

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
成果報告書

令和4年3月31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」の成果を取りまとめたものです。

目 次

1	事業の背景と目的.....	9
2	事業の実施体制	10
2.1	実施体制.....	10
2.2	放射線標準施設棟（FRS）	10
2.3	進捗管理.....	13
3	事業の概要.....	14
3.1	全体計画.....	14
3.2	概要.....	15
4	事業の成果.....	17
4.1	はじめに.....	17
4.1.1	新たな実用量.....	17
4.2	新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査.....	23
4.2.1	新たな実用量に対する校正場の整備.....	23
4.2.1.1	γ線.....	23
4.2.1.2	X線.....	32
4.2.1.3	β線.....	38
4.2.1.4	中性子.....	44
4.2.1.5	まとめ.....	51
4.2.2	新たな実用量を用いた線量計の校正.....	53
4.3	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.....	64
4.3.1	放射線作業場の選定	65
4.3.2	光子エネルギー分布の取得.....	65
4.3.3	放射線作業場における各線量の算出.....	79
4.3.4	線量計のエネルギー応答試験.....	97
4.4	まとめ.....	108
5	参考文献.....	111

付録1：キックオフ会合議事録

付録2：キックオフ会合資料

目 次

図 2-1	事業の実施体制.....	10
図 2-2	放射線標準施設棟の鳥瞰図.....	11
図 3-1	本事業の研究計画.....	14
図 4-1	光子に対する実効線量の管理に用いる場のモニタリングに関する現・新実 用量の比較.....	18
図 4-2	光子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる場のモニタリングに関する 現・新実用量の比較 (0° のみ)	18
図 4-3	光子に対する皮膚の線量管理に用いる場のモニタリングに関する現・新実 用量の比較 (0° のみ)	19
図 4-4	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・新実 用量の比較 (0° のみ)	19
図 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・新実用量の比較 (0° のみ)	20
図 4-6	光子に対する皮膚の線量管理に用いる個人モニタリングに関する現・新実 用量の比較 (0° のみ、スラブファントムに対するもの)	20
図 4-7	電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる場のモニタリングに関する 現・新実用量の比較 (0° のみ)	21
図 4-8	電子に対する皮膚の線量管理に用いる場のモニタリングに関する現・新実 用量の比較 (0° のみ)	21
図 4-9	中性子に対する実効線量の管理に用いる場のモニタリングに関する現・新 実用量の比較.....	22
図 4-10	中性子に対する実効線量の管理に用いる個人モニタリングに関する現・ 新実用量の比較.....	22
図 4-11	S-Cs 校正場の光子スペクトル分布.....	26
図 4-12	S-Cs 校正場の光子スペクトル分布.....	26
図 4-13	S-Co 校正場の光子スペクトル分布.....	27
図 4-14	S-Co 校正場の光子スペクトル分布.....	27
図 4-15	$d_{\text{local skin}}$ の評価に用いた計算体系.....	39
図 4-16	d_{lens} の評価に用いた計算体系	39
図 4-17	計算による $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 校正場における入射角度に応じた β 線スペクトル	40
図 4-18	計算による $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 校正場及び ^{85}Kr 校正場の β 線スペクトル.....	40
図 4-19	中性子の場のモニタリングにかかる実用量に対する換算係数	45

図 4-2 0	中性子の個人モニタリングにかかる実用量に対する換算係数	45
図 4-2 1	²⁴¹ Am-Be 線源のスペクトル	46
図 4-2 2	²⁵² Cf 線源のスペクトル	47
図 4-2 3	FRS の熱中性子校正場の中性子スペクトル	48
図 4-2 4	各校正場におけるフルエンス—線量当量換算係数の比 (新/現行)	51
図 4-2 5	A 社製シンチレーション式サーベイメータの校正の様子	55
図 4-2 6	B 社製電離箱式サーベイメータの校正の様子 (X 線を用いた校正) ..	55
図 4-2 7	B 社製電離箱式サーベイメータの校正の様子 (β 線を用いた校正) .	56
図 4-2 8	C 社製中性子用サーベイメータの校正の様子 (熱中性子を用いた校正)	56
図 4-2 9	C 社製中性子用サーベイメータの校正の様子 (速中性子を用いた校正)	57
図 4-3 0	D 社製光子用個人線量計の校正の様子	57
図 4-3 1	E 社製電子式個人線量計 (体幹部用) の校正の様子	58
図 4-3 2	F 社製受動形個人線量計 (水晶体用) の校正の様子	58
図 4-3 3	G 社製中性子用電子式個人線量計の校正の様子 (速中性子を用いた校正)	59
図 4-3 4	G 社製中性子用電子式個人線量計の校正の様子 (熱中性子を用いた校正)	59
図 4-3 5	コンクリートによる散乱線が主となる放射線場 (#3, #5, #7) の測定の様 子	67
図 4-3 6	加速器施設ビームライン機器周辺 (#16) の測定の様子	67
図 4-3 7	線源貯蔵室中央 (RI・核燃料物質) (#10) での測定の様子	68
図 4-3 8	漏洩線量場 (線源装備機器) (#13) の測定の様子	68
図 4-3 9	2"Φ×2"円筒形 NaI(Tl)検出器によるパルス波高スペクトル (#1~#9)	69
図 4-4 0	2"Φ×2"円筒形 NaI(Tl)検出器によるパルス波高スペクトル (#10~#15)	70
図 4-4 1	2"Φ×2"円筒形 NaI(Tl)検出器によるパルス波高スペクトル (#16)	71
図 4-4 2	光子エネルギー分布 (#1~#9)	75
図 4-4 3	光子エネルギー分布 (#10~#15)	76
図 4-4 4	光子エネルギー分布 (#16)	77
図 4-4 5	光子エネルギー分布 (#17)	77
図 4-4 6	光子エネルギー分布 (福島第一原子力発電所構内)	78
図 4-4 7	光子エネルギー分布 (原子力発電所)	78
図 4-4 8	S-Cs H*で校正した A 社製シンチレーション式サーベイメータ のエネルギー応答特性	100

図 4-4 9	S-Cs H^* で校正した B 社製電離箱式サーベイメータ のエネルギー応答特性.....	100
図 4-5 0	S-Cs D'_{lens} で校正した B 社製電離箱式サーベイメータ のエネルギー応答特性.....	101
図 4-5 1	N-80 $D'_{\text{local skin}}$ で校正した B 社製電離箱式サーベイメータ のエネルギー応答特性.....	101
図 4-5 2	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $D'_{\text{local skin}}$ で校正した B 社製電離箱式サーベイメータ のエネルギー応答特性.....	102
図 4-5 3	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ D'_{lens} で校正した B 社製電離箱式サーベイメータ のエネルギー応答特性.....	102
図 4-5 4	S-Cs H_p で校正した D 社製電子式個人線量計 (体幹部用) のエネルギー応答特性.....	103
図 4-5 5	N-80 $D_{p\text{local skin}}$ で校正した E 社製電子式個人線量計 (体幹部用) のエネルギー応答特性.....	103
図 4-5 6	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $D_{p\text{local skin}}$ で校正した E 社製電子式個人線量計 (体幹部用) のエネルギー応答特性.....	104
図 4-5 7	S-Cs $D_{p\text{lens}}$ で校正した F 社製受動形個人線量計 (水晶体用) のエネルギー応答特性.....	104
図 4-5 8	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $D_{p\text{lens}}$ で校正した F 社製受動形個人線量計 (水晶体用) のエネルギー応答特性.....	105

表 目 次

表 2-1	FRS の主な γ 線校正場	12
表 2-2	FRS の主な X 線校正場	12
表 2-3	FRS の主な β 線校正場	12
表 2-4	FRS の主な RI 中性子校正場	12
表 2-5	FRS の主な単色中性子校正場	13
表 2-6	事業の進捗状況の報告	13
表 4-1	現行実用量と新たな実用量	17
表 4-2	評価に用いた単色光子に対する線量換算係数	24
表 4-3	評価した S-Cs 校正場の換算係数 (1/2)	29
表 4-4	評価した S-Cs 校正場の換算係数 (2/2)	30
表 4-5	評価した S-Co 校正場の換算係数 (1/2)	31
表 4-6	評価した S-Co 校正場の換算係数 (2/2)	31
表 4-7	評価した X 線校正場の換算係数 (1/4)	34
表 4-8	評価した X 線校正場の換算係数 (2/4)	35
表 4-9	評価した X 線校正場の換算係数 (3/4)	36
表 4-10	評価した X 線校正場の換算係数 (4/4)	37
表 4-11	換算係数を評価した β 線校正場	38
表 4-12	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場について評価した換算係数	43
表 4-13	^{85}Kr 場について評価した換算係数	43
表 4-14	評価に用いた単色中性子に対する換算係数	44
表 4-15	評価した中性子校正場の換算係数	50
表 4-16	本事業で使用する換算係数 (まとめ)	52
表 4-17	新たな実用量に対する校正に用いた線量計の種類と特徴	54
表 4-18	現行実用量と新たな実用量に対する校正定数 (1/2)	62
表 4-19	現行実用量と新たな実用量に対する校正定数 (2/2)	63
表 4-20	選定した放射線作業場	66
表 4-21	再解析に利用したデータ一覧 (福島第一原子力発電所)	72
表 4-22	再解析に利用したデータ一覧 (原子力発電所)	73
表 4-23	①点線源取扱場及び②散乱線がメインの作業場における場所のモニタリングにかかる実用量	81
表 4-24	①点線源取扱場及び②散乱線がメインの作業場における個人モニタリングにかかる実用量	82
表 4-25	①点線源取扱場及び②散乱線がメインの作業場における新・現実用量の	

比較	83
表 4-2 6 ①点線源取扱場及び②散乱線がメインの作業場における実用量と防護量の比較	84
表 4-2 7 ③複数線源場、④漏洩線量場及び⑤加速器施設の作業場における場所のモニタリングにかかる実用量	85
表 4-2 8 ③複数線源場、④漏洩線量場及び⑤加速器施設の作業場における個人モニタリングにかかる実用量	86
表 4-2 9 ③複数線源場、④漏洩線量場及び⑤加速器施設の作業場における新・現実用量の比較	87
表 4-3 0 ③複数線源場、④漏洩線量場及び⑤加速器施設の作業場における実用量と防護量の比較	88
表 4-3 1 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における場所のモニタリングにかかる実用量（1）	89
表 4-3 2 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における個人モニタリングにかかる実用量（1）	89
表 4-3 3 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における新・現実用量の比較（1）	90
表 4-3 4 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における実用量と防護量の比較（1）	90
表 4-3 5 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における場所のモニタリングにかかる実用量（2）	91
表 4-3 6 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における個人モニタリングにかかる実用量（2）	92
表 4-3 7 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における新・現実用量の比較（2）	93
表 4-3 8 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における実用量と防護量の比較（2）	94
表 4-3 9 ⑧原子力発電所の作業場における場所のモニタリングにかかる実用量	95
表 4-4 0 ⑧原子力発電所の作業場における個人モニタリングにかかる実用量	95
表 4-4 1 ⑧原子力発電所の作業場における新・現実用量の比較	95
表 4-4 2 ⑧原子力発電所の作業場における実用量と防護量の比較	96
表 4-4 3 A社製シンチレーション式サーベイメータの応答評価例	106
表 4-4 4 B社製電離箱式サーベイメータの応答評価例	106
表 4-4 5 D社製電子式個人線量計（体幹部用）の応答評価例	106
表 4-4 6 E社製電子式個人線量計（体幹部用）の応答評価例	107
表 4-4 7 F社製受動形個人線量計（水晶体用）の応答評価例	107

1 事業の背景と目的

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

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

こうしたなかで、ICRP と国際放射線単位測定委員会（ICRU）によって、実効線量や等価線量といった防護量について、標準化されたファントムを用いて幅広い粒子、エネルギーに対して計算した換算係数が公表された^[4]のに引き続き、ICRU は令和 2 年 12 月に、ICRP と合同で検討を進めてきた実用量の定義変更を勧告する報告書（ICRU Report 95^[5]）を発刊した。線量測定の基準となる量の変更であることから、その導入による放射線管理への影響が懸念されている。具体的な懸念として、先行の調査事業報告書^[6]において、現行の線量計が引き続き使用できるか、導入前後で混乱なく一貫した線量測定評価が可能かなどの線量計の性能評価及びその許容範囲に関連する実務的課題が挙げられている。これらの課題の解決には、新たな実用量に対応した校正場を開発することにより、線量計を性能評価できる環境を整備し、実務的な観点を踏まえた線量計の性能要件を示すことが必要とされている。

また、放射線防護に係る線量の概念は我が国だけでなく世界各国で放射線防護の体系に取り入れられており、これらに変更された場合、各国で法令への取り入れに向けた検討が進められることになる。特に、我が国においては、これらの概念を取り入れている制度が各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現時点から技術的知見の整備が求められる。

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課題について検討し、技術的知見を蓄積することを目的として、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原子力規制庁から委託を受けて本事業を実施した。

本報告書は、本事業の成果等を取りまとめたものである。

2 事業の実施体制

2.1 実施体制

本事業の実施体制図を図 2-1 に示す。原子力機構 安全研究・防災支援部門 安全研究センター 原子炉安全研究ディビジョン リスク評価・防災研究グループに所属する 2 名に加えて、原子力機構 放射線標準施設棟（以下「FRS」という。）を利用した照射技術及び放射線計測技術を有する原子力科学研究部門 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課の 3 名の合計 5 名で、「(1) 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査」、及び「(2) 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」を実施した。

また、(2) の調査における放射線作業場の選定等、原子力機構の原子力施設で放射線管理業務を実施している原子力科学研究部門 原子力科学研究所 放射線管理部の助言を得た。

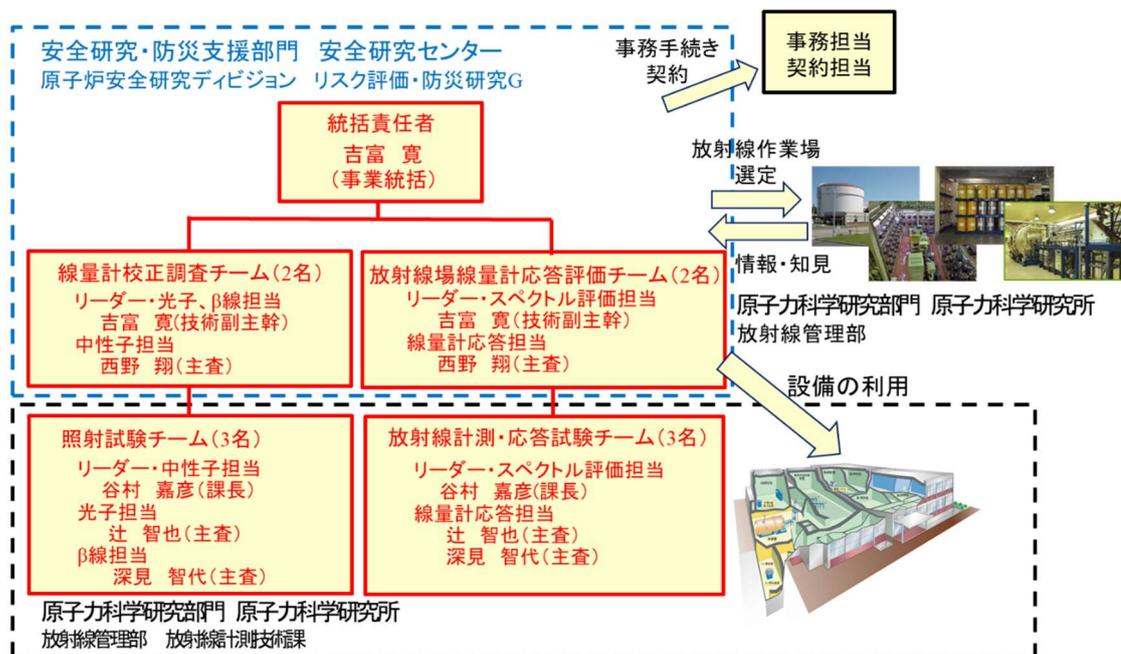


図 2-1 事業の実施体制

2.2 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、線量計の校正・試験等の必要な照射もこれらの校正場を利用した。また、校正場の評価に必要な校正場に関する詳細な情報や過去に評価されたスペクトルデータなど、必要に応じて FRS

の校正場を管理する放射線計測技術課が保有するデータを利用した。

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

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

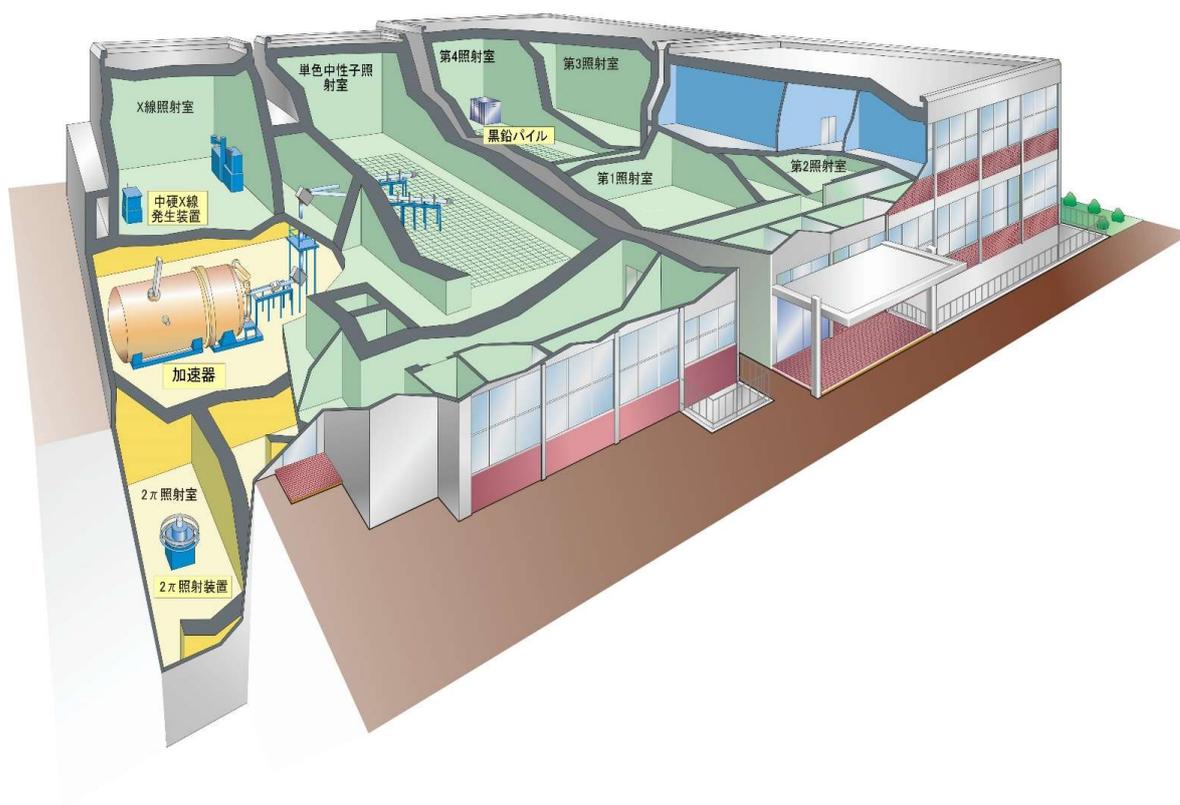


図 2-2 放射線標準施設棟の鳥瞰図

表 2-1 FRS の主な γ 線校正場

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

*令和 4 年 3 月現在

表 2-2 FRS の主な X 線校正場

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

表 2-3 FRS の主な β 線校正場

照射装置	照射室	線源及び平均エネルギー	線量当量率 ($H(0.07)$) 範囲*
β 線照射システム	β 線照射室	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (0.8 MeV)	16~340 mSv/h
		^{85}Kr (0.24 MeV)	45 mSv/h
		^{147}Pm (0.06 MeV)	0.2 mSv/h

*令和 4 年 3 月現在

表 2-4 FRS の主な RI 中性子校正場

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

*令和 4 年 3 月現在

表 2-5 FRS の主な単色中性子校正場

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

2.3 進捗管理

本事業を開始するにあたり、令和3年12月10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。議事録及び会合資料を付録1及び付録2に示す。また、随時関係者と意見交換を行って進捗状況を確認するとともに、事業の進捗状況については、月1回を目安に電子メールにて総括責任者から原子力規制庁担当者に報告した(表2-6参照)。さらに、令和4年3月14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。

いずれも、新型コロナウイルス感染症の感染拡大に伴い、対面での会合及び報告が困難となったため、Web会議や電子メールを利用した。

表 2-6 事業の進捗状況の報告

報告日	内容
令和3年12月28日	令和3年12月までの進捗報告
令和4年2月1日	令和4年1月までの進捗報告
令和4年3月2日	令和4年2月までの進捗報告

3 事業の概要

3.1 全体計画

本事業では、実用量の定義変更に伴い懸念されている線量計測上の課題のうち、放射線管理の現場で用いられている線量計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課題について検討し、技術的知見を蓄積することを目的としている。このため、「(1) 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査」、及び「(2) 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」の2つに分けて調査研究を実施する。

具体的な研究計画を図 3-1 に示す。「(1) 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査」では、FRS の校正場における新たな実用量に対する換算係数を算出し、それを用いた線量計の校正を行う。現行実用量に対する校正も同時に行い、得られた現・新実用量に対する校正定数の比較から、線量計の校正手法及び放射線管理の現場への影響について考察する。また、「(2) 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査」では、光子による外部被ばくが主体である実際の原子力施設の放射線作業場において、光子エネルギー分布を取得し、新たな実用量及び現行実用量に対する線量率を算出する。さらに、これらの放射線作業場を代表するエネルギーについて線量計の応答特性試験を行い、実用量の定義変更に伴う線量計のエネルギー応答に関する課題を抽出する。

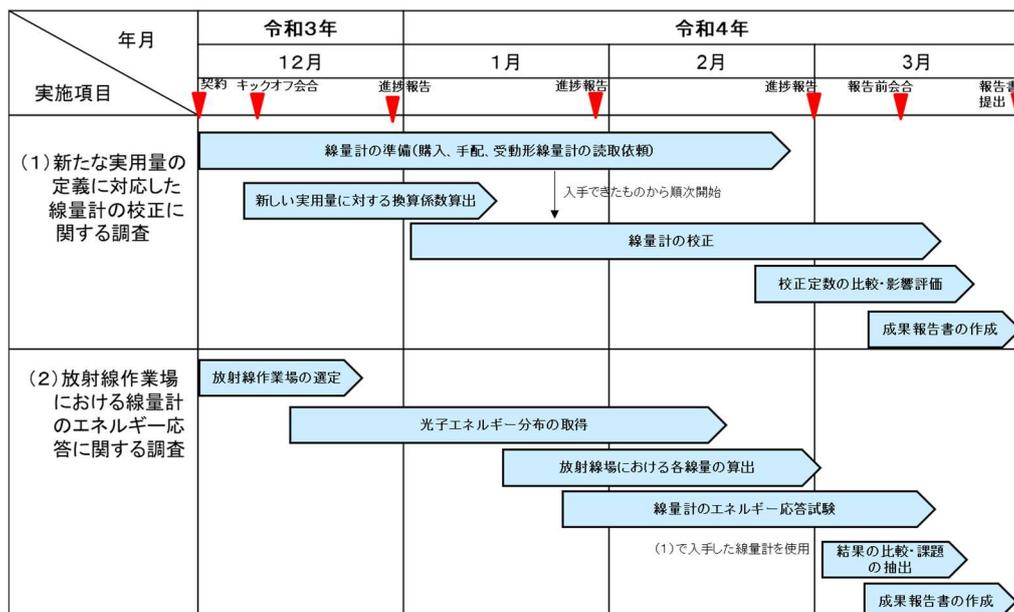


図 3-1 本事業の研究計画

3.2 概要

3.1 で示した計画に沿って「(1) 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査」、及び「(2) 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」を以下のとおり実施した。

(1) 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査

FRS の以下の校正場について新たな実用量（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）に対する換算係数を算出し、新たな実用量で線量計を校正できる環境を整えた。

- ^{137}Cs 及び ^{60}Co 線源を利用した γ 線校正場及び中硬 X 線発生装置を利用した管電圧 40 kV から 300 kV までの X 線校正場
- $^{241}\text{Am-Be}$ 及び ^{252}Cf 線源を利用した速中性子校正場並びに熱中性子校正場
- $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 及び ^{85}Kr 線源を利用した β 線校正場

これらの校正場を利用し、放射線管理の現場で用いられている市販の線量計 7 機種を例にとり、新たな実用量及び現行実用量に対する校正を実施し、校正定数を得た。校正定数の比較から、以下の技術的知見を得た。

- 光子については、実効線量の管理に用いる実用量で 2 割程度、現行に比べて小さくなるため、放射線管理測定における線量評価値もそれに従い小さくなる。
- 中性子に関しては、熱中性子で校正定数が 40%程度に小さくなる。一方で $^{241}\text{Am-Be}$ 線源を利用した速中性子校正場では 10%程度大きな値となる。これらの影響により、中性子用サーベイメータについては、実用量の定義変更に伴い、 $^{241}\text{Am-Be}$ 速中性子、 ^{252}Cf 速中性子、熱中性子でそれぞれ校正した際の校正定数の大小関係が入れ替わるケースがあることが分かった。
- 眼の水晶体の線量管理に用いる線量計については、 β 線校正場で校正した場合、校正定数が 40%程度に減少した。

(2) 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

光子による外部被ばくが主体となる原子力施設の 8 つの放射線作業場の計 37 ヶ所について、光子エネルギー分布を取得し、新たな実用量に基づいた線量を算出するとともに、当該放射線場を代表するエネルギーについて線量計のエネルギー応答特性を評価した。これらの結果から、以下の技術的知見を得た。

- 今回調査した作業場及び線量計の組み合わせでは、エネルギー応答の観点からは新たな実用量に対する校正が適切に行われれば、IEC 等が定める現行の線量計性能基準の許容範囲内での測定が可能と考えられる。

- 光子及び β 線の双方を測定できるタイプの線量計においては、校正線質及び評価量によっては、過小または過大に測定してしまう可能性がある。
- 校正定数の変更により測定評価値が一律に変化すること、また防護量に対する保守的裕度が少なくなることを考慮して、線量測定の現状を踏まえた線量計の性能基準の検討、新たな実用量導入の際の円滑な放射線管理実務の移行が課題と考えられる。

4 事業の成果

4.1 はじめに

4.1.1 新たな実用量

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

表 4-1 現行実用量と新たな実用量

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

(先行調査事業成果報告書^[6]及び ICRU Report 95^[5]を基に作成)

ICRP Publ. 74^[7]等や ICRU Report 95^[5]には、単色光子、電子及び中性子に対して空気カーマ（光子の場合）及びフルエンス（電子、中性子の場合）に対するこれらの実用量に対する換算係数が示されている。図 4-1～図 4-10 にこれら現行実用量及び新たな実用量への換算係数の一部を示した。光子については、カーマ近似有り無しの両方を図示した。電子については、眼の水晶体及び皮膚の線量管理に用いるもののみとし、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に違いがないため、一方のみを示した。中性子については、実効線量の管理に関するもののみを示した。

このように、エネルギーによって現・新実用量の関係性は変化し得る。線量計の校正・試験を行う多くの校正場においては単色エネルギーではないために、校正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換算係数の評価が必要となる。

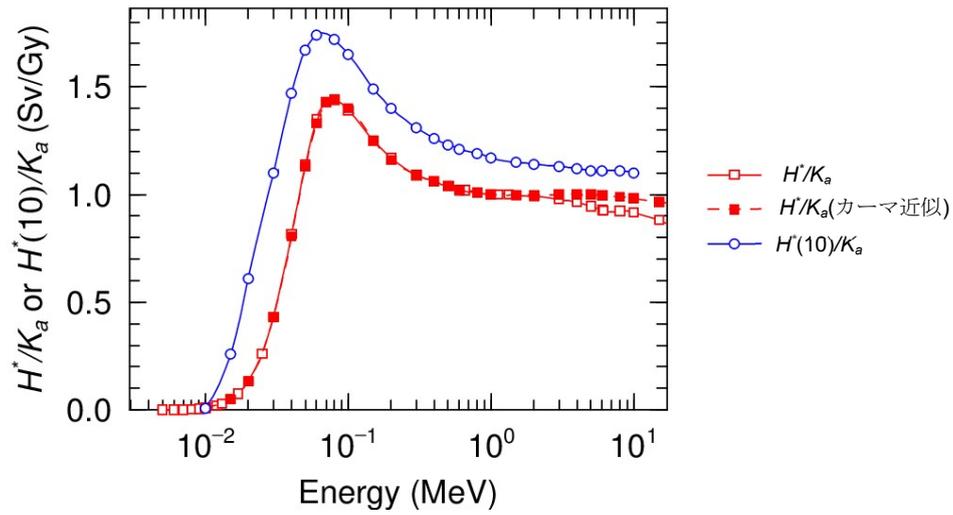


図 4-1 光子に対する実効線量の管理に用いる場所のモニタリング
に関する現・新実用量の比較

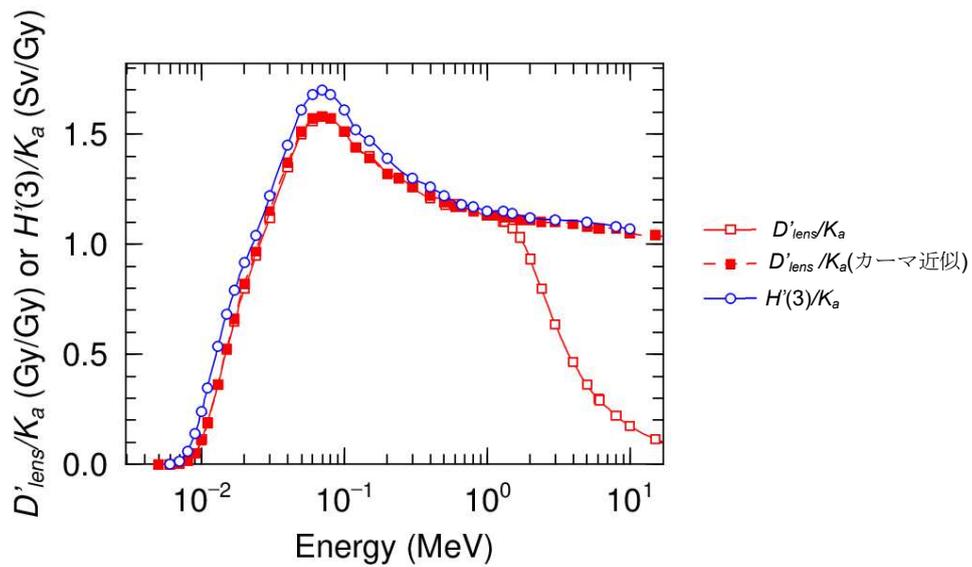


図 4-2 光子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる場所のモニタリング
に関する現・新実用量の比較 (0° のみ)

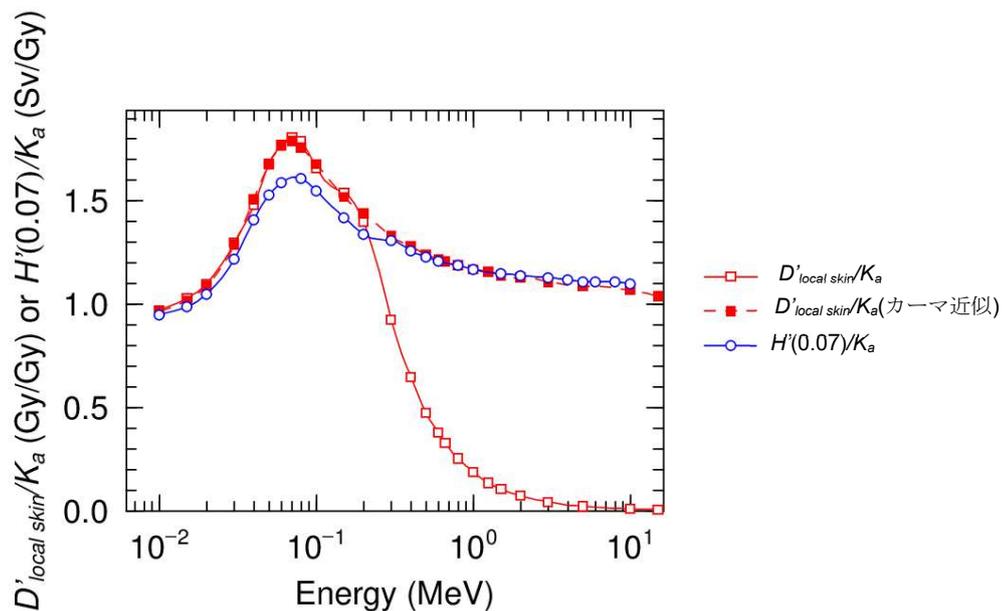


図 4-3 光子に対する皮膚の線量管理に用いる場所のモニタリングに関する現・新実用量の比較 (0° のみ)

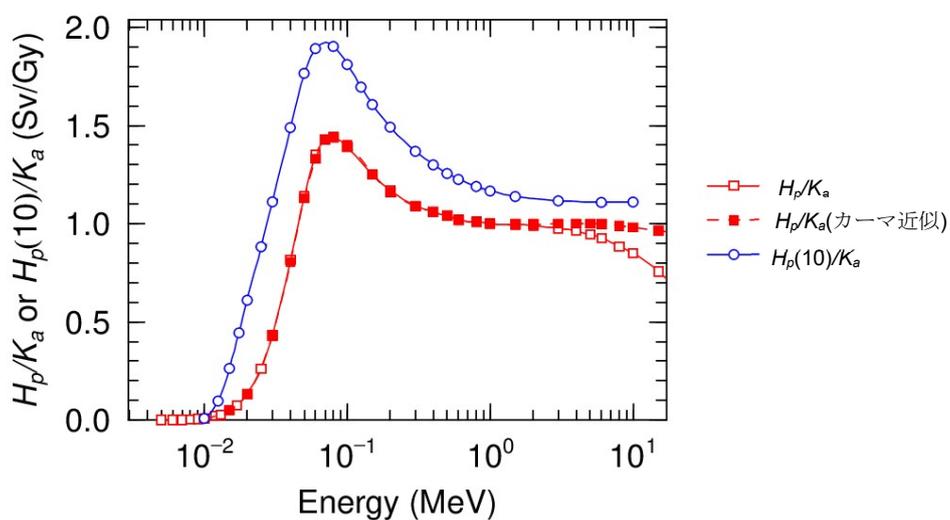


図 4-4 光子に対する実効線量の管理に用いる個人モニタリングに関する現・新実用量の比較 (0° のみ)

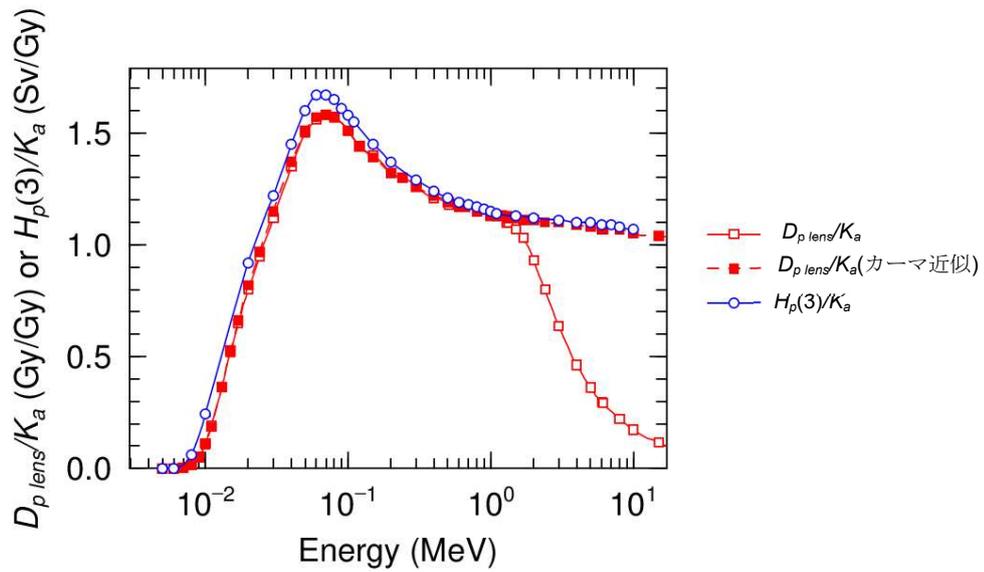


図 4-5 光子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる個人モニタリングに関する現・新実用量の比較 (0° のみ)

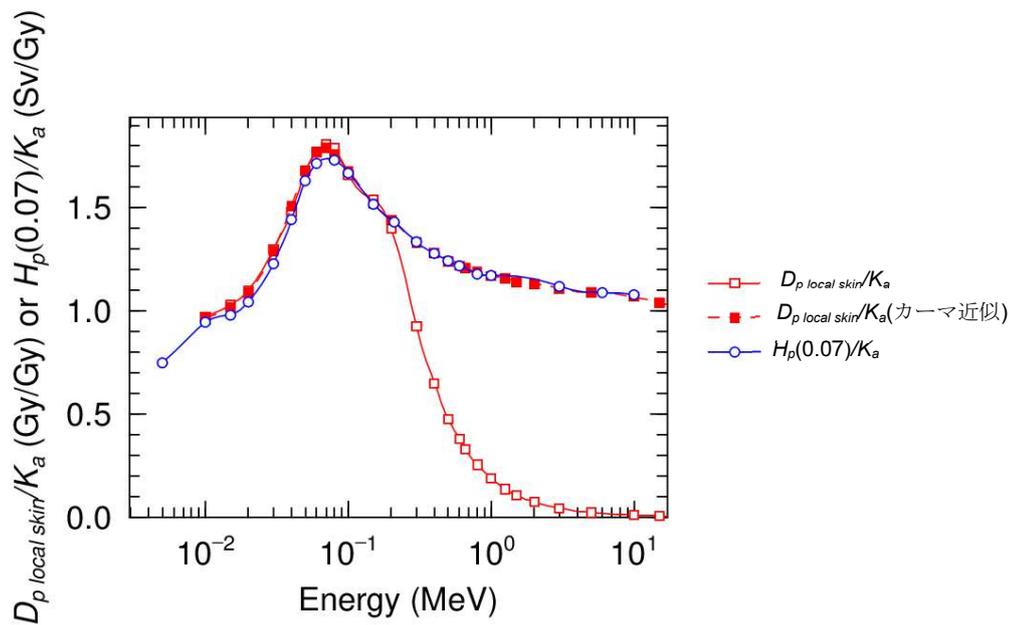


図 4-6 光子に対する皮膚の線量管理に用いる個人モニタリングに関する現・新実用量の比較 (0° のみ、スラブファントムに対するもの)

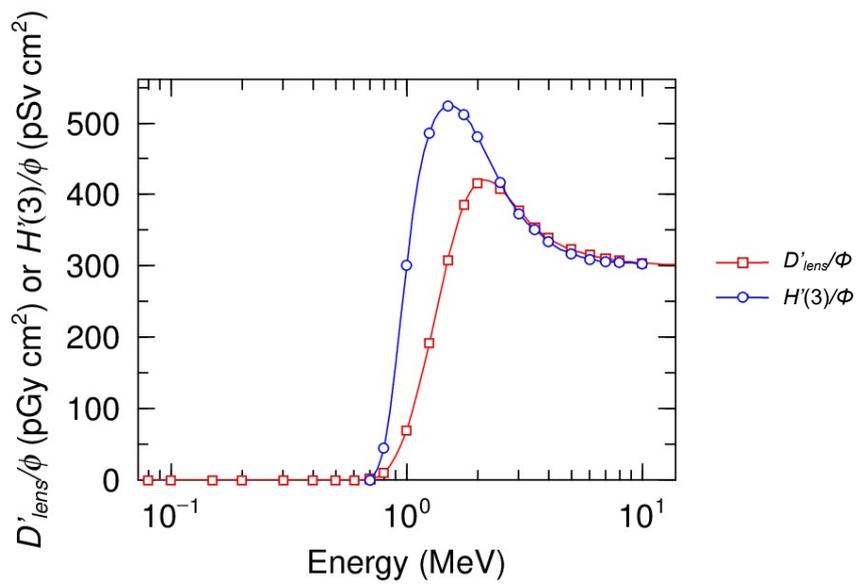


図 4-7 電子に対する眼の水晶体の線量管理に用いる場所のモニタリングに関する現・新実用量の比較 (0° のみ)

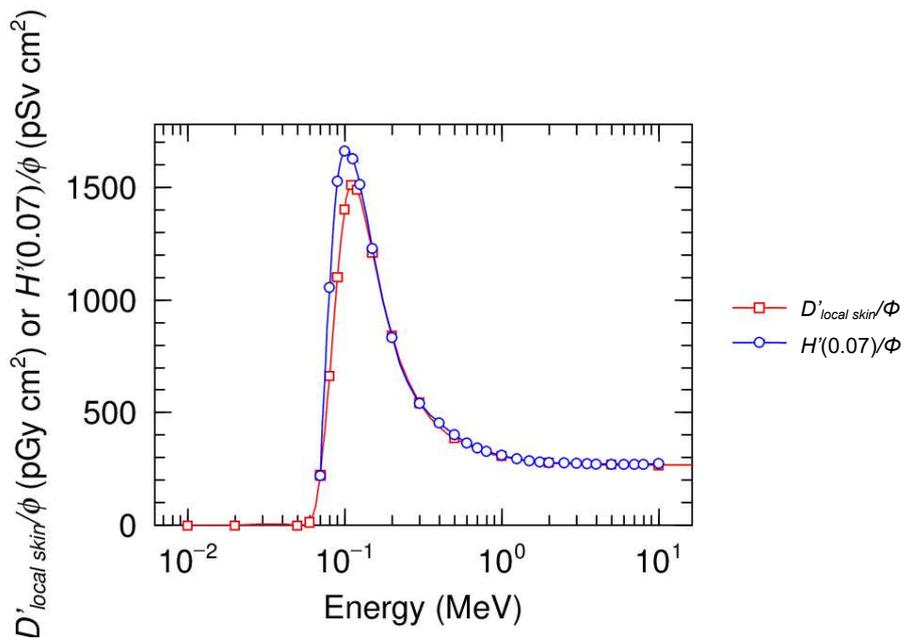


図 4-8 電子に対する皮膚の線量管理に用いる場所のモニタリングに関する現・新実用量の比較 (0° のみ)

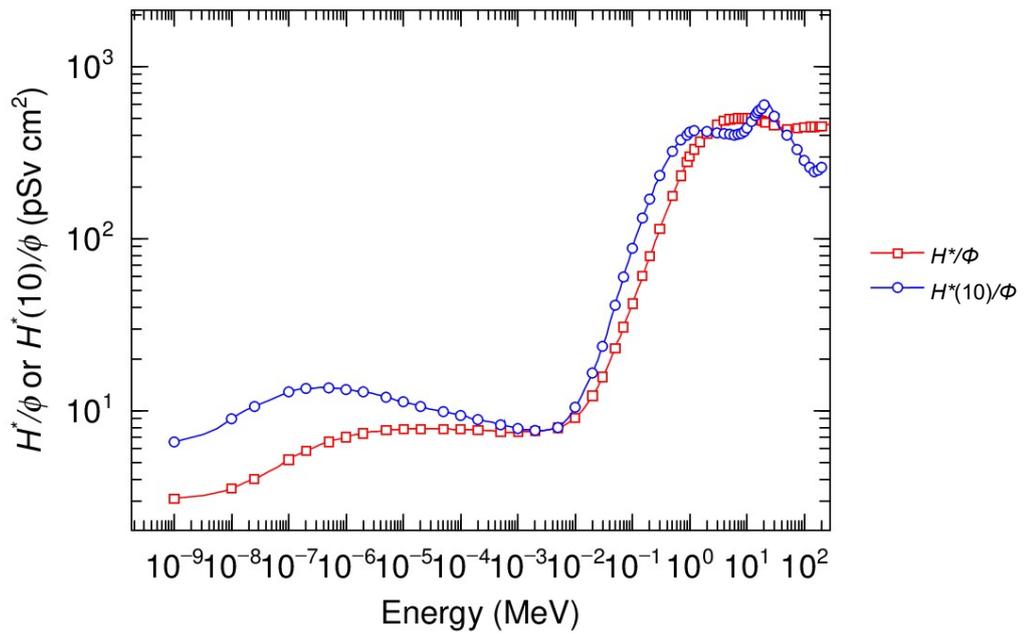


図 4-9 中性子に対する実効線量の管理に用いる場所のモニタリングに関する現・新実用量の比較

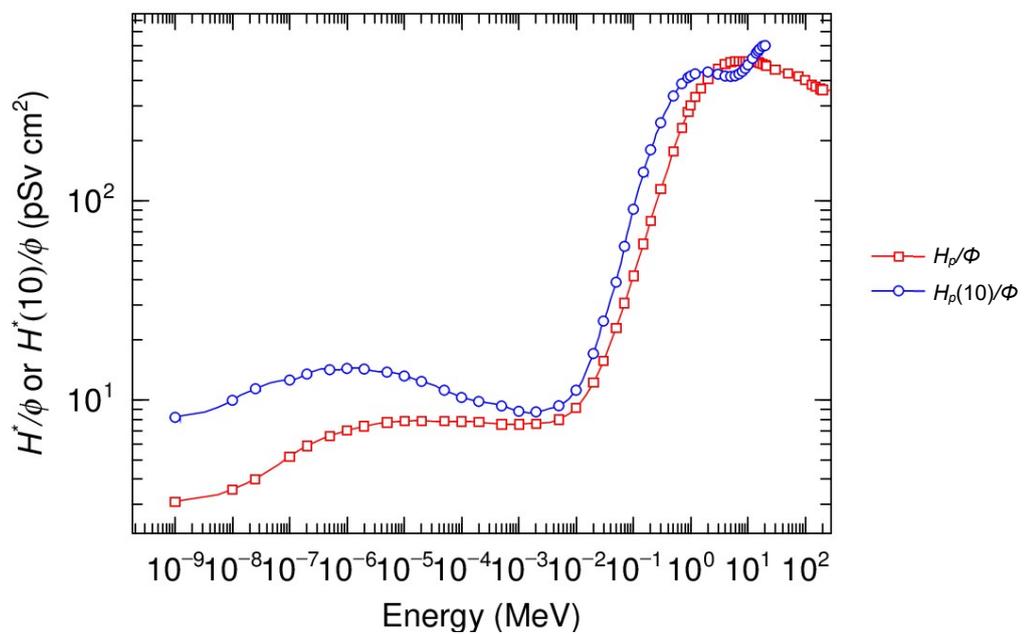


図 4-10 中性子に対する実効線量の管理に用いる個人モニタリングに関する現・新実用量の比較

4.2 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査

放射線管理に用いる線量計は、適切に校正されることが測定の信頼性を確保するために必要である。そこで、FRS の代表的な校正場に対して、新たな実用量に対する換算係数を評価し、それを用いて放射線管理の現場で用いられている市販の線量計に対して、現行及び新たな実用量に対する校正を実施し、校正結果を比較する。

4.2.1 新たな実用量に対する校正場の整備

4.2.1.1 γ 線

^{137}Cs 線源を用いた γ 線校正場（以下、ISO 4037^[8]や JIS Z 4511^[9]の記載方法に合わせて「S-Cs」と線質表記する。）は、線量計の性能を定める規格である JIS 規格（JIS Z 4333^[10], JIS Z 4312^[11], JIS Z 4345^[12], 及び JIS Z 4324^[13]）においても、校正や試験を行う上での基準 γ 線として定められている。実際、先行調査事業^[6]でも示されているとおり原子力施設等で放射線管理に使用される光子用線量計は、通常 S-Cs を用いて校正される。そこで、線量計の校正調査をする上で必要となる S-Cs について、新たな実用量に対する校正場を FRS で整備することとした。加えて、一部の JIS 規格において基準 γ 線として定められ、また 4.3.4 の調査で必要となる ^{60}Co 線源を用いた γ 線校正場（以下「S-Co」と線質表記する。）についても追加で実施した。

(1) 方法

ISO 4037-1^[14]に示される S-Cs 及び S-Co 線質について、新たな実用量への換算係数を評価すると同時に現行実用量への換算係数を同様の方法を用いて評価することで妥当性を検証することとした。光子については、標準量が空気カーマ K_a であるため、空気カーマに対する換算係数として計算した。評価に用いた単色光子に対する換算係数は表 4-2 のとおりである。校正場においては、4.2.2（図 4-30 参照）で示すように必要に応じてビルドアップ板を用いて電子平衡が成立した状態で校正を行うため、カーマ近似を用いた換算係数を利用した。また、 D'_{lens} 及び $D_{\text{p lens}}$ については、水晶体全体にわたって平均化された換算係数を利用した。対応する現行実用量は、表中に示されているとおり、 $H_p(3)$ についてはシリンダーファントム、 $H_p(0.07)$ についてはスラブファントムの換算係数とし、それ以外のファントムに対する換算係数は本事業では対象としなかった。

表 4-2 評価に用いた単色光子に対する線量換算係数

現行実用量		新たな実用量	
$H^*(10)/K_a$	ICRP 74 ^[7] Table A.21	H^*/K_a	ICRU 95 ^[5] Table A.5.1b
$H'(3,0^\circ)/K_a$	ISO 4037-3 ^[8] Table 7	$D'_{\text{lens}}(0^\circ)/K_a$	ICRU 95 ^[5] Table A.5.3b
$H'(0.07,0^\circ)/K_a$	ICRP 74 ^[7] Table A.21	$D'_{\text{local skin}}(0^\circ)/K_a$	ICRU 95 ^[5] Table A.5.4.1b
$H_p(10,0^\circ)/K_a$	ICRP 74 ^[7] Table A.24	$H_p(0^\circ)/K_a$	ICRU 95 ^[5] Table A.5.2b
$H_p(3,0^\circ)_{\text{cyl}}/K_a$	ISO 4037-3 ^[8] Table 39	$D_{\text{plens}}(0^\circ)/K_a$	ICRU 95 ^[5] Table A.5.3b
$H_p(0.07,0^\circ)_{\text{slab}}/K_a$	ICRP 74 ^[7] Table A.25 ISO 4037-3 ^[8] Table 33 [※]	$D_{\text{p local skin}}(0^\circ)_{\text{slab}}/K_a$	ICRU 95 ^[5] Table A.5.4.1b

※ $H_p(0.07,0^\circ)_{\text{slab}}/K_a$ については、ICRP 74^[7]では1 MeV までしか換算係数が示されていないため、1 MeV 以上については、ISO 4037-3^[8]の換算係数を用いた。

(a) S-Cs

FRS においては、コリメート付き線源または 4π 線源 (表 2-1 参照) を用いて ISO 4037-1^[14] もしくは JIS Z 4511^[9] に準拠した S-Cs 校正場を構築している。新たな実用量及び現行実用量に対する換算係数は以下の方法で評価し、比較した。

(i) 662 keV の単色光子として評価

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

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

FRS の第1照射室 (大きさ : 6.5 m × 6.4 m × 3.4 m^h) に設置された γ 線照射装置により構築される S-Cs 場 (線源から 2.000 m) に対して、CdZnTe 検出器 (Kromek 製 GR-1) を用いてパルス波高スペクトルを測定し、アンフォールディング処理 (4.3.2 参照) を行って光子スペクトル分布 $d\Phi/dE$ を導出した (図 4-1 1)。導出した光子スペクトルから以下の式により換算係数を算出した。

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

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

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

FRS の第 1 照射室、第 3 照射室 (大きさ : $6.4 \text{ m} \times 12.5 \text{ m} \times 6.5 \text{ m}^h$) 及び第 4 照射室 (大きさ : $12.5 \text{ m} \times 12.5 \text{ m} \times 11.7 \text{ m}^h$ 、床はグレーチング構造) において 4π 線源を用いて構築される S-Cs 場に対して、線源から 1.000 m、2.000 m 及び 3.000 m (第 1 照射室を除く) において $2'' \phi \times 2'' \text{NaI(Tl)}$ 検出器 (BNC 社製 SAM940 Model 940-2-G) を用いてパルス波高スペクトルを測定し、アンフォールディング処理 (4.3.2 参照) を行って光子スペクトル分布 $d\Phi/dE$ を導出した (図 4-12)。換算係数の計算は(ii)と同様である。

(iv) 文献値 (比較)

国際的に合意された新たな実用量に対する換算係数はないものの、国外で試算された報告^[15]があり、比較として示した。

(b) S-Co

原子力施設における光子エネルギー分布調査において、そのいくつかにおいて ^{60}Co によるピークが見られた (図 4-42~図 4-44 及び図 4-47)。そこで、 ^{60}Co から放出される光子による線量計のエネルギー特性調査 (4.3.4 参照) に資するために、FRS で整備する S-Co 線質について、現行実用量及び新たな実用量への換算係数を評価した。評価した条件は、S-Cs と同様である。ただし、コリメータ付き校正場は校正距離 1.000 m、 4π 線源による校正場は、第 3 照射室における校正距離 2.000 m のみ評価した。得られた光子スペクトル分布 $d\Phi/dE$ を図 4-13 及び図 4-14 に示す。また(i)においては、 ^{60}Co の γ 線エネルギーは ICRP Publ.107^[16] より 1.17323 MeV (放出率 0.9985) 及び 1.33249 MeV (放出率 0.999826) とした。

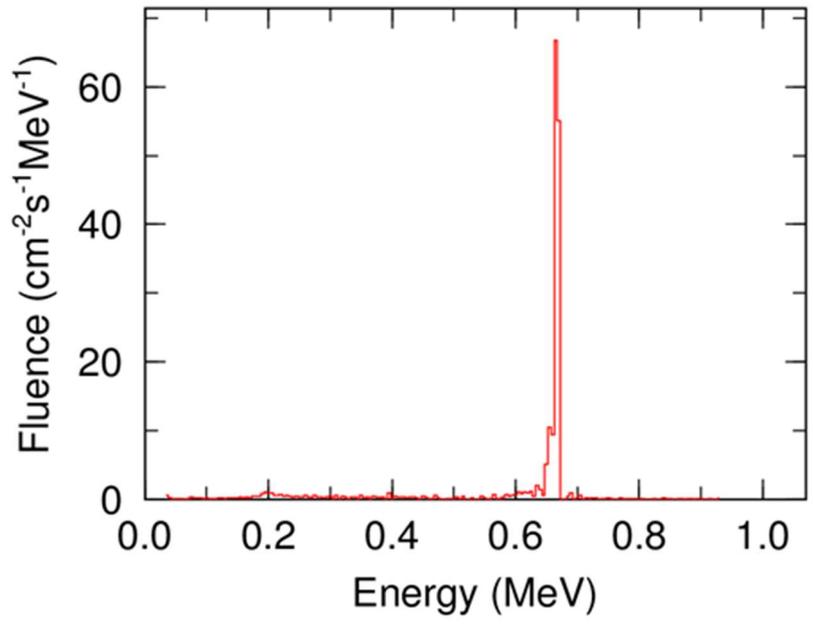


図 4-11 S-Cs 校正場の光子スペクトル分布
(FRS コリメート付き校正場、全フルエンスで規格化)

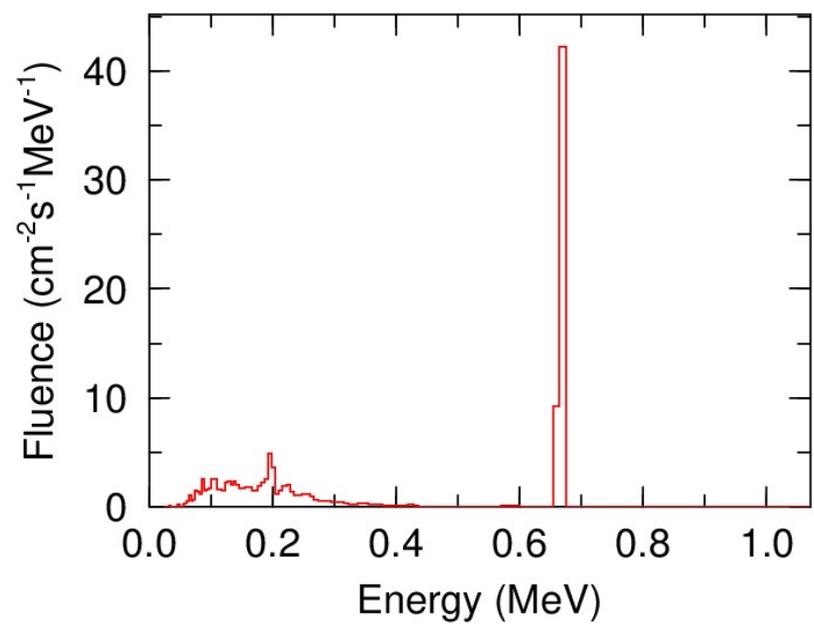


図 4-12 S-Cs 校正場の光子スペクトル分布
(FRS 4π 線源による校正場：第 1 照射室、校正距離 2.000 m、全フルエンスで規格化)

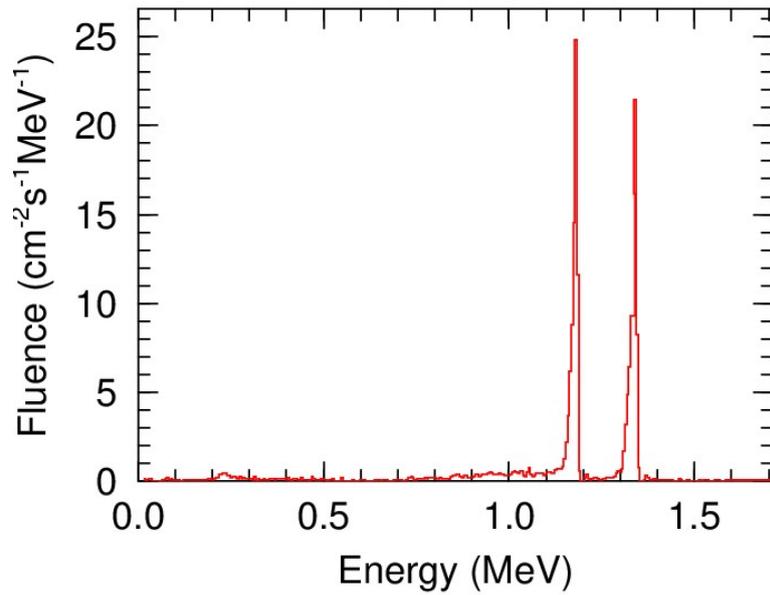


図 4-13 S-Co 校正場の光子スペクトル分布
(コリメート付き校正場、全フルエンスで規格化)

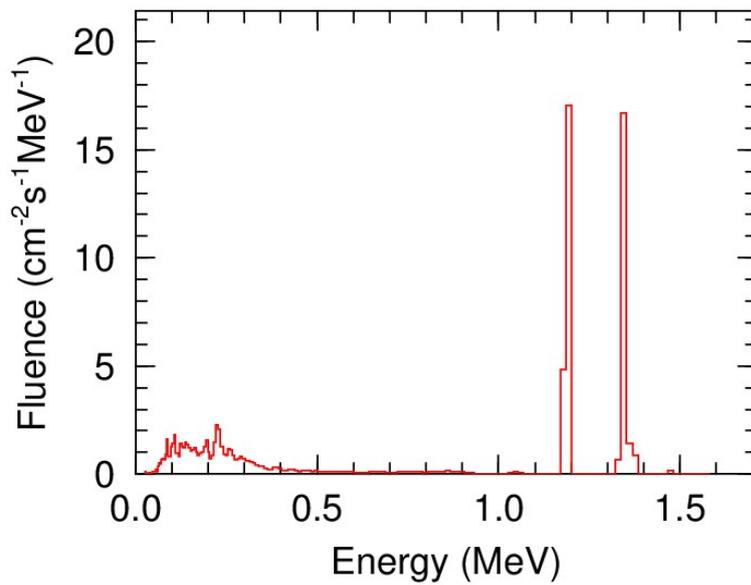


図 4-14 S-Co 校正場の光子スペクトル分布
(FRS 4 π 線源による校正場：第3照射室、校正距離 2.000 m、全フルエンスで規格化)

(2) 結果と考察

得られた S-Cs 校正場の換算係数を表 4-3 及び表 4-4 に、S-Co 校正場の換算係数を表 4-5 及び表 4-6 に示す。実際の校正場においては散乱線の影響により平均エネルギーは小さくなり、特にコリメートされていない 4π 線源を利用した場において校正距離が大きくなるほどその影響は大きくなる。また、照射室のコンクリート壁や床が主要な散乱体となるため、部屋の寸法が大きいほどその影響は小さくなると考えられる。第 4 照射室は、部屋の寸法も大きく、グレーチング床により散乱線が抑制されているため、S-Cs 校正場の結果からは、校正距離 3 m においても H^* 平均エネルギーは 0.63 MeV で、校正距離 2 m でのコリメータ付き校正場 (0.64 MeV) と近くその単色性は高い。

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

- ・校正場の違いに伴う散乱線の影響によって新たな実用量への換算係数も変化するが、その差異は最大でも 2.5% であり、現行実用量での差異と同程度である。
- ・実効線量のための実用量である H^* 及び H_p については現行実用量と比較して、0.83～0.85 倍小さくなる。先行調査事業⁶⁾でも指摘されているとおり、新たな実用量の S-Cs で校正した場合は、その指示値は 0.83～0.85 小さくなると考えられる。
- ・S-Cs と S-Co の領域では H^* と H_p の差異はない。
- ・個人線量及び方向性線量は 0 度での評価のため、その定義からも明らかなおりに $D'_{\text{lens}}(0^\circ)/K_a$ と $D_{\text{plens}}(0^\circ)/K_a$ 、 $D'_{\text{local skin}}(0^\circ)/K_a$ と $D_{\text{p local skin}}(0^\circ)_{\text{slab}}/K_a$ は等しい。
- ・文献値との差異は最大 3% 程度であり、現行実用量の文献値との差と同程度である。

(3) 結論

今回調査した校正場における新たな実用量に対する換算係数は、文献値や単色エネルギーとして得られるものと比較して、3% 程度の差異に収まる。現行の実用量について JIS Z 4511⁹⁾によると、換算係数の標準不確かさは、特に断りのない限り 2% とすることとなっているため、これらの差異は拡張不確かさ 4% ($k=2$) の範囲内である。そのため、以後の解析にあたっては、文献報告値(iv)の換算係数を使用し、その標準不確かさとして 2% を与えることとする。今後は、換算係数の入射角度依存性や他の線質についても評価することが望まれる。

表 4-3 評価した S-Cs 校正場の換算係数 (1/2)

評価条件	平均エネルギー		場所のモニタリングにかかる実用量						
	\overline{E}_Φ	\overline{E}_{H^*}	$H^*(10)/K_a$	H^*/K_a	$H^*(3,0^\circ)/K_a$	$D'_{\text{lens}}(0^\circ)/K_a$	$H^*(0.07,0^\circ)/K_a$	$D'_{\text{local skin}}(0^\circ)/K_a$	
	(MeV)	(MeV)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	
(i) 662 keV 単色光子	0.66	0.66	1.20	1.02	1.18	1.17	1.20	1.21	
(ii) FRS コリメータ付き校正場	0.60	0.64	1.21	1.02	1.19	1.18	1.21	1.22	
FRS 4 π 線源 (校正距離 1.000 m)	第4照射室	0.59	0.64	1.21	1.02	1.19	1.18	1.21	1.22
	第3照射室	0.56	0.63	1.23	1.03	1.19	1.18	1.21	1.23
	第1照射室	0.55	0.63	1.22	1.03	1.20	1.18	1.21	1.23
(iii) FRS 4 π 線源 (校正距離 2.000 m)	第4照射室	0.55	0.63	1.22	1.03	1.20	1.18	1.21	1.23
	第3照射室	0.48	0.60	1.23	1.04	1.21	1.19	1.22	1.24
	第1照射室	0.47	0.60	1.23	1.04	1.21	1.19	1.23	1.24
FRS 4 π 線源 (校正距離 3.000 m)	第4照射室	0.51	0.63	1.23	1.03	1.20	1.19	1.22	1.24
	第3照射室	0.44	0.60	1.24	1.04	1.22	1.20	1.23	1.25
(iv) 文献値	0.639 ^[15]	—	1.21 ^[8]	1.0158 ^[15]	1.19 ^[8]	1.1712 ^[15]	1.20 ^[8]	1.2136 ^[15]	

表 4-4 評価した S-Cs 校正場の換算係数 (2/2)

評価条件	個人モニタリングにかかる実用量						
	$H_p(10,0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(3,0^\circ)_{cyl}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{p\ lens}(0^\circ)/K_a$ (Gy/Gy)	$H_p(0.07,0^\circ)_{slab}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{p\ local\ skin}(0^\circ)_{slab}/K_a$ (Gy/Gy)	
(i) 662 keV 単色光子	1.21	1.02	1.18	1.17	1.20	1.21	
(ii) FRS コリメータ付き校正場	1.22	1.02	1.19	1.18	1.22	1.22	
FRS 4 π 線源 (校正距離 1.000 m)	第4照射室	1.23	1.02	1.19	1.18	1.21	1.22
	第3照射室	1.23	1.03	1.20	1.18	1.21	1.23
	第1照射室	1.23	1.03	1.20	1.18	1.22	1.23
(iii) FRS 4 π 線源 (校正距離 2.000 m)	第4照射室	1.24	1.03	1.20	1.18	1.22	1.23
	第3照射室	1.25	1.04	1.21	1.19	1.24	1.24
	第1照射室	1.26	1.04	1.21	1.19	1.24	1.24
FRS 4 π 線源 (校正距離 3.000 m)	第4照射室	1.24	1.03	1.20	1.19	1.23	1.24
	第3照射室	1.26	1.04	1.22	1.20	1.25	1.25
(iv) 文献値	1.21 ^[8]	1.0158 ^[15]	1.18 ^[8]	1.1712 ^[15]	1.21 ^[8]	1.2136 ^[15]	

表 4-5 評価した S-Co 校正場の換算係数 (1/2)

評価条件	平均エネルギー		場所のモニタリングにかかる実用量					
	\overline{E}_Φ	\overline{E}_{H^*}	$H^*(10)/K_a$	H^*/K_a	$H^*(3,0^\circ)/K_a$	$D'_{\text{lens}}(0^\circ)/K_a$	$H^*(0.07,0^\circ)/K_a$	$D'_{\text{local skin}}(0^\circ)/K_a$
	(MeV)	(MeV)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)
(i) 1.17323 MeV+1.33249 MeV 光子	1.25	1.25	1.16	0.998	1.15	1.12	1.16	1.16
(ii) FRS コリメータ付き校正場	1.16	1.22	1.16	1.00	1.15	1.13	1.16	1.16
(iii) FRS 4 π 線源	0.91	1.16	1.17	1.01	1.17	1.14	1.17	1.18
(iv) 文献値	1.197 ^[15]	—	1.16 ^[8]	0.9971 ^[15]	1.15 ^[8]	1.1276 ^[15]	1.16 ^[8]	1.1606 ^[15]

表 4-6 評価した S-Co 校正場の換算係数 (2/2)

評価条件	個人モニタリングにかかる実用量					
	$H_p(10,0^\circ)/K_a$	$H_p(0^\circ)/K_a$	$H_p(3,0^\circ)_{\text{cyl}}/K_a$	$D_p \text{ lens}(0^\circ)/K_a$	$H_p(0.07,0^\circ)_{\text{slab}}/K_a$	$D_p \text{ local skin}(0^\circ)_{\text{slab}}/K_a$
	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)
(i) 1.17323 MeV+1.33249 MeV 光子	1.15	0.998	1.13	1.12	1.16	1.16
(ii) FRS コリメータ付き校正場	1.16	1.00	1.14	1.13	1.17	1.16
(iii) FRS 4 π 線源	1.17	1.01	1.15	1.14	1.18	1.18
(iv) 文献値	1.15 ^[8]	0.9971 ^[15]	1.14 ^[8]	1.1276 ^[15]	1.17 ^[8]	1.1606 ^[15]

4.2.1.2 X線

低エネルギー領域の光子による校正・試験は X 線校正場を用いて行われる。X 線発生装置で発生する光子は X 線管電圧に対応するエネルギーを最大値とする連続スペクトルを有しているが、ISO 4037-1^[14]や JIS Z 4511^[9]では、フィルターを付加することによりいくつかの線質を規定している。そのうち、狭スペクトルシリーズ (N シリーズ) は、校正やエネルギー特性試験に適した線質として定められている。線量計の性能を定める規格である JIS 規格 (JIS Z 4333^[10]や JIS Z 4312^[11]) においても、N-80 や N-100 が校正や試験を行う上での基準 X 線として規定されているほか、先行調査事業^[6]でも、いくつかの線量計は N-100 もしくは 65 keV の X 線 (N-80 に相当) で校正されていることが示されている。

そこで、N-80 及び N-100 の 2 つの線質について、現行実用量及び新たな実用量への換算係数を評価した。加えて、原子力施設における光子スペクトル分布から代表エネルギーと認められる N-250 や 4.3.4 での解析に必要な N-40 から N-300 の線質についても評価を行った。

(1) 方法

X 線についても、標準量が空気カーマ K_a であるため、空気カーマに対する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換算係数は表 4-2 のとおりである。FRS の校正場においては、半価層測定から ISO 4037-1^[14]に示される場と同等であることが示されているため (matched field)、以下の方法により換算係数を評価した。

(i) ISO 4037-1^[14]の標準スペクトル^[17]で加重して換算係数を評価

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

(ii) 実効エネルギーに対して換算係数を評価

JIS Z 4511^[9]では、40 kV 以上の線質においては、実効エネルギーに該当する線量当量換算係数を利用してもよいことになっているため、新たな実用量に関してもこの方法によって換算係数を試算した。実効エネルギーは文献[18]によった。換算係数は、表 4-2 で示される文献中の値を Log-Linear スケールで 4 点の Lagrange 補間により、換算係数を評価した。

(iii) 文献値

国際的に合意された新たな実用量に対する換算係数は示されていないものの、試算した報告^[15]があり、比較として示した。

(2) 結果と考察

評価した換算係数を表 4-7～表 4-10 に示す。これらの結果から、X 線校正場にかかる新たな実用量に対する換算係数について、以下のことが示唆された。

- D'_{lens} 、 D_{plens} 、 $D'_{\text{local skin}}$ や $D_{\text{pllocal skin}}$ については、N-40 でも現行実用量との違いは 5% 程度に留まるのに対し、実効線量のための実用量である H^* 及び H_p については現行実用量と比較して、N-80 以下では急激に小さくなり N-40 では 0.44 倍ほどになる。
- γ 線校正場と同様、これらの領域で H^* と H_p の差異はなく、個人線量及び方向性線量は 0 度での評価のため、 $D'_{\text{lens}}(0^\circ)/K_a$ と $D_{\text{plens}}(0^\circ)/K_a$ 、 $D'_{\text{local skin}}(0^\circ)/K_a$ と $D_{\text{pllocal skin}}(0^\circ)_{\text{slab}}/K_a$ は等しい。
- 文献値との差異は N-40 の H^* 及び H_p に対して実効エネルギーから換算係数を評価した場合のみ、6% 小さくなるが、その他は 2% 以内の差である。一方、現行実用量では、いずれのケースにおいても文献値との差は 2% 以内である。図 4-1 及び図 4-4 にも示されるように、40 keV 以下では H^* 及び H_p に対する換算係数が大きく落ち込む領域であり、スペクトル形状を考慮した換算係数の評価が必要である。

(3) 結論

評価した値は文献値と同等であり、妥当性が確認できたため、以後の解析にあたっては、文献値の報告値(iii)の換算係数を使用し、その標準不確かさとして 2% を与えることとする。今回の調査では、入射角が 0 度の場合のみ、半価層が ISO 線質と同じであるとみなせることから ISO の標準スペクトル^[17]に対する評価とした。今後は、換算係数の入射角依存性に加え、新たな実用量下においても半価層が同じであれば同等線質とみなして同じ換算係数を使用することが妥当かどうか、また換算係数の不確かさを詳細に評価する上でも、校正場のスペクトルを評価して検証することが望ましいと考えられる。

表 4-7 評価した X 線校正場の換算係数 (1/4)

線質	評価手法	平均エネルギー				実効エネルギー E_{eff} (keV)	場所のモニタリングにかかる実用量					
		$\overline{E_{\Phi}}$ (keV)	$\overline{E_{H^*}}$ (keV)	$\overline{E_{D_{\text{lens}}}}$ (keV)	$\overline{E_{D_{\text{local skin}}}}$ (keV)		$H^*(10)/K_a$ (Sv/Gy)	H^*/K_a (Sv/Gy)	$H'(3)/K_a$ (Sv/Gy)	D'_{lens}/K_a (Gy/Gy)	$H'(0.07)/K_a$ (Sv/Gy)	$D'_{\text{local skin}}/K_a$ (Gy/Gy)
N-40	(i)	33.3	33.5	32.7	32.7	31.7	1.19	0.522	1.28	1.20	1.27	1.34
	(ii)						1.18	0.492	1.26	1.19	1.26	1.33
	(iii)	33.27 ^[4]	—	—	—	1.19 ^[8]	0.5222 ^[15]	1.27 ^[8]	1.2040 ^[15]	1.27 ^[8]	1.3445 ^[15]	
N-60	(i)	47.9	48.1	47.2	47.2	46.2	1.59	1.01	1.55	1.46	1.48	1.62
	(ii)						1.61	1.02	1.56	1.47	1.49	1.62
	(iii)	47.9	—	—	—	1.59 ^[8]	1.0139 ^[15]	1.54 ^[8]	1.4564 ^[15]	1.48 ^[8]	1.6175 ^[15]	
N-80	(i)	65.2	65.6	65.2	65.2	63.9	1.73	1.36	1.68	1.57	1.58	1.77
	(ii)						1.75	1.38	1.69	1.58	1.57	1.79
	(iii)	65.2 ^[4]	—	—	—	1.74 ^[8]	1.3639 ^[15]	1.68 ^[8]	1.5685 ^[15]	1.60 ^[8]	1.7693 ^[15]	
N-100	(i)	83.3	83.8	83.7	83.7	82.5	1.70	1.43	1.67	1.56	1.58	1.74
	(ii)						1.71	1.44	1.67	1.56	1.58	1.75
	(iii)	83.3 ^[4]	—	—	—	1.71 ^[8]	1.4256 ^[15]	1.66 ^[8]	1.5560 ^[15]	1.59 ^[8]	1.7410 ^[15]	
N-120	(i)	100	101	101	101	100	1.64	1.39	1.60	1.50	1.54	1.67
	(ii)						1.65	1.40	1.61	1.51	1.55	1.68
	(iii)	100.4 ^[4]	—	—	—	1.65 ^[8]	1.3933 ^[15]	1.60 ^[8]	1.5032 ^[15]	1.55 ^[8]	1.6752 ^[15]	

表 4-8 評価した X 線校正場の換算係数 (2/4)

線質	評価手法	平均エネルギー				実効エネルギー E_{eff} (keV)	場所のモニタリングにかかる実用量					
		$\overline{E_{\Phi}}$ (keV)	$\overline{E_{H^*}}$ (keV)	$\overline{E_{D_{\text{lens}}}}$ (keV)	$\overline{E_{D_{\text{local skin}}}}$ (keV)		$H^*(10)/K_a$ (Sv/Gy)	H^*/K_a (Sv/Gy)	$H'(3)/K_a$ (Sv/Gy)	D'_{lens}/K_a (Gy/Gy)	$H'(0.07)/K_a$ (Sv/Gy)	$D'_{\text{local skin}}/K_a$ (Gy/Gy)
N-150	(i)						1.58	1.33	1.53	1.45	1.49	1.61
	(ii)	118	120	120	120	118	1.58	1.34	1.53	1.45	1.50	1.61
	(iii)	118.2	—	—	—		1.58 ^[8]	1.3369 ^[15]	1.54 ^[8]	1.4486 ^[15]	1.50 ^[8]	1.6088 ^[15]
N-200	(i)						1.46	1.22	1.44	1.36	1.40	1.49
	(ii)	165	167	167	167	166	1.46	1.21	1.44	1.36	1.40	1.49
	(iii)	164.8	—	—	—		1.46 ^[8]	1.2148 ^[15]	1.44 ^[8]	1.3645 ^[15]	1.39 ^[8]	1.4927 ^[15]
N-250	(i)						1.39	1.15	1.38	1.32	1.36	1.43
	(ii)	207	210	210	210	208	1.39	1.15	1.38	1.32	1.36	1.43
	(iii)	207.3 ^[4]	—	—	—		1.39 ^[8]	1.1514 ^[15]	1.38 ^[8]	1.3184 ^[15]	1.34 ^[8]	1.4280 ^[15]
N-300	(i)						1.35	1.12	1.34	1.29	1.33	1.37
	(ii)	248	252	252	252	253	1.34	1.11	1.33	1.29	1.33	1.37
	(iii)	248.4 ^[4]	—	—	—		1.35 ^[8]	1.1164 ^[15]	1.34 ^[8]	1.2907 ^[15]	1.33 ^[8]	1.3787 ^[15]

表 4-9 評価した X 線校正場の換算係数 (3/4)

線質	評価 手法	個人モニタリングにかかる実用量					
		$H_p(10,0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(3,0^\circ)_{cyl}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{plens}(0^\circ)/K_a$ (Gy/Gy)	$H_p(0,07,0^\circ)_{slab}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{p\ local\ skin}(0^\circ)_{slab}/K_a$ (Gy/Gy)
N-40	(i)	1.20	0.522	1.28	1.20	1.28	1.34
	(ii)	1.18	0.492	1.26	1.19	1.26	1.33
	(iii)	1.21 ^[8]	0.5222 ^[15]	1.28 ^[8]	1.2040 ^[15]	1.28 ^[8]	1.3445 ^[15]
N-60	(i)	1.66	1.01	1.54	1.46	1.56	1.62
	(ii)	1.68	1.02	1.55	1.47	1.57	1.62
	(iii)	1.66 ^[8]	1.0139 ^[15]	1.54 ^[8]	1.4564 ^[15]	1.56 ^[8]	1.6175 ^[15]
N-80	(i)	1.89	1.36	1.66	1.57	1.72	1.77
	(ii)	1.91	1.38	1.67	1.58	1.73	1.79
	(iii)	1.89 ^[8]	1.3639 ^[15]	1.66 ^[8]	1.5685 ^[15]	1.72 ^[8]	1.7693 ^[15]
N-100	(i)	1.88	1.43	1.63	1.56	1.72	1.74
	(ii)	1.89	1.44	1.64	1.56	1.73	1.75
	(iii)	1.88 ^[8]	1.4256 ^[15]	1.63 ^[8]	1.5560 ^[15]	1.72 ^[8]	1.7410 ^[15]
N-120	(i)	1.80	1.39	1.58	1.50	1.66	1.67
	(ii)	1.81	1.40	1.58	1.51	1.67	1.68
	(iii)	1.80 ^[8]	1.3933 ^[15]	1.58 ^[8]	1.5032 ^[15]	1.66 ^[8]	1.6752 ^[15]

表 4-10 評価した X 線校正場の換算係数 (4/4)

線質	評価 手法	個人モニタリングにかかる実用量					
		$H_p(10,0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(3,0^\circ)_{cyl}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{plens}(0^\circ)/K_a$ (Gy/Gy)	$H_p(0.07,0^\circ)_{slab}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{p\ local\ skin}(0^\circ)_{slab}/K_a$ (Gy/Gy)
N-150	(i)	1.72	1.33	1.52	1.45	1.60	1.61
	(ii)	1.73	1.34	1.53	1.45	1.61	1.61
	(iii)	1.72 ^[8]	1.3369 ^[15]	1.52 ^[8]	1.4486 ^[15]	1.60 ^[8]	1.6088 ^[15]
N-200	(i)	1.56	1.22	1.42	1.36	1.49	1.49
	(ii)	1.56	1.21	1.42	1.36	1.49	1.49
	(iii)	1.56 ^[8]	1.2148 ^[15]	1.42 ^[8]	1.3645 ^[15]	1.49 ^[8]	1.4927 ^[15]
N-250	(i)	1.48	1.15	1.36	1.32	1.43	1.43
	(ii)	1.48	1.15	1.36	1.32	1.43	1.43
	(iii)	1.48 ^[8]	1.1514 ^[15]	1.36 ^[8]	1.3184 ^[15]	1.42 ^[8]	1.4280 ^[15]
N-300	(i)	1.42	1.12	1.32	1.29	1.38	1.37
	(ii)	1.42	1.11	1.32	1.29	1.38	1.37
	(iii)	1.42 ^[8]	1.1164 ^[15]	1.32 ^[8]	1.2907 ^[15]	1.38 ^[8]	1.3787 ^[15]

4.2.1.3 β 線

FRSの β 線校正場のうち、ISO 6980-1^[19] (JIS Z 4514^[20]) で定める表 4-1 1 に示す2つの Series1¹校正場について、新たな実用量での換算係数を評価した。 $D_{p\text{local skin}}$ はスラブファントムのみでの評価とした。

表 4-1 1 換算係数を評価した β 線校正場

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

(1) 方法

β 線については、標準供給される基準量が $70\ \mu\text{m}$ 深さの組織吸収線量 $D_t(007)$ であるため、 $D_t(007)$ からの換算係数として評価した。換算係数は、以下の複数の方法により計算し、比較することで妥当性を評価した。

(i) 直接計算による評価

ビーム軸に垂直に ICRU 組織でできた $30\text{ cm}\times 30\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ のファントムを置き、 $3.0\text{ cm}\ \phi$ ($D_t(007)$ 基準線量率測定の際に利用する外挿電離箱の窓面積に合わせた) 深さ $70\ \mu\text{m}$ の領域の吸収線量 $D_t(007)$ (Gy)を計算した。ファントムがない場合の 30 cm 位置、 $3.0\text{ cm}\ \phi$ での電子フルエンス Φ (cm^{-2})を別途計算し、 $D_t(007)/\Phi$ を求めた。計算は PHITS 3.100 (EGS モード)^[21]を使用し、光子及び電子は 1 keV まで追跡した。計算の妥当性は Depth dose curve を計算し実測された結果とよく一致することで確認した。

次に同様の方法で、ファントムを ICRU Report 95^[5]において $d_{\text{local skin}}$ の計算に用いられたファントム (表面が 2 mm の皮膚層で覆われた $30\text{ cm}\times 30\text{ cm}\times 14.8\text{ cm}$ の ICRU 組織スラブファントム) に変えて (図 4-1 5 参照)、中心軸上の $1.128\text{ cm}\ \phi$ (断面積 1 cm^2)、深さ $50\ \mu\text{m}$ から $100\ \mu\text{m}$ の領域での平均吸収線量を計算することで $D_{\text{local skin}}(0^\circ)/\Phi^2$ を評価した。線源から直接放出される光子については、その影響が小さいため無視した。

D_{lens} については、ICRU Report 95^[5]において d_{lens} の計算に用いられた眼モデルを校正点 (線源表面から眼の表面までの距離: 30 cm) に設置し (図 4-1 6 参照)、レンズ全体の平均吸収線量を計算することで $D_{\text{lens}}(0^\circ)/\Phi^3$ を評価した。

¹ JIS Z 4514^[20]ではシリーズ A

² $D'_{\text{local skin}}(0^\circ) = D_{\text{p local skin}}(0^\circ)$ であるため、合わせて $D_{\text{local skin}}(0^\circ)$ と記載

³ $D'_{\text{lens}}(0^\circ) = D_{\text{p lens}}(0^\circ)$ であるため、合わせて $D_{\text{lens}}(0^\circ)$ と記載

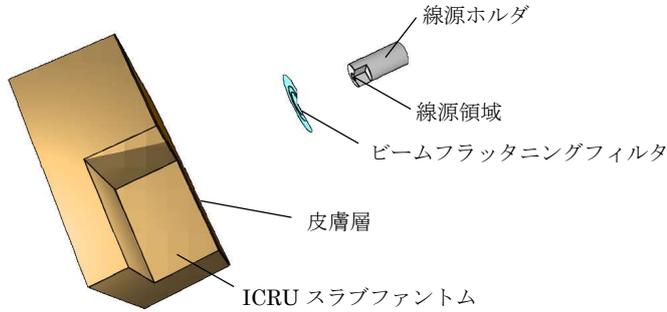


図 4-15 $d_{\text{local skin}}$ の評価に用いた計算体系

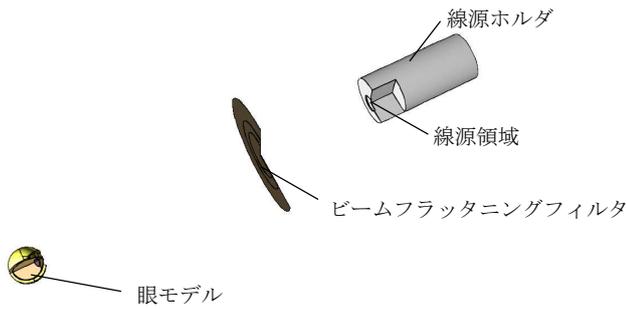


図 4-16 d_{lens} の評価に用いた計算体系

(ii)フルエンススペクトルから計算

(a) 計算により求めた校正点における電子ラジアンから角度を考慮して評価ファントムがない場合の 30 cm 位置、3.0 cm ϕ での電子ラジアン分布

$p = \frac{d^2\Phi}{dE d\Omega}$ ($\text{cm}^{-2} \text{MeV}^{-1} \text{sr}^{-1}$) を計算 (図 4-17 参照) し、以下により換算係数を導出した。

$$\frac{D_{\text{local skin}}(0^\circ)}{\Phi} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\Delta^2 \Phi_{i,j}}{\Delta E \Delta \alpha} \cdot D_{\text{local skin}}(E_i, \alpha_j) / \Phi \cdot \Delta E \Delta \alpha}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\Delta^2 \Phi_{i,j}}{\Delta E \Delta \alpha} \cdot \Delta E \Delta \alpha} \quad (2)$$

$$\frac{D_{\text{lens}}(0^\circ)}{\Phi} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\Delta^2 \Phi_{i,j}}{\Delta E \Delta \alpha} \cdot D_{\text{lens}}(E_i, \alpha_j) / \Phi \cdot \Delta E \Delta \alpha}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\Delta^2 \Phi_{i,j}}{\Delta E \Delta \alpha} \cdot \Delta E \Delta \alpha} \quad (3)$$

ここで、 $D_{\text{local skin}}(E_i, \alpha_j)/\Phi$ 、 $D_{\text{lens}}(E_i, \alpha_j)/\Phi$ はそれぞれ ICRU Report 95^[5] Table A.4.3.1 及び Table A.3.3 に示されるエネルギー E_i 、入射角 α_j の単色電子に対するフルエンスから新たな実用量への換算係数（必要に応じて補間した）。

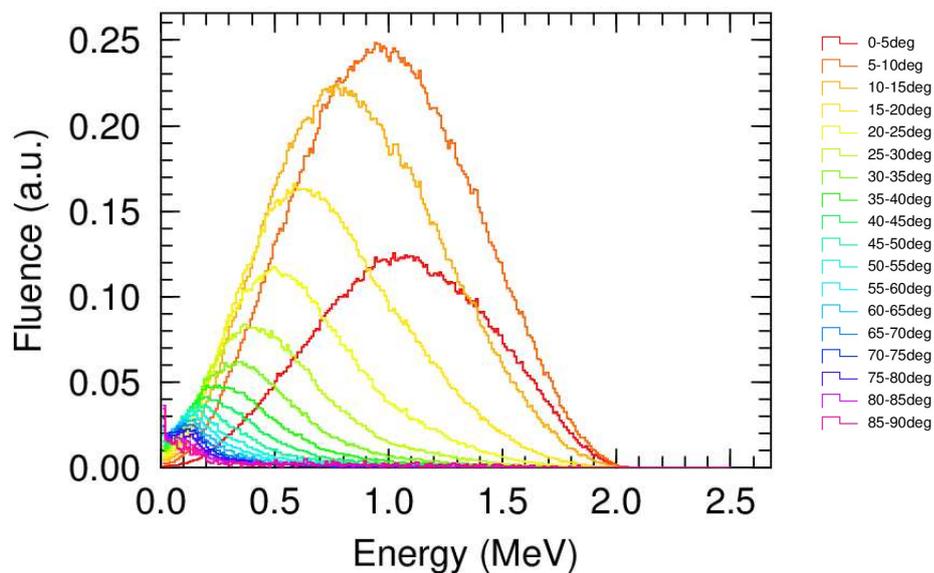


図 4-17 計算による $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 校正場における入射角度に応じた β 線スペクトル
(全フルエンスに対して規格化)

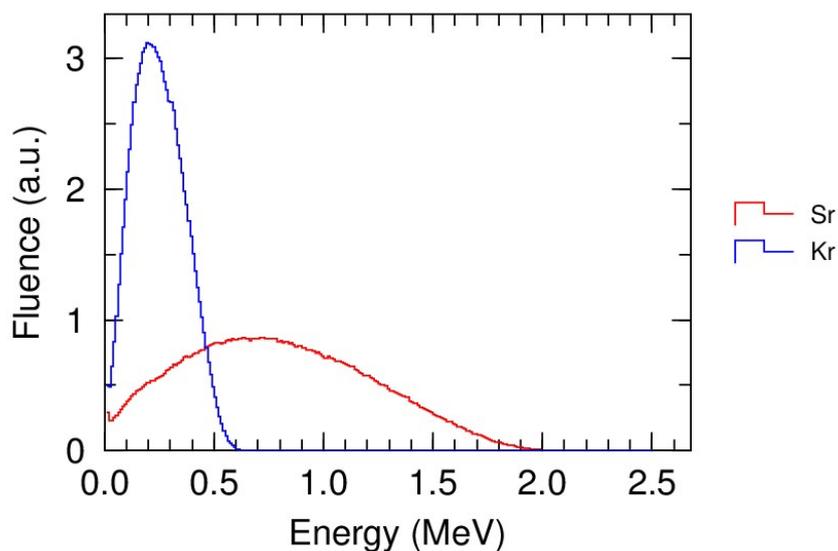


図 4-18 計算による $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 校正場及び ^{85}Kr 校正場の β 線スペクトル
(全フルエンスに対して規格化)

(b) 計算により求めた校正点における電子フルエンスから 0° 入射と仮定して評価

(a)で求めた電子フルエンス分布 $\frac{d\Phi}{dE}$ (図 4-18 参照) から 0° に対する換算係数を作用させて角度分布を考慮しない場合の校正場の換算係数を導出した。

$$\frac{D_{\text{local skin}}(0^\circ)}{\Phi} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\Phi_i}{\Delta E} \cdot D_{\text{local skin}}(E_i, 0^\circ) / \Phi \cdot \Delta E}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\Phi_i}{\Delta E} \cdot \Delta E} \quad (4)$$

$$\frac{D_{\text{lens}}(0^\circ)}{\Phi} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\Phi_i}{\Delta E} \cdot D_{\text{lens}}(E_i, 0^\circ) / \Phi \cdot \Delta E}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\Phi_i}{\Delta E} \cdot \Delta E} \quad (5)$$

(c) 実測された Depth-dose curve から評価

$D_{\text{local skin}}(0^\circ)$ については、その定義から密度 $\rho = 1.09 \text{ g/cm}^3$ の皮膚層中の深さ $50 \mu\text{m}$ から $100 \mu\text{m}$ の領域の平均吸収線量と考えてよい。Depth dose curve は、組織深さ 7 mg/cm^2 で規格化した組織深さに対する組織吸収線量の関数であり、皮膚のスケーリング因子は $\eta_{\text{skin,t}} = 0.997$ (ISO 6980-2^[22]) であるから、 $0.997 \times 0.005 \times 1.09 = 5.43 \text{ mg/cm}^2$ から $0.997 \times 0.010 \times 1.09 = 10.87 \text{ mg/cm}^2$ まで Depth dose curve を積分して下式で評価した。

$$\frac{D_{\text{local skin}}(0^\circ)}{D_t(0.07)} = \int_{5.43 \text{ mg/cm}^2}^{10.87 \text{ mg/cm}^2} \tau(d_t) dd_t \quad (6)$$

(d) 文献値

国際的に合意された新たな実用量に対する換算係数は示されていないものの、国外で換算係数を試算した報告があり^[23]、比較として示した。

(2) 結果と考察

評価した換算係数を表 4-12 及び表 4-13 に示す。どの方法によっても文献値 (iv) と同等の結果が得られた。

$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場における直接計算の $D_{\text{lens}}(0^\circ)$ については、PHITS の EGS モードを使用した場合には少し差異が見られるが、計算コードの違いに起因するものと思われる。また、 $D_{\text{lens}}(0^\circ)/D_t(0.07)$ は 0.17 (Gy/Gy) となり、現行の実用量 $H'(3,0^\circ)/D_t(0.07)$ の 0.431 (Sv/Gy) に比べて大きく減少する。これは、図 4-7 でも示されるように、 $0.8 \sim 2.5 \text{ MeV}$ の換算係数が大きく減少したことに起因している。一方、 ^{85}Kr 場の $D_{\text{lens}}(0^\circ)$ については極めて小さい値であり、現行実用量と同様、 $D_{\text{lens}}(0^\circ)$ には寄与しない。

$D_{\text{local skin}}(0^\circ)/D_t(0.07)$ については、両線源ともほぼ 1 となり、値としては、現行実用量と比べてほとんど変化しない。

(3) 結論

文献値との差異もないため、以降本事業では不確かさも含め文献報告値を使用する。今後は、入射角度に依存した換算係数の評価に加え、標準量、トレーサビリティの検証、実測による確認等が望まれる。

表 4-12 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 場について評価した換算係数

評価手法	$D_t(0.07)/\Phi$	$D_{\text{local skin}}(0^\circ)/\Phi$	$D_{\text{lens}}(0^\circ)/\Phi$	$D_{\text{local skin}}(0^\circ)/D_t(0.07)$	$D_{\text{lens}}(0^\circ)/D_t(0.07)$
	(pGy cm ²)	(pGy cm ²)	(pGy cm ²)	(Gy/Gy)	(Gy/Gy)
(i) 直接計算	393(368)*	402	54(61)*	1.02	0.14(0.17)*
(ii) (a) フルエンススペクトルから評価(角度考慮)	396	387	68	0.98	0.17
(ii) (b) フルエンススペクトルから評価(0°として評価)	406	395	69	0.97	0.17
(iii) Depth dose curve より評価	—	—	—	1.00	—
(iv) 文献値	—	—	—	1.00	0.17

*(i)内は EGS モードを使用しなかった場合。

表 4-13 ^{85}Kr 場について評価した換算係数

評価手法	$D_t(0.07)/\Phi$	$D_{\text{local skin}}(0^\circ)/\Phi$	$D_{\text{lens}}(0^\circ)/\Phi$	$D_{\text{local skin}}(0^\circ)/D_t(0.07)$	$D_{\text{lens}}(0^\circ)/D_t(0.07)$
	(pGy cm ²)	(pGy cm ²)	(pGy cm ²)	(Gy/Gy)	(Gy/Gy)
(i) 直接計算	659	613	—	0.93	—
(ii) (a) フルエンススペクトルから評価(角度考慮)	658	631	0.00552	0.96	8.4×10^{-6}
(ii) (b) フルエンススペクトルから評価(0°として評価)	760	726	0.00587	0.96	7.7×10^{-6}
(iii) Depth dose curve より評価	—	—	—	0.98	—
(iv) 文献値	—	—	—	0.98	—

4.2.1.4 中性子

ISO 8529-1^[24]に示され、原子力施設の放射線管理において測定器の校正によく利用される ²⁴¹Am-Be、²⁵²Cf、熱中性子の3つの線質について、中性子フルエンスから現行実用量及び新たな実用量への換算係数を評価した。換算係数の導出に用いた各線質の中性子エネルギー分布は、ISO 8529-1^[24]に示された標準スペクトルの他、FRSに整備された各校正場について数値計算または測定により独自に評価された中性子スペクトルを適用した。

(1) 方法

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

$$h_{\phi} = \frac{1}{\phi} \int_0^{\infty} h_{\phi}(E) \phi_E dE \quad (7)$$

積分計算を行う際の中性子フルエンススペクトルの各ビンの代表エネルギーは、各ビンの両端のエネルギー (E_{low} , E_{high}) を用いて、 $E = \sqrt{E_{low} \times E_{high}}$ とした。評価に用いた単色中性子に対するフルエンスー線量換算係数 $h_{\phi}(E)$ は、表 4-1 4に示したものを使用した。データ間の補間は、ICRP Publ. 74^[7]で推奨されているように、Log-Log スケールにおける4点(3次) Lagrange 補間公式を用いた。Lagrange 補間公式を用いて算出したデータ間の補間値を連続関数として表したものを、図 4-1 9左(場所のモニタリングにかかる実用量)及び図 4-2 0左(個人モニタリングにかかる実用量)に示した。また、現行実用量と新たな実用量の比を各図の右側に示した。

表 4-1 4 評価に用いた単色中性子に対する換算係数

現行実用量		新たな実用量	
$H^*(10)/\phi$	ICRP 74 ^[7] Table A.42	H^*/K_a	ICRU 95 ^[5] Table A.1.2
$H_p(10,0^\circ)/\phi$	ICRP 74 ^[7] Table A.42	$H_p(0^\circ)/\phi$	ICRU 95 ^[5] Table A.2.2

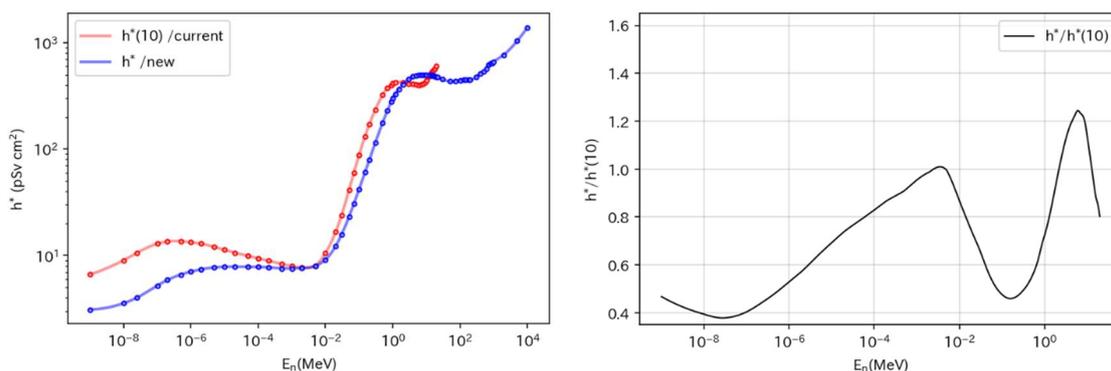


図 4-19 中性子の場のモニタリングにかかる実用量に対する換算係数

- (左) 現行及び新たな実用量の評価に用いたフルエンス-線量換算係数。
 データ間を Lagrange 補間したものを連続関数として実線で示した。
- (右) 新たな実用量/現行実用量の比

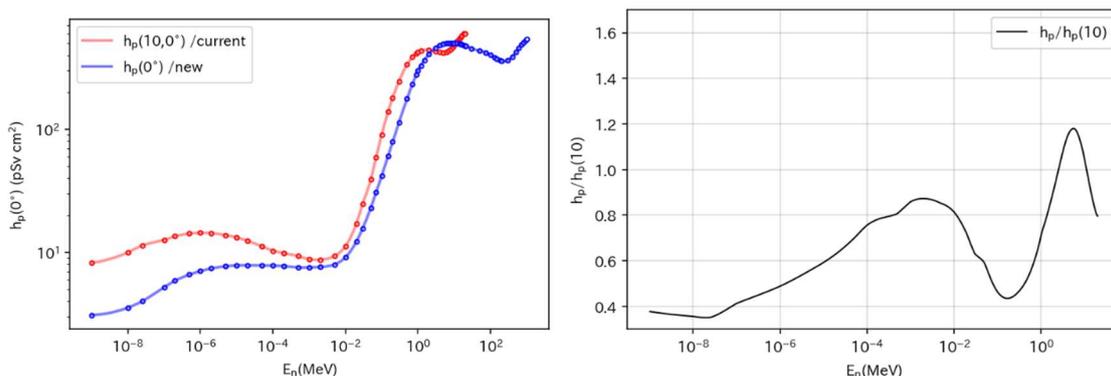


図 4-20 中性子の個人モニタリングにかかる実用量に対する換算係数

- (左) 現行及び新たな実用量の評価に用いたフルエンス-線量換算係数。
 データ間を Lagrange 補間したものを連続関数として実線で示した。
- (右) 新たな実用量/現行実用量の比

(a) $^{241}\text{Am}\text{-Be}$

FRS では、ステンレス製線源保護カプセルに内包された $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 線源を用いて、ISO 8529-1^[24] (JIS Z 4521^[25]) に準拠した速中性子校正場を整備している。新たな実用量及び現行実用量に対する換算係数を導出する際に、重み付けに使用した中性子エネルギー分布は以下のとおりである (図 4-21 参照)。

(i) ISO 8529-1^[24]に示される標準スペクトル

- (ii) FRS で使用している線源保護カプセル通過後のスペクトル（数値計算により評価したもの）^[26]

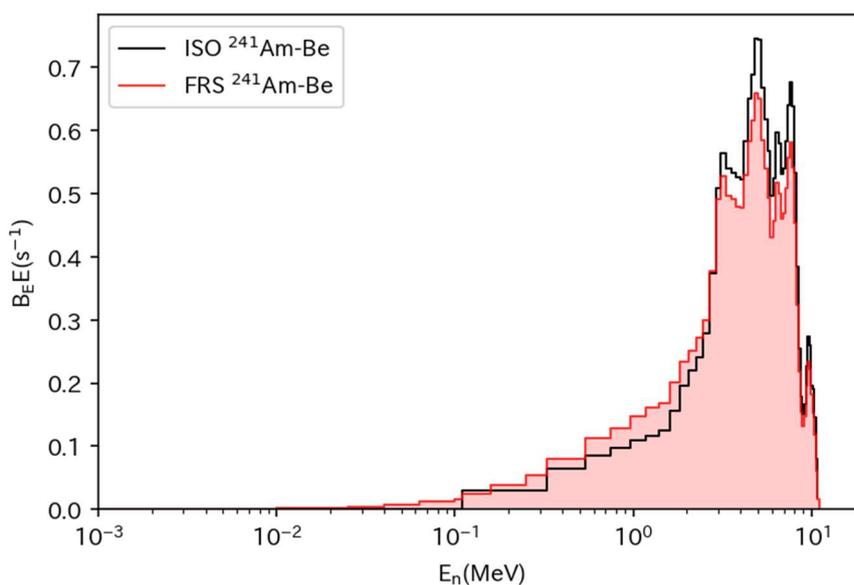


図 4-2-1 $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 線源のスペクトル

ISO 8529-1^[24]に示された $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ の標準スペクトル（黒）
と FRS で使用している線源保護カプセル通過後のスペクトル（赤）

- (b) ^{252}Cf

FRS では、ステンレス製線源保護カプセルに内包された ^{252}Cf 線源を用いて、ISO 8529-1^[24]（JIS Z 4521^[25]）に準拠した速中性子校正場を整備している。新たな実用量及び現行実用量に対する換算係数を導出する際に、重み付けに使用した中性子エネルギー分布は以下のとおりである（図 4-2-2 参照）。

- (i) ISO 8529-1^[24]に示される標準スペクトル

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

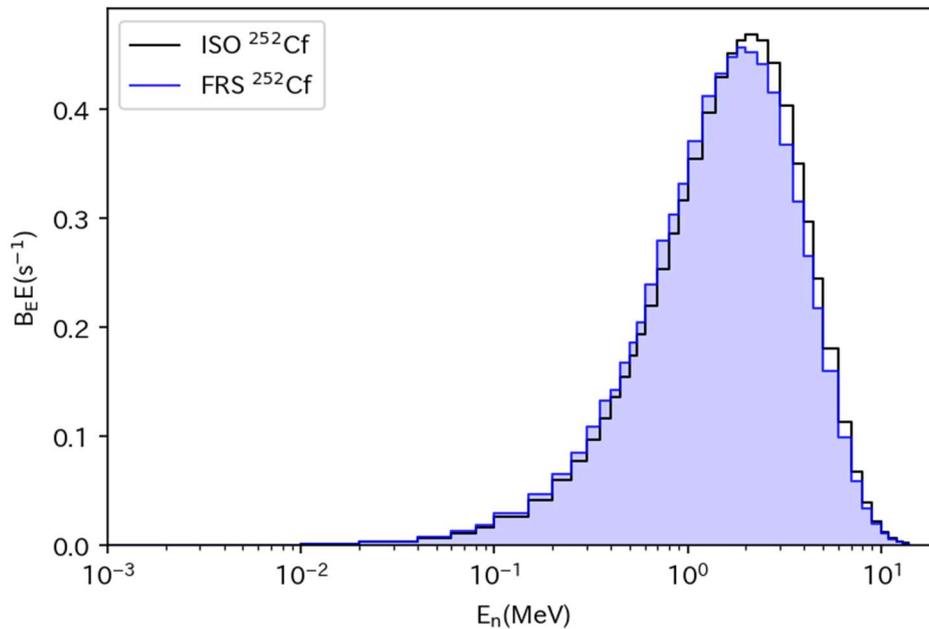


図 4-2 2 ^{252}Cf 線源のスペクトル

ISO 8529-1^[24]に示された ^{252}Cf の標準スペクトル (黒)
と FRS で使用している線源保護カプセル通過後のスペクトル (青)

(c) 熱中性子

FRS では、 ^{252}Cf 線源と黒鉛パイルを用いた ISO 8529-1^[24] (JIS Z 4521^[25]) に準拠した熱中性子校正場を整備している。減速材として使用する黒鉛パイルの大きさは 150 cm(W)×164 cm(D)×150 cm(H)であり、その中央に ^{252}Cf 線源を装荷して使用する。校正点は、黒鉛パイル表面から 40 cm の位置であり、パイルの南側と西側に 2 点整備している。 ^{252}Cf 線源から放出される中性子は大半が黒鉛パイル内で減速・熱化されたのちパイル外へ放出されるが、熱化が不十分な熱外中性子も一部含まれる。校正点における全フルエンスに含まれる熱外中性子の割合は、南側と西側の校正点でわずかに異なる (図 4-2 3 参照)。熱外中性子の影響を除去し、熱中性子のみを用いて校正試験を行いたい場合は、Cd 差法 (測定器をカドミウム (Cd) カバーで覆わない場合と覆った場合の差分をとることにより熱外中性子の寄与を差し引く手法) を適用することができる。

新たな実用量及び現行実用量に対する線量当量換算係数を導出する際に、重み付けに使用した中性子エネルギー分布は以下のとおりである (図 4-2 3 参照)。

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

$$\phi_E = AE_n \exp\left(-\frac{E_n}{2kT}\right) \quad (8)$$

(ii) FRS の熱中性子校正場において、ボナー球スペクトロメータを用いた測定により評価されたスペクトル^[28]

(iii) FRS の熱中性子校正場において、ボナー球スペクトロメータを用いた測定により評価されたスペクトル^[28]のうち、熱外中性子($>4.14 \times 10^{-7}\text{ MeV}$)を取り除いたもの (Cd 差法適用)

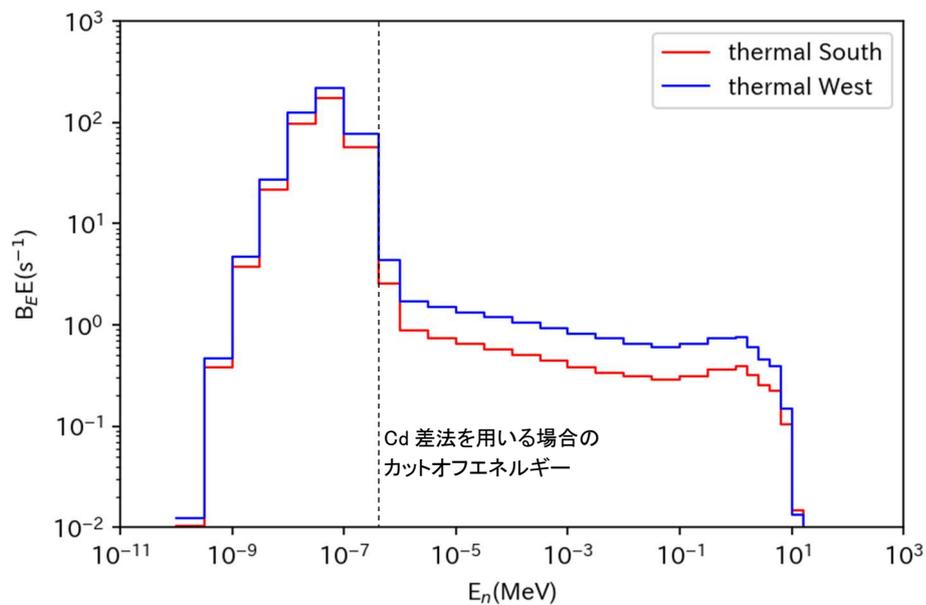


図 4-23 FRS の熱中性子校正場の中性子スペクトル

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

(2) 結果と考察

各条件のもとに評価した換算係数を表 4-15 にまとめた。また、現行実用量を用いて評価した換算係数との比を図 4-24 に示した。新たな実用量では、50 MeV 以下のエネルギーにおいて h^*_ϕ と $h_{p\phi}$ が完全に一致しているため、ここで評価対象とした中性子校正場においては、 H^*/ϕ と H_p/ϕ との間に違いは生じなかった。現行の実用量

と比較すると、 $^{241}\text{Am-Be}$ を用いた校正場では換算係数が最大で 10%ほど増加し、 ^{252}Cf を用いた校正場では換算係数が 10-15%ほど減少した。線源から放出される中性子のスペクトルは、線源保護カプセルにおける散乱により低エネルギー側にシフトする。FRS で使用している線源の場合、このエネルギーシフトによる換算係数の変化は、現行実用量では $^{241}\text{Am-Be}$ 、 ^{252}Cf とともに 1%程度であったのに対し、新たな実用量を用いた場合、3.7% ($^{241}\text{Am-Be}$)、2.6% (^{252}Cf) に増大した。これは、新たな実用量のもとで、保護カプセルにおける散乱によるエネルギーシフトの領域が、換算係数の変化率が大きい領域と重なりやすくなったためである。JIS Z 4521^[25]には、保護カプセルによるスペクトル変化による線量当量換算係数の不確かさとして、4% ($^{241}\text{Am-Be}$)、1% (^{252}Cf) を許容することが望ましいという記載がある。新たな実用量のもとでは、FRS の ^{252}Cf 校正場でこの範囲を外れるため、基準量及びその不確かさの算出の際には注意が必要となる。また、中性子線量計によっては、減速材付き線源を用いて校正が行われることがある。この場合も同様に、中性子スペクトルの変化による線量当量の変化は、新たな実用量を適用することにより大きくなると予想されるため、校正場基準量の算出には注意が必要となる。

熱中性子校正場においては、単色 ($E_n=0.025\text{eV}$) の熱中性子の換算係数が 4.0 pSv cm^2 であるのに対し、Maxwell-Boltzmann 分布を仮定すると 3.9 pSv cm^2 、FRS 熱中性子校正場では $4.6\text{-}5.9\text{ pSv cm}^2$ に分布した。現行実用量からの変化は顕著であり、現行の換算係数の 40%程度の値となる。熱外中性子を含む FRS の校正場においても、換算係数は、現行の半分以下の値となる。測定器を校正した際の校正定数も、これに応じて大きく変化することになり、実用面への影響も生じると思われる。

表 4-15 評価した中性子校正場の換算係数

線質	評価方法	平均エネルギー					場所のモニタリング にかかると実用量		個人モニタリング にかかると実用量	
		\overline{E}_ϕ	$\overline{E}_{H^*(10)}$	\overline{E}_{H^*}	$\overline{E}_{H_p(10)}$	\overline{E}_{H_p}	$H^*(10)/\phi$	H^*/ϕ	$H_p(10)/\phi$	H_p/ϕ
		(MeV)	(MeV)	(MeV)	(MeV)	(MeV)	(pSv cm ²)			
²⁴¹ Am-Be	(i)ISO	4.15	4.34	4.68	4.38	4.68	391	427	411	427
	(ii)FRS	3.80	3.99	4.39	4.02	4.39	389	411	407	411
²⁵² Cf	(i)ISO	2.13	2.26	2.61	2.27	2.61	385	351	400	351
	(ii)FRS	2.01	2.15	2.51	2.16	2.51	381	342	396	342
熱中性子	(i)M-B	2.5×10^{-8}	2.9×10^{-8}	2.9×10^{-8}	2.8×10^{-8}	2.9×10^{-8}	9.84	3.88	10.6	3.88
	<南> (ii)FRS-S	0.005	0.16	0.39	0.17	0.39	12.5	5.46	12.9	5.46
	(iii)FRS-S-Cd	7.0×10^{-8}	7.8×10^{-8}	8.1×10^{-8}	7.6×10^{-8}	8.1×10^{-8}	11.5	4.57	11.8	4.57
	<西> (ii)FRS-W	0.007	0.21	0.47	0.21	0.47	13.0	5.87	13.5	5.87
	(iii)FRS-W-Cd	7.3×10^{-8}	8.0×10^{-8}	8.4×10^{-8}	7.8×10^{-8}	8.4×10^{-8}	11.5	4.59	11.9	4.59

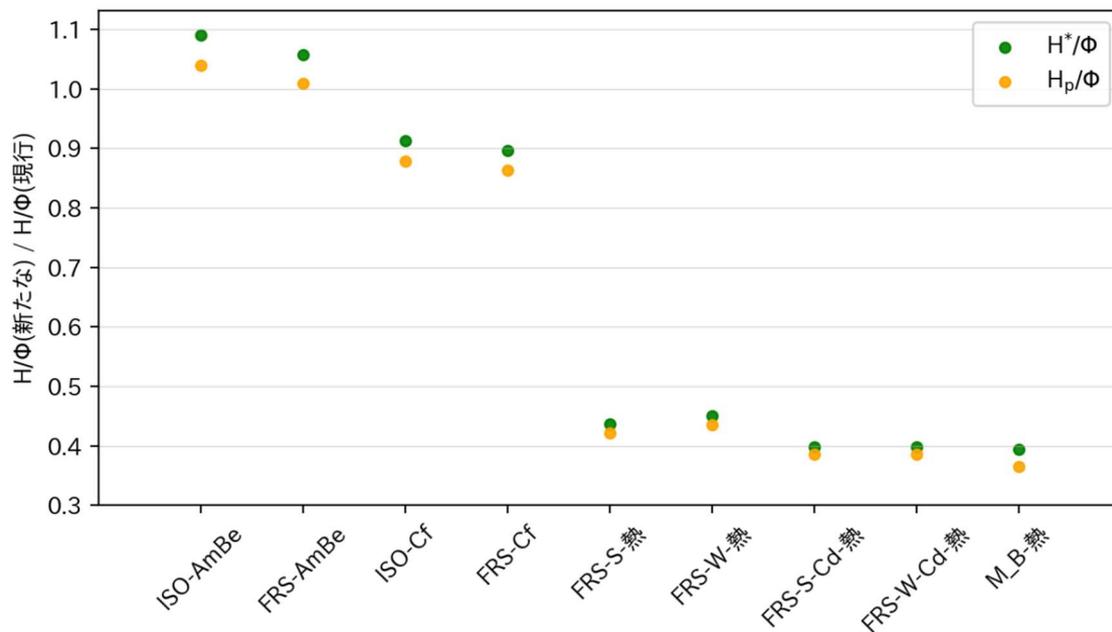


図 4-24 各校正場におけるフルエンス—線量当量換算係数の比（新/現行）

(3) 結論

以降の線量計校正では、速中性子については、ISO 8529-1^[24]の標準スペクトルを用いて導出した換算係数を使用し、その不確かさとして、²⁴¹Am-Be に対しては 4%、²⁵²Cf に対しては 1%の標準不確かさを考慮することとする。今後、新たな実用量を導入する際は、線源保護カプセルによる中性子スペクトル変化を考慮した換算係数を用いて、校正場基準値を算出することを検討することが望まれる。熱中性子については、ボナー球スペクトロメータを用いて測定した熱外中性子を含む校正場（Cd 差法の適用なし）における換算係数を用いて、以降の線量計校正を行う。

4.2.1.5 まとめ

次節以降で利用する換算係数を表 4-16 にまとめた。

表 4-16 本事業で使用する換算係数（まとめ）

(a) 光子

校正場	線質	H^*/K_a (Sv/Gy)	D'_{lens}/K_a (Sv/Gy)	$D'_{local\ skin}/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(0^\circ)/K_a$ (Gy/Gy)	$D_{plens}(0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{plocal\ skin}(0^\circ)_{slab}/K_a$ (Gy/Gy)
校正場	γ 線 S-Cs	1.02	1.17	1.21	1.02	1.17	1.21
校正場	S-Co	1.00	1.13	1.16	1.00	1.13	1.16
校正場	X 線 N-40	0.522	1.20	1.34	0.522	1.20	1.34
校正場	N-60	1.01	1.46	1.62	1.01	1.46	1.62
	N-80	1.36	1.57	1.77	1.36	1.57	1.77
	N-100	1.43	1.56	1.74	1.43	1.56	1.74
	N-120	1.39	1.50	1.68	1.39	1.50	1.68
	N-150	1.34	1.45	1.61	1.34	1.45	1.61
	N-200	1.21	1.36	1.49	1.21	1.36	1.49
	N-250	1.15	1.32	1.43	1.15	1.32	1.43
	N-300	1.12	1.29	1.38	1.12	1.29	1.38

(b) β 線

校正場	線質	$D_{local\ skin}(0^\circ)/D_t(0.07)$ (Gy/Gy)	$D_{lens}(0^\circ)/D_t(0.07)$ (Gy/Gy)
校正場	β 線 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	1.00	0.17
校正場	^{85}Kr	0.98	—

(c) 中性子

校正場	線質	H^*/ϕ (pSv cm ²)	H_p/ϕ (pSv cm ²)
校正場	中性子 熱中性子<南>	5.46	5.46
校正場	熱中性子<西>	5.87	5.87
	$^{241}\text{Am-Be}$	427	427
	^{252}Cf	351	351

4.2.2 新たな実用量を用いた線量計の校正

4.2.1 で評価した FRS の校正場に対する新たな実用量への換算係数を基に、国内で市販されているサーベイメータ及び個人線量計の校正を実施した。

(1) 方法

使用した線量計を表 4-17 に示す。これらの線量計は、各線種と測定量に対してそれぞれ少なくとも 1 種類は調査できるように選択した。本調査の目的は個々の線量計の性能を示すものではなく、実用量の定義変更に伴う校正への影響調査が主眼である。さらに、受動形線量計の(vi)を除いては各 1 個に対してのみ評価したものであり、器差についても考慮に入れられていないため、型式を代表する結果でないことにも注意が必要である。(vi)を除く線量計については、不確かさを評価するため複数回繰り返し照射した(ただし、E 社製電子式個人線量計(体幹部用)の S-Cs に対しては、繰り返し測定値が得られなかったため、不確かさを評価していない)。(vi)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^[12]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いないが、ICRU の報告書に記載された全てのケースを検討するために調査に含めた。一方で、末端部の線量評価にかかる線量計については、本調査では対象としなかった。校正はそれぞれの線量計に関連する JIS に準拠して実施した。

光子については、通常校正点として用いられている S-Cs に加え、低エネルギー対応の線量計に対する校正のため JIS Z 4333^[10]及び JIS Z 4312^[11]で校正のための基準 X 線として規定されている N-80 及び N-100 についても校正定数を評価した。H(10)測定用のサーベイメータ(i)については、低エネルギー用ではないが、これに準じて N-100 での校正定数も評価した。また、H(3)については、JIS においてはその試験条件に対する規定もないが、H(0.07)測定用サーベイメータに準じた方法で校正を行った。水晶体用の受動形個人線量計(vi)についても、JIS Z 4345^[12]では、校正に用いる基準 γ 線源として S-Cs のみ記載されているが、N-80 についても評価した。

校正定数は以下のとおり算出した。

$$N = \frac{H}{M} \quad (9)$$

ここで、 H は基準器により測定した空気カーマに 4.2.1 で評価した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)、 M は線量計の正味指示値である。ただし、(ii)の電離箱式サーベイメータについては、通気型であるため、取扱説明書に従い、大気条件補正を施した。また、複数レンジを持つ線量計については、どの線質においても同じレンジでの校正とした。校正の様子を図 4-25～図 4-34 に示す。

表 4-17 新たな実用量に対する校正に用いた線量計の種類と特徴

線量計の種類		測定量	主な仕様
(i) 光子用サーベイメータ	A 社製シンチレーション式サーベイメータ*1	$H^*(10)$	検出器：1"φ×1" NaI(Tl)シンチレータ 測定範囲：50 keV～3 MeV
(ii) 光子・β線用サーベイメータ	B 社製電離箱式サーベイメータ	$H^*(10)$ *2 $H(3)$ *2 $H(0.07)$	検出器：薄膜入射窓平行平板電離箱 測定範囲：60 keV～3 MeV (光子) $^{147}\text{Pm} \sim ^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (β線)
(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	$H^*(10)$	検出器： ^3He 比例計数管 測定範囲：0.025 eV～約 15 MeV
(iv) 光子用個人線量計	D 社製電子式個人線量計 (体幹部用)	$H_p(10)$	検出器：シリコン半導体 測定範囲：40 keV～
(v) 光子・β線用個人線量計 (体幹部用)	E 社製電子式個人線量計 (体幹部用)	$H_p(10)$ $H_p(0.07)$	検出器：半導体 測定範囲：15 keV～7 MeV (光子) 0.22 MeV～2.3 MeV (β線)
(vi) 光子・β線用個人線量計 (水晶体用)	F 社製受動形個人線量計 (水晶体用)	$H_p(3)$	検出器：TLD 測定範囲：15 keV～6.3 MeV (光子) 1.0 MeV～3.0 MeV (β線)
(vii) 中性子用個人線量計	G 社製電子式個人線量計 (体幹部用)	$H_p(10)$	検出器：シリコン半導体 測定範囲：0.025 eV～15 MeV

*1 エネルギー補償形

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

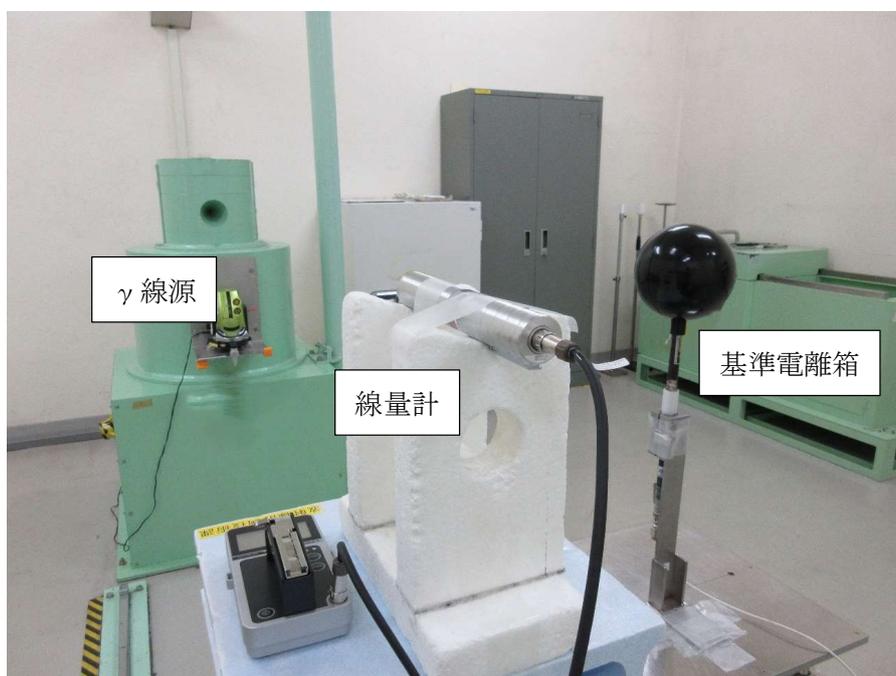


図 4-25 A社製シンチレーション式サーベイメータの校正の様子
(γ 線を用いた校正)



図 4-26 B社製電離箱式サーベイメータの校正の様子
(X線を用いた校正)



図 4-27 B社製電離箱式サーベイメータの校正の様子
(β 線を用いた校正)

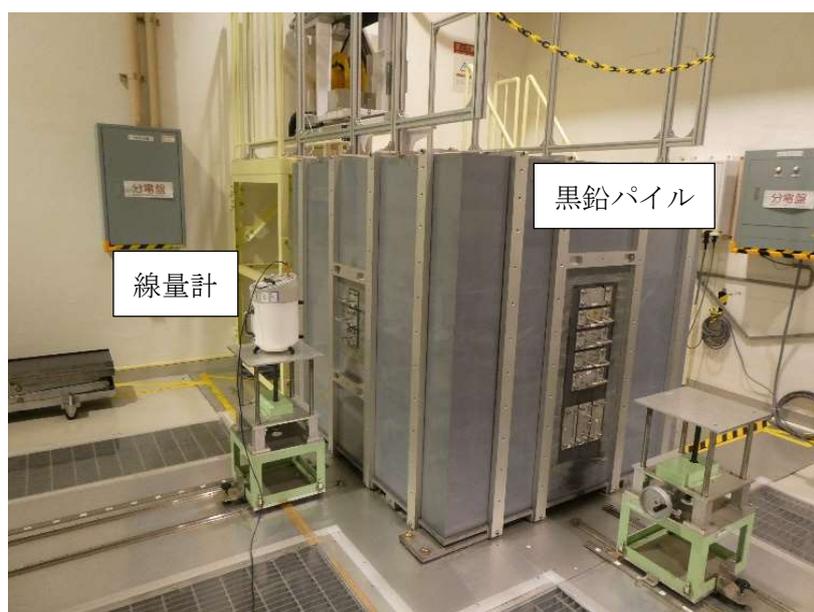


図 4-28 C社製中性子用サーベイメータの校正の様子
(熱中性子を用いた校正)

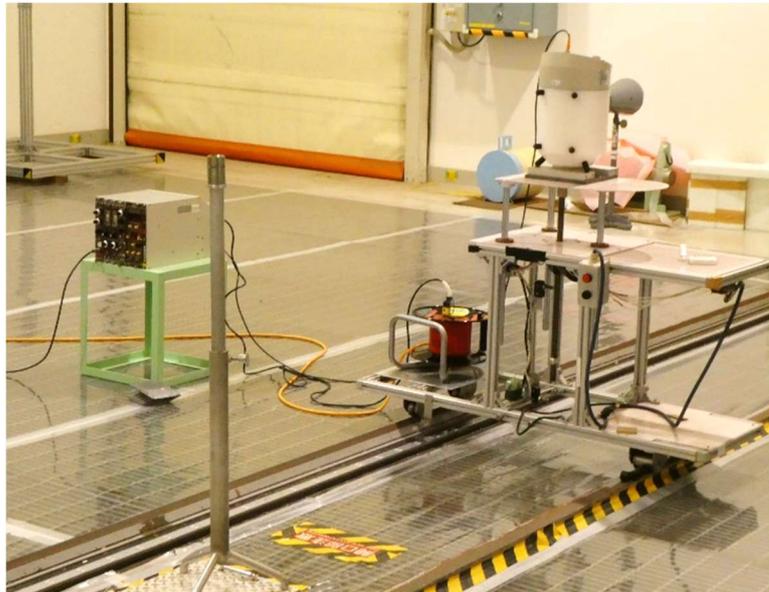


図 4-29 C社製中性子用サーベイメータの校正の様子
(速中性子を用いた校正)



図 4-30 D社製光子用個人線量計の校正の様子
(γ 線を用いた校正)

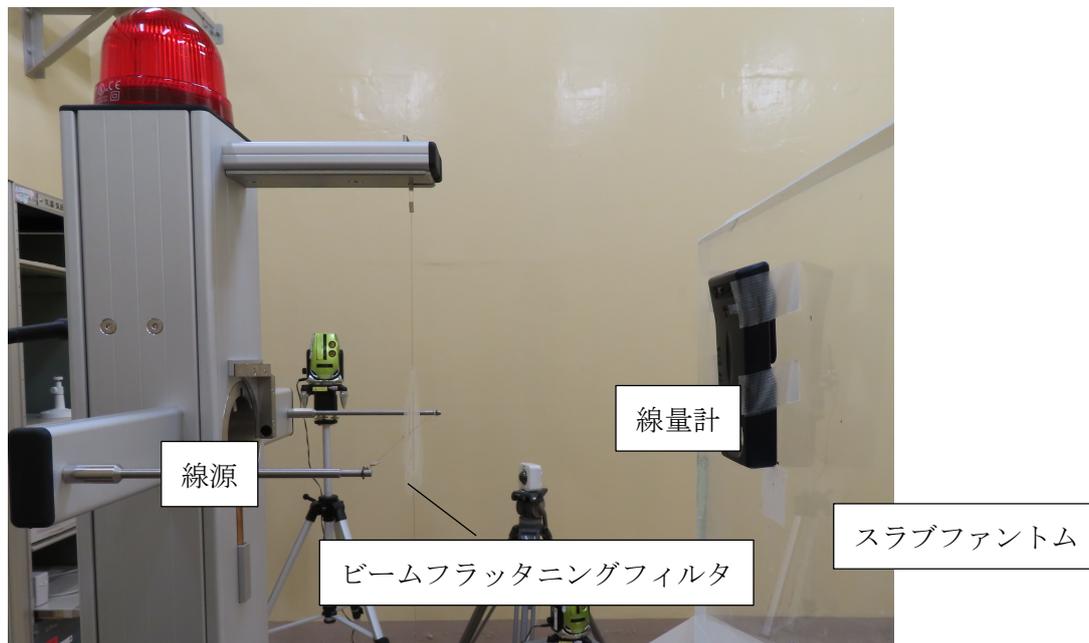


図 4-3 1 E 社製電子式個人線量計（体幹部用）の校正の様子
 (β 線を用いた校正)



図 4-3 2 F 社製受動形個人線量計（水晶体用）の校正の様子
 (β 線を用いた校正)

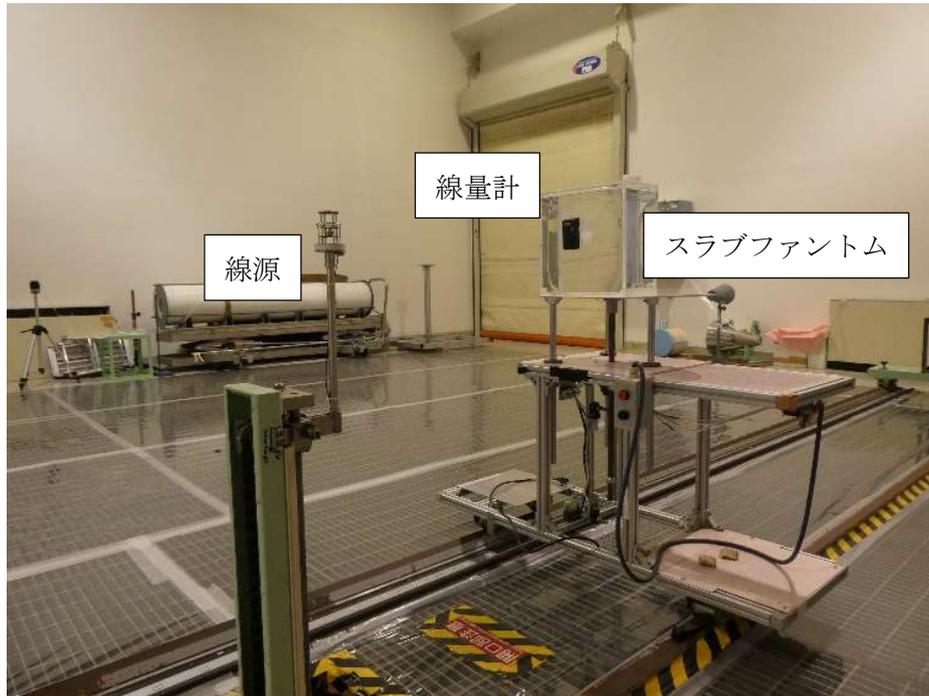


図 4-33 G 社製中性子用電子式個人線量計の校正の様子
(速中性子を用いた校正)

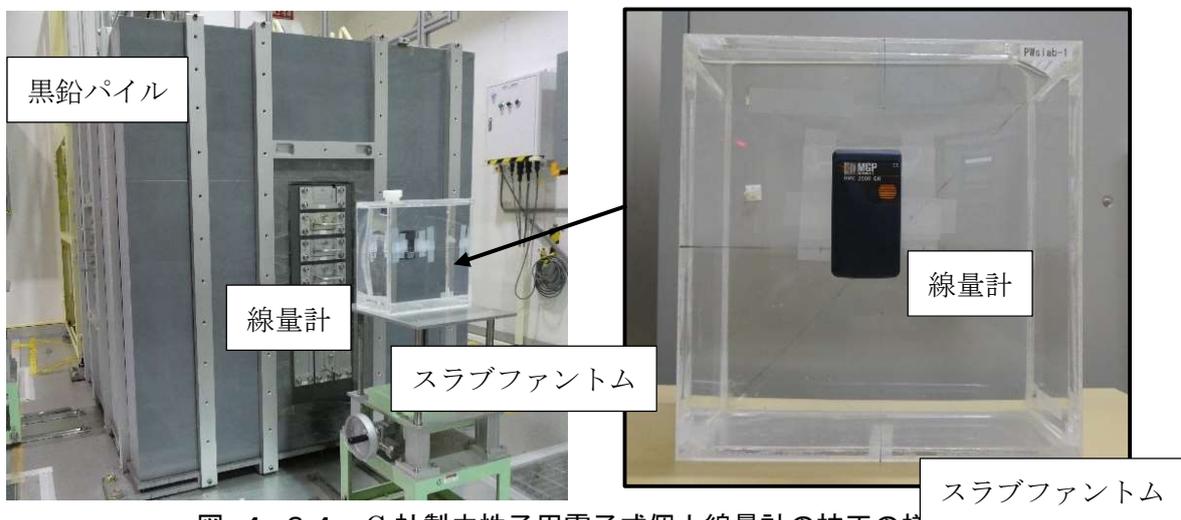


図 4-34 G 社製中性子用電子式個人線量計の校正の様子
(熱中性子を用いた校正)

(2) 結果と考察

校正の結果を表 4-18 及び表 4-19 に示す。現行実用量と新たな実用量での校正定数の比較からは以下の事項が示唆される。

- ・ 実効線量の管理に用いる線量計に関して、光子については新たな実用量で校正すると一律に校正定数が 2 割程度小さくなる。すなわち、新たな実用量の導入により、新たな実用量で線量計を校正することになった場合、放射線管理における測定値は現行と比較して 2 割程度小さく評価される。
- ・ 眼の水晶体の線量管理に用いる線量計については、 β 線で大きく校正定数が変化（現行に比べて 40%程度に減少）する。
- ・ 光子用サーベイメータの N-80 での $D'_{\text{local skin}}$ 及び D'_{lens} に対する校正定数は有意に減少する。
- ・ 前 2 項のケースを除いて、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は、現行及び新たな実用量間の校正定数の差異はいずれも不確かさの範囲内であった。
- ・ 中性子線量計については、新たな実用量を適用することにより、校正定数の変化が多くみられた。 $^{241}\text{Am-Be}$ 校正場においては 10%程度大きな値をとり、 ^{252}Cf 校正場においては 10%程度小さな値をとった。熱中性子校正場における校正定数の変化は著しく、現行の 40%程度の値となった。変化の方向や程度は、サーベイメータと個人線量計で同様であった。
- ・ 中性子用サーベイメータについては、新たな実用量を用いることで $^{241}\text{Am-Be}$ 、 ^{252}Cf 、熱中性子校正場で得た校正定数の大小関係が入れ替わっていることに注意が必要である。放射線管理の現場においては、作業場の中性子エネルギー分布が不明である場合、複数の線質の校正場で得た校正定数のうち最も大きな値を適用し、保守的な線量評価をすることが考えられる。十分な考慮なく、従来用いていた校正定数を適用して線量評価した場合、保守的な評価とならない場合がある。

(3) 結論

実際に新たな実用量で市販線量計の校正を行い、校正定数を得た。新たな実用量に対して適切に評価された校正場を用いれば、従来と同様の手法で校正自体を行うことは可能であろう。従って、新たな実用量の導入に際しては、まずは国内での対応した校正場の整備が重要であり、国家標準からトレーサビリティを確保して標準供給を受けた場において、新たな実用量に基づく換算係数を適切に評価し、実用測定器を校正する現状のスキームの検証が必要である。

放射線管理への影響としては、光子に対する H^* や H_p 、 β 線に対する D_{lens} 、中性子などのように校正定数が実用量の定義変更に伴って変化するものが挙げられる。校正定数が変化すると、その前後で測定値にギャップが生じることになってしまう。今回調査した範囲では、 $^{241}\text{Am-Be}$ を除いては、校正定数は減少する（測定値が小さくなる）方向にな

るため、実用量変更に伴う原因によってこれまで問題のなかった線量が、何らかの放射線管理上の基準値を超えてしまう、というようなケースは少ないものと考えられる。一方で、値そのものが小さくなってしまふことから放射線防護上の安全側の評価の観点からも、線量計の特性やそれが使用される作業場の放射線の状況も踏まえ、慎重に校正する量や線質について検討する必要があると考えられる。特に、中性子ではそうした問題が顕著にみられる。

表 4-18 現行実用量と新たな実用量に対する校正定数 (1/2)

線量計	線種	線質	校正定数(現行)	校正定数(新)
(i) A 社製シンチレーション式サーベイメータ	光子	S-Cs	$H^*(10)$: 1.08 (5.3%)	H^* : 0.90 (4.7%)
		N-100	$H^*(10)$: 1.00 (7.1%)	H^* : 0.84 (7.7%)
(ii) B 社製電離箱式サーベイメータ	光子	S-Cs	$H'(3)$: 1.00 (4.4%)	D'_{lens} : 0.98 (4.5%)
			$H'(0.07)$: 1.01 (4.3%)	$D'_{\text{local skin}}$: 1.02 (4.2%)
		N-80	$H'(3)$: 1.30 (4.4%)	D'_{lens} : 1.21 (4.4%)
			$H'(0.07)$: 1.26 (4.3%)	$D'_{\text{local skin}}$: 1.40 (4.4%)
	β 線	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	$H'(3)$: 1.03 (3.8%)	D'_{lens} : 0.41 (3.1%)
			$H'(0.07)$: 0.99 (3.0%)	$D'_{\text{local skin}}$: 0.99 (2.9%)
^{85}Kr	$H'(0.07)$: 1.06 (3.1%)	$D'_{\text{local skin}}$: 1.04 (2.9%)		
(iii) C 社製中性子用サーベイメータ	中性子	熱中性子	$H^*(10)$: 1.49 (5.7%)	H^* : 0.67 (5.7%)
		$^{241}\text{Am}-\text{Be}$	$H^*(10)$: 1.17 (12%)	H^* : 1.27 (12%)
		^{252}Cf	$H^*(10)$: 1.13 (8.9%)	H^* : 1.03 (8.9%)
(iv) D 社製電子式個人線量計 (体幹部用)	光子	S-Cs	$H_p(10)$: 1.03 (4.4%)	H_p : 0.86 (4.4%)
		N-100	$H_p(10)$: 0.91 (4.6%)	H_p : 0.69 (4.6%)
(v) E 社製電子式個人線量計 (体幹部用)	光子	S-Cs	$H_p(0.07)$: 1.22*	$D_{\text{p local skin}}$: 1.22*
		N-80	$H_p(0.07)$: 0.84 (4.1%)	$D_{\text{p local skin}}$: 0.86 (4.1%)
	β 線	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	$H_p(0.07)$: 0.87 (2.9%)	$D_{\text{p local skin}}$: 0.88 (2.9%)
			^{85}Kr	$H_p(0.07)$: 0.88 (3.1%)

()内は相対拡張不確かさ (包含係数 $k=2$) を示す。*不確かさを評価できなかった

表 4-19 現行実用量と新たな実用量に対する校正定数 (2/2)

線量計	線種	線質	校正定数(現行)	校正定数(新)
(vi) F 社製受動形個人線量計 (水晶体用)	光子	S-Cs	$H_p(3)$: 1.18 (4.8%)	$D_{p\text{ lens}}$: 1.17 (4.8%)
		N-80	$H_p(3)$: 1.02 (7.4%)	$D_{p\text{ lens}}$: 0.96 (7.3%)
	β 線	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	$H_p(3)$: 1.08 (3.7%)	$D_{p\text{ lens}}$: 0.42 (3.7%)
(vii) G 社製電子式個人線量計 (体幹部用)	中性子	熱中性子	$H_p(10)$: 0.38 (5.5%)	H_p : 0.16 (5.5%)
		$^{241}\text{Am-Be}$	$H_p(10)$: 0.74 (11%)	H_p : 0.77 (11%)
		^{252}Cf	$H_p(10)$: 1.67 (7.5%)	H_p : 1.46 (7.5%)

()内は相対拡張不確かさ (包含係数 $k=2$) を示す。

4.3 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

現行の放射線防護の規制において、実用量を使った測定として、例えば、放射線同位元素等の規制に関する法律施行規則（令和3年4月1日施行）^[29]第20条では、以下のよう

に定められている。

- ・ 場所の放射線の量の測定に関しては、 $H(10)$ ⁴について行い、 $H(0.07)$ ⁵が $H(10)$ の10倍を超えるおそれのある場所では $H(0.07)$ について行う。
- ・ これらの測定は放射線測定器を用いて行う。ただし、放射線測定器を用いて測定することが著しく困難である場合には、計算によりこれらの値を算出することができる。
- ・ これらの測定は、「使用施設、廃棄物詰替施設、貯蔵施設、廃棄物貯蔵施設、廃棄施設、管理区域の境界、事業所等内において人が居住する区域、事業所等の境界」の放射線の量の状況を知るために最も適した箇所において行う。
- ・ 外部被ばくによる線量の測定については、胸部又は腹部について $H_p(10)$ 及び $H_p(0.07)$ ⁶（中性子線については、 $H_p(10)$ ）を測定する。眼の水晶体の等価線量を算定するための測定については、眼の近傍その他の適切な部位について $H_p(3)$ ⁷を測定することにより行うこともできる⁸。

これらの測定は、実用量の定義が変更されることによって影響を受けると考えられる。そこで、こうした測定を行う放射線作業場における線量計のエネルギー応答を調査する。本事業においては、原子力施設の光子が被ばく源となる作業場に限定し、以下の2段階で調査した。

- ① 実際の放射線作業場における光子エネルギー分布を取得する。取得した光子エネルギー分布から、現行実用量及び新たな実用量に基づく線量を算出することにより、定義変更によってこれらの場において測定値そのものがどのように変わるかを示す。
- ② 実際の放射線管理においては、適切に校正された「線量計」を用いてこれらの実用量を測定することになるため、実際の場での測定値は、①で得られる線量に線量計のさまざまな特性が反映されたものになる。本調査では、そのうちエネルギー特性に焦点を絞り、①の光子エネルギー分布から評価した代表エネルギーに対する特性試験を4.2.1で整備したFRSの校正場を用いて行う。

⁴法令では、一センチメートル線量当量率又は一センチメートル線量当量という記載である。

⁵法令では、七十マイクロメートル線量当量率又は七十マイクロメートル線量当量という記載である。

⁶法令では、それぞれ一センチメートル線量当量及び七十マイクロメートル線量当量という記載である。

⁷法令では、三ミリメートル線量当量という記載である。

⁸線量が最大となる部位の測定についても規定があるが、本項では省略した。

4.3.1 放射線作業場の選定

原子力施設の放射線作業場について、光子による有意な外部被ばく源があり、散乱線の影響、遮蔽、線源自体のエネルギー分布により光子エネルギー分布に特徴を有する場として、表 4-20 のものを選定した。

4.3.2 光子エネルギー分布の取得

(1) 方法

(a) 光子スペクトル測定

選定した作業場のうち、#1～#16 については、2"φ×2"NaI(Tl)検出器（BNC 社製 SAM940 Model 940-2-G）を用いてスペクトル（パルス波高分布）を測定した。測定の様子を図 4-35～図 4-38 に、得られたスペクトルを図 4-39～図 4-41 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すぎないことに注意が必要である。

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。アンフォールディングに際しては、モンテカルロ計算により 4π 方向から入射する単色光子に対する検出器の応答（応答関数）を求めた^[30]。アンフォールディング処理には、PTB（ドイツ物理工学研究所）で開発された MAXED コード^[31]を使用した。

#17 については、吉富ら^[32]によって報告されている大型加速器施設における光子スペクトルを再解析した。これは小型の半導体検出器である CdZnTe 検出器（Kromek 製 GR-1）を用いて測定されたものであるため、対応する検出器の応答関数^[33]を用いて NaI(Tl)検出器と同様の手法でアンフォールディング処理を行い、光子エネルギー分布を得た。

表 4-20 選定した放射線作業場

放射線作業場	No	線源	特徴	備考
①点線源取扱場	#1,#2,#4,#6	^{137}Cs , ^{60}Co , ^{226}Ra	シンプルな場 (AP ジオメトリ、散乱線が少なく直達線による影響がメインの場)	
②コンクリート遮蔽・迷路構造等により散乱線がメインの場	#3,#5,#7	散乱線 (直達線は遮蔽)	コンクリートによる散乱線のみ	
③複数の線源からの被ばく (貯蔵室)	#8~#11	^{137}Cs , 核燃料物質, ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (制動放射) 等	複数線源による幅広いエネルギーにわたる mix 場	
④漏洩線量場 (線源保管容器, 装備機器, 発生装置)	#12, #13	^{137}Cs , ^{60}Co +鉛遮蔽等	鉛等で十分な遮蔽が施された容器・装置外へ漏洩線量 (線源輸送の模擬、装備機器、X線発生装置等の漏洩線量)	
	#14, #15	X線発生装置		
⑤加速器施設の場合 (運転停止中)	#16	消滅 γ 線, ^{54}Mn , ^{46}Sc ,	加速器施設に特有なエネルギー分布 (放射化物による被ばくがメインとなる場)	文献 ^[32] のスペクトルを再解析
	#17	^{60}Co		
⑥線源が広範囲に分布した場 (福島第一原子力発電所)	#18, #20, #21~#33	$^{134+137}\text{Cs}$ +散乱線	直達線+散乱線で構成され、ISOに近いジオメトリの場	文献 ^[34] のスペクトルを再解析
⑦鉛遮蔽等が施された場 (福島第一原子力発電所)	#19, #34~#36	$^{134+137}\text{Cs}$ +散乱線+鉛遮蔽	被ばく低減措置 (鉛遮蔽等) がなされた場	文献 ^[34] のスペクトルを再解析
⑧原子力発電所	#37	^{58}Co	原子力発電所の場 (原子炉停止中)	文献 ^[34] のスペクトルを再解析

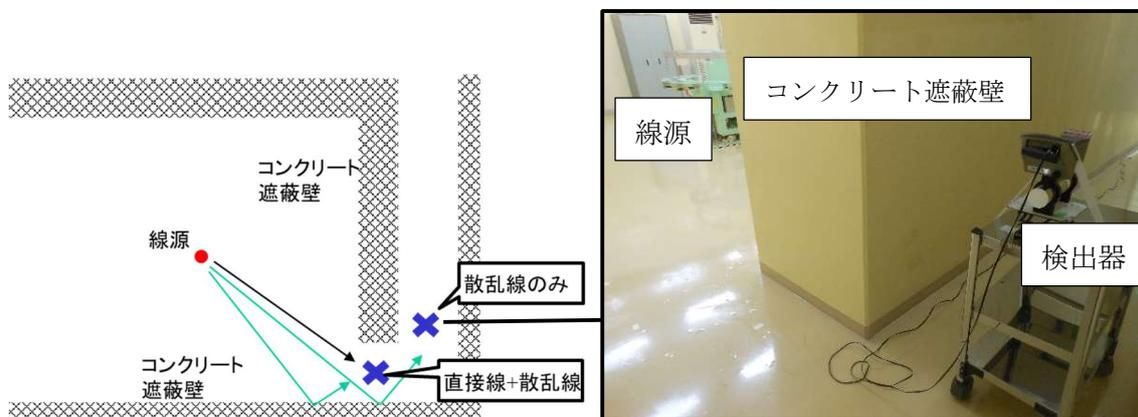


図 4-35 コンクリートによる散乱線が主となる放射線場（#3, #5, #7）の測定の様子

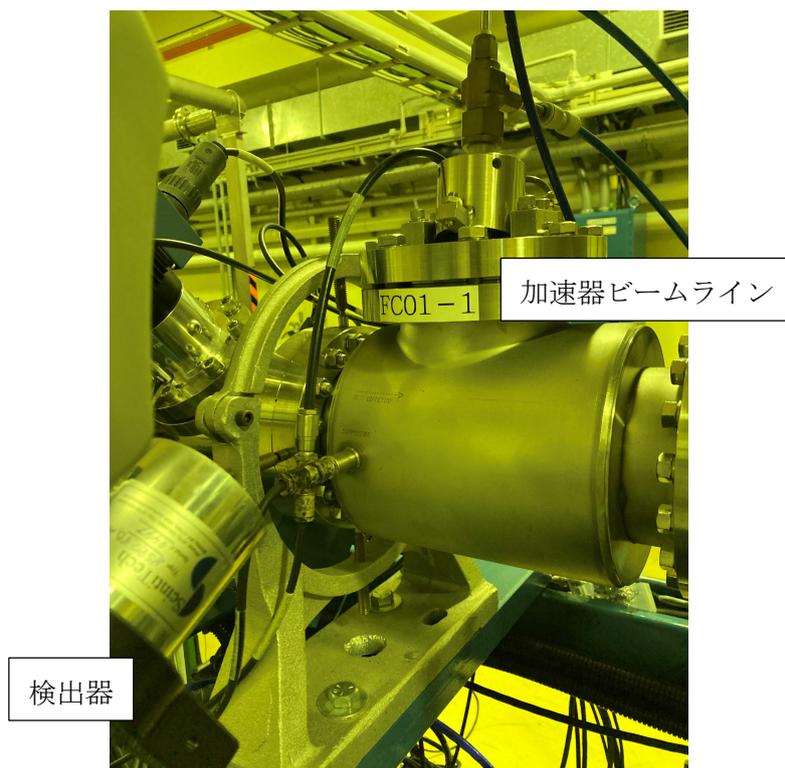


図 4-36 加速器施設ビームライン機器周辺（#16）の測定の様子



図 4-37 線源貯蔵室中央 (RI・核燃料物質) (#10) での測定の様子



図 4-38 漏洩線量場 (線源装備機器) (#13) の測定の様子

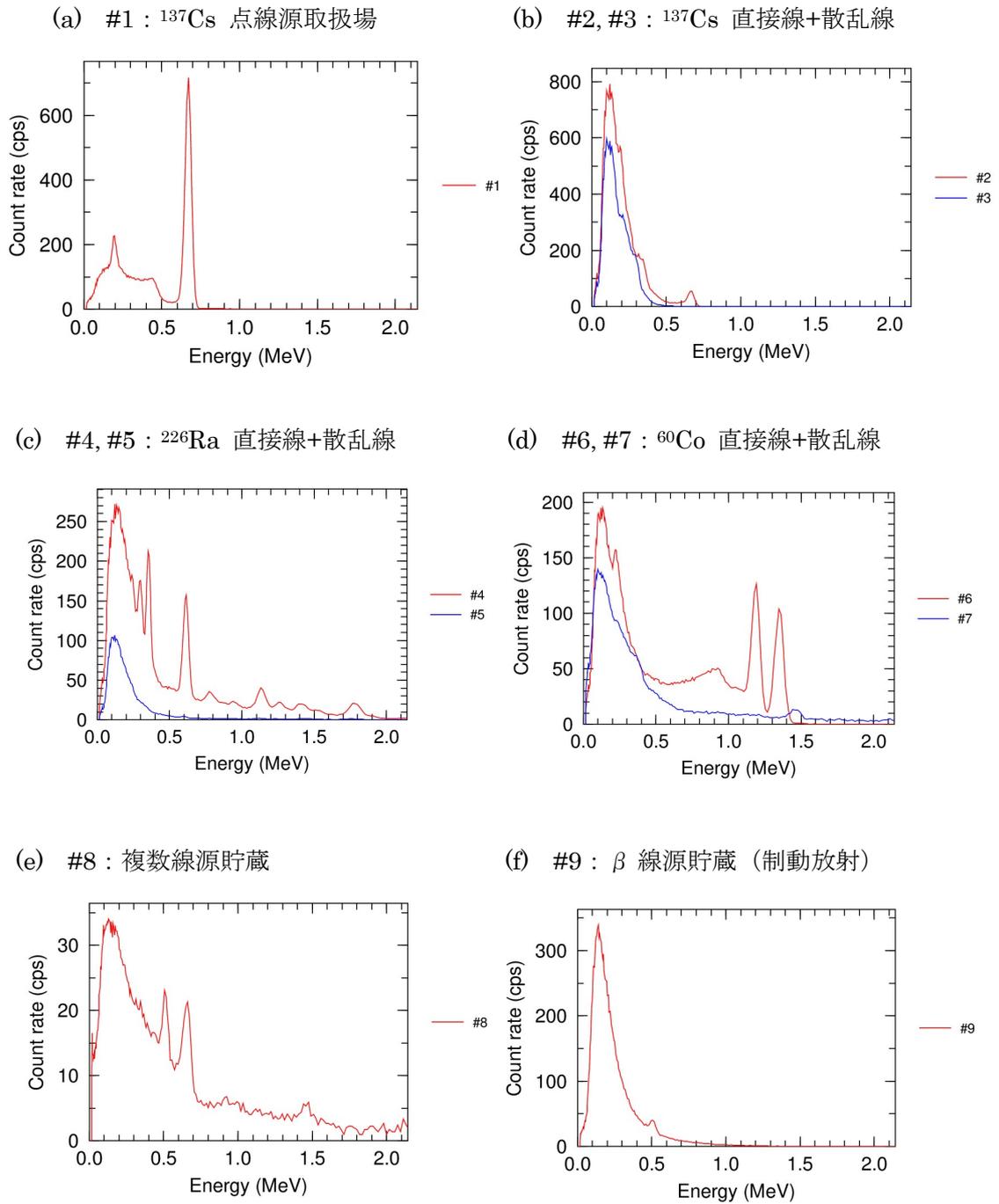
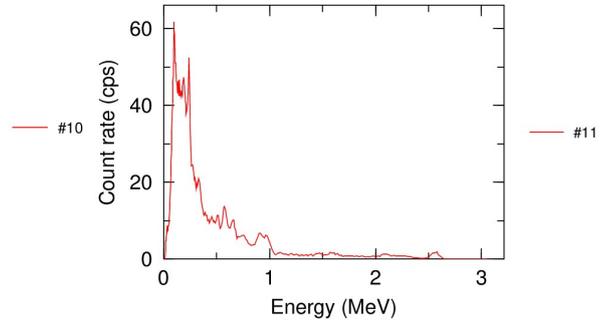
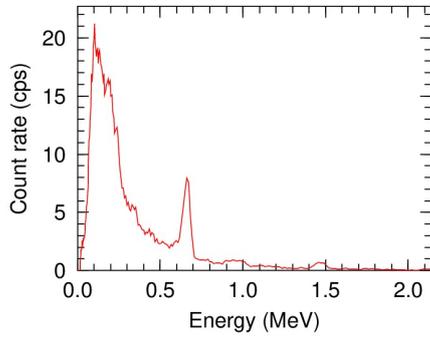
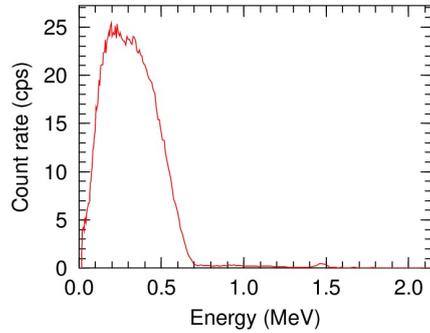


図 4-39 2"Φ×2"円筒形 NaI(Tl)検出器によるパルス波高スペクトル (#1~#9)

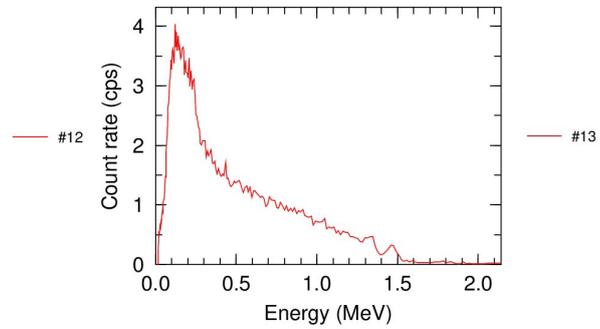
(a) #10 : 線源貯蔵室 (RI・核燃料物質) (b) #11 : 核燃料物質保管庫



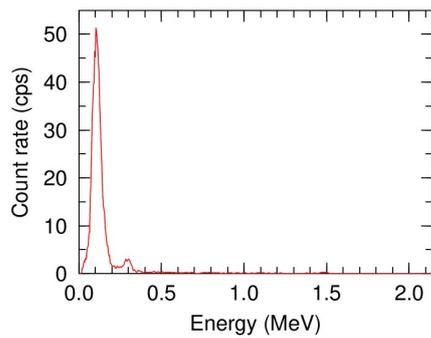
(c) #12 : ^{137}Cs 線源保管容器漏洩



(d) #13 : ^{60}Co 線源保管容器漏洩



(e) #14 : X線発生装置漏洩



(f) #15 : X線発生装置漏洩シャッター前

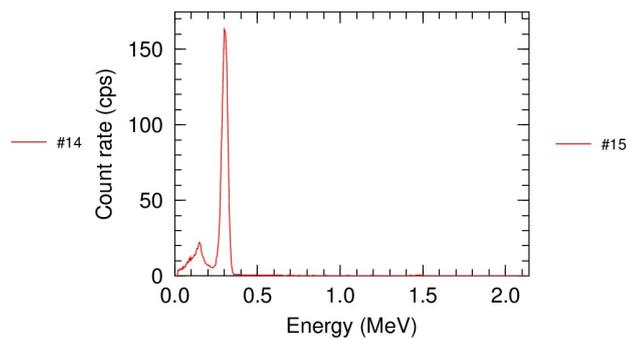


図 4-40 2"Φ×2"円筒形 NaI(Tl)検出器によるパルス波高スペクトル (#10~#15)

#16 : 加速器ビームライン機器周辺

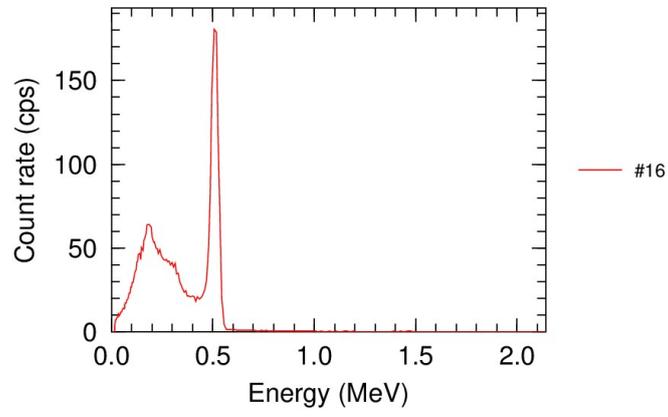


図 4-4 1 2"Φ×2"円筒形 NaI(Tl)検出器によるパルス波高スペクトル (#16)

(b) 福島第一原子力発電所構内の光子スペクトル

#18～#36は、平成30年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～）成果報告書^[34]（以下「水晶体事業成果報告書」という。）に掲載されている福島第一原子力発電所構内の光子スペクトルデータを再解析した。利用したデータは表4-21のとおりである。

表 4-2 1 再解析に利用したデータ一覧（福島第一原子力発電所）

No.	水晶体事業成果報告書 での図番号	測定場所
#18	図 3-12	① 2号機周辺作業場所
#19		⑤ 鉛遮蔽退避場所
#20		⑥ 3号機周辺作業場所
#21	図 3-13	(a) 3号 R/B 北道路南端①
#22		(b) 3号 R/B 北道路南端①
#23		(e) 3号 R/B 北ファントム西③
#24		(f) 3号 R/B 西法面前ホットスポット④
#25		(g) 3号 T/B 東南通路入口⑤
#26		(h) 2号 R/B 西道路東端⑥
#27	図 3-14	(c) 3号 R/B 北ファントム東②
#28		(d) 3号 R/B 北ファントム東②
#29		(i) 3号 R/B 北ファントム東（遮蔽ベストなし）②
#30		(k) 3号 R/B 北仮設階段前（遮蔽ベストなし）⑦
#31		(l) 3号 R/B 北仮設階段西前（遮蔽ベストなし）⑧
#32		(n) 2号 R/B 南道路北端（遮蔽ベストなし）⑨
#33		(p) 2～3号 R/B 北間道路中央⑩
#34	図 3-15	(m) 3号 R/B 北仮設階段西前（遮蔽ベストあり）⑧
#35	図 3-16	(j) 3号 R/B 北ファントム東（遮蔽ベストあり）②
#36	図 3-17	(o) 2号 R/B 南道路北端（遮蔽ベストあり）⑨

(c) 原子力発電所における光子スペクトル

#37として、水晶体事業成果報告書^[34]における原子力発電所における光子スペクトルデータを再解析した。利用したデータは表 4-2 2のとおりであり、定期検査のため停止している原子力発電所の蒸気発生器付近の光子スペクトルである。

表 4-2 2 再解析に利用したデータ一覧 (原子力発電所)

No.	水晶体事業成果報告書での図番号	測定場所
#37	図 2-18-1	原子力発電所 A-1 蒸気発生器マンホール周辺 (マンホール開放時) B ループ 高温側マンホール表面

(2) 結果と考察

#1~#16 について、スペクトル測定により得られた図 4-3 9~図 4-4 1 のパルス波高スペクトルをアンフォールディング処理することにより得られた光子エネルギー分布を図 4-4 2~図 4-4 4 に示した。以下にそれぞれのエネルギー分布の特徴を記載する。

- #1 : ほぼ ^{137}Cs の崩壊に伴う 662 keV の γ 線 (直達線) 単一とみなしてもよい場である。
- #2 : ^{137}Cs の崩壊に伴う 662 keV の γ 線ピーク (直達線) とともに 500 keV 以下にその散乱線がみられる。
- #3 : #2 でみられた直達線のピークは見られず、散乱線のみからなるエネルギー分布を示している。
- #4 : ^{226}Ra の崩壊に伴う複数の γ 線ピーク (直達線) とともに 500 keV 以下にその散乱線もみられる。
- #5 : #4 でみられた直達線のピークは見られず、散乱線のみからなるエネルギー分布を示している。
- #6 : ^{60}Co の崩壊に伴う 1173 keV 及び 1333 keV γ 線ピーク (直達線) とともにその散乱線もみられる。
- #7 : #6 でみられた直達線のピークは見られず、散乱線のみからなるエネルギー分布を示している。
- #8 : 貯蔵されている ^{85}Kr 線源の崩壊に伴う 514 keV 及び ^{137}Cs 線源の崩壊に伴う 662 keV の γ 線ピーク (直達線) とともに、低エネルギー側にその散乱線や制動放射線等を含んだ分布がみられる。
- #9 : β 線源が貯蔵されているため、高エネルギー側までテールを引く制動放射線が主であるが、一部 ^{85}Kr 線源の崩壊に伴う 514 keV の γ 線ピークもみられる。

- #10：貯蔵しているさまざまな線源 (^{137}Cs や核燃料物質など) に由来する γ 線ピークとその散乱線からなる複雑なエネルギー分布となっている。
- #11：貯蔵している核燃料物質由来の γ 線ピーク (子孫核種である ^{214}Bi 、 ^{208}Tl 、 ^{214}Pb 、 ^{212}Pb などを含む) とその散乱線等からなるエネルギー分布を示している。
- #12：鉛遮蔽等を通り抜けてくる ^{137}Cs 由来の γ 線の散乱線からなるエネルギー分布を示している。
- #13：#12 と同様、 ^{60}Co 由来の γ 線の散乱線からなるが、直達線のピークもみられる。
- #14：X 線管から漏洩する X 線のエネルギー分布で、低エネルギー側に広がっている。
- #15：鉛製のシャッターを通して漏洩する X 線のエネルギー分布で、200～300 keV に広がるエネルギー分布を示している。
- #16：消滅光子である 511 keV の直達線が主である。

また、大型加速器施設における光子スペクトル (#17) を再解析して得られた光子エネルギー分布を図 4-4 5 に、水晶体事業成果報告書^[34]から取得した#18 及び#19 の光子エネルギー分布を図 4-4 6 に、#37 の光子エネルギー分布を図 4-4 7 に示した。以下にそれぞれのエネルギー分布の特徴を記載する。

- #17： ^{54}Mn の崩壊に伴う 835 keV、 ^{46}Sc の崩壊に伴う 889 keV 及び 1121 keV、消滅光子である 511 keV のピーク及びその散乱線からなるエネルギー分布を示している。
- #18：水晶体事業成果報告書^[34]に記載のとおり、 $^{134+137}\text{Cs}$ 由来の γ 線ピークもみられるが、散乱線が主である。
- #19：水晶体事業成果報告書^[34]に記載のとおり、#18 に加えて鉛遮蔽に由来する特性 X 線のピークがみられる。
- #37：水晶体事業成果報告書^[34]に記載のとおり、 ^{58}Co 、 ^{60}Co 及び消滅光子である 511 keV のピーク及びその散乱線からなるエネルギー分布を示している。

いずれも、表 4-2 0 に示したような特徴が光子エネルギー分布に表れており、線源が同一でも散乱線の状況によってエネルギー分布は大きく異なることが分かった。

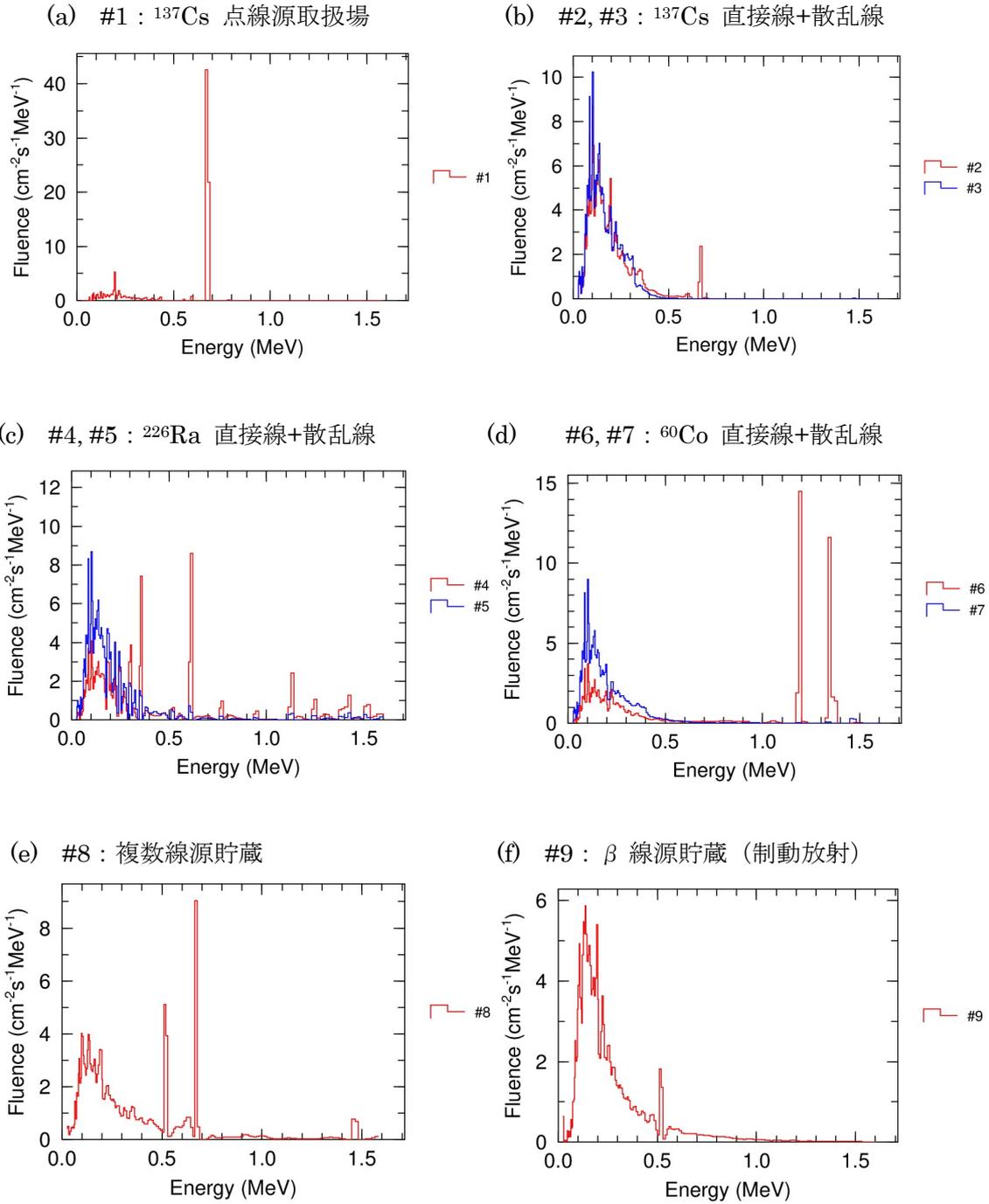
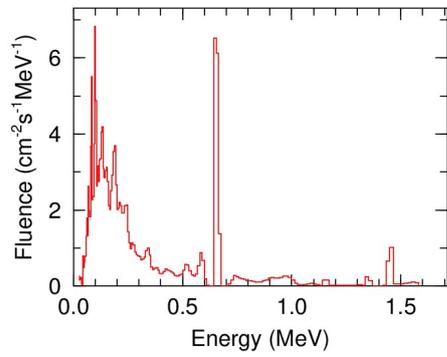
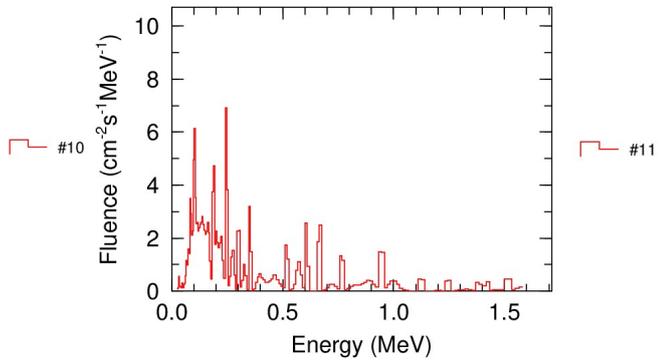


図 4-4 2 光子エネルギー分布 (#1~#9)
(全フルエンスで規格化)

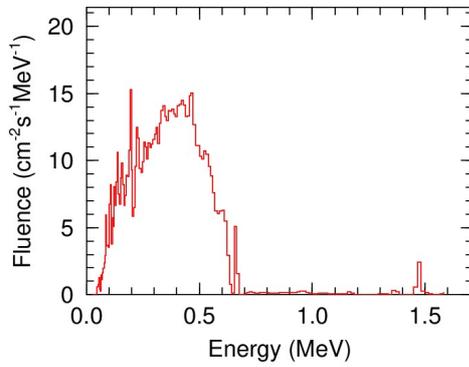
(a) #10 : 線源貯蔵室 (RI・核燃料物質)



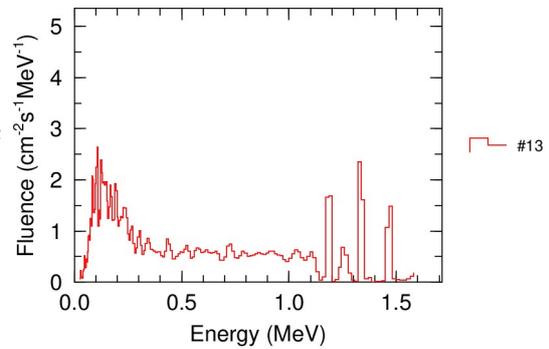
(b) #11 : 核燃料物質保管庫



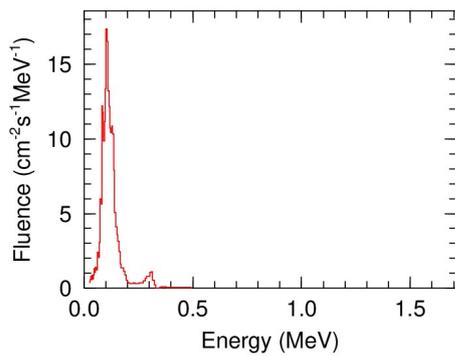
(c) #12 : ¹³⁷Cs 線源保管容器漏洩



(d) #13 : ⁶⁰Co 線源保管容器漏洩



(e) #14 : X線発生装置漏洩



(f) #15 : X線発生装置漏洩シャッター前

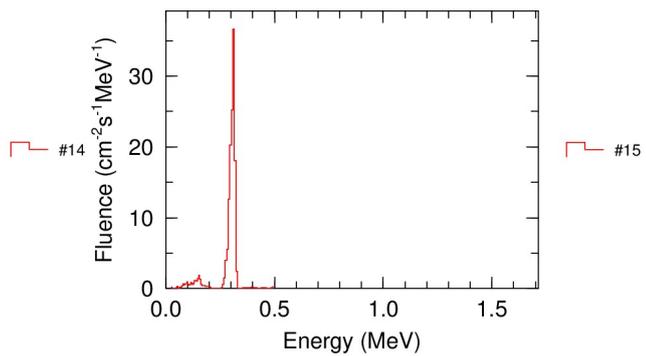


図 4-4 3 光子エネルギー分布 (#10~#15)
(全フルエンスで規格化)

#16 : 加速器ビームライン機器周辺

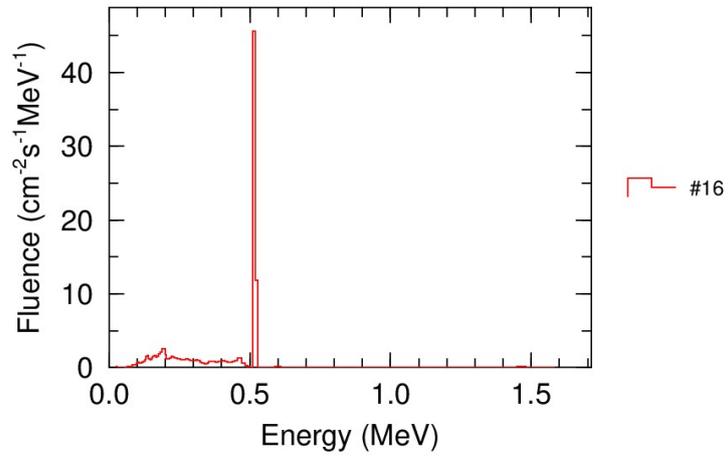


図 4-4 4 光子エネルギー分布 (#16)
(全フルエンスで規格化)

#17 : 大型加速器施設ビームライン付近作業エリア

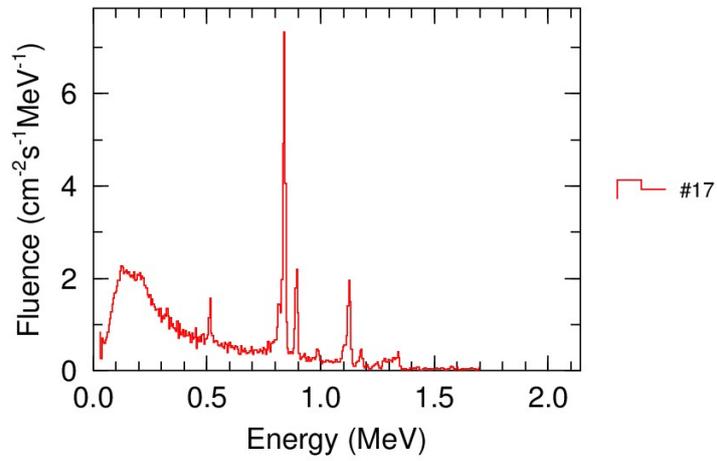
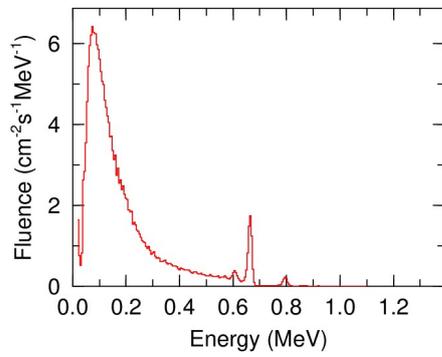


図 4-4 5 光子エネルギー分布 (#17)
(全フルエンスで規格化)

(a) #18 : 2号機周辺作業場所



(b) #19 : 鉛遮蔽退避場所

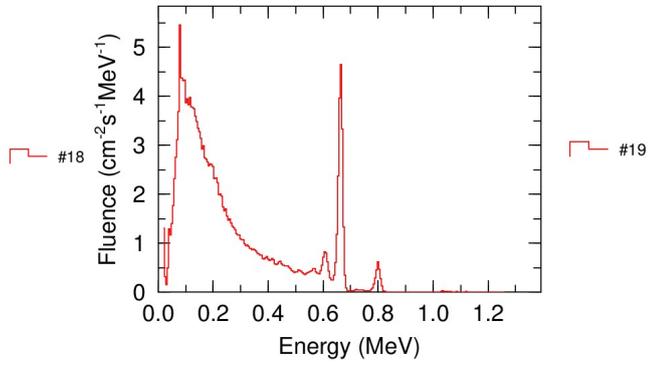


図 4-46 光子エネルギー分布 (福島第一原子力発電所構内)
(全フルエンスで規格化)

#37 : 蒸気発生器 B ループ 高温側マンホール表面

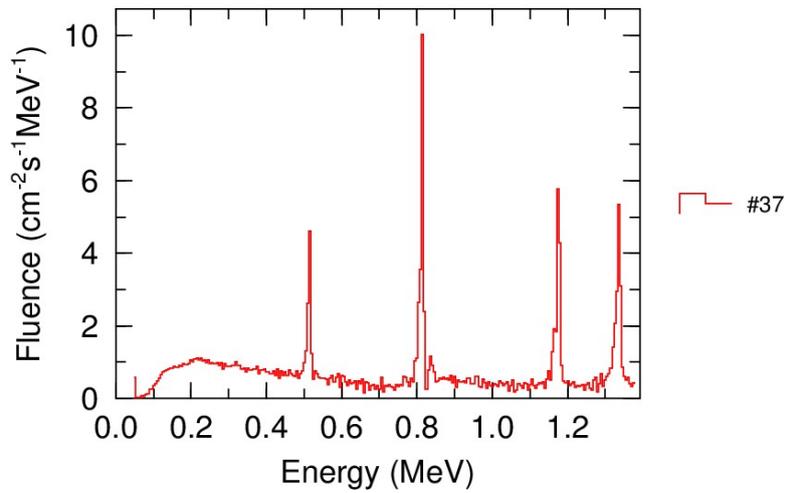


図 4-47 光子エネルギー分布 (原子力発電所)
(全フルエンスで規格化)

4.3.3 放射線作業場における各線量の算出

(1) 方法

取得した光子エネルギー分布から 4.2.1 と同様にして現行及び新たな実用量に対する線量率を求めた。ここでも、新たな実用量に対する換算係数はカーマ近似のものをを用いた。

光子エネルギー分布からは、複雑なスペクトルを持つ核燃料物質、²²⁶Ra 由来のものを除くと、何れも γ 線によるピークエネルギー（直達線）は 500 keV を超える（消滅光子（511 keV）、⁸⁵Kr（514 keV）、¹³⁴Cs（569, 605, 796 keV）、¹³⁷Cs（662 keV）、⁵⁸Co（811 keV）、⁵⁴Mn（835 keV）、⁴⁶Sc（889, 1121 keV）、⁶⁰Co（1173, 1333 keV））ので、500 keV 以下の成分を散乱線等の特徴を示すものとして、その H^* 平均エネルギーを算出した。

防護量との比較においては、各光子エネルギー分布をもつ拡張・整列場（AP ジオメトリ）を仮定した場合の防護量を評価した。ただし、福島第一原子力発電所の放射線場に関する#18～36 については、実効線量の評価に関して ISO ジオメトリを仮定した評価も行った。使用した換算係数は実効線量については、ICRP Publ.116^[4] Table A.1、眼の水晶体の吸収線量については、ICRP Publ.116^[4] Table F.1、皮膚の吸収線量については、ICRP Publ.116^[4] Table B.12 及び Table B.26 に示された両性の換算係数の平均換算係数を使用した。

(2) 結果と考察

①点線源取扱場（#1, #2, #4, #6）と②コンクリートによる散乱線がメインとなる作業場（#3, #5, #7）での線量の評価結果及び平均エネルギーをを表 4-23～表 4-24 に示す。比較のため、S-Cs（コリメート付き）、N-100 及び N-80 の校正場に相当する光子エネルギー分布に対する評価結果も同時に示した。表 4-25 には、現行の実用量と新たな実用量を比較した結果を、表 4-26 には、防護量との比較を示した。

#1 は線源を約 1 m の距離で取り扱うケースであり、直達線の割合が大きい。#1 から #2、#3 へと散乱線の割合が増えるにしたがって、平均エネルギーは低下していき、#3 ではほぼ散乱線のみとなっている。これは、²²⁶Ra や ⁶⁰Co についても同様である。原子力施設でよく見られるこれらの線源については、いずれも実効線量の管理に用いる実用量に関して、現行実用量 ($H(10)$ や H^*) に比べて新たな実用量 (H^* 及び H_p) は 0.78～0.87 程度となっている（表 4-25 参照）。これは、光子における校正点である S-Cs、N-80、及び N-100 と同程度であるため、線量計のエネルギー応答特性が現行実用量に沿ったものであるのならば（規格等で示される性能要件に合致するものであれば）、適切に校正されれば新たな実用量でも問題なく使用できるといえる。ただし、評価する線量自体は定義変更により小さくなるため、例えばこれまで $10 \mu\text{Sv/h}$ の 1 cm 線量当

量率であった場所の線量率は新たな実用量に基づいて測定した場合には、 $8 \mu\text{Sv/h}$ 程度と評価されることになる。一方で、水晶体及び皮膚の吸収線量評価に用いる実用量については、実際の作業場においても現・新実用量間でほとんど差異はない。防護量との比較においては、その定義からも新たな実用量はそのよい推定値を与えている。 H_p を測定することにより水晶体や皮膚の吸収線量を評価するような場合でも、20%程度の違いで推定することができる。

同様に③線源貯蔵室 (#8～#11)、④漏洩線量場 (#12～#15)、⑤加速器施設の場 (#16～#17) での線量評価結果を表 4-27～表 4-30に、⑥及び⑦福島第一原子力発電所 (#18～#36) での線量評価結果を表 4-31～表 4-38に、⑧原子力発電所 (#37) に対する線量評価結果を表 4-39～表 4-42に示した。スペクトル形状も分布も異なり、平均エネルギーも $0.15 \text{ MeV} \sim 1.03 \text{ MeV}$ と広範囲にわたっているが、評価した線量については、#1～#7 と同様のことがいえる。防護量との比較においては、ISO を仮定した場合は新たな実用量は保守的（過大）な評価となっている。

(3) 結論

原子力施設において、散乱線の影響等により特徴の異なる実際の放射線作業場を選定し、光子エネルギー分布を取得した。取得した光子エネルギー分布から線量を算出する本手法により、実際の放射線作業場における実用量の定義変更による影響を直接的に評価できることを明らかにした。今回調査した範囲では、 H^* 平均エネルギーは 0.15 MeV から 1.09 MeV と広範囲にわたり、その形状も異なっているものの、現行実用量と新たな実用量の差異は校正点である S-Cs、N-100 や N-80 と同等であった。今後も、法令で測定が義務付けられている箇所を中心に対象場所を拡大し、本調査の手法を適用して実用量の定義変更の影響を調査していくことが望まれる。

表 4-23 ①点線源取扱場及び②散乱線がメインの作業場における場所のモニタリングにかかる実用量

No.	場所	平均エネルギー			場所のモニタリングにかかる実用量				
		$\overline{E_{H^*}}$ (MeV)	$\overline{E_{H^*(<0.5\text{MeV})}}$ (MeV)	$H^*(10)/K_a$ (Sv/Gy)	H^*/K_a (Sv/Gy)	$H'(3)/K_a$ (Sv/Gy)	D'_{lens}/K_a (Gy/Gy)	$H'(0.07)/K_a$ (Sv/Gy)	$D'_{\text{local skin}}/K_a$ (Gy/Gy)
-	S-Cs 校正場 ^{※1,2}	0.64	0.31	1.20	1.02	1.18	1.17	1.20	1.21
-	N-100 X 線校正場 ^{※1}	0.084	—	1.71	1.43	1.66	1.56	1.60	1.74
-	N-80 X 線校正場 ^{※1}	0.066	—	1.74	1.36	1.68	1.57	1.48	1.77
#1	¹³⁷ Cs 点線源から 1m	0.63	0.22	1.21	1.03	1.20	1.18	1.21	1.23
#2	¹³⁷ Cs 直接線+散乱線(迷路入口)	0.30	0.22	1.37	1.14	1.35	1.30	1.34	1.40
#3	¹³⁷ Cs 散乱線のみ(迷路中央)	0.23	0.21	1.42	1.18	1.40	1.34	1.38	1.45
#4	²²⁶ Ra 直接線+散乱線(迷路入口)	0.87	0.27	1.22	1.04	1.21	1.18	1.22	1.23
#5	²²⁶ Ra 散乱線のみ(迷路)	0.57	0.22	1.31	1.10	1.30	1.25	1.29	1.33
#6	⁶⁰ Co 直接線+散乱線(迷路入口)	1.09	0.25	1.19	1.02	1.18	1.15	1.18	1.19
#7	⁶⁰ Co 散乱線のみ(迷路)	0.38	0.24	1.35	1.13	1.34	1.28	1.33	1.37

※1 比較のため ※2 コリメート付き校正場 (表 4-3 参照)

表 4-2 4 ①点線源取扱場及び②散乱線がメインの作業場における個人モニタリングにかかる実用量

No.	場所	個人モニタリングにかかる実用量					
		$H_p(10,0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(3,0^\circ)_{cyl}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{plens}(0^\circ)/K_a$ (Gy/Gy)	$H_p(0.07,0^\circ)_{slab}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{p local skin}(0^\circ)_{slab}/K_a$ (Gy/Gy)
-	S-Cs 校正場 ^{※1,2}	1.21	1.02	1.18	1.17	1.20	1.21
-	N-100 X 線校正場 ^{※1}	1.88	1.43	1.63	1.56	1.72	1.74
-	N-80 X 線校正場 ^{※1}	1.89	1.36	1.66	1.57	1.72	1.77
#1	¹³⁷ Cs 点線源から 1m	1.23	1.03	1.19	1.18	1.21	1.23
#2	¹³⁷ Cs 直接線+散乱線(迷路入口)	1.45	1.14	1.34	1.30	1.40	1.40
#3	¹³⁷ Cs 散乱線のみ(迷路中央)	1.51	1.18	1.39	1.34	1.45	1.45
#4	²²⁶ Ra 直接線+散乱線(迷路入口)	1.24	1.04	1.20	1.18	1.23	1.23
#5	²²⁶ Ra 散乱線のみ(迷路)	1.36	1.10	1.28	1.25	1.33	1.33
#6	⁶⁰ Co 直接線+散乱線(迷路入口)	1.19	1.02	1.16	1.15	1.20	1.19
#7	⁶⁰ Co 散乱線のみ(迷路)	1.42	1.13	1.32	1.28	1.37	1.37

※1 比較のため ※2 コリメート付き校正場 (表 4-4 参照)

表 4-25 ①点線源取扱場及び②散乱線がメインの作業場における新・現実用量の比較

No.	場所	新・現実用量の比較					
		$H^*/H^*(10)$ (Sv/Sv)	$D'_{lens}/H^*(3)$ (Gy/Sv)	$D'_{local\ skin}/H^*(0.07)$ (Gy/Sv)	$H_p/H_p(10)$ (Sv/Sv)	$D_{plens}/H_p(3)$ (Gy/Sv)	$D_{p\ local\ skin}/H_p(0.07)$ (Gy/Sv)
-	S-Cs 校正場 ^{※1,2}	0.84	0.99	1.01	0.84	0.99	1.00
-	N-100 X 線校正場 ^{※1}	0.84	0.94	1.09	0.76	0.96	1.01
-	N-80 X 線校正場 ^{※1}	0.78	0.93	1.20	0.72	0.95	1.03
#1	¹³⁷ Cs 点線源から 1m	0.85	0.98	1.02	0.83	0.99	1.02
#2	¹³⁷ Cs 直接線+散乱線(迷路入口)	0.83	0.96	1.04	0.79	0.97	1.00
#3	¹³⁷ Cs 散乱線のみ(迷路中央)	0.83	0.96	1.05	0.78	0.97	1.00
#4	²²⁶ Ra 直接線+散乱線(迷路入口)	0.85	0.98	1.01	0.84	0.98	1.00
#5	²²⁶ Ra 散乱線のみ(迷路)	0.84	0.96	1.03	0.81	0.97	1.00
#6	⁶⁰ Co 直接線+散乱線(迷路入口)	0.86	0.97	1.00	0.85	0.99	1.00
#7	⁶⁰ Co 散乱線のみ(迷路)	0.84	0.96	1.04	0.80	0.97	1.00

※1 比較のため ※2 コリメート付き校正場

表 4-26 ①点線源取扱場及び②散乱線がメインの作業場における実用量と防護量の比較

No.	場所	防護量との比較					
		$H^*/E(AP)$ (Sv/Sv)	$H_p/E(AP)$ (Sv/Sv)	$H_p/H_{lens}(AP)$ (Sv/Gy)	$H_p/H_{skin}(AP)$ (Sv/Gy)	$D_{plens}/H_{lens}(AP)$ (Gy/Gy)	$D_{plocal\ skin}/H_{skin}(AP)$ (Gy/Gy)
-	S-Cs 校正場 ^{※1,2}	1.00	1.00	0.87	1.10	1.00	1.31
#1	¹³⁷ Cs 点線源から 1m	1.00	1.00	0.87	1.10	1.00	1.31
#2	¹³⁷ Cs 直接線+散乱線(迷路入口)	1.00	1.00	0.88	1.11	1.00	1.36
#3	¹³⁷ Cs 散乱線のみ(迷路中央)	1.00	1.00	0.88	1.12	1.00	1.38
#4	²²⁶ Ra 直接線+散乱線(迷路入口)	1.00	1.00	0.90	1.18	1.03	1.40
#5	²²⁶ Ra 散乱線のみ(迷路)	1.00	1.00	0.90	1.16	1.02	1.39
#6	⁶⁰ Co 直接線+散乱線(迷路入口)	1.00	1.00	0.92	1.23	1.03	1.44
#7	⁶⁰ Co 散乱線のみ(迷路)	1.00	1.00	0.89	1.13	1.01	1.37

※1 比較のため ※2 コリメート付き校正場

表 4-27 ③複数線源場、④漏洩線量場及び⑤加速器施設の作業場における場所のモニタリングにかかる実用量

No.	場所	平均エネルギー		場所のモニタリングにかかる実用量					
		\overline{E}_{H^*} (MeV)	$\overline{E}_{H^*(<0.5\text{MeV})}$ (MeV)	$H^*(10)/K_a$ (Sv/Gy)	H^*/K_a (Sv/Gy)	$H'(3)/K_a$ (Sv/Gy)	D'_{lens}/K_a (Gy/Gy)	$H'(0.07)/K_a$ (Sv/Gy)	$D'_{\text{local skin}}/K_a$ (Gy/Gy)
#8	複数線源貯蔵(γ線源)	0.62	0.27	1.26	1.06	1.24	1.21	1.25	1.27
#9	β線源による制動放射(貯蔵)	0.42	0.26	1.31	1.10	1.30	1.25	1.29	1.33
#10	線源貯蔵室中央(RI・核燃料物質)	0.66	0.24	1.26	1.06	1.24	1.21	1.25	1.27
#11	核燃料物質保管庫	0.72	0.26	1.24	1.05	1.22	1.19	1.23	1.25
#12	¹³⁷ Cs 線源保管容器漏洩(貯蔵・輸送)	0.47	0.35	1.26	1.06	1.25	1.22	1.26	1.28
#13	⁶⁰ Co 線源装備機器漏洩(貯蔵・輸送)	0.92	0.29	1.20	1.02	1.19	1.16	1.20	1.21
#14	X線発生装置漏洩	0.15	—	1.53	1.28	1.50	1.42	1.46	1.56
#15	X線発生装置漏洩シャッター前	0.30	—	1.32	1.10	1.31	1.26	1.31	1.34
#16	加速器施設ビームライン機器周辺	0.49	0.31	1.25	1.05	1.24	1.21	1.25	1.26
#17	大型加速器施設ビームライン付近作業エリア(ビーム停止中)	0.63	0.29	1.24	1.04	1.22	1.19	1.23	1.25

表 4-28 ③複数線源場、④漏洩線量場及び⑤加速器施設の作業場における個人モニタリングにかかる実用量

No.	場所	個人モニタリングにかかる実用量					
		$H_p(10,0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(3,0^\circ)_{cyl}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{plens}(0^\circ)/K_a$ (Gy/Gy)	$H_p(0.07,0^\circ)_{slab}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{p local skin}(0^\circ)_{slab}/K_a$ (Gy/Gy)
#8	複数線源貯蔵(γ線源)	1.29	1.06	1.23	1.21	1.27	1.27
#9	β線源による制動放射(貯蔵)	1.37	1.10	1.29	1.25	1.33	1.33
#10	線源貯蔵室中央(RI・核燃料物質)	1.29	1.06	1.23	1.21	1.27	1.27
#11	核燃料物質保管庫	1.26	1.05	1.22	1.19	1.25	1.25
#12	¹³⁷ Cs 線源保管容器漏洩(貯蔵・輸送)	1.30	1.06	1.24	1.22	1.28	1.28
#13	⁶⁰ Co 線源装備機器漏洩(貯蔵・輸送)	1.21	1.02	1.18	1.16	1.21	1.21
#14	X線発生装置漏洩	1.66	1.28	1.48	1.42	1.56	1.56
#15	X線発生装置漏洩シャッター前	1.38	1.10	1.29	1.26	1.34	1.34
#16	加速器施設ビームライン機器周辺	1.28	1.05	1.23	1.21	1.26	1.26
#17	大型加速器施設ビームライン付近作業エリア(ビーム停止中)	1.26	1.04	1.22	1.19	1.25	1.25

表 4-29 ③複数線源場、④漏洩線量場及び⑤加速器施設の作業場における新・現実用量の比較

No.	場所	新・現実用量の比較					
		$H^*/H'(10)$ (Sv/Sv)	$D'_{lens}/H'(3)$ (Gy/Sv)	$D'_{local\ skin}/H'(0.07)$ (Gy/Sv)	$H_p/H_p(10)$ (Sv/Sv)	$D_{plens}/H_p(3)$ (Gy/Sv)	$D_{p\ local\ skin}/H_p(0.07)$ (Gy/Sv)
#8	複数線源貯蔵(γ線源)	0.84	0.97	1.02	0.82	0.98	1.00
#9	β線源による制動放射(貯蔵)	0.84	0.97	1.03	0.81	0.97	1.00
#10	線源貯蔵室中央(RI・核燃料物質)	0.84	0.97	1.02	0.82	0.98	1.00
#11	核燃料物質保管庫	0.85	0.97	1.01	0.83	0.98	1.00
#12	¹³⁷ Cs線源保管容器漏洩(貯蔵・輸送)	0.84	0.97	1.02	0.82	0.98	1.00
#13	⁶⁰ Co線源装備機器漏洩(貯蔵・輸送)	0.85	0.98	1.01	0.85	0.98	1.00
#14	X線発生装置漏洩	0.83	0.95	1.07	0.77	0.96	1.01
#15	X線発生装置漏洩シャッター前	0.83	0.97	1.02	0.80	0.98	1.00
#16	加速器施設ビームライン機器周辺	0.84	0.97	1.01	0.82	0.98	1.00
#17	大型加速器施設ビームライン付近作業エリア(ビーム停止中)	0.84	0.98	1.01	0.83	0.98	1.01

表 4-30 ③複数線源場、④漏洩線量場及び⑤加速器施設の作業場における実用量と防護量の比較

No.	場所	防護量との比較					
		$H^*/E(AP)$ (Sv/Sv)	$H_p/E(AP)$ (Sv/Sv)	$H_p/H_{lens}(AP)$ (Sv/Gy)	$H_p/H_{skin}(AP)$ (Sv/Gy)	$D_{plens}/H_{lens}(AP)$ (Gy/Gy)	$D_{plocal skin}/H_{skin}(AP)$ (Gy/Gy)
#8	複数線源貯蔵(γ線源)	1.00	1.00	0.89	1.13	1.01	1.35
#9	β線源による制動放射(貯蔵)	1.00	1.00	0.88	1.11	1.00	1.35
#10	線源貯蔵室中央(RI・核燃料物質)	1.00	1.00	0.89	1.14	1.01	1.36
#11	核燃料物質保管庫	1.00	1.00	0.89	1.15	1.01	1.37
#12	¹³⁷ Cs線源保管容器漏洩(貯蔵・輸送)	1.00	1.00	0.88	1.09	1.00	1.31
#13	⁶⁰ Co線源装備機器漏洩(貯蔵・輸送)	1.00	1.00	0.90	1.19	1.02	1.40
#14	X線発生装置漏洩	1.00	1.00	0.90	1.17	1.00	1.43
#15	X線発生装置漏洩シャッター前	1.00	1.00	0.87	1.08	1.00	1.31
#16	加速器施設ビームライン機器周辺	1.00	1.00	0.88	1.09	1.00	1.30
#17	大型加速器施設ビームライン付近作業エリア(ビーム停止中)	1.00	1.00	0.88	0.88	1.00	1.05

表 4-3 1 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における場所のモニタリングにかかる実用量 (1)

No.	場所	平均エネルギー		場所のモニタリングにかかる実用量					
		\overline{E}_{H^*} (MeV)	$\overline{E}_{H^*(<0.5\text{MeV})}$ (MeV)	$H^*(10)/K_a$ (Sv/Gy)	H^*/K_a (Sv/Gy)	$H'(3)/K_a$ (Sv/Gy)	D'_{lens}/K_a (Gy/Gy)	$H'(0.07)/K_a$ (Sv/Gy)	$D'_{\text{local skin}}/K_a$ (Gy/Gy)
#18	① 2号機周辺作業場所	0.32	0.21	1.37	1.13	1.35	1.30	1.34	1.39
#19	⑤鉛遮蔽退避場所	0.41	0.25	1.31	1.09	1.29	1.25	1.29	1.33
#20	⑥ 3号機周辺作業場所	0.43	0.24	1.30	1.09	1.29	1.25	1.29	1.32

表 4-3 2 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における個人モニタリングにかかる実用量 (1)

No.	場所	個人モニタリングにかかる実用量					
		$H_p(10,0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(3,0^\circ)_{\text{cyl}}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{\text{p lens}}(0^\circ)/K_a$ (Gy/Gy)	$H_p(0.07,0^\circ)_{\text{slab}}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{\text{p local skin}}(0^\circ)_{\text{slab}}/K_a$ (Gy/Gy)
#18	① 2号機周辺作業場所	1.44	1.13	1.34	1.30	1.39	1.39
#19	⑤鉛遮蔽退避場所	1.36	1.09	1.28	1.25	1.33	1.33
#20	⑥ 3号機周辺作業場所	1.35	1.09	1.28	1.25	1.32	1.32

表 4-3 3 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における新・現実用量の比較 (1)

No.	場所	新・現実用量の比較					
		$H^*/H'(10)$ (Sv/Sv)	$D'_{lens}/H'(3)$ (Gy/Sv)	$D'_{local\ skin}/H'(0.07)$ (Gy/Sv)	$H_p/H_p(10)$ (Sv/Sv)	$D_{plens}/H_p(3)$ (Gy/Sv)	$D_{p\ local\ skin}/H_p(0.07)$ (Gy/Sv)
#18	① 2号機周辺作業場所	0.82	0.96	1.04	0.78	0.97	1.00
#19	⑤鉛遮蔽退避場所	0.83	0.97	1.03	0.80	0.98	1.00
#20	⑥ 3号機周辺作業場所	0.84	0.97	1.03	0.81	0.98	1.00

表 4-3 4 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における実用量と防護量の比較 (1)

No.	場所	防護量との比較						
		$H^*/E(AP)$ (Sv/Sv)	$H^*/E(ISO)$ (Sv/Sv)	$H_p/E(AP)$ (Sv/Sv)	$H_p/H_{lens}(AP)$ (Sv/Gy)	$H_p/H_{skin}(AP)$ (Sv/Gy)	$D_{plens}/H_{lens}(AP)$ (Gy/Gy)	$D_{p\ local\ skin}/H_{skin}(AP)$ (Gy/Gy)
#18	① 2号機周辺作業場所	1.00	1.65	1.00	0.87	0.81	1.00	1.37
#19	⑤鉛遮蔽退避場所	1.00	1.58	1.00	0.87	0.82	1.00	1.34
#20	⑥ 3号機周辺作業場所	1.00	1.57	1.00	0.87	0.82	1.00	1.34

表 4-35 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における場所のモニタリングにかかる実用量（2）

No.	場所	平均エネルギー		場所のモニタリングにかかる実用量					
		\overline{E}_{H^*} (MeV)	$\overline{E}_{H^*(<0.5\text{MeV})}$ (MeV)	$H^*(10)/K_a$ (Sv/Gy)	H^*/K_a (Sv/Gy)	$H'(3)/K_a$ (Sv/Gy)	D'_{lens}/K_a (Gy/Gy)	$H'(0.07)/K_a$ (Sv/Gy)	$D'_{\text{local skin}}/K_a$ (Gy/Gy)
#21	(a) 3号 R/B 北道路南端①	0.41	0.23	1.31	1.10	1.30	1.26	1.29	1.34
#22	(b) 3号 R/B 北道路南端①	0.40	0.23	1.31	1.10	1.30	1.26	1.30	1.34
#23	(e) 3号 R/B 北ファントム西③	0.42	0.24	1.30	1.09	1.29	1.25	1.29	1.32
#24	(f) 3号 R/B 西法面前ホットスポット④	0.49	0.30	1.26	1.06	1.25	1.22	1.26	1.28
#25	(g) 3号 T/B 東南通路入口⑤	0.29	0.20	1.38	1.14	1.37	1.31	1.35	1.41
#26	(h) 2号 R/B 西道路東端⑥	0.31	0.22	1.37	1.13	1.35	1.30	1.34	1.39
#27	(c) 3号 R/B 北ファントム東②	0.40	0.24	1.31	1.10	1.30	1.26	1.29	1.33
#28	(d) 3号 R/B 北ファントム東②	0.41	0.24	1.31	1.10	1.29	1.25	1.29	1.33
#29	(i) 3号 R/B 北ファントム東 (遮蔽ベストなし) ②	0.40	0.24	1.31	1.10	1.30	1.26	1.30	1.34
#30	(k) 3号 R/B 北仮設階段前 (遮蔽ベストなし) ⑦	0.47	0.27	1.28	1.07	1.26	1.23	1.27	1.30
#31	(l) 3号 R/B 北仮設階段西前 (遮蔽ベストなし) ⑧	0.48	0.27	1.28	1.07	1.36	1.23	1.26	1.29
#32	(n) 2号 R/B 南道路北端 (遮蔽ベストなし) ⑨	0.39	0.23	1.32	1.10	1.31	1.26	1.30	1.34
#33	(p) 2～3号 R/B 北間道路中央⑩	0.39	0.24	1.32	1.10	1.30	1.26	1.30	1.34
#34	(m) 3号 R/B 北仮設階段西前 (遮蔽ベストあり) ⑧	0.49	0.29	1.27	1.06	1.25	1.22	1.26	1.28
#35	(j) 3号 R/B 北ファントム東 (遮蔽ベストあり) ②	0.43	0.26	1.29	1.08	1.28	1.24	1.28	1.31
#36	(o) 2号 R/B 南道路北端 (遮蔽ベストあり) ⑨	0.41	0.25	1.30	1.08	1.28	1.25	1.29	1.32

表 4-3 6 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における個人モニタリングにかかる実用量 (2)

No.	場所	個人モニタリングにかかる実用量					
		$H_p(10,0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	$H_p(3,0^\circ)_{cyl}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{plens}(0^\circ)/K_a$ (Gy/Gy)	$H_p(0.07,0^\circ)_{slab}/K_a$ (Sv/Gy)	$D_{p local skin}(0^\circ)_{slab}/K_a$ (Gy/Gy)
#21	(a) 3号 R/B 北道路南端①	1.37	1.10	1.29	1.26	1.33	1.34
#22	(b) 3号 R/B 北道路南端①	1.37	1.10	1.29	1.26	1.33	1.34
#23	(e) 3号 R/B 北ファントム西③	1.35	1.09	1.28	1.25	1.32	1.32
#24	(f) 3号 R/B 西法面前ホットスポット④	1.30	1.06	1.24	1.22	1.28	1.28
#25	(g) 3号 T/B 東南通路入口⑤	1.46	1.14	1.35	1.31	1.41	1.41
#26	(h) 2号 R/B 西道路東端⑥	1.44	1.13	1.34	1.30	1.39	1.39
#27	(c) 3号 R/B 北ファントム東②	1.37	1.10	1.29	1.26	1.33	1.33
#28	(d) 3号 R/B 北ファントム東②	1.36	1.10	1.29	1.25	1.33	1.33
#29	(i) 3号 R/B 北ファントム東 (遮蔽ベストなし) ②	1.37	1.10	1.29	1.26	1.33	1.34
#30	(k) 3号 R/B 北仮設階段前 (遮蔽ベストなし) ⑦	1.32	1.07	1.26	1.23	1.29	1.30
#31	(l) 3号 R/B 北仮設階段西前 (遮蔽ベストなし) ⑧	1.32	1.07	1.25	1.23	1.29	1.29
#32	(n) 2号 R/B 南道路北端 (遮蔽ベストなし) ⑨	1.38	1.10	1.30	1.26	1.34	1.34
#33	(p) 2～3号 R/B 北間道路中央⑩	1.38	1.10	1.29	1.26	1.34	1.34
#34	(m) 3号 R/B 北仮設階段西前 (遮蔽ベストあり) ⑧	1.30	1.06	1.24	1.22	1.28	1.28
#35	(j) 3号 R/B 北ファントム東 (遮蔽ベストあり) ②	1.34	1.08	1.27	1.24	1.31	1.31
#36	(o) 2号 R/B 南道路北端 (遮蔽ベストあり) ⑨	1.35	1.08	1.28	1.25	1.32	1.32

表 4-37 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における新・現実用量の比較 (2)

No.	場所	新・現実用量の比較					
		$H^*/H^*(10)$ (Sv/Sv)	$D'_{lens}/H^*(3)$ (Gy/Sv)	$D'_{local\ skin}/H^*(0.07)$ (Gy/Sv)	$H_p/H_p(10)$ (Sv/Sv)	$D_{plens}/H_p(3)$ (Gy/Sv)	$D_{p\ local\ skin}/H_p(0.07)$ (Gy/Sv)
#21	(a) 3号 R/B 北道路南端①	0.83	0.97	1.03	0.80	0.97	1.00
#22	(b) 3号 R/B 北道路南端①	0.83	0.97	1.03	0.80	0.97	1.00
#23	(e) 3号 R/B 北ファントム西③	0.84	0.97	1.03	0.81	0.98	1.00
#24	(f) 3号 R/B 西法面前ホットスポット④	0.84	0.97	1.02	0.82	0.98	1.00
#25	(g) 3号 T/B 東南通路入口⑤	0.83	0.96	1.05	0.78	0.97	1.00
#26	(h) 2号 R/B 西道路東端⑥	0.83	0.96	1.04	0.79	0.97	1.00
#27	(c) 3号 R/B 北ファントム東②	0.84	0.97	1.03	0.80	0.97	1.00
#28	(d) 3号 R/B 北ファントム東②	0.84	0.97	1.03	0.80	0.97	1.00
#29	(i) 3号 R/B 北ファントム東 (遮蔽ベストなし) ②	0.84	0.97	1.03	0.80	0.97	1.00
#30	(k) 3号 R/B 北仮設階段前 (遮蔽ベストなし) ⑦	0.84	0.97	1.02	0.81	0.98	1.00
#31	(l) 3号 R/B 北仮設階段西前 (遮蔽ベストなし) ⑧	0.84	0.97	1.02	0.81	0.98	1.00
#32	(n) 2号 R/B 南道路北端 (遮蔽ベストなし) ⑨	0.83	0.97	1.03	0.80	0.97	1.00
#33	(p) 2～3号 R/B 北間道路中央⑩	0.83	0.97	1.03	0.80	0.97	1.00
#34	(m) 3号 R/B 北仮設階段西前 (遮蔽ベストあり) ⑧	0.84	0.97	1.02	0.81	0.98	1.00
#35	(j) 3号 R/B 北ファントム東 (遮蔽ベストあり) ②	0.83	0.97	1.03	0.80	0.98	1.00
#36	(o) 2号 R/B 南道路北端 (遮蔽ベストあり) ⑨	0.83	0.97	1.03	0.80	0.98	1.00

表 4-38 ⑥線源が広範囲に分布した場、⑦鉛遮蔽が施された作業場における実用量と防護量の比較（2）

No.	場所	防護量との比較						
		$H^*/E(AP)$ (Sv/Sv)	$H^*/E(ISO)$ (Sv/Sv)	$H_p/E(AP)$ (Sv/Sv)	$H_p/H_{lens}(AP)$ (Sv/Gy)	$H_p/H_{skin}(AP)$ (Sv/Gy)	$D_{p,lens}/H_{lens}(AP)$ (Gy/Gy)	$D_{p,local\ skin}/H_{skin}(AP)$ (Gy/Gy)
#21	(a) 3号 R/B 北道路南端①	1.00	1.59	1.00	0.87	0.82	1.00	1.35
#22	(b) 3号 R/B 北道路南端①	1.00	1.59	1.00	0.87	0.82	1.00	1.35
#23	(e) 3号 R/B 北ファントム西③	1.00	1.58	1.00	0.87	0.82	1.00	1.34
#24	(f) 3号 R/B 西法面前ホットスポット④	1.00	1.54	1.00	0.87	0.83	1.00	1.32
#25	(g) 3号 T/B 東南通路入口⑤	1.00	1.66	1.00	0.87	0.81	1.00	1.38
#26	(h) 2号 R/B 西道路東端⑥	1.00	1.64	1.00	0.87	0.81	1.00	1.37
#27	(c) 3号 R/B 北ファントム東②	1.00	1.59	1.00	0.87	0.82	1.00	1.34
#28	(d) 3号 R/B 北ファントム東②	1.00	1.58	1.00	0.88	0.82	1.00	1.34
#29	(i) 3号 R/B 北ファントム東 (遮蔽ベストなし) ②	1.00	1.59	1.00	0.88	0.82	1.00	1.35
#30	(k) 3号 R/B 北仮設階段前 (遮蔽ベストなし) ⑦	1.00	1.55	1.00	0.87	0.83	1.00	1.33
#31	(l) 3号 R/B 北仮設階段西前 (遮蔽ベストなし) ⑧	1.00	1.55	1.00	0.87	0.83	1.00	1.33
#32	(n) 2号 R/B 南道路北端 (遮蔽ベストなし) ⑨	1.00	1.60	1.00	0.88	0.82	1.00	1.35
#33	(p) 2～3号 R/B 北間道路中央⑩	1.00	1.59	1.00	0.87	0.82	1.00	1.35
#34	(m) 3号 R/B 北仮設階段西前 (遮蔽ベストあり) ⑧	1.00	1.54	1.00	0.87	0.83	1.00	1.32
#35	(j) 3号 R/B 北ファントム東 (遮蔽ベストあり) ②	1.00	1.57	1.00	0.87	0.82	1.00	1.34
#36	(o) 2号 R/B 南道路北端 (遮蔽ベストあり) ⑨	1.00	1.58	1.00	0.87	0.82	1.00	1.34

表 4-3 9 ⑧原子力発電所の作業場における場所のモニタリングにかかる実用量

No.	場所	平均エネルギー		場所のモニタリングにかかる実用量					
		\overline{E}_{H^*}	$\overline{E}_{H^*(<0.5\text{MeV})}$	$H^*(10)/K_a$	H^*/K_a	$H'(3)/K_a$	D'_{lens}/K_a	$H'(0.07)/K_a$	$D'_{\text{local skin}}/K_a$
		(MeV)	(MeV)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)
#37	原子力発電所 A-1 蒸気発生器 B ループ 高温側マンホール表面	1.03	0.33	1.19	1.01	1.17	1.15	1.19	1.19

表 4-4 0 ⑧原子力発電所の作業場における個人モニタリングにかかる実用量

No.	場所	個人モニタリングにかかる実用量					
		$H_p(10,0^\circ)/K_a$	$H_p(0^\circ)/K_a$	$H_p(3,0^\circ)_{\text{cyl}}/K_a$	$D_{\text{p lens}}(0^\circ)/K_a$	$H_p(0.07,0^\circ)_{\text{slab}}/K_a$	$D_{\text{p local skin}}(0^\circ)_{\text{slab}}/K_a$
		(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)	(Sv/Gy)	(Gy/Gy)
#37	原子力発電所 A-1 蒸気発生器 B ループ 高温側マンホール表面	1.19	1.01	1.16	1.15	1.19	1.19

表 4-4 1 ⑧原子力発電所の作業場における新・現実用量の比較

No.	場所	新・現実用量の比較					
		$H^*/H^*(10)$	$D'_{\text{lens}}/H'(3)$	$D'_{\text{local skin}}/H'(0.07)$	$H_p/H_p(10)$	$D_{\text{p lens}}/H_p(3)$	$D_{\text{p local skin}}/H_p(0.07)$
		(Sv/Sv)	(Gy/Sv)	(Gy/Sv)	(Sv/Sv)	(Gy/Sv)	(Gy/Sv)
#37	原子力発電所 A-1 蒸気発生器 B ループ 高温側マンホール表面	0.86	0.98	1.00	0.85	0.99	1.00

表 4-4 2 ⑧原子力発電所の作業場における実用量と防護量の比較

No.	場所	防護量との比較					
		$H^*/E(AP)$ (Sv/Sv)	$H_p/E(AP)$ (Sv/Sv)	$H_p/H_{lens}(AP)$ (Sv/Gy)	$H_p/H_{skin}(AP)$ (Sv/Gy)	$D_{p,lens}/H_{lens}(AP)$ (Gy/Gy)	$D_{p,local\ skin}/H_{skin}(AP)$ (Gy/Gy)
#37	原子力発電所 A-1 蒸気発生器 B ループ 高温側マンホール表面	1.00	1.00	0.89	0.85	1.02	1.38

4.3.4 線量計のエネルギー応答試験

4.2.2では、国内で流通する市販線量計のいくつかについて、新たな実用量で校正したときの校正結果（校正定数）を示した。適切に「校正」された線量計であっても、校正時とは異なる実際の放射線場で適切な応答を示すかは、エネルギー応答「試験」によって確認する必要がある。言い換えると、4.3.3で評価した実用量からの「ずれ」をこうしたエネルギー応答試験によって事前に明らかにしておくことが望まれる。

4.3.3で評価した平均エネルギーからは、線源からの直達線のほかに、散乱線を表す500 keV以下のエネルギー成分の平均はおおよそ200~300 keVにある。そこで、N-250（ H^* 平均エネルギー：210 keV）をこれらの場における散乱線等を代表するエネルギーとみなして線量計の特性を評価した。また、原子力施設においては、直達線として ^{60}Co 及び遮蔽としてよく使用されている鉛からの特性X線（80 keV）についても重要であるため、S-Co及びN-100（ H^* 平均エネルギー：83.8 keV）についても特性調査を実施した。

X線発生装置からの漏洩線量場や β 線源からの制動放射線由来の場などは低エネルギーまでスペクトルが幅広く分布しており、線量計の応答によっては、特に低エネルギー成分が大きな影響を及ぼしかねず、実用量の定義変更による影響もそれに左右される可能性がある。そこで、線量計の仕様において低エネルギーまで測定可能とされている(ii)B社製電離箱式サーベイメータ、(iv)C社製受動形個人線量計（水晶体用）、及び(v)D社製電子式線量計（体幹部用）については、N-40、N-60、N-80、N-120、N-150、N-200、及びN-300も追加で評価することとした。これらのうち、 β 線も共通して測定できるものについては、 β 線に対する応答も併せて示すことにした。

(1) 方法

放射線管理での計測においては、指示値に4.2.2で求めた校正定数を乗ずることによって、測定値を得る。そこで、線質 R_0 で校正した線量計の線質 R に対する線量計のレスポンス r_R を以下の式により評価した。

$$r_R = \frac{M_R}{H_R} \cdot N_{R_0} \quad (10)$$

ここで、 M は線質 R で照射したときの線量計指示値、 H_R はそのときの基準線量（率）で

$$H_R = h_R \cdot K_a \quad (11)$$

（ h_R は表4-16に示した換算係数、 K_a は空気カーマ（率））として求められ、 N_{R_0} は基準となる線質（校正に用いる線質）に対する線量計の校正定数（表4-18及び表4-19に示すもの）である。

使用した線量計は4.2.2で使用した線量計のうち、光子に対して感度を有する(i) A社製シンチレーション式サーベイメータ、(ii) B社製電離箱式サーベイメータ、(iv) D社製電子式個人線量計(体幹部用)、(v) E社製電子式個人線量計(体幹部用)、及び(vi) F社製受動形個人線量計(水晶体用)の5種類とした。

(2) 結果と考察

(a) A社製シンチレーション式サーベイメータ

線質 S-Cs の H^* で校正した場合の N-100, N-250 及び S-Co の H^* に対するレスポンスを図 4-48 に示す。点線は、IEC 62387^[35] に示される許容範囲(レスポンスの最小: 0.71、最大: 1.67。ただし、これは現行の実用量に対する許容範囲である。)であり、図中のエラーバーは拡張不確かさ(包含係数 $k=2$) の範囲を示している(以降の図で同じ)。いずれのレスポンスも許容範囲内であり、正しく校正されれば、今回調査した原子力施設の放射線作業場においては、エネルギー特性の観点からは適切な応答を示すと考えられる。

(b) B社製電離箱式サーベイメータ

本機種は、 $H(0.07)$ のみならず、付属するフィルターを検出器前面に装着することにより、 $H^*(10)$ 、 $H(3)$ の測定も可能な線量計である。従って、このうちいずれかの測定量で校正することになる。そこで、以下の線質及び測定量で校正した場合の各線質の D'_{lens} 及び $D'_{\text{local skin}}$ に対するレスポンスを図 4-49 ~ 図 4-53 に示す。

- ・ S-Cs の H^* で校正 (図 4-49)
- ・ S-Cs の D'_{lens} で校正 (図 4-50)
- ・ N-80 の $D'_{\text{local skin}}$ で校正 (図 4-51)
- ・ $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線の $D'_{\text{local skin}}$ で校正 (図 4-52)
- ・ $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線の D'_{lens} で校正 (図 4-53)

β 線の D'_{lens} に対するレスポンスについては、 β 線 ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) の D'_{lens} で校正しない限りは、過大応答をする一方で、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線の D'_{lens} で校正すると光子で過小応答してしまうことが分かる。S-Cs の H^* で校正した場合、いくつかの線質を除いては許容範囲に収まっており、今回の調査範囲内では、エネルギー特性の観点からは適切な応答を示すことが期待される。

(c) D社製電子式個人線量計(体幹部用)

線質 S-Cs の H_p で校正した場合の N-100, N-250 及び S-Co の H_p に対するレスポンスを図 4-54 に示したが、全て許容範囲内に収まっている。

(d) E 社製電子式個人線量計（体幹部用）

N-80 の光子及び $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線の $D_{p\text{local skin}}$ で校正した場合の各線質の $D_{p\text{local skin}}$ に対するレスポンスを図 4-5 5 及び図 4-5 6 に示したが、これらに関しても全て許容範囲内であった。

(e) F 社製受動形個人線量計（水晶体用）

S-Cs の光子及び $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線の $D_{p\text{lens}}$ で校正した場合の各線質の $D_{p\text{lens}}$ に対するレスポンスを図 4-5 7 及び図 4-5 8 に示した。実用量の定義変更に伴い、 β 線に対する換算係数が小さくなる結果、過大応答をすることになるため、現状の線量計のまま、校正点のみを変更して使用する際は、光子及び β 線のどちらかが過大もしくは過小評価してしまうことに注意が必要である。

以上の結果を踏まえ、4.3.1 で選定したいくつかの放射線作業場に対して各線量計の応答を考慮に入れた線量率を試算した（表 4-4 3～表 4-4 7）。すなわち、これらは各線量計を用いて、それぞれの放射線作業場の線量を測定したときに期待される線量評価値である。ただし、今回の調査では代表エネルギー（線質）のみからの試算であり、実際の作業場における測定では、エネルギー分布の違いのみならず、方向特性や線量率特性といったさまざまな要因が線量計の応答に寄与してくることに注意が必要である。校正定数の違いによる差は見られるものの、今回の調査範囲内では、適切に校正が行われれば、これらの線量計を用いて妥当な線量測定結果が得られるものと期待される。

S-Cs H^* で校正

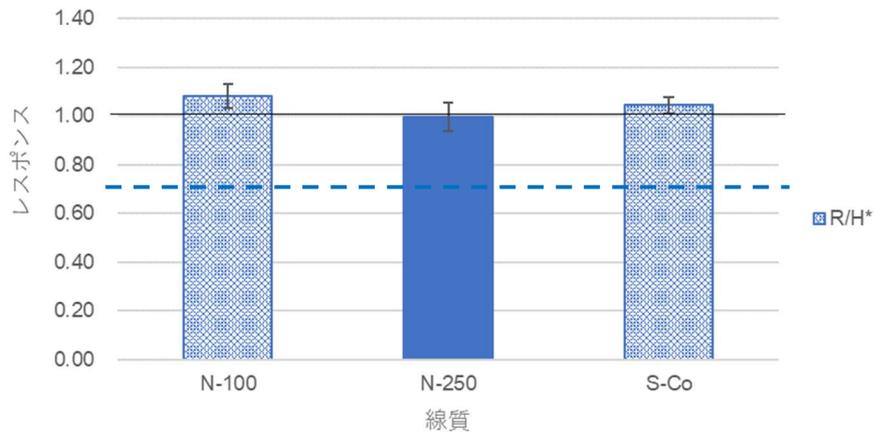


図 4-4 8 S-Cs H^* で校正した A 社製シンチレーション式サーベイメータのエネルギー応答特性

S-Cs H^* で校正

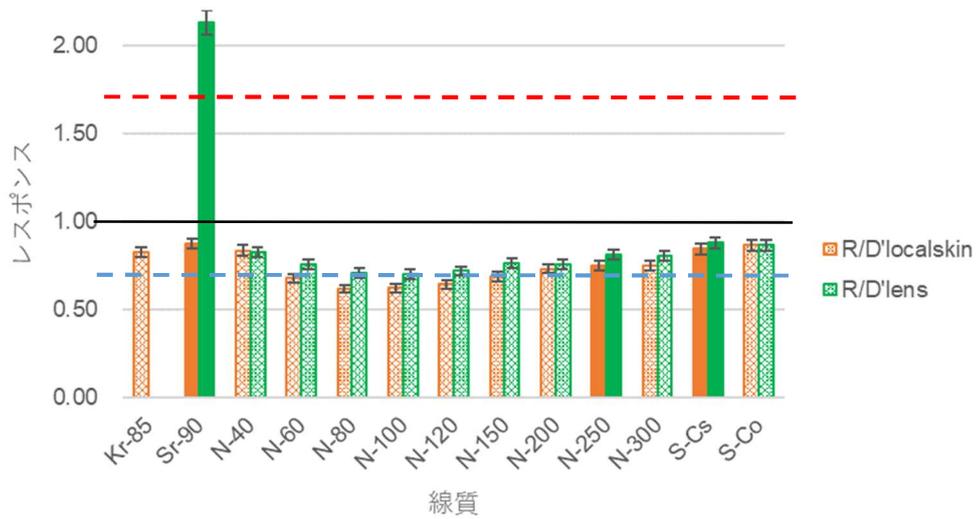


図 4-4 9 S-Cs H^* で校正した B 社製電離箱式サーベイメータのエネルギー応答特性

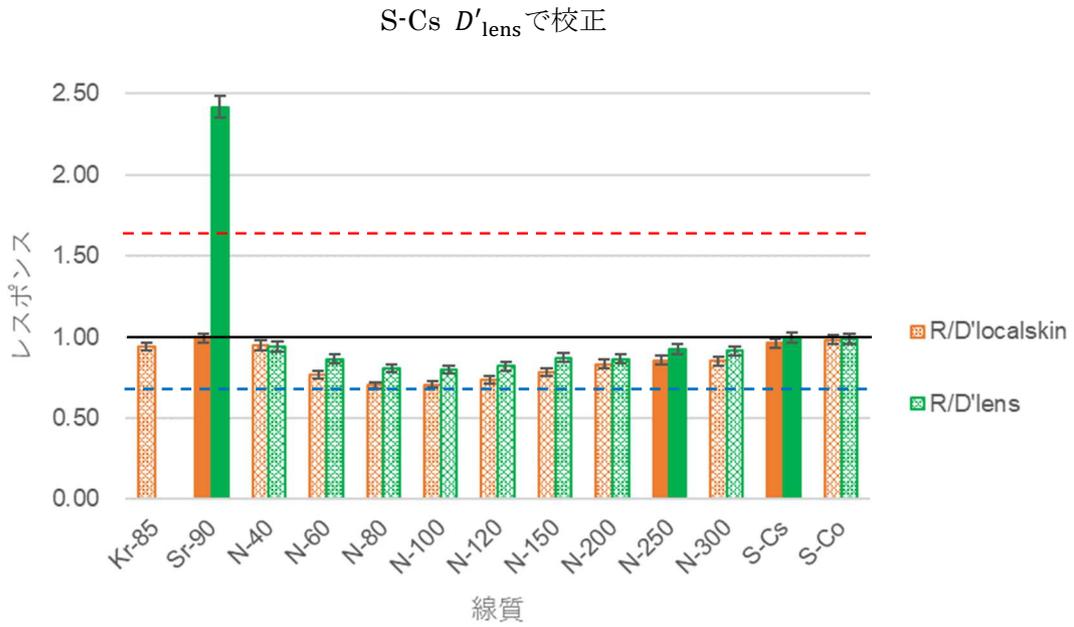


図 4-50 S-Cs D'_{lens} で校正した B 社製電離箱式サーベイメータのエネルギー応答特性

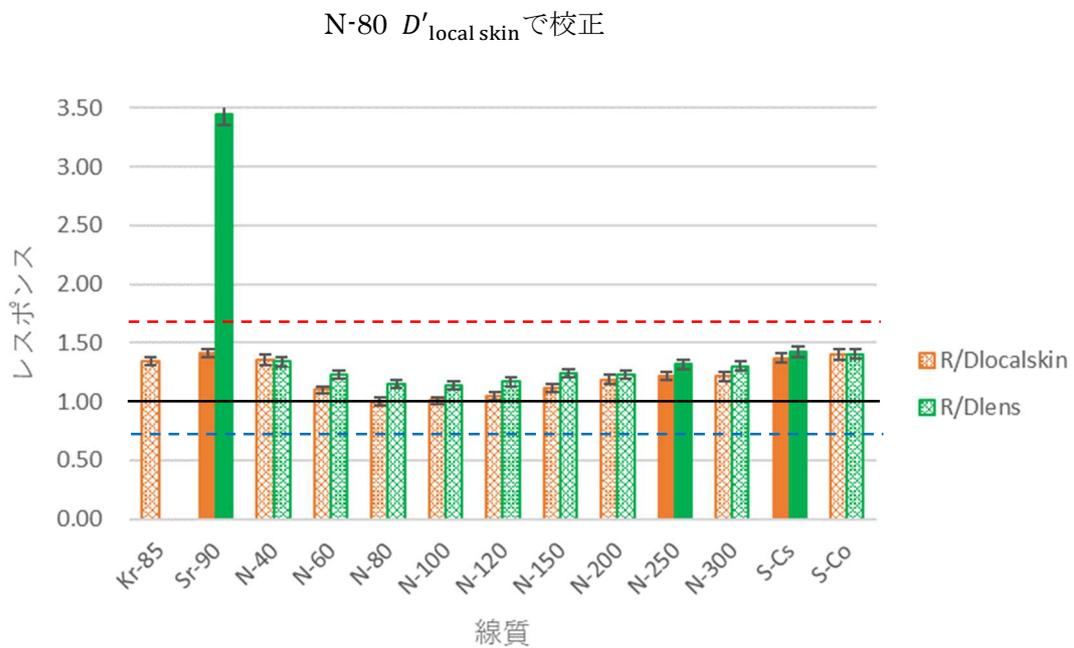


図 4-51 N-80 $D'_{local skin}$ で校正した B 社製電離箱式サーベイメータのエネルギー応答特性

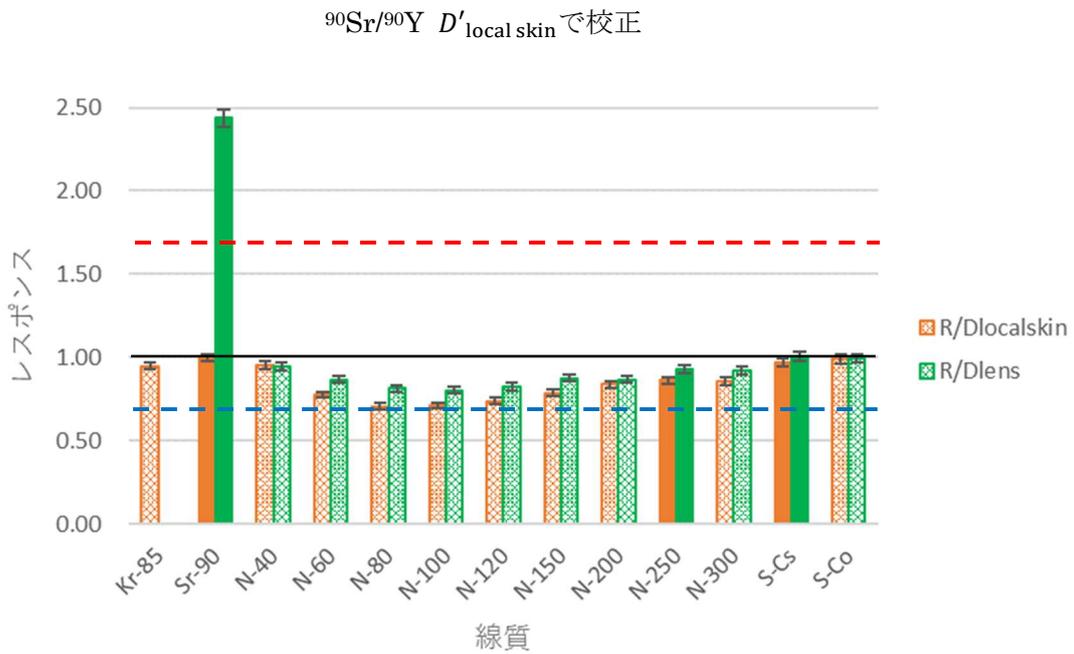


図 4-5 2 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $D'_{\text{local skin}}$ で校正した B 社製電離箱式サーベイメータのエネルギー応答特性

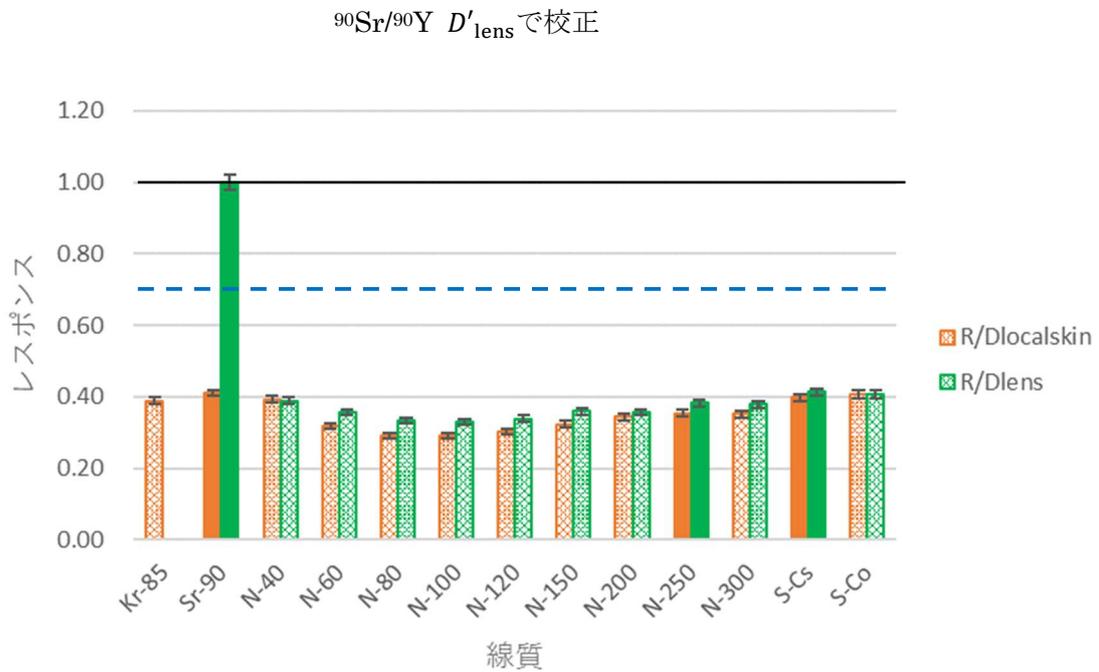


図 4-5 3 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ D'_{lens} で校正した B 社製電離箱式サーベイメータのエネルギー応答特性

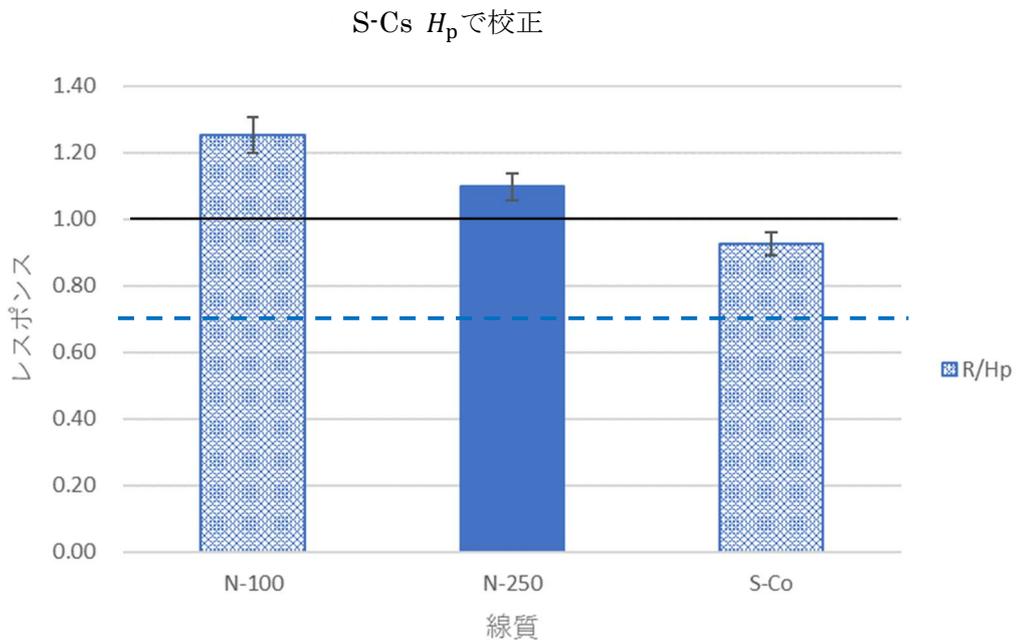


図 4-5 4 S-Cs H_p で校正した D 社製電子式個人線量計（体幹部用）のエネルギー応答特性

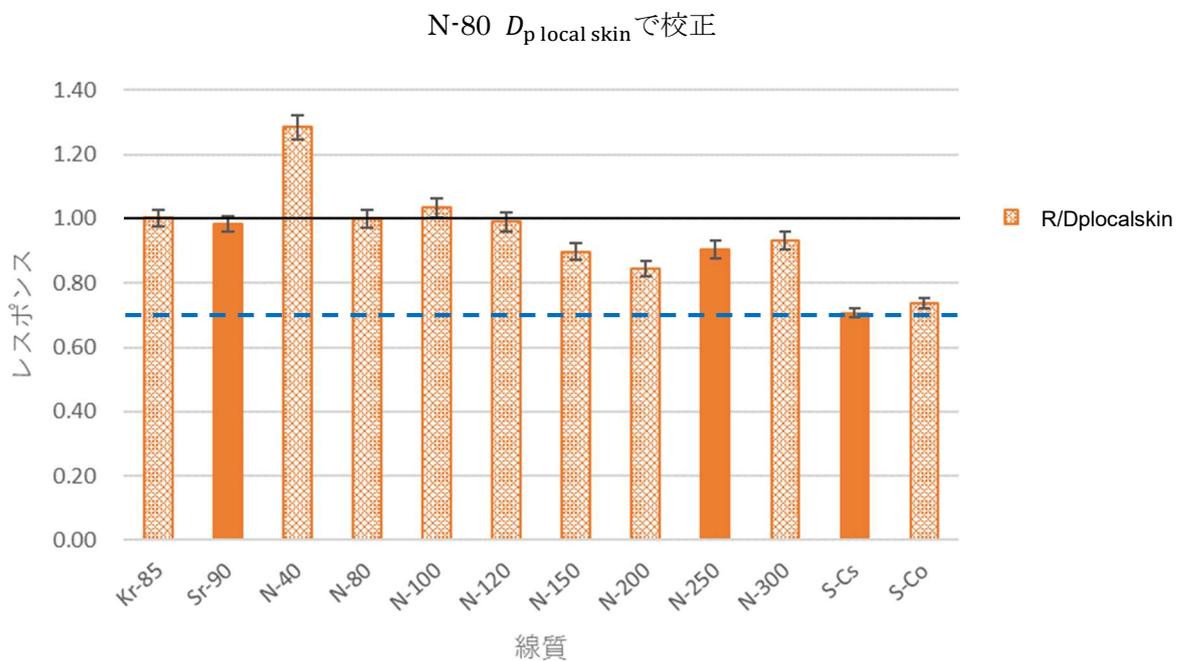


図 4-5 5 N-80 $D_{p local skin}$ で校正した E 社製電子式個人線量計（体幹部用）のエネルギー応答特性

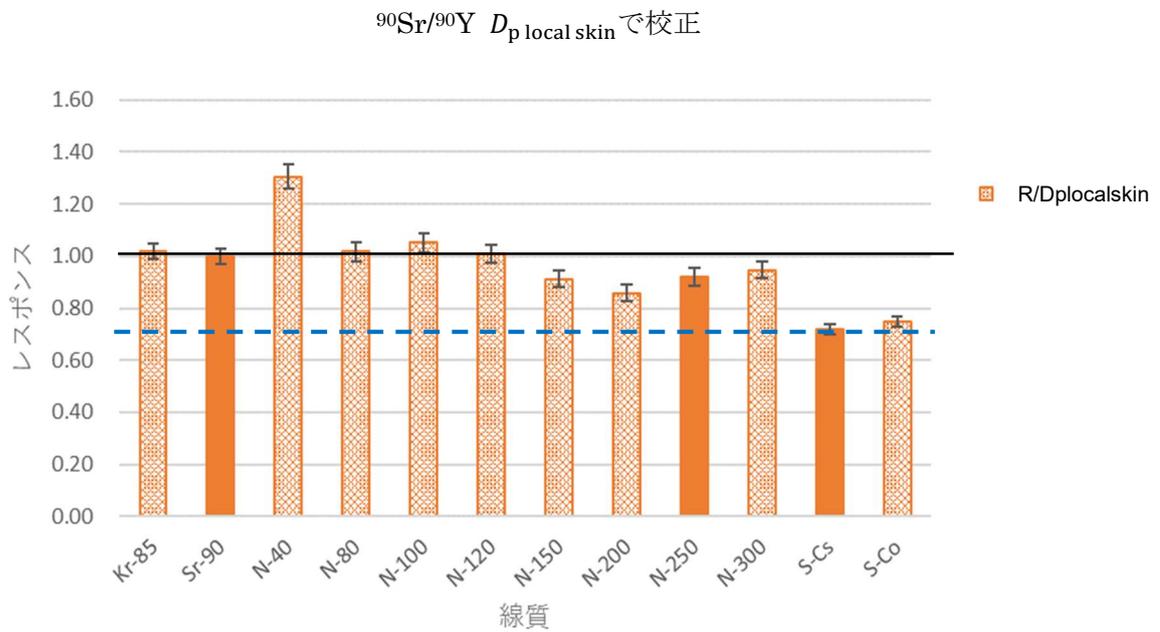


図 4-56 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ $D_{p, \text{local skin}}$ で校正した E 社製電子式個人線量計（体幹部用）のエネルギー応答特性

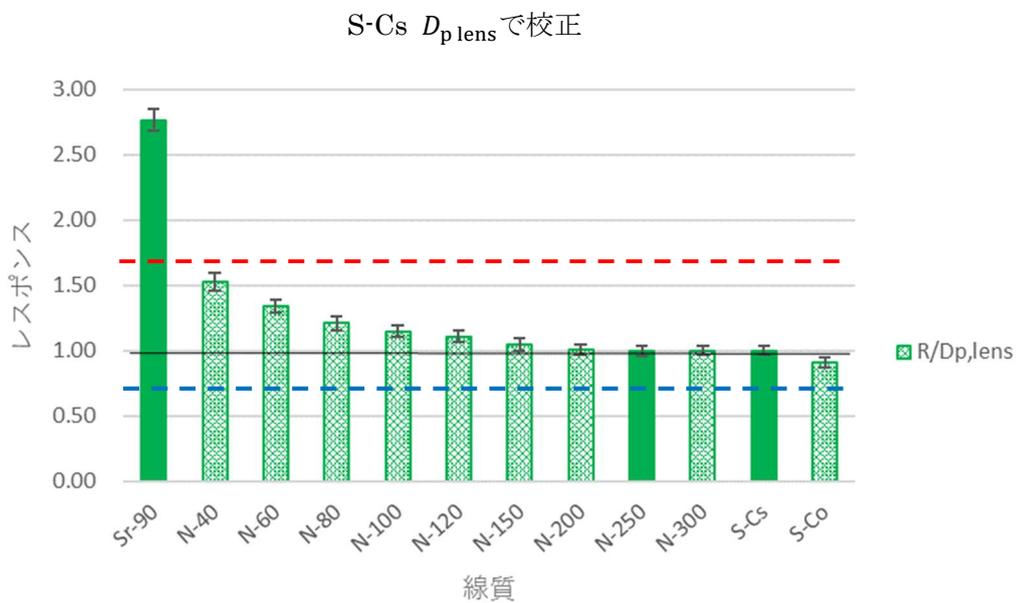


図 4-57 S-Cs $D_{p, \text{lens}}$ で校正した F 社製受動形個人線量計（水晶体用）のエネルギー応答特性

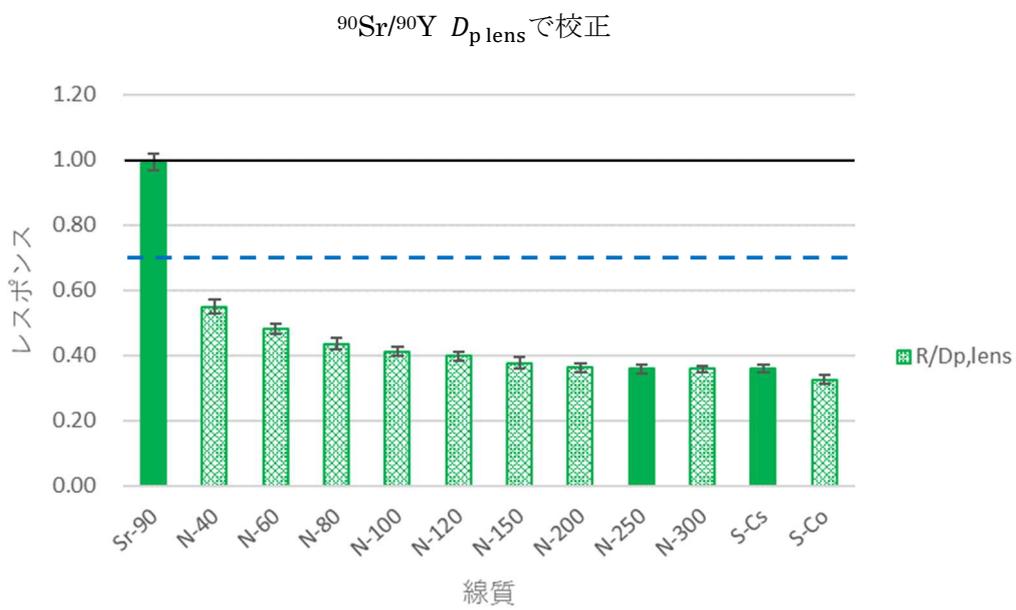


図 4-58 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ D_p lens で校正した F 社製受動形個人線量計 (水晶体用) のエネルギー応答特性

表 4-43 A社製シンチレーション式サーベイメータの応答評価例

放射線作業場のNo	代表エネルギー(線質)	$H^*(\mu\text{Sv/h})$		$H^*(10)(\mu\text{Sv/h})$	
		スペクトルから計算評価	線量計応答を考慮 ^{※1}	スペクトルから計算評価	線量計応答を考慮 ^{※2}
①	#2 S-Cs	4.1	4.1	5.0	5.0
②	#3 N-250	2.4	2.4	2.9	2.8
⑤	#13 S-Co	0.13	0.14	0.16	0.17

※1 S-Cs: H^* で校正した場合、※2 S-Cs: $H^*(10)$ で校正した場合

表 4-44 B社製電離箱式サーベイメータの応答評価例

(a) 眼の水晶体の線量管理に用いる実用量

放射線作業場のNo	代表エネルギー(線質)	$D'_{\text{lens}}(\mu\text{Sv/h})$		$H'(3)(\mu\text{Sv/h})$	
		スペクトルから計算評価	線量計応答を考慮 ^{※1}	スペクトルから計算評価	線量計応答を考慮 ^{※2}
③	#9 N-250	2.8	2.6	2.9	2.6

※1 S-Cs: D'_{lens} で校正した場合、※2 S-Cs: $H'(3)$ で校正した場合

(b) 皮膚の線量管理に用いる実用量

放射線作業場のNo	代表エネルギー(線質)	$D'_{\text{local skin}}(\mu\text{Sv/h})$		$H'(0.07)(\mu\text{Sv/h})$	
		スペクトルから計算評価	線量計応答を考慮 ^{※1}	スペクトルから計算評価	線量計応答を考慮 ^{※2}
③	#9 N-250	2.9	3.5	2.9	3.4

※1 N-80: $D'_{\text{local skin}}$ で校正した場合、※2 N-80: $H'(0.07)$ で校正した場合

表 4-45 D社製電子式個人線量計(体幹部用)の応答評価例

放射線作業場のNo	代表エネルギー(線質)	$H_p(\mu\text{Sv/h})$		$H_p(10)(\mu\text{Sv/h})$	
		スペクトルから計算評価	線量計応答を考慮 ^{※1}	スペクトルから計算評価	線量計応答を考慮 ^{※2}
①	#2 S-Cs	4.1	4.1	5.0	5.0
②	#3 N-250	2.4	2.6	2.9	3.0
⑤	#17 S-Cs	137	137	166	166

※1 S-Cs: H_p で校正した場合、※2 S-Cs: $H_p(10)$ で校正した場合

表 4-46 E 社製電子式個人線量計（体幹部用）の応答評価例

放射線作業場の No	代表エネルギー（線質）	$D_{p\text{ local skin}}$ ($\mu\text{ Sv/h}$)		$H_p(0.07)$ ($\mu\text{ Sv/h}$)	
		スペクトルから計算評価	線量計応答を考慮 ^{※1}	スペクトルから計算評価	線量計応答を考慮 ^{※2}
③ #9	N-250	2.9	2.6	2.9	2.6

※1 N-80: $D_{p\text{ local skin}}$ で校正した場合、※2 N-80: $H_p(0.07)$ で校正した場合

表 4-47 F 社製受動形個人線量計（水晶体用）の応答評価例

放射線作業場の No	代表エネルギー（線質）	$D_{p\text{ lens}}$ ($\mu\text{ Sv/h}$)		$H_p(3)$ ($\mu\text{ Sv/h}$)	
		スペクトルから計算評価	線量計応答を考慮 ^{※1}	スペクトルから計算評価	線量計応答を考慮 ^{※2}
⑥ #18	N-250	89	89	92	90
⑦ #19	N-100 ^{※3}	101	116	104	114
⑧ #37	S-Cs	1150	1150	1165	1165

※1 S-Cs: $D_{p\text{ lens}}$ で校正した場合、※2 S-Cs: $H_p(3)$ で校正した場合、※3 平均エネルギーからは必ずしも代表するエネルギーとは言えないが、光子スペクトル上顕著なピーク（鉛の特性 X 線に起因）として見られているため含めた。

(3) 結論

新たな実用量で校正された線量計について、4.3.3の結果から放射線作業場を代表するエネルギーで特性を調査した。調査の範囲内においては、ほとんどのケースで現行の性能基準の許容範囲内に収まっているが、光子及びβ線の双方を測定できるタイプの線量計では、過小もしくは過大に測定してしまう可能性があり、線量計の設計やフィルター、アルゴリズムの改良が必要となるケースもあると考えられる。また、4.3.3で示したとおり、新たな実用量は防護量に対する裕度が小さいため、今回の調査でも見られるような過小評価に対する許容範囲も含めた線量計の性能基準の検討を進めていく必要があると思われる。そのためには、調査の対象範囲（放射線作業場、線量計、方向依存性など）を拡大して、技術的知見を今後も蓄積していく必要があるだろう。

4.4 まとめ

本事業の2つの調査研究により得られた成果を以下にまとめた。

(1) 新たな実用量の定義に対応した線量計の校正に関する調査

(a) 国家標準とのトレーサビリティが確保されたFRSの代表的な以下の校正場についてエネルギー分布を考慮した新たな実用量 (H^* 、 D'_{lens} 、 $D'_{\text{local skin}}$ 、 H_p 、 $D_{p \text{ lens}}$ 、及び $D_{p \text{ local skin}}$) に対する換算係数を算出した。

- ^{137}Cs 及び ^{60}Co 線源を利用した ISO 4037-1^[14] (JIS Z 4511^[9]) に準拠する γ 線校正場
- 中硬 X 線発生装置を利用した管電圧 40 kV から 300 kV までの ISO 4037-1^[14] (JIS Z 4511^[9]) に準拠する X 線校正場
- $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 及び ^{252}Cf 線源を利用した ISO 8529-1^[24] (JIS Z 4521^[25]) に準拠する速中性子校正場並びに ^{252}Cf 線源を利用した ISO 8529-1^[24] (JIS Z 4521^[25]) に準拠する熱中性子校正場
- $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 及び ^{85}Kr 線源を利用した ISO 6980-1^[19] (JIS Z 4514^[20]) に準拠する β 線校正場

このうち、特に速中性子校正場においては、新たな実用量の方が保護カプセルによるスペクトル変化の影響を大きく受けること、熱中性子校正場における実効線量の管理に用いる実用量、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の β 線校正場における眼の水晶体の線量管理に用いる実用量については、換算係数が大きく減少することが示唆された。

(b) (a)の校正場を利用して、放射線管理の現場で用いられている市販の線量計（光子用サーベイメータ、光子・ β 線用サーベイメータ、中性子用サーベイメータ、光子用個人線量計、中性子用個人線量計の各1機種及び光子・ β 線用個人線量計2機種の計7機種）に対して新たな実用量の定義に基づいた校正を実施し、校正定数を得た。

(c) (b)と同じ線量計に対して、同様の方法で現行実用量の定義に基づいた校正を実施し、校正定数を得た。

(d) (b)と(c)で得られた校正定数を比較し、今回の調査範囲内において以下の技術的知見を得た。

- 新たな実用量での校正に伴い、特に H^* や H_p については校正定数が減少（ $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ を除く。 $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ については、校正定数は5～10%増加する）し、その程度は光子で20%程度である。それに伴って、放射線管理における測定値も同じ割合で小さくなる。
- 校正線質や校正する実用量（ H_p で校正するか $D_{p\text{lens}}$ で校正するかなど）による校正定数の違いは、実用量の定義変更に伴ってその関係性が変化する。例えば、中性子については、現行では、熱中性子での校正が保守的であった線量計でも定義変更に伴い、 $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ 速中性子での校正が保守的になるなどその関係性が変わる。
- 眼の水晶体の線量管理に用いる線量計について、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ からの β 線を利用して D_{lens} に対して校正した場合、その校正定数は現行と比べて6割程度小さくなった。

(2) 放射線作業場における線量計のエネルギー応答に関する調査

(a) 原子力施設の放射線作業場で、光子による有意な外部被ばく源があり、散乱線の影響等によるエネルギー分布に異なる特徴を有するものとして、8作業場を選定した。

(b) (a)で選定した8放射線作業場の計37ヶ所について、場の光子エネルギー分布をスペクトロメータによる測定などから取得した。

(c) (b)で得た光子エネルギー分布37個について、新たな実用量及び現行の実用量に基づいた線量率をそれぞれ算出した。加えて防護量との比較も行い、実際の作業場においても新たな実用量は防護量の良い推定値となっていることを確認したが、保守性の幅は小さくなっていることが分かった。

(d) (b)で得た光子エネルギー分布から、当該放射線作業場を代表するエネルギー線質

として N-250 (H^* 平均エネルギー：210 keV) を選定し、(1) (b) で用いた光子用線量計の応答試験を行い、新たな実用量及び現行実用量に対するレスポンスを得た。光子エネルギー分布形状や線量計の仕様範囲を考慮して、一部は N-40 から N-300 までの X 線線質や S-Co についても同様の方法で応答試験を行った。

(e) (a) で選定したいくつかの放射線作業場に対して、(d) で得た結果を基に各線量計の応答を考慮した線量率を評価した。これと (c) で評価した線量率の比較、また (d) で得た幅広い線質に対する線量計のエネルギー応答の結果から以下の知見を得た。

- 今回調査した原子力施設の放射線場の範囲内においては、適切に校正を行われれば、新たな実用量でも IEC 等が定める現行の性能基準の許容範囲内での測定が可能であることが分かった。
- 光子及び β 線の双方を測定できるタイプの線量計では、校正線質及び評価量によっては、過小または過大に測定してしまう可能性がある。
- 実用量の定義変更に伴う校正定数の変更により、測定評価値が変わってしまうこと、防護量に対する保守的裕度が少なくなることも鑑みて、線量計の性能基準や導入移行期における放射線管理の実務への混乱を防ぐための検討が必要になるものと思われる。

本事業では、実用量の定義変更に伴う線量計測上の課題に対する技術的な知見が得られた。今後は、本事業の手法を用いて調査の対象範囲（調査する放射線作業場、線量計の種類、方向特性）を拡大して技術的知見を継続して蓄積し、ISO や IEC といった線量計規格の動向と併せて規制導入への検討材料とすることが望まれる。

5 参考文献

- [1] International Commission on Radiological Protection (ICRP). *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37(2-4) (2007)
- [2] International Commission on Radiation Units and Measurement (ICRU). *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources*. ICRU Report 39 (1985)
- [3] International Commission on Radiation Units and Measurement (ICRU). *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry*. ICRU Report 51 (1993)
- [4] International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Conversion Coefficients for Radiation Protection Quantities for External Radiation Exposures*. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5) (2010)
- [5] International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). *Operational Quantities for External Radiation Exposure*. ICRU Report 95. J. ICRU 20(1) (2020)
- [6] 原子力規制庁 令和元年度放射線対策費（放射線管理に係る実用量の測定等の実態調査）事業成果報告書（2020）
- [7] 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)
- [8] International Organization for Standardization (ISO) *Radiological protection – X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence*. ISO 4037-3 (2019)
- [9] 日本産業規格, X線及び γ 線用線量（率）測定器の校正方法. JIS Z 4511 (2018)
- [10] 日本産業規格, X線, γ 線及び β 線用線量当量（率）サーベイメータ. JIS Z 4333 (2014)
- [11] 日本産業規格, X線, γ 線, β 線及び中性子用電子式個人線量（率）計 JIS Z 4312 (2013)
- [12] 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)
- [13] 日本産業規格, X線及び γ 線用据置形エリアモニタ JIS Z 4324 (2017)
- [14] International Organization for Standardization (ISO) *Radiological protection – Radiological protection – X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 1: Radiation characteristics and production methods*. ISO 4037-1 (2019)
- [15] 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. in press. (2021)
- [16] International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations*. ICRP Publication 107, Ann. ICRP 38(3) (2008)
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] International Organization for Standardization (ISO) *Nuclear energy – Reference beta-particle radiation – Part 1: Methods of production*. ISO 6980-1 (2006)
- [20] 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
- [21] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, P. Tsai, N. Matsuda, H. Iwase, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita. *Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02*, J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6), 684-690 (2018)
- [22] 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 (2004)
- [23] 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. in press. (2021)
- [24] International Organization for Standardization (ISO) *Reference neutron radiations – Part 1: Characteristics and methods of production*. ISO 8529-1 (2001)
- [25] 日本産業規格, 中性子線量当量 (率) 計の校正方法. JIS Z 4521:2006
- [26] J. R. Dumais, M. Yoshizawa and Y. Yamaguchi. ^{252}Cf 及び $^{241}\text{Am-Be}$ 中性子源を用いた速中性子校正場の散乱線評価. JAERI-Tech 98-005 (1998)
- [27] M. Kowatari, S. Nishino, K. M. Romallosa, H. Yoshitomi, Y. Tanimura, T. Ohishi. *Experimental Determination of Anisotropic Emission of Neutrons From ^{252}Cf Neutron Source with the Spherical Protection Case.*, Rad. Prot. Dosim. 189(4), 436-443 (2020)
- [28] Y. Uchita, J. Saegusa, Y. Kajimoto, Y. Tanimura, S. Shimizu and M. Yoshizawa. 黒鉛パイルを用いた熱中性子校正場の特性評価. JAERI-Tech 2005-012 (2005)
- [29] 放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則 (昭和三十五年総理府令第五十六号) (令和 3 年 4 月 1 日施行)
- [30] Y. Tanimura, J. Tomita, H. Yoshitomi, M. Yoshizawa, R. Hakozaki and S. Takahashi. 福島周辺の家屋の内外における γ 線スペクトルの評価, 保健物理, 51(3), 141-146 (2016)

- [31] 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)
- [32] H. Yoshitomi, M. Kowatari, M. Hagiwara, S. Nagaguro and H. Nakamura. *Quantitative estimation of exposure inhomogeneity in terms of eye lens and extremity monitoring for radiation workers in the nuclear industry*. Rad. Prot. Dosim. 184(2) 179-199. (2019)
- [33] Y. Tanimura, S. Nishino, H. Yoshitomi, M. Kowatari and T. Oishi. *Characteristics of commercially available CdZnTe detector as gamma-ray spectrometer under severe nuclear accident*, Progress in Nucl. Sci. Technol. 6, 134-138 (2019)
- [34] 原子力規制庁 平成 30 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業（原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～）成果報告書 (2019)
- [35] 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)

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 キックオフ会合 議事録

1. 日時：令和3年12月10日（金）11:00～12:00

2. 場所：新型コロナウイルス感染防止対策のため、Web会議にて実施

3. 出席者（順不同、敬称略）：

JAEA 安全研究センター リスク評価・防災研究グループ 吉富、西野

JAEA 原子力科学研究所 放射線計測技術課 谷村、深見、辻

原子力規制庁 大町、三浦

4. 議事

- ・吉富より事業内容の紹介がされた（添付資料1）。
- ・実施体制、役割分担については、添付資料1実施体制のとおりとすることで了承。
- ・2月に中間会合、3月に報告前会合を予定している。また、月末には進捗とりまとめをする。線量計の購入、読み取り作業の契約事務手続きは既に完了し、契約待ちの状態である。また、その他の線量計についても手配の手はずを整えており、校正試験は12月中から前倒しで実施する予定。
- ・線量計校正調査として、まずは、FRSの校正場について添付資料 p.5 のとおり換算係数を評価。
- ・光子については、荷電粒子平衡が成立した状態で校正を行う（必要に応じてビルドアッププレートを用いる）ので、校正場の換算係数としてはカーマ近似のものを使うことで了承された。N-80は、低エネルギー用の線量計の校正点として、眼の水晶体や皮膚の線量管理に用いる換算係数を評価。
- ・熱中性子については、ボナーで測定した結果を基に換算係数を評価するか、カドミ差法により熱成分のみの換算係数を評価するかは、校正方法と併せて関係者間で相談することとなった。何れの場合も、技術的には可能であることを確認。 $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ 及び ^{252}Cf については、カプセルの影響を考慮したスペクトルから、換算係数を決定する予定。
- ・校正試験のアウトプットイメージは添付資料 p6,7 のとおり。誤記載のある箇所は訂正する。（→その他の点も含めて誤記載は修正した。）中性子用の個人線量計の測定範囲は？
→測定範囲は調べて回答するが、照射する線量としては数 10uSv を考えている。（→測定範囲は、1uSv から 10Sv）
- ・放射線作業場の選定として7箇所提示があった。吉富から、他にもいくつか打診しており、場の特徴、実行可能性を踏まえて調整しているとの紹介があった。

- 1F 及び原子力発電所に関する場については、水晶体の事業において取得したデータを再解析することを検討。→具体的にどのデータを利用したいのか、成果報告書等に記載されているのか、等の情報を規制庁にお送りしご判断頂く。また、当該事業の主任研究者である藤田医科大の横山先生にも了承いただく必要あり。
- 福島環境中の除染に係る場のデータ再解析は？→内閣府調査のものは、放医研・栗原先生に了承が得られれば利用可能ではないか。JAEA 独自に取得したデータもあるので、それはすぐに使える（論文化もされている）。→今回の委託事業については、「原子力施設の放射線作業場」に限定しており、事業をまとめる上でも本事業ではスコープ外とする。
- 線量計応答調査について、線量計の応答試験は、測定した光子スペクトルから代表的なエネルギーに対して、校正場で試験する、という理解でよいか？→その理解でよい。そのため、特に X 線場等 p.5 以外の線質についても試験環境を整える必要が出てくる。
- 報告書案の方向性としては添付資料 p.11 のとおり了承された。ただし、今回の調査事業においては、短期間ということもあり線量計の校正点にかかる部分のみの調査、また放射線作業場についても限定した調査であるため、これらの課題に対して結論を出すのは尚早であって、それに向けての技術的な知見を提示し、今後の調査研究の方向性を提示していくに留まる。

以上

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 キックオフミーティング

2021年12月10日



国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

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



目的

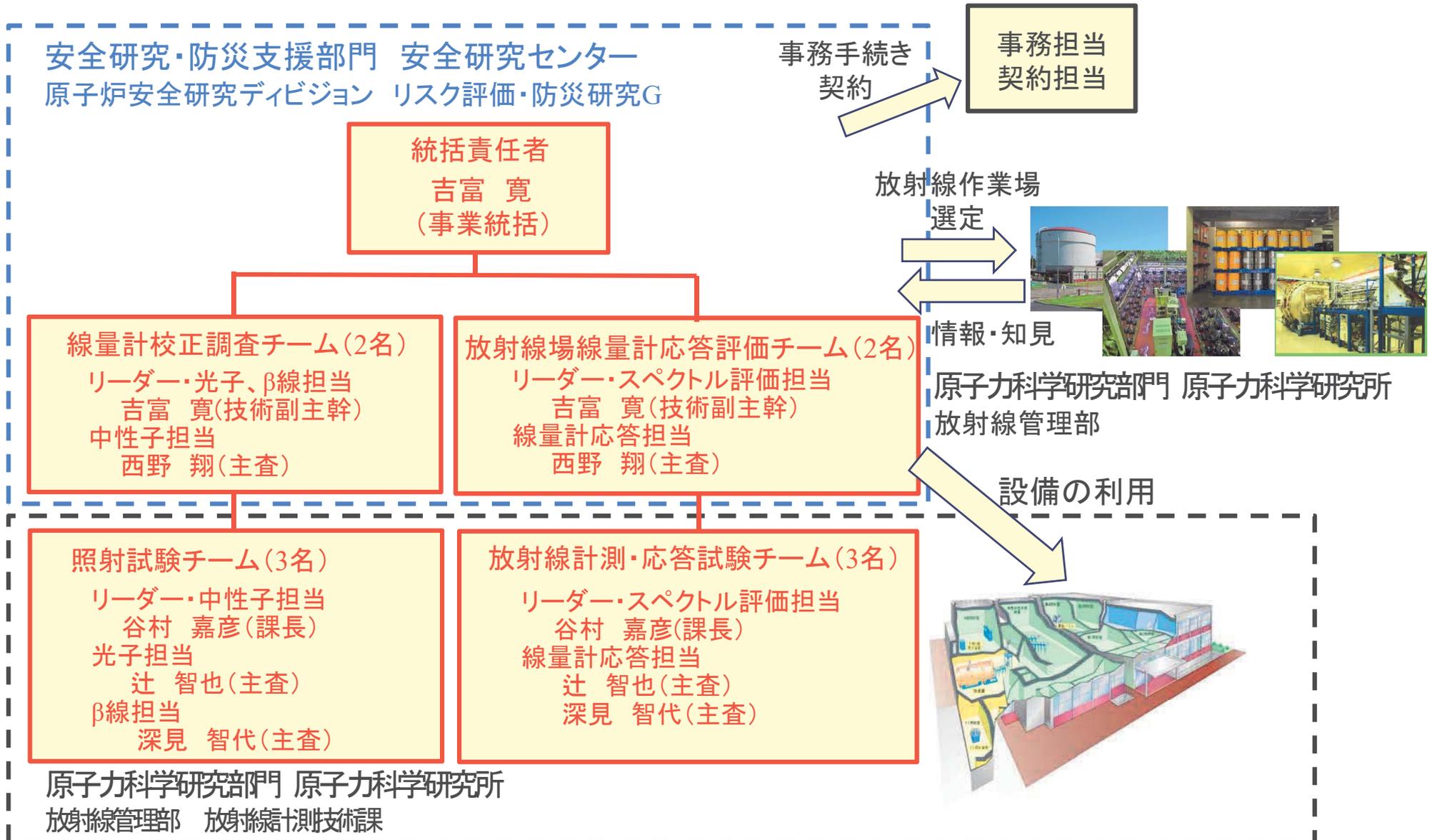
新たな実用量の導入によって懸念される線量計性能に関する実務的課題の解決に資するため、新たな実用量に対応した校正場を開発し、現状の線量計に対し、以下の事項を実施することにより必要な線量計性能を検討する技術的知見を蓄積することを目的とする。

①放射線管理の現場で用いられている線量計の校正

②放射線作業場における線量計のエネルギー応答

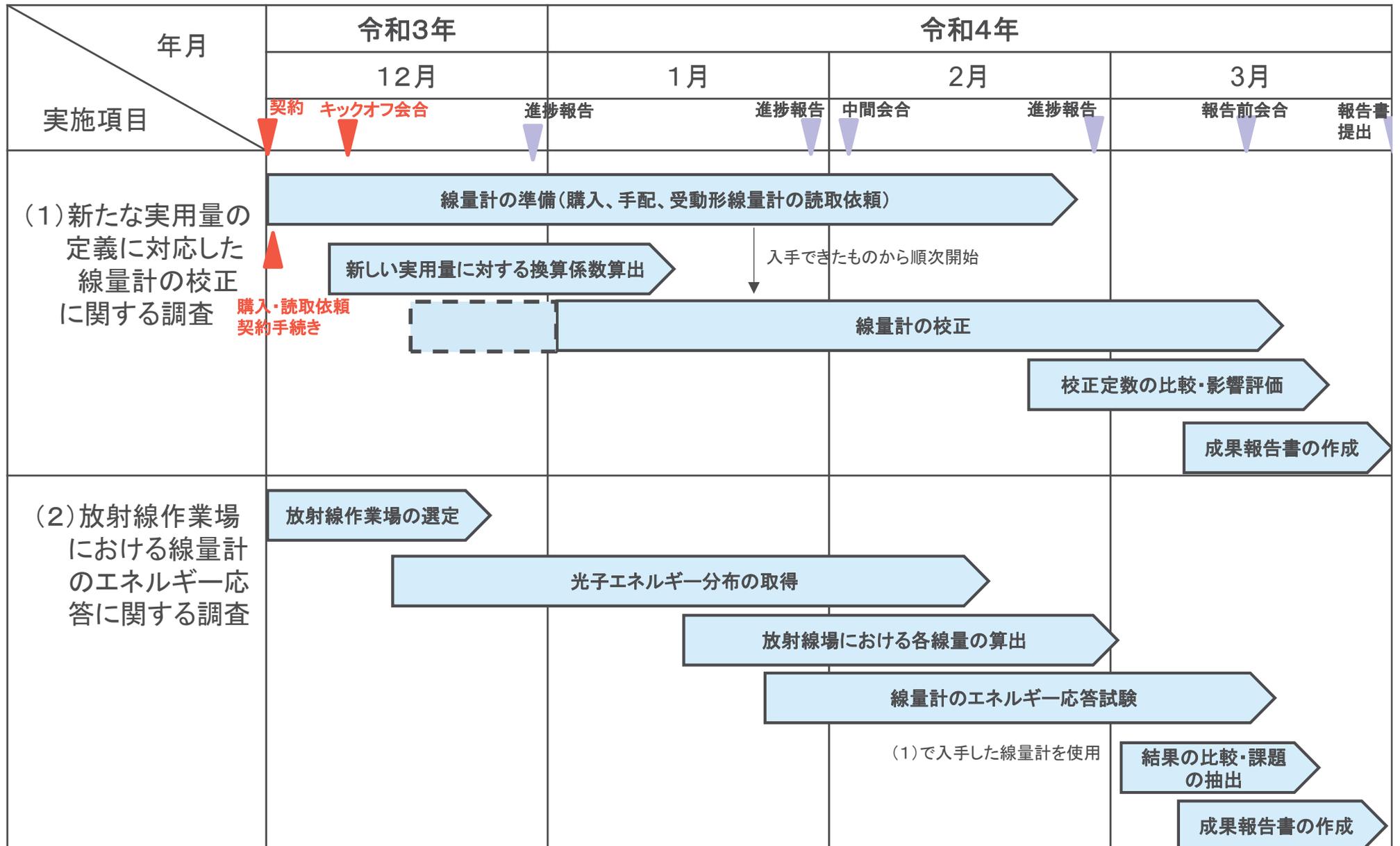


実施体制





研究計画と進捗状況

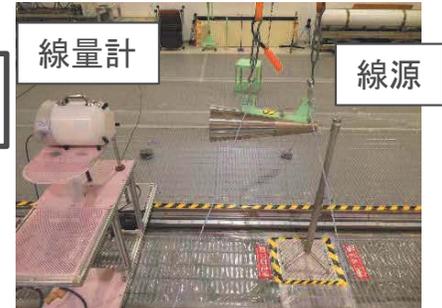


①線量計校正調査

線量計の校正

基準とする場で、校正定数を求める

線量計校正の様子



新しい実用量での基準線量(率)

H

線量計の指示値

G

N

まずはこれを求める

校正定数



$$N = \frac{H}{G}$$

$$H = \int h_R(E_p, \Omega) \Phi_R(E_p, \Omega) dE_p$$

ICRU 95レポート

校正場のスペクトル



①線量計校正調査

校正場の整備@FRS

線種	線質	換算係数 (Sv/Gy) or (Gy/Gy) or (Sv cm ²)			
		$H^*/Ka:$	$H_p/Ka:$	$D_{lens}/Ka:$	$D_{local\ skin}/Ka:$
光子	¹³⁷ Cs	$H^*/Ka:$	$H_p/Ka:$	$D_{lens}/Ka:$	$D_{local\ skin}/Ka:$
	N-100	$H^*/Ka:$	$H_p/Ka:$	—	—
	N-80	—	—	$D_{lens}/Ka:$	$D_{local\ skin}/Ka:$
β線	⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	—	—	$D_{lens}/D_R:$	$D_{local\ skin}/D_R:$
	⁸⁵ Kr	—	—	—	$D_{local\ skin}/D_R:$
中性子	熱中性子	$H^*/\Phi:$	$H_p/\Phi:$	—	—
	²⁴¹ Am-Be	$H^*/\Phi:$	$H_p/\Phi:$	—	—
	²⁵² Cf	$H^*/\Phi:$	$H_p/\Phi:$	—	—

①線量計校正調査

校正試験

線種	線量計の種類	線質	校正定数(現行)	校正定数(新)
光子	サーベイメータ 	^{137}Cs	$H^*(10): 1.00 (4.2\%)$	$H^*: 0.82 (4.6\%)$
		N-100	$H^*(10):$	$H^*:$
光子	サーベイメータ 	^{137}Cs	$H(3):$ $H(0.07):$	$D'_{\text{lens}}:$ $D'_{\text{local skin}}:$
		N-80	$H(3):$ $H(0.07):$	$D'_{\text{lens}}:$ $D'_{\text{local skin}}:$
β線		$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	$H(3):$ $H(0.07):$	$D'_{\text{lens}}:$ $D'_{\text{local skin}}:$
		^{85}Kr	$H(0.07):$	$D'_{\text{local skin}}:$
光子	個人線量計 	^{137}Cs	$H_p(10):$	$H_p:$
		N-100	$H_p(10):$	$H_p:$
光子	個人線量計 	^{137}Cs	$H_p(3):$	$D_{p \text{ lens}}:$
		N-80	$H_p(3):$	$D_{p \text{ lens}}:$
β線		$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	$H_p(3):$	$D_{p \text{ lens}}:$

※アウトプットのイメージ

①線量計校正調査

校正試験

線種	線量計の種類	線質	校正定数(現行)	校正定数(新)
光子	個人線量計 	^{137}Cs	$H_p(0.07):$	$D_{p \text{ local skin}}:$
		N-80	$H_p(0.07):$	$D_{p \text{ local skin}}:$
β線		$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	$H_p(0.07):$	$D_{p \text{ local skin}}:$
		^{85}Kr	$H_p(0.07):$	$D_{p \text{ local skin}}:$
中性子	サーベイメータ 	熱中性子	$H^*(10):$	$H^*:$
		$^{241}\text{Am-Be}$	$H^*(10):$	$H^*:$
		^{252}Cf	$H^*(10):$	$H^*:$
中性子	個人線量計 	熱中性子	$H_p(10):$	$H_p:$
		$^{241}\text{Am-Be}$	$H_p(10):$	$H_p:$
		^{252}Cf	$H_p(10):$	$H_p:$



②線量計応答調査

放射線作業場の選定

放射線場	線源	特徴
¹³⁷ Cs線源取扱場	¹³⁷ Cs	シンプルな場(AP、散乱線が少ない場:比較対象)
線源が広範囲に分布した場(1F)	¹³⁴⁺¹³⁷ Cs+散乱線	直接線+散乱線(ISOジオメトリ)
鉛遮蔽等が施された場(1F)	¹³⁴⁺¹³⁷ Cs+散乱線+鉛遮蔽	鉛遮蔽
コンクリート遮蔽・迷路構造等により散乱線がメインの場	散乱線(直接線は遮蔽)	コンクリートによる散乱線のみ
複数の線源からの被ばく(線源貯蔵室)	²⁴¹ Am, ¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr(制動放射)等	複数線源 (幅広いエネルギー)
放射化物取扱場	⁵⁴ Mn, ⁶⁰ Co	発生装置に特有
原子力発電所場	⁵⁸ Co, ⁶⁰ Co	ROTジオメトリ

測定器

1 cm³ LaBr₃(Ce)  、2 inch × 2 inch NaI(Tl)

1 inch × 1 inch NaI(Tl)  、1 cm³ CZT 

※一部、既測定データの再解析





②線量計応答調査

光子スペクトル取得

- ・波高スペクトルをアンフォールディング処理して、光子スペクトル評価
- ・光子スペクトルから以下を算出

放射線場	代表エネルギー	線量率(現行実用量)		線量率(新しい実用量)	
¹³⁷ Cs線源取扱場	662 keV	H*(10): H'(0.07): Hp(3):	H'(3): Hp(10): Hp(0.07):	H*: D' _{local skin} :	D' _{lens} (3): Hp:
線源が広範囲に分布した場(1F)					
鉛遮蔽等が施された場(1F)					
コンクリート遮蔽・迷路構造等により散乱線がメインの場					
複数の線源を取り扱う場					
放射化物取扱場					
原子力発電所					



②線量計応答調査

線量計応答試験

- ・代表エネルギーについて、以下の試験を実施

放射線場	特性試験線質	レスポンス(現行実用量)	レスポンス(新しい実用量)
¹³⁷ Cs線源取扱場			
線源が広範囲に分布した場(1F)			
鉛遮蔽等が施された場(1F)			
コンクリート遮蔽・迷路構造等により散乱線がメインの場			
複数の線源を取り扱う場			
放射化物取扱場			
原子力発電所			



報告書案

- ・実際に新しい実用量での校正環境を整備(5ページの表)
 - ・代表的な線量計に対して、校正定数の変化を提示
(6~7ページの表)
 - ・光子に関して、スペクトルに基づいて放射線作業場における現行、新しい実用量を算出(9ページの表)
 - ・線量計の応答試験から、放射線作業場での新しい実用量での応答を評価(10ページの表)
- (考察)
- ・線量計の設計変更なし+校正定数のみを変更することで対応できるか
(校正定数とカタログ仕様及び必要に応じた特性試験結果より)
 - ・校正点(基準エネルギー一点)及び校正する評価量(複数の量を兼用して測定できる場合)に応じた放射線作業場における測定値の変化、保守性(裕度)は?
 - ・実用量から防護量の評価(現状の管理方法は継続可能か)
例えば、 $D_{T\ lens} \rightarrow H_p, D_{p\ lens}, D_{p\ local\ skin}$ の適切なもの?
 - ・放射線場の照射ジオメトリによる評価量への影響
→線量計に求められる性能とは?