

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一方で、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といえる。また、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。

本研究課題は今年度で終了となるが、今後の課題として次のようなことが挙げられる。

（1）加速器施設における放射線業務従事者の被ばく源となる線源情報の入手

本研究では、令和元年度に CZT スペクトロメータを用いて作業環境における被ばく源となる放射性核種の同定を行った。しかしながら、現状でも研究用加速器施設における被ばく源となる放射性物質についてある程度支配的なものを調査し網羅するに至らなかった。また、定性的な類型化に基づき計算シミュレーションで行い、体幹部で観測される線量に対する眼の水晶体線量の推定値がある程度の精度で得られることは分かった一方、手指部線量に対しては過大評価することとなった。そのため、放射線管理の現場においては、1) 体積線源での線源分布、2) 体積線源における放射化生

成核種の割合、について事前に入手することが望ましい。

F. 健康危機情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

H. 知的財産権の出版・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

I. 引用文献

[1] ICRP, 1997. General Principles for the Radiation Protection of Workers. ICRP Publication 75. Ann. ICRP 27 (1).

[2] 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,

<http://www.jhps.or.jp/upimg/files/suisho-tai-guideline.pdf>. Available on 2<sup>nd</sup> March 2021.

## II. 分担研究報告

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

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

本研究では、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する。

本研究事業で医療従事者の眼の水晶体等価線量算定のために使用され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み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] ×  $1.21 \pm 0.03$  [Sv/Gy] と決定できた。

### A. 研究目的

本研究は、放射線業務従事者の眼の水晶体の被ばく線量の適切な評価に資するため、放射線業務従事者に対して実施されている個人モニタリングに関し、特に眼の水晶体等価線量算定に用いられる個人線量計に関して国際規格等でどのように要求されているかに着目し、線量計の応答及び構成方法について検討を行ったものである。

労働者の放射線防護については、電離放

射線障害防止規則第五条において等価線量の線量限度が定められており、第八条に記載のあるとおり、事業者は、労働者である放射線業務従事者の受けた放射線の線量について測定義務が課されている。

「第八条 事業者は、放射線業務従事者、緊急作業に従事する労働者及び管理区域に一時的に立ち入る労働者の管理区域内において受ける外部被ばくによる線量及び内部被ばくによる線量を測定しなければならない

い。

2 前項の規定による外部被ばくによる線量の測定は、一センチメートル線量当量、三ミリメートル線量当量及び七十マイクロメートル線量当量のうち、実効線量及び等価線量の別に応じて、放射線の種類及びその有するエネルギーの値に基づき、当該外部被ばくによる線量を算定するものについて行うものとする。」

眼の水晶体等価線量を含めた放射線業務従事者の外部被ばく線量は、令和3年4月1日施行の法令では、個人線量当量と呼ばれる単位での測定が行われ、通常の管理の現場においては、放射線業務従事者が装着する個人線量計で測定された指示値に相当する。測定により得られた線量の年間の積算値は、等価線量の推定値として、法令で定められた年間の線量限度を超えないよう、厳重に管理される。そこで、重要な点は、放射線業務従事者の眼の近傍付近に装着された個人線量計を用いた測定で得られた測定値が、「正しい」値であるかどうかである。

線量計からの指示値が不正確な値であった場合、例えば実際にばく露した線量よりも過小に評価された線量が記録された場合、実際には意図せずして年間の線量限度を超えていた、という事例も生じ得る。この場合、労働者たる放射線業務従事者は不利益を被ることになる。労働者保護の観点から、個人線量計は使用時に正確に動作することと同時に正しい値を指示することが必須となる。

外部被ばくモニタリングのうち眼の水晶体等価線量の妥当な推定値を与える 3mm 線量当量を適切に測定するためには、1) 個人線量計が適切な仕様に基づき生産され

ていること、2) 線量計は定期的に校正されていること、及び3) 校正定数は測定の特異性により国家標準に紐づけられていること、が不可欠である。これらはいずれも国際規格で定められており、国際規格の中では、個人線量計が有すべき使用、定期的な校正手法、及び校正機関、試験所等が具備すべき能力とその能力を実証するために満たすべき要求事項が定められている。

本研究では、眼の水晶体等価線量が強調される作業環境で放射線作業を行う放射線業務従事者に適切な線量評価を行えるよう、眼の近傍に取り付けられる個人線量計について、具体的な校正手法に関する検討を進める。令和元年度の調査では国際規格についての調査を進めると同時に本研究班で使用中のガラス線量計のエネルギー応答特性を実験的に検証した。事業最終年度の令和2年度では、前年度の試験結果を考慮し、ガラス線量計に適切な校正定数を与える方法を検討する。また、線量計校正のためγ線・エックス線照射を照射する状況と実際に医療従事者が当該ガラス線量計装着時にうける被ばく状況とは、線量計の照射ジオメトリが異なっている。この点が線量計の測定値及び校正定数に影響を与えるかについて検討した。

## B. 研究方法

本研究では、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する。得られた校正定数をガラス線量計の読み値に適応することで、妥当な 3mm 線量当量測定値が得られるかどうか、医療従事者が実際にばく露する状況を再現し、市販の TLD 線量計との指示値の比較を行う事で検討した。

また、校正定数決定のため実施するガラス線量計照射試験時に、医療従事者の目の近傍で起こりうる状況を再現した照射試験を実施し、実際に指示値等がどのように変化するかについても検討した。

本研究で採用した個人線量計は、前述のとおり本補助金事業で医療従事者の被ばく線量測定に使用されている千代田テクノル社製 Dose Ace 用ガラス線量計 GD352M である。令和元年度の調査では、IEC 及び ISO で記載のある手順に従い、個人線量計のエ

ネルギー特性試験が実施可能か実験的に検証した。今年度は、前年度の結果を拡張する点で、エネルギー特性試験に加え角度依存性試験について、文献値が妥当かどうかの検証を行った。令和元年度と同様に、基準となる 3mm 線量当量での  $\gamma$  線及び X 線の照射は、日本原子力研究開発機構原子力科学研究所放射線標準施設棟に設定された  $\gamma$  線及び X 線校正場で実施した。

令和 2 年度のエネルギー特性試験及び角度依存性試験では、試験対象となるガラス線量計を ISO シリンダーファントム（直径 20 cm 高さ 20 cm）中央に直接貼り付けて基準放射線を照射した。使用した基準放射線の線種は、ISO4037-3:2019 の記載に従い、S-Cs、N-40、N-60、N-120、N-200 の 5 線種とした。ガラス線量計に照射した線量は、3mm 線量当量で約  $5 \pm 0.1$  mSv である。

線量計のレスポンスは、IEC62387:2012



図 1 本研究班で使用するガラス線量計 GD352M 及び水晶体被ばく線量測定用 TLD 線量計 (DOSIRIS) を ISO シリンダーファントムに取り付けた様子。

の記述に従い、下式に従って求めた。ガラス線量計の読出しは本研究事業に所属する産業医科大学 産業生態科学研究所 放射線健康医学研究室に依頼して実施した。得られた読み値からバックグラウンド値を差し引き、正味値を下式の  $M_E$  とした。

$$R_E = \frac{M_E}{h_{pK}(3;0) \times K_a}$$

本研究では、先行研究で系統的に実施された試験の検証を行う事が目的であるため文献[1]に従い、S-Cs (Cs $\gamma$ 線校正場：平均エネルギー662 keV) で得られたレスポンスを基準として他のX線校正場で得られたレスポンスの相対応答を評価した。

$$RR_E = \frac{\frac{M_E}{h_{pK}(3;0) \times K_{a,E}}}{\frac{M_{S-Cs}}{h_{pK}(3;0) \times K_{a,S-Cs}}}$$

得られた相対応答は文献値と比較を行った。

また、校正定数は、レスポンスの逆数であるため以下の式に従い導出した。

$$C_E = \frac{h_{pK}(3;0) \times K_a}{M_E}$$

なお、本補助金事業で医療従事者の眼の近傍に取り付けて追加モニタリングに供されるガラス線量計は、本来医療被ばくモニタリングのために使用される。初期設定の状態で行う場合、当該ガラス線量計読み出し装置には、ガラス線量計の個体差補正及び読み出し装置校正のため、フリーエアで空気カーマの単位で基準となるガラス線量計が準備される。そのため、ガラス線量

計からの読み値は、空気等価吸収線量の単位となる。初期状態の評価では、個人線量計には評価が不可欠な人体からの後方散乱成分が考慮されていない。そこで、本研究では、国際規格で規定されたISOシリンダーファントムを用いて得られた校正定数を初期状態の読み値に対する補正係数として導入することを提案する。

本研究で導出した校正定数は、実際に医療現場での医療従事者の眼の水晶体被ばく追加モニタリングに有効か、ファントムを用いたばく露試験で検証した。ベンチマーク試験で対象とした装置は、CT装置及び血管造影装置であり、それぞれCT介助者及び術者のばく露状況を模擬した。医療従事者を模擬したファントムはRANDOファントムを採用し、RANDOファントム上に線量計を取り付け、被ばく線量を評価した。取り付けた線量計は、本事業で採用したガラス線量計GD352Mに加え、国内でサービスが開始された、眼の水晶体被ばく線量モニタリング用線量計DOSIRISを同じ場所に取り付け、CT装置の場合は撮影、血管造影装置の場合は透視、を行ったのち、被ばく線量を比較した。その際、ガラス線量計の読み値には、本研究で提案する補正係数を乗じて、3mm線量当量の測定値として評価した。

医療従事者が眼の近傍に個人線量計を装着する場合、当該線量計の開発時・校正試験時に実施される照射条件と、使用状況が大きく異なっている。本研究では、それらについても実験的に検証した。検討した項目は、1) 校正時において、ファントムから線量計を浮かせて照射した場合と密着させた場合とで違いがあるかどうか、2) 防護眼鏡内外に個人線量計を設置した場合に

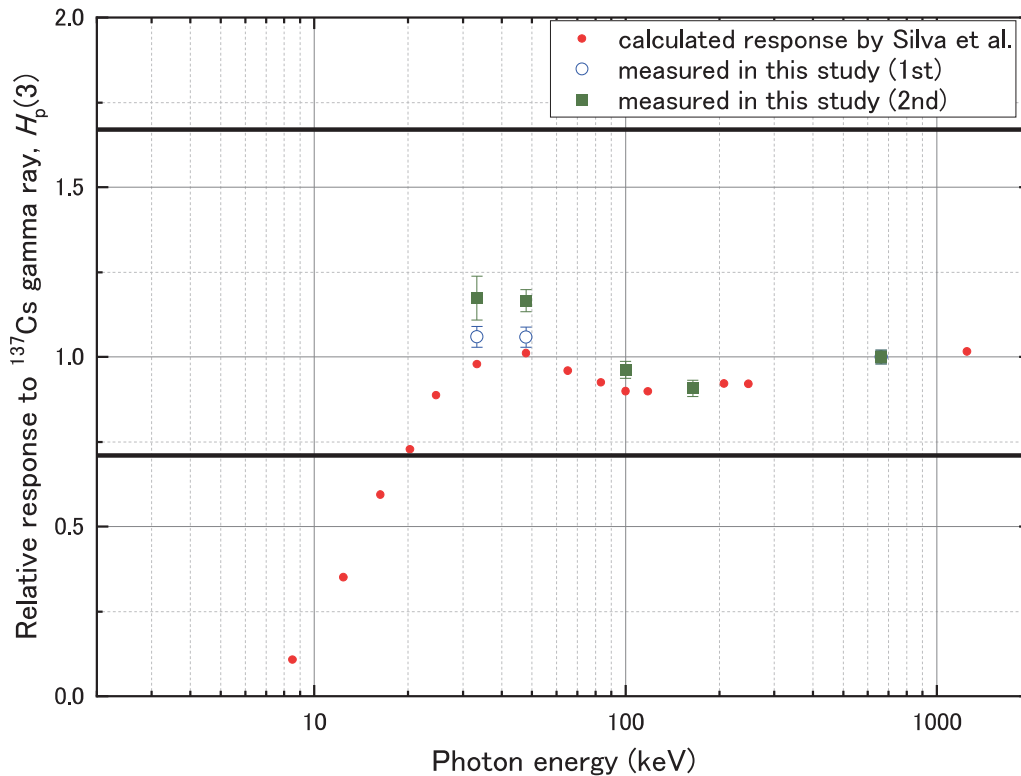


図2 本研究班で使用するガラス線量計 GD352M のエネルギー応答特性。日本原子力研究開発機構 放射線標準施設棟において ISO4037-3:2019 に従い線量計特性試験を実施。

線量計の応答はどのように変化するか、である。これらを実験的に検証するため、前述の $\gamma$ 線・X線校正場において、ISO シリンダーファントムを用い、1) 及び2) の照射条件を再現し、得られた応答を比較した。

### C. 研究結果

本研究では、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、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。エネルギー特性試験は、ISO4037-3:2019 の記述に従って実施した。図2では、今年度の試験結果と合わせて前

年度調査で得られた結果も示す。同図では先行研究となる文献値[1]もプロットしているが、モンテカルロ計算シミュレーションで得られた線量計レスポンスをよく再現できている。また、当該ガラス線量計のエネルギー応答特性が、20 keV 以上から非常に広いエネルギー範囲でIECの規格要件で示された基準値(エネルギー及び角度依存試験で得られた線量計レスポンスに対し0.71 ~ 1.67)に入っていることも確認できた。

また、ガラス線量計応答の角度依存性について、一部のエネルギーで実施した。投与したX線は、ISO N-series N-60 (平均エネルギー: 48 keV)で、角度は30度及び60度であった。0度で得られた線量計のレスポンスとの相対的なレスポンスは、30度で

の場合、30 度で  $0.846 \pm 0.041$ 、60 度で  $0.775 \pm 0.052$  であった。いずれも IEC 規格で示された基準値内の値である。さらに、図 3 では、文献[2]からモンテカルロ計算シミュレーションで得られたガラス線量計の角度応答の計算値を引用する。図に示す通り、線量計レスポンスは広い角度範囲で平坦であり、-60 度から 60 度で IEC 規格が示す 0.71~1.67 の範囲に入っている。個人モニタリング全般に係る規格である、ISO 15382: 2015 では、使用される線量計についての記載にとどまらず、どのように個人モニタリングが行われるべきかについての要求事項が記載されている。同規格には、インターベンショナルラジオロジー(IVR)術者に対する詳細な記載があり、「X 線防護眼鏡または顔面マスクを利用する際には、線量計は内側に装着すべきである。線量計を X 線防護眼鏡または顔面マスクの外側に装着する場合には、線量評価の際に補正が

必要である。」とある。IVR 術者が受ける X 線のエネルギー範囲は、20 ~ 100 keV との報告があり[3]、本研究事業で導入されているガラス線量計の応答は理想的であることが実験的に明らかとなった。

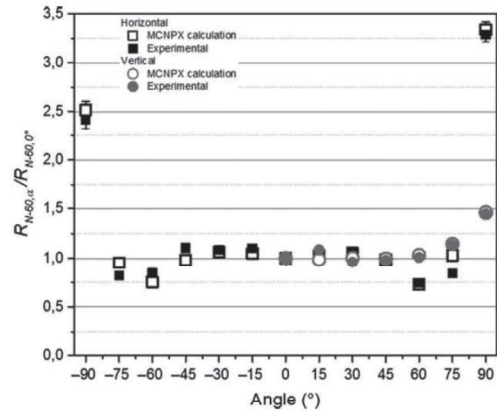


Figure 3. Angular dependence of GD-352M irradiated with N-60, obtained experimentally and via Monte Carlo calculations.

図 3 文献[2]より引用したガラス線量計 GD352M の応答の角度依存性。

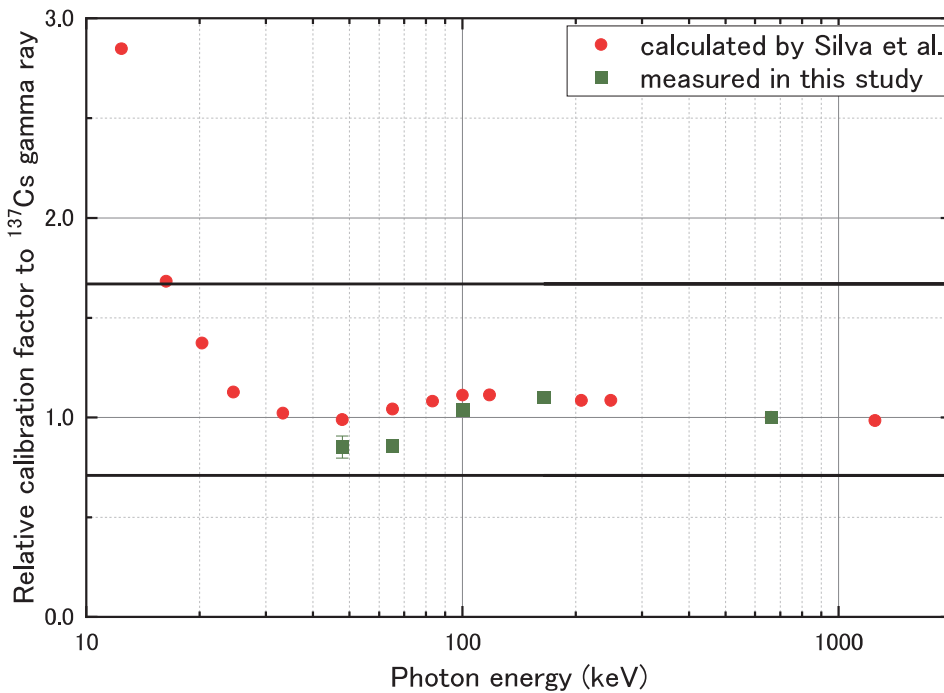


図 4 本研究班で使用するガラス線量計 GD352M の校正定数のエネルギー依存性

上記のエネルギー及び角度応答特性試験の結果を考慮し、具体的な線量計校正手法について検討した。前述の通り線量計レスポンスの逆数が校正定数である。校正定数を線量計指示値に乗じることで妥当な被ばく線量評価に供する。図4では本研究で評価した校正定数を示す。同図では文献値から計算した校正定数も示しているが、測定値とも非常によく一致している。また、IEC規格で示す基準の範囲内に入っていることが示されている。100 keV以下のX線に対する校正定数は1よりも大きくなることから、ガラス線量計の読み値に校正定数を乗じる場合、実際にばく露された線量を過小評価することはない。20 keV以下のX線に対する校正定数は、IEC規格で示す基準の上限値1.67を超える。校正定数に1.67以上を用いた場合、ガラス線量計における20 keV以上のX線の寄与を過大に評価することとなる。さらに詳細な検討は、後述のD. 考察に記載する。

#### D. 考察

本研究で得られた結果から以下の点について考察を進めた。

##### (1) ガラス線量計指示値からの3mm線量当量校正定数に係る検討

ここでは、ガラス線量計指示値に対する校正定数導出を基準照射の結果から考察を進める。現在、本研究班で使用するガラス線量計の読み出し装置は、医療被ばくモニタリングが主たる用途であることから、線量計読み出し装置校正に用いられる標準ガラス線量計は、 $^{137}\text{Cs}$ の662 keVによる基準照射が実施されている。その際の照射条件は、フリーエア照射であり、この照射条

件では、ガラス線量計の読出しの結果求められる線量は、空気等価吸収線量(Gy)となる。厳密には空気カーマというべきであるが、比較的エネルギーの低いX線の場合、測定に供される場でも二次電子平衡が成立するため、空気等価吸収線量と実質的に同等である。この単位で測定されることとなるため、実際には放射線場の値を評価することになる。一方で、医療従事者の眼の近傍における追加モニタリングを検討する場合、本研究班では当該ガラス線量計を専用の線量計ホルダに納めて防護眼鏡に取り付け、医療従事者の頭部周辺に装着した状態で被ばく線量を評価することとなる。後述のISOでも指摘はあるが、測定対象となる医療従事者の顔等から散乱するX線を加味した校正定数が与えられるべきである。ISO4037-3:2019においても眼の水晶体被ばく線量モニタリングに供される個人線量計はISO指定のシリンダーファントムを用いて校正することが求められており、被校正物である個人線量計に対し顔等からの後方散乱成分の入射を加味した応答から校正定数は評価されるべきである、という考えに立脚したものである。さらに、図2及び図4で示した通り、Silva et al.[1],[2]による、ガラス線量計素子自体のエネルギー応答特性は評価されており、文献値が実験値と比較して妥当であることが確認できた。

図4から、20 keV – 300 keV (IECの基準による)で、レスポンスが0.71 ~ 1.67の範囲に入るよう考慮すること、IVR術者が受けるX線のエネルギー範囲は、20 ~ 100 keVとの報告[3]、さらに別途報告する散乱X線成分のスペクトル測定で得られた結果も考慮すると20 keVから100 keVまで散乱X線エネルギーに対して最大の校正



定数となるよう考慮して、E = 100 keV(ISO4037-1 で N120 の線質)を基準とするのが妥当と考えられる。

上記の E = 100 keV(ISO4037-1 で N120 の線質)に対する校正定数導出は、以下に示す二通りの方法が考慮される。

- 1) 線量計読み出し装置校正用基準ガラス線量計を介する方法
- 2) 直接校正定数を与える方法

1) は以下の式で導出できる。

$$\begin{aligned} & \text{水晶体等価線量(3mm 線量当量)[Sv]} \\ &= \text{蛍光ガラス線量計指示値 [Gy]} \times \\ & \frac{\text{137Cs の基準線量Hp(3) [Sv]}}{\text{基準照射時の指示値 [Gy]}} \times \\ & \text{137Cs に対する N120 の相対的な校正定数} \\ & \text{(1.11)} \end{aligned}$$

ここで N120 に対する相対的な校正定数は文献値から引用した値であり、左辺第1項の値は本研究で求めた値を採用する。

<sup>137</sup>Cs 662 keV オンファントム照射（シリンダーファントム）の照射及び測定結果は表1に示すとおりである。

**表1 <sup>137</sup>Cs 662 keV オンファントム照射（シリンダーファントム）での基準照射によるガラス線量計校正定数**

投与線量 (mGy) , H	指示値 (mGy) , M	校正定数, H/M
5.0 ± 0.1	4.60 ± 0.03	1.09 ± 0.03

不確かさ : k = 1

この結果より、水晶体等価線量（3mm 線量当量）の評価は、

$$\begin{aligned} & \text{水晶体等価線量(3mm 線量当量)[Sv]} = \\ & \text{蛍光ガラス線量計指示値[Gy]} \\ & \times \text{校正定数 (1.21} \pm \text{0.03 (=1.09} \times \text{1.11))} \\ & \text{となり、この校正定数（補正係数）をガラ} \end{aligned}$$

ス線量計読み値に乗じることで妥当な眼の水晶体被ばく線量評価が可能となる。

2) の直接校正定数を与える方法から導出した場合は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} & \text{水晶体等価線量(3mm 線量当量)[Sv]} = \\ & \text{蛍光ガラス線量計指示値[Gy]} \\ & \times \text{校正定数} \end{aligned}$$

であるが、X-ray N-120 E = 100 keV オンファントム照射（シリンダーファントム）で、照射を実施し直接校正定数（Sv/Gy）を試みた。（不確かさ : k=1）

**表2 X-ray N-120 E = 100 keV オンファントム照射（シリンダーファントム）での基準照射によるガラス線量計校正定数**

投与線量 (mGy) , H	指示値 (mGy) , M	校正定数, H/M
4.94 ± 0.1	4.18 ± 0.02	1.18 ± 0.03

不確かさ : k = 1

$$\begin{aligned} & \text{水晶体等価線量(3mm 線量当量)[Sv]} = \\ & \text{蛍光ガラス線量計指示値[Gy]} \\ & \times \text{校正定数 (1.18} \pm \text{0.03)} \end{aligned}$$

が得られる。

1) 及び2) で試みた校正定数は、文献値を用いた場合でも実験値から直接導出した場合でも不確かさの範囲内で一致している。この点を考慮し、本報告書においてガラス線量計読み値に対する校正定数は、1.21 ± 0.03 (k=1) を提案する。

本研究で提案する、医療従事者の眼の水晶体に対する被ばく線量を適切に評価するための、ガラス線量計読み値に対する校正定数について、適切な被ばく線量を与えるかどうか、市販の TLD 線量計で得られた応

表3 ISO X線校正場での基準照射を行った場合の市販型 TLD 線量計測定値と本研究班で採用するガラス線量計測定値の比較

線種、エネルギー	投与線量 (mSv), H	TLD からの測定値 (mSv)	ガラス線量計からの 測定値(mSv)
N-40, 32 keV	4.98 ± 0.10	6.79	6.17
N-60, 48 keV	4.97 ± 0.10	6.16	6.11
N-120, 100 keV	4.94 ± 0.10	5.00	5.01
N-200, 160 keV	4.94 ± 0.10	4.57	4.73

\*不確かさ k=1

答との比較を行った。TLD 線量計は、フランス放射線防護原子力安全研究所 (Institute de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire-IRSN) で開発された DOSIRIS(<http://dosimetrie.irsn.fr/en-us/Documents/Product%20files/DOSIRIS%20EN%20WEB.pdf>)を用いた。

表3では、ISO N series の基準照射を行った場合の、ガラス線量計及びTLD 線量計からの測定値の比較を示す。基準照射はエネルギー応答特性試験実施時と同様に ISO シリンダーファントムに取り付けて実施した。本研究で提案する校正定数をガラス線量計読み値に乗じた測定値は、試験したエネルギー範囲において投与線量と非常によく一致しており、IEC 規格で示す基準を満たしている。市販型 TLD 線量計 DOSIRIS の応答についても、同様に IEC 規格で示す基準の範囲内に入っているが、低エネルギー

ーX 線では過大に応答することが明らかとなった。これはカタログでも示されているとおりであり、同時に「100 keV の X 線で校正されている」との記載の通り 100 keV に対して投与線量に対し TLD 測定値は非常によく一致している。

さらに医療従事者が実際にばく露する放射線場においても妥当な被ばく線量を与えるかについても検証を行った。検証では CT 装置及び血管造影装置における CT 介助者及び IVR 術者を模擬して測定を行った。使用装置及び撮影条件は以下に示すとおりである。

CT 装置における使用機器及び撮影条件は、

使用装置：Canon Aquilion prime

管電圧：120 kVp

mAs：350 mAs

ローテーションタイム：0.5 sec



図5 ガラス線量計読み値に対する校正定数ベンチマーク試験に使用した RANDO ファントムと CT 介助者位置でのばく露の様子。

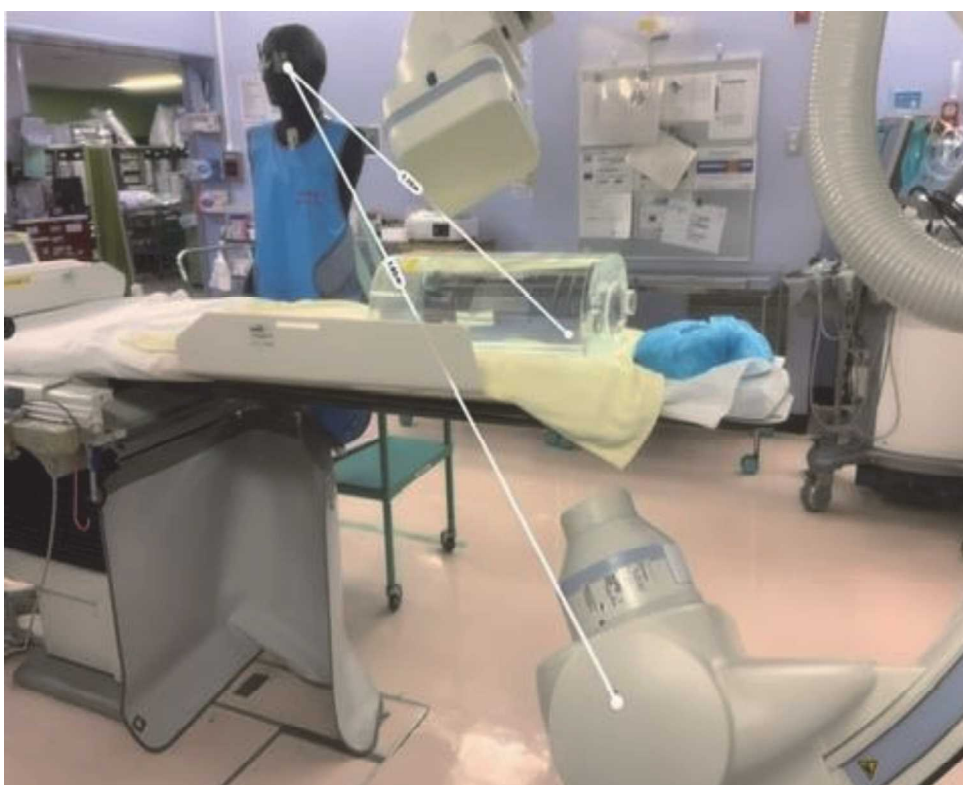


図6 ガラス線量計読み値に対する校正定数ベンチマーク試験に使用した RANDO ファントムと IVR 術者位置でのばく露の様子。

表4 CT 介助者位置でばく露試験を行った場合の市販型 TLD 線量計測定値と本研究班で採用するガラス線量計測定値の比較

RANDO ファントム上での装着位置	TLD からの測定値(mSv)	ガラス線量計からの測定値(mSv)	比率 (RPLD/TLD)
右眼 1	2.43	2.34	0.96
右眼 2	2.43	2.34	0.96
左眼 1	1.75	1.54	0.88
左眼 2	1.73	1.75	1.01
右眼 (防護眼鏡有り)	1.03	0.95	0.93
右眼 (防護眼鏡有り)	1.14	1.04	0.91
左眼 (防護眼鏡有り)	0.87	0.66	0.76
左眼 (防護眼鏡有り)	0.80	0.90	1.12
右放射線防護眼鏡外上	1.85	1.32	0.71
右目じり内側 (防護眼鏡有り)	0.84	0.63	0.75
左放射線防護眼鏡外上	0.87	0.71	0.81
左目じり内側 (防護眼鏡有り)	0.53	0.35	0.67

測定距離 : 455 mm  
 撮影回数 : 5 回  
 CTDvol : 116.6 mGy  
 DLP : 6148 mGy cm  
 である。  
 血管造影装置の使用装置及び撮影条件は以下のとおりである。

使用装置 : Siemens Artis zee  
 <透視モード>  
 管電圧・管電流 : 102.7 kVp, 70.6 mA

照射時間 : 5.3 ms  
 フレームレート : 30 FPS  
 透視時間 : 20 min

また、撮影対象者を模擬してアクリル製ファントム (胸部腹部水ファントム JISZ4915) を使用した。

表 4 では CT 介助者位置でのファントムばく露試験における TLD 線量計及びガラ

ス線量計測定値の比較を示す。ガラス線量計測定値は、本研究報告で提案するガラス線量計読み値に対し 1.21 を乗じて導出した。

表 4 に示す通り、CT 介助者を模擬した RANDO ファントムの眼の位置に取り付けた TLD 及びガラス線量計から得られた測定値は、防護眼鏡の着用有無にかかわらず非常によく一致している。TLD 線量計からの測定値に対する、ガラス線量計測定値の割合は、両眼位置の線量計の平均で、 $0.94 \pm 0.10$  ( $k=1$ ) である。TLD 及びガラス線量計測定値に付随する不確かさを考慮すると、両者の測定値に違いがないといえる。

表 5 では、上記表 4 と同様に血管造影装置における IVR 術者位置に設置した RANDO ファントムに取り付けた線量計からの測定値の比較を示す。CT 介助者における事例と異なり、ベンチマーク試験全体でのばく露量が小さく、市販 TLD 線量計の測定値が得られない (報告下限値以下) 条件

表5 IVR 術者位置でばく露試験を行った場合の市販型 TLD 線量計測定値と本研究班で採用するガラス線量計測定値の比較

RANDO フェントム上での装着位置	TLD からの測定値(mSv)	ガラス線量計からの測定値(mSv)	比率 (RPLD/TLD)
右眼 1	0.13	0.152	1.17
右眼 2	0.16	0.138	0.86
左眼 1	0.23	0.203	0.88
左眼 2	0.21	0.219	1.04
右眼 (防護眼鏡有り)	x	0.073	
右眼 (防護眼鏡有り)	x	0.060	
左眼 (防護眼鏡有り)	x	0.048	
左眼 (防護眼鏡有り)	x	0.053	

があった。防護眼鏡を適切に装着した IVR 術者の眼の近傍で得られる被ばく線量は報告下限以下として、測定値が得られていない。一方、本研究班で採用したガラス線量計は測定下限値が  $10 \mu\text{Gy}$  であることから防護眼鏡による適切な遮へいが行われた状態でも、低い被ばく線量の指示値が得られた。本研究班では、よりきめ細やかな被ばく線量評価を達成するため、特にばく露量の多い術者に対しては、一回ごとの行為・施術あたりで眼の被ばく線量算定を検討している。一回ごとのばく露量は今次研究で実施した線量と同程度になることが見込まれるため、市販 TLD 線量計では達成し得ない。この点は、市販 TLD に対するガラス線量計の大きなアドバンテージといえる。TLD 線量計からの測定値に対する、ガラス線量計測定値の割合は、両眼位置の線量計の平均で、 $0.99 \pm 0.15$  ( $k=1$ ) である。CT 介助者位置でのベンチマーク試験で得られた比率と同様に、IVR 術者位置でのベンチマーク試験においても同様に両者の測定値に違いがあるといえない。また、防護眼鏡がない状態での測定値に対する防護眼鏡あ

りの場合での測定値の比は、CT 介助者の場合、TLD 及びガラス線量計でそれぞれ、 $0.46$  及び  $0.45$  であり (両眼の平均)、血管造影装置における IVR 術者を模擬した場合だと、ガラス線量計で  $0.35$  であった。得られた低減係数は管電圧から推定される散乱 X 線成分のエネルギー範囲から考慮しても、いずれも妥当な範囲に入っているといえる。また、CT 介助者を模擬したベンチマーク試験の場合、TLD 及びガラス線量計で得られた低減係数は非常によく一致している。この点からも、本研究で提案するガラス線量計読み値に対する校正定数は妥当であるといえる。

(2) 線量計の使用状態を考慮した場合のガラス線量計指示値に係る検討

(1) での検討はガラス線量計校正と適切な校正定数を与える手法に関するものであった。線量計校正に関する検討と並行し、ガラス線量計の使用時に懸念される、医療従事者が装着する防護眼鏡の鉛等価レンズ自身及びモニタリングの対象となる装着者自身の頭部からの後方散乱成分がどの程度



図 7 本研究班で使用するガラス線量計 GD352M 及び水晶体被ばく線量測定用 TLD 線量計 (DOSIRIS) を防護眼鏡 (レンズのみ) 越しに ISO シリンダーファントムに取り付けた様子。

線量計の応答に寄与するかについても検討した。本研究における検討では、防護眼鏡のレンズのみを用いて、専用ガラス線量計ホルダを装着し、ISO シリンダーファントム正面に防護眼鏡レンズごと保持して基準照射を実施した (図 7 参照)。基準照射には ISO N40 と N60 を用い、基準照射は、角度 0 度で実施した。また、防護眼鏡レンズの内外には市販 TLD も同時に取り付けて応答を評価した。

表 6 では、N40 で基準照射した場合の、各条件におけるガラス線量計読み値の比較を示す。

表 6 X-ray N-40 E = 32 keV オンファントム照射 (シリンダーファントム) での基準照射によるガラス線量計指示値の変化

照射条件 N-40 4.98 mSv ( $H_0(3)$ )	指示値 (mGy), M (k = 1)	直付けとの指示 値の差 (mGy)
直付け	$5.13 \pm 0.29$	-
ホルダ直付け 内側	$5.17 \pm 0.29$	0.04
ホルダ直付け 外側	$5.25 \pm 0.39$	0.12
防護眼鏡上ホル ダ付 外側	$4.21 \pm 0.01$	0.92
防護眼鏡上ホル ダ付 内側	$1.00 \pm 0.03$	4.13

表 6 では本研究班で開発した防護眼鏡に装着するための専用ホルダに取り付けた状

態で、専用ホルダを ISO シリンダーファントムに直接取り付けて基準照射した場合に得られた読み値（単位 Gy）も併記した。専用ホルダに取り付けたガラス線量計からの読み値は、直付けで基準照射したガラス線量計からの読み値と有意な差が認められなかった。一方で、専用ホルダを防護眼鏡レンズ（東レ社製：パノラマシールド）に装着してファントムに取り付けて照射した場合、ガラス線量計の読み値は大きく低減した。次表 7 では同様に X 線の線種を変更して同様の試験を実施した場合に得られるガラス線量計読み値の変化を示す。線種は ISO N series の N60 である。表 6 と同様にシリンダーファントムに直接ガラス線量計を設置した場合に得られたガラス線量計読み値を基準として、異なるファントム設置条件の違いで生じる読み値の差異について評価した。

表 7 X-ray N-60 E = 48 keV オンファントム照射（シリンダーファントム）での基準照射によるガラス線量計指示値の変化

照射条件 N-60 4.97 mSv ( $H_p(3)$ )	指示値 (mGy), M (k = 1)	直付けとの指示 値の差 (mGy)
直付け	5.09 ± 0.07	-
ホルダ直付け 内側	5.29 ± 0.12	0.20
ホルダ直付け 外側	5.22 ± 0.09	0.13
防護眼鏡上ホル ダ付 外側	4.06 ± 0.07	1.03
防護眼鏡上ホル ダ付 内側	2.69 ± 0.13	2.40

基準照射に用いた X 線の線種に依存せず、

専用ホルダに取り付けたガラス線量計からの読み値と、直付けで基準照射したガラス線量計からの読み値との間に有意な差が認められなかった。前掲表 6 で示した結果と同様、X 線のエネルギーが変化したが、専用ホルダを防護眼鏡レンズに装着してファントムに取り付けて照射した場合、同様にガラス線量計の読み値は大きく低減した。

防護眼鏡内側に設置したガラス線量計読み値から評価される防護眼鏡レンズによる低減率は、ISO N series N40 及び N60 に対してそれぞれ、0.19 及び 0.53 となった。本補助金事業において別途実施した研究において測定した散乱 X 線成分の平均エネルギーは 40～50 keV であった。前掲のとおり医療従事者の行為等を模擬したベンチマーク試験で得られた同製品を用いた防護眼鏡による線量低減率は、CT 介助者の場合、TLD 線量計及びガラス線量計でそれぞれ、0.46 及び 0.45 であり（両眼の平均）、血管造影装置における IVR 術者を模擬した場合だと、ガラス線量計で 0.35 であった。今回の基準照射で得られた結果は防護眼鏡レンズのみでの遮へい能力を評価したものとなる。この点を考慮すると、適切に防護眼鏡が装着された場合、医療従事者の従事する行為での放射線ばく露状況において、眼の水晶体被ばく線量低減のための防護眼鏡は、性能通りの防護性能を発揮できることを示唆している。

一方、防護眼鏡レンズ外側に取り付けたガラス線量計の読み値は、直付け及び専用ホルダ直付けの条件で得られた読み値と比較して、入射 X 線のエネルギーにかかわらず小さくなっている。減少幅にはエネルギー依存が見られず 20%低い読み値となっている。防護眼鏡レンズ外側に設置されたガ

ラス線量計の照射条件は、直付けの条件と同様に直接到達する X 線に対する遮へいがなく、線源からの距離は直付け及びホルダ直付けと同条件である。ガラス線量計読み値低減の要因として、①ファントムまで入射する直達線が防護眼鏡レンズで遮へいされ、ファントムから発生する散乱線自体が減少している、及び②ファントムから発射される散乱 X 線成分が線量計から見て裏側に位置する防護眼鏡レンズに遮へいされて低減する、が考慮される。この点を考慮すると疑似的にはフリーエア照射条件に近い状況での基準照射となっていることが示唆される。

当該試験の目的は、本研究班で採用するガラス線量計を専用ホルダに装着して防護眼鏡に取り付けた際に、用いられる補正係数(校正定数)は、基準照射によって得られたものを用いるべきかどうか、を検討することにある。

そこで、より臨床の実態に近い校正定数として、散乱線測定結果に基づき、平均エネルギーが近い ISO N60 で得られた結果から、メガネ外側の線量計に対する指示値に対しては、以下の式に基づき読み値の補正係数を導出できる。

$$\begin{aligned} & \text{水晶体等価線量(3mm 線量当量)[Sv]} \\ &= \text{蛍光ガラス線量計指示値 [Gy]} \times \\ & \quad \frac{\text{137Cs の基準線量Hp(3) [Sv]}}{\text{基準照射時の指示値 [Gy]}} \times \\ & \text{防護眼鏡外側設置照射に対するオンファントム照射直付け条件の補正係数} \end{aligned}$$

ここで  $^{137}\text{Cs}$  662 keV オンファントム照射(シリンダーファントム)の照射でえられた校正定数は、1.09 であり、右辺第 2 項の補正係数は N40 及び N60 で得られた値はそれぞれ 1.21 及び 1.25 である。そこか

ら、右辺を計算すると保守的な見積もりでは  $1.09 \times 1.25 = 1.36$  となる。

一方で、防護眼鏡内側に設置されたガラス線量計読み値に対する補正係数については前掲の校正定数のみの導入を提案し、上述の補正を要しないと考えられるためである。防護眼鏡レンズ内側に設置されたガラス線量計の照射条件は、直付けの条件と同様にファントムから発射される散乱 X 線成分が線量計に遮へいされずに入射する状況が維持されている。そのため、防護眼鏡レンズによる後方散乱成分の入射が遮へいされることは考慮しなくてよいためである。なお、上記の評価で求めた補正係数はあくまで防護眼鏡外側に専用ホルダで装着されたガラス線量計からの読み値にのみ適応されるべきであり、眼鏡内側のガラス線量計読み値に対しては提案通り 1.21 の校正定数が乗じられるべきである。また、今回導出した補正係数はあくまで本研究班で使用中の防護眼鏡に対するものであるため、ISO で定める公定法により導出されたものではない。この点を考慮し、ガラス線量計に対する校正定数はあくまで 1.21 である点を強調する。

また、当該ガラス線量計の校正時にファントム表面より距離を開けて設置した場合と直接表面に取り付けた場合とで得られるレスポンス(校正定数の逆数)に違いがみられるかも検討した。本研究班ではガラス線量計を専用ホルダに取り付けて防護眼鏡の所定の位置に取り付けて使用することとしている。本研究では、プラスチックフォームを使用して ISO シリンダーファントム表面から 5 mm 浮かせて設置した場合とファントム表面にガラス線量計を直付けした場合に得られるレスポンスの違いを評価し



表8 シリンダーファントムの設置方法を変えた場合のガラス線量計応答の比較 (k=1)

照射条件、線種、投与線量	ファントム直付け	ファントムより 5 mm 浮かせて設置
S-Cs 5.00 mSv ( $H_p(3)$ )	0.871 ± 0.018	0.857 ± 0.019
N-40 4.98 mSv ( $H_p(3)$ )	1.032 ± 0.062	1.091 ± 0.035
N-60 4.97 mSv ( $H_p(3)$ )	1.025 ± 0.025	1.074 ± 0.041
N-120 4.94 mSv ( $H_p(3)$ )	0.846 ± 0.018	0.820 ± 0.018
N-200 4.94 mSv ( $H_p(3)$ )	0.798 ± 0.018	0.776 ± 0.017

た。表8に、一連の基準照射で得られた試験結果を示す。各線種で得られたレスポンスでt検定を行ったところ、N60の基準照射で得られたレスポンスの結果でのみ有意差あり、他は「有意差無」となった。この点から、ガラス線量計校正時の基準照射において、本試験で行ったエネルギー範囲では、ガラス線量計をISOシリンダーファントムに直接設置しても、シリンダーファントム表面から5mm距離を取って設置しても、校正定数には大きな影響を与えない、といえる。本件は線量計の校正手法については有用な知見である。一方で、本研究事業終了後においても、ガラス線量計のみならず、他の線量計でも同様の試験が実施されることが望ましい。

#### E. 結論

本研究では、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する。得られた校正定数をガラス線量計

の読み値に適応することで、妥当な3mm線量当量測定値が得られるかどうか、医療従事者が実際にばく露する状況を再現し、市販のTLD線量計との指示値の比較を行う事で検討した。また、校正定数決定のため実施するガラス線量計照射試験時に、医療従事者の眼の近傍で起こりうる状況を再現した照射試験を実施し、実際に指示値等がどのように変化するかについても検討した。

本研究事業で医療従事者の眼の水晶体等価線量算定のために使用され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] × **1.21 ± 0.03** [Sv/Gy]

と決定できた。本研究で提案する、医療従事者の眼の水晶体に対する被ばく線量を適切に評価するための、ガラス線量計読み

値に対する校正定数について、適切な被ばく線量を与えるかどうか、市販の TLD 線量計で得られた応答との比較を行った。ベンチマーク試験では CT 介助者及び IVR 十 t 者を模擬した RANDO ファントムの眼の位置に取り付けた TLD 及びガラス線量計から得られた測定値は、防護眼鏡の着用有無にかかわらず非常によく一致した。TLD 線量計からの測定値に対する、ガラス線量計測定値の割合は、両眼位置の線量計の平均で、CT 介助者模擬の試験では、 $0.94 \pm 0.10$  ( $k=1$ ) となり、IVR 術者模擬の試験では  $0.99 \pm 0.15$  ( $k=1$ ) であった。TLD 及びガラス線量計測定値に付随する不確かさを考慮すると、両者の測定値に違いがないといえる。

線量計校正に関する検討と並行し、ガラス線量計の使用時に懸念される、医療従事者が装着する防護眼鏡の鉛等価レンズ自身及びモニタリングの対象となる装着者自身の頭部からの後方散乱成分がどの程度線量計の応答に寄与するかについても検討した。その結果、専用ホルダ外側に設置したガラス線量計読み値に対し、

(1) 術者頭部を模擬したシリンダファントムよりバックスキャッター成分が 2%追加

(2) 防護眼鏡レンズでファントムからのバックスキャッターが遮へいされるため、20%減少

することが分かった。本研究では、より臨床の実態に近い校正定数として、散乱線測定結果に基づき、平均エネルギーが近い ISO N60 で得られた結果から、防護眼鏡外側に設置されたガラス線量計読み値に対する補正係数は、 $1.36$  [Sv/Gy] と推定される。なお、当該補正係数は防護眼鏡外側に専用

ホルダで装着されたガラス線量計からの読み値にのみ適応されるべきであり、眼鏡内側のガラス線量計読み値に対しては提案通り 1.21 の校正定数が乗じられるべきである。また、今回導出した補正係数はあくまで本研究班で使用中の防護眼鏡に対するものであるため、ISO で定める公定法により導出されたものではない。この点を考慮し、ガラス線量計に対する校正定数はあくまで 1.21 である点を強調する。

さらに、本研究では、プラスチックフォームを使用して ISO シリンダーファントム表面から 5 mm 浮かせて設置した場合とファントム表面にガラス線量計を直付けした場合に得られるレスポンスの違いを評価した。表 8 に、一連の基準照射で得られた試験結果を示す。各線種で得られたレスポンスで t 検定を行ったところ、N60 の基準照射で得られたレスポンスの結果でのみ有意差あり、他は「有意差無」となった。この点から、ガラス線量計校正時の基準照射において、本試験で行ったエネルギー範囲では、ガラス線量計を ISO シリンダーファントムに直接設置しても、シリンダーファントム表面から 5 mm 距離を取って設置しても、校正定数には大きな影響を与えない、といえる。

F. 健康危機情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

H. 知的財産権の出版・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

I. 引用文献

[1] E. H. Silva et al. ENERGY AND ANGULAR DEPENDENCE OF RADIOPHOTOLUMINESCENT GLASS DOSEMETERS FOR EYE LENS DOSIMETRY, Radiation Protection Dosimetry (2016), Vol. 170, No. 1–4, pp. 208–212.

[2] E. H. Silva et al. ENERGY AND ANGULAR DEPENDENCE OF RADIOPHOTOLUMINESCENT GLASS DOSEMETERS FOR EYE LENS DOSIMETRY, Radiation Protection Dosimetry (2018), Vol. 182, No. 2, pp. 177–183.

[3] I. Clairanda et al. Use of active personal dosimeters in interventional radiology and cardiology: Tests in laboratory conditions and recommendations - ORAMED project, Radiat. Meas. 46, 1252–1257 (2011).

Ⅲ. 分担研究報告（調査報告）

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

分担研究者 古渡 意彦

(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)

調査要旨

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、X 線スペクトル測定装置により評価した。本調査では、血管造影装置及び X 線透視装置を使用する医療従事者の施術位置での散乱 X 線成分の性状がどのようになっているか、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。

A. 調査目的

本調査は、昨年度に引き続き、特に医療従事者が医療行為で受ける眼の水晶体被ばく線量の適切な評価に供することを目的として、医療従事者の眼の水晶体被ばくの主たる被ばく源となる X 線の成分がどのようなものであるか、実際に測定することにより調査を行ったものである。

令和 3 年度施行予定の電離放射線障害防止規則においては、事業者は、労働者である放射線業務従事者等が管理区域内において受けた放射線の線量を測定することが義務づけられている。(第八条) 同規則第五条

において年間線量限度が明示されている、放射線業務従事者の眼の水晶体被ばくは外部被ばく線量として評価されるものであり、管理区域における放射線作業により最大の被ばくとなる部位が眼の近傍である場合は、眼の近傍に適切な線量計を設置し、線量計の読み値により眼の水晶体等価線量を算定することになる。

眼の水晶体等価線量の外部被ばくモニタリングには、眼の近傍に装着可能な個人線量計が用いられる。これら線量計は、眼の水晶体等価線量の妥当な推定値を与える 3mm 線量当量を適切に評価できるよう、

ISO 等で定められた仕様を有していることが求められている。また、個人線量計の指示値が妥当な線量当量を示すためには、当該線量計の応答が妥当であることと併せて線量計に入射する X 線の知見を有していることが望ましい。

医療従事者が医療行為等従事中に眼の近傍で被る放射線は、X 線管球から直接医療従事者の眼の近傍の到達する成分（以下、「直接成分」という。）は少ない一方で、X 線管球周辺を覆う遮へい、撮影・透視対象（患者）、ベッド・クレードル等周辺構造物で散乱されて発生する二次 X 線成分（以下、「散乱 X 線成分」という。）が優位であると考えられる。この点から、撮影装置の X 線管球に印加した管電圧をそのまま眼の近傍で観測される散乱成分のエネルギーとして用いるのは適切といえない。また、直接成分の平均エネルギー（実効エネルギー）を用いることは、散乱成分の特徴を表現する手法の一つである。しかしながら、散乱成分がこのエネルギーよりも低いことを示す以上の情報を与えないため、半価層法等による測定等による散乱成分の X 線エネルギー（この場合は実効エネルギー）自体の推定は不可欠である。

本調査では、令和元年度に引き続いて医療従事者の眼の水晶体被ばく線量モニタリングに不可欠な線量計の適切な校正定数を与えるために必要な情報として、医療従事者の行為等に従事する際に眼の近傍で受ける散乱 X 線の性状を把握することを目的として、X 線スペクトロメータを用いた測定によりフルエンス平均エネルギーを導出した。

#### B. 調査方法

本調査は、医療従事者の行為等に従事する際に眼の近傍で受ける散乱 X 線成分のスペクトルを取得し、眼の水晶体に入射する散乱成分の平均エネルギー及び分布を実験的に検証することを目的とする。一方で、医療従事者が行為等の従事する状況は非常に多岐にわたっており、それら全てを網羅することは困難である。令和 2 年度は、前年度に引き続き、測定対象とする装置及び行為を限定し、散乱 X 線成分の測定を行った。本年度は血管造影装置及び X 線透視装置を対象として調査を行った。使用装置及び撮影条件は表 1 に示すとおりである。

表 1 各装置からの散乱 X 線成分測定時の撮影条件

装置	測定位置	検出器の向き*	その他条件等
血管撮影装置	術者の眼の高さ	術者左眼方向から ISO 水ファントム	透視/撮影モード
X 線透視装置	術者の眼（床上 165 cm） 術者の胸部（床上 132 cm）	術者から ISO 水ファントム及び X 線チューブ側	検出器コリメータ開口部の角度を変えて測定

\*：コリメータ開口部の方向。開口部からのみ散乱 X 線成分が入射することを日本原子力研究開発機構での予備測定により確認済み。

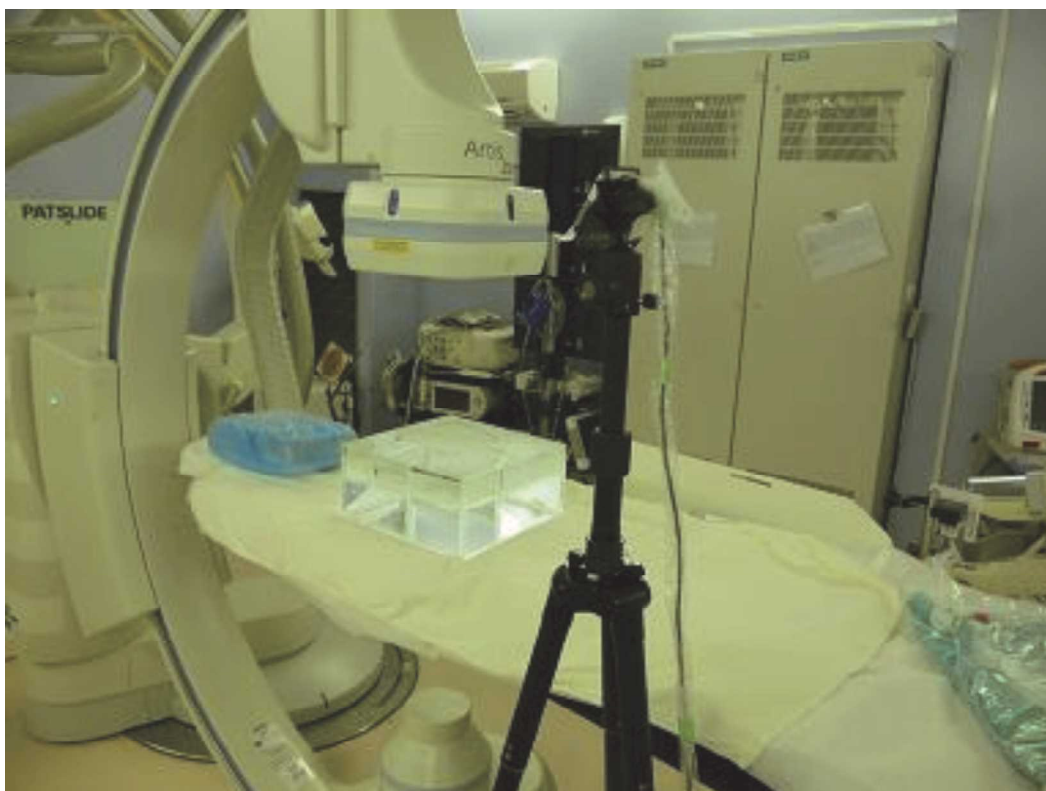


図1 血管造影装置における術者位置での散乱成分測定の様子

血管造影装置の使用装置及び撮影条件は以下のとおりである。

使用装置：Siemens Artis zee

<撮影モード>

管電圧・管電流：65 kVp, 231.8 mA

フレームレート：15 FPS

フィルター：0.6 mmt copper

<診断モード>

管電圧・管電流：65.4 kVp, 422.2 mA

フレームレート：15 FPS

フィルター：0.2 mmt copper

X線透視装置の使用装置及び撮影条件は以下に示すとおりである。

使用装置：Shimadzu SONIALVISION  
G4 D150BC-40S

管電圧・管電流：73 kVp, 0.7 mA

パルスレート：7.5 FPS

照射範囲：12 インチ

フィルター：0.1 mmt copper

本調査では、前年度に引き続き撮影対象者を模擬し、アクリル製水槽型ファントム（ISO水ファントム）を使用した。

本調査で使用したX線検出器は、Kromek社製GR-1であり、検出素子はCdZnTe半導体がいわれている（以下、「CZT検出器」という）。CZT検出器は図2に示す通りである。



図2 使用した CZT 検出器の様子

当該 CZT 検出器は Kurosawa らが血管造影装置による術者の眼の位置での散乱 X 線成分にも使用されているものである[1]。

事前に実施した予備測定の結果、後述の CZT 検出器で得られる波高分布にパイルアップ現象が観測され、適切な測定ができなかった。また、文献[1]においても、1 フレーム当たりの線量当量率は  $1 \text{ Sv h}^{-1}$  に達することが報告されており、X 線装置による撮影条件 1 フレーム当たりで CZT 検出器に入射する実効的な X 線線量当量率は、電離箱式線量率計で得られる指示値と比較して 100~1000 倍になることが想定された。適切な測定を達成するため、CZT 検出器前面に鉛コリメータ（開口部直径 1.2 mm）を取り付け、検出器筐体を鉛 3 mm+銅 2 mm で遮へいた（図 3 参照）。

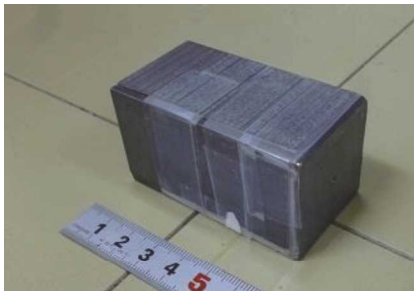


図 3 本調査で使用した鉛コリメータの様子

前掲図 1 に示す通り、鉛コリメータを装着した CZT 検出器は、三脚を用いて術者の眼の高さに設置し、コリメータ開口部は被検者を模擬したファントム中央になるよう設置した。また、X 線透視装置に関して、コリメータ付 CZT 検出器を術者の胸部の高さに設置した場合の測定も実施している。

CZT 検出器で得られた波高分布から X 線スペクトルを取得するため、本調査ではアンフォールディング法を用いた。使用した

アンフォールディングコードは報告者が以前から用いている MAXED である。アンフォールディングに用いる、CZT 検出器の応答関数はモンテカルロ計算コード MCNP4C を用いて作成したが、本調査で使用した鉛コリメータを取り付けた状態で体系を構築して、単色光子に対する応答関数を準備した。そのため、スペクトル推定時にアンフォールディングでコリメータの影響を除去できる。

### C. 調査結果

前項 B. で示した使用機器及び撮影条件で得られた波高分布を図 4 及び図 5 で示す。図 4 では血管造影装置からの散乱線成分による波高分布を示す。測定では術者が天吊り型防護板を適切に設置した場合も考慮し、天吊り型防護板を患者を模擬した水ファントム上に設置して同一の撮影条件で波高分布を測定し、天吊り型防護板による遮へい効果を評価した。

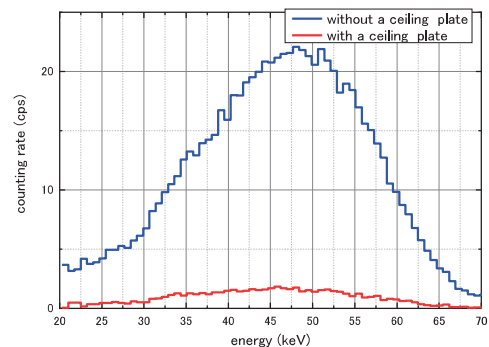


図 4 血管造影装置において水ファントムで患者を模擬した場合の、術者の眼の位置における散乱 X 線からの波高分布の比較

図 5 では X 線透視装置からの散乱線成分による波高分布を示す。散乱成分の測定では、術者の眼の高さに CZT 検出器を固定し、

コリメータ開口部を上方及び下方に向け、入射方向の違いによる散乱 X 線成分の違いについて評価した。

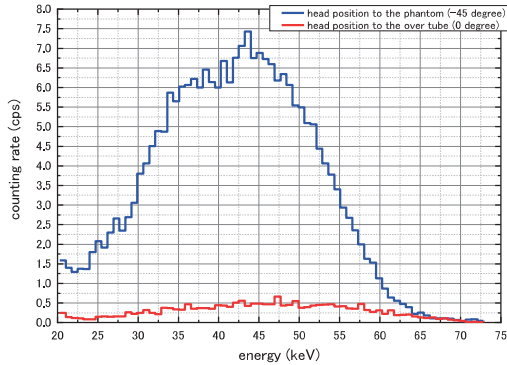


図 5 X 線透視装置において水ファントムで患者を模擬した場合の、術者の眼の位置における散乱 X 線からの波高分布の比較

また、X 線発生装置については、術者の位置及び胸部位置に入射する散乱成分についての比較を行うため、図 6-1 及び図 6-2 に示す測定体系で同一の撮影条件による測定を実施した。

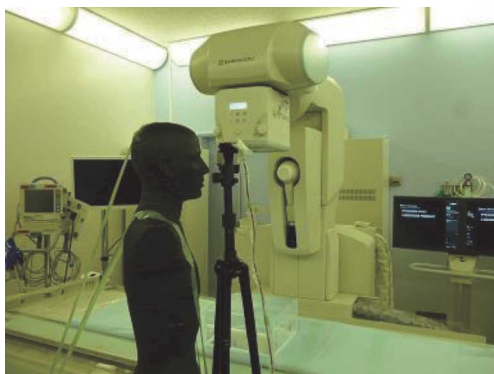


図 6-1 X 線透視装置における術者の眼の位置での散乱 X 線成分の測定の様子

図 7 は、図 5 と同様に X 線透視装置からの散乱線成分による波高分布を示す。図 6-2 に示す術者の胸部の高さで CZT 検出

器を固定して、コリメータ開口部を上方及び下方に向け、入射方向の違いによる散乱 X 線成分の違いについて評価している。



図 6-2 X 線透視装置における術者の胸部位置での散乱 X 線成分の測定の様子

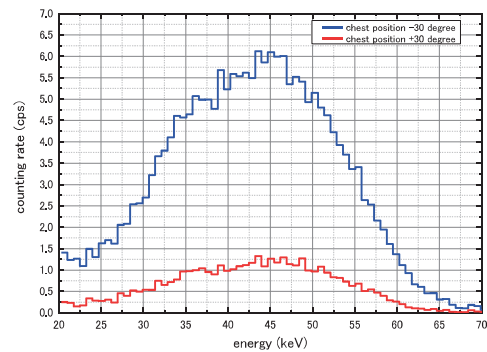


図 7 X 線透視装置において術者の胸部位置における散乱 X 線からの波高分布の比較

#### D. 考察

本項では、血管造影装置及び X 線透視装置においてアクリル製水ファントムを患者として使用した場合の、術者の眼の位置での散乱 X 線スペクトルを示すとともに、散乱 X 線成分取得及び遮へい等の効果について考察する。



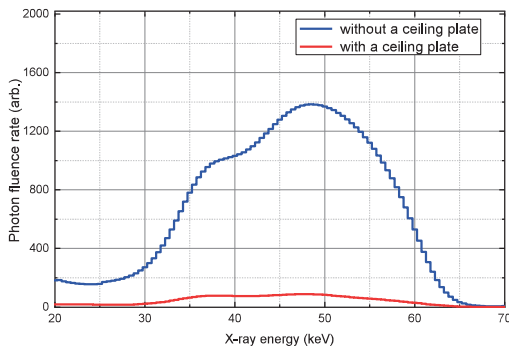


図 8 X線透視装置において水ファントムで患者を模擬した場合の、術者の眼の位置における散乱 X線スペクトルの比較

散乱 X線スペクトルから求められるフルエンス平均エネルギーを表 1 及び表 2 に示す。併せて、波高分布からも平均エネルギーを評価し同表に列挙する。

表 1 血管造影装置において水ファントムで患者を模擬した場合の、術者の眼の位置における散乱 X線スペクトル及び波高分布から評価された平均エネルギーの比較

	波高分布による評価 (keV)	X線スペクトルからの評価 (keV)
防護板なし	46	45
防護板あり	44	44

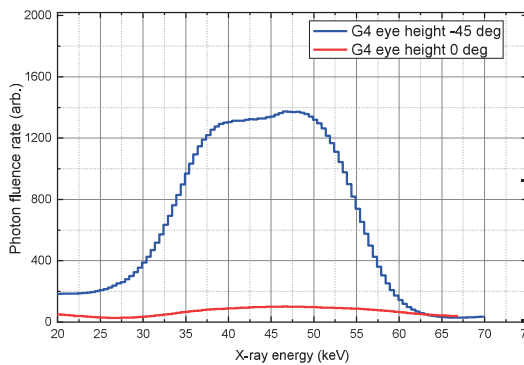


図 9 X線透視装置において水ファントムで患者を模擬した場合の、術者の眼の位置における散乱 X線スペクトルの比較

表 2 X線透視装置において水ファントムで患者を模擬した場合の、術者の眼の位置における散乱 X線スペクトル及び波高分布から評価された平均エネルギーの比較

	波高分布による評価 (keV)	X線スペクトルからの評価 (keV)
開口部下方	42	46
開口部水平	45	43

図 8 及び図 9 では、アンフォールディング法を用いて得られた、血管造影装置及び X線透視装置における術者位置での散乱 X線スペクトル成分を示す。図 8 及び図 9 では、前掲図 4 及び図 5 と同様、測定条件の違いより得られたそれぞれの波高分布から得られる X線スペクトルを示している。

アンフォールディング法により得られた

血管造影装置における術者眼の位置での散乱 X線成分測定において、散乱 X線スペクトルから得られる平均エネルギーは、天吊り型防護板がない状態で、45 keV であり、天吊り型防護板を適切に設置した状態では 44 keV であった。同条件で CZT 検出器で得られた波高分布から直接平均エネルギーを求めた場合、天吊り型防護板がない状態の測定で得られた平均エネルギーは 46 keV であり、天吊り型防護板を適切に設置した状態では 44 keV であった。

X線透視装置における術者の眼の位置で

の散乱 X 線成分の測定で評価される散乱 X 線スペクトルからの平均エネルギーは、コリメータ開口部下向きからの成分では、46 keV であり、コリメータ開口部の水平方向では 43 keV であった。血管造影装置の場合と同様、CZT 検出器で得られた波高分布から直接平均エネルギーを求めた場合、コリメータ開口部下向きからの成分では、42 keV であり、コリメータ開口部の水平方向では 45 keV であった。

例えば文献[3]図 7 によれば、血管造影装置において管電圧が 60 kVp から 70 kVp の場合、使用装置及び撮影条件は本調査とは異なっているものの、波高分布の範囲及びピーク位置は 30 ~ 50 keV である。これは、本調査における測定の妥当性を示すものといえる。

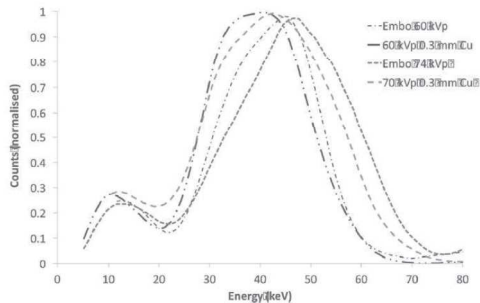


Fig. 6. Energy spectra for embolism collected during live interventional radiology cases plotted with data from the phantom study.

### 図 10 血管造影装置における術者の眼の位置におけるアクリルファントムからの散乱 X 線成分の波高分布の比較 (文献 3 図 7 より引用)

本調査での散乱 X 線成分スペクトル評価の目的は、眼の水晶体被ばく線量評価のために使用される線量計校正のための平均エネルギー取得である。そのため、散乱 X 線

成分のフルエンス平均エネルギーを指標都して、各装置、撮影条件、術式、作業位置等をパラメータとして評価する必要がある。フルエンス平均エネルギーでの評価と波高分布から直接評価した場合での平均エネルギーに大きな差異は見られなかった。前述の文献[3]では NaI(Tl)シンチレーション検出器を使用して測定して、波高分布を用いて散乱 X 線成分について評価を進めている。また、昨年度実施した CT 装置における CT 介助者の眼の位置における散乱 X 線成分の測定においても、同様の傾向がえられている。(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、眼鏡ありで 62 keV、眼鏡無しで 58 keV であった。波高分布から推定される散乱 X 線の平均エネルギーは、眼鏡ありで 63 keV、眼鏡無しで 60 keV であった。

いずれの場合においても、平均エネルギーには大きな違いが認められなかったことから、上述のパラメータに応じた散乱成分の変化を散乱 X 線成分のエネルギーを指標としてみる場合、波高分布から直接評価した平均エネルギーであっても線量評価上は大きな違いを与えないことが示唆される。

本調査では、医療従事者の眼の位置における X 線成分の平均エネルギー導出を主眼としたが、同時に、CZT 検出器の波高分布の面積から、1) 血管造影装置での術者位置における散乱 X 線成分の遮へい能力の評価、及び 2) X 線透視装置における散乱 X 線成分の入射方向の評価を行った。

図 4 で示した波高分布の面積の比から、天吊り型防護板による散乱 X 線成分の低減率を評価した。その場合、強度比で  $4,500 \text{ cps} / 67,000 \text{ cps} = 6.7\%$  の低減率となった。

Dose reduction factor (DRF)はこの逆数であり、今次調査においては、DRF=15 と評価される。文献[4]においては、DRF は4～33 の範囲で示されており、実際の術式の状況を考慮すると2から7程度が妥当である、との記載がある。この点から、本調査で評価された DRF は文献値と矛盾がないといえる。

X 線透視装置における術者の眼の位置での散乱 X 線成分の入射方向の違いについても波高分布の計数率の比で評価した。いずれもコリメータ開口部を患者を模擬したアクリル製水ファントム中央に向けた場合、及びコリメータ開口部を X 線管球中心部に向くに向けた場合とで比較を行った。(表3参照) 測定時の撮影条件は同一としている。

**表3 X 線透視装置において水ファントムで患者を模擬した場合の、術者の眼の位置及び胸部位置における散乱 X 線成分の波高分布から評価され強度比**

	開口部患者側 (cps)	開口部管球側 (cps)
眼の位置	238	20.8
胸部位置	209	41.2

表3に示す通り、術者の眼の位置及び胸部位置においても、患者側から到達する散乱成分が支配的であることを、CZT 検出器を用いる波高分布測定からも示された。患者から散乱される散乱 X 線成分について、眼の位置と胸部位置で違いがあるが、これはアクリル製水ファントムと測定した位置の距離の違いによって説明できる。

本調査で対象とした X 線透視装置はオーバーチュープ型であり、術者位置、患者位置及び X 線管球のレイアウトは一般的なもの

のである。本庁で使用した CZT 検出器のコリメータ開口部を管球側に向け、眼の位置及び胸部位置で測定した場合、散乱 X 線成分の強度は、それぞれの位置で開口部を患者側に向けた場合と比較して、約 10% 及び 20% と大きく提言している。これらは、X 線管球に施された遮へいが適切に機能し、X 線管球からの直接成分が到達するのを防護できていることの証左といえる。X 線管球側から散乱されて入射する成分について、眼の位置で観測された成分は、胸部位置で観測された強度の約半分である。これは測定した位置と X 線管球との距離の違いと X 線管球の下向きの開口部との位置関係の違いによって説明できる。胸部位置は、散乱体である X 線管球及び遮へい構造から遠くなるが、管球の開口部を大きく覗く体系となり、遮へいで散乱された成分が入射しやすくなるために生じている。さらに、患者側及び管球側の散乱線成分の強度を合算すると、眼の位置では 258.8 cps、胸部位置では 250.2 cps とほぼ同程度であるが、わずかに眼の位置で観測された強度が胸部位置を上回っている。この結果は、胸部で観測される線量が線量限度近傍となる場合には、眼の近傍での追加モニタリングが不可欠となることを示唆するものといえる。

#### E. 結論

本調査では、眼の近傍で使用される 3mm 線量当量測定用個人線量計について適切な校正定数を与えるため、医療従事者の眼の水晶体被ばく線量モニタリングに不可欠な線量計の適切な校正定数を与えるために必須の情報として、医療従事者の行為等に従事する際に眼の近傍で受ける散乱 X 線成分

### 別添 3

のスペクトル平均エネルギーを取得する目的で、X線スペクトロメータを用いた測定からフルエンス平均エネルギーを求めた。調査最終年度である令和2年度は、昨年度の予備調査で得られた結果を反映し、測定対象とする装置を拡張して散乱X線成分の測定を行った。本年度は、血管造影装置及びX線透視装置を選定し、術者の眼の近傍で受ける可能性のある散乱X線スペクトルを測定した。

前年度に引き続き、鉛コリメータ付CZT検出器を用いて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、血管造影装置における術者眼の位置での散乱X線成分測定において、散乱X線スペクトルから得られる平均エネルギーは、天吊り型防護板がない状態で、45 keVであり、天吊り型防護板を適切に設置した状態では44 keVであった。また、X線透視装置における術者の眼の位置での散乱X線成分の測定で評価される散乱X線スペクトルからの平均エネルギーは、コリメータ開口部下向きからの成分では、46 keVであり、コリメータ開口部の水平方向では43 keVであった。これらは文献[3]で実施された測定条件と異なっており直接比較することは困難であるが、管電圧の違い等を考慮すると矛盾はないといえる。

本調査では、医療従事者の眼の位置におけるX線成分の平均エネルギー導出を主眼としたが、同時に、CZT検出器の波高分布の面積から、1)血管造影装置での術者位置における散乱X線成分の遮へい能力の評価、及び2)X線透視装置における散乱X線成分の入射方向の評価を行った。1)については、血管造影装置において天吊り型防護板による散乱X線成分の低減率を評価

したところ、強度比で4,500 cps / 67,000 cps = 6.7%の低減率を得ている。これはTLD等を用いた測定例[5]とも矛盾のない結果であった。2)のX線透視装置における散乱X線成分の入射方向の評価については、患者側及び管球側の散乱線成分の強度を合算して得られる散乱X線成分の合計は、眼の位置では258.8 cps、胸部位置では250.2 cpsとほぼ同程度であることが示された。コリメータ付CZT検出器を用いることで、オーバーチューブ型X線透視装置について、術者の上方に位置するX線管球からの散乱X線成分よりも患者側からの散乱成分が支配的であることが測定により示された。この結果も当研究班の他のグループで評価された結果と矛盾はない。

本調査は、今年度で完了となるが、放射線防護学上重要な課題として、CT装置、血管造影装置及びX線撮影装置について、散乱X線成分の空間分布の詳細な評価を行う事は重要である。その際、複数のコリメータ付CZT検出器を同時に使用して測定することも有用であるといえる。さらに、本研究を通じ、精密でなくとも、CZT検出器の波高分布より正確な平均エネルギーを導出することが可能であることを示された。本調査で示したパラメータ（装置、撮影条件、術式、及び術者位置）を変更し、同一機器によりX線スペクトルを取得し詳細な知見を得ることも重要であるといえる。

#### F. 健康危機情報

なし

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

なし

2. 学会発表

Munehiko Kowatari, Keisuke Nagamoto, Koich Nakagami, Yoshihiko Tanimura, Takashi Moritake and Naoki Kunugita, Experimental evaluation of scattered X-ray spectra due to X-ray therapeutic and diagnosis equipment for eye lens dosimetry of medical staff.

Oral presentation. The 15th International Congress of the International Radiation Protection Association. (2021)

H. 知的財産権の出版・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

I. 引用文献

[1] T. kurosawa et al. Measurements of Photon Spectra around IVR for the Evaluation of Eye-lens Dose, Proceedings of the 14th International Congress of the International Radiation Protection Association. pp

815. (2016)

[2] I. Clairanda et al. Use of active personal dosimeters in interventional radiology and cardiology: Tests in laboratory conditions and recommendations - ORAMED project, Radiat. Meas. 46, 1252–1257 (2011).

[3] Masterson, M., Cournane, S., McWilliams, N., et al., 2019. Relative response of dosimeters to variations in scattered X-ray energy spectra encountered in interventional radiology. Physica Medica 67, 141-147. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2019.11.002>.

[4] Martin, C. J., 2016. EYE LENS DOSIMETRY FOR FLUOROSCOPICALLY GUIDED CLINICAL PROCEDURES: PRACTICAL APPROACHES TO PROTECTION AND DOSE MONITORING. Radiation Protection Dosimetry (2016), Vol. 169, doi:10.1093/rpd/ncv431.

## I. 分担研究報告（調査報告）

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

研究者分担者 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の2011年宣言を受け、IAEA BSS及びEU BSSでは、放射線業務従事者の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の、「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を5年間の平均で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」、との答申を受け、令和3年4月1日より改正放射線障害防止規則が施行される。

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。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<sup>106</sup>Ruについて評価したが、現行法令の体幹部での70 μm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（<sup>18</sup>F、<sup>15</sup>O、<sup>13</sup>N、及び<sup>11</sup>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。さらに、手指部の被ばくについても検討した。特に、陽電子放出核種による被ばく状況の場合、体幹部で測定された70 μm線量当量の測定値が、手指部等末端部線量をよく推定する事例があることが明らかとなった。

#### A. 研究目的

本研究事業は、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を目的としている。

本調査では、特に放射線業務従事者のβ線被ばく時の眼の水晶体の被ばく線量評価に

ついて検討を進めた。放射線審議会において「水晶体部会は、新たな水晶体の等価線量限度の取り入れは可能であると判断する。すなわち、国際放射線防護委員会（ICRP）によるソウル声明[1]において勧告されたように、水晶体の等価線量限度を5年間の平均で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。」と答申されたとおりの[2]、令和3年4月1日より改正放射線障害防止規則が施行される。我が国の放射線業務従事者の80%以上についてはその被ばく線量が装着する線量計の検出下限以下であるという現状から、眼の水晶体及び末端部等価線量の推定手法は、現行法令通り実施できる放射線作業が支配的であることは明らかである。（外部被ばく線量については、1センチメートル線量当量及び70マイクロメートル線量当量のうちのどちらか適切な方をもって眼の水晶体の等価線量とする、とある。）

本研究の背景には、国際原子力機関（IAEA）において整備された、眼の水晶体等価線量の線量限度引き下げに対応済みのISO15382:2012[3]に、「末端部及び眼の水晶体の線量に関するモニタリングの手順書」として、眼の水晶体等価線量の年間線量限度、モニタリングのタイミング、モニタリングの対象となる放射線業務従事者、線量計の装着位置、等について具体的に記載されている。この記載中にβ線被ばくは不均等になることが明記されており、同ガイドラインに従った管理を行うとすると、β線を取り扱う放射線作業で、被ばく線量の比較的多い作業員について、不可避免的に眼の水晶体線量の追加モニタリングを行う必要も出てくる。一方、一般社団法人日本保健物理学会で策定される「眼の水晶体の線量

モニタリングのガイドライン」では、被ばく状況の均等度についての言及があり、「体幹部均等被ばくかどうか」の判断が重要になる。この時に線種に対する言及はない。同ガイドラインではβ線被ばくモニタリング時の実用量について以下の通り言及されている。[3]

「図3に示すように1 MeV～3.5 MeVの電子については、70 μm 線量当量や1 cm 線量当量では3 mm 線量当量を担保することはできないが、β線は、エネルギースペクトルが連続であること、通常は容易に遮蔽が可能であり、このエネルギー領域の電子を選択的に被ばくするような状況は極めて稀であることから、3 mm 線量当量の測定を必要とせず、従来通り1 cm 線量当量または70 μm 線量当量のいずれか適切な方（高い方）を眼の水晶体の等価線量としてもよい（【例題17】参照）。なお、1 MeV以下の電子については、70 μm 線量当量が3 mm 線量当量より高くなるため、70 μm 線量当量の測定値を使用としてもよいが、著しく過大な評価になる可能性が高いことに留意する。また、1 MeV～3.5 MeVの電子については3 mm 線量当量が70 μm 線量当量又は1 cm 線量当量より高くなることも留意する。

そのため、電子による被ばくが無視できない場合などは、3 mm 線量当量を測定することが望ましい。」

本調査では、β線による被ばく状況のうち、詳細かつ包括的な研究が実施されてきた<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y β線源の以外の、これまで被ばく源として顧みられてこなかったβ線に着目し、極めて特殊な状況での放射線業務従事者の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、70 μm

線量当量等の被ばく線量と、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、体幹部線量と眼の水晶体等価線量の相関から、現行法令での眼の水晶体等価線量の推定手法がどの程度機能するか、眼の水晶体等価線量に対しよりよい推定を与えるのはこの実用量かについて評価を行った。

## B. 研究方法

我が国の放射線業務従事者の80%以上についてはその被ばく線量が検出下限以下であるという現状と、現行のモニタリング手法での眼の水晶体等価線量の推定が一部有効に機能している、という点を考慮して、放射線業務従事者が受ける眼の水晶体等価線量を体幹部で受けた線量当量から適切に推定評価する手法が依然として有効である、と考えられる。電離放射線障害防止規則の第八条の記述に基づき、体幹部に装着された個人線量計の測定で得られた1cm線量当量または70 $\mu$ m線量当量のいずれか大きな値を眼の水晶体等価線量の推定値とすることになる。

「第八条 事業者は、放射線業務従事者、緊急作業に従事する労働者及び管理区域に一時的に立ち入る労働者の管理区域内において受ける外部被ばくによる線量及び内部被ばくによる線量を測定しなければならない。

2 前項の規定による外部被ばくによる線量の測定は、一センチメートル線量当量及び七十マイクロメートル線量当量（中性子線については、一センチメートル線量当量）について行うものとする。ただし、次項の規定により、同項第三号に掲げる部位に放射線測定器を装着させて行う測定は、七十

マイクロメートル線量当量について行うものとする。

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

本調査では、 $\beta$ 線源を取り扱う放射線作業について、分担研究者の所属したグループで眼の水晶体の被ばく線量換算係数を計算するのに用いたファントムを手部及び頭部が可動できるよう改良し、個人線量当量の定義に合致するよう人体軟組織で構成される人体模擬数学ファントム（以下、「数学ファントム」という。）を開発した。この数学ファントムを用いて、頭部、胸部及び手指部における個人線量当量をモンテカルロ計算コードPHITS 3.1.7で計算した。得られた体幹部線量に対する、眼の水晶体及び末端部等価線量の比を求めると同時に、放射線作業環境場の線量当量をモニタリングし、その結果と体幹部、眼の水晶体及び手指部線量当量の測定結果とを比較し、それらの相関について議論する。

また、分担研究者らが以前開発・導入した不均等性を表す指標（Homogeneity Index = HI）を、体幹部モニタリングと水晶体または末端部モニタリングで得られる量の比として以下に示す式で定義する。

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



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

ここで、 $H_p(3)_{\text{head}}$  は人体頭部における深さ 3 mm での個人線量当量を表し、水晶体モニタリングで推奨されている量である。一方、 $H_p(10)_{\text{trunk}}$  は人体胸部における深さ 10 mm での個人線量当量で、実効線量算定のために行われる体幹部モニタリングで使用されている量である。電子については、通常原子力施設で扱われる程度のエネルギーでは深さ 10 mm には到達できず、1cm 線量当量は明らかに低い評価を与えない。一方で、そこで、評価量を同じにしたとしても不均等となる状況を抽出するために、現在通常は評価されていない人体胸部における深さ 3mm での個人線量当量  $H_p(3)_{\text{trunk}}$  も評価する。上述した HI の定義通り、HI が大きければ、被ばくの不均等性が高いと判断され、体幹部からの推定が妥当とはいえないことを示唆するものである。本調査では、これまで十分検証してきた HI を用いて不均等性を判断するが、その判断基準として  $\text{HI}=1.5$ [4]を導入し、後述の仮想的な放射線作業及びであった場合、均等被ばくとみなして体幹部モニタリングで得られた量から補正なしでそのまま等価線量を推定したとしても、 $0.67(=1/1.5)$ の過小評価となり、被ばくレベルがたとえ線量限度付近であったとしても許容できるためである。

本調査において対象とした核種は、これまで広く行われている  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ [5],[6]以外の核種とした。後述の  $^{106}\text{Ru}$  以外の核種はすべて  $\beta$  線に伴い  $\gamma$  線を放出する。今次調査で実施した計算シミュレーションでは、 $\beta$  線及び  $\gamma$  線の両方の影響を考慮した。

ばく露状況について、分担研修者が以前

行った均等被ばく状況のうち ICRP が定義する等方照射条件 (ISO 条件[7]) は報告済み[8]であるため、回転照射条件 (ROT 条件[7]) について実施する。さらに、今次研究事業の初年度に評価した除染作業等者の眼の水晶体被ばくに関する検討時に考慮した被ばく状況の一部から、商用原子力発電所の定期点検時に生じる可能性のあるばく露状況を勘案し、線源を  $^{106}\text{Ru}$  として、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を評価した。これは娘核種である  $^{106}\text{Rh}$  から高エネルギー  $\beta$  線が放出されるのみならず、商用原子力発電炉運転時の核分裂生成物として収量が比較的多いこと、 $^{106}\text{Ru}$  の半減期が約 1 年であり、本格運用開始が予定される六ヶ所村の再処理施設においても無視できない  $\beta$  線放出核種であることを理由に選定した。後述の通り、原子力施設では十分な防護施策がとられている点はあらかじめ指摘する。

陽電子放出核種は核医学の従事する医療従事者の被ばく源である。令和 2 年度現在、線源となる薬剤の自動分取装置、患者への投与時のシリンジの鉛遮へい、指リング装着等、医師を含む医療従事者の放射線防護は適切に実施されている。そのため、報告された線量について、後述のとおり適切な防護施策がとられているとの事例紹介があった。

「PET 検査に関わる作業員の被ばくアンケート調査の結果では、投与・説明をする医師は 25~40  $\mu\text{Sv}$ /月、患者誘導や PET 操作に携わる診療放射線技師：110  $\mu\text{Sv}$ /月、薬剤合成、品質検査、分注等に携わる薬剤師：25  $\mu\text{Sv}$ /月、サイクロトロンオペレータ：100  $\mu\text{Sv}$ /月との報告があった<sup>29)</sup>。このように、わずかながらも被ばくをする

可能性があり、スタッフの配置や距離、時間を考慮した防護対策が有効となる。」

とある。[9]

本調査では、陽電子放出核種のうち、核医学の現場で利用されている核種 ( $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、及び  $^{18}\text{F}$ ) について、医療従事者よりもサイクロトロンオペレータ等の加速器運転、薬剤製造にかかわる放射線作業従事者が業務従事中偶発的に遭遇する被ばく事象を想定し、前述の体幹部線量に対する眼の水晶体の比を評価した。

### C. 研究結果

$\beta$ 線放出核種による被ばくを受ける作業者の眼の水晶体の被ばく状況を考察するため、本項では均等及び不均等被ばく条件での作業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て評価を進めた。

眼の水晶体線量/体幹部線量の比は、前述の通りモンテカルロ計算コード PHITS に人体模擬数学ファントムを導入して求められた。計算シミュレーションでは、数学ファントムに対する照射ジオメトリ及び線源形状を変化させることで、 $\beta$ 線源を取り扱う放射線業務従事者の被ばく状況を再現できる。本研究においては、計算シミュレーションにおける評価上、体幹部及び眼の水晶体の線量は、個人線量当量 (1 cm, 3 mm 及び  $70\ \mu\text{m}$ ) の各単位で求め、上式の HI を導出し、比較を行った。

図1では単純な照射ジオメトリの例として、前方-後方照射ジオメトリを導入し、評価をすすめた。図1に示す照射ジオメトリは、評価対象の眼の水晶体へ前方から直接 $\beta$ 線が照射されるため、眼へのばく露が強調されることが予想される。

また、図2に示す点線源について、1) 線源が眼の高さにある場合、及び2) 線源が手元にある場合の、体幹部線量に対する眼の水晶体線量との比について評価を行った。

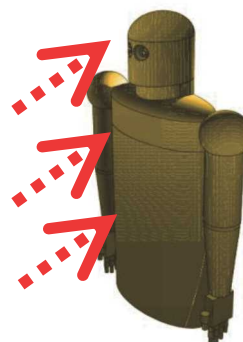


図1 前方-後方照射ジオメトリの模式図

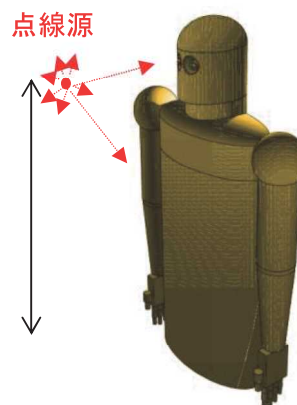


図2 点線源による被ばく状況を模擬したジオメトリの模式図

さらに、図3では原子力施設での均等被ばく状況を適切に模擬する回転照射ジオメトリの模式図について示している。



図3 回転照射ジオメトリ (ROT geometry)の模式図

線源を  $^{106}\text{Ru}$  とした場合の、各照射ジオメトリでの体幹部線量に対する眼の水晶体

比を表1に示す。評価対象とした  $^{106}\text{Ru}$  は  $^{106}\text{Rh}$  と放射平衡にあり、 $^{106}\text{Rh}$  からの高エネルギー  $\beta$  線を評価の対象とした。表1の評価における不確かさは、計算シミュレーションに伴う統計誤差のみを評価し不確かさとしている。

なお、加速器施設で放射線作業に従事する放射線業務従事者の被ばく源となりうる放射性物質についての考察は、後述のD. 考察で触れる。

陽電子放出核種について点線源近似を行い、1) 線源が眼の高さにある場合、及び2) 線源が手元にある場合の、体幹部線量に対する眼の水晶体線量との比について評価を行った。陽電子放出核種は常に 511 keV の消滅  $\gamma$  線の放出を伴うため、本評価では陽電子による被ばくに加え、陽電子崩壊からの  $\gamma$  線被ばくも加味している。

表1 異なる照射条件下での体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比

	前方-後方	点線源(眼の高さ)	点線源(手元)	ROT照射
眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$	$13.1 \pm 1.0$	$57.2 \pm 7.2$	$2.01 \pm 0.14$	$24.3 \pm 1.7$
眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(3)_{\text{trunk}}$	$1.00 \pm 0.03$	$3.42 \pm 0.08$	$0.14 \pm 0.14$	$1.25 \pm 0.03$
眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(0.07)_{\text{trunk}}$	$0.95 \pm 0.03$	$0.71 \pm 0.01$	$0.058 \pm 0.003$	$0.60 \pm 0.02$

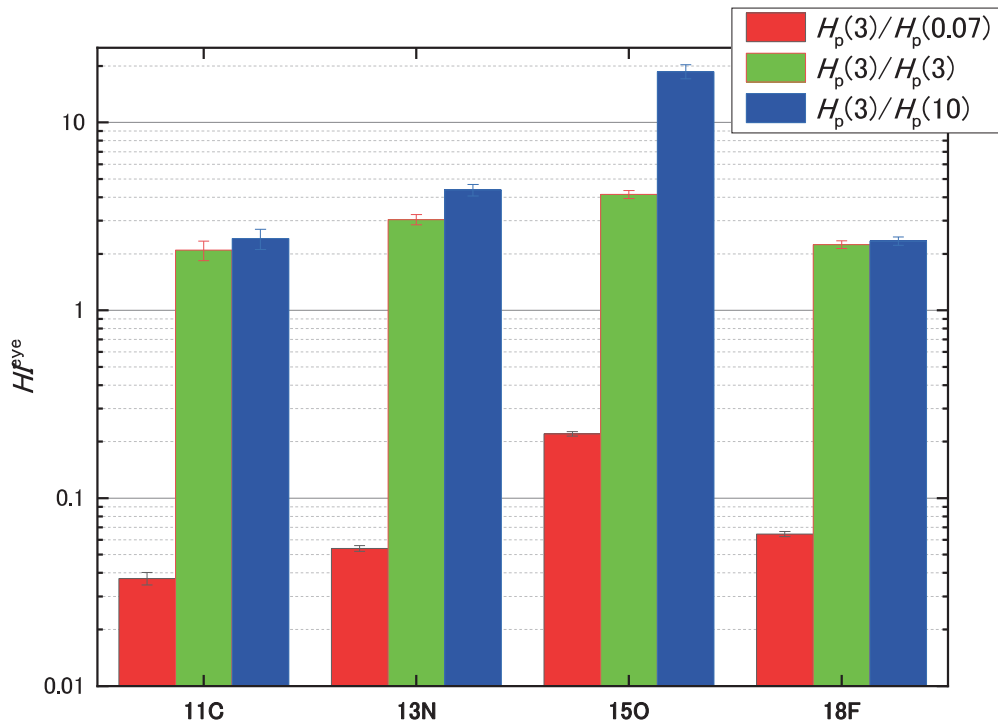


図4 陽電子放出核種による体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比  
(点線源による近似：眼の高さに線源を上げた状態)

図4では陽電子放出核種ごとの、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を比較した。点線源を眼の高さに置いた場合の評価であり、眼と線源の距離は50cmである。本調査での計算シミュレーションで得られた体幹部線量では、陽電子が遮へいなく到達した場合の線量を示している。体幹部で観測される70 $\mu$ m線量当量はいずれの核種でも3mm線量当量及び1cm線量当量と比較し約20倍の値となった。そのため、70 $\mu$ m線量当量で評価した $HI^{eye}$ は1より大幅に小さくなった。このことは、体幹部で測定された線量を眼の水晶体等価線量の推定値とした場合、大幅な過大評価となることを示している。また、3mm線量当量及び1cm線量当量で $HI^{eye}$ を比較した場合、いずれも1より大きな値をとった。 $^{18}F$ によるばく露状況を模擬した場合、3mm線量当量

及び1cm線量当量求めた $HI^{eye}$ は2.2及び2.3である。この場合、体幹部線量を眼の水晶体等価線量とした場合、40%程度に過小評価することになる。より詳細な評価はD.考察で述べる。

次いで、原子力施設の放射線業務従事者が被ばくする作業について、通常の $\gamma$ 線または $^{90}Sr$ - $^{90}Y$ からの $\beta$ 線を $^{106}Ru$ に線源を置き換えた場合の被ばく状況を考慮し、不均等被ばくになりうるかどうか検討した。

原子力施設においては、放射性物質に汚染した物品の取扱い、または室内全体が放射性物質で汚染された状況での放射線作業が被ばく源となりうる。まず、外側が均一に $^{106}Ru$ で汚染していると仮定した容器を、数学ファントム前面に直径100cm×高さ100cmの円筒形線源がクレーン等で作られている状況を模擬した体系により、

本作業を模擬することとした(図??参照)

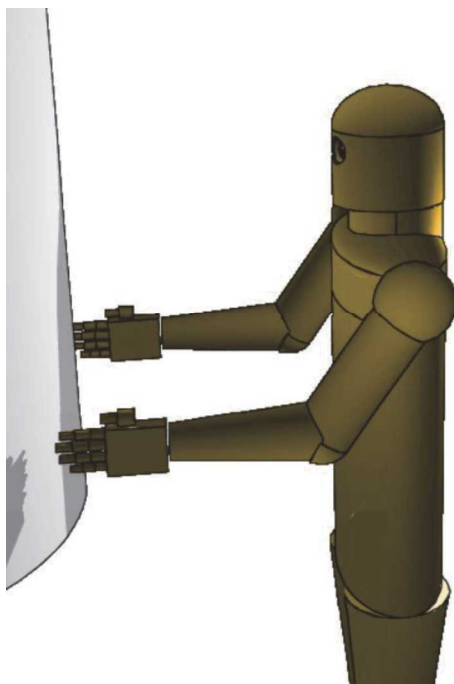


図4 原子力発電所作業者の大容量容器運搬等を模擬した計算シミュレーションのジオメトリ。大型円筒形線源を導入。

表2は、計算シミュレーションで得られた大容量容器をハンドリングする作業を模擬した計算体系で得られた体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を示す。表では1 cm, 3 mm 及び 70 μm 各単位の個人線量当量に対する眼の水晶体線量の比を比較している。本評価では、 $H_p(3)_{eye} / H_p(0.07)_{trunk}$  は1より小さい値が得られた。これは、ベータ線被ばく状況で一般的に用いられる70 μm 線量当量を眼の水晶体等価線量の推定値とした場合、<sup>106</sup>Ru が被ばく源の場合の大容量容器ハンドリングの場合、2倍程度の過大評価になることを示している。一方で、3mm 及び 1cm 線量当量に対する眼の水晶体線量の比は1に近く、いずれの測定単位でも眼の水晶体等価線量に対し良い

推定値を与えることが示された。

表2 原子力施設における放射線業務従事者の汚染容器ハンドリングを模擬した計算体系で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比(線源 <sup>106</sup>Ru)

模擬する作業名	容器ハンドリング
眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	0.92 ± 0.07
眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(3)_{trunk}$	0.92 ± 0.07
眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(0.07)_{trunk}$	0.50 ± 0.05

図5では、原子力施設においてばく露源である汚染源の範囲が限定された状況を模擬して評価することを目的に、放射線業務従事者が<sup>106</sup>Ruで汚染された壁面を除染する作業の従事した状況を模擬した計算シミュレーションのジオメトリを示す。この場合の線源領域は、幅500 cm × 高さ450 cmの長方形線源の中央で作業者が除染する場合を仮定した。

上記の計算ジオメトリを使用し、<sup>106</sup>Ruを汚染源として導入した場合の、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を表3に示す。

表3 原子力施設における作業者の壁面模擬する計算で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比(線源 <sup>106</sup>Ru)

模擬する作業名	壁面除染
眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$	2.99 ± 0.98
眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{eye} / H_p(3)_{trunk}$	1.23 ± 0.12

眼の水晶体 / 体幹部	$0.21 \pm 0.01$
$H_p(3)_{eye} / H_p(0.07)_{trunk}$	

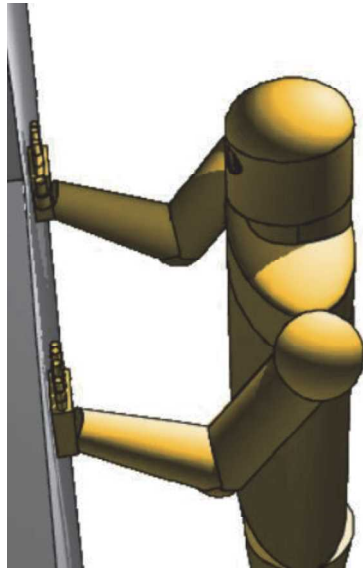


図5 作業者の壁面除染を模擬した計算シミュレーションのジオメトリ。長方形面状線源を導入。

頭部上方に至る壁面に一様に被ばく源がある場合、眼の水晶体線量は体幹部で観測される  $70 \mu\text{m}$  線量当量に対し約 0.2 倍になると評価された。この場合、体幹部線量を眼の水晶体線量の推定値とした場合には約 5 倍の過大評価になることを示している。一方で、 $3\text{mm}$  線量当量に対する眼の水晶体線量の比は 1.2 であることから、体幹部で測定された  $3\text{mm}$  線量当量を眼の水晶体線量の推定値とした場合には良い推定値を与えることが示された。

図6では、線源領域は、幅  $60 \text{ cm}$  × 高さ  $100 \text{ cm}$  の長方形線源の中央に放射線業務従事者が立って作業している状況を模擬した体系を準備した。

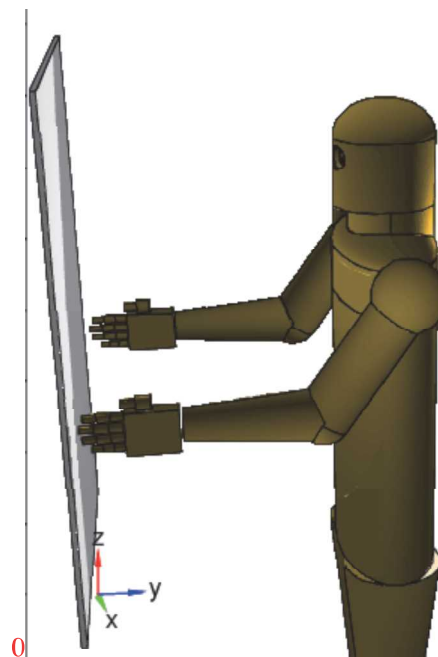


図6 作業者の面状線源からのばく露状況を模擬した計算シミュレーションのジオメトリ。

体幹部を中心に幅  $60 \text{ cm}$  × 高さ  $100 \text{ cm}$  の長方形線源がある場合、眼の水晶体線量は体幹部で観測される  $70 \mu\text{m}$  線量当量に対し約 0.34 倍になる（表4参照）。この場合も、前述同様に体幹部線量を眼の水晶体線量の推定値とした場合には約 3 倍の過大評価になることを示している。一方で、 $3\text{mm}$  線量当量に対する眼の水晶体線量の比は約 1 である。体幹部で得られた  $3\text{mm}$  線量当量測定値を眼の水晶体線量の推定値とした場合には良い推定値を与えることが示された。

表4 原子力施設における作業者の壁面模擬する計算で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比（線源  $^{106}\text{Ru}$ ）

模擬する作業名	壁面除染
眼の水晶体 / 体幹部	$16.3 \pm 2.0$

$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$	
眼の水晶体 / 体幹部	
$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(3)_{\text{trunk}}$	$0.94 \pm 0.03$
眼の水晶体 / 体幹部	
$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(0.07)_{\text{trunk}}$	$0.34 \pm 0.01$

眼の水晶体 / 体幹部	$588 \pm 179$
$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$	
眼の水晶体 / 体幹部	$0.97 \pm 0.02$
$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(3)_{\text{trunk}}$	
眼の水晶体 / 体幹部	$0.12 \pm 0.01$
$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(0.07)_{\text{trunk}}$	

#### D. 考察

本調査では、分担研究者も含め広く行われている  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$  線以外の核種としてより高エネルギー  $\beta$  線放出核種である  $^{106}\text{Ru}$ - $^{106}\text{Rh}$  を選定し、放射線業務従事者の眼の被ばく線量について評価した。分担研究者らの以前の研究で実施した  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$   $\beta$  線に対する体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を、図 1 に示す前方-後方ジオメトリで評価を行っている。

表 5  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  面線源からの前方-後方照射ジオメトリでの体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比(文献[10] table2 より引用)

$^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$	HI <sub>eye</sub>
------------------------------------	-------------------

本調査で評価した  $^{106}\text{Ru}$ - $^{106}\text{Rh}$  線源での前方-後方照射ジオメトリで得られた体幹部線量に対する眼の水晶体線量と比較すると、 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  による結果は、 $70 \mu\text{m}$  線量当量を用いた場合の眼の水晶体線量の比は、 $1/8$  となっている一方で、 $1\text{cm}$  線量当量での評価では、約  $45$  倍となっている。これは  $^{90}\text{Y}$  と  $^{106}\text{Rh}$  からの  $\beta$  線の最大エネルギーの違いによるものと考えられる。 $^{106}\text{Rh}$   $\beta$  線の最大エネルギーは  $3.5 \text{ MeV}$  であり、隊組織への透過力が高い。その分エネルギー沈着も深い領域に及ぶため、眼の水晶体と体幹部の各深さ ( $70 \mu\text{m}$ 、 $3 \text{ mm}$  及び  $1 \text{ cm}$ ) でのエネルギー沈着量の差が小さくなったと考えられる。

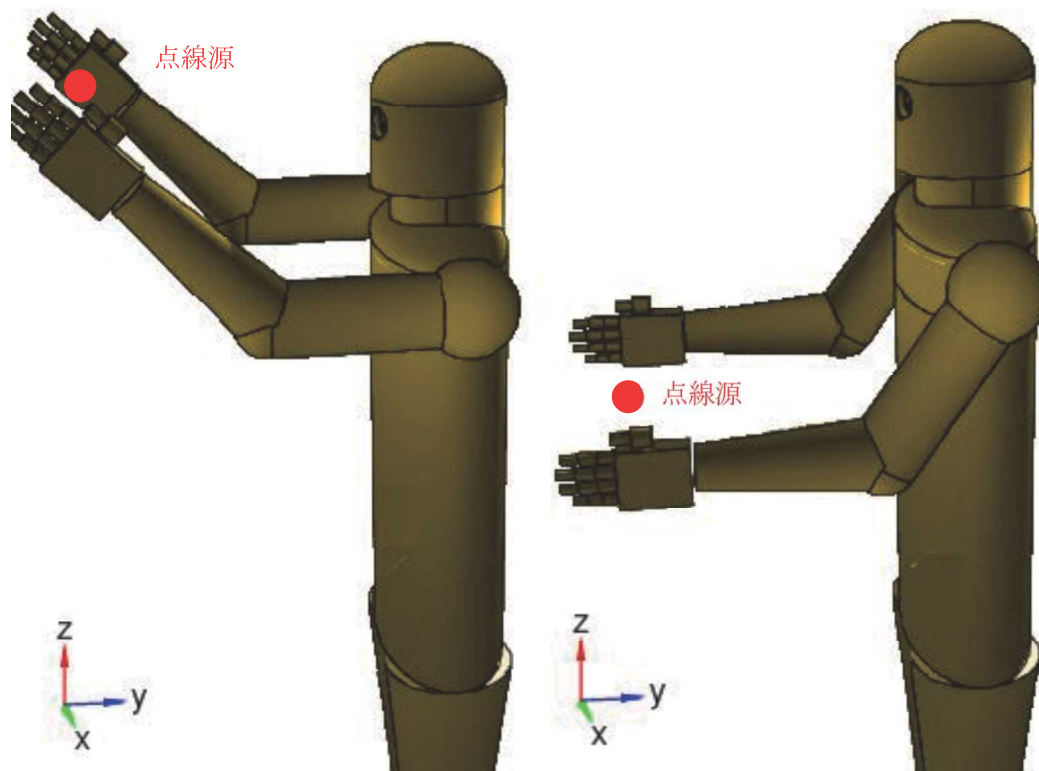


図7 点線源ハンドリング作業を模擬した人体ファントム

(左：眼の高さに線源を上げた状態 右：手元での作業を模擬)

本調査では上記β-線放出核種のみならず陽電子放出核種についても評価を行っている。得られた体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、 $70\mu\text{m}$ 線量当量を推定値とした場合には過大評価となる一方で1cm線量当量を眼の水晶体線量の推定値とした場合、大幅な過小評価になりうる事が示された。このことから、現行の法令に従う場合、体幹部の個人線量計での $70\mu\text{m}$ 線量当量の指示値を眼の水晶体等価線量の推定値とすることになる。一方で、体幹部の装着された個人線量計で3mm線量当量のモニタリングが実施されている場合、その値は眼の水晶体等価線量に対し $70\mu\text{m}$ 線量当量よりもよい推定を与える点は留意すべきである。

また、上述のβ-線放出核種と比較し、陽

電子放出核種で得られた1cm線量当量での体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は小さくなっていることがわかる。 $^{106}\text{Ru}$ の場合で約57であるところ、最大で18であった( $^{15}\text{O}$ の場合)。本調査で対象とした陽電子核種の陽電子エネルギーを表6に示す。

表6 本調査で対象とした陽電子放出核種からの放出陽電子の最大エネルギー

陽電子放出核種	$E_{\text{max}}$ (keV)
$^{11}\text{C}$	960
$^{13}\text{N}$	1199
$^{15}\text{O}$	1732
$^{18}\text{F}$	634

上記の通り、陽電子の最大エネルギーは



$^{90}\text{Y}$  及び  $^{106}\text{Rh}$  より低い。そのため、陽電子のみの影響を考慮すると、前掲表5のような結果となることが想定される。陽電子放出核種からの体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比には、陽電子による線量への寄与に加え、消滅 $\gamma$ 線の影響が加味される。線源ハンドリング中は、作業者は常に 511 keV の $\gamma$ 線によるばく露が不可避であるため、特に 1cm 線量当量測定値への寄与が大きくなると考えられる。

表7  $^{150}\text{O}$  点線源を眼の高さに設置した場合の計算で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比(陽電子のみを考慮)

模擬する作業名	HI <sup>eye</sup>
眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$	$40.5 \pm 3.3$
眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(3)_{\text{trunk}}$	$4.32 \pm 0.14$
眼の水晶体 / 体幹部 $H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(0.07)_{\text{trunk}}$	$0.21 \pm 0.01$

表7では、陽電子の寄与のみを考慮した $^{150}\text{O}$  点線源を眼の高さに設置した場合の計算で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を示す。3mm 線量当量及び70 $\mu\text{m}$  線量当量では $\gamma$ 線成分の寄与がみられず、HI<sup>eye</sup>に大きな差は見られなかったが、1cm 線量当量での体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は2倍以上に増加した。これは、体幹部での1cm 線量当量に相当するエネルギー沈着量が小さくなったことを示しており、この減少分が消滅 $\gamma$ 線によるものである。

$^{106}\text{Ru}$  線源については、原子力施設で用いられるフルフェイスマスクによる遮へいを加味した体幹部線量に対する眼の水晶体線

量の比についても検討を行った。

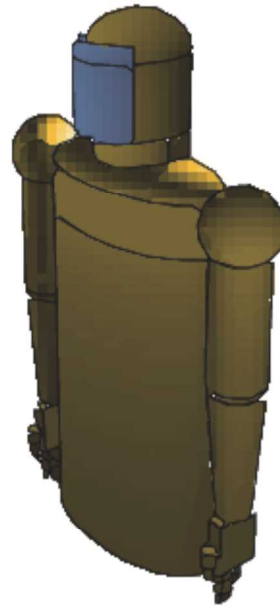


図8 作業者のフルフェイスマスク装着状況を模擬した計算シミュレーションのジオメトリ。

図8の通りポリカーボネート製フルフェイスマスクを、アクリル製遮へい板を顔面に設置することで模擬し、眼の高さに点線源を置いた場合の体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比について、个人防护装備がない場合との比較を行った。

表8  $^{106}\text{Ru}$  点線源を眼の高さに設置した場合の計算で得られた体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比( $H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(3)_{\text{trunk}}$ )

	HI <sup>eye</sup>
フェイスマスクなし	$3.46 \pm 0.08$
フェイスマスクあり	$1.97 \pm 0.05$

表8に示す通りフェイスマスク無に比べ、フェイスマスクありのほうが、HI<sup>eye</sup>が小さ

くなっている。これは、体幹部線量は変化がないものの、遮へいにより眼の水晶体線量は減少しているため、見かけ上  $HI_{eye}$  が減少している。フルフェイスマスクによる眼の水晶体線量の低減率は約 43%であった。

Tsujimura らは  $^{90}Sr$ - $^{90}Y$   $\beta$  線に対する、フルフェイスマスク装着有り無しでの眼の水晶体等価線量測定に関する検討を実験的に行っており、フルフェイスマスクの装着により、マスク内側で測定される眼の位置での 3mm 線量当量は 9-13%まで減少している [6]。これは、本調査で対象とした  $^{106}Ru$ ( $^{106}Rh$ ) よりも  $\beta$  線最大エネルギーが低いことにより、遮へいより入射する  $\beta$  線が低減したことによると思われる。

表 9 では手指部等末端部被ばくが体幹部線量とどう関係するかについての評価も行った。ばく露状況は図 7 に示す線源を持つ操作に加え、図 4 及び図 5 に示す作業についても手指部の線量を評価した。一般に  $\beta$  線核種による被ばくの場合、放射線業務従事者は体表面の汚染防止のためゴム手袋等を着用している（場合によっては綿手袋の上からゴム手袋を着用）。そのため、 $\beta$  線に対して十分遮へいされており、必要に応じて指リングの装着が求められる等、手指部の被ばくは適切に防護されていると考えられる。本調査で行った評価は、単純な照射ジオメトリを用いた、遮へい等がない状況での評価である。ここでは、「作業者が個人防護装備なく知らずに線源を持ち上げた」等

の偶発的に生じる放射線ばく露状況を模擬しているため、通常の作業環境では発生しない点について注記する。

## E. 結論

本調査では、放射線業務従事者の  $\beta$  線放出核種による外部被ばくでの、眼の水晶体線量について、令和 3 年 4 月 1 日施行の改正電離放射線障害防止規則で求められる眼の水晶体等価線量の年間限度を遵守する観点で、現行法令での推定が有効に機能するか検討した。現行法令では、電離放射線障害防止規則の第八条の記述に基づき、体幹部に装着された個人線量計の測定で得られた 1cm 線量当量または  $70 \mu m$  線量当量のいずれか大きな値を眼の水晶体等価線量の推定値とすることになる。放射線業務従事者の眼の水晶体等価線量が、不均等被ばくが強調される被ばく状況、または  $\beta$  線放出核種による被ばくにより年間線量限度近傍（または事業者の設ける管理基準近傍）まで被ばくする場合、追加モニタリングが必要となる。本調査では、 $\beta$  線源を取り扱う放射線作業について、分担研究者の所属したグループで開発した眼の水晶体の被ばく線量の計算が可能な人体軟組織で構成される数学ファントムを用い、頭部、胸部及び手指部における個人線量当量をモンテカルロ計算コード PHITS 3.1.7 で計算した。得られた体幹部線量に対する、眼の水晶体及

表 9 異なる照射条件下での体幹部線量に対する手指等末端部線量の比（線源  $^{106}Ru$ ）。  
手指部は掌で得られた線量とした。

$HI_{ext}$	点線源（眼の高さ）	点線源（手元）	壁面除染	大容量容器運搬
手指部 / 体幹部 $H_p(0.07)_{ext} / H_p(0.07)_{trunk}$	$0.38 \pm 0.01$	$0.73 \pm 0.01$	$0.86 \pm 0.04$	$1.08 \pm 0.09$

び末端部等価線量の比を求めると同時に、放射線作業環境場の線量当量をモニタリングし、その結果と体幹部、眼の水晶体及び手指部線量当量の測定結果とを比較し、それらの相関について議論を進めた。

調査の結果、放射線業務従事者のβ線放出核種による被ばくでの眼の水晶体線量について明らかになった点を以下に記載する。

(1)  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  β線以外の核種としてより高エネルギーβ線放出核種である $^{106}\text{Ru}$ - $^{106}\text{Rh}$ を対象に、放射線業務従事者の眼の被ばく線量について、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を、基本的なジオメトリで評価した。その結果、体幹部に装着した個人線量計からの70μm線量当量が状況により約20倍過大評価するが、保守的な推定値を与えることを示した。また、3mm線量当量の測定値が提供されている場合、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比が、実際の被ばく状況を模擬した場合には、0.9~1.4程度と得られており、3mm線量当量が眼の水晶体等価線量の良い推定値を与えることが明らかとなった。次年度以降個人線量測定サービス会社により3mm線量当量測定サービスが付加される場合、ベータ線被ばくが予想される事業所等では、積極的にサービスを求めることが望ましい。

(2) 陽電子放出核種について、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比からは、70μm線量当量が眼の水晶体線量を保守的に見積もる推定値であることが示された一方で、3mm線量当量の値が良い推定を与えることも明らかとなった。また、体幹部で観測される線量は消滅γ線511 keVの影響を大きく受けていることが確認できた。通常のβ線放出核種とは異なり、陽電子放出

核種を取り扱う放射線作業の場合、70μm線量当量でのモニタリングの重要性は変わらないが、1cm線量当量及び3mm線量当量によるモニタリングも重要であることが示された。

(3) β線放出核種に対する体幹部線量に対する手指部等末端部線量の比について、計算シミュレーションで基礎的な検討を進めた。点線源を眼の高さに掲げた場合には体幹部と線源との距離に依存したが、 $^{106}\text{Ru}$ 線源に対しては、比が0.7~1.1と見積もられた。このことは、被ばく状況によっては体幹部で観測された70μm線量当量が手指部等末端部線量の推定値として有効であることを示している。しかしながら、分担研究者らが実施した研究では、γ線源による被ばくが優位となる場合、測定値で体幹部線量に対し手指部線量が数十倍を超える場合がある、β線による被ばくは体表面汚染防止のためのゴム手袋等で十分遮へいできる、事前に末端部被ばくが強調されることが予想される放射線作業では予めリングバッジの装着が求められるため、あくまで偶発的な被ばく状況での推定にとどまる評価であることを明記する。

#### F. 健康危機情報

なし

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

なし

##### 2. 学会発表

なし

#### H. 知的財産権の出版・登録状況

##### 1. 特許取得

なし

## 2. 実用新案登録

なし

## 3. その他

なし

### I. 引用文献

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

[2] 放射線審議会, 140-1号: 眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について <http://www.nsr.go.jp/data/000221800.pdf>. Available on 2<sup>nd</sup> March 2019.

[3] 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」 [http://www.jhps.or.jp/upimg/files/suishotai\\_guideline\\_koushu\\_20200131.pdf](http://www.jhps.or.jp/upimg/files/suishotai_guideline_koushu_20200131.pdf) access on 7th March 2021.

[4] ICRP, 1997. General Principles for the Radiation Protection of Workers. ICRP Publication 75. Ann. ICRP 27 (1).

[5] Yoshitomi, H. and Kowatari, M., “EXPOSURE INHOMOGENEITY FROM <sup>241</sup>AM AND <sup>90</sup>SR/<sup>90</sup>Y SOURCES IN TERMS OF THE EYE LENS MONITORING IN THE NUCLEAR FACILITIES”. Radiation Protection Dosimetry, Volume 188, Issue 2, February 2020, Pages 191–198,

<https://doi.org/10.1093/rpd/ncz275>.

[6] Tsujimura, N., et al. “Lens Dosimetry Study In <sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y beta field: Full-face mask respirator shielding and dosimeter positioning” Proceedings of the 34th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, January 15-17, 2020, KEK, Tsukuba, Japan

[7] International Commission on Radiation Protection. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26(3-4) (1996).

[8] Munehiko Kowatari and Hiroshi Yoshitomi, “Assessment of Inhomogeneity of Exposure to Radiation Workers in Homogeneous Exposure Situations in Nuclear Industry and Accelerator Facility by Using Monte Carlo Calculations Coupled with a Mathematical Phantom - Exposure to the Lens of the Eye in Homogeneous Exposure Situation Due to Gamma and Beta Rays-“, RADIOISOTOPES, 68, 595-603 (2019). doi: 10.3769/radioisotopes.68.595

[9] 藤淵 俊王, “医療分野における職業被ばくと放射線防護—放射線診療従事者の不均等被ばく管理—”, Jpn. J. Health Phys., 53 (4), 247~254 (2018). DOI:

10.5453/jhps.53.247

[10] Hiroshi Yoshitomi et al.  
“QUANTITATIVE ESTIMATION OF  
EXPOSURE INHOMOGENEITY IN  
TERMS OF EYE LENS AND

EXTREMITY MONITORING FOR  
RADIATION WORKERS IN THE  
NUCLEAR INDUSTRY”, Volume 184,  
Issue 2, August 2019, Pages 179–188,  
<https://doi.org/10.1093/rpd/ncy197>

労災疾病臨床研究事業費補助金

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

分担研究課題：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

研究分担者 小野孝二 東京医療保健大学 看護学部 教授

研究分担者 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

研究分担者 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

研究分担者 樺田尚樹 産業医科大学 産業保健学部 教授

研究要旨

- ・ わが国での規制整備に資するために、国際原子力機関の国際原子力事象評価尺度 2 以上の医療分野での事例を収集し、日本での対応と比較した。
- ・ 医療分野での線量限度超えの事例も報告されており、報告事例への介入結果の公表例もあった。
- ・ 段階的な管理の導入が課題であると考えられた。
- ・ 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。
- ・ 被災動物を用いた検討でも本研究課題の最終目標である災害派遣型 EPR 線量評価ユニットとして急性被ばく 1Gy 以上が分別可能な、効果的な線量評価法・トリアージシステムを運用するための応用利用を検討し、事後的線量評価として広範囲に使える可能性が示唆された。
- ・ 医療従事者向けの放射線生物学に関する教材として、研究が深められていることが理解できる素材を作成した。
- ・ X 線装置においても国際的な免除レベルを取り入れることが望ましいと考えられる。
- ・ 低エネルギー光子を発生させる装置では、光子エネルギーに応じて制御するリスクに応じて方向線量当量率の深さに関する免除基準を明確にすることが求められる。
- ・ クルックス管の授業での利用では教員や中学生に対する線量拘束値をステークホルダーの参画のもとに設定することが課題となる。

## 目次

<b>A. 研究目的</b> .....	<b>3</b>
<b>B. 研究方法</b> .....	<b>4</b>
1. 海外当局での対応事例の解析.....	4
2. 線量評価の課題に対応するために防護眼鏡を着用した場合の防護眼鏡内の線量分布.....	4
3. 事後的な線量評価法として L BAND EPR 装置を用いた方法の検証.....	4
4. 放射線生物学に関する医療従事者向けの教育用素材の作成.....	4
5. クルックス管を用いた放射線授業への対応.....	4
<b>C. 研究結果</b> .....	<b>4</b>
1. INES2 以上で医療関係の事例の分析.....	4
2. 線量評価の課題に対応するために防護眼鏡を着用した場合の防護眼鏡内の線量分布.....	8
3. 事後的な線量評価法として L BAND EPR 装置を用いた方法の検証.....	9
4. 放射線生物学に関する医療従事者向けの教育用素材の作成を試みた。.....	9
5. クルックス管を用いた放射線授業への対応.....	9
<b>D. 考察</b> .....	<b>10</b>
1. INES2 以上で医療関係の事例の分析.....	10
1.1 米国における労働者の被ばく線量管理における個人情報保護の取り組み.....	12
2. 線量評価の課題に対応するために防護眼鏡を着用した場合の防護眼鏡内の線量分布.....	13
3. 事後的な線量評価法として L BAND EPR 装置を用いた方法の検証.....	13
4. 放射線生物学に関する医療従事者向けの教育用素材.....	13
5. クルックス管を用いた放射線授業への対応.....	13
<b>E. 結論</b> .....	<b>14</b>
<b>F. 健康危険情報</b> .....	<b>14</b>
<b>G. 研究発表</b> .....	<b>14</b>
医療従事者向けの放射線生物学に関する教材.....	17
EU での ICRP 勧告の影響の分析例[1].....	20
EU の医療分野での取り組み.....	20
眼の水晶体の等価線量のモニタリング.....	21
考察と結論.....	23
ASN による放射線防護の視察報告書 1.....	26
ASN による放射線防護の視察報告書 2.....	36

## A. 研究目的

疫学研究の知見を踏まえた眼の水晶体の等価線量限度の引き下げに関して、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 20 mSv へ引き下げる勧告がなされた後に、国際的に規制への取り入れの方向で検討が進められており、国際原子力機関 (IAEA) の国際基本安全基準 (BSS ; International Basic Safety Standards) の一般要求事項 GSR Part3 に取り入れられた。欧州連合では、この要求事項を欧州連合での基本安全基準に取り入れ加盟国での制度反映に法的拘束力持たせている。

これを受けて、各国が眼の水晶体等価線量限度の引き下げを国内法令に取り入れている。そこで、わが国での規制整備に資するために、これまでの海外諸国での眼の水晶体の新しい線量限度の取入れ状況の調査結果を踏まえて、海外当局での対応事例を調査した。

また、防護眼鏡を着用した場合のモニタリングにおいて、線量分布が著しく不均一になることから眼の水晶体の等価線量の過小評価への懸念があるので、その検証を計算で試みた。

他方、平成 32 年度から移行措置としてク

ルックス管の放射線授業が実施される見込となっている<sup>1</sup>。クルックス管の中には、Hp(0.07)として距離 15cm で 14mSv/h 程度の線量率になるものがある。このような授業の放射線安全に関する法令適用を考えるには、線源が規制から免除されうるかどうかはまずポイントとなる。放射線発生装置の規制からの適用免除基準は、IAEA GSR Part 3 及び RSG1.7 では(i)通常の使用条件において、機器のアクセス可能な表面から 0.1m の距離において、周囲線量当量率又は方向線量当量率が 1 $\mu$ Sv/h を超えないこと、又は(ii)、発生する放射線の最大エネルギーが 5keV を超えないこととされている。日本では、国の総合規制とは別に、労働安全衛生法で X 線装置を対象とし、照射管やフィルターを使用し、照射野を適切に制限することが求められる特定 X 線装置が定められているが、2021 年 2 月現在、X 線装置の定義が定められていない。そのため、蛍光 X 線分析や電子顕微鏡などの用途で使用される X 線放射型装置については、日本の施設によって採用されている放射線安全プロトコルに違いがある実情にある。クルックス管を用いた授業では生徒だけでなく教員も放射線に曝されうるので、その法令適用について検討した。

---

<sup>1</sup> 新学習指導要領移行措置

(4) 平成 32 年度の第 2 学年の理科の指導に当たっては、次のアからウまでのとおりとする。

ア 現行中学校学習指導要領第 2 章第 4 節第 2 [第 1 分野] の 2 (3) ア (エ) に規定する事項につい

ては、新中学校学習指導要領第 2 章第 4 節第 2 [第 1 分野] の 3 (5) エのうち「放射線の性質と利用」に関する規定を適用するものとする。



## B. 研究方法

### 1. 海外当局での対応事例の解析

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。調査事例の選定は、令和2年度放射線安全規制研究戦略的推進事業（原子力規制庁）「放射線影響分野における放射線防護対策の推進に関する調査と提言ならびに放射線防護人材の確保・育成に関連する業務」の業務を請け負った日本放射線安全管理学会の「放射線施設の放射線事故に係る最新知見の収集WG」の結果も利用した。

さらに米国における労働者の被ばく線量管理における個人情報保護の取り組みを調査した。

### 2. 線量評価の課題に対応するために防護眼鏡を着用した場合の防護眼鏡内の線量分布

防護眼鏡内の線量分布は以下の幾何学的な設定を用い、鉛ガラスの密度は4.26 g/cm<sup>3</sup>とし、組成は以下の通りとした。防護眼鏡の距離は1 cmと5 mmと変えてPHITSを用いて計算して結果を比較した。

### 3. 事後的な線量評価法としてL band EPR装置を用いた方法の検証

被災牛を用いて放射線被ばくによる信号

が検出できるかどうかを非破壊的な電子スピン共鳴法を利用した測定法で検証した。

### 4. 放射線生物学に関する医療従事者向けの教育用素材の作成

医療従事者を対象として想定した放射線生物学に関する教育用素材を作成した。

### 5. クルックス管を用いた放射線授業への対応

クルックス管を用いた放射線授業への対応として法令適用上の課題の整理を試みた。

（倫理面への配慮）

本研究は、公開されている資料を収集し分析することで行った。

## C. 研究結果

1. INES2以上で医療関係の事例の分析  
INES2以上で医療関係の事例を表1に示す。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。EUでの取り組みの資料を添付した。日本でも電離則等が改正され、新しい眼の水晶体の等価線量限度が2021年度から導入される予定となっており、放射線防護上の課題となっている。

事例の概要を以下に示す。

表 1 INES2 以上で医療関係の事例

事例番号	INES	国	場所	事象発生日	事象名
1	2	ドイツ	バイエルン州の放射性医薬品研究所	2020年12月8日	放射性同位体取扱施設
2	2	ドイツ	バイエルン州の病院	2020年1月31日	年間の線量限度を超える放射線曝露
3	2	英国	ウエールズにある医療機関	2019年12月31日	IVR従事者における水晶体過剰被ばく
4	2	スイス	病院の薬剤部	2019年6月21日	Ga-68溶液の飛沫による眼の汚染
5	2	フランス	アンジェ病院の核医学診療部門	2019年1月31日	核医学診療部門の手の線量限度を超える被ばく
6	2	フランス	サン・ドニにあるドラフオンテーヌ病院	2017年10月20日	IVR従事者における皮膚過剰被ばく
7	3	オーストラリア	オーストラリア原子力科学技術機構	2017年8月22日	品質管理分析者 (QC Analyst) の手の被ばく

事例 1 製造時の手順ミスによる作業員の放射線曝露 (INES2)

放射性医薬品の製造のために Lu-177 を取り扱っている施設でのグローブボックス内での作業中に、使用済みのカニューレを指定の回収容器に投入せずにグローブボックス内に気付かずに残ってしまった。この時、カニューレの保護キャップが外れていた。次のシフトで、作業者がカニューレを発見し、それを拾おうとした際に、グローブボックスの手袋越しに右手中指の指先をカニューレで刺した。カニューレに残っていた液

量は微量であったが、高い比放射能のため 1MBq 程度が局所の皮膚に注入された。この従業者はその後、作業を中止し、放射線管理担当者に連絡し治療を受け、残存した量は 10~20 kBq まで低下したが、穿刺部位の局所皮膚線量は 6.7 Sv と保守的に計算された。

なお、放射性医薬品が皮膚に誤って注入されることで放射性皮膚炎を起こすことはベータ線も放出する核種で知られており、IRPA15 で Lu-177 の投与時の血管外漏洩事例の言及例があった<sup>2</sup>。

<sup>2</sup> Kendall Elizabeth Berry (Fox Chase Cancer Center, USA). Three Years of Experience Treating Patients with

Lutathera® (Lutetium, Lu-177, Dotatate). T4.4-0221

## 事例2 実効線量限度を超えた事例

OSL(Optically Stimulated Luminescence)で計測された病院の労働者の実効線量が一月間で24.2 mSvとなっていた。この線量は、ドイツの法令で定められている実効線量の年間限度である20 mSvを超えていた。この労働者では組織反応は示さなかった。

放射線防護管理者も関係者も、想定される被ばくのシナリオを説明できなかった。病院と労働者は、必要な放射線防護措置は常に適用されていると説明している。過去12ヶ月間の線量計の測定値の評価では、被曝の記録はなかった。このことから所轄官庁は、当該従業員の5年間に蓄積された全身線量(24.2 mSvを含む)が100 mSvを超えてはならないと病院に指示した。

なお、日本では線量限度を超えた測定がいたずらであったことが判明した事例がある<sup>3</sup>。

## 事例3 IVR 従事者における水晶体異常被ばく

IVR 処置中に、オペレーター1名が1年以上にわたり、眼の水晶体において法令要求事項として定められている線量限度を超える累積線量を被ばくしていた。線量計が適切に使われていなかったため、毎月の線量

測定報告書で眼の水晶体への線量の増加が記録されることはなかった。管理システムの不具合、個人用防護具(PPE)の誤用、水晶体の等価線量を測定することに適さない線量計の使用など、いくつかの不具合が確認された。なお、眼における確定的影響は2020年6月現時点では報告されていない。水晶体における等価線量は推定25.8 mSvとされている。この線量の推定は、従事者のPPE使用の記憶に基づき現実的と判断した仮定を用いて実施された。

英国での眼の水晶体の等価線量限度は、関連する法律によると20.0 mSvとなっている(欧州連合は、欧州指令により欧州BSSの法令適用を加盟国に求めていた。欧州BSSの眼の水晶体の等価線量限度はIAEAのGSR part 3と同様である)。

この事件は英国の安全衛生行政機関によって調査され、現在は不起訴の決定を受けて事件としての扱いは終了している。なお、日本では線量限度を超えていたとされる労働者に対して適切な個人線量測定がなされなかったとして事業者が書類送検された事例がある<sup>4</sup>。また、線量限度は超えていなかったものの、労働者に対する適切な測定が行われていなかったとして事業者が書類送検された事例がある<sup>5</sup>。なお、医療で用いるX線はエネルギーが低いので素子の装着法によっては、人体でのX線の減弱により線量を過小評価することが考えられる<sup>6</sup>。このため、測定会社から注意が促されている<sup>7</sup>。また日本では指輪タイプの素子は商業サー

<sup>3</sup> 平成15年：国立柳川病院 技師

1名の年間線量が120.8mSv

<sup>4</sup> <https://www.rodco.co.jp/news/81887/>

<sup>5</sup> <https://www.rodco.co.jp/news/66845/>

<sup>6</sup>

[https://ndrecovery.niph.go.jp/trustrad/wp-content/uploads/2010/04/niph\\_yamaguchi.pdf](https://ndrecovery.niph.go.jp/trustrad/wp-content/uploads/2010/04/niph_yamaguchi.pdf)

<sup>7</sup> 『ガラスリングは、放射線を手の甲側から受ける場合は手の甲側にラベルを向け、

ビスではフリーサイズのみとなっており、指が細い労働者では線量が過小評価される可能性がある<sup>8</sup>。

#### 事例4 Ga-68 溶液による眼の汚染

ドラフト内で品質管理のため 700 mBq の Ga-68 を含む溶液が入ったバイアルからサンプルを取り出す際に、バイアルの蓋を注射器で突き刺したところ、液滴が飛び散り右眼を汚染した事例である。眼の水晶体の等価線量は 27 mSv と評価されている。

#### 事例5 核医学科の作業員の手の被ばく

アンジェ病院の核医学科の作業員が、2018年11月の1ヶ月間に 723 mSv の線量を手に受けた。線量計の送付が遅れたため、2019年1月になって初めて判明した。病院での調査では、被ばくの原因を特定できなかった。

ASN は対応した検査を実施したが、その間にも原因は特定できなかった（検査結果書をこの報告書に添付した）。しかし、放射性医薬品製剤の取り扱いやその管理記録などの汚染管理の分野では、改善の道筋が見えてきた。この作業員は、今後12ヶ月間、放射性核種の使用を禁止されている。

#### 事例6 放射線科医の手の被ばく

---

手の平側から受ける場合は手の平側にラベルを向けてください。』  
<http://www.c>

2017年の第1四半期において、IVRで透視を行っている放射線科医がX線により受けた手の被ばくが年間の等価線量限度(500 mSv)を超過した事例である。

2017年10月20日、デラフォンテーヌ病院センターは、X線透視装置を使用して透視下のIVRを行っていた放射線科医で過剰な被ばくがあったとして、放射線防護に関する重要な事象としてASNに報告した。個人線量計の読み取りを担当する検査機関への線量計(指に装着されていた素子)の送付が遅れた結果、結果の判明が2017年9月になったが、この医療従事者が2017年第1四半期に、カテゴリーAに分類される労働者の年間規制限度を超える線量(いわゆる「四肢」の線量が500 mSvを超える)を手に受けていたことが判明した。

この事象が発覚した後、病院は直ちに対応し、放射線科医はすべての放射線を用いた透視下のインターベンション手技手技を停止した。本事象の分析によると、放射線科医が受けた線量の大部分は、複雑な胸部または腹腔内骨盤生検の穿刺を行っている間に受けたものであり、その間、放射線科医の手は透視装置から照射された一次X線ビームに曝されていた。是正措置は、手順の最適化、IVRでの作業環境管理の改善により、手技中の従事者の手への放射線曝露を制限し、個人線量計の計測結果のタイムリーな分析を確実にすることとされた。

2018年1月24日、ASNはこの事象につ

[technol.co.jp/monitoring/pdf/pdf\\_all.pdf](http://technol.co.jp/monitoring/pdf/pdf_all.pdf)

<sup>8</sup>

[https://ndrecovery.niph.go.jp/trustrad/images/dental/5-7NIPH\\_dental2020.pdf](https://ndrecovery.niph.go.jp/trustrad/images/dental/5-7NIPH_dental2020.pdf)

いて検査を実施した。この検査の結果は公開されており、附属資料としてこの報告書に添付した。この検査では、医療機関で試みられた是正措置の有効性が確認されたほか、同様の事象の発生を防止するために、関係者や専門家と協議して策定された以下の行動計画が示された。

- ・ 検査手順を最適化するための作業を継続する。
- ・ 透視装置から照射される一次 X 線ビームへの手の放射線の曝露を避けるために、関係する医師の慣行を修正する。
- ・ 放射線科医の介入を容易にするために、手技の前に患者の準備を改善する。
- ・ 今回の検査に関するフォローアップレポートは、ASN のウェブサイトに掲載する。

フランス原子力安全局(ASN)は、電離放射線にさらされているすべての労働者が、特に手指や眼の水晶体に対する異常被曝を可能な限り早期に発見するために、線量計を着用する義務があることを強調したいとしている。規定に従った四肢での線量計の装着に関して多くの事業所で観察されている課題を考慮して、フランス原子力安全局は、同様の放射線曝露の事例が本当は存在するにもかかわらず検出されていない可能性を排除していない。

四肢の年間被ばく限度を超えたことを考慮して、フランス原子力安全局はこの事象を INES スケール（国際原子力・放射線事象スケール、重篤度の高い順に 0 から 7 まで段階的に評価される）のレベル 2 に分類

している。

## 事例 7 品質管理分析者の手の被ばく

品質管理の分析者が、ルーチンでの品質管理手順中に皮膚を  $^{99}\text{Mo}$  で被ばくした事例で、 $^{99}\text{Mo}$  (4.5 GBq、0.6 ml) を含む溶液が入ったバイアルを落とし、手が被ばくしたものである。被ばくから 2 週間以上経って、作業者の手に紅斑と水泡の発生し、被ばくした手の皮膚の等価線量は 10~20 Sv に相当すると評価されている。

## 2. 線量評価の課題に対応するために防護眼鏡を着用した場合の防護眼鏡内の線量分布

計算結果を図 1 に示す。眼の水晶体の吸収線量に比べて 3 倍以上高い場所がある一方で半分程度になる場所があった。

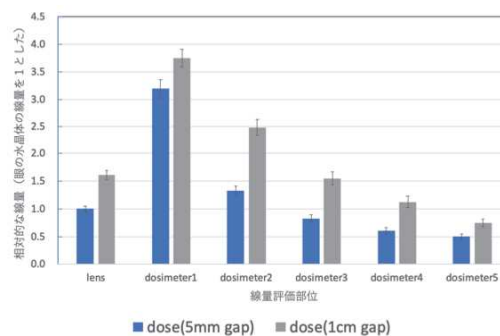


図 1 防護眼鏡を装着した場合の眼の水晶体の吸収線量と防護眼鏡内の各部位での線量の比

### 3. 事後的な線量評価法として L band EPR 装置を用いた方法の検証

これまでの検討で最終目標として災害派遣型 EPR 線量評価ユニットとして急性被ばく 1Gy 以上が分別可能な、効果的な線量評価法・トリージシステムを運用するためのシステムデザインがなされたことから、その実装に向けて、事故で被災した試料の計測を行った。

福島県での被災動物として旧避難区域にある浪江町に残っていた 3 頭の牛から 3～4 本の切歯を採取し (計 10 本)、計測した。また、大熊町の牧場からも 1 頭の牛から 4 本の切歯を採取し、計測した。

比較のために、北海道、岩手、群馬、鹿児島で 3 歳未満の牛からそれぞれ 10 本の切歯を採取した (計 40 本)。

測定の結果、浪江町に残っていた牛のすべての試料から原子力事故に由来すると考えられる信号の検出に成功した。この牧場は高濃度のプルームが通過した地域にあり、空間線量率や牛の個体線量計から事故後 1Gy 程度の被ばくをしていたと考えられる。一方、それよりも線量が低いと考えられる大熊町の農家から提供された牛や対照として収集した各地の牛からは信号は検出できなかった。

### 4. 放射線生物学に関する医療従事者向けの教育用素材の作成を試みた。

作成した資料を報告書に添付した。

### 5. クルックス管を用いた放射線授業への

対応

GSR 第 3 部や RSG1.7 では明示的に言及されていないが、GSG7 のパラ 2.34～2.38 で評価されているように、周辺線量当量での 10mm だけでなく、低エネルギー光子の場合はそれぞれ 3mm、0.07mm の基準深さが必要であることから、指向性線量当量では 0.07mm の基準深さが推奨されている。

しかし、眼の水晶体への 15mSv の等価線量や皮膚への 50mSv の等価線量をそれぞれ用いることなく実効線量を年間 1mSv 以下に抑えるシナリオを用いて免除レベルが導出されている。

このため、日本では、IAEA が示す X 線装置の免除レベルを実施し、光子エネルギーに応じて、周囲線量当量率や方向線量当量率の深さに関する免除基準を明確にすべきであると考えられた。

さらに、教師や中学生に対する線量拘束値をステークホルダーの参画のもとに設定すべきである。

本課題に関連して国際原子力機関で教育や研究に用いる放射線安全に関する検討が IAEA DS470 において進められているので、その状況を解析した。

### IAEA DS470 の取り組み

IAEA は、放射線の安全性に関する規制アプローチを提案している。教育・研究における放射線源の使用における放射線の安全性を確保するために、IAEA の調整委員会は 2012 年 9 月に文書作成概要を承認した。この文書は、GSR パート 3 の改訂作業のため、当初の予定よりも遅れているものの、2020

年の承認のために各安全基準委員会（主に放射線安全基準委員会（RASSC）と想定）に提出される予定とされていた（2021年2月末現在で、まだ作業中となっている）。また、2009年9月に文書DS470「教育・研究における放射線源の利用における放射線安全性」の草案が提示され、2020年11月のRASSC49で議論されたが、RASSC49と日本の教育環境の実態や規制の現状とを比較し、規制整備の課題を提示した。

#### IAEA DS470 へのコメントの概要

RASSC の範囲についてコメントしたのは、ドイツ、日本、パキスタン、アラブ首長国連邦、英国、米国である。ドイツからは X 線装置の多様性についてコメントがあり、日本とのコメントと合わせて対応されていた。来年度から実施される改訂学習指導要領（中学 2 年生の理科）で言及されているクルックス管の記述を附属書 I（I-3）で充実させ、日本での研究成果についても参照する対応が示されていた。

理科の授業での X 線を発生しうる装置の使用に適用される線量拘束値

線量拘束値は放射線防護上重要な概念で国際的には幅広く取り入れられていることから日本でも線量拘束値を導入すべきと考えられる。

教員や保護者の意見を考慮して、具体的な線量の制約を設定する必要がある。放射線防護の最適化では、費用便益分析結果などを踏まえて、関係者が検討する必要がある。この判断には、各分野の専門家の協力が必要である。

リスクへの対応は社会的課題でもある。地域の市民団体と教員との協働は実践的な効果があり、リスク教育の題材としても活用できる。日本や東欧諸国は、原子力災害をはじめとするリスクへの対応について様々な教訓を得ている。また、環境汚染を伴う災害への対応の難しさも各国で経験している。このような課題を解決するためには、関係者間での協働した取り組みも有効であると考えられる。

#### IAEA DS470 へのその他のコメント

日本からのコメントの中で、核医学検査を受けた患者を扱う看護学生の取り扱いについては、職業放射線防護評価サービス（ORPAS）の課題ともなっている。医療機関での消防署職員などコメディカルも含む従事者の教育訓練での放射線防護も関係者の合意形成を促進し、安全確保策を明確にしていく必要があると考えられる。

#### D. 考察

##### 1. INES2 以上で医療関係の事例の分析

海外では、IVR 従事中の医療従事者の異常被ばくの報告が INES を利用してなされている（表 2）。一方、国内では、個人線量測定協議会のデータで年間の実効線量が 50 mSv を超えた医療分野での労働者の存在が毎年、確認示されている。皮膚等価線量限度を超えた医療分野での労働者も測定会社の公開データから確認することができる。例えば、長瀬ランダウア社によると令和元年

度に皮膚等価線量が 500 mSv を超えた労働者は 4 名となっている。また、引き下げ前の眼の水晶体の等価線量限度である年間 150 mSv を超える労働者が厚労省の検討会での資料では平成 29 年度には 7 名おり、うち 6 名は医療従事者である<sup>1)</sup>。RI 規制法施行規則第 39 条第 1 項で規定されている報告義務のある計画外被ばくは、2020 年度に医療機関から報告があったが<sup>2)</sup>IVR の事例ではなく、このような事例は本制度の対象外と考えられるものの電離則第 44 条により事業主は、放射線業務従事者が受ける線量が線量限度を超えたときはその旨を所轄労働基準監督署長に報告しなければならないとされる。しかし、この制度により報告された線量限度を超えた労働者に関する発表はなく、これらの医療従事者に関する日本からの INES への通報事例は、2021 年 2 月現在存在していない。

このように個人線量測定協議会などのデータから日本でも線量限度を超過している事例があると考えられるが、線量限度超が判明した事例は労災申請がなされたものか勤務時間管理などの問題での立入時の判明に限られている。線量限度超の事例に対する調査報告書は日本では公開されていないが、関係学会での取り組みは日本でも進められており<sup>10)</sup>、行政機関により事業所への幅広い援助もなされている<sup>11-14)</sup>。

欧州で改正された BSS では、眼の水晶体の等価線量が 15mSv/年を超える可能性が高い作業者は、カテゴリ A に分類されており、このような作業者は個別の線量測定が必要となるが、それ以外は段階的な管理となっている。

これに対しては、日本は線量拘束値を導入していないままとされており、段階的なアプローチが法令上十分には導入されていない（防護衣を着用するかどうかでモニタリング方法を判断）。

欧州では規制整備において費用見積もりがなされており、30 年間で約 2,400 万ポンドの費用を必要と推測していた。日本でも、本件は、法令上、事前の規制影響分析の対象外ではあったが厚労省の検討会で経済面からの推計が提示された。

欧州では、現実的な課題として、新規/変更された個人線量測定、保護具、および教育にかかる費用は多額になる可能性があるが、国内法での施行後には、すべての放射線作業員の雇用者が新しい BSS（指令 2013/59/ユーラトム）に準拠することが法的に求められるため、このような費用を回避することはできないとの整理がされており、日本と同様にコストがかかることは違法性の阻却事由にならないと整理されていた。

また、日本の厚労省の検討会では現場での問題が露呈している調査結果が率直に提示されたが、欧州では、眼の水晶体の等価線量のモニタリングへの投資の増加と保護対策の改善の恩恵を十分に受けるためには、影響を受けた労働者を対象とした大規模な研究での検証が非常に重要であるとの視点が提示されていた。さらに、低線量放射線が放射線誘発性白内障の誘発に与える影響に関して、より多くの研究が行われていることも、将来の対策に生かすことができるだろうとされ、基礎研究が重要で日本でも研究



されているところであるが、効果検証と最新の知見を踏まえたPDCAの推進が想定されていた。

欧州では、眼の水晶体の等価線量限度の見直し、放射線防護に関する意識の向上など現場に肯定的影響を与えることが期待されていたが、日本も同様なことが期待されるとの議論が検討会でなされた。

欧州では、新しい勧告は、欧州全域に関連し、国際的な議論も巻き起こし、医療従事者だけでなく、原子炉容器への立ち入り、燃料の解体、産業用放射線撮影など、医療機関以外で働く人々にも影響を与える可能性があるとして指摘されているが、日本では廃炉作業にも着目されている。この課題に関して、個人レベルの教育、保護、モニタリングで目標を達成しない場合、作業パターンの変更が必要になるかもしれないことの指摘が欧州ではなされていた。日本でも医療従事者に対しては抜本的な対策の議論もなされつつある。

#### 1.1 米国における労働者の被ばく線量管理における個人情報保護の取り組み

米国の規制当局は、Radiation Exposure Monitoring System (REMS)を労働者保護の目的では直接は使わず、事業所からの外部と内部被ばくデータの提供を受け、それを Energy Employees Occupational Illness Compensation Program (EEOICPA)に用いている。

REMSは、外部被ばくのデータのみでトレンドが規制上のモニタリングとして分析されるものの、個々の労働者の線量再構築には使わない。

労働者の線量管理に Social Security Numbers を使うことは慎重にすべきとされているものの<sup>9</sup>、事業所固有番号の他に Social Security Numbers 使うこともあり、その場合は、Privacy Act Information and protect the Personally Identifiable Information (PII)に従い、結果として、補償要求に関しては、個別IDが割り当てられている。

以上から、以下の対応策が考えられた。

- ・ リスクに応じた管理が行えるように IAEA GSR part3 の段階的な放射線管理を規制に導入する。
  - このためには規制影響分析が課題となる。
- ・ 各事業所は電離則第44条を遵守する。
  - 行政機関は、電離則第44条に基づき報告された事例を集計して INES 通報し、公開する。
  - 報告された事例に対して、関係機関が協力して、当該事業所の背景も踏まえて解決の援助を行う。
  - 役立つ情報が活用できるようにデータの管理を進める。

<sup>9</sup><https://www.energy.gov/ehss/downloads/radiological-control-technical-position->

[regarding-use-social-security-numbers-dose](https://www.energy.gov/ehss/downloads/radiological-control-technical-position-regarding-use-social-security-numbers-dose)

## 2. 線量評価の課題に対応するために防護眼鏡を着用した場合の防護眼鏡内の線量分布

防護眼鏡を用いることで不均等な被ばく状態となり、素子の位置により眼の水晶体の線量を過小評価したり、過大評価したりする。確認した範囲では過小評価の程度は半分に留まったが、実際の場合ではより複雑なのでさらに差異が大きくなるかもしれない。水晶体の線量の過小評価を避けるためには素子を完璧に遮へいするのではなく、できるだけ外側に装着するのがよいかもしれない。

## 3. 事後的な線量評価法として L band EPR 装置を用いた方法の検証

原子力災害時には、施設職員や防災要員のなかに高線量被曝者が多数発生する恐れがある。その際にはトリアージのためのスクリーニング法を適用させる必要がある。

本研究は、高線量被曝により惹起された歯のラジカル量を、口腔内の *in vivo* 状態で電子スピン共鳴(EPR)という物理的な手法で測定し、被曝線量を評価する手法の確立をめざすものである。本研究は、これまで構築してきたダートマス大学との協力関係のもとで国内の関係する研究者とも協力関係を維持・拡大して、装置の改良等に取り組んでいる。

この目的で開発した装置で、原子力災害で被災した試料からの非破壊的な測定での信号検出に初めて成功した。この方法で推計された線量は予測値よりも高く、対象となった牛では白骨化したものもあったためべ

ータ線曝露の影響も受けている可能性がある。

この方法はこれまで歯科放射線診療、放射線治療、全身照射を受けた患者だけではなく、長年 ERCP に従事していた看護師からも信号が検出されており、労働者の事後的な線量評価でも活用できると考えられた。

## 4. 放射線生物学に関する医療従事者向けの教育用素材

放射線生物学に関する研究の進展が進んでいる。しかし、これらの研究の進展を医療従事者の放射線防護の教材に反映させることが課題となっている。

この資料では医療従事者の疑問に沿ったストーリーとし、放射線に生物影響の解明に向けて研究が進められていることが理解できるような内容とした。

放射線により生体が影響を受けることはリスク認知を高めることも考えられるが、放射線によってもたらされた生体内での反応に対して生命が対応する機能を持っていることの解明も進んでいることを伝えることで業務への取り組みによい影響を与えることを期待したい。

## 5. クルックス管を用いた放射線授業への対応

X 線装置の免除レベルの取り入れは、かつて放射線審議会基本部会でも課題とされており、日本での規制整備上の課題となっているが、クルックス管のような低エネルギー

一光子を発生させる装置では、光子エネルギーに応じて制御するリスクに応じて方向線量当量率の深さに関する免除基準を明確にすべきであると考えられた。さらに、教員や中学生に対する線量拘束値をステークホルダーの参画のもとに設定することが課題となる。

- 低エネルギー光子を発生させる装置では、光子エネルギーに応じて制御するリスクに応じて方向線量当量率の深さに関する免除基準を明確にすることが求められる。
- クルックス管の授業での利用では教員や中学生に対する線量拘束値をステークホルダーの参画のもとに設定することが課題となる。

## E. 結論

- ・ 国際原子力機関に各加盟国から 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。
- ・ 被災動物を用いた検討でも本研究課題の最終目標である災害派遣型 EPR 線量評価ユニットとして急性被ばく 1Gy 以上が分別可能な、効果的な線量評価法・トリアージシステムを運用するための応用利用を検討し、事後的線量評価として広範囲に使える可能性が示唆された。
- ・ 医療従事者向けの放射線生物学に関する教材として、研究が深められていることが理解できる素材を作成した。
- ・ X 線装置においても国際的な免除レベルを取り入れることが望ましいと考えられる。

## 謝辞

牛の歯を提供下さった農家の方々に感謝申し上げます。

## F. 健康危険情報

なし

## G. 研究発表

### 1. 論文発表

- 1) Ichiro Yamaguchi 1, Kazuhiko Inoue, Masahiro Natsuhori, Chryzel Angelica B. Gonzales, Hiroshi Yasuda, Yasuhiro Nakai, Minoru Miyake and Harold Swartz. L-Band Electron Paramagnetic Resonance Tooth Dosimetry Applied to Affected Cattle Teeth in Fukushima. Appl. Sci. 2021, 11(3), 1187;  
<https://doi.org/10.3390/app1103118>

7

- 2) Hirota S, Gonzales CAB, Yasuda H, Yamaguchi I, Toyoda S. Electron spin resonance signal of human nails: increase after irradiation. J Radioanal Nucl Chem [Internet]. 2021; Available from: <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07540-8>
- 3) Yamaguchi I. What can radiation protection experts contribute to the issue of the treated water stored in the damaged Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant? J Radiat Prot Res 2021;46(1): <https://doi.org/10.14407/jrpr.2020.00206>
- 4) 山口 一郎. 医療放射線の安全管理に責任を持つ担当者を国際原子力機関はどう規定しているか? 医療放射線防護; 2020. (82), 44-46.
- 5) 川口 勇生, 山口 一郎, 安東 量子, 甲斐 倫明, 吉田 浩子, 佐々木 道也. JHPS 国際シンポジウム:トリチウム問題をいかに解決するべきか? — 国際的視点および社会的視点から見た放射線防護—. 保健物理 2020;55(4): 173-182.
2. 学会発表
- (1) Yamaguchi I, Ono K, Kunugita N. Radiation safety issues regarding X ray emittable devices below 10 kV applied voltage. IRPA15;2021. 1.18-2. 5. 大韓民国 (オンライン) .T3. 7-0172, Congress abstract. p. 270.
- (2) Ono K, Kumasawa T, Shimatani K, keiichi, Kanou M, Yamaguchi I and Kunugita N. Radiation dose distribution of the surgeon and medical staff on orthopedic Balloon Kyphoplasty in Japan. IRPA15;2021. 1.18-2. 5. 大韓民国 (オンライン) .T4.2-1174, Congress abstract. p. 531.
- (3) H. Hirata, Yamaguchi I, M. Miyake. Overview of electron paramagnetic resonance-based human tooth dosimetry. M. Miyake. 4th Conference on Nuclear Analytical Techniques (NAT2020) Jointed with 6th Symposium on Radiation in Medicine, Space, and Power (RMSP-VI); 2020. 11. 12-2020. 11. 13. 大韓民国 (オンライン) . R0-1.
- (4) Yamaguchi I, Terada H, Shimura T, Inaba Y, Ushiyama A. Translation of scientific research into Public Health Action: in case of National Institute of Japan. Symposium1: Translation of scientific research into Public Health Action: An international perspectives; ISEE2020; 2020. 8. 24-27. オンライン. ID 2413.
- (5) 戸高安曇・豊田新・館萌々子、島崎達也、岡壽崇、山口一郎、井上一彦、保田浩志・廣田誠子、谷篤史、三宅実、水野秀之、星正治. 人の歯のエナメル質の標準試料作成に向けて—試料処

- 理方法による信号生成効率の比較  
一. ESR 応用計測研究会等合同研究会 2 月 19-20 日
- (6) 山口一郎, 中井康博, 三宅実, 廣田誠子, クリーゼル ゴンザレス, 保田浩志, 井上一彦. 人の臼歯を対象にした L;電子スピン共鳴法を用いた線量測定法における歯の幾何学的な条件が及ぼす影響. ESR 応用計測研究会等合同研究会 2 月 19-20 日
- (7) 山口一郎, 秋吉優史. 教育現場での X 線発生を伴う装置の放射線安全 IAEA の DS470 に関する検討. 第 19 回日本放射線安全管理学会 ; 2020. 12. 9-2021. 1. 8、オンライン、講演要旨集. p. 86 (P21)
- (8) 角山雄一, 佐瀬卓也, 山口一郎, 保田浩志. 海外の放射線施設の放射線事故に係る最新知見の収集. 日本放射線安全管理学会 ; 2020. 12. 9-2021. 1. 8、オンライン、講演要旨集. p. 57
- (9) 秋吉 優史, Do Duy Khiem , 安藤 太一, 松本 亮, 宮川 俊晴, 掛布 智久, 岡本 泰弘, 伊藤 照生, 山口 一郎. 暫定ガイドラインによるクルックス管からの漏洩 X 線量抑制の検証. 日本保健物理学会第 53 回研究発表会 ; 2020. 6. 29-30、オンライン、講演要旨集. p. 80
- (10) 山口 一郎, 南 佑子, 塚本 豊浩, 中井 康博, 三宅 実, ゴンザレス・クリーゼル , 廣田 誠子, 保田 浩志. スペシャルニーズ
- 歯科での放射線管理. 日本保健物理学会第 53 回研究発表会 ; 2020. 6. 29-30、オンライン、講演要旨集. p. 64

### 3.その他

## 放射線生物学研究の取り組み

100 mSv以下の低線量の放射線被ばく



ヒトの疫学データで  
リスクの有無を判断することは困難

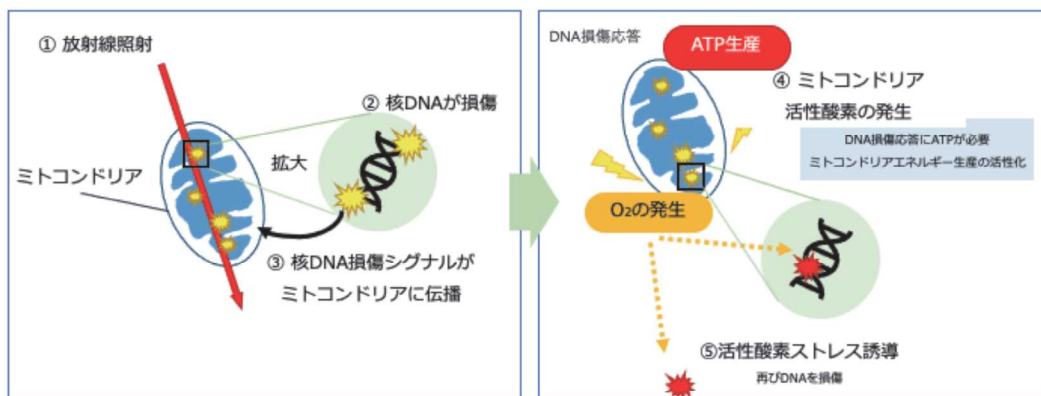
機序解明のため放射線発がんにおける  
**がん細胞と周辺部の細胞の相互作用** (がん微小環境)  
の役割に関して研究を行っています。

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

1

## 放射線生物学研究の取り組み

### 放射線による酸化ストレス：活性酸素の発生機構



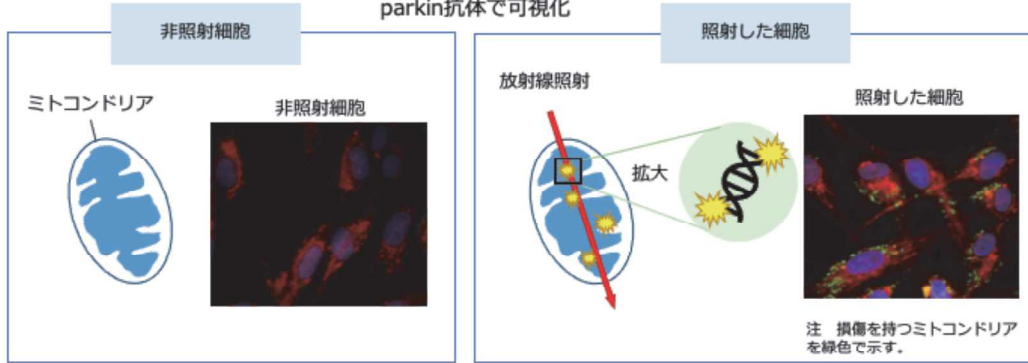
不均等被ばくを伴う放射線業務における被ばく線量の実態調査  
と線量低減に向けた課題評価に関する研究

2

## 放射線生物学研究の取り組み

### 放射線による細胞傷害

活性酸素により損傷を負ったミトコンドリアを  
parkin抗体で可視化

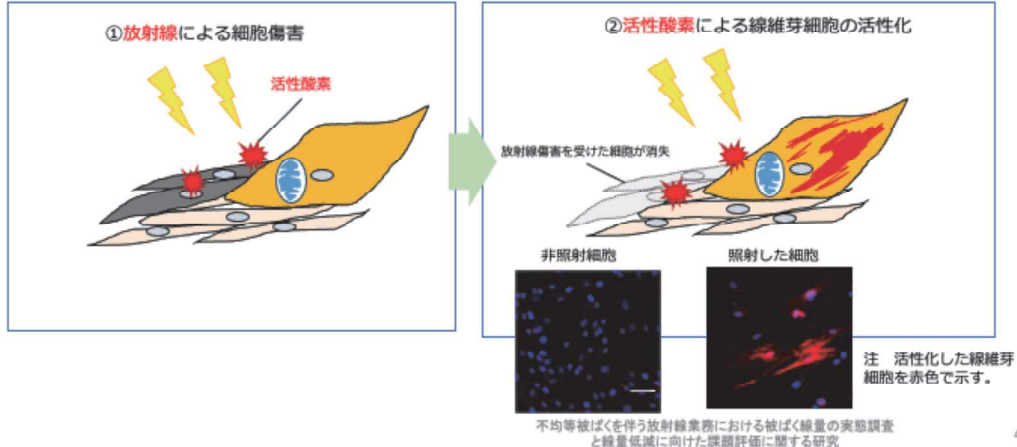


不均等被ばくを伴う放射線業務における被ばく線量の実態調査  
と線量低減に向けた課題評価に関する研究

3

## 放射線生物学研究の取り組み

### がん微小環境の形成

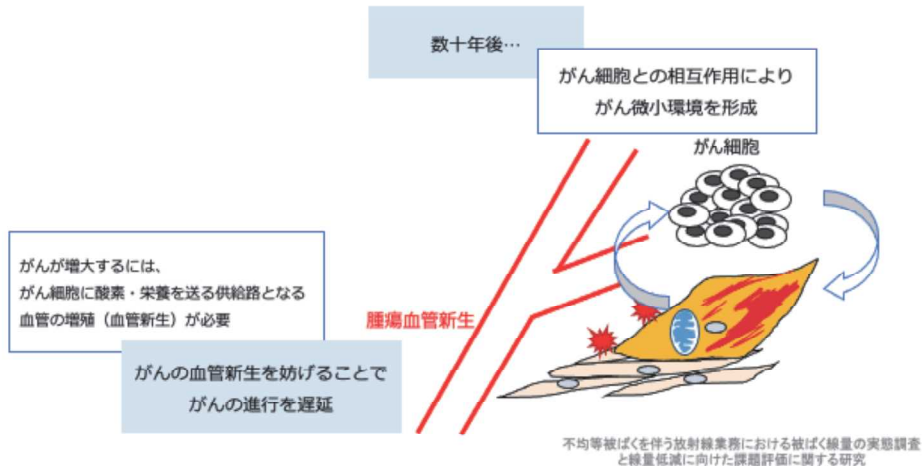


不均等被ばくを伴う放射線業務における被ばく線量の実態調査  
と線量低減に向けた課題評価に関する研究

4

## 放射線生物学研究の取り組み

### がん微小環境の形成

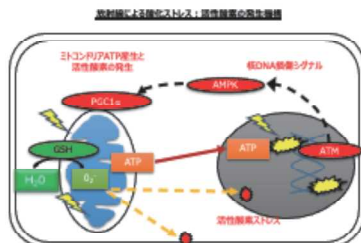


5

## 放射線による酸化ストレスが眼の水晶体の混濁をもたらす

### 放射線誘発白内障の解説

放射線業務従事者への水晶体への被ばくについて



放射線の標的細胞は増殖している細胞で、水晶体では水晶体上皮細胞であると考えられる。

水晶体上皮細胞の放射線によるゲノム損傷や酸化ストレスが放射線誘発白内障を発症する要因で、細胞分裂、細胞移動、分化の異常を引き起こすと考えられる。

放射線は、酸化ストレスによるクリスタリンの構造異常で変質し、クリスタリンの凝集で水晶体の混濁を引き起こすと考えられる。

労災疾病臨床研究事業費補助金「緊急被ばく医療が必要とされるような事故発生時におけるトリアージのための線量評価手法の確立に関する研究」平成27,28,29年度 報告-分冊研究報告書

6



## EU での ICRP 勧告の影響の分析例[1]

### EU の医療分野での取り組み

改正された BSS では、眼の水晶体の等価線量が 15mSv/年を超える可能性が高い作業者は、カテゴリーA に分類される。このような作業者は個別の線量測定が必要となる。このため新しい線量計の導入が必要となりコストがかかることになる。この中でも線量が高い労働者は、眼の水晶体に特化しただけ質の高い線量計を必要とする。対策を講じて医療現場では作業者の線量が限度を超えることが予想される。

よりよい線量測定技術の導入には、必然的に金銭的なコストが発生するが、これは健康への潜在的な利益という観点から見るべきであり、長期的には結果としてある程度の節約をもたらすことも期待できる。しかし、これらの効果を予測することは現時点では容易ではなく、完全な効果が実現されるまでには何年もかかるであろう。英国内では、新しい規制を遵守するために必要な初期費用は、医療従事者と原子力作業員の両方の設定で約 800 万ポンドと考えられている。これを実施するためには、30 年間で約 2,400 万ポンドかかると見積もられている。また、欧州放射線学会は最近、「欧州指令 2013/59/ユーラトムの概要：放射線医学における医療専門家のためのエッセンス」を発表し、放射線科が新 BSS 指令によって具体的にどのような影響を受けるかの概要を示している。

BSS と ICRP の眼の水晶体の等価線量に関する勧告の改訂に対応して、英国に拠

点を置く HSE は、影響を受ける人々への影響を概説した報告書を作成し、変更の費用と便益について報告した。この報告書は [www.hse.gov.uk](http://www.hse.gov.uk) に掲載されており、同様の評価を実施している国や近い将来に評価を計画している国にとっても有用である。英国に関連する主要な知見のいくつかを要約すると、HSE は、眼の水晶体の等価線量が高くなる人は比較的少数であると予測しているが、推奨線量限度を超える持続的な曝露が発生した場合には、一部の作業が禁止される可能性があると警告している。最適化された眼の水晶体の等価線量の評価用の線量計を用いた更なるモニタリングを取り入れることで、この問題は改善される可能性がある。2012 年の改定線量限度は、国際原子力機関 (IAEA) が発行した文書「眼の水晶体に対する新しい線量限度の職業放射線防護への影響」(TECDOC 番号 1731) にも盛り込まれており、HSE のガイダンスやインパクトノートは、それとも整合性が取られている (これらの動きは ICRP 勧告が IAEA の GSR part3 の改訂のプレッシャーも受けて出されたことを推測されるものともなっている)。

白内障手術は、負担が小さくリスクも小さいが、患者の約 4 分の 1 では挿入された人工水晶体により、後嚢胞混濁が誘発され、さらなる治療が必要になる ([www.visionaware.org](http://www.visionaware.org))。米国だけでも、メディケアは白内障摘出の費用を年間 36 億ドルと見積もっており、視覚障害の 60% を占めている。

改訂された水晶体の線量限度に対しては、遵守が困難であるとの懸念があるが、最近

の調査では、55%が眼の水晶体の等価線量の線量モニタリング調査にある程度積極的に参加していることが判明している。Public Health England が行った、3つの放射線科に勤務する英国人労働者を対象に実施した研究では、1000件以上の個別の手技を行った3つの放射線科の労働者が、Public Health England の個人線量測定サービスから入手できる最適化された眼の水晶体線量計を使用していた。また、コンプライアンスの可能性を評価するために、関連した質問票が含まれており、このパイロット研究には合計68人が参加したが、そのうちの2人は保護眼鏡を使用していなかったにもかかわらず、年間20 mSv以上の外部線量を受けたのは2人だけであった。これらの施設では、すでに確立された高い基準で放射線防護が行われており、高いレベルのPPEの意識と使用状況が明らかになった。特に小児科では、操作者と患者との密接な個人的な接触を必要とする画像診断技術が増加しており、処理能力と技術が向上するにつれて、線量制限を超えるリスクが潜在的な危険性となる。教育と訓練に加えて、眼の水晶体の等価線量の線量モニタリング、PPEの利用は、作業員の放射線防護を確実にするために最も重要である。

さらに、眼の水晶体の等価線量限度の見直しは、放射線防護に関する意識の向上や現場での訓練、あるいはコンプライアンスを確実にするための新しい線量測定と放射線防護措置の導入など、肯定的な形で、ほとんどの放射線作業員に影響を与えることになるだろう。勧告は、欧州全域に関連し、国際的な議論も巻き起こすであろう。HSEは、これらの新しい線量限度は、職業上の医療

被ばくだけでなく、原子炉容器への立ち入り、燃料の解体、産業用放射線撮影など、原子力部門で働く人々にも影響を与える可能性があるという指摘も行っている。個人レベルでは、教育、保護、モニタリングで目標を達成しない場合、作業パターンの変更が必要になるかもしれない。

#### 眼の水晶体の等価線量のモニタリング

IVRに従事する循環器科医が受ける眼の水晶体の線量が、新しい眼の水晶体の等価線量量の上限である20 mSv/年に近いのか、それを超えている可能性があると考えられる。

線量のモニタリングが適切に行われているかどうか確認するためには、現在の線量測定方法の変更が必要である。医療従事者とファントムの両方を使用することは、被ばく線量のデータを提供するだけでなく、モニタリング技術の適合性をテストするのにも有用である。一般的に、標準的なモニタリング方法は胸部に線量素子を装着して全身の線量を表示するものであるが、眼の水晶体の等価線量のモニタリングでは工夫が必要である。

前述したように、放射線作業員が受けた職業上の線量は、従来、作業の性質に応じて、身体または四肢のいずれかに1つまたは複数の線量素子バッジを装着してモニターされてきた。眼の水晶体の等価線量に関連した測定技術、すなわちHp(3)組織等価線量計を用いた最適化された線量計の必要性は以前から提起されており、現在、眼の水晶体の等価線量のモニタリング用に特別に開発され最適化された線量計が利用可能になり始めている。特に懸念されるのは、水晶体の

構造や組織組成の性質など、水晶体が持つ固有の特性を考慮した線量計の必要性である。ORAMED プロジェクトは、Radcard TLD 線量計（ポーランド、クラクフ）と共同で、眼の線量計に適した可能性のある EYE-D を開発した。EYE-D は、眼の水晶体の等価線量モニタリングに特化した最初の線量計の一つで、眼球に隣接した細いヘッドバンドに装着することができます。10 $\mu$ Sv という最低レベルの検出が可能なこの装置は、眼の水晶体の正確な被曝線量を達成するための一つの解決策であり、実用的な装着性も備えている。この線量計はテストされ、校正されている。アイルランドの別の施設にある 2 つの内視鏡部門の合計 12 人のスタッフが、内視鏡的逆行性胆管膵管造影検査の手順の間に線量計を着用し、この線量計は、眼の水晶体の等価線量をモニターするための実用的で効果的な手段であることが確認された。Mirion Technologies社は現在、EYE-D と同様の方法で装着する眼の水晶体の等価線量を評価するための線量計も発売している。国の Public Health England によって製造されたこれらの製品は、Hp(3) 線量等価測定法を組み込んだ線量計の別の例を示しており、線量測定を選択肢をさらに拡大している。

しかし、このような特別な線量計は、眼の水晶体の等価線量が大きくなる可能性がある場合にのみ適応される。実際、頭頸部のモニタリングや他の線量計で十分な場合もある。最近発表された調査では、多くの臨床スタッフが日常的に使用しているアクティブ個人線量計（APD）の使用が提案されている。この方法では、個人的な線量測定を追加

または変更する必要はないが、より高度な分析が必要である。この研究は、1 人の循環器内科医と 3 人の看護師によるものであるが、データは、この技術が現実的で実現可能であり、年間推定線量の精度を高めるであろうことを示唆しており、APD を忘れてしまった手技にフラグを立てるという付加的な利点があるため、スタッフにいつどこで追加トレーニングが必要になるかを示すことができる。いずれにしても、リスク評価には、着用時の素子の理想的な位置に関するガイダンスを含めるべきであり、理想的には、眼の水晶体の代表的な被曝量が得られるように線量計を頭や首の側面に配置することである。

既存の眼の水晶体の線量計の測定モデルと同様に、報告された症例や予測される線量限度を超える症例の発生率は、眼の線量計だけではなく、新しいアプローチや確立された眼の保護方法の更新が必要であることを示している。例えば、フランスのインターベンショナル心臓病専門医の大規模なコホートで実証されたように、鉛製の保護眼鏡を定期的に使用することで、白内障を発症するリスクを大幅に減少させることができる。例えば、天井に取り付けられた鉛を使用した顔面遮蔽は、水晶体の線量を大幅に低減することが証明されている。水晶体を遮蔽するために鉛入り眼鏡のような保護眼鏡を使用することが推奨されてきたが、眼鏡の種類によって達成される線量低減のばらつきを強調する多くの研究があることに留意すべきである。最近の研究では、最も一般的に使用されている 2 つのスタイルの鉛入りメガネによる線量低減の効率を評価し、

スポーツスタイルのラップアラウンドメガネの方が線量低減に有意に優れていることが示された。このことは、眼鏡を使用して線量を低減する際の制限要因の1つが額によって生じる後方からの散乱であるという考えを支持している。従って、「よりタイトなフィット感」の製品が有益であるだろう。眼の水晶体の線量制限の低減を考えると、眼の保護はさらに重要であり、最も効果的な保護手段と装用の実用性とのバランスは、高いレベルのコンプライアンスを確保するために、さらに調査されるべきである。

現実的なレベルでは、新規/変更された個人線量測定、保護具、および教育にかかる費用は多額になる可能性があるが、国内法での施行後には、すべての放射線作業員の雇用者が新しいBSS（指令2013/59/ユーラトム）に準拠することが法的に求められるため、このような費用を回避することはできない。

さらに、眼の線量計は装着可能なものでなければならないが、商品によっては、正しい使用についての追加のトレーニングを必要とする場合がある。

眼の水晶体の等価線量のモニタリングへの投資の増加と保護対策の改善の恩恵を十分に受けるためには、影響を受けた労働者を対象とした大規模な研究での検証が非常に重要である。また、低線量放射線が放射線誘発性白内障の誘発に与える影響に関して、より多くの研究が行われていることも、将来の対策に生かすことができるだろう。

## 考察と結論

2Gy未満の放射線量が臨床的に関連性のある白内障を誘発することを示すヒトの研究の数と質の向上を受けて、ICRPは労働者の眼の水晶体の等価線量の線量限度の勧告を見直し、その後、勧告を引き下げた。新しい制限値は0.5Gyの新しいしきい値に基づいているが、ICRPは特にしきい値なしのモデルの可能性を排除していない。ICRP 118 (2012)によると、医療機関での放射線業務従事者が職業的被曝の結果、白内障を発症する可能性があることが示唆されている。

さらに、医療部門で職業的に被曝している人の眼の水晶体の等価線量は、特にインターベンショナル放射線技師や循環器科医の場合、年間20 mSvを超える場合もあるとされている。このように、医療分野の労働者は、EU/ICRP勧告の新しい規制線量限度が他の場所で実施された場合、遵守できなくなるリスクを負う可能性が高い。

疫学的証拠は、例えば初期の水晶体変化を調査した少数の動物研究によって裏付けられている。しかし、放射線による白内障の発生および発生の特定の段階についての理解は最近進歩しているが、放射線による白内障発生が放射線防護目的の確率的な影響として最も適切に捉えられるか、それとも決定論的な影響として捉えられるかなど、関連する問題について結論を出すことはまだ困難である。初期の低線量効果と臨床的に関連する不透明度への進行について、長い潜伏期間と遺伝的背景の潜在的な影響を考慮に入れて、より多くの研究を行う必要があるというICRPの見解を支持するしかな

い。

現実的には、EU加盟国は現在、改訂 BSS に盛り込まれた ICRP 勧告を遵守しなければならず、それ以外の国では現在検討が進められている。BSS/ICRP 勧告の遵守を支援するために、効果的な削減、保護、モニタリング、線量測定のための戦略が用意されている（アクション・レベルに近づく可能性のある労働者のため眼の水晶体の等価線量のモニタリングを含む）。しかし、コンプライアンスを確実にし、プロスペクティブな疫学研究を支援するために年間の線量に関する信頼性の高いデータを得るためには、眼の水晶体の線量モニタリング技術を改良し、標準化する必要がある。

医療機関での放射線業務従事者の教育と訓練、特に保護とモニタリングの必要性、白内障発症の影響（PPE の使いやすさ、白内障治療にかかる費用と術後のリスク）の観点から注意を払うべきである。しかし、ICRP のレビューと勧告のプロセスの中で最も着目すべき成果の 1 つは、放射線防護と医療界において、水晶体被曝の重要性に対する認識が高まったことである。これは、2011 年以降、眼の線量モニタリングと関連する研究が増加していることに反映されている。

このほかにも、機序に関する知識のギャップをどのように解決するのが最善か、また、残された研究課題の解決に向けて、ヒトを対象とした研究をどのように行うべきかなど、他の研究で詳細に検討されている問題がある。また、白内障の発症から発症までの

潜伏期間についても十分に理解されていない。

まとめると、2018 年 2 月までに、すべての EU 加盟国において、医学的に被曝した放射線作業者が改訂された BSS を遵守することが期待されている。これは、適切な線量測定と保護が適用されれば、EU 域内では可能性が高いと思われる。本レビューの情報は、ICRP 勧告（2012 年）を検討している他の国が、自国の放射線防護の法的根拠を定義するために参考になるかもしれない。今後数年の間に、低線量被曝に焦点を当てた本レビューやその他の研究で提起された放射線障害の発生に関する疑問に答えるためのさらなる研究と結果が期待されており、白内障の発現に至るまでの不透明性の潜伏と進行のメカニズムの初期変化がどのように影響するのかを明らかにするべく研究も進められている。本誌およびその他の最近の論文で提起された科学的小および実用的な問題の概要を表 2 に示す。この表は、本文中で強調されているように、行動のための提案および推奨事項を示している。

表 2 このレビューの結果、提起された問題点と提案された行動の「一目でわかる」概要

問題	アクション
眼の水晶体の等価線量限度の低減	眼の線量を長期間にわたってモニタリングし、影響を評価する。
作業スケジュールに影響を与える可能性がある	保護的な線量低減対策を充実させることで、労働時間の短縮が回避できるはず。
眼の水晶体の線量を効果的にモニタリング	放射線防護の専門家は、以下のことをアドバイスする。 定期的なモニタリングと記録保存のためのモデルを提供する 特に重視するのは、1年間で15 mSv以上の線量を日常的に受けている労働者。
個人用保護具	変更が必要な場合がある。 適切なPPEの再評価を徹底 効果的かつ日常的に着用する。
人材育成と意識改革	労働者に眼の水晶体防護の重要性を認識させるための研修(法的・健康上の根拠の説明) 保護眼鏡の重要性と防護具の使用のコンプライアンスに関する研修 白内障発症の影響についての認識
低線量放射線の影響と線量率？	線量/線量率効果の大きさ 労働者コホートを将来に向けてフォローアップ

PPE, personal protective equipment. (個人防護具)

ASN による放射線防護の視察報告書 1

ナントにて、2019年2月21日

参照番号：CODEP-NAN-2019-008332

総責任者  
アンジェ大学病院  
所在地：4, rue Larrey  
49833 Angers CEDEX 9 (アンジェ、  
フランス)

**目的：** 放射線防護の視察 (2019年2月1日付、番号：INSNP-NAN-2019-0785)  
設備：アンジェ大学病院核医学部  
2017年7月25日に交付された許可M490004・CODEP-NAN-2017-030024

**参考資料：** 環境法典、特に第L.592-19条及びそれ以外の条項  
公衆衛生法典、特に第L.1333-29~31条及び第R.1333-166条  
労働法典、特に第4部第4巻  
2019年1月31日に報告された放射線防護に関する重大事象 (Evénement  
significatif de radioprotection) : ESR No. ESNPX-NAN-2019-0068

総責任者殿

参考資料に言及されている原子力安全当局 (Autorité de Sécurité Nucléaire : ASN) の権限において、放射線防護の管理に関して、参考資料に示されたESRの発生を受けて、2019年2月1日にあなたの施設において視察が実施されました。

視察の総括、及びその結果発生した主な要請と観察事項を以下にお知らせします。

労働法典の遵守に関する要請と観察事項は雇用者又は使用者である企業者の責任に属しますが、公衆衛生法典の遵守に関する要請と観察事項はASNにより交付される許可の取得者の責任に属します。

**視察の総括**

2019年2月1日の視察は、あなたの施設の核医学部の放射性医薬品取扱いはまだ同じ職務で同じ部署に配置されており、電離放射線に曝露していた。産業医は、放射性核種をもう扱わないことを条件として、超過が確認された日 (すなわち2019年1月25日) から数えて12か月にわたり、この放射性医薬品取り扱い薬剤師を核医学部に留めること

最後に、2019年11月のリング型線量計に記録された曝露期間の終了時に、放射性医薬品取扱いは四肢に723 mSvの等価線量を浴びていた。視察当日に、彼女は

年1月4日) 伝達された。

この線量限度の超過は、核医学部により実施された調査の対象となったが、この段階においては、これらの調査により過剰曝露の原因となったインシデントを特定することはできなかった。

この視察の目的は、この過剰曝露を引き起こした可能性のあるインシデントの潜在的な原因を理解し、不具合分析の質を検討し、実施された即時是正措置及びそれらの妥当性を確認することであった。

視察により、放射性医薬品取り扱い薬剤師、放射線防護監督者、核医学部長 (放射性医薬品取り扱い薬剤師でもある) 及び産業医との話し合いが可能となり、問題の医師の仕事場を訪問することができた。

視察により線量限度の超過の原因となったインシデントの起こった正確な状況を確定することはできなかったものの、それに対し、線量計測装置の管理及び分析に関する不具合を明らかにすることができた。また視察により、放射性医薬品の取扱いは後における汚染の不在の点検及びこれらの点検の記録に関する改善の基本方針を同定することもできた。

従ってこれらの不具合を鑑み、施設は曝露を受け分類されている労働者による線量計の装着の追跡、及び線量計の管理 (装着時間の遵守及び規則により定められた定期間隔での検査機関への返送) を強化しなければならぬ。

また、線量計の読取り結果の分析のために放射線防護監督者に割り当てられる時間は、十分であるとともに、施設において追跡される労働者の数 (大学病院内で約600人が分類されている) に適するように変更しなければならない。

さらに、検出線量計により計測された線量超過が起こった場合に、それを部署のレンジスターにおける検出の記録により裏付けるために、施設は汚染の不在の確認及び関連記録の手順に関する指示の遵守を確保しなければならぬ。

指摘された所見及び実施すべき措置を全て、以下に詳述する。一部の所見は既に、核医学部及び電離放射線を用いたX線透視ガイド下インターベンション手術が行われる手術室においてASNにより実施された前回の視察の際に、是正措置の要請の対象となっていた。一部の是正措置の要請は優先措置の要請であり、前回の視察の際に施設が負った義務で、これらの点について果たされていない又は極めて部分的にしか果たされていないものである。

ASN は、採用された是正措置の具体的なかつ効果的な整備を注意深く監視する。

最後に、2019年11月のリング型線量計に記録された曝露期間の終了時に、放射性医薬品取扱いは四肢に723 mSvの等価線量を浴びていた。視察当日に、彼女は

**A-1 是正措置の要請**

**A.1 規制で定められた年間曝露量の線量限度の超過**

労働法典第 R.4451-6 条に準拠し、労働者の電離放射線への曝露量は、「...略...」臓器又は組織について、対応する等価線量に基づき評価される以下の線量限度を超過しないこととする：a) 四肢及び皮膚については連続 12 ヶ月にわたり 500 mSv。皮膚については、曝露した表面がどこであれ、この線量限度は 1 cm<sup>2</sup> の全表面における平均線量に適用される。  
[...略...]

労働法典第 R.4451-80 条に準拠し：

- I. 労働者の曝露量が第 R. 4451-6 条、第 R. 4451-7 条及び第 R. 4451-8 条に定められている線量限度のいずれかを超過する場合は、雇用者は以下を目的として直ちに措置を取る：
- 1° この曝露を中止させる。
  - 2° 線量限度超過の原因をできるだけ早く突き止める。
  - 3° 労働者が浴びた実効線量及び等価線量、並びにそれらの体内分布の評価を行う。
  - 4° それに応じて、新たな超過が起きるのを防ぐための予防措置を調整する。
  - 5° 実施された予防措置の有効性を確保するために、第 R. 4451-40 条及び第 R. 4451-44 条に規定される初期検証を実施する。或いは、放射性物質の輸送作業の際に使用された車両に開示される状況の場合は、第 R. 4451-44 条 I の 1° に規定される確認、及び該当する場合は 2° に規定される確認を実施する。

II. 雇用者は、社会・経済委員会、並びに第 L. 8112-1 条に言及される労働視察点検官、または場合により防衛関連の設備及び活動に関する原子力安全当局又は原子力安全性及び放射線防護の代表者に対し、推定される原因、状況及びこのような超過の再発を防ぐために計画された措置を明確にして、情報を提供する。

視察当日に、視察官に新たな超過の発生を防ぐためのいかなる予防措置も提示されなかった。

**A.1.1 このような事象が繰り返すのを防ぐための予防措置をこちらに伝達し、それらの措置を取るよう要請します。**

過剰曝露の事象の発生後、予防措置の有効性を確保するためにいかなる初期検証も計画されなかった。

**A.1.2 放射性医薬品取扱員・薬剤師の仕事場の初期検証を実施するよう要請します。**

放射線防護に関する重大事象が 2019 年 1 月 31 日に ASN ホームページの速報報告サイト上で報告された。社会・経済委員会（又は、衛生・安全性・労働条件委員会）及び労働視察点検官への情報提供は、視察後になされた。事象の原因及び状況、並びに施設により取られ

**A.1.3 インシデント発生後 2 ヶ月以内に、以下をこちらに送るよう要請します。**

- この事象について OSE (又は CHSCT) に伝達された情報の写し 1 部
- ASN のガイド No.11 に明記された情報をまとめたインシデント報告書。このような事象が再現しないように、この事象を引き起こした可能性のある根本原因を調査して、あなたの考察結果をこちらに通知して下さい。

**A.2 四肢の受動型線量計の収納**

2013 年 7 月 17 日付の法令の附属書 I のポイント 1.2 に準拠し、装着時間外には線量計は、線量測定機関により定められた条件に従って保管される。施設内では、各保管場所に対照線量計がそのように識別されて常時納められる。この線量計は作業者用ではなく、他の線量計と同じ活用手順の対象となる。

部署の訪問時に、放射性医薬品取扱員・薬剤師の四肢線量計が業務終了時に対照線量計のそばに戻されることは決まっていなかった。一日の終わりに線量計は、単に彼らの机の上に置かれていた。

**A.2 記名された線量計測装置 (特にリング型線量計) が、装着されていない時には「対照」線量計のそばに収納されていることを確認するよう要請します。**

**A.3 線量測定追跡**

労働法典第 R.4451-66 条～第 R.4451-72 条は、線量計測結果の連絡及び活用の方法を定義している。

視察の際に視察官は、線量計測結果が厳格な追跡及びび分析の対象とされていないことを確認した (この放射性医薬品取扱員・薬剤師に関する四肢線量計及び能動型線量計の読取りが数ヶ月間欠けている)。

**A.3 産業界と連携して、曝露した従事者の線量計測結果の追跡及び活用に関してあなたの組織を強化するよう要請します。**

この要請は既に、2017 年 5 月 16 日に行われた核医学部の前回視察の際に述べられている。

**A.4 受動型線量計の送付**

電離放射線に曝露する労働者の医学的追跡カルテ及び線量測定追跡に係る 2013 年 7 月 17 日付の法令第 13 条に準拠し、雇用者は、装着期間の終了後直ちに、遅くともこの期間の終了後 10 日以内に線量計が線量測定機関に送られるようあらゆる措置を講じる。それが技



異常な曝露が疑われる場合は、雇用者はそのことを線量測定機関に伝え、及び線量計を受領後すぐ術的に不可能な場合は、雇用者はそのことを線量測定機関に伝え、及び線量計を受領後すぐに遅延なく送付する。[...]

異常な曝露が疑われる場合は、この曝露が遅延なく評価できるように雇用者はあらゆる措置を講じる。

視察官は、2018年11月のリング型線量計が2019年1月4日にしか分析のために検査機関に送られなかったことを指摘した。PCRはさらに、2018年12月の線量測定リングが2019年1月28日に線量測定機関に送られたことを示した。

**A.4 受動型線量計がそれらの装着期間の終了後すぐに、遅くともこの期間の終了後10日以内に線量測定機関に送付されるために講じられた措置をこちらに示すよう要請します。**

#### **A.5 放射線防護ユニット専用の手段**

労働法典第 R. 4451-112 条及び第 R. 4451-114 条に準拠し、雇用者は本章に規定される予防措置及び予防手段の実行のために放射線防護における顧問を1名以上任命する。

この顧問は以下を満たすこととする。

- 1° 「放射線防護監督者」と呼ばれる自然人で、施設から（もしくは、なければ企業から）給与を支払われていること。
  - 2° 「放射線防護監督機関」と呼ばれる法人であること。
- 複数の放射線防護監督者が任命される場合は、適当な機能手段を備えた内部団体の中にとめられる。

本大学病院の電離放射線を用いた手技を実践する他部署における ASN の前回の視察の際に既に強調されたように、放射線防護監督者は委ねられたタスク（廃棄物の管理、線量計の分配及び回収）を行うために、彼らの任務（特に個人線量計の読取りの分析）を遂行するために必要な時間が残っていないことがわかる。

**A.6 放射線防護ユニットがその全任務を果たすために十分なリソースを備えているように、適当な措置を取るよう要請します。**

この要請は既に、2018年11月27日、2017年9月6日及び2015年8月17日に行われた X 線透視下インターベンションの実践における前回視察の際に述べられている。

#### **A.6 人員及び物体の放射線学的管理**

2006年5月15日付の法令第 25 条第 1 節に準拠し、密封されていない放射線源の全周囲が労働者と接触しないようにするために、施設長は必要に応じて必要な手段が使用できるようにしておく。

2006年5月15日付の法令第 26 条に準拠し、汚染リスクがある場合は、管理ゾーン及び監視ゾーンにはその出口に人員及び物体の放射線学的管理装置が設置される。これらの装置（特にそれらの測定閾値）は、存在する放射性核種の特徴に適したものである。施設長は、装置の使用に適用される手順、及び人員又は物体の汚染が起きた場合に必要となる手順を、人員及び物体の管理ポイントに表示する。適当な除染機器を整備しなければならぬ。

注意：労働法典第 R. 4451-34 条に予定された法令が発せられていないため、前出の 2006年5月15日付の法令が適用される。

視察官は、放射性物質を扱う検査機関において、人員及び物体の放射線学的管理装置を労働者が使えるように用意されていないことを確認した。視察官は、特に表面又は物体（シリンジ、シールド、線源輸送に用いられる資材、遮蔽ごみ箱、調製用遮蔽壁等）の汚染を検出し、それにより核医学部内で起きた汚染の拡散を防ぐために、放射性医薬品の調製が実施される検査機関内に汚染検出器を設置することの有用性を呼びかけた。

**A.6.1 汚染リスクがある場合に人員及び物体の放射線学的管理を実施するために必要な手段、並びに適当な除染機器を、放射性物質を扱う検査機関の労働者が使用できるようにしておくよう要請します。**

また視察官は、放射性医薬品取扱員薬剤師が汚染を知ったことを指摘したにもかかわらず、彼女が核医学部の出口にあるハンドフットクロスマニタの近くに備えられている汚染記録簿には何ヶ月も前から記録をしていないことも確認した。

これらの発生が記録されていないことから、2018年11月に線量測定リングにより計測された線量超過をこの同じ期間に起こった事象として裏付けることは不可能である。

**A.6.2 規則により管理されたゾーンの出口において人員の放射線学的管理が全従事者に対して常に実施されるために、また事象の発生が体系的に記録されるために、必要な措置を取るよう要請します。**

#### **B-情報の要請**

なし

本書簡の附属書に、優先度による要請の分類を示します。

これらの点に関するあなたの観測事項及び回答を、附属書に言及されている優先措置の要請に関連して別途記載がある場合を除き、2ヶ月以内にお知らせ下さい。あなたが負うことになる義務について、それらを明確に特定し、それぞれについて提案する実施期限を附属書に記入するよう要請します。

最後に、環境法典第 L. 125-13 条の規定により制定された透明性及び一般への情報提供の手続きに準拠して、本書簡は、ASN のホームページ ([www.asn.fr](http://www.asn.fr)) 上にオンライン掲載される予定であることをお知らせします。

以上につき、よろしくお願い申し上げます。

地域代表

署名者：

Annick

BONNEVILLE

**書簡 CODEP-NAN-2019-N°008332 の附属書  
実施すべき措置の優先順位**

**アンジェ大学病院・核医学部**

ナント支局により 2019 年 2 月 1 日に実施された点検において行われた様々な検証により、該当する要件を満たすことができるために実施すべき措置の優先順位が確立された。本書簡で述べられている要請は、それらが呈する問題に応じて以下のように分類される。

**- 優先措置の要請**

逸脱の重大性、及び/又はそれらの再発を考慮して、行政上又は刑法上の帰結としての義務を侵害することなく、ASN(原子力安全当局)により定められた期限内に優先措置を必要とするもの。

取り組まれたテーマ	実行すべき是正措置	ASNにより定められた実施期限
A.1 規制で定められた年間曝露量の線量限度の超過	A.1.1 このような事象が繰り返されるのを防ぐための予防措置を伝達し、実施する。	1 ヶ月
	A.1.2 放射性医薬品取扱員薬剤師の仕事場の初期検証を実施する。	直ちに
	A.1.3 インシデント発生後 2 ヶ月以内に、以下を送付する： - この事象について CSE (又は CHSCT) に伝達された情報の写し 1 部 - ASN のガイド No.11 に明記された情報をまとめたインシデント報告書。このような事象が再現しないように、この事象を引き起こした可能性のある根本原因を調査して、あなたの考察結果をこちらに通知すること。	2019 年 3 月 25 日
A.3 線量測定追跡	産業医と連携して、曝露した従事者の線量計測結果の追跡及び活用に関する組織を強化する。	2 ヶ月

<b>A.4</b> 受動型線量計の送付	受動型線量計が装着期間の終了後すぐに、遅くともこの期間の終了後 10 日以内に線量測定機関に送付されるために講じられた措置を示す。	2 ヶ月
<b>A.5</b> 放射線防護ユニット専用の手段	放射線防護ユニットがその全ての任務を果たすために十分なリソースを備えているために、適切な措置を取る。	2019 年 3 月 31 日

- 計画的な措置の要請  
 措置を実施する者より提案されるスケジュールにより、是正措置又は計画的な伝達を必要とする。

取り組まれたテーマ	実行すべき是正措置	提案されるスケジュール
<b>A.2</b> 四肢受動型線量計の取納	記名された線量計測装置（特にリング型線量計）が、装着されていない時には「対照」線量計のそばに取納されていることを確認する。	
<b>A.6</b> 人員及び物体の放射線学的管理	A.6.1 汚染リスクがある場合に人員及び物体の放射線学的管理を実施するために必要な手段、並びに適当な除染機器を、放射性物質を扱う検査機関の労働者が使用できるようにしておく。	
	A.6.2 規則により管理されたゾーンの出口において人員の放射線学的管理が全従事者に対して常に実施されるために、また事象の発生が体系的に記録されるために、必要な措置を取る。	

- その他の是正措置  
 確認された逸脱は中等度の問題を呈し、適当な是正措置を必要とする。

なし

ヴァンセンヌにて、2018 年 2 月 12 日

ASN による放射線防護の視察報告書 2

参照番号：CODEP-PRS-2018-006441

ドラフオンテーム病院  
 所在地：2 rue du Docteur Pierre Delafontaine  
 93200 SAINT-DENIS (サン・ドニ、フランス)

目的：放射線防護に関する視察  
 設備：X線透視下手術

視察 ID 番号：INSNP-PRS-2018-1076

- 参考資料：
- [1] 環境法典、特に第 L. 592-19 条及びそれ以外の条項
  - [2] 公衆衛生法典、特に第 L. 1333-17 条及び第 R. 1333-98 条
  - [3] 労働法典、特に第 4 部の第 4 卷
  - [4] 2017 年 10 月 20 日に ASN(原子力安全当局)に報告された放射線防護に関する重大事象 (Evenement significatif de radioprotection: ESR) No. ESNPX-PRS-2017-0612
  - [5] 私からの 2018 年 1 月 15 日付の視察通知書簡 (参照番号：CODEP-PRS-2018-003511)

前略

参考資料に言及されている原子力安全当局 (Autorité de Sûreté Nucléaire: ASN) の権限において、放射線防護の管理に関して、参考資料に示されたこの ESR(放射線防護に関する重大事象)の発生を受けて[4]、2018 年 1 月 24 日にあなたの施設において視察が実施されました。

視察の総括、及びその結果発生した主な要請と観察事項を以下にお知らせします。

労働法典の遵守に関する要請と観察事項は雇用者又は使用者である企業の責任に属しますが、公衆衛生法典の遵守に関する要請と観察事項は ASN(原子力安全当局)により交付される許可の取得者の責任に属します。

**視察の総括**

この視察は、CT 下でインターベンション手技を実施する放射線科医における規制により定められた四肢への線量限界値の超過に関連した放射線防護に関する重大事象 (ESR) の報告[4]を受けて実施された。この医師は、2017 年第一四半期において四肢に 502.83 mSv の線量を浴びた。この事象は 2017 年 9 月に初めて、リング型線量計の読取りを行

この視察の目的は、この ESR の発生につながった一連の出来事をより良く理解し、不具合の分析の質、実施された是正措置の妥当性、及びこれらの措置の評価方法を検討することであった。そのため ASN は、問題の医師の実践を評価するため、また場合によっては勧告を作成するために、放射線医学専門家のサポートを要請した。より一般的には、この視察により、施設により取り戻されたリスク制御の手順を、特に組織的因子及び人的因子の面で検討することができた。

この視察の際に、放射線透視手技を行う透視装置による患者の治療プロセスに介入する主要な当事者、すなわち病院経営陣の代表者として人事部長、放射線部責任者及び ASN 許可取得者、ESR に関係する放射線科医、新しい産業医、パラメディカル幹部、品質保証責任者、医学物理学者、装置の操作者でもある放射線防護監督者 (Personne Compétente en Radioprotection : PCR)、放射線防護エンジニア、つまり ESR に関係する人々全員との話し合いがなされた。特に ESR の発生後に整備された是正措置について、専門機関による特異的なインタビュの時間が共同で持たれた。

視察官は、施設が視察の当日に、これらの話し合いと調査を容易にするような体制を編成し (文書資料及び求められた情報へのアクセス、視察官が同定した従事者との話し合いの組織)、視察の前に重要な準備作業を実施したことを強調する。

まともとして、施設による ESR の分析は ASN への報告後、迅速に実施された。この分析は詳細であり、透明性のあるものであった。この ESR をもたらした可能性の高い様々な原因について質問がなされ、放射線科チームの全従事者団体が関与した。

視察の際に、施設により実施された ESR の分析を補完し、深めることができた。視察チームが収集した要素より、組織的因子及び人的因子が事象の発生に大きく寄与したことが明らかとなる。

特に、以下に示すように、構造的因子 (組織的脆弱性) 及び文脈上の要因により、放射線透視手技を行う透視装置を用いた手技を実施する放射線科医の四肢に対する線量超過を、遅延なく検出することができなかった。

- 2017 年第一四半期のリング型線量計データが、2017 年 9 月になるまで分析のために検査機関に送付されなかった。
- 2017 年第二四半期の分析のための検査機関への送付がなされた時に、線量計の数の完全性が確認されていないこと。
- 前任の PCR が去り、その後任者が産休に入ってから、2017 年 6 月から 9 月までの間は PCR のポストが空席であったこと。
- 2017 年 7 月以降は、最近になって 2018 年 1 月にパートタイムで後任が就任するまで産業医のポストが空席であったこと。ESR の報告を受けて、別の病院の産業医がこの放射線科医の事例を管理することを承諾した。
- 事務局長のドアの後ろにある受動型線量計、リング型線量計、及び水晶体線量計のボードの位置は、作業セッション後の体系的な保管にとっては好ましくない。
- アラート閾値が存在せず、コンソールで操作する者の啓発がなされていない。

最後に、特に以下に関する文脈上の要因が、放射線科医が四肢に浴びた線量の超過を助長することとなった：

さらに、2017 年第一四半期の四肢の線量計測結果が 2017 年 9 月まで知られていなかっただため、放射線科医は規制により定められた年間限界値の超過後にも継続して 7 件のインタベンション手技を実施し、これによりさらに 35.07 mSv の線量に曝露することとなった。最終的に、この放射線科医は 12 カ月間で 537.90 mSv の累積線量を浴びた。

最後に、特に以下に関する文脈上の要因が、放射線科医が四肢に浴びた線量の超過を助長することとなった：

- 施術者の手を X 線的一次ビームに近づける実践法
- インタベンション手技の際に、動揺及び/又は肥満していた患者に対して放射線科医が遭遇した困難
- 患者が放射線透視手技を行う透視装置による検査を受ける前に、臨床部が前投薬プロトコールの実施において遭遇した困難
- ビームの中に入れるのを防ぐ機器が存在しないこと。
- 放射線透視を用いたインタベンション手技の実施時に、管理ゾーン内に集団防護装備 (特に、含鉛ついで) がいないこと。
- 放射線透視を用いたインタベンションの実践に関するプロトコールが最適化されていないこと。

ESR の分析に基づき施設は、特に四半期毎の線量計の読取りにおける遅延を防止、放射線透視を用いたインタベンション手技に関するプロトコールをアラート閾値の定義を含めて最適化することを目的とした、予防措置及び検出措置を強化するための是正措置を定義し、実施した。このインシデントが発見されたから、この放射線科医は本事例を担当した産業医との合意により、放射線透視手技を行う透視装置の使用を中止した。彼女は職務の再開時には、四半期毎ではなく月一回の受動型線量計による線量測定の対象となることにより、新たに線量超過が起こった場合により早く対応できるように、カテゴリー A に分類されることになる。新しい産業医は、採用直後にこの ESR について説明を受け、イオン化放射線に関連するリスクについて啓発されたことを、視察官に報告した。

また、本事象の分析により、検査開始時に動揺している患者を除外する方法を想定する必要性が明らかになった。

施設は、以下のような複数の是正措置を整備することを選択した：

- 放射線透視手技を行う透視装置を用いた実践法の変更：撮像時に手を遠ざける、必要であれば X 線透過性の使い捨てコックヘルメットを使用する、アラート閾値の整備してアキシシャル撮影をコンピュータ化する、撮像時に管理ゾーンからさらに外に出る。
- 放射線透視手技を行う透視装置を用いた 2 種類の生検プロトコールの最適化
- 放射線透視手技を行う透視装置を用いた手技に関する基準レベル及びアラート閾値の整備

- アラート閾値の超過が起こった場合における医学的追跡手順
- プロトコールの最適化及びコックヘルブツの使用に関する実践を、他の 2 箇所の病院と比較する。
- インターベンションナルラジオロジー (IVR) チェックリストにおける前投薬及び肥満のリスク因子の確認の統合
- 返却されていない線量計の徹底的な点検、及び関係者に対する措置
- 産業医を採用する。
- 返却された返却を確保するための、線量計のボードの位置の変更
- 部署のメモにより、線量計の義務的な装着及び返却の義務を呼びかける。
- より徹底した返却を確保するための、線量計の含鉛メガネの購入
- 放射線科医のための 2 台目のリング型線量計の購入 (6 ヶ月間)
- PCR 代理の任命

この視察により、以下の肯定的な点及び適正実践が示された。

- 視察中にはチーム全体が良く協力し、関係者が ESR の管理に関与した。
- ESR の管理に関与した部署のメンバー全員が透明性及び積極的な対応
- 患者の前投薬の欠陥を検出することを可能とする有害事象の報告システムの存在
- 有害事象の分析を可能とするフィードバック委員会 (Comité de Retour d'Expérience : CREX) の存在
- 品質担当者の方論的サポートに支えられた、是正措置の迅速な整備
- 本 ESR に関係した放射線科医による処方体系的な検証を伴う、放射線透視手技の正当化の原則が考慮されていること
- 産業医の長期におたる不在に対処するための代替手順の整備
- 放射線透視手技を行うエックス線診療室におけるアラート閾値が、作業場所に加えコントロールパネルにも表示されていること。
- 本 ESR に関係した放射線科医が実際に線量計を装着していたこと (受動型線量計、能動型線量計、リング型線量計、さらに水晶体線量計も使用可能であった)。これにより、四肢における線量超過を検出することができた。

しかし、いくつかの点については特別な注意を要する。

- 特に本 ESR に関係した放射線科医に関する作業場の分析の更新
- 特に搬送の制限、及び使用されたプロトコールのアクセス可能な一部のパラメータ (特に kV) と手技実施時にコンソールで作業する操作者の間との減少に関連する、放射線透視を用いたインターベンション手技に際して放射される線量の最適化作業の継続。
- PCR に関する新たな組織が正式に定められていない。

実施すべき措置を全て、以下にまとめると。

## A. 是正措置の要請

### ・ 放射線防護監督部署

労働法典第 R. 4451-114 条に準拠し、雇用者は、管轄者、及び存在する場合は放射線防護監督部署がその任務の遂行に必要な手段を使用できるように用意する。雇用者は、特に製造部門に対して、彼らが完全に必要に起因して自らの任務を遂行できるように施設が組織されていることを確保する。雇用者は、複数の管轄者を任命する場合は、彼らのそれぞれの責任の範囲を明確にする。

視察官に提示された放射線防護における新たな組織の中で、放射線防護監督部署は名義上の PCR、権限移譲の最中である PCR 代理、及び放射線防護エンジニアを基礎とする。しかし、施設レベルでの放射線防護の新たな組織を記載したくないかになる更新文書も視察官に提示されていない。

### A1. 任命された PCR に付与される任務及び手段を明記した組織メモを作成するよう要請します。

### ・ 作業場の分析及び労働者の分類

労働法典第 R. 4451-11 条に準拠し、リスクの評価においては、雇用者は、場合により外部企業の長又はその事業所からは給与が支給されていない労働者と共同で作業場の分析を実施し、この分析は定期的な、また労働者の健康及び安全に影響を与えうる可能性のある条件のあらゆる変更がなされた時に更新される。第 R. 4451-18 条に規定される管理ゾーン内で実施される作業に際し、雇用者は以下を行う。

- 1° 労働者が作業時に浴びる可能性のある集団線量及び個人線量の予測の評価を行わせる。第 R. 4451-103 条の適用により任命される放射線防護監督者に、作業に関する集団線量及び個人線量の目標値を、技術的现状及び実施すべき作業の性質を考慮して可能な限り低いレベルに、またいずれにせよ第 D. 152-5 条、第 D. 4153-34 条、第 R. 4451-12 条、及び第 R. 4451-13 条に規定された限界値を超過しないレベルに設定して定義させる。そのために、作業の責任者は放射線防護監督者に協力する。
- 3° 公衆衛生法典第 L. 1333-1 条に記述された放射線防護原則の遵守を確保する措置を取るために、作業中に実際に浴びた線量を測定及び分析させる。技術的に可能であれば、結果が直ちに読み取れるようにそれらの測定を継続的に実施する。

労働法典第 R. 4451-44 条に準拠し、放射線学的監視及び医学的監視が実施される条件を決定するために、通常の作業条件において年間 6 mSv を超える実効線量、又は第 R. 4451-13 条に定められた曝露量の年間限度値の 30% を超える等価線量を浴びる可能性のある労働者は、産業医の見解を受けて雇用者によりカテゴリー A に分類される。

労働法典第 R. 4451-46 条に準拠し、カテゴリー A に属さないイオン化放射線に曝露した労働者は、彼らの職業活動において、公衆衛生法典第 R. 1333-8 条に定められた線量限界値のいずれかを超える線量をもたらすイオン化放射線に曝露した時点で、カテゴリー B に分類される。

視察官は、放射線透視を用いたインターベンション手技を実施する放射線科医に関する作業場の分析が、ESRの発生後に更新されていないことを指摘した。実際、この作業場の最新の日付は2012年となっており、更新が行われるべきであると言及されている。現在この医師については、その結果実施された医学的監視及び線量計測による監視並びに予防（個人防護具の装着）の措置について結論を下すために、彼女が放射線透視手技を行う透視装置を用いて実際に実施している仕事の業務及び組織に関する仮定を考慮しないで、カテゴリーBに分類されている。

**A2. インターベンション手技の実施中にイオン化放射線に曝露する可能性のある職員について、考慮された仮定を公式化することにより作業場のレビューを行うよう要請します。**これらの調査の結果、労働者の年間曝露量（全身、四肢及び水晶体への線量）が推定され、その結果実施される医学的監視及び線量計測による監視、及び予防（個人防護具の装着）の措置について結論が下されるはずである。レビュー後にこれらの作業場の調査をこちらに伝達してください。

- ・ **放射線透視を用いたインターベンション手技の実施中に患者及び労働者に放射される線量の最適化**

公衆衛生法典第L.4451-1条に準拠し、イオン化放射線に曝露する独立労働者及び雇用者を含む労働者の健康及び安全に対するリスクの予防規則は、同法典第L.4121-2条に規定される予防の一般原則を侵害することなく、公衆衛生法典第L.1333-2条及び第L.1333-3条に記載された人々の放射線防護の一般原則を遵守して定められている。

公衆衛生法典第R.1333-59条に準拠し、同法典第L.1333-2条の2番に言及されているイオン化放射線への曝露時における最適化原則を適用するため、装置の選択、手技の実施、放射線量又は投与された放射性物質の活性の評価に際して、放射線量を合理的にできる限り低いレベルに維持することを目標とする手順及び作業が実施される。

公衆衛生法典第R.1333-69条に準拠し、手技を実施する医師は、通常実施する放射線科手技のそれぞれについて、各装置に関する書面のプロトコルを、第R.1333-71条に規定される手順書を用いて確立する。これらの書面によるプロトコルは、該当する装置の近くに永久的に置かれる。

ASNの総責任者代理は2014年3月24日に、「IVR」においてX線透視ガイド下手技の実施に際してASNに報告された事象の情報」というタイトルで、IVR手技を実施する全部署宛に宛てた回状を出した。

2016年6月13日にASNは関係者一同（AFIB、AFPPE、G4、SPPM、SNITEM及びANSM）の協力を得て、線量最適化の機能がより良く活用されるように、新しい設備の設置時に作業者に提供される教育を強化するためのガイドラインを発表した。これらのガイドラインは、医療施設長及びサブライナーの双方にとって、彼らによる教育の提供を定義し、従事者に教育を施すための基準枠組みとして使用されることとなる。これらのガイドラインはASNのホームページ（www.asn.fr）上に掲載されている。

放射線透視を用いたインターベンションの2種類のプロトコルで使用されているパラメ

ータは、本ESRを受けて最初の最適化の対象となった。これらのプロトコルでは電荷量に関するパラメータ（mAs）の値が低減されたが、視察においては電圧の値（kV）についても、適正な画像の質を維持しながら操作する余地があると判断された。撮像数を40枚に制限するアラート閾値が設定された。これらの閾値は機器のレベルで自動的に調節されたが、これにより閾値を超過した場合あらゆる追加の撮像をブロックすることができる。新たな作業場所及びコントロールパネルを再度初期化する必要がある。アラート閾値位置を調整し、アラート閾値に達しそうな時には放射線科医に通報するために、放射線透視手技を行う透視装置を用いた新しいプロトコルの使用に関する教育を受けていなければならない。

インターベンション手技の際に医師の手がビームの中に入るのを防ぐことができるような実践法については、コップル指子の購入を除いてまだ考察がなされていない。CT検査が最良の条件で行われ、扱いは難しい患者の場合でも医師の手が一次ビームに入るのを防ぐことができるように、患者の前投葉プロトコルを調整するための、部署との考察も開始されていない。

管理ゾーン内には、医師が撮像時に自らを防護できるように含納ついたのでような防護装置も存在していない。

最後に、従事者又は患者のいずれに対しても、線量超過のアラート発生時に対応が取れるようにするよう、放射線透視を用いたインターベンション手技の際に放射される線量の自動収集システムが、施設には存在しない。

**A8. 検査毎に各患者に応じて、それに基づいて新たな最適化を実行できるようなソフトウェアとして使用する標準プロトコルを更新することにより、最適化作業を継続するよう要請します。**また、この作業に医学物理学者及び医師を参加させ、これらのプロトコルを公式化して下さい。その後、採用した規定をこちらに示して下さい。

**A4. インターベンション手技に際して作業者が浴びる線量の制限及び最適化の原則を遵守するための措置を取るよう要請します。**

**B. 情報の補足**

該当なし。

**C. 観察事項**

- ・ **医療従事者の教育**

視察官は、全従事者が労働者の放射線防護について最新の教育を受けていることを確認した。しかし、アラート閾値の設定後に、操作者が放射線透視を用いたインターベンション手技を実施する医師への通報を行うよう正式に啓蒙されていない。この医師が放射線透視手技を行う透視装置に不適格とされる期間を利用して、このような教育を更新することが望

さらに、施設放射線科医は、本 ESR を受けて決定された是正措置を実施するために、基準施設からフィードバックを受けることが有用であろう。実際、行われた手技の規模は小さく、1人の医師によってしか実施されていないため、医師が習熟化を獲得し、適正実践を同僚と共有することが難しくなる。

**C1. 放射線透視手技を行う透視装置で発生した ESR を受けて、規則により管理されたゾーン内で介入を行う可能性のある全従事者が、労働者の放射線防護に関する最新の教育を受けることを勧めます。**

**C2. 基準施設とコンタクトを取って、放射線透視を用いたインタラクティブシミュレーションの実践に関する彼らの経験を共有することを勧めます。**

・ **医学放射線物理学の組織計画 (POPM)**

2004年11月19日付の修正された法令 (arrêté) 第7条に準拠し、公衆衛生法典第 R. 1333-24 条の適用により許可の対象となる設備を設置する施設、また IVR 設備を有する施設においては、同法典第 L. 61241 条の適用により定められた機能に関する技術的条件を侵害することなく、施設長は、本法令第6条の規定に準拠して、施設内における医学放射線物理学組織を記述した計画を決定する。施設長がない場合は、この計画は第6条第1前に定められた条件で定められる。この計画は、公衆衛生法典第 R. 1333-24 条の適用によりイオン化放射線の使用を許可された者により作成された提案を考慮に入れる。この計画は従事者における組織及び必要な手段を定め、特に施設において実施される医療実践、受け入れられる又は受け入れられる可能性のある患者数、技術の特殊性又は複雑性によって実装される制約 (特に作業時間において)、線量計測に関する現在の技能、及び公衆衛生法典第 R. 5212-28 条に言及される機器のメンテナンス及び内部及び外部品質管理のために実行される手段を考慮する。医学放射線物理学の専門家による医療の実施が、医学放射線物理学の専門家、又は施設外部の医学放射線物理学の専門家による医療の実施に委ねられる場合は、その専門家又は機関との書面の協定を作成しなければならない。この計画は、また場合によっては前記に規定される協定は、公衆衛生法典第 L. 1333-17 条に言及される放射線防護視察官が閲覧できるように維持される。

SFPM と共同で、ASN は医学放射線物理学の組織計画 (Plan d'Organisation de la 医学物理学 : POPM) の編纂に関するガイド No. 20 (2013年4月19日付の版) を出版した。

視察官は、操作者により実施される医学物理学的タスクの物理学者による監督及びバリデーションの方法が、POPM に明記されていないことを指摘した。

**C3. 医学物理学の組織計画を完成させ、更新することを勧めます。**

**2 ヶ月間にわたり**、あなたの方の注意事項及び視察事項、並びに上記の確認事項を改善するためにあなた方が取られる措置について知らせて下さい。あなた方が負う義務については、それらを明確に特定し、それぞれについて実施期限を明記して下さい。

これらの要案は全て、次の電子メールアドレスに送信することができます：  
[nantes.asn@asn.fr](mailto:nantes.asn@asn.fr)。特に施設の名前及び視察の参照番号を目的に記載して下さい。

最後に、環境法典第 L. 125-13 条の規定により制定された透明性及び一般への情報提供の手續きに準拠して、本書簡は、ASN のホームページ ([www.asn.fr](http://www.asn.fr)) 上にオンライン掲載される予定であることをお知らせします。

以上につき、よろしくようお願い申し上げます。

**署名者：B. POUBEAU**

# 博士論文

## 診断 CT 撮影時に介助を行う医療従事者の 眼の水晶体被ばく実態調査および放射線防護の実践

Exposure dose to the lens of medical staff who assist in diagnostic CT scans and  
specific measures to reduce the exposure dose

### 診断 CT 撮影時に介助を行う医療従事者の眼の水晶体被ばく実態調査および放射線防護の実践

**目的：**蛍光ガラス線量計 (RPLD) を用いた眼の水晶体線量計の開発を行い、診断 CT 撮影時に患者介助を行う医療従事者の眼の水晶体線量  $H_p(3)$  の実態調査を行い、新しい水晶体等価線量限度 (20 mSv/年) の遵守の可能性を評価した。さらに、CT 撮影介助時の作業環境を踏まえ労働衛生の基本に即った「多重放射線防護」を提案し、その効果を評価した。

**方法：**CT 検査時 ( $n = 98$ ) に患者介助に従事した医療従事者 ( $n = 11$ ; 集中治療医 6 名, 小児科医 2 名, 診療放射線技師 3 名) の眼の水晶体線量  $H_p(3)$  を調査した。RPLD 専用に開発された水晶体線量計を用いて、放射線防護眼鏡の左右内外に RPLD を合計 6 個設置した。また、放射線防護眼鏡やバッグバルブマスク用延長チューブの線量低減率を算出した。

**結果：**眼の水晶体線量  $H_p(3)$  は、放射線防護眼鏡を未着用時、集中治療医: 0.47 (0.12–2.49) mSv/検査, 診療放射線技師: 0.37 (0.07–1.64) mSv/検査, 小児科医: 0.30 (0.15–1.18) mSv/検査であった。集中治療医の年間 CT 撮影介助回数は 74 回で最も多く、予測される年間 CT 撮影介助可能回数は、放射線防護を未実施時 42 回、「多重放射線防護」を実施時 80 回であった。また、線量低減率は、放射線防護眼鏡が 51%、バッグバルブマスク延長チューブが 32% であった。

**考察：**CT 撮影介助時の眼の水晶体線量  $H_p(3)$  を、CT 撮影介助者に提示したところ、高線量の眼の水晶体被ばくに驚き、放射線防護眼鏡の使用率が 100% になった。さらに、CT 撮影介助者に対して労働衛生の 3 管理に即った「多重放射線防護」を実践したことで、労働環境や介助条件が改善され、眼の水晶体線量  $H_p(3)$  を大幅に低減することができたと考える。

**結論：**開発した水晶体線量計を用いることにより、CT 撮影介助者の眼の水晶体線量  $H_p(3)$  の実態調査を実施することができた。特に、CT 撮影時の集中治療医は、介助回数が多く、被ばく線量 (0.47 mSv/検査) も高いため、年間水晶体等価線量限度を超える可能性が非常に高い。しかしながら、適切に「多重放射線防護」を実践することで CT 撮影介助者に過度な負担をかけずに、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。

キーワード：眼の水晶体被ばく線量, 診断 CT 撮影, CT 撮影介助者, 蛍光ガラス線量計, 多重放射線防護, 労働衛生 3 管理

産業医科大学大学院 医学研究科 産業衛生学専攻

Graduate School of Occupational Health,

Graduate School of Medical Science,  
University of Occupational and Environmental Health, Japan

永元 啓介

Keisuke Nagamoto



第1章 序論	1	3-5-2. 等価線量	24
1-1. 研究の動機	1	3-5-3. 実効線量	26
1-2. 研究の背景	1	3-5-4. 防護量と実用量	27
1-2-1. 日本国内における放射線診療実施件数について	1	3-5-5. 外部被ばくによる実効線量	31
1-2-2. 医療従事者の職業被ばくについて	3	3-6. 医療分野における放射線機器について	32
1-2-3. 「診断」を目的とするCT撮影時の患者介助者の問題点	6	3-6-1. 血管造影検査・IVR (Interventional Radiology)	32
1-2-4. 眼の水晶体等価線量限度引き下げについて	6	3-6-2. 透視検査	32
1-2-5. 水晶体線量計について	8	3-6-3. X線CT検査	33
1-3. 研究の目的	10	3-7. 確率的影響と組織反応(確定的影響)	33
第2章 関連研究	11	3-8. 放射線誘発白内障について	36
2-1. ヨーロッパの医療施設で行われた職業被ばく測定に関する報告	11	3-9. 労働衛生の3管理	39
2-2. CTにおける医療従事者被ばく	12	3-10. 外部被ばく防護の3原則	40
2-2-1. 「治療」を目的とするCT透視における医療従事者被ばく	12	3-11. 放射線診療時における医療従事者の放射線防護について	41
2-2-2. 診断CT撮影時の医療従事者被ばくについて	14	3-11-1. 放射線防護衣 (作業管理)	41
2-3. 調査結果のまとめ	17	3-11-2. 放射線防護眼鏡 (作業管理)	43
第3章 研究に関連する基礎的事項	18	3-11-3. 散乱線防護クロス (作業環境管理)	44
3-1. 国際放射線防護委員会 (ICRP)	18	3-11-4. 天吊り型防護板 (作業環境管理)	45
3-2. 放射線防護体系の三原則	19	3-11-5. 放射線防護衝立 (作業環境管理)	46
3-3. 被ばく状況	19	3-12. 個人被ばく線量計	47
3-4. 被ばくの種類	20	3-12-1. 蛍光ガラス線量計 (RPLD)	47
3-4-1. 医療被ばく	21	3-12-2. 光刺激ルミネッセンス線量計 (OSLD)	50
3-4-2. 公衆被ばく	22	3-12-3. 熱ルミネッセンス線量計 (TLD)	51
3-4-3. 職業被ばく	22	3-12-4. 電子式個人被ばく線量計	52
3-5. 放射線防護を行うために必要な線量概念について	24	3-12-5. 半導体検出器	52
3-5-1. 吸収線量	24	第4章 診断CT撮影時の医療従事者の水晶体線量実態調査	54
		4-1. 水晶体線量計の開発	54
		4-1-1. 水晶体線量計開発の必要性	54
		4-1-2. 水晶体線量計の開発経緯	54

5-2. 直接 X 線成分を用いた「空気カーマ-3 mm 線量当量変換係数」算出について.....	83
5-3. 診断 CT 撮影時の医療従事者の眼の水晶体線量実態調査.....	84
5-4. CT 撮影介助者に対する労働衛生 3 管理.....	85
5-4-1. CT 撮影条件の最適化.....	86
5-4-2. CT 検査室内に表示したハザードマップの有効性.....	87
5-4-3. 放射線防護眼鏡.....	87
5-4-4. バックバルブマスク用延長チューブ.....	88
5-4-5. 放射線防護カーテン.....	89
5-4-6. 放射線防護衝立.....	90
5-5. 職種の違いによる眼の水晶体線量 $H_p(3)$ について.....	90
5-5-1. 集中治療医師の眼の水晶体線量 $H_p(3)$ について.....	91
5-5-2. 小児科医師の眼の水晶体線量 $H_p(3)$ について.....	92
5-5-3. 診療放射線技師の眼の水晶体線量 $H_p(3)$ について.....	92
5-6. 多重放射線防護を活用した防護研の提案.....	93
5-7. 本研究の産業衛生学的な意義.....	94
5-8. 本研究の限界.....	94
5-9. 今後の展望.....	95
5-10. 本研究の公開.....	95
第 6 章 総括.....	97
第 7 章 参考文献.....	99

4-2. 調査方法.....	58
4-2-1. 被ばく線量の測定対象.....	58
4-2-2. CT 撮影方法と CT 線量指標.....	61
4-2-3. 被ばく線量測定方法.....	61
4-2-4. 蛍光ガラス線量計 (GD-352M) 感度の方向依存性.....	62
4-2-5. 空気カーマ ( $K_{air}$ ) から眼の水晶体 $H_p(3)$ への変換.....	62
4-2-6. 年間 CT 撮影介助可能回数予測.....	66
4-2-7. 放射線防護具による水晶体線量低減効果の解析.....	66
4-2-7-1 放射線防護眼鏡の水晶体線量低減効果について.....	66
4-2-7-2 バックバルブマスク用延長チューブの放射線防護効果について.....	66
4-2-7-3 放射線防護カーテンの放射線防護効果について.....	67
4-2-7-4 放射線防護衝立の放射線防護効果について.....	67
4-2-8. 統計.....	68
4-3. 結果.....	69
4-3-1. CT 撮影条件の最適化.....	69
4-3-2. 空気カーマ ( $K_{air}$ ) から眼の水晶体線量 $H_p(3)$ への変換.....	70
4-3-3. 蛍光ガラス線量計 (GD-352M) 感度の方向依存性.....	71
4-3-4. 水晶体等価線量の左右差.....	72
4-3-5. CT 撮影介助者の立ち位置と介助内容.....	72
4-3-6. CT 撮影介助者の立ち位置の違いによる眼の水晶体被ばく線量の差.....	74
4-3-7. 職種の違いによる眼の水晶体線量の差.....	75
4-3-8. CT 撮影介助者の放射線防護眼鏡内外の眼の水晶体線量.....	76
4-3-9. 年間 CT 撮影介助可能回数.....	77
4-3-10. 放射線防護眼鏡による眼の水晶体線量低減効果.....	78
4-3-11. バックバルブマスク用延長チューブによる眼の水晶体線量低減効果.....	79
4-3-12. 放射線防護カーテンによる眼の水晶体線量低減効果.....	80
4-3-13. 放射線防護衝立による眼の水晶体線量低減効果.....	81
4-3-14. 症例報告：1 回の CT 撮影介助で高い水晶体被ばくを受けた症例.....	81
第 5 章 考察.....	82
5-1. 開発した水晶体線量計について.....	82

## 第1章 序論

### 1-1. 研究の動機

放射線誘発白内障のしきい線量はこれまで、急性被ばくでは5 Gy、多分割・遷延被ばくでは8 Gyであると考えられてきた[1]。しかし、多くの疫学的研究結果からそれらのしきい線量が大幅に低くなる可能性が指摘された[2-4]ため、国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection: ICRP) は、2011年の組織反応に関する声明で白内障のしきい線量を0.5 Gyに引き下げた。さらに、計画被ばく状況での職業被ばくについて、'定められた5年間の平均で年20 mSv、かついずれの1年についても50 mSvを超えないこと'とする新たな眼の水晶体等価線量限度を勧告した[5, 6]。この勧告以降、我が国でも医療従事者の水晶体被ばくと白内障に関する関心が高まっており、2017年4月には厚生労働省労働基準局より全国の医療施設に対し、現場における被ばく線量低減対策の検討および取り組みを希望する旨[7]が通知された。この通知により、眼の水晶体に受ける被ばく線量(水晶体等価線量)の基準値が、現行法令150 mSv/年の1/7以下へと引き下げられることとなり、高線量の散乱線場で検査に従事する者や適切な放射線防護方法を用いていない者の中には新しい基準値(20 mSv/年)を超える者が発生すると指摘されている。特に、放射線診療の中でもX線CT撮影は医療被ばくが高いことで知られており、胸部X線単純撮影時の実効線量が0.02 mSv[8]に対して、胸部CT撮影時の実効線量は7.8 mSv[9]と高線量な被ばくが報告されている。そのため、CT撮影時に患者介助を行う医療従事者の眼の水晶体被ばく線量は、非常に高い被ばくを受けていることが予測される。

そこで本研究では、放射線診療時の眼の水晶体被ばく線量を評価するために、新しい水晶体線量計の開発を行い、診断を目的としたCT検査時に患者介助に携わる医療従事者の眼の水晶体被ばく線量の実態を把握するとともに、新しい水晶体等価線量限度(20 mSv/年)の遵守可能性を評価した。さらに、測定した眼の水晶体線量データやCT検査時の作業環境を踏まえて、労働衛生の考えに基づいた水晶体線量低減のための放射線防護を実践することとした。

### 1-2. 研究の背景

#### 1-2-1. 日本国内における放射線診療実施件数について

国際科学委員会 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR) は、電離放射線による被ばくの影響と程度を評価・報告するために国連によって設置された委員会である。UNSCEARの2008年報告書では、人口あたりの医師数に基づいてグループ化するヘルスクエアレベル分類(I-IV; Iが最高、IVが最低)を諸外国に対して行い、医療放射線被ばくについての評価を行っている。また、2007年の時点での全世界での放射線診療の総件数が、過去

の調査(調査期間: 1991年から1996年)より24億件から36億件に増加している[10]、と報告している。

1997年から2007年における各ヘルスクエアレベルの医療用X線検査の年間頻度を示す(図1-1)。

図1-1から、レベルIの国(世界人口の24パーセントを占める)では、レベルIIIおよびIVの国(世界人口の27パーセントを占める)の65倍以上の頻度で医療用X線検査が実施されており、医療提供の大きな不均衡がX線装置と医師の利用可能性にも反映されていることがわかる。

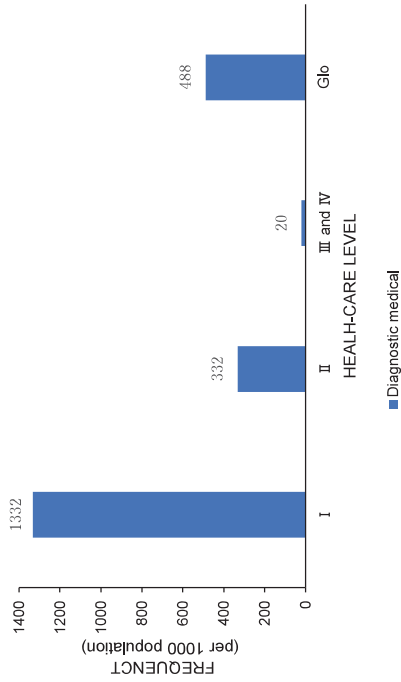


図1-1 医療レベルごとの医療用X線検査の年間頻度 1997-2007, UNSCEAR, Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with scientific annexes, UNSCEAR 2008 Report Vol.1, (2010), p. 8, [10]より Figure 3 を一部改変して引用した。

日本は、ヘルスクエアレベルIIに分類されている。日本の放射線診療件数は諸外国よりも多く、特に人口100万人当たりのX線CT装置の設置台数は世界で最多(表1-1)で、年を追うごとに増加する傾向にある。厚生労働省の第4回医療放射線の適正管理に関する検討会[11]の資料によると、平成14年から平成26年における国内でのX線CT検査の検査実施件数および検査件数は、増加傾向にある。また、UNSCEARの報告[10]より、日本における医療被ばく線量は3.87 mSv/年であり、これは世界平均の0.6 mSv/年より6.5倍高く、その中でもX線CT検査が59% (2.3/3.87 mSv/年)と非常に高い割合を占めている。

被ばく線量計の装着率、放射線防護衣着用の有無などが考えられるが、これまでに医療領域における放射線業務従事者の線量計装着に関する報告がないことから、推測の域を出ない。

表 1-2 2017 年度個人被ばく線量の実態

	年間平均実効線量		年間平均	
	測定下限値以下 (人数)	2 mSv 以上 (人数)	実効線量 (mSv/年)	水晶体等価線量 (mSv/年)
医師	57,791	2,849	0.29	0.84
診療放射線技師	12,983	3,320	0.77	1.26
看護師	44,133	677	0.13	0.49
その他	21,334	258	0.09	0.23
合計	136,241	7,104	—	—

株式会社千代田テクノル、平成 29 年個人線量の実態、放射線安全管理総合情報雑誌 FB news 501 (2018), p.11, [12]より Table 3a を一部改変して引用した。

医療従事者の年間実効線量および年間水晶体等価線量を示す(表 1-3)。これによると、被ばくを  
検出されない者(検出下限値以下の者)の割合は、実効線量で 76.32%、水晶体等価線量で 72.32%  
であり、医療従事者の多くは被ばくをしていないことがわかる。一方、被ばくを検出された者の  
割合は実効線量とも 25%前後であった。また、全医療従事者のうち、20 mSv(現行法令の実効線量  
および改正後の水晶体等価線量の年平均基準値)を超える被ばくを検出された者は、実効線量で  
は 0.03% (55 人)であったのに対し、水晶体等価線量ではその 18 倍の 0.50% (998 人)であった  
(表 1-3)。

表 1-1 人口 100 万人当たりの X 線 CT 装置設置台数

順位	国名	台数
1	Japan	92.6
2	Australia	45.3
3	United States	32.2
4	Republic of Korea	32.2

UNSCEAR, Sources and effects of ionizing radiation. Report to the  
General Assembly, with scientific annexes. UNSCEAR 2008 Report Vol.1,  
(2010), p. 60. [10]より Figure B-II を一部改変して引用した。

### 1-2-2. 医療従事者の職業被ばくについて

国内の線量測定メーカーが発行するガラスバッジを用いた個人モニタリングサービスの報告書  
[12]によると、医療従事者の職種別の年間平均実効線量は、医師が 0.29 mSv、診療放射線技師が  
0.77 mSv、看護師が 0.13 mSv であった。また、年間平均実効線量が検出されていない医療従事者  
が 136,241 名(医師:57,791 名, 診療放射線技師:12,983 名, 看護師:44,133 名, その他の職種:21,934  
名)であるのに対し、年平均実効線量が 2 mSv 以上であった医療従事者は 7,104 名(医師: 2,849  
名, 診療放射線技師:3,320 名, 看護師:677 名, その他の職種:258 名)であった(表 1-2)。均等被  
ばく管理の場合、年平均実効線量が 2 mSv を超える場合、水晶体等価線量は 20 mSv を超えてい  
る可能性がある。第 3 章の「3-11-1 項 放射線防護衣」でも詳しく説明するが、放射線防護衣(0.25-  
mm-Pb 厚相当)の放射線遮蔽能力は約 90%程度であった。医療従事者はその放射線防護衣の内側  
に個人被ばく線量計を装着して測定を行っている。放射線防護衣が講じられていない眼の  
水晶体は、個人被ばく線量計の測定値から求めた年平均実効線量の約 10 倍の線量を被ばくしてい  
ると考えられる。しかしながら、職種別の年間平均水晶体等価線量は、医師が 0.84 mSv、診療放  
射線技師が 1.26 mSv、看護師が 0.49 mSv であり(表 1-2)、年間平均水晶体等価線量の線量増加は、  
年間平均実効線量に対して 1.6-3.7 倍程度に上まっている。その原因として、医療従事者の個人

表 1-3 全国の医療施設（歯科を除く）における医療従事者の実効線量および水晶体等価線量の分布（2017年度）

年間線量 (mSv)	分布			
	実効線量 人数	割合 (%)	人数	割合 (%)
検出下限値以下	153,872	76.32	145,805	72.32
検出下限値 - 0.1	10,601	5.26	10,304	5.11
0.11-1.00	22,140	10.98	22,282	11.05
1.01-5.00	13,260	6.58	17,108	8.49
5.01-10.00	1,351	0.67	3,389	1.68
10.01-20.00	329	0.16	1,722	0.85
20.01-30.00	36	0.02	523	0.26
30.01-50.00	18	0.00	336	0.17
50.01-	1	0.00	139	0.07
合計	201,608	100	201,608	100

20 mSv を超える線量 55 人 (0.03%) 998 人 (0.50%)  
株式会社千代田テクノル、平成 29 年個人線量の実態、放射線安全管理総合情報雑誌 PB news 501 (2018), pp.8-9, [12]より Table 1a および Table 1c の記載内容を一部変更して引用した。

厚生労働省の眼の水晶体の被ばく線量限度の見直し等に関する検討会報告書[13]では、‘循環器内科、消化器内科、消化器外科、放射線診断科、整形外科には水晶体等価線量限度の 20 mSv/年を超える医師が多く、特に、循環器内科、消化器内科、脳神経外科には 50 mSv/年を超える医師がいる’、‘内視鏡や外来に携わる看護師は 20 mSv/年を超える者が多く、特に、内視鏡に携わる看護師の中には 50 mSv/年を超える者がいる’と報告された。つまり、日本国内の医療機関には、眼の水晶体に高い被ばく線量を受ける医療従事者が少なからず存在しているということである。放射線防護等の業務改善によって彼らの水晶体線量低減が行えなければ、診療件数自体を減少させざるを得なくなる。このことは、優れた医療を受ける機会の減少を招き、医療の質の低下、ひいては国民の健康に重大な影響を与えるおそれがある。ゆえに、そういった医療従事者の「放射線診療ごとの詳細な水晶体線量測定」や「放射線診療内容に応じたオーダーメイドの放射線防護」の実施が必要である。

### 1-2-3. 「診断」を目的とする CT 撮影時の患者介助者の問題点

長時間におよぶ放射線診療には、脳血管[14-17]、心血管[14, 18]、腫瘍[14, 17, 19]への IVR や ERC[14, 20-22]などがある。これらの放射線診療に携わる医師の眼の水晶体線量が大きいことは数多く報告されており、放射線誘発白内障のリスクについても広く認識されている。近年、CT 装置を透視ガイドとして用いながら組織生検や排膿術が行われるなど、「治療」目的で CT が多く利用されるようになり、これらの手技を施行する医師の全身被ばく線量[23-31]や眼の水晶体線量[23, 24, 26, 29-32]、手指被ばく線量[24-26, 28, 29, 31, 33, 34]、専用防護具とその被ばく低減効果[25, 28, 33, 34]に関する多くの報告がされている。

しかしながら、純粋な「診断」を目的とした CT 撮影時の医療従事者の眼の水晶体被ばくに関連する報告は少なく、小児患者の介助を行う看護師[35]やファントムを CT 撮影介助者に見立てた実験[36, 37]、CT 検査室の作業環境の散乱 X 線分布状況[38, 39] に関していくつつかの報告があるが、高線量が必要な成人患者の「診断」を目的とした CT 検査時に患者介助を行う医療従事者を直接測定し、その放射線防護を实践した報告は行われていない。通常、「診断」を目的とした CT 撮影で照射する放射線量 (CTDI<sub>vol</sub> (volume computed tomography dose index), DLP (dose length product)) [40]は、「治療」目的の CT 透視で照射する放射線量[27]の 5 から 10 倍以上大きい。そのため、患者の身体を主な散乱体とした散乱 X 線による医療従事者の眼の水晶体線量は、「診断」目的の CT 撮影の方が治療目的の CT 撮影より高くなる。特に集中治療室は、意識レベルが低下した患者の身体を保持したり、自発呼吸が消失した患者に対してバックバルブマスクを用いて換気補助を行ったりしながら診断 CT 撮影を行うこともあるので、彼らの被ばく線量、とりわけ眼の水晶体線量の測定と管理が急務である。

### 1-2-4. 眼の水晶体等価線量限度引き下げについて

1) ICRP が組織反応に関する声明において水晶体等価線量の被ばく限度値を引き下げた経緯  
ICRP は、水晶体等価線量限度を初めて勧告した 1954 年から現在までの間に、放射線業務従事者に対する水晶体の線量限度を 8 回改訂している。1980 年には「国際放射線防護委員会の 1980 年ブライトン会議の声明と勧告」を公表し、年間 300 mSv から年間 150 mSv へ引き下げた。1990 年には Publication 60 において年間 150 mSv と勧告しており、現在の我が国における線量限度はこれを踏まえたものになっている。その後 2003 年には、ICRP Publication 92 の中で「生物効果比 (RBE)、線質係数 (Q) および放射線加重係数 (W<sub>R</sub>)」を公表し、白内障のしきい線量が 0.5 Gy 程度である可能性、そもそもしきい線量がなく組織反応 (確定的影響) ではない可能性を指摘した。これを受け、2006 年には ICRP 第一専門委員会の中に新しい疫学的知見を踏まえて水晶体等価線

量限度を再考するためのタスクグループを設けて検討を進め、2011年4月ICRP 主委員会合会において組織反応に関する声明を発表した[5]。

組織反応に関する声明では、原爆被爆者[2,3]やチェルノブイリ事故復旧作業員[4]等に関する疫学調査の知見を踏まえて、放射線誘発性白内障のしきい線量が見直された。ICRPはこれらの研究成果について検討し、白内障に対するしきい線量をこれまで考えていた値(8 Gy)より大幅に低い0.5 Gy程度であるとした。しかし、放射線業務従事者の生涯労働年数を50年と仮定すると、しきい線量0.5 Gyから求めた平均水晶体等価線量は10 mSv/年となり、実効線量の基準値(平均20 mSv/年)を下回ることとなる。この点について組織反応に関する声明では触れられていないが、仮に、水晶体等価線量の基準値を実効線量の基準値以下に設定すると、実効線量も水晶体等価線量以下に制限せざるを得なくなる事態が生じ、実効線量に不必要な制限を加えることとなる。そこでICRPは、防護の最適化を行うように提唱している。これは、水晶体等価線量限度である20 mSv/年を遵守するだけではなく、可能な限り最適な防護措置を行うことを示している。

## 2) 白内障のしきい値引き下げの経緯としきい線量の科学的根拠

ICRPが2012年8月に出版したPublication 118[6]では、放射線白内障に関して約70編の疫学論文が引用されている。その中で、急性破げくと分割・遅延破げくにおけるしきい線量推定の科学的根拠になった論文は以下の3編である。

Nakashimaらは、2000-2002年に実施した原爆被爆者730人に対する水晶体混濁の調査結果から、急性破げくにおけるしきい線量推定値について、皮質白内障は0.6 Sv(90%CI, <0.0-1.2 Sv)、後囊下混濁は0.7 Sv(90%CI, <0.0-2.8 Sv)であると報告している[2]。また、Nertishiらは、原爆被爆者3,761人の術後白内障罹患率を調査した結果から、放射線影響による白内障のしきい線量の上限値は0.8 Gyであると報告している[3]。Worgulらは、チェルノブイリ事故の清掃員8,607人を対象として、作業後12-14年後に全白内障、後囊下白内障、皮質白内障などの調査を行い、分割・遅延破げくの際のしきい線量は0.34-0.5 Gyであると報告している[4]。

これらの研究結果をもとに、ICRPは白内障のしきい線量を0.5 Gyと勧告した。しきい線量が以前の勧告で示された数値より下がった理由については、ICRPは「線量が低くなると潜伏期間が長くなるため、短期間追跡調査では初期の水晶体の変化を十分な感度で検出できなかった」[6]と説明している。生物学的には全ての混濁が視覚障害性の白内障に進行すると仮定されているが、水晶体混濁の一過性を示唆する原爆被爆者のデータ[41, 42]もあることから、進行性と潜伏期間などについて更なる検討が必要である。

## 1-2-5. 水晶体線量計について

現在我が国で販売されている線量計のうち、眼の近傍で水晶体線量の測定に用いることができるとは、DOSIRIS<sup>TM</sup>(放射線防護・原子力安全研究所、フランス)とVision<sup>TM</sup>(ランダウエア、イリノイ州、米国)の2種類である(表1-4)。

DOSIRIS<sup>TM</sup>は、軽量素材(12 g)であるポリプロピレン製カプセルとTLD(LiF:Mg,Ti)を組み合わせて設計されており、3 mm線量当量H<sub>p</sub>(3)の測定を行える仕様になっている。また、放射線防護眼鏡の内側に装着可能な関節式アームを採用し、装着後に検出部を目尻に合わせるなど位置の微調整が可能となっている[43](図1-2)。

Vision<sup>TM</sup>は、キャップ付きのポリアミドホルダーで構成されており、H<sub>p</sub>(3)の測定を行える仕様になっている。キャップには超音波溶接によって密封された空洞があり、その内部にTLD(LiF:Mg,Ti)が配置されている。このVision<sup>TM</sup>はクリップ型のため、放射線防護眼鏡や帽子などに装着できる。

これらの水晶体線量計は、通常1ヶ月の積算線量を測定する仕様となっており、その線量下限値は0.1 mSvである。しかし、本研究では放射線診療1回あたりの測定評価(数十μSv)を目的としており、これらの線量計では感度が不足している。そのため、十分な感度と精度を備え、かつ安価に眼の水晶体線量が評価できる線量計の開発が不可欠となった。

表1-4 DOSIRIS<sup>TM</sup>とVision<sup>TM</sup>の特徴

商品名	DOSIRIS <sup>TM</sup>	Vision <sup>TM</sup>
線量計	TLD(LiF:Mg,Ti)	TLD(LiF:Mg,Ti)
測定線種	X・γ線, β線	X・γ線, β線
エネルギー範囲	X・γ線: 25 keV~1.25 MeV β線: 0.8 MeV(平均エネルギー)	X・γ線: 24 keV~1.25 MeV β線: 24 keV~1.25 MeV
報告線量範囲	H <sub>p</sub> (3): 0.1 mSv~1 Sv	H <sub>p</sub> (3): 0.1 mSv~10 Sv
千代田テクノル、眼の水晶体線量計 DOSIRISサービズを一部改変して引用した。Available from URL: <a href="https://www.c-technol.co.jp/radiation_monitoring/monitoring07">https://www.c-technol.co.jp/radiation_monitoring/monitoring07</a> (2020年8月9日確認)		Landauer, landauer vision <sup>TM</sup> を一部改変して引用した。Available from URL: <a href="https://www.landauer.com/sites/default/files/product-specification-file/LANDAUER%20vision.pdf">https://www.landauer.com/sites/default/files/product-specification-file/LANDAUER%20vision.pdf</a> (2020年8月9日確認)

### 1-3. 研究の目的

「1-2-2 項 医療従事者の職業被ばくについて」で示したとおり、日本国内の放射線診療に携わる医療従事者の中には、年間実効線量が 2 mSv を超える者が 7,104 人 (3.52%)、年間水晶体等価線量が 20 mSv を超える者が 998 人 (0.50%) いる (表 1-2, 表 1-3)。そのため、法令基準値の引き下げにより、今まで以上に眼の水晶体線量の低減を図る必要のある医療従事者が多く存在することとなった。高線量の被ばくが想定される放射線診療で眼の水晶体線量を測定し、被ばく低減のための放射線防護対策を策定する必要がある。しかしながら「1-2-5 項 水晶体線量計について」で示したとおり、現在我が国で入手できる水晶体線量計は 2 種類のみであり、どちらも数十  $\mu$ Sv 程度の被ばく評価に用いるには感度が不足している。そのため、十分な感度と精度を備え、かつ安価に水晶体等価線量を評価できる線量計の開発が不可欠となった。

そこで本研究では、「数十  $\mu$ Cy の低線量領域から安定した線量直線性[44-46]を持ち、医療従事者の眼の水晶体線量を 1 症例毎に測定できる水晶体線量計を独自開発すること」を第一の目的、「診断 CT 検査における患者介助者の眼の水晶体線量  $H_p(3)$  を調査し、新しい水晶体等価線量限度 (20 mSv/年) 遵守の可能性を評価すること」を第二の目的とした。さらに「数種類の放射線防護措置を重ねて講じる「多重放射線防護」を提案し、その効果を見積もること」を第三の目的とした。

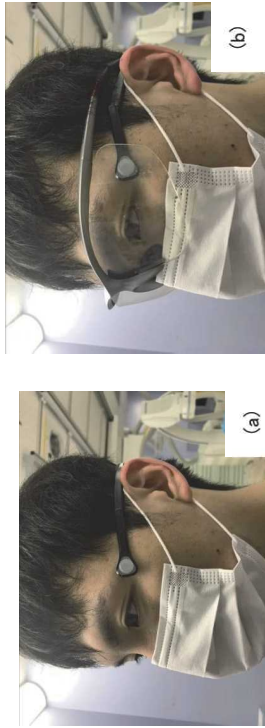


図 1-2 DOSIRIS の装着方法 (a) 放射線防護眼鏡なし (b) 放射線防護眼鏡あり

## 第2章 関連研究

### 2-1. ヨーロッパの医療施設で行われた職業被ばく測定に関する報告

職業上の放射線被ばくに関する大規模な実態調査としては、ORAMED project (Optimization of Radiation Protection of Medical Staff) がある。ORAMED project は、介入放射線学、核医学、製品開発など潜在的に高線量または複雑な放射線場をもたらす可能性のある手技について、医療従事者の被ばくをより適切に評価および低減するための方法や製品の開発を主な目的としている。

Vanhavere ら[14]は、心臓血管造影や内視鏡的逆行性胆管腔造影 (ERCP) 等に携わる医療従事者の眼の水晶体および四肢に関する一連の標準化された被ばくデータを取得し、放射線防護の最適化について ORAMED project で報告している。Vanhavere らは、欧州地域の 34 施設にて行われた約 1,300 件の放射線診療行為に対し、70  $\mu\text{m}$  線量当量 ( $H_p(0.07)$ ) で校正された TLD を用いて線量評価を行っている。測定されたすべての眼の水晶体線量  $H_p(0.07)$  の概要を図 2-1 に示す。

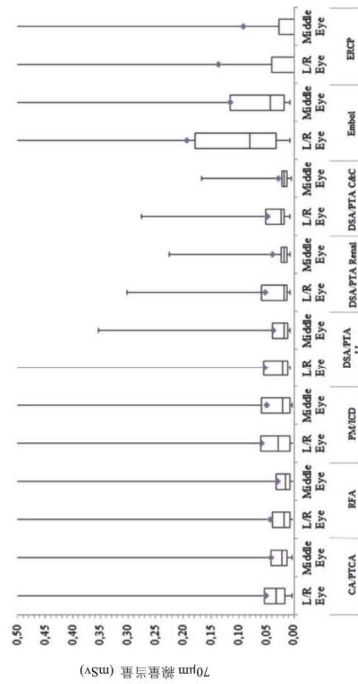


図 2-1 放射線診療時の眼の水晶体線量  $H_p(0.07)$  , F. Vanhavere, E. Carinou, J. Domienik, L. Donadille et al., Measurements of eye lens doses in interventional radiology and cardiology: Final results of the ORAMED project, Radiation Measurements 46 (11) (2011), p. 1244. [14]より Fig.2 を和訳し引用した。

この調査結果では、最大水晶体線量  $H_p(0.07)$  は ERCP で 4.0 mSv 検査、塞栓で 2.5 mSv 検査であった。また、塞栓時の水晶体線量  $H_p(0.07)$  は特に高く、その平均水晶体線量は約 60  $\mu\text{Sv}$  検査であった。

これらの放射線診療に従事する医療従事者の年間水晶体線量は、放射線診療実施回数と放射線防護策に大きく依存する。年間水晶体等価線量限度が現行法令の 150 mSv ならば線量限度に到達す

る心配はないが、20 mSv/年への引き下げ後は多くの医療従事者がこの限度を超える可能性があるため、適切な個人モニタリングと放射線防護策が重要になる。

### 2-2. CT における医療従事者被ばく

初期の頃の X 線 CT 装置は、脳の断面撮影に用いられていた。この頃の X 線 CT 装置は一列の検出器にデータ収集システム (data acquisition system: DAS) が搭載され、1 回の回転で 1 枚の画像しか得られず、撮影時間が長いことが難点であった。しかしながら、コンピュータ技術の発展や検出器の多列化により、従来のシングルスライスヘリカル撮影より高速なマルチスライスヘリカル撮影が行えるようになった。これにより、検査時間は大幅に短縮され、微細な画像再構成が可能となった。現在では医療において無くてはならない医療用放射線機器として定着している。CT 装置を用いた放射線診療には、「治療」を目的とした CT 撮影と「診断」を目的とした CT 撮影がある。

#### 2-2-1. 「治療」を目的とする CT 透視における医療従事者被ばく

「治療」を目的とした CT は、CT 画像を透視ガイドとし、病変位置や穿刺針の深さ方向の情報をリアルタイムに取得しながら組織生検や排膿術を行うものである。「治療」を目的とした CT 透視では、医療従事者が高線量被ばくを受けやすいと考えられており、多くの研究者らによって被ばくの実態が明らかにされてきた[23-34]。

Heusch らは、CT 透視に従事する医師の眼の水晶体線量を、半導体線量計を用いて 1 症例ごとに測定し、その中央値を 3.3  $\mu\text{Sv}$  ( $H_p(0.07)$ ; range: 0.03-218.9  $\mu\text{Sv}$ ) と報告[32]している。また、Gyekye らは、CT 透視時の放射線診療従事者の眼の水晶体線量をモンテカルロコード (MCNPX) を用いて算出し、その値を  $4.5 \pm 1.3 \mu\text{Gy}$ /検査 (防護具あり),  $4.8 \pm 1.3 \mu\text{Gy}$ /検査 (防護具なし) と報告[30]している。Gyekye らのシミュレーションでは、放射線防護眼鏡の有無によって被ばく線量の差が見られなかったが、これは、放射線防護眼鏡のレンズ形状が眼の水晶体の前面のみを防護する構造であったことにより、顎台や患者から発生する散乱 X 線を防護することができなかつたことが原因と考えられる。

「治療」を目的とする CT 透視で術者が受ける眼の水晶体線量について、過去の報告を示す (表 2-1)。



表 2-1 「治療」を目的とする CT 透視で術者が受ける眼の水晶体線量 : review

著者 (発行年) [参考文献番号]	測定対象	測定位置	線量計種類	測定線量
Silverman et al. (1999) [24]	ファントム	空気	電離箱線量計	2.6 $\mu\text{C/kg}$ (10 mR)
Daly et al. (1999) [29]	医師	放射線防護衣の外側 (頭部)	フィルムバッチ	0.1–0.3 mSv/1 ヶ月
Mellenberg et al. (1999) [31]	ファントム	放射線防護衣の外側 (襟)	フィルムバッチ	0.24 $\pm$ 0.14 mR/sec
Paulson et al. (2001) [26]	医師	放射線防護衣の外側 (眼の近傍)	OSLD	0.007–0.048 mSv/検査
Joemai et al. (2009) [23]	医師	放射線防護衣の外側	EPD Mk II	IR: 14 $\mu\text{Sv}$ /検査 AR: 5 $\mu\text{Sv}$ /検査 RT: 1 $\mu\text{Sv}$ /検査
Heusch et al. (2014) [32]	医師	放射線防護眼鏡の側面	EED-30	3.3 $\mu\text{Sv}$ /検査 (範囲 0.03–218.9 $\mu\text{Sv}$ /検査) 4.5 $\pm$ 1.3 $\mu\text{Gy}$ /検査
Gyekye et al. (2016) [30]	Monte Carlo calculations	眼	MCPX	(防護具あり) 4.8 $\pm$ 1.3 $\mu\text{Gy}$ /検査 (防護具なし)
Pravata et al. (2018) [27]	医師	放射線防護衣の外側	EED-30	8.2 $\mu\text{Gy}$ /検査 (DLP: 124 mGy $\cdot$ cm)

OSLD: optically stimulated luminescence dosimeter

IR: interventional radiologist

AR: assisting radiologist

RT: radiology technologist

2-2-2. 診断 CT 撮影時の医療従事者被ばくについて

「診断」を目的とする CT は、肺がん CT 検査やステージング分類、全身のスクリーニング検査のために、短時間 (十数秒) で全身の横断像 (アキシャル画像) を撮影するものである。診断 CT 撮影の際に医療従事者が受ける被ばくについては、照射線量が少ない小児患者の介助を行う看護師 [35] や臨床を模擬したファントム実験 [36, 37] による推定値の報告がある。

Al-Hajj らは、小児 CT 検査時の看護師の頭部および四肢の被ばく線量について、TLD を用いて測定した結果を報告している [35]。その結果を表 2-2 に示す。この表は、1 ヶ月あたりの積算線量と、その積算線量を作業回数で除した 1 検査あたりの被ばく線量を示している。この研究結果では、四肢の線量が頭部の線量より高く、頭部の線量は平均 48  $\mu\text{Sv}$ /検査であった。

表 2-2 小児 CT 検査に従事する看護師の被ばく線量

期間	症例数	合計時間 [s]	測定値 [mSv]		推定線量 [ $\mu\text{Sv}$ ]	
			頭部	四肢	頭部	四肢
1 ヶ月	42	628	1.65	3.25	40	77
2 ヶ月	16	445	1.24	*	78	*
3 ヶ月	38	380	0.95	2.95	25	78
平均	32	484	1.28	3.1	48	78

\*TLD リングを紛失した

A. N. Al-Hajj, A. M. Lobriguito et al., Occupational doses during the injection of contrast media in paediatric CT 検査. Radiation protection dosimetry 103 (2) (2003) p.171, [35] より Table 2 を一部変更して引用した。

宮島らは、頭部ファントムを被写体とした CT 撮影で、患者抑制を行う医療従事者を模して CT ガントリから 50 cm の空中 (眼の水晶体位置) に配置した電子式個人線量計によって 1 cm 線量当量の測定を行っている [36]。結果を表 2-3 に示す。

表 2-3 診断 CT 検査の頭部撮影時に患者抑制を行った場合の医療従事者の被ばく線量

測定項目	眼の水晶体	甲状腺	胸部	下腹部
CT ガントリー中心との距離 [cm]	50	59	62	70
1 cm 線量当量 [ $\mu\text{Sv}$ ]	594	627	605	52
放射線防護の内側の 1 cm 線量当量 [ $\mu\text{Sv}$ ]	-	89	85	5
線量低減率 (%)	-	86	86	90

R. Miyajima, T. Fujibuchi Effective Techniques to Reduce Radiation Exposure to Medical Staff during Assisi of X-ray Computed Tomography Examination, Nihon Houshyasen Giryusuu Gakkai Zasshi. 74 (4) (2018) p.330, [36]より Table 1 を一部改変して引用した。

Sookpeng ら[37]は、診断 CT 撮影における患者介助を模擬して ART ファントムを患者、シリコンマネキンファントムを医療従事者として配置し、シリコンマネキンファントムの左右の眼球正面に OSL 線量計を貼り付けて患者介助者の眼の水晶体線量  $H_p(3)$  を測定している。図 2-2 に測定位置を示す(地面からの高さ: 147 cm, CT ガントリーのアイソセンターからの距離 (A): 80 cm, (B): 80 cm, (C): 50 cm)。この研究では、患者介助としてバックバルブマスクを用いた換気補助 (A, B) および頭部固定 (C) を行ったと想定し、各々の立ち位置における眼の水晶体線量  $H_p(3)$  を測定している。その結果、バックバルブマスクを用いた換気補助時の平均水晶体線量は、立ち位置 (A) で 112  $\mu\text{Sv}$ /検査、立ち位置 (B) で 98  $\mu\text{Sv}$ /検査であった。また、頭部固定時 (C) の平均水晶体線量は 224  $\mu\text{Sv}$ /検査であった (表 2-4)。

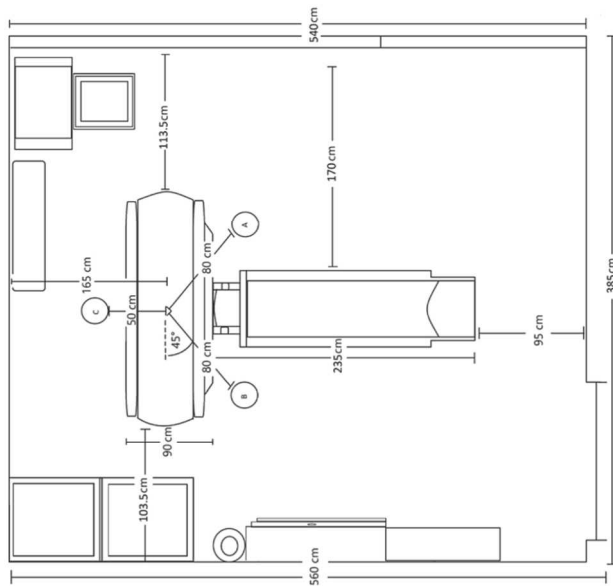


図 2-2 診断 CT 撮影時の医療従事者の立ち位置, S. Sookpeng, C.J. Martin et al. Eye Lens Radiation Doses to Miscentering Patients and Health-Care Staff From Head Computed Tomography, J. Radiol. Nurs. 38 (3) (2019), p.196, [37]より figure 2 を引用

表 2-4 診断 CT 検査において患者介助時の医療従事者の眼の水晶体線量

立ち位置	眼の水晶体線量 $H_p(3)$ (mSv)		
	右眼	左眼	平均
A	0.097	0.127	0.112
B	0.098	0.084	0.091
C	0.227	0.221	0.224

S. Sookpeng, C.J. Martin et al. Eye Lens Radiation Doses to Miscentering Patients and Health-Care Staff From Head Computed Tomography, J. Radiol. Nurs. 38 (3) (2019), p.197, [37]より Table 3 を和訳して引用した。

## 2-3. 調査結果のまとめ

放射線診療に従事する医療従事者の眼の水晶体線量について調査した研究を調べた結果、IVR [14]などで医療従事者の眼の水晶体線量が高いことが多く報告されており、「治療」を目的とするCT透視における医療従事者の被ばくに関しても幾つかの報告(表 2-1)が行われていた。しかし、「診断」を目的とするCT撮影時に患者介助を行う場合の眼の水晶体線量に関する報告は、わずかに小児介助の看護師[35]とフアントム実験[36, 37]のみであり、成人を対象とした高線量の診断CT検査に従事する医療従事者の眼の水晶体線量を測定し、放射線防護の実践を行っている報告は見当たらなかった。

## 第3章 研究に関連する基礎的事項

### 3-1. 国際放射線防護委員会(ICRP)

国際放射線防護委員会は、UNSCEAの報告書や放射線影響に係わる研究成果などを参考にして、専門家の立場から放射線防護に関する報告を行う民間の国際学術組織である。1928年、医学分野での放射線影響に対する懸念の高まりを受けて、国際放射線学会(International Society of Radiology: ISR)の主催により、第2回国際放射線医学会議(International Congress of Radiology: ICR)が開催された。その会議において放射線医学の専門家を中心とした「国際X線およびラジウム防護委員会」(International X-ray and Radium Protection Committee: IRRPC)が創設され、X線とラジウムの過剰暴露の危険性に関する報告が行われた。その後、原子力分野への適用も考慮し、1950年に組織名称を国際放射線防護委員会(International Commission on Radiological Protection: ICRP)に変更、許容線量値の改定を行った。

現在のICRPは、主委員会と5つの専門委員会(第1専門委員会:放射線の影響、第2専門委員会:放射線の線量、第3専門委員会:医療分野における防護、第4専門委員会:委員会勧告の適用、第5専門委員会:環境への防護)で構成されている。必要に応じてタスクグループが作られ、専門家の立場から放射線の影響に関する科学的知見とデータを集約し、これらを刊行物として発刊している。ICRPは非政府機関であるが、国際的に最も権威のある機関として認められており、ICRPが策定した放射線安全基準は各国の行政機関の法令や指針に反映されている。ICRPはこれまで、1958年、1977年、1990年および2007年に放射線防護に関する勧告を行っており、それぞれPublication 1, 26, 60 および 103 として刊行している。日本の現行法令には1990年勧告(Publication 60)が取り入れられており、2007年勧告(Publication 103)については、現在、放射線審議会などでその取入れを検討している状況である[47]。なお、1990年勧告と2007年勧告とで線量限度に大きな違いはない。

放射線防護における国際機関はICRP以外にも複数存在している。主な3機関とそれらの役割を以下に示す。

- 1) 国際放射線単位測定委員会(International Commission on Radiation Units and Measurements: ICRU): 1925年から1950年まで存続したX線単位委員会がICRUの始まりである。設立当初から非営利組織かつ非政府組織で、世界の物理学者、科学者、技術者がボランティアで参加している組織である。ICRUの活動は、放射線と放射能の単位の作成、放射線医学的診断、核医学、放射線治療、放射線防護、産業活動等における放射線関連の計測や手順の作成、その手順に必要な物理データの検討と適切な勧告である。

2) 国際科学委員会 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation : UNSCEAR) : 1950年代に大気圏内核実験が頻繁に行われた結果、環境中に大量の放射性物質が放出され、環境や健康に対する影響の懸念が増大したため、1955年に国連によって設立された委員会である。UNSCEAは、科学的に中立な立場から電離放射線による被ばくの程度や影響を評価し、数年ごとに詳細な報告書 (Sources and Effects of Ionizing Radiation) を出版している。これらの報告書は、ICRPやIAEAの基礎資料として用いられている。

3) 国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency : IAEA) : 1953年の国連総会にて創設の機関が高まり、1957年に国連によって発足した自治機関である。IAEAは、原子力の平和的利用を促進するとともに、軍事的利用への転用を防止することを目的としており、その事業内容は、原子力発電、非原子力発電 (医療、農業、水資源管理、環境、産業等) およびこれらの利用における安全やセキュリティに係る分野に大別される。IAEAは、開発途上国に対してこれらの分野における技術協力活動を実施しており、さらにICRP勧告の防護体系を基にした国際安全基準の策定も行っている。

### 3-2. 放射線防護体系の三原則

放射線防護には、放射線防護体系の三原則である「行為の正当化」、「防護の最適化」、「線量限度」が適用される。「行為の正当化」では、放射線被ばくを伴ういかなる行為もその導入が正味でプラスの便益を生むことを求めている。また、「防護の最適化」では、経済的および社会的な考慮を計算に入れた上で、すべての線量を合理的に達成できうる限り低く (As Low As Reasonably Achievable : ALARA) 保つべきであるとしている。このALARAの原則は、経済的、社会的なデメリットと放射線リスク低減によるメリットとのバランスをとるプロセスであり、単に最小線量を追求するものではないことに注意する必要がある。「線量限度」については、実効線量限度の概念が導入され、放射線被ばく影響に関する知見を踏まえて、個人の線量限度が設定されている。

### 3-3. 被ばく状況

放射線被ばくには、内部被ばくと外部被ばくがある。内部被ばくは、体内に取り込んだ放射線源によって体の中から放射線にさらされることであり、その放射線源は放射性同位元素のみである。一方、外部被ばくは、体外にある放射線源によって体の外から放射線にさらされることであり、その放射線源は放射性同位元素や放射線発生装置などである。

ICRPは、2019年12月までに公表した141のPublicationのうち、Publication 1, 6, 9, 26, 60, 103において、「Recommendations of the International Commission on Radiological Protection」として放射線防護体系に関する勧告を行っている。1990年勧告のPublication 60では、人の被ばくの種類を医療被ばく、職業被ばく、公衆被ばくの3つのカテゴリに分類した[48]。また、2007年のPublication 103では、1990年勧告の行為と介入による防護方法の考え方から被ばく状況に基づく防護方法の考え方に転換し、被ばく状況を以下の3つに区分し、状況に応じた放射線防護を行う必要があることを勧告している[47]。

#### 1) 計画被ばく状況

計画被ばく状況とは、被ばくが生じる前に放射線防護対策を計画できる状況のことであり、被ばくの大ささと範囲を合理的に予測できる。計画被ばく状況には、職業被ばく、公衆被ばく、介助者を含めた患者の医療被ばくが含まれる。

#### 2) 緊急時被ばく状況

緊急時被ばく状況とは、不測の状況 (事故や天災など) や悪意のある行為 (テロなど) によって急を要する防護対策が必要となった状況のことである。

#### 3) 現存被ばく状況

現存被ばく状況とは、高自然バックグラウンド地域における被ばく状況の他、事故などの非常事態が収束する過程で被ばく線量が平常時の公衆線量限度 (1 mSv/年) より高い状態が定着し、さらなる線量低減に長期間を要する状況のことをいう。現存被ばく状況では、その状況に応じて1-20 mSv/年間で適切と判断される値を参考レベルと定め、防護活動が実施される。原発事故後の汚染された土地での生活は、この種の典型的な状況である。

### 3-4. 被ばくの種類

ICRPは放射線防護の観点から、被ばくの種類を医療被ばく、公衆被ばく、職業被ばくの3つに分類している。Publication 103では「被ばくに関連する可能性のある人の望ましい活動を過度に制限することなく、放射線被ばくの有害な影響に対する人と環境の適切なレベルでの防護に寄与することである」[47]としており、これは、規制目的のために同一の個人が異なるカテゴリで被ばくを考慮する必要はないということを意味している。例えば、放射線業務によって職業被ば

くする医療従事者が考慮すべき被ばく線量は、職業被ばく者の規制に係る線量限度であり、そこに医療被ばく者の規制に係る線量を加算する必要はない。

### 3-4-1. 医療被ばく

医療被ばくとは、放射線診断や治療を受ける患者とその患者の介護を行う家族などの個人、あるいは生物医学研究の志願者が受ける被ばくのことである。被ばく線量の制限によって疾病の診断・治療に支障をきたす可能性を排除するため、医療被ばくに放射線防護体系の三原則のうちの「線量限度」は適用されない。しかし、不必要な被ばくは、結果として患者に不利益をもたらす可能性がある。それゆえ、放射線防護体系の三原則のうちの「防護の最適化」と「行為の正当化」については適用するとされている。

#### 1) 医療被ばくにおける「防護の最適化」

ICRP の諸勧告や IAEA の国際基本安全基準など国際的な指針では、診断領域の医療放射線防護において「防護の最適化」を達成するためのツールとして、診断参考レベル (diagnostic reference level: DRL) を推奨している。DRLs の概念が初めて提唱されたのは ICRP Publication 73 [49] であるが、現在では多くの国際機関が導入を推奨しており、関連する多くのガイドラインや論文等も公表されている[50-57]。欧州では、EU (European Union) の欧州指令 Council Directive 97/43/Euratom (1997年6月) によって定められた医療放射線防護の枠組みの中で、診断領域における DRLs の確立が EU 加盟国に求められ、それを受けイギリス[52, 54, 57]やオーストリア[53]、アイerland[51]などが DRLs を取り入れている。また米国では、ACR (American College of Radiology)、AAPM (American Association of Physicists in Medicine)、NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements) などによって示された DRL が、事実上の標準となっている。本邦においては、医療被ばく研究情報ネットワーク (Japan Network for Research and Information on Medical Exposures: J-RIME) が実施した線量の実態調査の結果に基づいてさまざまな専門家による議論が行われ、国際機関の専門家の助言も得て、2015年6月に本邦初となる DRLs が策定され (Japan DRLs 2015 [58])、2020年7月に最新版の DRLs (Japan DRLs 2020 [59]) が発刊された。

#### 2) 医療被ばくにおける「行為の正当化」

Publication 105 の勧告では、医療被ばくにおける「行為の正当化」を3つのレベルに分け、それぞれについて次のように考慮している。

#### 第1レベル：医学における放射線利用の正当化

「医学における放射線利用は、患者に害よりも便益を多く与える者として受け入れられる。このレベルの正当化は現在当然のこととされており、以下ではこれ以上論じない」 [60]と定義されている。

#### 第2レベル：定義された放射線医学的手法の正当化

「特定の目的を持つ特定の手法が定められ、正当化される(例えば、関連症状を示す患者の胸部撮影、あるいは病気が発見され治療される可能性のあるリスクを負った個人のグループ)。第2レベルの正当化の目的は、放射線医学的手法が診断あるいは治療を一般に向上させるかどうか、あるいは被ばくした個人について必要な情報を提供するかどうかを判断することである。」 [60]と定義されている。

#### 第3レベル：個々の患者への手法の正当化

「個々の患者に対する手法の適用が正当化されるべきである (すなわち、その特別な適用は、個々の患者に対し害より便益を多く与えると判断されるべきである)。それゆえ、すべての個々の医療被ばくは、その被ばくの特定の目的と、関係する個人の特性を考慮して、あらかじめ正当化されるべきである」 [60]と定義されている。

#### 3-4-2. 公衆被ばく

公衆被ばくは、職業被ばく、医療被ばく、自然放射線被ばく以外の被ばくと定義され、放射線防護体系の三原則「行為の正当化」、「防護の最適化」、「線量限度」のすべてが適用される。

ICRP の 1990 年勧告 (Publication 60) [48]では、公衆の年間線量限度を 1 mSv とし、5 年間の平均が 1 mSv/年を超えなければ、年間被ばく線量が 1 mSv を超える年があっても良いとした。

#### 3-4-3. 職業被ばく

職業被ばくは、「作業者がその自らの仕事の結果として被るすべての放射線被ばく」 [47]と定義されている。職業被ばくには、放射線防護体系の三原則「行為の正当化」、「防護の最適化」、「線量限度」のすべてが適用される。医療分野における職業被ばくの線量限度 (1990 年勧告以前は許容線量と呼ばれていた) は、医療被ばくおよび自然放射線による被ばくを除くすべての放射線源から受ける被ばくの上限值であり、個人の被ばく線量を制限するために設定される。労働安全衛生法 (昭和 47 年法律第 57 号) 第 22 条においては、電離放射線障害防止規則 (以下、電離則) [61]

や医療法施行規則[62]によってその数値が定められている。2007年勧告による線量限度[47]および(2021年4月改正予定の眼の水晶体等価線量限度を表3-1に示す。

表 3-1 職業被ばく者の線量限度

実効線量	等価線量
100 mSv/5年 (ただし、いかなる1年も50 mSvを超えないこと。)	水晶体 150 mSv/年 (2020年3月末まで) 水晶体 20 mSv/年 (2021年4月以降) 皮膚 500 mSv/年

ICRP, Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Ann. ICRP 37 (2-4) (2007) p.60, [47]より表6を一部改変して引用および、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, Ann. ICRP 41 (1-2) (2012) p. 11., [6]の記載内容を参考にして作成

職業被ばくにおける眼の水晶体等価線量限度は、厚生労働省の「眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会」での議論を踏まえて150 mSv/年から20 mSv/年に引き下げられた。また同時に、5年間につき100 mSvの実効線量限度も追加された。なお、令和3年4月から令和5年3月までの間に限り、適切な放射線防護措置を講じても水晶体等価線量が100 mSv/5年を超えるおそれがある医療従事者に対しては、50 mSv/年とする救済措置が講じられている。この救済措置は、行う放射線診療に高度な専門知識や経験が必要で、なおかつ後任者を容易に得ることができない場合に適用される。

3-5. 放射線防護を行うために必要な線量概念について  
各線量の比較を表3-2に示す。

表 3-2 放射線の線量の種類と単位

種類	線量概念	単位	意味	評価対象
吸収線量	物理量	Gy	物質1kgあたりに吸収されるエネルギー (J/kg)	ある組織体積中に沈着するエネルギーの分布の平均
等価線量	防護量	Sv	人の臓器・組織が個々に受ける影響	皮膚、眼などの組織の被ばく線量
実効線量	防護量	Sv	個々の臓器・組織が受ける影響を統合して、全身への影響を表したものを表したもの	全身の被ばく線量

ICRP, The 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection [ICRP publication 60: Annals of the ICRP, Elsevier Health Sciences (1991) pp. 96-101., [48]の記載内容を参考にして作成および、ICRP, Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Ann. ICRP 37 (2-4) (2007) pp.217-224., [47]の記載内容を参考にして作成

### 3-5-1. 吸収線量

物質は、放射線を受けるとその相互作用 (主に電離・励起) により、放射線のエネルギーを吸収する。吸収線量は、放射線の照射によって単位質量あたりの物質が吸収するエネルギーの量 [J/kg] であり、その単位には [Gy] (グレイ) が用いられる。物理量の1つなので、その量は測定器で直接測定することができる。

吸収線量は、物質の種類によって異なるため、取り扱い問題に応じて物質が何であるかを定める必要がある。よく用いられるのは、臓器吸収線量と空気吸収線量である。人体組織が放射線から得たエネルギー量である臓器吸収線量は、放射線の健康影響を決定する最も重要な指標である。

### 3-5-2. 等価線量

吸収線量が同じ場合でも、入射した放射線の種類 (γ線, α線, 中性子線など) によってその影響は異なる。これを補正したのが等価線量であり、各組織・臓器の局所的な被ばく線量を表すための線量概念である。等価線量は、放射線を被ばくした人体組織の吸収線量に放射線加重係数を乗じたものとして定義され、単位には [Sv] (シーベルト) が用いられる。放射線加重係数は、

放射線の違いによる身体への影響について、同じ尺度で評価するために設定された係数のことである。その値を表 3-3 に示す。

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R} \dots (1)$$

$H_T$  : 等価線量,

$W_R$  : 放射線 R に対する放射線加重係数,

$D_{T,R}$  : ある組織または臓器 T における放射線 R による吸収線量

等価線量は防護量なので、あくまで確率的影響のリスク制限に用いるためのものである。同じ臓器の被ばくでも、組織反応(確定的影響)を問題とするような場合には臓器吸収線量 [Gy] が用いられる。

表 3-3 ICRP 勧告 放射線加重係数 ( $W_R$ )

放射線の種類 (R)	エネルギー (E) 範囲	放射線加重係数 ( $W_R$ )
光子	全エネルギー	1
電子とミュオン粒子	全エネルギー	1
中性子線	中性子エネルギーの連続関数より求める (図 3-1)	
陽子と荷電パイ中間子	2 MeV<E	2
アルファ粒子, 核分裂片, 重イオン		20

ICRP Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Ann. ICRP 37 (2-4) (2007) pp.27-29., [47]より表 2 を一部改変して引用した。

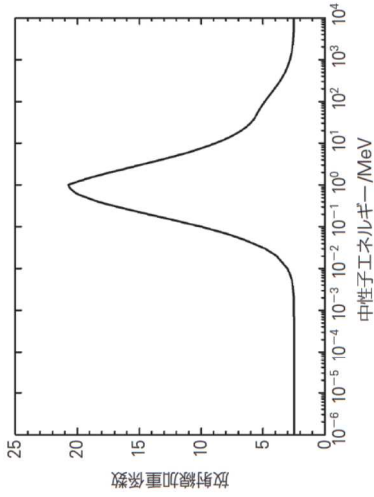


図 3-1 中性子に対する放射線加重係数と中性子エネルギーの関係, ICRP, Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Ann. ICRP 37 (2-4) (2007) p.29, [47]より図 1 を和訳して引用した。

### 3-5-3. 実効線量

実効線量は、各臓器の受けた放射線の等価線量に、その臓器の組織加重係数を乗じた値の総和として定義される。単位には [Sv] (シーベルト) が用いられる。組織加重係数とは、各組織や臓器の放射線に対する感受性(放射線の影響度)の指標を表した係数であり、すべての組織加重係数(表 3-4)を足し合わせると 1 になる。等価線量が各組織・臓器の局所的な被ばく線量を表すための線量概念であるのに対して、実効線量は被ばくの状態に関わらず個人の生物学的リスクの尺度となる。放射線障害の確率的影響のリスクは、放射線被ばくを受けた人体の組織・臓器の等価線量だけでなく、その組織・臓器の種類にも依存する。そこで、実効線量は式 (2) により求められる。

$$H_E = \sum_T H_T W_T \dots (2)$$

$H_E$  : 実効線量

$H_T$  : 式 (1) で求めた各臓器の等価線量

$W_T$  : 組織加重係数