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 成果報告書

国立研究開発法人産業技術総合研究所

令和6年3月29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	7
	2.1 実施体制	7
	2.2 実施期間	10
	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 プロメチウム線源	24
	4.2.2 中性子用ロングカウンタ	25
	4.2.3 中性子用方向特性試験用ステージ	27
	4.3 新たな実用量に対応した線量計の校正に関する調査	27
	4.3.1 校正・試験場の線量換算係数の評価	27
	4.3.1.1 国家標準機関における β 線校正場の新たな実用量への線量換算係数	27
	4.3.1.2 二次標準機関における蛍光X線校正場の新たな実用量への線量換算係数	ζ30
	4.3.1.3 ロッドファントムに対する局所皮膚吸収線量に係る線量当量換算係数	31
	4.3.2 方向特性試験方法の妥当性の検討	32
	4.3.2.1 X 線方向特性試験	32
	4.3.2.2 γ 線回転照射試験	39
	4.4 線量計の特性評価に関する調査	43
	4.4.1 国家標準機関における線量計の特性調査	43
	4.4.1.1 β 線場における電離箱式線量計の特性調査	43
	4.4.1.2 中性子場における線量計の特性調査	47
	4.4.2 JAEA における線量計の特性調査	51

4.4.3 トレーサビリティ確保に関する調査	53
4.5 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	53
4.5.1 原子力関連設備・加速器設備の光子場に関する調査および解析	53
4.5.2 中性子場に関する調査	55
4.6 新たな実用量への対応に係る課題の調査	58
4.6.1 開催の概要	58
4.6.2 講演の概要	58
4.6.3 総合議論	60
4.7 研究に必要な国内外の情報収集	62
4.7.1 国際機関が開催した会合における情報収集	62
4.7.2 国内外の学会等に関する情報収集	63
4.7.3 関係論文	64
5 課題の整理と対応策	65
5.1 線量計のエネルギー・方向特性に関わる課題	65
5.2 その他の観点の課題	66
6 まとめ	67
謝辞	68
参考文献	69

別添 「令和 5 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、モデルを用いて計算される量であり、実際に 測定することはできない。一方、外部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、これらが変更された場合、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。

以上の要求から、本事業は、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する。

本報告書は、本事業の成果などを取りまとめた。別添として二次校正機関が実施した内容 を詳細に記載し、「令和 5 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及び物理量(空気カーマ又はフルエンス)から実用量への換算 係数を表 1.2-1 に^[3,4]、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, <i>H</i> _p (10) 個人線量当量換算係数, <i>h</i> _p (10,α)	
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,α)	個人線量当量, <i>H</i> _p (3) 個人線量当量換算係数, <i>h</i> _p (3,α)	
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,α)	個人線量当量, <i>H</i> _p (0.07) 個人線量当量換算係数, <i>h</i> _p (0.07, α)	

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)
実効線量の管周辺線量, H*理周辺線量換算係数、h*		個人線量, $H_{\rm p}$ 個人線量換算係数、 $h_{\rm p}(\alpha)$
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, $d'_{lens}(\alpha)$	個人水晶体吸収線量, $D_{p lens}$ 個人水晶体吸収線量換算係数, $d_{p lens}(\alpha)$
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, $D'_{local skin}$ 方向性局所皮膚吸収線量換算係数, $d'_{local skin}(\alpha)$	個人局所皮膚吸収線量, $D_{p \text{ local skin}}$ 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

本事業は線量計測をはじめとする様々な物理量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	国際固体線量計測機構。2023 年はイタリア ピサ	
	State Dosimetry	において SSD20(20th International Conference on	
	Organization	Solid State Dosimetry)を開催。	
保健物理学会	(一社) 日本保健物	国際放射線防護学会に加盟する学会。放射線防	
	理学会	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	国際標準化機構。本事業で関係が深いのは、	
	Organization for	ISO/TC85/SC2(放射線防護分野)の WG2(基準	
	Standardization	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	日本産業規格。ISO で規定された規格は JIS 規格	
	Standards	として取り入れられている。	
ICRU	International	国際放射線単位測定委員会。放射線およびその物	
	Commission on	質との相互作用に関する物理量およびその単位	
	Radiation Units	の使用について概念開発、定義、勧告を、特に放	
	and Measurements	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	国際放射線防護委員会。専門家の立場から放射線	
	Commission on	防護に関する勧告を行う民間の国際学術組織。2	
	Radiological	年に 1 回 ICRP 国際シンポジウムを開催してお	
	Protection	り、2023年は東京で開催。	
CCRI	Consultive	放射線諮問委員会。国際度量衡委員会の下部に属	
	Committee of	し、放射線に関する単位を扱っている諮問委員	
	Ionizing Radiation	会。2年に1回パリで会議を開催している。2023	
		年は開催年に当たっている。	
APMP	Asia Pacific	アジア環太平洋標準計画。アジア太平洋地域にお	
	Metrology	ける標準研究所のネットワークとして組織され	
	Program	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。 2023 年の	
		TCRI は中国深圳市とオンラインのハイブリッド	
		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
AIST Solutions	図中表記に同じ	産業技術総合研究所のグループ会社。産総研と民
		間企業の共同研究のコーディネートを行ってい
		る。本事業ではコーディネータの黒澤忠弘氏に、
		ワークショップでの告知対象とする企業や機関
		について助言を受けた。
長崎大学原爆後	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
障害医療研究所		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
		美教授にワークショップで講師としてご協力い
		ただいた。

2.2 実施期間

本事業は令和5年4月5日~令和6年3月29日の期間で実施した。再委託事業については令和5年4月5日~令和6年2月29日の期間で実施した。

本事業を開始するにあたり、令和5 年4 月26 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6 年2 月20 日には、報告前会合を実施し、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 と実施状況に関して 設けた会合の実施日および内容を、表 2.2-1 に示す。また JAEA の出張報告について表 2.2-2 に示す。

実施日	内容	
令和5年4月26日	キックオフ会合	
令和5年5月30日	令和 5 年 4、5 月における実施状況 (Web 会議にて実施)	
令和5年6月28日	JAEA の出張報告 表 2.2-2 を参照 (電子メールにて実施)	
令和5年6月30日	令和 5 年 6 月における実施状況 (Web 会議にて実施)	
令和5年7月31日	令和 5 年 7 月における実施状況 (Web 会議にて実施)	
令和5年9月20日	令和 5 年 8、9 月における実施状況 (Web 会議にて実施)	
令和5年10月23日	令和 5 年 10 月における実施状況 (Web 会議にて実施)	
令和5年11月27日	JAEA の出張報告 表 2.2-2 を参照 (電子メールにて実施)	
令和5年11月27日	令和 5 年 11 月における実施状況 (Web 会議にて実施)	
令和5年12月21日	令和 5 年 12 月における実施状況 (Web 会議にて実施)	
令和6年1月31日	令和 6 年 1 月における実施状況、 成果のとりまとめについて (Web 会議にて実施)	
令和6年2月20日	令和 6 年 2 月における実施状況、 報告書に関する打ち合わせ (Web 会議にて実施)	

表 2.2-1 事業の実施状況の確認・報告会合等の一覧

表 2.2-2 JAEA による出張報告

件名	出張者・出張期間 ・用務先・報告日	内容
ICRU 国際 シンポジウ ム	出張者: 辻智也 出張期間: 4月19日 用務先: いわきワシントンホテル (福島県いわき市) 報告日: 6月28日	ICRU 国際シンポジウム「福島復興と放射 線計測」に参加し、新たな実用量の導入に 係る線量計測上の課題、特に環境モニタリ ングに与える影響について情報収集した。 また、福島第一原子力発電所事故での放射 性物質による環境汚染から得られた最新知 見、国内外における環境モニタリングに係 る研究開発の最新状況等について調査し た。
IAEA 二次 標準施設と 品質マネジ メントシス テムに関す る技術会合	出張者: 西野翔 出張期間: 5月28日~6月4日 用務先: IAEA本部(オーストリ ア・ウィーン) 報告日: 6月28日	各国の放射線二次標準機関に属する専門家 が参加する IAEA 技術会合に出席し、二次 標準機関における各種放射線校正場の整備 に関する技術情報、及び ICRU Report95 において提唱された線量モニタリングに係 る新たな実用量に関する知見を調査した。
ICRP 国際 シンポジウ ム	出張者: 谷村嘉彦、辻智也 出張期間: 11月7日~11月10日 用務先: グランドニッコー東京 (東京都港区) 報告日: 11月27日	ICRP 国際シンポジウム(ICRP2023)及 び日本保健物理学会第 56 回研究発表会に 参加し、新たな実用量に関する情報を収集 するとともに、国内外の動向を調査した。

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」と数μSv/h と環境レベルの低線量率の照射 が可能な「γ線標準照射室」2室がある^[5,6,7]。

○大線量γ線照射室

⁶⁰Co線源、¹³⁷Cs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)。

・⁶⁰Co 線源-7×10⁻² Gy/s~4×10⁻⁷ Gy/s

・¹³⁷Cs 線源-5×10⁻⁴ Gy/s~9×10⁻⁶ Gy/s



図 2.3-1 大線量γ線照射室

○γ線標準照射室

⁶⁰Co 線源、¹³⁷Cs 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)。

・⁶⁰Co 線源-3×10⁻⁶ Gy/s~1×10⁻⁹ Gy/s

・¹³⁷Cs 線源-2×10⁻⁶ Gy/s~6×10⁻¹⁰ Gy/s



図 2.3-2 y 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^[8,9,10]。 ○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、マンモグラフィー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、¹⁴⁷Pm,⁸⁵Kr, ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 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^[11,12]。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 示す。いずれのβ線照射場も ISO 6980-1:2022^[13]のシリ ーズ1の要求事項を満たしている。¹⁴⁷Pm 線源の器物番号は 2 つ記入しているが、2023 年 11 月まで 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。¹⁴⁷Pm 線源については 4.2.1 項も参照。



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	アルミニウム蒸着PET
質量厚(mg/cm²)	1.67
組織等価厚 d_{win} (mm)	0.0152
付加フィルタ:	
材質	PET
質量厚 (mg/cm²)	5.41
組織等価厚 d _{win} (mm)	0.0493
集電極:	
材質	PMMA
厚さ (mm)	20
直径 (mm)	30.05
集電極の面積 (mm²)	733.01
保護電極の幅 (mm)	15
電極間の絶縁体の幅(mm)	0.5
電荷測定システム:	振動容量電位計
	(MMA II-17E,
	Kawaguchi Electric Works)
使用した標準キャパシタの電気容量 (pF)	100

表 2.3-2 β線照射場の仕様

放射性核種	¹⁴⁷ Pm	⁸⁵ Kr	⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y
線源の型番	PHRB4809	KARB4810	SIRB4568
線源の器物番号 ・AH-4810		MH 983	MR 428
	(2016 年度購入)		
	• BE-7778		
	(2023 年度購入)		
線源窓の質量厚・	$(2.22\pm0.5)~\text{mg/cm}^2$	(22.2 ± 1.0)	$(79 \pm 8) \text{ mg/cm}^2$
材質	チタン	mg/cm ²	ステンレス
		チタン	
公称放射能	3.7 GBq	3.7 GBq	460 MBq
校正距離	20 cm	30 cm	30 cm
校正距離 ビームフラッタニ	20 cm 半径 5 cm 、厚	30 cm 半径 4 cm 、厚	30 cm 半径 2 cm、厚さ
校正距離 ビームフラッタニ ングフィルタ	20 cm 半径 5 cm 、厚 さ 100 µm の PET	30 cm 半径 4 cm 、厚 さ 50 µm の PET	30 cm 半径 2 cm、厚さ 190 µm、半径 3
校正距離 ビームフラッタニ ングフィルタ	20 cm 半径 5 cm 、厚 さ 100 µm の PET で、中央に半径	30 cm 半径4cm、厚 さ50 µmのPET と半径2.75 cm、	30 cm 半径 2 cm、厚さ 190 µm、半径 3 cm、厚さ 190 µm、
校正距離 ビームフラッタニ ングフィルタ	20 cm 半径 5 cm 、厚 さ 100 µm の PET で、中央に半径 0.975 cm の穴が開	30 cm 半径 4 cm 、厚 さ 50 µm の PET と半径 2.75 cm、 厚さ 190 µm の	30 cm 半径 2 cm、厚さ 190 µm、半径 3 cm、厚さ 190 µm、 半径 5 cm、厚さ
校正距離 ビームフラッタニ ングフィルタ	20 cm 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	30 cm 半径 4 cm 、厚 さ 50 µm の PET と半径 2.75 cm、 厚さ 190 µm の PET の組合わせ	30 cm 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
校正距離 ビームフラッタニ ングフィルタ	20 cm 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	30 cm 半径 4 cm 、厚 さ 50 µm の PET と半径 2.75 cm、 厚さ 190 µm の PET の組合わせ	30 cm 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
校正距離 ビームフラッタニ ングフィルタ 平均ベータエネル	20 cm 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 0.065 MeV	30 cm 半径4 cm、厚 さ50 µmのPET と半径2.75 cm、 厚さ190 µmの PETの組合わせ 0.25 MeV	30 cm 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 0.77 MeV
校正距離 ビームフラッタニ ングフィルタ 平均ベータエネル ギー	20 cm 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 0.065 MeV	30 cm 半径 4 cm 、厚 さ 50 µm の PET と半径 2.75 cm、 厚さ 190 µm の PET の組合わせ 0.25 MeV	30 cm 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 0.77 MeV

*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 a =365.242 198 78 d = 31 556 925.26 s

16

(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、11.5m×11.5m×11.5m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5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)標準とそれぞれの中性子生成 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 He4 π β γ 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	Р	³ He(n,p)T反応 (³ He比例計数管)	
144 keV		Р		
250 keV	⁷ Li(p,n) ⁷ Be	n) ⁷ Be P	n-p反応 (反跳陽子比例計数管)	
565 keV		Р	(汉政的了比内时获百)	
1.2 MeV	T(p,n) ³ He	Р		
2.5 MeV	$D(d a)^{3}$	С	n-p反応	
5.0 MeV	D(d,n) ⁻ He	Р	(Thick radiator検出器)	
8.0 MeV	${}^{9}\mathrm{Be}(\alpha,n){}^{12}\mathrm{C}$	Р		
14.8 MeV	T(d,n) ⁴ He	С	随伴粒子測定 (シリコン検出器)	
45 MeV	⁷ Li(p,n) ⁷ Be (準単色)	СҮ	n-p反応 (カウンタテレスコープ)	

P:ペレトロン加速器、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、光子として⁶⁰Co線源及び¹³⁷Cs線源からのγ線、 ISO4037-1に規定されるNシリーズのX線、蛍光X線、6.2 MeVの高エネルギーγ線、β 線として⁹⁰Sr/⁹⁰Y線源・⁸⁵Kr線源及び¹⁴⁷Pm線源からのβ線、中性子として放射性同位元 素や加速器からの熱中性子から 19 MeV に渡るエネルギー領域の中性子の校正場を利用し て線量計の校正・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と方向特性試験方法の妥当性の検討を行った。
- (2) 線量計の特性評価に関する調査 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を行った。
- (3) 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関して調査を行った。
- (4) 新たな実用量への対応に係る課題の調査
 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に関する調査

国家標準機関である産総所と二次標準機関である JAEA において、(a)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、(b)方向特性試験方法の妥当性の検討を行った。

(a) 校正・試験場の線量換算係数の評価

1) 令和4年度事業では、国家標準機関において、X線及び γ 線校正場 (¹³⁷Cs,

⁶⁰Co 線源由来)並びに中性子線校正場について新たな実用量への線量換算係数の評価を行い、β線については基準線量の評価に必要な各種補正係数の導出に必要な技術を開発した ^[15]。本年度事業ではβ線について開発された技術、および整備された試験環境を用いて、β 線校正場についての新たな実用量への線量換算係数を導出し評価した。成果を 4.3.1 項に示 す。 2) 令和4年度事業までに、二次標準機関において、ISO 4037-1^[16] (JIS Z 4511^[17]) に準拠した X 線校正場(N-40 から N-300)及び γ 線校正場(高エネルギーγ線、¹³⁷Cs、⁶⁰Co)、 ISO 6980-1^[13] (JIS Z 4514^[18]) に準拠した β 線校正場 (¹⁴⁷Pm、⁹⁰Sr/⁹⁰Y、⁸⁵Kr)、ISO 8529-1^[19] (JIS Z 4521^[20]) に準拠した中性子線校正場(単色中性子線、²⁴¹Am-Be、²⁵²Cf、熱中性 子線、重水減速中性子線及び黒鉛減速中性子線)についての線量換算係数の評価が完了した ^[15,21]。本年度事業では新規に稼働する蛍光X線校正場について、新たな実用量への線量換算 係数を導出し評価した。成果を 4.3.1 項に示す。

(b) 方向特性試験方法の妥当性の検討

令和 4 年度事業で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^[15]。これらを用い、水スラブファントム、アクリル製スラブファントム及び人体ファントムについて、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。具体的には、¹³⁷Cs 線源および ⁶⁰Co 線源からの γ 線及び N-100、N-250 のX線に対して、0度から 180 度まで 45 度きざみの照射角度及び ROT (回転)条件について妥当性を検討した。個人線量 H_p については 135 度を除いて測定を行った。線質は照射試験に使用する線量計のエネルギー特性(70 keV~1.5MeV で±30%)を考慮して選択した。成果を4.3.2 項に示す。

(2) 線量計の特性評価に関する調査

産総研とJAEAとが連携して、令和4年度事業^[15]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、並びに今年度事業で新たな 実用量への線量換算係数を導出したβ線校正場とJAEAの蛍光X線校正場において、線量 計のエネルギー特性に関するデータを取得した。今年度は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。

ここで応答(*R*)は線量計の正味指示値(*G*)と基準器により測定した空気カーマ(率)、組 織吸収線量(率)、もしくはフルエンス(率)に線量換算係数を乗じることによって得た現行ま たは新たな実用量に対する基準線量(率)(*C*)との比をいい,次の式(1)式による。

$$R = \frac{G}{C} \tag{1}$$

(a) エネルギー応答の方向特性試験

令和4 年度事業で産総研及び JAEA において、線量計の方向特性試験に必要な回転照 射装置、治具等を開発、整備した。本年度事業ではこれらを用い、放射線管理上必要と なるエネルギー及び照射角度を選定し、線量計のエネルギー応答の方向特性を測定した。 アクティブ型の線量計(サーベイメータ・エリアモニタ等)に関しては、光子用、光 子・β線用および中性子線用線量計について、令和4年度事業までに整備した機種に、 のべ11機種(産総研7機種、JAEA4機種)を追加し、特性に関する傾向について検討 した。受動形個人線量計については、令和4年度事業までに試験を実施した機種に、国 内で線量管理に使用されている主要な機種を10機種(いずれもJAEAで実施)追加し て、上記と同様に特性に関する傾向について検討した。

上記の追加した機種に対する特性試験の内容は下記の通りである。産総研における β 線照射試験においては ISO6980 規格で規定されている ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 線源、⁸⁵Kr 線源、¹⁴⁷Pm 線源からの β 線場について、国際比較や試験所間比較でよく用いられる 30 度・45 度の 方向特性を調査した。産総研における中性子の試験については、国内事業者で多く利用 されている中性子サーベイメータ及び電子式中性子個人線量計について、5.0 MeV 及び 14.8 MeV 単色中性子に対する特性評価試験を行った。また、JAEA との比較のために中 性子サーベイメータについて、²⁵²Cf 中性子線源及び ²⁴¹Am-Be 中性子線源に対する特性 評価試験を行った。JAEA においては、光子・ β 線用サーベイメータについてエネルギー 特性(光子:8.3 keV から 6.2 MeV、 β 線: ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 線源、⁸⁵Kr 線源、¹⁴⁷Pm 線源)及び 方向特性(30 度から 75 度)の試験を行った。また光子用エリアモニタ及び光子用受動 形環境線量計について 30 keV から 6.2 MeV の範囲でエネルギー特性試験を行った。光 子・ β 線用受動形個人線量計(体幹部用)についてはエネルギー特性(30 度・60 度) の試験を行った。光子・ β 線用受動形個人線量計(水晶体用)についてはエネルギー特性 (光子:8.3 keV から 6.2 MeV、⁹⁰Sr/⁹⁰Y 線源)及び方向特性(30 度・60 度)

度及び ROT)の試験を行った。光子・ β 線用受動形個人線量計(末端部用)については、 (光子:8.3 keV から 6.2 MeV、 β 線: 90 Sr/ 90 Y線源、 85 Kr線源)及び方向特性(30 度・

60 度・180 度・ROT)の試験を行った。中性子サーベイメータ及び受動形中性子個人線 量計については熱中性子から 5 MeV までの範囲のエネルギー特性試験と 30 度・60 度の 方向特性試験を行った。

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。

(b) 特性評価試験のトレーサビリティ確保に関する調査

線量計ユーザーへの校正・試験サービスの提供に必要なトレーサビリティ体系が構築 できることを検証するため、産総研と JAEA との間において、体幹部用受動形個人線量 計(2種類)・水晶体用受動形個人線量計・中性子用サーベイメータの特性試験結果につ いての相互比較によって特性試験の手法の適切性及び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。

(3) 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査

令和4年度事業において、原子力施設及び放射線使用施設の5つの放射線作業場を対象 とし、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^[15]。本 年度事業では令和4年度事業で実施したヒアリング結果等^[15]を踏まえ、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、令和4年度事業から対象を広 げた現場での測定の実施の可能性について調査した。さらにスペクトルデータを入手した 現場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現存す る線量計・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した。 本年度事業では21箇所の放射線作業場について上記の検討を行った。また中性子が存在す る放射線作業場の調査を行い、中性子のエネルギースペクトルを3件入手した。成果を4.5 節に示す。

(4) 新たな実用量への対応に係る課題の調査

新たな実用量の導入に係る課題を整理し、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令和4 年度事業の成果に基づいて、新たな実用量の導入に関する動向と課題及びその対応策につ いて、機器メーカー、校正事業者、線量計測・管理の現場に携わる者等と議論した。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、ICRP、ICRU、新たな実用量への対応に係る国際機関(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)及び関連する学術団体(国際固体線量計測機構(ISSDO)、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、プロメチウム線源、中性子用ロングカウンタ、中性子 用方向特性試験用ステージについてその外観や仕様について解説する。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 プロメチウム線源

ベータ線照射装置 Beta Secondary Standard (BSS2)は校正機関で世界的に広く用いられ ている照射装置である(2.3.1(3)も参照)。一般的に⁹⁰Sr/⁹⁰Y、⁸⁵Kr、¹⁴⁷Pmの3種類の線源 が用いられるが、このうち¹⁴⁷Pmは平均エネルギーが 0.065 MeV であり、雰囲気空気の密 度や組織深さの影響をうけやすい。本事業では、ベータ線用線量計の校正において、同じ型 式でかつ別個体の線源を使用した場合の結果を比較することを目的に、BSS2 用の¹⁴⁷Pm線 源を取得した。取得した線源の仕様は、表 2.3.2 に示した通り既存の¹⁴⁷Pm線源の仕様と共 通である。器物番号は既存線源の器物番号が AH-4810 で、本事業で準備した線源が BE-7778 である。外観の写真を図 4.2.1-1 に示す。線源には ISO6980-1:2022^[13]の規定に準じた ビームフラッタニングフィルタが付属する(表 2.3.2 を参照)。



図 4.2.1-1¹⁴⁷ Pm 線源の外観(左)および貯蔵容器(右)

4.2.2 中性子用ロングカウンタ

2 次標準機関と中性子フルエンスの比較を行うことを目的として、中性子用ロングカウン タを作製した。ロングカウンタは、エネルギー応答が平坦なことが特徴であり、通常中性子 フルエンスの測定や加速器中性子源のモニタとして使用される。産総研中性子標準場にお いて、中性子フルエンス測定及び加速器中性子源のモニタとして中性子標準場に据え付け られている。今回、従来産総研で使用しているロングカウンタと比較して、エネルギー応答 の平坦性を向上させる目的で、新たな設計も行った。図 4.2.2-1 に設計図面を示す。円柱形 高密度ポリエチレンとその軸上に円柱型 ³He 比例計数管がセットされる。³He 比例計数管 の有感長とポリエチレンの長さはほぼ同じになっている。ポリエチレンの周囲には、側面か らの室内散乱に起因するバックグランド中性子を遮蔽するために、ホウ素入りポリエチレ ンと高密度ポリエチレンが配置されている。前後には 1 mm 厚のカドミウムシートが挿入 されている。図 4.2.2-1 中の内側のポリエチレン前面の空洞の厚さ、空洞の内径、内側のポ リエチレンの長さ、³He 比例計数管のセッティングの位置を変化させた場合のエネルギー応 答の変化を MCNP6 コード用いたモンテカルロシミュレーションによって調べた。シミュ レーション結果の内、10 eV から 1 MeV の間のエネルギー応答の平坦性を定量的に評価し た。また、5MeV 以上のエネルギーでエネルギー応答は小さくなる傾向にあるが、そのエネ ルギー応答の低下を評価した。その結果、図 4.2.2-1 の設計により最適なエネルギー応答が 得られることが分かった。MCNP6 によって計算された図 4.2.2-1 のエネルギー応答を図 4.2.2-2 に示す。10 eV と 100 eV の間の構造は、入射窓に使用しているカドミウム同位体の 断面積構造に起因する。また、3 MeV 近傍の構造は、減速材に含まれる ¹²C の断面積構造 に起因することが分かっている。図 4.2.2-3 は、作製後のロングカウンタである。図 4.2.2-3 は、検出器を縦に置いた状態であり、実験の際にはこれを横にしてセッティングされる。 実際の検出器は、シミュレーションでは考慮されていない隙間や寸法公差があるため、エネ ルギー応答はシミュレーション結果とは同じにならないと考えられる。今後、線源中性子及 び単色中性子を用いた測定を行うことにより、シミュレーションによって得られたエネル ギー応答曲線の補正曲線を評価しなくてはならない。



図 4.2.2-1 ロングカウンタ設計の図



図 4.2.2-2 ロングカウンタ設計時のシミュレーションによって得られたエネルギー応答曲 線



図 4.2.2-3 作製したロングカウンタ

4.2.3 中性子用方向特性試験用ステージ

中性子個人線量計の角度特性を測定するために、令和 4 年度にγ線標準用に作製した回転 ステージを参考に中性子用ファントム回転ステージを作製した。図 4.2.3-1 は作製した回転 ステージの写真である。中性子校正の特性上、中性子の散乱を少なくするため、構造材の基 本を中性子の散乱が比較的少ないアルミニウムとした。さらに、水ファントムを設置する台 の下を中空の構造にした。回転機構の部分も小さくし、目盛り部分を小さくするなど、材料 そのものの量を可能な限り少なくした。



図 4.2.3-1 作製したファントム回転ステージの写真。左から 0 度、60 度、90 度設定の写 真である。

4.3 新たな実用量に対応した線量計の校正に関する調査

4.3.1 校正・試験場の線量換算係数の評価

4.3.1.1 国家標準機関における β 線校正場の新たな実用量への線量換算係数

β線校正場の換算係数は、現在国家標準として供給されている 0.07 mm 深さの組織吸収 線量率Ď_t(0.07) に乗じることで実用量を得るための換算係数である(表 1.2-1 及び表 1.2-2 を参照)。本事業では ⁹⁰Sr/⁹⁰Y線源について、局所皮膚吸収線量D_{local skin}と水晶体吸収線量 D_{lens}への換算係数を求めた。また ⁸⁵Kr線源、¹⁴⁷Pm線源について、局所皮膚吸収線量D_{local skin} への換算係数を求めた。方向性局所皮膚吸収線量と個人局所皮膚吸収線量、及び方向性水晶 体吸収線量と個人水晶体吸収線量は、それぞれ換算係数としては同じ値であるため、まとめ て局所皮膚吸収線量及び水晶体吸収線量として扱う。

本事業では局所皮膚吸収線量への換算係数を以下の方法で求めた。まず令和 4 年度事業

で用いた Scaling factor 法により、 $D_t(0.07 \text{ mm})$ に対するスラブファントムに関する直入射 条件における局所皮膚吸収線量 $D_{\text{local skin s}}(0^\circ)$ の比すなわち、 $d_{\text{local skin s}}(0^\circ)$ を求める。次に、 $D_{\text{local skin s}}(0^\circ) \geq D_{\text{local skin s}}(\alpha)$ の比やロッドファントムに対する局所皮膚吸収線量 $D_{\text{local skin r}}(\alpha)$ との比をシミュレーション計算によって求める。この手順により $d_{\text{local skin s}}(\alpha)$ や $d_{\text{local skin r}}(\alpha)$ を導出する。

水晶体吸収線量への換算係数は ICRP publication 116 に記述された眼球のモデルに基づいて水晶体に吸収されるエネルギーをシミュレーション計算により求め、同じくシミュレーション計算で求めたD_t(0.07 mm)との比によって求めた。

Scaling factor 法により求めた $d_{\text{local skin s}}(0^{\circ})$ を表 4.3.1.1-1 に示す。 90 Sr/ 90 Y 線源と 85 Kr 線 源については、Behrens らが EGSnrc コードによるシミュレーション計算で得た $d_{\text{local skin s}}(0^{\circ})^{[22]}$ とよく一致した。 147 Pm 線源については、Behrens の値と 2 %程度の差が 見られた。産総研が過去 20 年間で保有した 4 個の型番: PHRB4809 の 147 Pm 線源(器物番 号: MR428、TK 532A、AH-4810、BE-7778)について $d_{\text{local skin s}}(0^{\circ})$ の平均値及び標準偏 差は(0.819 ± 0.003)であった。Behrens は 147 Pm 線源の $d_{\text{local skin s}}(0^{\circ})$ の値を表 4.3.1.1-1 に 示す通り 0.802、その計算の統計に起因する標準不確かさを絶対値として 0.003 と見積もっ ている。本事業で得た値との比を取ると、比の値は 0.979 で、拡張不確かさ(k=2) が 0.009 となるため、不確かさの範囲内では一致していない。よって統計的な不確かさだけでなく導 出方法に起因して生じた差があると考えられる。

スラブファントムに関する局所皮膚吸収線量への換算係数を表 4.3.1.1-2 に、ロッドファ ントムに関する局所皮膚吸収線量への換算係数を表 4.3.1.1-3 に、水晶体吸収線量への換算 係数を表 4.3.1.1-4 に示す。表 4.3.1.1-2 と表 4.3.1.1-3 の¹⁴⁷Pm についての値は、本事業で 取得した線源(BE-7778)に対する値を示す。令和 4 年度に報告しているとおり、皮膚の線量 管理に用いる実用量については、角度依存性も含めて ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 場や ⁸⁵Kr 場では影響は小さ い^[15]。一方で¹⁴⁷Pm 場においては、現行実用量^[15]と比べて約 20~30 %小さな値となる。水 晶体の線量管理に用いる実用量については、0°においては 4 割程度に小さな値となるが、 入射角度の増大による線量換算係数の減少は緩やかである。

28

	Scaling factor に上ろ値	FCSprc ^[22]
	Scaling factor ic 2 3 li	
	(本研究)	
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	1.001	1.002
⁸⁵ Kr	0.981	0.983
147 Pm (BE-7778) ^{a)}	0.819	
¹⁴⁷ Pm (AH-4810) ^{b)}	0.816	0.802
¹⁴⁷ Pm (TK 532A) ^{c)}	0.823	
¹⁴⁷ Pm (MR 423) ^{d)}	0.817	

表 4.3.1.1-1 Scaling factor 法により求めたd local skin s(0°)

a) 2023 年購入

b) 2016 年購入

c) 2010 年購入

d) 2004 年購入

表 4.3.1.1-2 0.07 mm 深さの組織吸収線量をスラブファントムに関する局所皮膚吸収線量に換算するための換算係数 $d_{\text{local skin s}}(\alpha)$ (上段) と $H_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}$ に換算するための換算 係数 $h_p(0.07, \alpha)_{\text{slab}}$ (下段)

	$d_{\rm localskins}(\alpha)$					
			$h_{\rm p}(0.07)$	$(\alpha)_{\rm slab}$		
放射性核種	0 °	15°	30°	45°	60°	75°
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	1.00	1.01	1.05	1.10	1.13	0.82
	1.00	1.01	1.06	1.12	1.14	0.86
⁸⁵ Kr	0.98	0.97	0.93	0.83	0.67	0.45
	1.00	0.99	0.96	0.88	0.72	0.49
¹⁴⁷ Pm	0.82	0.80	0.65	0.51	0.37	-
	1.00	0.96	0.87	0.72	0.53	-

表 4.3.1.1-3 0.07 mm 深さの組織吸収線量をロッドファントムに関する局所皮膚吸収線量に換算するための換算係数 $d_{\text{local skin r}}(\alpha) \geq H_p(0.07, \alpha)_{\text{rod}}$ に換算するための換算係数 $h_p(0.07, \alpha)_{\text{rod}}$ (下段)

	$d_{ m local skin r}(\alpha)$ $h_{ m p}(0.07, \alpha)_{ m rod}$					
放射性核種	0 °	15°	30°	45°	60°	75°
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	1.01	1.02	1.05	1.05	0.99	0.79
	0.99	1.00	1.04	1.10	1.16	0.99
⁸⁵ Kr	0.96	0.94	0.89	0.80	0.66	0.49
	1.00	0.99	0.96	0.88	0.73	0.51
¹⁴⁷ Pm	0.76	0.73	0.68	0.58	0.45	-
	1.00	0.96	0.87	0.72	0.53	

表 4.3.1.1-4 0.07 mm 深さの組織吸収線量を水晶体吸収線量に換算するための換算係数 $d_{\text{lens}}(\alpha) \ge H_{\text{p}}(3)_{\text{cyl}}$ に換算するための換算係数 $h_{\text{p}}(3,\alpha)_{\text{cyl}}$ (下段)

	$d_{\rm lens}(\alpha)$ $h_{\rm p}(3, \alpha)_{\rm cyl}$						
放射性核種	0 °	0° 15° 30° 45° 60° 75°					
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	0.17	0.17 0.18 0.18 0.16 0.12 0.08					
	0.43	0.43 0.41 0.32 0.21 0.11 0.04					

4.3.1.2 二次標準機関における蛍光X線校正場の新たな実用量への線量換算係数

FRS では、ラジエータとして銅、モリブデン及び錫を利用した 8 keV~25 keV の蛍光 X 線場を整備している。これらの蛍光 X 線場の線量換算係数を、シリコンドリフト検出器を 用いて得られた光子エネルギー分布と単色エネルギー光子に対する換算係数に基づいて評 価した。詳細は JAEA 編の J4.2.1.1 に記す。概要は下記の通り。

(1) 銅を利用した蛍光 X 線場(平均光子エネルギー8.3 keV)

・ $H^*(10)$ についての換算係数に比べて H^* についての換算係数は約3倍、 $H_p(10)$ に ついての換算係数に比べて H_p についての換算係数は入射角度によって約5倍(0 度の場合)から100倍以上(75度の場合)の値であり、同一空気カーマに対して新 たな実用量の値は大きくなる。

 $\cdot H_p(3)$ についての換算係数に対する D_{lens} についての換算係数の比は、入射角度に

より約 0.3(0 度の場合)から約 35(90 度の場合)と大きく変化する。

・ $H_p(0.07)$ についての換算係数に比べて $D_{local \, skin}$ についての換算係数は2 %から 1 0 %程度大きな値を示す。

(2) モリブデンを利用した蛍光 X 線場(平均光子エネルギー17.6 keV)

・ $H^*(10)$ についての換算係数に比べて H^* についての換算係数は約 0.2 倍、 $H_p(10)$ についての換算係数に比べて H_p についての換算係数は入射角度によって約 0.2 倍 (0度の場合)から 0.9 倍(75 度の場合)の値であり、同一空気カーマに対して新た な実用量の値は小さくなる。

・H_p(3)についての換算係数に対するD_{lens}についての換算係数の比は、入射角度に より約 0.9 (0 度の場合)から 5.6(90 度の場合)と大きく変化する。

・*H*_p(0.07)についての換算係数に比べて*D*_{local skin}についての換算係数は1%から
 5%程度大きな値を示す。

(3) 錫を利用した蛍光 X 線場(平均光子エネルギー26.2 keV)

・ $H^*(10)$ についての換算係数に比べて H^* についての換算係数は約0.3 倍、 $H_p(10)$ についての換算係数に比べて H_p についての換算係数は入射角度によって約0.3 倍 (0 度から 60 度の場合)から 0.4 倍(75 度の場合)の値であり、同一空気カーマに 対して新たな実用量の値は小さくなる。

・H_p(3)についての換算係数に対するD_{lens}についての換算係数の比は、入射角度 0 度から 60 度では 0.93 から 1.01 の範囲で 1 に近い値を示す。75 度で 1.16、90 度 で 1.95 となり現在の実用量に対して大きい値になる。

・ $H_{\rm p}(0.07)$ についての換算係数に比べて $D_{\rm local\,skin}$ についての換算係数は1%から 9%程度大きな値を示す。

4.3.1.3 ロッドファントムに対する局所皮膚吸収線量に係る線量当量換算係数

日本原子力研究開発機構が FRS 施設の校正場について令和3 年度事業及び令和4 年度 事業で評価した線質(中性子を除く)及び上記4.2 a)2)で評価した蛍光X線場について、 ロッドファントムに対する線量換算係数を評価した。結果は J4.2.1.2 に記す。 4.3.2 方向特性試験方法の妥当性の検討

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 年度事業で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。 これらを用い、水スラブファントム、アクリル製スラブファントム、人体ファントムについ て、エネルギー特性試験や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。

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、アクリルファントム(30 cm×30 cm×15 cm)、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)に以下に示す同型番の線量計(HITACHI
 ALOKA MY DOSE G2)を2つ装着し、空気カーマで1.0 mGy 照射した際の指示値を比較した。

4.3.2.1 X 線方向特性試験

産総研が保有する中硬 X 線照射室に水ファントム及び人体ファントムを設置し(図 4.3.2-1)、線量計の方向特性試験を行った。試験条件は以下の通りである。

・線質:ISO-4037-1 Narrow series; N-100, N-250 (いずれの角度においても照射した空気 カーマは 1.0 mGy)

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

・照射距離: 3.0 m (照射野直径: 40 cm)



図 4.3.2-1 人体模擬ファントム(左)及び水ファントム(右)での照射試験(45 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-100, N-250)における人体ファントムの結果をそれぞれ表 4.3.2-1、表 4.3.2-2 に、水ファントムの結果をそれぞれ表 4.3.2-3、表 4.3.2-4 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。現行の実用量である $H_p(10)$ については、75°までの換算係数しかない為、0°及び 45°のみ、新たな実用量 H_p へ換算した指示値を示す。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 4.3.2-5、表 4.3.2-6、表 4.3.2-7、表 4.3.2-8 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 4.3.2-9 及び図 4.3.2-2 に示す。

本照射試験では空気カーマはどの条件でも 1 mGy 照射しているため、同一線質・同一入 射角度であれば指示値の比は H_p に対する応答の比に等しい。以下に同一線質・同一入射角 度で、同じ空気カーマを照射した場合、指示値の比が H_p に対する応答の比と等しいことを 示す。人体ファントムの試験についての応答 R_h と、水ファントムの試験についての応答 R_W は、それぞれ下記の式(2)、式(3)で表せる。

$$R_{\rm h} = \frac{G_{\rm h}}{K_{\rm air} \cdot h_{\rm p}(\alpha)} \tag{2}$$

$$R_{\rm W} = \frac{G_{\rm W}}{K_{\rm air} \cdot h_{\rm p}(\alpha)} \tag{3}$$

ここで G_h と G_W はそれぞれ人体ファントムの照射試験で得られた指示値と水ファントムの照射試験で得られた指示値、 K_{air} は照射した空気カーマである。式(2)と式(3)より、 R_h と R_W の比は式(4)で与えられ、指示値の比と等しいことが分かる。

$$\frac{R_{\rm h}}{R_{\rm W}} = \left(\frac{G_{\rm h}}{K_{\rm air} \cdot h_{\rm p}(\alpha)}\right) / \left(\frac{G_{\rm W}}{K_{\rm air} \cdot h_{\rm p}(\alpha)}\right) = \frac{G_{\rm h}}{G_{\rm W}}$$
(4)

 γ 線との比較の為に、令和 4 年度事業で得られた ¹³⁷Cs 線源の結果を表 4.3.2-9 及び図 4.3.2-2 に示す^[15]。

				- /
装置番号	照射角度	指示值H _p (10)	指示值H _p (10)(平均)	指示值(H _p 換算)
	Degree	mSv	mSv	mSv
製造番号 A	0	2.251	2.209	1.69
製造番号 B		2.166		
製造番号 A	45	1.713	1.717	1.25
製造番号 B		1.720		
製造番号 A	90	3.229	3.471	-
製造番号 B		3.712		
製造番号 A	135	0.2792	0.3750	-
製造番号 B		0.4707		
製造番号 A	180	0.2783	0.2431	-
製造番号 B		0.2079		

表 4.3.2-1 人体ファントムでの照射試験結果(N-100)

表 4.3.2-2 人体ファントムでの照射試験結果(N-250)

装置番号	照射角度	指示值H _p (10)	指示值H _p (10)(平均)	指示值(H _p 換算)
	degree	mSv	mSv	mSv
製造番号 A	0	1.680	1.649	1.28
製造番号 B		1.618		
製造番号 A	45	1.582	1.563	1.16
製造番号 B		1.544		
製造番号 A	90	1.712	1.739	-
製造番号 B		1.766		
製造番号 A	135	0.5137	0.6216	-
製造番号 B		0.7295		
製造番号 A	180	0.4232	0.3751	-
製造番号 B		0.3270		

装置番号	照射角度	指示值H _p (10)	指示值H _p (10)(平均)	指示值(H _p 換算)
	degree	mSv	mSv	mSv
製造番号 A	0	2.340	2.269	1.79
製造番号 B		2.198		
製造番号 A	45	1.748	1.705	1.27
製造番号 B		1.661		
製造番号 A	90	2.913	2.923	-
製造番号 B		2.933		
製造番号 A	135	0.1889	0.1857	-
製造番号 B		0.1825		
製造番号 A	180	0.2970	0.2980	-
製造番号 B		0.2989		

表 4.3.2-3 水ファントムでの照射試験結果(N-100)

表 4.3.2-4 水ファントムでの照射試験結果(N-250)

装置番号	照射角度	指示值H _p (10)	指示值H _p (10)(平均)	指示值(H _p 換算)
	degree	mSv	mSv	mSv
製造番号 A	0	1.736	1.672	1.35
製造番号 B		1.608		
製造番号 A	45	1.636	1.579	1.21
製造番号 B		1.521		
製造番号 A	90	1.556	1.525	-
製造番号 B		1.493		
製造番号 A	135	0.3413	0.3331	-
製造番号 B		0.3248		
製造番号 A	180	0.4994	0.4906	-
製造番号 B		0.4818		

表 4.3.2-5 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 (N-100)。基準 H_p は空気カーマに $h_p(\alpha)$ を乗じて得た。

照射角度	指示值(平均)	基準H _p	応答
Degree	mSv	mSv	(Sv/Sv)
0	2.209	1.44	1.53
45	1.717	1.26	1.36
90	3.471	0.670	5.18
135	0.3750	-	-
180	0.2431	0.971	0.25

表 4.3.2-6 人体ファントムでの照射試験で得られた H_p に対する応答 (N-250)。基準 H_p は空 気カーマに $h_p(\alpha)$ を乗じて得た。

照射角度	指示值(平均)	基準H _p	応答
Degree	mSv	mSv	(Sv/Sv)
0	1.649	1.15	1.43
45	1.563	1.05	1.49
90	1.739	0.629	2.76
135	0.6216	-	-
180	0.3751	0.854	0.44

表 4.3.2-7 水ファントムでの照射試験で得られた H_p に対する応答 (N-100)。基準 H_p は空気 カーマに $h_p(\alpha)$ を乗じて得た。

照射角度	指示值 (平均)	基準H _p	応答
Degree	mSv	mSv	(Sv/Sv)
0	2.209	1.44	1.58
45	1.717	1.26	1.35
90	3.471	0.670	4.36
135	0.3750	-	-
180	0.2431	0.971	0.31
表 4.3.2-8 水ファントムでの照射試験で得られた H_p に対する応答 (N-250)。基準 H_p は空気 カーマに $h_p(\alpha)$ を乗じて得た。

照射角度	指示值(平均)	基準H _p	応答
Degree	mSv	mSv	(Sv/Sv)
0	1.649	1.15	1.45
45	1.563	1.05	1.50
90	1.739	0.629	2.42
135	0.6216	-	-
180	0.3751	0.854	0.57

表 4.3.2-9 X 線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

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)			
	N-100	N-250	$^{137}Cs^{[15]}$	
0	0.974	0.993	0.973	
45	1.007	0.997	0.944	
90	1.188	1.149	1.034	
135	2.020	1.876	1.466	
180	0.816	0.771	0.753	



図 4.3.2-2 X線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。

N-100, N-250の両線質において、照射角度 0 度と 45 度では比がほぼ 1 であり、人体ファントムと水ファントムの指示値に大きな相違は見られなかった。照射角度 90 度と 135 度では、人体ファントムの指示値は水ファントムの指示値のそれぞれおよそ 1.2 倍、2 倍と大きくなった。これは 90 度で 1.0 倍、135 度で 1.4 倍であった ¹³⁷Cs γ 線の結果^[15]よりも明らかに大きく、さらに N-250 よりも実効エネルギーの低い N-100の方が大きかった。照射角度 180 度では比が 1 を下回り、水ファントムの方が人体ファントムより大きな指示値となった。また、 $H_p(10)$ 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-100, N-250の両線質ともに $H_p(10)$ の指示値より小さくなった。

135 度で水ファントムの方が指示値が小さくなったのは、人体ファントムと比較して水ファントムのほうが、X線が通過するファントムの実効厚が厚いため、減衰が大きくなったことが要因であることが推定できた。また 180 度では、人体ファントムと比較して水ファントムの実効厚が薄く、X線の減衰が小さいため、水ファントムでの指示値が人体ファントムの指示値より大きくなったと考えられる。

エネルギーの違いによる影響としては、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。一方で、 表 4.3.2-1 と表 4.3.2-2 の比較及び表 4.3.2-3 と表 4.3.2-4 の比較から線量計の応答はN-250 よりも N-100 の方が大きい。新旧換算係数及び線量計の一般的な感度特性から考えるとγ 線よりもエネルギーの低いX線のエネルギー領域では線量計の応答は大きく変化する為、 人体ファントムと水ファントムの実効厚の差による指示値の差異がより顕著になる。

新しい実用量になった際に、線量計のX線の方向特性試験が必要となった場合、45 度以下については水ファントムの使用は妥当であるが、90 度以上の角度について、水ファントム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大きく相違する可能性があることに注意する必要がある。また、45 度以下の照射についても、人体ファントムと水ファントムを使用し、現行の実用量と同じ指示値を得るには、同じ照射線量であっても*H*pの指示値は現行の*H*p(10)より小さいためより長い照射時間が必要となる。

4.3.2.2 γ線回転照射試験

令和4年度事業で整備した自動式回転治具を大線量γ線照射室に設置し(図 4.3.2-3)、 ICRU Report 95 における ROT (側面方向 360 度回転照射)に対応する照射試験を行った。試験条件は以下の通りである。

- ・線質:¹³⁷Cs, ⁶⁰Co (いずれの線質においても照射した空気カーマは 1.0 mGy)
- ・照射距離: 4.0 m (¹³⁷Cs), 6.0 m (⁶⁰Co)
- ・照射野直径:91 cm (¹³⁷Cs),68 cm (⁶⁰Co)
- ・回転周期:36秒



図 4.3.2-3 自動式回転治具



図 4.3.2-4 人体模擬ファントムでの照射試験の様子

照射はそれぞれのファントム、線質の条件において1回実施した。人体ファントムの結果 を表 4.3.2-10 に、水ファントムの結果を表 4.3.2-11 に、アクリルファントムの結果を表 4.3.2-12 に示す。表中の「指示値(平均)」は2個の同型番で異なる製造番号の線量計の指 示値の平均をとったものである。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(ROT)から得たH_pに対する応答を表 4.3.2-13 に示す。

	X 1.5.2 10 八件シアマーム C 5 日初日4A ※71 KK火相不				
装置番号	線質	照射時間	指示值H _p (10)	指示值H _p (10)(平均)	
		sec.	mSv	mSv	
製造番号 A	¹³⁷ Cs	185.00	0.8641	0.8673	
製造番号 B			0.8705		
製造番号 A	⁶⁰ Co	310.58	0.6984	0.7092	
製造番号 B			0.7199		

表 4.3.2-10 人体ファントムでの自動回転照射試験結果

X 1.5.2 II 小/// C C 自動回転添加軟硬相本					
装置番号	線質	照射時間	指示值H _p (10)	指示值H _p (10)(平均)	
		sec.	mSv	mSv	
製造番号 A	¹³⁷ Cs	184.87	0.7992	0.8063	
製造番号 B			0.8133		
製造番号 A	⁶⁰ Co	310.66	0.6463	0.6574	
製造番号 B			0.6684		

表 4.3.2-11 水ファントムでの自動回転照射試験結果

表 4.3.2-12 アクリルファントムでの自動回転照射試験結果

装置番号	線質	照射時間	指示值H _p (10)	指示值H _p (10)(平均)
		sec.	mSv	mSv
製造番号 A	¹³⁷ Cs	185.73	0.7840	0.7929
製造番号 B			0.8013	
製造番号 A	⁶⁰ Co	319.28	0.6352	0.6473
製造番号 B			0.6594	

表 4.3.2-13 自動回転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 (ROT)を乗じて得た。

ファントム	線質	指示值(平均)	基準H _p	応答
		mSv	mSv	(Sv/Sv)
人体	¹³⁷ Cs	0.8673	0.81	1.071
人体	⁶⁰ Co	0.7092	0.84	0.875
水	¹³⁷ Cs	0.8063	0.81	0.995
水	⁶⁰ Co	0.6574	0.84	0.783
アクリル	¹³⁷ Cs	0.7875	0.81	0.972
アクリル	⁶⁰ Co	0.6473	0.84	0.771

表 4.3.2-14 自動回転照射試験におけるファントム毎の線量計の指示値の比(1)

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)
¹³⁷ Cs	1.076
⁶⁰ Co	1.079

表 4.3.2-15 自動回転照射試験におけるファントム毎の線量計の指示値の比(2)

⁶⁰ Co	1.096
¹³⁷ Cs	1.094
	(人体ファントム/アクリルファントム)
線質	それぞれのファントムでの指示値の比

表 4.3.2-10、表 4.3.2-11、表 4.3.2-12 の結果から¹³⁷Cs 線源と⁶⁰Co 線源の両線源におい て、人体ファントムを使用した際の線量計の指示値が最も大きくなった。これは、人体ファ ントムの方が全角度における平均的な実効厚が水ファントムやアクリルファントムよりも 薄いため、γ線の減衰の影響が小さくなったことによるものと推定できる。また、表 4.3.2-14 及び表 4.3.2-15 の人体ファントムの水ファントムとアクリルファントムに対する指示値 の比から、¹³⁷Cs 線源と⁶⁰Co 線源の結果はほぼ同じであり、エネルギーの違いによる影響は 見られなかった。一方で、新実用量への移行により、線量計のγ線回転照射試験が必要にな った場合は、人体ファントムを用いた場合の結果と水ファントム又はアクリルファントム を用いた場合の結果に有意な差が生じる可能性があることに注意する必要がある。 4.4 線量計の特性評価に関する調査

4.4.1 国家標準機関における線量計の特性調査

4.4.1.1 β線場における電離箱式線量計の特性調査

電離箱式サーベイメータ、8mL 薄膜電離箱、60mL 薄膜電離箱の3 種類の電離箱式線量 計について応答の特性を調査した。8mL 薄膜電離箱は国際比較で用いられているタイプの 電離箱と同様の設計で製作した電離箱式検出器である。電離箱検出器の測定条件を表 4.4.1.1-1 に示す。

測定によって得られた、電離箱式サーベイメータのエネルギー特性と方向特性を図 4.4.1.1-1~図 4.4.1.1-3 に、8mL 薄膜電離箱のエネルギー特性と方向特性を図 4.4.1.1-4~図 4.4.1.1-5 に、60mL 薄膜電離箱のエネルギー特性を図 4.4.1.1-6 に示す。

図 4.4.1.1-1、図 4.4.1.1-4、図 4.4.1.1-6 より、0 度入射に関しては 90 Sr/ 90 Y線源および 85 Kr 線源による β 線場の応答は、現行の実用量に対する応答も新実用量に対する応答もほ ぼ同一である。 147 Pm線源に関する応答は、0度入射に関しては新たな実用量に対しては現 行より一律 22 %大きい応答になる。これは本事業で得た 147 Pm線源に対する 0 度入射条 件の $d_{10cal skin s}(\alpha)$ の値が 0.82(Gy/Gy)であり、H'(0.07)に対する換算係数 1 (Sv/Gy)との比 が 1.22 (Sv/Gy) であることに対応している。通常 β 線用線量計は 90 Sr/ 90 Y に対して校正さ れていることが多いため、 90 Sr/ 90 Y で校正した β 線用線量計により 147 Pm などの低エネル ギー β 線を測定する場合、過大応答となる点に注意する必要がある。

図 4.4.1.1-2、図 4.4.1.1-3、図 4.4.1.1-5 より、方向特性については現行の実用量に対す る応答と新たな実用量に対する応答の差は、⁸⁵Kr 線源に対する入射角 45 度の条件で最大と なる。例えば今回測定した電離箱式サーベイメータの場合はH'(0.07)に対する相対応答が 0.959 に対してD'_{local skin}に対する相対応答は 0.998、8mL 薄膜電離箱の場合はH'(0.07)に対 する相対応答が 0.889 に対してD'_{local skin}に対する相対応答は 0.924 であり、約 4 %の差と なる。

以上より、現在使用されている線量計を新たな実用量の測定に使用すると、方向特性の傾 向はおおむね変わらないものの、低エネルギーベータ線に対して現行でも過大応答する機 種は、新たな実用量では過大の程度が大きくなる可能性があると言える。

今回対象とした電離箱式サーベイメータに対して¹⁴⁷Pmの線源による差は、45度入射の 際が一番大きく4%程度であることが分かった。試験を実施する際の不確かさの見積もり の基礎データとして有用であると考えられる。

43

β線用線量計	8mL 薄膜電離箱	60 mL 薄膜電離箱
入射窓	アルミニウム蒸着 PET	アルミニウム蒸着 PET
付加フィルタ	50 µm PET	50 µm PET
印加電圧	300 V	400 V
電流計	振動容量型電位計	振動容量型電位計
	(MMA II-17E,	(MMA II-17E,
	川口電機製作所)	川口電機製作所)

表 4.4.1.1-1 電離箱検出器の測定条件



図 4.4.1.1-1 電離箱式サーベイメータのβ線に対するエネルギー特性。〇:*H*'(0.07)に対す る応答、〇:*D*'_{local skin} に対する応答



図 4.4.1.1-2 電離箱式サーベイメータの β線に対する方向特性。○:⁹⁰Sr/⁹⁰Y 場における H'(0.07)に対する応答、○:⁹⁰Sr/⁹⁰Y 場におけるD'_{local skin}に対する応答、△:⁸⁵Kr 場にお けるH'(0.07)に対する応答、△:⁸⁵Kr 場におけるD'_{local skin}に対する応答、◇:¹⁴⁷Pm 場に おけるH'(0.07)に対する応答、◇:¹⁴⁷Pm 場におけるD'_{local skin}に対する応答。¹⁴⁷Pm の結果 は器物番号 AH-4810 の線源による。



図 4.4.1.1-3 電離箱式サーベイメータのβ線に対する方向特性。◇:¹⁴⁷Pm 場(器物番号 AH-4810)におけるH'(0.07)に対する応答、◇:¹⁴⁷Pm 場(器物番号 AH-4810)における D'_{local skin}に対する応答。◆:¹⁴⁷Pm 場(器物番号 BE-7778)におけるH'(0.07)に対する応答、◆:¹⁴⁷Pm 場(器物番号 BE-7778)におけるD'_{local skin}に対する応答。



図 4.4.1.1-4 8mL 薄膜電離箱の β線に対するエネルギー特性。○:*H*'(0.07)に対する応答、 ○:*D*'_{local skin} に対する応答。



図 4.4.1.1-5 8mL 薄膜電離箱のβ線に対する方向特性。○:⁹⁰Sr/⁹⁰Y 場におけるH'(0.07)に 対する応答、○:⁹⁰Sr/⁹⁰Y 場におけるD'_{local skin}に対する応答、△:⁸⁵Kr 場における H'(0.07)に対する応答、△:⁸⁵Kr 場におけるD'_{local skin}に対する応答、◇:¹⁴⁷Pm 場におけ るH'(0.07)に対する応答、◇:⁴⁷Pm 場におけるD'_{local skin}に対する応答。¹⁴⁷Pm の結果は器 物番号 AH-4810 の線源による。



図 4.4.1.1-6 60mL 薄膜電離箱のβ線に対するエネルギー特性。○:*H*'(0.07)に対する応答、○:*D*'_{local skin} に対する応答。

4.4.1.2 中性子場における線量計の特性調査

国内事業者で多く利用されている P 社と Q 社の中性子サーベイメータ、及び R 社の電子 式中性子個人線量計について、5.0 MeV 及び 14.8 MeV 単色中性子に対する特性評価試験を 行った。また、JAEA との比較のために令和 4 年度実施していない S 社製中性子サーベイメ ータについて、²⁵²Cf 中性子線源及び ²⁴¹Am-Be 中性子線源に対する特性評価試験を行った。 値の比較は次年度以降に実施する。新しい換算係数に基づく照射線量と応答は、それぞれ 「照射線量(新)」、「応答(新)」と記載している。また、P 社と Q 社のサーベイメータの 特性評価については、パルスカウンタ出力の値に対して行われた。R 社の個人線量計の本年 度特性評価では、1 回照射に対する結果である。したがって、読み値に不確かさはつけられ ておらず、照射線量のみに不確かさを評価している。S 社のサーベイメータについては、指 示値をカメラで読み取り、10 回の繰り返し測定から結果を求めている。記載する照射線量 率と出力は 10 回読み取りの平均値である。

表 4.4.1.2-1~表 4.4.1.2-4 に P 社、Q 社の中性子サーベイメータ、R 社の中性子個人線量 計の 5 MeV 及び 14.8 MeV、及び S 社の中性子サーベイメータの ²⁵²Cf 及び ²⁴¹Am-Be に対 する結果を示す。さらに、図 4.4.1.2-1~図 4.4.1.2-3 に P 社、Q 社の中性子サーベイメー タ、R 社の中性子個人線量計の結果を示す。令和 4 年度の結果^[15]を加えている。²⁴¹Am-Be と ²⁵²Cf のデータは、フルエンス平均エネルギーである 4.2 MeV と 2.1 MeV にそれぞれプ ロットされている。中性子サーベイメータについて、²⁴¹Am-Be 線源と 5 MeV の結果は、新 しい実用量を用いた場合の応答が、現行の実用量を用いた場合の応答より小さくなる一方 で、565 keV、²⁵²Cf 線源、14.8 MeV の結果では、新しい実用量を用いた場合の応答が、現 行の実用量を用いた場合の応答より大きくなる。565 keV の応答は、新しい実用量と現行の 実用量を用いた場合の乖離が大きいことが分かる。中性子個人線量計については、²⁴¹Am-Be 線源と 5 MeV の結果は、新しい実用量を用いた場合の応答が、現行の実用量を用いた場合 の応答より小さくなる一方で、²⁵²Cf 線源、14.8 MeV の結果では、新しい実用量を用いた場 合の応答が、現行の実用量を用いた場合の応答より大きくなる。565 keV に対しては、指示 値が出ないほど応答が小さいため、中性子サーベイメータのような大きな乖離は見えない。 放射線管理に使用している事業者にとっては、これまで通り安全側に放射線管理ができて いるかどうかの調査が個別に必要になるであろう。

表 4.4.1.2-1 P 社のサーベイメータの結果

	P 社製中性子サーベイメータ						
	応答(新) 応答						
如司	$(1/(\mu Sv))$	$(1/(\mu Sv))$	照射線量(新)	照射線量			
称初	(下段:相対拡	(下段:相対拡	(µSv)	(μSv)			
	張不確かさ)	張不確かさ)					
E OM aV	3.55×10^{3}	4.32×10^{3}	66.4	E 4 7			
5.0MeV	(7.0 %)	(7.0 %)	00.4	34.7			
14.8 MeV	1.888×10^{3}	1.732×10^{3}	167.2	192.4			
	(4.5 %)	(4.5 %)	107.3	182.4			

表 4.4.1.2-2 Q 社のサーベイメータの結果

Q社製中性子サーベイメータ						
	応答(新)	応答				
始初	$(1/(\mu Sv))$	$(1/(\mu Sv))$	照射線量(新)	照射線量		
TOK US	(下段:相対拡	下段:相対拡 (下段:相対拡 (µSv)		(μSv)		
	張不確かさ)	張不確かさ)				
5 OMeV	8.82×10^{3}	$1.071 imes 10^4$	08.0	Q1 /		
5.0Mev	(7.0 %)	(7.0 %)	90.9	01.4		
14.8 MeV	4.46×10^{3}	4.09×10^{3}	070.0	206.8		
	(4.5 %)	(4.5 %)	212.3	290.0		

	R社製中性子個人線量計				
線源	応答(新) No1(上段) No2(下段)	応答 No1(上段) No2(下段)	照射線量 (新) (mSv) (下段: 相対拡張不 確かさ)	照射線量 (mSv) (下段: 相対拡張不 確かさ)	出力 (mSv) No1(上段) No2(下段)
$5.0 M_{\odot} V$	3.4	4.0	1.326	1.132	4.5
5.0 WeV	3.3	3.9	(7.0%)	(7.0%)	4.4
14.9 MoV	6.06	5.32	4.79	5.46	29.0
14.0 Mev	5.93	5.21	(4.5%)	(4.5%)	28.4

表 4.4.1.2-3 R 社の中性子個人線量計の結果

表 4.4.1.2-4 S 社の中性子サーベイメータの結果

	S 社製中性子サーベイメータ				
線源	応答(新) (下段:相対 拡張不確か さ)	応答 (下段:相対 拡張不確か さ)	平均照射線 量率(新) (μSv/h)	平均照射線 量率 (μSv/h)	平均出力 (μSv/h)
²⁵² Cf	1.10 (21%)	1.00 (21%)	32.8	36.1	36.1
²⁴¹ Am-Be	0.86 (11%)	0.94 (11%)	60.8	55.8	52.2



図 4.4.1.2-1 P 社中性子サーベイメータの結果。令和 4 年度の結果^[15]を追加して示す。



図 4.4.1.2-2 Q 社中性子サーベイメータの結果。令和 4 年度の結果[15]を追加して示す。



図 4.4.1.2-3 R 社中性子個人線量計の結果。令和 4 年度の結果[15]を追加して示す。

4.4.2 JAEA における線量計の特性調査

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 J4.3.2 ①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。

・光子のH*およびD'lensに対するエネルギー特性は、低エネルギーで過大応答が見られた。

・光子のD'lensに対する方向特性は良好である。

・光子のD'_{local skin}に対するエネルギー特性および方向特性は、現行実用量と大きく変化せず、良好である。

(b) 光子用エリアモニタ(D社可搬型γ線エリアモニタ)

JAEA 編 J4.3.2 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。

・光子の H* に対するエネルギー特性は、機器の仕様上の測定可能範囲である 50 keV 以上 で良好である。 (c) 光子用受動形環境線量計(E 社製受動形環境線量計)

JAEA 編 J4.3.2 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。新たな 実用量H*に対して低エネルギーの 33 keV で 2 倍程度の応答を示すが、60 keV 以上ではエ ネルギー特性は良好で現行量との差異も小さい。

(d) 光子・β 線用受動形個人線量計(F 社製、G 社製、H 社製受動形個人線量計(体幹部 用))

JAEA 編 J4.3.2 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。

・光子の H_p に対するエネルギー特性について、すべての線量計に共通して、50 keV 以下 で過大応答を示した。

・光子の $D_{p \text{ local skin}}$ に対するエネルギー特性については、8 keV を除けばいずれの線量計 も良好であった。

・光子に対する H_p と $D_{p \text{ local skin}}$ の方向特性は、現在の実用量に対する方向特性からの変化 は少ない。

・ β 線に対する $D_{p \text{ local skin}}$ の方向特性は、現在の実用量に対する方向特性と同様である。

(e) 光子 · β 線用受動形個人線量計(I 社製受動形線量計(水晶体用))

JAEA 編 J4.3.2 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。

・光子に対するエネルギー特性は 26.2 keV 以上で良好であるが、8 keV 以下では過大応答 を示す。

・方向特性は良好である。

(f) 光子・β線用受動形個人線量計(J 社製、K 社製、L 社製受動形線量計(末端部用))

JAEA 編 J4.3.2 ⑥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。

・光子に対するエネルギー特性および方向特性は、現行の実用量に対するエネルギー特性と
 同様であり、おおまかには良好である。

・β線に対する方向特性も、現行の実用量に対するエネルギー特性と同様である。

(g) 中性子サーベイメータ(B 社製中性子サーベイメータ)

JAEA 編 J4.3.2 ⑦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。

・²⁴¹Am-Be、²⁵²Cf や黒鉛減速場など数 MeV 付近にエネルギー分布をもつ中性子場におい

ては良好な応答を示す。

・熱中性子場や、1 MeV 以下の熱外中性子が支配的な場においては、実用量変更により過 大応答となる傾向がある。

(h) 中性子サーベイメータ (C 社製中性子サーベイメータ)

JAEA 編 J4.3.2 ⑦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。

・数 MeV 付近にエネルギー分布をもつ中性子場においては良好な応答を示す。

・熱中性子場に対しては3倍以上の過大応答となった。

(i) 受動形中性子個人線量計(M 社製、N 社製受動形中性子個人線量計(体幹部用))

JAEA 編 J4.3.2 ⑧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。

・M 社製個人線量計のH_pに対するエネルギー特性は、MeV 領域にエネルギー分布をもつ中 性子場においては良好な応答を示した。一方、1 MeV 以下の領域では、実用量の変更によ り過大応答する。

・N 社製個人線量計のH_pに対するエネルギー特性は、²⁵²Cf 以外のいずれにおいても、過小 または過大な応答を示す。

4.4.3 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。比較に用いた線量計は光子用の体幹部用受動形個人線量計、光子用の水晶体 用受動形個人線量計、中性子用サーベイメータ、中性子用の体幹部用受動形個人線量をそれ ぞれ1型式ずつである。光子用の体幹部用受動形個人線量計については、N-100 X 線と¹³⁷Cs γ線の照射場で、入射角度 60°の条件で試験を実施した。光子用の水晶体用受動形個人線 量計については N-80 X 線と¹³⁷Cs γ線の照射場で、入射角度 0°の条件で試験を実施した。 中性子用サーベイメータ、中性子用の体幹部用受動形個人線量については、いずれも²⁴¹Am-Be 線源からの中性子場について入射角度 0°の条件で試験を実施した。結果から線量計設 置時の角度の不確かさを考慮する必要性が示唆された。詳細は JAEA 編 「J4.3.4 トレーサ ビリティ確保に関する調査」に記す。

4.5 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 原子力関連設備・加速器設備の光子場に関する調査および解析 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4つの特徴が異なる放射線作業場を選定し、光子エネルギ ー分布を取得するとともに、令和4年度に示された手法を利用し、作業場における市販線 量計のエネルギー応答を評価し、実用量の定義が変わる場合の課題について調査した。詳細 は JAEA 編 「J4.4 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査」に記す。 以下に概要を記す。

(1) 放射線作業場における光子エネルギー分布の取得

本年度光子エネルギー分布を取得した放射線作業場は、再処理施設作業場、研究用原子炉施設炉室作業場、中性子ビーム利用施設作業場、大型加速器施設作業場から選択した。再処理施設作業場については坂下らの報告^[23]による光子エネルギー分布を取得した。研究用原子炉施設炉室作業場と中性子ビーム利用施設作業場については、3 MeV 以上の光子が存在することが想定されることから、2" $\phi \times 2$ "NaI(Tl)検出器を用いた測定により光子エネルギー分布を取得した。大型加速器施設作業場については線量率が高いこと想定されることから、1 cm×1 cm LaBr₃(Ce)検出器を用いた測定により光子エネルギー分布を取得した。

(2)放射線作業場における空気カーマを実用量に換算する換算係数

得られた光子エネルギー分布 (エネルギー微分光子フルエンス, $\frac{d\phi}{d\epsilon}$) と単色光子に対する 空気カーマを実用量に換算する換算係数から(1)で取得した放射線作業場の空気カーマを実 用量に換算する換算係数を導出した。ここで実用量としては、現行の実用量である $H^*(10)$ 、 $H'(3,0^\circ)$ 、 $H'(0.07,0^\circ)$ 、 $H_p(10,0^\circ)$ 、 $H_p(3,0^\circ)$ 、 $H_p(0.07,0^\circ)$ と、新たな実用量である H^* 、 $D'_{lens}(0^\circ)$ 、 $D'_{local skin}(0^\circ)$ 、 $H_p(0^\circ)$ 、 $D_{p lens}(0^\circ)$ 、 $D_{p local skin}(0^\circ)$ 、 $H_p(ROT)$ 、 $D_{p lens}(ROT)$ を対象にした。 得られた換算係数から、それぞれの実用量が対応する防護量ごとに現行の実用量に対する 換算係数と新たな実用量に対する換算係数との比を求めた。求めた換算係数の比は $H^*/$ $H^*(10)$ 、 $D'_{lens}(0^\circ)/H'(3,0^\circ)$ 、 $D'_{local skin}(0^\circ)/H'(0.07,0^\circ)$ 、 $H_p(0^\circ)/H_p(10,0^\circ)$ 、 $D_{p lens}(0^\circ)/H_p(0.07,0^\circ)$ である。

再処理施設作業場における現行の実用量に対する換算係数と新たな実用量に対する換算 係数との比は、光子エネルギー分布を取得した6つの工程間においてほぼ変わらず、多くの 線量計の校正線質である¹³⁷Cs校正場あるいは N-80 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。研究用原子炉施設炉室作 業場、中性子ビーム利用施設作業場、大型加速器施設作業場においても、現行の実用量に対 する換算係数と新たな実用量に対する換算係数との比は、光子エネルギー分布を取得した すべての工程でほぼ変わらず、¹³⁷Cs校正場あるいは N-80 校正場における比と同程度であ った。 (3)放射線作業場における線量計のエネルギー応答

令和 4 年度事業の報告書に記載した、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を用いて、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。

原子力発電所の放射線作業場においては、評価した市販線量計についてH*及びH_p に対し て 20%程度の過大応答が見られたが、他の実用量に対する応答は 0.9~1.1 であり、良好で ある。核燃料施設においては、²⁴¹Am の寄与が大きい場ではH_pに対して 20%以上過大応答 となるケースがあるが、それ以外は概ね良好な応答であった。研究・教育施設においては、 エネルギー範囲が多岐にわたり、X 線施設においては、H*に対する応答が約 1.5 と 50%程 度の過大応答を示す場合もあった。研究炉施設や加速器施設においては、H*及びH_pに対す る過大応答は最大で 30%程度であった。以上より光子に関しては放射線作業場のエネルギ ー分布によりH*及びH_pに対して過大応答する場合があることが分かった。

4.5.2 中性子場に関する調査

(1)中性子スペクトル測定事例の調査

中性子が存在する作業環境場に関する中性子計測が過去に行われた事例の調査を行った。 この調査は、産業技術総合研究所が研究代表を務めた平成 23 年度文部科学省 国家基幹研 究開発推進事業原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ「白色中性子源を用いた中性子線 量計の 革新的校正法に関する研究」^[24]からの引用である。日本原燃株式会社の青森県六ケ 所村核燃料再処理工場内の作業環境場における中性子計測事例を報告する。セキュリティ のため、場所等の詳細を記載することはできない。この場所では、試運転時に付着したプル トニウムから核分裂反応により生成されている中性子があり、かつ施設管理及びメンテナ ンスのために作業員が立ち入る場所である。中性子測定には、球形ポリエチレン減速材と CENTRONIC 製球形 ³He 比例計数管によって構成されるボナー球スペクトロメータ(BSS) を用いて、中性子スペクトルと中性子フルエンスの測定が行われた。BSS 実験では、直径 3 インチ、4インチ、5インチ、6インチ、8インチ、9.5インチのポリエチレン減速材及び減 速材無の測定が行われた。 BSS の応答関数は、 産総研中性子フルエンス標準における校正結 果と MCNPX コードによるシミュレーション結果によって作成された。図 4.5.1-1 に BSS の写真及び BSS の応答関数を示す。中性子スペクトルは、MAXED コードを用いたアンフ ォールディングによって導出された。測定場所は、再処理工程の内、精製工程でプルトニウ ム濃縮液を扱うドラフト横の A 地点、脱硝・混合過程でウランとプルトニウムの混合を行 っているドラフト横の B 地点、脱硝・混合過程で脱硝を行っているドラフト横の C 地点の 3か所であった。A 地点、B 地点、C 地点の中性子スペクトラルフルエンスの測定結果を図 4.5.1-2 に示す。いずれも核分裂スペクトルと構造材による散乱によって生成される熱・熱 外中性子成分によって構成されている。しかし、ドラフト内の構造や測定地点と周囲の壁等

の構造の違いから得られる中性子スペクトルには違いが見られる。このような特有の中性 子スペクトル環境下では、中性子サーベイメータもしくは中性子個人線量計によって得ら れる指示値と、測定によって得られた中性子スペクトルから換算される中性子周辺線量当 量もしくは中性子個人線量当量との比を、測定地点固有の校正定数として用いることもあ る。新実用量を適用する際には、その校正定数も再評価する必要がある。また、不確かさ評 価、トレーサビリティの考え方は今後整理する必要がある。

(2)中性子の存在する作業環境場の可能性

中性子の存在する作業環境場の可能性について、以下に列挙する。

・使用済み燃料を扱う場所:核分裂生成物が分離されていない状態では、γ線の線量は、中 性子の線量と比較してかなり大きいと考えられる。γ線は、主に核分裂生成物から生成され る。このような場では、使用する線量計を含む測定装置は、事前にγ線照射によって、中性 子起因として誤計数されることによる中性子線量への影響を評価できていることが望まし い。

・核燃料及び使用済み燃料輸送現場:核燃料、及び使用済み燃料は輸送用キャスクに格納さ れ輸送される。認可されたキャスクによって線量は大幅に低減されるが、輸送作業員はキャ スクから漏洩する線量にさらされる。核燃料、及び使用済み燃料からは、核分裂中性子と中 性子に起因する 2 次γ線が生成される。使用済み燃料からは、さらに核分裂生成物からの γ線がある。したがって、使用済み核燃料輸送現場では、全線量のうち、γ線成分の割合が 大きいと考えられる。

・研究用原子炉作業場:γ線は、放射化された構造材からの成分、ビームポートからの漏洩 成分、中性子に起因する2次γ線が考えられる。遮蔽の設計により、γ線の線量が中性子と 比較して小さい場所、大きい場所の両方が考えられる。

・高エネルギー加速器施設:研究用の高エネルギー加速器施設や陽子線治療などの医療用の 高エネルギー加速器施設では、2 次的に 20 MeV 以上の高エネルギー中性子が生成される。 高エネルギー中性子は透過性が高いため、これらの施設では、作業員が立ち入る場所で中性 子が観測できる場所がたびたびある。また、中性子によって施設構造材が放射化するため加 速器停止時にも γ線線量が大きな作業場は多い。大型電子ライナック施設の作業環境場で は、光核反応によって生成される γ線のため、中性子と比較して γ線の線量は大きい可能性 が高い。大型加速器施設では、まだ放射化の原因となる中性子のスペクトルが測定されてい るない箇所も多く存在するので、今後のデータの蓄積が重要である。また、20 MeV 以上の 高エネルギー中性子を評価できる個人線量計および中性子サーベイメータの開発及び普及 は不十分な状況である。





図 4.5.1-1 BSS の写真及び BSS の応答関数^[24]



図 4.5.1-2 A 地点、B 地点、C 地点で得られた中性子スペクトルとフルエンス^[24]

4.6 新たな実用量への対応に係る課題の調査

2023 年 12 月 14 日 (木) に令和 5 年度 ICRU Report95 に関するワークショップを開催 した。開催形式は対面およびオンラインでのハイブリッド形式で行った。

4.6.1 開催の概要

日時: 2023年12月14日(木) 13:00~15:30

参加者:現地参加約20名 オンライン参加約80名

現地会場:TKP 東京駅カンファレンスセンター カンファレンスルーム 2A

オンライン会場: Microsoft Teams

参加者の所属の内訳:研究所 25 名、大学 22 名、校正機関 18 名、メーカー 10 名、

電力会社 9名、その他(病院、官公庁、照射サービス会社、測定サービス会社) 議事次第:

1. 趣旨説明

2. ICRU Report95 の概要(産総研 黒澤忠弘)

3. 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)事業の成果(新たな実用量の導入に関する動向と課題及びその対応策)

JAEA における成果(JAEA 吉富 寛)

(2) 産総研における成果 (産総研 加藤昌弘)

4. 新しい実用量を受け入れる場合の医療現場の問題点(長崎大 横山須美 教授)

5. 総合議論(海外の動向の紹介、事前質問への回答、その他)

4.6.2 講演の概要

産総研黒澤による「ICRU Report95 の概要」では、従来の実用量からの変更点の説明・実 用量の定義変更に関する課題の説明、および欧州を中心に新たな実用量に関連する論文が 30 報以上発行されていることが紹介された。

「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)事業の成果(新たな実用量の導入に関する動向と課題及びその対応策)」では JAEA および産総研から、それぞれが令和4年度までにおこなった研究の紹介があった。

まず JAEA 安全研究センター リスク評価・防災研究グループの吉富より JAEA の実施内 容について発表があった。冒頭に FRS の概要について紹介があった。JAEA における校正 方法は、国家標準機関(産総研)での校正による標準電離箱により求めた FRS の校正場に おける物理量(フルエンス、空気カーマ等)に校正場固有の換算係数を乗じて実用量を導出 するという方法であるため、その換算係数の値が実用量の定義変更により変わることの影 響は大きい。FRS の校正場について現行の実用量と新たな実用量に対する線量換算係数を 導出した結果の紹介があった。光子場については、*H*pに対する線量換算係数は*H*p(10)に対 する線量換算係数に比べ、特に低エネルギー領域で小さくなる。令和 4 年度までの事業で はこの線量換算係数を評価した場において市販の線量計の特性評価を実施している。線量 計のエネルギー特性については光子においては低エネルギー側での変化が大きいこと、β 線のD_{lens}に対する線量計応答は大きく変化することが紹介された。中性子については、新た な実用量に対する換算係数を用いる場合は低エネルギー側で過大応答になることが示され た。さらに、作業環境における放射線のエネルギー分布を調査したこと、国内で実施した調 査結果として新たな実用量に関連する研究はいまだ盛んではないが、注目は大きいことが 報告された。

続いて本事業の研究代表者であり、産総研 計量標準総合センター 分析計測標準研究部 門 放射線標準研究グループの加藤から産総研の実施内容について発表があった。産総研の 放射線照射施設として、X線・ γ 線・ β 線の設備の紹介があった。続いて γ 線,X線, β 線の 新たな実用量の換算係数について現行の実用量の換算係数との違いが示された。 β 線源に ついては文献値との比較を実施した結果の紹介があった。令和 4 年度の事業では線量計の 方向特性試験方法の検討として、人体ファントムと水ファントムの線量計応答の差の調査 が行われた。後方照射 (90°以上)に関する照射試験では、ファントムによる差が大きいと いう結果が得られている。実際の作業環境としては、例えばインターベンショナルラジオロ ジー (IVR)において、術者は側面照射(角度照射)となる為、今後検討が必要となる。加 藤に引き続き産総研 計量標準総合センター 分析計測標準研究部門 放射能中性子標準研 究グループ松本からは中性子に関する結果の説明があった。MCNP-ANT により計算され た線源のスペクトルから新しい実用量への換算係数を導出したという内容の報告があった。

長崎大学原爆後障害医療研究所 横山須美 教授からは、新しい実用量を受け入れる場合の医療現場の問題点というタイトルで講演があった。医療分野の診断装置やマンモグラフィーからの X 線のエネルギーは 20keV~120keV 程度で、*H*_p(10)と*H*_pに対する換算係数が大きく変化するエネルギー領域に分布している。今後の放射線治療技術の発展に伴い放射線のエネルギーは多様化していくことが予想される。治療や診断の種類によりどのような問題が考えられるかという内容で以下のような話題があった。IVR などでは、術者や介助者

(医療従事者)の被ばくが問題となる。ヨウ素を用いた小線源治療では患者以外の被ばくが あるが問題となるレベルではない。放射線治療では医療従事者の被ばくはほとんどない。診 断用 X 線のエネルギー分布は X-scatter STK コードによる計算結果があり、このデータを もとに新実用量導入の影響を考察することが出来る。現在の実用量(*H*_p(10))で 20 mSv -50 mSv 被ばくするのは 0.1%以下である。水晶体に関しては 0.4%程度である。実用量の変 更で、線量限度付近及び線量限度を超える医療従事者は減る方向となるであろう。

また質疑応答として以下の内容があった。

・[質問]医療従事者への周知のチャンネルは? → [回答]学会等での周知を予定。

・[質問]水晶体に関しては不均等被ばくがより問題となるのでは? → [回答]各部位で別々 に測定することも視野に入れて検討する。 4.6.3 総合議論

総合討論での内容を以下に示す。新たな実用量が導入される時期やどういう対応が必要 なのかという観点で議論が行われた。関係する産業規格などが新たな実用量に対応するた め改訂される際などに国内事業者がスムーズに移行できるような準備が重要であると考え られる。

【アンケートの回答に関する討論】

・研究機関からの参加者より「取り上げてほしい作業環境について、γ線・中性子の混在場 も多く存在するが、それについてはどう考えているか」という意見があり、JAEA 吉富より、 「JIS で混在場の規格がある。線量計の要求事項も確認すべきである」と回答があった。

【自由意見】

・[質問(要望)]研究機関からの参加者:輸出の障壁にならないように JIS 規格を早めに整 理すべき

・[回答]産総研 黒澤:いち早く取り入れられるよう準備を進めていく予定で、規格で引用 できるように論文等でまとめておくことが重要。

・[質問]メーカーからの参加者:新実用量への対応に関して、日本がリードしていくべき か? ステークホルダー (メーカーなど) も巻きこんでほしい。

・[回答]産総研 黒澤:先ずは国際的に(EUなどに)遅れないように進めていくことが重 要

・[質問]校正事業者からの参加者:(二次)校正事業者に必要な対応は何か?

[回答 1]産総研_加藤:換算係数の評価、不確かさの評価を準備いただきたい。

[回答 2]産総研_松本:中性子試験は換算係数が小さくなると、規定の累積線量を得るための時間が長くなるため、注意が必要。

・[質問]校正事業者からの参加者:新実用量がGyで表されて、現行の線量限度はSvのま まだが、法令がGyに変更されるのか、それとも事業者がSvに換算するところまでやるの か。また、線質毎に線量を評価することが必要になるのか。

[回答]産総研_黒澤:ICRPでも議論中であり、新しい情報があれば共有していく予定。

・[質問] 長崎大 横山教授など:法令の取入れにかかる時間について

[回答]産総研 黒澤:およそ20年かかる予想。ICRPの次期主勧告が10年後で、それ から法的に取り入れられる。現場の調査、データ・課題点の整理を進めていく必要がある。

・[意見]メーカーからの参加者:メーカーは今なにをすべきかが分からない状況。今までの

サーベイメータをもつユーザーはどうするのか。新しい装置を売るチャンスだが、コストも かかる。メーカーとしては、新製品の評価手法が確立してほしい。

以上に当日取り上げ議論した内容を紹介した。アンケートの設問及び主な回答を以下に示 す。

○設問(1)

本事業では、代表的な放射線検出器・線量計について新旧実用量に対する応答の調査を実施 しています。本ワークショップや本事業で取り上げてほしい検出器・線量計がございました らご記入ください。

○回答

不均等被ばくを評価する線量計(末端部・眼近傍・首)
サーベイメータ(代表的な Nal シンチレーション式、テレテクタ)
中性子サーベイメータ NSN2
アクティブ型個人線量計
受動型個人線量計(ガラスバッジ、OSL、TLD、DIS 線量計)
電離箱検出器
シリコン半導体可搬型 MP
エリアモニタ
簡易測定器(はかる君など)

○設問(2)

本事業では、実際の放射線作業環境における線量計応答の調査をしています。本ワークショ ップや本事業で取り上げてほしい作業環境・照射場がございましたらご記入ください。

○回答

IVR 等医療従事者の作業環境 核医学診療部門 原発事故影響がある一般環境 廃炉作業環境 中性子照射場 X線・γ線照射施設 γ線・中性子混在場 γ線・β線混在場 パルスX線

AP 条件と ROT 条件の違い

○設問(3)

本事業に関するご質問・ご意見をお願いします

○回答

- 国内のみならず輸出を考えると、新実用量を用いた測定器の試験を早めに実施する 必要があるため、JIS 規格でもオプションとして早めに入れてほしい。
- この話を日本がリードしていきたいのであれば、各ステークホルダに宿題を出して もいいと思います。
- 校正事業者側の影響・対応について知りたい。
- 具体的な検出器・線量計で具体的な作業・被ばく環境や場で旧がどうなっていて新 がどうなるのか示していただけるとしたら、ありがたい。
- ICRP の防護量が現在どのように検討されているのか、もし情報があれば知りたい です。吸収線量で測定した水晶体や皮膚の線量は等価線量に変わる何かを評価対象 とするように変更されるのでしょうか?
- 放射線対策委託費事業での検討に関して、民間機関の発案による課題について検討 できるような仕組みも必要でないか(以前のように)。
- 新たな実用量の導入と放射線関係法令との関連も解説して下さい
- ICRP TG128 活動との協働などは予定しておりますか?

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

ICRU は 2023 年会にあわせて、2023 年 4 月 19 日に ICRU シンポジウム「福島復 興と放射線計測」を開催した。その中で、CERN の Thomas Otto 博士から実用線量計に対 する影響や、新たな実用量の導入の見込みについての講演があった。詳細は J4.5.2 を参照。

ウィーン IAEA 本部にて、2023 年5 月 29 日から6 月2 日の5 日間にわたって「放射 線二次標準機関(SSDL)と品質マネジメントシステム(QMS)の開発とトレンドに関する技 術会合」が開催された。放射線計量に関する最新規格のレビューや、各国の二次標準機関に おける活動紹介等が行われたが、新たな実用量に関しては特筆すべき報告はなかった。詳細 は J4.5.3 を参照。

放射線諮問委員会 CCRI (Consultive Committee of Ionizing Radiation: CCRI) は国際度 量衡委員会 (Comité international des poids et mesures: CIPM)の下部に属する、各量の諮 問委員会の一つで,放射線に関する単位を扱っている。委員会は主要標準研究所及び ICRU、 IAEA 等の国際機関から構成される。CCRI の会議は 2 年に 1 回開催されており、2023 年 は 6 月 8 日・9 日に開催された。この中の線量に関するグループである CCRI (I) では EURAMET のプロジェクトとして GuideRadPROS プロジェクト (EPM 22NRM07)が紹 介された^[25]。このプロジェクトでは実用量の測定における ICRU Report 95 の影響が評価さ れる計画になっている。

国際放射線防護委員会(ICRP)は、2 年に1 回 ICRP 国際シンポジウムを開催している。 第7回 ICRP 国際シンポジウムは 2023 年 11 月 6 日から 9 日にかけて東京で開催され た。延世大学校の Yeon Soo YEOM 氏の講演では標準人ファントムの詳細化により電子に 対する実効線量換算係数が変化することが示唆された。詳細は J4.5.4 を参照。

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アジア環太平洋標準計画 (Asia Pacific Metrology Program: APMP)が組織されており、毎年会合が開かれている。 この APMP には、放射線に関して TCRI (Technical Committee of Ionizing Radiation)が 設置されており、11月28日から30日に中国深圳市とオンラインのハイブリッド形式で会 合が行われた。放射線防護に関する話題としては、中国から管電圧250 kV から450 kV の X 線照射場の開発についての報告、タイから新たに建設した建屋における放射線標準の開 発計画の報告があったが、新たな実用量に関しては特筆すべき報告はなかった。

ISO 専門委員会である ISO/TC85/SC2 (放射線防護分野)の WG2(基準放射場)ではβ線 標準場に関する3つの規格^[13, 26,27]のマイナー改訂版の投票と、中性子標準場に関する線量 換算係数が規定されている規格 (ISO 8529-3^[28])の発刊があったがいずれも新たな実用量 に関しては触れられていない。その他中性子測定器の校正方法を規定する規格 (ISO 8529-2^[29])の改定方針の議論や、放射線標準場に共通する事項を定めた ISO 29661^[30]、光子標準 場に係る4 つの規格^[16, 31-33]の定期見直し投票が開始されているが現時点で新たな実用量を 取り入れる議論は始まっていない。WG19(外部被ばくの個人モニタリング)では 2023 年に 新たな規格として職業被ばくの統計的解析に必要な入力データ内容を定める規格である ISO 24426^[34]が発刊されたが、新たな実用量について取り込むまでには至っていない。また ISO 15382^[35]の改定審議が行われているが 2024 年 2 月時点ではドラフト案に新たな実用量 に関する記載はない。詳細は J4.5.1 を参照。

4.7.2 国内外の学会等に関する情報収集

「固体線量計を用いた線量計測に関する国際会議(SSD20)」が、2023 年 9 月 17 日か ら 22 日の6日間にわたってイタリア/ビアレッジョで開催された。千代田テクノル株式会 社の長谷川氏からは、同社が提供している中性子個人線量計に関する発表があり、ICRU 95 実用量を導入した際のエネルギー応答特性に関する報告もあった。一方で日本以外の国か ら実用量の定義変更に関する発表はなかった。詳細は J4.5.5.1 を参照。

第56回日本保健物理学会研究発表会が、グランドニッコー東京台場ホテルにおいて令和 5年11月9日~10日の期間で開催された。新たな実用量を対象とした研究報告について は、千代田テクノルの澤井氏らによる「ICRU Report95 新実用量の個人被ばく線量測定サ ービスへの影響」と題するポスター発表があり、国内で広く使用されているガラスバッジに ついて、新たな実用量H_pに関して現在のアルゴリズムでの指示値の応答、定数を見直した 新アルゴリズムでの指示値の応答が比較された。また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が散見された。詳細は J4.5.5.2 を参照。

4.7.3 関係論文

新たな実用量に関係する研究論文を調査し、(1)校正場に関するもの、(2)線量計の特性に関するもの、(3)線量計の試験方法に関するもの、(4)作業場での影響等に関するもの、(5)その他、に分類した。欧州を中心に徐々に研究活動が活性化している。詳細はJ4.5.6を参照。

5課題の整理と対応策

5.1 線量計のエネルギー・方向特性に関わる課題

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。課題と対応策については、(1)校正・試 験事業者、(2)線量計メーカー、(3)線量計使用者、のそれぞれの観点から整理した内容 を表 5.1-1 に示す。JAEA が主体的に実施した内容の詳細は JAEA 編 「J4.3.1 課題の整理と 対応策」を参照。

観点	課題	対応策
校正・試験事業者	新たな実用量に対する校正	・技術的な知見を蓄積し、標準化の
	に関する標準化	議論を早期に実施し、日本としての
		意見を整理する。
		・各規格の改定に関する議論を注視
		する。
	適切な校正線質の選択	・線量計ごとに使用目的を考慮して
		校正線質を提案する。
	ROT などの特性試験の必要	・技術的知見を蓄積し、必要性を判
	性	断する。
線量計メーカー	低エネルギー光子が、H _p 及	・演算方法の更新で対応
	びH*に対して過大応答する	・使用目的に応じて検討する
	低エネルギー中性子に対す	・サーベイメータはハードの改善
	る応答の改善	・個人線量計はアルゴリズムの修正
		で対応できる可能性がある
	複数の実用量を測定可能な	・測定量に応じて校正定数を変更す
	検出器における測定量間で	3
	の違い	・ハードの改善
	線量計の性能要件	・性能要件の再検討を働きかける
	新実用量では過大応答を示	
	すケースが多い	
線量計使用者	低エネルギー光子に対する	・管理する場のエネルギー分布を把
	応答	握する
	計測値の変化	・計測者への周知・教育

表 5.1-1 線量計のエネルギー・方向特性に関わる課題の概要

5.2 その他の観点の課題

新たな実用量に対応した線量計の校正場に関しては、令和 5 年度事業までに、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(国家標準機関におけ る熱中性子校正場を除く)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。

線量計の特性に関する調査としては、令和 5 年度事業までに実施していない線量計について、国内で使用例の多いものを抽出し、必要に応じて調査する必要がある。例えば医療現場で用いられているサーベイメータやエリアモニタなどが対象として考えられる。

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については、今後は今年度 までに調査が十分行われていない医療施設における放射線作業場を中心に調査をする必要 がある。特に診断X線の光子エネルギー領域(およそ100 keV 以下)では、現行の個人線 量計が新たな実用量に対して過大応答することが予測されていることから、重要な調査対 象であるであると考えられる。また新たな実用量が導入された場合に、不均等照射による個 人線量管理に与える影響を調査することも課題である。特に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について検討することが重要である。

新たな実用量に関するワークショップは2年間で3回実施し、関係者間での情報共有が 進んできた。今後もこのような活動を継続していくことが重要である。

研究の動向や新たな実用量の規格等への取入れについて最新の情報を収集するために、 引き続き ICRU、ICRP、IAEA、ISO/TC85/SC2(放射線防護分野)などの国際機関や国内外 の関連学会等を注視していくことも継続的な課題である。

6 まとめ

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)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。このことを背景に、令和 5 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)事業では以下の 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調査、(2)線量計の特性評価に関する 調査、(3)放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査、(4)新たな実用量へ の対応に係る課題の調査、(5)研究に必要な国内外の情報収集。本事業は産総研が受託し、 JAEA に一部事業内容を再委託して実施した。さらに本事業の成果に基づき、報告書を作成 した。

本事業で実施されたワークショップの参加者などから、新たな実用量に対応するための 産業規格の改訂について要望があることが分かった。実際に新実用量に対応した測定器を 開発する場面では、特に国外への輸出を考慮する場合、測定器の JIS 規格や ISO 規格に基 づく適合性試験を実施する必要がある。そのためメーカー等の製品開発や海外展開をスム ーズにするためにも JIS 規格・ISO 規格への早期の取入れが重要であると考えられる。規格 への取入れには本事業で実施したような、標準場や放射線作業場、線量計の新たな実用量に 関する特性のデータの蓄積が欠かせない。また現実的に規制に取り入れられる場合、どのよ うにいつ取り入れられるかという観点での注目度も高い。本事業で実施した動向調査や文 献調査によれば、ヨーロッパでは新たな実用量の導入に関する研究や検討が先行している。 そのため規制に取入れられる際の方針が固まる前の段階で日本からも蓄積したデータに基 づき具体的な方針を提言していくような姿勢も重要になると考えられる。

謝辞

本事業の遂行にあたり、昨年度事業で研究統括を務めた経験に基づいて、折に触れて的確 かつ豊富に助言を賜った黒澤忠弘氏に深く感謝します。ワークショップでご講演を賜った 横山須美氏に深く感謝します。β線の換算係数の導出や照射試験で貢献のあった二木佐和 子氏に感謝します。研究内容のミーティングに参加していただいた放射線標準研究グルー プのメンバーに感謝します。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

- 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] International Commission on Radiation Units and Measurement (ICRU). *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources*. ICRU Report 39 (1985)

[4] International Commission on Radiation Units and Measurement (ICRU). *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry*. ICRU Report 51 (1993)

- [5] 黒澤忠弘ら「γ線空気カーマ標準の設定」計量標準モノグラフ 7 (2005)
- [6] C. Kessler et al., "Key comparison BIPM.RI(I)-K5 of the air-kerma standards of the NMIJ, Japan and the BIPM in ¹³⁷Cs gamma radiation", *Metrologia* 50 06007 (2013)
- [7] C. Kessler et al., "Key comparison BIPM.RI(I)-K1 of the air-kerma standards of the NMIJ, Japan and the BIPM in ⁶⁰Co gamma radiation", *Metrologia* 59 06017 (2023)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] International Organization for Standardization (ISO). Nuclear energy Reference beta-particle radiation — Part 1: Methods of production. ISO 6980-1:2022 (2022)
- [14] Laboratoire National Henri Becquerel. Decay data Evaluation Project [cited 2024 Mar 23]. Available from: <u>http://www.lnhb.fr/home/conferences-publications/ddep_wg/</u>
- [15] 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 https://www.nra.go.jp/data/000447895.pdf (2023)
- [16] International Organization for Standardization (ISO). Radiological protection Radiological protection – X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 1: Radiation characteristics and production methods. ISO 4037-1 (2019)

- [17] 日本産業規格. X 線及び y 線用線量(率)測定器の校正方法. JIS Z 4511 (2018)
- [18] 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
- [19] International Organization for Standardization (ISO). Reference neutron radiations Part 1: Characteristics and methods of production. ISO 8529-1 (2001)
- [20] 日本産業規格. 中性子線量当量(率)計の校正方法. JIS Z 4521:2006
- [21] 原子力規制庁 令和 3 年度放射線対策費(新たな実用量への対応に係る線量計の校正 及び放射線作業場におけるエネルギー応答に関する調査研究)事業成果報告書 https://www.nra.go.jp/data/000404697.pdf (2022)
- [22] R. Behrens. Conversion coefficients from absorbed dose to tissue to the newly proposed ICRU/ICRP operational quantities for radiation protection for beta radiation qualities. J. Radiol. Prot. 41(4), 871 (2021)
- [23] S. Sakashita, A. Takahashi, Y. Yoshida and K. Shiba. 東海再処理施設における γ 線スペクト ロメトリによる γ 線測定器の性能評価. 第2 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(2019)
- [24] 平成 23 年度文部科学省 国家基幹研究開発推進事業原子力基礎基盤戦略研究イニシア ティブ「白色中性子源を用いた中性子線量計の 革新的校正法に関する研究」成果報告書
- [25] EURAMET The European Association of National Metrology Institutes [cited 2024 Mar 23]. Available from: <u>https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/project/harmonisation-update-and-implementation-of-standards-related-to-radiation-protection-dosimeters-for-photon-radiation</u>
- [26] International Organization for Standardization (ISO). Nuclear energy Reference beta-particle radiation — Part 2: Calibration fundamentals related to basic quantities characterizing the radiation field. ISO 6980-2:2022 (2022)
- [27] International Organization for Standardization (ISO). Nuclear energy Reference beta-particle radiation — Part 3: Calibration of area and personal dosemeters and the determination of their response as a function of beta radiation energy and angle of incidence. ISO 6980-3:2022 (2022)
- [28] International Organization for Standardization (ISO). Nuclear reference radiation fields Part 3: Calibration of area and personal dosemeters and determination of their response as a function of neutron energy and angle of incidence. ISO 8529-3 (2023)
- [29] International Organization for Standardization (ISO). Reference neutron radiations Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field. ISO 8529-2 (2000)
- [30] International Organization for Standardization (ISO). Reference radiation fields for radiation protection – Definitions and fundamental concepts. ISO 29661 (2012)
- [31] International Organization for Standardization (ISO). Radiological protection Radiological

protection – X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges from 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV. ISO 4037-2 (2019)

- [32] International Organization for Standardization (ISO). Radiological protection X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 3: Calibration of area and personal dosemeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence. ISO 4037-3 (2019)
- [33] International Organization for Standardization (ISO). Radiological protection Radiological protection X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy Part 4: Calibration of area and personal dosemeters in low energy X reference radiation fields. ISO 4037-4 (2019)
- [34] International Organization for Standardization (ISO). Content of input data for the statistical analysis of dose records of individuals monitored for occupational exposure to ionizing radiation, ISO 24426 (2023)
- [35] International Organization for Standardization (ISO). Radiological protection Procedures for monitoring the dose to the lens of the eye, the skin and the extremities, ISO 15382 (2015)

令和5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6年2月29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5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	<u>次</u>

J1. 事業	業の背景と目的15
J2. 事業	業の実施体制
J2.1 実	施体制
J2.2 実	施期間18
J2.3 放	射線標準施設棟(FRS)18
J2.4 進	按管理21
J3. 事業の	の概要
J3.1 全	体計画
J3.2 概	要
J4. 事業の	の成果
J4.1 は	こじめに
J4. 1.	1新たな実用量26
J4.2 新	たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査
J4. 2.	1 校正・試験場の線量換算係数の評価
J4.	2.1.1 蛍光 X 線校正場
J4.	2.1.2 ロッドファントムに対する局所皮膚吸収線量に係る線量換算係数 43
J4.3 線	量計の特性評価に関する調査54
J4. 3.	1 方法
J4. 3.	2 特性の傾向
J4. 3.	3課題の整理と対応策109
J4. 3.	4 トレーサビリティ確保に関する調査113
J4.4 放	射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査118
J4. 4.	1 放射線作業場の選定118
J4. 4.	2 光子エネルギー分布の取得121
J4.	4.2.1 スペクトロメータを利用した光子エネルギー分布の取得 121
J4.	4.2.2 個人線量計の指示値から推定される放射線作業場の光子エネルギー分布
J4. 4.	3 放射線作業場における各線量の算出132
J4. 4.	4 放射線作業場における線量計のエネルギー応答
J4.5 研	究に必要な国内外の情報収集150
J4. 5.	1 ISO
J4. 5.	2 ICRU

	J4. 5. 3 IAEA	151
	J4. 5. 4 ICRP	. 152
	J4.5.5 国内外の学術団体	. 153
	J4.5.5.1 国際固体線量計測機構	. 153
	J4.5.5.2 日本保健物理学会	. 155
	J4.5.6 関係論文の調査	. 156
J5.	まとめ	. 158
謝辞	<u> </u>	. 161
参考	文献	. 162

付録1:SSD20成果発表資料

付録2:ICRP2023成果発表資料



凶 J 2-1	事業の実施体制17
⊠ J 2-2	放射線標準施設棟の鳥瞰図 19
⊠ J 3-1	本事業の研究計画
⊠ J 4-1	光子に対する周辺線量換算係数(カーマ近似)28
⊠ J 4-2	光子に対する個人線量換算係数(カーマ近似)28
⊠J 4-3	光子に対する実効線量の管理に用いる個人モニタリング に関する現行・新実
用量	の比較29
⊠ J 4-4	光子に対する水晶体吸収線量換算係数(カーマ近似)
⊠ J 4-5	光子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリング に関する現
行・	新実用量の比較
⊠ J 4-6	光子に対する個人局所皮膚吸収線量換算係数(カーマ近似、スラブファント
ム)	
⊠ J 4-7	光子に対する皮膚の線量管理に用いる個人モニタリング に関する現行・新
実用	量の比較(スラブファントム)
⊠ J 4-8	光子に対する個人局所皮膚吸収線量換算係数(カーマ近似、ロッドファント
ム)	
⊠ J 4-9	光子に対する皮膚の線量管理に用いる個人モニタリング に関する現行・新
実用	量の比較(ロッドファントム)
⊠ J 4-10	電子に対する水晶体吸収線量換算係数
図J 4-11	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリング に関する現
図J4-11 行・デ	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリング に関する現 新実用量の比較
図J4-11 行・ラ 図J4-12	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリング に関する現 新実用量の比較
図J4-11 行・ ジ 図J4-12 図J4-13	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリング に関する現 新実用量の比較
図J4-11 行・ ³ 図J4-12 図J4-13 図J4-14	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリング に関する現 新実用量の比較
図J4-11 行・ ジ J4-12 図J4-13 図J4-14 実用	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリング に関する現 新実用量の比較
図 J 4-11 行・ 図 J 4-12 図 J 4-13 図 J 4-14 実用 図 J 4-15	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリングに関する現 新実用量の比較
 図 J 4-11 行・第 図 J 4-12 図 J 4-13 図 J 4-14 実用1 図 J 4-15 図 J 4-16 	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリングに関する現 新実用量の比較
 図 J 4-11 行・第 図 J 4-12 図 J 4-13 図 J 4-14 実用1 図 J 4-15 図 J 4-16 図 J 4-17 	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリング に関する現 新実用量の比較
図 J 4-11 行・ 図 J 4-12 図 J 4-13 図 J 4-14 実用 図 J 4-15 図 J 4-16 図 J 4-17 新実	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリングに関する現 新実用量の比較
図 J 4-11 行・ 図 J 4-12 図 J 4-13 図 J 4-14 実用 図 J 4-15 図 J 4-16 図 J 4-17 新実 図 J 4-18	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリングに関する現 新実用量の比較
 図 J 4-11 行・第 図 J 4-12 図 J 4-13 図 J 4-14 実用1 図 J 4-15 図 J 4-16 図 J 4-16 図 J 4-17 新実) 図 J 4-18 図 J 4-19 	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリング に関する現 新実用量の比較
 図 J 4-11 行・第 図 J 4-12 図 J 4-13 図 J 4-14 実用1 図 J 4-15 図 J 4-15 図 J 4-16 図 J 4-17 新実) 図 J 4-18 図 J 4-19 線量 	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリング に関する現 新実用量の比較
 図 J 4-11 行・第 図 J 4-12 図 J 4-13 図 J 4-13 図 J 4-14 実用 図 J 4-15 図 J 4-16 図 J 4-16 図 J 4-17 新実) 図 J 4-18 図 J 4-18 図 J 4-19 線量 図 J 4-20 	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリング に関する現 新実用量の比較

図 J 4-21 FRS の蛍光 X 線場における現行実用量 H _p (0.07,α) _{slab} と新たな実用量 D _{plocal}
_{skin} (α) _{slab} に対する線量換算係数の角度依存性43
図J4-22 D _{plocal skin} (a)rod/ Фの評価に用いた計算体系の例50
図 J 4-23 評価したロッドファントムに対する新たな実用量の線量換算係数と現行実
用量の線量換算係数との比較(⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y場)52
図 J 4-24 評価したロッドファントムに対する新たな実用量の線量換算係数と現行実
用量の線量換算係数との比較(⁸⁵ Kr 場)53
図 J 4-25 評価したロッドファントムに対する新たな実用量の線量換算係数と現行実
用量の線量換算係数との比較(¹⁴⁷ Pm 場)53
図J4-26 A社製電離箱式サーベイメータの蛍光X線に対する特性試験の様子58
図J4-27 B社製中性子用サーベイメータの単色中性子に対する特性試験の様子58
図J4-28 C社製中性子用サーベイメータの熱中性子に対する特性試験の様子59
図 J 4-29 D 社製可搬型 γ 線エリアモニタの高エネルギーγ 線に対する特性試験の
様子
図J4-30 E社製受動形環境線量計のX線に対する特性試験の様子60
図J4-31 F社製受動形個人線量計(体幹部用)の蛍光X線に対する特性試験の様子
図J4-32 G社製受動形個人線量計(体幹部用)のγ線に対する特性試験の様子.61
図J4-33 H社製受動形個人線量計(体幹部用)のβ線に対する特性試験の様子.61
図 J 4·34 I 社製受動形個人線量計(水晶体用)の蛍光 X 線に対する特性試験の様子
図J4-35 J社製受動形個人線量計(末端部用)の高エネルギーγ線に対する特性試
験の様子62
図 J 4-36 K 社製受動形個人線量計(末端部用)の β 線に対する特性試験の様子.63
図J4-37 L社製受動形個人線量計(末端部用)のX線に対する特性試験の様子63
図J4-38 M社製中性子用受動形個人線量計(体幹部用)の減速中性子に対する特性
試験の様子
図J4-39 N社製中性子用受動形個人線量計(体幹部用)のRI中性子に対する特性試
験の様子
図 J 4-40 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 4-41 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(3)及び D'lens に対する光子エネルギー
特性(入射角度:0°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))
図 J 4-42 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(3)及び D'lens に対する光子エネルギー
特性(入射角度:15°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))
図J4-43 A社製電離箱式サーベイメータのH'(3)及びD'lensに対する光子エネルギー

特性(入射角度:30°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))
図 J 4-44 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(3)及び D'lens に対する光子エネルギー
特性(入射角度:45°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))
図 J 4-45 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(3)及び D'lens に対する光子エネルギー
特性(入射角度:60°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))
図 J 4-46 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(3)及び D'lens に対する光子エネルギー
特性(入射角度:75°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))
図 J 4-47 A 社製電離箱式サーベイメータの D'lens に対する光子エネルギー特性 72
図 J 4-48 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(0.07) 及び D'local skin に対する光子エネ
ルギー特性(入射角度:0°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))
図 J 4-49 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(0.07) 及び D'local skin に対する光子エネ
ルギー特性(入射角度:15°、S-Cs H*(10)で校正 (規格化))
図 J 4-50 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(0.07) 及び D' _{local skin} に対する光子エネ
ルギー特性(入射角度:30°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))
図 J 4-51 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(0.07) 及び D' _{local skin} に対する光子エネ
ルギー特性(入射角度:45°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))
図 J 4-52 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(0.07) 及び D'local skin に対する光子エネ
ルギー特性(入射角度:60°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))
図 J 4-53 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(0.07) 及び D' _{local skin} に対する光子エネ
ルギー特性(入射角度 : 75°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))
図 J 4-54 A 社製電離箱式サーベイメータの D'local skin に対する光子エネルギー特性
図 J 4-55 A 社製電離箱式サーベイメータを S-Cs に対する H*で再校正(調整)した
ときの特性
図 J 4-56 D 社製可搬型 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J4-57 E社製受動形環境線量計の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J4-58 F社製受動形個人線量計(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°)で校正(規格化))
図J4-59 F社製受動形個人線量計(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:30°、S-Cs H _p (10,0°)で校正(規格化))
図J4-60 F社製受動形個人線量計(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:60°、S-Cs H _p (10,0°)で校正(規格化))
図J4-61 F社製受動形個人線量計(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: 75°、S-Cs H _p (10,0°)で校正(規格化))

に対するエネルギー特性(入射角度: 75°、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))82

図J	4-69) F	社製	受動形	個人	線量	計	(体幹	部用) 0	$>H_{\rm p}$	(0.07	')及び	К <i>D</i> _р	local s	_{kin} に	係る	, β
	線に	対す	るエ	ネルキ	ドー特	宇性	(入	射角	度:()°、	⁹⁰ Sr/	/90Y	H p(0).07,	0°)で	校正	E (規	見格
	化))																83

- 図J4-76 G社製受動形個人線量計(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:60°、S-CsH_p(10,0°)で校正(規格化))......87
- 図J4-77 G社製受動形個人線量計(体幹部用)のHp(10)及びHpに対する光子エネ

ルギー特性(入射角度:75°、S·Cs H _p (10,0°)で校正(規格化))
図 J 4-78 G 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H _p に対する光子エネルギー特性
(入射角度 : ROT、S-Cs H _p (10,0°)で校正(規格化))
図 J 4-79 G 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H _p に対する光子エネルギー特性
図 J 4-80 G 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H _p (0.07)及び D _{plocal 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°)で校正(規格化))
図 J 4-81 G 社製受動形個人線量計(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 : 30°、S-Cs H _p (10,0°)で校正(規格化))
図 J 4-82 G 社製受動形個人線量計(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:45°、S-Cs H _p (10,0°)で校正(規格化))
図 J 4-83 G 社製受動形個人線量計(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(人射角度:60°、S-Cs H _p (10,0°)で校止(規格化))
図J 4-84 G 社殿受動形個入緑重計(体幹部用)の $H_p(0.07)$ 及い D_p local skin に係る元
ナに対するエイルキー特性(八射角度:75°、S-Us $H_p(10,0°)$ で校正(規格化))
$ □ I_{4,05} \cap L$ $ □ I_{4,05} \cap L$ $ □ L_{5,05} \cap $
因 J 4-63 G 社衆支動 ℓ 個人 秋重司 (本幹部市) の $D_{\text{plocal skin}}$ に 体る 儿子 に 刈 j る エ イ ルギー 性州 (S-C ₀ H (0) で 拉正 (相枚 ℓ)) 01
ルギー 陸性(入財 角度・0° S-C。 $H(10.0°)$ で校正(相枚化)) 99
図 J 4-87 H 社製受動形個人線量計(休幹部用)の $H_{a}(10)$ 及び H_{a} に対する光子エネ
ルギー特性(入射角度・60° S-Cs $H_{\rm r}(100)$ で校正(規格化)) 92.92.92.92.92.92.92.92.92.92.92.92.92.9
図 J 4-88 H 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_n に対する光子エネルギー特性
(入射角度: ROT、S-Cs H _n (10.0°)で校正(規格化))
図 J 4-89 H 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H _n に対する光子エネルギー特性
図J4-90 H社製受動形個人線量計(体幹部用)のHp(0.07)及びDplocal skin に対する
光子エネルギー特性(入射角度:0°、S·Cs H _p (10,0°)で校正(規格化)) 94
図J 4-91 H 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H _p (0.07)及び D _{p local skin} に対する
光子エネルギー特性(入射角度:60°、S-Cs H _p (10,0°)で校正(規格化)) 94
図J4-92 H社製受動形個人線量計(体幹部用)のDplocalskinに対する光子エネルギー
特性

図 J 4-93 H 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H _p (0.07)及び D _{plocal skin} に係る
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Yβ線に対する方向特性(⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ YH _p (0.07,0°)で校正(規格化))95
図 J 4-94 H 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H _p (0.07)及び D _{plocal skin} に係る
⁸⁵ Krβ線に対する方向特性(⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ YH _p (0.07,0°)で校正(規格化))
図J4-95 I社製受動形個人線量計(水晶体用)のH _p (3)及びD _{plens} に対する光子エネ
ルギー特性(入射角度:0°、S-Cs H _p (3,0°)で校正(規格化))
図J4-96 I社製受動形個人線量計(水晶体用)のD _{plens} に対する光子エネルギー特性
(入射角度:ROT、S·Cs H _p (3,0°)で校正(規格化))
図J4-97 I社製受動形個人線量計(体幹部用)のD _{plens} に対する光子エネルギー特性
図 J 4-98 J 社製受動形個人線量計(末端部用)の H _p (0.07)及び D _{plocal skin} に対する光
子エネルギー特性(入射角度:0°、S•Cs H _p (0.07,0°)で校正(規格化)) 98
図 J 4-99 J 社製受動形個人線量計(末端部用)の H _p (0.07)及び D _{plocal skin} に対する光
子エネルギー特性(入射角度:30°、S-Cs H _p (0.07,0°)で校正(規格化))98
図 J 4-100 J 社製受動形個人線量計(末端部用)の H _p (0.07)及び D _{p local skin} に対する
光子エネルギー特性(入射角度:60°、S·Cs H _p (0.07,0°)で校正(規格化))…99
図 J 4-101 J 社製受動形個人線量計(末端部用)の D _{plocal skin} に対する光子エネルギ
ー特性(入射角度:180°、S·Cs H _p (0.07,0°)で校正(規格化))
図 J 4-102 J 社製受動形個人線量計(末端部用)の D _{plocal skin} に対する光子エネルギ
一特性(入射角度:ROT、S-Cs H _p (0.07,0°)で校正(規格化))100
図 J 4-103 J 社製受動形個人線量計(末端部用)の D _{plocal skin} に対する光子エネルギ
一特性
図 J 4-104 K 社製受動形個人線量計(末端部用)の H _p (0.07) 及び D _{p local skin} に係る
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Yβ線に対する方向特性(⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ YH _p (0.07,0°)で校正(規格化))101
図 J 4-105 K 社製受動形個人線量計(末端部用)の H _p (0.07)及び D _{p local skin} に係る
⁸⁵ Krβ 線に対する方向特性 (⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y H _p (0.07,0°)で校正(規格化))101
図 J 4-106 L 社製受動形個人線量計(末端部用)の H _p (0.07)及び D _{p local skin} に対する
光子エネルギー特性(入射角度:0°、S•Cs H _p (0.07,0°)で校正(規格化)) 102
図 J 4-107 L 社製受動形個人線量計(末端部用)の H _p (0.07)及び D _{p local skin} に対する
光子エネルギー特性(入射角度:60°、S·Cs H _p (0.07,0°)で校正(規格化)).102
図 J 4-108 L 社製受動形個人線量計(末端部用)の D _{plocal skin} に対する光子エネルギー
特性
図 J 4-109 L 社製受動形個人線量計(末端部用)の H _p (0.07) 及び D _{p local skin} に係る
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Yβ線に対する方向特性(⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ YH _p (0.07,0°)で校正(規格化)) 103

図 J 4-110 L 社製受動形個人線量計(末端部用)の H_p(0.07)及び D_{p local skin} に係る ⁸⁵Kr β 線に対する方向特性(⁹⁰Sr/⁹⁰Y H_p(0.07,0°)で校正(規格化))......104

図J4-111 B社製中性子サーベイメータのH*(10)及びH*に対する中性子エネルギー
特性105
図 J 4-112 C 社製中性子サーベイメータの H*(10)及び H*に対する中性子エネルギー
特性(入射角度:0°) 106
図 J 4-113 M 社製受動形中性子個人線量計(体幹部用)の H _p (10)及び H _p に対する
中性子エネルギー特性(入射角度:0°)106
図 J 4-114 M 社製受動形中性子個人線量計(体幹部用)の H _p (10)及び H _p に対する
中性子方向特性107
図J4-115 N社製受動形中性子個人線量計(体幹部用)のHp(10)及びHpに対する中
性子エネルギー特性(入射角度:0°)108
図J4-116 N社製受動形中性子個人線量計(体幹部用)のHp(10)及びHpに対する中
性子方向特性108
図 J 4-117 H*と D'lens、 D'local skin との関係113
図J4-118 G社製体幹部用受動形個人線量計のN-100に対する入射角度依存性115
図J4-119 線量測定が要求される放射線作業場の例119
図 J 4-120 スペクトル測定に用いた 2"Ф×2" NaI(Tl)検出器 122
図 J 4-121 スペクトル測定に用いた 1 cm 角 LaBr ₃ (Ce)検出器 122
図J4-122 大型加速器施設での測定の様子123
図 J 4-123 研究用原子炉施設における 2"Φ×2"円筒形 NaI(Tl)検出器によるパルス波
高スペクトル124
図 J 4-124 中性子ビーム利用施設における 2"Φ×2"円筒形 NaI(Tl)検出器によるパル
ス波高スペクトル125
図 J 4-125 大型加速器施設における LaBr ₃ (Ce)検出器によるパルス波高スペクトル
図J4-126 研究用原子炉施設の作業場における光子エネルギー分布127
図 J 4-127 中性子ビーム利用施設の作業場における光子エネルギー分布128
図J4-128 大型加速器施設の作業場における光子エネルギー分布129
図J4-129 再処理施設セル内作業でのTLD発光関係(1993年) ^[J36] 131
図J4-130 プルトニウム燃料施設グローブボックス作業でのTLD発光関係(1994年)
[J36]
図J4·131 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)141
図J4·132 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)141
図J4-133 O社製電子式個人線量計のエネルギー特性143
図J4-134 作業場モニタリングに関する線量計の原子力発電所放射線作業場での応答

評価145
図J4-135 個人モニタリングに関する線量計の原子力発電所放射線作業場での応答評
価145
図J4·136 作業場モニタリングに関する線量計の核燃料施設放射線作業場での応答評
価146
図J 4-137 個人モニタリングに関する線量計の核燃料施設放射線作業場での応答評価
図 J 4-138 作業場モニタリングに関する線量計の研究・教育施設(X 線施設、RI 施
設)放射線作業場での応答評価147
図 J 4-139 個人モニタリングに関する線量計の研究・教育施設(X 線施設、RI 施設)
放射線作業場での応答評価147
図J4·140 作業場モニタリングに関する線量計の研究・教育施設(研究炉施設)放射
線作業場での応答評価148
図J4-141 個人モニタリングに関する線量計の研究・教育施設(研究炉施設)放射線
作業場での応答評価148
図J4·142 作業場モニタリングに関する線量計の研究・教育施設(加速器施設)放射
線作業場での応答評価149
図J4-143 個人モニタリングに関する線量計の研究・教育施設(加速器施設)放射線
作業場での応答評価149

	<u>表 目 次</u>
表 J 2-1	FRS の主な γ 線校正場19
表 J 2-2	FRS の主な X 線校正場
表 J 2-3	FRS の主な β 線校正場
表 J 2-4	FRS の主な RI 中性子校正場
表 J 2-5	FRS の主な単色中性子校正場
表 J 2-6	事業の進捗状況等の報告
表 J 3-1	特性評価した個人モニタリング用線量計とその試験項目一覧
表 J 3-2	特性評価した作業場モニタリング用線量計とその試験項目一覧25
表 J 4-1	現行実用量と新たな実用量
表 J 4-2	評価に用いた単色光子に対する線量換算係数
表 J 4-3	評価した蛍光X線場における新・現行実用量に対する線量換算係数40
表J 4-4	評価した蛍光X線校正場におけるロッドファントムに対する皮膚の個人吸収
線量	換算係数
表 J 4-5	評価したX線校正場におけるロッドファントムに対する皮膚の個人吸収線量
換算	係数
表 J 4·6	評価した S-Cs 校正場におけるロッドファントムに対する皮膚の個人吸収線
量換	算係数
表 J 4-7	評価した S-Co 校正場におけるロッドファントムに対する皮膚の個人吸収線
量換	算係数
表J 4-8	評価した R-F 校正場におけるロッドファントムに対する皮膚の個人吸収線量
換算	係数
表 J 4-9	換算係数を評価した β 線校正場
表 J 4-1	0 ⁹⁰ Sr/90Y 場について評価したロッドファントムに対する皮膚の個人吸収線
量換	算係数
表 J 4-11	⁸⁵ Kr 場について評価したロッドファントムに対する皮膚の個人吸収線量換
算係	数
表 J 4-12	2 ¹⁴⁷ Pm 場について評価したロッドファントムに対する皮膚の個人吸収線量
換算	係数
表 J 4-13	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56
表 J 4-14	比較に用いた線量計と試験条件114
表 J 4-15	受動形個人線量計(体幹部)の H _p (60°)応答の比較116
表 J 4-16	受動形個人線量計(体幹部)の Dplocal skin(60°)応答の比較116
表 J 4-17	受動形個人線量計(水晶体)の D _{plens} (0°)応答の比較117
表 J 4-18	中性子サーベイメータの H*応答の比較117

表 J 4-19	受動形中性子個人線量計(体幹部)の H _p (0°)応答の比較117
表 J 4-20	スペクトルを取得した放射線作業場120
表J 4-21	再処理施設作業場(#1~#6)における場所のモニタリングにかかる実用量
(カー-	マ近似)134
表 J 4-22	再処理施設作業場(#1~#6)における個人モニタリングにかかる実用量
(カー	·マ近似)134
表J 4-23	再処理施設作業場(#1~#6)における新・現行実用量の比較(カーマ近似)
表 J 4-24	研究用原子炉施設炉室作業場(#7~#12)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)135
表 J 4-25	研究用原子炉施設炉室作業場(#7~#12)における個人モニタリングにか
かる実	第用量(カーマ近似)136
表 J 4-26	研究用原子炉施設炉室作業場(#7~#12)における新・現行実用量の比較
(カー	·マ近似)137
表 J 4-27	中性子ビーム利用施設作業場(#13~#16)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)137
表 J 4-28	中性子ビーム利用施設作業場(#13~#16)における個人モニタリングにか
かる実	第用量(カーマ近似)138
表 J 4-29	中性子ビーム利用施設作業場(#13~#16)における新・現行実用量の比較
(カー	·マ近似)138
表J 4-30	大型加速器施設作業場(#17~#21)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)139
表J 4-31	大型加速器施設作業場(#17~#21)における個人モニタリングにかかる実
用量	(カーマ近似)139
表 J 4-32	大型加速器施設作業場(#17~#21))における新・現行実用量の比較(カ
ーマ近	- (以)
表 J 4-33	スペクトルを取得した放射線作業場142
表 J 4-34	調査した関係論文一覧157

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[J1]。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[J2,J3]。こうした線量評価体系は我が国の法令にも取り入れられ、1 cm 線量当 量などの実用量が測定すべき量として規定され、放射線管理の現場で用いられているサー ベイメータ及び個人線量計(以下、本報告書においては単に「線量計」という。)は、こ うした実用量に沿って設計・校正され、使用されてきた。

こうしたなかで、ICRPと国際放射線単位・測定委員会(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^[J1]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^[J4]のに引き続 き、ICRUは令和2年12月に、ICRPと合同で検討を進めてきた実用量の定義変更を勧告 する報告書(ICRU Report 95^[J5])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^[J6]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。)^[37]及び令和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。)^[38]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、これらが変更された場合、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J2-1に示す。原子力機構 安全研究・防災支援部門 安全研究セ ンター 原子炉安全研究ディビジョンリスク評価・防災研究グループに所属する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部門 原子力科学研 究所 放射線管理部 放射線計測技術課の2名、及び核燃料・バックエンド研究開発部門 核 燃料サイクル工学研究所 放射線管理部の2名の合計8名で、「(1)新たな実用量に対応し た線量計の校正に関する調査」、「(2)線量計の特性評価に関する調査」、「(3)放射線作 業場における線量計のエネルギー応答に関する調査」及び「(4)研究に必要な国内外の 情報収集」を実施した。

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



図 J 2-1 事業の実施体制

J2.2 実施期間

本事業は令和5年4月5日~令和6年2月29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。また、令和3年度事業及び令和4年度事業で得 られた成果のほか、校正場の評価に必要となる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^[J9]。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。

これら FRS のもつ特徴やこれまでに蓄積された放射線計測技術を活かし、放射線測定器のエネルギー特性試験を高い信頼性をもって実施できる方法や品質保証体制を確立して、

令和4年6月23日から放射線分野では国内初となる産業標準化法試験事業者登録制度 (JNLA)に基づくJIS登録試験所として運用を開始した。これにより、FRSで試験を実施した測定器に対して、公的な試験成績書の発行というプロセスを経て、第三者として客 観的に放射線測定器の性能を証明することが可能となった^[J9-J12]。



図J2-2 放射線標準施設棟の鳥瞰図

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)	$3\mu\mathrm{Sv/h}{\sim}12\mathrm{mSv/h}$
低レベル昭射装置	笛1昭射 室	137 Cs (662 keV)*2	$7\mu\mathrm{Sv/h}{\sim}40\mathrm{mSv/h}$
國國 外 添加 衣臣	州工版机王	⁶⁰ Co (1250 keV) *2	$7\mu\mathrm{Sv/h}{\sim}140\mu\mathrm{Sv/h}$
中レベル照射装置	第3照射室	60 Co (1250 keV) *2	$10\mu\mathrm{Sv/h}{\sim}0.4\mathrm{Sv/h}$
9 - 昭针壮罡	9 - 昭射会	^{137}Cs (662 keV)	$2 \text{ mSv/h}{\sim}4 \text{ mSv/h}$
Δπ 照射表直	2π 职务主	⁶⁰ Co (1250 keV)	7 μ Sv/h \sim 0.5 mSv/h
		²⁴¹ Am (60 keV)	$8\mu\mathrm{Sv/h}{\sim}100\mu\mathrm{Sv/h}$
単体γ線源		¹³³ Ba (333 keV)	$0.5\mu\mathrm{Sv/h}\!\sim\!1\mu\mathrm{Sv/h}$
(4π 線源)	第1 ¹² 4照射主	137 Cs (662 keV)*2	$0.5\mu\mathrm{Sv/h}\!\sim\!60\mu\mathrm{Sv/h}$
		60 Co (1250 keV) *2	$0.5\mu\mathrm{Sv/h}{\sim}9\mu\mathrm{Sv/h}$
直てネルギーッ線	畄布山州子昭尉会	¹⁹ F(p, $\alpha \gamma$) ¹⁶ O	$20 \mu Sy/h \sim 2 m Sy/h$
同一小レイニア豚	半白十庄丁熙豹主	(6.2 MeV)	20 μ Sv/II ~2 IIISV/II

表 J 2-1 FRS の主なγ線校正場

*1 令和6年2月現在、*2 JIS 登録試験所の対象範囲

		1	1	
照射	装置	照射室	平均エネルギー範囲	線量当量率(<i>H*</i> (10))範囲
中硬X線発生装置			$20{\sim}260~{\rm keV^{*1}}$	$4\mu\mathrm{Sv/h}{\sim}2\mathrm{Sv/h}$
(蛍光X線)	F-Cu	V ú 昭 针 会	8.3 keV	$0.05 \mathrm{mSv/h}{\sim}3 \mathrm{mSv/h}{^{*2}}$
	F-Mo	▲ 脉 熙 豹 主	17.6 keV	$1\mu\mathrm{Sv/h}{\sim}90\mu\mathrm{Sv/h}$
	F-Sn		26.2 keV	$0.02 \text{ mSv/h} \sim 1 \text{mSv/h}$

表 J 2-2 FRS の主な X 線校正場

*1 JIS 登録試験所の対象範囲、*2H'(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
		${}^{90}\mathrm{Sr}/{}^{90}\mathrm{Y}~(2.0~\mathrm{MeV}){}^{*2}$	27 mSv/h
BSS2		$^{85}{ m Kr}$ (0.60 MeV) *2	40 mSv/h
	○始四社会	147 Pm (0.18 MeV) *2	0.1 mSv/h
	β 禄照射至	$^{90}{ m Sr}/^{90}{ m Y}~(2.0\!\sim\!\!2.2~{ m MeV})$	$5 \text{ mSv/h}{\sim}150 \text{ mSv/h}$
JAEA β 線照射装置		204 Tl (0.60 MeV)	7 μ Sv/h \sim 60 μ Sv/h
		¹⁴⁷ Pm (0.14~0.18 MeV)	$10 \ \mu \operatorname{Sv/h} \sim 300 \ \mu \operatorname{Sv/h}$

*1 令和6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		$^{252}{ m Cf} \left(0.025 \ { m eV} ight)$	$\sim \! 1\mu\mathrm{Sv/h}$
油山州フ担			²⁴¹ Am-Be (4.4 MeV)*2	$30\mu\mathrm{Sv/h}{\sim}110\mu\mathrm{Sv/h}$
)还,	下注了物	第4照射室	$^{252}{ m Cf}$ (2.3 MeV) *2	$30\mu\mathrm{Sv/h}\!\sim\!100\mu\mathrm{Sv/h}$
減速中	重水減速場		$^{252}{ m Cf}$ (2.1 MeV)	<1 µ Sv/h
性子場	黒鉛減速場		²⁴¹ Am-Be (2.1~2.2 MeV)	$20\mu\mathrm{Sv/h}{\sim}50\mu\mathrm{Sv/h}$

*令和6年2月現在、*2JIS 登録試験所の対象範囲

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
		⁴⁵ Sc(p,n) ⁴⁵ Ti	8 keV 27 keV	$\sim 2\mu{ m Sv/h}$
光左中州之相	光在中地了四时空	⁷ Li(p,n) ⁷ Be	144 keV *1 250 keV 565 keV*1	$70\mu{ m Sv/h}{\sim}7~{ m mSv/h}$
甲巴甲任于場	単 巴甲性于照射 至	³ H(p,n) ³ He	1.2 MeV 2.5 MeV	$30\mu{ m Sv/h}{\sim}3~{ m mSv/h}$
		² H(d,n) ³ He	$5.0~{ m MeV^{*1}}$	$100\mu\mathrm{Sv/h}{\sim}10\mathrm{mSv/h}$
		³ H(d,n) ⁴ He	14.8 MeV*1 19 MeV	$5\mu{ m Sv/h}{\sim}5~{ m mSv/h}$

表 J 2-5 FRS の主な単色中性子校正場

*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5年4月26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J2-6参照)。 さらに、令和6年2月20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。

報告日	内容
令和5年4月26日	キックオフ会合
令和5年5月30日	令和5年4、5月に係る進捗報告 (Web 会議にて実施)
令和5年6月28日	出張報告 (電子メールにて実施)
令和5年6月30日	令和5年6月に係る進捗報告 (Web 会議にて実施)
令和5年7月31日	令和5年7月に係る進捗報告 (Web 会議にて実施)
令和5年9月20日	令和5年8、9月に係る進捗報告 (Web 会議にて実施)
令和5年10月23日	令和5年10月に係る進捗報告 (Web 会議にて実施)
令和5年11月27日	出張報告 (電子メールにて実施)
令和5年11月27日	令和5年11月に係る進捗報告 (Web 会議にて実施)
令和5年12月21日	令和5年12月に係る進捗報告 (Web 会議にて実施)
令和6年1月31日	令和6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6年2月20日	報告前会合 (Web 会議にて実施)

表 J 2-6 事業の進捗状況等の報告

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)新たな実用量に対応した線量計の校正に関する調査」、「(2) 線量計の特性評価に関する調査」、「(3)放射線作業場における線量計のエネルギー応答 に関する調査」、及び「(4)研究に必要な国内外の情報収集」の4つに分けて調査研究を 実施する。

具体的な研究計画を図 J 3-1 に示す。「(1)新たな実用量に対応した線量計の校正に関 する調査」では、FRS に整備する蛍光 X 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。「(2)線量計の特性に関する調査」では、令和 4 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、中性子校正場 及び(1)で評価した蛍光 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。「(3) 放射線作業場における線量計のエネルギ 一応答に関する調査」では、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、令和4年度事業からより対象を広げた現場での測定の実施の可能性を調 査するとともに、利用可能な光子エネルギー分布を取得する。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。「(4)研究に必要な国内外の情報収集」では、本事業の実施にあたっては、実用量 に関する多岐にわたる高い専門性が必要であることから、ICRP、ICRU 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学術団体(国際固体線量計測機構及び日本保健物理 学会)の動向について情報収集を行うとともに、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)新たな実用量に対応した線量計の校正に関する調 査」、「(2)線量計の特性評価に関する調査」、「(3)放射線作業場における線量計のエ ネルギー応答に関する調査」、及び「(4)研究に必要な国内外の情報収集」を以下のと おり実施した。

(1) 新たな実用量に対応した線量計の校正に関する調査

FRS で整備した3種類の蛍光 X 線場について、(2)の特性評価に必要となる新たな 実用量(実効線量、眼の水晶体、及び皮膚の線量管理について場所のモニタリング及び 個人モニタリングにかかる実用量)に対する線量換算係数を算出し、新たな実用量で線 量計の特性試験が可能な環境を整えた。また、(2)において末端部用線量計の特性評 価に必要となるロッドファントムに対する線量換算係数を追加で評価した。

(2)線量計の特性評価に関する調査

令和4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、中性子校正場及び(1)で線量換算係数を導出した蛍光X線場において、 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するとともにトレーサビリ ティ確保に関する調査を実施した。

- (a) エネルギー応答の報告特性試験
 - 令和4年度事業までに整備した機種に、国内で入手可能な3機種(エリアモニタ、 受動形環境線量計、中性子サーベイメータ)を追加し、特性に関する傾向について 検討した。また、受動形個人線量計については、令和4年度事業までに試験を実施 した機種に、国内で線量管理に使用されている主要な機種(体幹部用3機種、末端 部用3機種)を追加して、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J3·1及び表J3·2に、令和3年度事業及び令和 4年度事業で実施したものを含め、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。
- (b) 特性評価試験のトレーサビリティ確保に関する調査

線量計ユーザーへの校正・試験サービスの提供に必要なトレーサビリティ体系が 構築できることを検証するため、国家標準機関と4機種の線量計について計8点で 特性試験結果を相互比較し、特性試験の手法の適切性及び結果の同一性を確認した。 また、課題と必要な対応策についてまとめた。

- (3) 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査
- 本事業においては、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4つの特徴が異なる放射線作 業場を選定し、光子エネルギー分布を取得するとともに、令和4年度事業で示された手 法を利用し、作業場における市販線量計のエネルギー応答を評価し、付随する課題につ いて調査した。これまでに調査した原子力施設においては、こうした既存の線量計であ ったとしても、妥当な測定・評価が可能なことを明らかにした。
- (4)研究に必要な国内外の情報収集

新たな実用量への対応に係る国際機関等として校正場や線量計に関する規格の策 定・審議を行う国際標準化機構(International Organization for Standardization (ISO))専門委員会(ISO/TC85/SC2)、ICRP、ICRU 並びに IAEA の動向を調査し た。また、関連する学術団体として、国外については国際固体線量計測機構、国内に ついては日本保健物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っ た。さらに、関連文献を調査し、得られた情報を本報告書にまとめた。

表J3-1 特性評価した個人モニタリング用線量計とその試験項目一覧

線質		光子			β線		中性子								
絼	量計	蛍光X線	中硬X線	γ線	高エネル ギーγ線	⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	⁸⁵ Kr	¹⁴⁷ Pm	熱中性子	144 keV	565 keV	5 MeV	²⁴¹ Am-Be	²⁵² Cf	黒鉛減速 ²⁴¹ Am-Be
	受動形個人線量	計(体幹	部光子・β	泉用〕											
	A(RPL)	*	*	*	*	*	*	*	_	-	-	_	-	_	-
	B(OSL)	*	●, ★**	●, ★ **	•	•	•	_	_	_	-	_	_	_	-
	C(TLD)	*	*	*	*	*	*	*	_	_	_	_	_	_	-
	受動形個人線量	計(体幹	部中性子戶	月)											
/==	D(PADC)	_	-	_	_	_	_	_	*	*	•	•	•	٠	*
個人	E(TLD)	_	-	_	-	-	_	-	*		*	*	*	*	*
Ξ	受動形個人線童計(水晶体用)														
タ	F(TLD)	*	•	•	•	•	_	_	_	_	-	_	_	_	-
リン	受動形個人線量計(末端部用)														
グ田	G(TLD)	*	***	***	*	*	*	*	_	_	_	_	-	_	-
用線	H(TLD)	*	*	*	*	*	*	*	_	_	-	_	-	_	-
量	電子式線量計(光	子・β線用)													
āt	I(Si半導体)			•	-	•	•	•	_	_	-	_	-	_	-
	電子式線量計(光子	-用)													
	J(Si半導体)	_	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	_	-
	電子式線量計(中	1性子用)													
	K(Si半導体)	_	-	_	_	-	_	_			•	•	▲,●	▲,●	
	L(Si半導体)	_	-	_	_	-	_	_			0*		0*	0*	

(過年度事業で実施されたものを含む)

[凡例]★:本事業、(参考)R3年度事業(△:0°のみ、▲:方向特性含む)、R4年度事業(○:0°のみ、●:方向特性含む)、-:対象外

*国家標準で実施 **国家標準と二次標準機関の双方で実施 線量計欄の()内は検出器を示す, RPLガラス線量計、OSL:光刺激ルミネッセンス線量計、TLD:熱ルミネッセンス線量計、 PADC (Poly Ally! Diglycol Carbonate):固体飛跡線量計

表J 3-2 特性評価した作業場モニタリング用線量計とその試験項目一覧

(過年度事業で実施されたものを含む)

	── 線質		光	子			β線					中性子			
線	量計	蛍光X線	中硬X線	γ線	高エネル ギーγ線	⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	⁸⁵ Kr	¹⁴⁷ Pm	熱中性子	144 keV	565 keV	5 MeV	²⁴¹ Am-Be	²⁵² Cf	黒鉛減速 ²⁴¹ Am-Be
	光子・β線用サ-	ーベイメー	9												
	M(電離箱)	*	•	•	•	•	٠	٠	_	_	_	_	-	-	-
ii-	光子用サーベイ	メータ													
業	N(Nal(TI))		0	0		_	-	-	_	_	_	_	-	-	-
場	O(電離箱)		0	0	0	_	_	_	_	_	_	_	-	_	-
Ē	中性子用サーベィ	バータ													
ダリ	P(3He比例計数管)	_	_	_	_	_	_	_			0**	0	**	∆**	*
ング	Q(3He比例計数管)	_	_	_	-	_	_	_			0*		0*	0*	
用綽	R(有機混合ガス比例 計数管)	-	-	-	-	_	_	-	*			*	*	*	*
帰量	受動形線量計(作	業環境測況	定用)												
計	S(OSL)		*	*	*	_	_	-	_	_	_	_	-	_	-
	エリアモニタ														
	T(Si半導体)	_	*	*	*	_	_	_	_	_	-	_	-	_	_
[凡	ーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーー														

*国家標準で実施、**国家標準と二次標準機関の双方で実施 線量計欄の0内は検出器を示す。OSL:光刺激ルミネッセンス線量計

J4. 事業の成果

J4.1はじめに

J4.1.1 新たな実用量

現行の放射線防護において使用される ICRU Report 39/51^[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J4-1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。

	現行事	ミ用量	新たな実用量		
汉司	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 <i>H</i> *(10)	個人線量当量 <i>H_p</i> (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 <i>H_p</i> (3)	方向性水晶体吸収線量 D' _{lens}	個人水晶体吸収線量 D _{p lens}	
局所的な皮膚の線量管理	方向性線量当量 H'(0.07)	個人線量当量 <i>H_p</i> (0.07)	方向性局所皮膚吸収線量 D' _{local skin}	個人局所皮膚吸収線量 D _{p local skin}	

表 J 4-1 現行実用量と新たな実用量

(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換算係数の積と して定義されており、現行実用量との違いの主な点は以下のとおりである。

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

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。令和3年度事業報告書^[J7]及び令和4年度事業報告書^[J8]でも示されてい る線量換算係数を再掲するとともに、本事業でも使用しているロッドファントムに対 する個人局所皮膚吸収線量換算係数を追加して図J4-1~図J4-17に示した。光子につ いては、カーマ近似のもののみを示した。眼の水晶体及び皮膚の線量管理に用いる実 用量については、場所のモニタリングに関する量と個人モニタリングに関する量(皮 膚の線量管理に用いる実用量については、スラブファントムに対するもの)の間で線 量換算係数の違いがないため、それぞれD_{lens}及びD_{local skin}と表記し、まとめて示した。 また、本報告書では、個人局所皮膚吸収線量については、D_{p local skin}(*a*)slabのように評 価ファントムを明記した表記とする。水晶体吸収線量については、ICRU Report 95^[J5] 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。図示した線 量換算係数は、前者に対するものであり、本事業においては水晶体全体にわたって平 均化された水晶体吸収線量のみを取り扱った。比較に用いた現行実用量の線量換算係 数は ICRP Publ.74^[J13]もしくは表 J4-2 に示された文献の値を用いた。

このように線量換算係数は、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、まずそのエネルギー分布を考慮した校正場に対する線量換算係 数の評価が必要となる。



図 J 4-1 光子に対する周辺線量換算係数(カーマ近似)





凡例における角度は放射線の入射角度を表す。



図 J 4-6 光子に対する個人局所皮膚吸収線量換算係数(カーマ近似、スラブファント

ム)

凡例における角度は放射線の入射角度を表す。



図 J 4-8 光子に対する個人局所皮膚吸収線量換算係数(カーマ近似、ロッドファント

ム)

凡例における角度は放射線の入射角度を表す。





ISO 4037-3 では0°のみしか示されていないため、0°のみ比較した。







図 J 4-12 電子に対する個人局所皮膚吸収線量換算係数(スラブファントム) 凡例における角度は放射線の入射角度を表す。



図 J 4-13 電子に対する皮膚吸収線量換算係数(ロッドファントム) 凡例における角度は放射線の入射角度を表す。



に関する現行・新実用量の比較(スラブファントムに対するもの)

凡例における角度は放射線の入射角度を表す。





凡例における角度は放射線の入射角度を表す。

J4.2 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査

放射線管理において、測定の信頼性を確保するためには、測定に用いる線量計が適切に 校正され、また使用される領域での応答を試験により把握しておくことが重要である。校 正・試験を行うためには、まず使用する校正・試験場に対して新たな実用量に対する線量 換算係数を評価する必要がある。令和3年度事業及び令和4年度事業では、FRS に整備す る ISO 4037-1^[J14] (JIS Z 4511^[J15]) 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X線場、¹⁹F($p, \alpha \gamma$)¹⁶O 反応 を利用した高エネルギー γ 線場、ISO 6980-1^[J16] (JIS Z 4514^[J17]) に準拠した¹⁴⁷Pm、 ⁸⁵Kr 及び ⁹⁰Sr 線源を使用した β 線場、ISO 8529-1^[J18] (JIS Z 4521^[J19]) に準拠した ²⁴¹Am-Be 速中性子場、 2^{52} Cf 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、これらに加えて蛍光 X 線場を整備^[J20]している(表 J 2-2 参照)。そこで、本事業で は、蛍光 X 線場に係る線量換算係数を評価した。 また、令和3年度事業及び令和4年度事業では、個人モニタリングに関する皮膚の線量 管理に用いる実用量D_{plocalskin}については、スラブファントムのみの評価であった。本事 業では、末端部用線量計に対する線量計特性試験を実施するため、過年度で評価されなか ったロッドファントムに対する線量換算係数を追加で評価した。

J4.2.1 校正・試験場の線量換算係数の評価

本報告書で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 ^[J13] Table A.21	H^*/K_a	ICRU 95 ^[J5] Table A.5.1b			
$H'(3,\alpha)/K_a$	ISO 4037-3 ^[J21] Table 7	$D'_{\rm lens}(\alpha)/K_a$	ICRU 95 ^[J5] Table A.5.3b			
$H'(0.07,\alpha)/K_a$	ICRP 74 ^[J13] Table A.21	$D'_{\rm local skin}(\alpha)/K_a$	ICRU 95 ^[J5] Table A.5.4.1b			
$H_p(10,\alpha)/K_a$	ICRP 74 ^[J13] Table A.24	$H_p(\alpha)/K_a$	ICRU 95 ^[J5] Table A.5.2b			
$H_p(3,\alpha)_{ m cyl}/K_a$	ISO 4037-3 ^[J21] Table 39	$D_{\rm p lens}(\alpha)/K_a$	ICRU 95 ^[J5] Table A.5.3b			
$H_p(0.07, \alpha)_{slab}/K_a$	ISO 4037-3 ^[J21] Table 33 ^{%2}	$D_{\rm p local skin}(\alpha)_{\rm slab}/K_a$	ICRU 95 ^[J5] Table A.5.4.1b			
$H_p(0.07, \alpha)_{rod}/K_a$	ISO 4037–3 ^[J21] Table 21 ^{\times3}	$D_{\rm p local skin}(\alpha)_{\rm rod}/K_a$	ICRU 95 ^[J5] Table A.5.4.3b			

※1 αは入射角度を表す。

※2 H_p(0.07, α)_{slab}/K_aについては、ICRP 74^[J13]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。

※3 H_p(0.07, a)_{rod}/K_aについては、ICRP 74^[J13]では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。なお、ISO 4037-3 では線量換算係数の角度依存性は小さいこと から 0°の値しか示されていないため、60°までの全ての角度について、0°の値を使用するこ ととした。

J4.2.1.1 蛍光 X 線校正場

図 J 4-3 などに示されるとおり、光子の H*や H_pに対する線量換算係数は、それぞ れ H*(10)や H_p(10)に来する線量換算係数と比較して、低エネルギー領域でその比が 1/5 以下から 3 倍以上まで乖離する。低エネルギー光子については、ISO 4037-1^[J14]や JIS Z 4511^[J15]において軟 X 線を用いた標準場のほか、蛍光 X 線を用いた標準場につ いても規定されている。軟 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、蛍光 X 線場は X 線発生装置からの一次線をラジエータと呼ば れる金属板に照射し、ラジエータから発生する K 列特性 X 線を利用するため、極めて 単色性が高い。低エネルギー領域では、線量換算係数や線量計のレスポンス変化も急 激であるために、線量計の特性試験の目的では、蛍光 X 線場の利用は有用である。
FRS では、ラジエータとして銅、モリブデン及び錫を利用した 8 keV~25 keV の蛍 光 X 線場を整備している^[J20]。蛍光 X 線場において、蛍光 X 線は、中硬 X 線発生装置 の一次 X 線をラジエータに照射して発生する K a 特性 X 線をフィルタで純度を高めつ つ 90°方向に取り出すことで得られる。そのため、ラジエータの種類に応じた単色性 の高い光子校正場を作ることができる。本報告書では、ISO や JIS に倣い、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 線場の線質をそれぞれ F-Cu、F-Mo 及び F-Sn と表記する。これらの標準場について、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dΦ/dE [J20] (図 J 4-18) から、(1)式により換算係数を算出した。図 J 4-18 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。

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

 $\Delta \Phi_i \ i E_i \sim E_i + \Delta E$ 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 $H \sim$ の換算係数である。



(全フルエンスで規格化)

(2) 結果と考察

評価した線量換算係数を表 J 4-3 に示す。また、それぞれの実用量についての角 度依存性を図 J 4-19~図 J 4-21 に図示した。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^[J15]に F-Mo と F-Sn 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いるが、それとほ ぼ同等の値となっている。
- ・ H^* 及び H_p についての F-Cu と F-Mo に係る線量換算係数、 D_{lens} についての F-Cu に係る線量換算係数は極めて小さい値となっている。F-Mo については、現行実 用量と比較して 20%程度の値となることから、実用量の定義変更に伴い、校正・ 試験事業者において所定の線量(率)を得るのが困難になる可能性がある。例え ば、FRS では F-Mo の場合、 H^* (10)では最大 90 μ Sv/h 程度が得られるが、 H^* で は 18 μ Sv/h 程度しか得られないことになる。
- ・H*や H_pについては、現行実用量である H*(10)や H_p(10)と比較して、1/5 以下 (F-Mo) ~5倍以上(F-Cu) も線量換算係数が異なるため、線量計の特性は大き く変化するものと予想される。D_{lens}については現行実用量との差異は、H*や H_p ほどではないものの、現行実用量は入射角度の増大とともに急激に線量換算係数 が減少するのに対して、新たな実用量では角度依存性はより小さく、線量計の方 向依存性に影響する可能性がある。
- ・*D*_{local skin}については、現行実用量である *H*_p(0.07)や *H*'(0.07)と比較して最大でも 10%程度の差異に留まっていた。

(3) まとめ

F-Cu、F-Mo及びF-Snの3つの線質について、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J4-3に示した線量換 算係数を使用することとする。その不確かさについては、今回評価しなかったが、 JISZ4511^[J15]で現行実用量について標準的に規定されている標準不確かさ2%を以 降の解析では使用する。

表 J 4-3 評価した蛍光 X 線場における新・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)

伯啠	\overline{E}	$H^*(10)/K_a$	H^*/K_a
砅貝	(MeV)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)
F-Cu	0.0083	1.30 × 10⁻³	4.05×10^{-3}
 F-Mo	0.0176	0.43	0.082
 F-Sn	0.0262	0.88	0.28

(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) (Sv/	,α)/K _a ⁄Gy)			$ \begin{array}{c} H_p(\alpha)/K_a \\ (Sv/Gy) \end{array} $								
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT
F-Cu	7.9 × 10⁻⁴	7.1 × 10⁻⁴	4.7 × 10 ⁻⁴	2.4×10^{-4}	7.9 × 10⁻⁵	1.5 × 10⁻⁵	4.1 × 10⁻³	4.0 × 10 ⁻³	3.7 × 10⁻³	3.2 × 10 ^{−3}	2.7 × 10 ⁻³	2.0 × 10 ⁻³	1.2 × 10 ⁻³	2.3 × 10 ^{−3}	2.2 × 10 ⁻³
F-Mo	0.44	0.42	0.38	0.31	0.18	0.04	0.082	0.080	0.075	0.066	0.051	0.035	0.022	0.007	0.036
F–Sn	0.90	0.88	0.84	0.75	0.59	0.30	0.28	0.27	0.25	0.23	0.18	0.13	0.079	0.060	0.13

(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			Н	'(3,α)/K _a (Sv/Gy)				$\begin{array}{c} H_p(3,\alpha)/K_a\\ (Sv/Gy) \end{array}$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
F-Cu	0. 075	0.068	0. 051	0. 028	0.0078	6. 2 × 10 ⁻⁴	2. 4 × 10 ⁻⁵	0. 075	0.068	0.055	0. 028	0. 0078	6. 0 × 10 ⁻⁴	6. 2 × 10 ⁻⁵
F-Mo	0.80	0.79	0. 77	0. 71	0. 61	0.39	0.061	0. 789	0. 782	0. 754	0. 701	0. 606	0. 422	0.077
F–Sn	1.08	1.08	1.06	1. 02	0.94	0.76	0. 33	1.09	1. 08	1.07	1.03	0.96	0.79	0. 42

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

						1		
綽啠				$D_{\rm lens}(\alpha)/K_a$	(Gy/Gy)			
你貝	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT
F–Cu	0. 021	0. 021	0. 020	0. 017	0. 012	0.0064	0. 0022	0. 0067
F-Mo	0.68	0.67	0.66	0.64	0.60	0.54	0.43	0.29

0.99

0.97

0.92

0.82

0.51

(d) 眼の水晶体の線量管理に用いる実用量(新たな実用量)

(e) 局所的な皮膚の線量管理に用いる実用量(現行実用量)

1.01

F–Sn

1.01

1.01

線質			H'(0.07, a (Sv/0	x)/K _a Gy)			$H_p(0.07, \alpha)_{slab}/K_a$ (Sv/Gy)					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	0°	15°	30°	45°	60°	75°
F–Cu	0.93	0.91	0.90	0.89	0.83	0.72	0.93	0.92	0.91	0.91	0.87	0.79
F-Mo	1.01	1.02	1.00	1.01	1.02	1.00	1.02	1.02	1.01	1.02	1.00	0.99
F–Sn	1.14	1.13	1.13	1.13	1.12	1.09	1.13	1.13	1.11	1.09	1.06	1.01

|--|

線質		$D_{ m local skin}(lpha)_{ m slab}/K_a$ (Gy/Gy)											
	0°	15°	30°	45°	60°	75°							
F–Cu	0.95	0.95	0.95	0.93	0.91	0.81							
F-Mo	1.05	1.05	1.05	1.04	1.03	1.01							
F−Sn	1.19	1.18	1.19	1.17	1.14	1.10							



図 J 4-19 FRS の蛍光 X 線場における現行実用量 H_p(10)と新たな実用量 H_pに対する線量 換算係数の角度依存性



図 J 4-20 FRS の蛍光 X 線場における現行実用量 H_p(3)と新たな実用量 D_{plens} に対する線 量換算係数の角度依存性



図 J 4-21 FRS の 蛍光 X 線場における現行実用量 *H*_p(0.07,α)_{slab} と 新たな実用量 *D*_{plocal skin}(α)_{slab} に対する線量換算係数の角度依存性

J4.2.1.2 ロッドファントムに対する局所皮膚吸収線量に係る線量換算係数

令和3年度事業及び令和4年度事業で評価した線質(中性子を除く)及びJ4.2.1.1 で評価した蛍光X線場について、ロッドファントムに対する線量換算係数を追加で評価した。

(1) 光子

(a) 方法

令和 4 年度事業と同様、それぞれ以下の方法により、標準量である空気カーマ*K*aに対する線量換算係数として計算した。評価に用いた単色光子に対する線 量換算係数は表 J 4-2 のとおりである。

(i) 光子エネルギー分布から評価

光子エネルギー分布から、(1)式により換算係数を算出した。γ線場については、コリメータ付き校正場及び 4π線源を利用した場それぞれについて評価した。X線場については、ISO 4037-1^[J14]の距離1mにおける標準スペクトル^[J22]を使用した。

(ii) 単色エネルギー(実効エネルギー等)の光子から評価

γ線場については、表J4-6及び表J4-7に示す単色の光子に対する線量換 算係数を評価した。X線場については、JISZ4511^[J15]では、40kV以上の線 質においては、実効エネルギーに該当する線量当量換算係数を利用してもよいことになっているため、この方法によって線量換算係数を試算した。実効エネルギーは文献^[J22]の値を参照し、表 J 4-2 で示される文献中の値を Log-Linear スケールで 4 点の Lagrange 補間することによって線量換算係数を評価した。蛍光 X 線場及び高エネルギー γ 線場については、この方法での評価は実施しなかった。

(iii) 文献値

国際的に合意された新たな実用量に対する線量換算係数は示されていない ものの、試算された研究報告^[J24]があり、比較として示した。蛍光X線場に ついては、試算された研究報告がないため、記載していない。

(b) 結果と考察

評価した線量換算係数を表J4-4~表J4-8に示す。これらの結果から、以下のことが示唆された。

- ・ 文献値との差異は、評価の方法に関わらず 2%以内に収まっている。
- スラブファントムと比較して、ロッドファントムでは散乱体積が小さいため ファントムによる後方散乱が少ない。60 keV 付近の後方散乱の影響が大きい 領域では、スラブファントムに比べてロッドファントムではその線量換算係 数は小さくなり、N-80 では 2/3 程度となる。一方で、ファントム後方散乱の 影響が小さくなる蛍光 X 線場や高エネルギー y 線場の領域ではファントムの 違いによる線量換算係数の差異はほとんどない。
- (c) まとめ

FRS で整備されている光子校正場に関して、ロッドファントムに対する皮膚の個人吸収線量換算係数を導出した。評価した線量換算係数は、文献で報告されている値と同程度であるので、 γ 線場、X 線場については、以下本報告書では文献報告値を用いる。蛍光 X 線場と高エネルギー γ 線場については、本項で試算した値を使用することとする。

表 J 4-4 評価した蛍光 X 線校正場におけるロッドファントムに対する皮膚の個人吸収線量換算係数

線質	評価				D _{ploca}	_{lskin} (α) _{rod} /. Gy/Gy)	K _a			
1772	手法	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT
F-Cu	(i)	0.94	0.94	0.93	0.90	0.82	0.62	0.38	0.00	0.44
F-Mo	(i)	1.05	1.05	1.04	1.04	1.02	0.95	0.82	0.17	0.69
F–Sn	(i)	1.11	1. 10	1. 11	1.09	1.08	1.05	0. 98	0.49	0. 87

表 J 4-5 評価した X 線校正場におけるロッドファントムに対する皮膚の個人吸収線量換算係数

線哲	評価	$ \begin{array}{c} $											
小水兵	手法	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT			
	(i)	1.14	1.14	1.14	1.13	1. 13	1. 11	1.05	0.65	0.96			
N-40	(ii)	1. 14	1.14	1.14	1.13	1. 12	1. 10	1.05	0.66	0.96			
	(iii)	1. 1373	1. 1393	1.1384	1.1303	1.1209	1. 102	1. 0437	0.6595	0.9599			
	(i)	1. 17	1. 18	1.18	1.17	1. 17	1. 15	1.10	0.80	1.04			
N-60	(ii)	1. 17	1. 18	1.18	1.18	1. 18	1.16	1.11	0. 81	1.04			
	(iii)	1. 1659	1. 1738	1.1729	1.1717	1.169	1. 1505	1. 1005	0.8048	1.0371			
	(i)	1. 19	1.19	1.19	1.19	1. 18	1. 17	1.13	0.87	1.07			
N-80	(ii)	1.19	1.19	1.18	1. 18	1. 18	1.16	1.13	0. 87	1.07			
	(iii)	1. 1903	1. 1913	1. 1858	1. 1857	1. 1802	1.1659	1.1305	0. 8735	1.0739			
	(i)	1.20	1. 20	1.19	1.19	1.19	1.18	1.15	0. 91	1.09			
N-100	(ii)	1.20	1. 20	1.19	1.19	1.19	1.18	1.15	0. 91	1.09			
	(iii)	1. 2016	1. 2024	1. 1939	1. 1935	1. 1851	1. 1779	1. 1497	0. 9052	1.0901			
	(i)	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.18	1.15	0. 92	1. 10			
N-120	(ii)	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.18	1.15	0. 92	1. 10			
	(iii)	1. 1899	1. 1902	1. 1879	1. 1889	1. 1867	1. 1777	1. 1495	0. 9231	1. 098			

(次頁へ続く)

線啠	評価	$\begin{array}{c} D_{p \text{ localskin}}(\alpha)_{\text{rod}}/K_{a} \\ (\text{Gy/Gy}) \end{array}$											
小小乒乓	手法	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT			
	(i)	1. 17	1.18	1.18	1.18	1. 18	1.17	1. 15	0. 94	1. 10			
N-150	(ii)	1. 18	1.18	1.18	1.18	1. 18	1. 17	1. 15	0. 94	1.10			
	(iii)	1. 1768	1.1769	1.1764	1. 181	1. 1805	1.1707	1. 1455	0. 9346	1.0995			
	(i)	1. 16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1. 14	0.95	1. 10			
N-200	(ii)	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1. 14	0.95	1. 10			
	(iii)	1. 161	1. 1569	1.1569	1.1625	1. 1624	1. 1565	1. 1362	0.953	1. 0958			
	(i)	1.16	1.15	1.15	1.15	1.15	1. 15	1. 13	0.96	1.09			
N-250	(ii)	1.16	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1. 13	0.96	1.09			
	(iii)	1. 157	1.1486	1. 1486	1.1494	1. 1502	1. 1493	1. 1293	0.9629	1.09			
	(i)	1. 15	1.14	1.14	1.14	1. 14	1.15	1. 12	0. 97	1.08			
N-300	(ii)	1.15	1.14	1.14	1.14	1.14	1. 15	1.12	0.97	1.08			
	(iii)	1. 1500	1.1426	1. 1426	1.1427	1.1452	1. 1451	1. 1251	0. 9706	1. 0876			

(前頁からの続き)

	評価手法	<u>.</u>				$D_{p \text{ locs}}$	_{alskin} (α) _{rod} / (Gy/Gy)	K _a			
		•	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT
	FRS コリメータ作	すき校正場	1. 12	1.12	1.12	1. 12	1.12	1.12	1. 11	1.02	1.09
	EDC 4 元 約酒	第4照射室	1. 12	1.12	1.12	1. 12	1.12	1. 12	1. 11	1.02	1.09
	「K34/1 秋/示	第3照射室	1. 12	1.12	1.12	1. 12	1.12	1.12	1. 11	1.02	1.09
	(牧正距離 1.000 m)	第1照射室	1. 12	1.12	1.12	1. 12	1.12	1.12	1. 11	1.01	1.09
(i)	FRS 4 π 線酒 -	第4照射室	1. 12	1.12	1.12	1. 12	1.12	1.12	1. 11	1.01	1.09
	FRS 4 ル 禄/尿 (拡正 55 離 2000 m)	第3照射室	1. 12	1.12	1.12	1. 12	1.12	1.12	1. 11	1.01	1.09
	(牧正距離 2.000 m)	第1照射室	1. 12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1. 11	1.01	1.09
	FRS 4π 線源	第4照射室	1. 12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1. 11	1.01	1.09
	(校正距離 3.000 m)	第3照射室	1. 13	1.12	1.12	1.13	1.13	1.13	1. 11	1.01	1.09
(ii)	662 keV 単色光	子	1. 12	1.12	1.12	1. 12	1.12	1.12	1. 11	1.02	1.09
(iii)	文献值 ^[J24]		1.1202	1.1201	1.1201	1.1201	1. 121	1. 121	1.1101	1.0178	1. 089

<u>表 J 4-6</u>評価した S-Cs 校正場におけるロッドファントムに対する皮膚の個人吸収線量換算係数

表 J 4-7 評価した S-Co 校正場におけるロッドファントムに対する皮膚の個人吸収線量換算係数

	評価手法		$\frac{D_{p \text{ localskin}}(\alpha)_{\text{rod}}/K_{a}}{(\text{Gy}/\text{Gy})}$										
			15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT			
(:)	FRS コリメータ付き校正場	1. 11	1.11	1.11	1. 12	1.12	1.12	1.11	1.04	1.09			
()	FRS 4π 線源	1. 11	1.11	1.11	1. 12	1.12	1.12	1.11	1.03	1.09			
(ii)	1.17323 MeV+1.33249 MeV 光子	1. 11	1.11	1.11	1. 12	1.12	1.12	1.11	1.04	1.09			
(iii)	文献値 ^[J24]	1. 1088	1.1088	1. 1088	1. 1171	1. 1172	1. 1172	1. 107	1.0362	1. 0885			

線質	評価	$\frac{D_{p \text{ localskin}}(\alpha)_{\text{rod}}/K_{a}}{(\text{Gy/Gy})}$								
W.A.	手法	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT
R-F	(i)	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1. 08	1.07	1.03	1.07
	(iii)	1.0729	1.078	1.078	1.0781	1.0781	1.0728	1.0678	1.0295	1.0617

表 J 4-8 評価した R-F 校正場におけるロッドファントムに対する皮膚の個人吸収線量換算係数

(2) β線

令和3年度事業及び令和4年度事業では、FRSの β 線校正場のうち、ISO 6980-1^[J16] (JIS Z 4514^[J17])で定める ⁹⁰Sr/⁹⁰Y、⁸⁵Kr 及び¹⁴⁷Pm 線源を使用したシリーズ1¹校正場について、眼の水晶体及び皮膚の線量管理に用いる実用量について線量 換算係数が評価された。しかしながら $D_{p \text{ local skin}}$ についてはスラブファントムのみ の評価であった。本事業では、 β 線についても末端部用線量計に対する線量計特性 試験を実施するため、評価されていないロッドファントムに対する線量換算係数を 追加で評価した。評価した校正場について表J 4-9 に示す。

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

表 J 4-9 換算係数を評価した β 線校正場

(a) 方法

 β 線については、現行では標準供給される基準量が 70 μ m 深さの組織吸収線 量 $D_t(0.07)$ であるため、 $D_t(0.07)$ からの換算係数として評価した。 ICRU Report95^[J5]においては、電子についてはフルエンスあたりの線量換算係数が角 度ごとに示されていることに加え、線量換算係数の算出方法(評価ファントム やその評価領域など)についても記載されている。令和 3 年度事業では、 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y と ⁸⁵Kr の校正場について、入射角 0°に対する $D_{local skin}(0°)/D_t(0.07)$ 及 $UD_{lens}(0°)/D_t(0.07)$ ついて、以下の 2 つの方法で評価され、ほぼ同じ結果が示 されている。

直接計算による評価

ICRU Report95^[J5]における換算係数評価手法と同様の手法を用いて、校正 点に配置した評価ファントム中の吸収線量を直接モンテカルロ計算により評 価する方法

② 校正点における電子フルエンスからの評価

ICRU Report95^[J5]に新たな実用量の定義に沿って、校正点における電子フルエンスから単色電子の線量換算係数から算出する方法

本事業では①の方法により、表 J 4-9 に示した β 線校正場での線量換算係数を評価した。

¹ JIS Z 4514^[15]ではシリーズ A

(i) 直接計算による評価

ICRU Report 95^[J5]において $D_{p \, local \, skin}(\alpha)_{rod}/\Phi$ の計算に用いられたファン トム (表面が 2 mm の皮膚層で覆われた 19 mm ϕ ×30 cm の ICRU 組織でで きたロッドファントム)を、線源からロッドファントムの軸に下した垂線上 の線源に面したロッドファントム表面を校正点に設置して (図 J 4-22 参照)、 深さ 50 μ m から 100 μ m の領域での平均吸収線量を計算することで $D_{p \, local \, skin}(\alpha)_{rod}/\Phi$ を評価した。線源から直接放出される光子については、 その影響が小さいため無視した。計算はモンテカルロコード PHITS 3.100 (EGS モード)^[J25]を使用し、光子及び電子は 1 keV まで追跡した。校正点に おける $D_t(0.07)/\Phi$ は令和 3 年度事業^[J7]及び令和 4 年度事業^[J8]で得られている ものを使用した。

(ii) 文献值

国際的に合意された新たな実用量に対する線量換算係数は示されていないものの、国外で線量換算係数を試算した報告があり^[J26]、比較として示した。なお、¹⁴⁷Pm場の入射角75°に対する線量換算係数は示されていない。



図 J 4-22 $D_{p \text{ local skin}}(\alpha)_{rod}/\phi$ の評価に用いた計算体系の例

(b) 結果と考察

評価した線量換算係数を表 J 4-10~表 J 4-12 に示す。60°以上の大きな入射角 を除けば文献値(ii)と 4%以内で一致している。また、現行実用量換算係数の比 較を図 J 4-23~図 J 4-25 に示したが、新たな実用量の定義では皮膚層の密度や 評価厚さが変わっている影響で、⁹⁰Sr/⁹⁰Y 場ではビルドアップによる大きな角度 での値が異なり、¹⁴⁷Pm 場では、全体的にやや小さな値となる。本事業では、 線量計の特性に与える影響を調査する目的のため、現行の標準量であるD_t(0.07) を基礎とした線量換算係数として計算により評価した。標準化においては、標 準量やトレーサビリティ、実測の観点からも詳細な検討が必要であるものと思 われる。

(c) まとめ

評価した線量換算係数も文献値と比較しても概ね同等であることから、以後の線量計特性試験の解析にあたっては、不確かさも含めて文献値を使用する。 ただし、データが示されていない¹⁴⁷Pm場の $D_{p \ local \ skin}$ (75°) $_{rod}$ については、本項で評価した値を用いることとする。

表 J 4-10 90Sr/90Y 場について評価したロッドファントムに対する個人局所皮膚吸収線量 換質係数

評価手法		$D_{\rm p\ local\ skin}(lpha)_{\rm rod}/D_t(0.07)$ (Gy/Gy)					
		0°	15°	30°	45°	60°	75°
(i)	直接計算	1.00	1.02	1.05	1.07	0.97	0.77
(ii)	文献値	1.008	1.013	1.051	1.051	0.985	0.789

表 J 4-11 ⁸⁵Kr 場について評価したロッドファントムに対する個人局所皮膚吸収線量換算

係数							
評価手法			D _{p local sk}	$_{\rm in}(\alpha)_{\rm rod}/D$	$t_t(0.07)$	(Gy/Gy)	
		0°	15°	30°	45°	60°	75°
(i)	直接計算	0.98	0.96	0.90	0.80	0.65	0.45
(ii)	文献値	0.955	0.938	0.892	0.798	0.661	0.492

表 J 4-12 ¹⁴⁷Pm 場について評価したロッドファントムに対する個人局所皮膚吸収線量換

算係数							
評価手法			D _{p local sk}	$_{\rm in}(\alpha)_{\rm rod}/D$	$t_t(0.07)$	(Gy/Gy)	
		0°	15°	30°	45°	60°	75°
(i)	直接計算	0.77	0.73	0.65	0.55	0.41	0.28
(ii)	文献値	0.741	0.715	0.663	0.565	0.440	_



図 J 4-23 評価したロッドファントムに対する新たな実用量の線量換算係数と現行実用量の線量換算係数との比較(⁹⁰Sr/⁹⁰Y 場)



図 J 4-24 評価したロッドファントムに対する新たな実用量の線量換算係数と現行実用量の線量換算係数との比較(⁸⁵Kr 場)



図 J 4-25 評価したロッドファントムに対する新たな実用量の線量換算係数と現行実用量の線量換算係数との比較(¹⁴⁷Pm 場)

J4.3線量計の特性評価に関する調査

令和3年度事業報告書^[J7]及び令和4年度事業報告書^[J8]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2機種、中性子用サーベイメータ2機 種、光子・β線用受動形個人線量計(体幹部用)1機種、中性子用受動形個人線量計(体 幹部用)1機種、光子・β線用電子式個人線量計1機種、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機種の 計12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、受動形個人線量計に関しては、国内で広く 使用されていて検出器が異なる線量計が他に2機種あり、末端部用の線量計も対象外とさ れていた。作業場モニタリングに用いる線量計に関しても、検出構造の異なる中性子サー ベイメータ1機種が国内で入手可能なほか、受動形線量計や据置型モニタを用いた作業環 境モニタリングも広く行われているが、試験されていなかった。また、光子に関しては、 30 keVまでしか試験されておらず、実用量の定義変更に伴う影響の大きい低エネルギー光 子についての試験が課題として残されていた。

また、令和4年度事業^[J8]では、回転照射装置や治具等を使用して二次標準機関である FRSにおいて線量計の方向特性試験を実施するのに必要な環境及び技術的基盤を整えた。 そこで、これらを利用し、作業環境モニタリング用の線量計については、令和4年度事業 までに試験した機種に加えて3機種、受動形個人線量計については、令和4年度事業まで に試験を実施した機種に、国内で線量管理に使用されている主要な6機種を追加してエネ ルギーや放射線入射方向に関する特性を取得し、特性に関する傾向について検討した。

放射線標準の国家計量標準は国立研究開発法人産業技術総合研究所が有しているが、 放射線防護目的で実用に供する線量計の校正・試験を全て国家標準機関で実施することは 現実的に不可能であり、現状においても計量トレーサビリティを確保した二次標準機関等 で、線量計の校正・試験サービスが行われている。従って、新たな実用量が導入されたと しても、二次標準機関等における校正や試験が、国家標準機関での校正や試験と同等の結 果を提供できることを検証しておく必要がある。令和4年度事業では、光子用サーベイメ ータ及び光子用受動形個人線量計(体幹部用)について、新たな実用量に係るエネルギー 特性試験の同等性が確認された。そこで、本事業では、光子用受動形個人線量計(水晶体 用)、中性子用サーベイメータ及び中性子用固体飛跡線量計について同一の試験を実施し て同等性を確認するとともに、光子用受動形個人線量計(体幹部用)については方向特性 試験の相互比較を実施する。

J4.3.1 方法

使用した線量計を表 J 4-13 に示す。体幹部用受動形個人線量計については、国内で

線量管理に使用されている機種をほぼ網羅している。本調査の目的は個々の線量計の 性能を示すものではなく、実用量の定義変更に伴う線量計測上の課題を探るために、 線量計特性の傾向を把握すること主眼を置いており、校正に用いた線質も製造メーカ 一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。特に L 社製受動形個人線量計については、メーカー仕様では光子用となって いるが、β線についても試験した。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^[J27]等に従い不確かさを評価した。*H*(3)については、現在法令での測定が要求さ れておらず、規格にもその許容範囲が示されていないが、ICRU Report 95^[J5]に記載さ れた全てのケースを検討するために調査に含めた。

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。

$$R = \frac{G}{C} \tag{2}$$

ここで、Cは基準器により測定した空気カーマ(率)、組織吸収線量(率)、もしくはフル エンス(率)に令和3年度事業、令和4年度事業及びJ4.2.1で評価した線量換算係数を 作用することによって求めた現行または新たな実用量に対する基準線量(率)、Gは線 量計の正味指示値である。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。

A 社製電離箱式サーベイメータについては、通気型であるため、その取扱説明書に従い、大気条件補正を施した。受動形線量計については、ISO/IEC 17025の認証を有する線量測定サービス機関に読み取り測定を依頼した。試験の様子を図J4-26~図J4-39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、1つ方向のみの照射とした。ROT 照射については、令和4年度事業^[J8]で ISO に定められている校正用ファントム及び回転台を使用した方法の妥当性が示されているため、これらと同じ手法を用いて試験した。

	線量計の種類*1			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*2	$H^{*}(10)^{*3}$	検出器:薄膜入射窓平行平板電離箱
			<i>H</i> ′(3)*3	測定範囲:60 keV~3 MeV(光子)
			<i>H</i> ′(0.07)	147 Pm~ 90 Sr/ 90 Y (β 線)
(ii)	中性子用サーベイメータ	B 社製中性子用サーベイメータ*2	<i>H</i> *(10)	検出器: ³ He比例計数管
				測定範囲:0.025 eV~約 15 MeV(中性子)
(iii)	中性子用サーベイメータ	C 社製中性子用サーベイメータ	<i>H</i> *(10)	検出器:有機混合ガス比例計数管
				測定範囲:0.025 eV~約 15 MeV(中性子)
(iv)	光子用エリアモニタ	D 社製可搬型γ線エリアモニタ	<i>H</i> *(10)	検出器 : Si 半導体
				測定範囲:50 keV~6 MeV(光子)
(v)	光子用受動形環境線量計	E 社製受動形環境線量計	<i>H</i> *(10)	検出器:OSL(Al ₂ O ₃ :C)
				測定範囲: 5 keV~10 MeV(光子)
(vi)	光子・β線用受動形個人線量計	F 社製受動形個人線量計(体幹部用)	$H_{\rm p}(10)$	検出器:RPL(銀活性リン酸塩)
	(体幹部用)		$H_{\rm p}(0.07)$	測定範囲: 10 keV~10 MeV(光子)
				$0.2~{ m MeV}{\sim}0.8~{ m MeV}$ (eta 線)
(vii)	光子・β線用受動形個人線量計	G 社製受動形個人線量計(体幹部用)*2	$H_{\rm p}(10)$	検出器:OSL(Al ₂ O ₃ :C)
	(体幹部用)		$H_{\rm p}(0.07)$	測定範囲: 5 keV~10 MeV(光子)
				150 keV \sim 10 MeV (β 線)
(viii)	光子・β線用受動形個人線量計	H 社製受動形個人線量計(体幹部用)	$H_{\rm p}(10)$	検出器:TLD (LiF:Mg,P,Cu)
	(体幹部用)		$H_{\rm p}(0.07)$	測定範囲: 16 keV~1.25 MeV(光子)
				0.8 MeV (β 線)
(ix)	光子・β線用受動形個人線量計	I 社製受動形個人線量計(水晶体用)*2	$H_{\rm p}(3)$	検出器 : TLD(LiF)
	(水晶体用)			測定範囲:15 keV~6.3 MeV(光子)
				$1.0 \mathrm{MeV} \sim 3.0 \mathrm{MeV}$ (β 線)
(x)	光子用受動形個人線量計	J社製受動形個人線量計(末端部用)	$H_{\rm p}(0.07)$	検出器:TLD (LiF)
	(末端部用)			測定範囲:15 keV~6.3 MeV(光子)
(xi)	β線用受動形個人線量計	K 社製受動形個人線量計(末端部用)	$H_{\rm p}(0.07)$	検出器 : TLD(LiF)
	(末端部用)			測定範囲:700 keV~3.0 MeV(β線)

表 J 4-13 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

(次頁へ続く)

(前頁からの続き)

線量計の	測定量	主な仕様	
(xii) 光子用受動形個人線量計 (末端部用)	L 社製受動形個人線量計(末端部用)	<i>H</i> _p (0.07)	検出器 : TLD(LiF(Mg,Ti)) 測定範囲 : 16 keV~1.25 MeV(光子)
(xiii) 中性子用受動形個人線量計 (体幹部用)	M 社製受動形個人線量計(体幹部用) *2	<i>H</i> _p (10)	検出器: PADC 測定範囲: 0.025 eV~0.5 eV (熱中性子) 24 keV~15 MeV (速中性子)
(xiv) 光子・中性子用受動形個人線量計 (体幹部用)	N 社製受動形個人線量計(体幹部用)	<i>H</i> _p (10)	検出器: TLD(LiF(Mg,Ti)) 測定範囲:16 keV~1.25 MeV(光子) 0.025 eV~4.5 MeV(中性子)

*1 複数記載されているものについては、複数の線種を測定できるタイプのものである。

*2 令和4年度事業[J8]において試験された線量計と同機種のものである。

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



図 J 4-26 A 社製電離箱式サーベイメータの蛍光 X 線に対する特性試験の様子



図 J 4-27 B 社製中性子用サーベイメータの単色中性子に対する特性試験の様子



図 J 4-28 C 社製中性子用サーベイメータの熱中性子に対する特性試験の様子



図 J 4-29 D 社製可搬型 γ 線エリアモニタの高エネルギー γ 線に対する特性試験の様子



図 J 4-30 E 社製受動形環境線量計の X 線に対する特性試験の様子



図 J 4-31 F 社製受動形個人線量計(体幹部用)の蛍光 X 線に対する特性試験の様子



図 J 4-32 G 社製受動形個人線量計(体幹部用)のγ線に対する特性試験の様子



図 J 4-33 H 社製受動形個人線量計(体幹部用)のβ線に対する特性試験の様子



図 J 4-34 I 社製受動形個人線量計(水晶体用)の蛍光 X 線に対する特性試験の様子



図 J 4-35 J 社製受動形個人線量計(末端部用)の高エネルギーγ線に対する特性試験の 様子



図 J 4-36 K 社製受動形個人線量計(末端部用)のβ線に対する特性試験の様子



図 J 4-37 L 社製受動形個人線量計(末端部用)の X 線に対する特性試験の様子



図 J 4-38 M 社製中性子用受動形個人線量計(体幹部用)の減速中性子に対する特性試験 の様子



図 J 4-39 N 社製中性子用受動形個人線量計(体幹部用)の RI 中性子に対する特性試験の様子

J4.3.2 特性の傾向

特性試験の結果を図J4·40~図J4·116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^[J28](サ ーベイメータ)及び IEC 62387^[J29](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。H'(3)については、IEC 60846·1^[J28] に規定がないため図示していない。中性子については、JIS Z 4341^[J30]やJIS Z 4416^[J31] に規定される許容範囲を示している。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。

- 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J4-40~図J4-54 参照)
 - ・光子については、33 keV 以上は令和4年度事業で取得されたものであり、本年度事業では、課題とされた低エネルギー光子に関する特性を蛍光 X 線場を用いて取得した。β線に関する特性については令和4年度事業報告書^[J8]を参照されたい。
 - *H* 及び D'*_{lens} 特性については、低エネルギーで過大応答する。特に *H**に関しては、
 20 keV 付近で応答は最大となり、10 倍以上の過大応答となる。*D'*_{lens}に関しては、
 8 keV では 10 倍以上の過大評価となり、現行実用量と比べても大きくなるが、17.6 keV 以上では、その応答は 2 倍以内に収まる。
 - ・D'_{lens}に対する方向特性については、良好であり、8 keV の過大応答性も角度ととも に小さくなる。
 - ・D'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せず、低エ ネルギーにおいても良好な特性を有している。
 - ・図J4-55にS-CsのH*の一点で再校正した場合の各特性を示した。光子のH*特性については40keV以下で、D'lens特性については15keV以下で過大応答し、D'local skin については40~100keVあたりで若干過小応答する。β線に対するD'lensは2倍以上の過大応答となる一方、D'local skin については良好な特性を示す。H*の40keV以下での応答変化は急激であるため、連続スペクトルをもつ放射線作業場でどの程度の影響となるか注意する必要がある。
- ② 光子用エリアモニタ (D 社製可搬型γ線エリアモニタ)
 (図 J 4-56 参照)
 - ・50 keV でカットオフされており、それ以下のエネルギーでは計測できないが、50 keV 以上のエネルギーでは、良好な特性を有している。エリアモニタについては、
 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、たとえ散乱線の状況等が
 変化したとしても新たな実用量においても適切に測定できるものと考えられる。

③ 光子用受動形環境線量計(E社製受動形環境線量計)

(図J4-57参照)

- ・線量アルゴリズムにより線量が評価されるタイプのものであり、新たな実用量 H* に対して低エネルギーの 33 keV で2倍程度の応答を示すが、60 keV 以上では良好 で現行量との差異も小さい。
- ④ 光子・β線用受動形個人線量計(F 社製、G 社製、H 社製受動形個人線量計(体幹部用))

(図J4-58~図J4-94参照)

- ・何れも材料や厚さの異なるフィルタに覆われた複数の素子を備え、線量アルゴリズムにより線量が評価されるタイプのものである。
- ・G 社製受動形個人線量計の H_p に対する 33 keV 以上の光子の特性については、令和 4 年度事業^[J8]で取得されたものである。なお、8 keV 光子に対する H_p 応答について は評価できなかった。G 社製受動形個人線量計の β 線に対する特性については、令 和 4 年度事業報告書^[J8]を参照されたい。
- ・全ての線量計に共通して、光子に関する H_p 特性においては、50 keV 以下では過大 な応答を示した。一方で、 $D_{p \text{ local skin}}$ 特性については、良好な特性を示したが、8 keV においては、G 社製受動形線量計では 0°及び 30°で過大となり、H 社製受動形線 量計では過小となった。
- ・光子に対する方向特性については、 H_p 、 D_p local skin ともに新たな実用量においても特 性変化は大きくない。また、ROT 照射においても良好な特性を示している。
- ・新たな実用量で再校正することにより影響を緩和することができる。
- ・β線に対する D_p local skin 特性については、現行実用量とその特性は変わらない。低エ ネルギーの¹⁴⁷Pm に対しては、何れも測定は難しく、F 社製受動形線量計を除いて は評価できなかった(メーカーの仕様範囲からも外れている)。また、G 社製受動 形線量計では⁸⁵Kr(メーカーの仕様範囲外)や入射角度の大きい場合には、応答が 小さくなる傾向があったが、現行実用量でも同様の傾向であり、線量計自身の特性 と考えられる。
- ⑤ 光子・β線用受動形個人線量計(I社製受動形線量計(水晶体用))
 (図J4-95~図J4-98 参照)
 - ・33 keV以上の光子の特性については、令和4年度事業^[J8]で取得されたものである。 光子に関する 0°以外の入射角度でのエネルギー特性及びβ線に対する特性につい ては、令和4年度事業報告書^[J8]を参照いただきたい。
 - ・26.2 keV 以上では良好であるが、8 keV では過大応答を示し、その程度は新たな実 用量で大きく8倍以上にもなる。

- ・方向特性についても、試験した全てのエネルギー領域において引き続き良好であり、 ROT 照射においても良好な特性を示していた。
- ⑥ 光子・β線用受動形個人線量計(J 社製、K 社製、L 社製受動形線量計(末端部用))

(図 J 4-98~図 J 4-110 参照)

- ・光子に対する応答特性は 8 keV において低下が見られるものの、それ以外の領域で は現行実用量と同様に良好であり、特段の対応なく適切に測定できると考えられる。
- ・方向特性についても、それほど大きな影響はない。J 社製受動形線量計については、 ROT 照射及び 180°照射試験も実施したが、良好な特性を示していた。
- ・ β線に対する応答特性は、エネルギーの低下と入射角度の増大に伴い低下し、
 ¹⁴⁷Pmに対する応答は評価できなかった(メーカーの仕様範囲外でもある)。現行実用量との差異はほとんどなく、線量計自身の特性と考えられる。
- ⑦ 中性子サーベイメータ(B社製、C社製中性子サーベイメータ)(図J4-111~図J4-112参照)
 - ・B 社製中性子サーベイメータは、²⁴¹Am-Be、²⁵²Cf や黒鉛減速場など数 MeV 付近に エネルギー分布をもつ中性子場においては良好なレスポンスを示しており、実用量 変更による影響も軽微である。このようなエネルギー領域の中性子が支配的な場に おいては、従来のように²⁴¹Am-Be や ²⁵²Cf 線源を用いた校正により、サーベイメ ータの計数と線量当量を対応付ける手法が引き続き適用可能と思われる。一方で、 熱中性子場や、1 MeV 以下の熱外中性子が支配的な場においては、実用量変更によ り過大応答となる傾向があり、とくに 144 keV の単色中性子に対しては、2.5 倍ほ どの過大応答となった。
 - ・C社製中性子サーベイメータも、数MeV付近にエネルギー分布をもつ中性子場においては良好なレスポンスを示しており、実用量変更による影響も軽微と言える。しかしながら熱中性子に対しては、3倍以上の過大応答となった。本サーベイメータは、反跳陽子式であるため、今回試験を行わなかった数100keVの領域では、現行実用量で大きく過小評価する傾向を示すと思われる。新実用量を適用した場合の影響も今後行う必要がある。
 - ・いずれのサーベイメータも、熱中性子~数 100 keV のエネルギー領域の中性子に対するレスポンスを調整するハード的な改良、または、作業環境模擬中性子場を利用するなど、使用する作業場の中性子エネルギー分布に応じた校正定数を使用するなどのソフト面での対応が必要になると思われる。
- ⑧ 受動形中性子個人線量計(M社製、N社製受動形中性子個人線量計(体幹部用))

(図J4-114~図J4-116参照)

- ・M 社製個人線量計の H_p特性に関しては、MeV 領域にエネルギー分布をもつ中性子 場(黒鉛減速場を含む)においては良好な応答を示しており、実用量変更による 影響も軽微である。一方、1 MeV 以下の領域では、実用量の変更により過大応答 する兆候が見られ、熱中性子や 144 keV に対しては2倍以上の過大応答を示した。 低エネルギー中性子に対する感度を下げるために、ラジエータやコンバータの調 整、または、線量評価アルゴリズムの修正などの対応が必要になると思われる。 方向特性については、入射角度が大きくなるにつれ、レスポンスが低下する傾向 が見られている。
- ・N 社製の個人線量計は、²⁵²Cf 及び熱中性子により感度校正が行われている。中間エネルギー帯においてエネルギー補償なされず、線量評価値は、²⁵²Cf 換算値または熱中性子換算値のいずれかとして提供される。そのため、現行実用量の²⁵²Cf と熱中性子においては、1程度の良いレスポンスが得られているが、他のエネルギーにおいては、過小または過大な応答を示す。とりわけ、黒鉛減速場においては、熱中性子換算として評価値が与えられたため、著しく過小評価することとなった。新たな実用量への対応に併せて、多様なエネルギー分布をもつ中性子場に対する線量評価方法が検討されることが望ましい。方向特性については、今回評価した²⁵²Cf と²⁴¹Am-Be の試験において、現行/新実用量の違い、入射角度の違いによる、レスポンスの有意な変化は見られなかった。



図 J 4-40 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 4-41 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(3)及び D'_{lens} に対する光子エネルギー特性 (入射角度: 0°、S-Cs H^{*}(10)で校正(規格化))



図 J 4-42 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(3)及び D'_{lens}に対する光子エネルギー特性 (入射角度:15°、S-Cs H^{*}(10)で校正(規格化))



図 J 4-43 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(3)及び D'lens に対する光子エネルギー特性 (入射角度: 30°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))



図 J 4-44 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(3)及び D'_{lens}に対する光子エネルギー特性 (入射角度:45°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))



図 J 4-45 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(3)及び D'_{lens}に対する光子エネルギー特性 (入射角度: 60°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))



図 J 4-46 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(3)及び D'_{lens}に対する光子エネルギー特 性(入射角度: 75°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))









図 J 4-48 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(0.07) 及び D'_{local skin} に対する光子エネル ギー特性(入射角度: 0°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))



図 J 4-49 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(0.07) 及び D'_{local skin} に対する光子エネル ギー特性(入射角度: 15°、S-Cs H*(10)で校正 (規格化))


図 J 4-50 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(0.07) 及び D'_{local skin} に対する光子エネル ギー特性(入射角度: 30°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))



図 J 4-51 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(0.07) 及び D'_{local skin} に対する光子エネル ギー特性(入射角度: 45°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))



図 J 4-52 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(0.07) 及び D'_{local skin} に対する光子エネル ギー特性(入射角度: 60°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))



図 J 4-53 A 社製電離箱式サーベイメータの H'(0.07) 及び D'_{local skin} に対する光子エネル ギー特性(入射角度: 75°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))



図 J 4-55 A 社製電離箱式サーベイメータを S-Cs に対する H*で再校正(調整) したとき

Photon energy (MeV)

の特性

光子については下軸、β線については上軸でプロットした



図 J 4-56 D 社製可搬型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))



(入射角度:0°、S-Cs H*(10)で校正(規格化))



図 J 4-58 F 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(10)及び H_pに対する光子エネルギ
一特性(入射角度:0°、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))



一特性(入射角度:30°、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))



図 J 4-60 F 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(10)及び H_pに対する光子エネルギ 一特性(入射角度:60°、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))



図 J 4-61 F 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(10)及び H_pに対する光子エネルギ 一特性(入射角度:75°、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))



図 J 4-62 F 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(10)及び H_pに対する光子エネルギ 一特性(入射角度: ROT、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))



凡例における角度は放射線の入射角度を表す。



図 J 4-64 F 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal 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°)で校正(規格化))



図 J 4-65 F 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal 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°)で校正(規格化))



図 J 4-66 F 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal 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°)で校正(規格化))



図 J 4-67 F 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal 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°)で校正(規格化))



(S-Cs *H*_p(0[°])で校正(規格化)) 凡例における角度は放射線の入射角度を表す。



図 J 4-69 F 社製受動形個人線量計(体幹部用)の *H*_p(0.07)及び *D*_{plocal skin} に係る β 線に 対するエネルギー特性(入射角度:0°、⁹⁰Sr/⁹⁰Y *H*_p(0.07,0°)で校正(規格化))



図 J 4-70 F 社製受動形個人線量計(体幹部用)の *H*_p(0.07)及び *D*_{plocal skin} に係る β 線に 対するエネルギー特性(入射角度:15°、⁹⁰Sr/⁹⁰Y *H*_p(0.07,0°)で校正(規格化))



図 J 4-71 F 社製受動形個人線量計(体幹部用)の *H*_p(0.07)及び *D*_{plocal skin} に係る β 線に 対するエネルギー特性(入射角度:30°、⁹⁰Sr/⁹⁰Y *H*_p(0.07,0°)で校正(規格化))



図 J 4-72 F 社製受動形個人線量計(体幹部用)の *H*_p(0.07)及び *D*_{p local skin} に係る β 線に 対するエネルギー特性(入射角度:45°、⁹⁰Sr/⁹⁰Y *H*_p(0.07,0°)で校正(規格化))



図 J 4-73 F 社製受動形個人線量計(体幹部用)の *H*_p(0.07)及び *D*_{p local skin} に係る β 線に 対するエネルギー特性(入射角度:60°、⁹⁰Sr/⁹⁰Y *H*_p(0.07,0°)で校正(規格化))



図 J 4-74 G 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(10)及び H_pに対する光子エネルギ
一特性(入射角度:0°、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))



図 J 4-75 G 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(10)及び H_pに対する光子エネルギ 一特性(入射角度: 30°、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))



図 J 4-76 G 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(10)及び H_pに対する光子エネルギ 一特性(入射角度:60°、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))



図 J 4-77 G 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(10)及び H_pに対する光子エネルギ 一特性(入射角度:75°、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))



図 J 4-78 G 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_pに対する光子エネルギー特性(入 射角度: ROT、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))







図 J 4-80 G 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal 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°)で校正(規格化))



図 J 4-81 G 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal 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°)で校正(規格化))



図 J 4-82 G 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal skin} に係る光子に 対するエネルギー特性(入射角度:45°、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))



図 J 4-83 G 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal 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°)で校正(規格化))



図 J 4-84 G 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal 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°)で校正(規格化))



 図 J 4-85 G 社製受動形個人線量計(体幹部用)の D_{plocal skin} に係る光子に対するエネル ギー特性(S-Cs H_p(0°)で校正(規格化))
凡例における角度は放射線の入射角度を表す。



図 J 4-86 H 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(10)及び H_pに対する光子エネルギ
一特性(入射角度:0°、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))



図 J 4-87 H 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(10)及び H_pに対する光子エネルギ 一特性(入射角度:60°、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))



図 J 4-88 H 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_pに対する光子エネルギー特性(入 射角度: ROT、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))



⁽S-Cs $H_p(0^\circ)$ で校正(規格化))

凡例における角度は放射線の入射角度を表す。



図 J 4-90 H 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal skin} に対する光子 エネルギー特性(入射角度:0°、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))



図 J 4-91 H 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal skin} に対する光子 エネルギー特性(入射角度:60°、S-Cs H_p(10,0°)で校正(規格化))



図 J 4-92 H 社製受動形個人線量計(体幹部用)の D_{plocal skin} に対する光子エネルギー特 性

(S-Cs *H*_p(0°)で校正(規格化)) 凡例における角度は放射線の入射角度を表す。



図 J 4-93 H 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal skin} に係る⁹⁰Sr/⁹⁰Y β線に対する方向特性(⁹⁰Sr/⁹⁰Y H_p(0.07,0°)で校正(規格化))



図 J 4-94 H 社製受動形個人線量計(体幹部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal skin} に係る⁸⁵Kr β 線に対する方向特性(⁹⁰Sr/⁹⁰Y H_p(0.07,0°)で校正(規格化))



図 J 4-95 【 社製受動形個人線量計 (水晶体用)の H_p(3)及び D_{plens} に対する光子エネル ギー特性 (入射角度: 0°、S-Cs H_p(3,0°)で校正(規格化))



図 J 4-96 I 社製受動形個人線量計(水晶体用)の D_{plens}に対する光子エネルギー特性 (入射角度: ROT、S-Cs H_p(3,0°)で校正(規格化))



 図 J 4-97 I 社製受動形個人線量計(体幹部用)の D_{plens}に対する光子エネルギー特性 (S-Cs D_{plens}(0°)で校正(規格化))

0°(33 keV 以上の領域を除く)及び ROT 照射以外については令和4年度事業報告書^[J8]で報告されている値をプロットした。凡例における角度は放射線の入射角度を表す。



図 J 4-98 J 社製受動形個人線量計(末端部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal skin} に対する光子 エネルギー特性(入射角度:0°、S-Cs H_p(0.07,0°)で校正(規格化))

 $H_p(0.07)_{rod}$ に対する換算係数は ISO 4037-3 において、1.25 MeV までしか示されていないため、高エネルギー γ 線に対しては $H_p(0.07)_{rod}$ レスポンスを示していない。



図 J 4-99 J 社製受動形個人線量計(末端部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal skin} に対する光子 エネルギー特性(入射角度: 30°、S-Cs H_p(0.07,0°)で校正(規格化))



図 J 4-100 J 社製受動形個人線量計(末端部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal skin} に対する光子 エネルギー特性(入射角度:60°、S-Cs H_p(0.07,0°)で校正(規格化))

 $H_p(0.07)_{rod}$ に対する換算係数は ISO 4037-3 において、1.25 MeV までしか示されていないため、高エネルギー γ 線に対しては $H_p(0.07)_{rod}$ レスポンスを示していない。



図 J 4-101 J 社製受動形個人線量計(末端部用)の D_{plocal skin} に対する光子エネルギー特 性(入射角度: 180°、S-Cs H_p(0.07,0°)で校正(規格化))







図 J 4-103 J 社製受動形個人線量計(末端部用)の D_{plocal skin} に対する光子エネルギー特 性





図 J 4-105 K 社製受動形個人線量計(末端部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal skin} に係る⁸⁵Kr β 線に対する方向特性(⁹⁰Sr/⁹⁰Y H_p(0.07,0°)で校正(規格化))



図 J 4-106 L 社製受動形個人線量計(末端部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal skin} に対する光子 エネルギー特性(入射角度:0°、S-Cs H_p(0.07,0°)で校正(規格化))



図 J 4-107 L 社製受動形個人線量計(末端部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal skin} に対する光子 エネルギー特性(入射角度:60°、S-Cs H_p(0.07,0°)で校正(規格化))



⁹⁰Sr/⁹⁰Yβ線に対する方向特性(⁹⁰Sr/⁹⁰YH_p(0.07,0°)で校正(規格化))



図 J 4-110 L 社製受動形個人線量計(末端部用)の H_p(0.07)及び D_{plocal skin} に係る⁸⁵Kr β 線に対する方向特性(⁹⁰Sr/⁹⁰Y H_p(0.07,0°)で校正(規格化))





(上)入射角度: 0°、252Cf H(10)で校正(規格化)したもの

(下) 横軸を対数とし、エネルギーレスポンス(文献値)を重ねた。



図 J 4-112 C 社製中性子サーベイメータの H*(10)及び H*に対する中性子エネルギー特性 (入射角度: 0°)



図 J 4-113 M 社製受動形中性子個人線量計(体幹部用)の H_p(10)及び H_pに対する中性 子エネルギー特性(入射角度:0°)



図 J 4-114 M 社製受動形中性子個人線量計(体幹部用)の H_p(10)及び H_pに対する中性 子方向特性

144 keV 以外については令和4年度事業報告書[J8]より再掲した。



図 J 4-115 N 社製受動形中性子個人線量計(体幹部用)の H_p(10)及び H_pに対する中性 子エネルギー特性(入射角度:0°)



図 J 4-116 N 社製受動形中性子個人線量計(体幹部用)の H_p(10)及び H_pに対する中性 子方向特性

J4.3.3 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。課題と対応策については、(1) 校正・試験事業者、(2)線量計メーカー、(3)線量計使用者、のそれぞれの観点か ら整理した。

(1) 校正・試験事業者

【課題1】新たな実用量に対する校正に関する標準化

本事業で示したとおり、使用する校正場に対して新たな実用量に対する線量換 算係数が適切に評価されていれば、新たな実用量で適切に校正や試験することは 可能である。また、校正や試験の手順、トレーサビリティの確保についても、本 事業で実施したとおり、これまでと変わらないと考えられる。一方で、国内では 計量法に基づく校正事業者や産業標準化法に基づく試験事業者が認証に基づく質 の高い標校正・試験サービスを提供しているが、こうした制度の下で実施してい くうえでも、標準的な線量換算係数や個人モニタリングに使用する線量計の校 正・試験に用いるファントムなども含め、早期に JIS 等の規格で標準化される必 要がある。

→(対応策)本事業などを通じて、技術的な知見を蓄積するとともに、ISO 等での動向を監視し、それに合わせて国内における標準化の議論を早期に実施していくことが重要であろう。

【課題2】適切な校正線質の選択

(2)でも言及するように、現行の線量計でも校正線質を線量計の使用環境に あわせて変更することで、影響を緩和することが可能である。個々の状況に応じ て校正依頼者が決定するものでもあるものの、標準的な校正線質の検討をしてお く必要があろう。

→ (対応策)線量計特性の傾向を把握して、保守的な評価、想定される使用現場でのエネルギー分布、校正場の利便性や校正コストなどを考慮して、校正線質を 提案することが望ましい。中性子と低エネルギー光子については、作業環境を模擬した場を利用した校正も検討の余地があるかもしれない。

【課題 3】線量換算係数が示されている ROT などの特性試験の必要性

ICRU Report 95¹⁵¹では一部の線種と測定量について ROT や 180°に対する線 量換算係数も示されている。しかしながら、現行の IEC や ISO、JIS では方向性 を持つ測定量に対してこうした照射は規定されておらず、こうした性能試験が必 要かの検討が必要である。

→ (対応策)本事業での特性試験結果からは、光子については、60°までの角度 特性が良好であれば、ROT 照射においても0°入射と同等のエネルギー特性を有
していた。ファントムの妥当性も含めて、さらなる技術的知見が必要であろう。 【課題 4】その他の実務的課題

本事業の遂行でも課題となったが、熱中性子や蛍光 X 線などの一部の線質については、線量換算係数が小さくなるために、影響が大きい線質であるものの、照 射時間が長くなり規定の線量を照射することが困難になる可能性がある。

(2)線量計メーカー

【課題1】低エネルギー光子に対する Hp 及び H*に対する過大応答

低エネルギー光子に関する過大応答改善を検討する必要があるものと考えられる。

→ (対応策) 受動形線量計のように線量評価アルゴリズムを用いているものや、 G(E)関数を用いたサーベイメータなどは演算を変化させるのみであるので、対応 は比較的容易と考えられる。特に、本事業で特性試験を行ったような市販線量計 については方向特性はそれほど影響を受けず、ROT 照射においても良好な応答 を示しているため、低エネルギー領域におけるエネルギー応答改善を目標とすれ ば対応できるかもしれない。また、線量計の使用領域によっては、新たな実用量 で再校正するだけで十分なケースもある。

本事業では、線量計測上の課題を探るため、低エネルギー領域では単色性の良 い蛍光 X 線場を使用した。実際の放射線作業場ではエネルギー分布をもつ場合が ほとんどであり、使用用途が限られている場合は、作業環境に近い連続スペクト ルを持つ校正場での校正などで対応できる可能性がある。

【課題2】低エネルギー領域の中性子に対する応答改善

熱中性子~数 100 keV 領域の中性子に対する応答の改善を検討する必要がある。 → (対応策) サーベイメータについてはハード的な改良が望まれるが、需要の状 況と開発コストのバランスとモデル変更のタイミングによると思われる。線量評 価アルゴリズムを用いた個人線量計については、その修正によって改善できる可 能性がある。一方で、既存の線量計の構造を変えることなく作業環境模擬中性子 場の利用など線量計が使用される作業場の中性子エネルギー分布に応じた校正定 数を使用する、線量計の仕様範囲を限定するなどのソフト面でも対応できるかも しれない。

【課題3】測定量間での差異

本事業で実施した A 社製電離箱式サーベイメータでは H*のほか、フィルター を変更したり取り外したりすることで D'lens や D'local skin の測定も可能である。図 J 4-47 や図 J 4-54 に示されるとおり、H*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。 → (対応策) 測定量に応じた校正定数を乗じるなどの方策が考えられる。

【課題4】線量計の性能要件

現状は IEC や ISO、JIS に基づいて各線量計に求める各種の性能要件が規定さ れており、本報告書でも許容範囲を示した。これまで実用量は防護量を過大に評 価していたこともあり、新たな実用量に対しては過大応答を示すケースが多い。 一方で、再校正によりエネルギー領域や入射角によっては、許容範囲ながら過小 応答となるケースも多々ある。新たな実用量は防護量と近い値となることから、 こうした過大応答や過小応答の許容範囲を見直す必要があるかもしれない。 → (対応策)線量測定に求められる精度や実用量はモニタリングに使用する防護

量の代用量であるという点、安全側の評価を行う必要性に加え、改善に必要なコ スト等も踏まえた上で、線量計の性能要件を再検討することが望ましい。

(3)線量計使用者

【課題1】低エネルギー光子に対する応答について

光子用サーベイメータや受動形環境線量計については、20 keV 程度の低エネ ルギーでは、著しく過大に H*を測定する可能性がある。同様、受動形個人線量 計においても現行の線量計のままでは H_pを過大に測定する。

→ (対応策) 図 J 4-1 に示されるように、この領域では H*が小さな量となるた め、放射線管理上 D'lens もしくは D'local skin の方が重要となってくる。一方で、 H*と D'lens もしくは D'local skin との関係は、図 J 4-117 に示すように数 100 keV 以下では現行実用量と比べて大きいため、H*の過大応答を許容するか、影響の 少ない D'local skin 用のサーベイメータを用いて測定する、といったことも考えられ る。現状の放射線管理においては特性の良好なサーベイメータを用いて H*(10) のみ測定評価する場合がほとんどであり、H'(3)の測定については法令でも規定 されておらず、一部で自主的に行われているのみである^[32]。H'(0.07)についても、 法令上 H*(10)の 10 倍を超えるおそれのある場所について測定が必要(放射性同 位元素等の規制に関する法律施行規則(令和5年10月1日施行) 第20条や電離 放射線障害防止規則(令和5年4月1日施行)第54条など)とされているのみ である。新たな実用量導入時においても合理的かつ適切な放射線管理を行うため にも、線量計の応答特性も鑑みて、どの測定量を測定評価するか、校正線質や調 整の有無などの考え方を整理しておく必要があるかもしれない。

個人モニタリングについては、線量管理に用いる線量計については、国内では 線量測定サービスを利用しているケースがほとんどであることから、H_pの過大応 答についても線量測定サービス機関の対応に留まると考えられる。また、通常体 幹部(頭頚部を含む)で H_p(10)と H_p(0.07)の両方の測定がされているため、光子 については現行と同様のロジックで実効線量、眼の水晶体の線量、皮膚線量を算 定することが可能であろう。一方で、日常的な作業管理等に補助的に用いる線量 計(電子式線量計など)については、ユーザーによる応答特性の改善は困難であ ることから課題は残る。

【課題2】再校正に伴う計測値の変化及び保守性の確保

新たな実用量に対する再校正は、線量計の使用者で対応できる部分であるもの の、再校正の前後で同一の放射線場を測定したとしても測定値が変わってしまう。 また、校正の時期によって、再校正したものとしていないものが混在すると、使 用する線量計によって、同一の場、あるいは同一の被ばくに対して異なる測定値 を与えてしまう可能性がある。中性子については、しばしば校正に用いられる熱 中性子と²⁴¹Am-Beの応答を比較すると、本事業でのB社製中性子サーベイメー タのように、これまでは²⁴¹Am-Beに対する応答の方が熱中性子に対する応答よ り大きかったものが、新たな実用量では熱中性子の方が大きくなり逆転する。放 射線場のエネルギー分布が不明な場合は、校正定数が大きい熱中性子を用いて保 守的に線量評価する例もあったが、見直す必要があるかもしれない。

→(対応策)計測量の変化については、測定評価に関係する者の計測量への理解 が重要であろう。また、管理する放射線場のエネルギー分布を考慮したうえで、 校正線質を決定することが必要である。

その他、本事業では、眼の水晶体の線量管理に用いる実用量及び局所皮膚の線量管理に用いる実用量に関して、中性子用線量計の特性に関する調査は実施しなかった。 ICRU Report 95^[15]では、これらの実用量は吸収線量で与えられるが、必要に応じて特定の健康影響に関する RBE 加重吸収線量を適用する可能性も言及されている。そのため、中性子に関するこれらの測定量の取扱いについては、慎重に議論し、どのように線量計測及び評価を実施していくかを検討していく必要があるものと考えられる。



図 J 4-117 H*と D'lens、 D'local skin との関係

J4.3.4 トレーサビリティ確保に関する調査

FRS は産業標準化法に基づく試験所として登録されており、国家標準とトレーサビリ ティを確保して現行実用量を用いた試験サービスを実施している二次標準機関である。 二次標準機関である FRS と国家標準である産業技術総合研究所の双方において実施され た線量計の特性試験を基に、新たな実用量に対する線量計の応答をそれぞれ独立して評 価したものを比較することにより、結果の同等性を確認することとした。本事業では、 令和 4 年度事業までに実施されていない線種、測定量、及び方向特性のうち、いくつか について比較することとした。

(1) 方法

比較には、FRS 及び国家標準双方において実施された線量計の特性試験結果を利用 した。比較に使用した線量計の種類、線種、測定量及び試験条件について表 J 4-14 に まとめた。B 社製中性子用サーベイメータは同一個体について照射された結果を基に、 H^* に対する応答をそれぞれ評価した。なお、本機種は光子に対する $H^*(10)$ を表示する 型式のものである。一方、受動形個人線量計については、同一型式の線量計 4 個をそ れぞれ照射された結果を基に、 H_p に対する応答を評価した。この場合も $H_p(10)$ として 評価された値で H_p に対する応答を、 $H_p(0.07)$ として評価された値で D_p local skin に対す る応答を求めた。

線量計応答は、以下の式で定義されるEn数により比較した。En数は1以下の場合、

不確かさの範囲内で一致しているとみなすことができる。

$$E_n = \frac{|R - R_{\rm ref}|}{\sqrt{u^2 + u_{\rm ref}^2}} \tag{3}$$

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

線種	線量計の種類	線質	測定量	試験条件	
业才	G 社劃休龄部用受動形個人線量計	N-100	$H_{\rm p}$	照射角度:60°	
	6 任农件杆的历文到77 固八脉重时	S-Cs	$D_{ m plocalskin}$		
76.1	Ⅰ牡制业目体田巠動政团↓須具訕	N-80	ס	照射角度:0°	
	1 社衆小田仲用文動形個八脉里計	S-Cs	<i>D</i> p lens		
中性子	B社製中性子用サーベイメータ	²⁴¹ Am-Be	H^*	照射角度:0°	
	M 社製体幹部用受動形個人線量計	²⁴¹ Am-Be	Hp	照射角度:0°	

表 J 4-14 比較に用いた線量計と試験条件

(2)結果と考察

それぞれの評価した結果を表 J 4-15 及び表 J 4-19 に示した。G 社製体幹部用受動 形個人線量計については、N-100 で E_n が 1 を超えた。比較した角度は 60°と大きな 角度であり、N-100 の X 線に対する試験に用いた線量計の応答は入射角度とともに急 激に変化し、 $\pm 3^\circ$ の変化で応答は 10%程度変化する(図 J 4-118 参照)。今回、放 射線の入射角度に関する不確かさは評価しておらず、こうした微小な変化が影響して いる可能性はあり、今後検証していくことが望まれる。ただ、本事業における線量計 の特性試験で評価しているように S-Cs に対する相対レスポンスの観点からは、何れ も E_n は 1 以下であった。その他の線質については何れも E_n は 1 以下であり、不確か さの範囲内で一致していた。すなわち、新たな実用量を用いた線量計の特性試験に関 して、二次標準機関においても国家標準機関と同等の結果を得ることができた。



0°に対する相対レスポンス。測定量は H_n

(3) まとめ

方向特性には一部検証は必要なものの、光子用線量計及び中性子線量計については、 今回の調査範囲においては新たな実用量が導入されたとしても、引き続き現状のトレ ーサビリティ体制で多くの実用器に対する校正や試験を二次標準機関で実施できるこ とが実証できた。今後も他の測定量や線種(β線)についても同等性が確保できるか を実証していくことが必要であろう。

線質	了的在中	レスポンス*1			相対レスポンス ^{※1.2}			
	入射冲度	FRS	国家標準	E_n	FRS	国家標準	E_n	
S-Cs	60°	1.41 (6.4%)	1.45 (5.4%)	0.33	—	—	—	
N-100	60°	1.35 (5.9%)	1.45 (4.1%)	1.03	0.96 (8.7%)	1.00 (6.8%)	0.42	

表J4-15 受動形個人線量計(体幹部)のH_p(60°)応答の比較

*1()内は相対拡張不確かさを表す。*2 基準条件である S-Cs とのレスポンスとの比

線質 入射角度	〕的在南	レスポンス*1			相対レスポンス ^{※1, 2}		
	入射円度	FRS	国家標準	E_n	FRS	国家標準	E_n
S-Cs	60°	0.99 (7.1%)	1.02 (5.4%)	0.29		—	—
N-100	60°	0.82 (6.1%)	0.90 (4.1%)	1.26	0.83 (9.3%)	0.88 (6.8%)	0.57

表 J 4-16 受動形個人線量計(体幹部)の D_{p local skin}(60°)_{slab} 応答の比較

*1()内は相対拡張不確かさを表す。*2 基準条件である S-Cs とのレスポンスとの比

線質 入射角	了的在中	レスポンス*1			相対レスポンス※1.2		
	入别거度	FRS	国家標準	E_n	FRS	国家標準	E_n
S-Cs	0°	0.85 (12.9%)	0.77 (7.8%)	0.65		—	—
N-80	0°	0.98 (6.1%)	1.02 (6.0%)	0.47	1.15 (14.3%)	1.33 (9.8%)	0.83

表 J 4-17 受動形個人線量計(水晶体)の D_{plens}(0°)応答の比較

*1()内は相対拡張不確かさを表す。*2 基準条件である S-Cs とのレスポンスとの比

表 J 4-18 中性子サーベイメータの H*応答の比較

線質	入时名中	レスポンス*1				
	八別円反	FRS	国家標準	E_n		
²⁴¹ Am-Be	0°	3.39 × 10³ µSv⁻¹ (12%)	3.53 × 10³µSv⁻¹ (12%)	0.23		

*1()内は相対拡張不確かさを表す。

纳西	1 时4 中		レスポンス ^{※1}		
称頁	称負	入别用皮	FRS	国家標準	E _n
²⁴¹ Am-Be	0°	0.98 (6%)	1.04 (5%)	0.79	

*1()内の相対不確かさは線量計読み取り値のばらつきのみ考慮して算出したものである。

J4.4 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査

現行の放射線防護の規制において、例えば、放射線同位元素等の規制に関する法律施行 規則(令和5年10月1日施行)第20条では、事業者に実用量を使った測定の義務が課さ れている。こうした測定において、実用量の定義が変更されることによって測定値が影響 を受ける可能性がある。そこで、こうした測定を行う実際の放射線管理の場における線量 計のエネルギー応答を調査した。

令和4年度事業では、原子力施設の放射線作業場の光子エネルギー分布と線量計の特性 試験の結果を組み合わせることで、放射線作業場における線量計の応答を評価する手法が 示されている。また、令和3年度事業及び令和4年度事業において、原子力施設及び放射 線使用施設の14放射線作業場の計48箇所についての光子エネルギー分布が報告され、こ れらの場での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。本事業においては、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4つの特徴が異なる放射線作業場 を選定し、光子エネルギー分布を取得するとともに、令和4年度に示された手法を利用し、 作業場における市販線量計のエネルギー応答を評価し、付随する課題について調査した。

J4.4.1 放射線作業場の選定

放射線の量の測定は、たとえば放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則では、使 用施設、貯蔵施設、廃棄施設、廃棄物詰替施設、廃棄物貯蔵施設、管理区域の境界、事業 所等内において人が居住する区域、事業所の境界、及び管理区域に立ち入る者について行 うものとされており、同様に核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律等に おいても線量測定の義務が課せられている。令和元年度事業報告書^[J6]も参考に、線量測定 が要求される放射線場について光子に対する測定の観点から分類したものを図 J 4-119 に 示した。

本事業では、この中で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、光 子による有意な外部被ばく源があり、令和3年度事業及び令和4年度事業で評価されてお らず特徴的な施設や放射線管理上測定を必要とする箇所において、散乱線の影響、遮蔽な ど光子エネルギー分布に特徴を有する場である表J4-20のものを選定した。再処理施設に おいては、その工程で存在する放射性物質や設備の状況も大きく異なる。そのため、主要 工程である①せん断、②分離・精製、③ウラン・プルトニウム混合製品貯蔵、④ウラン製 品貯蔵、⑤高レベル放射性廃液貯蔵、⑥高レベル放射性固体廃棄物貯蔵、に分けて調査し た。



図 J 4-119 線量測定が要求される放射線作業場の例

放射線作業場	No	代表的な線源	特徴	備考
① 再処理施設	#1	核分裂生成物	せん断工程	文献 ^[J33] のスペクトル
	#2	^{241}Am	分離、精製工程	を再解析
	#3	^{241}Am	U·Pu 混合製品貯蔵工程	
	#4	U崩壞生成物	U製品貯蔵工程	
	#5	核分裂生成物	高レベル放射性廃液貯蔵工程	
	#6	U崩壞生成物等	高レベル放射性固体廃棄物貯蔵工程	
 研究用原子炉施設の炉室 	#7~ 12	原子炉冷却水でみら	運転中の軽水原子炉施設において、高エ	
(運転中)		れる放射化核種及び	ネルギーγ線を放出する 16N の影響が考	
		16 N	えられる場	
③ 中性子ビーム利用施設	#13~16	消滅γ線,即発γ線	作業環境モニタリング地点	
			高エネルギー成分を含む	
			管理区域境界	
④ 大型加速器施設	#17~21	放射化核種	陽子シンクロトロンのビームライン周辺	
			大型加速器における放射化物による被ば	
			くが考えられる場 ^[J34]	

表 J 4-20 スペクトルを取得した放射線作業場

J4.4.2.1スペクトロメータを利用した光子エネルギー分布の取得

(1) 光子スペクトル測定

選定した作業場のうち、研究用原子炉施設の炉室及び中性子ビーム利用施設の 作業場#7~#16 については、3 MeV を超えるような高エネルギー光子による寄与 が想定されたため、2" φ×2"NaI(Tl)検出器(BICRON 製 2M2/2)(図 J 4-120 参 照)を用いてスペクトル(パルス波高分布)を測定した。得られたスペクトルを 図 J 4-123 及び図 J 4-124 に示した。

一方、大型加速器施設の作業場#17~#21 については、線量率の高い場所での測 定が想定されたため、1 cm×1 cm×1 cm LaBr₃(Ce)検出器(図J 4-121 参照)を 用いたスペクトル測定を行った。測定の様子を図J 4-122 に、測定結果を図J 4-125 に示した。

これらのパルス波高分布は、検出器の置かれた放射線場と検出器の相互作用の 結果としての検出器に付与されたエネルギーの分布を表しているに過ぎない。従 って、検出器の置かれた(測定した作業場の)元の放射線場のエネルギー分布を 知るには、これらのパルス波高スペクトルから元の光子エネルギー分布を算出す る復元処理(アンフォールディング処理)が必要となる。令和4年度事業^[J8]と同 じくあらかじめモンテカルロ計算により求めた検出器の応答関数を用いて、 MAXED コード^[J35]を用いて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J4-126~図 J4-128に示す。

エネルギー分布は、以下のような同様の特徴を有していた。

- #7~#12:何れも高エネルギー領域から続く散乱線と消滅γ線に由来する 511 keV
 の光子からなる分布を示している。地下の重水区画遮蔽壁については、
 ¹⁶Nに由来する 6~7 MeV のγ線が追加して顕著に見られた。
- #13~#15:何れも高エネルギー領域から続く散乱線と消滅γ線に由来する 511 keVに加えて、²⁸Al及び鉄による中性子捕獲に際に放出される即発γ線の 影響が見られた。
- #16:管理区域境界については、天然核種である ⁴⁰K のピークと散乱線のみが観測 された。
- #17~#21:荷電変換フォイル周辺では、54Mn、52Mn及び48Vによるピークとその 散乱線が認められた。一方、ビームダンプとコリメータ周辺は 60Coの ピークと散乱線が見られた。何れも、放射化により生じた核種と考えら れる。

(2) 再処理施設における光子エネルギー分布の取得

坂下ら^[J33]が、再処理施設において 3" φ×3"NaI(TI)検出器で測定しアンフォー ルディングした光子エネルギー分布を利用した。エネルギー分布は次のような特 徴を有していた。

- #1: せん断工程は使用済核燃料を搬入用プールから引き揚げてせん断する工程で あり、 137 Cs からの 662 keV の γ 線とその散乱線からなるエネルギー分布 を有していた。
- #2: せん断後に溶解した使用済核燃料を分離抽出する工程であり、²⁴¹Pu の崩壊 生成物である²⁴¹Am から放出される 60 keV のγ線を中心としたエネルギ 一分布を示していた。
- #3:分離したウランとプルトニウムを混合酸化物として貯蔵容器に詰める工程で あり、²⁴¹Am から放出される 60 keV のγ線と、それ以上のエネルギー領 域にも分布が見られる。
- #4:分離したウランの酸化物を貯蔵する工程であり、²⁰⁸Tl による 2.6 MeV の γ 線以外のピークは明確にない。
- #5:溶解、分離した核分裂生成物を一時的に貯蔵する工程であり、¹³⁷Cs による 662 keVのγ線とその散乱線からなるエネルギー分布を示していた。
- #6: せん断、溶解後の燃料被覆管等の固体廃棄物を貯蔵する工程であり、天然核 種である ⁴⁰K による 1.461 MeV と ²⁰⁸Tl による 2.6 MeV の γ 線とその散 乱線からなるエネルギー分布を示していた。



図 J 4-120 スペクトル測定に用いた 2" Φ × 2" NaI (TI) 検出器



図 J 4-121 スペクトル測定に用いた1 cm 角 LaBr₃(Ce)検出器



図 J 4-122 大型加速器施設での測定の様子



図 J 4-123 研究用原子炉施設における 2" Φ×2"円筒形 NaI(TI)検出器によるパルス波 高スペクトル



図 J 4-124 中性子ビーム利用施設における 2" Φ×2"円筒形 NaI(TI)検出器によるパル ス波高スペクトル



図 J 4-125 大型加速器施設における LaBr₃(Ce)検出器によるパルス波高スペクトル



図 J 4-126 研究用原子炉施設の作業場における光子エネルギー分布



図 J 4-127 中性子ビーム利用施設の作業場における光子エネルギー分布



図 J 4-128 大型加速器施設の作業場における光子エネルギー分布

J4.4.2.2 個人線量計の指示値から推定される放射線作業場の光子エネルギー分布

個人線量計の中には、それを着用した作業者の被ばく線量を測定するだけでなく、 入射する放射線のエネルギーを大まかに分析する機能を併せ持つものがある。そうし た線量計による測定例として、原子力機構核燃料サイクル工学研究所で使用されてい た個人線量計(TLDバッジ)を用いた作業現場における γ 線エネルギー測定につい て以下に示す。

TLD バッジを構成する幾つかの TLD 素子のうち、 y 線に対するレスポンスのエネ ルギー依存性が大きく異なる二種類の TLD 素子(Li₂B₄O₇ 素子と CaSO₄ 素子)の発 光比は、入射する γ線の平均的なエネルギーに対応し、比が1に近い場合は高エネル ギーγ線,比が1を超える場合は低エネルギーγ線による被ばくを表す。図J4-129 に、再処理施設で行われたセル内作業(機器の補修)における両 TLD 素子の発光関係 (●プロット)を示す。発光比は約1~2であり、これは137Cs等からの比較的高エネ ルギーの直接入射 v 線とその散乱成分(単色エネルギー換算で約 200~300 keV)が 混在する場に相当する。また、同図で白丸(○)のプロットは、東京電力福島第一原 子力発電所の屋外復旧作業現場で使用された TLD バッジから得られたもので、その発 光比は約2,137Csからの γ線の散乱線にほぼ対応するものであった。一方, MOX 燃 料施設のグローブボックス作業(滞留 MOX 燃料紛の回収)での発光関係(●プロッ ト)を図J4-130に示す。発光比は約10であり、明らかに241Am(241Puの子孫核種) の 60 keV のエネルギーをもつ y 線による被ばくであることが分かる。個人線量計の 測定値から推定される γ線エネルギーは、スペクトロメータ等による測定と比べて精 密なものではないが、作業区域全体にわたる平均的な情報であるため、少数の位置で の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。こうしたデータを 利用できれば、過去の大規模データを解析することにより新たな実用量の導入影響を 検討する際の有効なデータとなると考えられる。



図 J 4-129 再処理施設セル内作業での TLD 発光関係(1993 年)^[J36] 実線は¹³⁷Cs γ 線での発光関係に相当する。なお、白丸(〇)は東京電力福島第一原子力発 電所の屋外復旧作業現場(2018 年)で得られたものである^[J37]。



図 J 4-130 プルトニウム燃料施設グローブボックス作業での TLD 発光関係(1994 年) [J36]

実線は137Csy線及び241Amy線での発光関係にそれぞれ相当する。

J4.4.3 放射線作業場における各線量の算出

(1) 方法

取得した光子エネルギー分布から J4.2.1.1 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^[J5]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する ため明確ではなく、特に高エネルギー成分が存在する場においては光子と混在する二 次電子による複雑な混在場となっていると考えられる。また、照射ジオメトリについ ても、実際の被ばく状況はより複雑ではあるが、ここでは0°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

再処理施設の放射線作業場#1~#6 に対する線量の評価結果及び H*平均エネルギー を表J4-21及び表J4-22に示す。また、表J4-23に新・現行実用量の比較を示した。 H*平均エネルギーについては、核分裂生成物が中心となるせん断工程#1や高レベル放 射性廃液貯蔵工程#5 では 0.5~0.6 MeV となり、241Am が支配的となる分離・精製工 程#2 では 0.2 MeV となった。U・Pu 混合製品貯蔵工程#3 においては、241Am に由来 する 60 keV のγ線とともに、2 MeV 付近までエネルギーが分布しており、H*平均エ ネルギーは高エネルギー成分が多く寄与することから、0.54 MeV であった。一方、U 製品貯蔵工程#4 や高レベル放射性固体廃棄物貯蔵工程#6 については、208Tlの影響で 1~1.6 MeV となった。このように、平均エネルギーは工程によって大きく異なるが、 何れの場合も新・現行実用量の比はほぼ変わらず、多くの線量計の校正線質である S-Cs 校正場あるいは N-80 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。ただし、H*及びHaについては評価 する線量計測値自体が定義変更により小さくなることに注意が必要である。今回は 50 keV から 3.2 MeV まで 22 のエネルギービンに分かれた光子エネルギー分布を利用し た。また、感度の良い 3"Φ×3"の NaI(Tl)検出器を利用して取得されたものである。 今後は、さらに低エネルギー領域までの測定、また、線量率の比較的高い場などでの 測定ができることが望ましい。

研究用原子炉施設炉室作業場(#7~#12)及び中性子ビーム利用施設作業場(#13~#16)に対する線量評価結果及び H*平均エネルギーを表 J 4-24~表 J 4-29 に示した。H*平均エネルギーは 2~4 MeV と高く特徴的である。また、場所によって ¹⁶N の寄与などが異なるため平均エネルギーも変化することに注意が必要である。一方で、

新・現行実用量の比は変化せず、上述の再処理施設と同じことが言える。ただし、こ うした高エネルギー領域では、実際には電子平衡の状況によって線量は大きく変化す る可能性がある。

大型加速器施設作業場(#17~#21)においては(表J4·30~表J4·32参照)、多核種と消滅光子、その散乱線からなる複雑なエネルギー分布であるが、H*平均エネルギーとしては 0.6~0.8 MeV の範囲であり、新・現行実用量の比は変化せず、上述の作業場と同様の事項が言える。

以上の結果に、令和3年度事業報告書^[J7]及び令和4年度事業報告書^[J8]で記載されて いる放射線作業場における評価結果も含めて、H*平均エネルギーに対する新/現行実用 量の比を算出し、図J4-131及び図J4-132に示した。概ねこの比はエネルギー依存的 ではないことから、どこかのエネルギー点で校正した(現行実用量に対してレスポン スの良い)線量計を用いれば、適切にこれらの線量を測定することが可能であると考 えられる。H_p/H_p(10)については、主に1MeV以下でエネルギー依存的に振る舞うが、 それでもその変化は15%程度である。ただし、これらはカーマ近似の線量換算係数を 使用して得られた線量であることに注意を要する。

		\overline{E}	場所のモニタリングにかかる実用量					
No.	場所	E_{H^*}	$H^{*}(10)/K_{a}$	H^*/K_a	$H'(3,0^\circ)/K_a$	$D'_{\rm lens}(0^{\circ})/K_a$	$H'(0.07,0^{\circ})/K_a$	$D'_{\text{local skin}}(0^{\circ})/K_a$
		(MeV)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)
#1	せん断工程	0.56	1.25	1.05	1.23	1.20	1.24	1.26
#2	分離・精製工程	0.19	1.58	1.34	1.55	1.46	1.50	1.61
#3	U・Pu 混合製品貯蔵工程	0.54	1.37	1.16	1.34	1.29	1.33	1.38
#4	U製品貯蔵工程	1.55	1.18	1.02	1.17	1.14	1.18	1.18
#5	高レベル放射性廃液貯蔵工程	0.55	1.26	1.06	1.24	1.21	1.25	1.27
#6	高レベル放射性固体廃棄物貯蔵工程	1.05	1.22	1.04	1.21	1.18	1.21	1.22
-	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

表 J 4-21 再処理施設作業場(#1~#6)における場所のモニタリングにかかる実用量(カーマ近似)

個人モニタリングにかかる実用量									
No.	場所	$H_p(10,0^\circ)/K_a$	$H_p(0^\circ)/K_a$	$H_p(3,0^\circ)_{\rm cyl}/K_a$	$D_{\rm plens}(0^\circ)/K_a$	$H_p(0.07,0^\circ)_{slab}/K_a$	$D_{\rm plocalskin}(0^\circ)_{\rm slab}/K_a$	$H_p(\text{ROT})/K_a$	$D_{\rm plens}({\rm ROT})/K_a$
_		(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)
#1	せん断工程	1.28	1.05	1.23	1.20	1.26	1.26	0.81	0.94
#2	分離・精製工程	1.72	1.34	1.52	1.46	1.59	1.61	0.92	1.00
#3	U・Pu 混合製品貯蔵工程	1.43	1.16	1.33	1.29	1.38	1.38	0.86	0.96
#4	U製品貯蔵工程	1.19	1.02	1.16	1.14	1.18	1.18	0.85	0.96
#5	高レベル放射性廃液貯蔵工程	1.29	1.06	1.23	1.21	1.27	1.27	0.82	0.94
#6	高レベル放射性固体廃棄物貯蔵工程	1.24	1.04	1.20	1.18	1.23	1.22	0.84	0.95
-	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

表 J 4-22 再処理施設作業場(#1~#6)における個人モニタリングにかかる実用量(カーマ近似)

N.	+B 2C	$H^*/H^*(10)$	$D'_{\rm lens}/H'(3,0^\circ)$	$D'_{\rm local skin}(0^{\circ})/H'(0.07, 0^{\circ})$	$H_p(0^\circ)/H_p(10,0^\circ)$	$D_{\mathrm{plens}}(0^\circ)/H_p(3,0^\circ)$	$D_{\mathrm{plocalskin}}/H_p(0.07,0^\circ)$
INO.	场別	(Sv/Sv)	(Gy/Sv)	(Gy/Sv)	(Sv/Sv)	(Gy/Sv)	(Gy∕Sv)
#1	せん断工程	0.84	0.98	1.02	0.82	0.98	1.00
#2	分離・精製工程	0.85	0.94	1.07	0.78	0.96	1.01
#3	U・Pu 混合製品貯蔵工程	0.85	0.96	1.04	0.81	0.97	1.00
#4	U製品貯蔵工程	0.86	0.98	1.00	0.86	0.98	1.00
#5	高レベル放射性廃液貯蔵工程	0.84	0.98	1.02	0.82	0.98	1.00
#6	高レベル放射性固体廃棄物貯蔵工程	0.85	0.97	1.01	0.84	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	1.20	0.72	0.95	1.03

表 J 4-23 再処理施設作業場(#1~#6)における新・現行実用量の比較(カーマ近似)

		\overline{E}	場所のモニタリングにかかる実用量					
No.	場所	E_{H^*}	$H^{*}(10)/K_{a}$	H^*/K_a	$H'(3,0^{\circ})/K_a$	$D'_{\rm lens}(0^{\circ})/K_a$	$H'(0.07,0^{\circ})/K_a$	$D'_{\text{local skin}}(0^{\circ})/K_a$
		(MeV)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)
#7	作業環境モニタリング地点①	2.65	1.18	1.01	1.16	1.14	1.17	1.17
#8	作業環境モニタリング地点②	2.52	1.18	1.02	1.16	1.14	1.17	1.17
#9	実験設備設置場所	2.51	1.17	1.02	1.16	1.14	1.17	1.17
#10	通路	1.97	1.19	1.02	1.18	1.15	1.19	1.19
#11	炉頂	3.55	1.14	1.00	1.13	1.11	1.13	1.13
#12	地下重水区画遮蔽壁	3.77	1.14	1.00	1.13	1.10	1.13	1.13
-	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

表J4-24 研究用原子炉施設炉室作業場(#7~#12)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)

		個人モニタリングにかかる実用量							
No.	場所	$H_p(10,0^\circ)/K_a$	$H_p(0^\circ)/K_a$	$H_p(3,0^\circ)_{\rm cyl}/K_a$	$D_{\rm plens}(0^\circ)/K_a$	$H_p(0.07,0^\circ)_{slab}/K_a$	$D_{\rm plocalskin}(0^\circ)_{\rm slab}/K_a$	$H_p(\text{ROT})/K_a$	$D_{\rm plens}({\rm ROT})/K_a$
		(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)
#7	作業環境モニタリング地点①	1.18	1.01	1.16	1.14	1.18	1.17	0.85	0.95
#8	作業環境モニタリング地点②	1.18	1.02	1.16	1.14	1.18	1.17	0.86	0.96
#9	実験設備設置場所	1.18	1.02	1.15	1.14	1.17	1.17	0.86	0.96
#10	通路	1.20	1.02	1.17	1.15	1.20	1.19	0.84	0.95
#11	炉頂	1.14	1.00	1.12	1.11	1.13	1.13	0.88	0.97
#12	地下重水区画遮蔽壁	1.14	1.00	1.12	1.10	1.13	1.13	0.88	0.97
-	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

表J4-25 研究用原子炉施設炉室作業場(#7~#12)における個人モニタリングにかかる実用量(カーマ近似)

N.	+B 2C	$H^*/H^*(10)$	$D'_{\rm lens}/H'(3,0^\circ)$	$D'_{\rm local skin}(0^{\circ})/H'(0.07, 0^{\circ})$	$H_p(0^{\circ})/H_p(10,0^{\circ})$	$D_{\mathrm{plens}}(0^{\circ})/H_p(3,0^{\circ})$	$D_{\mathrm{plocalskin}}/H_p(0.07,0^\circ)$
INO.	场別	(Sv/Sv)	(Gy/Sv)	(Gy/Sv)	(Sv/Sv)	(Gy/Sv)	(Gy/Sv)
#7	作業環境モニタリング地点①	0.86	0.98	1.00	0.86	0.98	1.00
#8	作業環境モニタリング地点②	0.86	0.98	1.00	0.86	0.98	1.00
#9	実験設備設置場所	0.87	0.98	1.00	0.86	0.98	1.00
#10	通路	0.86	0.98	1.00	0.85	0.98	1.00
#11	炉頂	0.88	0.98	1.00	0.88	0.99	1.00
#12	地下重水区画遮蔽壁	0.88	0.98	1.00	0.88	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	1.20	0.72	0.95	1.03

表J4-26 研究用原子炉施設炉室作業場(#7~#12)における新・現行実用量の比較(カーマ近似)

		<u></u>	場所のモニタリングにかかる実用量								
No.	場所	E_{H^*}	$H^{*}(10)/K_{a}$	H^*/K_a	$H'(3,0^\circ)/K_a$	$D'_{\rm lens}(0^{\circ})/K_a$	$H'(0.07,0^\circ)/K_a$	$D'_{\text{local skin}}(0^{\circ})/K_a$			
		(MeV)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)			
#13	実験設備設置場所①	3.50	1.16	1.01	1.14	1.12	1.15	1.15			
#14	実験設備設置場所②	3.30	1.17	1.02	1.15	1.13	1.16	1.16			
#15	原子炉からの中性子取り出し口	3.68	1.16	1.01	1.14	1.12	1.14	1.15			
#16	管理区域境界	2.48	1.18	1.02	1.16	1.14	1.17	1.17			
-	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			

表J4-27 中性子ビーム利用施設作業場(#13~#16)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)

		個人モニタリングにかかる実用量								
No.	場所	$H_p(10,0^\circ)/K_a$	$H_p(0^\circ)/K_a$	$H_p(3,0^\circ)_{\rm cyl}/K_a$	$D_{\rm plens}(0^\circ)/K_a$	$H_p(0.07,0^\circ)_{slab}/K_a$	$D_{\rm plocalskin}(0^\circ)_{\rm slab}/K_a$	$H_p(\text{ROT})/K_a$	$D_{\rm plens}({\rm ROT})/K_a$	
_		(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	
#13	実験設備設置場所①	1.16	1.01	1.14	1.12	1.15	1.15	0.88	0.96	
#14	実験設備設置場所②	1.17	1.02	1.15	1.13	1.16	1.16	0.87	0.96	
#15	原子炉からの中性子取り出し口	1.16	1.01	1.14	1.12	1.15	1.15	0.88	0.96	
#16	管理区域境界	1.18	1.02	1.16	1.14	1.18	1.17	0.86	0.96	
_	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	

表J4-28 中性子ビーム利用施設作業場(#13~#16)における個人モニタリングにかかる実用量(カーマ近似)

表J4-29 中性子ビーム利用施設作業場(#13~#16)における新・現行実用量の比較(カーマ近似)

Na	坦武	$H^{*}/H^{*}(10)$	$D'_{\rm lens}/H'(3,0^\circ)$	$D'_{\text{local skin}}(0^{\circ})/H'(0.07,0^{\circ})$	$H_p(0^{\circ})/H_p(10,0^{\circ})$	$D_{\mathrm{plens}}(0^{\circ})/H_p(3,0^{\circ})$	$D_{\mathrm{plocalskin}}/H_p(0.07,0^\circ)$
INO.	场内	(Sv/Sv)	(Gy/Sv)	(Gy/Sv)	(Sv/Sv)	(Gy∕Sv)	(Gy/Sv)
#13	実験設備設置場所①	0.88	0.98	1.00	0.87	0.98	1.00
#14	実験設備設置場所②	0.87	0.98	1.00	0.87	0.98	1.00
#15	原子炉からの中性子取り出し口	0.88	0.98	1.00	0.87	0.98	1.00
#16	管理区域境界	0.86	0.98	1.00	0.86	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	1.20	0.72	0.95	1.03

		\overline{F}	場所のモニタリングにかかる実用量								
No.	場所	\mathbf{L}_{H^*}	$H^{*}(10)/K_{a}$	H^*/K_a	$H'(3,0^\circ)/K_a$	$D'_{\rm lens}(0^{\circ})/K_a$	$H'(0.07,0^\circ)/K_a$	$D'_{\text{local skin}}(0^{\circ})/K_a$			
		(MeV)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)			
#17	荷電変換フォイル付近①	0.74	1.23	1.04	1.21	1.18	1.22	1.24			
#18	荷電変換フォイル付近②	0.78	1.22	1.03	1.20	1.17	1.21	1.22			
#19	ビームコリメータ付近①	0.76	1.22	1.04	1.21	1.18	1.22	1.23			
#20	ビームコリメータ付近②	0.81	1.21	1.03	1.20	1.17	1.21	1.22			
#21	ビームダンプ付近	0.67	1.24	1.05	1.23	1.20	1.24	1.26			
-	S-Cs 校正場**1,2	0.64	1.20	1.02	1.18	1.17	1.20	1.21			
_	N-80X線校正場*1	0.066	1.74	1.36	1.68	1.57	1.48	1.77			

表J4-30 大型加速器施設作業場(#17~#21)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)

		個人モニタリングにかかる実用量								
No.	場所	$H_p(10,0^\circ)/K_a$	$H_p(0^\circ)/K_a$	$H_p(3,0^\circ)_{\rm cyl}/K_a$	$D_{\rm plens}(0^\circ)/K_a$	$H_p(0.07,0^\circ)_{slab}/K_a$	$D_{\rm plocalskin}(0^\circ)_{\rm slab}/K_a$	$H_p(\text{ROT})/K_a$	$D_{\rm plens}({\rm ROT})/K_a$	
		(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	
#17	荷電変換フォイル付近①	1.25	1.04	1.21	1.18	1.24	1.24	0.82	0.94	
#18	荷電変換フォイル付近②	1.23	1.03	1.20	1.17	1.23	1.22	0.82	0.94	
#19	ビームコリメータ付近①	1.24	1.04	1.20	1.18	1.23	1.23	0.82	0.94	
#20	ビームコリメータ付近②	1.23	1.03	1.19	1.17	1.22	1.22	0.82	0.94	
#21	ビームダンプ付近	1.27	1.05	1.22	1.20	1.26	1.26	0.82	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	

表J4-31 大型加速器施設作業場(#17~#21)における個人モニタリングにかかる実用量(カーマ近似)

N.	ᄩ	$H^{*}/H^{*}(10)$	$D'_{\rm lens}/H'(3,0^{\circ})$	$D'_{\rm local skin}(0^{\circ})/H'(0.07, 0^{\circ})$	$H_p(0^\circ)/H_p(10,0^\circ)$	$D_{\mathrm{plens}}(0^{\circ})/H_p(3,0^{\circ})$	$D_{\mathrm{plocalskin}}/H_p(0.07,0^\circ)$
INO.	场別	(Sv/Sv)	(Gy/Sv)	(Gy/Sv)	(Sv/Sv)	(Gy∕Sv)	(Gy∕Sv)
#17	荷電変換フォイル付近①	0.85	0.98	1.01	0.83	0.98	1.00
#18	荷電変換フォイル付近②	0.85	0.98	1.01	0.84	0.98	1.00
#19	ビームコリメータ付近①	0.85	0.98	1.01	0.83	0.98	1.00
#20	ビームコリメータ付近②	0.85	0.98	1.01	0.84	0.98	1.00
#21	ビームダンプ付近	0.84	0.97	1.02	0.83	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	1.20	0.72	0.95	1.03

表J4-32 大型加速器施設作業場(#17~#21))における新・現行実用量の比較(カーマ近似)



図 J 4-131 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)



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)

J4.4.4 放射線作業場における線量計のエネルギー応答

令和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、J4.4.1の放射線作業場に加えて過年度に光 子エネルギー分布が得られた放射線作業場を含めて、この手法を適用することで、J4.3 で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) 評価した放射線作業場

令和3年度事業及び令和4年度事業と本事業で評価された放射線作業場を表J4-20 のように整理して解析した。

	施設分類		解析に用いたエネルギ	[:] 一分布 ^{※1}
原子力発電所	定検中		R3:#37、R4:#7-11	(6)
	福島第一原子力系	ě電所	R3:#18-36	(19)
核燃料施設	再処理施設		R5:#1-6	(6)
	核燃料物質使用	貯蔵施設	R3:#10-11	(2)
研究・教育施設	X線施設		R3:#14-15	(2)
	RI 利用施設	使用	R3:#1-7、R4:#1	(8)
		貯蔵	R3:#8-9	(2)
		廃棄	R4:#2	(1)
		輸送	R3:#12-13	(2)
	研究炉施設	炉室・作業環境	R4:#3-5、R5:#7-12	(9)
		中性子利用施設	R4:#6、R5:#13-15	(4)
		管理区域境界	R5:#16	(1)
	加速器利用施設	静電加速器	R3:#16	(1)
		高エネルギー加	R3:#17、R5:#17-21	(c)
		速器		(0)

表J4-33 スペクトルを取得した放射線作業場

*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^[J7]されている もの、R4は令和4年度事業で報告^[J8]されているもの、R5はJ4.4.2.1で示したもの であり、それぞれの数字は、各報告書で付けられた番号である。

- (2) 評価に用いた線量計
 - (i) A 社製電離箱式サーベイメータ (H*、D'lens、D'local skin)
 - (ii) D 社製可搬型 γ 線エリアモニタ (H*)
 - (iii) E 社製受動形環境線量計(H*)
 - (iv) F 社製受動形個人線量計(Hp、Dp local skin)
 - (v) I 社製受動形個人線量計(Dplens)

(vi) J 社製受動形個人線量計(Dplocal skin)

(vii) O 社製電子式個人線量計(H_p)

ここで、()内は測定量であり、O社製電子式個人線量計については、令和4年度事業報告書[J8]よりエネルギー応答(図J4-133参照)を取得した。





(3) 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 $\Phi(E)$ (cm⁻² s⁻¹ 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。

$$H(E) = \Phi(E) \cdot (K_a/\varphi)(E) \cdot h(E)$$
(4)

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

$$R = \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} R_H(E) \cdot H(E) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} H(E) dE}$$
(5)

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。ただし、中性子利用施設においては、7 MeV を超えるような光子が観測されており、6.2 MeV 以上は外挿した。また、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。

(4) 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 4-134~図 J 4-143 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、A 社製電離箱式サーベイメータ、D 社製可搬型 γ 線エリアモニタ及び 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、F 社製体幹部受動形個人線量計及び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、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、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。

原子力発電所放射線作業場については、平均エネルギーが 0.5 MeV 未満のものは福島 第一原子力発電所構内、それ以外は原子力発電所(PWR)での定検中の作業場のもの であるが、何れの箇所、何れの線量計についても *H**及び *H*_pでは 20%程度の過大応答 が見られ、それ以外は 10%以内の応答となっている。

核燃料施設においては、²⁴¹Am の寄与が大きい場では H_p が 20%以上過大となるケースもある。しかし、規格で示される許容範囲(例えば、IEC 62387-1^[J29]では H_p(10)線 量計の 33~65 keV に対して 0.69~1.82)内であり、概ね良好な応答を示していた。

一方で、研究・教育施設においては、エネルギー範囲も多岐にわたっており、X 線施 設においては、50%程度の過大応答もあり得るが、このエネルギー領域では線量計の応 答も大きく変化し、その応答はスペクトルの形状に大きく依存する。研究炉施設や加速 器施設においても、*H**あるいは *H*_pの過大応答は 30%程度に留まり、許容範囲内である と考えられる。



図 J 4-134 作業場モニタリングに関する線量計の原子力発電所放射線作業場での応答評 価

赤:A 社製電離箱式サーベイメータ、青:D 社製可搬型γ線エリアモニタ、緑:E 社製受 動形環境線量計、o: *H**、×: *H**(10)、□: *D*'_{lens}、+: *H*'(3)、Δ: *D*'_{local skin}、*: *H*'(0.07)



図J4-135 個人モニタリングに関する線量計の原子力発電所放射線作業場での応答評価
 赤:F社製体幹部受動形個人線量計、青:I社製水晶体用受動形個人線量計、緑:J社製末
 端部用受動形個人線量計、紫:O社製電子式個人線量計、○:H_p、×:H_p(10)、□:D_p
 lens、+:H_p(3)、△:D_{p local skin}、*:H_p(0.07)


図 J 4-136 作業場モニタリングに関する線量計の核燃料施設放射線作業場での応答評価 赤:A 社製電離箱式サーベイメータ、青:D 社製可搬型γ線エリアモニタ、緑:E 社製受 動形環境線量計、○: *H**、×: *H**(10)、□: *D*'_{lens}、+: *H*'(3)、Δ: *D*'_{local skin}、*: *H*'(0.07)



図J 4-137 個人モニタリングに関する線量計の核燃料施設放射線作業場での応答評価
赤:F 社製体幹部受動形個人線量計、青:I 社製水晶体用受動形個人線量計、緑:J 社製末
端部用受動形個人線量計、紫:O 社製電子式個人線量計、○: H_p、×: H_p(10)、□: D_p
lens、+: H_p(3)、△: D_p local skin、*: H_p(0.07)



図 J 4-138 作業場モニタリングに関する線量計の研究・教育施設(X 線施設、RI 施設) 放射線作業場での応答評価

赤:A 社製電離箱式サーベイメータ、青:D 社製可搬型γ線エリアモニタ、緑:E 社製受動
形環境線量計、ο:H*、×:H*(10)、ロ:D'_{lens}、+:H'(3)、Δ:D'_{local skin}、*:H'(0.07)



図 J 4-139 個人モニタリングに関する線量計の研究・教育施設(X 線施設、RI 施設)放 射線作業場での応答評価

赤:F 社製体幹部受動形個人線量計、青:I 社製水晶体用受動形個人線量計、緑:J 社製末端部用受動形個人線量計、紫:O 社製電子式個人線量計、○: H_p、×: H_p(10)、□: D_p
lens、+: H_p(3)、△: D_p local skin、*: H_p(0.07)



図 J 4-140 作業場モニタリングに関する線量計の研究・教育施設(研究炉施設)放射線 作業場での応答評価

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



図 J 4-141 個人モニタリングに関する線量計の研究・教育施設(研究炉施設)放射線作 業場での応答評価

赤:F 社製体幹部受動形個人線量計、青:I 社製水晶体用受動形個人線量計、緑:J 社製末端部用受動形個人線量計、紫:0 社製電子式個人線量計、○: H_p、×: H_p(10)、□: D_p
lens、+: H_p(3)、△: D_p local skin、*: H_p(0.07)



図 J 4-142 作業場モニタリングに関する線量計の研究・教育施設(加速器施設)放射線 作業場での応答評価

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



図 J 4-143 個人モニタリングに関する線量計の研究・教育施設(加速器施設)放射線作 業場での応答評価

赤:F 社製体幹部受動形個人線量計、青:I 社製水晶体用受動形個人線量計、緑:J 社製末端部用受動形個人線量計、紫:0 社製電子式個人線量計、○: H_p、×: H_p(10)、□: D_p
lens、+: H_p(3)、△: D_p local skin、*: H_p(0.07)

J4.5 研究に必要な国内外の情報収集

J4. 5. 1 ISO

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

WG2に関連して、β線標準場に関する3つの規格(ISO 6980-1^[J16]、ISO 6980-2^[J38] 及び ISO 6980-3^[J39])について、軽微な改定に係る規格最終原案の投票が実施されたが、 何れも新たな実用量に関しては触れられておらず、現行実用量に関する記載のみである。 中性子標準場に関しては、線量換算係数が規定されている規格(ISO 8529-3^[J40])が 2023年6月に発刊され、放射線測定器の校正方法を規定する規格(ISO 8529-2^[J41])の 改定方針について議論されたが、まだ新たな実用量が取り入れられるには至っていない。 その他、放射線標準場に共通する事項を定めた ISO 29661^[J42]の定期的な見直し投票が 実施され、光子標準場に係る4つの規格(ISO 4037-1^[J14]、ISO 4037-2^[J43]、ISO 4037-3^[J21]、ISO 4037-4^[J45])の定期的な見直し投票が開始されているが、現時点で新たな実 用量の取り入れの検討はされていない状況である。

WG19に関しては、2023年に新たな規格として ISO 24426^[J46]が発刊された。本規格 は、電離放射線による職業被ばくの統計的解析に必要となる職業被ばく関連情報の入力 データ内容を定める規格として制定されたものであるが、本規格においても新たな実用 量については取り込むまでには至っていない。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^[J47]の改定審議作業 も進んでおり、各国から ICRU Report 95^[J5]に言及したコメントなどがなされているが、 現時点(2024年2月現在)ではドラフト案にも新たな実用量に関する記載はされてい ない。

J4. 5. 2 ICRU

国際放射線単位測定委員会(ICRU)は、放射線や放射能の量と単位に関して、最新の科学的データや情報を収集して評価検討し、計測に関する単位や量の定義から基礎データの整備等を行う活動を担っており、その成果はICRU報告書として刊行している。

本事業の発端である ICRU Report 95^[15]についても ICRU が 2020 年に刊行したものである。

ICRU は 2023 年会にあわせて、2023 年 4 月 19 日に ICRU シンポジウム「福島復興 と放射線計測」を開催した。その中で、CERN の Thomas Otto 博士から「ICRU Report 95 Operational Quantities for Environmental Measurements」と題する講演 が行われた。その中で、新たな実用量の定義の紹介に続いて以下のとおり実用線量計に 対する影響についても述べられていた。

- ・換算係数からは光子については、0.1 MeV~数 MeV については再校正で対応できるか もしれないが、数 10 keV の領域ではエネルギー特性の改善が必要である。
- ・環境用のTLD などでは改良が必要かもしれない。
- ・NaI(Tl)サーベイメータなど応答行列を用いて線量を算出するものについては、それほど問題なく対応できるかもしれない。
- ・6LiF/7LiF をポリエチレン球中に配置するような中性子モニタについては、中間エネル ギーで合わないが、場のスペクトルによっては、それほど問題にはならないかもしれ ない。

また、新たな実用量が導入されるのは 2030~2040 年頃になると考えられると述べられ た。これに対して、より良いものが開発されたのに、実用化まで 20 年近くも要するこ とに対しての見解が問われたが、実用量の変更は、法や規制にも関係するものであり、 法や規制にかかる時間は、科学の進歩よりもずっと時間を要するとのことであった。さ らに、導入されたとしても、さらなる経過措置が必要になるであろうと付け加えられた。

J4. 5. 3 IAEA

ウィーン IAEA 本部にて、2023 年 5 月 29 日から 6 月 2 日の 5 日間にわたって開催さ れた「放射線二次標準機関(SSDL)と品質マネジメントシステム(QMS)の開発とトレ ンドに関する技術会合」は、世界各国の二次標準機関に関わる研究者・技術者に対し、 SSDL (Secondary Standard Dosimetry Laboratory)及び QMS (Quality Management System)に関する最新の技術情報を提供することを目的とした会合であ る。2018 年に続き 2 回目の開催となった本会合には、70 近い国々から 100 名を超える 研究者・技術者が参加し、放射線計量に関する最新規格のレビューや、各国の二次標準 機関における活動紹介等が行われた。

会合では、測定器校正の国際規格である ISO 4037(X線及びγ線用線量(率)測定 器の校正方法)や ISO 8529(中性子線量当量(率)計の校正方法)のレビューにおい て、実用量を用いて校正場基準量を算出する手法が説明されたが、実用量の定義変更に 関する話題には触れられなかった。また、各国の近年のアクティビティ報告においても、 実用量の定義変更に関する報告はなかった。新たな実用量が、各国の法令に取り込まれ るまでに相当時間要すると見込まれていることから、各機関において具体的なアクショ ンは起こっていないと思われる。測定器校正に係る国際規格に新実用量が導入される頃 に、議論が活発化すると予想される。

国際法定計量機関(International Organization of Legal Metrology、OIML)の Anthony Donnellan 氏による講演では、「SSDL には、PSDL(Primary Standards Dosimetry Laboratory)と測定器ユーザーとの間を橋渡しする重要な役割があり、測 定器の適切な使用方法をユーザーへ助言する必要がある。また、継続的な能力確保のた め、可能な限り他の SSDL や PSDL との比較プログラムに参加する必要がある」こと が強調された。実用量の定義変更にあたっては、測定器のエネルギー応答特性が大きく 変化するものがあり、放射線管理の現場においては混乱が生じ得る。本事業において、 新たな実用量を適用した際の測定器レスポンスを評価し、放射線管理上の課題を抽出、 ユーザーへ提供することは、二次標準機関の役割としても重要であると再認識した。ま た、本事業において、産総研(PSDL)と放射線標準施設(SSDL)の間で実施する測 定器試験結果の相互比較が、計量トレーサビリティの確保を検証する上で重要なプロセ スであると確認できた。

X 線及びγ線用線量 (率)測定器の校正方法に関する最新規格(ISO 4037-1:2019)の レビューでは、世界で利用例が少なく、技術的情報が不足している蛍光 X 線校正場を、 基準放射線のラインナップから除外した(附属書のみに参考記載)との説明があった。 FRS では、蛍光 X 線場の単色性という特徴から、測定器のエネルギー応答特性の評価 には引き続き有効な線質であると考え、整備しているところである。本事業においても 報告しているような場の光子スペクトルや基準線量を算出する手法を確立するとともに、 各種測定器のエネルギー応答評価を通してその有益性を示していくことが必要であろう。 特に、実用量の定義変更に伴い、こうした低エネルギー領域における放射線測定器の応 答特性への影響は大きく、特性評価や設計においては有用性が高いと考えらえる。

J4. 5. 4 ICRP

国際放射線防護委員会(ICRP)は、2年に1回ICRP国際シンポジウムを開催している。第7回ICRP国際シンポジウム(以下「ICRP2023」という。)は2023年11月6日から9日にかけて東京で開催された。ICRP2023のテーマは「放射線防護の進展:科学とそれを超えて」であり、18のセッションに分かれて次期主勧告を意識して、放射線防護体系の今後に関するICRPの計画に対する議論や各タスクグループでの議論の紹介が行われるとともに、240件の一般発表があった。

そのうち、セッション 2 は「次期主勧告のための線量評価」であり、延世大学校の Yeon Soo YEOM 氏から「Mesh-type Reference Computational Phantoms (MRCPs) for the Next General Recommendations」と題する招待講演があった。その中で、次期主勧 告に向けてメッシュタイプ標準ファントム(MRCPs)の準備が進められているとの紹介が あった。MRCPs には現行の voxel ファントムでは再現が難しかった非常に詳細な眼球モ デルや骨格モデルに加えて、呼吸器や消化管の臓器、膀胱、皮膚のミクロン単位の厚さ の幹細胞層が含まれている。光子、中性子についてはファントムの変更による実効線量 の大きな変化は発生しないが、電子についてはMRCPsの幹細胞層の存在により、おおよ そ 0.1 MeV 未満ではフルエンス当たりの実効線量換算係数が減少、0.1 MeV~1 MeV で は増加、1 MeV 以上は変化しないという結果が示された。ICRU Report 95^[J5]の換算係数 の算出には現行の voxel ファントムが使用されており、発刊前のシンポジウムでは ICRU 委員からメッシュファントムへの変更による影響は小さいと説明されていが、今回の電 子に対する実効線量への影響の報告を受け、新たな実用量への影響を注視していく必要 があろう。

また、原子力機構の佐藤達彦氏(ICRP 第2専門委員会、ICRU 報告書作成委員会34) からマイクロドジメトリに関する ICRU のレポートの作成状況について報告があった。 ICRU Report95^[J5]では眼の水晶体と皮膚の線量管理には等価線量でなく吸収線量を使う べきとされており、これは等価線量に算出で用いる放射線加重係数は確率的影響に関係 するものであり、組織反応には使用すべきでない、という考えからである。さらに、特 定の影響に関連する RBE で加重した吸収線量が防護量や実用量に対して使われるかもし れない、とされている。講演では、現状 ICRP や ICRU によって組織反応を防止するた めの RBE の値が提案されていないこと、それに関連して ICRP ではタスクグループ TG118 が立ち上げられ、RBE、線質係数や放射線加重係数を決定するためのレビューが なされているとのことであった。これらの決定において、マイクロドジメトリは重要な 役割を果たすであろうことが述べられていた。

J4.5.5 国内外の学術団体

J4.5.5.1 国際固体線量計測機構

2023年9月17日から22日の6日間にわたってイタリア/ビアレッジョで開催され た「固体線量計を用いた線量計測に関する国際会議(SSD20)」は、国際固体線量計 測機構(International Solid State Dosimetry Organization、以下「ISSDO」という。) が主催し、固体線量計に関わる世界各国の研究者・技術者が参加し、最新の知見を共 有することを目的とした国際会議であり、前回の広島開催に続き、20回目の開催とな った。本会議は、固体検出器の基礎物性、特性、これを利用した測定システム、医療 や放射線防護に係る線量モニタリング、など幅広いテーマを取り扱っており、欧米を 中心に各国から参加した研究者・技術者により活発な議論が行われた。医療分野から の報告も多く、新たな放射線治療法として注目されている FLASH(超高線量率・極 短時間照射)や、BNCT(ホウ素中性子捕捉療法)等における線量計測に関する発表 が多くなされた。

千代田テクノル株式会社の長谷川涼氏からは、同社が提供し、日本国内で広く使用 されている中性子個人線量計の、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)への適応性評価に関する報告がなされた。本線量 計は、固体飛跡検出器である PADC(CR-39)に、ボロン(BN)コンバータ(熱中性 子測定用)及びポリエチレン(HDPE)ラジエータ(速中性子測定用)を組み合わせ た線量計であり、広い中性子エネルギー範囲において測定感度を有することが特徴で ある。本発表では、ISO 21909-1 への適応性の他に、ICRU Report 95^[15]に記載されて いる新たな実用量を適用した際の本線量計のエネルギー応答特性の変化についても言 及された。評価が行われた 144 keV から数 MeV のエネルギー点のうち、144 keV 及 び 250 keV においては、ISO 21909-1 に規定されたレスポンスの許容範囲から逸脱す るとのことであった。これは、1 MeV 以下の低エネルギー側において現行/新実用量 の差異が増大することに起因するものであり、本事業において実施した結果と同じ傾 向を示すものであった。この逸脱への対策として、熱中性子及び速中性子の飛跡数(密 度)をパラメータとする現行の線量評価アルゴリズムに、中性子エネルギーに関連する 飛跡サイズを新たなパラメータとして加え、各パラメータ係数を調整することを検討 しているとのことであった。

本会議では、様々な固体飛跡検出器のエネルギー応答特性に関する評価がなされて いたが、放射線防護の実務レベルでの話題は少なく、日本以外の国から実用量の定義 変更に関する報告はなかった。例えば、ブラジルからの参加者との意見交換において も、新しい実用量に対して関心はあるが、2017年ごろに個人線量当量 *H*_p(*d*)が取り入 れられたばかりであり、新たな実用量の導入はかなり先になるのではとの見解が得ら れた。このように、各国の法令に取り込まれるまでに、まだ10数年かかると見込まれ ていることから、様子見をしている研究者も多く、未だ大きな動きは起こっていない と見られる。放射線校正に係る国際規格に新たな実用量が導入される頃に、議論が活 発化すると予想されるため、引き続き動向を注視したい。

その他放射線計測に関する新たな知見を以下に示す。

イタリア国立核物理研究所(INFL)の Robert Bedogni 氏からは、新たに開発した 中性子の基準移行測定器に関する報告があった。本測定器は、ポリエチレン減速材内 の異なる位置に固体検出器(⁶LiF-Si/SiC)を複数個配置した構造をもつ、エネルギー 分析型の基準移行測定器である。線源カプセル構造による中性子スペクトルの変化も 考慮して、正確な中性子フルエンスを評価することが可能となる。本事業においても 実施しているように、計量トレーサビリティ確保のための基準移行技術において、有 効なツールとなる可能性がある。

ベルギー原子力研究センター(SCK・CEN)の Filip Vanhavere 氏からは、最新の コンピューティング技術を用いたリアルタイム個人線量評価の可能性について紹介が あった。実際の作業者の動きをモーションセンサーで捉えて数値ファントム化し、高 性能コンピュータを用いたモンテカルロ計算と機械学習を組み合わせることにより、 作業者のリアルタイムの被ばく線量を評価するというものである。本技術が進展すれ ば、将来的に実用量の概念は必要でなくなり、さらには、物理的な個人線量計さえも 不要となる可能性があるもので、興味深い内容であった。

イタリア新技術エネルギー環境局(ENEA)の Elena Fantuzzi 氏及び国際原子力機 関(IAEA)の Michael Hajek 氏からは、欧州線量評価グループ(EURADOS)が主 催する中性子線量計の国際相互比較の結果について報告があった。本相互比較は、 2012年、2017年及び2022年の3回実施されており、これらの結果が取りまとめられ た。250 keV の単色(単一エネルギー)中性子に対しては、熱ルミネセンス線量計

(TLD) などのアルベド型の線量計と反跳陽子の飛跡を計数する固体飛跡検出器

(CR-39)を用いた線量計のどちらについても、判定基準から外れる線量計測サービ スが多くあったとの報告があった。

こうした新たな知見や技術も取込みながら、新たな実用量の導入に対する課題や影響を今後も議論していく必要があるであろう。

J4.5.5.2 日本保健物理学会

一般社団法人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。令和5年度は、グランドニッコー東京台場ホテルにおいて令和5年11月 9日~10日の期間で第56回日本保健物理学会研究発表会が開催された。ICRP2023と 並行して開催され、45件のポスター発表があった。本事業では、この会議への参加を 通じて国内の動向を調査した。

その中で、新たな実用量を対象とした研究報告については、千代田テクノルの澤井 千秋氏らによる「ICRU Report95 新実用量の個人被ばく線量測定サービスへの影響」 と題するポスター発表があった。個人被ばく線量測定サービスとして国内で広く使用 されているガラスバッジについて、新たな実用量 H₆に関して現在のアルゴリズムでの 指示値のレスポンス、定数を見直した新アルゴリズムでの指示値のレスポンスが比較 されていた。現在のアルゴリズムでは換算係数の変化のとおり(図 J 4-17 参照)、低 エネルギーで過大応答となるが、新アルゴリズムで評価すると現在の実用量と同等の レスポンスが得られたと報告された。今後は吸収線量(皮膚、眼の水晶体)、周辺線 量についても検討を進めるとのことであった。レスポンスは S-Cs、S-Co、及び N シ リーズ X 線での指示値が比較され、現行アルゴリズムでのレスポンスは本事業で得ら れた結果と矛盾のないものであった。アルゴリズム変更は、低エネルギー側に影響す るプラスチック部分の定数変更で対応できるため、実用量の定義変更が導入された としても迅速に対応できると考えられる。一方で、新実用量の取入れにおいて、法令 規制と JIS 規格の変更が同時に進まない場合の信頼性確保についての懸念の声が聞か れた。

その他、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が散 見されたが、これらの場に関する情報は実用量の定義変更の観点からも重要である。 また、²⁴¹Am線源を用いた校正場(S-Am)などに関する報告^[J48]もあったが、こうし た情報も低エネルギー光子による影響の評価や校正・試験線質の検討において有用で あろう。

J4.5.6 関係論文の調査

新たな実用量に関係する研究論文を調査した。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)線量計の試験方法に関するもの、(4) 作業場での影響等に関するもの、(5)その他、に分類した。調査は主として Web of Science を通じて実施したが、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 31 論文を内容により分類した一覧を表 J 4-34 に示す。ICRU が新たな実用量に関するレポートを発刊して以来、欧州を中心に 徐々に研究活動が活発化しており、特に線量計の特性に関する報告が多くなされている。

(1) 校正場に関するもの(5)
・換算係数の試算
#光子: R.Behrens <i>et al</i> . ^[J24] 、T. Otto ^[J49]
β 線: R. Behrens ^[126]
#中性子: A. A. Qaaod. et al. ^[J50]
・その他
#高エネルギー場:F. Pozzi <i>et al.</i> ^[J51]
(2)線量計の特性に関するもの(14)
・個人モニタリング用線量計
#光子/ β 線: H. Hoedlmoser <i>et al</i> . ^[J52] 、I. O. Polo <i>et al</i> . ^[J53] 、L. Bossin <i>et al</i> . ^[J54] 、
M. Caresana et al. ^[J55] , J. Eakins et al. ^[J56] , D. Ekendahl et al. ^[J57] ,
T. Otto ^[J58] , Z. Cemusová <i>et al</i> . ^[J59]
#中性子: R. Tanner <i>et al.</i> ^[J60] 、B. Moreno <i>et al.</i> ^[J61]
・作業環境モニタリング用線量計
#光子:T. Otto ^[J58] 、Z. Cemusová <i>et al</i> . ^[J62]
#中性子: J. Eakins et al. ^[J63] 、F. Pozzi et al. ^[J64] 、F. G. Gonzalo et al. ^[J65]
(3)線量計の試験方法に関するもの(2)
V. Merza <i>et al.</i> ^[J66] , V. Merza <i>et al.</i> ^[J67]
(4) 作業場での影響等に関するもの(2)
D. Matthiä et al. ^[J68] , M. Abdelrahman et al. ^[J69]
(5)その他(9)
P. Gilvin et al. ^[J70] , P. Gilvin et al. ^[J71] , C. Ferrari et al. ^[J72] ,
K. Bouzagzi et al. ^[J73] , S. Djeffal et al. ^[J74] , C. Stettner et al. ^[J75] ,
F.G. Veinot et al. ^[J76] , N.E. Hertel et al. ^[J77] , S. Djeffal et al. ^[J78]
()内は文献数。一部重複して分類している。

表 J 4-34 調査した関係論文一覧

J5. まとめ

本事業の4つの調査研究により得られた成果を以下にまとめた。

(1)新たな実用量に対応した線量計の校正に関する調査

二次標準機関である FRS で整備されている 3 つの蛍光 X 線校正場の線質(F-Cu、 F-Mo 及び F-Sn) について線量計の特性評価に必要となる新たな実用量への線量換算 係数を評価した。これらの線質においては、現行実用量との違いが大きい。また、 (2)の特性評価に資するため、令和 3 年度事業及び令和 4 年度事業で評価した線質 も加え、FRS で整備している中性子を除く全ての線質について、ロッドファントムに 対する局所皮膚吸収線量に係る線量換算係数を追加で評価した。これにより FRS で末 端部用個人線量計を含め、低エネルギー光子領域まで新たな実用量で校正・試験する 環境が整備された。

(2)線量計の特性評価に関する調査

作業環境モニタリング用の線量計については、令和 4 年度事業までに試験した機種 に加えて 3 機種(光子用可搬型エリアモニタ、光子用受動形環境線量計、中性子サー ベイメータ)、受動形個人線量計については、令和 4 年度事業までに試験を実施した機 種に、国内で線量管理に使用されている主要な 6 機種(光子・β線用受動形個人線量 計(体幹部用)2機種、中性子用受動形個人線量計(体幹部用)1機種、光子用受動形 個人線量計(末端部用)2機種、β線用受動形個人線量計(末端部用)1機種)を追加 してエネルギーや放射線入射方向に関する特性を取得した。

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、 $H^* e^{-H_p}$ に対して低エネルギー領域で過大応答し、20 keV 付近では 10 倍以上の応答となるケースもある。 $H^* e^{-H_p}$ 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となる。方向特性に ついても、ROT 照射を含め調査範囲内では大きな影響はみられなかった。 D'_{lens} 、 D_p lens $e^{-D'_{local skin}}$ 、 $D_{p local skin}$ 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、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。

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'localskin など複数の実用量を測定できるものでは、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。特性試験については、要求すべき試 験の内容を精査する必要があるかもしれない。線量計メーカーについては、こうした 影響が大きい部分について特性改善のための改良が課題である。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。また、線量計にどのような性能 を要求するかの検討も必要であろう。線量計使用者には、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が課題である。 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有用であるほか、関係者の 理解醸成も重要であろう。

トレーサビリティ確保に関する調査として、光子及び中性子についての計 6 つの試 験条件で二次標準機関である FRS と国家標準機関である産業技術総合研究所での特性 試験結果を比較した。光子における方向特性試験に関しては、僅かに違いが見られた が、その他については不確かさの範囲内で一致し、同等性が確認できた。方向特性に ついては、入射角による応答変化が著しい領域での試験における不確かさの検証など を行っていく必要がある。また、β線など他の線種に対しても引き続き調査が必要な ものと考えれれる。

(3) 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査

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4 つの特徴が異なる放射線作業場(再処理施設、 研究用原子炉施設の炉室、中性子ビーム利用施設、大型加速器施設)を選定し、光子 エネルギー分布を取得した。再処理施設は工程によってエネルギー分布は大きく異な り、平均エネルギーも0.2 MeV から1.6 MeV まで分布していた。研究用原子炉施設の 炉室及び中性子ビーム利用施設では¹⁶N や鉄による即発 y 線など高エネルギー y 線成 分が見られた影響で平均エネルギーは高く、2~4 MeV 程度であった。大型加速器施 設においては特徴的な放射化物によるピークがみられたが、平均エネルギーは概ね 0.6~0.8 MeV 程度であった。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て いるレスポンスのよい線量計であれば、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。

さらに、原子力機構核燃料サイクル工学研究所において、過去に実施に使用された 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 ¹³⁷Cs 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、²⁴¹Am に由来する 60 keV のγ線により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を考えら れる。

また、光子エネルギー分布と線量計のエネルギー特性試験結果から、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。評価した場は、令和 3 年度事業や令和 4 年度事業で取得された光子エネルギー分布も利用し、原子力発電所 25 箇所、核燃料 施設 8 箇所、研究・教育施設 36 箇所であり、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線施設を除いては、高々30%程度の 過大応答 (²⁴¹Am 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、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。

(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)、ICRP、ICRU 並びに IAEA の動 向を調査した。まだ、これらが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、ICRP のタスクグループの状況などを今後も注視していく必 要がある。

関連する学術団体として国際固体線量計測機構(ISSDO)及び日本保健物理学会の 状況について、情報収集を行った。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いたが、新たな実用量に関する研究報告は我々の報告を除い ては計2件であり、まだ多くはない。新たな実用量が各国の法令に取り込まれるの は、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 いが、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。

また、関連文献についても調査を行い、調査した 31 の研究報告について、①校正 場に関するもの、②線量計の特性に関するもの、③線量計の試験方法に関するもの、 ④作業場での影響等に関するもの、⑤その他、に分類した。その結果、欧州を中心に 徐々に研究活動が活発化しており、特に国外で使用されている線量計について、線量 計の特性に関する報告が多くなされていることが分かった。

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 安全研究・防災支援部門 安 全研究センター 原子炉安全研究ディビジョン リスク評価・防災研究グループの高原 省五氏をはじめとして、事業の遂行における助言や放射線作業場における測定において協 力いただきました原子力機構 原子力科学研究部門 原子力科学研究所 放射線管理部の 半谷 英樹氏、山外 功太郎氏、大貫 孝哉氏、高宮 圭氏、石井 雅人氏、大石 皓平 氏、篠塚 友輝氏、同研究炉加速器技術部の荒木 正明氏、同 J-PARC センターの神谷 潤一郎氏及び仲野谷 孝光氏、原子力機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 青森研 究開発センターの鈴木 武彦氏に御礼申し上げます。また。再処理施設における光子スペ クトルデータの提供を頂きました原子力機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 核燃 料サイクル工学研究所 放射線管理部の吉田 忠義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] 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)
- [J10] 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)
- [J11] H. Yoshitomi. 放射線測定器のJIS 登録試験所開設, Isotope News, 786, 26-29 (2023)
- [J12] H. Yoshitomi, T. Tsuji, T. Fukami, S. Nishino, J. Takamine, T. Murayama and Y. Tanimura. The facility of radiation standards in Japan Atomic Energy Agency -Recent activities with a focus on establishment of accredited testing laboratory, Rad. Prot. Env., 46(5) S174-S175 (2023)
- [J13] 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)
- [J14] International Organization for Standardization (ISO). Radiological protection Radiological protection X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy Part 1: Radiation characteristics and production methods, ISO 4037-1 (2019)

- [J15] 日本産業規格. X線及びy線用線量(率)測定器の校正方法, JIS Z 4511 (2018)
- [J16] International Organization for Standardization (ISO). *Nuclear energy Reference beta-particle radiation — Part 1: Methods of production,* ISO 6980-1 (2022)
- [J17] 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
- [J18] International Organization for Standardization (ISO). *Reference neutron radiations Part 1: Characteristics and methods of production,* ISO 8529-1 (2001)
- [J19] 日本産業規格. 中性子線量当量(率)計の校正方法, JIS Z 4521:2006
- [J20] T. Tsuji, H. Yoshitomi and Y. Tanimura. *蛍光X線による低エネルギー単色X線校正場の整備*, 第4回日本保健物理学会日本放射線安全管理学会合同大会講演要旨集 1A3-4 (2022)
- [J21] International Organization for Standardization (ISO). Radiological protection X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy Part 3: Calibration of area and personal dosemeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence, ISO 4037-3 (2019)
- [J22] U. Ankerhold. Catalogue of X-ray spectra and their characteristic data ISO and DIN radiation qualities, therapy and diagnostic radiation qualities, unfiltered X-ray spectra, PTB-Dos-34, Braunschweig, Germany (2000)
- [J23] S. Shimizu, T. Sawahata, Y. Kajimoto, Y. Shikaze, Y. Yoshihara and Y. Tatebe. *国際規格に準拠* したX線標準場の整備, JAEA-Tech 2011-008 (2011)
- [J24] R. Behrens and T. Otto. Conversion coefficients from total air kerma to the newly proposed ICU/ICRP operational quantities for radiation protection for photon reference radiation qualities, J. Radiol. Prot., 42(1), 011519 (2021)
- [J25] 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)
- [J26] R. Behrens. Conversion coefficients from absorbed dose to tissue to the newly proposed ICRU/ICRP operational quantities for radiation protection for beta radiation qualities, J. Radiol. Prot., 41(4), 871 (2021)
- [J27] 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)
- [J28] 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)
- [J29] International Electrotechnical Commission (IEC). Radiation Protection instrumentation -

Passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation, IEC 62387-1 (2012)

- [J30] 日本産業規格. 中性子用線量当量(率) サーベイメータ, JIS Z 4341 (2006)
- [J31] 日本産業規格. 中性子用固体飛跡個人線量計, JIS Z 4416 (2005)
- [J32] 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 (2020)
- [J33] S. Sakashita, A. Takahashi, Y. Yoshida and K. Shiba. *東海再処理施設における y 線スペクト ロメトリによる y 線測定器の性能評価*, 第2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(2019)
- [J34] T. Nakanoya, J. Kamiya, M. Yoshimoto, T. Takayanagi, N. Tani, H. Kotoku, K. Horino, T. Yanagibashi, O. Takeda and K. Yamamoto. *3GeV シンクロトロンビーム入射部における放射 線遮蔽体の検討及び設置作業報告*, JAEA-Technology 2021-019 (2021)
- [J35] 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)
- [J36] N. Tsujimura, T. Momose and T. Nomura. *東海事業所における体幹部不均等被ばく及び局 部被ばく事例の解析*, PNC TN8410 94-337 (1994)
- [J37] N. Tsujimura, K. Hoshi, K. Aoki, H. Yoshitomi, Y. Tanimura and S. Yokoyama. Eye lens dosimetry for workers at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant -2: Field study using humanoid phantoms, Radiat. Meas., 134, 106305 (2020)
- [J38] International Organization for Standardization (ISO). Nuclear energy Reference beta-particle radiation Part 2: Calibration fundamentals related to basic quantities characterizing the radiation field, ISO 6980-2 (2022)
- [J39] International Organization for Standardization (ISO). Nuclear energy Reference beta-particle radiation Part 3: Calibration of area and personal dosemeters and the determination of their response as a function of beta radiation energy and angle of incidence, ISO 6980-3 (2022)
- [J40] International Organization for Standardization (ISO). Nuclear reference radiation fields Part 3: Calibration of area and personal dosemeters and determination of their response as a function of neutron energy and angle of incidence, ISO 8529-3 (2023)
- [J41] International Organization for Standardization (ISO). Reference neutron radiations Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field, ISO 8529-2 (2000)
- [J42] International Organization for Standardization (ISO). *Reference radiation fields for radiation* protection Definitions and fundamental concepts, ISO 29661 (2012)
- [J43] International Organization for Standardization (ISO). Nuclear reference radiation fields Part 3: Calibration of area and personal dosemeters and determination of their response as a function of neutron energy and angle of incidence, ISO 8529-3 (2023)

- [J44] International Organization for Standardization (ISO). *Radiological protection Radiological protection X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges from 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV,* ISO 4037-2 (2019)
- [J45] International Organization for Standardization (ISO). Radiological protection Radiological protection X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy Part 4: Calibration of area and personal dosemeters in low energy X reference radiation fields, ISO 4037-4 (2019)
- [J46] International Organization for Standardization (ISO). Content of input data for the statistical analysis of dose records of individuals monitored for occupational exposure to ionizing radiation, ISO 24426 (2023)
- [J47] International Organization for Standardization (ISO). *Radiological protection Procedures for monitoring the dose to the lens of the eye, the skin and the extremities*, ISO 15382 (2015)
- [J48] T. Tsuji, H. Yoshitomi and Y. Tanimura.²⁴¹Am 線源校正場とX 線校正場におけるサーベイ メータ特性の比較, 第 56 回日本保健物理学会合同大会講演要旨集(2023)
- [J49] T. Otto. Conversion coefficients from kerma to ambient dose and personal dose for X-ray spectra, J. Instrum., 14 P11011 (2019)
- [J50] A. A. Qaaod, M. Reginatto, M. Zboril and A. Zimbal, *The impact of new ICRU95 quantities and spectrum data on the dosimetric quantities of the neutron reference fields at PTB*, Radiat. Prot. Dosim., 199(6), 572-579 (2021)
- [J51] F. Pozzi and M. Silari, The CERN-EU high-energy Reference Field (CERF) facility: New FLUKA reference values of spectral fluences, present and newly proposed operational quantities, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A., 979 164477 (2020)
- [J52] H. Hoedlmoser, V. Bandalo and M. Figel, BeOSL dosemeters and new ICRU operational quantities: Response of existing dosemeters and modification options, Radiat. Meas., 42 (2022) 021512
- [J53] I. O. Polo, W.S. Santos, G. V. Moraes and P. Nicolucci, *Response of a TLD badge to the new* operational quantity $H_p(\theta)$: Monte Carlo approach, Radiat. Phys. Chem., 191, 109869 (2022)
- [J54] L. Bossin, J. B. Christensen, O.V. Pakari, S. Mayer and E. G. Yukihara, Performance of radiophotoluminescence personal dosimeters in terms of the ICRU Report 95's operational quantities, Radiat. Meas., 156, 106825 (2022)
- [J55] M. Caresana, L. Garlati, G. Zorloni, R. Behrens, T. Otto, G. Minchillo and F. Rossi, Impact of new operational dosimetric quantities on individual monitoring services, J. Radiol. Prot., 41, 1110-1121 (2021)
- [J56] J. Eakins and R. Tanner, The effect of revised operational dose quantities on the response characteristics of a beta/gamma personal dosemeter, J. Radiol. Prot., 39, 399-421 (2019)

- [J57] D. Ekendahl, Z. Cemusova, D. Kurkova and M. Kapucianova, Response of current photon personal dosemetersto new operational quantities, Radiat. Prot. Dosim., 190(1), 45-57 (2020)
- [J58] T. Otto, *Response of photon dosimeters and survey instruments to new operational quantities proposed by ICRU RC26*, J. Instrum., 14, 01010 (2019)
- [J59] Z. Cemusová, D. Ekendahl, D. Kurkova, L. Judas, M. Kapucianova and Z. Vykydal, *Response of current dosemeters to new operational quantities in rotational geometry*. Radiat. Prot. Dosim., 199(15-16), 1785-1789 (2023)
- [J60] R. Tanner and L. Hager and J. Eakins, *The response of the PHE neutron personal dosemeter in terms of the proposed ICRU personal dose equivalent*, Radiat. Prot. Dosim., 180(1-4), 17-20 (2018)
- [J61] B. Moreno, M. Million, D. Thomas and Graeme Taylor, Assessment of the impact on a PADC neutron dosimetry system of the new operational dose quantities proposed in ICRU report 95, Radiat. Prot. Dosim., 199(15-16), 1725-1728 (2023)
- [J62] Z. Cemusová, D. Ekendahl, L. Judas, M. Kapucianová, P. Kuca and Z. Vykydal, *Response of Current Area Dosemeters to New Operational Quantities*, Radiat. Prot. Dosim., 198(17), 1313-1321 (2022)
- [J63] J. Eakins, R. Tanner and L. Hager, *The effects of a revised operational dose quantity on the response characteristics of neutron survey instruments*, J. Radiol. Prot., 38, 688-701 (2018)
- [J64] F. Pozzi, M. Ferrarini, F. Ferrulli and M. Silari, Impact of the newly proposed ICRU/ICRP quantities on neutron calibration fields and extended range neutron rem-counters, J. Radiol. Prot., 39, 920-937 (2019)
- [J65] F. G. Gonzalo, G. Eduardo, M. G. José and E. C. Lenin, Impact of new ICRU dose quantities on REM-meters and on the operational radiation protection in Compact Proton Therapy Centers (CPTC), Proceedings of the ISSSD 2022, 2, 142-191 (2022)
- [J66] V. Merza, C. Hranitzky, A. Steurer and F. J. Maringer, Examination of applicability of the ISO slab phantom as calibration phantom for the new ICRU 95 operational quantity personal dose, J. Radiol. Prot., 42 (2022) 021512
- [J67] V. Merza, C. Hranitzky, A. Steurer and F. J. Maringer, Should the ISO slab phantom be used for calibrations in terms of the new ICRU 95 operational quantity personal dose?, Radiat. Prot. Dosim., 199(8-9), 754-758 (2023)
- [J68] D. Matthiä, M. M. Meier and K. Schennetten, *New operational dose quantity ambient dose H* in the context of galactic cosmic radiation in aviation*, J. Radiol. Prot., 42(2), 21520 (2022)
- [J69] M. Abdelrahman, P. Lombardo, J. Dabin, L. Struelens and F. Vanhavere, Impact of the implementation of the new radiation quantities recommended by ICRU/ICRP for practical use in interventional radiology: a Monte Carlo study, J. Radiol. Prot., 43 011513 (2023)
- [J70] P. Gilvin et al. Evaluation of the impact of the new ICRU operational quantities and recommendations for their practical application. EURADOS Report 2022-02 (2022)

- [J71] P. Gilvin et al. EURADOS project on the impact of the proposed ICRU operational dose quantities. Radiat. Prot. Dosim., 199(15-16), 1689-1695 (2023)
- [J72] C. Ferrari, G. Manenti and A. Malizia, Sievert or Gray: Dose quantities and protection levels in emergency exposure, Sensors, 23, 1918 (2023)
- [J73] K. Bouzagzi and A. Frahi-Amroun, *Proposal for a new operational quantity to assess the effective dose in the event of external exposure to photons*, Radiat. Phys. Chem. 185, 109487 (2021)
- [J74] S. Djeffal, J. Dubeau, J. Sun and F. Ali, New operational quantities (RBE × D_{p lens}/Φ) for eye lens neutron dosimetry as a function of energy and angle of incidence in the ICRU 95 formalism, J. Radiol. Prot., 43,031551 (2023)
- [J75] C. Stettner, C. Hranitzky, K. Poljanc and F; Strebl and C. Streli, *Catalogue of dose rate constants for more than 400 radionuclides in terms of ambient dose H* and comparison of figures to ambient dose equivalent H*(10)*, Appl. Radiat. Isot., 184, 110159 (2022)
- [J76] K. G. Veinot, N. E. Hertel, M. M. Hiller and K. F. Eckerman, Neutron dose coefficients for local skin, J. Radiol. Prot., 40(2), 554-582 (2020)
- [J77] N. E. Hertel, K. G. Veinot, M. M. Hiller and K. F. Eckerman, Neutron dose coefficients for the lens of the eye, J. Radiol. Prot., 41(4), 628-653 (2021)
- [J78] S. Djeffal, J. Dubeau, J. Sun and F. Ali, On the operational quantity for eye lens neutron dosimetry considering ICRU 95 report, J. Radiol. Prot., 42, 031515 (2022)