

労災疾病臨床研究事業費補助金

不均等被ばくを伴う放射線業務における
被ばく線量の実態調査と線量低減に向けた
課題評価に関する研究

令和2年度 総括・分担研究年度終了報告書

研究代表者 櫻田尚樹

令和3(2021)年3月

I. 総括研究年度終了報告

不均等被ばくを伴う放射線業務における被ばく線量の実態調査と線量低減に向けた課題評価に関する研究

櫻田尚樹 ----- 1

II. 分担研究年度終了報告

1. 労働安全衛生マネジメントシステムの応用した医療機関における放射線防護マネジメントシステム導入支援プログラムの開発

森 晃爾 ----- 15

2. 全国の医療機関を対象にした個人被ばく線量計の装着状況調査

盛武敬・松崎 賢 ----- 25

3. 水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査(医療分野の放射線の計測評価と被ばく防護) 千田浩一 ----- 33

4. 循環器内科医師における眼の水晶体の職業被ばくの実態調査

小野孝二・山口一郎・櫻田尚樹 ----- 52

5. 臨床現場における、医療スタッフの被ばく線量の測定

小野孝二・山口一郎・櫻田尚樹 ----- 59

6. 学術分野における放射線業務従事者の眼の水晶体等価線量の適切な評価に関する研究 古渡意彦 ----- 69

7. 医療従事者の眼の水晶体等価線量評価のための実用量測定に使用する線量計校正に関する研究 古渡意彦 ----- 87

8. 医療従事者の眼の水晶体被ばく線量評価のための血管造影装置等からの散乱X線スペクトル測定 古渡意彦 ----- 105

9. 産業・学術分野における放射線業務従事者のβ線放出核種による眼の水晶体等価線量の適切な評価に関する研究 古渡意彦 ----- 115

10. 海外諸国の眼の水晶体の線量限度の引き下げの法令への取入れの現状把握に関する研究 小野孝二・山口一郎・志村勉・櫻田尚樹 ----- 131

参考資料：永元啓介 博士論文 ----- 165

茂呂田孝一 博士論文 ----- 222

III. 研究成果の刊行に関する一覧表 ----- 271

I. 総括研究報告

不均等被ばくを伴う放射線業務における被ばく線量の実態調査と
線量低減に向けた課題評価に関する研究

研究代表者 櫻田尚樹 産業医科大学産業保健学部 教授

研究要旨

国際放射線防護委員会（ICRP）による眼の水晶体等価線量の年間限度を 150 mSv から 5年平均で年間 20 mSv となる引き下げ勧告、またその勧告の国際原子力機関（IAEA）一般的安全要件（GSR；General Safety Requirements）への取入れを受け、適切な放射線防護体系の運用の観点からも、新しい線量限度の国内規制取入れが急務とされた。

国内では放射線審議会が議論を進め、2018年2月に、取り入れることが適当であるとする「眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について」報告書を取りまとめ、同年3月に各行政機関に意見具申を行った。リスク管理機関として厚生労働省では労働安全衛生法・電離放射線障害防止規則（電離則）の改正を検討するために2018年12月に「眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会」を立ち上げ、検討を進めてきた。本研究班からは、様々なエビデンスを検討会に提示し、2019（令和元年）9月に検討会報告書が取りまとめられた。2019年12月23日第147回放射線審議会において、厚労省からの諮問に対し、国内法令への取り入れは妥当であるとされたが、同時に医療分野では、線量管理が杜撰であることが判明し線量管理を徹底させるための必要な措置を講じること、および、新しい水晶体の等価線量限度を超過する恐れが残されている現状から経過措置をとるが、その間にも被ばく状況等を把握し報告すること、が附帯事項とされた。これらの審議ののち、電離則は2021年（令和3年）4月1日から改正施行実施されることとなった。

研究班では、新しい線量限度導入に向けて、包括的な線量評価・モニタリング法の開発、実態の評価、放射線利用の最適化や保護具着用の効果、線量計装着実態の評価と課題の整理などを検討してきた。

本研究・調査の実施にあたっては、厚生労働省・文部科学省の「人を対象とする医学系研究に関する倫理指針」にもとづき、産業医科大学および国立保健医療科学院、関係機関における倫理委員会に申請・承認を経て実施した。

なお、厚労省検討会では、国が実施すべき支援事業が提示され、その一つとして「労働安全衛生マネジメントシステム等の取組を着実に進め、安全衛生管理体制を確立するための支援を行うことが望ましい。」とされた。これを受けて今年度実施された、「放射線被ばく管理に関する労働安全衛生マネジメントシステム導入支援事業」に、本研究班が開発した研修資料（詳細は総合報告書に掲載）がそのまま利用されるとともに、研究班として支援研修の支援を行なった。令和3年4月より電離則が改正されるが、法令遵守に加え、被ばく線量低減に向けてマネジメントシステム等を応用したさらなる自主管理が望まれる。

研究分担者

盛武 敬	産業医科大学 産業生態科学研究所 放射線衛生管理学准教授
森 晃爾	産業医科大学 産業生態科学研究所 産業保健経営学 教授
千田浩一	東北大学 災害科学国際研究所 災害放射線医学分野 教授
古渡意彦	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 高度被ばく医療センター 計測・線量評価部 物理線量評価グループ グループリーダー
小野孝二	東京医療保健大学 東が丘・立川看護学部 教授
山口一郎	国立保健医療科学院 生活環境研究部 上席主任研究官
志村 勉	国立保健医療科学院 生活環境研究部 上席主任研究官

研究協力者

中上晃一	産業医科大学産業生態科学研究所放射線衛生管理学
永元啓介	産業医科大学産業生態科学研究所放射線衛生管理学
酒井洸典	産業医科大学産業生態科学研究所産業保健経営学
末吉尚純	産業医科大学産業生態科学研究所産業保健経営学
大橋秀晃	産業医科大学 産業医実務研修センター
茂呂田孝一	産業医科大学産業生態科学研究所放射線衛生管理学
松崎 賢	産業医科大学産業生態科学研究所放射線衛生管理学
阿部利明	産業医科大学アイソトープ研究センター
稲葉洋平	東北大学災害科学国際研究所 助教
新井知大	駒澤大学
若松和行	国立国際医療研究センター病院
栗原恵一	国立国際医療研究センター病院
大塚 駿	国立国際医療研究センター病院
篠ヶ瀬智	国立国際医療研究センター病院

A. 目的

原子力施設・医療施設等、従事者が受けている眼の水晶体の被ばく及び防護の実態を把握するとともに、線量の適切な推定方法を確認することで、水晶体等価線量の引き下げを国内法令に導入するに資することを目的とする。初年度には新線量限度取り入れに関する海外の動向を精査するとともに、初年度および2年度を中心に簡便な線量算出方法を開発し、放射線業務従事者の被ばく線量を測定することで、効果的な防護最適化に関する基盤技術を確認した。最終的に様々な放射線場における基礎データを計算と測定により揃えとともに、規制の最適化を考慮した“放射線防護マネジメントシステム”を提唱する。

本研究班では、放射線防護・管理の専門家だけでなく、産業保健の専門家、行

政経験を有する専門家等幅広い分野の分担研究者とともに上記課題の解決を目指す。

最終年度は、放射線防護マネジメントシステムの導入支援プログラムの開発と支援のための研修提供を中心に、現場での測定評価法の開発と実際の測定を通じたエビデンスの提供を目指した。

B. 研究方法

1. 医療機関における放射線防護マネジメントシステム導入支援プログラムの開発

前年度の研究において、医療機関において放射線防護の推進に労働安全衛生マネジメントシステム(OHSMS)を応用した、放射線防護マネジメントシステム(Radiation Protection Management System; RPMS)の文書体系を基本に、研修を通じてRPMSの導入を支援するためのプログラムの開発を

行った。

RPMS 導入支援プログラムは、医療機関の放射線防護管理の担当者が、研修を通じてマネジメントシステムの概要および RPMS の各要素を理解するとともに、提供したモデル文書体系を各医療機関において自機関に合った形で修正し、文書体系の大枠を完成できることを目標とした全3回の研修プログラムを作成した。いくつかの参加条件を満たす医療機関を選定して、Web 会議方式での研修を行った。研修の評価のために、参加者から理解度、ワークの満足度、その他自由意見を聴取した。また、研修終了2ヶ月後に、実施状況の調査を行った。

2. 全国の医療機関を対象にした個人被ばく線量計の装着状況調査

電離放射線障害防止規則において、放射線業務従事者には線量測定が義務付けられているものの、適切に実施されていない事例が散見される。そこで本調査の目的は、全国の医療機関において、個人被ばく線量計の装着実施状況を把握することとした。

全国の各医療機関に従事する放射線業務従事者を対象とした。調査員は各医療機関よりホームページ上で公募し、各医療機関の放射線業務における個人線量計装着状況を目視で調査した。結果は、郵送もしくはメールにて回収し解析を行った。調査期間は2020年1月27日から5月9日の中から選択された任意の一日とした。調査項目は、①観察日、②診療科、③職種、④観察場所、⑤放射線業務従事者登録状況、⑥個人被ばく線量計（胸・腹部）装着状況、⑦個人被ばく線量計（頭・頸部）装着状況、⑧個人被ばく線量計（手指）装着状況の8項目とし、選択式回答形式とした。また、得られた個人被ばく線量計装着状況より、装着率を算出した。

3. 水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査(医療分野の放射線の計測評価と被ばく防護)

3-1. 心臓IVRでの水晶体線量の詳細評価

心臓 IVR（経皮的カテーテル冠動脈インターベンション、percutaneous coronary intervention；PCI）での水晶体線量の詳細評価を行った。

使用機器として、小型素子システムは Dose Ace（千代田テクノル）である。ガラス線量計素子は GD-352M であり、低エネルギー補償フィルタ付きホルダ（寸法 $\Phi 4.3 \times 14.5$ mm）を用いた。ガラス線量計リーダーは FGD-1000、読み取りマガジンは FGD-M151、アニール用電気炉は NEW-1CT、アニール用マガジンは FGD-C101、プレヒート用恒温器は DKN302、プレヒートトレイは FGD-C102 を用いた。

3-2. 心臓 IVR に従事する看護師の水晶体線量の詳細評価

測定対象は、心臓 IVR に従事する看護師であり、無作為に ABL（Ablation、カテーテルアブレーション）および PCI について測定を実施した。看護師の線量測定は、ABL については1検査ごと、PCI については1検査もしくは2検査以上の合算で評価した。

3-3. 気管支鏡検査での水晶体線量の詳細評価（医師、看護師）

気管支鏡検査の手技は仰臥位で行われ、光ファイバー気管支鏡（BF-P240、BF-260、BF-P260F、BF-P260F-0L8、Olympus、Japan）を用いた。局所麻酔下で行われ、スコープは経口的に挿入された。

検査に携わった8名の医師と3名の看護師の眼の被ばく線量は、線量計を使用して1か月間隔で測定した。この期間内累積6か月の眼の被ばく線量も計算した。手技中、スタッフは常に防護エプロン（通常は0.35mm鉛当量）を着用していたが鉛防護メガネは着用していなかった。

3-4. ポータブル撮影での水晶体線量の 詳細評価（放射線技師）

水晶体用線量計を使用し、実際に臨床でポータブル X 線撮影に従事する放射線技師の水晶体被ばく線量の測定、評価を行った。

使用した線量計は 3mm 線量当量の測定が可能な水晶体用線量計 DOSIRIS（千代田テクノロジー）およびガラスバッジ（千代田テクノロジー）である。

4. 循環器内科医師における眼の水晶体 の職業被ばくの実態調査

国立研究開発法人国立国際医療研究センター病院の循環器内科に所属する放射線業務従事者として登録される医師（5 名）を対象とした。モニタリング対象医師に対し、眼の水晶体被ばくに関する意識調査、長瀬ランダウア株式会社が 2021 年 4 月に運用開始を予定しているビジョンバッジ及びナノドット線量計を使用した眼の近傍の個人線量評価、及び着用所感等のヒアリング調査を実施した。

5. 臨床現場における、医療スタッフの 被ばく線量の測定

前項と同様の手法を用いて、循環器内科の冠動脈造影（以下 CAG：Coronary Angiography）および経皮的冠動脈インターベンション（以下 PCI：Percutaneous Coronary Intervention）に関わる医師、診療放射線技師、造影 CT 検査で介助に関わる医療スタッフ、腎臓内科で血液透析用バスキュラーアクセスのインターベンションによる修復（以下 VAIVT：Vascular Access Intervention Therapy）に関わる医師を対象に、検査・手技中における線量測定を行った。

6. 学術分野における放射線業務従事者 の眼の水晶体等価線量の適切な評価

学術分野における加速器施設で放射線業務に従事する放射線業務従事者について、

体幹部で評価された線量から眼の水晶体等価線量が推定可能かについて検討した。

7. 医療従事者の眼の水晶体等価線量評 価のための実用量測定に使用する線量計校 正に関する研究

放射線業務従事者の水晶体等価線量算定に用いられる線量計の校正に関する国際規格 IEC 及び ISO で策定された放射線業務従事者の眼の水晶体被ばくに関連した規格に着目し、昨年度の調査に引き続き本研究班で用いられているガラス線量計についての仕様を文献により確認するとともに、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構原子力科学研究所 放射線標準施設棟においてエネルギー特性試験を継続した。それらの結果から、ガラス線量計指示値からの 3mm 線量当量を「正しく」評価するために不可欠な校正定数を与える手法について検討した。

8. 医療従事者の眼の水晶体被ばく線量 評価のための血管造影装置等からの散乱 X 線スペクトル測定

本調本調査では、特に医療従事者の眼の水晶体等価線量算定に用いられる線量計について適切な校正定数を得るために必要な、医療従事者が行為等で作業する位置での主たる被ばく源となる血管造影装置等からの被検者、周辺構造物等により散乱されて発生する散乱 X 線成分について、CdTeZn 検出器により波高分布を取得した後、アンフォールディング法により X 線スペクトルを求めた。

計測回路一体型 CdTeZn 検出器に適切な鉛コリメータを取り付け、血管造影装置及び X 線透視装置における術者の眼の位置での散乱 X 線成分を測定した。得られた波高分布から推定される散乱 X 線の平均エネルギーは、血管造影装置で 45 keV、X 線透視装置で 43 keV であった。一方で、散乱 X

線スペクトルから推定される散乱 X 線の平均エネルギーは、血管造影装置で 46 keV、X 線透視装置で 42 keV であった。

9. 産業・学術分野における放射線業務従事者のβ線放出核種による眼の水晶体等価線量の適切な評価に関する研究

本調査では、β線放出核種にばく露する放射線業務従事者について、体幹部で評価された線量と眼の水晶体等価線量との関係を求め、眼の水晶体等価線量の適切な評価が可能か検討した。研究分担者らが以前開発した人体模擬数学ファントムを用い、β線による被ばくが優位となる放射線作業を模擬して、眼の水晶体線量が体幹部で観測される線量当量に対しどの程度になるか評価した。

10. 海外諸国の眼の水晶体の線量限度の引き下げの法令への取入れの現状把握に関する研究

海外当局での対応事例として、2000 年以降で 2021 年 3 月 1 日までに報告のあった各国の医療施設で発生した国際原子力・放射線事象尺度 (INES:The International Nuclear and Radiological Event Scale) レベル 2 以上の事故について調査した。

(倫理面への配慮)

本研究・調査の実施にあたっては、厚生労働省・文部科学省の「人を対象とする医学系研究に関する倫理指針」にもとづき、産業医科大学および国立保健医療科学院あるいは各分担者機関における倫理委員会に申請・承認を経て実施した。

利益相反情報は必要に応じて各研究機関の COI 委員会の審査を受けた。

C. 研究結果

1. 医療機関における放射線防護マネジ

メントシステム導入支援プログラムの開発

1-1. 研修プログラムの開発

1) 全体構成

マネジメントシステムによって PDCA が廻る状況を達成するために、計画、開発、導入、運用、運営、改善というフェーズがある。本研修では、導入準備が整うまでの範囲が対象となる。そこで、研修の構成要素を、以下の 15 項目とした。

- ① マネジメントシステムの基本
- ② 放射線防護リスクマネジメント手法
- ③ 変更の管理
- ④ 緊急事態への準備及び対応
- ⑤ インシデントおよび不適合への対応と是正処置
- ⑥ 法令およびその他の要求事項の順守
- ⑦ 放射線管理体制
- ⑧ 文書化・文書体系
- ⑨ 年間目標の策定
- ⑩ 計画の設定
- ⑪ 研修・資格者育成計画
- ⑫ 内部監査の基本
- ⑬ 内部監査計画の策定
- ⑭ 内部監査の実施/報告書の作成
- ⑮ システム改善計画

第 1 回研修会

このうち、第 1 回では①～⑧の解説と、以下の 3 つのワークを行うこととした。

ワーク 1-1 基本方針で示された事項を達成するために必要な活動① (リスク低減)

ワーク 1-2 基本方針で示された事項を達成するために必要な活動② (法令等の順守)

ワーク 1-3 システムマニュアルに必要な下位文書

そのうえで、以下の 3 項目の宿題を提示することとした。

宿題 1-1 基本方針案の策定

宿題 1-2 体制案の策定

宿題 1-3 文書体系案の策定 (テンプレー

ト)

第2回研修会

第2回では、第1回の復習および宿題の検討を行った上で、新たに項目⑨～⑫について解説を行うこととした。この中で、以下の3つのワークを行うこととした。

ワーク 2-1 基本項目に相当する評価指標（被ばく低減）

ワーク 2-2 RPMS を運用する上で必要な研修および資格者

ワーク 2-3 一般の放射線業務従事者に必要な導入教育の項目

そのうえで、以下の5項目の宿題を提示することとした。

宿題 2-1 基本方針の完成

宿題 2-2 前回宿題の文書類の完成

宿題 2-3 目標の作成

宿題 2-4 年間計画書の作成

宿題 2-5 追加文書類の作成（テンプレートを利用）

第3回研修会

第3回では、第2回の復習および宿題の検討を行った上で、新たに項目⑬～⑮について解説を行うこととした。この中で、以下の3つのワークを行うこととした。

ワーク 3-1 内部監査においてシステムの妥当性、実行性、有効性を評価するためのチェックリストの作成

ワーク 3-2 監査報告書の作成（映像および記録をもとに）

ワーク 3-3 事例を基にした改善策の検討

研修を実施した際のアンケート結果では、講義の理解度およびグループワークの満足度とも、高い評価が得られた。また、研修後には多くの機関で何らかの放射線防護管理の改善が行われ、組織体制や文書体系の準備が行われていた。

2. 全国の医療機関を対象にした個人被ばく線量計の装着状況調査

全国79名の調査員より、1348名の調査結果を得た。放射線業務従事者として90%以上が登録、管理されており、均等被ばく管理と不均等被ばく管理の比率は、ほぼ同等であった。また、全職種の個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率は65.3%であった。職種別では診療放射線技師が高く、医師が最も低かった。そのうち医師の診療科における個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率では放射線科が高く、整形外科が最も低かった。また、観察場所における個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率は一般撮影室が高く、手術室が最も低かった。その他、全職種における不均等被ばく管理下の個人被ばく線量計（頭・頸部）装着率は53.2%であり、個人被ばく線量計（手指）はほとんど利用されていなかった。

3. 水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査(医療分野の放射線の計測評価と被ばく防護)

3-1. 心臓IVRでの水晶体線量の詳細評価

治療部位（RCA、LAD、LCX）ごとに分けて検討した結果、PCI医師においては、各患者パラメータなどの装置表示値から水晶体線量を推定するのは困難であった。そのため、正確な水晶体線量を把握するためには実際に線量計を装着して測定するべきである。

3-2. 心臓IVRに従事する看護師の水晶体線量の詳細評価

ABL（Ablation、カテーテルアブレーション）に関しては右眼の線量が最も高い結果となり、PCIに関しては位置（左、中央、右）の違いで大きな差はない結果となった。

3-3. 気管支鏡検査での水晶体線量の詳細評価（医師、看護師）

医師では、20mSv/年を超える可能性がある。したがって気管支鏡検査のスタッフの

眼の被ばく線量には十分注意する必要がある。被ばく線量を減らすためには鉛防護メガネの着用が推奨される。さらに、正確な線量を測定するためには DOSIRIS のような眼の被ばく線量を、直接測定できる線量計の使用が必要である。

3-4. ポータブル撮影での水晶体線量の詳細評価（放射線技師）

撮影件数の多い施設においては、十分な被ばく防護策を講じない場合には線量限度に近い値となる可能性が示唆された。よってポータブル X 線撮影に従事する診療放射線技師は、適切な被ばく防護措置と被ばく線量評価を行う必要があると考える。水晶体線量評価については、プロテクターの外側、頸部に線量計を装着することでおおむね評価することが可能である。被ばく防護については、X 線照射時に患者から十分な距離をとることが非常に有効であるため、この点は常に意識する必要があると考える。

4. 循環器内科医師における眼の水晶体の職業被ばくの実態調査

放射線防護眼鏡の“左側かつ外側”の水晶体用線量計 Hp(3)と頸部用ガラスバッジ Hp(0.07)では相関係数 $R = 0.9590$, 決定係数 $R^2 = 0.9197$, $p < 0.01$, 傾き : 0.7306, 切片 : 0.0663, 放射線防護眼鏡の“左側かつ内側”と頸部用ガラスバッジ Hp(0.07)では相関係数 $R = 0.9114$, 決定係数 $R^2 = 0.8307$, $p < 0.05$, 傾き : 0.3472, 切片 : 0.0684 であった。

放射線防護眼鏡（パノラマシールド・オーバーグラス（東レ・メディカル株式会社, HF-480S, 0.07 mmPb）による左眼近傍の線量低減効果は平均 $47 \pm 7\%$ と、非常に実効性の高い放射線防護策であった。

5. 臨床現場における、医療スタッフの被ばく線量の測定

循環器内科の医師における 1 か月間の眼の近傍の水晶体線量計による測定結果

は防護眼鏡の外側で左側 1.2 mSv、右側 0.2 mSv であった。前年度治療実績から推定すると年間 36mSv ととなり、新しい線量上限を超過する可能性があり、適切な水晶体防護は必須であると言える。

造影 CT 検査で介助に関わる医療スタッフの水晶体線量計での眼の近傍の測定値は、放射線防護眼鏡の左外側では 6.2 mSv、右外側では 4.6 mSv、左内側では 2.6 mSv、右内側では 2.4 mSv との結果であった。適切な防護をせずに介助を 1 年間継続した場合、単純乗算で左眼では年間 74.4 mSv、右眼でも 55.2 mSv となり、新たな規制基準を大幅に超過すると考えられる。

6. 学術分野における放射線業務従事者の眼の水晶体等価線量の適切な評価

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ついて、小規模加速器施設である京都大学複合原子力研究所ライナック施設における不均等被ばく状況の放射線作業を模擬した作業環境において実験的に評価した。不均等被ばく状況の作業環境として、ビームコンバーター調整・交換作業及び中性子発生用 Ta ターゲットハンドリング作業を選択した。評価の結果、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、それぞれ機器調整の場合 2.6 程度、ターゲットハンドリング作業では 0.4 であった。

7. 医療従事者の眼の水晶体等価線量評価のための実用量測定に使用する線量計校正に関する研究

本研究事業で使用しているガラス線量計について前年度から実施しているエネルギー応答特性試験を継続し、ISO 規格の記述通りの特性試験が可能であることが分かった。使用するガラス線量計の応答について、文献値を再現すると同時に IVR 術者が被ばくする X 線のエネルギー範囲で適切な線量読出し値を与える応答を有することが確認

できた。

一連の評価の結果、ガラス線量計の読み値から妥当な $H_p(3)$ を与える校正定数は、

水晶体等価線量(3mm線量当量)[Sv] = ガラス線量計指示値 [Gy] \times 1.21 ± 0.03 [Sv/Gy]

と決定できた。

8. 医療従事者の眼の水晶体被ばく線量評価のための血管造影装置等からの散乱 X 線スペクトル測定

計測回路一体型 CdTeZn 検出器に適切な鉛コリメータを取り付け、血管造影装置及び X 線透視装置における術者の眼の位置での散乱 X 線成分を測定した。得られた波高分布から推定される散乱 X 線の平均エネルギーは、血管造影装置で 45 keV、X 線透視装置で 43 keV であった。一方で、散乱 X 線スペクトルから推定される散乱 X 線の平均エネルギーは、血管造影装置で 46 keV、X 線透視装置で 42 keV であった。

9. 産業・学術分野における放射線業務従事者の β 線放出核種による眼の水晶体等価線量の適切な評価に関する研究

商用原子力発電施設で高エネルギー β 線源として労働者の放射線防護上の課題となる ^{106}Ru について評価したが、現行法令の体幹部での $70\mu\text{m}$ 線量当量による測定値が最大 5 倍程度の過大評価となることを明らかとした。さらに、核医学の分野で使用される陽電子放出核種 (^{18}F 、 ^{15}O 、 ^{13}N 、及び ^{11}C) について、サイクロトロンオペレータ等が当該核種に暴露される状況を模擬して同様の評価を行った。眼の水晶体に対し、陽電子による被ばくが無視できない一方で消滅 γ 線による被ばくも有意に認められる。さらに、体幹部で測定された 3mm 線量当量が眼の水晶体線量に対しより良い推定値を与えることが確認できた。そのことから、線量測定サービスを利用する事業

者は 3mm 線量当量の測定結果も利用することが望ましい。

10. 海外諸国の眼の水晶体の線量限度の引き下げの法令への取入れの現状把握に関する研究

INES2 以上で医療関係の事例は欧州とオセアニアで 7 例の報告があった。このうち欧州より IVR 従事者の医療従事者の水晶体の異常被ばくの報告もあった。

D. 考察

1. 医療機関における放射線防護マネジメントシステム導入支援プログラムの開発

前年度の研究で開発した医療機関における医療機関における放射線防護マネジメントシステム導入支援プログラムは、マネジメントシステム導入に際して、ワークなどを通じて安全衛生担当者のマネジメントシステムに対する理解不足を改善するとともに、モデル文書を提供して文書体系構築の負担を軽減する Step by Step 研修がもたっている。

このプログラムは、研修の中でマネジメントシステムの基本を学ぶことができ、モデル文書をカスタマイズすることによって文書体系が構築することによって、効率的なマネジメントシステムの開発が可能となる方法である。オリジナルの研修は 5 回プログラムであったが、より多く医療機関が利用できるように、受講者側の負担を考慮して 3 回プログラムとした。

今回、モデル実施を行った結果、受講者の講義に対する高い理解が得られた。しかし、講義時間が長いなどの意見が存在したが、マネジメントシステムそのものに対する基本事項を含めた内容となっており、研修を受ける前の理解度によって適切な時間が影響を受ける可能性がある。

研修終了後 2ヶ月後の評価では、組織体制や文書体系の準備が行われていた。また、

放射線防護管理については、多くの機関で何らかの取組が行われていた。一方、病院長の許可取得と回答した機関もあり、研修参加時点で経営層の理解を取り付けておくことが必要と考えられる。

今回の評価は、研修そのもの及び終了直後の準備状況に対するものであったが、最終的な有効性はRPMSの導入状況および放射線管理の状況を含めて評価されるべきと考えられる。

2. 全国の医療機関を対象にした個人被ばく線量計の装着状況調査

個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率は必ずしも100%でないことが明らかとなり、現状の被ばく線量は過小評価されている可能性が考えられた。その要因として、個人被ばく線量計装着の重要性を理解するための教育が不可欠であり、今後、適切な放射線防護教育の実施が望まれる。

3. 水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査（医療分野の放射線の計測評価と被ばく防護）

心臓IVR(PCI)医師においては、各患者パラメータなどの装置表示値から水晶体線量を推定するのは困難であるため、正確な水晶体線量を把握するためには実際に線量計を装着して測定するべきである。PCI医師の水晶体線量計は左眼に装着する必要があるが、PCIは治療部位によっては線量比が異なるため、左眼の線量からほかの位置の線量を外挿する場合は治療部位(RCA、LAD、LCX)ごとに分けて行うべきである。

透視ガイド下の気管支鏡検査スタッフの眼の被ばく線量を評価した。これは気管支鏡検査を行うスタッフ（医師および看護師）の眼の被ばく線量評価の最初の研究である。特に医師では、新しい水晶体線量限度である20mSv /年を超える可能性がある。

臨床でポータブルX線撮影に従事する診療放射線技師の水晶体線量を詳細に測定した。その結果、撮影件数の多い施設においては、十分な被ばく防護策を講じない場合には線量限度に近い値となる可能性が示唆された。よってポータブルX線撮影に従事する診療放射線技師は、適切な被ばく防護措置と被ばく線量評価を行う必要があると考える。

4. 循環器内科医師における眼の水晶体の職業被ばくの実態調査

防護眼鏡を着用している場合、水晶体線量の代替評価として頸部用ガラスバッジ(Hp(0.07))による結果を用いると、約66%の過大評価となり、放射線防護眼鏡による防護策を講じているにもかかわらず、必要以上に安全側で管理することとなり、医師の業務配置等の運用に支障を来しかねない。適切な眼の水晶体の被ばく線量の管理及び診療体制の維持・継続のためにも、水晶体線量計を用いた眼の近傍の線量を実測する必要がある。

5. 臨床現場における、医療スタッフの被ばく線量の測定

臨床現場における、医療スタッフの被ばく線量の測定結果から、循環器内科でカテーテル検査・治療を行う医師とCT検査時に介助を行う医療スタッフにおいて、眼の近傍で比較的高い放射線被ばくを受けることが明らかとなった。適切な眼の水晶体の被ばく線量の管理及び診療体制の維持・継続のためにも、水晶体線量計を用いた眼の近傍の線量を継続的に実測し、防護策を講じる必要がある。

6. 学術分野における放射線業務従事者の眼の水晶体等価線量の適切な評価

体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、眼の水晶体線量について体幹部で観

測された線量から距離の逆二乗則または線源・作業者の姿勢を模擬した計算シミュレーションにより適切に推定可能であることが示された。このことは、年間線量限度近傍の被ばくを受ける可能性のある作業者に対し、適切な指標を示すものであるといえる。

7. 海外諸国の眼の水晶体の線量限度の引き下げの法令への取入れの現状把握に関する研究

INES2以上の医療分野の事例報告がなされていた。以下が課題であると考えられた。

- 線量限度超えの事例の報告
- 報告事例への介入
- 段階的な管理の導入

防護眼鏡の内側では線量が不均一になるため、眼の水晶体の等価線量を過小評価しないように素子の装着部位分を配慮することが望まれる。

E. 結論

医療機関における適切な放射線防護方法への対応が確保されると仮定すれば、水晶体の等価線量限度を5年間の平均で20 mSv/年かついずれの1年においても50 mSvを超えないこととする新たな眼の水晶体の等価線量限度を遵守することは可能であると考えられる。

以上の成果の多くは、厚生労働省「眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会」資料に反映され、2019年9月24日に報告書に取りまとめられ公開された。さらに、検討会での研究班成果報告を踏まえ、2019年11月1日には厚生労働省労働基準局安全衛生部長より「放射線業務従事者等に対する線量測定等の徹底及び眼の水晶体の被ばくに係る放射線障害防止対策の再周知について」通知が発出された。2019年12月23日開催の第147回放射線審議会において、厚生

労働省からの諮問において一連の上記資料が重ねて幅広く提示・議論された。

放射線審議会の議論において、医療分野では、線量管理が杜撰であることが指摘され線量管理を徹底させるための必要な措置を講じること、および、新しい水晶体の等価線量限度を超過する恐れが残されている現状から経過措置をとるが、その間にも被ばく状況等を把握し報告すること、が附帯事項とされた。これらの審議ののち、電離則は2021年（令和3年）4月1日から改正施行実施されることとなった。

なお、厚労省の検討会報告書では、国が実施すべき支援事業がいくつか提示され、国は、「事業者が、放射線防護設備の設置や改善による被ばく低減措置を講ずるための支援を行うことが望ましい。」および「労働安全衛生マネジメントシステム等の取組を着実に進め、安全衛生管理体制を確立するための支援を行うことが望ましい。」とされた。これを受けて今年度実施された、「放射線被ばく管理に関する労働安全衛生マネジメントシステム導入支援事業」に、本研究班が開発した研修資料がそのまま利用されるとともに、研究班として支援研修の支援を行なった。

令和3年4月より電離則が改正されるが、法令遵守に加え、マネジメントシステム等を応用したさらなる自主管理が望まれる。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

【原著論文】

- 1) Kawauchi S, Chida K, Moritake T, Hamada Y, Tsuruta W: Radioprotection of eye lens using protective material in neuro cone-beam computed tomography: Estimation of dose reduction rate and image quality. *Physica Medica*. 2021 (in press).
- 2) Nagamoto K, Moritake T, Nakagami K, Morota K, Matsuzaki S, Nihei S, Kamochi M, Kunugita N: Occupational radiation dose to the lens of the eye of medical staff who assist in diagnostic CT scans. *Heliyon*. 2021 January 30;7(1):e06063. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06063.
- 3) Morota K, Moritake T, Nagamoto K, Matsuzaki S, Nakagami K, Sun L, Kunugita N: Optimization of the Maximum Skin Dose Measurement Technique Using Digital Imaging and Communication in Medicine-Radiation Dose Structured Report Data for Patients Undergoing Cerebral Angiography. *Diagnostics (Basel)*. 2020 Dec 23;11(1):E14. doi: 10.3390/diagnostics11010014.
- 4) Sun L, Inaba Y, Kanzaki N, Bekal M, Chida K, Moritake T: Identification of Potential Biomarkers of Radiation Exposure in Blood Cells by Capillary Electrophoresis Time-of-Flight Mass Spectrometry. *Molecular Endocrinology and Metabolism*. 2020, 21, 812. doi: 10.3390/ijms21030812.
- 5) Kawauchi S, Chida K, Moritake T, Hamada Y, Matsumaru Y, Tsuruta W, Satoh M, Hosoo H, Sun L: Treatment of internal carotid aneurysms using pipeline embolization devices: measuring the radiation dose of the patient and determining the factors affecting it. *Radiat Prot Dosimetry*. 2020 Jun 24;188(3):389-396. doi: 10.1093/rpd/ncz298.
- 6) 坂本 肇, 五十嵐 隆元, 加藤 守, 川内 覚, 加藤 英幸, 塚本 篤子, 盛武 敬, 赤羽 正章: DRLs 2015の血管撮影・IVR分野における効果検証および追加項目の検討. *日本放射線技術学会誌*. 2020; 76(2):210-217. doi: 10.6009/jjrt.2020_JSRT_76.2.210.

【総説その他】

- 1) J-RIME, National Diagnostic Reference Levels in Japan (2020) -Japan DRLs 2020-, 2020.
http://www.radher.jp/J-RIME/report/DRL2020_Engver.pdf (accessed on 8 Feb. 2021).
- 2) 盛武 敬: 脳血管内治療に関する診断参考レベル構築のための医療被ばく実態調査 (Re-JDRL study) について. 教育講座第33回全国循環器撮影研究会総会・学術発表大会 (2019年4月13日) 医師講演. *全国循環器撮影研究会誌*, 32, 5-12, 2020 (査読無し)

【著書】

- 1) 盛武 敬: ICRP Publication 121 小児の放射線診断とIVRにおける放射線防護. 翻訳, 原子力規制委員会, 2021年1月27日
- 2) 盛武 敬: 医療放射線防護学 (第4章 放射線の生物影響・リスク 第1節~第3節), 国際文献社 医学物理学教科書シリーズ, 赤羽恵一・遠藤真広編著, 日本医学物理学学会監修, P52-84, 2020年8月

【学会発表】

- 1) 櫻田尚樹, 労災疾病臨床研究事業研究班: 基調講演「水晶体の線量限度改正」. 第42回医療放射線安全フォーラム, 2月14日, 2021. WEB開催.
- 2) Munehiko Kowatari, Keisuke Nagamoto, Koich Nakagami, Miho Itonaga, Yoshihiko Tanimura, Takashi Moritake, Naoki Kunugita: Experimental evaluation of scattered X-ray spectra due to X-ray therapeutic and diagnosis equipment for eye lens dosimetry of medical staff. IRPA15, 15th International Congress of the International Radiation Protection Association. COEX, Seoul, Korea, Jan 18-Feb 5, 2021.
- 3) (招待講演) 櫻田尚樹, 労災疾病臨床研究事業研究班: 医療従事者における個人被ばく線量管理の課題. 日本放射線安全管理学会第19回学術大会 12月9日~11日, 2020. WEB開催.
- 4) 大田 元, 盛武 敬, 茂呂田 孝一, 入佐剛, 齋藤 清隆, 末松 裕貴, 河野 智樹, 堀之内 翔一, 小笠原 奈月, 山下 真治, 横上 聖貴, 竹島 秀雄: 当院における

脳血管内治療時の医療被ばくの現状とその防護対策について. 第 36 回 NPO 法人日本脳神経血管内治療学会総会, 国立京都国際会館 (京都市・京都府), 11 月 19-21 日, 2020.

- 5) (招待講演) 盛武 敬: 被ばく防護ミニ講習会「医療放射線被ばくの最新トピックス～DRLs 2020 と電離則改正～」脳血管内治療に関する診断参考レベル構築のための医療被ばく実態調査 (Re-JDRL study) 報告, 第 36 回 NPO 法人日本脳神経血管内治療学会総会, 国立京都国際会館 (京都市・京都府), 11 月 19-21 日, 2020.
- 6) 孫 略, 稲葉 洋平, 千田 浩一, 盛武 敬: 被ばく後の血液抗酸化能評価. 日本放射線影響学会第 63 回大会 (ワークショップ) 生物学的線量推定の新技术 (Web 開催), 10 月 15-16 日 (Web 閲覧期間: 10 月 15-31 日), 2020.
- 7) 盛武 敬, 孫 略, マヘッシュ・ベカル, 中村 麻子, 志村 勉: 複数の生物学的指標を用いた逆行性生物線量測定法の開発. 日本放射線影響学会第 63 回大会 (ワークショップ) 生物学的線量推定の新技术 (Web 開催), 10 月 15-16 日 (Web 閲覧期間: 10 月 15-31 日), 2020.
- 8) 大田 元, 盛武 敬, 茂呂田 孝一, 入佐 剛, 齋藤 清隆, 末松 裕貴, 河野 智樹, 堀之内 翔一, 小笠原 奈月, 武石 剛, 山下 真治, 渡邊 孝, 横上 聖貴, 竹島 秀雄: 脳血管内治療時における医療被ばく線量の術中モニタリング—被曝量低減に向けた当施設の取り組み—. 日本脳神経外科学会第 79 会学術総会, 岡山コンベンションセンター (岡山市・岡山県), 10 月 15-17 日 (Web 閲覧期間: 10 月 15 日-11 月 30 日), 2020.
- 9) 松浦 康晃, 隅倉 有美子, 中上 晃一, 盛武 敬, 永元 啓介, 茂呂田 孝一, 松崎 賢, 栗山 知子, 櫻田 尚樹: スチューデント・ドクター制度における放射線診療実習での医学生の被ばく. 第 38 回産業医科大学学会, 第 32 回産業医学推進研究会全国大会, 産業医科

大学ラマツィーニホール (北九州市・福岡県), 10 月 10 日 (一部 Web 配信), 2020.

- 10) 阿部 利明, 盛武 敬, 馬田 敏幸, 中上 晃一, 永元 啓介, 櫻田 尚樹: 病院における個人水晶体等価線量低減を目的とした業務改善計画策定のための職業被ばく線量の実態調査. 日本保健物理学会第 53 回研究発表会 WEB 大会, 6 月 29-30 日 (Web 配信 6 月 29 日-7 月 31 日), 2020.
- 11) (招待講演) 櫻田尚樹, 労災疾病臨床研究事業研究班: 放射線管理区域に立ち入る医療従事者の個人被ばく線量計装着実態調査. 日本保健物理学会第 53 回研究発表会 WEB 大会, 6 月 29-30 日 (Web 配信 6 月 29 日-7 月 31 日), 2020.

【社会的業績】

- 1) 厚生労働省事業「放射線被ばく管理に関する労働安全衛生マネジメントシステム導入支援事業」. 研究班が研修資料提供、支援者研修、研修会に協力

【その他】

- 1) 「医療従事者の被ばく—把握できていない実態明らかに—」, NHK「おはよう日本」, 1月11日, 2021年

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

- 1) 放射線被ばくによる皮膚炎発生の予測: 特願2020-072182 (2020年4月14日出願); 発明者: 孫 略, 盛武 敬, 千田 浩一, 稲葉 洋平; 出願人: 産業技術総合研究所, 産業医科大学, 東北大学
- 2) 線量計ホルダ: 特願2018-149742 (2018年8月8日出願), 発明者: 盛武 敬, 孫 略, 永元啓介, 小野洋彰, 出願人: 盛武 敬, 孫 略, 永元啓介, 有限会社コスモテック, 株式会社保科製作所

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

II. 分担研究報告

令和2年度労災疾病臨床研究事業

分担研究報告書

不均等被ばくを伴う放射線業務における被ばく線量の実態調査と線量低減に向けた 課題評価に関する研究

医療機関における放射線防護マネジメントシステム導入支援プログラムの開発

研究分担者 森 晃爾(産業医科大学産業生態科学研究所産業保健経営学研究室教授)

研究要旨

【目的】

前年度の研究において、医療機関において放射線防護の推進に労働安全衛生マネジメントシステム(OHSMS)を応用した、放射線防護マネジメントシステム(Radiation Protection Management System; RPMS)の文書体系を基本に、研修を通じて RPMS の導入を支援するためのプログラムの開発を行った。

【方法】

RPMS 導入支援プログラムは、医療機関の放射線防護管理の担当者が、研修を通じてマネジメントシステムの概要および RPMS の各要素を理解するとともに、提供したモデル文書体系を各医療機関において自機関に合った形で修正し、文書体系の大枠を完成できることを目標とした全3回の研修プログラムを作成した。いくつかの参加条件を満たす医療機関を選定して、Web 会議方式での研修を行った。研修の評価のために、参加者から理解度、ワークの満足度、その他自由意見を聴取した。また、研修終了2ヶ月後に、実施状況の調査を行った。

【結果】

15 項目の構成要素からなる研修プログラムを作成し、全3回で9つのワークを含む研修を実施した。その結果、講義の理解度およびグループワークの満足度とも、高い評価が得られた。また、研修後には多くの機関で何らかの放射線防護管理の改善が行われ、組織体制や文書体系の準備が行われていた。

【結論】

医療機関における放射線防護マネジメントシステム導入支援プログラムを実施した。今後、導入状況も含めて確認して、プログラムの有効性を評価するとともに、改善を図る必要がある。

研究協力者

中上晃一 産業医科大学病院放射線部・産業生態科学研究所放射線衛生管理学研究室

永元啓介 産業医科大学病院放射線部・産業生態科学研究所放射線衛生管理学研究室

阿部利明 産業医科大学アイトープ研究センター・産業生態科学研究所放射線衛生管理学研究室

松崎 賢 新小文字病院放射線科・産業生態科学研究所放射線衛生管理学研究室

茂呂田孝一 新小文字病院放射線科・産業生態科学研究所放射線衛生管理学研究室

酒井洗典 産業医科大学産業生態科学研究所産業保健経営学

末吉尚純 産業医科大学産業生態科学研究所産業保健経営学

A. 研究目的

前年度の研究において、医療機関において放射線防護の推進に労働安全衛生マネジメントシステム（OHSMS）を応用した、放射線防護マネジメントシステム（Radiation Protection Management System; RPMS）の文書体系の開発を行った。これを受けて本年度は、研修を通じて RPMS の導入を支援するためのプログラムの開発を行った。

B. 研究方法

1. 研修プログラムの開発

RPMS 導入支援プログラムは、医療機関の放射線防護管理の担当者が、研修を通じてマネジメントシステムの概要および RPMS の各要素を理解するとともに、提供したモデル文書体系を各医療機関において自機関に合った形で修正し、文書体系の大枠を完成できることを目標とした。

具体的には、1回3時間～4時間の全3回の研修会として、各回に研修項目の範囲を明確にし、研修の中でグループワークを行って理解度を高め、研修の中で該当回の研修項目に相当するモデル文書を提供して、次回研修会までに修正したうえで持ち寄り、完成度の確認および完成に向けた課題の議論を行うこととした。そのような流れを2回繰り返したうえで、最終回ではシステム運営後に実施すべき内部監査の計画策定、実施、報告書の作成、システム改善計画の策定の研修を行うこととした。

以上のような研修方式は、マネジメントシステムの要素を段階的に学ぶことができるため、Step by Step 研修と名付けられている。

2. 研修プログラムの実施と評価

1) 対象医療機関の選定と参加者の属性

対象医療機関は、本研究班メンバーと関係のある医療機関の内、下記の参加条件を満たす事とした。

参加条件

① 「令和2年度厚生労働省委託事業 放射線被ばく管理に関する労働安全衛生マネジメントシステム導入支援事業」への参加施設であること。

② 研修会参加者は、「(ア) マネジメントシステム導入のキーパーソンとなる医師（産業医等を含む）」「(イ) 放射線管理を行う診療放射線技師」及び「(ウ) 経理等担当事務職員」の3名であること。

(ア) に関しては、少なくとも第1回目の参加が必要。

③ 病院管理者の内諾を得ていること。

2) 研修の実施方法

研修は、産業医科大学産業保健学部の会議室がホストとなり、各対象医療機関をオンラインで繋げる Web 会議方式で行った。

Web 会議方式のシステムは、小会議室を備えたテレビ会議プラットフォーム Zoom™

(Zoom Video Communications Inc., San Jose, CA, USA) を使用した。

研修の実施方法は、講義とグループワークを交互に行う事とした。グループワークは参加者をランダムに3つのグループに分けて行った。講義は講師が参加者全員に向けて行い、グループワークは各グループに配置されたファシリテーターが進行役を行った。

3) 研修の評価

評価方法は、選択と自由記述のアンケート形式とし無記名で以下の4つの項目で行った。

問 1、講義内容の理解度はいかがですか。(選択)

1. 理解できなかった。
2. 比較的理解できなかった。
3. 比較的理解できた。
4. 理解できた。

問 2、講義内容に関してご意見をお書きください。(自由記述)

問 3、ワークの満足度はいかがですか。(選択)

1. 不満足
2. 比較的不満足
3. 比較的満足
4. 満足

問 4、ワークの進め方に関してご意見をお書きください。(自由記述)

2) 研修会後の行動変容調査

評価方法は、選択と自由記述のアンケート形式とし無記名で以下の 3 つの項目で行った。

問 1、(導入状況) 現在、貴院ではマネジメントシステムの導入準備を進めていますか？

1. まだ、取りかかっていない。
2. 準備中
3. 準備完了

問 2、(放射線防護管理の実施状況) 12 月の第 3 回の個別支援研修会が終わって取り組んだ事がありますか？(複数可)

1. リスクアセスメントに基づいた管理
2. 現状の放射線防護管理状況の把握(個人線量計装着率調査、被ばく線量の把握 等)
3. 放射線防護に関する教育
4. 個人線量計装着率の改善
5. 個人線量計の配布状況の変更(均等

被ばく管理から不均等被ばく管理へ変更など)

6. その他

問 3、令和 3 年度に「個別支援研修会の続き」を計画しています。案内があった場合は参加しますか？

1. 参加する
2. 参加しない
3. 参加したいが、病院の許可が下りるかわかならない。

C. 研究結果

1. 研修プログラムの開発

1) 全体構成

マネジメントシステムによって PDCA が廻る状況を達成するために、計画、開発、導入、運用、運営、改善というフェーズがある。本研修では、導入準備が整うまでの範囲が対象となる。そこで、研修の構成要素を、以下の 15 項目とした。

- ① マネジメントシステムの基本
- ② 放射線防護リスクマネジメント手法
- ③ 変更の管理
- ④ 緊急事態への準備及び対応
- ⑤ インシデントおよび不適合への対応と是正処置
- ⑥ 法令およびその他の要求事項の順守
- ⑦ 放射線管理体制
- ⑧ 文書化・文書体系
- ⑨ 年間目標の策定
- ⑩ 計画の設定
- ⑪ 研修・資格者育成計画
- ⑫ 内部監査の基本
- ⑬ 内部監査計画の策定
- ⑭ 内部監査の実施/報告書の作成
- ⑮ システム改善計画

第1回

このうち、第1回では①～⑧の解説と、以下の3つのワークを行うこととした。

ワーク 1-1 基本方針で示された事項を達成するために必要な活動①（リスク低減）

ワーク 1-2 基本方針で示された事項を達成するために必要な活動②（法令等の順守）

ワーク 1-3 システムマニュアルに必要な下位文書

そのうえで、以下の3項目の宿題を提示することとした。

宿題 1-1 基本方針案の策定

宿題 1-2 体制案の策定

宿題 1-3 文書体系案の策定(テンプレート)

第2回

第2回では、第1回の復習および宿題の検討を行った上で、新たに項目⑨～⑫について解説を行うこととした。この中で、以下の3つのワークを行うこととした。

ワーク 2-1 基本項目に相当する評価指標（被ばく低減）

ワーク 2-2 RPMS を運用する上で必要な研修および資格者

ワーク 2-3 一般の放射線業務従事者に必要な導入教育の項目

そのうえで、以下の5項目の宿題を提示することとした。

宿題 2-1 基本方針の完成

宿題 2-2 前回宿題の文書類の完成

宿題 2-3 目標の作成

宿題 2-4 年間計画書の作成

宿題 2-5 追加文書類の作成(テンプレートを利用)

第3回

第3回では、第2回の復習および宿題の検討を行った上で、新たに項目⑬～⑮について解説を行うこととした。この中で、以下

の3つのワークを行うこととした。

ワーク 3-1 内部監査においてシステムの妥当性、実行性、有効性を評価するためのチェックリストの作成

ワーク 3-2 監査報告書の作成(映像および記録をもとに)

ワーク 3-3 事例を基にした改善策の検討

2. 研修プログラムの実施と評価

1) 対象医療機関の属性

医療機関の地域分類は、東北、関東、中部、近畿、九州であった。医療機関の労働者数、放射線業務従事者数及び水晶体等価線量が年間 20mSv を超える労働者数を Table 1 に示す。

2) 研修の評価

講義内容の理解度に関しては、第1回 94%、第2回 94%、第3回 100%の参加者が理解できた若しくは比較的理解できたと回答した。(Table 2)自由記述においては、ポジティブな回答が多く講義のわかりやすさや質問の受付とそれに対する回答が理解度に繋がるコメントがあった。また、グループワークが理解を深めている要素となっているコメントもあった。ネガティブな回答としては、講義が長いという意見があった。(Table 3)

グループワークの満足度に関しては、第1回 94%、第2回 94%、第3回 100%の参加者が満足若しくは比較的満足と回答した。(Table 4)自由記述においては、ポジティブな回答として他施設の意見を聞くことで気づきや理解度の深まりが生まれる事につながるコメントがあった。ネガティブな回答は、時間短縮をはかれたのではないかと聞いた意見があった。(Table 5)

3) 研修会後の行動変容調査

本調査は、第3回の研修会の2ヶ月後に実施した。回答率は、59%であった。

導入状況の質問に関しては、90%が準備中であり準備完了している施設はなかった。準備中と回答した施設の内、何の準備を行っているかを問う質問に関して「組織や体制作り」が89%で最も多く、続いて「文書体系の作成」「病院長の許可取得」との回答がそれぞれ44%であった。

放射線防護管理の実施状況に関しては、「現状の放射線防護管理状況の把握」が最も多く60%であった。「放射線防護に関する教育」が50%、「リスクアセスメントに基づいた管理」「個人線量計装着率の改善」がそれぞれ40%であった。「個人線量計の配布状況の変更」が30%であった。

令和3年度に個別支援研修会の続きを計画したときに、「参加したい」等の前向きな回答が100%であった。

D. 考察

前年度の研究で開発した医療機関における医療機関における放射線防護マネジメントシステム導入支援プログラムは、マネジメントシステム導入に際して、ワークなどを通じて安全衛生担当者のマネジメントシステムに対する理解不足を改善するとともに、モデル文書を提供して文書体系構築の負担を軽減する Step by Step 研修がもとなっている。

このプログラムは、研修の中でマネジメントシステムの基本を学ぶことができ、モデル文書をカスタマイズすることによって文書体系が構築することによって、効率的なマネジメントシステムの開発が可能となる方法である。オリジナルの研修は5回プログラムであったが、より多く医療機関が

利用できるように、受講者側の負担を考慮して3回プログラムとした。

今回、モデル実施を行った結果、受講者の講義に対する高い理解が得られた。しかし、講義時間が長いなどの意見が存在したが、マネジメントシステムそのものに対する基本事項を含めた内容となっており、研修を受ける前の理解度によって適切な時間が影響を受ける可能性がある。

研修終了後2ヶ月後の評価では、組織体制や文書体系の準備が行われていた。また、放射線防護管理については、多くの機関で何らかの取組が行われていた。一方、病院長の許可取得と回答した機関もあり、研修参加時点で経営層の理解を取り付けておくことが必要と考えられる。

今回の評価は、研修そのもの及び終了直後の準備状況に対するものであったが、最終的な有効性はRPMSの導入状況および放射線管理の状況を含めて評価されるべきと考えられる。

E. 結論

医療機関における放射線防護マネジメントシステム導入支援プログラムを実施した。今後、導入状況も含めて確認して、プログラムの有効性を評価するとともに、改善を図る必要がある。

F. 参考文献

1. 森 晃爾. 産業保健専門職・衛生管理者のためのマネジメントシステムによる産業保健活動. 2003. 労働調査会
2. 森 晃爾他. 産業保健スタッフのためのISO45001—マネジメントシステムで進める産業保健活動. 2019. 中央労働災害防止協会

G. 研究発表

該当なし

H. 知的所有権の取得状況

該当なし

添付文書

研修プログラム

- 放射線防護マネジメントシステム導入支援（第1回）
- 放射線防護マネジメントシステム導入支援（第2回）
- 放射線防護マネジメントシステム導入支援（第3回）

No.	医療機関	住所	労働者数	放射線業務従事者数	20mSv/年超
					労働者数
1	A	青森県	1460	480	0
2	B	秋田県	350	16	3
3	C	宮城県	951	235	17
4	D	埼玉県	2180	290	2
5	E	埼玉県	1429	175	1
6	F	埼玉県	1464	227	4
7	G	東京都	2300	290	5
8	H	東京都	1250	317	0
9	I	栃木県	2705	73	1
10	J	神奈川県	1350	350	1
11	K	静岡県	1500	43	1
12	L	大阪府	1000	720	0
13	M	兵庫県	1271	336	0
14	N	福岡県	823	165	2
15	O	福岡県	1424	297	0
16	P	福岡県	721	88	1

	第1回	第2回	第3回
理解できなかった	0	1	0
比較的理解できなかった	1	0	0
比較的理解できた	8	8	11
理解できた	7	7	4
	16	16	15*

* 参加医療機関は16施設であるが、途中退出の施設が1施設あった。

No.	全体に関する感想
1	わかりやすかった。
2	とても理解しやすかったです。
3	難しい内容でしたが、理解できました。
4	昨日の講義を聞いておらず多少戸惑いましたが、大変勉強になりありがとうございました。
5	何度も講義いただきありがとうございます。講義の内容については段々理解が深まってきました。
No.	講義に対する感想
1	具体的な事例やワーキングがあり、理解が深まりました。
2	昨日に引き継ぎありがとうございました。繰り返し聞けたことで、理解度が深まりました。
3	資料がしっかりしていたので分かりやすかったです。
4	質問時間を設けて頂いて理解が深まりました。
5	講義内容、ブレイクアウトセッション共に良かったです。参考になることも多かったです。
No.	内容に対する感想
1	放射線防護検討委員会の設置、マネジメントシステムの文書化ができれば違法になりますか？
2	MSシステムを院内の組織に組み込むのはだいぶ困難と思われる。
3	MSの内容がわかりました。既存組織との2重管理にならないよう工夫が必要と感じました。
4	抽象的な内容が多く、受講する前は不明な点が多かったがワークや具体的な例を出して頂いて非常に参考になりました。
5	法体系を理解する重要性が分かった。
6	基本的な部分を取り入れて頂き良かったです。

No.	全体に関する感想
1	昨日今日の参加で理解が深まりました。
2	前回の疑問点が解決しました。
3	わかりやすかったです。
4	今回の内容でマネジメントシステムについて理解が深まりました。
5	森先生の講義が大変分かりやすく、昨日の講義で分かり難かった点の理解がしました。
6	前回の疑問点が解決しました。
7	解りやすい講義で理解が深まりました。
No.	講義に対する感想
1	具体例が聞けてよかった。
2	グループワークが理解を深める上で有効であった。
3	先日のMS導入支援と比較して、分かりやすい例えなどが多く、同じ資料でもマネジメントシステムへの概念の理解が進みました。
4	昨日の支援研修で予習をした形であったので、本日の講義は理解が深まりました。
5	昨日と本日との2段回講義が理解を深める。と言うか、昨日のファイルはあるので自分でしっかり学習してから個別支援を受けるのがベストです。
6	ちょっと講義時間が長く感じました。
No.	内容に対する感想
1	リスクマネジメントの理解が深まりました
2	講義の内容自体は分かりやすいものであったのでシステムの構築はできると思います。ただ当施設でも私が主体となっていやっているのでこれを病院全体でおこなえるのかという不安感があります。
3	労働マネジメントシステムの導入は自主的であるにもかかわらず、形にはまった導入が必要という説明は違和感がある。

Table 3-3 第3回の理解度に対する意見	
No.	全体に関する感想
1	大変勉強になりました。
2	ありがとうございます。
3	非常にわかりやすかった
4	わかりやすかった。
5	ありがとうございます。
6	大変勉強になりました。
No.	講義に対する感想
1	事前資料を基に勉強し、講義に参加したため今まで一番理解が深まった。
2	丁寧な資料を提示、また都度動画のアップもありがとうございました。
3	本日は内部監査というところで、中々そこまでは準備はできていないところでしたが、全体像が見れたことで今後の進め方において大変勉強になりました。ありがとうございました。
4	支援事業よりもわかりやすかった。ワークショップも自分で考えるからよい。
No.	内容に対する感想
1	内部監査の導入がすごく大変なことがわかりました。
2	監査まで導入できるところまでシステムを立ち上げていこうと思います。
3	院内監査はハードルが高い。今回のMS支援の趣旨とは異なるが、同規模施設との相互監査もいいかもしれない。
No.	質問
1	労働衛生委員会はどのように関わってくるのかを聞ければと思いました。
2	改善項目と推奨項目の差異が、わかりにくかったが、法的にダメな項目で、分離してもokでしょうか？

Table 4 ワークの満足度

	第1回	第2回	第3回
不満足	0	0	0
比較的の不満足	1	1	0
比較的満足	9	10	11
満足	6	5	4
	16	16	15*

* 参加医療機関は 16 施設であるが、途中退出の施設が 1 施設あった。

Table 5-1 第1回のグループワークの満足度に対する意見

No.	全体に関する感想
1	丁寧に進行いただきありがとうございました。
2	聞こえているかわからないため、発表する時は一言ほしいです
3	特に問題なかったと思います。
4	問題ありません。
5	特にございません。
6	このままでよいです。
7	特に問題ありません。
No.	ワークの進行に対する感想
1	ワークの進め方はよかったですと思います。
2	スムーズだったと思います。
3	各チームで違った内容でのディスカッションを行うことで、時間短縮が図れたのではないかと感じました。
4	話を振っていただいて助かりました。自己紹介をやっていただいたほうがやりやすいかなと思います。
No.	ワークの内容に対する感想
1	実際にそれぞれの病院の実情を聞けてとても参考になりました。
2	全体のマネジメント研修に参加していない人もいるので、その内容も提示していただければと、参考になります。よろしくお願ひ致します。
3	各施設毎の実施状況をシェアしていただけると非常に参考になるため増やしてほしい。
4	ワークによる他施設の意見も聞けて良かったです。
No.	提案
1	まだ、各施設で出方を見ている状態なのかと感じました。正直、自施設の現状をなかなかさらしにくいとは思いますが、その枠を超えるためワーク外でも話し合いをもてるような場所は作れないでしょうか。

Table 5-2 第2回のグループワークの満足度に対する意見

No.	全体に関する感想
1	特に問題ありません
2	特にありません
3	時間のない中で大変かと思いますが、ありがとうございます。
4	特にありません
5	よろしいと思います。
No.	ワークの進行に対する感想
1	ワークを行うことで、再確認できました
2	良いと思います。
3	第1回目はZOOMの使い方にも不慣れでワークセッションについていだけで精いっぱいでしたが、本日はあらかじめ回答を考えながら落ち着いて臨むことができました。
4	もう少し時間を取っても良いと思う。
5	質問の意図を始めにお伝え頂いてから、意見を求めて頂けると話が膨らみやすいかと思ひます。
6	他の施設の方々意見が聞け、参考になりました。ありがとうございました。
7	ワーク自体は問題ありませんでしたが、インフラトラブルあり時間が勿体なかったです。
No.	ワークの内容に対する感想
1	時間が足りない、がんばります。
2	一部、個々の医療機関で考えなければいけない事項があるため、そこを重点的に進めていきたいです。
No.	提案
1	ワークで出た意見があとでいただけるとありがたいです。
2	森先生の講義を聞いた後、昨日の講義を聞く順番だと、昨日の講義も意味が感じられるかも知れません。

Table 5-3 第3回のグループワークの満足度に対する意見

No.	全体に関する感想
1	理解度が深まりました。
2	特にありません。
3	理解度が深まりました。
No.	ワークの進行に対する感想
1	この様な状況下ですので仕方ないが、対面が望ましい。
2	スムーズな進行でよかったです。
3	ワークをすることで、理解がすすんだ。
4	ワークをすることで体験型の研修が出来た。
5	事前の配布資料を拝見していましたので、わかりやすかったです。
6	システム構築が難しい印象で、今回の講義やワークは比較的理解しやすかったです。
7	回答があるのであまり自分では考えなかった。事後資料は後から配布でいいのではないか。
8	この様な状況下ですので仕方ないが、対面が望ましい。
No.	ワークの内容に対する感想
1	事前資料があつてよかった。
2	MSを完成させるには思っていたより作業量がありました。
3	中タイメージがついておらず、十分な対応が出来ていなかった。
No.	提案
1	これまでと同様に共有を使って各自がプレゼン出来れば良いと思う。

令和2年度労災疾病臨床研究事業

分担研究報告書

全国の医療機関を対象にした個人被ばく線量計の装着状況調査

研究分担者 盛武 敬 産業医科大学産業生態科学研究所放射線衛生管理学的研究室
松崎 賢 産業医科大学産業生態科学研究所放射線衛生管理学的研究室

研究要旨

【目的】電離放射線障害防止規則において、放射線業務従事者には線量測定が義務付けられているものの、適切に実施されていない事例が散見される。そこで本調査の目的は、全国の医療機関において、個人被ばく線量計の装着実施状況を把握することとした。【方法】全国の各医療機関に従事する放射線業務従事者を対象とした。調査員は各医療機関よりホームページ上で公募し、各医療機関の放射線業務における個人線量計装着状況を目視で調査した。結果は、郵送もしくはメールにて回収し解析を行った。調査期間は2020年1月27日から5月9日の中から選択された任意の一日とした。調査項目は、①観察日、②診療科、③職種、④観察場所、⑤放射線業務従事者登録状況、⑥個人被ばく線量計（胸・腹部）装着状況、⑦個人被ばく線量計（頭・頸部）装着状況、⑧個人被ばく線量計（手指）装着状況の8項目とし、選択式回答形式とした。また、得られた個人被ばく線量計装着状況より、装着率を算出した。【結果】全国79名の調査員より、1348名の調査結果を得た。放射線業務従事者として90%以上が登録、管理されており、均等被ばく管理と不均等被ばく管理の比率は、ほぼ同等であった。また、全職種の個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率は65.3%であった。職種別では診療放射線技師が高く、医師が最も低かった。そのうち医師の診療科における個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率では放射線科が高く、整形外科が最も低かった。また、観察場所における個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率は一般撮影室が高く、手術室が最も低かった。その他、全職種における不均等被ばく管理下の個人被ばく線量計（頭・頸部）装着率は53.2%であり、個人被ばく線量計（手指）はほとんど利用されていなかった。【考察】個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率は必ずしも100%でないことが明らかとなり、現状の被ばく線量は過小評価されている可能性が考えられた。その要因として、個人被ばく線量計装着の重要性を理解するための教育が不可欠であり、今後、適切な放射線防護教育の実施が望まれる。【結論】個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率は65.3%であり、現状の被ばく線量情報は過小評価されている可能性が示唆された。

A. 背景

電離放射線障害防止規則(以下、電離

規則)において、放射線業務従事者には線量測定が義務付けられている(電離則

第 8 条)。その線量測定の方法として、均等被ばく（全身に均等に被ばくする）の場合では 1 個（電離則第 8 条第 3 項第 1 号に該当）、不均等被ばく（全身に不均等に被ばくする）の場合では 2 個以上（電離則第 8 条第 3 項第 2、3 号に該当）の個人線量計の装着を求めている。

しかし、第 5 回 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会(1)において、適切に実施されていない事例が散見されることが明らかにされ、法令遵守の徹底や適切に線量測定が実施されているかの確認を求める厚生労働省労働基準局安全衛生部長通知（基安発 1101 第 2 号 令和元年 11 月 1 日）が発出された。

B. 目的

本調査では、全国の医療機関において、個人被ばく線量計の装着実施状況を正確に把握することを目的とした。

C. 方法

本調査では、全国の各医療機関に従事する放射線業務従事者を対象とした。調査員は各医療機関よりホームページ上で公募した。そして、各医療機関の放射線業務における個人線量計（ガラスバッジやフィルムバッジなど）装着状況を、各調査員が目視で調査した。このように第三者が調査することで、公明・公正さを担保した。得られた結果は、郵送もしくはメールにて回収し、解析を行った。

調査期間は 2020 年 1 月 27 日から 5

月 9 日の中から選択された任意の一日とした。調査項目は、①観察日、②診療科（選択肢：循環器内科、消化器内科、放射線科、整形外科、泌尿器科、救急科、循環器外科、脳神経外科、リハビリ科、その他）、③職種（選択肢：医師、看護師、診療放射線技師、その他）、④観察場所（選択肢：血管造影検査室、透視検査室、CT 室、手術室、ハイブリット手術室、CT アンギオ室、その他）、⑤放射線業務従事者登録状況（選択肢：有（均等被ばく管理）、有（不均等被ばく管理）、無）、⑥個人被ばく線量計（胸・腹部）装着状況（電離則第 8 条第 3 項第 1 号に該当）（選択肢：有、無）、⑦個人被ばく線量計（頭・頸部）装着状況（電離則第 8 条第 3 項第 2 号に該当）（選択肢：有、無）、⑧個人被ばく線量計（手指）装着状況（電離則第 8 条第 3 項第 3 号に該当）（選択肢：有、無）の 8 項目とし、選択式回答形式とした。

また、得られた個人被ばく線量計装着状況より、装着率を算出した。以下に算出方法を示す。

個人被ばく線量計の装着率 $D_p(\%)$

$$D_p(\%) = \frac{N_i}{T_i} \times 100$$

ここで、 $N : i$ における調査期間内に個人被ばく線量計 p を装着した（「有」と回答した）人数、 $T : i$ における調査期間内に個人被ばく線量計 p の装着状況を調査した人数、 p ：個人被ばく線量計（胸・腹部）装着状況、個人被ばく線量計（頭・頸部）装着状況、個人被ばく

線量計（手指）装着状況、*i*: 診療科（循環器内科、消化器内科、放射線科、整形外科、泌尿器科、救急科、循環器外科、脳神経外科、リハビリ科、その他）、職種（医師、看護師、診療放射線技師、その他）、観察場所（血管造影検査室、透視検査室、CT室、手術室、ハイブリット手術室、CTアンギオ室、その他）とした。

D. 結果

全国 79 名の調査員より、1348 名の調査結果を得た。

表 1 に放射線業務従事者登録状況の集計結果を示す。90%以上が放射線業務従事者として登録、管理されていた。また、均等被ばく管理と不均等被ばく管理の比率は、ほぼ同等であった。

表 2 に職種別の個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率を示す。全職種における個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率は 65.3%であった。また、職種別では診療放射線技師が高く、93.4%であった。反対に医師が一番低く、39.1%であった。なお、放射線業務従事者登録無のなかにも、電子式線量計で線量測定されている者も散見された。

表 3 に医師診療科別の個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率を示す。医師診療科における個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率は放射線科が高く、74.3%であった。反対に整形外科が一番低く、8.9%であった。

表 4 に観察場所別の個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率を示す。観察場所における個人被ばく線量計（胸・腹部）

装着率は一般撮影室が高く、100%であった。反対に手術室が一番低く、28.9%であった。

表 5 に不均等被ばく管理における職種別の個人被ばく線量計（頭・頸部）、個人被ばく線量計（手指）装着率を示す。全職種における不均等被ばく管理下の個人被ばく線量計（頭・頸部）装着率は 53.2%であった。また職種別では診療放射線技師が高く、72.7%であった。反対に医師が一番低く、33.5%であった。また個人被ばく線量計（手指）の装着率は 0-5.2%と低かった。

E. 考察

本調査の結果、放射線業務従事者登録されている者は 90%以上であることが明らかとなった。全職種の個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率は 65.3%であり、なかでも医師は 39.1%であった。その医師の個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率の診療科別内訳をみると、整形外科医が一番低く、8.9%であった。その他、観察場所別の個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率では、手術室が 28.9%と一番低かった。また、全職種の個人被ばく線量計（頭・頸部）装着率も 53.2%であり、この装着率も医師が 33.5%と一番低かった。90%以上は、放射線業務従事者登録されているため、線量測定を実施できる環境下であるものの、10%程度は何ら管理されていない可能性がある現状が判明した。

そこで、その職種別内訳を表 6 に示す。これをみると、医師が 38.5%いることが明らかとなった。医師は、一般的

的に被ばく線量が高いといわれており、業務内容によっては不均等被ばく管理すべきであると考えられる。また、看護師も IVR (Interventional Radiology) や患者介助などで被ばくすることが予測されるため、何らかの管理下におかれることが望ましいと推察される。反対に診療放射線技師は、全員、何らかの管理下におかれていることが明らかとなった。本調査から、個人被ばく線量計(胸・腹部)装着率は必ずしも 100%でないことが明らかとなった。このことから、現状の被ばく線量は過小評価されている可能性が考えられる。特に、被ばく線量が多いといわれている医師は、装着率が一番低かったことから、その影響が顕著である可能性がある。今後、装着率が上がってくる過程で、被ばく線量の推移を注視する必要があると考えられる。また、職種が異なれば、今までの教育背景も異なる。職種によっては、放射線防護に関する教育時間は非常に少ないことが予想されるため、個人被ばく線量計を装着する重要性が理解されず、そのことが装着率低下の要因となったと推察される。今後、適切な放射線防護教育の実施が望まれる。医師診療科別の個人被ばく線量計(胸・腹部)装着率では、放射線科の装着率は他と比較して高く、今までに放射線防護に関する専門教育を受けてきたためと推察される。反対に放射線科以外の診療科の装着率は低く、ICRP の報告でもあるように、放射線防護などのトレーニングを少し、もしくはまったく受けずに診療に携わっていることが要因と

して考えられる(2, 3)。観察場所別の個人被ばく線量計(胸・腹部)装着率では、一般撮影室の他にも放射線治療室、CT室、核医学検査室などが 85%を超えていた。これは、各観察場所のほとんどが、診療放射線技師で集計されていたためと考えられる。

一方、手術室では多職種が関わっている。そのため、放射線防護教育の享受が多様である多職種の影響が、個人被ばく線量計(胸・腹部)装着率低下に繋がったと考えられる。全職種の個人被ばく線量計(頭・頸部)装着率も低く、半分程度しか装着されていないことが明らかとなった。職種別にみると、個人被ばく線量計(胸・腹部)装着率と同様の傾向(診療放射線技師が高く、医師が低い)を示しており、放射線防護教育の重要性が示唆された。また、個人被ばく線量計(胸・腹部)装着率の値とは少し差異があるため、各人が別々で保管・管理されていると推察される。個人被ばく線量計を 2 個持つことの管理の難しさが示唆された。その他、個人被ばく線量計(手指)装着率は非常に低く、ほとんど利用されていないことが明らかとなった。

Vano らは、アルゼンチンのブエノスアイレスの病院で IVR を行う心臓病専門医の個人被ばく線量計装着率は 48-52%、看護師と血管造影検査室の技術者は 88-89%であったと報告している(4)。また Brun らは、フランスの手術室で勤務する外科医と麻酔科医の放射線防護教育実施前の個人被ばく線量計装着率は 17.8-53.3%であったと報告して

いる(5)。どちらもアンケートによる調査であるため、直接比較はできないが、医師の個人被ばく線量計装着率が低いという点と、看護師らの個人被ばく線量計装着率は医師よりも高い点は共通していた。本調査の限界点として、頻度の問題があげられる。今回は1日の調査であるため、たまたま装着していなかった日を調査したことも想定される。また、個人被ばく線量計(手指)装着率に関しては、『持っていないから“無い”』と『持っているが“装着していない”』を見分けることが困難であった。ほとんど利用されていないのは間違いないが、装着率は実際を反映していない可能性がある。

F. 結論

個人被ばく線量計の装着状況を正確に把握することを目的に調査を行った。全職種の個人被ばく線量計(胸・腹部)装着率は65.3%であり、現状の被ばく線量情報は過小評価されている可能性が示唆された。職種別にみると、医師の個人被ばく線量計(胸・腹部)装着率は低く、なかでも整形外科が一番低かった。観察場所別個人被ばく線量計(胸・腹部)装着率では、多職種が関わる手術室が一番低かった。また、個人被ばく線量計(頭・頸部)装着率は53.2%程度であり、個人被ばく線量計(手指)はほとんど利用されていなかった。これらの要因として、個人被ばく線量計を装着する重要性の理解が不足していることが考えられるため、今後、適切な放射線防護教育の実施が望まれる。

G. 研究発表
特になし

H. 論文発表
特になし

I. 学会発表
特になし

J. 知的財産権の出願・登録状況(予定を含む。)
特になし

K. 参考文献

1. Ministry of Health Labour and Welfare. The 5th meeting for reviewing the exposure limits of the crystalline lens of the eye: Japan. <https://www.mhlw.go.jp/content/11201000/000519683.pdf>. Accessed 11 August 2020.
2. International Commission on Radiological Protection, Clement CH, Ogino H, López PO. Occupational radiological protection in interventional procedures: Published for the International Commission on Radiological Protection by SAGE, 2018.
3. International Commission on Radiological Protection, Clement CH, Rehani MM. Radiological protection in fluoroscopically guided procedures performed outside the imaging department: Published for the International Commission on Radiological Protection by Elsevier, 2012.
4. Vano E, Kleiman NJ, Duran A, Romano-Miller M, Rehani MM. Radiation-associated lens opacities in catheterization personnel: results of a survey and direct assessments. J

Vasc Interv Radiol 2013;24(2):197-204. doi:
10.1016/j.jvir.2012.10.016

5. Brun A, Mor RA, Bourrelly M, Dalivoust G,
Gazazian G, Boufercha R, Lehucher-Michel
MP, Sari-Minodier I. Radiation protection for
surgeons and anesthetists: practices and

knowledge before and after training. J Radiol
Prot 2018;38(1):175-188. doi: 10.1088/1361-
6498/aa9dbd

表1 放射線業務従事者登録状況

管理状況	人数	比率 (%)
均等被ばく管理 *	592	43.9
不均等被ばく管理 **	626	46.4
無	130	9.6
合計	1348	

* 個人被ばく線量計1個で管理（電離則第8条第3項第1号に該当）

** 個人被ばく線量計2個以上で管理（電離則第8条第3項第2、3号に該当）

表2 職種別個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率

観察場所	対象者		個人被ばく線量計（胸・腹部）*	
	人数	割合 (%)	装着人数	装着率 (%)
血管造影検査室	490	36.4	326	66.5
透視検査室	377	28.0	230	61.0
CT室	116	8.6	102	87.9
手術室	166	12.3	48	28.9
ハイブリッド手術室	40	3.0	24	60.0
一般撮影室	58	4.3	58	100
核医学検査室	27	2.0	23	85.2
放射線治療室	52	3.9	49	94.2
その他	22	1.6	20	90.9
合計	1348		880	65.3

* 電離則第8条第3項第1号に該当

表3 医師診療科別個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率

医師診療科	対象者		個人被ばく線量計（胸・腹部）*	
	人数	割合 (%)	装着人数	装着率 (%)
循環器内科	130	25.0	56	43.1
外科	38	7.3	11	28.9
消化器外科	20	3.9	2	10.0
消化器内科	87	16.8	37	42.5
整形外科	56	10.8	5	8.9
脳神経外科	32	6.2	15	46.9
泌尿器科	31	6.0	10	32.3
放射線科	35	6.7	26	74.3
その他	90	17.3	41	45.6
合計	519		203	39.1

* 電離則第8条第3項第1号に該当

表4 観察場所別個人被ばく線量計（胸・腹部）装着率

観察場所	対象者		個人被ばく線量計（胸・腹部）*	
	人数	割合（%）	装着人数	装着率（%）
血管造影検査室	490	36.4	326	66.5
透視検査室	377	28.0	230	61.0
CT室	116	8.6	102	87.9
手術室	166	12.3	48	28.9
ハイブリッド手術室	40	3.0	24	60.0
一般撮影室	58	4.3	58	100
核医学検査室	27	2.0	23	85.2
放射線治療室	52	3.9	49	94.2
その他	22	1.6	20	90.9
合計	1348		880	65.3

* 電離則第8条第3項第1号に該当

表5 不均等被ばく管理下における職種別個人被ばく線量計（頭・頸部、手指）装着率

職種	対象者		個人被ばく線量計（頭・頸部）*		個人被ばく線量計（手指）**	
	人数	割合（%）	装着人数	装着率（%）	装着人数	装着率（%）
医師	272	43.5	91	33.5	3	1.1
看護師	144	23.0	93	64.6	1	0.7
診療放射線技師	172	27.5	125	72.7	9	5.2
臨床工学技士	37	5.9	24	64.9	0	0
その他	1	0.2	0	0	0	0
合計	626		333	53.2	13	2.1

* 電離則第8条第3項第2号に該当

** 電離則第8条第3項第3号に該当

表6 放射線業務従事者登録無の職種別内訳

職種	人数	割合（%）
医師	50	38.5
看護師	59	45.4
診療放射線技師	0	0
臨床工学技士	9	6.9
その他	12	9.2
合計	130	9.6

不均等被ばくを伴う放射線業務における被ばく線量の実態調査と線量低減に向けた
課題評価に関する研究

【水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査(医療分野の放射線の計測評価と被ばく防護)】

研究分担者 千田 浩一(東北大学・災害科学国際研究所/大学院医学系研究科・教授)

研究要旨

令和2年度(2020年度)は、医療分野の放射線の計測評価と被ばく防護に関する下記の有用な臨床的検討ができた。(査読付き論文成果は2編:英文1 和文1)。

・**心臓 IVR での水晶体線量の詳細評価**:治療部位(RCA、LAD、LCX)ごとに分けて検討した結果、PCI 医師においては、各患者パラメータなどの装置表示値から水晶体線量を推定するのは困難であった。そのため、正確な水晶体線量を把握するためには実際に線量計を装着して測定すべきである。PCI 医師の水晶体線量計は左眼に装着する必要があるが、PCI は治療部位(RCA、LAD、LCX)によって線量比が異なるため、左眼の線量からほかの位置(右眼)の線量を外挿する場合は治療部位ごとに分けて行うべきである。心臓 IVR に従事する看護師においても、正確な水晶体線量を把握するためには水晶体線量計を装着して測定することが望ましい。ABL に関しては右眼の線量が最も高い結果となり、PCI に関しては位置(左、中央、右)に違いで大きな差はない結果となった。したがって、看護師においては安全側に水晶体線量を評価するためには、線量計を右眼に装着することが必要な場合がある。

・**気管支鏡検査での水晶体線量の詳細評価**:透視ガイド下の気管支鏡検査スタッフの眼の被ばく線量を評価した。特に医師では、20mSv /年を超える可能性がある。したがって気管支鏡検査のスタッフの眼の被ばく線量には十分注意する必要がある。被ばく線量を減らすためには鉛防護メガネの着用が推奨される。さらに、正確な線量を測定するためには DOSIRIS のような眼の被ばく線量を、直接測定できる線量計の使用が必要である。

・**ポータブル撮影での水晶体線量の詳細評価**:ポータブル X 線撮影時の診療放射線技師の水晶体線量測定結果より、撮影件数の多い施設においては、十分な被ばく防護策を講じない場合には線量限度に近い値となる可能性が示唆された。よってポータブル X 線撮影に従事する診療放射線技師は、適切な被ばく防護措置と被ばく線量評価を行う必要があると考える。水晶体線量評価については、プロテクターの外側、頸部に線量計を装着することでおおむね評価することが可能である。被ばく防護については、X 線照射時に患者から十分な距離をとることが非常に有効であるため、この点は常に意識する必要があると考える。ただし患者から距離をとることが困難な場合もあるため、その際はポータブル撮影時には Pb 眼鏡やプロテクター等の防護具を適切に使用して被ばく防護に努めることが重要であると考えられる。

*主な研究協力者:稲葉 洋平(東北大学災害科学国際研究所 助教)

A. 研究目的

当分担研究は、放射線医療施設等における従事者が受けている眼の水晶体の被ばく線量と放射線防護の実態を把握するとともに、被ばく線量の適切な推定方法を確認することで、新線量限度取り入れに関する課題整理等に資することを目的とする。

そのために2020年度(令和2年度)は、**1.** 心臓 IVR での水晶体線量の詳細評価、**2.** 気管支鏡検査での水晶体線量の詳細評価、そして **3.** ポータブル撮影での水晶体線量の詳細評価について主に実施した。

B. 研究方法

1. 心臓 IVR での水晶体線量の詳細評価

1-1. 心臓 IVR 施行医師(1件毎の水晶体線量測定):PCI 医師における PCI 治療部位別の詳細検討

特に心臓 IVR 領域において、術者が適切な放射線防護を行わなければ新たに勧告された水晶体線量限度である 20 mSv/年(5年平均)を超過する危険性があることが明らかにされている。

そこで、心臓 IVR (経皮的カテーテル冠動脈インターベンション、percutaneous coronary intervention; PCI) での水晶体線量の詳細評価を行った。

(1) 使用機器

小型素子システムは Dose Ace (千代田テクノル) である。ガラス線量計素子は GD-352M であり、低エネルギー補償フィルタ付きホルダ(寸法 $\Phi 4.3 \times 14.5$ mm)を用いた。ガラス線量計リーダーは FGD-1000、読み取りマガジンは FGD-M151、アニール用電気炉は NEW-1CT、アニール用マガジンは FGD-C101、プレヒート用恒温器は DKN302、プレヒートトレイは FGD-C102 を用いた。なお、各素子

は校正済みである。

(2) 測定方法

はじめにガラス素子の欠け、汚れ、白曇りがないことを確認し、汚れがある場合はエタノールによる拭き取り又は洗浄を行った。次に、アニール用マガジン(FGD-C101)にガラス素子をセットし、アニール用電気炉(NEW-1CT)に入れ 400°C で 20 分保持し、その後、約 40°C 以下の時に取り出し、そして、標準用読み取りマガジン(FGD-M151)を使用し、初期値(プレドーズ)を読み取り記録した。

使用(照射)後は、ホルダ毎プレヒートトレイに並べ、プレヒート用恒温器(DKN302)に入れ 70°C で 30 分保持し、その後、室温になるまで放置し取り出し、次に、標準用読み取りマガジンをうい、読み取り・記録を行った。読み取り後はガラス素子の汚れ等を拭き取ってデジケータの中に入れ保管した。

心臓 IVR 医師の水晶体線量の詳細測定は無作為に実施した。

左前下行枝(LAD)への PCI、左回旋(LCx)枝への PCI、右冠動脈(RCA)への PCI の 3 分類に分け詳細に比較した。

各 PCI に使用した撮影・透視角度の分析も行ったが、それらの概略は次の通りである。LAD への PCI は右前斜位(RAO)、cranial30° RAO30°、cranial30°。RCA への PCI は左前斜位(LAO) 60°、LAO90°、cranial30°。

カテーテル挿入位置は原則として左橈骨アプローチである。

各検査において蛍光ガラス線量計を装着し、検査が終わり次第線量計を回収し測定した。(1 検査(手技)ごとに測定)。また、各検査の総透視時間、AK(Air Karma)、DAP(Dose Area Product)も記録した。そして、

得られたデータから各線量比を算出し、左右差の評価を行った。このほかにも、水晶体線量と各患者パラメータとの相関及び各装着位置の相関も評価した。

対象の PCI 施行医師にガラス線量計を左眼、眉間（中央）、右眼付近にそれぞれに装着した（左右位置は、眼尻の水晶体近傍付近に装着）。

PCI 施行医師は患者の右側に位置し、画像表示モニタは術者の前方やや右に位置していた。防護メガネ無しの状態での評価である。また天吊り防護板は原則的に使用した。

(3) 統計解析

3 群間の比較には Kruskal-Wallis 検定を使用し、p 値が 0.05 未満であった場合に有意差があると判断した。また Kruskal-Wallis 検定で有意差が認められた場合には、多重比較法として Steel-Dwass 検定を実施した。

1-2. 心臓 IVR に従事する看護師の水晶体線量の詳細評価

測定対象は、心臓 IVR に従事する看護師であり、無作為に ABL (Ablation、カテーテルアブレーション) および PCI について測定を実施した

看護師の線量測定は、ABL については 1 検査ごと、PCI については 1 検査もしくは 2 検査以上の合算で評価した。

使用機器および測定方法等は上記の心臓 IVR 医師と同様である。

2. 気管支鏡検査での水晶体線量の詳細評価(医師、看護師)

透視ガイド下での気管支鏡検査の臨床的価値は明らかだが、検査中にスタッフが受ける放射線量に関する研究はほとんどない。さらに、眼の被ばく線量に関する研究は全

くない。

したがって気管支鏡検査中に医療従事者が受ける眼の被ばく線量を含む、医療従事者の眼の被ばく線量の評価は不可欠である。気管支鏡検査を行うスタッフの現在の眼の被ばく線量を明らかにすることである。さらに直接測定した眼の被ばく線量を頸部の個人線量計の値と比較した。

(1) 対象

気管支鏡検査の手技は仰臥位で行われ、光ファイバー気管支鏡 (BF-P240、BF-260、BF-P260F、BF-P260F-OL8、Olympus、Japan) を用いた。局所麻酔下で行われ、スコープは傾向的に挿入された。

検査に携わった 8 名の医師と 3 名の看護師の眼の被ばく線量は、線量計を使用して 1 か月間隔で測定した。この期間内累積 6 か月の眼の被ばく線量も計算した。手技中、スタッフは常に防護エプロン（通常は 0.35mm 鉛当量）を着用していたが鉛防護メガネは着用していなかった。イメージインテンシファイア（照射野：11 インチ）を備えたオーバーテーブル X 線透視システム (WINSOPETM20 DREX-WIN20、東芝、Japan) を使用した (Fig. 1)。気管支鏡の挿入をガイドするために連続 X 線透視が使用された。透視 X 線の管電圧 (エネルギー) は約 80kVp であった。

手技中、主治医は患者の頭側に立っており、X 線管と患者は主治医の左側に位置していた。対照的に看護師と患者の距離は多少のばらつきはあったがおおよそ 2m だった。

(2) 測定方法

気管支鏡検査スタッフ (医師、看護師) は DOSIRIS (IRSN、フランス) を使用した。DOSIRIS は千代田テクノロ (Japan) によって提供と校正がなされている。1 か月の測定のあと眼線量計は読み取りのために千

代田テクノルへ返却した。

スタッフは全員左眼のすぐ横に眼線量計 (DOSIRIS) を着用し、さらに看護師は全員右眼のすぐ横に眼線量計 (DOSIRIS) も着用した。すなわち看護師は両側に眼線量計を着用した。加えて4名の医師は右眼のすぐ横にも眼線量計 (DOSIRIS) を着用した(すなわち4名の医師は両側に DOSIRIS を着用)。

さらに、ガラスバッジ個人線量計 (70 μ m 線量当量、[Hp (0.07)]、千代田テクノル) を使用した。ガラスバッジ個人線量計は、首の左側の鉛エプロンの外側に装着した。

3mm 線量当量の眼線量計と 0.07mm 線量当量の頸部の線量計の値の相関関係を調べ、個人線量計から眼の被ばく線量が推定可能かどうかを検討した。推定年間眼線量は次のように決定された。

推定年間眼線量 (mSv /年) = 測定された線量 6 ヶ月 \times 2

(3) 統計解析

ウィルコクソン符号順位検定を使用して、2つのグループ (頸部線量計線量と眼線量計線量、および左側線量と右側線量) の眼の線量を比較した。頸部と眼の線量計の測定値間の相関は、線形回帰によって分析された。統計的有意性は $p < 0.05$ とした。



Fig.1 気管支鏡検査での水晶体線量等の測定例 (医師、看護師)

3. ポータブル撮影での水晶体線量の詳細評価 (放射線技師)

ポータブル X 線撮影は移動が困難な患者の検査を行うことが可能であり、現在では一般病棟や集中治療室 (Intensive Care Unit : ICU)、手術室等、様々な場所で実施されている。ポータブル撮影では放射線技師と患者との距離が近くなる場合も多く、放射線技師の被ばく線量の評価ならびに放射線被ばく防護は重要である。

つまりポータブル撮影に携わる医療従事者についても水晶体被曝に関して、適切な放射線防護措置が必要であると考えられる。またポータブル撮影での放射線技師の水晶体線量を詳細に測定評価した報告はほとんどない。そこで臨床でポータブル X 線撮影に従事する診療放射線技師に線量計を装着し、実際の水晶体被ばく線量について詳細に調査した。

(1) 測定方法等

水晶体用線量計を使用し、実際に臨床でポータブル X 線撮影に従事する放射線技師の水晶体被ばく線量の測定、評価を行った。

使用した線量計は 3mm 線量当量の測定が可能な水晶体用線量計 DOSIRIS (千代田テクノル) およびガラスバッジ (千代田テクノル) である。線量計装着位置の概観を Fig.2 に示す。DOSIRIS は左眼の近傍に、ガラスバッジは左頸部に装着した。測定対象はポータブル X 線撮影に携わる診療放射線技師で、人数は計 4 名である。1 月ごとの線量で評価を行った。防護メガネは着用しておらず、線量計 (DOSIRIS、ガラスバッジ) はポータブル撮影時のみ装着した。なお DOSIRIS の測定値は 3mm 線量当量を、ガラスバッジの測定値は 1cm 線量当量と 70 μ m 線量当量のうち高い方の値を使用して評価を行った。

(2) 統計解析

DOSIRIS の測定値とガラスバッジの測定値の解析として、Wilcoxon の順位和検定を使用し、有意差検定を行った。p 値が 0.05 未満であった場合に有意差があると判断した。また縦軸を DOSIRIS の測定値、横軸をガラスバッジの測定値として回帰直線を求め、決定係数 R^2 から両者間の相関を評価した。同様に、ポータブル撮影件数と DOSIRIS の測定値との間の相関についても評価を行った。



Fig.2 ポータブル撮影での放射線技師の線量計装着位置の概観（左眼に DOSIRIS、左頸部プロテクタ外側にガラスバッジ）

C. 研究結果

1. 心臓 IVR での水晶体線量の詳細評価

1-1. 心臓 IVR 医師(1件毎の水晶体線量測定)の結果

・治療部位別の X 線管角度

まず、PCI 手技の治療部位別の X 線管角度の割合を以下に示す。手技 1 件ごとに撮影角度の割合を求め、全手技の平均をとったものである。

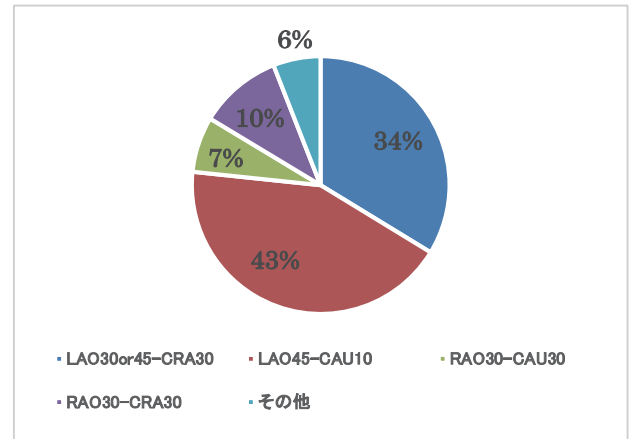


Fig.3 治療部位 RCA での X 線管角度の割合 (LAO-CRA:34%、LAO-CAU:43%)

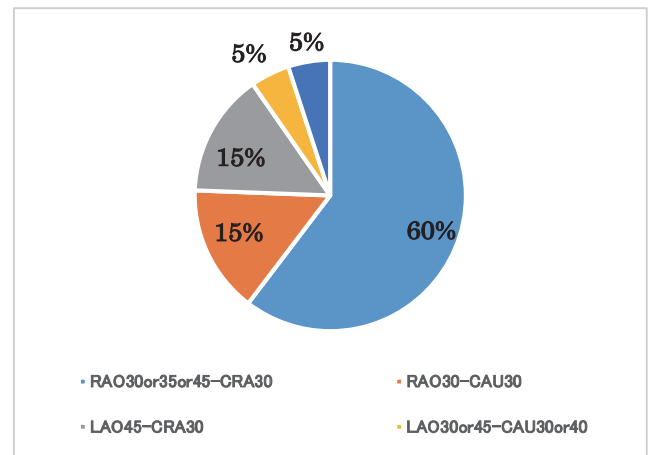


Fig.4 治療部位 LAD での X 線管角度の割合 (RAO-CRA:60%)

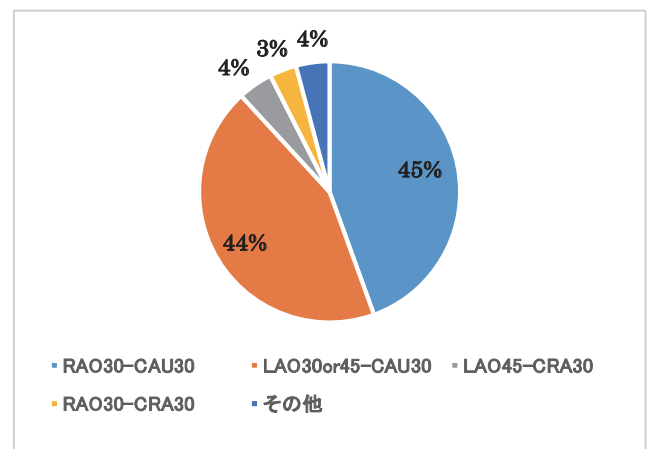


Fig.5 治療部位 LCX での X 線管角度の割合 (RAO-CAU:45%、LAO-CAU:44%)

治療部位別の X 線管角度の割合は、治療部位が RCA の場合は、LAO 方向が多数を占めており、治療部位が LAD の場合は RAO 方向が多数を占める結果となった (Fig. 3, 4)。治療部位が LCX の場合は、LAO と RAO がともにおよそ半数であった (Fig. 5)。

・各治療部位別の線量

PCI 手技における線量等について、治療部位別 (RCA、LAD、LCX) について比較を行った結果を以下に示す (表 1, 2)。

表 1 各治療部位別の線量パラメータ (平均±SD)

	透視時間 (min)	AK (mGy)	DAP (cGy・cm ²)
RCA	18.8± 10.3	934.7± 541.0	9002.9± 4937.2
LAD	18.8± 10.4	863.7± 730.5	7024.6± 5948.9
LCX	18.5± 10.3	1088.9 ±876.2	8250.9± 6641.1

表 2 各治療部位別の心臓 IVR 医師の 1 件当たりの水晶体線量 (左眼、中央、右眼) (平均±SD)

	左眼 (μSv)	中央 (μSv)	右眼 (μSv)	左眼/ 右眼
RCA	174.3± 142.0	71.3± 73.4	16.5± 12.6	11.3 ±5.2
LAD	76.1± 67.8	39.5± 26.0	16.3± 17.5	7.1± 5.4
LCX	77.6± 60.6	39.3± 19.8	14.7± 9.4	6.4± 4.8

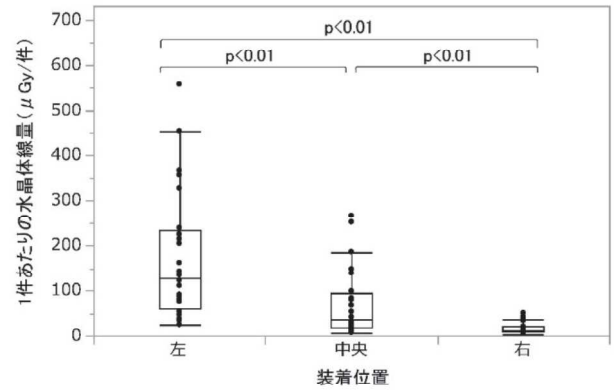


Fig.6 治療部位 RCA での心臓 IVR 医師の 1 件当たりの水晶体線量 (左眼、中央、右眼)

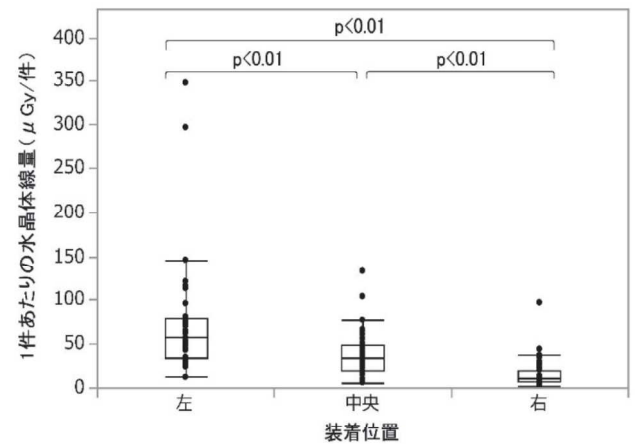


Fig.7 治療部位 LAD における心臓 IVR 医師の 1 件当たりの水晶体線量 (左眼、中央、右眼)

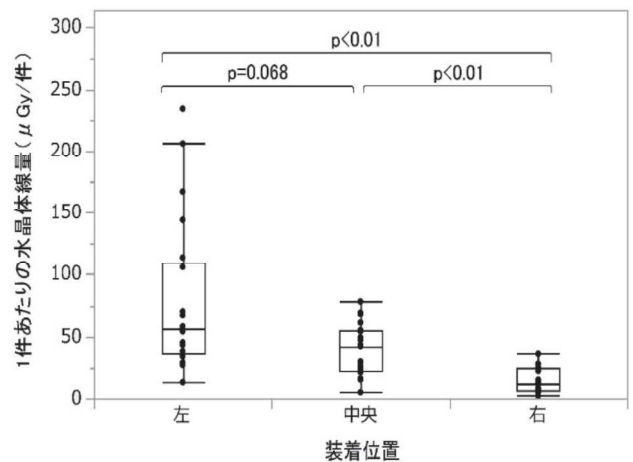


Fig.8 治療部位 LCX における心臓 IVR 医師の 1 件当たりの水晶体線量 (左眼、中央、右眼)

いずれの手技においても心臓 IVR 医師の左眼位置の線量が最も高い結果であった (Fig. 6-8)。

治療部位が RCA の場合には、心臓 IVR 医師の左右の線量比が特に大きい傾向にあった (表 2)。

・治療部位別の水晶体線量と患者線量パラメータとの間の相関

PCI 手技における治療部位別 (RCA、LAD、LCX) の心臓 IVR 医師の水晶体線量 (左眼、中央、右眼) と、患者線量パラメータ (透視時間、AK、DAP) との間の相関を以下に示す。

(表 3)

表 3 各治療部位 (RCA、LAD、LCX) 別の心臓 IVR 医師の水晶体線量 (左眼、中央、右眼) と、患者線量パラメータの相関係数 (r)

	透視時間 (min)	AK (mGy)	DAP (cGy・cm ²)
RCA			
左眼位置	0.621	0.673	0.642
中央	0.341	0.328	0.266
右眼位置	0.512	0.522	0.460
LAD			
左眼位置	0.688	0.695	0.623
中央	0.678	0.834	0.696
右眼位置	0.428	0.655	0.471
LCX			
左眼位置	0.346	0.690	0.653
中央	0.567	0.591	0.415
右眼位置	0.603	0.440	0.330

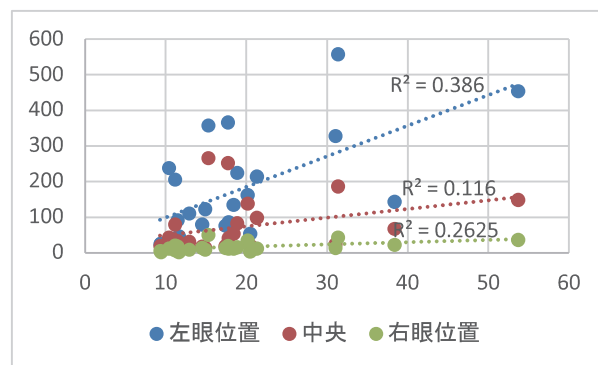


Fig.9 治療部位 RCA における心臓 IVR 医師の水晶体線量 (左眼、中央、右眼) と、透視時間の相関。縦軸：水晶体線量 (μ Sv/件)、横軸：透視時間 (min.)

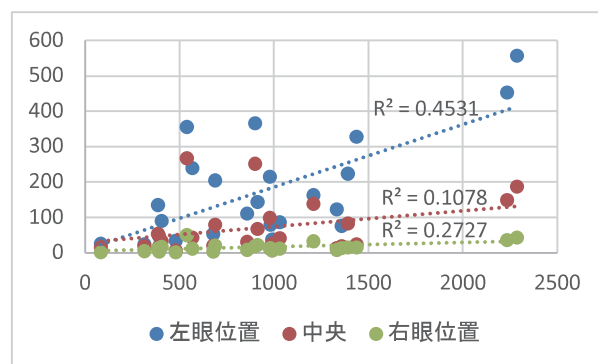


Fig.10 治療部位 RCA における心臓 IVR 医師の水晶体線量 (左眼、中央、右眼) と、AK の相関。縦軸：水晶体線量 (μ Sv/件)、横軸：AK (mGy)

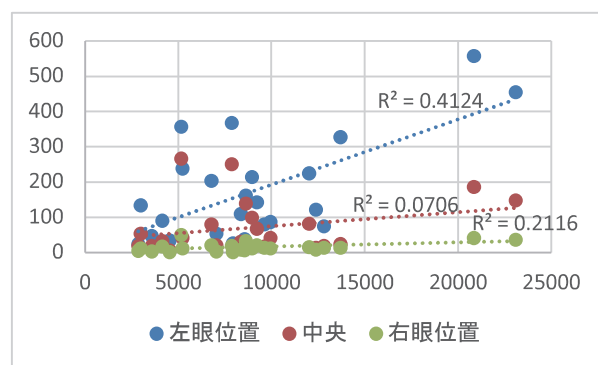


Fig.11 治療部位 RCA における心臓 IVR 医師の水晶体線量 (左眼、中央、右眼) と、DAP の相関。縦軸：水晶体線量 (μ Sv/件)、横軸：AK (cGy・cm²)

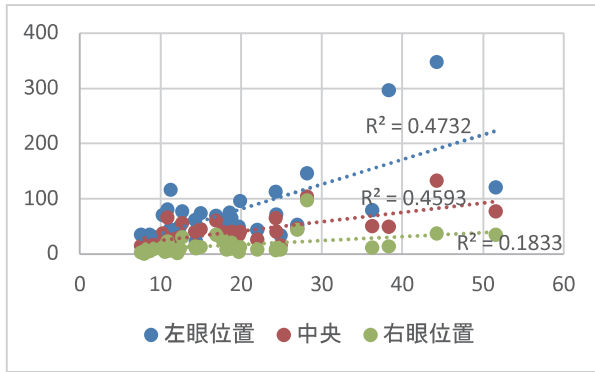


Fig.12 治療部位 LAD における心臓 IVR 医師の水晶体線量（左眼、中央、右眼）と、透視時間の相関． 縦軸：水晶体線量（ μ Sv/件）、横軸：透視時間（min.）

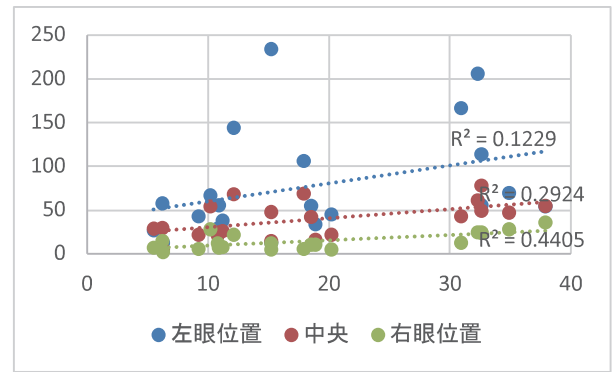


Fig.15 治療部位 LCX における心臓 IVR 医師の水晶体線量（左眼、中央、右眼）と、透視時間の相関． 縦軸：水晶体線量（ μ Sv/件）、横軸：透視時間（min.）

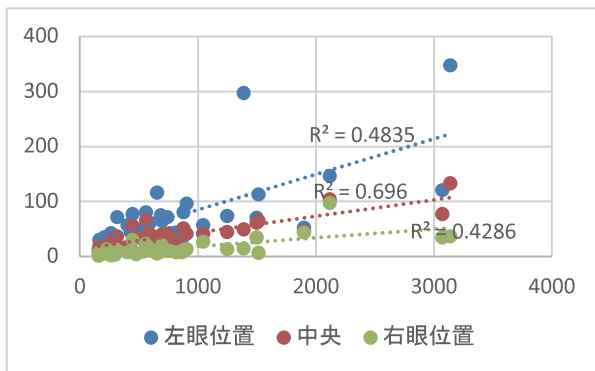


Fig.13 治療部位 LAD における心臓 IVR 医師の水晶体線量（左眼、中央、右眼）と、AK の相関． 縦軸：水晶体線量（ μ Sv/件）、横軸：AK（mGy）

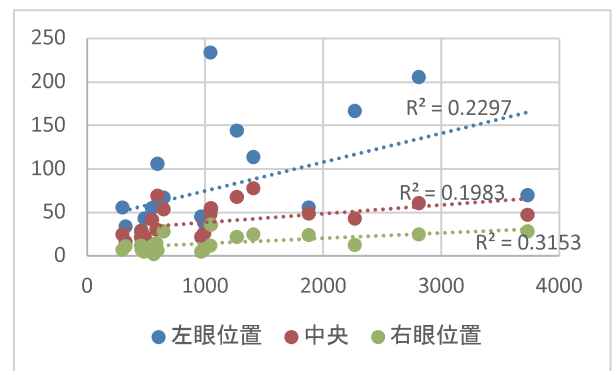


Fig.16 治療部位 LCX における心臓 IVR 医師の水晶体線量（左眼、中央、右眼）と、AK の相関． 縦軸：水晶体線量（ μ Sv/件）、横軸：AK（mGy）

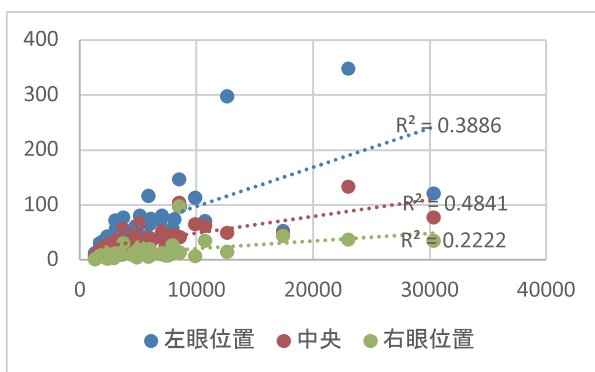


Fig.14 治療部位 LAD における心臓 IVR 医師の水晶体線量（左眼、中央、右眼）と、DAP の相関． 縦軸：水晶体線量（ μ Sv/件）、横軸：AK（ $cGy \cdot cm^2$ ）

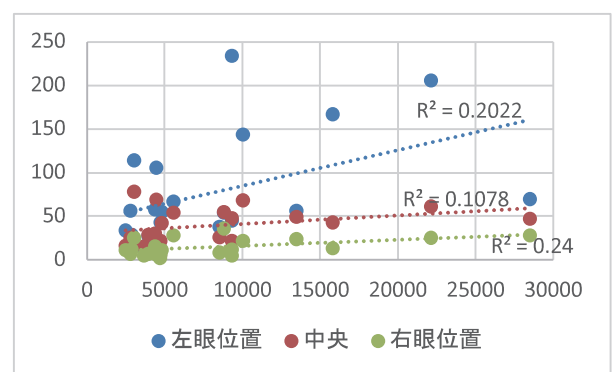


Fig.17 治療部位 LCX における心臓 IVR 医師の水晶体線量（左眼、中央、右眼）と、DAP の相関． 縦軸：水晶体線量（ μ Sv/件）、横軸：AK（ $cGy \cdot cm^2$ ）

・心臓 IVR 術者の身長と水晶体線量（左眼、中央、右眼）の関係

IVR 手技において、術者の身長が低い方が被写体等からの散乱線の影響を受けやすく、水晶体線量も多くなるかもしれない。そこで心臓 IVR 医師の身長を、平均以上・平均未満（平均：171cm）に分け、有意差を P 値で評価するために各装着位置（左眼、中央、右眼）に対して t 検定（自由度：88）を行いその影響について評価した。

その結果、すべての装着位置において身長による有意差は見られなかった。このことから、身長の高低は PCI においては水晶体線量の違いに寄与しない可能性があると考えられる。（Fig. 18）

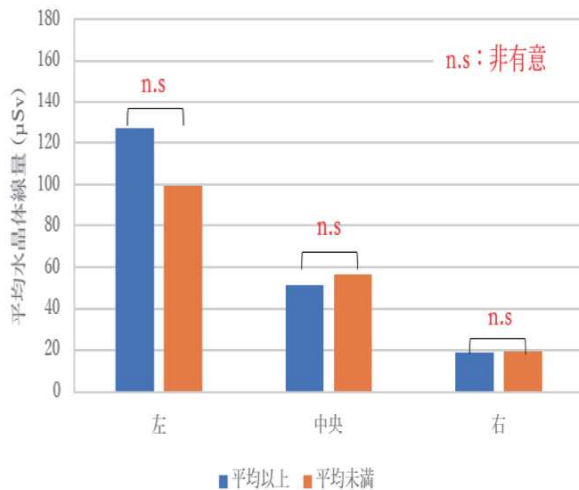


Fig.18 PCI における術者身長別（平均 171cm 以上と平均未満）の水晶体線量（左眼、中央、右眼）。

1-2. 心臓 IVR に従事する看護師の水晶体線量の詳細評価結果

・心臓 IVR 看護師の線量

心臓 IVR に従事する看護師における対象検査（ABL, PCI）の患者線量パラメータおよび水晶体線量（左眼、中央、右眼について、以下に示す（表 4、5）。

表 4 看護師における対象検査（ABL, PCI）の患者線量パラメータ（透視時間、AK、DAP）（平均±SD）

	透視時間 (min)	AK (mGy)	DAP (cGy・cm ²)
ABL	42.0±15.2	331.3±159.2	4631.7±1990.4
PCI	23.7±14.0	1179.8±937.6	9422.2±8152.0

表 5 看護師における対象検査（ABL, PCI）の 1 件当たりの水晶体線量（左眼、中央、右眼）（平均±SD）

	左眼 (μSv/件)	中央 (μSv/件)	右眼 (μSv/件)
ABL	21.7±9.3	26.3±12.3	36.9±18.9
PCI	25.3±33.2	23.3±33.2	20.4±31.4

・対象検査（ABL, PCI）別の看護師水晶体線量と患者線量パラメータとの間の相関

PCI 手技における治療部位別の心臓 IVR 看護師の水晶体線量（左眼、中央、右眼）と、患者線量パラメータ（透視時間、AK、DAP）との間の相関を以下に示す（Fig. 19-26）。

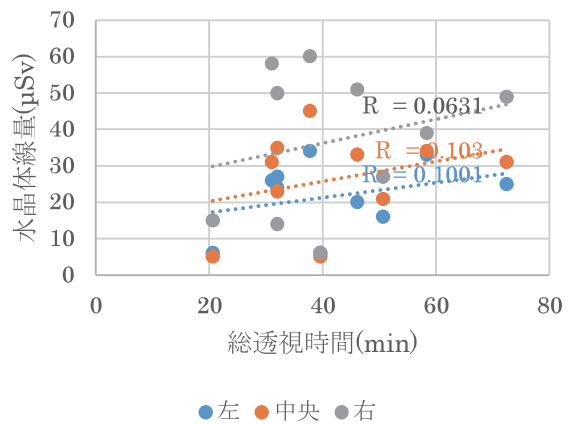


Fig.19 ABL における看護師の水晶体線量（左眼、中央、右眼）と透視時間の相関。

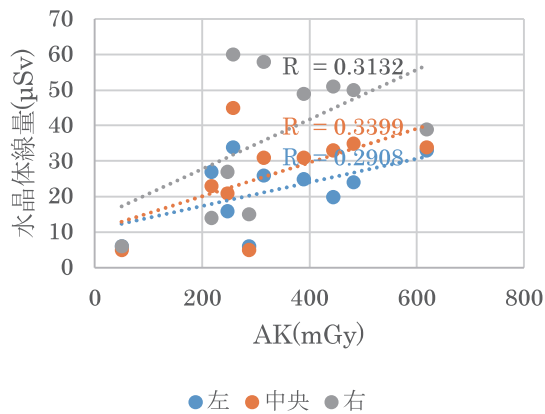


Fig.20 ABLにおける看護師の水晶体線量(左眼、中央、右眼)とAKの相関。

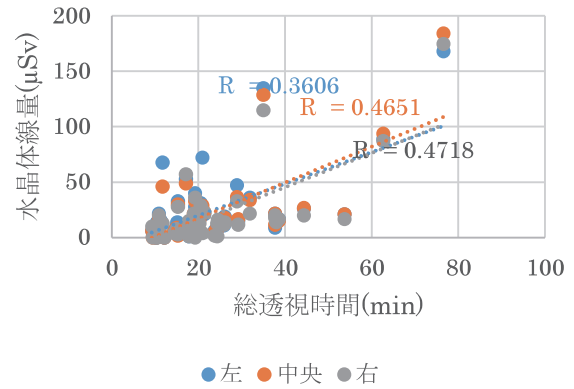


Fig.23 PCIにおける看護師の水晶体線量(左眼、中央、右眼)と透視時間の相関。

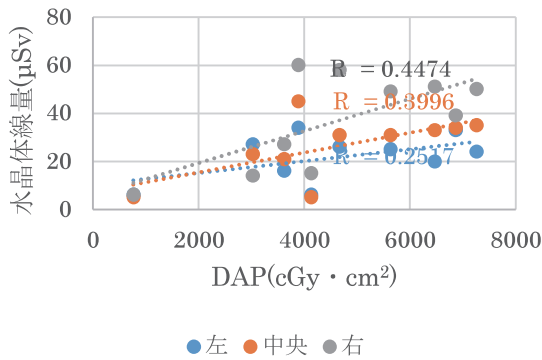


Fig.21 ABLにおける看護師の水晶体線量(左眼、中央、右眼)とDAPの相関。

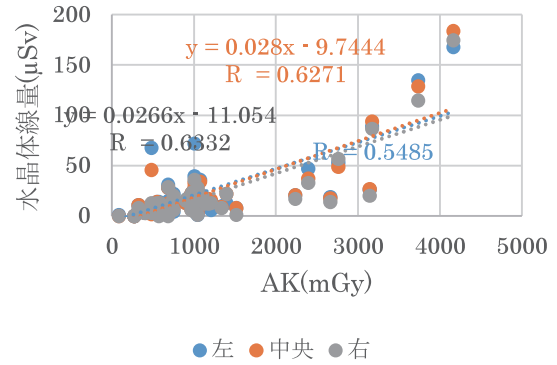


Fig.24 PCIにおける看護師の水晶体線量(左眼、中央、右眼)とAKの相関。

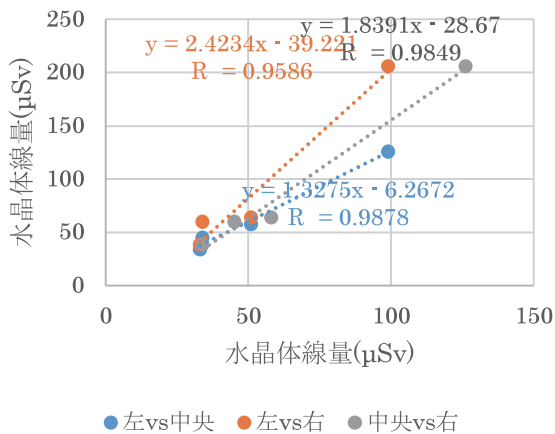


Fig.22 ABLにおける看護師の各水晶体線量(左眼、中央、右眼)間の相関。

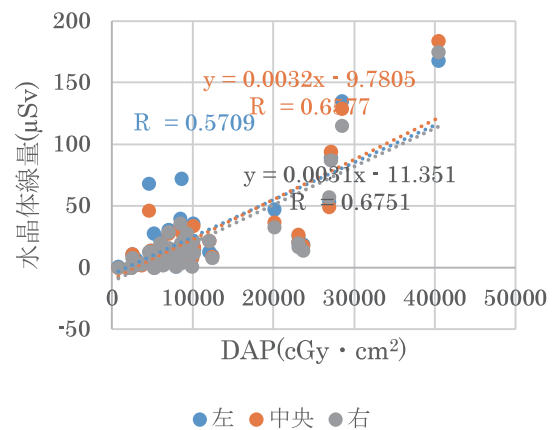


Fig.25 PCIにおける看護師の水晶体線量(左眼、中央、右眼)とDAPの相関。

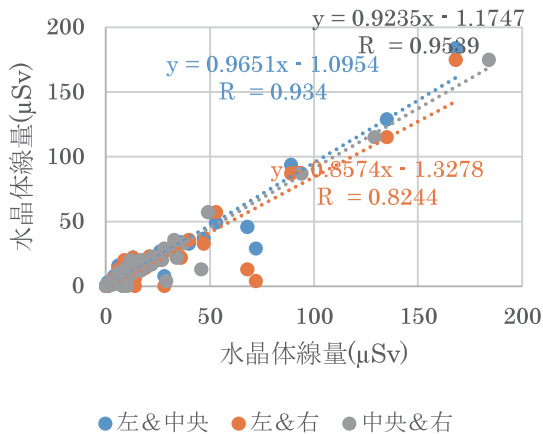


Fig.26 PCIにおける看護師の各水晶体線量(左眼、中央、右眼)間の相関。

2. 気管支鏡検査での水晶体線量の詳細評価結果(医師、看護師)

スタッフが受けた眼の線量は、看護師よりも医師の方が著しく高かった。本研究対象の6ヶ月の気管支鏡検査における透視時間(平均±SD)は4.3±3.5分であった。

・気管支鏡検査医師

表6は、6か月間の気管支鏡検査医師の線量測定結果をまとめたものである。

表6 気管支鏡検査医師(鉛眼鏡無)の6ヶ月間の平均線量(最小-最大)。(頸部バッジの3mm線量当量は特別に算出)

Neck badge (mSv/6 months)			DOSIRIS (mSv/ 6 months)
1cm 線量当量	70μm 線量当量	3mm 線量当量	3mm 線量当量
5.03 (0.24-11.01)	5.55 (0.30-12.20)	5.48 (0.28-12.03)	7.68 (0.57-15.82)

なお年間換算線量はDOSIRISが15.4±10.5(mSv/y)、neck badge(70μm線量当量)は11.1±8.3(mSv/y)であった。

次に気管支鏡検査医師(鉛眼鏡無)のDOSIRISとガラスバッジの相関を示す。両者には強い相関があった。

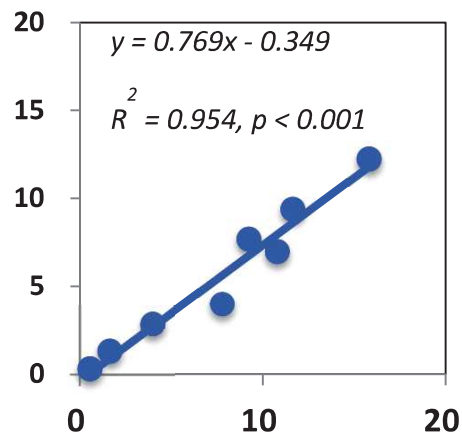


Fig.27 気管支鏡検査医師(鉛眼鏡無)のDOSIRISとガラスバッジの相関-6カ月間。縦軸:頸部線量(70μm線量当量mSv)、横軸:DOSIRIS(mSv)

次に気管支鏡検査医師(鉛眼鏡無)の左右DOSIRIS線量の相関を示す。両者には弱い相関があった。

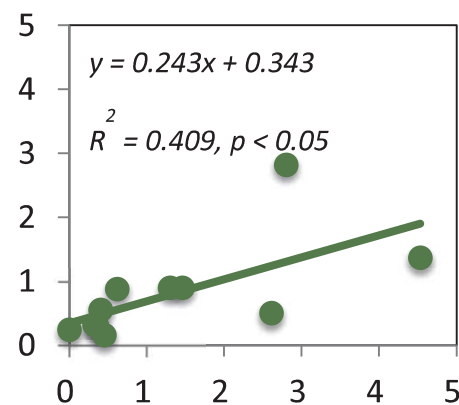


Fig.28 気管支鏡検査医師(鉛眼鏡無)の左右DOSIRIS線量の相関(mSv/1カ月)。縦軸:右眼DOSIRIS線量(mSv)、横軸:左眼DOSIRIS線量(mSv)

表 7 気管支鏡検査医師(鉛眼鏡無)の DOSIRIS 線量の左右差. 1 ヶ月間の平均線量 (最小-最大) 1.67 倍左側の線量が高い

左側	右側
1.35 (0-4.53)	0.81 (0.15-2.81)

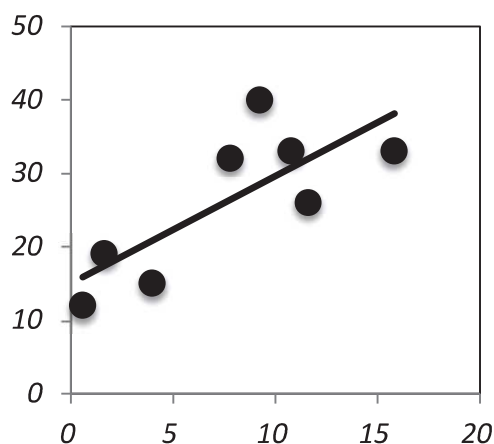


Fig.29 気管支鏡検査医師(鉛眼鏡無)の DOSIRIS 線量と第一術者件数 (mSv/6 カ月) の相関. 縦軸: 第一術者件数、横軸: DOSIRIS 線量 (mSv) $y = 1.49x + 15.06$ $R^2 = 0.595$, $p < 0.001$

・気管支鏡検査看護師

看護師の線量測定結果を以下に示す。

表 8 気管支鏡検査看護師(鉛眼鏡無)の 6 ヶ月間の平均線量 (最小-最大). (頸部バッジの 3mm 線量当量は特別に算出)

Neck badge (mSv/6 months)			DOSIRIS
1cm 線量当量	70 μm 線量当量	3mm 線量当量	3mm 線量当量
1.54 (0.10-2.54)	1.63 (0.10-2.62)	1.62 (0.10-2.65)	2.41 (0.19-3.76)

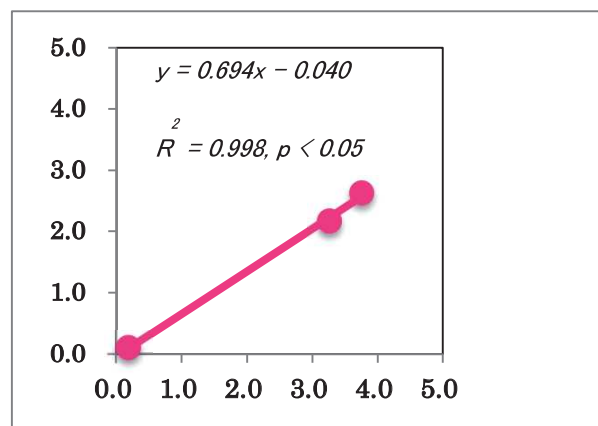


Fig.30 気管支鏡検査看護師(鉛眼鏡無)の DOSIRIS とガラスバッジの相関-6 カ月間. 縦軸: 頸部線量 (70 μm 線量当量 mSv)、横軸: DOSIRIS (mSv)

なお看護師の年間換算線量は DOSIRIS が 4.81 ± 3.87 (mSv/y)、neck badge (70 μm 線量当量) は 3.26 ± 2.69 (mSv/y)であった。

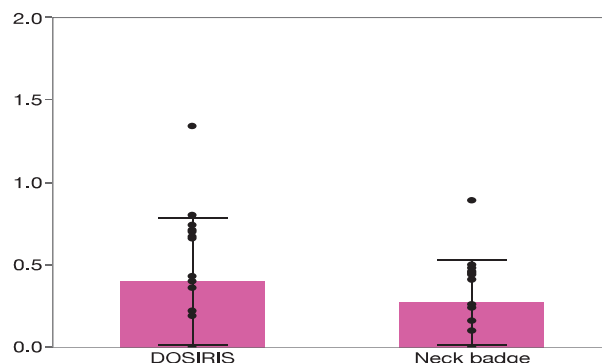


Fig.30 気管支鏡検査看護師(鉛眼鏡無)の DOSIRIS (mSv) とガラスバッジ (70 μm 線量当量 mSv) の線量-1 カ月間.

表 9 気管支鏡検査看護師の DOSIRIS 線量の左右差. 1 ヶ月間の平均線量 (最小-最大) 1.48 倍左側の線量が高い

左側	右側
0.40 (0-1.34)	0.27 (0-0.81)

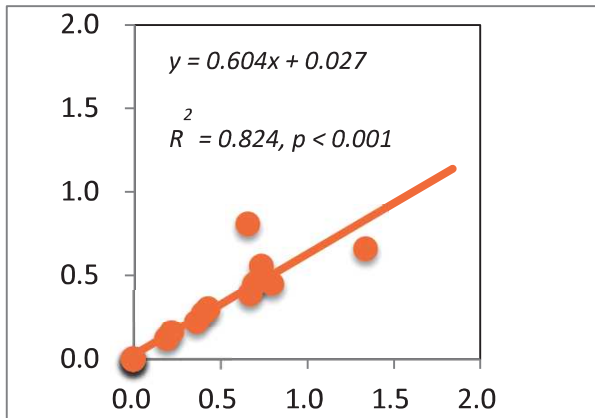


Fig.31 気管支鏡検査看護師(鉛眼鏡無)の左右 DOSIRIS 線量の相関 (mSv/1 カ月) . 縦軸 : 右眼 DOSIRIS 線量 (mSv)、横軸 : 左眼 DOSIRIS 線量 (mSv)

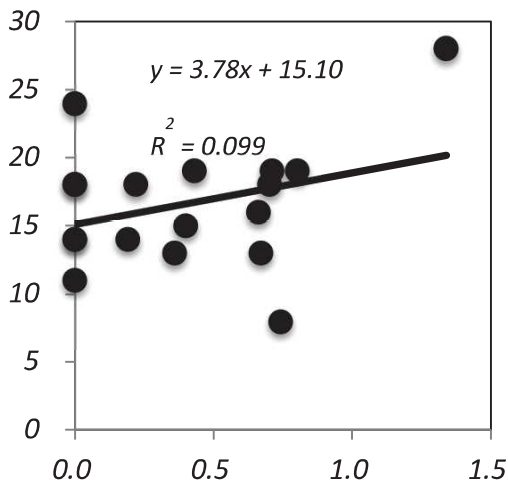


Fig.32 気管支鏡検査看護師(鉛眼鏡無)の DOSIRIS 線量と従事件数の相関 (mSv/1 カ月) の相関. 縦軸 : 従事件数、横軸 : DOSIRIS 線量 (mSv)

3. ポータブル撮影での水晶体線量の詳細評価結果(放射線技師)

・線量と件数

ポータブル X 線における DOSIRIS およびガラスバッジそれぞれの線量計の測定値、および 1 人の放射線技師が 1 か月間に実施したポータブル撮影の件数を以下に示す。

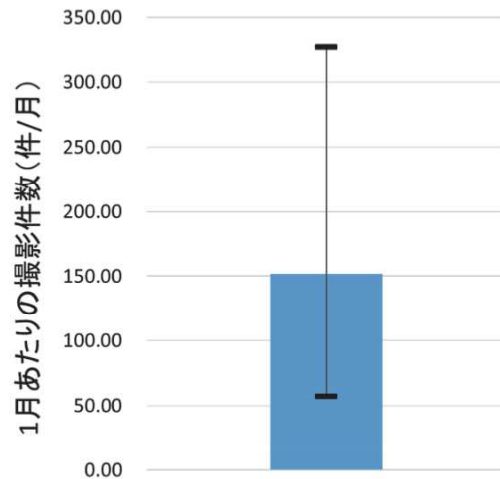


Fig.33 ポータブル撮影件数(1 カ月当り)

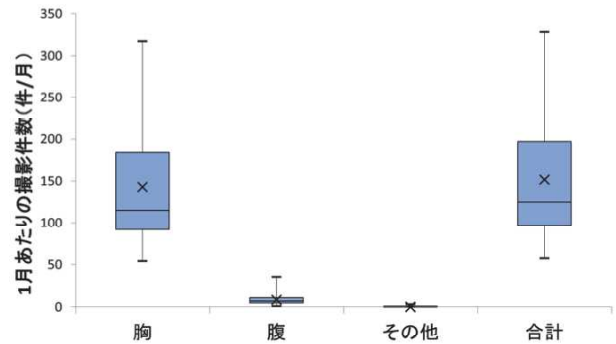


Fig.34 撮影部位ごとのポータブル撮影件数 (1 カ月当り)

1 人の放射線技師が 1 か月間に実施したポータブル撮影の件数は、平均 151.96 件、最大で 328 件であった。

またポータブル撮影部位のほとんどは胸部撮影であった。

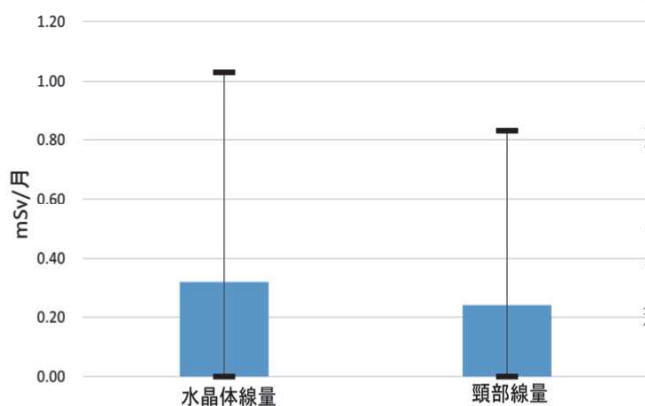


Fig.35 ポータブル撮影時の放射線技師の線量 (1 カ月当り)

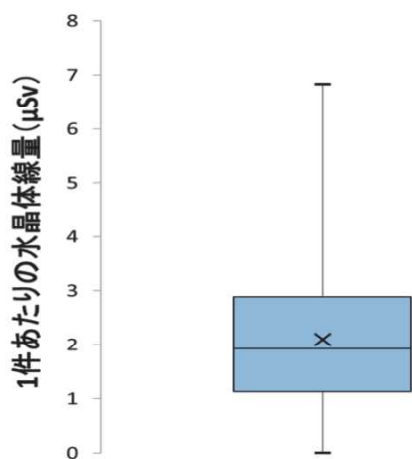


Fig.36 ポータブル撮影時の 1 件あたりの放射線技師の水晶体線量

DOSIRIS で測定した水晶体線量は平均で 0.32mSv/月、最大で 1.03mSv/月であった。また同時にガラスバッジで測定した頸部の線量は、平均で 0.24mSv/月、最大で 0.83mSv/月であった。

・ポータブル撮影時の 1 件あたりの放射線技師の線量等の相関

DOSIRIS の測定値とガラスバッジの測定値を比較した結果、 $p=0.351$ と両者の間に

有意な差は認められなかった。

DOSIRIS で測定した水晶体線量とガラスバッジで測定した頸部線量の相関は、決定係数 $R^2=0.9588$ と強い相関がみられた。

DOSIRIS で測定した水晶体線量と、1 人の放射線技師が 1 か月間に実施したポータブル撮影件数との相関は、 $R^2=0.4471$ と中程度の相関がみられた。

D. 考察

1. 心臓 IVR での水晶体線量の詳細評価

心臓 IVR 医師

PCI 医師において、左眼の線量が右眼よりも大きい結果であり、さらにどの治療部位 (RCA、LAD、LCX) の PCI の検査においても左眼の線量が最も高い結果となることが明らかになった。これは、どの治療部位 (RCA、LAD、LCX) においても、医師 (術者) の立ち位置が患者に対して右側、すなわち X 線管が医師の左眼に近い位置になるからであると考えられる。またどの治療部位 (RCA、LAD、LCX) の PCI の検査においても、各装着位置と各患者パラメータの間には相関は見られなかった。これは、手技の難度の違いや、途中で第 1 術者と第 2 術者が交代したことなどが原因であると考えられる。

X 線管角度の違いに関して、X 線管の角度が異なる要因として治療部位の違いが挙げられる。左前下行枝 (LAD) に対しては RA0 view 側、右冠動脈 (RCA) では LA0 view 側に X 線管を配置することが多い。左眼で有意差が見られたのは、左前下行枝の時は基本的に RA030° 及び cranial30° 程度で撮影・透視をすることが多いため、X 線管がより術者の右側に近くなったことが比較的多いことが考えられる。

この結果から、PCI において水晶体専用線

量計を用いて線量管理する際は注意が必要である。例えば、左眼の線量のみを測定し、それから右眼の線量を外挿する場合、治療部位によって過小/過大評価してしまう恐れがある。それを防ぐためには治療部位ごとに換算係数を決定しておくことも必要かと思われる。

身長の違いに関して、術者の身長が低い方が被写体及び X 線管からの散乱線の影響を受けやすいと思われる。そこで医師の身長を平均以上・平均未満（平均：171cm）に分け、有意差を P 値で評価するために各装着位置に対して t 検定を行いその影響について評価したが、すべての装着位置において身長による有意差は見られなかった。このことから、身長の高さは PCI においては水晶体線量の違いにあまり寄与しない可能性があると考えられる。

心臓 IVR に従事する看護師

ABL（アブレーション）はカテーテルによる不整脈治療であり、透視時間が長くなる場合も多い。ABL については看護師の右眼の平均線量が最も高くなった。これは、患者頸部にカテーテルを挿入する際、X 線管が介助する看護師の右眼側になる場所に位置することが多いためであると考えられる。また各装着位置の相関に関してはいずれの位置においても相関が見られた。しかし、対象件数が少ないため、今後件数を増やし再検討する必要がある。

PCI については、ほとんどの看護師で線量計装着位置（左眼、中央、右眼）による線量の違いは見られなかった。件数が少ない場合は誤差が大きくなる。また経験が浅く、放射線被ばくに関する教育不足している看護師の場合は線量増加に注意する必要があると思われる。

また各装着位置の相関に関しては、PCI においても、いずれの位置（左眼、中央、右眼）においても相関が見られた。これは医師と比較して看護師は動きの自由度が高いため、線量の偏りが小さくなったためであると考えられる。

2. 気管支鏡検査での水晶体線量の詳細評価（医師、看護師）

本研究は透視ガイド下気管支鏡検査を実施するスタッフ（医師および看護師）の眼の被ばく線量に関する詳細な報告である。

当研究では、医師と看護師への平均±SD 眼線量（DOSIRIS）は、それぞれ 7.68 ± 5.27 と 2.41 ± 1.94 mSv / 6 月であった。気管支鏡検査スタッフ（医師と看護師）、特に医師の眼の被ばく線量は心臓インターベンショナルラジオロジースタッフと同程度の高さだった。気管支鏡検査の医師の眼の被ばく線量は、新しい規制線量限度を超える可能性がある。したがって、気管支鏡検査スタッフ、特に医師は手技中に鉛防護メガネを着用することを推奨する。さらに手技中にける鉛防護メガネの遮蔽効果の評価も必要となる。（気管支鏡検査においても、手技中に鉛防護メガネを着用すると約 50%の遮蔽効果が得られると推定される。）

また、可能であれば天吊り防護板の使用も推奨される。ただし、実際は手技の邪魔になることが多いためより効果的に使用できる防護具の開発が求められる。

日本の気管支鏡検査はオーバーテーブル型の X 線装置で行われることが多い。オーバーテーブル型（A-P 方向）を使用する場合、眼を含むスタッフの上半身は散乱線による高線量の被ばくを受ける。したがって、眼の被ばく線量を減らすためには可能であればアンダーテーブル型の X 線装置（P-A 方向）

の使用が好ましい。

気管支鏡検査のスタッフの眼の被ばく線量は、DOSIRIS を使用した直接測定と比較して、頸部の個人線量計を使用した場合に過小評価される傾向があることがわかった。これは X 線管と頸部の個人線量計の距離と比べて、X 線管と DOSIRIS の距離が短いためであると考えられる。したがって、正確な線量を測定するためには DOSIRIS のような直接眼の被ばく線量を測定できる線量計の使用が推奨される。

また、右眼よりも左眼の線量のほうが高かった。これは左眼近傍の DOSIRIS と散乱線の発生源の距離のほうが右眼近傍の DOSIRIS と散乱線の発生源の距離よりも短いからであると考えられる。したがって X 線管等の散乱線の発生源に近い側に線量計を装着することが推奨される（本研究では左側）。気管支鏡検査スタッフへの放射線防護教育は重要であるといえる。

以上、要約すると、気管支鏡検査スタッフのような医療従事者の眼の被ばく線量の正確な評価は非常に重要である。そこで気管支鏡検査スタッフ（医師および看護師）の眼の被ばく線量（3mm 線量当量）を 6 か月間測定した。8 名の医師と 3 名の看護師の眼の被ばく線量は、直接眼線量計である DOSIRIS を使用して測定した。また、頸部の個人線量計（ガラスバッジ）から眼の被ばく線量を推定した。医師の眼の被ばく線量は、新しい線量限度を超える可能性がある。したがって気管支鏡検査スタッフ特に医師は手技中に鉛防護メガネの着用が推奨される。頸部の個人線量計を使用して評価された気管支鏡検査スタッフの眼の線量は、DOSIRIS を使用した直接測定と比較して過小評価されていた。したがって、気管支鏡検査スタッフは、水晶体被ばく線量を正しく評価するために、

DOSIRIS などの眼線量計を使用することが推奨される。また、右眼より左眼の線量の方が高かった。

3. ポータブル撮影での水晶体線量の詳細評価（放射線技師）

ポータブル撮影時の被ばく防護については、厚生労働省からの「在宅医療における X 線撮影装置の安全な使用に関する指針（平成 10 年 医薬安発第 69 号）」により、操作者は 0.25mm 鉛当量以上の防護衣（プロテクター）を着用する等防護に配慮すること、X 線撮影に必要な医療従事者以外は、X 線管容器及び患者から 2m 以上離れて X 線撮影が終了するまで待機すること、等が定められている。これまでポータブル撮影ならびに一般撮影時の空間散乱線量、従事者の被ばく線量等に関する検討は実施されており（水晶体線量評価ではないが）、その中で X 線照射時に患者から 2m 以上離れた場合に空間散乱線量は著しく低下することが報告されている。しかし実際には、ポータブル撮影に従事する放射線技師が患者から確実に 2m 以上の距離をとることができるとは限らない。

水晶体用線量計 DOSIRIS を使用して測定した水晶体線量は、最大で 1.03mSv/月という値であった。1 年間に換算すると 12.36mSv となる。これは新しい水晶体等価線量限度である 5 年平均の 1 年あたり 20mSv を下回っているものの、高い線量となった。最も高い線量を記録した月に該当技師が行ったポータブル撮影の件数は 326 件であった。より撮影件数の多い施設等では、十分な被ばく防護策を講じない場合には線量限度に近い値となる可能性もある。よって水晶体被ばく防護のため、X 線照射時に患者から十分な距離をとることを意識す

る必要があると考える。また患者から距離をとることが困難であり、かつ多くの件数をこなす必要がある場合には防護メガネ等追加の防護具の着用が必要となる可能性も考えられる。

技師ごとに比較を行った結果においては、撮影 1 件あたりの被ばく線量にある程度の差がみられた。技師ごとに撮影時の患者からの距離が異なることが影響したものと考えられる。

DOSIRIS で測定した水晶体線量とガラスバッジで測定した頸部線量には有意差は認められず同等であった。また両者の間には強い相関がみられた ($R^2=0.9588$)。この結果から、ポータブル撮影に従事する診療放射線技師の水晶体被ばく線量は、頸部に装着した個人線量計でおおむね評価可能であると考えられる。

水晶体線量と 1 か月間に実施したポータブル撮影件数との相関は中程度 ($R^2=0.4471$) であった。検査ごとに患者放射線技師との距離が異なることにより、相関の強さは中程度となったと考える。この結果から、撮影件数をもとに水晶体線量を評価することは困難であり、実際に頸部もしくは水晶体近傍に線量計を装着して評価する必要があると考える。

E. 結論

1. 心臓 IVR での水晶体線量の詳細評価

PCI 治療部位別の X 線管角度の割合を明らかにできた。治療部位が RCA の場合は、LAO 方向が多数を占め、治療部位が LAD の場合は RAO 方向が多数を占めた。治療部位が LCX の場合は、LAO と RAO がともにおよそ半数であった。

PCI 治療部位を左前下行枝(LAD)への PCI、

左回旋(LCx)枝への PCI、右冠動脈(RCA)への PCI の 3 分類に分け詳細に比較した結果から、どの治療部位(RCA、LAD、LCX)の PCI の検査においても、PCI 医師の左眼の線量が最も高い結果となることが明らかになった。

心臓 IVR(PCI)医師においては、各患者パラメータなどの装置表示値から水晶体線量を推定するのは困難であるため、正確な水晶体線量を把握するためには実際に線量計を装着して測定するべきである。PCI 医師の水晶体線量計は左眼に装着する必要があるが、PCI は治療部位によっては線量比が異なるため、左眼の線量からほかの位置の線量を外挿する場合は治療部位(RCA、LAD、LCX)ごとに分けて行うべきである。

IVR 術者の身長や装置の種類、術者の立ち位置など線量を変動させる要因が数多くある。したがって、より正確に解析するために、今後さらに、詳細に分別する必要があると考える。

IVR に従事する看護師においても、各患者パラメータなどの装置表示値から水晶体線量を推定するのは困難であるため、正確な水晶体線量を把握するためには実際に線量計を装着して測定するべきである。

ABL に関しては看護師の右眼の線量が最も高い結果となり、PCI に関してはそれぞれの位置で大きな差はない結果となった。したがって、看護師においては安全側に水晶体線量を評価するために線量計を右眼に装着することが必要な場合があると考えられる。

2. 気管支鏡検査での水晶体線量の詳細評価(医師、看護師)

透視ガイド下の気管支鏡検査スタッフの眼の被ばく線量を評価した。これは気管支鏡検査を行うスタッフ(医師および看護師)

の眼の被ばく線量評価の最初の研究である。特に医師では、新しい水晶体線量限度である 20mSv /年を超える可能性がある。したがって気管支鏡検査のスタッフの眼の被ばく線量には十分注意する必要がある。被ばく線量を減らすためには鉛防護メガネの着用が推奨される。さらに、正確な線量を測定するためには DOSIRIS のような眼の被ばく線量を、直接測定できる線量計の使用が必要である。

3. ポータブル撮影での水晶体線量の詳細評価(放射線技師)

臨床でポータブル X 線撮影に従事する診療放射線技師の水晶体線量を詳細に測定した。その結果、撮影件数の多い施設においては、十分な被ばく防護策を講じない場合には線量限度に近い値となる可能性が示唆された。よってポータブル X 線撮影に従事する診療放射線技師は、適切な被ばく防護措置と被ばく線量評価を行う必要があると考える。

線量評価については、プロテクターを着用する場合にはプロテクターの外側、頸部に線量計を装着することでおおむね評価することが可能である。被ばく防護については、X 線照射時に患者から十分な距離をとることが非常に有効であるため、この点は常に意識する必要があると考える。ただし患者から距離をとることが困難な場合もあるため、ポータブル撮影時には Pb 防護眼鏡やプロテクター等の防護具を、適切に使用して被ばく防護に努めることが重要であると考ええる。

F. 論文報告

1. Haga Y, Chida K, Kimura Y, Yamada S, Sota M, Abe M, Kaga Y, Meguro T, Zuguchi M. Radiation eye dose to medical staff during respiratory endoscopy under X-ray fluoroscopy. *J Radiat Res.* 2020;61(5):691-696. doi:10.1093/jrr/rraa034.
2. 大友 一輝, 佐藤 文貴, 芳賀 喜裕, 曾田 真宏, 加賀 勇治, 阿部 美津也, 伊澤 毅, 村林 優樹, 遠藤 美芽, 稲葉 洋平, 千田 浩一
心臓・血管系 IVR に従事する医師の水晶体被ばく線量の左右差に関する検討 (2021) 投稿中
3. 森島貴顕, 千田浩一, 稲葉洋平, 千葉昌弘, 千葉浩生
空間線量測定用新型サーベイメータの性能評価. *臨床放射線* (2020) 65(12): 1327-1333.

G. 研究発表

1. Mamoru Kato, PhD, Koichi Chida, PhD, Takato Ishida, BS, Fumiaki Sasaki, BS, Hajime Osaka, BS, and Toshibumi Kinoshita, MD, PhD. Occupational eye lens dose measurement using direct eye dosimeters in interventional cardiac electrophysiology procedures. *European Congress of Radiology ECR2020*. 令和2年7月, ウィーン, オーストリア, (Web)
2. Mamoru Kato, PhD, Koichi Chida, PhD, Takato Ishida, BS, Kazunori Matsumoto, BS, Fumiaki Sasaki, BS, and Hajime Osaka, BS. Evaluation of

- usefulness of neurovascular interventional radiology procedure supported using MR-3D road-mapping. 第76回日本放射線技術学会 JRC2020. 令和2年5月, 横浜 (Web)
3. Kentaro Sakamoto, Mamoru Kato, Noriyuki Takahashi, Koichi Chida, Takeshi Kasamatsu, Toshihiko Onodera, Hiroto Atsumi. Evaluation of Patient Radiation Dose in Percutaneous Coronary Intervention Using Radiophotoluminescence Dosimeter. 第76回日本放射線技術学会 JRC2020. 令和2年5月, 横浜 (Web)
 4. Morishima. Y, Chida. K, Inaba. Y. Radiation Protection Effect of Novel Pb Plate in Videofluoroscopic Swallowing Study. *Radiological Society of North America (RSNA2020)*, 令和2年11月 シカゴ アメリカ合衆国 web 開催.
 5. 大友 一輝, 遠藤 美芽, 村林 優樹, 安部 圭亮, 小野寺 真奈, 鈴木 友裕, 高橋 拓己, 一ツ木 康晶, 稲葉 洋平, 千田 浩一
診療放射線技師の被曝防護の実態調査: ポータブル X 線撮影に関するアンケートによる検討. 日本保健物理学会第53回研究発表会 WEB 大会

H. 知的所有権の取得状況

該当なし

令和2年度 労災疾病臨床研究事業
不均等被ばくを伴う放射線業務における被ばく線量の実態調査と
線量低減に向けた課題評価に関する研究

循環器内科医師における眼の水晶体の職業被ばくの実態調査

研究分担者	東京医療保健大学 国立保健医療科学院 産業医科大学	小野 孝ニ 山口 一郎 樺田 尚樹
研究協力者	駒澤大学 国立国際医療研究センター病院	新井 知大 若松 和行 栗原 恵一 大塚 駿 篠ヶ瀬 智

1. はじめに

医療放射線による診療行為は、一般撮影検査、放射線画像下治療（以下、IVR 検査）及び放射線治療等で利活用され、検査実績は年々増加傾向にある。[1] 本邦における診療行為に伴う放射線被ばく（以下、医療被ばく）は国際的平均値に照らし約6倍高く、医療水準が高い欧米等の先進国と比較しても約2倍高いことが知られている。[2] これらの医療放射線の利活用によって生じる医療従事者の被ばく（以下、職業被ばく）については、安全を確保することを目的として法令や各関係機関のガイドライン等で規制されている。2012年には国際放射線防護委員会（ICRP: International Commission on Radiological Protection）は、疫学調査研究の報告に基づき、放射線誘発白内障のしきい線量を「8 Gy 以上」から「0.5 Gy」に変更するとともに、職業被ばくにおける眼の水晶体の等価線量限度を5年間の年間平均線量で20 mSv(単年度当たりで50 mSv)に引き下げる声明を Publication 118 によって勧告した。[3] 国際原子力機関（IAEA: International Atomic Energy Agency）においても、General Safety Requirements Part 3 において、新たな水晶体等価線量限度に関する記載を取り入れており、技術文書である TECDOC No.1731 においても眼の近傍で線量評価を実施することを推奨している。[4, 5] 放射線を使用した高度・専門的技術を要する医療手技は特定の医療従事者が長い年月にわたって同様な作業を長時間且つ高頻度で従事する可能性が高い。新しい水晶体の線量限度及び白内障のしきい線量は、日常的な医療で超過するおそれがある。[6] 眼の水晶体の等価線量を正確に評価することに伴う、医療手技の妨げへの危惧についても職能団体から要望が挙がった。[7, 8] 本邦においては行政機関において所要の議論が行われ、大きく3つの事項（① 眼の水晶体の算定について3 mm 線量当量の選択肢を追加すること、② 眼の水晶体の線量限度の変更すること（5年間につき100 mSv 及び1年間につき50 mSv）、③ 眼の水晶体の線量の5年間の合計線量の記録を追加すること）について関係法令の改正が行われた。[9, 10, 11, 12] これに並行し、日本保健物理学会は眼の水晶体の線量モニタリングに係る基本的考え方をとりまとめた。[13] 医療機関においては放射線業務に従事する医療従事者の眼の水晶体被ばくについて眼の近傍で評価することによって実態調査が実施され、放射線防護眼鏡の遮へい効果を含む眼の水晶体の線量評価について報告されている。[14, 15, 16, 17]

本研究は先行研究で実施された測定法を踏襲し、2021年4月に長瀬ランダウア株式会社が提供する眼の近傍の3mm 線量当量を測定可能な線量計を先行的に試験運用した。[18] 本線量計の放射線防護眼鏡の線量低減効果、医療手技に及ぼす影響及び装着者の所感等を取りまとめ、関連法令等の施行後の運用を見据えた課題を抽出することを目的とする。

2. 方法

本研究は、国立研究開発法人国立国際医療研究センター病院の循環器内科に所属する放射線業務従事者として登録される医師（5名）を対象とした（以下、モニタリング対象医師）。モニタリング対象医師に

対し、眼の水晶体被ばくに関する意識調査、眼の近傍の個人線量評価及び着用所感等のヒアリング調査を実施した。本研究は、当院の倫理審査委員会の承認（承認番号：NCGM-G-003656-00）を受けて実施した。

2.1 眼の水晶体被ばくに関する意識調査

水晶体線量評価の実施に先立ち、各モニタリング医師に対して眼の水晶体被ばくに関する意識調査を実施した。意識調査には、以下の3つの設問を作成し各モニタリング医師に回答させた。1つ目は「IVR検査等を実施する際の放射線防護眼鏡の着用の有無について」、2つ目は「現行の水晶体等価線量限度の規制値の把握について」、最後に「法令改正後の水晶体等価線量限度の規制値の把握について」とした。なお、本設問に対する回答内容と個人を特定できる情報が結びつかないように匿名処理を行った。

2.2 眼の近傍の個人線量評価

2020年10月から11月までの1ヶ月間にわたって、眼の近傍において個人線量評価を実施した。使用した水晶体線量計は、長瀬ランダウア株式会社が2021年4月に運用開始を予定しているビジョンバッジ及びナノドット線量計を使用した。ビジョンバッジは支持部を含む総重量約1gの熱ルミネセンス素子で構成され、測定範囲は0.1 mSv～1000 mSvとし眼の近傍の3ミリメートル線量当量の測定を可能としている。一方、nanoDot線量計は小型OSL線量計が格納されており、測定範囲は10 μ Gy～10Gyとされている。放射線防護眼鏡はパノラマシールド・オーバークラス（東レ・メディカル株式会社、HF-480S, 0.07 mmPb（診断領域でのX線に対する鉛等量として））を着用した。放射線防護眼鏡の遮へい効果を評価することを目的として、眼の近傍に水晶体線量計を左側（内側及び外側）及び右側（内側及び外側）の計4箇所を設置し評価することとした（Figure 1）。更に、0.25 mm鉛当量の放射線防護エプロン（ネックガード、株式会社保科製作所）の外側に蛍光ガラス線量計（以下、頸部用ガラスバッジ、株式会社千代田テクノル）を装着し70マイクロメートル線量当量（Hp(0.07)）を眼の水晶体の等価線量の参考値とするために測定した。モニタリング対象医師はX線検出器フラットパネルディテクタ（以下、FPD）搭載型バイプレーン血管撮影装置 Philips Allura xper FD10/10 (Koninklijke Philips, Netherlands)を使用した。冠動脈造影での撮影モードで15 frames/s、透視線量率は15 pulses/sを用いた。基本的な撮影はBiplaneで行い、FPDサイズは8 inchによる撮影を基本となっている。撮影角度は右冠動脈撮影でRAO 30°、LAO 45°及びCRA 30°の計3方向、左冠動脈撮影でRAO 30°及びCAU 30°、LAO 30°及びCRA 25°、RAO 30°及びCRA 30°、LAO 50°及びCRA 30°、CRA 30°、CAU 30°の計6方向を基本としている。眼の水晶体用線量計と頸部用ガラスバッジの関係は回帰分析を使用し、*p*値が0.05未満を統計学的に有意とみなした。統計解析には多変量解析 Ver. 3.0 (株式会社エスミ)を用いた。



Figure 1 放射線防護眼鏡に対する水晶体線量計の着用外観

2.3 着用所感等のヒアリング調査

個人線量評価後に、モニタリング対象医師5名に眼の水晶体被ばくに関する意識調査及び本研究で得られた結果の開示・説明を行った上で、眼の近傍による水晶体等価線量測定することについて、水晶体線

量計の重量性、視認性及び手技への介入性の観点からヒアリングを実施した。更にそれらを踏まえた、今後の水晶体線量計の着用の要否に係る個人の考え方についても調査した。

3. 結果

3.1 眼の水晶体被ばくに関する意識調査

IVR 検査等を実施する際に、放射線防護服、放射線防護板及び防護カーテン等の放射線防護策を講じた上で、放射線防護眼鏡を「必ず着用している」と回答した者は5名中4名、同様に「時々着用する」と回答したものは1名であった(**Figure 2-a**)。現行の眼の水晶体の等価線量限度の規制値(単年度あたり150 mSv)を正しく把握している者は5名中2名であった(**Figure 2-b**)。法令改正後の眼の水晶体の等価線量限度の規制値(5年間の年間平均線量で20 mSvかつ単年度当たりで50 mSv)を正しく把握している者は5名中3名であった(**Figure 2-c**)。

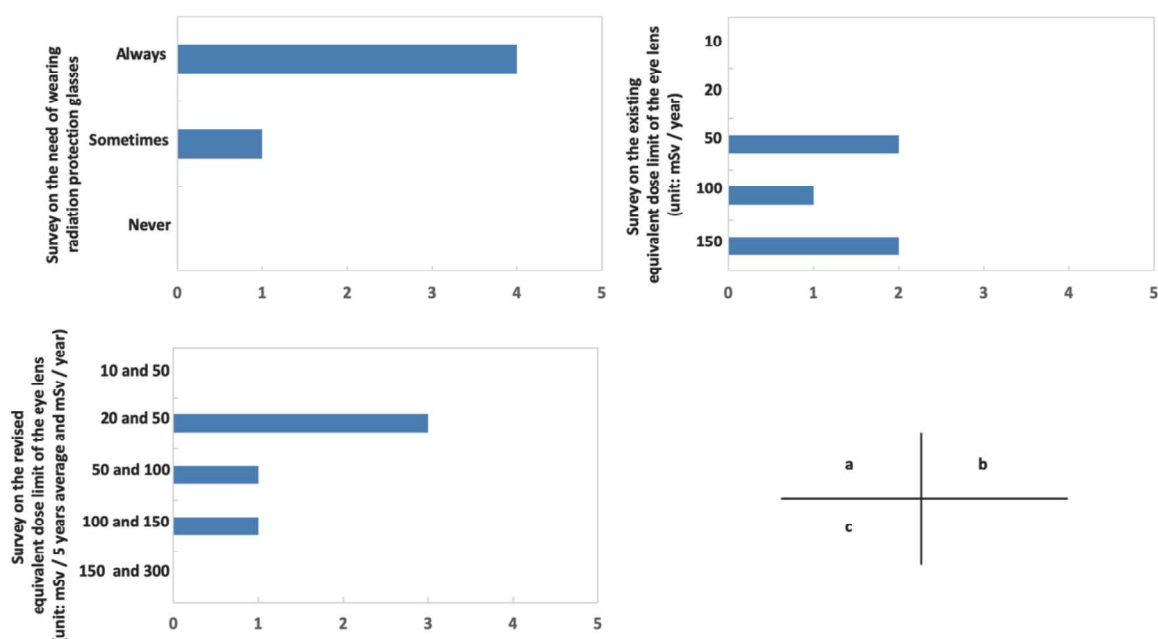


Figure 2 眼の水晶体への放射線被ばくに関する意識調査 (a) IVR 検査を実施する際に放射線防護眼鏡を着用する頻度、(b) 眼の水晶体の等価線量限度の現行の規制値に関する知識、(c) 眼の水晶体の等価線量限度の改訂された規制値に関する知識。

3.2 眼の近傍の個人線量評価

(1) ビジョンバッジによる眼の近傍の測定結果

モニタリング対象医師である循環器内科医医師5名が1ヶ月間に実施した検査及び治療手技は冠動脈造影、経皮的冠動脈形成術、経皮的動脈形成術、ペースメーカー植え込み術等を含む84例であった。医師1の水晶体線量計による眼の近傍での測定結果は、放射線防護眼鏡の左外側、左内側、右外側、右内側の順に0.4 mSv, 0.2 mSv, 0.1 mSv, 0.1 mSvであった(**Figure 3-a**)。同様に、医師2は0.4 mSv, 0.2 mSv, 0.0 mSv, 0.2 mSv, 医師3は1.2 mSv, 0.6 mSv, 0.3 mSv, 0.4 mSv, 医師4は0.6 mSv, 0.4 mSv, 0.1 mSv, 0.1 mSv, 医師5は0.8 mSv, 0.4 mSv, 0.3 mSv, 0.2 mSvであった(**Figure 3 b-e**)。頸部用ガラスバッジによって同時に測定された結果(Hp(0.07))は、医師1-5で、0.4 mSv, 0.5 mSv, 1.4 mSv, 0.7 mSv, 1.2 mSvであった。放射線防護眼鏡の“左側かつ外側”及び“左側かつ内側”の水晶体用線量計 Hp(3)と頸部用ガラスバッジ Hp(0.07)について回帰分析を実施した。回帰分析の結果、放射線防護眼鏡の“左側かつ外側”の水晶体用線量計 Hp(3)と頸部用ガラスバッジ Hp(0.07)では相関係数 $R = 0.9590$, 決定係数 $R^2 = 0.9197$, $p < 0.01$, 傾き : 0.7306, 切片 : 0.0663, 放射線防護眼鏡の左側かつ内側”と頸部用ガラスバッジ Hp(0.07)では相関係数 $R = 0.9114$, 決定係数 $R^2 = 0.8307$, $p < 0.05$, 傾き : 0.3472, 切片 : 0.0684であった(**Figure 4**)。

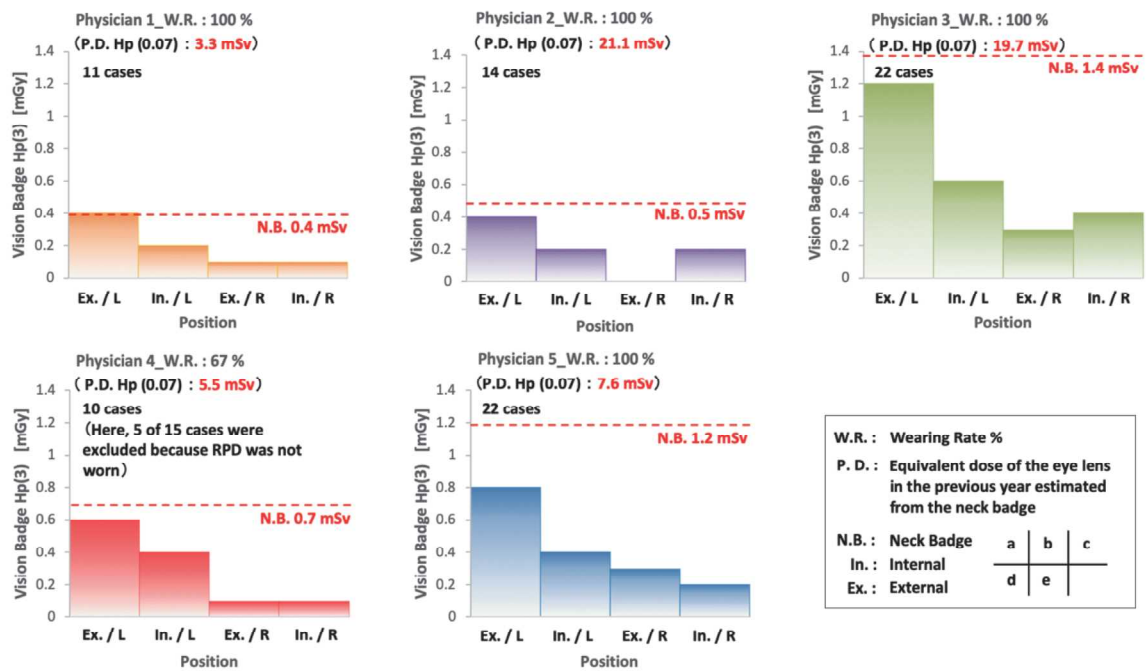


Figure 3 眼の近傍における個人線量評価の結果

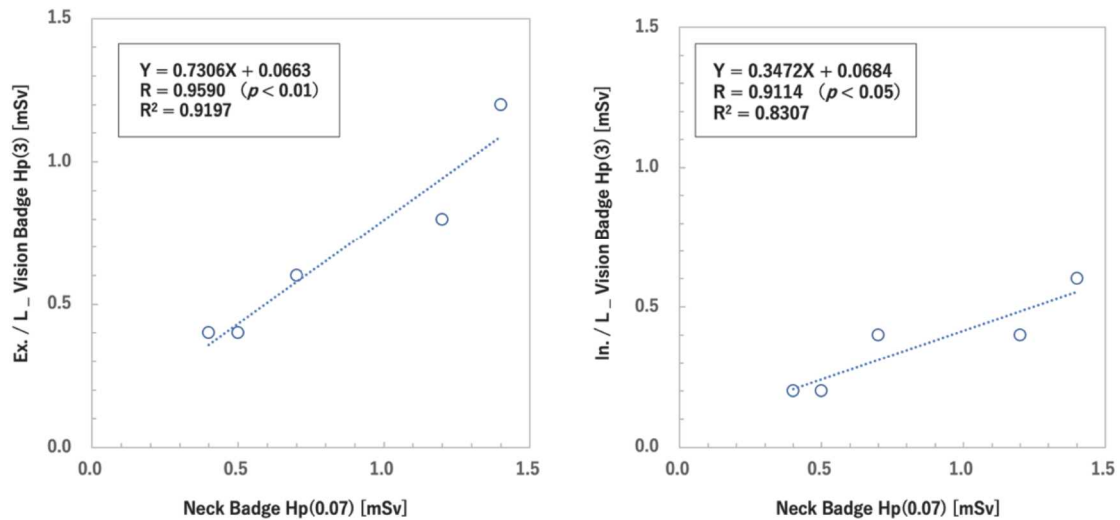


Figure 4 水晶体用線量計 Hp (3) と頸部用ガラスバッジ Hp (0.07) における放射線防護眼鏡の「左側かつ外側」及び「左側かつ内側」の回帰分析結果。

(2) ナノドット線量計による眼の近傍の測定結果

ナノドット線量計は対象測定医師5名のうち2名に対し、放射線防護眼鏡の左側かつ内側の位置で測定した。当該線量計は測定下限値が10 μ Gyと高感度検出器の特徴に照らし診療・検査毎に交換し手技間における比較を行なった。Figure 5に冠動脈造影検査及び経皮的冠動脈形成術における眼の近傍の等価線量の比較結果を示す。医師2においては、冠動脈造影検査で平均0.0282 \pm 0.0247 mGy、経皮的冠動脈形成術で平均0.0220 \pm 0.0064 mGy、医師3においては、冠動脈造影検査で平均0.0287 \pm 0.0193 mGy及び経皮的冠動脈形成術検査で平均0.0617 \pm 0.0404 mGyであった。

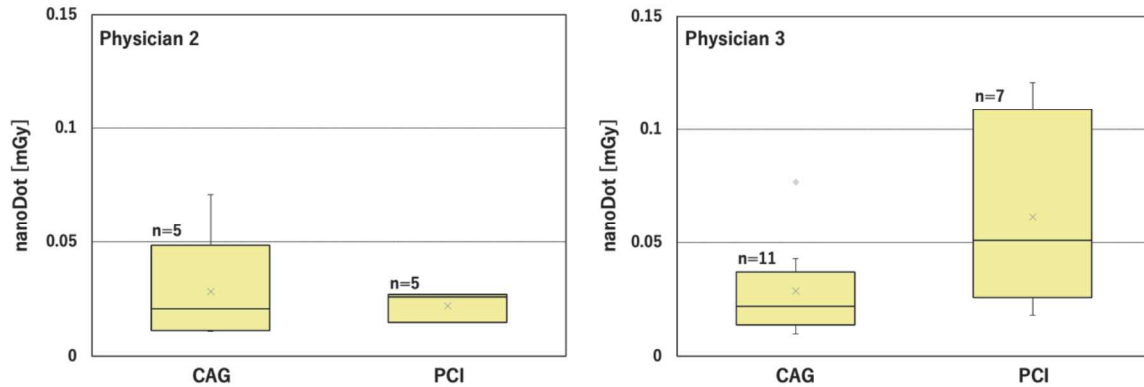


Figure 5 冠動脈造影検査及び経皮的冠動脈形成術における眼の近傍の等価線量の比較

3.3 着用所感等のヒアリング調査

水晶体線量計の重量性、視認性及び手技への介入性の観点からヒアリングを実施した結果、モニタリング対象医師 5 名の全員一致として、業務への支障を来すものではない旨回答が得られた。また、自身の眼の水晶体線量を正確に把握するためにも、法令改正後以降については水晶体線量計の着用を希望する要望があった。

4. 考察

本研究に参加したモニタリング対象医師が所属する施設は平時より、放射線業務において放射線防護眼鏡以外の防護衣（胸腹部、生殖腺、甲状腺）、遮へい板及び遮蔽カーテンを活用した放射線防護策が講じられていた。放射線防護眼鏡についても全ての医師で着用経験があり、放射線防護策としての既に親和性はあるものであった。一方、眼の水晶体に係る規制値は各医師が所属する関連学会等のホームページで、線量限度の改正に係る周知はされているものの認知度においてはモニタリング対象医師の中でもばらつきが確認されており、各施設単位での周知又は教育の徹底が急務である。[19]

本研究期間中に実施された手技の多くは、大腿動脈穿刺による経動脈的アプローチによって行われるため、患者の臥位姿勢に対し右側中間位置に位置取ることによって実施された。エックス線管球及び受像器と手技者の立ち位置に照らし、物理的に左眼の方が高線量場に近接するため、左眼の近傍の線量は右眼の近傍の線量に比べ、平均 $74 \pm 19\%$ 程度高い傾向を示している。本結果を踏まえると、眼の水晶体線量に係る職業被ばくの管理に当たって、左眼の近傍の線量に注目することで実効性を保証できる。特に医師 3 の左眼外側の線量は 1.2 mSv と高く、12 ヶ月（1 年）相当に単純乗算した場合、 14.4 mSv となる。本推定値は規制基準に相当せずとも、施設内ガイドラインによっては翌年度以降の規制対象者として登録される可能性については否定できない。新法令規制値（ $100 \text{ mSv}/5 \text{ 年}$ ）は、旧法令規制値（ $150 \text{ mSv}/1 \text{ 年}$ ）の実質 $1/7.5$ と非常に厳しい規制を受けることを踏まえると、本結果で示された放射線防護眼鏡による左眼近傍の線量低減効果は平均 $47 \pm 7\%$ と、非常に実効性の高い放射線防護策であることがわかる。左眼内側又は外側の $\text{Hp}(3)$ 及び $\text{Hp}(0.07)$ は非常に強い相関関係にあった。回帰分析の結果、左眼外側 $\text{Hp}(3)$ 及び $\text{Hp}(0.07)$ の一次関数の傾きは 0.7306 であり、 $\text{Hp}(0.07)$ は約 27% の過大評価である。従来、放射線防護の基本的考え方から安全側にたった規制を実施することから本結果の妥当性は許容できる。しかしながら、左眼内側 $\text{Hp}(3)$ 及び $\text{Hp}(0.07)$ の一次関数の傾きは 0.3472 と、 $\text{Hp}(0.07)$ は約 66% の過大評価となり、放射線防護眼鏡による防護策を講じているにもかかわらず、必要以上に安全側で管理することとなり、医師の業務配置等の運用に支障を来しかねない。また、ICRP は水晶体線量の評価は $\text{Hp}(3)$ を用い評価すべきとしているが、 $\text{Hp}(3)$ を測定できる線量計は少なく、ネックバッジの $\text{Hp}(0.07)$ を用いてもよいとされている。これは本邦の改正後の法令でも同様である。先行研究においても、 $\text{Hp}(0.07)$ の $\text{Hp}(3)$ の相関関係を導き、推定値を算出することについて一定の有用性は示されているものの、防護眼鏡の効果を見込まないと過大評価につながる可能性を危惧している [15]。また、推定値に基づいて被ばく管理をすることについて、現場の医師が定期的に受け取る個人線量モニタリングの報告

値と差が生じ、医師と管理者の間に認識の齟齬が生じる可能性がある。また、相関式に基づく推定値を算出する作業は管理の煩雑性が増すことになる。これらを踏まえると、推定値に基づく被ばく管理は実効性の観点から現場の実情に沿ったものであるかは懐疑的である。

本研究で使用した水晶体線量計（ビジョンバッジ）は総重量約1gと非常に軽量で目元の重量感を懸念する回答はなかった。また、本線量計は放射線防護眼鏡に圧着固定が可能であるため、視野内のチラつき等を感じることなく、医療手技への影響はないとのコメントが全員一致の回答として得られている。これらは、原子力規制庁が所管する放射線審議会で抽出された課題 [7, 8]を解決した段階に相当するため、本研究で使用した線量計等を活用することで医療現場にとっても親和性の高い放射線防護策となりうる。加えて、モニタリング対象医師の共通見解として、正確な線量を把握するためにも環境が許す場合においては継続した着用を希望したい旨の回答があった。正確な水晶体線量を見える化をすることで放射線業務従事者及び管理者の認識に一貫性を持たせることが可能となる。放射線診療に従事する者が実際に放射線防護策を適切に講じられている場合においては、眼の近傍においても不均等被ばくによる管理を実施することで、円滑な診療体制の維持及び継続が可能になると考える。本研究は5名の医師を対象に短期間で実施されたもので、統計的に十分なものではないため、1年間を通し継続評価を行い、再評価することについて課題を残している。

5. おわりに

本研究では、循環器内科の放射線診療に係る医師を対象に、意識調査、眼の近傍での線量評価及び着用所感等のヒアリング調査を実施した。頸部用ガラスバッジ(Hp(0.07))による代替評価においては、約66%の過大評価となる傾向が確認された。適切な眼の水晶体の被ばく線量の管理及び診療体制の維持・継続のためにも、水晶体線量計を用いた眼の近傍の線量を実測する必要がある。

謝辞

本研究にご協力いただきました国立研究開発法人国立医療研究センター病院 循環器内科及び放射線診療部門のスタッフの皆様、長瀬ランダウア株式会社 小林育夫氏に感謝申し上げます。

引用文献

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), “Report to the General Assembly, with scientific annexes: Volume I,” New York:UNITED NATIONS, 2008.
- [2] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), “Sources and Effects of Ionizing Radiation annexes: Volume I,” New York:UNITED NATIONS, 2010.
- [3] International Commission on Radiological Protection(ICRP), “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,” 2012.
- [4] International Atomic Energy Agency, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements Part 3, 2014.
- [5] International Atomic Energy Agency, Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye. IAEA TECDOC 1731, 2013.
- [6] 藤淵 俊王, “医療分野における職業被ばくと放射線防護, 保健物理 53.4: 247-254,” 2018 年.
- [7] 原子力規制委員会 第6回放射線審議会眼の水晶体の放射線防護検討部会, “資料 3-3 「眼の水晶体の放射線防護 について」,” 平成30年1月29日.
- [8] 原子力規制委員会 第6回放射線審議会眼の水晶体の放射線防護検討部会, “議事録,” 平成30年1月29日.
- [9] 原子力規制委員会 放射線審議会 眼の水晶体の放射線防護検討部会, “眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について(意見具申)(原規放発第18030211号),” 2018年.

- [10] 厚生労働省医政局, “医療法施行規則の一部を改正する省令等の公布について (医政発 0401 第 8 号),” 2020 年 4 月 1 日.
- [11] 厚生労働省労働基準局, “電離放射線障害防止規則の一部を改正する省令等の施行等について (基発 1027 第 4 号),” 2020 年 10 月 27 日.
- [12] 原子力規制委員会, “眼の水晶体の線量限度の変更のための放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則の一部を改正する規則 (原子力規制委員会規則第 13 号),” 2020 年 3 月 18 日.
- [13] 一般社団法人日本保健物理学会, “眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン,” 2020 年 7 月.
- [14] Kato Mamoru et al., “Occupational radiation exposure of the eye in neurovascular interventional physician,” *Radiation protection dosimetry* 185.2: 151-156., 2019.
- [15] 加藤守, 他, “脳神経血管および心臓電気生理手技のインターベンションに携わる医師の水晶体線量評価,” *日本放射線技術学会雑誌* 76.1: 26-33, 2020.
- [16] 竹中完 et al., “ERCP(内視鏡的逆行性胆管膵管造影検査)における水晶体被ばくの現状,” *日本消化器病学会雑誌* 116.12: 1053-1055, 2019.
- [17] Haga, Yoshihiro, et al., Occupational eye dose in interventional cardiology procedures. *Scientific reports* 7.1 : 1-7, 2017.
- [18] 長瀬 ランダウア 株式会社, “ビジョンバッジ (<https://www.nagase-landauer.co.jp/download/pdf/VisionbadgeServiceCatalogue.pdf>), 閲覧日: 2021 年 1 月 5 日”.
- [19] 永井良三, 他, 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, *Circulation journal: official journal of the Japanese Circulation Society*.

令和2年度 労災疾病臨床研究事業
不均等被ばくを伴う放射線業務における被ばく線量の実態調査と
線量低減に向けた課題評価に関する研究

臨床現場における、医療スタッフの被ばく線量の測定

研究分担者 小野 孝二
山口 一郎
櫻田 尚樹

研究協力者 東京医療保健大学大学院 看護学研究科 M1 菊名 千恵里
東京医療保健大学 東が丘看護学部 助教 嶋谷 圭一
駒澤大学 医療健康科学部 講師 新井 知大
つくばセントラル病院 診療放射線技術科 佐藤 雅之
つくばセントラル病院 診療放射線技術科 菊名 邦彦
福井大学附属国際原子力工学研究所 客員教授 小林 育夫

1. はじめに

医療分野において放射線はさまざまな検査・治療で利用されており、装置の普及も相まって検査数は国際的にも増加の一途をたどっている [1]。一方、放射線は以前より被ばくに伴う健康被害が報告されている。臨床現場においても、これらの放射線診療従事者（以下、従事者）が業務の過程で受ける被ばくを「職業被ばく」に分類し、線量限度を超えず防護の最適化を図られるための線量管理を実施している。

国際放射線防護委員会（ICRP）は、2011年に「組織反応に関する声明」（以下ソウル声明）において、計画被ばく状況における眼の職業被ばくに関する水晶体の等価線量限度について、定められた5年間の平均で20 mSv/年、かついずれの1年においても50 mSvを超えないことを勧告し、国際原子力機関（IAEA）の国際基本安全基準にもこの勧告の内容が取り入れられた [2]。これを受け各国に新たな水晶体の等価線量限度を取り入れる動きがあり、本邦でも2018年3月の放射線審議会において法令改正後は初となる意見具申が取りまとめられた。各省庁での検討を経て2020年に労働安全衛生法電離放射線障害防止規則改正の公布が行われ、2021年春の施行予定である [3]。

先行研究では、眼の水晶体線量は線量計を近傍部に装着し直接的に測定、または計算式を用いて間接的に推計し評価されている。各施設での被ばく線量低減に関する検討や調査は実施されている。しかし、これらの結果は論文等に取りまとめられることは少なく、信頼の高いデータや系統立った取りまとめが十分なされていない状況である [4]。また、それらの多くは全身における不均等被ばくに関するものやファントムを用いたシミュレーション研究であり、臨床現場で実際の患者に手技を行う術者における眼の水晶体被ばくに関する研究は豊富とは言えない [5,6,7]。放射線防護に関する認識や取り組みは施設間や医師の間で大きな乖離がある。現状の眼の水晶体等価線量限度が150 mSv/年であり、今後5年間の平均で20 mSvにまで引き下げられることを鑑みると、より厳しい管理は求められ、現状の課題の把握と放射線防護対策の検討は喫緊の課題である。

本研究は、臨床現場における医療スタッフの眼の水晶体被ばく線量等の実態を明らかにし、眼の水晶体の線量限度に係る法令等の改正に伴う現状の課題の把握と放射線防護対策を検討することを目的とする。

2. 対象および方法

2.1 研究対象

2020年12月1日から12月31日の間に、A施設で血管造影と造影CTに携わる循環器内科医師1名と腎臓内科医師2名、診療放射線技師5名を対象とした。

2.2 調査項目

循環器内科の冠動脈造影（以下CAG：Coronary Angiography）および経皮的冠動脈インターベンション（以下PCI：Percutaneous Coronary Intervention）に関わる医師、診療放射線技師、造影CT検査で介助に関わる医療スタッフ、腎臓内科で血液透析用バスキュラーアクセスのインターベンションによる修復（以下VAIVT：Vascular Access Intervention Therapy）に関わる医師を対象に、検査・手技中における線量測定を行った。

全てのスタッフに対して、放射線防護用術者向け眼鏡（東レ・メディカル社製パノラマシールド オーバグラス HF-480S）を装着し、水晶体線量計を使用し測定した。放射線防護眼鏡の遮へい効果を評価することを目的として、眼の近傍に水晶体線量計を左側（内側及び外側）及び右側（内側及び外側）の計4か所に設置し評価した。



Figure 1 放射線防護眼鏡に対する水晶体線量計の着用外観

使用した水晶体線量計は、2021年4月から長瀬ランダウア株式会社により運用開始予定のビジョンバッジを先行して使用した。ビジョンバッジは、支持部を含む総重量約1gの熱ルミネセンス素子で構成され、眼の近傍の3ミリメートル線量当量の測定（測定線種範囲0.1mSv～1000mSv）を可能としている[8]。放射線防護眼鏡に1か月間装着し線量測定を行った。1症例ごとの線量測定には線量計nanoDotを使用した。nanoDotは10mm×10mm、厚さ2mmのOSLD（光刺激ルミネセンス線量計）で、測定範囲10μGy～10Gyの金属フィルターを持たない小型の線量計である。X線画像に写らないという特長から、患者線量の評価や従来では線量測定は困難であった場所の線量評価は可能となった[9]。

2.2.1 循環器内科のCAGおよびPCIに関わる医師、診療放射線技師の眼の水晶体被ばく

放射線防護眼鏡の両側の内側・外側にビジョンバッジ及びnanoDotを装着した状態で手技を行い、対象期間の水晶体被ばく線量の測定を行った。nanoDotは症例ごとに交換し、1症例あたりの眼の水晶体被ばく線量の推計に用いた。モニタリング対象医師・診療放射線技師はX線検出器フラットパネルディテクタ（以下、FPD）搭載型シングルプレーン血管撮影装置 Philips Allura xper FD20（Koninklijke Philips, Netherlands）を使用した。冠動脈造影での撮影モードは15 frames/s、透視線量率は15 Pulses/sを用いた。FPDサイズは10.5 inchによる撮影を基本としている。

2.2.2 造影 CT 検査で介助に関わる医療スタッフの眼の水晶体被ばく

放射線防護眼鏡の両側の内側・外側にビジョンバッジを装着し手技を行い、対象期間の水晶体被ばく線量の測定を行った。造影 CT 撮影患者の介助は、造影剤注入時の刺入部の観察、患者の体勢を保持するための四肢や頭部の固定などである。介助を行う際、CT ガントリに近い側の放射線防護眼鏡の内側及び外側に nanoDot を装着し、1 症例ごとの線量を測定した。X 線 CT 装置として 64 列マルチスライス CT システム IQon spectral CT (Koninklijke Philips, Netherlands) を使用した。

2.2.3 VAIVT に関わる医師の眼の水晶体および手指、頭皮被ばく

放射線防護眼鏡の両側の内側・外側にビジョンバッジ及び nanoDot を装着し手技を行い、対象期間の水晶体被ばく線量の測定を行った。nanoDot は症例ごとに交換し、1 症例あたりの眼の水晶体被ばく線量の推計に用いた。モニタリング対象医師は X 線検出器 FPD 搭載型シングルプレーン血管撮影装置 Philips Allura xper FD20(Koninklijke Philips, Netherlands)を使用した。撮影モードは DSA3frames/s、透視線量率は 7.5Pulses/s を用いた。

手指の被ばく線量測定は、ディスポーザブル滅菌手袋を着用下の術者（腎臓内科医師）において、両環指に $70\mu\text{m}$ 線量当量の線量計を装着した。環指の線量計は、リングバッジ（長瀬ランダウア社製）(Figure 2,3)を用いた。リングバッジは熱蛍光線量計（TLD）を用いた、手指の被ばくを簡便にかつ正確に測定するために開発された線量計である。任意の皮膚の $70\mu\text{m}$ 線量当量の測定範囲は 0.2 mSv ～ 1000 mSv を可能としている [10]。



Figure 2-a リングバッジ

Figure 2-b ディスポーザブル滅菌手袋装着下のリングバッジ

頭皮の被ばく線量の測定は、放射線防護キャップを着用し、キャップの表面と裏面に装着した OSL 線量計（nanoDot）で測定した。防護キャップは、A 医師は X 線防護用帽子 LP-J845（株式会社ミハマメディカル製）、B 医師は RADCAP®（DVX 社製）を使用した（Figure3）。



Figure 3 放射線防護キャップに対する OSL 線量計装着の外観

2.3 倫理的配慮

本研究は東京医療保健大学の倫理審査の承認（院 32-48）を受け実施した。また、A 施設における審査の承認を得て実施した。

本研究調査により得られたデータを取扱う際は、被験者の秘密保護に十分配慮した。線量計は、収集の際に独自の番号を付与し、匿名化をおこなったデータのみを収集、管理した。公表するデータに関しては、特定の個人を識別することができないよう氏名は匿名化した。収集したデータは専用のパスワードプロテクトした記録媒体に保存し、鍵付きのキャビネットに保管した。集計データは本研究以外には使用せず、研究者のみが厳重に管理し研究終了の 10 年後速やかに削除する。また、研究の目的以外に研究で得られたデータを使用しないこととした。

3. 結果

3.1 循環器内科の CAG および PCI に関わる医師、診療放射線技師の眼の水晶体被ばく

2020 年 12 月 1 日から 12 月 31 日の 1 か月間に、循環器内科医師 1 名と診療放射線技師 2 名の携わった検査及び治療手技は CAG（左心・右心検査含む）1 例、PCI 3 例（経皮的冠動脈形成術：PTCA、回転式経皮経管冠動脈アテレクトミー：Rotablator：PTCRA、心筋血流予備比：FFR、血管内超音波：IVUS を含む）、経皮的末梢血管形成術（以下 PPI）1 例、永久的ペースメーカー埋め込み術 1 例、合計 6 症例であった。検査時間の合計は 690 分、平均 115.0±43.37 分、透視時間の合計は 185 分、平均 30.83±14.42 分であった。6 症例のうち、検査・治療の第二術者として、2 例を助手 A、4 例を助手 B が担当した。

循環器科医師の水晶体線量計による眼の近傍での測定結果は、放射線防護眼鏡の左外側、左内側、右外側、右内側の順に 1.2 mSv、0.5 mSv、0.2 mSv、0.4 mSv であった。同様に、助手 A（診療放射線技師）においては 0.2 mSv、検出限界以下（以下 ND：Not Detected）、0.1 mSv、ND、助手 B（診療放射線技師）においては 0.3 mSv、0.1 mSv、ND、0.1 mSv であった。症例ごとの線量を Table 1 に、OSL 線量計の測定値をもとに算出した放射線防護眼鏡による線量低減率を Table 2 に示す。

Table 1 カテーテル室での循環器科医師、助手における放射線防護眼鏡の左右及び内外の被ばく線量

1st-31-Dec-2020.

	Cardiologist nanoDot				Cardiologist assistant A nanoDot				Cardiologist assistant B nanoDot				DAP ^a		
	Left eye (mGy)		Right eye (mGy)		Left eye (mGy)		Right eye (mGy)		Left eye (mGy)		Right eye (mGy)		(mGy×cm ²)	Exam	section
	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside			
CAG1	0.267	0.134	0.05	0.064	0.064	0.025	0.02	0.016					205639	Rota ^c	LAD ^g
CAG2	0.178	0.07	0.097	0.062	0.119	0.059	0.094	0.047					51670	PMI ^d	L-Chest
CAG3	0.369	0.196	0.036	0.082					0.089	0.042	0.033	0.017	71600	PCI ^e	RCA ^h
CAG4	0.494	0.249	0.233	0.189					0.133	0.056	0.025	0.027	97103	PPI ^f	SFA ⁱ
CAG5	0.158	0.055	0.029	0.034					0.041	0.012	0.018	0.012	61989	LVG ^j +SG ^k	
CAG6									0.055	0.024	0.023	0.016	135787	PCI ^d	LAD
Total (mGy)	1.466	0.704	0.445	0.431	0.183	0.084	0.114	0.063	0.318	0.134	0.099	0.072	623788		
Mean	0.293	0.141	0.089	0.086	0.092	0.042	0.057	0.032	0.080	0.034	0.025	0.018	103964.7±53137.5 (Mean±SD)		
	Cardiologist Vision				Cardiologist Assistant A Vision				Cardiologist Assistant B Vision						
	Left eye (mSv)		Right eye (mSv)		Left eye (mSv)		Right eye (mSv)		Left eye (mSv)		Right eye (mSv)				
	outside	inside	outside	Inside	outside	inside	outside	inside	outside	inside	outside	Inside			
	1.2	0.5	0.2	0.4	0.2	ND ^b	0.1	ND	0.3	0.1	0.1	ND			

a DAP : Dose-area product

b ND, Not Detected.

c Rota : Rotablator

d PMI : Pacemaker implantation

e PCI : Percutaneous coronary intervention

f PPI : Percutaneous peripheral intervention

g LAD : Left anterior descending

h RCA : Right coronary artery

i SFA : Superficial femoral artery

j LVG : Left ventriculography

k SG : Swan-Gantz catheter

Table 2 循環器医師と助手の放射線防護眼鏡による眼の近傍の被ばく線量低減率

	Cardiologist		Assistant	
	Left eye	Right eye	Left eye	Right eye
Reduction (%)	52.0	3.1	56.5	36.6

3.2 造影 CT 検査で介助に関わる医療スタッフの眼の水晶体被ばく

2020年12月1日から12月31日の1か月間に1085件のCT検査を行い、106人に対し撮影前及び撮影中の介助を行った。介助の内訳は、造影剤注入時の立ち合い+抑制が3件、抑制のみ3件、造影剤注入時の立ち合いのみが100件であった。検査の内訳と各検査の平均DLP(mGy×cm)をTable 3に示す。

Table 3 検査中に介助を行ったCT検査の内訳

1st-31-Dec-2020.		
Examinations	n	DLP*[mGy×cm]
		Mean±SD
Abdominal (Plain+Enhanced)	42	2959.9±1352.5
Chest-Pelvis (Plain+Enhanced)	21	3570.3±1424.0
Cardiac CTA (Enhanced)	16	2279.1±1015.7
Abdominal (Enhanced)	10	2961.8±1062.8
Chest-Pelvis (Enhanced)	6	2952.8±1118.8
Others	11	3156.6±1557.5
Total	106	2998.2±1352.5

※DLP : Dose-Length Product

CT検査中の介助を行った診療放射線技師の12月1日から12月31日の1か月間での水晶体線量計による眼の近傍での測定結果は、放射線防護眼鏡の左外側、左内側、右外側、右内側の順に6.2 mSv、2.6 mSv、4.6 mSv、2.4 mSvであった。(Table 4)

Table 4 CT室スタッフの水晶体被ばく線量

1st-31-Dec-2020.		
Vision [Hp(0.3)] (mSv)	Inside	Outside
Right eye	2.4	4.6
Left eye	2.6	6.2

CT検査中の介助を行った症例のうち、撮影中に介助を行った場合の診療放射線技師における、OSL線量計による眼の近傍での測定結果をTable 5に示す。測定を行った6症例の内、眼の近傍での線量が高値であったのは患者の右側で上肢の固定を行った胸部～骨盤部造影CTで、撮影回数3回、Total DLPは1913.9 mGy×cmであった。

Table 5 CT室の診療放射線技師の放射線防護眼鏡内外の線量測定 (OSL 線量計)

1st-31-Dec-2020.

CT exam	NanoDot				Position of RT	DLP* (mGy×cm)	Area	Scan type
	Right eye (mGy)		Left eye (mGy)					
	inside	Outside	Inside	Outside				
1			0.147	0.279	Right side of patient	3097.4	Abdominal	Plain+Enhanced
2	0.05	0.169			Left side of patient	1033.5	Chest-Abd	Plain+Enhanced
3			0.343	0.643	Right side of patient	1913.9	Chest-Abd	Plain+Enhanced
4	0.107	0.325			Left side of patient	2292.5	Abdominal	Plain+Enhanced
5			0.07	0.234	Right side of patient	1489.0	Head	Plain
6	0.222	0.496			Left side of patient	3192.9	Abdominal	Plain+Enhanced

※ DLP : Dose-Length Product

3.3 VAIVT に関わる医師の眼の水晶体および手指、頭皮被ばく

2020年12月1日から12月31日の1か月間に、A医師は8例、B医師は17例の手技を行った。A医師の検査時間の合計は371分、平均46.38±19.46分、透視時間の合計は67.13分、平均8.39±4.10分であった。B医師における検査時間の合計は1043分、平均61.35±28.66分(範囲31-120分)、透視時間の合計は224.97分、平均13.23±12.03分(範囲1.0-46分)であった。B医師においては、VAIVTのほかに透視下での内頸動脈血液透析用ブラッドアクセスカテーテル挿入手技(1例)、エコーガイド下での内シャント閉塞に対する経皮的血管形成術(2例)も含まれている。

対象医師における1か月間の眼の近傍の水晶体線量計による測定結果は、A医師では放射線防護眼鏡の左外側、左内側、右外側、右内側の順に0.3 mSv、ND、0.1 mSv、0.1 mSv、B医師では放射線防護眼鏡の右外側で0.2 mSvであったが他の3部位においては検出限界以下であった(Table 6)。A医師、B医師ともに3症例ずつ nanoDot を装着し、症例ごとの眼の近傍と放射線防護キャップ内外の計測を行った。結果をTable 7に示す。

Table 6 腎臓内科医師の水晶体線量計における測定値

1st-31-Dec-2020.

	Number	Vision (mSv)				total DAP ^a (mGy×cm ²)	Mean ± SD
		Left eye		Right eye			
		Outside of glasses	Inside of glasses	Outside of glasses	Inside of glasses		
Nephrologist A	8	0.3	ND ^b	0.1	0.1	18877.18	2359.65 ± 1409.31
Nephrologist B	17	ND	ND	0.2	ND	42229	2484.06 ± 2421.92

a DAP : Dose-area product b ND : Not detected

Table 7 腎臓内科医師における症例ごとの OSL 線量計測定値と放射線防護眼鏡による線量低減率

1st-31-Dec-2020.

	nanoDot	Left eye (mGy)		Right eye (mGy)		DAP* (mGy × c m ²)	Section
		Outside of glasses	Inside of glasses	Outside of glasses	Inside of glasses		
Nephrologist A	VAIVT1	0.414	0.084	0.148	0.059	58.18	Lt-Forearm
	VAIVT2	0.007	0.008	0.009	0.007	579	Lt-Forearm
	VAIVT3	0.007	0.005	0.025	0.021	3782	Lt-Forearm
	Mean	0.143	0.032	0.061	0.029	1473.06	
	Reduction	77.3%		52.2%			
Nephrologist B	VAIVT11	0.004	0.007	0.025	0.023	3784	Lt-Forearm
	VAIVT12	0.026	0.024	0.028	0.017	342	Rt-Forearm
	VAIVT14	0.033	0.018	0.026	0.008	2082	Rt-Forearm
	Mean	0.021	0.016	0.026	0.016	2069.33	
	Reduction	22.2%		39.2%			

※DAP : Dose-area product

リングバッジは、A 医師・B 医師は共に 1 か月間、すべての症例で滅菌手袋の内側に装着し手技を行った。その線量測定結果を Table 8 に示す。A 医師においては右環指 1.1 mSv、左環指 2.0 mSv、B 医師においては右環指 2.2 mSv、左環指 2.0 mSv であった。

Table 8 腎臓内科医の手指被ばく線量

1st-31-Dec-2020.

	Nephrologist A		Nephrologist B	
	Ring badge		Ring badge	
Monitoring site	Left	Right	Left	Right
Dose (mSv)	2.0	1.1	2.0	2.2

4. 考察

循環器内科の医師における 1 か月間の眼の近傍の水晶体線量計による測定結果は防護眼鏡の外側で左側 1.2 mSv、右側 0.2 mSv であった。左眼外側の測定値が最も高く、これは CAG 術者の立位置に設置したファントムにおける眼の近傍の線量を測定した結果とも一致する [5]。12 か月 (1 年) 相当に単純乗算した場合、14.4 mSv の被ばく線量となり、本推定値は規制基準に相当せずとも、施設内ガイドラインによっては翌年度以降の規制対象者として登録される可能性については否定できない。また、A 施設における循環器科のカテーテル検査・治療の 2020 年度の実績は 150 件である。同様の組み合わせで 150 例の検査・治療を行った場合の水晶体被ばく線量の推定値は 36 mSv となり、新しい線量上限を超過する可能性がある。いずれにしても、術者において適切な水晶体防護は必須であると言える。

第二術者(助手)の診療放射線技師においては、第一術者と比較し全体的に低い測定値であった。最も高い測定値であった放射線防護眼鏡の左外側においても 0.084 mSv 程度であり、年間 250 症例程度携わると新たな上限を超過する可能性がある。これは 1 か月あたりに換算すると 20~21 症例となり、カテーテル介助を専門とする技師においては容易に超過する可能性が高く、注意が必要である。また、

診療放射線技師ではCTと一般撮影で勤務するもので水晶体被ばく線量が高いとのデータがあり[12]、勤務のローテーションで他の検査に入る可能性があることも考慮すべきである。

循環器科のカテーテル術者、助手の線量において、水晶体線量計の測定結果とOSL線量計の測定結果を単純加算したものは概ね一致しているが、水晶体線量計の方がやや低い結果となっている。測定部位によっては2倍程度の差が出ているところもあり、症例数や測定位置を増加し詳細な測定を行い検討していく必要がある。

循環器内科医師の症例ごとの線量は防護眼鏡の左内側で0.07~0.249 mGy、右内側で0.034 mGy~0.189 mGyであった。マレーシアの透視下で血管内治療を行う術者41人の眼の近傍での水晶体被ばく線量をOSLDで測定した結果[13]は、眼の水晶体等価線量の中央値の平均は0.052 mSv(0.0155から0.672 mSvの範囲)であったが、今回の結果と概ね一致している。同研究では、KAP、透視時間、および撮影回数には強い相関関係があるものの、これらのパラメータと測定された眼の水晶体線量との間は、弱~中程度の相関であることを示している。

次に、検査・治療内容においては下肢の経皮的血管形成術での測定値が最も高い結果となった。冠動脈治療と下肢血管治療とで水晶体被ばく線量を比較したデータは見当たらないが、測定値が高くなる要因として、FPDおよび線源が、より術者の近傍に位置すること、撮影の際にDSAを使用することなどが考えられる。したがって、末梢血管インターベンションを多く行う術者においては、より高い線量を被ばくする可能性が考えられ、注意が必要である。冠動脈治療部位の比較では、左冠動脈治療と比較し、右冠動脈のインターベンションにおいて左眼近傍の測定値が高い結果となった。冠動脈造影ではアームがLAO30° CAU30°の際に眼の近傍で受ける線量が最も高いとのデータが示されている[5]。右冠動脈造影においてはLAOが使用される傾向にあるため、比較的高い線量となった可能性が示唆される。

造影CT検査で介助に関わる医療スタッフの水晶体線量計での眼の近傍の測定値は、放射線防護眼鏡の左外側では6.2 mSv、右外側では4.6 mSv、左内側では2.6 mSv、右内側では2.4 mSvとの結果であった。適切な防護をせずに介助を1年間継続した場合、単純乗算で左眼では年間74.4 mSv、右眼でも55.2 mSvとなり、新たな規制基準を大幅に超過すると考えられる。放射線防護眼鏡を装着し介助を行った場合でも1年間の推定値はそれぞれ31.2 mSv、28.8 mSvとなり、一人のスタッフが介助を継続した場合は同様に基準を超過する可能性が考えられる。今回1組の放射線防護眼鏡と水晶体線量計で計測を行ったが、A施設では主に3人の診療放射線技師がCT撮影を担当している。3人で均等に検査を担当していると仮定すると、非防護の場合に基準を超過、2人では防護眼鏡装着下でも高値となり、症例数によっては基準を超過する恐れがある。また、今回の結果は1組の放射線防護眼鏡と水晶体線量計を介助者全員で使用した測定値の合算であり、主に介助に携わった3人の線量が均等に高いのか、3人のうち1人の線量が高いのか明確ではない。飯塚らの研究では、CTガイド下IVRにおける術者の身長と水晶体等価線量について、有意差はないものの身長170 cm以下の群では170 cm以上の群と比較し高い傾向にあることを示唆した[14]。今後、介助を行うスタッフについて、それぞれ個別の線量計を用いて評価を行う必要がある。

CT透視における術者の水晶体被ばくは数 μ Gyから数十 μ Gyという報告[15]があり、それに対して今回の頭部および腹部造影CT検査介助では同等以上の被ばくとなることが確認された。A施設では1か月間に1,000件以上の検査を行っており、それぞれの症例についても詳細に測定を継続する必要がある。さらには、成人CTの診断参考レベル(DRL)は胸部1相で510 mGy \times cm、胸部~骨盤1相1200 mGy \times cm、上腹部~骨盤1相880 mGy \times cm、肝臓ダイナミック2100 mGy \times cm、冠動脈1300 mGy \times cmである[15]。A施設のCT検査のDLPは平均2998.2 \pm 1352.5 mGy \times cmであり、DRLと比較し高い可能性がある。その場合、撮影方法について放射線科医とも議論し撮影線量を調整していくことが必要となる。

VAIVTの術者に関しては全体的に低い測定値であった。1か月間の症例数としては合計25例であるが、2020年の年間症例数は259例で、これはA施設の位置する県内においても上位の症例数である。

VAIVTでのnanoDotによる測定結果は、症例ごとの測定値にばらつきがみられた。特にA医師の1例目と3例目は同じ患者であるが、測定値にかなりの違いがみられた。DAPや撮影回数、透視時間は症

例1で少ないが、測定値は高値であった。症例1はDR室で撮影されており、その影響が示唆された。症例2と3では同じ機械、同じ側で、DAPや透視時間との関連が示唆される。

また、シャント肢と反対側の眼で線量が高くなる可能性が示唆された。これは術者の立ち位置によるもので、線源側の眼の近傍での測定値が高くなっているものと考えられる。この結果はCAGと同様に石井らの調査結果[5]とも一致した。

手指の線量は、透視時間にほぼ比例する可能性が示唆された。Josephらが透析用ブラッドアクセスの修復術中の術者の手指線量を調査したのものによると手指線量と透視時間、KAPの相関が示唆されたが、この結果とも一致する[11]。しかし、今回2名の術者の測定結果であり、測定値もばらつきがみられるため、今回の結果から被ばくおよび防護に関して確実なことは言えない。今後も症例ごとの細かな計測を継続し、データを蓄積していく必要がある。少なくとも今回の結果では、皮膚・水晶体ともに年間の線量上限を超過する可能性は低く、50年継続したとしても、放射線白内障のしきい線量には到達しないと考えられる。腎臓内科の医師らに今回の結果を伝えたところ、安心したとの声が聴かれた。

腎臓内科医師の前額部の線量に関しても、放射線防護キャップ装着の有無やDAPなどとの関連は明らかとならなかった。原因としては、nanoDotの装着位置がキャップの辺縁に近く、キャップと術者の間にすき間があった可能性が考えられる。その結果、下方からの散乱線の影響を受け、放射線防護キャップ内側も測定値が高くなった可能性がある。川内らは脳血管内治療をする患者のESDを64か所に線量計を装着し測定したが[16]、術者においても頭頸部の角度や向き、治療側や治療部位などで頭部の被ばく線量は増減する可能性が考えられ、きめ細かな測定が求められる。その結果、測定値が高いようであれば、脳腫瘍発症のリスクも考慮されるので防護方法に関する検討が必要である。今回測定に用いたOSL線量計nanoDotは鋭敏な線量計であるため、その特性ゆえにわずかな条件の違いにより測定値が変動する可能性がある。より正確な測定を行うためには、装着部位の条件を厳密に調整したうえで、同部位に複数個設置するなどの工夫が必要である。

また、カテーテル術者、VAIVT術者ともに防護眼鏡の右内側の測定値は高くなる傾向にあった。防護眼鏡の左外側の測定値がより高値である場合、右内側が右外側より高くなるケースも散見される。放射線防護眼鏡の線量低減に関する評価を行った研究[17]では、線源と眼の角度が大きい場合、右眼領域に対する線量低減係数は、左眼領域よりもはるかに低くなることが示唆されており、今回の結果も入射角による影響が示唆された。今回使用した放射線防護眼鏡は入射角の影響を考慮された最新のオーバーグラス型防護眼鏡であったが、それでも入射角の影響が考慮されるため、左眼の水晶体被ばく線量が高くなる傾向にある術者については、右眼においても同様に測定し、被ばく線量評価を行う必要性が示唆される。特にIVR領域では、放射線防護衣や放射線防護眼鏡での防護のみでは不十分で、天井吊りアームや防護性の高い遮蔽板の使用が推奨されている[18]。A施設においても、それらの器具を適切に使用し、被ばく線量の低減に努める必要がある。

本研究は単独施設において、少数の放射線診療従事者を対象に短期間で実施されたもので、統計的に十分なものではないため、年間を通し継続評価を行い、再評価することについて課題を残している。

5. おわりに

臨床現場における、医療スタッフの被ばく線量の測定結果から、循環器内科でカテーテル検査・治療を行う医師とCT検査時に介助を行う医療スタッフにおいて、眼の近傍で比較的高い放射線被ばくを受けることが明らかとなった。適切な眼の水晶体の被ばく線量の管理及び診療体制の維持・継続のためにも、水晶体線量計を用いた眼の近傍の線量を継続的に実測し、防護策を講じる必要がある。

謝辞

本研究にご協力いただきました社会医療法人若竹会つくばセントラル病院 循環器内科及び腎臓内科、放射線診療部門のスタッフの皆様に感謝申し上げます。

引用文献

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), “Report to the General Assembly, with scientific annexes: Volume I,” New York : UNITED NATIONS, 2008.
- [2] Stewart FA, Akleyev AV, Hauer-Jensen M, et al, ICRP publication 118 : ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs--threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. *Ann ICRP* 41 ; 1—322, 2012.
- [3] 厚生労働省労働基準局安全衛生部労働衛生課電離放射線労働者健康対策室, 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 報告書, 2019年9月24日.
- [4] 赤羽恵一, 飯本武士, 伊知地猛, 岩井敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, et al, 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (v). *保健物理*, 50(1), 76–89, 2015.
- [5] Ishii H., Chida K., Satsurai K., Haga Y., Kaga Y., Abe M., Inaba Y., et al, A PHANTOM STUDY TO DETERMINE THE OPTIMAL PLACEMENT OF EYE DOSEMETERS ON INTERVENTIONAL RADIOLOGY STAFF. *Radiation Protection Dosimetry*, 185(4), 409–413, 2019.
- [6] Kirkwood, M. L., Klein, A., Guild, J., Arbique, G., Xi, Y., Tsai, S., Ramanan, B., & Timaran, C., Novel modification to leaded eyewear results in significant operator eye radiation dose reduction. *Journal of Vascular Surgery*, 2020.
- [7] Walsh, C., O’Connor, U., & O’Reilly, G., Eye dose monitoring of PET/CT workers. *The British Journal of Radiology*, 87(1042), 20140373, 2019.
- [8] 長瀬ランダウア株式会社, “ビジョンバッジ (<https://www.nagase-landauer.co.jp/download/pdf/VisionbadgeServiceCatalogue.pdf>) , 閲覧日 : 2021年3月5日”.
- [9] 長瀬ランダウア株式会社, “OSL線量計 (<https://www.nagase-landauer.co.jp/download/pdf/InlightSystem.pdf>) , 閲覧日 : 2021年3月5日”.
- [10] 長瀬ランダウア株式会社, “リングバッジ (<https://www.nagase-landauer.co.jp/download/pdf/RingBadgeServiceCatalogue.pdf>) , 閲覧日 : 2021年3月5日”.
- [11] Stavas, J. M., Smith, T. P., DeLong, D. M., Miller, M. J., Suhocki, P. V., Newman, G. E., Radiation Hand Exposure during Restoration of Flow to the Thrombosed Dialysis Access Graft. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 17(10), 1611–1617, 2006.
- [12] 藤淵俊王, 藤田克也, 五十嵐隆元, 西丸英治, 堀田昇吾, 桜井礼子, 小野孝二, 放射線診療従事者の不均等被ばく管理の実態に基づく水晶体被ばく低減対策の提案. *日本放射線技術学会雑誌*, 77(2), 160–171, 2021.
- [13] Wong, J. H. D., Anem, L. E. A., Tan, S., Tan, S. K., & Ng, K. H., Eye lens dose of medical personnel involved in fluoroscopy and interventional procedures at a Malaysian Hospital. *Physica Medica*, 68, 47–51, 2019.
- [14] 飯塚崇文, 松本一真, 萩原芳明, 名定敏也, 池内陽子, 菊池圭介, 光家千恵美, 琴浦規子, 山門亨一郎, 小林薫, 高木治行, 加古泰一, CTガイド下IVRにおける術者頭頸部被ばくの測定. *日本放射線技術学会雑誌*, 75(7), 625–630, 2019.
- [15] 医療被ばく研究情報ネットワーク (J-RIME), 日本の診断参考レベル (2020) http://www.radher.jp/J-RIME/report/JapanDRL2020_jp.pdf. 閲覧日 : 2021年3月7日
- [16] Kawauchi, S., Chida, K., Moritake, T., Hamada, Y., Matsumaru, Y., Tsuruta, W., Sato, M., Hosoo, H., Sun, L., TREATMENT OF INTERNAL CAROTID ANEURYSMS USING PIPELINE EMBOLIZATION DEVICES: MEASURING THE RADIATION DOSE OF THE PATIENT AND DETERMINING THE FACTORS AFFECTING IT. *Radiation Protection Dosimetry*, 188(3), 389–396, 2020.
- [17] Kirkwood, M. L., Klein, A., Guild, J., Arbique, G., Xi, Y., Tsai, S., Ramanan, B., Timaran, C., Novel modification to leaded eyewear results in significant operator eye radiation dose reduction. *Journal of Vascular Surgery*, 0(0), 2020.
- [18] Fujibuchi, T, Occupational exposure and radiation protection in the medical field -non-uniform exposure management of medical staffs. *Japanese Journal of Health Physics*, 53(4), 247–254, 2018.

I. 分担研究報告

学術分野における放射線業務従事者の眼の水晶体等価線量の適切な評価 に関する研究

分担研究者 古渡 意彦

(国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 高度被ばく医療センター
計測・線量評価部 物理線量評価グループ グループリーダー)

研究要旨

ICRP が 2011 年に発出したソウル声明を受け、IAEA BSS 及び EU BSS では、放射線業務従事者の計画被ばく状況における水晶体の組織等価線量被ばく限度について、1 年間 150 mSv から 5 年平均で 1 年あたり 20 mSv の大幅な引き下げを取り入れた。我が国においても、放射線審議会眼の水晶体の放射線防護検討部会において検討された結果、計画被ばく状況における職業被ばくに関する水晶体の等価線量限度は、5 年間平均で 20mSv/年、かつ、いずれの 1 年においても 50mSv を超えないこととすることが適当である、と意見具申され、令和 3 年 4 月から施行される。

本研究では、学術分野における加速器施設で放射線業務に従事する放射線業務従事者について、体幹部で評価された線量から眼の水晶体等価線量が推定可能かについて検討した。令和元年度に本テーマに着手し、令和 2 年度には、特に線量評価手法に着目して研究を継続した。

(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ついて、小規模加速器施設である京都大学複合原子力研究所ライナック施設における不均等被ばく状況の放射線作業を模擬した作業環境において実験的に評価した。不均等被ばく状況の作業環境として、ビームコンバーター調整・交換作業及び中性子発生用 Ta ターゲットハンドリング作業を選択した。評価の結果、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、それぞれ機器調整の場合 2.6 程度、ターゲットハンドリング作業では 0.4 であった。この比率は眼の水晶体線量について体幹部で観測された線量から距離の逆二乗則または線源・作業者の姿勢を模擬した計算シミュレーションにより適切に推定可能であることが示された。このことは、年間線量限度近傍の被ばくを受ける可能性のある作業者に対し、適切な指標を示すものであるといえる。また、手指部線量についての評価も行ったが、点線源近似が可能である状況においては、眼の水晶体線量の場合と同様に、距離の逆二乗則または線源・作業者の姿勢を模擬した計算シミュレーションにより予測可能である。

A. 研究目的

本研究は、特に学術分野において、加速

器施設における放射線業務従事者が受ける
眼の水晶体における被ばく等価線量を適切
に評価する手法の開発を目的としている。

令和元年度は、来る令和3年4月施行の改正電離放射線障害防止規則で導入される眼の水晶体等価線量の年間線量限度の引き下げに対し、加速器施設における放射線業務従事者について現行の眼の水晶体等価線量の推定手法が適応かどうか、さらに適応できない事例はあるか議論する材料を提供することを目的に研究を進めた。前年度は、

(a) 加速器施設における放射線業務従事者はどのような放射性核種によりどのような状況で被ばくするのか

(b) 実際に放射線作業を行う作業環境で、放射線業務従事者の受ける体幹部線量と眼の水晶体等価線量の間にはどのような相関があるか。

に注目して文献・聞き取り調査を進めた。

(a) 及び (b) について、

施設の規模に関わらず、加速器施設の放射線業務従事者は、

1. ほとんどの放射線作業について内部被ばくは生じておらず、外部被ばくが支配的である。

2. 定常的な放射線作業においては、ほとんどの場合均等被ばく状況にカテゴライズされる。

ことを明らかとした。また、加速器施設における放射線業務従事者の外部被ばくの状況についても調査を進め、加速器施設における放射線業務には、主たるものとして、①実験・研究に伴う放射線作業、②加速器機器のメンテナンス、③施設内外の放射線管理及び④放射化物の管理等に分類できることが分かった。①～④に示す作業のほとんどが、国際放射線防護委員会 (ICRP) で定義する照射ジオメトリのうち、等方照射 (ISO 照射) ジオメトリで最もよく被ばく状況を反映できると考察された。

一方、②加速器機器のメンテナンス作業に限らず、被ばく源となる対象をハンドリングするような状況では、被ばく源からのβ線及びγ線の強度分布が実効的に制限され、「線源が一様に分布する状況から作業者が均一に放射線にばく露される状況である」といえない。体積線源又は点線源に比せられる放射化生成物を直接ハンドリングする放射線作業、例えば、加速器施設における放射化されたビームライン機器の点検作業、加速器施設における放射化された冷却水精製樹脂の点検作業のような作業、また小規模加速器施設においては研究で利用する研究者が直接ターゲットをハンドリングする事例が確認されており、これらの放射線作業は不均等被ばく状況と位置付けられるため、別途評価が必要である。

本研究事業最終年度である令和2年度は、これまで包括的な研究が実施されてこなかった研究分野の放射線作業のうち、特に加速器施設における放射線業務従事者に注目し、眼の水晶体の等価線量を体幹部での測定により得られた1cm線量当量(または70μm線量当量)の被ばく線量と眼の水晶体における被ばく等価線量の相関について、作業者の被ばく状況(作業環境における線種、線源の位置・形状、体勢、作業時間等)を考慮して詳細に検討を進め、体幹部線量から眼の水晶体等価線量算が推定可能か検討を行った。

B. 研究方法

本研究において加速器施設の放射線業務従事者の体幹部線量に対する眼の水晶体被ばく線量の比の評価は、分担研究者らが考案した人体模擬ファントムを放射線作業が実施される作業環境に設置し、ファントム

各所に線量計を取り付けて指示値を読む実験を行うこと進めた。

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

放射線治療時の線量評価等で使用されるランドファントム、ホールボディカウンタ校正用 BOMAB ファントム、等、目的に応じた種々の人体模擬物理ファントムが採用されている。一方で、本研究では放射線作業の現場にファントムを設置するフィールド試験を行うが、ファントムを設置する放射線作業環境が放射性物質で汚染されていることを前提としている。そのため、安価で迅速に設置可能なアクリル製のファントムを採用した。

この簡易物理ファントムについては、複雑な体系を有する人体模擬数学ファントム

（以下、「数学ファントム」という。）とフィールド試験に供するアクリル製物理ファントムを用いた場合でも、不確かさの範囲内で同じ被ばく状況が再現できることを事前に確認されている。

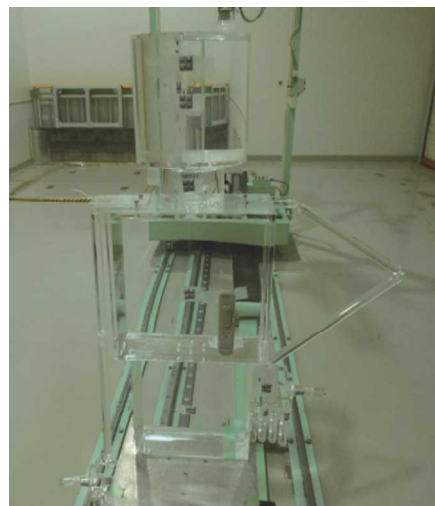


図 1 本研究で使用したアクリル製物理ファントムの外観(基準校正場に設置時)

今年度のフィールド試験は、京都大学複合原子力研究所ライナック施設において行った。模擬した放射線作業は当該ライナック施設を用いた RI 製造時及び中性子を利用する実験時におけるターゲット交換及びハンドリングである。主な被ばく源は、加速器運転に伴って生じる放射化生成物からの β 線及び γ 線からの被ばくが中心となる作業環境である。なお、A. 研究目的で示したとおり、測定では外部被ばくのみを対象としており、いずれの作業環境でも放射線業務従事者は事故等により内部被ばくが発生する可能性があるが、ここでは外部被ば

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 指: アクリル製 棒状	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)

くによる線量評価のみを行っている。

物理ファントムの全身各所に装着した線量計は、(1)の追加モニタリング用パッシブ型個人線量計の開発でも使用した、市販の OSL 線量計（長瀬ランダウア社製 NanoDOT™）である。OSL 線量計は、アクリル製物理ファントム各所に合計 40 個取り付け、アクリル製物理ファントムが設置された放射線作業環境での被ばく状況をモニタリングした。

C. 研究結果

加速器施設において放射線業務従事者が従事する放射線作業について、簡易物理ファントムに線量計を取り付け、体幹部で受ける被ばく線量に対して、眼の水晶体及び手指部の等価線量がどの程度になるか測定

により求めた。得られた体幹部線量に対する、眼の水晶体及び末端部等価線量の比を求める。得られた結果より、体幹部、眼の水晶体及び手指部線量当量の相関について、体幹部で測定された線量当量で予測可能か等について議論する。

本事業最終年度の令和 2 年度は、前年度に引き続きフィールド試験を中心に進める。フィールド試験は、B. 研究方法で示した放射線作業従事者を模擬する簡易物理ファントムの各所に OSL 線量計を取り付け、実際の加速器施設で放射線作業が行われる場所でばく露することで実施した。一連のフィールド試験は、令和元年度に引き続き京都大学複合原子力研究所ライナック施設において実施した。

当該加速器施設における当該施設におけ



図 2 京都大学複合原子力研究所ライナック施設におけるフィールド試験の様子（簡易物理ファントム各所に OSL 線量計を取り付け、作業環境に設置。ビームコンバーター調整作業を模擬）

る放射線業務従事者が従事する作業は前年度に調査している。他の加速器施設と同様に、1) 法令で定められた管理区域内外における放射線管理業務、2) 加速器本体のメンテナンス業務、及び3) 加速器を用いた研究活動に伴い生じる放射線作業、となる。被ばく源は、主に加速器運転時に生じる放射化生成物からの β 線及び γ 線からの被ばくが中心である。本研究では、特に3)の加速器を用いる研究業務で研究者が被ばくする状況に注目した。図2及び図3では京都大学複合原子力研究所ライナック施設で実施したフィールド試験でのファントム設置状況を示す。簡易物理ファントムは腹部まで準備し、平均身長日本人男性(約170 cm 相当)が実際の作業を行う姿勢を模擬して設置することから、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。線源は簡易物理ファントムの両手を固定したコンバーター(内部にPt製ターゲットが格納されており、加速器からの電子線を γ 線に変換し、RI製造等の実験に供する)であり、コンバーター及びターゲットに残留する放射性物質からの γ 線になる。模擬した放射線作業は、ビームコンバーター位置調整及び交換である。なお、当該放射線作業は2分程度で完了するものであり、十分に放射化生成物の冷却時間を取って、被ばく線量が小さくなるような対策が講じられている。さらに、当該施設は運用開始から長期間経過しており、周辺コンクリート壁にも放射化生成物が残留している。そのため、照射室内の空間線量当量率が十分にバックグラウンドレベルまで低下しない。そのことから、長時間照射室に滞在する場合、残留放射能から放出される γ 線による被ばくも無視できない。



図3 京都大学複合原子力研究所ライナック施設でのフィールド試験の様子(ビームコンバーター調整作業を別角度から)

簡易物理ファントムには、頭部及び手指部を中心にOSL線量計を取り付け、体幹部で受ける個人線量当量に加え、眼の水晶体及び手指部の線量当量の追加モニタリングを行った。簡易物理ファントムは配置を維持して21時間設置し、簡易物理ファントム各所に設置したOSL線量計を回収後、各所に設置したOSL指示値を用い、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比を評価した。

京都大学複合原子力研究所ライナック施設でのフィールド試験で得られた体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比を表2に示す。線量比は、OSL線量計指示値の比率で導出した。

表2 京都大学複合原子力研究所ライナック施設でのフィールド試験で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比(ビームコンバーター調整作業)

HI ^{eye} 又は HI ^{ext}	
右眼の水晶体 / 体幹部	2.12 ± 0.09

$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$	
左眼の水晶体 / 体幹部	1.69 ± 0.07
$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$	
右掌部 / 体幹部	12.9 ± 3.1
$H_p(0.07)_{\text{ext}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$	
左掌部 / 体幹部	36.7 ± 1.8
$H_p(0.07)_{\text{ext}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$	

京都大学複合原子力研究所ライナック施設でのフィールド試験では、ビームコンバーターにおけるビーム調整作業を模擬し、手指部を放射線源であるビームコンバーターに接触させ、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量を評価した。表2では掌に設置した OSL 線量計から手指部末端の線量として体幹部線量との比を求めた。この被ばく状況では、眼の水晶体/体幹部線量の比が 2.12 ± 0.09 及び 1.69 ± 0.07 、手指部/体幹部線量の比が 12.9 ± 3.1 及び 36.7 ± 1.8 となった。前年度も予備測定として同様のジオメトリでフィールド試験を行ったが、前年度同様の評価、すなわち現行の個人モニタリングにおける眼の水晶体等価線量の推定手法である、「体幹部で測定された1cm及び70 μm 線量当量のうちいずれか適切な方を、眼の水晶体線量の推定値とする」推定方法に従うとする場合、体幹部で観測された1cm線量当量を眼の水晶体線量の推定値とするが、その場合実際に受けた線量より2倍以上小さく評価することが分かった。体幹部に装着した電子式個人線量計から指示値では、1cm個人線量当量が2.5

mSvと評価されており、上記の評価で用いた右眼位置に取り付けたOSL線量計から得られた線量は、 6.28 ± 0.15 mSvであった。また、眼の水晶体位置及び掌で観測された線量に左右差がある。この点はD. 考察で詳細に検討する。

図4には、同ライナック施設におけるビームコンバーターハンドリング作業を模擬したフィールド試験の様子を示す。この試験では図2及び図3に示したビームコンバーターを他のターゲット（中性子発生用のTaターゲット等）に取り換えるため放射化したターゲットを取り外す作業を模擬したものである。簡易物理ファントムは18時間設置後にファントム各所に取り付けたOSL線量計を回収し体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比を評価した。

表3 京都大学複合原子力研究所ライナック施設でのフィールド試験で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比（ビームコンバーターハンドリング）

	HI _{eye} 又は HI _{ext}
右眼の水晶体 / 体幹部	
$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$	2.61 ± 0.12
左眼の水晶体 / 体幹部	
$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$	2.47 ± 0.23
右掌部 / 体幹部	
$H_p(0.07)_{\text{ext}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$	18.8 ± 1.8
左掌部 / 体幹部	
$H_p(0.07)_{\text{ext}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$	21.0 ± 1.5



図4 京都大学複合原子力研究所ライナック施設におけるフィールド試験の様子
(ビームコンバーター交換作業を模擬)

ビームコンバーターハンドリング作業を模擬したフィールド試験で得られた体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比を表3で示す。上記の作業同様に体積線源からの「不均等」な被ばく状況を再現できるように試験した。体幹部に装着した電子式ポケット線量計の指示値は、1cm 個人線量当量で 1.0 mSv であった。この被ばく状況では、眼の水晶体/体幹部線量の比が 2.61 ± 0.12 及び 2.47 ± 0.23 、手指部/体幹部線量の比が 18.8 ± 1.8 及び 21.0 ± 1.5 となった。この場合は眼の水晶体等価線量を過大に評価する。

また、前年度の研究結果により加速器施設における放射線業務従事者においても手指等末端部の被ばくが強調される作業があ

ることが分かった。そこで、医療従事者が手指等末端部の不均等被ばく状況下で用いる防護手袋を着用することが、加速器施設で作業に従事する放射線業務従事者の手指等の被ばく低減につながるか実験的な検証を試みた。ここでは、手指を模擬したプラスチック製容器に OSL 線量計を取り付けて防護手袋内に設置すると同時に防護手袋表面にも OSL 線量計を取り付け、放射線業務従事者が Ta ターゲットをハンドリングする際に保持する位置に防護手袋を置いた(図5参照)。防護手袋は24時間設置後、OSL 線量計指示値を読み取り、防護手袋内外の差異を比較した。表4では上記被ばく露試験での結果を示す。今回のフィールド試験では右手は Ta ターゲット自体をつかん

表4 京都大学複合原子力研究所ライナック施設でのフィールド試験で得られた手指部線量の比較 (Ta ターゲットハンドリングを模擬)

線量計設置位置	防護手袋外側(mSv)	防護手袋内側(mSv)
右掌	1010	368
右人差し指	740	550
右親指	1120	673
左掌	37.5	42.6
左人差し指	55.5	44.9
左親指	55.5	67.7

でいる一方で左手は Ta ターゲット冷却用配管のフレキシブルベローズを保持する状況を模擬したが、左右の手で観測された手指等被ばく線量が数十倍程度の違いが観測されている。



図5 京都大学複合原子力研究所ライナック施設での Ta ターゲットハンドリング作業における防護手袋による線量低減効果の検証

特に右手側で観測された線量が非常に大きい (740 ~ 1000 mSv)。これは Ta ターゲットを直接つかんだ状況を模擬しており、通常の放射線作業では起こりえない。一方、左手側はフレキシブルベローズをつかむ状況を模擬しており、被ばく線量は右手より小さい。ターゲットハンドリング時には Ta

ターゲットより遠い位置であるベローズをつかんで動かすことが聞き取り調査により明らかとなっている。実際の作業者の被ばく状況は右手よりも左手で観測されたものが実態に近いと考えられる。

被ばく線量については、右手側の線量は防護手袋の内外で 25%~70%と大きく低減している一方で、左手側で観測された線量は大きな変化はなく、部位によっては防護手袋内部の線量が防護手袋外部で観測された線量と比較して増加している。この点について次項D. 考察で詳細に検討する。

D. 考察

本項では、加速器施設の放射線業務従事者の被ばく状況について、不均等被ばく条件での放射線業務従事者が受ける体幹部線量に対する眼の水晶体被ばく線量の比についての評価を進めた。

前項C. 研究結果で記載した通り、フィールド試験では、加速器施設における放射線業務従事者の被ばくと、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量についての相関に着目した。今年度の試験で模擬した放射線作業は、

(a) 加速器施設における放射化したターゲット周辺機器(本研究ではビームコンバ

ーター)の調整及び交換作業

(b) 加速器施設における放射化したターゲットのハンドリング作業

であった。上記作業はいずれも不均等被ばくを伴うものである。前年度の調査時に得られた測定結果も併せ、体幹部で観測された被ばく線量と眼の水晶体及び手指等の被ばく線量との相関を評価し、体幹部線量から眼の水晶体及び手指部被ばく線量が予測可能かどうかをモンテカルロ計算シミュレーションでの評価も加えて検討を進める。

令和元年度の予備測定ではビームコンバーター近傍で得られた CZT 検出器からの波高分布から、ビームコンバーター近傍で機器調整を行う場合の被ばく源となりうる放射性物質には、 ^{22}Na 、 ^{51}Cr 、 ^{54}Mn 、 ^{57}Ni 、 ^{58}Co が主な被ばく源となりうることが特定できた。これらはビームコンバーターの主構造物である、アルミニウム合金及びステンレスから生成した放射化物と考えられる。なお、ビームコンバーターで観測された放射化生成物には ^{54}Mn (半減期 300 日) と長半減期の核種が存在している。特に、ビームコンバーターが長期間にわたって使用されている場合、冷却期間を設けた後の主要な被ばく源となりうる想定される。

図6では計算シミュレーションで使用した数学ファントムのジオメトリを示す。

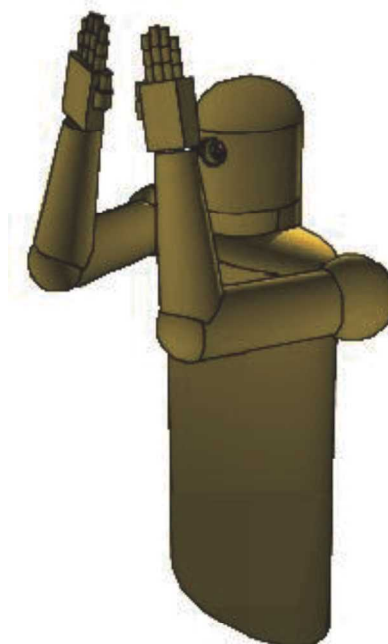


図6 京都大学複合原子力研究所ライナック施設でのビームコンバーター調整作業を模擬した計算シミュレーションのジオメトリ。点線源を導入。

数学ファントムを用いた体幹部及び眼の水晶体線量評価では、現行の個人モニタリングの線量計測の枠組みで用いられている、1cm 線量当量、3mm 線量当量及び 70 μm 線量当量の定義に従って、数学ファントム内に吸収線量を測定する領域を設定した。体幹部における 1cm 線量当量、3mm 線量当量及び 70 μm 線量当量の評価のため、数学ファントム左胸部中央深さ 10 mm、3 mm 及び 70 μm の位置での線量を求めた。眼の水晶体等価線量評価に用いられることが検討されている眼の水晶体における 3mm 線量当量は、数学ファントムの眉間中央部分の深さ 3 mm 位置での線量を求めた。吸収線量計算に使用した領域は、眼の水晶体位置で、1.0 cm^(L)×3.69 cm^(W)×0.01 cm^(D)

表5 京都大学複合原子力研究所ライナック施設でのビームコンバーター調整作業で観測される体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指線量の比 (HI^{eye} 又は HI^{ext})

	HI ^{eye} 又は HI ^{ext}	距離の逆二乗則から推定した比	計算シミュレーションで得られた比
右眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	2.12 ± 0.09	2.60	3.17 ± 0.36
左眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	1.69 ± 0.07	3.30	3.17 ± 0.36
右掌部 / 体幹部 $H_p(0.07)_{ext} / H_p(10)_{trunk}$	12.9 ± 3.1	10.9	39.5 ± 4.0
左掌部 / 体幹部 $H_p(0.07)_{ext} / H_p(10)_{trunk}$	36.7 ± 1.8	127	574 ± 58

であり、体幹部では、1.0 cm^(L)×6.18 cm^(W)×0.01 cm^(D)である。なお、吸収線量領域のサイズは、計算シミュレーション時の単位輸送粒子当たりの吸収線量に与える統計精度と線量評価の深さ位置への影響が小さくなることを考慮して選択された。なお、計算シミュレーションで求めた体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の妥当性については、複数のアクリル製水槽を組み併せて人体を模した簡易物理ファントムを用いた基準校正場における照射試験及び実際の放射線作業が行われる放射線作業場での実験により得られた結果との比較により検証された。計算シミュレーションで得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比と、基準放射線校正場での照射試験及び放射線作業場での照射試験において、体幹部及び眼に相当する箇所に取り付けた OSL 線量計から得られた、体幹部線量に対する、眼の水晶体及び末端部等価線量の比が、不確かさの範囲内で一致している。

表5では、同様に体幹部線量に対する眼の水晶体線量当量及び手指で得られた等価線量の比について左右差を加味して評価した。同表では OSL 線量計からの指示値の比率を求める際、手指部線量について、親指

等に設置した線量計は後述のとおり各指でばらつきが大きく、掌に設置した線量計からの指示値で代表した。また、線源であるビームコンバーター内部のターゲット位置から、体幹部、眼の水晶体及び手指部までの距離の差を考慮して距離の逆二乗則に基づく、体幹部線量に対するそれぞれの位置で評価される線量比の推定値を表示している。さらに、モンテカルロ計算シミュレーションで得られた比について併記した。なお、モンテカルロ計算シミュレーションでは左右の眼ごとに被ばく線量を求めなかったため、両目の水晶体に対する被ばく線量の平均値の推定を与えるものと考慮する。OSL 線量計の測定結果から得られた体幹部線量に対する眼の水晶体線量当量及び手指部の線量当量について、左右に有意な差が生じた。特に手指部については顕著であり、ビームコンバーターにファントム手指部を固定する際、左手ファントムが右手ファントムよりもビームコンバーター内部の Pt ターゲットに近接した位置に固定した。そのため、Pt ターゲットからの距離は、右手及び左手で異なっており、観測された OSL 線量計の指示値はその際を反映していると考えられる。一方で、設置したファントム

の左右の眼球位置からビームコンバーターまでの距離が異なっているにも関わらず、ビームコンバーターにより近接した左眼部分で得られた OSL 線量計の指示値が小さくなった。距離の逆二乗則に基づく体幹部線量と眼の水晶体線量当量及び手指部線量当量の比の推定値については、眼の水晶体等価線量の推定値は OSL 線量計で得られた測定値に対し、おおむね 1.2~2 倍以内の範囲の差異である。手指部の線量当量に対する推定値として考慮すると、左掌部で約 3.5 倍過大評価している一方で、右掌部は 0.84 倍と非常に良い一致を示した。また、計算シミュレーションで得られた体幹部線量に対する比でも同様の傾向が得られているが、手指部線量に対しては良い推定を与えていない。なお、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の推定に際し、体幹部で $H_p(3)_{trunk}$ が評価できる線量計による測定サービスが国内で提供されている。体幹部 3mm 線量当量での線量評価値で眼の水晶体線量の推定を計算シミュレーションでの結果で実施したが、 3.07 ± 0.44 とほとんど変化はなかった。このことは、眼の水晶体線量への β 線の寄与は小さく、 γ 線による被ばくが優位であることを示唆する結果

である。

表 6 ではビームコンバーター交換作業に伴う放射線作業に対する放射線業務従事者の体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部被ばく線量の比を示す。表 5 で示したターゲット調整作業と異なり、左右の眼の水晶体位置及び手指部で観測された OSL 線量計指示値に大きな左右差は見られなかった。これは、線源である Pt ターゲットを中心として正対したためであると思われる。表 5 と同様に距離の逆二乗則に基づく体幹部線量と眼の水晶体線量当量及び手指部線量当量の比の推定値については、眼の水晶体等価線量の推定値は OSL 線量計で得られた測定値に対し、1.6 倍以内の範囲で推定できることが分かった。手指部線量について同様の比較を行うと距離の逆二乗則に基づく推定及びモンテカルロ計算シミュレーションで得られた推定値と OSL 線量計指示値との間に大きな離れがみられる。特に、被ばく源であるビームコンバーター一点線源近似として評価しているため、手指線量推定値に左右差があると同時に 20 倍過大評価している。計算シミュレーションで得られた手指部線量の比は OSL 線量計指示値を約 10 倍過大評価する結果となり、い

表 6 京都大学複合原子力研究所ライナック施設でのビームコンバーター交換作業で観測される体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指線量の比 (HI^{eye} 又は HI^{ext})

	HI^{eye} 又は HI^{ext}	距離の逆二乗則から推定した比	計算シミュレーションで得られた比
右眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	2.61 ± 0.12	4.03	5.30 ± 0.40
左眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	2.47 ± 0.23	4.03	5.30 ± 0.40
右掌部 / 体幹部 $H_p(0.07)_{ext} / H_p(10)_{trunk}$	18.8 ± 1.8	154	208 ± 15
左掌部 / 体幹部 $H_p(0.07)_{ext} / H_p(10)_{trunk}$	21.0 ± 1.5	427	208 ± 15

表7 計算シミュレーションで得られた体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指線量の比
(HI_{eye} 又は HI_{ext})

(a) ビームコンバーター調整作業

	点線源近似	体積線源近似
右眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	3.17 ± 0.36	5.29 ± 0.47
左眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	3.17 ± 0.36	5.29 ± 0.47
右掌部 / 体幹部 $H_p(0.07)_{ext} / H_p(10)_{trunk}$	39.5 ± 4.0	65.0 ± 5.2
左掌部 / 体幹部 $H_p(0.07)_{ext} / H_p(10)_{trunk}$	574 ± 58	230 ± 18

(b) ビームコンバーター交換作業

	点線源近似	体積線源近似 (1)	体積線源近似 (2)
右眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	5.30 ± 0.40	3.84 ± 0.38	4.67 ± 0.44
左眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	5.30 ± 0.40	3.84 ± 0.38	4.67 ± 0.44
右掌部 / 体幹部 $H_p(0.07)_{ext} / H_p(10)_{trunk}$	208 ± 15	137 ± 12	147 ± 13
左掌部 / 体幹部 $H_p(0.07)_{ext} / H_p(10)_{trunk}$	208 ± 15	139 ± 12	148 ± 13

れも正確な予測を与えるのものではない。体幹部に対する手指部線量の比が大きいかい離する理由として、1) ビームコンバーターと被ばく線量を評価する体幹部、眼の水晶体近傍及び手指部が近接しすぎており体積線源であるビームコンバーターの点線源近似が成立しないこと、2) 計算シミュレーションではベータ線による被ばくも考慮しているが距離の逆二乗則及び OSL 線量計による測定には部分的な寄与にとどまる、ことに起因していると考えられる。

表7(a)及び(b)では計算シミュレーションで得られた体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指等末端部線量の比について、線

源体系を点線源及び体積線源の違いがどの程度結果に影響するか比較を行った。ここでは、体積線源はビームコンバーター内部の Pt ターゲット (直径 6 cm 厚さ 5 mm) から放射化生成物からの β 線及び γ 線が放出すると仮定して計算を行った。実際のビームコンバーターは外装が金属製であるため、外装から放出する放射化生成物が優位であると想定されるが、今次研究において被ばく線量が大きすぎることで、管理区域外に持ち出せないことから、ビームコンバーターにおける放射化生成物の生成量分布の把握に至っていない。そのため、本研究で行った体積線源近似も実態に即したものと

はいいがたい。そこで、(b)のビームコンバーター交換作業に係る体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指線量の比の計算ではビームコンバーター全体を体積線源とした場合の計算も併記した。図7では、線源体系の違いによる体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比の変化で用いた計算体系を示す。

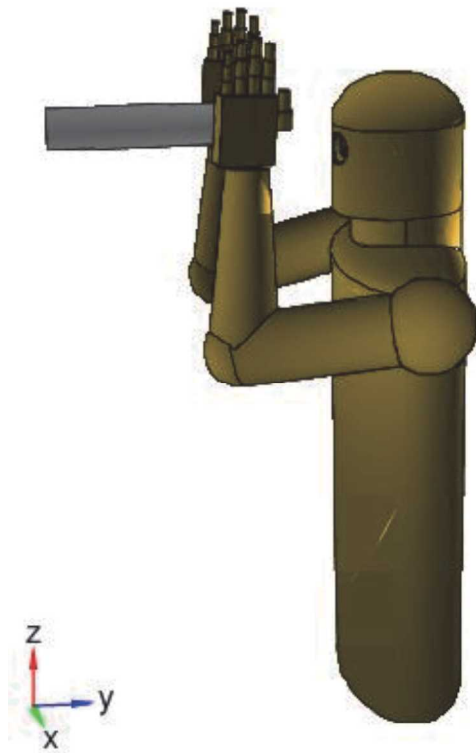


図7 京都大学複合原子力研究所ライナック施設でのビームコンバーター交換作業を模擬した計算シミュレーションのジオメトリ。コンバーター全体が体積線源とした例。

表7 (b)で示す通り点線源を導入した計算シミュレーションで得られた体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指等末端部線量の比よりも、体積線源を導入した場合に得ら

れた評価結果のほうが、OSL線量計指示値による結果に近い値が得られている。しかしながら、眼の水晶体線量についても距離の逆二乗則のほうが測定値から求められる値により近い推定を与えている。手指部線量に対する比は、体積線源を用いた計算シミュレーションで得られる指示値のほうが距離の逆二乗則に基づく推定値よりも良い推定を与えることが分かった。ビームコンバーター交換作業に対する推定でいうと、距離の逆二乗則に基づく推定値はOSL線量計指示値からの比に対し20倍過大評価しているが、体積線源を導入した計算シミュレーションでの評価では、約7倍程度の過大評価にとどまっている。上述の通り正確な線源情報がない状況での見積もりであることを考えると、体積線源を導入した計算シミュレーションは、眼の水晶体線量及び手指部線量に対する良い推定値を与えるツールであるといえる。

小規模加速器施設におけるターゲット調整・交換作業に関し、体幹部線量から眼の水晶体被ばく線量及び手指等末端部線量の推定が従来の手法で可能か、フィールド試験及び試験を模擬したモンテカルロ計算シミュレーションを用いて検証した。得られた結果は、ICRP27で示された均等被ばく状況での均等の指標のである1/1.5倍～1.5倍[1]の範囲を超えている。また、今年度策定された「眼の水晶体の線量モニタリングガイドライン」でも1.5～2倍程度以上からは、眼の水晶体近傍における追加モニタリングの検討に言及している[2]。その点からも当該作業を主たる放射線作業とする研究者等の放射線業務従事者のうち、1か月あたりの線量が1 mSvを超える恐れのある作業員については、作業時に補助線量計とし

て体幹部に電子式線量計の装着の義務付け、及び眼の水晶体近傍等への追加モニタリングの検討を進めることも重要である。また、本研究におけるフィールド試験で用いた線量当量の単位は1cm線量当量であり、一般的に作業者のモニタリングで使用されるガラス線量計、OSL線量計及び電子式線量計指示値として提供されているものである。作業者の聞き取り調査及び作業現場の確認により、線源と作業者の位置関係が分かれば、距離の逆二乗則を用いた眼の水晶体線量推定は、体幹部線量をそのまま用いるよりも眼の水晶体線量について「良い推定値」を与えることも示唆された。手指等末端部線量については、体幹部線量から距離の逆二乗則及びモンテカルロ計算シミュレーションから推定する場合、実際の測定値より10倍以上過大に評価する可能性が示された。一方、OSL線量計指示値からの推定では、体幹部に対し10倍から20倍程度にとどまるかもしれないことも示唆される一方で、正確な手指等末端部の被ばく線量を体幹部線量から推定することは困難といえる。これは、線源となるビームコンバータ

ーが体積線源であることに加え、長期間使用されたことによる放射化生成物残留の影響で、正確に線源を模擬し、作業者の体幹部・手指等末端部との位置関係を決定することが難しいためである。一方、作業前のモックアップ試験で、線源と作業者の位置及び作業に伴う手指等の位置関係が把握できる場合、距離の逆二乗則を用いた手指等末端部線量は（極端に）保守的な推定値を与えるため、放射線作業を設計するうえで有用な情報となる。放射線管理の実務の点からは、可能であれば、長時間のターゲット調整等実施する場合、ターゲット冷却後であっても、リングバッジ等追加線量計を装着して作業に当たることが望ましい。また、後述の通り直接ターゲット等に触れることがある場合、利き手はゴム手袋等（可能であれば医療従事者が着用する放射線防護用ゴム手袋が望ましい）の着用を義務付けることが放射線防護上重要な取り組みといえる。

表8では、ターゲット調整・交換作業と同様に体幹部線量に対する眼の水晶体線量

表8 京都大学複合原子力研究所ライナック施設でのフィールド試験で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比（Taターゲットハンドリング作業）。眼の水晶体及び手指部について左右別に評価。

	HI _{eye} 又は HI _{ext}	距離の逆二乗則から推定した比	計算シミュレーションで得られた比
右眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	0.42 ± 0.02	0.39	0.38 ± 0.06
左眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	0.37 ± 0.02	0.39	0.38 ± 0.06
右掌部 / 体幹部 $H_p(0.07)_{ext} / H_p(10)_{trunk}$	33.5 ± 0.7	63.1	35.9 ± 2.3
左掌部 / 体幹部 $H_p(0.07)_{ext} / H_p(10)_{trunk}$	1.84 ± 0.04	5.15	1.40 ± 0.11

当量及び手指で得られた等価線量の比について左右差を加味して評価した。OSL 線量計からの指示値の比に加え、線源である Ta ターゲットから、体幹部、眼の水晶体及び手指部の距離の違いを考慮して距離の逆二乗則に基づく、体幹部線量に対するそれぞれの位置で評価される線量比を推定するほか、モンテカルロ計算で得られた結果も併記した。OSL 線量計の測定結果から得られた体幹部線量に対する眼の水晶体線量当量について、左右で差異は生じていないが、掌（手指）部で測定された線量当量について、前掲のフィールド試験同様に明確な違いがみられる。これは、Ta ターゲットを遮へいから引き出す際に、線源である Ta ターゲットは右手側に近接し、左手は Ta ターゲット管に取り付けられた冷却水循環用フレキシブルペローズを保持する位置にあるという、距離の差異に起因するものと考えられる（図 8 参照）。距離の逆二乗則に基づく体幹部線量と眼の水晶体線量当量の比の推定値は、OSL 線量計指示値から得られた比と不確かさの範囲内で一致している。体幹部線量に対する手指部線量当量の比の推定値は異なっており、2～3 倍の範囲内の差異で評価できることが分かった。手指部線量当量の比について左右の比率を評価すると、左掌の線量当量に対し右掌部線量は、OSL 線量計指示値で約 18 倍、距離の逆二乗則に基づく推定値からは約 12 倍となった。一方、モンテカルロ計算シミュレーションで図 9 に示す不均等被ばく状況を模擬した場合の体幹部線量に対する眼の水晶体及び手指部線量の比は、OSL 線量計指示値からの比と比較し不確かさの範囲内で非常によく一致している。左掌部は、計算シミュレーションで得られた比は OSL 線量計指示値から

の比に比べ 0.78 倍であったが、ジオメトリの違い等を考慮すると非常によく再現しているといえる。図 9 で示した Ta ターゲットハンドリングに伴う放射線作業時に、放射線業務従事者が受ける放射線について、前年度実施した測定で被ばく源となる放射性物質が ^{182}Ta であると特定できた。被ばく源は Ta ターゲットであるが、前述のビームコンバーターと比較して小さく、点線源とみなせること、及び計算シミュレーションでは β 線及び γ 線の両方を考慮したことで、この不均等被ばく状況をよく再現できたと考えられる。当初、当該施設における Ta ターゲットは銅製のターゲット容器に内蔵されており、被ばく源としては γ 線源として考慮できるとしたが、より精度の良い評価を行うためには、 ^{182}Ta から放出される β 線についても評価が必要であることが確認できた。



図 8 京都大学複合原子力研究所ライナック施設での Ta ターゲットハンドリング作業を模擬したフィールド試験の様子（令和元年度実施分を再掲）。

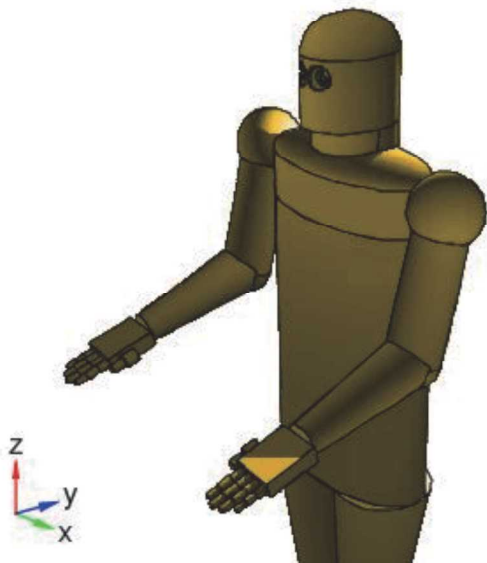


図9 京都大学複合原子力研究所ライナック施設での Ta ターゲットハンドリング作業を模擬した計算シミュレーションのジオメトリ。点線源を導入。

Ta ターゲットハンドリング作業については、追加実験として医療従事者が用いる防護手袋の内外での手指部線量の違いを OSL 線量計によって比較した。観測された被ばく線量は、右手側の線量は防護手袋の内外で 25%~70%と大きく低減している一方で、左手側で観測された線量は大きな変化はなく、部位によっては防護手袋内部の線量が防護手袋外部で観測された線量と比較して増加している。これは、被ばく源となる ^{182}Ta の β 線による手指部への放射線被ばくが無視できないために生じていると考えられる。放射線防護従事者の手指等末端部被ばく防護の観点から、加速器ターゲットハンドリング作業時には、少なくともターゲット近くを操作する手について、医療用放射線防護手袋の着用が望ましい。その際には必要に応じリングバッジ、末端部

モニタリング用線量率計を装着することが推奨される。

E. 結論及び今後の課題

本研究の目的は、放射線業務従事者のうち、加速器施設で放射線作業に従事する放射線業務従事者について、体幹部線量から眼の水晶体の組織等価線量の合理的な評価手法を確立することにある。本研究事業最終年度である令和2年度は、これまで包括的な研究が実施されてこなかった研究分野の放射線作業のうち、特に加速器施設における放射線業務従事者に注目し、眼の水晶体の等価線量を体幹部での測定により得られた 1cm 線量当量（または $70\mu\text{m}$ 線量当量）の被ばく線量と眼の水晶体における被ばく等価線量の相関について、作業者の被ばく状況（作業環境における線種、線源の位置・形状、体勢、作業時間等）を考慮して詳細に検討を進め、体幹部線量から眼の水晶体等価線量算が推定可能か検討を行った。

加速器施設における放射線業務従事者の被ばく状況について、不均等被ばく状況での放射線業務従事者の体幹部線量に対する眼の水晶体等価線量の比に着目し、評価を行った。本研究では、実際に放射線作業環境下に簡易物理ファントムに OSL 線量計を取り付けて設置し、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得た。一連のフィールド試験については、小規模加速器施設である京都大学複合原子力研究所ライナック施設において実施した。対象とした放射線作業は、研究者の加速器利用を伴う研究業務に伴い生じる放射線作業であり、加速器運転に伴い生じる放射化生成物からの β 線及び γ 線

からの被ばくが中心となる。

京都大学複合原子力研究所ライナック施設におけるビームコンバーター近傍でえられた体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、ビームコンバーターから測定された放射化聖性核種に対し、 $H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$ は 1.69~2.61 と、1.0 より大きくなった。これは体幹部で観測された $H_p(10)_{\text{trunk}}$ を眼の水晶体等価線量の推定値とした場合、実際に被ばくした眼の水晶体等価線量を約 1/3 に過小評価することになる。同施設において使用中性子発生用 Ta ターゲットをハンドリングする作業を模擬した不均等被ばく状況の場合、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は ^{182}Ta に対して、 $H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$ は約 0.4 となった。この場合、体幹部線量を眼の水晶体等価線量の推定値とした場合、2 倍程度過大評価となる。なお、これらの数字は ICRP Publication 75 で示された均等被ばく状況での均等度である 1/1.5 倍~1.5 倍[1] の範囲を超えており、いずれの場合においても $H_p(10)_{\text{trunk}}$ を用いて、眼の水晶体等価線量を推定した場合、推定値は、実際に観測される眼の水晶体等価線量に対し過大または過小評価することが示唆される。「眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン」では、不均等度に対し厳密な数値を設けておらず、体幹部線量に対し眼の水晶体線量推定値が 3 倍を超えない場合は体幹部線量で眼の水晶体線量の推定値とする場合には特に問題とはならないといえる。

これらのことから、令和 3 年 4 月より引き下げられる眼の水晶体等価線量の年間線量限度（年平均で年間 20 mSv または単年度で 50 mSv）、又は加速器施設の運営主体が独自に定める被ばく線量管理目標値まで

被ばく線量が到達するような作業を行う場合、放射線業務従事者に対し追加線量計を眼の近傍に設置して確実にモニタリングする、より厳重な計画線量で放射線作業を管理する等の対策が必要となる。

小規模加速器施設におけるターゲット調整・交換作業に関し、体幹部線量から眼の水晶体被ばく線量及び手指等末端部線量の推定が従来の手法で可能か、フィールド試験及び試験を模擬したモンテカルロ計算シミュレーションを用いて検証した。得られた結果から、作業者の聞き取り調査及び作業現場の確認により、線源と作業者の位置関係が分かれば、距離の逆二乗則を用いた眼の水晶体線量推定は、体幹部線量をそのまま用いるよりも眼の水晶体線量について「良い推定値」を与えることが示唆された。特に、被ばく源が点線源とみなせる不均等被ばく状況の場合、距離の逆二乗則に基づく推定値は実際の測定で得られた結果に対し非常に良い一致をみた。また、線源と作業者の姿勢まで模擬したジオメトリを用いるモンテカルロ計算シミュレーションでも良い推定が可能であることが分かった。手指等末端部線量について、同様に、被ばく源が点線源とみなせる不均等被ばく状況の場合、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推定値は実際の測定で得られた結果に対し非常に良く一致した。一方、被ばく源が体積線源であり、線源内部での核種の分布及び強度比が不明である場合、体幹部線量から距離の逆二乗則及びモンテカルロ計算シミュレーションから推定する場合、実際の測定値より 10 倍以上過大に評価する可能性が示された。作業前のモックアップ試験で、線源と作業者の位置及び作業に伴う手指等の位置