

令和4年度原子力規制庁委託成果報告書

新たな実用量への対応に係る線量計測上の課題
に関する研究

国立研究開発法人産業技術総合研究所

令和5年3月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問合せは、原子力規制庁までお願いします。

内容

1. 事業の背景.....	2
2. 事業の概要.....	2
2.1 事業計画（産総研実施分）	5
2.2 実施体制	5
3. 事業の成果（再委託分を除く）	6
3.1 事業を実施した産業技術総合研究所における照射施設の概要.....	6
3.2 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査	10
3.2.1 校正・試験場の線量換算係数の評価.....	11
(1) γ 線.....	11
(2) X線	16
(3) 中性子.....	70
(4) β 線.....	76
3.2.2 方向特性試験環境の整備	80
3.2.3 トレーサビリティ確保に関する調査	84
3.3 中性子線量計の特性評価に関する調査.....	84
3.4 新たな実用量への対応に係る課題の調査	87
3.4.1 ヒアリング調査	87
3.4.2 国内関係者が参加したワークショップ	88
3.5 国内外の情報収集	90
4. 再委託先である JAEA での事業実施内容の概要	90
5. まとめ.....	92
6. 謝辞.....	94
7. 参考文献.....	94

別添 「令和 4 年度新たな実用量への対応に係る線量計測上の課題に関する研究～二次標準機関及び原子力施設における調査研究～事業成果報告書」

1. 事業の背景

我が国における放射線障害防止に関する技術的基準は、国際放射線防護委員会（ICRP）や国際原子力機関（IAEA）等で国際的に合意された放射線防護の考え方を尊重し、制度間の斉一を図りながら、策定されてきた。

国際放射線単位測定委員会（ICRU）は令和2年12月に、ICRPと合同で検討を進めてきた放射線防護に係る概念である実用量の定義変更を勧告する報告書（ICRU Report 95 *Operational Quantities for External Radiation Exposure*）^[1]を発刊した。放射線の人体影響の指標となる実効線量及び等価線量は「防護量」と呼ばれ、モデルを用いて計算される量であり、実際に測定することはできない。一方、外部放射線防護のために放射線管理の現場で用いられているサーベイメータ及び個人線量計（以下単に「線量計」という。）は防護量を近似的に測定可能な「実用量」を基準に設計及び校正されており、新たな実用量の導入による放射線管理への影響が懸念されている。具体的な懸念として、先行の調査事業（令和元年度放射線対策委託費（放射線管理に係る実用量の測定等の実態調査）事業）報告書^[2]において、現行の線量計が引き続き使用できるか、導入前後で混乱なく一貫した線量測定評価が可能か等、線量計の性能評価及びその許容範囲に関連する実務的課題が挙げられている。

また、放射線防護に係る線量の概念は我が国だけでなく世界各国で放射線防護の体系に取り入れられており、これらに変更された場合、各国で法令への取り入れに向けた検討が進められることになる。特に、我が国においては、これらの概念を取り入れている制度の所管が複数の省庁にまたがっており、制度間の斉一を図る必要があることから、取り入れの検討を迅速に開始するために技術的知見の整備を早急に推し進めることが求められる。

これらの課題を整理するため、本事業では、新たな実用量の標準場開発やこれらの場を使った各種線量計の特性試験を実施することを目的とする。

2. 事業の概要

本事業は線量計測に関する国家標準機関である国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、「産総研」という。）が受託し、二次標準機関である国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。）に一部事業内容を再委託して、2.2に示す実施体制で大きく5つのテーマを実施した。それぞれのテーマの事業概要は以下の通りである。なお、本成果報告書は事業内容の内、産総研の実施分について第3章に記述し、JAEA実施分の成果については第4章に概要を示し、詳細は別添の「令和4年度新たな実用量への対応に関わる線量測定上の課題に関する研究～二次標準機関及び原子力施設における調査研究～事業成果報告書」で報告する。

（1）新たな実用量に対応した線量計の校正に関する調査

国家標準機関及び二次標準機関において、新たな実用量に対応した校正・試験場を開発す

るために、各校正・試験場の線量換算係数の評価、方向特性試験場の開発、トレーサビリティ確保に関する検討を行った。

具体的には以下の通り。

(a) 校正・試験場の線量換算係数の評価

1) 国家標準機関において、JIS Z4511^[3]及びISO 4037 に準拠した線質（管電圧 10 kV～400 kV）の X 線並びに γ 線（ ^{137}Cs , ^{60}Co 線源由来）について、空気カーマから新たな実用量への線量換算係数を評価した。 β 線については、 ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源に対して外挿電離箱による実測を行うとともに、基準線量の評価に必要な各種補正係数の導出に必要な技術を開発した。さらに、中性子場（ISO 8529 に準拠した ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-Be}$ 線源の連続エネルギー場、及び加速器を用いた 100 keV～15 MeV の単色中性子場）の散乱線やスペクトルについて、シミュレーション及び実測を行った。測定結果を 3.2.1 に記述する。（産総研実施分）

2) 二次標準機関において、令和 3 年度事業で評価された線質（ ^{137}Cs 、N-80、 $^{241}\text{Am-Be}$ 、熱中性子、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 等）以外のものとして、以下の(i)から(iv)に示す線質について、校正場に応じた新たな実用量への線量換算係数を評価した。（JAEA 実施分）

(i) ISO 4037-1 (JIS Z 4511) に準拠した N-40 から N-300 までの X 線場

(ii) ISO 4037-1 (JIS Z 4511) に準拠した高エネルギー γ 線場

(iii) ISO 6980-1 (JIS Z 4514) に準拠した ^{147}Pm 線源で構築される β 線場

(iv) ISO 8529-1 (JIS Z 4521) に準拠した単色中性子場 (565 keV、5 MeV)、
重水減速中性子場及びその他実用に供される減速中性子場

(b) 方向特性試験の開発

国家標準機関及び二次標準機関において、線量計の方向特性試験に必要な回転照射装置、治具等の開発を行った。また、回転照射を含めた方向特性試験の標準化に必要な角度制御方法やこれらの試験に対する校正用ファントムの妥当性について検討した。検討結果を 3.2.2 に記述する。（産総研及び JAEA で各々実施）

(c) トレーサビリティ確保に関する調査

線量計ユーザーへの校正・試験サービスの提供に必要なトレーサビリティ体系が構築できることを検証するため、国家標準機関において評価した線量換算係数や線量計の試験結果について、国家標準機関と二次標準機関間において相互比較を実施した。得られた結果について、両者で検討を行い国家標準と二次標準の同等性を確認した。検討結果を 3.2.3 に記述する。（JAEA 実施分）

(2) 線量計の特性評価に関する調査

二次標準機関の令和 3 年度事業では、実効線量、眼の水晶体や皮膚の線量管理に用いる実用量の測定に用いられる線量計（サーベイメータ 3 機種及び個人線量計 4 機種）について新たな実用量に対する校正試験が実施され、JIS Z 4333 及び JIS Z 4312 で校正のための基

準放射線として規定されている ^{137}Cs 、線質 N-80 及び N-100、JIS Z 4514 で規定される $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 、 ^{85}Kr 、JIS Z 4521 で規定される熱中性子及び速中性子($^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 、 ^{252}Cf)に対する校正定数が示された^[4]。本事業では、新たな実用量に対する国内のサーベイメータ（光子用、 β 線用それぞれ1機種、及び中性子用2機種）と個人線量計（受動形個人線量計について体幹部光子・ β 線用、体幹部中性子用及び水晶体用それぞれ1機種、並びに能動形個人線量計として1機種）の特性試験を、（1）で開発した校正場において線量計のエネルギー特性に関するデータを取得し、新たな実用量に対する技術的な課題点を抽出した。（産総研及びJAEAで各々実施）

（3） 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査

二次標準機関の令和3年度事業において、原子力施設の放射線作業場8か所について、線量計の応答試験を実施した^[4]。本事業では、放射線作業場として5箇所の原子力施設及び放射線使用施設を調査対象とし、光子エネルギー分布と当該作業場を代表するエネルギーについて、新たな実用量及び現行の実用量の定義に基づいた基準線量（率）の光子を照射し、市販のサーベイメータ及び個人線量計それぞれ2機種について、エネルギー応答試験を行った。（JAEA実施分）

（4） 新たな実用量への対応に係る課題の調査

新たな実用量の導入による放射線管理及び線量計等の校正等における課題について、産総研の研究実施者3名（研究統括、 γ 線線量担当、X線線量担当）で原子力施設である近畿大学原子力研究所、医療機関である藤田医科大学、京都医療科学大学を訪問し、当該施設の線量管理担当者の意見を収集し、課題を整理した。また都内等において、線量計メーカー、校正事業者、ユーザーを交えた意見交換を行うワークショップを開催し、1回目に新たな実用量の概要説明を通じて共通理解を行い、2回目にそれぞれの立場から見た新たな実用量の導入における課題を整理した。結果を3.4に記述する。（産総研実施分）

（5） 研究に必要な国内外の情報収集

本事業の実施に当たっては、実用量に関する多岐にわたる高い専門性が必要であることから、新たな実用量への対応に係る国際機関等（ISO専門委員会（ISO/TC85/SC2（放射線防護分野）等）、国際電気標準会議（IEC））及び関連する学術団体（アジア・オセアニア放射線防護学会（AOCRP）、日本原子力学会、日本保健物理学会）の動向について、それぞれの会議への参加を通じて調査するとともに、適宜事業内容に関連する国内外の専門家と意見交換等を行い、事業成果の向上・精緻化を図った。結果を3.5に記述する。（産総研及びJAEAで各々実施）

2.1 事業計画（産総研実施分）

上記の項目別に産総研にて実施した事業計画を示す。

（１） 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査

各種線質に対して、空気カーマ又はフルエンスから新しい実用量への換算係数を評価する。線質については以下の通りである。

γ 線： ^{60}Co , ^{137}Cs

X 線：Narrow, Wide, High-kerma, Low-kerma 線質^[4]

β 線： ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

中性子： ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-Be}$ 線源、144 keV, 565 keV, 5.0MeV, 14.8MeV 単色エネルギー

β 線については、外挿電離箱を用いた直接測定によって評価した。ただし測定値に対して各種補正係数が必要なことから、本事業では新たに見直しが必要となる補正係数の洗い出し、シミュレーションによる補正係数評価の検討を行う。

（２） 線量計の特性評価に関する調査

新しい実用量に対する中性子標準場の ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-Be}$ 線源、565 keV 単色エネルギーを用いて、国内で利用されている中性子線サーベイメータ 2 機種、及び中性子個人線量計 1 機種のエネルギー特性試験を行った。また産総研と JAEA での校正結果の相互比較のために、X 線 N-100 及び ^{137}Cs 線質に対して、電離箱式サーベイメータ（日本レイテック社製 ICS-1323）及び受動形個人線量計（長瀬ランダウア社製 OSL 線量計）の特性評価試験を行った。

（４） 新たな実用量への対応に係る課題の調査

新たな実用量の導入による放射線管理及び線量計等の校正等における課題について、試験研究用原子炉施設である近畿大学原子力研究所、医療機関である藤田医科大学、京都医療科学大学の線量管理者に意見を伺い、課題を整理した。また校正事業者や線量計メーカー、大学等の研究者の方々からの意見を伺うため、ワークショップを 2 回開催した。

（５） 研究に必要な国内外の情報収集

新たな実用量への対応に関わる国際機関（ISO TC85/SC2/WG2, CCRI）と学会（日本保健物理学会）の動向について調査するとともに、適宜事業内容の関連する国内外の専門家と意見交換を行った。

2.2 実施体制

研究実施体制を図 2.2 に示す。

本事業の研究実施体制

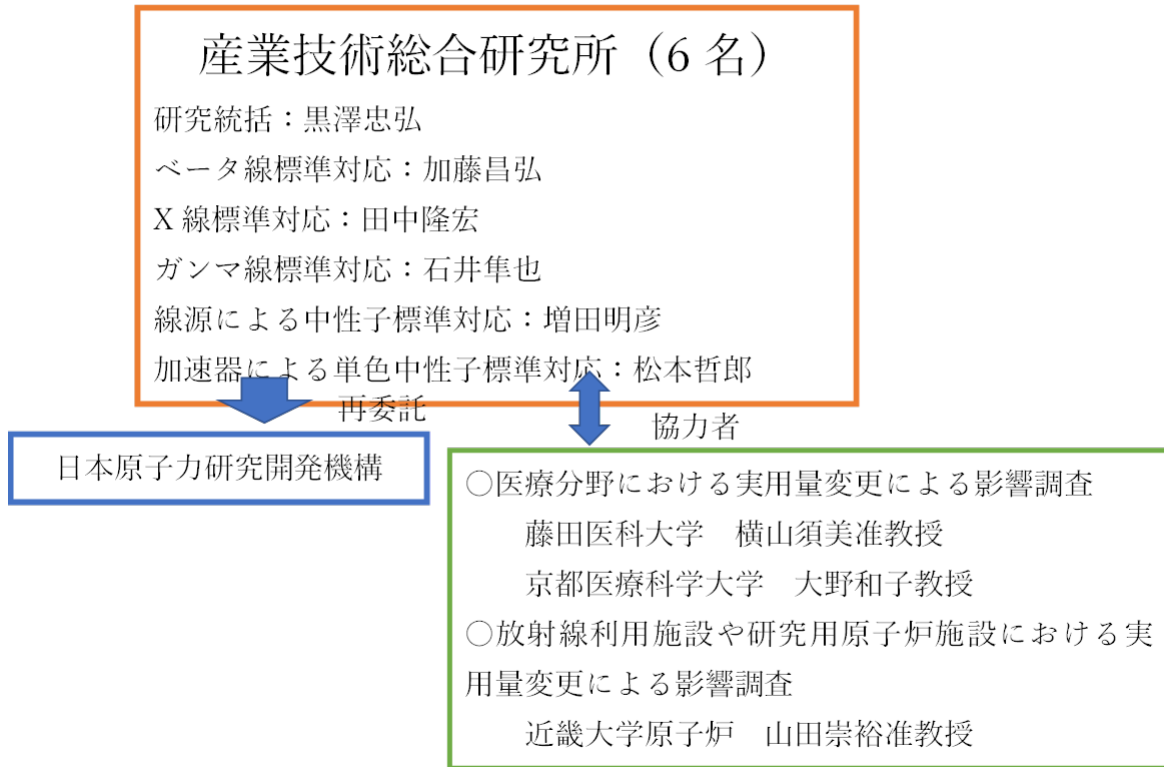


図 2.2 研究実施体制

3. 事業の成果（再委託分を除く）

3.1 事業を実施した産業技術総合研究所における照射施設の概要

（1） γ 線照射施設

大線量の照射が可能な「大線量 γ 線照射室」（以下、「大 γ 照射施設」という。）と数 μ Sv/hと環境レベルの低線量率の照射が可能な「 γ 線標準照射室」（以下、「小 γ 照射施設」という。）の2室がある。^[5]

○大線量 γ 線照射室

^{60}Co 線源、 ^{137}Cs 線源をそれぞれ1個ずつ有しており、線量率は以下の通りである。

- ・ ^{60}Co 線源— 7×10^{-2} Gy/s $\sim 4 \times 10^{-7}$ Gy/s
- ・ ^{137}Cs 線源— 5×10^{-4} Gy/s $\sim 9 \times 10^{-6}$ Gy/s



図 3.1.1 大線量 γ 線照射室

○ γ 線標準照射室

^{60}Co 線源、 ^{137}Cs 線源をそれぞれ 3 個ずつ有しており、幅広い線量率を設定している。線量率は以下の通りである。

- ^{60}Co 線源 – $3 \times 10^{-6} \text{ Gy/s} \sim 1 \times 10^{-9} \text{ Gy/s}$
- ^{137}Cs 線源 – $2 \times 10^{-6} \text{ Gy/s} \sim 6 \times 10^{-10} \text{ Gy/s}$



図 3.1.2 γ 線標準照射室

(2) X 線照射室

管電圧の違いによって「中硬 X 線照射室」と「軟 X 線照射室」の 2 室がある。

○ 中硬 X 線照射室

管電圧が 50～450 kV まで設定できるタングステンターゲットの照射装置となっている。



図 3.1.3 中硬 X 線照射室

○軟 X 線照射室

管電圧が 10 ~50 kV のタングステナーターゲットの照射装置となっている。また本事業では使用していないが、マンモグラフィ線質を設定するための Mo, Rh ターゲットの X 線管も有している。

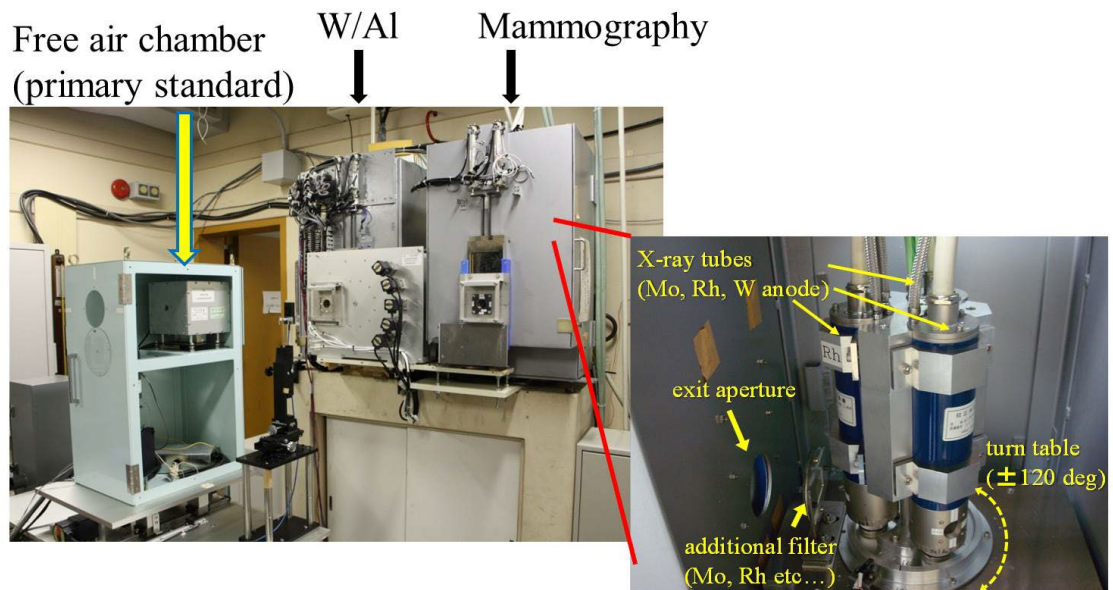


図 3.1.4 軟 X 線照射室

(3) β 線照射室

^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の3種類の線源を用いて β 線の照射試験を行える施設となっている。

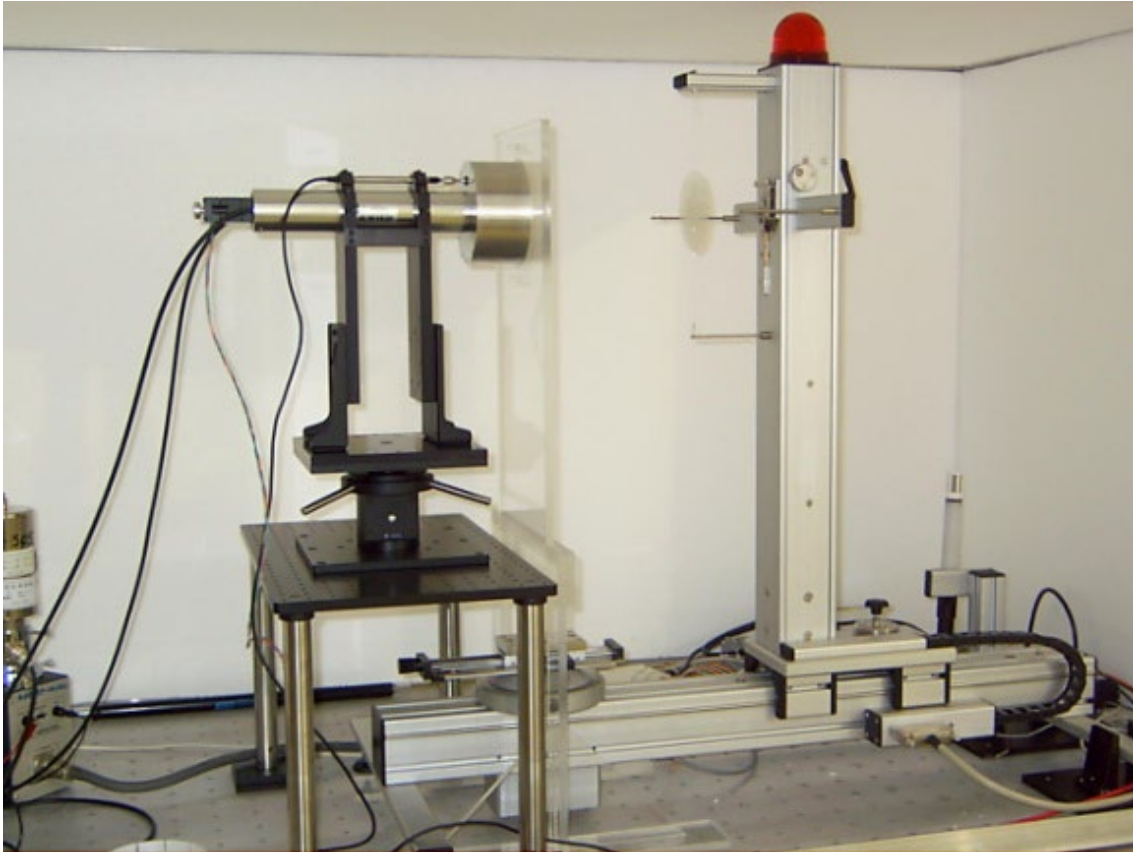


図 3.1.5 β 線照射装置と外挿電離箱

(4) 中性子照射施設

産総研中性子標準施設は、1980年に建設され、11.5 m \times 11.5 m \times 11.5 mの大きさで、アルミニウムグレーティング床構造を持つ低散乱中性子照射室、4 MV ペレトロン加速器、300 kV コッククロフト加速器によって構成されている。照射室地下には、230 cm \times 190 cm \times 190 cmの黒鉛パイルが設置されており、熱中性子フルエンス校正及び ^{241}Am -Be 中性子線源と ^{252}Cf 中性子線源の中性子放出率校正が可能である。

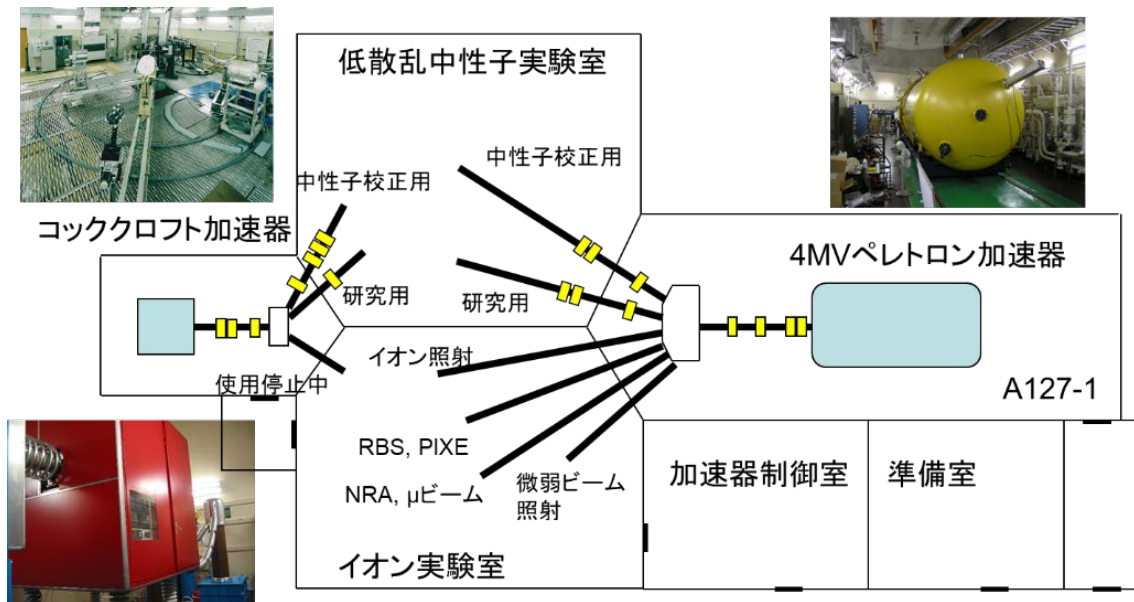


図 3.1.6 中性子照射施設の配置図

3.2 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査

現在用いられている実用量及び物理量（空気カーマ又はフルエンス）から実用量への換算係数を表 3.2-1 に、また ICRU Report95 で示された新しい実用量を表 3.2-2 に示す。表中の α は、ファントムの正面の垂直軸と放射線の入射方向との間の角度である。0 度はファントム正面に放射線が入射することを意味する。

表 3.2-1 現在の各種実用量及び物理量から実用量への換算係数

Task	実用量	
	空間線量 (上段：実用量、下段：換算係数)	従事者の線量 (上段：実用量、下段：換算係数)
実効線量の管理	周辺線量当量, $H^*(10)$ 周辺線量当量換算係数, $h^*(10)$	個人線量当量, $H_p(10)$ 個人線量当量換算係数, $h_p(10, \alpha)$
水晶体被ばく線量の管理	方向性線量当量, $H'(3)$ 方向性線量当量換算係数, $h'(3, \alpha)$	個人線量当量, $H_p(3)$ 個人線量当量換算係数, $h_p(3, \alpha)$
末梢部皮膚の被ばく線量の管理	方向性線量当量, $H'(0.07)$ 方向性線量当量換算係数, $h'(0.07, \alpha)$	個人線量当量, $H_p(0.07)$ 個人線量当量換算係数, $h_p(0.07, \alpha)$

表 3.2-2ICRU Report95 で示されている各種実用量及び物理量から実用量への換算係数

Task	実用量	
	空間線量 (上段：実用量、下段：換算係数)	従事者の線量 (上段：実用量、下段：換算係数)
実効線量の管理	周辺線量, H^* 周辺線量換算係数、 $h^*(10)$	個人線量, H_p 個人線量換算係数、 $h_p(10, \alpha)$
水晶体被ばく線量の管理	方向性水晶体吸収線量, D'_{lens} 方向性水晶体吸収線量換算係数、 $d_{lens}(\alpha)$	個人水晶体吸収線量, $D_{p lens}$ 個人水晶体吸収線量換算係数、 $h_p(3, \alpha)$
末梢部皮膚の被ばく線量の管理	方向性局所皮膚吸収線量, $D'_{local skin}$ 方向性局所皮膚吸収線量換算係数、 $d_{local skin}(\alpha)$	個人局所皮膚吸収線量, $D_{p local skin}$ 個人局所皮膚吸収線量換算係数、 $d_{p local skin}(\alpha)$

3.2.1 校正・試験場の線量換算係数の評価

(1) γ 線

換算係数の評価に用いたエネルギースペクトルは、小 γ 線源照射施設において過去に測定した ^{137}Cs 線源と ^{60}Co 線源による場の光子フルエンスのエネルギー分布と、大 γ 線照射施設に対して計算した MCNP コードによる ^{60}Co 線源による場の光子フルエンス分布^[5]である。これらのエネルギースペクトルに、ICRU report 95^[1]が示す単色光子に対する換算係数を適用して空気カーマから新たな実用量への換算係数を求めた。結果を表 3.2.1-G1 から表 3.2.1-G5 に示す。表には導出した値と共に、参考値として ICRU report 95^[1]が示す光子エネルギー662 keV および 1250 keV の単色光子に対する換算係数を示す。ICRU report 95 に 662 keV および 1250 keV の単色光子に対する値が示されていない場合は、多項式フィットによる補間で求めた。

^{137}Cs 線の校正場の換算係数の値と 662 keV 単色光子の換算係数の値とを比べると、多くの評価条件でその差は 0.01 程度であった。また ^{60}Co 線の校正場の換算係数と 1250 keV 単色光子の換算係数との比較においても、同様に 0.01 程度であった。校正場の換算係数と単色光子の換算係数との差が最大となったのは、いずれの校正場でも、ピラーファントムに対する個人局所皮膚吸収線量の後方入射の条件の時である。校正場に含まれる散乱線は、後方入射では直接線よりも減衰されるため、単色光子場の換算係数に対して校正場の換算係数の方が小さめの値を示すものと考えられる。

表 3.2.1-G1 産総研 γ 線校正場における空気カーマから ICRU report 95 で示された実用量への換算係数 1

周辺線量に関する換算係数(h^*)および個人線量に関する換算係数($h_p(\alpha)$)。 α は入射角度 ($0^\circ \sim 180^\circ$) または照射条件 (ROT、ISO、SS-ISO、IS-ISO) を示す。 662 keV と 1250 keV の値は ICRU report 95 の Table 5.1b および Table 5.2b から補間で得た値を参考に示す。

評価条件	$h^*/$ (SvGy ⁻¹)	$h_p(\alpha)$ / (Sv Gy ⁻¹)					
		0°	15°	30°	45°	60°	75°
¹³⁷ Cs (小 γ)	1.03	1.03	1.02	1.00	0.96	0.89	0.79
662 keV	1.02	1.02	1.01	0.99	0.95	0.88	0.79
⁶⁰ Co (小 γ)	1.00	1.00	1.00	0.98	0.95	0.90	0.82
⁶⁰ Co(MCNP)	1.01	1.01	1.00	0.99	0.95	0.90	0.82
1250 keV	1.00	1.00	0.99	0.98	0.95	0.90	0.83

評価条件	$h_p(\alpha)$ / (Sv Gy ⁻¹)					
	90°	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
¹³⁷ Cs (小 γ)	0.65	0.84	0.81	0.70	0.71	0.68
662 keV	0.65	0.84	0.81	0.70	0.71	0.68
⁶⁰ Co (小 γ)	0.71	0.86	0.84	0.74	0.76	0.72
⁶⁰ Co(MCNP)	0.70	0.86	0.83	0.74	0.76	0.72
1250 keV	0.71	0.86	0.84	0.74	0.76	0.73

表 3.2.1-G2 産総研 γ 線校正場における空気カーマから ICRU report 95 で示された実用量への換算係数 2

方向性水晶体吸収線量と個人水晶体吸収線量に関する換算係数($d_{\text{lens}}(\alpha)$)。方向性水晶体吸収線量に対する値と個人水晶体吸収線量に対する値は同じである。 α は入射角度($0^\circ \sim 90^\circ$)または照射条件 (ROT) を示す。662 keV の値として ICRU report 95 の Table 5.3b の値を、1250 keV の値として ICRU report 95 の Table 5.3b から補間で得た値を参考に示す。

評価条件	$d_{\text{lens}}(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$							
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT
^{137}Cs (小 γ)	1.17	1.18	1.19	1.22	1.21	1.18	1.18	0.93
662 keV	1.17	1.17	1.19	1.21	1.20	1.17	1.17	0.94
^{60}Co (小 γ)	1.13	1.14	1.15	1.16	1.16	1.14	1.14	0.95
^{60}Co (MCNP)	1.13	1.13	1.14	1.16	1.16	1.13	1.14	0.95
1250 keV	1.13	1.14	1.15	1.16	1.16	1.14	1.14	0.95

表 3.2.1-G3 産総研 γ 線校正場における空気カーマから ICRU report 95 で示された実用量への換算係数 3

スラブファントムに対する方向性局所皮膚吸収線量と個人局所皮膚吸収線量に関する換算係数($d_{\text{local skin s}}(\alpha)$)。方向性局所皮膚吸収線量に対する値と個人局所皮膚吸収線量に対する値は同じである。 α は入射角度($0^\circ \sim 75^\circ$)を示す。662 keV と 1250 keV の値として ICRU report 95 の Table 5.4.1b の値を参考として示す。

評価条件	$d_{\text{local skin s}}(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
^{137}Cs (小 γ)	1.23	1.23	1.24	1.25	1.27	1.29
662 keV	1.21	1.21	1.22	1.23	1.26	1.29
^{60}Co (小 γ)	1.16	1.16	1.17	1.18	1.20	1.23
^{60}Co (MCNP)	1.16	1.16	1.17	1.18	1.20	1.23
1250 keV	1.16	1.16	1.17	1.18	1.20	1.23

表 3.2.1-G4 産総研 γ 線校正場における空気カーマから ICRU report 95 で示された実用量への換算係数 4

ピラーファントムに対する個人局所皮膚吸収線量に関する換算係数($d_{p \text{ local skin p}}(\alpha)$)。 α は入射角度($0^\circ \sim 180^\circ$)または照射条件 (ROT) を示す。 662 keV と 1250 keV の値として ICRU report 95 の Table 5.4.2b の値を参考として示す。

評価条件	$d_{p \text{ local skin p}}(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
^{137}Cs (小 γ)	1.16	1.16	1.15	1.16	1.18	1.18	1.18
662 keV	1.16	1.15	1.14	1.16	1.17	1.17	1.18
^{60}Co (小 γ)	1.13	1.12	1.12	1.13	1.14	1.16	1.15
^{60}Co (MCNP)	1.13	1.13	1.12	1.13	1.15	1.16	1.15
1250 keV	1.13	1.12	1.12	1.13	1.14	1.16	1.15

評価条件	$d_{p \text{ local skin p}}(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$						
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
^{137}Cs (小 γ)	1.06	0.94	0.85	0.80	0.76	0.75	1.03
662 keV	1.07	0.94	0.86	0.81	0.79	0.76	1.03
^{60}Co (小 γ)	1.06	0.98	0.91	0.87	0.83	0.83	1.04
^{60}Co (MCNP)	1.06	0.98	0.90	0.86	0.83	0.82	1.04
1250 keV	1.06	0.99	0.93	0.88	0.84	0.84	1.04

表 3.2.1-G5 産総研 γ 線校正場における空気カーマから ICRU report 95 で示された実用量への換算係数 5

ロッドファントムに対する個人局所皮膚吸収線量に関する換算係数($d_{p\ local\ skin\ r}(\alpha)$)。 α は入射角度($0^\circ \sim 180^\circ$)または照射条件 (ROT) を示す。 662 keV と 1250 keV の値として ICRU report 95 の Table 5.4.3b の値を参考として示す。

評価条件	$d_{p\ local\ skin\ r}(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
^{137}Cs (小 γ)	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.11
662 keV	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.11
^{60}Co (小 γ)	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
^{60}Co (MCNP)	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
1250 keV	1.11	1.11	1.11	1.12	1.12	1.12	1.11

評価条件	$d_{p\ local\ skin\ r}(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$						
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
^{137}Cs (小 γ)	1.09	1.06	1.04	1.02	1.01	1.00	1.08
662 keV	1.10	1.07	1.05	1.03	1.02	1.02	1.09
^{60}Co (小 γ)	1.09	1.07	1.05	1.04	1.03	1.03	1.09
^{60}Co (MCNP)	1.09	1.07	1.05	1.04	1.03	1.03	1.09
1250 keV	1.10	1.08	1.06	1.05	1.04	1.04	1.09

(2) X線

低エネルギー光子に対する線量計の校正・試験は X 線標準場が用いられる。X 線標準場は X 線管で発生した連続的なエネルギー分布をもつ X 線を特定のフィルターを付加することにより、そのエネルギー分布等を調整し線質を形成する。一般的に線量計の校正で用いられる X 線線質としては、JIS Z4511 で規定される 4 つの線質、Low air kerma rate シリーズ (以下、L-series)、High air kerma rate シリーズ (以下、H-series)、Narrow-spectrum シリーズ (以下、N-series)、Wide-spectrum シリーズ (以下、W-series) 及び X 線管電圧に対する実効エネルギーの特定の比率で分類した QI (0.4~0.9) シリーズがある。本事業では、これらの X 線場について周辺線量、個人線量、水晶体吸収線量及び局所皮膚吸収線量に係る線量換算係数を評価した。

本事業では、産総研で実測的に評価されている各 X 線質の実効エネルギー対して新しい実用量への線量換算係数を評価した。その線量換算係数の計算には、評価する線質の実効エネルギー付近の線量換算係数を文献中^[1]から 4 点~6 点ほど選択し、それらの 3 次関数フィッティングで得られる数式を用いた。各 X 線線質の線量換算係数の計算結果を表 3.2.1-X0~表 3.2.1-X61 に示す。また、JIS Z4511 で定義される線質に対しては、その文献中^[3]で示されている現行の実用量に対する新しい実用量の値の比を計算した。その結果を図 3.2.1-X0~図 3.2.1-X12 に示す。

これらの結果から、X 線標準場における新たな実用量への線量換算係数について、以下が示唆された。

・新しい実用量への換算係数の角度依存性は、現行の実用量への線量換算係数とは異なる。新しい実用量への換算係数は入射角度が大きいほど、現行の実用量への線量換算係数との差は大きくなる傾向にあるが、以下に示すような例外もある。

- ◆ 図 3.2.1-X1~図 3.2.1-X4 に示される $h_p(\alpha)/h_p(10, \alpha)$ について、75° の値の比は 60° よりも 1 に近くなる。
- ◆ 図 3.2.1-X9~図 3.2.1-X12 に示されるスラブファントムにおける $d_{\text{local skin}}/h_p(\alpha, 0.07)$ について、75° の値の比は 60° よりも 1 に近くなる。
- ◆ 図 3.2.1-X9~図 3.2.1-X12 に示される $d_{\text{local skin}}/h'(\alpha, 0.07)$ について、値の比は入射角度が 0° から 30° までは 1 から離れ、45° から 75° までは反転して 1 に近づく。

・現行の実用量への換算係数に対する新しい実用量への換算係数の値の比は一部 (50 keV 以下・60° 以下の $d_{\text{lens}}(\alpha)/h'(3, \alpha)$ 及び $d_{\text{lens}}(\alpha)/h_p(3, \alpha)$ や 40 keV 以下のスラブファントムにおける $d_{\text{local skin}}/h_p(\alpha, 0.07)$ 及び $d_{\text{local skin}}/h'(\alpha, 0.07)$) を除き低エネルギー側で大きくなる傾向にある。

表 3.2.1-X0 産総研 X 線質 (L-series) の実効エネルギーと評価した換算係数

線質	$E_{\text{eff}} / \text{keV}$	$h^*_{E_{\text{max}}} / (\text{Sv Gy}^{-1})$
L-55	47.0	1.04
L-70	60.2	1.34
L-100	87.0	1.43
L-125	109.4	1.37
L-170	149.4	1.26
L-210	183.9	1.18
L-240	212.3	1.15

表 3.2.1-X1 産総研 X 線質 (H-series) の実効エネルギーと評価した換算係数

線質	$E_{\text{eff}} / \text{keV}$	$h^*_{E_{\text{max}}} / (\text{Sv Gy}^{-1})$
H-60	30.7	0.452
H-100	50.0	1.13
H-200	100.3	1.40
H-250	120.8	1.34
H-280	146.4	1.26
H-300	147.3	1.26

表 3.2.1-X2 産総研 X 線質 (N-series) の実効エネルギーと評価した換算係数

線質	$E_{\text{eff}} / \text{keV}$	$h^*_{E_{\text{max}}} / (\text{Sv Gy}^{-1})$
N-30	23.3	0.214
N-40	31.7	0.489
N-60	46.4	1.02
N-80	64.1	1.39
N-100	79.9	1.44
N-120	100.6	1.40
N-150	117.9	1.35
N-200	165.1	1.22
N-250	209.3	1.15
N-300	253.4	1.12

表 3.2.1-X3 産総研 X 線質 (W-series) の実効エネルギーと評価した換算係数

線質	$E_{\text{eff}} / \text{keV}$	$h^*_{E_{\text{max}}} / (\text{Sv Gy}^{-1})$
W-60	41.8	0.871
W-80	53.2	1.20
W-110	78.0	1.44
W-150	104.6	1.39
W-200	137.8	1.29
W-250	172.7	1.20
W-300	209.7	1.15

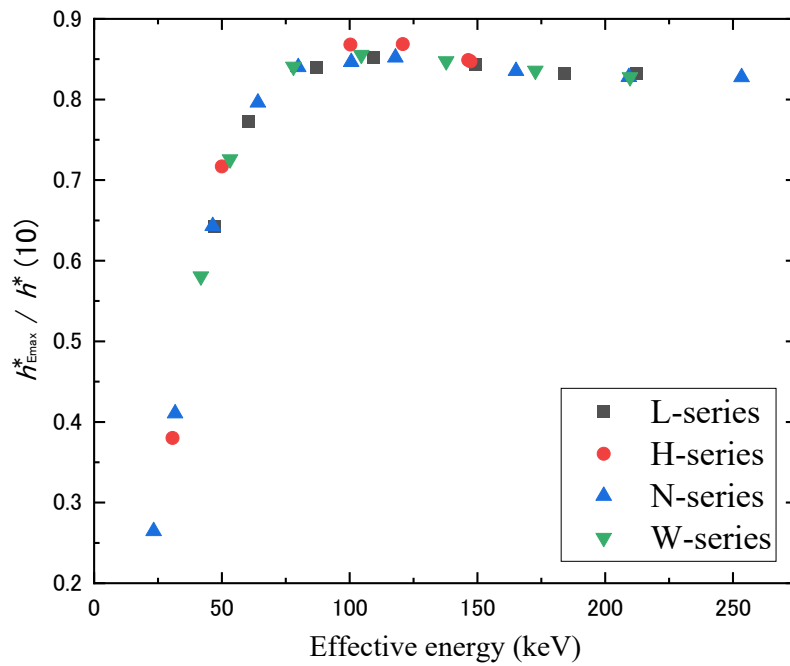


図 3.2.1-X0 現行実用量に対する新たな実用量の値の変動 (1/13)

表 3.2.1-X4 評価した X 線校正場の個人線量換算係数 (L-series)

線質	$h_p(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$											
	0°	max(±15°)	max(±30°)	max(±45°)	max(±60°)	max(±75°)	max(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
L-55	1.04	1.03	0.988	0.898	0.772	0.612	0.431	0.566	0.623	0.499	0.511	0.481
L-70	1.34	1.33	1.27	1.16	1.01	0.812	0.593	0.834	0.846	0.683	0.699	0.665
L-100	1.43	1.42	1.35	1.25	1.10	0.904	0.675	0.977	0.952	0.771	0.793	0.746
L-125	1.37	1.36	1.30	1.22	1.07	0.891	0.672	0.964	0.933	0.762	0.784	0.735
L-170	1.26	1.25	1.20	1.13	1.01	0.847	0.649	0.907	0.878	0.725	0.744	0.699
L-210	1.18	1.18	1.14	1.07	0.964	0.816	0.632	0.866	0.840	0.698	0.715	0.674
L-240	1.15	1.15	1.11	1.05	0.948	0.807	0.629	0.853	0.828	0.688	0.705	0.665

表 3.2.1-X5 評価した X 線校正場の個人線量換算係数 (H-series)

線質	$h_p(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$											
	0°	max(±15°)	max(±30°)	max(±45°)	max(±60°)	max(±75°)	max(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
H-60	0.452	0.446	0.424	0.387	0.324	0.240	0.154	0.143	0.233	0.184	0.186	0.179
H-100	1.13	1.12	1.07	0.973	0.840	0.668	0.475	0.639	0.685	0.550	0.563	0.531
H-200	1.40	1.39	1.32	1.24	1.09	0.899	0.675	0.973	0.944	0.768	0.791	0.742
H-250	1.34	1.33	1.27	1.19	1.06	0.879	0.666	0.949	0.918	0.752	0.773	0.725
H-280	1.26	1.26	1.21	1.14	1.01	0.850	0.651	0.911	0.882	0.727	0.747	0.702
H-300	1.26	1.26	1.21	1.14	1.01	0.849	0.650	0.910	0.881	0.727	0.746	0.701

表 3.2.1-X6 評価した X 線校正場の個人線量換算係数 (N-series)

線質	$h_p(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$											
	0°	max(±15°)	max(±30°)	max(±45°)	max(±60°)	max(±75°)	max(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
N-30	0.214	0.211	0.199	0.178	0.145	0.103	0.064	0.036	0.100	0.0793	0.0802	0.0774
N-40	0.489	0.482	0.459	0.419	0.352	0.262	0.169	0.165	0.255	0.201	0.203	0.195
N-60	1.02	1.02	0.970	0.882	0.757	0.600	0.421	0.551	0.610	0.488	0.500	0.470
N-80	1.39	1.38	1.32	1.21	1.05	0.848	0.624	0.886	0.888	0.718	0.735	0.699
N-100	1.44	1.43	1.36	1.26	1.10	0.902	0.670	0.971	0.950	0.767	0.789	0.744
N-120	1.40	1.39	1.32	1.23	1.09	0.899	0.675	0.973	0.943	0.768	0.790	0.742
N-150	1.35	1.34	1.28	1.20	1.06	0.882	0.668	0.953	0.922	0.754	0.776	0.728
N-200	1.22	1.22	1.17	1.10	0.986	0.831	0.640	0.886	0.859	0.711	0.730	0.686
N-250	1.15	1.15	1.11	1.05	0.950	0.808	0.629	0.854	0.829	0.689	0.706	0.666
N-300	1.12	1.11	1.08	1.02	0.931	0.800	0.626	0.841	0.814	0.679	0.700	0.659

表 3.2.1-X7 評価した X 線校正場の個人線量換算係数 (W-series)

線質	$h_p(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$								ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
	0°	max(±15°)	max(±30°)	max(±45°)	max(±60°)	max(±75°)	max(±90°)	180°				
W-60	0.871	0.864	0.826	0.748	0.639	0.502	0.345	0.428	0.505	0.402	0.411	0.386
W-80	1.20	1.20	1.14	1.04	0.903	0.721	0.518	0.709	0.743	0.598	0.612	0.580
W-110	1.44	1.43	1.36	1.25	1.10	0.900	0.668	0.968	0.948	0.766	0.787	0.743
W-150	1.39	1.37	1.31	1.23	1.08	0.895	0.674	0.969	0.939	0.765	0.788	0.739
W-200	1.29	1.28	1.23	1.16	1.03	0.859	0.656	0.924	0.894	0.735	0.756	0.710
W-250	1.20	1.20	1.16	1.09	0.976	0.825	0.637	0.877	0.851	0.705	0.723	0.681
W-300	1.15	1.15	1.11	1.05	0.949	0.808	0.629	0.854	0.829	0.689	0.706	0.666

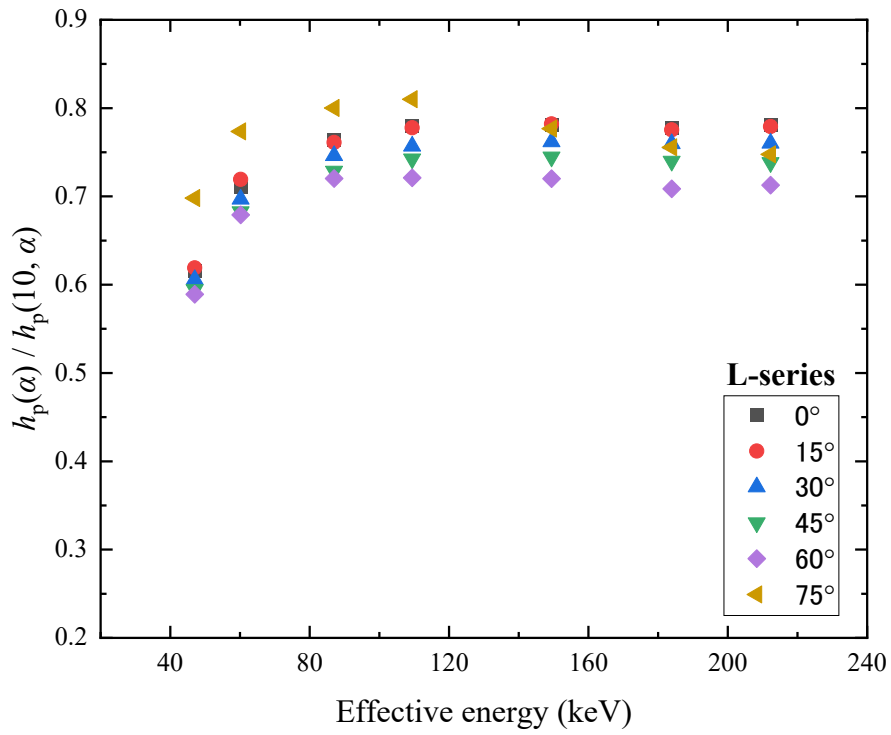


図 3.2.1-X1 現行実用量に対する新たな実用量の値の変動 (2/13)

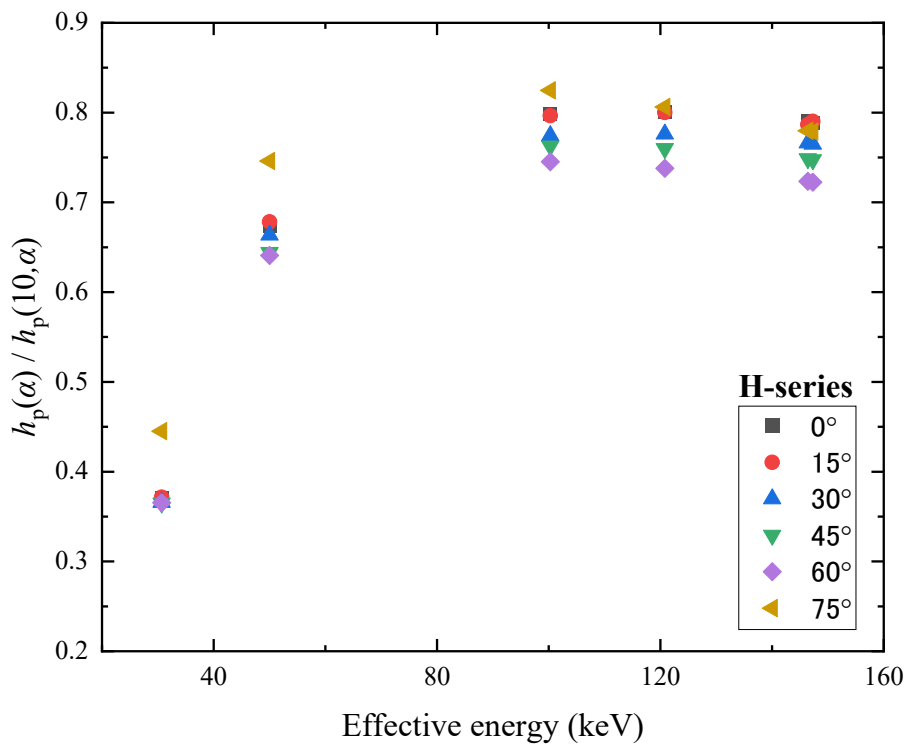


図 3.2.1-X2 現行実用量に対する新たな実用量の値の変動 (3/13)

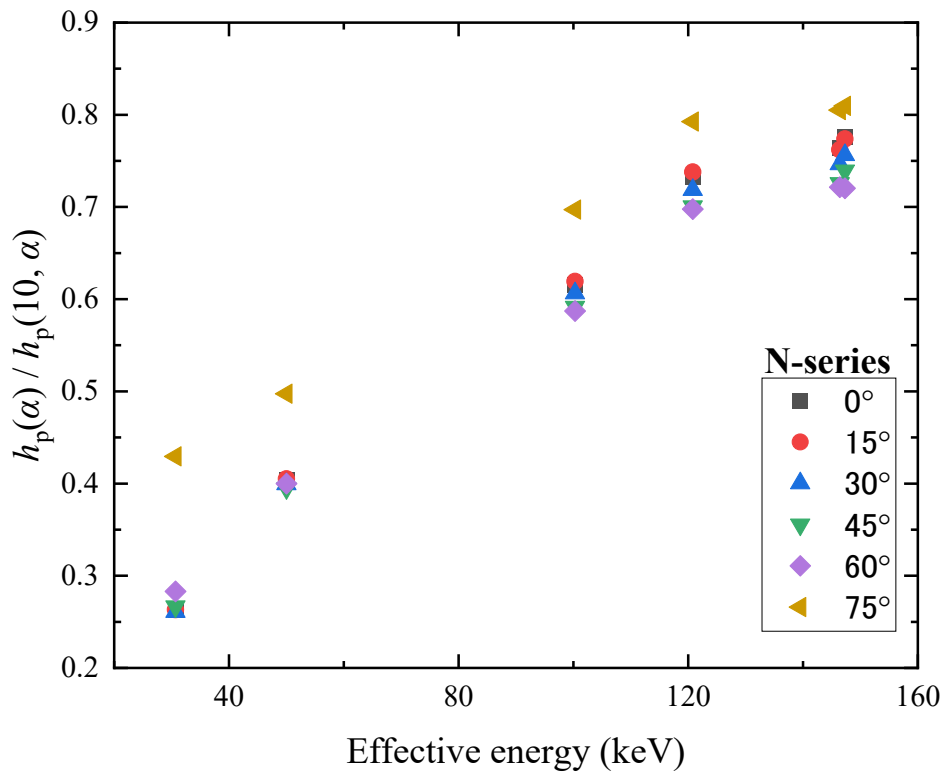


図 3.2.1-X3 現行実用量に対する新たな実用量の値の変動 (4/13)

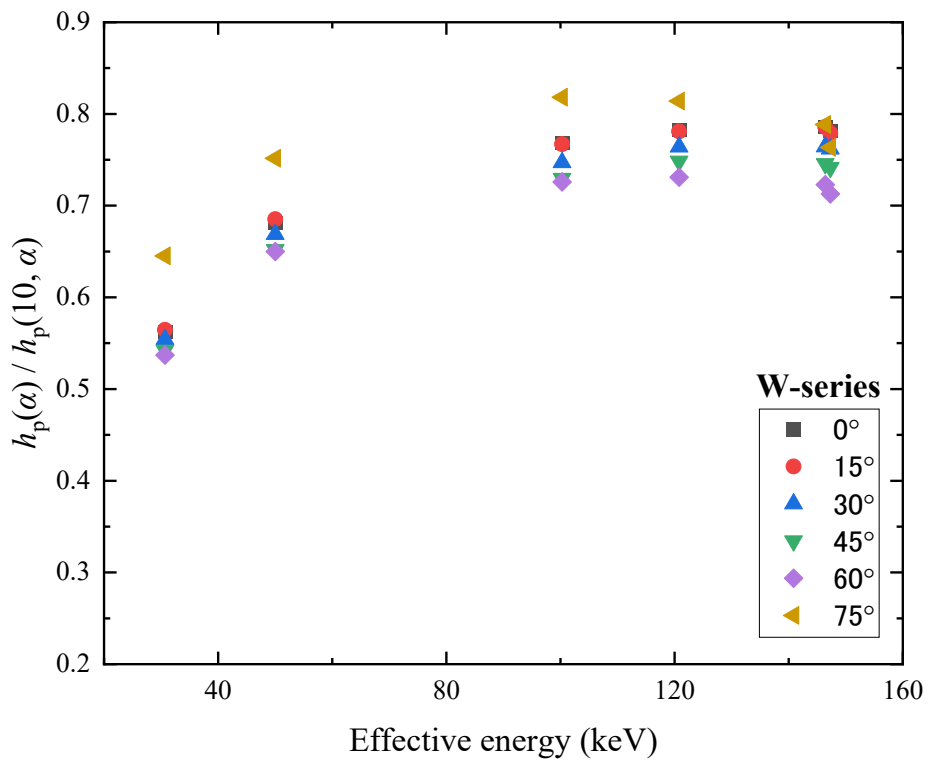


図 3.2.1-X4 現行実用量に対する新たな実用量の値の変動 (5/13)

表 3.2.1-X8 評価した X 線校正場の水晶体吸収線量換算係数 (L-series)

線質	$d_{\text{lens}}(\alpha) / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α							
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT
L-55	1.48	1.49	1.50	1.50	1.49	1.44	1.36	0.89
L-70	1.57	1.59	1.61	1.61	1.60	1.55	1.48	0.99
L-100	1.55	1.57	1.58	1.58	1.57	1.54	1.49	1.03
L-125	1.47	1.48	1.50	1.50	1.49	1.48	1.43	1.00
L-170	1.39	1.40	1.41	1.42	1.41	1.40	1.37	0.97
L-210	1.34	1.35	1.37	1.38	1.36	1.36	1.33	0.96
L-240	1.32	1.32	1.34	1.35	1.33	1.33	1.31	0.95

表 3.2.1-X9 評価した X 線校正場の水晶体吸収線量換算係数 (H-series)

線質	$d_{\text{lens}}(\alpha) / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α							
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT
H-60	1.17	1.18	1.18	1.17	1.14	1.10	1.02	0.63
H-100	1.51	1.52	1.54	1.54	1.53	1.48	1.40	0.92
H-200	1.50	1.51	1.53	1.53	1.52	1.50	1.45	1.01
H-250	1.44	1.44	1.46	1.46	1.46	1.45	1.40	0.98
H-280	1.39	1.40	1.42	1.42	1.41	1.41	1.37	0.97
H-300	1.39	1.40	1.42	1.42	1.41	1.41	1.37	0.97

表 3.2.1-X10 評価した X 線校正場の水晶体吸収線量換算係数 (N-series)

線質	$d_{\text{lens}}(\alpha) / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α							
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT
N-30	0.944	0.945	0.939	0.922	0.896	0.840	0.742	0.458
N-40	1.19	1.21	1.20	1.20	1.17	1.13	1.05	0.646
N-60	1.47	1.48	1.50	1.50	1.49	1.43	1.36	0.879
N-80	1.58	1.60	1.62	1.62	1.61	1.56	1.50	1.01
N-100	1.57	1.59	1.60	1.60	1.59	1.56	1.50	1.03
N-120	1.50	1.51	1.53	1.53	1.52	1.50	1.45	1.01
N-150	1.45	1.45	1.47	1.47	1.46	1.45	1.41	0.984
N-200	1.36	1.38	1.39	1.40	1.39	1.38	1.35	0.964
N-250	1.32	1.33	1.34	1.35	1.33	1.33	1.31	0.950
N-300	1.29	1.29	1.30	1.32	1.30	1.29	1.28	0.940

表 3.2.1-X11 評価した X 線校正場の水晶体吸収線量換算係数 (W-series)

線質	$d_{\text{lens}}(\alpha) / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
W-60	1.40	1.42	1.43	1.43	1.41	1.36	1.28	0.820
W-80	1.53	1.55	1.57	1.57	1.56	1.50	1.43	0.946
W-110	1.57	1.60	1.61	1.61	1.59	1.56	1.51	1.03
W-150	1.49	1.50	1.52	1.51	1.51	1.49	1.44	1.00
W-200	1.41	1.42	1.43	1.43	1.43	1.42	1.38	0.974
W-250	1.36	1.37	1.38	1.39	1.38	1.37	1.34	0.961
W-300	1.32	1.33	1.34	1.35	1.33	1.33	1.31	0.950

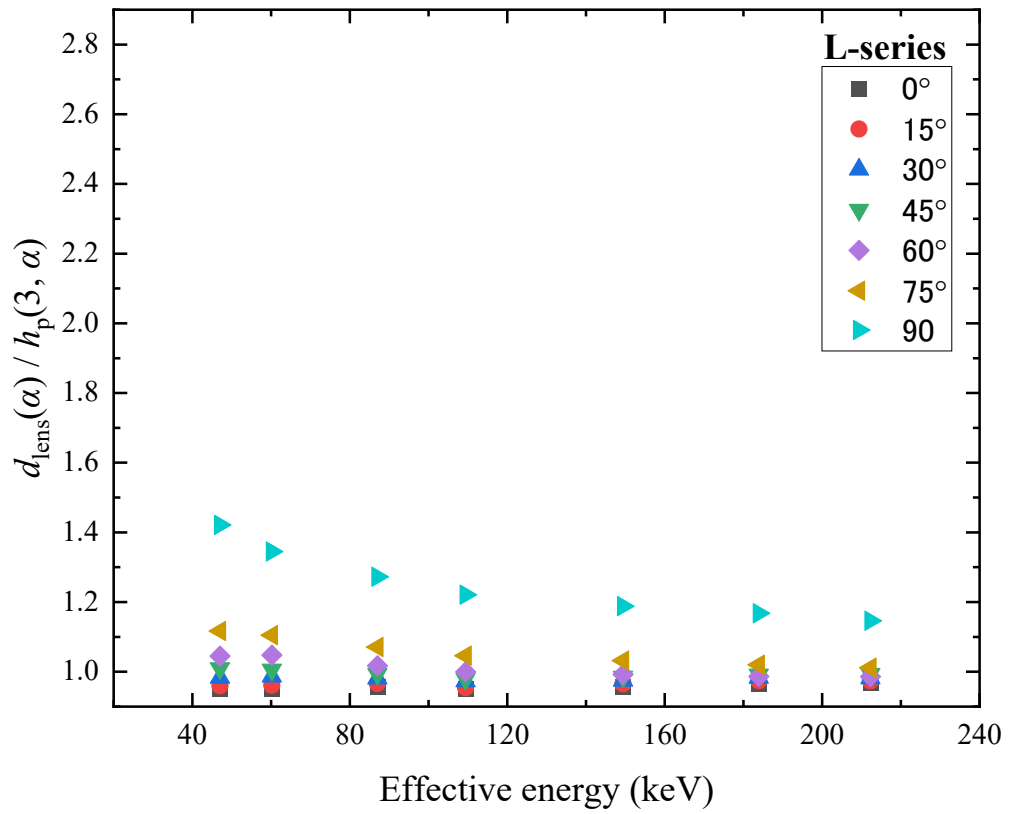
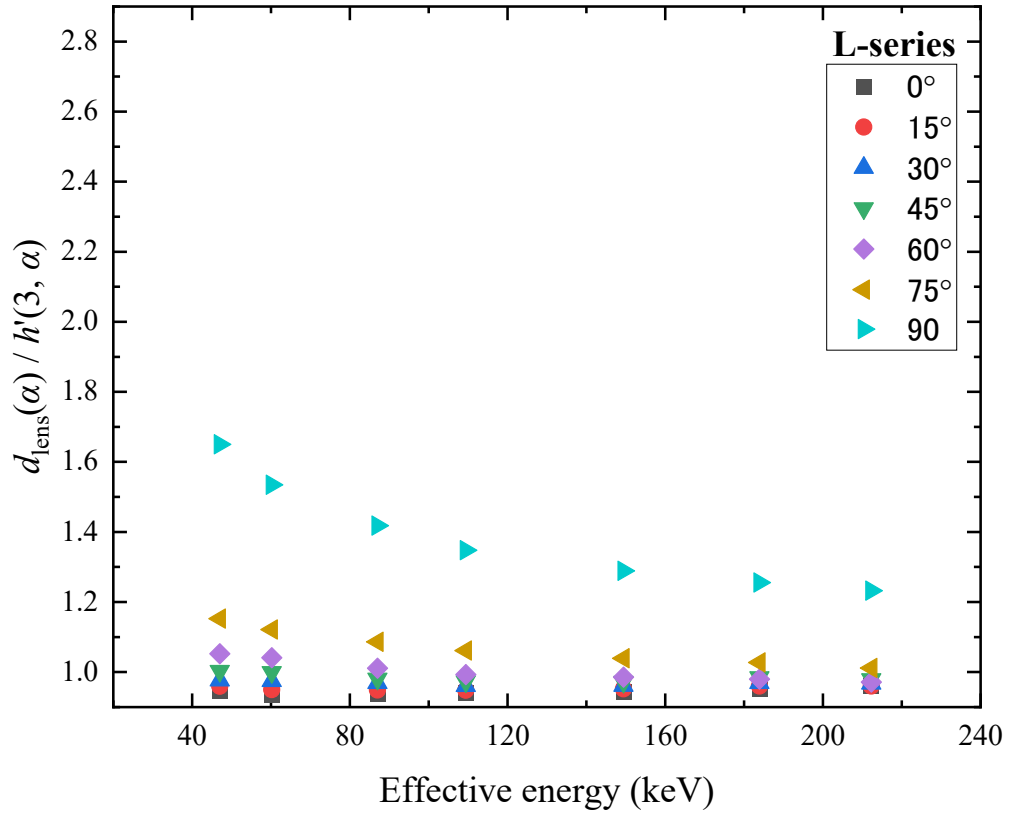


図 3.2.1-X5 現行実用量に対する新たな実用量の値の変動 (6/13)

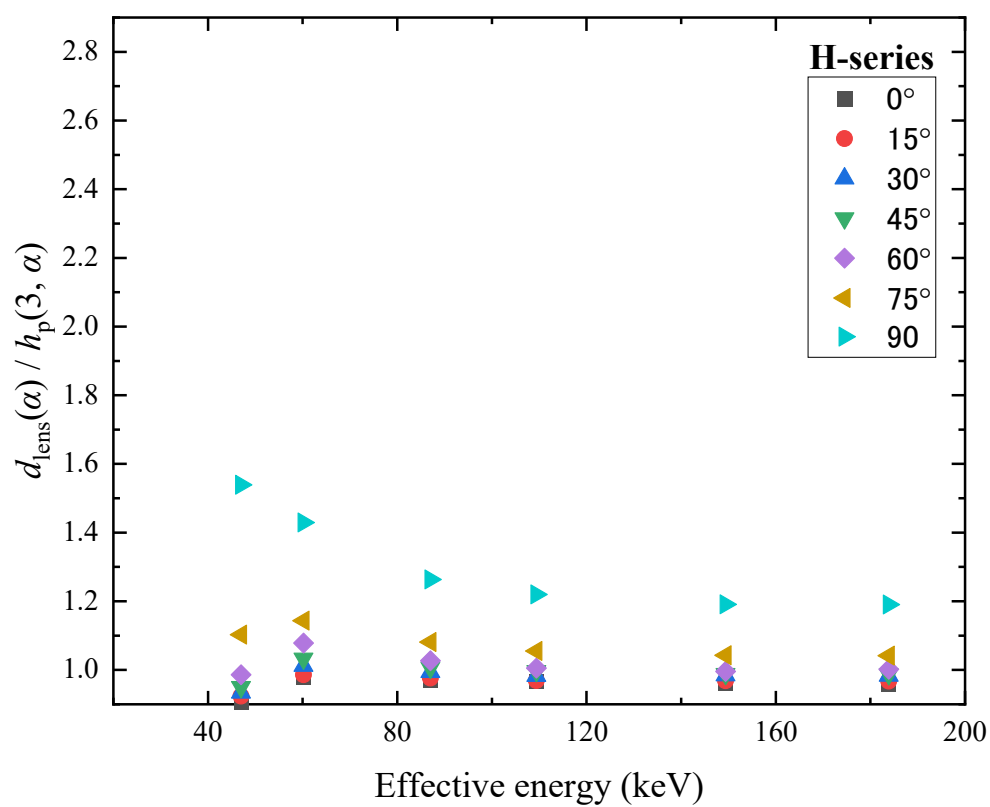
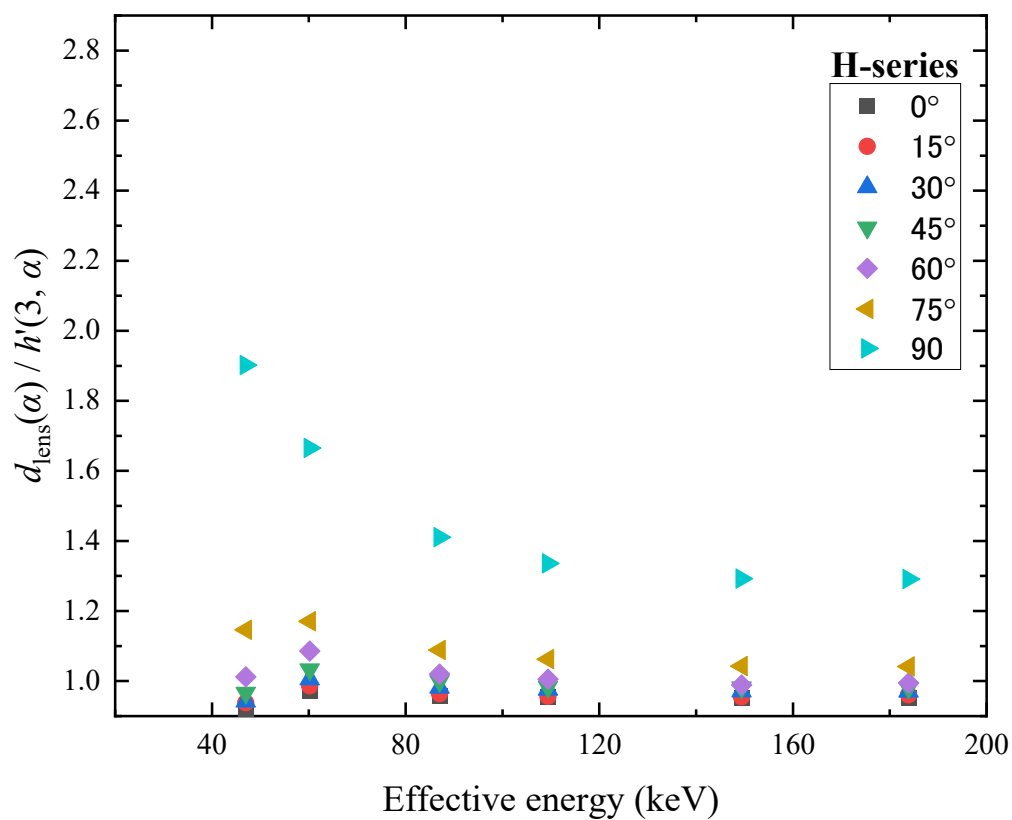


図 3.2.1-X6 現行実用量に対する新たな実用量の値の変動 (7/13)

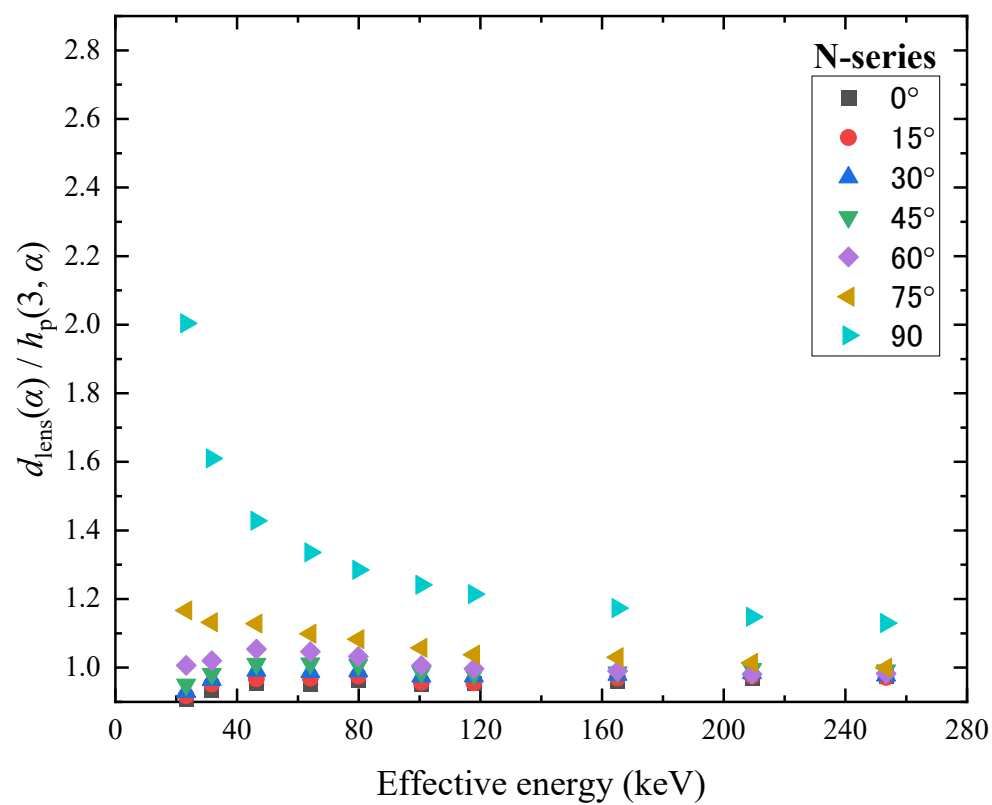
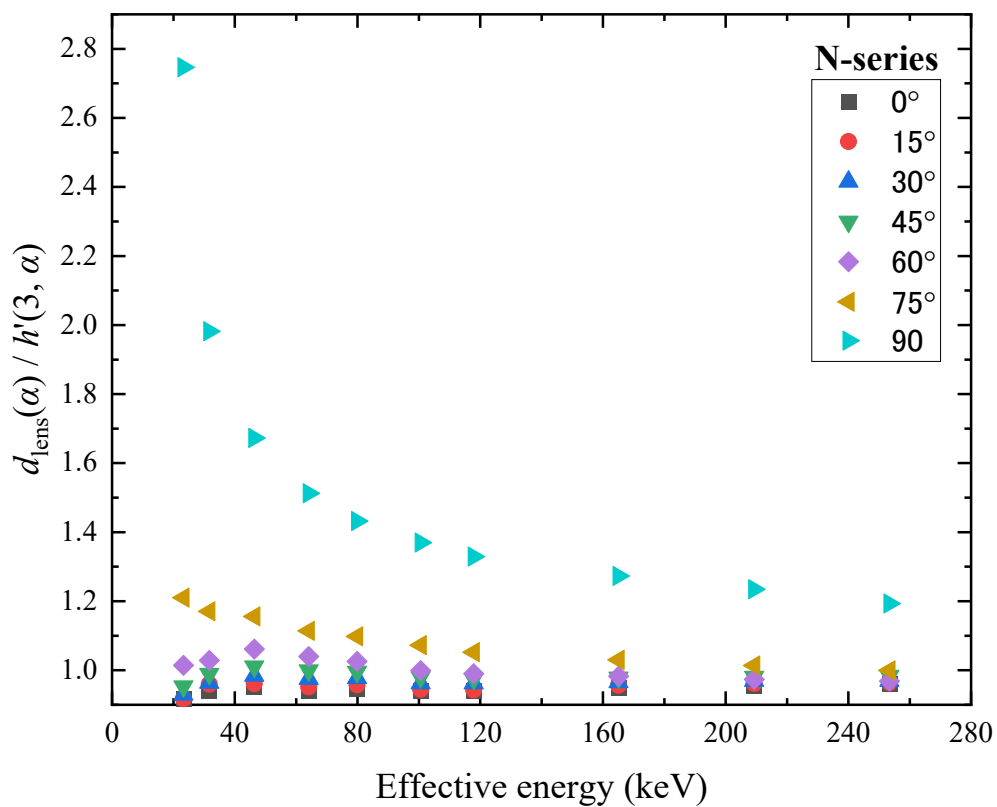


図 3.2.1-X7 現行実用量に対する新たな実用量の値の変動 (8/13)

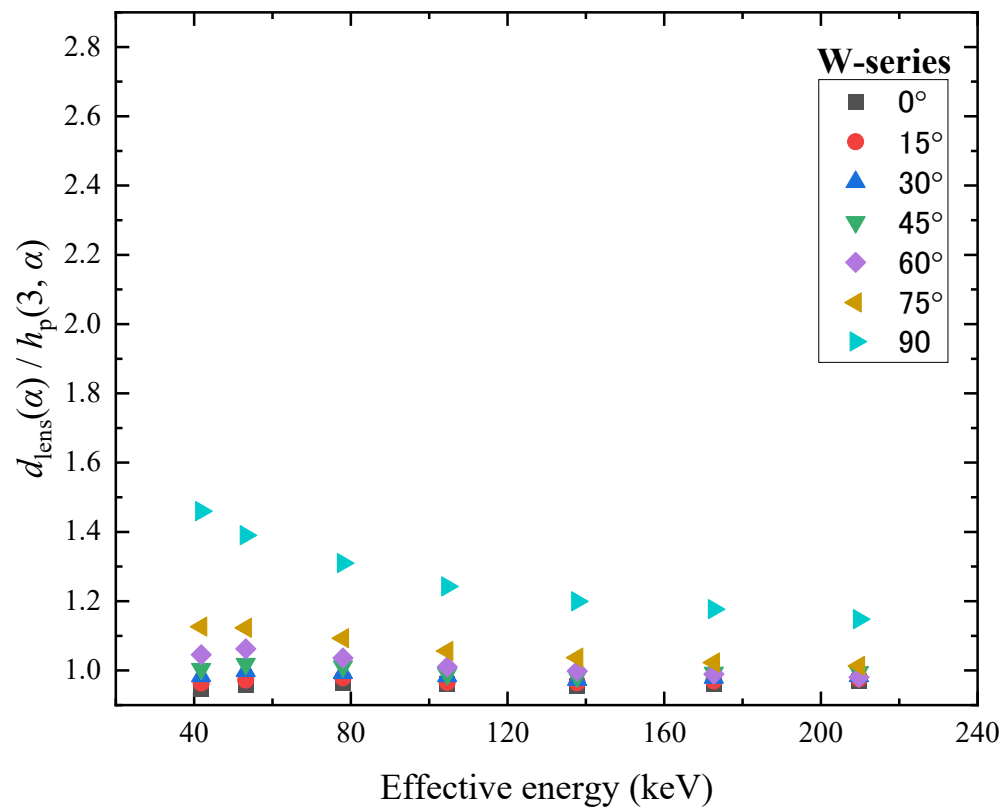
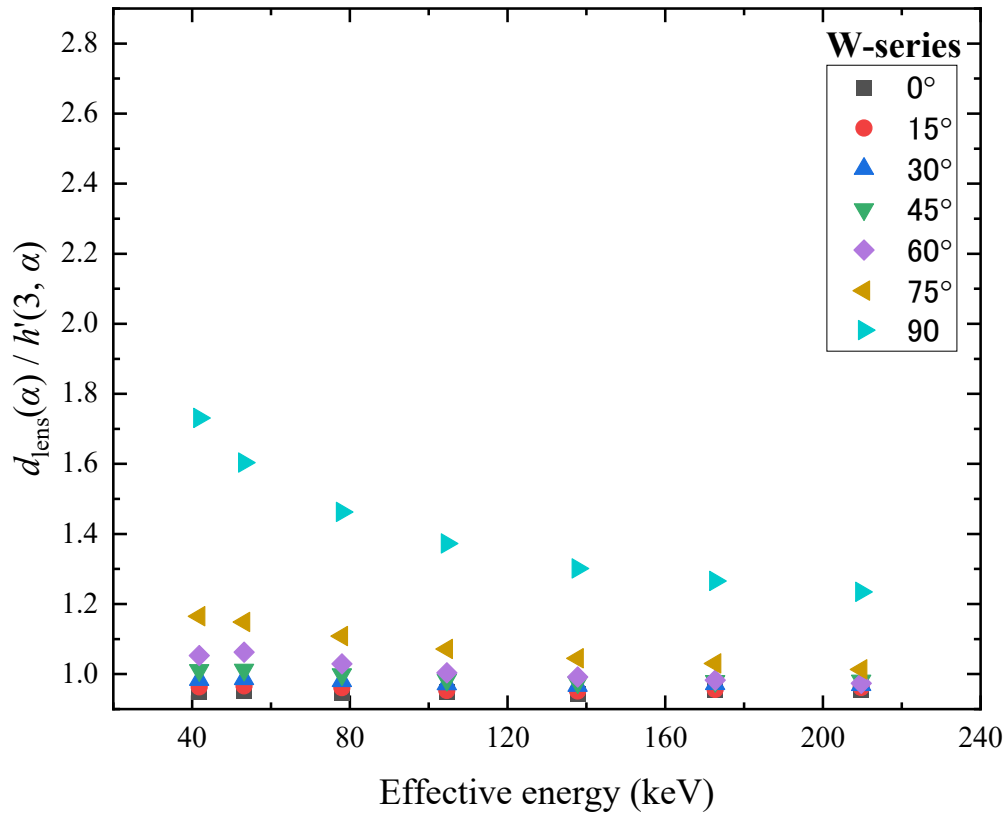


図 3.2.1-X8 現行実用量に対する新たな実用量の値の変動 (9/13)

表 3.2.1-X12 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数
(L-series, スラブファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
L-55	1.64	1.63	1.61	1.54	1.50	1.37
L-70	1.77	1.76	1.74	1.70	1.62	1.47
L-100	1.73	1.72	1.71	1.68	1.62	1.50
L-125	1.64	1.64	1.64	1.62	1.57	1.48
L-170	1.53	1.53	1.53	1.52	1.50	1.44
L-210	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.41
L-240	1.42	1.42	1.42	1.42	1.43	1.39

表 3.2.1-X13 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数
(H-series, スラブファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
H-60	1.30	1.29	1.29	1.27	1.23	1.17
H-100	1.68	1.67	1.65	1.59	1.54	1.40
H-200	1.68	1.67	1.67	1.65	1.59	1.49
H-250	1.61	1.61	1.61	1.59	1.55	1.47
H-280	1.54	1.54	1.54	1.53	1.51	1.45
H-300	1.54	1.54	1.54	1.53	1.51	1.44

表 3.2.1-X14 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数
(N-series, スラブファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
N-30	1.15	1.15	1.15	1.14	1.12	1.08
N-40	1.32	1.31	1.31	1.28	1.25	1.18
N-60	1.63	1.62	1.60	1.53	1.50	1.36
N-80	1.79	1.78	1.76	1.72	1.63	1.49
N-100	1.75	1.75	1.74	1.70	1.63	1.50
N-120	1.68	1.67	1.67	1.65	1.59	1.49
N-150	1.62	1.62	1.62	1.60	1.56	1.47
N-200	1.50	1.50	1.50	1.49	1.48	1.43
N-250	1.42	1.42	1.42	1.43	1.43	1.39
N-300	1.37	1.37	1.37	1.38	1.39	1.37

表 3.2.1-X15 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数
(W-series, スラブファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
W-60	1.55	1.54	1.53	1.45	1.43	1.31
W-80	1.71	1.70	1.69	1.63	1.57	1.42
W-110	1.76	1.75	1.74	1.70	1.63	1.50
W-150	1.66	1.66	1.66	1.64	1.58	1.49
W-200	1.56	1.56	1.56	1.55	1.52	1.45
W-250	1.48	1.48	1.48	1.48	1.47	1.42
W-300	1.42	1.42	1.42	1.42	1.43	1.39

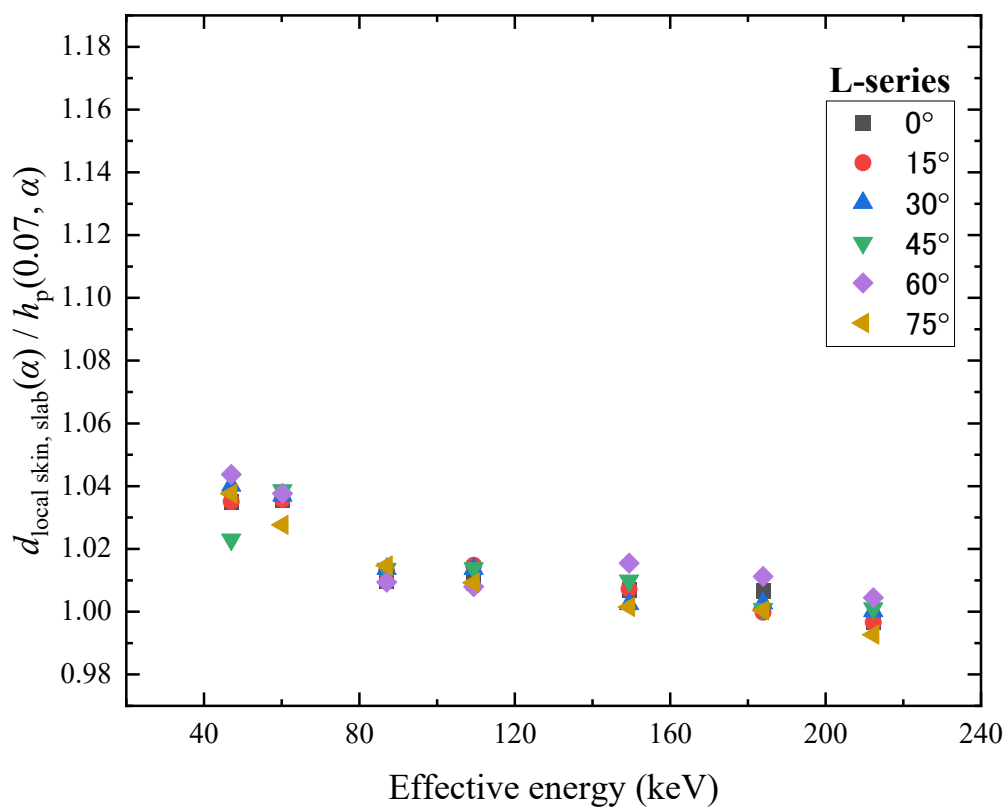
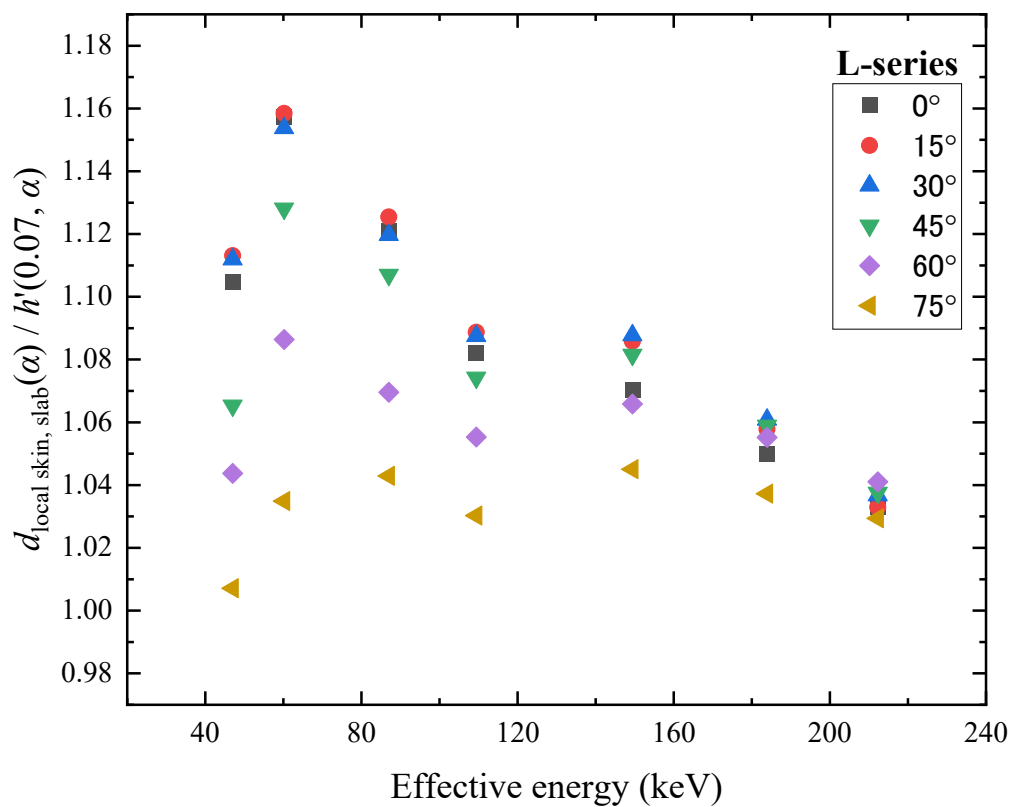


図 3.2.1-X9 現行実用量に対する新たな実用量の値の変動 (10/13)

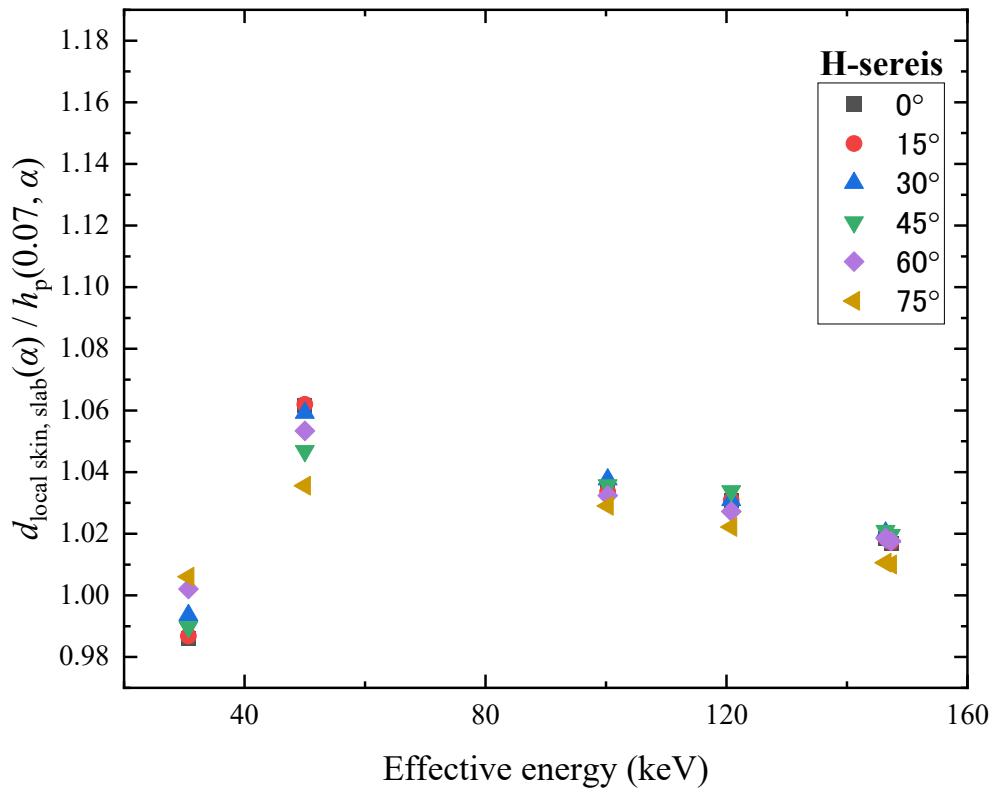
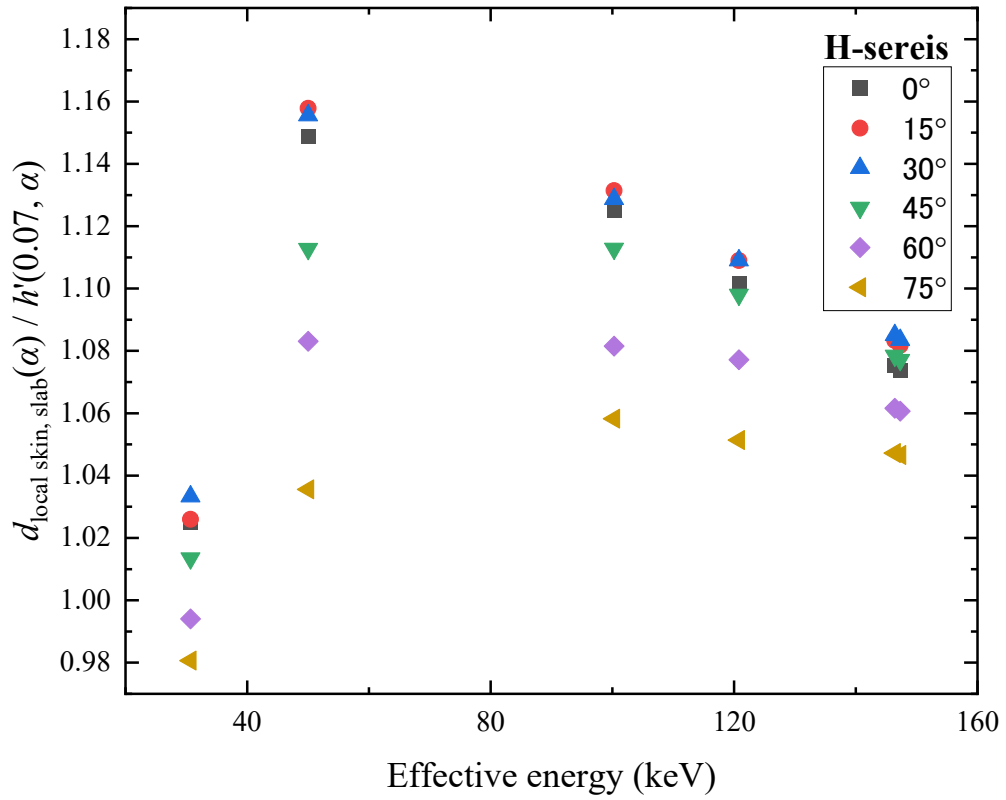


図 3.2.1-X10 現行実用量に対する新たな実用量の値の変動 (11/13)

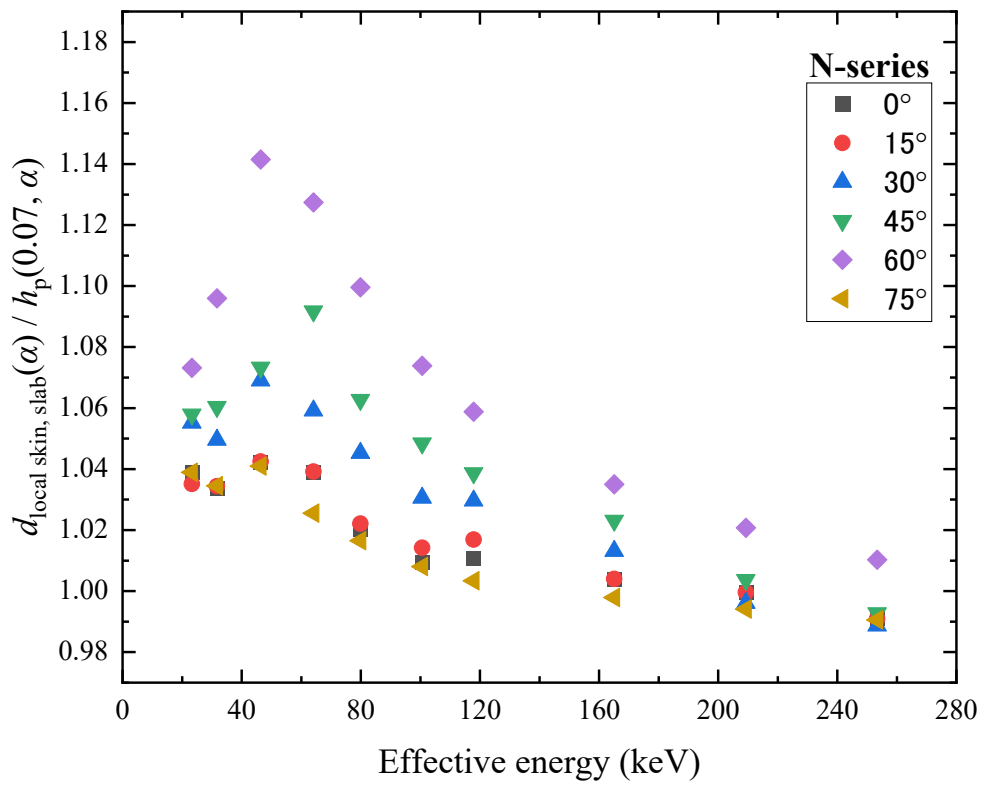
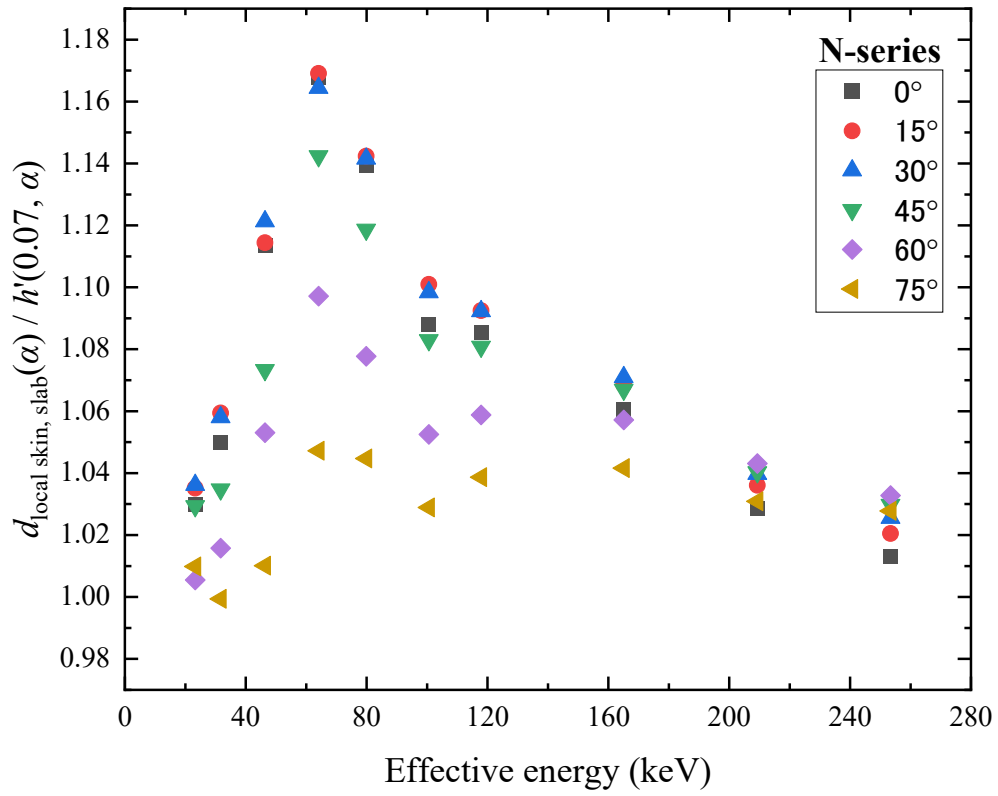


図 3.2.1-X11 現行実用量に対する新たな実用量の値の変動 (12/13)

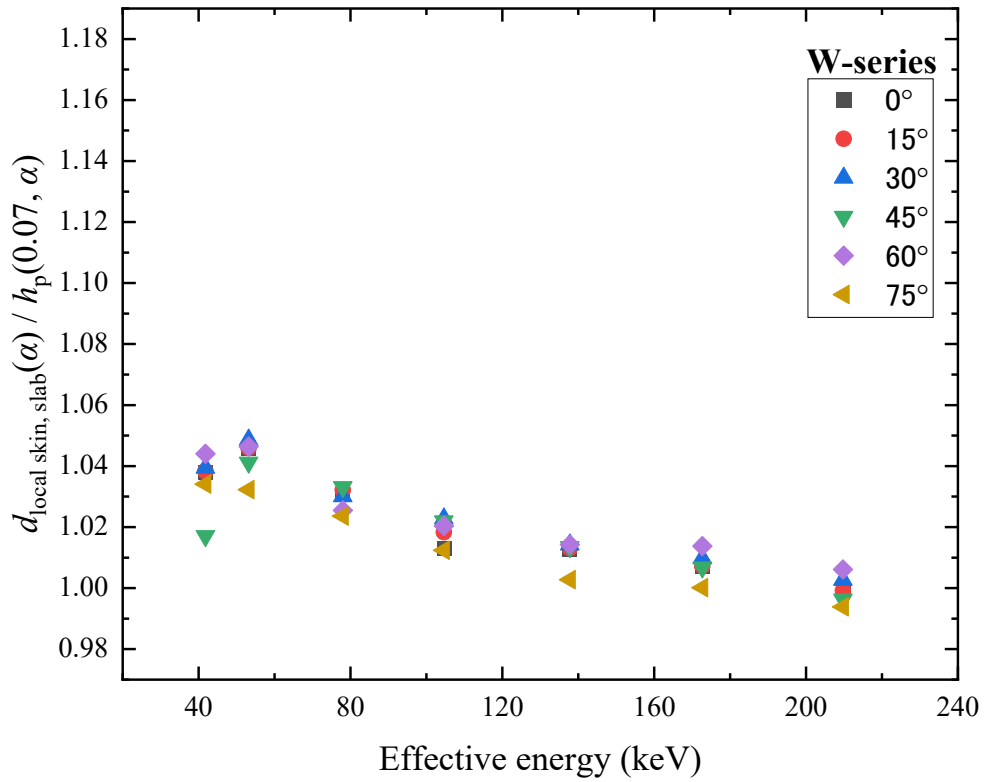
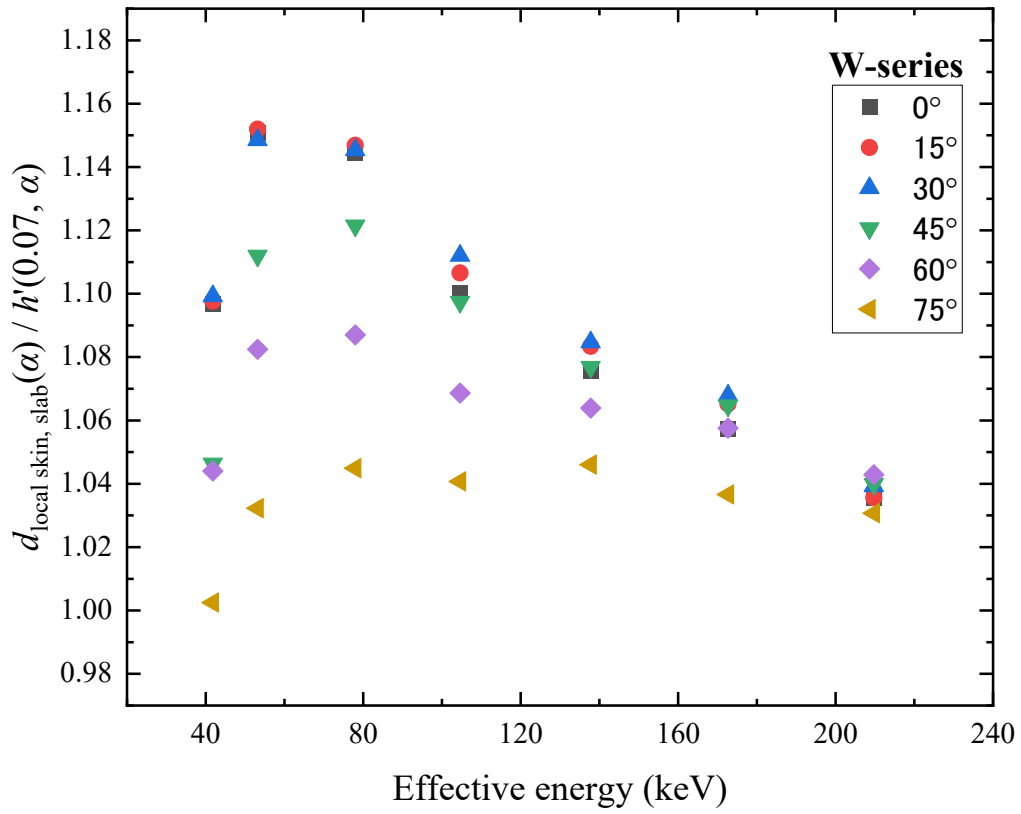


図 3.2.1-X12 現行実用量に対する新たな実用量の値の変動 (13/13)

表 3.2.1-X16 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (L-series, ピラーファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
L-55	1.43	1.45	1.41	1.44	1.41	1.41	1.30	0.970	0.691	0.538	0.429	0.386	0.395	1.033
L-70	1.46	1.47	1.44	1.45	1.43	1.44	1.35	1.06	0.800	0.649	0.543	0.493	0.508	1.09
L-100	1.43	1.41	1.43	1.40	1.40	1.41	1.34	1.09	0.857	0.703	0.625	0.562	0.561	1.10
L-125	1.38	1.36	1.38	1.37	1.36	1.37	1.31	1.08	0.865	0.717	0.636	0.580	0.573	1.08
L-210	1.31	1.31	1.32	1.32	1.32	1.33	1.28	1.08	0.871	0.744	0.655	0.604	0.594	1.07
L-240	1.27	1.28	1.28	1.28	1.29	1.30	1.26	1.07	0.879	0.763	0.672	0.627	0.615	1.06

表 3.2.1-X17 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (H-series, ピラーファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
H-60	1.27	1.27	1.26	1.26	1.23	1.22	1.09	0.660	0.389	0.247	0.185	0.152	0.140	0.805
H-100	1.45	1.46	1.42	1.45	1.42	1.42	1.32	1.00	0.724	0.572	0.461	0.417	0.429	1.05
H-200	1.40	1.38	1.40	1.38	1.37	1.38	1.32	1.08	0.865	0.709	0.633	0.575	0.569	1.09
H-250	1.35	1.35	1.36	1.35	1.34	1.36	1.30	1.08	0.866	0.725	0.641	0.586	0.578	1.08
H-280	1.31	1.31	1.32	1.32	1.32	1.33	1.28	1.08	0.870	0.743	0.653	0.603	0.592	1.07
1H-300	1.31	1.31	1.32	1.32	1.32	1.33	1.28	1.08	0.870	0.743	0.654	0.603	0.593	1.07

表 3.2.1-X18 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (N-series, ピラーファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
N-30	1.14	1.14	1.13	1.13	1.11	1.09	0.924	0.394	0.169	0.081	0.049	0.037	0.028	0.649
N-40	1.29	1.29	1.28	1.28	1.25	1.24	1.11	0.688	0.413	0.269	0.201	0.168	0.156	0.827
N-60	1.43	1.45	1.41	1.43	1.41	1.41	1.30	0.963	0.683	0.530	0.421	0.379	0.388	1.03
N-80	1.46	1.46	1.45	1.45	1.43	1.44	1.35	1.07	0.818	0.666	0.565	0.512	0.526	1.10
N-100	1.45	1.43	1.44	1.42	1.41	1.42	1.34	1.09	0.852	0.699	0.614	0.554	0.558	1.11
N-120	1.40	1.38	1.40	1.38	1.37	1.38	1.32	1.08	0.865	0.709	0.633	0.575	0.570	1.09
N-150	1.36	1.35	1.36	1.35	1.35	1.36	1.30	1.08	0.865	0.723	0.640	0.585	0.577	1.08
N-200	1.29	1.30	1.30	1.30	1.30	1.31	1.27	1.07	0.875	0.753	0.663	0.615	0.604	1.06
N-250	1.25	1.26	1.26	1.26	1.27	1.28	1.25	1.07	0.886	0.774	0.685	0.642	0.630	1.05
N-300	1.23	1.23	1.23	1.24	1.25	1.26	1.23	1.06	0.897	0.790	0.705	0.667	0.655	1.05

表 3.2.1-X19 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (W-series, ピラーファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
W-60	1.40	1.42	1.38	1.41	1.38	1.38	1.26	0.902	0.618	0.464	0.362	0.321	0.324	0.986
W-80	1.45	1.47	1.43	1.45	1.43	1.43	1.33	1.02	0.754	0.602	0.492	0.445	0.460	1.07
W-110	1.45	1.43	1.44	1.42	1.41	1.42	1.35	1.09	0.850	0.697	0.611	0.551	0.556	1.11
W-150	1.39	1.37	1.39	1.37	1.37	1.38	1.32	1.08	0.865	0.712	0.634	0.577	0.571	1.09
W-200	1.33	1.32	1.33	1.33	1.33	1.34	1.28	1.08	0.868	0.737	0.649	0.597	0.587	1.07
W-250	1.28	1.29	1.29	1.29	1.30	1.31	1.26	1.07	0.877	0.757	0.666	0.620	0.608	1.06
W-300	1.25	1.26	1.26	1.26	1.27	1.28	1.25	1.07	0.886	0.774	0.685	0.643	0.630	1.05

表 3.2.1-X20 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (L-series, ロッドファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
L-55	1.16	1.17	1.17	1.17	1.18	1.15	1.10	1.04	0.956	0.892	0.845	0.820	0.811	1.04
L-70	1.19	1.19	1.18	1.18	1.18	1.16	1.13	1.07	1.01	0.944	0.900	0.873	0.865	1.07
L-100	1.20	1.20	1.19	1.19	1.18	1.17	1.15	1.10	1.04	0.986	0.943	0.916	0.909	1.09
L-125	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.17	1.15	1.11	1.05	1.00	0.959	0.938	0.930	1.10
L-210	1.17	1.16	1.17	1.17	1.17	1.16	1.14	1.11	1.06	1.01	0.976	0.956	0.949	1.10
L-240	1.16	1.15	1.15	1.16	1.16	1.16	1.13	1.10	1.06	1.02	0.985	0.964	0.958	1.09

表 3.2.1-X21 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (H-series, ロッドファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
H-60	1.13	1.13	1.13	1.12	1.12	1.10	1.03	0.944	0.841	0.750	0.686	0.648	0.636	0.949
H-100	1.17	1.18	1.18	1.18	1.18	1.16	1.11	1.05	0.970	0.907	0.861	0.836	0.827	1.05
H-200	1.19	1.19	1.18	1.19	1.18	1.17	1.15	1.10	1.05	0.993	0.953	0.931	0.923	1.10
H-250	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.17	1.15	1.11	1.05	1.00	0.965	0.945	0.937	1.10
H-280	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.16	1.14	1.11	1.06	1.01	0.975	0.955	0.948	1.10
H-300	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.16	1.14	1.11	1.06	1.01	0.976	0.955	0.948	1.10

表 3.2.1-X22 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (N-series, ロッドファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
N-30	1.09	1.09	1.09	1.08	1.07	1.04	0.960	0.837	0.690	0.573	0.500	0.459	0.446	0.829
N-40	1.13	1.14	1.14	1.13	1.12	1.10	1.04	0.953	0.850	0.763	0.701	0.665	0.653	0.958
N-60	1.16	1.17	1.17	1.17	1.18	1.15	1.10	1.04	0.953	0.888	0.842	0.816	0.807	1.04
N-80	1.19	1.19	1.19	1.19	1.18	1.17	1.13	1.08	1.02	0.953	0.910	0.882	0.875	1.07
N-100	1.20	1.20	1.19	1.19	1.18	1.17	1.14	1.10	1.04	0.979	0.935	0.907	0.901	1.09
N-120	1.19	1.19	1.18	1.19	1.18	1.17	1.15	1.10	1.05	0.993	0.953	0.931	0.923	1.10
N-150	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.17	1.15	1.11	1.05	1.00	0.963	0.943	0.935	1.10
N-200	1.16	1.16	1.16	1.16	1.17	1.16	1.14	1.10	1.06	1.01	0.981	0.960	0.954	1.10
N-250	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.13	1.10	1.06	1.02	0.990	0.968	0.963	1.09
N-300	1.14	1.14	1.14	1.14	1.15	1.14	1.12	1.10	1.06	1.02	1.00	0.973	0.970	1.08

表 3.2.1-X23 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (W-series, ロッドファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
W-60	1.15	1.16	1.17	1.17	1.17	1.14	1.09	1.02	0.927	0.859	0.810	0.784	0.773	1.02
W-80	1.17	1.18	1.18	1.18	1.18	1.16	1.11	1.06	0.983	0.920	0.876	0.850	0.842	1.06
W-110	1.20	1.20	1.19	1.19	1.18	1.17	1.14	1.09	1.04	0.977	0.933	0.905	0.898	1.09
W-150	1.18	1.18	1.18	1.19	1.18	1.17	1.15	1.10	1.05	1.00	0.956	0.935	0.927	1.10
W-200	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.14	1.11	1.05	1.01	0.972	0.952	0.945	1.10
W-250	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.14	1.10	1.06	1.02	0.983	0.962	0.956	1.10
W-300	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.13	1.10	1.06	1.02	0.990	0.968	0.963	1.09

表 3.2.1-X24 産総研 X 線質 (QI=0.4) の実効エネルギー
と評価した換算係数

線質	$E_{\text{eff}} / \text{keV}$	$h^*_{E_{\text{max}}} / (\text{Sv Gy}^{-1})$
QI(0.4)-40 kV	16.0	0.0617
QI(0.4)-50 kV	20.0	0.133
QI(0.4)-60 kV	24.0	0.234
QI(0.4)-75 kV	30.0	0.427
QI(0.4)-100 kV	40.0	0.807
QI(0.4)-125 kV	50.0	1.13
QI(0.4)-150 kV	59.9	1.33
QI(0.4)-175 kV	70.0	1.43
QI(0.4)-200 kV	80.0	1.44
QI(0.4)-225 kV	89.9	1.42
QI(0.4)-250 kV	100	1.40

表 3.2.1-X25 産総研 X 線質 (QI=0.5) の実効エネルギー
と評価した換算係数

線質	$E_{\text{eff}} / \text{keV}$	$h^*_{E_{\text{max}}} / (\text{Sv Gy}^{-1})$
QI(0.5)-40 kV	20.0	0.133
QI(0.5)-50 kV	25.0	0.263
QI(0.5)-60 kV	30.0	0.427
QI(0.5)-75 kV	37.5	0.714
QI(0.5)-100 kV	50.0	1.13
QI(0.5)-125 kV	62.5	1.37
QI(0.5)-150 kV	75.0	1.44
QI(0.5)-175 kV	87.4	1.43
QI(0.5)-200 kV	100	1.40
QI(0.5)-225 kV	112	1.36
QI(0.5)-250 kV	124	1.33

表 3.2.1-X26 産総研 X 線質 (QI=0.6) の実効エネルギー
と評価した換算係数

線質	$E_{\text{eff}} / \text{keV}$	$h^*_{E_{\text{max}}} / (\text{Sv Gy}^{-1})$
QI(0.6)-40 kV	24.0	0.234
QI(0.6)-50 kV	30.0	0.427
QI(0.6)-60 kV	36.0	0.657
QI(0.6)-75 kV	45.0	0.978
QI(0.6)-100 kV	59.9	1.33
QI(0.6)-125 kV	75	1.44
QI(0.6)-150 kV	89.9	1.42
QI(0.6)-175 kV	105	1.38
QI(0.6)-200 kV	119	1.34
QI(0.6)-225 kV	134	1.30
QI(0.6)-250 kV	150	1.26

表 3.2.1-X27 産総研 X 線質 (QI=0.7) の実効エネルギー
と評価した換算係数

線質	$E_{\text{eff}} / \text{keV}$	$h^*_{E_{\text{max}}} / (\text{Sv Gy}^{-1})$
QI(0.7)-40 kV	28.0	0.358
QI(0.7)-50 kV	35.0	0.619
QI(0.7)-60 kV	42.0	0.878
QI(0.7)-75 kV	52.5	1.19
QI(0.7)-100 kV	70.0	1.43
QI(0.7)-125 kV	87.4	1.43
QI(0.7)-150 kV	105	1.38
QI(0.7)-175 kV	122	1.33
QI(0.7)-200 kV	140	1.28
QI(0.7)-225 kV	157	1.24
QI(0.7)-250 kV	174	1.20

表 3.2.1-X28 産総研 X 線質 (QI=0.8) の実効エネルギー
と評価した換算係数

線質	$E_{\text{eff}} / \text{keV}$	$h^*_{E_{\text{max}}} / (\text{Sv Gy}^{-1})$
QI(0.8)-40 kV	32.0	0.500
QI(0.8)-50 kV	40.0	0.807
QI(0.8)-60 kV	48.0	1.07
QI(0.8)-75 kV	59.9	1.33
QI(0.8)-100 kV	80.0	1.44
QI(0.8)-125 kV	100	1.40
QI(0.8)-150 kV	119	1.34
QI(0.8)-175 kV	140	1.28
QI(0.8)-200 kV	160	1.23
QI(0.8)-225 kV	180	1.19
QI(0.8)-250 kV	200	1.16

表 3.2.1-X29 産総研 X 線質 (QI=0.9) の実効エネルギー
と評価した換算係数

線質	$E_{\text{eff}} / \text{keV}$	$h^*_{E_{\text{max}}} / (\text{Sv Gy}^{-1})$
QI(0.9)-40 kV	36.0	0.657
QI(0.9)-50 kV	44.9	0.975
QI(0.9)-60 kV	54.0	1.22
QI(0.9)-75 kV	67.5	1.42
QI(0.9)-100 kV	89.9	1.42
QI(0.9)-125 kV	112	1.36
QI(0.9)-150 kV	134	1.30
QI(0.9)-175 kV	157	1.24
QI(0.9)-200 kV	180	1.19
QI(0.9)-225 kV	203	1.16
QI(0.9)-250 kV	225	1.14

表 3.2.1-X30 評価した X 線校正場の個人線量換算係数 (QI=0.4)

線質	$h_p(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$											
	0°	max(±15°)	max(±30°)	max(±45°)	max(±60°)	max(±75°)	max(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
QI(0.4)-40 kV	0.0617	0.0608	0.0564	0.0489	0.0383	0.0266	0.0164	0.0060	0.0266	0.0219	0.0224	0.0213
QI(0.4)-50 kV	0.133	0.131	0.123	0.109	0.0868	0.0606	0.0376	0.0166	0.0594	0.0478	0.0484	0.0467
QI(0.4)-60 kV	0.234	0.230	0.217	0.195	0.159	0.113	0.071	0.042	0.110	0.0872	0.0881	0.0852
QI(0.4)-75 kV	0.427	0.421	0.400	0.365	0.305	0.225	0.144	0.128	0.218	0.172	0.174	0.167
QI(0.4)-100 kV	0.807	0.800	0.765	0.692	0.589	0.461	0.314	0.379	0.461	0.366	0.375	0.352
QI(0.4)-125 kV	1.13	1.12	1.07	0.973	0.840	0.668	0.475	0.639	0.685	0.550	0.563	0.531
QI(0.4)-150 kV	1.33	1.33	1.26	1.16	1.01	0.809	0.591	0.830	0.842	0.680	0.696	0.662
QI(0.4)-175 kV	1.43	1.42	1.36	1.25	1.09	0.884	0.655	0.941	0.931	0.753	0.771	0.733
QI(0.4)-200 kV	1.44	1.43	1.36	1.26	1.10	0.902	0.670	0.972	0.950	0.767	0.789	0.744
QI(0.4)-225 kV	1.42	1.41	1.35	1.25	1.10	0.904	0.675	0.978	0.951	0.771	0.794	0.746
QI(0.4)-250 kV	1.40	1.39	1.33	1.24	1.09	0.899	0.675	0.974	0.944	0.768	0.791	0.742

表 3.2.1-X31 評価した X 線校正場の個人線量換算係数 (QI=0.5)

線質	$h_p(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$											
	0°	max(±15°)	max(±30°)	max(±45°)	max(±60°)	max(±75°)	max(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
QI(0.5)-40 kV	0.133	0.131	0.123	0.109	0.0868	0.0606	0.0376	0.0166	0.0594	0.0478	0.0484	0.0467
QI(0.5)-50 kV	0.263	0.258	0.244	0.221	0.181	0.129	0.0811	0.0522	0.1254	0.0992	0.1002	0.0969
QI(0.5)-60 kV	0.427	0.421	0.400	0.365	0.305	0.225	0.144	0.128	0.218	0.172	0.174	0.167
QI(0.5)-75 kV	0.714	0.707	0.676	0.611	0.518	0.402	0.271	0.312	0.400	0.316	0.324	0.304
QI(0.5)-100 kV	1.13	1.12	1.07	0.973	0.840	0.668	0.475	0.639	0.685	0.550	0.563	0.531
QI(0.5)-125 kV	1.37	1.36	1.30	1.19	1.04	0.835	0.612	0.866	0.872	0.705	0.721	0.686
QI(0.5)-150 kV	1.44	1.43	1.36	1.25	1.10	0.896	0.664	0.962	0.945	0.762	0.783	0.740
QI(0.5)-175 kV	1.43	1.42	1.35	1.25	1.10	0.904	0.675	0.977	0.952	0.771	0.793	0.746
QI(0.5)-200 kV	1.40	1.39	1.33	1.24	1.09	0.899	0.675	0.974	0.944	0.768	0.791	0.742
QI(0.5)-225 kV	1.36	1.35	1.30	1.21	1.07	0.888	0.671	0.961	0.930	0.759	0.782	0.733
QI(0.5)-250 kV	1.33	1.32	1.26	1.19	1.05	0.875	0.664	0.944	0.913	0.749	0.770	0.722

表 3.2.1-X32 評価した X 線校正場の個人線量換算係数 (QI=0.6)

線質	$h_p(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$											
	0°	max(±15°)	max(±30°)	max(±45°)	max(±60°)	max(±75°)	max(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
QI(0.6)-40 kV	0.234	0.230	0.217	0.195	0.159	0.113	0.0708	0.0423	0.1100	0.0872	0.0881	0.0852
QI(0.6)-50 kV	0.427	0.421	0.400	0.365	0.305	0.225	0.144	0.128	0.218	0.172	0.174	0.167
QI(0.6)-60 kV	0.657	0.651	0.622	0.561	0.475	0.366	0.244	0.272	0.362	0.286	0.293	0.276
QI(0.6)-75 kV	0.978	0.972	0.928	0.843	0.723	0.572	0.399	0.514	0.579	0.463	0.474	0.445
QI(0.6)-100 kV	1.33	1.33	1.26	1.16	1.01	0.809	0.591	0.830	0.842	0.680	0.696	0.662
QI(0.6)-125 kV	1.44	1.43	1.36	1.25	1.10	0.896	0.664	0.962	0.945	0.762	0.783	0.740
QI(0.6)-150 kV	1.42	1.41	1.35	1.25	1.10	0.904	0.675	0.978	0.951	0.771	0.794	0.746
QI(0.6)-175 kV	1.38	1.37	1.31	1.23	1.08	0.895	0.674	0.969	0.939	0.765	0.788	0.739
QI(0.6)-200 kV	1.34	1.33	1.28	1.20	1.06	0.881	0.667	0.951	0.920	0.753	0.775	0.727
QI(0.6)-225 kV	1.30	1.29	1.24	1.16	1.03	0.864	0.658	0.929	0.899	0.739	0.760	0.713
QI(0.6)-250 kV	1.26	1.25	1.20	1.13	1.01	0.846	0.649	0.906	0.877	0.724	0.743	0.699

表 3.2.1-X33 評価した X 線校正場の個人線量換算係数 (QI=0.7)

線質	$h_p(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$											
	0°	max(±15°)	max(±30°)	max(±45°)	max(±60°)	max(±75°)	max(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
QI(0.7)-40 kV	0.358	0.353	0.335	0.304	0.253	0.184	0.117	0.092	0.178	0.140	0.142	0.137
QI(0.7)-50 kV	0.613	0.606	0.578	0.526	0.446	0.339	0.223	0.247	0.333	0.262	0.267	0.254
QI(0.7)-60 kV	0.878	0.871	0.832	0.754	0.644	0.506	0.349	0.434	0.510	0.406	0.415	0.390
QI(0.7)-75 kV	1.19	1.18	1.13	1.03	0.890	0.710	0.509	0.695	0.731	0.588	0.602	0.570
QI(0.7)-100 kV	1.43	1.42	1.36	1.25	1.09	0.884	0.655	0.941	0.931	0.753	0.771	0.733
QI(0.7)-125 kV	1.43	1.42	1.35	1.25	1.10	0.904	0.675	0.977	0.952	0.771	0.793	0.746
QI(0.7)-150 kV	1.38	1.37	1.31	1.23	1.08	0.895	0.674	0.969	0.939	0.765	0.788	0.739
QI(0.7)-175 kV	1.33	1.32	1.27	1.19	1.05	0.877	0.666	0.947	0.916	0.751	0.772	0.724
QI(0.7)-200 kV	1.28	1.28	1.23	1.15	1.02	0.857	0.655	0.920	0.891	0.733	0.753	0.708
QI(0.7)-225 kV	1.24	1.23	1.19	1.12	1.00	0.839	0.645	0.897	0.868	0.718	0.737	0.693
QI(0.7)-250 kV	1.20	1.20	1.16	1.09	0.975	0.824	0.636	0.876	0.849	0.705	0.722	0.680

表 3.2.1-X34 評価した X 線校正場の個人線量換算係数 (QI=0.8)

線質	$h_p(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$											
	0°	max(±15°)	max(±30°)	max(±45°)	max(±60°)	max(±75°)	max(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
QI(0.8)-40 kV	0.500	0.493	0.470	0.428	0.360	0.269	0.174	0.172	0.262	0.206	0.209	0.200
QI(0.8)-50 kV	0.807	0.800	0.765	0.692	0.589	0.461	0.314	0.379	0.461	0.366	0.375	0.352
QI(0.8)-60 kV	1.07	1.06	1.02	0.924	0.795	0.632	0.446	0.591	0.644	0.516	0.529	0.498
QI(0.8)-75 kV	1.33	1.33	1.26	1.16	1.01	0.809	0.591	0.830	0.842	0.680	0.696	0.662
QI(0.8)-100 kV	1.44	1.43	1.36	1.26	1.10	0.902	0.670	0.972	0.950	0.767	0.789	0.744
QI(0.8)-125 kV	1.40	1.39	1.33	1.24	1.09	0.899	0.675	0.974	0.944	0.768	0.791	0.742
QI(0.8)-150 kV	1.34	1.33	1.28	1.20	1.06	0.881	0.667	0.951	0.920	0.753	0.775	0.727
QI(0.8)-175 kV	1.28	1.28	1.23	1.15	1.02	0.857	0.655	0.920	0.891	0.733	0.753	0.708
QI(0.8)-200 kV	1.23	1.23	1.18	1.11	0.993	0.836	0.643	0.893	0.865	0.715	0.734	0.690
QI(0.8)-225 kV	1.19	1.19	1.15	1.08	0.968	0.819	0.633	0.870	0.843	0.700	0.718	0.676
QI(0.8)-250 kV	1.16	1.16	1.12	1.06	0.955	0.811	0.631	0.858	0.834	0.693	0.708	0.668

表 3.2.1-X35 評価した X 線校正場の個人線量換算係数 (QI=0.9)

線質	$h_p(\alpha) / (\text{Sv Gy}^{-1})$											
	0°	max(±15°)	max(±30°)	max(±45°)	max(±60°)	max(±75°)	max(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
QI(0.9)-40 kV	0.657	0.651	0.622	0.561	0.475	0.366	0.244	0.272	0.362	0.286	0.293	0.276
QI(0.9)-50 kV	0.975	0.968	0.925	0.840	0.720	0.569	0.397	0.512	0.577	0.461	0.472	0.443
QI(0.9)-60 kV	1.22	1.22	1.16	1.06	0.918	0.734	0.528	0.726	0.757	0.610	0.624	0.591
QI(0.9)-75 kV	1.42	1.41	1.34	1.23	1.08	0.872	0.644	0.921	0.916	0.740	0.758	0.721
QI(0.9)-100 kV	1.42	1.41	1.35	1.25	1.10	0.904	0.675	0.978	0.951	0.771	0.794	0.746
QI(0.9)-125 kV	1.36	1.35	1.30	1.21	1.07	0.888	0.671	0.961	0.930	0.759	0.782	0.733
QI(0.9)-150 kV	1.30	1.29	1.24	1.16	1.03	0.864	0.658	0.929	0.899	0.739	0.760	0.713
QI(0.9)-175 kV	1.24	1.23	1.19	1.12	1.00	0.839	0.645	0.897	0.868	0.718	0.737	0.693
QI(0.9)-200 kV	1.19	1.19	1.15	1.08	0.968	0.819	0.633	0.870	0.843	0.700	0.718	0.676
QI(0.8)-225 kV	1.16	1.16	1.12	1.06	0.953	0.810	0.630	0.857	0.833	0.692	0.707	0.667
QI(0.8)-250 kV	1.14	1.13	1.10	1.04	0.942	0.804	0.627	0.848	0.823	0.684	0.703	0.663

表 3.2.1-X36 評価した X 線校正場の水晶体吸収線量換算係数 (QI=0.4)

線質	$d_{\text{lens}}(\alpha) / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
QI(0.4)-40 kV	0.598	0.592	0.577	0.553	0.514	0.444	0.333	0.247
QI(0.4)-50 kV	0.820	0.818	0.807	0.788	0.756	0.694	0.585	0.374
QI(0.4)-60 kV	0.966	0.969	0.963	0.947	0.921	0.867	0.770	0.474
QI(0.4)-75 kV	1.15	1.16	1.16	1.15	1.12	1.08	0.993	0.611
QI(0.4)-100 kV	1.37	1.39	1.39	1.39	1.38	1.33	1.25	0.793
QI(0.4)-125 kV	1.51	1.52	1.54	1.54	1.53	1.48	1.40	0.918
QI(0.4)-150 kV	1.57	1.58	1.61	1.61	1.60	1.55	1.48	0.992
QI(0.4)-175 kV	1.58	1.61	1.62	1.62	1.61	1.57	1.51	1.03
QI(0.4)-200 kV	1.57	1.59	1.60	1.60	1.59	1.56	1.50	1.03
QI(0.4)-225 kV	1.54	1.55	1.57	1.57	1.56	1.53	1.48	1.02
QI(0.4)-250 kV	1.51	1.51	1.53	1.53	1.52	1.50	1.45	1.01

表 3.2.1-X37 評価した X 線校正場の水晶体吸収線量換算係数 (QI=0.5)

線質	$d_{\text{lens}}(\alpha) / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
QI(0.5)-40 kV	0.820	0.818	0.807	0.788	0.756	0.694	0.585	0.374
QI(0.5)-50 kV	1.00	1.00	1.00	0.981	0.955	0.903	0.809	0.497
QI(0.5)-60 kV	1.15	1.16	1.16	1.15	1.12	1.08	0.993	0.611
QI(0.5)-75 kV	1.33	1.34	1.34	1.34	1.32	1.28	1.20	0.753
QI(0.5)-100 kV	1.51	1.52	1.54	1.54	1.53	1.48	1.40	0.918
QI(0.5)-125 kV	1.58	1.59	1.62	1.62	1.61	1.56	1.49	1.00
QI(0.5)-150 kV	1.58	1.60	1.61	1.62	1.60	1.57	1.51	1.03
QI(0.5)-175 kV	1.55	1.56	1.58	1.58	1.57	1.54	1.49	1.03
QI(0.5)-200 kV	1.51	1.51	1.53	1.53	1.52	1.50	1.45	1.01
QI(0.5)-225 kV	1.47	1.47	1.49	1.49	1.48	1.47	1.42	0.99
QI(0.5)-250 kV	1.43	1.44	1.46	1.46	1.45	1.44	1.40	0.98

表 3.2.1-X38 評価した X 線校正場の水晶体吸収線量換算係数 (QI=0.6)

線質	$d_{\text{lens}}(\alpha) / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
QI(0.6)-40 kV	0.966	0.969	0.963	0.947	0.921	0.867	0.770	0.474
QI(0.6)-50 kV	1.15	1.16	1.16	1.15	1.12	1.08	0.993	0.611
QI(0.6)-60 kV	1.29	1.31	1.31	1.31	1.29	1.24	1.16	0.727
QI(0.6)-75 kV	1.45	1.46	1.48	1.48	1.47	1.41	1.34	0.862
QI(0.6)-100 kV	1.57	1.58	1.61	1.61	1.60	1.55	1.48	0.992
QI(0.6)-125 kV	1.58	1.60	1.61	1.62	1.60	1.57	1.51	1.03
QI(0.6)-150 kV	1.54	1.55	1.57	1.57	1.56	1.53	1.48	1.02
QI(0.6)-175 kV	1.49	1.50	1.51	1.51	1.50	1.49	1.44	1.00
QI(0.6)-200 kV	1.45	1.45	1.47	1.47	1.46	1.45	1.41	0.983
QI(0.6)-225 kV	1.41	1.42	1.43	1.44	1.43	1.42	1.38	0.971
QI(0.6)-250 kV	1.39	1.40	1.41	1.42	1.41	1.40	1.37	0.969

表 3.2.1-X39 評価した X 線校正場の水晶体吸収線量換算係数 (QI=0.7)

線質	$d_{\text{lens}}(\alpha) / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
QI(0.7)-40 kV	1.09	1.10	1.10	1.09	1.06	1.02	0.925	0.568
QI(0.7)-50 kV	1.27	1.29	1.29	1.28	1.26	1.22	1.14	0.709
QI(0.7)-60 kV	1.41	1.42	1.43	1.43	1.41	1.37	1.29	0.822
QI(0.7)-75 kV	1.53	1.54	1.56	1.56	1.56	1.50	1.43	0.941
QI(0.7)-100 kV	1.58	1.61	1.62	1.62	1.61	1.57	1.51	1.03
QI(0.7)-125 kV	1.55	1.56	1.58	1.58	1.57	1.54	1.49	1.03
QI(0.7)-150 kV	1.49	1.50	1.51	1.51	1.50	1.49	1.44	1.00
QI(0.7)-175 kV	1.44	1.44	1.46	1.46	1.45	1.44	1.40	0.980
QI(0.7)-200 kV	1.40	1.41	1.43	1.43	1.42	1.42	1.38	0.973
QI(0.7)-225 kV	1.38	1.39	1.40	1.41	1.40	1.39	1.36	0.967
QI(0.7)-250 kV	1.35	1.37	1.38	1.39	1.37	1.37	1.34	0.961

表 3.2.1-X40 評価した X 線校正場の水晶体吸収線量換算係数 (QI=0.8)

線質	$d_{\text{lens}}(\alpha) / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
QI(0.8)-40 kV	1.20	1.22	1.21	1.21	1.18	1.14	1.06	0.652
QI(0.8)-50 kV	1.37	1.39	1.39	1.39	1.38	1.33	1.25	0.793
QI(0.8)-60 kV	1.49	1.50	1.52	1.52	1.51	1.45	1.38	0.897
QI(0.8)-75 kV	1.57	1.58	1.61	1.61	1.60	1.55	1.48	0.992
QI(0.8)-100 kV	1.57	1.59	1.60	1.60	1.59	1.56	1.50	1.03
QI(0.8)-125 kV	1.51	1.51	1.53	1.53	1.52	1.50	1.45	1.01
QI(0.8)-150 kV	1.45	1.45	1.47	1.47	1.46	1.45	1.41	0.983
QI(0.8)-175 kV	1.40	1.41	1.43	1.43	1.42	1.42	1.38	0.973
QI(0.8)-200 kV	1.37	1.38	1.40	1.41	1.39	1.39	1.35	0.966
QI(0.8)-225 kV	1.35	1.36	1.37	1.38	1.37	1.36	1.33	0.959
QI(0.8)-250 kV	1.33	1.34	1.35	1.36	1.34	1.34	1.32	0.953

表 3.2.1-X41 評価した X 線校正場の水晶体吸収線量換算係数 (QI=0.9)

線質	$d_{\text{lens}}(\alpha) / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
QI(0.9)-40 kV	1.29	1.31	1.31	1.31	1.29	1.24	1.16	0.727
QI(0.9)-50 kV	1.45	1.46	1.48	1.48	1.46	1.41	1.34	0.861
QI(0.9)-60 kV	1.54	1.55	1.57	1.58	1.57	1.51	1.44	0.953
QI(0.9)-75 kV	1.58	1.61	1.62	1.62	1.61	1.57	1.51	1.02
QI(0.9)-100 kV	1.54	1.55	1.57	1.57	1.56	1.53	1.48	1.02
QI(0.9)-125 kV	1.47	1.47	1.49	1.49	1.48	1.47	1.42	0.992
QI(0.9)-150 kV	1.41	1.42	1.43	1.44	1.43	1.42	1.38	0.971
QI(0.9)-175 kV	1.38	1.39	1.40	1.41	1.40	1.39	1.36	0.967
QI(0.9)-200 kV	1.35	1.36	1.37	1.38	1.37	1.36	1.33	0.959
QI(0.9)-225 kV	1.32	1.33	1.34	1.36	1.34	1.33	1.31	0.952
QI(0.9)-250 kV	1.31	1.31	1.32	1.34	1.32	1.31	1.30	0.946

表 3.2.1-X42 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.4, スラブファン
トム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
QI(0.4)-40 kV	1.03	1.03	1.03	1.02	1.01	0.990
QI(0.4)-50 kV	1.09	1.09	1.09	1.09	1.07	1.04
QI(0.4)-60 kV	1.17	1.16	1.16	1.15	1.13	1.09
QI(0.4)-75 kV	1.29	1.28	1.28	1.26	1.22	1.16
QI(0.4)-100 kV	1.51	1.50	1.49	1.42	1.40	1.29
QI(0.4)-125 kV	1.68	1.67	1.65	1.59	1.54	1.40
QI(0.4)-150 kV	1.77	1.76	1.74	1.70	1.62	1.47
QI(0.4)-175 kV	1.79	1.78	1.77	1.73	1.64	1.50
QI(0.4)-200 kV	1.75	1.75	1.73	1.70	1.63	1.50
QI(0.4)-225 kV	1.72	1.71	1.70	1.68	1.61	1.50
QI(0.4)-250 kV	1.68	1.68	1.67	1.65	1.59	1.49

表 3.2.1-X43 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.5, スラブファン
トム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
QI(0.5)-40 kV	1.09	1.09	1.09	1.09	1.07	1.04
QI(0.5)-50 kV	1.19	1.18	1.18	1.17	1.14	1.10
QI(0.5)-60 kV	1.29	1.28	1.28	1.26	1.22	1.16
QI(0.5)-75 kV	1.46	1.45	1.45	1.38	1.36	1.26
QI(0.5)-100 kV	1.68	1.67	1.65	1.59	1.54	1.40
QI(0.5)-125 kV	1.78	1.77	1.75	1.72	1.63	1.48
QI(0.5)-150 kV	1.77	1.77	1.75	1.71	1.64	1.50
QI(0.5)-175 kV	1.72	1.72	1.71	1.68	1.61	1.50
QI(0.5)-200 kV	1.68	1.68	1.67	1.65	1.59	1.49
QI(0.5)-225 kV	1.64	1.64	1.63	1.62	1.57	1.48
QI(0.5)-250 kV	1.60	1.60	1.60	1.58	1.55	1.47

表 3.2.1-X46 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.6, スラブファン
トム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
QI(0.6)-40 kV	1.17	1.16	1.16	1.15	1.13	1.09
QI(0.6)-50 kV	1.29	1.28	1.28	1.26	1.22	1.16
QI(0.6)-60 kV	1.43	1.42	1.41	1.35	1.33	1.24
QI(0.6)-75 kV	1.60	1.59	1.58	1.51	1.48	1.35
QI(0.6)-100 kV	1.77	1.76	1.74	1.70	1.62	1.47
QI(0.6)-125 kV	1.77	1.77	1.75	1.71	1.64	1.50
QI(0.6)-150 kV	1.72	1.71	1.70	1.68	1.61	1.50
QI(0.6)-175 kV	1.66	1.66	1.66	1.63	1.58	1.49
QI(0.6)-200 kV	1.61	1.61	1.61	1.60	1.55	1.47
QI(0.6)-225 kV	1.57	1.57	1.57	1.56	1.53	1.46
QI(0.6)-250 kV	1.53	1.53	1.53	1.52	1.50	1.44

表 3.2.1-X47 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.7, スラブファン
トム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
QI(0.7)-40 kV	1.25	1.24	1.24	1.22	1.19	1.13
QI(0.7)-50 kV	1.41	1.40	1.39	1.33	1.31	1.23
QI(0.7)-60 kV	1.55	1.54	1.53	1.46	1.43	1.32
QI(0.7)-75 kV	1.71	1.70	1.68	1.63	1.56	1.42
QI(0.7)-100 kV	1.79	1.78	1.77	1.73	1.64	1.50
QI(0.7)-125 kV	1.72	1.72	1.71	1.68	1.61	1.50
QI(0.7)-150 kV	1.66	1.66	1.66	1.63	1.58	1.49
QI(0.7)-175 kV	1.60	1.60	1.60	1.59	1.55	1.47
QI(0.7)-200 kV	1.55	1.55	1.56	1.55	1.52	1.45
QI(0.7)-225 kV	1.51	1.51	1.52	1.51	1.49	1.43
QI(0.7)-250 kV	1.48	1.48	1.48	1.48	1.47	1.42

表 3.2.1-X48 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.8, スラブファン
トム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
QI(0.8)-40 kV	1.33	1.32	1.32	1.29	1.25	1.18
QI(0.8)-50 kV	1.51	1.50	1.49	1.42	1.40	1.29
QI(0.8)-60 kV	1.65	1.64	1.63	1.56	1.52	1.38
QI(0.8)-75 kV	1.77	1.76	1.74	1.70	1.62	1.47
QI(0.8)-100 kV	1.75	1.75	1.73	1.70	1.63	1.50
QI(0.8)-125 kV	1.68	1.68	1.67	1.65	1.59	1.49
QI(0.8)-150 kV	1.61	1.61	1.61	1.60	1.55	1.47
QI(0.8)-175 kV	1.55	1.55	1.56	1.55	1.52	1.45
QI(0.8)-200 kV	1.51	1.51	1.51	1.50	1.49	1.43
QI(0.8)-225 kV	1.47	1.47	1.47	1.47	1.46	1.41
QI(0.8)-250 kV	1.43	1.43	1.44	1.44	1.44	1.40

表 3.2.1-X49 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.9, スラブファン
トム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
QI(0.9)-40 kV	1.43	1.42	1.41	1.35	1.33	1.24
QI(0.9)-50 kV	1.60	1.59	1.58	1.51	1.48	1.35
QI(0.9)-60 kV	1.72	1.71	1.70	1.64	1.58	1.43
QI(0.9)-75 kV	1.79	1.78	1.76	1.73	1.64	1.50
QI(0.9)-100 kV	1.72	1.71	1.70	1.68	1.61	1.50
QI(0.9)-125 kV	1.64	1.64	1.63	1.62	1.57	1.48
QI(0.9)-150 kV	1.57	1.57	1.57	1.56	1.53	1.46
QI(0.9)-175 kV	1.51	1.51	1.52	1.51	1.49	1.43
QI(0.9)-200 kV	1.47	1.47	1.47	1.47	1.46	1.41
QI(0.9)-225 kV	1.43	1.43	1.43	1.43	1.44	1.40
QI(0.9)-250 kV	1.40	1.40	1.40	1.41	1.42	1.38

表 3.2.1-X50 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.4, ピラーファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
QI(0.4)-40 kV	1.04	1.05	1.04	1.04	1.03	1.01	0.686	0.0948	8.54E-03	9.32E-04	2.11E-04	5.93E-05	5.93E-05	0.540
QI(0.4)-50 kV	1.09	1.10	1.09	1.08	1.07	1.06	0.834	0.261	0.0697	0.0225	0.0102	6.08E-03	4.66E-03	0.595
QI(0.4)-60 kV	1.15	1.15	1.14	1.14	1.12	1.10	0.940	0.420	0.193	0.0976	0.0609	0.0470	0.0364	0.662
QI(0.4)-75 kV	1.26	1.25	1.25	1.24	1.22	1.20	1.07	0.639	0.371	0.232	0.173	0.141	0.128	0.789
QI(0.4)-100 kV	1.39	1.41	1.37	1.39	1.37	1.36	1.24	0.873	0.587	0.434	0.335	0.296	0.297	0.965
QI(0.4)-125 kV	1.45	1.46	1.42	1.45	1.42	1.42	1.32	0.999	0.724	0.572	0.461	0.417	0.429	1.05
QI(0.4)-150 kV	1.46	1.47	1.44	1.45	1.43	1.44	1.35	1.06	0.799	0.647	0.542	0.491	0.506	1.09
QI(0.4)-175 kV	1.46	1.45	1.44	1.44	1.43	1.43	1.35	1.08	0.836	0.684	0.589	0.533	0.544	1.11
QI(0.4)-200 kV	1.45	1.43	1.44	1.42	1.41	1.42	1.34	1.09	0.852	0.699	0.615	0.554	0.558	1.11
QI(0.4)-225 kV	1.43	1.40	1.42	1.40	1.39	1.40	1.33	1.08	0.858	0.704	0.627	0.564	0.561	1.10
QI(0.4)-225 kV	1.40	1.38	1.40	1.38	1.37	1.38	1.32	1.08	0.865	0.708	0.633	0.575	0.569	1.09

表 3.2.1-X51 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.5, ピラーファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
QI(0.5)-40 kV	1.09	1.10	1.09	1.08	1.07	1.06	0.834	0.261	0.0697	0.0225	0.0102	6.08E-03	4.66E-03	0.595
QI(0.5)-50 kV	1.16	1.17	1.16	1.15	1.14	1.12	0.964	0.456	0.226	0.122	0.0797	0.0631	0.0499	0.680
QI(0.5)-60 kV	1.26	1.25	1.25	1.24	1.22	1.20	1.070	0.639	0.371	0.232	0.173	0.141	0.128	0.789
QI(0.5)-75 kV	1.37	1.38	1.35	1.37	1.34	1.33	1.21	0.826	0.541	0.388	0.297	0.259	0.256	0.931
QI(0.5)-100 kV	1.45	1.46	1.42	1.45	1.42	1.42	1.32	0.999	0.724	0.572	0.461	0.417	0.429	1.05
QI(0.5)-125 kV	1.46	1.46	1.44	1.45	1.43	1.44	1.35	1.067	0.811	0.660	0.557	0.505	0.519	1.10
QI(0.5)-150 kV	1.45	1.44	1.44	1.43	1.42	1.43	1.35	1.09	0.846	0.693	0.604	0.545	0.553	1.11
QI(0.5)-175 kV	1.43	1.41	1.43	1.40	1.40	1.41	1.34	1.09	0.857	0.703	0.625	0.562	0.561	1.10
QI(0.5)-200 kV	1.40	1.38	1.40	1.38	1.37	1.38	1.32	1.08	0.865	0.708	0.633	0.575	0.569	1.09
QI(0.5)-225 kV	1.37	1.36	1.37	1.36	1.36	1.37	1.31	1.08	0.865	0.719	0.637	0.581	0.574	1.08
QI(0.5)-225 kV	1.35	1.34	1.35	1.35	1.34	1.35	1.30	1.08	0.866	0.728	0.642	0.588	0.580	1.08

表 3.2.1-X52 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.6, ピラーファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
QI(0.6)-40 kV	1.15	1.15	1.14	1.14	1.12	1.10	0.940	0.420	0.193	0.0976	0.0609	0.0470	0.0364	0.662
QI(0.6)-50 kV	1.26	1.25	1.25	1.24	1.22	1.20	1.07	0.639	0.371	0.232	0.173	0.141	0.128	0.789
QI(0.6)-60 kV	1.35	1.36	1.33	1.35	1.32	1.31	1.19	0.795	0.510	0.359	0.273	0.236	0.230	0.908
QI(0.6)-75 kV	1.43	1.44	1.40	1.43	1.40	1.40	1.29	0.947	0.665	0.512	0.404	0.362	0.370	1.02
QI(0.6)-100 kV	1.46	1.47	1.44	1.45	1.43	1.44	1.35	1.06	0.799	0.647	0.542	0.491	0.506	1.09
QI(0.6)-125 kV	1.45	1.44	1.44	1.43	1.42	1.43	1.35	1.09	0.846	0.693	0.604	0.545	0.553	1.11
QI(0.6)-150 kV	1.43	1.40	1.42	1.40	1.39	1.40	1.33	1.08	0.858	0.704	0.627	0.564	0.561	1.10
QI(0.6)-175 kV	1.39	1.37	1.39	1.37	1.36	1.37	1.32	1.08	0.865	0.713	0.635	0.577	0.571	1.09
QI(0.6)-200 kV	1.36	1.35	1.36	1.35	1.35	1.36	1.30	1.08	0.866	0.724	0.640	0.585	0.577	1.08
QI(0.6)-225 kV	1.33	1.33	1.34	1.33	1.33	1.34	1.29	1.08	0.868	0.735	0.647	0.595	0.585	1.07
QI(0.6)-225 kV	1.31	1.31	1.32	1.31	1.31	1.33	1.28	1.08	0.871	0.745	0.655	0.605	0.594	1.06

表 3.2.1-X53 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.7, ピラーファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
QI(0.7)-40 kV	1.22	1.22	1.21	1.20	1.19	1.16	1.03	0.563	0.319	0.192	0.138	0.113	0.097	0.743
QI(0.7)-50 kV	1.34	1.35	1.32	1.33	1.31	1.30	1.17	0.772	0.489	0.339	0.256	0.220	0.213	0.891
QI(0.7)-60 kV	1.41	1.42	1.38	1.41	1.38	1.38	1.26	0.905	0.621	0.467	0.364	0.324	0.327	0.988
QI(0.7)-75 kV	1.45	1.46	1.43	1.45	1.43	1.43	1.33	1.02	0.748	0.596	0.485	0.439	0.454	1.07
QI(0.7)-100 kV	1.46	1.45	1.44	1.44	1.43	1.43	1.35	1.08	0.836	0.684	0.589	0.533	0.544	1.11
QI(0.7)-125 kV	1.43	1.41	1.43	1.40	1.40	1.41	1.34	1.09	0.857	0.703	0.625	0.562	0.561	1.10
QI(0.7)-150 kV	1.39	1.37	1.39	1.37	1.36	1.37	1.32	1.08	0.865	0.713	0.635	0.577	0.571	1.09
QI(0.7)-175 kV	1.35	1.35	1.36	1.35	1.34	1.35	1.30	1.08	0.866	0.726	0.642	0.587	0.579	1.08
QI(0.7)-200 kV	1.32	1.32	1.33	1.33	1.32	1.34	1.28	1.08	0.869	0.739	0.650	0.598	0.588	1.07
QI(0.7)-225 kV	1.30	1.30	1.31	1.31	1.31	1.32	1.27	1.07	0.873	0.749	0.659	0.609	0.599	1.06
QI(0.7)-225 kV	1.28	1.29	1.29	1.29	1.29	1.31	1.26	1.07	0.877	0.758	0.667	0.620	0.609	1.06

表 3.2.1-X54 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.8, ピラーファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
QI(0.8)-40 kV	1.29	1.29	1.28	1.28	1.26	1.24	1.116	0.696	0.420	0.275	0.206	0.172	0.161	0.834
QI(0.8)-50 kV	1.39	1.41	1.37	1.39	1.37	1.36	1.243	0.873	0.587	0.434	0.335	0.296	0.297	0.965
QI(0.8)-60 kV	1.44	1.45	1.42	1.44	1.42	1.42	1.309	0.980	0.703	0.550	0.440	0.396	0.407	1.04
QI(0.8)-75 kV	1.46	1.47	1.44	1.45	1.43	1.44	1.35	1.058	0.799	0.647	0.542	0.491	0.506	1.09
QI(0.8)-100 kV	1.45	1.43	1.44	1.42	1.41	1.42	1.34	1.087	0.852	0.699	0.615	0.554	0.558	1.11
QI(0.8)-125 kV	1.40	1.38	1.40	1.38	1.37	1.38	1.32	1.082	0.865	0.708	0.633	0.575	0.569	1.09
QI(0.8)-150 kV	1.36	1.35	1.36	1.35	1.35	1.36	1.30	1.08	0.866	0.724	0.640	0.585	0.577	1.08
QI(0.8)-175 kV	1.32	1.32	1.33	1.33	1.32	1.34	1.28	1.08	0.869	0.739	0.650	0.598	0.588	1.07
QI(0.8)-200 kV	1.30	1.30	1.30	1.30	1.31	1.32	1.27	1.07	0.873	0.750	0.660	0.611	0.600	1.06
QI(0.8)-225 kV	1.28	1.28	1.28	1.29	1.29	1.30	1.26	1.07	0.878	0.761	0.670	0.624	0.613	1.06
QI(0.8)-225 kV	1.26	1.27	1.27	1.27	1.28	1.29	1.25	1.07	0.884	0.770	0.680	0.637	0.625	1.05

表 3.2.1-X55 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.9, ピラーファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
QI(0.9)-40 kV	1.35	1.36	1.33	1.35	1.32	1.31	1.19	0.795	0.510	0.359	0.273	0.236	0.230	0.908
QI(0.9)-50 kV	1.42	1.44	1.40	1.43	1.40	1.40	1.29	0.946	0.664	0.510	0.403	0.361	0.369	1.02
QI(0.9)-60 kV	1.46	1.47	1.43	1.45	1.43	1.43	1.33	1.03	0.760	0.609	0.499	0.452	0.466	1.07
QI(0.9)-75 kV	1.46	1.46	1.45	1.44	1.43	1.44	1.35	1.08	0.830	0.678	0.580	0.525	0.538	1.10
QI(0.9)-100 kV	1.43	1.40	1.42	1.40	1.39	1.40	1.33	1.08	0.858	0.704	0.627	0.564	0.561	1.10
QI(0.9)-125 kV	1.37	1.36	1.37	1.36	1.36	1.37	1.31	1.08	0.865	0.719	0.637	0.581	0.574	1.08
QI(0.9)-150 kV	1.33	1.33	1.34	1.33	1.33	1.34	1.29	1.08	0.868	0.735	0.647	0.595	0.585	1.07
QI(0.9)-175 kV	1.30	1.30	1.31	1.31	1.31	1.32	1.27	1.07	0.873	0.749	0.659	0.609	0.599	1.06
QI(0.9)-200 kV	1.28	1.28	1.28	1.29	1.29	1.30	1.26	1.07	0.878	0.761	0.670	0.624	0.613	1.06
QI(0.9)-225 kV	1.26	1.26	1.26	1.27	1.27	1.29	1.25	1.07	0.884	0.771	0.682	0.639	0.627	1.05
QI(0.9)-225 kV	1.24	1.25	1.25	1.25	1.26	1.28	1.24	1.07	0.890	0.780	0.692	0.652	0.639	1.05

表 3.2.1-X56 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.4, ロッドファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
QI(0.4)-40 kV	1.04	1.04	1.04	1.03	1.01	0.932	0.772	0.565	0.358	0.211	0.136	0.102	0.0916	0.653
QI(0.4)-50 kV	1.07	1.07	1.06	1.06	1.05	1.00	0.893	0.736	0.565	0.427	0.344	0.300	0.286	0.756
QI(0.4)-60 kV	1.09	1.09	1.09	1.08	1.07	1.04	0.971	0.854	0.711	0.599	0.527	0.487	0.474	0.843
QI(0.4)-75 kV	1.13	1.13	1.13	1.12	1.11	1.09	1.03	0.938	0.834	0.741	0.675	0.636	0.624	0.942
QI(0.4)-100 kV	1.15	1.16	1.16	1.16	1.17	1.14	1.08	1.01	0.915	0.846	0.795	0.768	0.757	1.01
QI(0.4)-125 kV	1.17	1.18	1.18	1.18	1.18	1.16	1.11	1.05	0.970	0.907	0.861	0.836	0.827	1.05
QI(0.4)-150 kV	1.19	1.19	1.18	1.18	1.18	1.16	1.13	1.07	1.00	0.943	0.899	0.872	0.864	1.07
QI(0.4)-175 kV	1.20	1.19	1.19	1.19	1.18	1.17	1.14	1.09	1.03	0.965	0.922	0.893	0.886	1.08
QI(0.4)-200 kV	1.20	1.20	1.19	1.19	1.18	1.17	1.14	1.10	1.04	0.979	0.936	0.907	0.901	1.09
QI(0.4)-225 kV	1.20	1.20	1.19	1.19	1.18	1.17	1.15	1.10	1.04	0.988	0.945	0.919	0.912	1.09
QI(0.4)-225 kV	1.19	1.19	1.18	1.19	1.18	1.17	1.15	1.10	1.05	0.993	0.952	0.931	0.923	1.10

表 3.2.1-X57 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.5, ロッドファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
QI(0.5)-40 kV	1.07	1.07	1.06	1.06	1.05	1.00	0.893	0.736	0.565	0.427	0.344	0.300	0.286	0.756
QI(0.5)-50 kV	1.10	1.10	1.10	1.09	1.08	1.05	0.985	0.875	0.739	0.631	0.561	0.522	0.510	0.862
QI(0.5)-60 kV	1.13	1.13	1.13	1.12	1.11	1.09	1.03	0.938	0.834	0.741	0.675	0.636	0.624	0.942
QI(0.5)-75 kV	1.14	1.15	1.16	1.15	1.16	1.13	1.07	0.993	0.898	0.825	0.771	0.742	0.731	1.00
QI(0.5)-100 kV	1.17	1.18	1.18	1.18	1.18	1.16	1.11	1.05	0.970	0.907	0.861	0.836	0.827	1.05
QI(0.5)-125 kV	1.19	1.19	1.19	1.19	1.18	1.17	1.13	1.08	1.01	0.950	0.906	0.878	0.871	1.07
QI(0.5)-150 kV	1.20	1.20	1.19	1.19	1.18	1.17	1.14	1.09	1.03	0.973	0.929	0.901	0.894	1.08
QI(0.5)-175 kV	1.20	1.20	1.19	1.19	1.18	1.17	1.15	1.10	1.04	0.986	0.943	0.916	0.909	1.09
QI(0.5)-200 kV	1.19	1.19	1.18	1.19	1.18	1.17	1.15	1.10	1.05	0.993	0.952	0.931	0.923	1.10
QI(0.5)-225 kV	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.17	1.15	1.11	1.05	0.999	0.960	0.940	0.932	1.10
QI(0.5)-225 kV	1.18	1.17	1.17	1.18	1.18	1.17	1.15	1.11	1.05	1.00	0.966	0.946	0.939	1.10

表 3.2.1-X58 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.6, ロッドファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
QI(0.6)-40 kV	1.09	1.09	1.09	1.08	1.07	1.04	0.971	0.854	0.711	0.599	0.527	0.487	0.474	0.843
QI(0.6)-50 kV	1.13	1.13	1.13	1.12	1.11	1.09	1.03	0.938	0.834	0.741	0.675	0.636	0.624	0.942
QI(0.6)-60 kV	1.14	1.15	1.15	1.15	1.15	1.13	1.06	0.984	0.887	0.811	0.755	0.725	0.714	0.992
QI(0.6)-75 kV	1.16	1.17	1.17	1.17	1.18	1.15	1.09	1.031	0.945	0.880	0.833	0.807	0.798	1.04
QI(0.6)-100 kV	1.19	1.19	1.18	1.18	1.18	1.16	1.13	1.07	1.00	0.943	0.899	0.872	0.864	1.07
QI(0.6)-125 kV	1.20	1.20	1.19	1.19	1.18	1.17	1.14	1.09	1.03	0.973	0.929	0.901	0.894	1.08
QI(0.6)-150 kV	1.20	1.20	1.19	1.19	1.18	1.17	1.15	1.10	1.04	0.988	0.945	0.919	0.912	1.09
QI(0.6)-175 kV	1.18	1.18	1.18	1.19	1.18	1.17	1.15	1.10	1.05	0.996	0.956	0.935	0.927	1.10
QI(0.6)-200 kV	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.17	1.15	1.11	1.05	1.00	0.964	0.944	0.936	1.10
QI(0.6)-225 kV	1.17	1.17	1.17	1.18	1.17	1.17	1.14	1.11	1.05	1.01	0.971	0.951	0.943	1.10
QI(0.6)-225 kV	1.17	1.16	1.17	1.17	1.17	1.16	1.14	1.11	1.06	1.01	0.976	0.956	0.949	1.10

表 3.2.1-X59 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.7, ロッドファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
QI(0.7)-40 kV	1.12	1.12	1.12	1.11	1.10	1.08	1.02	0.921	0.803	0.706	0.640	0.602	0.590	0.914
QI(0.7)-50 kV	1.14	1.14	1.15	1.15	1.15	1.12	1.06	0.977	0.879	0.801	0.744	0.713	0.701	0.985
QI(0.7)-60 kV	1.15	1.16	1.17	1.17	1.17	1.15	1.09	1.02	0.928	0.861	0.811	0.785	0.775	1.02
QI(0.7)-75 kV	1.17	1.18	1.18	1.18	1.18	1.16	1.11	1.06	0.980	0.917	0.873	0.847	0.839	1.06
QI(0.7)-100 kV	1.20	1.19	1.19	1.19	1.18	1.17	1.14	1.09	1.03	0.965	0.922	0.893	0.886	1.08
QI(0.7)-125 kV	1.20	1.20	1.19	1.19	1.18	1.17	1.15	1.10	1.04	0.986	0.943	0.916	0.909	1.09
QI(0.7)-150 kV	1.18	1.18	1.18	1.19	1.18	1.17	1.15	1.10	1.05	0.996	0.956	0.935	0.927	1.10
QI(0.7)-175 kV	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.17	1.15	1.11	1.05	1.00	0.965	0.945	0.938	1.10
QI(0.7)-200 kV	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.14	1.11	1.05	1.01	0.973	0.953	0.946	1.10
QI(0.7)-225 kV	1.17	1.16	1.16	1.17	1.17	1.16	1.14	1.11	1.06	1.01	0.979	0.958	0.952	1.10
QI(0.7)-225 kV	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.14	1.10	1.06	1.02	0.983	0.962	0.956	1.10

表 3.2.1-X60 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.8, ロッドファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
QI(0.8)-40 kV	1.13	1.14	1.14	1.13	1.13	1.10	1.04	0.955	0.853	0.767	0.705	0.670	0.658	0.961
QI(0.8)-50 kV	1.15	1.16	1.16	1.16	1.17	1.14	1.08	1.01	0.915	0.846	0.795	0.768	0.757	1.01
QI(0.8)-60 kV	1.16	1.17	1.18	1.18	1.18	1.16	1.10	1.04	0.961	0.897	0.851	0.826	0.816	1.04
QI(0.8)-75 kV	1.19	1.19	1.18	1.18	1.18	1.16	1.13	1.07	1.00	0.943	0.899	0.872	0.864	1.07
QI(0.8)-100 kV	1.20	1.20	1.19	1.19	1.18	1.17	1.14	1.10	1.04	0.979	0.936	0.907	0.901	1.09
QI(0.8)-125 kV	1.19	1.19	1.18	1.19	1.18	1.17	1.15	1.10	1.05	0.993	0.952	0.931	0.923	1.10
QI(0.8)-150 kV	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.17	1.15	1.11	1.05	1.00	0.964	0.944	0.936	1.10
QI(0.8)-175 kV	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.14	1.11	1.05	1.01	0.973	0.953	0.946	1.10
QI(0.8)-200 kV	1.16	1.16	1.16	1.17	1.17	1.16	1.14	1.11	1.06	1.01	0.979	0.959	0.952	1.10
QI(0.8)-225 kV	1.16	1.15	1.16	1.16	1.16	1.16	1.14	1.10	1.06	1.02	0.984	0.963	0.958	1.10
QI(0.8)-225 kV	1.15	1.15	1.15	1.15	1.16	1.15	1.13	1.10	1.06	1.02	0.988	0.967	0.962	1.09

表 3.2.1-X61 評価した X 線校正場の局所皮膚吸収線量換算係数 (QI=0.9, ロッドファントム)

線質	$d_{\text{local skin}} / (\text{Gy Gy}^{-1})$ for a radiation incidence at α													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
QI(0.9)-40 kV	1.14	1.15	1.15	1.15	1.15	1.13	1.06	0.984	0.887	0.811	0.755	0.725	0.714	0.992
QI(0.9)-50 kV	1.16	1.17	1.17	1.17	1.18	1.15	1.09	1.03	0.945	0.879	0.832	0.807	0.797	1.04
QI(0.9)-60 kV	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.16	1.12	1.06	0.986	0.923	0.879	0.853	0.845	1.06
QI(0.9)-75 kV	1.19	1.19	1.19	1.19	1.18	1.17	1.13	1.08	1.02	0.961	0.917	0.889	0.882	1.08
QI(0.9)-100 kV	1.20	1.20	1.19	1.19	1.18	1.17	1.15	1.10	1.04	0.988	0.945	0.919	0.912	1.09
QI(0.9)-125 kV	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.17	1.15	1.11	1.05	0.999	0.960	0.940	0.932	1.10
QI(0.9)-150 kV	1.17	1.17	1.17	1.18	1.17	1.17	1.14	1.11	1.05	1.01	0.971	0.951	0.943	1.10
QI(0.9)-175 kV	1.17	1.16	1.16	1.17	1.17	1.16	1.14	1.11	1.06	1.01	0.979	0.958	0.952	1.10
QI(0.9)-200 kV	1.16	1.15	1.16	1.16	1.16	1.16	1.14	1.10	1.06	1.02	0.984	0.963	0.958	1.10
QI(0.9)-225 kV	1.15	1.15	1.15	1.15	1.16	1.15	1.13	1.10	1.06	1.02	0.989	0.967	0.962	1.09
QI(0.9)-225 kV	1.15	1.14	1.14	1.15	1.15	1.15	1.13	1.10	1.06	1.02	0.993	0.970	0.966	1.09

(3) 中性子

中性子については、jcss 校正を行っている ^{241}Am -Be 中性子線源スペクトルと ^{252}Cf 中性子線源スペクトル、144 keV、565 keV、5.0 MeV、14.8 MeV に対して、中性子フルエンスから新たな実用量に基づく中性子周辺線量、及び中性子個人線量換算係数を求めた。144 keV、565 keV、5.0 MeV、14.8 MeV に対して、MCNP-ANT コードによるシミュレーション及び実測により中性子フルエンスのエネルギー分布 (以下、中性子スペクトル) を求めた。 ^{241}Am -Be 中性子線源と ^{252}Cf 中性子線源については、ISO8529-1 に記載されているデータを利用している。 ^{241}Am -Be 中性子線源について、ISO8529-1:2021 では、185 GBq から 555 GBq の ^{241}Am を含むものを large サイズと記載し、概ね 40 GBq の ^{241}Am を含むものを small サイズと記載している。各線源の中性子スペクトルを図 3.2.1-N1 から図 3.2.1-N6 に示す。144 keV 及び 565 keV 中性子は 4 MV ペレトロン加速器からの陽子ビームと $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ 反応、5.0 MeV 中性子は 4 MV ペレトロン加速器からの重陽子ビームと $\text{D}(d,n)^3\text{He}$ 反応、14.8 MeV 中性子は 300 kV コッククロフト加速器からの重陽子ビームと $\text{T}(d,n)^4\text{He}$ 反応によって生成される。

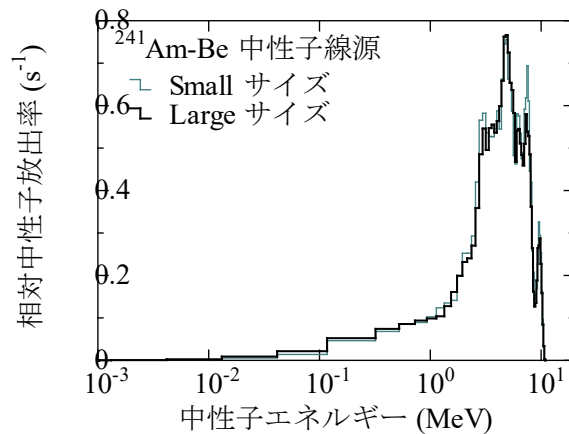


図 3.2.1-N1 ^{241}Am -Be 中性子線源の中性子スペクトル

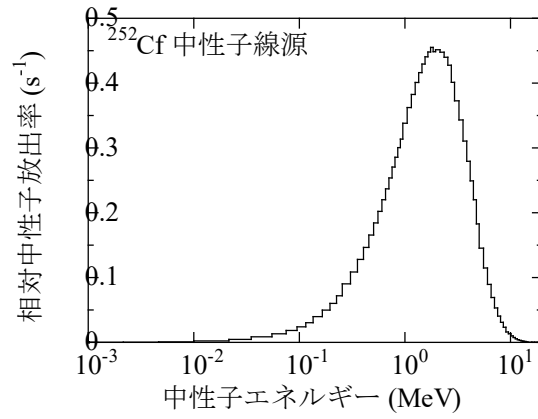


図 3.2.1-N2 ^{252}Cf 中性子線源の中性子スペクトル

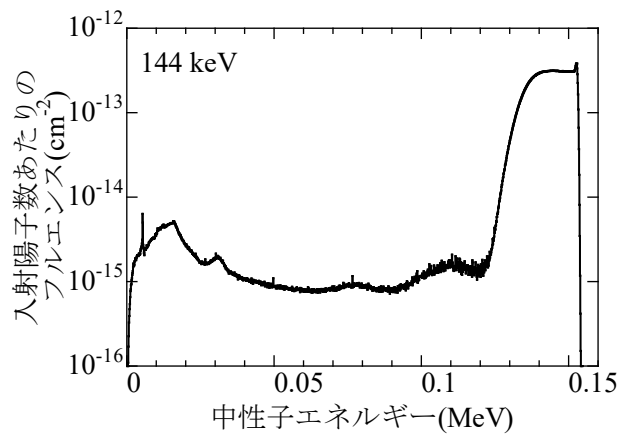


図 3.2.1-N3 産総研 144 keV 中性子標準の中性子スペクトル

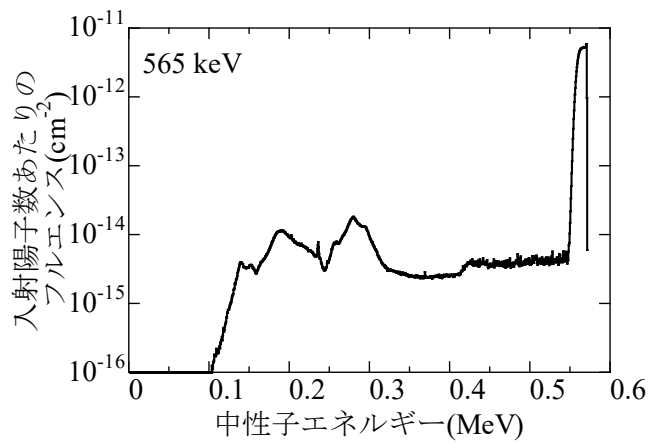


図 3.2.1-N4 産総研 565 keV 中性子標準の中性子スペクトル

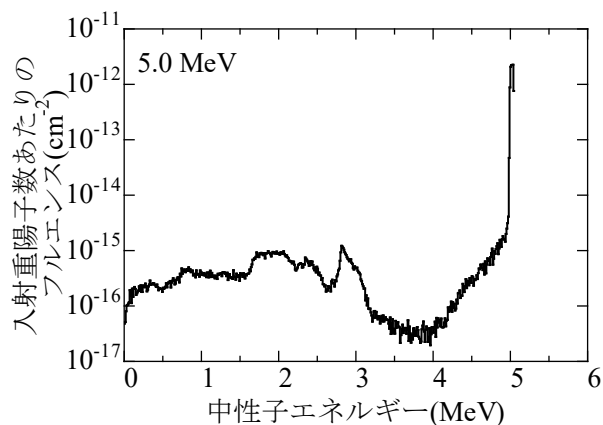


図 3.2.1-N5 産総研 5.0 MeV 中性子標準の中性子スペクトル

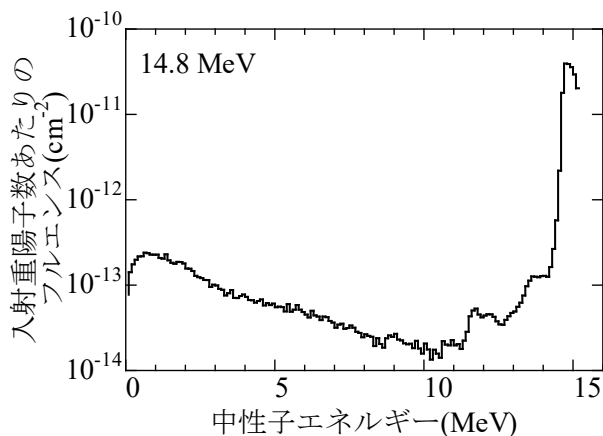


図 3.2.1-N6 産総研 14.8 MeV 中性子標準の中性子スペクトル

これらの中性子スペクトルに対して得られる現行の実用量に基づく換算係数を表 3.2.1-N1 に、新しい実用量に基づく換算係数を表 3.2.1-N2 に示す。換算係数は、中性子スペクトルのエネルギービンに直線内挿することによって得られている。表 3.2.1-N1 に記載される 144 keV、565 keV、5.0 MeV、14.8 MeV 単色中性子に対する $h^*(10)$ 及び $h_p(10)$ の値は、ISO8529-3:1998 の Table1 及び Table3 に記載される当該エネルギーに対する値よりも 1～3% 小さい値になっている。これは、当該単色中性子を用いた校正において引き去ることが不可能な、中性子生成ターゲットによって散乱された中性子に起因する低エネルギー中性子が原因である。

表 3.2.1-N1 現行の実用量に基づく換算係数

	h*(10) (pSv・cm ²)	h _p (10) (pSv・cm ²)					
		0°	15°	30°	45°	60°	75°
²⁴¹ Am-Be (small)	393	412	410	426	416	385	294
²⁴¹ Am-Be (large)	387	406	404	419	409	377	287
²⁵² Cf	385	400	395	408	387	344	228
144 keV	124	130	128	118	98.8	68.1	22.3
565 keV	336	348	342	340	306	240	112
5.0 MeV	405	420	418	437	435	409	330
14.8 MeV	533	557	558	577	567	569	508

表 3.2.1-N2 新しい実用量に基づく換算係数

	h* (pSv・cm ²)	h _p (pSv・cm ²)						
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
²⁴¹ Am-Be (small)	428	428	429	414	386	343	286	211
²⁴¹ Am-Be (large)	419	419	420	405	378	336	280	207
²⁵² Cf	350	350	351	336	307	266	212	149
144 keV	57.1	57.1	57.5	53.1	45.8	36.9	27.2	18.3
565 keV	192	192	194	182	161	133	97.7	64.7
5.0 MeV	492	492	491	476	450	404	342	254
14.8 MeV	489	489	488	479	462	430	385	319

現行の実用量に基づく中性子周辺線量当量換算係数 h*(10)と新しい実用量に基づく中性子周辺線量換算係数 h*を図 3.2.1-N7、及びそれらの比 h*/h*(10)を図 3.2.1-N8 に示す。²⁵²Cf と ²⁴¹Am-Be に関しては、その平均エネルギー位置でプロットしている。

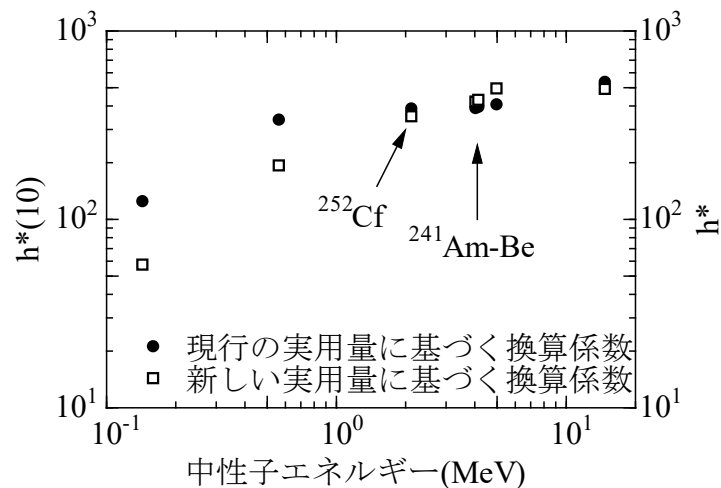


図 3.2.1-N7 現行の実用量に基づく中性子周辺線量当量換算係数 $h^*(10)$ と新しい実用量に基づく中性子周辺線量換算係数 h^*

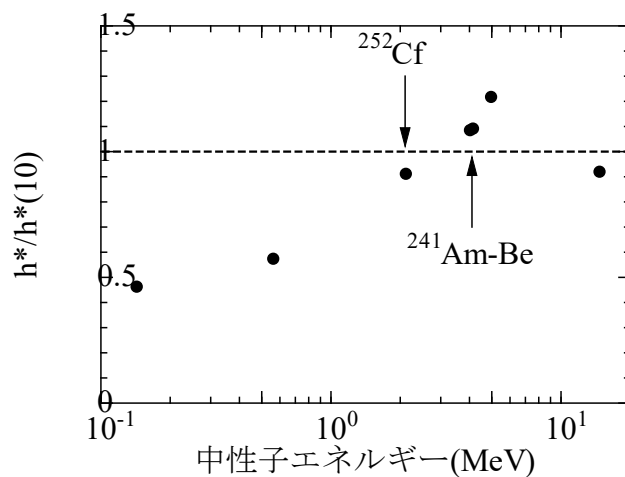


図 3.2.1-N8 現行の実用量に基づく中性子周辺線量当量換算係数 $h^*(10)$ と新しい実用量に基づく中性子周辺線量換算係数 h^* の比

図 3.2.1-N7、図 3.2.1-N8 より、今回評価したエネルギーの中では、²⁴¹Am-Be 中性子源スペクトルと 5.0 MeV 単色中性子に対しては、新しい実用量に基づく換算係数は現行の実用量に基づく換算係数より大きくなり、²⁵²Cf 中性子源スペクトルと 144 keV、565 keV、14.8 MeV に対しては、新しい実用量に基づく換算係数は現行の実用量に基づく換算係数よりも小さくなる。特に keV 領域においては約半分となる。これは、放射線施設の環境によって、新しい実用量に基づいた線量評価は、現行の実用量に基づいた線量評価よりも小さくなる可能性があることを示している。この場合、現行の実用量を用いたとき、放射線防護の観点

では安全側の評価ができていたという考え方もできる。線量計校正では、照射する周辺線量もしくは個人線量の不確かさに加えて、線量計が持つ固有の不確かさがある。校正事業者が行う中性子校正の場合には、拡張相対不確かさが 10%以上に及ぶこともある。新しい実用量を用いた校正において、不確かさの範囲を含めて線量評価が過小評価にならないことを確認することは、新しい実用量を適用するにあたっての課題となる。

現行の実用量に基づく中性子個人線量当量換算係数 $h_p(10;0^\circ)$ と新しい実用量に基づく中性子個人線量換算係数 $h_{p;0^\circ}$ を図 3.2.1-N9、及びそれらの比 $h_{p;0^\circ} / h_p(10;0^\circ)$ を図 3.2.1-N10 に示す。ここでも ^{252}Cf と $^{241}\text{Am-Be}$ に関しては、その平均エネルギー位置でプロットしている。

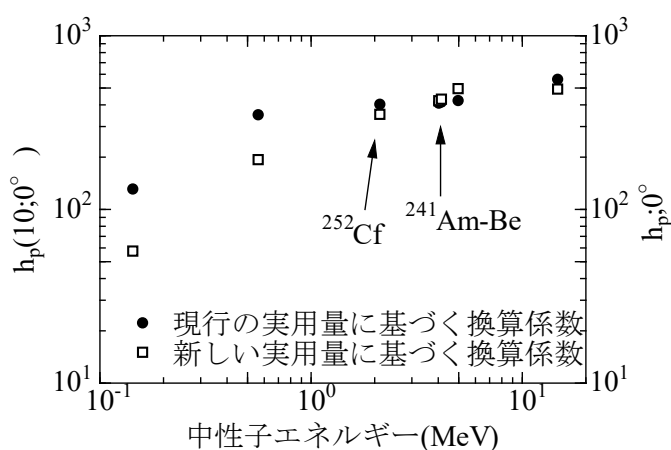


図 3.2.1-N9 現行の実用量に基づく中性子周辺線量当量換算係数 $h_p(10;0^\circ)$ と新しい実用量に基づく中性子周辺線量換算係数 $h_{p;0^\circ}$

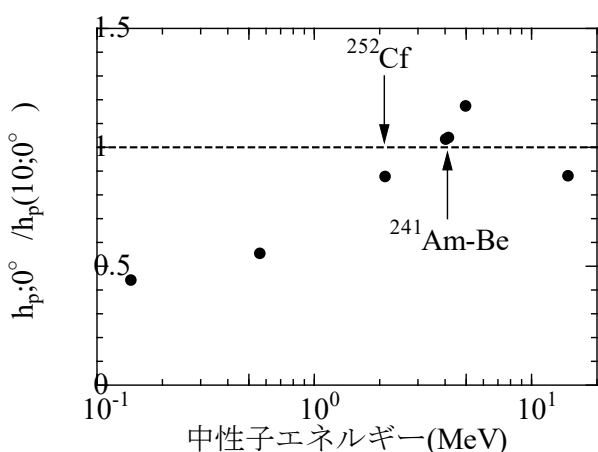


図 3.2.1-N10 現行の実用量に基づく中性子周辺線量当量 $h_p(10;0^\circ)$ と新しい実用量に基づく中性子周辺線量 $h_{p;0^\circ}$ の比

個人線量の場合も周辺線量と同様の傾向を示す。今回評価したエネルギーの中では、 ^{241}Am -Be 中性子源スペクトルと 5.0 MeV 単色中性子に対しては、新しい実用量に基づく換算係数は現行の実用量に基づく換算係数より大きくなり、 ^{252}Cf 中性子源スペクトルと 144 keV、565 keV、14.8 MeV に対しては、新しい実用量に基づく換算係数は現行の実用量に基づく換算係数よりも小さくなる。15°、30°、45°、60°、75° についても同様である。個人線量の速中性子に対する校正では、水ファントム上に線量計を置いて、線源から 75 cm 位置で照射することによって行われるが、サーベイメータ校正のようなシャドーコーン法等を用いて散乱線成分を引き去らないことも許容されている。この場合、校正值を用いて線量計で表示される値は、さらに過小評価となる可能性がある。周辺線量の場合と同様に、校正が持ち込む不確かさを、新しい実用量に基づく線量評価が許容しているかについて確認することは課題となる。

(4) β 線

ICRU report 95^[1]ではスラブファントムに対する局所皮膚吸収線量 ($D_{\text{local skin s}}(\alpha)$) と水晶体吸収線量 ($D_{\text{lens}}(\alpha)$) について個人吸収線量 (D_p) と方向性吸収線量 (D') が定義されており、それぞれの吸収線量で D' と D_p は数値としては同じである。また、ピラーファントムに対する局所皮膚吸収線量 ($D_{\text{local skin p}}(\alpha)$) とロッドファントムに対する局所皮膚吸収線量 ($D_{\text{local skin r}}(\alpha)$) に対して個人吸収線量が定義されている。本節で「組織」は「ICRU 4 元素軟組織」^[1]の意味で、「スキン」は密度 1.09 g/cm³ の ICRP110 で定義される skin^[6]の意味で用いる。

このうち $D_{\text{local skin s}}(0^\circ)$ については、これまで標準研究機関等で測定される 0.07 mm 組織吸収線量 ($D_t(d; 0^\circ, d = 0.07 \text{ mm})$) の測定手法^[7]を応用することによる導出方法が考えられる。測定による導出手法として、組織深さ d の関数としての組織吸収線量率 $D_t(d)$ の測定結果に scaling factor 理論^[7,8]を適用する方法 (scaling factor 法) と、外挿電離箱による電流測定結果から、 $D_{\text{local skin s}}(0^\circ)$ を導出する方法 (外挿曲線法) の2つの方法を検討する。その他の量および 0° 以外に対する各種吸収線量は、モンテカルロシミュレーションによって $D_{\text{local skin s}}(0^\circ)$ あるいは $D_t(0.07 \text{ mm}; 0^\circ)$ に対する比として求めることができる^[9]。以下に検討した $D_{\text{local skin s}}(0^\circ)$ の測定手法を示す。また、以下 3.1.1(4)節においては 0° についてのみ述べるため、 $D_{\text{local skin s}}(0^\circ)$ 、 $D_t(d; 0^\circ)$ の角度パラメータの表示は省略し、それぞれ $D_{\text{local skin s}}$ 、 $D_t(d)$ と記載する。

(4 a) Scaling factor 法

組織深さの関数としての組織吸収線量率 $D_t(d_t)$ に scaling factor 理論を適用して $D_{\text{local skin s}}$ を導出する方法である。

人体組織などの、元素番号が小さい元素からなる物質について、 β 線との相互作用を異なる物質間で比較・換算する考え方として scaling factor の理論がある。ICRU report 95 で定

義されているスラブファントムの表面 2 mm を構成するスキンに関して、質量厚 $\rho_{\text{skin}} \cdot d_{\text{skin}}$ における吸収線量を $D_{\text{skin}}(\rho_{\text{skin}} \cdot d_{\text{skin}})$ とすると、組織に対するスキンの scaling factor を $\eta_{\text{skin,t}}$ として、

$$D_{\text{skin}}(\rho_{\text{skin}} \cdot d_{\text{skin}}) = \eta_{\text{skin,t}} \cdot D_t(\eta_{\text{skin,t}} \cdot \rho_{\text{skin}} \cdot d_{\text{skin}}) \quad (1)$$

を得る。式中のパラメータは、下記のとおりである。

$$\rho_{\text{skin}} = 1.09 \text{ g/cm}^3$$

$$\eta_{\text{skin,t}} = 0.997$$

ICRU report 95 によれば、 $D_{\text{local skin s}}$ は、スラブファントムの表面からの深さ 0.05 mm から 0.1 mm の平均と定義される。ここに、 d_{skin} として、0.05 mm および、0.1 mm とすると、(1)式及び上記のパラメータから以下(2)、(3)式を得る。

$$D_{\text{skin}}(0.00545 \text{ g/cm}^2) = 0.997 \cdot D_t(0.00544 \text{ g/cm}^2) \quad (2)$$

$$D_{\text{skin}}(0.0109 \text{ g/cm}^2) = 0.997 \cdot D_t(0.01087 \text{ g/cm}^2) \quad (3)$$

以上より、 $D_{\text{local skin s}}$ は $D_t(\rho_t \cdot d_t)$ と、以下の式(4)で関係づけられる。 $\rho_t \cdot d_t = a_{m,t}$ とおくと、

$$D_{\text{local skin s}} = 0.997 \cdot \int_{0.00544 \text{ g/cm}^2}^{0.01087 \text{ g/cm}^2} D_t(a_{m,t}) da_{m,t} / \int_{0.00544 \text{ g/cm}^2}^{0.01087 \text{ g/cm}^2} da_{m,t} \quad (4)$$

$D_t(a_{m,t}) = D_t(\rho_t \cdot d_t)$ は、 $\rho_t = 1 \text{ g/cm}^3$ を用いて長さの単位の深さの関数 $D_t(d_t)$ として表すことができる。 $D_t(d_t)$ は過去の測定データがあることから、このデータと(4)式から、 $D_{\text{local skin s}}$ を導出できる。

本研究では、 $D_t(0.007 \text{ g/cm}^2 = 0.07 \text{ mm})$ に対する $D_{\text{local skin s}}$ の比として導出した。導出した結果を表 3.2.1-B1 に示す。表に示した核種による β 線の場合は、すべて ISO6980-1:2022^[10]に規定されるシリーズ 1 標準場である。比較対象として Behrens による EGSnrc の計算結果を参考に示す^[9]。¹⁴⁷Pm 線源については、線源ごとの個体差が見られた。

表 3.2.1-B1 産総研 β 線標準場の $D_t(0.07 \text{ mm})$ に対する $D_{\text{local skin s}}$ の比

	Scaling factor による値 (本研究)	EGSnrc ^[9]
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	1.001	1.002
⁸⁵ Kr	0.981	0.983
¹⁴⁷ Pm	0.816	0.802
¹⁴⁷ Pm (過去の線源 1)	0.823	
¹⁴⁷ Pm (過去の線源 2)	0.817	

(4b) 外挿曲線法

外挿電離箱を用いて得られる外挿曲線から $D_{\text{local skin s}}$ を求める方法である。空気とスキンの質量衝突阻止能比を求める必要があるため、測定対象領域の電子のエネルギースペクト

ルを得る必要がある。本研究では、この手法で導出する準備として、電子のエネルギースペクトルを、EGS5-MPI^[11,12]によるモンテカルロシミュレーションによって取得し、質量衝突阻止能比を求めた。電子のエネルギースペクトルは、ICRU report 95 で定義されたスラブファントムの、入射面中央の、断面積 1 cm²、表面からの深さ 0.05 mm から 0.1 mm の円柱状の領域について計算した。得られた結果を図 3.2.1-B1 に示す。このエネルギースペクトルから得た、空気とスキンの質量衝突阻止能比を表 3.2.1-B2 に示す。比較対象として、 $D_t(0.07\text{ mm})$ 導出時に用いる、組織深さ 0.07 mm における空気と ICRU 4 元素軟組織の質量衝突阻止能比を参考に示す。

表 3.2.1-B2 $D_{s\text{ local skin}}$ および $D_t(0.07\text{ mm})$ の導出時に用いられる質量衝突阻止能比。

	$D_{s\text{ local skin}}$ が定義される領域における空気に対するスキンの質量衝突阻止能比	組織深さ 0.07 mm における空気に対する ICRU 4 元素軟組織の質量衝突阻止能比
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	1.112	1.113
⁸⁵ Kr	1.123	1.122
¹⁴⁷ Pm	1.126	1.125

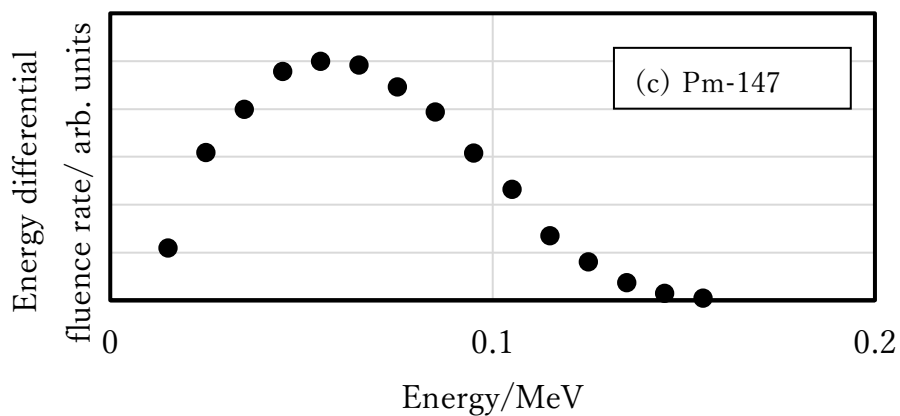
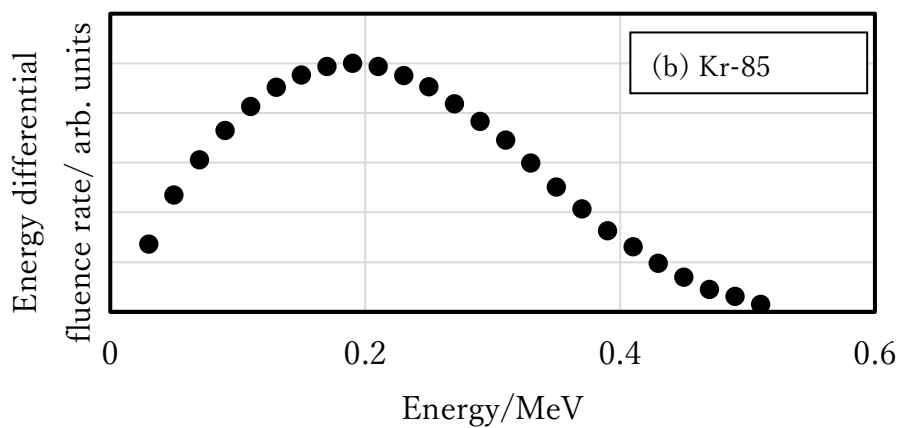
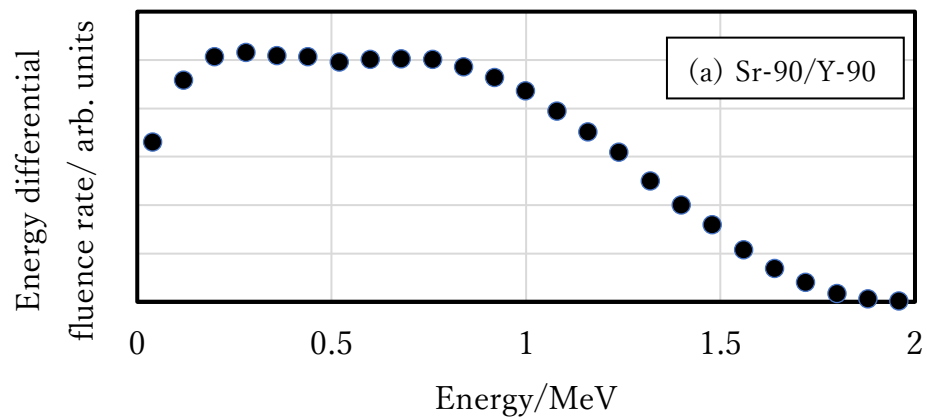


図 3.2.1-B1 ICRU report 95 で定義されるスラブファントムの、入射面中央の断面積 1 cm^2 、表面からの深さ 0.05 mm から 0.1 mm の円柱状の領域における電子のエネルギースペクトル。EGS5-MPI による。(a) $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 、(b) ^{85}Kr 、(c) ^{147}Pm による ISO6980-1 で規定されるシリーズ 1 β 線場に対して計算を行った。

(4c) 今後の展望

モンテカルロシミュレーションにより、 $D_t(0.07\text{ mm}; 0^\circ)$ に対する、ピラーファントムとロッドファントムに対する局所皮膚吸収線量と水晶体吸収線量および角度をつけた照射条件の各種吸収線量の比を求め、既存の文献値と比較する。また、今年度事業で求めた質量衝突阻止能比を用いて、外挿電離箱による測定結果に基づき、0度入射に対する $D_{\text{local skin s}}$ を求め、scaling factor 法や既存の結果と比較する。

3.2.2 方向特性試験環境の整備

○方向特性試験用回転治具

円滑な方向特性試験を実施するための回転治具を整備した。特に個人線量計の方向特性試験では、照射中心が線量計の実効中心となるため、ファントム前面付近が回転中心となるよう装置を設計している。ICRU Report95では、ROT（側面360度からの照射）に対する換算係数も示されている。そこで手動で回転させる治具の他に、自動で360度回転する治具も整備した。図3.2.2-1、図3.2.2-2にそれぞれの概略図を示す。

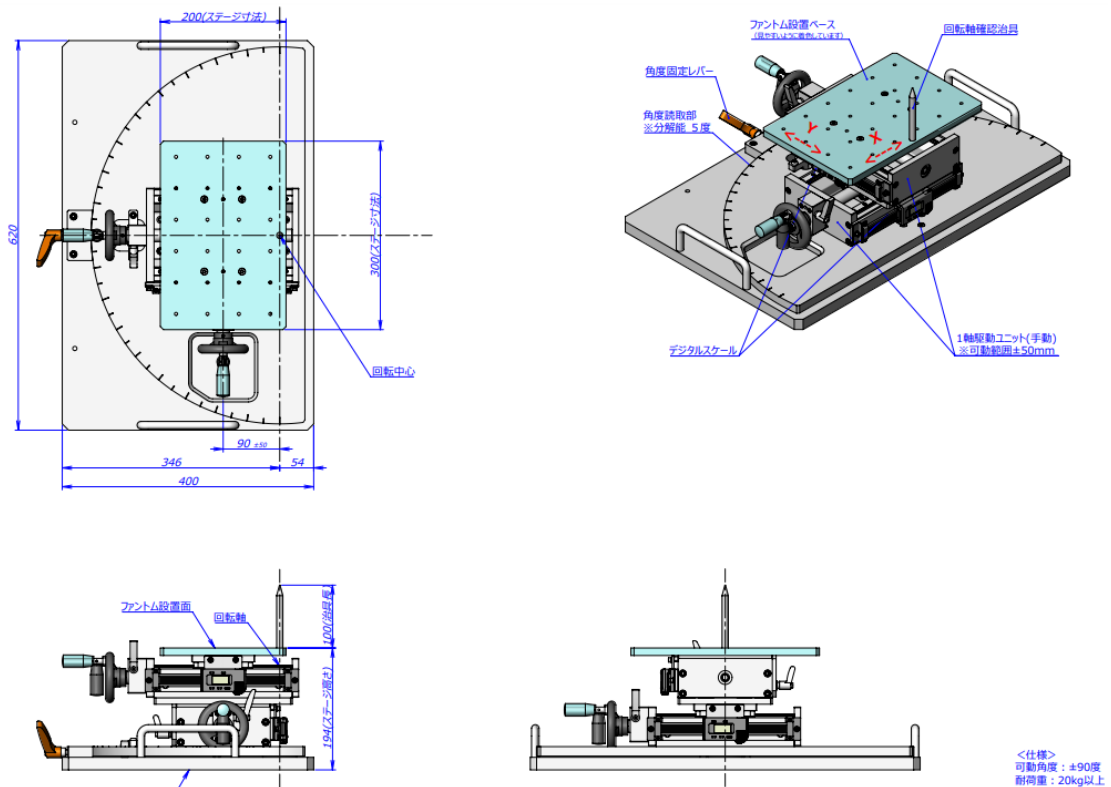


図 3.2.2-1 手動式回転治具

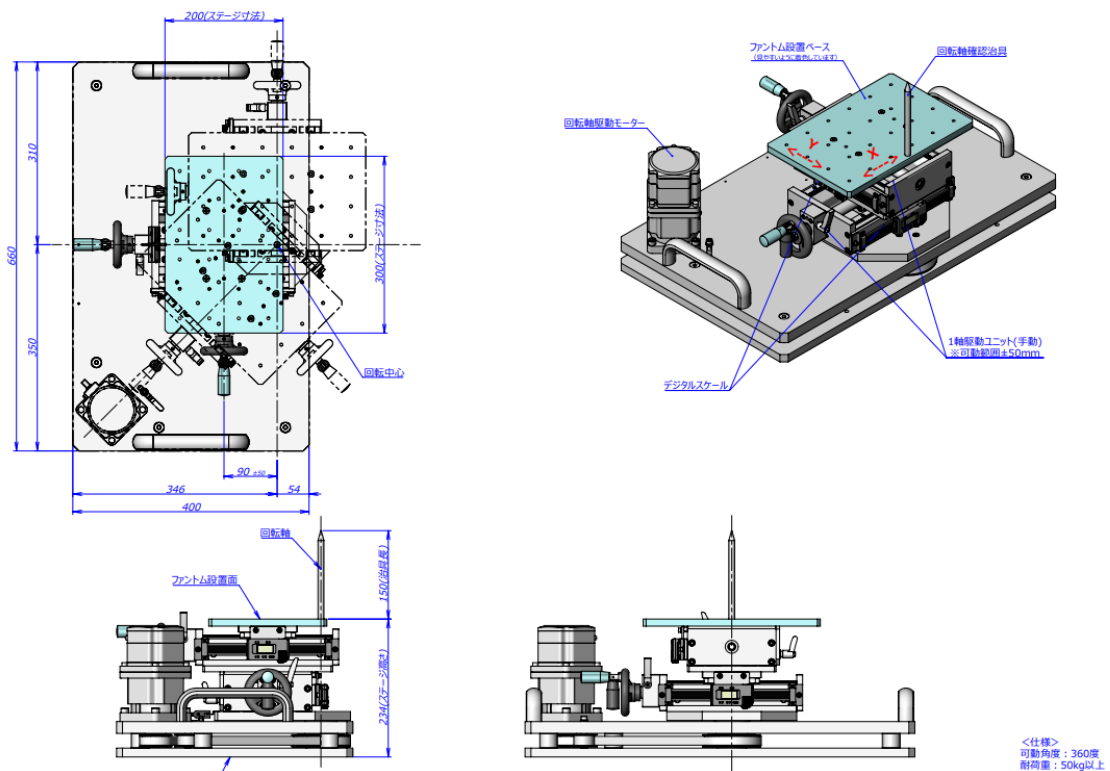


図 3.2.2-2 自動式回転治具

○方向特性試験で用いるファントムの検討

校正に用いられるファントムについて、水ファントムと人体を模擬したファントムとで各照射角度での線量計の応答について試験を行った。本調査の目的は個々の線量計の性能を示すものではなく、実用量の定義変更に伴う線量計測上の課題を探るために、線量計特性の傾向を把握すること主眼を置いている。また、校正に用いた線質も製造メーカー等が推奨している線質とは必ずしも一致しておらず、各線量計の定格範囲に関係なく可能な範囲でエネルギー・方向特性試験を行っていることに注意が必要である。

本試験の目的としては、個人線量計の校正時に通常用いられている体幹部用水ファントム (30 cm×30 cm×15 cm) と、人体を模擬した人体ファントム (京都科学社製 CT 人体トルソファントム CTU-41) で各照射角度による線量計の応答を試験し、ファントムによる散乱線や吸収の違いについて検討を行った。

試験条件は以下の通りである。

ファントム：体幹部用水ファントム、 人体ファントム (図 3.2.2-3)

線量計：HITACHI ALOKA MY DOSE G2

線源： ^{137}Cs (いずれの角度においても照射した空気カーマは 1.0 mGy)

照射角度：0, 45, 90, 135, 180 度 (0 度は線量計正面から γ 線が入射。180 度はファントムを透過して線量計の裏側に入射する角度)



図 3.2.2-3 人体模擬ファントムでの照射試験（45 度）

水ファントム、又は人体ファントムに線量計を設置し、各角度で照射した際の線量計の指示値を示す。水ファントムは中央部に上下対象に 2 台設置、また人体ファントムは、ファントムのみぞおち部を中心として上下対象に 2 台設置した。（図 3.2.2-3）

照射はそれぞれの角度において 1 回実施した。人体ファントムの結果を表 3.2.2-1 に、水ファントムの結果を表 3.2.2-2 に示す。表中の「指示値（平均）」は 2 個の異なる線量計の指示値の平均をとったものである。

表 3.2.2-1 人体ファントムでの照射試験結果

装置番号	照射角度	指示値	指示値 (平均)
	degree	mSv	mSv
製造番号 A	0	1.128	1.1365
製造番号 B		1.145	
製造番号 A	45	1.084	1.094
製造番号 B		1.104	
製造番号 A	90	1.012	1.0265
製造番号 B		1.041	
製造番号 A	135	0.4003	0.4076
製造番号 B		0.4149	
製造番号 A	180	0.5173	0.5266
製造番号 B		0.5359	

表 3.2.2-2 水ファントムでの照射試験結果

装置番号	照射角度	指示値	指示値 (平均)
	degree	mSv	mSv
製造番号 A	0	1.099	1.1065
製造番号 B		1.114	
製造番号 A	45	1.010	1.0325
製造番号 B		1.055	
製造番号 A	90	1.058	1.062
製造番号 B		1.066	
製造番号 A	135	0.5110	0.5978
製造番号 B		0.6846	
製造番号 A	180	0.3987	0.3967
製造番号 B		0.3947	

表 3.2.2-3 水ファントムと人体ファントムでの線量計の指示値の比

照射角度 (degree)	それぞれのファントムでの指示値の比 (人体ファントム/水ファントム)
0	1.027
45	1.060
90	0.967
135	0.682
180	1.327

表 3.2.2-3 の指示値の比から、前方方向（0 度～90 度）においては、ファントムからの散乱線による大きな相違は見られなかった。¹³⁷Cs 線源では、ファントムの素材や形状による散乱線成分の違いによる校正結果への影響は小さいと考えられる。一方 135 度では人体ファントムの方が指示値が小さく、180 度では人体ファントムのほうが指示値が大きくなった。135 度では、水ファントムと比較して人体ファントムのほうが体幹部を通過する実効厚が長いため、減衰が大きくなったことが要因であることが推定できた。また 180 度では、水ファントムと比較して人体ファントムの実効厚が薄いため、大きく減衰せずに指示値が大きくなったと考えられる。現在、個人線量計の方向特性試験は 90 度よりも小さい角度の前方方向のみであることから^[4]、この角度においては水ファントムを用いた校正は妥当であると考えられる。一方、新しい実用量になった際に、90 度以上の角度に対する線量計の試験が必要となった際には、適切なファントムについて検討する必要があると考えられる。

3.2.3 トレーサビリティ確保に関する調査

新たな実用量が導入された際にも、二次標準機関でトレーサビリティを確保し、国家標準機関と同等の試験が実施可能かを検証するために、再委託先の JAEA との間で市販線量計を用いて一部の光子線質（S-Cs 及び N-100）について試験結果の比較を実施した。結果については、別紙 JAEA 報告書に記載されている。両者の校正結果は不確かさの範囲内で一致しており、光子場において同等であることが確認できた。

3.3 中性子線量計の特性評価に関する調査

中性子サーベイメータとして国内事業者で多く利用されている A 社型式 X、B 社型式 Y、及び中性子個人線量計として国内で利用されているものの一つである C 社型式 Z について、換算係数の評価を行ったものの内、²⁴¹Am-Be 中性子線源（small サイズ）、²⁵²Cf 中性子線源、565 keV 単色中性子に対する特性評価試験を行った。表 3.3-N1 から表 3.3-N3 に結果を示す。各表に記載の不確かさは、すべて包含係数 $k=2$ の拡張相対不確かさである。新しい実用量に基づくレスポンスは、「レスポンス（新）」と記載している。また、サーベイメ

ータの特性評価については、パルスカウンタ出力の値に対して行われた。個人線量計の本受託研究の特性評価では、1回照射に対する結果である。したがって、個人線量計については、表示値の不確かさは評価できない。したがって、参考情報として、個人線量もしくは個人線量当量に不確かさを付けた。また、出力である表示値が「0」となっている。当該線量計は、ホウ素材とシリコン検出器を組み合わせた熱中性子センサーとポリエチレンとシリコン検出器を組み合わせた速中性子センサーによって構成されている。そのため、100 keV から 1 MeV のエネルギー領域における感度を犠牲にしている特徴がある。565 keV 近傍において、現行の 10 mSv 未満の照射では、妥当な数値であることは、メーカー側の開発担当者との情報交換及びこれまでの産総研で蓄積されている校正データによって確認されている。

表 3.3-N1 サーベイメータ A 社型式 X の特性評価試験結果

線源	A 社型式 X				
	レスポンス(新) ($s^{-1}/(\mu Sv/h)$) (下段：相対拡張不確かさ)	レスポンス ($s^{-1}/(\mu Sv/h)$) (下段：相対拡張不確かさ)	周辺線量 (μSv)	周辺線量当量 (μSv)	出力 (s^{-1})
$^{241}\text{Am-Be}$ (small)	2.81 (8.6 %)	3.06 (8.6 %)	26.8	24.6	4.214
^{252}Cf	3.90 (4.3 %)	3.55 (4.3 %)	27.9	30.7	161.6
565 keV	6.56 (5.2 %)	3.75 (5.2 %)	17.0	29.8	366.9

表 3.3-N2 サーベイメータ B 社型式 Y の特性評価試験結果

線源	B 社型式 Y				
	レスポンス(新) ($s^{-1}/(\mu Sv/h)$) (下段：相対拡張不確かさ)	レスポンス ($s^{-1}/(\mu Sv/h)$) (下段：相対拡張不確かさ)	周辺線量 (μSv)	周辺線量当量 (μSv)	出力 (s^{-1})
$^{241}\text{Am-Be}$ (small)	2.18 (8.6 %)	2.37 (8.6 %)	20	18.3	2.715
^{252}Cf	1.39 (4.3 %)	1.27 (4.3 %)	34.0	37.3	47.24
565 keV	1.95 (5.2 %)	1.11 (5.2 %)	33.1	57.9	64.3

表 3.3-N3 個人線量計 C 社型式 Z の特性評価試験結果

線源	C 社型式 Z				
	レスポンス(新) No1(上段)、 No2(下段)	レスポンス No1(上段)、 No2(下段)	個人線量 (mSv) (下段：相対 拡張不確か さ)	個人線量 当量 (mSv) (下段： 相対拡張 不確か さ)	出力 (mSv) No1(上 段)、 No2 (下段)
²⁴¹ Am-Be (small)	3.42	3.55	0.322	0.310	1.1
	3.42	3.55	(8.5 %)	(8.5 %)	1.1
²⁵² Cf	1.38	1.21	3.191	3.638	4.4
	1.35	1.18	(4.1 %)	(4.1 %)	4.3
565 keV	0	0	0.985	1.785	0
	0	0	(4.5 %)	(4.5 %)	0



図 3.3-N1 特性評価試験の様子。

表 3.3-N1～表 3.3-N3 より、²⁴¹Am-Be 中性子線源と ²⁵²Cf 中性子線源については、中性子サーベイメータ、中性子個人線量計ともに、レスポンスの変化は 10%～15%である。一方では、565 keV に対しては、レスポンスは新しい実用量を適用したときに約半分となる。中性子の場合、中性子フルエンスから換算係数を掛けることによって、周辺線量及び個人線量、もしくは周辺線量当量及び個人線量当量が導出される。すなわち、同じ中性子フルエンスに対して、新しい実用量で記載される線量と現行の実用量で記載される線量は異なるので、測定器の実用量に対するレスポンスも変化する。565 keV に対しては、新しい実用量を用いたとき、1 mSv、2 mSv という決まった線量の照射に対して、必要となる時間が概ね現行の実

用量を用いた場合の約2倍なる。したがって、校正に係るコストが大きくなることが、課題として挙げられる。

3.4 新たな実用量への対応に係る課題の調査

3.4.1 ヒアリング調査

新たな実用量への対応について、医療分野の放射線業務従事者の線量管理に精通している藤田医科大学：横山須美准教授、同じく医療分野の放射線業務従事者の線量管理や従事者への教育に関して精通している京都医療科学大学：大野和子教授、放射線利用施設や研究用原子炉施設の被ばく管理に精通している近畿大学原子力研究所：山田崇裕准教授に意見を伺った。

横山氏からは、医療分野の視点から以下のようなコメントをいただいた。

- ・水晶体の線量限度変更に伴い、医療現場における光子スペクトルの評価など過去におこなっており、診断用 X 線に対する光子スペクトルデータがある^[15]。

- ・新しい実用量に対する線量計の特性試験を行う場について、病院で使用されている X 線発生装置が利用可能である。

- ・IVR (Interventional Radiology、画像下治療) などでは、側面から照射されることになる。また看護師なども状況によって様々な方向から被ばくすることになる。線量計の方向特性をどう考えるのか課題。

大野氏からは、医療分野の放射線業務従事者への啓蒙という視点で以下のコメントをいただいた。

- ・低エネルギー光子の換算係数が大きく変わるということで、取り入れとなった場合医療分野へのインパクトが大きい。

- ・新しい実用量も大事だが、医療分野においてはそもそも防護量、実用量の違いなど認識している方が少ない。セミナーなどを通じて、新しい実用量も含めて放射線防護を理解してもらう活動を行っていきたい。

山田氏からは、出力 1W の試験研究用等原子炉施設での照射試験という視点でコメントをいただいた。

- ・非常に小型であるため原子炉周辺で線量計の照射試験など行うことができる。⁶⁰Co 線源よりも高エネルギーの γ 線場というところで特徴がある。線量率としては $10 \mu\text{Sv/h}$ 程度。Ge 検出器で測定したスペクトルデータもある。

- ・中性子ラジオグラフィのための場もあり、中性子の照射場も提供可能である。

- ・近畿大学には病院もあり、放射線診断装置周辺での線量測定の場合についても利用できるかどうか相談可能である。

- ・産総研が開発した小型線量計の D シャトルなども、広いエリアの線量を一度に測定できることから有効なのではないか？

現場での被ばく管理において、医療分野では照射方向が重要となってくるのが分かった。特に個人線量計の方向特性をどのように考えるべきか（どの角度まで考慮する必要があるか）重要な課題である。また新しい実用量に限ったことではないが、医療従事者への放射線防護に関する理解促進も重要であることが分かった。医療分野と保健物理分野のメンバーの継続的な交流、相互の情報発信に努めていくことが課題である。

本事業に関連する線量計の特性試験を行う環境としては、病院で用いられている X 線発生装置が利用可能であること、また数 MeV の高エネルギー γ 線の照射実験が可能であることが分かった。

3.4.2 国内関係者が参加したワークショップ

○第一回ワークショップ

開催日時：2022 年 10 月 28 日 13:00～17:00

開催場所：TKP 東京駅カンファレンスセンター

参加者：31 名（線量計メーカー、校正事業者等）

概要：線量計メーカーと校正事業者を中心に参加を案内した。初めに産総研・黒澤から ICRU report 95 についての説明を行い、その後参加者から提出されたアンケートの報告があった。別紙に説明に用いた資料を示す。

◆アンケートの質問項目と主な回答結果を示す。（13 社から回答）

（問 1）所属されている会社等で新しい実用量について話題になっていますでしょうか？

・話題になっていますが、社内全体に広がっているほどではなく、個人線量計に関連する部署内での話題に留まっている（5 社）

・ほとんど話題になっていない（8 社）

（問 2）新しい実用量についてどの程度情報を得ていますでしょうか？

・レポートを読んだ（9 社）

・セミナーなどで情報を得ている（4 社：上記の回答と重複を含む）

（問 3）新しい実用量に対して、開発や研究などのアクションを起こすとしたらどのタイミングをお考えでしょうか？

・ISO や IEC, IAEA のレポートなど国際規格が示されてから（6 社）

・法令に取り入れられることが決まってから（5 社）

（問 4）新しい実用量について疑問点などございましたら自由にお書き下さい。

・国内外での取り入れのタイミングはどうなるのか？（ロードマップが知りたい）

・取り入れに向けた国内の検討体制

◆以下に代表的な意見を示す。

・新しい実用量のそれぞれの定義について理解するのが難しい

- ・ 確定的影響については Gy での測定となるが法令との関係はどうなるのか？
- ・ ISO・IEC などは声が強い国に引っ張られてしまう傾向がある。そうならないように、事前に国内の意見を取りまとめておく必要がある。
- ・ 国内の事情と国際的なバランスもある。国内では法令改正にもつながることから、放射線審議会等の考え方が合わないと進まない。国全体で考えていく必要がある。
- ・ 放射線防護の変遷について保健物理学会誌にレポートがあるので、過去の経緯を知るのに有用である。
- ・ 理解を深めることも重要だが、それぞれの立場で受け取り方が変わる。ある程度考え方を統一していくべき。
- ・ 法令取り入れまでのロードマップなどがあると良いのではないか。

○第二回ワークショップ

開催日時： 2023 年 3 月 23 日 13:30～15:00

開催場所：TKP 東京駅大手町カンファレンスセンター及びオンライン

参加者：50 名（大学、研究機関等）

概要：一般社団法人日本保健物理学会、一般社団法人日本放射線影響学会および一般社団法人日本原子力学会に依頼して ML に案内を出した。そのため今回は大学・研究機関等からの参加者が多数を占めた。第一回ワークショップと同様に、初めに産総研・黒澤から ICRU report 95 についての説明を行い、その後参加者との意見交換を行った。

意見交換では以下のような意見・質問が出た。

- ・ 特に実用量が過小評価する場合は懸念されるが、数 MeV あるような作業場はどのような場所があるのか、どういう管理をされているのか（実態調査が必要）。
- ・ 場によってエネルギーが変わるのでその影響の度合いも違ってくるのではないか。
- ・ 全方向から放射線が来る場合の校正方向はどうなっているのか。
- ・ 現行の Hp(d)は(軟組織の?)深さ d で定義されている。新たな実用量ではどの点になっているのか。どのような形態の線量計が必要なのか・望ましいのか。
- ・ 子供が線量計をつける場合や、実効線量との関係は？
- ・ こういった情報提供は重要であり、学会等でも定期的にワークショップを開催すべき
- ・ 実用量の説明の前に ICRP Publ.103 に詳しい方の解説も必要かもしれない。

議論の中で多く聞かれた意見では、

- ・ 理解するのが難しい。
- ・ 導入までのロードマップはどうなるのか？

との声が多かった。今後、同様の会合を定期的で開催し、データなども示しながら様々な立場の方からの意見を集めていくことが重要であると考えます。

3.5 国内外の情報収集

ISO TC85/SC2 (放射線防護分野)^[13]は、サーベイメータや個人線量計の校正に関する規格や、積算型線量計に関する規格を整備しており、実用量に大きく関わっている。リモート会議(2022年5月31日 ISO TC85/SC2 plenary meeting)での議論の中でも ICRU Report95 は話題として出ているが、すぐに規格に取り入れるといった議論にはなっていない。ただ将来的に IAEA などが国際基本安全基準 (Basic Safety Standards: BSS) に取り入れるタイミングで対応が必要になる、との話があった。

各国の標準研究所が集まる会議の中で、放射線関連量に関する放射線諮問委員会 (CCRI)^[14]がある。今年度は CCRI の本会議は開催されず、線源に関する WG (2022年9月13日 CCRI Task Group on radioactive sources) のみの開催であったが、その中でも ICRU Report95 について話題が上がった。その中で、ドイツの標準研究所である PTB より、EURAMET と呼ばれるヨーロッパの標準に関する組織に対して、ICRU Report95 の影響に関する研究プロジェクトに応募したとの報告があった。その後の情報としてプロジェクトが採択されたとのことで、ヨーロッパでも新しい実用量に関する研究が進むことが想定される。

4. 再委託先である JAEA での事業実施内容の概要

大きく5つのテーマの一部について、再委託先での JAEA にて実施した。概要は以下の通りである。詳細については別紙の JAEA 報告書を参照いただきたい。

(1) 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査

FRS の以下の校正場について、(2) の特性評価に必要となる新たな実用量 (実効線量、眼の水晶体、及び皮膚の線量管理について場所のモニタリング及び個人モニタリングにかかる実用量) に対する線量換算係数を算出し、新たな実用量で線量計の特性試験が可能な環境を整えた。

- ・ ^{137}Cs 線源及び ^{60}Co 線源を利用した γ 線校正場及び中硬 X 線発生装置を利用した管電圧 40 kV から 300 kV までの X 線校正場、並びに高エネルギー γ 線校正場

- ・ $^{241}\text{Am-Be}$ 及び ^{252}Cf 線源を利用した速中性子校正場、熱中性子校正場、8 keV から 19 MeV までの 10 エネルギー点の単色中性子校正場、重水減速中性子校正場、黒鉛減速中性子校正場

- ・ $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 、 ^{85}Kr 線源及び ^{147}Pm 線源を利用した β 線校正場

また、光子の新たな実用量に対して、回転 (ROT) 照射や 180° (PA) 照射を含む方向特性試験方法を開発した。特に ROT 照射や PA 照射における校正用ファントムの妥当性を検証するとともに、個人線量計の特性がこれらの照射ジオメトリでどのように変化する

か試験した。、ROT 照射は問題ないものの、PA 照射において、PW ファントムは人体の吸収特性を表現しきれていないことを明らかにした。また、受動形個人線量計を用いて、これらの照射ジオメトリでの試験を行い、ROT 照射は AP 照射と同等の応答が得られたものの、PA 照射においては、特に低エネルギーで著しく過小応答することが示唆された。ただし、PA 照射が支配的となるのは特殊な被ばく状況と考えられることから、線量計の使用用途を考慮してこれらの性能要求が必要か検討する必要がある。

新たな実用量が導入された際にも、二次標準機関でトレーサビリティを確保し、国家標準機関と同等の試験が実施可能かを検証するために、市販線量計を用いて一部の光子線質（S-Cs 及び N-100）について試験結果の比較を実施した。結果は不確かさの範囲内で一致し、同等であることを確認した。

（２）線量計の特性評価に関する調査

（１）で線量換算係数を評価した校正場を用いて、国内で入手可能な計 7 機種 of 線量計に対するエネルギー・方向特性試験を実施し、これらの線量計を新たな実用量に対応させるための課題を抽出し、対応策を検討した。サーベイメータや個人線量計では、フィルターによる低エネルギー領域のレスポンスの改善、もしくは線量評価アルゴリズムの変更が考えられる。

（３）放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査

原子力施設及び放射線使用施設において、放射線管理において法令に基づく測定を実施している箇所や線源核種、散乱線等の影響によりエネルギー分布に異なる特徴を有する 7 つの放射線作業場の計 11 ヶ所について、光子エネルギー分布を取得した。取得したエネルギー分布から現行実用量及び新たな実用量に基づいた線量を算出し、線量計測値そのものがどう変化するか考察した。

また、光子エネルギー分布と線量計のエネルギー特性試験結果を組み合わせる放射線作業場における線量計のエネルギー応答を評価する手法を開発し、市販のサーベイメータ 2 機種及び個人線量計 2 機種について、この手法を適用することにより原子力発電所の放射線作業場における応答を評価し、線量計測上の課題等について整理した。平均エネルギーは、0.65 MeV から 4 MeV までにわたっていたが、新・現行実用量の比はほぼ変わらず、S-Cs 校正場における比と同程度であった。

（４）研究に必要な国内外の情報収集

新たな実用量への対応に係る国際機関等として校正場や線量計に関する規格の策定・審議を行う ISO 専門委員会 (ISO/TC85/SC2) の動向を調査した。また、欧州は EURADOS の状況、アジア・オセアニア地域はアジア・オセアニア放射線防護会議 (AOCRP) での状況、国内は日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会の状況について、会議等への参加と通じて情報収集を行った。さらに、現行実用量導入時の線量計測上の対応状況についても併せて調査し、得られた情報を別添の「令和 4 年度新たな実用量への対応に関わる線量測定上の課題に関する研究～二次標準機関及び原子力施設における調査研究～事業成果報告書」

にまとめた。

5. まとめ

本事業において、産総研での新しい実用量に対応する場の開発、また再委託先での JAEA では各種線量計の特性試験を実施し、効率的に事業を進めることができた。産総研でも方向特性試験が実施できる環境が整備できたことから、加速度的に試験データを収集することができ、新しい実用量への対応に関する基礎的データを示すことができると考えている。本事業では、産総研実施分について以下のような項目について評価することができた。

- ・ 産総研において、JIS Z4511 及び ISO 4037 に準拠した線質（管電圧 10 kV~400 kV）の X 線並びに γ 線（ ^{137}Cs , ^{60}Co 線源由来）について、空気カーマから新たな実用量への線量換算係数を評価した。 γ 線については、散乱線も含めたスペクトルデータで換算係数を評価した場合、単色 γ 線と比較して 1% 程度違いが見られることが分かった。校正場の換算係数と単色光子の換算係数との差は、ピラーファントムに対する後方入射の条件で大きくなる傾向が見られた。校正場に含まれる散乱線は、後方入射では直接線よりも減衰されるため、単色光子場の換算係数に対して校正場の換算係数の方が小さめの値を示すものと考えられる。X 線については、実効線量、個人線量について実効エネルギーが 70 keV 以下で現行の実用量よりも小さくなった。一方、水晶体吸収線量については特に照射角度が大きい場合、現行の実用量よりも大きくなることが分かった。中性子場（ISO 8529 に準拠した ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-Be}$ 線源の連続エネルギー場、及び加速器を用いた 100 keV~15 MeV の単色中性子場）の散乱線を含めたスペクトルを考慮して換算係数を評価した。新しい実用量になると 4 MeV から 5 MeV の一部エネルギー領域を除いて新しい実用量に基づく換算係数は現行の実用量に基づく換算係数よりも小さくなる。特に keV 領域においては約半分となる。現行の換算係数に基づいた線量評価と、新しい実用量に基づいた実用量とで比較すると、現行の実用量に基づいた線量評価の方が大きくなる場合が多いことが分かった。

β 線については、 ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源に対して外挿電離箱による線量評価手法である scaling factor 法、外挿曲線法について検討し、エネルギースペクトルをシミュレーションによって評価した。放出される β 線エネルギーの低い ^{147}Pm 線源は、個体によって $D_t(0.07\text{ mm})$ に対する $D_{\text{local skin s}}$ の比が違ってくることが分かった。

- ・ 線量計の方向特性試験に必要な回転照射装置、治具等の開発を行った。また、回転照射を含めた方向特性試験の標準化に必要な角度制御方法やこれらの試験に対する校正用ファントムの妥当性について検討した。通常体幹部用線量計の校正に用いられる水ファントムと、実際の人に近い人体ファントムで実験を行った結果、現行の線量計のスペックの範囲外である 90 度以上の照射で違いが大きくなることが分かった。

- ・ 線量計ユーザーへの校正・試験サービスの提供に必要なトレーサビリティ体系が構築できることを検証するため、産総研において評価した線量換算係数や線量計の試験結果につい

て、産総研と JAEA 間において相互比較を実施した。 ^{137}Cs 線源と N-100 線質での比較では、不確かさの範囲内で良い一致を示していることが分かった。

- ・国内で使用されている中性子サーベイメータ 2 機種と中性子用電子式個人線量計 1 機種のエネルギー特性試験を、開発した校正場にて実施した。実効エネルギーが高い ^{252}Cf 線源に対しては、現行と新しい実用量との違いは 10 %程度であったが、565 keV では 40 %程度の相違が見られた。

- ・新たな実用量の導入による放射線管理及び線量計等の校正等における課題について、産総研の研究実施者 3 名（研究統括、 γ 線線量担当、X 線線量担当）で原子力施設である近畿大学原子力研究所、医療機関である藤田医科大学、京都医療科学大学を訪問し、当該施設の線量管理担当者の意見を収集した。医療で用いられる X 線装置を使った試験や原子炉から発生する高エネルギー γ 線での試験が可能であることが分かった。また都内等において、線量計メーカー、校正事業者、ユーザーを交えた意見交換を行うワークショップを開催し、1 回目に新たな実用量の概要説明を通じて共通理解を行い、2 回目にそれぞれの立場から見た新たな実用量の導入における課題を整理した。

- ・本事業の実施に当たっては、実用量に関する多岐にわたる高い専門性が必要であることから、新たな実用量への対応に係る国際機関等（ISO 専門委員会（ISO/TC85/SC2（放射線防護分野）等）、国際電気標準会議（IEC））及び関連する学術団体（アジア・オセアニア放射線防護学会（AOCRP）、日本原子力学会、日本保健物理学会）の動向について、それぞれの会議への参加を通じて調査するとともに、適宜事業内容に関連する国内外の専門家と意見交換等を行い、事業成果の向上・精緻化を図った。

本年度事業の結果から、今後の課題として以下の項目が考えられる。

- ・ ^{147}Pm 線源の個体のばらつきによるスペクトルの変化が大きいことから、スペクトルの違いによる新しい実用量への実測による評価
- ・低エネルギー光子に対する線量計の応答が重要となるため、これらの試験に有用な単色性の高い特性 X 線場の開発、またこれらの場を用いた線量計応答試験の実施
- ・光子以外の線質（ β 線や中性子）に対する国家標準機関と二次校正機関との同等性の確認
- ・本事業で得られたデータを示しながら、関係者（ユーザー、線量計メーカー、校正事業者等）へのワークショップを通じた情報提供、意見集約
- ・学会等の協力を得ながら、新しい実用量が導入されるまで継続的な議論が行える場の構築

6. 謝辞

本事業の実施にあたり、医療分野や放射線利用施設に関する情報収集のためご協力いただきました、藤田医科大学の横山須美准教授、京都医療科学大学の野和子教授、近畿大学原子力研究所の山田崇裕准教授に御礼申し上げます。

またお忙しい中、本事業で開催しましたワークショップでご参加いただいた方々に深く御礼申し上げます。

7. 参考文献

- [1] International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). *Operational Quantities for External Radiation Exposure*. ICRU Report 95. J. ICRU 20(1) (2020)
- [2] 原子力規制庁 令和元年度放射線対策費（放射線管理に係る実用量の測定等の実態調査）事業成果報告書 <https://www.nra.go.jp/data/000319356.pdf> (2020)
- [3] JIS Z4511:2018 X線及び γ 線用線量（率）測定器の校正方法
- [4] 原子力規制庁 令和3年度放射線対策費（新たな実用量への対応に係る線量計の校正及び放射線作業場におけるエネルギー応答に関する調査研究）事業成果報告書 <https://www.nra.go.jp/data/000404697.pdf> (2022)
- [5] 黒澤忠弘ら「 γ 線空気カーマ標準の設定」計量標準モノグラフ 7 (2005)
- [6] ICRP (2009). International Commission on Radiological Protection. Adult Reference Computational Phantoms, ICRP Publication 110, Ann. ICRP 38(2). (Elsevier Science, Oxford).
- [7] International Organization for Standardization (ISO). *Nuclear energy — Reference beta-particle radiation — Part 2: Calibration fundamentals related to basic quantities characterizing the radiation field*. ISO 6980-2 (2022)
- [8] International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Dosimetry of External Beta Rays for Radiation Protection. ICRU Report 56 (1997)
- [9] R. Behrens. *Conversion coefficients from absorbed dose to tissue to the newly proposed ICRU/ICRP operational quantities for radiation protection for beta radiation qualities*. J. Radiol. Prot. 41(4), 871 (2021)
- [10] International Organization for Standardization (ISO). *Nuclear energy — Nuclear energy — Reference beta-particle radiation — Part 1: Methods of production*. ISO 6980-2 (2022)
- [11] H. Hirayama, Y. Namito, A.F. Bielajew, S.J. Wilderman and W.R. Nelson, SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005).
- [12] M. Shimizu, EGS5-MPI, <https://unit.aist.go.jp/rima/ioniz-rad/egs5mpi/index.html>, accessed 2023-03-26

[13] 山田崇裕「ISO/TC85/SC2（放射線防護分野）における国際標準化の動向及び国内対応委員会の活動状況」Jpn. J. Health Phys., 52(2), 100～106(2017)

[14] 柚木彰ほか「放射線・放射能・中性子の計量標準に係る国際活動について」、Isotope News 2020年4月号、No768 48-49 ページ (2020).

[15]平成29年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略推進事業）「原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～」成果報告書

令和4年度新たな実用量への対応に係る線量計
測上の課題に関する研究～二次標準機関及び原
子力施設における調査研究～事業
成果報告書

令和5年2月28日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
安全研究センター

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が実施した「令和4年度新たな実用量への対応に係る線量計測上の課題に関する研究～二次標準機関及び原子力施設における調査研究～事業」の成果を取りまとめたものです。

目 次

1	事業の背景と目的	15
2	事業の実施体制	17
2.1	実施体制	17
2.2	実施期間	18
2.3	放射線標準施設棟 (FRS)	18
2.4	進捗管理	21
3	事業の概要	22
3.1	全体計画	22
3.2	概要	23
4	事業の成果	26
4.1	はじめに	26
4.1.1	新たな実用量	26
4.2	新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査	35
4.2.1	校正・試験場の線量換算係数の評価	35
4.2.1.1	γ 線	35
4.2.1.2	X線	47
4.2.1.3	高エネルギー γ 線	59
4.2.1.4	β 線	64
4.2.1.5	中性子	71
4.2.2	方向特性試験の開発	87
4.2.1	トレーサビリティ確保に関する調査	100
4.3	線量計の特性評価に関する調査	102
4.4	放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査	146
4.4.1	放射線作業場の選定	146
4.4.2	光子エネルギー分布の取得	146
4.4.3	放射線作業場における各線量の算出	156
4.4.4	放射線作業場における線量計のエネルギー応答	163
4.5	研究に必要な国内外の情報収集	171
4.5.1	ISO	171
4.5.2	EURADOS	171
4.5.3	国内外の学術団体	173
4.5.4	現行実用量導入の経緯 (原子力機構での対応例) と課題の抽出	174

4.6	まとめ.....	176
5	謝辞.....	181
6	参考文献.....	182

付録1：AOCR-6 成果発表資料

付録2：第4回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同大会成果発表資料

目 次

図 2-1	事業の実施体制.....	17
図 2-2	放射線標準施設棟の鳥瞰図.....	19
図 3-1	本事業の研究計画.....	23
図 4-1	光子に対する個人線量換算係数（カーマ近似）.....	28
図 4-2	光子に対する実効線量の管理に用いる個人モニタリングに関する現行・新 実用量の比較.....	28
図 4-3	光子に対する水晶体吸収線量換算係数（カーマ近似）.....	29
図 4-4	光子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリングに関する現 行・新実用量の比較.....	29
図 4-5	光子に対する局所皮膚吸収線量換算係数（カーマ近似、スラブファントム）	30
図 4-6	光子に対する皮膚の線量管理に用いる個人モニタリングに関する現行・新 実用量の比較（スラブファントムに対するもの）.....	30
図 4-7	光子に対する皮膚の線量管理に用いる場所のモニタリングに関する現行・ 新実用量の比較.....	31
図 4-8	電子に対する周辺線量換算係数.....	31
図 4-9	電子に対する水晶体吸収線量換算係数.....	32
図 4-10	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリングに関する 現行・新実用量の比較.....	32
図 4-11	電子に対する皮膚吸収線量換算係数.....	33
図 4-12	電子に対する皮膚の線量管理に用いる個人モニタリングに関する現行・ 新実用量の比較（スラブファントムに対するもの）.....	33
図 4-13	中性子に対する個人線量換算係数.....	34
図 4-14	中性子に対する実効線量の管理に用いる個人モニタリングに関する現 行・新実用量の比較.....	34
図 4-15	FRS の S-Cs 校正場における現行実用量 $H_p(10)$ と新たな実用量 H_p に対す る線量換算係数の角度依存性.....	46
図 4-16	FRS の S-Cs 校正場における現行実用量 $H_p(3)$ 及び $H'(3)$ と新たな実用量 D_{lens} に対する線量換算係数の角度依存性.....	46
図 4-17	FRS の S-Cs 校正場における現行実用量 $H_p(0.07)$ 及び $H'(0.07)$ と新たな実 用量 $D_{local\ skin}$ に対する線量換算係数の角度依存性.....	47
図 4-18	R-F 場での波高スペクトル測定の様子.....	59
図 4-19	R-F 場の光子エネルギー分布.....	60

図 4-2 0	FRS の R-F 校正場における現行実用量 $H_p(10)$ と新たな実用量 H_p に対する線量換算係数の角度依存性.....	62
図 4-2 1	FRS の R-F 校正場における現行実用量 $H'(3)$ 及び $H_p(3)$ と新たな実用量 D_{lens} に対する線量換算係数の角度依存性.....	62
図 4-2 2	FRS の R-F 校正場における現行実用量 $H'(0.07)$ 及び $H_p(0.07)$ と新たな実用量 $D_{local\ skin}$ に対する線量換算係数の角度依存性.....	63
図 4-2 3	$D_{local\ skin}/\Phi$ の評価に用いた計算体系.....	66
図 4-2 4	D_{lens}/Φ の評価に用いた計算体系.....	66
図 4-2 5	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 標準場において評価した線量換算係数の比較.....	69
図 4-2 6	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 標準場において評価した線量換算係数の比較.....	69
図 4-2 7	^{85}Kr 標準場において評価した線量換算係数の比較.....	70
図 4-2 8	^{147}Pm 標準場において評価した線量換算係数の比較.....	70
図 4-2 9	中性子の場のモニタリングにかかる実用量に対する線量換算係数.....	72
図 4-3 0	中性子の個人モニタリングにかかる実用量に対する線量換算係数.....	72
図 4-3 1	FRS に整備した単色中性子校正場のエネルギー点における中性子の場所(上)及び個人モニタリング(下)にかかる新たな実用量に対する線量換算係数.....	73
図 4-3 2	$^{241}\text{Am-Be}$ 線源のスペクトル.....	74
図 4-3 3	^{252}Cf 線源のスペクトル.....	75
図 4-3 4	$\text{D}_2\text{O-}^{252}\text{Cf}$ 線源のスペクトル.....	76
図 4-3 5	$\text{Grp-}^{241}\text{AmBe}$ 線源のスペクトル.....	77
図 4-3 6	FRS の熱中性子校正場の中性子スペクトル.....	78
図 4-3 7	FRS の単色中性子校正場の各エネルギー点において現行実用量と新たな実用量を用いた場合の線量換算係数の比(エネルギーごと).....	84
図 4-3 8	FRS の単色中性子校正場の各エネルギー点において現行実用量と新たな実用量を用いた場合の線量換算係数の比(入射角度ごと).....	84
図 4-3 9	$^{241}\text{Am-Be}, ^{252}\text{Cf}$ 速中性子校正場において現行実用量と新たな実用量を用いた場合の線量換算係数の比.....	85
図 4-4 0	FRS の減速中性子校正場において現行実用量と新たな実用量を用いた.....	85
図 4-4 1	FRS の熱中性子校正場において現行実用量と新たな実用量を用いた.....	86
図 4-4 2	FRS の各中性子校正場において現行実用量と新たな実用量を用いた.....	86
図 4-4 3	用いた角度制御装置の例.....	87
図 4-4 4	方向特性試験における回転角度.....	88
図 4-4 5	ROT 照射試験に用いた回転台.....	88
図 4-4 6	PW ファントム.....	90
図 4-4 7	計算に用いた(i)PW ファントム及び(ii)AM ファントム.....	90

図 4-4 8	PW ファントムの AP 照射について評価した BF と文献値との比較.....	91
図 4-4 9	PW ファントムを用いた OSL 線量計の ROT 照射試験の様子.....	92
図 4-5 0	RANDO ファントムを用いた OSL 線量計の ROT 照射試験の様子.....	92
図 4-5 1	電離箱式線量計 (AE-133B) を用いた $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する方向特性試験結果と文献値 ^[35] との比較 (光子: N-40)	93
図 4-5 2	電離箱式線量計 (AE-133B) を用いた $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する方向特性試験結果と文献値 ^[35] との比較 (光子: N-100)	94
図 4-5 3	電離箱式線量計 (AE-133B) を用いた $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する方向特性試験結果と文献値 ^[35] との比較 (光子: N-300)	94
図 4-5 4	OSL 線量計を用いた $H_p(10)$ 及び H_p に対する方向特性試験結果と文献値 ^[36] との比較 (光子: N-100)	95
図 4-5 5	OSL 線量計を用いた $H_p(10)$ 及び H_p に対する方向特性試験結果と文献値 ^[36] との比較 (光子: S-Cs)	95
図 4-5 6	PW ファントム及び AM ファントムに対する各照射ジオメトリでの BF96	
図 4-5 7	PW ファントムと AM ファントムの断面図による厚さの比較.....	97
図 4-5 8	OSL 線量計の $H_p(0^\circ)$ レスポンスのファントムによる違い (AP ジオメトリ)	98
図 4-5 9	OSL 線量計の $H_p(180^\circ)$ レスポンスのファントムによる違い (PA ジオメトリ)	98
図 4-6 0	OSL 線量計の $H_p(ROT)$ レスポンスのファントムによる違い (ROT ジオメトリ)	99
図 4-6 1	A 社製電離箱式サーベイメータの高エネルギー γ 線に対する特性試験の様子.....	105
図 4-6 2	A 社製電離箱式サーベイメータの β 線に対する特性試験の様子.....	105
図 4-6 3	B 社製中性子用サーベイメータの単色中性子に対する特性試験の様子	106
図 4-6 4	C 社製電子式個人線量計 (体幹部用) の β 線に対する特性試験の様子	106
図 4-6 5	D 社製受動形個人線量計 (体幹部用) の γ 線に対する特性試験の様子	107
図 4-6 6	D 社製受動形個人線量計 (体幹部用) の X 線に対する特性試験の様子	107
図 4-6 7	D 社製受動形個人線量計 (体幹部用) の高エネルギー γ 線に対する特性試験の様子.....	108
図 4-6 8	D 社製受動形個人線量計 (体幹部用) の β 線に対する特性試験の様子	108
図 4-6 9	E 社製受動形個人線量計 (水晶体用) の X 線に対する特性試験の様子	109
図 4-7 0	E 社製受動形個人線量計 (水晶体用) の高エネルギー γ 線に対する特性	

試験の様子.....	109
図 4-7 1 E 社製受動形個人線量計（水晶体用）の β 線に対する特性試験の様子	110
図 4-7 2 F 社製中性子用電子式個人線量計の速中性子に対する特性試験の様子	110
図 4-7 3 G 社製中性子用受動形個人線量計（体幹部用）の単色中性子に対する特性 試験の様子.....	111
図 4-7 4 A 社製電離箱式サーベイメータの $H^*(10)$ 及び H^* に対する光子エネルギー 特性（入射角度： 0° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））.....	117
図 4-7 5 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(3)$ 及び D' lens に対する光子エネルギー 特性（入射角度： 0° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））.....	117
図 4-7 6 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(3)$ 及び D' lens に対する光子エネルギー 特性（入射角度： 15° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））.....	118
図 4-7 7 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(3)$ 及び D' lens に対する光子エネルギー 特性（入射角度： 30° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））.....	118
図 4-7 8 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(3)$ 及び D' lens に対する光子エネルギー 特性（入射角度： 45° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））.....	119
図 4-7 9 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(3)$ 及び D' lens に対する光子エネルギー 特性（入射角度： 60° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））.....	119
図 4-8 0 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(3)$ 及び D' lens に対する光子エネルギー 特性（入射角度： 75° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））.....	120
図 4-8 1 A 社製電離箱式サーベイメータの D' lens に対する光子エネルギー特性	120
図 4-8 2 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び D' local skin に対する光子 エネルギー特性（入射角度： 0° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））.....	121
図 4-8 3 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び D' local skin に対する光子 エネルギー特性（入射角度： 15° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））.....	121
図 4-8 4 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び D' local skin に対する光子 エネルギー特性（入射角度： 30° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））.....	122
図 4-8 5 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び D' local skin に対する光子 エネルギー特性（入射角度： 45° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））.....	122
図 4-8 6 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び D' local skin に対する光子 エネルギー特性（入射角度： 60° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））.....	123
図 4-8 7 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び D' local skin に対する光子 エネルギー特性（入射角度： 75° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））.....	123
図 4-8 8 A 社製電離箱式サーベイメータの D' local skin に対する光子エネルギー特性	124
図 4-8 9 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び D' local skin に対する β 線	

エネルギー特性（入射角度：0°、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））	124
図 4-9 0 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び D' local skinに対する β 線エネルギー特性（入射角度：15°、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））	125
図 4-9 1 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び D' local skinに対する β 線エネルギー特性（入射角度：30°、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））	125
図 4-9 2 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び D' local skinに対する β 線エネルギー特性（入射角度：45°、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））	126
図 4-9 3 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び D' local skinに対する β 線エネルギー特性（入射角度：60°、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））	126
図 4-9 4 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び D' local skinに対する β 線エネルギー特性（入射角度：75°、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））	127
図 4-9 5 A 社製電離箱式サーベイメータの D' local skinに対する β 線エネルギー特性	127
図 4-9 6 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(3)$ 及び D' lensに係る $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線に対する方向特性（S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））	128
図 4-9 7 C 社製電子式個人線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び D_p local skinに対する β 線エネルギー特性（入射角度：0°、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正（規格化））	128
図 4-9 8 C 社製電子式個人線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び D_p local skinに対する β 線エネルギー特性（入射角度：15°、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正（規格化））	129
図 4-9 9 C 社製電子式個人線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び D_p local skinに対する β 線エネルギー特性（入射角度：30°、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正（規格化））	129
図 4-1 0 0 C 社製電子式個人線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び D_p local skinに対する β 線エネルギー特性（入射角度：45°、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正（規格化））	130
図 4-1 0 1 C 社製電子式個人線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び D_p local skinに対する β 線エネルギー特性（入射角度：60°、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正（規格化））	130
図 4-1 0 2 C 社製電子式個人線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び D_p local skinに対する β 線エネルギー特性（入射角度：75°、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正（規格化））	131
図 4-1 0 3 D 社製受動形線量計（体幹部用）の $H_p(10)$ 及び H_p に対する光子エネルギー特性	131
図 4-1 0 4 D 社製受動形線量計（体幹部用）の $H_p(10)$ 及び H_p に対する光子エネルギー特性	131

	ギー特性 (入射角度 : 30°、S-Cs $Hp(10,0^\circ)$ で校正 (規格化) )	.....132
図 4-1 0 5	D 社製受動形線量計 (体幹部用) の $Hp(10)$ 及び Hp に対する光子エネルギー特性 (入射角度 : 45°、S-Cs $Hp(10,0^\circ)$ で校正 (規格化) )	.....133
図 4-1 0 6	D 社製受動形線量計 (体幹部用) の $Hp(10)$ 及び Hp に対する光子エネルギー特性 (入射角度 : 60°、S-Cs $Hp(10,0^\circ)$ で校正 (規格化) )	.....133
図 4-1 0 7	D 社製受動形線量計 (体幹部用) の $Hp(10)$ 及び Hp に対する光子エネルギー特性 (入射角度 : 75°、S-Cs $Hp(10,0^\circ)$ で校正 (規格化) )	.....134
図 4-1 0 8	D 社製受動形線量計 (体幹部用) の Hp に対する光子エネルギー特性	.....134
図 4-1 0 9	D 社製受動形線量計 (体幹部用) の $Hp(0.07)$ 及び Dp local skin に係る $^{90}Sr/^{90}Y$ β 線に対する方向特性 ($^{90}Sr/^{90}Y$ $Hp(0.07,0^\circ)$ で校正 (規格化) )	....135
図 4-1 1 0	D 社製受動形線量計 (体幹部用) の $Hp(0.07)$ 及び Dp local skin に係る ^{85}Kr β 線に対する方向特性 ($^{90}Sr/^{90}Y$ $Hp(0.07,0^\circ)$ で校正 (規格化) )	.....135
図 4-1 1 1	E 社製受動形線量計 (水晶体用) の $Hp(3)$ 及び Dp lens に対する光子エネルギー特性 (入射角度 : 0°、S-Cs $Hp(3,0^\circ)$ で校正 (規格化) )	.....136
図 4-1 1 2	E 社製受動形線量計 (水晶体用) の $Hp(3)$ 及び Dp lens に対する光子エネルギー特性 (入射角度 : 30°、S-Cs $Hp(3,0^\circ)$ で校正 (規格化) )	.....136
図 4-1 1 3	E 社製受動形線量計 (水晶体用) の $Hp(3)$ 及び Dp lens に対する光子エネルギー特性 (入射角度 : 45°、S-Cs $Hp(3,0^\circ)$ で校正 (規格化) )	.....137
図 4-1 1 4	E 社製受動形線量計 (水晶体用) の $Hp(3)$ 及び Dp lens に対する光子エネルギー特性 (入射角度 : 60°、S-Cs $Hp(3,0^\circ)$ で校正 (規格化) )	.....137
図 4-1 1 5	E 社製受動形線量計 (水晶体用) の $Hp(3)$ 及び Dp lens に対する光子エネルギー特性 (入射角度 : 75°、S-Cs $Hp(3,0^\circ)$ で校正 (規格化) )	.....138
図 4-1 1 6	E 社製受動形線量計 (水晶体用) の Dp lens に対する光子エネルギー特性	.....138
図 4-1 1 7	E 社製受動形線量計 (水晶体用) の $Hp(3)$ 及び Dp lens に係る $^{90}Sr/^{90}Y$ β 線に対する方向特性 (S-Cs $Hp(3,0^\circ)$ で校正 (規格化) )	.....139
図 4-1 1 8	B 社製中性子サーベイメータのレスポンスのエネルギー依存性	.....139
図 4-1 1 9	B 社製中性子サーベイメータのエネルギーレスポンスと文献値 ^[40] の比較。文献値と、新・実用量の比で補正した値を、それぞれ黒、赤の実線で示した。	.....140
図 4-1 2 0	F 社製電子式個人線量計の線量計のエネルギー特性(入射角 : 0°)	.....140
図 4-1 2 1	F 社製電子式個人線量計の線量計のエネルギー特性(入射角 : 30°)	...141
図 4-1 2 2	F 社製電子式個人線量計のエネルギー特性(入射角 : 60°)	.....141
図 4-1 2 3	F 社製電子式個人線量計の各線質に対するレスポンスの角度依存性	142
図 4-1 2 4	G 社製受動形個人線量計のエネルギー特性(入射角 : 0°)	.....143

図 4-1 2 5	G 社製受動形個人線量計のエネルギー特性(入射角：30°).....	143
図 4-1 2 6	G 社製受動形個人線量計のエネルギー特性(入射角：60°).....	144
図 4-1 2 7	G 社製受動形個人線量計の各線質に対するレスポンスの角度依存性	145
図 4-1 2 8	測定を行った放射線作業場の様子 (#1 及び#2)	147
図 4-1 2 9	③～⑥の放射線作業場における光子エネルギー分布の取得に使用した 測定系.....	147
図 4-1 3 0	2”Φ×2”円筒形 NaI(Tl)検出器によるパルス波高スペクトル (#1 及び#2)	149
図 4-1 3 1	研究用原子炉施設における 2”Φ×2”円筒形 NaI(Tl)検出器によるパルス 波高スペクトル (#3～#5)	149
図 4-1 3 2	中性子ビーム利用施設における 2”Φ×2”円筒形 NaI(Tl)検出器によるパ ルス波高スペクトル (#6)	150
図 4-1 3 3	光子エネルギー分布 (#1～#6)	153
図 4-1 3 4	光子エネルギー分布 (#7～#11)	154
図 4-1 3 5	CdTe 検出器や LaBr ₃ (Ce)検出器を用いた作業場スペクトル測定系の例	155
図 4-1 3 6	²⁴¹ Am 校正場及び N-80 校正場における CdTe 検出器による波高スペク トル	155
図 4-1 3 7	²⁴¹ Am 校正場及び N-80 校正場における 1”Φ×1” NaI(Tl)検出器による 波高スペクトル.....	155
図 4-1 3 8	原子力施設及び放射線使用施設の作業場で評価した新たな実用量 (カ ーマ近似) と現行実用量の比較 (場所のモニタリングにかかる実用量)	161
図 4-1 3 9	原子力施設及び放射線使用施設の作業場で評価した新たな実用量 (カ ーマ近似) と現行実用量の比較 (個人モニタリングにかかる実用量)	161
図 4-1 4 0	カーマ近似ありなしの線量換算係数を用いて評価した新たな実用量の 比較.....	162
図 4-1 4 1	手法の妥当性評価に用いた放射線場の H *スペクトル	164
図 4-1 4 2	手法の妥当性評価に用いた H 社製電離箱式サーベイメータのエネルギ ー特性.....	164
図 4-1 4 3	手法の妥当性評価に用いた I 社製電子式個人線量計のエネルギー特性	165
図 4-1 4 4	H 社製電離箱式サーベイメータを用いた直接測定時の様子.....	165
図 4-1 4 5	H 社製電離箱式サーベイメータの放射線作業場での応答評価	167
図 4-1 4 6	J 社製電離箱式サーベイメータの放射線作業場での応答評価	168
図 4-1 4 7	D 社製受動形個人線量計 (体幹部用) の放射線作業場での応答評価	168

図 4-148 E 社製受動形個人線量計（水晶体用）の放射線作業場での応答評価 169

目 次

表 2-1	FRS の主な γ 線校正場	19
表 2-2	FRS の主な X 線校正場	20
表 2-3	FRS の主な β 線校正場	20
表 2-4	FRS の主な RI 中性子校正場	20
表 2-5	FRS の主な単色中性子校正場	20
表 2-6	事業の進捗状況等の報告	21
表 3-1	令和 3 年度事業と合わせて特性が評価された線量計とその試験項目一覧	25
表 4-1	現行実用量と新たな実用量	26
表 4-2	評価に用いた単色光子に対する線量換算係数	36
表 4-3	評価した S-Cs 校正場の線量換算係数 (1/5)	39
表 4-4	評価した S-Cs 校正場の線量換算係数 (2/5)	40
表 4-5	評価した S-Cs 校正場の線量換算係数 (3/5)	41
表 4-6	評価した S-Cs 校正場の線量換算係数 (4/5)	42
表 4-7	評価した S-Cs 校正場の線量換算係数 (5/5)	43
表 4-8	評価した S-Co 校正場の線量換算係数 (1/5)	44
表 4-9	評価した S-Co 校正場の線量換算係数 (2/5)	44
表 4-10	評価した S-Co 校正場の線量換算係数 (3/5)	44
表 4-11	評価した S-Co 校正場の線量換算係数 (4/5)	45
表 4-12	評価した S-Co 校正場の線量換算係数 (5/5)	45
表 4-13	評価した X 線校正場の換算係数 (1/10)	49
表 4-14	評価した X 線校正場の換算係数 (2/10)	50
表 4-15	評価した X 線校正場の換算係数 (3/10)	51
表 4-16	評価した X 線校正場の換算係数 (4/10)	52
表 4-17	評価した X 線校正場の換算係数 (5/10)	53
表 4-18	評価した X 線校正場の換算係数 (6/10)	54
表 4-19	評価した X 線校正場の換算係数 (7/10)	55
表 4-20	評価した X 線校正場の換算係数 (8/10)	56
表 4-21	評価した X 線校正場の換算係数 (9/10)	57
表 4-22	評価した X 線校正場の換算係数 (10/10)	58
表 4-23	評価した R-F 校正場における実効線量の線量管理に用いる新・現行実用量に対する線量換算係数	61
表 4-24	評価した R-F 校正場における水晶体の線量管理に用いる新・現行実用量に対する線量換算係数	61

表 4-2 5	評価した R-F 校正場における皮膚の線量管理に用いる新・現行実用量に対する線量換算係数.....	61
表 4-2 6	換算係数を評価した β 線校正場	64
表 4-2 7	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場について評価した皮膚の線量管理に用いる実用量への線量換算係数.....	68
表 4-2 8	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場について評価した眼の水晶体の線量管理に用いる実用量への線量換算係数	68
表 4-2 9	^{85}Kr 場について評価した皮膚の線量管理に用いる実用量への換算係数	68
表 4-3 0	^{147}Pm 場について評価した皮膚の線量管理に用いる実用量への換算係数	68
表 4-3 1	評価に用いた単色中性子に対する線量換算係数.....	71
表 4-3 2	FRS に整備した単色中性子校正場における中性子の場所及び個人モニタリングにかかる実用量に対する線量換算係数	80
表 4-3 3	評価した $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 速中性子校正場の線量換算係数.....	81
表 4-3 4	評価した ^{252}Cf 速中性子校正場の線量換算係数	81
表 4-3 5	評価した $\text{D}_2\text{O}\text{-}^{252}\text{Cf}$ 、Grp-AmBe 減速中性子校正場の線量換算係数	82
表 4-3 6	評価した熱中性子校正場の線量換算係数.....	83
表 4-3 7	電離箱式サーベイメータの H^* 応答の比較	101
表 4-3 8	受動形個人線量計の $H_p(0^\circ)$ 応答の比較.....	101
表 4-3 9	新たな実用量に対する試験に用いた線量計の種類と特徴.....	104
表 4-4 0	選定した放射線作業場	148
表 4-4 1	再解析に利用したデータ一覧.....	150
表 4-4 2	原子力施設及び放射線使用施設作業場 (#1~#6) における場所のモニタリングにかかる実用量(カーマ近似)	158
表 4-4 3	原子力施設作業場 (#1~#6) における個人モニタリングにかかる実用量(カーマ近似)	158
表 4-4 4	原子力施設作業場 (#1~#6) における新・現行実用量の比較(カーマ近似)	159
表 4-4 5	原子力発電所(PWR)の蒸気発生器マンホール周辺作業場における場所のモニタリングにかかる実用量(カーマ近似)	159
表 4-4 6	原子力発電所(PWR)の蒸気発生器マンホール周辺作業場における個人モニタリングにかかる実用量(カーマ近似)	160
表 4-4 7	原子力発電所(PWR)の蒸気発生器マンホール周辺作業場における新・現行実用量の比較(カーマ近似)	160
表 4-4 8	評価した線量計応答の比較(電離箱式サーベイメータ)	166
表 4-4 9	評価した線量計応答の比較(電子式個人線量計)	166

1 事業の背景と目的

我が国における放射線障害防止に関する技術的基準は、国際放射線防護委員会（ICRP）や国際原子力機関（IAEA）等で国際的に合意された放射線防護の考え方を尊重し、制度間の斉一を図りながら、策定されてきた。

ICRP は、放射線防護における基本的な線量として「防護量」を開発し、被ばく線量限度等を示してきた^[1]。一方で、防護量は人体に関連付けられた量として定義されているために、実測が可能でない。そこで、外部放射線防護のためには、サーベイメータや個人線量計といった線量計で測定でき、防護量の良い推定値を与える「実用量」が開発され、用いられてきた^[2,3]。こうした線量評価体系は我が国の法令にも取り入れられ、1 cm 線量当量などの実用量が測定すべき量として規定され、放射線管理の現場で用いられているサーベイメータ及び個人線量計（以下、本報告書においては単に「線量計」という。）は、こうした実用量に沿って設計・校正され、使用されてきた。

こうしたなかで、ICRP と国際放射線単位測定委員会（ICRU）によって、実効線量や等価線量といった防護量について、ICRP の 2007 年勧告^[1]に基づき、標準化されたファントムを用いて幅広い粒子、エネルギーに対して計算した換算係数が公表された^[4]のに引き続き、ICRU は令和 2 年 12 月に、ICRP と合同で検討を進めてきた実用量の定義変更を勧告する報告書（ICRU Report 95^[5]）を発刊した。線量測定の基準となる量の変更であることから、その導入による放射線管理への影響が懸念されている。具体的な懸念として、令和元年度放射線対策委託費（放射線管理に係る実用量の測定等の実態調査）事業（以下「令和元年度事業」という。）報告書^[6]において、現行の線量計が引き続き使用できるか、導入前後で混乱なく一貫した線量測定評価が可能かなどの線量計の性能評価及びその許容範囲に関連する実務的課題が挙げられている。これらの課題の解決には、新たな実用量に対応した校正場を開発することにより、線量計を性能評価できる環境を整備し、実務的な観点を踏まえた線量計の性能要件を示すことが必要とされており、令和 3 年度放射線対策委託費（新たな実用量への対応に係る線量計の校正及び放射線作業場におけるエネルギー応答に関する調査研究）事業（以下「令和 3 年度事業」という。）^[7]において、放射線管理の現場で用いられている線量計の校正及び原子力施設の放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する技術的知見の整備に着手したところである。

また、放射線防護に係る線量の概念は我が国だけでなく世界各国で放射線防護の体系に取り入れられており、これらに変更された場合、各国で法令への取り入れに向けた検討が進められることになる。特に、我が国においては、これらの概念を取り入れている制度が複数の省庁にまたがっており、制度間の斉一を図る必要があることから、取り入れの検討を迅速に開始するために技術的知見の整備を早急に推し進めることが求められる。

そこで、新たな実用量を我が国に導入する上で懸念とされている上記課題のうち、放射

線管理の現場で用いられている線量計について、放射線に係る二次標準機関における校正・試験、原子力施設等の放射線作業場におけるエネルギー応答及び特性評価に関する技術的知見をさらに蓄積することを目的として、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。）安全研究センターが国立研究開発法人産業技術総合研究所から委託を受けて本事業を実施した。

本報告書は、本事業の成果等を取りまとめたものである。

2 事業の実施体制

2.1 実施体制

本事業の実施体制図を図 2-1 に示す。原子力機構 安全研究・防災支援部門 安全研究センター 原子炉安全研究ディビジョン リスク評価・防災研究グループに所属する 3 名に加えて、原子力機構 放射線標準施設棟（以下「FRS」という。）を利用した照射技術及び放射線計測技術を有する原子力科学研究部門 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課の 3 名、及び核燃料・バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所 放射線管理部の 2 名の合計 8 名で、「(1) 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査」、「(2) 線量計の特性評価に関する調査」、「(3) 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査」及び「(4) 研究に必要な国内外の情報収集」を実施した。

そのほか、(3) の調査における放射線作業場の選定等にあたり、原子力機構の原子力施設で放射線管理業務を実施している原子力科学研究部門 原子力科学研究所 放射線管理部の助言を得た。

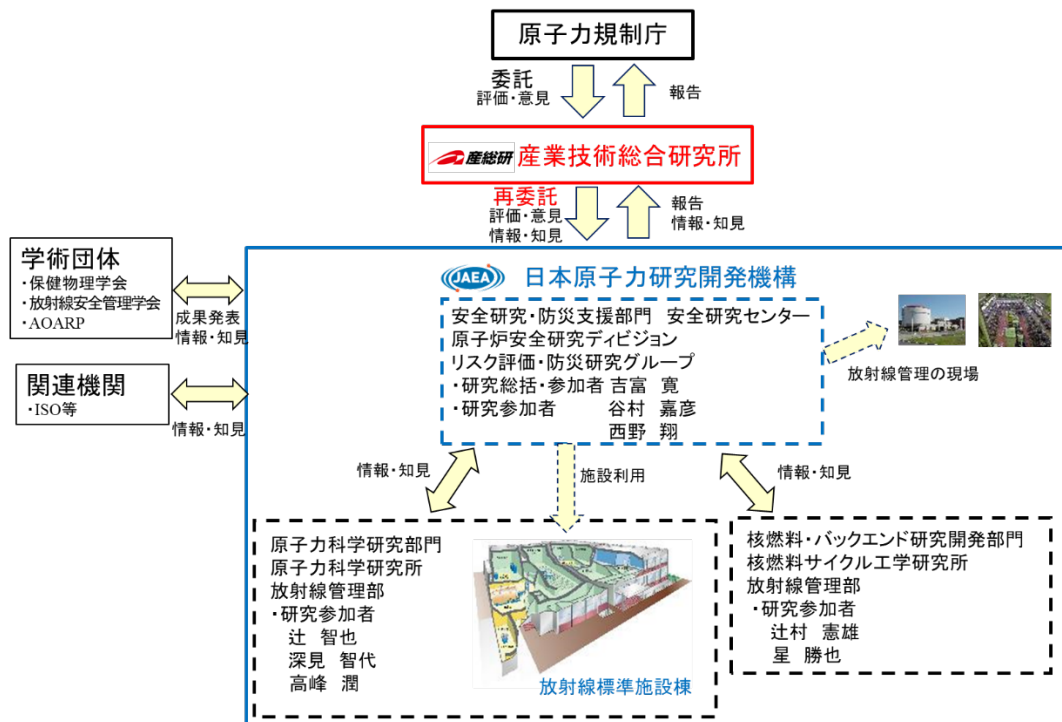


図 2-1 事業の実施体制

2.2 実施期間

本事業は令和4年9月28日～令和5年2月28日の期間で実施した。

2.3 放射線標準施設棟（FRS）

新たな実用量に対応した校正場の評価は FRS の校正場について行い、線量計の特性評価等においてもこれらの校正場を利用した。また、令和3年度事業で得られた成果のほか、校正場の評価に必要な校正場に関する詳細な情報や過去に評価されたスペクトルデータなど、必要に応じて FRS の校正場を管理する放射線計測技術課が保有するデータを利用した。

FRS は、広範囲な線種・エネルギーに関して校正や試験を行える校正施設として1980年に設置され、2001年には加速器を用いた単色中性子場を構築するための増設を経て放射線防護分野で国内最大規模を誇る総合的な校正施設である。図 2-2 に示すとおり、多数の「照射室」を有し、 γ 線源、X 線発生装置、 β 線源、RI 中性子線源及び加速器を用いた各種校正・試験場が構築され供用されている。

供用されている各校正場の特徴を表 2-1～表 2-5 に示す。これらの校正場は ISO や JIS に準拠しており、国家標準である国立研究開発法人産業技術総合研究所とトレーサビリティを確保（国内でトレーサビリティ体系が整備されていない線質を除く）した二次標準場である。放射線防護用の二次標準場においては、国家標準において標準供給量（光子では空気カーマ、 β 線では組織吸収線量、中性子では中性子フルエンス）で校正した基準器を用いて校正場を構築し、主に実用量を用いた照射でユーザーの放射線測定器の校正・試験を行っている。

これら FRS のもつ特徴やこれまでに蓄積された放射線計測技術を活かし、放射線測定器のエネルギー特性試験を高い信頼性をもって実施できる方法や品質保証体制を確立して、令和4年6月23日から放射線分野では国内初となる産業標準化法試験事業者登録制度（JNLA）に基づく JIS 登録試験所として運用を開始した。これにより、FRS で試験を実施した測定器に対して、公的な試験成績書の発行というプロセスを経て、第三者として客観的に放射線測定器の性能を証明することが可能となった^[8-10]。

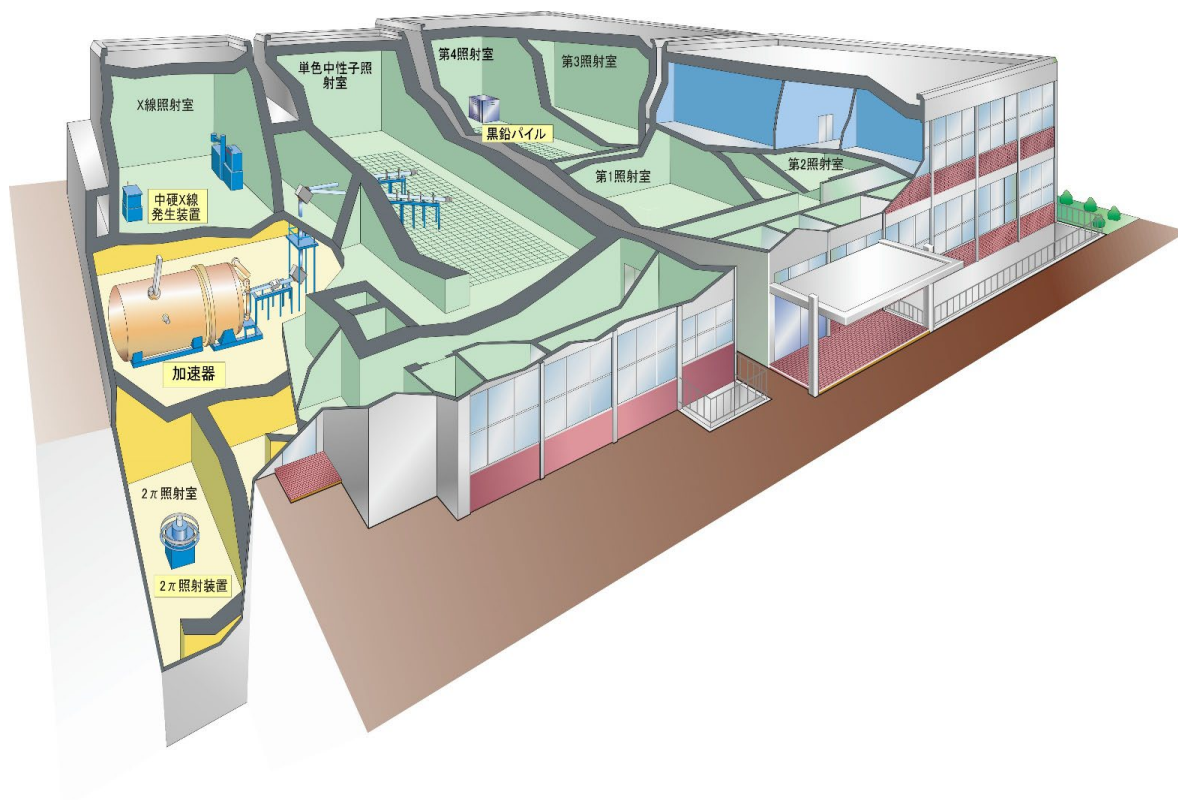


図 2-2 放射線標準施設棟の鳥瞰図

表 2-1 FRS の主な γ 線校正場

照射装置	照射室	核種(核反応)及びエネルギー	線量当量率 ($H^*(10)$) 範囲*1
極低レベル照射装置	第2照射室	^{137}Cs (662 keV)	$4 \mu\text{Sv/h} \sim 17 \text{mSv/h}$
低レベル照射装置	第1照射室	^{137}Cs (662 keV)*2 ^{60}Co (1250 keV)*2	$7 \mu\text{Sv/h} \sim 40 \text{mSv/h}$ $10 \mu\text{Sv/h} \sim 180 \mu\text{Sv/h}$
中レベル照射装置	第3照射室	^{60}Co (1250 keV)*2	$20 \mu\text{Sv/h} \sim 0.5 \text{Sv/h}$
2 π 照射装置	2 π 照射室	^{137}Cs (662 keV) ^{60}Co (1250 keV)	$2 \text{mSv/h} \sim 4 \text{mSv/h}$ $8 \mu\text{Sv/h} \sim 0.7 \text{mSv/h}$
単体 γ 線源 (4 π 線源)	第1～4照射室	^{241}Am (60 keV) ^{133}Ba (333 keV) ^{137}Cs (662 keV)*2 ^{60}Co (1250 keV)*2	$8 \mu\text{Sv/h} \sim 470 \mu\text{Sv/h}$ $0.7 \mu\text{Sv/h} \sim 1.2 \mu\text{Sv/h}$ $0.5 \mu\text{Sv/h} \sim 350 \mu\text{Sv/h}$ $0.5 \mu\text{Sv/h} \sim 10 \mu\text{Sv/h}$
高エネルギー γ 線	単色中性子照射室	$^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)^{16}\text{O}$ (6.2 MeV)	$20 \mu\text{Sv/h} \sim 2 \text{mSv/h}$

*1 令和5年1月現在、 *2 JIS登録試験所の対象範囲

表 2-2 FRS の主な X 線校正場

照射装置	照射室	実効エネルギー範囲	線量当量率 ($H^*(10)$) 範囲
中硬 X 線発生装置	X 線照射室	20~260 keV ^{*1}	4 μ Sv/h~2 Sv/h

*1 JIS 登録試験所の対象範囲

表 2-3 FRS の主な β 線校正場

照射装置	照射室	線源及び残留最大エネルギー	線量当量率 ($H(0.07)$) 範囲 ^{*1}
BSS2	β 線照射室	⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y (2.0 MeV) ^{*2}	27 mSv/h
		⁸⁵ Kr (0.60 MeV) ^{*2}	45 mSv/h
		¹⁴⁷ Pm (0.18 MeV) ^{*2}	0.2 mSv/h
JAEA β 線照射装置		⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y (2.0~2.2 MeV)	5 mSv/h~150 mSv/h
		²⁰⁴ Tl (0.60 MeV)	7 μ Sv/h~60 μ Sv/h
		¹⁴⁷ Pm (0.14~0.18 MeV)	10 μ Sv/h~300 μ Sv/h

*1 令和 5 年 1 月現在、 *2JIS 登録試験所の対象範囲

表 2-4 FRS の主な RI 中性子校正場

校正場	照射室	線源及び平均エネルギー	線量当量率 ($H^*(10)$) 範囲 [*]	
熱中性子場	第 4 照射室	²⁵² Cf (0.025 eV)	1 μ Sv/h~2 μ Sv/h	
速中性子場		²⁴¹ Am-Be (4.4 MeV) ^{*2}	30 μ Sv/h~110 μ Sv/h	
		²⁵² Cf (2.3 MeV) ^{*2}	50 μ Sv/h~300 μ Sv/h	
減速中 性子場		重水減速場	²⁵² Cf (2.1 MeV)	<1 μ Sv/h
		黒鉛減速場	²⁴¹ Am-Be (2.1~2.2 MeV)	20 μ Sv/h~50 μ Sv/h

*令和 5 年 1 月現在、 *2JIS 登録試験所の対象範囲

表 2-5 FRS の主な単色中性子校正場

校正場	照射室	核反応及びエネルギー	線量当量率 ($H^*(10)$) 範囲
単色中性子場	単色中性子照射室	⁴⁵ Se(p,n) ⁴⁵ Ti 8 keV 27 keV	~2 μ Sv/h
		⁷ Li(p,n) ⁷ Be 144 keV ^{*1} 250 keV 565 keV ^{*1}	70 μ Sv/h~7 mSv/h
		³ H(p,n) ³ He 1.2 MeV 2.5 MeV	30 μ Sv/h~3 mSv/h
		² H(d,n) ³ He 5.0 MeV ^{*1}	100 μ Sv/h~10 mSv/h
		³ H(d,n) ⁴ He 14.8 MeV ^{*1} 19 MeV	5 μ Sv/h~5 mSv/h

*1 JIS 登録試験所の対象範囲

2.4 進捗管理

本事業を開始するにあたり、令和4年10月6日にキックオフ会合を実施し、事業の進め方、役割分担、スケジュール、調査研究実施方針を関係者間で共有し、議論した。また、随時関係者と意見交換を行って進捗状況を確認するとともに、事業の進捗状況については、月1回を目安に電子メールにて総括責任者から産業技術総合研究所担当者殿に報告した（表2-6参照）。さらに、令和5年2月24日には、報告前会合を実施し、取得データの確認、事業のとりまとめ方針を関係者間で議論した。会合については、新型コロナウイルス感染症の感染拡大状況を踏まえて、必要に応じてWeb会議や電子メールを利用した。

表 2-6 事業の進捗状況等の報告

報告日	内容
令和4年11月1日	令和4年10月末までの進捗報告 (電子メールにて実施)
令和4年11月1日	成果発表内容・調査方針の共有、進捗報告 (対面にて実施)
令和4年11月29日	令和4年11月29日までの進捗報告 (電子メール及びWeb会議にて実施)
令和4年12月16日	令和4年12月16日までの進捗報告及び今後のスケジュールについて (Web会議にて実施)
令和4年12月28日	令和4年12月末までの進捗報告 (電子メールにて実施)
令和5年1月17日	成果報告について (電子メールにて実施)
令和5年1月19日	令和5年1月19日までの進捗報告及び今後のスケジュールについて (Web会議にて実施)
令和5年2月2日	令和4年1月末までの進捗報告 (電子メールにて実施)
令和5年2月24日	出張報告 (電子メールにて実施)
令和5年2月24日	成果報告について (Web会議にて実施)

3 事業の概要

3.1 全体計画

本事業では、実用量の定義変更に伴い懸念されている線量計測上の課題のうち、放射線管理の現場で用いられている線量計について、放射線に係る二次標準機関における校正、原子力施設等の放射線場におけるエネルギー応答及び特性評価に関する技術的知見の蓄積をさらに推し進め、また、線量計の校正や仕様現場における課題を整理することを目的としている。このため、「(1) 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査」、「(2) 線量計の特性評価に関する調査」、「(3) 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査」、及び「(4) 研究に必要な国内外の情報収集」の4つに分けて調査研究を実施する。

具体的な研究計画を図 3-1 に示す。「(1) 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査」では、FRSに整備する校正場における新たな実用量に対する線量換算係数を算出するとともに、方向特性試験方法の開発及びトレーサビリティ確保に関する調査を行う。「(2) 線量計の特性に関する調査」では、(1) で評価した新たな実用量に対する線量換算係数を用いた市販線量計のエネルギー・方向特性試験を実施し、その結果を踏まえて、新たな実用量に対応させるための課題を整理し、特性改善等の対応策について検討する。「(3) 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査」では、光子による外部被ばくが主体である実際の原子力施設及び放射線使用施設の放射線作業場において、光子エネルギー分布を取得し、新たな実用量及び現行実用量に対する線量を算出する。さらに、市販線量計のエネルギー応答特性試験の結果と組み合わせることで、実用量の定義変更に伴う線量計のエネルギー応答に関する課題を抽出する。「(4) 研究に必要な国内外の情報収集」では、本事業の実施にあたっては、実用量に関する多岐にわたる高い専門性が必要であることから、新たな実用量への対応に係る国際機関等や関連する学術団体の動向について情報収集を行うとともに、研究計画や研究成果の解釈等の妥当性を学会発表での外部の専門家との議論を通じて確認する。

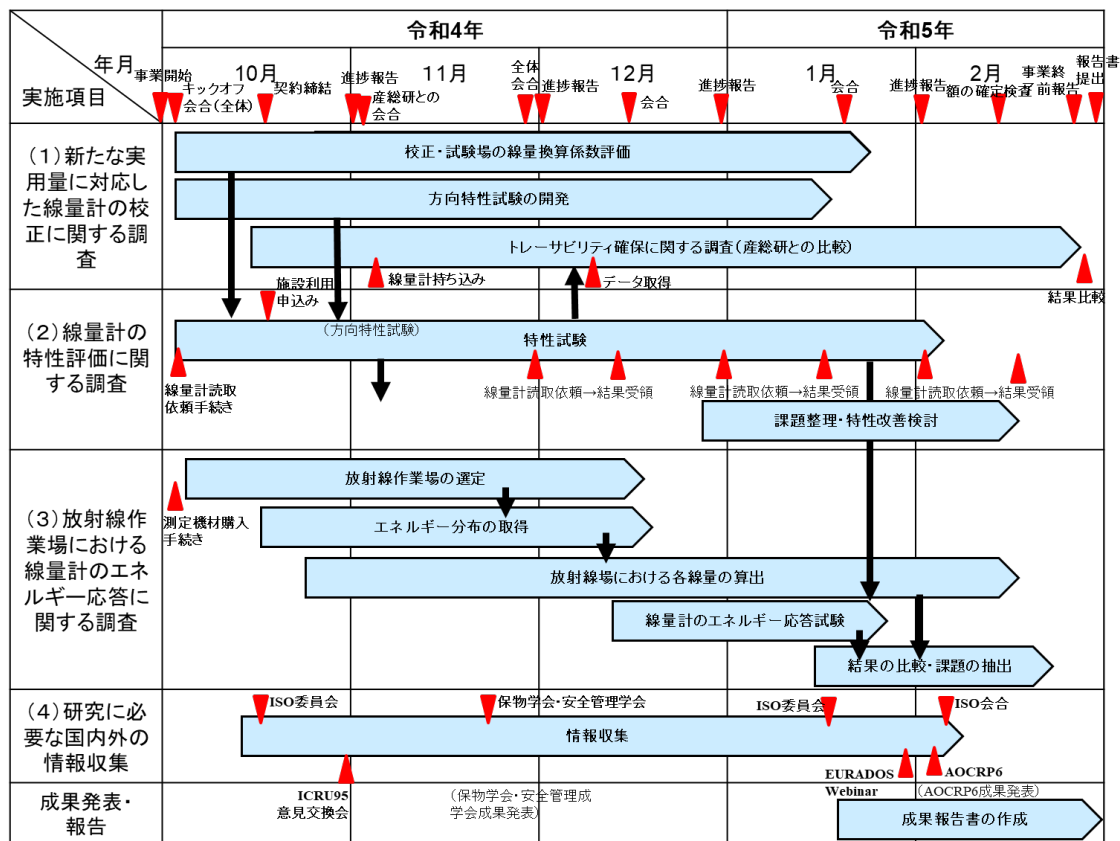


図 3-1 本事業の研究計画

3.2 概要

3.1で示した計画に沿って「(1) 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査」、「(2) 線量計の特性評価に関する調査」、「(3) 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査」、及び「(4) 研究に必要な国内外の情報収集」を以下のとおり実施した。

(1) 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査

FRS の以下の校正場について、(2) の特性評価に必要となる新たな実用量（実効線量、眼の水晶体、及び皮膚の線量管理について場所のモニタリング及び個人モニタリングにかかる実用量）に対する線量換算係数を算出し、新たな実用量で線量計の特性試験が可能な環境を整えた。

- ・ ^{137}Cs 及び ^{60}Co 線源を利用した γ 線校正場及び中硬 X 線発生装置を利用した管電圧 40 kV から 300 kV までの X 線校正場、並びに高エネルギー γ 線校正場
- ・ $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 及び ^{252}Cf 線源を利用した速中性子校正場、熱中性子校正場、8 keV から 19 MeV までの 10 エネルギー点の単色中性子校正場、重水減速中性子校正場、黒鉛減

速中性子校正場

・ $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 、 ^{85}Kr 線源及び ^{147}Pm 線源を利用した β 線校正場

また、新たな実用量に対して、回転 (ROT) 照射や 180° (PA) 照射を含む方向特性試験方法を開発した。特に ROT 照射や PA 照射における校正用ファントムの妥当性を検証するとともに、個人線量計の特性がこれらの照射ジオメトリでどのように変化するか試験した。

新たな実用量が導入された際にも、二次標準機関でトレーサビリティを確保し、国家標準機関と同等の試験が実施可能かを検証するために、市販線量計を用いて一部の光子線質 (S-Cs 及び N-100) について試験結果の比較を実施した。

(2) 線量計の特性評価に関する調査

(1) で線量換算係数を評価した校正場を用いて、国内で入手可能な計 7 機種 of 線量計に対するエネルギー・方向特性試験を実施し、これらの線量計を新たな実用量に対応させるための課題を抽出し、対応策を検討した。表 3-1 に、令和 3 年度事業の結果と合わせて新たな実用量に対する特性試験を行った線量計の種類と試験項目の一覧を示した。

(3) 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査








原子力施設及び放射線使用施設において、放射線管理において法令に基づく測定を実施している箇所や線源核種、散乱線等の影響によりエネルギー分布に異なる特徴を有する 7 つの放射線作業場の計 11 ヶ所について、光子エネルギー分布を取得した。取得したエネルギー分布から現行実用量及び新たな実用量に基づいた線量を算出し、線量計測値そのものがどう変化するか考察した。

また、光子エネルギー分布と線量計のエネルギー特性試験結果を組み合わせ、放射線作業場における線量計のエネルギー応答を評価する手法を開発し、市販のサーベイメータ 2 機種及び個人線量計 2 機種について、この手法を適用することにより原子力発電所の放射線作業場における応答を評価し、線量計測上の課題等について整理した。

(4) 研究に必要な国内外の情報収集

新たな実用量への対応に係る国際機関等として校正場や線量計に関する規格の策定・審議を行う ISO 専門委員会 (ISO/TC85/SC2) の動向を調査した。また、欧州は EURADOS の状況、アジア・オセアニア地域はアジア・オセアニア放射線防護会議での状況、国内は日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会の状況について、会議等への参加と通じて情報収集を行った。さらに、現行実用量導入時の線量計測上の対応状況についても併せて調査し、得られた情報を本報告書にまとめた。

表 3-1 令和3年度事業と合わせて特性が評価された線量計とその試験項目一覧

線質 線量計	光子							β線			中性子					
	N-40, 60, 150, 200, 300	N-80	N-100	N-250	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	高エネルギーγ線	⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	⁸⁵ Kr	¹⁴⁷ Pm	熱中性子	565 keV	5 MeV	²⁴¹ Am-Be	²⁵² Cf	
サーベイメータ	光子・β線用サーベイメータ															
	*電離箱式 	☆	○※1☆※2	☆	○※1☆※2	○※1☆※2	○※1☆※2	☆	○※1☆※2	○※1☆※2	☆	-	-	-	-	-
サーベイメータ	中性子用サーベイメータ															
	* ³ He比例計数管式 	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	☆	☆	○	○
個人線量計	受動形個人線量計(体幹部光子・β線用)															
	*OSL 	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	-	-	-	-	-	
	受動形個人線量計(体幹部中性子用)															
	*固体飛跡検出器 	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	☆	☆	☆	☆
	受動形個人線量計(水晶体用)															
	*TLD 	○※1☆※2,3	○※1☆※2	○※1☆※2	○※1☆※2	○※1☆※2	○※1☆※2	☆	○※1☆※2	-	-	-	-	-	-	-
電子式線量計(光子・β線用)																
*Si半導体式 	-	○※1	-	-	-	○※1	-	-	○※1☆※2	○※1☆※2	☆	-	-	-	-	
電子式線量計(中性子用)																
*Si半導体式 	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	☆	☆	○※1☆※2	○※1☆※2	

[凡例]○：令和3年度事業、☆：本事業で実施、-：対象外

※1 放射線入射角0度のみ実施、※2 放射線入射角0度以外のものについて実施、※3 N-40, 60, 150のみ実施

* 方向特性試験については、一部の角度のみを実施

4 事業の成果

4.1 はじめに

4.1.1 新たな実用量

現行の放射線防護において使用される ICRU Report 39/51^[2,3]に基づく実用量（以下「現行実用量」という。）と ICRU Report 95^[5]で提唱された実用量（以下「新たな実用量」という。）を表 4-1 に示す。以降、本報告書では各実用量の表記は表中に示した記号を用いることとする。

表 4-1 現行実用量と新たな実用量

役割	現行実用量		新たな実用量	
	場所のモニタリング	個人モニタリング	場所のモニタリング	個人モニタリング
実効線量の管理	周辺線量当量 $H^*(10)$	個人線量当量 $H_p(10)$	周辺線量 H^*	個人線量 H_p
眼の水晶体の線量管理	方向性線量当量 $H'(3)$	個人線量当量 $H_p(3)$	方向性水晶体吸収線量 D'_{lens}	個人水晶体吸収線量 D_p_{lens}
局所的な皮膚の線量管理	方向性線量当量 $H'(0.07)$	個人線量当量 $H_p(0.07)$	方向性局所皮膚吸収線量 $D'_{\text{local skin}}$	個人局所皮膚吸収線量 $D_p_{\text{local skin}}$

(令和元年度事業成果報告書^[6]及び ICRU Report 95^[5]を基に作成)

新たな実用量は、ある点におけるフルエンスもしくは空気カーマと換算係数の積として定義されており、現行実用量との違いの主な点は以下のとおりである。

- ・ICRU 球や人体軟組織中のある深さでの線量当量でなく、防護量の計算で用いられたのと同じファントムを使用して線量換算係数が得られている。
- ・そのため、線質係数は使用せず、放射線加重係数を基礎とした量となり、数値的には防護量のよりよい近似値を与える。
- ・現行実用量はカーマ近似を使用して線量換算係数が計算されていたのに対して、新たな実用量では全ての二次粒子を追跡した輸送計算により、線量換算係数が計算された。ただし、光子については、付属書において校正や試験での使用を目的としたカーマ近似を用いた換算係数も同時に示されている。
- ・眼の水晶体、局所的な皮膚の線量管理に用いる実用量は、吸収線量として定義された。そのため、単位は「Gy」である。

換算係数は、放射線の種類、エネルギー、角度に応じて ICRU Report 95^[5]に示されている。令和3年度事業報告書^[7]においては、方向性を持たない量である周辺線量とそれ以外の量については 0° についての換算係数が図示されているため、本報告書では、

ICRU Report 95^[5]に示された回転照射ジオメトリ (ROT) を含む各角度についての換算係数の一部、及び代表的な角度について現行の実用量との線量換算係数の比を図 4-1 ~ 図 4-14 に示した。光子については、カーマ近似のもののみを示した。眼の水晶体及び皮膚の線量管理に用いる実用量については、場所のモニタリングに関する量と個人モニタリングに関する量の間で線量換算係数の違いがないため、それぞれ D_{lens} 及び $D_{\text{local skin}}$ と表記し、まとめて示した。また、個人局所皮膚吸収線量については、末端部モニタリングを意図したピラーファントムやロッドファントムに対する線量換算係数も示されているが、本事業ではスラブファントムに対するもののみ対象としたため、スラブファントムについてのみ示した。以下、本報告書で単に $D_{\text{p local skin}}$ と記載した場合は、スラブファントムに対するものを意味する。水晶体吸収線量については、ICRU Report 95^[5]では水晶体全体にわたって平均化された線量換算係数のほか、放射線感受性細胞のみの吸収線量に対する線量換算係数も示されている。図示した線量換算係数は、前者に対するものであり、本事業においては水晶体全体にわたって平均化された水晶体吸収線量のみを取り扱った。なお、中性子に関しては、個人線量換算係数のみ図示した。比較に用いた現行実用量の線量換算係数は ICRP Publ.74^[11]もしくは表 4-2 に示された文献の値を用いた。

これらの線量換算係数から分かるように、放射線のエネルギーや入射角度によって現行・新実用量の関係性は変化し得る。線量計の校正・試験を行う多くの校正場においては単色エネルギーではないために、線量計の特性に対する影響を調査するには、まずそのエネルギー分布を考慮した校正場に対する線量換算係数の評価が必要となる。

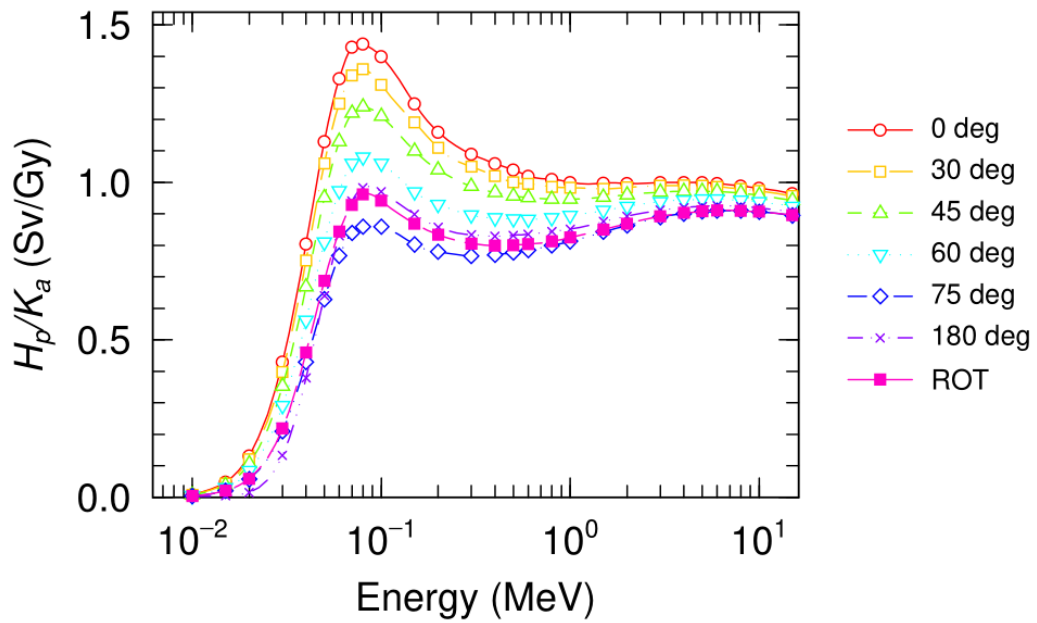


図 4-1 光子に対する個人線量換算係数（カーマ近似）

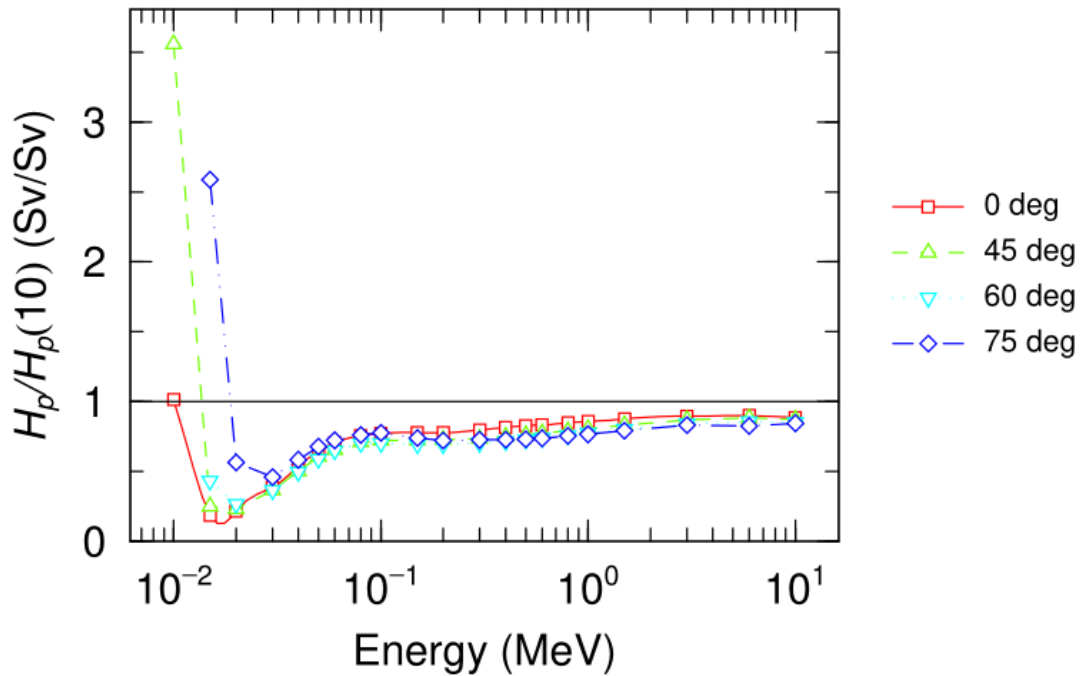


図 4-2 光子に対する実効線量の管理に用いる個人モニタリングに関する現行・新実用量の比較

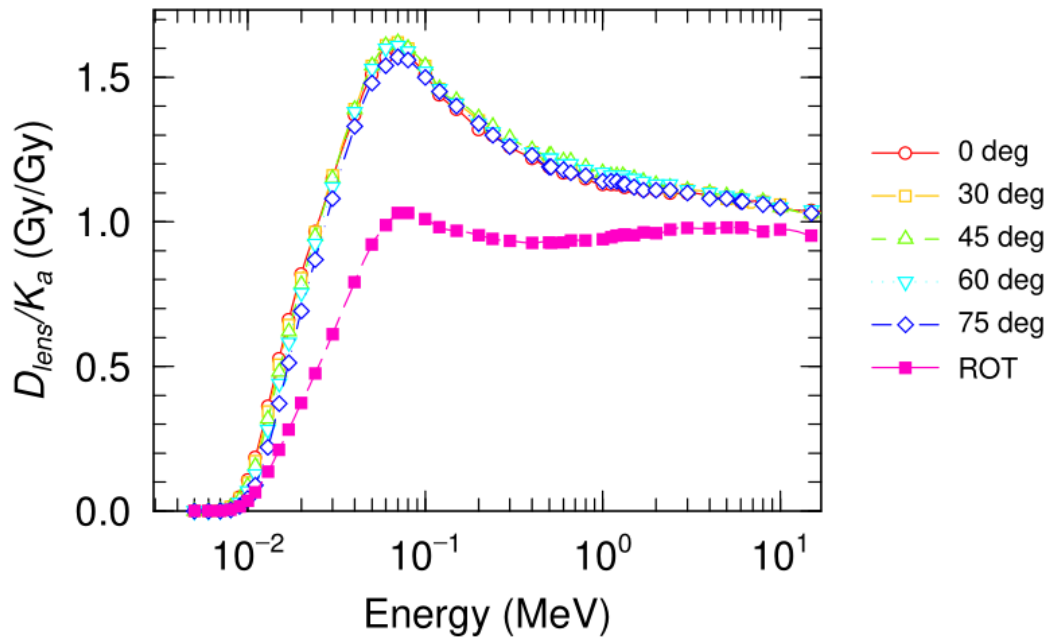


図 4-3 光子に対する水晶体吸収線量換算係数（カーマ近似）

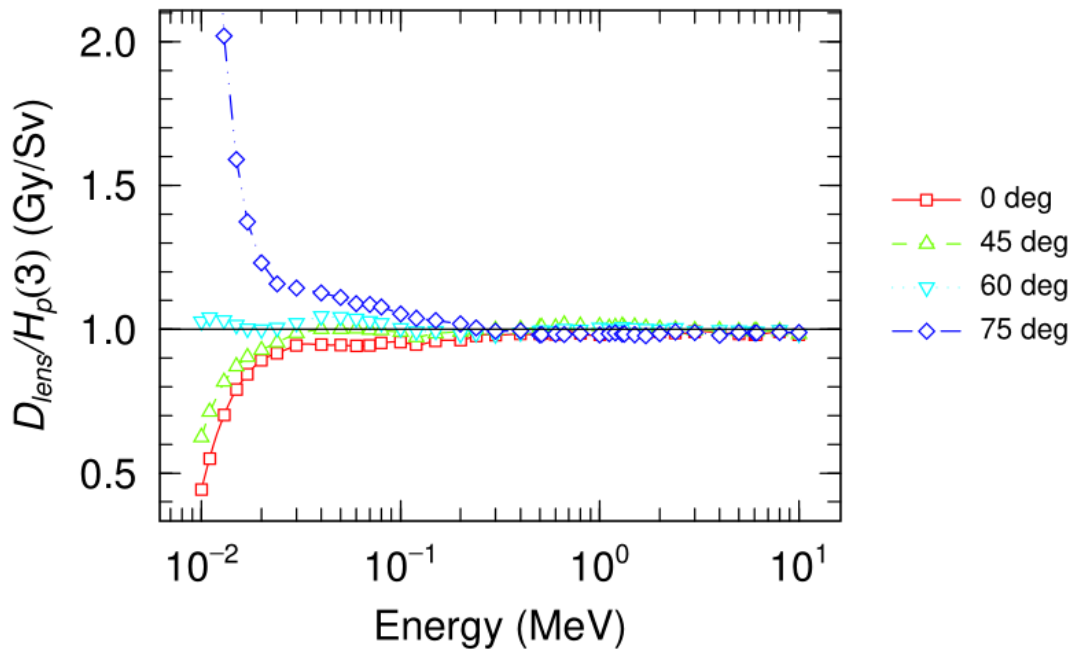


図 4-4 光子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリング
に関する現行・新実用量の比較

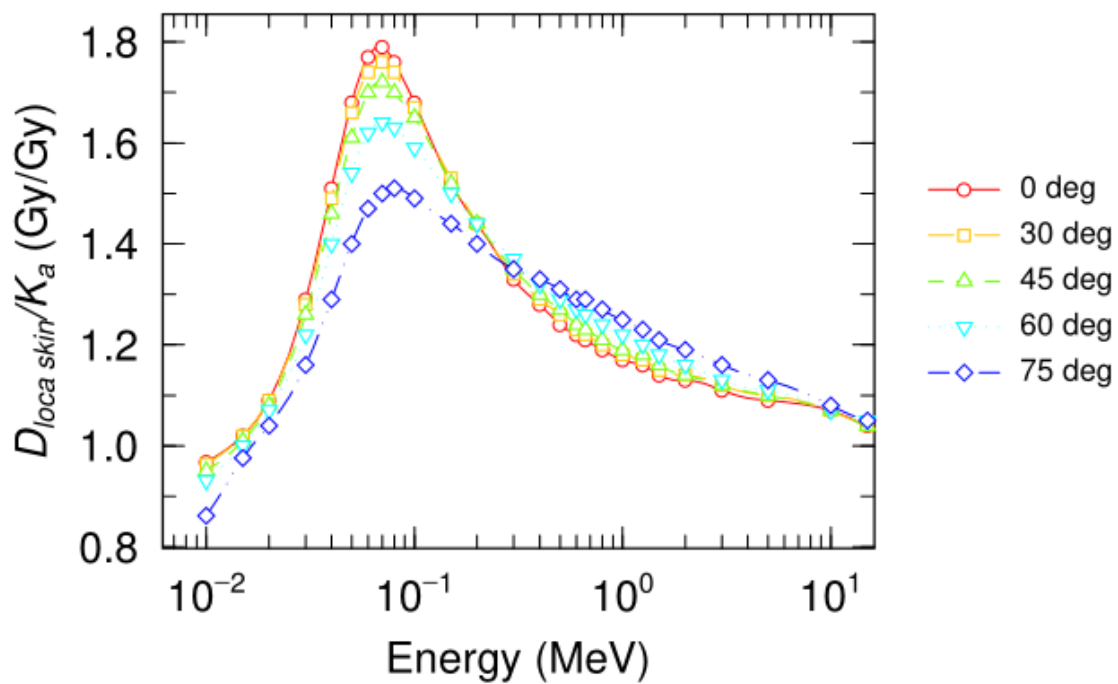


図 4-5 光子に対する局所皮膚吸収線量換算係数（カーマ近似、スラブファントム）

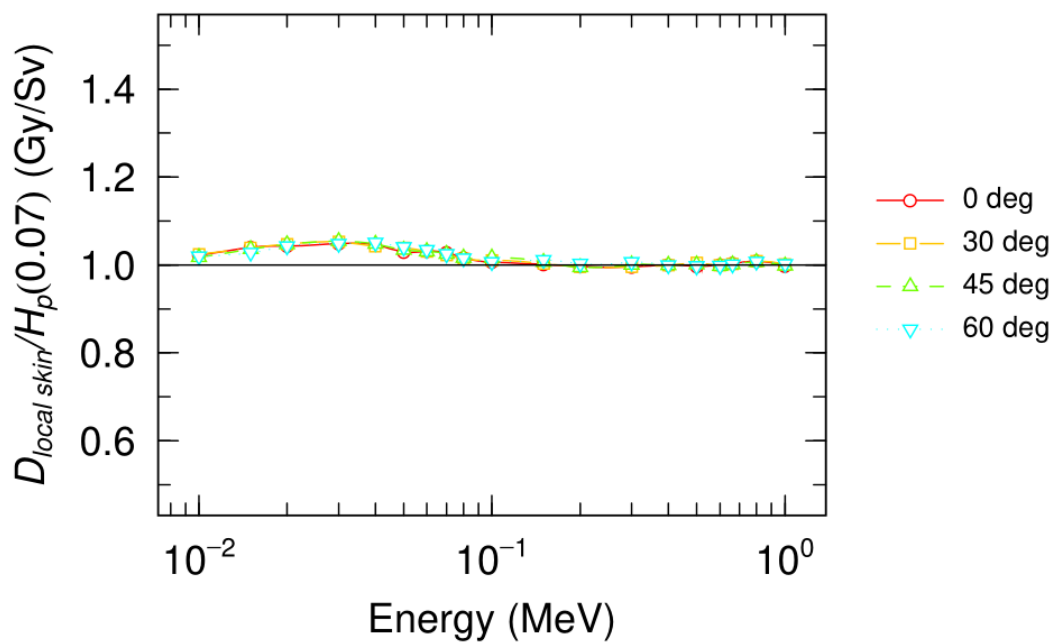


図 4-6 光子に対する皮膚の線量管理に用いる個人モニタリングに関する現行・新実用量の比較（スラブファントムに対するもの）

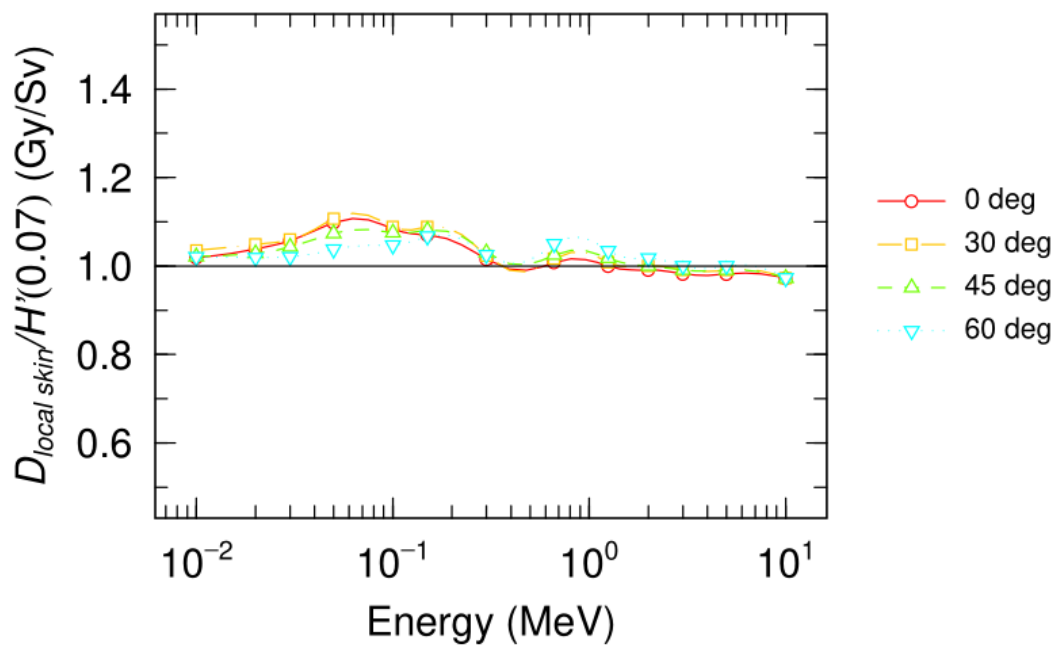


図 4-7 光子に対する皮膚の線量管理に用いる場所のモニタリングに関する現行・新実用量の比較

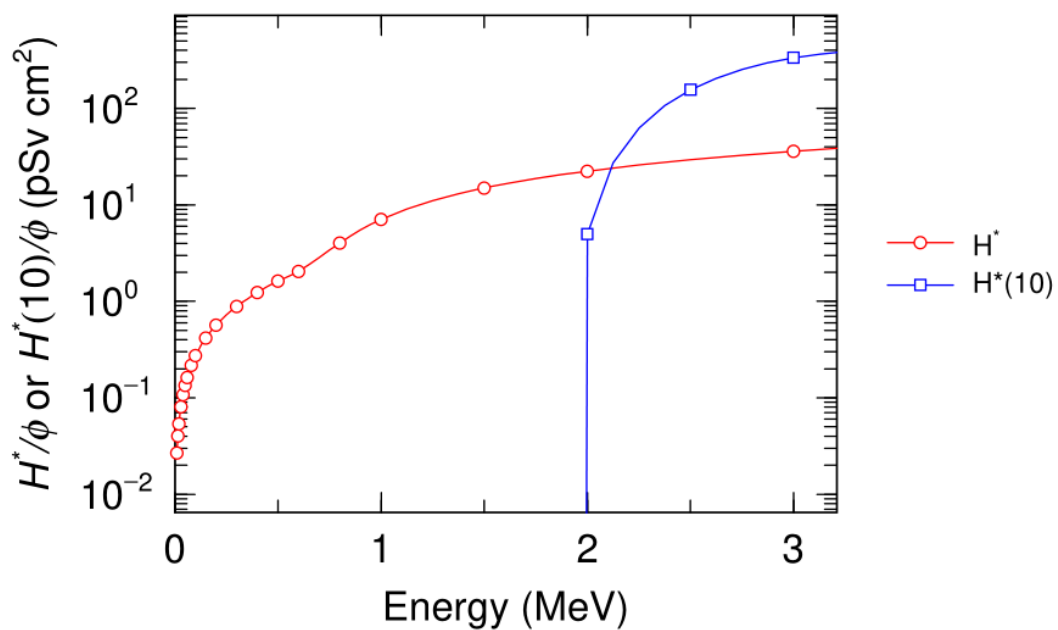


図 4-8 電子に対する周辺線量換算係数

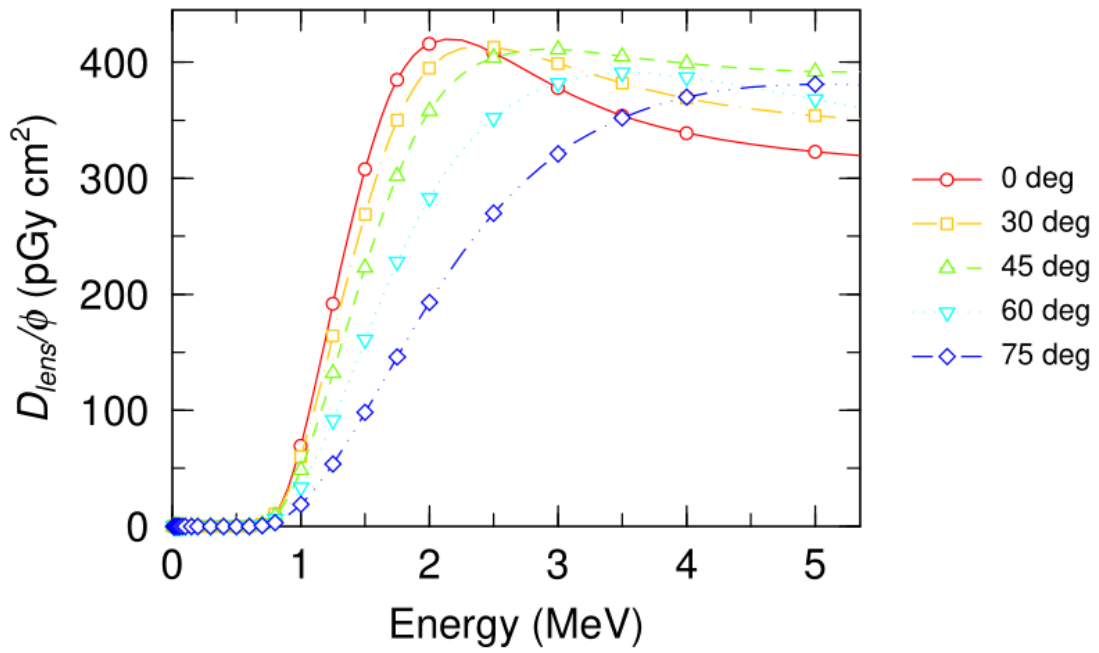


図 4-9 電子に対する水晶体吸収線量換算係数

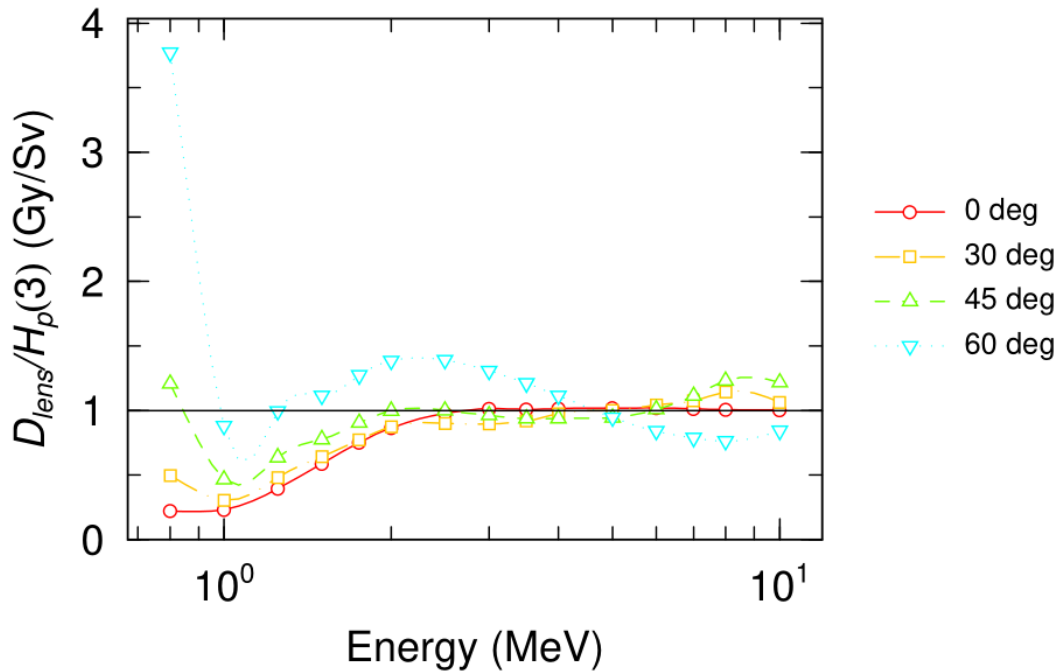


図 4-10 電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリングに関する現行・新実用量の比較

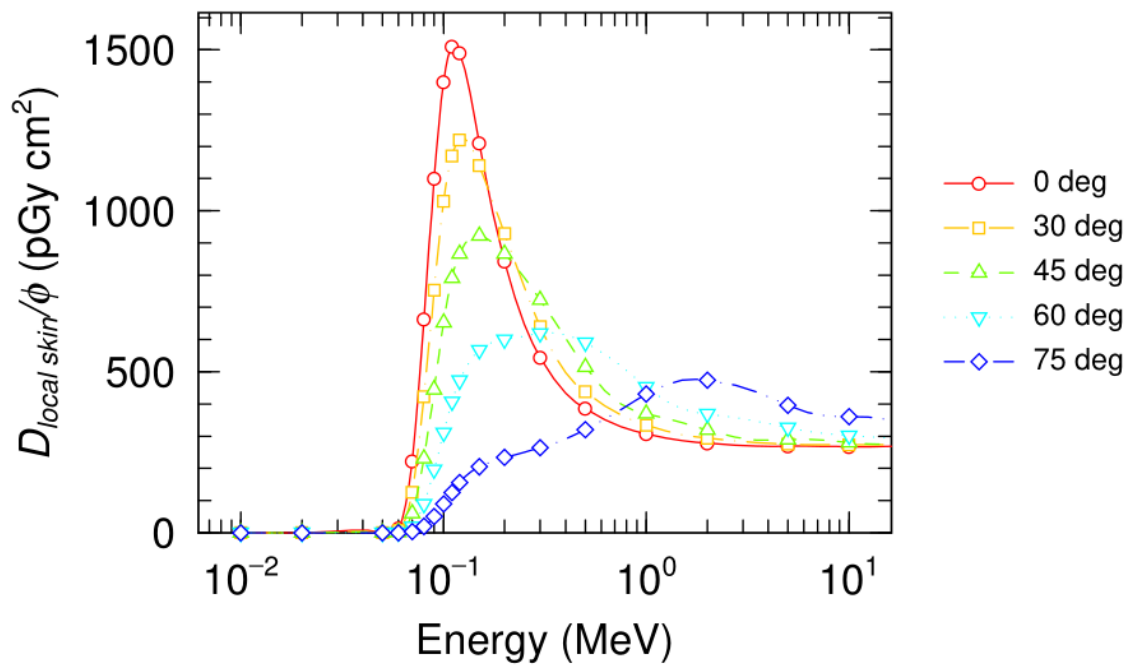


図 4-11 電子に対する皮膚吸収線量換算係数

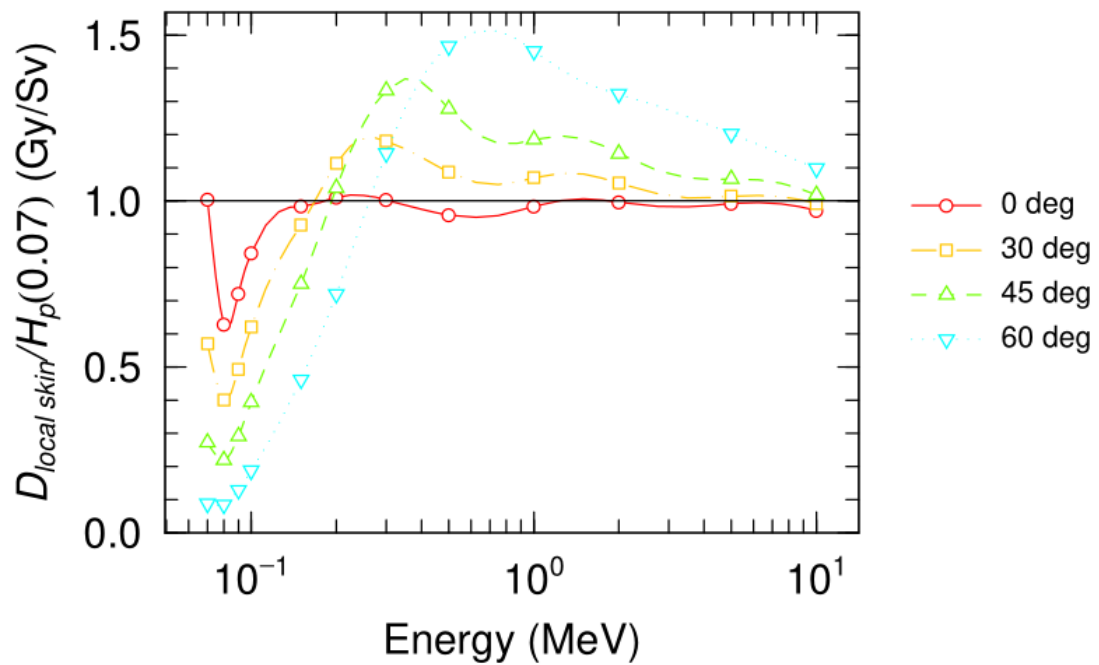


図 4-12 電子に対する皮膚の線量管理に用いる個人モニタリングに関する現行・新実用量の比較（スラブファントムに対するもの）

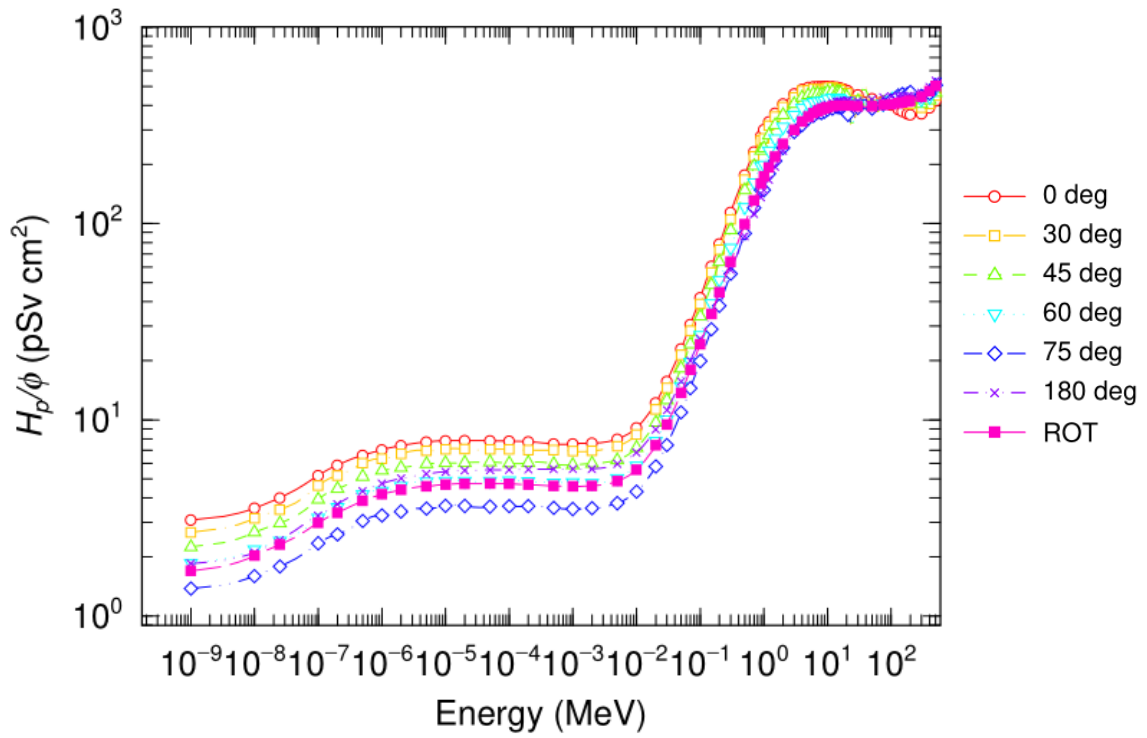


図 4-13 中性子に対する個人線量換算係数

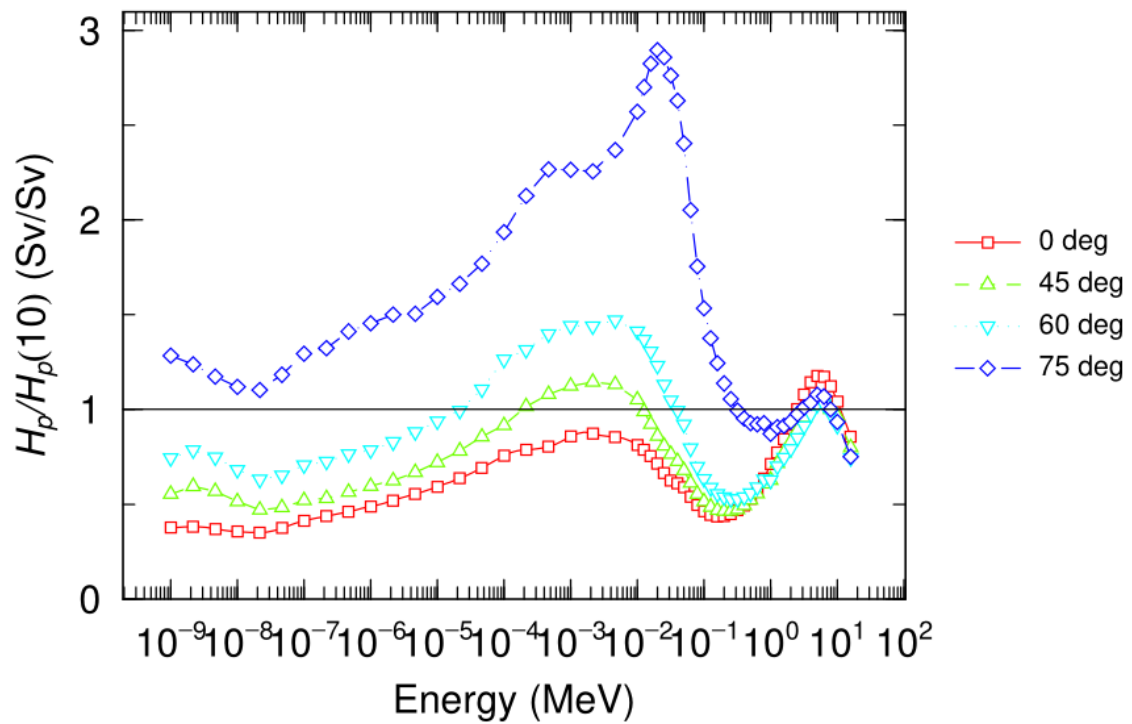


図 4-14 中性子に対する実効線量の管理に用いる個人モニタリング
に関する現行・新実用量の比較

4.2 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査

放射線管理において、測定の信頼性を確保するためには、測定に用いる線量計が適切に校正され、また使用される領域での応答を試験により把握しておくことが重要である。校正・試験を行うためには、まず使用する校正・試験場に対して新たな実用量に対する線量換算係数を評価する必要がある。令和3年度事業では、FRSに整備するISO 4037-1^[12] (JIS Z 4511^[13])に準拠した¹³⁷Cs、⁶⁰Co線源を使用した γ 線場及びN-40からN-300までのX線場、ISO 6980-1^[14] (JIS Z 4514^[15])に準拠した⁸⁵Kr及び⁹⁰Sr線源を使用した β 線場、ISO 8529-1^[16] (JIS Z 4521^[17])に準拠した²⁴¹Am-Be速中性子場、²⁵²Cf速中性子場及び熱中性子場について、周辺線量や 0° に対するその他の新たな実用量に対する線量換算係数が評価された。そこで、本事業では、 0° 以外の入射角度に対する換算係数の評価、及びFRSで整備する他の線質に対する線量換算係数を評価する。

4.1で示したとおり、周辺線量以外は入射角度によって基準となる線量も異なり、また一般に線量計の応答も変化する。また、定義変更に伴い、個人線量では 180° 照射(PA照射)でも線量換算係数が大きく減少することはないこと、回転照射(ROT照射)などの線量換算係数も示されていることから、これらも含めた方向特性試験の方法を開発し、線量計の方向特性評価に必要な環境を整備する。

これら放射線標準の国家計量標準は国立研究開発法人産業技術総合研究所が有しているが、放射線防護目的で実用に供する線量計の校正・試験を全て国家標準機関で実施することは現実的に不可能であり、現状においても計量トレーサビリティを確保した二次標準機関等で、線量計の校正・試験サービスが行われている。従って、新たな実用量が導入されたとしても、二次標準機関等における校正や試験が、国家標準機関での校正や試験と同等の結果を提供できることを検証しておく必要がある。そこで、本事業では、二次標準機関であるFRSで実施した線量計の特性試験結果と国家標準機関において評価した同型の線量計の試験結果との相互比較を実施することで、国家標準との同等性を確認する。

4.2.1 校正・試験場の線量換算係数の評価

4.2.1.1 γ 線

令和3年度事業では、¹³⁷Cs線源を用いた γ 線校正場(以下、ISO 4037-1^[12]やJIS Z 4511^[13]の記載方法に合わせて「S-Cs」と線質表記する。)及び⁶⁰Co線源を用いた γ 線校正場(以下「S-Co」と線質表記する。)について周辺線量及び 0° に対する個人線量、水晶体吸収線量及び局所皮膚吸収線量に係る線量換算係数が評価された。そこで、本事業

では0°以外の角度に対する線量換算係数を評価することとする。

(1) 方法

令和3年度事業と同様に、新たな実用量への線量換算係数を評価すると同時に現行実用量への線量換算係数を同じ方法を用いて評価することで妥当性を検証することとした。光子については、標準量が空気カーマ K_a であるため、空気カーマに対する換算係数として計算した。評価に用いた単色光子に対する線量換算係数は表4-2のとおりである。校正場においては、必要に応じてビルドアップ板を用いて電子平衡が成立した状態で校正を行うため、カーマ近似の線量換算係数を利用した。対応する現行実用量は、表中に示されているとおり $H_p(3)$ についてはシリンダーファントム、 $H_p(0.07)$ についてはスラブファントムの換算係数とし、それ以外のファントムに対する線量換算係数は本事業では対象としなかった。

表 4-2 評価に用いた単色光子に対する線量換算係数

現行実用量※1		新たな実用量※1	
$H^*(10)/K_a$	ICRP 74 ^[11] Table A.21	H^*/K_a	ICRU 95 ^[5] Table A.5.1b
$H'(3, \alpha)/K_a$	ISO 4037-3 ^[18] Table 7	$D'_{lens}(\alpha)/K_a$	ICRU 95 ^[5] Table A.5.3b
$H'(0.07, \alpha)/K_a$	ICRP 74 ^[11] Table A.21	$D'_{local\ skin}(\alpha)/K_a$	ICRU 95 ^[5] Table A.5.4.1b
$H_p(10, \alpha)/K_a$	ICRP 74 ^[11] Table A.24	$H_p(\alpha)/K_a$	ICRU 95 ^[5] Table A.5.2b
$H_p(3, \alpha)_{cyl}/K_a$	ISO 4037-3 ^[18] Table 39	$D_{plens}(\alpha)/K_a$	ICRU 95 ^[5] Table A.5.3b
$H_p(0.07, \alpha)_{slab}/K_a$	ISO 4037-3 ^[18] Table 33※2	$D_{p\ local\ skin}(\alpha)_{slab}/K_a$	ICRU 95 ^[5] Table A.5.4.1b

※1 α は入射角度を表す。

※2 $H_p(0.07, \alpha)_{slab}/K_a$ については、ICRP 74^[11]では1 MeVまでしか線量換算係数が示されていないため、ISO 4037-3^[18]の線量換算係数を用いた。

(a) S-Cs

FRS においては、コリメート付き線源または 4π 線源（表2-1参照）を用いてISO 4037-1^[12]やJIS Z 4511^[13]に準拠したS-Cs校正場を構築している。令和3年度事業と同様に、新たな実用量及び現行実用量に対する線量換算係数は以下の方法で評価し、比較した。

(i) 662 keVの単色光子として評価

662 keVの線量換算係数は表4-2で示される文献中の線量換算係数を引用した。直接記載されていない場合は、Log-Linearスケールで4点のLagrange補間により662 keVの線量換算係数を導出した。

(ii) FRS におけるコリメート付き校正場において測定評価した光子スペクトルから評価

FRS の第 1 照射室（大きさ：6.5 m×6.4 m×3.4 m^h）に設置された γ 線照射装置により構築される S-Cs 場（線源から 2.000 m）について、令和 3 年度事業で得られた光子スペクトル分布 $d\Phi/dE$ を利用して、以下の式により換算係数を算出した。

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\Phi_i}{\Delta E} \cdot (K_a/\Phi)(E_i) \cdot (H/K_a)(E_i) \cdot \Delta E}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\Phi_i}{\Delta E} \cdot (K_a/\Phi)(E_i) \cdot \Delta E} \quad (1)$$

$\Delta\Phi_i$ は $E_i \sim E_i + \Delta E$ のエネルギーをもつ光子のフルエンス、 $(K_a/\Phi)(E_i)$ は光子フルエンスから空気カーマへの換算係数であり ICRU Report 95^[5] Table A6 に示される数値を使用した。 $(H/K_a)(E_i)$ は、表 4-2 に示す空気カーマから各実用量 H への換算係数である。

(iii) FRS における 4π 線源を用いた校正場において測定評価した光子スペクトルから評価

FRS の第 1 照射室、第 3 照射室（大きさ：6.4 m×12.5 m×6.5 m^h）及び第 4 照射室（大きさ：12.5 m×12.5 m×11.7 m^h、床はグレーチング構造）において 4π 線源を用いて構築される S-Cs 場に対して、線源から 1.000 m、2.000 m 及び 3.000 m（第 1 照射室を除く）において令和 3 年度事業で得られた光子スペクトル分布 $d\Phi/dE$ を利用し、(ii) と同様の計算により線量換算係数を導出した。

(iv) 文献値（比較）

国際的に合意された新たな実用量に対する換算係数はないものの、国外で試算された報告^[19]があり、比較として示した。

(b) S-Co

評価した条件は、S-Cs と同様である。ただし、コリメータ付き校正場は校正距離 1.000 m、 4π 線源による校正場は、第 3 照射室における校正距離 2.000 m のみ評価した。評価方法(i)においては、⁶⁰Co の γ 線エネルギーは ICRP Publ.107^[20] より 1.17323 MeV（放出率 0.9985）及び 1.33249 MeV（放出率 0.999826）とした。

(2) 結果と考察

得られた S-Cs 校正場の線量換算係数を表 4-3～表 4-7 に、S-Co 校正場の線量換算係数を表 4-8～表 4-12 に示す。また、図 4-15～図 4-17 に S-Cs 校正場について、新・現行実用量に対する線量換算係数の角度依存性を比較図示した。

これらの結果から、S-Cs 及び S-Co 校正場にかかる新たな実用量に対する線量換算係数について、以下のことが示唆された。

- ・ 各校正場における散乱成分の違いにより、新たな実用量への線量換算係数も変わるが、その程度は最大でも S-Cs、S-Co ともに 3%であり、現行実用量における差異と同程度である。
- ・ 図から分かるように、S-Cs について H_p に対する線量換算係数の角度依存性は、現行実用量の $H_p(10)$ の角度依存性と異なり、 0° での比 ($H_p/H_p(10)$) は 0.84 であるが、角度が大きくなるにつれて小さくなり 75° では 0.74 となる。一方で、 180° 及び ROT においてもその線量換算係数は 75° よりも大きな値となり、 0° と比しても 8 割程度の値となる。これは S-Co についても同じ傾向である。これによって、線量計の方向特性が影響を受ける可能性がある。
- ・ 眼の水晶体の線量管理に用いる実用量については、数値的には大きな変化はないが、皮膚の線量管理に用いる実用量に関しては、場所のモニタリングに係る量についてもスラブファントムを用いて線量換算係数が計算されているため、角度依存性の傾向が異なり、これが線量計の方向特性に影響を与える可能性があるが、 75° でも高々 10%未満である。
- ・ 文献値との差異は、最大でも S-Cs で 3%、S-Co で 2%であり、現行実用量の文献値との差と同程度である。

(3) まとめ

FRS に整備する S-Cs 及び S-Co 校正場について新たな実用量に関する線量換算係数を評価した。令和 3 年度事業で得られた結果と合わせて、以降の線量計の特性試験に必要となる全ての量に対する線量換算係数が得られた。これらの線量換算係数は文献値と比較して 3%程度の差異に留まっている。現行の実用量について、JIS Z 4511^[13]によると、線量換算係数の標準不確かさは、特に断りのない限り 2%とすることとなっているため、これらの差異は拡張不確かさ 4% ($k=2$) の範囲内である。そのため、今後の解析にあたっては、文献値の線量換算係数を使用し、その標準不確かさとして 2%を与えることとする。

表 4-3 評価した S-Cs 校正場の線量換算係数 (1/5)

評価条件	$H_p(10, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)						$H_p(\alpha)/K_a$ (Sv/Gy)									
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT	
(i) 662 keV 単色光子	1.21	1.22	1.22	1.22	1.19	1.06	1.02	1.02	0.992	0.950	0.884	0.790	0.654	0.838	0.806	
(ii) FRS コリメータ付き校正場	1.22	1.23	1.23	1.23	1.19	1.06	1.02	1.02	0.996	0.953	0.885	0.789	0.651	0.838	0.807	
(iii) FRS 4 π 線源 (校正距離 1.000 m)	第4照射室	1.23	1.23	1.23	1.23	1.20	1.06	1.02	1.02	1.00	0.955	0.886	0.789	0.651	0.839	0.808
	第3照射室	1.23	1.24	1.24	1.23	1.20	1.06	1.03	1.03	1.00	0.956	0.888	0.790	0.651	0.840	0.809
	第1照射室	1.23	1.24	1.24	1.23	1.20	1.06	1.03	1.03	1.00	0.957	0.888	0.790	0.651	0.840	0.809
	第4照射室	1.24	1.24	1.24	1.24	1.20	1.06	1.03	1.03	1.00	0.958	0.889	0.790	0.651	0.840	0.809
	第3照射室	1.25	1.25	1.25	1.25	1.21	1.06	1.04	1.04	1.01	0.963	0.892	0.790	0.648	0.842	0.811
	第1照射室	1.26	1.26	1.26	1.25	1.21	1.07	1.04	1.04	1.01	0.965	0.893	0.791	0.649	0.843	0.813
(iii) FRS 4 π 線源 (校正距離 2.000 m)	第4照射室	1.24	1.25	1.25	1.24	1.21	1.06	1.03	1.03	1.01	0.961	0.891	0.791	0.650	0.842	0.811
	第3照射室	1.26	1.27	1.26	1.26	1.21	1.07	1.04	1.04	1.01	0.968	0.895	0.791	0.648	0.844	0.814
(iv) 文献値 ^[19]	1.21	1.22	1.22	1.22	1.19	1.06	1.0158	1.0181	0.9938	0.9509	0.8838	0.7886	0.6518	0.8368	0.8058	

表 4-4 評価した S-Cs 校正場の線量換算係数 (2/5)

評価条件	$H'(3, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)									$H_p(3, \alpha)_{cyl}/K_a$ (Sv/Gy)						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
(i) 662 keV 単色光子	1.18	1.19	1.20	1.20	1.21	1.20	1.08	0.236	1.18	1.18	1.19	1.19	1.20	1.19	1.10	
(ii) FRS コリメータ付き校正場	1.19	1.20	1.21	1.21	1.22	1.21	1.08	0.230	1.19	1.19	1.19	1.20	1.20	1.20	1.10	
FRS 4 π 線源 (校正距離 1.000 m)	第4照射室	1.19	1.20	1.21	1.21	1.22	1.21	1.08	0.230	1.19	1.19	1.20	1.20	1.21	1.20	1.10
	第3照射室	1.19	1.20	1.21	1.21	1.22	1.21	1.08	0.230	1.20	1.20	1.20	1.21	1.21	1.20	1.10
	第1照射室	1.20	1.20	1.21	1.21	1.22	1.21	1.08	0.228	1.20	1.20	1.20	1.21	1.21	1.20	1.10
(iii) FRS 4 π 線源 (校正距離 2.000 m)	第4照射室	1.20	1.21	1.21	1.21	1.22	1.21	1.08	0.227	1.20	1.20	1.20	1.21	1.21	1.20	1.10
	第3照射室	1.21	1.22	1.23	1.23	1.23	1.21	1.08	0.221	1.21	1.21	1.21	1.22	1.22	1.21	1.11
	第1照射室	1.21	1.22	1.23	1.23	1.23	1.22	1.08	0.221	1.21	1.21	1.21	1.22	1.22	1.21	1.11
FRS 4 π 線源 (校正距離 3.000 m)	第4照射室	1.20	1.21	1.22	1.22	1.23	1.21	1.08	0.226	1.20	1.20	1.21	1.21	1.21	1.21	1.11
	第3照射室	1.22	1.23	1.23	1.23	1.24	1.22	1.08	0.219	1.22	1.22	1.22	1.22	1.23	1.22	1.11
(iv) 文献値 ^[19]	1.19	1.19	1.20	1.21	1.21	1.20	1.08	0.232	1.18	1.19	1.19	1.20	1.20	1.19	1.11	

表 4-5 評価した S-Cs 校正場の線量換算係数 (3/5)

評価条件	D'_{lens/K_a} or $D_{\text{p lens}/K_a}$ (Gy/Gy)								
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT	
(i) 662 keV 単色光子	1.17	1.17	1.19	1.21	1.20	1.17	1.17	0.935	
(ii) FRS コリメータ付き校正場	1.18	1.18	1.20	1.22	1.20	1.18	1.18	0.935	
FRS 4 π 線源 (校正距離 1.000 m)	第4照射室	1.18	1.18	1.20	1.22	1.21	1.18	1.18	0.935
	第3照射室	1.18	1.18	1.20	1.22	1.21	1.18	1.18	0.936
	第1照射室	1.18	1.18	1.20	1.22	1.21	1.18	1.18	0.936
(iii) FRS 4 π 線源 (校正距離 2.000 m)	第4照射室	1.18	1.18	1.20	1.22	1.21	1.18	1.18	0.936
	第3照射室	1.19	1.19	1.21	1.23	1.22	1.19	1.19	0.937
	第1照射室	1.19	1.19	1.21	1.23	1.22	1.19	1.19	0.938
FRS 4 π 線源 (校正距離 3.000 m)	第4照射室	1.19	1.19	1.21	1.23	1.22	1.19	1.19	0.937
	第3照射室	1.20	1.20	1.22	1.24	1.22	1.20	1.19	0.939
(iv) 文献値 ^[19]	1.1721	1.1734	1.1910	1.2111	1.2010	1.1733	1.1732	0.9337	

表 4-6 評価した S-Cs 校正場の線量換算係数 (4/5)

評価条件	$H'(0.07, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)									$H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}/K_a$ (Sv/Gy)					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	
(i) 662 keV 単色光子	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.18	1.07	0.216	1.21	1.22	1.22	1.22	1.19	1.06	
(ii) FRS コリメータ付き校正場	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.18	1.07	0.211	1.22	1.23	1.24	1.26	1.28	1.29	
FRS 4 π 線源 (校正距離 1.000 m)	第4照射室	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.19	1.08	0.210	1.22	1.23	1.24	1.26	1.28	1.29
	第3照射室	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.19	1.08	0.210	1.23	1.23	1.25	1.27	1.29	1.29
	第1照射室	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.19	1.08	0.211	1.23	1.23	1.25	1.27	1.29	1.29
(iii) FRS 4 π 線源 (校正距離 2.000 m)	第4照射室	1.21	1.21	1.21	1.21	1.22	1.19	1.08	0.210	1.23	1.23	1.25	1.27	1.29	1.29
	第3照射室	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.20	1.09	0.204	1.24	1.25	1.26	1.28	1.29	1.30
	第1照射室	1.23	1.22	1.22	1.22	1.23	1.20	1.09	0.204	1.24	1.25	1.26	1.28	1.29	1.30
FRS 4 π 線源 (校正距離 3.000 m)	第4照射室	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.20	1.08	0.209	1.24	1.24	1.26	1.27	1.29	1.29
	第3照射室	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.21	1.09	0.203	1.25	1.25	1.27	1.28	1.30	1.30
(iv) 文献値 ^[19]	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.18	1.07	0.21	1.21	1.22	1.22	1.23	1.26	1.28	

表 4-7 評価した S-Cs 校正場の線量換算係数 (5/5)

評価条件	$D'_{\text{local skin}}(\alpha)/K_a$ or $D_p \text{ local skin}(\alpha)/K_a$ (Gy/Gy)						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	
(i) 662 keV 単色光子	1.21	1.21	1.22	1.23	1.26	1.29	
(ii) FRS コリメータ付き校正場	1.22	1.22	1.23	1.24	1.27	1.29	
FRS 4 π 線源 (校正距離 1.000 m)	第4照射室	1.22	1.22	1.23	1.24	1.27	1.30
	第3照射室	1.23	1.23	1.23	1.24	1.27	1.30
	第1照射室	1.23	1.23	1.24	1.25	1.27	1.30
(iii) FRS 4 π 線源 (校正距離 2.000 m)	第4照射室	1.23	1.23	1.24	1.25	1.27	1.30
	第3照射室	1.24	1.24	1.25	1.26	1.28	1.30
	第1照射室	1.24	1.24	1.25	1.26	1.29	1.30
FRS 4 π 線源 (校正距離 3.000 m)	第4照射室	1.24	1.24	1.24	1.25	1.28	1.30
	第3照射室	1.25	1.25	1.26	1.27	1.29	1.31
(iv) 文献値 ^[19]	1.2136	1.2136	1.2238	1.2337	1.2634	1.2909	

表 4-8 評価した S-Co 校正場の線量換算係数 (1/5)

評価条件	$H_p(10, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)						$H_p(\alpha)/K_a$ (Sv/Gy)								
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT
(i) 1.17323 MeV+1.33249 MeV 光子	1.15	1.15	1.15	1.16	1.14	1.06	1.00	0.995	0.980	0.949	0.903	0.829	0.714	0.865	0.838
(ii) FRS コリメータ付き校正場	1.16	1.16	1.15	1.16	1.15	1.06	1.00	1.00	0.981	0.950	0.902	0.827	0.710	0.863	0.836
(iii) FRS 4π 線源	1.17	1.17	1.17	1.18	1.16	1.06	1.01	1.01	0.989	0.955	0.905	0.825	0.705	0.864	0.837
(iv) 文献値 ^[19]	1.15	1.15	1.15	1.16	1.14	1.10	0.9971	0.9949	0.9819	0.9499	0.9029	0.8276	0.7116	0.8631	0.8376

表 4-9 評価した S-Co 校正場の線量換算係数 (2/5)

評価条件	$H'(3, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)							$H_p(3, \alpha)_{cyl}/K_a$ (Sv/Gy)							
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
(i) 1.17323 MeV+1.33249 MeV 光子	1.15	1.15	1.15	1.15	1.16	1.16	1.08	0.348	1.13	1.13	1.14	1.14	1.15	1.15	1.10
(ii) FRS コリメータ付き校正場	1.15	1.15	1.15	1.16	1.16	1.16	1.08	0.341	1.14	1.14	1.15	1.15	1.16	1.16	1.10
(iii) FRS 4π 線源	1.17	1.17	1.17	1.17	1.18	1.17	1.08	0.330	1.15	1.15	1.16	1.16	1.17	1.16	1.10
(iv) 文献値 ^[19]	1.15	1.15	1.15	1.16	1.17	1.17	1.08	0.345	1.14	1.14	1.14	1.15	1.16	1.15	1.10

表 4-10 評価した S-Co 校正場の線量換算係数 (3/5)

評価条件	D'_{lens}/K_a or D_{plens}/K_a (Gy/Gy)							
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT
(i) 1.17323 MeV+1.33249 MeV 光子	1.12	1.14	1.15	1.15	1.15	1.14	1.13	0.954
(ii) FRS コリメータ付き校正場	1.13	1.14	1.15	1.16	1.15	1.14	1.14	0.952
(iii) FRS 4π 線源	1.14	1.15	1.16	1.17	1.16	1.15	1.15	0.953
(iv) 文献値 ^[19]	1.1276	1.1366	1.1466	1.1579	1.1543	1.1366	1.1374	0.9528

表 4-1 1 評価した S-Co 校正場の線量換算係数 (4/5)

評価条件	$H'(0.07, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)							$H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}/K_a$ (Sv/Gy)						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	0°	15°	30°	45°	60°	75°
(i) 1.17323 MeV+1.33249 MeV 光子	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.14	1.04	0.348	1.16	1.17	1.18	1.20	1.23	1.23
(ii) FRS コリメータ付き校正場	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.14	1.05	0.340	1.16	1.17	1.18	1.20	1.24	1.23
(iii) FRS 4π 線源	1.17	1.17	1.17	1.17	1.18	1.15	1.05	0.329	1.18	1.19	1.19	1.21	1.25	1.24
(iv) 文献値 ^[19]	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.14	1.04	0.34	1.17	1.17	1.17	1.18	1.21	1.23

表 4-1 2 評価した S-Co 校正場の線量換算係数 (5/5)

評価条件	$D'_{\text{local skin}}(\alpha)/K_a$ or $D_{\text{p local skin}}(\alpha)/K_a$ (Gy/Gy)					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
(i) 1.17323 MeV+1.33249 MeV 光子	1.16	1.16	1.17	1.18	1.20	1.23
(ii) FRS コリメータ付き校正場	1.16	1.16	1.17	1.18	1.20	1.23
(iii) FRS 4π 線源	1.18	1.18	1.19	1.20	1.22	1.24
(iv) 文献値 ^[19]	1.1606	1.1606	1.1706	1.1806	1.2021	1.2317

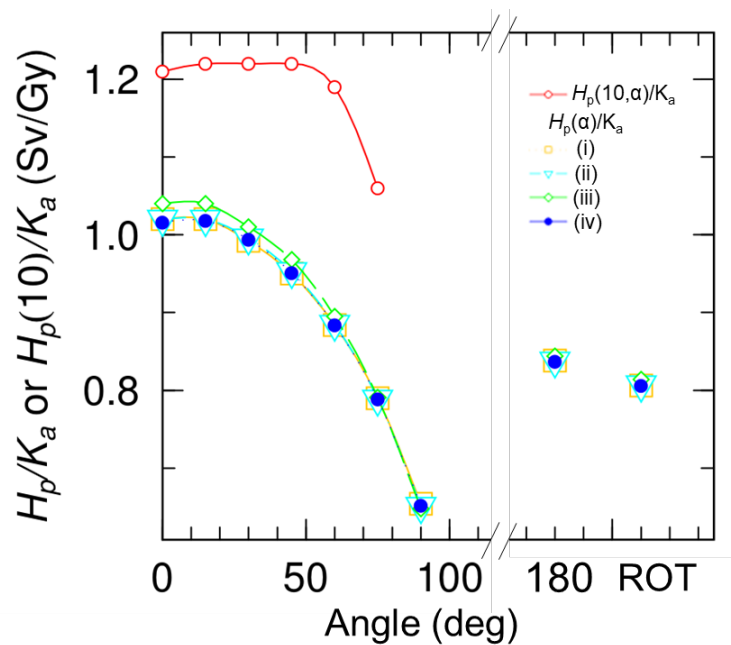


図 4-15 FRS の S-Cs 校正場における現行実用量 $H_p(10)$ と新たな実用量 H_p に対する線量換算係数の角度依存性

現行実用量については文献値、新たな実用量については、(i)~(iv)の各評価方法により求めた線量換算係数を示した。ただし、(iii)については、最もずれの大きい第 3 照射室、校正距離 3.000m のデータを図示した。

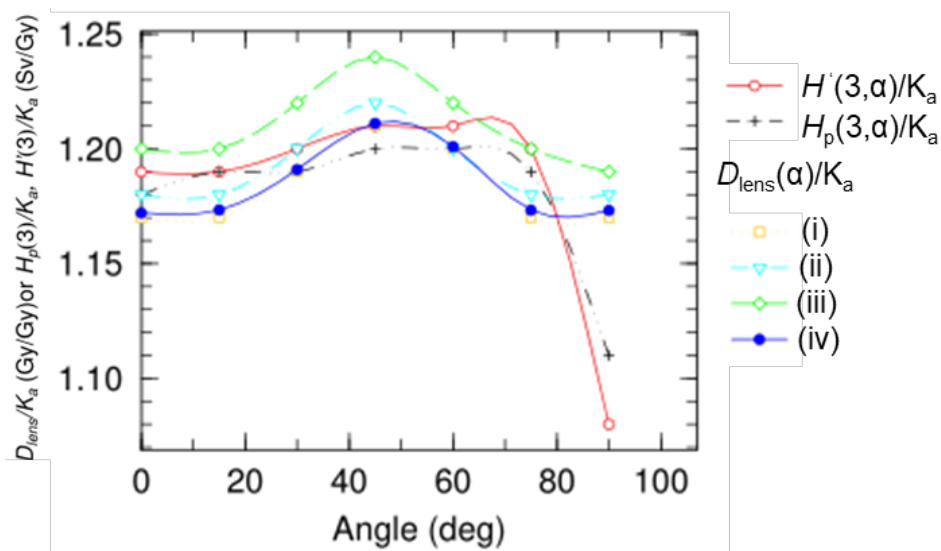


図 4-16 FRS の S-Cs 校正場における現行実用量 $H_p(3)$ 及び $H'(3)$ と新たな実用量 D_{lens} に対する線量換算係数の角度依存性

現行実用量については文献値、新たな実用量については、(i)~(iv)の各評価方法により求めた線量換算係数を示した。ただし、(iii)については、最もずれの大きい第 3 照射室、校正距離 3.000m のデータを図示した。

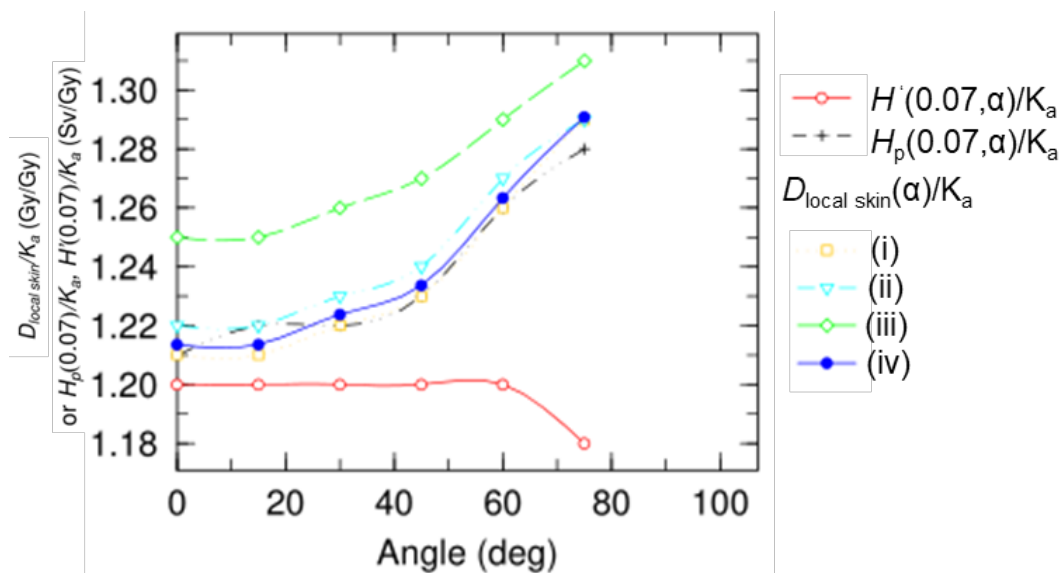


図 4-17 FRS の S-Cs 校正場における現行実用量 $H_p(0.07)$ 及び $H'(0.07)$ と新たな実用量 $D_{local\ skin}$ に対する線量換算係数の角度依存性

現行実用量については文献値、新たな実用量については、(i)~(iv)の各評価方法により求めた線量換算係数を示した。ただし、(iii)については、最もずれの大きい第 3 照射室、校正距離 3.000m のデータを図示した。

4.2.1.2 X線

低エネルギー領域の光子による校正・試験は X 線校正場を用いて行われる。X 線発生装置で発生する光子は X 線管電圧に対応するエネルギーを最大値とする連続スペクトルを有しているが、ISO 4037-1^[12]や JIS Z 4511^[13]では、フィルターを付加することによりいくつかの線質を規定している。そのうち、狭スペクトルシリーズ (N シリーズ) は、校正やエネルギー特性試験に適した線質として定められている。令和 3 年度事業では、これらで規定されている N-40 から N-300 までの X 線場について周辺線量及び 0° に対する個人線量、水晶体吸収線量及び局所皮膚吸収線量に係る線量換算係数が評価された。そこで、本事業では 0° 以外の角度に対する線量換算係数を評価することとした。

(1) 方法

令和 3 年度事業と同様の以下の方法で評価した。X 線についても、標準量が空気カーマ K_a であるため、空気カーマに対する線量換算係数として計算した。評価に用いた単色光子に対する線量換算係数は表 4-2 のとおりである。

(i) ISO 4037-1^[12]の標準スペクトル^[21]で加重して線量換算係数を評価

使用した標準スペクトルは距離 1 m のものとし、(1)式により線量換算係数を算出した。

(ii) 実効エネルギーに対して線量換算係数を評価

JIS Z 4511^[13]では、40 kV 以上の線質においては、実効エネルギーに該当する線量当量換算係数を利用してもよいことになっているため、新たな実用量に関してもこの方法によって換算係数を試算した。実効エネルギーは文献[22]によった。換算係数は、表 4-2 で示される文献中の値を Log-Linear スケールで 4 点の Lagrange 補間により、線量換算係数を評価した。

(iii) 文献値

国際的に合意された新たな実用量に対する換算係数は示されていないものの、試算した報告^[19]があり、比較として示した。

(2) 結果と考察

評価した換算係数を表 4-1 3～表 4-2 2 に示す。これらの結果から、X 線校正場にかかる新たな実用量に対する線量換算係数について、以下のことが示唆された。

- γ 線場と同様、X 線場においても、 H_p に対する線量換算係数の角度依存性は、現行実用量とは異なる。これにより、線量計の方向特性が影響を受ける可能性がある。
- 文献値との差異は、180°照射など数値が小さくなるものを除き、概ね 2%以内に収まっているが、N-40 の H_p に対して実効エネルギーから評価した線量換算係数は 6～10%小さくなっており、40keV 以下の線量換算係数が大きく落ち込む領域では、スペクトル形状を考慮した評価が必要である。
- $D_{\text{local skin}}$ については、N-250 以下の線質では、 γ 線領域とは異なり、入射角の増大とともに、線量換算係数は減少する。

(3) まとめ

令和 3 年度事業の結果と合わせて、線量計の特性評価に必要な FRS で整備する N シリーズの X 線校正場に関する線量換算係数は全て整備した。評価した値は文献値^[19]と同等であり妥当性が確認できたため、以後の解析にあたっては、文献に示されている (iii) の線量換算係数を使用し、その標準不確かさとして 2%を与えることとする。今回の調査では、FRS の場での半価層が ISO 規格に記載されている半価層と同じであるとみなせることから ISO 標準スペクトルに対する評価とした。しかし、新たな実用量下においても半価層が同じであれば同一線質とみなして同じ線量換算係数を使用することが妥当か、校正場における光子スペクトルを詳細に評価して今後検証していくことが望ましい。

表 4-13 評価した X 線校正場の換算係数 (1/10)

線質	評価 手法	$H_p(10, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)						$H_p(\alpha)/K_a$ (Sv/Gy)								
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT
N-40	(i)	1.20	1.18	1.15	1.06	0.876	0.526	0.522	0.515	0.485	0.430	0.357	0.264	0.170	0.192	0.278
	(ii)	1.18	1.16	1.13	1.04	0.860	0.511	0.492	0.486	0.456	0.404	0.335	0.246	0.156	0.168	0.257
	(iii)	1.21	1.19	1.15	1.06	0.88	0.53	0.5222	0.5150	0.4851	0.4305	0.3574	0.2642	0.1705	0.1929	0.2781
N-60	(i)	1.68	1.66	1.62	1.49	1.30	0.863	1.02	1.00	0.957	0.857	0.725	0.560	0.388	0.547	0.608
	(ii)	1.68	1.66	1.62	1.49	1.30	0.863	1.02	1.00	0.957	0.857	0.725	0.560	0.388	0.547	0.608
	(iii)	1.66	1.64	1.60	1.49	1.29	0.86	1.0139	0.9990	0.9502	0.8516	0.7227	0.5596	0.3883	0.5508	0.6080
N-80	(i)	1.89	1.88	1.84	1.73	1.51	1.08	1.36	1.35	1.28	1.16	1.01	0.794	0.573	0.874	0.876
	(ii)	1.91	1.89	1.85	1.75	1.52	1.09	1.38	1.37	1.30	1.18	1.02	0.803	0.578	0.883	0.884
	(iii)	1.89	1.87	1.83	1.72	1.51	1.07	1.3639	1.3485	1.2804	1.1616	1.0045	0.7935	0.5726	0.8733	0.8757
N-100	(i)	1.88	1.87	1.82	1.73	1.53	1.12	1.43	1.41	1.34	1.23	1.07	0.856	0.631	0.973	0.951
	(ii)	1.89	1.89	1.84	1.74	1.54	1.13	1.44	1.43	1.36	1.24	1.08	0.862	0.636	0.986	0.963
	(iii)	1.88	1.87	1.82	1.73	1.53	1.12	1.4256	1.4134	1.3429	1.2280	1.0706	0.8559	0.6308	0.9734	0.9520
N-120	(i)	1.80	1.79	1.76	1.67	1.51	1.11	1.39	1.37	1.31	1.20	1.05	0.854	0.634	0.967	0.938
	(ii)	1.81	1.80	1.76	1.68	1.51	1.11	1.40	1.38	1.31	1.21	1.06	0.859	0.636	0.971	0.942
	(iii)	1.80	1.79	1.75	1.67	1.51	1.11	1.3933	1.3727	1.3047	1.2045	1.0552	0.8554	0.6337	0.9662	0.9374
N-150	(i)	1.72	1.71	1.68	1.61	1.46	1.10	1.33	1.31	1.26	1.16	1.02	0.833	0.624	0.939	0.909
	(ii)	1.73	1.72	1.69	1.61	1.47	1.10	1.34	1.32	1.26	1.17	1.02	0.837	0.626	0.944	0.912
	(iii)	1.72	1.71	1.68	1.61	1.46	1.10	1.3369	1.3114	1.2542	1.1616	1.0207	0.8362	0.6239	0.9379	0.9069

表 4-14 評価した X 線校正場の換算係数 (2/10)

線質	評価 手法	$H_p(10, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)						$H_p(\alpha)/K_a$ (Sv/Gy)								
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT
N-200	(i)	1.56	1.56	1.54	1.49	1.38	1.09	1.22	1.20	1.16	1.08	0.955	0.794	0.605	0.883	0.856
	(ii)	1.56	1.56	1.54	1.49	1.38	1.09	1.21	1.20	1.16	1.08	0.95	0.794	0.604	0.882	0.855
	(iii)	1.56	1.56	1.54	1.49	1.38	1.08	1.2148	1.2030	1.1602	1.0766	0.9538	0.7930	0.6045	0.8830	0.8555
N-250	(i)	1.48	1.47	1.46	1.42	1.33	1.08	1.15	1.15	1.104	1.034	0.926	0.778	0.599	0.855	0.830
	(ii)	1.48	1.47	1.47	1.42	1.34	1.08	1.15	1.15	1.10	1.03	0.93	0.778	0.598	0.854	0.830
	(iii)	1.48	1.47	1.46	1.42	1.33	1.08	1.1514	1.1510	1.1017	1.0337	0.9262	0.7785	0.5990	0.8545	0.8304
N-300	(i)	1.42	1.42	1.41	1.38	1.30	1.06	1.12	1.11	1.074	1.008	0.909	0.770	0.599	0.842	0.816
	(ii)	1.42	1.41	1.41	1.38	1.30	1.06	1.11	1.11	1.07	1.01	0.91	0.769	0.598	0.841	0.815
	(iii)	1.42	1.42	1.41	1.38	1.30	1.07	1.1164	1.1140	1.0706	1.0083	0.9099	0.7713	0.5992	0.8413	0.8163

表 4-15 評価した X 線校正場の換算係数 (3/10)

線質	評価 手法	$H'(3, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)								$H_p(3, \alpha)_{cyl}/K_a$ (Sv/Gy)						
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
N-40	(i)	1.28	1.27	1.26	1.22	1.14	0.976	0.535	0.0013	1.277	1.267	1.253	1.223	1.152	1.001	0.651
	(ii)	1.26	1.25	1.25	1.21	1.13	0.967	0.525	0.0006	1.264	1.254	1.242	1.212	1.142	0.992	0.640
	(iii)	1.27	1.26	1.25	1.21	1.14	0.967	0.528	0.0021	1.28	1.27	1.25	1.22	1.15	1.00	0.65
N-60	(i)	1.55	1.54	1.52	1.48	1.40	1.24	0.816	0.0185	1.54	1.53	1.51	1.48	1.41	1.27	0.950
	(ii)	1.56	1.55	1.53	1.49	1.41	1.25	0.823	0.0168	1.55	1.54	1.52	1.49	1.42	1.28	0.956
	(iii)	1.54	1.54	1.52	1.48	1.4	1.24	0.811	0.0188	1.54	1.53	1.51	1.48	1.41	1.27	0.95
N-80	(i)	1.68	1.68	1.66	1.62	1.55	1.39	0.994	0.0491	1.66	1.66	1.64	1.61	1.55	1.42	1.12
	(ii)	1.69	1.70	1.67	1.63	1.56	1.40	1.00	0.0483	1.67	1.67	1.65	1.62	1.56	1.42	1.13
	(iii)	1.68	1.68	1.66	1.62	1.55	1.40	0.989	0.0488	1.66	1.65	1.64	1.6	1.54	1.42	1.12
N-100	(i)	1.67	1.66	1.65	1.62	1.55	1.42	1.05	0.0694	1.63	1.63	1.62	1.59	1.55	1.44	1.17
	(ii)	1.67	1.66	1.65	1.62	1.56	1.43	1.05	0.0699	1.64	1.64	1.62	1.60	1.56	1.45	1.18
	(iii)	1.66	1.66	1.64	1.61	1.55	1.42	1.05	0.0686	1.63	1.63	1.62	1.59	1.54	1.44	1.17
N-120	(i)	1.60	1.60	1.59	1.56	1.51	1.40	1.06	0.0786	1.58	1.58	1.57	1.55	1.51	1.42	1.17
	(ii)	1.61	1.61	1.60	1.57	1.52	1.41	1.06	0.0789	1.58	1.58	1.57	1.55	1.51	1.42	1.17
	(iii)	1.60	1.60	1.59	1.56	1.52	1.40	1.06	0.0781	1.58	1.58	1.57	1.55	1.51	1.42	1.17
N-150	(i)	1.53	1.53	1.53	1.51	1.47	1.38	1.05	0.0838	1.52	1.52	1.51	1.50	1.47	1.40	1.16
	(ii)	1.53	1.53	1.53	1.51	1.47	1.37	1.05	0.0836	1.53	1.53	1.52	1.51	1.47	1.40	1.17
	(iii)	1.54	1.54	1.53	1.51	1.48	1.38	1.06	0.0837	1.52	1.52	1.51	1.50	1.47	1.40	1.16

表 4-16 評価した X 線校正場の換算係数 (4/10)

線質	評価 手法	$H'(3, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)								$H_p(3, \alpha)_{cyl}/K_a$ (Sv/Gy)						
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
N-200	(i)	1.44	1.44	1.43	1.43	1.41	1.33	1.06	0.0980	1.42	1.42	1.41	1.41	1.40	1.35	1.15
	(ii)	1.44	1.44	1.43	1.43	1.41	1.34	1.06	0.0973	1.42	1.42	1.41	1.41	1.40	1.35	1.15
	(iii)	1.44	1.44	1.44	1.43	1.41	1.34	1.06	0.0981	1.42	1.42	1.42	1.42	1.40	1.34	1.15
N-250	(i)	1.38	1.38	1.38	1.37	1.37	1.30	1.06	0.113	1.36	1.36	1.36	1.36	1.35	1.31	1.14
	(ii)	1.38	1.38	1.38	1.37	1.36	1.30	1.06	0.113	1.36	1.36	1.36	1.36	1.35	1.31	1.14
	(iii)	1.38	1.38	1.38	1.38	1.37	1.31	1.06	0.113	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.31	1.14
N-300	(i)	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.28	1.07	0.126	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.29	1.13
	(ii)	1.33	1.33	1.34	1.34	1.34	1.28	1.07	0.126	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.29	1.13
	(iii)	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.29	1.07	0.125	1.32	1.33	1.33	1.33	1.32	1.29	1.13

表 4-17 評価した X 線校正場の換算係数 (5/10)

線質	評価 手法	D'_{lens}/K_a or $D_{\text{p lens}}/K_a$ (Gy/Gy)							
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT
N-40	(i)	1.20	1.22	1.22	1.21	1.19	1.14	1.06	0.655
	(ii)	1.19	1.21	1.21	1.20	1.17	1.13	1.05	0.645
	(iii)	1.2040	1.2171	1.2161	1.2088	1.1845	1.1413	1.0569	0.6552
N-60	(i)	1.46	1.47	1.48	1.48	1.47	1.42	1.34	0.873
	(ii)	1.47	1.48	1.49	1.49	1.48	1.44	1.35	0.881
	(iii)	1.4564	1.4696	1.4832	1.4829	1.4724	1.4215	1.3433	0.873
N-80	(i)	1.57	1.59	1.61	1.61	1.60	1.55	1.49	1.00
	(ii)	1.58	1.60	1.62	1.62	1.61	1.56	1.50	1.01
	(iii)	1.5685	1.5685	1.6067	1.6067	1.5968	1.5492	1.4871	1.0039
N-100	(i)	1.56	1.57	1.59	1.59	1.57	1.54	1.49	1.02
	(ii)	1.56	1.58	1.59	1.59	1.58	1.55	1.50	1.03
	(iii)	1.5560	1.5694	1.5870	1.5871	1.5734	1.5441	1.4903	1.0235
N-120	(i)	1.50	1.51	1.53	1.53	1.52	1.50	1.45	1.01
	(ii)	1.51	1.51	1.54	1.54	1.52	1.50	1.46	1.01
	(iii)	1.5032	1.5083	1.5304	1.5304	1.5169	1.4977	1.4519	1.0063
N-150	(i)	1.45	1.46	1.47	1.47	1.47	1.45	1.41	0.986
	(ii)	1.45	1.45	1.47	1.47	1.46	1.45	1.40	0.984
	(iii)	1.4486	1.4567	1.4711	1.4734	1.4664	1.4534	1.4098	0.9867

表 4-18 評価した X 線校正場の換算係数 (6/10)

線質	評価 手法	D'_{lens}/K_a or $D_{\text{p lens}}/K_a$ (Gy/Gy)							
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT
N-200	(i)	1.36	1.37	1.39	1.40	1.38	1.38	1.35	0.964
	(ii)	1.36	1.37	1.39	1.40	1.38	1.38	1.35	0.965
	(iii)	1.3645	1.3746	1.3887	1.3981	1.3846	1.3786	1.3474	0.9637
N-250	(i)	1.32	1.33	1.34	1.35	1.33	1.33	1.31	0.950
	(ii)	1.32	1.33	1.34	1.35	1.33	1.33	1.31	0.951
	(iii)	1.3184	1.3284	1.3399	1.3537	1.3346	1.3298	1.3075	0.9503
N-300	(i)	1.29	1.30	1.30	1.32	1.30	1.29	1.28	0.940
	(ii)	1.29	1.30	1.30	1.32	1.30	1.29	1.28	0.939
	(iii)	1.2907	1.2976	1.3032	1.3219	1.3020	1.2932	1.2806	0.9407

表 4-19 評価した X 線校正場の換算係数 (7/10)

線質	評価 手法	$H'(0.07, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)								$H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}/K_a$ (Sv/Gy)					
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	0°	15°	30°	45°	60°	75°
N-40	(i)	1.27	1.26	1.26	1.26	1.24	1.19	0.804	0.004	1.27	1.27	1.25	1.20	1.14	1.08
	(ii)	1.26	1.24	1.24	1.24	1.23	1.18	0.791	0.002	1.26	1.25	1.24	1.19	1.13	1.07
	(iii)	1.27	1.26	1.25	1.25	1.24	1.19	0.795	0.004	1.28	1.27	1.25	1.21	1.14	1.14
N-60	(i)	1.48	1.47	1.46	1.46	1.44	1.37	1.01	0.025	1.56	1.54	1.50	1.43	1.31	1.22
	(ii)	1.49	1.48	1.46	1.46	1.45	1.37	1.02	0.025	1.56	1.55	1.50	1.43	1.31	1.22
	(iii)	1.48	1.47	1.45	1.45	1.44	1.37	1.00	0.025	1.56	1.55	1.5	1.43	1.31	1.31
N-80	(i)	1.58	1.56	1.56	1.56	1.54	1.46	1.12	0.049	1.70	1.68	1.64	1.57	1.44	1.36
	(ii)	1.59	1.57	1.56	1.56	1.54	1.46	1.12	0.048	1.71	1.69	1.65	1.57	1.44	1.36
	(iii)	1.60	1.58	1.57	1.57	1.55	1.48	1.13	0.046	1.72	1.71	1.66	1.58	1.45	1.45
N-100	(i)	1.58	1.56	1.56	1.56	1.54	1.47	1.17	0.066	1.71	1.69	1.66	1.60	1.48	1.39
	(ii)	1.58	1.57	1.57	1.57	1.55	1.47	1.17	0.065	1.73	1.71	1.67	1.61	1.49	1.39
	(iii)	1.59	1.58	1.57	1.57	1.56	1.49	1.18	0.064	1.72	1.71	1.66	1.6	1.48	1.48
N-120	(i)	1.54	1.53	1.53	1.53	1.51	1.45	1.20	0.078	1.66	1.65	1.62	1.58	1.48	1.40
	(ii)	1.55	1.53	1.53	1.53	1.52	1.46	1.19	0.078	1.66	1.65	1.63	1.58	1.48	1.40
	(iii)	1.55	1.53	1.53	1.53	1.52	1.46	1.20	0.077	1.66	1.65	1.62	1.57	1.48	1.48
N-150	(i)	1.49	1.48	1.48	1.48	1.47	1.42	1.22	0.088	1.60	1.59	1.58	1.54	1.46	1.40
	(ii)	1.50	1.48	1.48	1.48	1.47	1.42	1.22	0.087	1.61	1.60	1.58	1.55	1.47	1.40
	(iii)	1.50	1.48	1.48	1.48	1.47	1.42	1.21	0.086	1.6	1.59	1.57	1.54	1.47	1.47

表 4-20 評価した X 線校正場の換算係数 (8/10)

線質	評価 手法	$H'(0.07, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)								$H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}/K_a$ (Sv/Gy)					
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	0°	15°	30°	45°	60°	75°
N-200	(i)	1.40	1.39	1.39	1.39	1.39	1.37	1.23	0.103	1.49	1.49	1.48	1.47	1.42	1.38
	(ii)	1.40	1.39	1.39	1.39	1.39	1.37	1.23	0.103	1.49	1.49	1.48	1.47	1.43	1.38
	(iii)	1.39	1.38	1.38	1.38	1.38	1.36	1.21	0.101	1.49	1.49	1.48	1.46	1.43	1.43
N-250	(i)	1.36	1.35	1.35	1.35	1.37	1.35	1.21	0.113	1.42	1.42	1.43	1.42	1.40	1.36
	(ii)	1.36	1.35	1.35	1.35	1.37	1.35	1.21	0.112	1.42	1.42	1.43	1.42	1.40	1.36
	(iii)	1.34	1.34	1.34	1.34	1.35	1.32	1.18	0.110	1.42	1.42	1.43	1.42	1.40	1.40
N-300	(i)	1.33	1.33	1.33	1.33	1.35	1.33	1.19	0.121	1.38	1.38	1.39	1.39	1.38	1.35
	(ii)	1.33	1.33	1.33	1.33	1.35	1.33	1.19	0.121	1.37	1.37	1.39	1.39	1.38	1.35
	(iii)	1.33	1.32	1.32	1.32	1.34	1.31	1.17	0.120	1.38	1.38	1.39	1.39	1.38	1.38

表 4-2 1 評価した X 線校正場の換算係数 (9/10)

線質	評価 手法	$D'_{\text{local skin}}(\alpha)/K_a$ or $D_{\text{p local skin}}(\alpha)/K_a$ (Gy/Gy)					
		0°	15°	30°	45°	60°	75°
N-40	(i)	1.34	1.33	1.33	1.31	1.27	1.19
	(ii)	1.33	1.32	1.32	1.30	1.25	1.18
	(iii)	1.3445	1.3346	1.3316	1.3098	1.2647	1.1919
N-60	(i)	1.62	1.61	1.60	1.56	1.49	1.36
	(ii)	1.62	1.61	1.61	1.56	1.49	1.36
	(iii)	1.6175	1.6075	1.5969	1.5557	1.4891	1.3609
N-80	(i)	1.77	1.76	1.74	1.70	1.62	1.48
	(ii)	1.79	1.78	1.75	1.71	1.63	1.48
	(iii)	1.7693	1.7593	1.7411	1.7001	1.6219	1.4798
N-100	(i)	1.74	1.73	1.72	1.69	1.62	1.50
	(ii)	1.75	1.74	1.73	1.69	1.63	1.51
	(iii)	1.7410	1.7336	1.7229	1.6882	1.6200	1.5034
N-120	(i)	1.67	1.67	1.67	1.64	1.59	1.49
	(ii)	1.68	1.68	1.67	1.65	1.59	1.49
	(iii)	1.6752	1.6733	1.6660	1.6435	1.5866	1.4883
N-150	(i)	1.61	1.61	1.61	1.59	1.55	1.47
	(ii)	1.61	1.61	1.61	1.60	1.55	1.47
	(iii)	1.6088	1.6084	1.6078	1.5916	1.5498	1.4676

表 4-2 2 評価した X 線校正場の換算係数 (10/10)

線質	評価 手法	$D'_{\text{local skin}}(\alpha)/K_a$ or $D_p \text{ local skin}(\alpha)/K_a$ (Gy/Gy)					
		0°	15°	30°	45°	60°	75°
N-200	(i)	1.49	1.49	1.50	1.49	1.48	1.43
	(ii)	1.49	1.49	1.50	1.49	1.48	1.43
	(iii)	1.4927	1.4927	1.4979	1.4916	1.4784	1.4252
N-250	(i)	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.39
	(ii)	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.39
	(iii)	1.4280	1.4279	1.4305	1.4313	1.4330	1.3947
N-300	(i)	1.37	1.37	1.38	1.39	1.40	1.37
	(ii)	1.37	1.37	1.38	1.38	1.40	1.37
	(iii)	1.3787	1.3787	1.3844	1.3900	1.4010	1.3721

4.2.1.3 高エネルギー γ 線

稼働中の原子力発電所等においては、 ^{16}N に由来する 6 MeV 程度の高エネルギーの γ 線が見られるため、ISO 4037-1^[12]や JIS Z 4511^[13]では 4~9 MeV の高エネルギー γ 線標準場が規定されている。このうち、FRS では、4MV ペレトロン加速器を用いて $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)^{16}\text{O}$ 反応における ^{16}O の脱励起を利用した高エネルギー γ 線場（以下「R-F」と線質表記する。）を整備している^[23]。この校正場について、以下に示す方法で新たな実用量に対する線量換算係数を評価した。

(1) 方法

3"φ×3"NaI(Tl)検出器（Bicron 社製 3H3/3）を用いてターゲットから 1 m の距離においてパルス波高スペクトルを測定し（図 4-18）、アンフォールディング処理を行って光子エネルギー分布 $d\Phi/dE$ を導出した（図 4-19）。導出した光子スペクトルから、(1)式により換算係数を算出した。FRS の R-F 場においては、荷電粒子平衡を成立させるために被照射物の前に厚さ 2.5 cm のビルドアップ板を設置することとなっているため、R-F 場においても表 4-2 に示されるカーマ近似の線量換算係数を基にして評価した。

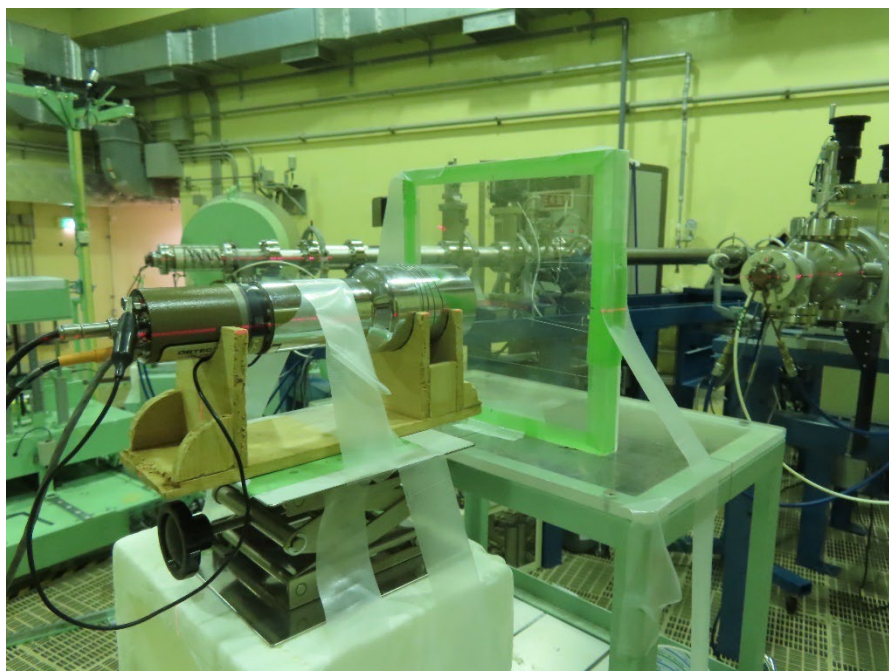


図 4-18 R-F 場での波高スペクトル測定の様子

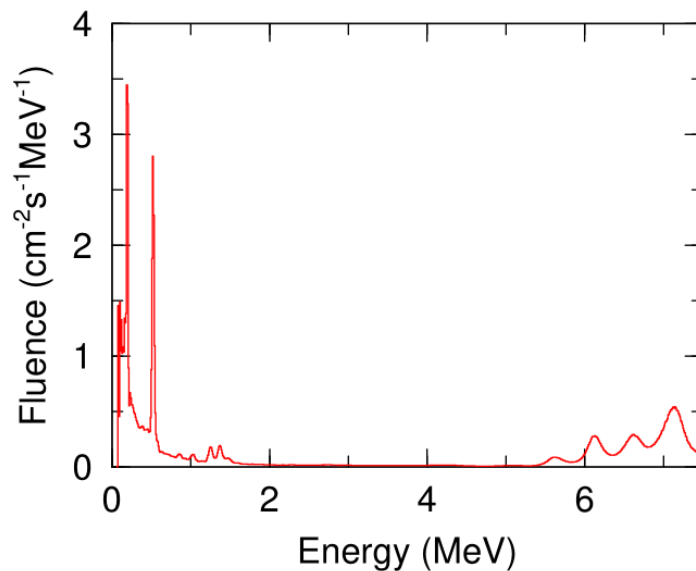


図 4-19 R-F場の光子エネルギー分布
(全フルエンスで規格化)

(2) 結果と考察

評価した線量換算係数を表 4-23～表 4-25に示す。これらの結果から以下のことが示唆された。

- ・ 現行実用量については古渡ら^[23]により報告されている値とほぼ同等である。
- ・ D_{lens} や $D_{\text{local skin}}$ については、現行実用量との違いは 4%程度に留まるのに対し、実効線量のための実用量である H^* 及び H_p については現行実用量と比較して、15%程度小さくなる。ただし、この違いは S-Cs 校正場とさほど変わらず、また角度によってもそれほど変わらない。一方で、 $H_p(180^\circ)$ や $H_p(\text{ROT})$ の線量換算係数は、 0° と比較しても 9 割以上の値となっており、こうした高エネルギー γ 線が支配的な場では、後方から来た成分に対しても線量計が過小評価しないよう注意が必要である。
- ・ 評価した線量換算係数の角度依存性を現行実用量と比較したものを図 4-20～図 4-22 に示したが、 H_p の角度依存性は現行実用量と比べて変化するが、 D_{lens} や $D_{\text{local skin}}$ についてはほとんど差異がない。

(3) まとめ

以降の線量計の特性評価にあたっては、表 4-23～表 4-25 に示した線量換算係数を使用することとする。その不確かさについては、今回評価しなかったが、JIS Z 4511^[13] で現行実用量について標準的に規定されている標準不確かさ 2% を以降の解析では使用する。

表 4-2 3 評価した R-F 校正場における実効線量の線量管理に用いる新・現行実用量に対する線量換算係数

$H^*(10)/K_a$ (Sv/Gy)	H^*/K_a (Sv/Gy)	$H_p(10, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)							$H_p(\alpha)/K_a$ (Sv/Gy)							
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT
1.13	1.00	1.15	1.16	1.16	1.15	1.15	1.12	1.00	0.998	0.988	0.970	0.940	0.897	0.830	0.917	0.900

表 4-2 4 評価した R-F 校正場における水晶体の線量管理に用いる新・現行実用量に対する線量換算係数

$H'(3, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)								$H_p(3, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)						
0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1.10	1.10	1.09	1.10	1.10	1.09	1.09		1.10	1.10	1.10	1.11	1.10	1.10	1.07

$D_{lens}(\alpha)/K_a$ (Gy/Gy)								
0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT	
1.09	1.09	1.08	1.10	1.10	1.08	1.08	0.970	

表 4-2 5 評価した R-F 校正場における皮膚の線量管理に用いる新・現行実用量に対する線量換算係数

$H'(0.07, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)							$H_p(0.07, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy)					
0°	15°	30°	45°	60°	75°		0°	15°	30°	45°	60°	75°
1.15	1.15	1.15	1.15	1.16	1.13		1.11	1.11	1.11	1.12	1.14	1.17

$D_{local\ skin}(\alpha)/K_a$ (Gy/Gy)								
0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT	
1.09	1.09	1.08	1.10	1.10	1.08	1.08	0.970	

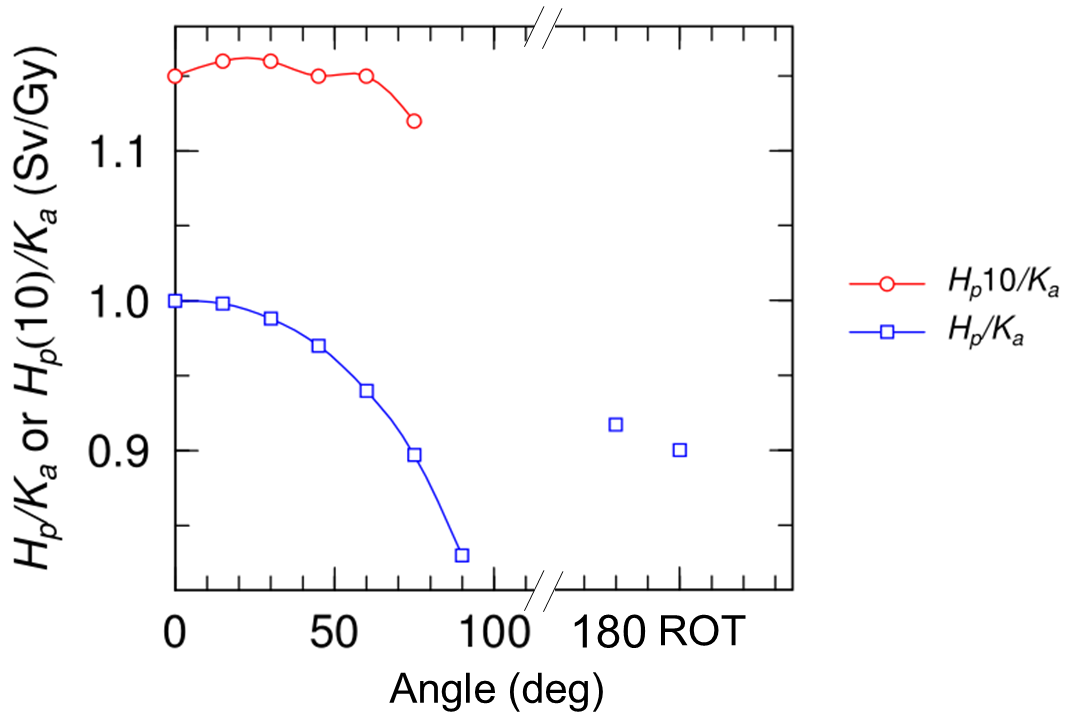


図 4-20 FRS の R-F 校正場における現行実用量 $H_p(10)$ と新たな実用量 H_p に対する線量換算係数の角度依存性

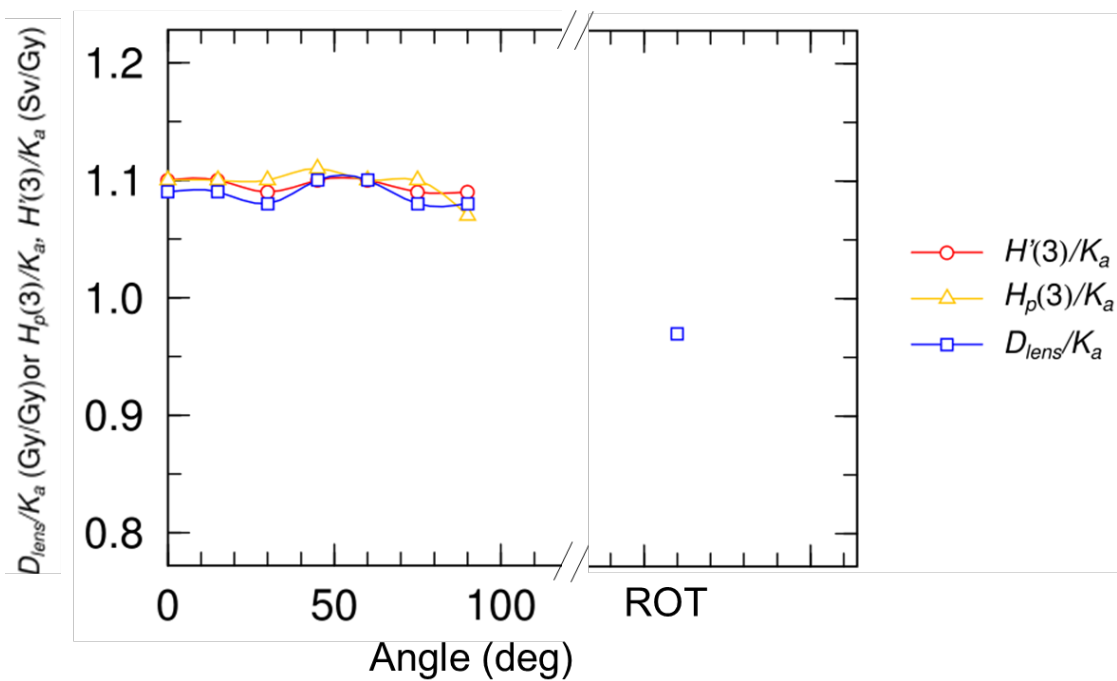


図 4-21 FRS の R-F 校正場における現行実用量 $H'(3)$ 及び $H_p(3)$ と新たな実用量 D_{lens} に対する線量換算係数の角度依存性

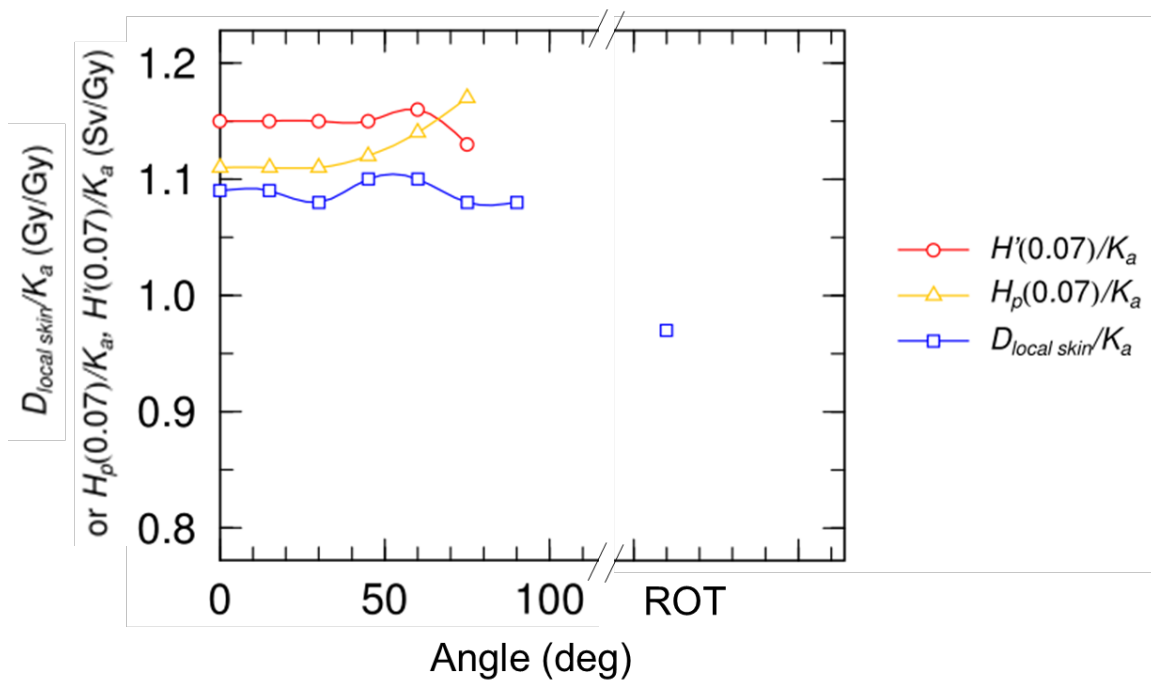


図 4-2-2 FRS の R-F 校正場における現行実用量 $H'(0.07)$ 及び $H_p(0.07)$ と新たな実用量 $D_{local\ skin}$ に対する線量換算係数の角度依存性

4.2.1.4 β線

令和3年度事業では、FRSのβ線校正場のうち、ISO 6980-1^[14]（JIS Z 4514^[15]）で定める⁹⁰Sr/⁹⁰Y及び⁸⁵Kr線源を使用した2つのシリーズ1校正場について、眼の水晶体及び皮膚の線量管理に用いる実用量について0°に対する線量換算係数が評価された。本事業では、これらの場に対して、0°以外の角度に対する線量換算係数を評価するとともに、¹⁴⁷Pm線源を用いたシリーズ1校正場についての線量換算係数も評価することとした。評価した校正場について表4-26に示す。なお、 $D_{p\text{ local skin}}$ はスラブファントムのみの評価とした。

表 4-26 換算係数を評価したβ線校正場

線源	距離	ビームフラッタニングフィルター
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	30 cm	有
⁸⁵ Kr	30 cm	有
¹⁴⁷ Pm	20 cm	有

(1) 方法

β線については、現行では標準供給される基準量が70μm深さの組織吸収線量 $D_t(0.07)$ であるため、 $D_t(0.07)$ からの換算係数として評価した。ICRU Report95^[5]においては、電子についてはフルエンスあたりの線量換算係数が角度ごとに示されていることに加え、線量換算係数の算出方法（評価ファントムやその評価領域など）についても記載されている。令和3年度事業では、⁹⁰Sr/⁹⁰Yと⁸⁵Krの校正場について、入射角0°に対する $D_{\text{local skin}}(0^\circ)/D_t(0.07)$ 及び $D_{\text{lens}}(0^\circ)/D_t(0.07)$ について、以下の2つの方法で評価され、ほぼ同じ結果が示されている。

① 直接計算による評価

ICRU Report95^[5]における換算係数評価手法と同様の手法を用いて、校正点に配置した評価ファントム中の吸収線量を直接モンテカルロ計算により評価する方法

② 校正点における電子フルエンスからの評価

ICRU Report95^[5]に新たな実用量の定義に沿って、校正点における電子フルエンスから単色電子の線量換算係数から算出する方法

本事業では①の方法により、表4-26に示したβ線校正場での線量換算係数を評価した。計算の妥当性についてはDepth dose curveを計算し実測された結果とよく

¹ JIS Z 4514^[15]ではシリーズA

一致すること、及び現行実用量に対する線量換算係数 $H_p(0.07, \alpha)/D_t(0.07)$ を評価し、ICRP Publ.74^[11]で示された線量換算係数との比較により確認した。

(i) 直接計算による評価

校正点において、ビーム軸に垂直に ICRU 組織でできた 30 cm×30 cm×15 cm のファントムを配置し、ファントム中 3.0 cm ϕ ($D_t(0.07)$ 基準線量率測定の際に利用する外挿電離箱の窓面積に合わせた) 深さ 70 μ m の領域の吸収線量 $D_t(0.07)$ (Gy) を計算した。別途ファントムがない条件で校正点における 3.0 cm ϕ の領域での電子フルエンス Φ (cm⁻²)を計算し、 $D_t(0.07)/\Phi$ を求めた。計算はモンテカルロコード PHITS 3.100 (EGS モード)^[24]を使用し、光子及び電子は 1 keV まで追跡した。

次に同様の方法で、評価ファントムを ICRU Report 95^[5]において $D_{\text{local skin}}/\Phi$ の計算に用いられたファントム (表面が 2 mm の皮膚層で覆われた 30 cm×30 cm×14.8 cm の ICRU 組織スラブファントム) に置き換えて (図 4-23 参照)、中心軸上の 1.128 cm ϕ (断面積 1 cm²)、深さ 50 μ m から 100 μ m の領域での平均吸収線量を計算することで $D_{\text{local skin}}(\alpha)/\Phi$ を評価した。線源から直接放出される光子については、その影響が小さいため無視した。

D_{lens} については、ICRU Report 95^[5]において D_{lens}/Φ の計算に用いられたのと同じ眼モデルを ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 場の校正点 (線源表面から眼の表面までの距離 : 30 cm) に設置し (図 4-24 参照)、レンズ全体の平均吸収線量を計算することで $D_{\text{lens}}(\alpha)/\Phi$ を評価した。計算は PHITS 3.100 を使用し、光子及び電子は 1 keV まで追跡した。令和 3 年度事業報告書^[7]では「⁸⁵Kr 場の $D_{\text{lens}}(0^\circ)$ については極めて小さい値であり、現行実用量と同様、 $D_{\text{lens}}(0^\circ)$ には寄与しない」とされていることから、 D_{lens} については ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 場のみ評価した。

一方、図 4-8 より、実効線量の管理に用いる実用量については、現行実用量と比較して、新たな実用量では 2 MeV 以下でも有意な線量換算係数をもつ。そのため、令和 3 年度事業で評価された ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 標準場における校正点での電子スペクトルを利用して、 H_p を評価した。ただし、全ての電子が 0° 方向から入射すると仮定して評価したことに注意が必要である。

(ii) 文献値

国際的に合意された新たな実用量に対する線量換算係数は示されていないものの、国外で線量換算係数を試算した報告があり^[25]、比較として示した。なお、¹⁴⁷Pm 場の入射角 75° に対する線量換算係数は示されていない。

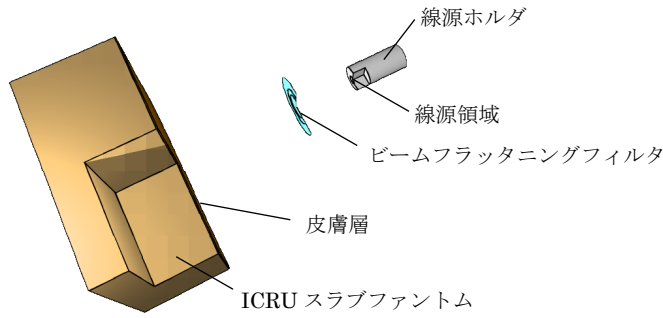


図 4-2 3 $D_{\text{local skin}}/\Phi$ の評価に用いた計算体系

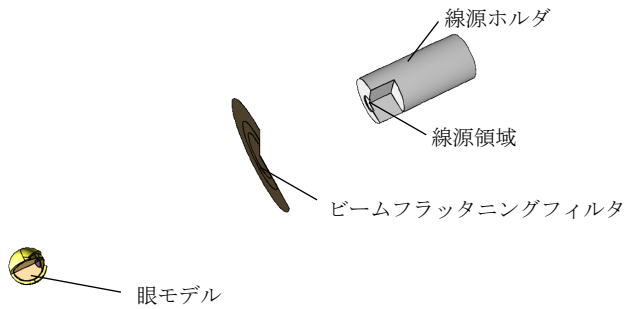


図 4-2 4 D_{lens}/Φ の評価に用いた計算体系

(2) 結果と考察

評価した線量換算係数を表 4-27～表 4-30に示す。概ね文献値(ii)と同等の結果が得られているが、眼の水晶体の線量管理に用いる実用量への線量換算係数については 0° では一致しているものの入射角の増大に伴い差異が大きくなった。これは、(ii)に示す文献^[25]では左右両眼の眼モデルを有する人体頭部ファントムを校正点に配置して計算がなされ、2つの眼の水晶体吸収線量の大きな方で線量換算係数が評価されていることに起因すると考えられる。文献の計算では、校正点と眉間が一致するようにファントムが配置されているため、入射角度が大きい場合は、必然的に片方の眼は線源に近づくことになる。その結果、眼モデルのみを校正点に配置して計算した(i)より、線量換算係数は大きい値となっているものと考えられる。そこで、文献の計算条件に合わせ、中心から3 cm 離れた位置に眼モデルを配置して同様に計算したところ、文献値と同様の結果が得られた(表中(i)'として示した。)。実用量は空間上のある一点において定義される量であることを鑑みて、本評価では校正点一点での評価にできる限り近い値となるように中心点に眼モデルを配置した計算条件とした。すなわち、これらの違いは評価条件に起因するものである。

$H_p(0^\circ)/D_t(0.07)$ については、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場については、 0.013 Sv/Gy と評価された。この値は、 $D_{\text{local skin}}/D_t(0.07)$ や $D_{\text{lens}}/D_t(0.07)$ と比較して小さく、実際の管理の現場で β 線による全身被ばくが支配的となるような評価すべき状況もほとんどないと考えられるほか、後述する EURADOS の報告書^[26]でも言及されているとおり、これを適切に測定できる既存の線量計もないものと考えられる。

得られた新・現行実用量換算係数の比較を図 4-25～図 4-28 に示す。皮膚の線量管理に用いる実用量については、新たな実用量の定義では皮膚層の密度や評価厚さが変わっているものの、角度依存性も含めて $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場や ^{85}Kr 場ではほぼ影響がない。一方、 ^{147}Pm 場においては、現行実用量と比べて16～27%小さな値となる。また、眼の水晶体の線量管理に用いる実用量については、令和3年度事業においても指摘されているように 0° においては4割程度に小さな値となるが、入射角度の増大による線量換算係数の減少は鈍く、 60° ではむしろ新たな実用量の方が大きくなる。これらのことは、 β 線に対する眼の水晶体モニタリング用の線量計の特性に大きな影響を及ぼすと考えられる。

本事業では、線量計の特性に与える影響を調査する目的のため、現行の標準量である $D_t(0.07)$ を基礎とした線量換算係数として計算により評価した。標準化においては、標準量やトレーサビリティ、実測の観点からも詳細な検討が必要であるものと思われる。

(3) まとめ

FRS で整備するシリーズ1の β 線校正場について、線量計の特性試験に必要な線量換算係数を全て得ることができた。評価した線量換算係数も文献値と比較しても概ね同等であり、差異がある D_{lens} についても、その原因は評価条件によるものである。以上より、以後の線量計特性試験の解析にあたっては、不確かさも含めて文献値を使用する。ただし、データが示されていない ^{147}Pm 場の $D_{\text{local skin}}(75^\circ)$ については、本項で評価した値を用いることとする。

表 4-27 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場について評価した皮膚の線量管理に用いる実用量への線量換算係数

評価手法	$H_p(0.07, \alpha)/D_t(0.07)$ (Sv/Gy)						$D_{\text{local skin}}(\alpha)/D_t(0.07)$ (Gy/Gy)					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	0°	15°	30°	45°	60°	75°
(i) 直接計算	1.00	1.01	1.06	1.14	1.15	0.81	1.02	1.03	1.08	1.14	1.13	0.78
(ii) 文献値	1.00	1.01	1.06	1.12	1.14	0.86	1.00	1.01	1.06	1.11	1.13	0.82

表 4-28 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場について評価した眼の水晶体の線量管理に用いる実用量への線量換算係数

評価手法	$D_{\text{lens}}(\alpha)/D_t(0.07)$ (Gy/Gy)					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
(i) 直接計算	0.17	0.17	0.15	0.13	0.092	0.058
(i)'	0.17	0.18	0.18	0.16	0.12	0.077
(ii) 文献値	0.169	0.179	0.174	0.159	0.121	0.078

(i)'は、文献値を同じ計算条件で計算したものである。詳細については本文参照。

表 4-29 ^{85}Kr 場について評価した皮膚の線量管理に用いる実用量への換算係数

評価手法	$H_p(0.07, \alpha)/D_t(0.07)$ (Sv/Gy)						$D_{\text{local skin}}(\alpha)/D_t(0.07)$ (Gy/Gy)					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	0°	15°	30°	45°	60°	75°
(i) 直接計算	1.00	1.00	0.97	0.88	0.69	0.42	1.00	0.99	0.94	0.85	0.66	0.40
(ii) 文献値	1.00	0.99	0.96	0.88	0.72	0.49	0.98	0.97	0.94	0.85	0.69	0.56

表 4-30 ^{147}Pm 場について評価した皮膚の線量管理に用いる実用量への換算係数

評価手法	$H_p(0.07, \alpha)/D_t(0.07)$ (Sv/Gy)						$D_{\text{local skin}}(\alpha)/D_t(0.07)$ (Gy/Gy)					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	0°	15°	30°	45°	60°	75°
(i) 直接計算	1.00	0.97	0.84	0.67	0.48	0.30	0.84	0.80	0.69	0.54	0.37	0.22
(ii) 文献値	1.00	0.96	0.87	0.72	0.53	-	0.802	0.763	0.693	0.565	0.413	-

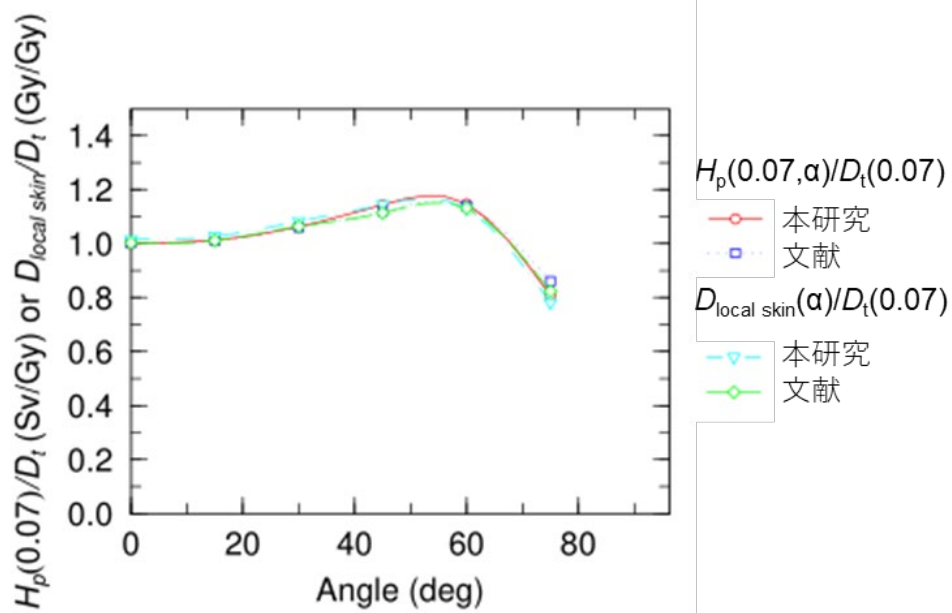


図 4-25 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 標準場において評価した線量換算係数の比較
(皮膚の線量管理に用いる実用量)

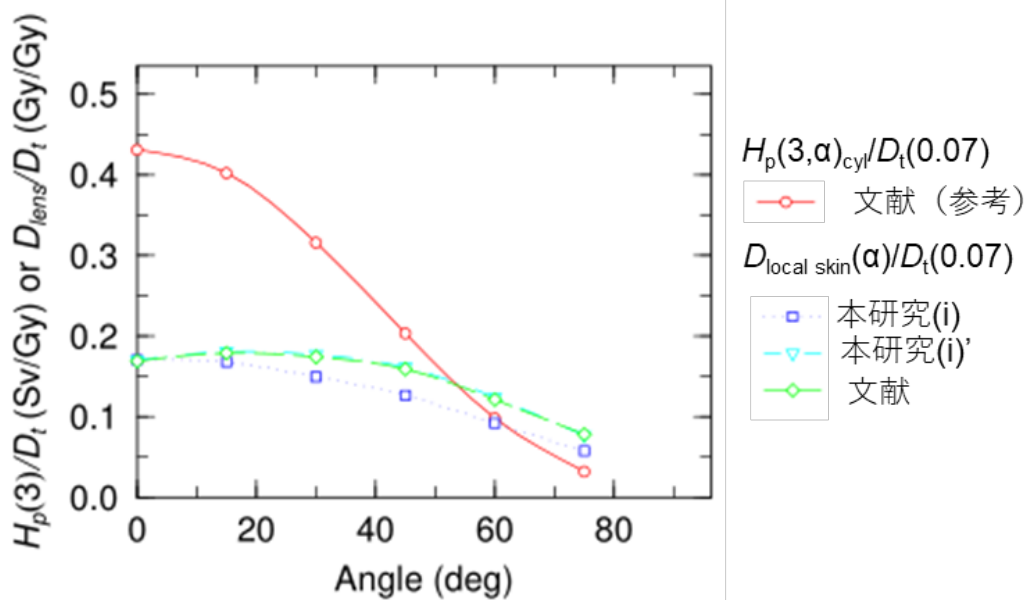


図 4-26 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 標準場において評価した線量換算係数の比較
(眼の水晶体の線量管理に用いる実用量)

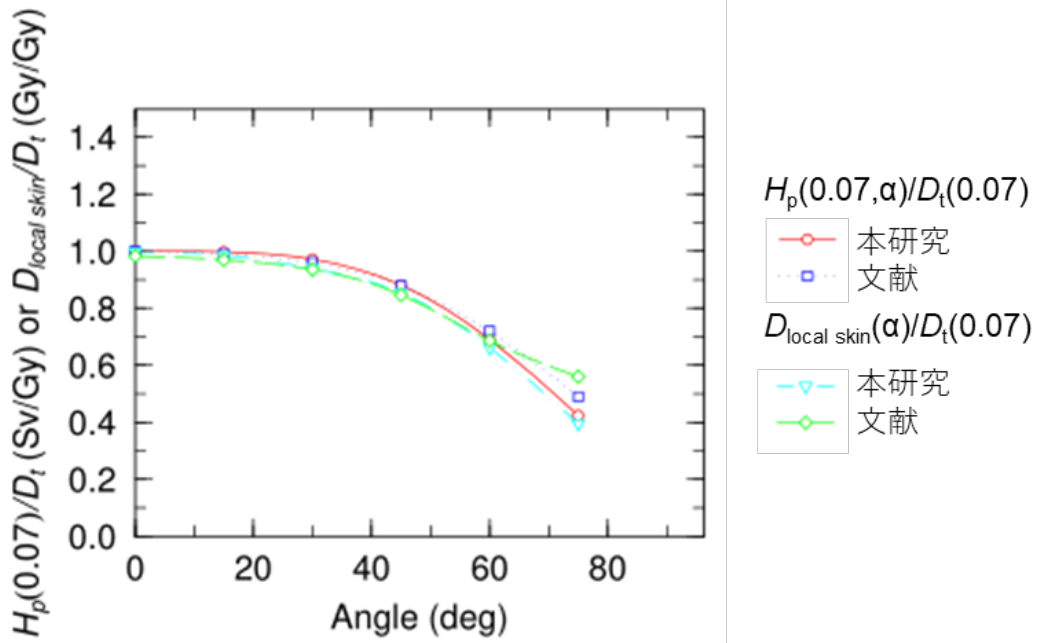


図 4-27 ^{85}Kr 標準場において評価した線量換算係数の比較
(皮膚の線量管理に用いる実用量)

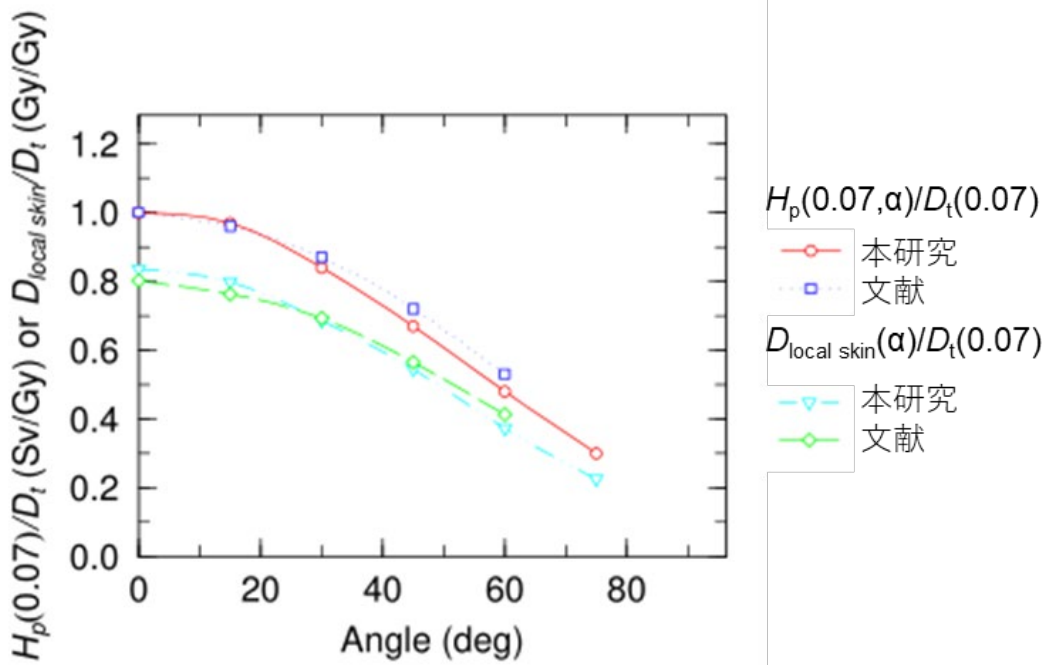


図 4-28 ^{147}Pm 標準場において評価した線量換算係数の比較
(皮膚の線量管理に用いる実用量)

4.2.1.5 中性子

ISO 8529-1^[16]に示され、原子力施設の放射線管理において測定器の校正によく利用される²⁴¹Am-Be、²⁵²Cf、熱中性子（令和3年度事業で実施）の3つの線質に加え、FRSに整備された単色中性子校正場、減速中性子校正場（重水減速場及び黒鉛減速場）について、中性子フルエンスから現行実用量及び新たな実用量への線量換算係数を評価した。線量換算係数の種類としては、令和3年度事業で評価した H^*/ϕ 、 $H_p(0^\circ)/\phi$ の他、 $H_p(\alpha)/\phi$ （ α : $0^\circ, 15^\circ, \dots, 90^\circ, 180^\circ$, ROT等）についても評価した。線量換算係数の導出に用いた各線質の中性子エネルギー分布は、ISO 8529-1^[16]に示された標準スペクトルのほか、FRSに整備された各校正場について数値計算または測定により独自に評価された中性子スペクトルを適用した。

(1) 方法

各中性子場における中性子フルエンスから実用量への線量換算係数は、単色中性子に対するフルエンスー線量換算係数 $h_\phi(E)$ 、及び校正場のフルエンススペクトル ϕ_E を用いて、次式のとおり計算した。

$$h_\phi = \frac{1}{\phi} \int_0^\infty h_\phi(E) \phi_E dE \quad (2)$$

積分計算を行う際の中性子フルエンススペクトルの各ビンの代表エネルギーは、各ビンの両端のエネルギー（ E_{low} , E_{high} ）を用いて、 $E = \sqrt{E_{low} \times E_{high}}$ とした。評価に用いた単色中性子に対するフルエンスー線量換算係数 $h_\phi(E)$ は、表 4-3 1 に示したものを使用した。データ間の補間は、ICRP Publ. 74^[11]で推奨されているように、Log-Log スケールにおける4点（3次）Lagrange補間公式を用いた。Lagrange補間公式を用いて算出したデータ間の補間値を連続関数として表したものを、図 4-2 9 左（場所のモニタリングにかかる実用量）及び図 4-3 0 左（個人モニタリングにかかる実用量）に示した。また、現行実用量と新たな実用量の比を各図の右に示した。

表 4-3 1 評価に用いた単色中性子に対する線量換算係数

現行実用量		新たな実用量	
$H^*(10)/\phi$	ICRP 74 ^[7] Table A.42	H^*/ϕ	ICRU 95 ^[5] Table A.1.2
$H_p(10,\alpha)/\phi$	ICRP 74 ^[7] Table A.42	$H_p(\alpha)/\phi$	ICRU 95 ^[5] Table A.2.2

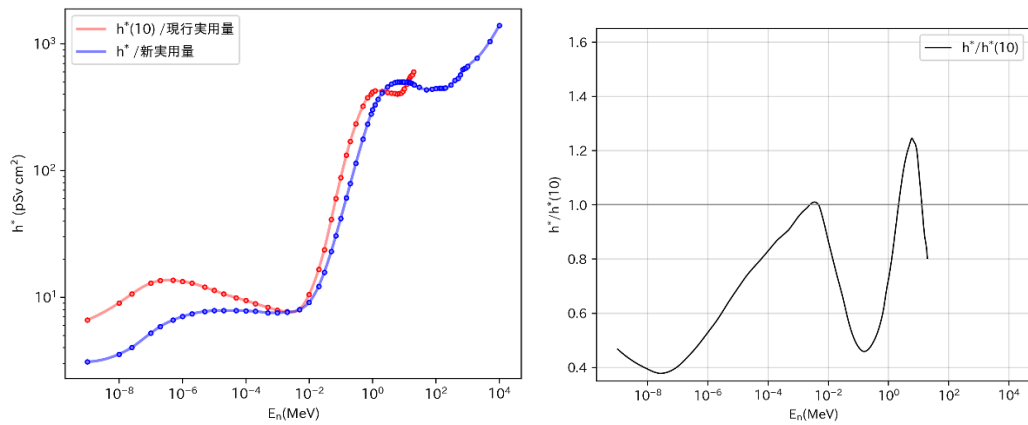


図 4-29 中性子の場のモニタリングにかかる実用量に対する線量換算係数
 (左) 現行及び新たな実用量の評価に用いたフルエンスー線量換算係数。
 データ間を Lagrange 補間したものを連続関数として実線で示した。
 (右) 新たな実用量/現行実用量の比

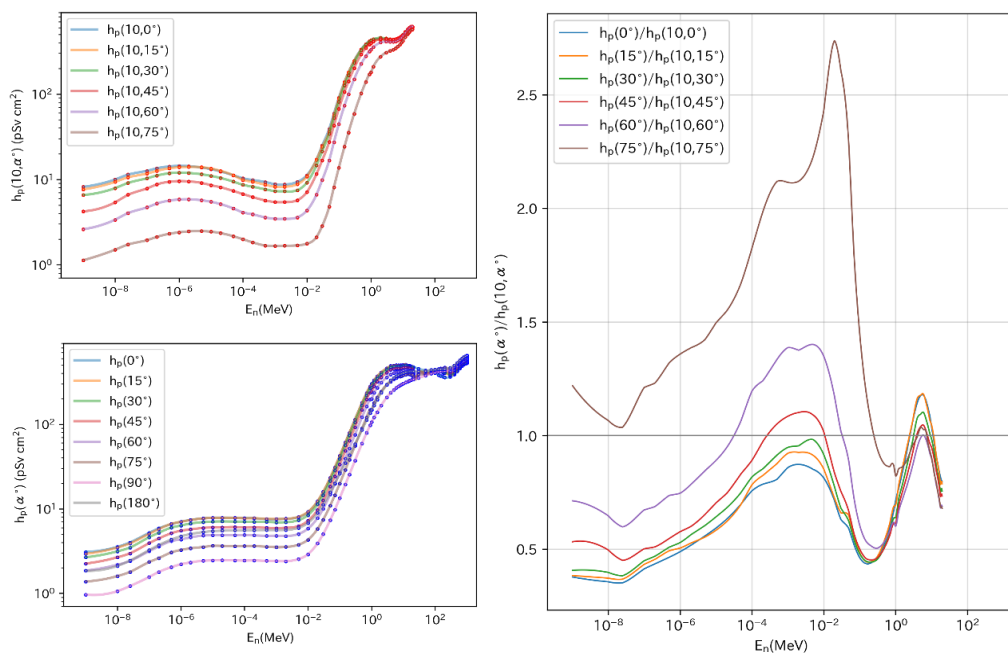


図 4-30 中性子の個人モニタリングにかかる実用量に対する線量換算係数
 現行実用量 (左上) 及び新たな実用量 (左下) の評価に用いたフルエンスー線
 量換算係数及び新たな実用量/現行実用量の比 (右)。データ間を Lagrange 補
 間したものを連続関数として実線で示した。

(a) 単色中性子校正場

FRS では、放射線測定器の校正や特性試験を目的として、4 MV バンデグラフ加速器を用いた単色中性子校正場を整備している。加速イオンの種類及びエネルギー、中性子発生用ターゲットの種類を変えることにより発生中性子のエネルギーが可変であり、これまでに、 $^{45}\text{Sc}(p,n)^{45}\text{Ti}$ 、 $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ 、 $^3\text{H}(p,n)^3\text{He}$ 、 $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ 、 $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ 反応を用いた校正場 (8 keV~19 MeV、ISO 8529-1^[16] (JIS Z 4521^[17]) に準拠) が整備済みである。加速器のコンディション低下により、2.5 MeV 及び 19 MeV の中性子は、現在、利用を停止している。

新たな実用量及び現行実用量に対する線量換算係数を導出にあたっては、中性子エネルギー分布の広がりには考慮せず、中心エネルギーにおける線量換算係数を導出した (図 4-3 1、表 4-3 2)。個人モニタリングにかかるフルエンスー線量換算係数には、20 MeV 付近に一部滑らかに補間できない領域が存在するが (図 4-3 1 下)、FRS に整備した 19 MeV 以下の単色中性子校正場の換算係数導出にあたっては、ほとんど影響はない。

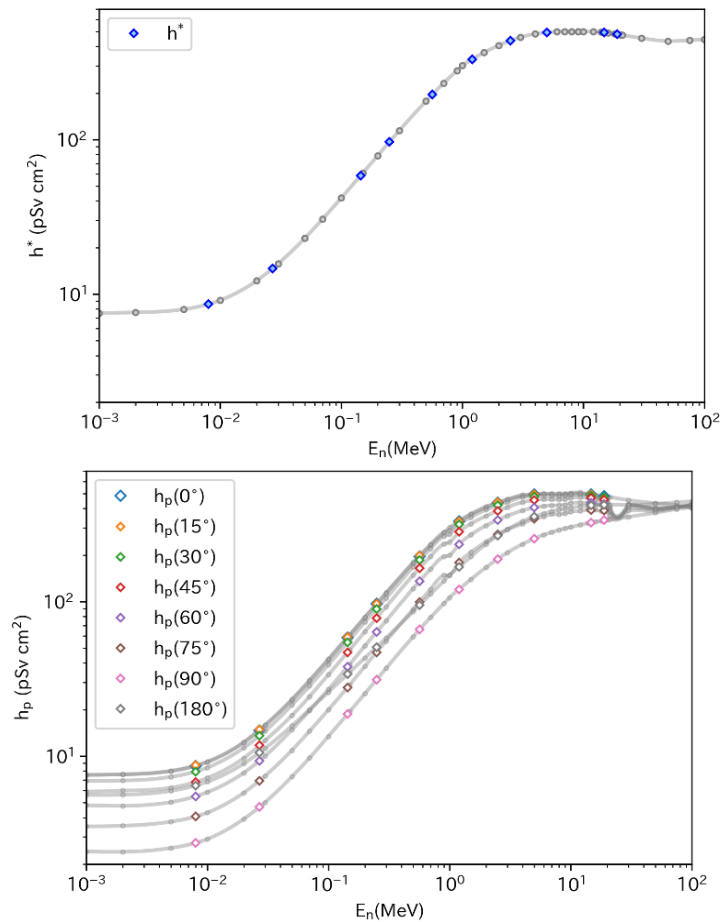


図 4-3 1 FRS に整備した単色中性子校正場のエネルギー点における中性子の場所 (上) 及び個人モニタリング (下) にかかる新たな実用量に対する線量換算係数

(b) $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 速中性子校正場

FRSでは、ステンレス製線源保護カプセルに内包された $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 線源を用いて、ISO 8529-1^[16] (JIS Z 4521^[17]) に準拠した速中性子校正場を整備している。新たな実用量及び現行実用量に対する線量換算係数を導出する際に、重み付けに使用した中性子エネルギー分布は以下のとおりである (図 4-3 2 参照)。

(i) ISO 8529-1^[16]に示される標準スペクトル

(ii) FRS で使用している線源保護カプセル通過後のスペクトル (数値計算により評価したもの) ^[27]

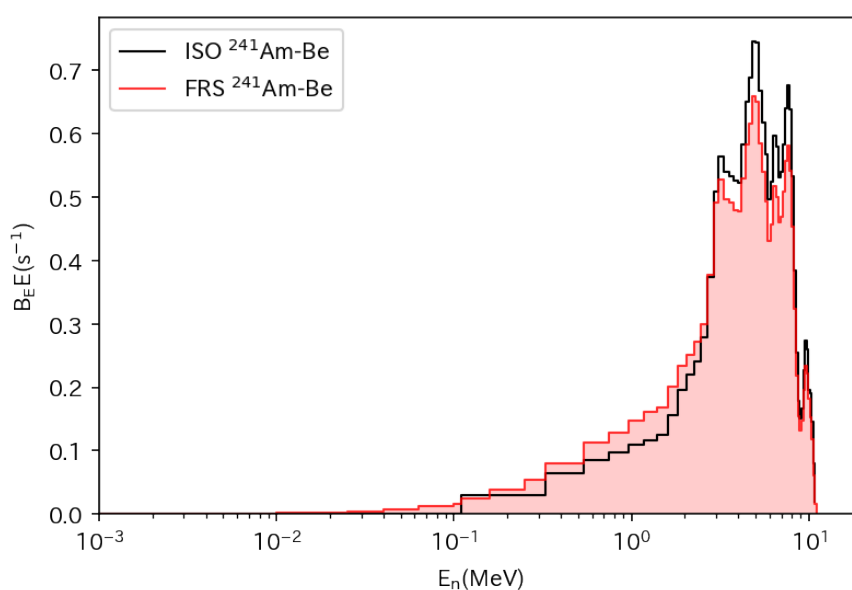


図 4-3 2 $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 線源のスペクトル

ISO 8529-1^[16]に示された $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ の標準スペクトル (黒)
と FRS で使用している線源保護カプセル通過後のスペクトル (赤)

(c) ^{252}Cf 速中性子校正場

FRSでは、ステンレス製線源保護カプセルに内包された ^{252}Cf 線源を用いて、ISO 8529-1^[16] (JIS Z 4521^[17]) に準拠した速中性子校正場を整備している。新たな実用量及び現行実用量に対する換算係数を導出する際に、重み付けに使用した中性子エネルギー分布は以下のとおりである (図 4-3 3 参照)。

(i) ISO 8529-1^[16]に示される標準スペクトル

- (ii) FRS で使用している線源保護カプセル通過後のスペクトル（数値計算により評価したもの） [28]

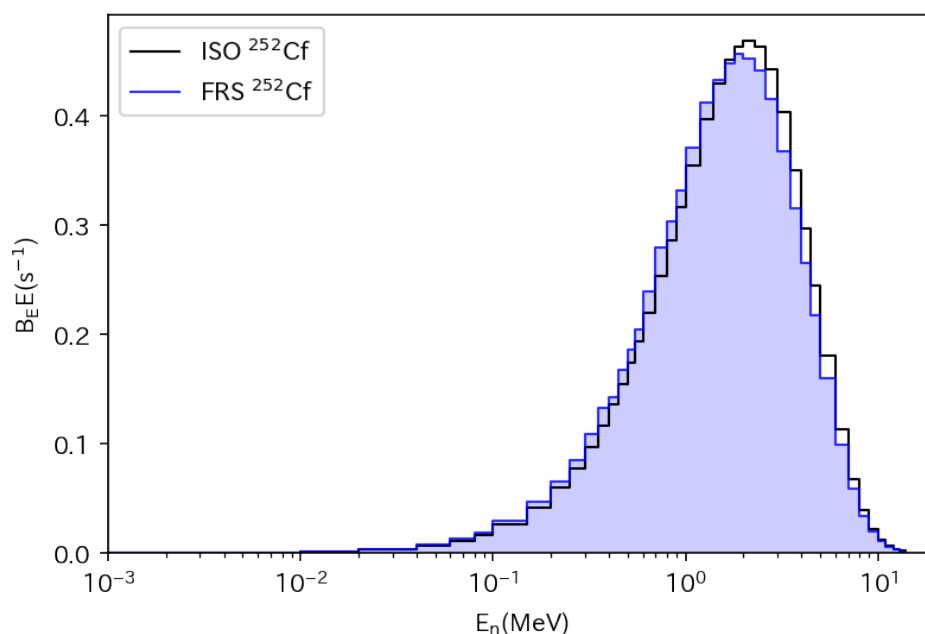


図 4-33 ^{252}Cf 線源のスペクトル

ISO 8529-1^[16]に示された ^{252}Cf の標準スペクトル（黒）
と FRS で使用している線源保護カプセル通過後のスペクトル（青）

- (d) 重水減速中性子場 (D_2O - ^{252}Cf)

FRS では、 ^{252}Cf 線源と重水球を用いた ISO 8529-1^[16] (JIS Z 4521^[17]) に準拠した重水減速中性子校正場を整備している。直径 30 cm の重水球の中心に、 ^{252}Cf 線源を差し込んで使用し、重水により減速された中性子を利用して、測定器の校正等を行う。熱中性子の量を抑制するために、球の表面は厚さ 1 mm のカドミウムカバーで覆われる。

新たな実用量及び現行実用量に対する線量換算係数を導出する際に、重み付けに使用した中性子エネルギー分布は以下のとおりである（図 4-34 参照）。

- (i) ISO 8529-1^[16]に示される標準スペクトル

- (ii) FRS において、ボナー球スペクトロメータを用いた測定により評価されたスペクトル^[29]

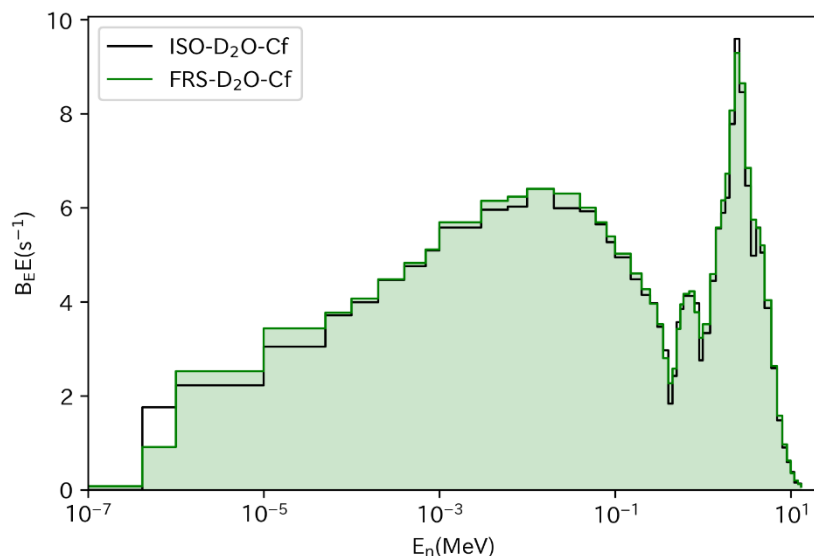


図 4-34 D₂O-²⁵²Cf 線源のスペクトル

ISO 8529-1^[16]に示された D₂O-²⁵²Cf の標準スペクトル (黒)
と FRS で使用している重水減速場のスペクトル (緑)

(e) 黒鉛減速場 (Grp-²⁴¹AmBe)

FRS では、²⁴¹Am-Be 線源と黒鉛パイルを用いた減速中性子校正場を整備している^[30]。本校正場は、熱中性子用としても使用されている黒鉛パイル (150 cm(W)×164 cm(D)×150 cm(H)) 内に ²⁴¹Am-Be 線源を 2 個設置し、黒鉛により減速された中性子を利用する校正場である。MeV 領域から熱中性子まで連続的なエネルギー分布をもつことが特徴とする校正場であり、線源装荷位置を変えることにより、エネルギー分布の異なる 2 つの場 (A, B) が利用可能である。黒鉛パイルの校正点側表面には、熱中性子の量を抑制するために、ガドリニウムを配合した熱中性子遮蔽シートを設置している。

新たな実用量及び現行実用量に対する線量換算係数を導出する際に、重み付けに使用した中性子エネルギー分布は以下のとおりである (図 4-35 参照)。

- (i) FRS において、ボナー球スペクトロメータを用いた測定により評価されたスペクトル (線源配置 A)^[30]
- (ii) FRS において、ボナー球スペクトロメータを用いた測定により評価されたスペクトル (線源配置 B)^[30]

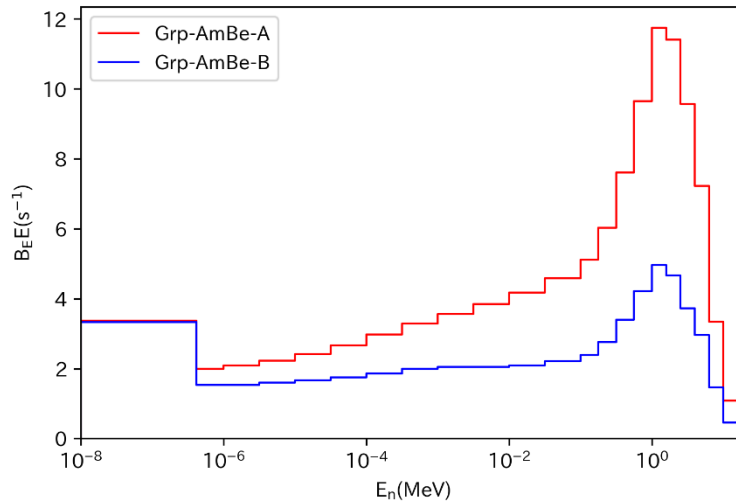


図 4-35 Grp-²⁴¹AmBe 線源のスペクトル

FRS に整備した黒鉛減速場のスペクトル。2 つの ²⁴¹Am-Be 線源の装荷位置 (A : 赤、B : 青) によって得られるスペクトル及びフルエンス率が異なる。

(f) 熱中性子校正場

FRS では、²⁵²Cf 線源と黒鉛パイルを用いた ISO 8529-1^[16] (JIS Z 4521^[17]) に準拠した熱中性子校正場を整備している。減速材として使用する黒鉛パイルの大きさは 150 cm(W)×164 cm(D)×150 cm(H)であり、その中央に ²⁵²Cf 線源を装荷して使用する。校正点は、黒鉛パイル表面から 40 cm の位置であり、パイルの南側と西側に 2 点整備している。²⁵²Cf 線源から放出される中性子は大半が黒鉛パイル内で減速・熱化されたのちパイル外へ放出されるが、熱化が不十分な熱外中性子も一部含まれる。校正点における全フルエンスに含まれる熱外中性子の割合は、南側と西側の校正点でわずかに異なる (図 4-3 6 参照)。熱外中性子の影響を除去し、熱中性子のみを用いて校正試験を行いたい場合は、Cd 差法 (測定器をカドミウム (Cd) カバーで覆わない場合と覆った場合の差分をとることにより熱外中性子の寄与を差し引く手法) を適用することができる。

新たな実用量及び現行実用量に対する線量換算係数を導出する際に、重み付けに使用した中性子エネルギー分布は以下のとおりである (図 4-3 6 参照)。

- (i) Maxwell-Boltzmann 分布(T=20°C)を仮定した熱中性子スペクトル。室温は 20°C (kT=0.025 eV) を仮定した。ここで、 E_n は中性子エネルギー、 A は適当な規格化定数を表す。

$$\phi_E = AE_n \exp\left(-\frac{E_n}{2kT}\right) \quad (3)$$

(ii) FRS の熱中性子校正場において、ボナー球スペクトロメータを用いた測定により評価されたスペクトル^[31]

(iii) FRS の熱中性子校正場において、ボナー球スペクトロメータを用いた測定により評価されたスペクトル^[31]のうち、熱外中性子($>4.14 \times 10^{-7}$ MeV)を取り除いたもの (Cd 差法適用)

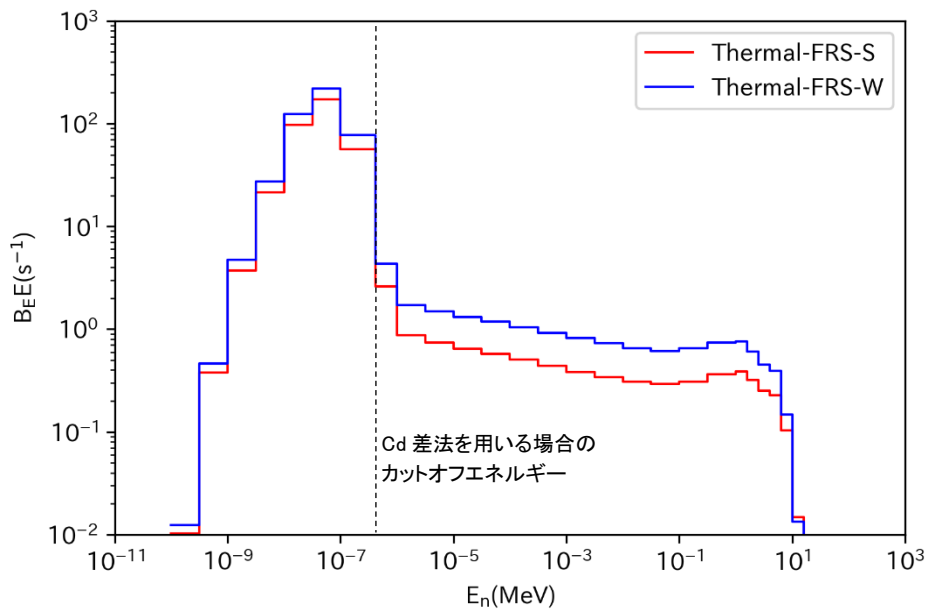


図 4-36 FRS の熱中性子校正場の中性子スペクトル

(青、赤はそれぞれ黒鉛パイル西側、南側の校正点)。Cd 差法を適用した場合、点線で示した Cd カットオフエネルギーより高いエネルギーの中性子の影響を差し引くことができる。

(2) 結果と考察

現行および新たな実用量を用いて導出した各中性子校正場におけるフルエンス-線量当量換算係数の値を表 4-3 2～表 4-3 6 にまとめた。また、現行の線量換算係数に対する新たな線量換算係数の比を図 4-3 7～図 4-4 1 に示した。さらに、実用量変更による線量換算係数の変化を比較しやすいように、各校正場における代表的な線量換算係数の値を、図 4-4 2 に一覧として表した。

まず、 H^*/ϕ 、及び $H_p(0^\circ)/\phi$ に着目すると、 $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 速中性子場及び単色中性子場 (2.5 MeV, 5 MeV) など、数 MeV 付近に局在したエネルギー分布をもつ校正場で、現行の線量換算係数よりも数%から 20%程度大きな値をとった。その他の線質/エネルギー

ギーでは、現行よりも小さい線量換算係数となった。 ^{252}Cf 速中性子場では 10～15% 程度減少し、広いエネルギー範囲に分布をもつ減速中性子場（重水減速場、黒鉛減速場）でも、1 MeV 以下の分布が支配的な場であることから、現行よりも 20% 程度小さい値となった。現行値からの変化が著しいのは、熱中性子場や、数 10～数 100 keV の領域に局在したエネルギー分布を持つ場（144 keV や 250 keV）で、現行の換算係数より 60% 程度小さな値をとった。

$H_p(\alpha)/\phi$ に着目すると、数 100 keV 以下の領域にエネルギー分布をもつ中性子場で、入射角度 α が大きくなるほど、新/現行の線量換算係数比が大きくなる傾向が見られた。とくに、単色中性子場（8 keV、27 keV、144 keV）における $H_p(60^\circ)/\phi, H_p(75^\circ)/\phi$ や、熱中性子場における $H_p(75^\circ)/\phi$ では、現行値を上回る線量換算係数をとった。しかしながら、 60° や 75° などの大きな入射角度を想定して、個人線量の評価を行うことは稀と思われるので、実用面での影響は限定的である。

(3) まとめ

以降の線量計校正では、単色中性子場については、エネルギー分布の広がりを見せず、中心エネルギー点において評価した線量換算係数を使用する。速中性子場については、ISO 8529-1^[16]の標準スペクトルを用いて導出した線量換算係数を使用し、その不確かさとして、 $^{241}\text{Am-Be}$ に対しては 4%、 ^{252}Cf に対しては 1% の標準不確かさを考慮することとする。今後、新たな実用量を導入する際は、線源保護カプセルによる中性子スペクトル変化を考慮した線量換算係数を用いて、校正場基準値を算出することを検討することが望まれる。熱中性子場については、ボナー球スペクトロメータを用いて測定した熱外中性子を含む校正場（Cd 差法の適用なし）における線量換算係数を用いて、以降の線量計特性試験を行う。

表 4-3 2 FRS に整備した単色中性子校正場における中性子の場所及び個人モニタリングにかかる実用量に対する線量換算係数

中性子 エネルギー	現行/ 新実用量	$H^*(10)/\phi$ or H^*/ϕ (pSv cm ²)	$H_p(10, \alpha)/\phi$ or $H_p(\alpha)/\phi$ (pSv cm ²)											
			0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
8 keV	現行	9.42	10.4	9.89	8.38	6.45	3.98	1.73	—	—	—	—	—	—
	新	8.60	8.60	8.69	7.93	6.78	5.49	4.06	2.74	6.44	5.26	3.96	4.16	3.76
27 keV	現行	21.5	22.5	22.0	19.3	15.1	8.82	2.61	—	—	—	—	—	—
	新	14.6	14.6	14.8	13.5	11.7	9.32	6.93	4.67	10.5	8.84	6.70	7.10	6.31
144 keV	現行	127	134	131	121	102	69.9	22.9	—	—	—	—	—	—
	新	58.4	58.4	58.8	54.2	46.8	37.7	27.8	18.7	33.9	33.5	25.7	26.7	24.6
250 keV	現行	203	215	214	201	173	125	47.0	—	—	—	—	—	—
	新	96.7	96.7	96.4	89.5	78.3	63.4	46.9	31.2	50.8	54.4	42.0	43.5	40.5
565 keV	現行	343	355	349	347	313	245	115	—	—	—	—	—	—
	新	196	196	198	185	164	135	99.4	65.8	94.6	110	85.4	89.3	81.4
1.2 MeV	現行	425	433	427	440	412	355	210	—	—	—	—	—	—
	新	330	330	331	315	282	235	179	120	167	193	153	157	149
2.5 MeV	現行	416	437	434	454	441	410	294	—	—	—	—	—	—
	新	437	437	437	419	385	338	271	188	267	280	226	238	213
5.0 MeV	現行	405	420	418	437	435	409	331	—	—	—	—	—	—
	新	494	494	492	478	452	405	343	255	354	351	290	305	275
14.8 MeV	現行	536	561	563	581	572	576	517	—	—	—	—	—	—
	新	493	493	494	485	467	436	391	324	419	398	346	358	333
19 MeV	現行	583	599	596	620	614	619	567	—	—	—	—	—	—
	新	480	480	475	475	456	429	389	336	423	398	351	379	324

表 4-3 3 評価した $^{241}\text{Am-Be}$ 速中性子校正場の線量換算係数

評価条件	現行/新実用量	$H^*(10)/\phi$ or H^*/ϕ (pSv cm ²)	$H_p(10, \alpha)/\phi$ or $H_p(\alpha)/\phi$ (pSv cm ²)											
			0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
ISO-AmBe	現行	391	411	409	424	414	383	293	-	-	-	-	-	-
	新	427	427	427	412	385	342	285	211	292	295	243	253	232
FRS-AmBe	現行	389	407	405	420	408	375	280	-	-	-	-	-	-
	新	411	411	412	397	369	327	271	199	277	281	231	240	221

表 4-3 4 評価した ^{252}Cf 速中性子校正場の線量換算係数

評価条件	現行/新実用量	$H^*(10)/\phi$ or H^*/ϕ (pSv cm ²)	$H_p(10, \alpha)/\phi$ or $H_p(\alpha)/\phi$ (pSv cm ²)											
			0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
ISO-Cf	現行	385	400	396	408	388	345	230	-	-	-	-	-	-
	新	351	351	352	337	308	266	212	149	210	223	180	187	172
FRS-Cf	現行	381	396	392	404	383	339	223	-	-	-	-	-	-
	新	342	342	343	327	299	258	205	144	202	216	174	181	166

表 4-35 評価した D₂O-²⁵²Cf、Grp-AmBe 減速中性子校正場の線量換算係数

線質	評価条件	現行/新実用量	$H^*(10)/\phi$ or H^*/ϕ (pSv cm ²)	$H_p(10, \alpha)/\phi$ or $H_p(\alpha)/\phi$ (pSv cm ²)											
				0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
D ₂ O-Cf	(i)ISO	現行	105	110	109	109	102	87.4	56.1	-	-	-	-	-	-
		新	91.4	91.4	91.8	87.3	79.6	68.6	54.5	38.4	56.3	58.2	46.7	48.8	44.6
	(ii)FRS	現行	106	110	109	110	102	87.8	56.4	-	-	-	-	-	-
		新	91.9	91.9	92.2	87.8	80.0	68.9	54.8	38.6	56.7	58.5	46.9	49.1	44.8
Grp-AmBe	(i) A	現行	156	163	161	163	153	132	84.7	-	-	-	-	-	-
		新	133	133	133	127	116	100	79.7	56.1	80.3	84.4	67.9	71.0	64.8
	(ii) B	現行	117	122	120	121	113	96.5	61.2	-	-	-	-	-	-
		新	97.0	97.0	97.5	92.8	84.6	72.8	57.9	40.6	58.7	61.5	49.4	51.7	47.2

※ 黒鉛減速場(Grp-AmBe)の $H_p(10, \alpha)$ は、すべての中性子が照射軸方向から揃って入射すると仮定して算出した。

表 4-36 評価した熱中性子校正場の線量算係数

線質	評価条件	現行/ 新実用量	$H^*(10)/\phi$ or H^*/ϕ ($\mu\text{Sv cm}^2$)	$H_p(10, \alpha)/\phi$ or $H_p(\alpha)/\phi$ ($\mu\text{Sv cm}^2$)											
				0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
熱中性子	(i)M-B	現行	9.84	10.6	9.91	8.50	6.02	3.70	1.60	—	—	—	—	—	—
		新	3.88	3.88	3.77	3.41	2.90	2.36	1.74	1.17	2.35	2.22	1.69	1.72	1.67
熱中性子	(ii)FRS-S	現行	12.5	12.9	12.1	10.7	8.13	5.18	2.35	—	—	—	—	—	—
		新	5.46	5.46	5.35	4.88	4.20	3.43	2.57	1.75	3.36	3.18	2.44	2.50	2.39
	(iii)FRS-S-Cd	現行	11.5	11.8	11.0	9.57	7.10	4.30	1.81	—	—	—	—	—	—
		新	4.57	4.57	4.45	4.02	3.43	2.77	2.05	1.38	2.82	2.62	1.99	2.03	1.96
熱中性子	(ii)FRS-W	現行	13.0	13.5	12.6	11.2	8.63	5.59	2.58	—	—	—	—	—	—
		新	5.87	5.87	5.76	5.27	4.56	3.73	2.80	1.91	3.60	3.44	2.64	2.71	2.58
	(iii)FRS-W-Cd	現行	11.5	11.9	11.0	9.60	7.13	4.32	1.82	—	—	—	—	—	—
		新	4.59	4.59	4.47	4.04	3.45	2.78	2.06	1.39	2.84	2.64	2.00	2.04	1.97

※ FRS 熱中性子校正場の $H_p(10, \alpha)$ は、すべての中性子が照射軸方向から揃って入射すると仮定して算出した。

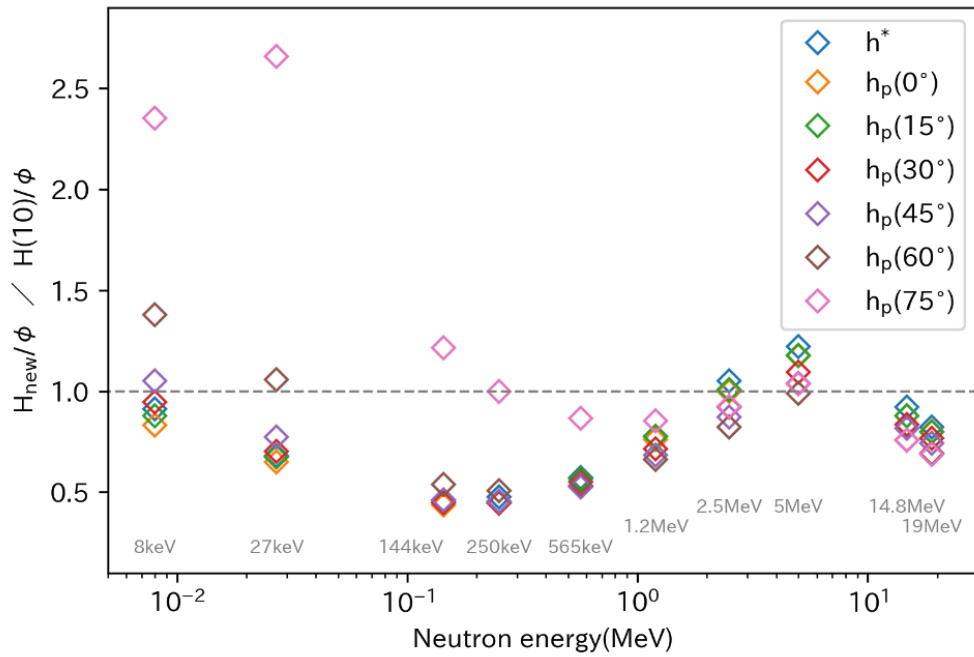


図 4-37 FRS の単色中性子校正場の各エネルギー点において現行実用量と新たな実用量を用いた場合の線量換算係数の比（エネルギーごと）

（横軸をエネルギーとして、角度（線量換算係数の種類）ごとに色分け）

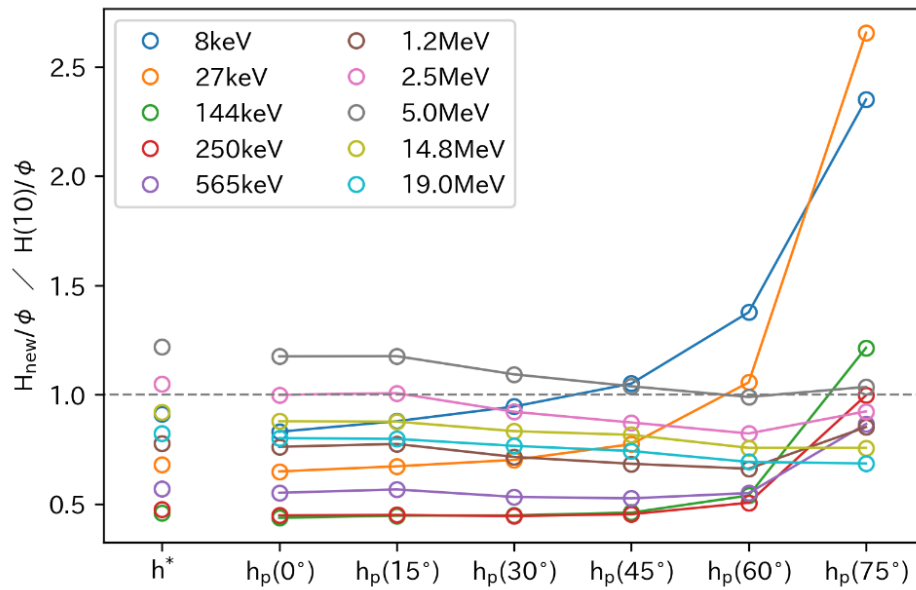


図 4-38 FRS の単色中性子校正場の各エネルギー点において現行実用量と新たな実用量を用いた場合の線量換算係数の比（入射角度ごと）

（横軸を入射角度（換算係数の種類）として、エネルギーごとに色分け）

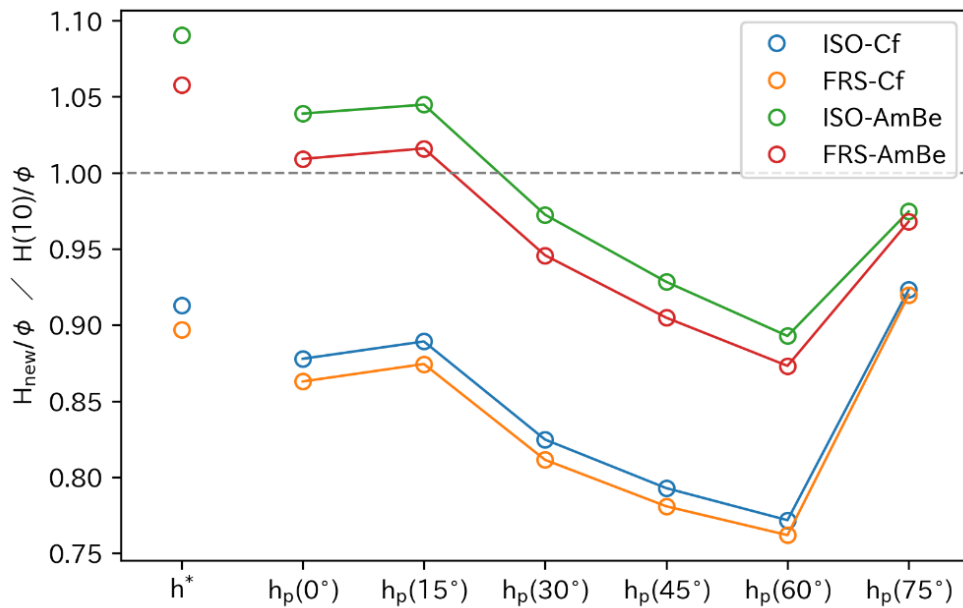


図 4-39 $^{241}\text{Am-Be}, ^{252}\text{Cf}$ 速中性子校正場において現行実用量と新たな実用量を用いた場合の線量換算係数の比

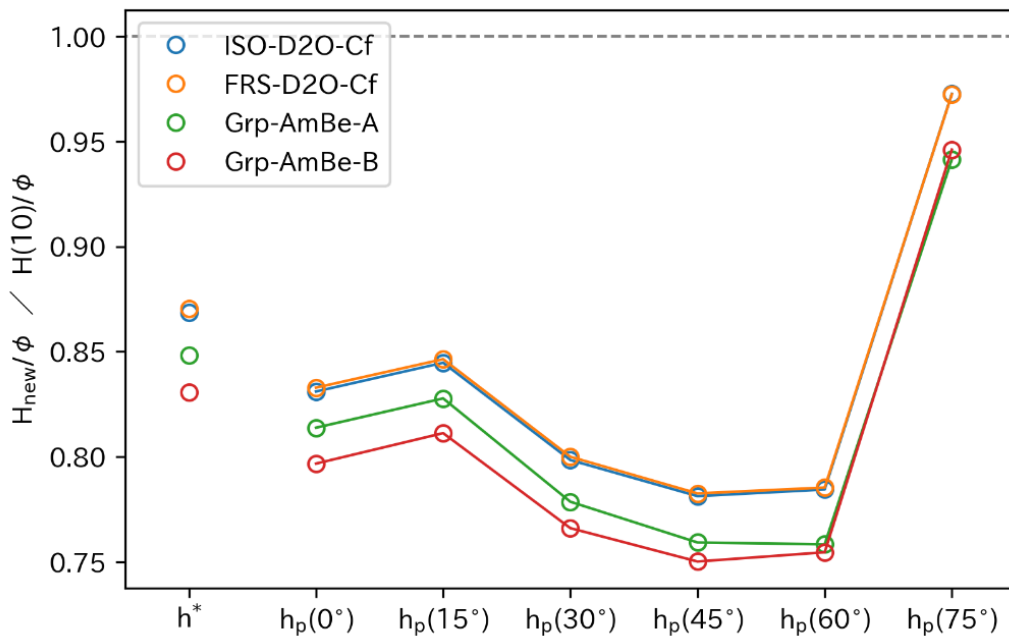


図 4-40 FRS の減速中性子校正場において現行実用量と新たな実用量を用いた場合の線量換算係数の比

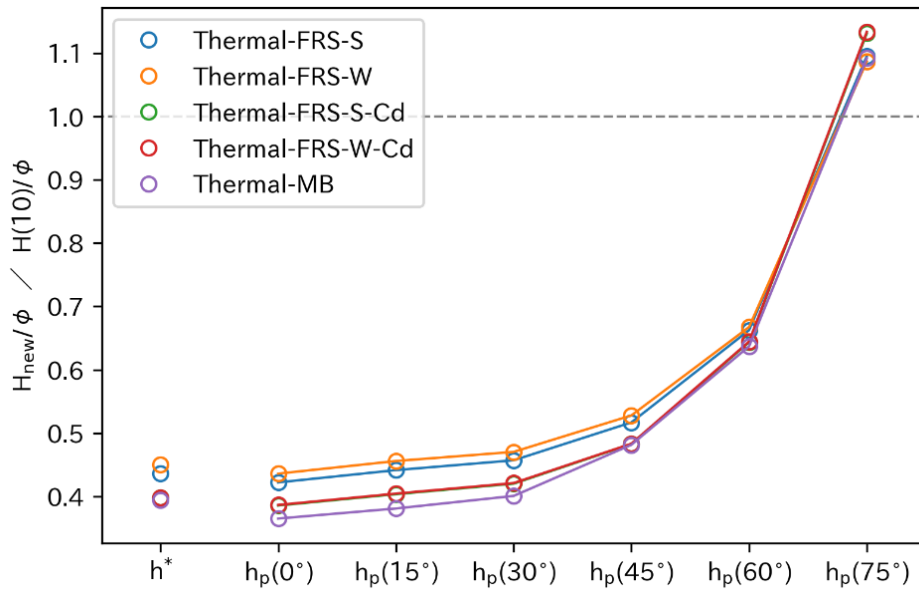


図 4-4-1 FRS の熱中性子校正場において現行実用量と新たな実用量を用いた場合の線量換算係数の比

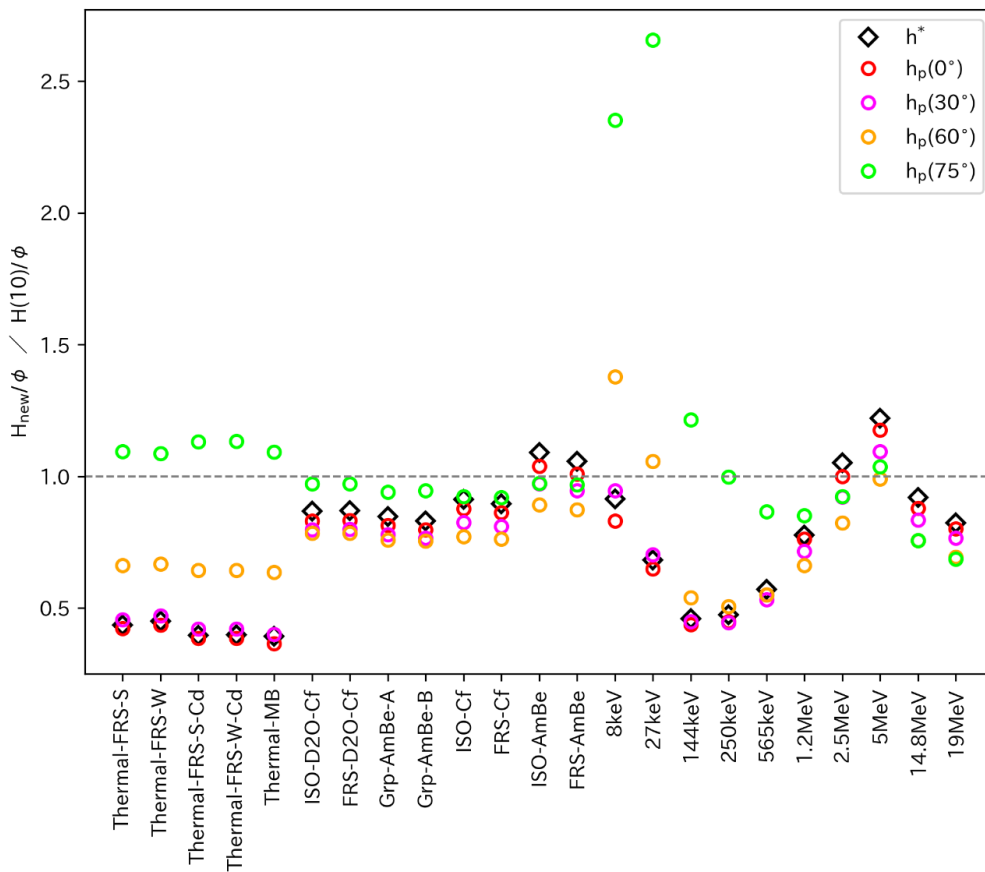


図 4-4-2 FRS の各中性子校正場において現行実用量と新たな実用量を用いた場合の線量換算係数の比のまとめ

4.2.2 方向特性試験の開発

先述したとおり、実用量の定義変更に伴い、個人線量や方向性吸収線量等の角度依存性についても現行実用量と異なり、線量計の方向特性に影響を与える可能性がある。また、個人線量計の現行規格では規定がない PA 照射（180° 照射）や ROT 照射についての線量換算係数も ICRU Report 95⁵⁾では示されており、先述したとおり、その値も線質によっては AP 照射（0° 照射）と比べてそれほど減少しない。

そこで、FRS の校正場を用いて新たな実用量を用いた線量計の方向特性試験が実施できるかの検証をするとともに、PA 照射や ROT 照射などの試験の方法についても検討した。

(1) 方法

(a) 角度（回転）制御方法

線量計の方向特性試験を実施するための角度制御については、照射装置等に応じて FRS で整備している装置を利用した。X 線や γ 線場で使用した角度制御装置の例を図 4-4 3 に示した。本事業では、放射線の入射角度の正負を図 4-4 4 に示すように定義し、特に断りのない限り、正の角度でのみ試験した。回転照射については図 4-4 5 に示すような回転台（Oriental motor 製 BMUD30-A2）を用いることとした。回転台は、150 秒/回転となるような速度で回転させ、照射時間を 150 秒の倍数に設定することで、回転照射ジオメトリ（ROT）を模擬することとした。



図 4-4 3 用いた角度制御装置の例

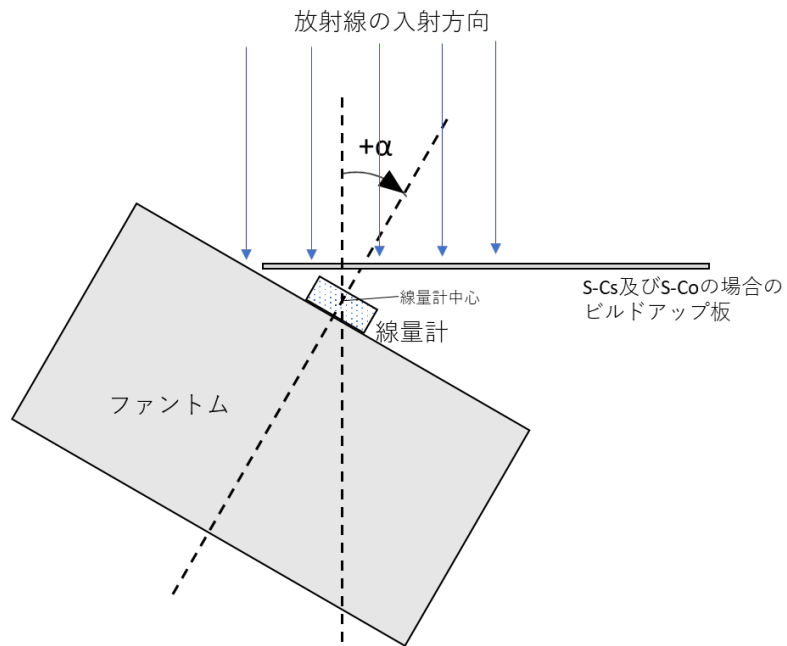


図 4-4 4 方向特性試験における回転角度
(PW ファントムに装着した線量計の場合の例)



図 4-4 5 ROT 照射試験に用いた回転台

(b) 基準線量

基準線量の設定については、従来の手順と変わらない。それぞれの標準量（光子であれば空気カーマ）に対して、特定二次標準器もしくは常用参照標準を用いて各校正場の測定を行い、これに 4.2.1 で評価した新たな実用量に対する角度ごとの線量換算係数を乗ずることによって基準線量を得た。4.2.1 に示すとおり、線量換算係数は 180° 照射については光子及び中性子に対する H_p 、ROT 照射については光子及び

中性子に対する H_p 、光子に対する D'_{lens} 、 D_{plens} について評価しているため、これらの量に対する試験が可能である。

(c) 方向特性試験の検証

(a)及び(b)の設備及び手順に基づいた新たな実用量に対する線量計の方向特性試験の妥当性検証を行った。試験に用いた線量計は電離箱式サーベイメータ（応用技研製 AE-133B）及び受動形個人線量計（長瀬ランダウア製 OSL 線量計）である。照射した線質は、前者は N-40, N-100 及び N-300 であり、後者は N-100 と S-Cs である。検証のために、現行実用量に対する方向特性試験結果も算出し文献値と比較した。

(d) PW 照射及び ROT 照射に対する校正用ファントムの妥当性確認

体幹部用の個人線量計の校正・試験においては、JIS Z 4331:2005^[32]で規定される外寸が 30 cm×30 cm×15 cm のメタクリル樹脂製水槽形板水ファントム（以下「PW ファントム」という。）が使用される（図 4-4 6 参照）²。従来から、方向特性試験においてもこうしたファントムが利用されてきた。しかしながら、PW ファントムは、人体体幹部による放射線の後方散乱の状況はよく模擬できるものの、PA 照射や ROT 照射のような照射ジオメトリで人体体幹部による吸収、散乱の状況を適切に模擬できるかは明らかでない。そこで、計算と実測の両面から PW ファントムの妥当性を検証することとした。なお、本事業においては、光子のみについて調査した。

計算においては、PW ファントムと ICRP Publ.110^[33]で示される標準男性ボクセルファントム（以下「AM ファントム」という。）（図 4-4 7 参照）の吸収・散乱の違いを調査することとした。AM ファントムは、 H_p 等の線量換算係数の計算にも用いられているファントムである。計算コードは、PHITS 3.100^[24]を用いた。真空中に置いた PW ファントム及び AM ファントム全体を覆うように単一エネルギーの光子を一様入射し、ファントム表面でのエネルギーフルエンスをタリーすることでそれぞれのファントム表面での空気カーマ $(K_a)_{ph}$ を算出した。同様に同じ位置で自由空气中（ファントムがない条件）での空気カーマ $(K_a)_{FA}$ を計算し、ファントム効果比 BF を下式により算出した。

$$BF = \frac{(K_a)_{ph}}{(K_a)_{FA}} \quad (4)$$

計算結果の妥当性については、以下のとおり行った。

① 文献値との比較

PW ファントムについては、 0° 照射に関して BF を計算した研究報告^[34]がある。文献値との比較を図 4-4 8 に示した。本研究で得られた PW ファントムに関する計

² 線種、線質によっては、その他 JIS Z 4331^[32]や各線量計規格で規定されるその他のファントムの使用も可能である。

算結果は文献値とよく一致していた。

② 実測との比較

PW ファントムの前面に薄窓形電離箱式線量計（検出器：Keithley 製 96035、電流計：EMF 製 520R）を配置して、N-100 の X 線及び S-Cs の γ 線を照射し、空気カーマ率を測定した。同じ位置でファントムがない条件での空気カーマ率を測定し、式により BF を実験的に求めた。照射条件としては、AP 照射（ 0° 照射）及び PA 照射（ 180° 照射）について実施した。得られた結果を計算により得られた BF とともに図 4-5 6 に示した。ただし、N-100 については連続スペクトルをもつため、平均エネルギー 83.3 keV として図示している。計算値と実測値は概ね一致しており、計算結果の妥当性を確認できた。

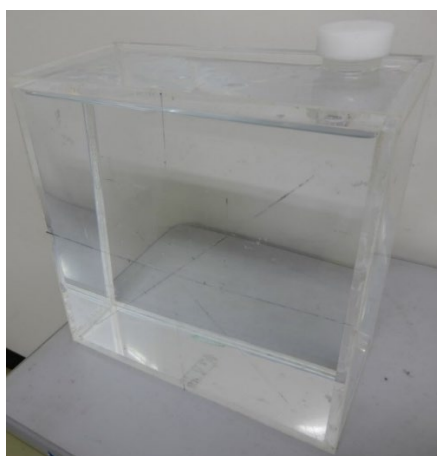
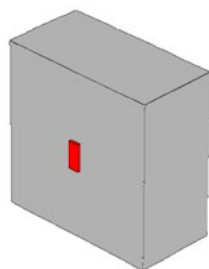


図 4-4 6 PW ファントム

(i)



(ii)

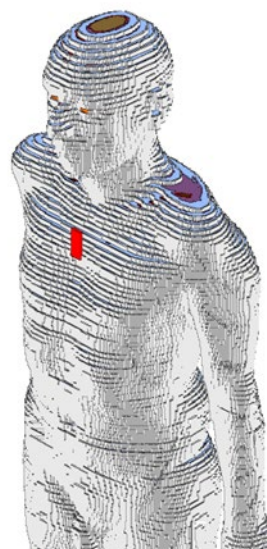


図 4-4 7 計算に用いた(i)PW ファントム及び(ii)AM ファントム
タリー領域を赤で示した。

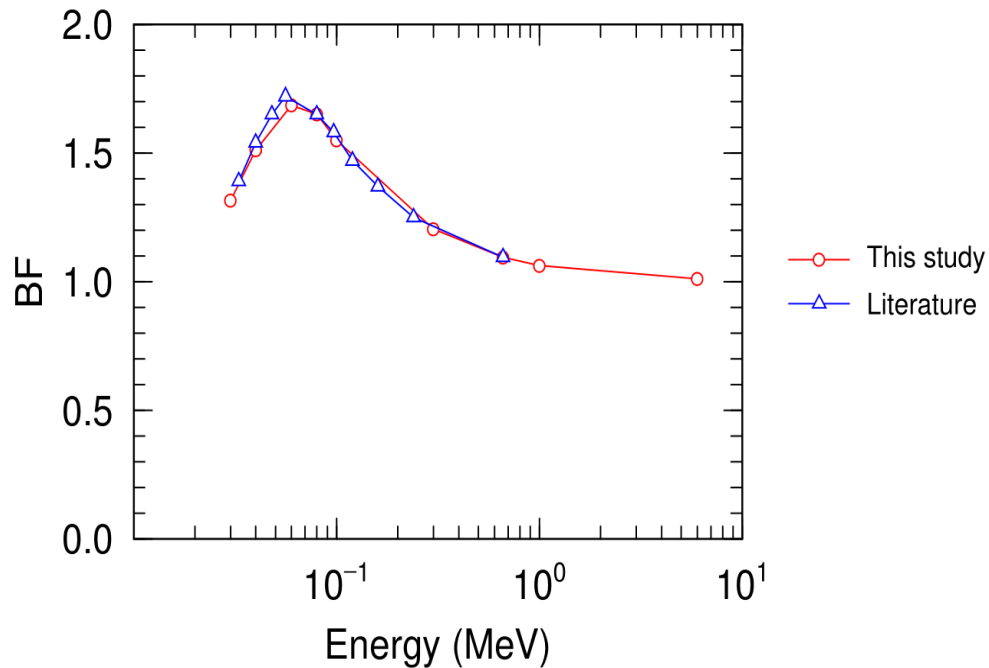


図 4-48 PW ファントムの AP 照射について評価した BF と文献値との比較

(e) 受動形個人線量計を用いた PA 及び ROT 照射試験

校正用の PW ファントム、人体形状を模擬した RANDO ファントムを用いて受動形個人線量計 (OSL 線量計) の照射試験を行った (図 4-49 及び図 4-50 参照)。RANDO ファントムは、胸部のみ (No.10~No.23 スライス) を使用した。OSL 線量計は、PW ファントムについては中央部に 4 個、RANDO ファントムについては胸部中央 No.17 スライスに貼り付けた。照射距離については、ファントム全体が一様に照射されるように 2.000 m とした。照射した線質は、N-40 (平均エネルギー 33.3 keV)、N-100 (平均エネルギー 83.3 keV) 及び S-Cs であり、照射ジオメトリは、AP 照射、PA 照射及び ROT 照射とした。なお、何れのケースでもビルドアップ板は使用しなかった。線量計は新たな実用量である個人線量 H_p で 0.45~4.0 mSv 照射し、照射後、ISO/IEC 17025 に基づく認定を受けた線量測定サービス機関で読み取りを行い、現行実用量である $H_p(10)$ として評価した。それぞれ同時に照射した 4 個の線量計の $H_p(10)$ 評価値の平均を読み取り指示値 C mSv とし、照射した線量の取り決め真値を G mSv とし、以下により線量計の応答 R を以下の式により算出した。

$$R = \frac{G}{C} \quad (5)$$

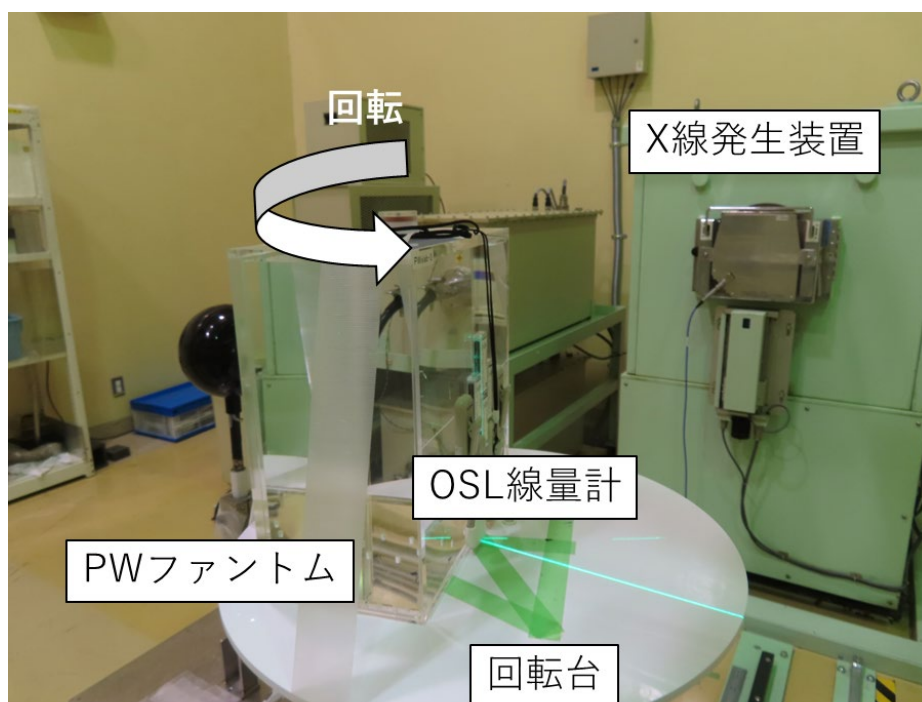


図 4-49 PW ファントムを用いた OSL 線量計の ROT 照射試験の様子

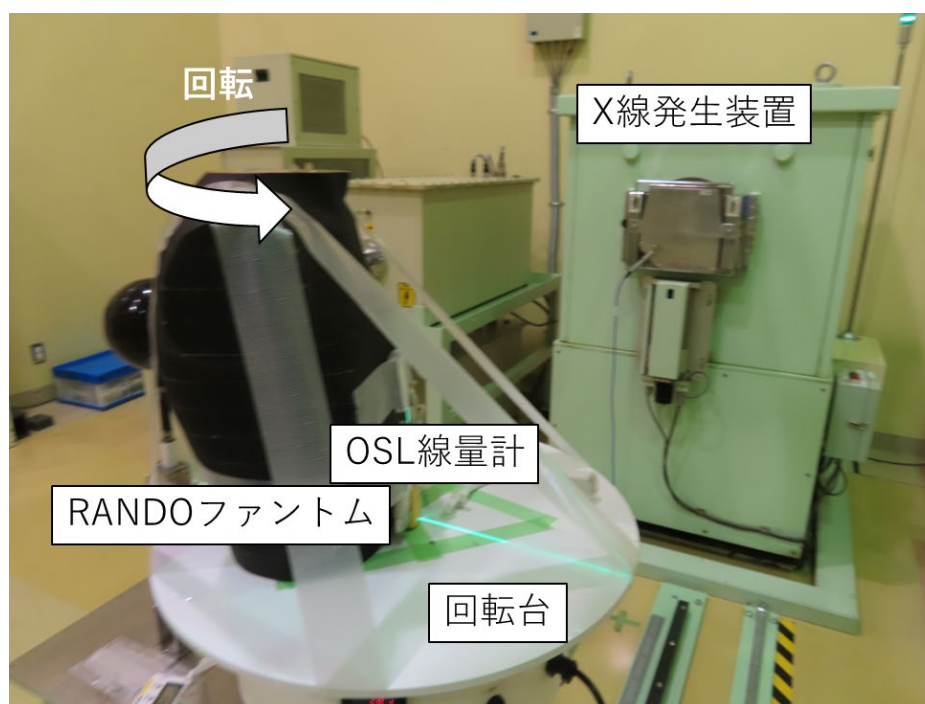


図 4-50 RANDO ファントムを用いた OSL 線量計の ROT 照射試験の様子

(2) 結果と考察

(a) 新たな実用量に対する方向特性試験の検証

電離箱式サーベイメータの方向特性試験の結果を図 4-5 1～図 4-5 3に、受動形個人線量計の方向特性試験の結果を図 4-5 4及び図 4-5 5に示した。現行実用量に対する応答は何れも文献値とよく一致しており、用いた設備や手順の妥当性を確認するとともに、新たな実用量に対するそれぞれの線量計の方向特性も得られた。これらのことから、FRS において新たな実用量に対する方向特性試験が可能であることが実証できた。

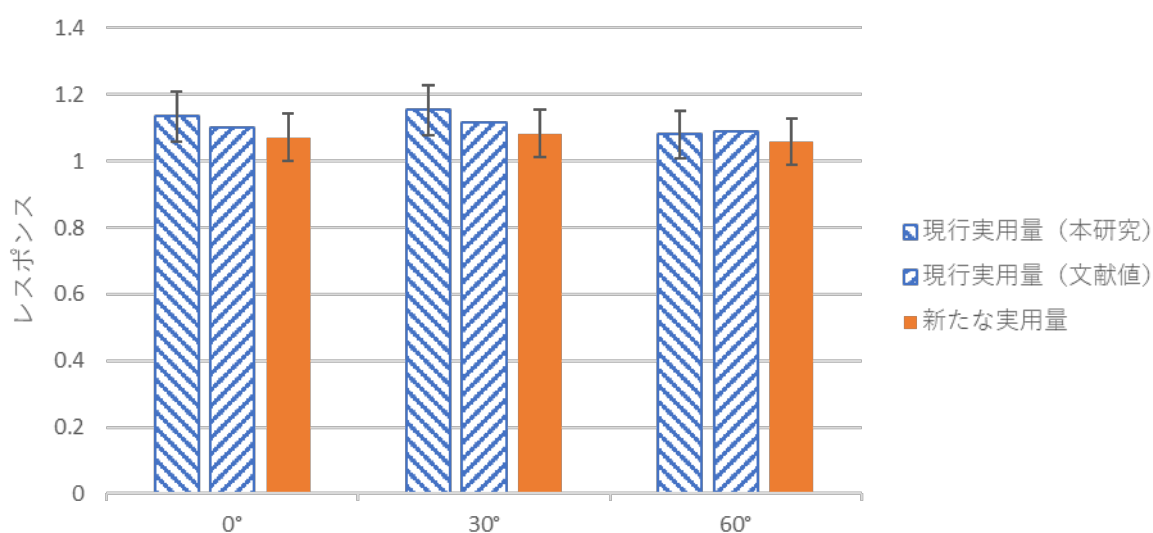


図 4-5 1 電離箱式線量計 (AE-133B) を用いた $H'(0.07)$ 及び $D'_{\text{local skin}}$ に対する方向特性試験結果と文献値^[35]との比較 (光子: N-40)
N-300 に対する $H'(0.07, 0^\circ)$ で規格化している

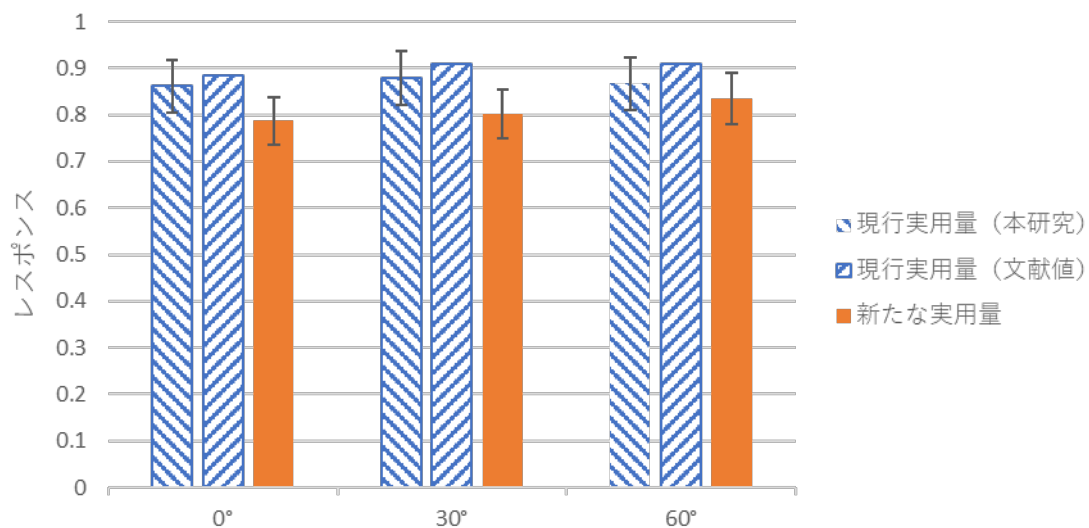


図 4-5 2 電離箱式線量計 (AE-133B) を用いた $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する方向特性試験結果と文献値^[35]との比較 (光子: N-100)
N-300 に対する $H'(0.07, 0^\circ)$ で規格化している

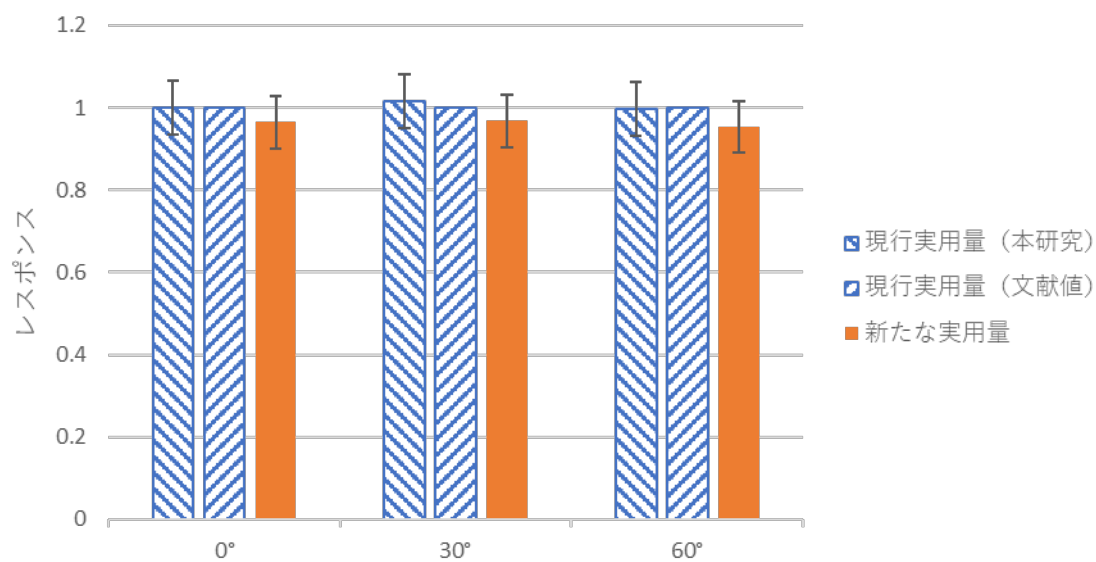


図 4-5 3 電離箱式線量計 (AE-133B) を用いた $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する方向特性試験結果と文献値^[35]との比較 (光子: N-300)
N-300 に対する $H'(0.07, 0^\circ)$ で規格化している

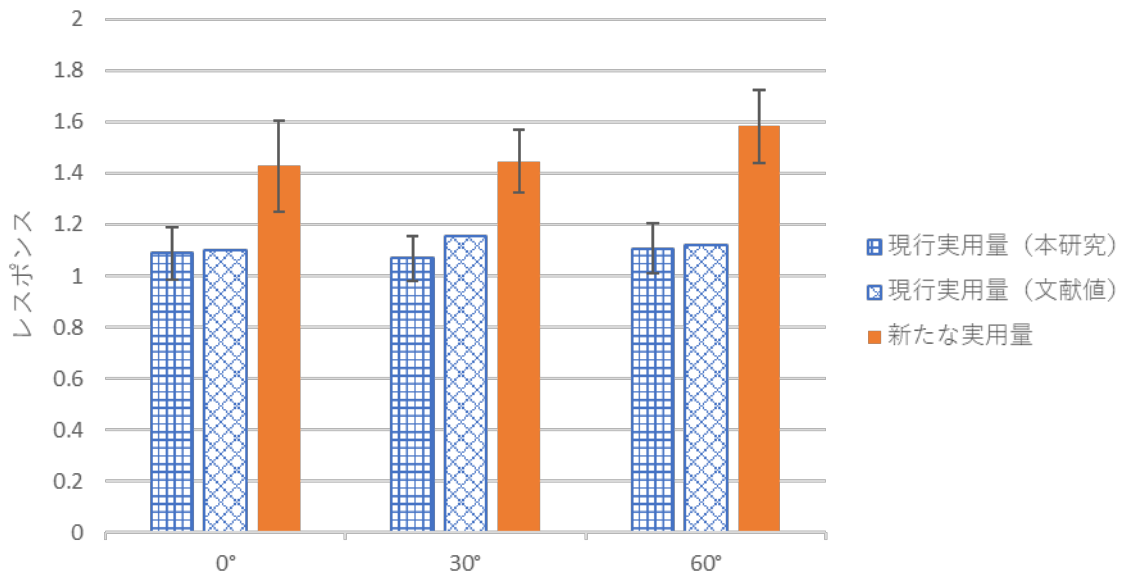


図 4-5 4 OSL 線量計を用いた $H_p(10)$ 及び H_p に対する方向特性試験結果と文献値^[36]との比較 (光子 : N-100)

S-Cs に対する $H_p(10,0^\circ)$ で規格化している

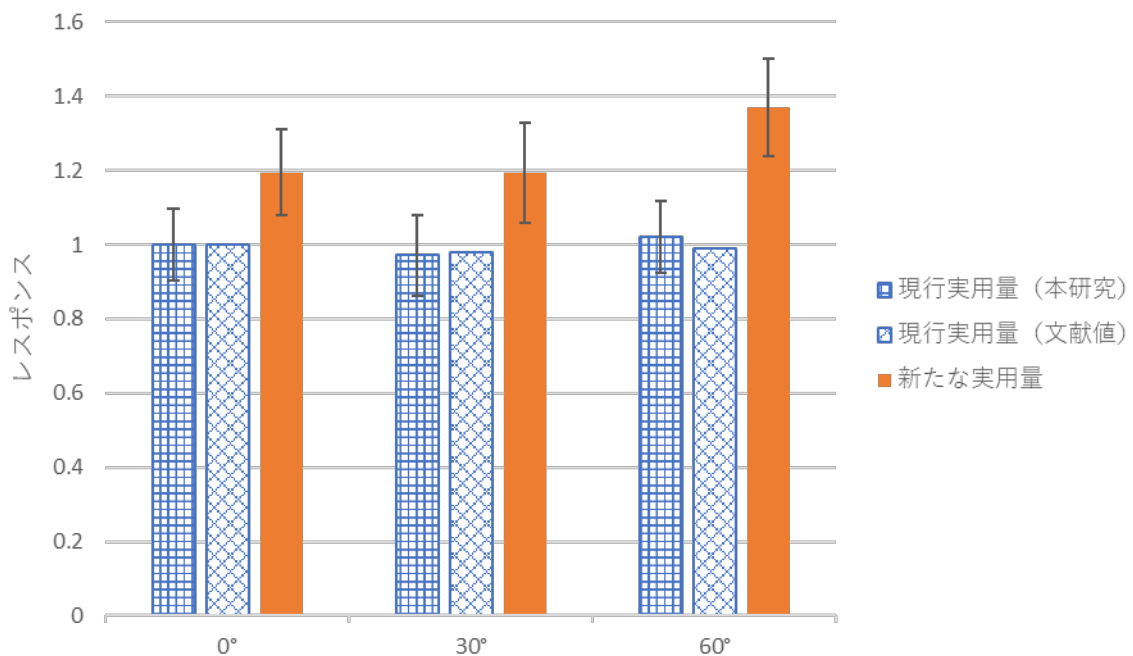


図 4-5 5 OSL 線量計を用いた $H_p(10)$ 及び H_p に対する方向特性試験結果と文献値^[36]との比較 (光子 : S-Cs)

S-Cs に対する $H_p(10,0^\circ)$ で規格化している

(b) PA 照射及び ROT 照射における校正用ファントムの妥当性検証

計算により得られた単色光子の AP 照射、PA 照射及び ROT 照射に対する PW ファントム及び AM ファントムの BF を図 4-5 6 に示す。AP 照射及び ROT 照射においては両ファントムの BF の違いは最大でも 4% に留まっており、PW ファントムはこれらの照射ジオメトリについては、人体の散乱特性を適切に模擬できていると言える。図 4-4 7 に示したとおり、AM ファントムは PW ファントムに比べて散乱体積は大きいものの、胸部には肺などの低密度の組織があるために平均密度としては小さく、散乱特性としては結果的に同程度になったものと考えられる。PA 照射については、662 keV で 15% の違いが見られ、エネルギーが低いほどその違いは大きくなり、30 keV では BF は 3 倍程度 PW ファントムの方が大きくなる。これは、図 4-5 7 に示したとおり、AM ファントムの厚さ (~20 cm) が PW ファントム (15 cm) に比べて大きいことに由来する。

このように PA 照射に対しては、PW ファントムの吸収特性は、人体胸部、腹部相当厚に比べて薄いため、必要に応じて吸収厚の調整等が必要かもしれない (例えば、主として医療用 X 線装置の調整や測定などに使用される胸・腹部用 X 線水ファントム^[37]は 19~20 cm の厚さを有している)。

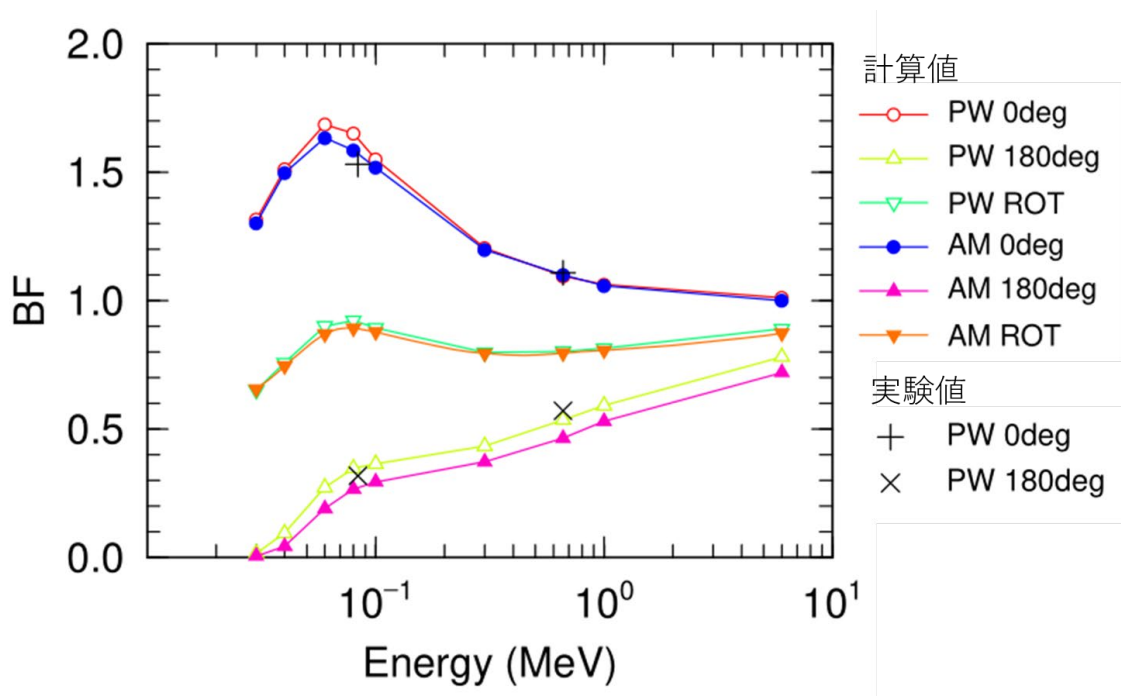


図 4-5 6 PW ファントム及び AM ファントムに対する各照射ジオメトリでの BF

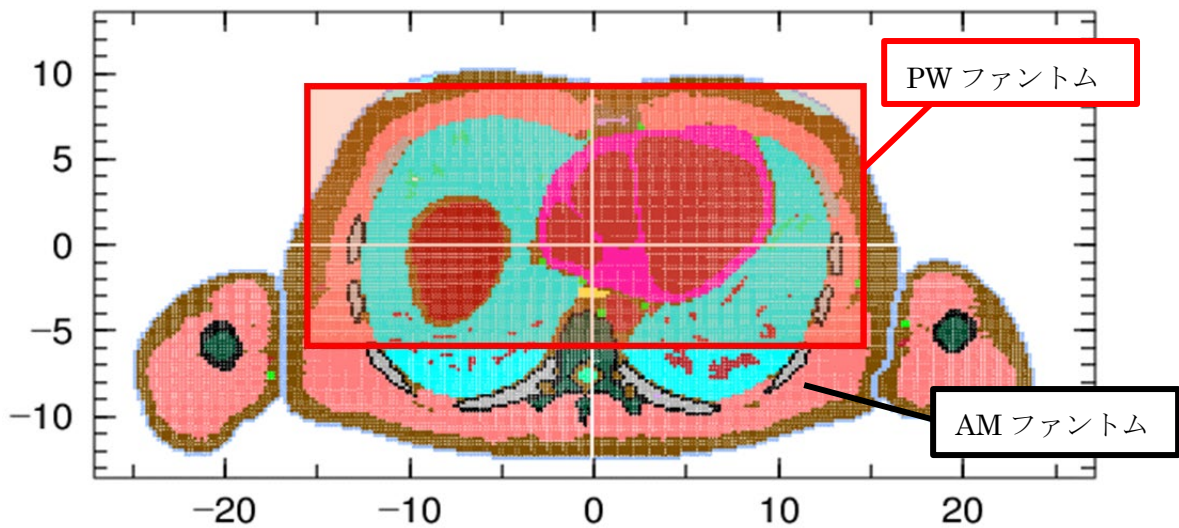


図 4-57 PW ファントムと AM ファントムの断面図による厚さの比較
 図中の数字の単位は cm。両ファントムの胸部中心表面を合わせて示した。

(c) 受動形線量計を用いた PA 及び ROT 照射試験

OSL 線量計の AP 照射、PA 照射及び ROT 照射の結果をそれぞれ図 4-58～図 4-60 に示した。全て新たな実用量 H_p に対する応答として図示している。これらの結果からは、ファントムの違いについては、N-40 に対する ROT 照射以外は有意差が見られなかった。一方で、(b)での評価結果からは、ROT 照射においては PW ファントムと AM ファントムの間で BF に違いが見られるものの PA 照射では差が見られている。これには、RANDO ファントムとの違いや散乱光子に対する線量計応答の違いなどが影響しているものと考えられる。

また、AP 照射と ROT 照射については、3つの線質とも同程度の応答を示した。PA 照射については、線量計は過小応答を示し、特に低エネルギーで顕著である。これは、既存線量計は当然のことながら、現行実用量に則して線量計着点の人体組織下 1 cm での線量当量を測定するような設計となっているため 180° 照射での感度は低下するが、4.2.1でも述べたとおり、定義変更により線量換算係数は 180° 照射においても PA 照射の防護量と同等の値となり顕著に低下しないことに起因すると考えられる。

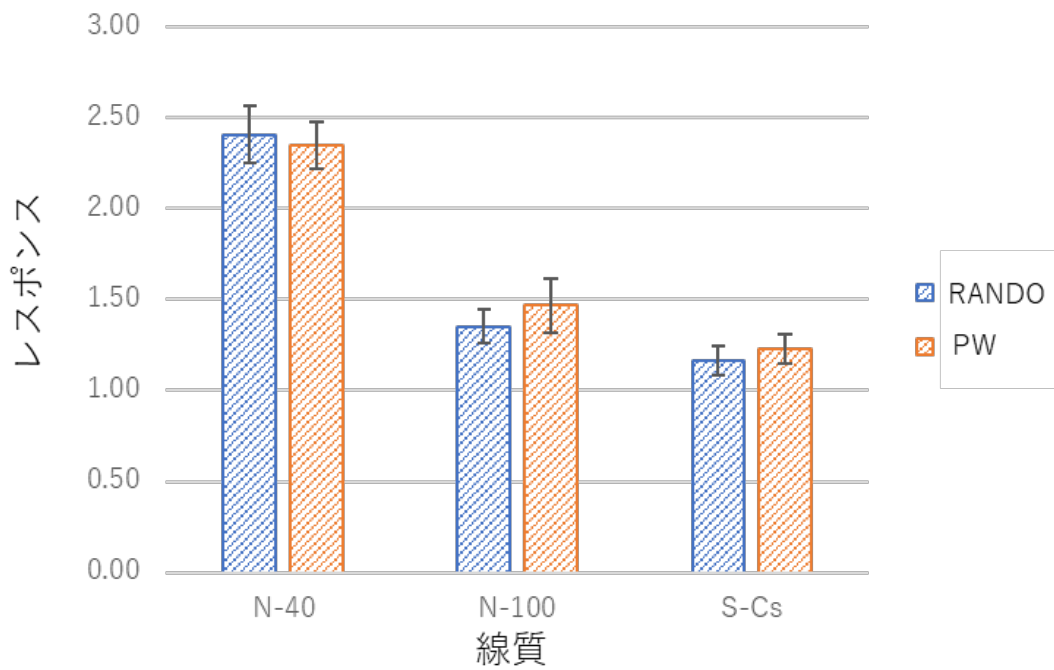


図 4-5 8 OSL 線量計の $H_p(0^\circ)$ レスポンスのファントムによる違い (AP ジオメトリ)

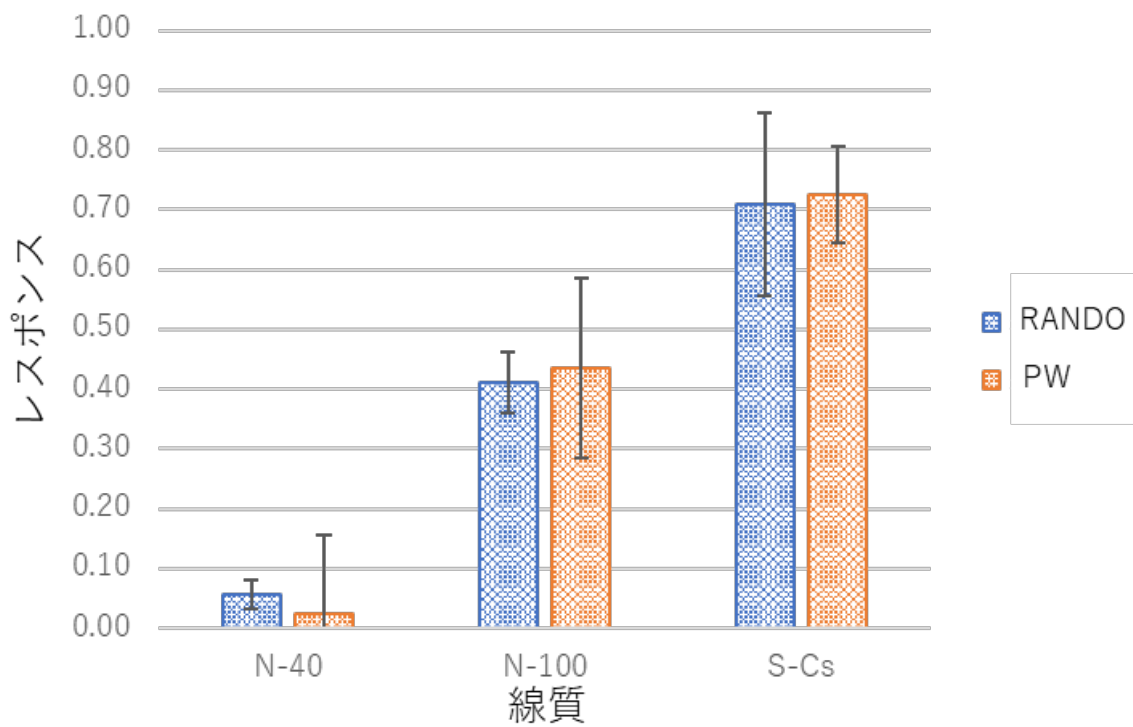


図 4-5 9 OSL 線量計の $H_p(180^\circ)$ レスポンスのファントムによる違い (PA ジオメトリ)

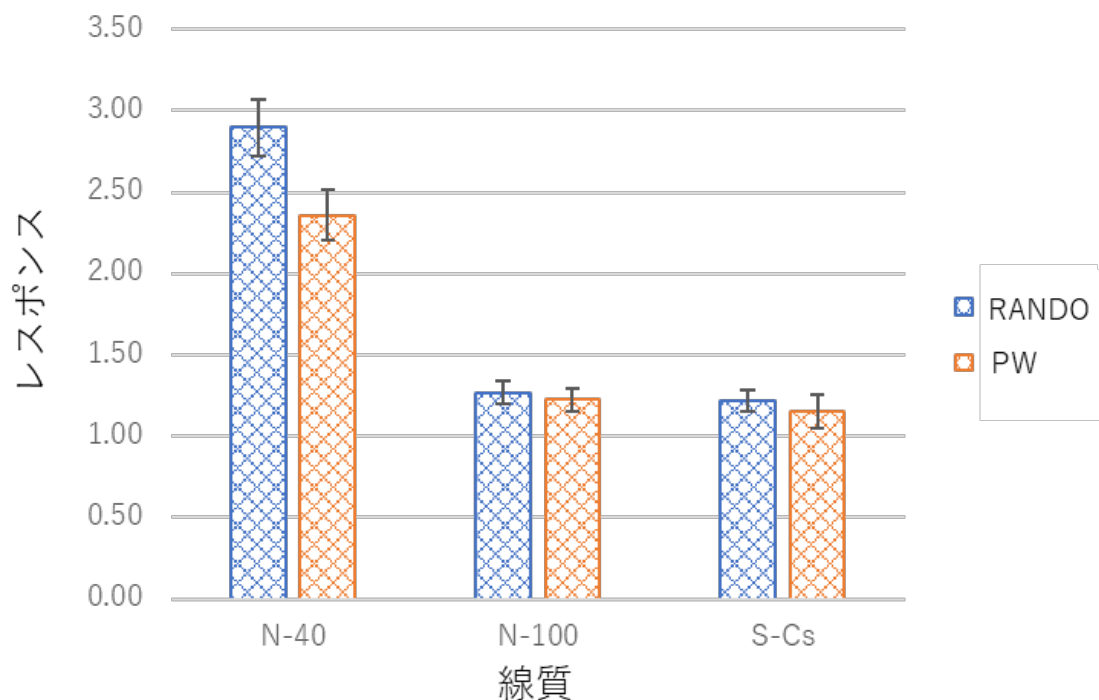


図 4-60 OSL 線量計の $H_p(\text{ROT})$ レスポンスのファントムによる違い (ROT ジオメトリ)

(3) まとめ

FRS で整備する角度制御装置等を用いて、新たな実用量に対して回転照射を含めた線量計の方向特性試験に必要な試験環境を整えた。PA 照射や ROT 照射については、定義変更に伴いこうした試験や性能要求が必要であるかの検討材料に資するためにも、その試験の方法を検討した。特に、個人線量計については、人体による放射線の散乱・吸収を模擬するために従来からファントムに装着した状態で校正や試験が行われてきたが、その際に用いられている PW ファントムについて、PA 照射や ROT 照射での使用の妥当性について検証した。PA 照射については、PW ファントムは人体胸部や腹部吸収散乱特性を適切に模擬できず、特に低エネルギーでは顕著である。一方で ROT 照射では、PW ファントムでも妥当であると考えられるが、散乱線のエネルギー・角度分布など線量計応答に影響を与える可能性があるため、特に低エネルギー光子などではさらに詳細に検討する必要があるかもしれない。また、本調査では、光子に対する体幹部用ファントムについてのみ検討を行った。中性子や頭部用ファントム（シリンダーファントム）などについても今後同様な手法を用いて検討しておく必要があると考えられる。

受動形線量計を例に、PA 照射や ROT 照射に対する応答特性を取得した。ROT 照射では 0° 照射に近い応答が得られたが、PA 照射では特に低エネルギー光子で著しく過小応答する。ただし、事故時などを除いては、PA 照射だけを考慮しなければならない

被ばく状況は特殊であり、線量計に 180° 特性をどこまで求めるかは十分に議論する必要があろう。

4.2.1 トレーサビリティ確保に関する調査

FRS は産業標準化法に基づく試験所として登録されており、国家標準とトレーサビリティを確保して現行実用量を用いた試験サービスを実施している二次標準機関である。本事業では、二次標準機関である FRS と国家標準である産業技術総合研究所の双方において実施された線量計の特性試験を基に、新たな実用量に対する線量計の応答をそれぞれ独立して評価したものを比較することにより、結果の同等性を確認することとした。

(1) 方法

比較には、FRS 及び国家標準双方において実施された電離箱式サーベイメータ（日本レイテック社製 ICS-1323）及び受動形個人線量計（長瀬ランダウア社製 OSL 線量計）の特性試験結果を利用した。試験された線質は光子に対する N-100 及び S-Cs である。電離箱式サーベイメータは同一個体について照射された結果を基に、 H^* に対する応答をそれぞれ評価した。なお、本機種は光子に対する $H^*(10)$ を表示する型式のものである。一方、受動形個人線量計については、同一型式の線量計 5 個をそれぞれ照射された結果を基に、 H_p に対する応答を評価した。

線量計応答は、以下の式で定義される E_n 数により比較した。 E_n 数は 1 以下の場合、不確かさの範囲内で一致しているとみなすことができる。

$$E_n = \frac{|R - R_{\text{ref}}|}{\sqrt{u^2 + u_{\text{ref}}^2}} \quad (6)$$

ここで、 R は線量計の応答であり、 u はその拡張不確かさである。添え字の ref は、参照試験所（ここでは国家標準機関での結果）における対応する試験結果を示している。

(2) 結果と考察

それぞれの評価した結果を表 4-37 及び表 4-38 に示した。何れも E_n は 1 以下であったことから、両者の結果は不確かさの範囲内で一致していた。すなわち、新たな実用量を用いた線量計の特性試験に関して、二次標準機関においても国家標準機関と同等の結果を得ることができた。

表 4-37 電離箱式サーベイメータの H^* 応答の比較

線質	FRS	国家標準	E_n
S-Cs	1.23 (4.8%)	1.19 (3.4%)	0.57
N-100	1.23 (5.1%)	1.22 (4.4%)	0.08

()内は相対拡張不確かさを表す。

表 4-38 受動形個人線量計の $H_p(0^\circ)$ 応答の比較

線質	FRS	国家標準	E_n
S-Cs	1.21 (6.4%)	1.27 (4.6%)	0.65
N-100	1.45 (4.6%)	1.48 (4.9%)	0.29

()内は相対拡張不確かさを表す。

(3) まとめ

光子用線量計については、新たな実用量が導入されたとしても、引き続き現状のトレーサビリティ体制で多くの実用器に対する校正や試験を二次標準機関で実施できることが実証できた。今後は方向特性試験やその他の線種（ β 線や中性子）についても同等性が確保できるかを実証していくことが必要であろう。

4.3 線量計の特性評価に関する調査

令和3年度事業報告書^[7]では、サーベイメータ3機種及び個人線量計4機種を対象として、光子についてはS-Cs、N-80及びN-100、β線については⁹⁰Sr/⁹⁰Y、中性子については熱中性子及び速中性子(²⁴¹Am-Be、²⁵²Cf)に関して新たな実用量に対する校正定数が示されている。さらに、一部の機種や線質については、エネルギー特性試験結果についても記載されている。本事業では、国内で入手可能な光子・β線用サーベイメータ1機種、中性子用サーベイメータ1機種、光子・β線用受動形個人線量計(体幹部用)1機種、中性子用受動形個人線量計(体幹部用)1機種、光子・β線用電子式個人線量計1機種、中性子用電子式個人線量計1機種、光子・β線用受動形個人線量計(水晶体用)1機種の計7機種について、4.2.1で線量換算係数を求めた校正・試験場を利用してエネルギー・方向特性試験を実施し、新たな実用量に対する技術的な課題点を抽出する。

(1) 方法

使用した線量計を表4-39に示す。本調査の目的は個々の線量計の性能を示すものではなく、実用量の定義変更に伴う線量計測上の課題を探るために、線量計特性の傾向を把握すること主眼を置いている。また、校正に用いた線質も製造メーカー等が推奨している線質とは必ずしも一致しておらず、各線量計の定格範囲に関係なく可能な範囲でエネルギー・方向特性試験を行っていることに注意が必要である。さらに、受動形線量計を除いては各1個体に対してのみ評価したものであり、器差についても考慮に入れられていないため、型式を代表する結果でもない。受動形線量計については、各線質に対して4個の線量計を照射し、JIS Z 4345^[38]等に従い不確かさを評価した。H(3)については、現在法令での測定が要求されておらず、規格にもその許容範囲が示されていないが、ICRU Report 95^[5]に記載された全てのケースを検討するために調査に含めた。一方で、末端部の線量評価にかかる線量計については、本調査では対象としなかった。

試験方法は、各線量計に対するJIS規格に従って実施し、線量計の応答は以下のとおり算出した。

$$R = \frac{G}{C} \quad (7)$$

ここで、 C は基準器により測定した空気カーマ(率)、組織吸収線量(率)、もしくはフルエンス(率)に4.2.1で評価した線量換算係数を作用することによって求めた現行または新たな実用量に対する基準線量(率)、 G は線量計の正味指示値である。A社製電離箱式サーベイメータについては、通気型であるため、その取扱説明書に従い、大気条件補

正を施した。受動形線量計については、ISO/IEC 17025 の認証を有する線量測定サービス機関に読み取り測定を依頼した。試験の様子を図 4-6 1 ～図 4-7 3 に示す。

表 4-39 新たな実用量に対する試験に用いた線量計の種類と特徴

線量計の種類*1	測定量	主な仕様
(i) 光子用サーベイメータ β線用サーベイメータ	A社製電離箱式サーベイメータ $H^*(10)^{*2}$ $H(3)^{*2}$ $H(0.07)$	検出器：薄膜入射窓平行平板電離箱 測定範囲：60 keV～3 MeV（光子） $^{147}\text{Pm} \sim ^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ （β線）
(ii) 中性子用サーベイメータ	B社製中性子用サーベイメータ $H^*(10)$	検出器： ^3He 比例計数管 測定範囲：0.025 eV～約 15 MeV
(iii) β線用電子式個人線量計 （体幹部用）	C社製電子式個人線量計（体幹部用） $H_p(10)$ $H_p(0.07)$	検出器：半導体 測定範囲：15 keV～7 MeV（光子） 0.22 MeV～2.3 MeV（β線）
(iv) 光子用受動形個人線量計 （体幹部用） β線用受動形個人線量計 （体幹部用）	D社製受動形個人線量計（体幹部用） $H_p(10)$ $H_p(0.07)$	検出器：OSL 測定範囲：5 keV～10 MeV（光子） 150 keV～10 MeV（β線）
(v) 光子用受動形個人線量計 （水晶体用） β線用受動形個人線量計 （水晶体用）	E社製受動形個人線量計（水晶体用） $H_p(3)$	検出器：TLD 測定範囲：15 keV～6.3 MeV（光子） 1.0 MeV～3.0 MeV（β線）
(vi) 中性子用電子式個人線量計	F社製電子式個人線量計（体幹部用） $H_p(10)$	検出器：シリコン半導体 測定範囲：0.025 eV～15 MeV
(vii) 中性子用受動形個人線量計	G社製受動形個人線量計（体幹部用） $H_p(10)$	検出器：ADC（CR-39） 測定範囲：0.025 eV～0.5 eV（熱中性子） 24 keV～15 MeV（速中性子）

*1 複数記載されているものについては、複数の線種を測定できるタイプのもので、それぞれに対して試験した。

2 $H^(10)$ 用または $H(3)$ 用付属フィルタを装着することによって測定する

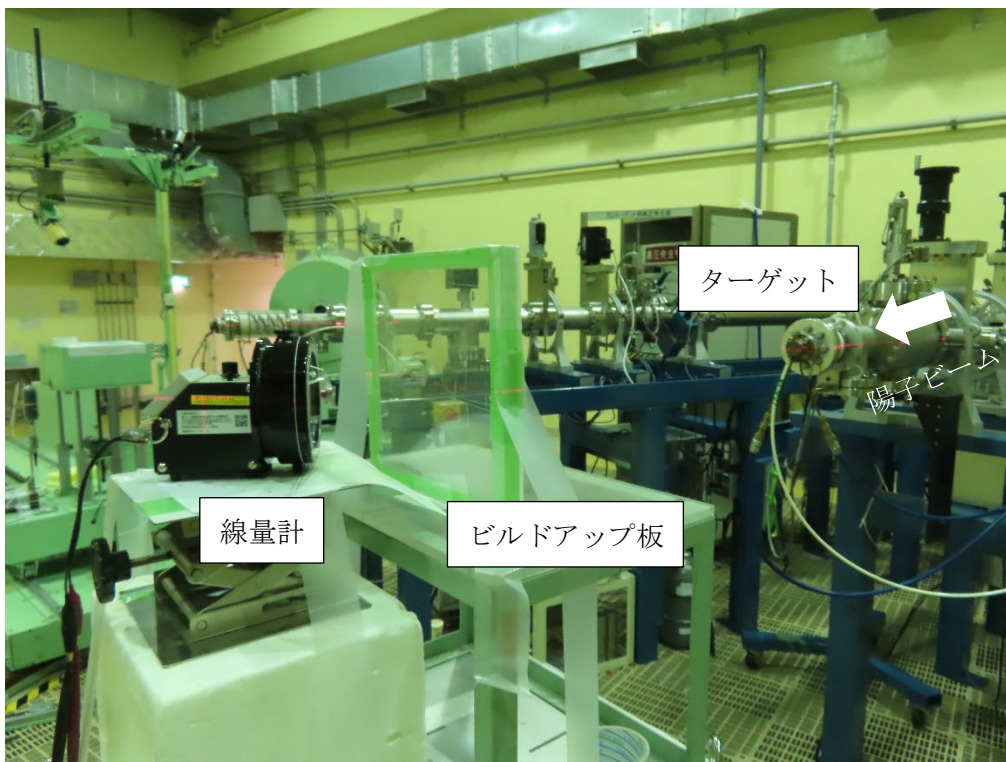


図 4-6 1 A 社製電離箱式サーベイメータの高エネルギー γ 線に対する特性試験の様子

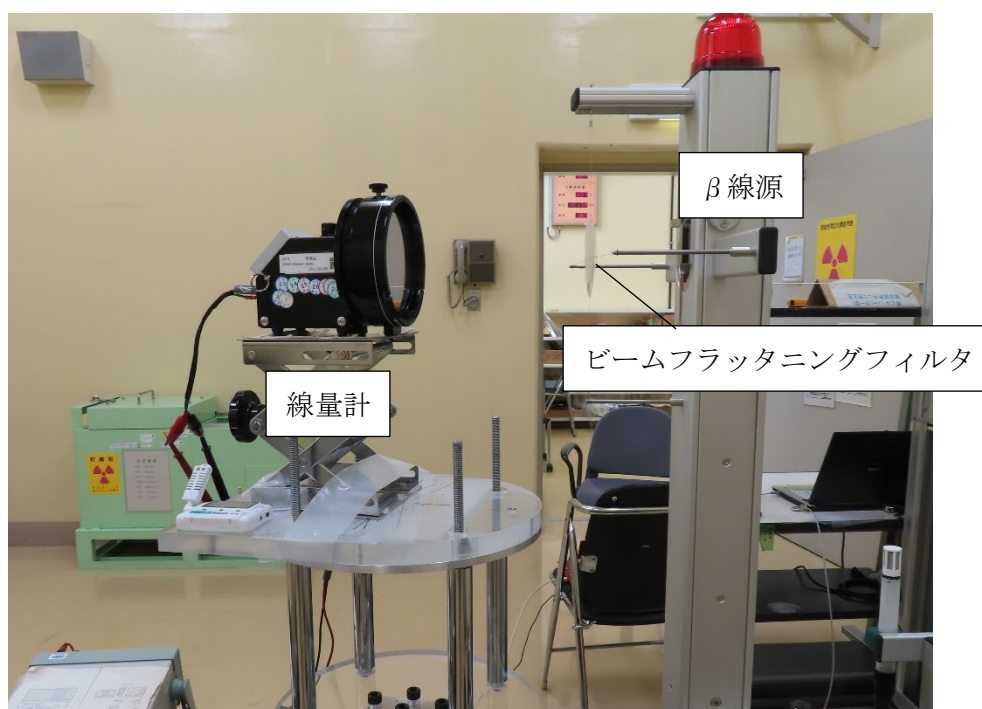


図 4-6 2 A 社製電離箱式サーベイメータの β 線に対する特性試験の様子

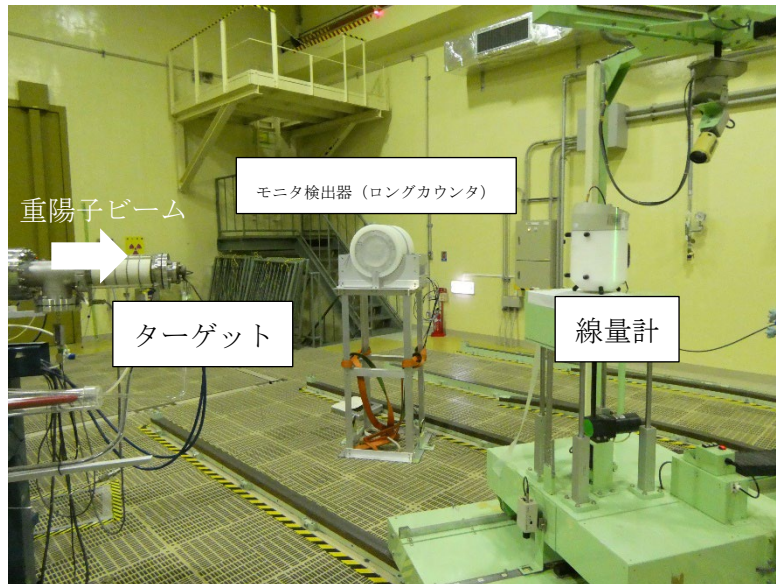


図 4-6 3 B 社製中性子用サーベイメータの単色中性子に対する特性試験の様子



図 4-6 4 C 社製電子式個人線量計（体幹部用）のβ線に対する特性試験の様子

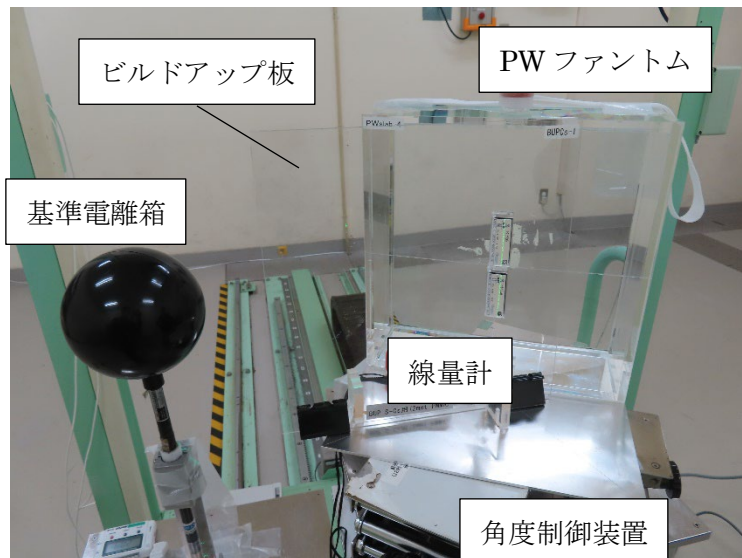


図 4-6 5 D社製受動形個人線量計（体幹部用）の γ 線に対する特性試験の様子

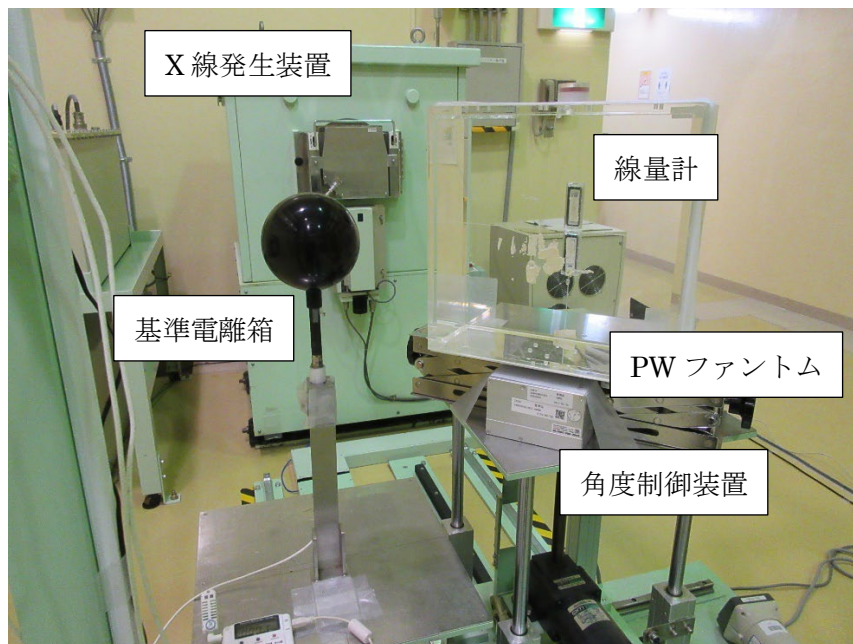


図 4-6 6 D社製受動形個人線量計（体幹部用）のX線に対する特性試験の様子

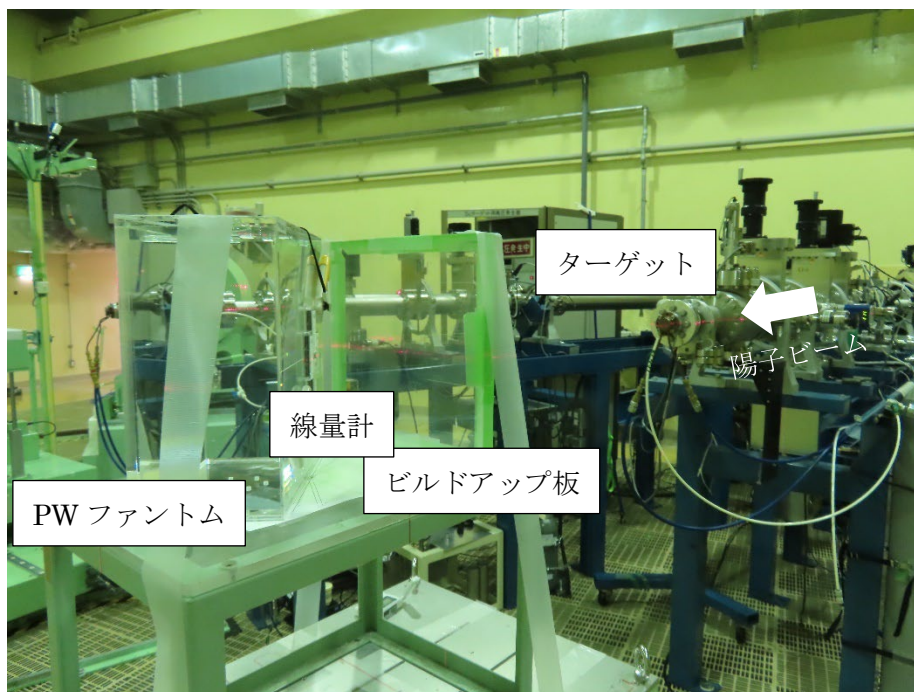


図 4-67 D社製受動形個人線量計（体幹部用）の高エネルギー γ 線に対する特性試験の様子



図 4-68 D社製受動形個人線量計（体幹部用）の β 線に対する特性試験の様子

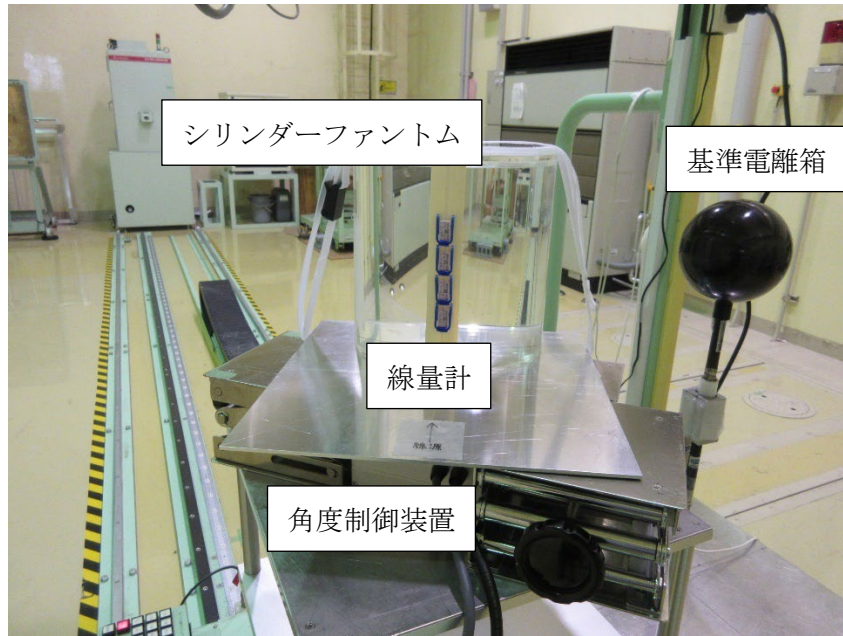


図 4-69 E社製受動形個人線量計（水晶体用）のX線に対する特性試験の様子

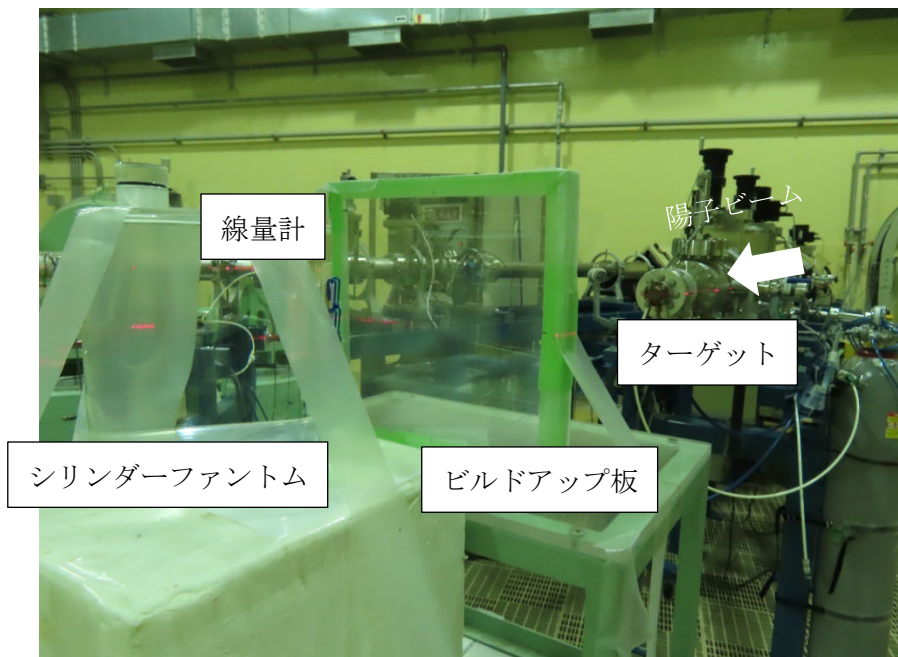


図 4-70 E社製受動形個人線量計（水晶体用）の高エネルギー γ 線に対する特性試験の様子

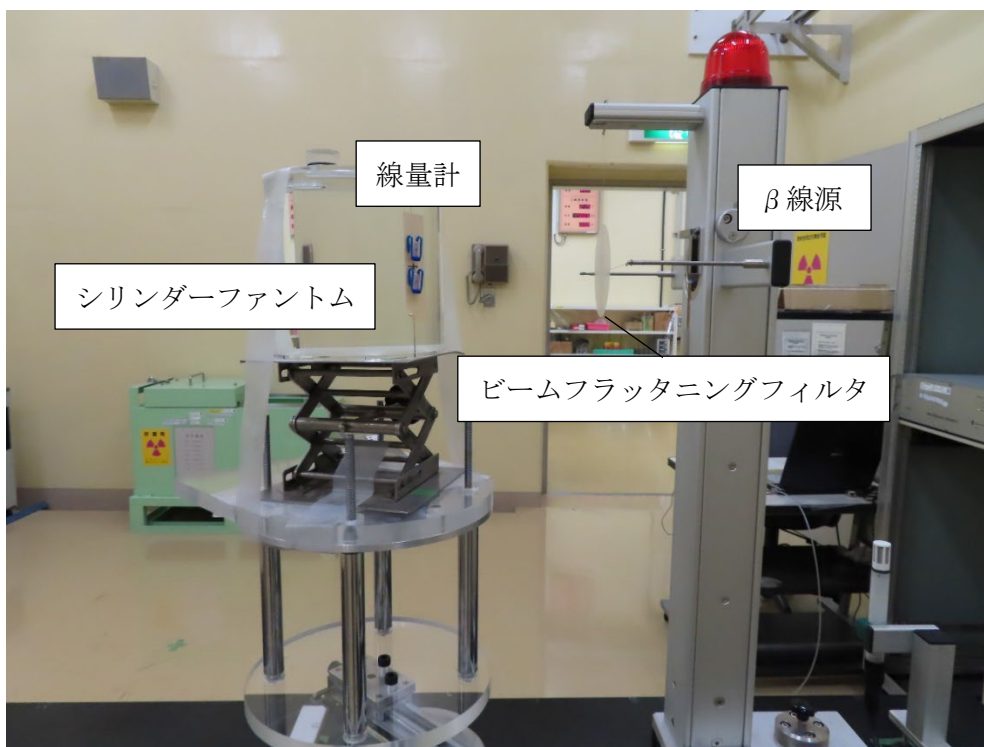


図 4-7 1 E社製受動形個人線量計（水晶体用）のβ線に対する特性試験の様子

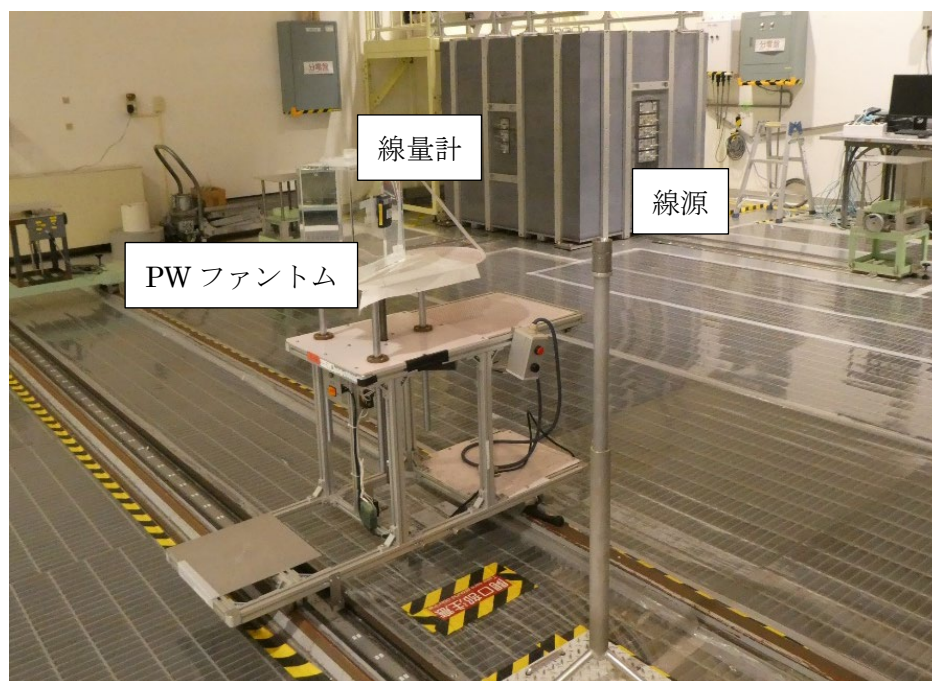


図 4-7 2 F社製中性子用電子式個人線量計の速中性子に対する特性試験の様子

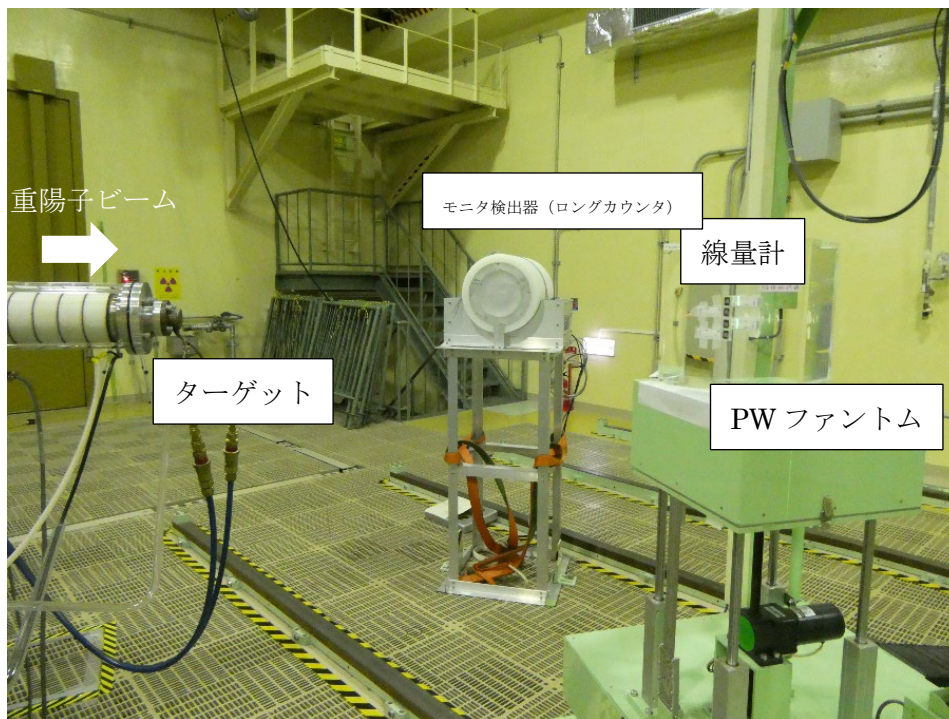


図 4-7 3 G 社製中性子用受動形個人線量計（体幹部用）の単色中性子に対する特性試験の様子

(2) 結果と考察

特性試験の結果を図 4-7 4～図 4-1 2 7 に示す。光子及び β 線に関して図中に示した破線は IEC 62387^[39] に規定される許容範囲を示している。ただし、この許容範囲は、現行実用量に対するものであり、また各線量計の定格範囲を考慮せず、試験した全範囲に関して図示していることに注意が必要である。 $H^*(3)$ については、IEC 62387^[39] に規定がないため図示していない。現行実用量と新たな実用量での応答の比較から示唆される事項（課題）と検討した対応策について以下にまとめた。

① 光子用サーベイメータ（A 社製電離箱式サーベイメータ）

（図 4-7 4～図 4-8 8 参照）

- ・ H^* 特性については、N-40 に対しては過大応答をする。
- ・ D'_{lens} 及び $D'_{\text{local skin}}$ 特性は、エネルギー、入射角によらず現行実用量と大きく変化しない。

【検討した対応策】

- ・ H^* 特性については、新たな実用量 H^* で再校正（規格化）することにより、全体的な過大応答は軽減されるものの、低エネルギーにおける現行許容範囲幅から逸脱した過大応答について解消できるほどではない。本機種は、ユーザーによる校正定数

の調整が可能のため、こうした対応を講ずることは容易であり、また読み値に大きな校正定数を乗ずる必要もない。一方で、こうした対応をした場合、 D'_{lens} 及び $D'_{\text{local skin}}$ 特性にも影響する。しかし、S-Csの新実用量 H^* で校正された場合には一律に応答は過小になるものの、入射角が大きくなっても、現行許容範囲幅にはほとんどのケースで収まる。

- 本機種は、樹脂製 1 cm 線量当量用フィルターを検出器前面に装着することによって現行の $H^*(10)$ を測定できるようにしている。このフィルターの素材や厚さを調整することによって、低エネルギーにおける H^* 特性を改善できる可能性がある。この場合は、他の特性 (D'_{lens} 及び $D'_{\text{local skin}}$ 特性)にも影響しない。
- 低エネルギー光子に対する過大応答の許容範囲の検討も考えられる。新たな実用量は防護量と近い値となるため、過小評価とならないよう、過大評価に対しては許容できる範囲を広くとるといった考え方もあり得る。
- 低エネルギーの特性を改善するために、電極構造などを工夫する設計変更も対応策の1つではあるが、これは製造メーカーの対応となるほか、他の特性に影響を与えないか慎重な検討が必要であることから、コストと時間を要すると考えられる。

② 光子用受動形個人線量計 (D社製受動形個人線量計 (体幹部用))

(図 4-103 図 4-74 ~ 図 4-108 参照)

- ①と同様 H_p 特性に関しては、低エネルギーで過大応答となる。
- 60° までは入射角によって H_p 特性はそれほど大きくは変化しない。

【検討した対応策】

- ①と同様、新たな実用量 H_p で再校正することにより、 45° までは N-40 でも 2.1 倍程度の過大応答に留まる。
- 本線量計は複数の検出素子を持ち、各素子の読み取り結果を基に、線量評価アルゴリズムにより実用量を評価している。線量評価アルゴリズムの H_p への最適化により改善できる可能性がある。また、これらの素子は材料や厚さの異なったフィルターにより覆われているが、フィルター構造の見直しが必要になるかもしれない。何れにせよ、これらは製造メーカーや線量測定機関でないと対応できない。

③ 光子用受動形個人線量計 (E社製受動形線量計 (水晶体用))

(図 4-111 ~ 図 4-116 参照)

- $D_{p\text{lens}}$ 特性に関しては、現行実用量と変わらず良好であり、これだけに着目すると対応は不要と考えられるが、⑥項に後述する課題がある。

④ β 線用サーベイメータ (A社製電離箱式サーベイメータ)

(図 4-89 ~ 図 4-96 参照)

- ・本機種は①に示した光子とともに、 β 線も測定できるように開発されたものであるが、 β 線に対する $D'_{\text{local skin}}$ 特性は非常に良く、特段の対応をしなくとも、 ^{147}Pm に対する 75° での特性のようなかなり厳しい条件を除いては、良好な応答を示している。①の対応策で示したように S-Cs に対する H^* で校正（規格化調整）されたとしても図4-95に示すように、その応答特性は許容範囲内である。
- ・ β 線に対する D'_{lens} 特性は、線量換算係数の評価でも予想されたとおりに非常に悪くなる。

【検討した対応策】

- ・ β 線に対する D'_{lens} 特性については、フィルターや設計の変更が必要になるものと思われる。これは、当該機種に限らず、 β 線に対する $H'(3)$ 測定器共通の懸念事項であろう。その際には、光子の特性も考慮する必要がある。ただし、現状でも $H'(3)$ 測定の法的要求はなく、 $H'(3)$ モニタリングはほとんど行われていない。

⑤ β 線用受動形個人線量計（D社製受動形個人線量計（体幹部用））

（図4-109～図4-110参照）

- ・ β 線に対する $D_{\text{p local skin}}$ 特性については、現行実用量と変わらないため、特段の対応なく適切に測定できると考えられる。

⑥ β 線用受動形個人線量計（E社製受動形線量計（水晶体用））

（図4-117参照）

- ・①と同様、 β 線に係る $D_{\text{p lens}}$ の特性は大きく変化する。本機種は1つ素子で光子及び β 線を区別することなく線量を測定するタイプのものであるため、光子に対して校正を行うと β 線に対しては過大応答し、 β 線に対して校正を行うと光子に対しては過小応答することになる。

【検討した対応策】

- ・ β 線に対する 30° までの過大応答を許容すれば、光子で校正することにより、設計変更なしに継続使用できる可能性がある。
- ・フィルターの設計変更により β 線に対する特性の改善が見込まれるが、その際には光子の特性も考慮する必要がある。

⑦ β 線用電子式個人線量計（C社製電子式個人線量計（体幹部用））

（図4-97～図4-102参照）

- ・ β 線に対する $D_{\text{p local skin}}$ 特性は、 75° のような厳しい条件を除いては、現行と変わらず良好な応答を示しているため、特段の対応なしに引き続き使用が可能なものと考えられる。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の入射角 75° に対しては、過小応答するが、特異的に β 線が 75° からのみ入射するようなケースは想定しづらく、実用上の問題は生じないもの

と推察される。

⑧ 中性子用サーベイメータ (B社製中性子サーベイメータ)

(図 4-1 1 8～図 4-1 1 9 参照)

- ・ $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ や ^{252}Cf など数 MeV 付近にエネルギー分布をもつ中性子場の測定においては良好であり、実用量変更による影響は軽微である。従来の $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ や ^{252}Cf 線源を用いた校正により、サーベイメータの計数と線量当量を対応付ける手法が引き続き適用可能と思われる。一方、熱中性子場や、1MeV 以下の中性子が支配的な場においては、現行で過小応答していたものが、過大応答に転じる。

【検討した対応策】

- ・低エネルギー中性子に対するレスポンスを下げるハード的な改良、もしくは、熱中性子校正場で別途校正を行い、測定する中性子場のエネルギー分布に応じた校正定数を使用するなどのソフト面での対応が必要になると思われる。使用場所が限定されるサーベイメータにおいては、作業環境模擬中性子場の利用も検討するとよい。

⑨ 中性子用受動形個人線量計 (G社製受動形個人線量計 (体幹部用))

(図 4-1 2 4～図 4-1 2 7 参照)

- ・ H_p 特性に関しては、MeV 領域の中性子場においては良好な応答を示しており、実用量変更による影響も軽微である。565keV など、MeV 以下の領域では、実用量の変更により過大応答する兆候が見られる。角度依存性については、入射角度が大きくなるにつれ、レスポンスが低下する傾向が見られた。

【検討した対応策】

- ・ラジエータやコンバータ、線量評価アルゴリズムの調整で対応できる可能性があるが、より詳細な検討が必要である。

⑩ 中性子用電子式個人線量計 (F社製電子式個人線量計 (体幹部用))

(図 4-1 2 0～図 4-1 2 3 参照)

- ・ $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ と ^{252}Cf の間でも顕著な応答の違いが見られ、エネルギー依存性が大きいと思われる。特に 565 keV では、レスポンスが入射角度によらず 0.2 程度と、大きく過小評価した。角度依存性については、入射角度が大きくなるにつれレスポンスが低下する傾向が、 $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ や 5 MeV などエネルギーの高い中性子に対して見られた。ただし、これらについては現行実用量でも同様の傾向であり、線量計の有する特性と考えられる。

(3) まとめ

国内で入手可能な7機種の線量計について、エネルギー・方向特性試験を実施した。

その結果、以下の知見を得た。

- 実効線量の管理に用いる実用量を測定する光子用の線量計に関しては、新たな実用量での校正が必要であるとともに、低エネルギー光子に対する過大応答についての対応を検討すべきである。ただし、今回調査したエネルギー範囲は、N-40 (33 keV) までであるため、詳細な対応策を検討するには、さらに低エネルギー領域での試験が望まれる。
- 60° までの方向特性については、 β 線に対する水晶体用線量計を除いて調査した範囲内では許容可能な範囲での変化に留まっていた。
- 低エネルギー光子に対する特性改善策としては、線量計の構造にも依存するが、本調査で用いたサーベイメータや個人線量計のようにフィルター素材、厚さの変更、または受動形個人線量計に関しては、線量評価アルゴリズムの変更³により対応できる可能性がある。
- $D_{p\text{ lens}}$ または D'_{lens} を測定対象とする β 線用サーベイメータ及び個人線量計については、0° では 2 倍以上の過大応答し、その方向特性も悪化するため、改善が必要である。フィルターの変更などで改善できる可能性があるが、今回調査したような 1 つの検出器で光子及び β 線を同時に測定する線量計に対しては、光子の特性も同時に考慮する必要があり、双方の特性を阻害しないような措置が必要となる。
- 中性子用サーベイメータについては、MeV 領域の中性子が支配的な場の測定では実用量変更による影響は軽微であるが、低エネルギー領域では現行で過小応答していたものが過大となる。測定する中性子場のエネルギーに応じた校正定数の使用や作業環境模擬中性子場での校正（使用場所が限定される場合）、低エネルギー中性子の感度を下げる設計変更などが対応策として考えられる。
- 中性子用個人線量計についても、同様に MeV 領域では良好な特性を示すが、低エネルギー領域での過大応答、入射角度の増大に伴う過小応答の傾向がみられる。ラジエータやコンバータ、線量評価アルゴリズムの調整で対応できる可能性があるが、より詳細な検討が必要である。
- 中性子線量計は、レスポンスのエネルギー依存性が大きく、小型の設計が求められる個人線量計では特に顕著である。また、線量換算係数が大きい数 MeV の領域で適切な応答を示すように校正されることが一般的であるため、1 MeV 以下にエネルギー分布をもつ中性子場で、著しく過大もしくは過小応答する例も見られる。
- 実用量はモニタリングに使用する防護量の代用量であるという観点や改善に必要なコスト等も踏まえた上で、特に線量計が過大応答に関する許容範囲について再検討することが望ましいと考えられる。

³ サーベイメータについても $G(E)$ 関数等を用いて $H^*(10)$ のカーブに合わせているものについては同様の対応が可能かもしれない

これらの課題や対応策については、線量計の構造や設計思想、想定使用範囲に大きく依存するため、原則的にはケースバイケースになる。しかし、法令に基づく外部被ばくによる個人線量評価に使用される線量計の種類は国内では数種類に限られることから、これについては課題となる点を個々に調査することは可能であると考えられる。サーベイメータなどについては、さまざまな種類のものが放射線管理の現場で使用されているものの、検出原理や使用状況に応じてその影響の傾向を把握することは可能と考えられ、今後もこうした調査を継続することが望ましい。本事業においては、個々の線量計のエネルギー・方向特性を網羅的に調査した。本調査結果を踏まえ、また実際の放射線管理におけるこれらの線量計の使用状況や法令に基づく測定に必要な精度なども考慮して、新たな実用量に対してどこまでの性能を線量計に求めるべきか詳細に検討する必要があるものと考えられる。

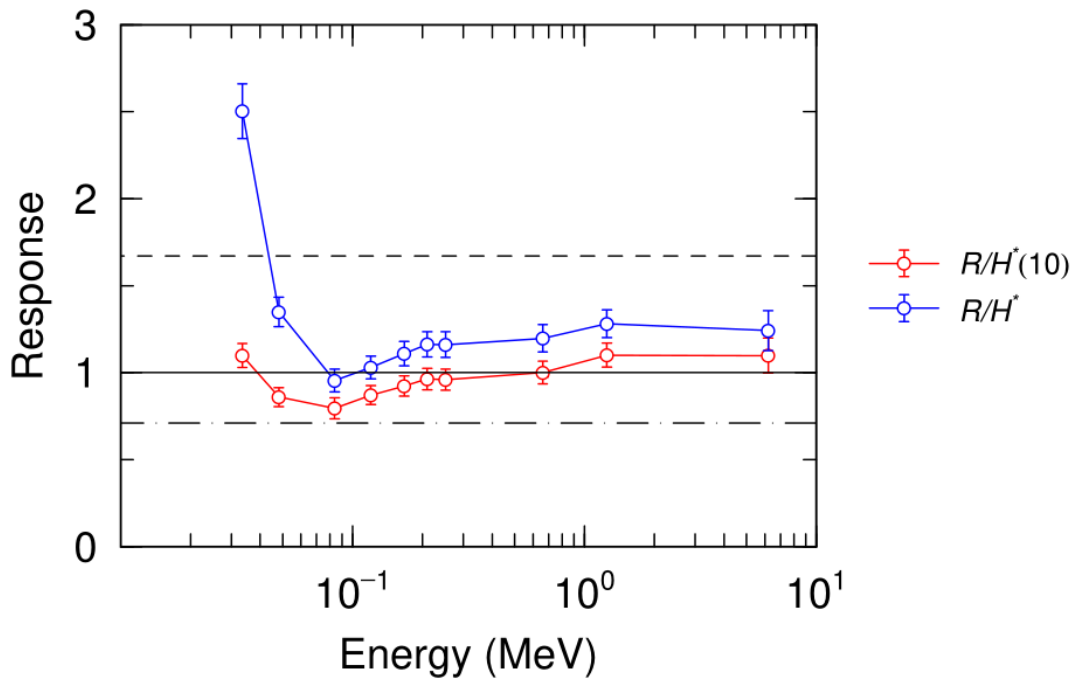


図 4-74 A 社製電離箱式サーベイメータの $H^*(10)$ 及び H' に対する光子エネルギー特性
(入射角度: 0° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正(規格化))

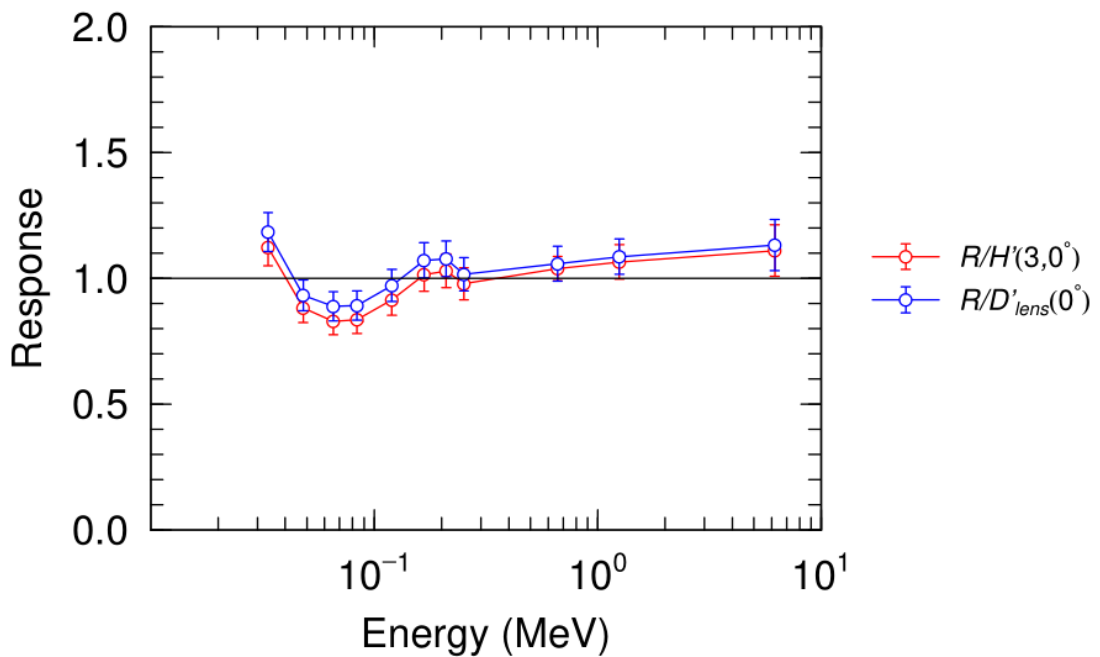


図 4-75 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(3)$ 及び D'_{lens} に対する光子エネルギー特性
(入射角度: 0° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正(規格化))

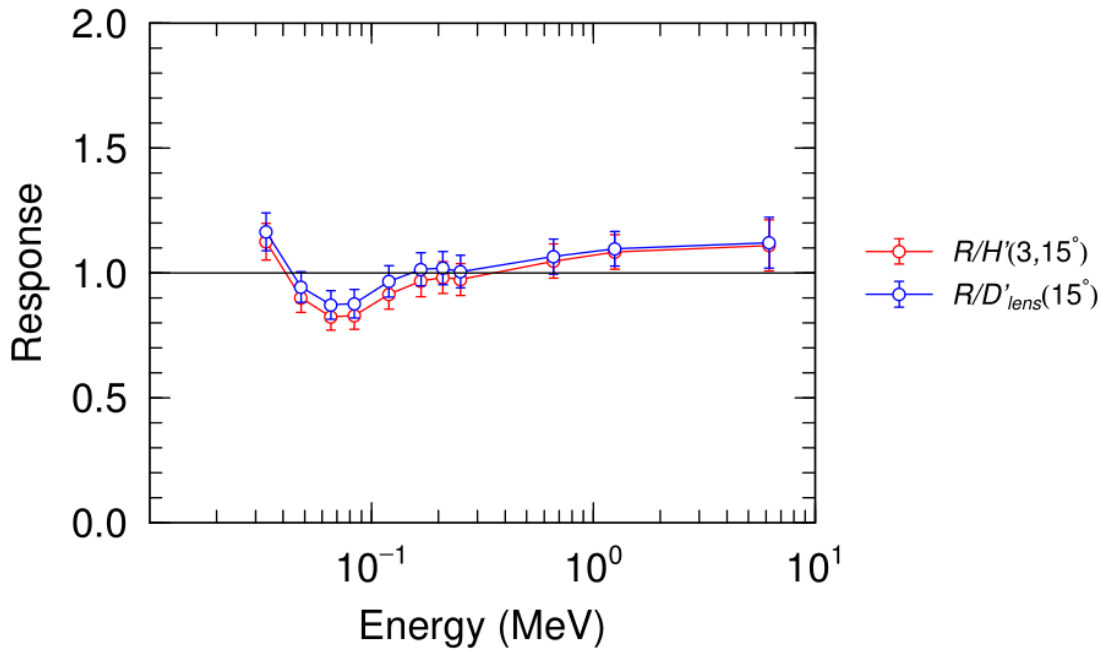


図 4-76 A社製電離箱式サーベイメータの $H'(3)$ 及び D'_{lens} に対する光子エネルギー特性（入射角度：15°、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））

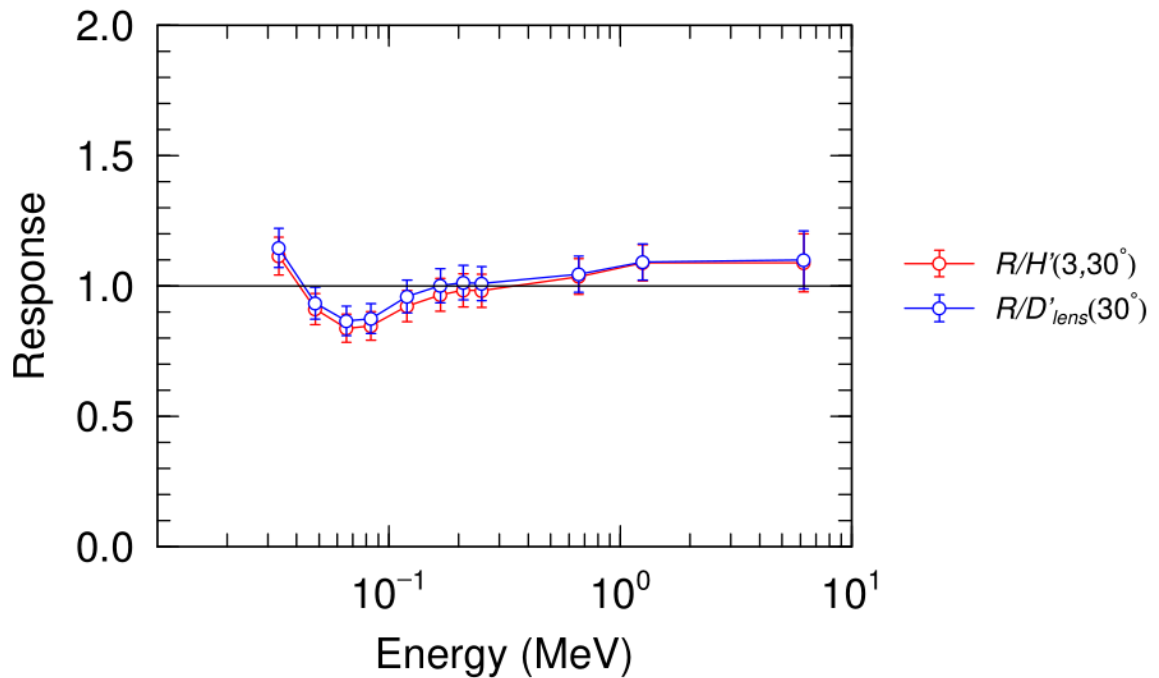


図 4-77 A社製電離箱式サーベイメータの $H'(3)$ 及び D'_{lens} に対する光子エネルギー特性（入射角度：30°、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））

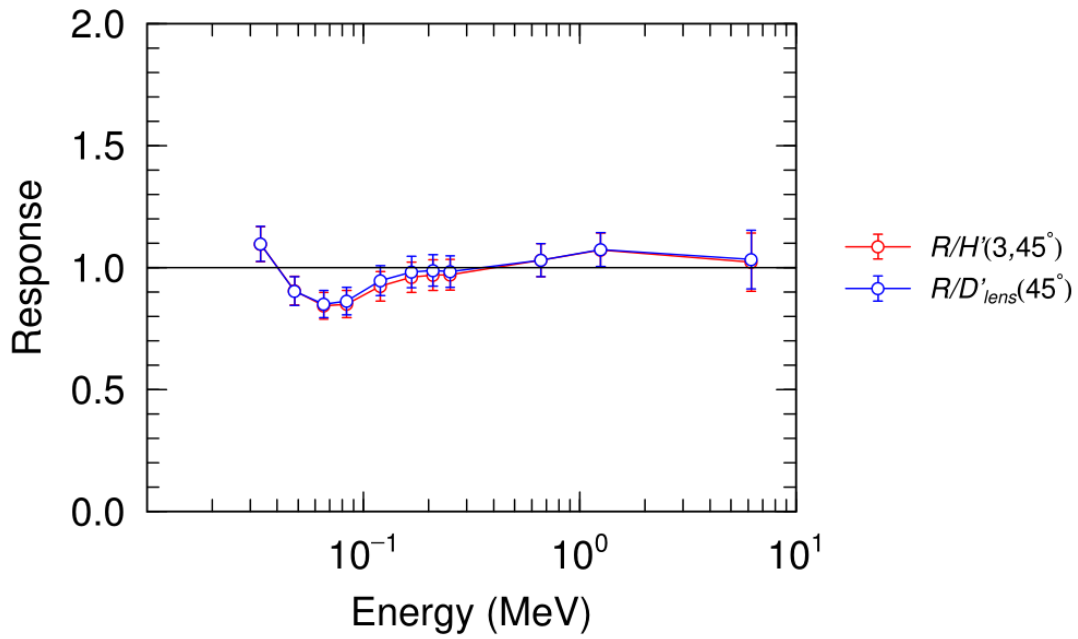


図 4-78 A社製電離箱式サーベイメータの $H'(3)$ 及び D'_{lens} に対する光子エネルギー特性（入射角度：45°、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））

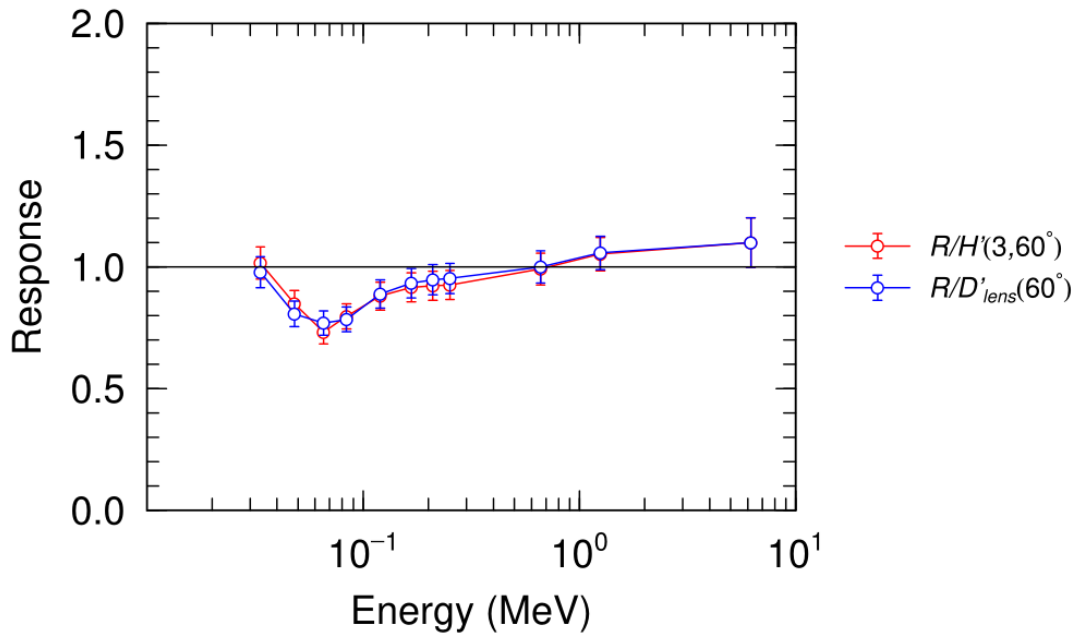


図 4-79 A社製電離箱式サーベイメータの $H'(3)$ 及び D'_{lens} に対する光子エネルギー特性（入射角度：60°、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））

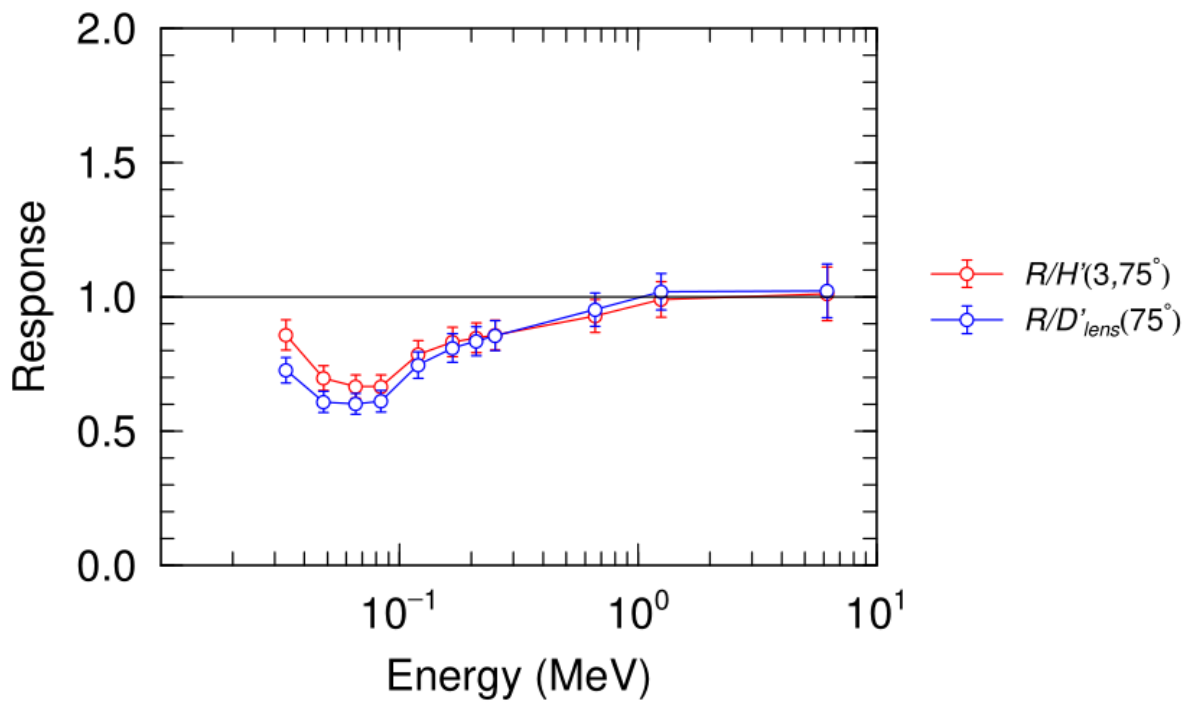


図 4-80 A社製電離箱式サーベイメータの $H'(3)$ 及び D'_{lens} に対する光子エネルギー特性（入射角度： 75° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））

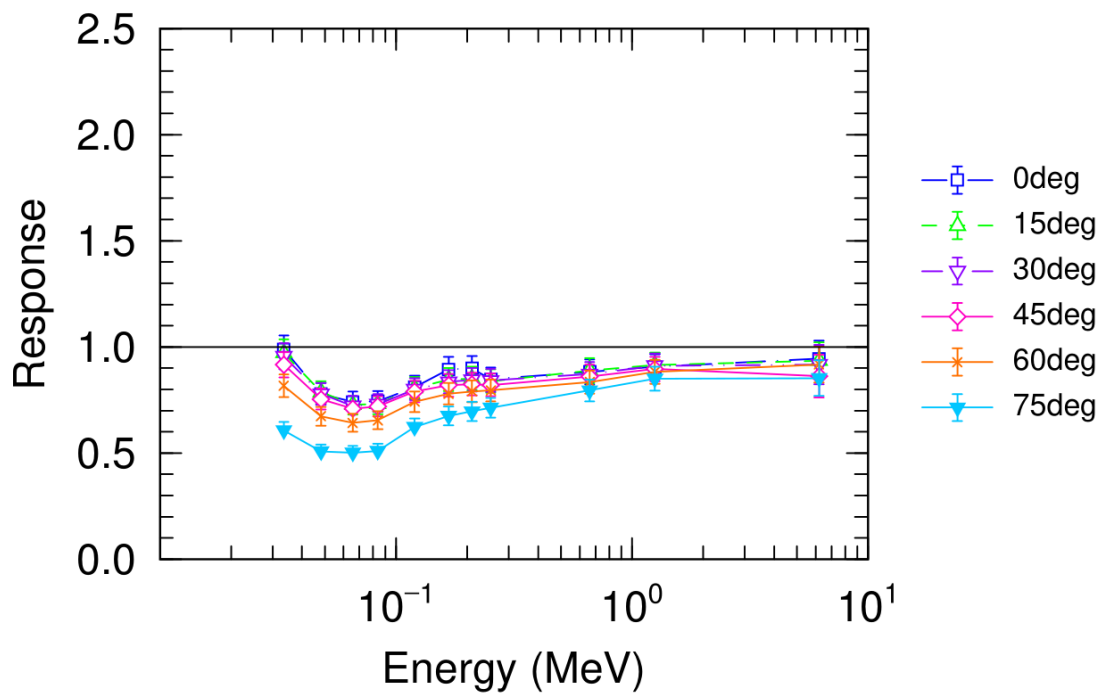


図 4-81 A社製電離箱式サーベイメータの D'_{lens} に対する光子エネルギー特性（S-Cs H^* で校正（規格化））

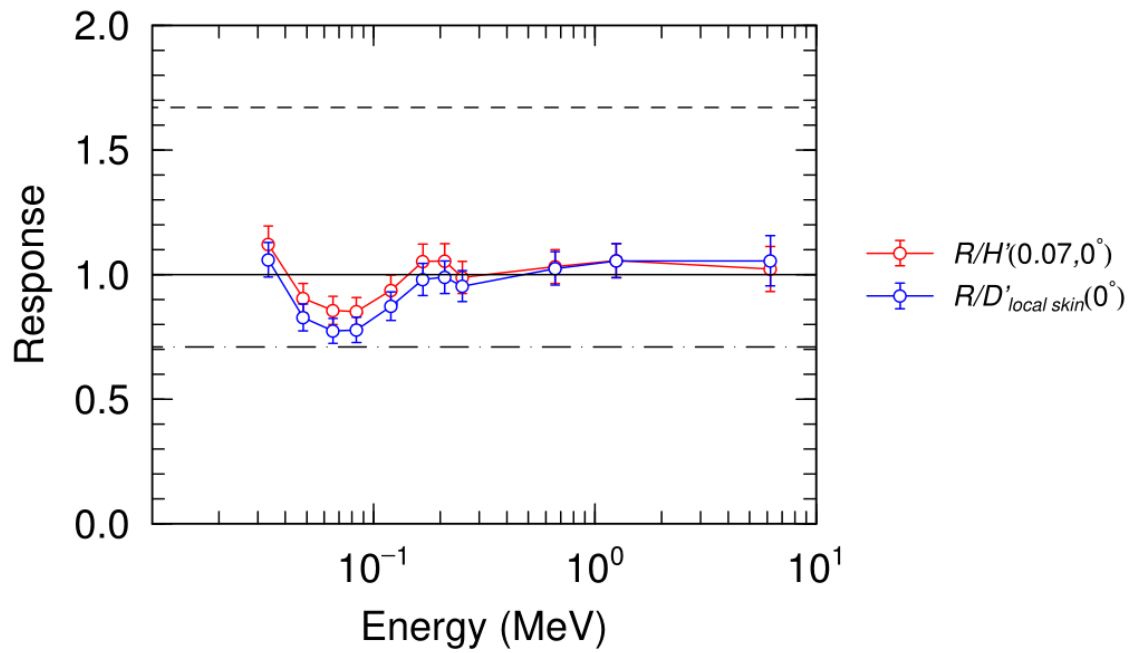


図 4-82 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する光子エネルギー特性（入射角度： 0° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））

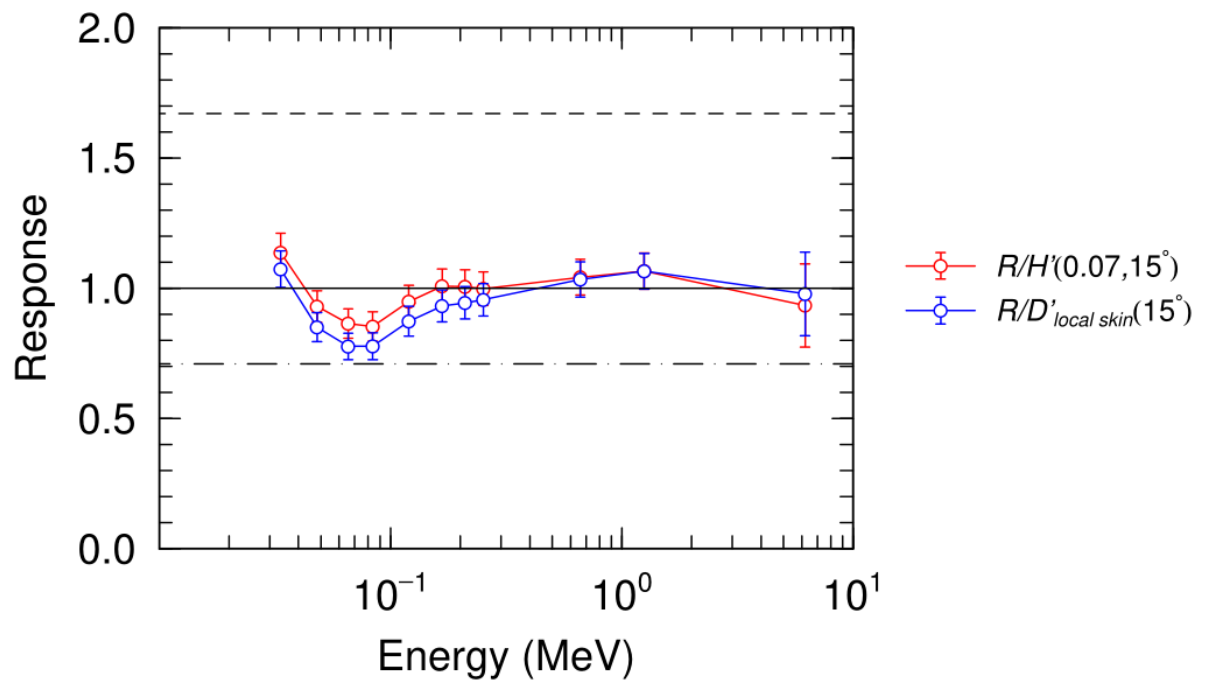


図 4-83 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する光子エネルギー特性（入射角度： 15° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））

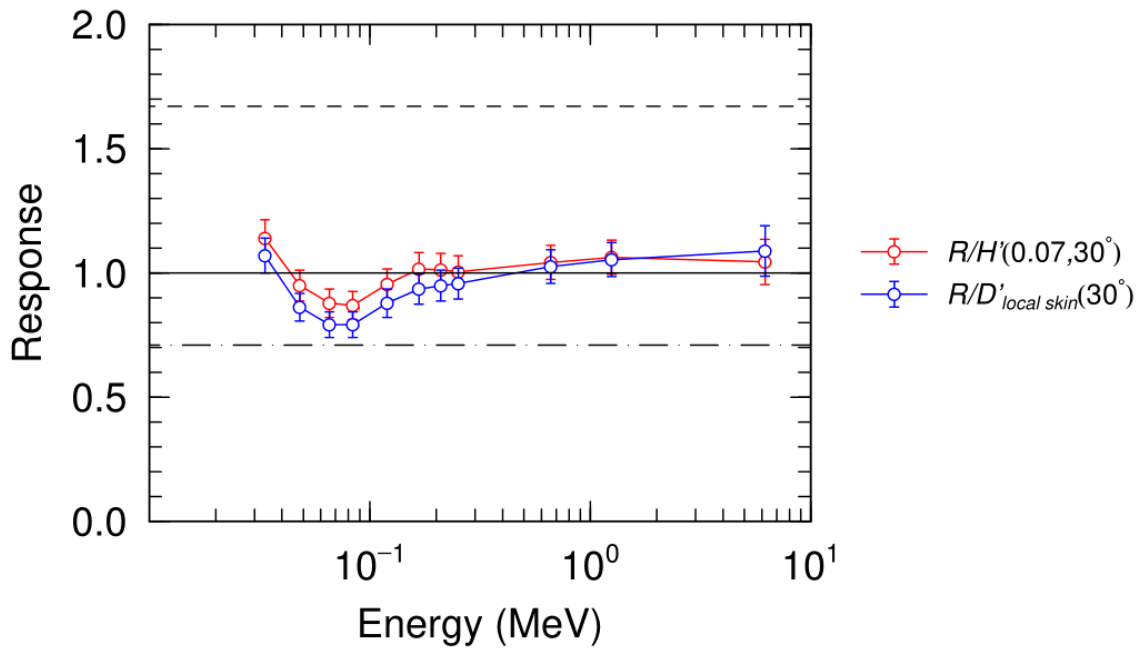


図 4-8 4 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する光子エネルギー特性（入射角度： 30° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））

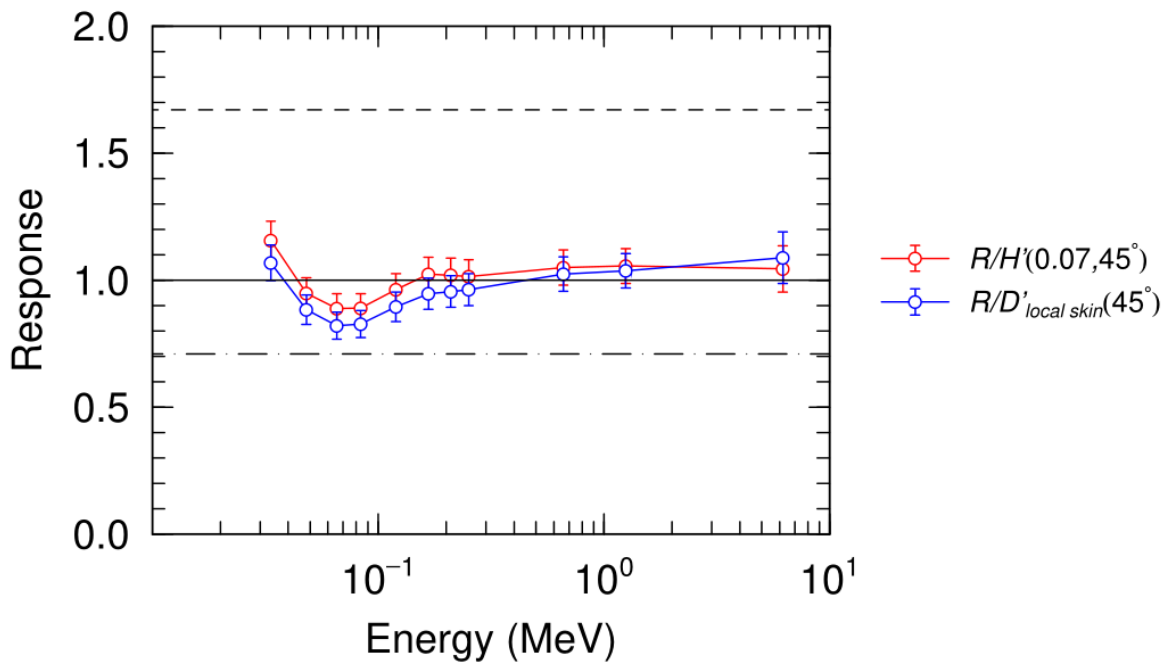


図 4-8 5 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する光子エネルギー特性（入射角度： 45° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））

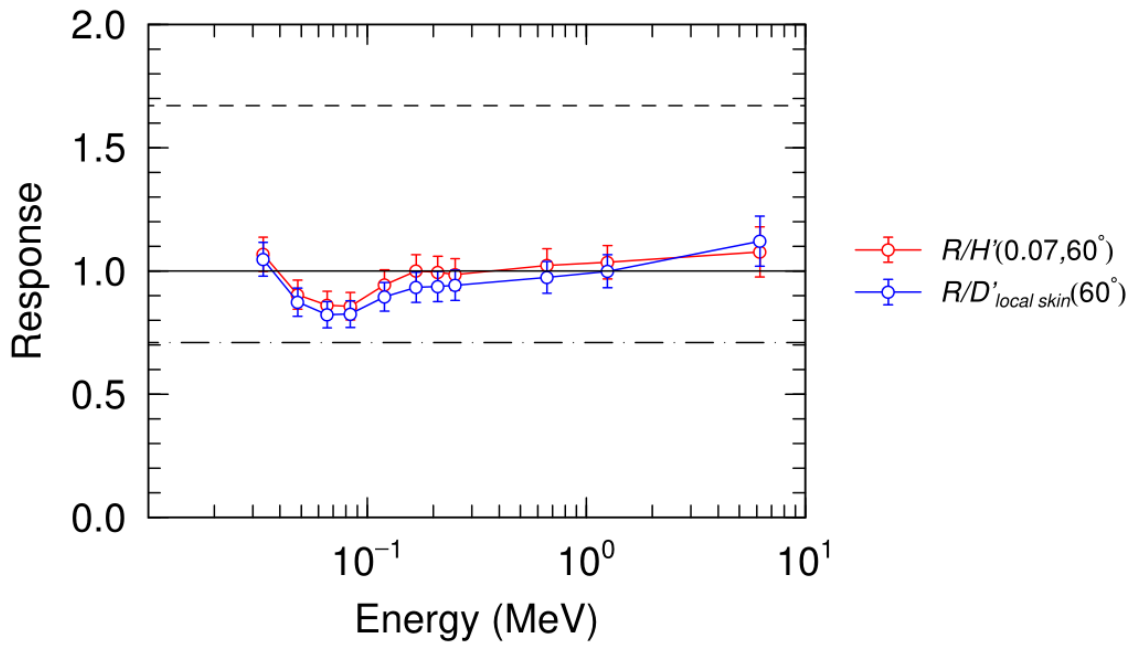


図 4-86 A社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する光子エネルギー特性（入射角度： 60° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））

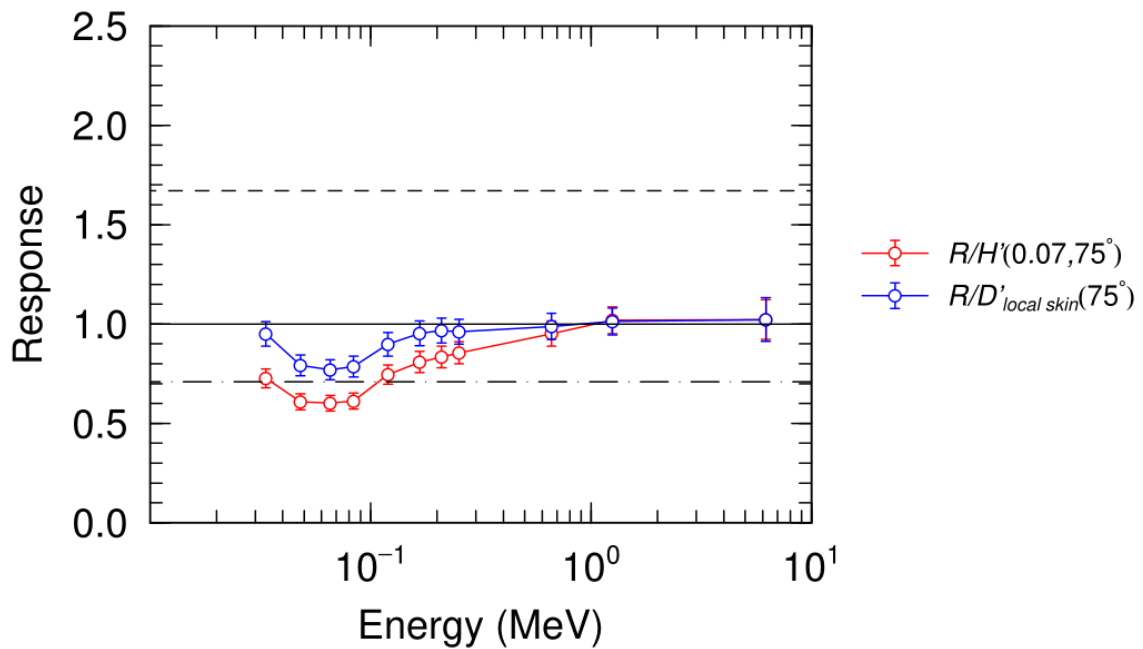


図 4-87 A社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する光子エネルギー特性（入射角度： 75° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））

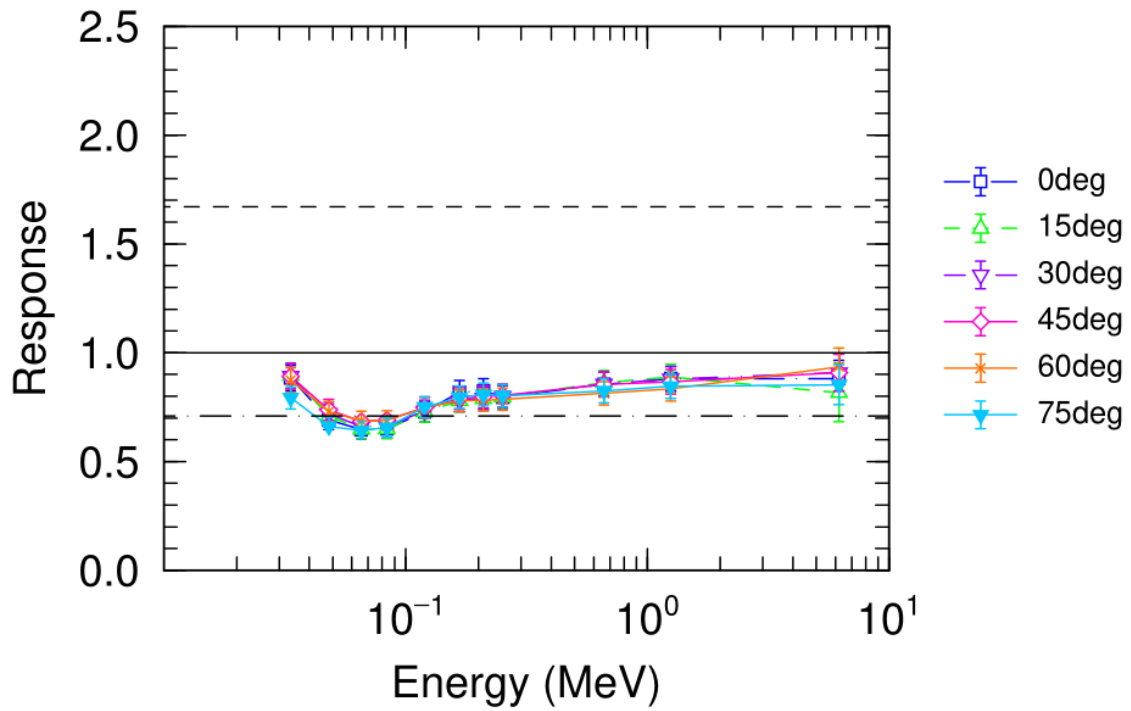


図 4-88 A 社製電離箱式サーベイメータの $D'_{local\ skin}$ に対する光子エネルギー特性 (S-Cs H^* で校正 (規格化))

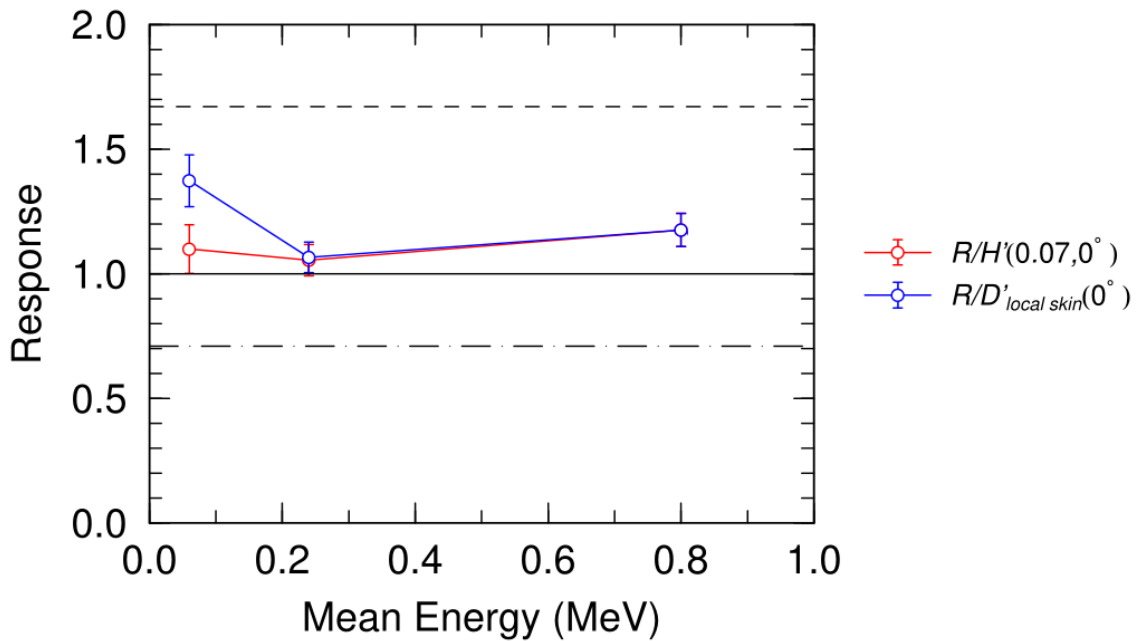


図 4-89 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する β 線エネルギー特性 (入射角度: 0° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正 (規格化))

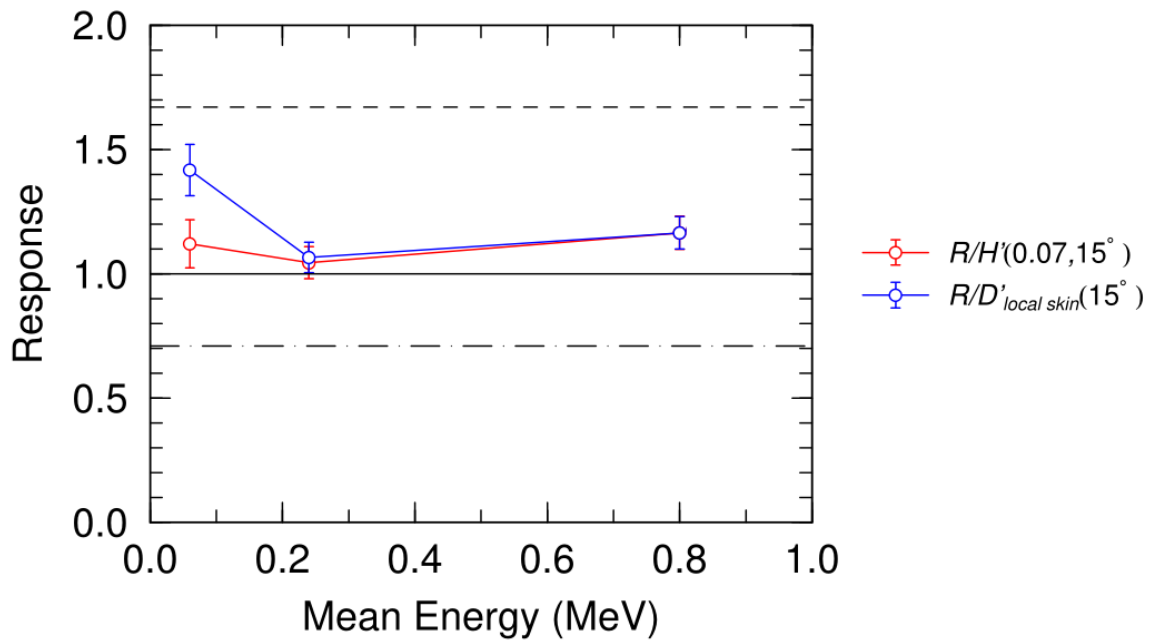


図 4-90 A社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する β 線エネルギー特性（入射角度： 15° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））

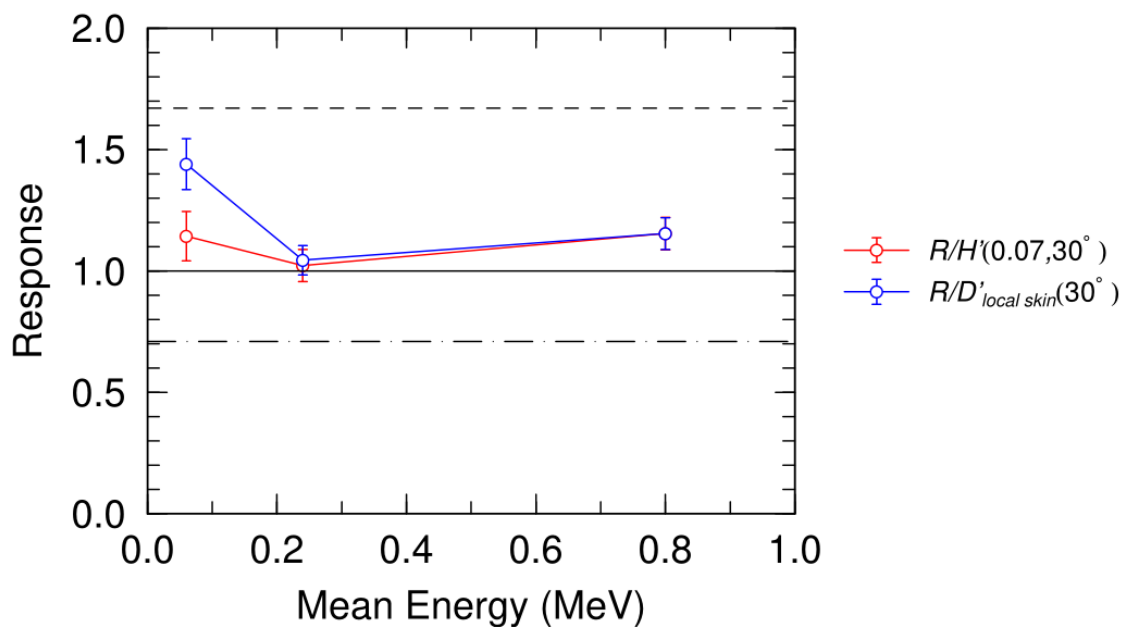


図 4-91 A社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する β 線エネルギー特性（入射角度： 30° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正（規格化））

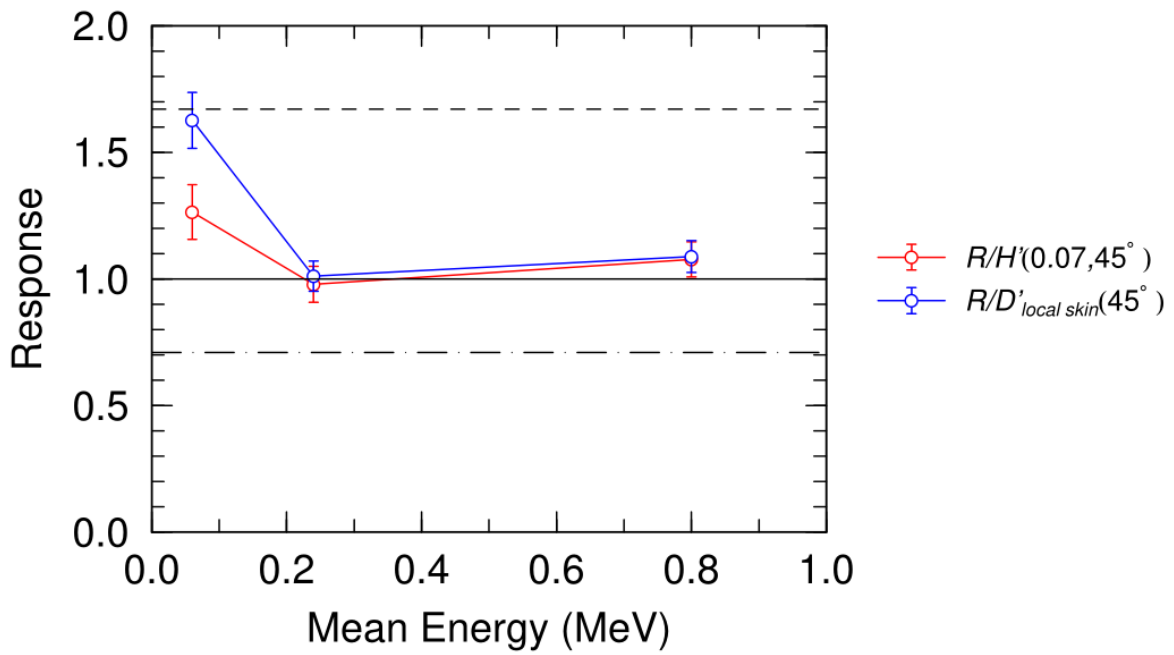


図 4-9 2 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する β 線エネルギー特性 (入射角度: 45° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正 (規格化))

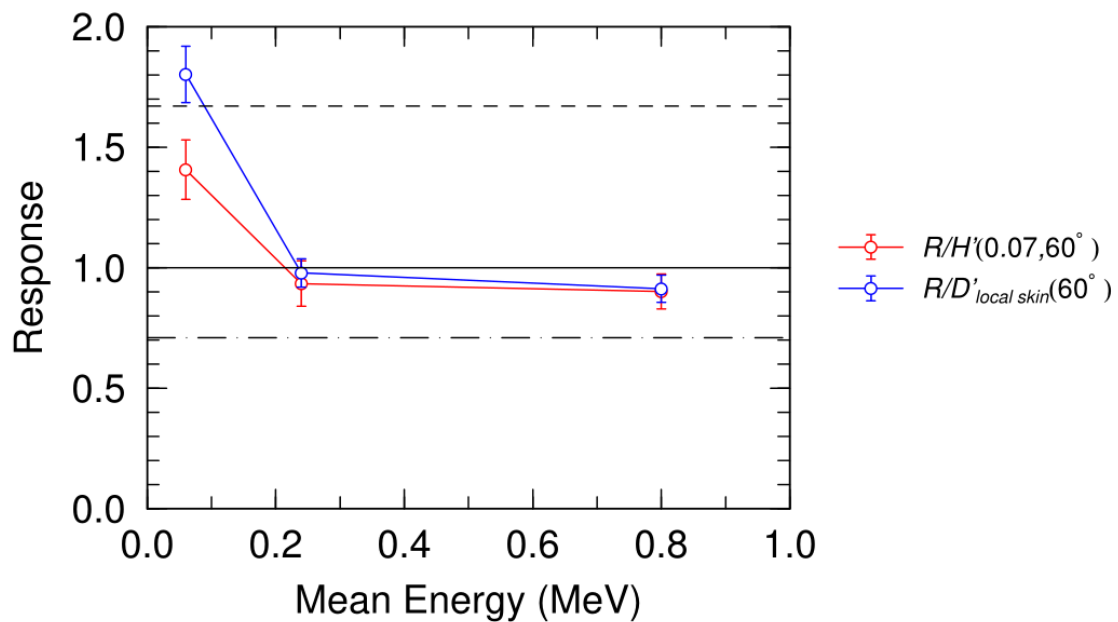


図 4-9 3 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する β 線エネルギー特性 (入射角度: 60° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正 (規格化))

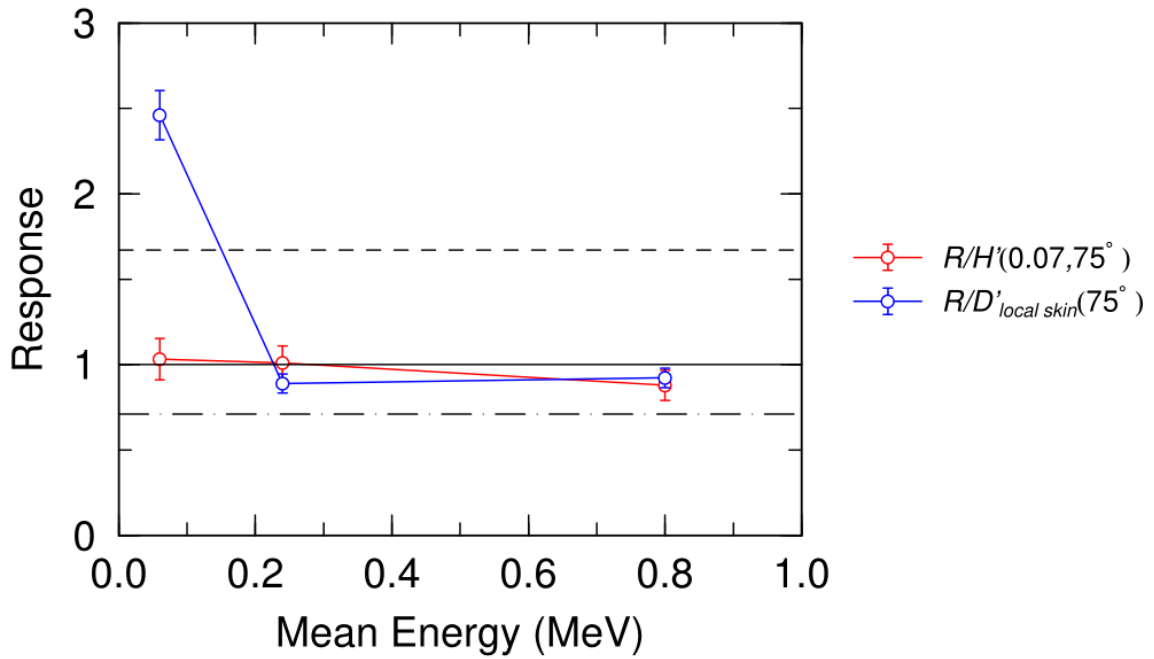


図 4-94 A 社製電離箱式サーベイメータの H' (0.07)及び $D'_{local\ skin}$ に対する β 線エネルギー特性 (入射角度: 75° 、S-Cs H^* (10)で校正 (規格化))

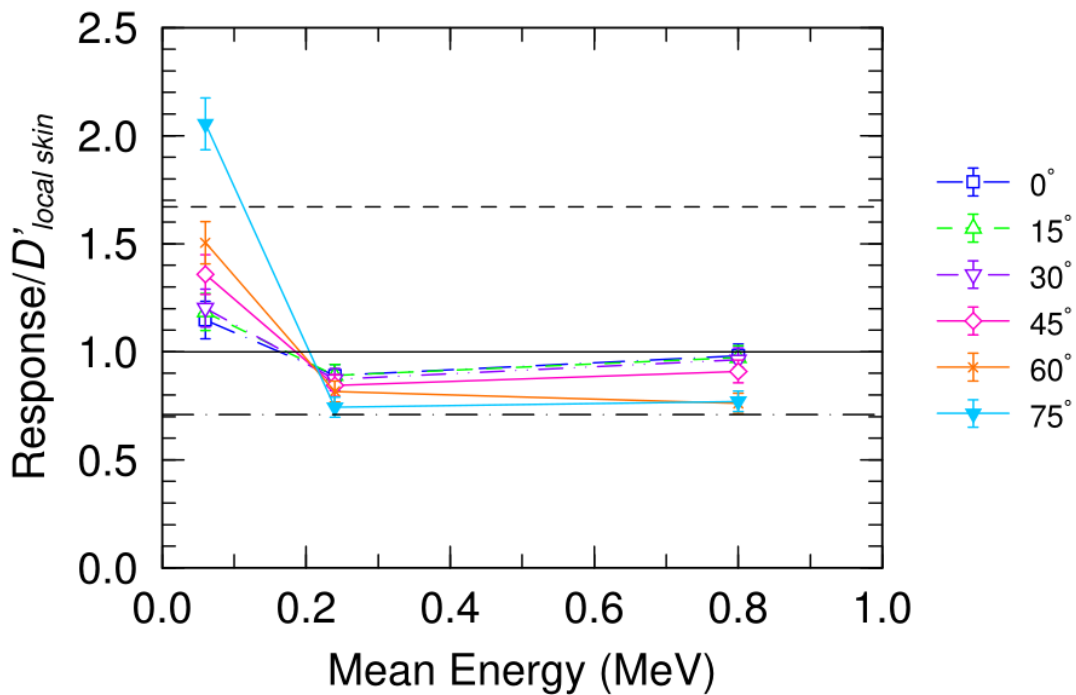


図 4-95 A 社製電離箱式サーベイメータの $D'_{local\ skin}$ に対する β 線エネルギー特性 (S-Cs H^* で校正 (規格化))

破線は、IEC 62387 に示される現行実用量に対する許容範囲を表す。

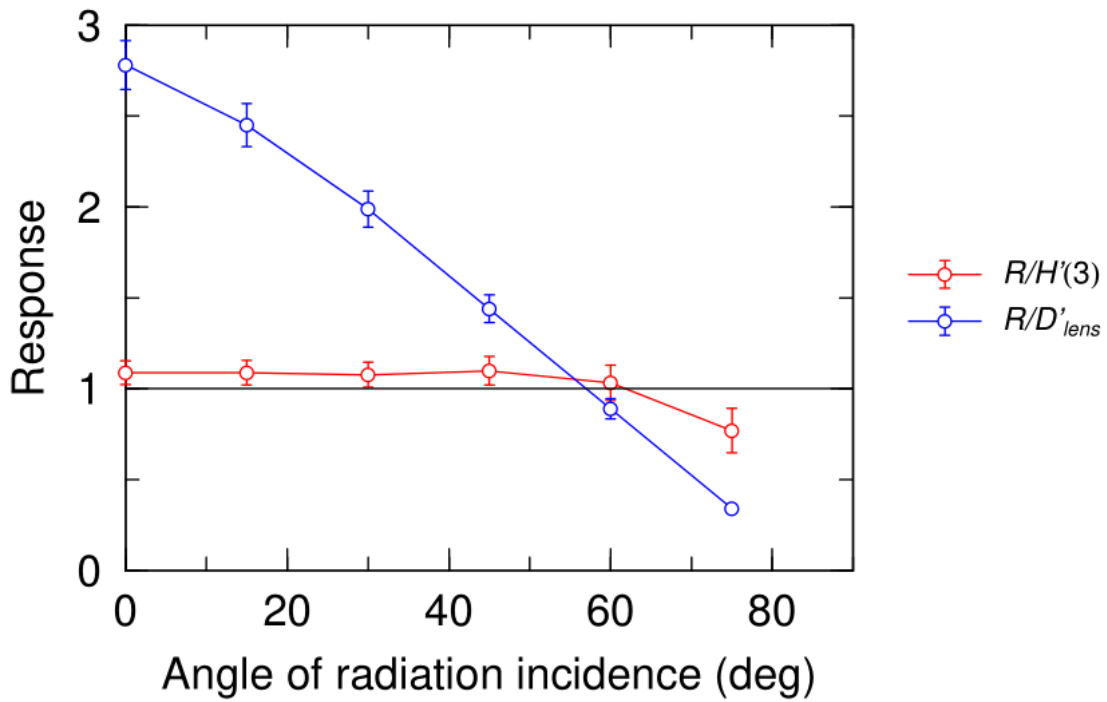


図 4-96 A社製電離箱式サーベイメータの $H'(3)$ 及び D'_{lens} に係る $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線に対する方向特性 (S-Cs $H^*(10)$ で校正 (規格化))

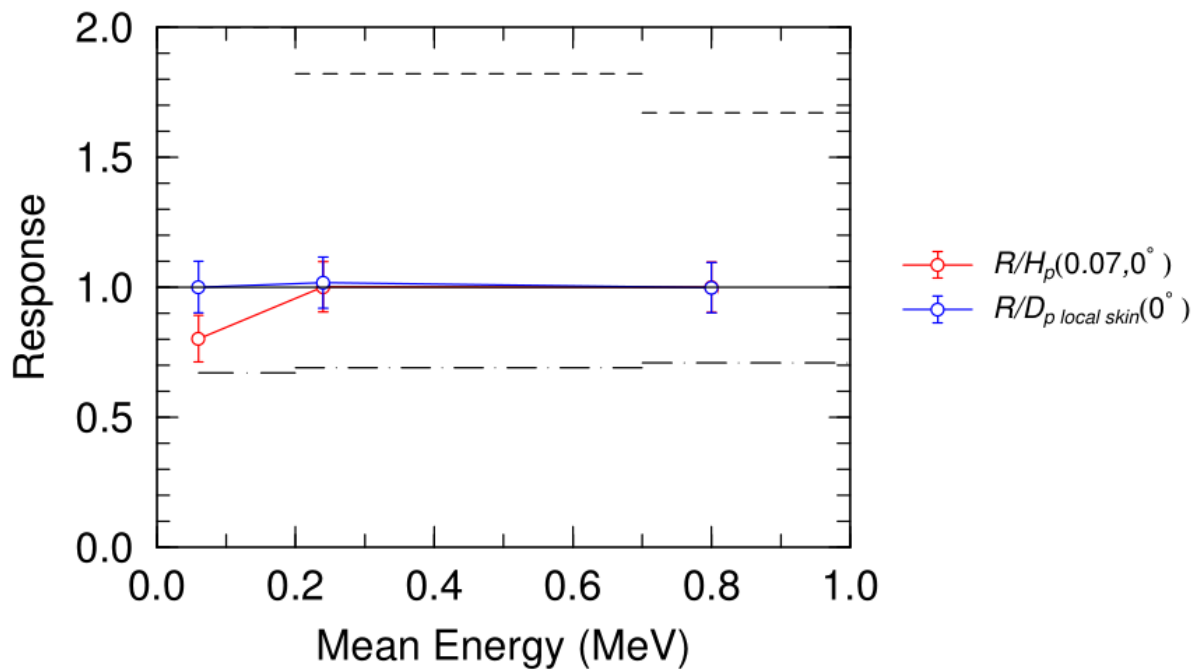


図 4-97 C社製電子式個人線量計 (体幹部用) の $H_p(0.07)$ 及び $D_p local skin$ に対する β 線エネルギー特性 (入射角度: 0° 、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正 (規格化))

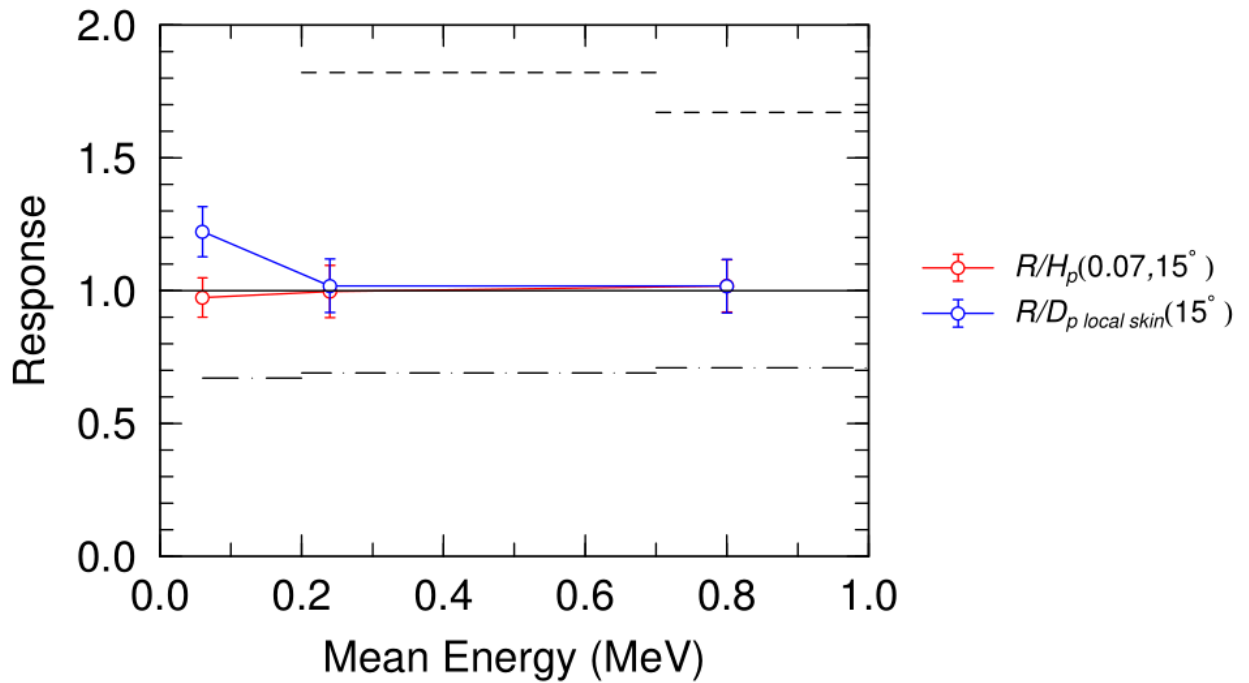


図 4-98 C社製電子式個人線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に対する β 線エネルギー特性（入射角度： 15° 、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正（規格化））

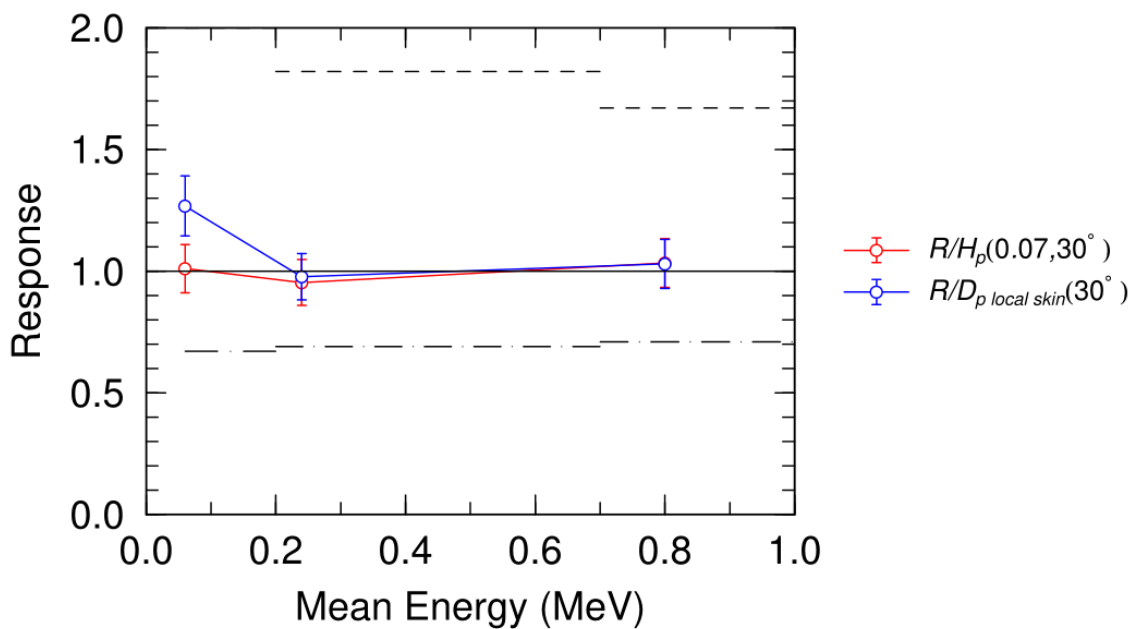


図 4-99 C社製電子式個人線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に対する β 線エネルギー特性（入射角度： 30° 、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正（規格化））

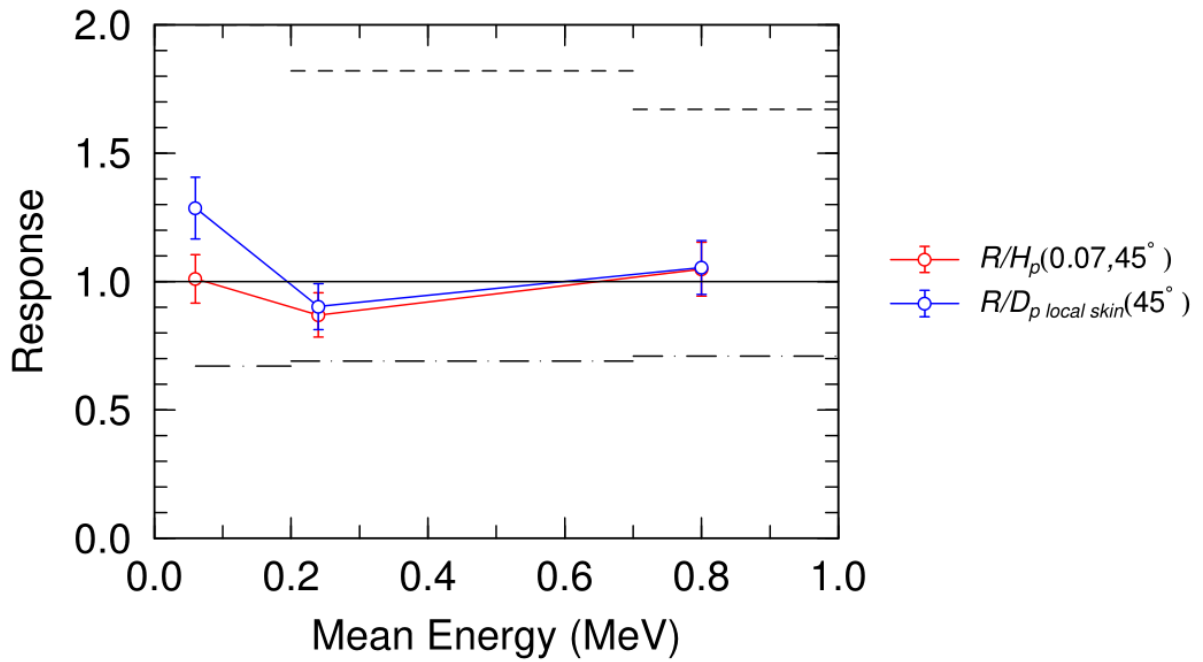


図 4-100 C社製電子式個人線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に対する β 線エネルギー特性（入射角度： 45° 、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正（規格化））

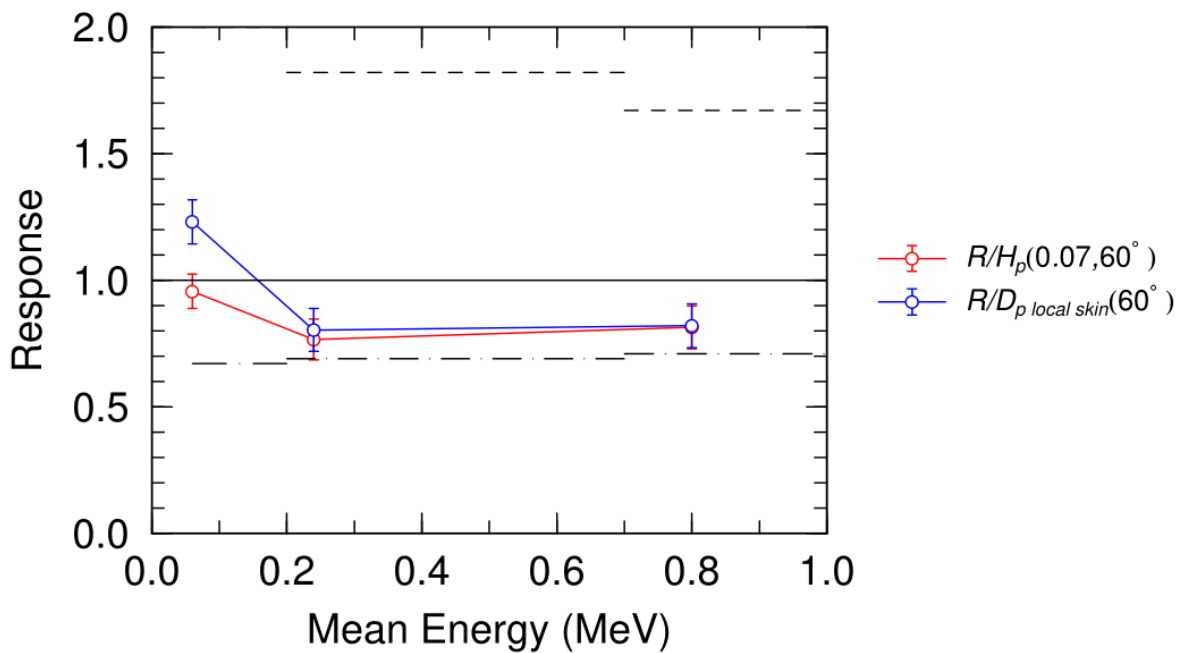


図 4-101 C社製電子式個人線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に対する β 線エネルギー特性（入射角度： 60° 、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正（規格化））

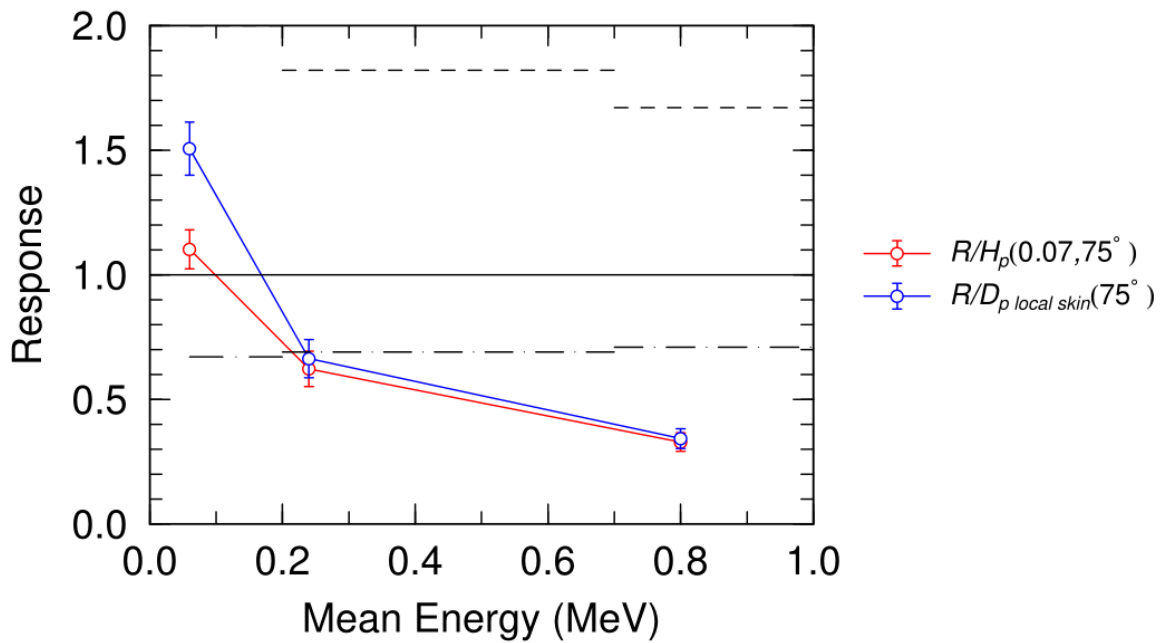


図 4-102 C社製電子式個人線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に対する β 線エネルギー特性（入射角度： 75° 、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正（規格化））

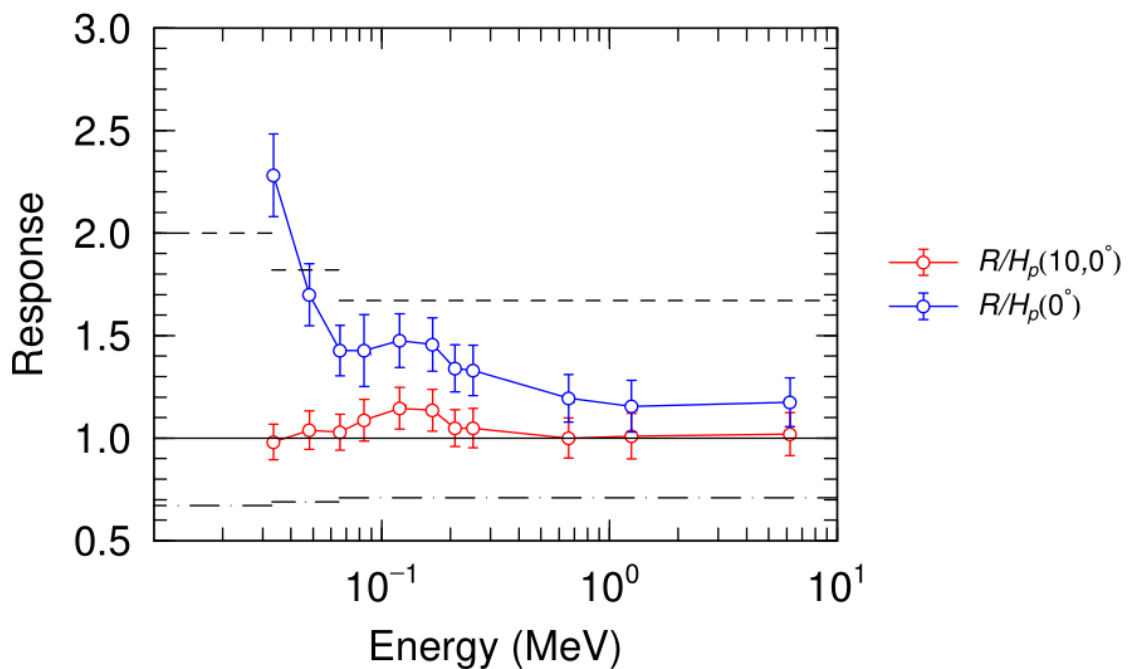


図 4-103 D社製受動形線量計（体幹部用）の $H_p(10)$ 及び H_p に対する光子エネルギー特性（入射角度： 0° 、S-Cs $H_p(10, 0^\circ)$ で校正（規格化））

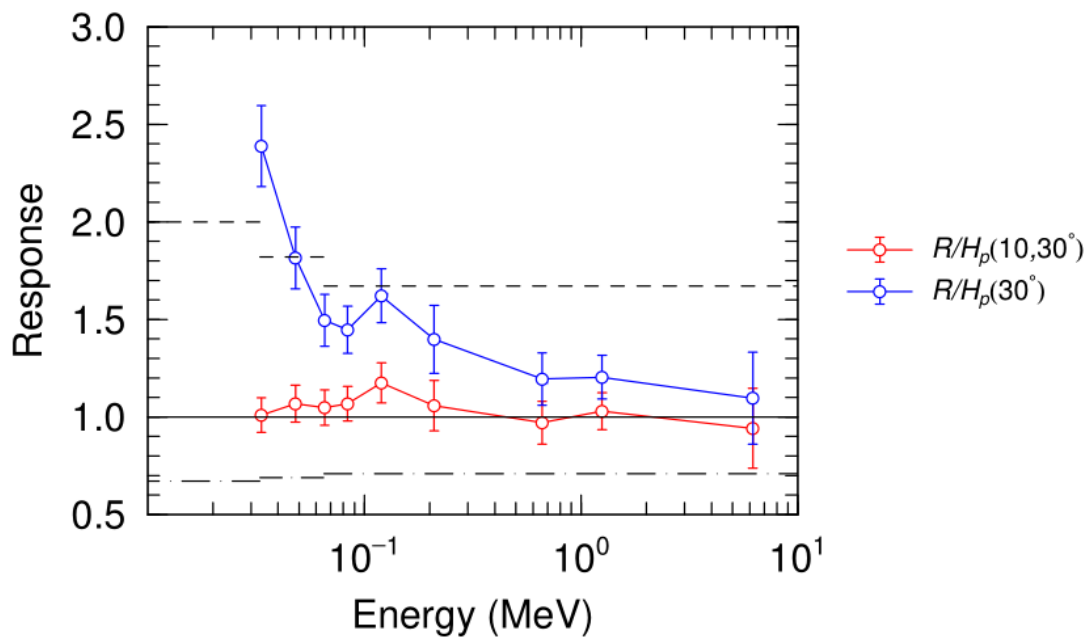


図 4-104 D社製受動形線量計（体幹部用）の $H_p(10)$ 及び H_p に対する光子エネルギー特性（入射角度： 30° 、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正（規格化））

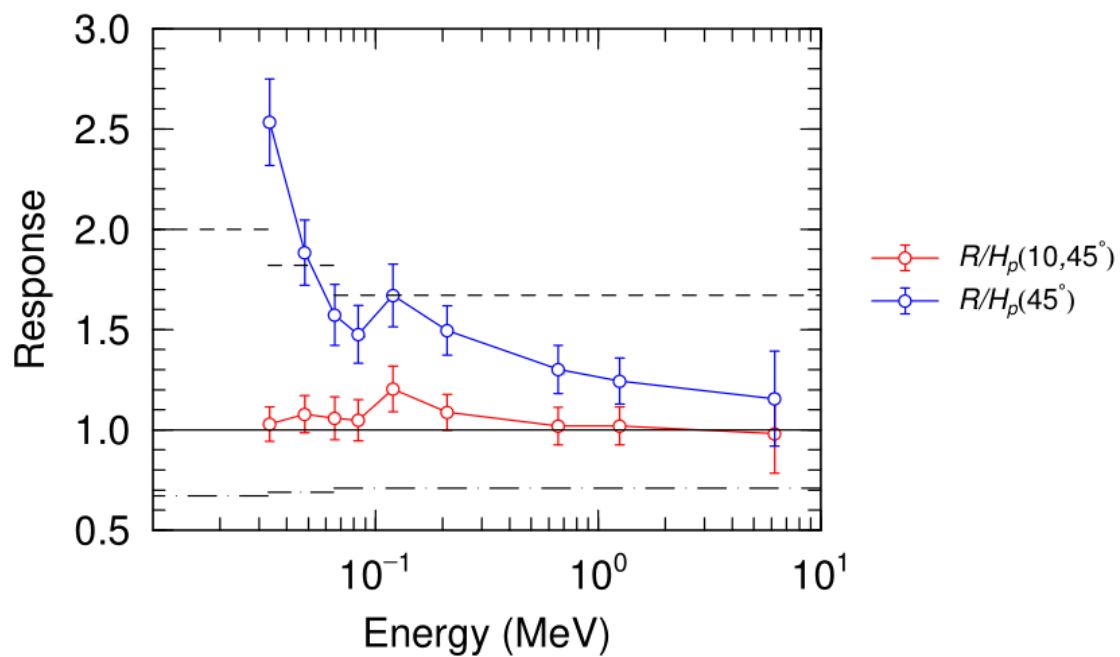


図 4-105 D社製受動形線量計（体幹部用）の $H_p(10)$ 及び H_p に対する光子エネルギー特性（入射角度：45°、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正（規格化））

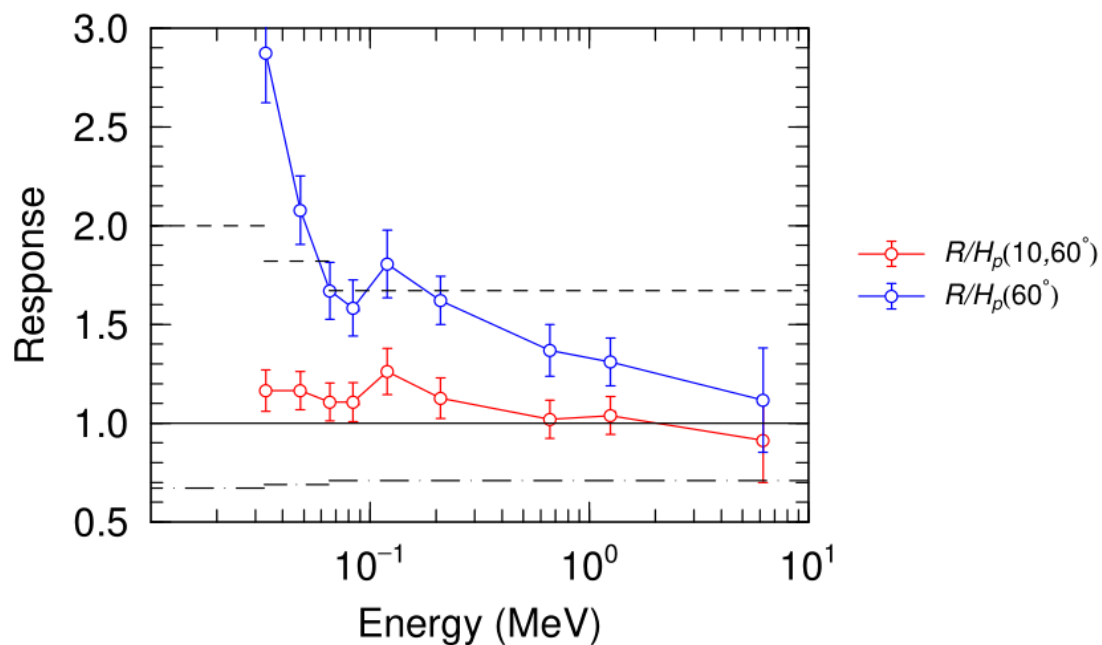


図 4-106 D社製受動形線量計（体幹部用）の $H_p(10)$ 及び H_p に対する光子エネルギー特性（入射角度：60°、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正（規格化））

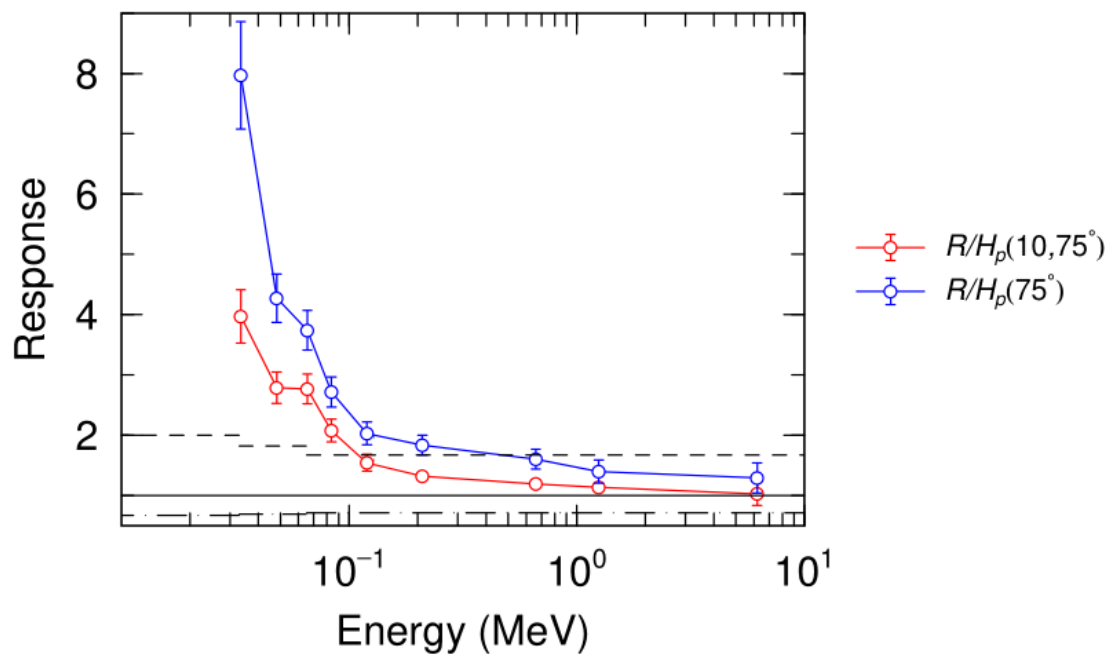


図 4-107 D社製受動形線量計（体幹部用）の $H_p(10)$ 及び H_p に対する光子エネルギー特性（入射角度： 75° 、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正（規格化））

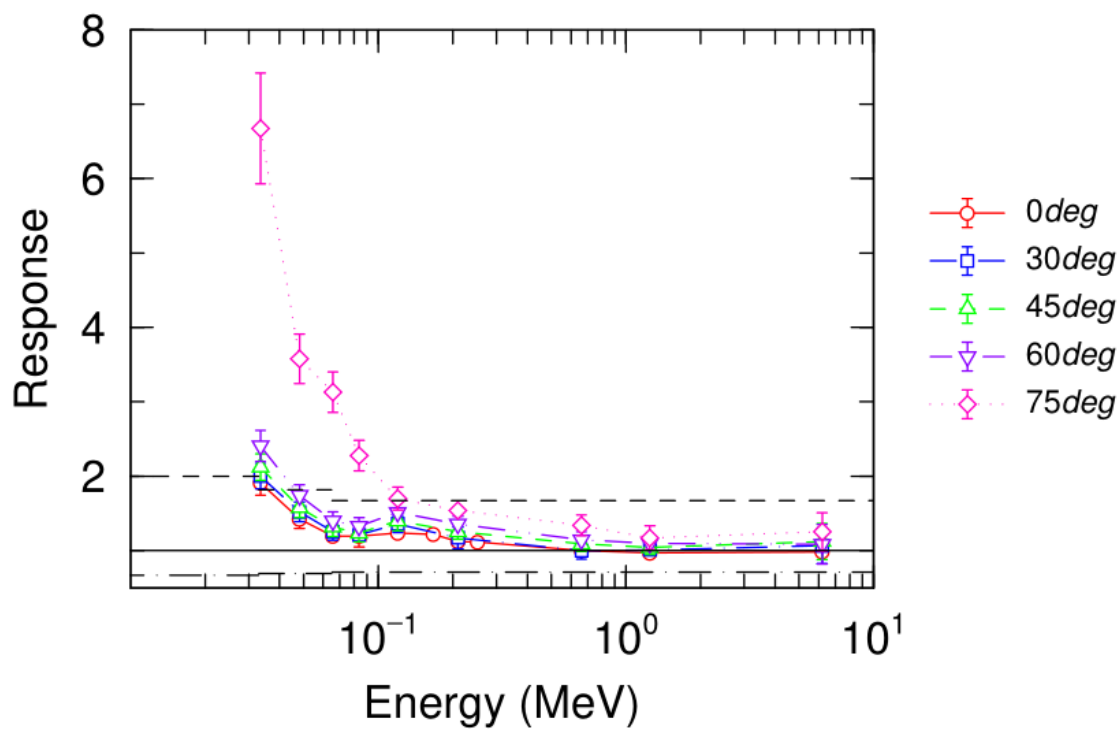


図 4-108 D社製受動形線量計（体幹部用）の H_p に対する光子エネルギー特性（S-Cs $H_p(0^\circ)$ で校正（規格化））

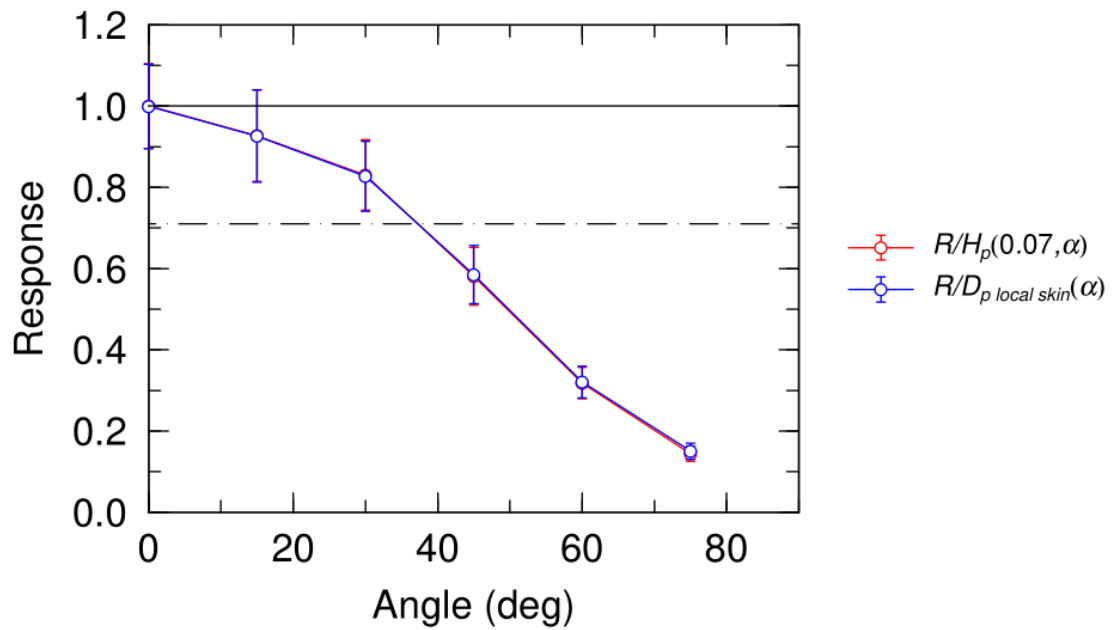


図 4-109 D社製受動形線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に係る $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線に対する方向特性（ $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正（規格化））

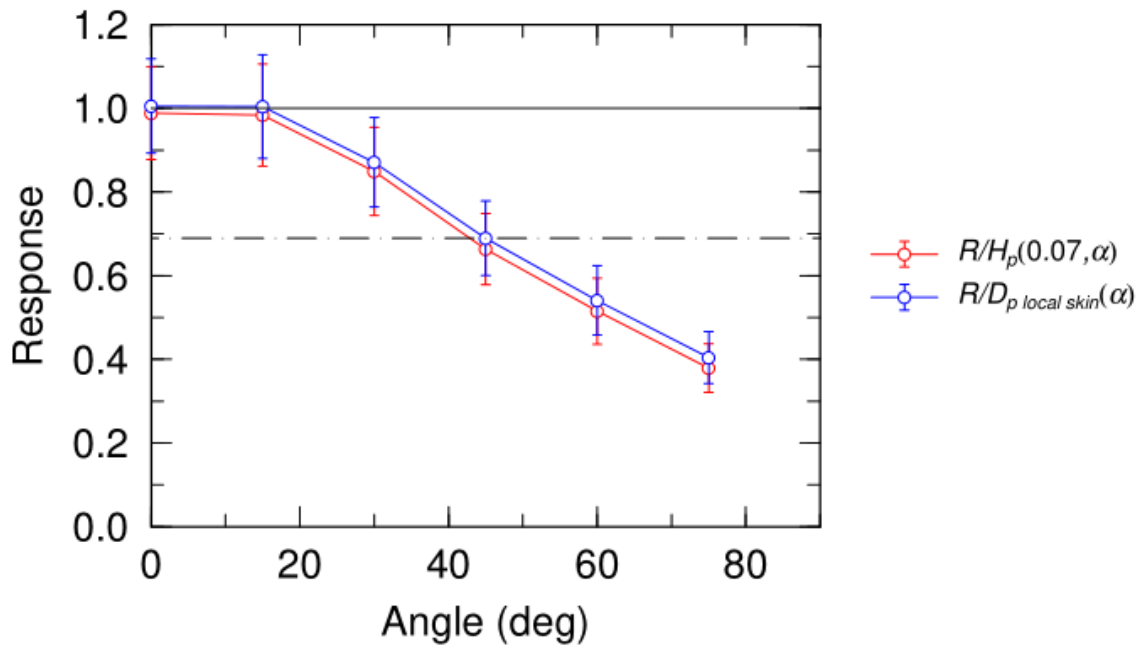


図 4-110 D社製受動形線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に係る ^{85}Kr β 線に対する方向特性（ $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正（規格化））

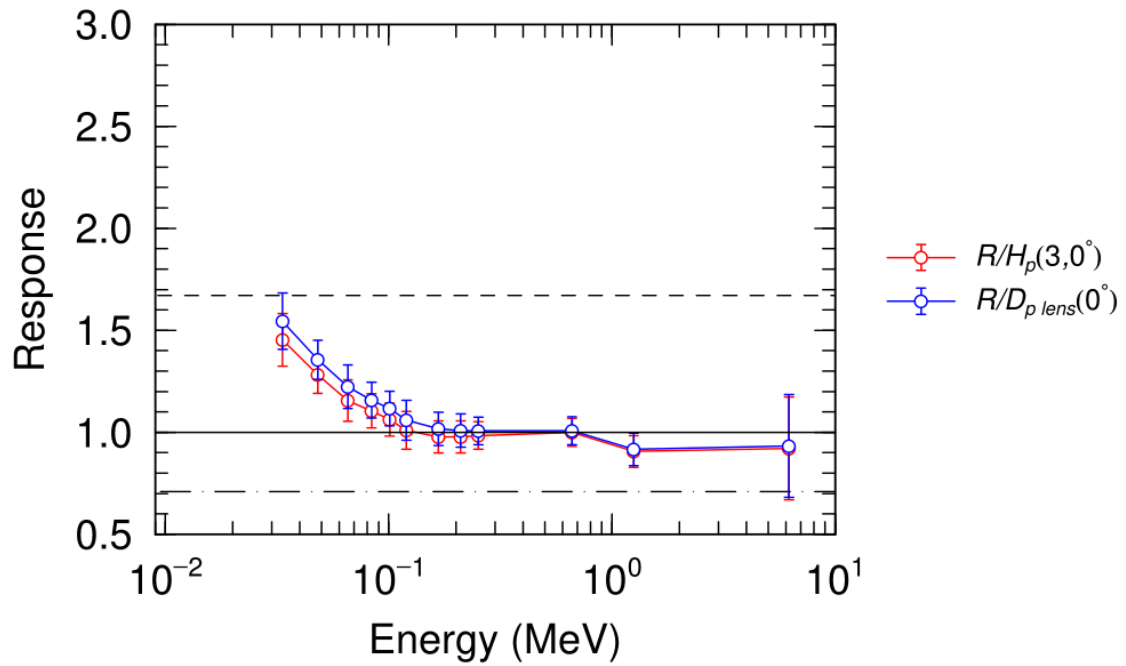


図 4-1-11 E社製受動形線量計（水晶体用）の $H_p(3)$ 及び D_{plens} に対する光子エネルギー特性（入射角度： 0° 、S-Cs $H_p(3,0^\circ)$ で校正（規格化））

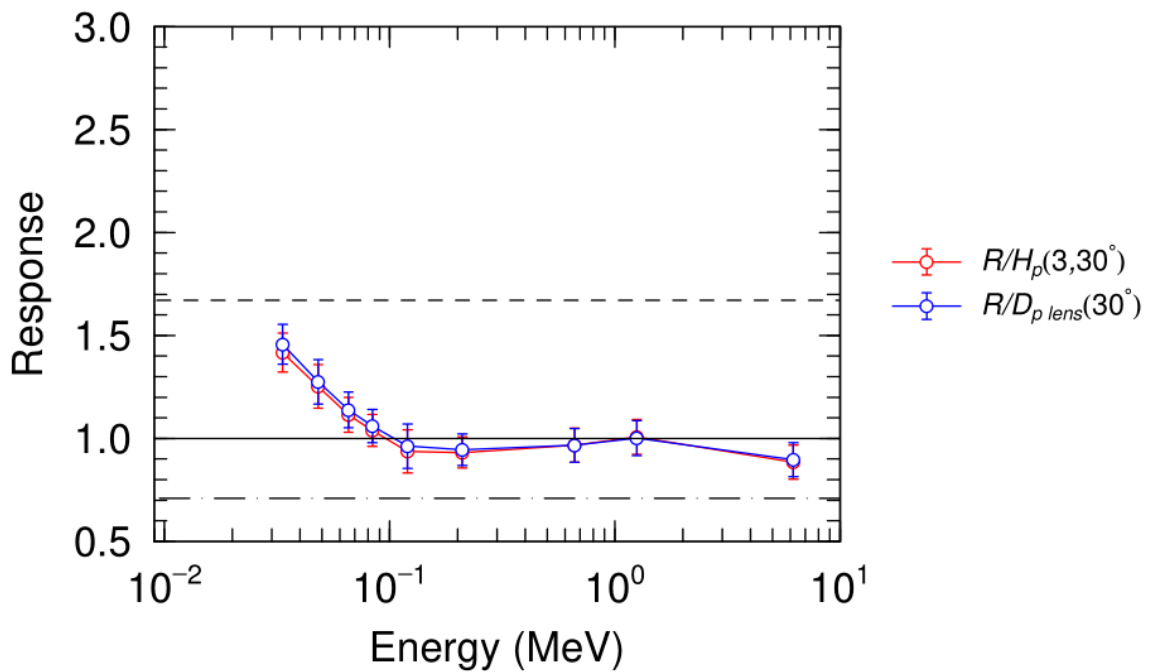


図 4-1-12 E社製受動形線量計（水晶体用）の $H_p(3)$ 及び D_{plens} に対する光子エネルギー特性（入射角度： 30° 、S-Cs $H_p(3,0^\circ)$ で校正（規格化））

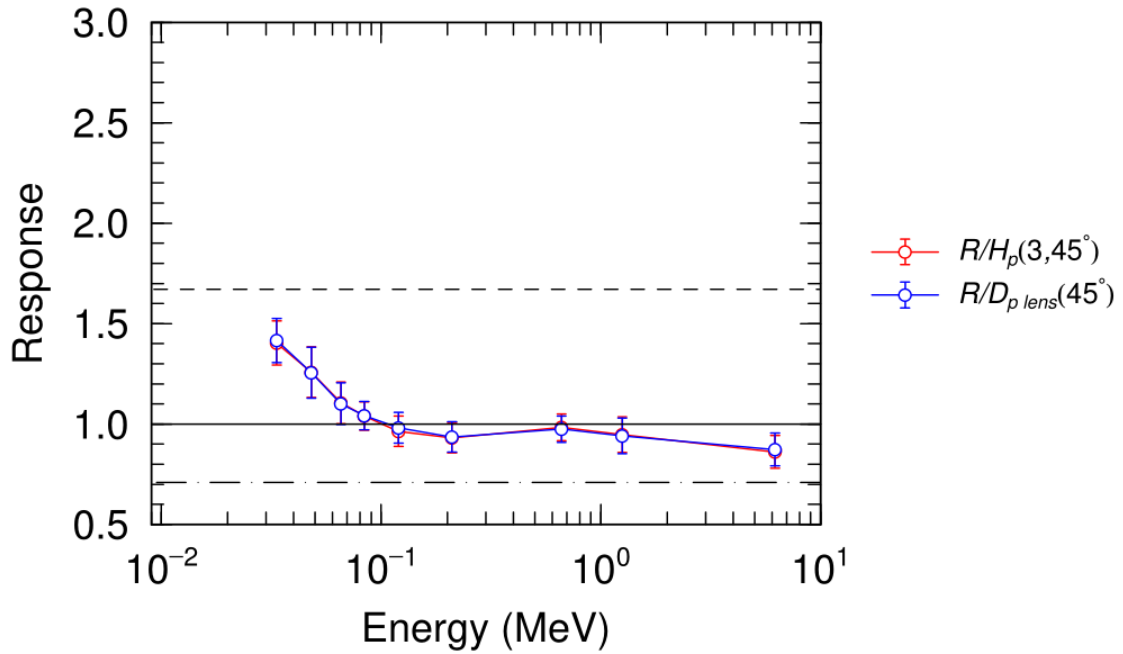


図 4-1-13 E社製受動形線量計（水晶体用）の $H_p(3)$ 及び $D_{p\ lens}$ に対する光子エネルギー特性（入射角度： 45° 、S-Cs $H_p(3,0^\circ)$ で校正（規格化））

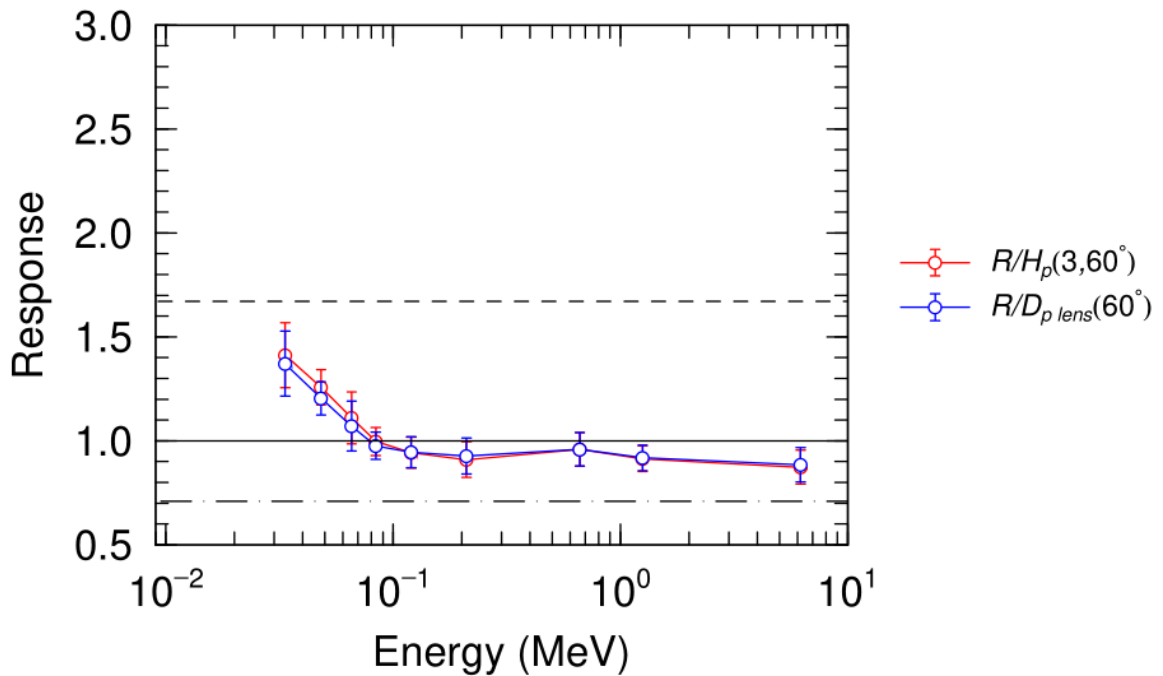


図 4-1-14 E社製受動形線量計（水晶体用）の $H_p(3)$ 及び $D_{p\ lens}$ に対する光子エネルギー特性（入射角度： 60° 、S-Cs $H_p(3,0^\circ)$ で校正（規格化））

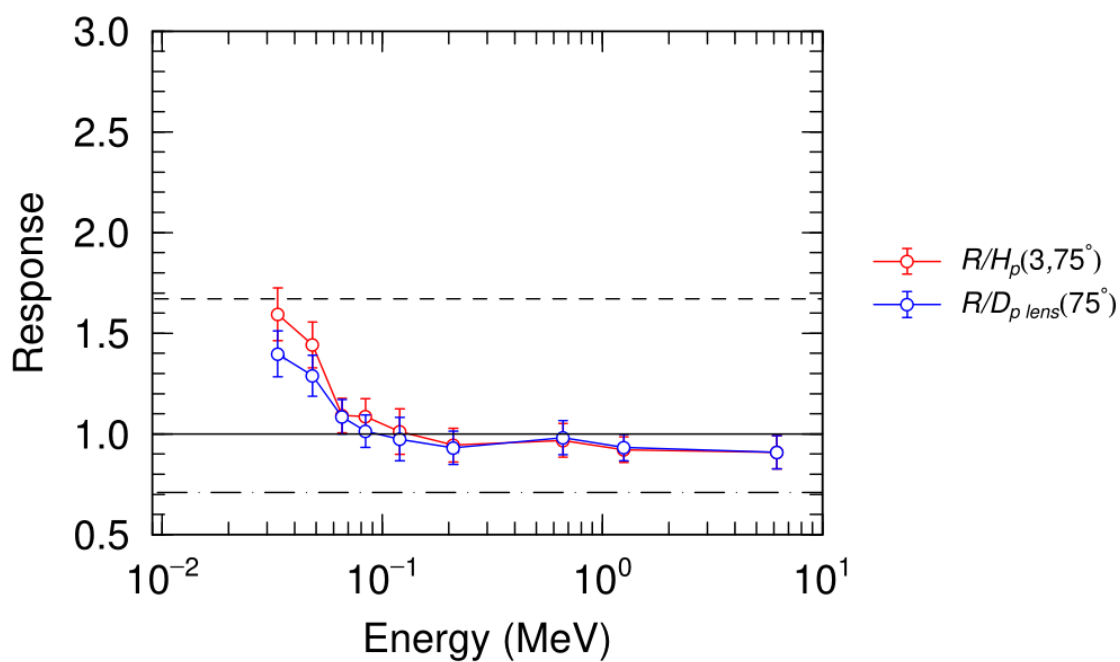


図 4-1-15 E社製受動形線量計（水晶体用）の $H_p(3)$ 及び D_{plens} に対する光子エネルギー特性（入射角度： 75° 、S-Cs $H_p(3,0^\circ)$ で校正（規格化））

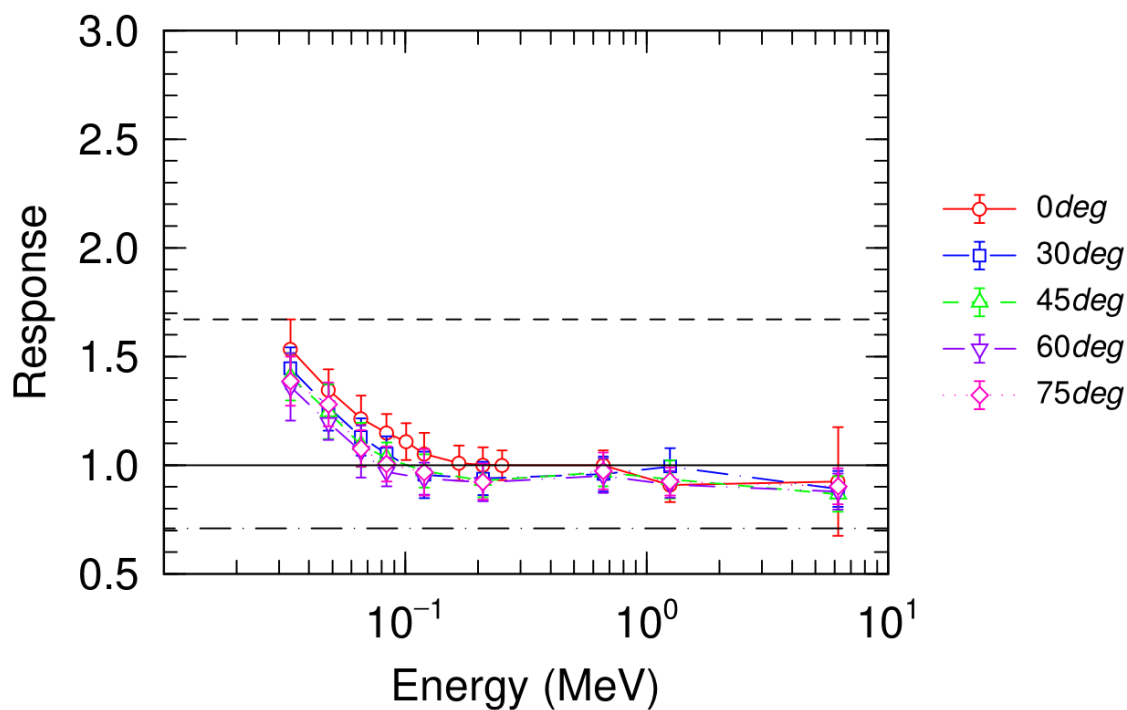


図 4-1-16 E社製受動形線量計（水晶体用）の D_{plens} に対する光子エネルギー特性（S-Cs $D_{plens}(0^\circ)$ で校正（規格化））

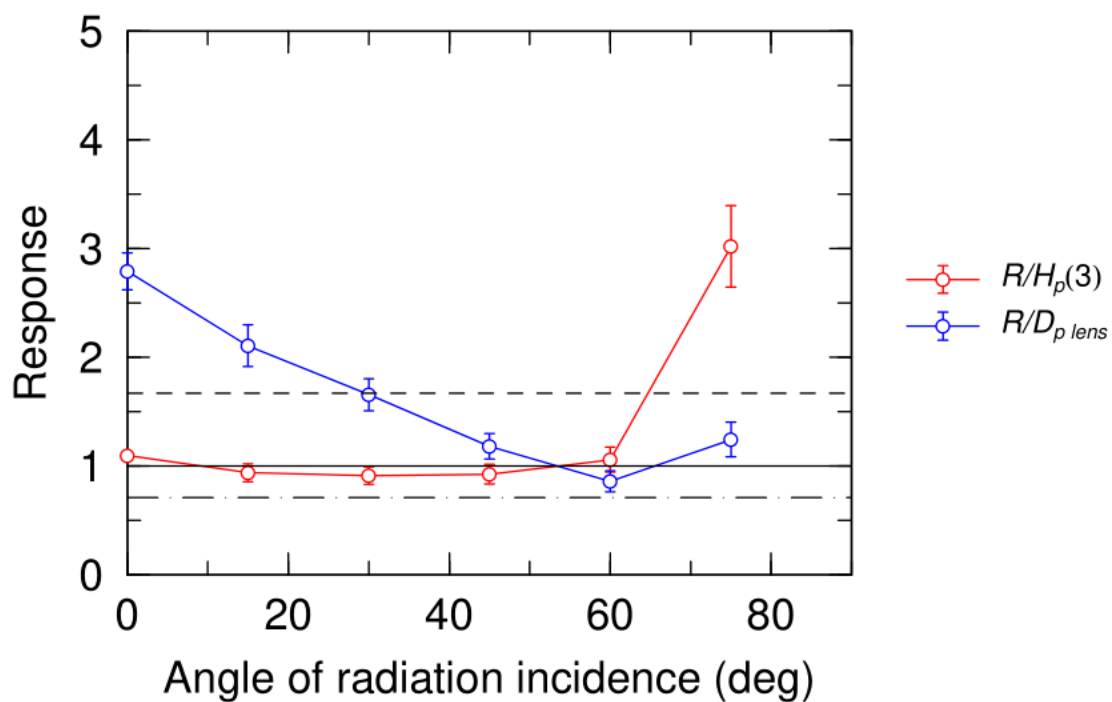


図 4-1-17 E 社製受動形線量計（水晶体用）の $H_p(3)$ 及び D_{plens} に係る $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線に対する方向特性（S-Cs $H_p(3,0^\circ)$ で校正（規格化））

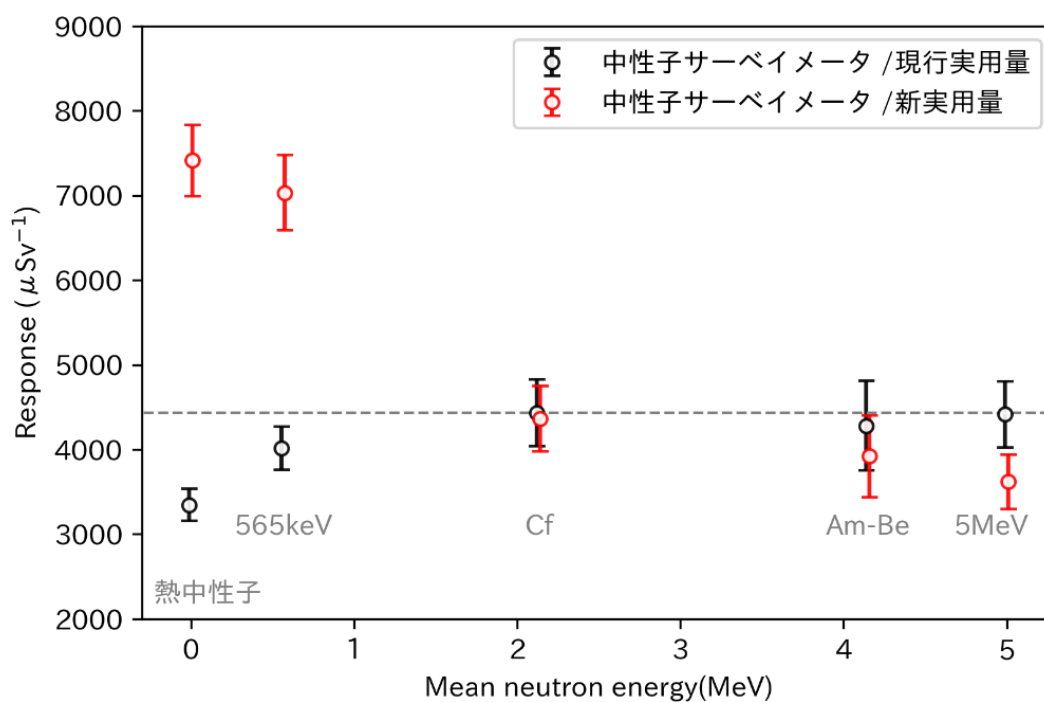


図 4-1-18 B 社製中性子サーベイメータのレスポンスのエネルギー依存性

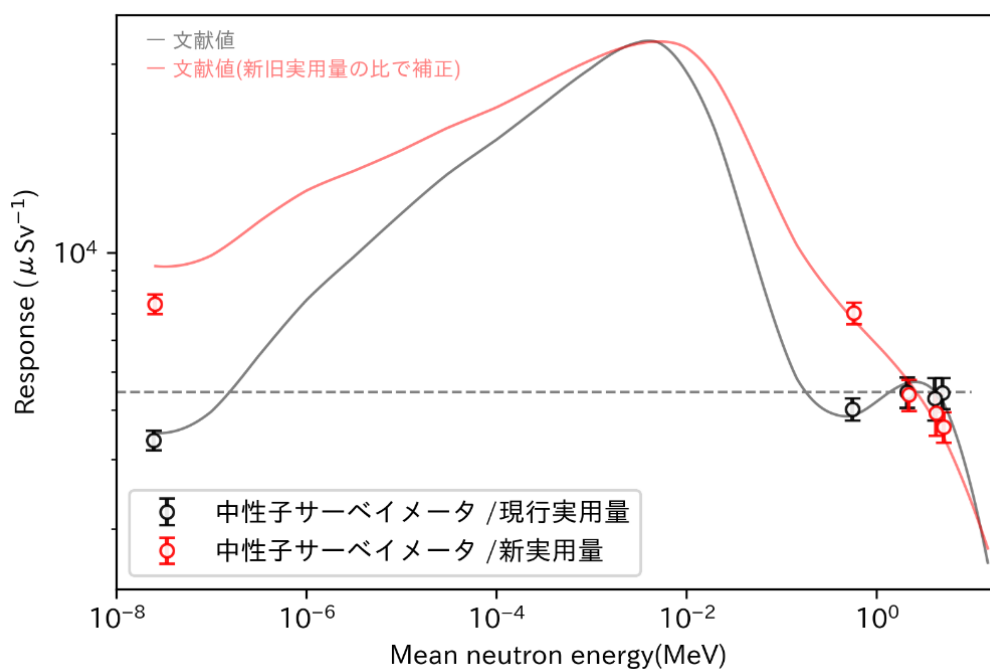


図 4-119 B社製中性子サーベイメータのエネルギーレスポンスと文献値^[40]の比較。
文献値と、新・現実用量の比で補正した値を、それぞれ黒、赤の実線で示した。

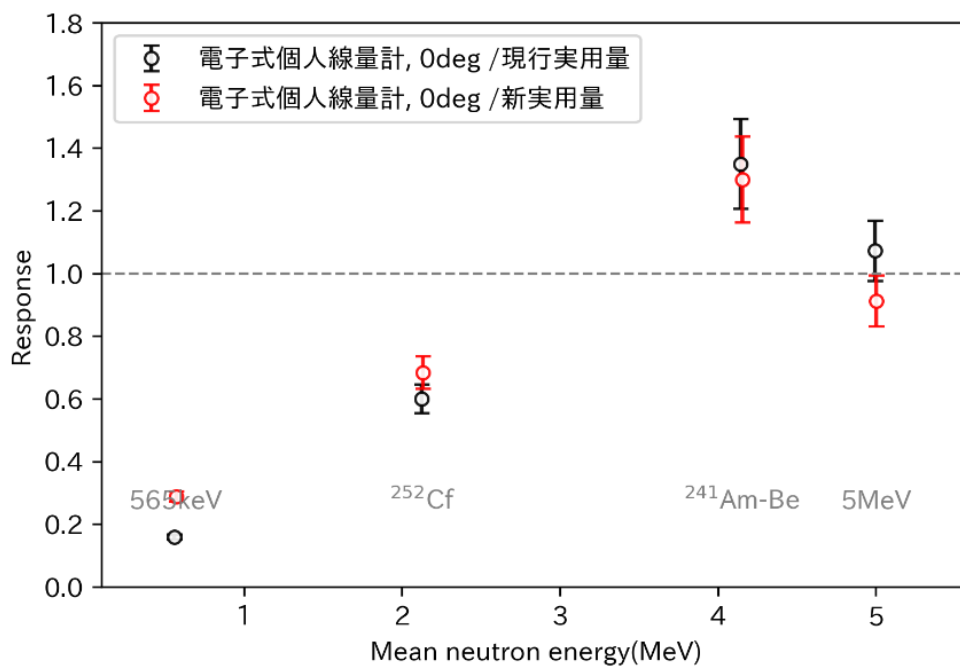


図 4-120 F社製電子式個人線量計の線量計のエネルギー特性(入射角: 0°)

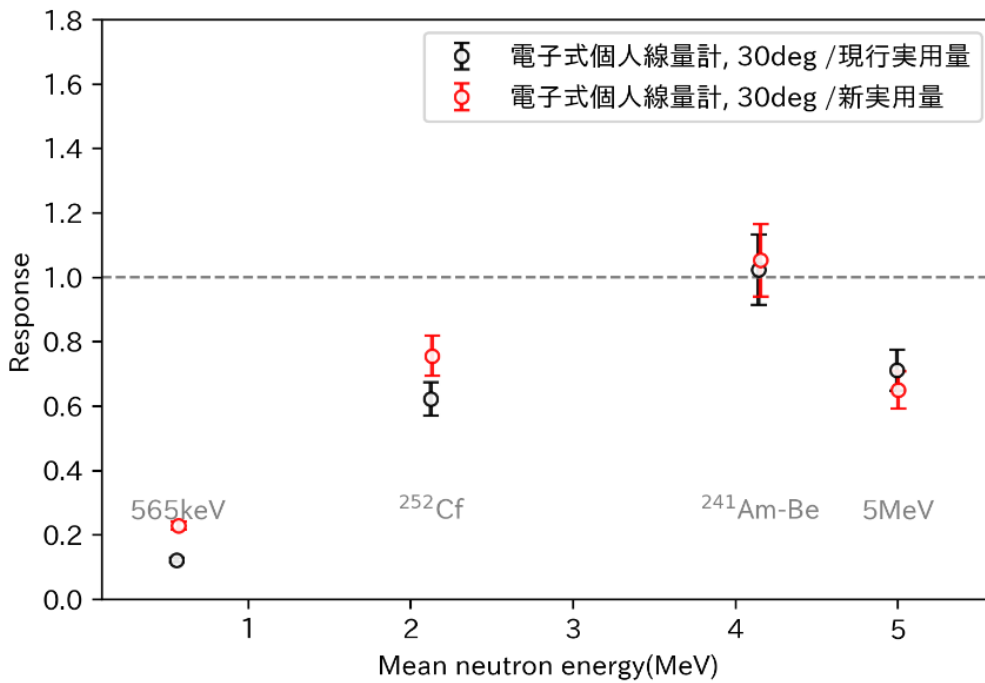


図 4-1-2-1 F社製電子式個人線量計の線量計のエネルギー特性(入射角：30°)

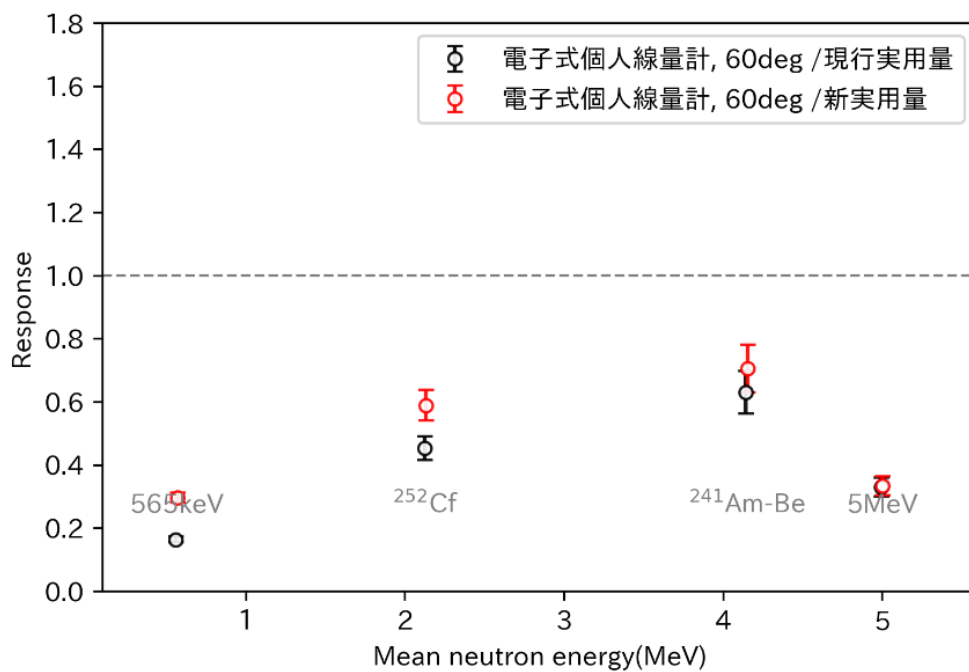


図 4-1-2-2 F社製電子式個人線量計のエネルギー特性(入射角：60°)

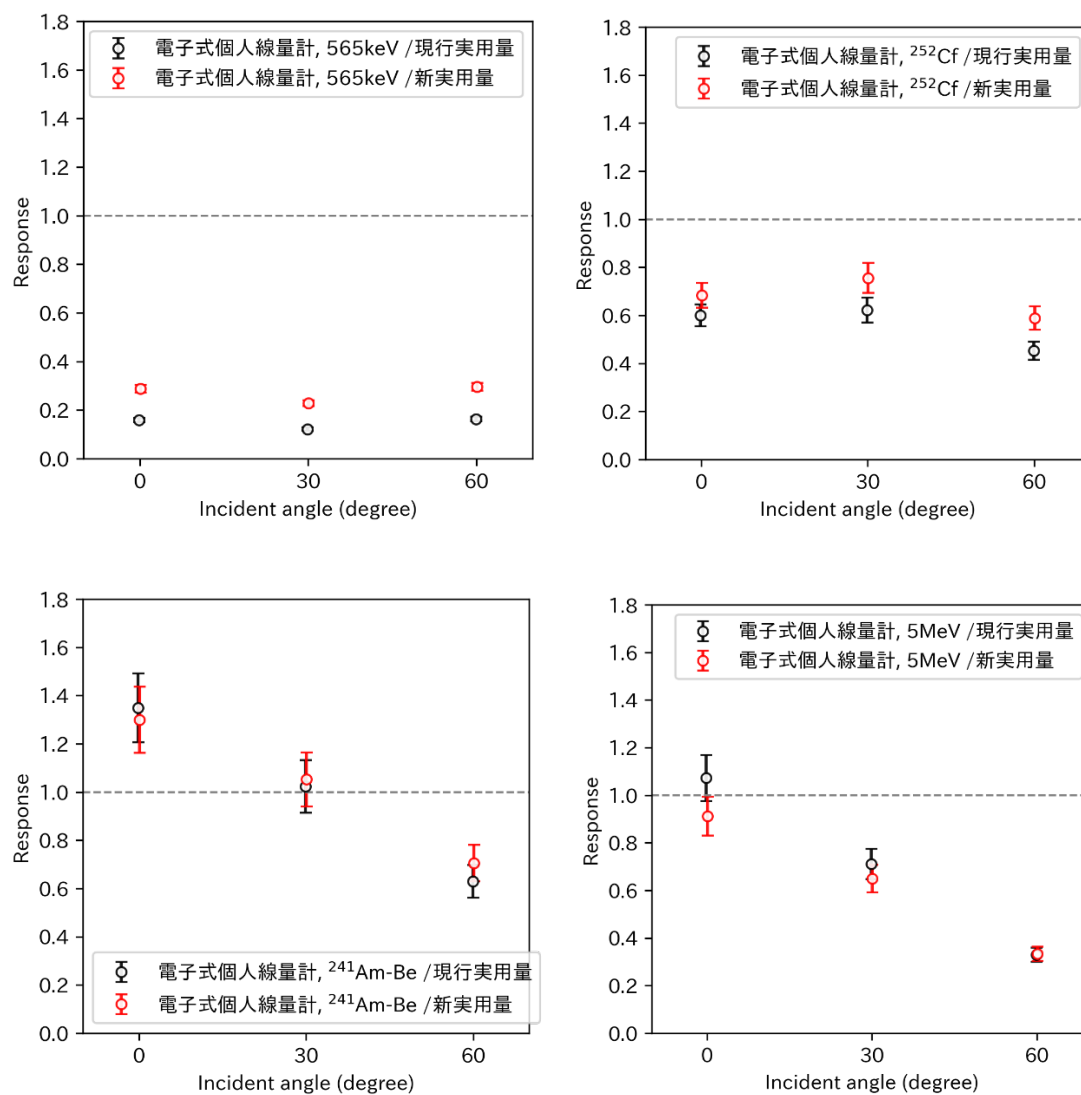


図 4-123 F社製電子式個人線量計の各線質に対するレスポンスの角度依存性

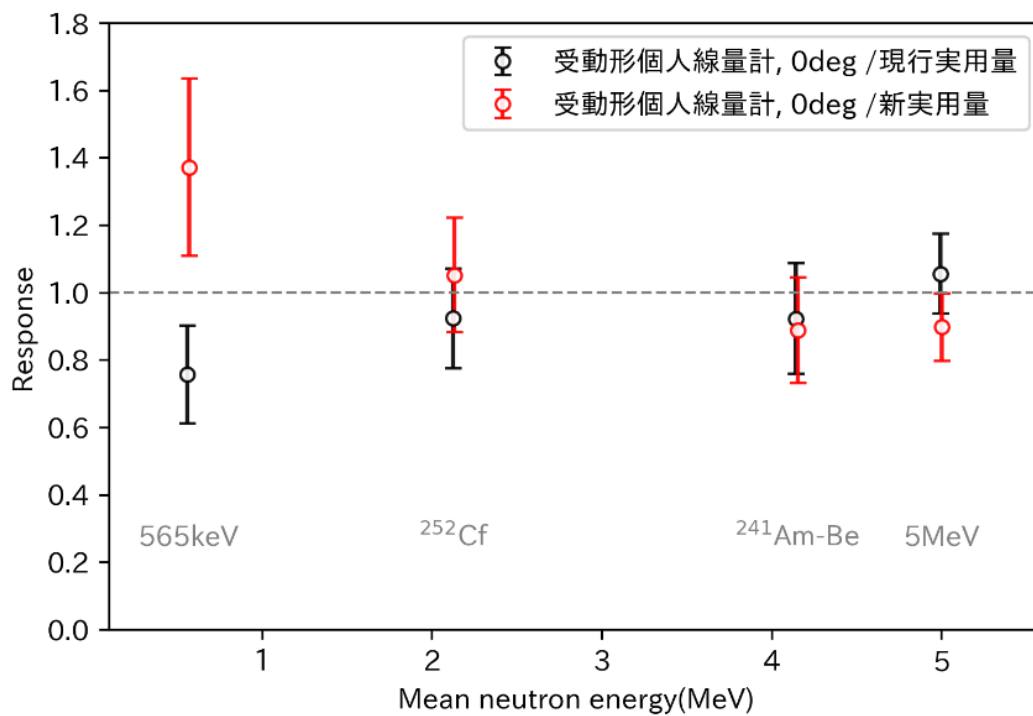


図 4-124 G社製受動形個人線量計のエネルギー特性(入射角: 0°)

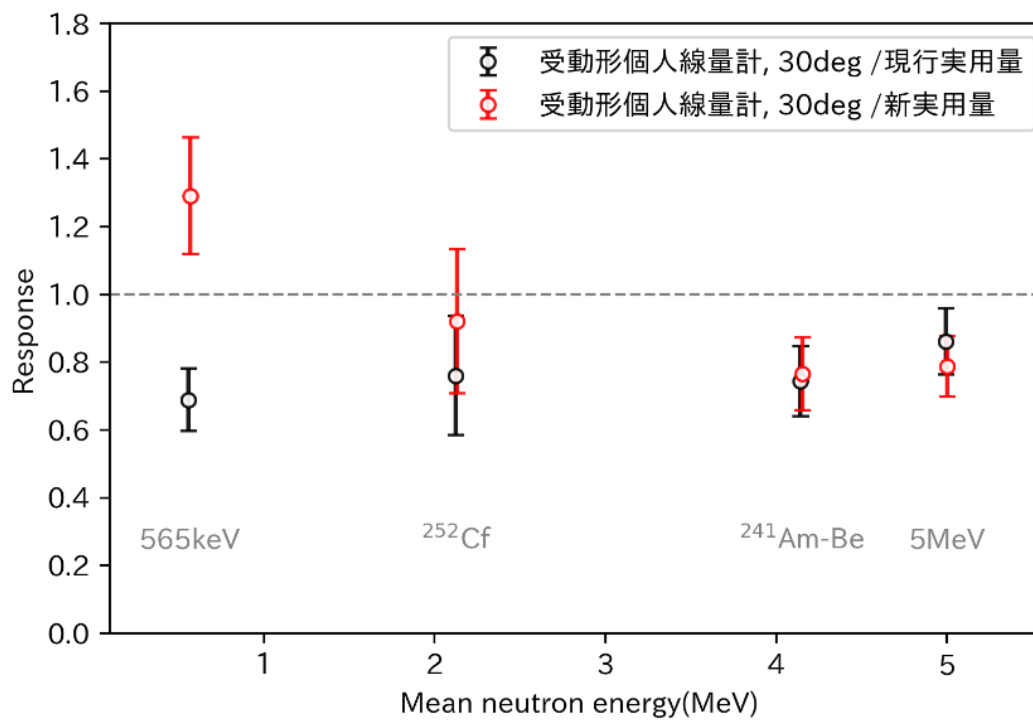


図 4-125 G社製受動形個人線量計のエネルギー特性(入射角: 30°)

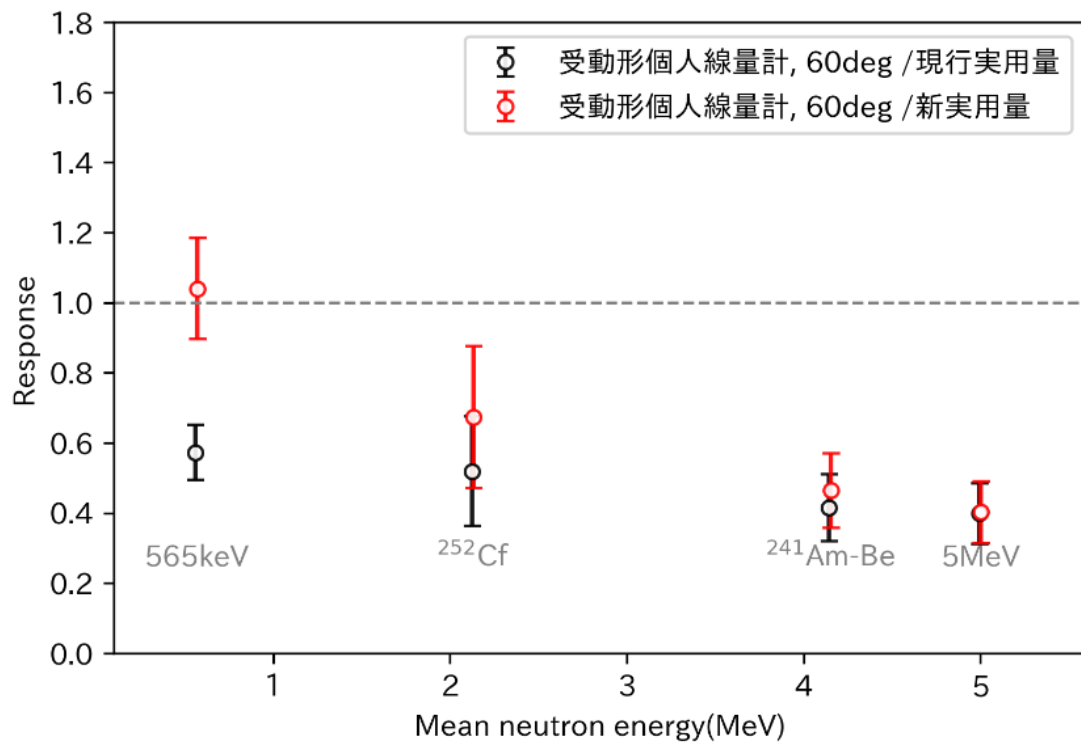


図 4-126 G社製受動形個人線量計のエネルギー特性(入射角: 60°)

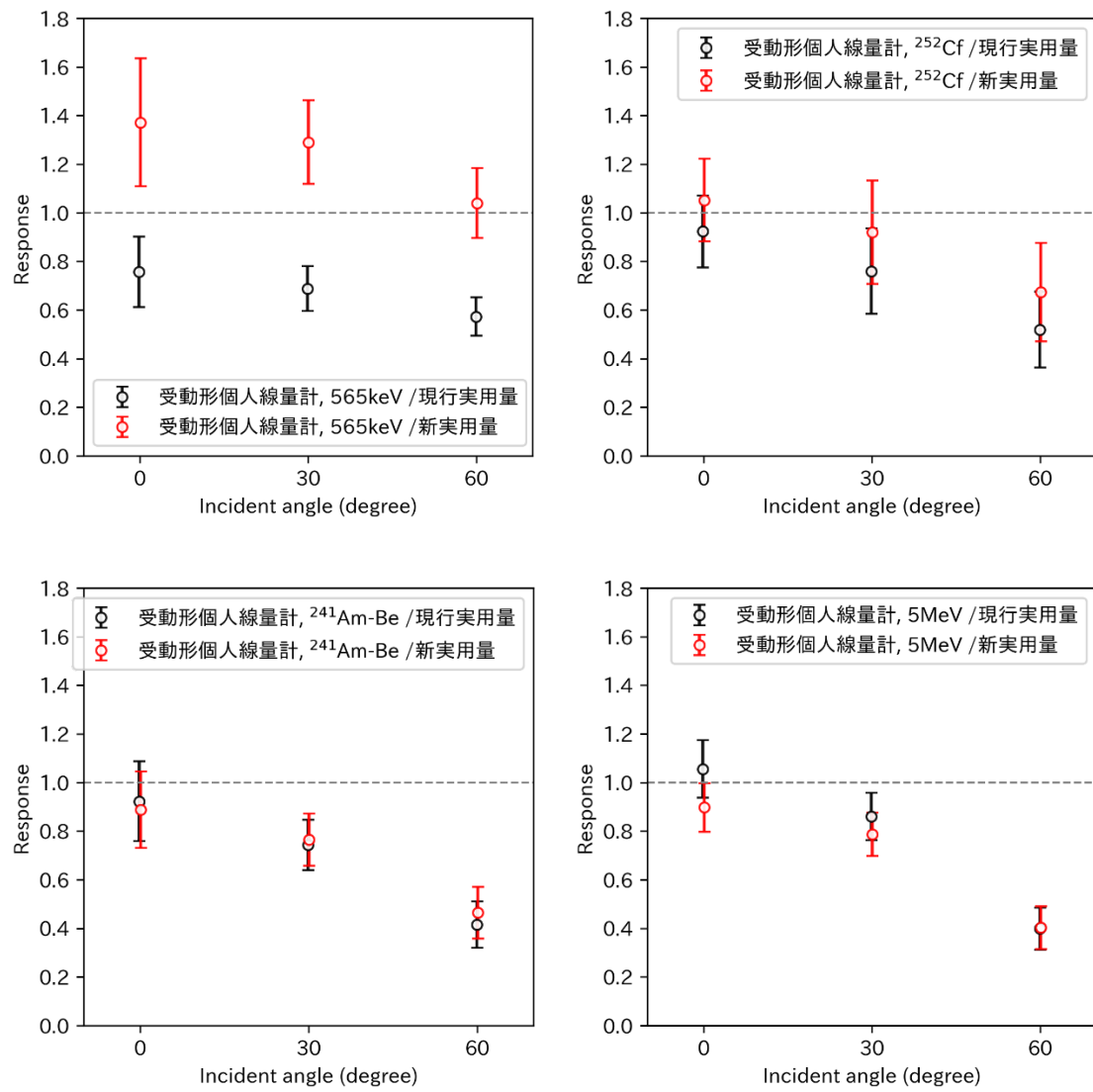


図 4-127 G社製受動形個人線量計の各線質に対するレスポンスの角度依存性

4.4 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査

現行の放射線防護の規制において、例えば、放射線同位元素等の規制に関する法律施行規則（令和3年4月1日施行）^[4]第20条では、事業者に実用量を使った測定の義務が課されている。こうした測定において、実用量の定義が変更されることによって測定値が影響を受ける可能性がある。そこで、こうした測定を行う実際の放射線管理の場における線量計のエネルギー応答を調査した。

令和3年度事業では、原子力施設の放射線作業場数例の光子エネルギー分布から、現行実用量及び新たな実用量に基づく線量を算出することにより、定義変更によってこれらの場において測定量そのものがどのように変わるかが示されるとともに、光子エネルギー分布から評価した代表エネルギーに対する線量計の特性試験により放射線作業場における線量計の応答が評価された。本事業では、原子力施設及び放射線使用施設の7つの特徴が異なる放射線作業場を選定し、光子エネルギー分布を取得した。また、市販のサーベイメータ2機種及び個人線量計2機種について、FRSにおけるエネルギー特性試験結果に基づいて、原子力施設の放射線作業場におけるこれらの線量計のエネルギー応答を評価することで付随する課題について調査する。

4.4.1 放射線作業場の選定

原子力施設の放射線作業場について、光子による有意な外部被ばく源があり、散乱線の影響、遮蔽、線源自体のエネルギー分布により光子エネルギー分布に特徴を有する場として、表4-40のものを選定した。

4.4.2 光子エネルギー分布の取得

(1) 方法

(a) 光子スペクトル測定

選定した作業場のうち、#1及び#2については、2"φ×2"NaI(Tl)検出器（BNC社製SAM940 Model 940-2-G）を用いてスペクトル（パルス波高分布）を測定した。測定の様子を例を図4-128に、得られたスペクトルを図4-130に示した。これらのパルス波高分布は、検出器の置かれた放射線場と検出器の相互作用の結果としての検出器に付与されたエネルギーの分布を表しているに過ぎない。従って、検出器の置かれた（測定した作業場の）元の放射線場のエネルギー分布を知るには、これらのパルス波高スペクトルから元の光子エネルギー分布を算出する復元処理（アンフォールディング処理）が必要となる。令和3年度事業と同じく、あらかじめモンテカルロ計

算により求めた検出器の応答関数を用いて、MAXED コード^[42]を用いてアンフォールディングを行った。

表に示した③～⑥の放射線作業場については、3 MeV を超えるような高エネルギー γ 線の影響が考えられた。そこで、別の 2" ϕ \times 2" NaI(Tl) 検出器 (BICRON 製 2M2/2) (図 4-1 2 9 参照) を用いた測定を行い、同様の手法でアンフォールディング処理を行い、光子エネルギー分布を得た。



図 4-1 2 8 測定を行った放射線作業場の様子 (#1 及び#2)

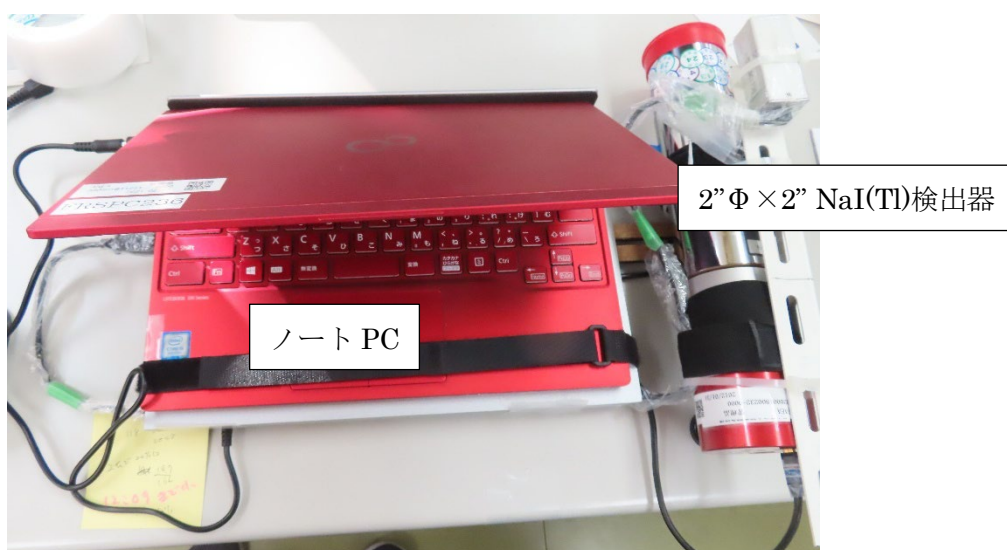


図 4-1 2 9 ③～⑥の放射線作業場における光子エネルギー分布の取得に使用した測定系

表 4-40 選定した放射線作業場

放射線作業場	No	代表的な線源	特徴	備考
①フードでの RI 線源取り扱い	#1	^{137}Cs	フードにおける非密封線源の取り扱い 直接線が支配的な場	
②廃棄施設	#2	^{137}Cs	放射性廃棄物を保管廃棄する保管廃棄設 備周辺の人が常時立ち入る場所	
③研究用原子炉施設・中性子利 用設備作業環境（運転中）	#3	消滅 γ 線, 即発 γ 線	作業環境モニタリング地点 高エネルギー成分を含む	
④研究用原子炉施設の炉心プー ル水循環系（運転中）	#4	原子炉冷却水でみら れる放射化核種	運転中の軽水原子炉施設における人が常 時立ち入る場所	
⑤研究用原子炉施設の燃料破損 モニタ周辺（運転中）	#5	原子炉冷却水でみら れる放射化核種及び ^{16}N	運転中の軽水原子炉施設において、高エ ネルギー γ 線を放出する ^{16}N の影響が考 えられる場	
⑥中性子ビーム利用施設	#6	消滅 γ 線, 即発 γ 線	高エネルギー γ 線及びその散乱線による 場（人が常時立ち入る場所）	
⑦原子力発電所	#7～#11	^{58}Co 及び ^{60}Co	原子力発電所（PWR）の場（原子炉停止 中）	文献 ^[43] のスペクトル を再解析

(a) #1 : フードでの RI 線源取り扱い (b) #2 : 廃棄施設

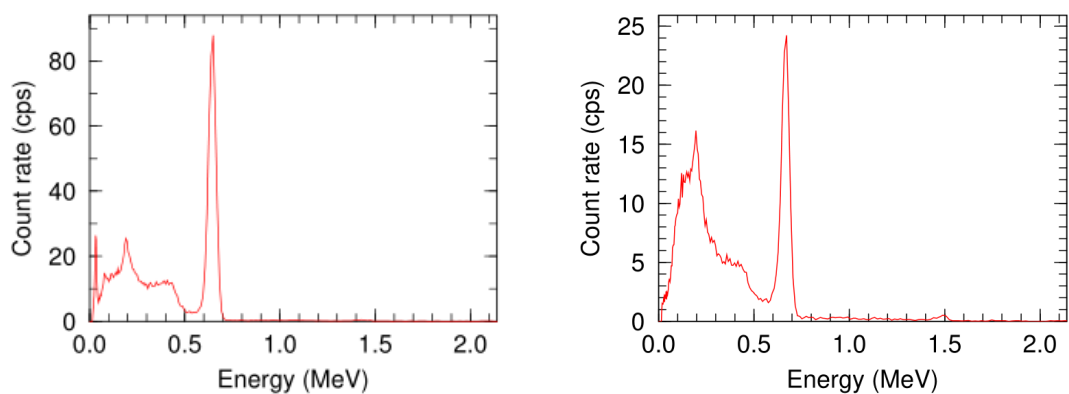
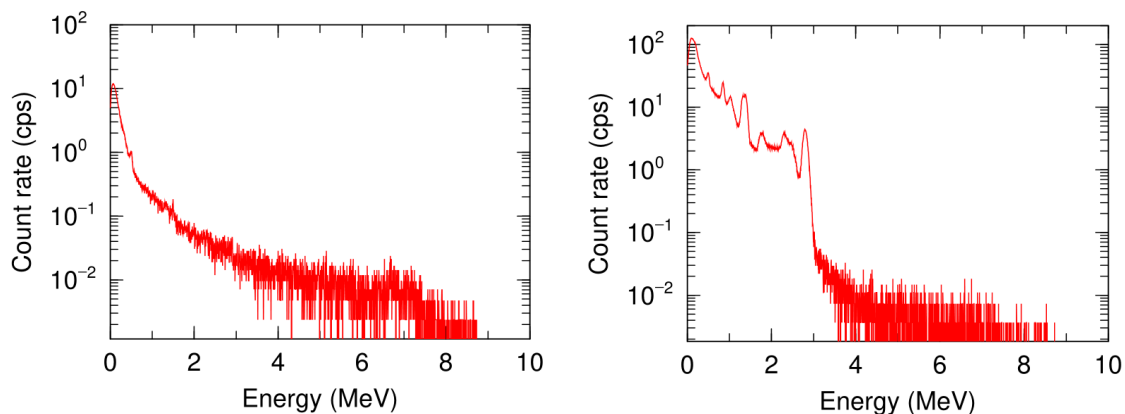


図 4-130 2" Φ × 2" 円筒形 NaI (TI) 検出器によるパルス波高スペクトル (#1 及び #2)

(a) #3 : 中性子利用設備・作業環境 (b) #4 : 炉心プール水循環系周辺



(c) #5 : 燃料破損モニタ周辺

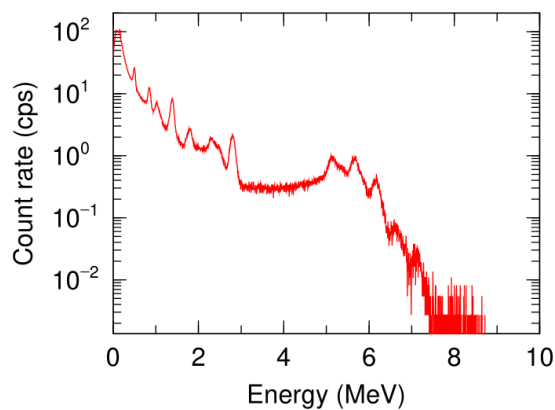


図 4-131 研究用原子炉施設における 2" Φ × 2" 円筒形 NaI (TI) 検出器によるパルス波高スペクトル (#3~#5)

(a) #6 : 中性子ビーム利用施設

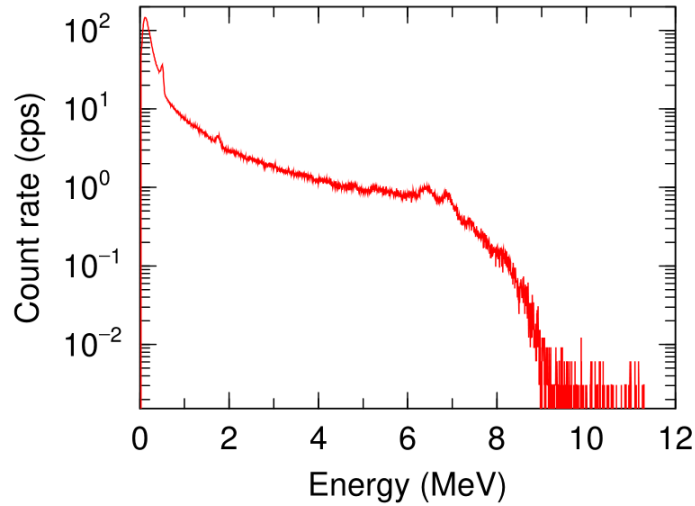


図 4-132 中性子ビーム利用施設における2”φ×2”円筒形 NaI(Tl) 検出器によるパルス波高スペクトル (#6)

(c) 原子力発電所における光子スペクトル

平成 30 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～）成果報告書^[43]（以下「水晶体事業成果報告書」という。）に記載されている原子力発電所のデータを利用した。利用したデータは表 4-4 1 のとおりであり、定期検査のため停止している原子力発電所（PWR）の蒸気発生器付近で CdZnTe 検出器を用いて取得された γ 線波高分布である。これを再解析（アンフォールディング処理）することにより光子スペクトルデータを得た。

表 4-4 1 再解析に利用したデータ一覧
（原子力発電所 B 蒸気発生器マンホール周辺（マンホール開放時））

No.	水晶体事業成果報告書での図番号	測定場所
#7	図 2-18-2	SG-C Hot 側
#8		SG-C Cold 側
#9		A ループ室配管
#10		C ループ 17.5 m
#11		SG-A Cold 側（MH 閉止状態）

(2) 結果と考察

#1～#6 について、スペクトル測定により得られた図 4-1 3 0～図 4-1 3 2 のパルス波高スペクトルをアンフォールディング処理することにより得られた光子エネルギー分布を図 4-1 3 3 に示した。以下にそれぞれのエネルギー分布の特徴を記載する。

- #1：ほぼ ^{137}Cs の崩壊に伴う 662 keV の γ 線（直達線）単一とみなしてもよい場である。
- #2：#1 と比較して、低エネルギー領域に少し散乱成分が含まれている場である。
- #3：目立ったピークはないが、8 MeV 程度の高エネルギー領域までテールを引くエネルギー分布を示している。
- #4：プール水中に含まれる放射化核種である ^{24}Na 、 ^{56}Mn 、 ^{59}Fe の崩壊に伴う γ 線、消滅光子及びそれらの散乱線からなるエネルギー分布を示しているが、3 MeV を超える高エネルギー成分は見られない。
- #5：#4 のピークに加えて ^{16}N の崩壊に伴う 6-7 MeV の高エネルギー γ 線の成分を持つエネルギー分布を示している。
- #6：8 MeV 程度まで即発 γ 線による成分が見られるエネルギー分布を示している。

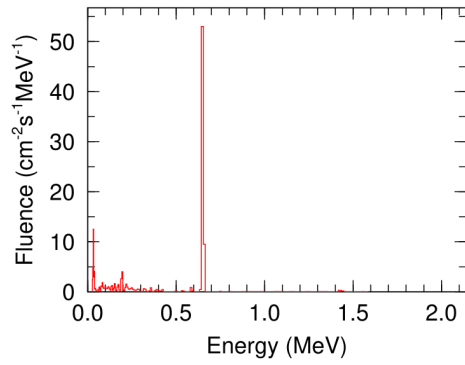
また、水晶体事業成果報告書^[34]から取得した波高分布の再解析により得られた光子エネルギー分布（#7～#11）を図 4-1 3 4 に示した。エネルギー分布は、全て以下のような同様の特徴を有していた。

- #7～#11：水晶体事業成果報告書^[43]にも記載されているとおり、 ^{58}Co の崩壊に伴う 811 keV、 ^{60}Co の崩壊に伴う 1173 keV 及び 1333 keV、消滅光子である 511 keV のピーク及びその散乱線からなるエネルギー分布を示している。

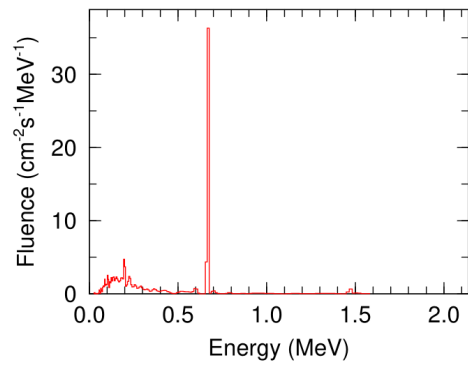
いずれも、表 4-4 0 に示した特徴が光子エネルギー分布にも表れており、線源や散乱の状況を反映したものとなっている。また、今回新たにスペクトルを測定した①～⑥の場は、主として高エネルギー成分が想定され。また線量率についても最大でも $15 \mu\text{Sv h}^{-1}$ を超えないような放射線作業場を選定したため、NaI(Tl)検出器を用いた。今回は対象としなかった低エネルギー光子が主となる放射線作業場や線量率が高い放射線作業場での光子エネルギー分布の測定を念頭にした場合は、違った測定系を用いる必要がある。また、放射線管理の現場における測定では、狭隘な場所での測定や汚染管理などの観点も踏まえて可搬性に優れていることも重要なポイントである。低エネルギー光子が主体的な場及び線量率が高い場での測定のために、それぞれ $25 \text{ mm}^2 \times 1 \text{ mm}^t$ の CdTe 半導体検出器（EMF 社製 EMF123 型 X 線スペクトロメータ）、及び $12.7 \text{ mm } \Phi \times 12.7 \text{ mm}$ の LaBr₃(Ce)シンチレーション式検出器（応用光研社製 2S2LABR、CAEN 社製 S2570D i-Spector Digital）を用いた測定系を検討した（図 4-1 3 5 参

照)。一例として CdTe 検出器を利用し、FRS の ^{241}Am 校正場及び N-80 の X 線校正場でスペクトル測定を行った結果を図 4-136 に示した。また、比較として 1"Φ×1" NaI(Tl)検出器（日本レイテック社製 TCS-1172）を用いた同じ場でのスペクトル測定の結果を図 4-137 に示した。これらのスペクトルはアンフォールディング処理をしていない波高分布であることに注意が必要である。このように CdTe 検出器は、低エネルギー光子の測定に適していると考えられる。今後はこうした測定系を利用して、低エネルギー光子場や高線量率場での光子エネルギー分布の取得を行い、データを蓄積していくことが望まれる。

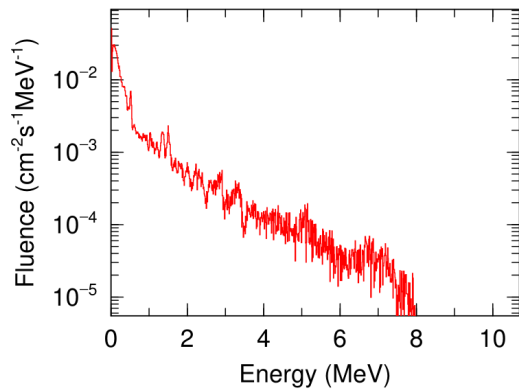
(a) #1 : フードでの RI 線源取り扱い



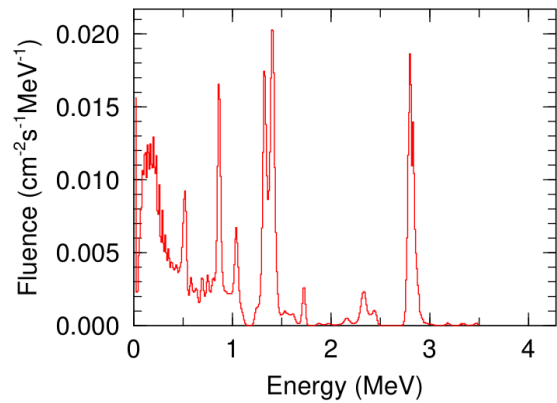
(b) #2 : 廃棄施設



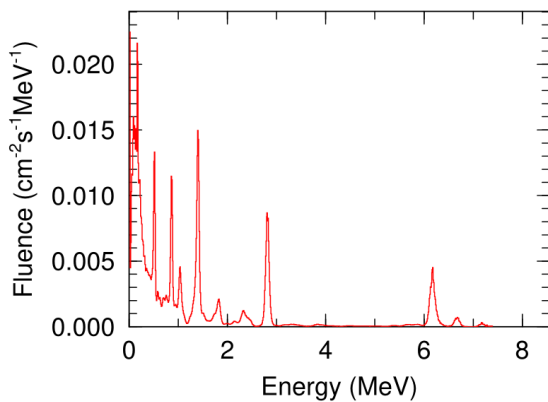
(c) #3 : 研究炉・作業環境



(d) #4 : 研究炉・プール水循環系



(e) #5 : 研究炉・燃料破損モニタ周辺



(f) #6 : 中性子ビーム利用施設

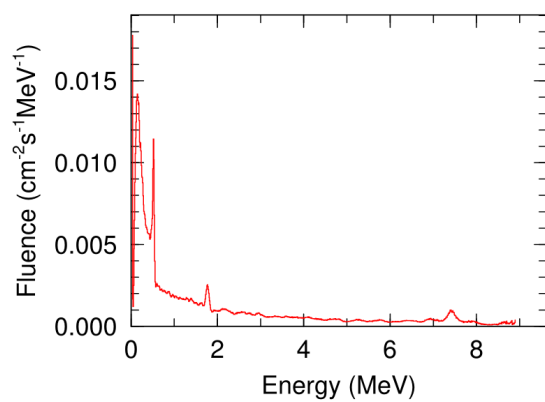
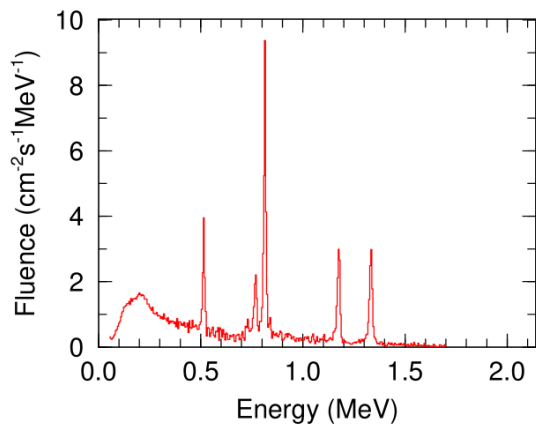
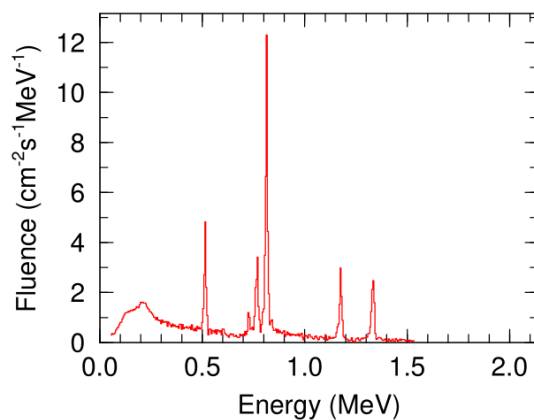


図 4-133 光子エネルギー分布 (#1~#6)
(全フルエンスで規格化)

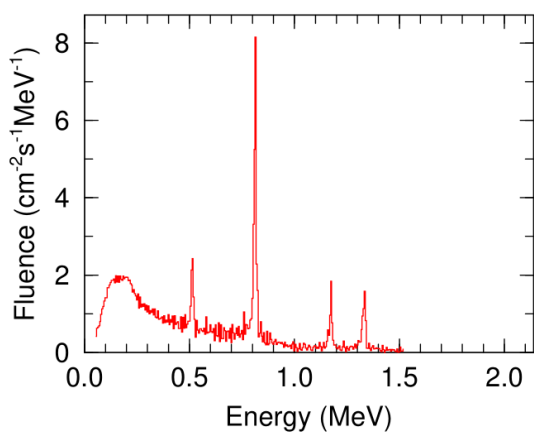
(a) #7 : SG-C (Hot 側)



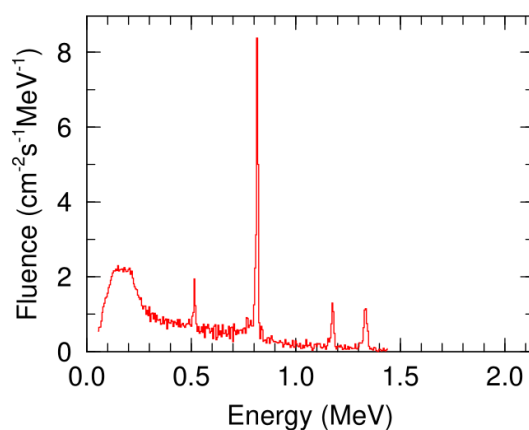
(b) #8 : SG-C (Cold 側)



(a) #9 : A ループ室配管



(b) #10 : C ループ 17.5 m



(b) #11 : SG-A (Cold 側)

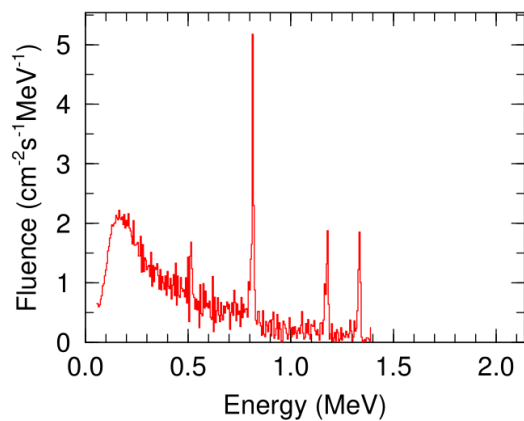


図 4-1 3 4 光子エネルギー分布 (#7~#11)

(全フルエンスで規格化)

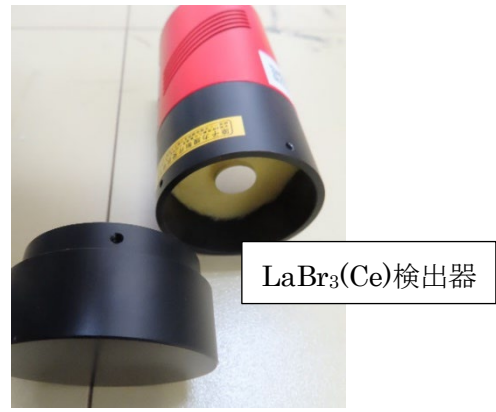
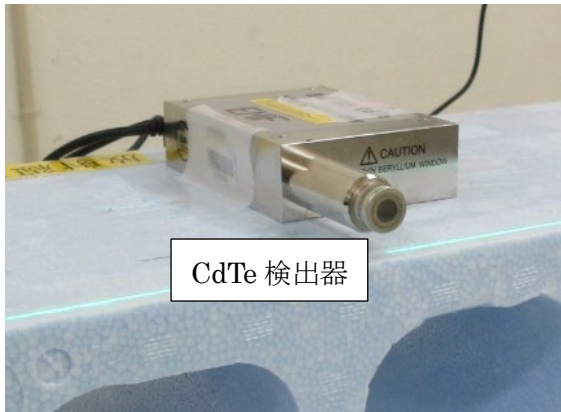


図 4-1-35 CdTe 検出器や LaBr₃(Ce)検出器を用いた作業場スペクトル測定系の例

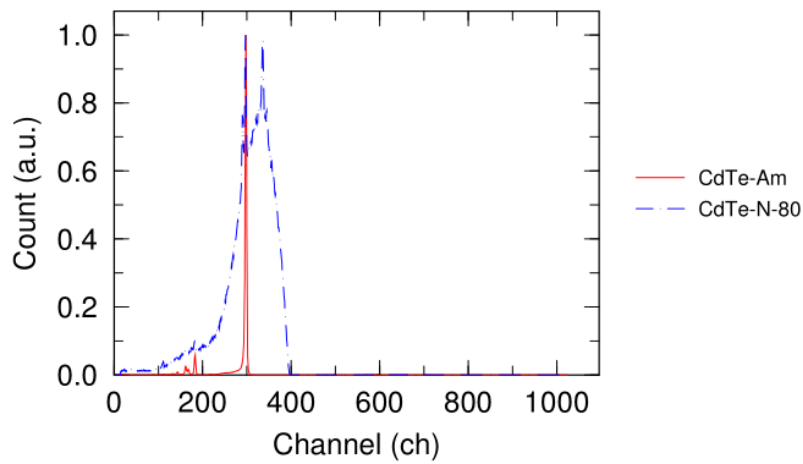


図 4-1-36 ²⁴¹Am 校正場及び N-80 校正場における CdTe 検出器による波高スペクトル
(最大値で規格化)

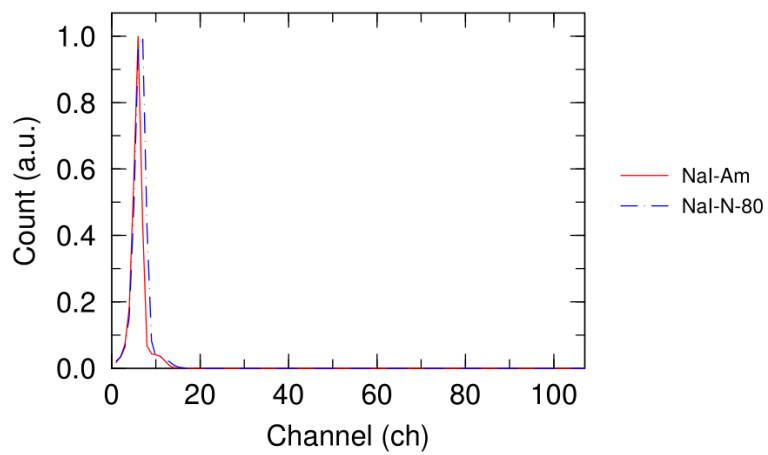


図 4-1-37 ²⁴¹Am 校正場及び N-80 校正場における 1"Φ×1" NaI(Tl)検出器による波高
スペクトル
(最大値で規格化)

4.4.3 放射線作業場における各線量の算出

(1) 方法

取得した光子エネルギー分布から4.2.1と同様にして現行及び新たな実用量に対する線量率を求めた。ここでは、ICRU Report 95⁶⁾で第一義的に示される電子平衡を仮定しない線量換算係数ではなく、まずは電子平衡が何れのケースでも達成されると仮定し、新たな実用量に対する線量換算係数はカーマ近似のものを用いた。実際には、各放射線作業場における電子平衡状態は周囲の状況に大きく依存するため明確ではなく、特に高エネルギー成分が存在する場においては光子と混在する二次電子による複雑な混在場となっていると考えられる。また、照射ジオメトリについても、実際の被ばく状況はより複雑ではあるが、ここでは0°もしくはROT照射として単純化して解析した。

(2) 結果と考察

#1～#6の場に対する線量の評価結果及び H^* 平均エネルギーを表4-42～表4-44に示す。また、表に新・現行実用量の比較を示した。 H^* 平均エネルギーは0.65 MeVから4 MeVまでにわたっているが、何れの場合も新・現行実用量の比はほぼ変わらず、多くの線量計の校正線質であるS-Csにおける比と同程度である。すなわち、現行実用量に関してよいエネルギー応答を示す線量計に関しては、新たな実用量で適切に校正されれば、引き続き問題なく使用できると考えられる。ただし、 H^* 及び H_p については評価する線量計測値自体が定義変更により小さくなることに注意が必要である。

また、原子力発電所の場合(#7～#11)に対する線量評価結果及び H^* 平均エネルギーを表4-45～表4-47に示した。 H^* 平均エネルギーは0.71～0.85 MeVの範囲であり、同様に新・現行実用量の比は変化せず、上述した事項と同じことが言える。

以上の結果に、令和3年度事業報告書⁷⁾に記載されている放射線作業場における評価結果も含めて、 H^* 平均エネルギーに対する新/現行実用量の比を算出し、図4-138及び図4-139に示した。概ねこの比はエネルギー依存的ではないことから、どこかのエネルギー点で校正した(現行実用量に対してレスポンスの良い)線量計を用いれば、適切にこれらの線量を測定することが可能であると考えられる。 $H_p/H_p(10)$ については、主に1 MeV以下でエネルギー依存的に振る舞うが、それでもその変化は15%程度である。これらは、カーマ近似の線量換算係数を使用して得られた線量である。これらの作業場について、新たな実用量についてカーマ近似ありなしの線量の比を算出し、図4-140に示した。 H^* や H_p については、これら調査した作業場ではその違いはほとんどない。一方で、 D_{lens} については、本事業で調査した研究用原子炉などのように平均エネルギーが1 MeVを超えるような場ではその影響が見られる。

$D_{\text{local skin}}$ については、原子力施設で見られる多くの作業場において大きく異なるため、二次電子の振る舞いに注意が必要である。

表 4-4 2 原子力施設及び放射線使用施設作業場（#1～#6）における場所のモニタリングにかかる実用量（カーマ近似）

No.	場所	場所のモニタリングにかかる実用量						
		\overline{E}_{H^*} (MeV)	$H^*(10)/K_a$ (Sv/Gy)	H^*/K_a (Sv/Gy)	$H'(3,0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$D'_{\text{lens}}(0^\circ)/K_a$ (Gy/Gy)	$H'(0.07,0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$D'_{\text{local skin}}(0^\circ)/K_a$ (Gy/Gy)
#1	フードでの RI 線源取り扱い	0.65	1.22	1.02	1.20	1.18	1.21	1.23
#2	廃棄施設	0.65	1.23	1.04	1.21	1.19	1.22	1.24
#3	研究炉・作業環境	1.88	1.20	1.02	1.18	1.16	1.19	1.20
#4	研究炉・炉心プール循環系	1.67	1.17	1.01	1.15	1.13	1.17	1.16
#5	研究炉・燃料破損モニタ周辺	2.97	1.16	1.01	1.14	1.12	1.15	1.15
#6	中性子ビーム利用施設	3.97	1.14	1.01	1.13	1.11	1.13	1.13

表 4-4 3 原子力施設作業場（#1～#6）における個人モニタリングにかかる実用量（カーマ近似）

No.	場所	個人モニタリングにかかる実用量							
		$H_p(10,0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(3,0^\circ)_{\text{cyl}}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{\text{p lens}}(0^\circ)/K_a$ (Gy/Gy)	$H_p(0.07,0^\circ)_{\text{slab}}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{\text{p local skin}}(0^\circ)_{\text{slab}}/K_a$ (Gy/Gy)	$H_p(\text{ROT})/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{\text{p lens}}(\text{ROT})/K_a$ (Gy/Gy)
#1	フードでの RI 線源取り扱い	1.23	1.02	1.20	1.18	1.22	1.23	—	—
#2	廃棄施設	1.25	1.04	1.21	1.19	1.24	1.24	—	—
#3	研究炉・作業環境	1.21	1.02	1.18	1.16	1.20	1.20	0.84	0.95
#4	研究炉・炉心プール循環系	1.17	1.01	1.15	1.13	1.17	1.16	0.85	0.96
#5	研究炉・燃料破損モニタ周辺	1.16	1.01	1.14	1.12	1.15	1.15	0.87	0.96
#6	中性子ビーム利用施設	1.14	1.01	1.12	1.11	1.13	1.13	0.88	0.97

表 4-4 4 原子力施設作業場（#1～#6）における新・現行実用量の比較（カーマ近似）

No.	場所	$H^*/H^*(10)$	$D'_{\text{lens}}/H'(3,0^\circ)$	$D'_{\text{local skin}}(0^\circ)/H'(0.07,0^\circ)$	$H_p(0^\circ)/H_p(10,0^\circ)$	$D_{\text{plens}}(0^\circ)/H_p(3,0^\circ)$	$D_{\text{plocal skin}}/H_p(0.07,0^\circ)$
		(Sv/Sv)	(Gy/Sv)	(Gy/Sv)	(Sv/Sv)	(Gy/Sv)	(Gy/Sv)
#1	フードでのRI線源取り扱い	0.84	0.99	1.01	0.83	0.99	1.00
#2	廃棄施設	0.84	0.98	1.01	0.83	0.98	1.00
#3	研究炉・作業環境	0.85	0.98	1.01	0.84	0.98	1.00
#4	研究炉・炉心プール循環系	0.86	0.98	1.00	0.87	0.99	1.00
#5	研究炉・燃料破損モニタ周辺	0.87	0.98	1.00	0.87	0.98	1.00
#6	中性子ビーム利用施設	0.88	0.98	1.00	0.88	0.99	1.00

表 4-4 5 原子力発電所（PWR）の蒸気発生器マンホール周辺作業場における場所のモニタリングにかかる実用量（カーマ近似）

No.	場所	$\overline{E_{H^*}}$ (MeV)	場所のモニタリングにかかる実用量					
			$H^*(10)/K_a$ (Sv/Gy)	H^*/K_a (Sv/Gy)	$H'(3,0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$D'_{\text{lens}}(0^\circ)/K_a$ (Gy/Gy)	$H'(0.07,0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$D'_{\text{local skin}}(0^\circ)/K_a$ (Gy/Gy)
#7	SG-C (Hot 側)	0.85	1.20	1.02	1.19	1.16	1.20	1.21
#8	SG-C (Cold 側)	0.82	1.20	1.03	1.19	1.17	1.20	1.21
#9	A ループ室配管	0.74	1.22	1.04	1.21	1.18	1.22	1.23
#10	C ループ 17.5 m	0.71	1.22	1.04	1.21	1.18	1.22	1.24
#11	SG-A (Cold 側)	0.71	1.22	1.04	1.22	1.19	1.22	1.24

表 4-46 原子力発電所（PWR）の蒸気発生器マンホール周辺作業場における個人モニタリングにかかる実用量（カーマ近似）

No.	場所	個人モニタリングにかかる実用量							
		$H_p(10,0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(3,0^\circ)_{cyl}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{p\ lens}(0^\circ)/K_a$ (Gy/Gy)	$H_p(0.07,0^\circ)_{slab}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{p\ local\ skin}(0^\circ)_{slab}/K_a$ (Gy/Gy)	$H_p(ROT)/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{p\ lens}(ROT)/K_a$ (Gy/Gy)
#7	SG-C (Hot 側)	1.22	1.02	1.18	1.16	1.21	1.21	0.82	0.94
#8	SG-C (Cold 側)	1.22	1.03	1.18	1.17	1.21	1.21	0.82	0.94
#9	A ループ室配管	1.24	1.04	1.20	1.18	1.23	1.23	0.82	0.94
#10	C ループ 17.5 m	1.25	1.04	1.21	1.18	1.24	1.24	0.82	0.94
#11	SG-A (Cold 側)	1.25	1.04	1.21	1.19	1.24	1.24	0.82	0.94

表 4-47 原子力発電所（PWR）の蒸気発生器マンホール周辺作業場における新・現行実用量の比較（カーマ近似）

No.	場所	$H'/H'(10)$	$D'_{lens}/H'(3,0^\circ)$	$D'_{local\ skin}(0^\circ)/H'(0.07,0^\circ)$	$H_p(0^\circ)/H_p(10,0^\circ)$	$D_{p\ lens}(0^\circ)/H_p(3,0^\circ)$	$D_{p\ local\ skin}/H_p(0.07,0^\circ)$
		(Sv/Sv)	(Gy/Sv)	(Gy/Sv)	(Sv/Sv)	(Gy/Sv)	(Gy/Sv)
#7	SG-C (Hot 側)	0.86	0.98	1.01	0.84	0.98	1.00
#8	SG-C (Cold 側)	0.86	0.98	1.01	0.84	0.98	1.00
#9	A ループ室配管	0.85	0.98	1.01	0.84	0.98	1.00
#10	C ループ 17.5 m	0.85	0.98	1.01	0.83	0.98	1.00
#11	SG-A (Cold 側)	0.85	0.98	1.01	0.83	0.98	1.00

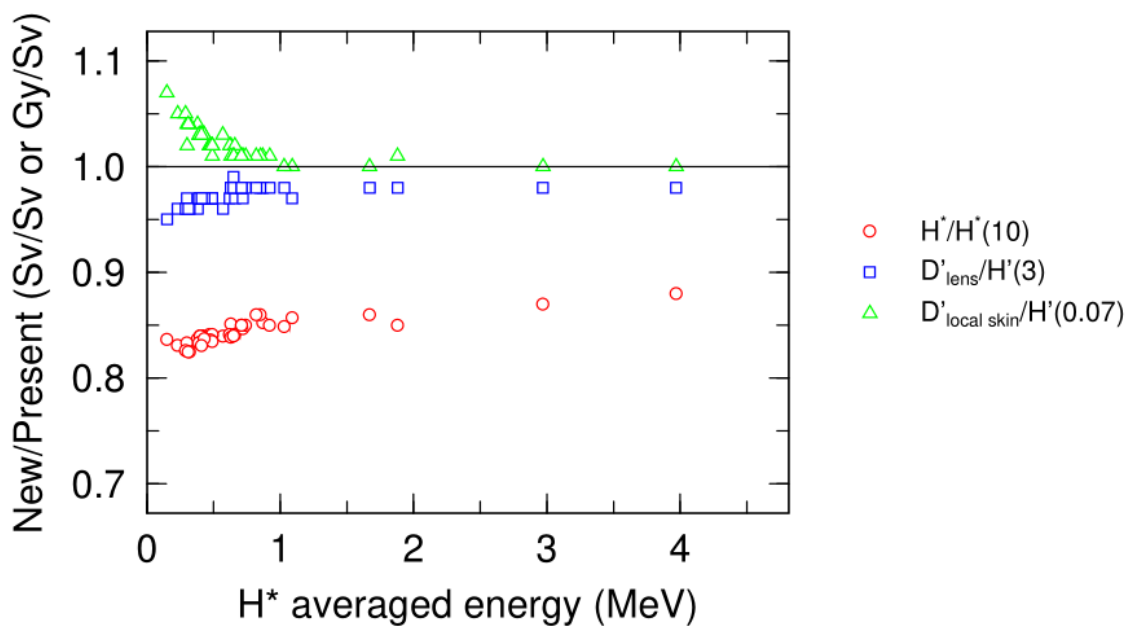


図 4-138 原子力施設及び放射線使用施設の作業場で評価した新たな実用量（カーマ近似）と現行実用量の比較（場所のモニタリングにかかる実用量）

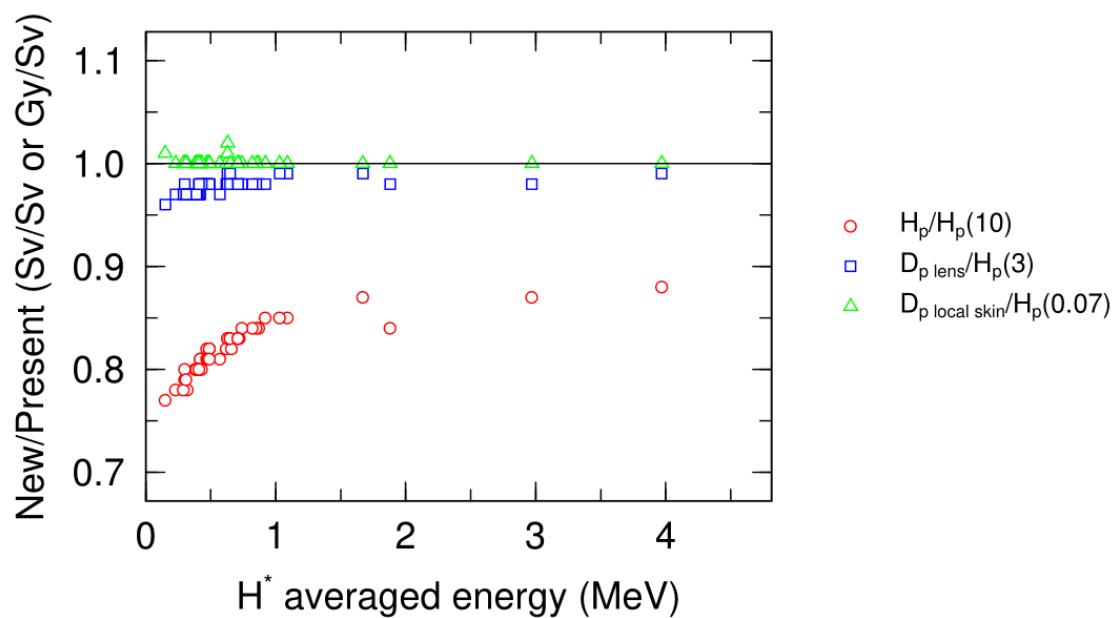


図 4-139 原子力施設及び放射線使用施設の作業場で評価した新たな実用量（カーマ近似）と現行実用量の比較（個人モニタリングにかかる実用量）

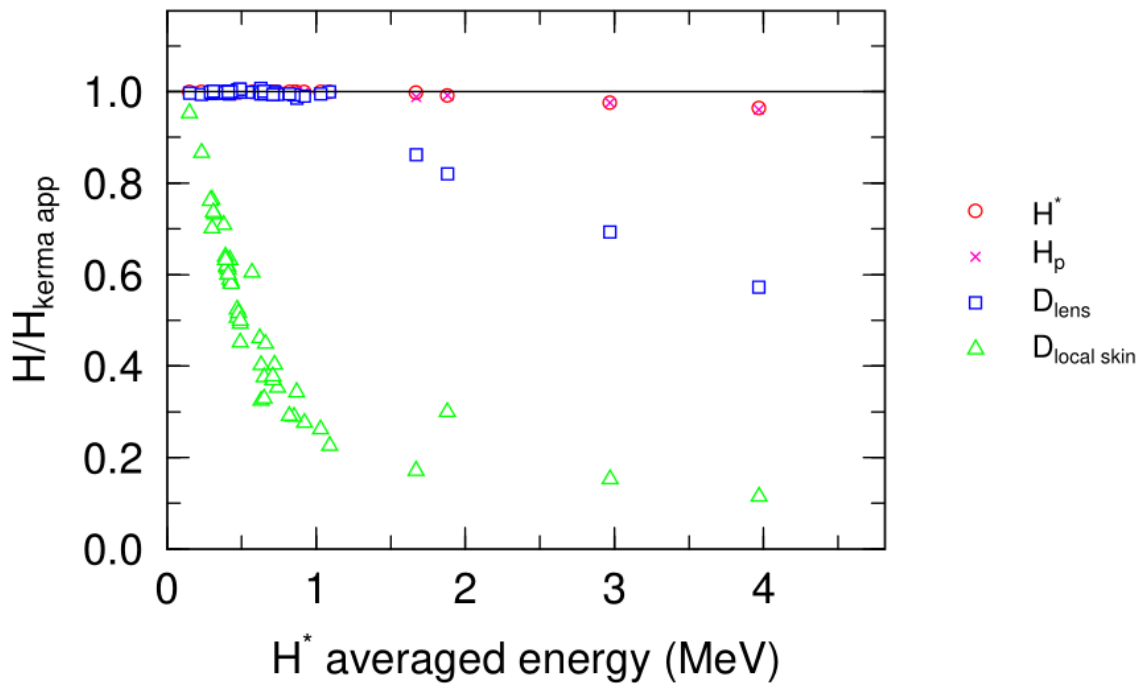


図 4-140 カーマ近似ありなしの線量換算係数を用いて評価した新たな実用量の比較

4.4.4 放射線作業場における線量計のエネルギー応答

令和3年度事業報告書^[7]及び4.3から、国内で入手可能ないくつかの線量計について、新たな実用量に対するエネルギー特性が明らかとなった。また令和3年度事業及び4.4.において、原子力施設における作業場の光子エネルギー分布の情報も得られた。そこで、これらの情報を組み合わせることによって、放射線作業場における線量計の応答を評価する手法を開発し、実際の作業場に適用することとした。

(1) 方法

(a) 光子エネルギー分布に基づいた作業場における線量計の応答評価方法

放射線作業場において得られた光子エネルギー分布 $\Phi(E)$ ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MeV}^{-1}$)から以下のとおり実用量スペクトル $H(E)$ を算出した。

$$H(E) = \Phi(E) \cdot (K_a/\varphi)(E) \cdot h(E) \quad (8)$$

ここで、 $(K_a/\varphi)(E)$ (Gy/cm^{-2})は、エネルギー E に対するフルエンスから空気カーマへの線量換算係数、 $h(E)$ (Sv/Gy もしくは Gy/Gy)は、エネルギー E に対する空気カーマから実用量 H への線量換算係数である。

線量計の実用量 H に関するエネルギー E に対する応答を $R_H(E)$ としたとき、この放射線場における線量計の応答 R を

$$R = \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} R_H(E) \cdot H(E) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} H(E) dE} \quad (9)$$

で評価した。ここで、 $R_H(E)$ については、 0° におけるエネルギー特性試験結果をLagrange補間することにより得た。

(b) 妥当性評価

この手法の妥当性を検証するために、令和3年度事業で光子エネルギー分布が報告されている放射線場一例について、当該手法で評価した線量計の応答と直接線量計を放射線場において測定した結果を比較した。

比較に用いた放射線場は令和3年度事業報告書^[7]に記載のコンクリート遮蔽壁により ^{137}Cs の直接線と散乱線からなる場(#2の場)であり、試験時の $H^*(10)$ 線量率は $4.95 \mu \text{Sv h}^{-1}$ であった。その光子エネルギー分布から評価した H^* スペクトルを図4-1-4-1に示す。使用した線量計は、H社製電離箱式サーベイメータ及びI社製電子式個人線量計とした。それぞれのエネルギー特性を図4-1-4-2及び図4-1-4-3に示した。

直接測定において、線量計は光子エネルギー分布が取得された場所と同じ位置に設置した(図4-1-4-4参照)。電子式個人線量計についてはPWファントムに貼

り付けて一定時間放置し積算線量に対して応答を評価した。

光子エネルギー分布と線量計のエネルギー特性試験から評価した線量計応答と直接測定により得られた応答の比較を表 4-4 8 及び表 4-4 9 に示す。何れも光子エネルギー分布から評価した線量計の応答は、直接測定した結果をよく再現しており、本手法による評価が有効であることが分かった。

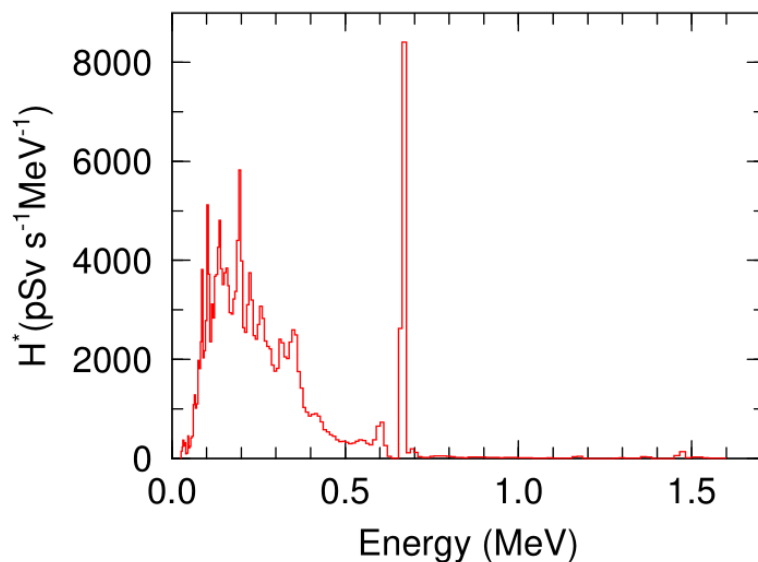


図 4-1 4 1 手法の妥当性評価に用いた放射線場の H^* スペクトル

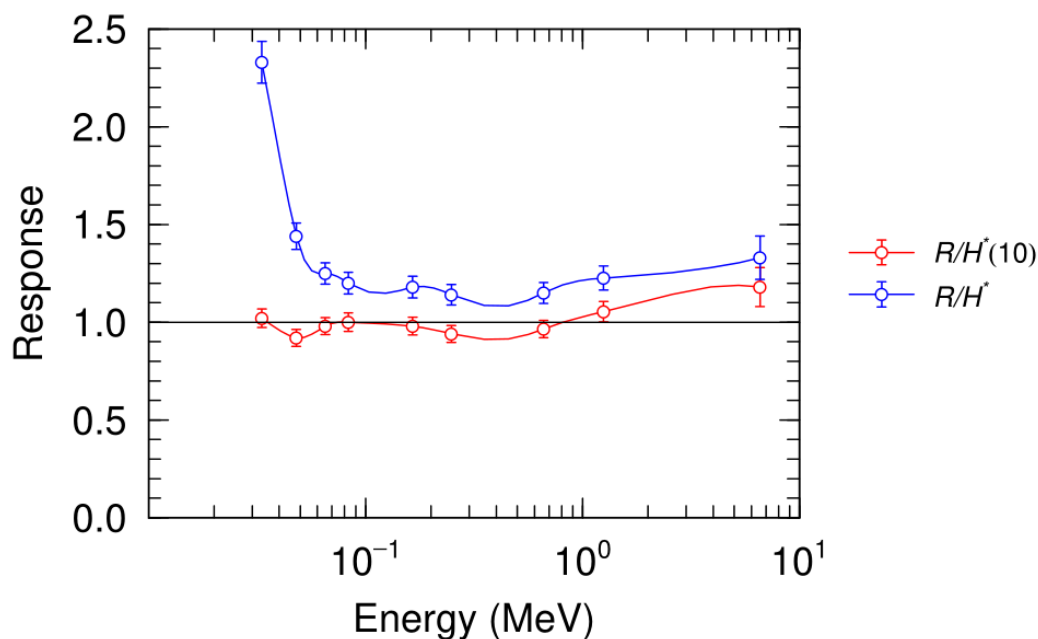


図 4-1 4 2 手法の妥当性評価に用いた H 社製電離箱式サーベイメータのエネルギー特性

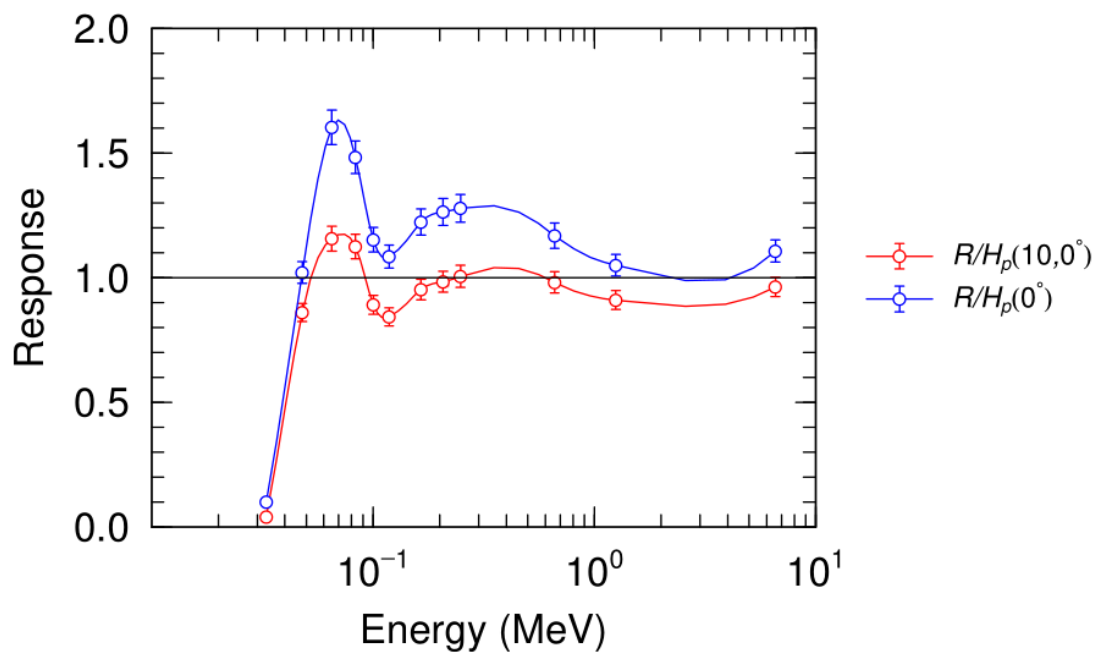


図 4-1-4-3 手法の妥当性評価に用いた I 社製電子式個人線量計のエネルギー特性



図 4-1-4-4 H 社製電離箱式サーベイメータを用いた直接測定時の様子

表 4-48 評価した線量計応答の比較（電離箱式サーベイメータ）

評価方法	$H^*(10)$ 応答	H^* 応答
光子エネルギー分布から評価	0.97	1.18
直接測定から評価	0.99	1.19

表 4-49 評価した線量計応答の比較（電子式個人線量計）

評価方法	$H_p(10)$ 応答	H_p 応答
光子エネルギー分布から評価	0.96	1.23
直接測定から評価	0.99	1.25

(c) 評価した放射線場

令和 3 年度事業と本事業で評価された原子力発電所（福島第一原子力発電所を含む）の放射線作業場について解析した。

(d) 評価した線量計

以下の線量計を評価に用いた。

- ・ H 社製電離箱式サーベイメータ
- ・ J 社製電離箱式サーベイメータ
- ・ D 社製受動形個人線量計（体幹部用）
- ・ E 社製受動形個人線量計（水晶体用）

J 社製電離箱式サーベイメータのエネルギー特性については、文献^[45]から取得した。

(2) 結果と考察

原子力発電所で取得された光子スペクトルを利用し、これらの作業場における電離箱式サーベイメータ 2 機種及び受動形個人線量計 2 機種について、上述した手法を用いて現行実用量及び新たな実用量に対する応答を評価したものを図 4-145～図 4-148 に示す。図中横軸は、評価した放射線作業場における H^* 平均エネルギーである。

電離箱式サーベイメータについては 2 機種ともに H^* については、20%程度過大な応答を示すことになるが、場の平均エネルギーにはほとんど依存しないことから、 H^* に対する校正をすることによって、適切にモニタリングすることが可能である。そうした場合には、現行と比較して 20%程度小さな値として線量を測定することとなる。

体幹部用個人線量計についても、傾向は同じであるが、若干エネルギー依存的に応答に変化がみられ、 $H_p(10)$ での応答の変化は 5%程度なのに対して H_p では 15%程度変化する。低エネルギーほど応答は過大となり、調査範囲内では最大 36%過大応答することが想定される。ただし、当該機種の S-Cs の H_p に対する校正定数は 0.81 であるから、

H_p に対する校正によって、これらの過大応答は是正され、最大でも 10%の過大応答に留まる。

水晶体用個人線量計については、その応答は現行実用量と変わらない。なお、校正は低エネルギー領域でなされているため全体的に過小応答となっているが、許容範囲内であるほか、校正点を（例えば S-Cs に）変更することで、より適切なモニタリングが可能であると考えられる。

なお、カーマ近似ありなしについては、水晶体用線量計で最大 2.5%変わる程度であり、この範囲内ではほとんど影響がない。

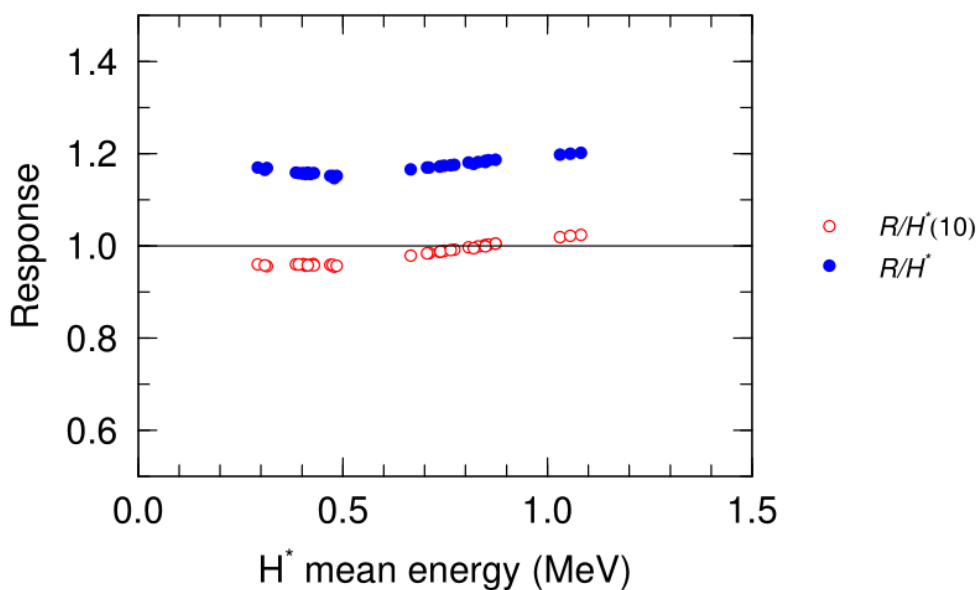


図 4-145 H社製電離箱式サーベイメータの放射線作業場での応答評価

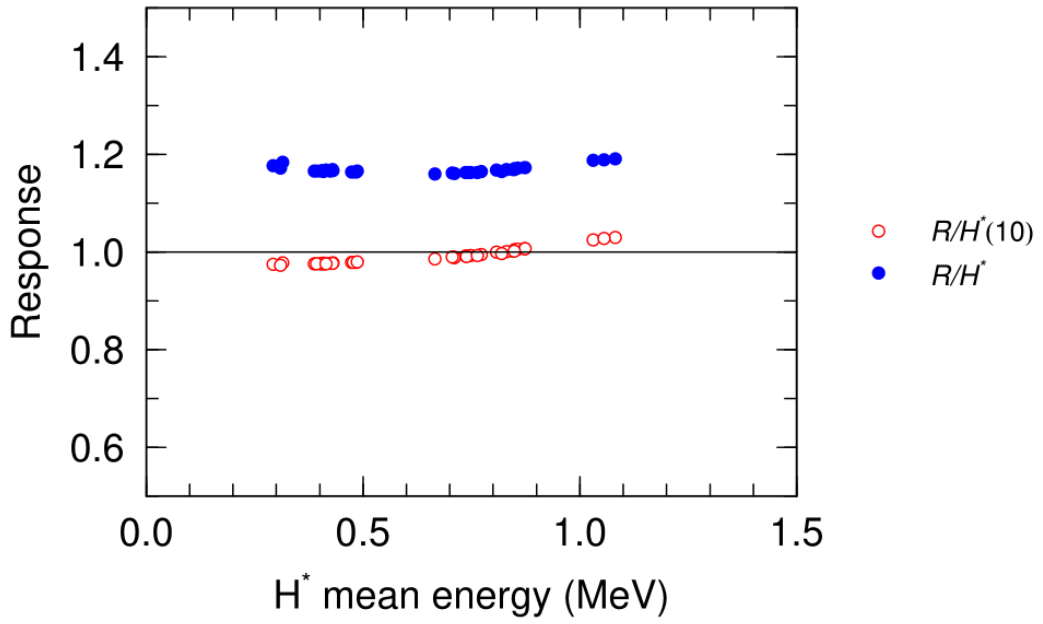


図 4-146 J社製電離箱式サーベイメータの放射線作業場での応答評価

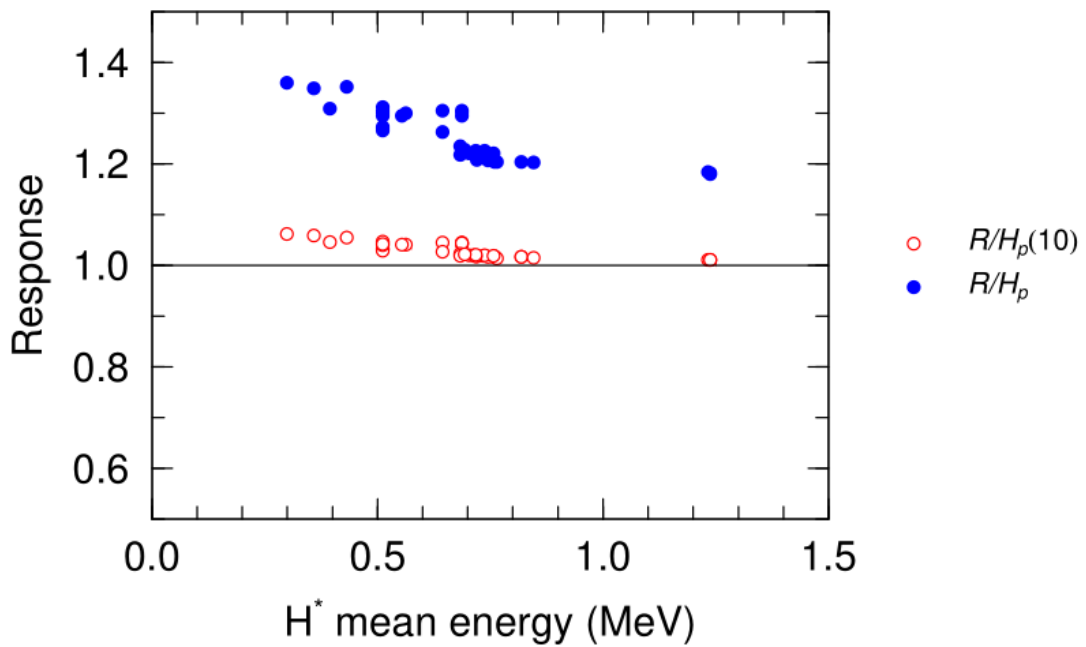


図 4-147 D社製受動形個人線量計（体幹部用）の放射線作業場での応答評価

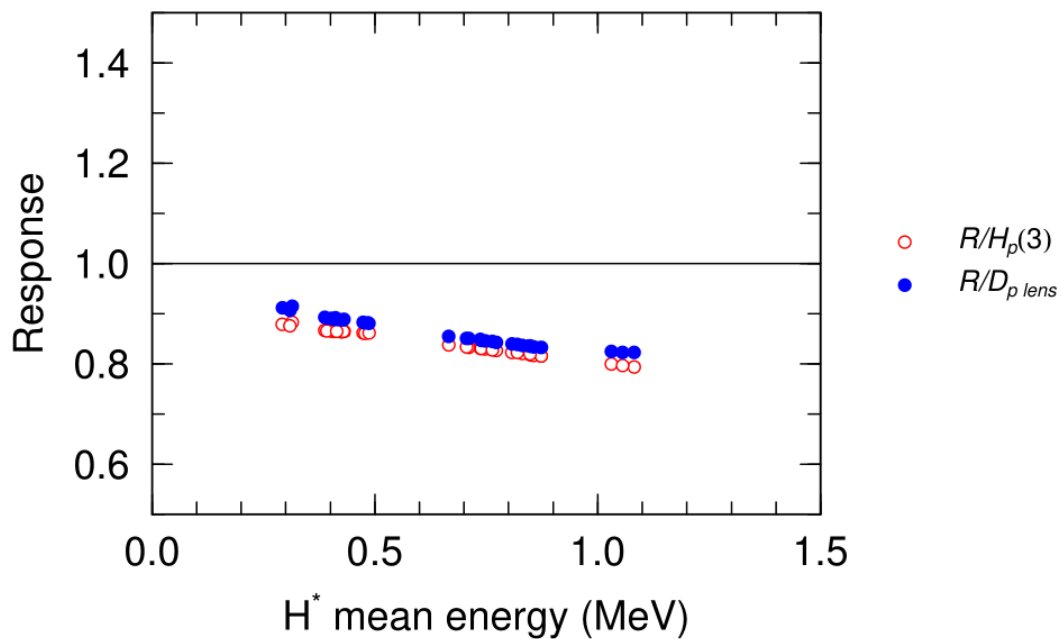


図 4-148 E社製受動形個人線量計（水晶体用）の放射線作業場での応答評価

(3) まとめ

原子力施設及び放射線使用施設における 7 つの放射線作業場を選定し、11 個の光子エネルギー分布を取得した。得られたエネルギー分布から、現行実用量及び新たな実用量に基づいた線量を評価した。平均エネルギーは 0.65 MeV から 4 MeV まで広範囲に分布していたが、新・現行実用量の比はほぼ一定であった。令和 3 年度事業で得られた放射線場における線量も含めて現行実用量との比較を行ったが、作業場の平均エネルギーによらず、その差異は校正点である S-Cs などの校正場での差異と同程度であった。ただし、皮膚や水晶体の線量管理に用いる実用量については、場の電子平衡の状況に依存することに注意が必要である。

さらに、エネルギー特性と放射線場のスペクトルを組み合わせ、放射線作業場における応答を評価する手法を開発し、放射線管理で用いられる市販のサーベイメータ及び個人線量計の計 4 機種について、実際の放射線作業場での光子エネルギー分布から実用量を評価した。 H_p や H^* については、現状のままでは過大応答をしてしまうが、何れも新たな実用量に対して適切に校正が行われれば、これらの線量計を用いて妥当な線量測定結果が得られるものと期待される。

本調査では、高エネルギー光子場を含めて、原子力施設や放射線使用施設での線量計のエネルギー応答に着目した。加速器施設や医療施設など、今回調査したエネルギー範囲外の場も多く存在する。今後は、例えば低エネルギー光子を対象としたエネルギー

特性試験や放射線作業場のスペクトルを取得する方法などを開発し、本手法を用いて調査範囲を広げることが望まれる。

4.5 研究に必要な国内外の情報収集

4.5.1 ISO

国際標準化機構（ISO）は、日本を含む世界各国の標準化団体から構成される非政府国際組織であり、策定された国際規格（ISO 規格）は、製品やサービスなどの国際的な取引において利用されている。線量計の校正・試験方法や性能要件を規定する規格についても多く刊行されており、それが日本産業規格（JIS）にも取り入れられている。放射線防護分野での線量計関連の規格の多くでは、実用量を取り扱っているため、その動向を注視しておく必要がある。放射線防護分野の規格の審議は、専門委員会 TC85（核エネルギー・原子力技術の平和利用分野）の分科委員会 SC2 が担当している。本事業では SC2 のうち、2つのワーキンググループ（WG2：基準放射線場、及び WG19：外部被ばくの個人モニタリング）を中心に調査した。

WG2に関連して、 β 線標準場に関する3つの規格（ISO 6980-1^[14]、ISO 6980-2^[46]及び ISO 6980-3^[47]）が2022年に発刊されたが、何れも新たな実用量に関しては触れられておらず、現行実用量に関する記載のみである。中性子標準場に関しては、線量換算係数が規定されている規格（ISO/DIS 8529-3^[48]）の審議がなされたが、まだ新たな実用量が取り入れられるには至っていない。その他、光子標準場を含めて、現時点で新たな実用量の取り入れを検討している審議中の規格はない状況である。

WG19に関しては、2022年に新たに発刊された規格はなく、審議中の規格についても、新たな実用量については取り込むまでには至っていない。2021年のSC2の会合においても、WG19が所管する規格への影響を把握するためにICRU Report95の検討状況についての質問があったが、WG19としては、現時点ではこれらについて注視しているものの、何らかの具体的な作業をしている段階ではない、との回答をしている状況である。なお、2021年に示されたISO/TC85/SC2の向こう3年間のロードマップにおいて、とりわけ対応の必要性を検討するとされた新たに生じた9つの課題のうちの1つとしてICRP/ICRUによる線量の定義変更が挙げられている。

4.5.2 EURADOS

欧州線量評価グループ（EURADOS）は、欧州の80以上の機関が参加する独立した線量評価ネットワークであり、約600名にも及ぶ専門家がその活動に寄与している。EURADOSでは、新たな実用量の影響評価についての検討を開始しており、2022年7月に報告書^[26]（以下単に「報告書」という。）を発刊し、2023年1月にはこれに関する

ウェビナーを開催した。本事業では、これらにより欧州における新たな実用量にかかる検討状況を調査した。以下に要点を記載する。

- ・ 報告書は、以下の章立てにより構成されている。
 1. 目的
 2. 新・現行実用量の主な違い
 3. 線量計の設計への影響
 4. 放射線防護への影響
 5. 校正場や規格への影響
 6. 規制への影響
 7. 結論
- ・ 光子については、ICRU Report 95⁵⁾において、電子平衡を仮定しない線量換算係数（non-CPE 線量換算係数）とカーマ近似の線量換算係数（CPE 線量換算係数）の両方が示されているが、これに関しては詳しく議論されている。

ICRU Report 95⁵⁾においても、校正目的には CPE 線量換算係数の方が使われるかもしれない、とされているが、報告書でも線量計の校正や試験は電子平衡下で実施されるため、（とりわけ末端部線量計については強く）CPE 線量換算係数を使うことを推奨している。一方で、ICRU Report 95⁵⁾で（第一義的に）記載された non-CPE 線量換算係数が、どのような場合に使われるかについて詳しい説明がなく、線量計測のコミュニティに混乱をもたらすことが懸念されるとしている。
- ・ 報告書では、いくつかの線量計についての新・現行実用量に対する特性が示されている。特に光子については、まずは第一義的に示されている non-CPE 線量換算係数を使用しているために、特に高いエネルギーで大きくレスポンスが変化している。特性の改善として、CPE 線量換算係数の使用のほか、一般的に①新たな実用量での再校正、②線量評価アルゴリズムの変更、③フィルターの変更、④設計変更（線量計の更新）を挙げており、この順にコストがかかるとしている。他には、使用領域の制限も対策の1つとして挙げられている。
- ・ 新たな実用量を導入すると防護量はより正確に推定できることになるであろうが、線量測定値そのものが変わってしまう。これは特に低エネルギーX線や中性子、高エネルギー粒子が関係する被ばく状況で重要で、放射線防護の取組みにも影響を与える可能性がある。低エネルギー光子は、医療分野でよく扱われているため、その従事者の数も多い。このような場では、新たな実用量の導入によって、その線量測定値は最大6分の1、よくあるケースでも半分程度にはなり得る。このことは、放射線防護に関する意識の低下をもたらす懸念があるとしている。
- ・ 線量計測量そのものが変わってしまうことは、放射線に携わる多くの人に混乱を招く可能性があり、放射線防護システム（や線量計及びその結果）に対する不信感を増大

させてしまうかもしれず、これを避けるための手段は正しい理解（教育）だとしている。

- ・関連する ISO 規格、IEC 規格、IAEA 文書の改訂が必要になるだろうとしている。
- ・まずは、対応に必要なコストを見積もる必要がある。

4.5.3 国内外の学術団体

(1) アジア・オセアニア放射線防護協議会（AOARP）

AOARP は国際放射線防護学会（IRPA）の地域協議会であり、主として 4 年に一度、地域会議であるアジア・オセアニア放射線防護会議（AOCRP）を開催している。通算 6 度目の会合である AOCRP-6 がインド・ムンバイで令和 5 年 2 月 7 日～11 日の期間、開催されたことに伴い、会議への参加を通じてアジア・オセアニア地域での新たな実用量関係の研究動向について調査した。会議開催時点では、これらの地域において新たな実用量導入に向けた調査研究等の報告はなく、開催国のインドで原子力研究を担っており二次標準機関でもあるバーバー原子力研究所（BARC）の研究者からも、まだ組織的な調査検討は行っておらず、国際的な動向を注視している段階であるとのことであった。原子力機構からは、本事業で得られた新たな実用量に関する成果を発表（参考資料 1 参照）したが、発表に関する反響は多く、関心の高さは窺えた。何れも現行実用量の範囲内ではあるが、新規線量計の開発などの外部線量計測や実際の放射線管理の場に関する研究報告は多く、今後ともこれらの地域における研究活動については、実用量の定義変更の観点からも引き続き注視すべきである。

(2) 日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会

日本保健物理学会は、IRPA の加盟学会の 1 つであり、日本国内における放射線防護に関する基礎的な研究課題から実務管理分野における技術課題までを包括的に取り扱う学術団体であり、年に 1 回、研究発表会を開催している。日本放射線安全管理学会は、さまざまな放射線管理の現場で遭遇する実務に直結した学術的課題を分野横断的に取り扱う学術団体であり、こちらも年に 1 回、研究発表会を開催している。令和 4 年度は、両学会が合同で九州大学伊都キャンパスにおいて令和 4 年 11 月 24 日～26 日の期間で第 4 回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同大会が開催された。本事業では、この会議への参加を通じて国内の動向を調査した。

新たな実用量を対象とした研究報告については、原子力機構から本事業で得られた成果の発表（参考資料 2 参照）以外にはなく、調査した範囲内では、現段階では具体的な研究事例はなかった。しかし、実用量を利用した測定の対象となる放射線管理の場についての研究報告は多く見受けられ、特に低エネルギー光子による被ばくが主となる医療現場や中性子による被ばくが考えられる場については、実用量の

定義変更の観点からも、エネルギー分布や被ばくジオメトリなどの情報は重要である。また、線量計に求める性能を試験する観点からも、本研究発表会でも報告があった^[49]ような低エネルギー光子を対象として蛍光 X 線場のような場を活用することは有用であろう。

4.5.4 現行実用量導入の経緯（原子力機構での対応例）と課題の抽出

新たな実用量への対応に係る線量計測上の課題を抽出するにあたっては、これまでの実用量の歴史的発展や現行実用量導入に至る経緯を整理しておくことは重要である。そこで、本事業では、現行実用量導入時（平成元年 4 月）の原子力機構での対応例を中心に調査し、新たな実用量導入における線量計測上の課題を抽出することとした。

実用量の歴史的変遷は、例えば文献[50]などに詳しいが、実用量は、線量限度が直接測定できない人体内部の線量として定められたことに伴って、サーベイメータや個人線量計での測定から限度を超えていないことを確認するための量として、それまでの考え方をうまく取り込みながら光子や中性子などについても一律に適用できる量として ICRU により徐々に発展させられてきたものであることが分かる。さらに、これらの概念を実装するのに必要な線量換算係数などの数値データも追隨して公開されていった。現行実用量の導入に際しては、限度が定められた線量は決定臓器の線量から実効線量当量に、測定のための線量、すなわち実用量は（たとえば光子であれば）照射線量から 1 cm 線量当量等へ変わった一方で、その実用量の測定をもって線量限度を超えてないことを確認するという防護の基本的考え方がそのまま継続され、また換算係数などの数値の変化もそう大きなものではなかったため、線量計測上の実際の対応はそれほどでもなかったようである。例えば、旧動燃では、平成元年の法令改正以前、すなわち個人線量計として照射線量測定器が使用されていた時代から TLD を使用していたが、その設計自体は組織等価物質でできた検出素子を 1 cm 相当厚の樹脂で覆っており、照射線量測定器としてのみならず 1 cm 線量当量測定器としても十分な性能を有していた。そのため、新たに実用量が導入されたときも、線量換算係数の変更に対応するために TLD 測定値から線量を計算するためのアルゴリズムを調節する程度の対応で済んだ。旧原研を含め当時国内で広く利用されていたフィルムバッジの対応もほぼ同様であった。一方、光子用のサーベイメータについては、照射線量から ICRU 球ファントムの存在を前提とした $H^*(10)$ 等の量への変更に伴って、特に低エネルギー光子についてファントム散乱に起因するようなレスポンスの調整が必要となり、順次 1 cm 線量当量対応測定器への移行がなされていったが、再処理施設や原子炉施設のような高エネルギー光子場では、照射線量率を測定するサーベイメータの指示値 1 R/h を 10 mSv/h (^{137}Cs γ 線の場合は厳密には 10.3 mSv/h) に読み替える対応で当面の間支障はなかった。中性子用のサー

バイメータについては、再設計は特に必要ではなく、平成元年以前のものが継続して使用された。

このように平成元年の実用量導入に際して、線量計測上のインパクトを比較的小さく抑えることができたのは、上述したように、その導入前後で線量概念などに極端に大きな変更がなく、むしろ多くの部分が継続されたからだったとも言える。したがって、新たな実用量導入における課題を考える上では、ICRU Report 95^[5]の実用量では継続されない部分に焦点を当てればよい。そうした継続されないものの一つとして、ICRU Report 95^[5]で導入された実用量 H_p は防護量である実効線量に基づいたもので、実効線量と数値が（特定のエネルギーと入射角度を除き）等しいという点が挙げられる。従来の実用量では、防護量である実効線量（当量）と定義においても数値においても相違があることは大前提であり、むしろその数値の相違を上手く活用してモニタリングの諸ルールが作られていた。例えば、実用量 $H_p(10)$ と実効線量 E の数値的な大小関係 ($H_p(10) > E$) は、前方 (AP) 照射条件において $H_p(10)$ で校正した個人線量計であれば、AP 以外の ROT や ISO といった照射条件で使用されても E の過小評価をもたらすことにはならないので、個人線量計を AP 照射条件で校正することに科学的根拠を与えたとともに個人線量計の運用ルールの単純化に役立った。また、現行実用量がその定義からいわば体表面近くの線量を測るようなものであり最大の線量に近い推定値を与えるという事実も、被ばく事故の初期対応段階に被ばく線量の「上限」を知りたいというニーズに合致するもので、通常個人線量計を事故時の線量評価にそのまま適用することを可能にした⁴。ICRU Report 95^[5]の実用量 H_p が現行 $H_p(10)$ などに替わって導入されると、むしろ好都合と解釈されてきた現行実用量の上記利点の多くが失われてしまうため、それらを補うための措置—例えば、AP 照射以外での校正の実施や被ばく事故時に評価すべき線量の検討—を講じる必要が生じると考えられる。ICRU Report 95^[5]の実用量の導入検討にあっては、これまでの実用量の考え方との違いとそれによる影響を今一度整理しておく必要がある。

⁴ 一例をあげると、米国の個人線量計認定制度 NVLAP (National Voluntary Laboratory Accreditation Program) の試験項目には「事故カテゴリー (光子)」があり、吸収線量 $D(10)$ で 0.05~5 Gy の照射が行われる。ここで、 $D(10)$ は、「ICRU 軟組織中の深さ 10mm で定義された吸収線量」であり、実用量 $H_p(10)$ の単位 Sv を Gy に読み替えたものに等しい。

4.6 まとめ

本事業の4つの調査研究により得られた成果を以下にまとめた。

(1) 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査

(a) 校正・試験場の線量換算係数の評価

FRSの校正場に関連する次の線質について線量計の特性評価に必要となる全ての新たな実用量への線量換算係数を評価した。

ISO 4037-1 (JIS Z 4511)に準拠した

- ・ X線場：N-40 から N-300 までの線質
- ・ γ 線場：S-Cs 及び S-Co の線質
- ・ 高エネルギー γ 線場：R-F の線質

ISO 6980-1 (JIS Z 4514)に準拠した

- ・ シリーズ1の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 、 ^{85}Kr 及び ^{147}Pm β 線場

ISO 8529-1 (JIS Z 4521)に準拠した

- ・ 単色中性子場：8 keV、27 keV、144 keV、250 keV、565 keV、1.2 MeV、2.5 MeV、5.0 MeV、14.8 MeV、及び 19 MeV
- ・ 速中性子場： ^{241}Am -Be、 ^{252}Cf
- ・ 重水減速中性子場
- ・ 熱中性子場

及びその他実用に供される

- ・ 黒鉛減速中性子場

このうち、光子校正場においては、線量換算係数の角度依存性が現行とは異なること、 180° や ROT に対する線量換算係数も線質によっては 0° と比較してそれほど減少しないことが示唆された。 β 線校正場においては、眼の水晶体の線量管理に用いる実用量や ^{147}Pm 場では、その線量換算係数は現行実用量と比較して差異が見られたが、その他に関しては、現行実用量と比較してほぼ変わらない。中性子校正場については、数 MeV 付近に局在したエネルギー分布をもつ校正場で現行実用量と比較して数%から 20%線量換算係数が大きくなることが分かった。その他のエネルギーでは、現行よりも減少し、1 MeV 以下の中性子が支配的となる減速中性子校正場では現行よりも 20%程度小さく、144 keV や 250 keV の単色中性子校正場や熱中性子校正場では 60%程度減少する。角度依存性については、数 100 keV 以下の領域にエネルギー分布をもつ校正場では変化が大きく、入射角度が大きくなるほど新/現行実用量の比は増大する傾向がみられた。

(b) 方向特性試験の開発

新たな実用量を用いて、FRSで線量計の方向特性試験を実施可能なことを確認した。また、光子に関してROT照射やPA照射の試験に対する校正用水ファントム(PWファントム)の妥当性を検証し、ROT照射は問題ないものの、PA照射において、PWファントムは人体の吸収特性を表現しきれていないことを明らかにした。また、受動形個人線量計を用いて、これらの照射ジオメトリでの試験を行い、ROT照射はAP照射と同等の応答が得られたものの、PA照射においては、特に低エネルギーで著しく過小応答することが示唆された。ただし、PA照射が支配的となるのは特殊な被ばく状況と考えられることから、線量計の使用用途を考慮してこれらの性能要求が必要か検討する必要がある。

(c) トレーサビリティ確保に関する調査

線量計ユーザーへの校正・試験サービスの提供に必要なトレーサビリティ体系が構築できることを検証するため、S-CsとN-100について、国家標準機関と線量計2機種に対する特性試験結果の相互比較を行い、不確かさの範囲内で一致することを確認した。

(2) 線量計の特性評価に関する調査

(a) (1)で構築した光子校正場を利用し、光子用サーベイメータ、受動形個人線量計(体幹部用)、及び受動形個人線量計(水晶体用)各1機種についてエネルギー・方向特性を取得した。

(b) (1)で構築したβ線校正場を利用し、β線用サーベイメータ、電子式個人線量計、受動形個人線量計(体幹部用)、及び受動形個人線量計(水晶体用)各1機種についてエネルギー・方向特性を取得した。

(c) (1)で構築した中性子校正場を利用し、中性子用サーベイメータ、電子式個人線量計、及び受動形個人線量計(体幹部用)各1機種についてエネルギー・方向特性を取得した。

(d) これらの線量計を新たな実用量に対応させるための課題を以下のとおりまとめた。

・ H_p または H^* を測定対象とする光子用サーベイメータ及び個人線量計については低エネルギーで過大応答する。これには以下の対応が考えられる。

- ① 新たな実用量での校正(校正定数の変更、校正エネルギー点の変更も含む)
- ② フィルターの変更(本事業で用いたようなサーベイメータや個人線量計に対してのみ有効)
- ③ 線量評価アルゴリズムの変更(本事業で用いたようなアルゴリズムを使用する)

個人線量計に対してのみ有効)

④ 設計の変更

ただし、ユーザーで対応可能なものは一部の機種に対する上記①及び②のみである。また、線量計の過大応答の許容範囲についても議論が必要であろう。

- D_{plens} または D'_{lens} を測定対象とする β 線用サーベイメータ及び個人線量計については、 0° では 2 倍以上の過大応答し、その方向特性も悪化するため、改善が必要である。フィルターの変更などで改善できる可能性があるが、1つの検出器で光子及び β 線を同時に測定する線量計に対しては、光子の特性も同時に考慮する必要がある。
- 中性子用サーベイメータについては、MeV 領域の中性子が支配的な場の測定では実用量変更による影響は軽微であるが、低エネルギー領域では現行で過小応答していたものが過大に転じる。これには以下の対応が考えられる。
 - ① 熱中性子場で別途校正を行い、測定する中性子場のエネルギー分布に応じた校正定数の使用
 - ② 作業環境模擬中性子場での校正（使用場所が限定される場合）
 - ③ 低エネルギー中性子の感度を下げる設計変更
- 中性子用個人線量計についても、新たな実用量に対しても MeV 領域では良好な応答を示していたが、低エネルギー領域での過大応答、入射角度の増大に伴う過小応答の傾向がみられる。ラジエータやコンバータ、線量評価アルゴリズムの調整で対応できる可能性があるが、より詳細な検討が必要である。

(3) 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査

- (a) 原子力施設及び放射線使用施設において、放射線管理において法令に基づく測定を実施している箇所や線源核種、散乱線等によりエネルギー分布に異なる特徴を有するものとして、7放射線作業場を選定した。
- (b) (a)で選定した7放射線作業場の計11カ所について、場の光子エネルギー分布をスペクトロメータによる測定などにより取得した。
- (c) (b)で得た光子エネルギー分布から、新たな実用量及び現行の実用量に基づいた線量を算出し比較した。平均エネルギーは、0.65 MeV から 4 MeV までにわたっていたが、新・現行実用量の比はほぼ変わらず、S-Cs 校正場における比と同程度であった。
- (d) 市販のサーベイメータ 2 機種及び個人線量計 2 機種について、特性試験の実施等により、エネルギー特性を得た。

(e) (b)と(c)の結果を組み合わせることによって、これらの線量計の放射線作業場における応答を評価する手法を開発した。この手法を用いて、原子力発電所の放射線作業場における(d)の線量計の応答を評価した。水晶体用線量計については、現行実用量とその応答は変わらないが、 H^* や H_p を測定する線量計については、過大な応答となる。しかし、調査した原子力施設の範囲内においては、応答の変化は放射線作業場のエネルギーにより大きく変化しない(H_p を測定する体幹部用個人線量計においても15%程度)ため、新たな実用量で校正すれば適切なモニタリングが可能と考えられる。ただし、 H^* や H_p については、線量測定値が校正により15%~20%小さくなる。

(4) 研究に必要な国内外の情報収集

新たな実用量への対応に係る国際機関等として、ISO 専門委員会(ISO/TC85/SC2)の動向について調査した。令和5年2月28日時点ではISO規格への取り入れられた、または取り入れる予定のものはなかった。

その他国内外の情報収集として、欧州はEURADOSの状況、アジア・オセアニア地域はAOCRP-6での状況、国内は日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会の状況について調査した。EURADOSでは、新たな実用量に関して線量計測上の課題や放射線防護への影響についての検討がなされており、令和4年7月には新たな実用量に関する報告書が発刊された。一方、アジア・オセアニア地域や国内においては、まだ組織的な調査がなされていない状況であった。AOCRP-6や日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同大会での研究発表においては、外部の専門家とこれらの研究成果の妥当性を確認するとともに、定義変更に伴う各分野への実務上の影響について議論するなど、本件に関する関心の高さも窺えた。

さらに、現行実用量導入時の原子力機構での対応を中心に調査した。現行実用量導入時に線量計測上のインパクトを比較的小さく抑えることができたのは、導入前後で線量概念などに極端に大きな変更がなく、多くの部分が継続されたことが要因として挙げられる。従って、新たな実用量導入に際する課題を検討する上では、継続されない部分に焦点を当て、現行実用量との考え方の違いを整理しておく必要がある。

本事業では、実用量の定義変更に伴う線量計測上の課題に対する技術的な知見が得られた。今後は、本事業の手法を用いて調査の対象範囲(調査する放射線作業場や線量計の種類、エネルギー範囲)を拡大して技術的知見を継続して蓄積し、ISOやIECといった線量計規格の動向と併せて規制導入への検討材料とすることが望まれる。また、放射線は原子力分野のみならず医療、工業など幅広い分野で利用されているため、実用量を用いた線量計測に携わる者は専門家ばかりではない。線量計測上よりよい仕組みを導入したとしても、数多くのこれらの関係者の新たな実用量に対する理解なしには、混乱を生むのみであろう。従って、導入検討の段階から新たな実用量に対する理解を深め、本

事業などで得られた課題を関係者で共有していくことが重要であるとする。

5 謝辞

本事業の実施にあたり、産業技術総合研究所 計量標準総合センター 分析計測標準研究部門 放射線標準研究グループの黒澤 忠弘博士、加藤 昌弘博士、石井 隼也氏、同部門 放射能中性子標準研究グループ 松本 哲郎博士ほか関係の皆様方に御礼申し上げます。

本事業を遂行するにあたり、水晶体事業で得られたスペクトルの使用を許可いただきました藤田医科大学の横山 須美准教授にも御礼申し上げます。

また、本事業の円滑な遂行にご尽力いただきました原子力機構 安全研究・防災支援部門 安全研究センター 原子炉安全研究ディビジョン リスク評価・防災研究グループの高原 省五グループリーダーをはじめとして、事業の遂行における助言や放射線作業場における測定において協力いただきました原子力機構 原子力科学研究部門 原子力科学研究所の吉澤 道夫副所長、同放射線管理部の半谷 英樹部長、山外 功太郎氏、鈴木 武彦氏、大貫 孝哉氏、高宮 圭氏、石井 雅人氏、大石 皓平氏、篠塚 友輝氏、同研究炉加速器技術部の荒木 正明氏に御礼申し上げます。

6 参考文献

- [1] International Commission on Radiological Protection (ICRP). *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37(2-4) (2007)
- [2] International Commission on Radiation Units and Measurement (ICRU). *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources*. ICRU Report 39 (1985)
- [3] International Commission on Radiation Units and Measurement (ICRU). *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry*. ICRU Report 51 (1993)
- [4] International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Conversion Coefficients for Radiation Protection Quantities for External Radiation Exposures*. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5) (2010)
- [5] International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). *Operational Quantities for External Radiation Exposure*. ICRU Report 95. J. ICRU 20(1) (2020)
- [6] 原子力規制庁 令和元年度放射線対策費（放射線管理に係る実用量の測定等の実態調査）事業成果報告書(2020)
- [7] 原子力規制庁 令和3年度放射線対策費（新たな実用量への対応に係る線量計の校正及び放射線作業場におけるエネルギー応答に関する調査研究）事業成果報告書(2022)
- [8] H. Yoshitomi. 原子力機構 FRS 標準場の現状と JIS 登録試験所について, FBnews, 投稿中
- [9] H. Yoshitomi. 放射線測定器の JIS 登録試験所開設, Isotope News, 投稿中
- [10] H. Yoshitomi, T. Tsuji, T. Fukami, S. Nishino, J. Takamine, T. Murayama and Y. Tanimura. *The facility of radiation standards in Japan Atomic Energy Agency -Recent activities with a focus on establishment of accredited testing laboratory*. Rad. Prot. Env. 46(5) S174-S175 (2023)
- [11] International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation*. ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26(3-4) (1996)
- [12] International Organization for Standardization (ISO). *Radiological protection – Radiological protection – X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 1: Radiation characteristics and production methods*. ISO 4037-1 (2019)
- [13] 日本産業規格. *X線及び γ 線用線量（率）測定器の校正方法*. JIS Z 4511 (2018)
- [14] International Organization for Standardization (ISO). *Nuclear energy – Reference beta-particle radiation – Part 1: Methods of production*. ISO 6980-1 (2022)
- [15] 日本産業規格. *β 線組織吸収線量測定器及び線量当量測定器の校正方法*. JIS Z 4514:2010
- [16] International Organization for Standardization (ISO). *Reference neutron radiations – Part 1:*

- Characteristics and methods of production.* ISO 8529-1 (2001)
- [17] 日本産業規格. 中性子線量当量 (率) 計の校正方法. JIS Z 4521:2006
- [18] International Organization for Standardization (ISO). *Radiological protection – X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence.* ISO 4037-3 (2019)
- [19] R. Behrens and T. Otto. *Conversion coefficients from total air kerma to the newly proposed ICRU/ICRP operational quantities for radiation protection for photon reference radiation qualities.* J. Radiol. Prot. 42(1), 011519 (2021)
- [20] International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations.* ICRP Publication 107, Ann. ICRP 38(3) (2008)
- [21] U. Ankerhold. *Catalogue of X-ray spectra and their characteristic data – ISO and DIN radiation qualities, therapy and diagnostic radiation qualities, unfiltered X-ray spectra.* PTB-Dos-34, Braunschweig, Germany (2000)
- [22] S. Shimizu, T. Sawahata, Y. Kajimoto, Y. Shikaze, Y. Yoshihara and Y. Tatebe. 国際規格に準拠した X 線標準場の整備. JAEA-Tech 2011-008 (2011)
- [23] M. Kowatari, and Y. Tanimura. *Establishment of 6- to 7- MeV high-energy gamma-ray calibration fields produced using the 4-MV Van de Graff accelerator at the facility of radiation standards, Japan Atomic Energy Agency.* Radiat. Prot. Dosim. 168(3) 300-313 (2016)
- [24] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, P. Tsai, N. Matsuda, H. Iwase, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita. *Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02,* J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6), 684-690 (2018)
- [25] R. Behrens. *Conversion coefficients from absorbed dose to tissue to the newly proposed ICRU/ICRP operational quantities for radiation protection for beta radiation qualities.* J. Radiol. Prot. 41(4), 871 (2021)
- [26] P. Gilvin et. al. *Evaluation of the impact of the new ICRU operational quantities and recommendations for their practical application.* EURADOS Report 2022-02 (2022)
- [27] J. R. Dumais, M. Yoshizawa and Y. Yamaguchi. ²⁵²Cf 及び ²⁴¹Am-Be 中性子源を用いた速中性子校正場の散乱線評価. JAERI-Tech 98-005 (1998)
- [28] M. Kowatari, S. Nishino, K. M. Romallosa, H. Yoshitomi, Y. Tanimura, T. Ohishi. *Experimental Determination of Anisotropic Emission of Neutrons From ²⁵²Cf Neutron Source with the Spherical Protection Case.,* Radiat. Prot. Dosim. 189(4), 436-443 (2020)
- [29] M. Kowatari, et.al. *Evaluation of the characteristics of the neutron reference field using D₂O-moderated ²⁵²Cf source.,* Radiat. Prot. Dosim. 126(1-4), 138-144 (2007)
- [30] S. Nishino, et.al. *Development of the graphite-moderated neutron calibration fields using ²⁴¹Am-*

- Be sources in JAEA-FRS.*, J. Radiat. Prot. Res. 41(3), 211-215 (2016)
- [31] Y. Uchita, J. Saegusa, Y. Kajimoto, Y. Tanimura, S. Shimizu and M. Yoshizawa. 黒鉛パイルを用いた熱中性子校正場の特性評価. JAERI-Tech 2005-012 (2005)
- [32] 日本産業規格. 個人線量計校正用ファントム. JIS Z 4331 (2005)
- [33] International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Adult Reference Computational Phantoms*. ICRP Publication 110, Ann. ICRP 39(2) (2009)
- [34] F. Takahashi and Y. Yamaguchi. 光子入射におけるファントム材質の後方散乱線への影響. Radioisotopes. 52(2), 94-97 (2003)
- [35] S. Mikami. *Performance test in terms of energy and angular dependence with ISO photon radiation on an ambient and directional dose equivalent rate meter*. Radioisotopes. 54, 545-553 (2005)
- [36] A. Suzuki, T. Suzuki, M. Takahashi, T. Nakata, T. Murayama and M. Tsunoda. 外部被ばく個人線量測定用 OSL 線量計の諸特性. JAEA-Tech 2014-049 (2015)
- [37] 日本産業規格. 胸・腹部用 X 線水ファントム. JIS Z 4915 (1974)
- [38] 日本産業規格. X・ γ 線及び β 線用受動形個人線量計測装置並びに環境線量計測装置 JIS Z 4345 (2017)
- [39] International Electrotechnical Commission (IEC). *Radiation Protection instrumentation – Passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation*. IEC 62387-1 (2012)
- [40] J. Saegusa, Y. Tanimura and M. Yoshizawa. *Relation between Neutron Dosimeter Readings and Calibration Fields for Various Workplace spectra*, Proceedings of IRPA-11 (2004)
- [41] 放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則 (昭和三十五年総理府令第五十六号) (令和 3 年 4 月 1 日施行)
- [42] M. Reginatto, P. Goldhagen and S. Neumann. *Spectrum unfolding, sensitivity analysis and propagation of uncertainties with the maximum entropy deconvolution code MAXED*, Nucl. Instr. Meth. A. 476, 242-246 (2002)
- [43] 原子力規制庁 平成 30 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業 (原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか? ~水晶体被ばくの実態から探る~) 成果報告書(2019)
- [45] N. Kamwang, M. Kowatari and H. Yoshitomi. *Investigation on the energy dependence of various types of survey meter in gamma and X-ray field*. AOCRP-4 Proceedings 2-3 (2015)
- [46] International Organization for Standardization (ISO). *Nuclear energy – Reference beta-particle radiation – Part 2: Calibration fundamentals related to basic quantities characterizing the radiation field*. ISO 6980-2 (2022)
- [47] International Organization for Standardization (ISO). *Nuclear energy – Reference beta-particle radiation – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the determination of their*

- response as a function of beta radiation energy and angle of incidence. ISO 6980-3 (2022)*
- [48] ISO/DIS 8529-3 *Reference neutron radiations – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and determination of their response as a function of neutron energy and angle of incidence.*
- [49] T. Tsuji, H. Yoshitomi and Y. Tanimura. 蛍光 X 線による低エネルギー単色 X 線校正場の整備. 第 4 回日本保健物理学会日本放射線安全管理学会合同大会講演要旨集 1A3-4 (2022)
- [50] M. Yoshizawa. 連載講座「放射線防護に用いる線量概念について」第 4 回 被ばく線量モニタリングのための実用量について, 保健物理, 44(1), 36-45 (2009)