



**放射線測定器の性能試験に用いる
国際規格に準拠したX線標準場の整備**

Establishment of X-ray Reference Fields for Performance Tests of Radiation
Measuring Instruments Based on International 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 2011

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

放射線測定器の性能試験に用いる国際規格に準拠した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・澤島 忠広*・梶本 与一・志風 義明・吉原 泰明*・立部 洋介

(2011年2月16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 線標準場が設定され、世界的に適用されている。原子力科学研究所の当該 X 線標準場は、2003 年に整備して運用してきた。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 of X 線管球を設置したため、当該 X 線標準場を 2010 年に再構築し、ISO4037-1 に準拠した Narrow series、Wide series 及び High air-kerma series の 3 つのシリーズを 27 の線質について整備した。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及び ISO4037-1 の線質との比較について述べる。実験の結果、原科研の X 線標準場の線質は、国際規格の線質と良く一致していることを確認した。また、ISO 線質を設定する場合の留意点や ISO 線質の設定指標の問題点を明らかにした。これにより、国際規格に基づく放射線防護用測定器の性能試験及び世界の校正機関との基準照射及び相互比較実験が実施できることになり、これらの詳細なデータを明らかにした。

Establishment of X-ray Reference Fields for Performance Tests of Radiation
Measuring Instruments Based on International 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 February 16, 2011)

The International Standard, ISO4037-1, is applied worldwide for setting the condition of X-ray reference fields to be used for the performance test of radiation measuring instruments for radiation protection. X-ray reference fields were established at the Facility of Radiation Standard in Nuclear Science Research Institute in 2003 and had been operated. In 2010, we rebuilt the X-ray reference fields by replacing the X-ray tube with a new model due to the damage of the old one of the middle-hard X ray irradiation device. We have established three series of medium-hard X-ray reference fields, Narrow, Wide and High air-kerma series with 27 radiation qualities, based on ISO 4037-1. This article described quality of the X-ray fields, X-ray spectra, conversion coefficients to the dose equivalent from Air-kerma and comparison with the quality of ISO4037-1 in the X-ray fields of medium-hard X-ray voltages ranging from 20kV to 300kV. As the results of experiments, these X-ray reference fields were well agreed with the condition of the international standard. In addition, we clarified points to pay attention in setting ISO qualities, and the issues in the index of the ISO quality. As a result, these X-ray reference fields were found to be used to carry out the performance test, standard irradiation based on the international standard, and an intercomparison experiment with the reference laboratories in the world.

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

* Institute of Radiation Measurement

目 次

1. 序 論	1
2. X線標準場の設定	2
2.1 線質の設定方法	2
2.2 半価層測定用の電離箱式線量計の仕様	3
2.3 設定結果及び ISO との比較	4
3. 各線質の X線エネルギースペクトルの評価	9
3.1 測定方法	9
3.1.1 フルエンススペクトルの評価	9
3.1.2 線量スペクトルの評価	10
3.1.3 スペクトル分解能の評価	12
3.2 結果及び ISO との比較	13
4. 線質に対する線量当量換算係数の評価	39
4.1 評価方法	39
4.2 評価結果及び ISO との比較	39
5. 結 論	49
参考文献	52
付録 A. ISO4037-1(1996)の 3 シリーズの線質の仕様	53

Contents

1. Introduction	-----	1
2. Characterization of X-ray Reference Fields	-----	2
2.1 Characterization Methods of Radiation Quality	-----	2
2.2 Ionization Chamber used for Measurement of Half Value Layer	-----	3
2.3 Results and Comparison with the ISO Standard	-----	4
3. Estimation of X-ray Energy Spectra for Reference Fields	-----	9
3.1 Measurement Methods	-----	9
3.1.1 Fluence Spectrum	-----	9
3.1.2 Dose Spectrum	-----	10
3.1.3 Resolution of Spectrum	-----	12
3.2 Results and Comparison with the ISO Standard	-----	13
4. Estimation of Dose Equivalent Conversion Coefficients for Reference Fields	-----	39
4.1 Estimation Method	-----	39
4.2 Results and Comparison with the ISO Standard	-----	39
5. Conclusions	-----	49
References	-----	52
Appendix A. Specifications of quality of three series of ISO4037-1(1996)	-----	53

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 2008 年 2 月に破損し、2009 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、2003 年に設定して運用してきた ISO4037-1¹⁾ (以下「ISO」という)の国際規格に対応した X 線標準場²⁾ 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 X 線標準場を再構築した。

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 ISO 線質と本施設での設定線質(以下「JAEA 線質」という)との比較について、実験データに基づいてまとめたものである。

X 線質の設定は、ISO が推奨する X 線標準場のうち、スペクトルの広がり最も狭い Narrow シリーズ、スペクトルの広がりを持たせた Wide シリーズ、高線量の空気カーマ率に対応させた High air-kerma シリーズの 3 つのシリーズである。設定方法は、ISO の基礎フィルタとほぼ同じ厚さを装荷し、ISO の評価項目である半価層、均等度、平均エネルギー、エネルギー分解能及び線量強度を評価し、日本国内の日本工業規格 JIS Z 4511³⁾ で規定される実効エネルギー及び線質指標を追加して評価した。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実施し、第一半価層と第二半価層の比から均等度を求めた。国内規格に対応した実効エネルギーの評価は、WM.J.Veigle ら⁴⁾ の線減弱係数のデータを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、上記の ISO シリーズの線量強度が異なる 3 つのシリーズに対して、管電圧 20kV から 300kV の範囲で平均エネルギー 14.4keV から 248keV において全体で 27 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、平均エネルギー、エネルギー分解能及びスペクトルの健全性を確認すると共に、ICRP Publication 74⁵⁾、B.Grosswendt⁶⁾ 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(Hp(10)(E)及び Hp(0.07)(E))をそれぞれ評価し、その平均エネルギーを求めた。

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

得られた JAEA 線質と ISO 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、スペクトル分解能及び ISO4037-3⁷⁾ に示される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。

これらの実験結果から、各シリーズの JAEA 線質は、ISO 線質と良く一致していることが明らかになり、各線質のスペクトルの健全性も確認した。また、ISO 線質を設定する場合の留意点や ISO 線質の設定指標の問題点を明らかにした。これにより、本標準場を使用して、放射線防護用測定器に対して、国際電気標準会議(IEC)が制定した放射線測定器に関する IEC 規格の性能試験及び世界の校正機関との基準照射及び相互比較実験が実施できることになった。

2. X線標準場の設定

2.1 線質の設定方法

標準場の設定に用いる中硬X線照射装置の機器構成及び基礎フィルタの種類等は、文献 8)の2章の記載と同様であるため本論文では割愛する。なお、連続X線のろ過効果に影響するX線管球の窓材及び厚さは、ベリリウムの3mmと10keV以下の低エネルギーの特性X線を減弱させるアルミニウムの0.3mmである。また、X線をろ過する基礎フィルタ(Additional filter)には、付録Aに示すISOの各シリーズと同じアルミニウム(Al)、銅(Cu)、すず(Sn)及び鉛(Pb)の4種類の材料を用意し、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。以下に線質の設定方法を示す。ただし、JAEA線質では、中硬X線照射装置を利用するため、20kV未満の放射線強度が低いことから、これらの線質の設定を除外した。

付録A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、ISO及びJISの両規格趣味の線質条件が満たされ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として、基礎フィルタ及び半価層測定フィルタの材質は、付録Aに示すISOの各シリーズのものと同じにし、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は±0.02mm以内で一致したが、Snは0.06mm～0.12mmの違いが生じた。半価層の測定では、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測定距離は2.0mとした。

第1半価層から線質の実効エネルギーを求める評価方法は、200keV以下のエネルギーについては文献 2)及び文献 8)で示される下記の(2-1)式及び(2-2)式により算出した。150keVから400keVのエネルギー範囲については、付録Aに示すISO線質の半価層がCuで評価されており、これとの比較を行うため、新たにTable2-1の数値を用いて、(2-3)式に示すCuに対するフィッティング関数を作成し、実効エネルギーを算出した。3つの近似式の誤差は±1%である。また、半価層の評価方法は、基礎フィルタのみを装荷したときの線量を基準とし、AlまたはCuの半価層測定フィルタの厚さを一定間隔で増やしなが測定を行い、基準の線量から1/4以下になる厚さまで測定を行った。フィルタ厚毎の測定値を、基準の線量に対する減衰率の対数値を算出して、3次式または2次式の近似式を求め、基礎フィルタを装荷したときの線量が1/2、1/4になるフィルタの厚さを近似式から算出した。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。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(2-4)式及び(2-5)式により算出した。

$$E_{\text{eff}} = 22.03t_1^{0.341} + 0.1469t_1^{2.01} \quad (\text{Al : 6keV to 60keV}) \text{ ----- (2-1)}$$

$$E_{\text{eff}} = 76.48t_1^{0.355} + 2.543t_1^{2.00} \quad (\text{Cu : 15keV to 200keV}) \text{ ----- (2-2)}$$

$$E_{\text{eff}} = 0.0047 t_1^5 - 0.1463 t_1^4 + 2.1813 t_1^3 - 11.689 t_1^2 + 52.166 t_1 + 35.936$$

(Cu : 150keV to 400keV) ----- (2-3)

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

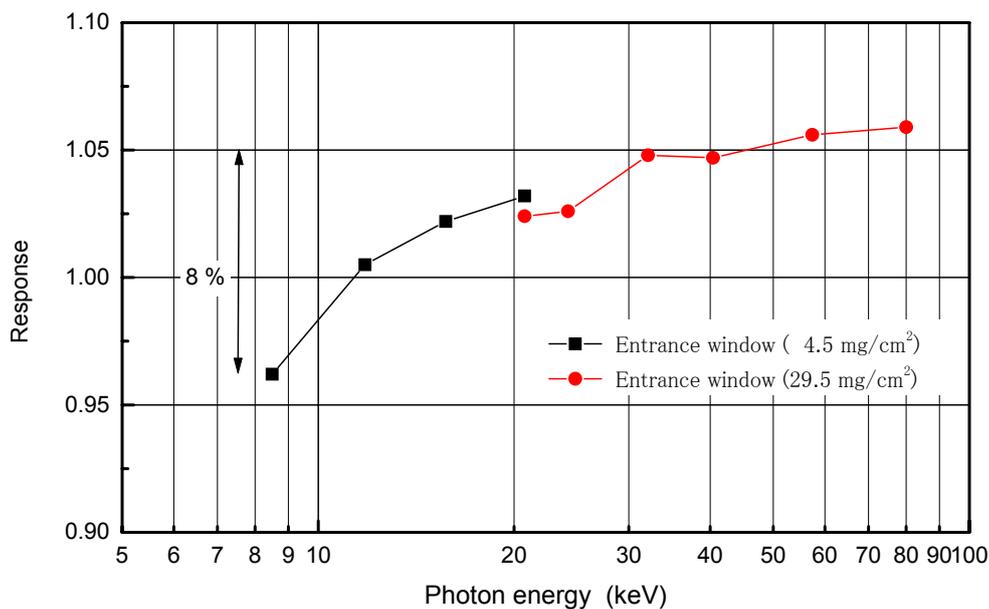
$$Q I = \frac{\text{実効エネルギー}(E_{\text{eff}})}{\text{最大エネルギー}(E_{\text{max}})} \text{ ----- (2-5)}$$

Table 2-1 Relationship between effective energy and half-value layer for copper filter

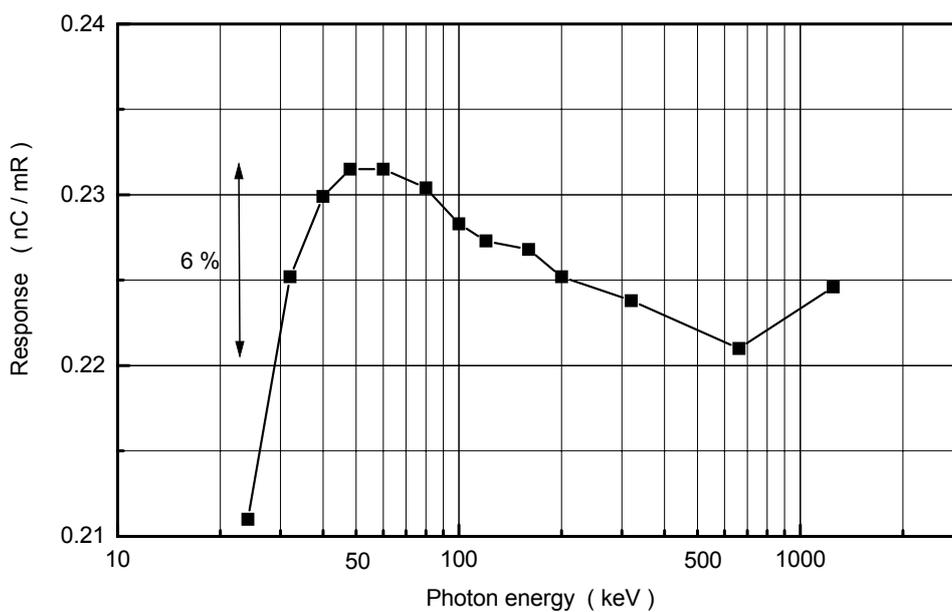
Effective energy (keV)	Total attenuation cross section (barn)	Half-value layer (mm)
50	2.70E+02	0.303
60	1.65E+02	0.496
80	7.92E+01	1.03
100	4.78E+01	1.71
150	2.33E+01	3.51
200	1.64E+01	4.99
300	1.18E+01	6.93
400	9.89E+00	8.27
500	8.78E+00	9.32
Conversion coefficient (cm ² /g/barn)		9.478E-03
Density (g/cm ³)		8.94

2.2 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.2-1 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ジタル表示される。これらは、国内の標準機関(産業技術総合研究所)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) EXTRADIN A6 (800ml) ionization chamber

Fig. 2-1 Energy characteristics of reference ionization chambers used for the measurement of half-value layer

2.3 設定結果及び ISO との比較

ISO の 3 シリーズに準拠した JAEA 線質を Table 2-2~Table 2-4 に示す。また、付録 A には ISO4037-1(1996)から引用した同じシリーズの ISO 線質を示し、同表の右欄には JAEA 線質と比較するための実効エネルギー、線質指標及び均等度を表した。そして、JAEA 線質と ISO 線質(以下、

「両者」という)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 Table2-5～Table2-7 にまとめて示す。以下に JAEA 線質の結果及び ISO 線質との比較を示す。なお、Table 2-2～Table 2-4 に示す各シリーズのフルエンス平均エネルギーは、ISO 線質の仕様に合わせて記載するもので、この測定結果及び考察は 3 章のスペクトルの評価で述べる。

- (1) 今回設定した 3 つのシリーズの JAEA 線質は、Table2-2～Table2-4 に示すように、Narrow シリーズが 20kV～300kV の管電圧で 12 線質、Wide シリーズが 60kV～300kV の管電圧で 7 線質、High air-kerma シリーズが 20kV～300kV の管電圧で 8 線質の合計 27 の線質を構築した。これらの線質のフルエンス平均エネルギーは、管電圧 20kV～300kV の範囲で 14.4keV～248keV である。以下に、各測定・評価項目の結果と考察及び ISO 線質との比較を示す。
- (2) JAEA 線質の均等度は、Table2-2～Table2-4 に示すように、Narrow シリーズが 0.83～0.99、Wide シリーズが 0.78～0.97、High air-kerma シリーズが 0.64～0.86 であった。一方、付録 A の ISO では、Narrow シリーズが 0.86～1.00、Wide シリーズが 0.80～0.97、High air-kerma シリーズが 0.63～0.84 であった。両者は±0.03 で良く一致した。
- (3) 両者の半価層の比較では、Table2-5～Table2-7 に示すように、110kV 以下の線質では Al 及び Cu 材質で±0.01mm～±0.07mm と少ない変化であったが、120kV から 300kV の線質では徐々に差が大きくなり、Cu 材質で JAEA の方が 0.02mm～0.34mm と高い値を示した。この違いは、スペクトル及び実効エネルギーの差異を間接的に表すもので、120kV 未満では両者の線質が良く一致し、120kV 以上では両者の線質に若干違いが生じた。
- (4) 両者の実効エネルギーの比較では、Table2-5～Table2-7 に示すように、110kV 以下の線質で ±1keV と一致したが、それ以上の 120kV から 300kV の線質で 2keV から 18keV の違いが生じた。120kV 以上の違いは、上記の(3)で示した、実効エネルギーを算出するための第 1 半価層の厚さが異なることによるもので、両者の半価層厚さの違いが Narrow シリーズで 0.12～0.34mm、Wide シリーズで 0.02～0.27mm、High air-kerma シリーズで 0.02～0.16mm と、JAEA の方が高い値を示したことによる。
- (5) JAEA 線質の線質指標は、Table2-2～Table2-4 に示すように、Narrow シリーズが 0.75～0.90、Wide シリーズが 0.65～0.73、High air-kerma シリーズが 0.49～0.55 であった。一方、付録 A の ISO の各シリーズの線質指標は、上記と同様の線質で Narrow シリーズが 0.75～0.84、Wide シリーズが 0.66～0.71、High air-kerma シリーズが 0.48～0.54 であった。Table2-5～Table2-7 の両者の比較では、JAEA は-0.04～+0.07 の違いが生じ、割合で表すと±5%と有意な変化が生じた。一方、日本の JIS Z 4511 の設定では、線質指標を 0.60、0.70、0.80、0.90 の値に対して±0.01(±1%)に合わせている(文献 8)参照)のに対し、ISO の各シリーズの線質指標は±5%と変化し、線質指標を基準とする分類はできない。これは、ISO の各シリーズの線質の設定指標が基礎フィルタのみであることが原因である。また、ISO の各シリーズは、管球の固有フィルタ(窓材)が Be 1mm のデータであるのに対し、JAEA の管球の固有フィルタは Be 3mm+Al 0.3mm であり、40kV 以下の低エネルギー領域において線質指標に違いが生じた。世界中で市販されている X 線管球の窓材には、Be 1mm～7mm のものが利用されており、特に、40kV 以下の低エネルギー領域において、ISO の各シリーズの線質条件が、これら全ての管球について適合するものではないと言える。

(6) JAEA 線質の各シリーズの校正距離 1m での管電流 1mA 当たりの空気カーマ率は、Narrow シリーズが 2.1~15 mGy/h、Wide シリーズが 0.6~3 mGy/min、High air-kerma シリーズが 6~12 mGy/min であった。各標準場の上限の空気カーマ率は、上記の値と文献 8)の管電圧と上限管電流の特性より 20kV~120kV までは 25mA、150kV 以上で 10mA より求めることができる。従って、1Gy/h 程度の高い線量率を照射する場合は、High air-kerma シリーズが利用できる。個人線量計のように数 mSv の積算照射を短時間で行う場合は、Narrow シリーズで管電流を 10mA 程度にして利用できる。また、サーベイメータのように 1mGy/h~5mGy/h 程度の線量率照射を行う場合は、管電流や校正距離を変更することにより、Narrow シリーズ又は Wide シリーズの標準場が利用できる。

以上の結果から、両者の均等度及び線質指標は、ほぼ同様の値となった。しかし、線質指標は、ISO 線質の各シリーズで±5%変化し、更に、管球の固有フィルタが異なる JAEA 線質との違いも±5%あり、日本の設定指標の±1%に対して変化が大きく、線質の設定指標が基礎フィルタのみでは変化が大きいことが明らかになった。また、半価層及び実効エネルギーの比較では、110kV 以下の線質では両者は良く一致したが、120kV 以上の線質で JAEA の方が徐々に大きな値を示した。両者の均等度は良く一致し、連続スペクトルのろ過効果にあまり影響しないことが判明した。これらにより、ISO の各シリーズの標準場を校正機関が設定する場合は、半価層、均等度、実効エネルギー及び線質指標の測定を行い、ISO 線質との違いを明らかにしておくことが重要である。

Table 2-2 Characteristics of JAEA narrow series

Tube voltage (kV)	Additional filter (mm)				Half-value layer (mm)		Homoge. coefficient	Mean energy (keV)	Quality index (QI)	Dose rate (mGy/h mAat1m)
	Al	Cu	Sn	Pb	First	Second				
20	0.996				Al 0.376	Al 0.431	0.87	16.5	0.79	11.1
25	2.005				Al 0.709	Al 0.779	0.91	20.7	0.79	8.9
30	3.998				Al 1.275	Al 1.334	0.96	24.7	0.81	5.4
40		0.204			Cu 0.0755	Cu 0.0816	0.93	31.5	0.76	8.9
60		0.600			Cu 0.221	Cu 0.265	0.83	46.9	0.75	10.5
80		2.000			Cu 0.600	Cu 0.641	0.94	64.7	0.81	4.5
100		5.005			Cu 1.181	Cu 1.228	0.96	83.4	0.85	2.1
120		5.005	1.059		Cu 1.833	Cu 1.888	0.97	101	0.86	2.1
150			2.615		Cu 2.516	Cu 2.652	0.95	119	0.81	14.9
200		2.000	2.903	1.006	Cu 4.250	Cu 4.304	0.99	162	0.87	6.6
250			2.118	2.995	Cu 5.524	Cu 5.567	0.99	207	0.89	6.5
300			2.903	4.997	Cu 6.455	Cu 6.492	0.99	248	0.90	6.7

Table 2—3 Characteristics of JAEA wide series

Tube voltage (kV)	Additional filter (mm)		Half-value layer (mm)		Homoge. coefficient	Mean energy (keV)	Quality index (QI)	Dose rate (mGy/min mAat1m)
	Cu	Sn	First	Second				
60	0.300		Cu 0.165	Cu 0.195	0.85	43.1	0.67	0.55
80	0.500		Cu 0.332	Cu 0.427	0.78	55.1	0.65	0.78
110	2.000		Cu 0.975	Cu 1.132	0.86	78.5	0.71	0.48
150		1.059	Cu 1.945	Cu 2.226	0.87	105	0.71	1.0
200		2.118	Cu 3.328	Cu 3.640	0.91	137	0.73	1.8
250		4.001	Cu 4.494	Cu 4.667	0.96	169	0.73	2.3
300		6.395	Cu 5.446	Cu 5.609	0.97	200	0.73	2.8

Table 2—4 Characteristics of JAEA high air-kerma series

Tube voltage (kV)	Additional filter (mm)			Half-value layer (mm)		Homoge. coefficient	Mean energy (keV)	Quality index (QI)	Dose rate (mGy/min mAat1m)
	Al	Cu	Air	First	Second				
20	0.152		1000	Al 0.131	Al 0.170	0.77	14.4	0.55	12.2
30	0.501		1000	Al 0.420	Al 0.599	0.70	20.3	0.55	9.4
60	3.201		1000	Al 2.484	Al 3.385	0.73	37.5	0.52	6.3
100	3.897	0.170	1000	Cu 0.316	Cu 0.497	0.64	58.0	0.51	9.8
200		1.169	2000	Cu 1.718	Cu 2.429	0.71	101	0.50	6.7
250		1.600	2000	Cu 2.533	Cu 3.506	0.72	121	0.49	9.7
280		3.000	2000	Cu 3.534	Cu 4.120	0.86	143	0.54	9.1
300		2.500	2000	Cu 3.548	Cu 4.279	0.83	146	0.51	11.6

Table 2—5 Comparison of narrow series for JAEA qualities and ISO qualities

Tube voltage (kV)	First half-value layer * (mm)			Effective energy (keV)			Quality index (QI)		
	JAEA	ISO	JAEA-ISO	JAEA	ISO	JAEA-ISO	JAEA	ISO	JAEA/ISO
20	0.376	0.32	0.056	15.8	15.0	0.8	0.79	0.75	1.05
25	0.709	0.66	0.049	19.7	19.2	0.5	0.79	0.77	1.03
30	1.275	1.15	0.125	24.2	23.3	0.9	0.81	0.78	1.04
40	0.0755	0.084	-0.009	30.5	31.7	-1.2	0.76	0.79	0.96
60	0.221	0.24	-0.019	44.8	46.2	-1.4	0.75	0.77	0.97
80	0.600	0.58	0.020	64.7	63.9	0.8	0.81	0.80	1.01
100	1.181	1.11	0.071	84.7	82.5	2.2	0.85	0.83	1.02
120	1.833	1.71	0.123	103	100	3	0.86	0.83	1.04
150	2.516	2.36	0.156	122	118	4	0.81	0.79	1.03
200	4.250	3.99	0.260	174	166	8	0.87	0.83	1.05
250	5.524	5.19	0.334	223	208	15	0.89	0.83	1.07
300	6.455	6.12	0.335	271	253	18	0.90	0.84	1.07

* HVL material is aluminum for tube voltage from 20kV to 30kV and copper for others.

Table 2—6 Comparison of wide series for JAEA qualities and ISO qualities

Tube voltage (kV)	First half-value layer (mm) Cu			Effective energy (keV)			Quality index (QI)		
	JAEA	ISO	JAEA-ISO	JAEA	ISO	JAEA-ISO	JAEA	ISO	JAEA/ISO
60	0.165	0.18	-0.015	40.3	41.6	-1.3	0.67	0.69	0.97
80	0.332	0.35	-0.018	51.9	52.9	-1.0	0.65	0.66	0.98
110	0.975	0.96	0.015	78.2	77.7	0.5	0.71	0.71	1.00
150	1.945	1.86	0.085	107	104	3	0.71	0.69	1.03
200	3.328	3.08	0.248	146	138	8	0.73	0.69	1.06
250	4.494	4.22	0.274	182	173	9	0.73	0.69	1.06
300	5.446	5.20	0.246	220	209	11	0.73	0.70	1.04

Table 2—7 Comparison of high air-kerma series for JAEA qualities and ISO qualities

Tube voltage (kV)	First half-value layer * (mm)			Effective energy (keV)			Quality index (QI)		
	JAEA	ISO	JAEA-ISO	JAEA	ISO	JAEA-ISO	JAEA	ISO	JAEA/ISO
20	0.131	0.12	0.011	11.0	10.7	0.3	0.55	0.54	1.02
30	0.420	0.38	0.040	16.4	15.9	0.5	0.55	0.53	1.04
60	2.484	2.42	0.064	31.0	30.6	0.4	0.52	0.51	1.02
100	0.316	0.30	0.016	51.0	50.0	1.0	0.51	0.50	1.02
200	1.718	1.70	0.018	100	99.7	0.3	0.50	0.50	1.00
250	2.533	2.47	0.063	123	121	2	0.49	0.48	1.02
280	3.534	3.37	0.164	152	147	5	0.54	0.53	1.02
300	3.548	3.40	0.148	152	148	4	0.51	0.49	1.04

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

3. 各線質の X 線エネルギースペクトルの評価

3.1 測定方法

3.1.1 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.3-1 に示すダイア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 1mm φ 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 5mm φ ~ 35mm φ を選択した。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、47.9mm φ × 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.3-2 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。このため、80keV 以上のスペクトル領域では、Fig.3-2 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。

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(3-1)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。

$$\phi(E) = N_c(E) / (S \cdot \eta_E) \quad \text{-----} \quad (3-1)$$

- φ(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
- 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(cm²)

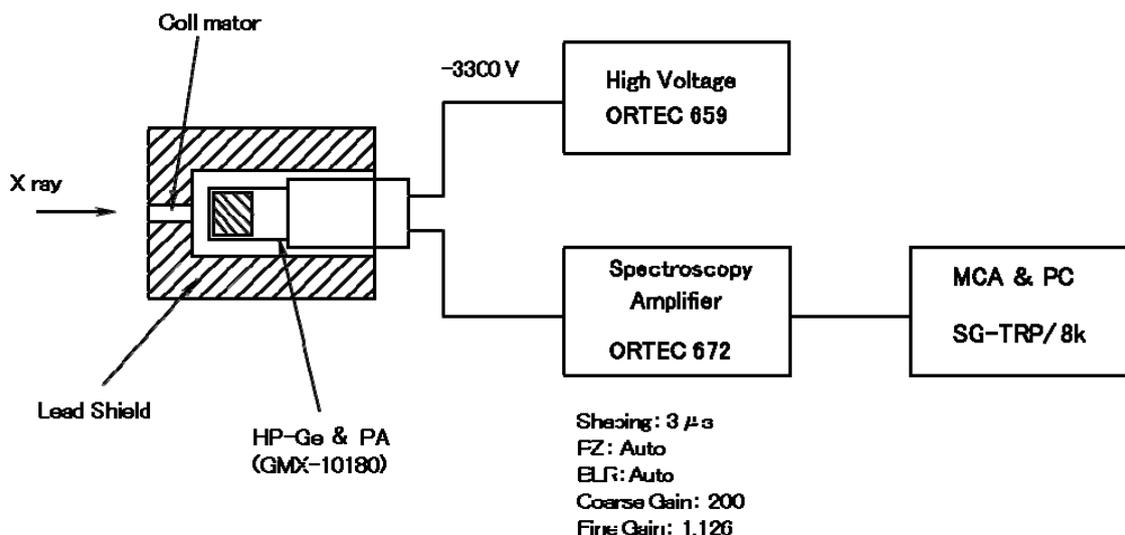


Fig. 3-1 Diagram for the measurements of pulse height spectra

ピーク検出効率($\eta(E)$)の評価は、Fig.3-2 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(核種：Co-57、Ba-133、Cs-137)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(3-2)式~(3-6)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。(3-2)式は 9keV~30keV の Ge-K
 吸収端の変化に対応し、(3-3)式~(3-6)式はコリメータ口径が 5mm ϕ 、10mm ϕ 、20mm ϕ 、35mm
 ϕ 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.3-2 に示す。

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

(9keV~30keV)

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

(コリメータ 5mm ϕ : 81keV~662keV)

$$\eta(E) = \exp(0.1370(\ln E)^3 - 2.404(\ln E)^2 + 12.552(\ln E) - 15.752) / 100 \quad \text{----- (3-4)}$$

(コリメータ 10mm ϕ : 81keV~662keV)

$$\eta(E) = \exp(-0.03623(\ln E)^3 + 0.3777(\ln E)^2 - 1.6588(\ln E) + 7.675) / 100 \quad \text{----- (3-5)}$$

(コリメータ 20mm ϕ : 81keV~662keV)

$$\eta(E) = \exp(0.01603(\ln E)^3 - 0.5321(\ln E)^2 + 3.6516(\ln E) - 2.528) / 100 \quad \text{----- (3-6)}$$

(コリメータ 35mm ϕ : 81keV~662keV)

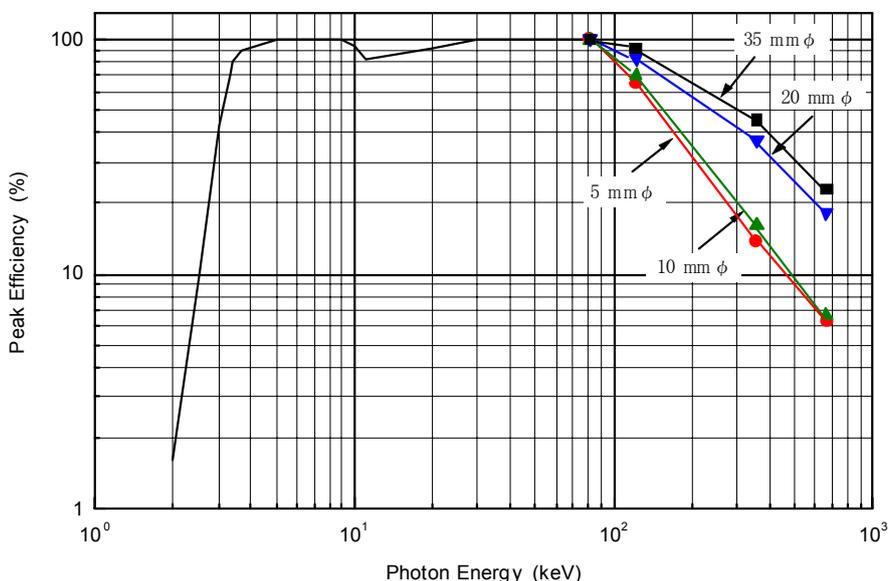


Fig. 3-2 Peak efficiency of the HP-Ge detector (GMX-10180)

3.1.2 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 ICRU47⁹⁾ の各線量に係る換算係数を乗じて求めた。なお、方向性線量当量(H'(0.07)(E))及び個人線量当量(H_p(0.07)(E))スペクトルは、入射角度の表現が必要であるが、本試験は 0° であるので割愛した。また、High air-kerma 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 9)の A.1 式と文献 10)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(3-7)式~(3-11)式に示す。なお、方向性線量当量(H'(0.07)(E))及び個人線量当量(H_p(0.07)(E))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。

$$Ka(E) = \int \phi(E) \cdot C_K(E) dE \quad \text{-----} \quad (3-7)$$

$C_K(E)$: フルエンスから空気カーマへの換算係数 (Gy · cm²)

$$H^*(10)(E) = \int Ka(E) \cdot C_{H^*}(E) dE \quad \text{-----} \quad (3-8)$$

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

$$H'(0.07)(E) = \int Ka(E) \cdot C_H(E) dE \quad \text{-----} \quad (3-9)$$

$C_H(E)$: 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)

$$H_p(10)(E) = \int Ka(E) \cdot C_{p10}(E) dE \quad \text{-----} \quad (3-10)$$

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

$$H_p(0.07)(E) = \int Ka(E) \cdot C_{p0.07}(E) dE \quad \text{-----} \quad (3-11)$$

$C_{p0.07}(E)$: 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(3-12)式~(3-17)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。

$$E_F = \int E \cdot \phi(E) dE / \int \phi(E) dE \quad \text{-----} \quad (3-12)$$

$$E_K = \int E \cdot Ka(E) dE / \int Ka(E) dE \quad \text{-----} \quad (3-13)$$

$$E_{H(10)} = \int E \cdot H^*(10)(E) dE / \int H^*(10)(E) dE \quad \text{-----} \quad (3-14)$$

$$E_{H(0.07)} = \int E \cdot H'(0.07)(E) dE / \int H'(0.07)(E) dE \quad \text{-----} \quad (3-15)$$

$$E_{p(10)} = \int E \cdot H_p(10)(E) dE / \int H_p(10)(E) dE \quad \text{-----} \quad (3-16)$$

$$E_{p(0.07)} = \int E \cdot H_p(0.07)(E) dE / \int H_p(0.07)(E) dE \quad \text{-----} \quad (3-17)$$

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.3-3 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.3-4～Fig.3-6 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(70 μ 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.3-3 に示すように 40keV 以上で 70 μ 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 70 μ m 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.3-4～Fig.3-6 の各シリーズのフルエンススペクトルで 60keV 以下の線質を評価の対象とした。

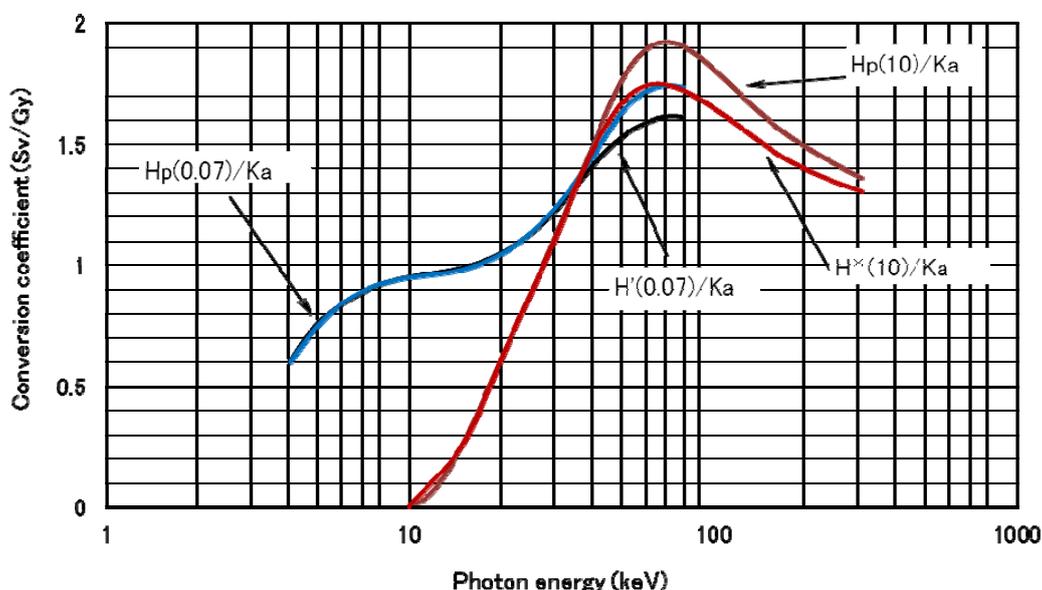


Fig.3-3 Conversion coefficients from air-kerma to various dose equivalents for photons

3.1.3 スペクトル分解能の評価

3.1.1 及び 3.1.2 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((3-12)式～(3-17)式の値)で除したパーセントで表され、(3-18)式で評価した。ただし、スペクトルに特性X線が存在する場合の ΔE は、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。

$$R_E = \frac{\Delta E}{\text{平均エネルギー}} \times 100 \quad \text{-----} \quad (3-18)$$

3.2 結果及び ISO との比較

各シリーズに対応した、標準場のフルエンススペクトル、空気カーマスペクトル及び各線量当量スペクトルの評価結果を Fig.3-4～Fig.3-21 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 3-1～Table 3-3 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のスペクトル分解能を Table3-4～Table 3-5 に示すと共に、今回設定した JAEA 線質と ISO 線質のフルエンス平均エネルギーの比較を Table3-6 に示す。以下にこれらの評価結果及び考察を示す。

- (1) 各シリーズのスペクトルでは、Fig.3-6 に示す High air-kerma シリーズの 20kV 及び 30kV のスペクトルで、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。その他のシリーズを含めた 50keV 以下の領域では特性 X 線が発生していないが、80kV～300kV の一部の線質において、58keV 及び 67keV 付近に 2 本ずつ特性 X 線が発生している。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、1mm ϕ 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.3-2 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 以上の各スペクトルでは、W 焦点から発生する K 軌道特性 X 線が寄与しないエネルギー領域において特性 X 線は発生しておらず、きれいなスペクトルを示した。
- (2) 実効エネルギー E_{eff} と各スペクトルから求めた平均エネルギーの比較(Table 3-1～Table 3-3 参照)に関する考察を以下に示す。
 - ① 実効エネルギーとフルエンス平均エネルギーの比較(E_{eff}/E_F)では、Narrow シリーズ及び Wide シリーズの 20kV～150kV の線質と High air-kerma シリーズの 200kV～300kV の線質が 0.94～1.06 と $\pm 6\%$ で両者がほぼ同じ値を示したが、Narrow シリーズ及び Wide シリーズの 200kV～300kV の線質と High air-kerma シリーズの 20kV～100kV の線質が 1.07～1.10 と 0.76～0.88 のように変化した。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こと及び単色エネルギーに見立てていることから、ろ過効果が大きい 60kV 以下の線質ではフルエンスエネルギーが高い値を示し、100kV 以上の線質でフルエンスエネルギーが小さい傾向を示した。
 - ② 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、Narrow シリーズの 200kV 以下の線質で $-2\% \sim +5\%$ 、Wide シリーズの全ての線質で $-2\% \sim +4\%$ と近い値を示したが、Narrow シリーズの 250kV 以上及び High air-kerma シリーズの全ての線質で $+6\% \sim +8\%$ 及び $-17\% \sim -7\%$ と違いが大きくなった。この傾向は、フルエンス平均エネルギーとの

比較とほぼ同様の結果となった。また、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も、ほぼ同様の結果となった。

- ③ 実効エネルギーと方向性線量当量 $H'(0.07)$ 及び個人線量当量 $H_p(0.07)$ の平均エネルギーの比較では、Narrow シリーズと Wide シリーズの全ての線質 $\pm 3\%$ とよく一致したが、High air-kerma シリーズの全ての線質で $-17\% \sim -10\%$ の違いが生じた。High air-kerma シリーズの違いが大きい理由は、上記の①で示す半価層フィルタのろ過効果の影響が大きく寄与したと考えられる。
- (3) 各スペクトルのスペクトル分解能は、Table3-4 及び Table3-5 に示すように、Narrow シリーズでは全ての線質で、フルエンスが $0.27 \sim 0.40$ 、空気カーマが $0.26 \sim 0.46$ 、周辺線量当量が $0.26 \sim 0.42$ 、個人線量当量 $H_p(10)$ が $0.26 \sim 0.42$ で、平均値に対して $-20\% \sim +30\%$ に変化し、方向性線量当量の $0.34 \sim 0.44$ と個人線量当量 $H_p(0.07)$ の $0.34 \sim 0.44$ 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 $0.53 \sim 0.59$ 、空気カーマが $0.52 \sim 0.64$ 、周辺線量当量が $0.52 \sim 0.60$ 、個人線量当量 $H_p(10)$ が $0.52 \sim 0.59$ で、平均値に対して 10% 程度変化した。

High air-kerma シリーズでは、フルエンスが $0.53 \sim 0.93$ 、空気カーマが $0.59 \sim 1.01$ 、周辺線量当量が $0.69 \sim 1.00$ 、個人線量当量 $H_p(10)$ が $0.70 \sim 1.00$ 、方向性線量当量が $0.54 \sim 0.68$ 、個人線量当量 $H_p(0.07)$ が $0.60 \sim 0.69$ 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 $90\% \sim 100\%$ に達した。従って、本シリーズの 200kV 以上の線質は、スペクトル幅が極端に広いので、高線量率の照射には適するが、測定器のエネルギー特性試験には不適當である。

上述のシリーズ毎の6種類の線量単位のスペクトル分解能の平均値で表すと、Narrow シリーズが 34% 、Wide シリーズが 56% 、High air-kerma シリーズが 75% となり、Narrow シリーズに対する相対比で表すと、Wide シリーズが 1.6 倍、High air-kerma シリーズが 2.2 倍に増加した。この結果は、文献2)で報告された旧X線管球の評価値とほぼ同様となった。ISO の各線質のフルエンススペクトルに対する分解能は、付録Aより Narrow シリーズで $0.27 \sim 0.37$ 、Wide シリーズで $0.48 \sim 0.57$ であり、上記の JAEA 線質と比較すると両者は良く一致した。

- (4) ISO 線質のフルエンス平均エネルギーとの比較では、JAEA 線質が Narrow シリーズで $16.5\text{keV} \sim 248\text{keV}$ 、Wide シリーズで $43.1\text{keV} \sim 200\text{keV}$ 、High air-kerma シリーズで $14.4\text{keV} \sim 146\text{keV}$ であった。ISO のフルエンス平均エネルギーは、付録Aより、Narrow シリーズが $16\text{keV} \sim 250\text{keV}$ 、Wide シリーズが $45\text{keV} \sim 208\text{keV}$ 、High air-kerma シリーズが $12.9\text{keV} \sim 147\text{keV}$ である。両者の値は、Table3-6 に示すように 27 線質のうち 25 の線質が $\pm 3 \text{ keV}$ で一致した。大きな違いが生じたのは、Wide シリーズの 250kV 、 300kV の 2 線質だけであった。 40kV 以下の線質での $1\text{keV} \sim 2\text{keV}$ 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、ろ過作用が変化したからである。この固有フィルタは、JAEA で 3mm の Be と 0.3mm の Al が付加されているのに対し、ISO は 1mm の Be である。この固有フィルタの違いをアルミニウムの等価厚さに換算すると、JAEA が 2.4mm 、ISO が 0.7mm に相当し、基礎フィルタを同じ厚さにしているため、低エネルギー領域においてこの固有フィルタの違いが平均エネルギーに影響し、JAEA の方が 1keV 程度高くなった。このため、校正機関どうしで標準場の線量率の相互比較を行う場合は、この領域で影響が発生するため、管球の固有フィルタの厚さが同じこ

とを確認して実施することが重要である。なお、この JAEA 線質のフルエンス平均エネルギーは、標準場の指標として、Table2-2～Table2-4 に示した。

以上の結果から、評価した X 線エネルギースペクトルの平均エネルギーの比較では、周辺線量当量 $H^*(10)$ と個人線量当量 $H_p(10)$ が全線質について良く一致し、方向性線量当量 $H'(0.07)$ 、個人線量当量 $H_p(0.07)$ とこの線質に対応する空気カーマの 3 種類の平均エネルギーも全線質において良く一致した。また、各シリーズの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。さらに、スペクトル分解能は、各シリーズで変化が大きく、線質の統一性が取れていないことが明らかになった。JAEA 線質と ISO 線質のフルエンス平均エネルギーの比較では、管球の固有フィルタの違いがあるものの、ほとんどの線質で $\pm 3\text{keV}$ とよく一致した。

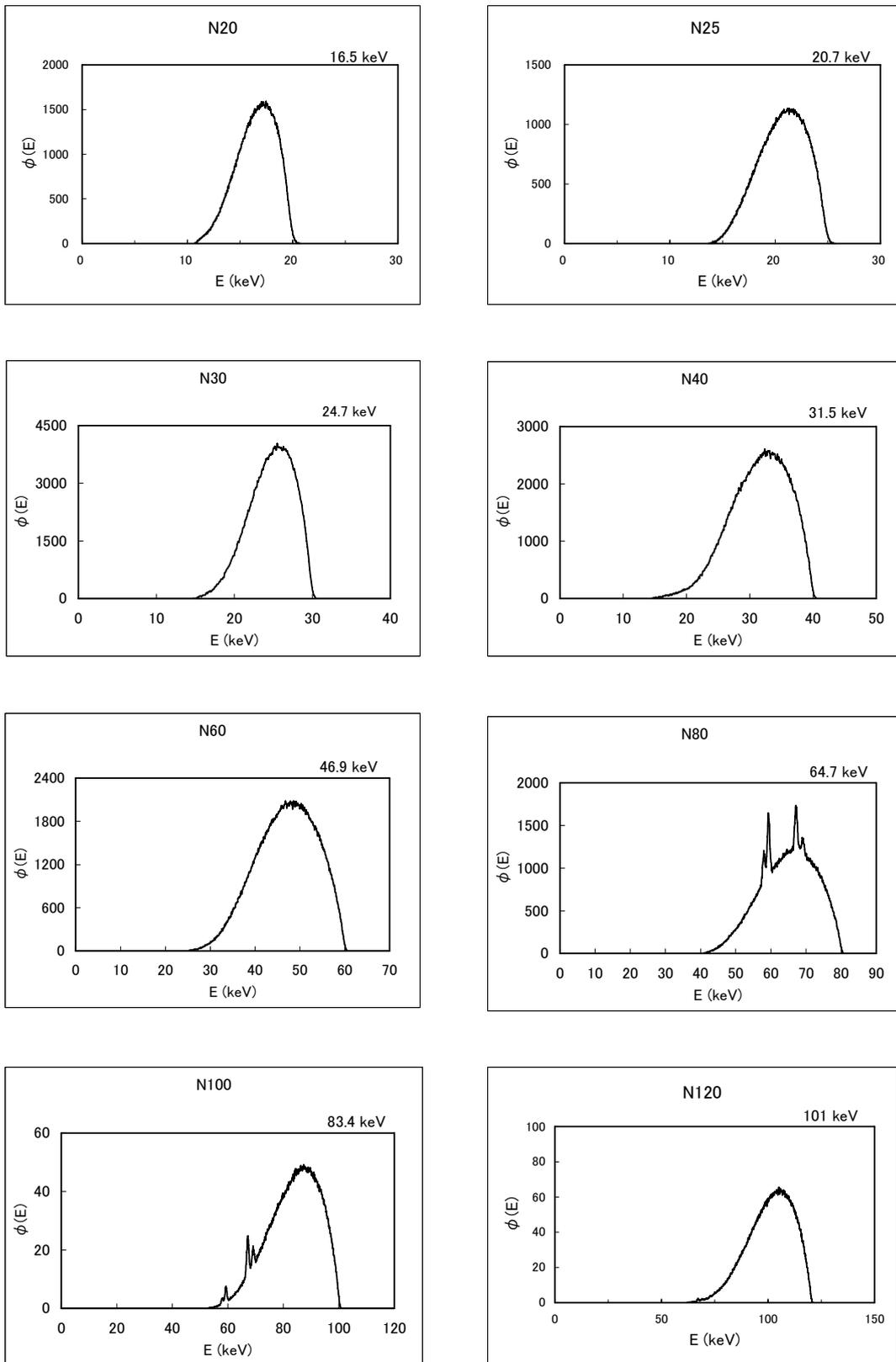


Fig.3–4 Fluence spectra of JAEA narrow series

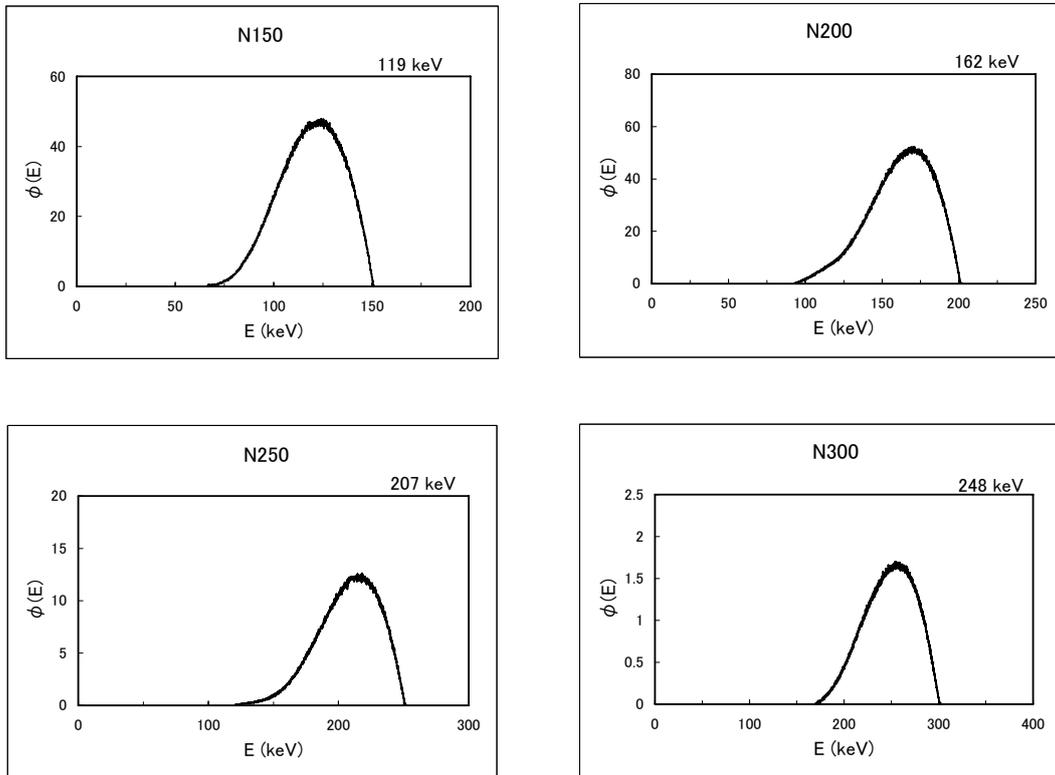


Fig.3-4 Continued

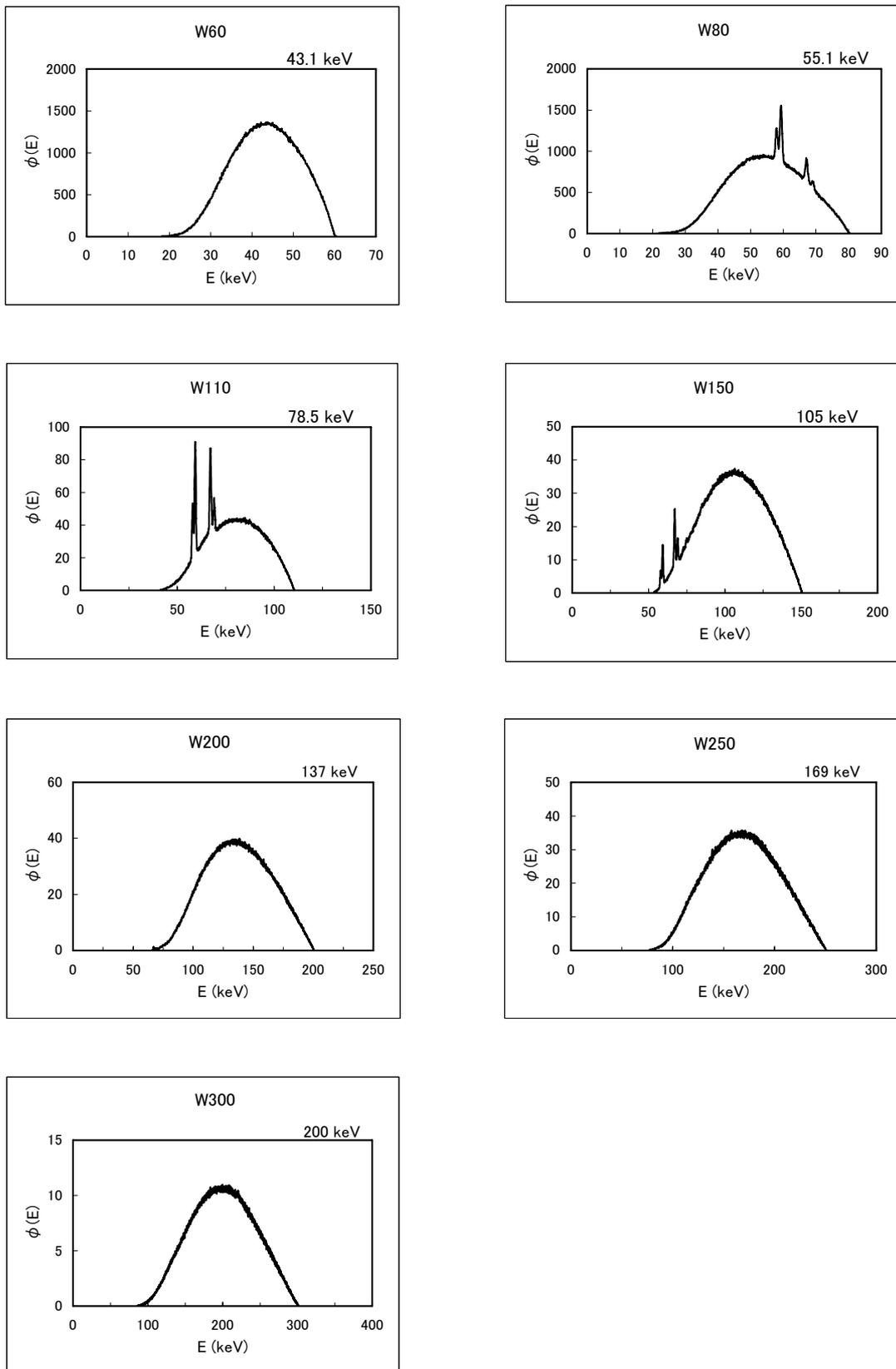


Fig.3— 5 Fluence spectra of JAEA wide series

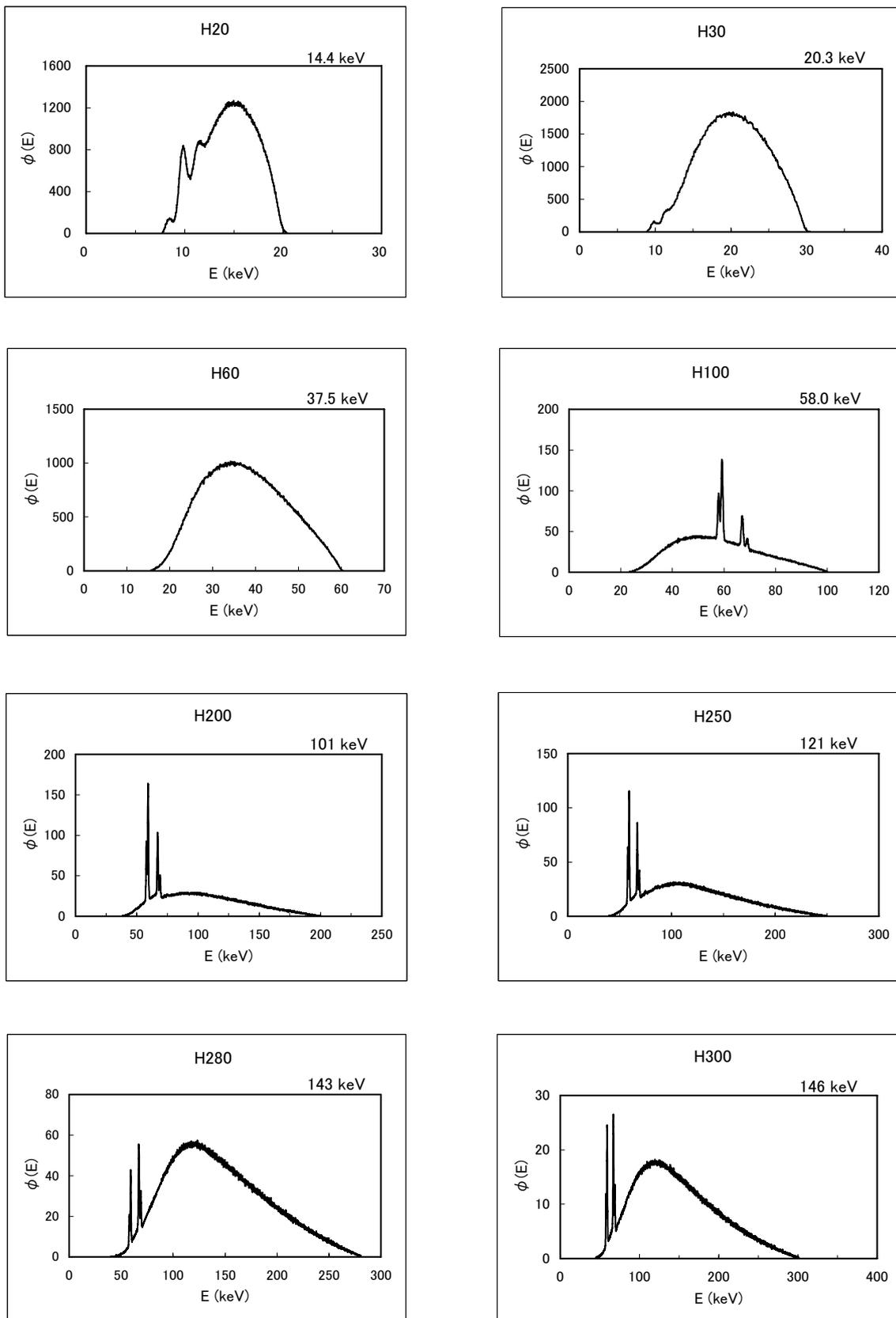


Fig.3– 6 Fluence spectra of JAEA high air-kerma series

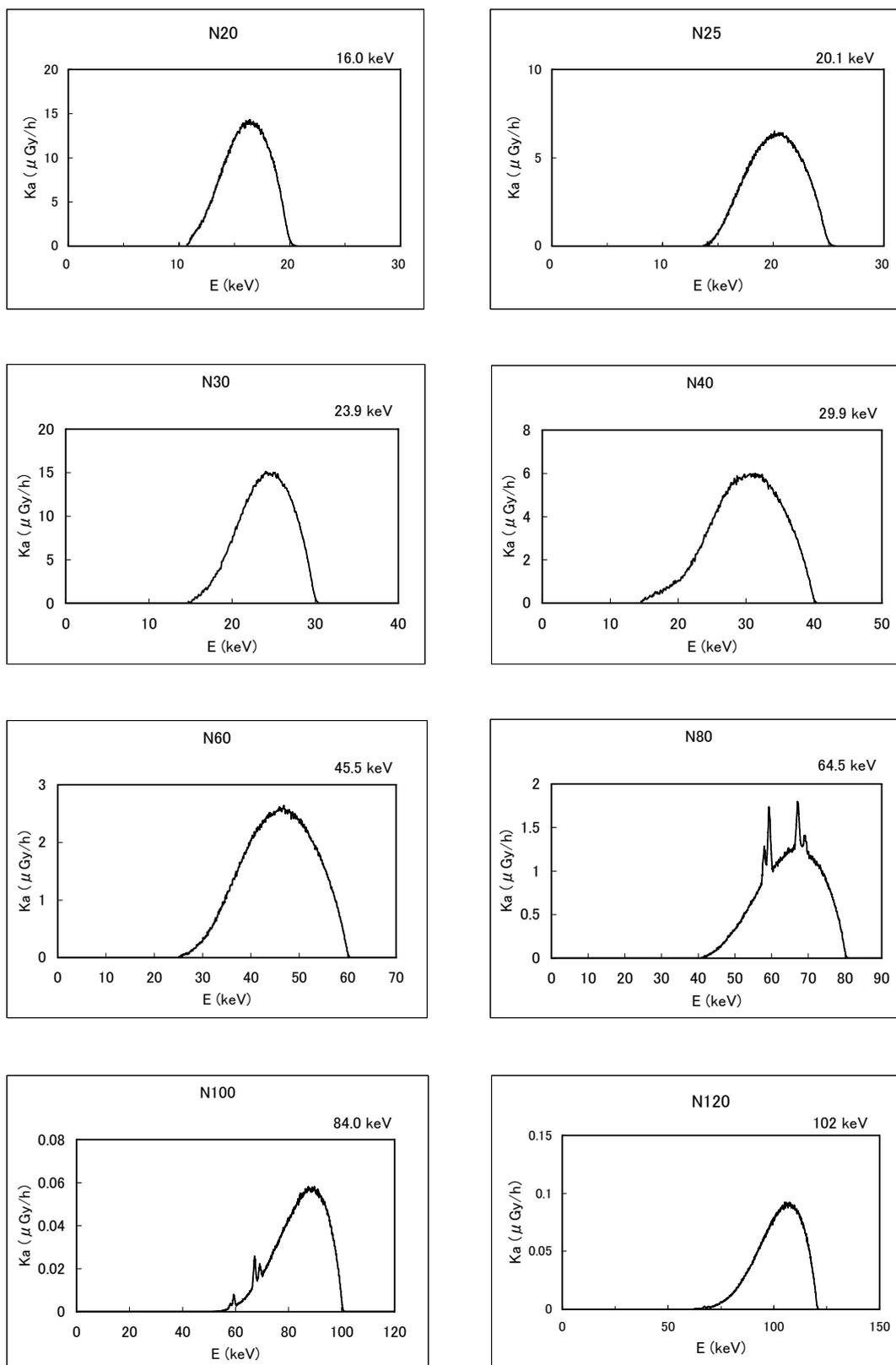


Fig.3-7 Air-kerma spectra of JAEA narrow series

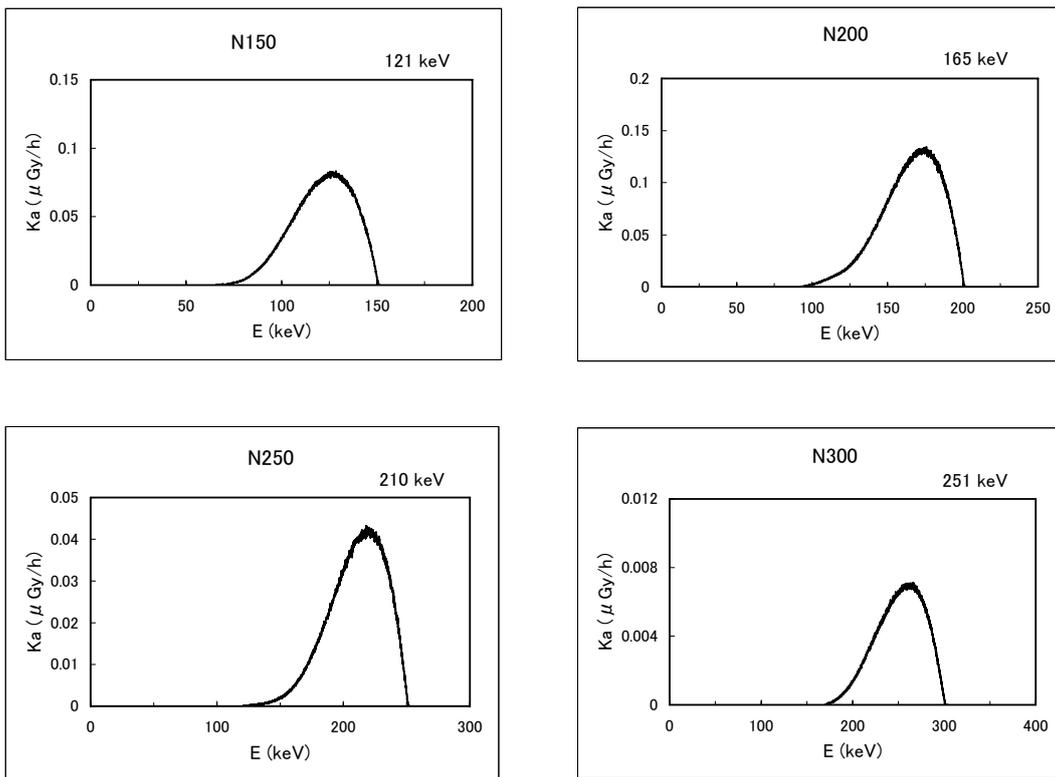


Fig.3 – 7 Continued

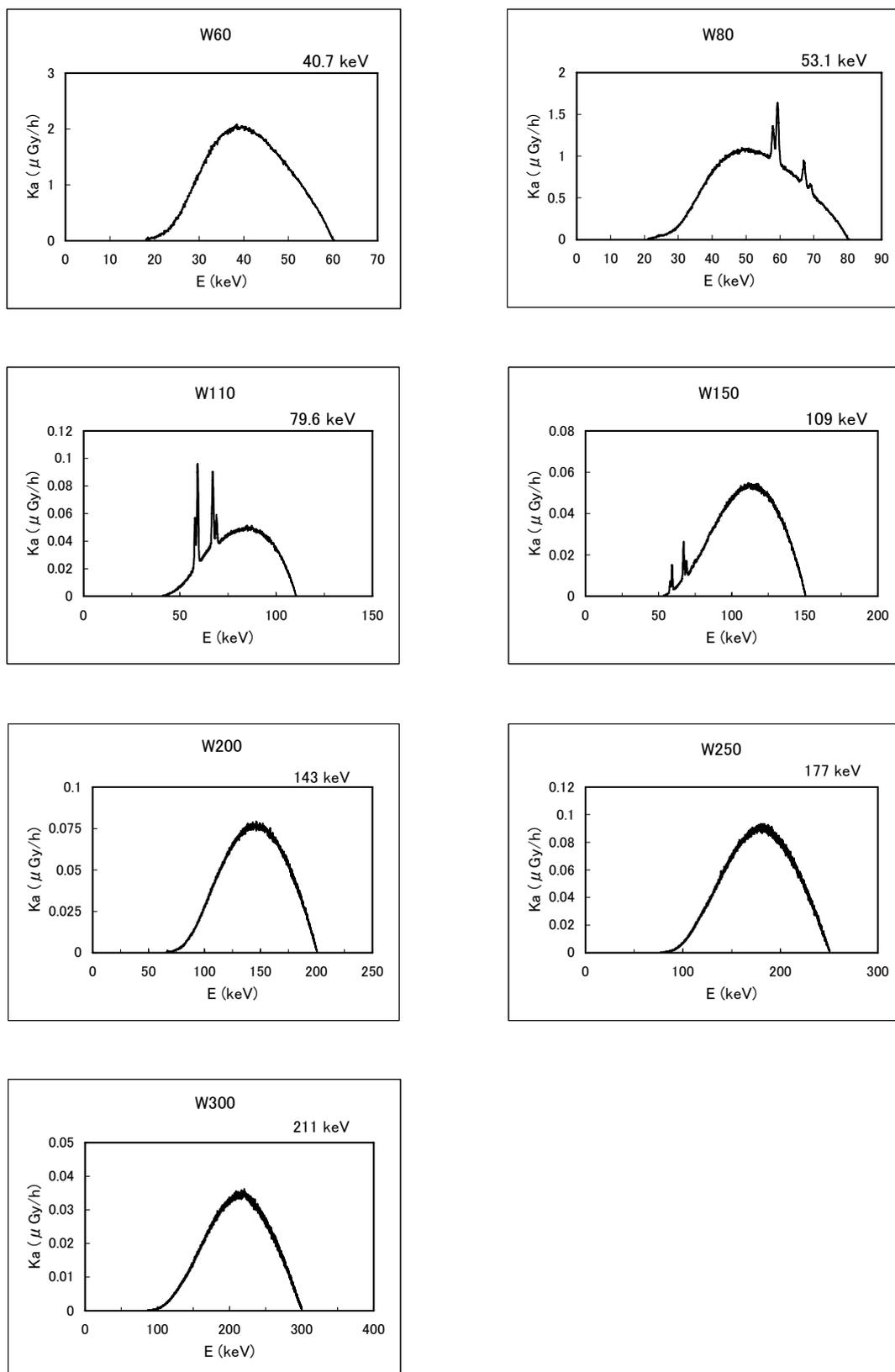


Fig.3– 8 Air-kerma spectra of JAEA wide series

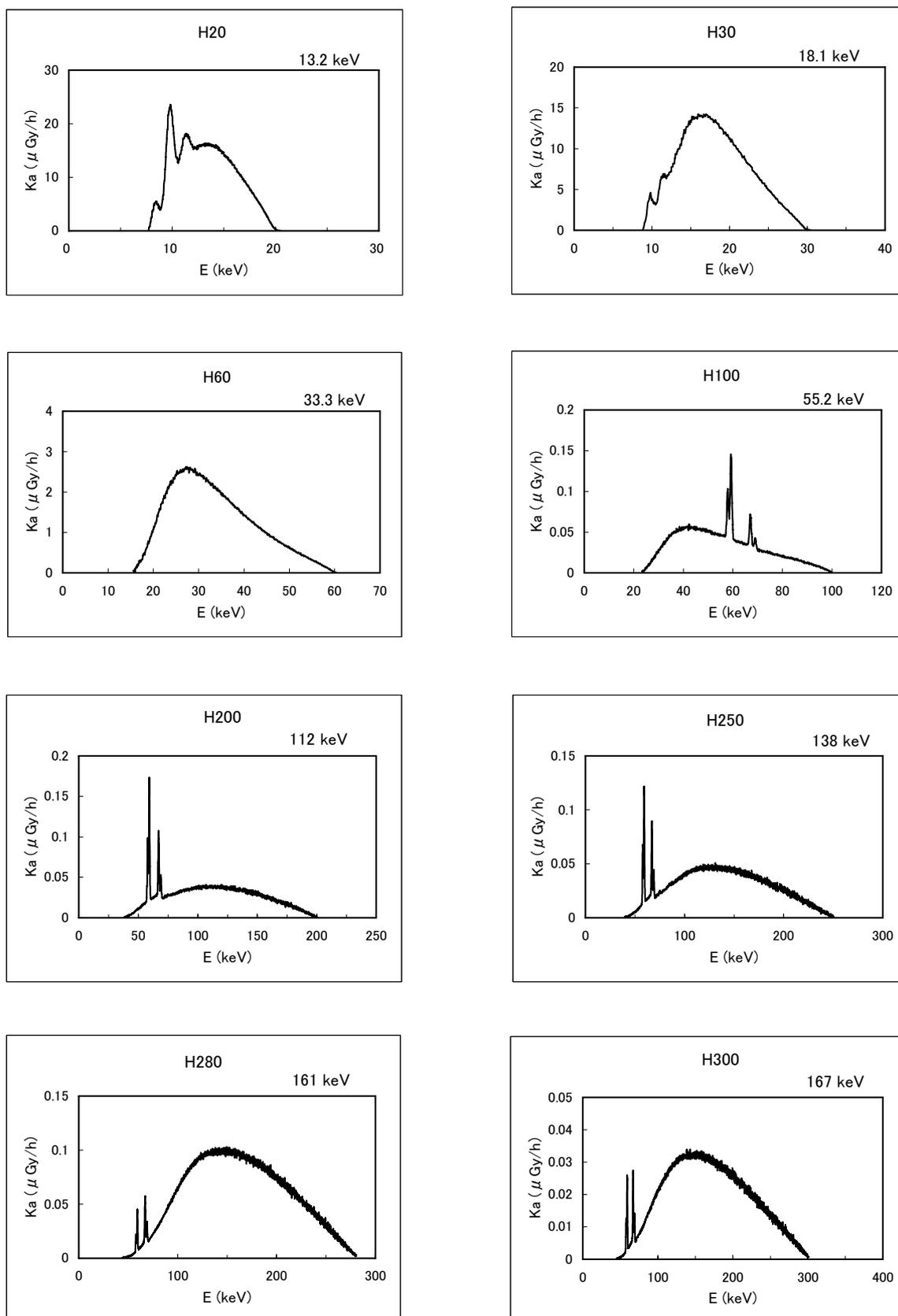


Fig.3-9 Air-kerma spectra of JAEA high air-kerma series

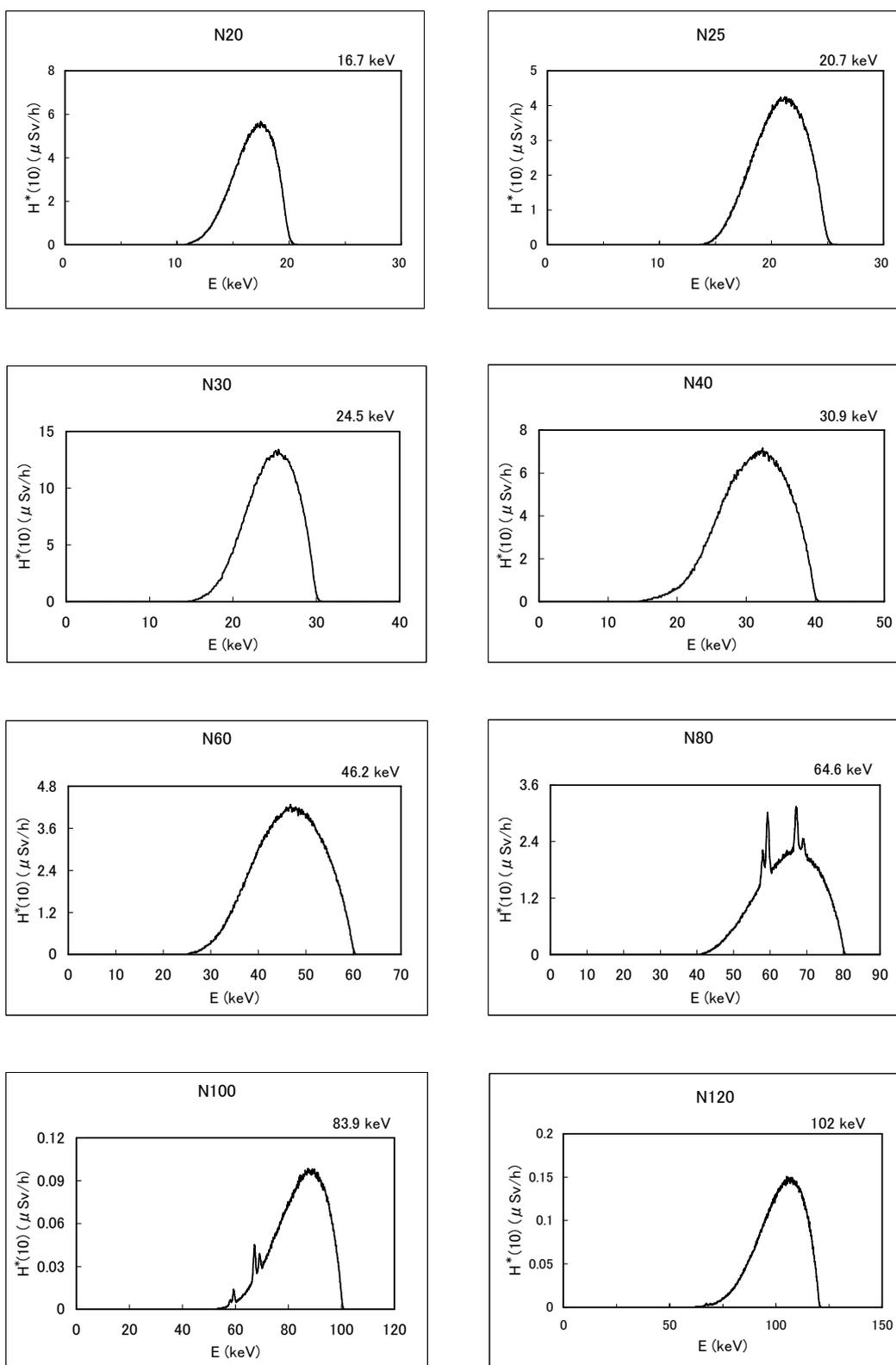


Fig.3— 10 Ambient dose equivalent spectra of JAEA narrow series ($H^*(10)$)

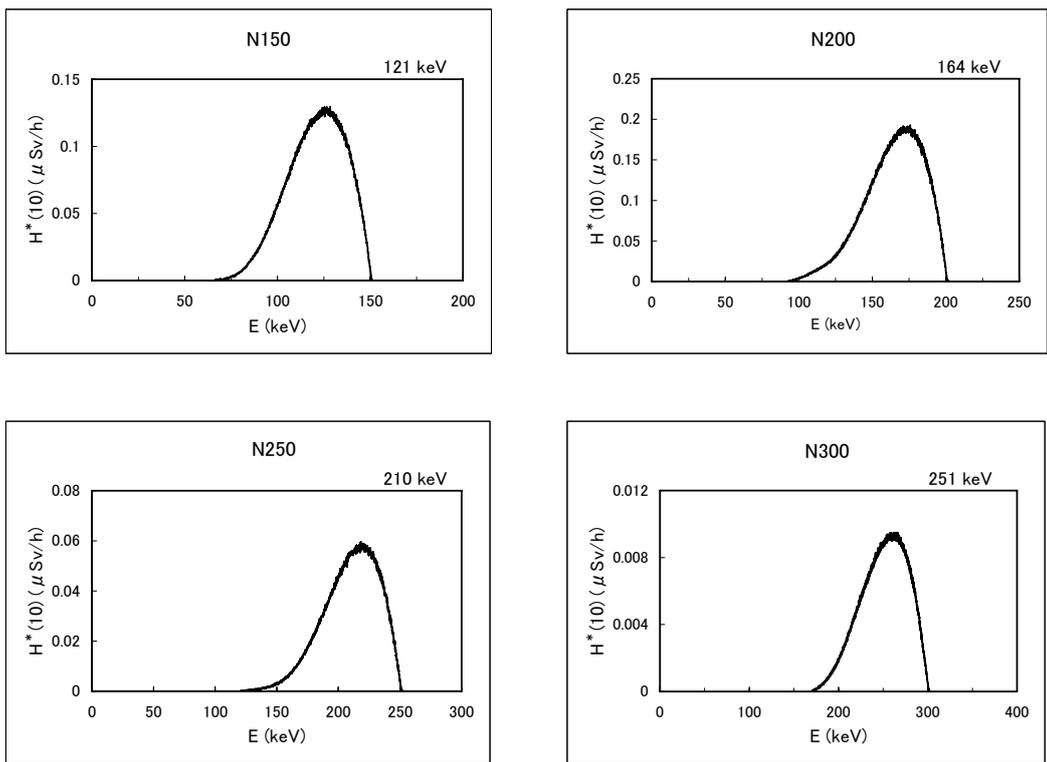


Fig.3 – 10 Continued

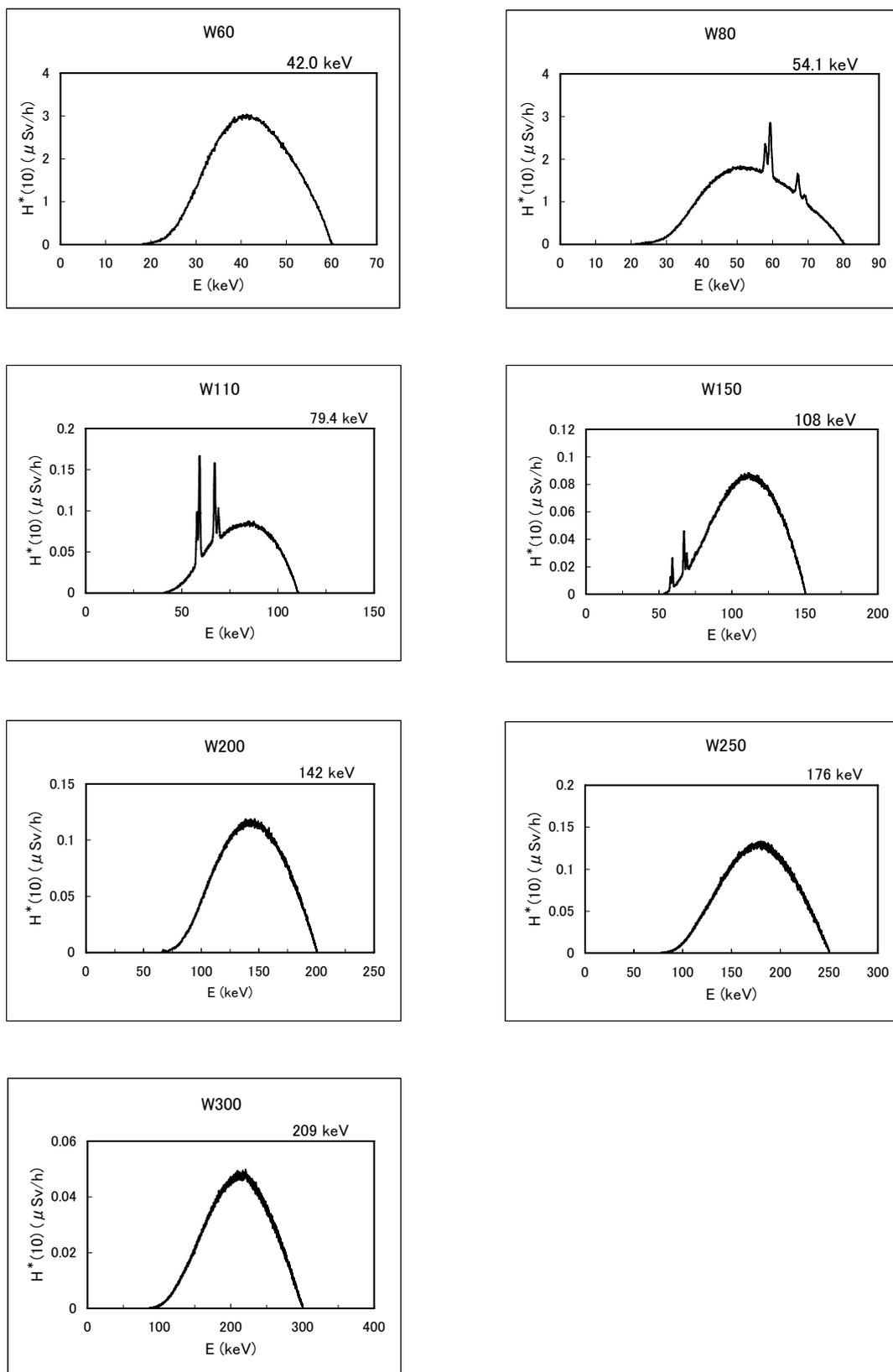


Fig.3– 11 Ambient dose equivalent spectra of JAEA wide series ($H^*(10)$)

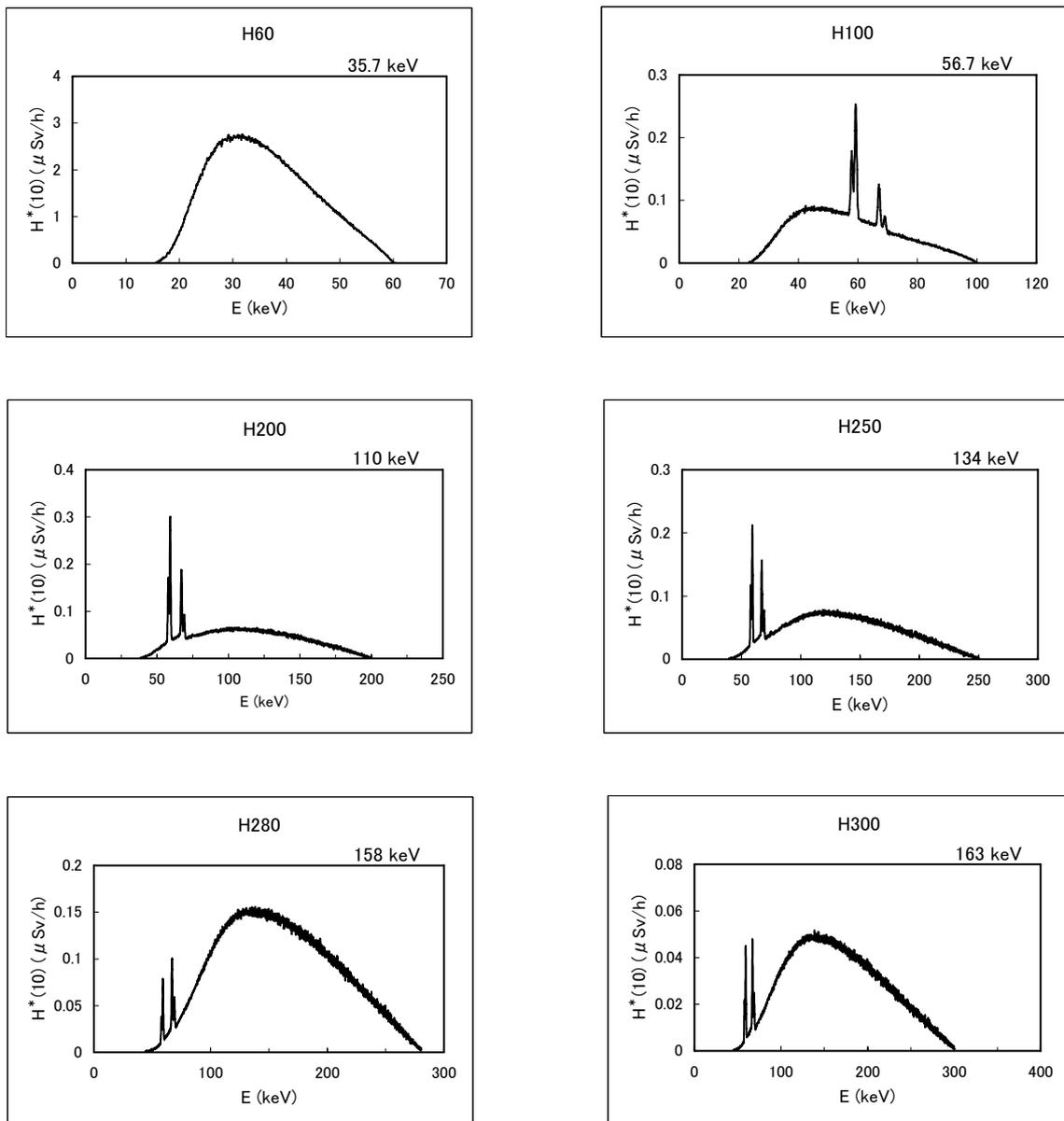


Fig.3– 12 Ambient dose equivalent spectra of JAEA high air-kerma series ($H^*(10)$)

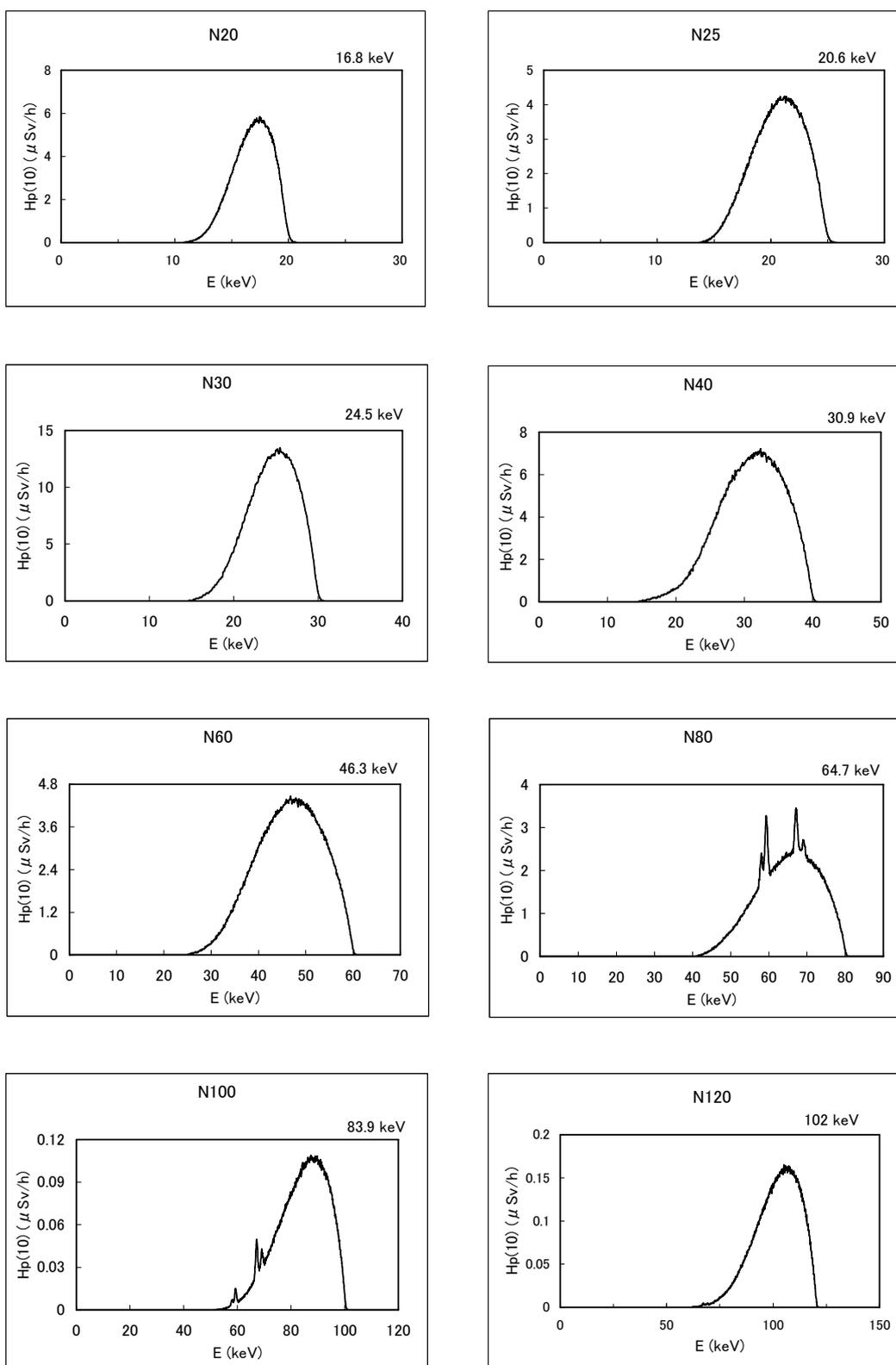


Fig.3— 13 Personal dose equivalent spectra for strongly penetrating radiation of JAEA narrow series ($H_{p(10)}$)

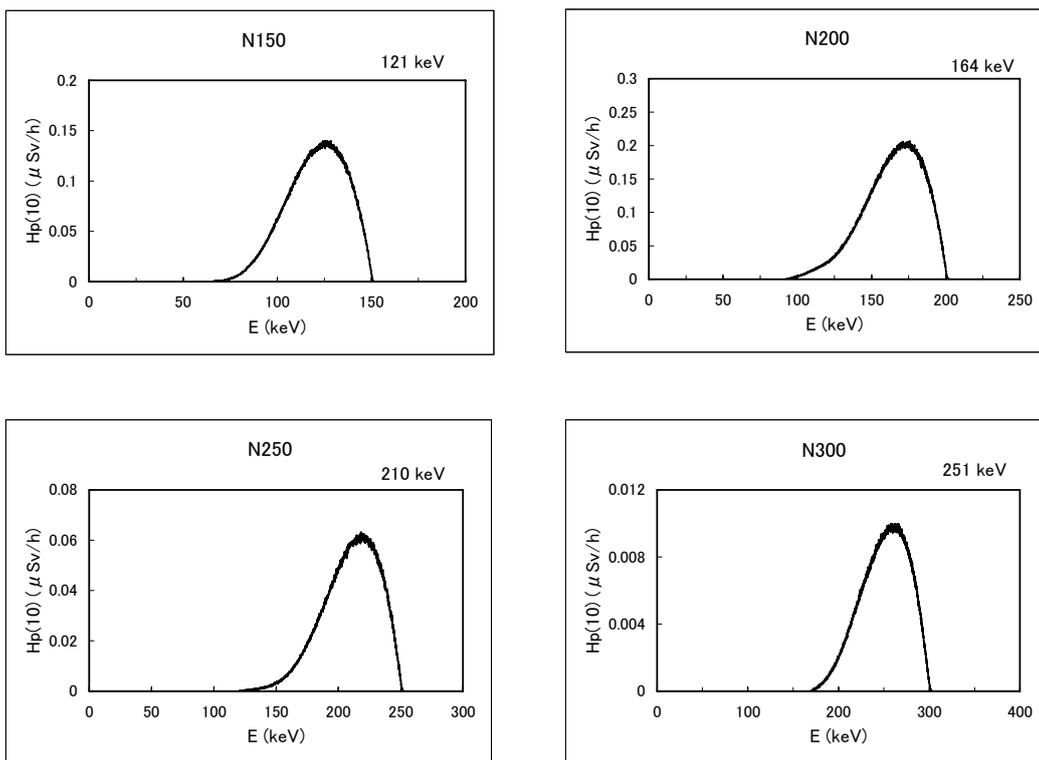


Fig.3 – 13 Countinued

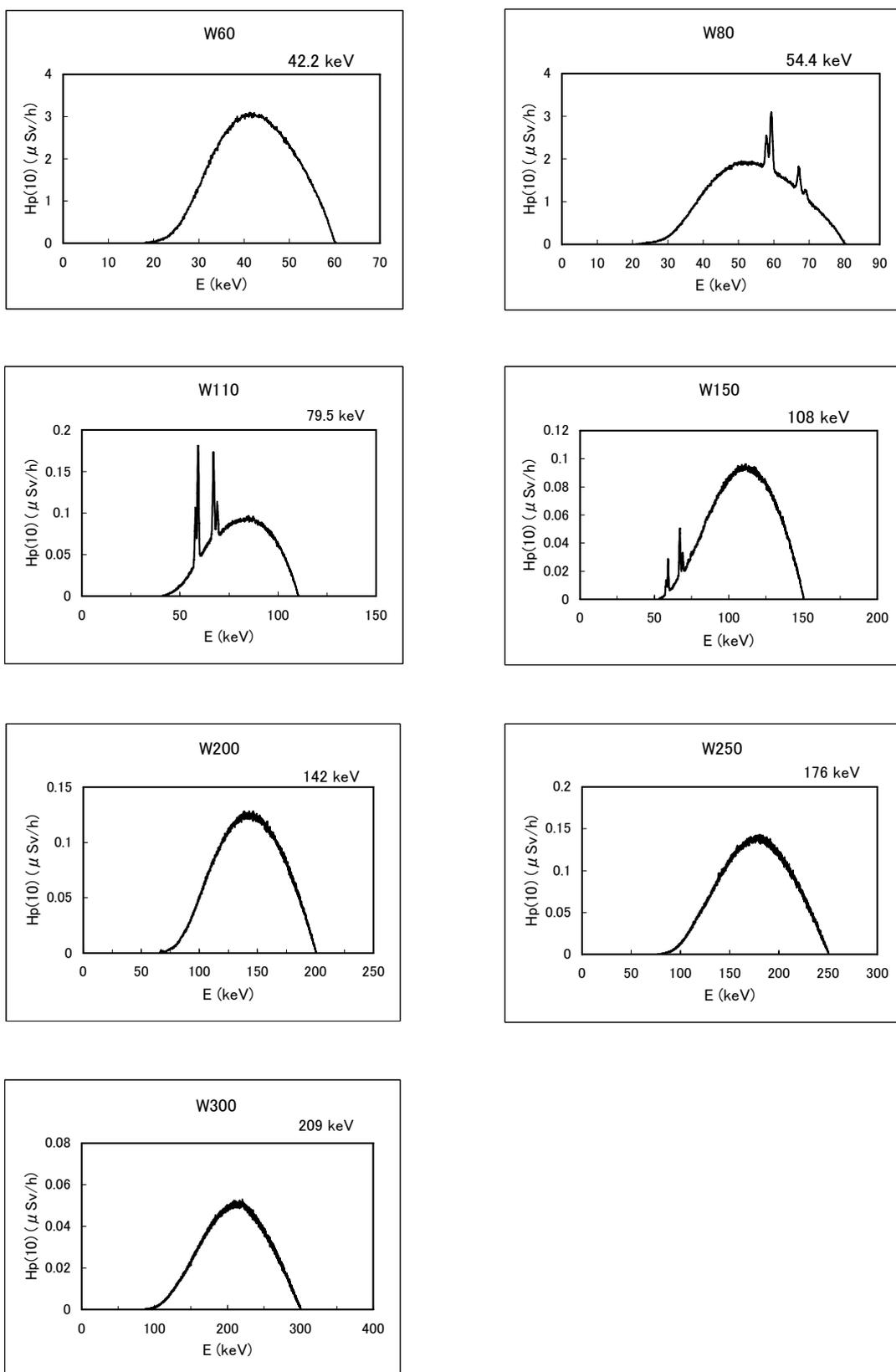


Fig.3— 14 Personal dose equivalent spectra for strongly penetrating radiation of JAEA wide series ($H_{p(10)}$)

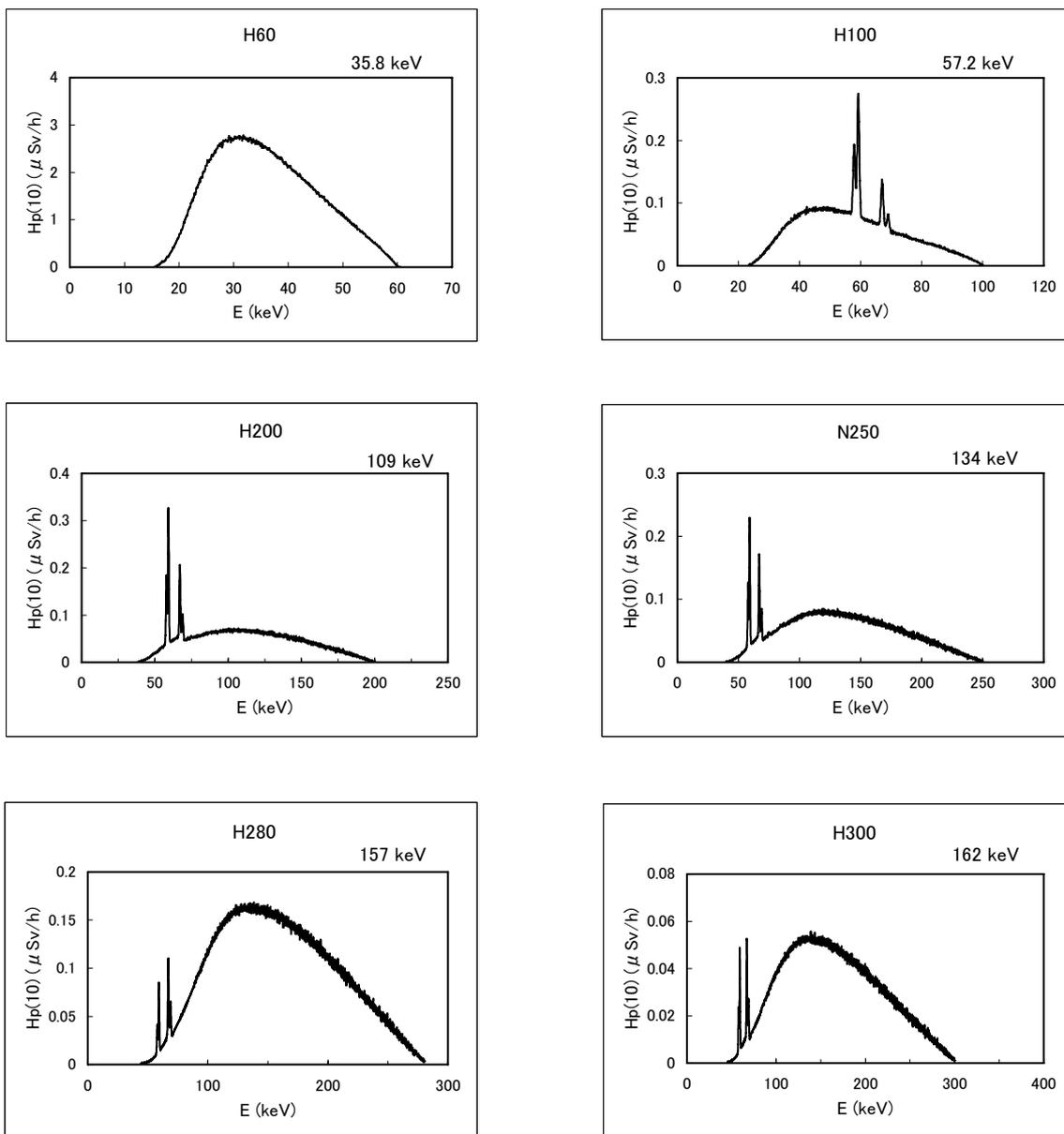


Fig.3– 15 Personal dose equivalent spectra for strongly penetrating radiation of JAEA high air-kerma series ($H_{p(10)}$)

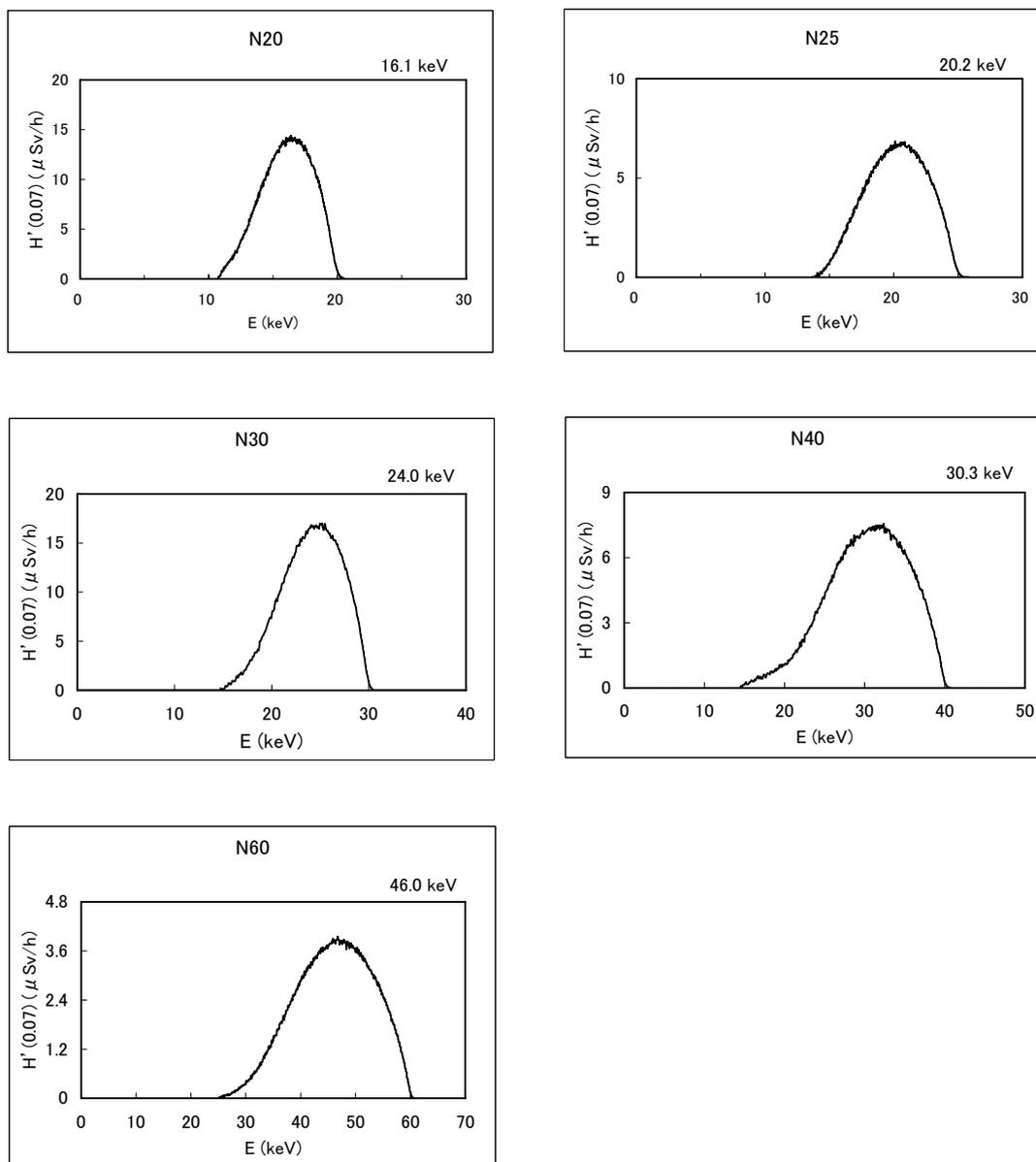


Fig.3— 16 Directional dose equivalent spectra of JAEA narrow series ($H'(0.07)$)

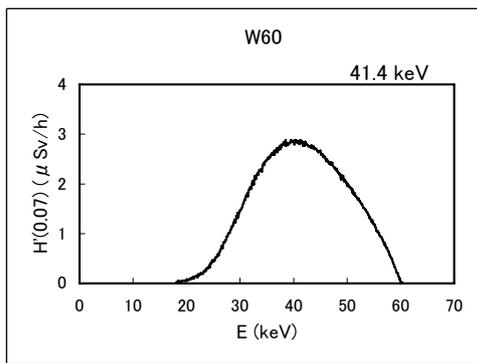


Fig.3– 17 Directional dose equivalent spectra of JAEA wide series ($H'(0.07)$)

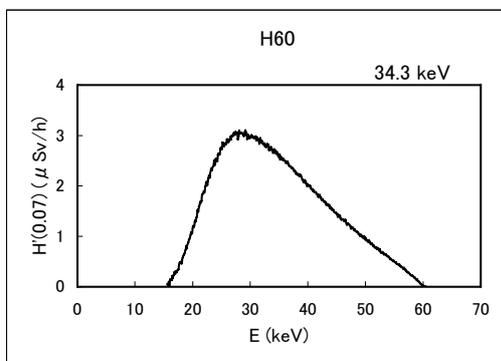
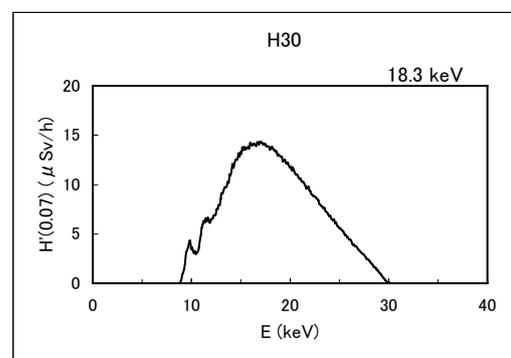
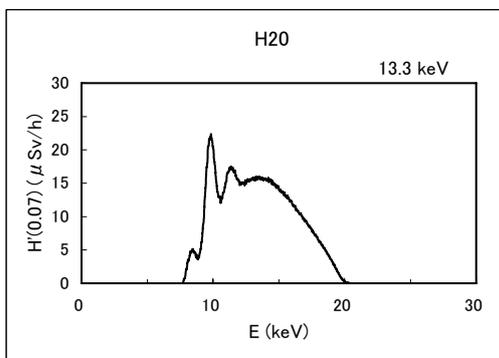


Fig.3– 18 Directional dose equivalent spectra of JAEA high air-kerma series ($H'(0.07)$)

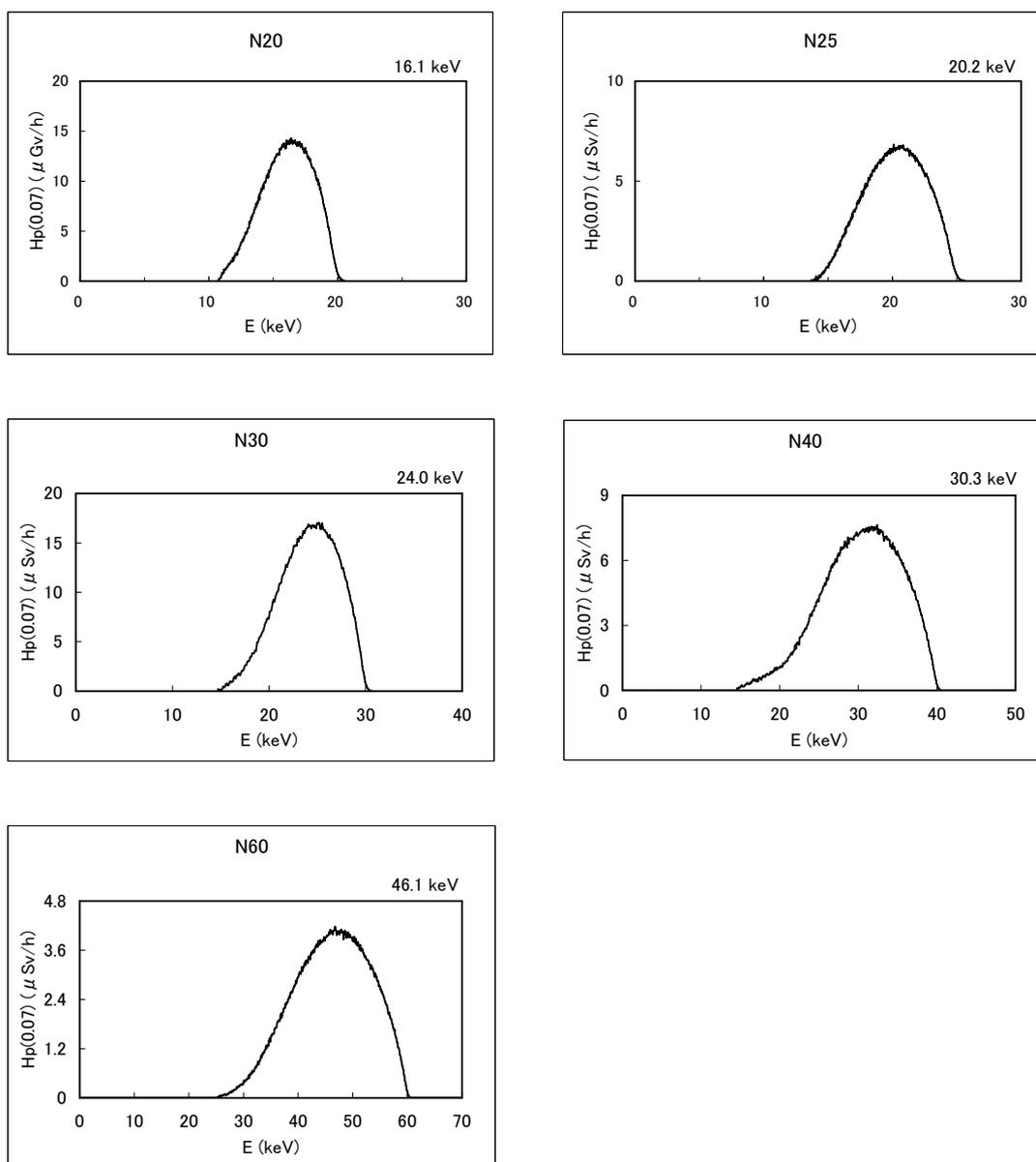


Fig.3— 19 Personal dose equivalent spectra for weakly penetrating radiation of JAEA narrow series ($H_{p(0.07)}$)

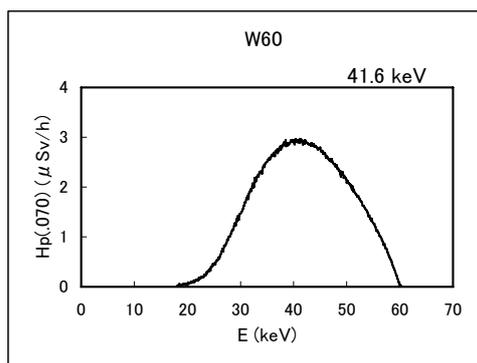


Fig.3– 20 Personal dose equivalent spectra for weakly penetrating radiation of JAEA wide series ($H_{p(0.07)}$)

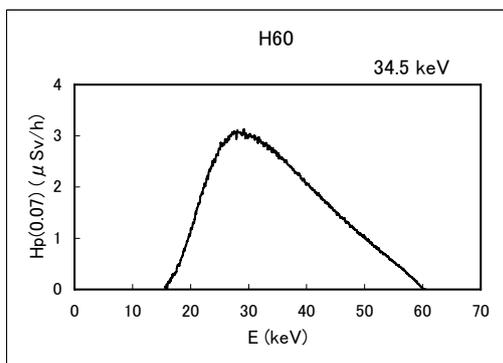
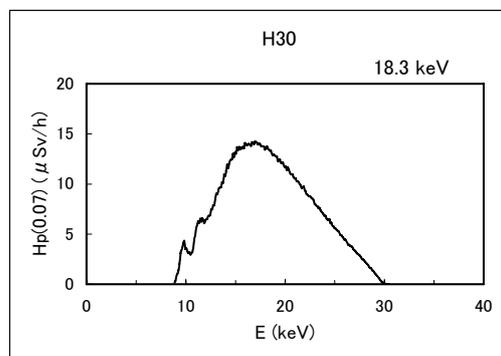
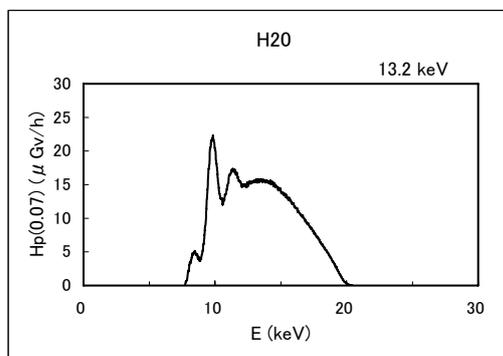


Fig.3– 21 Personal dose equivalent spectra for weakly penetrating radiation of JAEA high air-kerma series ($H_{p(0.07)}$)

Table 3—1 Relationship between effective energy and mean energy for JAEA narrow 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	$E_{H(10)}$	$E_{H(0.07)}$	$E_{p(10)}$	$E_{p(0.07)}$	$\frac{E_{eff}}{E_F}$	$\frac{E_{eff}}{E_K}$	$\frac{E_{eff}}{E_{H(10)}}$	$\frac{E_{eff}}{E_{H(0.07)}}$	$\frac{E_{eff}}{E_{p(10)}}$	$\frac{E_{eff}}{E_{p(0.07)}}$
	20	15.8	16.5	16.0	16.7	16.1	16.8	16.1	0.96	0.99	0.95	0.98	0.94
25	19.7	20.7	20.1	20.7	20.2	20.6	20.2	0.95	0.98	0.95	0.98	0.96	0.98
30	24.2	24.7	23.9	24.5	24.0	24.5	24.0	0.98	1.01	0.99	1.01	0.99	1.01
40	30.5	31.5	29.9	30.9	30.3	30.9	30.3	0.97	1.02	0.99	1.01	0.99	1.01
60	44.8	46.9	45.5	46.2	46.0	46.3	46.1	0.96	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97
80	64.7	64.7	64.5	64.6		64.7		1.00	1.00	1.00		1.00	
100	84.7	83.4	84.0	83.9		83.9		1.02	1.01	1.01		1.01	
120	103	101	102	102		102		1.02	1.01	1.01		1.01	
150	122	119	121	121		121		1.03	1.01	1.01		1.01	
200	174	162	165	164		164		1.07	1.05	1.06		1.06	
250	223	207	210	210		210		1.08	1.06	1.06		1.06	
300	271	248	251	251		251		1.09	1.08	1.08		1.08	

Table 3—2 Relationship between effective energy and mean energy for JAEA wide 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	$E_{H(10)}$	$E_{H(0.07)}$	$E_{p(10)}$	$E_{p(0.07)}$	$\frac{E_{eff}}{E_F}$	$\frac{E_{eff}}{E_K}$	$\frac{E_{eff}}{E_{H(10)}}$	$\frac{E_{eff}}{E_{H(0.07)}}$	$\frac{E_{eff}}{E_{p(10)}}$	$\frac{E_{eff}}{E_{p(0.07)}}$
	60	40.3	43.1	40.7	42.0	41.4	42.2	41.6	0.94	0.99	0.96	0.97	0.95
80	51.9	55.1	53.1	54.1		54.4		0.94	0.98	0.96		0.95	
110	78.2	78.5	79.6	79.4		79.5		1.00	0.98	0.98		0.98	
150	107	105	109	108		108		1.02	0.98	0.99		0.99	
200	146	137	143	142		142		1.07	1.02	1.03		1.03	
250	182	169	177	176		176		1.08	1.03	1.03		1.03	
300	220	200	211	209		209		1.10	1.04	1.05		1.05	

Table 3—3 Relationship between effective energy and mean energy for JAEA high air-kerma 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	$E_{H(10)}$	$E_{H(0.07)}$	$E_{p(10)}$	$E_{p(0.07)}$	$\frac{E_{eff}}{E_F}$	$\frac{E_{eff}}{E_K}$	$\frac{E_{eff}}{E_{H(10)}}$	$\frac{E_{eff}}{E_{H(0.07)}}$	$\frac{E_{eff}}{E_{p(10)}}$	$\frac{E_{eff}}{E_{p(0.07)}}$
	20	11.0	14.4	13.2		13.3		13.2	0.76	0.83		0.83	
30	16.4	20.3	18.1		18.3		18.3	0.81	0.91		0.90		0.90
60	31.0	37.5	33.3	35.7	34.3	35.8	34.5	0.83	0.93	0.87	0.90	0.87	0.90
100	51.0	58.0	55.2	56.7		57.2		0.88	0.92	0.90		0.89	
200	100	101	112	110		109		0.99	0.89	0.91		0.92	
250	123	121	138	134		134		1.02	0.89	0.92		0.92	
280	152	143	161	158		157		1.06	0.94	0.96		0.97	
300	152	146	167	163		162		1.04	0.91	0.93		0.94	

Table 3—4 Resolution of each energy spectra for narrow series and wide series

Tube Voltage (kV)	Resolution (%)											
	Narrow series						Wide 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	30	34	27	34	27	34	—	—	—	—	—	—
25	31	34	30	34	30	34	—	—	—	—	—	—
30	31	36	32	35	32	35	—	—	—	—	—	—
40	39	46	41	44	41	44	—	—	—	—	—	—
60	40	44	42	43	42	43	53	59	55	57	55	57
80	33	35	35	—	35	—	57	64	60	—	59	—
100	29	28	28	—	28	—	—	—	—	—	—	—
110	—	—	—	—	—	—	58	54	54	—	54	—
120	27	26	26	—	26	—	—	—	—	—	—	—
150	37	34	35	—	35	—	55	51	52	—	52	—
200	32	30	30	—	30	—	56	53	54	—	53	—
250	29	26	27	—	27	—	57	52	54	—	53	—
300	30	28	28	—	28	—	59	53	54	—	55	—
Average	32±4	33±7	32±5	38±5	32±5	38±5	56±2	55±5	55±3	57	54±2	57

Table 3—5 Resolution of each energy spectra for high air-kerma series

Tube Voltage (kV)	Resolution (%)					
	High air-kerma series					
	Fluence	Ka	H* (10)	H' (0.07)	Hp(10)	Hp(0.07)
20	53	59	—	54	—	60
30	63	61	—	59	—	62
60	72	62	69	68	70	69
100	72	72	74	—	74	—
200	93	101	100	—	100	—
250	90	93	94	—	94	—
280	77	85	85	—	85	—
300	79	90	89	—	89	—
Average	75±13	78±17	85±12	60±6	85±12	64±4

Table3— 6 Comparison of fluence spectrum mean energy for JAERI qualities and ISO qualities

Kind of Series	Tube Voltage	Fluence Spectrum Mean Energy (keV)		Ratio (JAEA/ISO)	Difference keV
		JAEA	ISO		
Narrow	20	16.5	16	1.03	0.5
	25	20.7	20	1.04	0.7
	30	24.7	24	1.03	0.7
	40	31.5	33	0.95	-1.5
	60	46.9	48	0.98	-1.1
	80	64.7	65	1.00	-0.3
	100	83.4	83	1.00	0.4
	120	101	100	1.01	1
	150	119	118	1.01	1
	200	162	164	0.99	-2
	250	207	208	1.00	-1
	300	248	250	0.99	-2
Wide	60	43.1	45	0.96	-1.9
	80	55.1	57	0.97	-1.9
	110	78.5	79	0.99	-0.5
	150	105	104	1.01	1
	200	137	137	1.00	0
	250	169	173	0.98	-4
	300	200	208	0.96	-8
High Air-Kerma	20	14.4	12.9	1.12	1.5
	30	20.3	19.7	1.03	0.6
	60	37.5	37.3	1.01	0.2
	100	58.0	57.4	1.01	0.6
	200	101	102	0.99	-1
	250	121	122	0.99	-1
	280	143	146	0.98	-3
	300	146	147	0.99	-1

4. 線質に対する線量当量換算係数の評価

4.1 評価方法

X線標準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、放射線防護の実用量である周辺線量当量率や個人線量当量率が一般的に使用される。このため、放射線測定器に照射する標準場の基準線量当量率は、まず、標準場の照射線量率を測定して空気カーマ率に変換し、この値に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線標準場は、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線標準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。このため、今回設定した ISO X線標準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($f_{H(10)Total}$ 等 : 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 に示されるスペクトル積分比から求められた 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 JAEA 線質の換算係数との比較を行った。

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、3.1.2 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。

4.2 評価結果及び ISO との比較

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 Table4-1~Table4-6 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 4-7~Table 4-12 に示す。これらのデータから、各線量当量の平均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.4-1~Fig.4-4 に示す。また、各シリーズで利用する換算係数をまとめた表を Table 4-13~Table 4-15 に示す。更に、ISO4037-3 に示される ISO 換算係数と JAEA 換算係数との比較を Table 4-16~Table 4-17 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の積分比から求めた換算係数($f_{H(10)Total}$)と線量当量の平均エネルギーに対する換算係数(f_{EH})の比較では、Table4-1~Table4-3 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±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%~13%と大きな違いが生じた。これは、40kV 以下の低エネルギー線質では Fig.3-3 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平均エネルギーの換算係数に違いが生じたからである。

ISO 4037-1 のスペクトル積分比から求めた換算係数が ISO 4037-3 に示されており、この換算係数と JAEA が同じ手法で評価した換算係数との比較では、Table 4-16 に示すように Narrow シリーズの 60kV 以上の線質、Wide シリーズの 80kV 以上の線質及び High air-kerma シリーズの 100kV 以上の線質において $\pm 2\%$ 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 $2\% \sim 16\%$ と大きな違いが生じた。これは、3.2 項の(4)に示した管球の固有フィルタの厚さの違いによるものと推定される。

一方、国内規格の JIS Z 4511 に準じた実効エネルギーに対する換算係数とスペクトル積分比から求めた換算係数との比較では、Fig. 4-1 に示すように、Narrow シリーズの 25kV 以上の線質、Wide シリーズの全線質及び High air-kerma シリーズの全線質において、概ね $\pm 3\%$ と両者はよく一致した。

これらの結果から、標準場の周辺線量当量を空気カーマから求める場合の換算係数は、スペクトルの積分比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、Table 4-4~Table 4-6 及び Fig. 4-2 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、ISO の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の換算係数は、(1)と同様の判断により、スペクトルの積分比から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、Table 4-7~Table 4-12 に示すようにスペクトルの積分比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 $\pm 3\%$ 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. 4-3~Fig. 4-4 に示すように、ほとんどの線質で $\pm 3\%$ で一致した。

ISO 4037-3 のスペクトル積分比から求めた換算係数と JAEA が同じ手法で評価した換算係数との比較では、Table 4-17 に示すように Narrow シリーズ、Wide シリーズ及び High air-kerma シリーズの全ての線質において $\pm 3\%$ と両者はよく一致した。

これらの結果から、標準場の基準線量当量を空気カーマから求める場合の換算係数は、スペクトル平均エネルギー、実効エネルギー及びスペクトルの積分比から算出した 3 種類の値が $\pm 3\%$ で一致し、どれを用いても良いことがわかった。但し、使用する換算係数は、(1)及び(2)と統一性を図るため、スペクトルの積分比から算出した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、スペクトルの積分比から算出した値、スペクトル平均エネルギーからの値及び実効エネルギーからの値が $\pm 3\%$ で良く一致した。但し、40kV 以下の低エネルギー線質では、スペクトルの積分比から算出した換算係数が正確であることから、全ての線質について、文献 7) の国際規格の手法であるスペクトル積分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 4-13~Table 4-15 の各種換算係数を利用することとする。このほか、線質のスペクトル評価ができない校正機関では、管球の固有フィルタが $Be 1mm \sim 3mm$ を有する場合に、25kV 以上の線質において、実効エネルギーに対応する換算係数を用いることができることを明らかにした。

Table 4—1 Comparison of conversion coefficients from air kerma to ambient dose equivalent for JAEA narrow series (f: H * (10) / Ka)

Voltage (kV)	$f_{H(10)Total}$ (Sv/Gy)	$E_{H(10)}$ (keV)	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	0.336	16.7	0.375	1.12	15.8	0.313	0.93
25	0.603	20.7	0.653	1.08	19.7	0.589	0.98
30	0.814	24.5	0.856	1.05	24.2	0.842	1.03
40	1.083	30.9	1.139	1.05	30.5	1.122	1.04
60	1.561	46.2	1.611	1.03	44.8	1.585	1.02
80	1.732	64.6	1.747	1.01	64.7	1.747	1.01
100	1.704	83.9	1.708	1.00	84.7	1.705	1.00
120	1.643	102	1.643	1.00	103	1.639	1.00
150	1.579	121	1.578	1.00	122	1.575	1.00
200	1.461	164	1.456	1.00	174	1.436	0.98
250	1.390	210	1.387	1.00	223	1.373	0.99
300	1.348	251	1.346	1.00	271	1.330	0.99

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

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

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

Table 4—2 Comparison of conversion coefficients from air kerma to ambient dose equivalent for JAEA wide series (f: H * (10) / Ka)

Voltage (kV)	$f_{H(10)Total}$ (Sv/Gy)	$E_{H(10)}$ (keV)	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	1.432	42.0	1.522	1.06	40.3	1.478	1.03
80	1.629	54.1	1.709	1.05	51.9	1.690	1.04
110	1.706	79.4	1.722	1.01	78.2	1.725	1.01
150	1.620	108	1.622	1.00	107	1.625	1.00
200	1.517	142	1.513	1.00	146	1.501	0.99
250	1.446	176	1.433	0.99	182	1.423	0.98
300	1.397	209	1.389	0.99	220	1.376	0.98

Table 4—3 Comparison of conversion coefficients from air kerma to ambient dose equivalent for JAEA high air-kerma series (f: H * (10) / Ka)

Voltage (kV)	$f_{H(10)Total}$ (Sv/Gy)	$E_{H(10)}$ (keV)	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	1.179	35.7	1.329	1.13	31.0	1.142	0.97
100	1.599	56.7	1.726	1.08	51.0	1.681	1.05
200	1.605	110	1.615	1.01	100	1.650	1.03
250	1.543	134	1.537	1.00	123	1.571	1.02
280	1.492	158	1.47	0.99	152	1.485	1.00
300	1.483	163	1.459	0.98	152	1.485	1.00

Table 4—4 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for JAEA narrow series (f: Hp(10) / Ka)

Voltage (kV)	$f_{\text{Hp}(10)\text{Total}}$ (Sv/Gy)	$E_{\text{Hp}(10)}$ (keV)	f_{EHp} (Sv/Gy)	$\frac{f_{\text{EHp}}}{f_{\text{Hp}(10)\text{Total}}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{\text{eff}}}{f_{\text{Hp}(10)\text{Total}}}$
20	0.339	16.8	0.395	1.17	15.8	0.322	0.95
25	0.607	20.6	0.647	1.07	19.7	0.592	0.98
30	0.818	24.5	0.858	1.05	24.2	0.843	1.03
40	1.092	30.9	1.151	1.05	30.5	1.134	1.04
60	1.627	46.3	1.681	1.03	44.8	1.641	1.01
80	1.890	64.7	1.914	1.01	64.7	1.914	1.01
100	1.879	83.9	1.888	1.00	84.7	1.885	1.00
120	1.801	102	1.801	1.00	103	1.796	1.00
150	1.717	121	1.713	1.00	122	1.709	1.00
200	1.571	164	1.567	1.00	174	1.543	0.98
250	1.478	210	1.475	1.00	223	1.455	0.98
300	1.421	251	1.419	1.00	271	1.397	0.98

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

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

Table 4—5 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for JAEA wide series (f: Hp(10) / Ka)

Voltage (kV)	$f_{\text{Hp}(10)\text{Total}}$ (Sv/Gy)	$E_{\text{Hp}(10)}$ (keV)	f_{EHp} (Sv/Gy)	$\frac{f_{\text{EHp}}}{f_{\text{Hp}(10)\text{Total}}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{\text{eff}}}{f_{\text{Hp}(10)\text{Total}}}$
60	1.476	42.2	1.562	1.06	40.3	1.500	1.02
80	1.734	54.4	1.835	1.06	51.9	1.799	1.04
110	1.874	79.5	1.905	1.02	78.2	1.909	1.02
150	1.769	108	1.773	1.00	107	1.777	1.00
200	1.641	142	1.632	0.99	146	1.619	0.99
250	1.550	176	1.538	0.99	182	1.525	0.98
300	1.487	209	1.477	0.99	220	1.460	0.98

Table 4—6 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for JAEA high air-kerma series (f: Hp(10) / Ka)

Voltage (kV)	$f_{\text{Hp}(10)\text{Total}}$ (Sv/Gy)	$E_{\text{Hp}(10)}$ (keV)	f_{EHp} (Sv/Gy)	$\frac{f_{\text{EHp}}}{f_{\text{Hp}(10)\text{Total}}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{\text{eff}}}{f_{\text{Hp}(10)\text{Total}}}$
60	1.201	35.8	1.344	1.12	31.0	1.154	0.96
100	1.704	57.2	1.868	1.10	51.0	1.784	1.05
200	1.746	109	1.767	1.01	100	1.811	1.04
250	1.671	134	1.66	0.99	123	1.705	1.02
280	1.608	157	1.586	0.99	152	1.601	1.00
300	1.596	162	1.573	0.99	152	1.601	1.00

Table 4–7 Comparison of conversion coefficients from air kerma to directional dose equivalent for JAEA narrow series (f: H'(0.07) / Ka)

Voltage (kV)	$f_{H(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	$E_{H(0.07)}$ (keV)	$f_{EH'}$ (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	1.002	16.1	1.001	1.00	15.8	0.998	1.00
25	1.054	20.2	1.053	1.00	19.7	1.046	0.99
30	1.114	24.0	1.113	1.00	24.2	1.117	1.00
40	1.223	30.3	1.226	1.00	30.5	1.231	1.01
60	1.468	46.0	1.490	1.01	44.8	1.476	1.01

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

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

Table 4–8 Comparison of conversion coefficients from air kerma to directional dose equivalent for JAEA wide series (f: H'(0.07) / Ka)

Voltage (kV)	$f_{H(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	$E_{H(0.07)}$ (keV)	$f_{EH'}$ (Sv/Gy)	$\frac{f_{EH'}}{f_{H(0.07)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{H(0.07)Total}}$
60	1.398	41.4	1.431	1.02	40.3	1.414	1.01

Table 4–9 Comparison of conversion coefficients from air kerma to directional dose equivalent for JAEA high air-kerma series (f: H'(0.07) / Ka)

Voltage (kV)	$f_{H(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	$E_{H(0.07)}$ (keV)	$f_{EH'}$ (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	0.977	13.3	0.976	1.00	11.0	0.959	0.98
30	1.032	18.3	1.027	1.00	16.4	1.004	0.97
60	1.276	34.3	1.308	1.03	31.0	1.241	0.97

Table 4–10 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for JAEA narrow series (f: Hp(0.07) / Ka)

Voltage (kV)	$f_{Hp(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	$E_{Hp(0.07)}$ (keV)	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	0.994	16.1	0.993	1.00	15.8	0.989	0.99
25	1.049	20.2	1.048	1.00	19.7	1.040	0.99
30	1.114	24.0	1.113	1.00	24.2	1.117	1.00
40	1.233	30.3	1.237	1.00	30.5	1.241	1.01
60	1.540	46.1	1.569	1.02	44.8	1.545	1.00

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

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

Table 4–11 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for JAEA wide series (f: Hp(0.07) / Ka)

Voltage (kV)	$f_{Hp(0.07)Total}$ (Sv/Gy)	$E_{Hp(0.07)}$ (keV)	f_{EHp} (Sv/Gy)	$\frac{f_{EHp}}{f_{Hp(0.07)Total}}$	E_{eff} (keV)	f_{eff} (Sv/Gy)	$\frac{f_{eff}}{f_{Hp(0.07)Total}}$
60	1.448	41.6	1.479	1.02	40.3	1.450	1.00

Table 4–12 Comparison of conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent for JAEA high air-kerma series (f: Hp(0.07) / Ka)

Voltage (kV)	f _{Hp(0.07)Total} (Sv/Gy)	E _{Hp(0.07)} (keV)	f _{EHP} (Sv/Gy)	f _{EHP}	E _{eff} (keV)	f _{eff} (Sv/Gy)	f _{eff}
				f _{Hp(0.07)Total}			f _{Hp(0.07)Total}
20	0.970	13.2	0.967	1.00	11.0	0.954	0.98
30	1.027	18.3	1.020	0.99	16.4	0.996	0.97
60	1.301	34.5	1.328	1.02	31.0	1.251	0.96

Table 4–13 Conversion coefficient of dose equivalent to air kerma for JAEA narrow series(Summary)

Voltage (kV)	E _F (keV)	H*(10)/Ka (Sv/Gy)	H'(0.07)/Ka (Sv/Gy)	Hp(10)/Ka (Sv/Gy)	Hp(0.07)/Ka (Sv/Gy)
20	16.5	0.336	1.002	0.339	0.994
25	20.7	0.603	1.054	0.607	1.049
30	24.7	0.814	1.114	0.818	1.114
40	31.5	1.083	1.223	1.092	1.233
60	46.9	1.561	1.468	1.627	1.540
80	64.7	1.732	—	1.890	—
100	83.4	1.704	—	1.879	—
120	101	1.643	—	1.801	—
150	119	1.579	—	1.717	—
200	162	1.461	—	1.571	—
250	207	1.390	—	1.478	—
300	248	1.348	—	1.421	—

Table 4–14 Conversion coefficient of dose equivalent to air kerma for JAEA wide series(Summary)

Voltage (kV)	E _F (keV)	H*(10)/Ka (Sv/Gy)	H'(0.07)/Ka (Sv/Gy)	Hp(10)/Ka (Sv/Gy)	Hp(0.07)/Ka (Sv/Gy)
60	43.1	1.432	1.398	1.476	1.448
80	55.1	1.629	—	1.734	—
110	78.5	1.706	—	1.874	—
150	105	1.620	—	1.769	—
200	137	1.517	—	1.641	—
250	169	1.446	—	1.550	—
300	200	1.397	—	1.487	—

Table 4–15 Conversion coefficient of dose equivalent to air kerma
for JAEA high air-kerma series (Summary)

Voltage (kV)	E_F (keV)	$H^*(10)/K_a$ (Sv/Gy)	$H'(0.07)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(10)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(0.07)/K_a$ (Sv/Gy)
20	14.4	—	0.977	—	0.970
30	20.3	—	1.032	—	1.027
60	37.5	1.179	1.276	1.201	1.301
100	58.0	1.599	—	1.704	—
200	101	1.605	—	1.746	—
250	121	1.543	—	1.671	—
280	143	1.492	—	1.608	—
300	146	1.483	—	1.596	—

Table 4– 16 Comparison of conversion coefficient from air kerma to H* (10) and Hp(10) for JAEA qualities and ISO qualities

Kind of Series	Voltage (kV)	H*(10)/Ka		Ratio (JAEA/ISO)	Hp(10)/Ka		Ratio (JAEA/ISO)
		JAEA	ISO		JAEA	ISO	
Narrow	20	0.336	-	-	0.339	0.27	1.26
	25	0.603	0.52	1.16	0.607	0.55	1.10
	30	0.814	0.80	1.02	0.818	0.79	1.04
	40	1.083	1.18	0.92	1.092	1.17	0.93
	60	1.561	1.59	0.98	1.627	1.65	0.99
	80	1.732	1.73	1.00	1.890	1.88	1.01
	100	1.704	1.71	1.00	1.879	1.88	1.00
	120	1.643	1.64	1.00	1.801	1.81	1.00
	150	1.579	1.58	1.00	1.717	1.73	0.99
	200	1.461	1.46	1.00	1.571	1.57	1.00
	250	1.390	1.39	1.00	1.478	1.48	1.00
300	1.348	1.35	1.00	1.421	1.42	1.00	
Wide	60	1.432	1.49	0.96	1.476	1.55	0.95
	80	1.629	1.66	0.98	1.734	1.77	0.98
	110	1.706	1.71	1.00	1.874	1.87	1.00
	150	1.620	1.62	1.00	1.769	1.77	1.00
	200	1.517	1.52	1.00	1.641	1.65	0.99
	250	1.446	1.44	1.00	1.550	1.54	1.01
300	1.397	1.39	1.01	1.487	1.47	1.01	
High Air-Kerma	60	1.179	1.15	1.03	1.201	1.19	1.01
	100	1.599	1.57	1.02	1.704	1.68	1.01
	200	1.605	1.61	1.00	1.746	1.75	1.00
	250	1.543	1.54	1.00	1.671	1.67	1.00
	300	1.483	1.48	1.00	1.596	1.59	1.00

Ratio is JAERI qualities divided by ISO qualities
H*(10)/Ka and Hp(10)/Ka value of ISO qualities quoted ISO 4037-3 (1999)

Table 4– 17 Comparison of conversion coefficient from air kerma to H'(0.07) and Hp(0.07) for JAEA qualities and ISO qualities

Kind of Series	Voltage (kV)	H'(0.07)/Ka		Ratio (JAEA/ISO)	Hp(0.07)/Ka		Ratio (JAEA/ISO)
		JAEA	ISO		JAEA	ISO	
Narrow	20	1.002	1.00	1.00	0.994	0.98	1.01
	25	1.054	1.03	1.02	1.049	1.03	1.02
	30	1.114	1.10	1.01	1.114	1.10	1.01
	40	1.223	1.25	0.98	1.233	1.27	0.97
	60	1.468	1.48	0.99	1.540	1.55	0.99
Wide	60	1.398	1.43	0.98	1.448	1.49	0.97
High Air-Kerma	20	0.977	0.96	1.02	0.970	0.95	1.02
	30	1.032	1.02	1.01	1.027	1.01	1.02
	60	1.276	1.26	1.01	1.301	1.29	1.01

Ratio is JAERI series divided by ISO qualities
H'(0.07)/Ka and Hp(0.07)/Ka value of ISO qualities quoted ISO 4037-3 (1999)

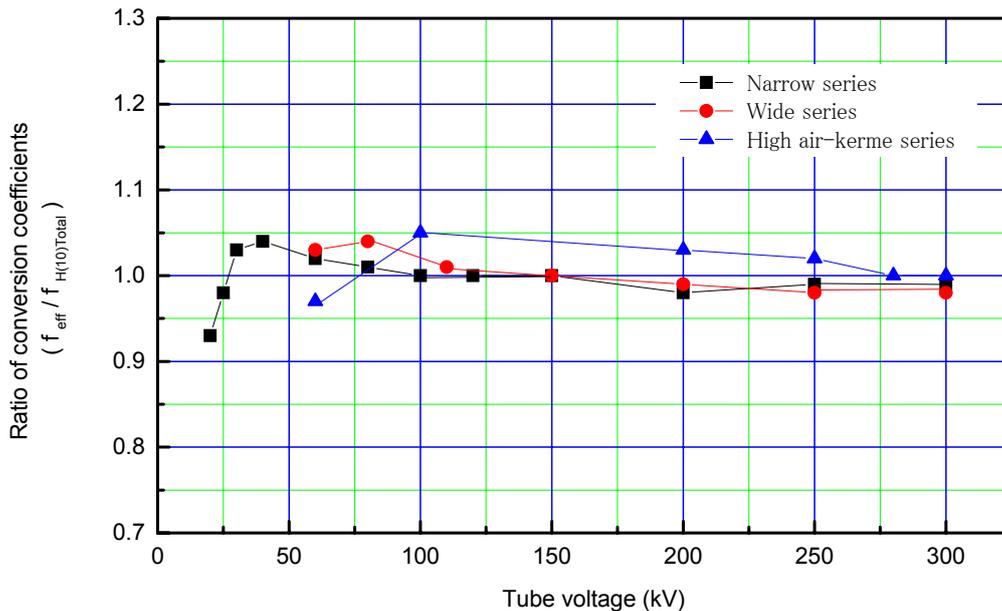


Fig.4- 1 Ratio of f_{eff} to $f_{\text{H}(10)\text{Total}}$ for $\text{H}^*(10) / \text{Ka}$

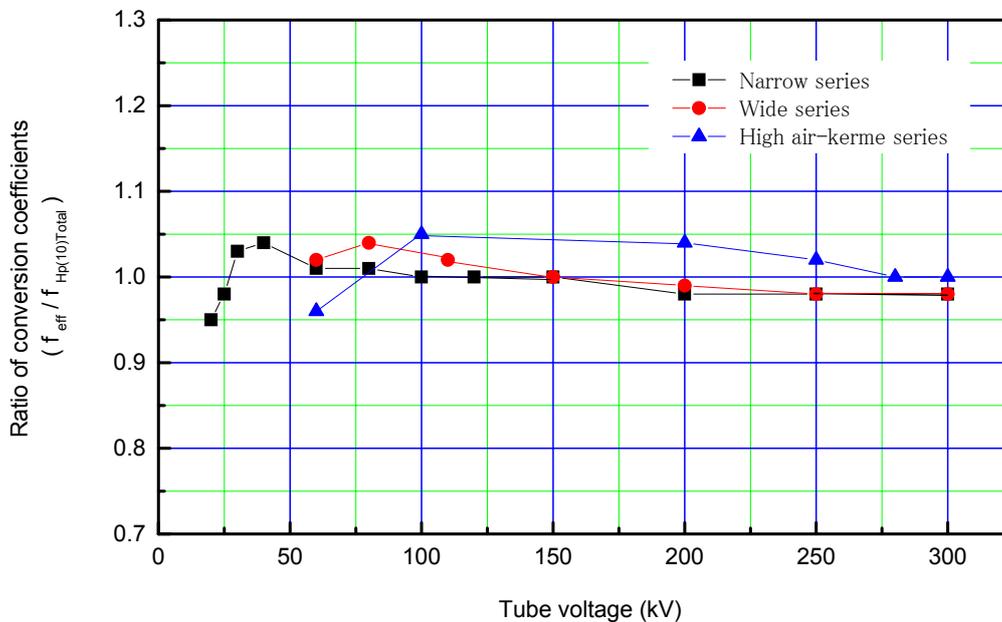


Fig.4- 2 Ratio of f_{eff} to $f_{\text{Hp}(10)\text{Total}}$ for $\text{H}_p(10) / \text{Ka}$

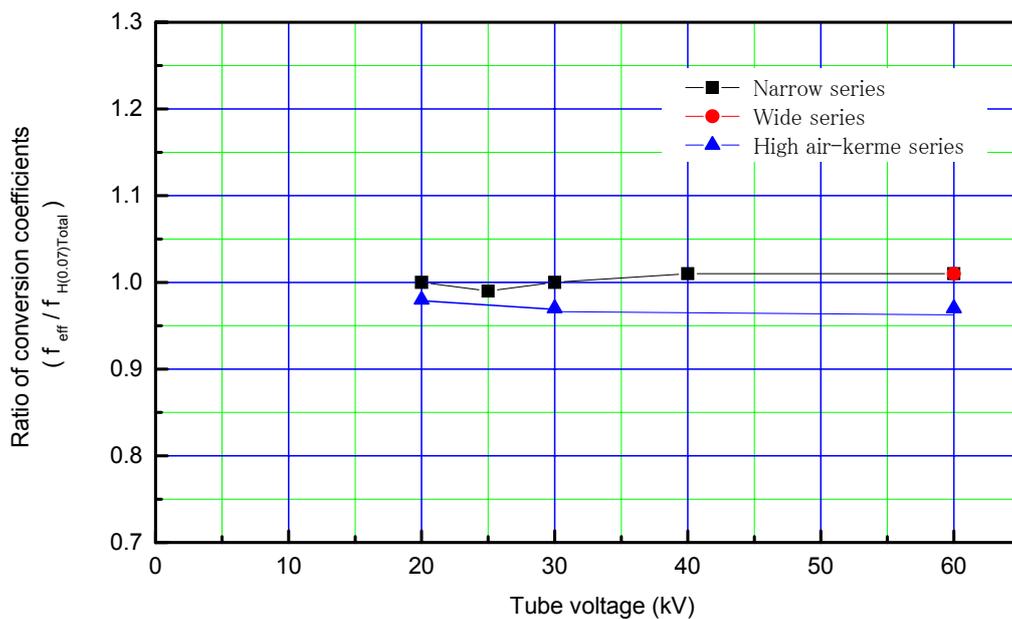


Fig.4 – 3 Ratio of f_{eff} to $f_{H(0.07)\text{Total}}$ for $H'(0.07) / \text{Ka}$

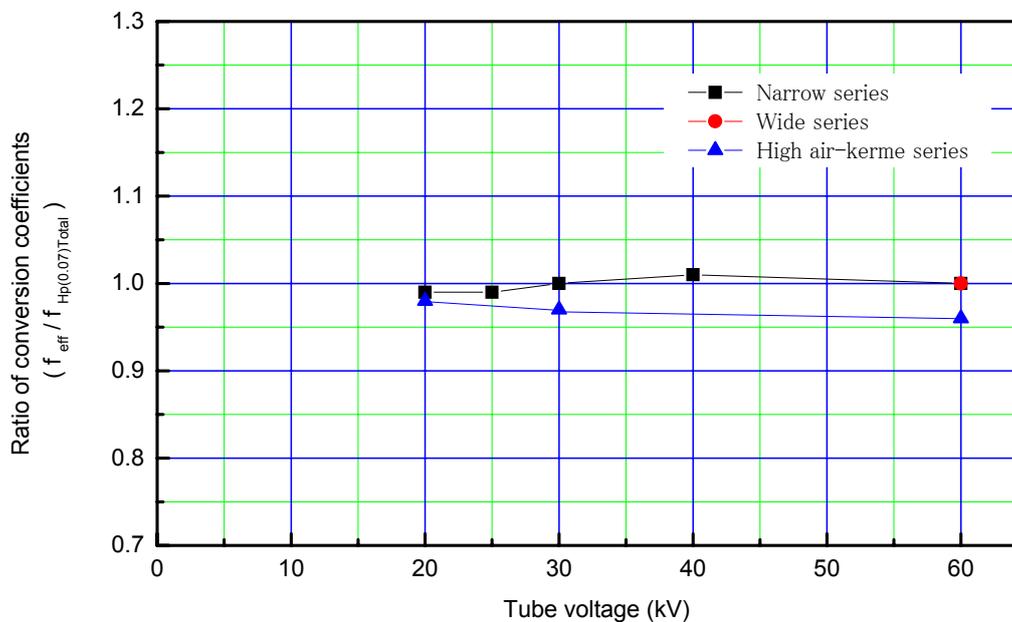


Fig.4 – 4 Ratio of f_{eff} to $f_{H_p(0.07)\text{Total}}$ for $H_p(0.07) / \text{Ka}$

5. 結 論

本報告では、原子力科学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線標準場を27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及び各線量に対応した空気カーマからの換算係数を評価した。また、今回設定したJAEA線質とISO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線標準場の設定では、ISO線質と同じ基礎フィルタを用い、各シリーズの線質について、ISOの設定指標である半価層、均等度、平均エネルギー及び空気カーマ率を評価し、これに加えて、国内のJIS規格が推奨する実効エネルギー及び線質指標を評価し、ISO線質の評価結果と比較を行い、以下の結果が得られた。
 - ① 今回設定した3つのシリーズのJAEA線質は、Narrowシリーズが20kV～300kVの管電圧で12線質、Wideシリーズが60kV～300kVの管電圧で7線質、High air-kermaシリーズが20kV～300kVの管電圧で8線質の合計27の線質を構築した。これらの線質のフルエンス平均エネルギーは、管電圧20kV～300kVの範囲で14.4keV～248keVである。
 - ② 均等度では、全シリーズで両者が±0.03で良く一致し、半価層測定用フィルタによる連続スペクトルのろ過効果にあまり影響を及ぼさないことがわかった。また、下記で述べる⑤及び⑥の実効エネルギーや線質指標の変化に対して、影響が少ないことが判明した。
 - ③ 両者の半価層の比較では、全シリーズの110kV以下の線質でAl及びCu材質で±0.07mmと変化が少なかったが、それ以上の管電圧でJAEAの方が最大で0.3mm(Cu)厚くなり、各線質のスペクトル及び実効エネルギーに若干の影響を及ぼした。
 - ④ 各シリーズの校正距離1mでの管電流1mA当たりの空気カーマ率は、Narrowシリーズが2.1～15 mGy/h、Wideシリーズが0.6～3 mGy/min、High air-kermaシリーズが6～12 mGy/minであった。これらのシリーズを利用する場合は、校正距離及び管電流を変更することにより、1Gy/h程度の高い線量率を照射する場合にHigh air-kermaシリーズが利用でき、個人線量計のように数mSvの積算照射を短時間で行う場合にNarrowシリーズが利用でき、サーベイメータのように1mGy/h～5mGy/h程度の線量率照射を行う場合にNarrowシリーズ又はWideシリーズの標準場が利用できる。
 - ⑤ 実効エネルギーでは、全シリーズの110kV以下の線質で両者が±1keVで良く一致したが、それ以上の管電圧でJAEA線質の方が徐々に高い値を示し、最大で18keV変化した。これは、上記の③の半価層の違いが影響したためである。
 - ⑥ 線質指標では、全シリーズでISO線質と最大5%の差異が生じ、ISOの各シリーズ内でも±5%変化している。これは、ISOの各シリーズの線質の設定指標が基礎フィルタのみでは変化が大きく、日本のJIS規格に示される線質指標による分類ができないことが判明した。また、40kV以下の線質における両者の違いは、X線管球のBe固有フィルタがISOで1mm、JAEAがBe 3mm+Al 0.3mmの厚さの違いによるもので、世界中で市販されているX線管球の固有フィルタには、Be 1mm～7mmのものが利用されており、ISOの線質条件が、40kV以下の

低エネルギー領域において、これら全ての管球について適合するものではないことがわかった。以上の結果から、ISO の各シリーズの標準場を校正機関が設定する場合は、半価層、均等度、実効エネルギー及び線質指標の測定を行い、ISO 線質との違いを明らかにしておくことが重要である。

- (2) 各シリーズのスペクトルの評価では、High air-kerma シリーズの 20kV 及び 30kV のスペクトルで、タングステン焦点から L 軌道特性 X 線等(8.4keV、9.9keV 及び 11.7keV)が発生し、その他のシリーズを含めた 50keV 以下の領域では特性 X 線が発生しなかった。また、80kV～300kV の一部の線質で、K 軌道特性 X 線等(58.0keV、59.3keV、67.2keV 及び 69.3keV)が発生した。
- (3) 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、Narrow シリーズ及び Wide シリーズの 20kV～150kV の線質と High air-kerma シリーズの 200kV～300kV の線質が±6%ではほぼ一致したが、その他の線質で-24%～+10%と大きな変化を示した。この違いは、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、フルエンス当たりの照射線量換算係数が影響し、ろ過効果が大きい 60kV 以下の線質ではフルエンスエネルギーが高い値を示し、100kV 以上の線質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、Narrow シリーズ 200kV 以下及び Wide シリーズの全ての線質で-2%～+5%と両者は良く一致したが、その他の線質で-17%～+8%と違いが大きくなった。この傾向は、フルエンス平均エネルギーとの比較とほぼ同様の結果となった。また、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も、ほぼ同様の結果となった。
 - ③ E_{eff} と方向性線量当量 $H'(0.07)$ 及び個人線量当量 $H_p(0.07)$ の平均エネルギーの比較では、Narrow シリーズと Wide シリーズの全ての線質で±3%とよく一致したが、High air-kerma シリーズの全ての線質で-17%～-10%の違いが生じた。この違いは、上記の①で示す半価層フィルタのろ過効果の影響が大きく寄与したと考えられる。
- (4) 各シリーズのスペクトル分解能は、6 種類のスペクトルに対して、Narrow シリーズが 26%～46%、Wide シリーズが 52%～64%、High air-kerma シリーズが 53%～101%となり、管電圧が同じスペクトルで同様の傾向を示した。しかし、High air-kerma シリーズは 100kV 以下で 53%～74%、200kV 以上の線質では 90%～100%に達し、スペクトル幅が極端に広いため、高線量率の照射には適するが、測定器のエネルギー特性試験には不適當である。これらの変化は、Narrow と Wide シリーズが平均値に対して±10%と良好であったが、High air-kerma シリーズが平均値に対して±30%と大きく変化した。これらのシリーズ毎の平均値は、Narrow シリーズが 34%、Wide シリーズが 56%、High air-kerma シリーズが 75%となり、Narrow シリーズに対する相対比で表すと、Wide シリーズが 1.6 倍、High air-kerma シリーズが 2.2 倍に増加した。一方、付録 A に示す ISO の分解能は、Narrow シリーズで 27%～37%、Wide シリーズで 48%～57%であり、上記の JAEA 線質と比較すると両者は良く一致した。
- (5) 各シリーズのフルエンス平均エネルギーは、Narrow シリーズで 16.5keV～248keV、Wide シリーズで 43.1keV～200keV、High air-kerma シリーズで 14.4keV～146keV であった。付録 A に示す ISO のフルエンス平均エネルギーとの比較では、両者の値が 27 線質のうち 25 の線質で ±3 keV で一致した。大きな違いが生じたのは、Wide シリーズの 250kV、300kV の 2 線質だ

けであった。40kV以下の線質で1keV～2keVの違いが生じたのは、X線管球の固有フィルタの厚さの違いにより、ろ過作用が変化したからである。この領域で校正機関どうしの線量率の相互比較を行う場合は、管球の固有フィルタの厚さが同じで有ること、又は、固有フィルタの厚さが異なる場合はスペクトルの形状をISOと比較することが重要である。

- (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、スペクトルの積分比から求めた換算係数($f_{H(10)Total}$ 又は $f_{Hp(10)Total}$)と線量当量の平均エネルギーに対する換算係数(f_{EH} 又は f_{EHP})の比較で、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 $\pm 2\%$ でよく一致した。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 $5\% \sim 13\%$ と大きな違いが生じた。このため、使用する換算係数は、ISO 4037-3 に準じたスペクトルの積分比から求めた換算係数を用いることにした。

ISO 4037-3 に示される ISO 換算係数と JAEA が同じ手法で評価した換算係数との比較では、Narrow シリーズの 60kV 以上の線質、Wide シリーズの 80kV 以上の線質及び High air-kerma シリーズの 100kV 以上の線質において $\pm 2\%$ 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 $3\% \sim 16\%$ と大きな違いが生じた。これは、管球の固有フィルタの厚さの違いによるものと推定される。

一方、国内規格の JIS Z 4511 に準じた実効エネルギーに対する換算係数とスペクトル積分比から求めた換算係数との比較では、Narrow シリーズの 25kV 以上の線質、Wide シリーズの全線質及び High air-kerma シリーズの全線質において、概ね $\pm 3\%$ と両者はよく一致した。このことから、線質のスペクトル評価ができない校正機関では、管球の固有フィルタが Be1mm～3mm を有する場合に、25kV 以上の線質において、実効エネルギーに対応する換算係数を用いることができることを明らかにした。

- (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、スペクトルの積分比から求めた換算係数($f_{H(0.07)Total}$ 又は $f_{Hp(0.07)Total}$)に対する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})と実効エネルギーに対応する換算係数(f_{eff})の比較で、全ての線質において、平均エネルギー及び実効エネルギーに対して $\pm 3\%$ で一致した。

ISO 4037-3 に示される ISO 換算係数と JAEA が同じ手法で評価した換算係数との比較では、Narrow、Wide 及び High air-kerma シリーズの全ての線質において $\pm 3\%$ と両者はよく一致した。

これらの結果から、標準場の基準線量当量を空気カーマから求める場合の換算係数は、スペクトル平均エネルギー、実効エネルギー及びスペクトルの積分比から算出した 3 種類の値が $\pm 3\%$ で一致し、どれを用いても良いことがわかった。但し、使用する換算係数は、(6)と統一性を図るため、スペクトルの積分比から算出した換算係数を用いることにした。

上記の結論より、今回整備した JAEA の ISO に準拠した X 線標準場は、一部の低エネルギーの線質を除く多くの線質で ISO 線質に良く一致していることが確認できた。また、ISO 線質を設定する場合の留意点や ISO 線質の設定指標の問題点を明らかにし、今後、これらについて ISO の改定時に意見を述べることにする。これらの ISO に準拠した X 線標準場は、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に対して、国際電気標準会議(IEC)が制定した IEC 規格に基づくエネルギー特性試験及び方向特性試験等の性能試験に使用できるほか、世界の校正機関との基準照射及び相互比較実験に使用できることになった。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 清水 滋、Qingli ZHANG、梶本 与一、川崎 朋克、藤井 克年 : “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” JAERI-Tech 2003-095 (2004)
- 3) 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)
- 4) H.J.Veiglo : Atomic data table Vol.5 (1973)
- 5) 国際放射線防護委員会 : ICRP Publication 74 , “Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation” (1996)
- 6) 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)
- 7) 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)
- 8) 清水 滋、澤島 忠広、梶本 与一、志風 義明、吉原 泰明、立部 洋介 : “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” JAEA-Technology 2010-009 (2010)
- 9) 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)
- 10) 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)

付録A. ISO4037-1(1996)の3シリーズの線質の仕様

ISO 4037-1(1996)に記載されている ISO X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)及び均等度(Homogeneity coefficient)の計算結果を示す。なお、実効エネルギーは、WM.J.Veigele 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	Reso- lution %	Additional filter mm				1st HVL mm	E_{eff} keV	Quality index (QI)	Homoge. coefficient (H)
			Pb	Sn	Cu	Al				
20	16	34				1.0	0.32Al	15.0	0.75	0.86
25	20	33				2.0	0.66Al	19.2	0.77	0.90
30	24	32				4.0	1.15Al	23.3	0.78	0.88
40	33	30			0.21		0.084Cu	31.7	0.79	0.92
60	48	36			0.6		0.24Cu	46.2	0.77	0.92
80	65	32			2.0		0.58Cu	63.9	0.80	0.94
100	83	28			5.0		1.11Cu	82.5	0.83	0.95
120	100	27		1.0	5.0		1.71Cu	100	0.83	0.97
150	118	37		2.5			2.36Cu	118	0.79	0.96
200	164	30	1.0	3.0	2.0		3.99Cu	166	0.83	0.99
250	208	28	3.0	2.0			5.19Cu	208	0.83	0.99
300	250	27	5.0	3.0			6.12Cu	253	0.84	1.00

Table A.2 Characteristics of ISO wide-spectrum series

Tube potential kV	Mean energy keV	Reso- lution %	Additional filter mm				1st HVL mm	E_{eff} keV	Quality index (QI)	Homoge. coefficient (H)
				Sn	Cu	Al				
60	45	48			0.3		0.18	41.6	0.69	0.86
80	57	55			0.5		0.35	52.9	0.66	0.80
110	79	51			2.0		0.96	77.7	0.71	0.86
150	104	56		1.0			1.86	104	0.69	0.89
200	137	57		2.0			3.08	138	0.69	0.93
250	173	56		4.0			4.22	173	0.69	0.96
300	208	57		6.5			5.20	209	0.70	0.97

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

Tube potential kV	Mean energy keV	Reso- lution %	Additional filter mm				1st HVL mm	E_{eff} keV	Quality index (QI)	Homoge. coefficient (H)
				Air	Cu	Al				
20	12.9	Not specified		750		0.15	0.12Al	10.7	0.54	0.75
30	19.7			750		0.5	0.38Al	15.9	0.53	0.63
60	37.3			750		3.2	2.42Al	30.6	0.51	0.74
100	57.4			750	0.15	3.9	0.30Cu	50.0	0.50	0.64
200	102			2250	1.15		1.70Cu	99.7	0.50	0.71
250	122			2250	1.6		2.47Cu	121	0.48	0.75
280	146			2250	3.0		3.37Cu	147	0.53	0.84
300	147			2250	2.5		3.40Cu	148	0.49	0.82

This is a blank page.

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
物質の量	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	キログラム毎立方メートル	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
比透磁率 ^(b)	(数字の)	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
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)
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
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
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
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	Vs
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 ^(e)	°C	K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(c)
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
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
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
酸素活性化	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間には換算係数がある。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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s
表面張力	ニュートンメートル	N m
角速度	ニュートン毎メートル	N/m
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³
電表面電荷	ジュール毎立方メートル	J/m ³
電束密度, 電気変位	ジュール毎立方メートル	J/m ³
誘電率	ジュール毎立方メートル	J/m ³
透磁率	ジュール毎立方メートル	J/m ³
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
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)
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎キログラム	J/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
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)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³

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	1 h=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	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	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	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 =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) 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=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

