

JAERI-Tech

2003-095

JP0450262



国際規格(ISO4037-1)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

2004年1月

清水 滋・Qingli ZHANG*・梶本 与一
川崎 朋克・藤井 克年

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

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

国際規格(ISO4037-1)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

日本原子力研究所東海研究所保健物理部
清水 滋・Qingli ZHANG*・梶本 与一
川崎 朋克・藤井 克年

(2003年11月28日受理)

国際標準化機構の国際規格 ISO4037-1 では、放射線防護用測定器の性能試験に用いるX線基準場が設定され、世界的に適用されている。原研の現行のX線基準場は、国内の利用を前提として構築されているため国内規格に適合しているが、上記国際規格とは異なっている。このため、国際的な性能試験に対応させるため、国際規格に準拠した Narrow series 、Wide series 及び High air-kerma series のX線基準場を、原研放射線標準施設棟の中硬X線照射装置を用いて整備した。本論文では、整備したX線場の線質設定、各線量単位のX線スペクトル等の評価を行うとともに、上記国際規格の線質やX線スペクトルとの比較を行った。この結果、原研のX線基準場の線質は、国際規格の線質と良く一致していることが確認でき、これにより放射線防護用測定器の広範囲な性能試験を国際規格に基づいて実施できることになった。

Establishment of X-ray Reference Fields for Performance Tests of Radiation
Measuring Instruments Based on International Standard (ISO4037-1)

Shigeru SHIMIZU , Qingli ZHANG*, Yoichi KAJIMOTO
Tomokatsu KAWASAKI and Katsutoshi FUJII

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

(Received November 28 , 2003)

The International Standard ISO4037-1 of the International Organization for Standardization is widely applied in the world to construct X-ray reference fields for performance tests of radiation measuring instruments. The application of the current JAERI's X-ray reference field constructed in accordance with the Japanese Standards should be limited for domestic purposes because of the characterization technique different from the International Standards. Therefore, for application to international performance tests, X-ray reference fields in the narrow, wide and high air-kerma series based on the International Standards were established using the medium-hard X-ray generator of the Facility of Radiation Standards (FRS), JAERI. This report presents quality characterization, estimation of X-ray spectra of each dose units of the new FRS's fields, and comparison of the qualities and the X-ray spectra to those of the ISO's. The FRS's qualities show good agreement with ISO's: the reference fields should serve for performance tests for international radiation protection purposes.

Keywords : X-ray Reference Field, Radiation Measuring Instrument, ISO4037-1,
Half Value Layer, Beam Quality, X-ray Energy Spectra, Calibration,
Effective Energy, International Standard

* China Institute for Radiation Protection

目 次

1. 序 論 -----	1
2. 照射場の設定に用いた装置の仕様 -----	2
2.1 X線照射装置の仕様 -----	2
2.2 半価層測定用電離箱式線量測定器の仕様 -----	2
3. X線照射場の設定 -----	3
3.1 線質の設定方法 -----	3
3.2 設定結果及び考察 -----	3
4. 線質に対するX線エネルギースペクトルの評価 -----	5
4.1 測定方法 -----	5
4.2 線量スペクトルの評価 -----	5
4.3 結果及び考察 -----	6
5. 線質に対する線量当量換算係数の評価 -----	9
5.1 評価方法 -----	9
5.2 結果及び考察 -----	9
6. 結 論 -----	11
謝 辞 -----	12
参考文献 -----	13
付録 1 -----	52

Contents

1. Introduction -----	1
2. Specification of Apparatus used for Characterization of Reference Fields -----	2
2.1 X-ray Generator -----	2
2.2 Ionization Chamber used for Measurement of Half Value Layer -----	2
3. Characterization of X-ray Reference Fields -----	3
3.1 Characterization Methods of Radiation Quality -----	3
3.2 Results and Discussion -----	3
4. Estimation of X-ray Energy Spectra for Reference Feilds -----	5
4.1 Measurement Methods -----	5
4.2 Estimation of Dose Spectra -----	5
4.3 Results and Discussion -----	6
5. Estimation of Dose Equivalent Conversion Coefficients for Reference Fields -----	9
5.1 Estimation Method -----	9
5.2 Results and Discussion -----	9
6. Conclusions -----	11
Acknowledgements -----	12
References -----	13
Appendix 1 -----	52

This is a blank page.

表 リ ス ト

- Table 1-1 原研 Narrow シリーズの特性
- Table 1-2 原研 Wide シリーズの特性
- Table 1-3 原研 High air-kerma シリーズの特性
- Table 2-1 原研 Narrow シリーズに対する実効エネルギーと平均エネルギーの関係
- Table 2-2 原研 Wide シリーズに対する実効エネルギーと平均エネルギーの関係
- Table 2-3 原研 High air-kerma シリーズに対する実効エネルギーと平均エネルギーの関係
- Table 3 原研のX線線質に対するエネルギースペクトルの分解能
- Table 4 原研のX線線質とISOのX線線質のフルエンススペクトル平均エネルギーの比較
- Table 5-1 原研 Narrow シリーズに対する周辺線量当量と空気カーマの比の比較
- Table 5-2 原研 Wide シリーズに対する周辺線量当量と空気カーマの比の比較
- Table 5-3 原研 High air-kerma シリーズに対する周辺線量当量と空気カーマの比の比較
- Table 5-4 原研 Narrow シリーズに対する強透過性個人線量当量と空気カーマの比の比較
- Table 5-5 原研 Wide シリーズに対する強透過性個人線量当量と空気カーマの比の比較
- Table 5-6 原研 High air-kerma シリーズに対する強透過性個人線量当量と空気カーマの比の比較
- Table 6-1 原研 Narrow シリーズに対する方向性線量当量と空気カーマの比の比較
- Table 6-2 原研 High air-kerma シリーズに対する方向性線量当量と空気カーマの比の比較
- Table 6-3 原研 Narrow シリーズに対する弱透過性個人線量当量と空気カーマの比の比較
- Table 6-4 原研 High air-kerma シリーズに対する弱透過性個人線量当量と空気カーマの比の比較
- Table 7-1 原研のX線線質とISOのX線線質によるNarrow シリーズの比較
- Table 7-2 原研のX線線質とISOのX線線質によるWide シリーズの比較
- Table 7-3 原研のX線線質とISOのX線線質によるHigh air-kerma シリーズの比較
- Table 8-1 原研のX線線質とISOのX線線質による $H^*(10)$ と $H_p(10)$ の空気カーマに対する換算係数の比較
- Table 8-2 原研のX線線質とISOのX線線質による $H^*(0.07)$ と $H_p(0.07)$ の空気カーマに対する換算係数の比較

図 リ ス ト

- Fig.1 X線照射装置のダイヤグラム
 Fig.2 X線照射器の断面図
 Fig.3 中硬X線測定に用いる基準電離箱のエネルギー特性
 Fig.4 軟X線測定に用いる基準電離箱のエネルギー特性
 Fig.5 パルス波高スペクトルの測定ダイヤグラム
 Fig.6 高純度 Ge 検出器(GMX-10180-P)の光子エネルギーに対するピーク効率
 Fig.7-1 原研 Narrow シリーズのフルエンススペクトル
 Fig.7-2 原研 Narrow シリーズの空気カーマススペクトル
 Fig.7-3 原研 Narrow シリーズの周辺線量当量スペクトル($H^*(10)$)
 Fig.7-4 原研 Narrow シリーズの方向性線量当量スペクトル($H'(0.07)$)
 Fig.7-5 原研 Narrow シリーズの強透過性個人線量当量スペクトル($H_p(10)$)
 Fig.7-6 原研 Narrow シリーズの弱透過性個人線量当量スペクトル($H_p(0.07)$)
 Fig.8-1 原研 Wide シリーズのフルエンススペクトル
 Fig.8-2 原研 Wide シリーズの空気カーマススペクトル
 Fig.8-3 原研 Wide シリーズの周辺線量当量スペクトル($H^*(10)$)
 Fig.8-4 原研 Wide シリーズの強透過性個人線量当量スペクトル($H_p(10)$)
 Fig.9-1 原研 High air-kerma シリーズのフルエンススペクトル
 Fig.9-2 原研 High air-kerma シリーズの空気カーマススペクトル
 Fig.9-3 原研 High air-kerma シリーズの周辺線量当量スペクトル($H^*(10)$)
 Fig.9-4 原研 High air-kerma シリーズの方向性線量当量スペクトル($H'(0.07)$)
 Fig.9-5 原研 High air-kerma シリーズの強透過性個人線量当量スペクトル($H_p(10)$)
 Fig.9-6 原研 High air-kerma シリーズの弱透過性個人線量当量スペクトル($H_p(0.07)$)
 Fig.10-1 Narrow シリーズに対する原研のX線線質と ISO のX線線質のフルエンススペクトルの比較
 Fig.10-2 Wide シリーズに対する原研のX線線質と ISO のX線線質のフルエンススペクトルの比較
 Fig.10-3 High air-kerma シリーズに対する原研のX線線質と ISO のX線線質のフルエンススペクトルの比較
 Fig.11 光子に対する線量当量換算係数の特性

1. 序 論

原研は 1986 年以来、東海研究所保健物理部所管の放射線標準施設棟に設置した米国パンタック社製 HF-420C 型中硬 X 線照射装置を用いて、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多くの X 線照射場を整備し、各種放射線測定器のエネルギー特性試験に利用してきた。これらの照射場は、国家標準場とトレーサビリティが確保された二次標準場であり、ビーム線質指標 ($QI=0.6 \sim 0.9$) で規定される 4 つのシリーズから成り、管電圧 10kV から 350kV の範囲 (実効エネルギー 9.0keV から 318keV) において全体で 59 の線質が構築されている¹⁾。これらの日本独自の設定方法は、管電圧、フィルタ、実効エネルギー、均等度、線質指標などに基づくもので、国内の日本工業規格(JIS Z 4511)²⁾ で規格化されている。

一方、国際標準化機構 (ISO) は、放射線防護用測定器の性能試験や校正に使用する X 線照射場の共通の規格を各国に普及させるため、1979 年に ISO4037 レポートを出版した。このレポートは、近年に改定を行い ISO4037-1³⁾、ISO4037-2、ISO4037-3⁴⁾ に分類されて出版された。このうち、ISO 4037-1 では連続 X 線に関する基本照射場が掲載されており、低線量の空気カーマ率に対応させた Low air-kerma series、スペクトルの広がりが最も狭い Narrow series、スペクトルの広がりを持たせた Wide series、高線量の空気カーマ率に対応させた High air-kerma series の 4 シリーズからなり、全体で 41 種類の X 線線質を推奨している。これらのシリーズで使用する管電圧の範囲は 10kV から 300kV であり、フルエンスの平均エネルギーでは 7.5keV から 250keV の範囲である。

日本独自の方式と ISO の線質表示方法などの違いにより、放射線標準施設棟の標準場は国際的な相互比較には利用されることは少なかったが、放射線測定器の規格の国際化に伴い、性能試験用照射場も国際規格への準拠が必要となってきた。このため、国際的な比較試験などに利用するため、原研の X 線照射装置により ISO に準拠した照射場を整備することとした。これらの ISO 線質を各々の X 線照射装置で使用する場合は、X 線管球の窓面に取り付けられた固有フィルタの厚さの違いやコリメータの散乱線の違いにより、低エネルギー領域では X 線の発生量とフィルタによるろ過作用が異なる他、高エネルギー領域ではコリメータ散乱線が影響するため、必ずしも ISO 線質と一致しない。従って、ISO に準拠した線質を設定する場合は、半価層測定やスペクトル測定などを実験により明らかにして、ISO 線質と詳細に比較検討を行う必要がある。

原研の中硬 X 線照射装置を用いて、ISO 4037-1 が推奨する上記の X 線照射場のうち、低線量率の校正に用いる Low air-kerma series を除く 3 シリーズの 29 種類について設定を行い、ISO に準拠した X 線照射場を整備した。本報告では、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エネルギー・フルエンス・スペクトルを求め、実際の照射に用いる空気カーマ、周辺線量当量、方向性線量当量、強透過性及び弱透過性の個人線量当量に対するスペクトルを評価した。そして、これらのスペクトルから平均エネルギー、スペクトル分解能、空気カーマからの線量当量換算係数を評価した。更に、得られた原研の線質と ISO の線質について、半価層、実効エネルギー、フルエンス・スペクトル、フルエンス平均エネルギー、スペクトル分解能、線量当量換算係数等の比較を行い、両者の整合性について考察した。

実験結果から、原研の線質は ISO 線質と良く一致していることが明らかになり、本照射場を使用して、国際的な照射試験所間の照射場の性能比較及び放射線測定器の感度比較等が実施できることになった。

2. 照射場の設定に用いた装置の仕様

2.1 X線照射装置の仕様

原研放射線標準施設棟の中硬X線照射装置は、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、コリメータ、シャッター、フィルタケースを具備した照射器で構成される。これらの構成図を Fig.1 に、照射器の断面図を Fig.2 に示す。本装置は、米国パンタック社製 HF-420C 型で 1986 年に設置し、主として放射線測定器のエネルギー特性試験に利用されている。

X線管球は、ドイツの AEG-TELEFUNKEN 製の MB420/1 型で、ターゲットはタンゲステン、管球窓の厚さは 7mm のベリリウム、さらにその前面には厚さ 0.3mm のアルミニウムが装着され、外筒にはメタルセラミック材を使用している。照射器は Fig.2 に示すように、X線管球を厚さ 2.5cm の鉛容器内に設置して漏洩X線を遮へいし、X線管球の窓の前面にシャッターと 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。このような構造により、シャッターを閉じた状態で、照射する前に管電圧・管電流を安定させることができ、シャッターの開閉だけに依存する安定したX線の照射が可能である。

X線管球へ供給する電圧・電流の安定性は、共に ±0.02% 以下と優れ、線量率の安定性は ±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できる。また、シャッターの開・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 filtration)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コリメータ角度を 30° と大きくしても十分機能するように 1 辺 25cm の正方形 (1mm 以下の薄いフィルタは中央に 22cm φ の穴のあいた 25cm 角の額縁に収めた)とした。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。

2.2 半価層測定用電離箱式線量測定器の仕様

X線線質の第 1 半価層、第 2 半価層の測定には、Fig.3 及び Fig.4 に示すエネルギー特性を有する EXRADIN A5(100ml)、EXRADIN A6(800ml)、Victoreen 30-330(0.2ml)、Ionex 2575(600ml) の 4 つの通気型空洞電離箱検出器を使用した。前者の 2 つの検出器は、X線スペクトルが中硬X線領域 (30keV～300keV) に分布している場合に使用し、感度の変化は 30keV～300keV の範囲で ±3% である。後者の 2 つの検出器は軟X線領域(8keV～50keV) に分布している場合に使用し、感度の変化は Victoreen 30-330 型が 8keV～32.5keV の範囲で ±1%、Ionex 2575 型が 8keV～20keV の範囲で ±3% 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ジタル表示される。これらは、国内の標準機関(AIST)で直接校正されたトレーサビリティを有する測定器(二次標準器)であり、値付けされた校正定数は ±3% の不確かさである。

3. X線照射場の設定

3.1 線質の設定方法

付録1に示すISOの各シリーズには、各管電圧の線質に対して基礎フィルタ厚さ、第1半価層、フルエンス平均エネルギー、スペクトル分解能が示されている。一方、国内の線質条件には、日本工業規格のJIS Z 4511に示され、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、両者の線質条件を満足するように各データを取得した。

まず、線質を決めるための条件は、ISOの各シリーズに示される基礎フィルタ及び半価層測定フィルタの材質を同じにし、基礎フィルタの厚さは我々が用意したフィルタの組み合わせからISOに最も近い厚さとした。この結果、Al、Cu及びPbが±0.02mm以内で一致したが、Snは0.05mm～0.1mmの違いが生じた。半価層の測定では、NarrowシリーズとWideシリーズではX線スペクトルのエネルギー領域により2.2項に示すIonex2575とEXRADIN A6を使い分け、X線管球の焦点と検出器との照射距離を1.2mとした。また、High air-kermaシリーズでは、上記と同様のエネルギー領域によりVictorren 30-330とEXRADIN A5を使い分け、照射距離を1.0m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、WM.J.Veigleら⁵⁾のデータをフィッティング関数にして用いた。なお、200kV以下のエネルギーについては下記の(1)式及び(2)式¹⁾により求めた。また、X線スペクトルの単色化の程度を表す(1.00：単色エネルギー)均等度(H)及びX線スペクトルの幅の比率を表す線質指標(QI)は(3)式及び(4)式により算出した。

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

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

$$H = \frac{\text{第1半価層}(t_1)}{\text{第2半価層}(t_2)} \quad (3)$$

$$QI = \frac{\text{実効エネルギー}(E_{eff})}{\text{最大エネルギー}(E_{max})} \quad (4)$$

3.2 設定結果及び考察

ISOの3シリーズに準拠した原研照射場のX線線質(以下「原研線質」という。)をTable1-1～Table1-3に示す。また、付録1にはISOのX線線質(以下「ISO線質」という。)を示し、同表の右欄には原研線質と比較するための実効エネルギー、線質指標を表した。そして、両者の線質について半価層、実効エネルギー及び線質指標を比較した結果をTable7-1～Table7-3にまとめて示

す。以下に結果及びISO線質との比較内容を示す。

- (1) 原研線質の実効エネルギーの範囲は、Table7-1～Table7-3に示すように、Narrowシリーズが9.0keV～255keV、Wideシリーズが39.4keV～205keV、High air-kermaシリーズが13.4keV～149keVであった。ISOの各シリーズの実効エネルギーは、Narrowシリーズが7.8keV～254keV、Wideシリーズが41.6keV～209keV、High air-kermaシリーズが10kVを除く線質で10.7keV～148keVであった。両者の値は、29線質のうち26の線質が±3keVで一致した。大きな違いが生じたのは、Narrowシリーズの200kVとWideシリーズの200kV、300kVの3線質だけであった。低エネルギーでの1keV～3keVの違いは、X線管球の窓材に設置されている固有フィルタの厚さの違いにより、ろ過作用(Inherent filtration)が変化したからである。この固有フィルタは、原研の管球窓は7mmのベリリウムと0.3mmのアルミニウムが付加されているのに対し、ISOは1mmのベリリウムである。このため、低エネルギーのろ過の程度が原研の方が大きくなり、実効エネルギーが高くなかった。上記の原研の固有フィルタは、アルミニウムに換算すると0.5mmに相当する。
- (2) 原研線質の線質指標の範囲は、Narrowシリーズが15kV以下を除く線質で0.72～0.85、Wideシリーズが0.64～0.71、High air-kermaシリーズが30kV以下を除く線質で0.49～0.53であった。ISOの各シリーズの線質指標は、上記と同様の範囲でNarrowシリーズが0.75～0.85、Wideシリーズが0.66～0.71、High air-kermaシリーズが0.48～0.52であった。両者の値は、低エネルギーの4線質を除く23の線質が±0.03(±5%)で一致した。しかし、国内の設定では、線質指標を0.60、0.70、0.80、0.90の値に対して±0.02(±2%)に合わせているのに対し、ISOの各シリーズは線質指標に±5%～±10%の広がりがあり、線質指標を基準とする分類はできない。すなわち、ISOの線質の分類はスペクトル幅の比率に統一性がないと言える。
- (3) 半価層の比較では、Narrowシリーズでは基礎フィルタ厚さが若干異なる3線質で±0.1mmの違いがあったが、その他の線質では±0.05mm(Al及びCu)であった。Wideシリーズでは基礎フィルタ厚さが若干異なる2線質で±0.2mmの違いがあったが、その他の線質では±0.03mm(Cu)で一致した。High air-kermaシリーズでは30kV以下で0.15mmの違いがあったが、その他の線質では±0.05mmで一致した。
- (4) 原研線質の均等度の範囲は、Table1-1～Table1-3に示すように、(2)項の線質指標と同じ線質に対してNarrowシリーズが0.75～0.98、Wideシリーズが0.84～0.95、High air-kermaシリーズが0.66～0.86であった。ISOでは第2半価層が評価されていない線質が多いので、ISOとの比較は行わなかった。

4. 線質に対するX線エネルギースペクトルの評価

4.1 測定方法

各線質のX線波高分布の測定は、Fig.5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(GMX-10180-P)の全面に設置し、放射線の入射量やコリメータ散乱線の影響を考慮して1mm ϕ 、5mm ϕ 、10mm ϕ 、35mm ϕ の4種類のコリメータから選択して測定を行った。測定に用いたGe検出器は、47.9mm ϕ ×55.3mmの結晶にBe0.5mmの窓を有するn型HPGeで、 ^{60}Co 1333keVの基準フルエンス率に対する検出効率は実験により12%である。X線焦点とGe検出器の距離は、Narrowシリーズ及びWideシリーズで3m、放射線強度が高いHigh air kermaシリーズで6mとした。得られたX線波高分布から、50keV以上の光子で評価したピーク検出効率特性(Fig.6:丸印は実測値)の補正、コリメータ断面積の補正を(5)式で行い、各距離におけるエネルギーフルエンススペクトル($\phi(E)$)を評価した。これらの手法による誤差は、およそ±5%と推定した。なお、スペクトルのエネルギー校正是0.125keV/chで、4000ch当たり500keVとした。

$$\phi(E) = N_c(E) / (S \cdot \eta_E) \quad \dots \quad (5)$$

$\phi(E)$: フルエンスに対するエネルギースペクトル(cm $^{-2}$)

$N_c(E)$: ピークエネルギーE(keV)における計数率

η_E : ピークエネルギーE(keV)の検出効率

S : コリメータの断面積(cm 2)

ピーク検出効率(η_E)の評価は、基準放射能が既知な γ 線ポイント標準線源を用い、53keV～1333keVの光子に対するピーク計数率とその光子の基準フルエンス率の比から算出した。(5)式で波高分布に検出効率の補正を加えるため、Fig.6のピーク検出効率特性から(6)式及び(7)式に示す最小二乗法によるフィッティング関数を作成した。(6)式は120keV～1333keVのエネルギーに対応し、(7)式は9keV～30keVのGe-K吸収端の変化に対応させ、5keV～9keVのピーク検出効率は1.0とした。なお、50keV以下のピーク検出効率は、Fig.6の実線で示すメーカー値を使用した。

$$\eta_E = \exp(-0.1292(\ln E)^2 + 0.6829\ln E + 4.308) / 100 \quad \dots \quad (6)$$

(120keV～1333keV)

$$\eta_E = \exp(1.3392(\ln E)^4 - 15.632(\ln E)^3 + 68.145(\ln E)^2 - 131.32\ln E + 98.774) / 100 \quad \dots \quad (7)$$

(9keV～30keV)

4.2 線量スペクトルの評価

線量スペクトルは、上記で得られたエネルギーフルエンススペクトルにICRP74⁶⁾及びICRU47⁷⁾の各線量に係る換算係数を乗じて得られるが、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)を用いてデータの内挿を行い、このフィッティング関数で補正を加えた。

評価した線量スペクトルは、空気カーマスペクトル($K_a(E)$)、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($H'(0.07)(E)$)、強透過性及び弱透過性個人線量当量スペクトル($H_p(10)(E)$ 及び $H_p(0.07)(E)$)である。これらの評価式を(8)式～(12)式に示す。なお、方向性線量当量及び弱透過性個人線量当量スペクトル($H_p(0.07)(E)$)の評価は、スペクトル平均エネルギーが40keV以下の線質について行った。

$$K_a(E) = \phi(E) \cdot C_{K_a}(E) \quad \dots \quad (8)$$

$C_{K_a}(E)$: フルエンスから空気カーマへの換算係数 ($Gy \cdot cm^2$)

$$H^*(10)(E) = \phi(E) \cdot C_{H^*}(E) \quad \dots \quad (9)$$

$C_{H^*}(E)$: フルエンスから周辺線量当量への換算係数 ($Sv \cdot cm^2$)

$$H'(0.07)(E) = \phi(E) \cdot C_{H'}(E) \quad \dots \quad (10)$$

$C_{H'}(E)$: フルエンスから方向性線量当量への換算係数 ($Sv \cdot cm^2$)

$$H_p(10)(E) = K_a(E) \cdot C_{p10}(E) \quad \dots \quad (11)$$

$C_{p10}(E)$: 空気カーマから強透過性個人線量当量への換算係数 (Sv/Gy)

$$H_p(0.07)(E) = K_a(E) \cdot C_{p0.07}(E) \quad \dots \quad (12)$$

$C_{p0.07}(E)$: 空気カーマから弱透過性個人線量当量への換算係数 (Sv/Gy)

得られた各線量スペクトルから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比較を行った。また、フルエンス平均エネルギーについて、付録1に示すISO線質と今回設定した原研線質との比較を行った。更に、ISO4037-1に示されるISOのフルエンススペクトルと原研で評価したフルエンススペクトルの比較を行い、フルエンススペクトルの違いを考察した。

原研の各線量スペクトルについて、スペクトルの半値幅と平均エネルギーの比からスペクトル分解能を求め、このうち、フルエンススペクトル分解能について原研線質とISO線質との比較を行った。

4.3 結果及び考察

各線量スペクトルの評価結果を各シリーズ毎にまとめてFig.7-1～Fig.9-6に示す。また、各スペクトルの図中には平均エネルギーを示す。

半価層による実効エネルギーと各線量スペクトルの平均エネルギーをまとめたものをTable2-1～Table2-3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 $E_{P(0.07)}$

は強透過性と弱透過性の個人線量当量平均エネルギーを表す。各線量スペクトルの分解能の結果を Table 3 に示す。また、原研線質と ISO 線質のフルエンス平均エネルギーの比較を Table 4 に、両者のフルエンススペクトルの相対比較を Fig.10-1～Fig.10-3 に示す。フルエンススペクトルの比較では、図中の薄い線が ISO スペクトルで濃い線が原研スペクトルであり、両者の平均エネルギーを図中に表示した。評価した各スペクトルの平均エネルギーの比較において、その違いを考察するため、ICRP74 及び ICRU47 に示される換算係数のフルエンスに対する各線量単位の特性を Fig.11 に示す。以下に評価結果及び考察を示す。

- (1) 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、Table2-1～Table2-3 に示すように、Narrow シリーズ及び Wide シリーズがほぼ±5%と近い値を示し、High air-kerma シリーズは-3%～-8%と違いが大きかった。
- (2) 実効エネルギーと周辺線量当量の平均エネルギーの比較($E_{\text{eff}}/E_{H(10)}$)では、Narrow シリーズが 60kV 以下の線質で-8%の違いが生じたが、80kV 以上の線質で±3%、Wide シリーズが全体的に ±5%、High air-kerma シリーズが 20kV の線質で-18%であったが高エネルギーになるにつれて両者は近い値になった。
- (3) 周辺線量当量と強透過性個人線量当量 $H_p(10)$ の平均エネルギーは、シリーズの全線質について ±1keV でよく一致した。また、方向性線量当量と弱透過性個人線量当量 $H_p(0.07)$ の平均エネルギーも ±0.1keV 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。これらは、Fig.11 に示すフルエンスに対する各線量単位の換算係数の特性から、相対的に比較すると同様の考察ができる、測定結果の妥当性が確認できた。
- (4) Table4 に示す原研線質と ISO 線質のフルエンス平均エネルギーの比較では、29 線質のうち 23 線質が ±2keV でよく一致した。残りの 6 線質(Wide シリーズの 300kV、High air-kerma シリーズの 20kV 及び 200kV 以上の線質)は、3keV～17keV の違いが生じた。

これらの違いを詳細に分析するためのフルエンススペクトルの比較では、Fig.10-1～Fig.10-3 に示すように、10kV～30kV の線質では、X 線管球の固有フィルタの違いによるろ過作用と ISO スペクトルに対して Ge 検出器の材料による目的外の特性 X 線(8.3keV、9.9keV、11.7keV 付近)の発生があり、これらが影響した。40kV～150kV の線質では、両者のスペクトルは良く一致した。200keV 以上の線質では、Narrow シリーズ、Wide シリーズ及び High air-kerma シリーズは一部の線質で Sn 及び Pb の基礎フィルタ厚さの違いにより若干のずれが生じたが両者はほぼ一致した。しかし、Fig.10-3 に示す High air-kerma シリーズの 250kV 以上の ISO スペクトルには、管球ターゲットのタンクステンの特性 X 線(59.3keV、69.3keV)のほかに、鉛の特性 X 線(75.0keV、84.9keV)が発生していることが確認された。この鉛の特性 X 線は、スペクトル測定時に鉛コリメータ部分に一次 X 線が衝突して発生するものである。これを低減させるには、一次 X 線の入射軸の確認及び Ge 検出器とコリメータを若干離す必要がある。また、High air-kerma シリーズの 200kV 以上のフルエンス平均エネルギーに 8keV～17keV の違いが生じた理由は、200kV 以上のエネルギーではスペクトル測定時のコリメータ散乱線(小角散乱)が急激に増加するための影響とも考えられるが、Table7-3 の 200kV 以上の半価層及び実効エネルギーの比較で両者が良く一致していること、Table8-1 の 200kV 以上の線量当量換算係数が良く一致していること、Fig.10-3 に示すフルエンススペクトルの相対比較でもほぼ一致していることから、ISO の平均エネルギーの評価に問題があると考えられる。

(5) 原研の各線質のスペクトル分解能は、Table3 に示すように、Narrow シリーズでは 15kV 以下のろ過効果が大きい線質を除いた 20kV 以上の線質で、フルエンスが 0.28~0.41、空気カーマが 0.26~0.45、周辺線量当量が 0.25~0.43、強透過性個人線量当量 $H_p(10)$ が 0.25~0.42 で、ほぼ同じ傾向を示し、方向性線量当量の 0.31~0.44 と弱透過性個人線量当量 $H_p(0.07)$ の 0.31~0.44 も同じ傾向を示した。これら同じ傾向を示す線質は、スペクトルの積分値には違いがあるが、スペクトルの相対的な形状がほぼ同じことを示している。

Wide シリーズでは、フルエンスが 0.53~0.59、空気カーマが 0.52~0.66、周辺線量当量が 0.52~0.60、強透過性個人線量当量 $H_p(10)$ が 0.51~0.60 でほぼ同じ分解能の範囲であった。

High air-kerma シリーズでは、フルエンスが 0.40~0.98、空気カーマが 0.49~1.08、周辺線量当量が 0.34~1.10、強透過性個人線量当量 $H_p(10)$ が 0.33~1.02、方向性線量当量が 0.46~0.73、弱透過性個人線量当量 $H_p(0.07)$ が 0.46~0.74 で、線質の管電圧が上昇するにつれて分解能が極端に悪くなり、200kV 以上の線質ではほぼ 100% に達した。従って、本シリーズの 200kV 以上の線質では、このようにスペクトル幅が極端に広いので、測定器のエネルギー特性試験には不適当であることがわかった。

ISO の各線質のフルエンススペクトルに対する分解能は、Narrow シリーズで 0.27~0.37、Wide シリーズで 0.48~0.57 であり、原研線質の同じシリーズと比較すると両者は数% 以内でほぼ一致した。

以上の結果から、評価した原研の 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、周辺線量当量と強透過性個人線量当量が全線質について良く一致し、方向性線量当量、弱透過性個人線量当量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。しかし、ISO 線質のフルエンススペクトルには、10kV~30kV の線質に目的外の Ge 検出器の特性 X 線が発生していること、High air-kerma シリーズの 250kV 以上の線質に目的外の鉛の特性 X 線が発生していること、High air-kerma シリーズの 200kV 以上の線質のフルエンス平均エネルギーの評価に問題があることが確認された。

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線照射場を放射線測定器の性能試験に用いる場合の基準線量率は、放射線防護用の周辺線量当量率や個人線量当量率が一般的に使用される。このため、放射線測定器に照射する照射場の基準線量当量率は、まず、照射場の照射線量率を測定して空気カーマ率に変換し、この値に各線量当量のエネルギーに対応した空気カーマからの換算係数($H^*(10)/Ka$ 、 $H'(0.07)/Ka$ 、 $H_p(10)/Ka$ 、 $H_p(0.07)/Ka$ など)を乗じて算出する。しかし、X線照射場は、X線エネルギースペクトルに広がりをもっているため、ICRP74に示される線量当量換算係数はそのまま利用できない。従って、X線照射場の線量当量換算係数を求める場合は、各線量当量スペクトルの各エネルギーに対応した換算係数を積分して求める必要がある。これ故、今回設定したX線照射場の線量当量換算係数は下記の方法で求め、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と実効エネルギーに対する換算係数との比較検討を行った。

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)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)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。また、ISO 4037-3に示されるISO線質の $H^*(10)/Ka$ 及び $H_p(10)/Ka$ の換算係数と上記で算出した原研の換算係数との比較を行った。

5.2 結果及び考察

原研の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Table 5-1～Table 5-6に、方向性線量当量換算係数($H'(0.07)/Ka$)及び弱透過性個人線量当量換算係数($H_p(0.07)/Ka$)の比較結果をTable 6-1～Table 6-4に示す。ISO4037-3に示されるISOの換算係数と原研との比較をTable 8-1～Table 8-2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は、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、Table 5-1～Table 5-3に示すようにNarrowシリーズの80kV以上の線質、Wideシリーズの110kV以上の線質及びHigh air-kermaシリーズの200kV以上の線質において±1%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連れて、両者の換算係数には±2%～±42%と大きな違いが生じた。また、実効エネルギーに対する換算係数も同様に一致した。従って、照射場の周辺線量当量を空気カーマから求める場合は、スペクトルの比較から算出した換算係数 $f_{H(10)Total}$ (Sv/Gy)を用いることとする。
- (2) 強透過性個人線量当量換算係数は、(1)項と同様に比較すると、Table 5-4～Table 5-6に示すようにNarrowシリーズの80kV以上の線質、Wideシリーズの110kV以上の線質及びHigh air-kermaシリーズの200kV以上の線質において±2%と両者はよく一致した。しかし、上記以外の線質で低い管電圧になるにつれて、両者の換算係数には±3%～±43%と大きな違いが生じた。これらの結果は(1)項と全く同じ傾向を示した。従って、照射場の個人線量当量を空気カーマから求める場合は、スペクトルの比較から算出した換算係数 $f_{H_p(10)Total}$ (Sv/Gy)を用いることとする。

- (3) 方向性線量当量及び弱透過性個人線量当量換算係数は、Table6-1～Table6-4に示すように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、すべての線質について±1%で一致した。しかし、実効エネルギーの換算係数との比較では、各シリーズの30kV、40kV及び60kVの線質で±2%～±6%の違いが生じた。このため、照射場の基準線量当量を空気カーマから求める場合は、スペクトル平均エネルギーの換算係数を用いても良いが、原則としてスペクトルの比から算出した換算係数 $f_{H(0.07)Total}(Sv/Gy)$ 又は $f_{Hp(0.07)Total}(Sv/Gy)$ を用いることとする。
- (4) ISO 4037-3に示されるISOの各シリーズの周辺線量当量及び強透過性個人線量当量の各換算係数との比較は、Table8-1に示すようにNarrowシリーズの60kV以上の線質、Wideシリーズの全ての線質及びHigh air-kermaシリーズの100kV以上の線質において±3%とよく一致した。しかし、上記以外の線質で低い管電圧になるにつれて、スペクトルのろ過作用の違いにより両者の換算係数は±4%～±112%と大きな違いが生じた。
- (5) ISO 4037-3に示されるISOの各シリーズの方向性線量当量及び弱透過性個人線量当量換算係数との比較は、Table8-2に示すようにNarrowシリーズの10kVを除く全ての線質において±3%で一致した。

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、スペクトルの比から算出した値を用いることにした。また、原研の線質を用いて放射線測定器や個人線量計の国際的な基準照射を行う場合は、ISOの線質に±3%で一致している上記の(4)項、(5)項に示した線質を推奨する。

6. 結 論

本報告では、東海研究所放射線標準施設棟に設置されている中硬X線照射装置(米国パンタック社製 HF-420C型)を用いて、ISO 4037-1で推奨する放射線防護用測定器の性能試験及び校正に使用する3つのシリーズに対応したX線照射場を29の線質について設定し、実際の照射に用いる各種線量当量スペクトルを評価した。また、原研で設定した線質とISOの線質の比較検討を行った。これらの設定結果及び検討結果より以下の結論を得た。

- (1) ISOに準拠したX線照射場の設定では、ISOの線質と同じ基礎フィルタを用い、各線質について国内のJIS規格が推奨する実効エネルギー、線質指標、均等度、半価層を評価し、ISOの線質と比較を行った。その結果、X線管球の窓に取り付けられた固有フィルタのろ過作用の違いにより、原研の線質はISOと比較して全体的に1keV～3keV高い実効エネルギーとなり、半価層で表すとNarrowシリーズで0.05mm(AI)、Wideシリーズで0.03mm(Cu)、High air-kermaシリーズで最大0.15mm(AI)それぞれ原研の方が厚くなつた。しかし、管電圧が大きくなるにつれて半価層のずれの影響が少なくなり、両者の実効エネルギー、線質指標はほぼ同じになり、ISOの線質に良く一致していることが確認できた。
- (2) フルエンススペクトルの比較では、スペクトル平均エネルギーが全体的に±2keVで両者はよく一致した。ただし、一部の線質(High air-kermaシリーズの20kV及び200kV以上の線質等)では、3keV～17keVの違いが生じた。この理由は、低エネルギーでは、X線管球の固有フィルタの違いによるろ過作用とISOの方に目的外のGeなどの特性X線が発生していることが影響し、高エネルギーでは、両者の実効エネルギー及びスペクトルがほぼ一致していることから、ISOのフルエンス平均エネルギーの評価値に問題があること、並びにHigh air-kermaシリーズの250kV以上のフルエンススペクトルに目的外の鉛の特性X線が発生していることが確認された。今後のISO 4037-1の改訂において、これらの訂正が望まれる。
- (3) 各線量スペクトルの評価では、フルエンススペクトルを基底として、空気カーマスペクトル(K_a)、周辺線量当量スペクトル($H^*(10)$)、方向性線量当量スペクトル($H'(0.07)$)、強透過性個人線量当量スペクトル($H_p(10)$)、弱透過性個人線量当量スペクトル($H_p(0.07)$)を評価し、これらスペクトルの平均エネルギーの比較を行った。その結果、周辺線量当量及び強透過性個人線量当量の平均エネルギーは全ての線質について良く一致した。また、方向性線量当量、弱透過性個人線量当量及びこの線質に対応した空気カーマの3種類の平均エネルギーは、対象となる全ての線質について良く一致した。
- (4) 各線量スペクトルの分解能の比較では、各シリーズの管電圧毎の分解能で比較すると、30kV以上のNarrowシリーズ、60kV以上のHigh air-kermaシリーズ及びWideシリーズの全てがそれぞれ近い値を示した。また、High air-kermaシリーズの分解能は、管電圧が大きくなるにつれて大きな値になり、200kV以上で平均エネルギーに相当するスペクトル半値幅(分解能:100%)になることを確認し、エネルギー特性としての利用は好ましくないことがわかった。
- (5) 実際に照射場の基準線量当量を求める場合は、照射線量を測定して空気カーマを求め、これに空気カーマから線量当量へ変換する線量当量換算係数を乗じて算出する。各線質の換算係数は、各線量スペクトルと空気カーマスペクトルの積分値の比から求めたものと、線量当量平均エネルギー

に対するものとを比較したところ、低エネルギーの線質に対して値が一致しないため、全ての線質についてスペクトルの比から求めた線量当量換算係数を用いることにした。

(6) ISO 4037-3 の ISO 線質の線量当量換算係数との比較では、周辺線量当量及び強透過性個人線量当量の換算係数は、3 シリーズの 28 線質のうち 20 線質が両者共に±3 %以内で良く一致し、それ以外の線質は低い管電圧の線質になるにつれて、固有フィルタのろ過作用の影響により±4%～112%と大きな違いが生じた。また、方向性線量当量及び弱透過性個人線量当量の換算係数は、2 シリーズの 9 線質のうち Narrow シリーズの 10kV の H'(0.07) を除く全ての線質について±3%で一致した。

(7) ISO 線質を X 線照射装置で設定する場合は、X 線管球の窓面に取り付けられた固有フィルタの厚さの違いやコリメータ孔の散乱線の違いにより、低エネルギー領域又は高エネルギー領域において必ずしも ISO 線質と一致しない場合があることがわかった。このため、ISO に準拠した線質を設定する場合は、半価層測定やスペクトル測定を実験により明らかにして、ISO 線質と十分な比較検討を行う必要性がある。

(8) 今回整備した照射場を放射線測定器や個人線量計の国際的な基準照射に用いる場合は、測定器の各線量単位に対応したエネルギー特性が良好なときは全ての線質について利用できる。しかし、エネルギー特性が低エネルギー領域で悪い測定器では、低い管電圧の線質を使用する場合には ISO 線質との感度の違いが顕著になるため、注意を要する。

上記の結論より、これらの ISO に準拠した X 線照射場の整備では、いくつかの低エネルギーの線質を除く線質について ISO の線質に良く一致していることが確認できた。これらの X 線照射場は、放射線防護に用いるサーベイメータ及び個人線量計等の国際的な基準照射に十分使用できることが明らかになった。

謝　辞

本技術論文をまとめに当たり、貴重な助言を頂いた原研線量管理課の山本英明課長並びに原研安全管理室の村上博幸調査役に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 清水滋 他 : JAERI-Tech 99-004, “放射線測定器の性能試験に用いるX線校正場の特性評価” (1999)
- 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” (1999)
- 3) 国際標準化機構 : ISO 4037-1, “X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy” Part1 : Radiation characteristics and production methods (1996)
- 4) 国際標準化機構 : ISO 4037-3, “X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy” Part3 : Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence (1999)
- 5) WH.J.Veiglo : Atomic data table Vol.5 (1973)
- 6) 国際放射線防護委員会 : ICRP Publication 74 , “Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation” (1996)
- 7) 国際放射線単位・測定委員会 : ICRU Report 47 , “Measurement of dose equivalents from external photon and electron radiations” (1992)

Table 1-1 Characteristics of JAERI narrow series

Tube potential kV	Additional filtration mm				Half-value layer * mm		Homogen. coefficient	Effective energy (keV)	Quality index QI
	Pb	Sn	Cu	Al	1st	2nd			
10				0.102	0.0735	0.0765	0.96	9.0	0.90
15				0.501	0.186	0.189	0.98	12.4	0.83
20				0.996	0.364	0.406	0.90	15.6	0.78
25				2.005	0.665	0.725	0.92	19.2	0.77
30				4.013	1.09	1.205	0.90	22.9	0.76
40			0.204		0.07	0.0757	0.92	29.7	0.74
60			0.600		0.200	0.232	0.86	43.2	0.72
80			2.000		0.525	0.55	0.95	61.5	0.77
100			5.016		1.02	1.08	0.94	79.7	0.80
120		1.060	5.015		1.72	2.28	0.75	100	0.84
150		2.668			2.44	2.50	0.98	120	0.80
200	1.006	2.903	2.000		4.12	4.28	0.96	170	0.85
250	2.995	2.122			5.14	5.52	0.93	207	0.83
300	4.987	2.903			6.14	6.43	0.95	255	0.85

* HVL material is aluminum for tube potential from 10kV to 30kV and copper for others.

Table 1-2 Characteristics of JAERI wide series

Tube potential kV	Additional filtration mm				Half-value layer mm Cu		Homogen. coefficient	Effective energy (keV)	Quality index QI
	Pb	Sn	Cu	Al	1st	2nd			
60			0.300		0.155	0.181	0.86	39.4	0.66
80			0.500		0.324	0.386	0.84	51.5	0.64
110			2.000		0.93	1.07	0.87	76.7	0.70
150		1.059			1.90	2.16	0.88	105	0.70
200		2.122			3.24	3.60	0.90	143	0.71
250		3.967			4.25	4.51	0.94	174	0.70
300		6.395			5.11	5.40	0.95	205	0.68

Table 1-3 Characteristics of JAERI high air-karma series

Tube potential kV	Additional filtration mm				Half-value layer * mm		Homogen. coefficient	Effective energy (keV)	Quality index QI
	Air	Cu	Al	1st	2nd				
20	1000		0.152	0.232	0.278	0.83	13.4	0.67	
30	1000		0.505	0.53	0.695	0.76	17.8	0.59	
60	1000		3.201	2.44	3.08	0.79	30.7	0.51	
100	1000	0.170	3.892	0.312	0.448	0.70	50.8	0.51	
200	1000	1.169		1.65	2.50	0.66	98.3	0.49	
250	1000	1.600		2.52	3.48	0.72	122	0.49	
280	1000	3.000		3.41	3.98	0.86	148	0.53	
300	1000	2.500		3.43	4.15	0.83	149	0.50	

* HVL material is aluminum for tube potential from 20kV to 60kV and copper for others.

Table 2-1 Relationship between effective energy and mean energy for JAERI narrow series

Tube Voltage (kV)	Mean energy (E_{eff} :Effective energy) (keV)						Ratio of E_{eff} and 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_{eff}	E_{eff}	$E_{H(10)}$	$E_{H(0.07)}$	E_{eff}	E_{eff}
10	9.0	8.7	8.7		8.7		8.8	1.03	1.03			1.03		1.02
15	12.4	13.2	13.0	13.5	13.0	13.5	13.0	0.94	0.95	0.92	0.95	0.92	0.95	
20	15.6	17.0	16.7	17.3	16.7	17.3	16.7	0.92	0.93	0.90	0.93	0.90	0.93	0.93
25	19.2	20.8	20.1	20.8	20.2	20.7	20.2	0.92	0.96	0.92	0.95	0.93	0.95	
30	22.9	25.0	24.1	24.8	24.4	24.8	24.4	0.92	0.95	0.92	0.94	0.92	0.94	
40	29.7	32.1	30.6	31.5	31.0	31.6	31.0	0.93	0.97	0.94	0.96	0.94	0.96	
60	43.2	47.4	45.9	46.7		46.8		0.91	0.94	0.93		0.92		
80	61.5	63.5	63.1	63.3		63.5		0.97	0.97	0.97		0.97		
100	79.7	84.2	85.0	84.9		84.9		0.95	0.94	0.94		0.94		
120	100	101	103	102		102		0.99	0.97	0.98		0.98		
150	120	119	122	121		121		1.01	0.99	0.99		0.99		
200	170	166	169	168		168		1.02	1.00	1.01		1.01		
250	207	210	213	213		213		0.99	0.97	0.97		0.97		
300	255	252	255	255		255		1.01	1.00	1.00		1.00		

Table 2-2 Relationship between effective energy and mean energy for JAERI wide series

Tube Voltage (kV)	Mean energy (E_{eff} :Effective energy) (keV)						Ratio of E_{eff} and 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_{eff}	E_{eff}	$E_{H(10)}$	$E_{H(0.07)}$	E_{eff}	E_{eff}
60	39.4	43.4	40.7	42.1		42.4		0.91	0.97	0.94		0.93		
80	51.5	54.9	52.5	53.6		54.0		0.94	0.98	0.96		0.95		
110	76.7	78.4	80.1	79.6		79.7		0.98	0.96	0.96		0.96		
150	105	104	109	108		108		1.01	0.97	0.98		0.98		
200	143	137	145	143		143		1.04	0.99	1.00		1.00		
250	174	174	183	182		181		1.00	0.95	0.95		0.96		
300	205	205	216	214		214		1.00	0.95	0.96		0.96		

Table 2-3 Relationship between effective energy and mean energy for JAERI high air-karma series

Tube Voltage (kV)	Mean energy (E_{eff} :Effective energy) (keV)						Ratio of E_{eff} and 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_{eff}	E_{eff}	$E_{H(10)}$	$E_{H(0.07)}$	E_{eff}	E_{eff}
20	13.4	15.6	14.6	16.3	14.7	16.3	14.7	0.86	0.92	0.82	0.91	0.82	0.91	
30	17.8	21.3	19.1	21.3	19.3	21.1	19.3	0.84	0.93	0.84	0.92	0.84	0.92	
60	30.7	37.9	32.9	35.8	34.3	36.0	34.4	0.81	0.93	0.86	0.90	0.85	0.89	
100	50.8	58.2	55.0	57.3		57.8		0.87	0.92	0.89		0.88		
200	98.3	93.8	108	105		105		1.05	0.91	0.94		0.94		
250	122	110	132	127		126		1.11	0.93	0.96		0.97		
280	148	132	153	149		148		1.12	0.97	0.99		1.00		
300	149	130	154	149		148		1.14	0.96	1.00		1.00		

Table 3 Resolution of energy spectrum for JAERI qualities

Tube Voltage (kV)	Narrow Series				Wide Series				High Air-Kerma Series				
	Fluence	K _a	H [*] (10)	H'(0.07)	Fluence	K _a	H [*] (10)	H _{p(10)}	Fluence	K _a	H [*] (10)	H _{p(10)}	H _{p(0.07)}
10	0.13	0.14	0.13	0.13									
15	0.30	0.23	0.16	0.22	0.16	0.23							
20	0.28	0.31	0.25	0.31	0.25	0.31			0.40	0.49	0.34	0.46	0.33
25	0.29	0.34	0.29	0.34	0.29	0.34							0.46
30	0.30	0.33	0.30	0.32	0.31	0.32			0.58	0.64	0.53	0.64	0.55
40	0.39	0.45	0.42	0.44	0.39	0.44							
60	0.40	0.45	0.43	0.42	0.42	0.53	0.63	0.56	0.72	0.68	0.72	0.73	0.74
80	0.41	0.44	0.43	0.42	0.42	0.56	0.66	0.60	0.60				
100	0.28	0.27	0.28	0.27					0.76	0.78	0.77	0.77	0.79
110							0.57	0.59	0.55				
120	0.28	0.27	0.27	0.26									
150	0.39	0.36	0.37	0.34	0.34	0.57	0.55	0.56	0.52				
200	0.31	0.28	0.28	0.29	0.29	0.59	0.55	0.56	0.53	0.98	1.08	1.07	1.02
250	0.28	0.28	0.26	0.26	0.26	0.56	0.52	0.54	0.54	0.94	1.08	1.10	0.95
280										0.82	0.89	0.87	0.86
300	0.29	0.26	0.26	0.26	0.26	0.54	0.52	0.52	0.51	0.88	0.93	0.90	0.86

Table 4 Comparison of fluence spectrum mean energy for JAERI qualities and ISO qualities

Kind of Series	Tube Voltage	JAERI Mean Energy keV	ISO Mean Energy keV	Ratio (JAERI/ISO)	Difference keV
Narrow Series	10	8.7	8	1.09	0.7
	15	13.2	12	1.10	1.2
	20	17.0	16	1.06	1.0
	25	20.8	20	1.04	0.8
	30	25.0	24	1.04	1.0
	40	32.1	33	0.97	-0.9
	60	47.4	48	0.99	-0.6
	80	63.5	65	0.98	-1.5
	100	84.2	83	1.01	1.2
	120	101	100	1.01	1
	150	119	118	1.01	1
	200	166	164	1.01	2
	250	210	208	1.01	2
Wide Series	300	252	250	1.01	2
	60	43.4	45	0.96	-1.6
	80	54.9	57	0.96	-2.1
	110	78.4	79	0.99	-0.6
	150	104	104	1.00	0
	200	137	137	1.00	0
	250	174	173	1.01	1
High Air-Kerma Series	300	205	208	0.99	-3
	20	15.6	12.9	1.21	2.7
	30	21.3	19.7	1.08	1.6
	60	37.9	37.3	1.02	0.6
	100	58.2	57.4	1.01	0.8
	200	93.8	102	0.92	-8.2
	250	110	122	0.90	-12
	280	132	146	0.90	-14
	300	130	147	0.88	-17

Table 5-1 Comparison of the ratio of ambient dose equivalent to air kerma
for JAERI narrow series (f: $H^*(10) / Ka$)

Voltage (kV)	$E_{H(10)}$ (keV)	$f_{H(10)Total}$ (Sv/Gy)	f_{EH} (Sv/Gy)	$\frac{f_{EH}}{f_{H(10)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(10)Total}}$
15	13.5	0.121	0.151	1.25	12.4	0.092	0.76
20	17.3	0.366	0.414	1.13	15.6	0.300	0.82
25	20.8	0.600	0.661	1.10	19.2	0.550	0.92
30	24.8	0.831	0.885	1.06	22.9	0.783	0.94
40	31.5	1.117	1.162	1.04	29.7	1.086	0.97
60	46.7	1.569	1.625	1.04	43.2	1.551	0.99
80	63.3	1.731	1.754	1.01	61.5	1.751	1.01
100	84.9	1.703	1.703	1.00	79.7	1.722	1.01
120	102	1.635	1.630	1.00	100	1.639	1.00
150	121	1.569	1.561	0.99	120	1.565	1.00
200	168	1.455	1.449	1.00	170	1.446	0.99
250	213	1.388	1.384	1.00	207	1.392	1.00
300	255	1.343	1.339	1.00	255	1.338	1.00

$f_{H(10)Total}$: $H^*(10)$ 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 the ratio of ambient dose equivalent to air kerma
for JAERI wide 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)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(10)Total}}$
60	42.1	1.438	1.522	1.06	39.4	1.447	1.01
80	53.6	1.632	1.717	1.05	51.5	1.695	1.04
110	79.6	1.706	1.723	1.01	76.7	1.733	1.02
150	108	1.612	1.607	1.00	105	1.619	1.00
200	143	1.510	1.499	0.99	143	1.500	0.99
250	182	1.435	1.428	1.00	174	1.440	1.00
300	214	1.388	1.383	1.00	205	1.394	1.00

Table 5-3 Comparison of the ratio of ambient dose equivalent to air kerma
for JAERI high air-kerma 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	16.3	0.242	0.343	1.42	13.4	0.143	0.59
30	21.3	0.544	0.693	1.27	17.8	0.450	0.83
60	35.8	1.212	1.332	1.10	30.7	1.129	0.93
100	57.3	1.602	1.739	1.09	50.8	1.688	1.05
200	105	1.605	1.621	1.01	98.3	1.647	1.03
250	127	1.550	1.544	1.00	122	1.557	1.00
280	149	1.499	1.486	0.99	148	1.488	0.99
300	149	1.498	1.485	0.99	149	1.487	0.99

Table 5-4 Comparison of the ratio of personnel dose equivalent to air kerma
for JAERI narrow 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)	$\frac{f_{eff}}{f_{Hp(10)Total}}$
15	13.5	0.127	0.157	1.24	12.4	0.096	0.76
20	17.3	0.383	0.440	1.15	15.6	0.314	0.82
25	20.7	0.596	0.648	1.09	19.2	0.566	0.95
30	24.8	0.799	0.824	1.03	22.9	0.745	0.93
40	31.6	1.115	1.188	1.07	29.7	1.097	0.98
60	46.8	1.636	1.695	1.04	43.2	1.597	0.98
80	63.5	1.875	1.911	1.02	61.5	1.902	1.01
100	84.9	1.879	1.882	1.00	79.7	1.904	1.01
120	102	1.804	1.796	1.00	100	1.810	1.00
150	121	1.72	1.707	0.99	120	1.716	1.00
200	168	1.566	1.557	0.99	170	1.554	0.99
250	213	1.476	1.470	1.00	207	1.479	1.00
300	255	1.419	1.414	1.00	256	1.413	1.00

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

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

Table 5-5 Comparison of the ratio of personnel dose equivalent to air kerma
for JAERI wide 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)	$\frac{f_{eff}}{f_{Hp(10)Total}}$
60	42.4	1.481	1.569	1.06	39.4	1.475	1.00
80	54.0	1.732	1.832	1.06	51.5	1.794	1.04
110	79.7	1.874	1.901	1.01	76.7	1.913	1.02
150	108	1.771	1.761	0.99	105	1.785	1.01
200	143	1.641	1.626	0.99	143	1.629	0.99
250	181	1.538	1.527	0.99	174	1.544	1.00
300	214	1.477	1.468	0.99	206	1.482	1.00

Table 5-6 Comparison of the ratio of personnel dose equivalent to air kerma
for JAERI high air-kerma 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	16.3	0.253	0.363	1.43	13.4	0.151	0.60
30	21.1	0.539	0.666	1.24	17.8	0.476	0.88
60	36.0	1.228	1.363	1.11	30.7	1.148	0.93
100	57.8	1.707	1.875	1.10	50.8	1.783	1.04
200	105	1.752	1.760	1.00	98.3	1.818	1.04
250	126	1.685	1.669	0.99	122	1.706	1.01
280	148	1.623	1.603	0.99	148	1.613	0.99
300	148	1.621	1.599	0.99	149	1.611	0.99

Table 6-1 Comparison of the ratio of ambient dose equivalent to air kerma
for JAERI narrow series (f: $H'(0.07) / Ka$)

Voltage (kV)	$E_{H(0.07)}$ (keV)	$f_{H(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	$f_{EH'}$ (Sv/Gy)	$f_{EH'}$ $f_{H(0.07)Total}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	f_{eff} $f_{H(0.07)Total}$
10	8.7	0.947	0.938	0.99	9.0	0.944	1.00
15	13.0	0.970	0.97	1.00	12.4	0.965	0.99
20	16.7	1.010	1.01	1.00	15.6	1.000	0.99
25	20.2	1.050	1.049	1.00	19.2	1.037	0.99
30	24.4	1.111	1.114	1.00	22.9	1.088	0.98
40	31.0	1.232	1.238	1.00	29.7	1.212	0.98

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

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

Table 6-2 Comparison of the ratio of ambient dose equivalent to air kerma
for JAERI high air-kerma series (f: $H'(0.07) / Ka$)

Voltage (kV)	$E_{H(0.07)}$ (keV)	$f_{H(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	$f_{EH'}$ (Sv/Gy)	$f_{EH'}$ $f_{H(0.07)Total}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	f_{eff} $f_{H(0.07)Total}$
20	14.7	0.989	0.991	1.00	13.4	0.975	0.99
30	19.3	1.047	1.039	0.99	17.8	1.022	0.98
60	34.3	1.290	1.307	1.01	30.7	1.233	0.96

Table 6-3 Comparison of the ratio of personnel dose equivalent to air kerma
for JAERI narrow series (f: $H_p(0.07) / Ka$)

Voltage (kV)	$E_{H_p(0.07)}$ (keV)	$f_{H_p(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	f_{EH_p} (Sv/Gy)	f_{EH_p} $f_{H_p(0.07)Total}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	f_{eff} $f_{H_p(0.07)Total}$
10	8.8	0.932	0.934	1.00	9.0	0.937	1.01
15	13.0	0.975	0.967	0.99	12.4	0.964	0.99
20	16.7	1.000	0.999	1.00	15.6	0.987	0.99
25	20.2	1.048	1.048	1.00	19.2	1.033	0.99
30	24.4	1.117	1.121	1.00	22.9	1.093	0.98
40	31.0	1.245	1.252	1.01	29.7	1.225	0.98

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

f_{EH_p} : Conversion coefficient for energy $E_{H_p(0.07)}$

Table 6-4 Comparison of the ratio of personnel dose equivalent to air kerma
for JAERI high air-kerma series (f: $H_p(0.07) / Ka$)

Voltage (kV)	$E_{H_p(0.07)}$ (keV)	$f_{H_p(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	f_{EH_p} (Sv/Gy)	f_{EH_p} $f_{H_p(0.07)Total}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	f_{eff} $f_{H_p(0.07)Total}$
20	14.7	0.982	0.979	1.00	13.4	0.969	0.99
30	19.3	1.044	1.035	0.99	17.8	1.013	0.97
60	34.3	1.319	1.326	1.01	30.7	1.246	0.94

Table 7-1 Comparison of narrow series for JAERI qualities and ISO qualities

Tube potential (kV)	First half-value layer * (mm)			Effective energy (keV)			Quality index (QI)		
	JAERI	ISO	JAERI-ISO	JAERI	ISO	JAERI-ISO	JAERI	ISO	JAERI/ISO
10	0.0735	0.047	0.0265	9.0	7.8	1.3	0.90	0.78	1.16
15	0.186	0.14	0.046	12.4	11.3	1.1	0.83	0.75	1.10
20	0.364	0.32	0.044	15.6	15.0	0.7	0.78	0.75	1.05
25	0.665	0.660	0.005	19.2	19.2	0.1	0.77	0.77	1.00
30	1.09	1.15	-0.06	22.9	23.3	-0.4	0.76	0.78	0.98
40	0.07	0.084	-0.014	29.7	31.7	-2.0	0.74	0.79	0.94
60	0.200	0.24	-0.04	43.2	46.2	-2.9	0.72	0.77	0.94
80	0.525	0.58	-0.055	61.5	63.9	-2.3	0.77	0.80	0.96
100	1.02	1.11	-0.09	79.7	82.5	-2.8	0.80	0.83	0.97
120	1.72	1.71	0.01	100	100	0	0.84	0.83	1.00
150	2.44	2.36	0.08	120	118	2	0.80	0.79	1.02
200	4.12	3.99	0.13	170	166	4	0.85	0.83	1.02
250	5.14	5.19	-0.05	207	209	-2	0.83	0.84	0.99
300	6.14	6.12	0.02	255	254	1	0.85	0.85	1.00

* HVL material is aluminum for tube potential from 10kV to 30kV and copper for others.

Table 7-2 Comparison of wide series for JAERI qualities and ISO qualities

Tube potential (kV)	First half-value layer * (mm) Cu			Effective energy (keV)			Quality index (QI)		
	JAERI	ISO	JAERI-ISO	JAERI	ISO	JAERI-ISO	JAERI	ISO	JAERI/ISO
60	0.155	0.18	-0.025	39.4	41.6	-2.2	0.66	0.69	0.95
80	0.324	0.35	-0.026	51.5	52.9	-1.5	0.64	0.66	0.97
110	0.93	0.96	-0.03	76.7	77.7	-1.0	0.70	0.71	0.99
150	1.90	1.86	0.04	105	104	1.1	0.70	0.69	1.01
200	3.24	3.08	0.16	143	138	5	0.71	0.69	1.03
250	4.25	4.22	0.03	174	173	1	0.70	0.69	1.01
300	5.11	5.20	-0.09	205	209	-4	0.68	0.70	0.98

Table 7-3 Comparison of high air-kerma series for JAERI qualities and ISO qualities

Tube potential (kV)	First half-value layer * (mm)			Effective energy (keV)			Quality index (QI)		
	JAERI	ISO	JAERI-ISO	JAERI	ISO	JAERI-ISO	JAERI	ISO	JAERI/ISO
20	0.232	0.12	0.112	13.4	10.7	2.7	0.67	0.53	1.25
30	0.53	0.38	0.15	17.8	15.9	1.9	0.59	0.53	1.12
60	2.44	2.42	0.02	30.7	30.6	0.1	0.51	0.51	1.00
100	0.312 Cu	6.56 Al	—	50.8	48.3	2.5	0.51	0.48	1.06
200	1.65	1.70	-0.05	98.3	99.7	-1.4	0.49	0.50	0.99
250	2.52	2.47	0.05	122	121	1	0.49	0.48	1.01
280	3.41	3.37	0.04	148	147	1	0.53	0.52	1.01
300	3.43	3.40	0.03	149	148	1	0.50	0.49	1.01

* HVL material is aluminum for tube potential from 20kV to 60kV and copper for others.

Table 8-1 Comparison of conversion coefficient from air kerma to $H^*(10)$ and $H_p(10)$ for JAERI qualities and ISO qualities

Kind of Series	Voltage (kV)	JAERI $H^*(10)/Ka$	ISO $H^*(10)/Ka$	Ratio (JAERI/ISO)	JAERI $H_p(10)/Ka$	ISO $H_p(10)/Ka$	Ratio (JAERI/ISO)
Narrow Series	15	0.121	-	-	0.127	0.06	2.12
	20	0.366	-	-	0.383	0.27	1.42
	25	0.600	0.52	1.15	0.596	0.55	1.08
	30	0.831	0.80	1.04	0.799	0.79	1.01
	40	1.117	1.18	0.95	1.115	1.17	0.95
	60	1.569	1.59	0.99	1.636	1.65	0.99
	80	1.731	1.73	1.00	1.875	1.88	1.00
	100	1.703	1.71	1.00	1.878	1.88	1.00
	120	1.635	1.64	1.00	1.801	1.81	1.00
	150	1.569	1.58	0.99	1.716	1.73	0.99
	200	1.455	1.46	1.00	1.565	1.57	1.00
	250	1.388	1.39	1.00	1.475	1.48	1.00
	300	1.343	1.35	0.99	1.418	1.42	1.00
Wide Series	60	1.438	1.49	0.97	1.481	1.55	0.96
	80	1.632	1.66	0.98	1.732	1.77	0.98
	110	1.706	1.71	1.00	1.872	1.87	1.00
	150	1.612	1.62	1.00	1.763	1.77	1.00
	200	1.510	1.52	0.99	1.637	1.65	0.99
	250	1.435	1.44	1.00	1.537	1.54	1.00
	300	1.388	1.39	1.00	1.476	1.47	1.00
High Air-Kerma Series	20	0.242	-	-	0.253	-	-
	30	0.544	-	-	0.539	0.39	1.38
	60	1.212	1.15	1.05	1.228	1.19	1.03
	100	1.602	1.57	1.02	1.707	1.68	1.02
	200	1.605	1.61	1.00	1.738	1.75	0.99
	250	1.550	1.54	1.01	1.671	1.67	1.00
	280	1.499	1.49	1.01	1.613	1.60	1.01
	300	1.498	1.48	1.01	1.609	1.59	1.01

Ratio is JAERI qualities divided by ISO qualities

 $H^*(10)/Ka$ and $H_p(10)/Ka$ value of ISO qualities quoted ISO 4037-3 (1996)Table 8-2 Comparison of conversion coefficient from air kerma to $H'(0.07)$ and $H_p(0.07)$ for JAERI qualities and ISO qualities

Kind of Series	Voltage (kV)	JAERI $H'(0.07)/Ka$	ISO $H'(0.07)/Ka$	Ratio (JAERI/ISO)	JAERI $H_p(0.07)/Ka$	ISO $H_p(0.07)/Ka$	Ratio (JAERI/ISO)
Narrow Series	10	0.947	0.91	1.04	0.932	0.91	1.02
	15	0.970	0.96	1.01	0.975	0.96	1.02
	20	1.010	1.00	1.01	1.000	0.98	1.02
	25	1.050	1.03	1.02	1.048	1.03	1.02
	30	1.111	1.10	1.01	1.117	1.10	1.02
	40	1.232	1.25	0.99	1.245	1.27	0.98
High Air-Kerma Series	20	0.989	0.96	1.03	0.982	0.95	1.03
	30	1.047	1.02	1.03	1.044	1.01	1.03
	60	1.290	1.26	1.02	1.319	1.29	1.02

Ratio is JAERI series divided by ISO qualities

 $H'(0.07)/Ka$ and $H_p(0.07)/Ka$ value of ISO qualities quoted ISO 4037-3 (1996)

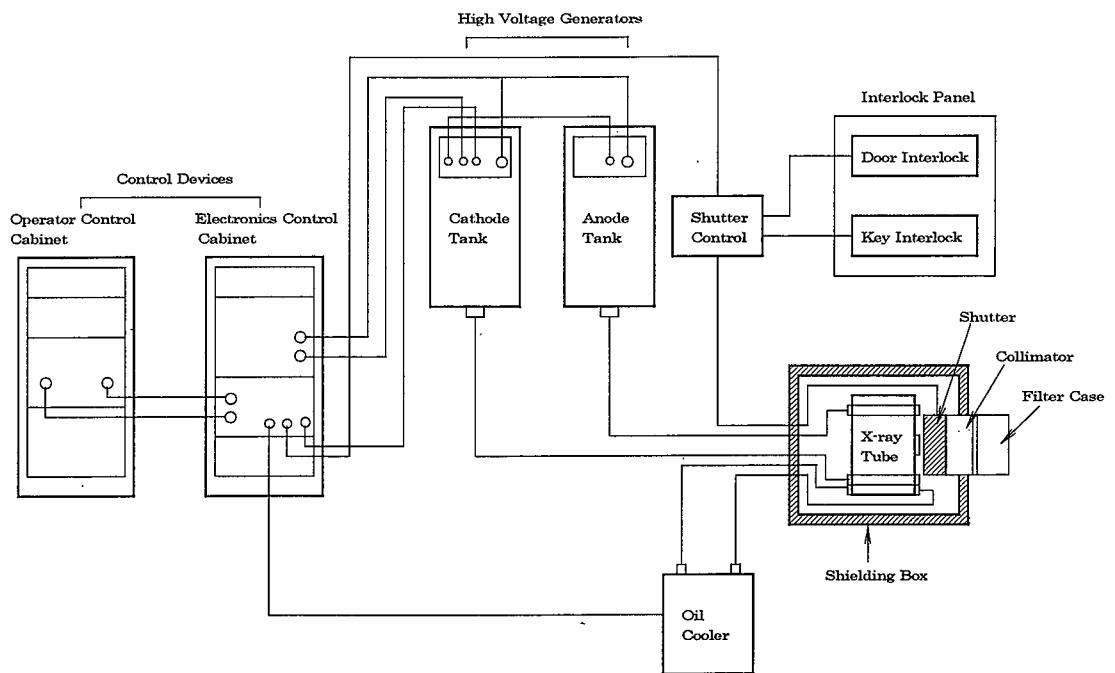


Fig.1 Diagram of X-ray generator

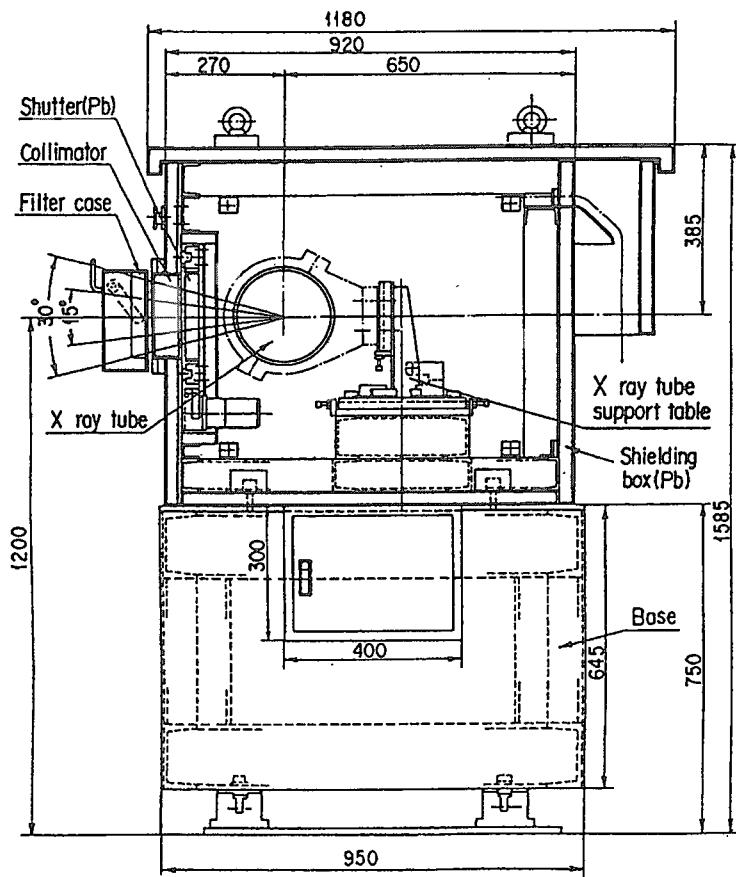


Fig.2 Conceptional view of X-ray irradiating apparatus

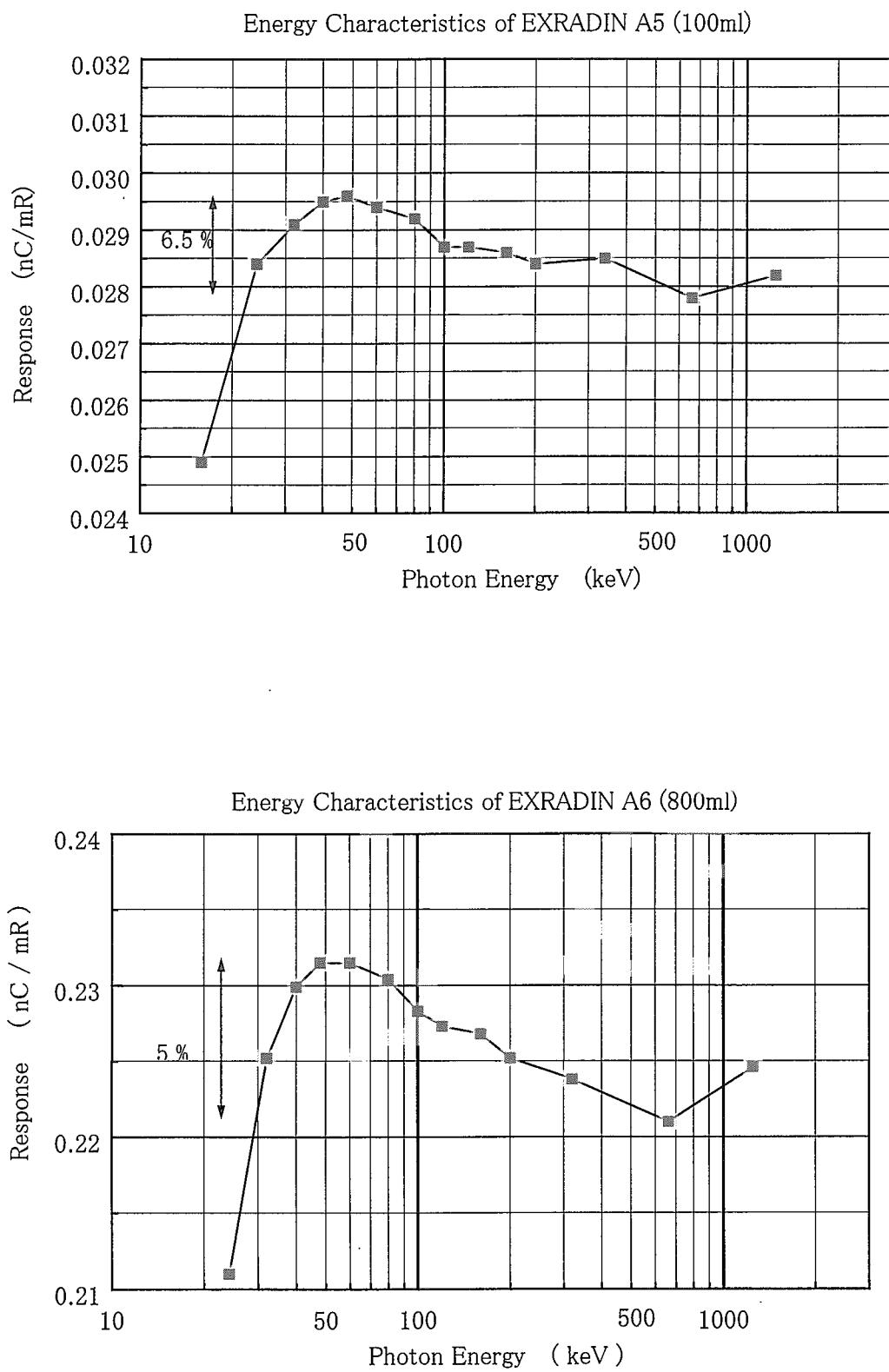


Fig.3 Energy characteristics of reference ionization chambers for Medium-hard X-ray measurements

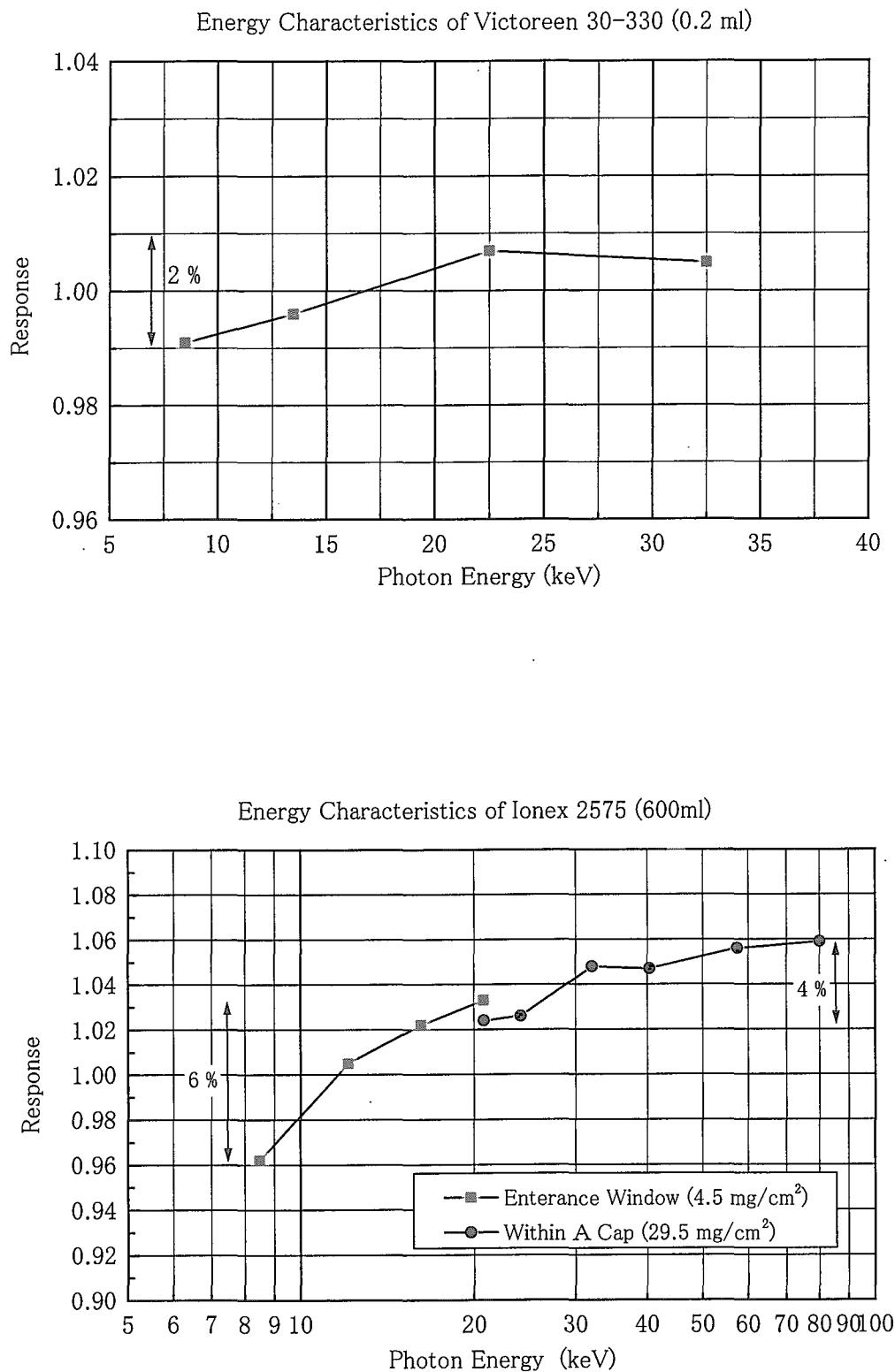


Fig.4 Energy characteristics of reference ionization chambers for soft X-ray measurements

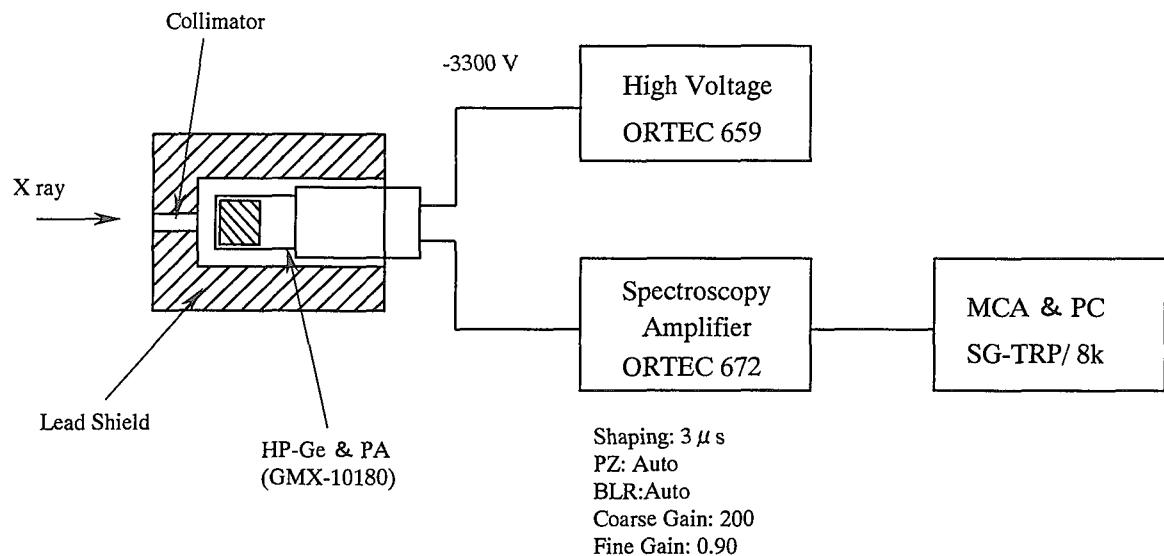


Fig.5 Diagram for the measurements of pulse height spectra

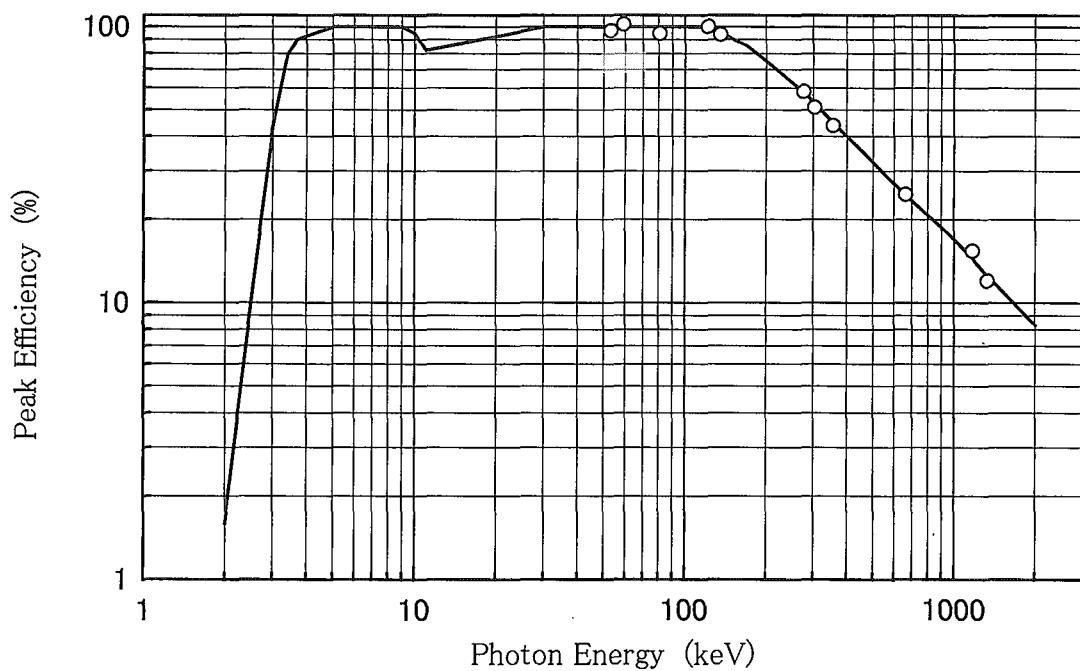


Fig. 6 Peak efficiency for photon energy of the HP-Ge detector (GMX-10180-P)

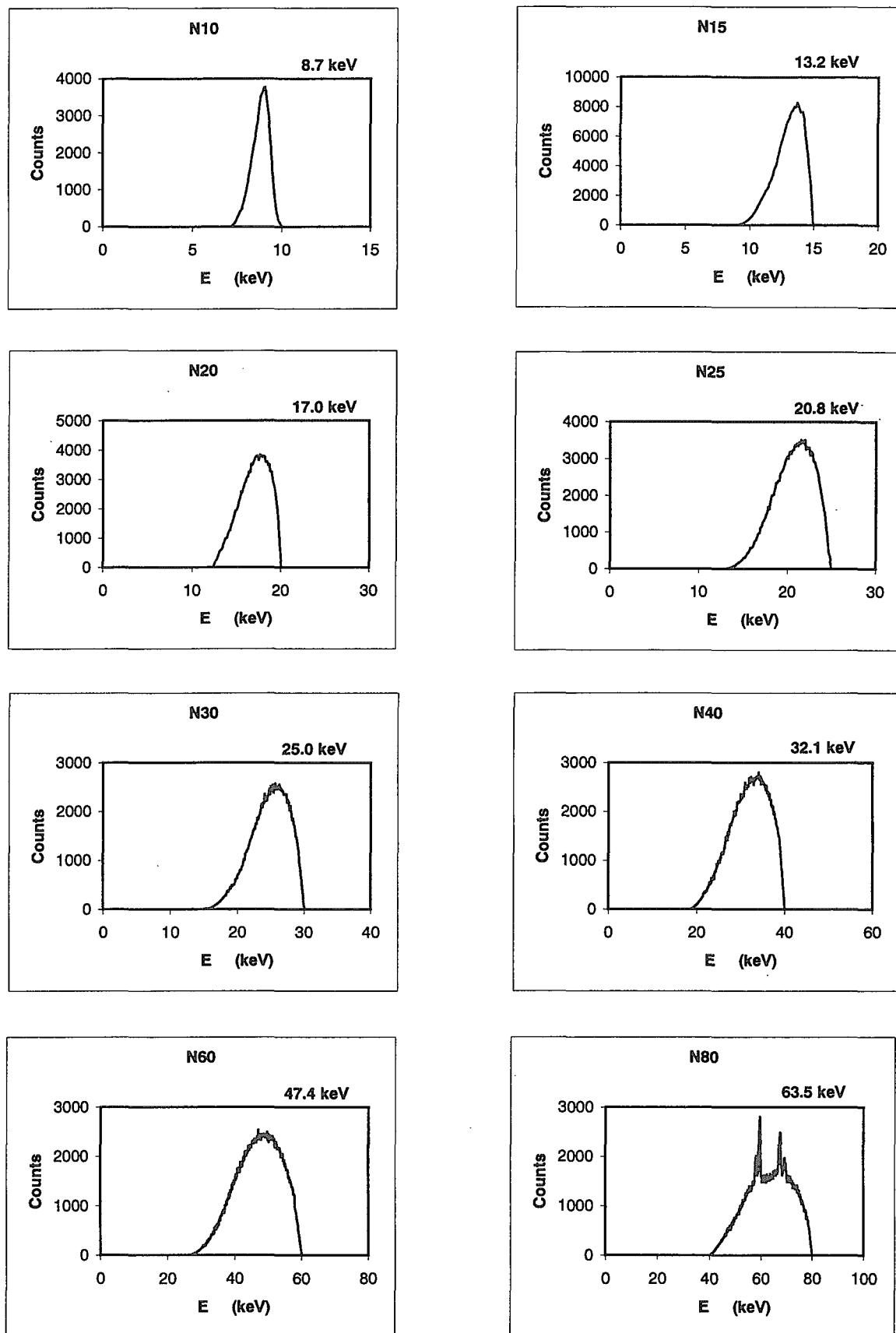


Fig.7-1 Fluence spectra of JAERI narrow series

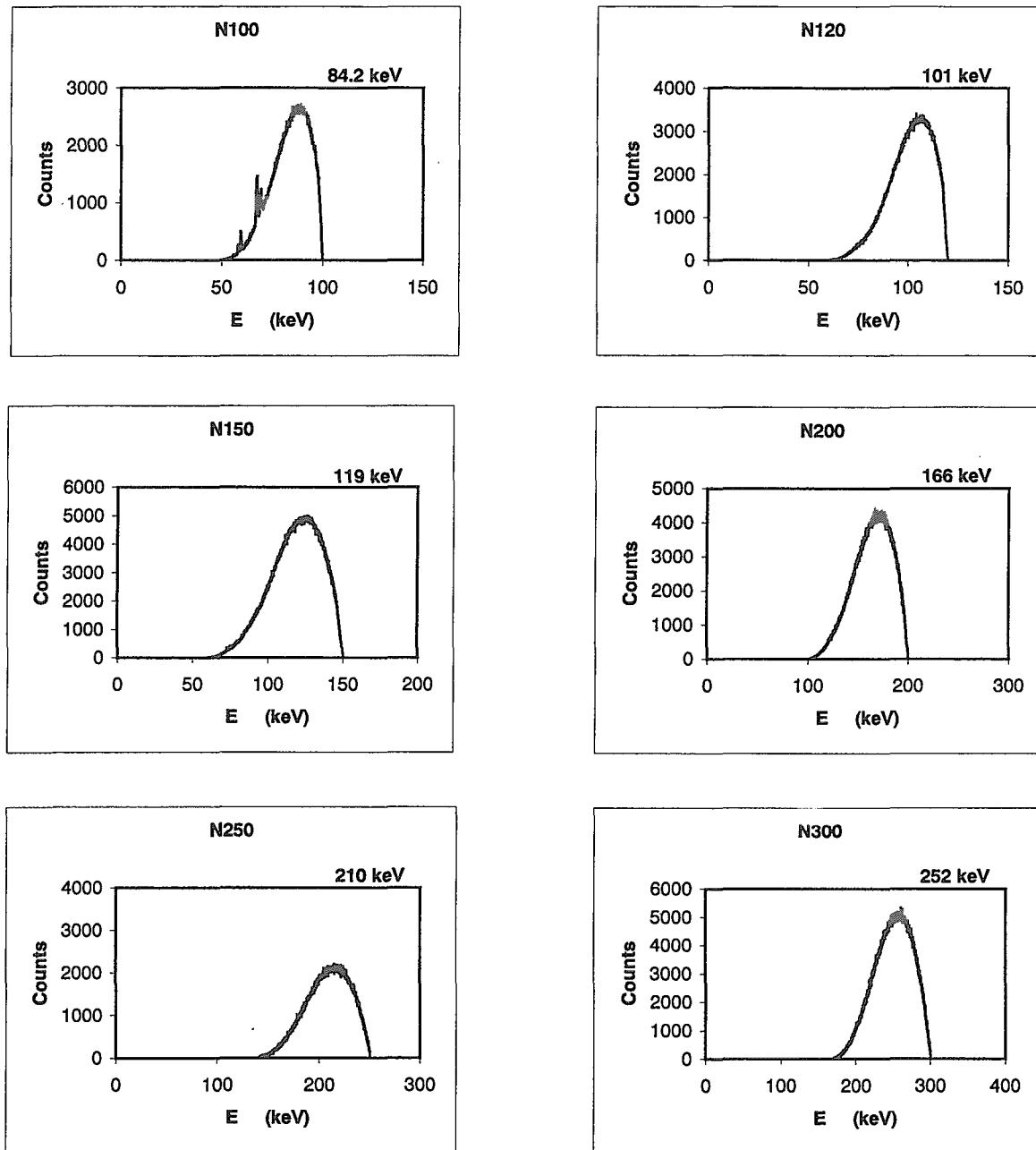


Fig.7-1 Countinued

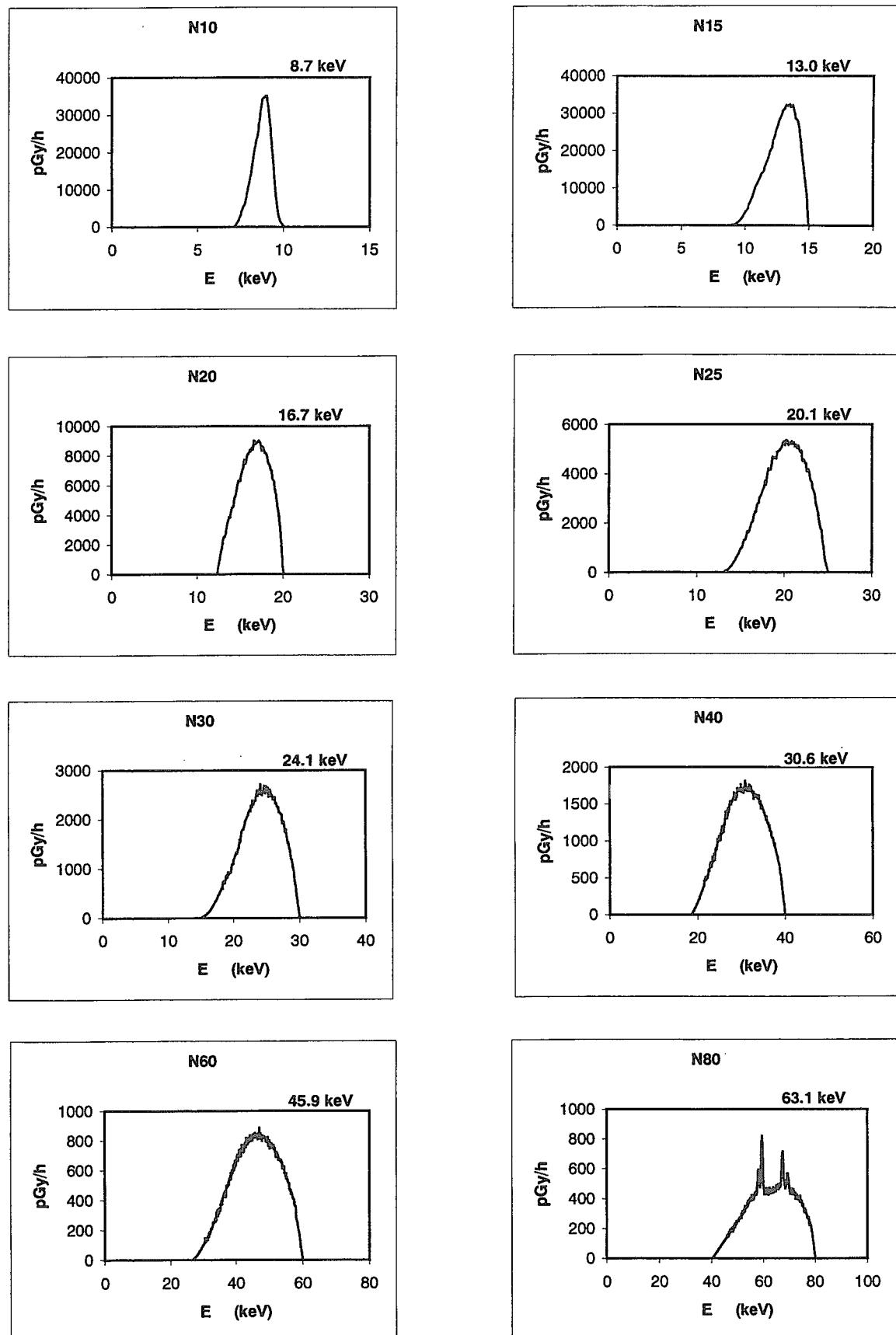


Fig.7-2 Air-kerma spectra of JAERI narrow series

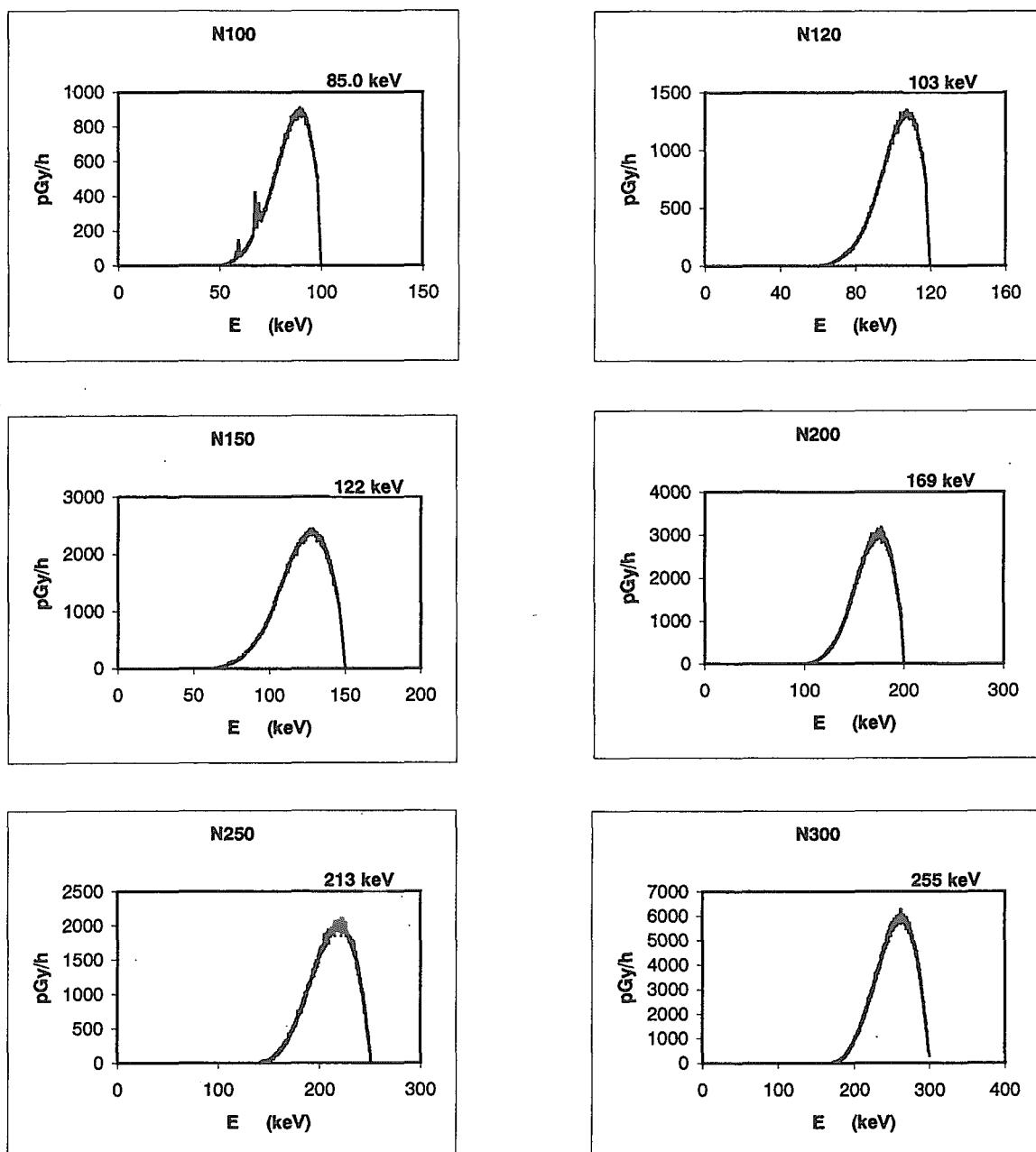
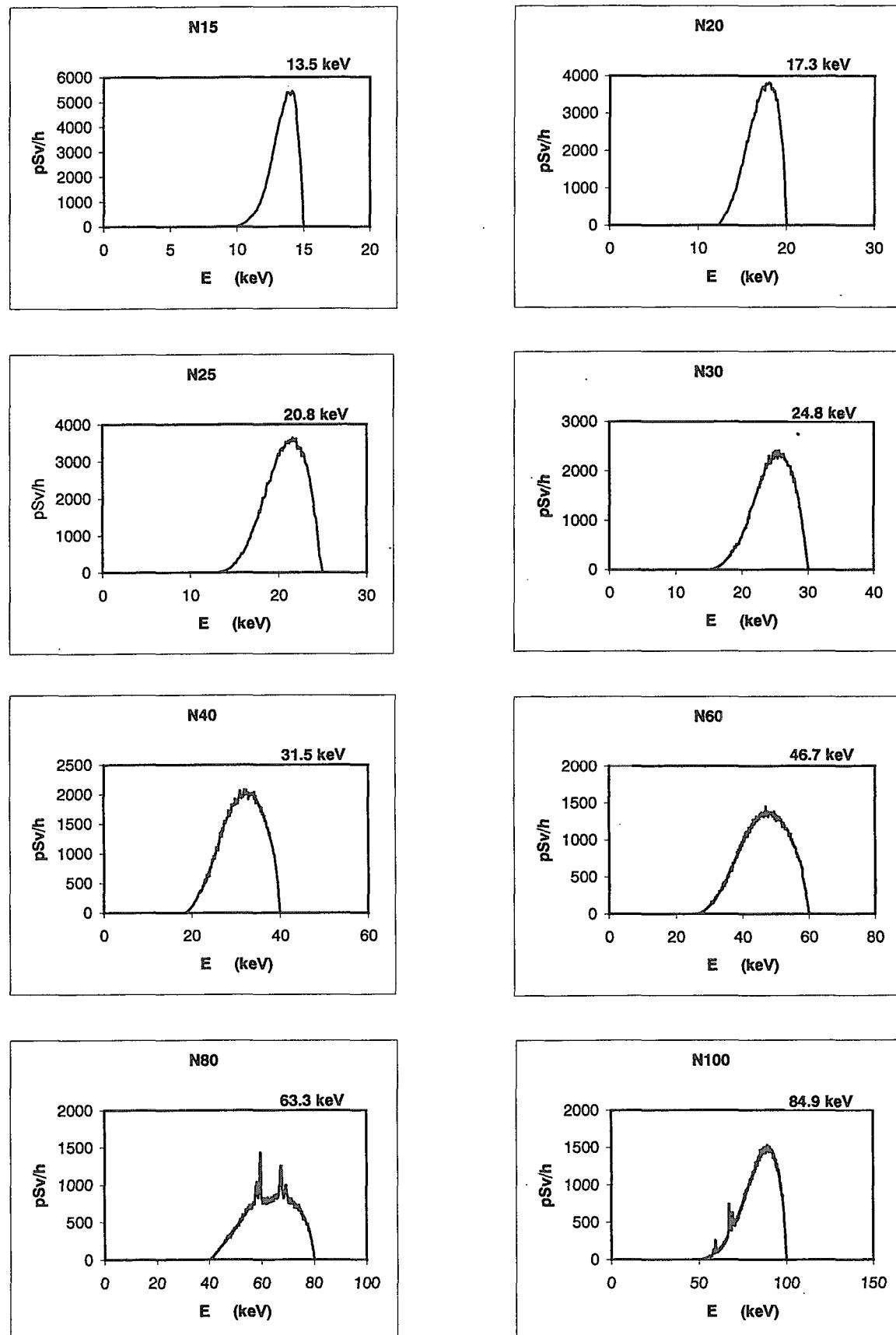


Fig.7-2 Countinued

Fig.7-3 Ambient dose equivalent spectra of JAERI narrow series ($H^*_{(10)}$)

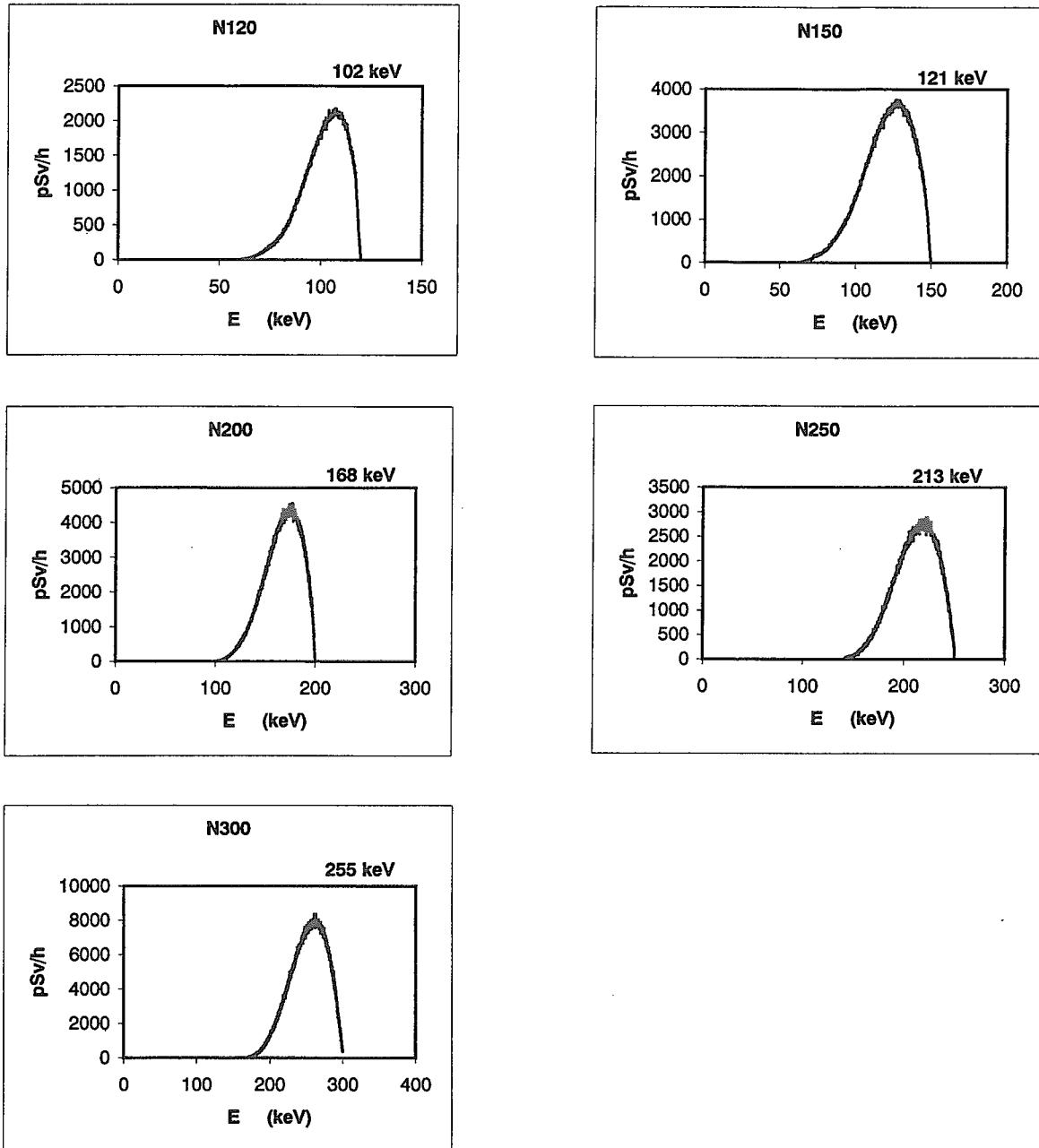


Fig.7-3 Countinued

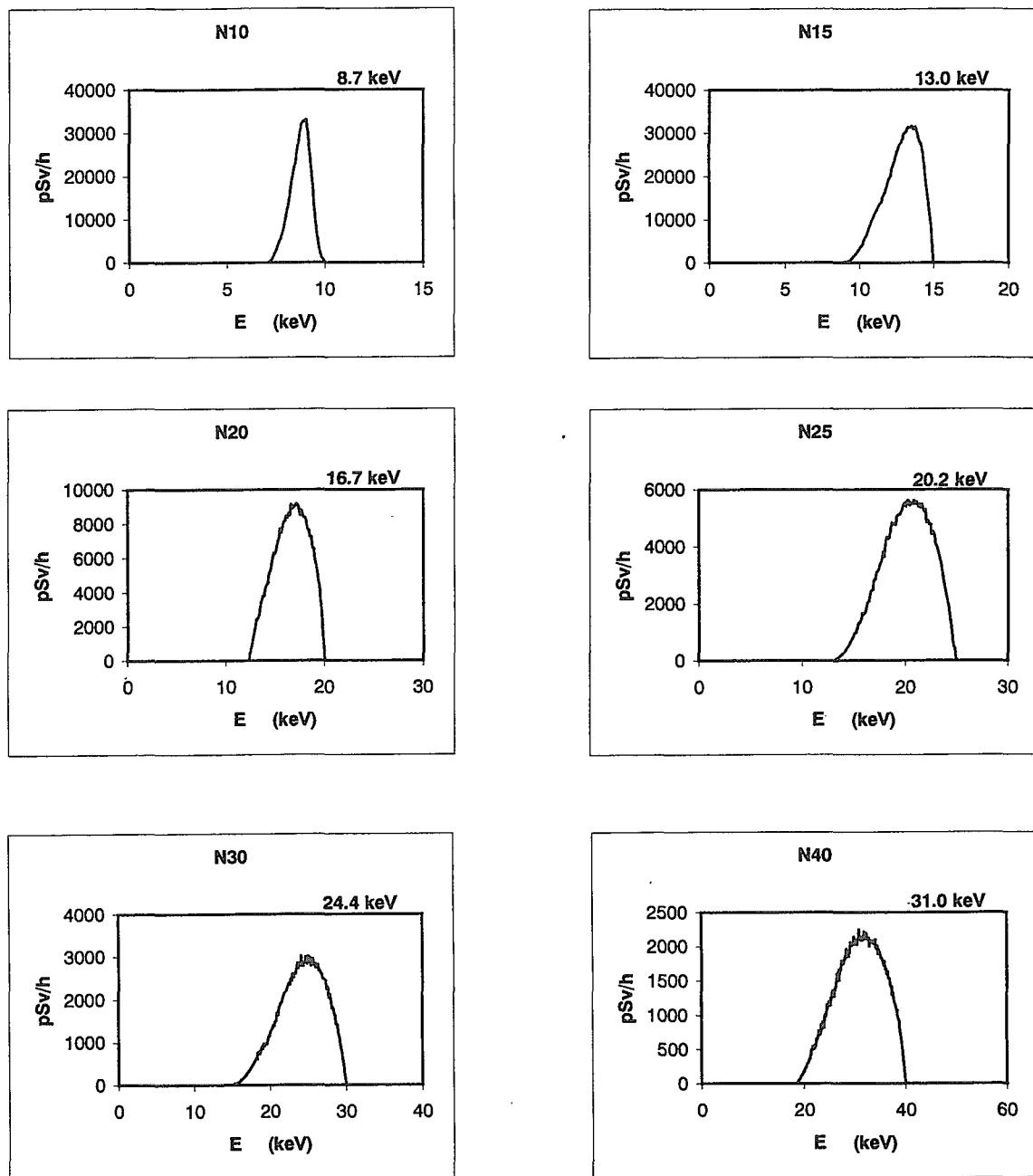


Fig.7-4 Directional dose equivalent spectra of JAERI narrow series ($H'_{(0.07)}$)

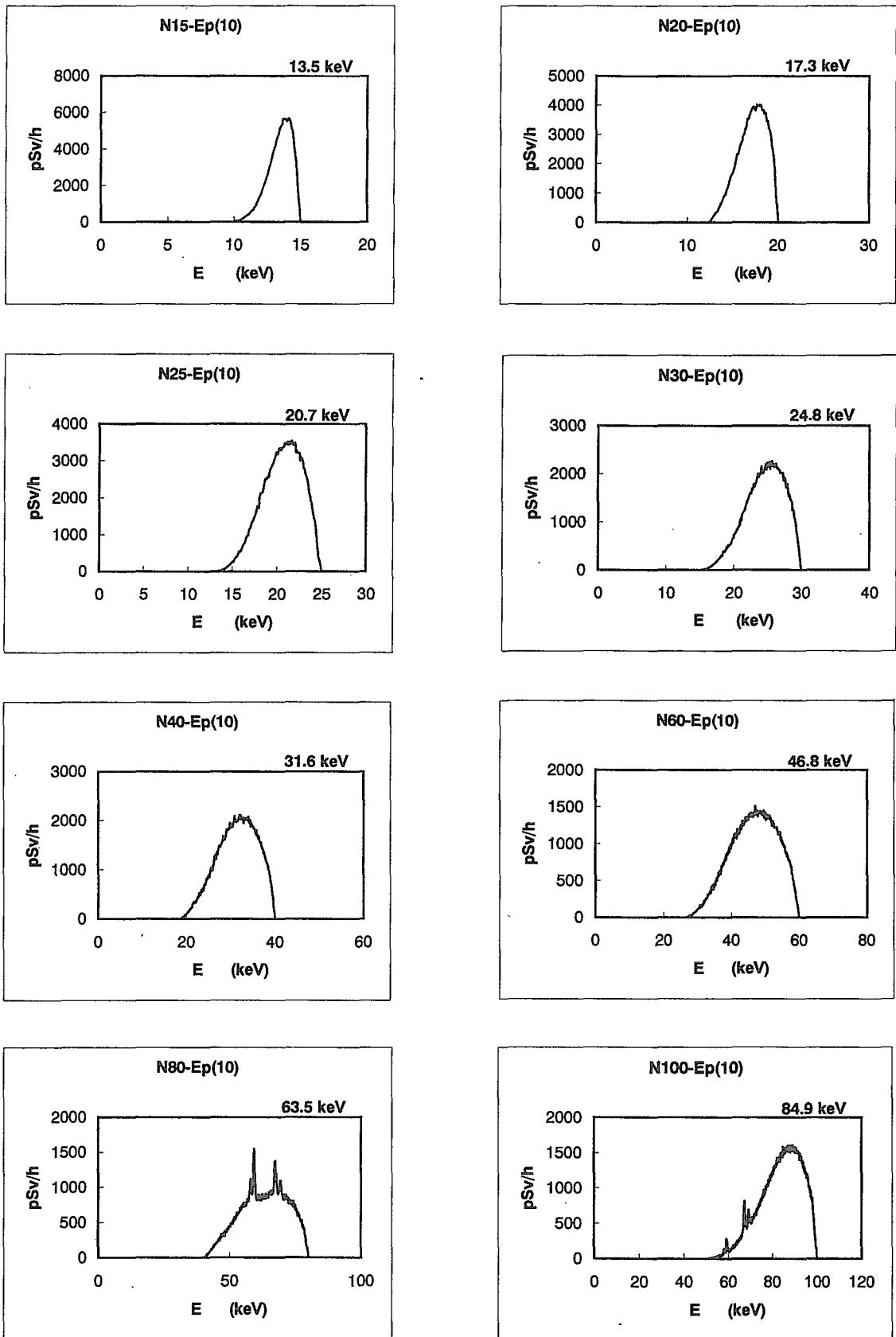


Fig.7-5 Personal dose equivalent spectra for strongly penetrating radiation of JAERI narrow series ($H_{p(10)}$)

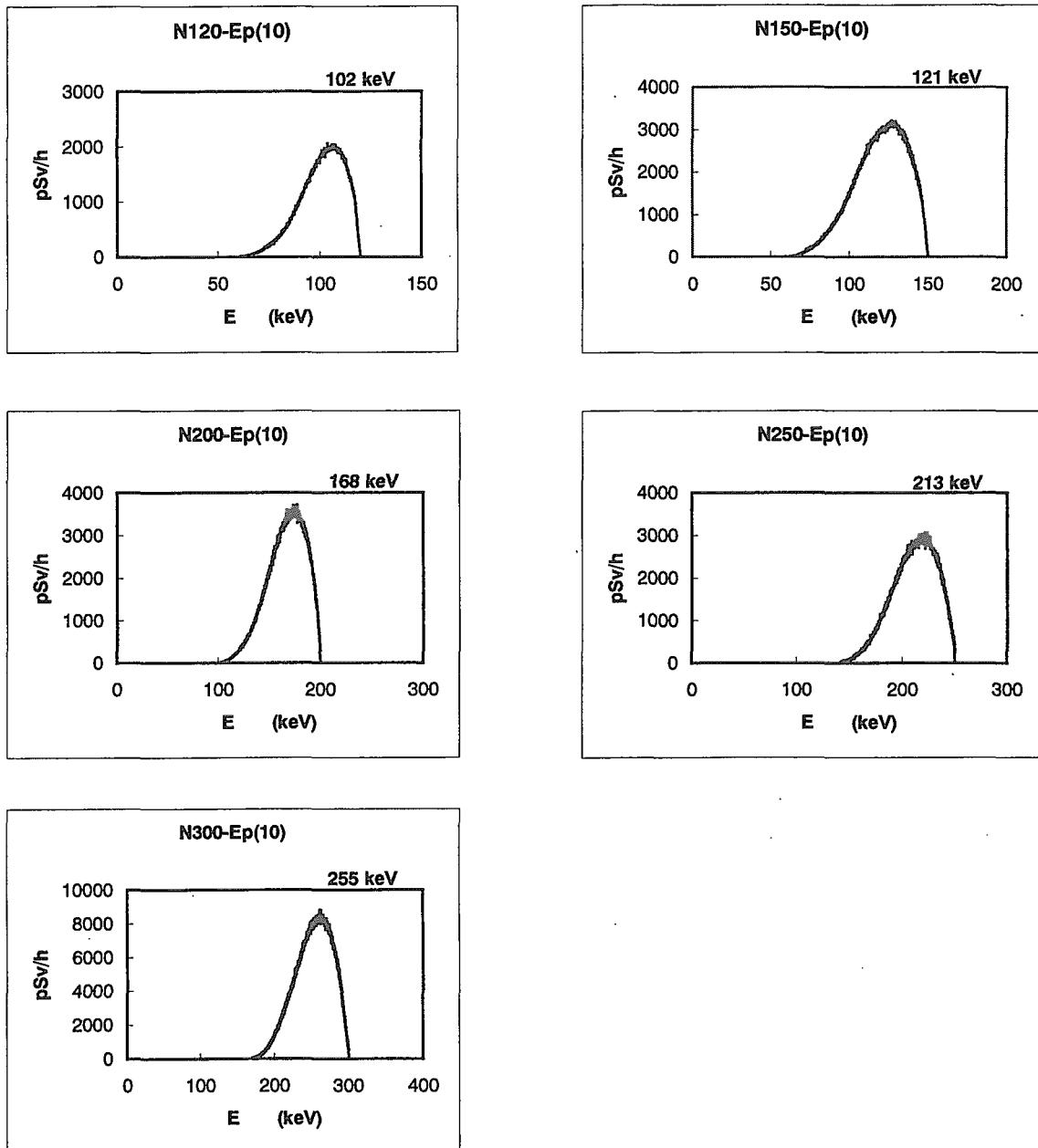


Fig.7-5 Countinued

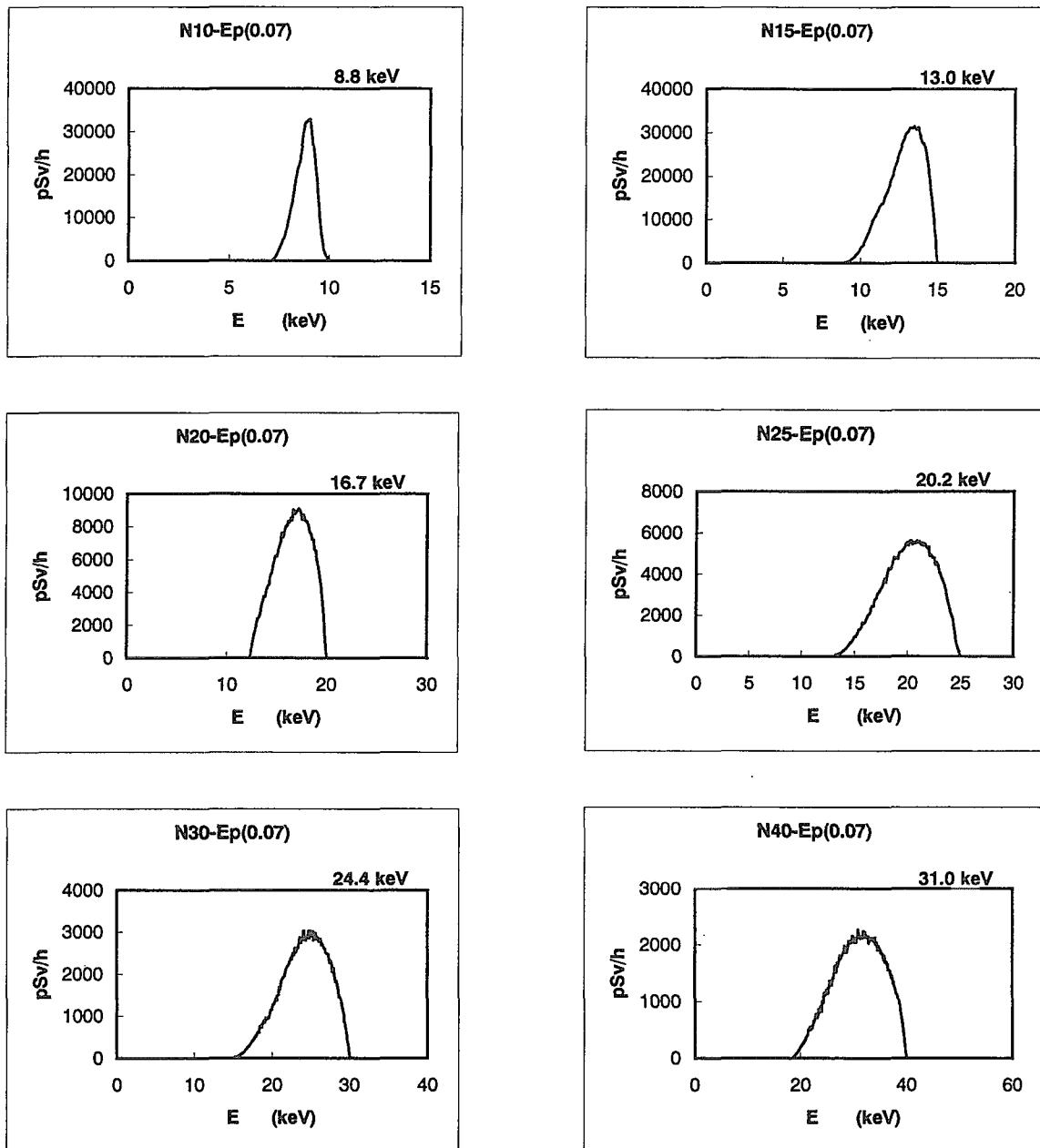


Fig.7--6 Personal dose equivalent spectra for weakly penetrating radiation of JAERI narrow series ($H_{p(0.07)}$)

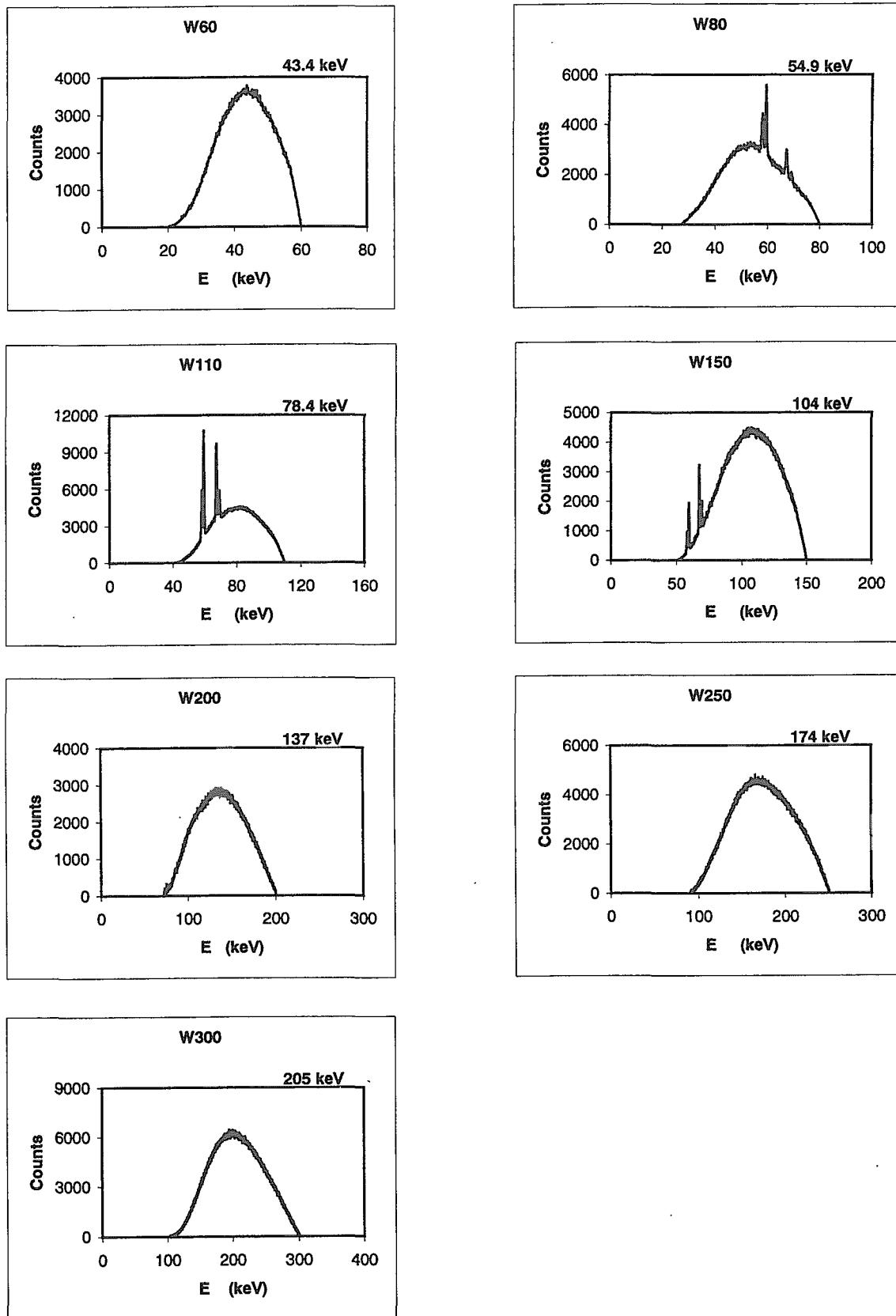


Fig.8-1 Fluence spectra of JAERI wide series

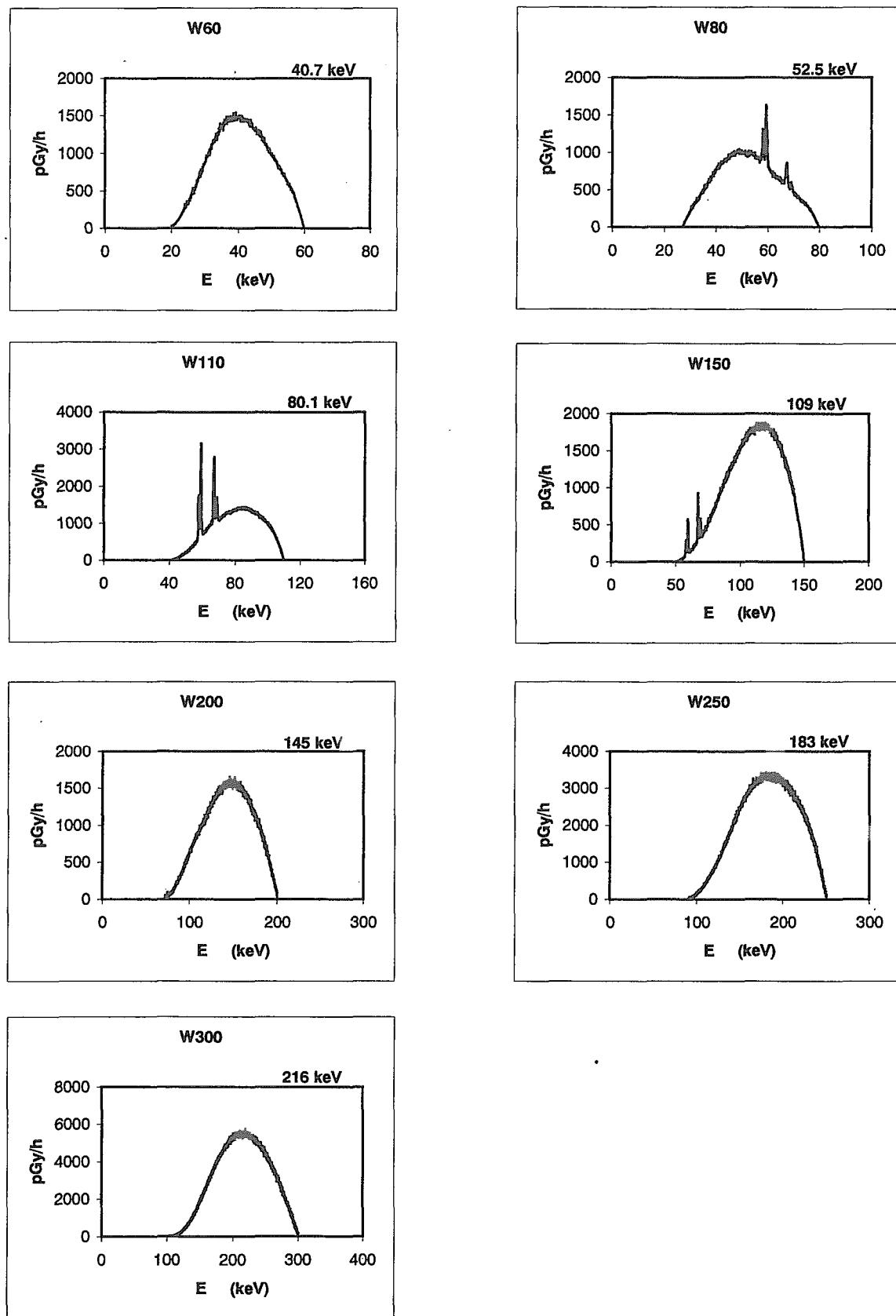
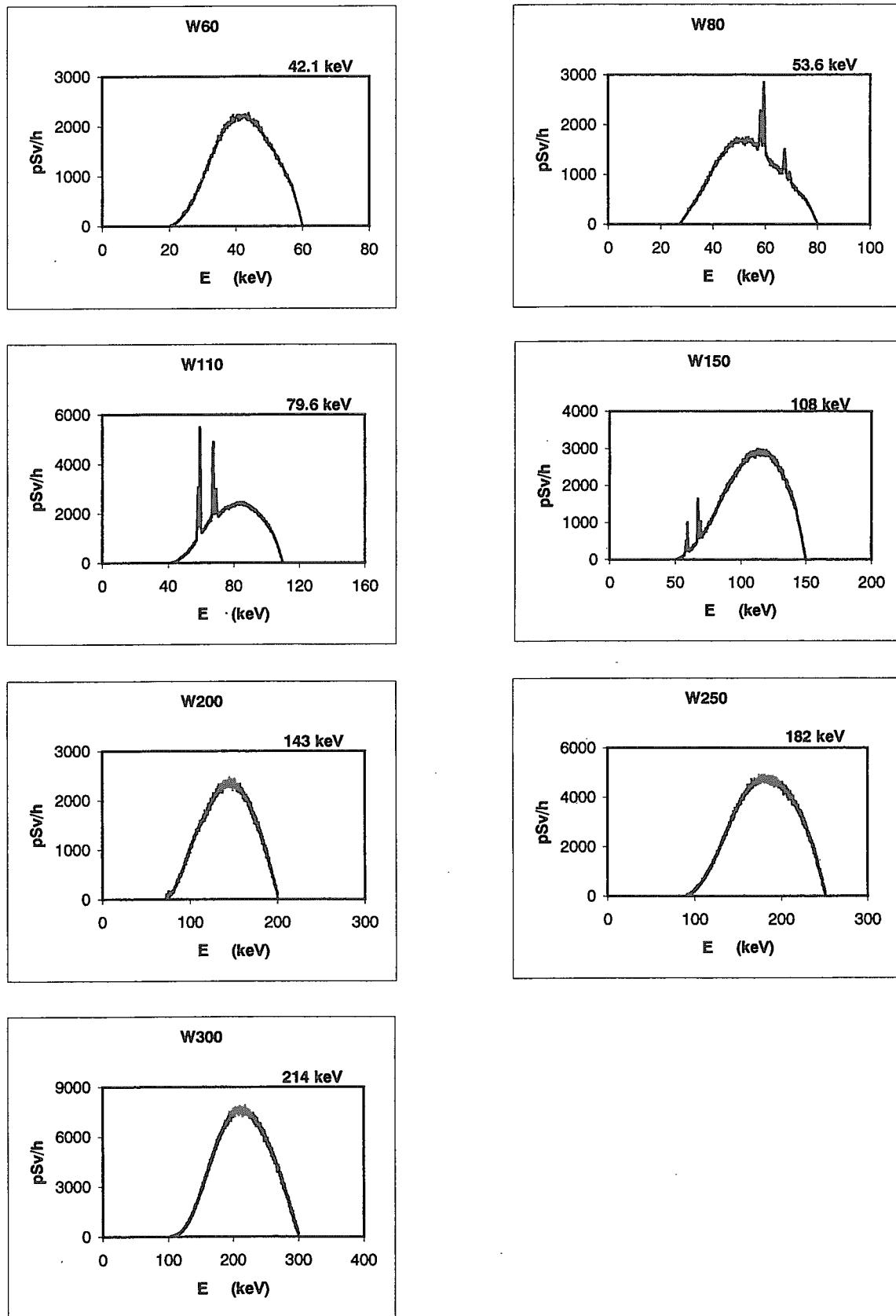


Fig.8-2 Air-kerma spectra of JAERI wide series

Fig.8-3 Ambient dose equivalent spectra of JAERI wide series ($H^*_{(10)}$)

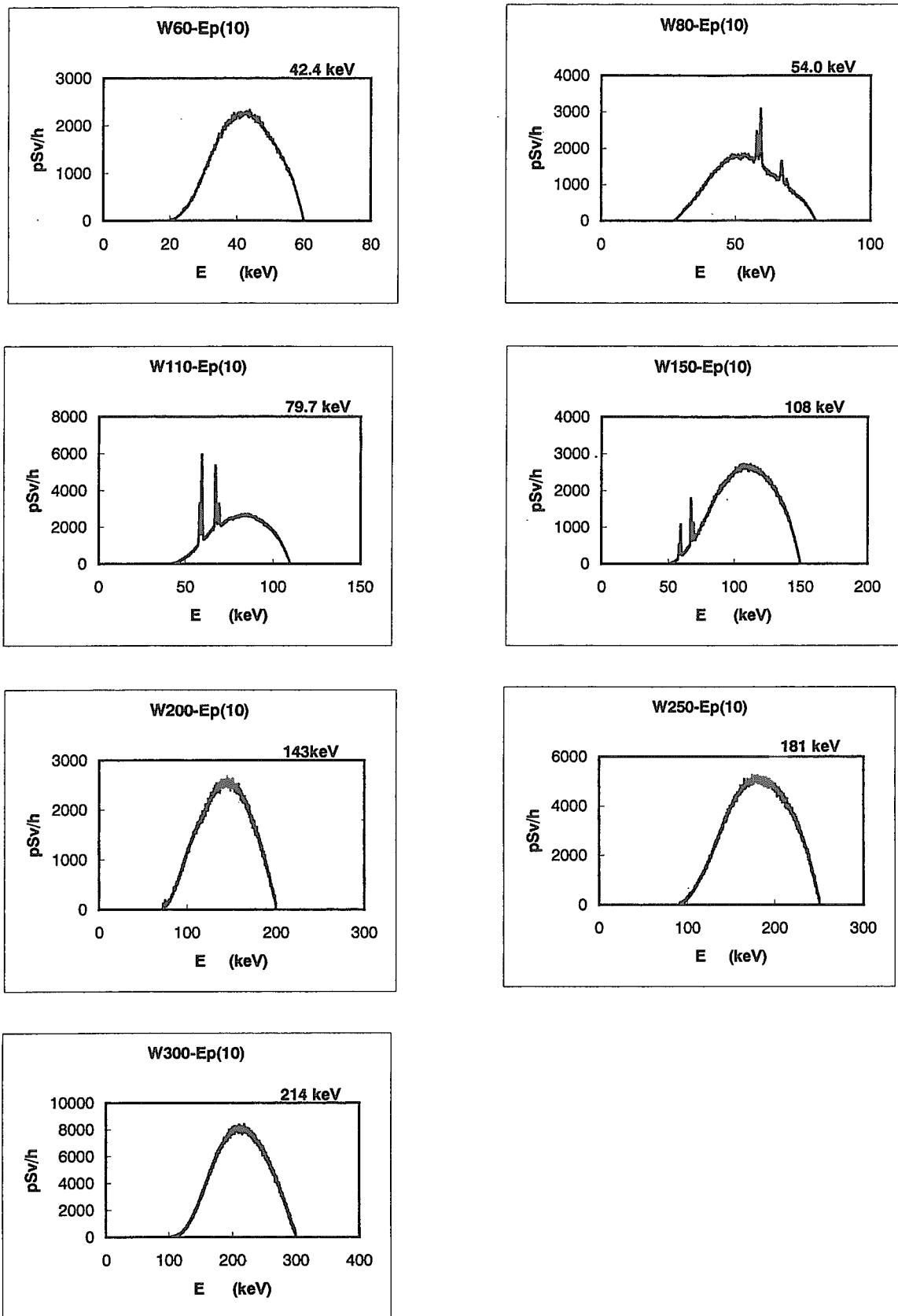


Fig.8-4 Personal dose equivalent spectra for strongly penetrating radiation of JAERI wide series ($H_{p(10)}$)

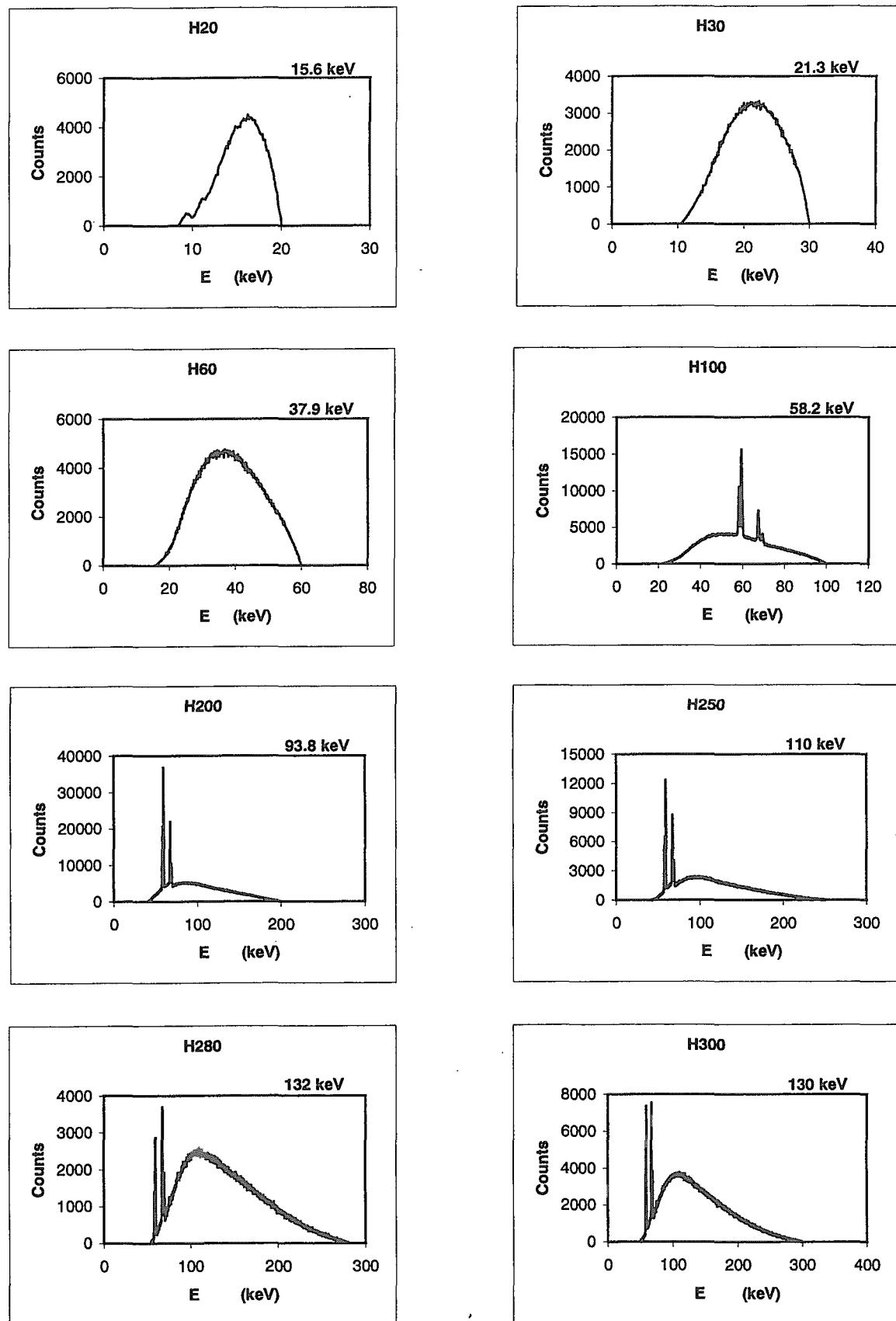


Fig.9-1 Fluence spectra of JAERI high air-kerma series

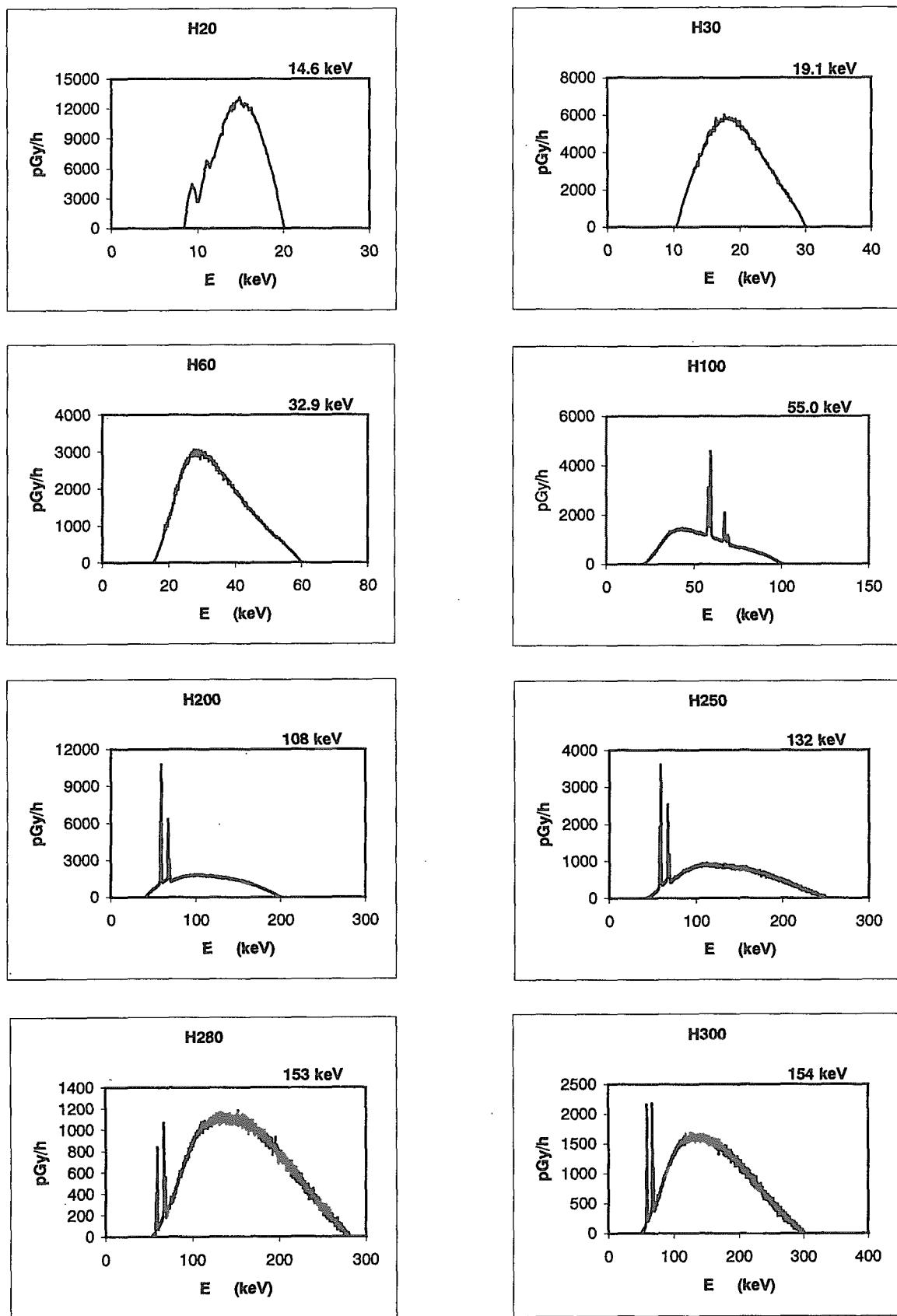
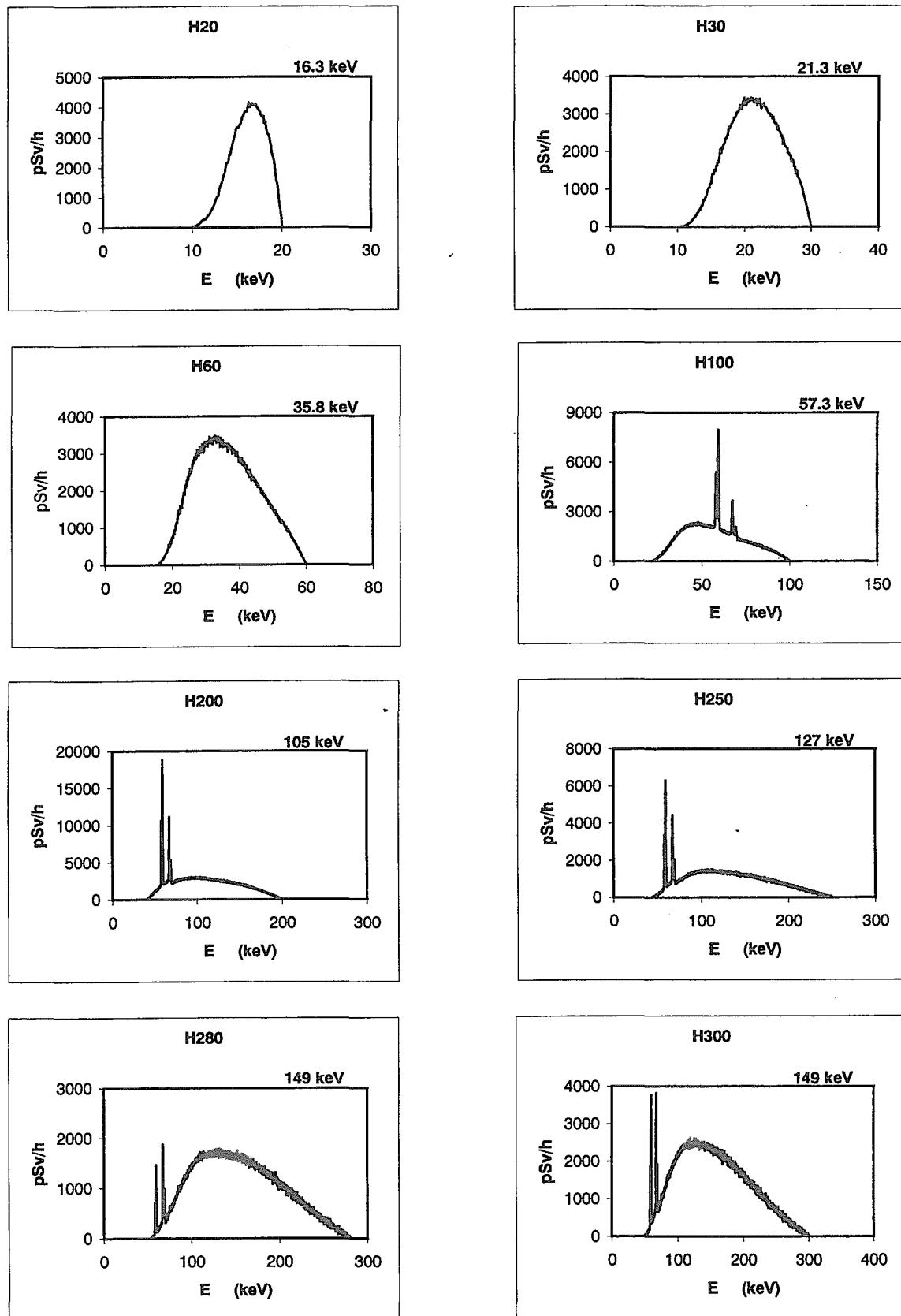


Fig.9 – 2 Air-kerma spectra of JAERI high air-kerma series

Fig.9-3 Ambient dose equivalent spectra of JAERI high air-kerma series ($H^*_{(10)}$)

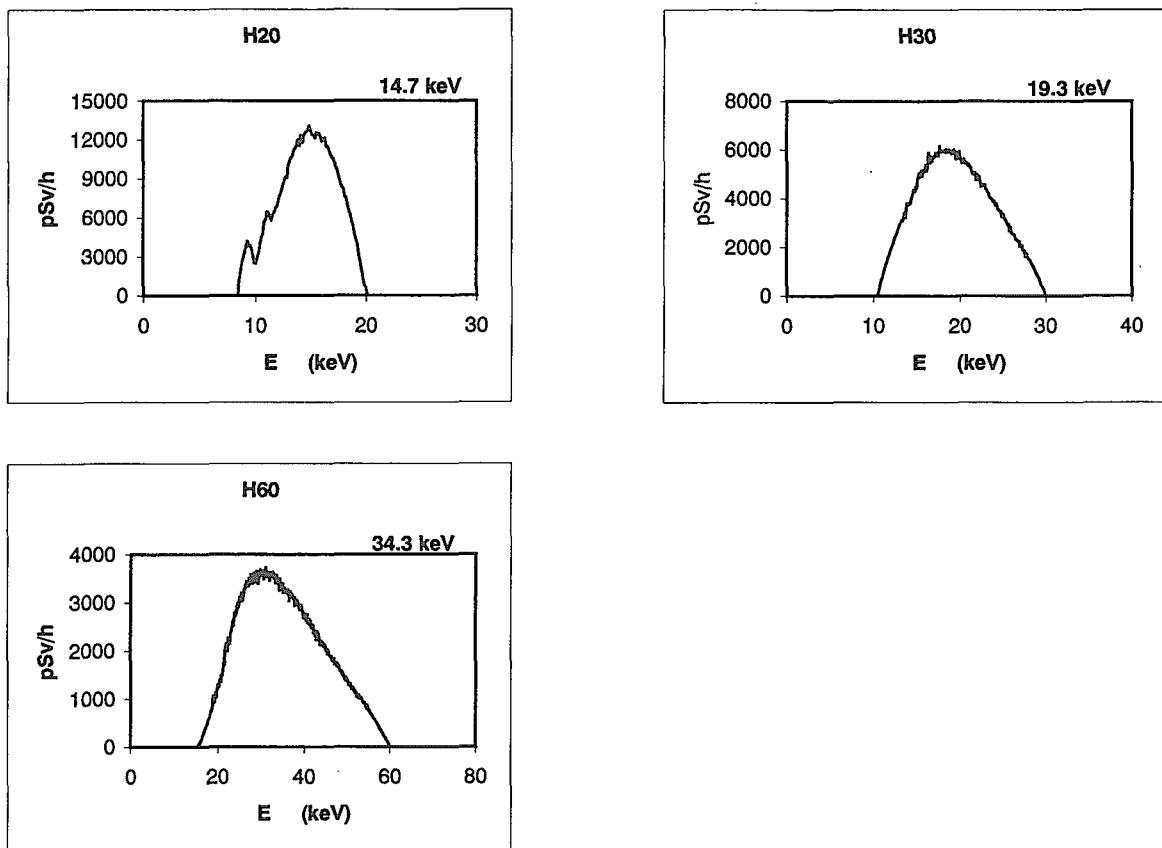


Fig.9-4 Directional dose equivalent spectra of JAERI high air-kerma series ($H'_{(0.07)}$)

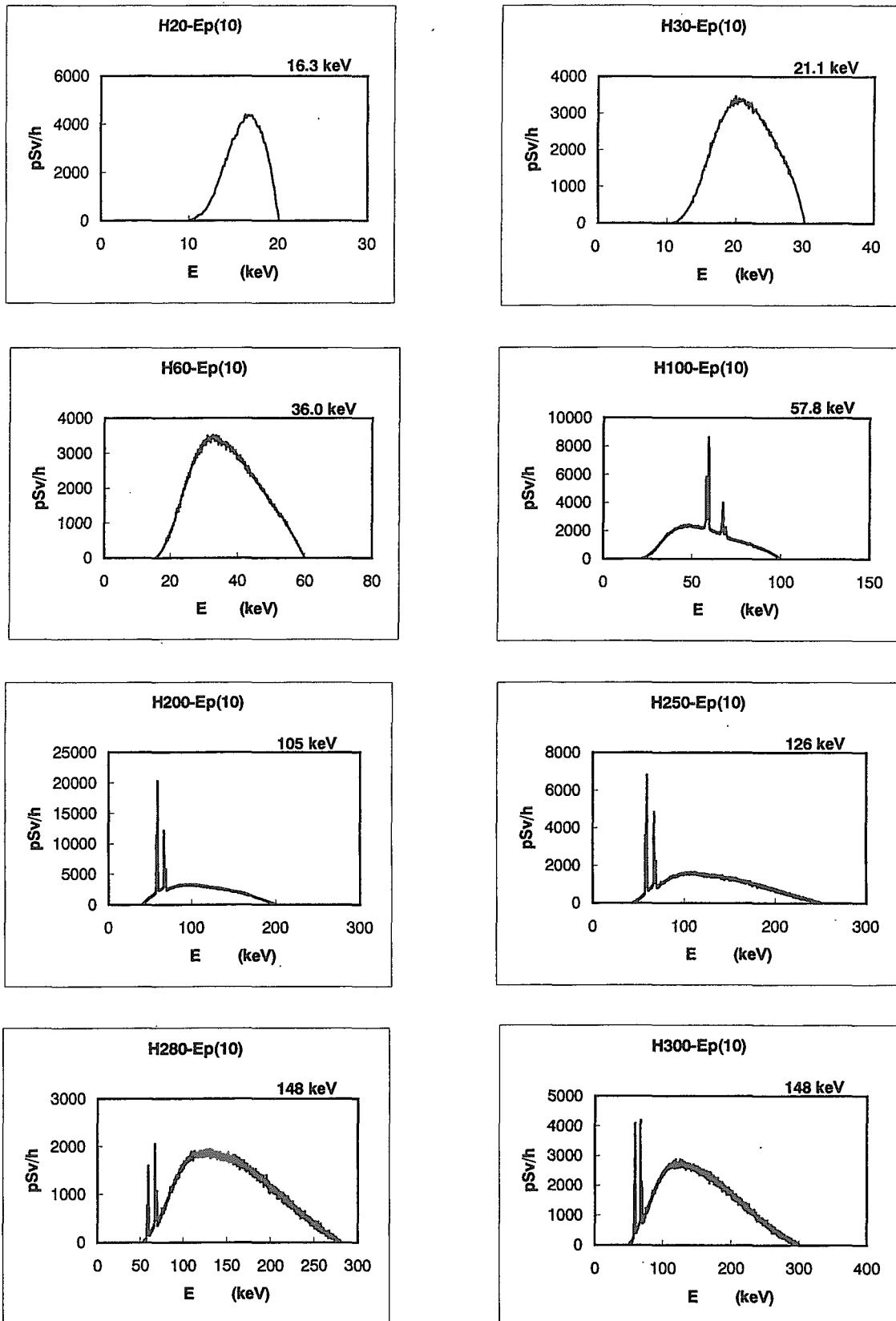


Fig.9-5 Personal dose equivalent spectra for strongly penetrating radiation of JAERI high air-kerma series ($H_{p(10)}$)

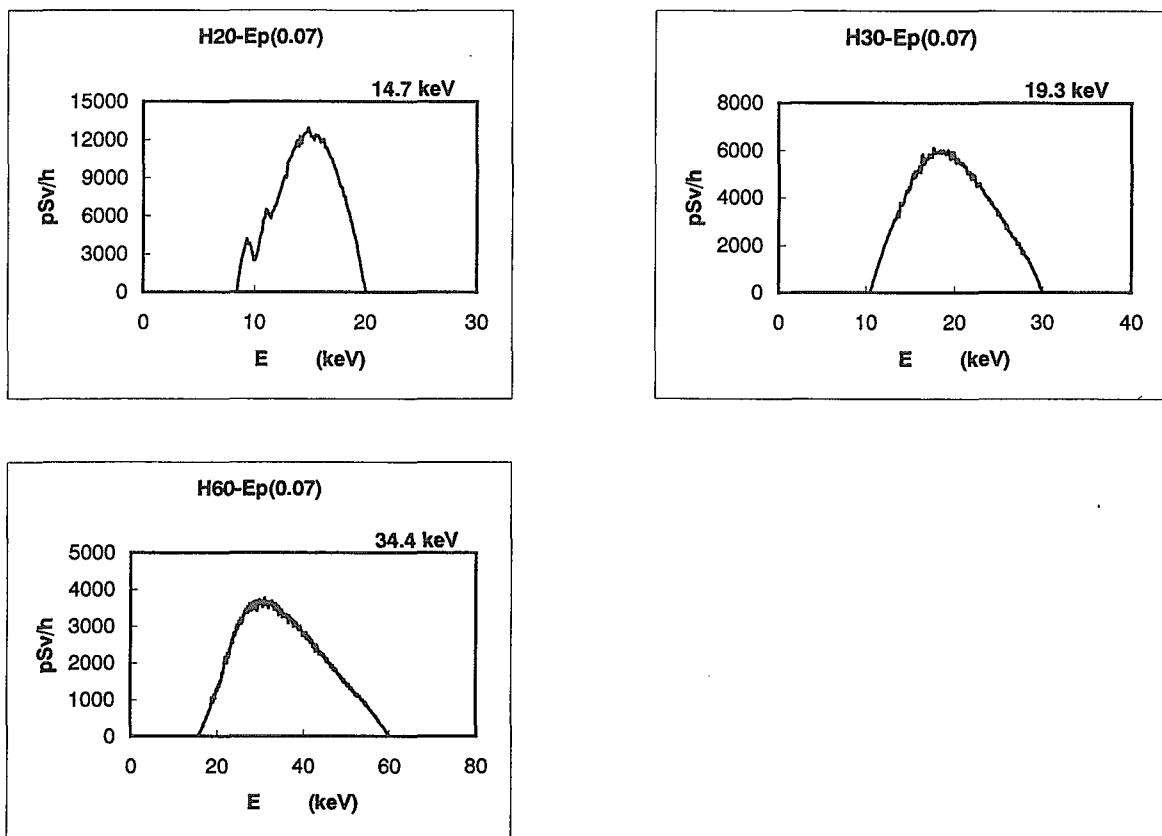


Fig.9-6 Personal dose equivalent spectra for weakly penetrating radiation of JAERI high air-kerma series ($H_{p(0.07)}$)

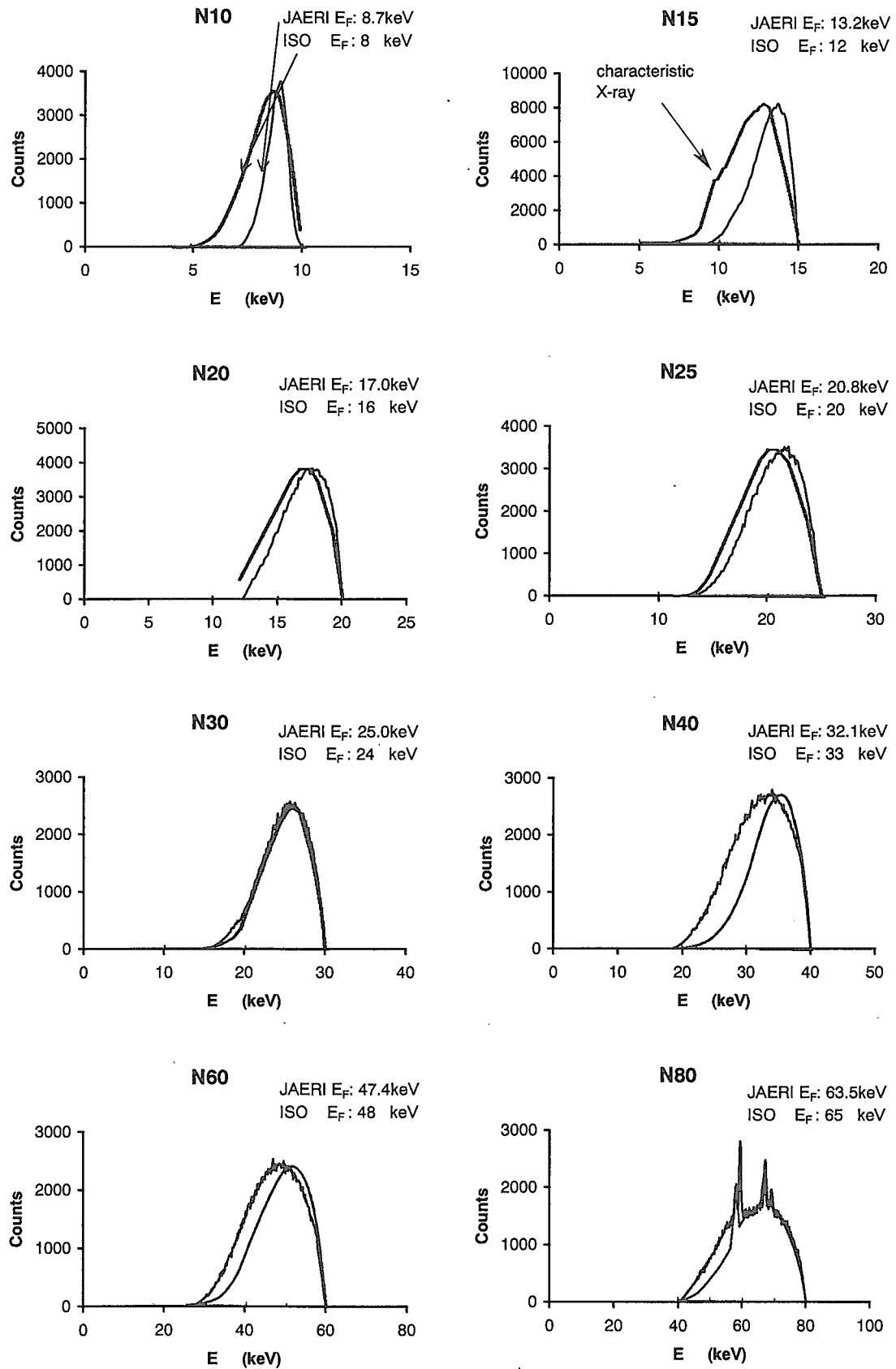


Fig.10-1 Comparison of fluence spectra of JAERI and ISO qualities for narrow series

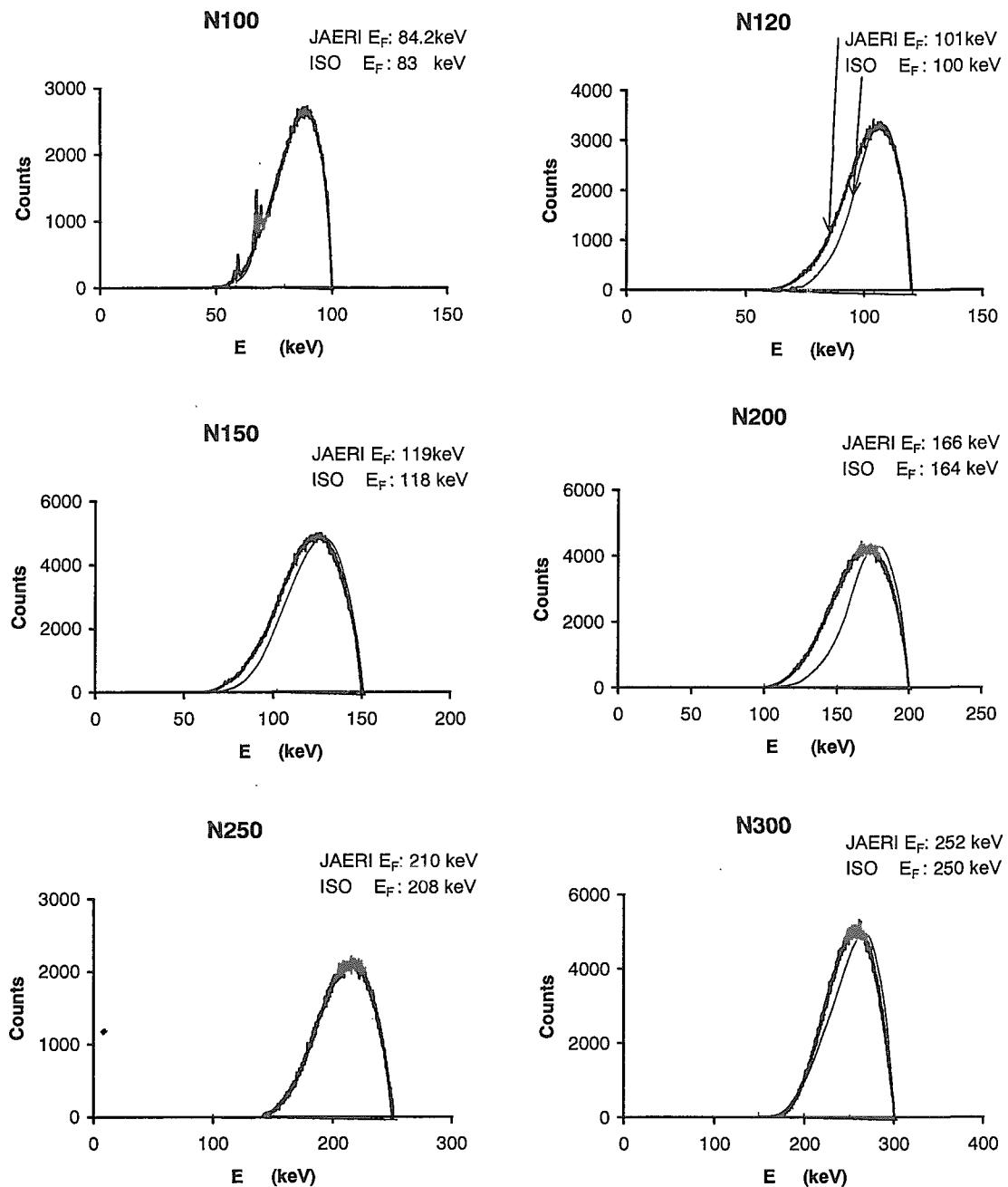


Fig.10-1 Countinued

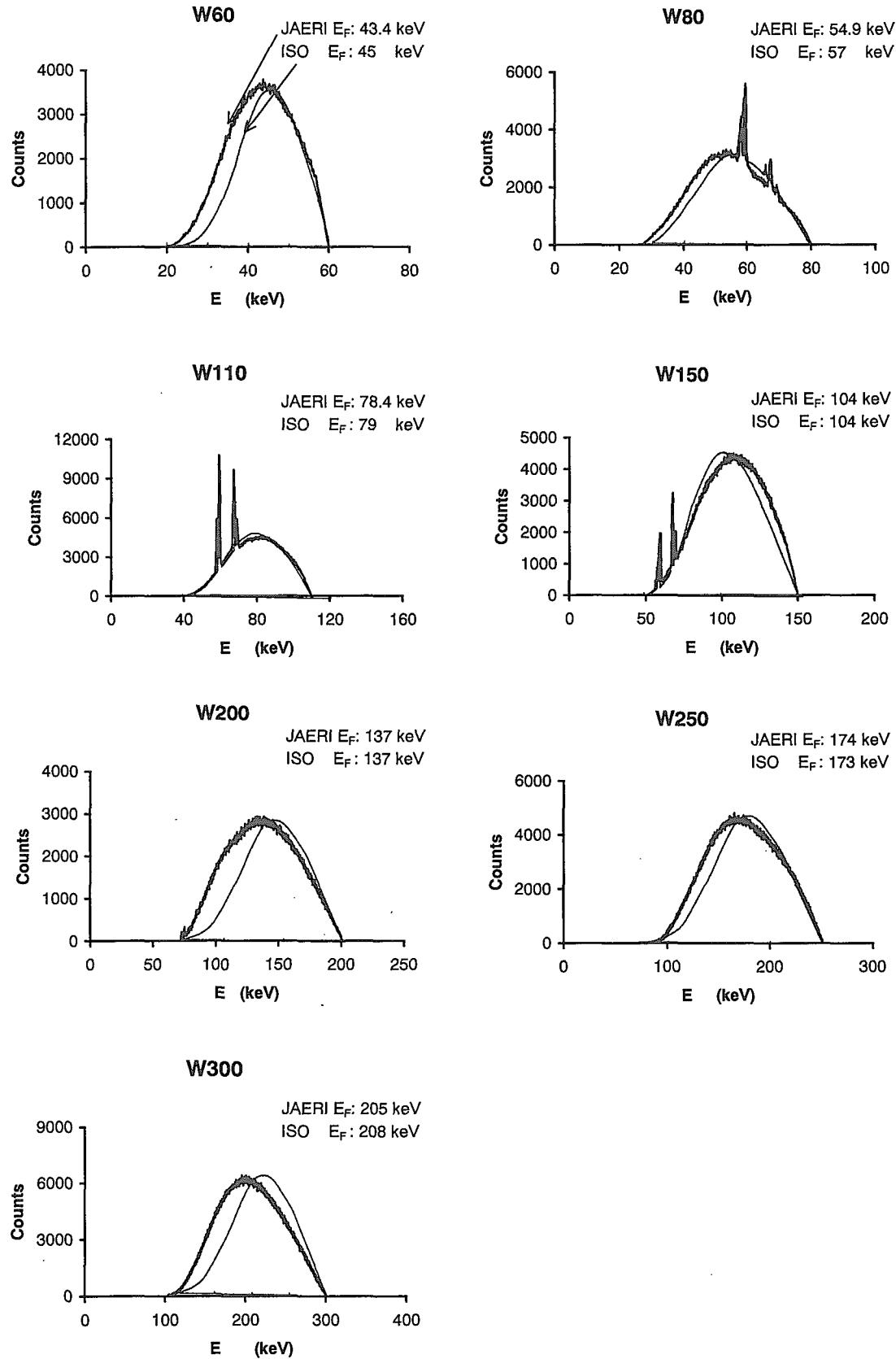


Fig.10-2 Comparison of fluence spectra of JAERI and ISO qualities for wide series

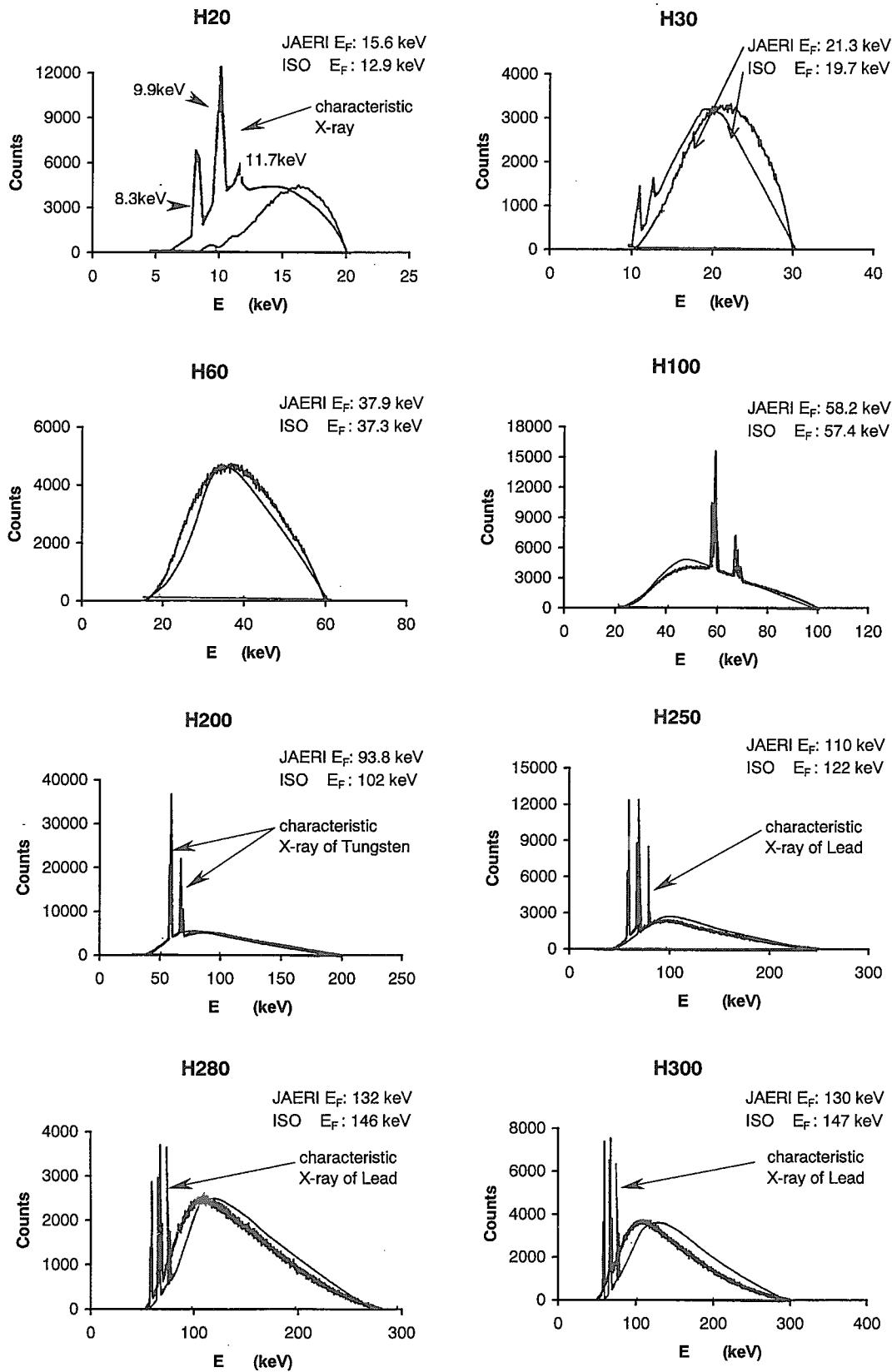


Fig.10-3 Comparison of fluence spectra of JAERI and ISO qualities for high air-kerma series

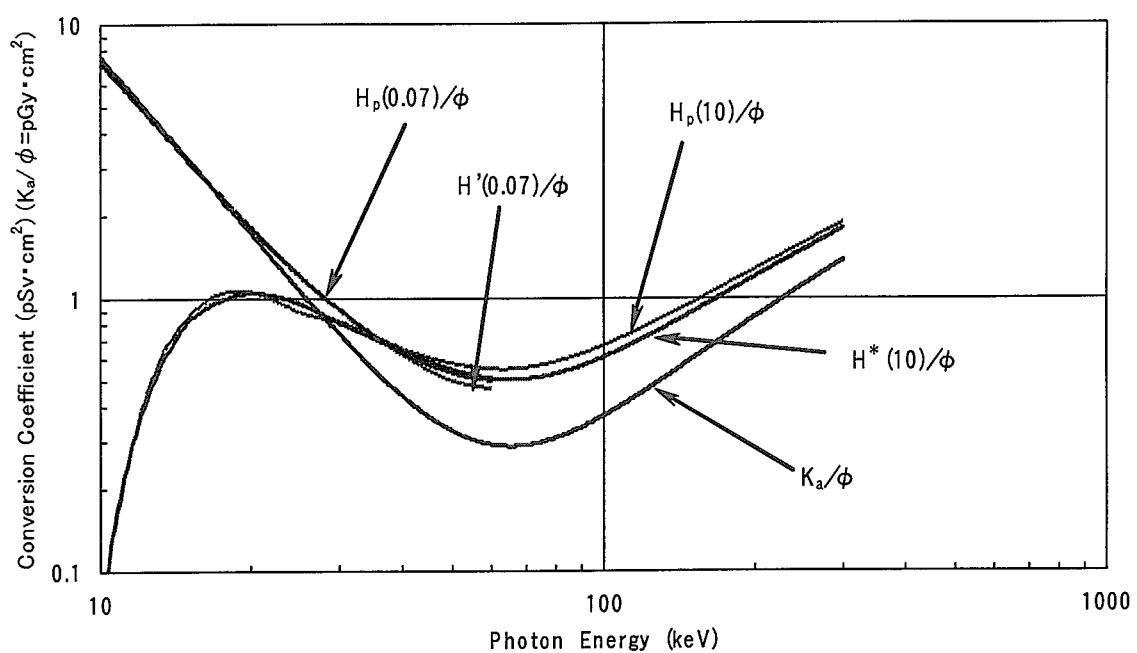


Fig.11 Characteristics of conversion coefficients of dose equivalents for photons

付 錄 1

ISO 4037-1(1996)に記載されている ISO X線線質の Narrow spectrum series、Wide spectrum series、High air-kerma series の 3 シリーズを Table A.1～Table A.3 に示す。各表の右欄には、日本国内の線質規格である実効エネルギー(E_{eff})と線質指標(Quality index)の計算結果を示す。なお、実効エネルギーは、WM.J.Veigle らの「Atomic data table Vol.5」(1973)のデータを用いて光子エネルギーに対する半価層を求め、この両者の関係をフィッティング関数にして算出した。

Table A.1 Characteristics of ISO narrow-spectrum series

Tube potential kV	Mean energy keV	Resolution %	Additional filtration mm				1st HVL mm	E_{eff} keV	Quality index (QI)
			Pb	Sn	Cu	Al			
10	8	28				0.1	0.047Al	7.8	0.78
15	12	33				0.5	0.14Al	11.3	0.75
20	16	34				1.0	0.32Al	15.0	0.75
25	20	33				2.0	0.66Al	19.2	0.77
30	24	32				4.0	1.15Al	23.3	0.78
40	33	30			0.21		0.084Cu	31.7	0.79
60	48	36			0.6		0.24Cu	46.2	0.77
80	65	32			2.0		0.58Cu	63.9	0.80
100	83	28			5.0		1.11Cu	82.5	0.83
120	100	27		1.0	5.0		1.71Cu	100	0.83
150	118	37		2.5			2.36Cu	118	0.79
200	164	30	1.0	3.0	2.0		3.99Cu	166	0.83
250	208	28	3.0	2.0			5.19Cu	209	0.82
300	250	27	5.0	3.0			6.12Cu	254	0.83

Table A.2 Characteristics of ISO wide-spectrum series

Tube potential kV	Mean energy keV	Resolution %	Additional filtration mm				1st HVL mm Cu	E_{eff} keV	Quality index (QI)
			Pb	Sn	Cu	Al			
60	45	48			0.3		0.18	41.6	0.69
80	57	55			0.5		0.35	52.9	0.66
110	79	51			2.0		0.96	77.7	0.71
150	104	56		1.0			1.86	104	0.69
200	137	57		2.0			3.08	138	0.69
250	173	56		4.0			4.22	173	0.69
300	208	57		6.5			5.20	209	0.69

Table A.3 Characteristics of ISO high air-kerma rate series

Tube potential kV	Mean energy keV	Resolution %	Additional filtration mm				1st HVL mm	E_{eff} keV	Quality index (QI)
			Al	Cu	Air				
10	7.5				750		0.036Al	7.1	0.71
20	12.9		0.15		750		0.12Al	10.7	0.53
30	19.7		0.5		750		0.38Al	15.9	0.53
60	37.3		3.2		750		2.42Al	30.6	0.51
100	57.4		3.9	0.15	750		0.30Cu	48.3	0.48
200	102			1.15	2250		1.70Cu	99.7	0.50
250	122			1.6	2250		2.47Cu	121	0.48
280	146			3.0	2250		3.37Cu	147	0.53
300	147			2.5	2250		3.40Cu	148	0.49

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

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

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

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

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

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

(注)

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

換算表

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

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストーカス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

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

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

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1	0.01	1	

照 射 線 量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線 量 当 量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

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



古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています