

労災疾病臨床研究事業費補助金事業

総合研究報告の概要

研究課題名（課題番号）：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

1. 研究目的

本研究は、特に原子力・工業・学術分野における、放射線業務従事者の受ける体幹部、眼の水晶体及び手指部の被ばく線量の相関について調査し、体幹部線量から適切な眼の水晶体及び手指部等価線量評価手法を開発し、合理的な低減対策を提案するものである。国際放射線防護委員会（ICRP）からの勧告を受け、国際原子力機関（IAEA）の策定する国際基本安全基準（BSS）では、放射線業務従事者の水晶体の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。さらにヨーロッパ連合（EU）でも同一の線量限度が導入され、米国でも眼の水晶体線量限度の引き下げが検討されている。我が国の個人モニタリングの現状では、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（1cm線量当量及び70 μ m線量当量）から、いずれか適切な値を、眼の水晶体等価線量の推定値としているが、体幹部で測定した線量（以下、「体幹部線量」という。）では眼の水晶体等価線量を過小評価しうる被ばく事例があり、特に原子力分野では、このような被ばく事例は十分評価されてこなかった。

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。事業実施期間の二年間で、体幹部線量から水晶体及び手指部の組織等価線量の合理的な線量評価手法を確立し、喫緊の課題である放射線業務従事者の眼の水晶体被ばくの低減化対策について提言すると同時に、眼の水晶体被ばくに対する追加モニタリングの可否を一義的かつ適切に判断できる放射線管理フレームワークを提案する。

2. 研究方法

本事業実施期間の二年間で、喫緊の課題である放射線業務従事者の眼の水晶体被ばくに特に重点を置き、以下の項目に沿って研究を進めた。

（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

モンテカルロ計算コードPHITSに人体模擬数学ファントムを導入して放射線業務従事者を模擬し、体幹部線量と眼の水晶体及び手指部等価線量との関係について評価した。評価では、 β 線・ γ 線・X線に対し、形状等の種々の線源条件、照射条件等の線源と放射線業務従事者の位置関係を考慮した。また、簡易物理ファントムを製作し、試作OSL線量計を取り付けて基準校正場、並びに実際の核燃料施設及び加速器施設の放射線作業環境において、実験的に妥当性を検証した。

(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

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、国内の学術論文及び研究報告、並びに海外の放射線管理実務者のとの情報交換で得られた、工業・原子力・学術分野での不均等被ばく状況での被ばく線量低減化事例を参考に、(1)で開発した手法に基づき放射線防護資機材の被ばく低減効果を検証した。被ばく低減効果の検証結果より、放射線業務従事者の被ばく低減化対策を提言する。

(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)の成果を受け、眼の水晶体被ばくに対する追加モニタリングの要否を一義的かつ適切に判断できる放射線管理フレームワークについて、放射線作業における事前の計画線量と体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を組み合わせて判断基準に用いる管理手法について提案し、適応可能性を検証した。

3. 研究成果

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、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。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推定しうるのは、X線・ γ 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 及び 70 μ m 個人線量当量のいずれの線量当量単位でもある程度精度よく推定できた。一方で、 β 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 μ 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、体幹部において 3mm 個人線量当量がモニタリングされていた場合、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線源と放射線業務従事者との位置関係(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、 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、 β 線の場合、体幹部に対する眼の水晶体線量の比はジオメトリから解析的な予測よりも十倍以上大きくなる場合がある。

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・ γ 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、 β 線被ばくに対しては、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。

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 ^{137}Cs γ 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) ^{90}Sr - ^{90}Y β 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として、以下の施策は有効であると考えられる。

(a) 特に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、低エネルギー光子が被ばく源となる放射線作業環境で業務に従事する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) ^{90}Sr - ^{90}Y β 線からの被ばくを受ける放射線業務従事者については、全面マスクが必要な放射線場での作業を予定する放射線業務従事者であっても、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 β 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には有効に機能する取り組みと言える。

(c) 眼の水晶体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に着用するのが望ましいが、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。

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（ β 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開始し、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、眼の水晶体被ばくに関する追加モニタリングに係る適切な意思決定に併せて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 線に関しては、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。

4. 今後の展開及び解決すべき課題

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。

①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。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。

②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。

③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薄く軽量で小型であり、作業性を著しく損なわない。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。

以上