

平成29 年度放射線安全規制研究戦略的推進
事業費（眼の水晶体等価線量評価に用いる
線量計の試験校正手法の開発）事業

成果報告書

平成30 年3 月

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

1 はじめに

水晶体等価線量の職業被ばく限度値は 2011 年に国際放射線防護委員会(ICRP)により引下げの声明があり[1]、国内規制に取り入れるための検討が行われている。信頼性の高い水晶体等価線量の管理を行うには国内における線量計の試験・校正システムの確立が欠かせない。本事業の目的は平成 29 年度から平成 30 年度までの 2 年間において、水晶体等価線量評価に用いる線量計の試験・校正手法を開発することである。具体的には①β線標準場のエネルギーの拡大と、②X線・β線標準場の水晶体等価線量評価に関わる実用量の導出によって線量計を試験・校正できる環境を整備し、③水晶体等価線量評価に用いる線量計の試験・校正の実証実験を行う。本報告書では平成 29 年度に実施した研究内容とその成果、また次年度の計画の概要を記す。

2 本事業の背景と目的

2.1 水晶体等価線量の職業被ばく限度値

眼の水晶体への放射線被ばくは、白内障の原因となることが知られている。日本では 2018 年 3 月現在、水晶体等価線量について 150 mSv/年の職業被ばく限度値が定められている。しかし 2011 年の ICRP の声明において、5 年間の平均で 20 mSv/年、そのうち任意の一年間で 50 mSv を超えないという限度値が提唱された[1]ため、現行の限度値引き下げに関する議論が盛んになっている。

水晶体の等価線量は、いわゆる防護量と呼ばれる量であり、モデル化された人体における水晶体が吸収したエネルギーに基づく値である[2]。そのため実際に測定で求めることは現実的ではない。そこで測定する場合は 3mm 線量当量という実用量が定められている。実用量は防護量より大きくなるように、つまり安全側に評価できるように定義されており、防護量は各種線量計で測定した実用量から推定して求められる。

放射線を被ばくすることによる影響は、水晶体に生じる白内障の他に、全身への確率的影響（がん及び遺伝的影響）や、皮膚に生じる炎症・紅斑・脱毛等の障害がある。これらの障害についても水晶体と同様に職業被ばく限度値がそれぞれ、実効線量・皮膚の等価線量として定められている。測定に関する実用量は、全身への影響では 1cm 線量当量、皮膚の障害については 70 μ m 線量当量である。

現在の水晶体等価線量の限度値は、実効線量及び皮膚の等価線量の限度値に到達していない場合、限度値を超えることはほとんどないと言われている。そのため現在は放射線を伴う作業下で 3mm 線量当量の測定義務は課されていない。1cm 線量当量と 70 μ m 線量当量を測定し、それぞれが実効線量及び皮膚の等価線量の限度値以下であることを確認すれば十分だと考えられるからである。

しかしながら限度値の引き下げをした場合はこの考え方による推定では不十分であると懸念される。そのため、水晶体等価線量についても、実効線量と皮膚の等価線量と同様に、等価線量のモニタリング方法や管理方法、防護の手段、また 3mm 線量当量を測定する場合はその測定方法を十分検討する必要がある。また、実用量の品質を保証するという観点から、3mm 線量当量を測定する線量計の校正やトレーサビリティの確保が重要になると考えられる。

2.2 実用線量計の校正のトレーサビリティ

2.1 節で述べたように水晶体等価線量は、各種線量計で測定する線量当量に基づいて推定される。実効線量と皮膚の等価線量に対応する 1cm 線量当量と 70 μ m 線量当量の場合、サーベイメータや個人線量計などの各種線量計は一般的に校正事業者、線量測定サービス事業者、線量計メーカーが標準線量計や標準照射場に対して校正を行っている。また測定を行う事業者自身が校正を行う場合もある。これらの校正に用いる線量計などは、産業技術総合研究所計量標準総合センターが提供している国家標準にトレーサブルな手法で校正されている。しかし 3mm 線量当量の場合はまだこのシステムが整っていない。ICRP の限度値引き下げ勧告以降、水晶体被ばくに関する現状把握や管理・防護手法の研究開発が盛んになり、3mm 線量当量測定用線量計の試験・校正のニーズは急激に高まっている。また実際に限度値が引き下げられた場合は、3mm 線量当量についても 1cm 線量当量と 70 μ m 線量当量と同等の校正や試験ができるようなシステムを構築する必要がある。そこで本事業では、3mm 線量当量に関する国家標準の整備と試験・校正方法の研究開発を主題にした研究を実施する。

2.3 測定や校正における 3mm 線量当量

水晶体等価線量の推定において測定する実用量は単に「3mm 線量当量」と表現することも多いが、正確には方向性線量当量 ($H'(3; \Omega)$) と個人線量当量($H_p(3)$)の 2 種類がある。 $H'(3; \Omega)$ は場の放射線量を示す量で、サーベイメータなどで測定する量である。単一の方向から放射線が来る場において ICRU 球(4.2 節参照)の特定された方向 Ω の半径上の深さ 3mm で生じる線量当量であると定義される。 $H_p(3)$ は従事者一人ひとりの被ばく線量を測定する量で、個人線量計などで測定する量である。 $H_p(3)$ は人体上のある点の深さ 3mm における線量当量と定義される。この個人線量を測定する線量計の校正には、一般にファントムを用いる。例えば 1cm 深さの個人線量($H_p(10)$)を測定する線量計を校正する場合、人体を模擬するファントムとして通常スラブファントムが用いられている。 $H_p(3)$ の場合は測定する線量計は眼の付近に装着することが想定されるため、スラブファントムだけではなく頭部を模擬した円柱ファントムの導入が検討されている。また個人線量計の試験においては個人線量計の方向依存性の確認が要求されるため、ファントムの設置角度を変えて

照射する場合もある。このような事情から、個人線量計の校正を行う際は、ファントムの種類やファントムの設置角度による線量当量の違いに注意する必要がある。

2.4 X線空気カーマと β 線組織吸収線量

現実の放射線を扱う作業において、水晶体の被ばく線量が比較的高くなると考えられている業務に、透視しながら行う医療行為（インターベンショナルラジオロジー）における術者の被ばくと原子力発電所の作業従事者（特に廃炉作業）における被ばくがある。前者はX線による被ばく、後者は β 線による被ばくを主に考慮する必要がある。本節ではX線と β 線の線量当量に関わる国家標準について述べる。

X線の国家標準は空気カーマ(K_{air})である。 $H'(3; \Omega)$ や校正時のファントムの条件に対応した $H_p(3)$ を導出するためにはX線場ごとの空気カーマ-線量当量換算係数を空気カーマに乗じて求める。わが国ではすでにX線空気カーマの校正システムは整備されている。したがって $H'(3; \Omega)$ や $H_p(3)$ を求めるためには、校正などを実施するX線標準場の空気カーマ-線量当量換算係数が分かればよい。本研究の実施内容の一つはX線場の空気カーマ線量当量換算係数の導出である。この換算係数は4章で述べるようにシミュレーション計算によって求めた。

β 線の国家標準は組織吸収線量(D_t)である。 β 線の場合は組織吸収線量に組織吸収線量-線量当量換算係数を乗じて $H'(3; \Omega)$ や $H_p(3)$ を導出する。この換算係数は平成30年度にシミュレーション計算によって求める予定である。 β 線の標準場は皮膚の等価線量評価に用いる線量計の試験・校正のため、ISO6980-1:2006 [3]で規定されたシリーズ1標準場が現在校正や試験に使える標準場として整備されている。シリーズ1標準場のエネルギーは最大残留エネルギーで指標されて、0.13MeV、0.51MeV、1.8MeVの3種類がある。このうち0.13MeV、0.51MeVの電子は組織の深さ3mmまで到達できないので、水晶体等価線量測定のために利用できるのはシリーズ1標準場としては1.8MeVの1種類しかない。一般に線量計の応答はエネルギー特性を持つことが知られているため、3mm線量当量測定用の線量計の品質を保証するには、 β 線標準場のエネルギーを拡大するための技術開発が不可欠である。本事業では β 線標準場のエネルギー拡大をテーマの一つとして取り組む。

2.5 水晶体吸収線量

現在実用量としては3mm線量当量が使われているが、国際放射線単位測定委員会(ICRU)ではそれに代わって水晶体吸収線量を実用量として導入する検討が行われている[4]。平成30年度には水晶体吸収線量が導入された場合の検討も行う予定である。

2.6 本研究の目的

2.1 節から 2.5 節までで述べたことを背景に、本研究では次の 3 点を主な目的として研究を行う。

第一の目的として、 β 線標準場のエネルギーの種類を拡大する。最大残留エネルギーが 0.51MeV から 1.8MeV の間の場合はストロンチウム線源による β 線をアクリル製のフィルタでエネルギーを調整することで生成する。1.8MeV 以上の場合はルテニウム線源を用いることで生成する。 β 線源とアクリルフィルタを用いてエネルギーの種類を増やすという手法は 20 年以上前に Shimizu[5]によって提唱され、日本工業規格[6]でも触れられているが、現在手に入る文献資料としては概要が記載されているものだけであり、標準場として利用できる状況にない。しかし水晶体等価線量モニタリングに使用する線量計の品質管理の観点でエネルギーの拡大は重要であり、この手法を参考にして開発を行う。

第二に、X 線・ β 線標準場の水晶体等価線量評価に関わる実用量を導出する。これは既存の X 線場・ β 線場と本事業で開発する拡大エネルギー β 線場について、標準として提供されている物理量（空気カーマまたは組織吸収線量）から 3mm 線量当量を導出する換算係数を求めることによって実現する。これらの換算係数は測定で求めることが困難なため、モンテカルロシミュレーションによって求める

第三に、水晶体等価線量評価に用いる線量計の試験・校正の実証実験を行う。まず主要な線量計を選定し、標準場の準備が整ったのちに X 線・ β 線場において線量計の校正やエネルギー特性・角度特性の試験を行う。さらに実際に行った試験・校正を通じて開発した標準場及び試験校正システムを評価する。

本研究の成果は、水晶体等価線量計の試験・校正方法の標準化につながるとともに、国内団体・国際機関等からの評価・要望に耐える品質の水晶体等価線量評価システムの構築に貢献すると考えられる。

3 β 線場のエネルギーの拡大

本研究ではルテニウム 106(Ru-106)線源（最大残留エネルギー 2.8 MeV）、ストロンチウム 90(Sr-90)線源（同 1.8 MeV）と、それぞれのエネルギー減弱標準場（同 0.8 MeV～2.6 MeV）を開発することにより、校正や試験に利用できる β 線場のエネルギー点を拡大する計画である。エネルギー減弱標準場は、アクリル製のフィルタを用いて最大残留エネルギーを低下させるものであるが、この場合エネルギーと同時に場の線量率も低下してしまう。線量率の低下は線量計の応答を下げ、測定精度の悪化につながる。そのために本研究では現在所属研究グループで所持している Sr-90 線源(460 MBq)よりも放射能の大きい線源を導入することとした。平成 29 年度は残留最大エネルギー 1.8MeV の既存のストロンチウム 90 線源と既存のアクリルフィルタによる予備実験を行うとともに、平成 30 年度に導入する予定の線源の選定を行った。

3.1 既存の線源による予備測定

新たな残留最大エネルギーの β 線標準場を生成するにあたっては、外挿電離箱により深さ 3mm における組織吸収線量の絶対値測定をする必要がある。また校正する際は外挿電離箱と校正対象の線量計で検出器としての有効面積が異なることが想定されるため、線量率の動径分布測定が必要である。外挿電離箱としては 70 μm 組織吸収線量率の国家標準器として保有している外挿電離箱を用い、線量率の動径分布測定は小体積電離箱を用いる予定である。平成 29 年度は既存のストロンチウム 90 線源と既存のアクリルフィルタを用いてエネルギー減弱標準場を生成し、外挿電離箱による測定を試みた。外挿電離箱は、電荷検出部の極板間隔を変えながら電流を計測するが、極板間隔(t)がゼロの極限における測定電流値(I)と極板間隔の増加量比 $[\Delta I / \Delta t]_{\Delta t \rightarrow 0}$ の決定が最も重要である[7]。70 μm 組織吸収線量率の測定においては $[\Delta I / \Delta t]_{\Delta t \rightarrow 0}$ 決定の不確かさは標準不確かさで約 0.35 %であるが、既存線源とアクリルフィルタの組み合わせにおいても 0.45%程度の不確かさで決定できることが分かった。

3.2 平成 30 年度の計画

平成 30 年度に導入する予定の β 線源とアクリルフィルタの組み合わせで場を生成し、標準場の 3mm 組織吸収線量率を 70 μm 組織吸収線量率の国家標準器である外挿電離箱を用いて測定する予定である。さらに標準場としての基本的な性質である線量率の動径分布などを測定により求める予定である。

4 標準場における 3mm 線量当量換算係数

水晶体等価線量評価に関わる実用量を導出するため、平成 29 年度は X 線標準場の 3mm 線量当量換算係数を求めた。単色エネルギー X 線の 3mm 線量当量換算係数をシミュレーション計算により求め、X 線場のエネルギースペクトルについて加重平均するという方法を用いた。また β 線については予備的に単色電子線の組織吸収線量を線量当量に換算する係数を計算し、計算コードの健全性を確認した。

4.1 空気カーマ-線量当量換算係数と組織吸収線量-線量当量換算係数

本研究で扱う換算係数を以下に示す。

(1) $h'(3; \alpha)$: 空気カーマから方向性線量当量 $H'(3; \Omega)$ への換算係数

$$h'(3; \alpha) = H'(3; \Omega) / K_{\text{air}}$$

ここで、ICRU report 57 の記述[2]にならい、方向性線量当量の定義における特定の角度 Ω は規定方向に対する入射放射線の角度 α としている。

- (2) $h_{p,slab}(3; \alpha)$: 入射角 α における ICRU スラブ中の深さ 3mm の線量当量 $H_{p,slab}(3; \alpha)$ への、空気カーマからの換算係数

$$h_{p,slab}(3; \alpha) = H_{p,slab}(3; \alpha) / K_{air}$$

- (3) $h_{p,cyl}(3; \alpha)$: 入射角 α における円柱ファントム中の深さ 3mm の線量当量 $H_{p,cyl}(3; \alpha)$ への空気カーマからの換算係数

$$h_{p,cyl}(3; \alpha) = H_{p,cyl}(3; \alpha) / K_{air}$$

- (4) $H_{p,slab}(3; 0^\circ) / \Phi_e$: 入射角 0 度における ICRU スラブ中の深さ 3mm の線量当量 $H_{p,slab}(3; 0^\circ)$ への、電子フルエンス Φ_e からの換算係数

4.2 計算の対象とするファントム

本研究のシミュレーション計算で扱うファントムの詳細を以下に示す。下記 3 種類のファントムはいずれも実在物質ではなく概念的なものであるが、電子光子輸送シミュレーション計算を行う際の物質としての特性は十分に規定されている。

(1)ICRU 球：密度 1 g/cm^3 の組織等価物質からなる直径 30 cm の球場均質ファントム。組織等価物質の質量組成は、酸素 76.2 %、炭素 11.1 %、水素 10.1 %、窒素 2.6% である。

(2)ICRU スラブ：密度 1 g/cm^3 の組織等価物質からなる。形状は $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ の直方体である。人体の胴体を模擬している。 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ の面の垂線と放射線の入射方向が一致する場合を入射角 0 度とする。

(3)円柱ファントム：密度 1 g/cm^3 の組織等価物質からなる。形状は直径 20 cm、高さ 20 cm の円柱である。人体の頭部を模擬している。放射線の入射方向が両底面と並行になるように照射する条件で計算を実施した。

4.3 産総研における X 線標準場

本研究で換算係数を求めた標準場を以下に示す。以下に示した標準場のうち産総研では N シリーズと Qi 線質の標準場についてはこれまで標準として維持・管理し、校正サービスを提供してきた。本研究では 3mm 線量当量に関する試験・校正に対応するため、医療診断装置からの X 線の特性を規定する RQR 線質を新たに整備した。4 章冒頭で述べたように X 線標準場の 3mm 線量当量換算係数を求めるためには、標準場それぞれのエネルギー

スペクトルが必要である。N シリーズと Qi 線質の標準場については、半導体検出器による測定値を用いた。RQR 線質の場については MCNP コードによるシミュレーション計算により求めた。

(1) N シリーズ

ISO4037-1:1996[8]で規定されている線質。X 線のエネルギー分布は鋭いピーク形状であり、線量計のエネルギー特性の調査などで用いられている。国家標準機関の相互比較など計量や校正の場面で良く用いられる。

(2) RQR シリーズ

IEC 61267:2005[9]で規定されている線質。診断用 X 線装置から放出される X 線の特性を記述している。 $H_p(3)$ 測定においては ORAMED での線量計の評価でも用いられており[8]、校正場として国内事業者からのニーズがある。本研究では RQR 線質の X 線場を標準場として設定した。設定手法は IEC 61267(JIS T 61267:2014)の手法に従った[9,11]。本研究で設定した RQR 線質の X 線場のフィルタの条件は表 1 の通りである。他の文献による報告と比較すると、同じ RQR 指標であってもフィルタの厚さが若干異なっていることが分かる。また MCNP コードにより得たエネルギースペクトルを図 1(a)~(c)に示す。

表 1 本研究で設定した RQR 線質の X 線標準場のフィルタの厚さ

	管電圧 (kV)	フィルタ厚さ (Al 厚, mm)		
		本研究	ORAMED [10]	UPC [12]
RQR9	120	3.84	3.39	3.5
RQR8	100	3.40	-	3
RQR7	90	3.22	3.0	3
RQR6	80	3.00	-	3
RQR5	70	2.88	-	2.5
RQR4	60	2.67	2.72	2.5
RQR3	50	2.48	-	2.5
RQR2	40	2.47	-	2.5

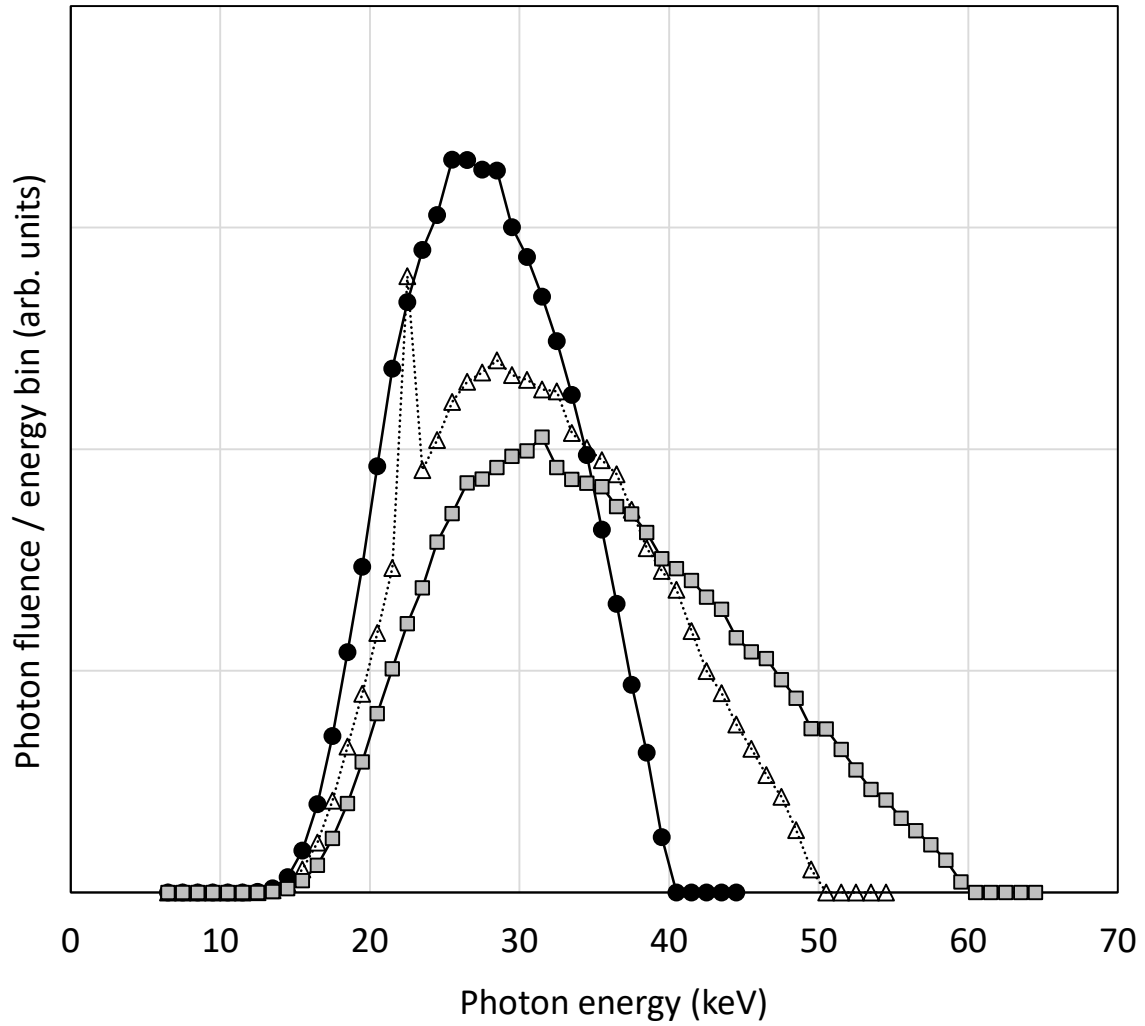


図 1(a) RQR 線質のエネルギー微分フルエンススペクトル。黒丸と実線は RQR2、白三角と点線は RQR3、灰色の四角と実線は RQR4 のスペクトルを示す。

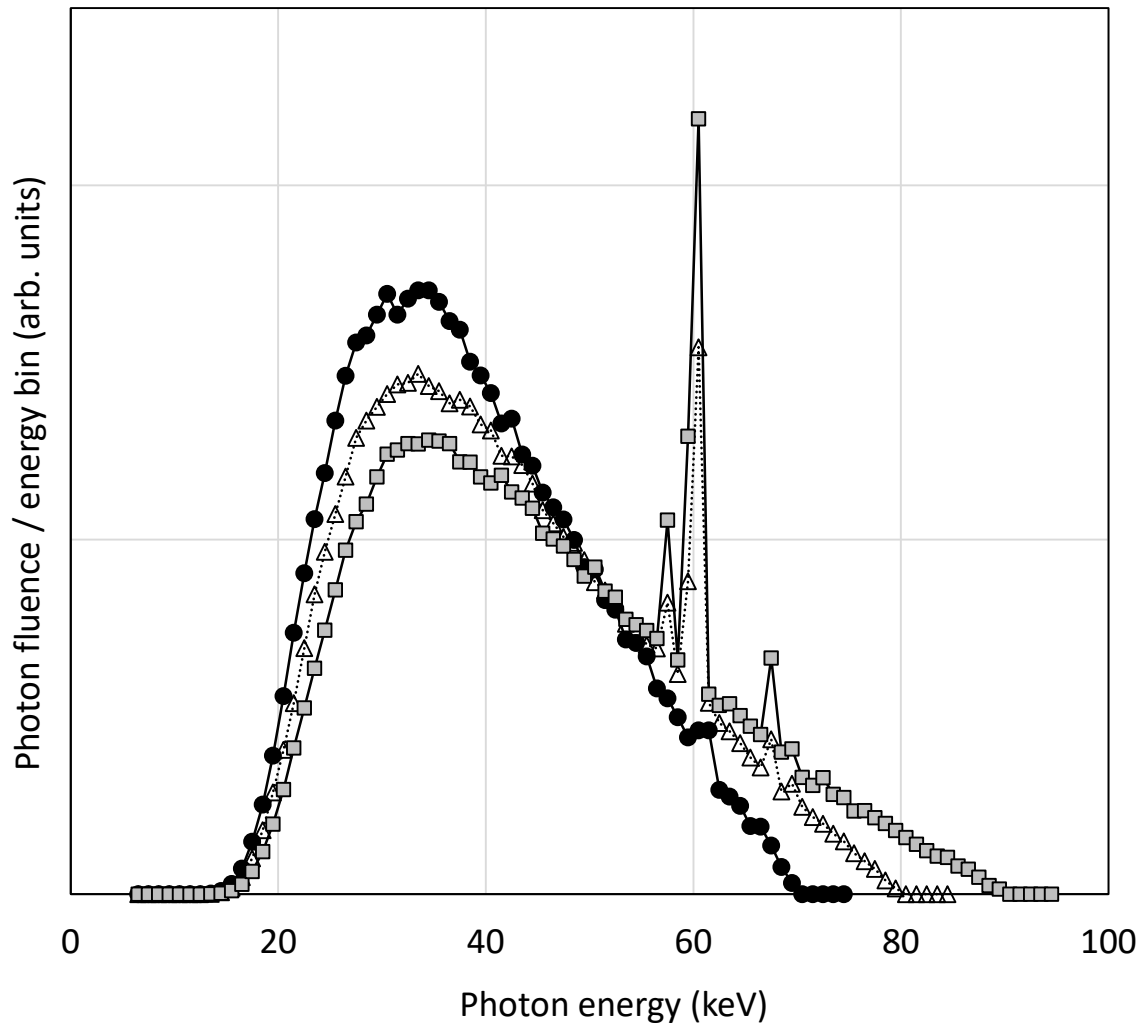


図 1(b) RQR 線質のエネルギー微分フルエンススペクトル。黒丸と実線は RQR5、白三角と点線は RQR6、灰色の四角と実線は RQR7 のスペクトルを示す。

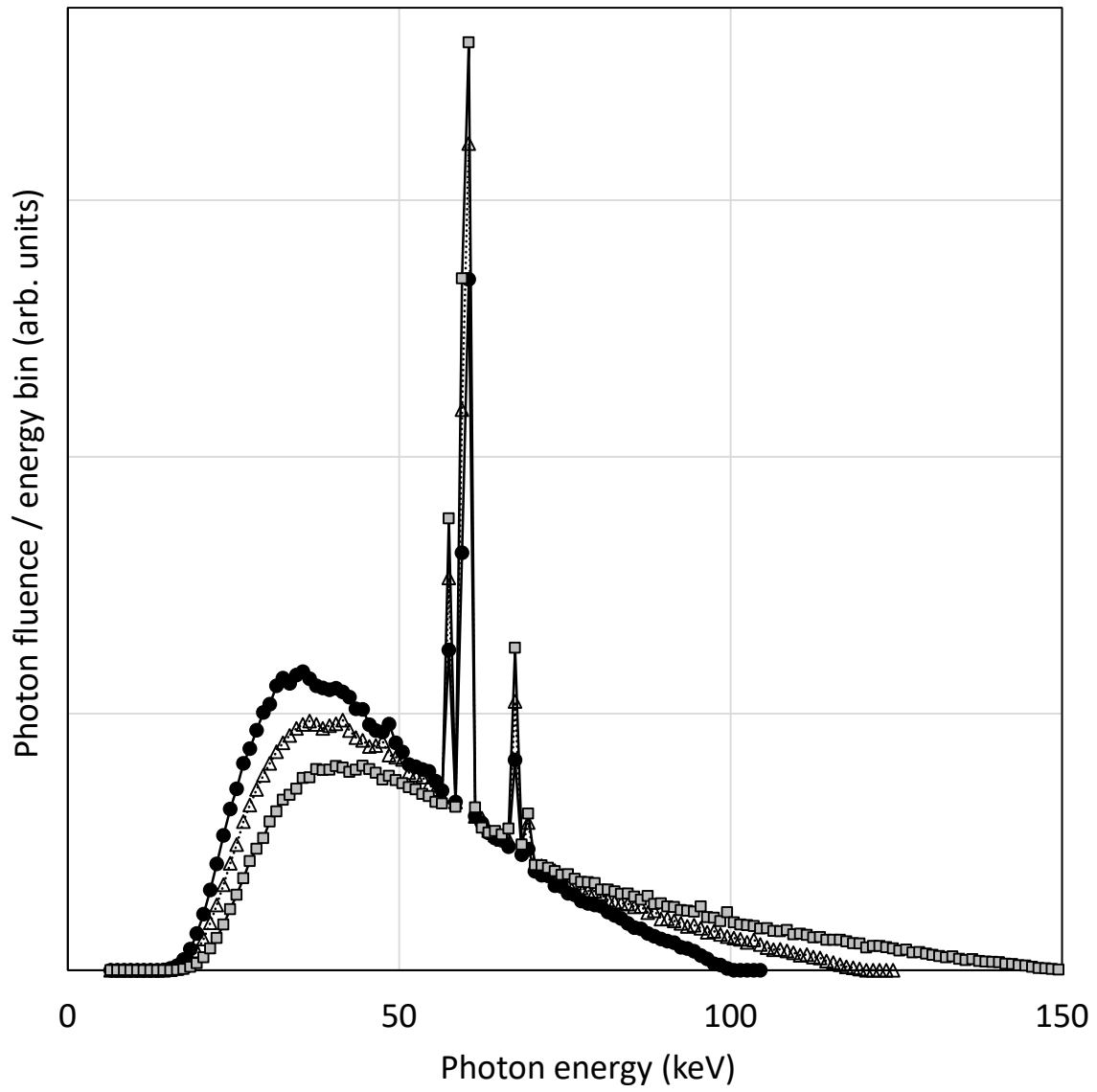


図 1(c) RQR 線質のエネルギー微分フルエンススペクトル。黒丸と実線は RQR8、白三角と点線は RQR9、灰色の四角と実線は RQR10 のスペクトルを示す。

(3) QI シリーズ

JIS Z 4511:2004[13]で規定されている。日本で使われてきた線質で線質指標 QI と管電圧で表される。QI は実効エネルギーと管電圧の比で表される。したがって管電圧と QI との値が等しい場合、固有フィルタ及び付加フィルタの厚さが異なっても実効エネルギーは同じになる。QI シリーズでは、QI の値が低いと広いスペクトル分解能をもつ高い線量率場が得られ、QI の値が高いと狭いスペクトル分解能をもつ低い線量率場が得られる。

4.3 換算係数の計算

産総研放射線標準研究グループでは、これまでにスラブファントムに関して空気カーマ-3mm 個人線量当量換算係数の計算を行ってきた。本研究では新たに円柱ファントムおよび ICRU 球に関して線量当量換算係数を計算した。単色エネルギー X 線の 3mm 線量当量換算係数は EGS5 コード[14]によるモンテカルロシミュレーションで計算した。計算を行ったジオメトリを図 2 に示す。

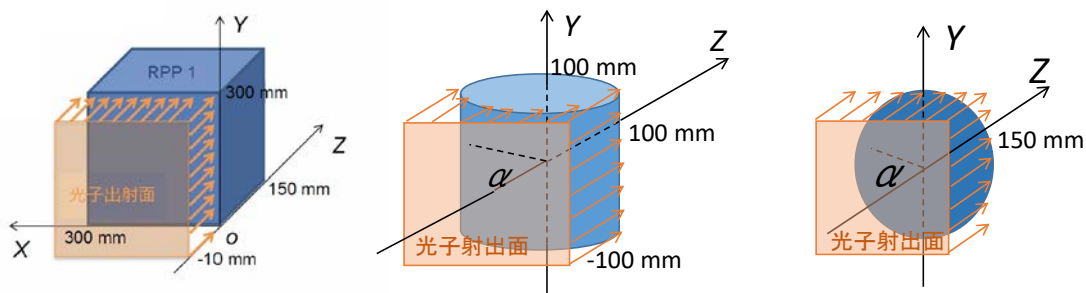


図 2 空気カーマから 3mm 線量当量に換算する係数を計算する際に本研究で用いたジオメトリ。左から ICRU スラブ、円柱ファントム、ICRU 球を一様な放射線場に設置している。

4.3.1 単色エネルギー X 線の 3mm 線量当量換算係数

シミュレーション計算により得た 3mm 線量当量換算係数の結果を図 1 に示す。他の研究結果とはおよそ 1%以内で一致した。また図 2 には入射角が 0 度の条件であっても、50 keV~150 keV において、ファントムによる違いが最大 10%程度あることが分かる。

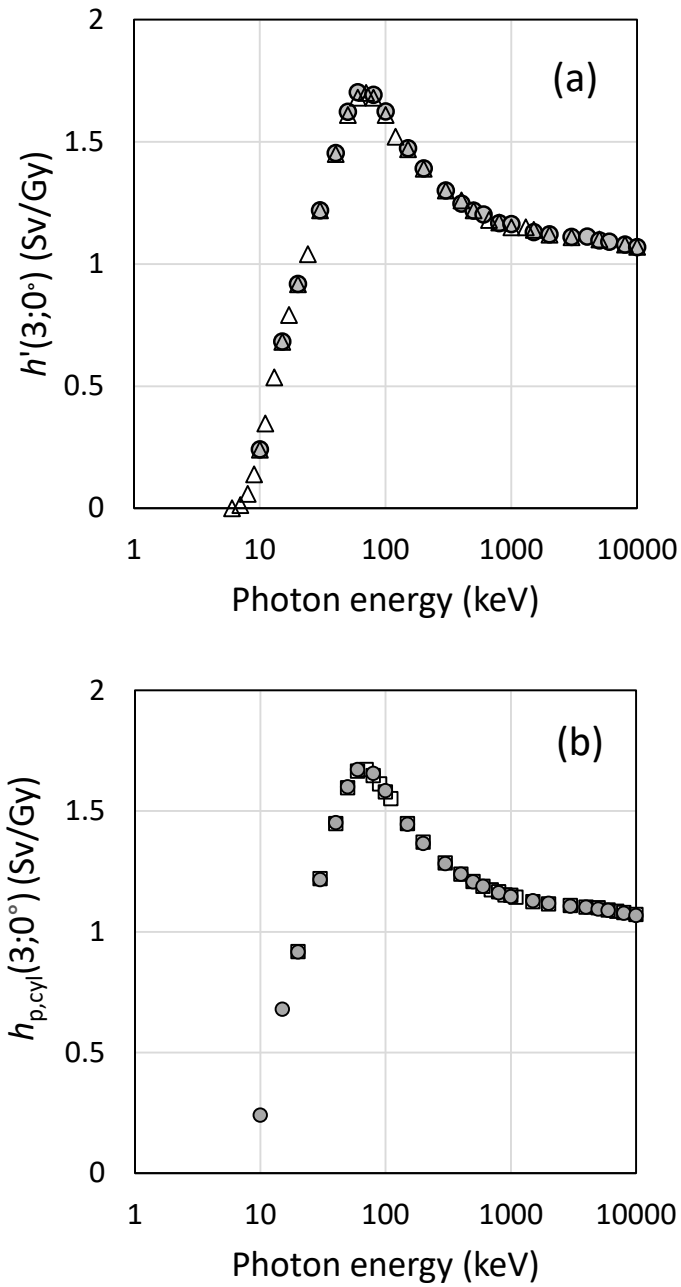


図3 空気カーマから3mm線量当量への換算係数。入射角は0度である。(a) 方向性線量当量への換算係数●：本研究、△Behrens[15]。(b) 個人線量当量（円柱ファントム）への換算係数。●：本研究、□Daures[16]。

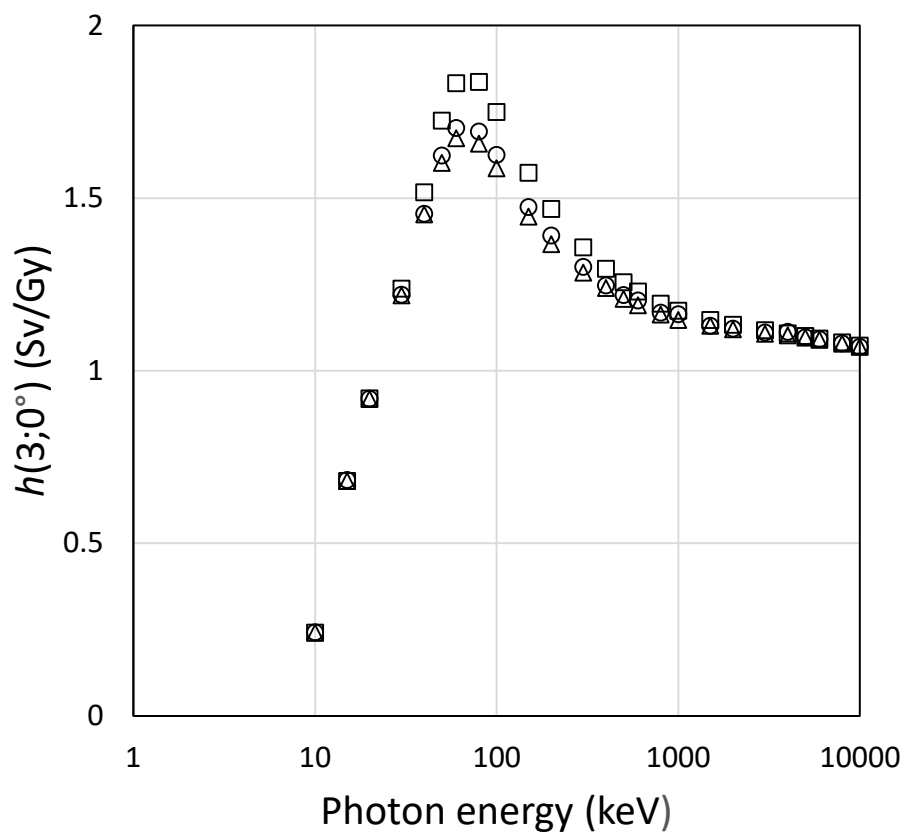


図4 空気カーマから3mm個人線量当量への換算係数（スラブファントム及び円柱ファントム）と3mm方向性線量当量への換算係数の比較。入射角は0度である。□：個人線量当量（スラブファントム）、△：個人線量当量（円柱ファントム）、○：方向性線量当量。

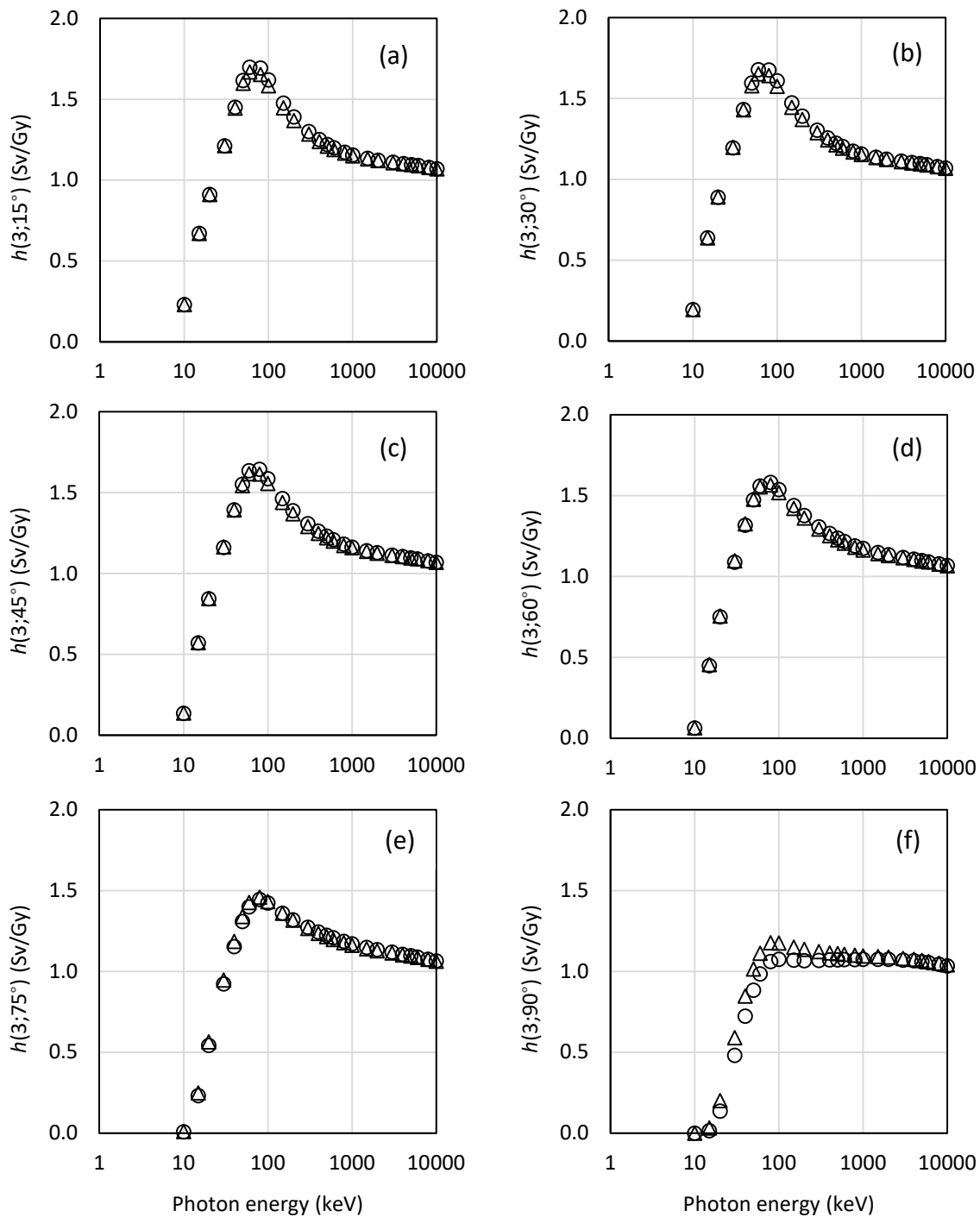


図5 空気カーマから 3mm 個人線量当量へ換算係数 (円柱ファントム) と 3mm 方向性線量当量への換算係数の比較。△: 個人線量当量 (円柱ファントム)、○: 方向性線量当量。
 (a) 入射角 15 度、(b) 入射角 30 度、(c) 入射角 45 度、(d) 入射角 60 度、(e) 入射角 75 度、(f) 入射角 90 度。

4.3.2 X線標準場における3mm線量当量換算係数

このようにして照射場の換算係数を求めた。この成果によりX線場において3mm線量当量の単位で校正や試験を実施することが可能となった。得られた換算係数の例として入射角0度の場合の値を表に示す。

表 2-1 X線標準場の3mm線量当量換算係数

線質	$h_{p,slab}(3,0^\circ)$	$h_{p,cyl}(3,0^\circ)$	$h(3,0^\circ)$
N-300	1.403	1.317	1.338
N-250	1.459	1.359	1.383
N-200	1.532	1.415	1.441
N-150	1.671	1.524	1.557
N-120	1.743	1.582	1.619
N-100	1.814	1.641	1.677
N-80	1.831	1.669	1.700
N-60	1.677	1.574	1.592
N-40	1.321	1.301	1.304
N-30	1.069	1.075	1.077

表 2-2 RQR線質X線場の3mm線量当量換算係数

線質	管電圧	$h_{p,slab}(3,0^\circ)$	$h_{p,cyl}(3,0^\circ)$	$h(3,0^\circ)$
RQR10	150	1.595	1.488	1.507
RQR9	120	1.524	1.435	1.450
RQR8	100	1.454	1.381	1.393
RQR7	90	1.412	1.348	1.358
RQR6	80	1.360	1.308	1.315
RQR5	70	1.308	1.266	1.271
RQR4	60	1.250	1.218	1.222
RQR3	50	1.177	1.156	1.158
RQR2	40	1.110	1.098	1.099

表 2-3 QI 0.4X 線場の 3mm 線量当量換算係数

管電圧	$h_{p,slab}(3,0^\circ)$	$h_{p,cyl}(3,0^\circ)$	$h(3,0^\circ)$
250	1.669	1.528	1.558
225	1.697	1.551	1.582
200	1.721	1.572	1.603
175	1.734	1.586	1.615
150	1.724	1.583	1.610
125	1.678	1.553	1.576
100	1.587	1.486	1.503
75	1.350	1.298	1.306
60	1.185	1.159	1.162
50	1.094	1.079	1.081
40	1.015	1.007	1.008

表 2-4 QI 0.5 X 線場の 3mm 線量当量換算係数

管電圧	$h_{p,slab}(3,0^\circ)$	$h_{p,cyl}(3,0^\circ)$	$h(3,0^\circ)$
250	1.622	1.487	1.517
225	1.658	1.516	1.547
200	1.697	1.548	1.580
175	1.736	1.581	1.613
150	1.767	1.609	1.641
125	1.767	1.616	1.645
100	1.702	1.574	1.596
75	1.525	1.444	1.456
60	1.325	1.282	1.288
50	1.176	1.154	1.156
40	1.051	1.041	1.042

表 2-5 QI 0.6 X 線場の 3mm 線量当量換算係数

管電圧	$h_{p,slab}(3,0^\circ)$	$h_{p,cyl}(3,0^\circ)$	$h(3,0^\circ)$
250	1.565	1.442	1.470
225	1.606	1.473	1.503
175	1.698	1.547	1.580
150	1.751	1.591	1.625
125	1.793	1.629	1.662
100	1.781	1.629	1.658
75	1.649	1.541	1.558
60	1.472	1.407	1.415
50	1.302	1.267	1.271
40	1.122	1.107	1.109

表 2-6 QI 0.7 X 線場の 3mm 線量当量換算係数

管電圧	$h_{p,slab}(3,0^\circ)$	$h_{p,cyl}(3,0^\circ)$	$h(3,0^\circ)$
250	1.512	1.400	1.426
225	1.548	1.427	1.455
200	1.595	1.464	1.493
175	1.651	1.509	1.540
150	1.713	1.558	1.592
125	1.778	1.611	1.647
100	1.821	1.652	1.686
75	1.752	1.615	1.639
60	1.596	1.505	1.518
50	1.423	1.370	1.375
40	1.224	1.202	1.204

表 2-7 QI 0.8 X線場の 3mm 線量当量換算係数

管電圧	$h_{p,slab}(3,0^\circ)$	$h_{p,cyl}(3,0^\circ)$	$h(3,0^\circ)$
250	1.472	1.369	1.394
225	1.504	1.394	1.419
200	1.547	1.427	1.453
175	1.600	1.468	1.497
150	1.666	1.520	1.553
125	1.743	1.581	1.617
100	1.819	1.645	1.680
75	1.813	1.655	1.685
60	1.701	1.584	1.603
50	1.542	1.467	1.475
40	1.325	1.292	1.294

表 2-8 QI 0.9 X線場の 3mm 線量当量換算係数

管電圧	$h_{p,slab}(3,0^\circ)$	$h_{p,cyl}(3,0^\circ)$	$h(3,0^\circ)$
250	1.447	1.351	1.374
225	1.474	1.371	1.395
200	1.510	1.397	1.423
175	1.555	1.432	1.459

4.4 β 線標準場における 3mm 線量当量換算係数 $H'(3;0^\circ) / \Phi_e$ の導出

本研究では、現状の Sr90 線源を用いた β 線場における 3mm 線量当量換算係数と開発する予定の拡大エネルギー β 線場における 3mm 線量当量換算係数を求める計画である。今年度はそのためにまず単色電子線について電子フルエンスを 3mm 線量当量に換算する係数を求める計算を行った。計算は EGS5 コードを用いた。スラブファントムについての計算結果を EGS5 の前のバージョンである EGS4 コードを用いて求めた Hirayama[17]の結果と共に示す。EGS コードによる $H'(3;0^\circ)/\Phi_e$ 計算の不確かさは 3-7%程度と見積もられているが、バージョンが違うとはいえ同じコードでの計算結果であり、両者の値は約 1%以内で一致している。統計の不確かさに加えて、計算コードのバージョンアップに伴う物理現象の取り扱い方法の更新、またスコア領域の厚さが Hirayama の計算で 0.03 mm に対して本研究では 0.02 mm という若干の違いがあることを考慮すると、一致の程度は良いといえる。この結果から、計算コードの妥当性・健全性が確認されたため、このコードをベースにして平成 30 年度は実際の β 線場の計算を実施する。

表 3 β 線標準場における 3mm 線量当量換算係数 $H'(3;0^\circ)/\Phi_e$

	本研究		Hirayama[17]		相対的な差
	値	統計の不確かさ	値	統計の不確かさ	
1	0.299	0.4%	0.296	1.0%	1.1%
1.5	0.524	0.3%	0.524	0.5%	0.0%
2	0.493	0.2%	0.488	0.2%	1.0%
2.5	0.432	0.2%	-	-	-
3	0.385	0.3%	0.383	0.2%	0.6%
4	0.343	0.2%	0.340	0.3%	0.8%
7	0.311	0.3%			
10	0.306	0.3%	0.305	0.3%	0.3%

5 線量計の試験・校正の実証実験

平成 30 年度には開発した試験・校正システムを用いて実際に照射試験及び線量計の校正を実施する計画である。平成 29 年度は試験校正を行う対象の線量計の選定を行った。選定の結果は以下の通りである。このうち VISION 線量計については平成 29 年度に照射試験を実施した。

(1) 個人線量当量を測定する個人線量計

- ・ 熱ルミネッセンス線量計

VISION: 長瀬ランダウア(株)提供

DOSIRIS: (株) 千代田テクノル提供

いずれも水晶体線量測定用として商品化されている線量計である。

- ・ 蛍光ガラス線量計: (株) 千代田テクノル提供

現在 $H_p(10)$ や $H_p(0.07)$ 測定に実績のある線量計である。

(2) 場の線量測定に用いる線量計

- ・ 電離箱式サーベイメータ (AE-133B/Λ2+, (株)応用技研製)

場の値としての 1cm 線量当量、3mm 線量当量、70 μ m 線量当量の測定に対応した線量計である。フィルタを付け替えることで 3 つの線量当量の測定が可能である。



図 6 電離箱式サーベイメータ AE-133B/Λ2+

(3) β 線のワーキングスタンダードとしての薄膜電離箱

β 線の測定に適した、入射窓の薄いタイプの電離箱を3種類用意した。それぞれ入射窓の厚さや大きさ、測定領域の有効体積が異なる。線量率分布の補正を検証すること、エネルギー特性がどの程度であるかという観点で校正定数の測定を行う計画である。

表4 校正の実証実験に使う予定の薄膜電離箱

	型式	メーカー	入射窓厚 (mg/cm ³)	入射窓の 有効径(mm)	測定領域の 体積(cm ³)
β 線用電離箱	CE-60S	応用技研	0.28	100	60
薄膜電離箱	C-1341D	応用技研	7	16	0.6
軟X線用電離箱	23344	PTW	2.76	13	0.2



図7 薄膜電離箱の外観 それぞれの写真の電離箱の型式は以下の通りである。
左 CE-60S、右上 C-1341D、右下 23344

6 結論

本事業では、眼の水晶体等価線量評価に用いる線量計の試験校正手法の開発と題し、①β線標準場のエネルギーの拡大、②X線・β線標準場の水晶体等価線量評価に関わる実用量の導出、③水晶体等価線量評価に用いる線量計の試験・校正の実証実験の3つを主なテーマとして平成29年度から30年度の2か年計画で研究を進めている。平成29年度は、β線標準場のエネルギーの拡大としては、既存設備による研究手法の検証を行うとともに、平成30年度に導入するβ線源の検討を行った。この成果により平成30年度の拡大エネルギーβ線場の設定が堅実に遂行できると考えられる。水晶体等価線量評価に関わる実用量の導出のテーマでは、ISO4037、IEC61267、JIS Z 4511で規定されているX線標準場における空気カーマを3mm線量当量に換算する係数を求めた。対象とするファントムはICRU球、ICRUスラブ、円柱ファントムである。これにより水晶体等価線量評価にかかわる線量計の試験や校正を実施することが可能となった。平成30年度はβ線に関して実用量を導出する。線量計の試験・校正の実証実験としては対象とする線量計を選定し、一部の線量計には照射試験を行った。平成30年度に実際に試験・校正を行うことで、開発した標準場及び試験校正システムの評価が可能となり、標準場設定法や校正手法の改善につながることを期待できる。

参考文献

- [1] ICRP, ICRP Publication 118, *Ann. ICRP*, **41** (1/2) (2012)
- [2] ICRU, ICRU Report 57 (1998)
- [3] ISO, ISO6980-1:2006 (2006)
- [4] Draft Joint Report of ICRU and ICRP for Consultation: Operational Quantities for External Radiation Exposure (2017)
- [5] 清水滋 : JAERI-M 93-172, p233-235, “保健物理と管理の研究” , (1993)
- [6] 日本工業規格 JIS Z 4514:2010 (2010)
- [7] ISO, ISO6980-2:2004 (2004)
- [8] ISO,ISO4037-1:1996 (1996)
- [9] IEC, IEC61267:2005 (2005)
- [10] F. Vanhavere *et al*, ORAMED: Optimization of Radiation Protection of Medical Staff, ERADOS report 2012-02 (2012)
- [11] 日本工業規格 JIS T 61267:2014 (2014)
- [12] S. Principi *et al*, *Radiation Protection Dosimetry* **170**, 45-48 (2016)
- [13] 日本工業規格 JIS Z 4511:2004 (2004)
- [14] H. Hirayama *et al*, SLAC Report number: SLAC-R-730(2005)
- [15] R. Behrens, *J. Radiological Protection* **37** 354-378 (2017)
- [16] J. Daures *et al*, Rapport CEA-R-6235 (2009)
- [17] H. Hirayama, *Radiation Protection Dosimetry* **51** 107-124 (1994)