

平成30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31 年3 月

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

目次

1 はじめに	4
2 本事業の背景と目的	4
2.1 水晶体等価線量の職業被ばく限度値	4
2.2 実用線量計の校正のトレーサビリティ	5
2.3 X線空気カーマと β 線組織吸収線量	5
2.4 本研究の目的	6
3 エネルギー拡大 β 線場	7
3.1 エネルギー拡大 β 線場の設定方法	7
3.1.1 エネルギー拡大 β 線場の設定に用いた照射装置と線源およびフィルタ	7
3.1.2 エネルギー拡大 β 線場の種類と線源やフィルタの組み合わせ	8
3.2 エネルギー拡大 β 線場の組織吸収線量率測定	12
3.2.1 外挿電離箱による電流測定	12
3.2.2 電極間隔の関数としての補正電流値	13
3.3 拡大エネルギー β 線場の特性	18
4 β 線照射場における3mm線量当量換算係数	23
4.1 計算を行った対象	23
4.2 シミュレーション計算の条件	23
4.3 ファントムの形状に関する計算結果	24
4.4 線量当量換算係数の角度特性に関する計算結果	25
5 薄膜電離箱の校正	28
5.1 70 μ m線量当量の単位での校正	28
5.1.1 使用した電離箱	28
5.1.2 校正定数の測定結果	28
5.2 3mm線量当量の単位での校正	29
5.2.1 使用した電離箱	29
5.2.2 校正定数の測定結果	29

6. まとめ	33
7. 総括	34
成果発表リスト	35
参考文献	35

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① β 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 30 年度に実施した研究内容とその成果を記し、2 年度の事業内容の成果を総括する。

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。

現在の水晶体等価線量は、全身への影響を示す実効線量およ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(産総研)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こととした。

2.3 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。空気カーマから 3mm 線量当量を求めるには 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。本事業では平成 29 年度に X 線場の空気カーマ線量当量換算係数の導出を行った。また関連して、ヨーロッパなどで 3mm 線量当量の試験所間比較などで使われている IEC61267[2]に規定されている RQR 線質の場を開発した。

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 3mm 線量当量を導出する。この換算係数の導出については 4 章で述べる。 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(以下 ISO シリーズ 1 標準場と呼称する)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。ISO 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おり、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 3 mm 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 ISO 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こととした。

2.4 本研究の目的

2.1 節から 2.3 節までで述べたことを背景に、次の 3 点を主な目的とする研究計画を立てた。

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[4]によって提唱され、日本工業規格[5]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。本テーマは平成 29 年度に既存設備による予備研究を実施している。本年度は新たに 2 種類の β 線源を導入し本格的な開発を行うこととした。

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。平成 29 年度においては主に X 線の 3mm 線量当量換算係数をもとめた。本年度は β 線に関して 3mm 線量当量換算係数を計算により求めることを目的とした。

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。平成 29 年度は対象とする線量計を選定するとともに、一部の個人線量計に対する照射試験を実施した。本年度は β 線場において薄膜電離箱の校正定数を測定する計画を立てた。

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 エネルギー拡大 β 線場

3.1 エネルギー拡大 β 線場の設定方法

3.1.1 エネルギー拡大 β 線場の設定に用いた照射装置と線源およびフィルタ

エネルギー拡大 β 線場を設定するために以下のものを用いた。

(1) β 線源

(1-1) Sr-90/Y-90 線源 公称放射能 3.7 GBq

本事業において新たに導入した β 線源。核種はストロンチウム 90(Sr-90)とイットリウム 90(Y-90)の平衡線源で、放出される β 線の最大エネルギーは 2.27 MeV、半減期は 10523 日である[3]。

線源の構造として、放射能を含む層の有効径は約 55 mm、窓材はステンレスで厚さ 0.05 mm。外形はほぼ円柱の形をしており、底面の直径が約 8 mm で高さが約 5 mm である。

(1-2) Sr-90/Y-90 線源 公称放射能 460 MBq

産総研で本事業開始前より所持している β 線源[6]。

線源の構造として、放射能を含む層の有効径は約 60 mm、窓材はステンレスで厚さ 0.1 mm。BSS2 用の線源ホルダに格納されているため、線源単体の形状は不明である。

(1-3) Ru-106/Rh-106 公称放射能 74 MBq

本事業において新たに導入した β 線源。核種はルテニウム 106(Ru-106)とロジウム 106(Rh-106)の平衡線源で、放出される β 線の最大エネルギーは 3.54 MeV、半減期は 374 日である[3]。

線源の構造として、放射能を含む層の有効径は約 55 mm、窓材はステンレスで厚さ 0.05 mm。外形はほぼ円柱の形をしており、底面の直径が約 8 mm で高さが約 5 mm である。

(2) β 線照射装置

産総研で本事業開始以前より使用している β 線照射装置(Beta-Secondary Standard 2: 略称 BSS2, Eckert & Ziegler 社)を用いた。BSS2 には専用の線源ホルダ(NIGB7586)があり、メーカーから輸入代理店を通して購入することができる。3.7 GBq の Sr-90/Y-90 線源と 74 MBq の Ru-106/Rh-106 線源は BSS2 用の線源ホルダにマウントして使用することとした。 β 線を照射する場合は、線源をマウントした線源ホルダを BSS2 装置に装着して使用する。線源ホルダの写真を図 1 に示す。BSS2 用の製品であるため、本体に装着した上で、遠

隔操作用パーソナルコンピューターからの命令でシャッターの開閉を行うことができる。線源ホルダ内部のパーツを図2に示す。標準で付属するパーツでは、今回導入した線源とサイズが合わなかったため、特注で少しサイズの異なるパーツを製作し、使用した。

BSS2は β 線照射装置では国内外で最も一般的に用いられている。よってBSS2を用いて拡大エネルギー場を設定する手法を開発すれば、その手法は産総研のみならず多くの校正施設などでも比較的容易に適用できると考えられる。

(3) エネルギー低減フィルタ

本研究で製作したエネルギー低減フィルタを、外見および厚さなどに関して表1にまとめる。また参考にこれまで産総研で標準として供給してきたISO6980-1:2004で規定されたシリーズ1 β 線場で用いているビームフラッタニングフィルタも表1に示す。エネルギー低減フィルタは β 線のエネルギーを低下することが目的であるが、使用する場合は線量率が減ること、場が均一にはならないことに注意する必要がある。場の均一性は本研究においては電離箱を用いて測定した(3.3節を参照)。

3.1.2 エネルギー拡大 β 線場の種類と線源やフィルタの組み合わせ

Ru-106/Rh-106線源を用いる場合は、エネルギー低減フィルタは用いず、そのまま照射した。3.7 GBqのSr-90/Y-90線源と460 MBqのSr-90/Y-90線源ではエネルギー低減フィルタを線源からおよそ2 cmの位置になるようにBSS2の本体に設置した。エネルギー低減フィルタの設置には専用の治具を製作し、これを用いた。BSS2に設置したエネルギー低減フィルタの様子を、ISOシリーズ1 β 線場の設定の様子とともに図3に示す。

事業発足当初は、Ru-106/Rh-106線源についてもエネルギー低減フィルタとの組み合わせの場を開発することを検討していたが、フィルタと組み合わせる場合線量率が弱くなってしまうため断念した。メーカーで強い放射能の線源を製作できない事情があり、最大で74 MBqの線源しか調達できなかったことが原因である。

3.7 GBのSr-90/Y-90線源では3 mm, 4 mm, 5 mmのすべての厚さのアクリルフィルタとの組み合わせで場を設定した。460 MBqでは5mmのアクリルフィルタを用いた場合十分な線量率が得られなかったため、3mmと4mmとの組み合わせについて場を設定した。本研究において設定した場の、線源とフィルタの組み合わせを表2に示す。また本事業の開始以前より産総研において維持管理してきたISOシリーズ1 β 線場を、併せて表2に示す。Ru-106/Rh-106線源を用いた照射場と、エネルギー低減用フィルタを用いた照射場では、検出器と線源の距離は20 cmとした。

表 1

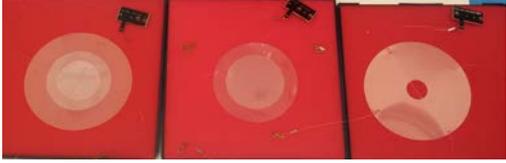
	エネルギー低減フィルタ	ビームフラッタニングフィルタ
外見		
材質	アクリル	ポリエチレンテレフタレート
厚さ	3 mm, 4 mm, 5 mm	50 μ m, 100 μ m, 180 μ m の組み合わせ
主な特徴	β 線エネルギーの低下が目的 線量率も低下する 場の不均一性を補正する必要がある	ISO6980-1:2006 で規定されたシリーズ 1 β 線場の設定に必要な 場の均一化が目的

表 2 エネルギー拡大 β 線場および産総研で維持管理している ISO6980-1:2006 シリーズ 1 β 線場(*印)。BFF はビームフラッタニングフィルタを示す。

線源核種	公称放射能 (Bq)	フィルタ	線源フィルタ間 距離(cm)	線源検出器間 距離(cm)
*Pm-147	3.7 G	BFF	10	20
*Kr-85	3.7 G	BFF	10	30
*Sr-90/Y-90	460 M	BFF	10	30
Sr-90/Y-90	460 M	アクリル 3 mm	約 2	20
Sr-90/Y-90	460 M	アクリル 4 mm	約 2	20
Sr-90/Y-90	3.7 G	アクリル 3 mm	約 2	20
Sr-90/Y-90	3.7 G	アクリル 4 mm	約 2	20
Sr-90/Y-90	3.7 G	アクリル 5 mm	約 2	20
Ru-106/Rh-106	74 M	なし	-	20



図 1 BSS2 用線源ホルダの外観

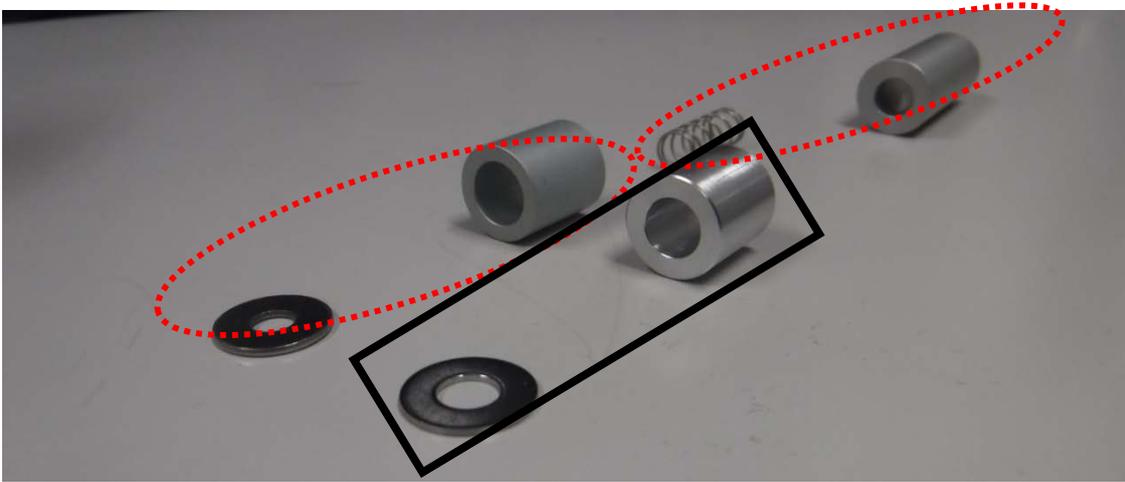


図 2 BSS2 用線源ホルダの内部のパーツ。赤の楕円で示した 4 つの部品は標準添付部品である。4 つの部品のうち左下 2 つの部品については本事業で導入した線源とサイズが合わなかったため、黒い長方形で示した 2 つの部品をオーダーメイドで製作した。

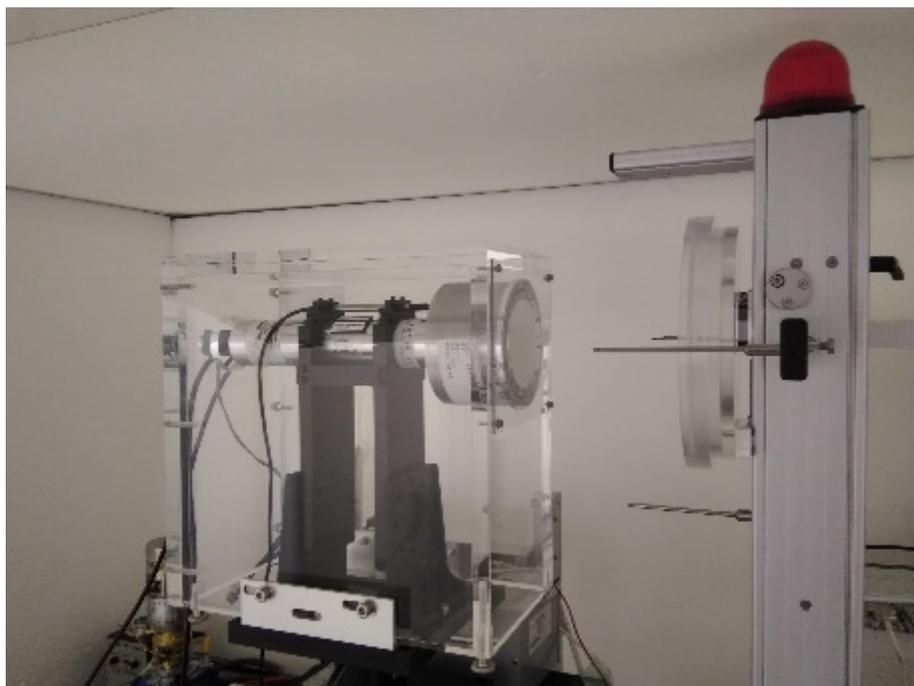


図 3 ISO シリーズ 1 β 線場の設定の様子(上)とエネルギー拡大 β 線場の設定の様子(下)

3.2 エネルギー拡大 β 線場の組織吸収線量率測定

エネルギー拡大 β 線場の組織吸収線量率は ISO6980-2:2004[7]に記載されている外挿電離箱を用いる手法によった。測定に用いる主な装置の詳細は文献[6]と同様のものを用いた。検出器は外挿電離箱(応用技研,C-112A)を用いた。外挿電離箱からの電離電流値は振動容量電位計(川口電機、MMA-II17E)を用いて測定した。

70 μm 組織吸収線量率は以下の式から求めることができる。

$$\dot{D}_{R\beta} = s_{t,a} \frac{\bar{W}_0}{e} \frac{1}{\rho_{a0} a} k_{br} k_{ba} k_{hu} k_{ra} \left[\frac{dI_{\text{corr}}(l)}{dl} \right]_{l=0} \quad (1)$$

ここで、 $s_{t,a}$ は平均質量阻止能、 \bar{W}_0/e は空気の W 値、 ρ_{a0} は参照条件における空気の密度、 a は外挿電離箱の有効径、 k_{ba} は後方散乱補正係数、 k_{br} は制動放射補正係数、 k_{hu} は湿度補正係数、 k_{ra} は線量率分布補正係数、 I_{corr} は補正した電流値、 l は外挿電離箱の極板間隔である。このうち、 $s_{t,a}$ 、 \bar{W}_0/e 、 ρ_{a0} 、 k_{ba} 、 k_{hu} は文献値[7]から求めた。 a は以前に測定した結晶値[6]を用いた。 k_{br} は組織等価物質で用いたフィルタを用いて β 線を遮断し、制動放射のみの寄与を求めた。 k_{ra} は3.3節で述べる線量率分布から求めた。 l は外挿電離箱に内蔵された接触式センサにより計測した。

また補正電流値 I_{corr} はISO6980-2:2004に従って大気条件や吸収散乱特性について補正した。吸収散乱特性については3.3節で述べる方法を用いて測定によりそれぞれの β 線場について求めた。

以下、(1)式における $[dI_{\text{corr}}(l)/dl]_{l=0}$ をゼロ点外挿電流勾配と呼ぶ。

3.2.1 外挿電離箱による電流測定

外挿電離箱は入射窓を兼ねた高圧電極と集電極の間隔(電極間隔)を変える機能を持つ電離箱である。吸収線量は「微小質量に付与する平均エネルギー」と定義される[8]ため、電離箱で吸収線量を測定しようとする場合、定義における「微小質量」を実現しようとする、なるべく電流発生に寄与する空気の体積は小さい方が望ましい。しかし体積が小さいほど電流値は小さくなるため、測定は困難となる。

そこで外挿電離箱による電流測定では、電流発生に寄与する空気の体積を変化させつつ電流値を測定するという手法をとる。言い換えると、ある程度の体積がある場合の電流値変化の測定結果に基づき、体積がゼロの極限における電流値の傾き ($[dI_{\text{corr}}(l)/dl]_{l=0}$:ゼロ点外挿電流勾配) を推定するという事になる。

3.2.2 電極間隔の関数としての補正電流値

ゼロ点外挿電流勾配は電極間隔の関数としての補正電流値のプロットから得る。図 4 に Ru-106/Rh-106 線源を測定した際の電極間隔の関数としての補正電流値を示す。図から分かるようにほぼ線形関係が得られるが、2 次関数 $I(l)=al^2+bl+c$ でフィッティングすることにより良いフィット結果が得られることが知られている [7]。図 4 の結果からはフィット関数のパラメータは $a=-5.2300 \times 10^{-16}$ 、 $b=9.6038 \times 10^{-14}$ 、 $c=-1.8766 \times 10^{-15}$ と得られた。ゼロ点外挿電流勾配は、フィット関数の導関数から求めることができる。他の β 線場の測定結果についても図 5~図 9 に示す。図中に測定結果とフィット関数を、キャプションにフィッティングで得たパラメータを記した。ゼロ点外挿電流勾配の決定の不確かさはパラメータ b 決定の不確かさとほぼ等しくなる。本事業におけるゼロ点外挿電流勾配の決定の不確かさを、ISO シリーズ 1 β 線場のゼロ点外挿電流勾配の決定の不確かさと共に表 3 に示す。得られる電離電流値が小さい Ru-106/Rh-106 線源による β 線場や、460 MBq の Sr-90/Y-90 線源と 4 mm 厚のエネルギー低減フィルタとの組み合わせによる β 線場では、不確かさが大きくなっているのが分かる。

最終的な 70 μ m 組織吸収線量率の不確かさは、(1)式に基づいて決定した。ゼロ点外挿電流勾配の不確かさに加え、(1)式で現れるパラメータの不確かさを合成して求める。この結果を表 3 に示す。3mm 組織吸収線量率はこの 70 μ m 組織吸収線量率に、70 μ m 深さの線量率と 3mm 深さの線量率の比をかけて求める。この方法については 3.3 節で述べる。

表3 エネルギー拡大 β 線場および産総研で維持管理しているISOシリーズ1 β 線場(*印)のゼロ点外挿電流勾配の決定の不確かさと β 線場の70 μm 組織吸収線量率($\dot{D}(0.07)$)。不確かさは包含係数 $k=1$ で表す。

線源核種	公称放射能 (Bq)	フィルタ	ゼロ点外挿電流勾配決定の不確かさ ($k=1$)	$\dot{D}(0.07)$ (mGy/h)	$\dot{D}(0.07)$ の不確かさ ($k=1$)
*Pm-147	3.7 G	BFF	2.0 %	4.1	2.4 %
*Kr-85	3.7 G	BFF	0.89 %	80.5	1.3 %
*Sr-90/Y-90	460 M	BFF	0.90 %	30.0	1.3 %
Sr-90/Y-90	460 M	アクリル 3 mm	0.88 %	26.3	1.3 %
Sr-90/Y-90	460 M	アクリル 4 mm	3.8 %	11.7	3.9 %
Sr-90/Y-90	3.7 G	アクリル 3 mm	0.36 %	233	1.0 %
Sr-90/Y-90	3.7 G	アクリル 4 mm	0.45 %	111	1.0 %
Sr-90/Y-90	3.7 G	アクリル 5 mm	0.47 %	41.1	1.0 %
Ru-106/Rh-106	74 M	なし	2.0 %	14.8	2.2 %

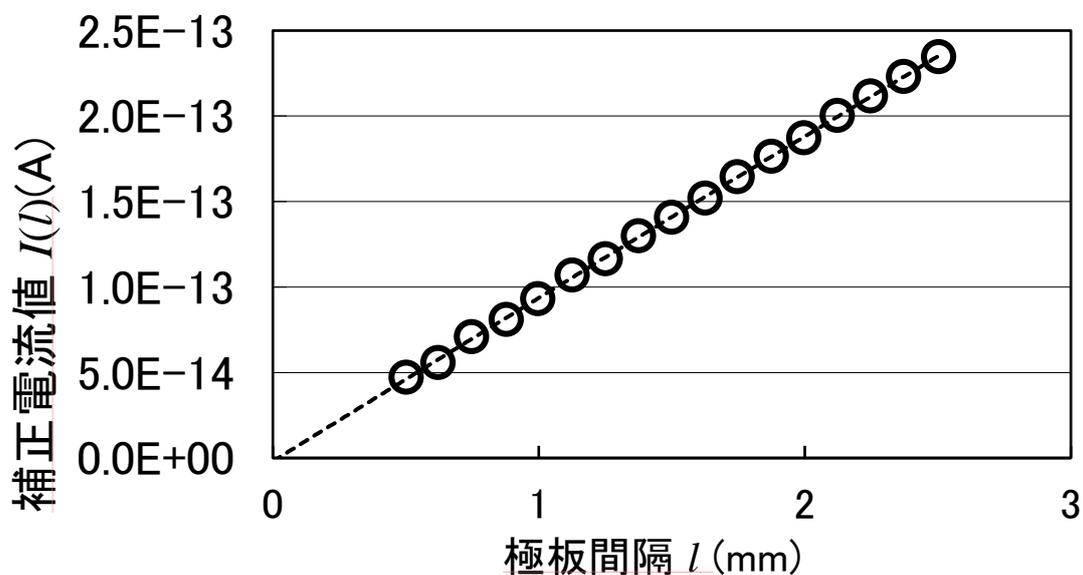


図 4 Ru-106/Rh-106 線源からの β 線による電離電流値を外挿電離箱で測定した結果。点線は 2 次式 $I(l)=al^2+bl+c$ によるフィット結果を示す。得られたパラメータは $a=-5.2300 \times 10^{-16}$ 、 $b=9.6038 \times 10^{-14}$ 、 $c=-1.8766 \times 10^{-15}$ である。

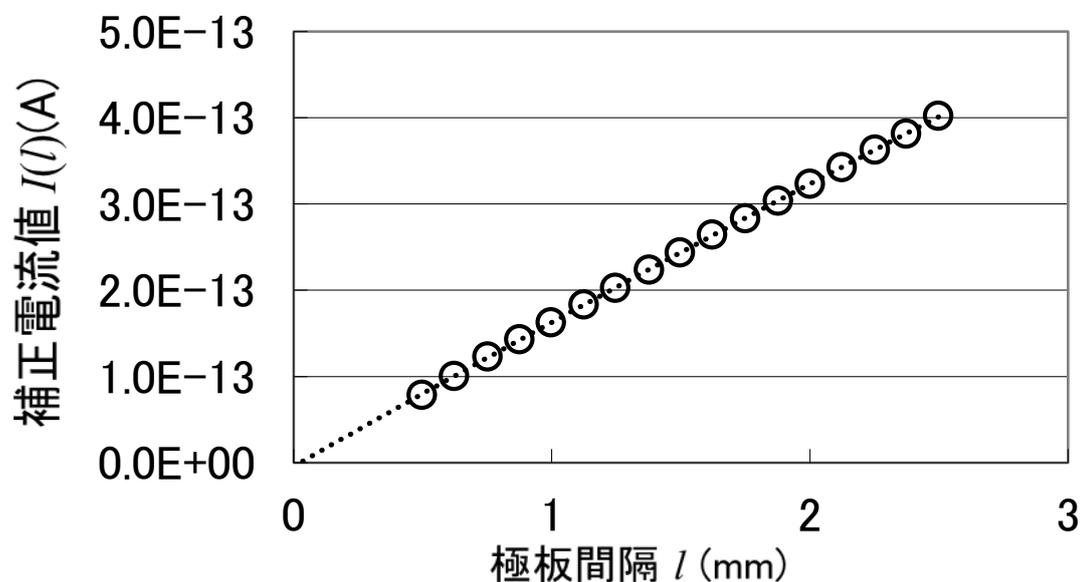


図 5 Sr-90/Y-90 線源(460 MBq)とエネルギー低減フィルタ 3mm の組み合わせによる β 線による電離電流値を外挿電離箱で測定した結果。点線は 2 次式 $I(l)=al^2+bl+c$ によるフィット結果を示す。得られたパラメータは $a=-3.1689 \times 10^{-15}$ 、 $b=1.7009 \times 10^{-13}$ 、 $c=-4.1453 \times 10^{-15}$ である。

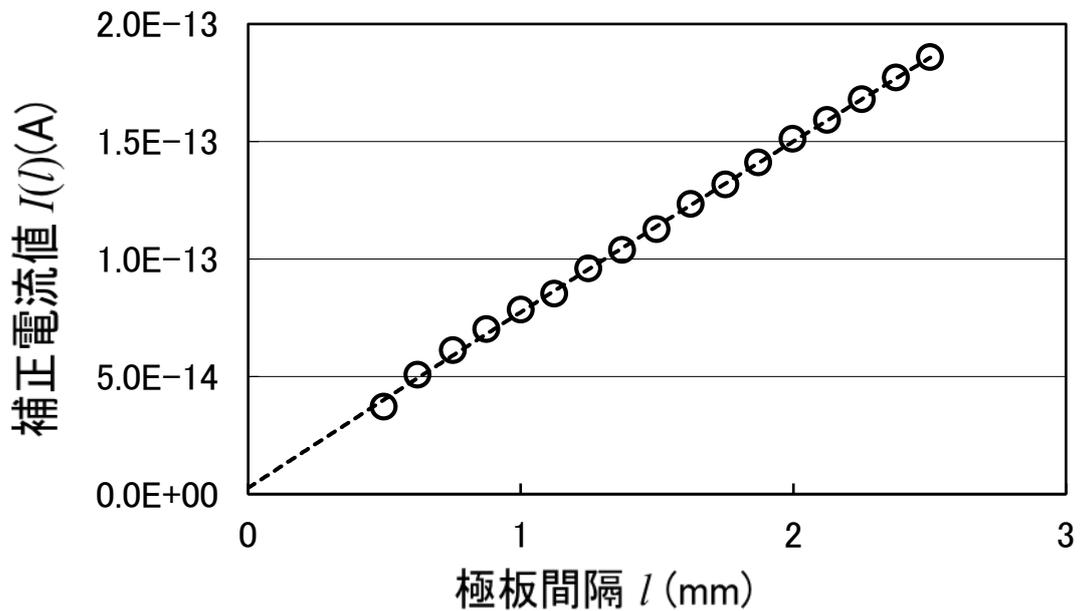


図 6 Sr-90/Y-90 線源(460 MBq)とエネルギー低減フィルタ 4 mm の組み合わせによる β 線による電離電流値を外挿電離箱で測定した結果。点線は 2 次式 $I(l)=a^2+bl+c$ によるフィット結果を示す。

得られたパラメータは $a=-1.0823 \times 10^{-15}$ 、 $b=7.5894 \times 10^{-14}$ 、 $c=2.5974 \times 10^{-15}$ である。

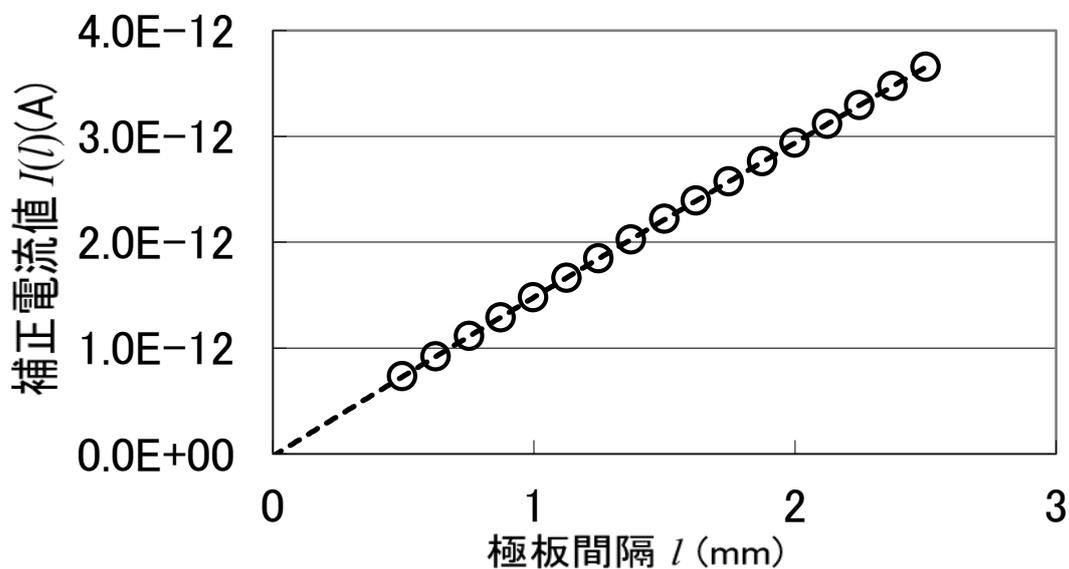


図 7 Sr-90/Y-90 線源(3.7 GBq)とエネルギー低減フィルタ 3 mm の組み合わせによる β 線による電離電流値を外挿電離箱で測定した結果。点線は 2 次式 $I(l)=a^2+bl+c$ によるフィット結果を示す。

得られたパラメータは $a=-2.0343 \times 10^{-14}$ 、 $b=1.5203 \times 10^{-12}$ 、 $c=-2.0823 \times 10^{-14}$ である。

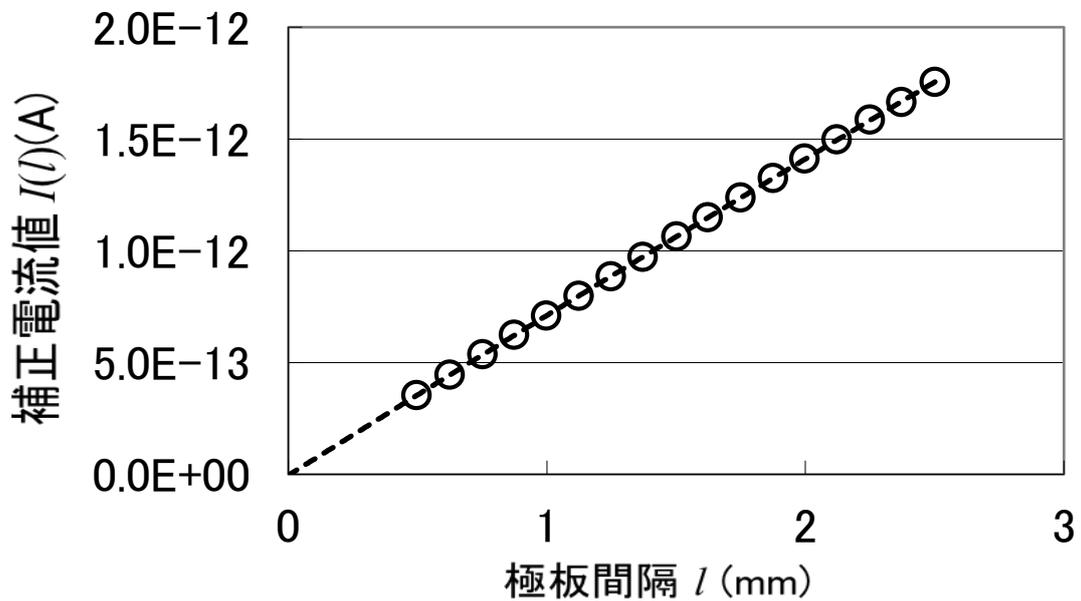


図 8 Sr-90/Y-90 線源(3.7 GBq)とエネルギー低減フィルタ 4 mm の組み合わせによる β 線による電離電流値を外挿電離箱で測定した結果。点線は 2 次式 $I(l)=a^2+bl+c$ によるフィット結果を示す。

得られたパラメータは $a=-7.5881 \times 10^{-15}$ 、 $b=7.2265 \times 10^{-13}$ 、 $c=-4.3353 \times 10^{-15}$ である。

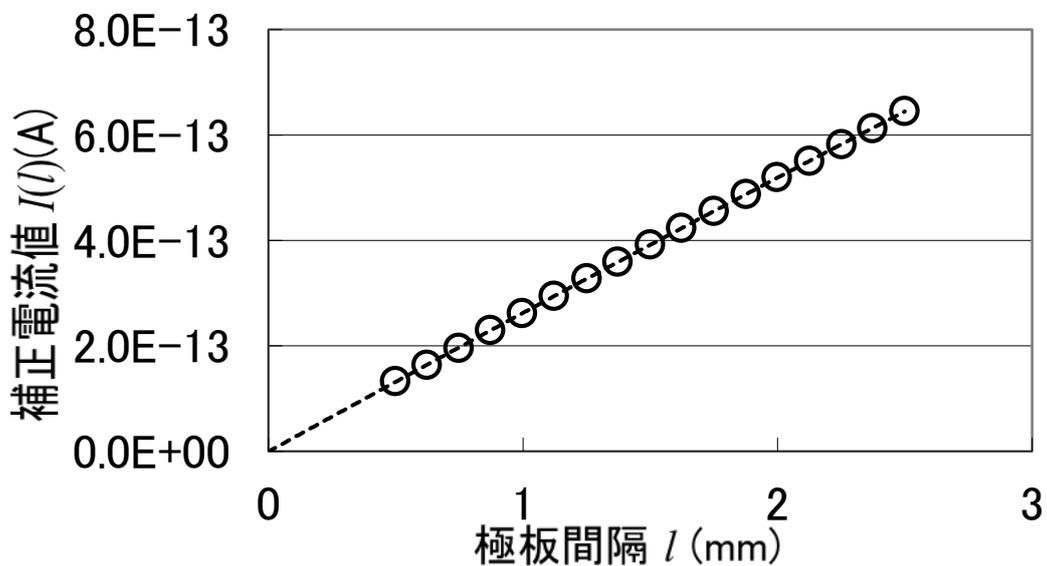


図 9 Sr-90/Y-90 線源(3.7 GBq)とエネルギー低減フィルタ 5 mm の組み合わせによる β 線による電離電流値を外挿電離箱で測定した結果。点線は 2 次式 $I(l)=a^2+bl+c$ によるフィット結果を示す。

得られたパラメータは $a=-3.2726 \times 10^{-15}$ 、 $b=2.6624 \times 10^{-13}$ 、 $c=-4.6762 \times 10^{-16}$ である。

3.3 拡大エネルギー β 線場の特性

本節では β 線場の特性のうち本研究の目的に欠かせない、最大残留エネルギー、散乱吸収特性、組織等価深さ $70\mu\text{m}$ と 3mm における線量率の比、線量率分布をどのようにして求めたかを述べる。最大残留エネルギーは、拡大エネルギー β 線場の指標として用いた。散乱吸収特性は 3.2 節で述べたように、外挿電離箱による測定において、得られた電流値の補正に必要である。また 3.2 節に記した内容によって $70\mu\text{m}$ 組織吸収線量率を求めることができるが 3mm 組織吸収線量率を求めるには、組織等価深さ $70\mu\text{m}$ と 3mm における線量率の比が必要である。線量率分布は、拡大エネルギー β 線場が場の均一性が保証されていない照射場であるため、外挿電離箱と検出部分の大きさの異なる検出器を校正する場合に必要である。

(1) 最大残留エネルギー

外挿電離箱の入射窓面のすぐ線源側にポリエチレンテレフタレート (PET) 製のフィルタを設置して電流値を測定することにより照射場の電子の最大飛程 $R_{\text{res}}[\text{mg}/\text{cm}^2]$ を求め、最大飛程を理論式により最大残留エネルギー $E_{\text{res}}[\text{MeV}]$ に換算する手法によった [3]。理論式は以下の式 (2) の通りである。

$$E_{\text{res}} = \sqrt{\frac{(0.0091 \cdot R_{\text{res}} + 1)^2 - 1}{22.4}} \quad (2)$$

電流値は PET 製のフィルタの厚さの関数として測定し、大気条件で補正する。測定した電流値の対数をフィルタの質量厚に対してプロットしたグラフから最大飛程を求めることができる。得られたグラフを図 10 に示す。図における直線成分とバックグラウンド値との交点が最大飛程となる。この測定により Sr-90/Y-90 線源とアクリル 3mm との組み合わせでは最大残留エネルギーは 1.5MeV 、アクリル 4mm との組み合わせでは 1.3MeV 、アクリル 5mm との組み合わせでは 1.0MeV 、Ru-106/Rh-106 では 3.0MeV との結果が得られた。

(2) 散乱吸収特性

導出するために実施する測定は最大残留エネルギーの場合と同様である。すなわち PET フィルタの厚さの関数として、外挿電離箱による検出電流値を大気圧で補正しプロットする。プロットの方法が最大残留エネルギーの導出の場合と少し異なり、横軸である PET フィルタの厚さは ISO6980-1:2006 の手法により組織等価厚に変換する。得られたプロットを図 11 に示す。この図から相対吸収線量率を組織等価厚の関数として表すことができる。この相対吸収線量率と組織等価厚の関係を散乱吸収特性という。組織吸収線量率の絶対測定において散乱吸収特性は、大気条件の参照条件 (気温 20°C 、気圧 1013.15hPa 、相対湿度 65%) からのずれを補正するために用いる。この補正の理論的な背景は ISO6980-2:2004 に詳しいが、簡単に述べると以下のように理解される。すなわち、大気条件の参照条件からのずれは

空気層の質量厚の増減ととらえることができるため、空気層の質量厚の増減を組織等価厚の変化に換算して散乱吸収特性と照らし合わせるにより、 β 線の線量率の補正を導いている。

(3)組織等価深さ $70\mu\text{m}$ と 3mm における線量率の比 $\dot{D}(3)/\dot{D}(0.07)$

導出するためのデータは散乱吸収特性を求めるための図と同じものを用いる。この図において組織等価厚 0.07 mm 付近と 3 mm 付近に着目し、 0.07 mm 付近と 3 mm 付近のデータから、フィッティングにより組織等価厚の関数としての相対吸収線量率を求める。この関数から 0.07mm における相対吸収線量率と 3mm における相対吸収線量率が得られるため、比をとることにより組織等価深さ $70\mu\text{m}$ と 3mm における線量率の比が得られる。得た値を、 3mm 組織吸収線量率とその不確かさと共に表 4 に示す。

(4)線量率分布

まず Sr-90/Y-90 線源(460 MBq)とアクリルフィルタ 3 mm の組み合わせについて、小体積電離箱を用いて詳細な測定を実施した。その結果を図 12 に示す。このように線量率分布は 2 次関数で良く表すことができると分かった。この結果を踏まえ、他の β 線場においては最低限の測定点において線量率分布を測定し、二次関数によるフィット結果に基づいて線量率分布を表現した。

表 4 拡大エネルギー β 線場および ISO シリーズ 1 β 線場の 3mm 組織吸収線量率。不確かさは包含係数 $k=1$ で表す。

線源核種	公称放射能 (Bq)	フィルタ	$\dot{D}(3)/\dot{D}(0.07)$	$\dot{D}(3)$ (mGy/h)	$\dot{D}(3)$ の不確かさ ($k=1$)
*Sr-90/Y-90	460 M	BFF	43 %	12.9	1.6 %
Sr-90/Y-90	460 M	アクリル 3 mm	13.5 %	3.55	1.6 %
Sr-90/Y-90	3.7 G	アクリル 3 mm	18.9 %	44.0	1.4 %
Sr-90/Y-90	3.7 G	アクリル 4 mm	10.4 %	11.5	1.4 %
Sr-90/Y-90	3.7 G	アクリル 5 mm	4.4 %	1.81	1.4 %
Ru-106/Rh-106	74 M	なし	70 %	10.4	2.4 %

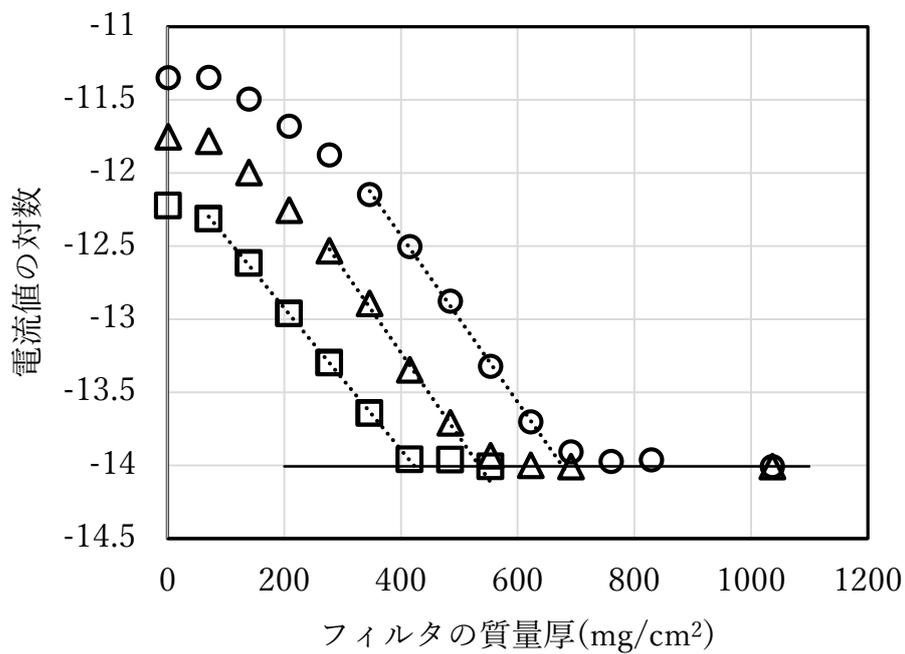


図 10 最大飛程を求めるプロット。電流値の対数をフィルタの質量厚に対してプロットする。直線成分とバックグラウンド値との交点が最大飛程である。○：Sr-90/Y-90 と 3mm のアクリルフィルタの組み合わせ、△：Sr-90/Y-90 と 4mm のアクリルフィルタの組み合わせ、□：Sr-90/Y-90 と 5mm のアクリルフィルタの組み合わせ

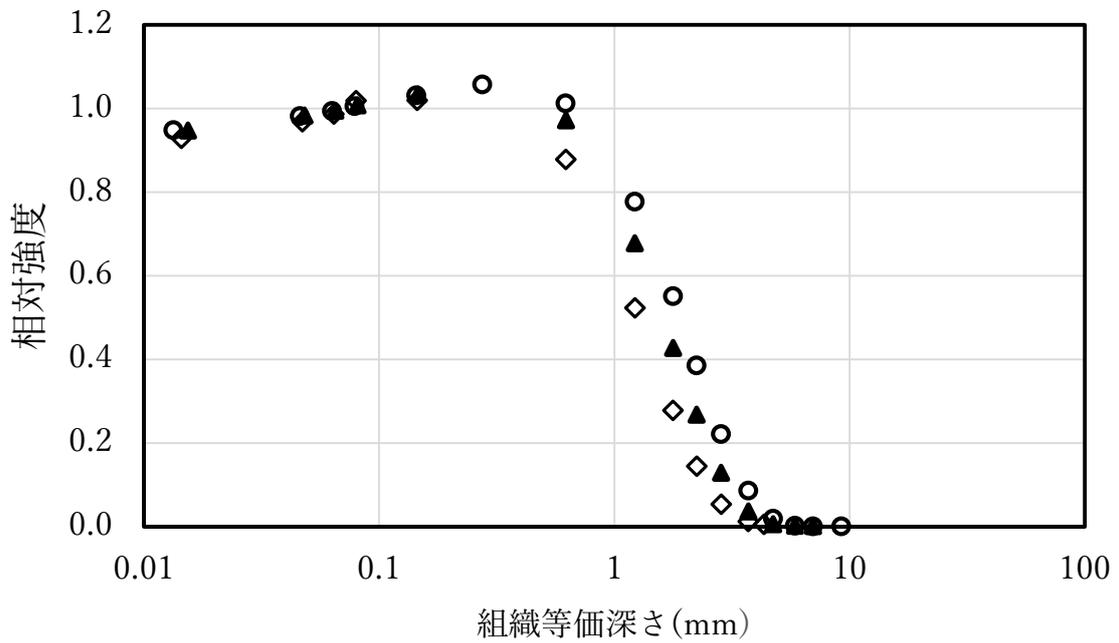
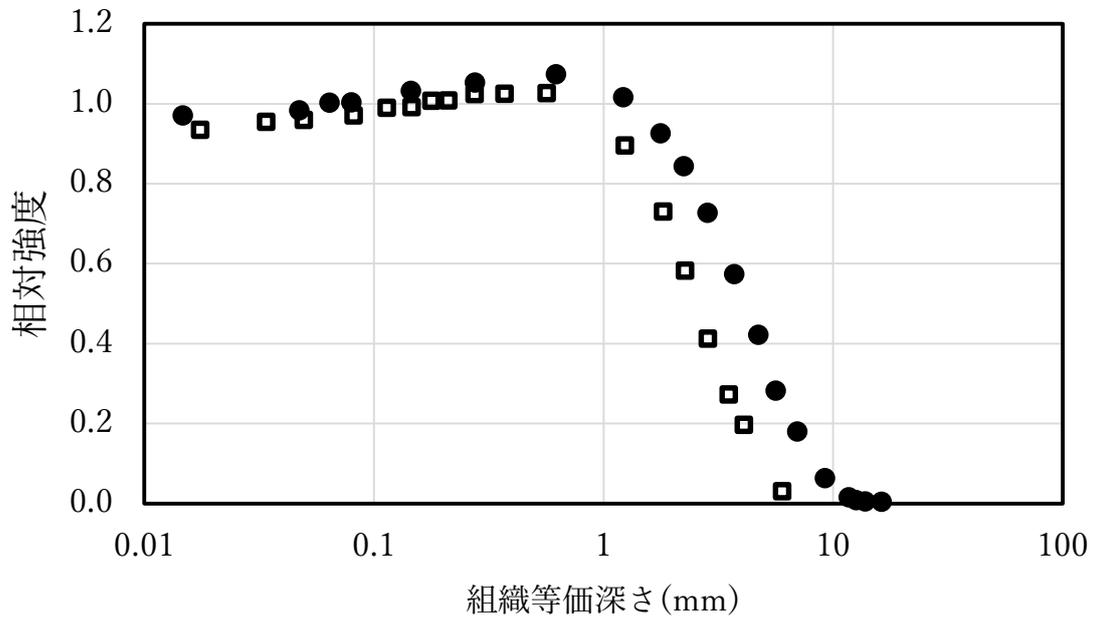


図 11 β 線場の、組織等価深さに対する相対組織吸収線量率。●：ルテニウム線源による β 線場、□：ストロンチウム線源とビームフラッタニングフィルタを組み合わせた β 線場、○：ストロンチウム線源とアクリル3mm厚のフィルタを組み合わせた β 線場、▲：ストロンチウム線源とアクリル4mm厚のフィルタを組み合わせた β 線場。◇：ストロンチウム線源とアクリル5mm厚のフィルタを組み合わせた β 線場。

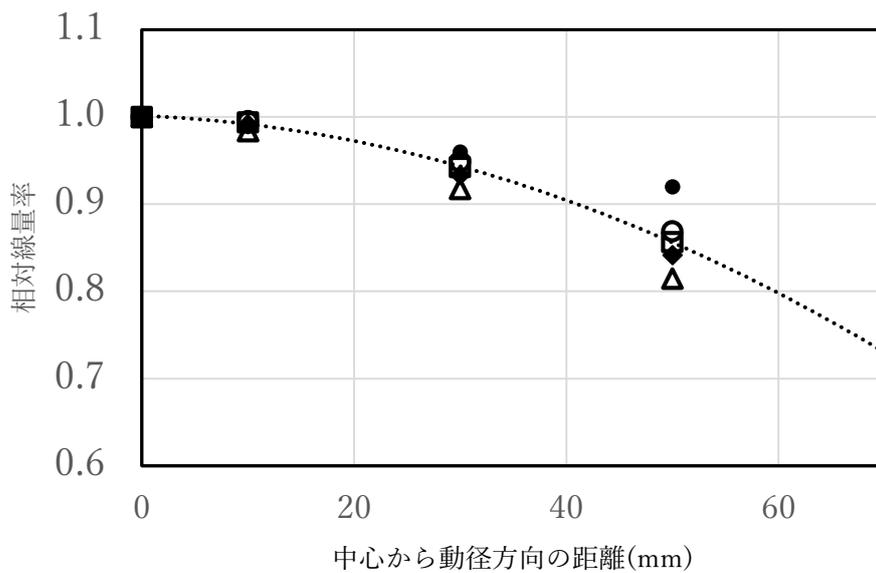
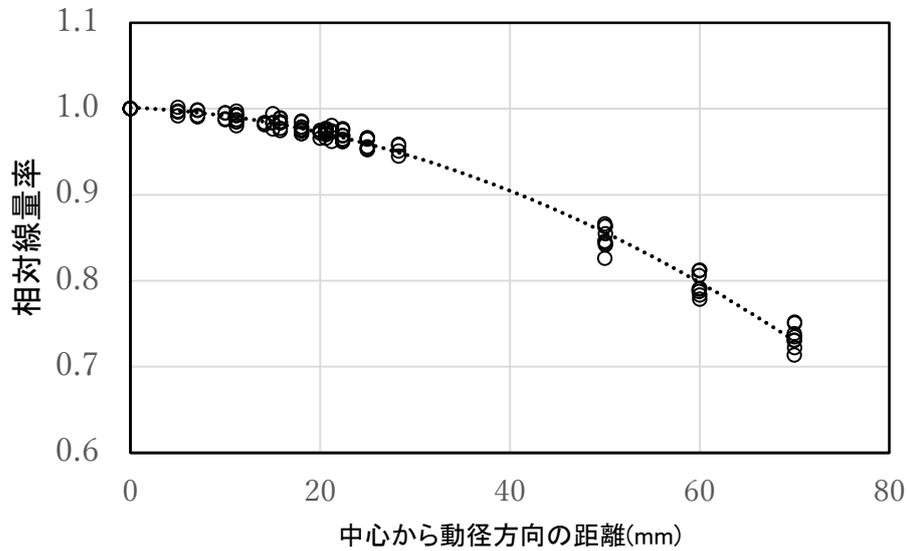


図 12 基準面（線源から線源検出器間距離離れた垂直面）における相対線量率。(上)460 MBq の Sr-90/Y90 とアクリル 3mm 厚のフィルタを組み合わせた β 線場。点線は二次関数によるフィット結果を示す。(下)点線は上図の点線と同じ。●：ルテニウム線源による β 線場、○：ストロンチウム線源(3.7 GBq)とアクリル 3mm 厚のフィルタを組み合わせた β 線場、□：ストロンチウム線源(3.7 GBq)とアクリル 4mm 厚のフィルタを組み合わせた β 線場。◆：ストロンチウム線源(3.7 GBq)とアクリル 5mm 厚のフィルタを組み合わせた β 線場。△：460 MBq の Sr-90/Y90 とアクリル 4mm 厚のフィルタを組み合わせた β 線場。

4 β 線照射場における 3mm 線量当量換算係数

β 線場の 3mm 線量当量($H(3)$)を求めるために、3mm 組織吸収線量($D(3)$)から換算するための換算係数を EGS5 コード[9]のシミュレーション計算により求めた。線量当量は吸収線量に線質係数 Q を乗じることで求められる[8]。 β 線の線質係数は 1Sv/Gy であるので、標準の照射条件において換算係数は 1Sv/Gy である。ここで標準の照射条件とは線量計に対して直入射で β 線を照射することとする。方向特性の試験などにおいては角度をつけた条件で照射を行うため、入射角度を変数とした換算係数を求める必要がある。求めた換算係数を下記の式(3)で定義する[3]。

$$h(d; \alpha) = \frac{H(d; \alpha)}{D(d; 0^\circ)} \quad (3)$$

ここで d は組織深さを示す。本事業の主な目的としては 3mm となるが、0.07 mm 深さについても計算を行った。 α は入射角度であり、本研究では 0 度から 75 度まで 15 度ステップで計算を行った。

4.1 計算を行った対象

(1)ファントムごとの特性

Sr-90/Y-90 とビームフラッタニングフィルタを組み合わせた場について、ファントムの形状 (スラブファントム、円柱ファントム、ICRU 球) の違いにより線量当量換算係数がどのように振舞うか計算により調査した。

(2)3mm 線量当量換算係数の角度特性

角度特性の計算はエネルギー低減フィルタを用いた場と Ru-106/Rh-106 線源を用いた場について、ICRU 球について計算を行った。

4.2 シミュレーション計算の条件

計算は EGS5 コードの拡張パッケージである EGS5-MPI[10]による並列計算を行った。3 種類のファントムの素材は ICRU 組織とした。スラブファントムは 30cm×30cm×15cm の直方体、円柱ファントムは直径 20cm×高さ 20cm の円柱、ICRU 球は直径 30cm の球として設定した。線源の構造はメーカーから提示された情報をもとに構築した。

本研究において線量当量は、ファントム内の指定した領域に吸収されたエネルギーをスコアするという方法により求めた。スラブファントムの場合は入射面中央の直下に、5 mm 角で厚さ 0.02 mm の領域を複数の深さに設定した。円柱ファントム及び ICRU 球の場合は円柱もしくは球の中心から着目する方向の角度に対して $\pm 1^\circ$ の立体角を見込む円錐を設

定し、この円錐中の複数の深さにおけるそれぞれ厚さ 0.02 mm の領域のエネルギーをスコアする領域とした。EGS5 コードで記述したスコア領域を図 13 に示す。

4.3 ファントムの形状に関する計算結果

図 14 に、スラブファントムの線量当量換算係数に対する、円柱ファントム及び ICRU 球の線量当量換算係数の比を、ファントムの深さに対して示す。照射条件は Sr-90/Y-90 線源による ISO シリーズ 1 β 線場における直入射条件である。この条件においては深さ 3mm までではファントムによる依存性は見られないことが分かった。

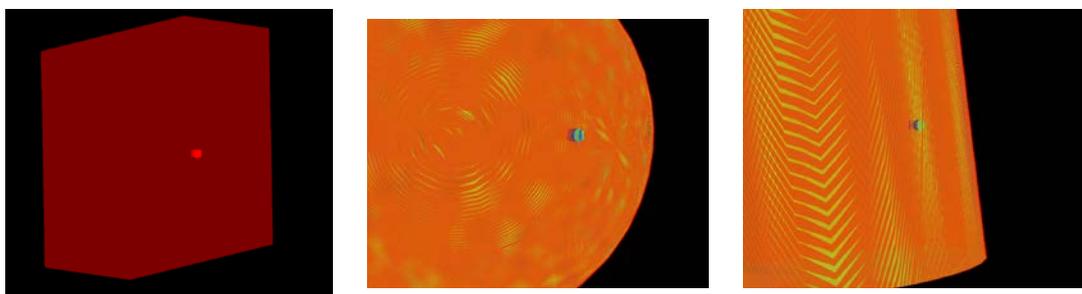


図 13 シミュレーション計算における吸収エネルギーをスコアした領域。左：スラブファントム、中央：ICRU 球、右：円柱ファントム。各図において中央部分の明るい領域がスコア領域である。

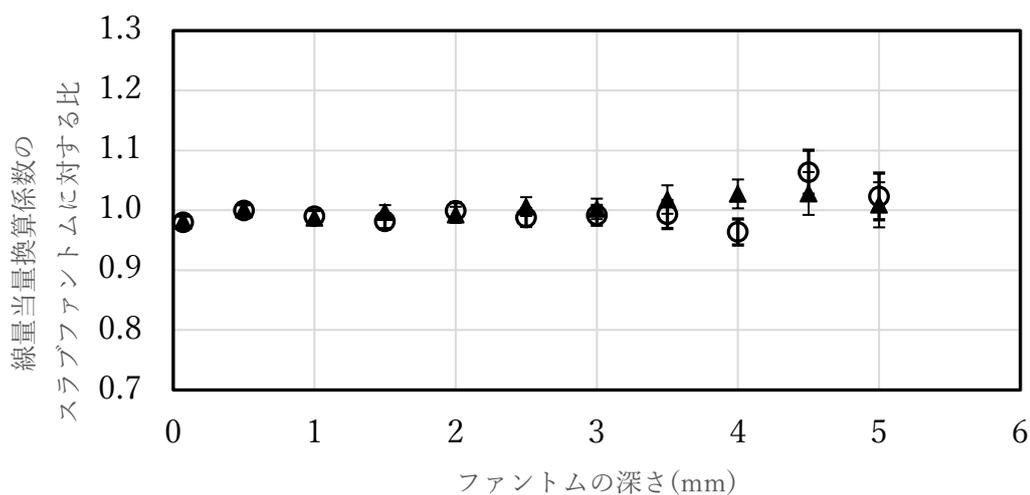


図 14 ISO シリーズ 1 β 線場における円柱ファントム(▲)と ICRU 球(○)に対する線量当量換算係数。スラブファントムの線量当量換算係数に対する比として、ファントムの深さの関数として表示している。

4.4 線量当量換算係数の角度特性に関する計算結果

図 15 から図 19 に、70 μm 線量当量および 3mm 線量当量に関する線量当量換算係数の角度特性の計算結果を示す。計算の統計的な不確かさを図中のエラーバーで示しているが、図 15 および図 16 では計算精度が高いため、エラーバーは図では見えないほど小さい。70 μm 線量当量の換算係数では、いずれの場合でも角度が増大するにつれて一度は換算係数が大きくなり、75 度では換算係数が小さくなるという傾向を示した。また 3mm 線量当量の換算係数では角度の増大と共に単調に換算係数は小さくなる。Sr-90/Y-90 線源では一般的に数百マイクロメートルの深さまでは線量率が増加し、その後減少に転じるという特徴が知られている[3]。入射角が大きくなることによって実効的な深さが大きくなるので、このような挙動を示していると考えられる。

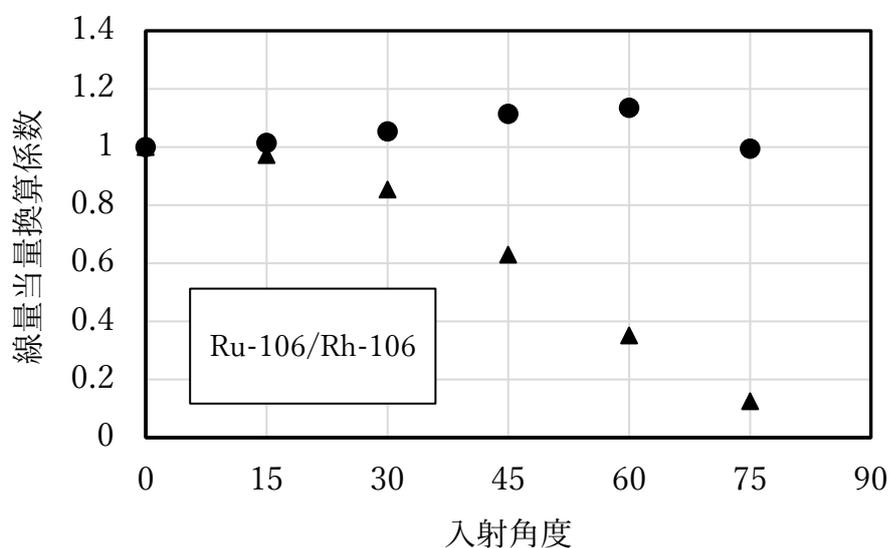


図 15 Ru-106/Rh-106 線源による β 線場における線量当量換算係数の入射角特性。●:70 μm 線量当量換算係数。▲3mm 線量当量換算係数。

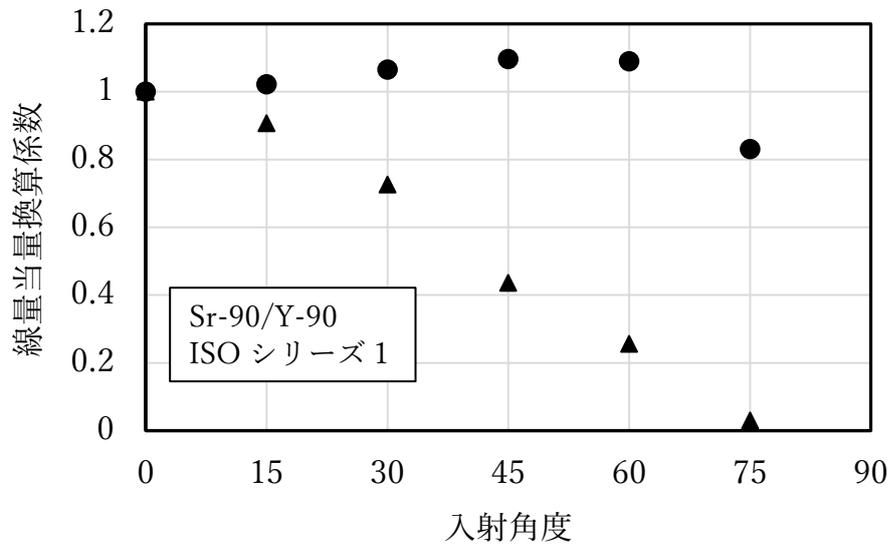


図 16 Sr-90/Y-90 線源による ISO シリーズ 1 β 線場の線量当量換算係数の入射角特性。●：70 μ m 線量当量換算係数。▲3mm 線量当量換算係数。

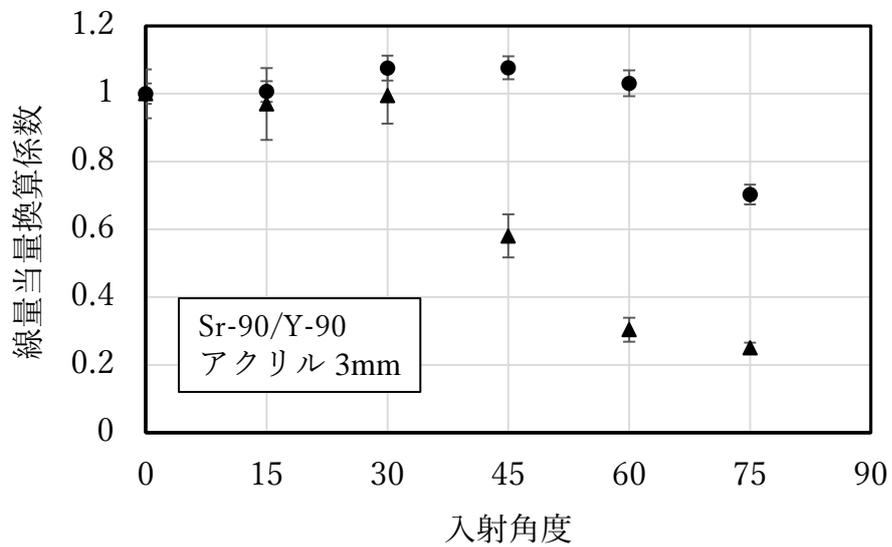


図 17 Sr-90/Y-90 線源と 3mm のアクリルフィルタの組み合わせによる β 線場の線量当量換算係数の入射角特性。●：70 μ m 線量当量換算係数。▲3mm 線量当量換算係数。

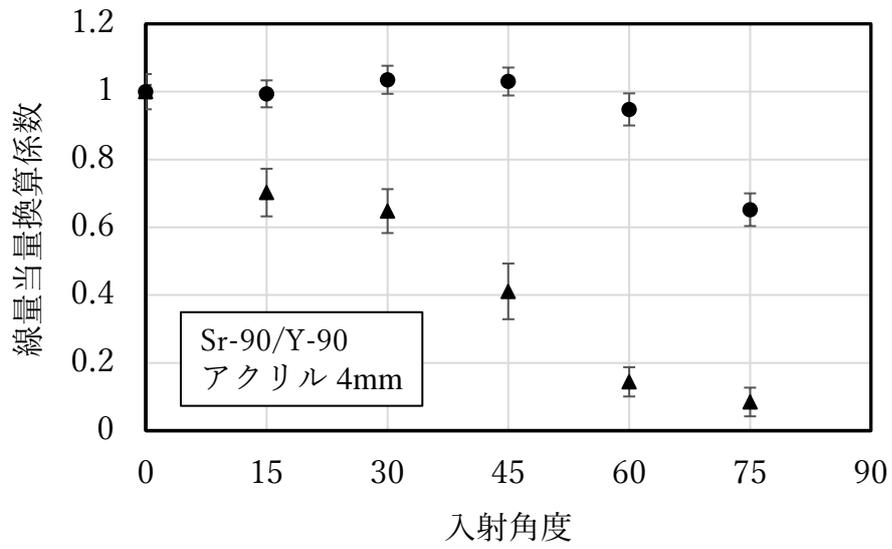


図 18 Sr-90/Y-90 線源と 4mm のアクリルフィルタの組み合わせによる β 線場の線量当量換算係数の入射角特性。●：70 μ m 線量当量換算係数。▲3mm 線量当量換算係数。

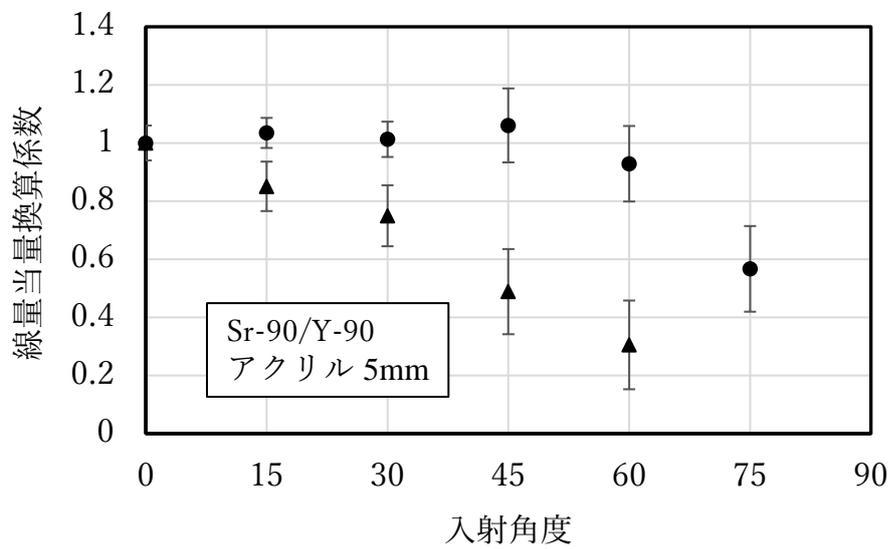


図 19 Sr-90/Y-90 線源と 5mm のアクリルフィルタの組み合わせによる β 線場の線量当量換算係数の入射角特性。●：70 μ m 線量当量換算係数。▲3mm 線量当量換算係数。

5 薄膜電離箱の校正

5.1 70 μm 線量当量の単位での校正

校正定数 $N_{0.07}$ は以下の式(4)によって導出した。

$$N_{0.07} = \frac{\dot{D}(0.07) \cdot h / k_{ra}}{M_d} \quad (4)$$

ここで、 $\dot{D}(0.07)$ は 70 μm 組織吸収線量、 h は線量当量換算係数、 k_{ra} は線量率分布補正係数、 M_d は検出器の出力値を大気条件（測定時の空気密度）で補正した値である。今回の校正においては直入射条件で実施しているため h は 1 Sv/Gy である。 k_{ra} は 3.3 節で求めた線量率分布に基づいて求めた。

5.1.1 使用した電離箱

70 μm 線量当量の単位での校正は、薄膜電離箱 CE-60S(応用技研)と CE-08(応用技研)を対象とした。両者ともに 70 μm 線量当量測定用のフィルタが付属しており、このフィルタを装着した条件で校正定数の測定を行った。電圧は-400V を印加して測定した。電流測定は振動容量電位計(MMA-II17E、川口電機)を用いた。CE-60 は有効体積が 60 ml、CE-08 は有効体積が 8 ml であり、大きさが異なる。検出面の有効直径についても CE-60 は約 10 cm、CE-08 は約 4 cm である。そのため両者の校正定数を測定し結果を比較することで、線量率分布補正の妥当性を検証可能である。

図 20 と図 21 にそれぞれの電離箱の写真を、専用フィルタとともに示す。

5.1.2 校正定数の測定結果

図 22 に CE-60S の校正定数の測定結果を、図 23 に CE-08 の校正定数の測定結果を示す。図中のエラーバーは校正定数の測定の不確かさを包含係数 $k=2$ で示している。図より Sr-90/Y-90 線源とエネルギー低減フィルタの組み合わせによる β 線場での結果は、線源の放射能および線源カプセルの違いはあるものの、よく一致していることが分かる。また 2 種類の検出面の有効径の異なる電離箱で、共に良好な結果が得られたことは、線量率分布の補正が適切に行われていることの傍証と言える。

本研究の成果による測定点が増えることで、従来の 3 点のみのエネルギーに比べ、校正定数のエネルギー特性を詳細に調査し、理解できるようになると期待できる。

5.2 3mm 線量当量の単位での校正

校正定数 N_3 は以下の式(5)によって導出した。

$$N_3 = \frac{\dot{D}(3) \cdot h / k_{ra}}{M_d} \quad (5)$$

ここで、 $\dot{D}(3)$ は3mm 組織吸収線量、 h は線量当量換算係数、 k_{ra} は線量率分布補正係数、 M_d は検出器の出力値を大気条件（測定時の空気密度）で補正した値である。70 μ m 線量当量の校正と同様に今回の校正においては直入射条件で実施しているので h は 1 Sv/Gy であり、 k_{ra} は 3.3 節で求めた線量率分布に基づいて求めた。

5.2.1 使用した電離箱

3 mm 線量当量の単位での校正は、薄膜電離箱 CE-60S(応用技研)を用いた。この電離箱に 3 mm 線量当量測定用のフィルタは付属していないため、本研究では 2 mm 厚さのアクリルフィルタと 0.5 mm 厚のアクリルフィルタを重ねて、3mm 線量当量測定器として CE-60 電離箱を用いた。アクリルの本来の組織等価厚は 2.6mm であるが、入手しやすい厚さのものをを用いるという方針を取った。測定時は-400V を印加して測定した。電流測定は振動容量電位計(MMA-II17E、川口電機)を用いた。

図 20 に CE-60S 電離箱の写真を、2 mm 厚、0.5 mm 厚のアクリルフィルタとともに示す。

5.2.2 校正定数の測定結果

図 24 に CE-60S の校正定数の測定結果を示す。校正定数の不確かさは図中に包含係数 $k=2$ で示した。3.7 GBq と 460 MBq の Sr-90/Y-90 線源をそれぞれ 3mm のエネルギー低減フィルタと組み合わせた場(最大残留エネルギー1.5 MeV)の校正定数の違いは、カプセルの線源窓の厚さに起因していると考えられる。この二つの場については $\dot{D}(3)/\dot{D}(0.07)$ の値に差が見られている（表 4 参照）。実際の電子エネルギースペクトルを調査することでこの原因を探ることができるだろう。

本研究の成果による測定点が変わり、従来 1 点だけであった測定点が増え、校正定数のエネルギー特性を検証できるようになった。2.5mm のアクリルフィルタを使った CE-60S 電離箱は、1MeV~3MeV の範囲にわたり、校正定数が $\pm 10\%$ の変動内に収まっており、3mm線量当量の測定において有用な線量計であると評価できる。

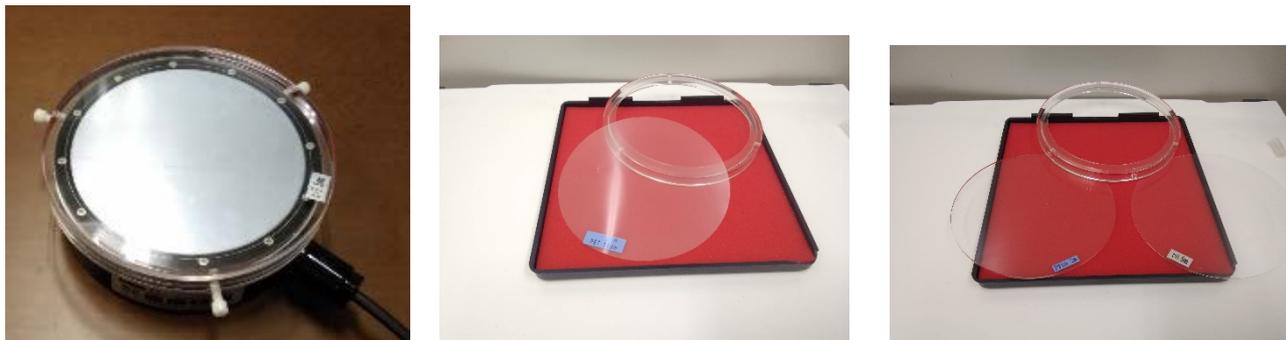


図 20 CE-60S 電離箱 (左)、70 μm 線量当量測定用フィルタと装着具(中央)、3mm 線量当量測定用に用いた 2mm 厚アクリルフィルタ及び 0.5mm 厚アクリルフィルタと装着具



図 21 CE-08 電離箱。70 μm 線量当量測定用フィルタが装着されている (左)、70 μm 線量当量測定用フィルタ単体の写真(右)

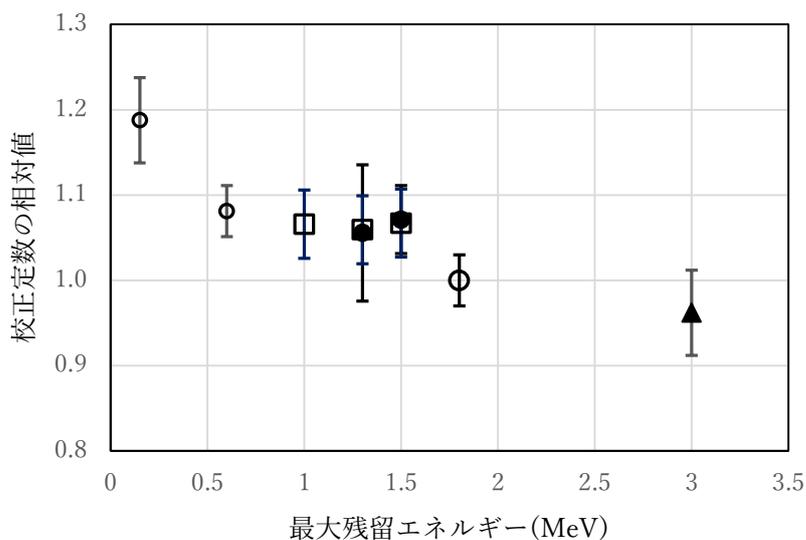


図 22 CE-60S 電離箱の 70 μ m 線量当量に対する校正定数。70 μ m 測定用のフィルタを装着した状態で測定した。□：3.7GBq の Sr-90/Y-90 線源とエネルギー低減フィルタの組み合わせによる β 線場、●：460MBq の Sr-90/Y-90 線源とエネルギー低減フィルタの組み合わせによる β 線場、○：ISO シリーズ 1 β 線場、▲：Ru-106/Rh-106 β 線源による β 線場。

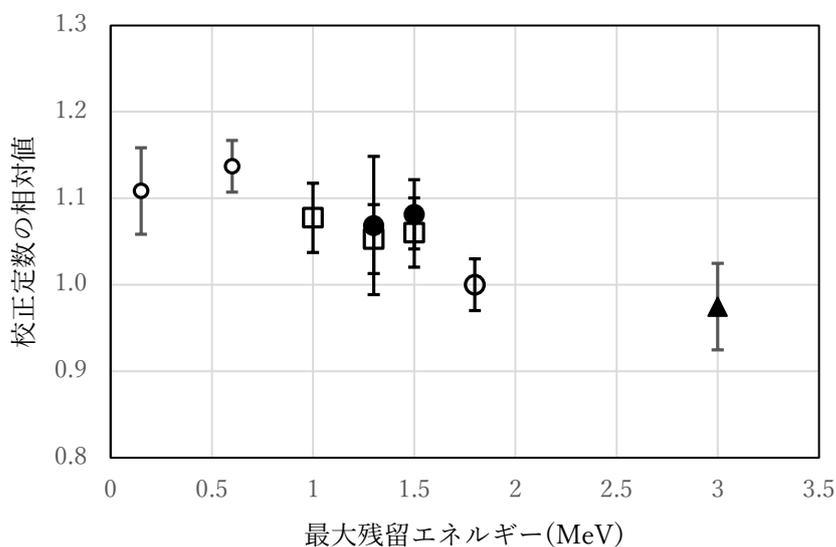


図 23 CE-08 電離箱の 70 μ m 線量当量に対する校正定数。70 μ m 測定用のフィルタを装着した状態で測定した。□：3.7GBq の Sr-90/Y-90 線源とエネルギー低減フィルタの組み合わせによる β 線場、●：460MBq の Sr-90/Y-90 線源とエネルギー低減フィルタの組み合わせによる β 線場、○：ISO シリーズ 1 β 線場、▲：Ru-106/Rh-106 β 線源による β 線場。

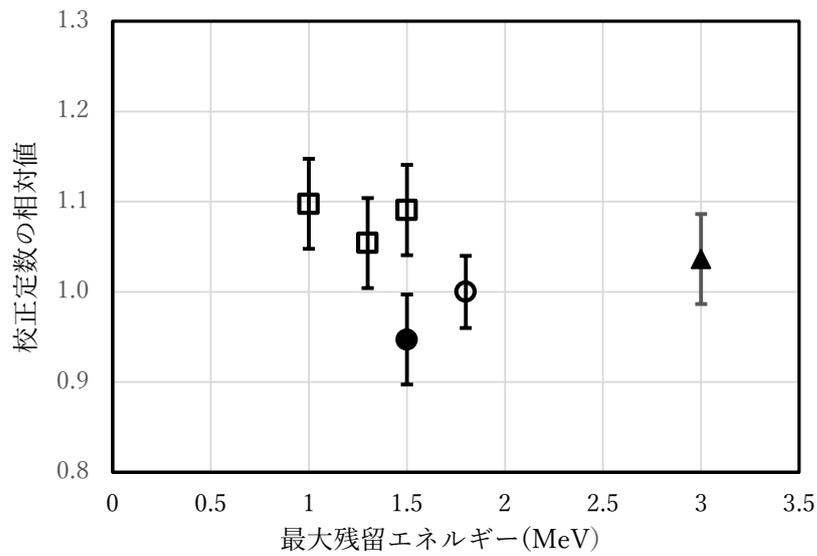


図 24 CE-60S 電離箱の 3mm 線量当量に対する校正定数。2mm と 0.5mm のアクリルフィルタを重ねて装着した状態で測定した。□：3.7GBq の Sr-90/Y-90 線源とエネルギー低減フィルタの組み合わせによる β 線場、●：460MBq の Sr-90/Y-90 線源とエネルギー低減フィルタの組み合わせによる β 線場、○：ISO シリーズ 1 β 線場、▲：Ru-106/Rh-106 β 線源による β 線場。

6. まとめ

本事業は、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、平成 29 年度から 30 年度の 2 か年計画で研究を進めてきた。平成 29 年度は主に X 線の 3mm 線量当量換算係数に関する成果をあるとともに、 β 線のエネルギー拡大のための予備研究や個人線量計への照射試験を実施した。平成 30 年度には主として β 線の 3mm 線量当量に関する計量システムの構築を目指し、拡大エネルギー β 線場の開発、3mm 線量当量換算係数の計算、 β 線場における 3mm 線量当量の単位での校正定数の測定を行った。X 線に関する成果についてはアジアオセアニア放射線防護国際会議(AOCCRP-5)において、 β 線に関する成果については日本保健物理学会第 51 回研究発表会と日本原子力学会 2019 年春の年会で発表を行った。また JASIS2018 第 4 回分析計測標準研究部門シンポジウムでは X 線と β 線の両方にわたる発表を行った（成果発表リストを参照）。

拡大エネルギー β 線場としては ISO6980-1:2004 のシリーズ 1 標準場に含まれない、Kr-85 線源と Sr-90/Y-90 線源の間のエネルギーと Sr-90/Y-90 線源より上のエネルギーについて開発を行った。具体的には Sr-90/Y-90 線源のエネルギーをアクリル製のエネルギー低減フィルタで減らす方法と Ru-106/Rh-106 線源を使う方法によった。本事業の手法は、国内外で β 線照射装置として一般的に用いられている β 線照射装置である BSS2 のシステムに組み込んで実行することができるため、今後他の校正事業者において実施を検討する場合、技術的には導入は比較的容易である。

3mm 線量当量換算係数の計算では EGS5 コードによるモンテカルロシミュレーションを行い、Sr-90/Y-90 線源による ISO シリーズ 1 β 線場および本事業で開発した拡大エネルギー β 線場の線量当量換算係数の角度依存性を求めた。

また開発した β 線場において薄膜電離箱の校正定数を 70 μ m 線量当量および 3mm 線量当量の単位について測定し、従来の校正定数と矛盾ない結果を得た。

今年度の成果により、 β 線の 3mm 線量当量測定器のエネルギー特性の評価や角度特性の評価が可能になった。このことにより、現在確立している β 線の 70 μ m 線量当量測定に関する国内の計量システムと同等のシステムを、 β 線 3mm 線量当量測定についても構築する準備が整ったといえる。さらに 70 μ m 線量当量測定器のエネルギー特性を調査する際にも、これまで測定点として存在しなかったエネルギー領域において校正定数の測定や照射試験の実施が可能となり、3MeV 以下のエネルギーで詳細にエネルギー特性を調査できるようになった。

今後は開発した β 線場が国内外で広く活用されるように、工業規格化を推進していくことが期待される。

7. 総括

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、① β 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きた。

β 線標準場のエネルギーの拡大では、平成29年度には本事業開始時点で産業技術総合研究所が維持管理していた施設・設備を用いて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。平成30年度には既存設備のSr-90/Y-90線源よりも放射能の大きいSr-90/Y-90線源およびRu-106/Rh-106線源を導入し、アクリル製のエネルギー低減フィルタを用いる方法により拡大エネルギー β 線場を開発した。

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、平成29年度には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。このうちIEC61267で規定されている診断用X線装置によるRQR指標のX線場は、あらたに産業技術総合研究所のX線照射施設でも発生できるようにフィルタの組み合わせを開発した。3mm線量当量換算係数の計算で対象としたファントムはICRU球、ICRUスラブ、円柱ファントムである。平成30年度はISOシリーズ1の β 線場と拡大エネルギー β 線場に関して、組織吸収線量から3mm線量当量を導出するための換算係数を導出した。

線量計の試験・校正の実証実験としては平成29年度に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年度にはISOシリーズ1の β 線場と拡大エネルギー β 線場において薄膜電離箱の校正定数を70 μ m線量当量および3mm線量当量の単位について測定し、従来の校正定数と矛盾ない結果を得た。

以上の成果により、X線および β 線校正場において3mm線量当量の単位での校正や照射試験が可能になった。また β 線用電離箱の3mm線量当量及び70 μ m線量当量について、校正定数のエネルギー特性をより詳細に測定することができることを実証した。この成果は管理方法を提言するために実施する3mm線量当量計測の保証や個人線量モニタリングの品質保証に活用が期待される。さらに拡大エネルギー β 線場については工業規格化を推進していくことにより、国内外で広く活用されるポテンシャルのある技術であり、今後の展開が期待できる。

成果発表リスト

平成 30 年度に本事業に関連して行った国内外学会等における成果発表を記す。

- ・ ”Dose equivalent conversion coefficients of the x-ray reference fields in NMIJ”, Masahiro Kato, Tadahiro Kurosawa and Kazufumi Yachi, アジアオセアニア放射線防護国際会議 (AOCR-5, オーストラリア メルボルン：平成 30 年 5 月)
- ・ ” β 線 3mm 吸収線量に対する薄膜電離箱とサーベイメータの校正”, 加藤昌弘、黒澤忠弘、日本保健物理学会第 51 回研究発表会 (札幌：平成 30 年 6 月)
- ・ ” 水晶体被ばく線量測定に用いる線量当量換算係数の決定と実用”, 加藤昌弘、黒澤忠弘、JASIS2018 第 4 回分析計測標準研究部門シンポジウム(千葉：平成 30 年 9 月)
- ・ ” 水晶体被ばく線量測定における 1MeV 以上の β 線校正場の開発”, 加藤昌弘、黒澤忠弘、日本原子力学会 2019 年春の年会 (水戸：平成 31 年 3 月)

参考文献

- [1] ICRP, ICRP Publication 118, *Ann. ICRP*, **41** (1/2) (2012)
- [2] IEC, IEC61267:2005 (2005)
- [3] ISO, ISO6980-1:2006 (2006)
- [4] 清水滋 : JAERI-M 93-172, p233-235, “保健物理と管理の研究”, (1993)
- [5] 日本工業規格 JIS Z 4514:2010 (2010)
- [6] R. Behrens, *et al*, *Metrologia* 44(1A):06003
- [7] ISO, ISO6980-2:2004 (2004)
- [8] ICRU, ICRU60 (1998)
- [9] H. Hirayama et al, SLAC Report number: SLAC-R-730(2005)
- [10] 清水森人 <https://unit.aist.go.jp/rima/ioniz-rad/egs5mpi/index.html>