

平成28年度厚生労働省労災疾病臨床研究事業費補助金

平成28年度 総括・分担研究報告書

放射線業務従事者の眼の水晶体等末端部等価線量の適切な評価及び被ばく線量の低減に
関する研究

研究代表者 古渡 意彦

(日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課 主査)

平成29年(2017年) 3月

目次

I. 総括研究報告 1

II. 分担研究報告 3 2

以上

I. 総括研究報告

放射線業務従事者の眼の水晶体等末端部等価線量の適切な評価及び被ばく線量の低減に関する研究

研究代表者 古渡 意彦

(日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課 主査)

研究要旨

ICRP の 2011 年宣言を受け、IAEA BSS 及び EU BSS では、放射線業務従事者の水晶体の組織等価線量被ばく限度について、年間 150 mSv から 5 年平均で年 20 mSv とする大幅な引き下げを取り入れた。本研究では、眼の水晶体等価線量限度の引き下げに対し、体幹部、眼の水晶体及び末端部で得られた線量の相関に関して調査を進め、体幹部で評価された線量から適切な等価線量評価手法を開発する。事業の最終年度である本年度は、以下のとおり課題を設定し、研究を遂行した。

(1) 眼の水晶体及び末端部モニタリング用パッシブ型個人線量計を、既存の OSL 線量計を用いて開発を行った。開発した線量計については、基準放射線場におけるエネルギー応答特性試験を行って、性能を検証した。試験の結果、 γ 線エネルギー 40-1250 keV の範囲内及び ^{90}Sr - ^{90}Y β 線に対して、 ^{137}Cs γ 線を基準に $\pm 20\%$ と、良好な応答比が得られた。

(2) 簡易物理ファントムに開発した追加モニタリング用 OSL 線量計を取り付け、放射線作業が実施される作業環境でのモニタリング試験を実施し、加速器施設で均等被ばく状況を模擬した結果では、体幹部に対する眼の水晶体線量の比が 0.6~3.5 となり、体幹部線量が眼の水晶体線量を大幅に過小評価するケースが生じることが分かった。

(3) 体幹部線量と眼の水晶体等価線量との相関について、均等被ばく状況での放射線業務従事者の被ばくの不均等度を、計算シミュレーションを用いてより詳細に評価した。作業環境で遭遇しうる、ISO 及び ROT 照射条件を模擬して評価した結果、X 線・ γ 線に対する体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、60 keV~6 MeV の範囲内で、0.8~1.3 となった。現行の推定手法を用いた場合でも、ISO publication 75 のいう factor 1.5 以内で推定できることが確認できた。

A. 研究目的

本研究は、放射線業務従事者が受ける眼の水晶体及び手指等の末端部における被ばく等価線量を適切に評価する手法の開発を目的としている。放射線業務従事者の被ば

くの現状を考慮すると、眼の水晶体のみ、あるいは手指、足等末端部のみ極端に被ばくするような、特殊な被ばく事例は少ない [1]。特に、工業・原子力・学術分野においては、このような被ばく事例は非常に限られている。現状でも、眼の水晶体及び末端

部等価線量の推定手法は提示されている。
(電離放射線障害防止規則では、外部被ばく線量については、1センチメートル線量当量及び70マイクロメートル線量当量のうちのどちらか適切な方をもって眼の水晶体の等価線量とする、とある。)しかしながら、後述する眼の水晶体等価線量の年間線量限度の引き下げの検討を考慮すると、現行の眼の水晶体等価線量の推定手法についての適応範囲とその限界については議論されるべきである。

現在、我が国においては、放射線業務従事者の眼の水晶体及び手指等の末端部における等価線量は、眼の水晶体を含めた頭頸部、または手指、足等の末端部について、「最も多く放射線にさらされるおそれのある部位」である場合、当該放射線業務従事者に対して専用の線量計が準備され、それぞれの部位に対する等価線量の評価に供される。一方で、上述のとおり、工業・原子力・学術分野における放射線業務従事者に対しては、そのような特殊な被ばくを受ける作業は非常に限られており、一般的に実施されている個人モニタリングについて、放射線業務時に体幹部で測定された1cm線量当量を実効線量として外部被ばく線量としている。

本研究では、眼の水晶体、末端部等の等価線量を体幹部で測定された1cm線量当量、70 μ m線量当量等の体幹部で得られた被ばく線量と、放射線業務従事者の被ばく状況(作業環境における線種、線源の位置・形状、体勢、作業時間等)を考慮、眼の水晶体及び末端部における被ばく等価線量の相関を詳細に検討することで、体幹部線量から眼の水晶体及び末端部組織等価線量を予測するモデルを提案する。

本研究の背景には、国際放射線防護委員会(ICRP)による声明で眼の水晶体被ばく線量限度が一年間で150 mSvから年平均20 mSvへと大幅に下げることが勧告されたことを契機に、国際原子力機関(IAEA)、EU及び米国においても、眼の水晶体等価線量の線量限度引き下げを導入したことがある[2],[3]。(ただし、米国放射線防護審議会(NCRP)によると、ICRPの声明をそのまま導入するのではなく、眼の水晶体線量限度を吸収線量で50 mGyまで引き下げる、というものであった。[4])我が国においても、以前より放射線業務従事者の眼の水晶体被ばくに対する包括的な調査が開始されている[1],[5]。この調査の対象は、全ての放射線業務従事者であるが、詳細な評価の対象となっているのは、主にインターベンショナルラジオロジー(画像下治療:IVR)、核医学等に従事する医療従事者である。一方で、工業・原子力・学術分野の放射線業務従事者における眼の水晶体及び末端部被ばく線量に係る調査も既に行われており、本研究においても平成27年度に文献調査を実施した。国内の学術論文、研究報告を中心に、工業・原子力・学術分野での被ばく線量評価事例及び被ばく線量低減化事例を調査した結果、国内では、65件の論文による報告があり、のべ95件の放射線作業の事例が紹介されていた。眼の水晶体被ばくの報告事例は、のべ95件の報告のうち2例であり、いずれも β 線による被ばくが優位な放射線作業であった。いずれの作業でも眼の水晶体に対し、追加モニタリングが施されていた。さらに、鉛エプロン装着、追加遮へいの実施、等、被ばく低減対策は十分にとられており、これら対策が放射線業務従事者の被ばく線量低減に効果があつ

た、と結論付けられている。

前述のとおり、工業・原子力・学術分野での現行の個人モニタリングでは、放射線業務従事者の体幹部に装着された線量計の指示値（主に 1cm 線量当量及び 70 μ m 線量当量の結果）をそのまま外部被ばく線量として換算して報告するのが一般的である。眼の水晶体等価線量については、体幹部線量のうちいずれか適切なものから、水晶体組織等価線量を推定している。平成 27 年度の文献調査結果及び放射線業務従事者の被ばく線量の実態（例えば[6]）から考慮すると、従来の推定手法でもそのまま導入できる被ばく事例が多いと予想される。しかしながら、 β 線による被ばくでは、水晶体等価線量を数十倍過大評価しうる可能性は既に海外の研究者により指摘されている。

（例えば[7]など）さらに、放射線業務従事者の顔面が線源に近接した状況での放射線作業を考慮すると、体幹部で測定される被ばく線量を用いる場合、眼の水晶体等価線量を過小評価すると予想される。特に原子力分野では、このような「不均等に被ばく」する放射線作業時の被ばく線量低減対策は、各現場で個別に経験則に基づいて実施されてきたのが現状である。

今年度については、上述の研究目的と目的達成のための課題解決のため、平成 27 年度に達成した成果を受け、以下の課題を設定する。

(a) 追加モニタリングが必須となる放射線作業において、妥当な線量評価を提供できる個人線量計の準備

(b) 実際の放射線作業環境下での体幹部線量と眼の水晶体及び末端部等価線量はどのような相関があるか。また、作業環境モニタリングで得られた周辺線量当量（率）と

の関連はどうか。

(c) 現行の個人モニタリングにおける眼の水晶体等価線量の推定方法が、どの状況まで適応可能か。特に均等被ばく状況とされてきた状況では、放射線業務従事者はどの程度均等に被ばくしうるか。

上記の課題に解答するため、次項 B. 研究方法に挙げるテーマを設定し、研究を進めた。

B. 研究方法

研究期間内で体幹部線量から眼の水晶体、末端部等の組織等価線量の合理的な評価手法を確立するため、本事業最終年度である平成 28 年度では、以下に示す (1)、(2) 及び (3) のテーマを並行して進めた。

(1) 眼の水晶体及び末端部モニタリング用パッシブ型個人線量計の開発

(2) 実際の放射線作業環境下におけるモニタリング試験

(3) 均等被ばく状況下における、体幹部線量と眼の水晶体及び末端部等価線量の不均衡度に関する検討

なお、(2) の放射線作業環境下におけるモニタリング試験について、試験結果の詳細は、分担研究報告に記載し、ここでは研究方法及び結果の概要のみについて述べる。

本事業最終年度である平成 28 年度は、(1) の追加モニタリング用パッシブ型個人線量計について、エネルギー補償用フィルタを検討することで、既存の OSL 線量計を利用することで進めた。(2) について、加速器施設及び核燃料物質使用施設の放射線作業環境下に簡易物理ファントムを設置

し、表面に取り付けた OSL 線量計の読み値から、体幹部線量と眼の水晶体及び末端部等価線量の相関について評価した。(3)は、体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の比を、均等被ばく状況として ISO 及び ROT 照射ジオメトリを考慮し、計算シミュレーションにより、被ばくの均等度を求めた。

(1) で進めるパッシブ型個人線量計の試作及び基準校正場での試験を通じ、(a) 追加モニタリングが必須となる放射線作業において、妥当な線量評価を提供できる個人線量計に要求される特性のうち、線量評価に寄与するものを明らかとする。

(2) の放射線作業環境下におけるモニタリング試験では、原子力・学術分野における放射線業務従事者が経験しうる被ばく状況下の人体模擬物理ファントムを用いた被ばく線量測定の結果を、(b) 実際の放射線作業環境下での体幹部線量と眼の水晶体及び末端部等価線量はどのような相関があるか。また、作業環境モニタリングで得られた周辺線量当量(率)との関連に着目して解釈を進める。得られた知見は、種々の被ばく状況について効率よく体幹部線量に対する眼の水晶体及び末端部等価線量の比を推定する手法構築にフィードバックされることが期待できる。

(3) では、眼の水晶体及び末端部の等価線量は、放射線業務従事者の日常的な放射線業務で生じる被ばく状況は、ほとんどが均等被ばく状況とされている中で、(c) 現行の個人モニタリングにおける眼の水晶体等価線量の推定方法が、どの状況まで適応可能か。特に均等被ばく状況とされてきた状況では、放射線業務従事者はどの程度均等に被ばくしうるか、計算シミュレーション

により検証する。

(1) 眼の水晶体及び末端部モニタリング用パッシブ型個人線量計の開発

本事業におけるパッシブ型個人線量計開発の位置づけは、「追加モニタリングが必要となった場合、利用しやすさと眼の水晶体及び末端部モニタリングに適切な線量当量単位での応答特性が使用条件下(線種、エネルギー、設置位置等)で十分に精度が確保しうるか」、という点である。これを達成するため、本事業では、一般に入手可能なパッシブ型個人線量計のうち、既存の OSL 線量計を改造することで、眼の水晶体及び末端部の被ばくモニタリングに適した線量計を開発した。

眼の水晶体及び末端部追加モニタリング用線量計については、TLD 線量計で製品化されたものもある[7]。同様にアクティブ型末端部モニタリング用線量計も既に市販されている。現状では、新規に開発された眼の水晶体及び末端部モニタリング用線量計を使用する以外に、追加モニタリングの補助線量計として、頭部及び手指部に既存の線量計(TLD、OSL 線量計、等)を取り付ける、という被ばく管理も行われている。

平成28年度には、市販の OSL 線量計(長瀬ランダウア社製 NanoDOT™)を使用し、照射面の正面に追加フィルターとして2mm厚の亚克力板を装着できるよう設計した治具と OSL 線量計を組み合わせ、眼の水晶体等価線量モニタリングのためのパッシブ型個人線量計の開発・試験を行った。さらに、手指部追加モニタリング用素子として、同様に、70 μ m 線量当量を妥当に評価できるよう、市販の OSL 線量計を改造し、手指部追加モニタリング用の個人線

量計の開発も併せて行った。

開発した線量計の試験は、日本原子力科学研究所 放射線標準施設棟（以下、「原子力機構 FRS」という。）で運用中の X 線・ γ 線、及び ^{90}Sr - ^{90}Y β 線基準校正場でエネルギー応答試験を行った。また、開発された線量計は後述のモニタリング試験に供された。

（2）実際の放射線作業環境下におけるモニタリング試験

放射線業務従事者の 80%以上についてはその被ばく線量が検出下限以下であるという現状と、現行のモニタリング手法での眼の水晶体等価線量の推定が一部有効に機能している、という点を考慮して、放射線業務従事者が受ける眼の水晶体等価線量を体幹部で受けた線量当量から適切に推定評価する手法が依然として有効である、と考えられる。この点に着目して、原子力・工業・学術分野において放射線業務従事者が実際に遭遇する放射線作業について、アクリル製物理ファントムに線量計を取り付け、体幹部で受ける被ばく線量に対して、眼の水晶体及び手指部の等価線量がどの程度になるか測定により求めた。得られた体幹部線量に対する、眼の水晶体及び末端部等価線量の比を求めると同時に、放射線作業環境場の線量当量をモニタリングし、その結果と体幹部、眼の水晶体及び手指部線量当量の測定結果とを比較し、それらの相関について議論する。さらに、平成 27 年度に検証した計算シミュレーションを用いて、簡易物理ファントムを設置した作業環境を模擬し、眼の水晶体及び末端部線量/体幹部線量の比に影響を及ぼす要因を検討する。

簡易物理ファントムは、線量計を校正す

る際に使用するアクリル製水ファントム（国際規格 ISO4037、日本興業規格 JIS4511 等で定められた形状のアクリル製水槽に水を満たしたもの）を図 1 に示すように組み合わせ、人体模擬ファントムとして使用した。アクリル製物理ファントムは、頭部、頸部、胸部及び腹部が水で満たしたアクリル製水槽で構成されている。手指は、可動式となっており、不均等被ばくをモニタリングするための指リングと呼ばれる個人線量計を基準校正場で校正する際に使用するロッドファントム（直径 19 mm ϕ のアクリル棒）を指の長さ加工し、アクリル製の手のひらに取り付けて、手指のファントムとした。表 1 に使用したアクリル製物理ファントムの各部の仕様を示す。

放射線治療時の線量評価等で使用されるランドファントム、ホールボディカウンタ校正用 BOMAB ファントム、等、目的に応じた種々の人体模擬物理ファントムが採用されている。他方、本研究ではモニタリング試験を行う作業環境が放射性物質で汚染されていることを前提としている。そのため、安価で迅速に設置可能なアクリル製のファントムを採用している。

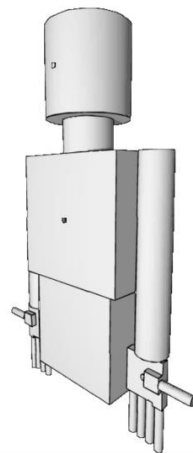


図 1 (a) 本研究で使用したアクリル製物理ファントムの外観

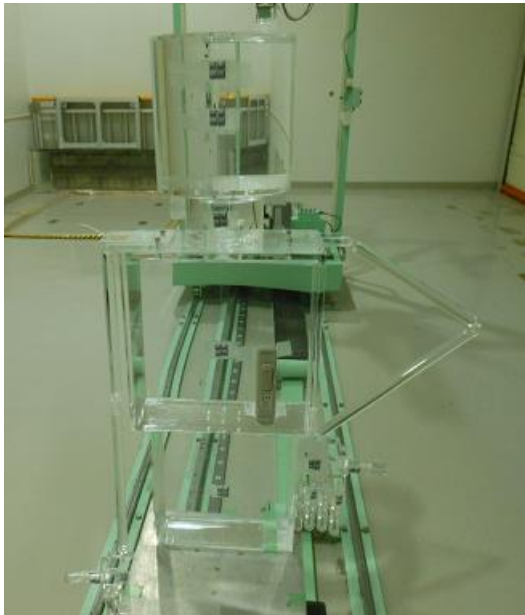


図 1 (b) 本研究で使用したアクリル製物理ファントムの外観(基準校正場に設置時)

この簡易物理ファントムについては、複雑な体系を有する人体模擬数学ファントム(以下、「数学ファントム」という。)とモニタリング試験に供するアクリル製物理ファントムを用いた場合でも、不確かさの範囲内で同じ被ばく状況が再現できることを事前に確認されている。平成27年度には、計算シミュレーションで結果と比較するため、基準校正場における照射試験と同一体系の被ばく条件を計算シミュレーションで正確に再現して比較した。計算シミュレ

ションと原子力機構 FRS における基準校正場での照射試験の結果、体幹部、眼の水晶体及び手指部に相当する箇所に取り付けた OSL 線量計から得られた、体幹部線量に対する、眼の水晶体及び末端部等価線量の比が、計算及び測定結果の双方で不確かさの範囲内で一致することが検証されている。

モニタリング試験は、核燃料物質使用施設である、日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 燃料試験施設(以下、「燃料試験施設」という。)及び大強度陽子加速器施設(J-PARC) 50 GeV シンクロトロン施設において行った。前者は、原子力分野で典型的な核分裂生成物からのβ線及びγ線からの被ばくが支配的となる作業環境であり、後者は加速器運転時に生じる放射化生成物からのβ線及びγ線からの被ばくが中心となる作業環境である。平成27年度に実施した文献調査から、原子力分野は、メンテナンス、施設又は物品の解体撤去、除染及び核燃料製造・取扱い過程での放射線作業事例の報告が多く、これらの放射線作業を「特殊な被ばくが生じうる放射線作業」として、日常的に行われるメンテナンス等とはっきりと区別しており、そのための特別な放射線防護対策等を行っている。本研究でもその点を考慮し、原子力機構燃料試験施設での廃棄物輸送・管理という、日常

表 1 簡易物理ファントム各部の仕様

	材質及び形状		サイズ
頭部	アクリル製水槽	円筒型	20 cmΦ×20 cm(H)
頸部	アクリル製水槽	円筒型	12 cmΦ×8 cm(H)
胸部	アクリル製水槽	箱型	30 cm(H)×30 cm(W)×15 cm(D)
腹部	アクリル製水槽	箱型	25 cm(H)×25 cm(W)×12 cm(D)
手指部	掌: アクリル製	板状	Palm: 9 cm(H)×9.7 cm(W)×1.5 cm(D)
	指: アクリル製	棒状	Thumb: 1.9 cmΦ×7 cm(L)
			Other fingers: 1.9 cmΦ×10 cm(L)

的に頻繁に行われない作業を模擬するモニタリング試験を行った。

なお、本研究は外部被ばくのみを対象としており、いずれの作業環境でも放射線業務従事者は内部被ばくが発生する可能性があるが、ここでは外部被ばくによる線量評価のみを行っている。

物理ファントムの全身に装着した線量計は、(1)の追加モニタリング用パッシブ型個人線量計の開発でも使用した、市販のOSL線量計（長瀬ランダウア社製NanoDOT™）である。OSL線量計は、アクリル製物理ファントム各所に合計40個取り付け、アクリル製物理ファントムが設置された放射線作業環境での被ばく状況をモニタリングした。なお、線量計は、線量計をそのまま取り付けたものと、エネルギー補償フィルタである2mm厚アクリル板を前面に張り付けた条件と両方の照射条件に加え、(1)の追加モニタリング用パッシブ型個人線量計の開発で試作したOSL線量計を用いて、線量評価を行っている。

(3)均等被ばく状況下における、体幹部線量と眼の水晶体等価線量の不均等度に関する検討

現行の個人被ばく線量モニタリングでは、均等被ばくとされてきた放射線作業に対して、放射線業務従事者の体幹部線量評価が注目され、均等被ばく状況下での眼の水晶体等価線量がどの程度になるか、特段注意が払われてこなかった。本研究の目的は、放射線業務従事者が受ける眼の水晶体及び手指等の末端部における被ばく等価線量を適切に評価する手法の開発であり、均等被ばく状況においても妥当な眼の水晶体及び手指部等価線量を推定できる手法の構築を

目指している。そこで、従来均等被ばくと考えられてきた放射線作業環境について、平成27年度に整備した計算シミュレーションを用いて評価を行った。

放射線業務従事者の被ばくの不均等の場合には、喫緊の課題でもある、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比で評価することとした。計算コードは医療照射時の投与線量評価等で使用実績の豊富なPHITSを使用し、放射線業務従事者の人体を数学ファントムで模擬した。数学ファントムには、ICRP116で眼の水晶体の防護量に係る換算係数を計算するのに使用されたファントムを採用し、当該ファントムに腕及び手指を追加して、腰から上までを模擬した。数学ファントムは、モニタリングで使用される実用量である線量当量を正當に評価することを考慮し、ICRUの指定する人体等価物質とした。(図2参照)



図2 計算に使用した数学ファントム

数学ファントムを用いた体幹部及び眼の水晶体線量評価では、現行の個人モニタリングの線量計測の枠組みで用いられている、

1cm 線量当量、3mm 線量当量及び 70 μ m 線量当量の定義に従って、数学ファントム内に吸収線量を測定する領域を設定した。体幹部における 1cm 線量当量、3mm 線量当量及び 70 μ m 線量当量の評価のため、数学ファントム左胸部中央深さ 10 mm、3 mm 及び 70 μ m の位置での線量を求めた。眼の水晶体等価線量評価に用いられることが検討されている眼の水晶体における 3mm 線量当量は、数学ファントムの眉間中央部分の深さ 3 mm 位置での線量を求めた。吸収線量計算に使用した領域は、眼の水晶体位置で、1.0 cm^(L)×3.69 cm^(W)×0.01 cm^(D)であり、体幹部では、1.0 cm^(L)×6.18 cm^(W)×0.01 cm^(D)である。なお、吸収線量領域のサイズは、計算シミュレーション時の単位輸送粒子当たりの吸収線量に与える統計精度と線量評価の深さ位置への影響が小さくなることを考慮して選択された。計算体系には、エネルギーによる散乱及び吸収の影響を除外するため、空気を除いて計算した。そのため、実際の被ばく状況とは空気の存在による違いが生じることが考えられる。

均等被ばく状況を考慮するため、照射条件は等方照射ジオメトリ (ISO ジオメトリ) 及び回転照射ジオメトリ (ROT ジオメトリ) とし、線源には光子及び β 線を選択した。計算シミュレーションで求めた、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、ROT 照射条件について基準校正場で物理ファントムに線量計を装着した測定によって検証した。計算シミュレーション検証のための照射試験は、全て原子力機構 FRS で整備済みの¹³⁷Cs、⁶⁰Co 及び⁹⁰Sr-⁹⁰Y 基準校正場で行った。

C. 研究結果

(1) 眼の水晶体及び末端部モニタリング用パッシブ型個人線量計の開発

本研究では、既存の OSL 線量計を改造し、適切なエネルギー補償フィルタを照射面の前面に施すことにより、眼の水晶体及び末端部モニタリングに供する線量計を開発した。平成 27 年度に実施した計算シミュレーション及び予備試験の結果を受け、市販の OSL 線量計 (長瀬ランダウア社製 NanoDOT™) の放射線の入射方向前面に 2 mm 厚の亚克力板を装着して、眼の水晶体等価線量モニタリングに適した OSL 線量計を開発した。2 mm^tの亚克力板を前面に装着することで、亚克力表面から OSL 線量計素子までの実効的な厚さが約 3 mm となり、眼の水晶体等価線量モニタリングでの採用が EU 諸国で推奨されている 3mm 個人線量当量 (H_p(3)) の定義に近づき、特に X 線・ γ 線については、広いエネルギー範囲での応答特性の改善が見込まれる。また、手指部末端部モニタリングでは、70 μ m 線量当量での評価が求められているが、市販の OSL 線量計ではエネルギー応答の問題から、モニタリングが困難な線種が依然として残っている。例えば、⁸⁵Kr 及び¹⁴⁷Pm からの β 線は残余最大エネルギーがいずれも低く、市販の OSL 線量計を原子力分野で広く使われる、耐候性指リング等の厳重なケーシングを施した状態では測定不能である (この場合、手指への被ばくという観点では保護具で十分遮へいされており、モニタリングの観点でも測定不能という状態は妥当な評価と言えなくはない)。また、医療で用いられるエネルギー領域の X 線及び核燃料物質取扱使用施設での被ば

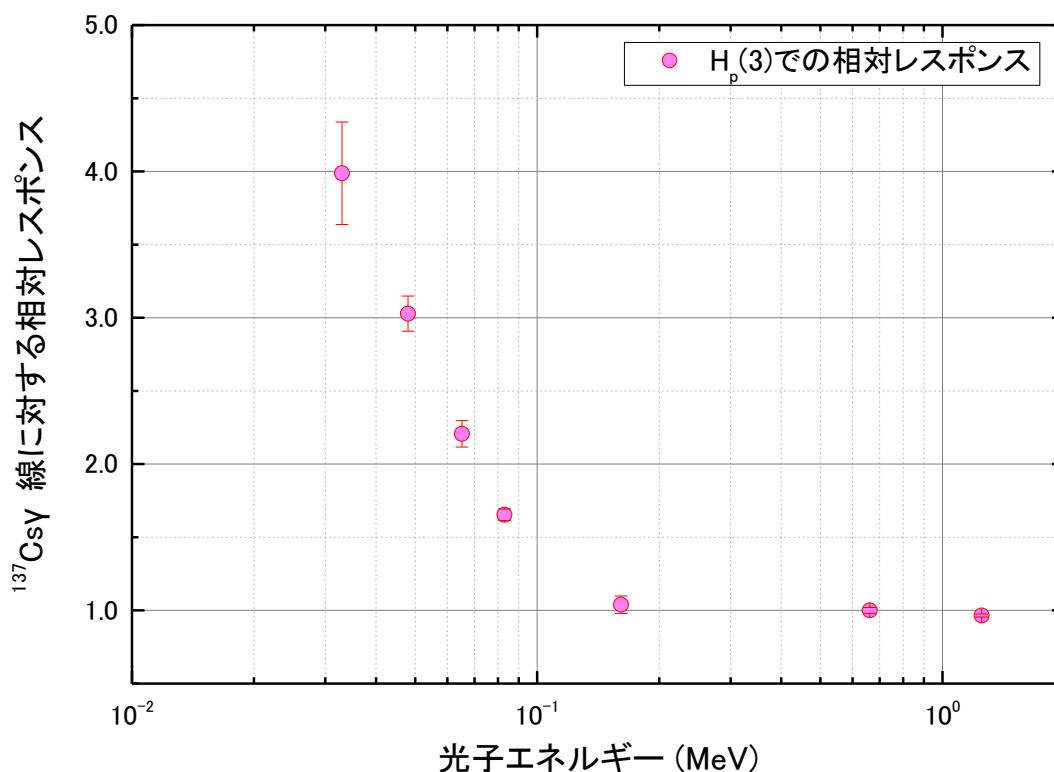


図3 2 mm厚の亚克力板を取り付けた OSL 線量計のエネルギー応答特性
(^{137}Cs γ 線に対する $H_p(3)$ での相対レスポンス)

くが考慮される ^{241}Am や ^{239}Pu からの低エネルギー γ 線に対しても、市販の OSL 線量計のケーシングの影響で満足な応答特性が得られない可能性がある。そこで、市販の OSL 線量計のケーシングの OSL 本体部分に相当する箇所を開口して、遮光用のアルミマイラー（約 16 μm 相当）を張り付けて改造し、OSL 線量計の低エネルギー γ 線への応答特性の改善を試みた。

図3では、OSL 線量計に 2mm^tの亚克力板を取り付けた線量計のエネルギー応答特性の γ 線及び X 線に対する実験結果を示す。エネルギー応答特性試験は、原子力機構 FRS で整備した基準放射線場で行われ、 ^{137}Cs 及び ^{60}Co γ 線以外は、国際規格 ISO-4037-1 に規定された X 線基準校正場 (ISO Narrow series) で試験を行った。図3に示す通り、線量計応答特性は、100 -

1250 keV のエネルギー範囲に対し、2 mm^tの亚克力フィルタを取り付けることで、エネルギー応答が factor 1.67 (1/1.67 ~ 1.67) 以内に入ることが確認できた。

図4では、計算シミュレーション及び基準校正場での測定で得られた OSL 線量計の電子及び β 線に対するエネルギー応答の比較を示す。OSL 線量計には 2 mm^tの亚克力板を取り付けたものを用い、 ^{137}Cs γ 線基準校正場で得られた $H_p(3)$ に対するレスポンスに対する相対レスポンスで示している。単色の電子線及びスペクトルを有する β 線に対しても、2 mm^t亚克力板を装着した OSL 線量計のレスポンスは、 ^{137}Cs γ 線に対し、10%以内で一致した。また、 ^{90}Sr - ^{90}Y β 線基準校正場での照射試験と計算シミュレーションでの結果を比較したところ、不確かさの範囲内で一致した。この

ことから、計算シミュレーションの妥当性が示されている。

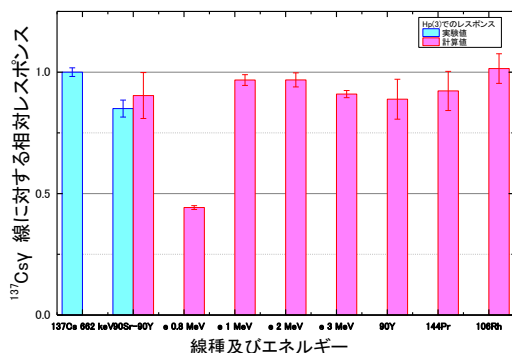


図4 計算シミュレーション及び実験による OSL 線量計の電子に対するエネルギー応答 ($H_p(3)$ での応答特性)

図5では、計算シミュレーションで求めた、OSL 線量計の γ 線に対するエネルギー応答特性の結果を示す。計算は、EGS5 コードを使用し、ISO ロッドファントム ($\phi 1.9 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}^L$) に OSL 線量計を取り付けた状態で、使用した OSL 線量計を模擬し、ケーシングの有無について、 $70 \mu\text{m}$ 線量当量 ($H_p(0.07)$) でレスポンスを評価した場合の結果である。レスポンスは、 ^{137}Cs γ 線に対して得られたレスポンスを 1 とし、相対レスポンスで評価している。図5に示す通り、応答特性の観点からいうと、ケーシングのある市販の OSL 線量計の特性は、 $80 \sim 1250 \text{ keV}$ の範囲内で、 $\pm 10\%$ 以内に収まっていた。一方、ケーシングのない状態での OSL 線量計については、 1250 keV の γ 線に対しての応答に大きな変化がない一方で、 $15 \sim 80 \text{ keV}$ の領域でケーシング有の OSL 線量計と比較し応答が上昇し、エネルギー応答特性の観点から言うと低下した。

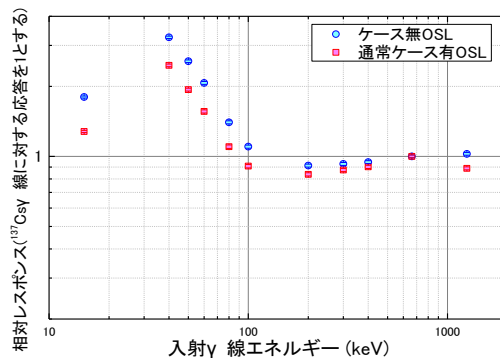


図5 計算シミュレーションによる OSL 線量計のエネルギー応答 ($H_p(0.07)$ での応答特性)

図6では、試作した OSL 線量計の外観を示す。図の中央の OSL 線量計は、手指部の $70 \mu\text{m}$ 個人線量当量でのモニタリングのため、市販の OSL 線量計のケーシングの素子部分を開口し、アルミマイラーによる遮光膜 (厚さ: $16 \mu\text{m}$) を取り付けたものである。本事業で試作した線量計では、頭部及び原子力施設の放射線作業時に一般的に使用される全面マスク内側で簡便に着脱できるよう、OSL 線量計の外寸 ($1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$) に合わせたケーシングを製作し、ケーシング全体を固定する面ファスナー (登録商標名: マジックテープ、ベルクロ等) を採用している。

試作した OSL 線量計の使用例及び特性の結果については、次項 D. 考察で詳細に示す。



図6 試作した OSL 線量計及び装着治具の外観 (左右: 3mm 個人線量当量モニタリング用。中央: 70 μ m 個人線量当量モニタリング用)

(2) 実際の放射線作業環境下におけるモニタリング試験

原子力・工業・学術分野において放射線業務従事者が実際に遭遇する放射線作業について、アクリル製物理ファントムに線量計を取り付け、体幹部で受ける被ばく線量に対して、眼の水晶体及び手指部の等価線量がどの程度になるか測定により求めた。

得られた体幹部線量に対する、眼の水晶体及び末端部等価線量の比を求めると同時に、放射線作業環境場の線量当量をモニタリングし、その結果と体幹部、眼の水晶体及び手指部線量当量の測定結果とを比較し、それらの相関について議論する。さらに、平成27年度に検証した計算シミュレーションを用いて、簡易物理ファントムを設置し



図7 原子力機構燃料試験施設におけるモニタリング試験の様子 (簡易物理ファントムに試作した OSL 線量計を取り付け、作業環境に設置)

た作業環境を模擬し、体幹部線量に対する眼の水晶体及び末端部線量の比に影響を及ぼす要因を検討する。

モニタリング試験は、簡易物理ファントムに(1)で開発したOSL線量計を取り付けることで実施した。モニタリング試験は、核燃料物質使用施設である、日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 燃料試験施設(以下、「原子力機構燃料試験施設」という。)及び大強度陽子加速器施設(J-PARC) 50 GeV シンクロトロン施設において行った。前者は、原子力分野で典型的な放射性汚染物である ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 等の核分裂生成物からの β 線及び γ 線からの被ばくを受ける作業環境である。後者は、主に加速器運転時に生じる放射化生成物からの β 線及び γ 線からの被ばくが中心となる作業環境である。なお、本研究では眼の水晶体及び手指部等価線量を外部被ばくによる線量評価のみを対象としている。

図7では原子力機構燃料試験施設で行ったモニタリング試験の様子を示す。簡易物理ファントムは腹部まで準備しており、日本人男性の平均身長と同程度の高さに設置するため、台座を用いて簡易物理ファントム全体の高さを調整した。線源としては、図7右側のドラム缶中に放射性廃棄物として存在する ^{137}Cs であり、簡易物理ファントムは、 ^{137}Cs からの γ 線による外部被ばくを受けることとなる。簡易物理ファントムには、頭部及び手指部に試作したOSL線量計を取り付け、体幹部で受ける個人線量当量に加え、眼の水晶体及び手指部の線量当量の追加モニタリングを行った。さらに、簡易物理ファントムを設置した作業環境の作業環境モニタリングも実施し、1cm 周辺線量当量率($\text{H}^*(10)$)で、75 ~ 135 $\mu\text{Sv h}^{-1}$

であった。

簡易物理ファントムは約24時間設置し、回収した後、簡易物理ファントム各所に設置したOSL線量計からの指示値を読み、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比を評価した。

原子力機構燃料試験施設における、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比を表2に示す。線量比は、OSL線量計指示値の比率で求められており、OSL線量計指示値を用いた比率が、個人線量当量の比と一致することは、計算シミュレーション及び基準校正場での測定により既に確認済みである。

原子力機構燃料試験施設におけるモニタリング試験の放射線作業環境では、ドラム缶に封入された放射性廃棄物という、「体積線源からの不均等被ばく」状況が想定された。特に、放射線作業を模擬し、手指部を作業の対象となるドラム缶に接触させ、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量を評価した。この被ばく状況では、眼の水晶体/体幹部線量の比が 0.42 ± 0.04 、手指部/体幹部線量の比が 3.03 ± 0.34 となった。このことから、この放射線作業環境において現行の個人モニタリングにおける眼の水晶体等価線量の推定手法である、「体幹部で測定された1cm及び70 μm 線量当量のうちいずれか適切な方を、眼の水晶体線量の推定値とする」推定方法に従うとする場合、1cm線量当量を眼の水晶体線量の推定値とするのが妥当であり、その場合2倍以上過大評価することが分かった。なお、体幹部に装着した電子式個人線量計から指示値では、1cm個人線量当量が1.370 mSv、70 μm 個人線量当量が1.429 mSvと評価されており、この場合どちらを選択しても同

等の結果となる。

表2 原子力機構燃料試験施設におけるモニタリング試験で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比

	HI ^{eye} 又は HI ^{ext}
眼の水晶体 / 体幹部 H _p (3) _{eye} / H _p (10) _{trunk}	0.42 ± 0.04
手指部 / 体幹部 H _p (0.07) _{ext} / H _p (10) _{trunk}	3.03 ± 0.34

平成27年度の文献調査により、原子力研究施設を除いた学術分野では、加速器施設での放射線業務従事者被ばく事例が報告されているが、メンテナンス中の放射線業務従事者の被ばく事例の他、加速器施設解体に伴う被ばく線量が報告されている。本研究においては加速器施設における機器メンテナンス中の放射線業務従事者の被ばくを模擬する目的で、J-PARC 50 GeV シンクロトロン施設でのモニタリング試験を行った。



図8 J-PARC 50 GeV シンクロトロン施設でのモニタリング試験の様子

図8にはJ-PARC 50 GeV シンクロトロン施設でのモニタリング試験の様子を示す。この試験では加速器運転直後で放射化したバルブ操作を行う等の加速器メンテナンスを模擬した。

表3では、J-PARC 50GeV シンクロトロン施設における体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比を示す。J-PARC 50GeV シンクロトロン施設におけるモニタリング試験の放射線作業では、放射化したバルブという、「点線源からの不均等被ばく」状況が想定された。

表3 J-PARC 50GeV シンクロトロン施設におけるモニタリング試験で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比

	HI ^{eye} 又は HI ^{ext}
眼の水晶体 / 体幹部 H _p (3) _{eye} / H _p (10) _{trunk}	0.70 ± 0.04
手指部 / 体幹部 H _p (0.07) _{ext} / H _p (10) _{trunk}	2.96 ± 0.34

この被ばく状況では、眼の水晶体/体幹部線量の比が 0.70 ± 0.04、手指部/体幹部線量の比が 2.96 ± 0.34 となった。この放射線作業環境においては、試験開始前により不均等な被ばく状況を再現すると想定したが、測定結果は、想定より「均等」な被ばく状況を示すものであった。体幹部に装着したOSL線量計の指示値は、1cm 個人線量当量で 153 mSv であり、この場合も眼の水晶体等価線量を過大評価する（年間の線量限度を大きく超えているが、本研究でのモニタリング試験はあくまで体幹部線量と眼の水晶体/手指部線量の相関を評価することが

目的であるため、簡易物理ファントムでの過剰な線量での評価も許容しうるものである)。さらに詳細な結果及び考察については、分担研究報告で述べる。

(3) 均等被ばく状況下における、体幹部線量と眼の水晶体及び末端部等価線量の不均等度に関する検討

本事業において喫緊の課題である眼の水晶体等価線量の被ばく状況を詳細に考察するため、本項では均等被ばく条件での放射線業務従事者の体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の比率に注目した。眼の水晶体線量/体幹部線量の比は、モンテカルロ計算コード PHITS2.8.2 に人体模擬数学ファントムを導入して求められた。本研究で用

いる評価手法は、平成27年度において簡易物理ファントムと市販の OSL 線量計を基準放射線場に設置して測定した結果と計算で簡易物理ファントムと OSL 線量計素子を模擬した条件、さらに人体模擬数学ファントム中の体幹部で得られる線量に対する眼の水晶体線量の比について比較することで検証されたものである。 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 及び ^{90}Sr - ^{90}Y 基準放射線を用いた前方-後方照射ジオメトリ (AP ジオメトリ) での均一照射条件下での検証の結果、OSL 線量計を使用した線量評価と数学ファントムを用いる理想的な評価とは若干のずれが見られたが、(1) OSL がいずれも体表面に張り付けられていること、及び(2) 眼の水晶体線量/体幹部線量の比を評価するために OSL の線量評価には換算係数がかけられて

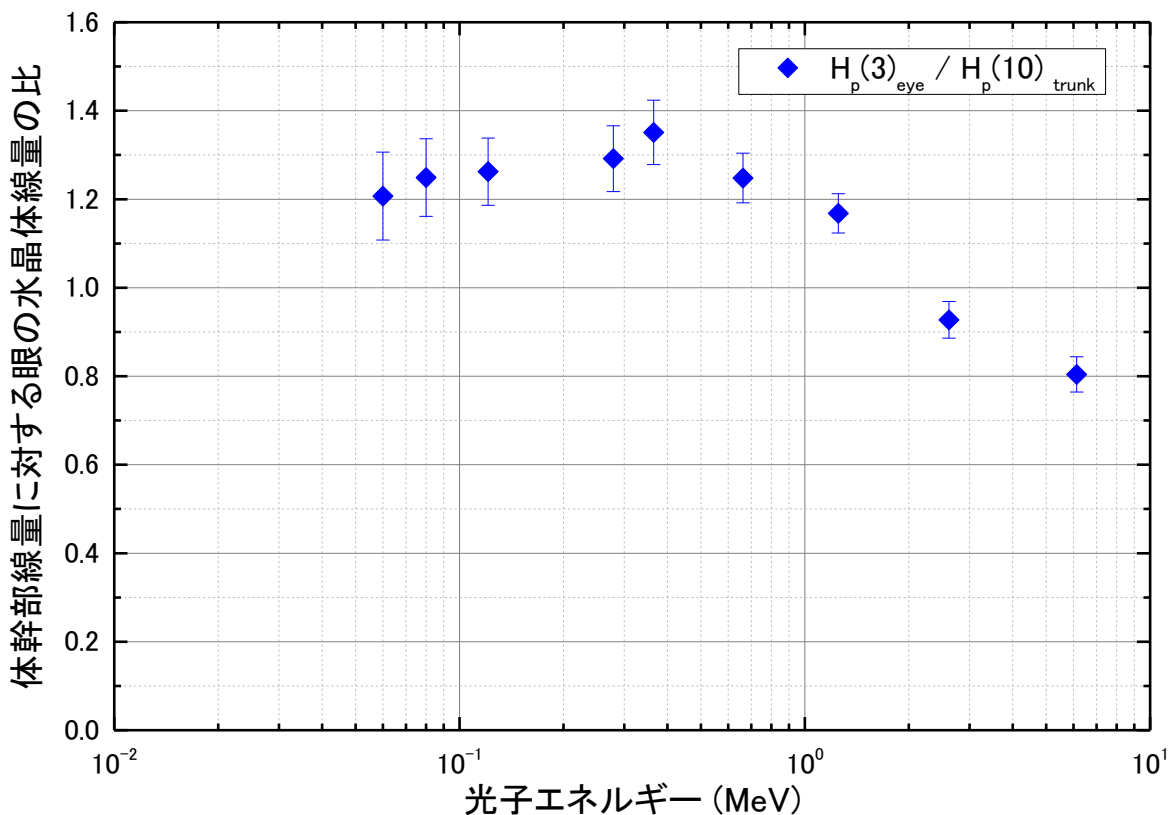


図9 ISO 照射条件下での体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の γ 線エネルギーに対する変化

表4 ISO 照射条件下での体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の比較 (β線)

体幹部線量に対する 眼の水晶体線量の比	線源及び計算条件		
	Beta-ray, ISO irradiation		
	⁴¹ Ar	⁹⁰ Y	¹⁰⁶ Rh
H _p (3) _{eye} / H _p (10) _{trunk}	-	(1.99 ± 0.68)×10 ³	25.9 ± 1.3
H _p (3) _{eye} / H _p (0.07) _{trunk}	(6.07 ± 0.65)×10 ⁻³	0.237 ± 0.003	0.439 ± 0.006
H _p (3) _{eye} / H _p (3) _{trunk}	1.04 ± 0.17	1.06 ± 0.02	1.07 ± 0.02

いないこと、を考慮すると、数学ファントムによる計算シミュレーションでの、体幹部線量に対する眼の水晶体線量比の値は妥当であると評価された。

本項においては、眼の水晶体線量/体幹部線量の比を、放射線業務従事者の受けた外部被ばくの不均等度とし、その不均等度を表す指標として不均等度指標 (Homogeneity Index = HI) を導入した。体幹部線量当量に対する眼の水晶体または末端部等価線量の比で表され、以下のように定義した。

$$(光子) HI_{\text{photon}}^{\text{eye}} = \frac{H_p(3)_{\text{eye}}}{H_p(10)_{\text{trunk}}} \dots (1)$$

ここで、H_p(10)_{trunk} 及び H_p(3)_{eye} はそれぞれ 1cm 及び 3mm 個人線量当量を表し、それぞれ体幹部及び眼の水晶体モニタリングで評価されることを推奨されている量で

ある。

評価に用いた線源はγ線及びβ線で、主に原子力及び加速器研究施設において、放射線業務従事者が受ける可能性のあるエネルギー範囲のものを選択した。γ線については、0.06 ~ 6 MeV までの単色のγ線を選択した。β線は、⁴¹Ar, ⁹⁰Y 及び ¹⁰⁶Rh を考慮した。これらのβ線放出核種は、加速器施設及び原子力施設での放射線業務従事者の被ばくへの寄与が大きい核種として知られている。

簡易物理ファントムと基準放射線場での照射試験は、回転照射ジオメトリ (ROT ジオメトリ) での均一照射条件で行われ、数学ファントムを用いて得られた体幹部及び眼の水晶体線量の比と、実験的に得られた比についても比較した。

図9はISO照射条件下における体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比のγ線エネ

表5 ROT 照射条件下での体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の比較 (γ線)

核種	²⁴¹ Am	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co
γ線エネルギー (MeV)	0.06	0.662	1.25
H _p (3) _{eye} / H _p (10) _{trunk} ROT 照射条件 (実験値)	-	1.11 ± 0.06	1.03 ± 0.03
H _p (3) _{eye} / H _p (10) _{trunk} ROT 照射条件 (計算値)	1.02 ± 0.01	1.22 ± 0.01	1.22 ± 0.01
H _p (3) _{eye} / H _p (10) _{trunk} ISO 照射条件 (計算値)	1.21 ± 0.10	1.25 ± 0.06	1.17 ± 0.04

ルギーに対する変化を示す。図に示す通り 0.06 ~ 6 MeV の広い範囲で、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、0.8 ~ 1.4 の範囲内に収まっている。

表 4 は、 β 線に対する体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の変化について示す。計算シミュレーションに用いた β 線源のうち、 ^{41}Ar での評価において、残余最大エネルギー (Residual Maximum Energy) が約 1.198 MeV であり、体幹部線量評価のために設けた深さ 10 mm 位置ではエネルギー沈着が見られず、 β 線 1 粒子あたりの吸収線量が 0 Gy となったため、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が評価できなかった。

表 5 では、ROT 照射条件での γ 線照射下における体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を示す。併せて、ISO 照射条件での計算結果も示す。ROT 照射条件での体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、原子力分野で受ける機会の多い γ 線エネルギー範囲である 0.06 ~ 1.25 MeV に対し、1.0 ~ 1.2 となった。 ^{137}Cs 及び ^{60}Co γ 線に対しては、基準校正場での実験も併せて行ったが、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、それぞれ ^{137}Cs に対して 1.11、 ^{60}Co に対して 1.03 と計算と比較して低い値を取った。さらに、ISO 照射条件と ROT 照射条件で得られた体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を比較した場合、 ^{241}Am に対して得られた比を除き、不確かさの範囲内で両者は良く一致した。詳細な議論については、次項 D. 考察に後述する。

D. 考察

(1) 眼の水晶体及び末端部モニタリング

用パッシブ型個人線量計の開発

本研究では、実験で使用した OSL 線量計の γ 線エネルギー応答特性について、計算シミュレーションで評価した。現行使用されている、1cm 線量当量及び $70\mu\text{m}$ 線量当量に加え、3mm 線量当量に対しても応答特性を評価した。図 10 では、計算シミュレーション及び基準校正場での照射試験で求めた、 γ 線に対する OSL 線量計応答特性の比較である。OSL 線量計の前面には 1 cm 線量当量及び $70\mu\text{m}$ 線量当量での応答特性改善のために取り付けられた 2mm^t のアクリルフィルタの代わりに、金属製のフィルタを取り付けることで応答特性の改善を試みた。

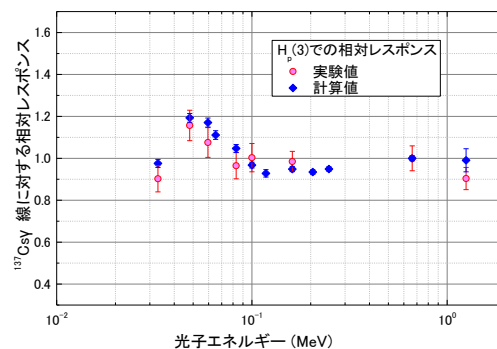


図 10 計算シミュレーション及び基準校正場での実験で得られた試作 OSL 線量計のエネルギー応答特性の比較

($H_p(3)$ での応答特性)

計算シミュレーション及び基準校正場における照射試験の結果、眼の水晶体用線量計について、3 mm 個人線量当量($H_p(3)$)で校正定数を求めた場合、 γ 線エネルギー 40-1250 keV の広い範囲で、 ^{137}Cs γ 線を基準として $\pm 20\%$ という良好な応答比が得られた。このことから、適切な金属フィルタ (この場合、錫製厚さ 1 mm 及びアルミ製

厚さ 0.5 mm で、錫製フィルタを前面にアルミ製フィルタをその下に重ね、その下に OSL 線量計を取り付けて使用した。) を OSL 線量計照射面の前面に配置することで市販の OSL 線量計の応答特性に対する性能向上が可能であることが示された。

本研究では、低エネルギー γ 線領域の応答特性改善のため、ケースがない状態の OSL 線量計の応答も引き続き評価したが、前掲 C. に示すとおり $H_p(0.07)$ での応答特性で、通常のケースがある状態での応答と比較して、大きな変化は見られなかった。本年度実施した計算シミュレーションによる評価では、指を模擬したアクリル製 ISO ロッドファントムの前面に OSL 線量計を取り付けた条件で応答特性の評価を行っている。そのため、OSL 線量計へはファントム表面から散乱された γ 線・二次電子成分が応答に加味されている。これが結果に反映されており、大きな差が出なかったと思われる。しかしながら、低エネルギー γ 線に対しては、むしろ応答特性の観点から悪化している。これは、低エネルギー γ 線に対し、ケーシングが荷電粒子平衡の材料として機能していることから説明できる。

ケーシングの有無による OSL の感度の変化について議論すると、 ^{137}Cs γ 線 (662 keV) に対し、ケーシング有の OSL 線量計に対するケーシング無の OSL の相対感度は、1.09 と約 9% 感度が向上したのに対し、40 keV の γ 線に対しては、約 41% も感度が向上している。エネルギー応答特性の観点からは、ケーシングが無い状態で不利と言えるが、感度の観点からすると、より低い線量当量率まで測定可能であるといえる。この点から、70 μm 線量当量で評価の対象となる低エネルギー領域の γ 線に対しては、

ケーシング無の OSL 線量計を用いるモニタリングは、より正確な線量評価を与える可能性がある。

本項(3)での考察にも記載するとおり、特に、 β 線被ばく時の体幹部線量からの眼の水晶体等価線量の評価時には以下に引用する提言がなされている。

「胸等に取り付けた個人線量計から評価した β 線 70 μm 線量当量をそのまま β 線 3 mm 線量当量、すなわち水晶体の等価線量とする方法は、過大な線量評価を与える。それが線量限度に近づくような場合は、3 mm 線量当量と 70 μm 線量当量の本質的な違いや、必要に応じて防護具による遮へい効果を考慮し、補正を行うべきである。」
[8]

放射線作業時に、眼の水晶体被ばくへの追加モニタリングがなされておらず、また、追加モニタリング対策が施されていても 3 mm 線量当量に対する線量計の応答が評価されていない場合に、この点を事前に考慮して対策を講じることは重要であろう。

本事業において、平成 28 年度に実施した前述のケーシング無の OSL 線量計に対しては、 β 線に対する感度も期待できる。そこで、手指部モニタリングへの適応も考慮し、 β 線による被ばく状況での、線量計応答評価及び眼の水晶体等価線量モニタリングに適した線量計の開発を行った。前述のとおり、計算シミュレーションによる γ 線に対する電子線及び連続分布を持つ β 線に対する OSL 線量計応答特性を評価し、(2)に示す簡易物理ファントムを用いるモニタリング試験に供する。

表 6 では、OSL 線量計の β 線被ばくに対する眼の水晶体及び手指部モニタリングへ適応可能なケーシング無の OSL 線量計の、

β 線に対する応答特性を評価した。(図1 1 参照)

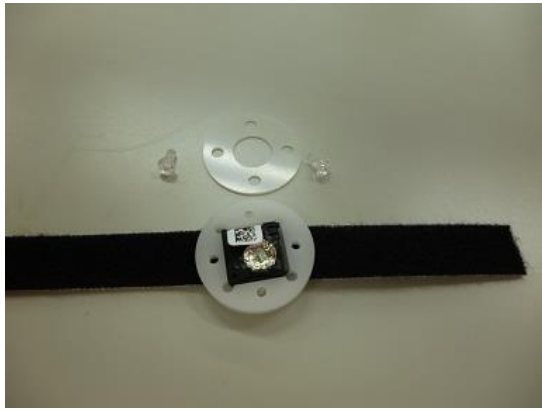


図1 1 試作 OSL 線量計の外観(ケーシングを開口し、アルミマイラー製遮光膜を取り付けたもの)

表6 試作及び市販の OSL 線量計の種々の β 線に対する ^{137}Cs γ 線 $H_p(10)$ での線量当量に対する $H_p(0.07)$ での相対レスポンスの比較

	試作 OSL (16 μm マイラー膜)	市販 OSL
^{90}Sr - ^{90}Y	0.98	1.02
^{85}Kr	0.58	0.26
^{147}Pm	0.15	-

評価は、原子力機構 FRS で整備済みの基準 β 線校正場における照射試験により実施した。得られた応答特性は、70 μm 個人線量当量($H_p(0.07)$)で校正定数を求め、 ^{137}Cs γ 線での 1cm 個人線量当量での応答を基準として相対レスポンスを求めた。

照射試験による相対レスポンスの評価の結果、ケーシング無の試作 OSL について、市販の OSL 線量計では観測不可能である、残余最大エネルギーが約 225 keV の ^{147}Pm β 線に対しても感度を有することが分かっ

た。さらに、 ^{85}Kr β 線に対しても応答特性の改善が見られる一方で、 ^{90}Sr - ^{90}Y β 線に対する応答は一致しており、感度についても同様に一致している。このことから、 β 線による手指部の被ばくが考慮される放射線作業にあっては、被ばく原因となる β 線のエネルギーに大きく依存せず、適切に手指部のモニタリングが可能であろう。

β 線による被ばくについて、前掲の文献[8]の提言を受け、1cm 線量当量及び 70 μm 線量当量に加え、眼の水晶体線量評価のため、OSL 線量計の前面に 2 mm^t のアクリルフィルタを取り付けて、電子線及び β 線に対し、計算シミュレーション及び基準校正場での照射試験から 3 mm 個人線量当量($H_p(3)$)に対する応答を評価した。OSL 線量計の応答は、投与した 3mm 個人線量当量に対する OSL 線量計からの指示値(計数値)で求めた。その結果、 ^{90}Sr - ^{90}Y β 線に対して、 ^{137}Cs γ 線を基準に 0.85 と、良好な応答比が得られている。表7では市販の OSL 線量計について、アクリルフィルタ有無について、基準 ^{90}Sr - ^{90}Y β 線校正場での照射試験により得られた OSL 線量計からの応答に対して、 ^{137}Cs γ 線での $H_p(10)$ に対する相対レスポンスで比較を行ったものである。基準 ^{90}Sr - ^{90}Y β 線校正場での照射試験では、頭部を模擬した円筒型アクリルファントムに OSL 線量計を設置して試験を行い、応答特性については 70 μm 及び 3mm 個人線量当量に対し評価した。

表7 市販のOSL線量計の ^{90}Sr - ^{90}Y β 線に対する ^{137}Cs γ 線での $H_p(10)$ に対する相対レスポンスの比較

	市販 OSL+ 2 mm ^t アクリルフィルタ	市販 OSL
$H_p(3)$	0.97	2.45
$H_p(0.07)$	0.42	1.05

表7に示すとおり、アクリルフィルタを取り付けたOSL線量計で3mm個人線量当量を評価した場合、 ^{137}Cs γ 線での $H_p(10)$ に対して同等の応答が得られる一方で、市販のOSL線量計をそのまま用いた場合、3mm個人線量当量での評価では過大応答となった。一方、OSL線量計の応答について、70 μm 個人線量当量で評価を行った場合、アクリルフィルタを取り付けたOSL線量計では ^{137}Cs γ 線に対し過小評価する一方で、市販のOSL線量計では同等の応答が得られている。これらの特性を詳細に把握しない限り、前掲の文献[2]の提言を実行することは困難であると言わざるを得ない。このことは、適切な線量当量単位でのモニタリングのための線量計には、適切な応答特性を有する線量計を準備し、特性と校正定数を事前に把握しておく必要があることを示唆しているといえる。

(2) 実際の放射線作業環境下におけるモニタリング試験

放射線作業環境下でのモニタリング試験は、平成27年度に検証を終えた簡易物理ファントムに前項(1)で開発した試作OSL線量計を取り付け、体幹部で得られる線量当量に対する眼の水晶体及び手指部線量当量の相関を評価することを目的としている。

モニタリング試験は、原子力機構燃料試験施設及びJ-PARC 50 GeV シンクロトロン施設において行った。前者は、原子力分野で典型的な放射性汚染物である ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 等の核分裂生成物からの β 線及び γ 線からの被ばくを受ける作業環境である。後者は、主に加速器運転時に生じる放射化生成物からの β 線及び γ 線からの被ばくが中心となる作業環境である。なお、本研究では眼の水晶体及び手指部等価線量を外部被ばくによる線量評価のみを対象としている。ここでは考察について簡単に述べる。なお、本課題に対しては、分担報告書において詳細な考察が行われている。

前項C. 研究結果では簡潔に記載したが、モニタリング試験では、不均等被ばく及び均等被ばく状況での作業環境での放射線業務従事者の被ばくと、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量についての相関に着目している。平成28年度のモニタリング試験は、以下に示す作業を模擬して選定された。

(a)~(c)は50 GeV シンクロトロン施設における作業、(d)及び(e)は原子力機構燃料試験施設における作業である。(a)、(b)及び(d)は「不均等被ばく状況」を考慮した体積線源からの被ばく、(c)及び(e)は、広範囲に分布した線源からの均等被ばく状況を模擬事例である。

- (a) 加速器施設における放射化されたビームライン機器の点検作業
- (b) 加速器施設における放射化された冷却水精製樹脂の点検作業
- (c) 加速器施設における放射化された空気中での作業
- (d) 原子力施設における汚染物取扱作業

(e) 原子力施設における高線量率 BG 場での作業(遠方にある汚染物品からの被ばく)

前掲の表 2 に示した体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比は、不均等被ばく状況(d)で得られた結果であるが、その不均等被ばく状況について、開発した計算シミュレーションにより再現した結果を、表 8 及び表 9 に示す。

表 8 原子力機構燃料試験施設におけるモニタリング試験で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比と計算シミュレーションで得られた結果の比較

眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	HI_{eye}
モニタリング試験	0.42 ± 0.04
計算シミュレーション① (点線源による模擬)	0.45 ± 0.03
計算シミュレーション② (体積線源による模擬)	0.43 ± 0.02

表 9 原子力機構燃料試験施設におけるモニタリング試験で得られた、体幹部線量に対する手指部線量の比と計算シミュレーションで得られた結果の比較

眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(0.07)_{ext} / H_p(10)_{trunk}$	HI_{ext}
モニタリング試験	3.03 ± 0.34
計算シミュレーション① (点線源による模擬)	2.20 ± 0.06
計算シミュレーション② (体積線源による模擬)	2.81 ± 0.09

計算シミュレーションによる線量比は、OSL線量計からの指示値の比率で求められており、OSL線量計指示値を用いた比率が、放射線業務従事者を模擬した数学ファントムで得られる個人線量当量の比と一致することは、計算シミュレーション及び基準校正場での測定により既に確認済みである。

図 1 2 (a)及び(b)では、計算シミュレーションで使用したジオメトリを示す。

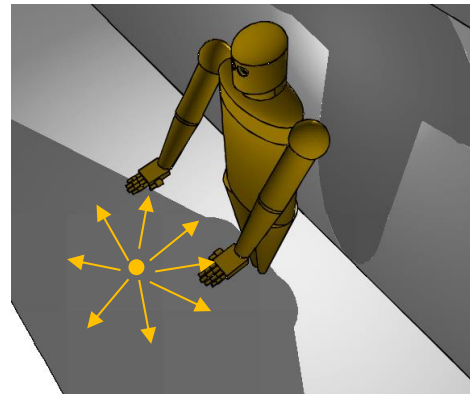


図 1 2 (a) 原子力機構燃料試験施設における廃棄物取扱い作業模擬に関する計算シミュレーション①のジオメトリ (点線源を模擬)

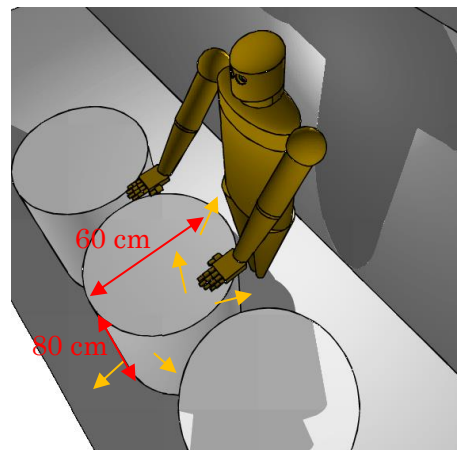


図 1 2 (b) 原子力機構燃料試験施設における廃棄物取扱い作業模擬に関する計算シミュレーション②のジオメトリ (ドラム缶の体積線源を模擬)

原子力機構燃料試験施設における「体積線源からの不均等被ばく」状況でのモニタリング試験結果を再現するため、検証済みの計算シミュレーションに数学ファントムの周辺にモニタリング試験を実施した作業環境の体系を導入し、体幹部に対する眼の水晶体及び手指部線量の比を計算した。線源には ^{137}Cs γ 線源を用いたが、シミュレーション①では、ドラム缶に封入された放射性廃棄物を点線源として模擬したのに対し、シミュレーション②では、60 cm ϕ × 80 cm 高さの円筒形堆積線源を導入した。この被ばく状況では、眼の水晶体/体幹部線量の比が 0.42 ± 0.04 と得られたが、シミュレーション①では 0.45 ± 0.03 、シミュレーション②では 0.43 ± 0.02 となり、いずれの場合も不確かさの範囲内で一致している。このことは、平成27年度に提案した計算シミュレーションによる眼の水晶体/体幹部線量比の推定が、実際の放射線作業環境を非常に良く再現できることを示している。それと同時に、この放射線作業について言うと、線源形状を単純化した点線源であっても体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を正当に見積もることが可能であることを示している。一方、体幹部線量に対する手指部線量の比に関して言うと、モニタリング試験では手指部/体幹部線量の比が 3.03 ± 0.34 となった。この状況を計算シミュレーションで模擬した場合、シミュレーション①では 2.20 ± 0.06 、シミュレーション②では 2.81 ± 0.09 となった。眼の水晶体線量/体幹部線量比の場合と異なり、点線源で放射線作業環境を模擬した場合、モニタリング試験結果より約27%過小評価するのに対し、ドラム缶を模擬した体積線源を計算

シミュレーションのジオメトリに導入した場合、不確かさの範囲内で一致することが分かった。特にこのケースでは、手指部が線源に接触していることもあり、点線源でこの被ばく状況を近似できないことを改めて確認した、といえる。このことは、手指部等価線量モニタリングの結果まで正確に推定する場合、計算シミュレーションに数学ファントムと詳細な線源情報を導入することが必要であることを示唆するものである。

一方で、均等被ばく状況(e)で得られた体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比について、モニタリング試験結果及び開発した計算シミュレーションにより再現した結果を、表10に示す。図13ではモニタリング試験で簡易物理ファントムを設置した状況をしめす。

表10 原子力機構燃料試験施設におけるモニタリング試験で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比と計算シミュレーションで得られた結果の比較 (均等被ばく状況の模擬)

眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$	HI_{eye}
モニタリング試験	0.67 ± 0.05
計算シミュレーション① (ROT照射)	1.22 ± 0.01
計算シミュレーション② (面線源によるROT照射)	0.73 ± 0.01

均等被ばく(e)の放射線作業において、主な被ばく源は周囲に置かれた1 m³ 容器内の線源であった。計算シミュレーション①では、後述(3)でも示したICRPでも評価されている回転照射ジオメトリ(ROT照

射)で計算シミュレーションを行った。計算シミュレーション②では、数学ファントム表面から1 mの距離にある高さ1 mの範囲に一様分布した ^{137}Cs 線源からのROT照射を仮定した。計算シミュレーション②では、 ^{137}Cs 線源の照射範囲を限定したROT照射による体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を評価した。この場合、眼の水晶体線量/体幹部線量の比は、不確かさの範囲内で一致した。不均等被ばく状況での実際の放射線作業環境でのモニタリング試験で得られた眼の水晶体線量/体幹部線量の比と計算シミュレーションで得られた比の比較と同様に、均等被ばく状況であっても、計算シミュレーションにより体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の評価が可能であることが明らかとなった。また、線源形状について、均等被ばく状況をもたらすと想定される、広範囲に分布する線源に対しても、ICRPで評価されたROT照射及びISO照射ジオメトリそのものを導入するよりも、線源が存在し得る高さを考慮した評価が、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を正確に評価する、という観点では重要であることを示している。



図13 原子力機構燃料試験施設における均等被ばく状況模擬のモニタリング試験

また、均等被ばく状況を想定したモニタリング試験(e)からは、「均等被ばく状況での不均等度」が明らかとなった。モニタリング試験において、眼の水晶体/体幹部線量の比が 0.67 ± 0.05 と得られたが、これは現行の1cm個人線量当量での体幹部線量を眼の水晶体線量の推定値として使用した場合、約1.5倍過大評価していることになる。一方で、計算シミュレーションによる単純なROT照射条件下での推定では、約18%過小評価(=1/1.22)となる。保守的な推定を与えるという観点では、詳細に作業環境の線源条件を模擬した方が良いといえるが、放射線作業着手前には均等被ばく状況を想定したにも関わらず、実際には放射線業務従事者は不均等に被ばくしうる、という点について十分留意する必要がある。この点からも、計算シミュレーションで数学ファントムとある程度詳細な線源条件を導入し、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比を推定することは、放射線業務従事者の被ばく線量の妥当な推定を与えるものである。

表11では、計算シミュレーションで得

られた体幹部線量当量を変化させた時の眼の水晶体線量比の比較を示す。被ばく条件は上述の不均等及び均等被ばく状況の条件での計算値を示した。また、比較に用いた個人線量当量の単位は、1cm 及び 3mm 個人線量当量とした。

表 1 1 計算シミュレーションで得られた体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比との比較

	不均等被ばく 状況	均等被ばく 状況
$H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	0.43 ± 0.02	0.73 ± 0.01
$H_p(3)_{eye} / H_p(3)_{trunk}$	0.42 ± 0.02	0.69 ± 0.01

表 1 1 で示す通り、個人線量当量の単位を変化させた場合でも、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、大きく変化しなかった。これは、いずれの状況も ^{137}Cs γ 線が主たる被ばく原因となる放射線作業環境での事例であるためと思われる。この点から、 β 線被ばくが優位ではないことが明らかかな作業環境においては、現行の個人モニタリングで実施されている、1cm 個人線量当量を用い、本事業で確立した計算シミュレーションを用いる体幹部線量から眼の水晶体線量の比を推定する手法で、適切な眼の水晶体線量当量の推定値を与えることが分かった。なお、 β 線被ばく状況ではこの値は大きく変わったと想定される。詳細な解析は、分担報告書に記載している。

(3) 均等被ばく状況下における、体幹部線量と眼の水晶体及び末端部等価線量の不均等度に関する検討

工業・原子力・学術分野における被ばく線量評価及び被ばく線量低減化事例の報告は、ほぼすべてが不均等被ばく状況での放射線作業に対する線量評価であり、日常的に行われている放射線作業とは明確に区別された、「特殊作業における放射線被ばく事例」として報告されている。一方、放射線業務従事者の 80% は線量計の検出下限未満の被ばく線量であり、そのほとんどが定常的な放射線作業に従事した結果と考えられる。そのような放射線作業での被ばく条件として、放射線業務従事者が日常的に行う点検、機器メンテナンス等では、全身へ均等に被ばくする状況が考慮される。

本事業において、事業着手当初より上述の「特殊作業における放射線被ばくで、不均等被ばく状況」における体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の相関について詳細な検討を行ってきた。しかしながら、被ばく状況の大部分が、「定常作業における放射線被ばくで、均等被ばく状況」についての評価は、研究事例も少なく、本事業でも予備試験を行ったのみであった。

そこで、均等被ばく条件での放射線業務従事者の体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比に注目した。これは、特に喫緊の課題である眼の水晶体等価線量の被ばく状況をより詳細に考察するためである。眼の水晶体線量/体幹部線量の比は、モンテカルロ計算コード PHITS2.8.2 に人体模擬数学ファントムを導入して評価した。

図14では、ISO照射条件下における体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の γ 線エネルギーに対する変化を示している。図に示す通り0.06 ~ 6 MeVの広い範囲で、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、0.8 ~ 1.4の範囲内に収まっている。1.5 MeV未満の γ 線の場合、 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$ は1より大きく見積もられた。これは体幹部で観測された $H_p(10)_{trunk}$ を眼の水晶体等価線量の推定値とした場合、過小評価することになる。特に、Cs及びCoの原子力施設、特に商業用原子力発電所で運転中も含めた放射線作業環境において想定されるエネルギー範囲(0.6 ~ 1.3 MeV [8])で、 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$ は1.2と評価されていることから、 $H_p(10)_{trunk}$ を用いる

眼の水晶体等価線量の推定値は、実際に観測されうる眼の水晶体等価線量に対し0.83(=1/1.2)倍となることが示唆される。このことから、放射線業務従事者の受ける線量が法令で定められた線量限度近傍、又は事業所の定める被ばく線量管理目標値近傍で被ばくすることが想定される放射線作業では、放射線作業が均等被ばく状況であっても、追加線量計を用いる追加モニタリングが必要であろう。一方、年間を通じて放射線業務従事者の被ばく線量が線量計の検出下限未満(作業環境のバックグラウンドレベル程度)である場合、現行の個人モニタリングを踏襲し、追加モニタリングが不要であることは言を俟たない。

同様に、診断で見られるX線のエネルギー

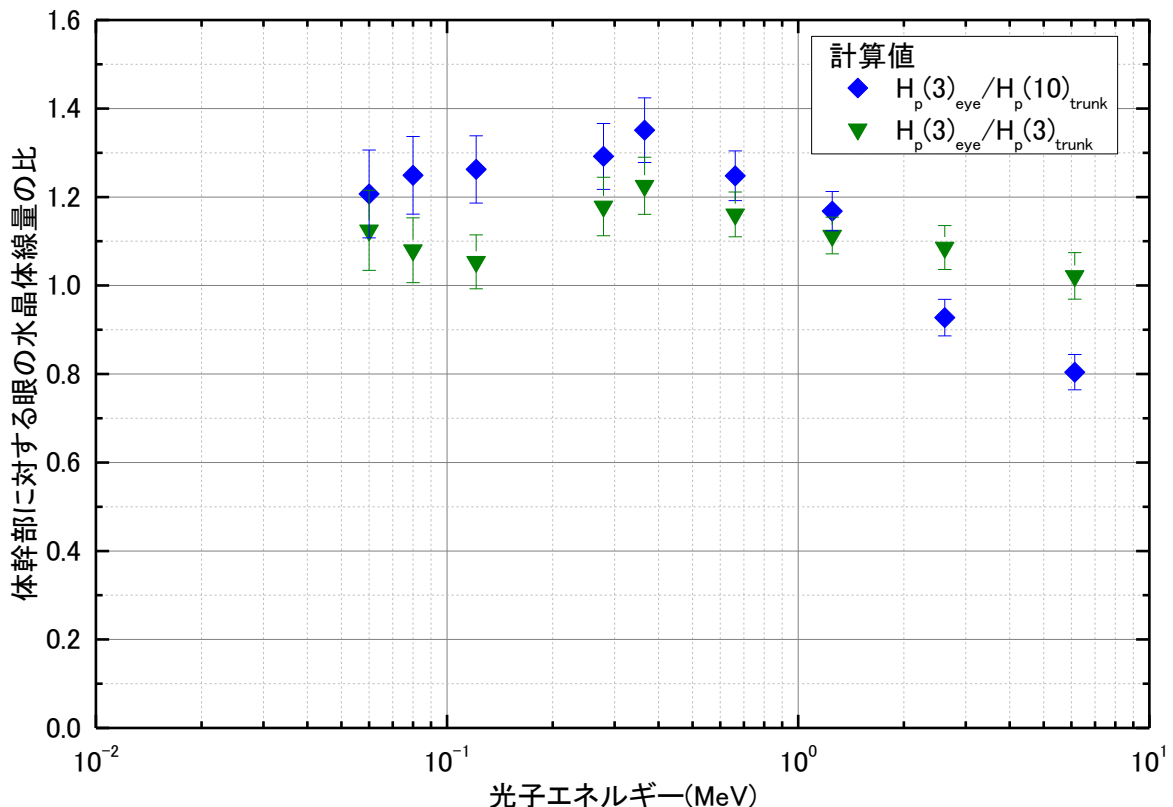


図14 ISO照射条件下での体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の γ 線エネルギーに対する変化

一領域でも、同様に $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$ は 1.2 程度と 1 より大きく評価されている。このことから、現行の個人モニタリングで行われる手法を採用する場合、眼の水晶体等価線量を 20% 程度過小評価することになる。この被ばく状況でも上述のエネルギー領域と同様に、放射線業務従事者の受ける線量が法令で定められた線量限度近傍、又は事業所の定める被ばく線量管理目標値近傍で被ばくすることが想定される放射線作業では、放射線作業が均等被ばく状況であっても、眼の水晶体における線量当量をモニタリングするための追加線量計の装着が勧められる。

2 MeV を超えるエネルギーの高い γ 線による被ばくの場合、 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$ は 1 より小さくなる。これは体幹部で観測された $H_p(10)_{trunk}$ を眼の水晶体等価線量の推定値とする場合、過大評価することになる。原子力施設では、我が国に普及している沸騰水型軽水炉 (Boiling Water Reactor, BWR) 近傍で見られる。学術分野においては、線形加速器、電子線加速器等の近傍では見られるエネルギーである。本事業では医療分野を対象としなかったが、医療照射で使用される X 線のエネルギーで 10 MV 程度、電子線では 20 MeV 程度まで加速する線形加速器等の加速器近傍で観測されるエネルギーといえる。例えば γ 線エネルギーが 6 MeV の場合、 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$ は 0.8 であるため、 $H_p(10)_{trunk}$ を用いる眼の水晶体等価線量の推定値は、実際に観測されうる眼の水晶体等価線量に対し 1.25 (=1/0.8) 倍となることが示唆される。この推定値は、保守的な評価を与えるが、注意が必要であろう。

原子力分野においては、放射線業務従事

者の被ばくにおける、放射線の入射方向に関する包括的な研究がなされており、「(1) 身体前面の線量(A)と身体後面の線量(P)の比(P/A)は、0.31~1.34 ですべての作業者の平均値は、0.85 であった。」及び「(3)個人モニタの装着期間が長くなるにしたがって、身体前面と身体後面の線量の比のばらつきは小さくなり、1.0 より小さい平均値の近傍に収束することがわかった。」[9]という知見が得られている。このことから、原子力施設での定常作業における被ばくは、ISO 照射条件よりむしろ ROT 照射条件がより被ばく状況の実態に近い可能性がある。本研究では、計算シミュレーションに加えて簡易物理ファントムを用いた基準校正場での試験により、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を評価した (前掲表 5 参照)。

ROT 照射条件での体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、原子力分野で受ける機会の多い γ 線エネルギー範囲である 0.06 ~ 1.25 MeV に対し、1.0 ~ 1.2 となった。 ^{137}Cs 及び ^{60}Co γ 線に対しては、基準校正場での実験も併せて行ったが、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、それぞれ ^{137}Cs に対して 1.11、 ^{60}Co に対して 1.03 と計算と比較して低い値を取った。この差異は、計算シミュレーションでは照射ジオメトリの影響のみを分離して評価するために計算体系内に空気を導入していないことに対し、簡易物理ファントムを用いた実験では空気による γ 線の散乱及び吸収による影響が加味されることから生じる、と考察される。

γ 線と同様に β 線に対しても、ISO 照射条件での体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比について、計算シミュレーションで評価した。特に、この放射線作業環境にお

いて現行の個人モニタリングにおける眼の水晶体等価線量の推定手法である、「体幹部で測定された 1cm 及び 70 μm 線量当量のうちいずれか適切な方を、眼の水晶体線量の推定値とする」推定方法に従うとする場合、残余最大エネルギー（Residual Maximum Energy）が約 1.198 MeV である ^{41}Ar では、1cm 個人線量当量は β 線 1 粒子あたりの吸収線量が 0 Gy となり、選択できず、評価した全ての β 線放出核種に対し、70 μm 個人線量当量で眼の水晶体線量を推定することとなる。その場合、 ^{41}Ar 、 ^{90}Y 及び ^{106}Ru からの β 線に対し、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、0.006 ~ 0.44 である。このことは、被ばく評価の対象となる β 線の残余最大エネルギーが低い場合、従来の 70 μm 個人線量当量で眼の水晶体等価線量を推定する手法では、場合によっては数百倍過大評価する可能性を示唆している。例えば、東京電力福島第一原子力発電所における事故復旧作業では、放射線作業従事者が ^{90}Sr - ^{90}Y を高濃度に含んだ汚染水を保管するタンクの保守、多核種除去設備の沈殿物及び吸着剤の取扱いで β 線により被ばくする状況が考慮されている [10]。前掲表 5 に示すとおり、均等被ばく状況が考慮される作業環境であったとしても、体幹部で得られた 1cm 個人線量当量での眼の水晶体線量の推定では大幅な過小評価になる一方で、同じ体幹部で得られた 70 μm 個人線量当量では、3、4 倍程度の過大評価となる。過大評価である場合、眼の水晶体等価線量は保守的に推定されているため、実際に受けた等価線量より低く、放射線業務従事者の防護の観点では望ましい点があるが、計画被ばく線量を過大評価される眼の水晶体等価線量を基準に設計する

場合、過剰な防護資機材や非効率な作業時間の設定をもたらす可能性が十分考えられる。このことから、いずれの場合においても、適切な放射線管理とは呼べない可能性がある。

同じ計算シミュレーションによる体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を、3mm 個人線量当量同士で比を求めたものを図 14 及び前掲表 5 に示している。この時 γ 線・X 線に対しては、0.06 ~ 6 MeV の広い範囲で、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、1.02 ~ 1.22 の範囲を取る。

β 線に対しては、1.03 ~ 1.07 となり、眼の水晶体線量が体幹部で得られた線量当量とほぼ等しくなることが分かった。仮に体幹部での個人モニタリングにおいて、3mm 線量当量がモニタリングの対象となっている場合、放射線業務従事者が通常作業で受けるような放射線作業環境での均等被ばく状況においては、体幹部で得られた線量当量をそのまま用いることで精度よく眼の水晶体等価線量を評価できる可能性が示された。ただし、体幹部線量に対する眼の水晶体の比は 1 を超えているため、X 線・ γ 線に対していうと体幹部線量を眼の水晶体等価線量とする場合、最大で 20% 程度過小評価する (=1/1.22 倍) 可能性があることを指摘しておく。

E. 結論

本研究は、放射線業務従事者が受ける眼の水晶体及び手指等の末端部における被ばく等価線量を適切に評価する手法の開発を目的としている。研究期間内で体幹部線量から眼の水晶体、末端部等の組織等価線量の合理的な評価手法を確立するため、本研

究事業最終年度である平成28年度では、以下に示す(1)、(2)及び(3)のテーマを並行して進めた。

(1) 眼の水晶体及び末端部モニタリング用パッシブ型個人線量計の開発

(2) 実際の放射線作業環境下におけるモニタリング試験

(3) 均等被ばく状況下における、体幹部線量と眼の水晶体及び末端部等価線量の不均等度に関する検討

本事業最終年度である平成28年度は、(1)の追加モニタリング用パッシブ型個人線量計について、エネルギー補償用フィルタを検討することで、既存のOSL線量計を利用することで進めた。(2)について、加速器施設及び核燃料物質使用施設の放射線作業環境下に簡易物理ファントムを設置し、表面に取り付けたOSL線量計の読み値から、体幹部線量と眼の水晶体及び末端部等価線量の相関について評価した。(3)は、体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の比を、均等被ばく状況としてISO及びROT照射ジオメトリを考慮し、計算シミュレーションにより、被ばくの均等度を求めた。

(1)で進めたパッシブ型個人線量計の試作及び基準校正場での試験を通じ、図3では、OSL線量計に2mm^tの亚克力板を取り付けた線量計を試作し、原子力機構FRSで整備した基準X線・γ線校正場でエネルギー応答特性試験を行った。2mm^tの亚克力板を追加したOSL線量計応答特性は、100～1250 keVのエネルギー範囲に対し、エネルギー応答がfactor 1.67 (1/1.67～1.67)以内に入ることが確認できた。さらに、2mm^t亚克力板付OSL線量計の電子及びβ線に対する応答特性も評価した。

レスポンスは、¹³⁷Cs γ線基準校正場で得られたH_p(3)に対するレスポンスに対する相対レスポンスで評価し、単色の電子線及びスペクトルを有するβ線に対しても、2mm^t亚克力板付OSL線量計のレスポンスは、¹³⁷Cs γ線に対し、10%以内で一致した。また、⁹⁰Sr-⁹⁰Y β線基準校正場での照射試験と計算シミュレーションでの結果も、不確かさの範囲内で一致している。このことから、計算シミュレーションの妥当性が示されている。また、手指部等価線量モニタリングのため、市販OSL線量計のケーシングを開口して改造し、β線による皮膚等価線量モニタリング用のOSLを試作した。評価は、原子力機構FRSで整備済みの基準β線校正場における照射試験により実施した。応答特性は、H_p(0.07)で校正定数を求め、¹³⁷Cs γ線での1cm個人線量当量での応答を基準として相対レスポンスを求めた。照射試験による相対レスポンスの評価の結果、ケーシング無の試作OSLについて、市販OSL線量計では観測不可能である、残余最大エネルギーが約225 keVの¹⁴⁷Pm β線に対しても感度を有することが分かった。さらに、⁸⁵Kr β線に対しても応答特性の改善が見られる一方で、⁹⁰Sr-⁹⁰Y β線に対する応答は一致しており、感度についても同様に一致している。これらの結果から、眼の水晶体及び手指部の追加モニタリングが必要となり得る放射線作業では、特にβ線による不均等被ばく状況が想定される作業では、本研究で試作した個人線量計は追加モニタリング実施時に妥当な線量当量の測定結果を与えうるものであることが示唆される。

(2)の放射線作業環境下におけるモニタリング試験は、簡易物理ファントムに(1)

で開発した OSL 線量計を取り付けることで実施した。モニタリング試験は、核燃料物質使用施設である、原子力機構燃料試験施設及び J-PARC 50 GeV シンクロトロン施設において行った。モニタリング試験では、不均等被ばく及び均等被ばく状況での作業環境での放射線業務従事者の、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量についての相関に着目して行われた。原子力機構燃料試験施設での、ドラム缶に封入された放射性廃棄物という、「体積線源からの不均等被ばく」状況を想定した不均等被ばく状況で得られた、眼の水晶体/体幹部線量の比は 0.42 ± 0.04 、手指部/体幹部線量の比が 3.03 ± 0.34 となった。J-PARC 50 GeV シンクロトロン施設における均等被ばく状況を模擬した作業では、眼の水晶体/体幹部線量の比が 0.70 ± 0.04 、手指部/体幹部線量の比が 2.96 ± 0.34 となった。均等被ばく状況では、かろうじて factor 1.5 (=1/1.5 ~ 1.5) となっているが、モニタリング試験着手時点で想定したよりも、「不均等な被ばく」が観測された。これは、均等被ばく状況になると想定された面線源の領域が、実際には不均等被ばく状況に近い状態であることが、計算シミュレーションとの比較で明らかとなった。このことは、体幹部線量からの眼の水晶体線量の推定手法に、これらの線源情報が加味されるべきであることを示唆している。なお、各モニタリング試験で得られた眼の水晶体/体幹部線量及び手指部/体幹部線量の比については、平成 27 年度に整備した数学ファントムを導入する計算シミュレーションで不確かさの範囲内で再現できており、本事業で整備した計算シミュレーションを用いる手法が、体幹部線量からの眼の水晶体及び手指部線量の妥当

な線量評価手法であると示された。

(3) では、現行の個人モニタリングにおける眼の水晶体等価線量の推定方法が、どの状況まで適応可能か。特に均等被ばく状況とされてきた状況では、放射線業務従事者はどの程度均等に被ばくしうるか、計算シミュレーションで検証した。その結果、ISO 照射条件での γ 線に対しては $0.06 \sim 6 \text{ MeV}$ の広いエネルギー範囲で、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、 $0.8 \sim 1.4$ の範囲内に収まっていた。特に、 1.5 MeV 未満の γ 線の場合、 $H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$ は 1 より大きく見積もられている。原子力分野において想定される放射線作業環境でのエネルギー範囲 ($0.6 \sim 1.3 \text{ MeV}$ [8]) 及びで診断で見られる X 線のエネルギーの領域で、 $H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$ は 1.2 と評価されているため、 $H_p(10)_{\text{trunk}}$ を用いて得られる眼の水晶体等価線量の推定値は、実際に観測されうる眼の水晶体等価線量に対し $0.83 (=1/1.2)$ 倍となることが示唆される。このことから、放射線業務従事者の受ける線量が法令で定められた線量限度近傍、又は事業所の定める被ばく線量管理目標値近傍で被ばくすることが想定される放射線作業では、放射線作業が均等被ばく状況であっても、追加線量計を用いる追加モニタリングが必要であろう。 β 線に対しては、 β 線の最大残余エネルギーに依存せず、ISO 照射条件で 3mm 個人線量当量で求めた体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、 $1.03 \sim 1.07$ となり、眼の水晶体線量が体幹部で得られた線量当量とほぼ等しくなることが分かった。体幹部での被ばくモニタリングにおいて、 3mm 線量当量がモニタリングの対象となっている場合、放射線業務従事者が通常作業で受けるような

放射線作業環境での均等被ばく状況においては、体幹部で得られた線量当量をそのまま用いることから精度よく眼の水晶体等価線量を評価できる可能性が示された。

また、平成28年度の研究結果を踏まえ、全体報告書に反映させるべき点について以下に簡潔に示す。

本事業の実施期間を通じ、体幹部線量から眼の水晶体及び手指部等価線量に対し一義的かつ妥当な推定値を与える手法の開発を目的としてきた。これまで計算シミュレーション及び人体模擬物理ファントムを用いた基準放射線校正場及び実際の放射線作業環境でのモニタリング試験で実施してきた。放射線業務従事者の体幹部で得られた線量当量に対する、眼の水晶体及び手指部等価線量の相関についてまとめ、開発した体幹部線量当量から眼の水晶体及び手指部の等価線量の推定手法について妥当性を検証する。

眼の水晶体及び手指部等価線量の低減化対策について、原子力・工業・研究分野で放射線業務従事者が一般的に使用する全面マスク、鉛エプロン等の防護資機材が実際の放射線作業環境でどの程度被ばくを低減するか、上述の計算シミュレーション及び作業環境でのモニタリング試験を通じて評価した。得られた結果に基づき、放射線業務従事者の眼の水晶体及び手指部等価線量の低減化対策について述べる。

上述の眼の水晶体及び手指部等価線量の推定手法の確立及び線量低減化対策への提言に加え、放射線業務従事者の眼の水晶体追加モニタリング要否に係る放射線管理フレームワークを提案する。特に原子力・工業・研究分野では、放射線業務従事者の眼

の水晶体の追加モニタリングをどの時点で行うかという意思決定が個々の現場の放射線管理で得られた経験則に基づいて行われている。経験則のみに基づいた放射線管理の場合、保守的な推定に基づく過剰な装備と追加モニタリング用線量計で放射線業務従事者の作業性が犠牲となり却って体幹部の被ばくが増加することとなり、特に経験のない初めての放射線作業では、追加モニタリングをせずに過剰に被ばくし線量限度を超えてしまう、という適切な管理と言えないケースが生じうる。これは、過剰被ばくやその他の放射線業務従事者の労働災害をもたらしうる。このことを受け、本事業の実施期間で行った検討で得られた成果に基づき、放射線業務従事者の眼の水晶体追加モニタリング要否について、一義的かつ適切に意思決定を可能とする放射線管理フレームワークを提案する。

F. 健康危機情報
なし

G. 研究発表
1. 論文発表

M. kowatari and H. Yoshitomi, “
Evaluation of inhomogeneity of exposure
to radiation workers encountered in
nuclear industry and research accelerator
facility”, RADIOISOTOPES 誌、投稿準備
中

2. 学会発表
なし

H. 知的財産権の出版・登録状況

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

I. 引用文献

- [1] 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (I) - わが国における水晶体線量評価に関する研究と原子力発電所の線量管理の現状 - Jpn. J. Health Phys., 50 (4), 249 - 256 (2015).
- [2] International Atomic Energy Agency (IAEA). Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3.
- [3] European Union (EU). Basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionizing radiation. Council Directive 2013/59/EURATOM.
- [4] NCRP Commentary No. 26 - Guidance on Radiation Dose Limits for the Lens of the Eye (2016). ISBN 978-0-913392-17-1.
- [5] 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (V) - わが国の各分野における従事者の水晶体被ばく及び防護の現状 - Jpn. J. Health Phys., 50 (1), 76 - 89 (2015).
- [6] 千代田テクノル; 「平成 27 年度個人線量の実態」, FBNews No.479,15-18, ('16.11.1 発行) .
- [7] 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (II) - いつものようにβ線3ミリメートル線量当量を測定・評価すべきか - Jpn. J. Health Phys., 50 (4), 257 - 261 (2015).
- [8] 被ばく線量の測定評価マニュアル, 原子力安全技術センター, 東京 (2000) .
- [9] 草間朋子, 福井 徹, 太田勝正, 加藤命久, 中野健二; 原子力発電所作業者を対象とした個人モニタの装着基準に関する実験的考察, 保健物理, 22, 259-264, (1987).
- [10] 経済産業省 経済産業省トリチウム水タスクフォース (第8回) 資料1 東京電力 (株); 福島第一原子力発電所におけるトリチウム量及び多核種除去設備処理水化学的水質について access at <http://www.meti.go.jp/earthquake/nucl>

[ear/pdf/140424/140424_02_003.pdf](#)

available on 31st March 2017.

II-1. 分担研究報告

原子力・研究用施設における作業時の被ばく不均等度の定量的事前評価に関する研究

分担研究者 吉富 寛

(日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課 主査)

研究要旨

放射線業務従事者の等価線量管理において、放射線作業計画時に被ばくの”不均等性”を適切に評価し、被ばく低減策や追加のモニタリングの判断をすることが求められる。平成27年度報告では、数学ファントムを用いて被ばくの不均等性を定量化する手法を提案し、既知の照射場においてその妥当性を検証した。この手法を実際の作業時に適用するためには、放射線作業計画時に被ばく状況を適切にモデル化して評価することが必要となってくる。本研究では、原子力・研究用放射線施設におけるベンチマーク作業場を5箇所選定し、被ばく状況のモデル化を含めた不均等度の定量的事前評価の妥当性を検証した。

不均等被ばくを模擬した場においては、想定される線源中心に点線源を配置した単純なモデルでも2-30%の精度で不均等指標を評価でき、計画被ばく線量が小さい場合にはこのようなモデル化でも許容できる。単純一様体積線源を仮定した場合には不確かさの範囲内で決定できたが、詳細な評価のためには影響の大きい低エネルギー光子の関与や主作業姿勢について、事前に情報を把握しておく必要がある。均等被ばくが想定される状況でも、 β 線の関与や線源存在域の制限は不均等度に大きく影響を及ぼすため、 β 線放出核種情報の事前入手や照射ジオメトリに線源存在可能域を考慮したモデル化が重要となることが明らかになった。

A. 研究目的

本研究は、放射線業務従事者が受ける眼の水晶体及び手指等の末端部における被ばく等価線量を適切に評価し、その被ばく低減策に資することを目的としている。そもそも、眼の水晶体及び末端部皮膚の等価線量の評価は、確定的影響防止の観点から、いかなる個人も線量限度を超過した被ばくが生じることがないように適切な線量管理を

行うとともに、適切な防護策を講ずることも目的として行われる。放射線業務従事者に関するこれらの等価線量の評価は、国内法令に従い、原則として個人線量計などの放射線測定器を用いた個人モニタリングによる測定結果を基に行われてきた。例えば、電離放射線防止規則では、体幹部（胸部あるいは腹部）によるモニタリング以外に「最も多く放射線にさらされるおそれのある部位」に放射線測定器を装着して1センチメ

ートル線量当量 $H_p(10)$ 及び 70 マイクロメートル線量当量 $H_p(0.07)$ を測定することと規定されている。すなわち、最も多く放射線にさらされる部位が眼の水晶体を含む頭・頸部あるいは手指等を含む末端部である「不均等被ばく」とみなされる場合には、その部位での追加の個人モニタリングが実施されるべきである。追加モニタリングがなされない場合、体幹部でのモニタリング結果を基に等価線量を評価することになるが、著しい過大評価や過小評価となる可能性がある。被ばく線量が線量限度と比べて十分小さい場合は、その差は許容され得るが、その判断に必要な過大（過小）評価の程度についての定量的かつ系統的な仕組みはこれまで検討されてこなかった。さらに、眼の水晶体に関しては、近年 ICRP がその声明[1]の中で職業被ばくについてその線量限度を現行の年間 150 mSv から 5 年平均で年間 20 mSv へと引き下げることが勧められたことも踏まえると、今後より厳格な等価線量管理並びに被ばく低減対策が望まれる。

平成 27 年度報告[2]では、数学ファントムを用いて、眼の水晶体及び末端部被ばくに関する不均等度を定量的に評価する手法を開発した。この不均等指標を用いることにより、眼の水晶体もしくは末端部被ばくに対する“不均等被ばく”となり得る要因を明らかにでき、主報告書で提案するように判定基準との比較によって、系統的かつ定量的根拠に基づいた意思決定が可能になる。実際に、開発した不均等指標の評価手法を適用し、追加モニタリング要否の判断に資するためには、放射線作業前に想定される被ばく状況について指標を評価しておく必要がある。筆者らの先行研究[3]では、線源位置、核種、及び照射ジオメトリが既知の

標準場においては、妥当に不均等度が評価できることを示した。一方で、原子力・研究施設の分野においては、通常、被ばくする線源状況は複雑であり、こうした場において不均等指標を適切に評価できるかが課題として残されていた。実際には、作業開始前に線源分布が詳細に知られていることは稀であり、作業者がその環境中を動くことを考えると、詳細な線源分布を忠実に再現するよりも主な被ばく線源を想定したモデルを基に不均等度を評価することが望ましい。そこで、本研究では、原子力・研究用加速器施設において 5 つの作業場を選定し、被ばく線源を単純モデル化して不均等度を評価し、実測で得られた結果と比較することによりその妥当性を検証することを目的とした。

B. 研究方法

不均等度を表す指標は、人体各部位におけるモニタリング量 $H_p(d)$ の比として以下の式により求めた。

$$HI_{eye}(10) = H_p(3)_{head} / H_p(10)_{trunk} \quad (1)$$

$$HI_{eye}(3) = H_p(3)_{head} / H_p(3)_{trunk} \quad (2)$$

$$HI_{ext}(10) = H_p(0.07)_{ext} / H_p(10)_{trunk} \quad (3)$$

$$HI_{ext}(0.07) = H_p(0.07)_{ext} / H_p(0.07)_{trunk} \quad (4)$$

放射線業務従事者の外部被ばくによる実効線量推定のための個人モニタリングは体幹部に装着した線量計によって $H_p(10)$ を測定することによってなされる。また、眼の水晶体の等価線量及び末端部皮膚の等価線量はそれぞれ、眼の周辺及び末端部に装着した線量計による $H_p(3)$ 及び $H_p(0.07)$ によって妥当に推定できる[4]。そのため、 $HI_{eye}(10)$ 及び $HI_{ext}(10)$ は、体幹部 $H_p(10)$ 線量から水晶体、末端部皮膚線量を直接推定することが許容できるかの判断の定量的な指標を与

えている。また、 $HI_{eye}(3)$ 及び $HI_{ext}(0.07)$ は、体幹部モニタリングで $H_p(3)$ 、 $H_p(0.07)$ を評価することによって水晶体、末端部皮膚線量を推定できるかを判断する指標になる。

本研究の目的は、これらの指標が実際の作業場で適切に事前評価できるかを検証することにある。そのためには、被ばく状況をモデル化した計算評価とファントム実験により得られた実測値を比較する必要がある。計算評価は、平成27年度報告で作成した数学ファントム[2]を用い、モンテカルロ計算コード PHITS 2.8.8[5]によって(1)から(4)を計算することで実施した。実測評価は、簡易物理ファントム[2]の各部位に装着したフィルタ付小型 OSL 線量計 (長瀬ランダウア製 nanoDot™) により行った。平成27年度報告では、これらで不均等被ばく指標が適切に実測できることを光子及び β 線に対して示した。線量計の特性については、総括研究報告にその詳細を示している。

不均等被ばく指標は、予想される被ばく線量が線量限度に近いほど精度よく評価することが求められる。そこで、不均等被ばく指標を検証するための模擬作業として、原子力・研究用加速器施設において被ばく線量が比較的大きいことが想定される以下の5つの作業を選定した。(a)~(c)は研究用加速器施設である日本原子力研究開発機構の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) における作業、(d)及び(e)は研究用原子力施設である燃料試験施設における作業である。(a)、(b)及び(d)は体積線源からの被ばくで不均等被ばくが想定されるもの、(c)及び(e)は、広範囲に分布した線源からの被ばく状況で均等被ばくが想定される模擬事例である。

(f) 加速器施設における放射化されたビー

ムライン機器の点検作業


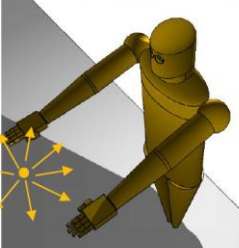


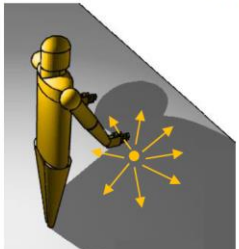
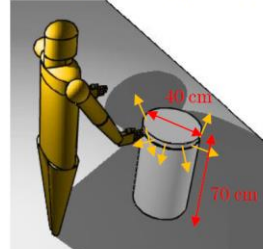
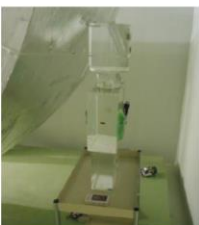

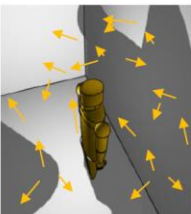

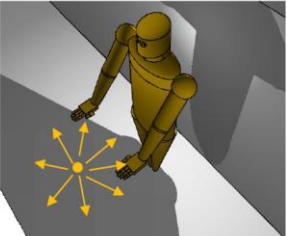
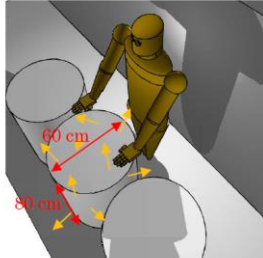


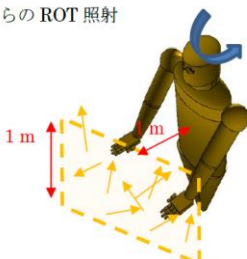
- (g) 加速器施設における放射化された冷却水精製樹脂の点検作業
- (h) 加速器施設における放射化された空気中での作業
- (i) 原子力施設における汚染物取扱作業
- (j) 原子力施設における高線量率雰囲気場での作業(遠方にある汚染物品からの被ばく)

作業における不均等度の事前評価の目的では、線源のモデル化は、適切な不均等指標が得られる範囲内で可能な限り単純であるべきである。そこで、本研究では、以下に示す2種類の単純モデル化を行い、不均等指標を評価した。

- ① 点線源、または ICRP 74[6]で示される照射ジオメトリ
- ② 簡易モデル化した体積線源

それぞれの被ばく状況及び評価した単純モデルを表1に示した。(a)については、高さ1 mに設置されたビームライン上の放射化機器からの被ばく状況であり、ビームラインから60 cmの位置に直立する作業者の被ばくを模擬した。被ばく線源としては単純化モデル②では、文献[7]からビーム損失想定箇所である左右のアブソーバー及び中央のゲートバルブ計3箇所の ^{54}Mn 線源を、単純化モデル①では、人体正面に位置するゲートバルブ位置の ^{54}Mn 点線源を仮定した。(b)の状況では、冷却水精製樹脂が40 cm $\Phi \times 70$ cmHのステンレス容器中に詰められており、上方の配管から放射化された冷却水が流入する。そこで、単純化モデル①では、樹脂中心位置の点線源を、単純化モデル②では、樹脂上部に広がった面線源を仮定した。線源としては、冷却水中に含まれる陽電子放出核種からの消滅 γ 線を想定

表 1 被ばく状況と評価に用いた単純化モデル

被ばく状況	作業場状況 ^{*1}	単純モデル化 ^{*2}	
		①	②
(a)		⁵⁴ Mn 点線源 (L = 60 cm, H = 100 cm) 	ビーム損失想定部位に分布する ⁵⁴ Mn 線源 
(b)		511 keV 光子点線源 (L = 50 cm, H = 35 cm) 	冷却水フィルタ上部に広がった面 511keV 光子源 
(c)		¹⁵ O ISO 照射 	空気中に一様分布した ¹⁵ O 
(d)		¹³⁷ Cs 点線源 (L = 40 cm, H = 40 cm) 	一様に ¹³⁷ Cs を含む 200L ドラム缶 
(e)		¹³⁷ Cs ROT 照射 	高さ 1 m 以内に一様分布した ¹³⁷ Cs 等方線源からの ROT 照射 

^{*1} 実測に用いたファントムもともに示した。

^{*2} 図中の L は人体表面からの距離(cm)、H は床面からの高さ(cm)を示す。また、図中の矢印は線源から放出される放射線の方向を示した。

した 511 keV の単色光子を仮定した。(c)については、単純化モデル①では真空中¹⁵OのISO照射を仮定したが、単純化モデル②では周囲のコンクリートを含めてモデル化して線源の存在できる空間を制限し、その空間内で一様分布する¹⁵O線源を仮定した。(d)では、作業者前面の200Lドラム缶(50 cmΦ×80 cmH)内の線源のみを考慮した。単純化モデル①では、ドラム缶中心の¹³⁷Cs点線源を、単純化モデル②では、ドラム缶内に一様分布した¹³⁷Cs線源を仮定した。一方、(e)では周囲一面に置かれた1 m³容器内の汚染物品からの被ばくを考慮するために¹³⁷Cs線源のROT照射を仮定した。単純化モデル②では線源の存在領域を高さ1 m以内に制限を設けた。

これらのモデルにおいて、⁵⁴Mn及び¹³⁷Csについては835 keV及び662 keVの単色光子をそれぞれ放出するものとした。何れのケースにおいても線源はステンレスまたは鉄製の容器等に覆われているため、放出されるβ線や特性X線についてはその寄与は小さいため無視した。¹⁵Oについては、ICRP 107[8]に示されるスペクトルを持つβ⁺線を放出するものとした。ただし、ISO照射においては、511 keVの光子及び¹⁵Oのβ⁺線スペクトルを持つ陽電子が同じ割合で存在すると仮定した。

簡易物理ファントムを用いた実測においては、 $H_p(3)_{\text{head}}$ は両眼位置及び頭部ファントム中央に装着した2 mmアクリルフィルタ付きOSL線量計計6個から評価し、 $H_p(3)_{\text{trunk}}$ 及び $H_p(10)_{\text{trunk}}$ は、胸部ファントム中央に装着した2 mmアクリルフィルタ付きOSL線量計2個から評価した。ただし、β⁺線の影響が考えられた(c)の事例については、 $H_p(10)_{\text{trunk}}$ は、金属フィルタ(1

mm錫+0.5 mmアルミニウム)付きOSL線量計2個から評価した。 $H_p(0.07)_{\text{trunk}}$ は胸部ファントム中央に装着した追加フィルタのないOSL線量計2個から、 $H_p(0.07)_{\text{ext}}$ は、左右手指及び掌に装着したフィルタなしOSL線量計計10個から評価した。

C. 研究結果

5つの被ばく事例のうち、(a)、(b)及び(d)については、体積線源からの被ばく事例であり、主に被ばくに寄与する線源が偏在しているため、体幹部と眼部及び末端部の被ばく線量は不均一になることが想定される。表2に、それぞれの状況で実測と単純化モデル①及び②によって計算評価した $HI_{\text{eye}}(10)$ 及び $HI_{\text{ext}}(10)$ を示す。 $HI_{\text{eye}}(10)$ については、0.42~0.70となり、体幹部で測定した $H_p(10)$ により眼の水晶体線量を保守的に見積もることが可能であるが、(d)では2倍以上の過大な見積りとなることを示している。これらの例では、モデル化①で評価した場合でも不均等指標を20%以内で評価できており、想定する被ばく線源の中心に点線源を配置することにより眼の水晶体に関する不均等指標を大まかに見積もることが可能であることを示唆している。一方で、体積線源を仮定した単純化モデル②では、不確かさの範囲内で不均等指標を評価できており、不均等指標の評価には、②の簡易モデルで十分であることが明らかになった。末端部被ばくについては、 $HI_{\text{ext}}(10)=3\sim4$ となっており、何れのケースにおいても10を下回っている。末端部皮膚の等価線量については、勧告される線量限度が、実効線量限度の10倍大きいことから、実効線量限度を担保できれば例え体幹部の $H_p(10)$ から末端部皮

表 2 不均等被ばくが想定される(a), (b)及び(d)の被ばく状況下における
(1) $HI_{eye}(10)$ 及び(2) $HI_{ext}(10)$ の実測値と計算値の比較

(1) $HI_{eye}(10)$

	(a)	(b)	(d)
実測値	0.70 ± 0.04	0.58 ± 0.05	0.42 ± 0.04
計算値 (単純化モデル①)	0.60 ± 0.02	0.61 ± 0.01	0.45 ± 0.03
計算値 (単純化モデル②)	0.65 ± 0.01	0.62 ± 0.02	0.43 ± 0.02

(2) $HI_{ext}(10)$

	(a)	(b)	(d)
実測値	2.96 ± 0.34	3.83 ± 0.91	3.03 ± 0.34
計算値 (単純化モデル①)	3.41 ± 0.09	2.62 ± 0.16	2.20 ± 0.06
計算値 (単純化モデル②)	2.57 ± 0.03	3.24 ± 0.01	2.81 ± 0.09

膚線量を算定したとしてもこれらのケースでは線量限度を超えることはない。追加モニタリングの判断は不均等指標と被ばく線量の大きさ及び線量測定の不確かさを考慮して判断すべきであろう。また、これらのケースは高エネルギーの光子が支配的であったことから、モデル①でも実測と比較して30%程度の差異で評価が可能であり、モデル②においては、詳細なソースタームの分布を考慮していないにも関わらず不確かさの範囲内で実測結果をよく再現している。

(c)及び(e)の例では、均等被ばく状況が想定されたため、単純化モデル①では等方的なISO及びROT照射を仮定した。しかしながら、表3に示したように実測結果は、不均等被ばく状況であることを示唆しており、単純化モデル①で仮定した等方照射が適切

でないと考えられた。特に(c)では体幹部の $H_p(10)$ モニタリングからの水晶体線量評価は、著しい過小評価となり得ることを示唆している。単純化モデル①で仮定したISO照射が適切でない原因の1つとして、(c)での被ばく状況は、ISOが模擬している無限に広がった空間に分布した線源ではなく、実際に線源が存在する作業空間は限られたダクトスペースであり、人体前方及び側方にはスペースが少なく、後方及び上方に大きな空間が広がっているためと考えられた。そこで、上述の状況を模擬した空間内に一様分布する ^{15}O を仮定したものが単純化モデル②である。単純化モデル化①と比較して、結果は不確かさの範囲内で実測値と一致しており、制限された空間を考慮したモデルが必要であることを示している。また、

表3 被ばく事例(c)及び(e)における $HI_{eye}(10)$ の実測値と計算値の比較

	(c)	(e)
実測値	3.56 ± 0.75	0.67 ± 0.05
計算値 (単純化モデル①)	1.45 ± 0.03	1.22 ± 0.01
計算値 (単純化モデル②)	4.03 ± 0.28	0.73 ± 0.01

表4 被ばく事例(c)について、計算評価した $HI_{eye}(3)$ と実測値の比較

実測値	1.52 ± 0.32
計算値 (単純化モデル①)	1.04 ± 0.03
計算値 (単純化モデル②)	1.44 ± 0.09

想定した核種である ^{15}O は最大エネルギー 1.732 MeV の β^+ 線を放出する。このエネルギーの β^+ 線は、3 mm の組織を透過できることから、直接 $H_p(3)$ に影響することが考えられる。一方で、1 cm 深さには陽電子は直接到達することはできず、511 keV の消滅 γ 線のみ寄与する。そこで(c)については、現状では評価されていない体幹部のモニタリング量を $H_p(3)$ とすることで、水晶体線量の推定が可能かの判断に資するため、 $HI_{eye}(3)$ の評価も同時に行った (表4)。結果は体幹部では通常評価されていない $H_p(3)$ でモニタリングすることによってファクター1.5で水晶体線量を見積もることが可能であることを示している。 β^+ 線など透過力の弱い放射線による被ばくが考えられる場合は、体幹部の $H_p(3)$ モニタリングを考慮に入れた不均等指標の評価を行うことが推奨される。また、 $HI_{eye}(3)$ についても単純化モデル

②では、実測結果をよく再現しておりモデルの妥当性を検証できた。単純化モデル①では $HI_{eye}(3)$ の点からは均等被ばくと判断され、実測結果が示す不均等性を正しく評価できていない。

平成27年度報告でも指摘したように、ISO 15382[9]では線量限度近くでの等価線量の算定の不確かさはファクター1.5を超えないようにすることが求められる。単純化モデル②を用いた(c)の例では、体幹部 $H_p(3)$ モニタリングからの推定に対する不確かさだけでもファクター1.5に達するため、線量限度付近ではこの推定方法は許容できず追加モニタリングを要する”不均等被ばく”とみなしてよいであろう。一方、計画被ばく線量が線量限度と比べて十分に小さいときには、体幹部 $H_p(3)$ モニタリングが許容され得る“均等被ばく”と判断され得る。

(e)の状況において、主な被ばく源は周囲

に置かれた 1 m^3 容器内の線源である。そこで、モデル化②では、人体表面から 1 m の距離にある高さ 1 m の範囲に一様分布した ^{137}Cs 線源からの ROT 照射を仮定した。このモデルで評価した $HI_{\text{eye}}(10)$ は不確かさの範囲内で一致しており、不均等指標の評価にとってこのモデル化がより妥当であることが分かった。

これらの結果からは、広く分布する線源に対しては、ICRP の照射ジオメトリそのものでなく、線源が存在し得る高さを考慮した評価が眼部に対する不均等指標の評価において必要なケースがあることを示している。

不均等指標は、線源の幾何学的な位置や大きさ以外に、放出される光子や（陽）電子のエネルギー、作業姿勢に依存する。平成 27 年度報告では点線源に対してこれらの因子の影響について明らかにし、光子については 20 % 程度にとどまるが、 β 線については、50 % 程度異なるケースもありうることを示した。光子による被ばく模擬事例である(a)のケースについて、線源の光子エネルギー及び作業姿勢を変化させたときの $HI_{\text{eye}}(10)$ を図 1 に示す。光子エネルギーは 60-1250 keV の範囲で変化させ、作業姿勢については、ビームライン中央に設置されたゲートバルブ部に対する前傾姿勢と直立横向き の 2 種類の姿勢を考慮した。 $HI_{\text{eye}}(10)$ は光子エネルギーとともに低下し、60 keV では 835 keV と比較して 35 % 減少する。一方で、ファントムがない場合の眼部及び体幹部モニタリング位置での光子フルエンス比を計算したところ、80 keV までは 835 keV と比較して 5 % 以内の変化であった。低エネルギー領域は、ファントムによる後方散乱の寄与が大きい が、体幹部に比べて散乱

体積の小さい頭部ではその影響は小さいことから、不均等指標が減少したと考えられる。被ばく線量が多い場合等、不均等指標を精度よく見積もる必要がある場合は低エネルギー光子の関与を事前調査することが肝要である。(a)の事例において、実際の作業環境中で CZT 検出器により測定した γ 線スペクトルを図 1 中に示した。スペクトル測定結果からは、線源光子として消滅 γ 線の 511 keV から ^{60}Co の 1333 keV までが有意に検出されており、これらは文献[7]から想定されるものとも矛盾しない。このケースについては低エネルギー光子が関与しないことから、 $HI_{\text{eye}}(10)$ の差は 5 % 程度あり ^{54}Mn の 835 keV 光子で被ばく線源を代表することは妥当である。作業姿勢に関しては、前傾姿勢時は、眼部が線源に近づくため $HI_{\text{eye}}(10)$ は増加すると予想されたが、体幹部も同時に線源に近づくため予想に反して 15 % 減少した。一方で横向き姿勢時は不確かさの範囲で $HI_{\text{eye}}(10)$ は一致した。個別の作業に関して、詳細な不均等指標の評価が要求されるケースに関しては、姿勢による不均等指標の変化も考慮に入れ、追加モニタリング要否の決定がなされるべきであろう。

平成 27 年度報告によると、電子が関与する場合は、線源の想定がより厳密になされるべきと考えられる。そこで、（陽）電子の関与が想定された(c)のケースについて、不均等指標に与える核種想定の影響を評価した（図 2）。本ケースにおいて、対象となる被ばく線源は空気の放射化核種である。そこで、 ^{15}O 以外の放射化核種として事前の作業場モニタリングの結果を踏まえて、 β^+ 放出核種である (1) ^{13}N （最大エネルギー 1.198 MeV）、(2) ^{11}C （最大エネルギー 0.960

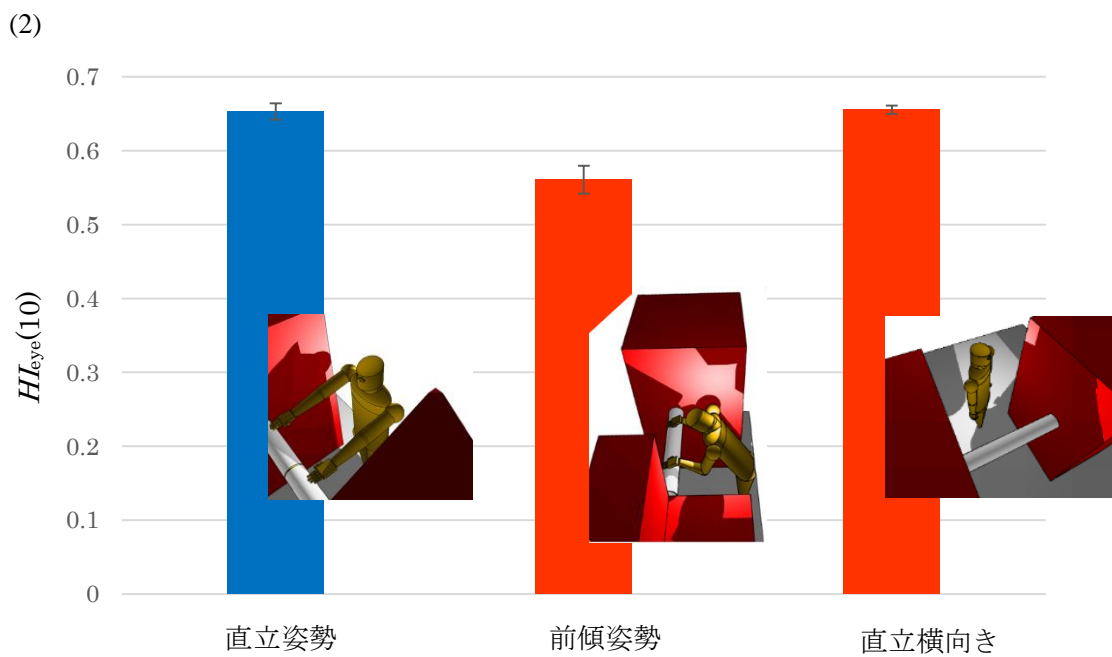
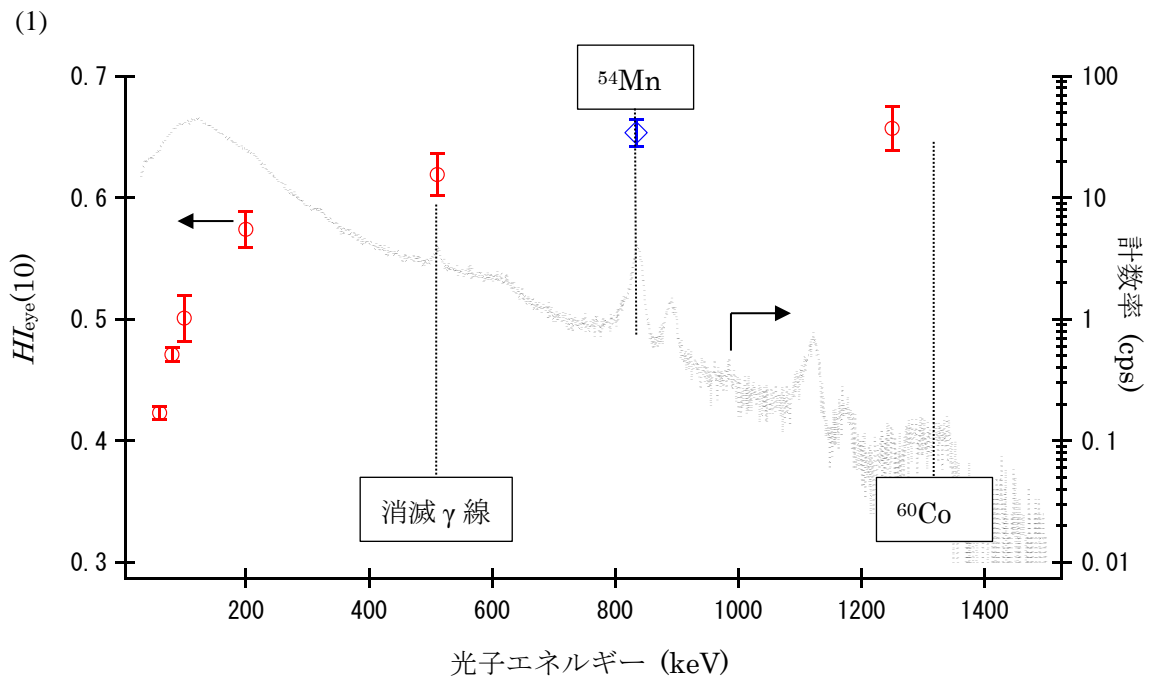


図 1 (1)光子エネルギー及び(2)作業姿勢を変化させたときの $H_{eye}(10)$

(1)の図中には、作業場において CZT 検出器により得られたスペクトルも同時に示した。

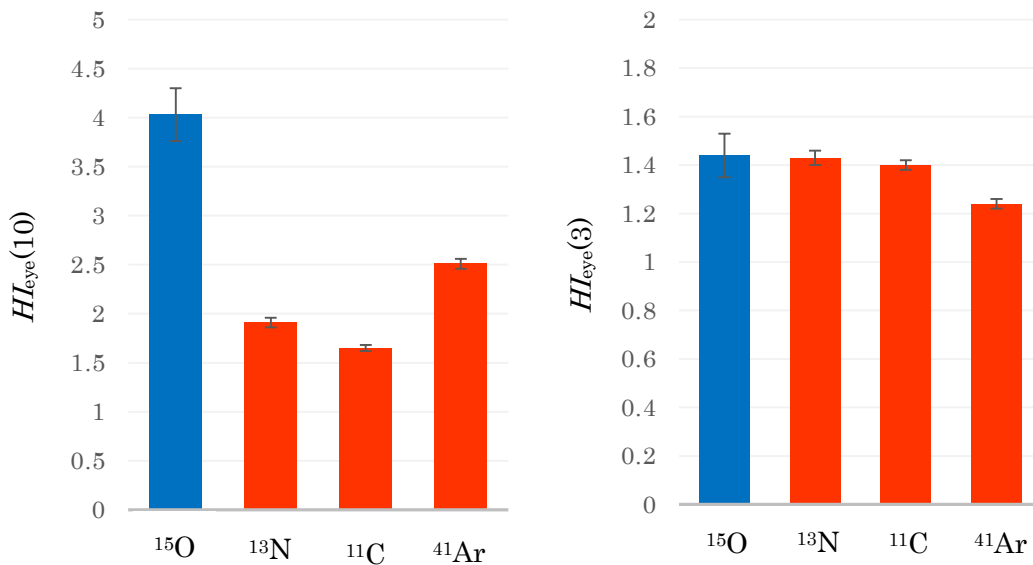


図 2 (c)の事例について、想定核種の違いによる $HI_{eye}(10)$ 及び $HI_{eye}(3)$ への影響

MeV) , 及び β^- 放出核種である(3) ^{41}Ar (最大エネルギー1.199 MeV) の3核種を想定した。これらの核種に対しては、 β^\pm 線に加えて、511 keVの消滅 γ 線(^{11}C や ^{13}N)、1294 keVの γ 線(^{41}Ar)も被ばくに寄与する。 $HI_{eye}(10)$ については、核種によって大きく異なる結果となったが、 $HI_{eye}(3)$ に対してはその影響は小さい。これらの核種から放出される β^\pm 線は何れも $H_p(3)$ に寄与するが $H_p(10)$ には寄与しない。一方で光子については、 $H_p(3)$ にも $H_p(10)$ にも同程度の寄与が考えられるため、 $HI_{eye}(10)$ については、光子に対する β^\pm 線の寄与割合を反映して核種によって大きく変動する結果となった。このように(陽)電子が関与する際は、体幹部の $H_p(3)$ モニタリングを前提とした $HI_{eye}(3)$ の方が想定核種の不確かさによる影響が小さく、その点からも事前に $HI_{eye}(3)$ を評価して追加モニタリングの検討をすることが望まれる。

D. 考察及び結論

放射線業務従事者の身体近くにある線源からの被ばく寄与が大きいと想定されるケースにおいては、点線源を仮定したとしても2-30%の精度で不均等度を評価できる。これは、線量限度よりも十分に低い被ばく状況下における追加モニタリングに係るスクリーニングに対しては十分であろう。一方で、詳細な線源分布を仮定せず、体積線源のみを仮定した場合でも実測結果を不確かさの範囲内で再現することができた。光子線源の場合、100 keVを下回るような光子源の存在に気を付ければ、体積線源を仮定したモデルで十分に不均等指標を評価できる。

空間内に広範囲に広がる線源に対しては、一様線源とみなしてそれに対応するICRPの照射ジオメトリそのものでは不均等指標を評価するには不十分なケースがあること

が分かった。 $HI_{eye}(10)$ に対しては、ICRPの照射ジオメトリに線源の高さなど存在領域に制限を設けることで妥当な評価が可能になった。また、最大エネルギーが700 keV以上の β 線が関与する場合、原子力・学術分野においては通常体幹部モニタリングで評価されている $H_p(10)$ に加えて $H_p(3)$ を評価することで、より妥当な水晶体線量評価が可能なケースがあることが明らかになった。本研究では、不均等指標によって体幹部と眼部及び末端部モニタリングにかかる不均等被ばくを定量化したことで、線源分布、線源エネルギーや姿勢などのモデルの違いがどの程度被ばくの不均等性に寄与するかを定量的に明らかにすることができた。放射線作業従事前に得られる線源情報及び作業情報から不均等指標を評価することで、被ばくの不均等度並びにその変化範囲を定量的に把握できることは、追加モニタリングの判断にとって有用である。その判断は、不均等度とその変化範囲以外に被ばく線量の大きさ、線量計の応答を考慮して決定すべきであろう。

E. 健康危機情報

なし

F. 研究発表

1. 論文発表

H. Yoshitomi and M. Kowatari, "Estimation of homogeneity of exposure in terms of eye lens and extremity monitoring prior to radiation works in the nuclear sector." Radiation Protection Dosimetry 誌、投稿準備中

2. 学会発表

なし

G. 知的財産権の出版・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

H. 引用文献

[1] ICRP, 2012. ICRP statement on tissue reactions/early and late effects of radiation in normal tissues and organs-threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP Publication 118, Ann. ICRP 41(1/2)

[2] 吉富 寛, 2016. 厚生労働省労災疾病臨床研究事業費補助金平成27年度分担研究報告書

[3] Yoshitomi.H. *et al.*, 2016. Assessment of equivalent dose of the lens of the eyes and the extremities to workers under nonhomogeneous exposure situation in nuclear and accelerator facilities by means of measurements using a phantom coupled with Monte Carlo simulation. IRPA-14 proceedings

[4] Behrens. R. 2012. On the operational quantity $H_p(3)$ for eye lens dosimetry. J. Radiol. Prot. 32 455-464

- [5] Sato, T., *et. al.*, 2013. Particle and heavy ion transport code system PHITS, Version 2.5.2. J. Nucl. Sci. Technol. 50(9), 913-923
- [6] ICRP, 1996. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26(3-4)
- [7] N. Ikeda *et.al.* 2016. Residual radiation measurements at J-PARC MR using the ASTROCAM 7000HS newly developed radioactive substance visualization camera. Proceedings of IPAC2016
- [8] ICRP, 2008. Nuclear decay data for dosimetric calculations. ICRP Publication 107, Ann. ICRP 38(3)
- [9] ISO, 2015. Radiological protection – Procedures for monitoring the dose to the skin, the extremities, and the lens of the eye. ISO 15382

II-2. 分担研究報告

原子力分野における ^{241}Am 及び $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ からの被ばくの不均等性評価と 低減化に関する研究

分担研究者 吉富 寛

(日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課 主査)

研究要旨

低エネルギー光子や β 線は医療分野や原子力分野においても重要な外部被ばく源であるが、その弱透過性から不均等被ばくが懸念されてきた。一方で、放射線防護具の装着が被ばく低減に有用と考えられてきた。本研究では、原子力分野における被ばく管理上重要な ^{241}Am と $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ による眼の水晶体被ばくに焦点を当て、原子力・学術分野で起こり得る被ばく事例について体幹部線量に対する不均等度及びその放射線防護具の効果を評価した。 ^{241}Am からの60 keV光子については、不均等被ばくを強調した極端なケースでもその不均等度はファクター1.6程度であった。一方で、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ については、現状行われているHp(10)もしくはHp(0.07)による評価は、ファクター10以上の過小・過大評価となり得る。しかし、体幹部モニタリングでHp(3)の評価をすることで、ファクター2程度におさまる。

60 keV光子に関しては、AP照射で低減効果のあった防護具については、ROT照射においても同程度の効果が見込まれた。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線に関しては、呼吸保護具として用いられている全面マスクでも17%程度の眼の水晶体被ばくの低減効果が期待できる。また、計算モデルでも、これらの防護具の効果を適切に評価できた。

これらの結果から、原子力分野では ^{241}Am や $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ による被ばくは予想されていたよりも、均等な被ばく状況となっていたが、装着する防護具によってその不均等性が大きく変化するため、放射線作業計画時にはこれらの効果も考慮に入れた不均等度の評価及び追加モニタリングや被ばく低減対策の意思決定がなされるべきであろう。

A. 研究目的

医療分野で指摘されているように、眼の水晶体や末端部の不均等被ばくは弱透過性放射線である低エネルギー光子や β 線による被ばくで懸念されている[1,2]。これは、

これらの放射線は周囲の物質により容易に吸収・散乱されることによって、人体各部位を不均一に照射する可能性が危惧されるためである。そのような状況下においては、通常行われる体幹部モニタリングからの線量評価は、眼の水晶体や末端部の適切な線

量を与えず、放射線防護対策において誤った判断がなされかねない。特に眼の水晶体に関しては、ICRP が線量限度の引き下げを勧告[3]したことにより、今後より厳格に被ばく線量管理を実施することが望まれる。このような背景から、追加モニタリングや低減策を講ずるにあたり、これら弱透過性放射線に対して眼の水晶体被ばくの不均等度が実際どの程度であるのか、定量的に評価しておく必要がある。

また、これらの弱透過性放射線は容易に遮蔽できるため、その被ばく低減に防護具の使用が効果的とされてきた。しかし、防護具の性能は外部光子に対する遮蔽を目的としたものではあるが、JIS Z4831[4]で規定されているように前方入射に対して評価されており、原子力分野に代表されるように線源の周りを動き回る作業員に対してどの程度防護効果があるかは不明であった。また、外部被ばく防護を意図していない呼吸保護具に対する外部被ばく防護効果や、β線に対する防護性能についてはこれまで評価されてこなかった。

筆者らによる先行研究[5]で、被ばくの不均等度を定量的に評価する手法を開発するとともにその妥当性を検証し、実測による評価手法を確立した。そこで本研究では、これらの成果を活用し、原子力・学術分野において被ばく管理上重要な低エネルギー光子源である ^{241}Am 及びβ線源である $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ による眼の水晶体被ばくに焦点を当て、原子力・学術分野で起こり得る被ばく事例について体幹部線量に対する不均等度及びその放射線防護具の効果を評価し、適切な被ばく評価及び低減化に資することを目的とした。

B. 研究方法

眼の水晶体被ばくの不均等度を定量的に評価するために、本分担研究報告 II-1 で示した不均等指標 $HI_{\text{eye}}(10)$ 及び $HI_{\text{eye}}(3)$ に加えて、下式で示す $HI_{\text{eye}}(0.07)$ を用いた。

$$HI_{\text{eye}}(0.07) = H_p(3)_{\text{head}}/H_p(0.07)_{\text{trunk}}$$

$HI_{\text{eye}}(d)$ ($d = 10, 3, 0.07$) の評価はモンテカルロ計算コード PHITS 2.8.8[6]を用いた計算により行った。また、線源として ^{241}Am については60 keV 単色光子のみを考慮した。崩壊に伴う Np の14 keV LX 線については、通常原子力分野における作業では周囲の物質によって容易に遮蔽されること、また60 keV の光子と比較して $H_p(3)$ への寄与が小さくなることから ($H_p(3,60 \text{ keV})/K_a = 1.667 \text{ Sv/Gy}$ に対し、 $H_p(3,14 \text{ keV})/K_a = 0.60 \text{ Sv/Gy}$) 評価しなかった。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ については、 ^{90}Sr 及び ^{90}Y 双方の寄与を考慮し、そのβ線スペクトルはICRP 107[7]から得た。

不均等度を評価する原子力・学術分野における ^{241}Am 及び $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ による典型的な被ばく事例として、過去の文献から原子力機構原科で行われた以下に示すそれぞれ4つの作業を抽出してモデル化した。(図1参照)

- (a) ^{241}Am AP 照射
- (b) ^{241}Am ROT 照射
- (c) フードでの ^{241}Am を含む燃料取扱作業 [8]
- (d) グローブボックスにおける ^{241}Am を含む試料調整作業[9]
- (e) $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ AP 照射
- (f) $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ROT 照射
- (g) $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ で一様に汚染されたホットセルの除染作業[9,10]
- (h) $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ を含む試料調整作業

(a)、(b)並びに(e)、(f)は真空中、その他は空气中での照射とした。(d)及び(h)については、不均等被ばくが強調される条件とするため、線源位置を眼の高さとして評価した。

これらの線源を取り扱う場合、内部及び外部被ばくの低減のため、防護具が装着されるケースが多い[11]。防護具は外部放射線に対する低減を意図されているか否かに関わらず、その装着部位に対する外部被ばく低減効果を有すると考えられるため、被ばくの不均等度を変化させる。その効果は、特に低エネルギー光子やβ線などの弱透過性の放射線に対してはより顕著だと想定される。そこで、本研究では、原子力施設や医療施設で一般的に用いられている以下の放射線防護具(図2参照)について、その不均等指標へ影響を実測と計算の両面から評価した。

① 含鉛エプロン

(羽衣製 SLA-25L 鉛当量 0.25 mmPb)

② 全面マスク

(MSA 製 Ultra-Twin®)

③ 放射線防護眼鏡

(東レ・メディカル製 HF-400S

鉛当量 0.07 mmPb)

実測での評価は、本分担研究報告Ⅱ-1でも示した簡易物理ファントムの各部位に2 mmのアクリルフィルタ付 OSL 線量計(長

瀬ランダウア製 nanoDot™)を装着したものを、日本原子力研究開発機構放射線標準施設棟の校正場で照射した。光子については、²⁴¹Am に対する均等照射を模擬するために ISO Narrow シリーズの X 線(N-80:平均エネルギー64.7 keV)を用い、ICRP 75に示される AP 条件及び ROT 条件での照射を行った。また、比較のために同条件で¹³⁷Csを用いた照射も実施した。ROT 照射については、ファントムを体軸の周りに60°ずつ回転させることで模擬した。β線については、⁹⁰Sr/⁹⁰Y 線源を用い、眼部に対する防護具②と③について AP 条件での照射のみ実施した。

計算評価においては、含鉛エプロンは厚さ0.25 mmの鉛板として模擬し、全面マスクは窓面のみ模擬し、実測結果を踏まえて厚さ2.5 mmのアクリルとした。放射線防護眼鏡については、厚さ0.07 mmの鉛と2.0 mmのアクリルを重ねたものとして模擬した。線源はN-80については60 keVの単色光子、¹³⁷Csについては662 keVの単色光子とし、⁹⁰Sr/⁹⁰Yについては放射線標準施設棟のβ線校正場の校正点でのβ線スペクトルを計算し、それを垂直入射することで模擬した。

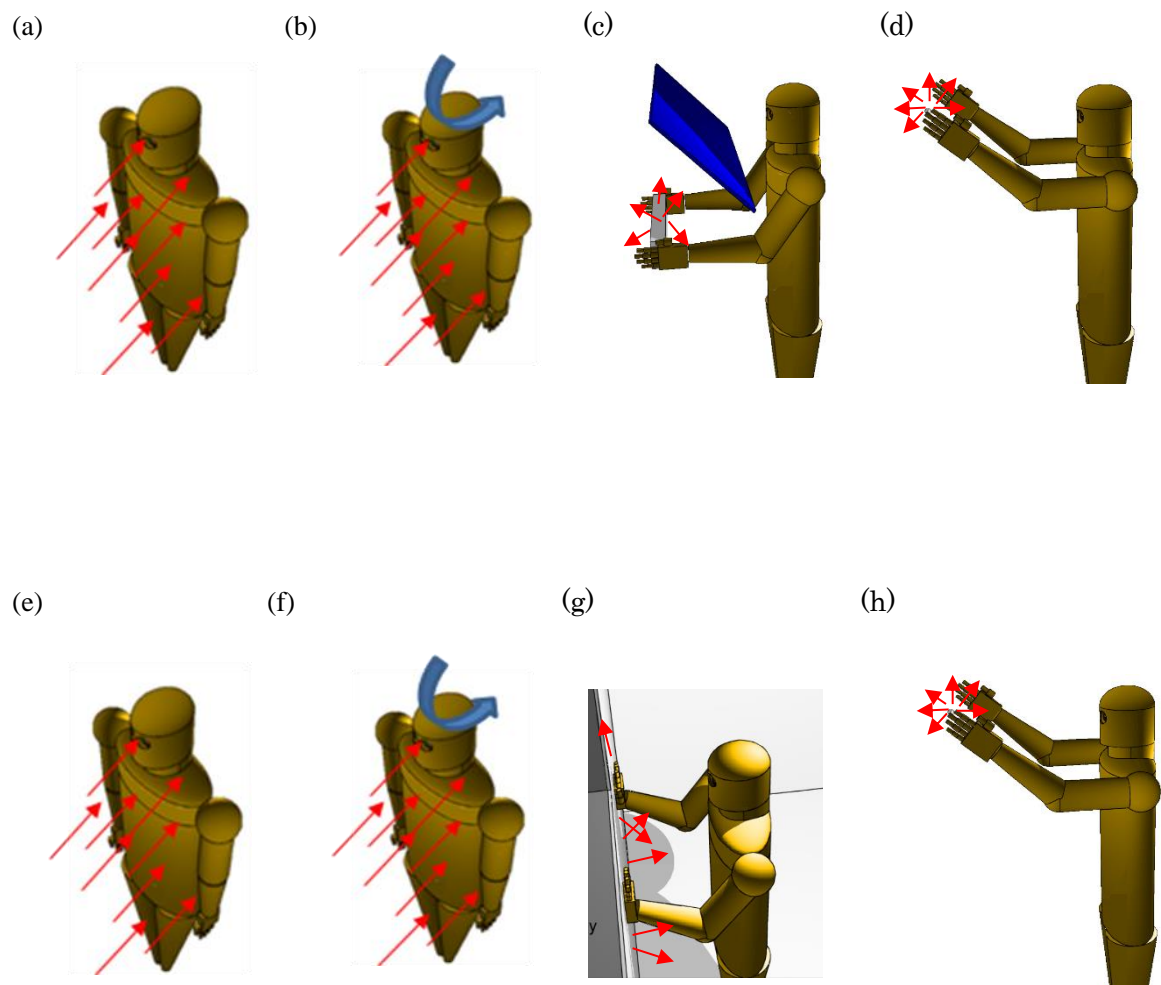
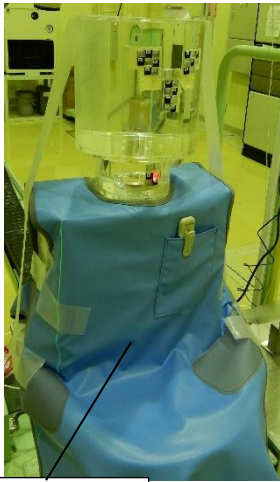


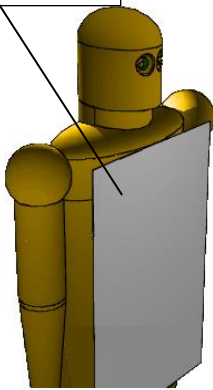
図1 評価に用いた各被ばく事例の照射ジオメトリ

(a)～(d)は ^{241}Am による被ばく、(e)～(h)は $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ による被ばくを模擬したものである。
 図中の矢印は光子あるいは β 線の放出方向を示している。

① 含鉛エプロン



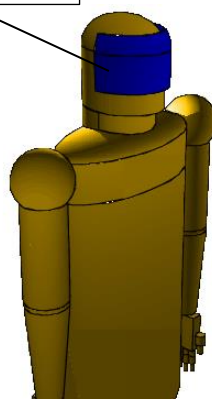
含鉛エプロン



② 全面マスク



全面マスク



③ 放射線防護眼鏡



放射線防護眼鏡

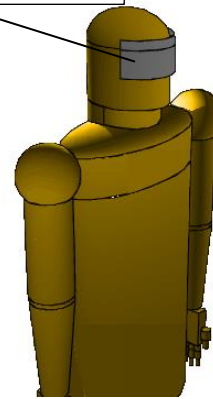


図2 本研究で使用した放射線防護具（上）及び計算評価に用いたモデル（下）

C. 研究結果

^{241}Am について、ROT 照射である(b)のみ均等被ばくと言える状況であり、(a)や(c)については、体幹部の $H_p(10)$ で晶体線量を保守的に評価できる（表1参照）。(d)については、不均等被ばくを想定した眼の高さの線源を扱う極端なケースではあるものの、体幹部モニタリングでの $H_p(10)$ は、眼の周辺で測定する $H_p(3)$ の 63 % 程度の過小評価にとどまる。実際にグローブボックス等で線源を扱う場合は、眼の高さより低い位置での取り扱いがほとんどと考えられることや線量計の応答の不確かさを考慮に入れる

と、このように線源を直接取り扱うような場合においても被ばく線量の大きさによっては、体幹部モニタリングからの推定が許容されるケースもあり得る。

$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ からの β 線に対しては、 $H_p(10)$ への寄与が非常に小さく、どのケースにおいても精度よく $HI_{\text{eye}}(10)$ を求められていないが、体幹部の $H_p(10)$ からの評価は 2 桁以上過小評価のおそれがある。一方で、 $HI_{\text{eye}}(0.07)$ は 0.07~0.42 となり 2~14 倍程度の過大評価が見込まれる。これは、 $H_p(3)$ に寄与しない ^{90}Sr (最大エネルギー-0.546 MeV) や ^{90}Y (最大エネルギー-2.28 MeV) の 700 keV 以下の

成分によるものである。現行の国内法令では、水晶体の等価線量の算定は1センチメートル線量当量と70マイクロメートル線量当量の適切な方を用いることとなっているが、 β 線が関与する場合には過度に保守的な評価になってしまう可能性があることを示している。体幹部モニタリングで $H_p(3)$ の評価を行った場合、(e)及び(f)では均等被ばくと言える状況であり、(g)でも過小評価ではあるものの、その程度は33%にとどまっている。(h)のような極端な例においても、2倍程度の過小評価であるので、原子力分野の利用方法では被ばく線量の大きさ等によっては、体幹部モニタリングで $H_p(3)$ を評価することによって、水晶体線量評価が許容できるケースがあり得る。

さらに、これらの被ばく事例において、放射線防護具を併用することによって不均等指標が変化し、体幹部モニタリングが許容されるケースもあれば、追加モニタリングが要求されるケースもあり得る。表3に光

子に対して各種防護具装着による $HI_{eye}(10)$ の変化を示した。含鉛エプロン及び放射線防護眼鏡は、それぞれ外部光子に対する体幹部及び眼部の防護の目的で使用されている。60 keV程度の低エネルギー光子に対しては、その防護効果が見込まれ、含鉛エプロンでは体幹部の線量が小さくなるため $HI_{eye}(10)$ が増大し、放射線防護眼鏡については、眼部の線量が低減されるので $HI_{eye}(10)$ は減少する。全面マスクは、そもそも放射性物質の内部取り込みを防ぐ目的であり、60 keV程度の外部光子に対してはその防護効果は期待できない。また、ROT照射時においても、その防護効果はAP照射時と比べて大きく変化しなかった。前方から入射する光子の寄与が大きいためであり、原子力施設のみならず、低エネルギー光子が重要な被ばく源となる医療分野等におけるサポートスタッフなどの線源周辺を動き回る作業員に対してもこれらの防護装備は有用であることが明らかとなった。比較に用いた ^{137}Cs については、全てのケー

表1 ^{241}Am による被ばく事例における不均等被ばく指標 $HI_{eye}(10)$

	(a)	(b)	(c)	(d)
$HI_{eye}(10)$	0.84 ± 0.01	1.02 ± 0.01	0.23 ± 0.01	1.57 ± 0.06

表2 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ による被ばく事例における不均等被ばく指標 $HI_{eye}(d)$

	(e)	(f)	(g)	(h)
$HI_{eye}(10)$	588 ± 179	917 ± 266	1958 ± 252	10300 ± 6825
$HI_{eye}(0.07)$	0.12 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.42 ± 0.01
$HI_{eye}(3)$	0.97 ± 0.02	1.03 ± 0.02	1.33 ± 0.04	2.18 ± 0.08

スで有意に防護具の効果が認められず、計算結果もそれを支持している。原子力分野などで低エネルギー光子の関与が想定されないケースでは、外部被ばくに対してはこれらの防護具の使用効果は低く、作業者への過剰な負担とならないように注意する必要がある。

不均等指標を追加モニタリングの判断に利用するためには放射線作業前の事前評価においてこれらの防護具の効果を計算に組み込むことが必要になる。計算値は実測値を概ね再現しているが、N-80 に対する含鉛エプロンを装着した ROT 照射、並びに ^{137}Cs の ROT 照射については、計算結果は実測値を過大評価している。前者については、含鉛エプロンはファントム前面に配置した鉛板で模擬(図 2 参照)しているため、

斜めから入射する光子に対する挙動が実際とは異なるためと考えられ、こうした状況において含鉛エプロンを不均等指標の計算に組み込む際には注意が必要である。後者については、ファントム寸法の違いに起因するものと考えられる。実測に用いた簡易物理ファントムの頭部厚さ (20 cm) は人体模擬数学ファントムの頭部厚さ (19.4 cm) とほぼ同じであるのに対して、体幹部厚さ (15 cm) は人体模擬数学ファントムの体幹部厚さ (19.4 cm) に比べて薄い。その結果、後方から入射した光子は、より多く体幹部ファントム前面まで到達し、不均等指標を低下させる。一方で、低エネルギー光子については、PA 照射の相対的寄与が小さいためにこの効果が顕著に現れていない。

表 3 防護具による $HI_{\text{eye}}(10)$ の変化

(a) AP 照射

	防護具なし		①含鉛エプロン		②全面マスク		③放射線防護眼鏡	
	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値
N-80	0.84 ± 0.03	0.84 ± 0.01	3.10 ± 0.03	2.96 ± 0.06	0.84 ± 0.04	0.81 ± 0.01	0.62 ± 0.02	0.59 ± 0.01
S-Cs	1.00 ± 0.04	1.02 ± 0.01	1.11 ± 0.08	1.03 ± 0.03	1.01 ± 0.13	0.98 ± 0.01	0.97 ± 0.08	0.97 ± 0.02

(b) ROT 照射

	防護具なし		①含鉛エプロン		②全面マスク		③放射線防護眼鏡	
	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値
N-80	0.99 ± 0.04	1.02 ± 0.01	3.05 ± 0.04	4.04 ± 0.05	0.93 ± 0.04	0.99 ± 0.02	0.71 ± 0.03	0.68 ± 0.01
S-Cs	1.11 ± 0.06	1.22 ± 0.01	1.09 ± 0.03	1.21 ± 0.02	1.06 ± 0.04	1.16 ± 0.01	1.05 ± 0.05	1.16 ± 0.04

60 keV 光子に対しては顕著な効果の見られなかった全面マスクも $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ からの β 線については、眼部の線量を 16%程度にまで低減できる (表 4)。モニタリングの観点からは、眼部の防護がなされたとしても体幹部の $H_p(10)$ は、引き続き眼の水晶体線量を適切に見積もることができない。一方で、体幹部の $H_p(0.07)$ については、眼部の防護によってさらに 10 倍を超えた過大な評価となってしまう。 $H_p(3)$ で評価を行ったとしても、5 倍を超える保守的な評価となる。これらの防護装備の効果을考慮して、眼の水

晶体の被ばくの大きさが線量限度と比べて著しく小さい場合には、体幹部の $H_p(0.07)$ や $H_p(3)$ を利用した保守的な評価は許容され得るであろう。計算値については、 $H_p(10)_{\text{trunk}}$ へのエネルギー沈着が小さいために $HI_{\text{eye}}(10)$ が精度よく決定できず、 $HI_{\text{eye}}(0.07)$ についても計算では実際の校正場での方向性を考慮しない AP 照射を仮定したため、過大な評価となっているが、防護具の効果については、このモデルで適切に実測値を評価できている。

表 4 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線の AP 照射における防護具装着による $HI_{\text{eye}}(d)$ の変化

	防護具なし		②全面マスク		③放射線防護眼鏡	
	実測値	計算値*	実測値	計算値	実測値	計算値
$HI_{\text{eye}}(10)$	76 ± 26	1117 ± 102	12.6 ± 4.3	178 ± 17	8.3 ± 3.0	107 ± 10
$HI_{\text{eye}}(0.07)$	0.44 ± 0.02	0.57 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.054 ± 0.002
$HI_{\text{eye}}(3)$	1.01 ± 0.08	0.94 ± 0.01	0.17 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.09 ± 0.01

*表 2 における(e)と異なる値となっているのは、実測を模擬するため線源周囲の物質や空気により減弱された $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線校正場の校正点における β 線スペクトルを使用しているためである。

D. 考察及び結論

低エネルギー光子や β 線は医療分野や原子力分野においても重要な外部被ばく源であるが、その弱透過性から人体各部位が不均一に照射される不均等被ばくが懸念されてきた。しかしながら、 ^{241}Am からの 60 keV 光子では、極端なケースでも $HI_{\text{eye}}(10)$ が 1.6 程度であり、体幹部モニタリングによる推定でも 63%の過小評価にとどまる。これは、計画被ばく線量が線量限度の 3/10 を超えないようなケースでは許容され得る。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

からの β 線に関しては、 $HI_{\text{eye}}(10)$ が 500~10000、 $HI_{\text{eye}}(0.07)$ が 0.07~0.42 となり、体幹部での $H_p(10)$ や $H_p(0.07)$ モニタリングに対しては、不均等被ばくと言える状況である。現行法令では、水晶体線量は $H_p(10)$ もしくは $H_p(0.07)$ の適切な方から算定されている。実際にこれらのケースでは保守的な評価を考へて $H_p(0.07)$ の値が水晶体線量として採用されていると思われるが、10 倍を超える過大評価になっている可能性がある。一方で、体幹部モニタリングで $H_p(3)$

を評価した場合、極端なケースでも 2 倍程度の過小評価、ホットセル除染などのケースでは 30 %程度の過小評価にとどまっていた。ホットセル除染などのケースでは、通常全面マスク等の防護具を使用することから、計画被ばく線量によっては、追加モニタリングの代わりに体幹部モニタリングで $H_p(3)$ を評価することにより、過度に保守的でない合理的な線量管理が可能になるかもしれない。

含鉛エプロンや含鉛アクリル製放射線防護眼鏡は低エネルギー光子や β 線に対しては ROT 照射時を含めて一定の効果を有するので、線源を直接取り扱う主作業員以外の補助作業員でも被ばく線量の低減には有効である。一方で、高エネルギーの光子に対しては、これらの防護具はほとんど被ばく低減効果を期待できないため、作業性を向上させて作業時間を短縮する方が有利に働くであろう。汚染環境下での作業でよく使用される全面マスクに関しては、光子に対する低減効果は認められなかったものの、 β 線については 85 %水晶体線量を減少させる。この場合、残留する線量寄与を追加モニタリングで評価するよりも、追加の遮蔽によって β 線の寄与を無視できるまでに下げる努力も模索すべきである。例えば、全面マスク窓と 3 mm の軟組織に放射線防護眼鏡を合わせた合計の組織等価厚さが 1 cm になるように防護眼鏡も併用した場合、原子力分野で $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ など通常問題となる β 線による水晶体被ばくへの影響はほぼ考慮する必要がなくなり、体幹部 $H_p(10)$ による評価が妥当になると考えられる。放射線作業計画時には、これらの防護装備も考慮に入れて不均等指標を事前評価し、追加モニタリングと被ばく低減策の双方を視野に

入れた検討が推奨される。

E. 健康危機情報

なし

F. 研究発表

1. 論文発表

H. Yoshitomi and M. Kowatari, "Inhomogeneity of eye lens exposure from ^{241}Am and $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ in nuclear industry." *Radiation Protection Dosimetry* 誌、投稿準備中

2. 学会発表

G. 知的財産権の出版・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

H. 引用文献

[1] Carinou E., *et. al.* 2011. Monte Carlo calculations on extremity and eye lens dosimetry for medical staff at interventional radiology procedures. *Radiat. Prot. Dosim.* 144(1-4) 492-496

[2] Vanhavere F., *et. al.* 2012. ORAMED : Optimization of radiation protection of medical staff. EURADOS Report 2012-02

[3] ICRP, 2012. ICRP statement on tissue

reactions/early and late effects of radiation in normal tissues and organs-threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP Publication 118, Ann. ICRP 41(1/2)

[4] 日本工業規格 JIS Z4831 診断用 X 線防護具 (2000)

[5] Yoshitomi.H. *et al.*, 2016. Assessment of equivalent dose of the lens of the eyes and the extremities to workers under nonhomogeneous exposure situation in nuclear and accelerator facilities by means of measurements using a phantom coupled with Monte Carlo simulation. IRPA-14 proceedings

[6] Sato, T., *et. al.*, 2013. Particle and heavy ion transport code system PHITS, Version 2.5.2. J. Nucl. Sci. Technol. 50(9), 913-923

[7] ICRP, 2008. Nuclear decay data for dosimetric calculations. ICRP Publication 107, Ann. ICRP 38(3)

[8] 日本原子力研究所 1991. 保健物理-管理と研究-No.33. JAERI-M 91-171

[9] 日本原子力研究所 2005. 保健物理-研究と管理-No.47. JAERI-Review 2005-028

[10] 日本原子力研究所 1998. 保健物理-研究と管理-No.40. JAERI-Review 98-015

[11] 日本原子力研究所 2002. 保健物理-研究と管理-No.44. JAERI-Review 2002-036