S.SHIMIZU, K.MINAMI：IAEA-SM-330/11, Measurement Assurance in Dosimetry, “Relation between degree of X ray monochromaticity and dose distribution non-uniformity of irradiation field”(1994)

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

8) 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)

9) 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)

10) 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