

令和6年度放射線対策委託費
(新たな実用量への対応に向けた研究) 事業
成果報告書

国立研究開発法人産業技術総合研究所

令和7年3月31日

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 | はじめに | 5 |
| 1.1 | 事業の背景 | 5 |
| 1.2 | 現行の実用量及び ICRU Report 95 に示された実用量 | 6 |
| 2 | 事業の実施体制 | 8 |
| 2.1 | 実施体制 | 8 |
| 2.2 | 実施期間 | 11 |
| 2.3 | 施設・設備 | 12 |
| 2.3.1 | 産業技術総合研究所の放射線照射施設 | 12 |
| 2.3.2 | JAEA の放射線照射施設 | 19 |
| 3 | 事業の概要 | 20 |
| 3.1 | 事業項目 | 20 |
| 3.2 | 事業内容 | 20 |
| 4 | 事業の成果 | 24 |
| 4.1 | はじめに | 24 |
| 4.2 | 本事業で整備した装置 | 24 |
| 4.2.1 | 電流測定用抵抗器 | 24 |
| 4.2.2 | 中性子用プリアンプ等 | 24 |
| 4.2.3 | スペクトロメータ | 26 |
| 4.3 | 新たな実用量に対応した線量計の校正場に関する課題の調査 | 30 |
| 4.3.1 | 校正・試験場の線量換算係数の評価 | 30 |
| 4.4 | 線量計の特性に関する課題の調査 | 31 |
| 4.4.1 | 国家標準機関における線量計のエネルギー応答と方向特性の評価 | 31 |
| 4.4.1.1 | γ 線場における線量計の特性評価 | 31 |
| 4.4.1.2 | X 線場における線量計の特性評価 | 38 |
| 4.4.1.3 | β 線場における線量計の特性評価 | 42 |
| 4.4.1.4 | 中性子場における線量計の特性調査 | 53 |
| 4.4.2 | 二次標準機関（日本原子力研究開発機構）における線量計のエネルギー応答と方向特性の評価 | 58 |
| 4.4.3 | 特性評価試験のトレーサビリティ確保に関する調査 | 60 |
| 4.5 | 線量計の校正定数の決定と個人線量管理上の課題に関する調査 | 76 |
| 4.5.1 | 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 | 76 |
| 4.5.1.1 | 原子炉施設等の光子場に関する調査および解析 | 76 |
| 4.5.1.2 | 医療施設における光子場に関する調査および解析 | 76 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.5.2 | 校正定数の決定に関する課題の調査..... | 81 |
| 4.5.3 | 不均等照射に対する新たな実用量による個人線量管理に関する課題の調査..... | 87 |
| 4.6 | ワークショップの開催..... | 88 |
| 4.6.1 | 開催の概要..... | 88 |
| 4.6.2 | 講演の概要..... | 88 |
| 4.6.3 | 総合議論..... | 91 |
| 4.7 | 研究に必要な国内外の情報収集..... | 91 |
| 4.7.1 | 国際機関が開催した会合における情報収集..... | 91 |
| 4.7.2 | 国内外の学会等に関する情報収集..... | 97 |
| 4.7.3 | 関係論文..... | 99 |
| 5 | 令和4年度～令和6年度で実施した事業のまとめ..... | 103 |
| 5.1 | 新たな実用量に対応した線量計の校正場に関する課題の調査..... | 103 |
| 5.2 | 線量計の特性に関する課題の調査..... | 103 |
| 5.3 | 線量計の校正定数の決定と個人線量管理上の課題に関する調査..... | 107 |
| 5.3.1 | 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..... | 107 |
| 5.3.2 | 校正定数の決定に関する課題の調査..... | 108 |
| 5.3.3 | 不均等照射に対する新たな実用量による個人線量管理に関する課題の調査..... | 108 |
| 5.4 | ワークショップの開催..... | 109 |
| 5.5 | 研究に必要な国内外の情報収集..... | 109 |
| 6 | まとめ..... | 110 |
| | 謝辞..... | 110 |
| | 参考文献..... | 111 |

別添 「令和6年度新たな実用量への対応に向けた研究～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 はじめに

1.1 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（International Commission on Radiological Protection; ICRP）や国際原子力機関（International Atomic Energy Agency; 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、策定されている。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、人体を模擬したファントム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、外部被ばくに対する放射線防護のために放射線管理の現場で用いられ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とした「実用量」を指示するように設計及び校正される。

国際放射線単位測定委員会（International Commission on Radiation Units and Measurements; 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。この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。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。

これらを踏まえ、令和3年度より新たな実用量に関する放射線対策委託費事業が実施された。令和3年度では、日本原子力研究開発機構が受託元となり、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^[3]として実施され、新たな実用量に対する標準場の開発などが行われた。令和4年度からは産業技術総合研究所が受託元、日本原子力研究開発機構が再委託先として連携し、令和4年度放射線対策費（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）事業^[4]、令和5年度放射線対策費（新たな実用量への対応に向けた研究）事業^[5]として、国家標準機関及び二次標準機関の有するいくつかの校正場における新たな実用量に対応した線量換算係数が整備されるとともに、いくつかの代表的な線量計の特性評

価に関する調査、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調査、新たな実用量への対応に係る課題の調査、及び国内外の動向の調査が実施された。

本事業は令和4年度、令和5年度事業に引き続いて、放射線管理の現場で用いられている代表的な線量計について、放射線に係る国家標準機関及び二次標準機関における校正、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の蓄積を更に推し進め、また、線量計の校正や使用現場における課題を整理することを目的としている。

本報告書は、本事業の成果などを取りまとめた。別添として二次標準機関が実施した内容を詳細に記載し、「令和6年度新たな実用量への対応に向けた研究～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」とした。この別添文書を以後「JAEA 編」と称す。

1.2 現行の実用量及びICRU Report 95 に示された実用量

現在用いられている実用量は、ICRU Report39^[6]及び51^[7]に基づいている。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1.2-1に示す。またICRU Report95で示された新しい実用量を表1.2-2に示す^[1]。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 1.2-1 現在の各種実用量及び物理量から実用量への換算係数

| 目的 | 実用量 | |
|----------------|--|---|
| | 場のモニタリング (Area monitoring) (上段：実用量、下段：換算係数) | 個人モニタリング (Individual monitoring) (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 1.2-2 ICRU 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

| 目的 | 実用量 | |
|----------------|---|---|
| | 場のモニタリング (Area monitoring) (上段：実用量、下段：換算係数) | 個人モニタリング (Individual monitoring) (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^* | 個人線量, H_p 個人線量換算係数, $h_p(\alpha)$ |
| 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, $d'_{\text{lens}}(\alpha)$ | 個人水晶体吸収線量, $D_{p \text{ lens}}$ 個人水晶体吸収線量換算係数, $d_{p \text{ lens}}(\alpha)$ |
| 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, $D'_{\text{local skin}}$ 方向性局所皮膚吸収線量換算係数, $d'_{\text{local skin}}(\alpha)$ | 個人局所皮膚吸収線量, $D_{p \text{ local skin}}$ 個人局所皮膚吸収線量換算係数, $d_{p \text{ local skin}}(\alpha)$ |

2 事業の実施体制

2.1 実施体制

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実施した。事業の概要（計画）の詳細は3章に詳述する。また図2.1-1に本事業の実施体制図を示すとともに、JAEA編の図J2-1にJAEAを中心とした実施体制図を示す。図中の学術団体・関連機関等・協力者について表2.1-1に示す。

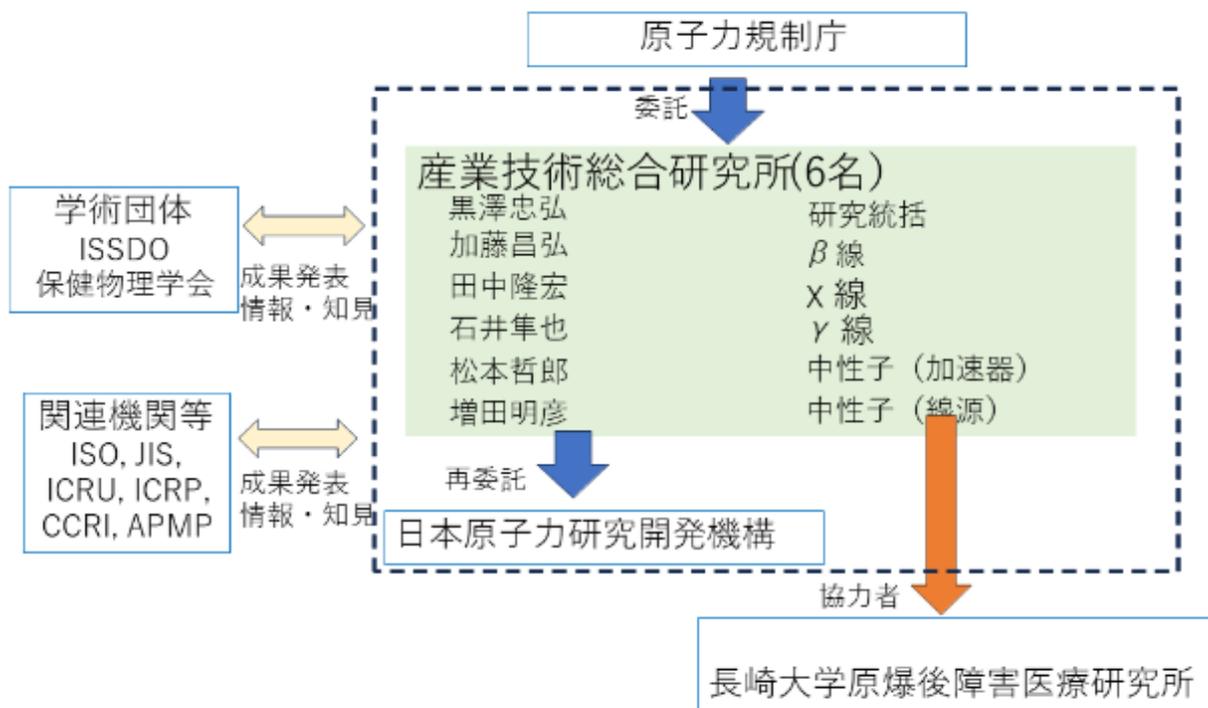


図 2.1-1 本事業の実施体制図

表 2.1-1 図 2.1-1 における学術団体・関連機関等・協力者

| 図中の表記 | 正式名称 | 概要 |
|--------|--|---|
| ISSDO | International Solid State Dosimetry Organization | 国際固体線量計測機構。2023 年にイタリアピサにおいて SSD20(20 th International Conference on Solid State Dosimetry)を開催。 |
| 保健物理学会 | (一社) 日本保健物理学会 | 国際放射線防護学会に加盟する学会。放射線防護・安全に関する学術および技術の開発を促進し、その成果を社会ならびに実務に反映することによって、広く人類の繁栄に寄与することを目的としている。 |
| ISO | International Organization for Standardization | 国際標準化機構。本事業で関係が深いのは、ISO/TC85/SC2(放射線防護分野)のWG2(基準放射場)とWG19(外部被ばくの個人モニタリング)である。 |
| JIS | Japanese Industrial Standards | 日本産業規格。ISO で規定された規格は JIS 規格として取り入れられている。 |
| ICRU | International Commission on Radiation Units and Measurements | 国際放射線単位測定委員会。放射線およびその物質との相互作用に関する物理量およびその単位の使用について概念開発、定義、勧告を、特に放射線によって引き起こされる生物学的効果の側面から行うことを目的としている。 |
| ICRP | International Commission on Radiological Protection | 国際放射線防護委員会。専門家の立場から放射線防護に関する勧告を行う民間の国際学術組織。2 年に 1 回 ICRP 国際シンポジウムを開催しており、2023 年に東京で開催。 |
| CCRI | Consultive Committee of Ionizing Radiation | 放射線諮問委員会。国際度量衡委員会の下部に属し、放射線に関する単位を扱っている諮問委員会。2 年に 1 回パリで会議を開催している。2023 年に開催し、次は 2025 年に開催予定。 |
| APMP | Asia Pacific Metrology Program | アジア環太平洋標準計画。アジア太平洋地域における標準研究所のネットワークとして組織されており、毎年会合が開かれている。APMP には、放射線に関して TCRI(Technical Committee of Ionizing Radiation)が設置されている。2024 年の TCRI はインドニューデリーにてオンラインとのハイブリッド形式で開催。 |

表 2.1-1 図 2.1-1 における学術団体・関連機関等・協力者（前ページからの続き）

| 図中の表記 | 正式名称 | 概要 |
|--------------------|---------|--|
| 長崎大学原爆後 障害医療研究所 | 図中表記に同じ | 国内外の大学・研究機関との連携の下、放射線健康リスク管理学を中心とした被ばく医療学を推進し、人類の安全・安心を担う専門家を輩出することをミッションとしている。本事業では横山須美教授に医療現場における光子スペクトルの測定に協力いただいた。 |

2.2 実施期間

本事業は令和6年8月20日～令和7年3月31日の期間で実施した。再委託事業については令和6年8月20日～令和7年2月28日の期間で実施した。

本事業を開始するにあたり、令和6年9月3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、事業の進捗状況については、月1回を目安にJAEAから報告を受けるとともに、原子力規制庁に報告した。さらに、令和7年2月4日には、報告書提出前の会合を実施し、事業のとりまとめ方針を関係者間で議論した。産総研が、原子力規制庁およびJAEAと実施状況を確認するために設けた会合の実施日および内容を、表2.2-1に示す。

表 2.2-1 事業の実施状況の確認・報告会合等の一覧

| 報告日 | 内容 |
|-----------|--|
| 令和6年9月3日 | キックオフ会合 |
| 令和6年9月30日 | 令和6年9月に係る進捗報告 (Web会議にて実施) |
| 令和6年11月6日 | 令和6年10月に係る進捗報告 (Web会議にて実施) |
| 令和6年12月6日 | 令和6年11月に係る進捗報告 (Web会議にて実施) |
| 令和7年1月14日 | 令和6年12月に係る進捗報告 (Web会議にて実施) |
| 令和7年2月4日 | 令和7年1月に係る進捗報告、成果の とりまとめについて (Web会議にて実施) |
| 令和7年3月3日 | 令和7年2月に係る進捗報告、成果の とりまとめについて (Web会議にて実施) |

2.3 施設・設備

本事業で研究対象とし、また校正・照射試験に使用した放射線照射施設の概要を示す。

2.3.1 産業技術総合研究所の放射線照射施設

(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」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」2室がある^[8,9,10]。

○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(図 2.3-1を参照)。

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



図 2.3-1 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(図 2.3-2を参照)。

- ・ ^{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 2.3-2 γ 線標準照射室

(2) X線照射施設

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。[11, 12, 13]

○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である(図 2.3-3 を参照)。

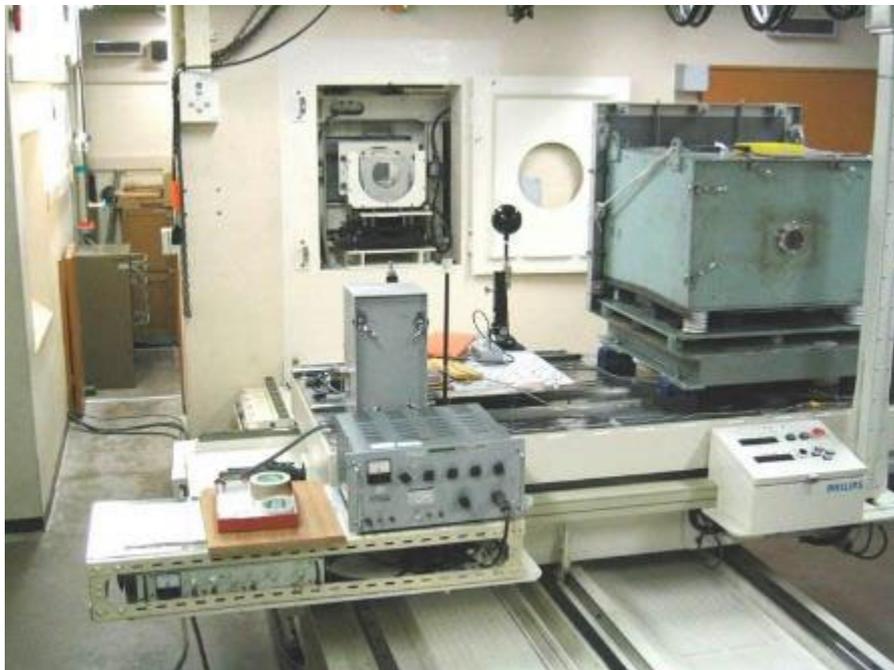


図 2.3-3 中硬 X 線照射室

○軟 X 線照射室

管電圧が 10 ～50 kV のタングステンターゲットの照射装置である。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 2.3-4 を参照)。

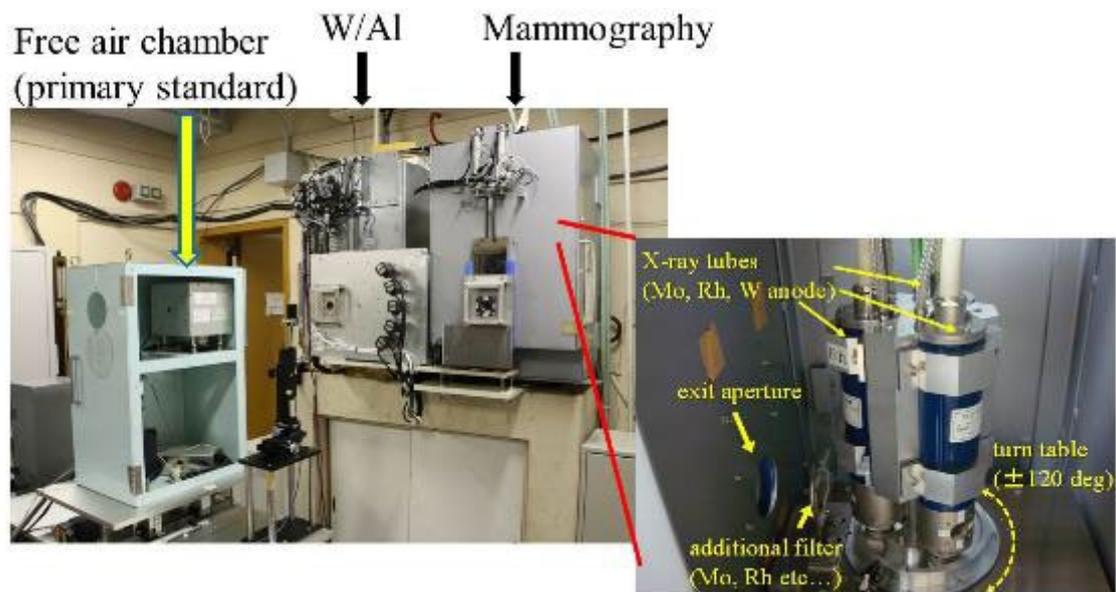


図 2.3-4 軟 X 線照射室

(3) β 線照射施設

β 線照射施設の主要装置は、ベータ線照射装置(Beta-Secondary Standard 2: 略称 BSS2, Eckert & Ziegler 社)および外挿電離箱(C-112-A, 株式会社応用技研)であり、 ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の 3 種類の線源を用いて β 線用線量計の校正および照射試験を実施できる施設である^[14,15]。 β 線照射装置と外挿電離箱の写真を図 2.3-5 に示す。外挿電離箱の仕様を表 2.3-1 に、 β 線照射場の仕様を表 2.3-2 に示す。いずれの β 線照射場も ISO 6980-1:2023^[16] のシリーズ 1 の要求事項を満たしている。 ^{147}Pm 線源の器物番号は 2 つ記入しているが、2023 年 11 月までは 2016 年購入の AH-4810 を使用し、2023 年 12 月以降は 2023 年購入の BE-7778 を使用している。 ^{147}Pm 線源については令和 5 年度報告書の 4.2.1 項も参照されたい。



図 2.3-5 β 線照射装置と外挿電離箱

表 2.3-1 外挿電離箱 C112-A の仕様

| | |
|---|---|
| 入射窓: 材質 質量厚(mg/cm ²) 組織等価厚 d_{win} (mm) | アルミニウム蒸着PET 1.67 0.0152 |
| 付加フィルタ: 材質 質量厚 (mg/cm ²) 組織等価厚 d_{win} (mm) | PET 5.41 0.0493 |
| 集電極: 材質 厚さ (mm) 直径 (mm) 集電極の面積 (mm ²) 保護電極の幅 (mm) 電極間の絶縁体の幅 (mm) | PMMA 20 30.05 733.01 15 0.5 |
| 電荷測定システム: 使用した標準キャパシタの電気容量 (pF) | 振動容量電位計 (MMA II-17E, Kawaguchi Electric Works) 100 |

表 2.3-2 β 線照射場の仕様

| 放射性核種 | ^{147}Pm | ^{85}Kr | $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ |
|---------------------|--|---|---|
| 線源の型番 | PHRB4809 | KARB4810 | SIRB4568 |
| 線源の器物番号 | ・ AH-4810 (2016 年度購入) ・ BE-7778 (2023 年度購入) | MH 983 | MR 428 |
| 線源窓の質量厚・ 材質 | (2.22 ± 0.5) mg/cm^2 チタン | (22.2 ± 1.0) mg/cm^2 チタン | (79 ± 8) mg/cm^2 ステンレス |
| 公称放射能 | 3.7 GBq | 3.7 GBq | 460 MBq |
| 校正距離 | 20 cm | 30 cm | 30 cm |
| ビームフラッタ ニングフィルタ | 半径 5 cm、厚 さ 100 μm の PET で、中央に半径 0.975 cm の穴が開 いているもの | 半径 4 cm、厚 さ 50 μm の PET と半径 2.75 cm、厚 さ 190 μm の PET の組み合わせ | 半径 2 cm、厚さ 190 μm 、半径 3 cm、厚さ 190 μm 、 半径 5 cm、厚さ 190 μm の PET の組 合わせ |
| 平均ベータエネ ルギー | 0.065 MeV | 0.25 MeV | 0.77 MeV |
| 半減期 ^[17] | (2.6234 ± 0.0004) a* | (10.752 ± 0.023) a* | (28.80 ± 0.07) a* |

*a は時間の単位「年」を示す。日(d)、秒(s)との関係は下記の通り。

$$1 \text{ a} = 365.242 \text{ 198 78 d} = 31 \text{ 556 925.26 s}$$

(4) 中性子照射施設

産総研中性子標準施設は、昭和55年に建設され、11.5 m×11.5 m×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×190 cm×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²⁴¹Am-Be中性子線源と²⁵²Cf中性子線源の中性子放出率校正が可能である。令和6年度時点で、供給を行っている放射性同位元素中性子源を用いた中性子フルエンス(率)標準とそれぞれ中性子生成及びフルエンス決定方法のリストを表2.3-3、加速器を用いた中性子フルエンス(率)標準とそれぞれの核反応、装置、及びフルエンス決定方法のリストを表2.3-4に示す。45 MeV中性子フルエンス標準に関しては、国立研究開発法人量子科学技術研究機構(QST)高崎量子応用研究所イオン照射研究施設(TIARA)のサイクロトロン施設において中性子生成を行い、標準供給を可能にしている。

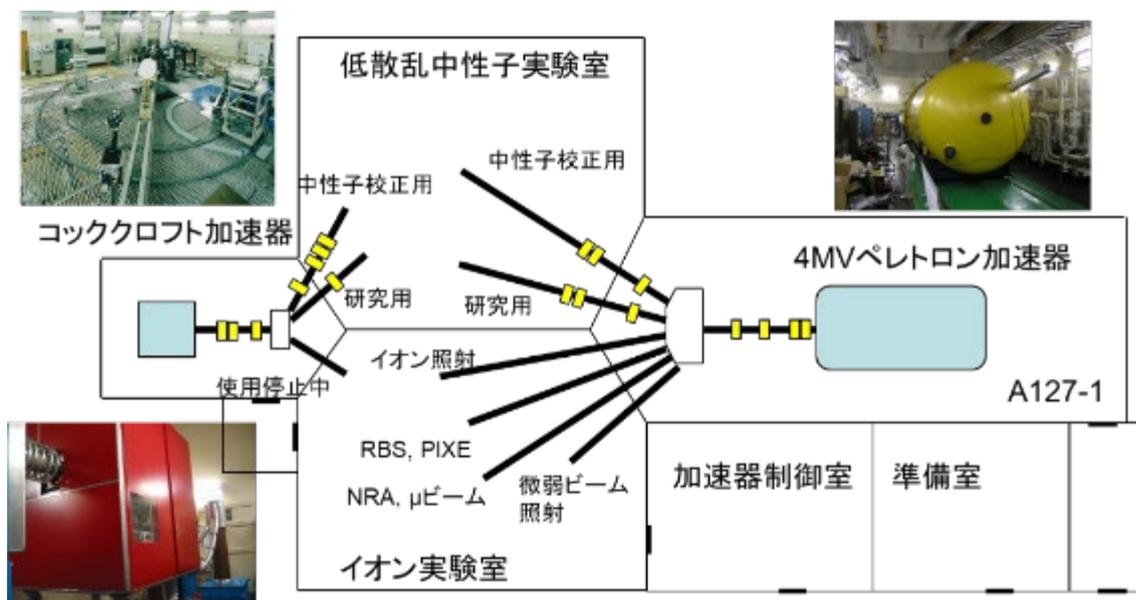


図 2.3-6 中性子照射施設の配置図

表2.3-3 放射性同位元素中性子源を用いた中性子フルエンス（率）標準の中性子生成及びフルエンス決定方法

| エネルギー | 中性子生成 | フルエンス決定 |
|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 熱中性子 | 黒鉛パイル+ ²⁴¹ Am-Be中性子源 | 金放射化法 (³ He4πβγ同時測定装置) |
| 重水減速 ²⁵² Cfスペクトル | 重水減速球+ ²⁵² Cf中性子源 | 中性子放出率とシミュレーションによる決定 ボナー球検出器を用いた測定 |
| ²⁵² Cfスペクトル | ²⁵² Cf中性子源 | 中性子放出率と距離による決定 |
| ²⁴¹ Am-Beスペクトル | ²⁴¹ Am-Be中性子源 | 中性子放出率と距離による決定 |

表2.3-4 加速器を用いた中性子フルエンス（率）標準のエネルギー、核反応、装置、及びフルエンス決定方法

| エネルギー | 中性子生成 | 装置 | フルエンス決定 |
|----------|--|----|--|
| 24 keV | ⁷ Li(p,n) ⁷ Be+Fe filter | P | ³ He(n,p)T反応 (³ He比例計数管) |
| 144 keV | ⁷ Li(p,n) ⁷ Be | P | n-p反応 (反跳陽子比例計数管) |
| 250 keV | | P | |
| 565 keV | | P | |
| 1.2 MeV | T(p,n) ³ He | P | n-p反応 (Thick radiator検出器) |
| 2.5 MeV | D(d,n) ³ He | C | |
| 5.0 MeV | | P | |
| 8.0 MeV | ⁹ Be(α,n) ¹² C | P | |
| 14.8 MeV | T(d,n) ⁴ He | C | 随伴粒子測定 (シリコン検出器) |
| 45 MeV | ⁷ Li(p,n) ⁷ Be (準単色) | CY | n-p反応 (カウンタテレスコープ) |

P:ペレットロン加速器、C:コッククロフト加速器、CY:QST-TIARAのサイクロトロン

2.3.2 JAEA の放射線照射施設

JAEA 放射線標準施設棟には、多くの種類の γ 線校正場、X 線校正場、 β 線校正場、中性子校正場が構築されている。本事業では、特性試験に資するために FRS (放射線標準施設) に整備する ^{241}Am γ 線校正場における新たな実用量に対する線量換算係数を導出し評価した。また、 ^{241}Am γ 線校正場及び令和 5 年度事業までに新たな実用量への線量換算係数の導出が完了した光子校正場、 β 線校正場を利用して線量計のエネルギー・方向特性試験を実施した。校正場の詳細は JAEA 編の「J2.3 放射線標準施設棟(FRS)」に記す。

3 事業の概要

3.1 事業項目

以下の 5 項目からなる事業を行った。

- (1) 新たな実用量に対応した線量計の校正に関する課題の調査
新たな実用量に対応した校正・試験場の線量換算係数の評価を行った。
- (2) 線量計の特性に関する課題の調査
国内で使用されている線量計のエネルギー特性および方向特性に関する調査、及び特性評価試験のトレーサビリティ確保に関する評価を行った。
- (3) 線量計の校正定数の決定と個人線量管理上の課題に関する調査
放射線作業場における線量計のエネルギー応答（レスポンス）に関する調査、校正定数の決定に関する課題の調査及び不均等照射に対する新たな実用量による個人線量管理に関する課題の調査を行った。
- (4) ワークショップの開催
課題対応のための国内関係者の連携を促すため、ワークショップを 1 回開催し、課題を調査した。
- (5) 研究に必要な国内外の情報収集
関連国際機関の主催する会議や国内外の学術会議への出席、関連論文の調査を通じて情報収集を行った。

3.2 事業内容

- (1) 新たな実用量に対応した線量計の校正場に関する課題の調査

令和 5 年度までに、国家標準機関及び二次標準機関において、光子、 β 線及び中性子線の各校正場について、新たな実用量への線量換算係数の導出等の整備を進めた。本年度事業では、令和 5 年度事業で必要な機器や解析等の評価体制が整った線種について、新たな実用量への線量換算係数を導出することによって校正場を整備し、新たな実用量の校正場に関する課題を調査した。また、産総研の熱中性子の校正場に対する新たな実用量への線量換算係数の導出を行った。成果を 4.3.1 項に示す。

- (2) 線量計の特性に関する課題の調査

産総研と JAEA とが連携して、令和 5 年度事業^[4,5]までに新たな実用量への線量換算係数の導出が完了した光子校正場、 β 線校正場及び中性子線校正場に加えて、²⁴¹Am 線源を利用

した γ 線校正場に対する線量換算係数を導出し、線量計のエネルギー特性に関するデータを取得した。線量計の特性評価に関する調査として、(a) エネルギー応答の方向特性試験、(b)特性評価試験のトレーサビリティ確保に関する検討を行った。成果を 4.4 節に示す。

(a) エネルギー応答と方向特性の評価

産総研においては、2社が提供する受動形個人線量計に対して、X線、 γ 線、 β 線、中性子場でのエネルギー特性試験を行った。

JAEA においては、令和 5 年度事業までに評価対象としておらず国内で入手可能な 4 機種（光子用サーベイメータ、光子用エリアモニタ、光子・ β 線用電子式線量計（DIS 線量計）及び眼の水晶体用の受動形個人線量計）、並びに令和 5 年度事業までにエネルギー特性は評価したが方向特性については評価されていなかった光子用電子式線量計の特性試験を実施し、これらの結果を含めた特性に関する傾向について検討した。

以上のデータと評価結果を踏まえ、現存する機種を新たな実用量に対応させるための技術的な課題を整理し、必要な対応策について検討した。成果を 4.4.1 項及び 4.4.2 項に示す。

(b) 特性評価試験のトレーサビリティ確保に関する調査

令和 5 年度事業では、回転照射を含めた方向特性試験の標準化に必要な校正用ファントムの妥当性を検討した。加えて、国家標準及び二次標準機関それぞれの校正場において同一あるいは同形式の線量計について方向特性の測定を実施し、両機関における特性試験の手法の適切性及び結果の同一性を相互に検証した。本年度事業では、令和 5 年度事業までに得られた成果に基づき、JAEA において方向特性が得られている線量計（体幹部用及び水晶体用の受動形線量計、中性子用の電子式個人線量計）について、産総研において方向特性の評価を行い、相互の結果の同一性を確認し課題を抽出して必要な対応策について検討した。成果を 4.4.3 項に示す。

(3) 線量計の校正定数の決定と個人線量管理上の課題に関する調査

令和 5 年度事業までに、法令等により作業者の個人線量管理及び線量又は線量率の測定が要求される現場を類型化して整理した。原子力施設及び放射線使用施設の放射線作業場を対象として、実測あるいは入手した光子エネルギースペクトルデータの解析によって、新たな実用量及び現行の実用量の定義に基づいたエネルギー応答を評価した。これらの成果を踏まえ、本年度事業では、(a) 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、(b) 校正定数の決定に関する課題の調査、(c)不均等照射に対する新たな実用量による個人線量管理に関する課題の調査を行った。

(a) 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

令和5年度事業までに検討した放射線作業場に加えて、低エネルギーの光子散乱線が主と考えられる放射線作業場を対象を拡げ、核燃料再処理施設、保管廃棄施設、廃止措置を行っている施設及び医療施設における光子エネルギースペクトルデータを実測又は過去の文献等から取得した。令和5年度まで及び本年度事業でエネルギー応答と方向特性に関するデータを得た線量計及び上記(2)(a)でエネルギー応答と方向特性に関するデータを得た線量計について、光子エネルギースペクトルが得られている放射線作業場における新たな実用量のエネルギー応答を解析し、結果をまとめて整理を行った。結果を4.5.1項に示す。

また作業場における光子エネルギースペクトル及びその方向特性の測定に適する測定装置を検討し、整備した。成果を4.2.3項に示す。

(b) 校正定数の決定に関する課題の調査

(a)の結果に基づき、解析対象とした線量計について新たな実用量に対応する校正定数を定める際の課題を検討し、その結果を整理した。成果を4.5.2項に示す。

(c) 不均等照射に対する新たな実用量による個人線量管理に関する課題の調査

頸部に装着した体幹部用線量計による実用量測定で、水晶体用線量計による測定を代替する運用は、現状の眼の水晶体の線量管理においてしばしば行われている。そこで、頸部に装着した体幹部用線量計と眼部に装着した水晶体用線量計について、それぞれ新たな実用量を測定した場合、頸部に装着した体幹部用線量計の指示値から妥当な水晶体線量の推定値が得られるか検証した。まず、ファントム形状(校正用の簡易型ファントムと人体形状を模擬したファントム)、着用部位や鉛エプロンの着用が線量計の指示値に与える影響を確認した。令和5年度事業までに得られた校正用ファントムを使用した線量計の方向特性試験結果も活用し、頭部及び胸部への放射線の入射方向が変わったときの頸部に装着した体幹部用線量計と眼部に装着した水晶体用線量計により見込まれる線量指示値を比較した。成果を4.5.3項に示す。

(4) ワークショップの開催

新たな実用量の導入に係る課題を整理し、課題対応のための国内関係者の連携を促すため、ワークショップを1回開催した。課題についての認識を効果的に共有し、国内関係者の連携を強化するため、遠隔地の関係者が容易に参加でき、会場の収容人数の物理的制限を回避可能な対面とオンラインとのハイブリッド形式で開催した。ワークショップではICRU Report95の作成委員会のメンバーの方に、主にその導入の経緯について解説を依頼し、ワークショップ参加者と議論した。成果を4.6節に示す。

(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（IAEA 及び ISO 専門委員会（ISO/TC85/SC2（放射線防護分野）の WG2(基準放射場)と WG19(外部被ばくの個人モニタリング)）、また日本保健物理学会の動向について調査するとともに、会議への参加を通じて適宜事業内容に関連する国内外の専門家と情報交換等を行い、事業成果の向上・精緻化を図った。成果を 4.7 節に示す。

4 事業の成果

4.1 はじめに

「3 事業の概要」で示した内容に基づき、達成した成果を本章で報告する。まず4.2節では「本事業で整備した装置」として、電流測定用抵抗器、中性子用プリアンプ等、スペクトロメータについて仕様等を解説する。それに引き続いて「3.2 事業内容」に記載した順で本事業の成果を述べる。

4.2 本事業で整備した装置

4.2.1 電流測定用抵抗器

産総研では、自由空気電離箱や空洞電離箱からの電流測定に振動容量型電位計を用いている。標準コンデンサと併用して、一定間隔で電荷をコンデンサに蓄積しその電位差から電荷量を計測している。この手法は、電流量に合わせてコンデンサの容量を変えることによって低電流から高電流まで対応でき、また低電流においてもコンデンサに蓄積する時間を長くすることによって安定した信号を得ることが可能である。ただし、電荷を蓄積するためある程度の時間が必要であり、また電流測定のばらつきを評価するため複数回計測することから、1回の電流測定のために10分から20分程度時間が必要である。

X線の出力は、 γ 線のような線源と比較すると日によって若干変動することから、照射試験を行う前後で線量の確認が必要となる。X線照射室では、線量評価のために透過型電離箱を副標準器として用いている。そこで、効率よく線量計の試験を実施するため、電荷を積算する手法ではなく本事業で整備した抵抗器を用いてこの透過型電離箱の電流測定を行うようにした。この透過型電離箱はX線管に近く比較的安定した電流値が得られることから、サンプリング数を増やすことにより、従来の測定と同程度のばらつきで電流が測定できた。また、照射する線量確認の測定時間も1分程度と効率の良い線量計試験を実施することが可能となった。

4.2.2 中性子用プリアンプ等

令和6年度は、表4.2.2-1に示す物品の購入を行った。熱中性子校正用台車は、黒鉛パイル外の熱中性子標準場において、水ファントムを設置して行う中性子個人線量計校正、及び中性子サーベイメータ校正のために利用される。中性子による散乱の影響をきわめて小さくするために、金属の中でも中性子散乱断面積が比較的小さいアルミニウムによって作製された(図4.2.2-1)。熱中性子校正では、黒鉛パイル内において、金箔放射化法によって中性子フルエンス率が評価された位置と線量計等を校正する黒鉛パイル外の位置の相対測定が、 ^3He 比例計数管を用いて行われる。バイアス電源によって高圧が印加された ^3He 比例計数管からの出力信号は、低雑音電荷有感型前置増幅器(プリアンプ)、線形増幅器を經由し、マルチチャンネルアナライザに取り込まれる。

表 4.2.2-1 中性子場の整備に導入した備品等のリスト

| | 物品名 | 仕様 |
|---|---------------|------------------------------------|
| 1 | 熱中性子校正用台車 | 全アルミ製、上下可動 |
| 2 | 低雑音電荷有感型前置増幅器 | クリアパルス 581 型 |
| 3 | バイアス電源 | クリアパルス 6672PN 型 |
| 4 | 水ファントム | JIS Z 4331:2024 に規定される水ファントムの規格に準拠 |



図 4.2.2-1 熱中性子校正用台車



図 4.2.2-2 低雑音電荷有感型前置増幅器



図 4.2.2-3 バイアス電源



図 4.2.2-4 水ファントム

4.2.3 スペクトロメータ

放射線を取り扱う作業現場での光子エネルギー分布を評価するために、スペクトロメータを整備した。本年度整備した NaI(Tl)シンチレータを内蔵する SPIR-Ace (MIRION TECHNOLOGIES 社製)は、内部にバッテリーを搭載しており、電源に接続することなく使用可能である。SPIR-Ace の基礎的な仕様を以下に示す。

- ・装置サイズ：20.6 cm×15.3 cm×5.7 cm
- ・装置重量：1.45 kg
- ・検出器サイズ： ϕ 35 mm×51 mm

・測定エネルギー範囲：25 keV – 3 MeV

産総研の照射施設で、整備したスペクトロメータの諸特性について調査した。まず、保有している表示付認証機器放射性同位元素(^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co)を用いて、エネルギー分解能を評価した。その結果を表 4.2.3-1 に示す。一般的な NaI(Tl)シンチレータのエネルギー分解能の値が得られている。

次に、 ^{137}Cs - γ 線に対するエネルギー分布の取得能力について、 γ 線照射室で試験した。その様子を図 4.2.3-1 に示す。また、低エネルギーに関するエネルギー分布の取得能力について試験するため、図 4.2.3-2 に示すように産総研の中硬 X 線照射室にスペクトロメータを設置し、ISO 4037-1;2019 Narrow-series^[18]として定義される X 線線質 N-40 の測定を実施した。

^{137}Cs - γ 線の線量率毎に取得した波高分布の結果を図 4.2.3-3 に示す。線量率（空気カーマ率）は、異なる放射能の線源と測定位置（線源-検出器間の距離）を変えることによって調整した。230 $\mu\text{Gy/h}$ 以上では、 ^{137}Cs - γ 線のエネルギーを超えるカウントが存在しているが、これは検出器の分解時間内での 2 光子同時計数によるパイルアップの影響と考えられる。従って、110 $\mu\text{Gy/h}$ までは、パイルアップの影響なくエネルギー分布を取得できている。

X 線(N-40) の線量率毎に取得した波高分布の結果を図 4.2.3-4 に示す。線源-検出器間の距離は 5.0 m で一定とし、線量率（空気カーマ率）は、X 線管の管電流を変化させることで調整した。 ^{137}Cs - γ 線の結果とは異なり、19 $\mu\text{Gy/h}$ 以上からパイルアップの影響が現れている。これは、検出器の感度が低エネルギー側で大きいため、同線量率の場合でも計数率が ^{137}Cs - γ 線よりも大きくなることに起因している。後述の 4.5.1 項において、IVR 施設での線量率は数百 $\mu\text{Sv/h}$ 以上に及ぶ。このような放射線環境で、本スペクトロメータによるエネルギー分布の取得を行うには、内径 5 mm 以下のコリメータを適用するなど、入射する光子数を適切に低減させる必要がある。

表 4.2.3-1 スペクトロメータのエネルギー分解能

| 核種 | エネルギー | FWHM |
|-------------------|--------|------|
| | keV | % |
| ^{241}Am | 59.5 | 20 |
| ^{137}Cs | 661.7 | 7.6 |
| ^{60}Co | 1173.2 | 6.0 |
| ^{60}Co | 1332.5 | 3.9 |

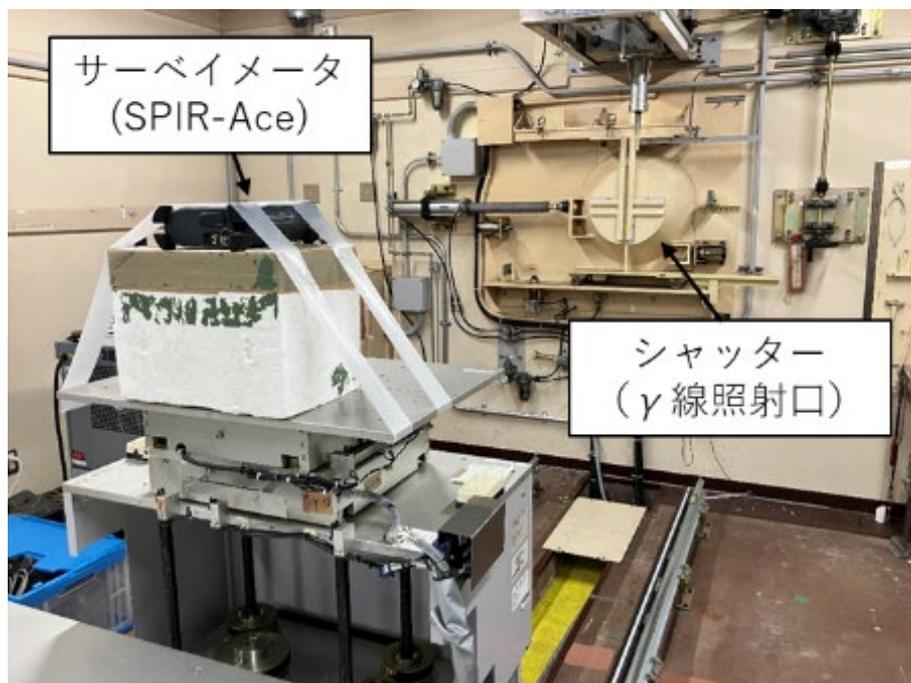


図 4.2.3-1：スペクトロメータ（SPIR-Ace）の γ 線照射試験の様子

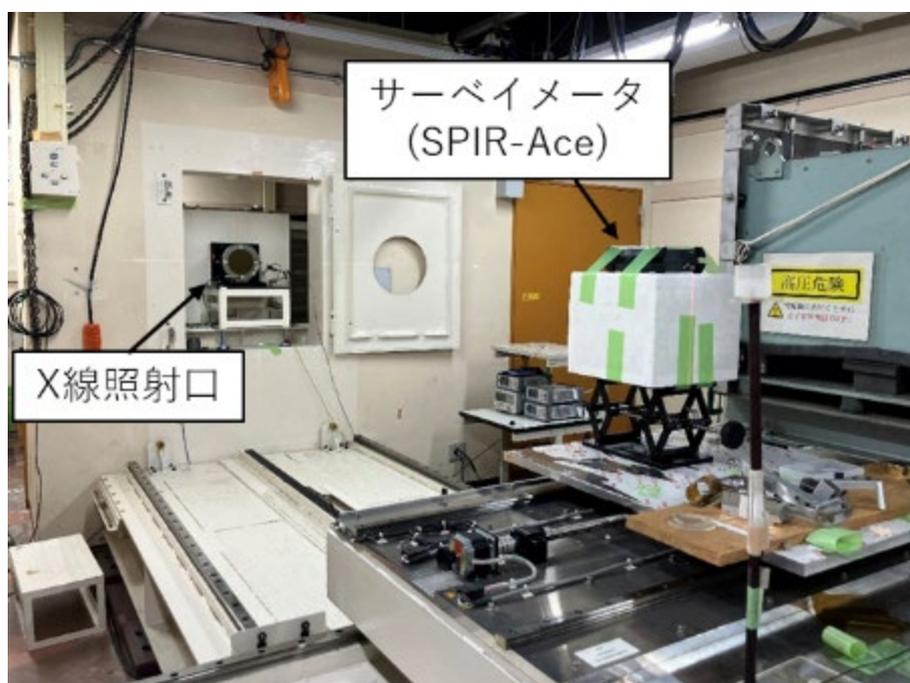


図 4.2.3-2：スペクトロメータ（SPIR-Ace）のX線照射試験の様子

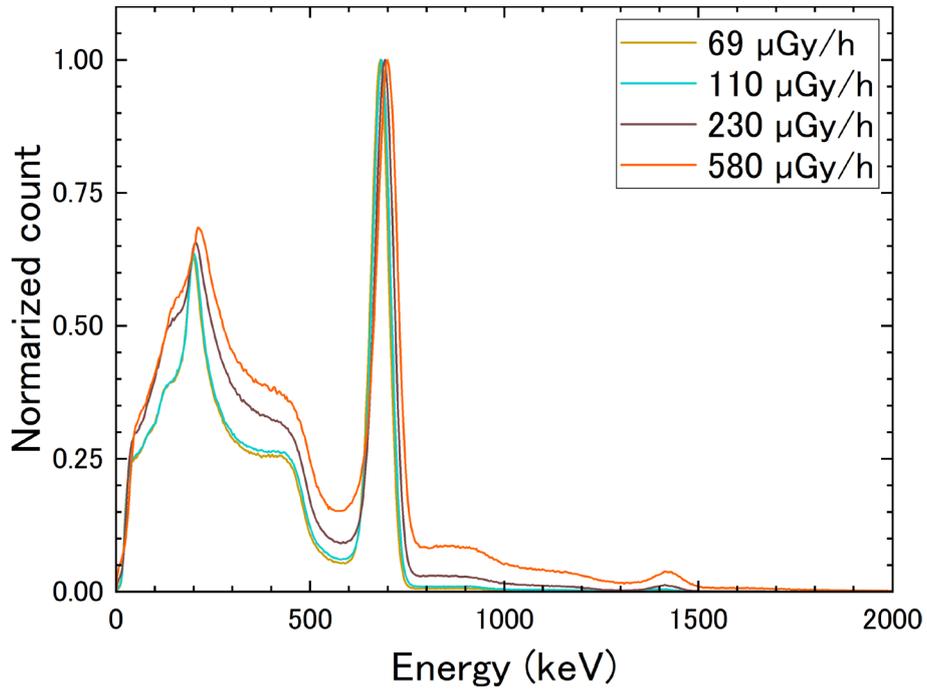


図 4.2.3-3 ^{137}Cs - γ 線場において空気カーマ率毎に得られるスペクトロメータの波高分布の変化（各測定最大のカウンタで規格化）

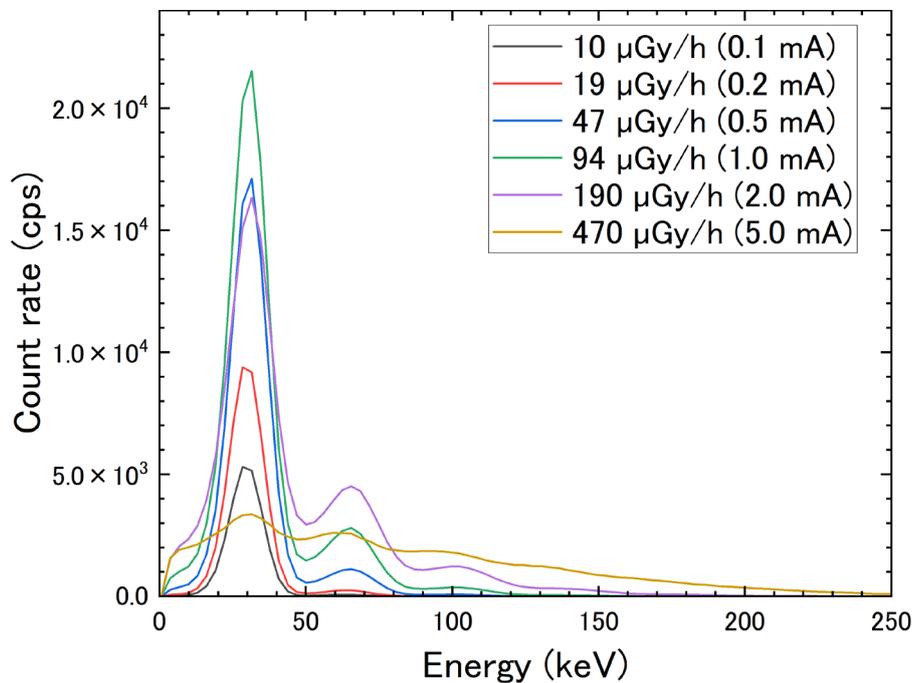


図 4.2.3-4 : N-40 において空気カーマ率毎に得られるスペクトロメータの波高分布の変化（凡例の括弧内の値は管電流の設定値）

4.3 新たな実用量に対応した線量計の校正場に関する課題の調査

4.3.1 校正・試験場の線量換算係数の評価

中性子標準施設において、モンテカルロシミュレーションコード (MCNP6.2) を用いて評価した熱中性子フルエンスのエネルギー分布の結果に対して、中性子フルエンスから新たな実用量への換算係数を求めた。産総研では図 4.3.1-1 に示す原子炉級の高純度黒鉛ブロックにより構成される黒鉛パイル(幅: 230 cm、奥行: 190 cm、高さ: 190 cm)の中心に $^{241}\text{Am-Be}$ 線源を設置することで熱中性子場を形成する。 $^{241}\text{Am-Be}$ 線源から生成された中性子は、黒鉛によって減速され、熱中性子になる。黒鉛パイル外の校正位置における熱中性子場のエネルギー分布を図 4.3.1-2 に示す。産総研熱中性子標準場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及び新しい実用量に基づく換算係数を表 4.3.1-1 に示す。換算係数は、ICRU Report に記載の単色中性子に対する換算係数をエネルギー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た。現行及び新しい実用量ともに ICRU Report ではフルエンス-線量換算係数は最低で 10^{-9} MeV までしか与えられておらず、今回の評価ではそれ以下のエネルギーにはすべて 10^{-9} MeV で与えられている換算係数を用いた。表 4.3.1-1 では、現行の実用量に基づく中性子個人線量当量換算係数及び中性子周辺線量当量換算係数をそれぞれ $h_p(10)$ 及び $h^*(10)$ と示し、新しい実用量に基づく中性子個人線量換算係数及び中性子周辺線量換算係数をそれぞれ h_p 及び h^* で示した。ICRU Report に記載の h_p 及び h^* は $h_p(10)$ 及び $h^*(10)$ に比べ特に熱中性子領域で低下しており、産総研熱中性子標準場における個人線量及び周辺線量への換算係数もそれぞれ 62 % 及び 61 % 低い値になっている。

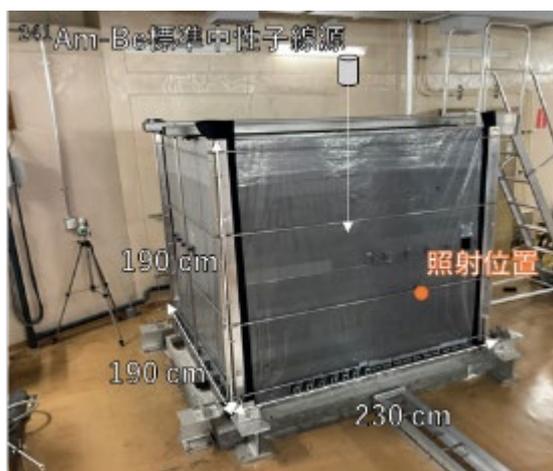


図 4.3.1-1 産総研熱中性子標準場

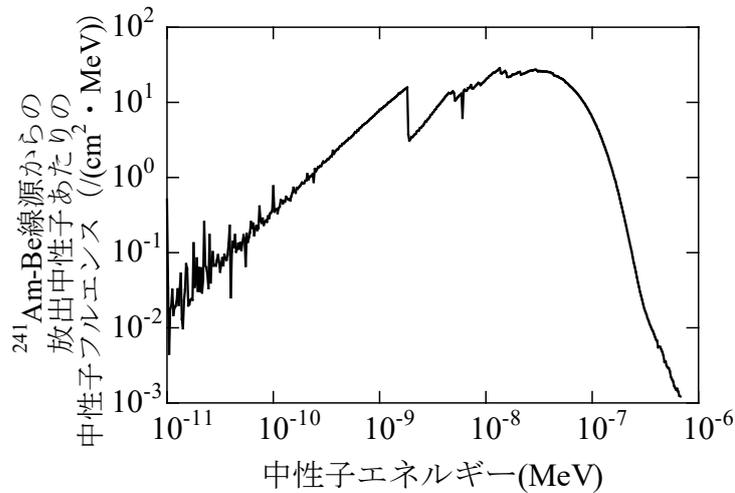


図 4.3.1-2 産総研熱中性子標準場における中性子スペクトル

表 4.3.1-1 産総研の熱中性子標準場における現行の実用量及び新しい実用量に基づく換算係数

| | 換算係数 (pSv cm ²) |
|---|-----------------------------|
| h _p (10) (現行の実用量に基づく中性子個人線量当量換算係数) | 11.6 |
| h*(10) (現行の実用量に基づく中性子周辺線量当量換算係数) | 11.2 |
| h _p (新しい実用量に基づく中性子個人線量換算係数) | 4.38 |
| h* (新しい実用量に基づく中性子周辺線量換算係数) | 4.38 |

4.4 線量計の特性に関する課題の調査

4.4.1 国家標準機関における線量計のエネルギー応答と方向特性の評価

線量計のエネルギー応答及び方向特性の試験は、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。

$$R = \frac{G}{C}$$

ここで C は γ 線、X 線、 γ 線及び中性子場で基準器により測定した空気カーマやフルエンスなど物理量に令和 4 年度~令和 6 年度に評価した換算係数を乗じ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。 R が 1 に近いほどその線量計の特性は良好であると判断される。

4.4.1.1 γ 線場における線量計の特性評価

産総研つくば中央事業所の大線量照射室 (¹³⁷Cs γ 線場) において、国内で利用されている

代表的な光子用受動形個人線量計（体幹部用、末端部用）の方向特性を評価した。また、光子用受動形個人線量計（水晶体用）について、後述の 4.4.1.2 に述べるエネルギー特性試験のために、0 度のみ応答を評価した。評価した線量計と試験内容を表 4.4.1.1-1 に示す。また、各ファントムによる照射試験の様子を図 4.4.1.1-1～図 4.4.1.1-3 に示す。全ての照射角度条件において、 γ 線の照射時にはビルドアップ板を設置した。3 個または 4 個の線量計に照射し、JIS Z 4345^[19]に従い不確かさを評価した。

現行または新たな実用量に対する基準線量（率）は、基準器により測定した空気カーマ（率）に令和 4 年度事業^[4]で評価した線量換算係数（表 3.2.1-G1, 表 3.2.1-G2, 表 3.2.1-G5）を乗じることによって求めた。なお、A 社製受動形個人線量計及び B 社製受動形個人線量計どちらも、体幹部用（B1、B2）と水晶体用（E1、E2）は光子と β 線の測定に対応したものであり、末端部用（R1、R2）は光子の測定のみに対応したものである。

表 4.4.1.1-1 γ 線の照射試験に用いた受動形個人線量計

| 識別記号 | 装着部位 | 検出方法による分類 | 線量計の取扱事業者 | 方向特性試験 |
|------|------|-----------|-----------|-------------|
| B1 | 体幹部 | ガラス線量計 | A 社 | 0 度～75 度* |
| B2 | 体幹部 | OSL 線量計 | B 社 | 0 度～75 度* |
| E1 | 眼の近傍 | TLD 線量計 | A 社 | 0 度のみ |
| E2 | 眼の近傍 | TLD 線量計 | B 社 | 0 度のみ |
| R1 | 指 | ガラス線量計 | A 社 | 0 度～180 度** |
| R2 | 指 | TLD 線量計 | B 社 | 0 度～180 度** |

* 5 点（0 度, 30 度, 45 度, 60 度, 75 度）

** 4 点（0 度, 30 度, 60 度, 180 度）

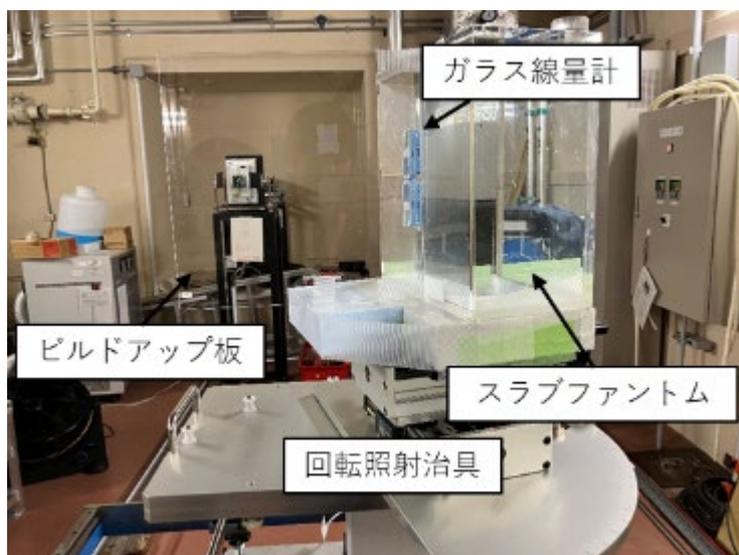


図 4.4.1.1-1 A 社製受動形個人線量計(体幹部用)の γ 線に対する方向特性試験の様子(75 度)

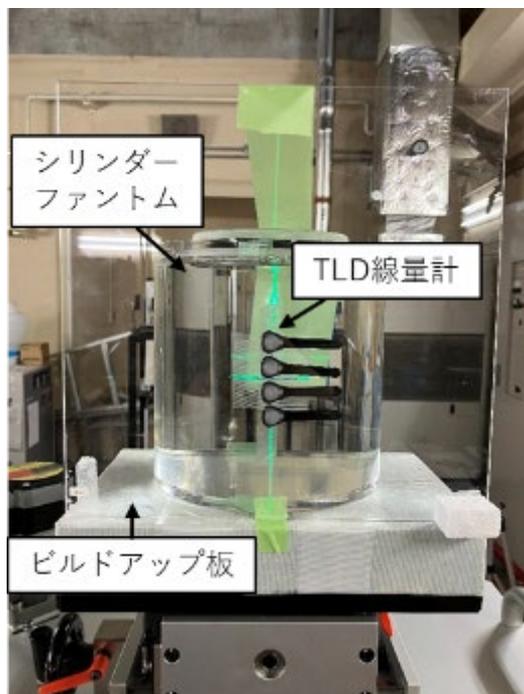


図 4.4.1.1-2 A 社製受動形個人線量計(水晶体用)の γ 線に対する特性試験の様子

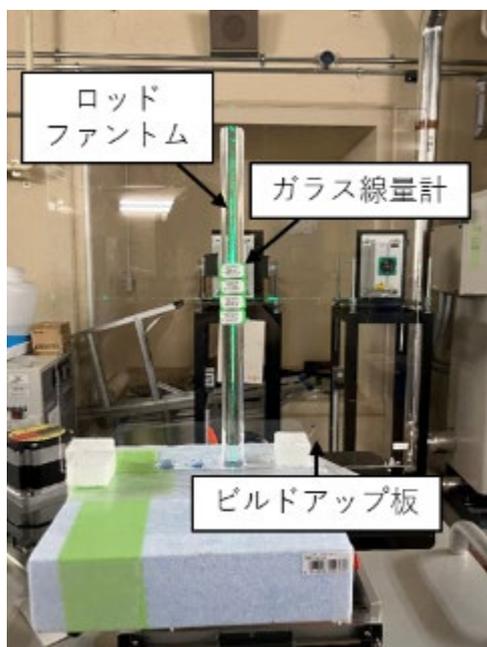


図 4.4.1.1-3 A 社製受動形個人線量計(末端部用)の γ 線に対する特性試験の様子

A 社及び B 社の各受動形個人線量計の現行の実用量に対して評価した照射角度 0 度の応

答をそれぞれ表 4.4.1.1-2、表 4.4.1.1-4 に示す。また、新たな実用量に対して評価した照射角度 0 度の応答をそれぞれ表 4.4.1.1-3、表 4.4.1.1-5 に示す。受動形個人線量計(末端部用)については、自動回転照射における $D_{p,local\ skin}(ROT)_{rod}$ に対する応答も評価した。評価した A 社及び B 社の各受動形個人線量計の現行の実用量及び新たな実用量に対する応答から示唆される事項について以下に述べる。

・受動形個人線量計(体幹部用)の $H_p(0^\circ)$ に対する応答を除き、A 社製の各受動形個人線量計(体幹部用・水晶体用・末端部用)の応答は 1 に近い値を示した。一方、B 社製の受動形個人線量計の応答は体幹部用の $H_p(10, 0^\circ)$ に対する応答を除き、1 から離れた値を示した。

・A 社及び B 社の受動形個人線量計(末端部用)の $D_{p,local\ skin}(0^\circ)_{rod}$ と $D_{p,local\ skin}(ROT)_{rod}$ に対する応答の変化は小さく良好な特性を示した。

表 4.4.1.1-2 A 社製各受動形個人線量計(体幹部用・水晶体用・末端部用)の現行の実用量に対する応答(S-Cs)

| $G/H_p(10, 0^\circ)$ | | $G/H_p(3, 0^\circ)$ | | $G/H_p(0.07, 0^\circ)_{rod}$ | |
|----------------------|----------|---------------------|----------|------------------------------|----------|
| 値 | 相対拡張不確かさ | 値 | 相対拡張不確かさ | 値 | 相対拡張不確かさ |
| Sv/Sv | %, $k=2$ | Sv/Sv | %, $k=2$ | Sv/Sv | %, $k=2$ |
| 1.03 | 4.0 | 0.98 | 4.1 | 0.93 | 4.1 |

表 4.4.1.1-3 A 社製各受動形個人線量計(体幹部用・水晶体用・末端部用)の新たな実用量に対する指示値の比(S-Cs)

| $G/H_p(0^\circ)$ | | $G/D_{p,lens}(0^\circ)$ | | $G/D_{p,local\ skin}(0^\circ)_{rod}$ | | $G/D_{p,local\ skin}(ROT)_{rod}$ | |
|------------------|----------|-------------------------|----------|--------------------------------------|----------|----------------------------------|----------|
| 値 | 相対拡張不確かさ | 値 | 相対拡張不確かさ | 値 | 相対拡張不確かさ | 値 | 相対拡張不確かさ |
| Sv/Sv | %, $k=2$ | Sv/Gy | %, $k=2$ | Sv/Gy | %, $k=2$ | Sv/Gy | %, $k=2$ |
| 1.21 | 4.0 | 0.99 | 4.1 | 0.94 | 4.1 | 0.94 | 4.1 |

表 4.4.1.1-4 B 社製各受動形個人線量計(体幹部用・水晶体用・末端部用)の現行の実用量に対する応答(S-Cs)

| $G/H_p(10, 0^\circ)$ | | $G/H_p(3, 0^\circ)$ | | $G/H_p(0.07, 0^\circ)_{rod}$ | |
|----------------------|----------|---------------------|----------|------------------------------|----------|
| 値 | 相対拡張不確かさ | 値 | 相対拡張不確かさ | 値 | 相対拡張不確かさ |
| Sv/Sv | %, $k=2$ | Sv/Sv | %, $k=2$ | Sv/Sv | %, $k=2$ |
| 1.01 | 6.0 | 0.76 | 6.7 | 0.75 | 5.7 |

表 4.4.1.1-5 B 社製各受動形個人線量計（体幹部用・水晶体用・末端部用）の
新たな実用量に対する応答(S-Cs)

| $G/H_p(0^\circ)$ | | $G/D_{p\text{ lens}}(0^\circ)$ | | $G/D_{p\text{ local skin}}(0^\circ)_{\text{rod}}$ | | $G/D_{p\text{ local skin}}(\text{ROT})_{\text{rod}}$ | |
|------------------|--------------|--------------------------------|--------------|---|--------------|--|--------------|
| 値 | 相対拡張 不確かさ | 値 | 相対拡張 不確かさ | 値 | 相対拡張 不確かさ | 値 | 相対拡張 不確かさ |
| Sv/Sv | %, $k=2$ | Sv/Gy | %, $k=2$ | Sv/Gy | %, $k=2$ | Sv/Gy | %, $k=2$ |
| 1.19 | 6.0 | 0.76 | 6.7 | 0.76 | 5.7 | 0.74 | 4.5 |

A 社及び B 社の各受動形個人線量計について、現行の実用量と新たな実用量に対して評価した方向特性を図 4.4.1.1-4～図 4.4.1.1-7 に示す。各図の縦軸は、現行の実用量（照射角度：0 度）に対する応答の値を基準に規格化されている。

現行の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について以下に述べる。

- ・ H_p についての応答はいずれの照射角度でも現行の実用量の $H_p(10)$ よりも大きい。また、A 社及び B 社の線量計は内部に複数の検出素子を持ち、各素子の読み取り結果から線量評価アルゴリズムにより実用量を評価しているため、新たな実用量となった際は、線量評価アルゴリズムを H_p への最適化することで方向特性を改善できる可能性がある。
- ・ $D_{p\text{ local skin}}$ については現行の実用量と同様に照射角度の違いによる応答の変化は小さく、良好な方向特性を示す。

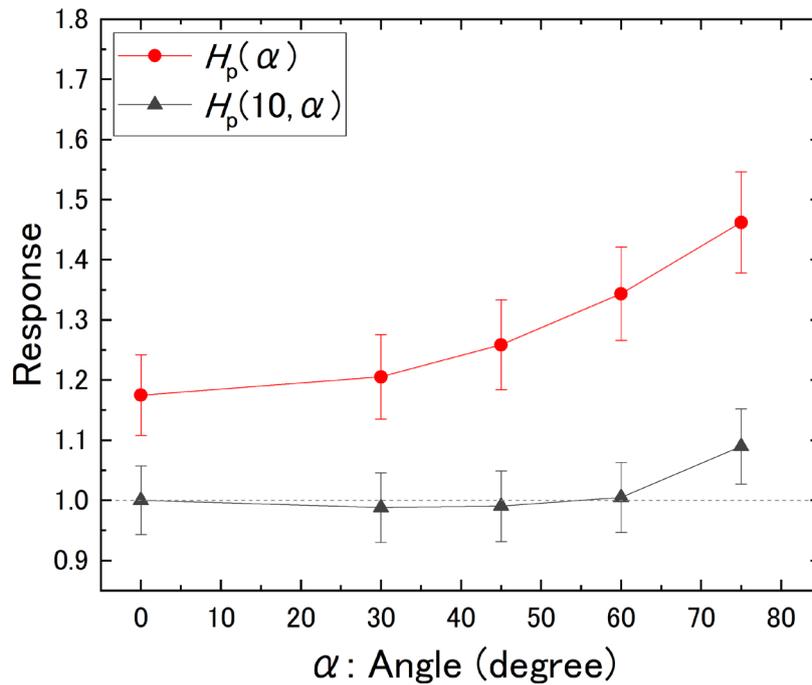


図 4.4.1.1-4 A 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p 及び $H_p(10)$ に対する方向特性 (S-Cs $H_p(10, 0^\circ)$ で校正 (規格化))

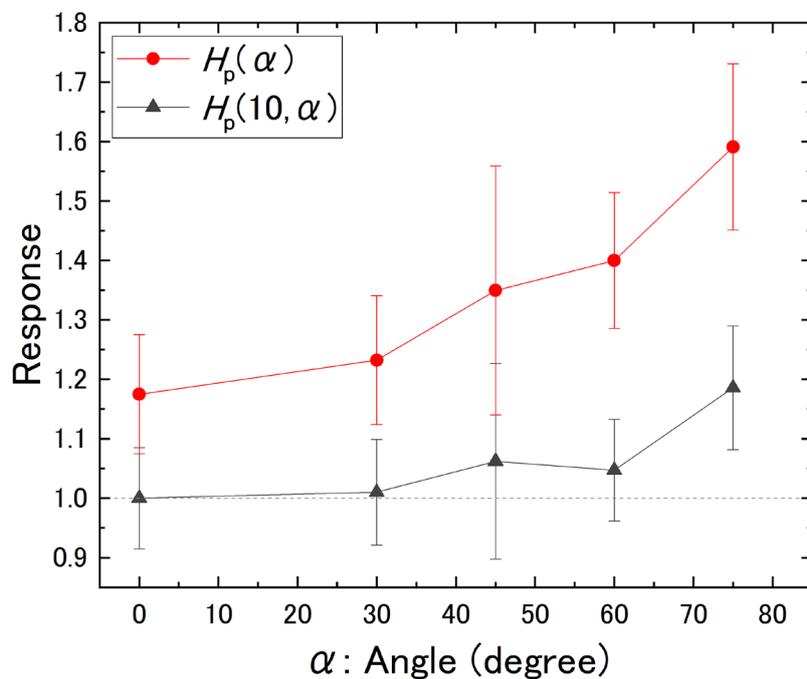


図 4.4.1.1-5 B 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p 及び $H_p(10)$ に対する方向特性 (S-Cs $H_p(10, 0^\circ)$ で校正 (規格化))

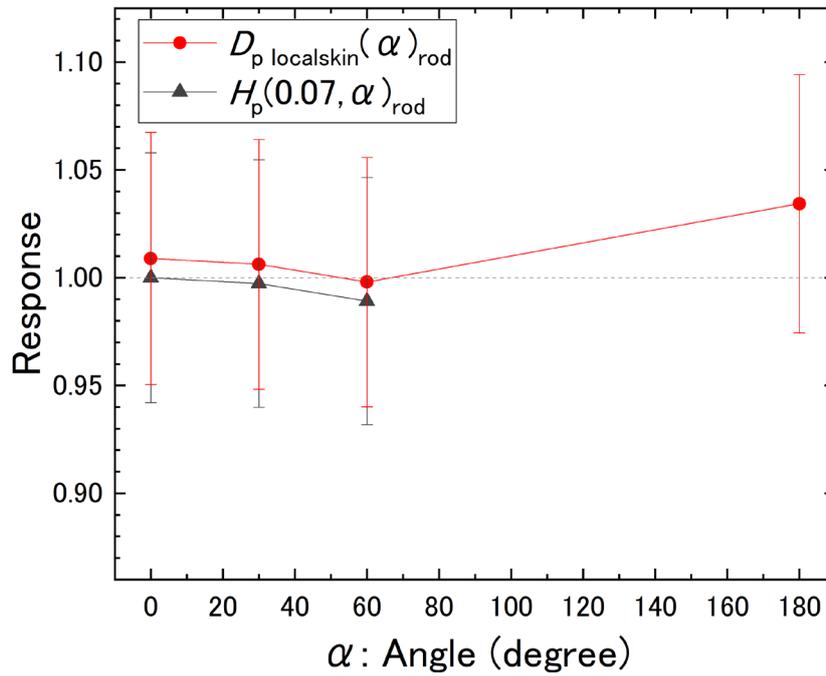


図 4.4.1.1-6 A 社製受動形個人線量計(末端部用) の $D_{p \text{ localskin}}$ 及び $H_p(0.07)$ に対する方向特性(S-Cs $H_p(0.07, 0^\circ)$)で校正 (規格化)

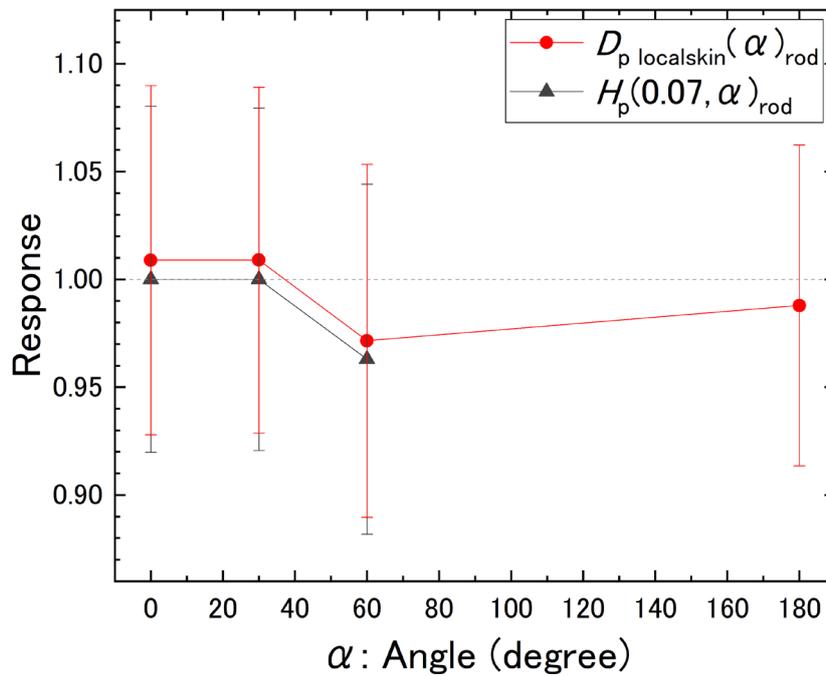


図 4.4.1.1-7 B 社製受動形個人線量計(末端部用) の $D_{p \text{ localskin}}$ 及び $H_p(0.07)$ に対する方向特性(S-Cs $H_p(0.07, 0^\circ)$)で校正 (規格化)

4.4.1.2 X線場における線量計の特性評価

産総研つくば中央事業所の中硬 X 線照射室において、国内で利用されている代表的な光子用受動形個人線量計（体幹部用、末端部用、水晶体用）のエネルギー特性を評価した。評価した線量計と試験内容を表 4.4.1.2-1 に示す。X 線場で評価した線量計は、表 4.4.1.1-1 に示した γ 線場で評価した線量計と同様である。 γ 線場での試験と同様に、3 個または 4 個の線量計に照射し、JIS Z 4345^[19]に従い不確かさを評価した。現行の実用量への換算係数は ISO-4037-3:2019^[20]記載の値を適用し、新たな実用量への換算係数は令和 4 年度事業^[4]で評価したもの(表 3.2.1-X6, 表 3.2.1-X10, 表 3.2.1-X22)を適用した。

表 4.4.1.2-1 光子エネルギー特性試験に用いた受動形個人線量計（表 4.4.1.1-1 で示した識別記号とである）

| 識別記号 | 装着部位 | 検出方法による分類 | 線量計の取扱事業者 | 測定エネルギー点 |
|------|------|-----------|-----------|----------|
| B1 | 体幹部 | ガラス線量計 | A 社 | 8 点で実施* |
| B2 | 体幹部 | OSL 線量計 | B 社 | 8 点で実施* |
| E1 | 眼の近傍 | TLD 線量計 | A 社 | 7 点で実施** |
| E2 | 眼の近傍 | TLD 線量計 | B 社 | 7 点で実施** |
| R1 | 指 | ガラス線量計 | A 社 | 8 点で実施* |
| R2 | 指 | TLD 線量計 | B 社 | 8 点で実施* |

*N-40～N-300, S-Cs, S-Co

** N-40～N-300, S-Cs

A 社及び B 社の各受動形個人線量計について、現行の実用量と新たな実用量に対して評価したエネルギー特性を図 4.4.1.2-1～図 4.4.1.2-6 に示す。各図の縦軸は、現行の実用量（照射角度：0 度, S-Cs）に対する応答の値を基準に規格化されている。現行の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について以下に述べる。

- ・ A 社及び B 社の受動形個人線量計（体幹部用）に共通して、50 keV 以下のエネルギーでは、 $H_p(10, 0^\circ)$ に対しては良好な特性を示すのに対し、 $H_p(0^\circ)$ に対しては過大な応答を示した。新たな実用量となった際は、線量評価アルゴリズムを H_p への最適化することでエネルギー特性を改善できる可能性がある。
- ・ A 社及び B 社の受動形個人線量計（水晶体用）及び受動形個人線量計（末端部用）については、現行の実用量と新たな実用量のエネルギー特性は同様な挙動を示し、低エネルギー側での変化が大きい。A 社及び B 社の受動形個人線量計（水晶体用）については、100 keV 以下から応答が過大となり、N-40 では 1.4 以上となる。受動形個

人線量計（末端部用）についても、N-100 以下で 1.2 以上過大応答となる。また、受動形個人線量計（末端部用）の $D_{p\text{ local skin}}$ 特性については、現行の実用量の $H_p(0.07)$ よりも良好なエネルギー特性を示した。

- ・ B 社の受動形個人線量計（末端部用）は、光子及び β 線を区別せず測定するため、新たな実用量での再校正を、光子、 β 線のどちらか一方に対して行う場合、もう一方が過大、過小応答することになる。設計変更の際は、光子、 β 線両方の特性を考慮する必要がある。

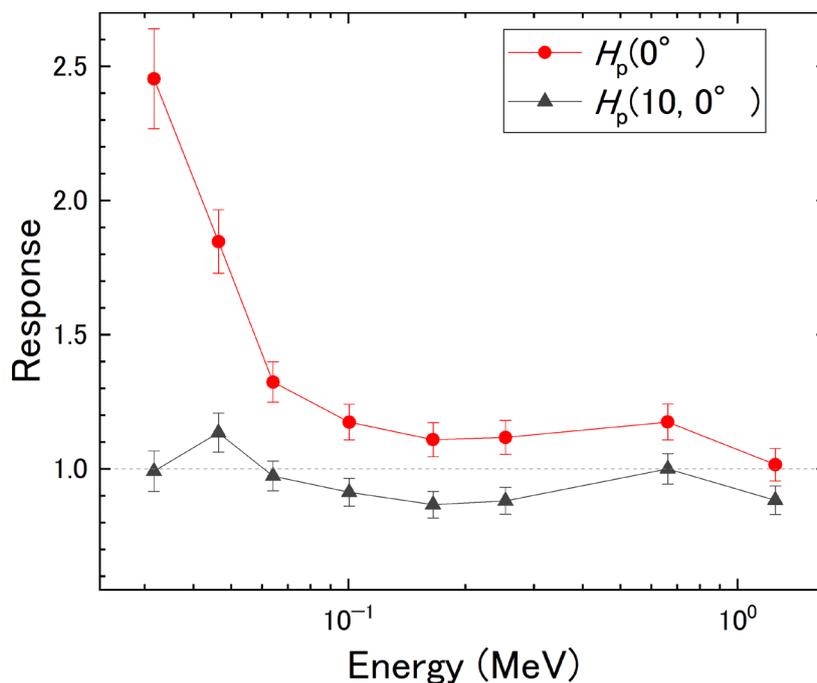


図 4.4.1.2-1 A 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p 及び $H_p(10)$ に対する光子エネルギー特性 (S-Cs $H_p(10, 0^\circ)$ で校正 (規格化))

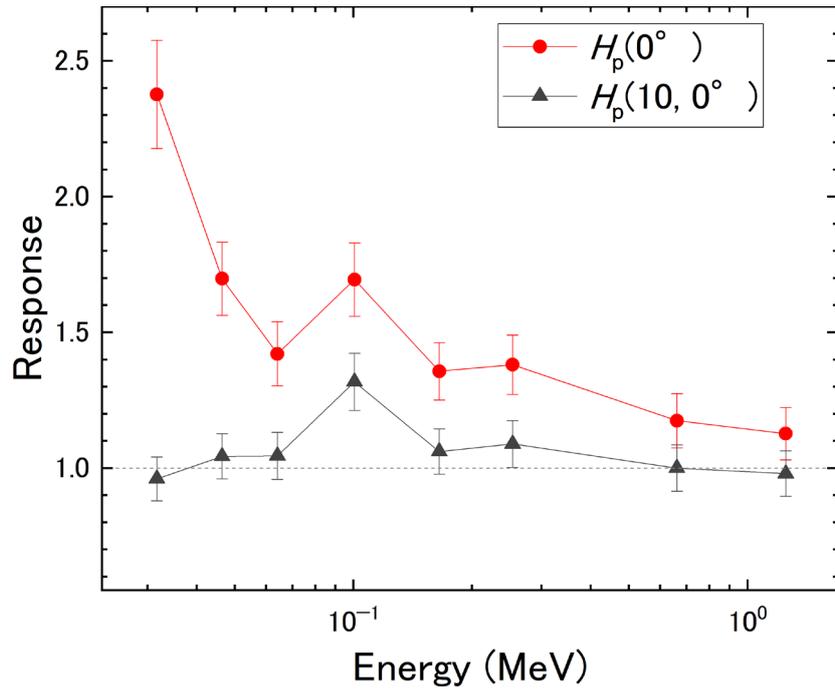


図 4.4.1.2-2 B 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p 及び $H_p(10)$ に対する光子エネルギー特性 (S-Cs $H_p(10, 0^\circ)$)で校正 (規格化))

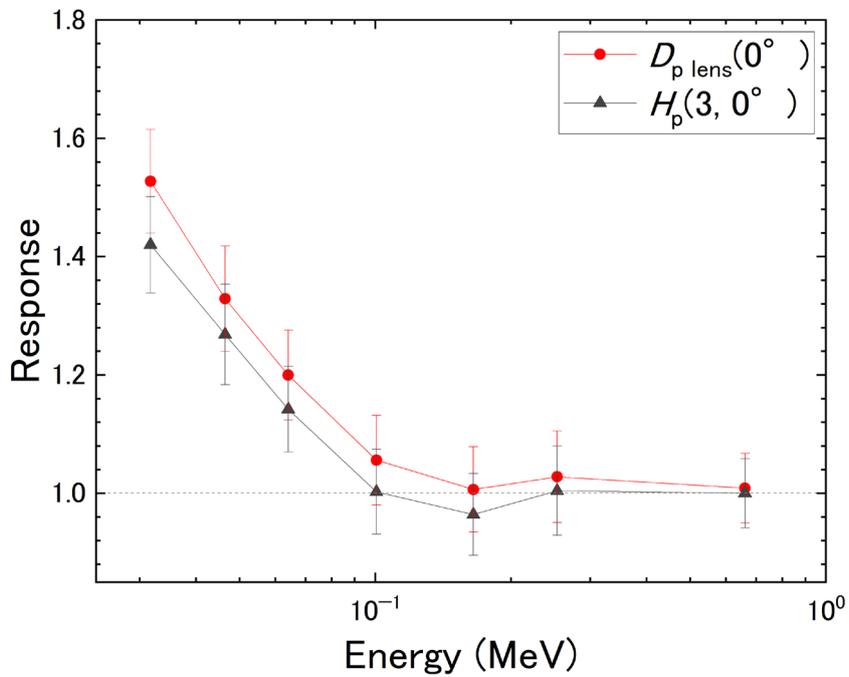


図 4.4.1.2-3 A 社製受動形個人線量計(水晶体用)の $D_{p \text{ lens}}$ 及び $H_p(3)$ に対する光子エネルギー特性 (S-Cs $H_p(3, 0^\circ)$)で校正 (規格化))

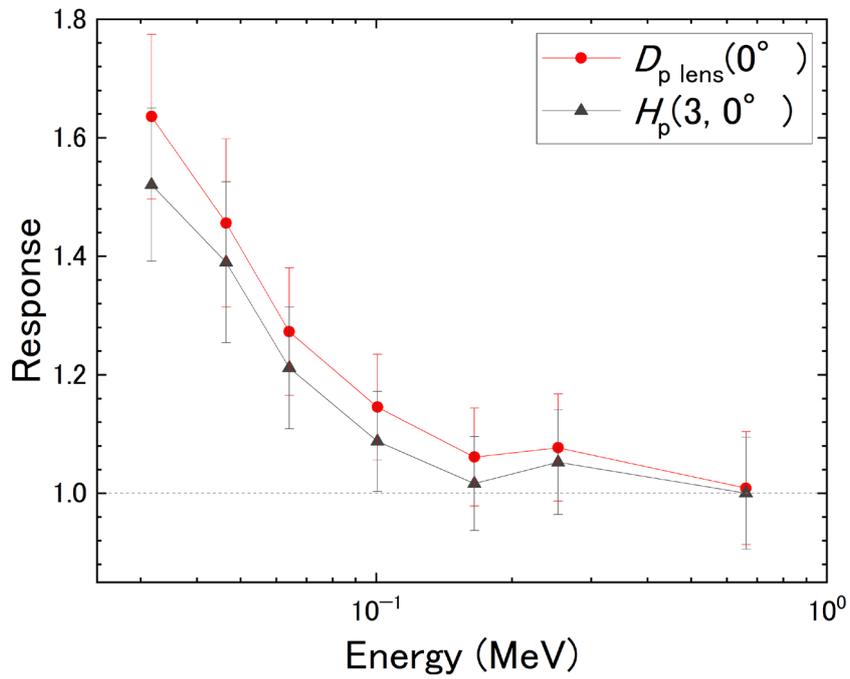


図 4.4.1.2-4 B 社製受動形個人線量計(水晶体用)の $D_p \text{ lens}$ 及び $H_p(3)$ に対する光子エネルギー特性 (S-Cs $H_p(3, 0^\circ)$)で校正 (規格化))

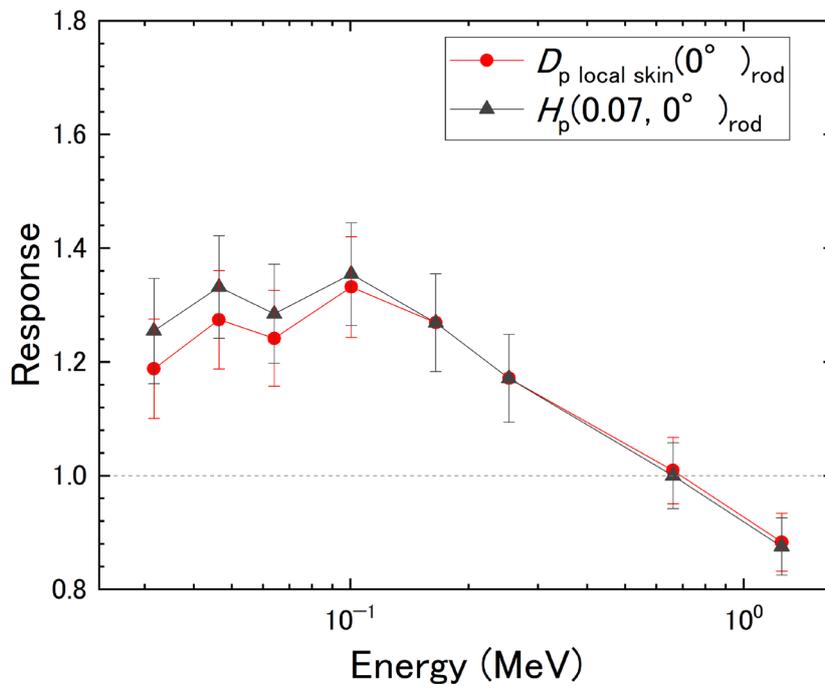


図 4.4.1.2-5 A 社製受動形個人線量計(末端部用)の $D_p \text{ local skin}$ 及び $H_p(0.07)$ に対する光子エネルギー特性(S-Cs $H_p(0.07, 0^\circ)$)で校正 (規格化))

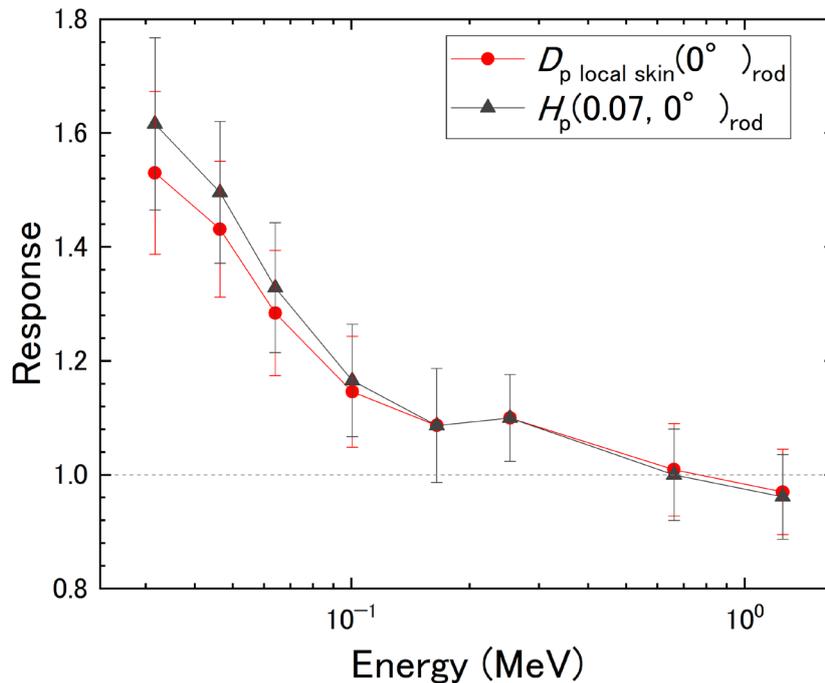


図 4.4.1.2-6 B 社製受動形個人線量計(末端部用)の $D_p \text{ local skin}$ 及び $H_p(0.07)$ に対する光子エネルギー特性 (S-Cs $H_p(0.07, 0^\circ)$)で校正 (規格化))

4.4.1.3 β 線場における線量計の特性評価

放射線作業従事者の職業被ばくを管理するために、国内外の多くの放射線を取扱う事業者が受動形の個人線量計を用いている。 β 線の被ばく線量を管理するために国内で利用されている代表的な受動形の個人線量計を対象に、エネルギー特性試験及び方向特性試験を実施した。

照射試験の実施条件

照射試験は産総研つくば中央事業所の β 線照射施設で行った。 β 線照射場は令和5年度事業報告書^[5]に記載したように $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源、 ^{85}Kr 線源、 ^{147}Pm 線源およびそれらの線源に対応するビームフラッタニングフィルタを用い、ISO6980-1:2023^[16]で規定される要求事項を満たすシリーズ1標準場を生成した。それぞれの照射場において、あらかじめ外挿電離箱(C-112A、応用技研)で、参照条件下の0.07 mm深さの組織吸収線量率($\dot{D}_t(0.07)$)を測定している。この測定手法および0.07 mm深さの組織吸収線量率 $\dot{D}_t(0.07)$ はEURAMET補完比較により妥当性が確認されている^[15]。照射時は温度・気圧・湿度の環境条件を、それぞれ校正された温度計・気圧計・湿度計で測定し、外挿電離箱で測定した参照条件下の $\dot{D}_t(0.07)$ の値に対して散乱吸収補正と放射能減衰補正を施すことにより、照射時の $\dot{D}_t(0.07)$ を得た。散乱吸収補正と放射能減衰補正の値および不確かさはISO6980-2:2023^[21]の導出方法により得た。用いた線量計及び実施した特性試験の内容を、表4.4.1.3-1に示す。

体幹部用の線量計については、現行の実用量である個人線量当量 $H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}$ 及び新たな実用量であるスラブファントムに関する局所皮膚吸収線量 $D_{\text{local skin s}}(\alpha)$ についての応答を評価した。ここで α は照射角度を示している。頭部に装着する水晶体用線量計については、現行の実用量である個人線量当量 $H_p(3, \alpha)_{\text{cyl}}$ 及び新たな実用量である水晶体吸収線量 $D_{\text{lens}}(\alpha)$ についての応答を評価した。指に装着する末端部用線量計については、現行の実用量である個人線量当量 $H_p(0.07, \alpha)_{\text{rod}}$ 及び新たな実用量であるロッドファントムに関する局所皮膚吸収線量 $D_{\text{local skin r}}(\alpha)$ についての応答を評価した。いずれの実用量についても $\dot{D}_t(0.07)$ からの換算係数は令和5年度報告書^[5]の4.3.1.1に記載の値を用いた。

受動形線量計はいずれも個人線量測定試験所であるA社又はB社から貸与されたものを使用した。A社製受動形個人線量計及びB社製受動形個人線量計どちらも、体幹部用(B1、B2)と水晶体用(E1、E2)は光子と β 線の測定に対応したものであり、4.4.1.1及び4.4.1.2の試験で用いた線量計と同一モデルである。末端部用(R3)は β 線の測定のみに対応したものである。産総研で照射した受動形線量計は個人線量測定試験所に返却し、照射した線量に起因する個人線量当量がSv単位で報告される。局所皮膚吸収線量及び水晶体吸収線量に対する応答を評価する際は、報告された個人線量当量について数字はそのままで単位をGyに読み替えた。この取扱いにより現行の実用量に対する応答もICRU Report 95実用量に対する応答も無次元量となる。B社については受動形線量計を返却する際に照射した放射線の種類と照射角度条件の情報を提供しており、報告された個人線量当量はこの情報が反映されていると考えられる。

実施した試験においてファントムはJIS Z 4331:2024^[22]で規定されているファントムを用いた。装着部位が体幹部の線量計についてはP30ファントム、頭部の線量計についてはシリンダファントム、指の線量計についてはISOロッドファントムである。

本試験では各条件で合計4個ずつの線量計に照射した。1回の照射において線量計を2個ずつまたは4個ずつをファントムに設置した。図4.4.1.3-1から図4.4.1.3-7に照射時の写真を示す。

表 4.4.1.3-1 β 線の照射試験に用いた受動形個人線量計

| 識別記号 | 装着部位 | 検出方法による分類 | 線量計の取扱事業者 | 測定エネルギー点 | 方向特性試験 |
|------|------|-----------|-----------|--------------------------------------|-----------|
| B1 | 体幹部 | ガラス線量計 | A社 | 2点で実施* | 0度～75度 |
| B2 | 体幹部 | OSL線量計 | B社 | 2点で実施* | 0度～75度 |
| E1 | 眼の近傍 | TLD線量計 | A社 | 1点($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) | 0度～75度 |
| E2 | 眼の近傍 | TLD線量計 | B社 | 1点($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) | 0度～75度 |
| R3 | 指 | ガラス線量計 | A社 | 3点で実施** | 0度～75度*** |

* $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源線源及び ^{85}Kr 線源による照射場で試験を実施。

** $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源、 ^{85}Kr 線源線源及び ^{147}Pm による照射場で試験を実施。

*** $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源及び ^{85}Kr 線源による照射場で方向特性試験を実施。 ^{147}Pm 線源による照射場では0度入射条件でのみ試験を実施。



図 4.4.1.3-1 線量計 B1 の照射試験時の配置。照射角度 0 度の場合を示す。4 個同時に照射した。



図 4.4.1.3-2 線量計 B1 の照射試験時の配置。照射角度 45 度の場合を示す。2 個同時に照射した。15 度、30 度、60 度、75 度においても 2 個同時に照射した。



図 4.4.1.3-3 線量計 B2 の照射試験時の配置。照射角度 0 度の場合を示す。4 個同時に照射した。

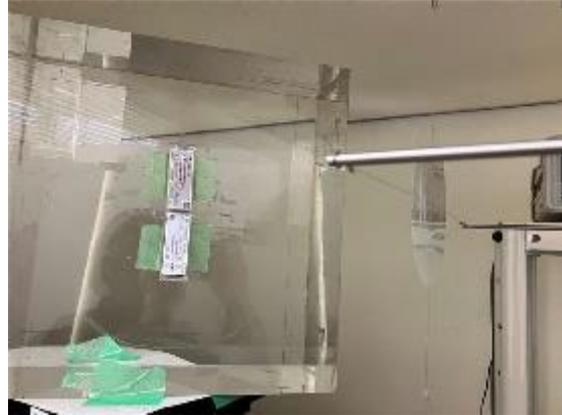


図 4.4.1.3-4 線量計 B2 の照射試験時の配置。照射角度 45 度の場合を示す。2 個同時に照射した。15 度、30 度、60 度、75 度においても 2 個同時に照射した。

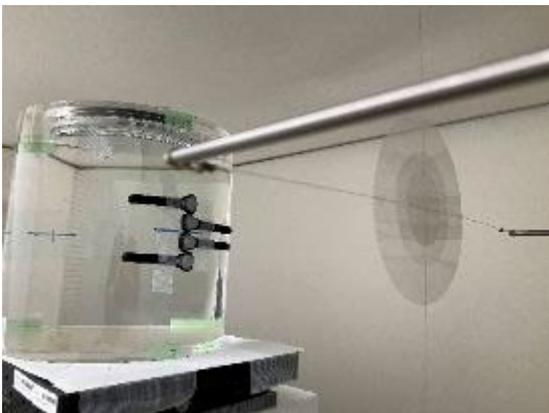


図 4.4.1.3-5 線量計 E1 の照射試験時の配置。照射角度 0 度の場合を示す。いずれの入射角度の場合も 4 個同時に照射した。



図 4.4.1.3-6 線量計 E2 の照射試験時の配置。照射角度 0 度の場合を示す。いずれの入射角度の場合も 4 個同時に照射した。



図 4.4.1.3-7 線量計 R3 の照射試験時の配置。照射角度 0 度の場合を示す。いずれの入射角度の場合も 4 個同時に照射した。

線量計 B1 の結果および考察

$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における線量計 B1 (体幹部用ガラス線量計) の照射角度に対する応答を図 4.4.1.3-8 に示す。スラブファントムに関する局所皮膚吸収線量に対する応答を赤丸 (○)、個人線量当量 $H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}$ に対しての応答を黒丸 (○) で表した。図からいずれの実用量に対しても応答に大きな変化がないことが分かる。これは ICRU Report が現行の実用量と新たな実用量に与える換算係数の間に大きな変化がないこと^[5]から予測される結果と矛盾がない。

図のエラーバーは拡張不確かさ (包含係数 $k=2$) を表す。本事業の β 線照射試験における受動形線量計の応答の不確かさの評価では、標準場の $\dot{D}_t(0.07)$ 、 $\dot{D}_t(0.07)$ から実用量への換算係数、受動形個人線量計の設置位置のばらつきと設置角度のばらつき、受動形個人線量計の測定値のばらつき、受動形個人線量計の測定値の分解能を要因として考慮した。

^{85}Kr 場における照射角度に対する応答を図 4.4.1.3-9 に示す。スラブファントムに関する局所皮膚吸収線量に対する応答を赤三角 (△)、個人線量当量 $H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}$ に対しての応答を黒三角 (△) で表した。 ^{85}Kr 場における方向特性は $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場より良く、角度変化に対して応答の変化がフラットである。ICRU Report 95 で示された実用量は現行の実用量に比べてこの照射試験で用いた条件における換算係数が数%小さい値となるため、応答は数%大きい値を示す。

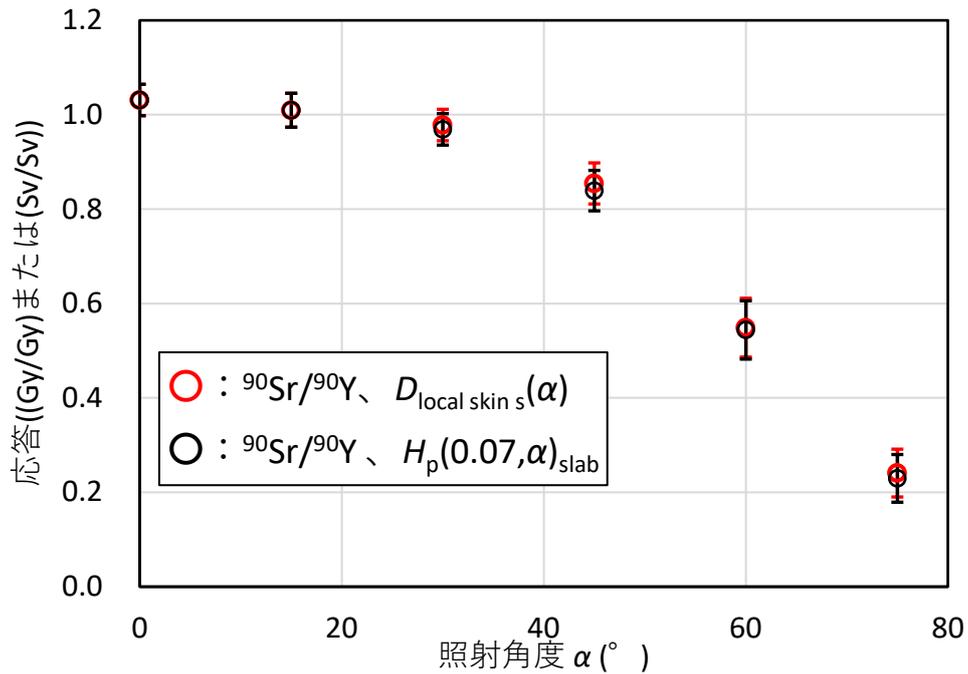


図 4.4.1.3-8 線量計 B1 (体幹部用ガラス線量計) の照射角度に対する応答。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における結果を○と○で示す。○はスラブファントムに関する局所皮膚吸収線量に対して、○は個人線量当量 $H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}$ に対するの応答である。

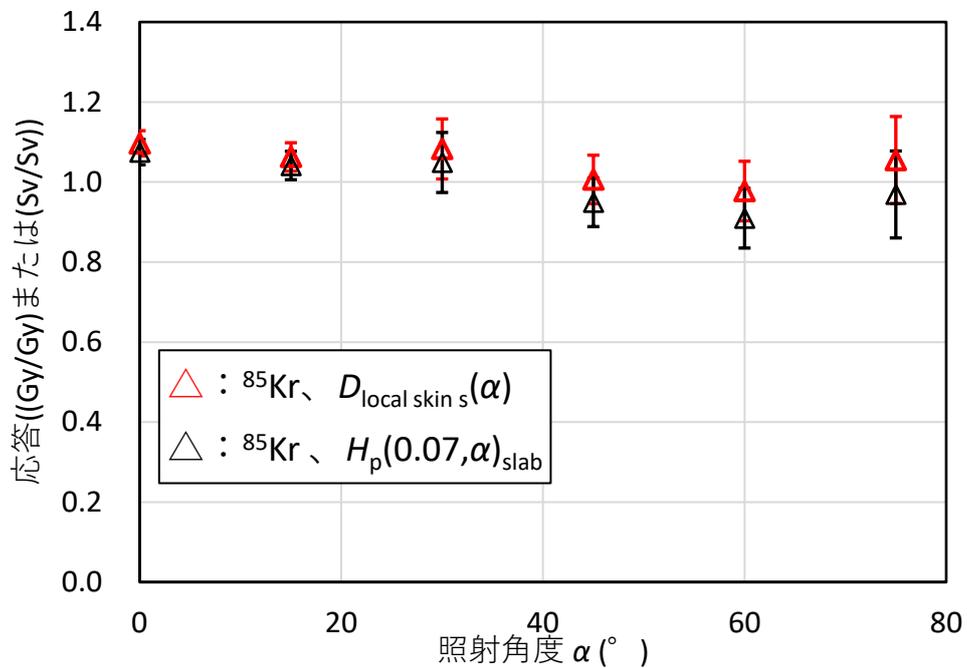


図 4.4.1.3-9 線量計 B1 (体幹部用ガラス線量計) の照射角度に対する応答。 ^{85}Kr 場における結果を△と△で示す。△はスラブファントムに関する局所皮膚吸収線量に対して、△は個人線量当量 $H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}$ に対するの応答である。

線量計 B2 の結果と考察

$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における線量計 B2 (体幹部用 OSL 線量計) の照射角度に対する応答を図 4.4.1.3-10 に示す。スラブファントムに関する局所皮膚吸収線量に対する応答を赤丸 (○)、個人線量当量 $H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}$ に対しての応答を黒丸 (○) で表した。線量計 B1 の場合と同様に、いずれの実用量に対しても応答に大きな変化はない。

^{85}Kr 場における照射角度に対する応答を図 4.4.1.3-11 に示す。スラブファントムに関する局所皮膚吸収線量に対する応答を赤三角 (Δ)、個人線量当量 $H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}$ に対しての応答を黒三角 (Δ) で表した。線量計 B1 の場合と同様に、 ^{85}Kr 場における方向特性は $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場より良く、ICRU Report 95 で示された実用量は現行の実用量に比べてこの照射試験で用いた条件における換算係数が数%小さい値となるため、応答は数%大きい値を示す。

本照射試験では、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場及び ^{85}Kr 場のいずれにおいても 30 度の応答よりも 45 度の応答が大きい値を示した。個人線量測定試験所から報告された個人線量当量には、入射放射線の種類及び照射角度の情報も加味されている可能性があり、線量計のハードウェアとしての性能のみの評価ではないかもしれないことに注意が必要である。

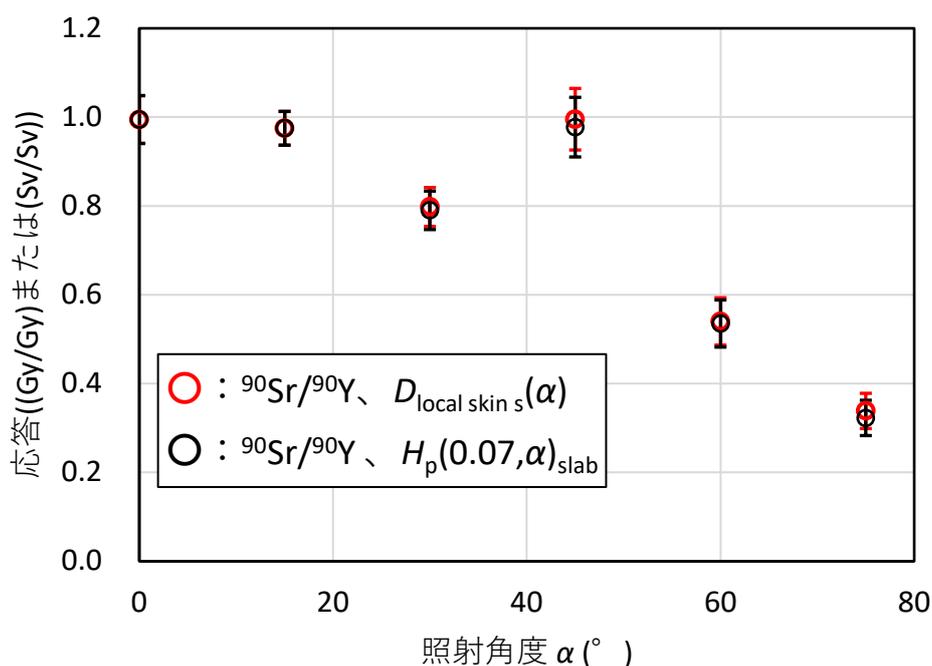


図 4.4.1.3-10 線量計 B2 (体幹部用 OSL 線量計) の照射角度に対する応答。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における結果を○と○で示す。○はスラブファントムに関する局所皮膚吸収線量に対して、○は個人線量当量 $H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}$ に対しての応答である。

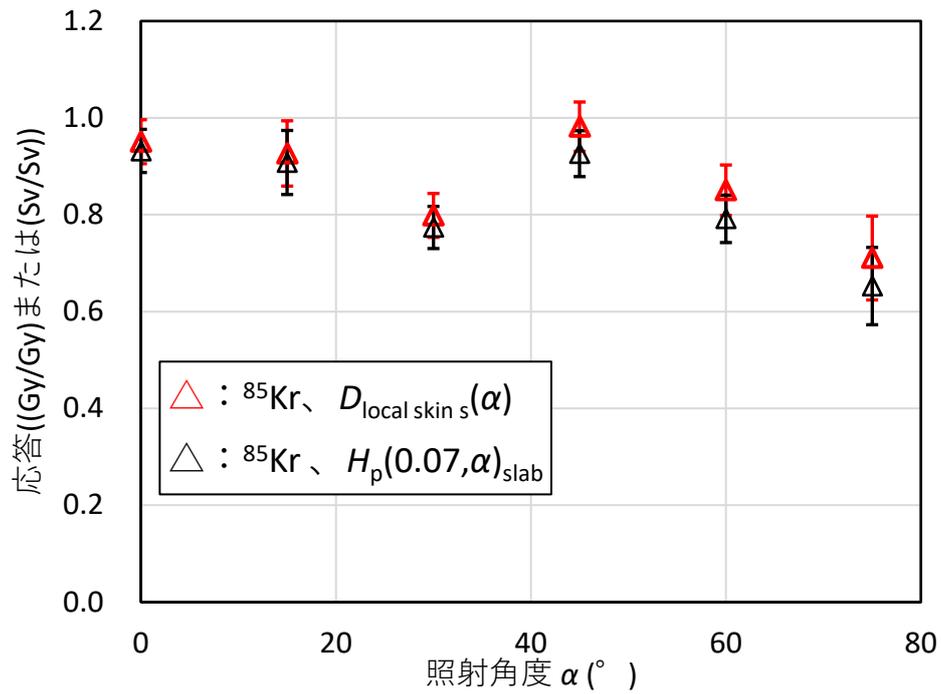


図 4.4.1.3-11 線量計 B2 (体幹部用 OSL 線量計) の照射角度に対する応答。 ^{85}Kr 場における結果を \triangle と \triangle で示す。 \triangle はスラブファントムに関する局所皮膚吸収線量に対して、 \triangle は個人線量当量 $H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}$ に対するの応答である。

線量計 E1 の結果および考察

線量計 E1 (水晶体用 TLD 線量計) の照射角度に対する応答を図 4.4.1.3-12 に示す。水晶体吸収線量に対する応答を赤丸 (○)、個人線量当量 $H_p(3)_{cyl}$ に対しての応答を黒丸 (○) で表した。水晶体吸収線量に対する応答の方がフラットな方向特性を示している。ただし、個人線量当量と水晶体吸収線量との間で応答は大きく異なるため全体的な値の校正は必要である。いずれの実用量についても 75 度の応答は不確かさが大きい、換算係数が小さくその不確かさが大きいこと、報告された個人線量当量のばらつきが大きいことに起因している。

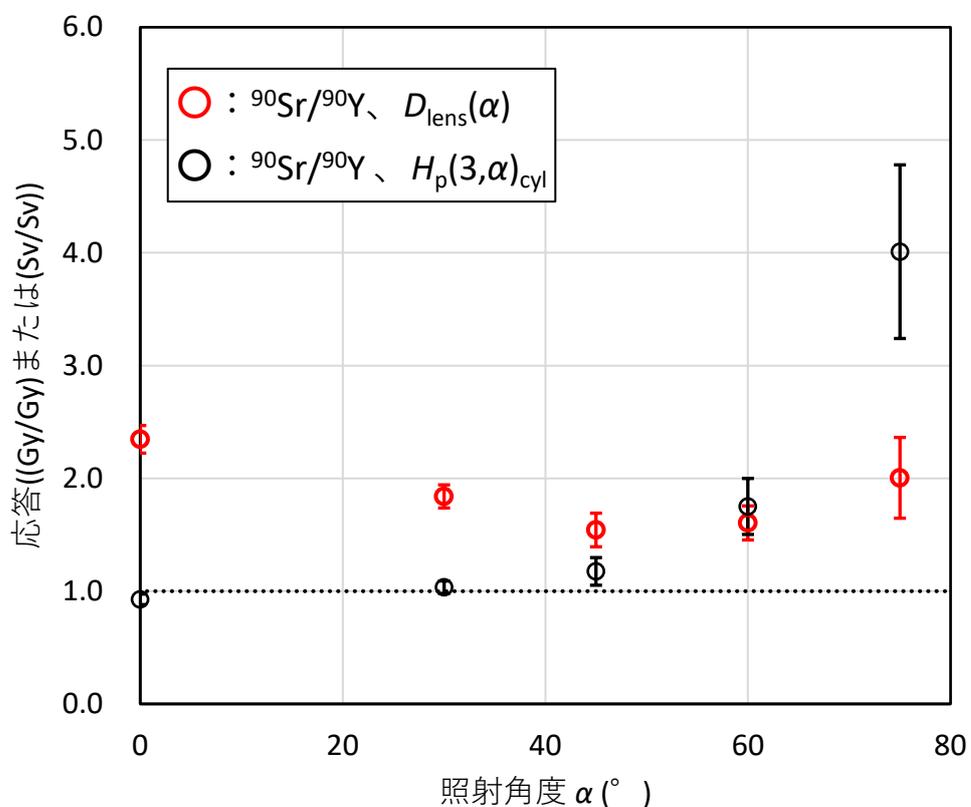


図 4.4.1.3-12 線量計 E1 (水晶体用 TLD 線量計) の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における照射角度に対する応答。○は水晶体吸収線量に対して、○は個人線量当量 $H_p(3 \alpha)_{cyl}$ に対しての応答である。

線量計 E2 の結果および考察

線量計 E2（水晶体用 TLD 線量計）の照射角度に対する応答を図 4.4.1.3-13 に示す。水晶体吸収線量に対する応答を赤丸（○）、個人線量当量 $H_p(3)_{cyl}$ に対しての応答を黒丸（○）で表した。個人線量当量 $H_p(3)_{cyl}$ に対する応答・方向特性が良好であり、現行の実用量に合わせて設計されているように見える。水晶体吸収線量に対しては換算係数の変更に伴い応答・方向特性とも大きく変化することが分かる。60 度と 75 度の応答の不確かさが大きくなった原因としては、報告された個人線量当量のばらつきが大きかったことが主な要因である。

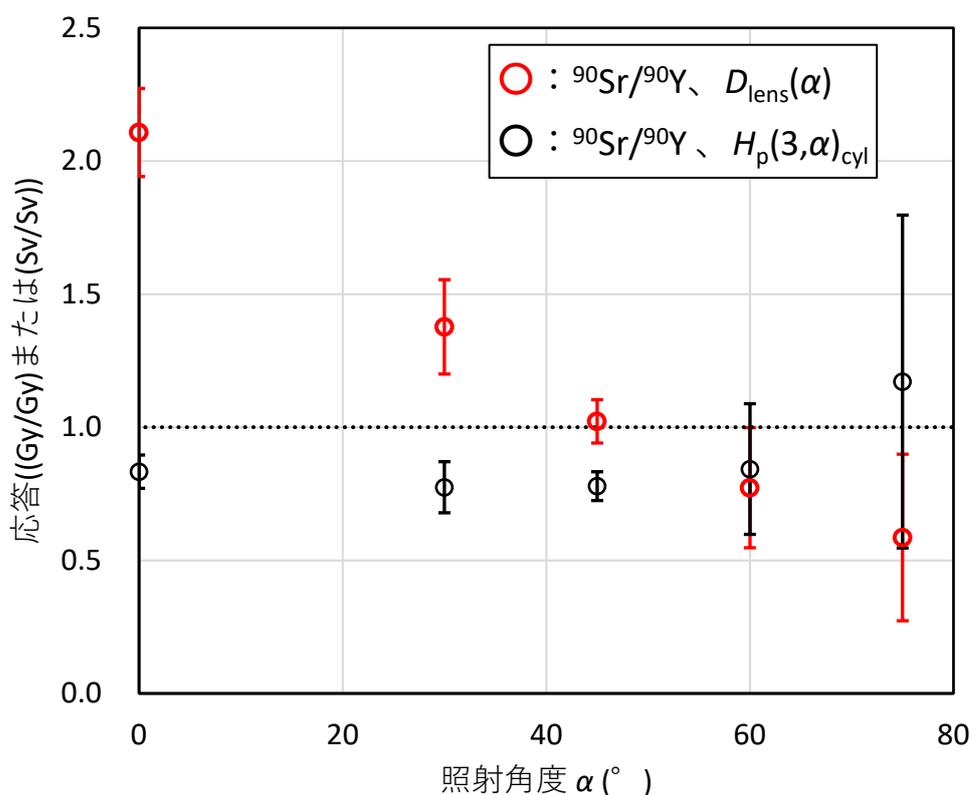


図 4.4.1.3-13 線量計 E2（水晶体用 TLD 線量計）の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における照射角度に対する応答。○は水晶体吸収線量に対して、○は個人線量当量 $H_p(3 \alpha)_{cyl}$ に対しての応答である。

線量計 R3 の結果および考察

線量計 R3（指装着用ガラス線量計）の照射角度に対する応答を図 4.4.1.3-14 および図 4.4.1.3-15 に示す。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における結果は図 4.4.1.3-14 に、ロッドファントムに関する局所皮膚吸収線量に対する応答を赤丸（○）、個人線量当量 $H_p(0.07, \alpha)_{rod}$ に対しての応答を黒丸（○）で表した。いずれの実用量に対しても大きい照射角度では応答が小さい値を示すが、45 度以上では $D_{\text{local skin r}}(\alpha)$ に対して $H_p(0.07, \alpha)_{rod}$ が小さい値となるため、本事業の結果からは新たな実用量においては線量計の方向特性が改善される可能性が示唆される。 ^{85}Kr

場における結果は図 4.4.1.3-15 に、ロッドファントムに関する局所皮膚吸収線量に対する応答を赤三角 (\triangle)、個人線量当量 $H_p(0.07, \alpha)_{rod}$ に対しての応答を黒三角 (\blacktriangle) で表した。この線量計は ^{85}Kr 場では過小応答の特徴を持つが、 $D_{local\ skin\ r}(\alpha)$ に対して $H_p(0.07, \alpha)_{rod}$ は小さい値となるため、新たな実用量に対しては過小応答が若干改善されることが示唆される。なお ^{147}Pm 場でも照射試験を実施したが、有意な出力値を得られなかった。

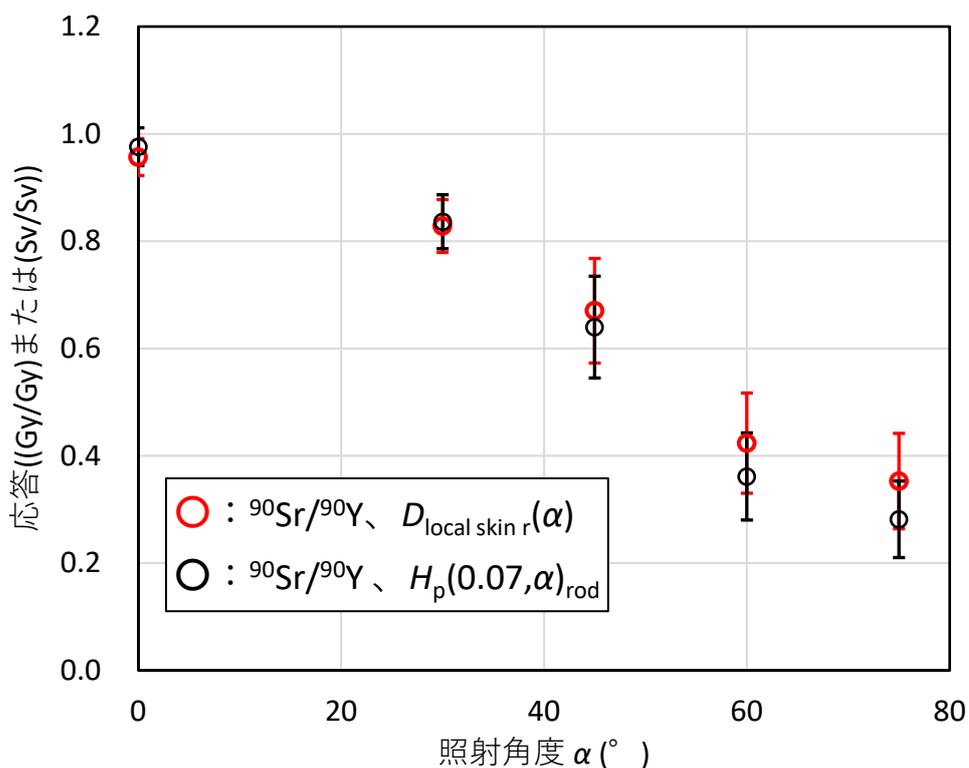


図 4.4.1.3-14 線量計 R3 (指装着用ガラス線量計) の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における照射角度に対する応答。○は ISO ロッドファントムに関する局所皮膚吸収線量に対して、○は個人線量当量 $H_p(0.07, \alpha)_{rod}$ に対しての応答である。

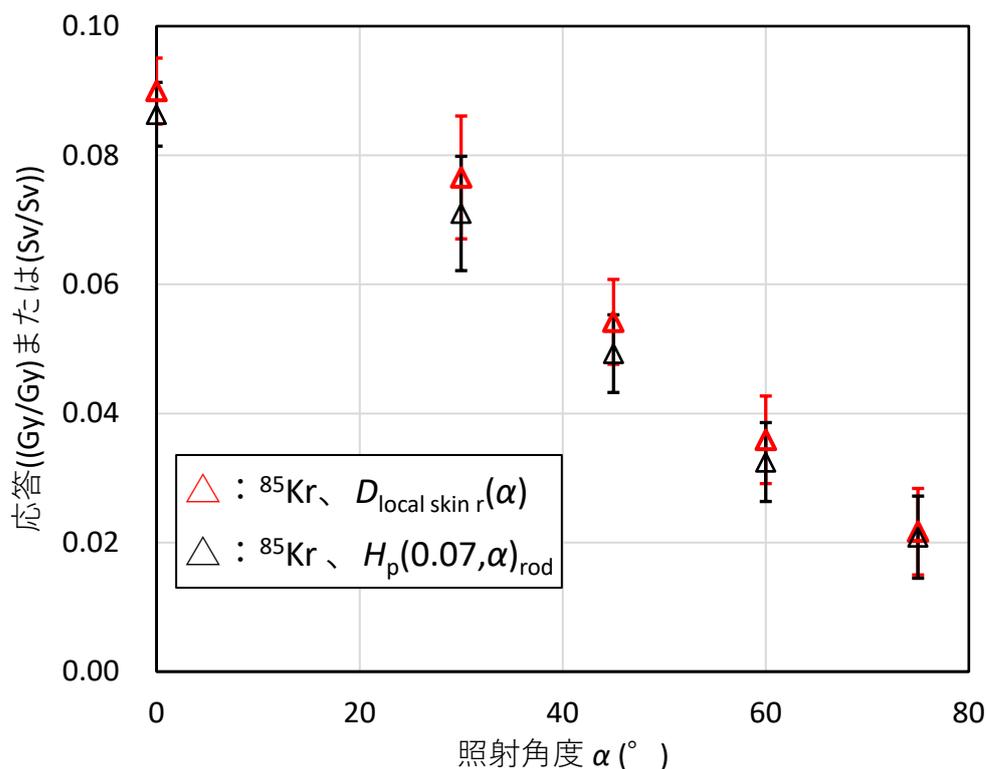


図 4.4.1.3-15 線量計 R3（指装着用ガラス線量計）の ^{85}Kr 場における照射角度に対する応答。 \triangle は ISO ロッドファントムに関する局所皮膚吸収線量に対して、 \triangle は個人線量当量 $H_{\text{p}}(0.07, \alpha)_{\text{rod}}$ に対するの応答である。

4.4.1.4 中性子場における線量計の特性調査

令和 4 年度^[4]及び令和 5 年度^[5]の事業において、565 keV、5.0 MeV、14.8 MeV の評価を行った際に利用した国内事業者で多く利用されている P 社と Q 社のサーベイメータ及び R 社の電子式中性子個人線量計について、熱中性子と 144 keV の応答評価を行った。熱中性子では、黒鉛パイル外正面の基準照射位置にサーベイメータ及び電子式個人線量計を設置し、それぞれの応答評価を実施した。144 keV は、産総研ビームラインの所定の位置に、P 社と Q 社のサーベイメータ及び R 社の電子式中性子個人線量計を設置し、産総研の所定の校正方法で応答を導出した。P 社と Q 社のサーベイメータについては、シャドウコーン法による測定が行われた。

熱中性子と 144 keV に対する P 社及び Q 社のサーベイメータ、R 社の電子式個人線量計の試験結果を表 4.4.1.4-1～表 4.4.1.4-3 にそれぞれ示す。熱中性子及び 144 keV では、現行の実用量と新しい実用量を用いた場合とで、換算係数が 2 倍以上変化するため、熱中性子

及び 144 keV とともに、新しい実用量を用いた場合の方が、2 倍以上応答が大きくなった。図 4.4.1.4-1～図 4.4.1.4-3 に、令和 4 年度及び令和 5 年度に得られた結果を含めた結果を示す。P 社、Q 社のサーベイメータでは、現行の実用量に適用するように開発されており、現行の実用量に基づく結果では、比較的フラットな応答を示すのに対して、新しい実用量に基づく結果では、応答の平坦性が、特に 144 keV に対して損なわれている傾向にある。R 社電子式個人線量計では、144 keV と 565 keV に対しては応答がきわめて小さく、現行の実用量と新しい実用量に基づく結果の差異は小さいが、熱中性子に対しては、新しい実用量に基づいた結果が現行の実用量に基づいた結果の約 2 倍の応答となった。

表 4.4.1.4-1 P 社サーベイメータの結果

| | 熱中性子 応答 (μSv^{-1})** | 144 keV 応答 (μSv^{-1})** |
|---------------|--------------------------------------|---|
| 現行の実用量に基づいた結果 | 3.45×10^3 (13 %)* | 4.74×10^3 (6.3 %)* |
| 新しい実用量に基づいた結果 | 8.8×10^3 (14 %)* | 1.029×10^4 (6.3 %)* |

* カッコ内は相対拡張不確かさ ($k=2$)

** 校正場での照射時の中性子フルエンスと換算係数 h^* または $h^*(10)$ の積で求まる周辺線量(Sv)または周辺線量当量(Sv)あたりのサーベイメータの計数

表 4.4.1.4-2 Q 社サーベイメータの結果

| | 熱中性子 応答 (μSv^{-1})** | 144 keV 応答 (μSv^{-1})** |
|---------------|--------------------------------------|---|
| 現行の実用量に基づいた結果 | 1.03×10^4 (13 %)* | 2.10×10^4 (6.3 %)* |
| 新しい実用量に基づいた結果 | 2.61×10^4 (14 %)* | 4.57×10^4 (6.3 %)* |

* カッコ内は相対拡張不確かさ ($k=2$)

** 校正場での照射時の中性子フルエンスと換算係数 h^* または $h^*(10)$ の積で求まる周辺線量(Sv)または周辺線量当量(Sv)あたりのサーベイメータの計数

表 4.4.1.4-3 R 社電子式個人線量計の結果

| 熱中性子 | | | |
|---------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|
| | 応答 | 照射線量 (mSv) | 線量計の出力 (mSv) |
| 現行の実用量に基づいた結果 | 7×10^{-1} | 4.15×10^{-1} (11%)* | 3×10^{-1} |
| 新しい実用量に基づいた結果 | 2×10^0 | 1.57×10^{-1} (11%)* | |
| 144 keV | | | |
| | 応答 | 照射線量 (mSv) | 線量計の出力 (mSv) |
| 現行の実用量に基づいた結果 | 0.0 | 9.78×10^{-1} (5.9%)* | 0.0 |
| 新しい実用量に基づいた結果 | 0.0 | 4.30×10^{-1} (5.9%)* | |

* カッコ内は相対拡張不確かさ ($k=2$)

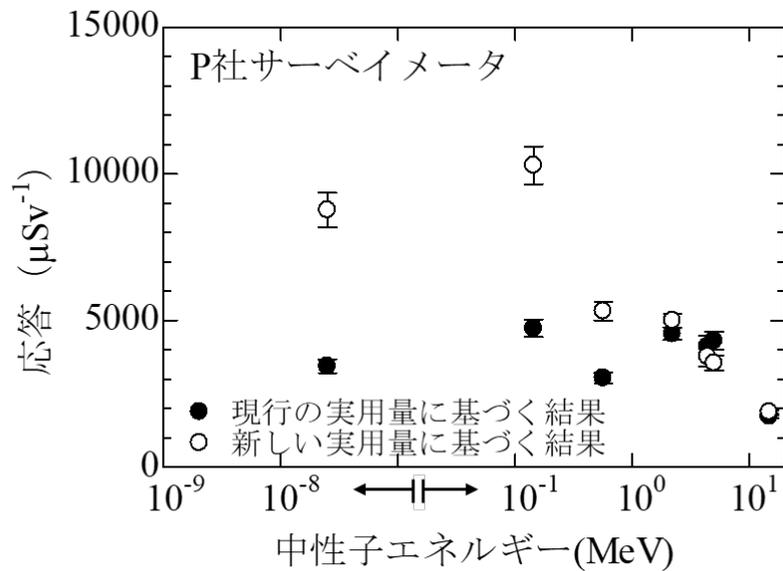


図 4.4.1.4-1 P 社サーベイメータの応答結果

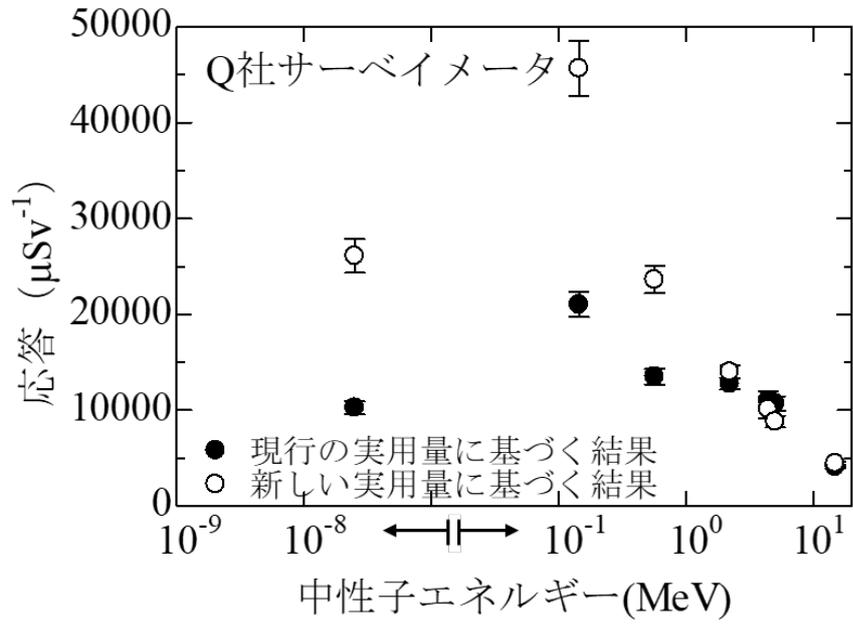


図 4.4.1.4-2 Q 社サーベイメータの応答結果

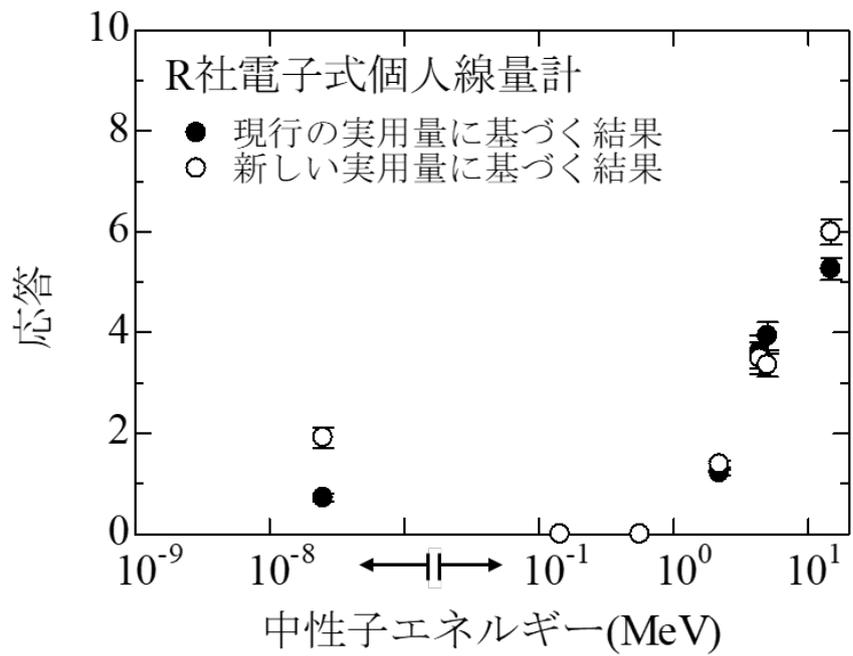


図 4.4.1.4-3 R 社電子式個人線量計の応答結果

令和6年度は受動形個人線量計（以下、S社受動形個人線量計）に対する評価も行った。S社受動形個人線量計のエネルギー応答の評価は、144 keVと14.8 MeVに対して行われた。個人線量計は、バッチ内のセンサー部分が中性子源ターゲットから75 cmになるように設置された。試験では、水ファントム上に図のように5個の線量計を貼り付け照射された。図中黄色丸部分が線量計のセンサー部分であり、ファントム表面の中心点から直径15 cm以内に収まるように貼り付けられた。表4.4.1.4-4と表4.4.1.4-5に144 keV及び14.8 MeVに対する現行の実用量に基づく応答と新しい実用量に基づく応答の両方を示す。本事業で試験を行ったR社電子式中性子線量計（図4.4.1.4-3）では、144 keVに対する応答がゼロに極めて近い結果となるのに対し、今回試験を行ったS社受動形個人線量計では、照射線量に対して1を超える応答が得られた。一方、14.8 MeVに対して、本事業で試験を行ったR社電子式中性子線量計（図4.4.1.4-3）では、2を超える大きな応答であったのに対し、今回試験を行ったS社受動形個人線量計では、1を下回る小さな応答となった。これらの傾向は、新しい実用量が適用されても変わらなかった。表4.4.1.4-4と表4.4.1.4-5では、参考として、得られたX線及び γ 線に対する線量の結果も示している。

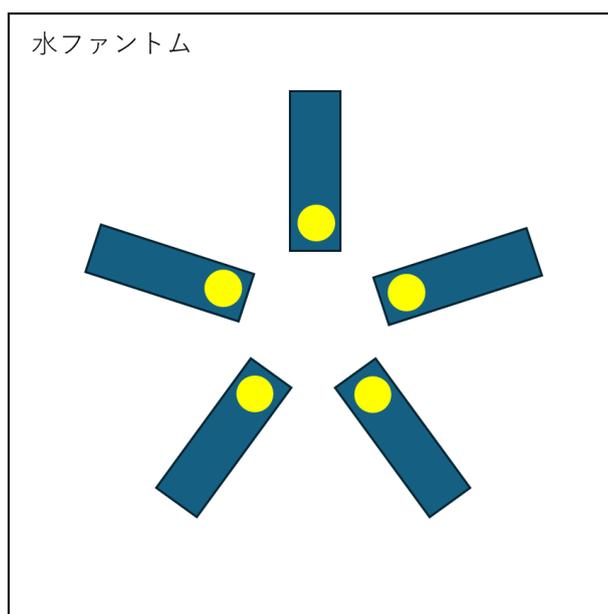


図 4.4.1.4-4 中性子照射時の水ファントム上での受動形中性子線量計の配置

表 4.4.1.4-4 144 keV に対する受動形中性子線量計の結果 (S 社)

| | 応答 | | 中性子指示値 (mSv) | 光子指示値 (mSv) |
|-----|-----------------|-----------------|--------------|-------------|
| | 現行の実用量に基づく結果 | 新しい実用量に基づく結果 | | |
| No1 | 1.31 | 2.99 | 1.3 | 0.2 |
| No2 | 1.51 | 3.45 | 1.5 | 0.2 |
| No3 | 1.31 | 2.99 | 1.3 | 0.2 |
| No4 | 1.31 | 2.99 | 1.3 | 0.1 |
| No5 | 1.61 | 3.68 | 1.6 | 0.2 |
| 平均 | 1.41 (0.08)* | 3.22 (0.18)* | - | - |

*カッコ内は、照射線量の拡張不確かさ($k=2$)のみが含まれる

表 4.4.1.4-5 14.8 MeV に対する受動形中性子線量計の結果 (S 社)

| | 応答 | | 中性子指示値 (mSv) | 光子指示値 (mSv) |
|------|-----------------|-----------------|--------------|-------------|
| | 現行の実用量に基づく結果 | 新しい実用量に基づく結果 | | |
| No6 | 0.32 | 0.36 | 1.3 | 0.1 |
| No7 | 0.34 | 0.39 | 1.4 | 0.1 |
| No8 | 0.32 | 0.36 | 1.3 | 0.1 |
| No9 | 0.34 | 0.39 | 1.4 | 0.1 |
| No10 | 0.32 | 0.36 | 1.3 | 0.1 |
| 平均 | 0.33 (0.02)* | 0.37 (0.02)* | - | - |

*カッコ内は、照射線量の拡張不確かさ($k=2$)のみが含まれる

4.4.2 二次標準機関（日本原子力研究開発機構）における線量計のエネルギー応答と方向特性の評価

本事業で JAEA が実施した線量計の特性調査の結果を以下に記す。

(a) 光子・ β 線用サーベイメータ (A 社製電離箱式サーベイメータ)

JAEA 編 J4.2.1.2 ①に、新たな実用量に対する応答のエネルギー特性および方向特性を図示するとともに、詳細な結果を記す。以下に概要を記す。

・電離箱式ということもあり、現行の実用量に対する光子のエネルギー特性は、光子のエネルギーの変化に対して応答の変化が平坦であり、優れている。 H^* に対する特性も 60 keV

から 1.25 MeV では、変化はほとんどないが、全体的に 2 割程度過大応答する。

・ β 線に対する $D'_{\text{local skin}}$ のエネルギー特性及び方向特性の傾向は、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が、電離箱深さが厚いために特性は良好ではない。図 J4-11 に示されるとおり、S-Cs を利用した H^* で再校正することにより全体的に過小応答することになる。

・ 本機種は 7 keV 以上の光子に対して感度があるとされており、今回調査したエネルギー範囲の下限は 59.5 keV であるが、 H^* と $H^*(10)$ の線量換算係数はこれより低エネルギーの領域でさらに乖離が大きくなるため、この領域での光子に対する H^* 特性を取得し、影響を検討する必要がある。

(b) 光子用エリアモニタ (B 社製据置型 γ 線エリアモニタ)

JAEA 編 J4.2.1.2 ②に、エネルギー特性を図示するとともに、詳細な結果を記す。以下に概要を記す。

・ 検出器として GM 計数管を採用しており、数 100 keV 以下のエネルギーの光子に対しては、現行実用量においても過大応答し特性は良好ではないが、新たな実用量では、この領域での応答はさらに増大する。ただし、本エリアモニタは、定置に据え置いてトレンドを監視する目的のものであり、定置する放射線作業場のエネルギーに近い線質で校正すれば、新たな実用量においても目的に合致した測定を行い得ると考えられる。

(c) 光子・ β 線用電子式個人線量計 (C 社製 DIS 線量計 (体幹部用))

JAEA 編 J4.2.1.2 ③に、エネルギー特性を図示するとともに、詳細な結果を記す。

・ 電離箱検出器をベースとした線量計であるため、光子に対する H_p エネルギー特性は良好ではあるものの、現行実用量では 60 keV 以下の低エネルギー領域で応答は過小である。この特性により既存の線量計を新たな実用量測定に適用する際にその多くで問題となる低エネルギー領域での過大応答性が軽減される。照射角度が大きくなるにつれその応答は過大になるが、図 J4-17 に示されるとおり、S-Cs を利用した H_p で再校正することにより方向特性も含め調査範囲内においては IEC 62387^[23] で示される現行実用量に対する許容範囲内の応答を示した。

・ 光子に関する $D_{p\text{local skin}}$ のエネルギー特性についても現行と変化なく良好であるが、60 keV 以下の低エネルギーで 60° 以上の照射角度が大きい場合には 30% 程度以上過小応答となる。S-Cs を利用した、 H_p で再校正することにより全体的に応答は小さくなり、60 keV 以下では IEC 62387^[23] で示される許容範囲を超えた過小応答を示した。

・ β 線に関する $D_{p\text{local skin}}$ 特性についても現行と変わらないが、 ^{147}Pm については、その過小応答性が新たな実用量では軽減される。方向特性については $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 及び ^{85}Kr のどちらにおいても、角度とともにその応答は小さくなるが、実用量の変更による変化はなく、線量計自身のもつ特性である。光子の場合と同様に S-Cs を利用した、 H_p で再校正することにより

全体的に応答は小さくなる。

(d) 光子用電子式個人線量計 (D 社製電子式個人線量計 (体幹部用))

JAEA 編 J4.2.1.2 ④に、エネルギー特性および方向特性を図示するとともに、詳細な結果を記す。以下に概要を記す。

・S-Am 以外についての特性は令和 5 年度事業報告書^[5]図 J4-133 から取得したものである。

・測定範囲が 40 keV 以上の光子を対象とした線量計であり、40 keV を下回ると急激に応答が低下する。そのため、実用量変更による変化の大きい領域は、線量計の仕様範囲外となるため影響は少ない。全体的な過大応答性については、 H_p で再校正することにより軽減できるものと考えられる。

・60 keV 付近における方向特性については、60° 入射においては 0° と比較して H_p では 1.6 倍程度過大に応答する。本線量計は、60 keV 付近で応答が最大となる特性を有しているため、大きな角度で入射した場合の過大応答性については留意する必要がある。

(e) 光子・ β 線用受動形個人線量計 (E 社製受動形個人線量計 (水晶体用))

JAEA 編 J4.2.1.2 ⑤に、エネルギー特性および方向特性を図示するとともに、詳細な結果を記す。以下に概要を記す。

・光子に対する $D_{p, lens}$ 特性に関しては、エネルギー特性、方向特性とも現行実用量と変わらず良好である。しかしながら、他機種である令和 4 年度事業で試験された E 社製受動形個人線量計 (水晶体用) と同様 (令和 4 年度事業原子力機構報告書^[4]図 4-116)、低エネルギーで応答は過大となっているが、IEC 62387^[23]に規定される許容範囲内に収まっている。

・ β 線に係る $D_{p, lens}$ 特性は、 $H_p(3)$ と比較して $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場の 0° に対する応答も 2 倍以上となるほか、方向依存性も異なり、大きく変化する。本機種は、1 つの素子で光子及び 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り、令和 4 年度事業で試験された E 社製受動形個人線量計 (水晶体用) と同様の課題がある。すなわち、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。一方、方向特性については、現行実用量で 60° 以上の大きな角度で見られた過大応答性は新たな実用量では改善される。

4.4.3 特性評価試験のトレーサビリティ確保に関する調査

産総研および JAEA の FRS でそれぞれ同じ型式の線量計に対して同様の条件で照射試験を実施し、その応答を比較する試験所間比較を行うことで、トレーサビリティ確保に関する調査を行った。

○光子 (X 線・ γ 線)

光子については、受動形個人線量計(体幹部用)を 2 型式、受動形個人線量計(水晶体用)と受動形個人線量計(末端部用)をそれぞれ 1 型式ずつ比較した。表 4.4.3-1 に産総研と JAEA

の FRS で得られた同型式の光子用線量計のエネルギー特性(照射角度 0 度)の対応を示す。
また、図 4.4.3-1～図 4.4.3-4 に各機関で得られた各線量計のエネルギー特性の比較を示す。

調査した全ての型式の受動形個人線量計について、エネルギー特性は両機関で概ね一致している。しかし、以下に示す線量計の特定のエネルギー領域について両機関の結果に差が見られた。

- ・ B 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p 及び $H_p(10)$ に対するエネルギー特性の 100 keV 付近
- ・ B 社製受動形個人線量計(末端部用)の $D_{p \text{ local skin}}$ 及び $H_p(0.07)$ に対するエネルギー特性の 100 keV 付近

上記の各機関の結果に差が見られるが、各図中に示す拡張不確かさ ($k=2$) の範囲内では一致しているため、トレーサビリティの確保として問題となるほどの差ではない。各機関で得られた線量計応答に差が生じた原因としては以下のようなものが考えられる。

- ・ B 社製の受動形個人線量計(体幹部用)と受動形個人線量計(末端部用)のエネルギー特性には、100 keV 付近で特徴的な変曲が確認できる。単色エネルギーの γ 線とは異なり、X 線場のエネルギー分布は広がった連続分布であり、ISO-4037-1^[18]で示す半価層の値を基準に X 線の線質は各機関の評価により作成されるが、それぞれの X 線場のエネルギー分布には差がある可能性がある。線量計応答の変化の幅が大きいエネルギー領域で、2 機関の同 X 線質のエネルギー分布の差が結果に影響した可能性がある。

また、トレーサビリティ確保の上で問題となるその他の影響を以下に述べる。

- ・ 受動形個人線量計(末端部用)の試験に使用するロッドファントムは、スラブファントムやシリンダファントムと比較して軽量で動きやすいため、固定する必要がある。しかし、ロッドファントムの固定方法に定めはなく、固定治具による散乱線の影響や基準位置からのずれの影響が各機関の照射場で異なる可能性がある。
- ・ A 社製の受動形個人線量計(体幹部用)には、衣服への取り付けのためのクリップが存在し、各機関において同条件で照射試験を行う必要があったが、産総研ではクリップを使用し、JAEA の FRS での試験の際にはクリップを使用していなかった。このクリップの有無は、スラブファントムとガラス検出素子との距離を変化させるため、スラブファントムからの散乱線の寄与に影響することが予想されるが、各機関のエネルギー特性に有意な差は確認されなかった。

表 4.4.3-1 各機関で得られた光子用線量計エネルギー特性の対応

| 線量計 | 産総研(AIST) | JAEA の FRS |
|--------------------|-----------------------------|---|
| 受動形個人線量計 (体幹部用) | 図 4.4.1.2-1 (令和 6 年度, A 社製) | 図 J 4-58 (令和 5 年度, F 社製) |
| 受動形個人線量計 (体幹部用) | 図 4.4.1.2-2 (令和 6 年度, B 社製) | 図 4-103 (令和 4 年度, D 社製)及 び図 J 4-74 (令和 5 年度, G 社製) |
| 受動形個人線量計 (水晶体用) | 図 4.4.1.2-4 (令和 6 年度, B 社製) | 図 4-111 (令和 4 年度, E 社製)及び 図 J 4-95 (令和 5 年度, I 社製) |
| 受動形個人線量計 (末端部用) | 図 4.4.1.2-6 (令和 6 年度, B 社製) | 図 J 4-98 (令和 5 年度, J 社製) |

括弧内は各図を記載している事業成果報告書の年度と製造者の識別記号を示す。

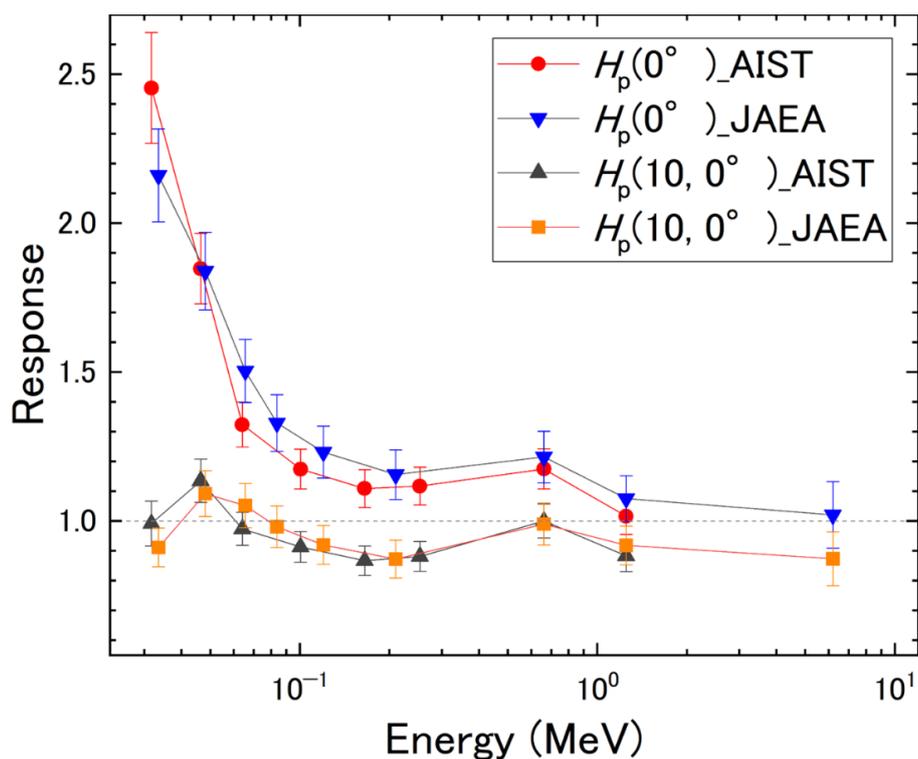


図 4.4.3-1 産総研(AIST)及び JAEA-FRS で評価された A 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p 及び $H_p(10)$ に対する光子エネルギー特性の比較 (S-Cs $H_p(10, 0^\circ)$ で校正 (規格化))

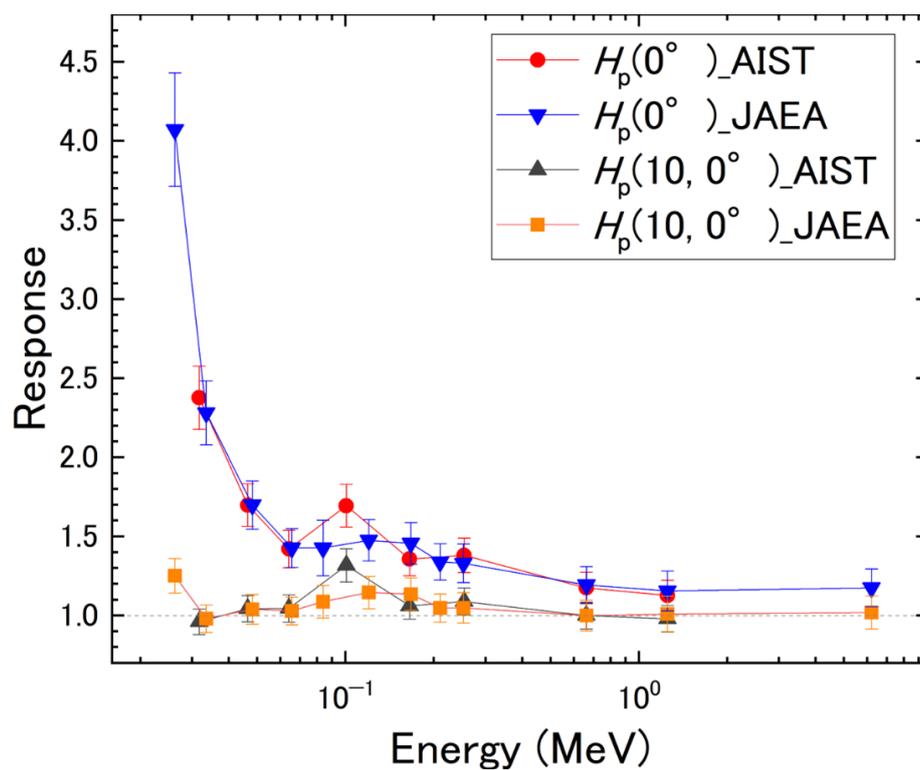


図 4.4.3-2 産総研(AIST)及び JAEA-FRS で評価された B 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p 及び $H_p(10)$ に対する光子エネルギー特性の比較 (S-Cs $H_p(10, 0^\circ)$ で校正 (規格化))

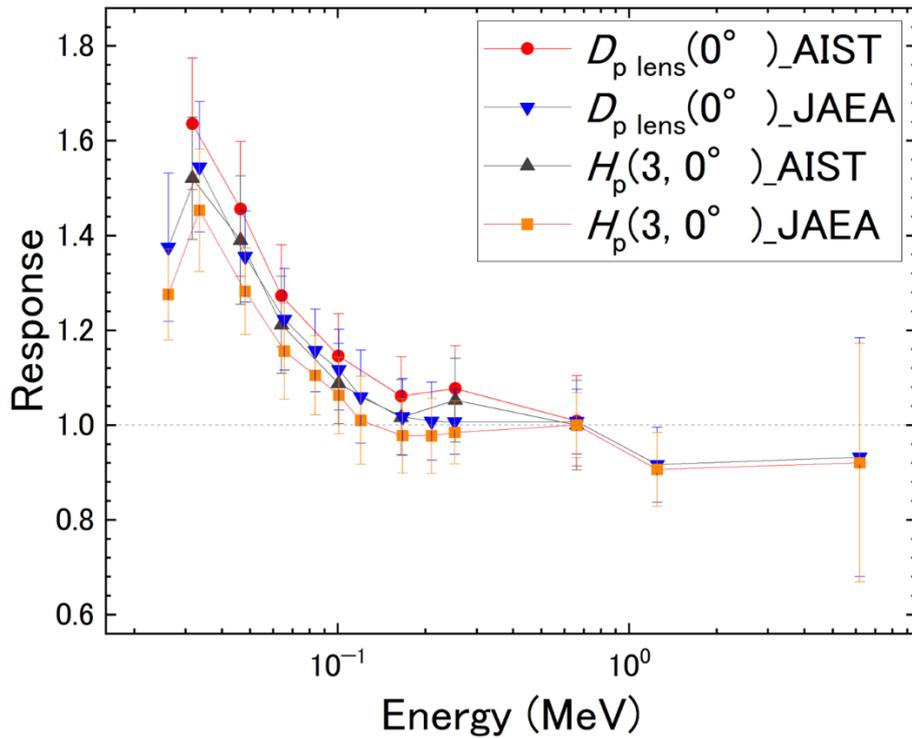


図 4.4.3-3 産総研(AIST)及び JAEA-FRS で評価された B 社製受動形個人線量計(水晶体用)の $D_{p\text{ lens}}$ 及び $H_p(3)$ に対する光子エネルギー特性の比較 (S-Cs $H_p(3, 0^\circ)$)で校正 (規格化)) JAEA-FRS の蛍光 X 線に対する応答の結果は、図の見やすさの観点から記載していない。

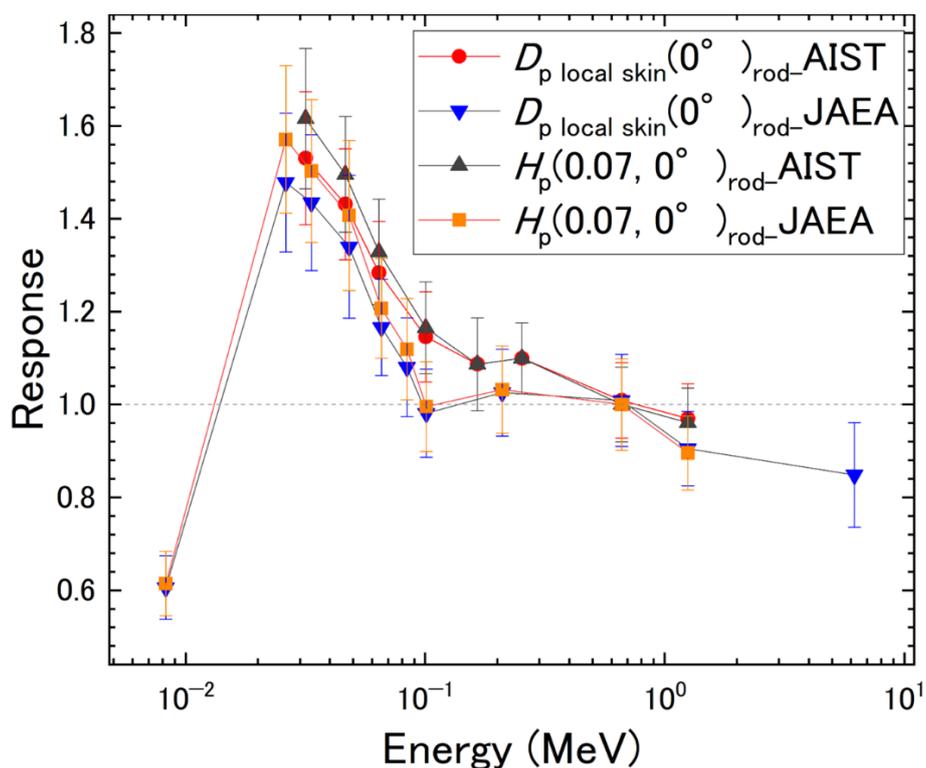


図 4.4.3-4 産総研(AIST)及び JAEA-FRS で評価された B 社製受動形個人線量計(末端部用)の $D_p \text{ local skin}$ 及び $H_p(0.07)$ に対する光子エネルギー特性の比較 (S-Cs $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正 (規格化))

○β線

本事業では JAEA が過去に測定した 3 種類の受動形線量計について、産総研のβ線照射場においても照射試験を実施した。産総研における試験の条件及び結果は 4.4.1.3 に述べたとおりである。以下に 3 種類の線量計について比較した結果を述べる。

・体幹部用ガラス線量計 B1

令和 5 年度事業 JAEA 報告書^[5]の図 J 4-69 から図 J 4-73 に示した F 社製受動形線量計の応答と比較した。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場については JAEA 報告書においては、現行の実用量に対する応答及び ICRU Report 95 に示された実用量に対する応答の差はわずかであり、この点において本事業の結果と一致している。また ^{85}Kr 場については、新たな実用量に対する応答の方がやや大きい値を示しており、この点も本事業の結果と同様である。

産総研と JAEA で得られた応答の方向特性の結果の比較を、図 4.4.3-5 から図 4.4.3-8 に示す。いずれの実用量についても、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場においては JAEA・産総研共に 0 度でおよそ 1 の応答が照射角度の増加と共に単調減少し、60 度において 0.6 を下回る。また ^{85}Kr 場については JAEA・産総研共に 0 度でおよそ 1 より少し大きい応答が照射角度の増加と共に減少し、60 度において 0.9~1 の値を示す。このように同様の方向特性を示す結果を得た。以

上のように線量計 B1 の試験結果からは、新たな実用量を導入した場合のトレーサビリティに大きな問題はないと考えられる。

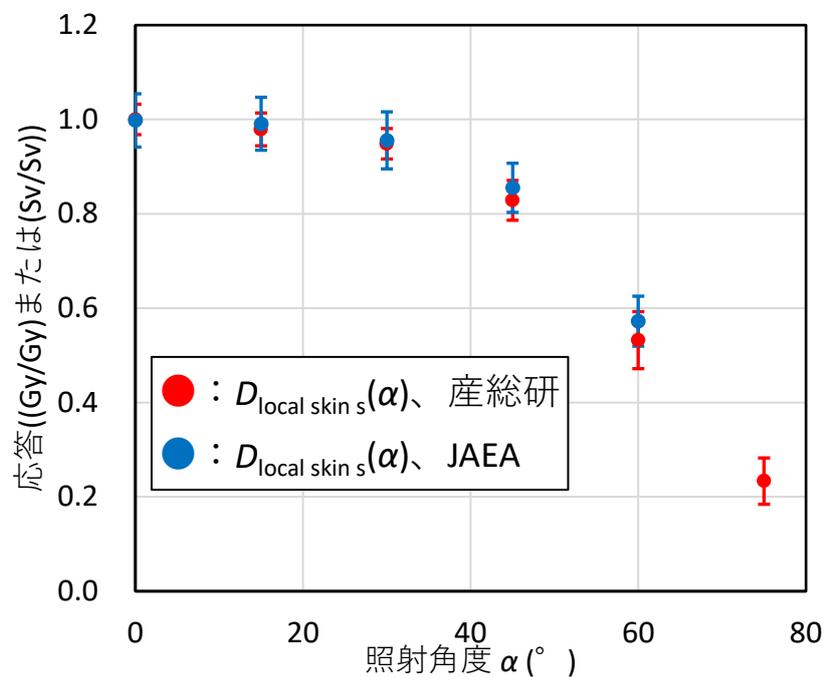


図 4.4.3-5 産総研及び JAEA で評価された体幹部用ガラス線量計 B1 の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における局所皮膚吸収線量に対する応答の方向特性の比較。0度で規格化。

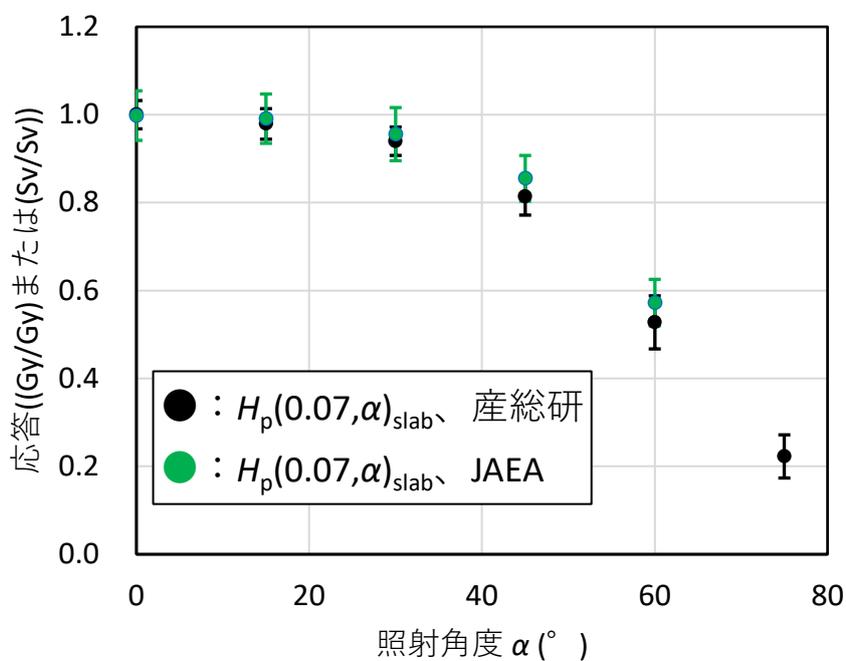


図 4.4.3-6 産総研及び JAEA で評価された体幹部用ガラス線量計 B1 の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における $H_p(0.07, \alpha)_{slab}$ に対する応答の方向特性の比較。0度の応答で規格化。

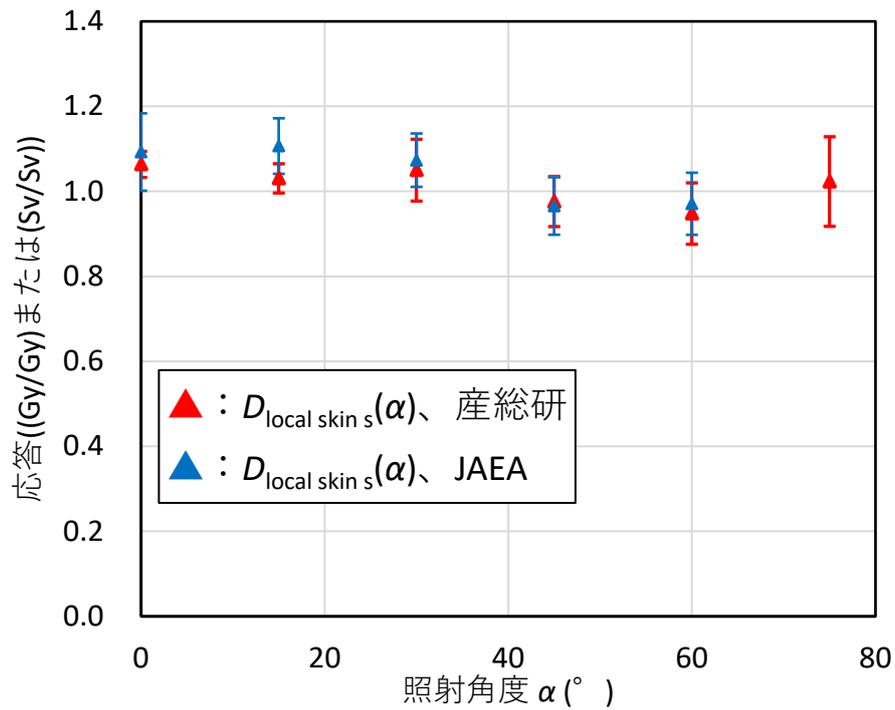


図 4.4.3-7 産総研及び JAEA で評価された体幹部用ガラス線量計 B1 の ^{85}Kr 場における局所皮膚吸収線量に対する応答の方向特性。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場の 0 度の応答で規格化。

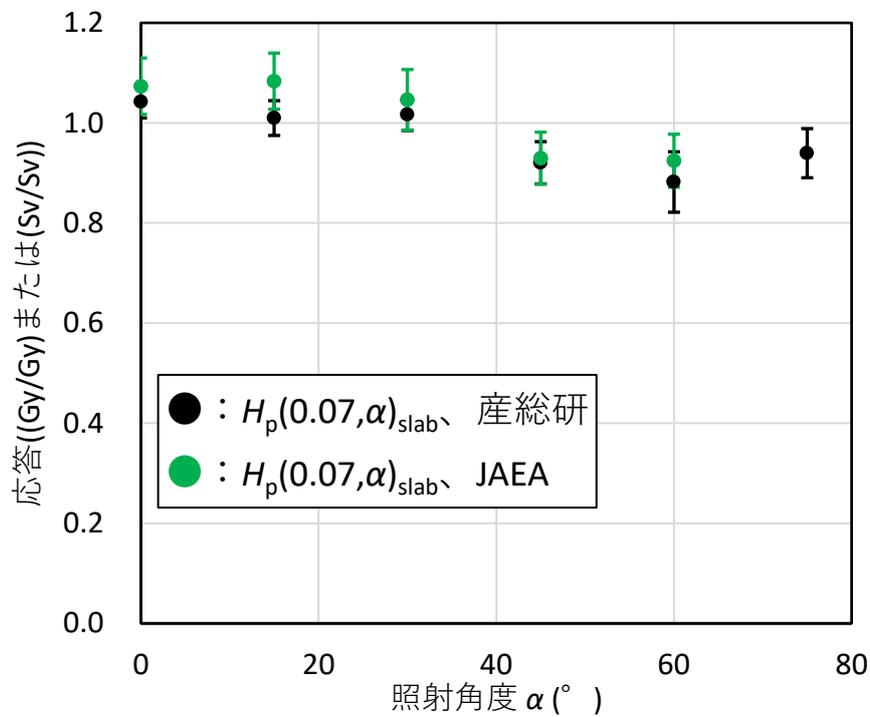


図 4.4.3-8 産総研及び JAEA で評価された体幹部用ガラス線量計 B1 の ^{85}Kr 場における $H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}$ に対する応答の方向特性。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場の 0 度の応答で規格化。

・体幹部用 OSL 線量計 B2

令和 4 年度事業 JAEA 報告書^[4]の図 4-109、図 4-110 に示した D 社製受動形線量計の応答と比較した。⁹⁰Sr/⁹⁰Y 場について現行の実用量及び ICRU Report 95 に示された実用量に対する応答の差がわずかであるという点、及び ⁸⁵Kr 場について新たな実用量に対する応答の方がやや大きい値で一致した結果を得た。

産総研と JAEA で得られた応答の方向特性の結果の比較を、図 4.4.3-9 から図 4.4.3-12 に示す。⁹⁰Sr/⁹⁰Y 場及び ⁸⁵Kr 場ともに、新たな実用量と現行の実用量のいずれについても、0 度から 30 度の結果はよく一致しているが、45 度から 75 度において応答の値が異なる。4.4.1.3 で述べたように、本事業では受動形線量計の読み取りを行った試験所に対して放射線の種類と照射角度の情報を提供しており、この情報が B2 による個人線量当量の算出に加味され影響を受けている可能性がある。よって線量計 B2 と D 社受動形線量計とのデータの比較は、トレーサビリティ確保の検討には適していないと考えられる。

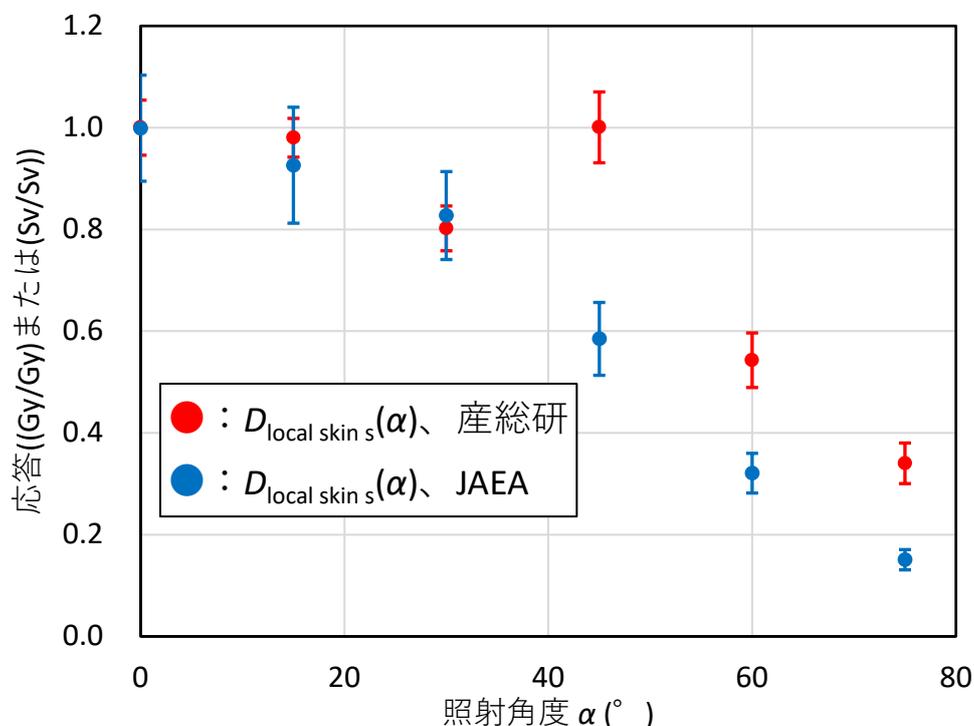


図 4.4.3-9 産総研及び JAEA で評価された体幹部用 OSL 線量計 B2 の ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 場における局所皮膚吸収線量に対する応答の方向特性の比較。0 度で規格化。

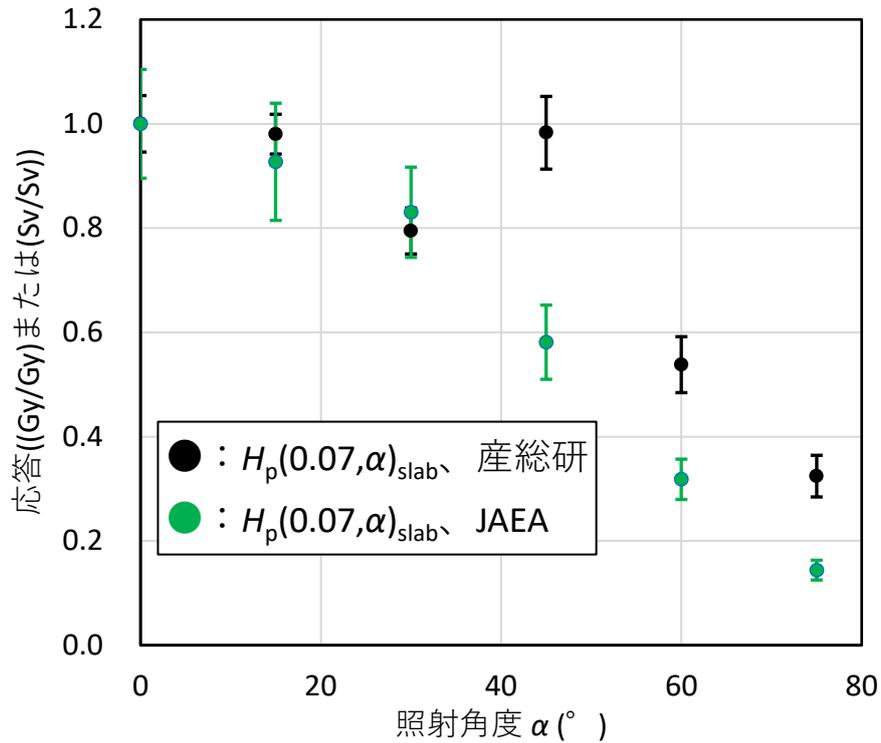


図 4.4.3-10 産総研及び JAEA で評価された体幹部用 OSL 線量計 B2 の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における $H_p(0.07, \alpha)_{slab}$ に対する応答の方向特性の比較。0 度の応答で規格化。

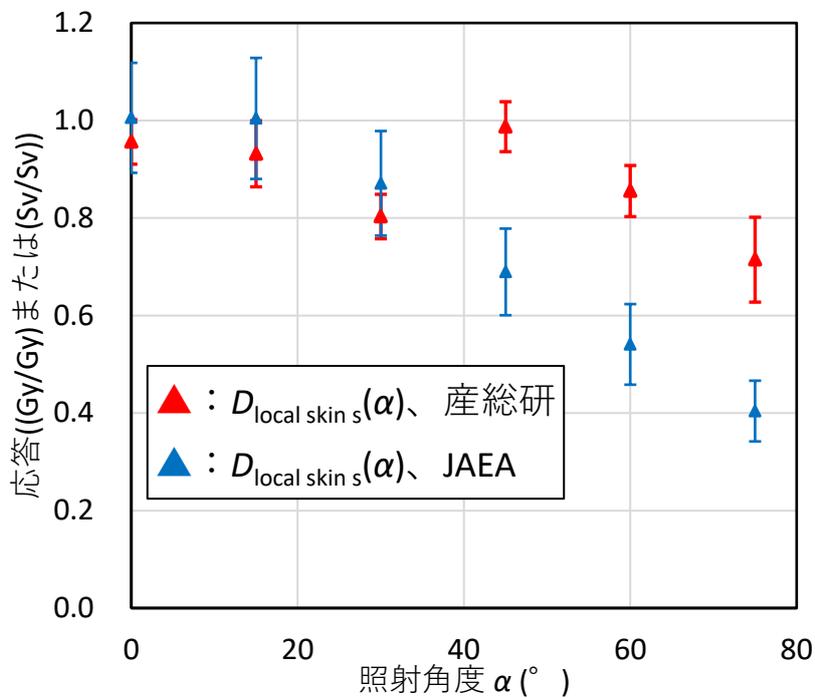


図 4.4.3-11 産総研及び JAEA で評価された体幹部用 OSL 線量計 B2 の ^{85}Kr 場における局所皮膚吸収線量に対する応答の方向特性の比較。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場の 0 度の応答で規格化。

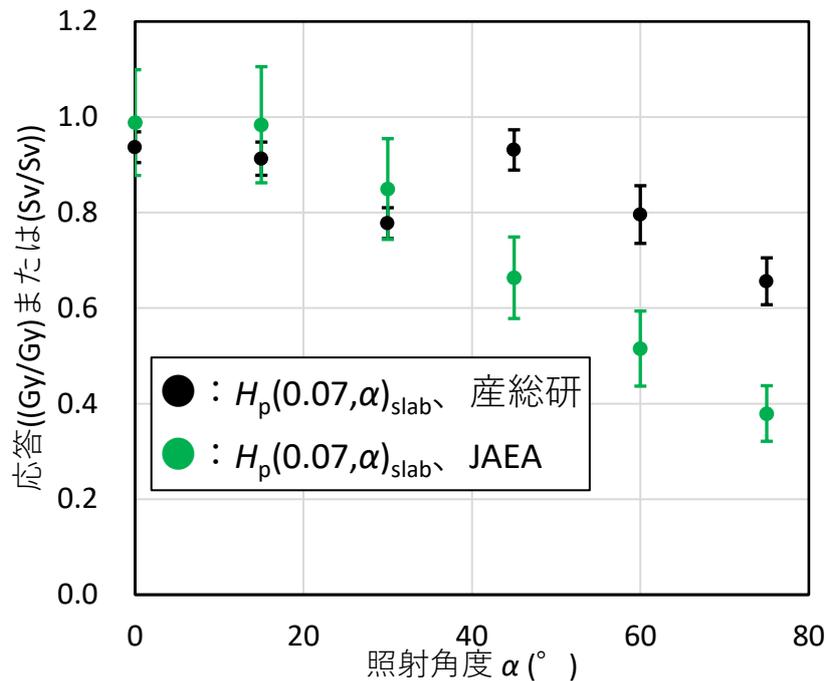


図 4.4.3-12 産総研及び JAEA で評価された体幹部用ガラス線量計 B2 の ^{85}Kr 場における $H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}$ に対する応答の方向特性の比較。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場の 0 度の応答で規格化。

・ 水晶体 TLD 線量計 E2

令和 4 年度事業 JAEA 報告書^[4]の図 4-117 に示された E 社製受動形線量計の応答と比較した。産総研と JAEA で得られた応答の方向特性の結果の比較を、図 4.4.3-13 と図 4.4.3-14 に示す。現行の実用量に対する応答の方向特性と ICRU Report 95 に示された実用量に対する応答の方向特性が大きく異なるという点で一致した結果を得た。

いずれの実用量に対する応答についても JAEA と産総研の結果は 0 度から 60 度の範囲でよく一致した。75 度の結果は、応答の値としては差が見られるが不確かさの範囲内では一致している。より詳しく調査するためには、さらに多くの線量を照射することにより受動形線量計による個人線量当量測定のみならず、さらにはばらつきを低減するにはまとまった試験時間を確保する必要がある。以上のように新たな実用量を導入した場合のトレーサビリティに大きな問題はないと考えられるが、75 度については今後の調査が期待される。

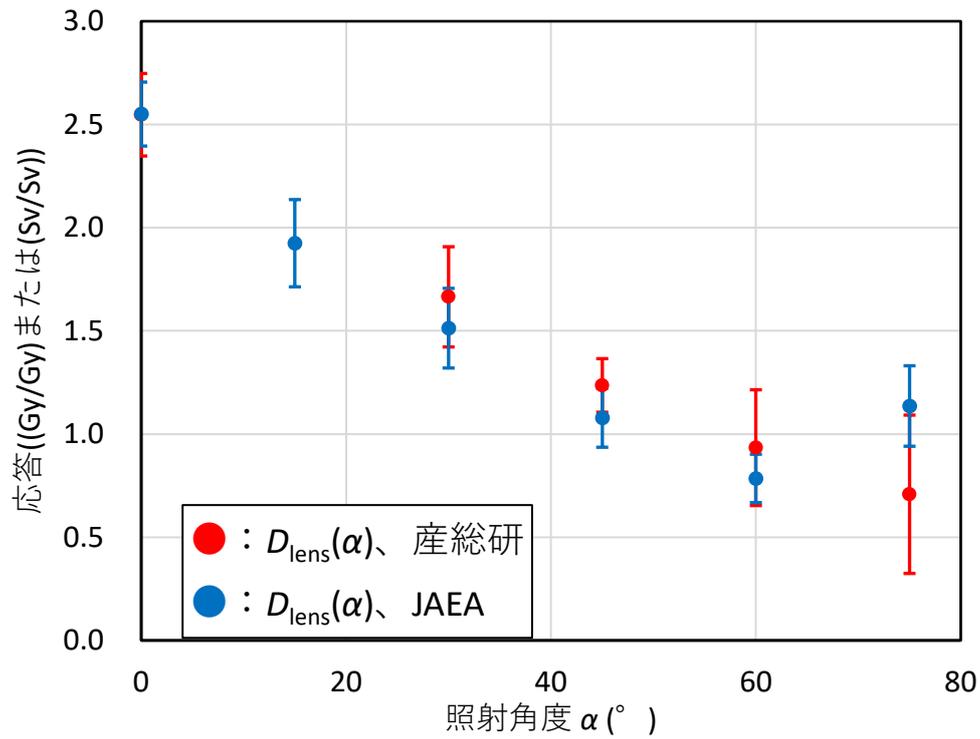


図 4.4.3-13 産総研及び JAEA で評価された水晶体 TLD 線量計 E2 の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における水晶体吸収線量に対する応答の方向特性の比較。0度で規格化。

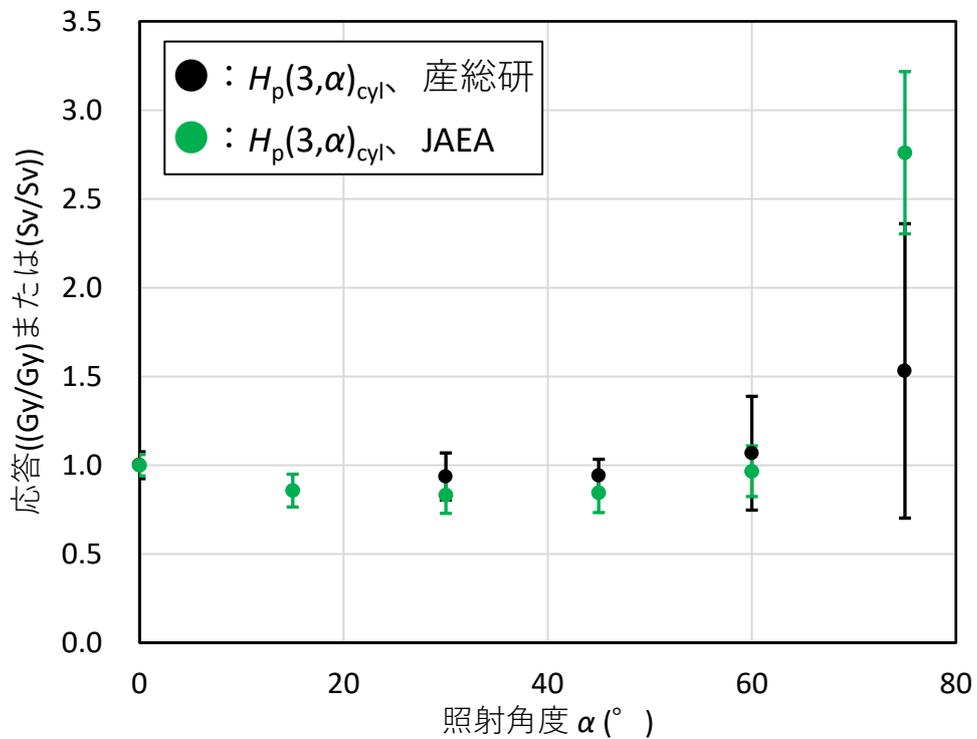


図 4.4.3-14 産総研及び JAEA で評価された水晶体 TLD 線量計 E2 の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における $H_p(3, \alpha)_{\text{cyl}}$ に対する応答の方向特性の比較。0度の応答で規格化。

○中性子

中性子のトレーサビリティ確保に関する調査として、過去に JAEA において測定された中性子電子式個人線量計（以下、T 社中性子個人線量計、令和 4 年度 JAEA 編 F 社製中性子用電子式個人線量計（表 4-39）^[4]）を、産総研の中性子標準場において測定した。本項目では、T 社中性子個人線量計に対する方向特性の試験も含まれる。

JAEA で実施されたエネルギーと同じ 5 MeV に対し線量計の校正と方向特性試験を行った（図 4.4.3-15）。追加で 14.8 MeV に対しても校正及び方向特性試験（図 4.4.3-16）を行ったので、報告する。

表 4.4.3-2 及び表 4.4.3-3 は 5 MeV、14.8 MeV に対する結果である。表 4.4.3-2 及び表 4.4.3-3 に記載の不確かさは、照射した中性子個人線量当量のみが考慮されており、線量計指示値の不確かさは含まれていない。線量計指示値の不確かさを考慮するためには、有効自由度が 10 を超えるまで繰り返し測定を行う必要があるが、今回の試験では行われていない。方向特性試験は、令和 5 年度事業^[5]で作製した治具を用いて行われた。

5 MeV での現行実用量 Hp (10) 及び新たな実用量 Hp への対応についての JAEA の結果との比較を、図 4.4.3-17 及び図 4.4.3-18 に示す。JAEA の結果の不確かさにも線量計指示値の不確かさは含まれていない。産総研と JAEA の結果には、差異が見られる。同一条件で試験を行った結果、0 度、30 度、60 度に対して、それぞれ 14 %、20 %、37 %、産総研のデータが大きくなっている。5 MeV の中性子フルエンスについては、産総研と JAEA の間では、産総研で jcss 校正された減速材付き中性子検出器を仲介検出器としてトレーサビリティが確立している。また、これまでに本事業では用いていない受動形線量計の産総研及び JAEA 間比較^[27]において整合性が確認されている。差異の原因の一つの可能性は、線量計内の統計による不確かさである。過去の海外標準研究所とのプライベートコミュニケーションでは、統計の不確かさを 1 % 以下にするためには 10 mSv を超える照射が必要であるという議論もあった。今回は、産総研では 0.5 mSv 程度の照射、JAEA では 1 mSv 程度の照射であるため、本事業での結果には大きな統計不確かさが含まれている可能性がある。また、今回対象とした T 社中性子個人線量計の機種固有の要因の可能性もあり、将来的に、本事業におけるプロトコルの詳細検討などを行い、データ検証を行う必要がある。

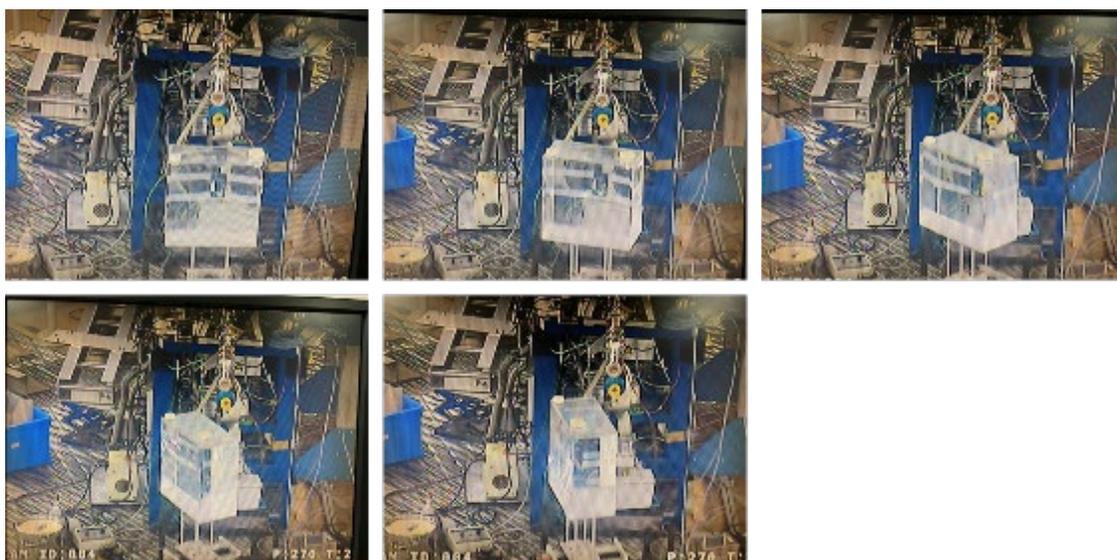


図 4.4.3-15 5 MeV 方向特性試験の様子 (モニタカメラ越しの撮影)

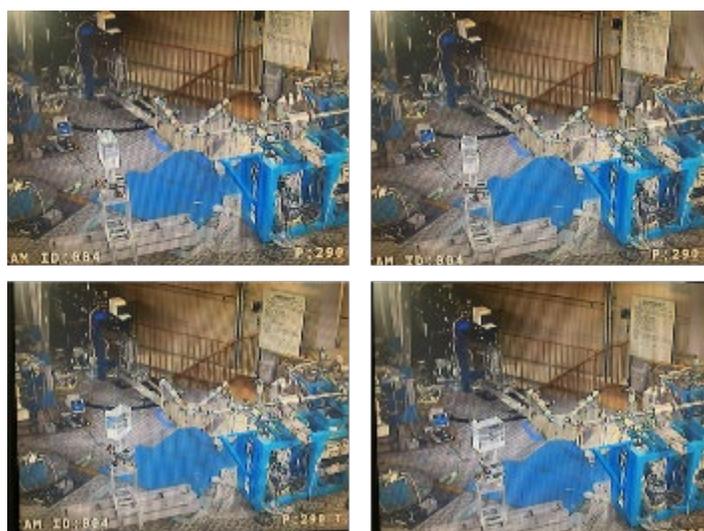


図 4.4.3-16 14.8 MeV 方向特性試験の様子 (モニタカメラ越しの撮影)

表 4.4.3-2 5 MeV 中性子に対する応答の方向特性 (T 社中性子個人線量計)

| 角度 | 応答 | | 中性子指示値 (mSv) | 光子指示値 (mSv) |
|-----|-----------------|-----------------|--------------|-------------|
| | 現行の実用量に基づく結果 | 新しい実用量に基づく結果 | | |
| 0° | 1.22 (0.09)* | 1.04 (0.08)* | 0.694 | 0.006 |
| 15° | 1.06 (0.08)* | 0.91 (0.07)* | 0.598 | 0.007 |
| 30° | 0.86 (0.06)* | 0.79 (0.06)* | 0.505 | 0.007 |
| 45° | 0.61 (0.05)* | 0.59 (0.04)* | 0.357 | 0.007 |
| 60° | 0.45 (0.03)* | 0.46 (0.03)* | 0.251 | 0.006 |
| 75° | 0.41 (0.03)* | 0.40 (0.03)* | 0.19 | 0.006 |

*カッコ内の数字は、照射線量に対する拡張不確かさ ($k=2$)

表 4.4.3-3 14.8MeV 中性子に対する応答の方向特性 (T 社中性子個人線量計)

| 角度 | 応答 | | 中性子指示値 (mSv) | 光子指示値 (mSv) |
|-----|-----------------|-----------------|--------------|-------------|
| | 現行の実用量に基づく結果 | 新しい実用量に基づく結果 | | |
| 0° | 2.23 (0.12)* | 2.59 (0.13)* | 2.643 | 0.012 |
| 15° | 2.13 (0.11)* | 2.43 (0.12)* | 2.482 | 0.012 |
| 30° | 1.73 (0.09)* | 2.08 (0.11)* | 2.158 | 0.013 |
| 45° | 1.67 (0.09)* | 2.05 (0.10)* | 1.973 | 0.013 |
| 60° | 1.17 (0.06)* | 1.55 (0.08)* | 1.624 | 0.014 |
| 75° | 1.02 (0.05)* | 1.35 (0.07)* | 1.064 | 0.012 |

*カッコ内の数字は、照射線量に対する拡張不確かさ ($k=2$)

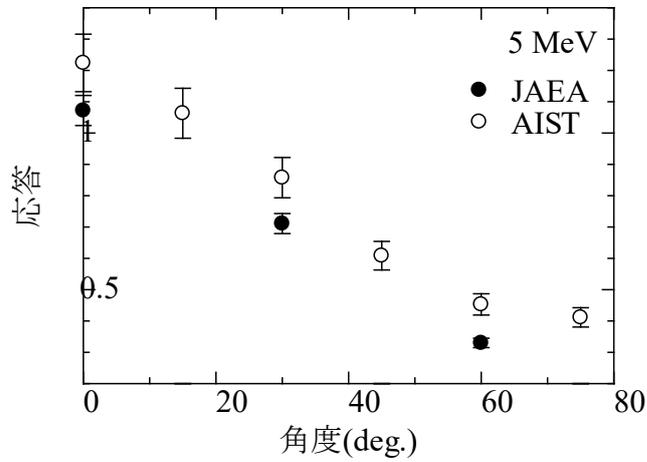


図 4.4.3-17 現行の実用量を用いた結果に対する産総研と JAEA の結果の比較

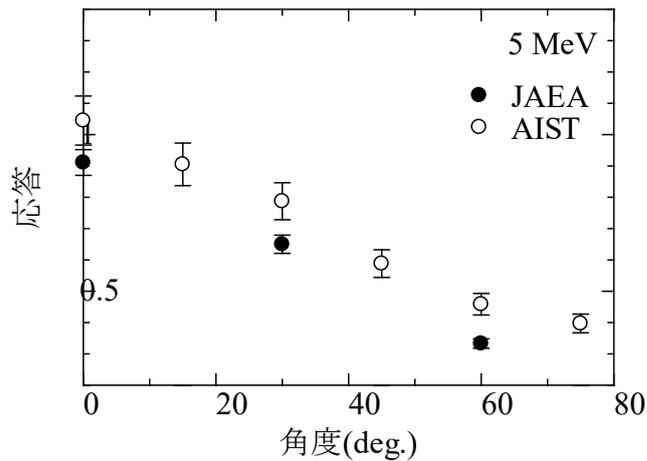


図 4.4.3-18 新しい実用量を用いた結果に対する産総研と JAEA の結果の比較

トレーサビリティの詳細を検証するためには、中性子エネルギーに対する応答が平坦な検出器が必要となる。令和 5 年度事業において作製した中性子用ロングカウンタが有力候補になる。本年度、モンテカルロシミュレーション(MCNP6.2)によってその特性を詳細に検証した^[24]。0.1 eV~1 eV、1 eV~10 eV、10 eV~10 MeV、10 MeV~20 MeV の 4 群に分けて平坦性を検証し、単色中性子標準場において散乱中性子成分が多くなる 10 eV 以下において応答が小さく、10 eV~10 MeV のエネルギー範囲で産総研中性子標準場において運用中のロングカウンタと比較して平坦応答性が向上した。また、一般的に 10 MeV~20 MeV の応答は、10 eV~10 MeV の範囲の応答と比較して急激に小さくなるが、本事業のロング

カウンタは、運用中のロングカウンタと比較して応答の小さくなる割合も抑えられた。したがって、加速器を用いた中性子標準場で利用する 1 keV~20 MeV のエネルギー範囲において本事業のロングカウンタは運用中のロングカウンタに比べて平坦応答性が向上していることが明らかになった。

4.5 線量計の校正定数の決定と個人線量管理上の課題に関する調査

4.5.1 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

4.5.1.1 原子炉施設等の光子場に関する調査および解析

JAEA 編 J4.3.1 に作業場の選定、光子スペクトルの取得、実用量の評価について図示するとともに、詳細な結果を示す。以下に概要を記す。

・原子力施設及び放射線使用施設において光子による有意な外部被ばく源があり、令和 5 年度事業までに評価されていない放射線作業場として、廃止措置中の原子炉施設、ホットラボ施設及び建屋式保管廃棄施設の放射線作業場を選定し、光子スペクトルを入手した。

・選定した作業場において、2"φ×2"NaI(Tl)検出器 (BNC 社製 SAM940 Model 940-2-G 図 J4-35 参照) を用いて取得されたスペクトル (パルス波高分布) を入手した。パルス波高分布から検出器の応答関数を用いてアンフォールディング処理を行い、光子エネルギースペクトルを得た。

・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 校正場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。

4.5.1.2 医療施設における光子場に関する調査および解析

長崎大学病院の画像下治療 (IVR; Interventional Radiology) を行う施設で、治療時の術者の被ばく環境の調査を行った。X 線照射装置は患者の下部の位置にあり、X 線は基本的に上方向に照射される。患者の位置にファントムを設置し、ファントム中心 (床面から 105 cm) に対して、異なる位置 (距離、高さ) でエネルギー分布と線量率の測定を実施した。IVR 用の X 線照射装置の管電圧は、照射時に得られる画像からのフィードバックにより自動で調整されるため、ファントム厚さに依存し、管電圧と管電流が変化する。そのため、標準的に用いられるファントム厚さを 20 cm とし、ファントムの厚さに対する変化についても測定を行った。

エネルギー分布の測定には、Kromek 社製の薄型 CdZnTe 半導体検出器 GR05+ (結晶サイズ: 5 mm×5 mm×5 mm) を使用した。高線量率での検出器の計数飽和を避けるため、厚さ 5 cm、内径 5 mm の鉛コリメータを検出器の前方に置き、検出器の周囲も鉛製の遮蔽箱で覆った。CdZnTe 半導体検出器を用いた測定の様子を図 4.5.1.2-1 に示す。



図 4.5.1.2-1 長崎大学病院 IVR 施設での測定の様子

検出器の設置高さをファントム中心の高さと同程度とし、ファントム厚さ 20 cm の際にファントム中心からの距離毎に得られた波高分布を図 4.5.1.2-2 に示す。ファントム中心から検出器の距離は、1.5 m、2.5 m 及び 3.2 m とした。ファントム厚さ 20 cm における管電圧の値は 78 kV、管電流は 6.5 mA だった。1.5 m 及び 2.5 m の距離での測定では、最大エネルギー（管電圧）以上にカウントが存在する。これはファントム中心からの距離が近いほど計数率は高くなるため、検出器の分解時間における 2 光子以上の同時計数によるパイルアップの影響だと考えられる。それぞれの波高分布は最大エネルギー 78 keV から検出器感度下限の約 10 keV にわたって分布しており、共通して 40 keV 付近を最大値としている。

次に、ファントム厚さ ± 5 cm の違いに依るエネルギー分布の変化を調査するため、パイルアップの影響が小さい距離 2.5 m で各条件の測定を行った。その結果を図 4.5.1.2-3 に示す。ファントム厚さ 15 cm、25 cm の際の管電圧はそれぞれ 69 kV、96 kV、管電流はそれぞれ 4.8 mA、5.8 mA だった。エネルギー分布の形の比較のため、図の縦軸は各条件での最大計数値で規格化されている。各条件の最大エネルギーが異なるため、高エネルギー側での

分布に差があるが、計数率が最大となるエネルギーはいずれも 40 keV 程度だった。

続いて、術者の不均等被ばくについても調査するため、検出器及びコリメータの設置位置を地面から 134 cm の高さまで上げ、コリメータの穴がファントムの中心を向くように傾けて（地面に対し約 22° ）設置し、測定を行った。各ファントム厚さ（管電圧）で得られた波高分布を図 4.5.1.2-4 に示す。コリメータの傾き設定の都合上、測定はファントム中心からの距離が 112 cm で行われたため、パイルアップの影響が図 4.5.1.2-3 と比較して大きい。しかし、同ファントム厚さ 20 cm（管電圧：78 kV）における異なる高さで得られた波高分布の比較を示す図 4.5.1.2-5 から分かるように、2つの波高分布（地面からの高さ 105 cm と 134 cm）はほとんど同じである。

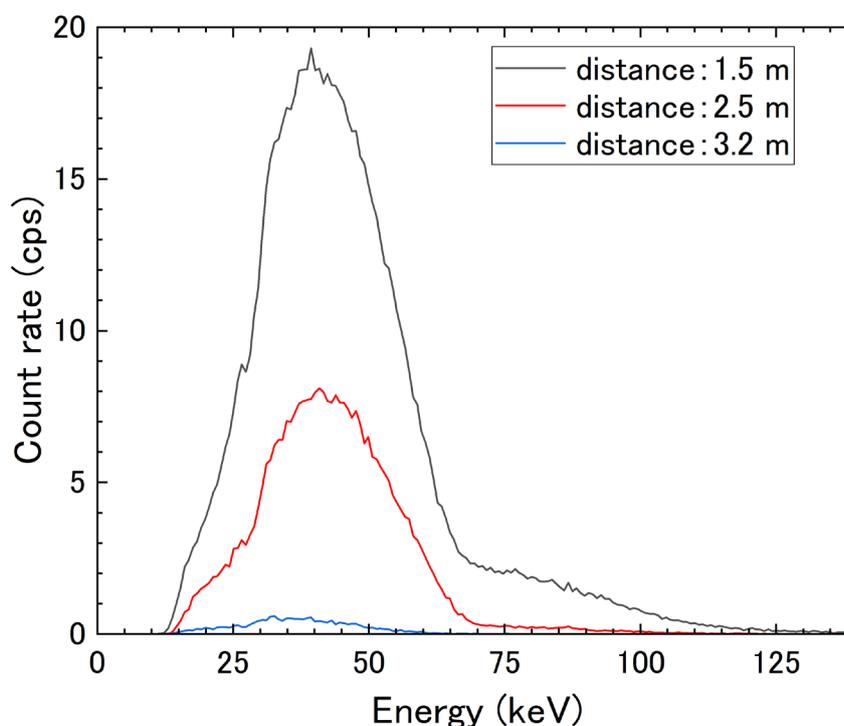


図 4.5.1.2-2 IVR 施設において薄型 CdZnTe 半導体検出器により測定された波高分布（ファントム中心からの距離毎の比較、管電圧：78 kV）

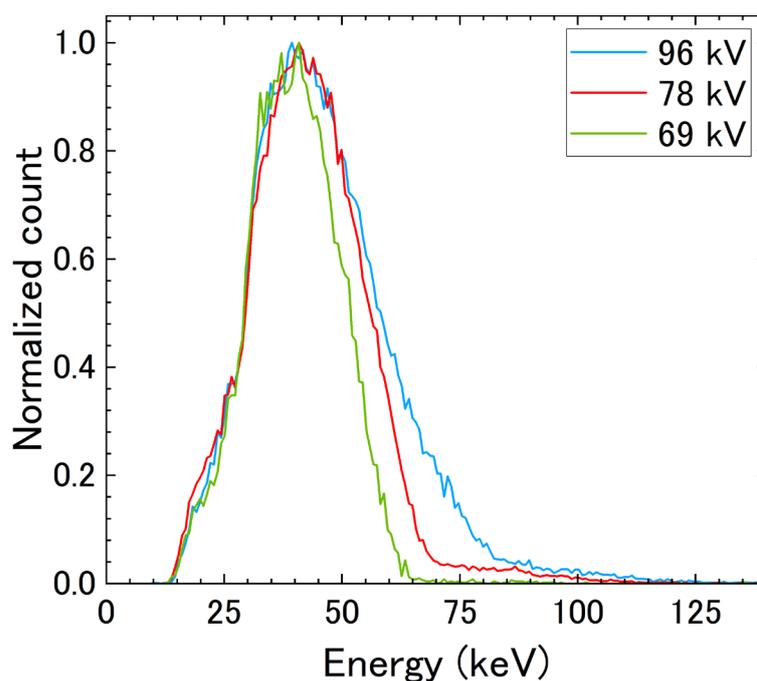


図 4.5.1.2-3 IVR 施設において薄型 CdZnTe 半導体検出器をファントム中心からの距離：250 cm、地面からの高さ:105 cm に設置した際に測定された波高分布（管電圧毎の比較）

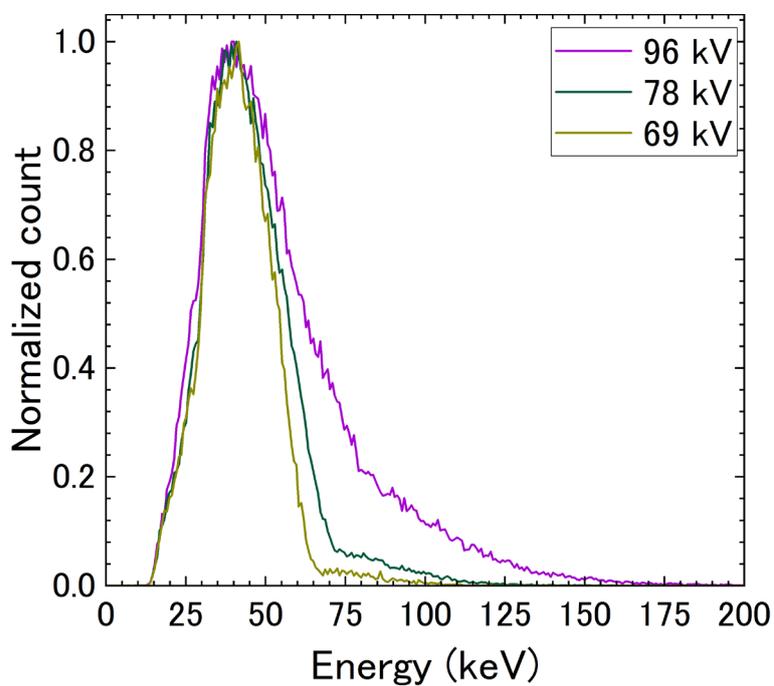


図 4.5.1.2-4 IVR 施設において薄型 CdZnTe 半導体検出器をファントム中心からの距離：112 cm、地面からの高さ:134 cm に設置した際に測定された波高分布（管電圧毎の比較）

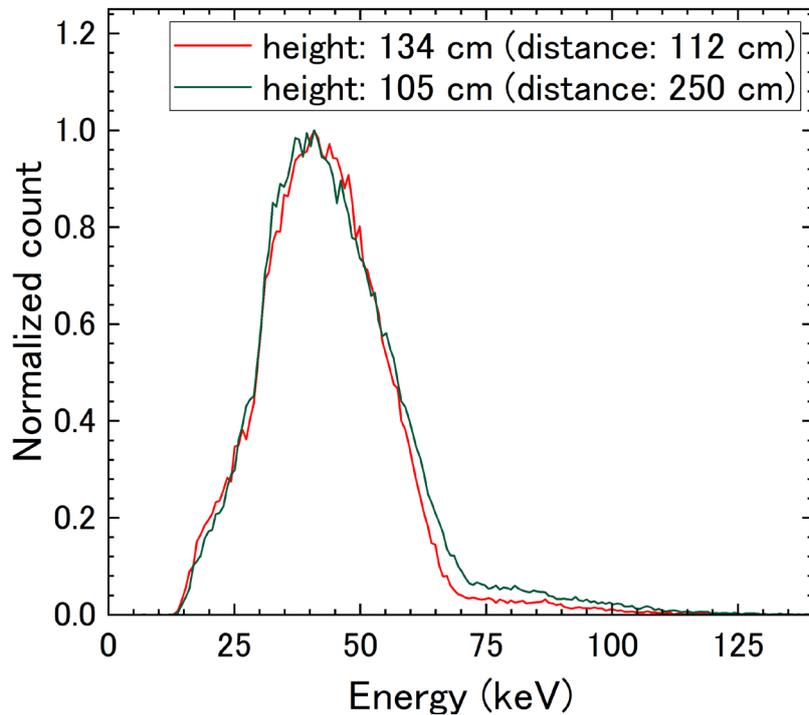


図 4.5.1.2-5 IVR 施設において薄型 CdZnTe 半導体検出器により測定された波高分布（地面からの高さ毎の比較、管電圧：78 kV）

IVR 施設での線量率の測定には、応用技研製の電離箱式サーベイメータ AE-133B を使用した。本測定器はビルドアップキャップを付け替えることにより、1 cm 周辺線量当量率と 3 mm 線量当量率の測定が可能である。サーベイメータによる各測定の指示値は、1 分間の平均値として得られ、照射時の指示値から照射していない時の指示値をバックグラウンドとして差し引いて正味の線量率を得た。また、各指示値は空気密度の補正（基準環境条件：22°C、1013.25 hPa）が適用された。サーベイメータの線量率測定の結果を表 4.5.1.2-1 に示す。ファントム中心からの距離毎の線量率は、110 cm では 250 cm の 6.7 倍～7.1 倍にまで及んだ。これは点線源を仮定した場合の距離の二乗に伴う減衰（5.2 倍）よりも大きく、空気による吸収の影響などが考えられる。ファントム厚さによる違いは、20 cm 厚さ（管電圧：78 kV）に対し、-5 cm の厚さ（管電圧：69 kV）で線量率は 0.37 倍～0.41 倍であり、+5 cm（管電圧：96 kV）では 2.1 倍～2.2 倍となった。これは患者の体型によって、術者の被ばく線量がファクター 2 以上異なることを示唆している。高さ毎の違いについては、地面からの 90 cm に対し、134 cm の高さでは、線量率は 2%～10% 程度小さくなった。

表 4.5.1.2-1 IVR 施設における電離箱式サーベイメータによる線量率測定の結果

| ファントム中心 からの距離 (cm) | 地面からの 高さ (cm) | ファント ム厚さ (cm) | 管電圧 (kV) | 管電流 (mA) | 電離箱指示値 | |
|--------------------------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| | | | | | $H^*(10)$ ($\mu\text{Sv/h}$) | $H(3)$ ($\mu\text{Sv/h}$) |
| 250 | 90 | 15 | 69 | 4.8 | 7.52 | 8.15 |
| 250 | 90 | 20 | 78 | 6.5 | 20.31 | 21.85 |
| 250 | 90 | 25 | 96 | 5.8 | 45.08 | 46.54 |
| 110 | 90 | 15 | 69 | 4.8 | 53.39 | 57.52 |
| 110 | 90 | 20 | 78 | 6.5 | 140.0 | 147.6 |
| 110 | 90 | 25 | 96 | 5.8 | 297.8 | 311.5 |
| 110 | 134 | 15 | 69 | 4.8 | 52.2 | 55.6 |
| 110 | 134 | 20 | 78 | 6.5 | 127.6 | 135.4 |
| 110 | 134 | 25 | 96 | 5.8 | 269.6 | 281.9 |

IVR 施設で扱う 100 keV 以下の低エネルギー X 線は現行の実用量の換算係数から新たな実用量の換算係数への変化が他のエネルギー領域と比べて大きい。今回使用した CdZnTe 検出器では、 h_p のような現行の実用量よりも換算係数の値が大きくなる数十 keV 以下の光子に対する議論は行えないが、数十 keV 以上から 100 keV までのエネルギー領域では、個人線量換算係数 h_p や個人水晶体吸収線量換算係数 $d_{p \text{ lens}}$ (45 度以下) の値は現行の実用量よりも小さくなる。一方、個人局所皮膚吸収線量換算係数 $d_{p \text{ local skin}}$ については、10% 以下程度ではあるが 100 keV 以下のエネルギーでは、現行の実用量よりも大きくなる。IVR は、術者の被ばく線量が大きく、患者の体格によって被ばく線量の差も大きい。その為、新たな実用量となった際にも、規制値を超えないよう、低エネルギーに対する線量が適切に評価できる線量計を用いて被ばく管理を行う必要がある。

4.5.2 校正定数の決定に関する課題の調査

(1) 原子炉施設等における線量計の校正定数を定める際の課題

JAEA 編 J4.3.2 に解析対象とした線量計について新たな実用量に対応する校正定数を定める際の課題について検討した詳細な結果を示す。以下に概要を記す。

廃止措置中の原子炉施設及びホットラボ施設では S-Cs で再校正することによって、より妥当な線量応答を得ることができる。単一の校正定数を採用することにより、複数の測定量を測定できる線量計については、眼の水晶体や皮膚の線量管理に用いる実用量に対する応答が低下するが、20% 程度である。建屋式保管廃棄施設において ^{241}Am が支配的な場では、エリアモニタは 34% 過小応答となる。これを ^{241}Am の γ 線エネルギーに近い線質である N-

80 で校正すると 10%の過小応答に留まる。そうした場合、高エネルギー成分が混在する#27 やしばしばエリアモニタが設置される環境である後方壁付近などでは、40%程度過大な応答となる。

以上のことから、これらの線量計を S-Cs で校正した場合、今回調査した原子力施設のエネルギー分布の範囲内では、ほとんどのケースで適切にモニタリングできる。しかしながら、原子力施設での主要な低エネルギー光子源である ^{241}Am が支配的となる場では、その応答に注意すべきケースがあり、放射線場のエネルギー分布及び使用する線量計のエネルギー応答特性を把握することが重要である。

(2) ファントムの違いによる校正定数への影響

校正時におけるファントムの違いによる影響について、令和 5 年度事業^[5]の N-100, N-250, ^{137}Cs 及び ^{60}Co 線源に加えて本年度は N-80, N-150 の照射実験を実施し、検討を行った。ICRU Report 95 では人体ファントムによるモンテカルロシミュレーションで計算された個人線量換算係数 h_p の定義は示されているが、校正に使用するファントムの指定はない。従って、校正に使用するファントムの選択によって換算係数に差異が生じる可能性がある。令和 4 年度事業^[4]では、線量計の方向特性試験に必要な回転照射装置、治具等を開発、整備した。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 4.5.2-1)
- ・線量計：HITACHI ALOKA MY DOSE G2
- ・線源：ISO-4037-1 Narrow series ; N-80, N-150
- ・照射角度：0 度, ROT
- ・照射距離：3.0 m (照射野直径：40 cm)

水ファントム、また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。図 4.5.2-1 に示すように、水ファントムは中央部に上下対象に 2 台設置し、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。自動回転照射 (ROT) 試験では、ファントムを載せた回転照射装置のステージを 150 秒/回転となるような速度で回転させ、照射時間を 150 秒の倍数に設定した。

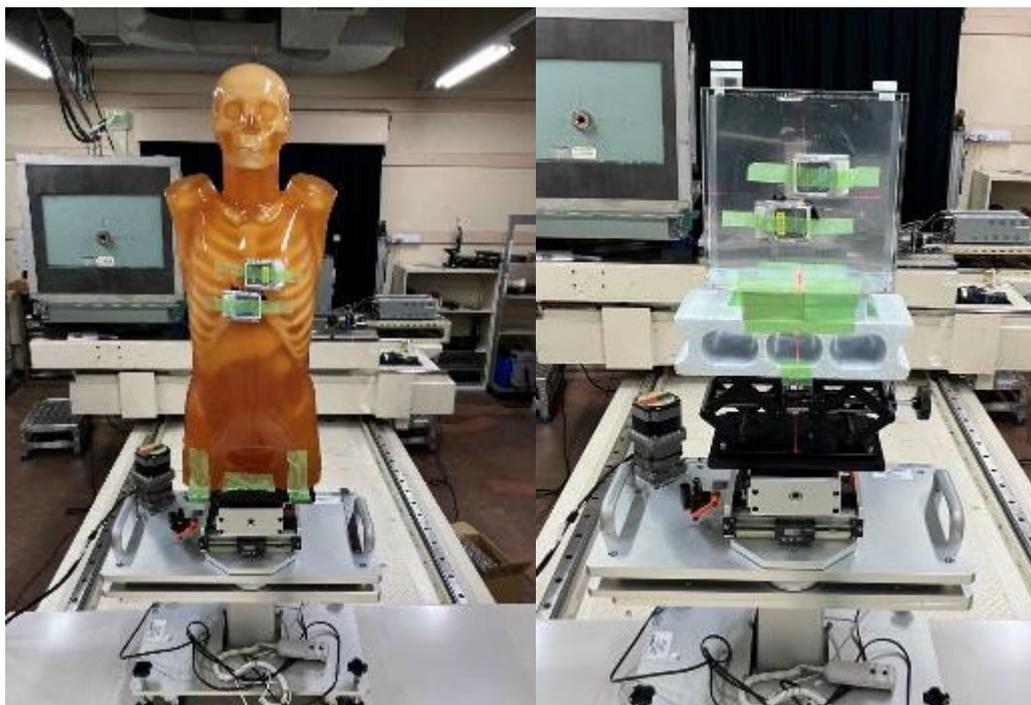


図 4.5.2-1 人体ファントム（左）及び水ファントム（右）での照射試験（0度）

照射はそれぞれのファントム、角度、線質の条件において1回実施した。各 X 線質（N-80, N-150）における人体ファントムの結果を表 4.5.2-1 に、水ファントムの結果を表 4.5.2-2 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。照射角度0度について、以下の式により現行の実用量である $H_p(10)$ から新たな実用量 H_p へ換算した指示値を示す。

$$H_p(0^\circ) = H_p \times h_p(0^\circ) / h_p(10, 0^\circ)$$

また各照射試験で得られた、照射した空気カーマと個人線量換算係数 $h_p(\alpha)$ から得た H_p に対する応答を表 4.5.2-3、表 4.5.2-4 に示す。人体ファントムと水ファントムの各 X 線照射での線量計の指示値の比を表 4.5.2-5 及び図 4.5.2-2 に示す。 γ 線との比較の為に、令和4年度事業^[4]で得られた ^{137}Cs 線源（照射角度0度）の結果と、令和5年度事業^[5]で得られた N-100, N-250, ^{60}Co 線源（照射角度0度）の結果及び ^{137}Cs 線源（ROT 照射）の結果を表 4.3.2-5 及び図 4.5.2-2 に示す。なお、令和4年度事業^[4]で得られた ^{137}Cs 線源の結果（表 3.2.2-1、表 3.2.2-2、表 3.2.2-3）に誤りがあり、表 3.2.2-1 に人体ファントム結果を記載すべきところを水ファントムの結果が記載されており、表 3.2.2-2 に水ファントム結果を記載すべきところを人体ファントムの結果が記載されていた。また、表 3.2.2-3 は表頭の記載は「それぞれのファントムでの指示値比（人体ファントム/水ファントム）」であるが、記載されている数値に誤りがあり、水ファントム/人体ファントムの数値となっていた。令和4年度事業^[4]の表 3.2.2-3 の数値を訂正したものを表 4.5.2-6 に示す。

表 4.5.2-1 人体ファントムでの照射試験結果

| 装置番号 | 照射角度 | 線質 | 照射した 線量 K_{air} | 指示値 $H_p(10)$ | 指示値 $H_p(10)$ (平均) | 指示値 (H_p 換算) |
|--------|--------|-------|----------------------|------------------|-----------------------|--------------------|
| | degree | | mGy | mSv | mSv | mSv |
| 装置番号 A | 0 | N-80 | 0.546 | 1.490 | 1.366 | 1.00 |
| 装置番号 B | | | | 1.242 | | |
| 装置番号 A | | N-150 | 0.540 | 1.380 | 1.359 | 1.07 |
| 装置番号 B | | | | 1.337 | | |
| 装置番号 A | ROT | N-80 | 0.546 | 0.9657 | 0.8749 | - |
| 装置番号 B | | | | 0.7840 | | |
| 装置番号 A | | N-150 | 0.540 | 0.8418 | 0.8211 | - |
| 装置番号 B | | | | 0.8003 | | |

表 4.5.2-2 水ファントムでの照射試験結果

| 装置番号 | 照射 角度 | 線質 | 照射した 線量 K_{air} | 指示値 $H_p(10)$ | 指示値 $H_p(10)$ (平均) | 指示値 (H_p 換算) |
|--------|----------|-------|----------------------|------------------|-----------------------|--------------------|
| | degree | | mGy | mSv | mSv | mSv |
| 装置番号 A | 0 | N-80 | 0.520 | 1.411 | 1.306 | 0.960 |
| 装置番号 B | | | | 1.200 | | |
| 装置番号 A | | N-150 | 0.540 | 1.406 | 1.391 | 1.09 |
| 装置番号 B | | | | 1.375 | | |
| 装置番号 A | ROT | N-80 | 0.546 | 0.9928 | 0.8570 | - |
| 装置番号 B | | | | 0.7211 | | |
| 装置番号 A | | N-150 | 0.540 | 0.7863 | 0.7667 | - |
| 装置番号 B | | | | 0.7471 | | |

表 4.5.2-3 人体ファントムでの照射試験で得られた基準 H_p に対する応答。
基準 H_p は空気カーマに $h_p(\alpha)$ を乗じて得た。

| 照射角度 | 線質 | 指示値 (平均) | 基準 H_p | 応答 |
|--------|-------|----------|----------|-------|
| degree | | mSv | mSv | Sv/Sv |
| 0 | N-80 | 1.366 | 0.759 | 1.80 |
| | N-150 | 1.359 | 0.729 | 1.86 |
| ROT | N-80 | 0.8749 | 0.485 | 1.80 |
| | N-150 | 0.8211 | 0.515 | 1.59 |

表 4.5.2-4 水ファントムでの照射試験で得られた基準 H_p に対する応答。基準 H_p は空気カーマに $h_p(\alpha)$ を乗じて得た。

| 照射角度 | 線質 | 指示値 (平均) | 基準 H_p | 応答 |
|--------|-------|----------|----------|-------|
| degree | | mSv | mSv | Sv/Sv |
| 0 | N-80 | 1.306 | 0.722 | 1.81 |
| | N-150 | 1.391 | 0.729 | 1.91 |
| ROT | N-80 | 0.8570 | 0.485 | 1.77 |
| | N-150 | 0.7667 | 0.515 | 1.49 |

表 4.5.2-5 令和4年度事業[4]の表 3.2.2-3 の訂正 (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)

| 線質 | 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° | ROT |
| N-80 | 1.046 | 1.021 |
| N-100 | 0.974 | - |
| N-150 | 0.977 | 1.071 |
| N-250 | 0.993 | - |
| ^{137}Cs | 0.973 | 1.076 |
| ^{60}Co | - | 1.079 |

表 4.5.2-6 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 | 0.973 |
| 45 | 0.944 |
| 90 | 1.034 |
| 135 | 1.466 |
| 180 | 0.753 |

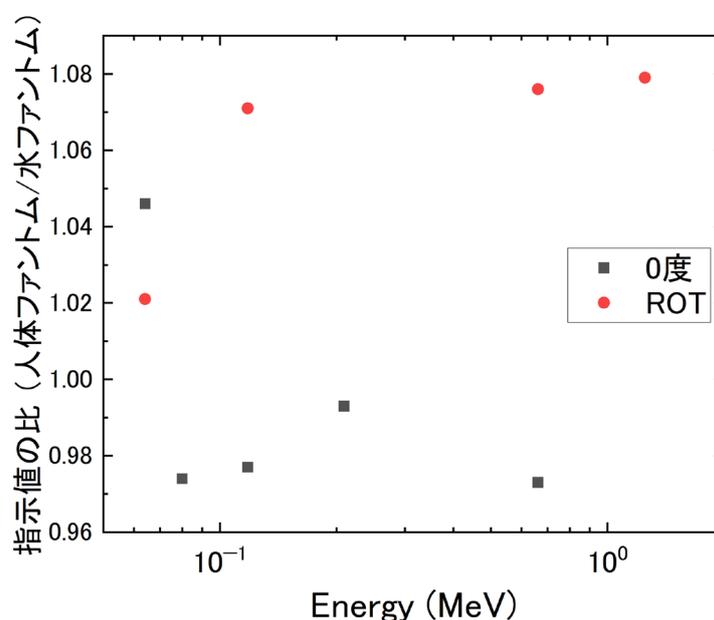


図 4.5.2-2 方向特性試験におけるファントム毎の線量計の指示値の比

以下の考察では、各角度におけるファントムの違いによる指示値の差異の変化を主眼とするため、それぞれのファントムの照射試験で得られた指示値の比を用いた。

令和5年度までに N-100, N-250, ^{137}Cs 線源について、指示値の比（人体ファントム/水ファントム）の照射角度の依存性が調査されている。照射角度0度から45度までは1.0付近でほとんど一定であり、照射角度45度から135度の範囲では、角度の増加に伴い上昇する。特に、135度において ^{137}Cs では1.4以上まで変化し、N-100では2.0以上の変化が観測された。135度から180度の範囲では角度の増加に伴い急激に減少し、180度ではそれぞれの線質で同様に1を下回り、0.8程度となった。これらを踏まえると、今回の照射試験で得られた照射角度0度及びROT照射における指示値の比のエネルギー毎の変化はともに10%

以下程度と小さい。しかし、照射角度 0 度では、N-80 の結果を除き、指示値の比は 1 以下となるのに対し、ROT 照射では、調査した全ての線質に対して 1 以上となり、使用するファントムに対する指示値の大小関係が逆になっている。これは、令和 5 年度事業までにも示唆されているように、人体ファントムと水ファントムの実効厚さの違いが関係していると考えられる。今回の試験結果では、0 度と全方向で人体ファントムと水ファントムの実効厚さの大小関係が異なると推定される。

N-100(実効エネルギー83 keV)以上のエネルギーの線質と N-80(実効エネルギー65 keV)で傾向が異なるのは、本照射試験に用いた線量計の低エネルギー光子に対する感度が関係していると考えられる。線量計の仕様としては、60 keV 以上のエネルギーの感度が保証されているが、これ以下のエネルギーについては感度が小さい。人体ファントムと水ファントムの実効厚さの違いによる散乱線のエネルギー変化が線量計応答に大きく影響したため、N-80 に対するファントム間の指示値の比は N-100 以上のエネルギーの結果と差が生じたと考えられる。

新しい実用量になった際に、線量計の自動回転照射試験が必要となった場合、水ファントムの使用は妥当であるが、水ファントムを用いた校正試験の結果は新たな実用量の換算係数の算出に用いられた標準ファントム(数値ファントム)により近い人体ファントムの結果と相違する可能性があることに注意する必要がある。また、体幹部用個人線量計の空気カメラから新たな実用量への換算係数 h_p の数値は、現行の実用量への換算係数 $h_p(10)$ よりも小さいため、 $H_p(10)$ に相当する指示値を新たな実用量 H_p へ換算した指示値は、N-80, N-150 の両線質ともに $H_p(10)$ の指示値より小さくなった。従って、線量計が H_p で再校正された場合、同じ指示値を得るのにより長い照射時間が必要となる。これは校正を実施する試験機関の負担増につながる可能性がある。

4.5.3 不均等照射に対する新たな実用量による個人線量管理に関する課題の調査

JAEA 編 J4.3.3 に、側方からの不均等照射において、新たな実用量によっても眼の水晶体の線量を体幹部用個人線量計の装着で代替して評価する場合の課題と、このような運用を想定する場合の個人線量計の校正と線量の管理についての課題を整理した詳細な結果を示す。以下に概要を記す。

- ・前方方向から 65 keV 程度の光子で照射された場合は、頸部や(鉛エプロンを装着していない場合)胸部での H_p 測定値から適切に水晶体線量をモニタリングでき得ることが示唆された。

- ・頭部及び胸部がともに 75° となる場合を除いては、20%以内で水晶体吸収線量を推定でき、新たな実用量で測定した場合においても、頸部での H_p の測定で適切なモニタリングが可能と考えられる。しかし、 75° においては、体幹部用線量計ではフィルターを用いてエネルギー補正を行っている関係で応答が悪化し、頸部からの推定には大きな不確かさが伴う。また、今回は検討していないが、眼部に防護眼鏡等を装着している場合には、頸部からの推

定は過大な評価を与えてしまうことにも注意が必要である。

4.6 ワークショップの開催

2025年1月27日に、都内にてICRU Report95に関するワークショップを対面とオンラインのハイブリッド会議で開催した。参加登録は約110名となり、学術分野のみならず電力や医療分野の方々にも参加いただいた。

4.6.1 開催の概要

2025年1月27日（月）13:30～16:15

現地会場：イオンコンパス東京 八重洲会議室 RoomB

オンライン会場：Microsoft Teams

参加者の所属の内訳：研究所 23名、医療系（大学も含む） 19名、校正機関 7名、メーカー 21名、電力会社 21名、その他（官公庁、個人）

議事次第：

1. 趣旨説明
2. ICRU Report95の策定経緯及び概要（JAEA 遠藤先生）
3. 産総研における原子力規制庁新たな実用量事業の成果（産総研 黒澤）
4. JAEAにおける原子力規制庁新たな実用量事業の成果（JAEA 吉富先生）
5. ICRU Report95への対応に関する海外の動向（産総研 黒澤）
6. 総合討論

4.6.2 講演の概要

(1)ICRU Report95の策定経緯及び概要

JAEA 遠藤氏よりICRU Report95の策定経緯及び概要について講演をいただいた。遠藤氏はICRU Report95の執筆メンバーであり、本レポート作成の経緯を中心に説明いただいた。ICRUレポートに記述されていない考え方、判断等の背景をうかがえる内容であり、今後の新たな実用量の導入にむけた議論において関係者が共有すべき大変参考になる情報といえる。

講演の要点

ICRPの1990年勧告を契機に、1995年、1996年に2回「最近の外部被ばく線量評価法に関するワークショップ」が日本原子力研究所（現JAEA）にて開催された。1995年は「ICRP 1990年勧告を契機に進められた線量評価研究の現状・問題点、今後の課題」、1996年は「実用量」について議論が行われた。そこで将来の取り組みに対する意見として、

- ・ICRP や ICRU の勧告を受け入れるだけの姿勢を改めるべき
- ・日本としての考えを持ち、国際的な場で主張していく
- ・日本の研究成果をICRP や ICRU に反映させていく流れが必要

が出され、これらを受けて今回の実用量改定にも日本が大きく関与してきた。

今回の改定国際的な流れとして以下のレポートが影響していた。

- ICRP Publication 60 (1991) : ICRP 1990 年勧告
航空機乗務員、宇宙飛行士の宇宙線被ばくを職業被ばくに含める：高エネルギー放射線に対する防護
- ICRP Publication 74 (1996) / ICRU Report 57 (1998)
ICRP 1990 年勧告外部被ばく線量係数：“高エネルギー放射線は今後の課題”と言及
- ICRP Publication 103 (2007) : ICRP 2007 年勧告
宇宙線、加速器等の高エネルギー放射線に対する防護：パイ中間子 w_R 設定
- ICRP Publication 110 with ICRU (2009)
線量評価用成人男女標準ファントム開発：リファレンスデータ導出のためのモデル
- ICRU Report 84 with ICRP (2010)
航空機乗務員宇宙線被ばくに関するデータ：放射線タイプ・エネルギー範囲の例示
- ICRP Publication 116 with ICRU (2010)
ICRP 2007 年勧告外部被ばく線量係数：ICRP Publication 74 から放射線タイプ・エネルギー範囲を大幅拡張

ICRU 内でも、ICRP 2007 年勧告の策定状況を見ながら、2006 年に内部で検討資料をまとめていた。

この中で、ICRU Report 39 (1985), 43 (1988), 51 (1993), 57 (1998), 66 (2001) で提案された実用量について

- 諸量の定義に用いる ICRU 組織等価物質は実在しないため、実用量そのものが実測により検証できない
- 既存の実用量の線量係数は一部適切に計算されていない（カーマ近似による計算）
- 加速器、宇宙線等の高エネルギー放射線にするモニタリングに対して、現在の実用量の線量係数（ICRP74/ICRU57）では不十分
- 水晶体の測定に用いる $H_p(3)$ のリファレンスデータがない等の課題が整理された。

これを受けて、2009 年から ICRU 内で実用量改定について ICRU Report Committee 26 (RC26) にて検討が進められた。

この委員会の目的としては、「ICRP 2007 年勧告における防護量の改定等に対応するよう、実用量を検討する」ということで、以下の項目について検討が行われた。

- ICRP による防護量の定義の改定、線量係数の拡張等を踏まえ、現在の実用量の合理性を検討する
- 実用量と防護量の関係を整理し、提案する

○新たな提案が測定器の設計、校正等の実務へ及ぼす影響を分析する委員会の中では、以下の3つの提案について検討がなされた。

提案1：現在の実用量の適用性を確認した上で継続して使用する

(ポイント) 現状への影響を極力抑える

提案2：現在の実用量を使用するが、周辺線量当量 $H^*(d)$ は $d=10\text{ mm}$ に固定せず、適切な深さを使用する

(ポイント) 影響を緩和するよう変更を一部にとどめる

提案3：防護量を基に実用量を定める

(ポイント) 問題解決を図るため、現在の考え方を見直す

提案1、2についても検討されたが、高エネルギー領域も含めた幅広いエネルギー領域で実効線量を近似することが困難であることが分かり、提案3を採用することとなった。

提案3での検討内容を以下に示す。

○実効線量の管理：実効線量を基に測定量を定める

放射線防護の線量計測は、防護量の管理が目的 \Rightarrow 目的量を対象とするため合理的で分かりやすい。また実効線量係数のリファレンスデータ (ICRP116) が既にある

○白内障・皮膚の急性障害の管理：吸収線量を基に測定量を定める

等価線量は吸収線量と放射線加重係数の積： $H_T = D_T \times w_R$

w_R は確率的影響に対するもので、等価線量は確定的影響に対する防護線量管理には適さない

また課題点として、防護量線量係数の改定による実用量への影響も検討された。

・組織加重係数 (w_T) の合計は1のため、各臓器の w_T 値が相対的に変わっても、加重して合算された実効線量の値の変化は小さい。そのため実用量への影響も小さい。

・放射線加重係数 (w_R) は実効線量の値に直接関わる。そのため実用量へ影響する可能性がある。

・ボクセルファントムとメッシュファントムに対する実効線量の違いは小さい。そのため実用量への影響も小さい。

また1980年代にICRUで防護量をベースとした実用量も検討されていたことも今回の改訂の後押しになったとのことであった。当時は標準ファントムもなく、膨大な計算を行う環境もなかったことから見送られたが、現在の科学技術の進展により可能となった。

さらに、東電福島第一原発事故後、線量体系の複雑さから線量に関するコミュニケーションにおける理解促進が困難であったことも提案3を選定した理由の1つとなった。

(2) 産総研及びJAEAにおける原子力規制庁の新たな実用量事業の成果

産総研及びJAEAより令和5年度の委託事業の一部について成果報告を行った。(内容については令和5年度委託事業成果報告書^[5]を参照のこと。)

(3) IAEA での ICRU Report95 に関する技術会合

次に、産総研・黒澤より、2024 年 10 月に開催された IAEA での ICRU Report95 に関する技術会合について報告があった。なお、本技術会合については 4.7.1 項に後述する。

4.6.3 総合議論

最後の総合討論では、医療分野で影響が大きいとのことだがどのようなアクションが必要かなどの質問があった。また、物理量を計測して管理するのはどうかなどの意見もあった。遠藤氏の講演の最後にもあったが、

- ・欧州では EURADOS を中心に議論、また IAEA でも議論が進行しており動向把握・これらの機関への協力は重要
 - ・変更に関するメリット・デメリットを正しく理解し、議論を行うことが重要
 - ・これまで線量概念の発展に日本は貢献してきており、引き続きこの議論をリードするため国内関係者の連携、国際的な協力が重要
- であることから、今後も継続して議論できる環境整備を検討する必要がある。

4.7 研究に必要な国内外の情報収集

4.7.1 国際機関が開催した会合における情報収集

実用量に関連する国際機関、学術団体の動向として、IAEA が新たな実用量に関する技術会合を実施したので報告する。ISO TC85/SC2 での議論について概要を以下に示す。

(a)IAEA 技術会合

2024 年 10 月に IAEA で” Technical Meeting on the Implications of the International Commission on Radiation Units and Measurements Report 95 on Operational Quantities for External Radiation Exposure”が開催された。本会合の White paper^[25]が IAEA から示されており、その概要を以下に示す。

会議の目的：

技術会合の目的は、様々な職業分野における放射線防護の実践に新実用量を採用することが与える影響について、現在の知識を議論し、ギャップを特定することであった。この会議は、関係者の認識を高め、放射線防護に対する新しい実用量の潜在的な影響について検討し、提示し、文書化するよう促した。これには、モニタリングシステムの再設計、校正、標準化、規制、放射線防護の実践、訓練の必要性などの側面が含まれる。この会合は、専用の IAEA 技術文書 (IAEA-TECDOC) 作成の一環として開催された。

議論の概要

1) 現行の実用量 (ICRU Report 39/51) の限界

- 防護量と実用量の間には、その定義の違いによる不整合が生じている。
- 防護量は人体を模擬したボクセルファントムで定義されているが、実用量は球やスラブ、円柱など単純な形状となっている。
- 実用量は深さ 10 mm といった単一の深さで定義されており、異なる深さに臓器がある人体を再現できていない。このため中性子では 1 MeV 以下では過大評価、10 MeV 以上では過小評価となっている。
- 70keV 以下の低エネルギー光子では、実用量が実効線量を大幅に過大評価する結果となった。
- 1 MeV 以下の電子による $H(3)$ や $Hp(3)$ は、水晶体の等価線量を過小評価している。特に放射線が斜めに入射し、エネルギーが低いほど大きくなっている。
- 実用量で用いられている線質係数 $Q(L)$ と、実効線量で用いられている放射線加重係数 w_R は、異なるコンセプトで定義されている。
- ICRU 39/51 でも、実用量、防護量共に人体ファントムをベースとした単純なスキームでの評価を推奨している。これにより実用量が全てのエネルギー範囲で防護量の測定値を示すことができる。
- 高エネルギー放射線の発生源は、現在の実用量が定義された 30 年前よりも増えている。放射線治療のための高エネルギー陽子、電子、重イオン加速器、放射性医薬品を製造するためのサイクロトロン、研究のための高エネルギー粒子加速器、航空機や宇宙空間における高エネルギー放射線などがある。

2) ICRU Report95 で示された実用量

- 防護量との良い近似を維持しつつ、実用量として定義する放射線の種類・エネルギーを拡張するためには、実用量の定義におけるパラダイムシフトが必要である。ICRU Report95 では、防護量に関連する換算係数とともに、空間または体表面のある点における線量として実用量を再定義することを推奨している。
- ICRP と ICRU は ICRP Publication 110 において成人標準ファントムを定義している。これらのファントムは、防護量への換算係数の参照値を定義するために使用され、実用量を定義するためにも使用することができる。提唱された実用量は防護量のより良い推定値となっており、また放射線防護量の理解促進にもつながる。
- ICRU Report95 の主な目的は、ICRU Report 39/51 で定義された実用量の制限を克服し、外部被ばくの実用量の一般的な定義を紹介することと、放射線に関する物理量から実用量を計算するための具体的な換算係数を示すことである。

3) 技術的及び規制的な影響

【一般的な影響】

- 新しい実用量は、実効線量の定義と結びついており実用量の定義に関して大きな転換を意味する。放射線加重係数や組織加重係数、またファントムの改訂などがあれば、新たな実用量と実効線量との不整合が生じる可能性がある。
- 将来防護量を導出するのに使用するファントムがメッシュファントムへと移行した際、実用量も変更となる可能性がありまだ検証もされていない。
- 現在のところ、新実用量が測定可能であるという実験や理論による実証はなく、現行の実用量導入以来の新たな科学的発展に基づくものでもない。
- 新しい実用量では、研究開発、試験、認定、許可に関連する費用や、線量計などの再設計が必要となる。1つの素子での測定は困難であり、より複雑な線量計や測定器の設計、アルゴリズムの開発が必要となる可能性がある。全身用の個人線量計の測定値に対して、実効線量と水晶体線量を推定するアルゴリズムを再評価する必要がある。
- 新しい実用量を取り入れる際には、ISO や IEC が発行する標準化文書を全面的に見直す必要がある。
- 航空機乗務員の線量測定と患者の線量測定は ICRU Report95 の範囲外であり、航空機乗務員の Q(L)がどのように維持されるのか、また患者の線量測定に新しい実用量が適用できるのかという疑問が生じる。
- 照射の状況や防護服の有無による不均等被ばくなど、特定の被ばく状況については未解決の技術的問題がある。
- 実施スケジュールとロードマップが不明確なため、関係者の間で混乱が生じている。
- 新たな実用量を導入した際に、例えば Hp と Hp(10)が混在することにより混乱が生じる可能性がある。明確な新しい科学的知見や実用的な改善、あるいは技術的な実現可能性の実証がなければ、利用者がすでに理解しにくいと感じている概念に基づく変更を説明することは困難であろう。
- 公衆衛生と安全性の向上は、新実用量の実施に予想されるコストを相殺するほど明確には実証されていない。高いコストが見込まれているが、新実用量の実施の決定に必要な費用対効果の検討がなされていない。実用量を変更する動機と正当性を説明することは困難であり、放射線防護システム全体に対する信頼性への影響には賛否両論があり、現行システムの安全性の利点は見過ごされている。

【個人及び空間線量のモニタリングサービスへの影響】

- 新しい実用量を正確に評価するためには、線量計の設計やアルゴリズムの改良が必要である。改良が難しい場合は、新たな線量計システムを購入または開発することになる。不確かさについても再評価が必要である。
- 新しい実用量に合わせて、モニタリングシステムの性能に関する型式試験と評価が必要となる。
- 線量計のエネルギー範囲に合わせた性能試験を実施できる校正機関へのアクセス

を確保する必要がある。

○国内規制当局はその移行期間を計画する必要がある。2つの実用量が混在する可能性があり、その管理や記録を区別する必要がある。その結果、サービスの処理時間とコストが増加する可能性が高い。

○普及や働きかけを含めて、ユーザーへのサポート強化を計画する必要がある。

○新しい実用量を採用するために、必要な財政的・人的資源のサポートが必要である。

○実用量の定義変更に伴う懸念点は以下の通り。

・ どのような線量計の設計にすれば新しい実用量の測定を満たすことができるのか明らかになっていない。

・ 新しい実用量に対応した ISO/IEC がどうなるのか明らかになっていない。

・ 現在の相互比較では、新しい実用量に対応するシステムを適切にテストするには不十分である。

【メーカーへの影響】

(前述のコメントに加えて)

○移行期間の準備と共に、顧客サポートの強化を計画すべきである。円滑な移行を確実にするため、顧客への周知とアウトリーチを実施する必要がある。

○実用量の定義変更に伴う懸念点は以下の通り。

・ 規制の枠組み、明確なスケジュール、顧客の需要が確立されるまでは、メーカーは新しいソリューションを開発しない可能性がある。

【標準研究所への影響】

○新しい実用量の導入はそれほど困難ではない。ただし二次標準を使用する試験所には影響があるかもしれない。

○空気カーマを基準としている場合、校正手順は ISO によって定義されたファントムと空気カーマから実用量への換算係数を用いることになる。

○低エネルギーX線の試験が増える可能性がある。

○品質マネジメントシステム文書の改訂が必要となる。

○移行期間においては、現行と新しい実用量二つの校正を依頼される可能性がある。それに対応したシステムの改修が必要となる。

○実用量の定義変更に伴う懸念点は以下の通り。

・ 新しい実用量のトレーサビリティを確保するため、新たな二次標準を開発することが必要になるかもしれない。

・ 新しい実用量が採用となった場合、放射線取扱主任者など線量の管理者に対する追加訓練が必要となる。

【国際標準化団体への影響】

- ISO と IEC は、新しい実用量へ対応するため多くの規格を改訂する必要があるが、対応する人的リソースに限りがあるため作業は困難である。
- 新しい実用量の技術的な実現可能性に関する知見が少ない
- 複雑な混合場における線量計とアルゴリズムの性能に関して知見がなく、規格策定にたいして不確実性が高い。
- 最適化された線量計が開発されるまでは、規格の許容範囲を緩和する可能性がある。ただしその許容範囲は最大 500%になる可能性がある。

【国際機関及び科学技術組織への影響】

- 新しい実用量の導入を促進するためには、利害関係者の意識を高めながら、そのメリット、コスト、影響に関する議論を進めることが極めて重要である。
- 新しい実用量に対する線量計等の評価を行うことは、その影響を理解するために必要である。移行期間前に、相互比較等を通じて問題を特定し対処することができる。
- 研究ニーズを特定し、新たな実用量に関連する科学的研究を促進することは、効果的な解決策の開発に寄与する。新たな実用量導入の準備及び実施のための財政支援も認識しておく必要がある。
- 円滑な移行を実現するためには、規制当局や政府関係者との連携が不可欠である。
- 出版物や研修、ガイドラインの作成を通じた教育活動は、知識とベストプラクティスの普及に役立つ。研修とともに技術的・専門的なサポートを提供することで、すべての関係者が十分な準備を整えることができる。

【行政や規制当局への影響】

- 新しい実用量を効果的に導入するためには、国と地域の両レベルで利益、コスト、影響を評価することが不可欠である。
- 新しい実用量への移行に合わせた相互比較試験を支援し開始することは、潜在的な課題を特定し対処するのに役立つ。
- 新しい実用量を導入するためには、法律や規制の改正が必要である。さらに移行期間を計画することにより、スムーズな切り替えが可能となる。
- このテーマに関する研究の推進と資金提供は、効果的な解決策とベストプラクティスの開発に寄与する。すべての関係者が十分な準備を整え、実施プロセスを成功に導くためには、新しい実用量に関する研修プログラムを含め、移行を支援するための資金を保証する必要がある。
- 実施に向けた包括的なロードマップとスケジュールを策定することは、すべての利害関係者に明確な指針を与えることになる。
- 新しい実用量の実施に関する詳細なガイドラインを作成することは、この移行をさ

らに支援することになる。

【認可事業者、有資格専門家、放射線防護官への影響】

- 被ばく状況や被ばく分野に適した線量測定システムと機器を提供することは、正確性と信頼性を維持することにつながる。
- 機器、ソフトウェア、トレーニングの更新や取得など、線量測定に関連する費用や投資が増加する可能性を考慮した計画を立てることも重要である。
- 特定の対象者に絞った訓練を実施することで、放射線防護システムに対する信頼を浸透させることができる。新しい実用量への移行を管理するには、スタッフへの情報提供、機器の準備、影響を効果的に伝えることが必要である。
- 移行プロセスを通じて、防護原則の最適化を推進し、強固な安全文化を維持し続けることが重要である。

【職業被ばくを受ける作業員への影響】

- 作業組織と実務への影響を評価することは極めて重要である。これらに基づき、有効性と妥当性を維持するために、放射線防護プログラムを適宜適合される必要がある。
- 線量計の測定値が下がったと言って、防護措置を減らすのではなく、防護措置の最適化の原則を守ることが重要である。継続的な安全性と規制基準の遵守のために、厳格な防護措置を維持していくべきである。
- 新しい実用量を効果的に実施するためには、研修の機会に参加し、疑問を提起し、懸念に対処することが重要である。このような積極的なアプローチにより、すべての利害関係者が十分な情報を得て、変更に備えることができる。
- 国際及び国内当局は、他の専門機関と共に、新たな実用量の影響及び採用を評価するための段階的かつ慎重な評価期間の必要性を引き続き認識している。これは、実施コストと、測定における防護量をより正確に表す実用量の利点とバランスを取ることを目的としている。

4) IAEA 技術文書

IAEA では、現在の知識における特定されたギャップを文書化し、新しい実用量を採用することが様々な放射線防護実務に与える影響について議論することを目的として、TECDOC の作成が進められている。この TECDOC では、議論を促進するための枠組みとして機能し、関係者が現在の放射線防護システムに対する新しい実用量の潜在的な影響を検討し、文書化することを推奨する。TECDOC は、新たな実用量の導入に関する意思決定プロセスを支援するために不可欠な情報を収集するために必要な行動に関する勧告を示す。

(b) ISO に関する調査

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、中性子線及び光子線のそれぞれの標準場に係るサブグループに分かれて規格改定の要否や改定内容についての議論が進められた。 β 線標準場に関する3つの規格 (ISO 6980-1、ISO 6980-2 及び ISO 6980-3) については、2023年度に軽微な改定が行われたが、新たな実用量に関係するものはない。中性子標準場に関しては、放射線測定器の校正方法を規定する規格 (ISO 8529-2) の改定に必要なシミュレーション計算を整理・開始されているが、現行の実用量に関連する事項に限定されており、まだ新たな実用量を取り入れるための具体的な議論は開始されていない。放射線標準場に共通する事項を定めた ISO 29661 については、光子線の空気カーマと衝突空気カーマが混在しているなどの課題があり、2025年以降に改定作業に着手することが決定された。光子標準場に係る4つの規格 (ISO 4037-1、ISO 4037-2、ISO 4037-3 及び ISO 4037-4) については、ISO 29661 の改訂作業が進み、また、欧州国家計量標準研究所協会 (EURAMET) の GuideRadPROS プロジェクトの結果が利用できるようになった後に改定作業に着手することとなった。同プロジェクトの目的には、新たな実用量の取入れに必要な事項の調査が含まれているが、ISO 4037 シリーズへの取入れに係る具体的な議論はなかった。

WG19 に関しては、2024年に ISO 14146 が改定発刊された。本規格は、線量測定業務の定期検査の基準と性能限界を定める規格であるが、現行実用量に基づいた要求事項が記載されており、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。その他、皮膚、末端部及び眼の水晶体の線量をモニタリングするための手順を定めた規格である ISO 15382 の改定審議作業も進んでいるが、いずれのドラフト案においても将来的な意識はされつつも、現時点 (2025年2月現在) では新たな実用量に関する記載はされていない。

4.7.2 国内外の学会等に関する情報収集

日本保健物理学会は、国際放射線防護学会 (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6年度は、両学会が合同で大阪大学吹田キャンパスにおいて令和6年12月16日～18日の期間で第5回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同大会を開催した。本事業では、過年度事業に関する成果の一部を報告（吉富 寛ほか、ICRU95の実用量を導入した場合の原子力施設における眼の水晶体線量管理への影響）^[26]するとともに、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、JAEAから本事業で得られた成果の発表（JAEA編付録参照）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や個人線量計による線量評価に関する研究報告は散見された。以下に線量評価に関連する主な研究報告について記載する。

千代田テクノル株式会社の犬飼裕司氏からは、同社の提供する線量測定サービス使用者の統計データを解析し、医療従事者の眼の水晶体等価線量の推移に関する報告（犬飼裕司ほか、医療従事者の眼の水晶体の等価線量の推移）があった。頸部用線量計と眼の水晶体用線量計の測定値の関係性を調査されており、頸部用線量計の測定値より眼の水晶体用線量計の測定値が低くなる傾向があったが、その相関は弱く、逆に高くなっている例も散見されるとのことであった。眼の水晶体については、防護眼鏡を装着していることが一因と思われるが、こうした実データを解析し、新たな実用量での解析をしていくことなどは有用であろう。

長瀬ランダウア株式会社の織田侑樹氏からは、同社が提供し、日本国内でも広く使用されている中性子固体飛跡個人線量計の、ISO 21909-1:2021（受動形中性子個人線量計の性能及び試験条件に関する国際規格）への適合に向けた中性子エネルギーを推定するアルゴリズムの開発に関する報告（織田侑樹ほか、国際規格適合に向けた中性子エネルギー推定の検討）がなされた。飛跡画像から飛跡密度、飛跡の面積、長軸・短軸比率などの特徴量を基にした中性子エネルギー推定アルゴリズムが作成され、これを用いることによりISO 21909-1:2021の要求性能に適合することができた、とのことであった。新たな実用量に関しても、このような手法を利用してアルゴリズム変更により対応できる可能性もあるため、注視すべきである。

千代田テクノル株式会社の高島直貴氏からは、防護具着用医療従事者向けの実効線量評価用線量計の開発に関する研究報告（高島直貴ほか、防護具着用医療従事者向け実効線量評価用線量計の開発）がなされた。JAEA編J4.3.3でも述べたように、鉛エプロンのような放射線防護具を着用した場合、体幹部と頭頸部に個人線量計を2個装着するなどのモニタリングが行われている。本研究では、ガラス線量計に金属フィルタの構成配置を最適化することで、X線領域において防護具着用時の実効線量を1個の線量計で精度よく評価できる可能性が示唆された。このような研究は、新たな実用量への対応にも応用できる可能性があり、今後の研究が期待される。

4.7.3 関係論文

新たな実用量に関する研究論文について、令和 5 年度事業の調査時から新たに公開されたものを調査した。調査した論文は（１）校正場に関するもの、（２）線量計の特性に関するもの、（３）作業場での影響等に関するもの、（４）その他、に分類した。調査は主として Web of Science を通じて実施し、必要に応じて関係する論文誌を確認した。何れも、内容を確認できたもののみ調査に加えた。調査した 18 論文を内容により分類した一覧を表 4.7.3-1 に示す。ICRU が新たな実用量に関するレポートを発刊後、欧州を中心に徐々に研究活動が活発化してきたが、最近では日本、タイ、ベトナムなどのアジア諸国でも多くの研究が報告されている。

表 4.7.3-1 令和 5 年度事業調査時以降に公開された新たな実用量に関する論文リスト

| |
|--|
| (1) 校正場に関するもの(4) |
| # 光子 : T. Tsuji <i>et al.</i> ^[r1] 、D.-K. Bui <i>et al.</i> ^[r2] |
| # 中性子 : H. R. Vega-Carrillo <i>et al.</i> ^[r3] 、T. Matsumoto <i>et al.</i> ^[r4] |
| (2) 線量計の特性に関するもの(3) |
| ・個人モニタリング用線量計 |
| # 光子 : P. Rindhatayathon <i>et al.</i> ^[r5] 、L. Bossin <i>et al.</i> ^[r6] 、N. T. M. Loan <i>et al.</i> ^[r7] |
| (3) 作業場での影響等に関するもの(4) |
| # 光子/ β 線/中性子 : J. Dubeau <i>et al.</i> ^[r8] |
| # 光子/中性子 : E. de S. L. Oliveira <i>et al.</i> ^[r9] |
| # 光子 : Y. Tanimura <i>et al.</i> ^[r10] |
| # 中性子 : A. Endo ^[r11] |
| (4) その他(7) |
| C. Ferrari <i>et al.</i> ^[r12] 、H. R. Vega-Carrillo <i>et al.</i> ^[r13] 、D. Ž. Krstić <i>et al.</i> ^[r14] 、 M. M. Hiller <i>et al.</i> ^[r15] 、H. R. Vega-Carrillo <i>et al.</i> ^[r16] 、P. Rindhatayathon <i>et al.</i> ^[r17] 、 A. Ulanowski <i>et al.</i> ^[r18] |

()内は文献数。

- r1. T. Tsuji, H. Yoshitomi, M. Kowatari, and Y. Tanimura, “Establishment of a 241Am gamma calibration field based on international standards and its conversion coefficients,” *Radiation Protection Dosimetry*, Sep. 2024, doi: 10.1093/rpd/ncae186.
- r2. D.-K. Bui, N.-Q. Nguyen, and N.-T. Le, “Validation of ISO-4037 X-ray reference field following ICRU-95 operational dosimetric quantity,” 2025. [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=5079203>
- r3. H. R. Vega-Carrillo, M. G. Garcia-Reyna, and G. Garcia-Fernandez, “Spectrum-Averaged Neutron Fluence-to-Dose Conversion Coefficients of 252Cf, 252Cf/D2O, 241AmB, 241AmBe and 239PuBe Neutron Sources, Using the New Dosimetric Quantities of ICRP/ICRU,” *Journal of Atomic and Nuclear Physics*, vol. 4, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.36959/349/543.
- r4. T. Matsumoto, A. Masuda, H. Harano, and S. Manabe, “Simulation study for design of long counter for standard neutron fields from 1 keV to 20 MeV at NMIJ/AIST,” *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 200, no. 13, pp. 1251–1257, Aug. 2024, doi: 10.1093/rpd/ncae151.
- r5. P. Rindhatayathon and V. Pungkun, “Investigating the impact of new dosimetric quantities recommended by ICRU 95 on the OSLD individual monitoring system at OAP, Thailand,” *Journal of Radiological Protection*, vol. 44, no. 1, p. 013503, Mar. 2024, doi:

- 10.1088/1361-6498/ad255c.
- r6. L. Bossin *et al.*, “Implications of the ICRU 95 quantities for various personal dosimetry techniques,” *Radiation Measurements*, vol. 176, p. 107207, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.RADMEAS.2024.107207.
- r7. N. Thi Mai Loan and D. Thanh Luong, “RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE ALGORITHMS TO DETERMINE THE OPERATIONAL PERSONAL QUANTITIES FOR PHOTON USING PHOTOLUMINESCENT DOSIMETER,” 2024.
- r8. J. Dubeau, S. Djefal, J. Sun, F. Ali, and A. Talebitaher, “Dose Calculations using Phantom Models in Workplaces,” 2024. [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=4979429>
- r9. E. de Souza Luz Oliveira, J. C. Pereira da Silva, F. J. de Oliveira Ferreira, G. Naulfel Claassen, and L. Fernandes da Silva, “Radiological protection of Young Scientist and Scientific Researcher trainees in controlled areas of the Argonaut reactor installation: analytical approach,” *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, vol. 12, no. 3A (Suppl.), p. e2447, Sep. 2024, doi: 10.15392/2319-0612.2024.2447.
- r10. Y. Tanimura *et al.*, “Present and new operational quantities evaluated from photon spectrum measurements at workplaces in the research reactor and accelerator facility at the JAEA,” *Radiation Measurements*, vol. 176, p. 107196, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.RADMEAS.2024.107196.
- r11. A. Endo, “Analysis of the relationship between ambient dose, ambient dose equivalent and effective dose in operational neutron spectra,” *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 200, no. 13, pp. 1266–1273, Aug. 2024, doi: 10.1093/rpd/ncae157. (4)
- r12. C. Ferrari, G. Manenti, and A. Malizia, “Sievert or Gray: Dose Quantities and Protection Levels in Emergency Exposure,” *Sensors*, vol. 23, no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/s23041918. [緊急時被ばく]
- r13. H. R. Vega-Carrillo and T. G. Soto-Bernal, “Neutrons produced in a 12 MV LINAC working in electron mode,” *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 208, p. 110905, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.RADPHYSICHEM.2023.110905. [リニアック治療時の中性子影響]
- r14. D. Ž. Krstić and D. R. Nikezić, “History of radiological protection and evolution of dosimetric quantities,” in *Book of Proceedings*, Institute for Information Technologies, University of Kragujevac, 2023, pp. 73–80. doi: 10.46793/ICCBI23.073K. [放射線防護の歴史]
- r15. M. M. Hiller, K. G. Veinot, and N. E. Hertel, “Influence of neutron cross-section resonances on organ/tissue equivalent and effective dose coefficients for the ICRP voxel phantoms,” *Radiation and Environmental Biophysics*, vol. 63, no. 1, pp. 143–164, Mar.

2024, doi: 10.1007/s00411-023-01058-9. [ボクセルファントムによる中性子の
換算係数の評価]

- r16. H. R. Vega-Carrillo *et al.*, “BK_a, BH*(10) and BH* for 70, 90 and 120 kV X-rays in clay based bricks,” *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 229, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.radphyschem.2024.112430. [遮蔽設計]
- r17. P. Rindhatayathon *et al.*, “Machine learning approaches for improving dosimeter reading accuracy conform with new operational quantities recommended by the ICRU 95,” Oct. 2024. [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=5001704> [機械学習による読み取り精度の向上]
- r18. A. Ulanowski, T. Sato, N. Petoussi-Henss, and M. Balonov, “Relationships between protection and operational dosimetric quantities for external exposure to natural background radiation,” *Radiation and Environmental Biophysics*, 2025, doi: 10.1007/s00411-025-01109-3. [自然放射線による被ばく線量の変化]

5 令和4年度～令和6年度で実施した事業のまとめ

5.1 新たな実用量に対応した線量計の校正場に関する課題の調査

本項目では、国家標準機関である産総研及び二次標準機関である JAEA で、X 線、 γ 線、 β 線、中性子の照射場における新しい実用量への換算係数を評価し、線量計の照射試験が行える環境を整えた。産総研及び JAEA にて、新しい実用量に対する試験環境の違いによる校正への影響を検討した。

光子校正場においては、新しい実用量への換算係数の角度依存性が現行と異なること、また新しい実用量への線量換算係数について、線質によって 0° の換算係数が 180° や ROT の値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、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における眼の水晶体の線量管理に用いる実用量では 0 度で現行の値と比較して 40% 小さく、また ^{147}Pm 場での皮膚に対する線量換算係数は現行実用量と比較して 25% 程度小さくなったが、 ^{85}Kr 及び $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場の皮膚に対する換算係数は現行実用量と比較してほぼ変わらない結果となった。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% 程度、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% 程度減少した。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換算係数の相違が大きく、照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。

産総研と JAEA の校正場間では、X 線・ γ 線については空気カーマ、 β 線では吸収線量、中性子ではフルエンスといった物理量でトレーサビリティが確保されている。新たな実用量もこれら物理量と換算係数を用いて評価するため、新たな実用量に対する線量計のエネルギー応答等の試験結果の比較から線量計のばらつきを考慮してほぼ同等であることが確認できた。国家標準機関同士の国際比較でも空気カーマやフルエンスといった物理量で実施されているため、新しい実用量が導入された場合でも、同等性は担保できるものと考えられる。ただ線量計の個体差が大きく、詳細な比較を行うためには、試験する線量計の個数を増やして統計的なばらつきを小さくするなどの工夫が重要であることが分かった。線量計の校正定数に対する不確かさについては、特に低エネルギー光子に対して換算係数が大きく変わることから、見直しが必要となる。

5.2 線量計の特性に関する課題の調査

JAEA 編に記載の機種も含めて、表 5.2.1 に示すように国内で市販され放射線管理に用いられている線量計に対して、応答のエネルギー特性及び方向特性を取得した（方向特性については、方向依存性がある実用量に対してのみ実施）。得られた特性の傾向は以下のとおりであった。

光子用線量計については、 H^* や H_p に対して低エネルギー領域で過大応答し、20 keV 付近では現行の実用量と比較して10倍以上の応答となるケースもある。 H^* や H_p で再校正（S-Csの応答で調整）した場合は、40 keV 付近までは現状のままでも許容範囲内の応答であるケースが多い。エリアモニタについては、入射光子のエネルギーによって大きく応答が変動するものもあるが、定置でのモニタリングを想定し、トレンドを監視する目的の機器であるため、設置する放射線場に対応する線質での校正、あるいは試験による特性の把握で十分と考えられ、実用量の変更にもこうした観点から対応することによって、モニタリングの目的に適用し得ると思われる。方向特性についても、ROT照射を含めて調査範囲内では大きな影響はみられなかった。 D'_{lens} 、 D_{plens} や $D'_{local\ skin}$ 、 $D_{plocal\ skin}$ については、8 keVを除けば良好な特性を示していた。

β 線についても、今回調査した $D_{plocal\ skin}$ に関しては、実用量の定義変更に伴う変化は小さい。その他、眼の水晶体の線量評価に用いる実用量については、光子と β 線で応答のエネルギー・方向特性が異なるため、混在場で用いる線量計は改良を要すると考えられる。

中性子用線量計については、現行実用量と比較して、熱中性子～数100 keVの領域でのエネルギーの違いによる応答の変化が著しい。受動形個人線量計においては、入射角の増大に伴い応答が低下する傾向が見られるものもあった。

これらのエネルギー・方向特性の傾向から、現行の線量計を新たな実用量に対応させるための課題を①校正・試験事業者、②線量計メーカー、③線量計使用者、それぞれの観点から整理し、対応策を検討した。

① 校正・試験事業者においては、低エネルギー光子や中性子では応答が大きく影響を受け、また H^* と $D'_{local\ skin}$ など複数の実用量を測定できるものでは、測定量による違いも見られるが、校正線質を（使用される作業環境も踏まえて）変更する、あるいは複数の校正定数を準備するなどの対応策が考えられる。また、早期の標準化や線量計に要求すべき試験事項の明確化は、新たな実用量の導入への対応を円滑に進める上で望ましい。

② 線量計メーカーについては、低エネルギー光子や低エネルギー中性子に対する応答改善が課題である。対応が容易なものから順に、使用定格範囲の制限、再校正（校正線質の変更を含む）、アルゴリズム等線量演算機能の改良、線量計の構造変更が考えられる。

③ 線量計使用者の観点からは、線量計の特性の傾向も踏まえたうえで、合理的な線量管理方法の検討や再校正に伴う計測値の変化への対応の検討が課題である。また、線量計の使用用途を限定するなどの対策も考えられるが、それには管理する放射線場のエネルギー分布などの情報が重要であるほか、関係者の理解醸成も重要である。また、眼の水晶体の線量管理においては、体幹部（頸部や胸部）に着用した線量計でモニタリングされているケースも多いが、実用量の変更により測定量間の関係性が変化するために、こうした管理が引き続き可能かどうか検証しておく必要がある。

表 5.2.1 特性を評価した線量計の種類等の一覧

| 線量計の種類 | 検出器 | 測定線種 | 測定量 | 参照先 (産総研分は括弧内に提示) |
|------------------|---|-----------|---|------------------------|
| シンチレーション式サーベイメータ | NaI(Tl) | 光子 | H^* | R3-A |
| 電離箱式サーベイメータ | 電離箱 | 光子 | H^* 、 D'_{lens} 、 $D'_{\text{local skin}}$ | R3-B、R4-A、R5-A |
| | | β 線 | D'_{lens} 、 $D'_{\text{local skin}}$ | |
| 電離箱式サーベイメータ | 電離箱 | 光子 | H^* 、 $D'_{\text{local skin}}$ | R6-A |
| | | β 線 | $D'_{\text{local skin}}$ | |
| 電離箱式サーベイメータ | 電離箱 | 光子 | H^* | R4-H |
| 電離箱式サーベイメータ | 電離箱 | 光子 | H^* | R4-J |
| 中性子用サーベイメータ | ^3He 比例計数管 | 中性子 | H^* | R3-C、R4-B、R5-B |
| 中性子用サーベイメータ | 有機混合ガス比例計数管 | 中性子 | H^* | R5-C |
| 可搬型エリアモニタ | Si 半導体 | 光子 | H^* | R5-D |
| 据置型エリアモニタ | GM 計数管 | 光子 | H^* | R6-B |
| 受動形環境線量計 | OSL ¹ ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$) | 光子 | H^* | R5-E |
| 受動形個人線量計 (体幹部) | OSL ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$) | 光子 | H_p 、 D_p local skin,slab | R4-D、R5-G (AIST B2) |
| | | β 線 | D_p local skin,slab | |
| 受動形個人線量計 (体幹部) | RPL ² (銀活性リン酸塩) | 光子 | H_p 、 D_p local skin,slab | R5-F (AIST B1) |
| | | β 線 | D_p local skin,slab | |
| 受動形個人線量計 (体幹部) | TL ($\text{LiF}:\text{Mg,P,Cu}$) | 光子 | H_p 、 D_p local skin,slab | R5-H |
| | | β 線 | D_p local skin,slab | |

¹ 光刺激ルミネッセンス

² ラジオフォトルミネッセンス

| | | | | |
|-----------------|----------------------------|-----------|-------------------------------|-----------------------------|
| DIS 個人線量計 (体幹部) | DIS | 光子 | H_p 、 D_p local skin,slab | R6-C |
| | | β 線 | D_p local skin,slab | |
| 電子式個人線量計 (体幹部用) | Si 半導体 | 光子 | H_p 、 D_p local skin,slab | R3-E、R4-C |
| | | β 線 | D_p local skin,slab | |
| 電子式個人線量計 (体幹部用) | Si 半導体 | 光子 | H_p | R3-D、R4-I、R5-O、R6-D |
| 受動形個人線量計 (水晶体用) | TL (LiF) | 光子 | D_p lens | R3-F、R4-E、R5-I (AIST E2) |
| | | β 線 | | |
| 受動形個人線量計 (水晶体用) | TL | 光子 | D_p lens | R6-E (AIST E1) |
| | | β 線 | | |
| 受動形個人線量計 (末端部用) | TL (LiF) | 光子 | D_p local skin rod | R5-J (AIST R2) |
| 受動形個人線量計 (末端部用) | TL (LiF) | β 線 | D_p local skin rod | R5-K |
| 受動形個人線量計 (末端部用) | TL (LiF(Mg,Ti)) | 光子 | D_p local skin rod | R5-L |
| | | β 線 | | |
| 受動形個人線量計 (体幹部用) | PADC ³ | 中性子 | H_p | R4-G、R5-M |
| 受動形個人線量計 (体幹部用) | TL (LiF(Mg,Ti)) | 中性子 | H_p | R5-N |
| 電子式個人線量計 (体幹部用) | Si 半導体 | 中性子 | H_p | R3-G、R4-F |
| 受動形個人線量計 (末端部用) | RPL ⁴ (銀活性リン酸塩) | 光子 | D_p local skin rod | (AIST R1) |
| | | β 線 | | (AIST R3) |

³ ポリアリルジグリコールカーボネート

⁴ ラジオフォトルミネッセンス

5.3 線量計の校正定数の決定と個人線量管理上の課題に関する調査

5.3.1 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

法令等により線量管理、線量または線量率測定が要求される現場を類型化したうえで、原子力施設及び放射線使用施設の特徴が異なる放射線作業場（原子力発電所、核燃料施設、廃棄施設及び研究・教育施設）を選定し、光子エネルギー分布を取得した。 H^* 平均エネルギーは0.15 MeV～4 MeVであり、X線や ^{241}Am 及び散乱線による低エネルギーのものから、 ^{16}N や即発 γ 線のように6～8 MeV付近の光子まで観測された。エネルギー分布は異なるものの、現行/新実用量の比は何れの場合においてもS-CsやN-80校正場と同程度であり、これらの線質で校正した線量計であれば、新たな実用量でも適切に測定評価できることが示唆された。また H^* 平均エネルギーに対する新・現行実用量の比は、低エネルギーではその差が大きくなり最大で30%程度の差であることが分かった。

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から、放射線作業場における線量計のエネルギー応答を評価した。X線施設と建屋式保管廃棄施設の各1箇所に対するエリアモニタの応答を除いては、高々30%程度の過大応答(^{241}Am の寄与の大きい場)であり、許容範囲内であった。X線施設においては、その応答はスペクトルの形状に大きく依存すると考えられ、線量計が使用される放射線場のエネルギー分布の情報を取得することは重要である。また、エネルギー依存性の大きいエリアモニタに関しても、定置する場所の放射線場のエネルギー分布を考慮し、適した線質での校正や試験による特性の把握が望まれる。

また、原子力機構核燃料サイクル工学研究所において、過去に実際の放射線作業で使用された個人線量計(TLD バッジ)の指示値を用いて、放射線作業場の光子エネルギーを推定した。再処理施設では ^{137}Cs 等からの比較的エネルギーの高い直接線と散乱線、MOX燃料施設では、 ^{241}Am に由来する60 keVの γ 線による被ばくと考えられた。こうした手法は、スペクトロメータ測定データを補完する情報として活用できるものと考えられる。

○医療施設

全身についての新しい実用量では、低エネルギー光子に対して現行の実用量より測定される線量の数値が大幅に小さくなることから、X線装置などを多用している医療分野での影響が大きいと考えられる。医療分野の有識者にヒアリングを行った結果、術者が立ち会って治療を行うIVR装置等の透視装置などが対象となることが分かった。これらの作業場における光子スペクトルは、シミュレーションで評価されていることが多く、実測はほとんどされていないとのことであった。令和6年度事業では、実際に病院で用いられているIVR装置周辺の光子スペクトルの測定を試みた。コリメータ(直径2mm)の使用やX線管から距離を取る(約1m)ことにより、検出器に入射する光子数を低減させ光子スペクトルを得ることができた。IVR装置は、X線管自体を回転させ撮影することから、術者の位置での光子の角度分布もオペレーションによって異なる。このため新しい実用量の影響については、より詳細なデータ収集が必要になると考えられる。

5.3.2 校正定数の決定に関する課題の調査

現状、原子力施設で用いられる光子用線量計は、ほとんどが S-Cs 場で 1 点校正されている。そこで、表 5.3.2.1 に示す 7 機種を新たな実用量に対して S-Cs 場で校正した場合における廃止措置中の原子力施設、ホットラボ施設及び建屋式保管廃棄施設の放射線作業場での線量計応答について調査した。調査したエネルギー分布の範囲内では、ほとんどのケースで適切にモニタリングできることが分かった。建屋式保管廃棄施設において ^{241}Am が支配的な場では、エリアモニタは 34% 過小応答となる。これを ^{241}Am の γ 線エネルギーに近い線質である N-80 で校正すると 10% の過小応答に留まる。そうした場合、高エネルギー成分が混在する場やしばしばエリアモニタが設置される環境である後方壁付近などでは、40% 程度過大な応答となる。このように、原子力施設での主要な低エネルギー光子源である ^{241}Am が支配的となる場では、その応答に注意すべきケースがあり、放射線場のエネルギー分布及び使用する線量計のエネルギー応答特性を把握することが重要となる。

表 5.3.2.1 原子力施設における光子場における線量計の応答評価に用いた線量計

| |
|-----------------------------|
| R5-A 社製電離箱式サーベイメータ |
| R5-D 社製可搬型 γ 線エリアモニタ |
| R5-E 社製受動形環境線量計 |
| R5-F 社製受動形個人線量計（体幹部） |
| R5-I 社製受動形個人線量計（水晶体） |
| R5-J 社製受動形個人線量計（末端部） |
| R5-O 社製電子式個人線量計（体幹部） |

5.3.3 不均等照射に対する新たな実用量による個人線量管理に関する課題の調査

眼の水晶体の線量管理において、胸部又は腹部に加えて頭頸部等に装着した体幹部用線量計の実用量の測定によって水晶体用線量計による測定を代替する運用がなされる場合があり、さらにこうしたケースでは鉛エプロン等を着用し不均等照射となっている。そこで、60 keV 付近の光子による被ばくを想定し、頸部に着用した体幹部用線量計で H_p 測定を実施した場合に、適切に水晶体の線量をモニタリングできるかを人体形状ファントム実験やこれらの事業で得られた線量計の特性データを解析して検証した。

人体形状ファントムにおける実験から、ファントム形状や着用部位、胸部への鉛エプロンの着用によっても頸部の線量計応答に有意な影響を及ぼさないことを明らかにした。さらに特性試験データを解析からは、頭部及び胸部がともに光子の照射角度が 75° となる場合を除いては、頭頸部での線量計測定値から水晶体吸収線量を 20% 以内で推定できた。これにより、新たな実用量で測定した場合においても、頸部での H_p の測定で妥当なモニタリングが可能と考えられた。 75° においては、こうした大きな角度での放射線入射に対する体幹部用線量計の応答が良くないことから、頸部の線量計測定値からの水晶体吸収線量推定に

は大きな不確かさが伴うことが分かった。

5.4 ワークショップの開催

令和4年度から令和6年度の事業で、計4回のワークショップを開催し、放射線防護に関わる大学等の研究者、校正事業者、線量計メーカー、電力会社等の方々に参加いただいて意見交換を行った。

初回などでは、新しい実用量を理解するのが難しいといった意見が多かったが、回を重ねるごとにその中身についての質問等が増え、理解が少しずつ進んでいると感じた。得られた意見としては、

- ・国際規格や規制当局で取り入れとなったら対応する
- ・今後新しい実用量が取り入れとなるまでのロードマップが知りたい
- ・このような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などがあった。

本事業のワークショップによって、関係者の新しい実用量への理解が促進されたと考えている。新しい実用量の取り入れは、放射線管理を行っている方全てに影響があることから、今後も多くのステークホルダーとの意見交換が重要であると考えている。

5.5 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) 等の国際機関及び国内外の関連学術団体の動向及び関連する文献の調査を実施した。ISO では、関係する規格や報告書などに反映されるような動きは見られなかったものの、IAEA 等の状況などを今後も注視していく必要がある。新たな実用量に関する研究としては、欧州を中心として徐々に活発化している状況にあるが、学術団体の研究発表会での直接の研究報告の例は少ない。ただし、線量計測上の新たな知見や放射線作業場に関する研究報告は多くなされており、新たな実用量への対応に応用できる個人線量計に係る研究なども散見されている。種々の議論を経て新たな実用量が各国の法令に取り込まれるとしても、少なくともまだ10数年はかかるであろうこと、国によっては現行の実用量を取り入れたばかりのところもあって様子見している研究者も多く、まだ大きな動きとはなっていない。しかしながら、国際機関の動向によっては議論や研究が活発化するものと考えられる。

現行実用量導入時の JAEA での対応の調査からは、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ことが分かった。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。

6 まとめ

令和4年度～令和6年度放射線対策委託費（新たな実用量への対応に向けた研究）事業において、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蓄積され、校正や試験ができる環境や放射線場のエネルギー分布などを測定する手法も整備された。海外の動向を見ても、世界に先駆けて新しい実用量に関する試験環境を整えることができたと考えている。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おり、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、円滑に放射線管理を行うことは困難である。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成果や課題を国内外の関係者で共有していくことが重要であると考えている。

謝辞

ワークショップでご講演を賜った遠藤章氏に深く感謝します。医療分野での光子スペクトル評価に関して多大なるご協力いただきました長崎大学 横山須美教授、玉熊佑紀助教、長崎大学病院 福田徹氏、川内野友彦氏、道越恭江氏に深く感謝します。またお忙しい中、本事業で開催しましたワークショップにご参加いただいた方々に深く御礼申し上げます。

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] 原子力規制庁 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）事業報告書 <https://www.nra.go.jp/data/000404697.pdf> (2022)
- [4] 原子力規制庁 令和4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測上の課題に関する研究）事業報告書 <https://www.nra.go.jp/data/000447895.pdf> (2023)
- [5] 原子力規制庁 令和5年度放射線対策委託費（新たな実用量への対応に向けた研究）事業報告書 <https://www.nra.go.jp/data/000473714.pdf> (2024)
- [6] International Commission on Radiation Units and Measurement (ICRU). *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources*. ICRU Report 39 (1985)
- [7] International Commission on Radiation Units and Measurement (ICRU). *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry*. ICRU Report 51 (1993)
- [8] 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)
- [9] C. Kessler et al., “Key comparison BIPM.RI(I)-K5 of the air-kerma standards of the NMIJ, Japan and the BIPM in ^{137}Cs gamma radiation”, *Metrologia* **50** 06007 (2013)
- [10] C. Kessler et al., “Key comparison BIPM.RI(I)-K1 of the air-kerma standards of the NMIJ, Japan and the BIPM in ^{60}Co gamma radiation”, *Metrologia* **59** 06017 (2023)
- [11] D. T. Burns et al., “Key comparison BIPM.RI(I)-K2 of the air-kerma standards of the NMIJ, Japan and the BIPM in low-energy x-rays”, *Metrologia* **52** 06008 (2015)
- [12] J. Ishii et al., “The NMIJ air kerma primary standard for high energy x-ray beams in 300–450 kV”, *Biomed. Phys. Eng. Express* **8** 015021 (2022)
- [13] D. T. Burns et al., “Key comparison BIPM.RI(I)-K3 of the air-kerma standards of the NMIJ, Japan and the BIPM in medium-energy x-rays”, *Metrologia* **60** 06022 (2023)
- [14] M. Kato et al., “APMP supplementary comparison report of absorbed dose rate in tissue for beta radiation (BIPM KCDB: APMP.RI(I)-S2)”, *Metrologia* **54** 06003 (2017)
- [15] R. Behrens et al., “EURAMET supplementary comparison of personal dose equivalent rate at 0.07 mm and 3 mm depth, $H_p(0.07)$ and $H_p(3)$ for beta radiation”, *Metrologia* **60** 06020 (2023)
- [16] International Organization for Standardization (ISO). Nuclear energy – Reference beta-particle radiation — Part 1: Methods of production. ISO 6980-1:2023 (2023)
- [17] Laboratoire National Henri Becquerel. Decay data Evaluation Project [cited 2024 Mar 23].

Available from: http://www.lnhb.fr/home/conferences-publications/ddep_wg/

- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 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)
- [21] International Organization for Standardization (ISO). Nuclear energy – Reference beta-particle radiation — Part 2: Calibration fundamentals related to basic quantities characterizing the radiation field. ISO 6980-2:2023 (2023)
- [22] 日本産業規格. 個人線量計校正用ファントム. JIS Z 4331 (2024)
- [23] International Electrotechnical Commission (IEC). Radiation Protection instrumentation – Dosimetry systems with integrating passive detectors for individual, workplace and environmental monitoring of photon and beta radiation, IEC 62387 (2020)
- [24] T. Matsumoto, A. Masuda, H. Harano, S. Manabe, Simulation study for design of long counter for standard neutron fields from 1 keV to 20 MeV at NMIJ/AIST, Radiation Protection Dosimetry 200 (13), 1251-1257 (2024). <https://doi.org/10.1093/rpd/nae151>
- [25] ” Technical Meeting on the Implications of the International Commission on Radiation Units and Measurements Report 95 on Operational Quantities for External Radiation Exposure”
<https://nucleus.iaea.org/sites/committees/CSS%20Draft/White%20Paper-%20TM%20on%20New%20OQs-%20EVT2402557-Final.pdf>
- [26] 吉富 寛、谷村嘉彦、辻 智也、西野 翔、ICRU95 の実用量を導入した場合の原子力施設における眼の水晶体線量管理への影響、第 5 回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会講演要旨集(2024)
- [27] 「原子力科学研究所等の放射線管理 (2022 年度)」, JAEA-Review 2023-044, DOI:10.11484/jaea-review-2023-044

別紙

令和6年度新たな実用量への対応に向けた研究
～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7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6年度新たな実用量への対応に向けた研究～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

| | | |
|----------|--------------------------------------|-----|
| J1. | 事業の背景と目的..... | 12 |
| J2. | 事業の実施体制 | 14 |
| J2.1 | 実施体制..... | 14 |
| J2.2 | 実施期間..... | 15 |
| J2.3 | 放射線標準施設棟（FRS） | 15 |
| J2.4 | 進捗管理..... | 18 |
| J3. | 事業の概要..... | 19 |
| J3.1 | 全体計画..... | 19 |
| J3.2 | 概要..... | 21 |
| J4. | 事業の成果..... | 24 |
| J4.1 | はじめに..... | 24 |
| J4.2 | 線量計の特性評価に関する調査 | 26 |
| J4.2.1 | S-Am 場に係る線量換算係数の評価 | 26 |
| J4.2.1.1 | 線量換算係数..... | 26 |
| J4.2.1.2 | S-Am 場..... | 27 |
| J4.2.1 | エネルギー応答と方向特性の評価..... | 31 |
| J4.2.1.1 | 方法..... | 31 |
| J4.2.1.2 | 特性の傾向..... | 36 |
| J4.2.2 | 課題の整理と対応策..... | 53 |
| J4.3 | 線量計の校正定数の決定と個人線量管理上の課題に関する調査 | 55 |
| J4.3.1 | 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 | 55 |
| J4.3.1.1 | 作業場の選定..... | 55 |
| J4.3.1.2 | 光子スペクトルの取得 | 56 |
| J4.3.1.3 | 光子エネルギー分布 | 63 |
| J4.3.1.4 | 放射線作業場における各線量の算出 | 72 |
| J4.3.1.5 | 放射線作業場における線量計のエネルギー応答 | 87 |
| J4.3.1.6 | 光子エネルギースペクトル及び方向特性の測定方法の開発 | 92 |
| J4.3.2 | 校正定数の決定に関する課題の調査 | 96 |
| J4.3.3 | 不均等照射に対する新たな実用量による個人線量管理に関する課題の調査 .. | 101 |
| J4.3.3.1 | ファントムや着用部位、鉛エプロンの影響の調査..... | 101 |
| J4.3.3.2 | 体幹部用線量計で代替測定する際の影響調査..... | 106 |
| J4.4 | 研究に必要な国内外の情報収集 | 110 |
| J4.4.1 | 国際機関 | 110 |

| | |
|---|-----|
| J4.4.1.1 ISO | 110 |
| J4.4.2 国内の学術団体 | 111 |
| J4.4.2.1 日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会 | 111 |
| J5. これまでの事業で得られた成果の総括 | 113 |
| J5.1 新たな実用量に対応した線量計の校正に関する調査 | 113 |
| J5.1.1 FRS に整備する校正場に対する線量換算係数の評価 | 113 |
| J5.1.2 方向特性試験方法の開発 | 118 |
| J5.1.3 トレーサビリティ確保に関する調査 | 119 |
| J5.2 線量計の特性評価に関する調査 | 120 |
| J5.3 線量計の校正定数の決定と個人線量管理上の課題に関する調査 | 124 |
| J5.3.1 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 | 124 |
| J5.3.2 校正定数の決定に関する課題の調査 | 128 |
| J5.3.3 不均等照射に対する新たな実用量による個人線量管理に関する課題の調査 .. | 128 |
| J5.4 研究に必要な国内外の情報収集 | 129 |
| J5.5 おわりに | 129 |
| 謝辞 | 130 |
| 参考文献 | 131 |

付録：第 5 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 J 2-1 | 事業の実施体制..... | 14 |
| 図 J 2-2 | 放射線標準施設棟の鳥瞰図 | 16 |
| 図 J 3-1 | 本事業の研究計画..... | 20 |
| 図 J 4-1 | S-Am 場の光子エネルギー分布..... | 28 |
| 図 J 4-2 | A 社製電離箱式サーベイメータの γ 線に対する特性試験の様子 | 34 |
| 図 J 4-3 | B 社製据置型 γ 線エリアモニタの γ 線に対する特性試験の様子..... | 34 |
| 図 J 4-4 | C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の β 線に対する特性試験の様子 | 35 |
| 図 J 4-5 | D 社製電子式個人線量計 (体幹部用) の γ 線に対する特性試験の様子 ... | 35 |
| 図 J 4-6 | 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..... | 36 |
| 図 J 4-7 | 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)) | 39 |
| 図 J 4-8 | A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{\text{local skin}}$ 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)) | 39 |
| 図 J 4-9 | A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{\text{local skin}}$ に対する $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線方向特性 (S-Cs $H^*(10)$ で校正 (規格化)) | 40 |
| 図 J 4-10 | A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{\text{local skin}}$ に対する ^{85}Kr β 線方向特性 (S-Cs $H^*(10)$ で校正 (規格化)) | 40 |
| 図 J 4-11 | A 社製電離箱式サーベイメータの $D'_{\text{local skin}}$ に対する β 線エネルギー特性 (入射角度: 0° 、S-Cs H^* で校正 (規格化)) | 41 |
| 図 J 4-12 | B 社製据置型 γ 線エリアモニタの $H^*(10)$ 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)) | 41 |
| 図 J 4-13 | C 社製 DIS 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)) | 42 |
| 図 J 4-14 | C 社製 DIS 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)) | 42 |
| 図 J 4-15 | C 社製 DIS 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)) | 43 |
| 図 J 4-16 | C 社製 DIS 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)) | 43 |
| 図 J 4-17 | C 社製 DIS 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)) | 44 |
| 図 J 4-18 | C 社製 DIS 個人線量計 (体幹部用) の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に係る光子に対するエネルギー特性 (入射角度: 0° 、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正 (規格化)) . | 44 |

| | |
|--|----------|
| 図 J 4-19 C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に係る光子に対するエネルギー特性 (入射角度: 30° 、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正 (規格化)) | 45 |
| 図 J 4-20 C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に係る光子に対するエネルギー特性 (入射角度: 60° 、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正 (規格化)) | 45 |
| 図 J 4-21 C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に係る光子に対するエネルギー特性 (入射角度: 75° 、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正 (規格化)) | 46 |
| 図 J 4-22 C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の $D_{p \text{ local skin}}$ に係る光子に対するエネルギー特性 (S-Cs $H_p(0^\circ)$ で校正 (規格化)) | 46 |
| 図 J 4-23 C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に係る β 線に対するエネルギー特性 (入射角度: 0° 、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正 (規格化)) | 47 |
| 図 J 4-24 C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に係る β 線に対するエネルギー特性 (入射角度: 30° 、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正 (規格化)) | 47 |
| 図 J 4-25 C 社製 DIS 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)) | 48 |
| 図 J 4-26 C 社製 DIS 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)) | 48 |
| 図 J 4-27 C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の $D_{p \text{ local skin}}$ に係る β 線に対するエネルギー特性 (S-Cs $H_p(0^\circ)$ で校正 (規格化)) | 49 |
| 図 J 4-28 D 社製電子式個人線量計 (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)) | 49 |
| 図 J 4-29 D 社製電子式個人線量計 (体幹部用) の $H_p(10)$ 及び H_p に係る S-Am の γ 線に対する方向特性 (S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正 (規格化)) | 50 |
| 図 J 4-30 E 社製受動形個人線量計 (水晶体用) の $H_p(3)$ 及び $D_{p \text{ lens}}$ 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)) | 50 |
| 図 J 4-31 E 社製受動形個人線量計 (水晶体用) の S-Am に対する方向特性 (S-Cs $H_p(3,0^\circ)$ で校正 (規格化)) | 51 |
| 図 J 4-32 E 社製受動形個人線量計 (水晶体用) の S-Cs に対する方向特性 (S-Cs $H_p(3,0^\circ)$ で校正 (規格化)) | 51 |
| 図 J 4-33 E 社製受動形個人線量計 (水晶体用) の S-Co に対する方向特性 | 52 |
| 図 J 4-34 E 社製受動形個人線量計 (水晶体用) の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線に対する方向特性 | 52 |
| 図 J 4-35 2"Φ×2"円筒形 NaI(Tl)検出器 | 56 |
| 図 J 4-36 取得した廃止措置中の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 (1) | 57 |
| 図 J 4-37 取得した廃止措置中の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 (2) | 58 |
| 図 J 4-38 取得した廃止措置中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) | 59 |
| 図 J 4-39 取得したホットラボ施設における 2"Φ×2"円筒形 NaI(Tl)検出器によるパルス波高スペクトル (1) | 59 |
| 図 J 4-40 取得したホットラボ施設における 2"Φ×2"円筒形 NaI(Tl)検出器によるパルス波高スペクトル (2) | 60 |
| 図 J 4-41 取得したホットラボ施設における 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) | 61 |
| 図 J 4-42 取得した建屋式保管廃棄施設における 2"Φ×2"円筒形 NaI(Tl)検出器によるパルス波高スペクトル (1) | 61 |
| 図 J 4-43 取得した建屋式保管廃棄施設における 2"Φ×2"円筒形 NaI(Tl)検出器によるパルス波高スペクトル (2) | 62 |
| 図 J 4-44 取得した建屋式保管廃棄施設における 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) | 63 |
| 図 J 4-45 廃止措置中の原子炉施設の作業場における光子エネルギー分布 (1) ... | 66 |
| 図 J 4-46 廃止措置中の原子炉施設の作業場における光子エネルギー分布 (2) ... | 67 |
| 図 J 4-47 廃止措置中の原子炉施設の作業場における光子エネルギー分布 (3) ... | 68 |
| 図 J 4-48 ホットラボ施設の作業場における光子エネルギー分布 (1) | 68 |
| 図 J 4-49 ホットラボ施設の作業場における光子エネルギー分布 (2) | 69 |
| 図 J 4-50 ホットラボ施設の作業場における光子エネルギー分布 (3) | 70 |
| 図 J 4-51 建屋式保管廃棄施設の作業場における光子エネルギー分布 (1) | 70 |
| 図 J 4-52 建屋式保管廃棄施設の作業場における光子エネルギー分布 (2) | 71 |
| 図 J 4-53 建屋式保管廃棄施設の作業場における光子エネルギー分布 (3) | 72 |
| 図 J 4-54 廃止措置中の原子炉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) | 84 |
| 図 J 4-55 廃止措置中の原子炉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) | 84 |
| 図 J 4-56 ホットラボ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) | 85 |
| 図 J 4-57 ホットラボ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) | 85 |
| 図 J 4-58 建屋式保管廃棄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) | 86 |
| 図 J 4-59 建屋式保管廃棄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) | 86 |
| 図 J 4-60 作業場モニタリングに関する線量計の廃止措置中の原子炉施設放射線作業場での応答評価..... | 89 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 図 J 4-61 | 個人モニタリングに関する線量計の廃止措置中の原子炉施設放射線作業場での応答評価..... | 89 |
| 図 J 4-62 | 作業場モニタリングに関する線量計のホットラボ施設放射線作業場での応答評価..... | 90 |
| 図 J 4-63 | 個人モニタリングに関する線量計のホットラボ施設放射線作業場での応答評価..... | 90 |
| 図 J 4-64 | 作業場モニタリングに関する線量計の建屋式保管廃棄施設放射線作業場での応答評価..... | 91 |
| 図 J 4-65 | 個人モニタリングに関する線量計の建屋式保管廃棄施設放射線作業場での応答評価..... | 91 |
| 図 J 4-66 | 各金属板の遮蔽効果の比較..... | 93 |
| 図 J 4-67 | コリメータの組立て構造図（上）及び外観（下）..... | 94 |
| 図 J 4-68 | コリメータに内包した CdZnTe 検出器による測定の様子..... | 95 |
| 図 J 4-69 | 0°照射時の遮蔽プラグ有り・無しそれぞれの波高スペクトル..... | 95 |
| 図 J 4-70 | 各入射角度における遮蔽プラグ有り・無しの差スペクトル..... | 96 |
| 図 J 4-71 | 作業場モニタリングに関する線量計の廃止措置中の原子炉施設放射線作業場での応答評価（新たな実用量の線質 S-Cs で校正）..... | 98 |
| 図 J 4-72 | 個人モニタリングに関する線量計の廃止措置中原子炉施設放射線作業場での応答評価（新たな実用量の線質 S-Cs で校正）..... | 98 |
| 図 J 4-73 | 作業場モニタリングに関する線量計のホットラボ施設放射線作業場での応答評価（新たな実用量の線質 S-Cs で校正）..... | 99 |
| 図 J 4-74 | 個人モニタリングに関する線量計のホットラボ施設放射線作業場での応答評価（新たな実用量の線質 S-Cs で校正）..... | 99 |
| 図 J 4-75 | 作業場モニタリングに関する線量計の建屋式保管廃棄施設放射線作業場での応答評価（新たな実用量の線質 S-Cs で校正）..... | 100 |
| 図 J 4-76 | 個人モニタリングに関する線量計の建屋式保管廃棄施設放射線作業場での応答評価（新たな実用量の線質 S-Cs で校正）..... | 100 |
| 図 J 4-77 | ファントム照射試験の様子..... | 103 |
| 図 J 4-78 | 校正用ファントムと人体形状ファントムでの線量計レスポンスの比較..... | 104 |
| 図 J 4-79 | 着用部位による体幹部用線量計②のレスポンスの比較..... | 105 |
| 図 J 4-80 | 鉛エプロンの有無による体幹部用線量計のレスポンスの比較..... | 106 |
| 図 J 4-81 | $D_{p \text{ lens}}(0^\circ) 1 \text{ mGy}$ 照射時において RANDO ファントム各部位に装着した線量計の指示値の比較..... | 107 |
| 図 J 5-1 | FRS に整備する光子校正場に関する新/現行実用量の線量換算係数の比較 ($H_p/H_p(10)$)..... | 114 |
| 図 J 5-2 | FRS に整備する光子校正場に関する新/現行実用量の線量換算係数の比較..... | |

| | | |
|----------|--|-----|
| | $(D_{p \text{ lens}}/H_p(3))$ | 115 |
| 図 J 5-3 | FRS に整備する光子校正場に関する新/現行実用量の線量換算係数の比較 $(D_{p \text{ local skin}}/H_p(0.07))$ | 116 |
| 図 J 5-4 | FRS に整備する β 線校正場に関する新/現行実用量の線量換算係数の比較 $(D_{p \text{ local skin}}/H_p(0.07))$ | 116 |
| 図 J 5-5 | FRS に整備する β 線校正場 ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場) に関する新/現行実用量の線量換算係数の比較 $(D_{p \text{ lens}}/H_p(3))$ | 117 |
| 図 J 5-6 | FRS に整備する中性子校正場に関する新/現行実用量の線量換算係数の比較 $(H_p/H_p(10))$ | 117 |
| 図 J 5-7 | FRS に整備する光子線校正場に関する $H_p(\text{ROT})$ と $H_p(0^\circ)$ の比較..... | 118 |
| 図 J 5-8 | FRS に整備する光子線校正場に関する $D_{p \text{ lens}}(\text{ROT})$ と $D_{p \text{ lens}}(0^\circ)$ の比較.... | 119 |
| 図 J 5-9 | 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 (場所のモニタリングにかかる実用量) | 127 |
| 図 J 5-10 | 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) | 127 |

目 次

| | | |
|----------|---|-----|
| 表 J 2-1 | FRS の主な γ 線校正場 | 16 |
| 表 J 2-2 | FRS の主な X 線校正場 | 17 |
| 表 J 2-3 | FRS の主な β 線校正場 | 17 |
| 表 J 2-4 | FRS の主な RI 中性子校正場 | 17 |
| 表 J 2-5 | FRS の主な単色中性子校正場 | 17 |
| 表 J 2-6 | 事業の進捗状況等の報告 | 18 |
| 表 J 3-1 | 特性評価した線量計とその試験項目一覧 | 23 |
| 表 J 4-1 | 現行実用量と新たな実用量 | 24 |
| 表 J 4-2 | 評価に用いた単色光子に対する線量換算係数 | 27 |
| 表 J 4-3 | 評価した S-Am 場における新・現行実用量に対する線量換算係数 | 29 |
| 表 J 4-4 | 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 | 33 |
| 表 J 4-5 | スペクトルを入手した放射線作業場 | 56 |
| 表 J 4-6 | 廃止措置中の原子炉施設作業場 (#1~#14) 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) | 75 |
| 表 J 4-7 | 廃止措置中の原子炉施設作業場 (#1~#14) における個人モニタリングにか かる実用量 (カーマ近似) | 76 |
| 表 J 4-8 | 廃止措置中の原子炉施設作業場 (#1~#14) における新・現行実用量の比較 (カーマ近似) | 77 |
| 表 J 4-9 | ホットラボ施設作業場 (#15~#26) 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) | 78 |
| 表 J 4-10 | ホットラボ施設作業場 (#15~#26) における個人モニタリングにか かる実用量 (カーマ近似) | 79 |
| 表 J 4-11 | ホットラボ施設作業場 (#15~#26) における新・現行実用量の比較 (カー マ近似) | 80 |
| 表 J 4-12 | 建屋式保管廃棄施設作業場 (#27~#40) 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) | 81 |
| 表 J 4-13 | 建屋式保管廃棄施設作業場 (#27~#40) における個人モニタリングにか かる実用量 (カーマ近似) | 82 |
| 表 J 4-14 | 建屋式保管廃棄施設作業場 (#27~#40) における新・現行実用量の比較 (カーマ近似) | 83 |
| 表 J 4-15 | ファントム照射試験条件 | 102 |
| 表 J 4-16 | 解析に使用した線量計及び特性試験データ | 107 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 表 J 4-17 | $D_{p\ lens}=1\ mGy$ となる場合に見込まれる線量計指示値の比較..... | 109 |
| 表 J 5-1 | 特性を評価した線量計の種類等の一覧（原子力機構での実施分）（1） . | 122 |
| 表 J 5-2 | 特性を評価した線量計の種類等の一覧（原子力機構での実施分）（2） . | 123 |
| 表 J 5-3 | スペクトルを取得した放射線作業場..... | 126 |

J1. 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（International Commission on Radiological Protection、以下「ICRP」という。）や国際原子力機関（International Atomic Energy Agency、以下「IAEA」という。）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。

こうした中で、ICRP と国際放射線単位・測定委員会（International Commission on Radiation Units and Measurements、以下「ICRU」という。）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^[4]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]の引き継ぎ、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である。

そうした中で、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]、令和 4 年度放射線対策費（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）事業（以下「令和 4 年度事業」という。）^[8]及び令和 5 年度放射線対策費（新たな実用量への対応に向けた研究）事業（以下「令和 5 年度事業」という。）において、国家標準機関及び二次標準機関の有するいくつかの校正場における新たな実用量に対応した線量換算係数が整備されるとともに、いくつかの代表的な線量計の特性評価に関する調査、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調査、

新たな実用量への対応に係る課題の調査、及び国内外の動向の調査が実施され、技術的知見の蓄積がなされてきたところである。

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。

J2. 事業の実施体制

J2.1 実施体制

本事業の実施体制図を図 J 2-1 に示す。原子力機構 原子力安全・防災研究所 安全研究センター リスク評価・防災研究グループに所属する 4 名に加えて、原子力機構 放射線標準施設棟（Facility of Radiation Standards、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所 放射線管理部 放射線計測技術課の 3 名（先のリスク評価・防災研究グループに所属する 3 名の本務先）、及び核燃料サイクル工学研究所 放射線管理部の 2 名の合計 6 名で、「（1）線量計の特性評価に関する調査」、「（2）線量計の校正定数の決定と個人線量管理上の課題に関する調査」及び「（3）研究に必要な国内外の情報収集」を実施した。

そのほか、（2）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所 放射線管理部、原子炉施設及びその廃止措置に関する知見を有する大洗原子力工学研究所 環境技術開発部及び廃棄施設に関する知見を有する原子力科学研究所 バックエンド技術部の助言を得た。

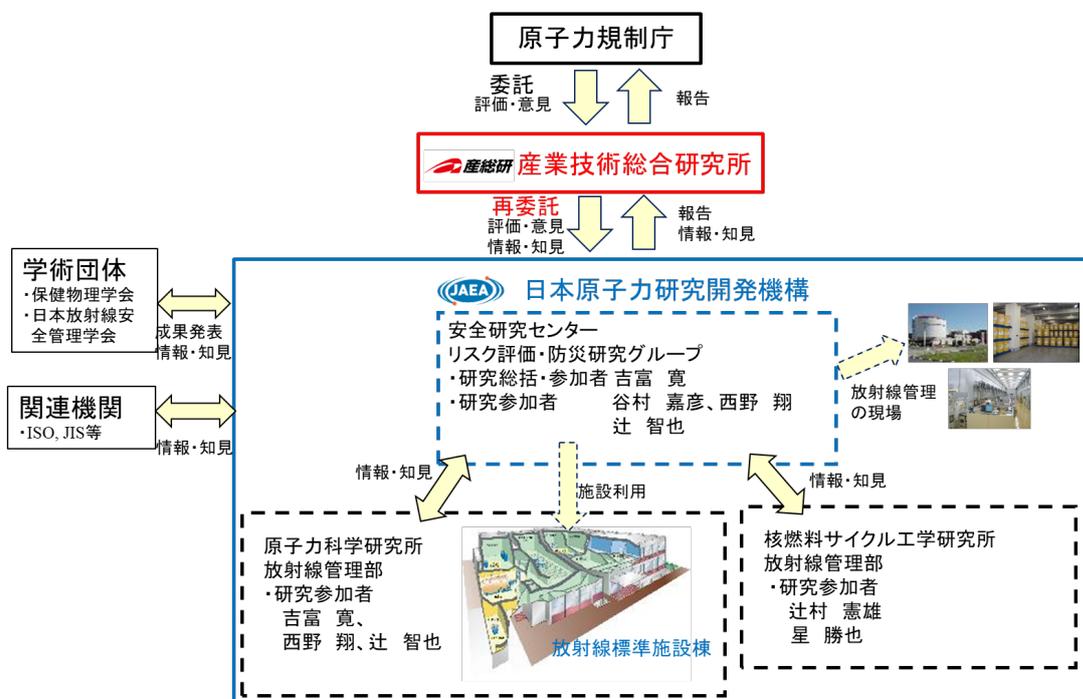


図 J 2-1 事業の実施体制

J2.2 実施期間

本事業は令和6年8月20日～令和7年2月28日の期間で実施した。

J2.3 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。ただし、X 線装置の不具合に伴い、X 線の試験については、国立研究開発法人産業技術総合研究所にて評価された校正場において試験を実施した。また、令和5年度事業までに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 J 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 J 2-1～表 J 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^[9]。放射線防護用の二次標準場として、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。また、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、放射線分野では国内唯一の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、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することが可能である^[10-12]。

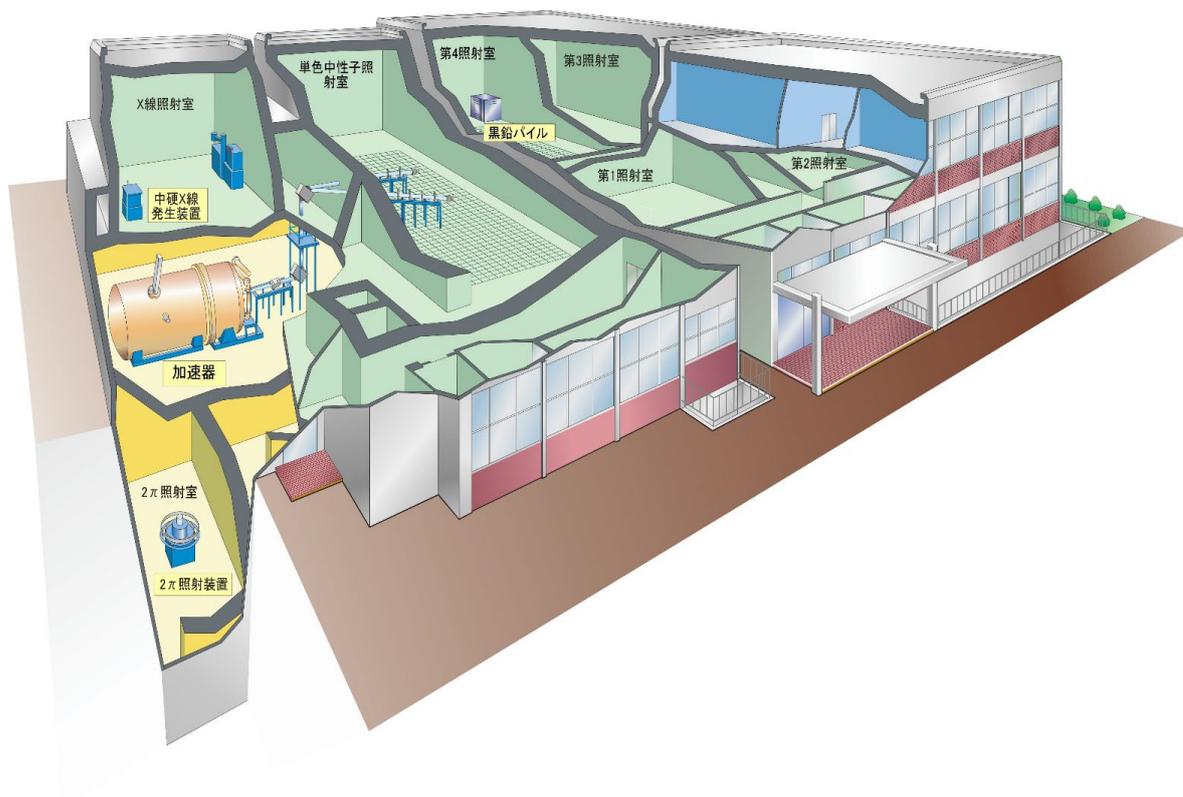


図 J 2-2 放射線標準施設棟の鳥瞰図

表 J 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) | $3 \mu\text{Sv/h} \sim 12 \text{mSv/h}$ |
| 低レベル照射装置 | 第 1 照射室 | ^{137}Cs (662 keV)*2 ^{60}Co (1250 keV)*2 | $7 \mu\text{Sv/h} \sim 40 \text{mSv/h}$ $6 \mu\text{Sv/h} \sim 120 \mu\text{Sv/h}$ |
| 中レベル照射装置 | 第 3 照射室 | ^{60}Co (1250 keV)*2 | $8 \mu\text{Sv/h} \sim 0.4 \text{Sv/h}$ |
| 2 π 照射装置 | 2 π 照射室 | ^{137}Cs (662 keV) ^{60}Co (1250 keV) | $2 \text{mSv/h} \sim 4 \text{mSv/h}$ $7 \mu\text{Sv/h} \sim 0.5 \text{mSv/h}$ |
| 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 | $8 \mu\text{Sv/h} \sim 100 \mu\text{Sv/h}$ $0.5 \mu\text{Sv/h} \sim 1 \mu\text{Sv/h}$ $0.5 \mu\text{Sv/h} \sim 60 \mu\text{Sv/h}$ $0.5 \mu\text{Sv/h} \sim 8 \mu\text{Sv/h}$ |
| 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 7 年 2 月現在、 *2 JIS 登録試験所の対象範囲

表 J 2-2 FRS の主な X 線校正場

| 照射装置 | 照射室 | 平均エネルギー範囲 | 線量当量率 ($H^*(10)$) 範囲 |
|------------------------|--------|--------------------------|--------------------------------|
| 中硬 X 線発生装置 (蛍光 X 線) | X 線照射室 | 20~260 keV ^{*1} | 4 μ Sv/h~2 Sv/h |
| | | 8.3 keV | 0.05mSv/h~3mSv/h ^{*2} |
| | | 17.6 keV | 1 μ Sv/h~90 μ Sv/h |
| | | 26.2 keV | 0.02 mSv/h~1mSv/h |

*1 JIS 登録試験所の対象範囲、*2 $H^*(0.07)$ の範囲として示した。

表 J 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} | 26 mSv/h |
| | | ⁸⁵ Kr (0.60 MeV) ^{*2} | 38 mSv/h |
| | | ¹⁴⁷ Pm (0.18 MeV) ^{*2} | 80 μ Sv/h |
| JAEA β 線照射装置 | β 線照射室 | ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y (2.0~2.2 MeV) | 5 mSv/h~140 mSv/h |
| | | ²⁰⁴ Tl (0.60 MeV) | 5 μ Sv/h~40 μ Sv/h |
| | | ¹⁴⁷ Pm (0.14~0.18 MeV) | 6 μ Sv/h~200 μ Sv/h |

*1 令和 7 年 2 月現在、*2JIS 登録試験所の対象範囲

表 J 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 |
| 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} | 30 μ Sv/h~80 μ Sv/h |
| 減速中 性子場 | | 重水減速場 | ²⁵² Cf (2.1 MeV) |
| | 黒鉛減速場 | ²⁴¹ Am-Be (2.1~2.2 MeV) | 20 μ Sv/h~50 μ Sv/h |

*令和 7 年 2 月現在、*2JIS 登録試験所の対象範囲

表 J 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 Sc(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

J2.4 進捗管理

本事業を開始するにあたり、令和6年9月3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J 2-6 参照）。さらに、令和7年2月4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。

表 J 2-6 事業の進捗状況等の報告

| 報告日 | 内容 |
|-----------|--|
| 令和6年9月3日 | キックオフ会合 |
| 令和6年9月30日 | 令和6年9月に係る進捗報告 (Web会議にて実施) |
| 令和6年11月6日 | 令和6年10月に係る進捗報告 (Web会議にて実施) |
| 令和6年12月6日 | 令和6年11月に係る進捗報告 (Web会議にて実施) |
| 令和7年1月14日 | 令和6年12月に係る進捗報告 (Web会議にて実施) |
| 令和7年2月4日 | 令和7年1月に係る進捗報告、成果の とりまとめについて (Web会議にて実施) |

J3. 事業の概要

J3.1 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、線量計の校正や使用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) 線量計の特性評価に関する調査」、「(2) 線量計の校正定数の決定と個人線量管理上の課題に関する調査」、及び「(3) 研究に必要な国内外の情報収集」の3つに分けて調査研究を実施する。

具体的な研究計画を図 J 3-1 に示す。「(1) 線量計の特性に関する調査」では、特性試験に資するために FRS に整備する ^{241}Am γ 線校正場における新たな実用量に対する線量換算係数を導出し評価する。 ^{241}Am γ 線校正場及び令和 5 年度事業までに新たな実用量への線量換算係数の導出が完了した光子校正場、 β 線校正場並びに国立研究開発法人産業技術総合研究所の X 線校正場を利用して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、現行の線量計を新たな実用量に対応させるための課題を整理し、必要な対応策について検討する。

「(2) 線量計の校正定数の決定と個人線量管理上の課題に関する調査」では、令和 5 年度事業までに検討した放射線作業場に加えて、散乱線など低エネルギー光子が主と考えられる以下の放射線作業場を対象を拡げ、光子エネルギー分布を取得する。

- ・ 保管廃棄施設もしくは廃止措置を行っている施設

光子エネルギー分布を入手できた場合については線量計のエネルギー応答を評価し、新たな実用量を導入した場合に、既存の線量計・線量率計を使用する際の課題を抽出、整理して必要な対応策について検討する。また、これらの放射線作業場における光子エネルギー分布及びその方向特性の測定に適するコリメータを検討し、整備する。また、上記で解析対象とした線量計について、新たな実用量に対応する校正定数を定める際の課題を検討する。その際、新たな実用量の校正定数を1つの基準放射線に対して決定した線量計・線量率計を、多様なエネルギー分布を持つ放射線作業場で運用する際の課題の有無の観点で検討する。さらに、不均等照射に対する新たな実用量による個人線量管理に関する課題の調査として、頸部に装着した体幹部用線量計による実用量測定で、水晶体用線量計による測定を代替する場合の課題について調査する。

「(3) 研究に必要な国内外の情報収集」に関しては、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、ISO 等の新たな実用量への

対応に係る国際機関及び関連する国内の学術団体（日本保健物理学会）の動向について情報収集を行うとともに、研究発表会での発表を通じて適宜事業内容に関連する国内外の専門家と情報交換等を行い、事業成果の向上・精緻化を図る。

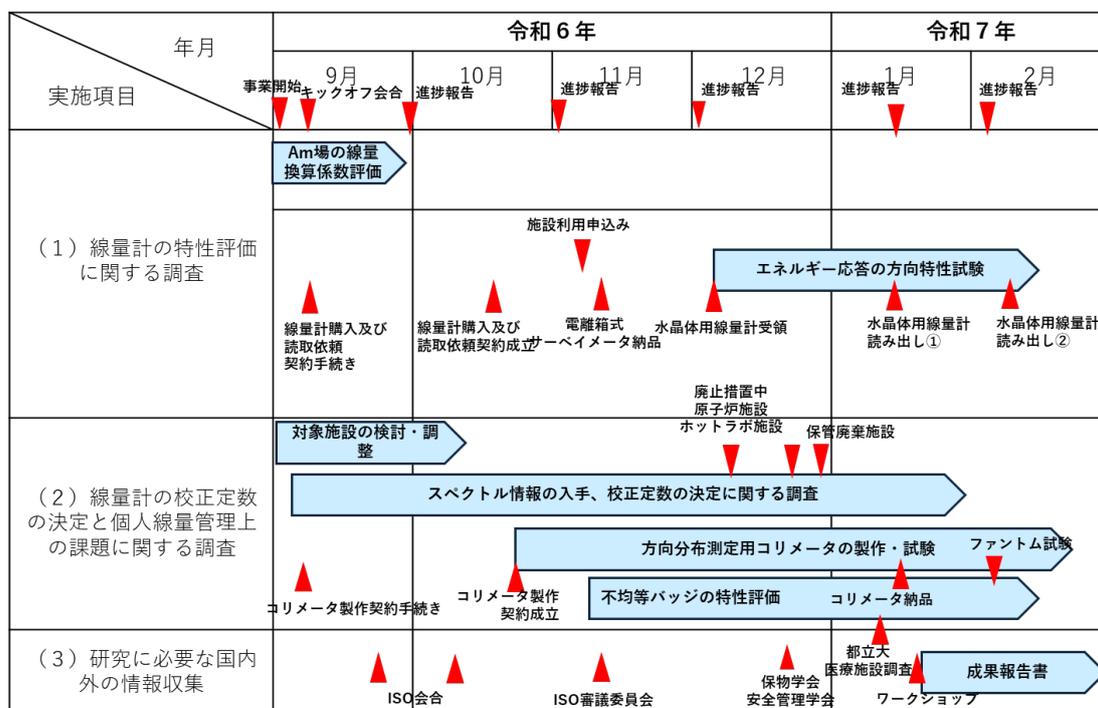


図 J 3-1 本事業の研究計画

J3.2 概要

J3.1 で示した計画に沿って「(1) 線量計の特性評価に関する調査」、「(2) 線量計の校正定数の決定と個人線量管理上の課題に関する調査」、及び「(3) 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) 線量計の特性評価に関する調査

令和 5 年度事業までに新たな実用量への線量換算係数の導出が完了した光子校正場及び β 線校正場に加えて、 ^{241}Am 線源を利用した γ 線校正場に対する線量換算係数を導出し、線量計のエネルギー特性に関するデータを以下のとおり取得した。

(a) エネルギー応答と方向特性の評価

令和 5 年度事業までに評価対象としておらず国内で入手可能な 3 機種（光子用サーベイメータ、光子用エリアモニタ、光子・ β 線用電子式線量計（DIS 線量計）及び眼の水晶体用の受動形個人線量計）及び令和 5 年度事業までにエネルギー特性は評価したが方向特性については評価されていなかった光子用電子式線量計を追加し、特性に関する傾向について検討した。これらのデータと評価結果を踏まえ、既存の線量計を新たな実用量に対応させるための課題を整理し、必要な対応策について検討した。表 J 3-1 に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。

(2) 線量計の校正定数の決定と個人線量管理上の課題に関する調査

令和 5 年度事業までにおいて、法令等により作業者の個人線量管理、及び線量又は線量率の測定が要求される現場を類型化して整理し、原子力施設及び放射線使用施設の放射線作業場を対象として、実測あるいは入手した光子エネルギースペクトルデータの解析によって、新たな実用量及び現行の実用量の定義に基づいたエネルギー応答が評価された。これらの成果を踏まえ、本事業においては、(a) 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、(b) 校正定数の決定に関する課題の調査、及び(c)不均等照射に対する新たな実用量による個人線量管理に関する課題の調査を行った。

(a) 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

令和 5 年度次長までに検討した放射線場に加えて、低エネルギー光子源や散乱線において特徴を有する以下の放射線作業場を対象を拡げ、光子エネルギー分布を入手した。

- ・ 廃止措置中の原子炉施設
- ・ ホットラボ施設
- ・ 建屋式保管廃棄施設

また、これらの作業場における光子エネルギー分布及びその方向依存性を測定するために必要なコリメータを製作した。

さらに、令和5年度までの事業において得られた線量計応答を利用して、これらの放射線作業場における新たな実用量のエネルギー応答を解析し、整理した。

(b) 校正定数の決定に関する課題の調査

(a)の結果に基づき、解析対象とした線量計について新たな実用量に対応する校正定数を定める際の課題を検討し、その結果を整理した。これらの原子力施設においては、S-Cs に対して校正された線量計・線量率計を用いても、ほとんどのケースで妥当な測定が可能であることが分かった。²⁴¹Am などの低エネルギー光子が支配的な放射線作業場において、エネルギー特性が大きく変化するエリアモニタ等によって測定する場合は、その特性を十分に把握しておくことが望ましい。

(c) 不均等照射に対する新たな実用量による個人線量管理に関する課題の調査

頸部に装着した体幹部用線量計による実用量測定で、水晶体用線量計による測定を代替する運用は、現状の眼の水晶体の線量管理においてしばしば行われている。そこで、頸部に装着した体幹部用線量計と眼部に装着した水晶体用線量計について、それぞれ新たな実用量を測定した場合、頸部に装着した体幹部用線量計の指示から妥当な水晶体線量の推定が得られるか検証した。まず、ファントム形状（校正用の簡易型ファントムと人体形状を模擬したファントム）、着用部位や鉛エプロンの着用が線量計の指示に影響を与えないことを確認した。令和5年度事業までに得られた校正用ファントムを使用した線量計の方向特性試験結果も活用し、頭部及び胸部への放射線の入射方向が変わったときの頸部に装着した体幹部用線量計と眼部に装着した水晶体用線量計により見込まれる線量指示値を比較した。その結果、65 keV 付近の光子に対しては、頭部及び胸部がともに75°方向から被ばくする状況を除いては、頸部の線量計から適切に眼の水晶体の線量を推定することが可能であることが示唆された。

(3) 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・審議を行う国際標準化機構（International Organization for Standardization (ISO)）専門委員会（ISO/TC85/SC2）や関連する国内学術団体として日本保健物理学会及び日本放射線安全管理学会の状況について、会議等への参加を通じて情報収集を行い、得られた情報を本報告書にまとめた。

表 J 3-1 特性評価した線量計とその試験項目一覧

| 線質 線量計 | 光子 | | | | β線 | | |
|-------------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------------------------|------------------|-------------------|
| | ²⁴¹ Am | ¹³⁷ Cs | ⁶⁰ Co | X線 ¹⁾ | ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y | ⁸⁵ Kr | ¹⁴⁷ Pm |
| 光子・β線用サーベイメータ | | | | | | | |
| A (電離箱式) | ○ | ○ | ○ | — | ○ | ○ | ○ |
| 光子用エリアモニタ | | | | | | | |
| B (GM計数管) | ○ | ○ | ○ | — | — | — | — |
| 光子・β線用電子式個人線量計 (体幹部) | | | | | | | |
| C (DIS ²⁾) | ○* | ○* | ○* | ○* | ○* | ○* | ○* |
| 光子用電子式個人線量計 (体幹部) | | | | | | | |
| D (Si半導体) ³⁾ | ○* | ○ | ○ | ○ | — | — | — |
| 光子・β線用受動形個人線量計 (水晶体) | | | | | | | |
| E (TL ⁴⁾) | ○* | ○* | ○* | ○* | ○* | — | — |

[凡例]○：実施、—：対象外、*：角度特性含む

¹⁾国立研究開発法人産業技術総合研究所で実施 ²⁾Direct Ion Storage ³⁾過年度実施分を含む ⁴⁾熱ルミネッセンス

J4. 事業の成果

J4.1 はじめに

現行の放射線防護において使用される ICRU Report 39/51^[J2,J3]に基づく実用量（以下「現行実用量」という。）と ICRU Report 95^[J5]で提唱された実用量（以下「新たな実用量」という。）を表 J 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 J 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_{plens} |
| 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 $D_{\text{plocal skin}}$ |

(令和元年度事業成果報告書^[J6]及び ICRU Report 95^[J5]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線量換算係数の積として定義されており、線量換算係数は、放射線の種類、エネルギー及び角度に応じて ICRU Report 95^[J5]に示されている。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線量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。
- ・ 現行実用量と比較して、より幅広い線種、エネルギー及び照射角度に対して線量換算係数が示されている。

- ・ 水晶体吸収線量については、ICRU Report 95^[J7]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付属書 C に参考として示されている。本事業においては、特に断りのない限り、水晶体全体にわたって平均化された水晶体吸収線量を取り扱った。

線量換算係数は、放射線のエネルギーや入射角度によって大きく変化し、実用量の定義変更に伴い現行実用量と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、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。令和 5 年度事業までに FRS に整備した主な校正場については、線量換算係数が評価された^[J7-J9]。

J4.2 線量計の特性評価に関する調査

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、また試験により、使用される領域での特性を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5年度事業までに、FRSに整備するISO 4037-1^[J13] (JIS Z 4511^[J14])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までの狭スペクトルシリーズ(Nシリーズ)の連続X線場、ラジエータとして銅、モリブデン及び錫を利用した蛍光X線場、¹⁹F(p, α γ)¹⁶O反応を利用した高エネルギー γ 線場、ISO 6980-1^[J15] (JIS Z 4514^[J16])に準拠した¹⁴⁷Pm、⁸⁵Kr及び⁹⁰Sr線源を使用した β 線場、ISO 8529-1^[J17] (JIS Z 4521^[J18])に準拠した²⁴¹Am-Be速中性子場、²⁵²Cf速中性子場、熱中性子場、重水減速中性子場及び単色中性子場に加えて黒鉛減速場について、新たな実用量に対する線量換算係数が評価された。FRSでは、これらに加えて²⁴¹Am線源を使用した γ 線場(以下「S-Am」という。)を整備^[J19]しており(表J 2-2参照)、単色性のよい場が利用可能である。特性試験に利用するため、まず、S-Am場に係る線量換算係数を評価した。

また、令和5年度事業までに国立研究開発法人産業技術総合研究所に整備される国家標準のX線校正場においても新たな実用量に対する線量換算係数が評価されている。

これらの校正場を利用し、現在の放射線管理で普及している線量計のエネルギー応答と方向特性を評価し、現行の線量計の新たな実用量への対応に関する技術的な課題を抽出し、必要な対応策について整理した。

J4.2.1 S-Am場に係る線量換算係数の評価

J4.2.1.1 線量換算係数

S-Am場に係る線量換算係数の評価に用いた単色光子に対する線量換算係数を表J 4-2に示した。新たな実用量の線量換算係数は何れもカーマ近似に対するものである。

表 J 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 ^[J20] Table A.21 | H^*/K_a | ICRU 95 ^[J5] Table A.5.1b |
| $H'(3, \alpha)/K_a$ | ISO 4037-3 ^[J21] Table 7 | $D'_{\text{lens}}(\alpha)/K_a$ | ICRU 95 ^[J5] Table A.5.3b |
| $H'(0.07, \alpha)/K_a$ | ICRP 74 ^[J20] Table A.21 | $D'_{\text{local skin}}(\alpha)/K_a$ | ICRU 95 ^[J5] Table A.5.4.1b |
| $H_p(10, \alpha)/K_a$ | ICRP 74 ^[J20] Table A.24 | $H_p(\alpha)/K_a$ | ICRU 95 ^[J5] Table A.5.2b |
| $H_p(3, \alpha)_{\text{cyl}}/K_a$ | ISO 4037-3 ^[J21] Table 39 | $D_{\text{plens}}(\alpha)/K_a$ | ICRU 95 ^[J5] Table A.5.3b |
| $H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}/K_a$ | ISO 4037-3 ^[J21] Table 33 ^{※2} | $D_{\text{plens}}(\alpha)_{\text{slab}}/K_a$ | ICRU 95 ^[J5] Table A.5.4.1b |

※1 α は入射角度を表す。

※2 $H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}/K_a$ については、ICRP 74^[J20]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^[J21]の線量換算係数を用いた。

J4. 2. 1. 2 S-Am 場

光子校正場について、ISO 4037-1^[J13]や JIS Z 4511^[J14]では X 線を用いた校正場のほか、²⁴¹Am 線源を用いた標準場についても規定されており、FRS では ISO 4037-1 に則った ²⁴¹Am 標準場を整備している^[J19]。X 線を用いた線質では、制動放射線を利用するために連続スペクトルを有するが、²⁴¹Am 標準場は放射性壊変に伴う γ 線を利用するため、極めて単色性が高い。また、線源がステンレス製保護カプセルに封入されていることでより低エネルギーの γ (X) 線が遮へいされており、59.5 keV の γ 線のみを照射することができる場となっている。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

CdTe 検出器 (EMF 社製 123 型) を用いて得られた光子エネルギー分布 $d\Phi/dE$ ^[J19] (図 J 4-1) から、(1)式により換算係数を算出した。図 J 4-1 に示されるとおり、エネルギー分布の単色性は極めて高い。

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

ここで、 $\Delta\Phi_i$ 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^[J5] Table A6 に示される数値を使用した。 $(H/K_a)(E_i)$ は、表 J 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。

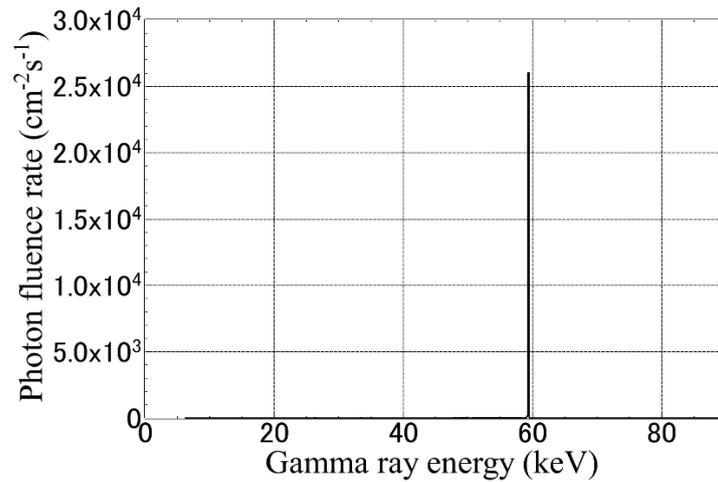


図 J 4-1 S-Am 場の光子エネルギー分布

(2) 結果と考察

評価した線量換算係数を表 J 4-3 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 ISO 4037-3^[J21]や JIS Z 4511^[J14]に S-Am に対する $H'(3)$ と $H_p(3)$ を除く実用量についての線量換算係数が示されており、 $H_p(0.07)_{\text{slab}}$ の 30° 以上を除いてほぼ同等の値となっている。 30° 以上の $H_p(0.07)_{\text{slab}}$ の違いは換算係数の算出に用いた光子フルエンスから空気カーマへの換算係数(K_a/Φ)(E_i)が ISO 4037-3の単色光子を基にした今回の算出と ICRU Report 95の単色光子を基にしている ISO 4037-3や JIS Z 4511で異なっているためである^[J19]。

(3) まとめ

S-Am について、新たな実用量に対する線量換算係数を導出した。以降の線量計の特性評価にあたっては、表 J 4-3 に示した線量換算係数を使用することとする。今回算出された線量換算係数と ISO 4037-3^[J21]や JIS Z 4511^[J14]に示される線量換算係数との差は JIS Z 4511 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である 2%以内に収まっていた。その不確かさについては、今回評価しなかったが、標準不確かさ 2%を以降の解析では使用する。

表 J 4-3 評価した S-Am 場における新・現行実用量に対する線量換算係数

(a) 実効線量の管理に用いる実用量 (場所のモニタリングに関するもの)

| 線質 | \bar{E} (MeV) | $H^*(10)/K_a$ (Sv/Gy) | H^*/K_a (Sv/Gy) |
|------|--------------------|--------------------------|----------------------|
| S-Am | 0.0592 | 1.73 | 1.31 |

(b) 実効線量の管理に用いる実用量 (個人モニタリングに関するもの)

| 線質 | $H_p(10, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy) | | | | | | $H_p(\alpha)/K_a$ (Sv/Gy) | | | | | | | | |
|------|----------------------------------|------|------|------|------|------|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° | 90° | 180° | ROT |
| S-Am | 1.88 | 1.86 | 1.82 | 1.71 | 1.49 | 1.05 | 1.31 | 1.30 | 1.23 | 1.11 | 0.96 | 0.75 | 0.54 | 0.81 | 0.83 |

(c) 眼の水晶体の線量管理に用いる実用量 (現行実用量)

| 線質 | $H'(3, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy) | | | | | | | $H_p(3, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy) | | | | | | |
|------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° | 90° | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° | 90° |
| S-Am | 1.67 | 1.67 | 1.65 | 1.61 | 1.53 | 1.37 | 0.96 | 1.66 | 1.65 | 1.63 | 1.60 | 1.53 | 1.40 | 1.10 |

(d) 眼の水晶体の線量管理に用いる実用量 (新たな実用量)

| 線質 | $D_{\text{lens}}(\alpha)/K_a$ (Gy/Gy) | | | | | | | |
|------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° | 90° | ROT |
| S-Am | 1.56 | 1.57 | 1.60 | 1.60 | 1.59 | 1.53 | 1.47 | 0.98 |

表 J 4-3 評価した S-Am 場における新・現行実用量に対する線量換算係数（続き）

(e) 局所的な皮膚の線量管理に用いる実用量（現行実用量）

| 線質 | $H'(0.07, \alpha)/K_a$ (Sv/Gy) | | | | | | $H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}/K_a$ (Sv/Gy) | | | | | |
|------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|--|------|------|------|------|------|
| | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° |
| S-Am | 1.57 | 1.56 | 1.55 | 1.55 | 1.53 | 1.45 | 1.70 | 1.67 | 1.63 | 1.55 | 1.42 | 1.31 |

(f) 局所的な皮膚の線量管理に用いる実用量（新たな実用量）

| 線質 | $D_{\text{local skin}}(\alpha)_{\text{slab}}/K_a$ (Gy/Gy) | | | | | |
|------|--|------|------|------|------|------|
| | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° |
| S-Am | 1.76 | 1.75 | 1.73 | 1.69 | 1.61 | 1.46 |

J4.2.1 エネルギー応答と方向特性の評価

令和3年度事業報告書^[47]、令和4年度事業報告書^[48]及び令和5年度事業報告書^[49]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、光子用サーベイメータ3機種、中性子用サーベイメータ3機種、光子・β線用受動形個人線量計（体幹部用）3機種、中性子用受動形個人線量計（体幹部用）2機種、光子・β線用電子式個人線量計1機種、光子用電子式個人線量計1機種、中性子用電子式個人線量計2機種、光子・β線用受動形個人線量計（水晶体用）1機種、光子・β線用受動形個人線量計（末端部用）1機種、光子用受動形個人線量計（末端部用）1機種、β線用受動形個人線量計（末端部用）1機種に示される計20機種について、国家標準及び二次標準機関の校正・試験場を利用したエネルギー・方向特性試験の結果が示されている。しかし、水晶体用受動形個人線量計に関しては、国内で広く使用されている線量計が他に1機種あるほか、最近では電子式と受動形の間位置するハイブリッドタイプのものも市販されている。作業場モニタリングに用いる線量計に関しても、放射線管理の現場でしばしば使用されている低エネルギー光子の測定に適した電離箱式のサーベイメータや原子力施設において使用されている検出構造の違う据置型エリアモニタについても試験されていなかった。そこで、これらの線量計5機種についてエネルギー及び方向特性を取得し、その傾向について解析することとした。

J4.2.1.1 方法

使用した線量計を表J4-4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に主眼を置いており、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、各線量計の仕様範囲や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。また、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おらず、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^[22]等に従い不確かさを評価した。

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。

$$R = \frac{G}{C} \quad (2)$$

ここで、 C は基準器により測定した空気カーマ(率)もしくは組織吸収線量(率)に令和5年度事業までに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。 R が1に近いほどその線量計の特性は良好であると判断される。

照射については、 γ 線及び β 線についてはFRSで実施し、X線領域については国立研究開発法人産業技術総合研究所で実施した。

A社製電離箱式サーベイメータについては、大気条件補正を施した。B社製据置型 γ 線エリアモニタについては、接続したレートメータにより指示値を読み取った。体幹部用個人線量計についてはスラブファントムに、水晶体用個人線量計についてはシリンダーファントムに設置した状態で照射した。C社製DIS線量計については、照射後リーダーにより指示値を読み取った。E社製受動形個人線量計については、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J 4-2～図J 4-6に示す。なお、方向特性については、本来は、基準方向に対して垂直方向及び水平方向の両方向、さらに基準方向に対して対称でない場合には、プラス方向とマイナス方向のそれぞれに対して試験すべきであるが、本事業では特性の傾向を把握する目的のため、一方向のみの照射とした。

表 J 4-4 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・β線用サーベイメータ | A 社製電離箱式サーベイメータ | $H^*(10)$ $H(0.07)$ ²⁾ | 検出器：電離箱 検出放射線：7 keV 以上（光子） 100 keV 以上（β線） |
| (ii) 光子用エリアモニタ | B 社製据置型γ線エリアモニタ | $H^*(10)$ | 検出器：GM 計数管 測定範囲：－（光子） |
| (iii) 光子・β線用電子式個人線量計 （体幹部用） | C 社製 DIS 線量計（体幹部用） | $H_p(10)$ $H_p(0.07)$ | 検出器：DIS（Direct Ion Storage） 測定範囲：15 keV～9 MeV（光子） 0.24 MeV～2.2 MeV（β線） |
| (iv) 光子用電子式個人線量計 | D 社製電子式個人線量計（体幹部用） | $H_p(10)$ | 検出器：Si 半導体 測定範囲：40keV 以上（光子） |
| (v) 光子・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：TL（ ⁷ LiF:Mg,Ti） 測定範囲：24 keV～1.25 MeV（光子） 0.8 MeV（β線） |

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ある。

2) 検出器窓面に 440 mg/cm²のスライドがついており、このスライドを開けることによって測定する。

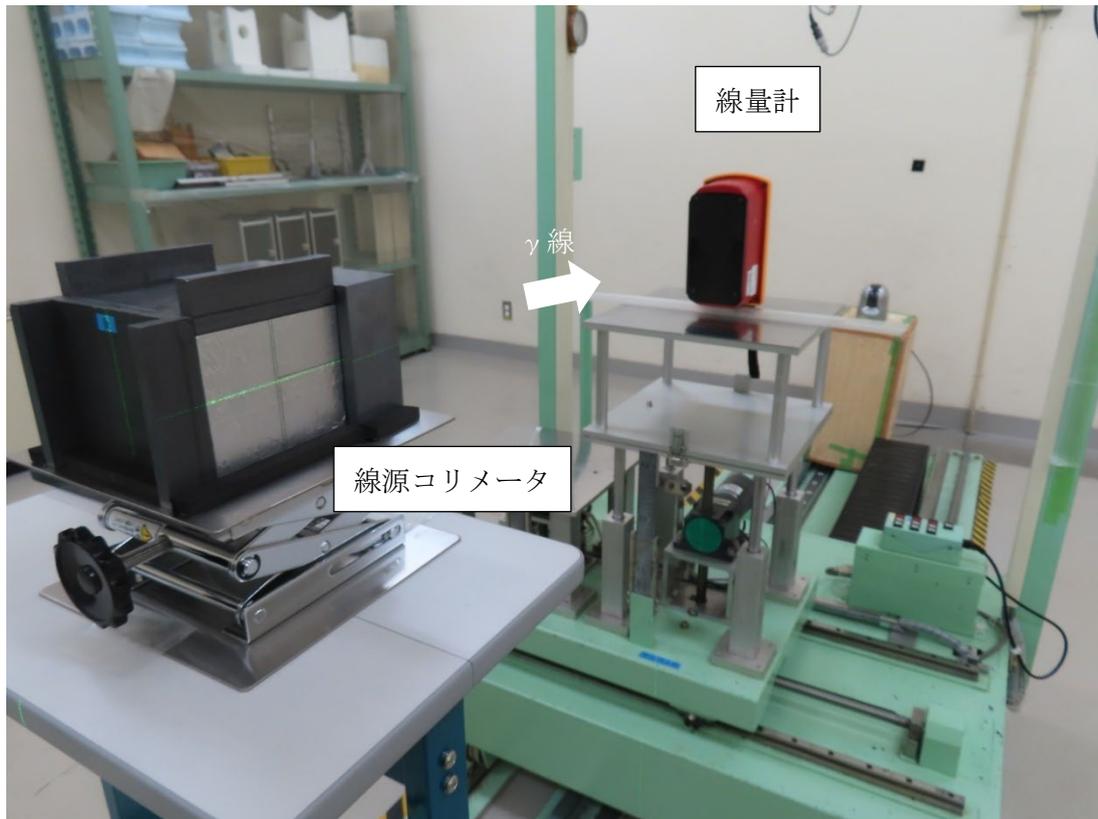


図 J 4-2 A 社製電離箱式サーベイメータの γ 線に対する特性試験の様子

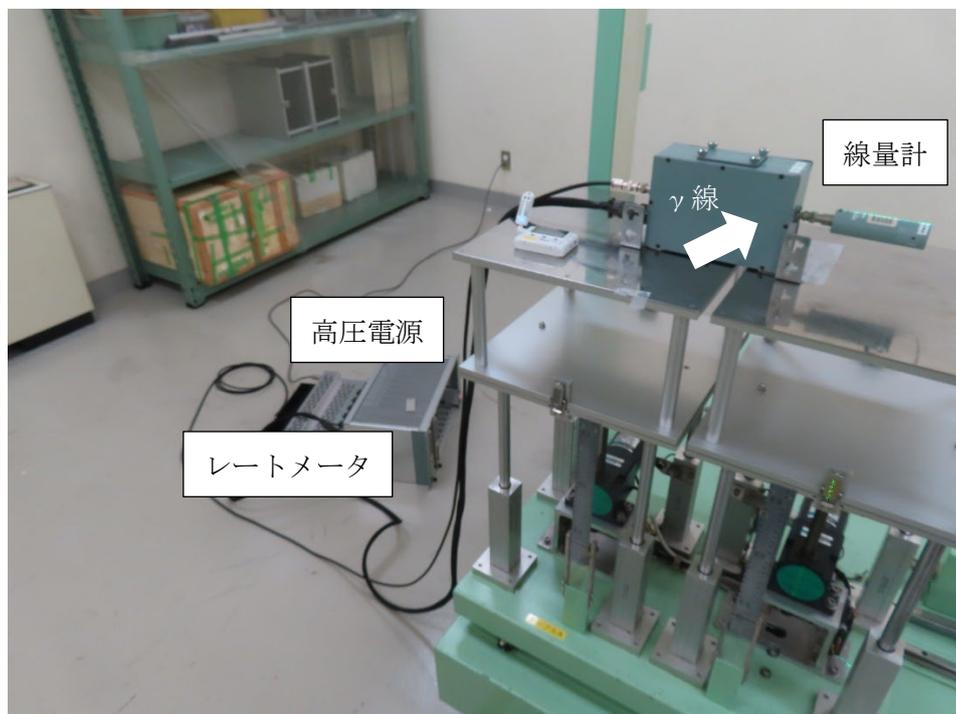


図 J 4-3 B 社製据置型 γ 線エリアモニタの γ 線に対する特性試験の様子

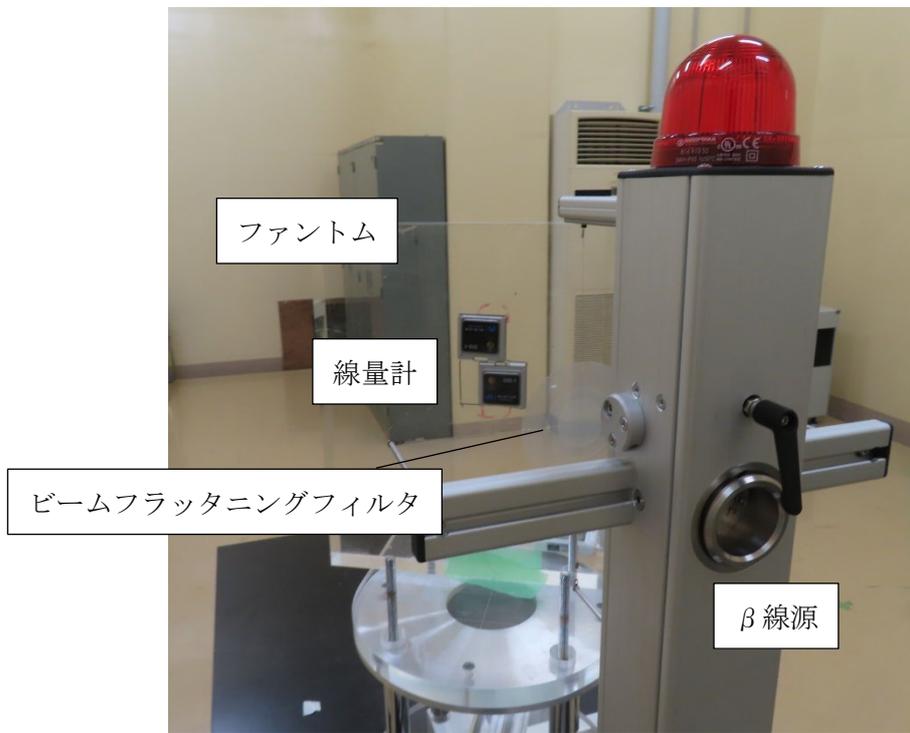


図 J 4-4 C 社製 DIS 線量計（体幹部用）の β 線に対する特性試験の様子

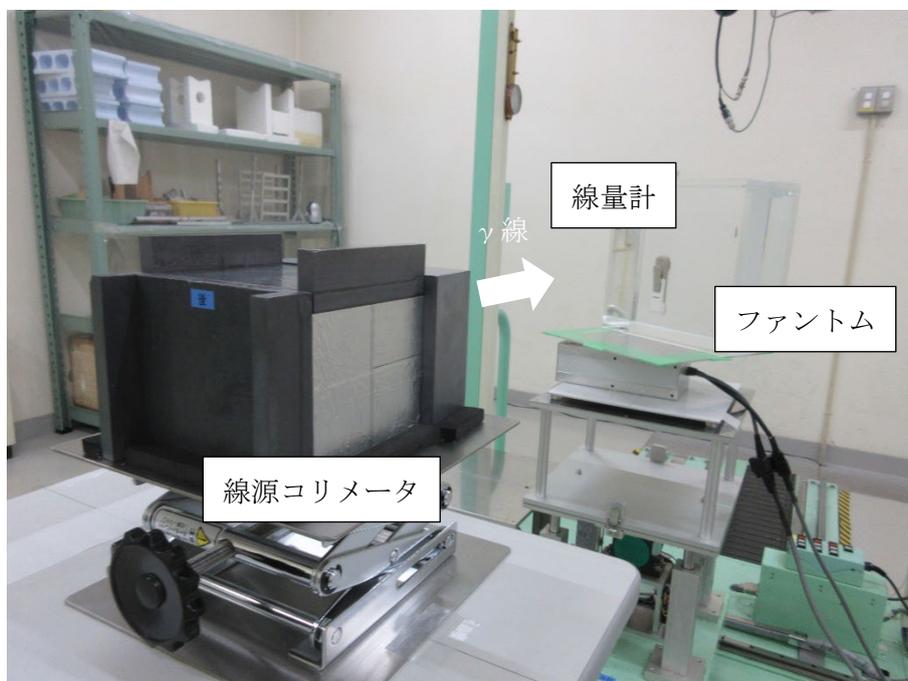


図 J 4-5 D 社製電子式個人線量計（体幹部用）の γ 線に対する特性試験の様子

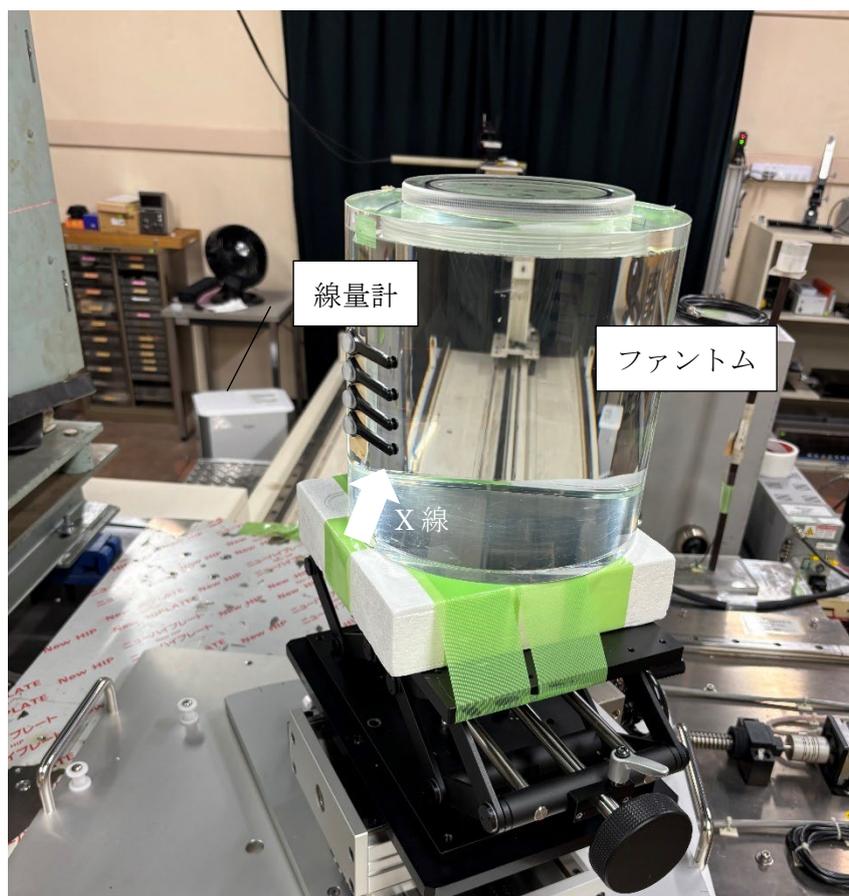


図 J 4-6 E 社製受動形個人線量計（水晶体用）の X 線に対する特性試験の様子

J4.2.1.2 特性の傾向

特性試験の結果を図 J 4-7～図 J 4-34 に示す。各図において、縦軸は式(2)で定義する R である。また、光子及び β 線に関して図中に示した破線は IEC 60846-1^[J23]（サーベイメータ）、IEC 62387^[J24]（受動形個人線量計）及び IEC 61526^[J25]（電子式個人線量計）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図示していることに注意が必要である。これらから示唆されるそれぞれの線量計の特性の傾向について以下にまとめた。

① 光子・ 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 J 4-7～図 J 4-11 参照）

- ・電離箱式ということもあり、光子に対するエネルギー特性は優れている。 H^* 特性もこの領域では、変化はほとんどないが、全体的に 2 割程度過大応答する。
- ・ β 線に対する $D'_{\text{local skin}}$ 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

化しないが、電離箱深さが厚いために特性は良好ではない。図 J 4-11 に示されるとおり、S-Cs を利用した H^* で再校正することにより全体的に過小応答することになる。

- ・本機種は 7 keV 以上の光子に対して感度があるとされており、今回調査したエネルギー範囲の下限は 59.5 keV であるが、 H^* と $H^*(10)$ の線量換算係数はこれより低エネルギーの領域でさらに乖離が大きくなるため、この領域での光子に対する H^* 特性を取得し、影響を検討する必要がある。

② 光子用エリアモニタ (B 社製据置型 γ 線エリアモニタ)

(図 J 4-12 参照)

- ・検出器として GM 計数管を採用しており、数 100 keV 以下のエネルギーの光子に対しては、現行実用量においても過大応答し特性は良好ではないが、新たな実用量では、この領域での応答はさらに増大してしまう。ただし、本エリアモニタは、定置に据え置いてトレンドを監視する目的のものであり、定置する放射線作業場のエネルギーに近い線質で校正すれば、新たな実用量においても目的に合致した測定を行い得ることができるものと考えられる。

③ 光子・ β 線用電子式個人線量計 (C 社製 DIS 線量計 (体幹部用))

(図 J 4-13～図 J 4-27 参照)

- ・電離箱検出器をベースとした線量計であるため、光子に対する H_p エネルギー特性は良好ではあるものの、現行実用量では 60 keV 以下の低エネルギー領域でレスポンスは小さくなる。この特性により新たな実用量で問題となる低エネルギー領域での過大応答性が軽減される。入射角度が大きくなるにつれその応答は過大になるが、図 J 4-17 に示されるとおり、S-Cs を利用した H_p で再校正することにより方向特性も含め調査範囲内においては IEC 62387^{U24)} で示される許容範囲内の応答を示した。
- ・光子に関する $D_{p, local skin}$ 特性についても現行と変化なく良好であるが、60 keV 以下の低エネルギーで 60° 以上の入射角度が大きい場合には 30% 程度以上過小応答となる。S-Cs を利用した、 H_p で再校正することにより全体的に応答は小さくなり、60 keV 以下では IEC 62387^{U24)} で示される許容範囲を超えた過小応答を示す。
- ・ β 線に関する $D_{p, local skin}$ 特性についても現行と変わらないが、 ^{147}Pm については、その過小応答性が新たな実用量では軽減される。方向特性については $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 及び ^{85}Kr のどちらにおいても、角度とともにその応答は小さくなるが、実用量の変更による変化はなく、線量計自身のもつ特性である。光子の場合と同様に S-Cs を利用した、 H_p で再校正することにより全体的に応答は小さくなる。

④ 光子用電子式個人線量計 (D 社製電子式個人線量計 (体幹部用))

(図 J 4-28～図 J 4-29 参照)

- S-Am 以外についての特性は令和 5 年度事業報告書^[9]図 J4-133 から取得したものである。
- 測定範囲が 40 keV 以上の光子を対象とした線量計であり、40 keV を下回ると急激にレスポンスが低下する。そのため、実用量変更による変化の大きい領域は、線量計の仕様範囲外となるため影響は少ない。全体的な過大応答性については、 H_p で再校正することにより軽減できるものと考えられる。
- 60 keV 付近における方向特性については、 60° 入射においては 0° と比較して H_p では 1.6 倍程度過大に応答する。本線量計は、60 keV 付近で応答が最大となる特性を有しているため、大きな角度で入射した場合の過大応答性については留意する必要がある。

⑤ 光子・ β 線用受動形個人線量計 (E 社製受動形個人線量計 (水晶体用))

(図 J 4-30～図 J 4-34 参照)

- 光子に対する $D_{p \text{ lens}}$ 特性に関しては、エネルギー特性、方向特性とも現行実用量と変わらず良好である。しかしながら、他機種である令和 4 年度事業で試験された E 社製受動形個人線量計 (水晶体用) と同様 (令和 4 年度事業原子力機構報告書^[8]図 4-116)、低エネルギーで応答は増大するが、IEC 62387^[24]に規定される許容範囲内に収まっている。
- β 線に係る $D_{p \text{ lens}}$ 特性は、 $H_p(3)$ と比較して $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場の 0° に対する応答も 2 倍以上となるほか、方向依存性も異なり、大きく変化する。本機種は、1 つの素子で光子及び 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り、令和 4 年度事業で試験された E 社製受動形個人線量計 (水晶体用) と同様の課題がある。すなわち、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。一方、方向特性については、現行実用量で 60° 以上の大きな角度で見られた過大応答性は新たな実用量では改善される。

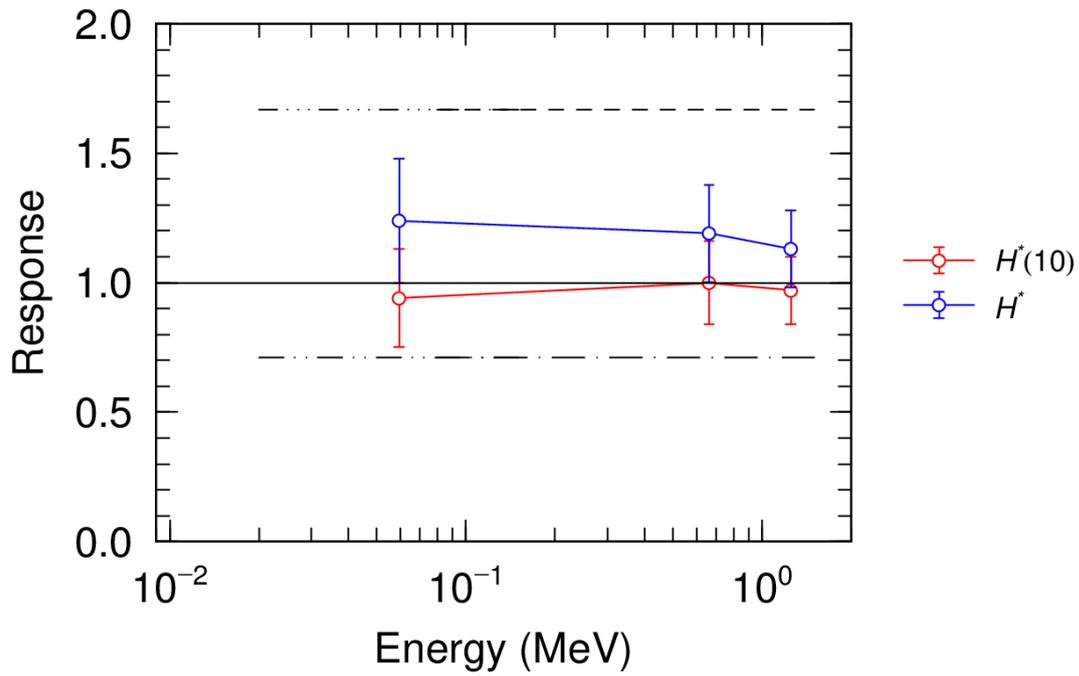


図 J 4-7 A 社製電離箱式サーベイメータの $H^*(10)$ 及び H^* に対する光子エネルギー特性 (入射角度: 0° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正 (規格化))

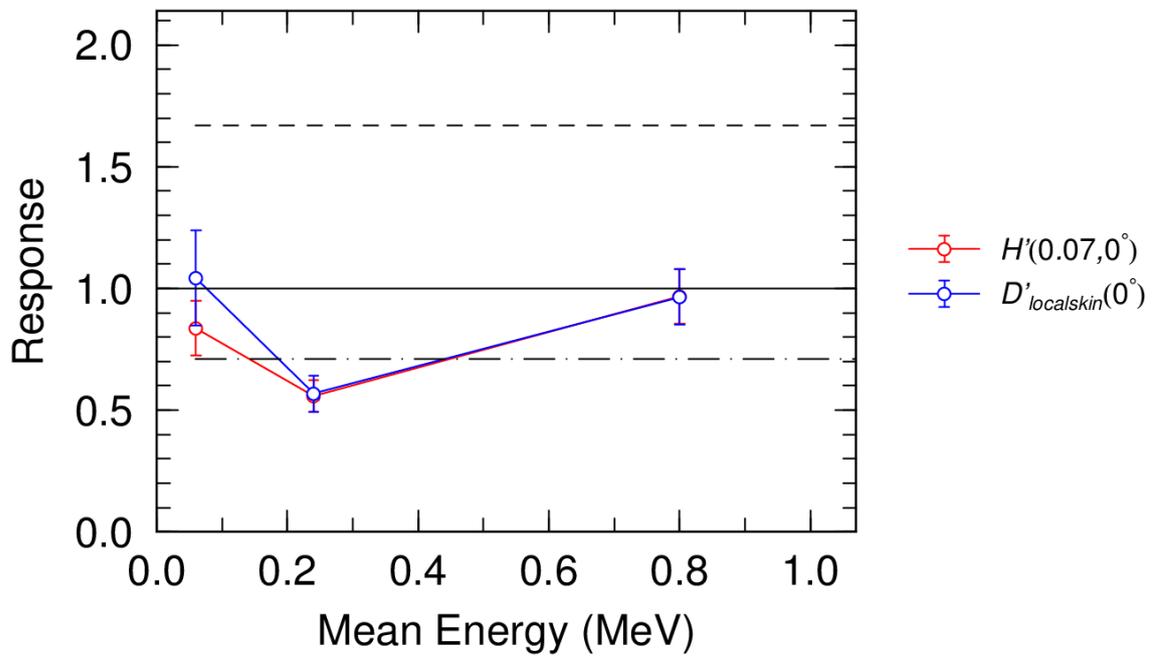


図 J 4-8 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する β 線エネルギー特性 (入射角度: 0° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正 (規格化))

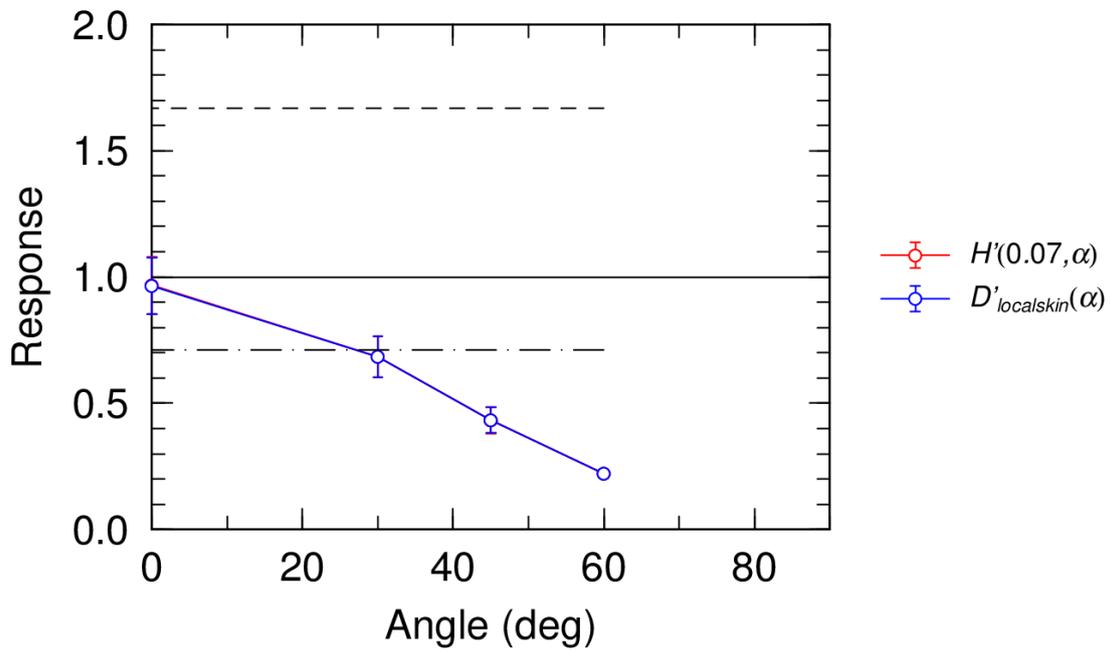


図 J 4-9 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線方向特性 (S-Cs $H^*(10)$ で校正 (規格化))

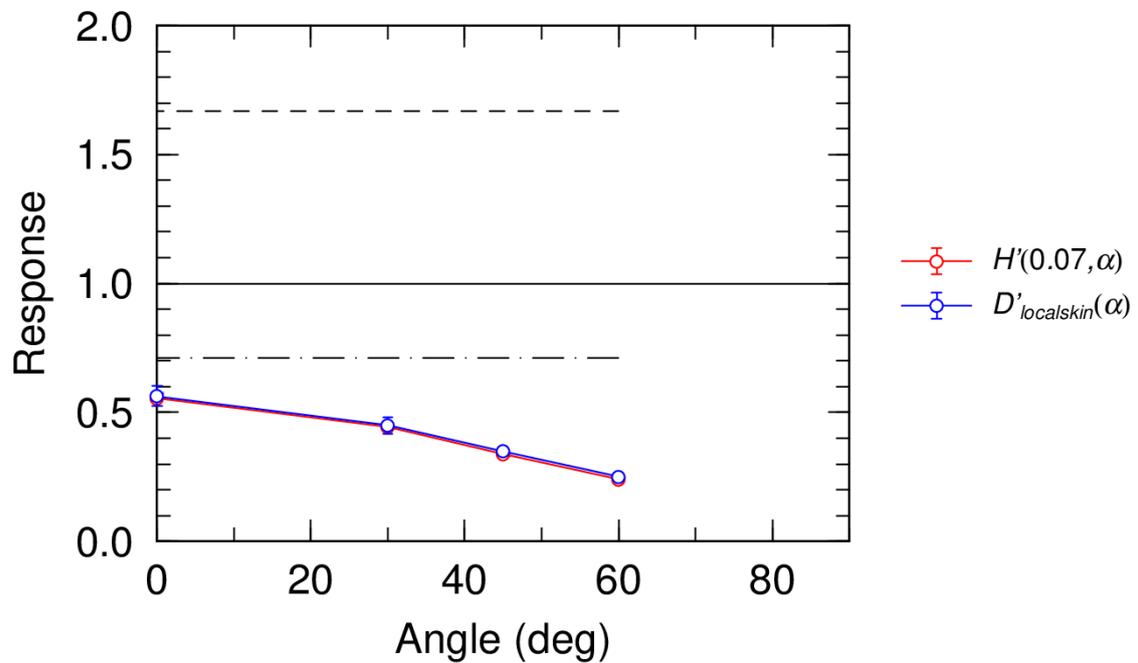


図 J 4-10 A 社製電離箱式サーベイメータの $H'(0.07)$ 及び $D'_{local\ skin}$ に対する ^{85}Kr β 線方向特性 (S-Cs $H^*(10)$ で校正 (規格化))

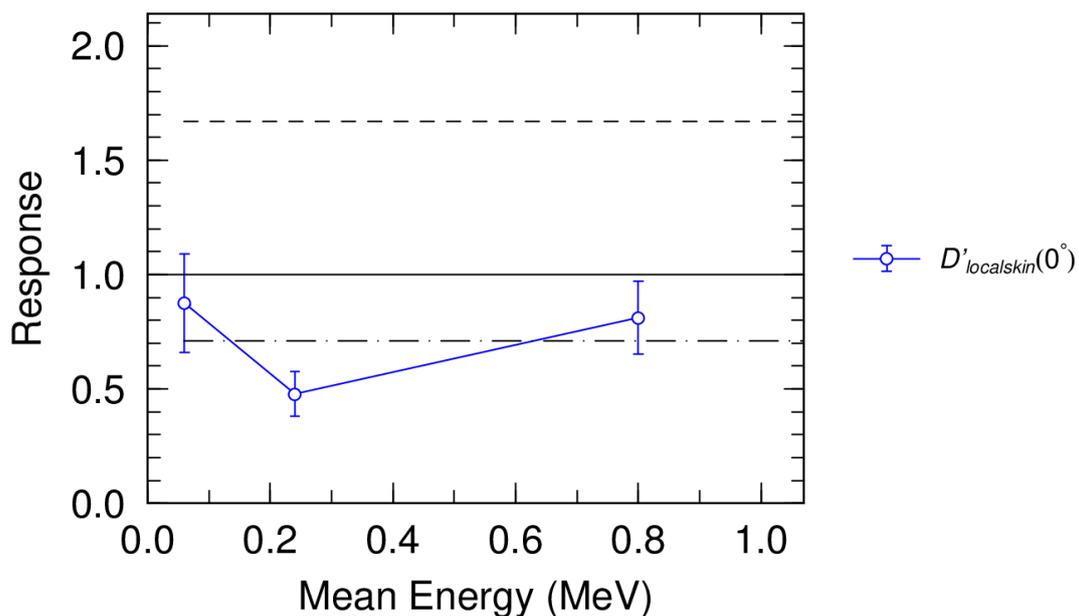


図 J 4-11 A 社製電離箱式サーベイメータの $D'_{local\ skin}$ に対する β 線エネルギー特性 (入射角度 : 0° 、S-Cs H^* で校正 (規格化))

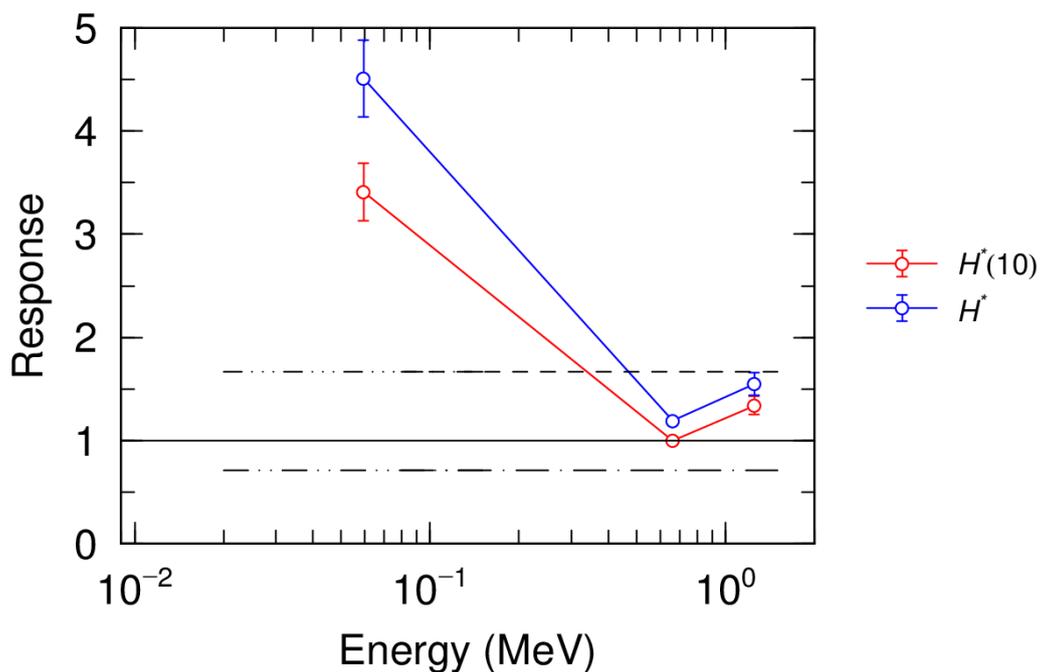


図 J 4-12 B 社製据置型 γ 線エリアモニタの $H^*(10)$ 及び H^* に対する光子エネルギー特性 (入射角度 : 0° 、S-Cs $H^*(10)$ で校正 (規格化))

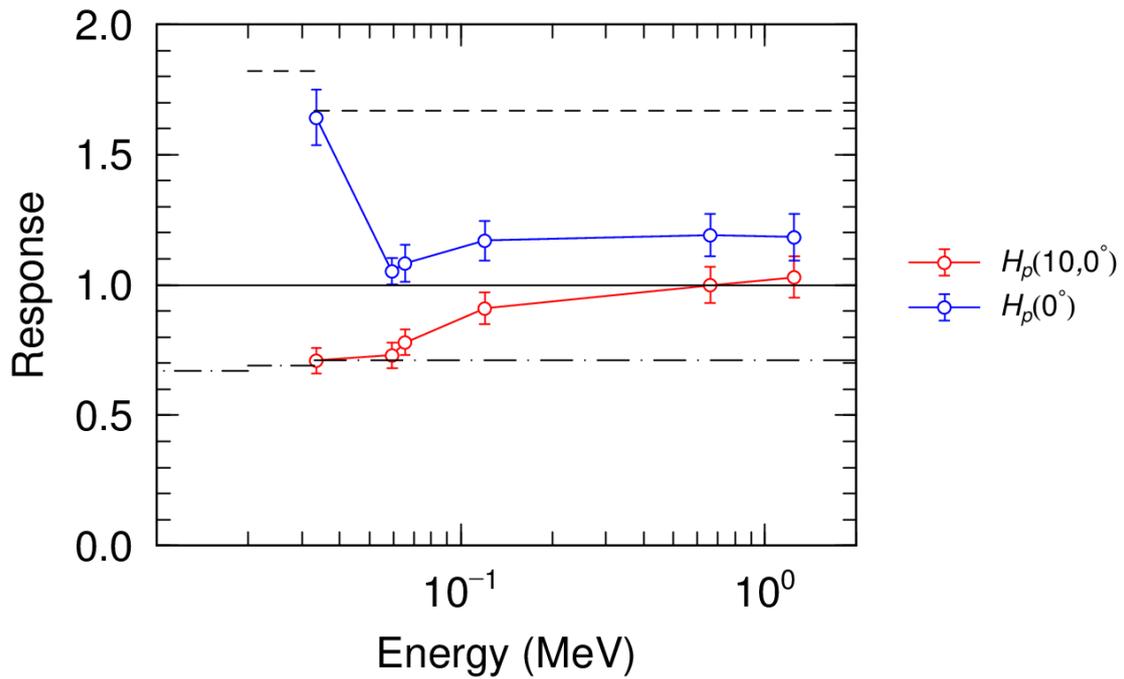


図 J 4-13 C 社製 DIS 線量計（体幹部用）の $H_p(10)$ 及び H_p に対する光子エネルギー特性
（入射角度： 0° 、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正（規格化））

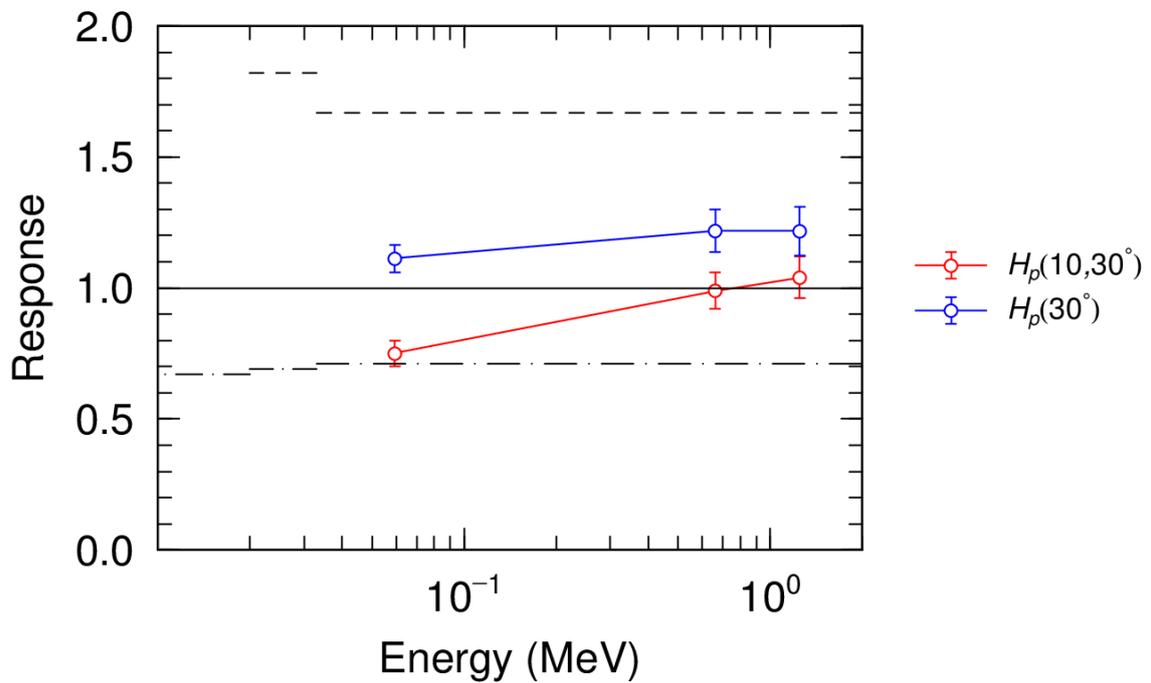


図 J 4-14 C 社製 DIS 線量計（体幹部用）の $H_p(10)$ 及び H_p に対する光子エネルギー特性
（入射角度： 30° 、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正（規格化））

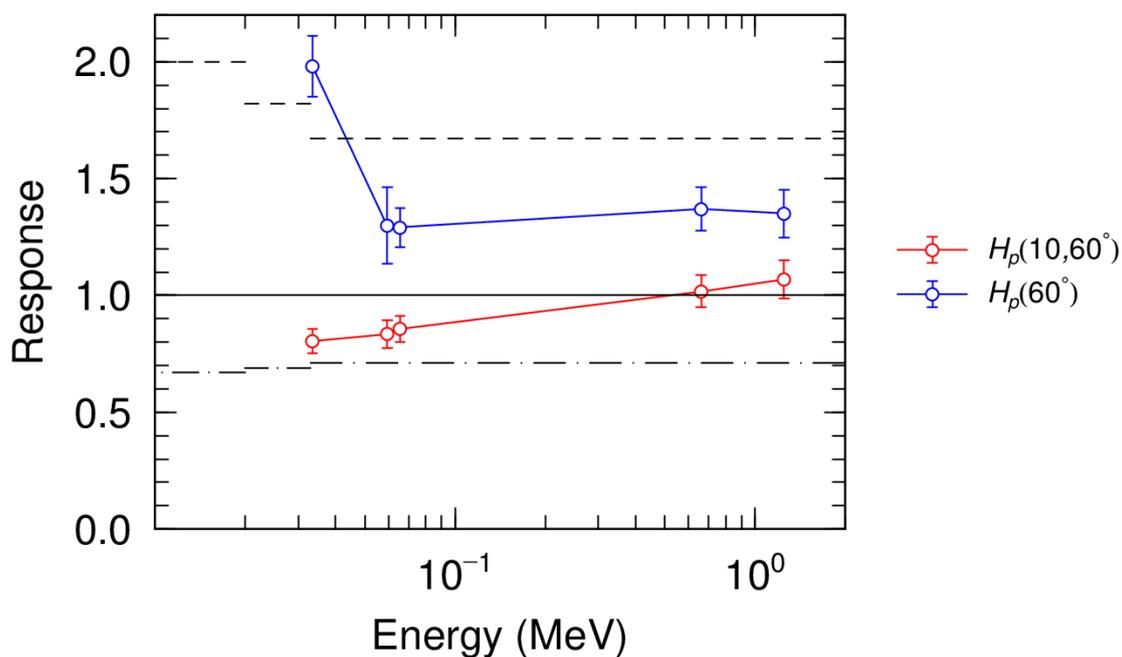


図 J 4-15 C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の $H_p(10)$ 及び H_p に対する光子エネルギー特性 (入射角度 : 60° 、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正 (規格化))

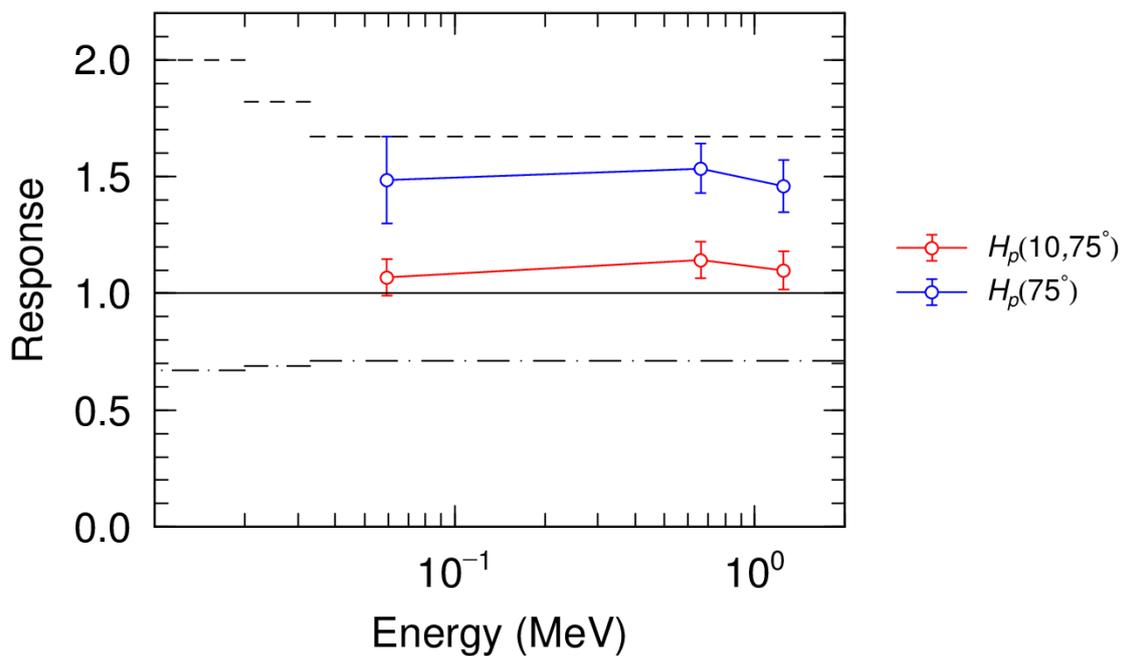


図 J 4-16 C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の $H_p(10)$ 及び H_p に対する光子エネルギー特性 (入射角度 : 75° 、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正 (規格化))

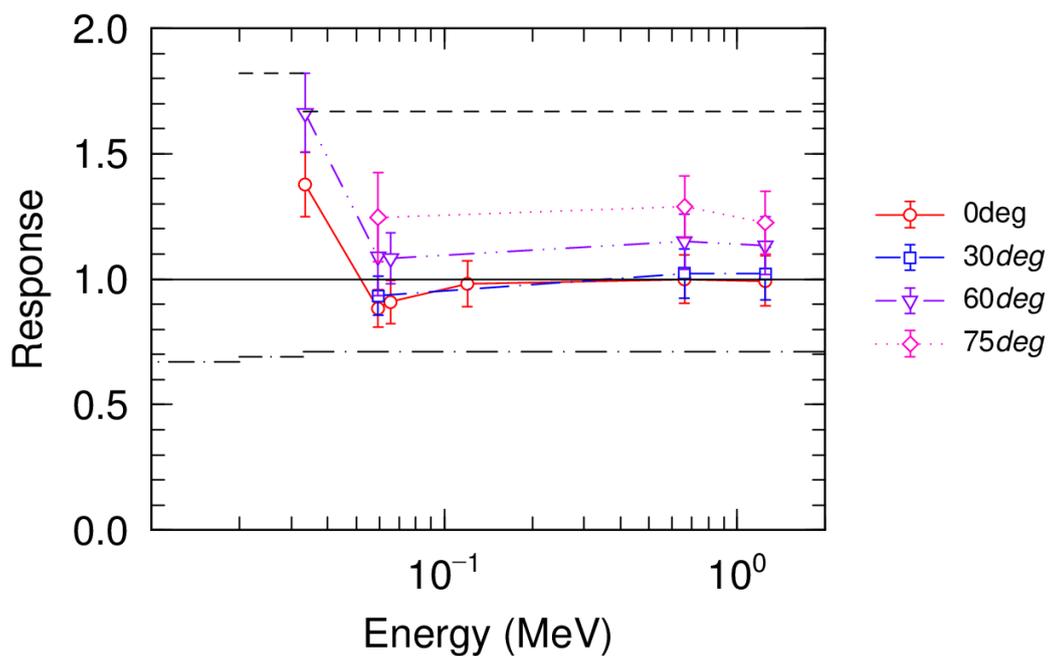


図 J 4-17 C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の H_p に対する光子エネルギー特性 (S-Cs $H_p(0^\circ)$ で校正 (規格化))

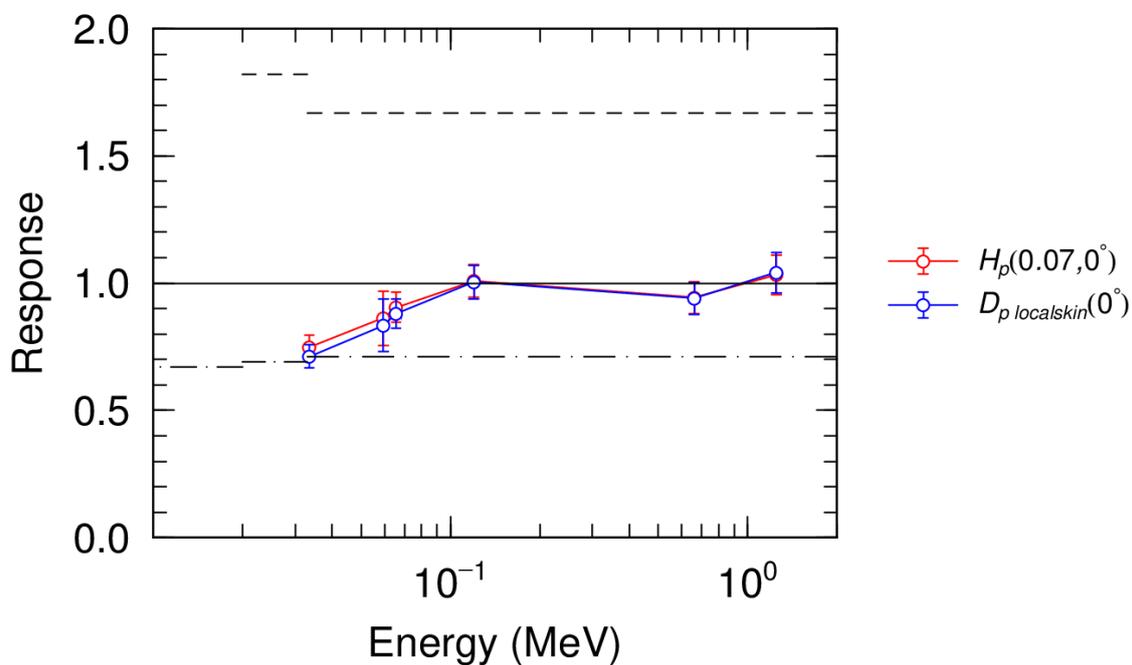


図 J 4-18 C 社製 DIS 個人線量計 (体幹部用) の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p,local\ skin}$ に係る光子に対するエネルギー特性 (入射角度: 0° 、S-Cs $H_p(10, 0^\circ)$ で校正 (規格化))

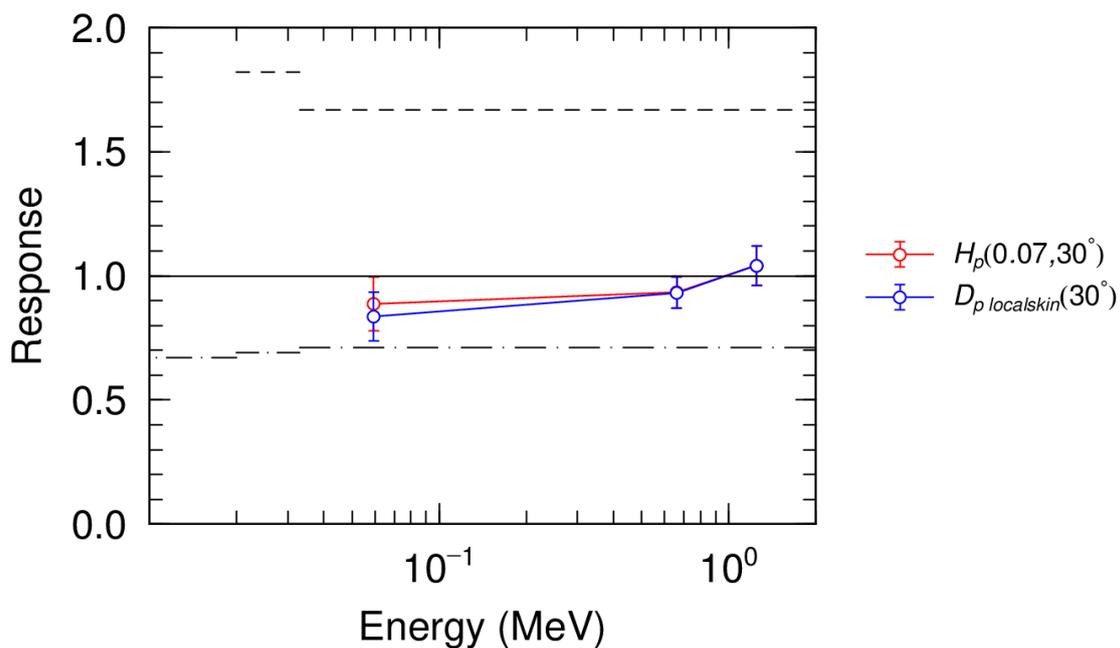


図 J 4-19 C 社製 DIS 線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p\ local\ skin}$ に係る光子に対するエネルギー特性（入射角度： 30° 、S-Cs $H_p(10, 0^\circ)$ で校正（規格化））

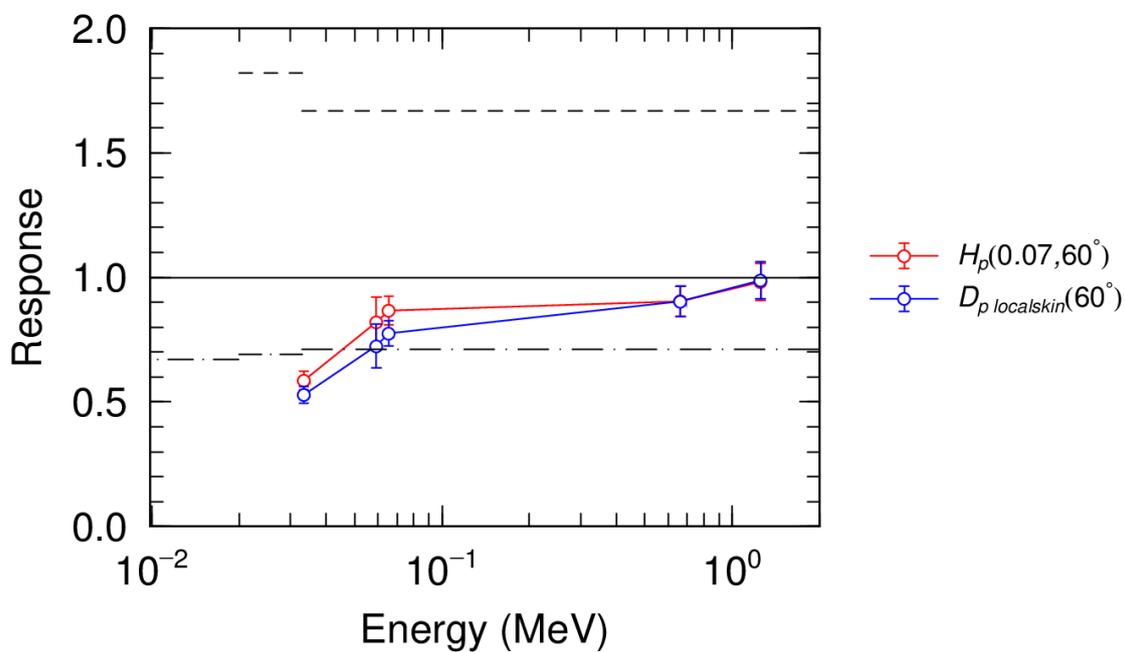


図 J 4-20 C 社製 DIS 線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p\ local\ skin}$ に係る光子に対するエネルギー特性（入射角度： 60° 、S-Cs $H_p(10, 0^\circ)$ で校正（規格化））

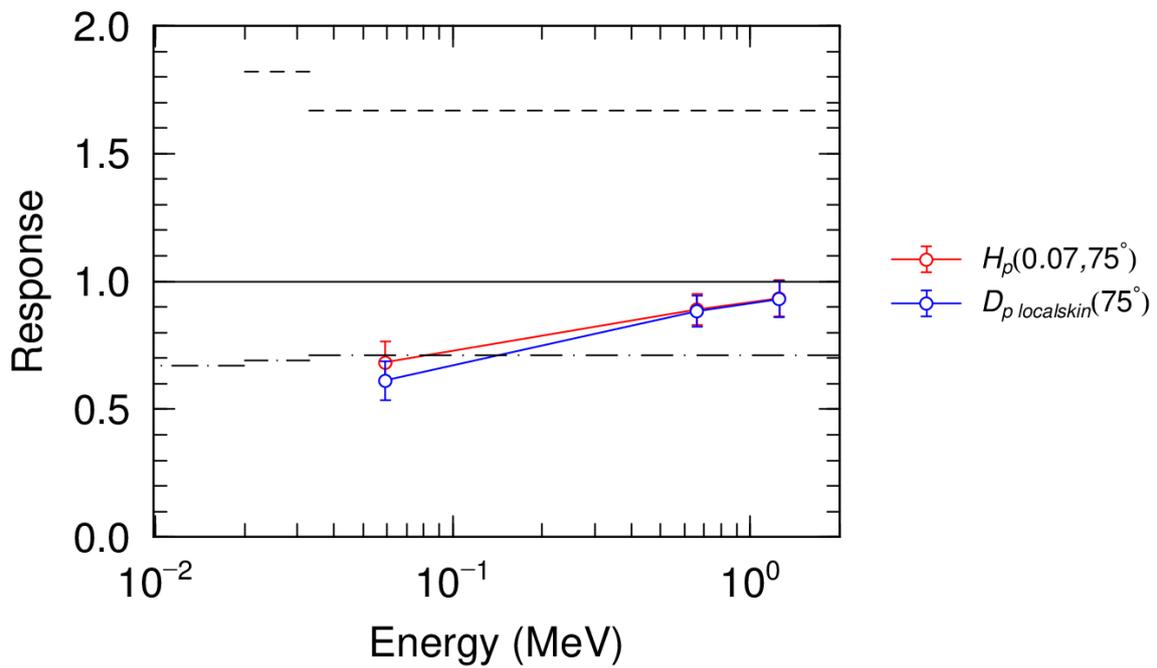


図 J 4-21 C 社製 DIS 線量計（体幹部用）の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p,local,skin}$ に係る光子に対するエネルギー特性（入射角度： 75° 、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正（規格化））

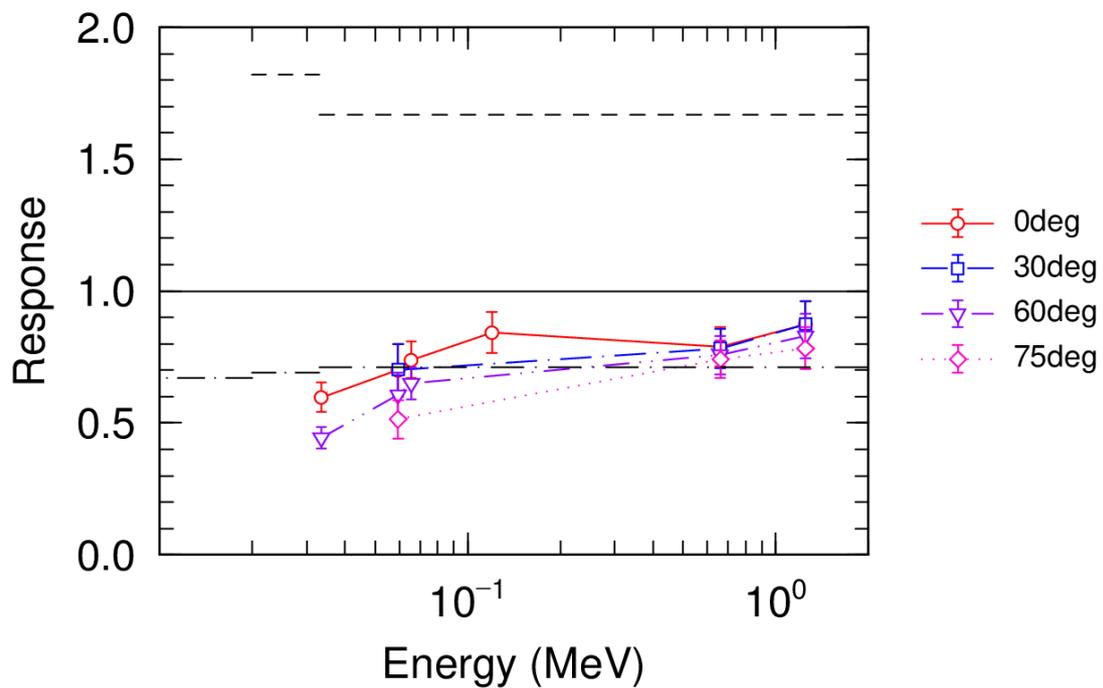


図 J 4-22 C 社製 DIS 線量計（体幹部用）の $D_{p,local,skin}$ に係る光子に対するエネルギー特性（S-Cs $H_p(0^\circ)$ で校正（規格化））

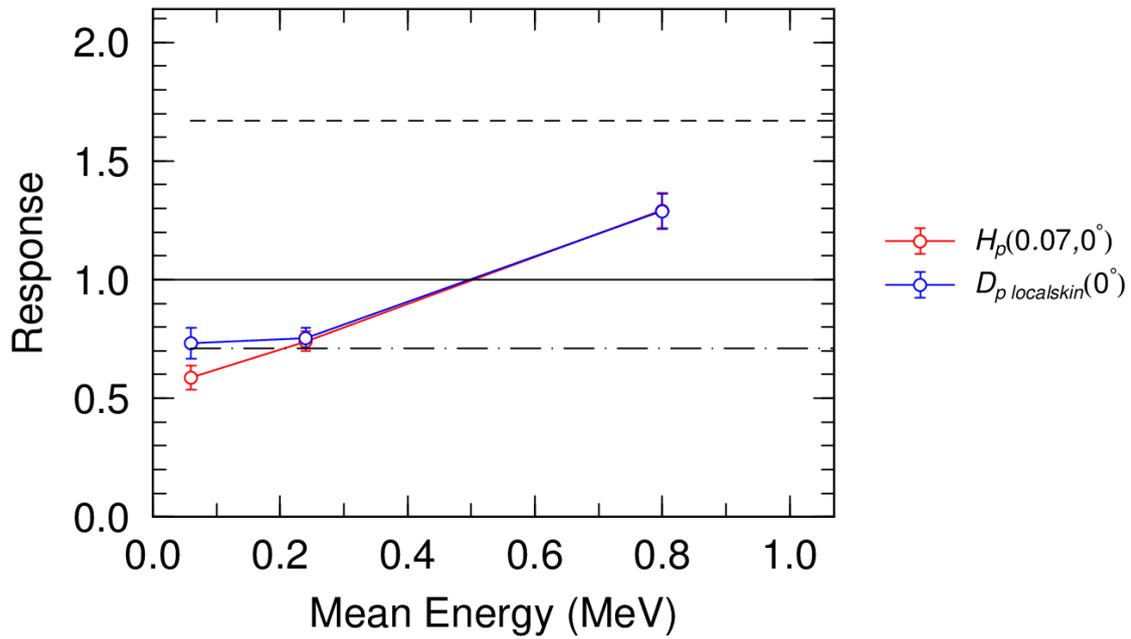


図 J 4-23 C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に係る β 線に対するエネルギー特性 (入射角度 : 0° 、S-Cs $H_p(10, 0^\circ)$ で校正 (規格化))

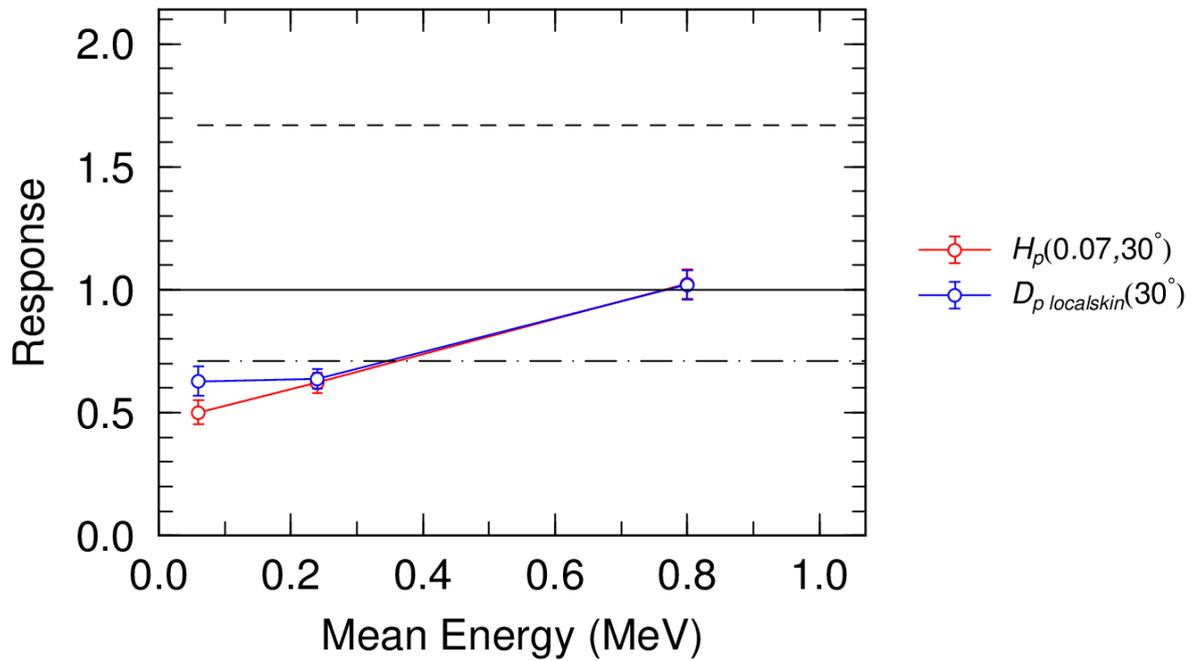


図 J 4-24 C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に係る β 線に対するエネルギー特性 (入射角度 : 30° 、S-Cs $H_p(10, 0^\circ)$ で校正 (規格化))

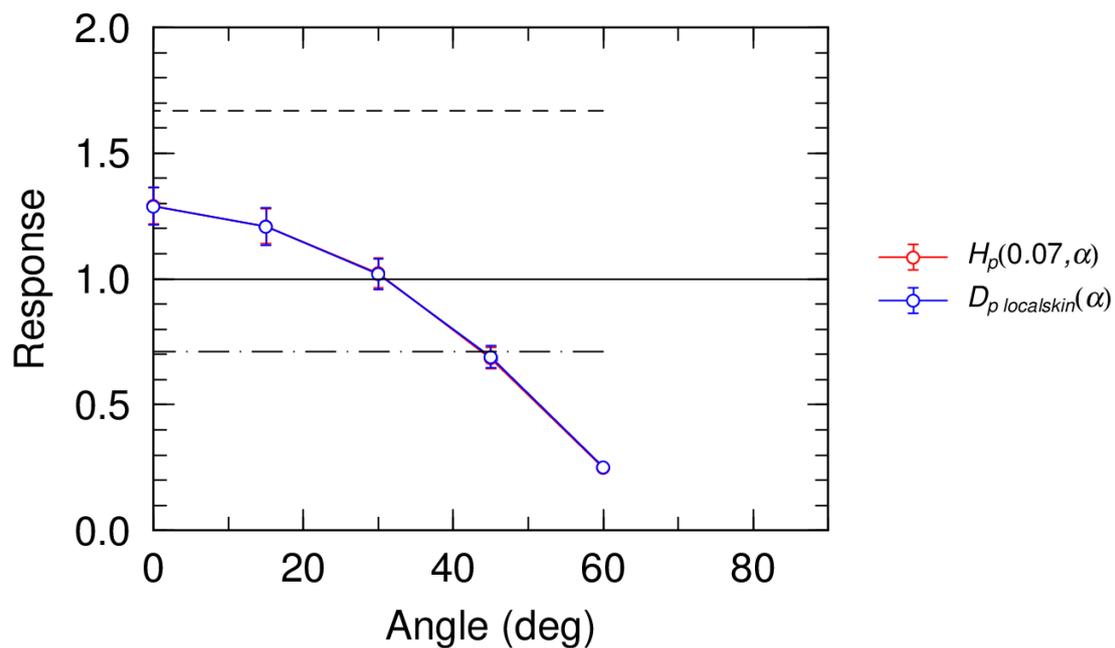


図 J 4-25 C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に係る $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線に対する方向特性 ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正 (規格化))

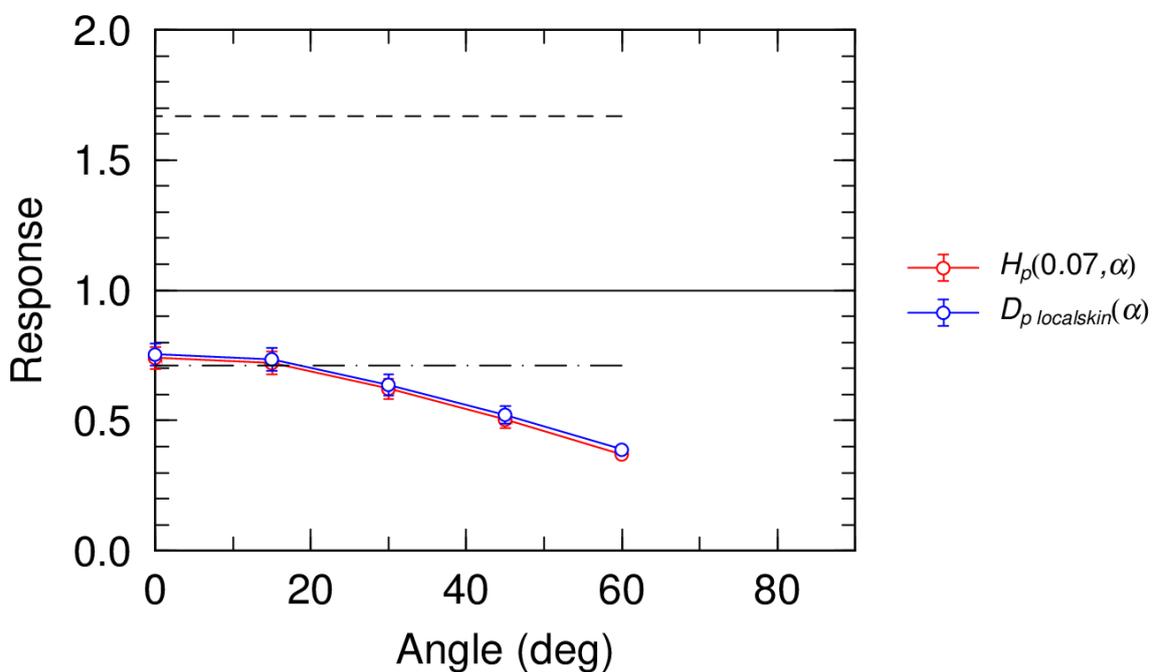


図 J 4-26 C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の $H_p(0.07)$ 及び $D_{p \text{ local skin}}$ に係る ^{85}Kr β 線に対する方向特性 ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $H_p(0.07, 0^\circ)$ で校正 (規格化))

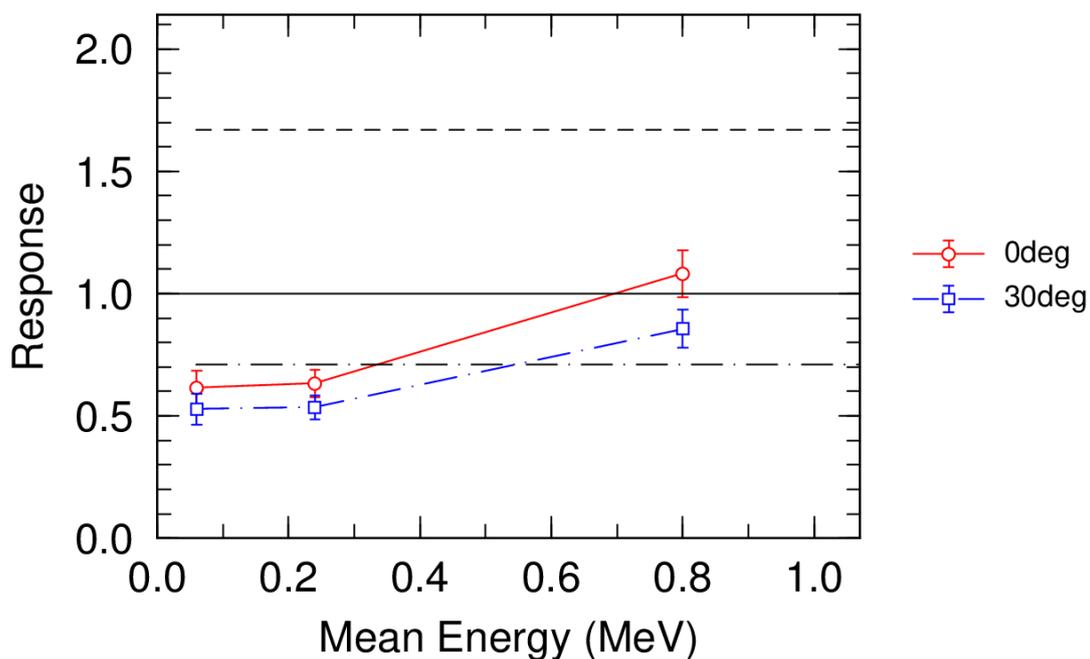


図 J 4-27 C 社製 DIS 線量計 (体幹部用) の $D_{p\ local\ skin}$ に係る β 線に対するエネルギー特性 (S-Cs $H_p(0^\circ)$ で校正 (規格化))

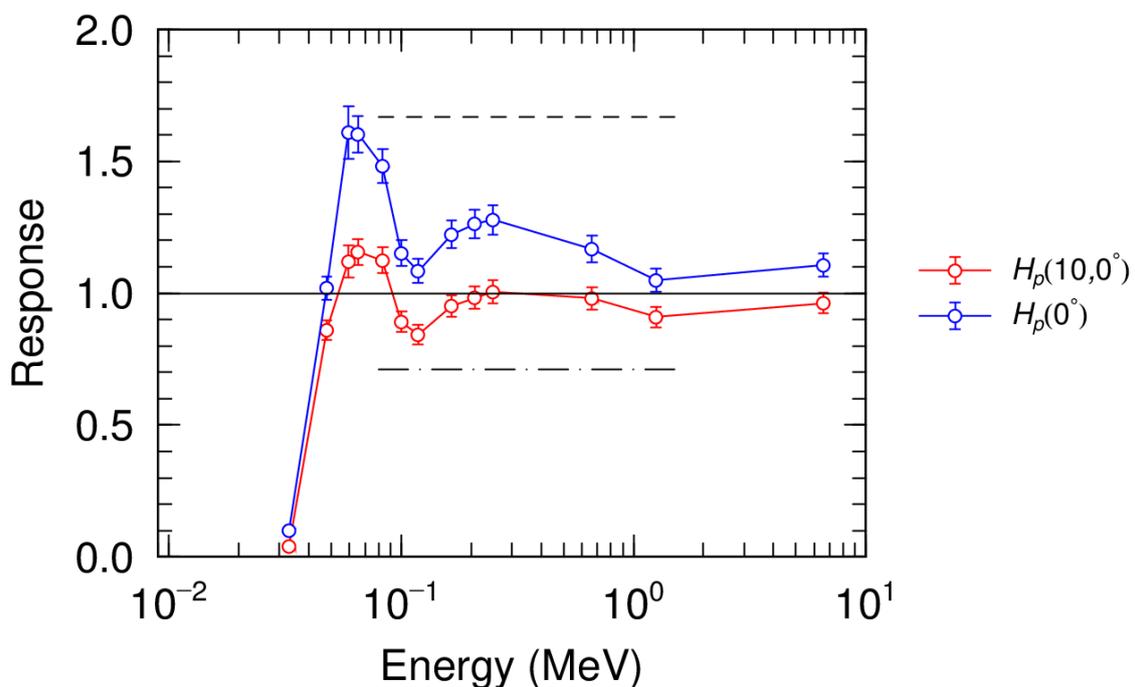


図 J 4-28 D 社製電子式個人線量計 (体幹部用) の $H_p(10)$ 及び H_p に対する光子エネルギー特性 (入射角度: 0° 、S-Cs $H_p(10,0^\circ)$ で校正 (規格化))

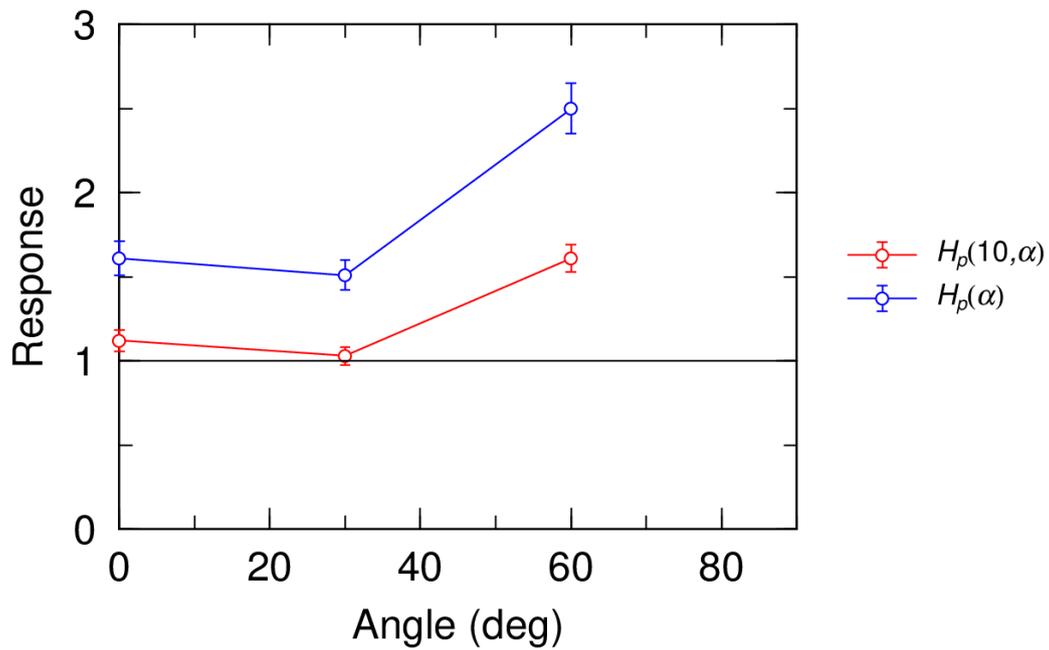


図 J 4-29 D 社製電子式個人線量計（体幹部用）の $H_p(10)$ 及び H_p に係る S-Am の γ 線に対する方向特性（S-Cs $H_p(10, 0^\circ)$ で校正（規格化））

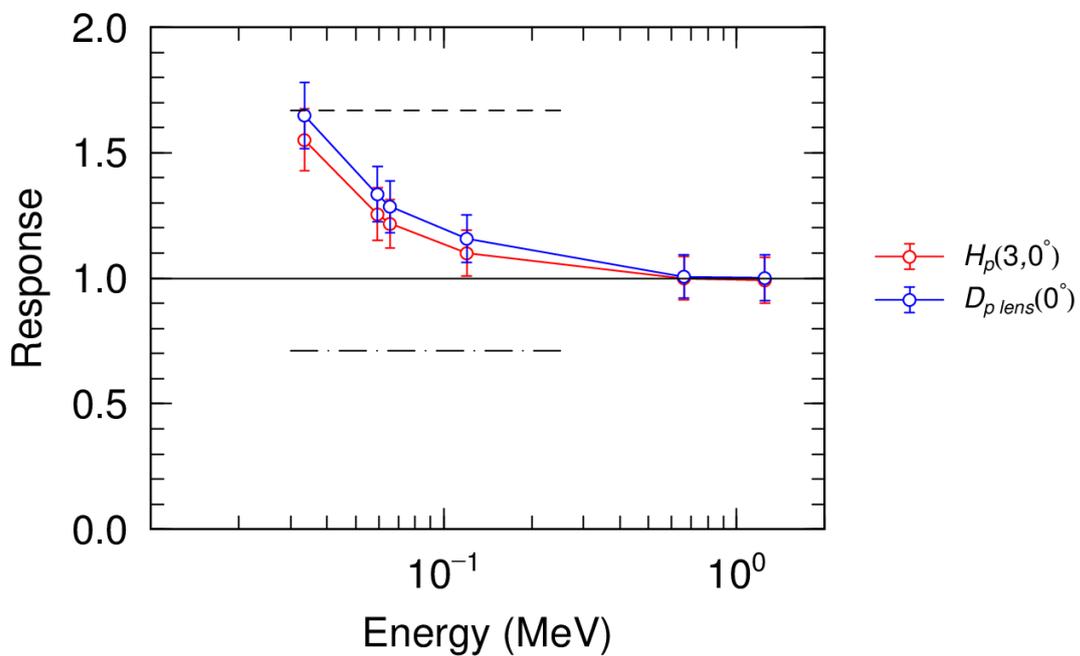


図 J 4-30 E 社製受動形個人線量計（水晶体用）の $H_p(3)$ 及び $D_{p\ lens}$ に対する光子エネルギー特性（入射角度： 0° 、S-Cs $H_p(3, 0^\circ)$ で校正（規格化））

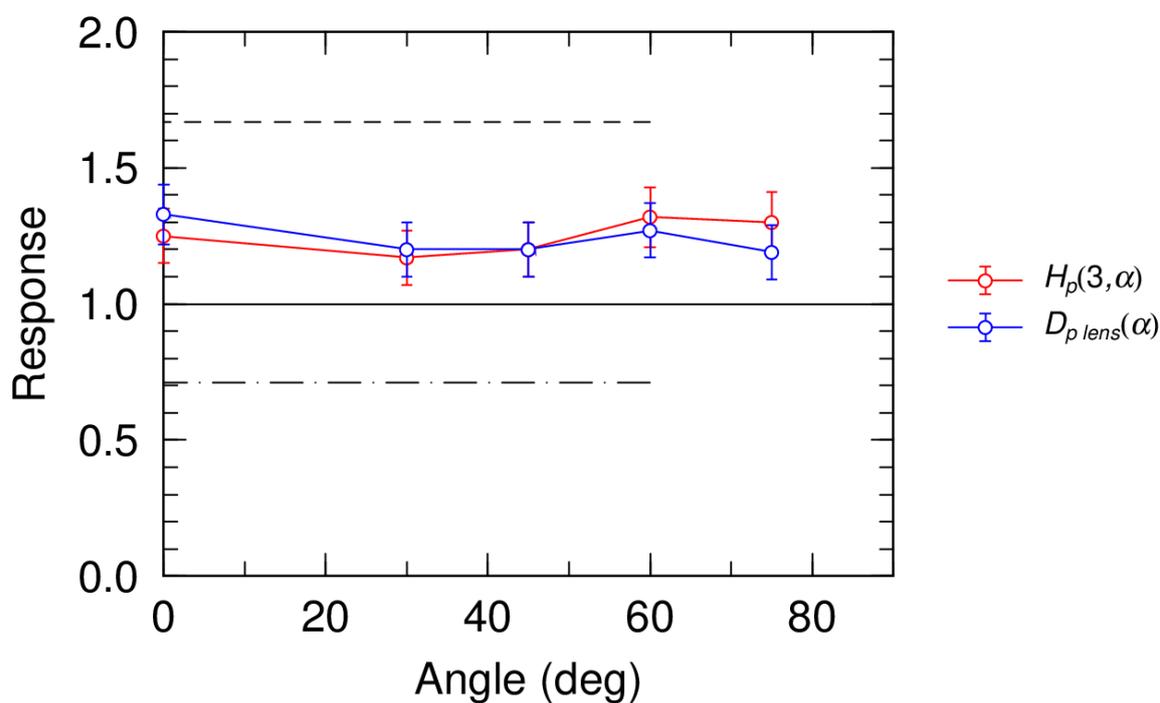


図 J 4-31 E 社製受動形個人線量計（水晶体用）の S-Am に対する方向特性（S-Cs $H_p(3,0^\circ)$ で校正（規格化））

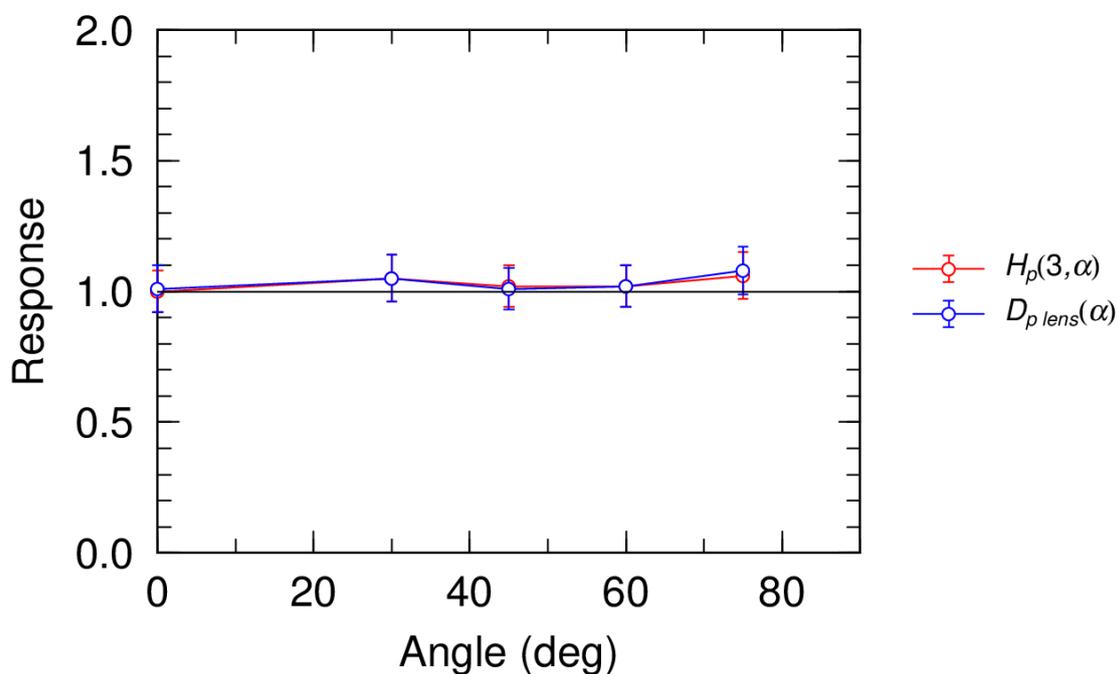


図 J 4-32 E 社製受動形個人線量計（水晶体用）の S-Cs に対する方向特性（S-Cs $H_p(3,0^\circ)$ で校正（規格化））

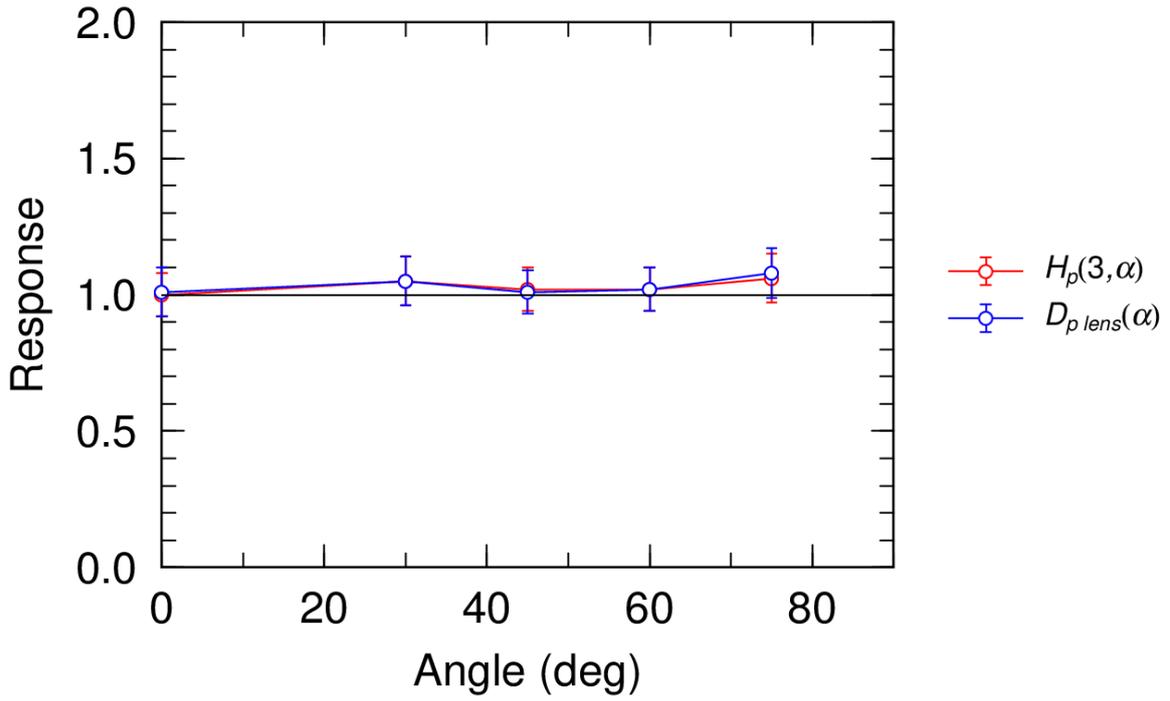


図 J 4-33 E 社製受動形個人線量計（水晶体用）の S-Co に対する方向特性
 (S-Cs $H_p(3,0^\circ)$ で校正 (規格化))

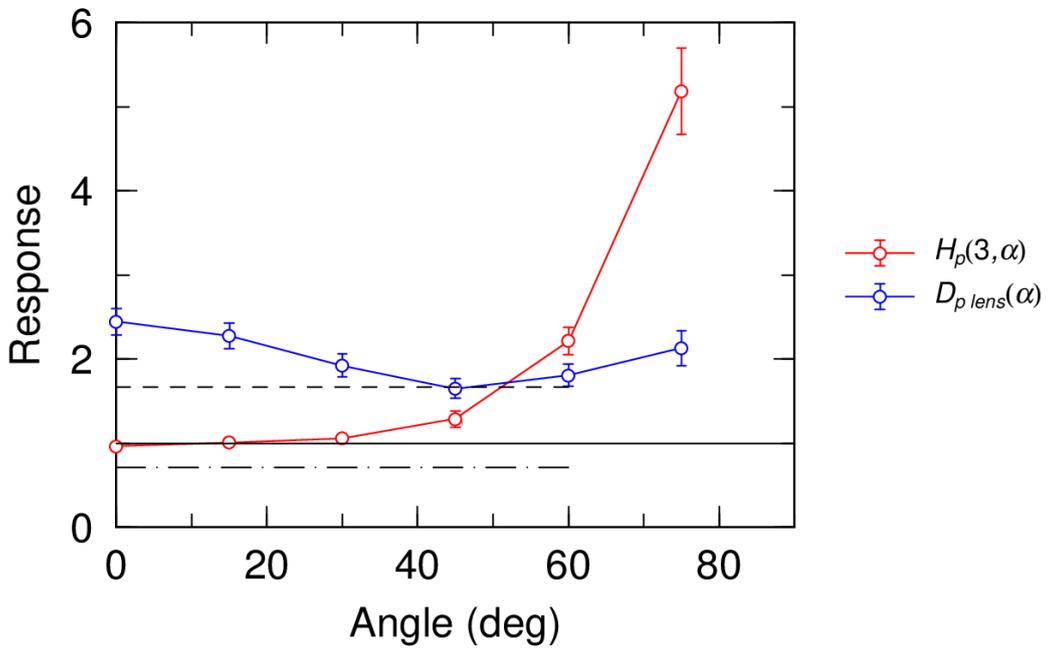


図 J 4-34 E 社製受動形個人線量計（水晶体用）の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線に対する方向特性
 (S-Cs $H_p(3,0^\circ)$ で校正 (規格化))

J4. 2. 2 課題の整理と対応策

実施した線量計のエネルギー・方向特性の傾向から、現行の線量計を新たな実用量に対応させるための課題を整理し、対応策を検討した。令和5年度事業においては、課題と対応策について、校正・試験事業者、線量計メーカー、線量計使用者、のそれぞれの観点から整理されている^[9]。そこで、本項では追加で得られた課題と対応策についてのみ記載し、全体を通した課題と対応策についてはJ5章にまとめて記載する。

(1) 適切な校正線質の選択と使用範囲の制限【校正・試験事業者、線量計使用者】

令和5年度事業報告書^[9]においても一部校正・試験事業者に対する課題として挙げられているものである。本事業で示されたB社製据置型γ線エリアモニタのように、使用環境が限定されるものに関しては、適切な校正線質を選択し、使用範囲を限定することで新たな実用量にも対応できる可能性がある。低エネルギー光子に対する H^* や H_p に対する過大応答性についても、線量計の使用される環境が決まっていれば、同様の対応策が考えられる。本事業におけるD社製電子式個人線量計についても、使用範囲を多くの原子力施設でみられる40 keV以上に制限しているが、これもこのような対策の範疇になろう。いずれの場合においても、線量計使用者が、放射線場の状況を把握していることが重要になってくる。

(2) 低エネルギー光子に対する試験【校正・試験事業者】

光子に対しては、低エネルギー領域での $H^*(10)$ に対する H^* の線量換算係数の変化が大きい。A社製電離箱サーベイメータは60 keV付近までしか特性を評価しなかったが、7 keVまでのより低いエネルギーの光子まで測定できる機種であるため、さらに低エネルギー領域での特性の把握が望まれる。このように影響の大きい数keVから60 keVくらいの領域に対するエネルギー・方向特性試験ができる環境の整備は重要である。また、シミュレーション計算技術の発展に伴い、計算空間上で線量計の設計をすることも多いが、実測との関係性を明らかにするためにも蛍光X線やS-Amといったような単色性の高い場での試験は有用であろう。一方で、校正については、使用する環境にあわせた連続スペクトルを持つ線質で行うことが現実的と思われる。

(3) 測定量間での応答特性の差異【線量計メーカー、線量計使用者】

令和5年度事業報告書^[9]においても線量計メーカーに対する課題として挙げられているものである。本事業で実施したA社製電離箱式サーベイメータやC社製DIS線量計では H^* や H_p に加えて、 $D'_{local\ skin}$ や $D_{p\ local\ skin}$ の測定も可能であるが、図J4-11や図J4-22に示されるとおり、 H^* や H_p で校正し、それに合わせて線量計を調整した場合、 D'_{lens} や $D'_{local\ skin}$ では一律応答が小さくなるなど、測定量間での差異が

現行実用量と比べて大きくなる。C社製DIS線量計では、 $H_p(10)$ と $H_p(0.07)$ に分けて指示値が得られるため、測定量に応じた校正定数を乗じるなどの方策が有効と考えられる。

一方、眼の水晶体用の線量計であるE社製受動形線量計については、光子と β 線で応答が異なるため、現状の線量計設計のまま1つの素子で両方を精度よく測定することは困難と思われる。一方、 $D_{p\text{lens}}$ については、ICRU Report 95^[15]において、感受性の高い組織のみに着目した水晶体吸収線量 $D_{p\text{lens, sens}}$ に対する線量換算係数も与えられている。例えば、1 MeV電子が 0° 方向から入射した場合のフルエンスから $D_{p\text{lens}}$ への線量換算係数は 69.5 pGy cm^2 であるのに対し、 $D_{p\text{lens, sens}}$ への線量換算係数は 229 pGy cm^2 である。一方で、 $H'(3)$ （電子に対しては $H_p(3)$ と同程度と考えてよい）への線量換算係数はICRP Publ.74^[20]によると 301 pSv cm^2 である。すなわち、 β 線に対する線量計特性に与えるインパクトは $D_{p\text{lens, sens}}$ の方が小さい。線量計の設計変更には時間とコストがかかることから、今後、国際的な動向を注視し、水晶体吸収線量を上述のどちらの量で測定すべきか科学的な議論を含め検討する必要がある。

(4) 眼の水晶体線量測定【線量計メーカー、線量計使用者】

眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン^[26]によると、眼の水晶体の線量測定は、水晶体用個人線量計を用いた眼の近傍での直接測定に加えて、以下のようなモニタリング方法についても記載されている。

- ・体幹部均等被ばくで、眼の水晶体の線量が管理基準に近づく又は超えるおそれのない場合は、体幹部基本部位に装着した個人線量計から眼の水晶体線量を算定
- ・体幹部不均等被ばくで、眼の水晶体の線量が管理基準に近づく又は超えるおそれのない場合は、通常の水晶体不均等被ばく管理時の個人線量計装着部位（体幹部基本部位+線量が最大となる体幹部位）で測定し、眼に近い部位に装着した個人線量計で眼の水晶体の線量を算定

現行の実用量による線量管理において、体幹部用の線量計では $H_p(10)$ 又は $H_p(0.07)$ が測定され、眼の水晶体用の線量計では $H_p(3)$ が測定されている。(3)でも述べたとおり、各測定量間の関係性が変化し、それぞれの線量計のレスポンスも本事業で調査したとおり変化する。そこで、上述したような代替測定法による評価が可能であるかどうかを検討しておく必要がある。これについては本報告書のJ4.3.3においても詳細に記載する。

J4.3 線量計の校正定数の決定と個人線量管理上の課題に関する調査

現行の放射線防護の規制において、放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則（令和6年3月7日施行）第20条などでも示されるように、実用量を使った測定が要求されている。令和5年度事業までに、法令等により放射線業務従事者の個人線量管理、及び線量又は線量率の測定が要求される放射線作業場を類型化して整理した。これらの中から原子力施設及び放射線使用施設の放射線作業場を対象として、実測あるいは入手した光子エネルギースペクトルデータの解析によって、新たな実用量及び現行の実用量の定義に基づいた線量計のエネルギー応答が評価されている。本事業においては、(a)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、(b)線量計の校正定数の決定に関する課題の調査、(c)不均等照射に対する新たな実用量による個人線量管理に関する課題の調査、を実施した。

J4.3.1 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

J4.3.1.1 作業場の選定

原子力施設及び放射線使用施設において光子による有意な外部被ばく源があり、令和5年度事業までに評価されていない放射線作業場として、廃止措置中の原子炉施設、ホットラボ施設及び建屋式保管廃棄施設の放射線作業場を選定し、光子スペクトルを入手することとした。

廃止措置中の原子炉施設は、原子炉材料や燃料の基礎研究などを行っていた研究炉で、運転を停止し廃止措置に移行している原子炉である。運転を停止した機器が保管され、これらの機器を使用していた状況や使用停止からの時間経過によって支配的な線源核種が異なるという特徴がある。また、原子炉建屋には炉室のように巨大な空間が広がっている作業場や配管系や設備が設置されている狭隘箇所など、周囲の状況も様々である。

ホットラボ施設は、コンクリートセルや鉛セルが設置され、照射した試料の分析などが行われている。メンテナンスを行うエリアとマニピュレータを用いて操作するエリアに分かれ、線源や放射線作業場環境が異なるなどの特徴がある。

建屋式保管廃棄施設は、コンクリート壁で囲まれた保管室に廃棄物が保管されているが、保管エリアによって、廃棄物の種類や性質が異なっている。廃棄物中に含まれる低エネルギー光子放出核種の寄与や周囲のコンクリートや廃棄物中に含まれるセメントなどによる散乱線の場の光子エネルギー分布への影響などが想定され、特徴的な場となっていることが示唆される。

選定した作業場とその特徴を表J4-5にまとめた。

表 J 4-5 スペクトルを入手した放射線作業場

| 放射線作業場 | No | 代表的な線源 | 特徴 |
|---------------|---------|--|--|
| ① 廃止措置中の原子炉施設 | #1～#14 | ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 及びこれらの散乱線 [J27] | 廃止措置中の炉室や保管されている大型機器等があり、大空間や狭隘部がある作業場 |
| ② ホットラボ施設 | #15～#26 | ^{137}Cs や遮蔽体として用いられている劣化ウラン | ホットセル内のメンテナンスを行うための作業場や遠隔操作を行う作業場 |
| ③ 建屋式保管廃棄施設 | #27～#40 | ^{137}Cs 、 ^{241}Am など廃棄物中の線源 | 廃棄物を保管廃棄している保管室であり、周囲が廃棄物やコンクリート壁床に囲まれた作業場 |

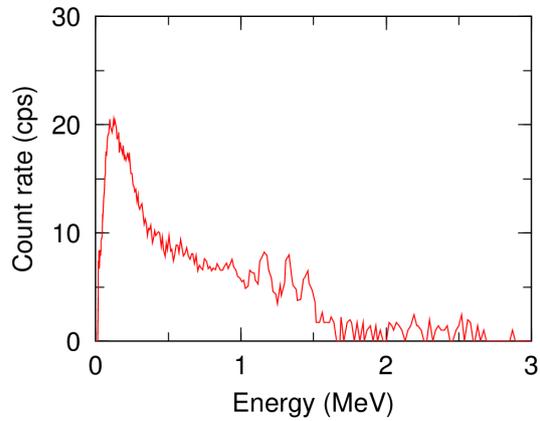
J4.3.1.2 光子スペクトルの取得

選定した作業場において、2”φ×2”NaI(Tl)検出器（BNC 社製 SAM940 Model 940-2-G、図 J 4-35 参照）を用いて取得されたスペクトル（パルス波高分布）を入手した。入手したスペクトルを図 J 4-36～図 J 4-44 に示した。

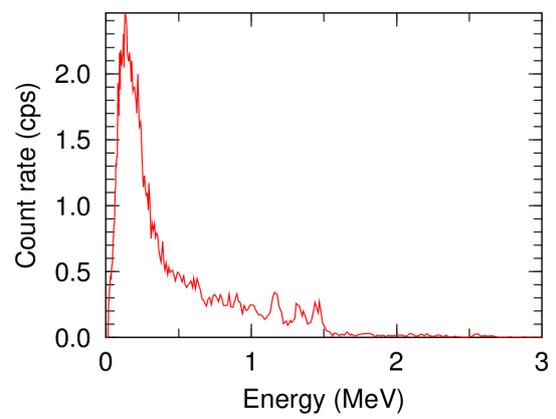


図 J 4-35 2”φ×2”円筒形 NaI(Tl)検出器

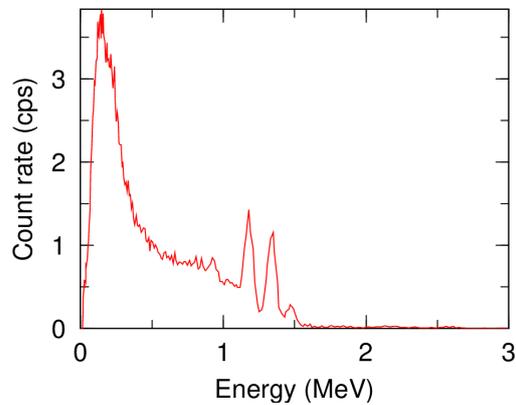
(a) #1 : 1階炉室作業エリア



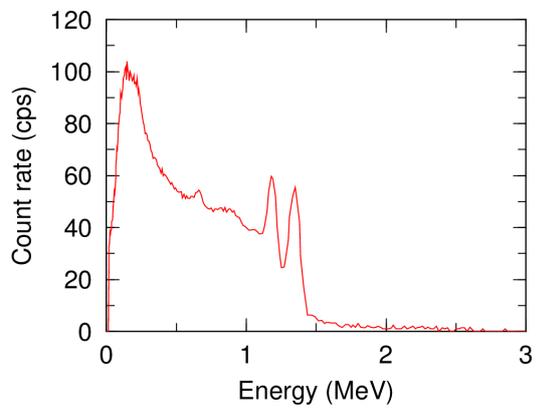
(b) #2 : 1階炉室カナル付近



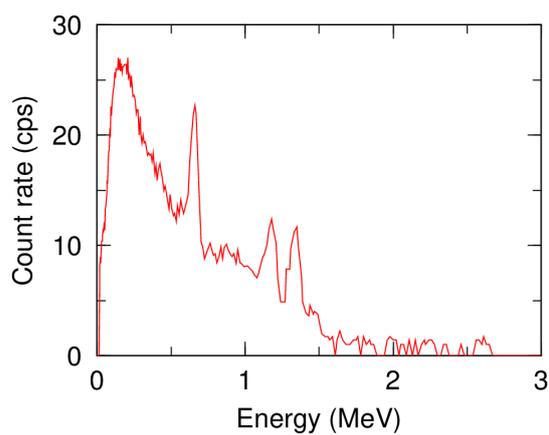
(c) #3 : 1階炉室物品置き場付近



(d) #4 : イオン交換塔 A



(e) #5 : イオン交換塔 B



(f) #6 : イオン交換塔 A 前置フィルタ付近

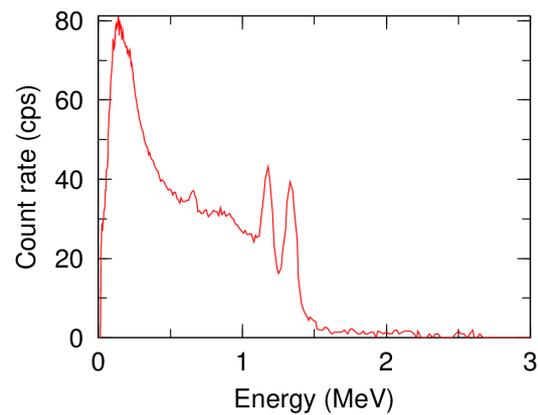
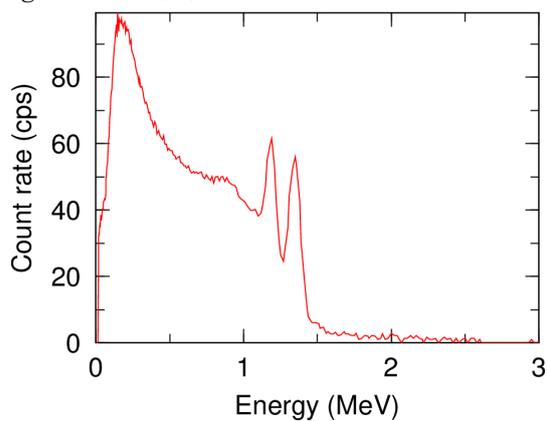
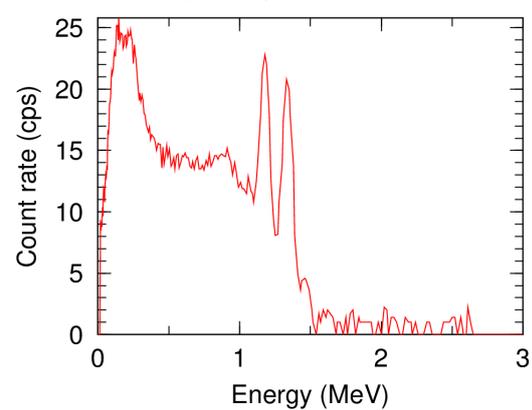


図 J 4-36 取得した廃止措置中の原子炉施設における 2" Φ × 2" 円筒形 NaI(Tl) 検出器によるパルス波高スペクトル (1)

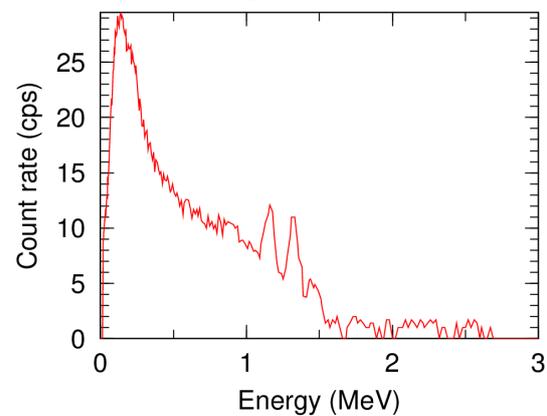
(g) #7 : 主循環ポンプストレナ



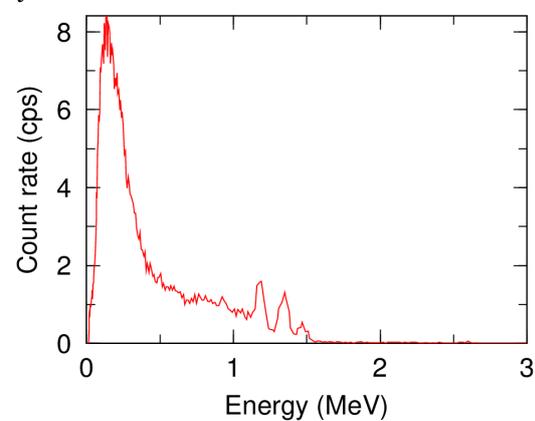
(h) #8 : 主循環系配管



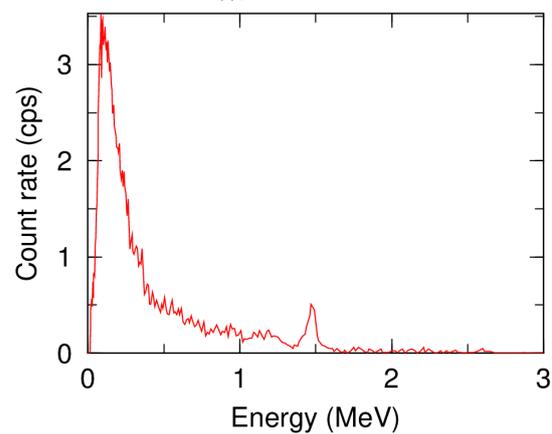
(i) #9 : 主循環系通路



(j) #10 : 地下3階炉心下



(k) #11 : 地下4階炉下



(l) #12 : 排水貯槽上部付近

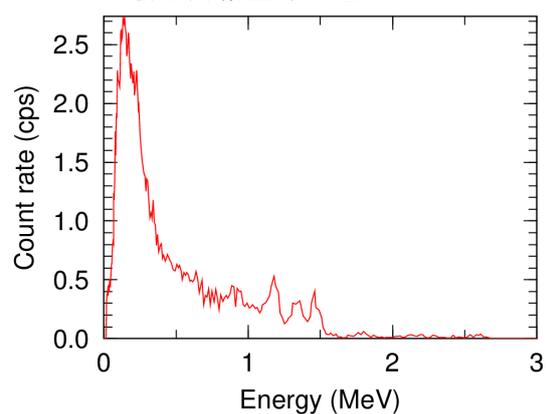
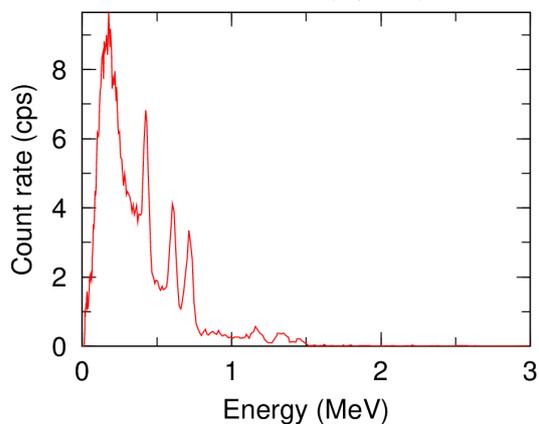


図 J 4-37 取得した廃止措置中の原子炉施設における 2" Φ × 2" 円筒形 NaI(Tl) 検出器によるパルス波高スペクトル (2)

(m) #13 : シュラウド照射装置配管



(n) #14 : 3階炉室吹き抜け

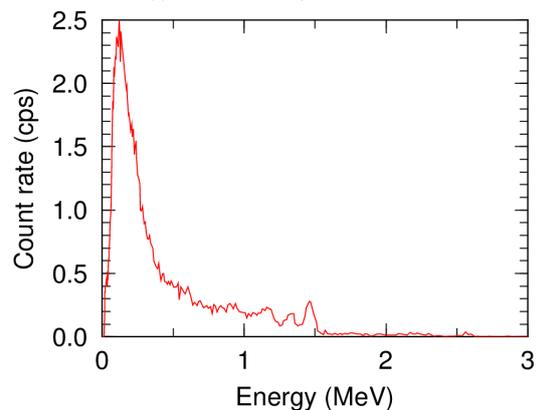
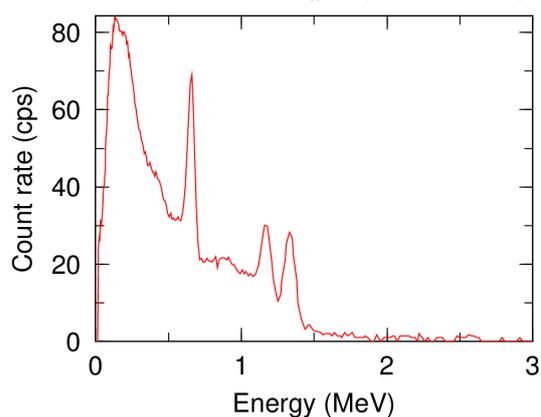
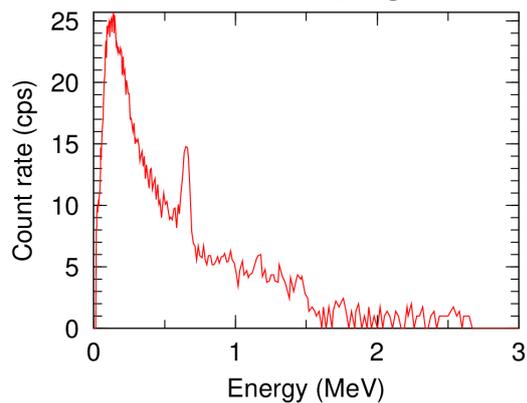


図 J 4-38 取得した廃止措置中の原子炉施設における 2" Φ × 2" 円筒形 NaI(Tl) 検出器によるパルス波高スペクトル (3)

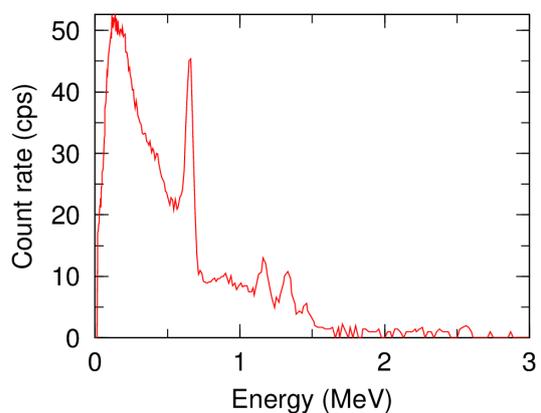
(a) #15 : コンクリートセル扉前 (サービスエリア)



(b) #16 : サービスエリア通路①



(c) #17 : サービスエリア通路②



(d) #18 : サービスエリア通路③

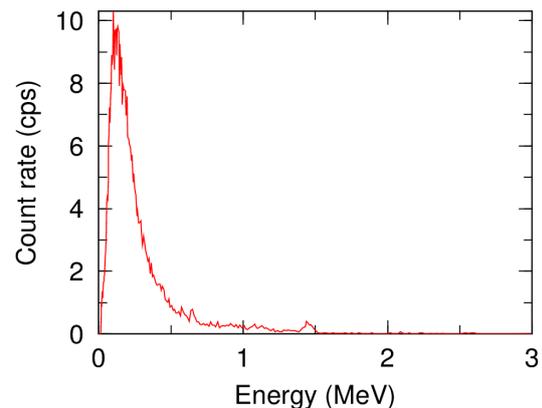
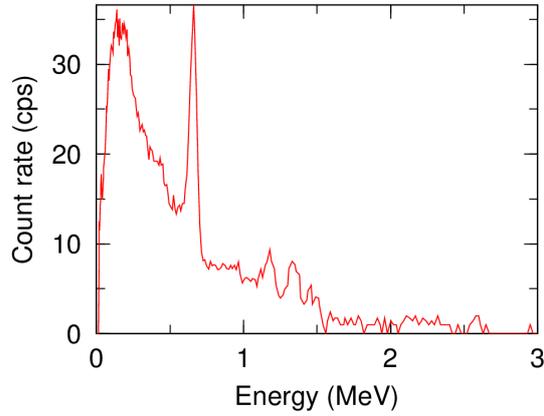
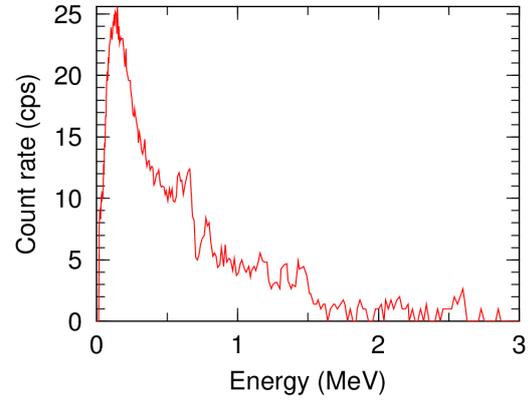


図 J 4-39 取得したホットラボ施設における 2" Φ × 2" 円筒形 NaI(Tl) 検出器によるパルス波高スペクトル (1)

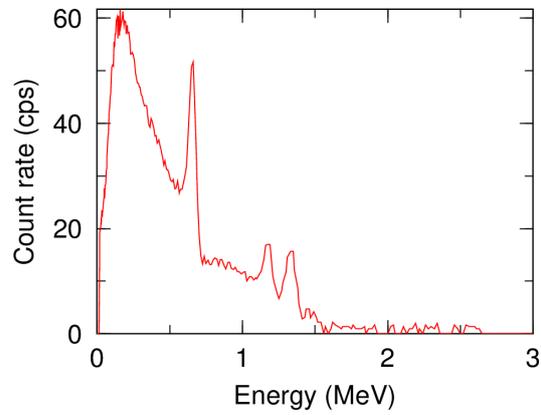
(e) #19 : 物品保管付近 (サービスエリア)



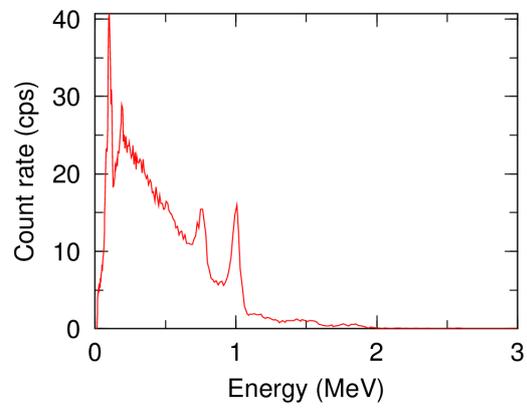
(f) #20 : 鉛セル扉前 (サービスエリア) ①



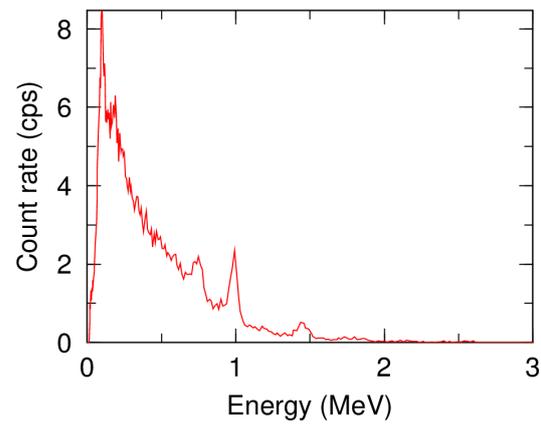
(g) #21 : 鉛セル扉前 (サービスエリア) ②



(h) #22 : 顕微鏡鉛セル遮蔽前 (操作室)



(i) #23 : 顕微鏡鉛セルマニピュレータ前 (操作室)



(j) #24 : コンクリートセル No.5 配管付近 (操作室)

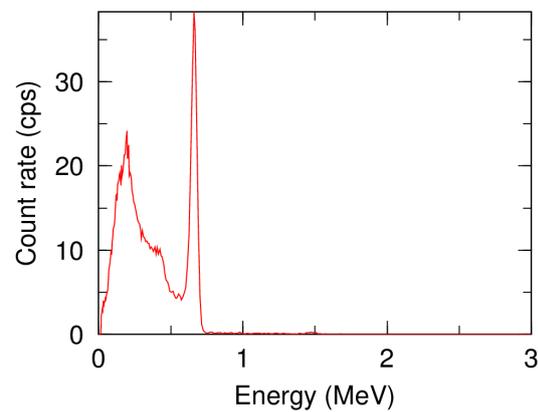
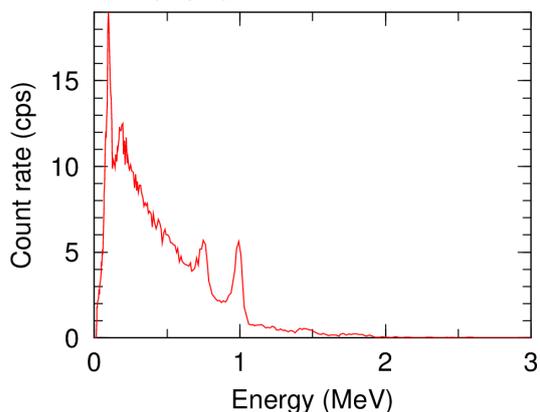


図 J 4-40 取得したホットラボ施設における 2" Φ × 2" 円筒形 NaI(Tl) 検出器によるパルス波高スペクトル (2)

(k) #25 : 顕微鏡鉛セル前付近



(l) #26 : 顕微鏡鉛セル前通路

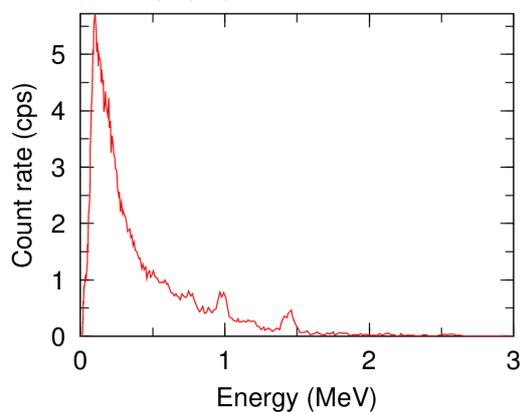
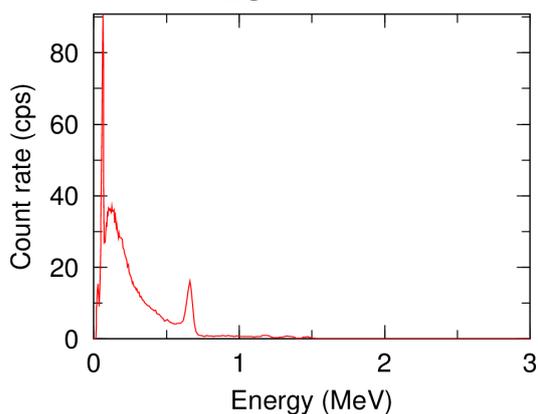
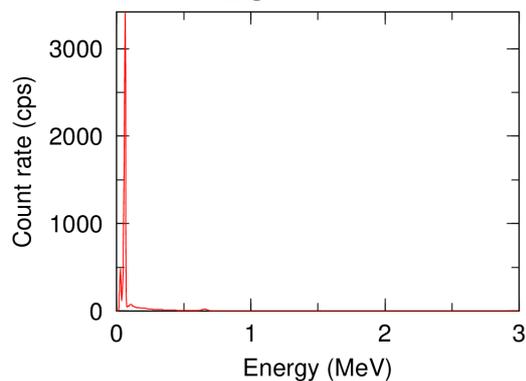


図 J 4-41 取得したホットラボ施設における 2" Φ × 2" 円筒形 NaI(Tl) 検出器によるパルス波高スペクトル (3)

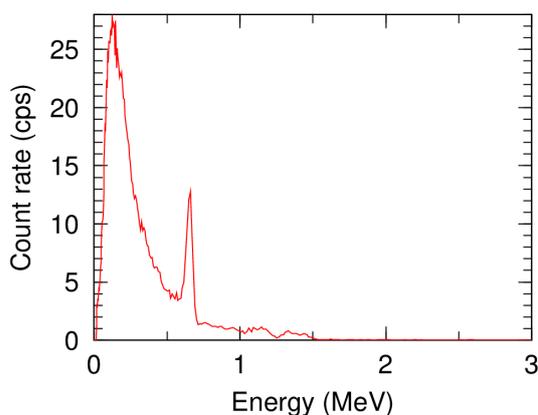
(a) #27 : 入口付近①



(b) #28 : 入口付近②



(c) #29 : 保管室ドラム缶前①



(d) #30 : 保管室ドラム缶前②

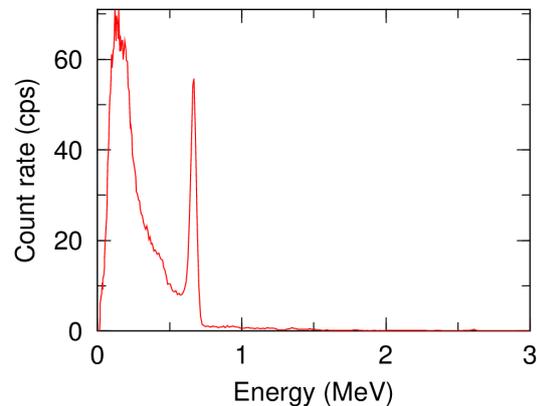
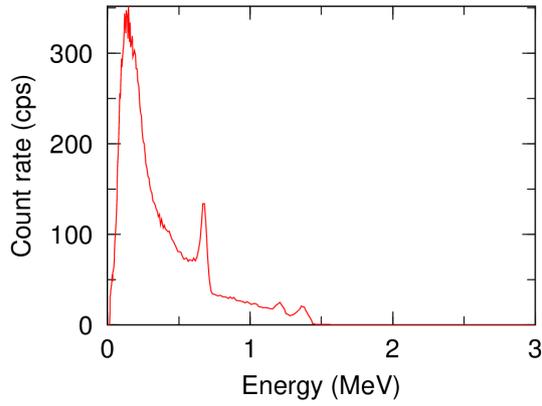
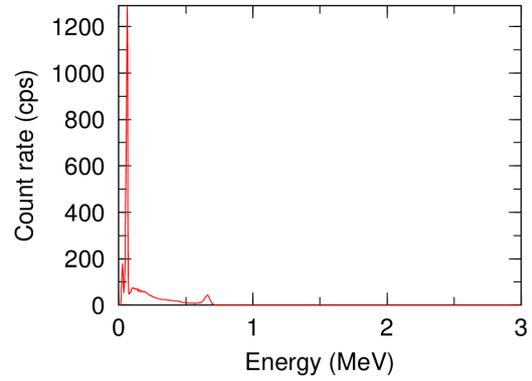


図 J 4-42 取得した建屋式保管廃棄施設における 2" Φ × 2" 円筒形 NaI(Tl) 検出器によるパルス波高スペクトル (1)

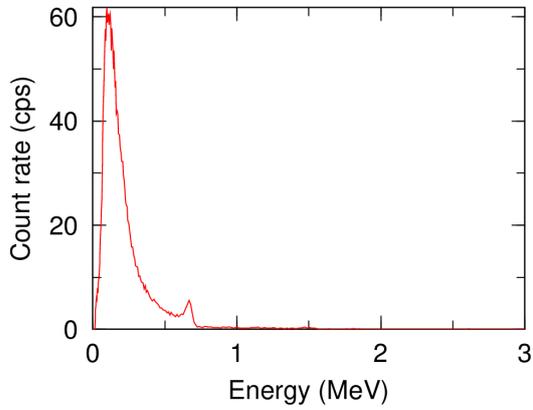
(e) #31 : 保管室ドラム缶前③



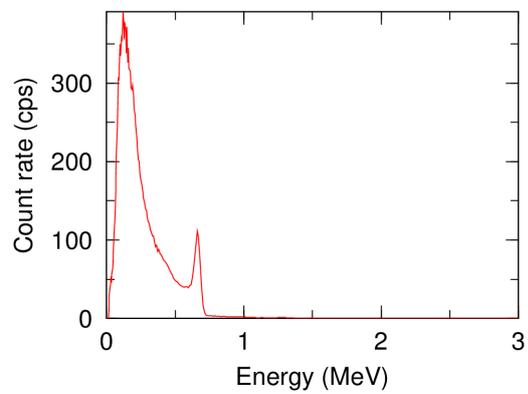
(f) #32 : ドラム缶・コンクリート柱狭隘部



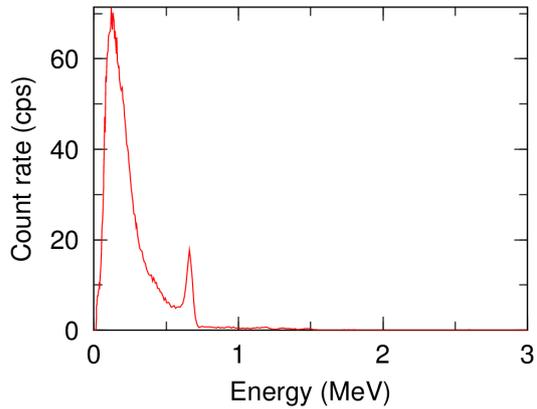
(g) #33 : 保管室隅



(h) #34 : セメント固化体エリア



(i) #35 : 1m³容器保管体エリア



(j) #36 : 廃棄体で囲まれたエリア

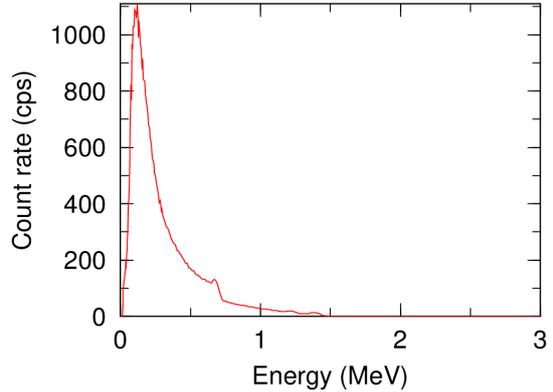
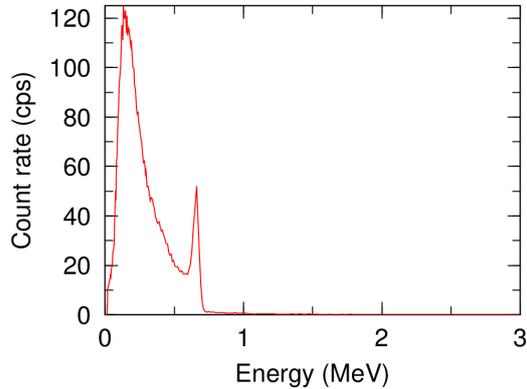
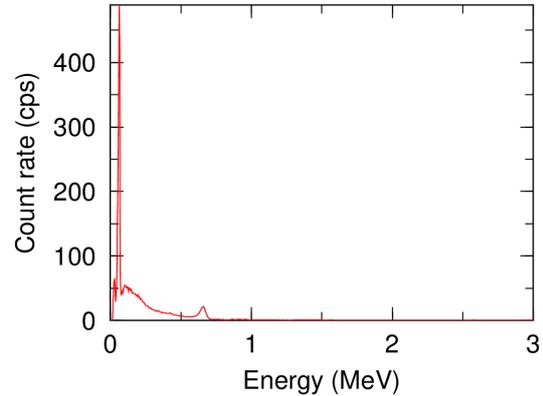


図 J 4-43 取得した建屋式保管廃棄施設における 2" Φ × 2" 円筒形 NaI(Tl) 検出器による
パルス波高スペクトル (2)

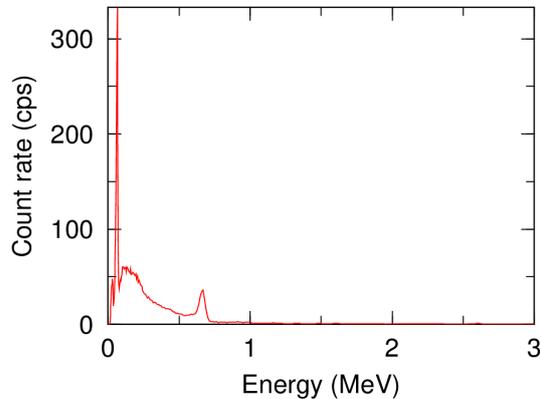
(k) #37 : 1m³ 容器保管体間狭隘部



(l) #38 : α 廃棄物エリア①



(m) #39 : α 廃棄物エリア②



(n) #40 : α 廃棄物エリア②後方壁付近

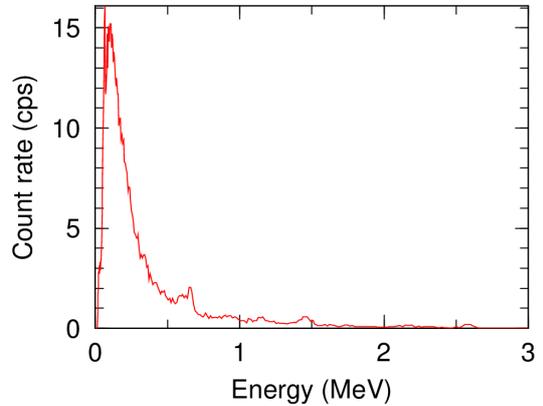


図 J 4-44 取得した建屋式保管廃棄施設における 2" $\Phi \times 2$ " 円筒形 NaI (Tl) 検出器によるパルス波高スペクトル (3)

J4.3.1.3 光子エネルギー分布

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（測定した箇所）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。そこで、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^[28]によりアンフォールディングを行った。アンフォールディング処理により評価した光子エネルギー分布を図 J 4-45～図 J 4-53 に示す。

廃止措置中の原子炉施設においては、主たる線源核種は ^{60}Co となっているが、各場所の状況に応じて光子エネルギー分布は、以下のような特徴を有していた。

| | |
|--------------|--|
| #1～#3 | ^{60}Co 由来のピーク (1172 keV 及び 1333 keV) と天然核種である ^{40}K のピーク及びこれらの散乱線のみが観測されている。 |
| #4, #6 | ^{60}Co 及び ^{137}Cs (662 keV) に由来するピークと、散乱線からなる。 |
| #5 | 過去に設置されていた臨界実験装置の精製に用いていたイオン交換塔であり、使用されなくなつてからの時間経過により、#4 と比べて ^{60}Co のピークは小さく、 ^{137}Cs のピークは相対的に大きくなっている。 |
| #7, #8 | ^{60}Co のピークとその散乱線からなるエネルギー分布となっているが、直達線の割合が大きい。 |
| #9, #10, #12 | ^{60}Co のピークとその散乱線からなるエネルギー分布となるが、線源からの距離があるため、#7 や#8 と比べて散乱線の割合が大きい。 |
| #11 | 線量率も低く、天然核種である ^{40}K のピークと散乱線のみが観測された。 |
| #13 | 原子炉用燃料・材料の照射試験をするために設置された装置の一部であり、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ に由来する 430 keV、610 keV 及び 720 keV 付近のピークとその散乱線が観測された。 |
| #14 | 炉心を望む炉室の 3 階部分のエリアであり、大空間内でのスペクトルとなる。階下からくる ^{60}Co のピークと散乱線からなるエネルギー分布となっているが、散乱線の割合が大きい。 |

ホットラボ施設においては、主たる線源核種は ^{137}Cs となっているが、各場所の状況に応じて光子エネルギー分布は、以下のような特徴を有していた。

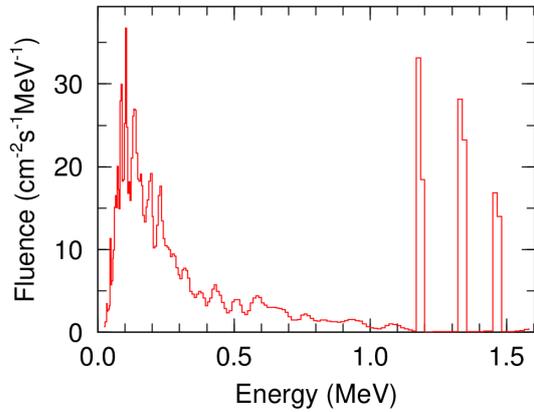
| | |
|----------------------|--|
| #15～#17 | ^{137}Cs 由来のピークと小さな ^{60}Co 由来のピーク及び散乱線からなる。 |
| #18 | 線量率も低く、天然核種である ^{40}K のピークと散乱線のみが観測された。 |
| #19, #21 | 付近に ^{137}Cs 線源があると考えられ、直達線の影響が大きい。 |
| #20 | 複数のピークとその散乱線からなるエネルギー分布を示しており、散乱線の割合も大きい。 |
| #22, #23 #25, #26 | 遮蔽に用いられている劣化ウランからの γ 線ピーク ($^{234\text{m}}\text{Pa}$ からの 766 keV 及び 1 MeV の γ 線、 ^{238}U や ^{234}Th からの 100 keV 付近の γ 線) が観測されている。 |
| #24 | ^{137}Cs からの直達線の影響が大きい。 |

建屋式保管廃棄施設においては、主たる線源核種は ^{137}Cs 又は ^{241}Am となっているが、保管されている廃棄体や周囲の状況に応じて光子エネルギー分布は、以下のような特徴を有していた。

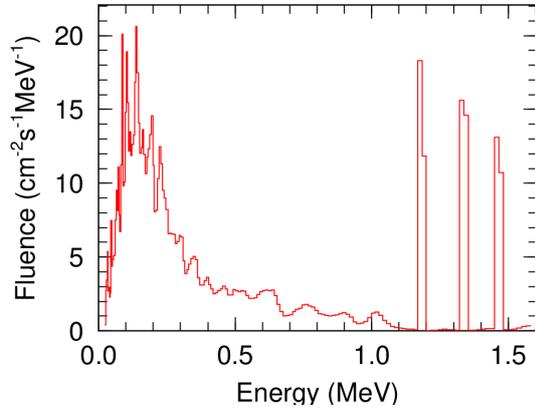
| | |
|----------|--|
| #27 | ^{137}Cs 及び ^{241}Am に由来するピークが観測されている。 |
| #28, #32 | ^{241}Am に由来する 60 keV 付近のピークのみが観測されている。 |
| #29, #30 | ^{137}Cs に由来するピークと散乱線からなるエネルギー分布である。 H^* スペクトルでの 0.5 MeV 以下の散乱線割合は 36～37% となった。 |

| | |
|----------|--|
| #31 | ^{60}Co 及び ^{137}Cs に由来するピークと、散乱線からなる。 |
| #33 | ^{137}Cs に由来するピークが観測されているが、コンクリート壁による散乱の割合が大きい。 |
| #34 | セメント充填された廃棄体が保管されており、#29 や#30 と比べても散乱線が多い (H^* スペクトルでの 0.5 MeV 以下の散乱線割合は 54%) |
| #35, #37 | 1m ³ 容器保管体が保管されており、 ^{137}Cs 由来のピークと散乱線領域からなる。 |
| #36 | 周囲が廃棄体で囲まれており、散乱線の割合が多くなっている。 |
| #38, #39 | ^{241}Am に由来する 60 keV 付近のピークが主となるエネルギー分布である。 |
| #40 | #39 と比較して、壁床等による散乱線の影響がみられている。 |

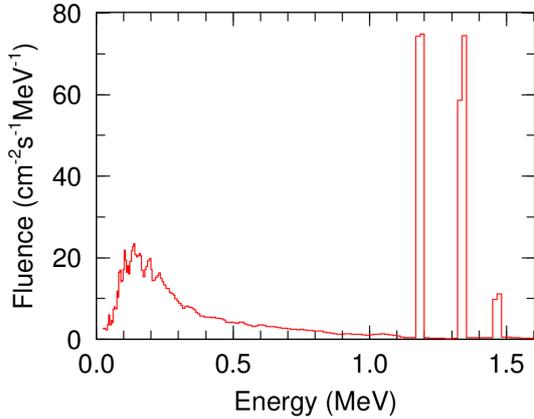
(a) #1 : 1階炉室作業エリア



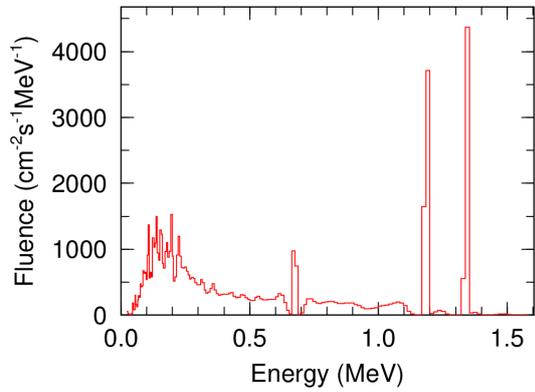
(b) #2 : 1階炉室カナル付近



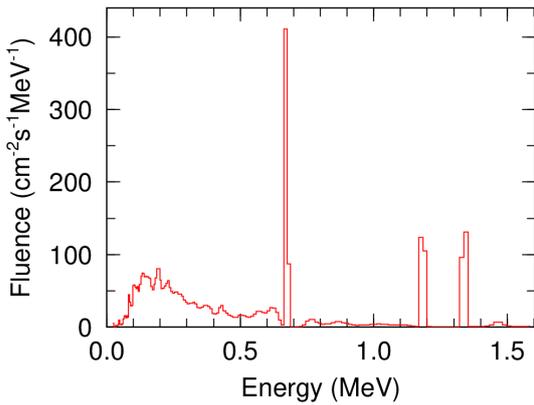
(c) #3 : 1階炉室物品置き場付近



(d) #4 : イオン交換塔 A



(e) #5 : 旧イオン交換塔 B



(f) #6 : イオン交換塔 A 前置フィルタ付近

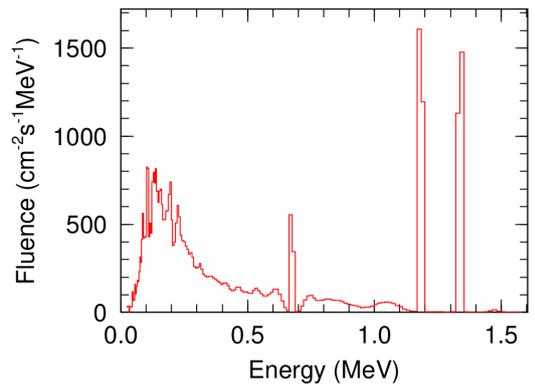
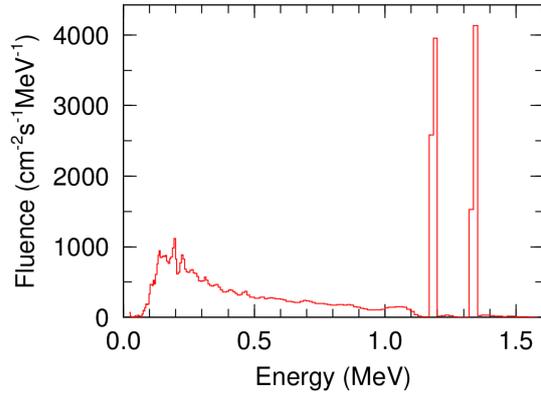
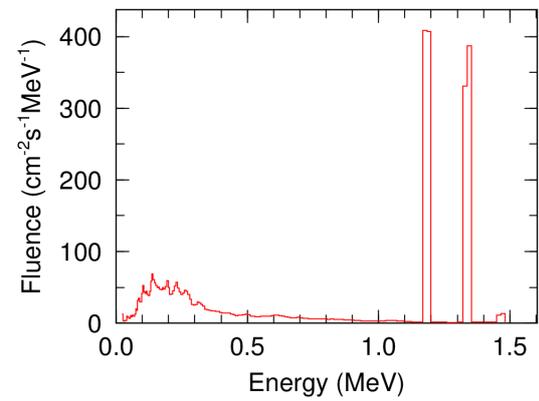


図 J 4-45 廃止措置中の原子炉施設の作業場における光子エネルギー分布 (1)

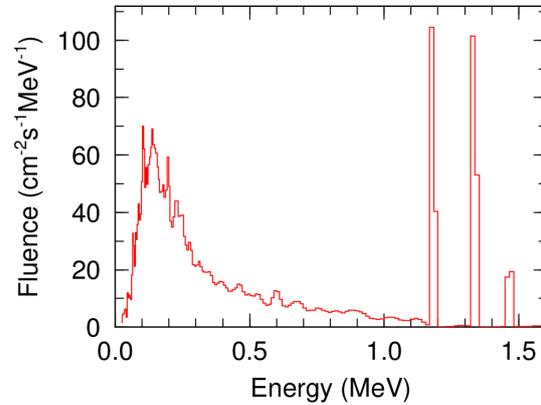
(g) #7 : 主循環ポンプストレナ



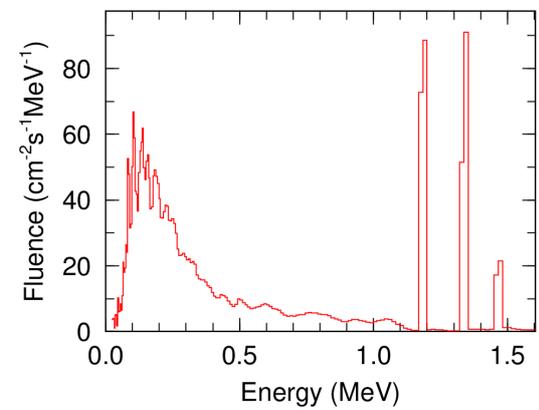
(h) #8 : 主循環系配管



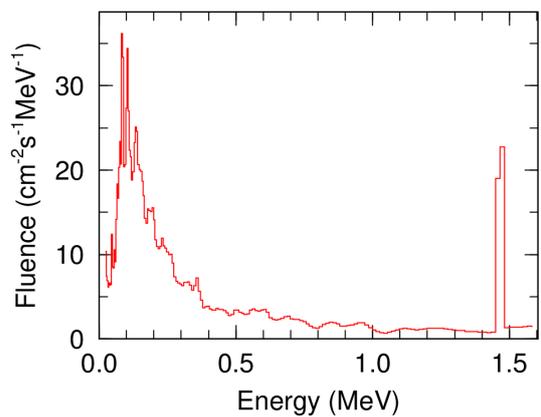
(i) #9 : 主循環系通路



(j) #10 : 地下3階炉心下



(k) #11 : 地下4階炉下



(l) #12 : 排水貯槽上部付近

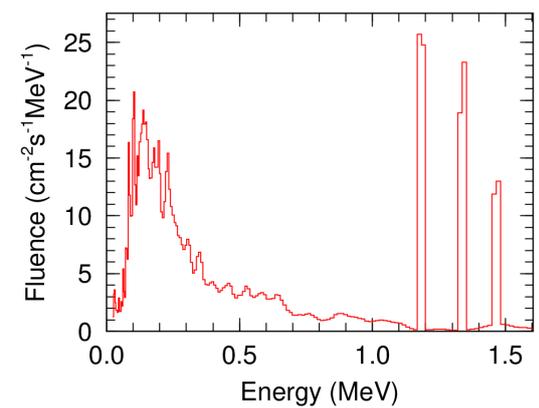
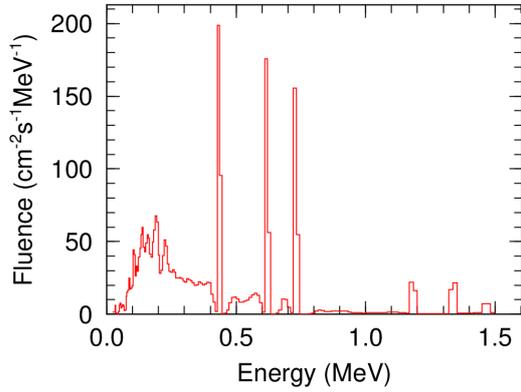


図 J 4-46 廃止措置中の原子炉施設の作業場における光子エネルギー分布 (2)

(m) #13 : シュラウド照射装置配管



(n) #14 : 3階炉室吹き抜け

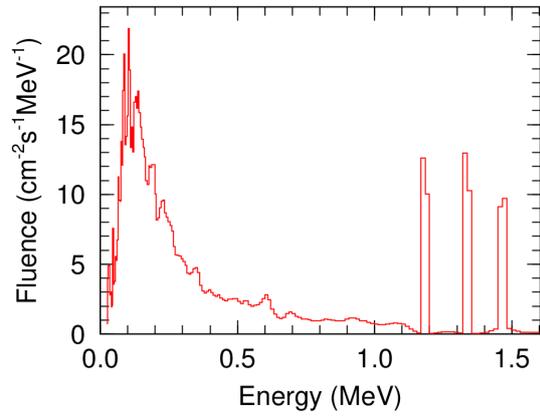
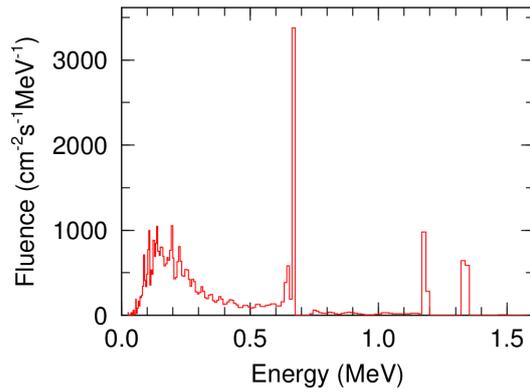
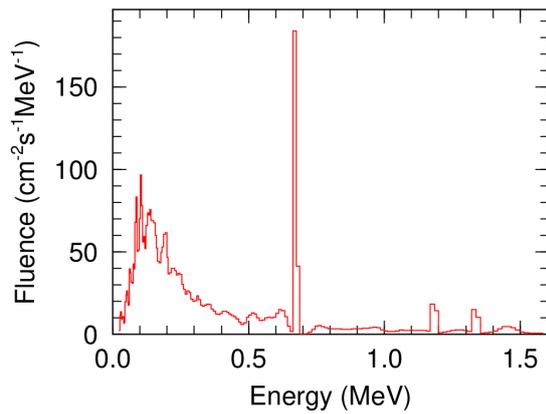


図 J 4-47 廃止措置中の原子炉施設の作業場における光子エネルギー分布 (3)

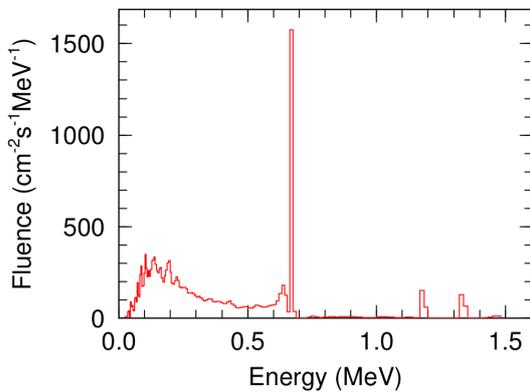
(a) #15 : コンクリートセル扉前 (サービスエリア)



(b) #16 : サービスエリア通路①



(c) #17 : サービスエリア通路②



(d) #18 : サービスエリア通路③

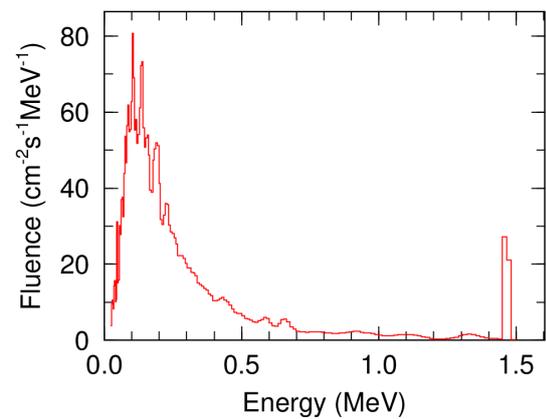
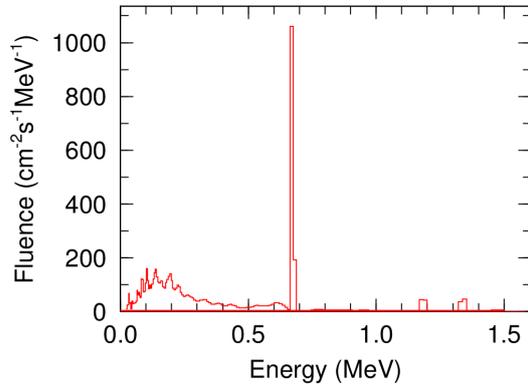
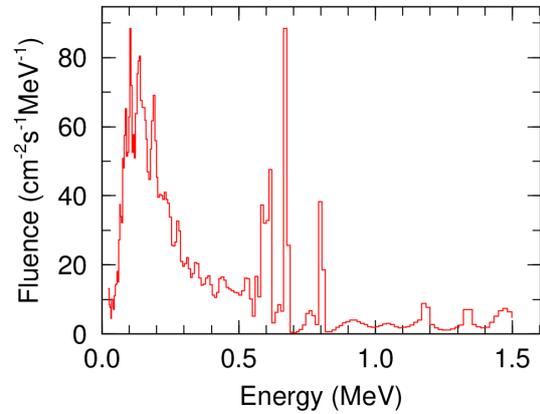


図 J 4-48 ホットラボ施設の作業場における光子エネルギー分布 (1)

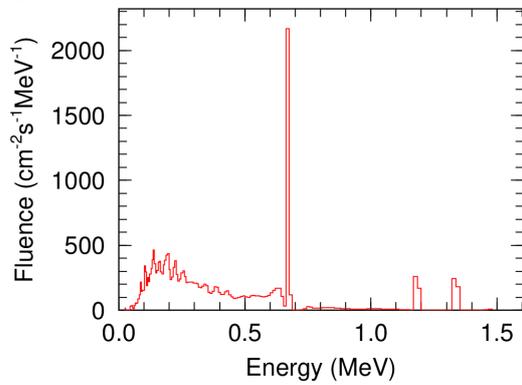
(e) #19 : 物品保管付近 (サービスエリア)



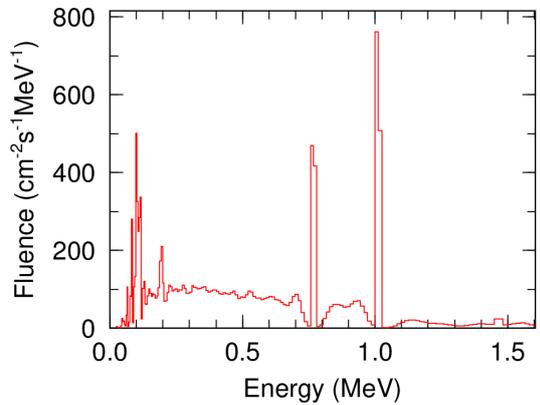
(f) #20 : 鉛セル扉前 (サービスエリア) ①



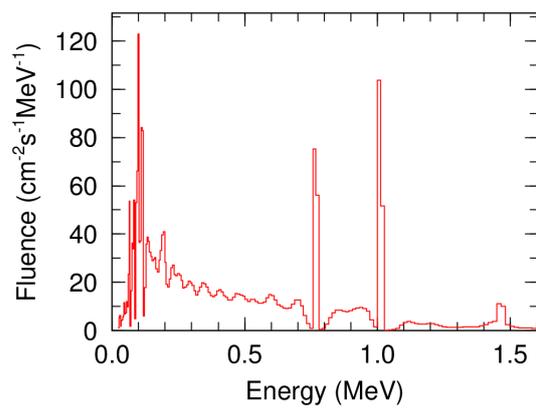
(g) #21 : 鉛セル扉前 (サービスエリア) ②



(h) #22 : 顕微鏡鉛セル遮蔽前 (操作室)



(i) #23 : 顕微鏡鉛セルマニピュレータ前 (操作室)



(j) #24 : コンクリートセル No.5 配管付近 (操作室)

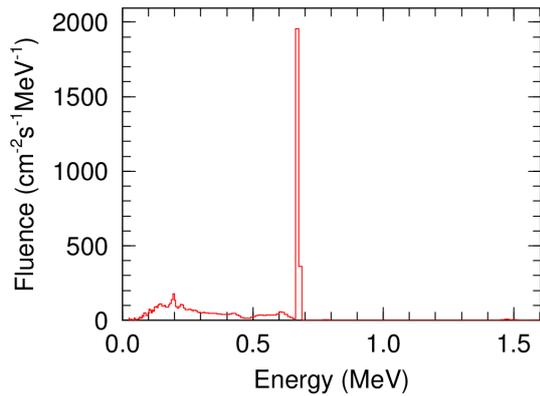
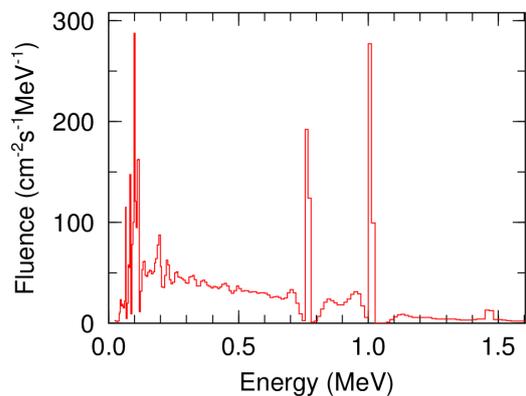


図 J 4-49 ホットラボ施設の作業場における光子エネルギー分布 (2)

(k) #25 : 顕微鏡鉛セル前付近



(l) #26 : 顕微鏡鉛セル前通路

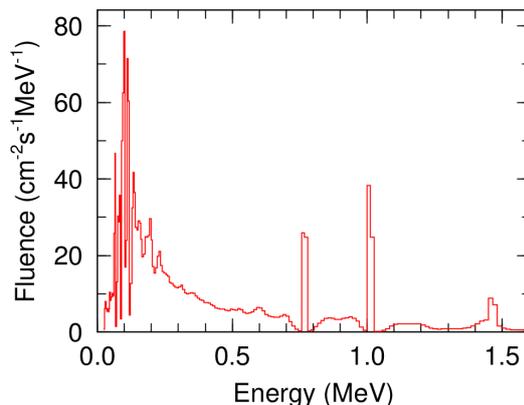
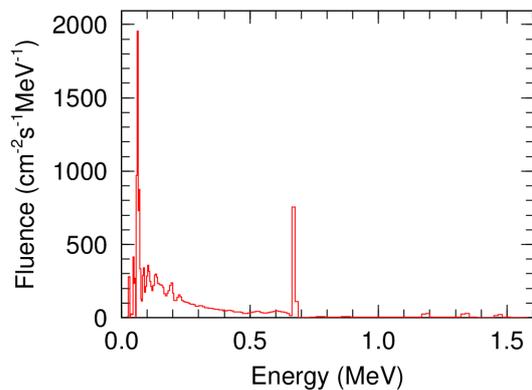
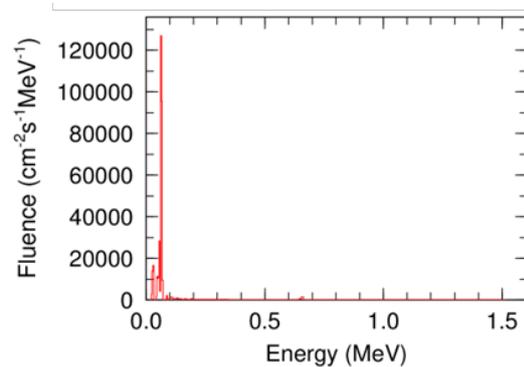


図 J 4-50 ホットラボ施設の作業場における光子エネルギー分布 (3)

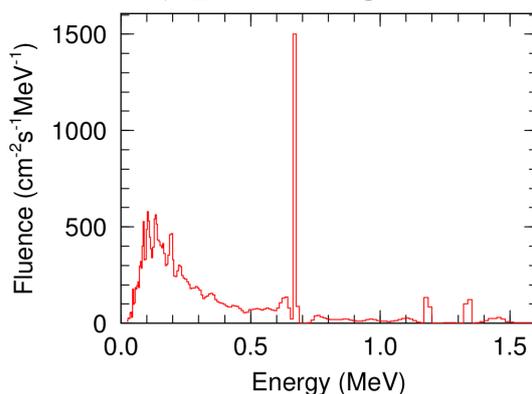
(a) #27 : 入口付近①



(b) #28 : 入口付近②



(c) #29 : 保管室ドラム缶前①



(d) #30 : 保管室ドラム缶前②

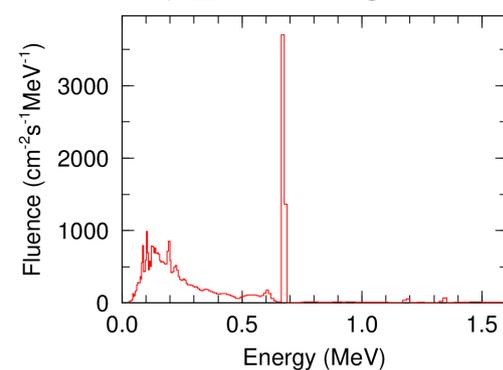
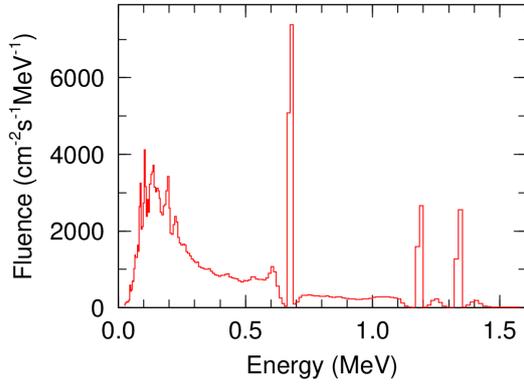
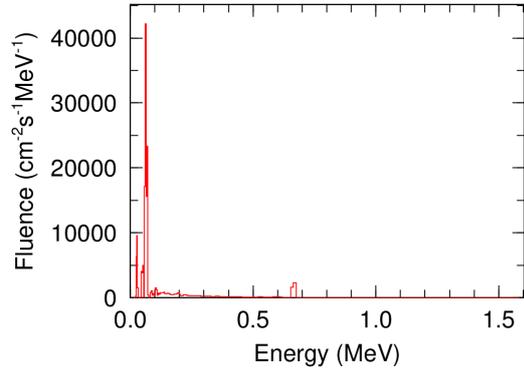


図 J 4-51 建屋式保管廃棄施設の作業場における光子エネルギー分布 (1)

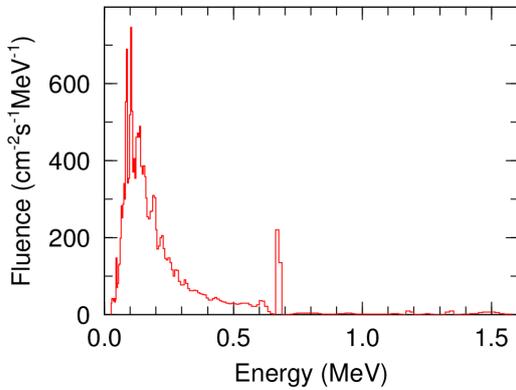
(e) #31 : 保管室ドラム缶前③



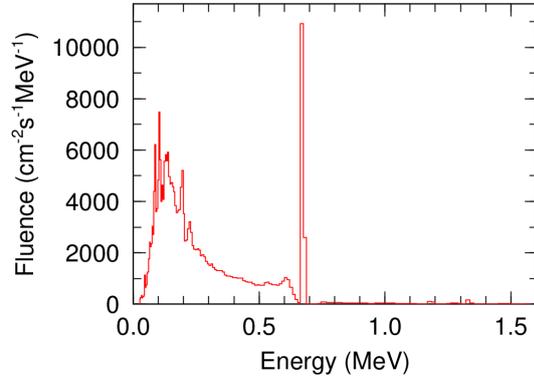
(f) #32 : ドラム缶-コンクリート柱狭隘部



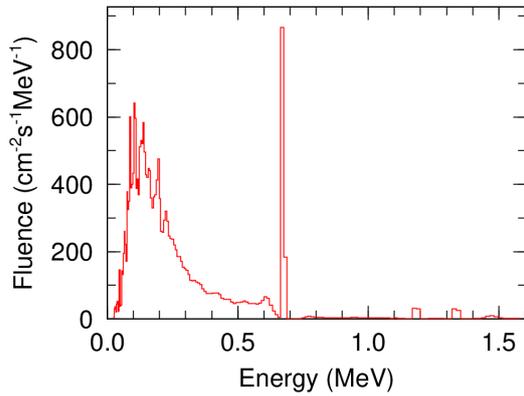
(g) #33 : 保管室隅



(h) #34 : セメント固化体エリア



(i) #35 : 1m³容器保管体エリア



(j) #36 : 廃棄体で囲まれたエリア

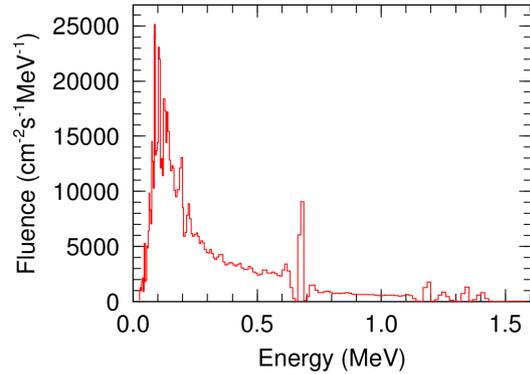
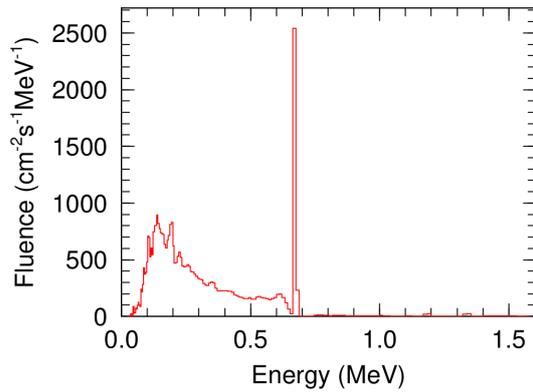
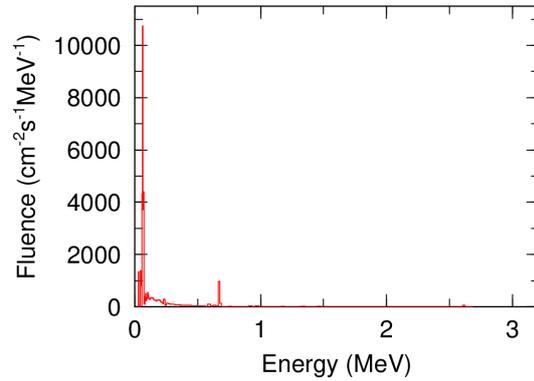


図 J 4-52 建屋式保管廃棄施設の作業場における光子エネルギー分布 (2)

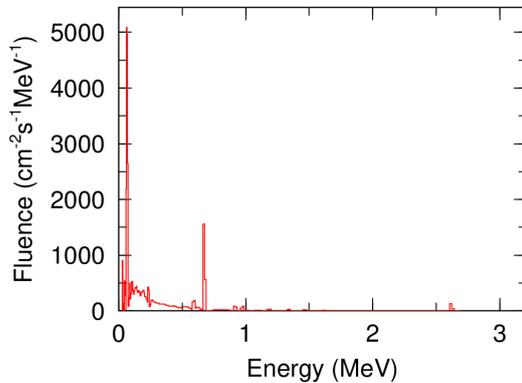
(k) #37 : 1m³ 容器保管体間狭隘部



(l) #38 : α 廃棄物エリア①



(m) #39 : α 廃棄物エリア②



(n) #40 : α 廃棄物エリア②後方壁付近

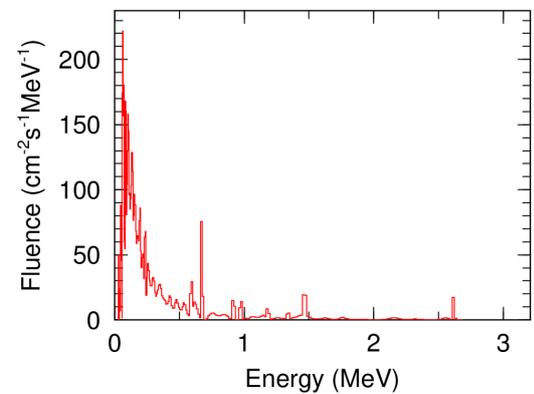


図 J 4-53 建屋式保管廃棄施設の作業場における光子エネルギー分布 (3)

J4.3.1.4 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 J4.2.1.2 の(1)式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 95^[5]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ていると仮定し、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し、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ことに注意が必要である。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° 照射または ROT 照射として単純化して解析した。

(2) 結果と考察

廃止措置中の原子炉施設放射線作業場 (#1~#14) に対する線量の評価結果及び H^* 平均エネルギー¹を表 J 4-6 及び表 J 4-8 に示した。 H^* 平均エネルギーについては、 ^{60}Co とその散乱線が中心となることから、#5 及び#13 を除いては、0.9~1.2 MeV となった。#5 及び#13 は他と比べて H^* 平均エネルギーが小さいが、#5 は使用停止後時間が経過していることで、 ^{137}Cs の寄与が相対的に大きくなったため、#13 は $^{108\text{m}}\text{Ag}$ が支配的なためである。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 校正場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。

ホットラボ施設放射線作業場 (#15~#26) に対する線量評価結果及び H^* 平均エネルギーを表 J 4-9~表 J 4-11 に示した。 H^* 平均エネルギーは#22、#23、#25、及び#26 を除いては 0.64~0.75 MeV となり、 ^{137}Cs などが支配的であることに対応している。一方で顕微鏡鉛セルマニピュレータ付近は、 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ に起因する γ 線により H^* 平均エネルギーは少し高く 0.84~0.90 MeV となっている。しかしながら、この範囲内では、新・現行実用量の比は変化せず、上述の廃止措置中の原子炉施設と同様である。

建屋式保管廃棄施設放射線作業場 (#27~#40) に対する線量評価結果及び H^* 平均エネルギーを表 J 4-12~表 J 4-14 に示した。 ^{137}Cs が支配的なところと ^{241}Am が支配的なところに大きく大別される。 ^{241}Am が支配的であるところであっても、少量の高エネルギー成分によって、 H^* 平均エネルギーは 0.2~0.5 MeV 付近となっている。そのため、例えば#28 については、フルエンス平均エネルギーは 90 keV 程度である。新・現行実用量の比は、 ^{137}Cs が支配的なところでは S-Cs 校正場、 ^{241}Am が支配的なところでは N-80 X 線校正場に近い値となっている。すなわちその何れかの場で校正し、もう一方の場での試験により応答を確認しておけば、その線量計により適切にモニタリングできると考えられる。今回は 0° 及び ROT 照射のみの解析としたが、実際の照射ジオメトリは複雑であるため、今後は入射光子の方向依存性などを測定し詳細に解析することが必要と考えられる。

それぞれの施設における 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 J 4-54~図 J 4-59 に示した。ただし、これらは解析において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とに注意を要する。廃止措置中の原子炉施設及びホットラボ施設については、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。建屋式保管廃棄施設放射線作業場については、 $D'_{\text{lens}}/H'(3)$ や $D_{\text{p lens}}/H_{\text{p}}(3)$ はエネルギー依存的ではないが、 $H^*/H^*(10)$ や $H_{\text{p}}/H_{\text{p}}(10)$ は H^* 平均エネルギー 0.4 MeV を下回ると徐々に減少

¹ 各光子エネルギーに対する H^* への線量換算係数で重み付けた加重平均エネルギー

し、 $D'_{\text{local skin}}/H'(0.07)$ や $D_{\text{p local skin}}/H_{\text{p}}(0.07)$ は徐々に増加する。それでも最大値と最小値の比は 15%以内であった。

表 J 4-6 廃止措置中の原子炉施設作業場（#1～#14）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 | 1 階炉室作業エリア | 0.95 | 1.21 | 1.03 | 1.20 | 1.17 | 1.21 | 1.22 |
| #2 | 1 階炉室カナル付近 | 0.95 | 1.17 | 1.01 | 1.16 | 1.14 | 1.17 | 1.17 |
| #3 | 1 階炉室物品置き場付近 | 1.13 | 1.16 | 1.00 | 1.15 | 1.13 | 1.16 | 1.16 |
| #4 | イオン交換塔 A | 0.96 | 1.20 | 1.02 | 1.19 | 1.16 | 1.20 | 1.20 |
| #5 | イオン交換塔 B | 0.86 | 1.21 | 1.03 | 1.20 | 1.17 | 1.21 | 1.22 |
| #6 | イオン交換塔 A 前置フィルタ付近 | 0.94 | 1.20 | 1.03 | 1.19 | 1.16 | 1.20 | 1.21 |
| #7 | 主循環ポンプストレナー | 0.99 | 1.19 | 1.02 | 1.18 | 1.15 | 1.19 | 1.20 |
| #8 | 主循環循系配管 | 1.12 | 1.18 | 1.01 | 1.17 | 1.14 | 1.18 | 1.18 |
| #9 | 主循環系通路 | 0.90 | 1.21 | 1.03 | 1.20 | 1.17 | 1.21 | 1.22 |
| #10 | 地下3階炉心下 | 1.00 | 1.17 | 1.01 | 1.16 | 1.13 | 1.17 | 1.17 |
| #11 | 地下4階炉下 | 0.92 | 1.18 | 1.01 | 1.17 | 1.14 | 1.18 | 1.18 |
| #12 | 排水貯槽上部付近 | 1.02 | 1.17 | 1.01 | 1.16 | 1.13 | 1.17 | 1.17 |
| #13 | シュラウド照射装置配管 | 0.67 | 1.18 | 1.01 | 1.17 | 1.14 | 1.18 | 1.18 |
| #14 | 3 階炉室吹き抜け | 1.05 | 1.17 | 1.01 | 1.16 | 1.14 | 1.17 | 1.17 |
| - | S-Cs 校正場 ¹⁾ | 0.64 | 1.20 | 1.02 | 1.18 | 1.17 | 1.20 | 1.21 |

1) 比較のため、コリメート付き校正場に関する線量換算係数^[J7,J8]を示した。

表 J 4-7 廃止措置中の原子炉施設作業場（#1～#14）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) |
| #1 | 1階炉室作業エリア | 1.23 | 1.03 | 1.19 | 1.17 | 1.22 | 1.22 | 0.83 | 0.95 |
| #2 | 1階炉室カナル付近 | 1.17 | 1.01 | 1.15 | 1.14 | 1.22 | 1.17 | 0.84 | 0.95 |
| #3 | 1階炉室物品置き場付近 | 1.16 | 1.00 | 1.14 | 1.13 | 1.19 | 1.16 | 0.84 | 0.95 |
| #4 | イオン交換塔 A | 1.21 | 1.02 | 1.18 | 1.16 | 1.20 | 1.20 | 0.83 | 0.95 |
| #5 | イオン交換塔 B | 1.22 | 1.03 | 1.19 | 1.17 | 1.22 | 1.22 | 0.82 | 0.94 |
| #6 | イオン交換塔 A 前置フィルタ付近 | 1.22 | 1.03 | 1.18 | 1.16 | 1.21 | 1.21 | 0.83 | 0.95 |
| #7 | 主循環ポンプストレーナ | 1.20 | 1.02 | 1.17 | 1.15 | 1.20 | 1.20 | 0.83 | 0.95 |
| #8 | 主循環循系配管 | 1.18 | 1.01 | 1.15 | 1.14 | 1.18 | 1.18 | 0.84 | 0.95 |
| #9 | 主循環系通路 | 1.23 | 1.03 | 1.19 | 1.17 | 1.22 | 1.22 | 0.83 | 0.95 |
| #10 | 地下3階炉心下 | 1.17 | 1.01 | 1.15 | 1.13 | 1.21 | 1.17 | 0.84 | 0.95 |
| #11 | 地下4階炉下 | 1.18 | 1.01 | 1.16 | 1.14 | 1.23 | 1.18 | 0.83 | 0.95 |
| #12 | 排水貯槽上部付近 | 1.17 | 1.01 | 1.15 | 1.13 | 1.21 | 1.17 | 0.84 | 0.95 |
| #13 | シュラウド照射装置配管 | 1.18 | 1.01 | 1.16 | 1.14 | 1.25 | 1.18 | 0.82 | 0.94 |
| #14 | 3階炉室吹き抜け | 1.17 | 1.01 | 1.15 | 1.14 | 1.22 | 1.17 | 0.84 | 0.95 |
| - | S-Cs 校正場 ¹⁾ | 1.21 | 1.02 | 1.18 | 1.17 | 1.20 | 1.21 | 0.81 | 0.94 |

1) 比較のため、コリメート付き校正場に関する線量換算係数^[J7,J8]を示した。

表 J 4-8 廃止措置中の原子炉施設作業場（#1～#14）における新・現行実用量の比較（カーマ近似）

| No. | 場所 | $H'/H'(10)$ (Sv/Sv) | $D'_{\text{lens}}/H'(3,0^\circ)$ (Gy/Sv) | $D'_{\text{local skin}}(0^\circ)/H'(0.07,0^\circ)$ (Gy/Sv) | $H_p(0^\circ)/H_p(10,0^\circ)$ (Sv/Sv) | $D_{\text{p lens}}(0^\circ)/H_p(3,0^\circ)$ (Gy/Sv) | $D_{\text{p local skin}}/H_p(0.07,0^\circ)$ (Gy/Sv) |
|-----|------------------------|------------------------|---|---|---|--|--|
| #1 | 1 階炉室作業エリア | 0.85 | 0.97 | 1.01 | 0.84 | 0.98 | 1.00 |
| #2 | 1 階炉室カナル付近 | 0.86 | 0.98 | 1.00 | 0.86 | 0.99 | 0.96 |
| #3 | 1 階炉室物品置き場付近 | 0.86 | 0.98 | 0.99 | 0.87 | 0.99 | 0.97 |
| #4 | イオン交換塔 A | 0.85 | 0.98 | 1.01 | 0.85 | 0.99 | 1.00 |
| #5 | イオン交換塔 B | 0.85 | 0.98 | 1.01 | 0.84 | 0.99 | 1.00 |
| #6 | イオン交換塔 A 前置フィルタ付近 | 0.85 | 0.98 | 1.01 | 0.85 | 0.99 | 1.00 |
| #7 | 主循環ポンプストレーナ | 0.85 | 0.98 | 1.01 | 0.85 | 0.99 | 1.00 |
| #8 | 主循環系配管 | 0.86 | 0.98 | 1.00 | 0.86 | 0.99 | 1.00 |
| #9 | 主循環系通路 | 0.85 | 0.97 | 1.01 | 0.84 | 0.98 | 1.00 |
| #10 | 地下3階炉心下 | 0.86 | 0.98 | 1.00 | 0.86 | 0.99 | 0.96 |
| #11 | 地下4階炉下 | 0.86 | 0.98 | 1.00 | 0.86 | 0.99 | 0.96 |
| #12 | 排水貯槽上部付近 | 0.86 | 0.98 | 1.00 | 0.86 | 0.99 | 0.96 |
| #13 | シュラウド照射装置配管 | 0.85 | 0.98 | 1.00 | 0.85 | 0.99 | 0.95 |
| #14 | 3 階炉室吹き抜け | 0.86 | 0.98 | 1.00 | 0.86 | 0.99 | 0.96 |
| - | S-Cs 校正場 ¹⁾ | 0.84 | 0.99 | 1.01 | 0.84 | 0.99 | 1.00 |

1) 比較のため、コリメート付き校正場に関する線量換算係数^[J7,J8]について示した。

表 J 4-9 ホットラボ施設作業場（#15～#26）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) |
| #15 | コンクリートセル扉前(サービスエリア) | 0.75 | 1.23 | 1.04 | 1.22 | 1.19 | 1.22 | 1.24 |
| #16 | サービスエリア通路① | 0.69 | 1.25 | 1.05 | 1.23 | 1.20 | 1.24 | 1.26 |
| #17 | サービスエリア通路② | 0.64 | 1.24 | 1.05 | 1.23 | 1.20 | 1.24 | 1.26 |
| #18 | サービスエリア通路③ | 0.66 | 1.27 | 1.07 | 1.26 | 1.22 | 1.26 | 1.29 |
| #19 | 物品保管付近(サービスエリア) | 0.69 | 1.23 | 1.04 | 1.22 | 1.19 | 1.23 | 1.24 |
| #20 | 鉛セル扉前(サービスエリア)① | 0.67 | 1.25 | 1.05 | 1.23 | 1.20 | 1.24 | 1.26 |
| #21 | 鉛セル扉前(サービスエリア)② | 0.67 | 1.23 | 1.04 | 1.22 | 1.19 | 1.23 | 1.25 |
| #22 | 顕微鏡鉛セル遮蔽前(操作室) | 0.86 | 1.17 | 1.01 | 1.16 | 1.13 | 1.17 | 1.17 |
| #23 | 顕微鏡鉛セルマニピュレータ前(操作室) | 0.89 | 1.17 | 1.01 | 1.16 | 1.14 | 1.17 | 1.17 |
| #24 | コンクリートセル No.5 配管付近 | 0.60 | 1.18 | 1.01 | 1.16 | 1.14 | 1.18 | 1.18 |
| #25 | 顕微鏡鉛セル前付近 | 0.84 | 1.17 | 1.01 | 1.16 | 1.14 | 1.17 | 1.17 |
| #26 | 顕微鏡鉛セル前通路 | 0.90 | 1.18 | 1.01 | 1.17 | 1.14 | 1.18 | 1.18 |
| - | S-Cs 校正場 ¹⁾ | 0.64 | 1.20 | 1.02 | 1.18 | 1.17 | 1.20 | 1.21 |

¹⁾ 比較のため、コリメート付き校正場に関する線量換算係数^[J7,J8]を示した。

表 J 4-10 ホットラボ施設作業場（#15～#26）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) |
| #15 | コンクリートセル扉前(サービスエリア) | 1.25 | 1.04 | 1.21 | 1.19 | 1.24 | 1.24 | 0.82 | 0.94 |
| #16 | サービスエリア通路① | 1.27 | 1.05 | 1.22 | 1.20 | 1.26 | 1.26 | 0.82 | 0.94 |
| #17 | サービスエリア通路② | 1.27 | 1.05 | 1.22 | 1.20 | 1.26 | 1.26 | 0.82 | 0.94 |
| #18 | サービスエリア通路③ | 1.31 | 1.07 | 1.25 | 1.22 | 1.29 | 1.29 | 0.83 | 0.95 |
| #19 | 物品保管付近(サービスエリア) | 1.25 | 1.04 | 1.21 | 1.19 | 1.24 | 1.24 | 0.82 | 0.94 |
| #20 | 鉛セル扉前(サービスエリア)① | 1.27 | 1.05 | 1.22 | 1.20 | 1.26 | 1.26 | 0.82 | 0.94 |
| #21 | 鉛セル扉前(サービスエリア)② | 1.26 | 1.04 | 1.21 | 1.19 | 1.25 | 1.25 | 0.82 | 0.94 |
| #22 | 顕微鏡鉛セル遮蔽前(操作室) | 1.17 | 1.01 | 1.15 | 1.13 | 1.22 | 1.17 | 0.83 | 0.95 |
| #23 | 顕微鏡鉛セルマニピュレータ前(操作室) | 1.17 | 1.01 | 1.15 | 1.14 | 1.22 | 1.17 | 0.83 | 0.95 |
| #24 | コンクリートセル No.5 配管付近 | 1.18 | 1.01 | 1.16 | 1.14 | 1.25 | 1.18 | 0.82 | 0.94 |
| #25 | 顕微鏡鉛セル前付近 | 1.17 | 1.01 | 1.15 | 1.14 | 1.22 | 1.17 | 0.83 | 0.95 |
| #26 | 顕微鏡鉛セル前通路 | 1.18 | 1.01 | 1.16 | 1.14 | 1.23 | 1.18 | 0.83 | 0.95 |
| - | S-Cs 校正場 ¹⁾ | 1.21 | 1.02 | 1.18 | 1.17 | 1.20 | 1.21 | 0.81 | 0.94 |

1) 比較のため、コリメート付き校正場に関する線量換算係数^[J7,J8]を示した。

表 J 4-11 ホットラボ施設作業場（#15～#26）における新・現行実用量の比較（カーマ近似）

| No. | 場所 | $H'/H'(10)$ (Sv/Sv) | $D'_{lens}/H'(3,0^\circ)$ (Gy/Sv) | $D'_{local\ skin}(0^\circ)/H'(0.07,0^\circ)$ (Gy/Sv) | $H_p(0^\circ)/H_p(10,0^\circ)$ (Sv/Sv) | $D_{p\ lens}(0^\circ)/H_p(3,0^\circ)$ (Gy/Sv) | $D_{p\ local\ skin}/H_p(0.07,0^\circ)$ (Gy/Sv) |
|-----|------------------------|------------------------|--------------------------------------|---|---|--|---|
| #15 | コンクリートセル扉前(サービスエリア) | 0.85 | 0.98 | 1.01 | 0.83 | 0.98 | 1.00 |
| #16 | サービスエリア通路① | 0.84 | 0.97 | 1.02 | 0.83 | 0.98 | 1.00 |
| #17 | サービスエリア通路② | 0.84 | 0.98 | 1.02 | 0.83 | 0.98 | 1.00 |
| #18 | サービスエリア通路③ | 0.84 | 0.97 | 1.02 | 0.82 | 0.98 | 1.00 |
| #19 | 物品保管付近(サービスエリア) | 0.84 | 0.98 | 1.01 | 0.83 | 0.98 | 1.00 |
| #20 | 鉛セル扉前(サービスエリア)① | 0.84 | 0.97 | 1.02 | 0.83 | 0.98 | 1.00 |
| #21 | 鉛セル扉前(サービスエリア)② | 0.85 | 0.98 | 1.01 | 0.83 | 0.98 | 1.00 |
| #22 | 顕微鏡鉛セル遮蔽前(操作室) | 0.86 | 0.98 | 1.00 | 0.86 | 0.99 | 0.96 |
| #23 | 顕微鏡鉛セルマニピュレータ前(操作室) | 0.86 | 0.98 | 1.00 | 0.86 | 0.99 | 0.96 |
| #24 | コンクリートセル No.5 配管付近 | 0.85 | 0.98 | 1.00 | 0.85 | 0.98 | 0.95 |
| #25 | 顕微鏡鉛セル前付近 | 0.86 | 0.98 | 1.00 | 0.86 | 0.99 | 0.96 |
| #26 | 顕微鏡鉛セル前通路 | 0.86 | 0.98 | 1.00 | 0.86 | 0.99 | 0.96 |
| - | S-Cs 校正場 ¹⁾ | 0.84 | 0.99 | 1.01 | 0.84 | 0.99 | 1.00 |

1) 比較のため、コリメート付き校正場に関する線量換算係数^[J7,J8]について示した。

表 J 4-12 建屋式保管廃棄施設作業場（#27～#40）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) |
| #27 | 入口付近① | 0.57 | 1.28 | 1.07 | 1.26 | 1.23 | 1.26 | 1.29 |
| #28 | 入口付近② | 0.22 | 1.50 | 1.16 | 1.48 | 1.40 | 1.42 | 1.54 |
| #29 | 保管室ドラム缶前① | 0.65 | 1.25 | 1.06 | 1.23 | 1.20 | 1.24 | 1.26 |
| #30 | 保管室ドラム缶前② | 0.56 | 1.26 | 1.06 | 1.24 | 1.21 | 1.25 | 1.27 |
| #31 | 保管室ドラム缶前③ | 0.75 | 1.23 | 1.04 | 1.21 | 1.19 | 1.22 | 1.24 |
| #32 | ドラム缶-コンクリート柱間狭隘部 | 0.37 | 1.38 | 1.13 | 1.36 | 1.30 | 1.33 | 1.40 |
| #33 | 保管室隅 | 0.43 | 1.33 | 1.12 | 1.31 | 1.27 | 1.31 | 1.35 |
| #34 | セメント固化体エリア | 0.46 | 1.29 | 1.08 | 1.27 | 1.24 | 1.28 | 1.31 |
| #35 | 1m ³ 容器保管体エリア | 0.49 | 1.30 | 1.09 | 1.28 | 1.24 | 1.28 | 1.31 |
| #36 | 廃棄体で囲まれたエリア | 0.58 | 1.27 | 1.07 | 1.26 | 1.22 | 1.26 | 1.28 |
| #37 | 1m ³ 容器保管体狭隘部 | 0.48 | 1.27 | 1.07 | 1.26 | 1.23 | 1.26 | 1.29 |
| #38 | α廃棄物エリア① | 0.48 | 1.33 | 1.08 | 1.31 | 1.26 | 1.30 | 1.35 |
| #39 | α廃棄物エリア② | 0.56 | 1.28 | 1.06 | 1.26 | 1.23 | 1.26 | 1.30 |
| #40 | α廃棄物エリア②後方壁付近 | 0.65 | 1.27 | 1.07 | 1.26 | 1.22 | 1.26 | 1.29 |
| | S-Cs 校正場 ^{1),2)} | 0.64 | 1.20 | 1.02 | 1.18 | 1.17 | 1.20 | 1.21 |
| - | N-80 X 線校正場 ¹⁾ | 0.066 | 1.74 | 1.36 | 1.68 | 1.57 | 1.48 | 1.77 |

1) 比較のため示した[7,8]。 2) コリメート付き校正場

表 J 4-13 建屋式保管廃棄施設作業場（#27～#40）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) | $D_{plens}(0^\circ)/K_a$ (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) | $D_{plens}(ROT)/K_a$ (Gy/Gy) |
| #27 | 入口付近① | 1.32 | 1.07 | 1.25 | 1.23 | 1.29 | 1.29 | 0.82 | 0.94 |
| #28 | 入口付近② | 1.60 | 1.16 | 1.47 | 1.40 | 1.50 | 1.54 | 0.79 | 0.94 |
| #29 | 保管室ドラム缶前① | 1.28 | 1.06 | 1.23 | 1.20 | 1.26 | 1.26 | 0.82 | 0.94 |
| #30 | 保管室ドラム缶前② | 1.29 | 1.06 | 1.23 | 1.21 | 1.27 | 1.27 | 0.82 | 0.94 |
| #31 | 保管室ドラム缶前③ | 1.25 | 1.04 | 1.21 | 1.19 | 1.24 | 1.24 | 0.82 | 0.94 |
| #32 | ドラム缶-コンクリート柱間狭隘部 | 1.45 | 1.13 | 1.35 | 1.30 | 1.39 | 1.40 | 0.82 | 0.95 |
| #33 | 保管室隅 | 1.39 | 1.12 | 1.30 | 1.27 | 1.35 | 1.35 | 0.83 | 0.95 |
| #34 | セメント固化体エリア | 1.34 | 1.08 | 1.27 | 1.24 | 1.31 | 1.31 | 0.82 | 0.94 |
| #35 | 1m ³ 容器保管体エリア | 1.34 | 1.09 | 1.27 | 1.24 | 1.31 | 1.31 | 0.82 | 0.94 |
| #36 | 廃棄体で囲まれたエリア | 1.31 | 1.07 | 1.25 | 1.22 | 1.29 | 1.28 | 0.82 | 0.94 |
| #37 | 1m ³ 容器保管体狭隘部 | 1.32 | 1.07 | 1.25 | 1.23 | 1.29 | 1.29 | 0.82 | 0.94 |
| #38 | α廃棄物エリア① | 1.38 | 1.08 | 1.30 | 1.26 | 1.34 | 1.35 | 0.81 | 0.94 |
| #39 | α廃棄物エリア② | 1.32 | 1.06 | 1.26 | 1.23 | 1.29 | 1.30 | 0.81 | 0.94 |
| #40 | α廃棄物エリア②後方壁付近 | 1.31 | 1.07 | 1.25 | 1.22 | 1.29 | 1.29 | 0.83 | 0.94 |
| - | S-Cs 校正場 ^{1),2)} | 1.21 | 1.02 | 1.18 | 1.17 | 1.20 | 1.21 | 0.81 | 0.94 |
| - | N-80 X 線校正場 ¹⁾ | 1.89 | 1.36 | 1.66 | 1.57 | 1.72 | 1.77 | 0.88 | 1.00 |

1) 比較のため示した[7,8]。 2) コリメート付き校正場

表 J 4-14 建屋式保管廃棄施設作業場 (#27~#40) における新・現行実用量の比較 (カーマ近似)

| No. | 場所 | $H'/H'(10)$ (Sv/Sv) | $D'_{\text{lens}}/H'(3,0^\circ)$ (Gy/Sv) | $D'_{\text{local skin}}(0^\circ)/H'(0.07,0^\circ)$ (Gy/Sv) | $H_p(0^\circ)/H_p(10,0^\circ)$ (Sv/Sv) | $D_{\text{p lens}}(0^\circ)/H_p(3,0^\circ)$ (Gy/Sv) | $D_{\text{p local skin}}/H_p(0.07,0^\circ)$ (Gy/Sv) |
|-----|---------------------------|------------------------|---|---|---|--|--|
| #27 | 入口付近① | 0.84 | 0.97 | 1.02 | 0.81 | 0.98 | 1.00 |
| #28 | 入口付近② | 0.77 | 0.95 | 1.08 | 0.73 | 0.95 | 1.03 |
| #29 | 保管室ドラム缶前① | 0.84 | 0.97 | 1.02 | 0.83 | 0.98 | 1.00 |
| #30 | 保管室ドラム缶前② | 0.84 | 0.98 | 1.02 | 0.82 | 0.98 | 1.00 |
| #31 | 保管室ドラム缶前③ | 0.85 | 0.98 | 1.01 | 0.83 | 0.98 | 1.00 |
| #32 | ドラム缶-コンクリート柱間狭隙部 | 0.82 | 0.96 | 1.05 | 0.78 | 0.97 | 1.01 |
| #33 | 保管室隅 | 0.84 | 0.96 | 1.03 | 0.80 | 0.97 | 1.00 |
| #34 | セメント固化体エリア | 0.84 | 0.97 | 1.02 | 0.81 | 0.98 | 1.00 |
| #35 | 1m ³ 容器保管体エリア | 0.84 | 0.97 | 1.03 | 0.81 | 0.98 | 1.00 |
| #36 | 廃棄体で囲まれたエリア | 0.84 | 0.97 | 1.02 | 0.82 | 0.98 | 1.00 |
| #37 | 1m ³ 容器保管体狭隙部 | 0.84 | 0.97 | 1.02 | 0.81 | 0.98 | 1.00 |
| #38 | α 廃棄物エリア① | 0.82 | 0.97 | 1.04 | 0.79 | 0.97 | 1.01 |
| #39 | α 廃棄物エリア② | 0.83 | 0.97 | 1.03 | 0.81 | 0.98 | 1.00 |
| #40 | α 廃棄物エリア②後方壁付近 | 0.84 | 0.97 | 1.02 | 0.82 | 0.98 | 1.00 |
| - | S-Cs 校正場 ^{1),2)} | 0.84 | 0.99 | 1.01 | 0.84 | 0.99 | 1.00 |
| - | N-80 X 線校正場 ¹⁾ | 0.78 | 0.93 | 1.07 | 0.72 | 0.95 | 1.03 |

1) 比較のため示した[7,8]。2) コリメート付き校正場

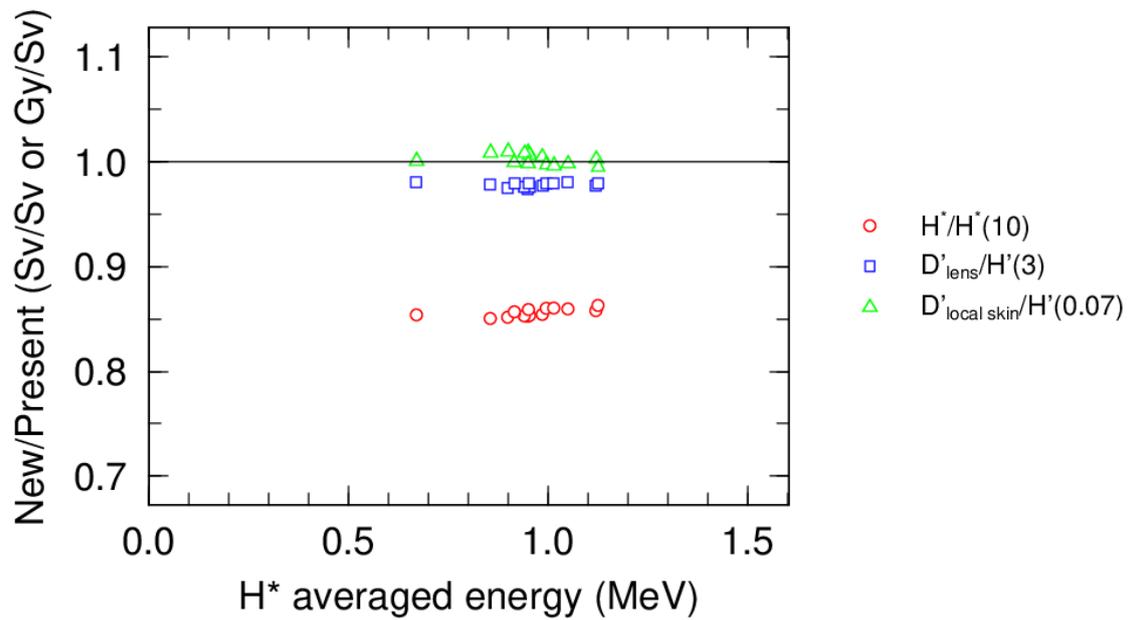


図 J 4-54 廃止措置中の原子炉施設の作業場で評価した新たな実用量（カーマ近似）と現行実用量の比較（場所のモニタリングにかかる実用量）

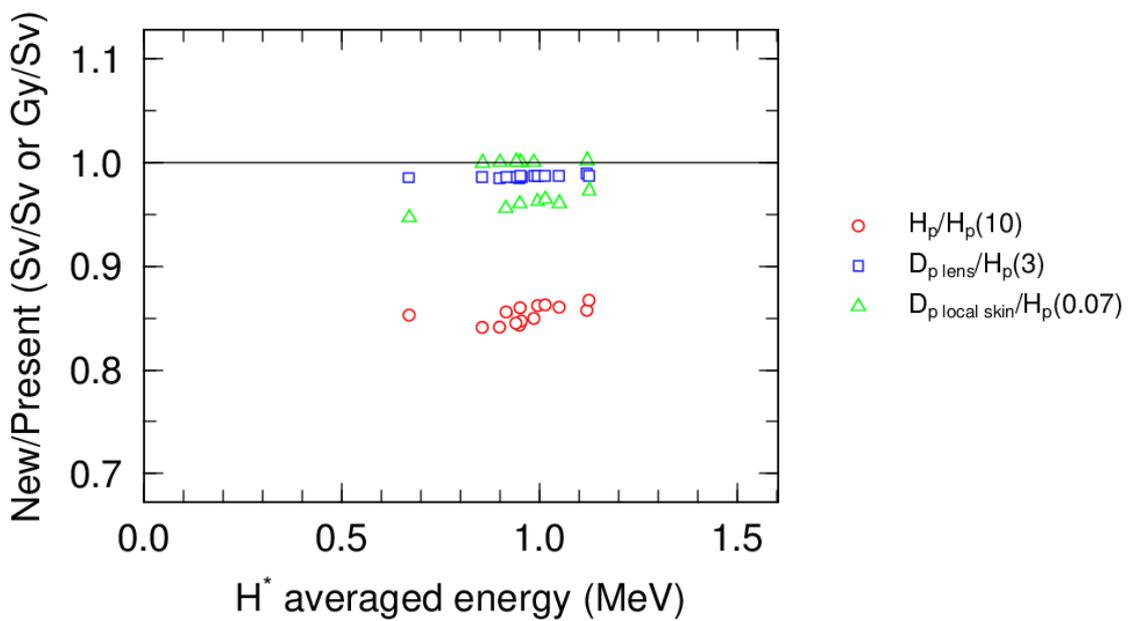


図 J 4-55 廃止措置中の原子炉施設の作業場で評価した新たな実用量（カーマ近似）と現行実用量の比較（個人モニタリングにかかる実用量）

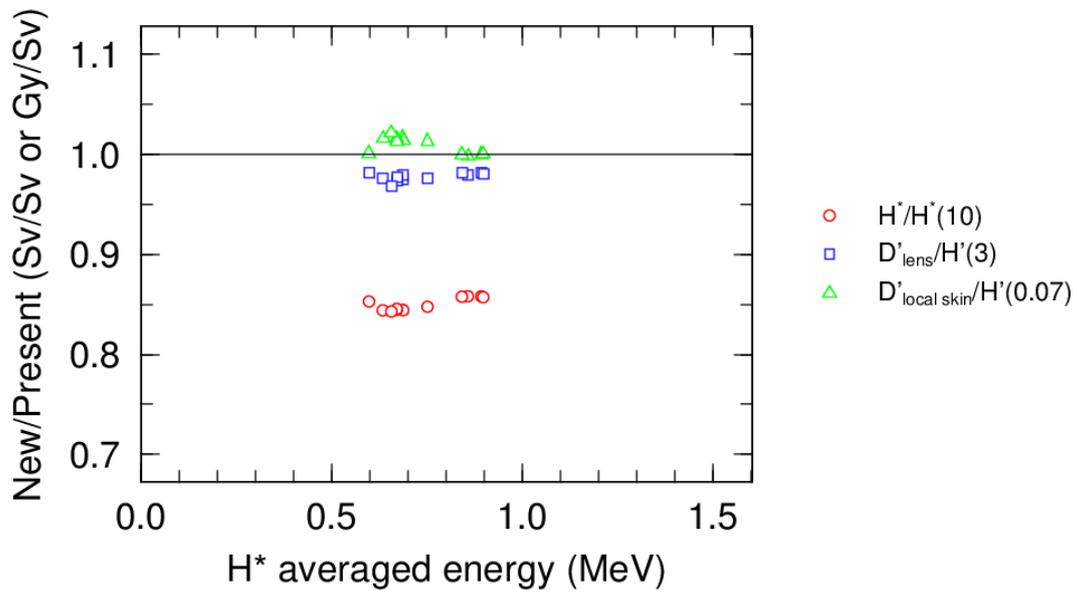


図 J 4-56 ホットラボ施設の作業場で評価した新たな実用量（カーマ近似）と現行実用量の比較（場所のモニタリングにかかる実用量）

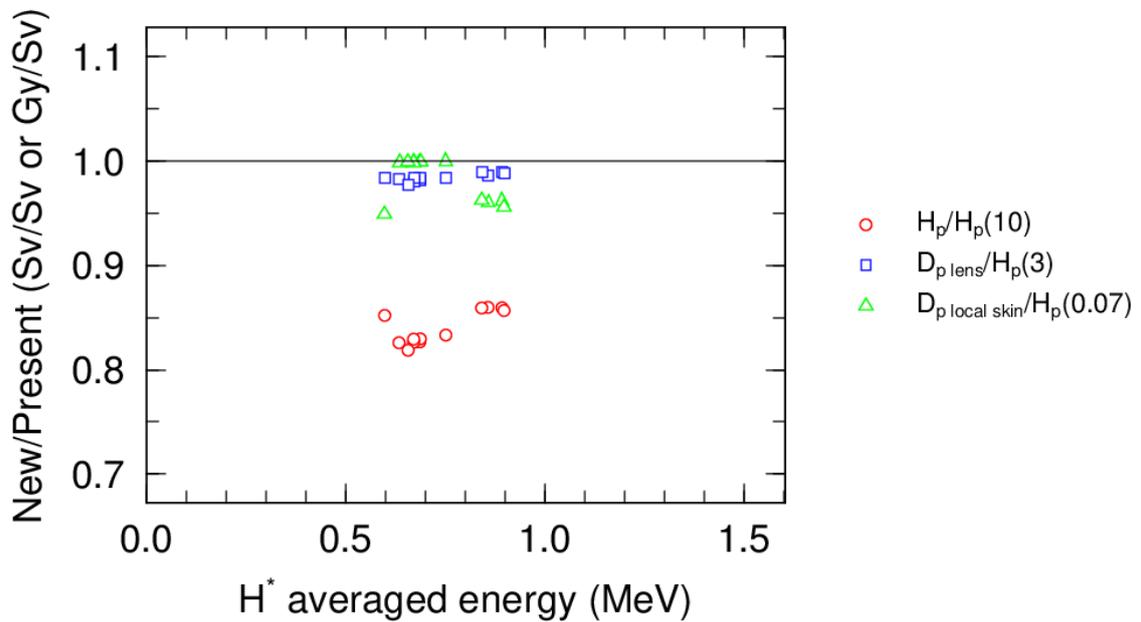


図 J 4-57 ホットラボ施設の作業場で評価した新たな実用量（カーマ近似）と現行実用量の比較（個人モニタリングにかかる実用量）

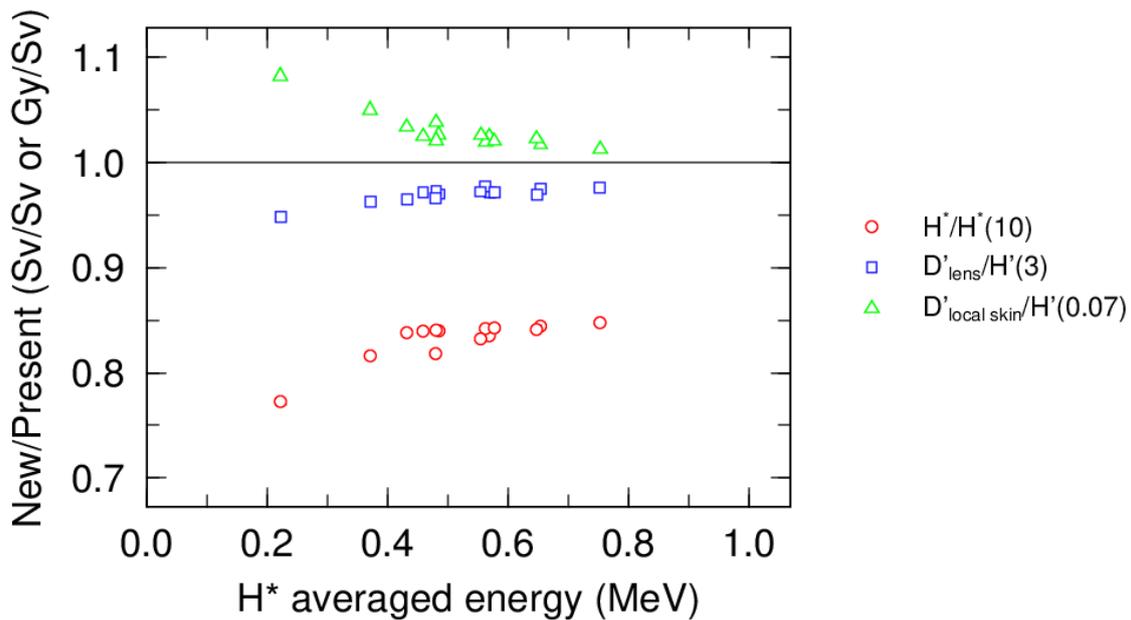


図 J 4-58 建屋式保管廃棄施設の作業場で評価した新たな実用量（カーマ近似）と現行実用量の比較（場所のモニタリングにかかる実用量）

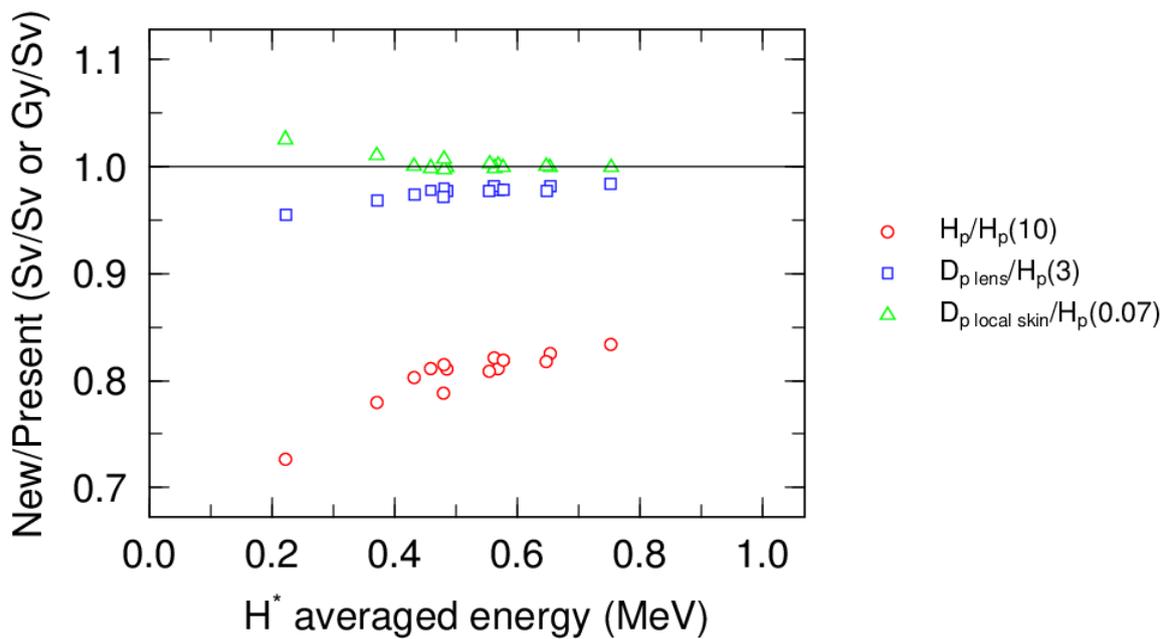


図 J 4-59 建屋式保管廃棄施設の作業場で評価した新たな実用量（カーマ近似）と現行実用量の比較（個人モニタリングにかかる実用量）

J4.3.1.5 放射線作業場における線量計のエネルギー応答

令和 4 年度事業では、光子エネルギー分布に基づいた放射線作業場における線量計の応答評価手法が提示されている。本事業では、J4.3.1.1 の放射線作業場に、この手法を適用することで、令和 5 年度事業までに取得された線量計のエネルギー特性から、多様な各放射線作業場における市販線量計のエネルギー応答を評価した。

(1) 解析に用いた線量計

解析に用いた線量計は、以下のとおり令和 5 年度事業で評価された線量計と同じものとした。

(i) R5-A 社製電離箱式サーベイメータ (H^* 、 D'_{lens} 、 $D'_{\text{local skin}}$)

(ii) R5-D 社製可搬型 γ 線エリアモニタ (H^*)

(iii) R5-E 社製受動形環境線量計 (H^*)

(iv) R5-F 社製受動形個人線量計 (H_p 、 $D_{p \text{ local skin}}$)

(v) R5-I 社製受動形個人線量計 ($D_{p \text{ lens}}$)

(vi) R5-J 社製受動形個人線量計 ($D_{p \text{ local skin}}$)

(vii) R5-O 社製電子式個人線量計 (H_p)

ここで、() 内は測定量であり、令和 5 年度事業までに得られたエネルギー応答を利用した。

(2) 線量計のエネルギー応答の評価方法

令和 4 年度事業で示された方法を利用した。具体的には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。

$$H(E) = \Phi(E) \cdot (K_a/\varphi)(E) \cdot h(E) \quad (3)$$

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

$$R = \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} R_H(E) \cdot H(E) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} H(E) dE} \quad (4)$$

で評価した。ここで、 E_{\max} 及び E_{\min} はそれぞれ光子エネルギー分布における最大エネルギー及び最小エネルギーである。 $R_H(E)$ 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。従って、本手法では、放射線場は

常に前方方向からのみと仮定していること、電子平衡が成立していることを仮定していることに注意が必要である。

(3) 結果と考察

それぞれの放射線作業場について、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 J 4-60～図 J 4-65 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。応答は、R5-A 社製電離箱式サーベイメータ、R5-D 社製可搬型 γ 線エリアモニタ及び R5-E 社製受動形環境線量計については、S-Cs 校正場において現行実用量である $H^*(10)$ で校正（規格化）した場合、R5-F 社製体幹部受動形個人線量計及び R5-O 社製電子式個人線量計については、S-Cs 校正場において現行実用量である $H_p(10)$ で校正（規格化）した場合、R5-I 社製水晶体用受動形個人線量計については、S-Cs 校正場において現行実用量である $H_p(3)$ で校正（規格化）した場合、R5-J 社製末端部用受動形個人線量計については、S-Cs 校正場において現行実用量である $H_p(0.07)$ で校正（規格化）した場合を図示している。

廃止措置中の原子炉施設及びホットラボ施設の放射線作業場については、ともに同様の傾向にあり、最大で R5-A 社製電離箱式サーベイメータで 30%程度の過大応答となる程度である。エネルギー違いによるレスポンスの変化は高々 10%程度であった。一方、建屋式保管廃棄施設においては ^{241}Am の寄与が大きい場合、過大または過小の応答となるケースがある。R5-F 社製体幹部受動形個人線量計では H_p が 50%程度過大となるケースや R5-D 社製可搬型 γ 線エリアモニタで H^* が 25%過小応答となるケースなどである。しかしながら、規格で示される許容範囲（例えば、IEC 62387^[24]では $H_p(10)$ 線量計の 33～65 keV に対して 0.69～1.82）内に収まっており、これらの場でも適切にモニタリングできると考えられる。

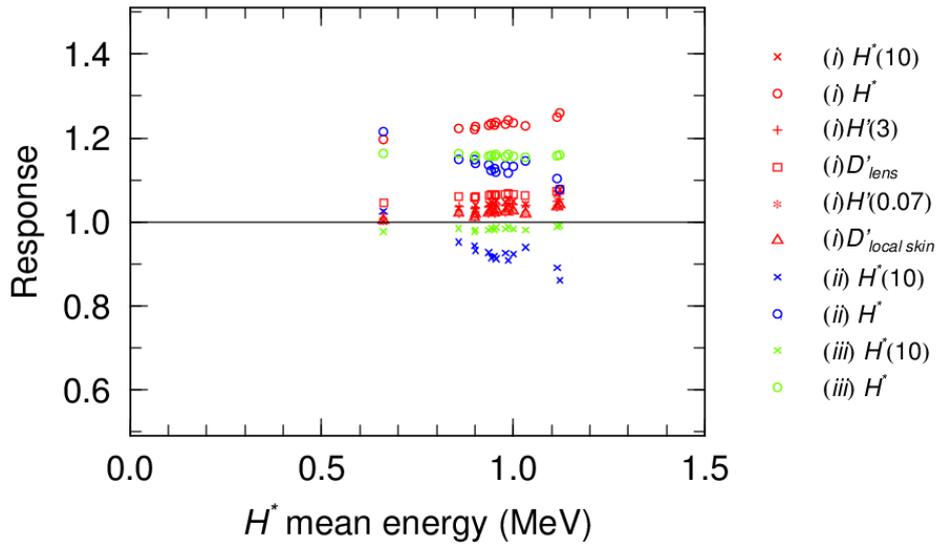


図 J 4-60 作業場モニタリングに関する線量計の廃止措置中の原子炉施設放射線作業場での応答評価

赤：R5-A 社製電離箱式サーベイメータ、青：R5-D 社製可搬型 γ 線エリアモニタ、緑：R5-E 社製受動形環境線量計、 \circ ： H^* 、 \times ： $H^*(10)$ 、 \square ： D'_{lens} 、 $+$ ： $H'(3)$ 、 \triangle ： $D'_{local\ skin}$ 、 $*$ ： $H'(0.07)$

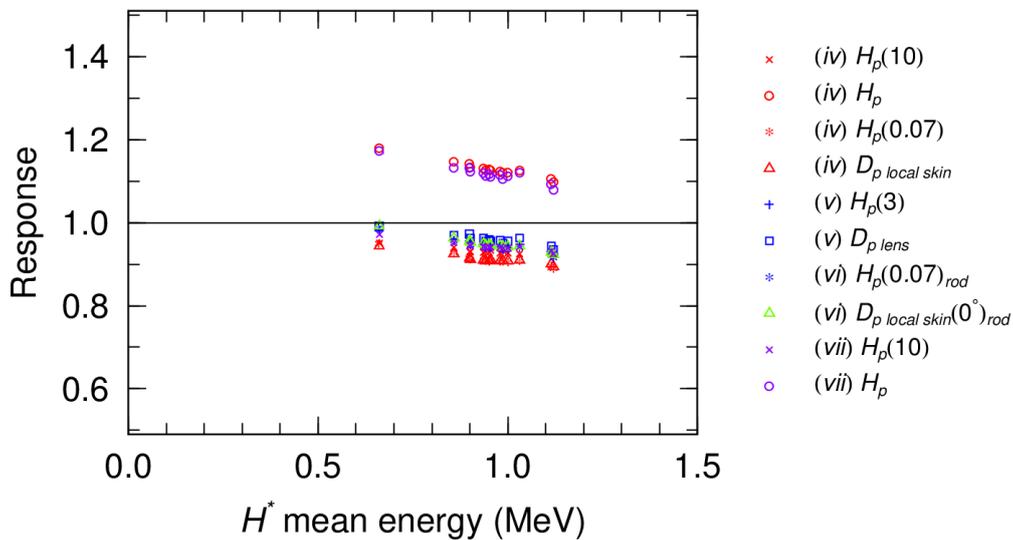


図 J 4-61 個人モニタリングに関する線量計の廃止措置中の原子炉施設放射線作業場での応答評価

赤：R5-F 社製体幹部受動形個人線量計、青：R5-I 社製水晶体用受動形個人線量計、緑：R5-J 社製末端部用受動形個人線量計、紫：R5-O 社製電子式個人線量計、 \circ ： H_p 、 \times ： $H_p(10)$ 、 \square ： $D_{p\ lens}$ 、 $+$ ： $H_p(3)$ 、 \triangle ： $D_{p\ local\ skin}$ 、 $*$ ： $H_p(0.07)$

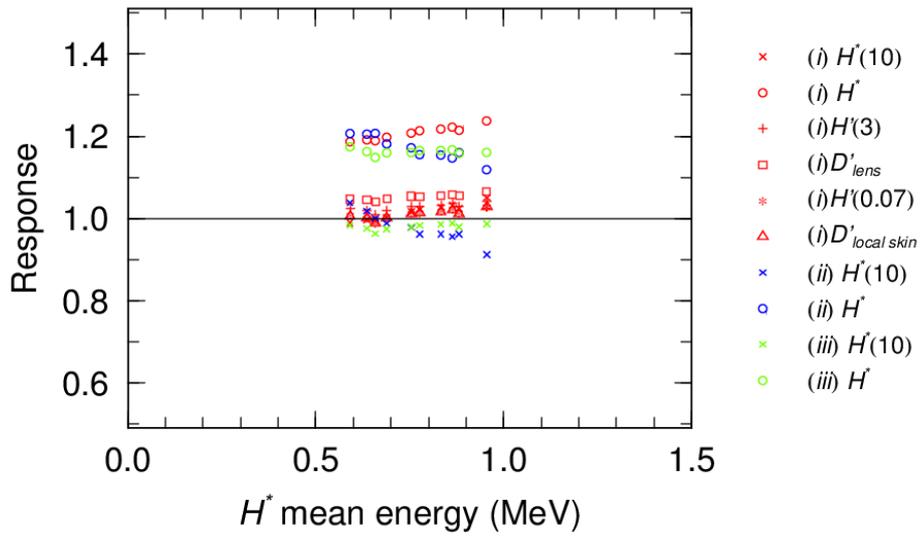


図 J 4-62 作業場モニタリングに関する線量計のホットラボ施設放射線作業場での応答評価

赤：R5-A 社製電離箱式サーベイメータ、青：R5-D 社製可搬型 γ 線エリアモニタ、緑：R5-E 社製受動形環境線量計、 \circ ： H^* 、 \times ： $H^*(10)$ 、 \square ： D'_{lens} 、 $+$ ： $H'(3)$ 、 \triangle ： $D'_{local\ skin}$ 、 $*$ ： $H'(0.07)$

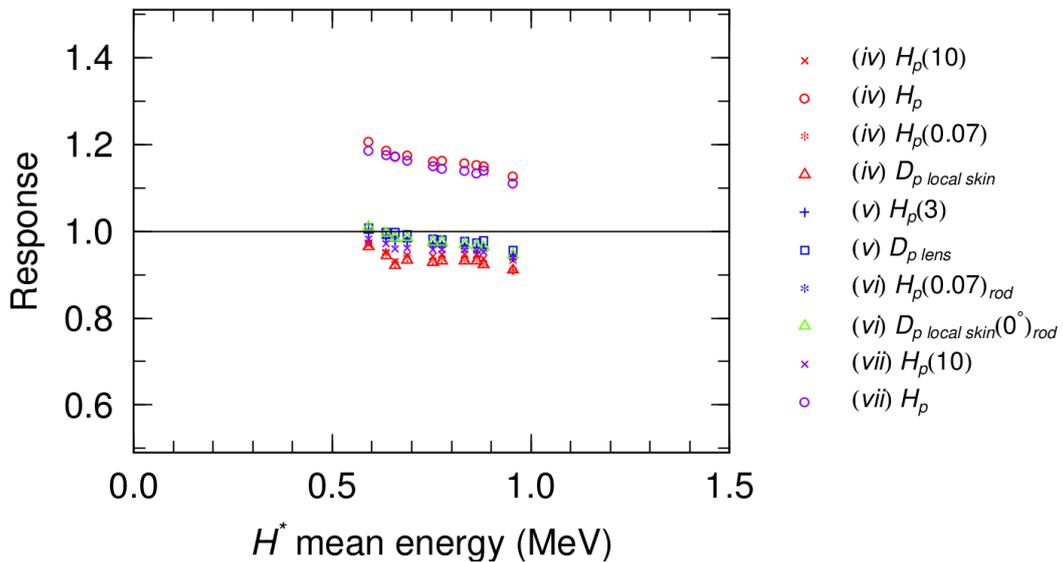


図 J 4-63 個人モニタリングに関する線量計のホットラボ施設放射線作業場での応答評価

赤：R5-F 社製体幹部受動形個人線量計、青：R5-I 社製水晶体用受動形個人線量計、緑：R5-J 社製末端部用受動形個人線量計、紫：R5-O 社製電子式個人線量計、 \circ ： H_p 、 \times ： $H_p(10)$ 、 \square ： $D_{p\ lens}$ 、 $+$ ： $H_p(3)$ 、 \triangle ： $D_{p\ local\ skin}$ 、 $*$ ： $H_p(0.07)$

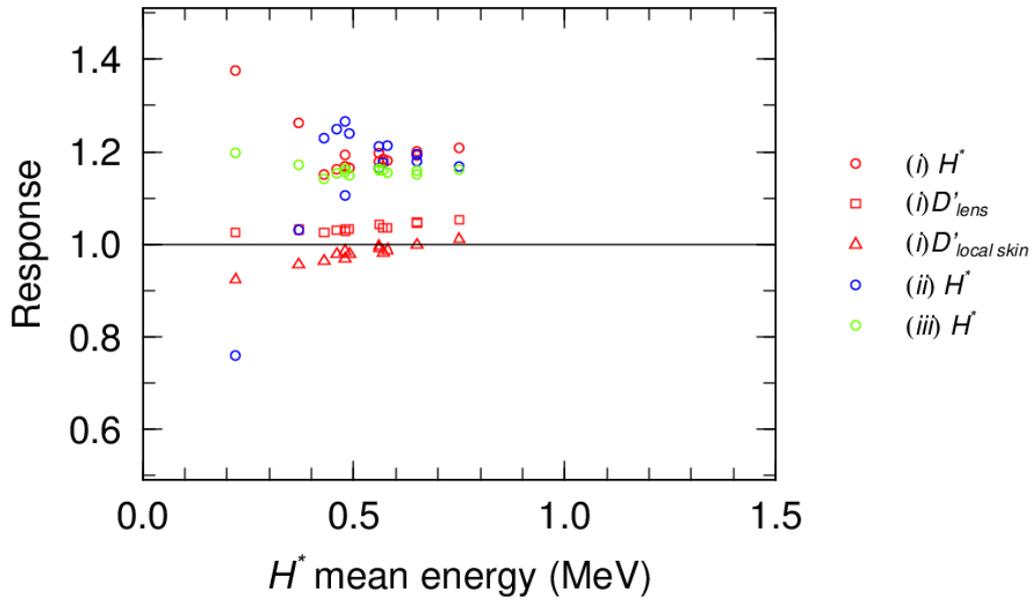


図 J 4-64 作業場モニタリングに関する線量計の建屋式保管廃棄施設放射線作業場での応答評価

赤：R5-A 社製電離箱式サーベイメータ、青：R5-D 社製可搬型 γ 線エリアモニタ、緑：R5-E 社製受動形環境線量計、 \circ ： H^* 、 \times ： $H^*(10)$ 、 \square ： D'_{lens} 、 $+$ ： $H'(3)$ 、 \triangle ： $D'_{local\ skin}$ 、 $*$ ： $H'(0.07)$

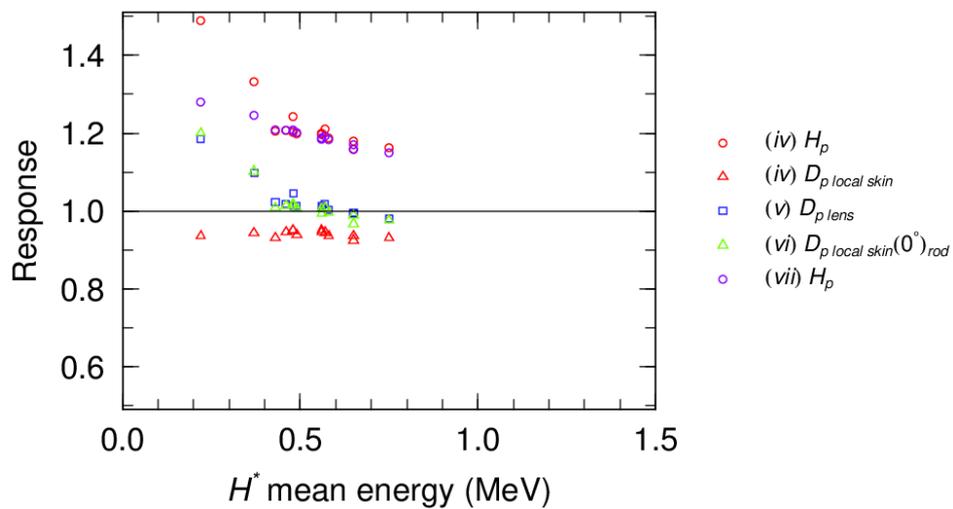


図 J 4-65 個人モニタリングに関する線量計の建屋式保管廃棄施設放射線作業場での応答評価

赤：R5-F 社製体幹部受動形個人線量計、青：R5-I 社製水晶体用受動形個人線量計、緑：R5-J 社製末端部用受動形個人線量計、紫：R5-O 社製電子式個人線量計、 \circ ： H_p 、 \times ： $H_p(10)$ 、 \square ： $D_{p\ lens}$ 、 $+$ ： $H_p(3)$ 、 \triangle ： $D_{p\ local\ skin}$ 、 $*$ ： $H_p(0.07)$

J4.3.1.6 光子エネルギースペクトル及び方向特性の測定方法の開発

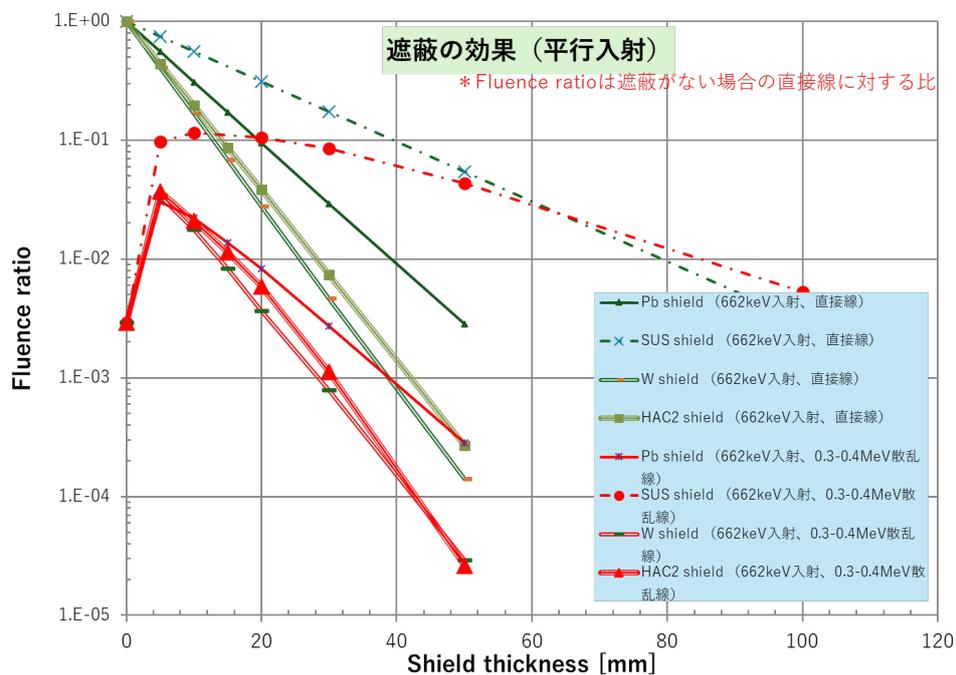
上述の放射線作業場においては、廃止措置中の原子炉施設における⁶⁰Coや^{108m}Ag、ホットラボ施設における劣化ウランに起因する光子を除いては、¹³⁷Cs (^{137m}Ba)からの γ 線である662 keV以下のエネルギーを持つ光子が支配的である。そこで、これらのエネルギー領域の光子場で特定方向の光子エネルギー分布を取得するための検出器コリメータを設計し、その性能を確認した。

(1) コリメータの設計

遮蔽材を決定するためにSUS、鉛、タングステン及びタングステン合金(HAC2)の遮蔽効果を計算評価した。モンテカルロ計算コードPHITS 2.88^[J29](EGSモード)を用い、遮蔽体の評価面から反対側に20 cm離れた位置に平板線源(半径500 cm)を設置し、「(a) 平行線源(遮蔽体に垂直入射)」及び「(b) 4π 等方線源」の二つの条件で計算した。線源は、662 keV単色光子とし、遮蔽体表面から1 cm離れた位置で直接線の透過率及び0.3-0.4 MeV散乱線を評価した。図J 4-66にそれぞれ平行入射、 4π 入射における遮蔽の効果を示した。何れの場合においても密度の高いタングステンがすぐれた遮蔽性能を有している。平行入射の場合のみタングステン及びHAC2の両方を評価したが、HAC2でも、それほど遮蔽性能が悪化しない。また、20 mm厚さのタングステンで、 4π 入射の直接線透過率を1%以下に、散乱線を10%以下に低減できる。以上のことから、加工に優れたHAC2を採用し、可搬性も考慮して基本厚さを20 mmとすることとした。また、タングステンからの特性X線(54 keV及び67 keV)が検出器に入射するのを防ぐために、検出器内包部分を3 mm厚さのSUSで覆う構造とした。また、組み上げたHAC2遮蔽体は外枠のSUS板で固定した。上部には取っ手、底面には固定用ネジ穴を設置するとともに、検出器からのケーブル孔も設けた。検出器スペースは39 mm×39 mm×70 mmであり、前方のコリメータ穴は1 cm ϕ とした。コリメータの組み立て図及び外観を図J 4-67に示した。コリメータの総重量は約13 kg(CdZnTe検出器込み)である。また、長軸の検出器に対しては、後方の鉛遮蔽体も準備した。

662 keV程度の高いエネルギーの γ 線は平行入射の場合、直接線で数%程度遮蔽体を透過することが見込まれる(図J 4-66参照)ため、このような場合には、1 cm ϕ ×5.8 cmの鉛製遮へいプラグをコリメータ穴に付け(図J 4-67参照)、プラグ有り無しそれぞれのスペクトルの差から方向依存的なスペクトルを得ることとした。

(a) 平行線源（遮蔽体に垂直入射）の場合の遮蔽効果



(b) 4π 等方線源の場合の遮蔽効果

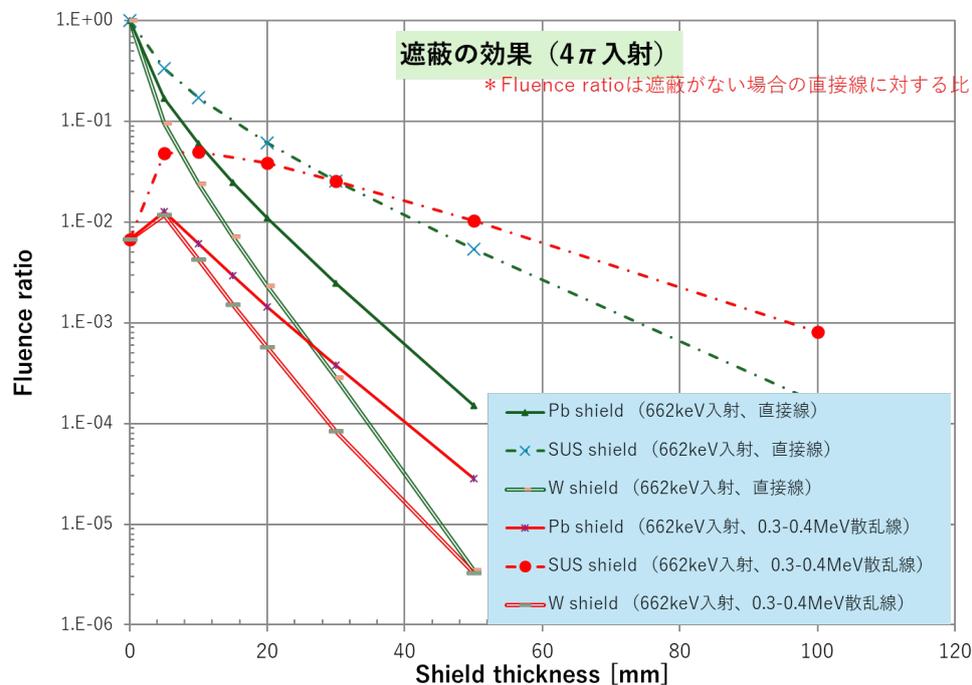


図 J 4-66 各金属板の遮蔽効果の比較

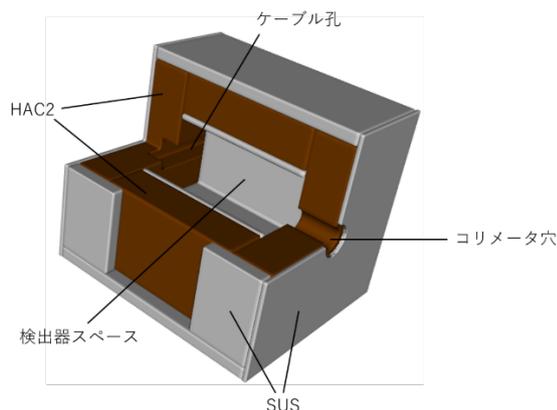


図 J 4-67 コリメータの組立て構造図（上）及び外観（下）
 左下は遮蔽プラグ無し、右下は遮蔽プラグを装着したところ

(2) コリメータの性能評価

設計したコリメータに $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ CdZnTe 検出器（Kromek 社製 GR-1）を内装し、コンクリート製の室内（ $6.4 \text{ m} \times 6.5 \text{ m} \times 3.4 \text{ m}$ ）の高さ 1.2 m 位置に設置した ^{137}Cs 線源から 2.0 m の距離に置き、水平方向に 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° とコリメータの方向を変えて測定を行った。 0° は、コリメータ穴が線源の方向を向いている場合である。試験の様子を図 J 4-68 に示す。図 J 4-69 に 0° で遮蔽プラグ有り・無しそれぞれで得られた波高スペクトルを、各角度において遮蔽プラグ無しから遮蔽プラグ有のスペクトルを引いた差スペクトルを図 J 4-70 に示す。差スペクトルでは 0° のみ有意な信号がみられており、本コリメータを使うことで、少なくとも $\pm 30^\circ$ 内から入射する光子波高スペクトルを測定することが可能となる。ただし、得られた波高スペクトルから、場の光子エネルギー分布を得るためには、内包する検出器を含めて応答関数を整備し、アンフォールディングを行う必要があることに注意すべきである。

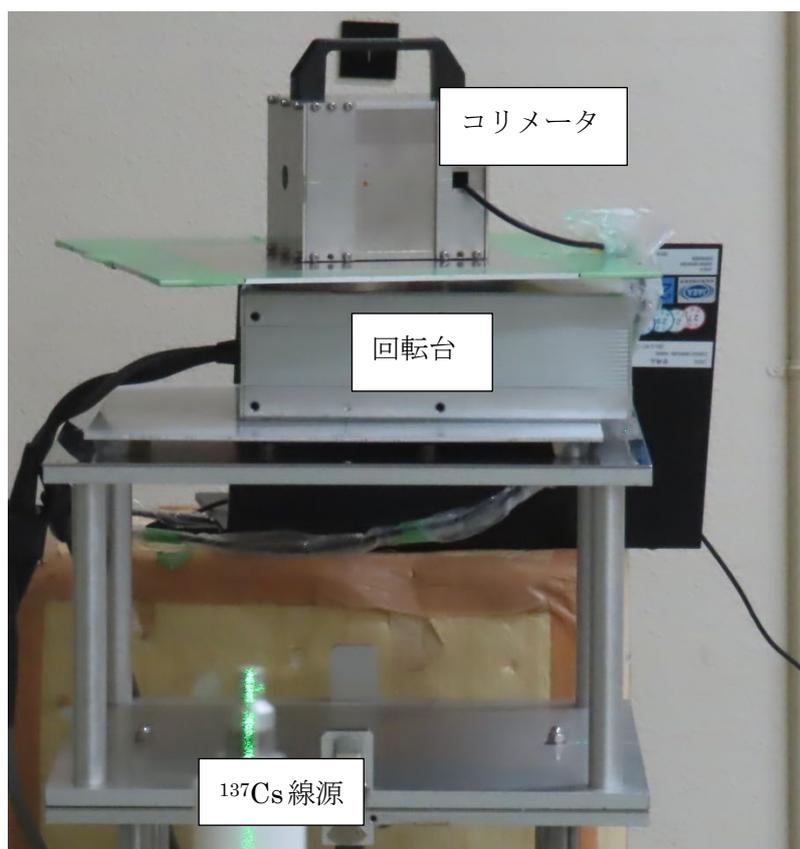


図 J 4-68 コリメータに内包した CdZnTe 検出器による測定の様子

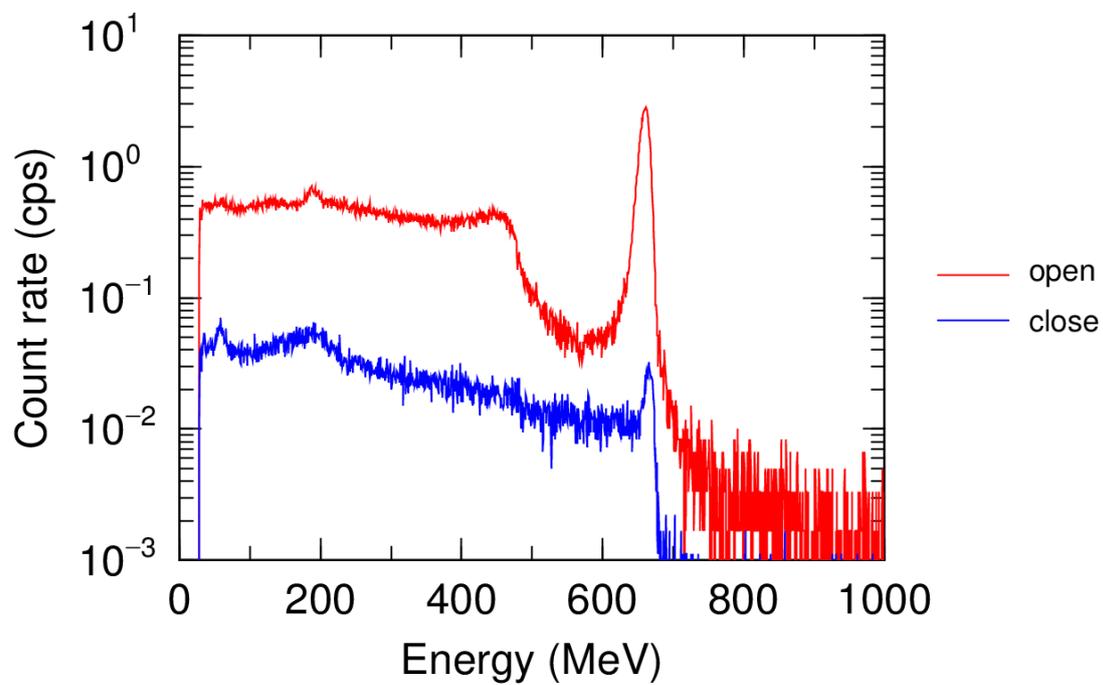


図 J 4-69 0° 照射時の遮蔽プラグ有り・無しそれぞれの波高スペクトル

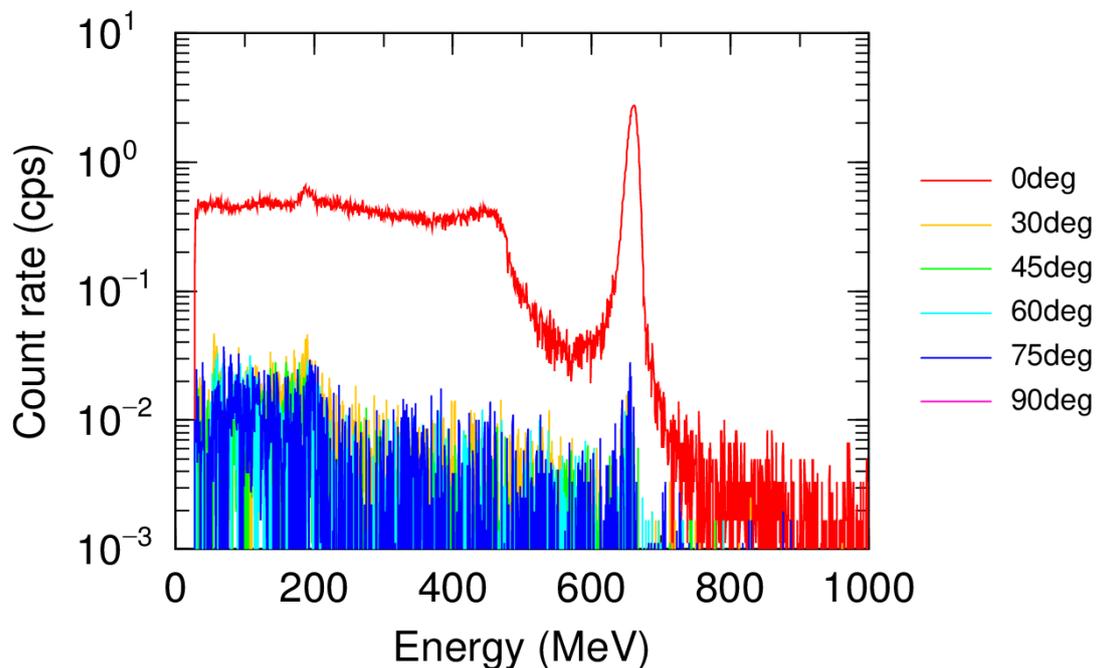


図 J 4-70 各入射角度における遮蔽プラグ有り・無しの差スペクトル

J4.3.2 校正定数の決定に関する課題の調査

J4.3.1.5 の結果に基づき、解析対象とした線量計について新たな実用量に対応する校正定数を定める際の課題について検討する。図 J 4-71～図 J 4-76 に、以下のとおり線量計を校正し指示値を補正した場合、廃止措置中の原子炉施設、ホットラボ施設及び建屋式保管廃棄施設の放射線場におけるレスポンスを評価した結果を示した。

- | | | |
|-------|-----------------------------|---------------------------------|
| (i) | R5-A 社製電離箱式サーベイメータ | : S-Cs H^* で校正 |
| (ii) | R5-D 社製可搬型 γ 線エリアモニタ | : S-Cs H^* で校正 |
| (iii) | R5-E 社製受動形環境線量計 | : S-Cs H^* で校正 |
| (iv) | R5-F 社製受動形個人線量計 (体幹部) | : S-Cs H_p で校正 |
| (v) | R5-I 社製受動形個人線量計 (水晶体) | : S-Cs D_p lens で校正 |
| (vi) | R5-J 社製受動形個人線量計 (末端部) | : S-Cs D_p local skin rod で校正 |
| (vii) | R5-O 社製電子式個人線量計 (体幹部) | : S-Cs H_p で校正 |

廃止措置中の原子炉施設及びホットラボ施設では S-Cs で再校正することによって、より妥当な線量レスポンスを得ることができる。単一の校正定数を採用することにより、複数の測定量を測定できる線量計については、眼の水晶体や皮膚の線量管理に用いる実用量に対するレスポンスが低下するが、20%程度である。建屋式保管廃棄施設において ^{241}Am が支配的な場では、エリアモニタは 34%過小応答となる。これを ^{241}Am の γ 線エネルギーに近い線質である N-80 で校正すると 10%の過小応答に留まる。そうした場合、高エネルギー成分が混在する#27 やしばしばエリアモニタが設置される環境である後方壁付近#40 な

どでは、40%程度過大な応答となる。

以上のことから、これらの線量計を $S\text{-Cs}$ で校正した場合、今回調査した原子力施設のエネルギー分布の範囲内では、ほとんどのケースで適切にモニタリングできる。しかしながら、原子力施設での主要な低エネルギー光子源である ^{241}Am が支配的となる場では、その応答に注意すべきケースがあり、放射線場のエネルギー分布及び使用する線量計のエネルギー応答特性を把握することが重要である。

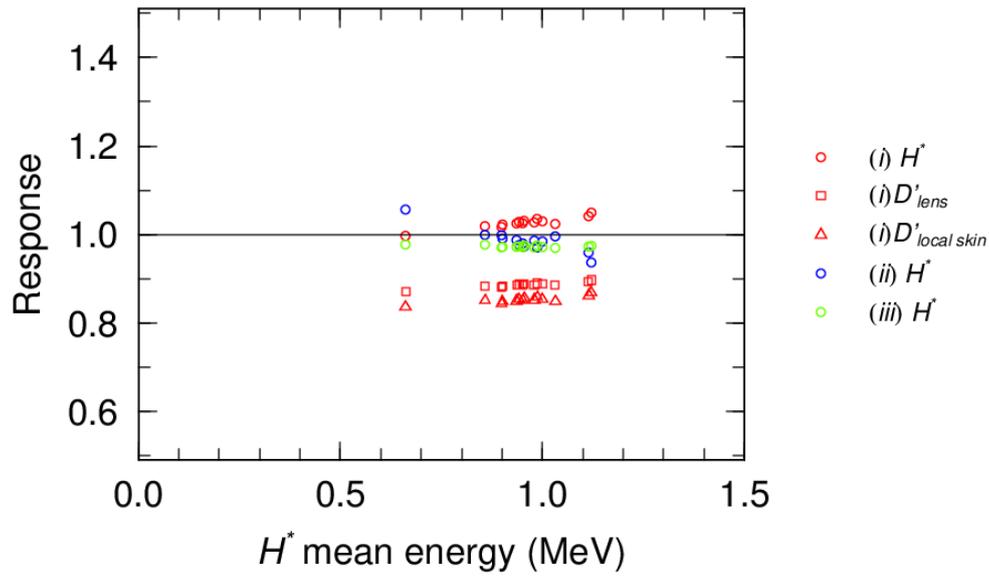


図 J 4-71 作業場モニタリングに関する線量計の廃止措置中の原子炉施設放射線作業場での応答評価（新たな実用量の線質 S-Cs で校正）

赤：R5-A 社製電離箱式サーベイメータ、青：R5-D 社製可搬型 γ 線エリアモニタ、緑：R5-E 社製受動形環境線量計、○： H^* 、□： D'_{lens} 、△： $D'_{local skin}$

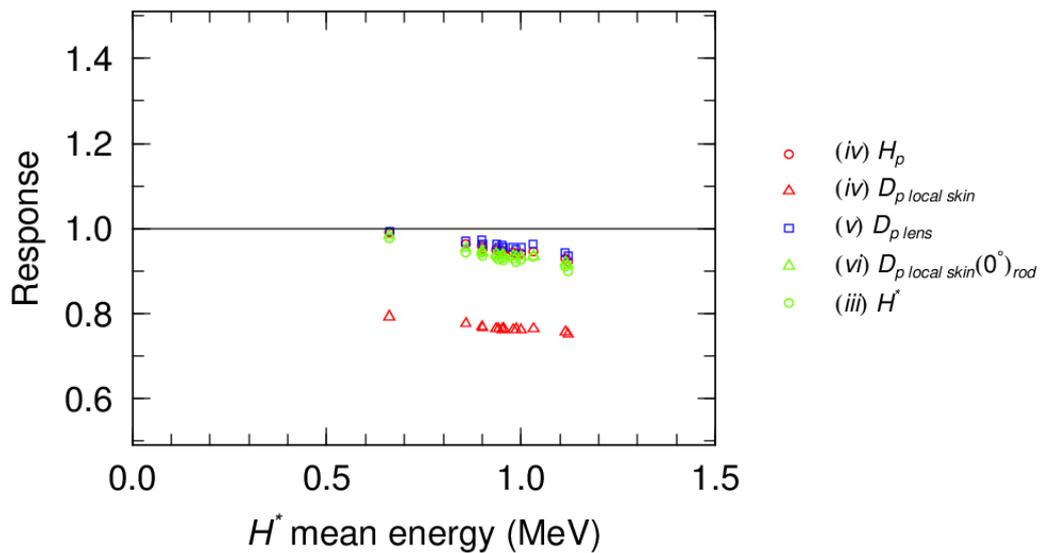


図 J 4-72 個人モニタリングに関する線量計の廃止措置中原子炉施設放射線作業場での応答評価（新たな実用量の線質 S-Cs で校正）

赤：R5-F 社製体幹部受動形個人線量計、青：R5-I 社製水晶体用受動形個人線量計、緑：R5-J 社製末端部用受動形個人線量計、紫：R5-O 社製電子式個人線量計、○： H_p 、□： $D_p lens$ 、△： $D_p local skin$

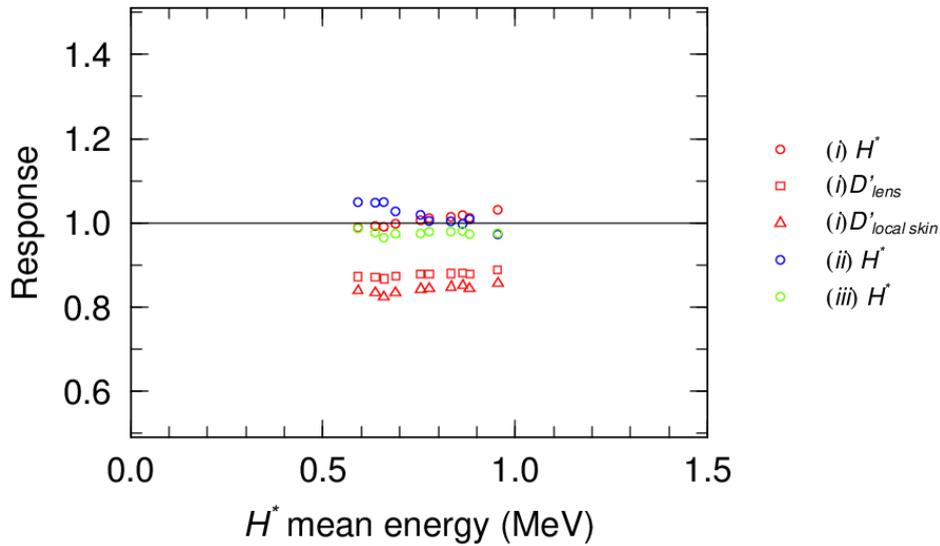


図 J 4-73 作業場モニタリングに関する線量計のホットラボ施設放射線作業場での応答評価
(新たな実用量の線質 S-Cs で校正)

赤：R5-A 社製電離箱式サーベイメータ、青：R5-D 社製可搬型 γ 線エリアモニタ、緑：R5-E 社製受動形環境線量計、○： H^* 、□： D'_{lens} 、△： $D'_{local\ skin}$

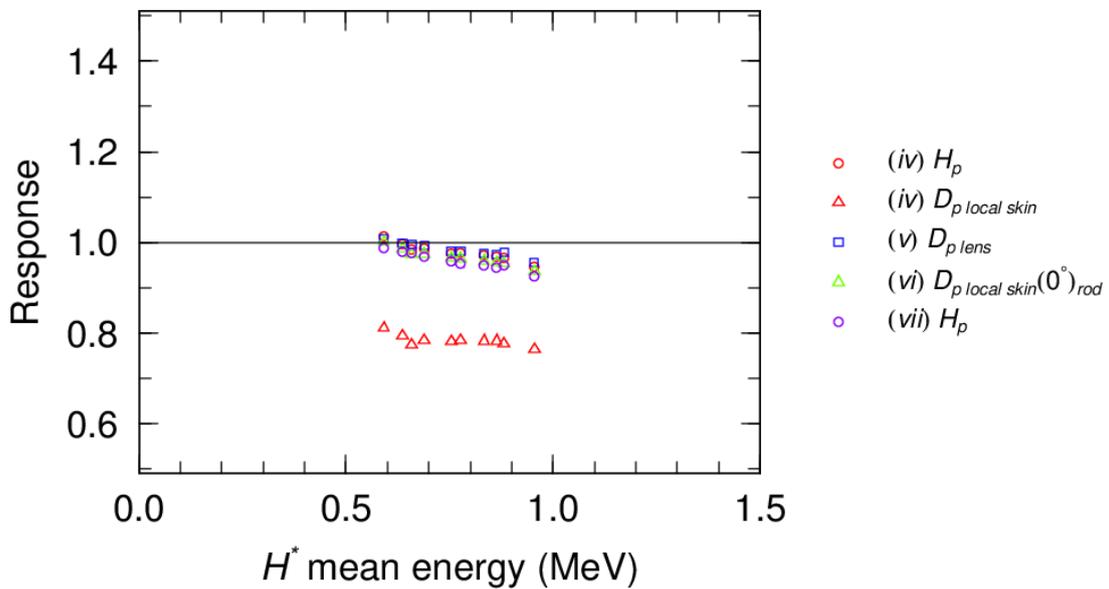


図 J 4-74 個人モニタリングに関する線量計のホットラボ施設放射線作業場での応答評価
(新たな実用量の線質 S-Cs で校正)

赤：R5-F 社製体幹部受動形個人線量計、青：R5-I 社製水晶体用受動形個人線量計、緑：R5-J 社製末端部用受動形個人線量計、紫：R5-O 社製電子式個人線量計、○： H_p 、□： $D_p\ lens$ 、△： $D_p\ local\ skin$

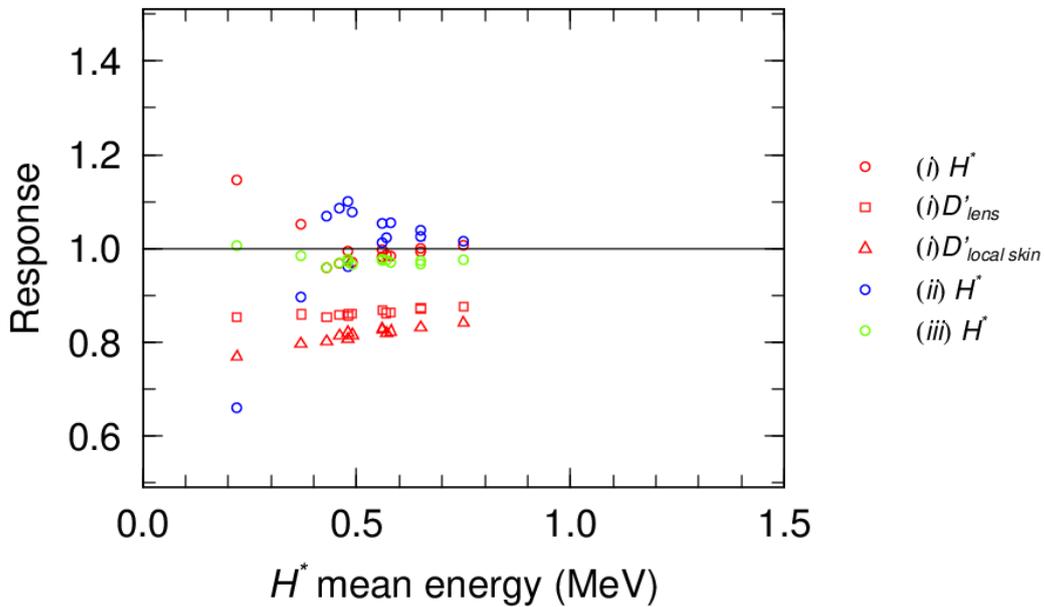


図 J 4-75 作業場モニタリングに関する線量計の建屋式保管廃棄施設放射線作業場での応答評価（新たな実用量の線質 S-Cs で校正）

赤：R5-A 社製電離箱式サーベイメータ、青：R5-D 社製可搬型 γ 線エリアモニタ、緑：R5-E 社製受動形環境線量計、 \circ ： H^* 、 \square ： D'_{lens} 、 \triangle ： $D'_{local\ skin}$

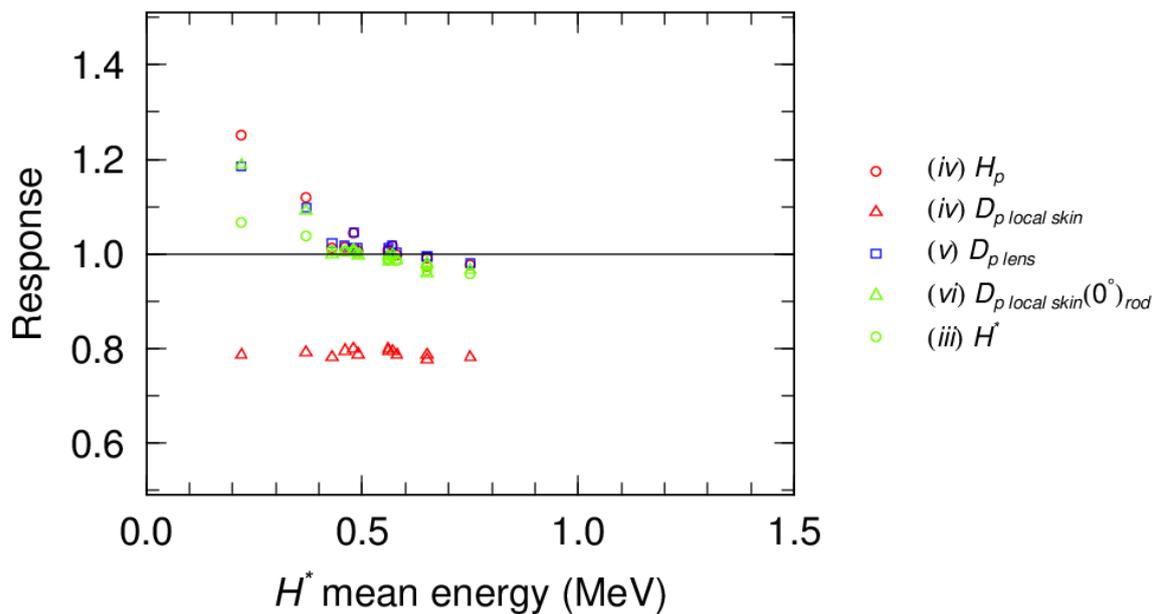


図 J 4-76 個人モニタリングに関する線量計の建屋式保管廃棄施設放射線作業場での応答評価（新たな実用量の線質 S-Cs で校正）

赤：R5-F 社製体幹部受動形個人線量計、青：R5-I 社製水晶体用受動形個人線量計、緑：R5-J 社製末端部用受動形個人線量計、紫：R5-O 社製電子式個人線量計、 \circ ： H_p 、 \square ： $D_p\ lens$ 、 \triangle ： $D_p\ local\ skin$

J4.3.3 不均等照射に対する新たな実用量による個人線量管理に関する課題の調査

平成 30 年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業）により、作業者の眼の水晶体の線量管理において、胸部又は腹部に加えて頭頸部等に装着した体幹部用線量計の実用量の測定によって水晶体用線量計による測定を代替する運用がなされることがあることが指摘されている^[J30]。また、こうしたケースにおいては、被ばく源が低エネルギー光子であることが多く、しばしば鉛エプロンの着用により、不均等照射とみなされる状況にある。さらに、医療現場などにおいては、必ずしも前方からの照射状況ではないことも示唆されている。一方で、令和 4 年度事業では、個人線量計の低エネルギー光子に対する方向特性についての懸念が指摘されている^[J8]。加えて、新たな実用量では線量換算係数がより広範な入射角度条件、すなわち前方寄りに加えて側方、後方、回転方向等について定義されている。これらを踏まえ、本事業では、側方からの不均等照射において、新たな実用量によっても眼の水晶体の線量を体幹部用個人線量計の装着で代替して評価する場合の課題と、このような運用を想定する場合の個人線量計の校正と線量の管理についての課題を整理する。

個人線量計の特性データについては、令和 5 年度事業までに蓄積されたデータや本事業で取得したデータを用いることができるが、これらは校正用ファントムの表面中心に線量計を配置したときの応答となる。一方で、実際の状況としては、人体の頭頸部を含めた部位に線量計を装着し、さらに体幹部に鉛エプロンを着用していることが想定される。着用部位や鉛エプロンの着用によって、後方散乱の状態が変化し、線量計の応答が変化する可能性がある。そこで、校正用ファントム→人体ファントム→着用部位→鉛エプロンの影響、と条件を変えて追加でデータを取得し、これまでに得られている個人線量計の特性データと併せて課題について検討した。

J4.3.3.1 ファントムや着用部位、鉛エプロンの影響の調査

(1) 方法

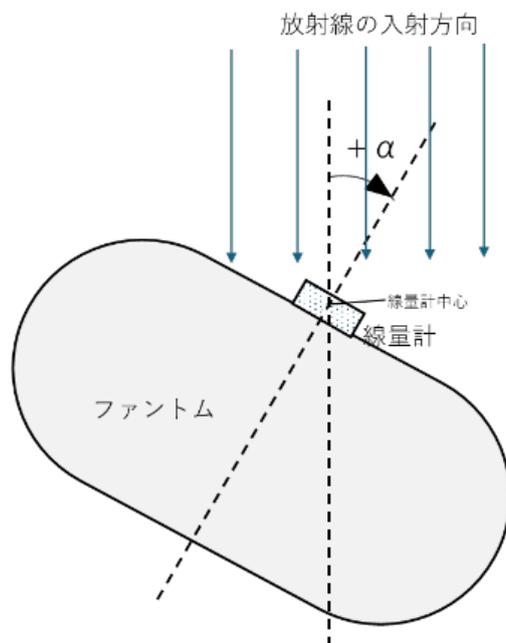
照射は、国立研究開発法人産業技術総合研究所の X 線校正場を用いて実施した。線質については、大半の IVR での管電圧は 50-125 kVp 程度であること^[J31]、J4.3.1.3 でも観測されているように原子力施設で見られる ^{241}Am から放出される γ 線エネルギー (59.5 keV) とも近いこと、ファントム後方散乱が最も大きくなるエネルギー帯域であること (令和 4 年度事業原子力機構報告書^[J8]4.2.2) を考慮し、何れも N-80 (平均エネルギー 65 keV) とした。試験に用いた線量計は、水晶体用受動形個人線量計 (検出器: LiF:Mg,Ti、表 J 4-4 に示される D 社製受動形個人線量計であり、本項では単に「水晶体用線量計①」という。) 及び体幹部用受動形個人線量計

(検出器：RPL（銀活性リン酸塩）、令和 5 年度事業報告書^[9]表 J 4-13 に示される F 社製受動形個人線量計であり、本項では単に「体幹部用線量計②」という。) であり、人体形状をした RANDO ファントム（男性）の各部位に装着して照射した。照射した線量はいずれも空気カーマで $K = 1.000 \pm 0.015$ mGy であり、その他の照射条件は表 J 4-15 に示した。鉛エプロンは鉛当量が 0.25mm のもの（HAGOROMO 製 ソフライト）を使用した。試験の様子を図 J 4-77 に示す。

表 J 4-15 ファントム照射試験条件

| No | 線量計 | 照射角度 ¹⁾ | ファントム | 着用部位 | 鉛エプロンの有無 |
|----|----------|--------------------|--------------|------------------------|-----------------|
| 1 | 水晶体用線量計① | 0° | RANDO 頭部 | 左眼部及び側頭部 ²⁾ | 無 |
| 2 | | 60° | | | |
| 3 | | 90° | | | |
| 4 | 体幹部用線量計② | 0° | RANDO 頭部及び胸部 | 頸部中央及び左頸部 | 無 |
| 5 | | 60° | | 頸部中央 | 有 ³⁾ |
| 6 | | 0° | RANDO 胸部 | 胸部中央 | 無 |
| 7 | | | | | 有 ⁴⁾ |
| 8 | | | | | |

1) 照射角度は以下のとおり一方向のみの回転とした。

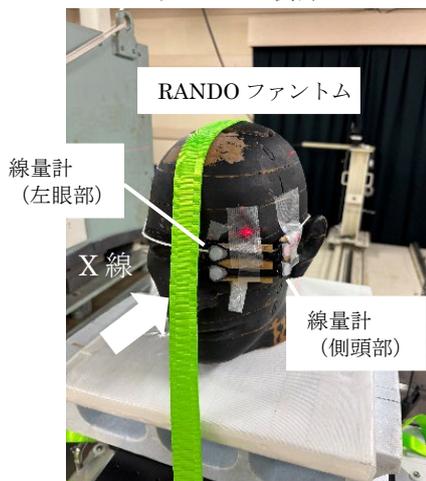


2) 図 J 4-77 に示すとおり、眼部と側頭部に関してはそれぞれ線量計の向きは 90° 異なっている。

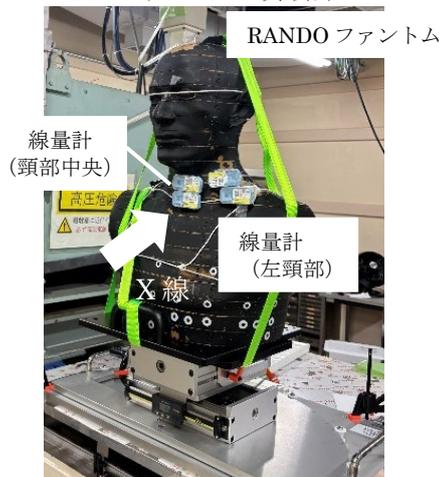
3) 線量計は鉛エプロンの外側（線源側）に設置した。

4) 線量計は鉛エプロンの内外に設置した。

(a) RANDO ファントム頭部



(b) RANDO ファントム頭頸部



(c) RANDO ファントム胸部



(d) 鉛エプロン装着時



図 J 4-77 ファントム照射試験の様子

照射後、線量計の読み取りを行った。水晶体用線量計①については、現行実用量である $H_p(3)$ として線量評価値 (mSv) が得られるが、これを新たな実用量である水晶体吸収線量 $D_{p,lens}$ に対する指示値 G_{lens} (mGy) と読み替えた。体幹部用線量計 F についても、現行実用量である $H_p(10)$ として線量評価値 (mSv) が得られるが、新たな実用量である個人線量 H_p に対する指示値 G_{WB} (mGy) と読み替えた。水晶体用線量計①のレスポンスは以下のとおり評価した。

$$R_{lens} = \frac{G_{lens}}{K_{air} \cdot d_{lens}(\alpha)} \cdot \frac{1}{R_{N-80,cal}} \quad (5)$$

ここで、 $R_{N-80,cal}$ は校正用シリンダーファントムを用いた N-80 に対する水晶体用線量計①の $D_{p\ lens}$ レスポンスであり、図 J 4-30 から取得した。 $d_{lens}(\alpha)$ は入射角度 α に対応する空気カーマから $D_{p\ lens}$ への線量換算係数で令和 4 年度事業報告書^[8]表 3.2.1-X10 に示される値を用いた。

体幹部用線量計②のレスポンスは以下のとおり評価した。

$$R_{hp} = \frac{G_{WB}}{K_{air} \cdot h_p} \cdot \frac{1}{R_{S-Cs,cal}} \quad (6)$$

ここで、 $R_{S-Cs,cal}$ は校正用水スラブファントムを用いた S-Cs に対する体幹部用線量計②の H_p レスポンスであり、令和 5 年度事業報告書^[9]図 J 4-58 から取得した。これは体幹部用線量計が通常 S-Cs で校正されることに対応するものである。 h_p は空気カーマから H_p への線量換算係数で令和 4 年度事業報告書^[8]表 3.2.1-X6 に示される値を用いた。

(2) 結果

(a) ファントムによる違い

校正用ファントムと RANDO ファントムでの線量計レスポンスを比較したものを図 J 4-78 に示した。水晶体用線量計①の校正用ファントムに対するレスポンスについては、 0° については図 J 4-30 から、 60° については新たに取得した。体幹部用線量計②の校正用ファントムに対するレスポンスについては、令和 5 年度事業報告書^[9]図 J 4-58 から取得した。

本試験範囲内においては、不確かさの範囲内でファントムの影響はない。このことは、令和 4 年度事業原子力機構報告書^[8]4.2.2 及び令和 5 年度事業報告書^[9]4.3.2 とも整合しており、前方からの光子入射においては、校正用ファントムでも人体形状 (RANDO) ファントムでもレスポンスは有意に変わらない。

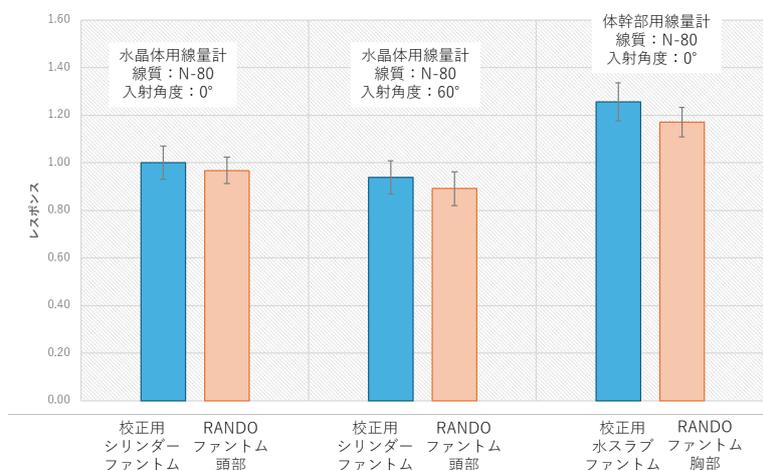


図 J 4-78 校正用ファントムと人体形状ファントムでの線量計レスポンスの比較

(b) 着用部位による違い

体幹部用線量計②について、RANDO ファントム頸部と胸部に装着した場合のレスポンスの違いを比較した結果を図 J 4-79 に示す。本線量計では着用した部位のファントム後方散乱の違いに起因するレスポンスの有意な差異は見られなかった。

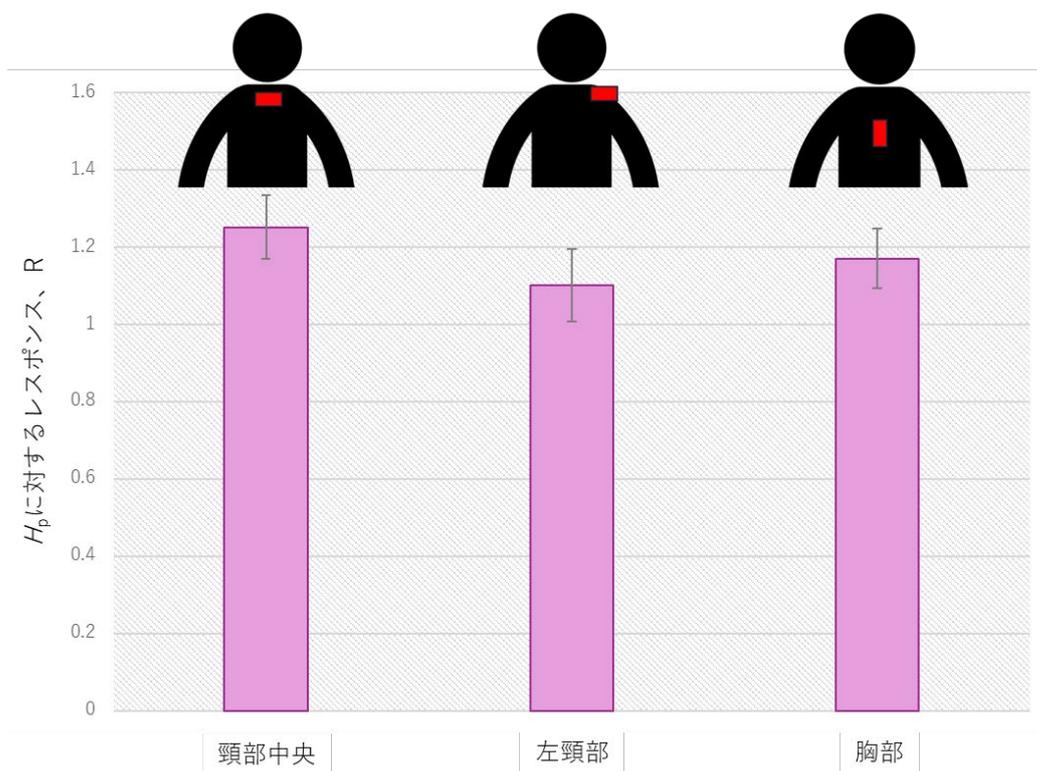


図 J 4-79 着用部位による体幹部用線量計②のレスポンスの比較

(c) 鉛エプロンによる違い

RANDO ファントム胸部を鉛エプロンで覆い、鉛エプロンによる体幹部用線量計②のレスポンスへの影響を調べた結果を図 J 4-80 に示す。頸部については、鉛エプロンによる有意な影響はみられなかった。一方で、胸部の鉛エプロン外側に装着したものについては、ファントム後方散乱線の減少によりレスポンスが低下した。鉛エプロン内側に装着した場合は、当然ながら遮蔽効果の影響がみられる。この場合、基準とした線量は鉛エプロンの影響を加味していないことに注意が必要である。

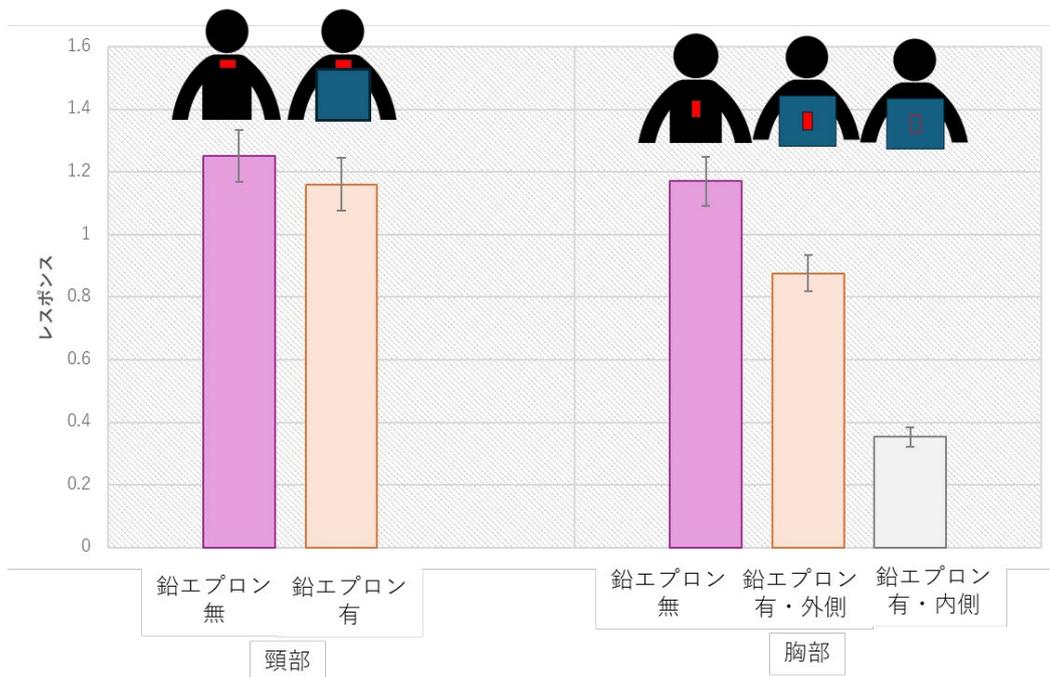


図 J 4-80 鉛エプロンの有無による体幹部用線量計のレスポンスの比較

J4.3.3.2 体幹部用線量計で代替測定する際の影響調査

(1) RANDO ファントムを使用した実験

J4.3.3.1 からは、本調査条件では、ファントム、着用部位および鉛エプロンの有無による線量計レスポンスへの影響は考慮しなくてもよいといえる。そこで、まず以下のとおり RANDO ファントムの各部位に線量計を装着し、 $D_{p\ lens}(0^\circ)$ が 1 mGy となるように一様に照射されたケースにおいて見込まれる線量計指示値を解析評価した。

- (i) 眼部に水晶体用線量計①を装着
- (ii) 側頭部に水晶体用線量計①を装着
- (iii) 頸部に体幹部用線量計②を装着
- (iv) 胸部に体幹部用線量計②を装着

(i)、(ii)については、(5)式から R_{lens} を計算することにより指示値 G (mGy) を得た。
 (iii)、(iv)については、(6)式で得られる R_{hp} を用いて、以下の式により指示値 G (mGy) を算出した。ただし、mSv を mGy と読み替えている。

$$G = \frac{R_{hp} \cdot h_p(0^\circ)}{d_{lens}(0^\circ)} \quad (7)$$

結果を図 J 4-81 に示す。側頭部については、線量計は 90° 方向から照射されるために指示値は 20%程度小さくなるが、頸部、胸部については差異は 10%以内に収まる。従って、前方方向から 65 keV 程度の光子で照射された場合は、頸部や（鉛エプロンを装着していない場合）胸部での H_p 測定値から適切に水晶体線量をモニタリングでき得ることが示唆された。

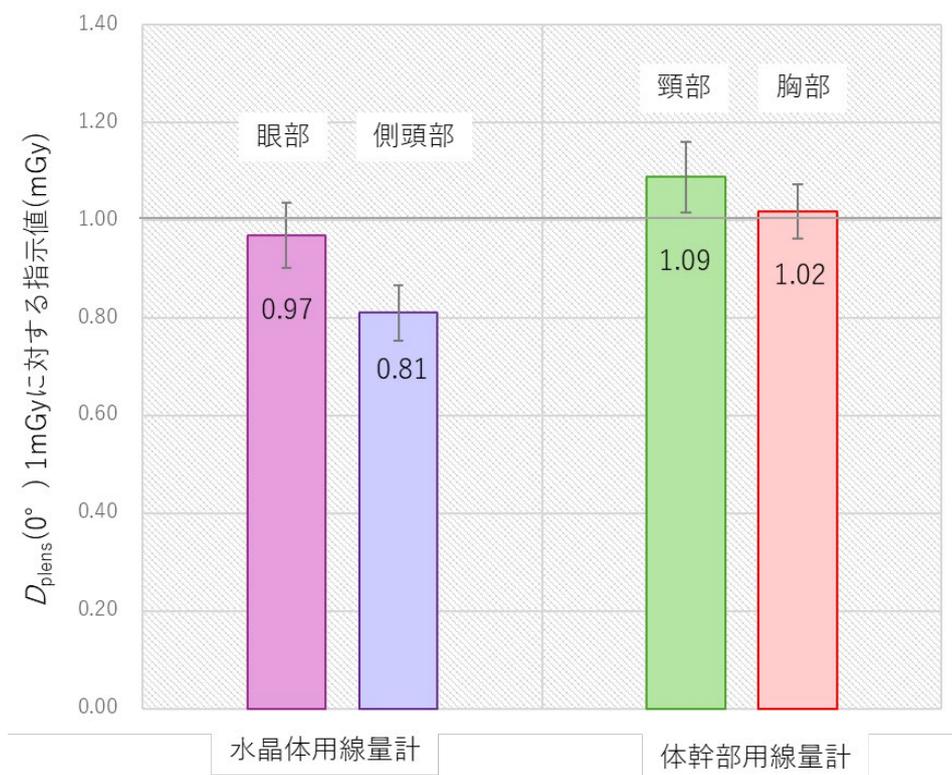


図 J 4-81 $D_{plens}(0^\circ)$ 1 mGy 照射時において RANDO ファントム各部位に装着した線量計の指示値の比較

(2) 特性試験データを利用した評価

さらに広範な条件での影響調査のため、本事業及び令和 5 年度事業までに得られた線量計特性データを利用して、眼部及び頸部に装着した線量計により得られると見込まれる指示値の変化を調査した。解析に使用した線量計及び特性試験データは表 J 4-16 に示されるとおりである。

表 J 4-16 解析に使用した線量計及び特性試験データ

| 線量計 | 利用した特性試験データ |
|----------|---|
| 水晶体用線量計① | 図 J 4-30 及び角度特性については新たに取得 |
| 体幹部用線量計② | 令和 5 年度事業報告書 ^[J9] 図 J4-63 |
| 水晶体用線量計③ | 令和 4 年度事業原子力機構報告書 ^[J8] 図 4-116 |
| 体幹部用線量計④ | 令和 4 年度事業原子力機構報告書 ^[J8] 図 4-108 |

本項においても、 $D_{p\text{ lens}}(0^\circ)$ が 1 mGy となるように一様に照射されたケースにおいて、眼部及び頸部で見込まれる線量計指示値 G をそれぞれ頭部の向き α 及び胸部の向き β をパラメータとして解析評価した。線量計指示値 G については、それぞれ水晶体用線量計及び体幹部用線量計のレスポンスから次式を用いて評価した。

$$G_{\text{lens}} = \frac{R_{\text{lens};\text{N-80}}(\alpha)}{R_{\text{lens};\text{N-80}}(0^\circ)} \quad (8)$$

$$G_{\text{WB}} = \frac{R_{\text{WB};\text{N-80}}(\beta)}{R_{\text{WB};\text{S-Cs}}(0^\circ)} \cdot \frac{h_p(\beta)}{d_{\text{lens}}(\alpha)} \quad (9)$$

ここで、

$R_{\text{lens};\text{N-80}}(\alpha)$: 入射角度 α 、N-80 における $D_{p\text{ lens}}(\alpha)$ に対する水晶体用線量計のレスポンス

$R_{\text{WB};\text{N-80}}(\beta)$: 入射角度 β 、N-80 における $H_p(\alpha)$ に対する体幹部用線量計のレスポンス

$R_{\text{WB};\text{S-Cs}}(0^\circ)$: 入射角度 0° 、S-Cs における $D_{p\text{ lens}}(\alpha)$ に対する体幹部用線量計のレスポンス

表 J 4-17 に見込まれる線量計指示値を比較した結果を示す。この中では RANDO ファントムを使って直接得られた結果も参考として示した。前項からは鉛エプロンの有無で有意な差がなかったため、頸部で見込まれる線量計指示値は、鉛エプロン着用時でも同様と考えてよい。頭部及び胸部がともに 75° となる場合を除いては、20%以内で水晶体吸収線量を推定でき、新たな実用量で測定した場合においても、頸部での H_p の測定で適切なモニタリングが可能と考えられる。しかし、 75° においては、体幹部用線量計ではフィルターを用いてエネルギー補正を行っている関係でレスポンスが悪化し、頸部からの推定には大きな不確かさが伴う。また、今回は検討していないが、眼部に防護眼鏡等を装着している場合には、頸部からの推定は過大な評価を与えてしまうことにも注意が必要である。本事業においては、N-80 (60 keV 程度) での線量計のふるまいについて解析した。今後は、本手法を拡大し、医療施設などでの光子エネルギー分布や方向分布を取得し、より放射線作業場の現状に則した解析をしていくことが望まれる。

表 J 4-17 $D_{\text{lens}}=1 \text{ mGy}$ となる場合に見込まれる線量計指示値の比較

| 頭部の向き(α) | 胸部の向き(β) | 水晶体用線量計① | 体幹部用線量計② | 水晶体用線量計③ | 体幹部用線量計④ |
|-------------------|------------------|-------------------------|--|-----------|-----------|
| | | 眼部 | 頸部 | 眼部 | 頸部 |
| 0° | 0° | 1.00±0.11 | 1.09±0.10 | 1.00±0.12 | 1.04±0.10 |
| | | 0.97±0.07 ¹⁾ | 1.09±0.07 ¹⁾ (1.01±0.07) ²⁾ | — | — |
| 30° | 0° | 0.93±0.10 | 1.06±0.09 | 0.93±0.11 | 1.01±0.10 |
| 60° | 0° | 0.94±0.10 | 1.07±0.09 | 0.88±0.12 | 1.02±0.10 |
| | | 0.89±0.07 ¹⁾ | 1.07±0.07 ¹⁾ (0.99±0.07) ²⁾ | — | — |
| 75° | 0° | 0.92±0.10 | 1.10±0.10 | 0.89±0.10 | 1.05±0.10 |
| 90° | 0° | 0.89±0.06 | 1.15±0.08 ¹⁾ (1.06±0.08) ²⁾ | — | — |
| 30° | 30° | 0.93±0.10 | 1.01±0.08 | 0.93±0.11 | 1.00±0.10 |
| 60° | 60° | 0.94±0.10 | 0.87±0.09 | 0.88±0.12 | 0.88±0.11 |
| | | 0.89±0.07 ¹⁾ | — (0.77±0.06) ²⁾ | — | — |
| 75° | 75° | 0.92±0.10 | 0.69±0.06 | 0.89±0.10 | 1.60±0.16 |

1) RANDO ファントムを使って得られたデータから評価したもの

2) 鉛エプロンを胸部に装着したときの線量計応答から評価したもの

J4.4 研究に必要な国内外の情報収集

J4.4.1 国際機関

J4.4.1.1 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、中性子線及び光子線のそれぞれの標準場に係るサブグループに分かれて規格改定の要否や改定内容についての議論が進められた。 β 線標準場に関する 3 つの規格（ISO 6980-1、ISO 6980-2 及び ISO 6980-3）については、2023 年度に軽微な改定が行われたが、新たな実用量に係るものはない。中性子標準場に関しては、放射線測定器の校正方法を規定する規格（ISO 8529-2）の改定に必要なシミュレーション計算を整理・開始されているが、現行の実用量に関連する事項に限定されており、まだ新たな実用量を取り入れるための具体的な議論は開始されていない。放射線標準場に共通する事項を定めた ISO 29661 については、光子線の空気カーマと衝突空気カーマが混在しているなどの課題があり、2025 年以降に改定作業に着手することが決定された。光子標準場に係る 4 つの規格（ISO 4037-1、ISO 4037-2、ISO 4037-3 及び ISO 4037-4）については、ISO 29661 の改訂作業が進み、また、欧州国家計量標準研究所協会（EURAMET）の GuideRadPROS プロジェクトの結果が利用できるようになった後に改定作業に着手することとなった。同プロジェクトの目的には、新たな実用量の取入れに必要な事項の調査が含まれているが、ISO 4037 シリーズへの取入れに係る具体的な議論はなかった。

WG19 に関しては、2024 年に ISO 14146 が改定発刊された。本規格は、線量測定業務の定期検査の基準と性能限界を定める規格であるが、現行実用量に基づいた要求事項が記載されており、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。その他、皮膚、末端部及び眼の水晶体の線量をモニタリングするための手順を定めた規格である ISO 15382 の改定審議作業も進んでいるが、いずれのドラフト案においても将来的な意

識はされつつも、現時点（2025年2月現在）では新たな実用量に関する記載はされていない。

J4.4.2 国内の学術団体

J4.4.2.1 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6年度は、両学会が合同で大阪大学吹田キャンパスにおいて令和6年12月16日～18日の期間で第5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、過年度事業に関する成果の一部を報告するとともに、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（付録参照）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や個人線量計による線量評価に関する研究報告は散見された。以下に線量評価に関連する主な研究報告について記載する。

千代田テクノル株式会社の犬飼裕司氏からは、同社の提供する線量測定サービス使用者の統計データを解析し、医療従事者の眼の水晶体等価線量の推移に関する報告があった。頸部用線量計と眼の水晶体用線量計の測定値の関係性を調査されており、頸部用線量計の測定値より眼の水晶体用線量計の測定値が低くなる傾向があったが、その相関は弱く、逆に高くなっている例も散見されるとのことであった。眼の水晶体については、防護眼鏡を装着していることが一因と思われるが、こうした実データを解析し、新たな実用量での解析をしていくことなどは有用であろう。

長瀬ランダウア株式会社の織田侑樹氏からは、同社が提供し、日本国内でも広く使用されている中性子固体飛跡個人線量計の、ISO 21909-1:2021（受動型中性子個人線量計の性能及び試験条件に関する国際規格）への適合に向けた中性子エネルギーを推定するアルゴリズムの開発に関する報告がなされた。飛跡画像から飛跡密度、飛跡の面積、長軸・短軸比率などの特徴量を基にした中性子エネルギー推定アルゴリズムが作成され、これを用いることによりISO 21909-1:2021の要求性能に適合することができた、とのことであった。新たな実用量に関しても、このような手法を利用してアルゴリズム変更により対応できる可能性もあるため、注視すべきである。

千代田テクノル株式会社の高島直貴氏からは、防護具着用医療従事者向けの実効線量評価用線量計の開発に関する研究報告がなされた。J4.3.3でも触れたが、鉛エプロンのような放射線防護具を着用した場合、体幹部と頭頸部に個人線量計を2個装着するなどのモニタリングが行われている。本研究では、ガラス線量計に金属フィルタの構成配置を最適化することで、X線領域において防護具着用時の実効線量を1個の線量計で精度よく評価できる可能性が示唆された。このような研究は、新たな実用量への対応にも応用できる可能性があり、今後の研究が期待される。

J5. これまでの事業で得られた成果の総括

令和 3 年度事業から令和 5 年度事業まで及び本事業での原子力機構の担当分の調査研究により得られた成果を以下にまとめた。

J5.1 新たな実用量に対応した線量計の校正に関する調査

J5.1.1 FRS に整備する校正場に対する線量換算係数の評価

二次標準機関である FRS で整備されている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

- ・ 蛍光 X 線場：F-Cu、F-Mo 及び F-Sn の線質
- ・ X 線場：N-40 から N-300 までの線質
- ・ γ 線場：S-Am、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 19MeV
- ・ 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

図 J 5-1～図 J 5-6 に新・現行実用量を比較した図を示した。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。また、蛍光 X 線場のような低エネルギーの領域では現行実用量と比べて線量換算係数は大幅に減少する。

β 線校正場においては、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における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%程度、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。

線量換算係数を評価したことで二次標準機関である FRS においても、新たな実用量での線量計の特性試験が可能な環境が整備された。

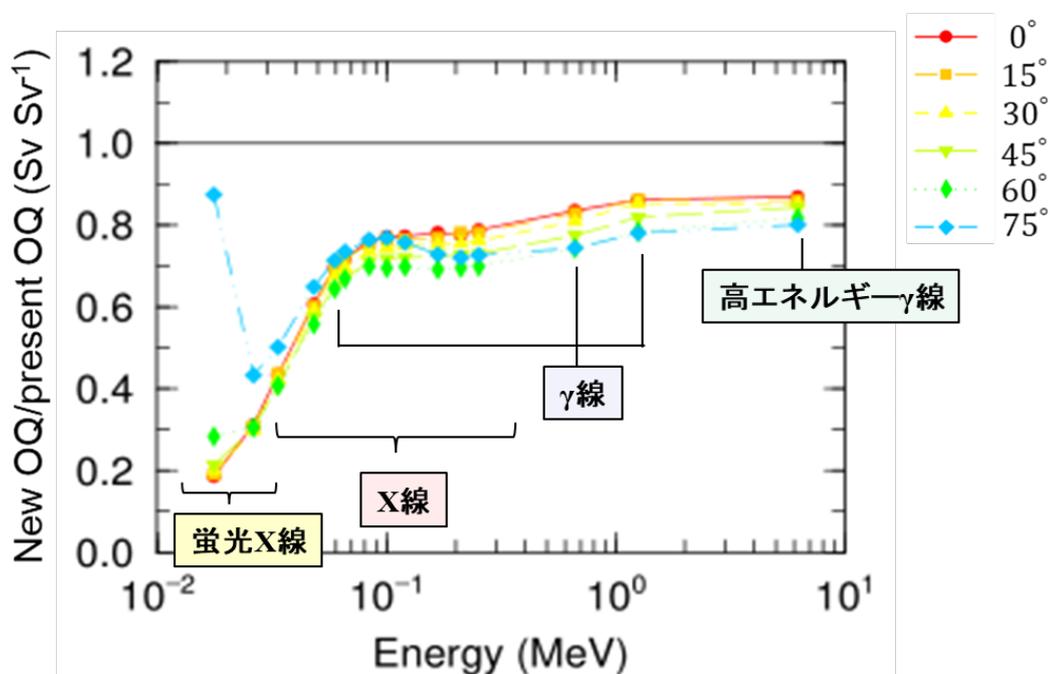


図 J 5-1 FRS に整備する光子校正場に関する新/現行実用量の線量換算係数の比較
($H_b/H_b(10)$)

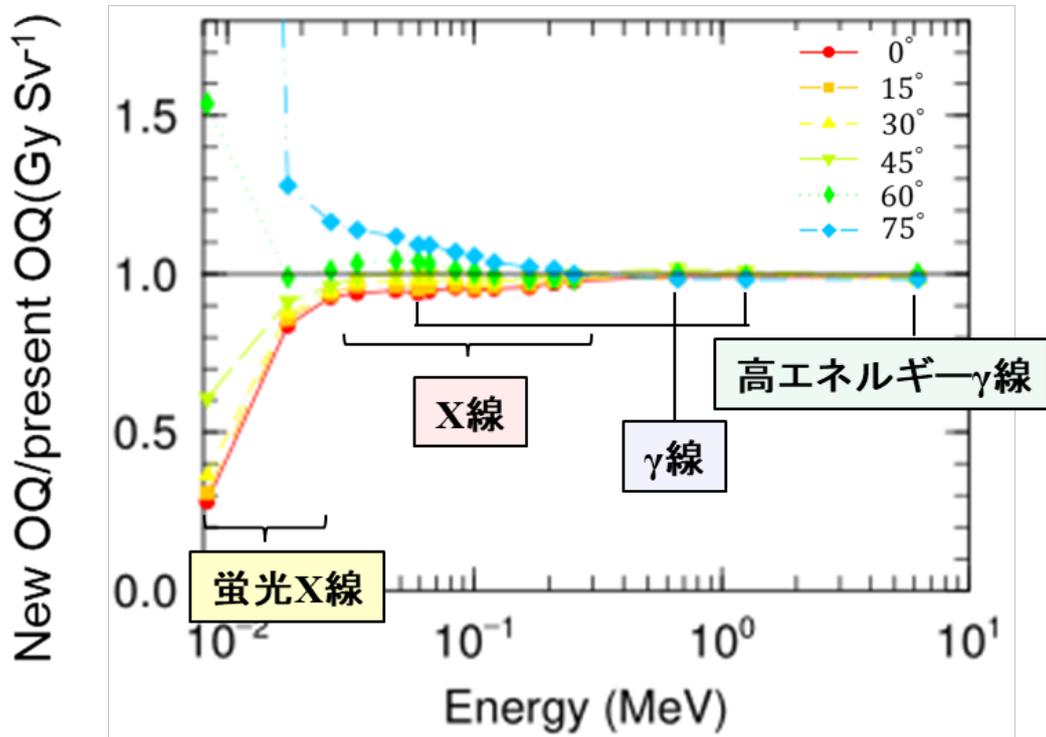


図 J 5-2 FRS に整備する光子校正場に関する新/現行実用量の線量換算係数の比較
 $(D_{p \text{ lens}}/H_p(3))$

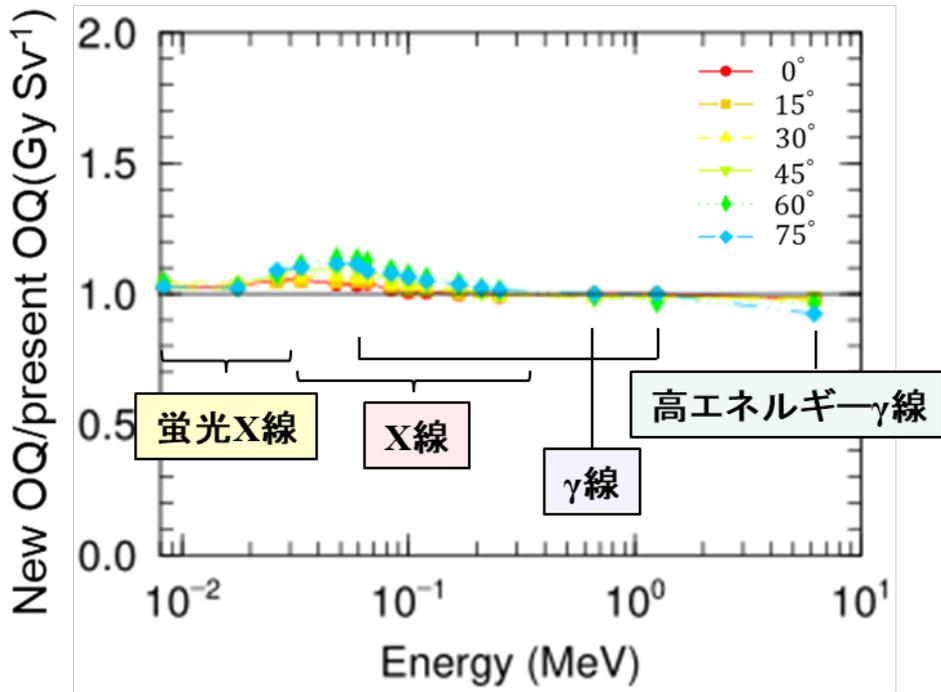


図 J 5-3 FRS に整備する光子校正場に関する新/現行実用量の線量換算係数の比較
 $(D_{p \text{ local skin}}/H_p(0.07))$

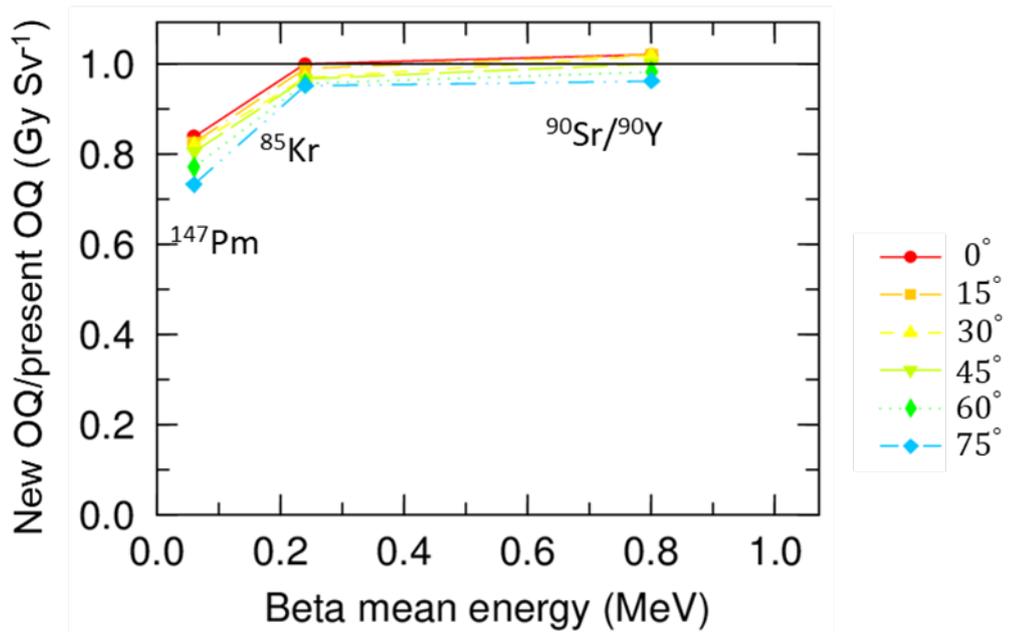


図 J 5-4 FRS に整備するβ線校正場に関する新/現行実用量の線量換算係数の比較
 $(D_{p \text{ local skin}}/H_p(0.07))$

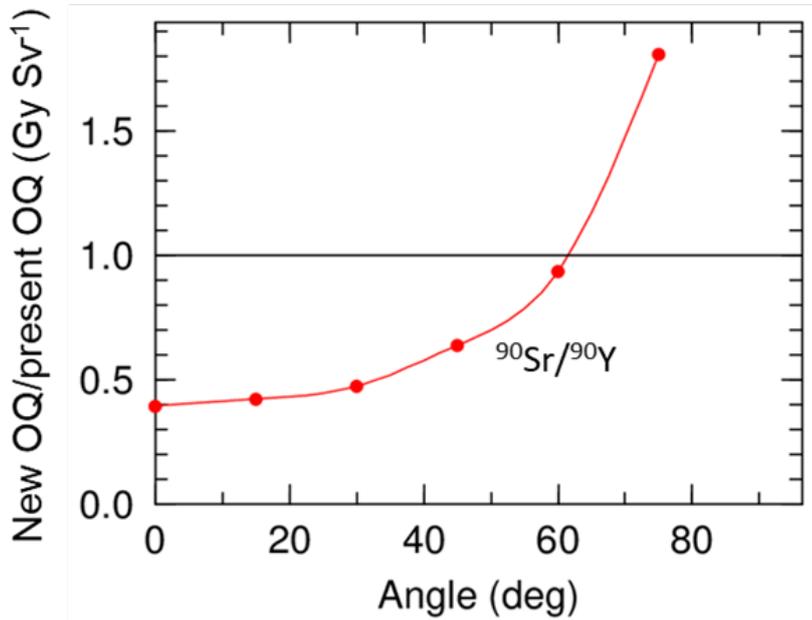


図 J 5-5 FRS に整備する β 線校正場 ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場) に関する新/現行実用量の線量換算係数の比較 ($D_{p\text{lens}}/H_b(3)$)

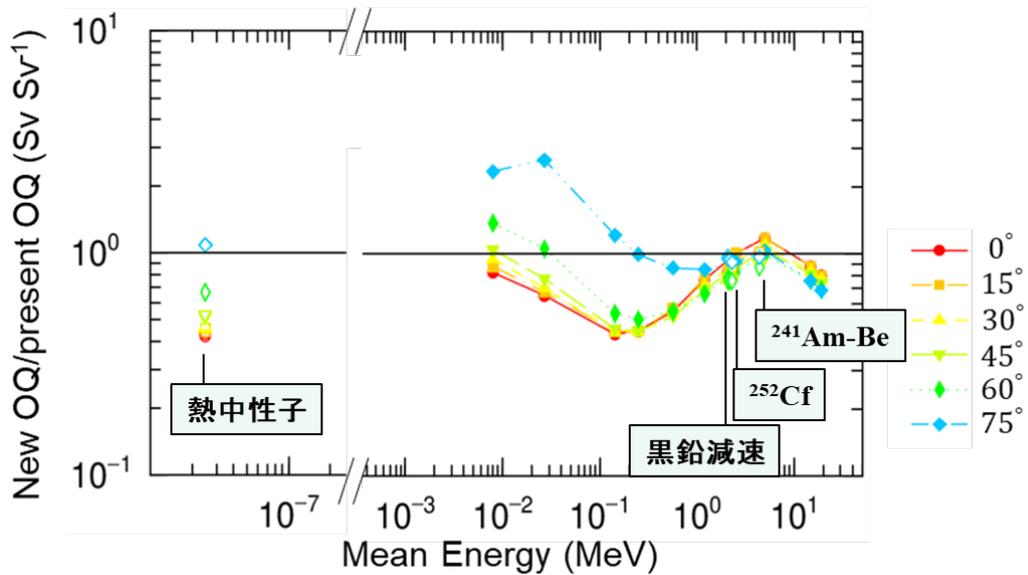


図 J 5-6 FRS に整備する中性子校正場に関する新/現行実用量の線量換算係数の比較 ($H_b/H_b(10)$)

J5. 1. 2 方向特性試験方法の開発

新たな実用量では前述したとおり、180° 照射（PA 照射）や ROT 照射といった照射ジオメトリに対しても線量換算係数が示されている（図 J 5-7 及び図 J 5-8 参照）。そこで、線量計の方向特性に必要な治具等を開発し、ROT 照射を含む照射試験が可能な環境を整備した。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。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、また校正用ファントムの妥当性についても検討する必要がある。

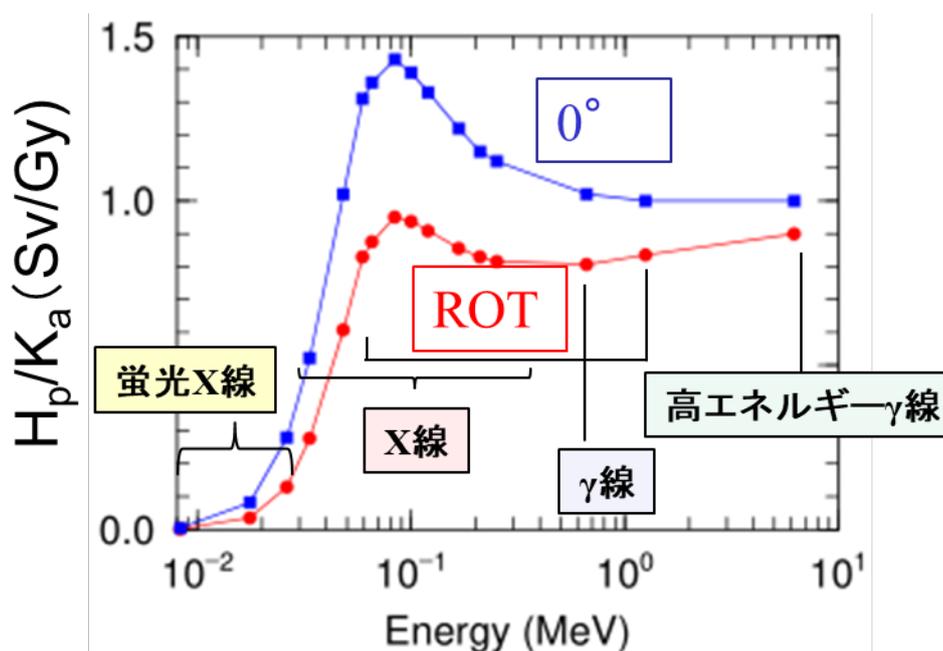


図 J 5-7 FRS に整備する光子線校正場に関する $H_p(\text{ROT})$ と $H_p(0^\circ)$ の比較

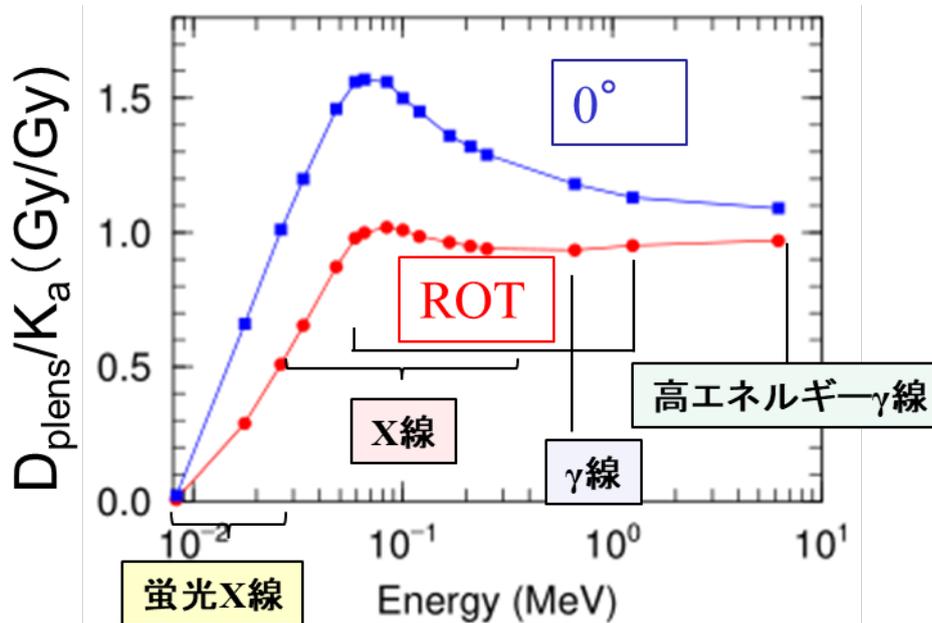


図 J 5-8 FRS に整備する光子線校正場に関する $D_{\text{plens}}(\text{ROT})$ と $D_{\text{plens}}(0^\circ)$ の比較

J5.1.3 トレーサビリティ確保に関する調査

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や試験を全て国家標準で実施することは現実的でない。そのため、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・試験サービスが実施されている。従って、新たな実用量が導入されたとしても、このような体系が維持されることを想定し、その妥当性を検証しておく必要がある。光子用サーベイメータ、光子用受動形個人線量計（体幹部用）、光子用受動形個人線量計（水晶体用）、中性子サーベイメータ及び中性子用受動形個人線量計（体幹部用）について、国家標準及び FRS の双方で試験を実施した。N-100 の入射角度 60° 以外では不確かさの範囲内で結果は一致した。N-100 の入射角度 60° については、用いた線量計の方向特性が 60° 付近で急激に増大する領域であり、不確かさ評価をしていない微小な角度ずれの可能性が考えられるが、今後検証が必要である。ただし、S-Cs との相対レスポンスの観点からは、不確かさの範囲内で一致しており、調査範囲内では、新たな実用量での校正・試験においても二次標準機関で同等の結果を得ることができることが示唆された。

J5.2 線量計の特性評価に関する調査

表 J 5-1 及び表 J 5-2 に示すように、国内で市販され、放射線管理に用いられている線量計に対してエネルギー特性及び方向特性を取得した（方向特性については、方向依存性がある実用量に対してのみ実施）。得られた特性の傾向としては以下のとおりであった。

光子用線量計については、 H^* や H_p に対して低エネルギー領域で過大応答し、20 keV 付近では現行の実用量と比較して 10 倍以上の応答となるケースもある。 H^* や H_p で再校正（S-Cs の応答で調整）した場合は、40 keV 付近までは現状のままでも許容範囲内の応答であるケースが多い。エリアモニタについては、入射光子のエネルギーによって大きくレスポンスが変動するものもあるが、定置でのモニタリングを想定し、トレンドを監視する目的の機器であるため、設置する放射線場に対応する線質での校正、あるいは試験による特性の把握で十分と考えられ、実用量の変更にもこうした観点から対応することによって、モニタリングの目的に適用し得ると思われる。方向特性についても、ROT 照射を含めて調査範囲内では大きな影響はみられなかった。 D'_{lens} 、 D_p 、 $D'_{local\ skin}$ や $D_{p\ local\ skin}$ については、8 keV を除けば良好な特性を示していた。 β 線についても、今回調査した $D_{p\ local\ skin}$ に関しては、実用量の定義変更に伴う変化は小さい。その他、眼の水晶体の線量評価に用いる実用量については、光子と β 線で応答が異なるために混在場では注意を要すると考えられる。

中性子用線量計については、現行実用量と比較して、熱中性子～数 100 keV の領域でのレスポンスの変化が著しい。受動形個人線量計においては、入射角の増大に伴いレスポンスが低下する傾向が見られるものもあった。

これらのエネルギー・方向特性の傾向から、現行の線量計を新たな実用量に対応させるための課題を①校正・試験事業者、②線量計メーカー、③線量計使用者、それぞれの観点から整理し、対応策を検討した。

- ① 校正・試験事業者においては、低エネルギー光子や中性子では応答が大きく影響を受け、また H^* と $D'_{local\ skin}$ など複数の実用量を測定できるものでは、測定量による違いも見られるが、校正線質を（使用される作業環境も踏まえて）変更する、あるいは複数の校正定数を準備するなどの対応策が考えられる。また、早期の標準化や線量計に要求すべき試験事項の明確化は新たな実用量の導入への対応を円滑に進める上で望ましい。
- ② 線量計メーカーについては、低エネルギー光子や低エネルギー中性子に対する応答改善が課題である。対応が容易なものから順に、使用定格範囲の制限、再校正（校正線質の変更を含む）、アルゴリズム等線量演算機能の改良、線量計の構造変更が考えられる。

- ③ 線量計使用者の観点からは、線量計の特性の傾向も踏まえたうえで、合理的な線量管理方法の検討や再校正に伴う計測値の変化への対応の検討が課題である。また、線量計の使用用途を限定するなどの対策も考えられるが、それには管理する放射線場のエネルギー分布などの情報が重要であるほか、関係者の理解醸成も重要である。また、眼の水晶体の線量管理においては、体幹部（頸部や胸部）に着用した線量計でモニタリングされているケースも多いが、実用量の変更により測定量間の関係性が変化するために、こうした管理が引き続き可能かどうか検証しておく必要がある。これについては、後述するとおり、本事業において 60 keV 付近のエネルギーにおいて実験室環境における検証がなされた。

表 J 5-1 特性を評価した線量計の種類等の一覧（原子力機構での実施分）（1）

| 線量計の種類 | 検出器 | 測定線種 | 測定量 | 参照先 ¹⁾ |
|------------------|--|------|---|-------------------|
| シンチレーション式サーベイメータ | NaI(Tl) | 光子 | H^* | R3-A |
| 電離箱式サーベイメータ | 電離箱 | 光子 | H^* 、 D' _{lens} 、 D' _{local skin} | R3-B、R4-A、R5-A |
| | | β線 | D' _{lens} 、 D' _{local skin} | |
| 電離箱式サーベイメータ | 電離箱 | 光子 | H^* 、 D' _{local skin} | R6-A |
| | | β線 | D' _{local skin} | |
| 電離箱式サーベイメータ | 電離箱 | 光子 | H^* | R4-H |
| 電離箱式サーベイメータ | 電離箱 | 光子 | H^* | R4-J |
| 中性子用サーベイメータ | ³ He 比例計数管 | 中性子 | H^* | R3-C、R4-B、R5-B |
| 中性子用サーベイメータ | 有機混合ガス比例計数管 | 中性子 | H^* | R5-C |
| 可搬型エリアモニタ | Si 半導体 | 光子 | H^* | R5-D |
| 据置型エリアモニタ | GM 計数管 | 光子 | H^* | R6-B |
| 受動形環境線量計 | OSL ² (Al ₂ O ₃ :C) | 光子 | H^* | R5-E |
| 受動形個人線量計（体幹部） | OSL (Al ₂ O ₃ :C) | 光子 | H_p 、 D_p local skin,slab | R4-D、R5-G |
| | | β線 | D_p local skin,slab | |
| 受動形個人線量計（体幹部） | RPL ³ （銀活性リン酸塩） | 光子 | H_p 、 D_p local skin,slab | R5-F |
| | | β線 | D_p local skin,slab | |
| 受動形個人線量計（体幹部） | TL (LiF:Mg,P,Cu) | 光子 | H_p 、 D_p local skin,slab | R5-H |
| | | β線 | D_p local skin,slab | |
| DIS 個人線量計（体幹部） | DIS | 光子 | H_p 、 D_p local skin,slab | R6-C |
| | | β線 | D_p local skin,slab | |
| 電子式個人線量計（体幹部用） | Si 半導体 | 光子 | H_p 、 D_p local skin,slab | R3-E、R4-C |
| | | β線 | D_p local skin,slab | |

1) R に続く数字は、報告された事業年度を表す。またハイフンに続く文字は各事業年度原子力機構報告書^[7-9]に記載されている英字に対応している。

² 光刺激ルミネッセンス

³ ラジオフォトルミネッセンス

表 J 5-2 特性を評価した線量計の種類等の一覧（原子力機構での実施分）（2）

| 線量計の種類 | 検出器 | 測定線種 | 測定量 | 参照先 ¹⁾ |
|----------------|-------------------|-----------------|----------------------|---------------------|
| 電子式個人線量計（体幹部用） | Si 半導体 | 光子 | H_p | R3-D、R4-I、R5-O、R6-D |
| 受動形個人線量計（水晶体用） | TL (LiF) | 光子 β 線 | D_p lens | R3-F、R4-E、R5-I |
| 受動形個人線量計（水晶体用） | TL | 光子 β 線 | D_p lens | R6-E |
| 受動形個人線量計（末端部用） | TL (LiF) | 光子 | D_p local skin rod | R5-J |
| 受動形個人線量計（末端部用） | TL (LiF) | β 線 | D_p local skin rod | R5-K |
| 受動形個人線量計（末端部用） | TL (LiF(Mg,Ti)) | 光子 β 線 | D_p local skin rod | R5-L |
| 受動形個人線量計（体幹部用） | PADC ⁴ | 中性子 | H_p | R4-G、R5-M |
| 受動形個人線量計（体幹部用） | TL (LiF(Mg,Ti)) | 中性子 | H_p | R5-N |
| 電子式個人線量計（体幹部用） | Si 半導体 | 中性子 | H_p | R3-G、R4-F |

1) R に続く数字は、報告された事業年度を表す。またハイフンに続く文字は各事業年度原子力機構報告書^[J7-J9]に記載されている英字に対応している。

⁴ ポリアリルジグリコールカーボネート

J5.3 線量計の校正定数の決定と個人線量管理上の課題に関する調査

J5.3.1 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

法令等により線量管理、線量または線量率測定が要求される現場を類型化したうえで、原子力施設及び放射線使用施設の特徴が異なる放射線作業場（原子力発電所、核燃料施設、廃棄施設及び研究・教育施設）を選定し、合計 113 個の光子エネルギー分布を取得した（表 J 5-3 参照）。 H^* 平均エネルギーは 0.15 MeV～4 MeV であり、X 線や ^{241}Am 及び散乱線による低エネルギーのものから、 ^{16}N や即発 γ 線のように 6～8 MeV 付近の光子まで観測された。エネルギー分布は異なるものの、現行/新実用量の比は何れの場合においても S-Cs や N-80 校正場と同程度であり、これらの線質で校正した線量計であれば、新たな実用量でも適切に測定評価できることが示唆された。113 個の光子エネルギー分布について、新・現行実用量の比を H^* 平均エネルギーに対してプロットしたものを図 J 5-9 及び図 J 5-10 に示した。低エネルギーではその差が大きくなるが、最大でも 30%程度の差であることが分かった。

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から、放射線作業場における線量計のエネルギー応答を評価した。評価に用いた線量計はサーベイメータやエリアモニタ、個人線量計など 7 機種である。X 線施設と建屋式保管廃棄施設の 1 箇所に対するエリアモニタの応答を除いては、高々 30%程度の過大応答（ ^{241}Am の寄与の大きい場）であり、許容範囲内であった。X 線施設においては、その応答はスペクトルの形状に大きく依存すると考えられ、線量計が使用される放射線場のエネルギー分布の情報を取得することは重要である。また、エネルギー依存性の大きいエリアモニタに関しても、定置する場所の放射線場のエネルギー分布を考慮し、適した線質での校正や試験による特性の把握が望まれる。

また、原子力機構核燃料サイクル工学研究所において、過去に実際の放射線作業で使用された個人線量計（TLD バッジ）の指示値を用いて、放射線作業場の光子エネルギーを推定した。再処理施設では ^{137}Cs 等からの比較的エネルギーの高い直接線と散乱線、MOX 燃料施設では、 ^{241}Am に由来する 60 keV の γ 線による被ばくと考えられた。こうした手法は、スペクトロメータ測定データを補完する情報として活用できるものと考えられる。

これらの放射線作業場におけるエネルギー応答と方向依存性を測定するためのタンダステン合金製のコリメータを製作し、 ^{137}Cs 線源を用いてその性能を評価し、 $\pm 30^\circ$ 内の光子スペクトルを取得することが可能なことを確認した。200 keV 以下の低エネルギーでは CdTe 検出器を用いた測定やさらに低エネルギーでは Si 半導体検出器を用いてエネルギー分布を測定することが可能である。今後、こうした機器を活用し、

対象となる放射線作業場の範囲を拡げて光子エネルギー分布を取得し、実用量変更にかかるインパクトを評価していくことが望まれる。

表 J 5-3 スペクトルを取得した放射線作業場

| 施設分類 | | 特徴 | 成果報告書での番号 ¹⁾ | | |
|---------|------------|--|--|------------------|------|
| 原子力発電所 | 定検中 | 定検中 PWR (^{58}Co 、 ^{60}Co など) | R3:#37、R4:#7-11 | 【6】 | |
| | 福島第一原子力発電所 | 広範囲の線源 ($^{134+137}\text{Cs}$) 分布・散乱線、ISO に近いジオメトリ | R3:#18-36 | 【19】 | |
| 核燃料施設 | 再処理施設 | ^{241}Am 、FP、U 崩壊生成物など工程によって特徴的 | R5:#1-6 | 【6】 | |
| | 核燃料物質使用 | 使用施設 | ホットセル | R6:#15-26 | 【12】 |
| | | 貯蔵施設 | 幅広いエネルギー範囲 | R3:#10-11 | 【6】 |
| 廃棄施設 | 建屋式保管廃棄施設 | ISO に近い場、コンクリートや周囲の廃棄物による散乱、多様な線源核種 | R6:#27-40 | 【14】 | |
| 研究・教育施設 | X 線施設 | | 低エネルギー・漏洩線量 | R3:#14-15 | 【2】 |
| | RI 利用施設 | 使用 | 直達線、遮蔽や迷路構造による散乱線・漏洩線量、RI 実験（フードにおける線源取扱い） | R3:#1-7、R4:#1 | 【8】 |
| | | 貯蔵 | さまざまな線源（核種）による場 | R3:#8-9 | 【2】 |
| | | 廃棄 | 施設の廃棄物周辺 | R4:#2 | 【1】 |
| | | 輸送 | 容器による遮蔽からの漏洩線量 | R3:#12-13 | 【2】 |
| | 研究炉施設 | 炉室・作業環境 | 運転中 (^{16}N 高エネルギー γ 線) | R4:#3-5、R5:#7-12 | 【9】 |
| | | 中性子利用施設 | 高エネルギー即発 γ 線 | R4:#6、R5:#13-15 | 【4】 |
| | | 管理区域境界 | コンクリート遮蔽からの漏洩 | R5:#16 | 【1】 |
| | | 廃止措置施設 | 汚染残存物などからの線量 | R6:#1-14 | 【14】 |
| | 加速器施設 | 静電加速器 | 放射化物 | R3:#16 | 【1】 |
| | | 高エネルギー加速器 | 放射化物 | R3:#17、R5:#17-21 | 【6】 |

¹⁾ 【】内は各カテゴリにおけるスペクトル数。R3 は令和 3 年度事業で報告^[7]されているもの、R4 は令和 4 年度事業で報告^[8]されているもの、R5 は令和 5 年度事業で報告^[9]されているもの、R6 は J4.4.2.1 で示したものである。

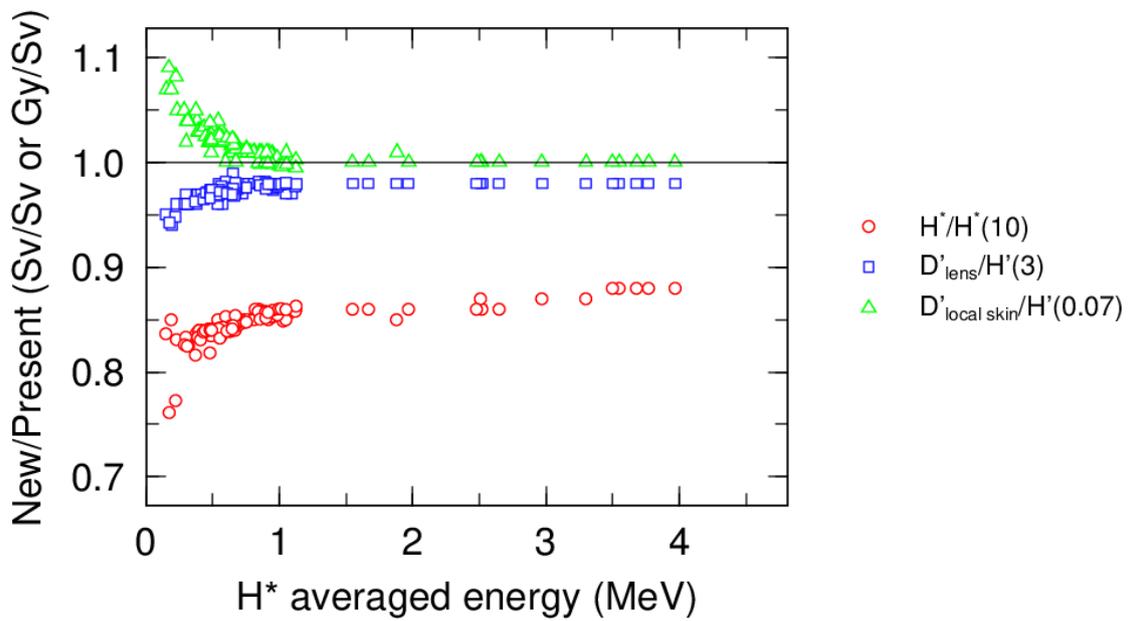


図 J 5-9 原子力施設及び放射線使用施設の作業場で評価した新たな実用量（カーマ近似）と現行実用量の比較（場所のモニタリングにかかる実用量）

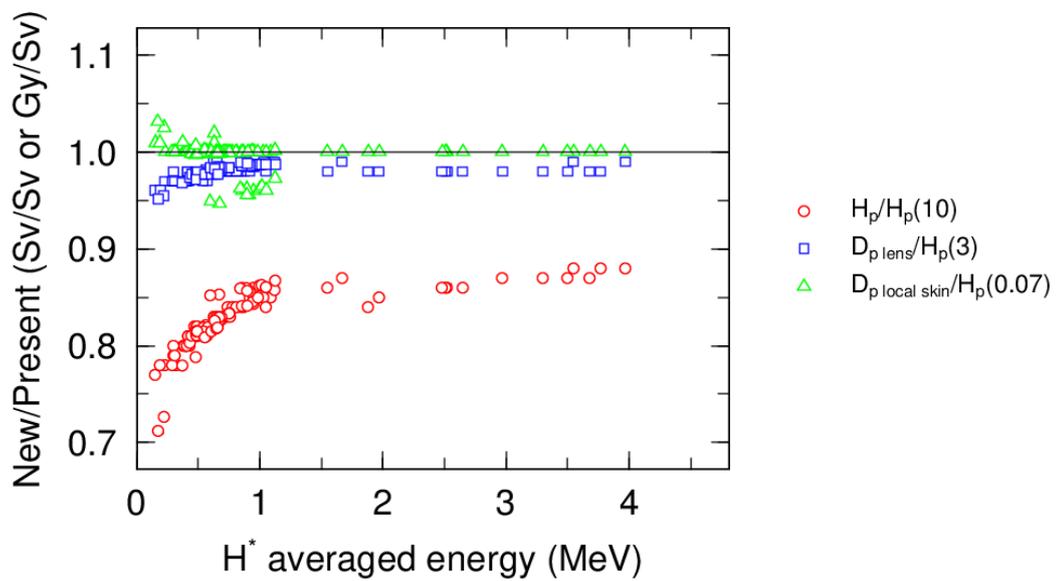


図 J 5-10 原子力施設及び放射線使用施設の作業場で評価した新たな実用量（カーマ近似）と現行実用量の比較（個人モニタリングにかかる実用量）

J5.3.2 校正定数の決定に関する課題の調査

現状、原子力施設で用いられる光子用線量計は、ほとんどが S-Cs 場で 1 点校正されている。そこで、前述した 7 機種を新たな実用量に対して S-Cs 場で校正した場合における廃止措置中の原子力施設、ホットラボ施設及び建屋式保管廃棄施設の放射線作業場での線量計応答について調査した。調査したエネルギー分布の範囲内では、ほとんどのケースで適切にモニタリングできることが分かった。しかしながら、原子力施設での主要な低エネルギー光子源である ^{241}Am が支配的となる場では、その応答に注意すべきケースがあり、放射線場のエネルギー分布及び使用する線量計のエネルギー応答特性を把握することが重要となる。

J5.3.3 不均等照射に対する新たな実用量による個人線量管理に関する課題の調査

眼の水晶体の線量管理において、胸部又は腹部に加えて頭頸部等に装着した体幹部用線量計の実用量の測定によって水晶体用線量計による測定を代替する運用がなされる場合があり、さらにこうしたケースでは鉛エプロン等を着用し不均等照射となっている。そこで、60 keV 付近の光子による被ばくを想定し、頸部に着用した体幹部用線量計で H_p 測定を実施した場合に、適切に水晶体の線量をモニタリングできるかを人体形状ファントム実験やこれらの事業で得られた線量計の特性データを解析して検証した。

まず、人体形状ファントムにおける実験から、ファントム形状や着用部位、胸部への鉛エプロンの着用によっても頸部の線量計応答に有意な影響を及ぼさないことを明らかにした。さらに特性試験データを解析からは、頭部及び胸部がともに光子の入射角度が 75° となる場合を除いては、頭頸部での線量計測定値から水晶体吸収線量を 20% 以内で推定できた。これにより、新たな実用量で測定した場合においても、頸部での H_p の測定で妥当なモニタリングが可能と考えられた。 75° においては、こうした大きな角度での放射線入射に対する体幹部用線量計のレスポンスが良くないことから、頸部の線量計測定値からの水晶体吸収線量推定には大きな不確かさが伴うことが分かった。

J5.4 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) 等の国際機関及び国内外の関連学術団体の動向及び関連する文献の調査を実施した。ISO では、関係する規格や報告書などに反映されるような動きは見られなかったものの、IAEA 等の状況などを今後も注視していく必要がある。新たな実用量に関する研究としては、欧州を中心として徐々に活発化している状況にあるが、学術団体の研究発表会での直接の研究報告の例は少ない。ただし、線量計測上の新たな知見や放射線作業場に関する研究報告は多くなされており、新たな実用量への対応に応用できる個人線量計に係る研究なども散見されている。種々の議論を経て新たな実用量が各国の法令に取り込まれるとしても、少なくともまだ 10 数年はかかるであろうこと、国によっては現行の実用量を取り入れたばかりのところもあって様子見している研究者も多く、まだ大きな動きとはなっていない。しかしながら、国際機関の動向によっては議論や研究が活発化するものと考えられる。

現行実用量導入時の原子力機構での対応の調査からは、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ことが分かった。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。

J5.5 おわりに

これらの事業において、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蓄積され、校正や試験ができる環境や放射線場のエネルギー分布などを測定する手法も整備された。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おり、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、円滑に放射線管理を行うことは困難である。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成果や課題を関係者で共有していくことが重要であると考えられる。

謝辞

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 原子力安全・防災研究所 安全研究センター リスク評価・防災研究グループの高原 省五氏をはじめとして、事業の遂行における助言や放射線作業場における光子スペクトルの入手において協力いただきました原子力機構 原子力科学研究所 放射線管理部の半谷 英樹氏、阿部 琢也氏、山田 克典氏、中畠 純也氏、本田 文弥氏、森 健一氏、原子力機構 原子力科学研究所 バックエンド技術部の須藤 智之氏、川原 孝宏氏、原子力機構 大洗原子力工学研究所 環境技術開発部の永田 寛氏に御礼申し上げます。また、放射線作業場における光子スペクトルの提供並びに放射線標準施設棟において照射いただきました原子力機構 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課の諸氏に御礼申し上げます。

参考文献

- [J1] 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)
- [J2] International Commission on Radiation Units and Measurement (ICRU). *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources*, ICRU Report 39 (1985)
- [J3] International Commission on Radiation Units and Measurement (ICRU). *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry*, ICRU Report 51 (1993)
- [J4] 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)
- [J5] International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). *Operational Quantities for External Radiation Exposure*, ICRU Report 95, J. ICRU 20(1) (2020)
- [J6] 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)
- [J7] 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)
- [J8] 原子力規制庁 令和4年度放射線対策費（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）事業成果報告書(2022)
- [J9] 原子力規制庁 令和5年度放射線対策費（新たな実用量への対応に向けた研究）事業成果報告書(2023)
- [J10] Y. Tanimura and H. Yoshitomi. 放射線標準のトレンド,3; JAEA における二次標準の現状について, 日本原子力学会誌 ATOMOΣ 66(1) 42-45 (2024)
- [J11] 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, 557, 1-5 (2023)
- [J12] H. Yoshitomi. 放射線測定器の JIS 登録試験所開設, Isotope News, 786, 26-29 (2023)
- [J13] 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)
- [J14] 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 (2024)
- [J15] International Organization for Standardization (ISO). *Nuclear energy – Reference beta-particle radiation – Part 1: Methods of production*, ISO 6980-1 (2022)
- [J16] 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

- [J17] International Organization for Standardization (ISO). *Reference neutron radiations – Part 1: Characteristics and methods of production*, ISO 8529-1 (2001)
- [J18] 日本産業規格. 中性子線量当量 (率) 計の校正方法, JIS Z 4521:2006
- [J19] T. Tsuji, H. Yoshitomi, M. Kowatari and Y. Tanimura. *Establishment of a ^{241}Am gamma calibration field based on international standards and its conversion coefficients*, Radiat. Prot. Dosim., 200(15), 1416-1424 (2024)
- [J20] 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)
- [J21] International Organization for Standardization (ISO). *Radiological protection – X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate 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)
- [J22] 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)
- [J23] International Electrotechnical Commission (IEC). *Radiation Protection instrumentation – Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors*, IEC 60846-1 (2009)
- [J24] International Electrotechnical Commission (IEC). *Radiation Protection instrumentation – Dosimetry systems with integrating passive detectors for individual, workplace and environmental monitoring of photon and beta radiation*, IEC 62387 (2020)
- [J25] International Electrotechnical Commission (IEC). *Radiation Protection instrumentation – Measurement of personal dose equivalents for X, gamma, neutron and beta radiations – Active personal dosimeters*, IEC 61526 (2020)
- [J26] 日本保健物理学会. 眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン, Jpn. J. Health Phys. 56(3), 179-257 (2021)
- [J27] H. Nagata, K. Otsuka, T. Omori, H. Hanakawa and H. Ide. *JMTR 原子炉施設に残存する二次汚染物の放射エネルギー評価*, JAEA-Technology 2022-029 (2022)
- [J28] 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)
- [J29] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Y. Matsuya, N. Matsuda, Y. Hirata, T. Sekikawa, L. Yao, P.E. Tsai, H.N. Hunter, H. Iwase, Y. Sakaki, K. Sugihara, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita. *Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System*

- *PHITS version 3.33*, J. Nucl. Sci. Technol., 61, 127-135 (2024)

[J30] 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)

[J31] International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Occupational Radiological Protection in Interventional Procedures*, ICRP Publication 139, Ann. ICRP 47(2) (2018)