

平成 27 年度厚生労働省労災疾病臨床研究事業費補助金
平成 27 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 28 年 (2016 年) 3 月

目次

I. 総括研究報告 1

II. 分担研究報告 2 5

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 等では、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 まで大幅な引き下げを検討している。本研究では、上述の課題に対し、体幹部、眼の水晶体及び末端部線量の相関に関する評価を通じて、体幹部線量から適切な等価線量評価手法を開発する。本年度は、以下のとおり課題を設定し、研究を遂行した。

(1) 体幹部線量に対する、眼の水晶体及び末端部等価線量の相関について、均等被ばくを模擬した条件で、シミュレーション及び実験結果は互いに非常に良く一致した。この結果を受け、シミュレーション手法の妥当性が確保された。今後、①線種、②作業者の体勢及び③線源－作業者の位置関係に着目した水晶体/体幹部線量比の評価を、計算シミュレーションを用い、系統立てて実施可能となった。

(2) 工業・原子力・学術分野における、放射線作業と放射線業務従事者の被ばく状況に関する文献調査を行い、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 例であった。いずれも β 線による被ばくが優位な放射線作業であり、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った、と結論付けられている。

(3) 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では、OSL 線量計について、 β 線エネルギー応答特性について向上を目指した最適な線種弁別フィルターを検討し、線量計開発を継続する。

A. 研究目的

本研究の目的は、放射線業務従事者の眼の水晶体及び手指等の末端部の被ばく線量評価が必須となる特殊な被ばく状況下において、眼の水晶体及び末端部の組織等価線量を適切に評価する手法を開発する。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実施されている個人モニタリングでは、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が、眼の水晶体、末端部等の等価線量を適切に評価する手法は現在も検討が進められている。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被ばく線量と、放射線業務従事者の被ばく状況（線源の位置、線種、体勢、作業時間等）を考慮した、眼の水晶体及び末端部被ばく線量の相関を詳細に検討することを通じ、眼の水晶体及び末端部組織等価線量の予測モデルを提案する。

本研究の背景として、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、我が国の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。調査の対象は、全ての放射線業務従事者であり、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の調査は行われているが、原子力分野は個々の被ばく事例が少なく、後述の眼の水晶体等価線量と体幹部での測定結果の関連性についての調査等は今後待たれるところである。

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。（例として、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示」第十一条において、「一 外部被ばくによる実効線量は、一センチメートル線量当量とすること。」及び「二 眼の水晶体の等価線量は、一センチメートル線量当量又は七十

マイクロメートル線量当量のうち、適切な方とすること。」と定められている。）工業・原子力・学術分野で通常生じうる放射線作業環境においては、体幹部線量のうち適切なものから、水晶体組織等価線量を推定しており、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。一方、放射線業務従事者の顔面が線源に近接した状況を考慮すると、体幹部で測定される被ばく線量では水晶体組織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に係る系統的な調査は十分になされてこなかった。

本研究では、上述の課題に対し、体幹部での線量当量に対する、眼の水晶体及び末端部等価線量の相関について評価し、眼の水晶体及び末端部の外部被ばくによる等価線量を適切に評価可能な手法を開発する。放射線業務従事者の体幹部、眼の水晶体及び末端部線量について、工業・原子力・学術の分野で一般的に行われている放射線作業に対し、主に計算シミュレーションと人体模擬物理ファントムを用いた実験を通じて推定する。体幹部、眼の水晶体及び末端部の線量を比較して、以下に挙げる2点を検討する。すなわち、

(a) 眼の水晶体及び末端部の等価線量は、体幹部で測定された線量とどの程度の範囲で一致するのか、または異なるのか。

及び

(b) 体幹部で測定できる線量当量のうち、最も適切に眼の水晶体及び末端部の等価線量

を評価しうるのは、1cm 線量当量か、3mm 線量当量か又は 70 μ m 線量当量か。

さらに、体幹部線量から眼の水晶体及び末端部の外部被ばくによる等価線量の推定手法を提案し、妥当な線量評価が可能か検証する。

B. 研究方法

本研究では、上記の目的について、以下に示す(1)、(2)及び(3)のテーマを並行して進め、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。

(1) 体幹部線量と眼の水晶体及び末端部等価線量との相関に関する検討

(2) 工業・原子力・学術分野における、放射線作業と放射線業務従事者の被ばく状況に関する調査

(3) 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

上記のテーマは、いずれも相互に関連している。(1)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平常業務で生じる被ばく状況で、(a) 体幹部での線量とどの程度の範囲で一致するかを検証することを目的としている。この目的を達成するために、平常業務でどのような放射線作業があるか調査すると同時に、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の等価線量の割合を見積もる手法を準備する必要がある。そこで、(2)の文献調査を進め、工業・原子力・学術分野での被ばく事例の実態を把握し、(1)で準備する手法に適応し、平常業務で生じる被ばく状況では体幹部線量に対する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評価する。本研究では、個人モニタリング時の線量評価に着目しているため、(b) 体幹部で測定できる線量当量(1cm 線量当量、3mm 線量当量及び70 μ m 線量当量)のうち、最も適切に眼の水晶体及び末端部の等価線量を評価しうるのはどれかについても、検討する必要がある。この目的のため、(1)においては、計算シミュレーションを用いた体幹部線量、眼の水晶体及び末端部等価線量の推定を中心に行うとともに、(3)では測定手法の最適化を提案する。

研究着手初年度である平成27年度について、(1)の体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の比を、種々の条件で系統立てて行うための計算シミュレーションの準備と実験による妥当性の評価を行った。(2)について、国内で報告されてきた被ばく評価事例を調査し、主に眼の水晶体線量のモニタリング事例に注目した。(3)については、線量計応答の改善案として、線量計の前面に2mm アクリル板を取り付けて、計算シミュレーションで γ 線に対する線量計のエネルギー応答特性を評価した。

(1) 体幹部線量と眼の水晶体及び末端部等価線量との相関に関する検討

放射線業務従事者が定期的に行う放射線作業について、計算シミュレーション及び簡易物理ファントムと線量計を組み合わせた測定により、体幹部で受ける被ばく線量に対し、同一放射線作業時に眼の水晶体及び手指等末端部の等価線量がどの程度になるか評価する。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、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。特

に、放射線源、線種、作業者と線源との位置関係、作業者の体勢、作業環境等は、眼の水晶体及び末端部線量/体幹部線量の比に影響を与える要因として考量される。これらをパラメータとして簡単に変更できる計算シミュレーションを用いて眼の水晶体及び末端部線量/体幹部線量の比を評価することで、効率よく研究を進めることができる。

本研究で行う評価の第一段階は、計算シミュレーション及び物理ファントムを用いる実験を通じ、計算シミュレーションで相関を予測可能かどうか検証することである。計算シミュレーションでは、いくつかの段階を踏んで検証を行い、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。）と後述のフィールド試験に供する単純な形状の簡易物理ファントム（以下、「物理ファントム」という。）を用いた場合でも、同様の結果が再現できることを事前に確認する。計算結果と比較するため、計算で行った同一体系の被ばく条件を放射線照射場での実験で再現して比較する。

次の段階として、計算シミュレーションを利用して、文献等で報告されている被ばく状況を再現し、眼の水晶体及び末端部線量/体幹部線量の比が報告値とどの程度一致しているか比較する。さらに、計算機上で放射線業務従事者の放射線作業における被ばく条件を模擬することで、詳細な検討を加える。

ここで使用する計算コードは、PHITSを選定した。本計算コードは、放射線治療時の医療被ばく評価及び医療施設の遮へい計算で十分に実績がある。計算シミュレーションでは、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、後述の線量当量を評価することも考慮し、ICRUの指定する人体等価物質とした。（図1参照）



図1 本研究で使用した数学ファントムの外観

本研究では、現行の個人モニタリングの線量計測の枠組みを踏襲するため、ICRPが定義する実用量である、1cm線量当量、3mm線量当量及び70 μ m線量当量の定義に従い、数学ファントムにおいて、吸収線量を測定する領域を設定する。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、人体模擬ファントム左胸部中央深さ10mm、3mm及び70 μ mの位置での線量を求めた。3mm線量当量については、人体模擬ファントムの眉間中央部分の深さ3mm位置での線量を求めた。手指における70 μ m線量当量についても同様に、手指における表面から深さ70 μ m位置での吸収線量を評価した。吸収

線量計算に使用した領域は、眼の水晶体位置で、 $1.0\text{ cm}^{(L)} \times 3.69\text{ cm}^{(W)} \times 0.01\text{ cm}^{(D)}$ であり、体幹部では、 $1.0\text{ cm}^{(L)} \times 6.18\text{ cm}^{(W)} \times 0.01\text{ cm}^{(D)}$ である。末端部での皮膚等価線量評価のために、 $1.0\text{ cm}^{(L)} \times 6.18\text{ cm}^{(W)} \times 5\text{ }\mu\text{m}^{(D)}$ の領域で、吸収線量を計算した。吸収線量領域のサイズは、計算シミュレーション時の計数の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。

計算シミュレーション及び実験では、実際に行われる個人モニタリングの状況を正確に模擬するため、以下に示す4条件で比較し、それぞれが一致することを確認した。なお、条件①から③までは全て計算シミュレーションであり、計算結果検証のための照射実験は、④の条件で行っている。条件④では、照射後にOSL線量計を読み出し、各OSL線量計の計数値から体幹部が被る線量に対する眼の水晶体及び末端部等価線量の割合、計算で評価された割合と一致するか確認する。

- ① 数学ファントム中の、胸部、眉間及び手指の一定深さ位置の吸収線量
- ② 数学ファントム表面の①と同じ位置に取り付けたOSL線量計からの信号量
- ③ 照射試験に使用する物理ファントムを、計算シミュレーション上で模擬し、②と同じ位置に取り付けたOSL線量計からの信号量
- ④ 照射試験に使用する物理ファントムに、②と同じ位置に取り付けたOSL線量計からの信号量

計算シミュレーションで求めた、眼の水晶体線量/体幹部線量及び末端部線量/体幹部線量は、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。

基準照射場は、日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 放射線標準施設棟（以下、「FRS」という。）で整備済みの ^{137}Cs 、 ^{60}Co 及び ^{90}Sr - ^{90}Y 放射線校正場を用いる。物理ファントムは、線量計を校正する際に使用するファントムを組み合わせ、人体模擬ファントムとして使用した。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、目的に応じた人体模擬物理ファントムが使用されている。一方、本研究では放射線作業を行う汚染環境下で物理ファントムを用いたフィールド試験を実施する。この場合、安価で簡便に設置可能であることが望ましい。この点を考慮し、アクリル製のファントムを採用した。

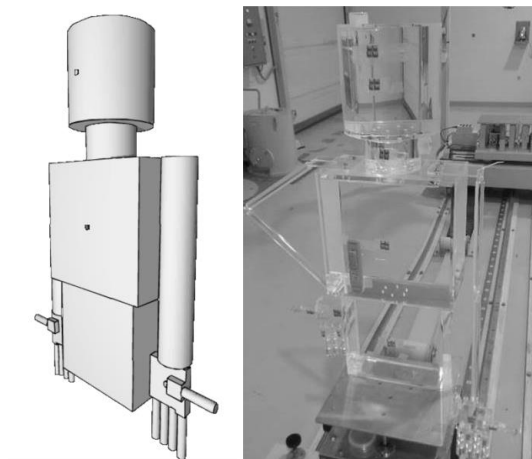


図2 本研究で使用したアクリル製物理ファントムの外観

図2には、アクリル製物理ファントムの外観を示す。アクリル製物理ファントムは、個人線量計校正時に使用されるISO/JIS規格のファントムを基準としており、頭部、頸部、胸部及び腹部をアクリル製水槽で作成し、使用時に水を満たしたものである。手指については、指に装着して不均等被ばくをモニタする指リングを放射線校正場で

校正するのに使用するロッドファントム（直径 19 mm φ のアクリル棒）を指の長さに加工作し、手のひらに取り付け、手指のファントムとする。表 1 に使用した物理ファントムのサイズを示す。

物理ファントムの全身に装着した線量計は、個人モニタリングで広く使用されている OSL 線量計（長瀬ランダウア社製 NanoDOT™）を使用した。OSL 線量計は、物理ファントム各所に合計 40 個取り付け、放射線による被ばく状況をモニタした。なお、線量計は、線量計をそのまま取り付けたものと、2 mm 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で行った。γ線照射場及び ⁹⁰Sr-⁹⁰Y β線照射場での線量評価は、2 mm 厚アクリル板を前面に張り付けた条件で照射した OSL 線量計からの信号量を用いて行った。

（2）工業・原子力・学術分野における放射線作業と放射線業務従事者の被ばく状況に関する調査

放射線業務従事者は、その作業内容により、被ばくの様相は異なる。そのため、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末端部等価線量の割合も、放射線作業の内容に大きく依存する。本研究で実施する計算シミュレーション及び基準

照射場での実験での評価は、放射線業務従事者の個人モニタリング施策のうち、不均等被ばく状況を適切に分類して追加モニタリング及び放射線防護対策の提案を適切に行う計画を伴う枠組みの提案である。提案される枠組みの有用性は、実際の放射線作業に対して適応されて検証されるべきである。この点を考慮し、不均等被ばく状況モニタリングの枠組みの提案に先んじ、現在行われている放射線防護の取り組みについての調査が不可欠である。

そこで、工業・原子力・学術分野における、放射線作業と放射線業務従事者の被ばく状況に関する調査を行った。本研究では、主に国内の学術論文、研究報告を中心に調査し、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比較した。

放射線業務従事者の実施する放射線作業と作業に伴う放射線業務従事者の被ばく状況は、特に工業・原子力・学術分野においては、系統立てた取りまとめが行われていない。そのため、放射線業務従事者の間で共有される、放射線作業に伴う暗黙知に属するようなノウハウも含め、各作業現場、各事業所、各業者等に個別に蓄積されてきた。例として、放射線作業時の放射線業務従事者の体勢及び線源との距離の取り方は、

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)

体幹部線量と眼の水晶体及び末端部線量に大きく影響する。しかしながら、これらを明示的にマニュアル化し、教育訓練する、等の施策については、各作業現場では確実に行われていると推測されるが、放射線防護対策の具体策が学術誌等で報告される事例はほぼ皆無である。

本研究での調査を通じ、工業・原子力・学術分野における、放射線業務従事者の被ばく状況を系統立てて把握し、放射線作業の特徴、被ばくを増加させる主要因と被ばく低減対策をまとめている。

(3) 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

眼の水晶体及び末端部モニタリング用線量計について、いくつかの提案が既になされており、TLD線量計で製品化しているものもある。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。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も、不均等被ばくモニタリングのため、頭部に既存の線量計(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。

本研究では、現状で一般的に利用可能なパッシブ型個人線量計のうち、既存のOSL線量計を用いて、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の開発を試みた。

線量計表面に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線量計の開発・試験を行った。

C. 研究結果

(1) 体幹部線量に対する、眼の水晶体及び末端部等価線量の相関に関する検討

計算シミュレーション及び実験での線量評価の妥当性は、 γ 線及び β 線照射場について、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の割合を比較することで確認した。計算シミュレーションに適応した数学ファントム内部に投与された線量の比較は、単位入射放射線に対する各評価点での吸収線量の比を取っている。吸収線量の評価は、ICRP74などで示す、個人線量当量の定義に準じている。そのため、評価された吸収線量の値は、放射線作業における放射線業務従事者が、個人モニタリングの結果得られる測定値の理想的なもの、と本研究では位置付けている。その他の評価条件では、胸部中心及び眉間部分の体表面に取り付けられたOSLからの信号量の比とした。なお、この評価は計算シミュレーションの妥当性を確認することを主眼においており、OSLの信号量を線量当量へ換算するための換算係数は乗じられていない。

実験は、原子力機構FRSに整備された、 ^{137}Cs 及び ^{60}Co γ 線照射場、並びに ^{90}Sr - ^{90}Y β 線照射場で行った。照射条件は、全て前方-後方照射(AP照射条件)で全身に均等な線量となるような条件としている。照射した線量は、いずれの線種についても個人線量当量($H_p(10)$)で10 mSvである。なお、評価では、体幹部線量及び眼の水晶体線量の関係についての評価を先行して重点的に実施した。手指で測定される線量である末端部線量については、いくつかの条件で実施しており、次項の考察で詳細な結果を示す。

表2には、計算シミュレーションと実験による体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を示す。表に示す通り、いずれの線種

表2 計算シミュレーションと実験による体幹部線量に対する眼の水晶体線量比

線源及び照射条件	計算			実験	
	数学ファントム		物理ファントム		
	① Ideal	② OSL	③ OSL	④ OSL	
(1) Parallel ⁶⁰ Co	1.02 ± 0.01	0.97 ± 0.01	0.97 ± 0.03	0.98 ± 0.01	
	0.98 ± 0.02	0.97 ± 0.03	0.95 ± 0.01	0.93 ± 0.03	
(2) Point ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y, 110 cm	1.25 ± 0.04	1.28 ± 0.09	1.29 ± 0.04	1.29 ± 0.05	

についても、実験条件を考慮すると①から④の条件で良い一致をみた。特に⁶⁰Co及び⁹⁰Sr-⁹⁰YではOSLからの線量比の結果は、どの条件であっても非常に良く一致している。一方で、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ある。このずれは、OSLがいずれも体表面に張り付けられていること、及びOSLの評価には（この時点では）換算係数がかけられていないこと、に起因すると考えられる。この点を考慮すると、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いえる。さらに、物理ファントム表面に装着した線量計が、高性能で精密な物理ファントムと同等の応答になることが示されている。これらを受け、数学ファントムを用い、線種、線源の位置、作業者の姿勢、作業環境、等の、放射線作業時の被ばく線量評価に影響を与えるパラメータを変更し、体幹部線量と眼の水晶体線量との相関について評価を進める。

また、いくつかの条件で線量比の評価につながる計算及び予備測定を行っている。表3に⁶⁰Co照射場で、物理ファントム全体を一定方向に回転させた場合の、体幹部線量に対する眼の水晶体線量比の変化について示す。物理ファントムの角度を変えても、γ線が物理ファントム全体に均等に照射さ

れるよう、照射場に配置して実験を行った。照射した線量は、いずれの角度についても、個人線量当量(H_p(10, 0°))で20 mSvである。体幹部に対する眼の水晶体線量の比は、胸部中心及び眉間部分の体表面に取り付けられたOSLからの信号量の比で計算した。表3では、体幹部に取り付けた電子式ポケット線量計からの読み値を線量として併せて記載している。

表3 照射方向を変えた場合の、実験による体幹部線量に対する眼の水晶体線量比

線源及び照射条件 ⁶⁰ Co photon, Parallel 角度(°)	実験	線量計 指示値
	OSL	(mSv)
0	0.96 ± 0.04	18.45
30	0.97 ± 0.04	18.53
60	0.94 ± 0.03	18.85
75	0.99 ± 0.07	19.05

実験の結果、不確かさを考慮した場合、角度にほとんど依存せず、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が1.0程度となっている。この結果、γ線エネルギーが高い場合については、角度に依存せず、体幹部線量から眼の水晶体線量を適切に推定可能であると考えられる。今回の予備実験ではγ線のエネルギーが高いため（平均1.25 MeV）、放射線の入射方向で大きな違いが

なかったとも考えられるため、さらに低エネルギーの γ 線での実験又は計算が必要である。

(2) 工業・原子力・学術分野における、放射線作業と放射線業務従事者の被ばく状況に関する調査

工業・原子力・学術分野における、放射線作業と放射線業務従事者の被ばく状況に関する調査として、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比較した。表4に各分野での被ばく評価事例の報告数を示す。

表4 工業・原子力・学術分野での被ばく事例報告数

分野	文献数
工業	3
原子力	56
うち原子力研究施設	(44)
学術（加速器施設）	6

表4に示すとおり、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る。論文での報告のうち、86%が原子力関連となっている。さらに、原子

力分野の中でも、原子力研究施設での被ばく事例の報告は、44例と突出している。これは、研究施設として、定型化した作業以外の多種多様な放射線作業が行われており、安全に作業を行うにあたり計画被ばく線量の見積もりも含めた放射線作業全体を記録する目的も含まれている、と考えられる。また、工業分野は3件であり、学術分野で6件であった。学術分野の報告は全て加速器施設における被ばく事例の報告であった。

表5では、各分野での放射線作業の分類を示す。この表では放射線作業の事例を挙げているため、全件数は95件となっている。作業事例は、分野ごとに分類の傾向は大きく異なっている。工業分野は全て非破壊検査時の被ばく事例の紹介であるため、全て「その他」に含まれる。工業分野では、非破壊検査での線源取扱い事例が報告されている。原子力研究施設を除いた学術分野では、加速器施設での事例のみであり、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。原子力分野は、被ばく事例報告の中心を占めており、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い。

原子力分野であっても、日常的に行われ

表5 工業・原子力・学術分野での放射線作業の分類

作業区分	工業	原子力（うち原子力研究施設）	学術（加速器施設）
メンテナンス	-	17(13)	6
解体又は撤去	-	18(17)	3
除染	-	19(17)	-
核燃料製造・取扱い	-	19(17)	-
その他	3	10(7)	-

*：被ばく評価事例の全数は95件

るメンテナンス等とはっきりと区別し、「特殊な被ばくが生じうる放射線作業」としてこれらの作業をとらえ、放射線防護対策等を行っている。放射線作業の特徴、被ばくを増加させる主要因と被ばく低減対策に係る検討は、次項で詳細に検証する。

(3) 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、現状で一般的に利用可能なパッシブ型個人線量計のうち、既存の OSL 線量計を用いて、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の開発を試みた。

線量計表面に 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線量計の開発・試験を行った。

図 3 では、計算シミュレーションで求めた、OSL 線量計の γ 線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 スラブファントム(30×30×15 cm³) に OSL 線量計を取り付けた状態で、実験で使用した OSL 線量計を模擬し、前面に亚克力板(10×10×2 mm³)の有無について、1cm 線量当量でレスポンスを評価した場合の結果である。図 4 は、70 μ m 線量当量でレスポンスを求めた結果である。

図 3 及び 4 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、応答特性を改善することができた。

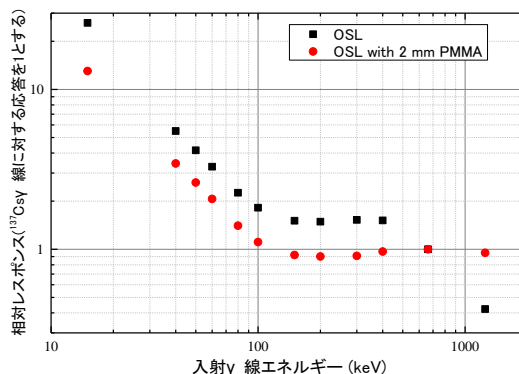


図 3 計算シミュレーションによる OSL 線量計のエネルギー応答 ($H_p(10)$ での応答特性)

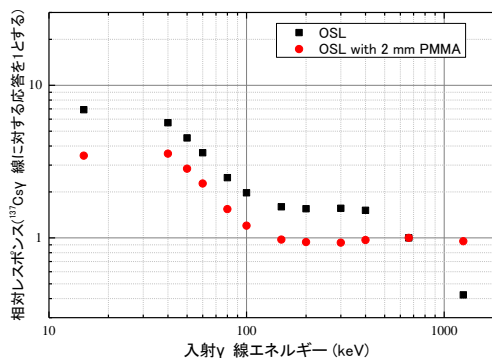


図 4 計算シミュレーションによる OSL 線量計のエネルギー応答 ($H_p(0.07)$ での応答特性)

D. 考察

(1) 体幹部線量と眼の水晶体及び末端部等価線量との相関に関する検討

以下に示す点に従って、計算シミュレーション及び実験で得られた、体幹部線量に対する、眼の水晶体及び末端部等価線量の相関について考察を進める。

(a) 体幹部線量として評価する線量当量についての考察

本研究では、数学ファントムを用いた線量比の計算結果は、体幹部の線量を胸部中央深さ 10 mm での単位入射放射線あたりの吸収線量とし、眼の水晶体線量を眉間中央深さ 3 mm 位置での単位入射放射線あたりの吸収線量を求め、比を取っている。本研究で使用した数学ファントムと吸収線量の評価方法から、ICRP 及び ICRU が示している個人線量当量の定義通りの計算を行っており、本研究では理想的な線量当量として取り扱っている。現行法令では、「体幹部で測定された 1cm 及び 70 μ m 線量当量のうちいずれか適切な方」を、眼の水晶体等価線量の推定値として評価できる。さらに、体幹部での線量当量は、眼の水晶体等価線量のモニタリングの線量当量単位として有望な、3mm 線量当量での評価も可能である。これらの点を考慮し、体幹部で測定される線量当量（1cm、3mm 及び 70 μ m 線量当量）について、それぞれの単位での体幹部の線量当量を用いた場合の、眼の水晶体線量モニタリングへの影響について考察した。この検討を行うことで、個人モニタリング施策として、現行の 1cm 及び 70 μ m 線量当量での体幹部モニタリングのみで、眼の水晶体線量のモニタリングとして、適切に暴露された等価線量を推定しうるのか、についての議論に資する。また、眼の水晶体線量を測定するため、追加で線

量計を装着する場合、補助線量計の校正定数をどの単位のものを用いるのか（現行では、1cm 及び 70 μ m 線量当量のみであるため）、についての議論にも資するものである。

表 6 では、計算シミュレーションによる評価する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。体幹部の線量について、左胸部中央深さ 10 mm、3 mm 及び 70 μ m での単位入射放射線あたりの吸収線量を求め、それぞれの吸収線量に対する、眼の水晶体線量を眉間中央深さ 3 mm 位置での単位入射放射線あたりの吸収線量の比を取っている。線種は γ 線であり、エネルギーを変えて評価した。 γ 線の入射については、各条件で前方-後方照射 (AP 照射条件) で全身に均等に照射される条件で計算した。

γ 線照射における、体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の比は、同一線種の場合、どの線量当量単位でも大きな変化は見られなかった。また、入射 γ 線エネルギーに対する比の変化について、各線量当量単位に対する比は 20%程度に収まっている。ただし、60 keV の γ 線に対する結果では、1cm、3 mm 及び 70 μ m 線量当量のいずれの線量当量による場合でも、体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の比は 1 より小さい。現行法令では、「体幹部で測定され

表 6 評価する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 (γ 線)

線源及び照射条件 photon, parallel (MeV)	計算		
		数学ファントム	
	$H_p(3) / H_p(10)$	$H_p(3) / H_p(3)$	$H_p(3) / H_p(0.07)$
0.06	0.80 ± 0.02	0.82 ± 0.01	0.87 ± 0.02
0.662	0.98 ± 0.02	0.94 ± 0.02	0.97 ± 0.02
1.25	1.02 ± 0.01	0.99 ± 0.01	1.01 ± 0.01

表7 評価する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（電子）

線源及び 照射条件 Electron, parallel (MeV)	計算		
	数学ファントム		
	H _p (3) / H _p (10)	H _p (3) / H _p (3)	H _p (3) / H _p (0.07)
1.0	-	0.96 ± 0.01	1.08 ± 0.02
1.5	-	1.01 ± 0.01	1.82 ± 0.03
2.0	41.4 ± 3.6	0.98 ± 0.01	1.68 ± 0.03
2.5	2.40 ± 0.10	1.03 ± 0.04	1.56 ± 0.06
3.0	1.09 ± 0.02	1.02 ± 0.02	1.38 ± 0.03

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にできるが、被ばくに寄与するγ線エネルギーが低い場合には、体幹部線量からの眼の水晶体線量の推定は、過小評価になることは留意すべきである。この場合、体幹部における 70 μm 線量当量の測定値を、眼の水晶体線量の推定値とする方が、過小評価の割合が小さくなる（より実際の被ばく線量に近くなる）、と言える。

表7では、電子線を用いた場合の、計算シミュレーションによる評価する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。電子は単色の電子線を用い、エネルギーを変えて評価した。γ線の場合と同様に、各条件で前方-後方照射(AP 照射条件)で全身に均等に照射される条件で計算した。

電子線照射における、体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の比は、各線量当量単位で大きく変化した。特に体幹部線量の評価を 1cm 線量当量で行った場合に顕著に表れており、2 MeV のエネルギーの電子に対して、40 倍以上過大になっている。一般的に利用されるβ線源である ⁹⁰Sr-⁹⁰Y のうち、⁹⁰Y の最大エネルギーが 2.28 MeV であ

ることから、体幹部での 1cm 線量当量での測定値を眼の水晶体線量の推定値として使用するの、大幅な過小評価といえる。一方で、体幹部線量を 70 μm 線量当量の単位で、眼の水晶体線量の比を求めた場合、その比は評価したエネルギー範囲内で 1 を越えた。このことから、70 μm 線量当量での測定値を眼の水晶体線量の推定値として使用した場合、過大評価になるがファクター2以内に収まる、保守的な推定値であるといえる。「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場合、現状では 70 μm 線量当量を眼の水晶体線量と推定値とするのが妥当である。

体表面から同じ深さ(d = 3 mm)で吸収線量の評価を行っているため、体幹部の 3 mm 線量当量に対する眼の水晶体線量の比は、電子のエネルギーに依存せずほぼ 1 となった。このことから、体幹部における 70 μm 線量当量の測定値よりも、3mm 線量当量の測定値の方が、より正確な眼の水晶体線量の推定値になると言える。

(b) 「不均等被ばく」についての考察

本研究では、実際の放射線作業の現場で

遭遇する放射線被ばく状況下を模擬し、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。この時、放射線の線種、線源の形状、放射線の放射線業務従事者への入射方向、放射線業務従事者の体勢、周囲の状況、等、体幹部線量と眼の水晶体及び末端部線量に差異を生じさせ得る要因について調べ、どの要因が眼の水晶体及び末端部被ばく線量の予測の際に重要となるか検証する。相関を詳細に検討することを通じ、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線量から、眼の水晶体及び末端部組織等価線量の予測モデルを提案する。この場合、「不均等ひばく」状況での、体幹部線量からの眼の水晶体及び末端部組織等価線量の予測が困難であると考えられる。

本研究における不均等被ばくの定義として、以下の2つが考えられる。なお、本研究の遂行上、必要に応じて、この定義の修正を迫られうる点について、あらかじめ記載する。

①「個人被ばく線量モニタリングにおいて、被ばく線量評価対象となる部位で、体幹部で観測される線量の読み値に対する不確かさ、入射放射線情報に関する情報不足に伴う不確かさ及びその他被ばく評価上影響を与えうる因子に伴う不確かさを加味して、体幹部の線量と「ほぼ」等しい、と見積もることができない被ばくを、不均等被ばくと呼ぶ。」

②「個人被ばく線量モニタリングにおいて、全身に均等に放射線を暴露されない状況での被ばくを、不均等被ばくと呼ぶ。」

②の定義に従うとすると、「均等に被ばく

しない」状況は全て含まれることになる。この場合、通常行われている放射線作業、例えば線源取扱い、放射化した機器の撤去・補修、セル等での残存した放射性物質の除染等は、手指を線源（汚染源）に近接させることから、それらのほぼ全ては「不均等ひばく（状況）」と分類される。一方で管理区域内での定常的な放射線作業には、巡視点検、定期的な放射線サーベイ、線源を取り扱わない作業（管理区域内に設置された機器を補修する、定期メンテナンスを行う）等は、（ほとんどバックグラウンドと同レベルであろうが）場の放射線を均等にばく露されていることになり、ICRP で定義される ISO ジオメトリ又は ROT ジオメトリに近いばく露条件で被ばくを被りうるといえる。

さらに、②の定義の場合、「不均等被ばく状況」であれば、「全て」追加モニタリングを行う、という枠組みを作るとすると、従来の除染作業は全て追加モニタリングが必要となる。例として、除染の対象となる汚染源の濃度が低く、放射線作業時に通常用いられる、ゴム手袋と綿手袋を二重に装着して十分被ばく低減の効果が認められるにも関わらず、全ての放射線業務従事者が TLD 線量計を使用した指リングを装着する事態になり、これは膨大な管理負担の増加を伴う。徹底した追加モニタリングの結果が、費用対効果の面、放射線業務従事者の心理面（被ばくへの恐怖）等を考慮しても、放射線業務従事者の被ばく低減対策として最適か、検討の余地は残る。この点について、我が国の眼の水晶体被ばく事例の詳細な調査を進めている研究者らから以下に引用する提言がある。

「今後、わが国の法令において、水晶体の

線量限度が引き下げられたとしても、専用線量計装着が必要となる従事者は非常に限られている。このため、水晶体の線量が限りなく 0 に近い数多くの作業員に対して測定を義務付けるといった非合理的な管理を行うのではなく、現実に応じた方法で水晶体の線量を評価すべきである。」[1]

一方、①の定義では、上述の②の定義でも挙げた均等被ばく条件に加え、眼の水晶体及び手指の末端部等価線量が「不確かさを加味して、体幹部の線量と「ほぼ」等しい、と見積もることができる」場合、均等に被ばくすると見なすことになる。この場合は、体幹部線量のモニタリングのみを行い、必要に応じ眼の水晶体及び手指の末端部皮膚等価線量の推定を行うことになる。推定には体幹部線量の測定値を用いるほか、放射線作業に伴う作業環境の線量当量率、被ばく源となる核種、線種、線源の形状、作業員の姿勢（顔面を線源に極端に近接させた場合、後述の通り、眼の水晶体線量は体幹部線量より増加する）、作業環境の状況、等の情報は有益である。これらの作業環境及び放射線作業に関する情報は、作業着手前に入手可能である。これらの情報から、事前に放射線業務従事者の被ばく線量、及び体幹部に対する眼の水晶体線量及び手指の末端部皮膚線量の比が、比較的簡単に推定できれば、さらに適切な被ばく低減対策立案に資すると考えられる。

不均等被ばくを考慮するうえで必要となる要因には、上記の他にも、法令で定められた線量限度、使用する線量計の特性、及び、追加モニタリングのために線量計が装着される位置も挙げられる。

線量限度については、現行の法令（放射線障害防止規則第 4 条及び第 5 条）で、体

幹部での線量（全身の被ばく。内部被ばくも合算される）が、5年平均 20 mSv（単年で 50 mSv）であるのに対し、眼の水晶体等価線量が、年間 150 mSv、及び皮膚の等価線量は年間 500 mSv となっている。（いずれも平成 28 年 4 月時点での線量限度）このことは、合理的に評価される限りにおいて、「不均等被ばく」状況で、放射線業務従事者の体幹部線量測定からの推定での、眼の水晶体/末端部等価線量の評価を容認しうる。例えば、作業全体での被ばく線量が体幹部で 10 μ Sv 程度と既に分かっている場合で、体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の推定が可能である場合、その比が 10 倍から 20 倍になったとしても、法令で定める線量限度を超えないため、推定が妥当である限り、体幹部のみのモニタリングで十分である。しかしながら、これが等価線量の線量限度に達する見込みの場合、より正当な線量評価がなされるべきであり、眼の水晶体等価線量に対する追加モニタリングは不可欠となる。さらにいうと、眼の水晶体等価線量を 5 年平均 20 mSv 以下での管理の場合、体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の推定が可能であったとしても、眼の水晶体線量/体幹部線量の比が大きい場合、推定の不確かさが大きい場合、体幹部線量が 20 mSv に接近する場合、等、追加モニタリングが要求される場合が出てくると考えられる。

個人モニタリングに使用される線量計についても、考慮すべき点がある。例えば、本研究での測定で使用した線量計は、OSL 線量計と補助線量計として電子式線量計を使用した。いずれも、線量評価時には不確かさを有しており、メーカー推奨値で ^{137}Cs γ 線に対し、それぞれ 15%及び 20%となっ

ている。これらは、定期校正時により詳細な値を得ることは可能である。また、被ばく源が明瞭に把握されている場合にはこの不確かさもより詳細に見積もることも可能であるが、被ばく源の情報が少ない場合、線量計の指示値にはより大きな不確かさが加わる可能性がある。

現行の個人モニタリングでも、必要に応じ追加モニタリングが行われている。眼に直接線量計を装着できないため、眼の近傍に線量計を装着し、放射線作業に伴う眼の水晶体線量、として取り扱われている。特に原子力分野においては、追加モニタリングが必要な放射線作業は、内部被ばくのおそれのある場合が多く、放射線業務従事者は防護マスクを装着した状況で作業することになる。このことから、マスクを装着した状態で、線量計を適切に眼の水晶体線量を測定できる位置に装着する必要がある。現在のところ、追加モニタリングの線量計は、頸部、額、作業着の襟などに装着される事例があり、このことが眼の近傍に装着していないことによる線量評価の不確かさを生起している可能性がある。

(c) 「不均等被ばく」状況における、体幹部線量に対する、眼の水晶体等価線量の相関
前項の研究結果でも示した通り、放射線業務従事者の全身が均等に被ばくする状況

を模擬した計算シミュレーション及び実験から、この被ばく条件では体幹部線量に対し眼の水晶体線量がほぼ等しくなると予想される。一方で、「顔面が極端に被ばく源(線源)に接近した状況」、「床面除染のため、体をかがめて作業する」、「一方向からの被ばく」等は、潜在的に顔面への放射線のばく露量と体幹部へのそれが異なり得る。このような「不均等被ばく」状況下で、体幹部線量に対する、眼の水晶体等価線量の比がどうなるか事前に評価しておく必要がある。

表8には、計算シミュレーションと実験による体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を示す。照射条件は、いずれの線種についても、点等方線源を顔面から ^{137}Cs 線源で 40 cm、 ^{90}Sr - ^{90}Y で 80 cm の位置に設置した条件である。①から④の条件は、前項に示した数学ファントム及び物理ファントムの条件である。特に ^{137}Cs 線源での結果については、①から④の全ての条件で良く一致しているといえる。一方で、 ^{90}Sr - ^{90}Y では OSL からの線量比の結果は、どの条件であっても非常に良く一致している。一方で、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ある。このずれは、数学ファントムと物理ファントムで、OSL の取り付け位置に差異があること、に起因すると考えられる。 β 線の照射において、線源

表8 点線源を使用した場合の、計算シミュレーションと実験による体幹部線量に対する眼の水晶体線量比

線源及び照射条件	計算				実験
	数学ファントム		物理ファントム		④ OSL
	① Ideal	② OSL	③ OSL	④ OSL	
Point ^{137}Cs , 40 cm	2.37 ± 0.04	2.25 ± 0.07	2.20 ± 0.05	2.17 ± 0.16	
Point $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, 80 cm	1.57 ± 0.02	1.54 ± 0.09	1.92 ± 0.02	1.89 ± 0.17	

がファントムに近接している場合、取り付け位置の少しの差異が、線量比に寄与する。実際に③の条件でOSLの取り付け位置を5 cm 移動させると、線量比は 1.92 から 1.40

となり、不確かさの範囲内で②と一致する。この点を考慮して、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

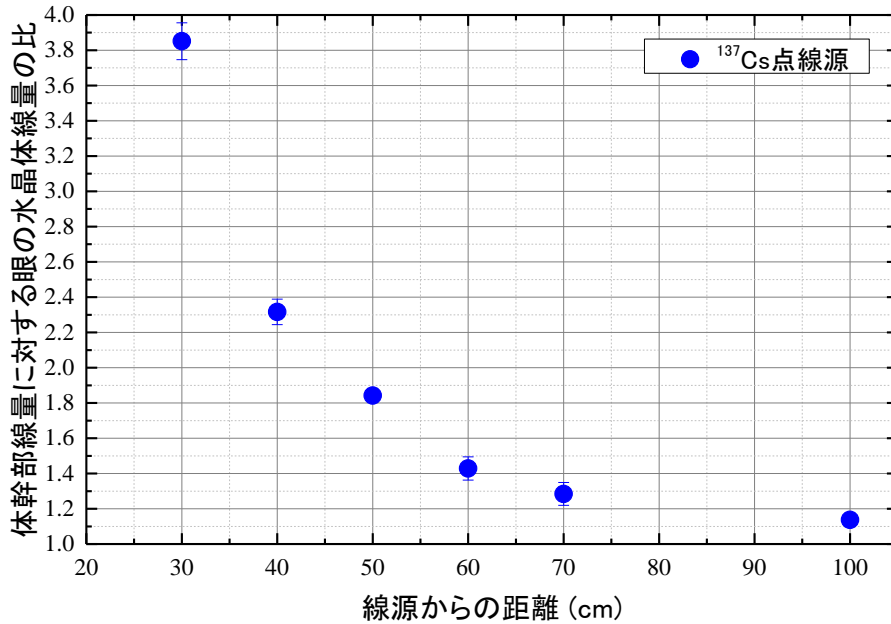


図5 体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の線源距離に対する変化 (^{137}Cs γ 線源)

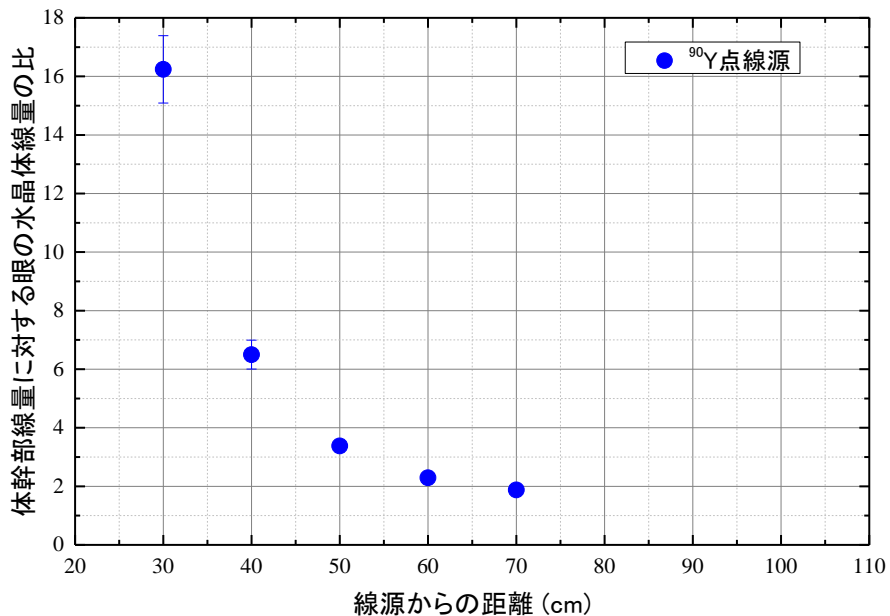


図6 体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の線源距離に対する変化 (^{90}Y β 線源)

といえる。

図5及び図6では、点線源を取り扱う際の、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の線源距離に対する変化を示す。全て計算シミュレーションにより評価されたもので、体表面からの深さ10 mm（体幹部）及び3 mm（眉間）における吸収線量を求めている。線源の高さは、顔の中心に来るように合わせて評価を行った。

^{137}Cs 点線源の場合、線源距離が遠方になるに従って、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が1に近づく様子が明らかとなった。体幹部及び眼の水晶体における線量は、点等方線源の場合、距離の逆二乗則にしたがって変化すると考えられる。体幹部と眼の水晶体の線量をモニタする位置によるが、仮に体幹部と眼の水晶体モニタ位置間の距離を20 cm とすると、40 cm では、放射線の強度比は2.25、100 cm では1.44となる。線源からの距離が近い場合、大まかな推定でも、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を良く再現できている一方で、距離が遠ざかる場合、距離の逆二乗に従う推定では過大評価となる傾向がある。ただし、保守的な推定にはなるため、放射線作業が高エネルギー γ 線の点線源を取り扱うような場合、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を推定するのに有効といえる。

一方で、 ^{90}Y β 線源の場合、線源距離が遠方になるに従って、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が1に近づいていくが、線源距離が近い場合、 γ 線の場合と比較し

て、その比が γ 線の場合より4倍程度大きくなることが明らかとなった。 γ 線源の場合、距離の逆二乗則にしたがった推定は、良い近似を与えることが示されたが、 β 線源の場合、距離の逆二乗則による簡易推定では、近距離では体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を極端に過小評価しうることが示された。この点から、特に β 線源が被ばく源となり得る場合の体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の評価、及びその相関に係る検討は、さらに詳細に行う必要がある。

(d) 末端部被ばくについての評価

後述の(2)工業・原子力・学術分野における、放射線作業と放射線業務従事者の被ばく状況に関する調査において、手指の被ばく事例が12例報告されている。手指の末端部被ばくは、被ばく源に防護具越しではあるものの直接接触する機会が考慮され、その際の等価線量は体幹部での線量と比較し、大きく異なることが予想されるため、眼の水晶体被ばく同様に検討すべき課題である。眼の水晶体被ばく同様に、体幹部線量に対する手指の末端部等価線量の相関について予備評価のため、いくつかの計算及び実験を行った。

表9には、計算シミュレーションと実験による体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を示す。照射条件は、 ^{60}Co γ 線照射場において、①から④の条件は、前項に示した数学ファントム及び物理ファントムの条

表9 計算シミュレーションと実験による体幹部線量に対する手指の皮膚等価線量の比

線源及び照射条件		計算		実験	
		数学ファントム		物理ファントム	
		① Ideal	② OSL	③ OSL	④ OSL
^{60}Co	Parallel	1.02 ± 0.04	0.95 ± 0.05	0.97 ± 0.03	0.98 ± 0.03

件と同一である。計算シミュレーションから実験まで、①から④の全ての条件で良く一致しているといえる。今後、 ^{90}Sr - ^{90}Y β 線源等についても計算及び実験を行い、本手法が眼の水晶体のみならず手指の末端部線量に対しても妥当な評価を与えることを検証する必要がある。

また、点線源とみなせるような被ばく源の取扱いを模擬した予備計算も行っている。評価した源は、 ^{137}Cs γ 線源及び ^{90}Sr - ^{90}Y β 線源である。線源と体幹部表面との距離を20 cm、手指との距離を15 cmとして評価した。体幹部線量に対する手指の末端部線量の比は、それぞれ ^{137}Cs γ 線源で 2.41 ± 0.04 であり、 ^{90}Sr - ^{90}Y β 線源で 3.52 ± 0.07 となった。同様に距離の逆二乗則での推定ではいずれも1.78となるが、線種に関わらず大きくなっている。また、 β 線を用いた場合の手指の末端部線量の方が大きく、この点は前述(c)の結果から考慮しても妥当である。通常の放射線作業においても、放射線業務従事者の手指のみ被ばく源に近づく状況は生じている。今後も体幹部線量に対する手指の皮膚等価線量の相関について評価を継続する。

今後の課題として、上記の点についてそれぞれ評価・検討を継続することに加え、後述の文献調査でも明らかであるが、被ばく線量低減対策のために放射線作業時に装着する防護機材の効果を検討する必要がある。主に原子力分野では、内部被ばく防護のための全面マスク装着は、放射線作業時に不可欠であり、全面マスクを装着した場合についての眼の水晶体/体幹部線量の比については考慮すべきである。

(2) 工業・原子力・学術分野における、放射線作業と放射線業務従事者の被ばく状況に関する調査

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から、報告されている放射線作業の特徴及び被ばくを増加させる主要因に注目し、実際に行われた被ばく低減対策について調査した。眼の水晶体及び手指の末端部等価線量の測定が行われた事例について、特に詳細に評価を行った。

眼の水晶体被ばく等価線量の記録がある報告は、2例であり、いずれも原子力分野の原子力研究施設における報告であった。以下で、それぞれの被ばく事例で、放射線作業の特徴、被ばくを増加させる主要因と被ばく低減対策について考察する。

一方の事例は、分析セル撤去時の被ばく事例である。本事例は、内部被ばくを伴う放射線作業であり、グリーンハウス内に全面マスク、空気呼吸器等の防護資材を装着し、グリーンハウス内で作業する。文献中には、下記の記述があり、解体作業時の放射線場は、 β 線が優位な場であることが示唆される。この点から、被ばくを増加させる要因として、 β 線放出核種の残存が挙げられるが、核種の報告はない。「測定は、線量管理課の協力を得て、GBと電離箱式サーベイメータ(形式: ICS-311)を用い、 β 線及び γ 線の測定を行った。その結果、 β 線は最大37.5mSv/h、 γ 線は9.0mSv/hであった。」(JAERI-Review 2002-036, pp. 101)

被ばく低減対策として、次のように報告されている。これらから、被ばく源への追加遮へいによる作業環境での線量当量率低減、及び防護資材を装着して体幹部を遮へ

いする、という対策がわかる。「被ばく低減対策として、塩ビ板、鉛ガラス等によりコンベア開口部に遮へいを施し、体幹部を覆う塩ビエプロン（厚さ 3mm）、鉛エプロン（厚さ 0.25mm）を装着した。」（JAERI-Review 2002-036, pp. 101）

放射線作業の全行程で、体幹部線量が 0.6 mSv 眼の水晶体等価線量で 1.3 mSv 皮膚等価線量が 3.7 mSv（いずれも個人最大）と記録されている。体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の比を見積もると約 2.2 となる。さらに、放射線業務従事者の襟に装着された線量計からの測定値と体幹部線量の測定値（いずれも 70 μ m 線量当量）の比は、個人最大で、0.7 mSv / 0.4 mSv = 1.75 となった。本研究で行った計算シミュレーションでの電子線照射場（約 1.7）や実験で行った ^{90}Sr - ^{90}Y 点線源の β 線照射場に対する値（約 1.9）に極めて近い。本研究で評価した、体幹部に対する眼の水晶体線量比は、点等方線源からの被ばく状況とも前方—後方（AP）照射の均等被ばく状況とも近いいため、いずれの状況が近いか判断できない。また、この報告事例では上述のとおり、エプロンを装着した放射線業務従事者が作業しており、防護効果も本来は加味されるべきである。これらの点を考慮しても、本研究で提案中のツールにより、現時点で体幹部線量に対する眼の水晶体線量比を予測できていることにはならない。さらに、本研究では眼の水晶体線量は $H_p(3)$ で行っているのに対し、文献での報告は 70 μ m 線量当量の測定値である。この考察からは、 β 線による被ばくが優位な放射線作業の場合、現行の追加モニタリング対策を行った場合でも、ある程度正当な推定値が得られる可能性が示唆される。

もう一方の事例は、廃液貯留槽の撤去時の被ばく事例で、同様に β 線が優位な場であることが明記されている。本事例も一方の事例と同様、内部被ばくを伴う放射線作業であり、グリーンハウス内に全面マスク、空気呼吸器等の防護資材を装着し、グリーンハウス内で作業するものであった。文献中には、被ばくを増加させる要因として、 ^{90}Sr 及び ^{137}Cs の残存が確認されており、いずれも β 線放出核種である点に留意すべきである。以下に、該当部分を引用する。「2002 年度に実施された LV-2 内のスラッジの測定及び 2006 年度に実施した LV-2 解体作業時の測定から、主な核種は ^{90}Sr であり β 線の高線量率による被ばくが問題となることが予想された。」及び「LV-2 の表面線量当量率は底部が最も高く γ 線：150 μ Sv/h、 β 線：8mSv/h であった。」（いずれも、JAEA-Review 2010-074, pp. 62）

被ばく低減対策は、主に内部被ばく防護のための保護具に言及しており、エアラインマスク及びタイベックスーツを着用し、放射線業務従事者が作業した、とある。このことから、仮に、眼の水晶体等価線量を推定する場合、マスクによる β 線の遮へいは考慮されるべきである。

この事例では、体幹部の線量は 0.1 mSv 以下であり、眼の水晶体等価線量は最大 1.1 mSv と報告されている。測定時の線量当量の単位に係る記述はないが、体幹部線量を最大で 0.1 mSv と仮定すると、体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量比は 11 となる。この値は、本研究で行った計算シミュレーションでの電子線照射場における、1cm 線量当量に対する眼の水晶体線量の値を考慮すればあり得る推定値になる。しか

しながら、放射線業務従事者の被ばく状況、保護具を着用して体幹部線量を低減する被ばく線量低減対策、等を考慮せねばならず、妥当な推定と言えない。

この事例から考察されることとして、足元に線源がある、壁一面が被ばく源、等の複雑な線源ジオメトリ、 β 線・ γ 線混在場及び狭あい部での放射線作業については、本研究において計算シミュレーション及び実験で行っている体幹部線量に対する眼の水晶体線量の相関を検討するうえで、評価に加えるべき点として挙げられる。

また、手指の皮膚等価線量の被ばく報告が12例ある。全て原子力分野の原子力研究施設における報告であった。これらの報告における放射線作業の被ばく源は、U燃料が1例、Pu燃料が1例、Pu線源が1例、それ以外の9例は全て汚染した機器であった。いずれの作業も被ばく源に直接接触れる作業である、という点が、放射線作業として特徴的な点であり、かつ被ばくを増大させるものである。このため、作業では指にTLD線量計を装着して追加モニタリングが実施されている。いずれの放射線作業自体も被ばく線量低減対策が施されており、放射線業務従事者が鉛エプロンを装着するほか、鉛含有手袋の装着、さらには被ばく源を追加遮へいする、等の対策が取られていた。

これらの報告では、明確に手指が被ばくする、という前提でTLD指リング等を装着し追加モニタリングが施されていた。一方で、作業環境の線量当量率の測定が行われ

ていながら、放射線業務従事者がどの程度被ばくするのかについての事前の計画線量の推定、及び追加モニタリングを導入する意思決定に係る定量的な指標についての報告は、一例もない。

(3) 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。原稿使用されている、1cm線量当量及び70 μ 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7では、計算シミュレーションで求めた、 γ 線に対するOSL線量計応答特性の比較である。1cm線量当量及び70 μ m線量当量での応答特性と同様に、線量計応答特性は、100–1250 keVのエネルギー範囲に対し、2mm^tのアクリルフィルタを取り付けることで、応答特性を改善できた。

また、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線量計の応答も併せて評価した。しかしながら、H_p(0.07)での応答特性で、通常の場合がある状態及び追加で2mm厚のアクリル板をかぶせた状態での応答と比較して、大きな変化は見られなかった。今回行った評価では、ISO水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おり、ファントム表面からの散乱成分が応答に加味されている。これが結果に反映され、大きな差が出なかったと思われる。

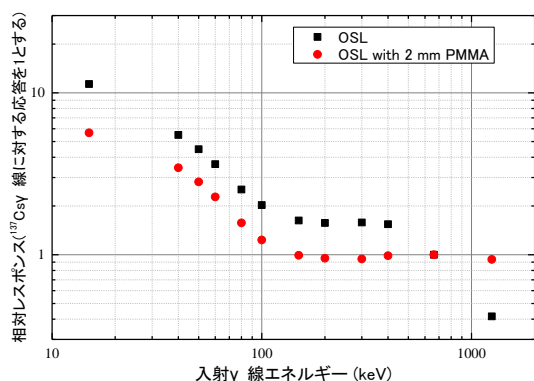


図7 計算シミュレーションによる OSL 線量計のエネルギー応答 ($H_p(3)$ での応答特性)

次年度の課題として、 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う。電子線及び連続分布を持つ β 線に対する線量計応答特性を評価し、線量計前面へ装着する材料を検討して、物理ファントムを用いる試験に供する。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 $70 \mu\text{m}$ 線量当量をそのまま β 線 3mm 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、 3mm 線量当量と $70 \mu\text{m}$ 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。」
[2]

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 3mm 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おくことは重要である。

E. 結論

本研究の目的は、放射線業務従事者の眼の水晶体及び手指等の末端部の被ばく線量評価が必須となる特殊な被ばく状況下において、眼の水晶体及び末端部の組織等価線量を適切に評価する手法を開発する。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実施されている個人モニタリングでは、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が、眼の水晶体、末端部等の等価線量を適切に評価する手法は現在も検討が進められている。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、 $70 \mu\text{m}$ 線量当量等の体幹部被ばく線量と、放射線業務従事者の被ばく状況（線源の位置、線種、体勢、作業時間等）を考慮した、眼の水晶体及び末端部被ばく線量の相関を詳細に検討することを通じ、眼の水晶体及び末端部組織等価線量の予測モデルを提案する。

本研究における1年目にあたる平成27年度では、以下に示す通り研究を進めた。本年度までの結論を次の(1)～(3)項ごとに示す。

(1) 体幹部線量に対する、眼の水晶体及び末端部等価線量との相関に関する検討

モンテカルロ計算コード PHITS で人体模擬数学ファントムを用いて放射線業務従事者を模擬し、体幹部、眼の水晶体及び末端部等価線量の関係について評価した。同時に、線量計校正に使用されるアクリル製水槽ファントムを組み合わせ、人体模擬物理ファントムを製作し、OSL 線量計を取り付けて ^{137}Cs 及び ^{60}Co γ 線照射場、並びに

^{90}Sr - ^{90}Y β 線照射場で照射し、計算シミュレーションで行った体幹部・水晶体線量比を導出する手法が妥当であるか、実験的に検証した。均等被ばくを模擬した照射では、シミュレーション結果と非常に良く一致した。この結果を受け、①線種、②作業者の体勢及び③線源－作業者の位置関係に着目した水晶体/体幹部線量比評価を、計算シミュレーションを用い、系統立てて実施可能となった。また、不均等被ばく状況の模擬に先んじ、均等被ばく状況を模擬したシミュレーションを行った。その結果、 ^{60}Co γ 線及び ^{90}Sr - ^{90}Y β 線源に対し、「全身に均等被ばくした場合には、体勢によらず体幹部線量が末端部線量を 10%以内で代表すること」を明らかとし、「点線源で顔面近傍に不均等被ばくする場合、水晶体線量が体幹部の 10 倍を超え、体幹部線量は 1/10 も過小評価となること」が示された。

併せて、手指の末端部線量についての予備試験も開始した。

(2) 工業・原子力・学術分野における、放射線作業と放射線業務従事者の被ばく状況に関する調査

工業・原子力・学術分野における、放射線作業と放射線業務従事者の被ばく状況に関する調査として、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比較した。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る。報告のうち、86% が原子力関連となっており、原子力研究施設での被ばく事例の報告は、44 例と突出している。これらの放射線作業は、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・取扱い過程がほぼ均等に報告されている。

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 例であった。いずれも β 線による被ばくが優位な放射線作業であり、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った、と結論付けられている。一方、手指の末端部皮膚等価線量の被ばく報告事例は 12 例で、眼の水晶体に係る被ばく線量評価事例と同様の被ばく低減対策が取られていた。

調査した放射線業務従事者の被ばく事例報告のうち、放射線業務従事者がどの程度被ばくするのかについての事前の計画線量の推定、及び追加モニタリングを導入する意思決定に係る定量的な指標についての報告は皆無であった。

(3) 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

既存の OSL 線量計の γ 線及び β 線エネルギー応答特性向上を目指して、2 mm 厚の亚克力板を装着し、不均等被ばく状況下での水晶体等価線量モニタリングに適した線量計を開発・試験した。その結果、眼の水晶体等価線量評価において推奨される $\text{Hp}(3)$ で校正定数を求めた場合、 γ 線エネルギー 100-1250 keV の範囲内で、 ^{137}Cs γ 線を基準に $\pm 20\%$ という良好な応答比が得られた。亚克力板がない状態では、同じエネルギー範囲で、 ^{137}Cs γ 線を基準に $\pm 200\%$ となるため、エネルギー応答特性が大きく改善されたといえる。今後は、特に低エネルギー γ 線に対して応答特性が改善

するようなフィルターを検討し、線量計開発を継続する。さらにβ線への応答特性を向上させることに注目して、線量計開発を継続する。

また、今後の課題について以下に簡潔に述べる。

本研究で開発した計算シミュレーション手法を追加モニタリング可否の意思決定の枠組みへ取り込み、合理的な放射線防護対策に資するためには、実際の放射線作業に対し、本手法が適用可能かどうか確認する必要がある。そのため、本研究で作成した簡易物理ファントムを用い、フィールド試験として実際に放射線作業が行われる放射線場に設置して暴露し、場の放射線情報、物理ファントムに取り付けた線量計からの線量情報、及び計算シミュレーションの結果について検証を行う。

計算シミュレーションを用い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相関に関する検討では、今年度より複雑な線源位置、作業者の姿勢、周囲の環境を導入し、①体幹部の線量に対して眼の水晶体線量及び手指の末端部線量の比がどのように変化し、どのパラメータが大きな影響を与えうるか、及び②過去の放射線作業の事例を計算シミュレーションで模擬可能か、について詳細な検討を加える。さらに、工業・学術分野のみならず医療分野で広く使用されているX線を用いた場合の不均衡被ばく状況下において、体幹部線量に対する、眼の水晶体及び末端部等価線量がどのような相関となるのか、計算シミュレーションを中心に行う。

過去の放射線作業時の被ばく状況に関する調査から、特にβ線による被ばくが優位

な場では、線量低減対策が効果を奏したことが述べられているが、比較試験がされていないために、定量的な防護効果は今なお明らかでない。事前の計画線量推定、効果的な防護対策のためには、照射実験と計算を組み合わせ、これらの効果を定量的に明らかにする。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はβ線への応答に注力しエネルギー応答特性の改善を目指して開発を継続する。同様に、放射線業務従事者の放射線作業時の線量計装着方法には改善の余地が残る。原子力分野の場合、全面マスクのどの位置に装着するかで線量計からの読み値も変わり得るため、検討が必要である。

F. 健康危機情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

Hiroshi Yoshitomi et al. "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", the 14th international congress of the International Radiation Protection Association (May 2016, Cape Town, South Africa)

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] 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) - いつどのように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)

II. 分担研究報告

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

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

放射線作業前の適切な等価線量アセスメントは、被ばく低減対策を含めた放射線作業計画の立案に必要である。アセスメントに際し、等価線量の評価部位は体幹部から離れているために、被ばく状況の”不均等性”は重要な因子となる。しかしながら、従来は不均等性を評価する場合、恣意的で経験に基づく判断が行われてきており、系統的かつ一義的に判断できる仕組みがなかった。本研究では、体幹部モニタリングで測定された線量に対する眼の水晶体線量、または末端部線量の比を指標にして、これを基に不均等性を判断する手法を開発した。この手法を用いて、工業・原子力・学術分野で想定される被ばく状況を単純モデル化して指標を計算した。また、不均等性を定量化したことにより、水晶体に関する不均等性に影響を及ぼす因子を明らかにすることができた。今後、本手法の検証のために、ベンチマークとしていくつかの実際の作業場に対して本手法を適用し、フィールド試験の結果と比較することが必要であるが、ここで得られた成果は、これらフィールド試験における基礎データを与えるものである。

A. 研究目的

本研究の目的は、放射線業務従事者の眼の水晶体及び手指等の末端部の被ばく線量の適切な評価に資するため、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実施されている個人モニタリングに関し、放射線作業前の適切な等価線量アセスメント手法の確立を目指すものである。放射線作業前の適切な等価線量アセスメントは、被ばく低減対策を含めた放射線作業計画の立案に必要である。特に、等価線量の評価部位は体幹部から離れているため、被ばく状況の”不均等性”は重要な因子となる。

しかしながら、従来は不均等性の判断は経験に基づいており、系統的かつ簡単に判断できる仕組みがなかった。不均等被ばくのおそれがあるにも関わらず、体幹部モニタリングから補正なしに末端部等の等価線量の評価がなされた場合、著しく過小評価する可能性がある。

本研究では、体幹部モニタリングに対する眼の水晶体線量、または末端部線量の比を指標にして、これを基に不均等性の判断をすることを考慮している。眼の水晶体被ばく線量評価に関して、現状では、工業・原子力・学術分野において、どのような被ばく状況に体幹部モニタリングが適切な水

晶体線量を与えず、かつ放射線業務従事者の追加モニタリングが必要となるかについて、散発的な報告がなされてきただけであり、体系的には明らかとなっていない。現状では、体幹部モニタリングから水晶体線量を推定しているが、新たな線量限度が導入された場合に既存の評価方法で十分かどうか検証しておく必要がある。

そこで、体幹部モニタリングと眼の水晶体モニタリングの相関に着目し、系統的に眼の水晶体被ばくに関する不均等性を分類する方法を構築することを目的とした。

B. 研究方法

工業・原子力・学術分野において、眼の水晶体被ばくに関して不均等被ばくと判断される状況を漏れなく十分に抽出することが必要である。そこで、まず過去の文献から原子力施設における作業で不均等被ばくが危惧される 63 件の事例を調査してその被ばく状況を単純モデル化した。次に、不均等性を表す指標(Homogeneity Index = HI)を、体幹部モニタリングと水晶体または末端部モニタリングで得られる量の比として以下に示す式で定義した。

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

$$\text{(電子)} \quad \text{HI}_{\text{electron}}^{\text{eye}} = \frac{H_p(3)_{\text{head}}}{H_p(3)_{\text{trunk}}} \dots (2)$$

ここで、 $H_p(3)_{\text{head}}$ は人体頭部における深さ 3 mm での個人線量当量を表し、水晶体モニタリングで推奨されている量である。一方、 $H_p(10)_{\text{trunk}}$ は人体胸部における深さ 10 mm での個人線量当量で、実効線量算定

のために行われる体幹部モニタリングで使用されている量である。電子については、通常原子力施設で扱われる程度のエネルギーでは深さ 10 mm には到達できず、 $H_p(10)$ は明らかにより評価を与えない。そこで、評価量を同じにしたとしても不均等となる状況を抽出するために、現在通常は評価されていない人体胸部における深さ 3mm での個人線量当量 $H_p(3)_{\text{trunk}}$ を用いることとした。個人線量当量の評価するためには、人体を模擬するファントムが必要である。そこで、眼の水晶体の被ばく線量換算係数を計算するのに用いられたファントムを手部及び頭部が可動できるよう改良し、個人線量当量の定義に沿うよう人体軟組織で構成される人体模擬数学ファントム（以下、「数学ファントム」という。）を開発した。この数学ファントムを用いて、頭部及び胸部における個人線量当量をモンテカルロ計算コード PHITS 2.7.6 で計算し、HI を評価した。HI の計算の妥当性は総括研究報告で示したとおり、均等・不均等被ばくを模擬した場における照射実験により確認した。

この定義から明らかのように、HI はその値が大きければ、被ばくの不均等性が高いと判断され、体幹部からの推定が妥当でなくなることを示唆する量である。本研究は、HI を用いて不均等性の判断ができる可能性を示すことにあるので、その判断基準として、1.5 と設定し本手法の検証をした。1.5 と設定した理由は、HI=1.5 であった場合、均等被ばくとみなして体幹部モニタリングで得られた量から補正なしでそのまま等価線量を推定したとしても、0.67(=1/1.5)の過小評価となり、被ばくレベルがたとえ線量限度付近であったとしても許容できるためである。

C. 研究結果

末端部被ばくに関しては、線源をピンセット等で取り扱うケースなど、これまで経験に基づいて不均等被ばくと判断し、末端部モニタリングを実施してきた。そこで、まずこのケースを例にとり、今回導入したHIを用いて不均等性の判断を行った。図1に示すような体系で典型的な光子及びβ線源である¹³⁷Cs及び⁹⁰Sr/⁹⁰Y点線源を取り扱うときのHIを試算した。その結果、¹³⁷Csに対しては、 $HI=2.41 \pm 0.04$ 、⁹⁰Sr/⁹⁰Yに対しては $HI=3.52 \pm 0.07$ となった。判断基準を1.5とすると、共に不均等被ばくのおそれがあると判断され、これまで経験に基づいて行っていた判断を、本指標を用いることで定量的かつ簡便に再現することができた。

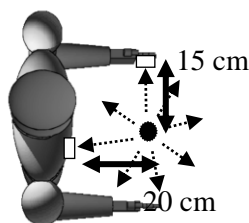


図1 末端部被ばく計算に用いるジオメトリ（上部から見た様子）

D. 考察

眼の水晶体に関しては、原子力・学術分野でのこれまでの測定例がほとんどないために、経験に基づいた判断は困難である。そこで、表1で示したパラメータを基にした被ばく条件での計算を系統的に行った。その一例を図2(a)及び図2(b)に示す。双方とも頭上にある線源を取り扱う作業を模擬するもので、判断基準として1.5を考えると、不均等被ばく状況のおそれがあるとして分類される。図2(c)には、¹³⁷Cs及び⁹⁰Sr/⁹⁰Y点線源について $HI=1.5$ となるような線源位置を示したものである。すなわち、この曲線より体軸に近いもしくは高い位置に線源がある場合は、不均等被ばくのおそれがあると判断される。これらは、具体的には頭上の汚染配管や放射化された加速器構成機器などの状況が該当する可能性があると考えられる。

表1で示したパラメータはその全てが重要であるとは限らない。表2に¹³⁷Cs及び⁹⁰Sr/⁹⁰Y点線源について、各パラメータを変化させたときのHIを示した。光子の場合は、線源の広がりそれほど重要なファ

表1 評価に用いたパラメータの一覧

パラメータ		範囲	
	放射線の種類	光子	β線
(a) 線源関連因子	エネルギー (核種)	²⁴¹ Am, ¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co	⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y, ¹⁰⁶ Rh
	線源分布	一様平行線束, 点線源, 一様面線源(40 cmΦ)	
(b) 作業員関連因子	顔の向き	下向き, 上向き	
(c) 線源-作業員間のジオメトリ関連の因子	線源位置	水平距離: 体軸から前方に 40 ~ 110 cm 線源高さ: 眼の位置から -20 cm ~ 60 cm	

クターではなく、点線源で求められた HI 過敏であるので、それぞれについて計算しを用いて不均等性の判断は妥当である。一 ておく必要がある。
方、β線の場合は、これらのパラメータに

表 2 各パラメータを変化させた時の HI の変化

	線源形状	エネルギー	顔の向き	線源位置
光子 HI^{eye_photon}	一様面線源 (40 cmΦ) 60 cm ^{137}Cs	点線源 60 cm ^{241}Am	点線源, 下向き 60 cm ^{137}Cs	点線源 100 cm ^{137}Cs
	1.44 ± 0.04	1.33 ± 0.01	1.78 ± 0.02	1.15 ± 0.02
β線 $HI^{eye_electron}$	一様面線源 (40 cmΦ) 60 cm $^{90}Sr/^{90}Y$	点線源 60 cm ^{106}Rh	点線源, 下向き 60 cm $^{90}Sr/^{90}Y$	点線源 100 cm $^{90}Sr/^{90}Y$
	1.22 ± 0.03	1.91 ± 0.02	2.84 ± 0.10	1.43 ± 0.03

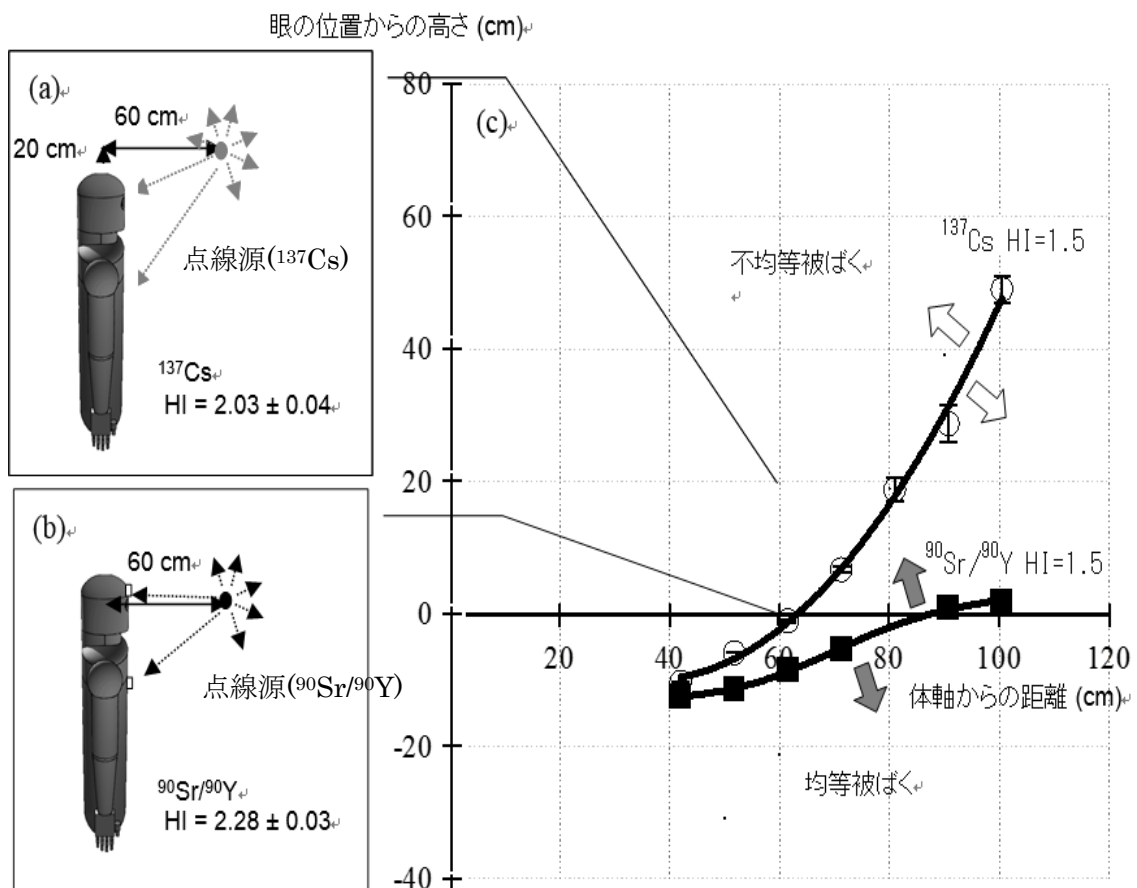


図 2 不均等被ばく状況に対するジオメトリ (a) ^{137}Cs γ線及び (b) ^{90}Sr - ^{90}Y β線、並びに (c) 各線源での HI の距離に対する変化

E. 結論

不均等被ばくのスクリーニング目的に不均等性指標(HI)を導入し、人体数学ファントムを使ったモンテカルロ計算により評価する方法を開発した。計算により得られたHIは被ばくの不均等性の観点からは実験値をよく再現した。また、本手法を用いてこれまで経験から末端部不均等被ばくと考えられてきた事例に適用し、量的にかつ簡便に不均等性を判断できることを示した。さらに一連の単純モデル化した被ばく条件において水晶体に対するHIを試算し、頭上の線源を取り扱うケースなどでは眼の水晶体被ばくに関して不均等被ばく状況となるおそれがあることを示唆し、HIの計算にとって重要な被ばくパラメータを明らかにした。今後、本手法の検証のために、ベンチマークとしていくつかの実際の作業場に対して本手法を適用し、フィールド試験の結果と比較することが必要である。本研究結果は、これらフィールド試験における基礎データを与えるものである。本研究で提案した手法は、眼の水晶体のみならず末端部被ばくに関しても不均等性を判断するための簡便で系統的なアプローチを提供することができるであろう。

F. 健康危機情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

Hiroshi Yoshitomi et al. "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", the 14th international congress of the International Radiation Protection Association (May 2016, Cape Town, South Africa)

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

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

Hiroshi Yoshitomi^{a*}, Masayuki Hagiwara^b, Munehiko Kowatari^a, Sho Nishino^a, Toshiya Sanami^b, Hiroshi Iwase^b

^aDepartment of Radiation Protection, Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirakata, Tokai, Naka, Ibaraki 311-1195 Japan.

^bRadiation Science Center, High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 Japan.

Abstract. Proper assessment of the equivalent doses to the lens of the eye and extremities for radiation workers is important to ensure that the dose limits are not exceeded. Homogeneity of the radiation field greatly impacts on the assessment of eye lens and extremity doses. However, there has been no systematic approach to estimate (non-) homogeneity in nuclear sector. The general aim of our project is to provide a comprehensive methodology to identify nonhomogeneous exposure situations. To fulfil this purpose, an index that represents the correlation between whole-body monitoring and eye lens or extremity monitoring was introduced for the screening of nonhomogeneous conditions. In this study, the followings which are essential for the next investigations to apply this method to the workplace field were carried out: (1) to establish the method to calculate the indices, (2) to verify the calculated indices by the measurements using phantom. The geometrical factors that should be taken into account for homogeneity in eye lens monitoring such as a distance and direction of face are also obtained in the calculations of (1).

KEYWORDS: *nonhomogeneous exposure, equivalent dose, eye lens dose, extremity dose, dose assessment*

1 INTRODUCTION

The equivalent doses to the lens of the eye and extremities for radiation workers should be assessed properly to ensure that the dose limits are not exceeded. Additionally, the emerging two issues has been demanding more appropriate evaluation of the equivalent doses of the lens of the eye and hands. One is the new occupational dose limit for the lens of the eye from the recent ICRP statement [1]: *i.e.* the dose limit for the lens of the eye for occupational exposure in planned situations was reduced from 150 mSv per annum to 20 mSv per annum averaged over 5 consecutive years and 50 mSv in any single year. The other is growing demand on the manipulation of highly activated materials in the maintenance works of an accelerator [2] and contaminated materials during the decommissioning works of nuclear facility, which increases the potential exposure risk to the extremities to a wider variety of radio-nuclides.

The equivalent doses to the lens of the eye and extremities from the whole-body monitoring can be commonly assessed from the view point of the cost and workload, if appropriate. On the other hand, this estimation might significantly underestimate the equivalent doses to the lens of the eye and extremities in nonhomogeneous exposure situations in some exposure cases [3]. An additional monitoring near the eye or extremities should be needed for the proper assessment. Therefore, homogeneity of exposure is one of key factors for adequate estimate of the equivalent doses to the lens of the eye and extremities [4, 5]. However, there has been no quantitative scheme to systematically estimate (non-) homogeneity of exposure.

Our project aims to provide a comprehensive and quantitative scheme to identify the nonhomogeneous exposure situations. This will help with proper implications of radiation protection measures even under nonhomogeneous exposure situation. Before starting radiation works, monitoring for radiation workers could be easily but reasonably planned, including whether or not an additional monitoring of the eye or extremities is required. For designing the scheme, the following issues have been investigated. (1)

* Presenting author, e-mail: yoshitomi.hiroshi@jaea.go.jp

Calculation platform for estimating the relationship between dose equivalent measured on the trunk and the lens of the eye and the extremity is being prepared. (2) Classification of nonhomogeneous exposure situation under typical radiation works at nuclear and accelerator facilities is being processed. (3) From reported radiation works, factors leading nonhomogeneous exposure are being drawn.

This work describes a proposal of introduction of quantitative index for nonhomogeneous exposure situation and an attempt of the screening of nonhomogeneous exposure situation based on a proposed “homogeneity index (HI)”. The proposed HI is defined by the ratio of eye lens or extremity dose to the dose measured on the trunk. This also represents the correlation between whole-body monitoring and lens of the eye or extremity monitoring. A set of the HIs obtained by Monte Carlo simulation incorporated with a mathematical phantom for some simplified exposure conditions is calculated. Verification of the HIs under both homogeneous and nonhomogeneous exposure situations is carried out by the benchmark measurements using a physical phantom. Calculations changing exposure conditions were also demonstrated, in order to identify the parameters that significantly impact on the HIs.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Homogeneity index (HI)

To identify the nonhomogeneous exposure conditions quantitatively, the HIs defined as the ratio of the personal dose equivalent for the eye lens monitoring or the extremity monitoring to that for the whole-body monitoring are used:

$$HI_{\text{photon}}^{\text{eye}} = \frac{H_p(3)_{\text{head}}}{H_p(10)_{\text{trunk}}} \quad (1) \quad \text{for photon exposure to the eye lens,}$$

$$HI_{\text{electron}}^{\text{eye}} = \frac{H_p(3)_{\text{head}}}{H_p(3)_{\text{trunk}}} \quad (2) \quad \text{for electron exposure to the eye lens,}$$

$$HI^{\text{extremity}} = \frac{H_p(0.07)_{\text{extremity}}}{H_p(0.07)_{\text{trunk}}} \quad (3) \quad \text{for photon and electron exposure to the extremity}$$

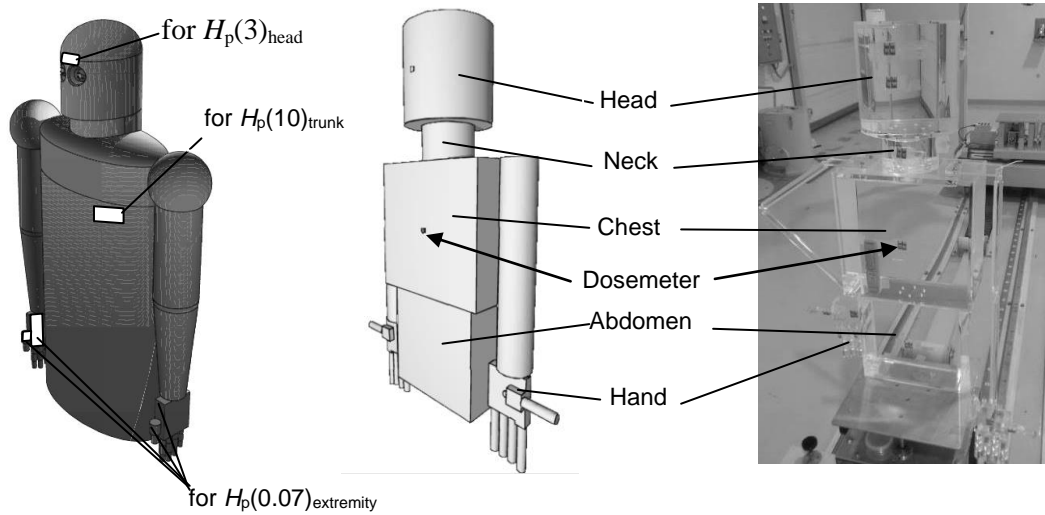
where, $H_p(d)$ is personal dose equivalent at a depth of d mm ($d = 0.07$ mm, 3 mm, or 10 mm) below a specified point indicated by a subscript on a mathematical phantom. The recommended depths d for the respective points in monitoring were chosen [6, 7]. $H_p(3)_{\text{trunk}}$ was used for electron exposure to the eye lens to identify the nonhomogeneous conditions regardless of the evaluation depth although it is not commonly evaluated using whole-body dosimeter. The required characteristics of the mathematical phantom for the purpose is to simulate absorption and scattered radiation by the human body and to change the posture easily. Hence, the geometry of the phantom was taken from the reference [8, 9] with some modification as follows: (1) Shoulder, upper arms, elbows, lower arms and hands were added to the phantom but legs were omitted. (2) Facial skeleton and ribs were only considered as bone ($\rho = 1.4$ g/cm³). (3) The medium of the phantom except for bones and eyes was chosen to be ICRU 4-element tissue ($\rho = 1.0$ g/cm³). Fig.1 shows the geometry of the phantom.

2.2 MC Simulations

Personal dose equivalents, $H_p(d)$, are directly calculated according to the definition [6] using Monte Carlo code PHITS 2.7.6 [10] with standard atomic data libraries to obtain the HIs. The mathematical phantom described in the previous section was set in a vacuum for parallel exposure or in a dry air for other exposure conditions. As illustrated in the Fig.1, the scoring volumes for the evaluation of $H_p(3)_{\text{head}}$ and $H_p(d)_{\text{trunk}}$ were located at 3 mm depth below the surface at the forehead (1.0 cm(L)×3.69 cm(W)×0.01 cm(D)) close to the eyes and at d mm depth below the left side of the chest (1.0 cm(L)×6.18 cm(W)×0.01 cm(D) for $d = 3$ and 10 mm, 1.0 cm(L)×6.18 cm(W)×5 μm(D) for $d = 0.07$ mm), respectively. The $H_p(0.07)_{\text{extremity}}$ was evaluated from the maximum values among the absorbed doses in four scoring volumes at 0.07 mm depth below the both palms (7.98 cm(L)×9.59 cm(W)×5 μm(D)) and both thumbs (1.0 cm(L)×1.0 cm(W)×5 μm(D)). These positions were corresponding to the

common monitoring positions with personal dosimeters. The obtained absorbed dose gives $H_p(d)$ as quality factor is recommended to be equal to 1 for both photons and electrons considered in this study.

Figure 1: Three dimensional view of the mathematical phantom (right) employed in this work for the calculations of the HIs and the physical phantom (centre: the modelling for calculations, left: the picture of the phantom) for the benchmark. The scoring regions to evaluate the $H_p(d)$ are also indicated.



The HI is used for the screening purpose to find the nonhomogeneous exposure conditions at the first step. Therefore, the exposure conditions to calculate HIs should be simplified as much as possible rather than simulate a specific radiation work. Some parameters that would characterise radiation works in the nuclear sector were categorised into three types: *i.e.* source-related, worker-related and source-to-worker-geometry-related parameters. The simplified exposure conditions are then constituted by the combination of these parameters. Some of the parameters used in this work are listed in Table 1.

Table 1: Some parameters considered for the calculation of the HI^{eye} in this work

Category of parameters		Range of the parameter	
Source-related	Type of radiation	Photon	Beta
	Energy (Nuclides)	^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{106}Rh
	Source distribution	Parallel, Point, Planar(40 cm Φ)	
Worker-related	Direction of face	Down, Up	
Source-to-worker-geometry	Source position	Horizontal position: 40 ~ 110 cm in front of the body axis Height of the source: -20 cm ~ 60 cm above the eye level	

2.3 Benchmark

For the benchmark of the simulation results, the irradiations were performed using a simple water-filled physical phantom equipped with several dosimeters at the Facility of Radiation Standards (FRS) of Japan Atomic Energy Agency (JAEA). The physical phantom consists of 6 parts: *i.e.* head, neck, chest, abdomen and both hands. The position of the hands is able to change freely and the angle of the head is adjustable. Fig.1 also shows the geometry of the physical phantom and Table 2 summarises the specification of the phantom in detail. Small optically-stimulated luminescence dosimeters (OSLD) with $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ as a sensitive material (nanoDotTM manufactured by Landauer. Inc.) were used to measure the dose at specified positions on the phantom. Except for the extremity measurements for beta-rays, the OSLDs were covered with PMMA slab filter with 2 mm thickness so that the total mass-

thickness over the sensitive region was around 300 mg/cm^2 [13]. OSL signals from the nanoDots™ were read using a microStar OSL reader (Landauer, Inc). Net OSL signals corrected for sensitivity were then directly used for comparison in this study.

As described in 2.2, the HIs were calculated from the absorbed dose on the ideal receptors made of soft tissue according to the definition of $H_p(d)$, which is different from the OSLD for the benchmark experiments. Therefore, four exposure conditions were chosen for the benchmark experiment so that they include both homogenous and nonhomogeneous exposure conditions and the responses of the OSLDs are identical to those of the ideal receptors from the view of the HI. To confirm this, another set of calculations using the mathematical phantom with the OSLDs was made. The OSLDs were precisely modelled according to the manufacturer data and placed on the surface of the mathematical phantom at the same positions as scoring regions for the simulations of the HI. Furthermore, the other set of calculations that fully simulates the experimental setup (see Fig.1) was made to ensure that response of the OSLD was calculated properly.

Table 2: The specification of the physical phantom used for benchmark

Materials and shape		Dimension
Head	Water-filled cylinder with PMMA* walls	20 cmΦ×20 cm(H) [11]
Neck	Water-filled cylinder with PMMA walls	12 cmΦ×8 cm(H)
Chest	Water-filled slab with PMMA walls	30 cm(H)×30 cm(W)×15 cm(D) [12]
Abdomen	Water-filled slab with PMMA walls	25 cm(H)×25 cm(W)×12 cm(D)
Hand	Palm: PMMA cylinder Fingers: PMMA rod	Palm: 9 cm(H)×9.7 cm(W)×1.5 cm(D) Thumb: 1.9 cmΦ×7 cm(L) Other fingers: 1.9 cmΦ×10 cm(L)

* Polymethyl metaacrylate

3 RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Framework of the method to identify nonhomogeneous exposure situations

The framework of the proposing methodology to identify nonhomogeneous exposure situations is described in the Fig.3. At the initial step, the HIs to quantify the (non-) homogeneity were calculated for simplified reference exposure conditions and then compared to the criteria level. Namely, an exposure condition for which the HI is greater than the criteria level could be nonhomogeneous and further investigation should be made in detail at the next step taking more specific information of the radiation work into account.

The criteria level was tentatively set to 1.5 in this paper. This value corresponds to the expanded uncertainty for assessed annual equivalent dose at or near the dose limit, 0.67 to 1.5 (factor 1.5), specified in the ISO 15382. From a view of the conservative estimation, lower criteria level was not considered. If the HI for a certain exposure situation is less than 1.5, the direct assessment from the whole-body monitoring with ideal dosimeter for that exposure situation will not underestimate the equivalent dose less than 0.67. It will be acceptable even though the dose level is near the dose limit and no correction have been made.

3.2 Benchmark

The results of the benchmark calculations and measurements for the HIs under four exposure conditions are summarised in Table 3. Good agreements within uncertainty between (a) and (b) shows that the OSLD can be used to measure the HI under these conditions. Good agreement within uncertainty between (c) and (d) indicates the successful modelling. Hence, the consistent values between (b) and (c) indicate the calculated HIs (shown as (a) in the Table 3) were verified by the experiments (shown as (d)). For the exposure conditions (1) to (3) and (5), these values were the same within uncertainties, but there found to be a gap for the exposure condition (4). This is because the

monitoring positions for head relative to those for the trunk were different between the mathematical phantom and the physical phantom. This effect is considered to be remarkable for the exposure of beta-rays with a short distance between the source and the phantom, which will increase the uncertainty of the HI.

Figure 2: The framework of the proposed method to identify nonhomogeneous exposure situations

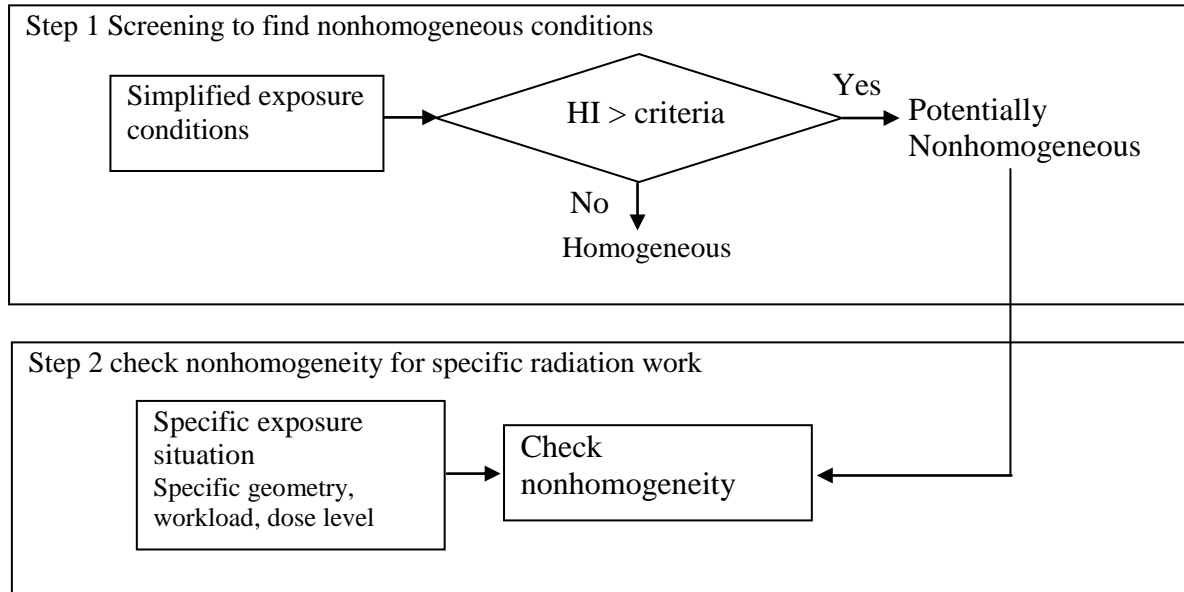


Table 3: Comparisons of the HIs obtained by simulation using (a) the mathematical phantom with ideal receptors, (b) the mathematical phantom with OSLD, (c) the physical phantom with OSLD and experiment using (d) the physical phantom with OSLD. (1), (2) and (5) belong to the homogeneous exposure condition while (3) and (4) belong to the nonhomogeneous exposure condition. Exposure conditions of (1) and (5) are the same but (5) is related to the extremity. The associated uncertainties are given for $k = 1$.

Exposure condition (source shape, nuclide and position [*])	HI	Simulation		Experiment	
		Mathematical phantom		Physical phantom	
		(a) Ideal	(b) OSLD	(c) OSLD	(d) OSLD
(1) Parallel ⁶⁰ Co	HI ^{eye} _{photon}	1.02 ± 0.01	0.97 ± 0.01	0.97 ± 0.03	0.98 ± 0.01
(2) Point ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y, 110 cm	HI ^{eye} _{electron}	1.25 ± 0.04	1.28 ± 0.09	1.29 ± 0.04	1.29 ± 0.05
(3) Point ¹³⁷ Cs, 40 cm	HI ^{eye} _{photon}	2.37 ± 0.04	2.25 ± 0.07	2.20 ± 0.05	2.17 ± 0.16
(4) Point ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y, 80 cm	HI ^{eye} _{electron}	1.57 ± 0.02	1.54 ± 0.09	1.92 ± 0.02	1.89 ± 0.17
(5) Parallel ⁶⁰ Co	HI ^{extremity} _{photon}	1.02 ± 0.01	0.95 ± 0.05	0.97 ± 0.03	0.98 ± 0.03

^{*} Values indicate the distances between the source and the longitudinal body axis of the phantom. The sources were placed at the same level of the eye.

3.3 Examples of the HIs

As for the equivalent dose to the extremities, the finger or palm dose monitoring has often been conducted in nuclear-related works in which hand is empirically considered to be highly exposed than trunk. Therefore, an attempt to calculate the HI for an obvious nonhomogeneous exposure situation for the hands in nuclear sector was firstly carried out. Manipulation of the point source as illustrated in Fig.3 has been considered to be the typical nonhomogeneous exposure situation for hands. The HI^{extremity} for this exposure situation was calculated. The HIs for ¹³⁷Cs photons and ⁹⁰Sr/⁹⁰Y beta were

determined to be 2.41 ± 0.04 and 3.52 ± 0.07 , respectively. If the criteria level is set to 1.5, it will be determined that both exposure situations are nonhomogeneous as expected.

Little study to investigate the nonhomogeneity exposure situations for the dose to the lens of the eye has been found. Hence, the HI^{eye} for ^{137}Cs point source above eye level and $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ point source at eye level were calculated as examples. The results are shown in Fig.4 (a) and (b), respectively, which implies that these exposure conditions were considered to be nonhomogeneous based on the criteria level of 1.5. Thirdly, the source positions where HIs are equal to 1.5 were determined both for ^{137}Cs and $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ point source from the various calculations (Fig.4 (c)). If a point source is closer to the body than it is on the boundary or above the boundary, the exposure is determined to be nonhomogeneous. These results demonstrate that handling point-like source within arm's reach above the eye level is considered to be the nonhomogeneous exposure situations in terms of eye lens.

Figure 3: The assuming typical geometry for handling the point source

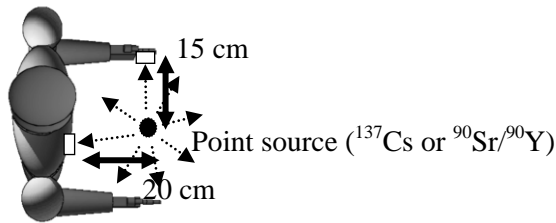
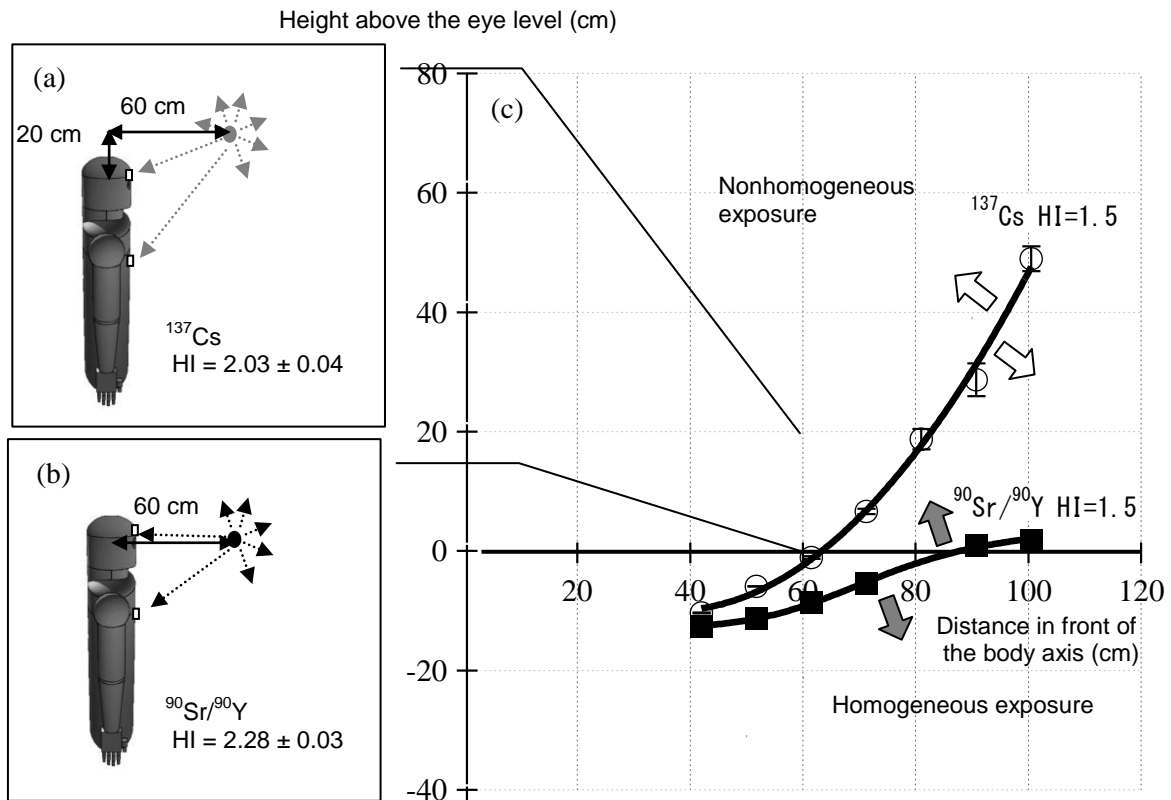


Figure 4: The HIs from (a) ^{137}Cs point source 20 cm above the eye level and (b) $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ point source at the eye level. The horizontal distance from the body axis is 60 cm for both case. (c) Boundary between nonhomogeneous exposure and homogeneous exposure conditions in the case that the criteria of 1.5 was selected. The longitudinal body axis of the phantom is aligned to the y-axis (the positive y-direction indicates the height above the eye level). The front face of the phantom looks into the positive x-direction.



3.4 Important parameters for the HIs

In the previous section, the HIs for the point source are demonstrated. The HIs should be calculated for the other simplified exposure conditions which is given by a combination of some parameters listed in Table 1. However, not all of the parameters significantly impact on the HI (Table 4). Source position is clearly impact parameters for the HI but some parameters such as wideness of the source and energy are less important for photons. For beta-rays the HI are found to be sensitive to most of the parameters.

Table 4: Influence of the parameters on the HI^{eye} . The reference condition for comparison is ^{137}Cs point source 60 cm away from the body axis at eye level for photon ($HI^{eye}_{photon} = 1.55 \pm 0.03$) and $^{90}Sr/^{90}Y$ point source 60 cm away from the body axis at eye level for beta ($HI^{eye}_{electron} = 2.28 \pm 0.03$).

	Source distribution	Energy	Direction of face	Source position
Photon HI^{eye}_{photon}	Planar (40 cm Φ) 60 cm at eye level ^{137}Cs	Point 60 cm at eye level ^{241}Am	Point, face down 60 cm at eye level ^{137}Cs	Point 100 cm at eye level ^{137}Cs
	1.44 ± 0.04	1.33 ± 0.01	1.78 ± 0.02	1.15 ± 0.02
Beta $HI^{eye}_{electron}$	Planar (40 cm Φ) 60 cm at eye level $^{90}Sr/^{90}Y$	Point 60 cm at eye level ^{106}Rh	Point, face down 60 cm at eye level $^{90}Sr/^{90}Y$	Point 100 cm at eye level $^{90}Sr/^{90}Y$
	1.22 ± 0.03	1.91 ± 0.02	2.84 ± 0.10	1.43 ± 0.03

4 SUMMARY

The proposed method would provide systematic methodology to identify the nonhomogeneous exposure situations in terms of eye lens and extremity doses. For the initial screening of nonhomogeneous exposure situations, the index, HI, to quantify the homogeneity of the exposure was introduced. The method to obtain HIs was established using Monte Carlo simulations coupled with the mathematical phantom. The calculated HIs reproduced the measured data regarding the homogeneity in the monitoring of eye lens and extremity. These results and a set of the obtained HIs for some simplified exposure conditions enable us to conduct further verification of this methodology, which is to apply this method to some of the exposure situations encountered in nuclear sector.

This study also reveals that handling source within arm's reach above the eye level may be potentially nonhomogeneous exposure situations in terms of eye lens and it would be possible to reduce parameters for the calculation of the HIs. It should be noted that further discussions regarding the criteria level for the HI will be needed.

5 ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to Mr. M. Yoshizawa and Mr. T. Ohishi for helpful discussions. This work was supported by MHLW (Ministry of Health, Labour and Welfare, Japan) Hojokin Grant Number 150801-01.

6 REFERENCES

- [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] Watanabe, H., Tanaka, S., Anazawa, Y., 1991. Radiation safety of Takasaki ion accelerators for advanced radiation application in JAERI. Jpn. J. Health Phys. 26, 395-404 (in Japanese)
- [3] Farah, J., Struelens, L., Dabin, J., et. al., 2013. A correlation study of eye lens dose and personal dose equivalent for interventional cardiologists. Radiat. Prot. Dosim. 157(4), 561-569

- [4] IAEA, 2013. Implications for occupational radiation protection of the new dose limit for the lens of the eye. IAEA TECDOC No.1731
- [5] ISO, 2015. Radiological protection – Procedures for monitoring the dose to the lens of the eye, the skin and the extremities. ISO 15382
- [6] ICRU, 1992. Measurement of dose equivalents from external photon and electron radiations. ICRU Report 47
- [7] ICRU, 1993. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report 51
- [8] Behrens, R. and Dietze, G. 2011. Dose conversion coefficients for photon exposure of the human eye lens. *Phys. Med. Biol.* 56, 415-437
- [9] ICRP, 2010. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5)
- [10] Sato, T., Niita, K., Matsuda, N., et. al., 2013. Particle and heavy ion transport code system PHITS, Version 2.5.2. *J. Nucl. Sci. Technol.* 50(9), 913-923
- [11] Gualdrini, G., Mariotti, F., Wach, S., et. al., 2011. A new cylindrical phantom for eye lens dosimetry development. *Radiat. Meas.* 46, 1231-1234.
- [12] ISO, 1999. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence. ISO 4037-3
- [13] Yoshitomi, H., Ibrahimi, F., Eakins, J. et. al. A new eye dosimeter for Hp(3) measurements using OSL. to be submitted.

別添 3 - 2 別表 1 工業分野における不均等被ばく状況での放射線作業に係る文献調査結果

区分	文献名	発行年	タイトル	施設名	放射線作業及び被ばく源	不均等被ばくに対する記述	作業姿勢	保護具	被ばくデータ
工業	IRPA 13 proceeding		Estimation of Eye Lens Dose to Industrial Gammagraphy Workers	非破壊検査	RI 線源利用		なし		
工業	保健物理 17 63-67	1982	非破壊検査における放 射線管理	非破壊検査	RI 線源利用 取扱 RI 線源		なし		
工業	保健物理 17 333-336	1982	工業領域における RI 利用と放射線防護 II	非破壊検査	RI 線源利用 取扱 RI 線源		なし		

別添 3 - 2 別表 2 学術分野における不均等被ばく状況下における放射線作業に係る文献調査結果

区分	文献名	発行年	タイトル	施設名	放射線作業及び被ばく源	不均等被ばくに対する記述	作業姿勢	保護具	被ばくデータ
加速器	保健物理 34(2), 166-170	1999	東北大学サイクロトロン の解体と誘導放射性 核種の測定	加速器 (東北大)	サイクロトロン解体 加速器 放射化残留放射能	空間分布及び経時変化	なし		実効線量
加速器	保健物理 34(2), 161-165	1999	原研電子リニアックの 解体と誘導放射性核種 の測定	加速器 (原研)	電子加速器解体 加速器放射 化残留放射能	加速管核種別空間線量分布	なし		
加速器	保健物理 34(2), 151-160	1999	中性子散乱実験用遮蔽 体の放射化量評価と解 体	加速器 (KEK)	電子リニアック解体 加速器 放射化残留放射能	表面線量の壁面からの距離 による変化	なし		
加速器			Spring-8における高エ ネルギー加速器の放射 線管理の現状と問題点	加速器 (Spring8)	加速器メンテナンス 加速器運転時放射線、放射化 (光子エネルギー)		なし		
加速器	保健物理 38(2) 116-127	1991	原研高崎研究所イオン 照射研究施設における 放射線安全対策	加速器 (原研)	加速器メンテナンス 放射化物品		なし		
加速器	JAEA-Review 2012-050	2012	J-PARC 放射線管理年報 (2011 年度)	加速器 (J-PARC)	加速器メンテナンス 加速器 放射化 (ガス・冷却水 (フィル ター))	表面線量率、1m線量率	なし		
				加速器 (J-PARC)	加速器メンテナンス 加速器 放射化 (3 GeV シンクロトロン トンネル内ダスト)		なし		

別表 2-1

別添 3 - 2 別表 2 学術分野における不均等被ばく状況下における放射線作業に係る文献調査結果

加速器 (J-PARC)	加速器メンテナンス 放射化 (50GeV シンクロトロン)	加速器 空間線量率分布	なし	
加速器 (J-PARC)	加速器メンテナンス 放射化 (ハドロン実験施設 1 次 ビームライン)	加速器	実効線量 のみ	3.2mSv

別表 2-2

別添 3-2 別表 3 原子力分野（研究施設関連）における不均等被ばく状況下における放射線作業に係る文献調査結果

区分	文献名	発行年	タイトル	施設名	放射線作業及び被ばく源	不均等被ばくに対する記述	作業姿勢	保護具	被ばくデータ
研究			Safe disassembly and storage of radioactive components of JT-60U torus		JT60 decommissioning		なし		
研究	JAEA-Review 2006-034	2006	平成17年度 放射線管理部年報	JAEA 核サ研	MOX 燃料取扱 MOX 粉末	指リング、腕時計型線量計着用	なし	○（鉛手袋）	等価線量 記録レベル未満
研究	JAEA-Review 2005-028	2005	保健物理—研究と管理—No. 47	ホットラボ（JAEA 原科 研:ホットラボ）鉛セル	表面汚染（設備、機器）		なし	○	実効線量 記録レベル未満
				JAEA 原科研（JRR3）	原子炉メンテナンス冷却材ポンプ		なし	○	
				ホットラボ（JAEA 原科 研:燃試）	セル内除染汚染機器	皮膚線量と高エネルギーβ核種 の関係	なし	○	
				原子炉燃料（JAEA 原科 研:FCA）	原子炉燃料取扱 Pu 燃料	燃料取り扱い時の皮膚被ばく	なし	○（鉛エプロン、 含鉛手袋）	
				JAEA 原科研（BECKY）	使用済燃料取り扱い TRU 試料調整	TRU 取り扱い、手首部被ばく	なし		
研究	JAEA-Review 2004-024	2004	保健物理—研究と管理—No. 46	再処理研究（JAEA 原科 研）	タンク解体スラッジ固化		なし	等価線量 0.3mSv	
研究	JAEA-Review 2002-036	2002	保健物理—研究と管理—No. 44	ホットラボ（JAEA 原科 研:燃試）	セル内機器メンテナンス	β核種組成比、皮膚被ばく	なし		

別表 3-1

別添 3 - 2 別表 3 原子力分野（研究施設関連）における不均等被ばく状況下における放射線作業に係る文献調査結果

				再処理研究（JAEA 原科 研）	セル。フード解体汚染機 器		なし	○（塩ビエプロン （3mm t）、鉛 エプロン（0.25m m t）、塩ビ板、 鉛板による局所 遮蔽）	等価線量 （水晶 体、皮膚）	3.7mSv（皮膚）、1.2 mSv（水晶体）
研究	JAEA-Review 2001-041	2001	保健物理—研究と管理 —No. 43	JAEA 原科研（RI 製造）	ケーブル解体再処理廃液に よる汚染	指部被ばく	なし		等価線量 （皮膚）	24.3mSv（皮膚）
研究	JAEA-Review 2001-007	2001	保健物理—研究と管理 —No. 42	ホットラボ（JAEA 原科 研：ホットラボ）	放射性廃液の放射能		なし			
研究	JAEA-Review 2000-001	2000	保健物理—研究と管理 —No. 41	ホットラボ（JAEA 原科 研：ホットラボ）	セル内除染汚染機器（照 射後化学試験）	ホットラボケーブル立入除染時の Ru106-Rh106 によるβ線被ばく	なし	○（鉛局所遮蔽）	等価線量 （皮膚）	1.7 mSv
研究	JAEA-Review 2000-001	2000	保健物理—研究と管理 —No. 41	ホットラボ（JAEA 原科 研：WASTEF）	セル内除染汚染機器	WASTEF No1 セル内除染作業時 の不均等被ばくの評価				
研究	JAEA-Review-98-015	1998	保健物理—研究と管理 —No. 40	ホットラボ（JAEA 原科 研：WASTEF）	セル内除染汚染機器	頭部、胸部、腹部、大腿部に TLD を装着して評価			等価線量 （皮膚）	2.4 mSv
研究	JAEA-Review-95-020	1995	保健物理—研究と管理 —No. 37	原子炉燃料（JAEA 原科 研：FCA）	原子炉燃料取扱 Pu 燃料	床面除染時は大腿部が胸部の 1. 6 倍、頭部・腹部は胸部とほぼ同 じ	座り込 む姿勢	○（鉛エプロン）	実効線 量、等価 線量（皮 膚）	38mSv（指部）、 0.7mSv（実効線量）

別表 3-2

別添 3-2 別表 3 原子力分野（研究施設関連）における不均等被ばく状況下における放射線作業に係る文献調査結果

研究	JAERI-M 9654	1981	保健物理一研究と管理 —No. 23	研究施設（JAEA 大洗研： 燃研棟）	Pu 線源取り扱い Pu 線源	“ ^{210}Po (0.07)/ ^{210}Pb (10)~2-6 (トレンド データ)			
研究	JAERI-M 9066	1980	保健物理一研究と管理 —No. 22	研究施設（JAEA 大洗研： 燃研棟）	Pu 線源取り扱い Pu 線源	頭部、胸部、足首に TLD 装着した 結果。頭部と胸部に違いは見られ ず	なし	○ (GB のアクリル 板に含鉛アクリ ル板 (0.5mm 鉛等 価) を取り付け →1/10 に低減)	
研究	JAERI-M 8526	1979	保健物理一研究と管理 —No. 22	ホットラボ (JAEA 原科 研:ホットラボ)	ケーブル除染汚染機器	なし	○ (鉛、鉄板局所 遮蔽)	実効線 量、等価 線量 (手 先皮膚)	手指 ($\gamma+\beta$) /WB (γ) ~3、手先被ばく: β / γ ~ 1
研究	JAERI-M-92-144	1992	保健物理一研究と管理 —No. 34	ホットラボ (JAEA 原科 研:燃試)	セル内除染汚染機器	線源を直接グローブで取扱い (Pu 17keV についても考慮する必要あ り) ”	なし	“○ (鉛エプロン (0.55mm&0.35mm 等価)	WB、局部モニタリ ング結果
研究	JAERI-M-91-171	1991	保健物理一研究と管理 —No. 33	原子炉燃料 (JAEA 原科 研: FCA)	原子炉燃料取扱 Pu 燃料	“TLD による手先の被ばく線量の 測定		実効線 量、等価 線量 (手 先皮膚)	等価線量 62.1 mSv
研究	JAERI-M-90-224	1990	保健物理一研究と管理 —No. 32	ホットラボ (JAEA 原科 研:燃試)	セル内除染汚染機器	線源を直接グローブで取扱い (Pu 17keV についても考慮する必要あ り) ”	なし	“○ (鉛エプロン (0.5mmPb 等価)、	

別表 3-3

別添 3-2 別表 3 原子力分野（研究施設関連）における不均等被ばく状況下における放射線作業に係る文献調査結果

				り)	フード)			
		再処理研究 (JAEA 原科 研: RI 製造)	ケーブル解体再処理廃液に よる汚染	GB 作業では厚型の TLD リングの装 着困難”	なし	実効線量	胸部、頸 部は同程 度、背面 は低い	
		研究施設 (JAEA 原科研: 電源特会施設)	装置解体汚染機器		なし		実効線 量、等価 線量 (皮 膚)	
研究	JAERI-M-89-212	1989	保健物理一研究と管理 —No. 31	ホットラボ (JAEA 原科 研: 第 2 廃棄物処理棟)	セル内除染汚染機器	Pu 取扱いはフード内、燃料板を直 接取扱い	なし	腹部～腰部について は、胸部に対し腹部 0.8+-0.15、下腹部 1+-0.3、背部0.6+-0.2、 腰部0.65+-0.35、手部 は最大 740mrem で 6+-4、 $\beta/\gamma=2.5+-1.3$
				ホットラボ (JAEA 原科 研: 燃試)	セル内除染汚染機器		なし	胸部 70um 線量: 50mrem (β のみ)
				ホットラボ (JAEA 大洗 研: ホットラボ)	廃棄物切断汚染機器	“FCA における不均等被ばくの現 状		WB (γ : 130mrem, β 170mrem)、手部 (650mrem)、足 (60mrem)

別表 3-4

別添 3 - 2 別表 3 原子力分野（研究施設関連）における不均等被ばく状況下における放射線作業に係る文献調査結果

研究	JAERI-M-88-226	1988	保健物理—研究と管理 —No. 30	ホットラボ（JAEA 原科 研：燃試）	セル内除染汚染機器	含鉛エプロンの透過率 ⁷	燃料取 扱い時 の作業 形態	実効線 量、等価 線量	
研究	JAERI-M-87-147	1987	保健物理—研究と管理 —No. 29	ホットラボ（JAEA 原科 研：燃試）	セル内除染汚染機器	局部被ばく、Ru 割合	なし	実効線 量、等価 線量	手部：1900mrem
研究	JAERI-M-84-156	1984	保健物理—研究と管理 —No. 29	ホットラボ（JAEA 原科 研：第 2 廃棄物処理棟）	セル内除染汚染機器	身体被ばく分布測定（胸部、腹部、 下腹部、背部、腰部及び手部）	なし	実効線 量、等価 線量	
				ホットラボ（JAEA 原科 研：燃試）	セル内除染汚染機器		なし	実効線 量、等価 線量	
研究	JAERI-M-83-134	1983	保健物理—研究と管理 —No. 25	ホットラボ（JAEA 原科 研：燃試）	セル内除染汚染機器		なし	WB モニタ リング、 手足モニ タリング 結果	足部はシューズ、靴下 で遮蔽され小さい
				研究施設（JAEA 大洗研： 燃研棟）	Pu 線源取り扱い Pu 線源	Rh, Pr による β 線被ばく	なし	実効線 量、等価 線量	
研究	JAERI-M-82-112	1981	保健物理—研究と管理 —No. 24	ホットラボ（JAEA 原科 研：ホットラボ）	セル内除染汚染機器		なし	実効線 量、等価	

別表 3-5

別添 3 - 2 別表 3 原子力分野（研究施設関連）における不均等被ばく状況下における放射線作業に係る文献調査結果

							線量
日本保健物理学会第							
研究	17 回研究発表会要 旨集 63	1982		原子炉燃料（JAEA 核サ 研：Pu 燃）	Pu 燃料取扱い Pu 燃料	Rh による β 線被ばく	なし ○（非含鉛 GB） “WB 被ばくに対する比
研究	JAERI-M-7979	1979	保健物理—研究と管理 —No. 20	ホットラボ（JAEA 原科 研：ホットラボ）	ケーブル除染汚染機器	Rh, Pr による β 線被ばく	なし
研究	JAERI-M-6696	1976	保健物理—研究と管理 —No. 18	研究炉（JAEA 原科研： JRR-2）	原子炉メンテナンス放射 化された原子炉炉材	手足にパームバッジをつけて末 端部被ばく評価	なし 実効線 量、等価 線量（手、 足） $\beta/\gamma=0.9$ （手）、0.6 （足）
研究	JAERI-M-5018	1972	保健物理—研究と管理 —No. 14	原子炉燃料（JAEA 原科 研：FCA）	原子炉燃料取扱 Pu、U 燃 料	Rh, Pr による β 線被ばく	なし WB 被ばくに対する手部 線量の比：4-6
研究	JAERI-M-4615	1972	保健物理—研究と管理 —No. 13	原子炉燃料（JAEA 原科 研：FCA） ホットラボ（JAEA 原科 研：ホットラボ）	原子炉燃料取扱 Pu 燃料 ケーブル内メンテナンス汚 染機器	“WB モニタリングと末端部被ばく 線量の比	なし ○（鉛ガラス（1 0 cm t）） 実効線量
研究	JAERI-M 5025	1970	保健物理—研究と管理 —No. 12	ホットラボ（JAEA 原科 研：ホットラボ）	高汚染フィルタ交換フィ ルタ	中性子の寄与	
研究	JAERI-M 5021	1969	保健物理安全管理部の 活動 No. 11	研究炉（JAEA 原科研： JRR-2）	原子炉メンテナンス（遮 蔽プラグ修理）原子炉	動燃 Pu 燃料製造施設との比較”	なし
研究	JAERI-5017	1968	保健物理安全管理部の 活動 No. 10	ホットラボ（JAEA 原科 研：ホットラボ） 原子炉燃料（JAEA 原科	照射試料（黒鉛）放射化 物 U 燃料取扱い金属 U 燃料		なし 実効線

別表 3-6

別添 3-2 別表 3 原子力分野（研究施設関連）における不均等被ばく状況下における放射線作業に係る文献調査結果

				研：FCA)				量、等価 線量(手)
				研究炉（JAEA 原科研： JRR-3)	フィルタ交換フィルタ		なし	実効線 量、等価 線量(手)
研究	JAERI-M-5016	1967	保健物理安全管理部の 活動 No. 9	研究炉（JAEA 原科研： JRR-3)	照射試料取扱い照射試料	炉材溶接時の眼の被ばく	作業形 態図	実効線 量、等価 線量(手)
				研究炉（JAEA 原科研： JRR-2)	原子炉メンテナンス（炉 心修復）放射化された原 子炉材		なし -（綿手のみ）	
研究	JAERI-M-5015	1965	保健物理安全管理部の 活動 No. 8	研究炉（JAEA 原科研： TCA)	原子炉燃料取扱照射済燃 料		なし	
研究	JAERI-M-5014	1964	保健物理安全管理部の 活動 No. 7	研究施設（JAEA 原科研： Pu 特研)	照射済試料(事故)照射済 試料		なし	
				ホットラボ（JAEA 原科 研:ホットラボ）鉛セル	セル解体表面汚染（設備、 機器）		なし ○	実効線量 のみ 0.1mSv
研究	JAEA-Review 2012-001	2011	放射線管理部年報 (2010 年度)	JAEA 原科研	汚染配管撤去表面汚染 (配管)		なし ○	実効線量 のみ 記録レベル未満
				JAEA 原科研	汚染配管撤去表面汚染 (配管)		なし ○	実効線量 のみ 記録レベル未満
研究			平成 21 年度放射線管 理部年報	JAEA 核サ研	セル内機器交換作業汚染 機器		なし ○	?

別表 3-7

別添 3-2 別表 3 原子力分野（研究施設関連）における不均等被ばく状況下における放射線作業に係る文献調査結果

				JAEA 核サ研 UF6 取扱設備	汚染機器解体汚染機器		なし	○		記録レベル未満	
				JAEA 核サ研	汚染機器解体汚染機器		なし	○		実効線量、等価線量（皮膚？体幹部測 定？） 実効線量：2.6mSv/等価 線量：29.1mSv	
研究	JAEA-Review 2006-032	2006	放射線管理部年報 (2005 年度)	研究炉（JAEA 原科研：JRR-3）	原子炉機器更新汚染機器		なし	○		実効線量のみ 0.2mSv	
				研究炉（JAEA 原科研：JRR-4）	医療照射（BNCT）放射化した患者		なし	なし		実効線量のみ	
				研究炉（JAEA 原科研：TRACY）	原子炉メンテナンス汚染機器		なし	○		実効線量のみ 0.8 mSv	
				原子炉燃料（JAEA 原科研：FCA）	原子炉燃料取扱 Pu 燃料	モニタリングの実施	なし	○（鉛エプロン、 含鉛手袋）		なし	なし
				ホットラボ（JAEA 原科研：燃試）	セル内機器交換作業汚染機器		なし	○		なし	なし
研究	JAEA-Review 2010-074	2010	放射線管理部年報 (2009 年度)	廃棄物処理（JAEA 原科研：解体分別）	廃液タンク解体汚染機器		なし	○		実効線量、等価線量（水晶体、皮膚） 実効線量：2.6mSv/等価 線量（水晶体）：1.1mSv/ 等価線量（皮膚）： 3.4mSv	

別表 3-8

別添 3-2 別表 3 原子力分野（研究施設関連）における不均等被ばく状況下における放射線作業に係る文献調査結果

				研究炉（JAEA 原科研：JRR-4）	原子炉補修放射化物品	なし	なし	実効線量	002 mSv
								実効線	
研究	JAEA-Review 2008-063	2008	放射線管理部年報 (2009 年度)	原子炉燃料（JAEA 原科研：FCA）	原子炉燃料取扱 U 燃料	ウランのβ線による手の局所被ばく	なし	○（鉛エプロン、含鉛手袋）	量、等価線量（皮膚） 実効線量：<0.1mSv/等価線量（皮膚）：5.2mSv
								実効線	
				ホットラボ（JAEA 原科研：燃試）	廃液タンク除染タンク内表面汚染	局部被ばくモニタリング	なし	○	量、等価線量（皮膚）
研究	JAEA-Review 2014-059	2014	放射線管理部年報 (2013 年度)	廃棄物処理（JAEA 原科研：廃液輸送管）	汚染配管撤去表面汚染（配管）		なし	○	実効線量のみ 記録レベル未満
研究	JAEA-Review 2013-048	2013	放射線管理部年報 (2012 年度)	ホットラボ（JAEA 原科研：ホットラボ）鉛セル	セル解体表面汚染（設備、機器）		なし	○	記録レベル未満
研究	保健物理 22 53-57	1987	32P 取扱作業者の手指 および眼（水晶体）の 放射線被ばく管理に関する 考察	RI 取扱	32P 取扱作業	32P 取扱作業のモデル化と末端部 被ばく評価	なし		実効線量のみ 0.05 mSv
研究	保健物理 8, 137-141	1971	燃料再処理に伴う放射線 管理の経験	再処理研究（JAEA 原科研）	再処理配管、タンクからの 線量		なし	○	
研究	JAEA-Tech 2011-011	2011	再処理特別研究棟 廃 液貯槽 LV-2 の一括撤 去作業 その 2(撤去作	再処理研究（JAEA 原科研）	汚染物品解体表面汚染 (設備、機器)		なし		

別表 3-9

別添 3-2 別表 3 原子力分野（研究施設関連）における不均等被ばく状況下における放射線作業に係る文献調査結果

		業)							
研究	JAEA-Tech 2007-019	2007	ホットラボの廃止措置 (鉛セル解体・撤去1)	ホットラボ (JAEA 原科 研:ホットラボ) 鉛セル	汚染物品解体 表面汚染 (設備、機器)	なし	○	実効線量 のみ	

別添 3 - 2 別表 4 原子力分野における不均等被ばく状況下における放射線作業に係る文献調査結果

区分	文献名	発行年	タイトル	施設名	放射線作業及び被ばく源	不均等被ばくに対する記述	作業姿勢	保護具	被ばくデータ
原子力	ISOE International ALARA symposium	2009	Characterization of radiation fields for dose reduction during outages at Darlington Nuclear station	原子力発電所 (CANDU)	原子炉メンテナンス 蒸気発生器等		なし		
原子力	Progress in Nucl. Sci. Tech 1 170-173	2011	An analysis of radiation field characteristics for extremity dosimetry in nuclear power plants	原子力発電所	原子炉メンテナンス 蒸気発生器 Upper U-tube	複数 TLD による不均等被ばく評価	なし		実効線量、等価線量 (皮膚)
原子力	Radiat research 167 233-243	2007	Cataracts among Chernobyl Clean-up Workers: Implications regarding permissible eye exposure	原子力発電所 (事故時)	チェルノブイリ・clean up 事故時汚染	β 線、 γ 線による clean-up 作業者の水晶体線量の推定	なし		等価線量 (水晶体)
原子力	Proceedings of 23rd International Conference on Nuclear		JRTF の廃止措置における廃液貯槽の原位置解体	JAEA 原科研 (R1 製造)	ケーブル解体再処理廃液による汚染	指部被ばく	なし		

別表 4-1

別添 3 - 2 別表 4 原子力分野における不均等被ばく状況下における放射線作業に係る文献調査結果

Engineering (ICONE-23) (DVD-ROM)						
原子力	動燃技報 No. 72	1989	1cm 線量当量測定用 γ 線スペクトロメータ	原子炉 (常陽)	空間線量当量率 (Hp(10), H' (3), H' (0.07))	なし
原子力			workplace photon radiation fields	光子場 (燃料加工、再処理、放射性医薬品、工業利用、病院)	作業場光子スペクトル	
原子力	保健物理 38 (2) 116-127	2003	「ふげん」の廃止措置における被ばく低減の取り組み	原子炉 (ふげん)	原子炉廃止措置 原子炉、配管、タンク (各配管の汚染密度、主要構成材料)	
原子力	保健物理 49 (2) 79-87	2014	敦賀発電所及び東海第二発電所における線量低減への取り組みについて	原子力発電所	原子炉メンテナンス 蒸気発生器伝熱管	β 線局所被ばく なし
原子力			Significant of beta-radiation skin burns in Chernobyl patients for the theory and practice of radiopathology	原子力発電所 (事故時)	チェルノブイリ・clean up 除染	β 線局所被ばく
原子力	PNC 1994. 10		東海事業所における体	ホットラボ (JAEA 原科研 : セル内除染汚染機器	体幹部遮蔽による不均等被ば	なし ○ (鉛エブ 頭頸部線量

別表 4-2

別添 3 - 2 別表 4 原子力分野における不均等被ばく状況下における放射線作業に係る文献調査結果

			幹部不均等被ばく及び 燃試)			く		ロン)
			局部被ばく事例の解析					
原子力			核燃料施設における放 射線防護の最適化に関 する研究	原子炉燃料 (JAEA 原科研: FCA)	原子炉燃料取扱 Pu 燃料		体幹部遮蔽による不均等被ば	なし
			Measurement of Radiation Dose Rate from Turbine Building of Boiling Water Reactor	原子力発電所 (BWR)	原子炉メンテナンス			なし
原子力	Proceedings of International Symposium on EcoTopia Science	2007						

別表 4-3