

厚生労働省労災疾病臨床研究事業費補助金

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

平成 27 年度～平成 28 年度 総合研究報告書

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)

目次

I. 総合研究報告 . . . . . 1

研究代表者氏名：古渡 意彦

II. 研究成果の刊行に関する一覧表 . . . . . 4 4

(参考資料1) 平成27年度報告書

(参考資料2) 平成28年度報告書

以上

# I . 総合研究報告

労災疾病臨床研究事業費補助金

総合研究報告書

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

(150801-01)

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 の声明を受け、IAEA 及び EU 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 まで大幅に引き下げた。本事業では、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とともに被ばく線量低減化について提案する。事業実施期間の 2 年間で、以下に示す課題を設定して、本事業の目的を達成した。

(1) モンテカルロ計算シミュレーションに人体模擬数学ファントムを組み合わせ、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評価し、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を開発した。計算シミュレーションを用いる手法は、人体模擬物理ファントムを用い、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の結果と比較を行い、計算シミュレーション及び実験で一致することが確認された。

(2) 計算シミュレーションを用いる体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の推定手法と基準放射線校正場での照射試験で、工業・原子力・学術分野で一般的に使用される、放射線防護メガネ、全面マスク、鉛エプロン等の防護資機材の特に眼の水晶体等価線量の低減効果について調査した。その結果、(a)医療分野では補助者であっても防護メガネを着用することで眼の水晶体被ばくを半減できる可能性がある、(b)β線被ばく時には全面マスク及び防護メガネで 1/10 以下まで眼の水晶体被ばくを防護できる、及び(c)額に追加線量計を取り付けるのが望ましい、ことが被ばく低減対策として提案できる。

(3) 本事業では、特に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した。本意思決定フレームワークを導入することで、眼の水晶体等価線量を、体幹部で測定された線量当量からある程度の精度で適切な推定が可能となった。

## 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する手法の開発と眼の水晶体及び手指等末端部の被ばく線量低減化対策の提言を目的としている。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現行の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おり、これが眼の水晶体及び手指部等末端部の等価線量を適切に推定可能か、どの範囲まで適応可能か、現在もなお不明な点がある。本研究では、眼の水晶体及び手指部の等価線量を体幹部で測定された1cm線量当量、70 $\mu$ m線量当量等の体幹部で評価された線量当量と、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、眼の水晶体及び手指部被ばく線量の相関を詳細に検討することを通じ、放射線業務従事者が放射線業務により受けると思われる眼の水晶体及び手指部等価線量の予測モデルを提案する。同時に、放射線業務従事者の眼の水晶体及び手指等末端部の被ばく線量評価が不可欠であるような被ばく状況下において装着される全面マスク、鉛エプロン等の防護具がどの程度被ばく線量を低減するかについて検討を進め、眼の水晶体及び手指等末端部の被ばく線量低減化対策についても提言する。

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5年平均20 mSv (5年で100 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)、ヨーロッパ連合 (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、または検討したことにある [1],[2]。(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。[3])

我が国においても、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既に進められている [4],[5]。調査の対象は、全ての放射線業務従事者であるが、特に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。医療従事者を対象とした放射線被ばくの実態調査、線量評価手法、使用すべき線量計の性能評価及び医療従事者の放射線管理のあり方については、EUのプロジェクトであるヨーロッパ線量計測グループ (EURADOS) のプロジェクトであるORAMEDで非常に精力的に研究され、それらはEU各国の放射線防護施策に反映されていることは特筆すべきである [6]。

我が国の放射線業務従事者の被ばくの現状を鑑みるに、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 [7]。特に、我が国の工業・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いことに加え、それらは特殊な放射線作業であると位置づけられ、系統だった評価がなされてこなかったのが現状である。

工業・原子力・学術分野における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 $\mu$ 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。電離放射線障害防止規則第八条第2項において、「2前項の規定による外部被ばくによる線量の測定は、一センチメートル線量当量及び七十マイクロメートル線量当量(中性子線については、一センチメートル線量当量)について行うものとする。ただし、次項の規定により、同項第三号に掲げる部位に放射線測定器を装着させて行う測定は、七十マイクロメートル線量当量について行うものとする。」とあり、線量計を取り付ける部位については、第3項において次のように示されている。

「3 第一項の規定による外部被ばくによる線量の測定は、次の各号に掲げる部位に放射線測定器を装着させて行わなければならない。ただし、放射線測定器を用いてこれを測定することが著しく困難な場合には、放射線測定器によつて測定した線量当量率を用いて算出し、これが著しく困難な場合には、計算によつてその値を求めることができる。

一 男性又は妊娠する可能性がないと診断された女性にあつては胸部、その他の女性にあつては腹部

二 頭・頸部、胸・上腕部及び腹・大腿部のうち、最も多く放射線にさらされるおそれのある部位(これらの部位のうち最も多く放射線にさらされるおそれのある部位が男性又は妊娠する可能性がないと診断された女性にあつては胸部・上腕部、その他の女性にあつては腹・大腿部である場合を除く。)

三 最も多く放射線にさらされるおそれのある部位が頭・頸部、胸・上腕部及び

腹・大腿部以外の部位であるときは、当該最も多く放射線にさらされるおそれのある部位(中性子線の場合を除く。)

眼の水晶体等価線量の推定でも同様に、現行の個人モニタリングでは、工業・原子力・学術分野で通常生じうる放射線作業環境の場合、線量計は体幹部のみに取り付け、体幹部で測定された線量当量のうち適切なものから、必要に応じて水晶体組織等価線量を推定している。

放射線業務従事者という労働者の被る労働災害を考慮すると、目的とする作業を完遂するに当たり、放射線業務従事者は可能な限り被ばくをせず(本質的には全く被ばくせずに)に目的とする作業を完遂することが望ましい。しかしながら、一般には放射線業務従事者は、厳重な放射線管理の下、放射線被ばくを伴う有害作業を進め、各々の業務を着実に進めている。その有害作業の結果として、放射線業務従事者に対しいくばくかの被ばくが生じる。一方、放射線作業時には、昨今新たに線量限度が取り入れられた緊急作業時に限らず、予期しえない事象の結果、電離放射線障害防止規則で定められた線量限度を超えるような放射線業務従事者に対する過剰な被ばくを伴うことも完全には否定できず、このことは労働災害の観点からは看過しえない。ICRPの声明では、「急性被ばくによる視覚障害性白内障のしきい線量は、0.5 Gy」と判断されており、X線・ $\gamma$ 線に対する被ばくを想定した場合、現行法令の線量限度の3.3倍(=500/150=3.33...)である。事故、トラブル、照射機器等の不調は、予測され、当然回避されるべきであるが、後述の放射線被ばくの不均等性が加わり、体幹部線量のみ被ばく管理が行われている放射線作業の現場

では、このしきい線量を越えた被ばくを受ける事例は発生しうる。あるいは、(非常に極端な事例ではあるが)  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  のような核種のみを大量に扱うような、 $\beta$ 線のみによる被ばくが考えられる放射線作業では、一般的に $\gamma$ 線を想定した作業環境モニタリングの指示値で判断した場合 ( $\beta$ 線を適切に測定できないため)、実際の被ばく線量よりも線量計の指示値は低くなり、作業中にいつの間にか線量限度を超え、しきい線量を超えていた、等も考えられる。また、放射線緊急作業時には、実効線量限度が 250 mSv まで引き上げられることとなったが、これがそのまま眼の水晶体等価線量となる場合、前述のしきい線量の 1/2 まで許容されることとなる。緊急作業時においても適切に防護がなされず、不均等に被ばくする状況であれば、緊急時作業者は簡単にこの線量まで被ばくするであろう。当然ながら、緊急時作業者も放射線業務従事者であり、放射線被ばくから十分に防護されなければならない。このような眼の水晶体への過剰な被ばくは、労働災害を撲滅する観点からも回避されなければならない。

現行の個人モニタリングについていうと、前述のとおり我が国の放射線業務従事者の 80%程度は、体幹部に装着した線量計の検出下限以下の被ばくしかしていないとの報告がある [7]。この点からも、これまで機能してきた眼の水晶体等価線量の推定手法を継続利用して、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、 $\beta$ 線による被ばくの場合、眼の水晶体等価線量を場合によっては数百倍過大評価しうる可能性が指摘されている [8]。その一方で、過小評価しうる放射線作業も想定でき、例

えば、放射線業務従事者の顔面が線源に近接した場合などは、体幹部で測定される線量当量では眼の水晶体等価線量を正當に評価しうるとは考えづらい。このような放射線被ばくの不均等性については、特に原子力・工業。学術分野では、個別の放射線作業が不均等であり、適切なモニタリングと防護対策が必要である、というような、ある「不均等に被ばく」する放射線作業時のモニタリング及び被ばく線量低減対策が時々報告される程度で、これらを系統的に調査する試みは十分になされてこなかった。

本事業では、事業期間の2か年で、現状での問題点の解決を目標とし、以下に挙げる4点の課題を設定して、これらを検討する。すなわち、

(a) 眼の水晶体及び手指等末端部の等価線量は、体幹部で測定された線量当量から適切な推定が可能かどうか。また、可能な場合どの程度確実に評価できるのか。

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手指等末端部の等価線量を評価しうるのは、1cm 個人線量当量か、3mm 個人線量当量か又は  $70\mu\text{m}$  個人線量当量か。(また、現行の個人モニタリングで実施される 1cm 個人線量当量及び  $70\mu\text{m}$  個人線量当量での推定はどの程度妥当なのか。)

(c) ICRP 等が出された声明に従って眼の水晶体等価線量の線量限度が大幅に下がる場合、現行の放射線作業時に放射線業務従事者が使用する防護資機材でどの程度等価線量の低減が見込まれるのか。

(d) 眼の水晶体及び手指等末端部の等価線量の追加モニタリングの可否をどのように

一義的かつ合理的に決定するのか。

上述のとおり設定した課題に応えるため、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評価し、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を開発する。さらに、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。これらは、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、放射線業務従事者の体幹部、眼の水晶体及び手指部線量とその相関について、主に計算シミュレーションで評価し、得られた結果について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の結果と比較して検証する。

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、経験のない初めての放射線作業で、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た、という適切な管理と言えないケースが生じうる。これらは、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す。また、IAEA TECDOC においても、どの場合に眼の線量計の追加モニタリングを行うかについて議論している [9]。そこで、上述の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。

なお、体幹部線量からの眼の水晶体組織等価線量の推定手法の確立について、体幹部線量からの眼の水晶体組織等価線量の推定手法を組み込んだ汎用ツールの開発・頒布・使用方法の教育、等は、本事業では行わない。また、眼の水晶体及び手指部等価線量の低減化対策について、放射線作業における適切な放射線防護具についての概説にとどめ、具体的にどのような姿勢で放射線作業がなされるべきか、この放射線作業にはこの防護資機材を準備する、といった具体的な提案までは行わない。

## B. 研究方法

### B-1. 研究方法の概要

本事業を完遂するにあたり、上記の目的に対し、以下に示す(1)、(2)及び(3)の課題を設定した。これら3テーマを並行

して実施し、本事業実施期間の2か年内で放射線業務従事者の体幹部で受けた線量当量からの眼の水晶体及び手指部等価線量の合理的な評価手法の確立と、被ばく線量低減対策について提言する。

(1) 体幹部線量と眼の水晶体及び手指部等価線量の合理的な推定手法の確立

(2) 工業・原子力・学術分野における、放射線業務従事者の眼の水晶体被ばく線量の低減化対策に関する検討

(3) 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の提案

事業期間の2か年で、(1)の体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部等価線量の比を、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環境を整備し、計算シミュレーションで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評価し、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を開発した。特に、本事業では、X線・ $\gamma$ 線及び $\beta$ 線に注目し、 $\beta$ 線被ばく時にも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が得られる手法を準備した。計算シミュレーションで得られた結果については、人体模擬物理ファントムを用い、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の結果と比較を行うことで妥当性を検証した。(2)について、(1)で開発した手法を用い、基準放射線校正場での実験と組み合わせ、工業・原子力・学術分野で一般的に使用される、防護メガネ、全面マスク、鉛エプロン等の防護資機材の

特に眼の水晶体等価線量の低減効果について調査し、それらを適切に用いた放射線業務従事者の眼の水晶体被ばく線量の低減化対策について提言する。(3)については、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を通じて得られた成果に基づき、眼の水晶体等価線量に対して重要なパラメータを抽出する。それらの眼の水晶体等価線量への影響度合いを考慮して、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。

(倫理面への配慮)

本事業を遂行するに当たり、研究対象者に対する人権擁護上の配慮、研究方法による研究対象者に対する不利益、危険性の排除や説明と同意(インフォームド・コンセント)に関わる状況、実験動物に対する動物愛護上の配慮等への観点を十分考慮し、放射線業務従事者が実際に放射線作業の現場で被ばくした体幹部、眼の水晶体及び手指部線量を取得するという、研究を進める手法を取らなかった。その代わりに、後述の計算シミュレーションを用いる手法で研究を進めるほか、後述の作業環境でのモニタリング試験では、簡易物理ファントムを用いて放射線作業を模擬し、放射線業務従事者が受けると想定される被ばく線量を取得した。また、研究代表者及び分担研究者も放射線業務従事者として、放射線作業に従事するが、研究代表者らは、所属する日本原子力科学研究所放射線障害予防規程及び放射線安全取扱手引の定めに従い、放射性物質の管理区域外への漏えい等がないように適切に放射性同位元素等を取扱う。研

究代表者らの放射線被ばくについて、「合理的に達成可能な限り低く（ALARA）」の原則に基づく無用な放射線被ばくがないよう、厳重な被ばく管理の上で研究を遂行する。

以上により、当該事業に関し、倫理面への配慮が十分になされ、事業遂行に倫理面での問題がないと判断される。

## B-2. 具体的な研究方法

B-2 (1). 体幹部線量と眼の水晶体及び手指部等価線量の合理的な推定手法の確立

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合理的な推定手法の確立を、平成27年度及び平成28年度において、以下に示す課題を進めることで行った。なお、それぞれ個別の研究手法、研究結果及び結論については、各年度の報告書に委ねるものとする。

<平成27年度>

(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

<平成28年度>

(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

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

線量の合理的な推定手法の確立するためには、いくつかの段階を経る必要があった。

本事業での第一段階は、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。これは、平成27年度課題(1)で集中的に行ったが、平成27年度課題(2)に示す、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で得られた放射線作業環境を模擬できる放射線場を選定したモニタリング試験により検証している。平成28年度の課題(2)に示す通り、計算シミュレーションに基づく眼の水晶体等価線量の推定手法が実際の放射線作業環境下における個人モニタリング状況を再現できるか確認した。モニタリング試験を行う施設は、平成27年度課題(2)に示す、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結果を受け、(a)不均等被ばく状況で一般的に実施される作業、(b)均等被ばく状況を代表する作業、及び(c)研究用加速器施設における放射線作業、を模擬できる作業環境とし、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を選定した。

計算シミュレーションの妥当性について、いくつかの段階を踏んで検証した。すなわち、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基準校正場での実験で再現して比較した。

本研究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)

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 $\mu$ 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した。計算シミュレーション手法自体の妥当性確認は、研究着手時点で行っており、本事業で利用した数学ファントムを用いて、光子に対する空気カーマから個人線量当量への換算係数( $H_p(10)/K_a$ 、 $H_p(3)/K_a$ 、及び $H_p(0.07)/K_a$ )を計算し、それらが文献値を再現しているか確認した。一連の計算の結果、本事業で採用した数学ファントムとシミュレーショ

ンコードでえられた結果が、光子に関しては文献値と4%以内、電子に対しては約6%で一致していることを確認した。



図1 本研究で利用した数学ファントムの外観

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2参照)

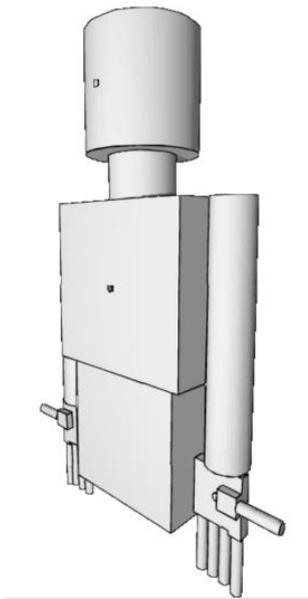


図 2 (a) 本研究で使用したアクリル製物理ファントムの外観(計算シミュレーション導入時)



図 2 (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)

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）を指の長さ加工し、手のひらに取り付け、手指のファントムとした。

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受ける線量に対する眼の水晶体及び手指部等価線量の比と、計算シミュレーションで評価された体幹部での吸収線量に対する眼の水晶体及び手指部での吸収線量の比と一致するか確認した。

- 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/体幹部線量の比は、モニタリング試験前に基準

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。基準校正場は、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<sup>241</sup>Am、<sup>137</sup>Cs、<sup>60</sup>Co及び<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y放射線校正場を用いた。

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、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で行っている。 $\gamma$ 線及び<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y $\beta$ 線基準校正場での線量評価は、2mm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。

モニタリング試験においては、これらの線量計に加え、平成27年度課題（3）及び平成28年度課題（1）で試作した、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も導入した。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利用範囲内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、既存のOSL線量計を改造することで、眼の水晶体及び手指部の被ばくモニタリングに適した線量計を試作した。本事業では、照射面の正面に追加フィルターとして2mm厚のアクリル板を装着できるよう設計した治具と市販の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に最適化さ

れた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 $\mu$ 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、特に $\beta$ 線被ばくに対して対応可能な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、原子力機構FRSで運用中のX線・ $\gamma$ 線、及び<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y $\beta$ 線基準校正場でエネルギー応答試験を行った。

さらに、体幹部線量からの眼の水晶体等価線量の推定については、体幹部で測定できる線量当量（1cm個人線量当量、3mm個人線量当量及び70 $\mu$ m個人線量当量）のうち、最も適切に眼の水晶体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、計算シミュレーションを用いた各個人線量当量単位で評価された体幹部線量に対する、眼の水晶体及び手指部等価線量の比を比較することで評価した。

B-2. (2) 工業・原子力・学術分野における、放射線業務従事者の眼の水晶体被ばく線量の低減化対策に関する検討

(2) について、計算シミュレーションを用いる体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の推定手法と基準放射線校正場での照射試験により、工業・原子力・学術分野で一般的に使用される、防護メガネ、全面マスク、鉛エプロン等の防護資機材の特に眼の水晶体等価線量の低減効果について調査した。

原子力分野では、低エネルギー光子成分からの被ばくが考慮される、<sup>235</sup>U、<sup>241</sup>Am、<sup>239</sup>Np等の使用済み核燃料から生じる核種の取扱い、同じく核分裂生成物の $\beta$ 線放出

核種である、 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ 、 $^{106}\text{Ru}$ - $^{106}\text{Rh}$  が放射性汚染物として考慮される放射線作業環境があることが、平成27年度に実施した文献調査で明らかとなっている。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ことも、文献調査で明らかとなっている。防護具によっては、内部被ばくを防護するために装着されたものが、結果として、その装着部位での外部被ばくを低減する効果があることが予想される。そのことが、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比を変化させる可能性がある。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であると想定される。そこで、本事業では、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を対象とし、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を、計算シミュレーション及び基準校正場での実験により評価した。

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 放射線防護メガネ

(東レ・メディカル製 HF-400S  
鉛当量 0.07 mmPb )

含鉛エプロン及び放射線防護メガネは、いずれも光子による外部被ばくに対する体幹部及び眼部の防護の目的で使用される。全面マスクは、一般に放射線作業時において、放射線業務従事者が放射性物質の吸入摂取を避けるために着用される。

数学ファントムを用いる計算シミュレーションでは、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

みを厚さ 2.5 mm のアクリルで模擬した。放射線防護メガネについては、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ている。線源は N-80 については 60 keV の単色光子、 $^{137}\text{Cs}$  については 662 keV の単色光子とし、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  については原子力機構 FRS のβ線校正場の校正点におけるβ線スペクトルを計算したものをを用いた。

測定による被ばく線量低減効果の評価は、上述の簡易物理ファントムの各部位に 2 mm<sup>3</sup> のアクリルフィルタ付 OSL 線量計を装着したものを取り付け、原子力機構 FRS で整備済みの基準校正場で照射した。光子については、 $^{241}\text{Am}$  に対する均等照射を模擬するために ISO4037 Narrow series の X 線 (N-80: 平均エネルギー 64.7 keV) を用い、前方-後方照射 (AP 照射) 条件及び回転照射 (ROT 照射) 条件で照射した。また、原子力分野で一般的な放射線作業環境で見られる放射線源を考慮し、同じ照射条件で  $^{137}\text{Cs}$  γ 線での照射も実施している。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、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  線源を用い、顔面、つまり眼の水晶体への被ばく低減効果の評価を行うため、②全面マスク及び③放射線防護メガネについて AP 条件での照射のみ実施した。なお、医療分野での被ばく源となりうる 40 keV の単色光子に対し、③放射線防護メガネによる眼の水晶体への被ばく低減効果も併せて評価し、被ばく低減化対策への提言を行う。

B-2. (3) 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の提案

本事業では、特に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した。IAEA-TECDOC-1731 中では、場合分けに応じた適切な線量当量と線量計による個人モニタリング手法が提案されている [9]。当該意思決定フレームワークは、特に眼の水晶体線量の追加モニタリングを一義的かつ合理的に行えるようにするものである。本事業で行った一連の計算シミュレーション及びフィールド試験の結果を、IAEA TECDOC-1731 中で **impact factor** と呼ばれる **key factor** に注目して、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比への影響の度合いを検討した。その後、眼の水晶体被ばくへの影響度が高いと思われる、**key factor** より順に条件分岐を行って、適切に眼の水晶体への追加モニタリングの要否が判断できるような放射線管理フレームワークを提案する。また、この放射線管理フレームワークでは、本事業で提案している、体幹部線量と眼の水晶体等価線量の比を示す不均等度指標 (*HI*) を導入し、条件分岐に用いる。

なお、本事業で提案したのは、眼の水晶体被ばく評価のための追加モニタリングの要否に関する意思決定であり、現行の個人モニタリング施策全体に対するチャレンジではない。そのため、現行の個人モニタリング施策で実施されているとおり、 $\beta$ 線については  $H_p(0.07)$  で皮膚等価線量が評価されるべきであり、40 keV 以下の光子に対しても同様である点はあらかじめ記載しておく。

## C. 研究結果及び考察

### C-1. 研究結果及び考察の概要

本事業を完遂するにあたり、上記の目的に対し、以下の (1)、(2) 及び (3) の課題に対して研究を進め、本事業実施期間 2 年での研究結果及び考察を示す。

(1) 体幹部線量と眼の水晶体及び手指部等価線量の合理的な推定手法の確立

(2) 工業・原子力・学術分野における、放射線業務従事者の眼の水晶体被ばく線量の低減化対策に関する検討

(3) 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の提案

(1) で示す、体幹部線量と眼の水晶体及び手指部等価線量の合理的な推定手法の確立について、様々な被ばく条件に対し系統立てて評価するための計算シミュレーション環境の整備を完了した。これにより、線源、線種、放射線業務従事者と線源の位置関係を表すジオメトリ等の条件を変えた場合でも、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比が求められるようになった。得られるようにした。計算シミュレーションで得られた体幹部線量当量に対する眼の水晶体及び手指部等価線量の比については、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の結果と比較を行い、実際に放射線業務従事者が受ける被ばく線量を再現できることを確認した。本事業では、特に、X線・ $\gamma$ 線及び $\beta$ 線に対する被ばくに注目し、 $\beta$ 線被ばく時にも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が得られる手法が開発できた。得られた知見のうち、ここでは以下の点を挙げる。

(a) 点線源及び体積線源による被ばくを考慮する場合、 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  線のように、「どの場合でも均等に被ばくする」と考えられている  $\gamma$  線に対しても、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が 3 を超えるような、不均等被ばくの状況が、通常の放射線作業環境に存在する。

(b)  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$  線については、どのような条件でも従来は不均等被ばくが想定されていた。本事業を通じ、点線源を用いる不均等被ばく条件であっても、適切な線量当量単位を選択すると、factor 1.5 以内(1/1.5~1.5)で、「均等に被ばくした」と言える。一方で、均等被ばく条件である等方照射条件では、現行モニタリング手法では眼の水晶体等価線量を約 4 倍過大評価する。

(c) 実際の放射線作業環境を模擬したフィールド試験の結果、 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  線による均等被ばく状況でも、体幹部線量に対し眼の水晶体等価線量は、約 1.5 倍であり、このことはある程度「不均等に被ばくする」ことが示唆している。

(d) 特に  $\beta$  線について顕著であったが、X 線・ $\gamma$  線・ $\beta$  線に対しては、眼の水晶体線量を体幹部線量当量から推定する際には、現行モニタリングで使用される 1cm 及び 70  $\mu\text{m}$  個人線量当量 ( $H_p(10)$  及び  $H_p(0.07)$ ) よりも 3mm 個人線量当量 ( $H_p(3)$ ) を用いる場合、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が 1 に近づく。このことは、現行の個人モニタリング施策を大きく変更せず、眼の水晶体モニタリングをより適切に運用できる可能性を示唆している。

(2) について、計算シミュレーションを用いる体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の推定手法と基準放射線校正場での照射試験により、工業・原子力・学術分野

で一般的に使用される、防護メガネ、全面マスク、鉛エプロン等の防護資機材の特に眼の水晶体等価線量の低減効果について調査した。得られた知見のうち、ここでは以下の知見を挙げる。

(a) X 線に対して、前方-後方照射条件のみならず均等被ばく条件であっても、鉛エプロン及び放射線防護メガネが眼の水晶体等価線量低減に有効である。

(b) 原子力分野で見られる  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  線に対しては、一般的に着用される全面マスク及び放射線防護メガネは照射条件に限らず線量低減の効果は見込めない。ただし、鉛エプロンは照射条件に関わらず有効である。

(c)  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$  線源に対して、一般的に着用される全面マスク及び放射線防護メガネは前方-後方照射条件及び均等被ばく条件のいずれについても、約 90% の線量低減効果が見込める、という知見が得られた。

(3) 本事業では、特に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した。当該意思決定フレームワークは、既に提案されていた IAEA-TECDOC-1731 中での意思決定ツールをより具体的にするものである。本事業で提案したものは、IAEA 及び EU で既に導入された眼の水晶体等価線量の年間線量限度である 20 mSv を基準に、1 か月または一回の放射線作業に係る事前の計画被ばく線量が体幹部での 1cm 個人線量当量 ( $\beta$  線の場合は、3mm 個人線量当量) で線量限度の 3/10 に安全係数を 5 で考慮した、0.1 mSv を越えるかどうかから始め、本事業で体幹部線量と眼の水晶体等価線量の比を示す不均等度指標 (HI) を導入した分岐で追加モニタリングの要否を決定できるようにした。本意思決定フレームワークを導

入することで、眼の水晶体等価線量を、体幹部で測定された線量当量からある程度の精度で適切な推定が可能となった。同時に、X線・γ線に対して言うと、現行の個人モニタリングの施策に基づく放射線管理を大きく変更せずに、追加モニタリングの要否を一義的かつ妥当な判断を下しながら、確実に個人被ばく線量の管理を実施できる枠組みを準備した。

本意思決定フレームワークで重要となるのは、事前の作業環境モニタリングと放射線作業の事前の決定である。前者で場の線量当量率を求め、後者で作業時間を評価し、それぞれの積が、事前の計画被ばく線量となるためである。これらのある程度精度よく評価しておくことで、本事業で提案する意思決定フレームワークは適切に機能する。前者の事前の放射線作業環境モニタリングにおいては、線量計による線量測定と同時に線種と放射線のエネルギー情報も十分入手されなければならない。同時に、作業単位での放射線業務従事者の計画被ばく線量算定には積算作業時間の算定が必須である。

## C-2. 具体的な研究結果及び考察

### C-2(1). 体幹部線量と眼の水晶体及び手指部等価線量の合理的な推定手法の確立

本事業では、モンテカルロ計算シミュレーションに人体模擬数学ファントムを組み合わせ、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評価し、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を開発した。推定手法の開発では、我が国の放射線業務従事者の被ばくの要因となる放射線の種類の大部分をカバーする、X線・γ線及びβ線を考慮し、体幹部線量に対する、眼の水晶体及び手指部等価線量がどのような相関が得られるのかに着目した。

本項では、推定手法の開発過程である、(1) 計算シミュレーションでの結果と、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の結果と比較による、体幹部

表1 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  
(前方-後方照射 (AP 照射) 条件での評価)

線源条件		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
Parallel	<sup>60</sup> Co	1.02 ± 0.01	0.97 ± 0.01	0.97 ± 0.03	0.98 ± 0.01
	<sup>137</sup> Cs	0.98 ± 0.02	0.97 ± 0.03	0.95 ± 0.01	0.93 ± 0.03

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
Point	<sup>137</sup> Cs, 40 cm	2.37 ± 0.04	2.25 ± 0.07	2.20 ± 0.05	2.17 ± 0.16
	<sup>90</sup> Sr/ <sup>90</sup> Y, 80 cm	1.57 ± 0.02	1.54 ± 0.09	1.92 ± 0.02	1.89 ± 0.17
	<sup>90</sup> Sr/ <sup>90</sup> Y, 110 cm	1.25 ± 0.04	1.28 ± 0.09	1.29 ± 0.04	1.29 ± 0.05

線量に対する、眼の水晶体及び手指部等価線量の比の検証、及び(2) 検証済みの計算シミュレーションを用いた推定手法で得られた知見、について記載する。

表1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。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た。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、 $^{137}\text{Cs}$  及び  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線校正場、並びに  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$  線校正場で行った。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。

表1に示す通り、いずれの線種及び照射条件についても、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  $^{60}\text{Co}$  及び  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  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、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生じた条件も見られた。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、現実に放射線作業が実施される放射線作業環境でも、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比が再現できるか、モニタリング試験により検証した。モニタリング試験は、簡易物理ファントムに本事業で OSL 線量計を取り付け、放射線作業環境に設置することで行った。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  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  等の核分裂生成物からの  $\beta$  線及び  $\gamma$  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  $\beta$  線及び  $\gamma$  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3 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）

一例として、図3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3右手のドラム缶中に放射性廃棄物として存在する<sup>137</sup>Csであり、簡易物理ファントムは、<sup>137</sup>Csからのγ線による外部被ばくを受けることとなる。

**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**

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

表2では、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を示している。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、計算シミュレーションにおいて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<sup>137</sup>Csγ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<sup>φ</sup>×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 $0.42 \pm 0.04$ と得られたが、シミュレーション①では $0.45 \pm 0.03$ 、シミュレーション②では $0.43 \pm 0.02$ 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、本事業で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。

表3 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  
( $\gamma$ 線及び電子線)

線源及び照射条件 photon, parallel (MeV)	計算 数学ファントム		
	H <sub>p</sub> (3) / H <sub>p</sub> (10)	H <sub>p</sub> (3) / H <sub>p</sub> (3)	H <sub>p</sub> (3) / H <sub>p</sub> (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

線源及び照射条件 Electron, parallel (MeV)	計算 数学ファントム		
	H <sub>p</sub> (3) / H <sub>p</sub> (10)	H <sub>p</sub> (3) / H <sub>p</sub> (3)	H <sub>p</sub> (3) / H <sub>p</sub> (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

これを受け、数学ファントムを用い、線量当量の単位、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し、どのパラメータの影響が大きいか検討を進めた。

計算シミュレーションを用いた体幹部線量と眼の水晶体線量との相関に係る検討で、

(a) 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手指等末端部の等価線量を記述しうるかの検討を行った。表3では、前方-後方照射(AP照射)条件での $\gamma$ 線及び電子線に対する、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の比較を示している。 $\gamma$ 線についてはエネルギーに大きく依存せず、1cm、70 $\mu$ m及び3mm個人線量当量のいずれの個人線量当量単位でも同等の評価を得られることが分かった。電

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( $\beta$ 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		
	<sup>41</sup> Ar	<sup>90</sup> Y	<sup>106</sup> Rh
H <sub>p</sub> (3) <sub>eye</sub> / H <sub>p</sub> (10) <sub>trunk</sub>	-	(1.99 ± 0.68) × 10 <sup>3</sup>	25.9 ± 1.3
H <sub>p</sub> (3) <sub>eye</sub> / H <sub>p</sub> (0.07) <sub>trunk</sub>	(6.07 ± 0.65) × 10 <sup>-3</sup>	0.237 ± 0.003	0.439 ± 0.006
H <sub>p</sub> (3) <sub>eye</sub> / H <sub>p</sub> (3) <sub>trunk</sub>	1.04 ± 0.17	1.06 ± 0.02	1.07 ± 0.02

子では、現行の個人モニタリング施策に従うと、1cm 個人線量当量または  $70 \mu\text{m}$  個人線量当量をそのまま眼の水晶体線量の推定値とすることになるが、評価したエネルギー範囲では、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比（本事業では、不均等度指標：Homogeneity Index ( $HI^{\text{eye}}$ )とも呼ぶ。）は1より大きく、体幹部線量では眼の水晶体線量を過小評価につながり得ることが分かった。一方で、3mm 個人線量当量で評価された場合、体幹部線量に対する眼の水晶体線量はほぼ1となり、体幹部線量が眼の水晶体線量の非常によい推定値を与えることが明らかとなった。表4では、 $\beta$ 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。表4の評価条件は、等方照射（ISO 照射）条件として評価した。表3と同様に、計算シミュレーションに用いた $\beta$ 線源のうち、 $^{41}\text{Ar}$ 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、 $\beta$ 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ていない。

$\beta$ 線被ばくの場合、現行の個人モニタリングで実施される 1cm 個人線量当量及び  $70 \mu\text{m}$  個人線量当量での推定は、極端な過大又は過小評価をもたらす可能性があることがわかった。これは、体幹部での  $70 \mu\text{m}$  個人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、過大評価をもたらすことになる。現行の個人モニタリング施策に従い、「体幹部で測定された 1cm 及び  $70 \mu\text{m}$  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、現状の推定手法では  $70 \mu\text{m}$  線量当量を眼の水晶体線量と推定値とするのが、保守的な見積もりとなるが、適切な推定値といえるのか、という点では議論の余地がある。同時に、体幹部を 3mm 個人線量当量でモニタリングがなされていた場合、体幹部での 3mm 個人線量当量は良い推定を与える。これは、体表面から同じ深さ( $d = 3 \text{ mm}$ )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（ $\beta$ 線）のエネルギー

表5 線種による体幹部線量に対する眼の水晶体線量比の比較  
( $\gamma$ 線及び電子線)

AP 照射条件 parallel E = 1.5 MeV	計算 数学ファントム		
	$H_p(3) / H_p(10)$	$H_p(3) / H_p(3)$	$H_p(3) / H_p(0.07)$
Photon	$1.05 \pm 0.01$	$1.02 \pm 0.01$	$1.05 \pm 0.02$
Electron	-	$1.01 \pm 0.01$	$1.82 \pm 0.03$

AP 照射条件 parallel E = 2.0 MeV	計算 数学ファントム		
	$H_p(3) / H_p(10)$	$H_p(3) / H_p(3)$	$H_p(3) / H_p(0.07)$
Photon	$1.06 \pm 0.01$	$1.05 \pm 0.01$	$1.03 \pm 0.01$
Electron	$41.4 \pm 3.6$	$0.98 \pm 0.01$	$1.68 \pm 0.03$

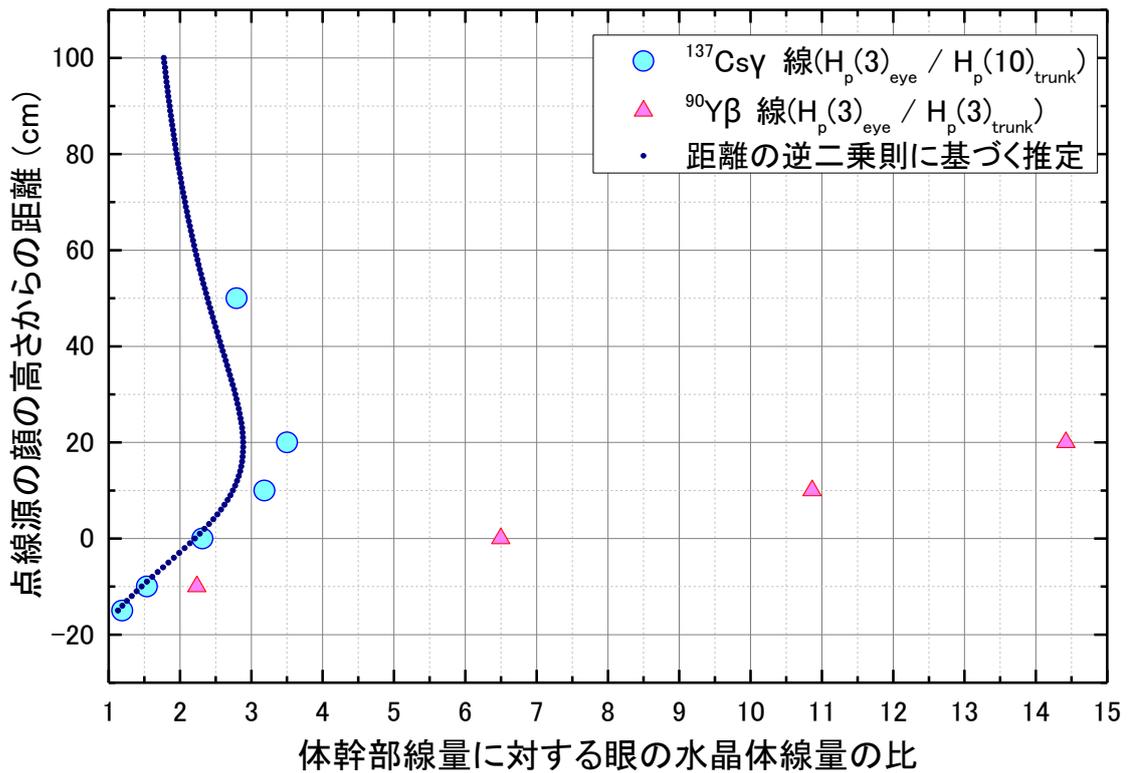


図4 体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の点線源の顔からの位置に対する変化 ( $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  線源及び  $^{90}\text{Y}$   $\beta$  線源)

及び照射条件に依存せずほぼ 1 となった。このことから、体幹部における  $70 \mu\text{m}$  線量当量の測定値よりも、 $3\text{mm}$  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) 本事業で進めた、体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の比を評価する際に事前に考慮したパラメータは、①線種、②線源位置 (含む入射方向)、③放射線業務従事者と線源との位置関係 (ジオメトリ)、であった。

具体的には、①線種については、同一線源位置及び同一ジオメトリで、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を比較した。表 5 では、同一エネルギー及び同一照射条件で、線種を変えた場合に、体幹部に対す

る眼の水晶体線量の比を示す。1.5 MeV の電子及び  $\gamma$  線に対しては、ほぼ一致 (1.01) し、2.0 MeV の場合で、 $\gamma$  線が 1.05 に対して電子で 1.68 と 65%程度大きくなった。

②線源位置についての評価は、線源と数学ファントムの中心との距離を 40 cm に固定し、顔の高さを 0cm として、線源の高さを変えて行った。図 4 では、 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  線及び  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$  線に対する、体幹部線量に対する眼の水晶体線量比の、点線源の顔からの位置による変化を示す。図では、点等方線源から距離の逆二乗側に従って放射線が入射することを仮定して解析的に求めた線量比も示している。 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  線の場合では、 $-15 \text{ cm} \sim 50 \text{ cm}$  の範囲で体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が 1.19~3.50 と得られ、距離の逆二乗側で解析的に予測できる

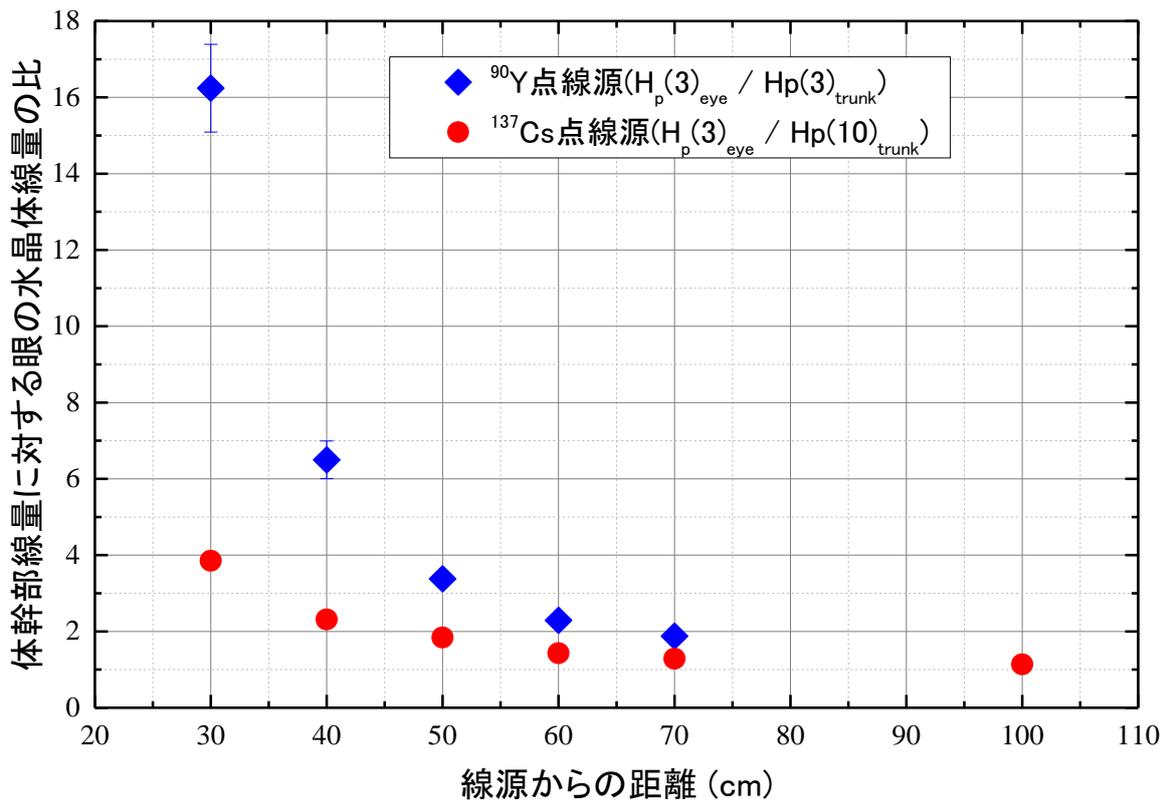


図5 体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の線源距離に対する変化  
( $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  線源及び  $^{90}\text{Y}$   $\beta$  線源)

ものとなった。一方で、 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$  線に対しては、-20 cm~20 cm の範囲で体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が 0.61~14.4 と、距離の逆二乗では全く予測できないことが明らかとなった。

③のジオメトリについて、顔の高さで固定した点線源での前方-後方照射 (AP 照射) 条件での結果を示す。図5では、点線源を被ばく源とした場合の、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。結果は、 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  線及び  $^{90}\text{Y}$   $\beta$  線の点線源によるものを示している。

$^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  線の場合、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、距離の逆二乗則にしたがう大まかな推定でも、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  $\gamma$  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、 $^{90}\text{Y}$   $\beta$  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、 $\gamma$ 線の場合と比較して、その比が $\gamma$ 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。 $\gamma$ 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、 $\beta$ 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。

上記①～③から得られた知見として、ジオメトリ及び線源形状よりも、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を精度よく推定するには、線種の情報が不可欠であることが明らかとなった。一方、光子については、工業・原子力・研究分野で受けるエネルギー範囲では、点線源の場合、距離の逆二乗則でもよい推定を与える一方、 $\beta$ 線被ばくが考慮される場合、本事業で導入した数学ファントムを用いる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の推定は有効であるといえる。これらに加え、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の放射線作業環境のモニタリング試験からは、照射条件が同一の回転照射（ROT照射）条件であっても線源形状により、 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線による体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部等価線量の比が変化することがわかった。十分に広い面線源からの体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が、 $1.22 \pm 0.01$ に対し、同一のROT照射条件で、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 $^{137}\text{Cs}$ 線源を仮定すると、 $0.73 \pm 0.01$ となる。この計算シミュレーション結果は、モニタリング試験の実

験結果をよく再現している。このことから、線源形状もパラメータとして考慮すべきものであることが確認された。

(c) これまで均等被ばく状況とされてきた、等方照射（ISO照射）及び回転照射（ROT照射）条件について、X線・ $\gamma$ 線に対しては、60 keV～6 MeVまでの範囲で、体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の比は0.8～1.4の範囲内に収まっていることが分かった。一方、 $\beta$ 線被ばくに対しては、前掲表4に示す通り、体幹部線量当量を3mm個人線量当量で被ばく線量のモニタリングが行われた場合、1.03～1.07となり、体幹部で得られた線量当量が非常に良い眼の水晶体等価線量の推定値を与えることが分かった。同一線種でもエネルギーが重要である一方で、 $\gamma$ 線で生じる不均等被ばく状況は、ジオメトリを正確に知ること、距離の逆二乗則に従い、体幹部に対する眼の水晶体線量の比を求めることが可能であることが分かった。一方、 $\beta$ 線ではジオメトリから解析的な予測よりも場合によっては体幹部に対する眼の水晶体線量の比は十倍以上大きくなることもある

図6では、本事業での一連の計算シミュレーション及びモニタリング試験の結果に基づく、眼の水晶体線量の比を推定する簡易ツールの提案例である。ここでは、本事業で検証した①線種とそのエネルギーごとの分岐の他、②線源形状及び③ジオメトリを考慮し、計算シミュレーション結果の最小二乗フィッティングで得られた推定値を組み合わせ、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の予測を可能とするものである。放射線作業が実施される段階の計画被ばく線量設計時に、体幹部での被ばく線量は推

定されるため、体幹部線量に体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比である、不均等度指標 ( $HI^{eye}$ ) を乗じ、眼の水晶体線量を推定可能である。なお、モニタリング試験結果を考慮すると、本来であれば、放射線作業が実施される段階の計画被ばく線量設計時に併せて数学ファントムと線源形状を加えた体系を作成して計算シミュレーションを行い、正確な線量推定を行うことが望ましい。

今後の展開としてまず考えられるのは、本事業で提案した簡易推定ツールの精度向上、となる。課題として、本事業の実施期間でできた放射線作業環境に加え、さらにさまざまな状況を想定した計算シミュレーションを行い、可能な限りの放射線作業環

境をカバーできるようにすべきである。また、上記の点についての評価及び検討を継続することに加え、防護資機材着用時の被ばく低減効果を、簡易推定ツールに組み込むことを検討する必要がある。後述の研究結果でも示しているが、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、 $\beta$ 線被ばく時には眼の水晶体線量を大きく低減できる可能性が示された。また、含鉛エプロンも被ばく低減効果の観点で低エネルギー光子には有効である。これらの点については、簡易推定ツールへの導入を考慮すべきである。

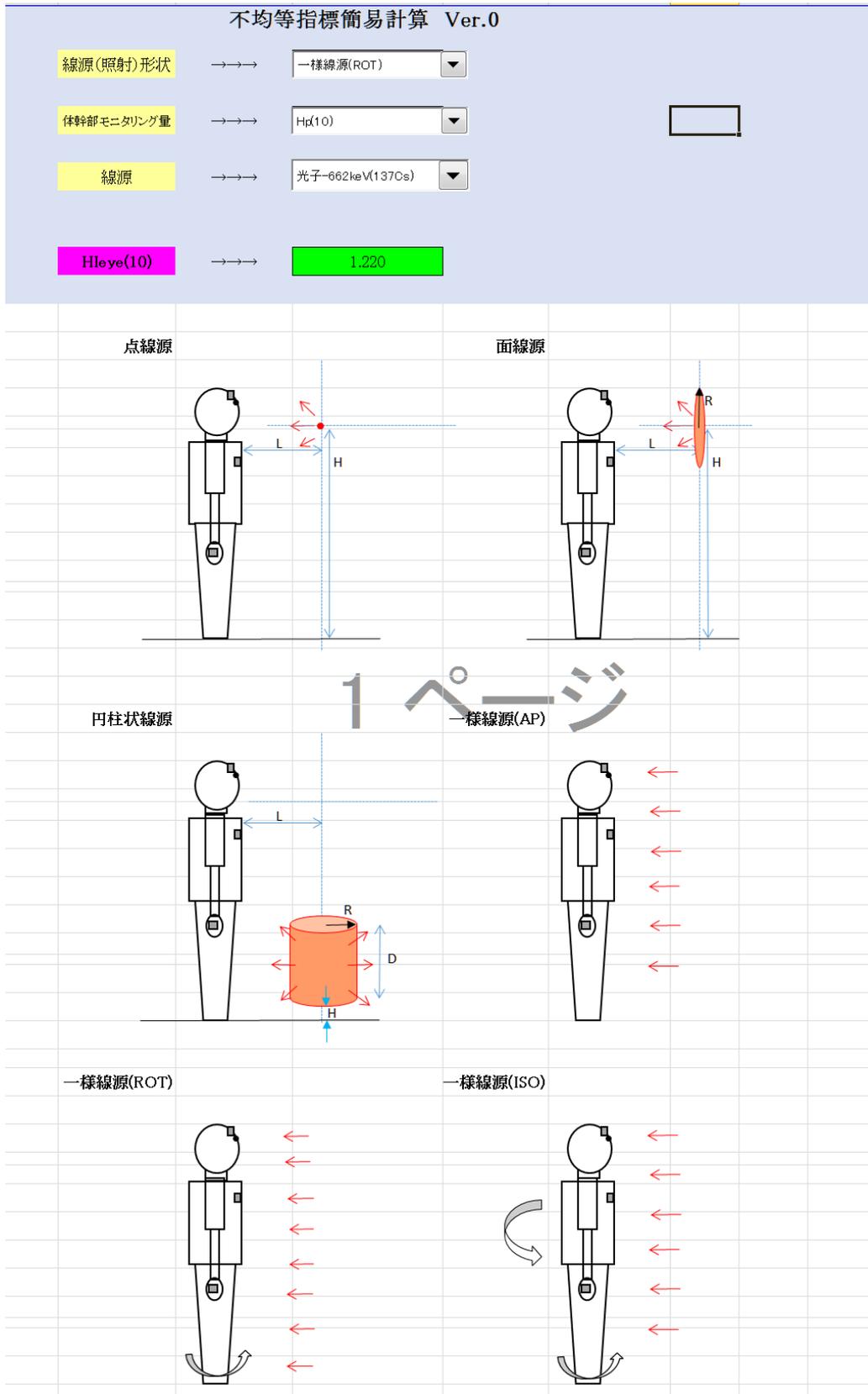


図6 放射線業務従事者の体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の簡易推定ツール (提案例)

(d) 眼の水晶体線量の合理的な推定手法の確立を主眼に置いているが、手指部皮膚等価線量の評価も重要な課題である。平成27年度に実施した工業・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では、手指の被ばく事例が95例中で12例報告されている。手指部被ばくは、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ことから、放射線業務従事者の眼の水晶体被ばく同様に検討すべき課題である。実際に ORAMED プロジェクトにおいても、RI 製剤とそれらを投与する医療従事者の手指部被ばくについて、実態調査、線量低減対策等を提言している [6]。眼の水晶体同様に、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6には、計算シミュレーションと基準 $\gamma$ 線校正場での照射試験による体幹部線量に対する手指部線量の比を示す。照射条件は、 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 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。このことは、眼の水晶体線量のみならず本手法が手指部線量の推定に対しても妥当な評価を与えることを示唆している。

また、点線源を被ばく源として、点線源

とみなせる放射性物質を取り扱う際の被ばく状況を模擬した計算シミュレーションも行った。評価した線源は、 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線源及び $^{90}\text{Y}$   $\beta$ 線源であり、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  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線源で  $2.41 \pm 0.04$  であり、 $^{90}\text{Y}$   $\beta$ 線源で  $3.52 \pm 0.07$  となった。距離の逆二乗則での解析的な推定ではいずれも  $1.78 (=20^2/15^2)$  となる。計算シミュレーションで得られた体幹部線量に対する手指部線量の比は、線種に関わらず大きくなった。また、 $\beta$ 線を用いた場合の手指の末端部線量の方が大きく、この点は前述の(b)で考察した線種の違いによるジオメトリの影響の変化についての結果から考慮しても妥当といえる。

この効果について、簡易物理ファントムを用いた基準放射線校正場での照射試験でより詳細に検討した。表7では、 $\beta$ 線及び $\gamma$ 線点線源を用いた場合の、体幹部線量に対する手指部線量の比の比較を示す。照射試験に用いた線源は、 $^{241}\text{Am}$  及び  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線源、並びに  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$ 線源である。 $\gamma$ 線源を用いた場合には、体幹部表面との距離を80 cmで設置し、 $\beta$ 線源を用いた場合は、体幹部表面との距離を50 cmで設置した。線源と手指との距離については、 $^{241}\text{Am}$  及び  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線源では50 cm、 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$ 線源では20 cmとして測定した。体幹部線量に対する手指部線量の比は、簡易物理ファントムに装着した OSL 線量計の指示値の比

表6 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部等価線量の比

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	
		①Ideal	②OSL	③OSL	④OSL
$^{60}\text{Co}$	Parallel	$1.02 \pm 0.04$	$0.95 \pm 0.05$	$0.97 \pm 0.03$	$0.98 \pm 0.03$

を表している。

**表 7 原子力機構 FRS 基準校正場での照射試験で得られた、体幹部線量に対する手指部線量の比の比較**

眼の水晶体 / 体幹部	HI <sup>ext</sup>
<sup>241</sup> Am	1.39 ± 0.22
<sup>137</sup> Cs	2.17 ± 0.13
<sup>90</sup> Sr- <sup>90</sup> Y	3.05 ± 0.41

距離の逆二乗則での解析的な推定では、 $\gamma$ 線源に対し、2.56 (=80<sup>2</sup>/50<sup>2</sup>) であり、 $\beta$ 線源に対しては、6.25 (=50<sup>2</sup>/20<sup>2</sup>) であり、計算シミュレーションとは異なり、得られた体幹部線量に対する手指部線量の比は、線種に関わらず小さくなった。特に、 $\beta$ 線を用いた場合、解析的な予測から考慮される体幹部線量に対する手指部線量の比は二倍以上となっている。この点は、体幹部線量から手指部線量を推定する場合には、解析的な手法で予測を試みる場合、限定された条件でのみ妥当な線量推定値を与えることを示唆するものである。

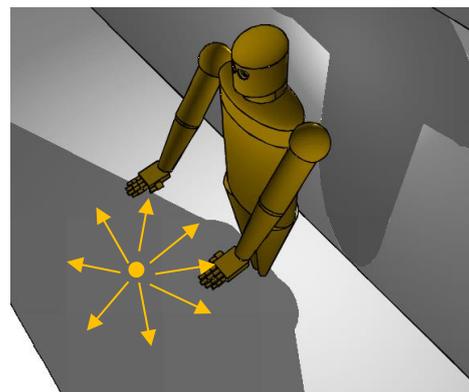
本事業では、簡易物理ファントムに開発した試作 OSL 線量計を取り付け、体幹部で得られる線量当量に対する眼の水晶体及び手指部線量当量の相関を評価することを目的に、放射線作業環境下でのモニタリング試験を行っている。本節では、原子力機構燃料試験施設での不均等被ばく状況を模擬したモニタリング試験で得られた、体幹部線量に対する手指部線量の比のモニタリング試験結果について示す。原子力機構燃料試験施設は、原子力分野で典型的な放射性汚染物である <sup>60</sup>Co、<sup>137</sup>Cs、<sup>90</sup>Sr 等の核分裂生成物からの  $\beta$ 線及び $\gamma$ 線からの被ばくを受ける作業環境であり、原子力施設におけ

る汚染物を取扱う作業による被ばく状況を模擬した。

前掲の表 2 に示した体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、不均等被ばく状況である、原子力施設における汚染物を取扱う放射線作業で得られた結果であり、表 8 では、体幹部線量に対する手指部線量の比について、モニタリング試験の結果とそれを開発した計算シミュレーションにより再現した結果を示している。また、図 7 (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。

**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 <sub>p</sub> (0.07) <sub>ext</sub> / H <sub>p</sub> (10) <sub>trunk</sub>	HI <sup>ext</sup>
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



**図 7 (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)**

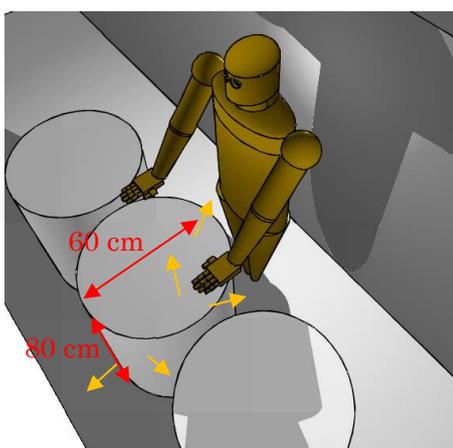


図 7 (b) 原子力機構燃料試験施設における廃棄物取扱い作業模擬に関する計算シミュレーション②のジオメトリ  
(ドラム缶の体積線源を模擬)

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、体幹部に対する手指部線量の比を計算している。線源には  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  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、 $60\text{ cm}^{\phi} \times 80\text{ cm}$  高さの円筒形堆積線源を導入した。この被ばく状況では、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  $3.03 \pm 0.34$  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  $2.20 \pm 0.06$ 、シミュレーション②では  $2.81 \pm 0.09$  となった。体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の場合と異なり、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できた。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。

本事業で実施した計算シミュレーション、基準校正場での照射試験及び放射線作業環境におけるモニタリング試験を通じ、高エネルギー光子に対しては、眼の水晶体線量の場合と同様に手指部線量も、計算シミュレーションにより体幹部線量から妥当な推定値が得られることは明らかとなった。一方で、これまで得られた結果は、 $\beta$  線被ばく時については手指部線量の予測が計算シミュレーションによっても困難であることが示唆するものである。

そこで、本事業において、手指部への追加モニタリングに供することを考慮し、 $\beta$  線による被ばく状況で使用可能な、眼の水晶体及び手指部等価線量モニタリングに適した OSL 線量計を試作した。施策の仮定では、計算シミュレーションにより、 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  線に対する感度を 1 とした場合の、電子線及び連続分布を持つ  $\beta$  線に対する OSL 線量計の相対感度を計算して応答特性を評価した。

表 9 では、OSL 線量計の  $\beta$  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、 $\beta$  線に対する応答特性を評価した。(図 8 参照)

表9 試作及び市販の OSL 線量計の種々のβ線に対する  $^{137}\text{Cs}$  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
$^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$	0.98	1.02
$^{85}\text{Kr}$	0.58	0.26
$^{147}\text{Pm}$	0.15	-



図8 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)

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、 $^{137}\text{Cs}$  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  $^{147}\text{Pm}$  β線に対しても感度を有することが分かった。さらに、 $^{85}\text{Kr}$  β線に対しても応答特性の改善が見られる一方で、 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  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。

図9及び図10では、原子力機構で追加モニタリングに使用している OSL 線量計の指リングと本事業で試作した手指部追加モニタリング用 OSL 線量計の比較と使用例を示している。図9及び図10は着用者の素手に直接取り付けている様子を示しているが、実際の放射線作業時にはこの上から綿手袋、ゴム手袋等により手指を保護されることを記載しておく。



図9 試作 OSL 線量計の着用例



図10 試作 OSL 線量計の使用例(指に2個着用している)

試作した OSL 線量計で特筆すべきは厚みであり、ホルダ部込で約 4 mm となっている。一方、現在利用中の OSL 線量計を用いる指リングは防滴用のケース込で約 8 mm の厚みがあり、これは着用者の作業性を著しく阻害することとなる。図 10 では着用者が試作 OSL 線量計を 2 つ指に取り付けて、ピンセットで薄い板をつかむ、という繊細な作業を、作業性を損なわずに行っている様子を示している。本事業で注目したような、β線のみ適切に線量評価する、あるいは低エネルギー光子成分からの線量評価を確実に行う、という、被ばく源がはっきり特定できる被ばく状況での追加モニタリングで用いる場合、線量計に求められる性能も、β線及び低エネルギー光子成分のモニタリングに適したものをを用いることも一案である。

C-2 (2). 工業・原子力・学術分野における、放射線業務従事者の眼の水晶体被ばく線量の低減化対策に関する検討

本事業では、原子力施設、医療施設等で一般的に用いられている、①含鉛エプロン、②全面マスク及び③放射線防護メガネという放射線防護具を対象とし、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を、計算シミュレーション及び基準校正場での実験により評価した。なお、いずれの防護具も単体で使用することを想定した評価となっており、①含鉛エプロンのみ装着、②全面マスクのみ装着、及び③放射線防護メガネのみ装着、とした。この時、②及び③の条件で、①含鉛エプロンの同時装着は行っていない。(放射線防護の現場では、当然同時に装着しているが、ここでは議論を簡単にするため、防護具の着用を切り分けている。)

表 10 では、光子に対する各放射線防護具装着の有無による、 $HI_{eye}(10)$ の変化を示

表 10 防護具による体幹部線量に対する眼の水晶体線量比( $HI_{eye}(10)$ )の変化

線源及び照射条件		基準校正場での実験			
		防護具無	①含鉛エプロン	②全面マスク	③放射線防護メガネ
AP 照射	N-80	0.84 ± 0.03	3.10 ± 0.03	0.84 ± 0.04	0.62 ± 0.02
	<sup>137</sup> Cs	1.00 ± 0.04	1.11 ± 0.08	1.01 ± 0.13	0.97 ± 0.08
ROT 照射	N-80	0.99 ± 0.04	3.05 ± 0.04	0.93 ± 0.04	0.71 ± 0.03
	<sup>137</sup> Cs	1.11 ± 0.02	1.09 ± 0.03	1.06 ± 0.04	1.05 ± 0.05
線源及び照射条件		計算シミュレーション			
		防護具無	①含鉛エプロン	②全面マスク	③放射線防護メガネ
AP 照射	N-80	0.84 ± 0.01	2.96 ± 0.06	0.81 ± 0.01	0.59 ± 0.01
	<sup>137</sup> Cs	1.02 ± 0.01	1.03 ± 0.03	0.98 ± 0.01	0.97 ± 0.02
ROT 照射	N-80	1.02 ± 0.01	4.04 ± 0.05	0.99 ± 0.02	0.68 ± 0.01
	<sup>137</sup> Cs	1.22 ± 0.01	1.21 ± 0.02	1.16 ± 0.01	1.16 ± 0.04

した。上段には実験値、下段には計算値を示している。どの照射条件、防護具装着条件であっても、 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  線に対しては大きな被ばく線量低減効果が見られなかった。一方で、約 60 keV 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る。含鉛エプロンで着用時は体幹部の線量が小さくなり、結果として  $HI^{eye}(10)$  が増大した。放射線防護メガネ着用時には、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、前述のとおり放射性物質の吸入・経口摂取を防ぐ目的で着用されるものであり、60 keV 程度の外部光子に対してその防護効果は期待できず、計算シミュレーション及び基準校正場での試験結果もそれを反映している。また、ROT 照射及び AP 照射時ともに、③放射線防護メガネの、低エネルギー光子に対する被ばく低減効果が確認できた。このことは、低エネルギー光子が重要な被ばく源となる医療分野の医療従事者は、どのような人員であっても線源周辺に立ち入る作業員に対しては、放射線防護メガネの着用は勧められるものである。一方で、 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  線については、①含鉛エプロ

ンであっても、被ばく低減効果が認められなかった。当然ながら、放射線作業現場で低エネルギー光子成分がほとんどない、という放射線作業環境は稀であるため、①含鉛エプロン装着による被ばく線量低減効果は認められるだろうが、原子力・工業・研究分野で、明確に低エネルギー光子の関与が想定されないケースでは、含鉛エプロンを事前の検討を経ずに放射線業務従事者に装着させることは、放射線業務従事者への心身への過剰な負担となるばかりでなく、放射線作業自体の生産性の観点からも、十分考慮されなければならない。

表 1 1 では、 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$  線に対する各放射線防護具装着の有無による、 $HI^{eye}$  の変化を示す。表 1 0 の光子の場合と同様に、上段には実験値、下段には計算値を示している。照射条件は AP 照射条件とした。表 7 では、 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$  以外にも、 $H_p(3)_{eye} / H_p(0.07)_{trunk}$  及び  $H_p(3)_{eye} / H_p(3)_{trunk}$  を評価した。 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$  では判断が難しいが、 $H_p(3)_{eye} / H_p(0.07)_{trunk}$  で評価された結果を見ると、計算シミュレーションは  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$  線での照射試験を良く再現して

表 1 1 防護具による体幹部線量に対する眼の水晶体線量比( $HI^{eye}$ )の変化

線源及び照射条件	基準校正場での実験		
	防護具無	②全面マスク	③放射線防護メガネ
$H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	76 ± 26	12.6 ± 4.3	8.3 ± 3.0
$H_p(3)_{eye} / H_p(0.07)_{trunk}$	0.44 ± 0.02	0.07 ± 0.01	0.05 ± 0.01
$H_p(3)_{eye} / H_p(3)_{trunk}$	1.01 ± 0.08	0.17 ± 0.01	0.11 ± 0.01
線源及び照射条件	計算シミュレーション		
	防護具無	②全面マスク	③放射線防護メガネ
$H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	1117 ± 102	178 ± 17	107 ± 10
$H_p(3)_{eye} / H_p(0.07)_{trunk}$	0.57 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.054 ± 0.002
$H_p(3)_{eye} / H_p(3)_{trunk}$	0.94 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.09 ± 0.01

いるといえる。このことは、本事業で用いた計算シミュレーションによる体幹部線量からの眼の水晶体線量の比の推定手法が適切に機能していることを補強している。また、 $H_p(3)_{eye} / H_p(3)_{trunk}$  での評価結果から考慮すると、②全面マスク及び③放射線防護メガネのいずれも、眼の水晶体線量の低減効果が認められる。②の全面マスクは、非密封放射性物質からの吸入・経口摂取による内部被ばくが重要となる放射線作業環境で着用されるが、 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$ 線による眼の水晶体外部被ばくに対する被ばく低減効果が著しい。③放射線防護メガネについても、 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$ 線に対して②全面マスクと同程度の被ばく低減効果が確認できた。このことは、たとえ外部被ばく線量のみが考慮される放射線作業環境にあっても、 $\beta$ 線からの被ばくが懸念される場合には、線源周辺に立ち入る放射線業務従事者に対し、放射線防護メガネが着用されることが望ましい。

EURADOS の ORAMED プロジェクト [6]以降、医療分野においても IVR 術者に対する被ばく線量評価に関する研究が盛んに行われている ([13],[14],[15])。本事業で開発した、体幹部線量からの眼の水晶体線量推定の手法を 40 keV の光子に対して適応し、特に③放射線防護メガネの眼の水晶体への被ばく線量低減に対する評価を行った。また、③放射線防護メガネの被ばく

線量低減効果の評価の前に、低エネルギー光子に対する、眼の水晶体線量の評価における線量計着用位置の検討も併せて行っている。

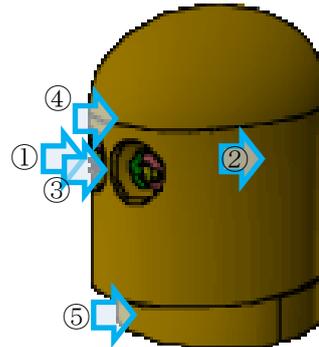


図 1 1 数学ファントムにおける眼の水晶体被ばく線量評価位置

図 1 1 では、数学ファントムにおける眼の水晶体被ばく線量評価位置を示している。本事業で導入した計算シミュレーションでは、眉間の位置で体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を求めており、眉間での吸収線量はエネルギーに依存せず眼の水晶体の線量とシミュレーションにおける統計誤差の範囲で一致することを確認している。IVR で実施される術式、医療現場での放射線管理手法等により、術者頭頸部の様々な位置に追加線量計を取り付けられ、モニタ

表 1 2 眼の水晶体被ばく線量評価位置ごとの眼の水晶体吸収線量の変化

線源及び照射条件	計算シミュレーション 単位(Gy /cm <sup>2</sup> )				
	①水晶体	②眉間	③額	④側頭部	⑤頸部
60 keV Photon parallel AP 照射	0.626 ± 0.014	0.632 ± 0.008	0.631 ± 0.008	0.590 ± 0.012	0.805 ± 0.008

リングが行われている（例えば、IRSN 開発の DOSIRIS™ は側頭部への着用することとなる）。表 1 2 に、数学ファントムにおける眼の水晶体被ばく線量評価位置ごとの単位光子フルエンス当たりの眼の水晶体吸収線量の比を示す。表は、平行ビームの 60 keV 光子が前方-後方照射（AP 照射）条件で入射した際の結果を示す。表に示す通り、眼の水晶体の受ける線量を正確にモニタリングできる箇所は、眉間又は額となる。このことは正面からの放射線被ばくが多い場合には、額に線量計を着用することが妥当な追加モニタリングにつながることを示唆している。一方で、側頭部からの被ばくが多いことが事前に分かっている場合、左右の眼の水晶体被ばく線量が異なるため、少なくともいずれか線源（X線管球側）の方向に線量計が装着されるべきであり、左右の側頭部に計 2 個の追加線量計を一对として用いられることが望ましい。また、頸部では眼の水晶体吸収線量を過大評価する可能性があるため、追加モニタリングとして頸部に線量計を装着するのは、やむを得ない場合を除き、適切とは言えない。

表 1 3 では、40 keV 単色光子に対する③放射線防護メガネ装着の有無による、 $HI_{eye}(10)$ の変化を示した。また、X線の場合と同様に、AP 照射及び ROT 照射時ともに、③放射線防護メガネの低エネルギー光子に対する被ばく低減効果が確認できた。

表 1 3 防護具による体幹部線量に対する眼の水晶体線量比( $HI_{eye}(10)$ )の変化

線源及び照射条件		計算シミュレーション		
		防護具無	③放射線防護メガネ	③放射線防護メガネ (フルフェイス)
AP 照射	40 keV	0.88 ± 0.03	0.32 ± 0.01	0.30 ± 0.01
ROT 照射	40 keV	1.07 ± 0.02	0.19 ± 0.01	0.18 ± 0.01

特に、ROT 照射時における被ばく低減効果が顕著である。③放射線防護メガネによる線量減衰係数(Dose Reduction Factor, DRF)で考慮すると、ROT 照射時では、③放射線防護メガネでは、5.6(=1.07/0.19)となり文献[6]及び[13]で評価された範囲内にある。一方、文献[14]及び[15]では DRF は 2 から 3 で評価されており、術式の対象となる患者及び周辺構造物からの散乱線、並びに X 線源と術者の位置関係等により違いが生じていると思われる。そのため、本事業では、表 9 中に併記した③‘放射線防護メガネ（フルフェイス）の形状の放射線防護メガネの着用も提案する。ROT 照射では市販の③放射線防護メガネと DRF で差がないが、約 20%以下まで眼の水晶体被ばく線量を低減できる効果が期待できる一方、入射方向が特定しづらい、低エネルギー光子を主成分とする散乱線に対し有効に機能すると思われる。

#### C-2 (3). 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の提案

本事業では、特に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した。IAEA-TECDOC-1731 中では、場合分けに応じた適切な線量当量と線量計による個人モニタリング手法が提案されている [9]。

TABLE 3. DOSES DUE TO PHOTON RADIATION

Impact factor	Comment	
A (Energy and angle)	Is the mean photon energy below about 40 keV?	
	If yes ↓ $H_p(0.07)$ may be used but not $H_p(10)$ (see Fig. 6 in Ref. [65] and Fig. 1 in Ref. [66])	If no ↓ Is the radiation coming mainly from the front or is the person moving in the radiation field?
	If yes ↓ $H_p(0.07)$ or $H_p(10)$ may be used (see Fig. 1 in Ref. [66])	If no ↓ $H_p(0.07)$ may be used but not $H_p(10)$ (see Fig. 1 in Ref. [66])
B (Geometry)	Are homogeneous radiation fields present?	
	If yes ↓ Monitoring on the trunk may be used.	If no ↓ Monitoring near the eyes is necessary.
C (Protective equipment)	Is protective equipment such as lead glasses, ceiling, table shields, and lateral suspended shields in use?	
	If used for the eye ↓ Monitoring near the eyes and below the protective equipment or below an equivalent layer of material is necessary. Otherwise, appropriate correction factors to take the shielding into account should be applied.	If used for the trunk (e.g. a lead apron) ↓ Monitoring below the shielding underestimates the dose to the lens of the eye as the eye is not covered by the trunk shielding. ↓ Separate monitoring near the eyes is necessary.

図 1 2 IAEA-TECDOC-1731 [9]で提案された、個人モニタリングに関するスキーム

図 1 2 で、IAEA-TECDOC-1731 で提案された、個人モニタリングに関するスキームを引用する [9]。

IAEA TECDOC-1731 [9]によると、被ばく源となる放射線の線種による場合分けのあと、Impact factor の A から C の順に、条件分岐を行うことを提案している。Impact factor は、(A) 放射線のエネルギーと入射方向、(B) ジオメトリ、(C) 防護資機材の有無、となっている [9]。

本事業において、体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の比を評価する際に事前に考慮したパラメータは、①線種、②線源位置（含む入射方向）、③放射線業務従事者と線源との位置関係（ジオメトリ）、であり、IAEA TECDOC-1731 で示された Impact factor と同じものであった。

①の線種に対して言うと、同一線源位置

及び同一ジオメトリで、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、1.5 MeV の電子及びγ線に対しては、ほぼ一致 (1.01) するのに対し、2.0 MeV の場合で、γ線が 1.03 に対して電子で 1.68 と 65%程度大きくなった。しかしながら、2 倍を超えるものではなかった。エネルギーについては、等方照射 (ISO 照射) 条件では、0.06 ~ 6.0 MeV の広いエネルギー範囲のγ線に対し、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、0.8 ~ 1.4 となり、β線に対しても、体幹部線量を評価する個人線量当量の単位を  $H_p(3)$  とすることで、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は 1.04~1.07 と、ほとんど変化が無いことを明らかとした。これは点線源に対しても同様の傾向がある。

②線源位置（含む入射方向）について、γ線で生じる不均等被ばく状況は、ジオメトリを正確に知ること、距離の逆二乗側に従い、体幹部に対する眼の水晶体線量の比を求めることが可能であることが分かった。一方、β線ではジオメトリから解析的な予測よりも場合によっては体幹部に対する眼の水晶体線量の比は十倍以上大きくなることが明らかとなった。 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  β線に対しては、線源と数学ファントムの中心との距離を 40 cm に固定し、顔の高さを 0cm として、線源の高さを変えたところ、-20 cm ~ 20 cm の範囲で体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が 0.61~14.4 と距離の逆二乗では全く予測できないことが明らかとなった。

同様に、③ジオメトリについて、顔の高さで固定した点線源での前方-後方照射条件についていうと、 $^{137}\text{Cs}$  γ線に対しては体幹部に対する眼の水晶体線量の比は、距離の逆二乗則で解析的に予測できるものとな

る一方で、 $\beta$ 線では、 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  点線源が放射線業務従事者の顔から 30 cm 離れた位置にある場合、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が約 16 となった。これは、 $\beta$ 線被ばくの場合には、距離の逆二乗則からの予測値を大幅に超えることが分かった。

これらの事実は、位置関係と線種は、眼の水晶体線量/体幹部線量の比により影響を与えることが示唆される。ただし、本事業では、あらゆる放射線作業を網羅したわけではないことをあらかじめ述べておく。

一方、IAEA TECDOC-1731 Table 3 [9] での、(B)ジオメトリの「均等被ばく状況か？」という条件分岐に対して、本事業では、「不均等被ばくかどうか」について、不均等度指標を導入し、定量的な議論を行っている。これは、平成 28 年度研究報告書の課題 (2) 及び (3) でも示したが、均等被ばく状況下であっても、放射線業務従事者は X 線・ $\gamma$ 線・ $\beta$ 線に対し「ある程度不均等に」被ばくしていることが明らかとなったためである。ICRP 75「作業者の放射線防護に対する一般原則」では、「作業場においては、放射線場のエネルギー Spektral 方向は一般に良くわかっておらず、個人線量計で測られた測定値の不確かさは著しく大きいであろう。放射線場が均質でなく、方向がはっきりしないことによって、標準モデルの使用には誤差が生じる。関連する線量限度付近の実効線量を推定する際の 95%信頼度での総合的な不確かさは、光子についてはプラスマイナスどちらかの方向についても係数 1.5 となり、エネルギー不明の中性子、及び電子についてはもっとずっと大きくなる。(251)」 [16]、とあり、単色光子による均等被ばく状況であっても、体幹部線量に対する眼の水晶体線量

の比は、1.2 程度と評価されている。体幹部線量をそのまま眼の水晶体等価線量とした場合、実際に受けた水晶体等価線量を約 0.83 倍に小さく見積もることとなる。これは、引用中の「線量限度近傍」の状況を考慮し、放射線業務従事者の眼の水晶体等価線量の線量限度が、年平均 20 mSv と引き下げられた場合、この推定値を用いることで、「意図せずに」線量限度を超える可能性を示唆するものである。

本事業で確立した、放射線業務従事者が放射線業務中に受ける眼の水晶体及び手指部等価線量の推定手法により、均等被ばく状況と事前に考えていても、「均等に被ばくしない」ことが定量的に議論できることになった。同時に、体幹部線量からある精度で眼の水晶体線量を推定できる手法を開発できた。本事業は、現行の個人モニタリング施策において、「どの状況なら放射線業務従事者の眼の水晶体追加モニタリングが必要で、どの場合には必要ないのか」という判断を行う際に、誤った経験則のあてはめや、思い付き、念のため、という、合理的と言えない着想に基づいた追加モニタリング要否の判断を排除することを目標とした。

本事業で提案する、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の提案例を図 13 に示す。なお、本事例についてはあくまで提案の域を出ない。特に個々の数値については、分野ごと事業者ごとにより厳重な管理基準もあることから、それらの管理基準値が適切に導入されることが望ましい。

本事業での提案は、IAEA 及び EU で既に導入された眼の水晶体等価線量の年間線量限度である 20 mSv を基準に、1 か月または一回の放射線作業に係る事前の計画被

ばく線量が体幹部での 1cm 個人線量当量（β線の場合は、3mm 個人線量当量）で線量限度の 3/10 に安全係数として 5 倍をとり、0.1 mSv (= 20 mSv / 12 ヶ月 × 3/10 × 1/5) を越えるかどうかから始め、本事業で体幹部線量と眼の水晶体等価線量の比を示す不均等度指標 ( $HI_{eye}$ ) を導入した分岐で追加モニタリングの要否を決定できるようにした。本フレームワークで眼の水晶体追加モニタリングが不要とされたとしても、本事業で開発された、体幹部線量から眼の水晶体等価線量を推定する手法が開発されているため、放射線業務従事者が眼の水晶体モニタリングのために線量計を着用せずとも、作業後には適切な推定値を提供できることが期待される。

我が国の放射線業務従事者の被ばく状況は、年間 1.00 mSv ~ 5.00 mSv の被ばくを受けた放射線業務従事者が全体の 5.07% (14192 人)、年間 5.01 mSv ~ 10.00 mSv の被ばくを受けた放射線業務従事者が全体の 0.56% (1553 人)、年間 10.01 mSv ~ 15.00 mSv の被ばくを受けた放射線業務従事者が全体の 0.11% (296 人)、年間 15.01 mSv ~ 20.00 mSv の被ばくを受けた放射線業務従事者が全体の 0.03% (72 人)、年間 20.01 mSv ~ 50.00 mSv の被ばくを受けた放射線業務従事者が全体の 0.02% (62 人) とのことであった [7]。仮に眼の水晶体等価線量の年間線量限度が、単年で 50 mSv を越えず、5 年平均で 20 mSv を越えない、という引き下げを導入するとした場合、被ばくの非

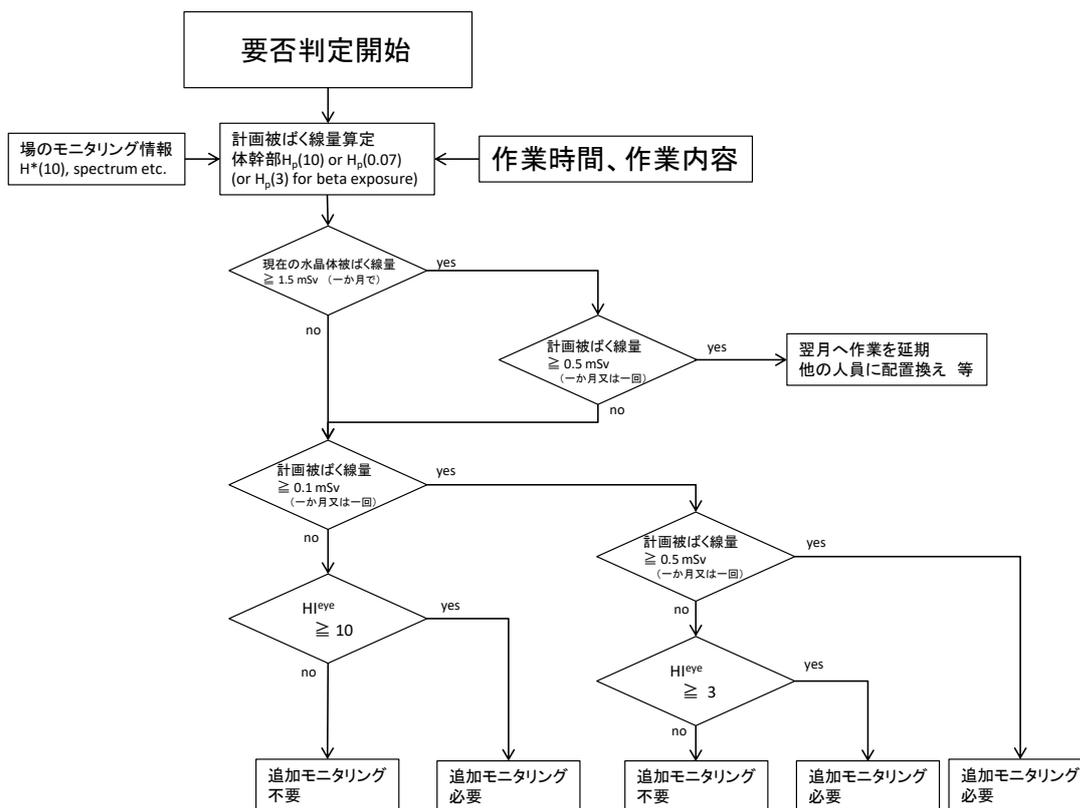


図 1 3 放射線業務従事者の眼の水晶体追加モニタリング要否に係る放射線管理フレームワーク (提案例)

等方性が全く考慮できないが、年平均 20 mSv を越えないようにクライテリアを 5 mSv と想定した場合（実際は 50 mSv /12 か月 = 4.16 mSv となる。）、対象となる放射線業務従事者の被ばくにおける不均等度がクライテリアを超えるとしても、放射線業務従事者全体の 0.71%（1983 人）が追加モニタリングを要求されることになるが、実際はこれより低くなるといえる。このことから、本意思決定フレームワークを導入することで、眼の水晶体等価線量を、体幹部で測定された線量当量からある程度の精度で適切な推定が可能となった。同時に、X線・ $\gamma$ 線に対して言うと、現行の個人モニタリングの施策に基づく放射線管理を大きく変更せずに、追加モニタリングの要否を一義的かつ妥当な判断を下しながら、確実に個人被ばく線量の管理を実施できる枠組みを準備した。なお、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、

「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、現実に即した方法で水晶体の線量を評価すべきである。」[4]

という提言があり、本意思決定フレームワークはこの提言に十分応えるものである。

本意思決定フレームワークで重要となるのは、事前の作業環境モニタリングと放射線作業の事前の決定である。前者で場の線量当量率を求め、後者で作業時間を評価し、それぞれの積が、事前の計画被ばく線量となるためである。これらのある程度精度よ

く評価しておくことで、本事業で提案する意思決定フレームワークは適切に機能する。前者の事前の放射線作業環境モニタリングにおいては、線量計による線量測定と同時に、(a)  $\beta$ 線が支配的な放射線場でないかどうか、(b) 40 keV 以下の低エネルギー光子成分支配的な放射線場でないかどうか、という、線種と放射線のエネルギー情報も十分入手されなければならない。同時に、作業単位での放射線業務従事者の計画被ばく線量算定には積算作業時間の算定が必須である。

なお、本事業で提案したのは、追加モニタリングの要否に関する意思決定であるため、現行の個人モニタリング施策で実施されているとおり、 $\beta$ 線については  $H_p(0.07)$  で皮膚等価線量が評価されるべきであり、40 keV 以下の光子に対しても同様である点はあらかじめ記載しておく。

#### D. 結論及び今後の課題

本事業では、放射線業務従事者の眼の水晶体及び手指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、眼の水晶体及び手指部等価線量を適切に評価する手法を開発した。放射線に起因する白内障発症の疫学研究の結果から、ICRP で出された声明に応じ、IAEA 及び EU では既に眼の水晶体等価線量の年間線量限度を 150 mSv から単年で 50 mSv、5 年で 100 mSv を越えないように引き下げが行われた。我が国の現状では、放射線業務従事者の被ばくは、特に工業・原子力・学術分野における放射線業務従事者は 80% 以上が線量計の検出下限以下の被ばくとなっている。現行の放射線業務従事者への個人モニタリングによると、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、眼の水晶体及び手指部等末端部等価線量は、体幹部で測定された1cm線量当量及び70 $\mu$ m線量当量から適切なものを推定値としている。本事業では、特に眼の水晶体等価線量の線量限度引き下げに、現行の個人モニタリングが対応可能かどうか、どのような点が問題となるか、修正点はあるのか、等に応えることを目的とした。本事業では、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 $\mu$ 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し、放射線業務従事者が放射線業務中に受ける眼の水晶体及び手指部等価線量の予測モデルを構築した。眼の水晶体等価線量については簡易予測ツールの提案まで行った。

本事業における研究期間で遂行したテーマと得られた結論を以下に示す。

(1) モンテカルロ計算シミュレーションに人体模擬数学ファントムを組み合わせ、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評価し、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を開発した。本事業では、我が国の放射線業務従事者の被ばくの要因となる放射線の種類の大部分をカバーする、X線・ $\gamma$ 線及び $\beta$ 線を考慮し、体幹部線量に対する、眼の水晶体及び手指部等価線量がどのような相関が得られるのかに着目した。計算シミュレーションを用いる手法は、人体模擬物理ファ

ントムを用い、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の結果と比較を行い、体幹部線量に対する、眼の水晶体及び手指部等価線量の比が計算シミュレーション及び実験で一致することが確認された。その結果、本手法により、体幹部線量より一義的かつ妥当な眼の水晶体線量が得られることが確認できた。体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部等価線量の適切な推定手法の開発を進める過程で、以下の知見が得られた。

1・(a) 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手指等末端部の等価線量を記述しうるのは、X線・ $\gamma$ 線についてはエネルギーに大きく依存せず、1cm個人線量当量であるが、3mm個人線量当量でも70 $\mu$ m個人線量当量でもある程度精度よく推定可能であった。一方で、 $\beta$ 線被ばくの場合、現行の個人モニタリングで実施される1cm個人線量当量及び70 $\mu$ m個人線量当量での推定は、ほとんど機能せず、極端な過大又は過小評価になることが確認できた。同時に、体幹部を3mm個人線量当量でモニタリングがなされていた場合、体幹部での3mm個人線量当量は良い推定を与える。

1・(b) 本事業で進めた、体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の比を評価する際に事前に考慮したパラメータは、①線種、②線源位置（含む入射方向）、③放射線業務従事者と線源との位置関係（ジオメトリ）、であった。同一線種でもエネルギーが重要である一方で、 $\gamma$ 線で生じる不均等被ばく状況は、ジオメトリを正確に知ることで、距離の逆二乗側に従い、体幹部に対する眼の水晶体線量の比を求めることが可能であることが分かった。一方、 $\beta$ 線では、パラメ

ータによっては、体幹部に対する眼の水晶体線量の比がジオメトリからの解析程な予測結果よりも十倍以上大きくなることがある。

具体的には、①線種については、同一線源位置及び同一ジオメトリで、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、1.5 MeVの電子及び $\gamma$ 線に対しては、ほぼ一致(1.01)し、2.0 MeVの場合で、 $\gamma$ 線が1.03に対して電子で1.68と65%程度大きくなった。②線源位置では、線源と数学ファントムの中心との距離を40 cmに固定し、顔の高さを0 cmとして、線源の高さを変えたところ、 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線の場合では、-15 cm~50 cmの範囲で体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が1.19~3.50と得られ、距離の逆二乗則で解析的に予測できるものとなった。一方で、 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$ 線に対しては、-20 cm~20 cmの範囲で体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が0.61~14.4と、距離の逆二乗では全く予測できないことが明らかとなった。③ジオメトリについて、顔の高さで固定した点線源での前方-後方照射条件についていうと、 $\gamma$ 線に対して $\beta$ 線は、 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ 点線源が放射線業務従事者の顔から30 cm離れた位置にある場合、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が約16となる一方で、 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線では同一の照射条件で3.9であった。 $\beta$ 線被ばくは体幹部の線量計装着部位、眼の水晶体及び線源との位置関係に基づく、単純な距離の逆二乗側で、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が記述できるのに対し、 $\beta$ 線被ばくの場合には、距離の逆二乗則からの予測値を大幅に超えることが分かった。

上記①~③に加えて、照射条件が回転照射条件であっても線源形状により、 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線

による体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部等価線量の比が変化することがわかり、パラメータとして考慮すべきものであることが明らかとなった。

1・(c) これまで均等被ばく状況とされてきた、等方照射(ISO照射)及び回転照射(ROT照射)条件について、X線・ $\gamma$ 線に対しては、60 keV~6 MeVまでの範囲で、体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の比は0.8 ~ 1.4の範囲内に収まっていることが分かった。一方、 $\beta$ 線被ばくに対しては、体幹部線量当量を3 mm個人線量当量で被ばく線量のモニタリングが行われた場合、1.03 ~ 1.07となり、体幹部で得られた線量当量が非常に良い眼の水晶体等価線量の推定値を与えることが分かった。

1・(d) 手指部のモニタリングについて、モニタリング試験で得られた結果と計算シミュレーションによる体幹部線量からの手指部線量の比は不確かさの範囲で一致しており、眼の水晶体線量の場合と同様に、本事業で開発した手法が手指部等価線量についても、体幹部線量から一義的かつ妥当な推定値を与えることが明らかとなった。一方 $\beta$ 線被ばくの場合に対応可能な、手指部追加モニタリング用線量計も試作し、基準 $\beta$ 線校正場での試験から $\beta$ 線被ばく時に適切なモニタリングが可能であることが示された。

(2)について、計算シミュレーションを用いる体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の推定手法と基準放射線校正場での照射試験により、工業・原子力・学術分野で一般的に使用される、防護メガネ、全面マスク、鉛エプロン等の防護資機材の特に眼の水晶体等価線量の低減効果について調

査した。その結果、2-(a) X線に対して、前方-後方照射条件のみならず均等被ばく条件であっても、鉛エプロン及び放射線防護メガネが眼の水晶体等価線量低減に有効である、2-(b) 原子力分野で見られる<sup>137</sup>Cs $\gamma$ 線に対しては、一般的に着用される全面マスク及び放射線防護メガネは照射条件に限らず線量低減の効果は見込めない。ただし、鉛エプロンは有効であろう、及び2-(c) <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y $\beta$ 線源に対して、一般的に着用される全面マスク及び放射線防護メガネは前方-後方照射条件及び均等被ばく条件のいずれについても、約90%の線量低減効果が見込める、という知見が得られた。

上記の結論から得られる低減化対策は以下の施策は有効であると考えられる。

(a) 医療従事者にあつては、眼の水晶体等価線量の低減が見込めるため、放射線業務従事者については可能な限り放射線作業時には放射線防護メガネが着用されることが望ましい。

(b) <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y $\beta$ 線からの被ばくを受ける放射線業務従事者についても、全面マスクが必要ない放射線場での作業を予定する放射線業務従事者についても、可能な限り放射線作業時には放射線防護メガネが着用されることが望ましい。また、全面マスクも $\beta$ 線遮へい効果は高く、可能であれば放射線防護メガネの上から全面マスクを着用できれば、眼の水晶体への被ばくを1/100倍まで低減できる可能性がある。

これらはいずれも、ICRP等で出された声明に従って眼の水晶体等価線量の線量限度が大幅に下がる場合には有効に機能する取り組みと言える。

(c) 追加モニタリングに使用される線量計の着用位置には十分注意が払われるべきで

ある。正面及び均等被ばく状況が考慮される場合、放射線業務従事者の額が望ましい一方で、左右いずれかに線源があることが事前に分かっている場合は、側頭部を対にしてモニタリングすることを検討すべきである。

(3) 本事業では、特に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した。当該意思決定フレームワークは、既に提案されていたIAEA-TECDOC-1731中での意思決定ツールをより具体的にするものである。本事業で提案したものは、IAEA及びEUで既に導入された眼の水晶体等価線量の年間線量限度である20 mSvを基準に、1か月または一回の放射線作業に係る事前の計画被ばく線量が体幹部での1cm個人線量当量( $\beta$ 線の場合は、3mm個人線量当量)で線量限度の3/10をさらに1/5した、0.1 mSvを越えるかどうかから始め、本事業で体幹部線量と眼の水晶体等価線量の比を示す不均等度指標(*HI*)を導入した分岐で追加モニタリングの要否を決定できるようにした。本意思決定フレームワークを導入することで、眼の水晶体等価線量を、体幹部で測定された線量当量からある程度の精度で適切な推定が可能となった。同時に、X線・ $\gamma$ 線に対して言うと、現行の個人モニタリングの施策に基づく放射線管理を大きく変更せず、追加モニタリングの要否を一義的かつ妥当な判断を下しながら、確実に個人被ばく線量の管理を実施できる枠組みを準備した。

本意思決定フレームワークで重要となるのは、事前の作業環境モニタリングと放射線作業の事前の決定である。前者で場の線

量当量率を求め、後者で作業時間を評価し、それぞれの積が、事前の計画被ばく線量となるためである。これらのある程度精度よく評価しておくことで、本事業で提案する意思決定フレームワークは適切に機能する。前者の事前の放射線作業環境モニタリングにおいては、線量計による線量測定と同時に線種と放射線のエネルギー情報も十分入手されなければならない。同時に、作業単位での放射線業務従事者の計画被ばく線量算定には積算作業時間の算定が必須である。

本事業は2か年で終了であるが、今後の展開と解決すべき課題について列挙する。

本事業で対象とした線種は、X線・ $\gamma$ 線・ $\beta$ 線である。放射線業務従事者の被ばくに起因する放射線はこれだけでなく、重粒子及び中性子もある。特に中性子については今後医療分野での放射線治療施設の増加、研究分野での加速器施設の増加等により、医療従事者、研究者、技術者等の放射線業務従事者の中性子による被ばくの機会が増加すると思われる。しかしながら、眼の水晶体等価線量を評価するために必要な知見がほとんどないのが現状である。例えば、中性子による線量計測は他の放射線と比べて特殊であり、線量計測の基準となる物理量が組織等価吸収線量や空気カーマというある物質（空気や組織のような）への沈着エネルギーではなく、中性子束（中性子フルエンス）という単位面積を通過する粒子数で表現する。中性子フルエンス当たりの眼の水晶体に関する3mm個人線量当量が現時点でも公開されていない。同時に適切に眼の水晶体等価線量をモニタリングする個人線量計も存在しない。この点から、特に中性子については、今後の研究の進展が

待たれるところである。

眼の水晶体モニタリング用パッシブ型個人線量計の開発は、様々な機関で精力的に行われているが、手指部モニタリングについては未だ課題も多い。医療分野でも「手技を実施する際に邪魔になるため、できれば着用しないで手技を行いたい」というコメントもある。これは原子力分野においても同様であり、特に緊急時対応で繊細な作業を要求される場合を考慮すると（例として高線量率・高汚染環境下で分電盤内の電気配線を実施する、等）、本事業で試作した手指部モニタリング用パッシブ型個人線量計は、従来利用されていた指リングより小さく、作業性をそこまで損なわない。今後は耐候性及び耐久性の観点での性能向上が必要であると思われる。

本事業で提案した眼の水晶体追加モニタリング可否の意思決定の枠組みでは、事前の体幹部での被ばく線量の予測が最も重要である。本事業で実施したモニタリング試験では、放射線作業が行われる作業環境での1cm周辺線量当量( $H^*(10)$ )と、簡易物理ファントムに取り付けたOSL線量計からの線量当量、及び計算シミュレーションでの結果は、15%以内でお互いに一致している。しかしながら、この結果は特定の放射線作業に対してである。一方、前述のとおり、将来にわたる全ての放射線作業を網羅して評価することは、膨大な人的リソースと時間を費やす代わりに、得られる情報の効用が小さい（数か月かけて事前の計画被ばくを精度よく評価するよりも、実際に放射線作業に着手した方がよい、という場合もあろう）。この点からも、事前の計画被ばくのrough estimationを可能とするツールとして、適切な線量計及びスペクトロメー

タによる作業環境モニタリングと計算シミュレーションを組み合わせてパッケージとし、このツールの有効性について、原子力分野のみならず、医療分野での被ばくに対しても検証されることが望ましい。

どの分野の放射線業務従事者に対しても、眼の水晶体追加モニタリングを適切に行えるようガイドラインとそれに伴う講習、並びに放射線作業の現場での教育訓練が徹底される必要がある。これらの整備は、本事業で対象の範囲外であったが、医療分野においては包括的なガイドラインが既に整備済みである [12]。また、教育訓練の内容に関する指針についても ORAMED プロジェクトで既に検討されている [6]。同様の取り組みが、工業・原子力・研究分野でもなされるべきであるが、先行する医療分野での取り組みを分野ごとにアレンジして導入することも念頭においてよいと思われる。

原子力分野での放射線業務従事者のβ線被ばくは喫緊の課題であり、特に眼の水晶体への意図しない被ばくに対しこれまで以上に注意が払われてきている。β線被ばく時に、体幹部線量からの眼の水晶体等価線量の推定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。」 [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 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おくことは重要である。一方で、β線被ばくが事前に想定されているのであれば、3mm 個人線量当量で妥当な線量当量を与える個人線量計を使用してモニタリングがなされるべきであろう。

#### E. 健康危機情報

なし

#### F. 研究発表

##### 1. 論文発表

H. Yoshitomi et al. “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

H. Yoshitomi et al. “Inhomogeneity of eye lens exposure from <sup>241</sup>Am and <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y in nuclear industries”, Radiation Protection Dosimetry 誌、投稿準備中

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

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 14<sup>th</sup> international congress of the International Radiation Protection Association (May 2016, Cape Town, South Africa)

Munehiko Kowatari et al. “Proposal of Framework for Decision Making of Additional Monitoring of Eye Lens Dose for Radiation Workers”, 9<sup>th</sup> International Symposium On Radiation Safety and Detection Technology (July 2017, Nagoya, Japan)

#### 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] International Atomic Energy Agency (IAEA). Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3.

[2] European Union (EU). Basic safety standards for protection against the

dangers arising from exposure to ionizing radiation. Council Directive 2013/59/EURATOM.

[3] NCRP Commentary No. 26 - Guidance on Radiation Dose Limits for the Lens of the Eye (2016). ISBN 978-0-913392-17-1.

[4] 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)

[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] ORAMED: Optimization of Radiation Protection of Medical Staff, EURADOS Report 2012-02. ISBN 978-3-943701-01-2.

[7] 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) .

- [8] R. Behrens and G. Dietze; Monitoring the eye lens: which dose quantity is adequate? *Phys. Med. Biol.*, 55 (2010), 4047-4062  
doi:10.1088/0031-9155/55/14/007
- [9] International Atomic Energy Agency (IAEA). implications for occupational radiation protection of the new dose limit for the lens of the eye. IAEA-TECDOC-1731. (2013), ISBN 978-92-0-115213-8.
- [10] 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).
- [11] 原子力規制庁; access at <https://www.nsr.go.jp/data/000182221.pdf>  
Available on 31st-March-2017
- [12] 循環器診療における放射線被ばくに関するガイドライン (2011 年改訂版)  
Access at: [http://www.j-circ.or.jp/guideline/pdf/JCS2011\\_nagai\\_rad\\_h.pdf](http://www.j-circ.or.jp/guideline/pdf/JCS2011_nagai_rad_h.pdf)  
Available on 31<sup>st</sup>-March-2017
- [13] Hu Panpan et al. ; Shielding effect of lead glasses on radiologists' eye lens exposure in interventional procedures, *Radiat. Prot. Dosim.*, (2016), 1-5  
doi:10.1093/rpd/ncw098
- [14] Sumi Yokoyama et al. ; Evaluation of eye lens doses of interventional cardiologists, *Radiat. Prot. Dosim.*, 173(2017), No.1-3, 218 - 222  
doi:10.1093/rpd/ncw321
- [15] Yoshihiro Haga et al. ; Scientific Reports, 569, No. 7 (2017), 1-7  
doi:10.1038/s41958-017-00556-3
- [16] ICRP, 1997. General Principles for the Radiation Protection of Workers. ICRP Publication 75. *Ann. ICRP* 27 (1).

## Ⅱ．研究成果の刊行に関する一覧表

研究成果の刊行に関する一覧表  
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  
(150801-01)

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)

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書籍名	出版社名	出版地	出版年	ページ

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
H.Yoshitomi, M. Kowatari, T. Ohishi	Estimation of homogeneity of exposure in terms of eye lens and extremity monitoring prior to radiation works in the nuclear sector	Radiation Protection Dosimetry			
H.Yoshitomi, M. Kowatari, T. Ohishi	Inhomogeneity of eye lens exposure from <sup>241</sup> Am and <sup>90</sup> Sr/ <sup>90</sup> Y in nuclear industries	Radiation Protection Dosimetry			
M. Kowatari, H. Yoshitomi	Evaluation of inhomogeneity of exposure to radiation workers encountered in nuclear industry and research accelerator facility	RADIOISOTOPES			

\*: 投稿準備中