

労災疾病臨床研究事業費補助金

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

平成 30 年度 総括・分担報告書

研究代表者 櫛田尚樹

平成 31 (2019) 年 3 月

目 次

I. 総括研究報告

不均等被ばくを伴う放射線業務における被ばく線量の実態調査と線量低減に向けた課題評価に関する研究 樫田尚樹	1
---	---

II. 分担研究報告

1. 海外諸国の眼の水晶体の線量限度の引き下げの法令への取入れの現状把握に関する研究 小野孝二・古渡意彦・山口一郎・志村勉・樫田尚樹	17
2. 水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査(医療分野の放射線の計測評価と被ばく防護) 千田浩一	107
3. IVR を中心とした現場での線量評価と医療実施との最適化に関する研究 盛武敬	111
4. 除染等業務に従事する作業員の眼の水晶体等価線量の適切な評価に関する研究 古渡意彦	203
5. 放射線業務従事者の眼の水晶体等価線量の線量計測に関する国際規格の動向 古渡意彦	233
6. 医療従事者の放射線防護への労働安全衛生マネジメントシステムの応用 森晃爾	239
7. 放射線被ばくと白内障発生の基礎的知見の整理 志村勉	248

III. 研究成果の刊行に関する一覧表	261
---------------------------	-----

本研究成果は、「眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会」の資料にも反映されている。

https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_02959.html

I. 総括研究報告

平成 30 年度労災疾病臨床研究事業費補助金
総括研究年度終了報告書

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

研究代表者 樺田尚樹 産業医科大学産業保健学部 教授
(前所属・国立保健医療科学院生活環境研究部 部長)

研究要旨

国際放射線防護委員会 (ICRP) による眼の水晶体等価線量の年間限度を 150 mSv から 5 年平均 20 mSv へ引き下げる勧告、また国際原子力機関 (IAEA) 一般的安全要件 (GSR ; General Safety Requirements) への取入れを受け、適切な放射線防護体系の運用の観点からも、新しい線量限度の国内規制取入れが急務である。国内では現行では、水晶体の放射線被ばく線量の直接的な測定評価は実施されておらず、線量限度導入に向けて、包括的な線量評価・モニタリング法の開発、実態の評価、保護具着用の効果などを検討していく必要がある。一方で、これらを実施導入するにあたっては、過度な対応や就業機会の制限につながるなどがないように、最適化を図り、幅広いステークホルダー間の理解と協力を得られる環境を作り、現場適応への課題を整理することが必須である。本研究班では、放射線防護・管理の専門家だけでなく、産業保健の専門家、行政経験を有する専門家等幅広い分野の分担研究者とともに上記課題の解決を目指すことを目的とする。

1) 海外諸国の取入れに関する実例の情報を収集

・国際原子力機関 (IAEA) による職業被ばくの一般安全ガイド (RSG-7) が 2018 年 10 月に刊行されたことから、その内容を分析した。また、IAEA の ORPAS mission に参加する機会を得たので、国際的な場でのその適用の状況をまとめた。RSG-7 では、基本的な枠組みが整理して提示されており、TECDOC-1731 のベースになるものとして、日本でも大いに役立つと考えられた。国内規制整備の課題としては、基本的な枠組みとしての段階的なアプローチ、マネジメントシステム、認証制度の確立や、対策を講じる手順としての意思決定支援技術、線量拘束値や調査レベルの確立が課題であると考えられた。その一方、最終ドラフトから刊行に異例の時間を要しており、課題の困難さも物語っていた。また、線量評価などを含む法令要件に関し、測定の要否、頻度、手法等も含めて EU 諸国で比較し、EU 指令にかかわらず、ベルギーとイタリアでは規制への取り入れがなされておらず、フランスでは、規制適用が一部、猶予されており、それらは医療現場への配慮に基づくものであることを確認した。その結果も踏まえて、IAEA での取り組みの現状も直接情報収集し課題を把握した。測定では認証制度の導入も課題であり、その実情に関しても把握を試みた。

2) 水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査

次年度の詳細測定へ向けたフィールド調査と予備測定調査を行い下記の有用な基礎的検討ができた。

・検査 1 件毎の水晶体線量を測定評価するためには高感度な RPL 線量計にて測定することが望ましいことを明らかにした。

・水晶体線量計の適切な着用部位についてファントム実験にて詳細に検討した。測定部位は左眼と右眼の中央表面位置の線量 (左右の水晶体線量)、眼の近傍の線量 (左眼横、右眼横、額中央の線量) にて評価し、血管 IVR を想定した各照射角度 (Angulation) において術者医師位置と看護師位置にて測定した。その結果、医師位置では LAO 系の Angulation で X 線管が近づくために水晶体線量が高くなったが、看護師位置では散乱線源から離れていたために Angulation による影響は小さいことが分かった。医師位置では左眼 (X 線管側) の線量が高く、水晶体線量計を左側頭部に着用することで過小評価することなく、ばらつ

きも小さくなることが分かった。看護師位置では左右差がほとんどなく、水晶体線量計を額中央に着用することで過小評価することなく、ばらつきも小さくなることが分かった。

・また医療現場における脊髄腔造影、内視鏡的逆行性胆管膵管造影法(ERCP) 施行医師、CT 介助者等水晶体の被ばく線量が高くなりうる従事者において実態を調査するとともに、放射線防護対策の必要性を検証した。

・シミュレーションに関しては、水晶体被ばく線量評価手法の開発に関連し、初年度は、以下について実施した 1) 除染等業務、学術分野に加え、医療分野で用いられる X 線源について調査し、シミュレーション計算を実施した。2) 学術分野における不均等被ばく状況及び眼の水晶体線量評価のため簡易物理ファントムを整備するとともに、線型加速器 (KEK つくば及び京都大学複合原子力研究所) での実験環境を整備した。1) について、除染等及び学術分野での放射線業務従事者は、作業時に①棒状の体積線源、②面線源からの被ばくを受け、計算シミュレーションにより、体幹部で受ける被ばく線量に対し水晶体線量が大きく変化することが明らかとなった (約 0.6~4.0 倍)。

3) 放射線防護への労働安全衛生マネジメントシステムの応用

原子力施設・医療施設等で、従事者の眼の水晶体の被ばくを適切に管理するために、マネジメントシステムの適用を前提とした議論を進めている。特に、医療施設においてはマネジメントシステムによる管理が行われていないといった実態がある。マネジメントシステムでは、①基本方針、②体制整備、③管理手順の明確化、④継続的改善の要素を組み合わせる目的達成を図る仕組みである。また、管理手順の中心として、リスク等の課題の評価と評価結果に基づく管理が含まれる。マネジメントシステムの導入に当たっては、導入する組織の特徴に合わせた仕組みである必要があるため、原子力施設と医療施設における一般的な業務管理の状況を勘案してモデル化する必要がある。そこで、他の分担研究の成果を受けて提案される、両施設における線量評価と実現可能な被ばく防御手法を手順として盛り込む。

4) 放射線被ばくと白内障発生の基礎的知見の整理

放射線誘発白内障の生物学的意義について、新しい疫学研究も含めて整理した。疫学研究では米国での診療放射線技師を対象にした調査やロシアのマヤックでの労働者の調査でも共にリスクが検出されており、100 mGy 未満に限定しても白内障リスクと線量関係が検出され、後囊下以外に、皮質や核でも白内障リスクが見いだされていることに着目すべきであると思われた。放射線の標的細胞と想定される水晶体上皮細胞の役割や水晶体の特徴と機能についての文献を調査し、放射線誘発白内障の発生機序について整理した。従来の ICRP と NCRP が策定した眼の放射線防護基準では、放射線白内障は、しきい線量を超えた時にのみ起こる組織反応と仮定されていた。しかし、動物モデルや被ばくヒト集団の遅発性、進行性の放射線白内障などの新たな報告から、一部の放射線誘発白内障では、しきい線量がなく確率的影響であることが示唆されている。さらに、微小混濁が視覚障害性白内障に進行すると仮定することや線量率効果が考慮されないことなど、ICRP の旧勧告からの変更点や新勧告しきい線量 (0.5Gy) の科学的根拠についての取りまとめを行った。

以上の成果は、厚生労働省「眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会」資料に反映されている。

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
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
盛武 敬	産業医科大学 産業生態科学研究所	放射線健康医学 准教授

千田浩一	東北大学 災害科学国際研究所 災害放射線医学分野 教授
小野孝二	東京医療保健大学 東が丘・立川看護学部 教授
古渡意彦	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 放射線管理部 放射線計測技術課 主査
森 晃爾	産業医科大学 産業生態科学研究所 産業保健経営学 教授

研究協力者

阿部利明	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
茂呂田孝一	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
中上晃一	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
永元啓介	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
松崎 賢	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

A. 目的

原子力施設・医療施設等、従事者が受けている眼の水晶体の被ばく及び防護の実態を把握するとともに、線量の適切な推定方法を確立することで、新線量限度取り入れに資することを目的とする。初年度には新線量限度取り入れに関する海外の動向を精査するとともに、初年度および2年度を中心に簡便な線量算出方法を開発し、放射線業務従事者および患者及び従事者の被ばく線量を同時測定することで、効果的な防護最適化に関する基盤技術を確立する。原子力施設等では、 β 線及び低エネルギー成分の被ばくの、場の線量当量と体幹部・水晶体線量との相関を検証し、包括的モニタリング手法を確立する。最終的に様々な放射線場における基礎データを計算と測定により揃えとともに、規制の最適化を考慮した“放射線被ばくマネジメント”を提唱する。

また、EU加盟国等すでに規制を取り入れた地域・国における、取り入れ前後の情報を得ることは非常に有用である。

本研究班では、放射線防護・管理の専門家だけでなく、産業保健の専門家、行政経験を有する専門家等幅広い分野の分担研究者とともに上記課題の解決を目指す。具体的には、

1) 海外諸国の取入れに関する事例の情報

を収集（山口、古渡、志村、小野、樺田）【初年度-2年目】

2) 水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査（盛武、千田、古渡）【初年度-2年目】

3) 放射線防護への労働安全衛生マネジメントシステムの応用（森、盛武、小野、樺田）【全期間】

4) 放射線被ばくと白内障発生の基礎的知見の整理（山口、志村、樺田）【初年度中心】
を検討することとした。

B. 研究方法

1. 海外諸国の取入れに関する事例の情報を収集

国際原子力機関（IAEA）による職業被ばくの一般安全ガイド（GSG-7）が2018年10月に刊行されたことから、その内容を分析するなど、海外の規制の動向を文献的に検討した。

また研究者のネットワーク等を通じ情報収集するとともに国際原子力機関を訪問し、関係者からの情報収集を行った。

さらに、IAEAのORPAS missionに参加する機会を得たので、国際的な場でのその適用の状況をまとめるとともに情報の収集を行った。

2. 水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査

・不均等被ばく状況測定システムの開

発：現在不均等被ばくは、胸部（女子は腹部）と頸部の2カ所の個人被ばく線量計により積算線量を測定しているが、医療現場のIVR等での被ばく状況を反映しているか不明な点が多い。また、1ヶ月の積算値では「いつ、どこで、どのような状況で被ばくしたのか」が分からないため、効果的な被ばく低減策を講じることができない。そこで、盛武らのIVR患者の線量評価システム（RADIREC）を開発・運用の実績を活かした測定システムを開発することで、「症例毎の被ばく線量」を明らかにし、より詳細な被ばく状況の把握を可能にした。

- ・病院内不均等被ばくの実態調査：上記で開発した線量測定システムを活用し、医療における不均等被ばくの実態を明らかにした。

- ・ファントム実験：心臓IVRに従事する医師と看護師における、水晶体線量計の最適な着用部位を、ファントム実験により検討した。

3. “放射線被ばくマネジメント”の提唱と実践

放射線障害防止法改正に伴い、より具体的な事業者のマネジメント層の関与を含めた組織としての業務改善が求められる。他の分担研究で検討されている不均等被ばくのモニタリングや被ばく管理等の知見をもとに、医療従事者の放射線防護のための管理手法への労働安全衛生マネジメントシステムの応用のあり方を検討した。

4. 放射線被ばくと白内障発生の基礎的知見の整理

文献的に、これまでの放射線被ばくと白内障発生の基礎的知見をもとに、放射線の白内障リスクを検討する上で重要な発症メカニズムについて整理しまとめた。

（倫理面への配慮）

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

利益相反情報は必要に応じて各研究機関のCOI委員会の審査を受けた。

C. 研究結果

1. 海外諸国の取入れに関する実例の情報を収集

国際原子力機関（IAEA）の放射線源にさらされた労働者の保護のための一般安全要件（GSG-7）では、基本的な枠組みが整理して提示されており、眼の水晶体の等価線量限度の引き下げへの対応に関して具体的な技術的要件を示した技術文書（TECDOC-1731）のベースになるものとして、日本でも役立つと考えられた。

国内規制整備の課題として、対策の基本的な枠組みとして求められる段階的なアプローチの導入や認証制度の確立があげられ、対策を講じる手順を決定する意思決定支援技術やIAEAが放射線管理の基本的なツールとして提示している線量拘束値や調査レベルの規制等への導入も課題であると考えられた。その一方、GSG-7は最終ドラフトから刊行に時間を要しており、労使間で合意を得ることの困難さも物語っていた。課題の困難さを覚悟して取り組む必要がある。

線量評価などを含む法令要件に関し、要測定者の選定、測定頻度、測定方法等も含めてEU諸国で比較し、ほとんど国では対応がなされていたが、その一方で、EU指令にかかわらず、ベルギーとイタリアでは規制への取り入れが2018年12月現在ではなされておらず、フランスでは規制適用が一部、猶予されており、それらは医療現場への配慮に基づくものであると考えられた。また、個人線量測定では認証制度の導入も課題となっていた。

一方アメリカ国内においては、水晶体の線量限度引下げの検討について米国原子力規制委員会（以下NCR）の依頼で米国放射線防護審議会（以下NCRP）は科学委員会「眼の水晶体に対する放射線線量限度に関するガイダンス」を設置した。2015年3月には審議が開始され、線量限度の引き下げは妥当ではないとの意見であった。しかし、ICRPの引き下げ勧告を受けて変更しないのは国際的調和性に欠けるとの判断により再検討する流れとなった。

2016年2月5日から公開意見募集を実施

して検討し、放射線作業者は 150mSv/年→50mGy/年に引き下げることが挙げられた。なお、組織反応の防止には吸収線量限度で考えるべきとの指針より単位も Sv から Gy へ変更となった。その後、2017 年 1 月 25 日には NCRP Commentary No.26 を WEB 上で公開し、NCRP は新水晶体線量限度（作業員 50mGy/年、公衆 15mGy/年）を勧告した。

一方の NCR は 2014 年 7 月から 2015 年 6 月の間で 150mSv/年→50mSv/年への引き下げ導入（作業員の実効線量限度 50mSv/年に合わせ、水晶体の等価線量を 50mSv/年に引き下げた）を検討して意見の公募を求めた。しかし、専門家やステークホルダーからの反対（対費用効果の面から）により 2016 年 5 月の時点で断念し、導入しないことを 2016 年 12 月に正式に公知した。NCRP Commentary No.26 は NRC の依頼と CDC（疾病管理予防センター）との共同財政支援によって作成された文章であり、勧告内容は NRC も議論を検討する可能性はあるものの現時点での線量限度引き下げの見込みはない。

アメリカ国内の現在は、NCRP が勧告した値（作業員 50mGy/年、公衆 15mGy/年）ではなく、現行の水晶体等価線量限度（作業員 150mSv/年、公衆 15mSv/年）が継続されている。

2. 水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査

眼の水晶体の等価線量が年間20mSvを超える恐れのある分野は、医療分野が最も多く、ついで東京電力福島第一原子力発電所廃炉作業従事者などである。医療技術の発達に伴い、医療分野においては、水晶体の等価線量が経年的に増加傾向にある。循環器IVR領域などにおいては、防護メガネを着用していない場合、線源に近い左眼が高値を示し20mSv/年の等価線量限度を超える事例が見受けられる。

ファントム実験では医師位置ではLeft anterior oblique (LAO)系のAngulationでX線管が近づくために水晶体線量が高くなったが、看護師位置では散乱線源から離れていたためにAngulationによる影響は小さいことを示した。

医療現場において実態調査をしたところ、防護装具の不適切な使用が認められた。そこで、各医療施術領域ごとの被ばく実態、防護メガネ、遮蔽板等の防護策の組み合わせによる線量低減効果等を示した。たとえば、ERCP施行医師の水晶体被ばくの調査では、現時点で症例数は少ないものの、散乱線防護クロスを使用したうえで防護メガネを着用しても、術者の眼の水晶体線量は82, 7 μ Gy/検査であり、防護メガネ外側の線量、即ち、防護メガネ未着用時の水晶体線量は129.6 μ Gy/検査となり、決して少なくない線量と言える。一般的に、オーバーチューブ型の透視装置は、X線管の照射口が術者の眼に近く水晶体線量は高くなる傾向にある。散乱線防護クロスを使用すると約9割の散乱線除去が見込めるとの報告もあるが、実際の臨床では、患者の体位変換などで散乱線防護クロスに隙間があったり、適切に使用されていないことなどによって、予想以上の散乱線に晒されていることも否定はできない。今回の研究では、症例数から検討すると術者の眼の水晶体線量が5年で100 m Gyを超えることはなかった。しかしながら、件数の多い施設では線量限度を超える可能性が示唆された。また、散乱線防護クロスの未使用や防護メガネの未装着は、少ない症例数でも線量限度を超える可能性があることが示された。

3. “放射線被ばくマネジメント”の提唱と実践

放射線防護へのマネジメントシステムの応用において、その前提となるマネジメントシステムの骨格を整理した。マネジメントシステムの骨格は、基本方針、体制、目標、計画、評価、監査、マネジメントレビュー、改善である。次に、マネジメントシステムを利用した安全衛生リスクの管理手法について整理した。マネジメントシステムは、目的を達成するために必要十分な事項を確実に実行するために、継続的改善を図る仕組みである。したがって、目的を達成のための必要十分事項が明確であれば、いくつかの条件を整えればマネジメントシステムの運用によってその目的は達成することができる。

医療従事者の放射線防護は、作業環境管

理，作業管理，健康管理，労働衛生教育の労働衛生管理の基本を応用することによって，必要十分事項を明確にできるため，マネジメントシステムの応用が有効であると考えられた。併せて，法令順守のための仕組みと必要十分事項および法令事項の調整について検討した。その上で，医療従事者の放射線防護のためのマネジメントシステムの構築について，①基本方針の策定と宣言，②手順および基準の策定，③体制の構築，④計画の策定，⑤目標の設定，⑥実行と記録，⑦目標および実施状況の評価，⑧システム監査，⑨継続的改善ごとに整理した。

4. 放射線被ばくと白内障発生の基礎的知見の整理

水晶体は外胚葉組織から形成され，前方に虹彩，後方には，硝子体と網膜が存在する。水晶体は透明な被膜に包まれており，外側から，水晶体上皮，水晶体皮質，水晶体核からなる。最前方の単一層には，水晶体上皮細胞が存在し，**germinative zone (GZ: 胚細胞体)**で増殖する。放射線の標的はこの増殖している水晶体上皮細胞と考えられている。水晶体上皮細胞は，分裂後に**transitional zone (TZ: 移行帯)**に移動し，線維細胞への分化を開始する。水晶体には，血管や神経はなく，栄養は血液からではなく，角膜と水晶体の間にある房水から供給される。水晶体の代謝は，水晶体上皮と核を持つ若い水晶体繊維細胞に限られる。

白内障は，水晶体の混濁化が原因であり，視覚障害を引き起こす。そのリスク因子としては，加齢，遺伝組成，紫外線暴露，糖尿病などが知られている。水晶体は，骨髄のように，放射線に高感受性の組織の一つである。白内障は解剖学的に，発生場所による違いから，核型，皮質型，後囊下型に分類される。後囊下型白内障が，主な放射線白内障と考えられているが，放射線以外でも，加齢やステロイドなどによって，誘発されることや，宇宙放射線の被ばくでは，飛行機のパイロットに核型白内障が観察され，後囊下型白内障以外でも，放射線が関与することが報告されている。

放射線の人体への影響は，組織反応と確率的影響に分けられる。白内障は組織反応

に該当し，1950年代から1960年代にかけての解析から，水晶体の混濁が検出されるしきい線量は，急性照射で**2Gy**，分割照射や長期慢性照射で**5Gy**とされた。しかし，最近のヒトの疫学解析結果から，白内障のしきい線量は従来よりも低いことが予想された。また，**ICRP**では，水晶体混濁のしきい線量について新たに**1%**の白内障の出現率として，線量・線量率効果は採用せずに**0.5Gy**を提唱し，従来よりも大幅に低減された。白内障の病因や発症機構は未解明であり，遺伝要因や環境要因など，多因子が関わると考えられている。

D. 考察

1. 海外諸国の取入れに関する実例の情報を収集

眼の水晶体の放射線防護に関する技術文書である**TECDOC-1731**を現場に適用する際の基本になるものとして，日本でも役立つと考えられた。国内規制整備の課題としては，基本的な枠組みでの段階的なアプローチや認証制度の確立や，対策を講じる手順としての意思決定支援技術，線量拘束値や調査レベルの確立が課題であると考えられた。その一方，最終ドラフトから刊行に時間を要しており，課題の困難さも物語っていた。

今後，**IAEA**の**GSR part3**や**GSG-7**を利用した規制整備が有益であると考えられるが，規制面では，**Graded approach**の適用が課題になると考えられた。

また，眼の水晶体等価線量評価に関して，**IAEA**の技術文書に具体的な記載のない管理方策を我が国の放射線作業の実情に合わせて測定の要否，頻度，手法等を検討する必要があるが，そのための準備を行った。

2. 水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査

医療分野においては，十分な防護措置が取られていない実態が認められるとともに，まだ小規模のデータではあるが，診療放射線技を中心とした専門職の介入で改善している実例も見出された。

今後は，実態の把握とともに次項のマネジメントシステムとも連動し，複合的な防

護措置を十分に実施し、従事者の安全、健康確保とともに、医療供給へ支障を来さない対応が必須である。

3. “放射線被ばくマネジメント”の提唱と実践

放射線防護を対象としたマネジメントシステムが確実に実行されるためには、リーダーシップの存在とPDCAの運用、関係者の連携が可能となるような体制の整備が必要であると考えられる。また、放射線防護システムのOHSMSや医療機関の経営管理の仕組みとの統合を検討する必要があると考えられる。

4. 放射線被ばくと白内障発生の基礎的知見の整理

これまでの生物学的な研究による知見を整理し、放射線誘発白内障の発症メカニズムについて解説した。また、最近の疫学研究の知見のうち注目すべきこととして100 mGy未満に限定しても白内障リスクと線量関係が検出され、後囊下以外に、皮質や核でも白内障リスクが見いだされていることを提示した。

E. 結論

以上より、水晶体の等価線量限度の低減化を国内法令に導入するに際し、各種現場での測定評価を通じて、被ばく線量低減化の検討を行い、産業保健的視点からも検討した。成果の一部は、厚生労働省「眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会」資料に反映されている。その中では章末に提示した資料のように以下にまとめた。

業種別で見ると水晶体の等価線量が年20 mSvを超えるおそれのある分野は、主に一般医療と東京電力福島第一原子力発電所廃炉作業である。

医療においては、循環器内科、消化器内科、消化器外科、放射線診断科、整形外科の医師は、眼の水晶体の等価線量が20mSv/年を超える割合が高い。中には50mSv/年を超える医師がいる。看護師においてもERCP介助など一部の業務で超過しうる。一方、診療放射線技師においては、超過は認められなかった。

ある医療機関の例では、眼の水晶体の等

価線量は経年的に増加している。眼の水晶体の等価線量の専門性が高い業務に順次している上位3名の平均線量は、被ばく検出者の平均線量のおよそ10倍であった。

循環器科領域の医師の防護眼鏡を用いていない場合、眼の水晶体の等価線量は、線源との位置関係から左眼で高値であった。左眼の水晶体の等価線量は、防護板を用いても、20mSv/年に相当する1.7mSv/月を超えていた。

循環器科領域の看護師の防護眼鏡を用いていない場合、眼の水晶体の等価線量は、左右で差が生じなかった。眼の水晶体の等価線量は、防護板を用いることにより、20 mSv/年に相当する1.7mSv/月よりも低かった。

防護眼鏡を用いない場合、眼の近傍を測定した眼の水晶体の等価線量は、頸部における値と比較して低下する傾向はあるが、その差は限定的であった。

防護眼鏡の内側と外側を同時測定した結果、眼の水晶体の等価線量には良好な相関関係が認められた。調べた範囲では防護眼鏡の遮蔽率は約60%であった。

循環器領域の医師について、防護眼鏡を用いた眼の近傍で測定した眼の水晶体の等価線量は、頸部で測定した値と比較して有意に低下しており、被ばく低減率は約68%であった。

CT撮影介助者について、防護眼鏡を用いた眼の近傍で測定した眼の水晶体の等価線量は、防護眼鏡を用いない眼の近傍で測定した値と比較して、低減する傾向が認められ、被ばく低減率は約45%であった。

放射線防護を含めたマネジメントに関しては、今後の対策として、組織トップのリーダーシップや関係者の連携を前提とすれば、管理方法が明確である放射線防護にはマネジメントシステムが有効に働くことは明らかである。今後、マネジメントシステムを利用した放射線防護の好事例の集積が待たれる。

F. 健康危険情報
なし

G. 研究発表

1. 論文発表

【原著論文】

- [1] Ishii H, Chida K, Satsurai K, Haga Y, Kaga Y, Abe M, Inaba Y, Zuguchi M: A PHANTOM STUDY TO DETERMINE THE OPTIMAL PLACEMENT OF EYE DOSEMETERS ON INTERVENTIONAL RADIOLOGY STAFF, Radiation Protection Dosimetry (2019), in press.
- [2] Kawauchi S, Chida K, Moritake T, Matsumaru Y, Hamada Y, Sakuma H, Yoda S, Sun L, Sato M and Tsuruta W: Estimation of patient lens dose associated with c-arm cone-beam computed tomography usage during interventional neuroradiology. Radiation Protection Dosimetry, 2018 Nov 17
- [3] 人見 剛, 松原 俊二, 盛武 敬, 他 : 脳血管撮影における患者被ばく防護の最適化への第一歩 血管撮影装置表示値による撮影目的・疾患群別診断参考レベル設定の可能性調査. 日本放射線技術学会誌, 75 (3) , 263-269, 2019.
- [4] 山口一郎. 医療放射線安全管理法令から見た線量管理の現状. 医療放射線防護, 78, 20-25, 2018.
- [5] 山口一郎. 医療放射線施設の立入検査-医療放射線管理に関するサイトで比較的良好に閲覧されているページの紹介-. 医療放射線防護, 78, 62-69, 2018.
- [6] 山口一郎. 医療放射線安全ルールの問題. 医療放射線防護, 78, 75-78, 2018.

【著書】

- [1] 盛武 敬: 増補新訂 医療機関における産業保険活動ハンドブック (第5章-2レントゲン撮影等の放射線被曝対策), 公益財団法人 産業医学振興財団, P298-306, 2019 2.
- [2] 茂呂田 孝一: 増補新訂 医療機関における産業保険活動ハンドブック (第5章コラム: 放射線単位のいろいろ), 公益財団法人 産業医学振興財団, P307-308, 2019 2.
- [3] 茂呂田 孝一: 増補新訂 医療機関における産業保険活動ハンドブック (第5章コラム: 診断参考レベルを用いた患者被曝防護の最適化), 公益財団法人 産

業医学振興財団, P309, 2019 2.

- [4] 茂呂田 孝一: 増補新訂 医療機関における産業保険活動ハンドブック (第5章コラム: 診療放射線技師さんとの立ち話で役立つ線量値あれこれ), 公益財団法人 産業医学振興財団, P310, 2019 2.
- [5] 永元 啓介: 増補新訂 医療機関における産業保険活動ハンドブック (第5章コラム: 水晶体等価線量限度 (20mSv/年) 引き下げの経緯), 公益財団法人 産業医学振興財団, P311, 2019 2.
- [6] 松崎 賢: 増補新訂 医療機関における産業保険活動ハンドブック (第5章 コラム: いろいろな放射線防護具), 公益財団法人 産業医学振興財団, P312-314, 2019 2.

2. 学会発表

- [1] Ishii H, Chida K, Satsurai K, Haga Y, Kaga Y, Abe M, et al.: Evaluation of Eye Lens Doses in Interventional Radiology Staff: Where Should the Eye Dosimeter be Optimally Placed? Radiological Society of North America (RSNA2018), November 2018, Chicago
- [2] Morota K, Moritake T, Matsuzaki S, Nagamoto K, Sun L, Ishihara T, Okazaki R: Evaluation of trend and reducing patient exposure dose with DICOM-RDSR. 5th Asian and Oceanic IRPA Regional Congress on Radiation Protection (AOCRP-5), Melbourne, Australia, May 20-23, 2018
- [3] 樺田尚樹: 診療放射線従事者に対する個人管理の現状と課題, 基調講演, 第40回「医療放射線の安全利用」フォーラム, テーマ: 「医療放射線診療放射線従事者の個人管理の現状と課題」首都大学東京 (東京都・荒川区) 2月17日, 2018
- [4] 秋吉優史, 宇藤茂憲, 掛布智久, 神野郁夫, 小林育夫, 谷口和史, 野村貴美, 藤淵俊王, 宮川俊晴, 山口一郎, 横山須美. 低エネルギーX線の評価と安全管理に関する問題点と現状, 日本放射線安全管理学会第17回学術大会, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市) 12月5-7日, 2018年, 講演集. p19
- [5] 谷口 和史, 青木 久美子, 秋吉 優史, 川島 紀子, 小鍛冶 優, 森山 正樹, 宮川 俊晴, 山口 一郎. 教育現場での実態測定結果報告. 日本放射線安全管理学会第17回学術大会, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市) 12月5-7日, 2018年, 講

- 演集. p21
- [6] 藤淵 俊王, 秋吉 優史, 小林 育夫, 多田 順一郎, 谷口 和史, 山口 一郎. 低エネルギーX線の放射線安全管理. 日本放射線安全管理学会第17回学術大会, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市) 12月5-7日, 2018年, 講演集. p22
- [7] 阿部 利明, 盛武 敬, 馬田 敏幸, 永元 啓介, 中上 晃一, 茂呂田 孝一, 松崎 賢, 岡崎 龍史: 放射線施設におけるPDCAサイクルの実践方法の提案. 日本放射線安全管理学会第17回学術大会, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市), 12月5-7日, 2018.
- [8] 川内 寛, 千田 浩一, 盛武 敬, 濱田 祐介, 佐久間 秀之, 孫 略, 松丸 祐司, 鶴田 和太郎, 細尾 久幸, 田野 政勝: 血流改変ステントを用いた脳動脈瘤治療における患者被ばく線量-患者因子・手術因子と被ばく線量の関係-. 第34回NPO法人日本脳神経血管内治療学会学術総会, 仙台国際センター (宮城県・仙台市), 11月22-24日, 2018.
- [9] 中上 晃一, 盛武 敬, 細田 悦子: 病棟ポータブルX線検査時に放射線技師が抱える不安の解消 ~看護師との取り組み事例報告~. 第56回日本医療・病院管理学会学術総会, ホテルハマツ (福島県・郡山市), 10月27-28日, 2018
- [10] 阿部 利明, 盛武 敬, 中上 晃一: 大学アイソトープ研究センターによる病院放射線管理業務支援. 第56回日本医療・病院管理学会学術総会, ホテルハマツ (福島県・郡山市), 10月27-28日, 2018.
- [11] 松崎 賢, 他: チーム医療で臨む医療放射線防護の実践. **多職種連携シンポジウム** (座長: 茂呂田孝一, 他, コメンテーター: 盛武 敬, 他) 第46回日本放射線技術学会秋季学術大会, 仙台国際センター (宮城県・仙台市), 10月4-6日, 2018.
- [12] 茂呂田 孝一, 盛武 敬, 松崎 賢, 永元 啓介, 孫 略, 石原 隆宏, 岡崎 龍史: 脊髄腔造影施行医師の水晶体被ばく実態調査と放射線防護メガネの必要性. 第46回日本放射線技術学会秋季学術大会, 仙台国際センター (宮城県・仙台市), 10月4-6日, 2018.
- [13] 松崎 賢. IVR施行医の被ばく防護実態調査. 第46回日本放射線技術学会秋季学術大会, 仙台国際センター (宮城県・仙台市), 10月4日-6日, 2018.
- [14] 古場 裕介, 盛武 敬, 茂呂田 孝一: ボクセルファントムとモンテカルロ計算を用いた頭部IVRにおける臓器線量評価法の検討病室撮影における患者介助者の被ばく線量. 第116回日本医学物理学会学術大会, アイーナ (いわて県民情報交流センター) (岩手県・盛岡市), 9月15-17日, 2018
- [15] 永元 啓介, 盛武 敬, 中上 晃一, 茂呂田 孝一, 松崎 賢, 阿部 利明, 高山 愛菜, 孫 略, 村上 誠一, 岡崎 龍史: 病室撮影における患者介助者の被ばく線量. 日本放射線看護学会第7回学術集会, 長崎大学ポンペ会館・良順会館・医学部記念講堂 (長崎県・長崎市), 9月8-9日, 2018
- [16] 阿部 利明, 盛武 敬, 永元 啓介, 茂呂田 孝一, 松崎 賢, 中上 晃一, 馬田 敏幸, 岡崎 龍史: 視覚に訴える線量報告書「被ばく線量確認書」の試作について. 日本放射線看護学会第7回学術集会, 長崎大学ポンペ会館・良順会館・医学部記念講堂 (長崎県・長崎市), 9月8-9日, 2018
- [17] 松崎 賢, 盛武 敬, 茂呂田 孝一, 永元 啓介, 孫 略, 中上 晃一, 阿部 利明, 岡崎 龍史: 血管撮影に従事する看護師の被ばく防護装具使用状況実態. 日本放射線看護学会第7回学術集会, 長崎大学ポンペ会館・良順会館・医学部記念講堂 (長崎県・長崎市), 9月8-9日, 2018
- [18] 茂呂田 孝一, 盛武 敬, 松崎 賢, 永元 啓介, 孫 略, 中上 晃一, 阿部 利明, 高川 恵美, 田代 裕子, 松尾 佳奈, 岡崎 龍史: 血管撮影に従事する看護師に最適な放射線防護衣の選択. 日本放射線看護学会第7回学術集会, 長崎大学ポンペ会館・良順会館・医学部記念講堂 (長崎県・長崎市), 9月8-9日, 2018
- [19] 松崎 賢. 非血管系IVR施行医の被ばく防護に対する実態調査と業務改善. 平成30年度日本産業衛生学会九州地方会学会. ウェルとばた (福岡県北九州市), 6月29日-30日, 2018.
- [20] 永元 啓介. X線CT検査における患者介助方法の違いが医療従事者被ばく線量に与える影響. 平成30年度日本産業衛生学会九州地方会学会. ウェルとばた (福岡県北九州市), 6月29日-30日, 2018.
- [21] 阿部 利明. 放射線業務従事者教育訓練でのPDCAサイクル実践. 平成30年度日本産業衛生学会九州地方会学会. ウェルとばた (福岡県北九州市), 6月29日-30日, 2018.
- [22] 茂呂田 孝一. 脊髄腔造影における医師

の水晶体線量調査と防護メガネ着用の必要性. 平成30年度日本産業衛生学会九州地方会学会. ウェルとばた(福岡県北九州市), 6月29日-30日, 2018.

- [23] 永元 啓介, 盛武 敬, 茂呂田 孝一, 松崎 賢, 高山 愛菜, 孫 略, 渡辺 亮, 村上 誠一, 岡崎 龍史: CT検査における患者介助者の被ばく線量測定. 第91回日本産業衛生学会, 市民会館シアーズホーム夢ルーム(熊本県・熊本市), 5月16日-19日, 2018
- [24] 松崎 賢, 盛武 敬, 茂呂田 孝一, 永元 啓介, 孫 略, 熊奈 津代, 梶木 繁之, 岡崎 龍史: 病院血管系IVR施行医の被ばく防護に対する実態調査と業務改善. 第91回日本産業衛生学会, 市民会館シアーズホーム夢ルーム(熊本県・熊本市), 5月16日-19日, 2018
- [25] 永元 啓介, 盛武 敬, 茂呂田 孝一, 松崎 賢, 高山 愛菜, 孫 略, 渡辺 亮, 村上 誠一, 岡崎 龍史: CT検査における患者介助者の被ばく線量測定. 第74回日本放射線技術学会総会学術大会, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市), 4月12日-15日, 2018
- [26] 松崎 賢, 盛武 敬, 茂呂田 孝一, 永元 啓介, 孫 略, 岡崎 龍史: IVR施行医の被ばく防護に対する実態調査. 第74回日本放射線技術学会総会学術大会, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市), 4月12日-15日, 2018
- [27] 茂呂田 孝一, 盛武 敬, 松崎 賢, 永元 啓介, 孫 略, 石原 隆宏, 岡崎 龍史: DICOM-RDSRを用いた患者被ばくの傾向評価と低減対策. 第74回日本放射線技術学会総会学術大会, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市), 4月12日-15日, 2018.

3.その他

- [1] 盛武 敬: 放射線行政の動向と診断参考レベル, 第34回NPO法人日本脳神経血管内治療学会総会 被ばく防護ミニ講習会, 仙台国際センター(宮城県・仙台市), 2018年11月24日, 主催:(NPO)日本脳神経血管内治療学会

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

- [1] 線量計ホルダ:特願 2018-149742 (2018年8月8日出願), 発明者:盛武 敬, 孫 略, 永元啓介, 小野洋彰, 出願人:盛武 敬, 孫 略, 永元啓介, 有限会

社コスモテック, 株式会社保科製作所

2. 実用新案登録 なし

3. その他 なし

放射線誘発白内障の発生機序

水晶体は「水晶体囊」と呼ばれる基底膜に包まれている。前方内縁部にある胚細胞帯の上皮細胞が唯一増殖可能で、生涯にわたって分裂して成長しつづける。分裂後、移行帯に移行し、水晶体線維細胞に分化する。最終分化細胞は細胞小器官（核、ミトコンドリア）を持たず、クリスタランタンパク質で構成され透明な構造。

放射線の標的細胞は、胚細胞帯で唯一増殖する**水晶体上皮細胞**。
放射線白内障（後囊下型白内障）は、被ばくした上皮細胞の異常分化が原因。
異形成の線維細胞は水晶体の後部（後囊下）へ移動し、乳白色の懸濁を形成。

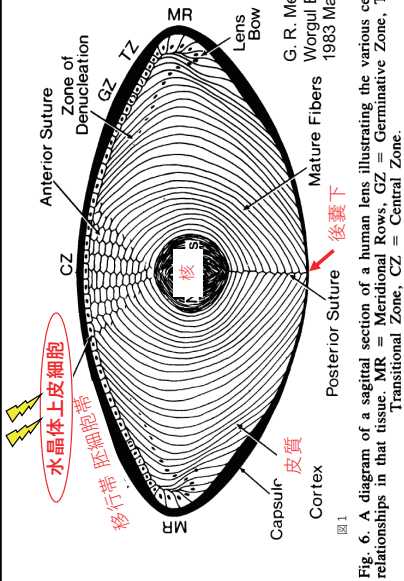


図1

Fig. 6. A diagram of a sagittal section of a human lens illustrating the various cellular relationships in that tissue. MR = Meridional Rows, GZ = Germinal Zone, TZ = Transitional Zone, CZ = Central Zone.

新勧告しきい線量（0.5Gy）の科学的根拠

ICRPの旧勧告	旧勧告からの変更点
微小混濁と視覚障害白内障は、必ずしも視覚障害性白内障に進行しない	微小混濁が視覚障害性白内障に進行すると仮定する
線量率効果があるとして、しきい線量を視覚障害性白内障と微小混濁に分けて勧告	水晶体の生物影響は、急性被ばく、多分割・遷延被ばく、慢性被ばくで同じと考え、視覚障害性白内障と微小混濁を分けずに、しきい線量 0.5Gyを勧告
線量率効果 微小混濁が急性被ばくで0.5～2Gy、慢性被ばくで5Gy 視覚障害性白内障では、急性被ばくで2～10Gy、慢性被ばくで8Gy	

微小混濁が視覚障害性白内障に進行する

原爆被爆者やチェルノブイリ事故清見島の疫学調査から、被ばくから数十年後に発症する遷延性の放射線白内障の報告から、進行性の白内障の存在が示唆

放射線白内障の線量率効果は考慮せず

急性被ばくのしきい線量 0.5Gy (Minamoto et al. Int J Radiat Biol 80 (2004) 339-345, Nerishi et al. Radiat Res 168 (2007) 404-408)
分割・遷延被ばくのしきい線量: <0.5Gy (Worgul et al. Radiat Res 167 (2007) 233-243.)
動物モデル (マウス) データでは、急性照射と比較して、分割照射と遷延照射のしきい線量は高い値を示唆。しかし、マウスと人との違い (マウスは人と比べ短寿命、視覚に関わる解剖学的、生理学的特性の違い、遺伝的背景) **ヒトの疫学的データでは、急性被ばくより大きくない。**

慢性被ばくについては水晶体混濁を指標にしており、白内障への進行に関する不確実性からしきい線量は不明

眼の水晶体の被ばく状況（業種別）

- 業種別で見ると水晶体の等価線量が年20mSvを超えるおそれのある分野は、主に一般医療と東京電力福島第一原子力発電所廃炉作業である。

【 眼の水晶体の等価線量分布（業種別） 】

注 1 分布

注 2

注 3

注 4 【単位：μSv/h】

注 5

注 6

注 7

注 8

注 9

注 10

注 11

注 12

注 13

注 14

注 15

注 16

注 17

注 18

注 19

注 20

注 21

注 22

注 23

注 24

注 25

注 26

注 27

注 28

注 29

注 30

注 31

注 32

注 33

注 34

注 35

注 36

注 37

注 38

注 39

注 40

注 41

注 42

注 43

注 44

注 45

注 46

注 47

注 48

注 49

注 50

注 51

注 52

注 53

注 54

注 55

注 56

注 57

注 58

注 59

注 60

注 61

注 62

注 63

注 64

注 65

注 66

注 67

注 68

注 69

注 70

注 71

注 72

注 73

注 74

注 75

注 76

注 77

注 78

注 79

注 80

注 81

注 82

注 83

注 84

注 85

注 86

注 87

注 88

注 89

注 90

注 91

注 92

注 93

注 94

注 95

注 96

注 97

注 98

注 99

注 100

注 101

注 102

注 103

注 104

注 105

注 106

注 107

注 108

注 109

注 110

注 111

注 112

注 113

注 114

注 115

注 116

注 117

注 118

注 119

注 120

注 121

注 122

注 123

注 124

注 125

注 126

注 127

注 128

注 129

注 130

注 131

注 132

注 133

注 134

注 135

注 136

注 137

注 138

注 139

注 140

注 141

注 142

注 143

注 144

注 145

注 146

注 147

注 148

注 149

注 150

注 151

注 152

注 153

注 154

注 155

注 156

注 157

注 158

注 159

注 160

注 161

注 162

注 163

注 164

注 165

注 166

注 167

注 168

注 169

注 170

注 171

注 172

注 173

注 174

注 175

注 176

注 177

注 178

注 179

注 180

注 181

注 182

注 183

注 184

注 185

注 186

注 187

注 188

注 189

注 190

注 191

注 192

注 193

注 194

注 195

注 196

注 197

注 198

注 199

注 200

注 201

注 202

注 203

注 204

注 205

注 206

注 207

注 208

注 209

注 210

注 211

注 212

注 213

注 214

注 215

注 216

注 217

注 218

注 219

注 220

注 221

注 222

注 223

注 224

注 225

注 226

注 227

注 228

注 229

注 230

注 231

注 232

注 233

注 234

注 235

注 236

注 237

注 238

注 239

注 240

注 241

注 242

注 243

注 244

注 245

注 246

注 247

注 248

注 249

注 250

注 251

注 252

注 253

注 254

注 255

注 256

注 257

注 258

注 259

注 260

注 261

注 262

注 263

注 264

注 265

注 266

注 267

注 268

注 269

注 270

注 271

注 272

注 273

注 274

注 275

注 276

注 277

注 278

注 279

注 280

注 281

注 282

注 283

注 284

注 285

注 286

注 287

注 288

注 289

注 290

注 291

注 292

注 293

注 294

注 295

注 296

注 297

注 298

注 299

注 300

注 301

注 302

注 303

注 304

注 305

注 306

注 307

注 308

注

図5

眼の水晶体の被ばく状況(看護師、主要な診療科目別)

- 内視鏡、外来に携わる看護師は、眼の水晶体の等価線量が20mSv/年を超える割合が高い。
- 内視鏡に携わる看護師には、眼の水晶体の等価線量が50mSv/年を超える者がある。

【 眼の水晶体の等価線量分布 (看護師、主要な診療科目別) 】

水晶体等価線量 mSv/年	内視鏡	外来	救急救命センター	血管造影	手術室	心臓血管外科	診療看護師	病棟	放射線治療科	放射線診断科	不妊診療科	歯科	麻酔科
ND	7.1%	42.1%	20.0%	0.0%	82.3%	50.0%	23.8%	65.5%	4.4%	0.0%	0.0%	100.0%	60.0%
2.5以下	0.0%	32.4%	40.0%	0.0%	16.8%	50.0%	61.9%	31.0%	17.8%	100.0%	50.0%	0.0%	40.0%
2.5超～5以下	7.1%	11.3%	40.0%	8.3%	0.6%	0.0%	9.5%	0.0%	22.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
5超～10以下	0.0%	7.3%	0.0%	16.7%	0.3%	0.0%	4.8%	3.4%	35.6%	0.0%	50.0%	0.0%	0.0%
10超～20以下	35.7%	5.9%	0.0%	29.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	20.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
20超～50以下	35.7%	0.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
50超～100以下	14.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
100超	14.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
人数	14	423	5	24	310	4	21	87	45	1	2	1	5
20超	50.0%	0.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

※ 眼の水晶体の等価線量は、均等被ばくの場合には胸部 (Xは腹部)、不均等被ばくの場合には頭頸部に装着した線量計の1cm又は70μm又は70μmの線量当量で評価しているが、防護眼鏡等による遮蔽効果は考慮していない。

注：全国17か所の医療機関 (国立病院機構関連施設) に在籍する看護師543人を対象として調査した結果

藤岡 俊王、藤田克也、五十嵐 隆元、西丸 英治、堀田昇吾、桜井 礼子、小野 孝二
日本放射線技術学会学術調査研究班による調査 (2018年秋季日本放射線技術学会秋季学術大会発表)

第2回 眼の水晶体の被ばく状況(看護師、主要な診療科目別)

5

藤岡 俊王、藤田克也、五十嵐 隆元、西丸 英治、堀田昇吾、桜井 礼子、小野 孝二
日本放射線技術学会学術調査研究班による調査 (2018年秋季日本放射線技術学会秋季学術大会発表)

図7

医療従事者の眼の水晶体が受ける被ばくの実態(経年変化)

- 眼の水晶体の等価線量は経年的に増加している。
- 眼の水晶体の等価線量は経年的に増加している。
- 眼の水晶体の等価線量は経年的に増加している。

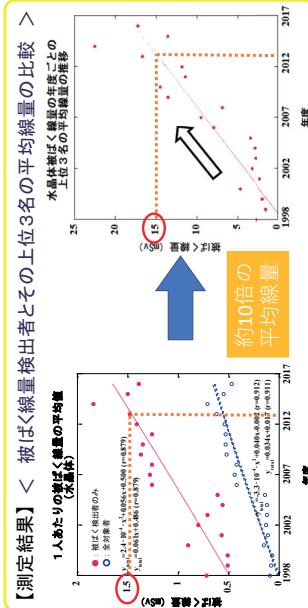
【測定条件】 ● 特定機能病院A(病床数 約700)と一般病院B(病床数約150)

● 対象者は医師、看護師、診療放射線技師

● 眼の水晶体の等価線量の算定方法は、次のいずれかを採用。

① 均等被ばくの場合：基本部位(男性は胸部、女性は腹部)

② 不均等被ばくの場合：頸部のH_{1cm}又はH_{70μm}の最大値



第2回 眼の水晶体の被ばく状況(看護師、主要な診療科目別)

7

藤岡 俊王、藤田克也、五十嵐 隆元、西丸 英治、堀田昇吾、桜井 礼子、小野 孝二
日本放射線技術学会学術調査研究班による調査 (2018年秋季日本放射線技術学会秋季学術大会発表)

眼の水晶体の被ばく状況(診療放射線技師、主要な担当業務別、一月間)

- 比較的線量は少ないが血管造影、一般撮影、X線CT検査では検査数、介助数の多い施設は20mSvを超える可能性がある。

第2回の検討会資料5-改訂資料

【 眼の水晶体の等価線量分布 (診療放射線技師、主要な担当業務別) 】

水晶体等価線量 mSv/月	核医学	PET	血管造影	MRI	TV室	放射線治療	CT	一般撮影
ND	2.2%	6.4%	9.6%	27.1%	26.6%	30.5%	15.4%	7.7%
2.5以下	97.7%	93.5%	90.1%	72.6%	73.3%	69.2%	82.4%	91.6%
2.5超～5以下	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.2%	1.4%	0.5%
5超～10以下	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	0.0%
10超	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
人数	135	155	499	622	60	406	879	3657

※ 眼の水晶体の等価線量は、均等被ばくの場合には胸部 (Xは腹部)、不均等被ばくの場合には頭頸部に装着した線量計の1cm又は70μmの線量当量で評価しているが、防護眼鏡等による遮蔽効果は考慮していない。

※ 途中のローテーションがあり、月毎の主担当業務で集計しているため、単純に12倍したものが年間の線量とはならない。

注：全国17か所の医療機関 (国立病院機構関連施設) を対象として調査した結果

※ 調査期間は3年間で用いたデータは個人の各月のデータ (延べ6,413件(診療放射線技師6,413人・月))

※ 従事する業務は、月毎で最も被ばくしたと思われる業務を施設の調査担当者が入力

※ MRIでの622名は、調査期間の3年間のうち、MRIを主担当とした月の延べ人数

※ 当直や他の部門の業務もあり、個人線量計が支給されている

※ 日中業務がMRIで、当直やヘルプ等でX線撮影等の業務をし、その際に被ばくした可能性がある

6

藤岡 俊王、藤田克也、五十嵐 隆元、西丸 英治、堀田昇吾、桜井 礼子、小野 孝二
日本放射線技術学会学術調査研究班による調査 (2018年秋季日本放射線技術学会秋季学術大会発表)

図8

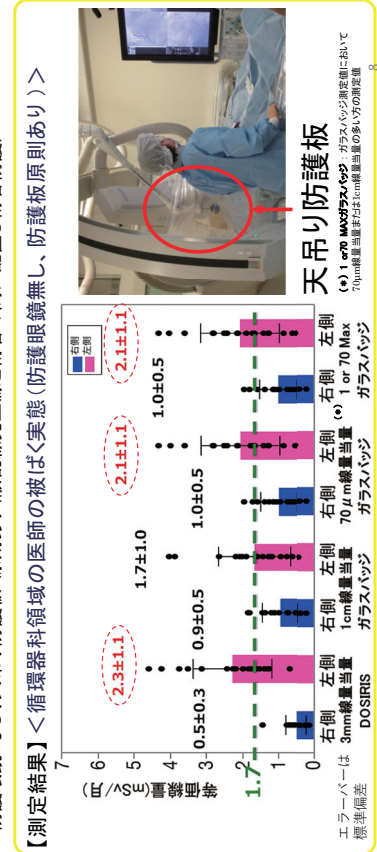
循環器科領域の被ばく実態(医師)

- 循環器科領域の医師の防護眼鏡を用いていない場合、眼の水晶体の等価線量は、左眼で高値であった。
- 循環器科領域の医師の左眼の水晶体の等価線量は、原則として防護板を用いても、20mSv/年に相当する17mSv/月を超えていた。

【測定条件】 サンプル15名に対して、DOSIRISとガラスバジルの両方を着用して計測

防護眼鏡：なし、天吊り防護板：原則あり(散乱線発生源と術者の間に配置し術者防護)

【測定結果】 <循環器科領域の医師の被ばく実態(防護眼鏡無し、防護板原則あり)>



第2回 眼の水晶体の被ばく状況(看護師、主要な診療科目別)

7

藤岡 俊王、藤田克也、五十嵐 隆元、西丸 英治、堀田昇吾、桜井 礼子、小野 孝二
日本放射線技術学会学術調査研究班による調査 (2018年秋季日本放射線技術学会秋季学術大会発表)

測定部位による眼の水晶体の等価線量の比較

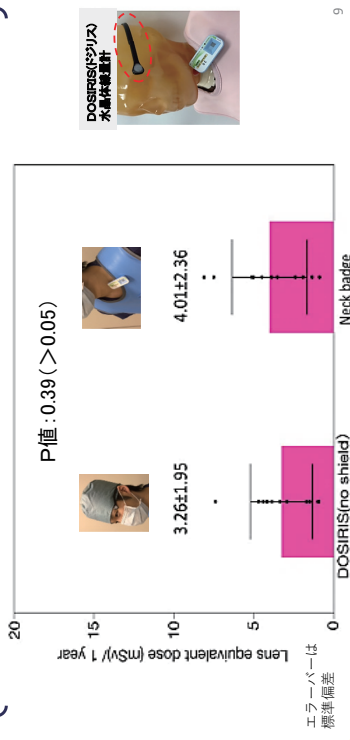
- 防護眼鏡を用いない場合、眼の近傍を測定した眼の水晶体の等価線量は、頸部における値と比較して低下する傾向はあるが、有意な差は認められない。

【測定条件】

IC看護師11名に対して、DOSIRISと頸部ガラスバスバジの両方を着用して計測

【測定結果】

眼の近傍(no shield:防護眼鏡なし、DOSIRISを使用)と
頸部(Neck badge:ガラスバスバジを使用)の水晶体年間推定評価の比較



第2回 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会(平成31年2月6日) 榊田尚樹

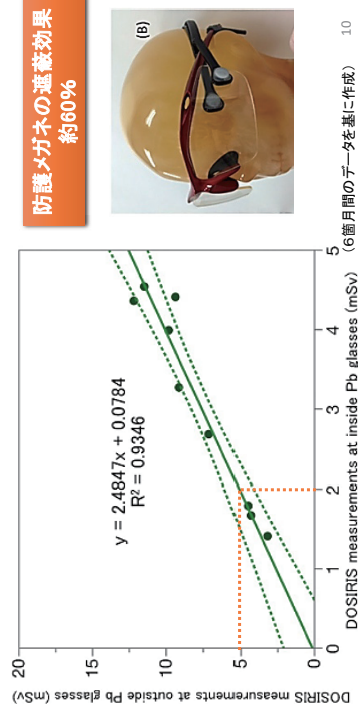
防護眼鏡の遮蔽率

- 防護眼鏡の内側と外側を同時測定した結果、眼の水晶体の等価線量には良好な相関関係が認められた。
- 防護眼鏡の遮蔽率は約60%であった。

【測定条件】

循環器領域のIVR医師9名に対し、防護眼鏡内側と外側を同時に計測(DOSIRISを2個使用)

【測定結果】<「防護眼鏡の内側と外側」の線量の相関>



第2回 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会(平成31年2月6日) 榊田尚樹

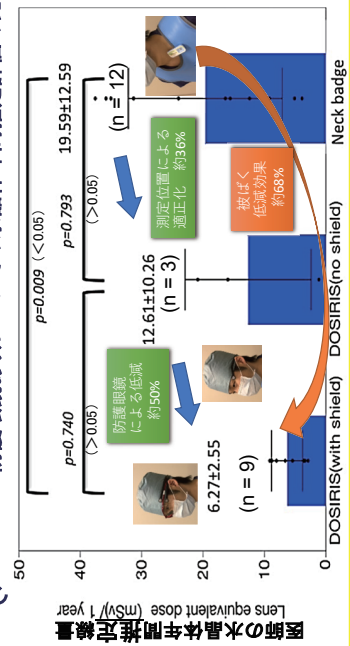
測定部位の変更と放射線防護の効果の推計(循環器領域)

- 循環器領域の医師について、防護眼鏡を用いた眼の近傍で測定した眼の水晶体の等価線量は、頸部で測定した値と比較して有意に低下しており、被ばく低減率は約68%であった。

【測定条件】

- ・ 計12名の医師について、次のとおり計測した。
 - ・ 3名はDOSIRIS(防護眼鏡なし)と頸部ガラスバスバジの両方
 - ・ 9名はDOSIRIS(防護眼鏡あり)と頸部ガラスバスバジの両方
- なお、1箇月分の測定を年間に評価した値が年間推定評価である。

【測定結果】(頸部(Neck badge:頸部ガラスバスバジ)と眼の近傍(no shield:防護眼鏡なし)、with shield:防護眼鏡あり)についての水晶体年間推定評価の比較



千田浩一, 他 Scientific Reports誌

第2回 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会(平成31年2月6日) 榊田尚樹

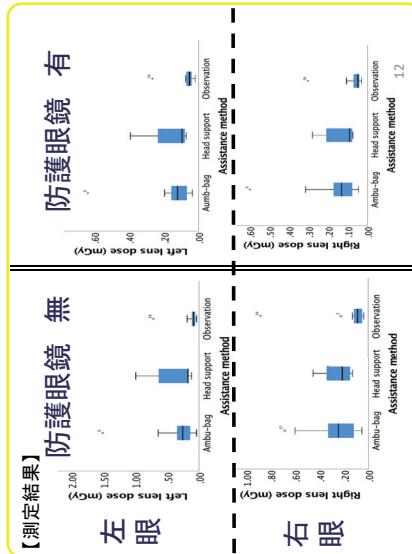
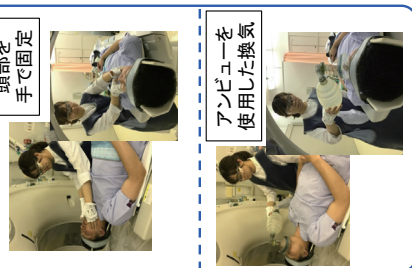
防護眼鏡の遮蔽(CT撮影介助者)

- CT撮影介助者について、防護眼鏡を用いた眼の近傍で測定した眼の水晶体の等価線量は、防護眼鏡を用いない眼の近傍で測定した値と比較して、低減する傾向が認められ、被ばく低減率は約45%であった。

【測定条件】

CT検査時の患者介助
(イメージ)

サンプル50名について、防護眼鏡の左右内外に蛍光ガラス線量計(GD-352M)を使用して計測した。



第2回 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会(平成31年2月6日) 榊田尚樹

防護板等による遮蔽

- オーバーチューブ用防護カーテンを使用しない場合、頸部で測定した眼の水晶体の等価線量が25%の看護師で20mSv/年を超えていた。
- オーバーチューブ用防護カーテンを使用した場合、頸部で測定した眼の水晶体の等価線量は半分以下に低減した。

【測定条件】

4名の看護師について、DOSIRIS(防護眼鏡なし)と頸部ガラスバズバジの両方で計測した。



【測定結果】

< 年間の眼の水晶体の等価線量 >

	Ns1	Ns2	Ns3	Ns4
防護カーテンなし(mSv)	12.2	29.8	17.0	12.9
防護カーテンあり(mSv)	7.2	7.0	8.4	3.8

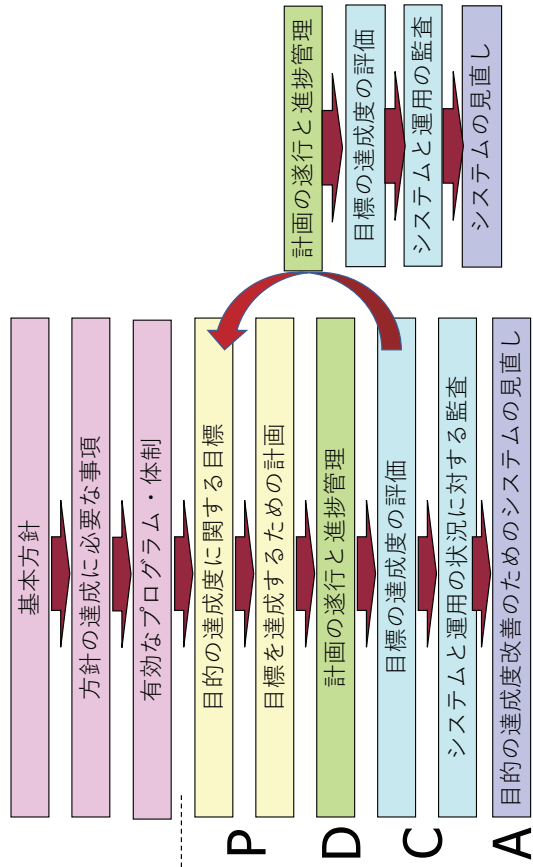
約77%低減

Yoshiaki Morishima, Koichi Chida, Takayoshi Meguro. Effectiveness of additional lead shielding to protect staff from scattering radiation during endoscopic retrograde cholangiopancreatography procedures
J Radiat Res. 2018;59(2):225-232. doi:10.1093/jrr/rxx039

まとめ

- ある医療機関の例では、眼の水晶体の等価線量は経年的に増加している。眼の水晶体の等価線量の上位3名の平均線量は、全検出者の平均線量のおよそ10倍であった。
- 循環器科領域の医師の防護眼鏡を用いていない場合、眼の水晶体の等価線量は、左眼で高値であった。左眼の水晶体の等価線量は、防護板を用いても、20mSv/年に相当する1.7mSv/月を超えていた。
- 循環器科領域の看護師の防護眼鏡を用いていない場合、眼の水晶体の等価線量は、左右で差が生じた。眼の水晶体の等価線量は、防護板を用いることにより、20mSv/年に相当する1.7mSv/月よりも低かった。
- 防護眼鏡を用いない場合、眼の近傍を測定した眼の水晶体の等価線量は、頸部における値と比較して低下する傾向はあるが、その差は限定であった。
- 防護眼鏡の内側と外側を同時測定した結果、眼の水晶体の等価線量には良好な相関関係が認められた。調べた範囲では防護眼鏡の遮蔽率は約60%であった。
- 循環器科領域の医師について、防護眼鏡を用いた眼の近傍で測定した眼の水晶体の等価線量は、頸部で測定した値と比較して有意に低下しており、被ばく低減率は約68%であった。
- CT撮影介助者について、防護眼鏡を用いた眼の近傍で測定した眼の水晶体の等価線量は、防護眼鏡を用いない眼の近傍で測定した値と比較して、低減する傾向が認められ、被ばく低減率は約45%であった。

目的を達成するためのマネジメントシステムの骨格



対応経費の推計

- 想定する対象者：

眼の水晶体の等価線量分布（業種別）において、平成29年度に眼の水晶体の等価線量が20mSv/年を超えている一般医療の労働者全て（2,221人）

- 防護メガネの初期購入費用（推計） **120百万円※1**

（仮定） 防護メガネ：平均5万円/個
※1 50,000円 × 2,221人 = 約120百万円

- 眼の近傍における1年間の測定費用（推計） **年間54百万円※2**

（仮定） 測定費用：平均2千円/個・月
※2 2,000円/月 × 12月 × 2,221人 = 約54百万円/年

II. 分担研究報告

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 古渡意彦 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 主査

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

- ・ 国際原子力機関（IAEA）の放射線源にさらされた労働者の保護のための一般安全要件（GSG-7）では、基本的な枠組みが整理して提示されており、眼の水晶体の等価線量限度の引き下げへの対応に関して具体的な技術的要件を示した技術文書（TECDOC-1731）のベースになるものとして、日本でも役立つと考えられた。
- ・ 国内規制整備の課題として、対策の基本的な枠組みとして求められる段階的なアプローチの導入や認証制度の確立があげられ、対策を講じる手順を決定する意思決定支援技術や IAEA が放射線管理の基本的なツールとして提示している線量拘束値や調査レベルの規制等への導入も課題であると考えられた。その一方、GSG-7 は最終ドラフトから刊行に時間を要しており、労使間で合意を得ることの困難さも物語っていた。課題の困難さを覚悟して取り組む必要がある。
- ・ 線量評価などを含む法令要件に関し、要測定者の選定、測定の頻度、測定方法等も含めて EU 諸国で比較し、ほとんど国では対応がなされていたが、その一方で、EU 指令にかかわらず、ベルギーとイタリアでは規制への取り入れが 2018 年 12 月現在ではなされておらず、フランスでは規制適用が一部、猶予されており、それらは医療現場への配慮に基づくものであると考えられた。また、個人線量測定では認証制度の導入も課題となっていた。

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。

これを受けて、欧州原子力共同体（EURATOM）加盟国では 2018 年 11 月現在で、既にイタリアとベルギーを除き国内法令に取り入れた。

適切な放射線防護体系の運用の観点からも、新しい線量限度の国内規制取入れが急務でとなっている。

有効な対策を進めるための基になる科学的な根拠を示すためには、線量モニタリングの適切な普及と線量低減化法の確立が課題である。放射線審議会の眼の水晶体の放射線防護検討部会でもそのあり方の議論がなされ、放射線審議会に報告され、それに基づき意見具申がなされたが、技術的な解決策を実行するためには、本課題に関する事業所内のガバナンスの整備が必要となり、そのためには規制整備も求められることになる。とりわけ労働安全衛生法に基づく規制は、労働者保護の観点に立ち、労使間での健全な協調の基で、資源の有限性にも鑑み最適化を図り、幅広いステークホルダー間の理解と協力を得られる環境を作り、マネジメント・システムの現場適用への課題を整理することが必須となる。

この観点で放射線業務に係る各種調査研究報告等や、諸外国の労働法令を含む制度や事例について必要な検証を行い、不均等被ばくのおそれのある放射線業務従事者の線量管理の方法と被ばく低減対策を実施するための規制整備の課題を取りまとめることが求められているが、EU 加盟国等すでに規制を取り入れた地域・国における、取り入れ前後の情報を得ることは有用であると考えられる。

そこで、本研究では、放射線審議会から意見具申された眼の水晶体線量の等価線量限度の引き下げの検討に資することを目的に、海外の動向を精査し、労働者の権利の確保と共に規制の最適化を考慮した効果的な“放射線被ばくマネジメント”を機能させるための課題の整理を試みた。

B. 研究方法

1) 国際機関の文書の解析

国際原子力機関（IAEA）による職業被ばくの一般安全ガイド（GSG-7）が 2018 年 10 月に刊行されたことから、その内容を分析した。

2) 海外諸国の取入れに関する事例の情報収集

海外の規制の動向を各政府機関のウェブサイトを対象に調査し、さらに文献的に、および研究者のネットワーク等を通じ情報収集するとともに国際原子力機関を訪問し、関係者からの情報収集を行った。

さらに、IAEA の ORPAS mission に参加する機会を得たので、国際的な場でのその適用の状況をまとめるとともに国際原子力

機関の本部を訪問し、情報の収集を行った。

3) 疫学研究の動向の把握

海外の規制の動向に影響を与えた疫学研究の結果を分析した。

4) 法令の整備に向けた実用量に関する論点整理

眼の水晶体の線量限度の引き下げの規制整備においてモニタリングのあり方も課題となっていることから、その論点整理を試みた。

5) 現状把握のための統計データの検討

眼の水晶体の線量限度の引き下げの課題を検討するために、労働者の放射線曝露の現状の把握を試みるために公開されている資料を分析した。

(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) 国際機関の文書の解析

国際原子力機関では、技術文書として IAEA TECDOC No. 1731「Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye」を発行している。この技術文書の上位文書として、GSR Part 3 のガイダンスに該当する GSG-7 で労働者を対象にした放射線防護の基本的な枠組みが整理して提示されており、日本での規制整備にも役立つと考え

られる。

GSG-7 では、計画被ばく状況での職業被ばくに関して、3.68 から 3.116 項で要求事項 19 から 24 まで提示している。

要求事項 19：規制当局の責任

要求事項 20：職業被ばくのモニタリングと記録

要求事項 21：雇用主や登録・許可事業所の労働者の防護上の責任

要求事項 22：労働者のコンプライアンス

要求事項 23：雇用主や登録・許可事業所間の連携

要求事項 24：放射線防護プログラムにおけるアレンジメント

要求事項 25：職業上の放射線曝露の評価と労働者の健康調査

要求事項 26：情報提供、教育訓練

要求事項 27：労働の対価の条件

要求事項 28：女性労働者と職業訓練を受ける 18 歳未満の未成人での特別な扱い

要求事項 23 は、複数の場で勤務する場合の雇用主側の調整の責任を規定しているものである。古くからある課題ではあるが、医療従事者を含め多様化しており、今日的な対応も求められるところでもある。日本でもクロスアポイント制度への放射線安全の適用が課題になっているが、法令面の整備が課題となっている。

要求事項 26 では、特別な教育が該当するが日本では医療従事者は放射線に関して十分な知識を持っているので、この規定が免除されている実態にあると考えられる。その一方で医療法施行規則の改正では医療従

事者の放射線防護に関する認識への懸念から規制が強化されており、考え方の整合性が問われる事態になっており、実情を踏まえた段階的な規制の適用が望まれると考えられた。

要求事項 28 は、女性の線量限度が現場での調査結果を踏まえて放射線審議会で議論されているところである。IAEA の ORPAS ミッションでも、アジアの文化的な背景や関係者間での意見の多様性も考慮に入れつつ、そのあるべき姿が議論になり、胎児の放射線防護に十分に留意しつつ、女性の働く権利にもどう配慮するかが課題となっていた。一方、EU では男女平等にも配慮した放射線管理が実装されていた。放射線審議会では現場で行われた調査も議論に題材として活用されており、女性労働者も主体的に係わり検討を進める必要がある。救急救命分野で放射線診療を活用するハイブリッド ER システム (HERS) が普及しつつあり、(Hybrid ER は 2019 年 2 月時点で、全国で 11 施設となっている) このシステム導入している施設の中では、男性の研修医が女性の研修医の放射線業務を引き受けるような行動例が観察されていた。この事例では、男性の研修医が女性の研修医の放射線業務を引き受けるという職員間でのリスク分配であり、誰がリスクを引き受けるかの観点では、職種間での力関係などが現場で異なる現状にもある。例えば、放射線科医のリスクを看護師が引き受ける例もあり、課題として一般化しうると考えられた。

教育養成での放射線曝露は、直接の該当事例はないと考えられるが、救急救命士の研

修で、年間で一定の日数の医療機関での研修が義務づけられており、この研修で放射線に曝露する例が確認されており、似た構造にあると考えられた。また、学校教育においてクルックス管を用いた実験が今後再開される可能性があり、その放射線曝露実態が低エネルギーのパルス場で装置の安定性の問題もあることから、その実情の把握がいまだに十分ではなく、その放射線防護のあり方も課題になり得ると考えられた。これらの課題も段階的規制の考え方に基づき、線量拘束値の概念も利用して放射線防護の最適化を図ることが望まれると考えられた。

なお、要求事項 28 の 18 歳未満の未成人での特別な扱いに関して、放射線障害防止法では、以下のように取扱いの制限を規定しているが、准看護師に関しては放射性同位元素等の取扱が可能となっており、その放射線安全での特別な配慮の法整備が課題となっている。

第三十一条 何人も、次の各号のいずれかに該当する者に放射性同位元素又は放射性汚染物の取扱いをさせてはならない。

一 十八歳未満の者

二 心身の障害により放射線障害の防止のために必要な措置を適切に講ずることができない者として原子力規制委員会規則で定めるもの

2 何人も、前項各号のいずれかに該当する者に放射線発生装置を使用させてはならない。

3 前二項の規定は、保健師助産師看護師法(昭和二十三年法律第二百三号)により免許を受けた准看護師その他の原子力規制委

員会規則で定める者については、適用しない。

2) 海外諸国の取入れに関する実例の情報収集

(規制の国際比較)

線量評価などを含む法令要件に関し、測定
の要否、頻度、手法等も含めて EU 諸国で
比較した。比較した結果をこの分担研究報
告書の末尾に表 A および「規制の国際比
較」として示す。EU 指令にかかわらず、
ベルギーとイタリアでは規制への取り入れ
がなされておらず、フランスでは、規制適
用が一部、猶予されており、それらは医療
現場への配慮に基づくものであることを確
認した。その結果も踏まえて、IAEA での
取り組みの現状も直接情報収集し課題を把
握した。測定では認証制度の導入も課題で
あり、その実情に関しても把握を試みた。
本課題は国際的な取り組みが求められる国
際放射線防護学会 (IRPA) でもタスクグ
ループが調査を繰り返しており、2019 年
1 月現在フェーズ 3 の調査が行われてい
る。この調査でポイントになると思われる
点も検討した。

一方、眼科的な検査の進歩により、より微
小な水晶体混濁も検査が可能となっている。
電離則の特殊健康診断において、このため
線量限度を超えた労働者への対応における

電離則第 44 条 (診察等) 第二項への対応の
課題の整理だけではなく、眼の水晶体への
放射線による影響の検査法を明らかにする
必要があるが、この点については踏み込ん
だ取り組みは確認できなかった。

(放射線防護の原則)

ILO では、確定的影響 (組織反応) に関し
て、しきい値を超えないように管理するこ
とを求めている¹。この原則は、IAEA GSR
part3 発行後も見直されていない。このため
しきい線量の取扱いも課題となると考えら
れた。この課題は IRPA の Task3 の質問紙
調査において日本の関係者の懸念として回
答された。ただし、放射線審議会では、
100mSv/5y (=0.5Sv/25yr) の線量限度で
問題ないとしており、しきい値を超えない
ように管理することが可能との想定で意見
具申していた。また、ICRP では、
100mSv/5y では理論上、生涯線量がしきい
値を超えうるが、現場で放射線管理を適切
に行っていれば、しきい値を超える可能性
が大きいとしていた²。同様に海外のリ
ポートでも線量限度を守っても理論的にし
きい値を超える可能性に言及しているもの
があった³。

(ORPAS での対応事例)

国際機関の文書の適用する場面として国

¹
https://www.ilo.org/global/publications/books/WCMS_120131/lang-en/index.htm

²
<https://gnssn.iaea.org/RTWS/general/Shared%20Documents/Radiation%20Protection/TM%20on%20the%20>

[New%20Dose%20Limit%20to%20the%20Lens%20of%20the%20Eye/07.%20Clement%20-%20ICRP.pdf](https://www.arpansa.gov.au/sites/g/files/net3086/f/rhc-statement-occupational-dose-limit-for-eye.pdf)

³
<https://www.arpansa.gov.au/sites/g/files/net3086/f/rhc-statement-occupational-dose-limit-for-eye.pdf>

国際原子力機関は、Occupational Radiation Protection Appraisals (ORPAS)職業放射線防護評価サービスを提供している。

ORPAS は独立した評価サービスであり、ホスト国に対して、規制の枠組みや全ての対象事業所での放射線利用に関する活動に適用される関連する IAEA の安全基準に添い関係する分野での領域横断的なレビューを提供する。主に参照される文書は、GSG-7 によりガイダンスされる GSR Part 3 である。

ORPAS の目的は、ホスト国に対して職業被ばく防護に対策に関して客観的な評価を提供し、ホスト国が職業被ばく防護に対策に関して必要な措置を講じているかどうかを判断し、これらの措置が有効に機能し、一般的に最適化されている華道家も判断する。さらに国際的なガイダンスの適合するためにさらに改善すべきところや良い取り組みであるところを明らかにし、防護の最適化に資するようにし、このような改善を達成するために取るべき手立てを推奨するとともにホスト国での独自の取り組みで他でも参考になると考えられるものを指摘することである。

ORPAS は放射線に関わる全ての種類の事業所や活動を扱い、規制当局、エンドユーザーそして技術支援組織 (technical and scientific support services or organisations (TSOs)) の全てをカバーしており、放射線防護に関わる個人モニタリング、作業場モニタリング、助言サービスの全てを含んでいる。

ORPAS は、自己評価、放射線防護での安全文化、事業所や放射線防護活動の品質管

理システムを促進している。

ORPAS は、レビューサービス関与や国際的なガイダンスに関する知識や良好事例の把握を踏まえて選ばれた国際的な専門家によって提供される。これらの、各国の放射線安全制度やその適用の違いを認識できる必要があるとされている。

専門家チームによる活動成果は最終報告書としてまとめられ、そこに改善のための推奨や行動が示されることになる。

この仕組みは加盟国からの公式な要請に基づき実施される。

今回は、インドネシア国政府の求めにより国際原子力機関が行う職業上の放射線防護対策の評価のミッションに、山口が専門家チームのメンバーとして参加した (2018 年 11 月に実施)。本ミッションはアジアでは 3 カ国目で昨年度も参加したマレーシアに引き続くものである。インドネシア政府からの正式の要請が 2018 年 2 月にあり、Pre-ORPAS が同年の 5 月に実施されている。

チームは 10 人で構成されそれに IAEA のコーディネータも含めた 11 人で 5 つのグループでそれぞれの分野を担当し、山口はタイの専門家と共に医療分野を担当し、2 つの医療施設を訪問し評価を行うとともに他のグループとも連携して原子力規制担当部署の医療分野などでの評価を試みた。訪問調査の評価結果のドラフトを作成し、相手方から事実関係などの確認を得た後に予備報告書としてまとめられた。まとめられた予備報告書の基本的な考え方や勧告内容に関して各関係者の理解が得られ、インドネシアの訪問調査が終了した。

このように ORPAS は機能した取り組みとなっており、このような外部評価の仕組

みを利用することも有用であると考えられた。

3) 疫学研究の動向の把握

放射線誘発白内障のリスクに関する疫学研究の動向把握を試みた。

Medline で過去 5 年間のヒトでの眼の水晶体での放射線曝露による白内障に関する文献を検索したところ以下の 18 の論文が抽出された。この検索では、紫外線に関するものを除外した。

((("lens, crystalline"[MeSH Terms] OR ("lens"[All Fields] AND "crystalline"[All Fields]) OR "crystalline lens"[All Fields] OR ("lens"[All Fields] AND "eye"[All Fields]) OR "lens eye"[All Fields]) AND ("ionising radiation"[All Fields] OR "radiation, ionizing"[MeSH Terms] OR ("radiation"[All Fields] AND "ionizing"[All Fields]) OR "ionizing radiation"[All Fields] OR ("ionizing"[All Fields] AND "radiation"[All Fields])) AND ("cataract"[MeSH Terms] OR "cataract"[All Fields])) AND (hasabstract[text] AND "2014/03/1"[PDat] : "2019/02/28"[PDat] AND "humans"[MeSH Terms])

1: Little MP, Kitahara CM, Cahoon EK, Bernier MO, Velazquez-Kronen R, Doody MM, Borrego D, Miller JS, Alexander BH, Simon SL, Preston DL, Hamada N, Linet MS, Meyer C. Occupational radiation exposure and risk of cataract incidence in a cohort of US radiologic technologists.

Eur J Epidemiol. 2018 Dec;33(12):1179-1191.

2: Thome C, Chambers DB, Hooker AM, Thompson JW, Boreham DR. Deterministic Effects to the Lens of the Eye Following Ionizing Radiation Exposure: is There Evidence to Support a Reduction in Threshold Dose? Health Phys. 2018 Mar;114(3):328-343.

3: Dauer LT, Ainsbury EA, Dynlacht J, Hoel D, Klein BEK, Mayer D, Prescott CR, Thornton RH, Vano E, Woloschak GE, Flannery CM, Goldstein LE, Hamada N, Tran PK, Grissom MP, Blakely EA. Guidance on radiation dose limits for the lens of the eye: overview of the recommendations in NCRP Commentary No. 26. Int J Radiat Biol. 2017 Oct;93(10):1015-1023.

4: Rose A, Rae WID, Chikobvu P, Marais W. A multiple methods approach: radiation associated cataracts and occupational radiation safety practices in interventionalists in South Africa. J Radiol Prot. 2017 Jun 26;37(2):329-339.

5: Thrapsanioti Z, Askounis P, Datseris I, Diamanti RA, Papathanasiou M, Carinou E. Eye Lens Radiation Exposure in Greek Interventional Cardiology Article. Radiat Prot Dosimetry. 2017 Jul 1;175(3):344-356.

- 6: Hamada N, Sato T. Cataractogenesis following high-LET radiation exposure. *Mutat Res.* 2016 Oct - Dec;770(Pt B):262-291.
- 7: Ainsbury EA, Barnard S, Bright S, Dalke C, Jarrin M, Kunze S, Tanner R, Dynlacht JR, Quinlan RA, Graw J, Kadhim M, Hamada N. Ionizing radiation induced cataracts: Recent biological and mechanistic developments and perspectives for future research. *Mutat Res.* 2016 Oct - Dec;770(Pt B):238-261.
- 8: Shore RE. Radiation and cataract risk: Impact of recent epidemiologic studies on ICRP judgments. *Mutat Res.* 2016 Oct - Dec;770(Pt B):231-237.
- 9: Hamada N. Ionizing radiation sensitivity of the ocular lens and its dose rate dependence. *Int J Radiat Biol.* 2017 Oct;93(10):1024-1034.
- 10: Moriña D, Grellier J, Carnicer A, Pernot E, Ryckx N, Cardis E. InterCardioRisk: a novel online tool for estimating doses of ionising radiation to occupationally-exposed medical staff and their associated health risks. *J Radiol Prot.* 2016 Sep;36(3):561-578.
- 11: Negrone M, Di Lascio D. [Risk of deterministic effects after exposure to low doses of ionizing radiation: retrospective study among health workers in view of a new publication of International Commission on Radiological Protection]. *G Ital Med Lav Ergon.* 2016 Apr-Jun;38(2):83-8.
- 12: Chodick G, Sigurdson AJ, Kleinerman RA, Sklar CA, Leisenring W, Mertens AC, Stovall M, Smith SA, Weathers RE, Veiga LH, Robison LL, Inskip PD. The Risk of Cataract among Survivors of Childhood and Adolescent Cancer: A Report from the Childhood Cancer Survivor Study. *Radiat Res.* 2016 Apr;185(4):366-74.
- 13: Higgins A. Measurement of occupational doses of ionising radiation to the lens of the eyes of interventional radiologists. *J Radiol Prot.* 2016 Mar;36(1):74-92.
- 14: Yeltokova M, Zharliganova D, Shaidarov M, Bakhtin M, Kazymbet P, Tel L, Dossakhanov A, Kozhakbayeva M, Hoshi M. Deterministic effect of lens at leukergy of patients who received low doses of ionising radiation. *Radiat Prot Dosimetry.* 2015 Sep;166(1-4):324-7.
- 15: Markiewicz E, Barnard S, Haines J, Coster M, van Geel O, Wu W, Richards S, Ainsbury E, Rothkamm K, Bouffler S, Quinlan RA. Nonlinear ionizing radiation-induced changes in eye lens cell proliferation, cyclin D1 expression and lens shape. *Open Biol.* 2015

Apr;5(4):150011.

16: Auvinen A, Kivelä T, Heinävaara S, Mrena S. Eye Lens Opacities Among Physicians Occupationally Exposed to Ionizing Radiation. Ann Occup Hyg. 2015 Aug;59(7):945-8.

17: Silkoset RD, Widmark A, Friberg EG. Inspection of cardiology departments in Norway: are they making it great in radiation protection? Radiat Prot Dosimetry. 2015 Jul;165(1-4):254-8.

18: Hamada N, Fujimichi Y. Role of carcinogenesis related mechanisms in cataractogenesis and its implications for ionizing radiation cataractogenesis. Cancer Lett. 2015 Nov 28;368(2):262-74.

海外の規制整備に影響を与えている疫学研究の成果としては米国での診療放射線技師を対象にした調査やロシアのマヤックでの労働者の調査でも共にリスクが検出されており、100 mGy 未満に限定しても白内障リスクと線量関係が検出され、後囊下以外に、皮質や核でも白内障リスクが見いだされていることに着目すべきであると思われる

た。以下により重要と考えられる疫学研究成果を記述する。

3.1) 米国の診療放射線技師の前向きコホート研究者の参加者を対象にした追跡調査⁴

5 年間の累積水晶体吸収線量の平均値は 56 mGy (四分位範囲 24-69 mGy)であり、5 年間の累積水晶体吸収線量は自己申告白内障発症と強い関係にあった。過剰ハザード比は $0.69 \times 10^{-3}/\text{mGy}$ (95% CI 0.27×10^{-3} to 1.16×10^{-3} , $p < 0.001$)であり、100 mGy 未満に限定しても白内障リスクと線量関係が検出されていた($p = 0.03$)。一方、白内障の手術歴とは有意な関係は検出されていなかった (0.34×10^{-3} (95% CI -0.19×10^{-3} to 0.97×10^{-3} , $p = 0.22$))。

本研究の特徴を浜田は、『本研究は、疾病の情報が自己報告に基づいており、発症部位別(後囊下など)の情報がないなどの弱みはあるが、コホートサイズが大きい低線量・低線量率・遷延被く集団であり、水晶体線量も推定されており、重要な疫学データを供する。』とまとめている(浜田信行. 放影協ニュース 2018. 4, No.95)。

3.2) 米国での核医学診療に従事する診療放射線技師を対象にした追跡調査⁵

核医学に従事することは有意な白内障発

⁴ Little MP et al. Occupational radiation exposure and risk of cataract incidence in a cohort of US radiologic technologists. Eur J Epidemiol. 2018 Dec;33(12):1179-1191

⁵ Bernier MO et al. Cataract Risk in a Cohort of U.S. Radiologic Technologists Performing Nuclear Medicine Procedures. Radiology. 2018 Feb;286(2):592-601

症のリスクであった（HR, 1.08; 95% confidence interval [CI]: 1.03, 1.14）。1980年代から 2000 年代初期の診断核医学従事はリスクがより高いことが判明した（HR, 1.30; 95% CI: 1.08, 1.58）。特別な放射線防護との関係では、1980 年代に放射線治療に従事でリスク増加 1980s（HR, 1.32; 95% CI: 1.04, 1.67）があった以外は関係を見いだせなかった。この研究では個別の眼の水晶体の線量評価がなされていなかったことから、今後、眼の水晶体の等価線量との関係を明らかにすることが求められるとされた。

3.3) ロシアでのマヤックの労働者を対象にした追跡調査⁶

マヤック作業者は、初期の線量率が高いことや、線量計測に弱みがあるものの、コホートサイズが大きい慢性被ばく集団で、線量範囲が広く、症例数も多いことから、重要な疫学データを提供するとされており（浜田信行．放影協ニュース 2018. 4, No.95）、0.25Gy 以上では、白内障全体のリスクが直線的に増加することが 2016 年に報告されていた。

第 2 報として、発症部位別（後囊下、皮質、核）の白内障リスクが発表されたものであり、後囊下だけではなくいずれの発症部位でも線量に応じたリスクが観測されている。

⁶ Tamara V. AzizovaE, Nobuyuki Hamada, Evgeniya S. Grigoryeva. Risk of various types of cataracts in a cohort of Mayak workers following chronic occupational exposure to ionizing radiation. European Journal of

3.4) 中国での高自然放射線地域での疫学研究⁷

慢性被ばく集団の他の疫学としては、2015 年に、中国陽江市の高自然放射線地域の 45 歳の住民における知見が報告されている。皮質白内障と核白内障のリスクは増加しなかったが、後囊下白内障のリスクは有意に増加していることが確認されている。生涯累積線量は、最大でも数 100mSv 程度であると考えられ、更なる解析が期待されている（浜田信行．放影協ニュース 2018. 4, No.95）。

4) 法令の整備に向けた実用量に関する論点整理

眼の水晶体の線量限度の引き下げの規制整備においてモニタリングのあり方も課題となっていることから、その論点整理を試みた。個人線量測定に関する法令要求事項のあり方として、以下の二つの課題を検討した。

4.1) 眼の水晶体の等価線量に係る追加的なモニタリングの対象者

ISO(国際標準化機構)の 15382:2015(2017 年 1 月改訂完了)では、インターベンショナルラジオロジー(IVR)を取り扱う術者での放射線モニタリングに対しては、以下のように規定している。

Epidemiology. 2018, 33(12), 1193–1204

⁷ Wang Yan, Akiba S, Sun Quanfu. Survey of lens opacities of residents living in high background radiation area in Yangjiang, Guangdong province. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2015, 35(2):130-133

- ・ X線管側に線量計を装着すべき
- ・ 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
- ・ 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
- ・ モニタリング・レベルに関しては、一年間で 15 mSv かつ連続して 6 mSv/y 以上の放射線曝露が想定される場合にはモニタリングが必要
- ・ モニタリング期間に関しては、モニタリング・レベル以上の線量を被ばくすることが予想される場合、モニタリング間隔は一月間が望ましい

また、国際原子力機関では、以下の考え方を示している。

- ・ IAEA GSR（一般要求事項） Part3 では、段階的アプローチを提示
- ・ TECDOC-1731 では、眼の水晶体の等価線量が 5mSv/y を超えそうな場合に頭頸部での測定を求めている。
- ・ SSG-46 では、IVR の従事者で複数の素子を用いることを求めている。

このほか IRPA では、眼の水晶体の等価線量が 6mSv/y を超えそうな場合に眼の水晶体の等価線量のモニタリングを推奨している。

一方、日本では不均等被曝かどうかでモニタリングの手法を変えるという手法がとられており、医療分野では体幹部のエプロンを装着するかどうかはほぼ不均等被曝であるかどうかを決定する要因であると

理解されている現状にある。また、モニタリングの必要性に関して、線量限度の 10% である記録レベルを超えるかどうかを判断材料として用いられている例がある。

今後の方向性としては国際原子力機関の考え方の利用の是非を関係者間で話し合い望ましいルール整備あり方を検討することが望ましいのではないかと考えられた。

4.2) 眼の水晶体の等価線量に係る追加的なモニタリングの技術的な基準

この課題では、(1)(前項で論じたように)どのような対象者に、(2)どの部位で、(3)どのような量を (Hp(3)) を計測対象にするかどうかなど、(4)どのように計測するか(防護眼鏡を装着している場合に、その装着の効果はどう見込むかなど)が課題であると考えられた。

(3)に対しては、 β 線や低エネルギー光子に曝露する作業場では、Hp(3)が合理的な評価を提供する一方で、Hp(0.07)は眼の水晶体の等価線量として、過度に保守的な値を与えうるが大量の β 線や低エネルギー光子に眼が曝される作業場は考えがたく、散乱線のエネルギースペクトル情報を考慮すると、光子が照射される場では、医療で用いられている条件の範囲をマンモグラフィーでは線量限度近くになることが考えがたいことから、管電圧 66kV と総ろ過 2.5mmAl から管電圧 99kV と総ろ過 3.5mmAl + 0.4mmCu⁸で全体をカバーできると考えると、線量限度との比較の観点で Hp(3)で評

価することの合理性が高い作業場は現実的には存在しないのではないかと考えられた。

例として 66kV の管電圧で発生させ 2.5mmAl でフィルタリングした一次線とそれを水ファントムに照射して発生させた散乱線のスペクトルを図 3 に示す。また、120kV で発生させ 2.5mmAl + 0.4mmCu + 1.0mmAl でフィルタリングした一次線とそれを水ファントムに照射して発生させた散乱線のスペクトルを図 4 に示す。

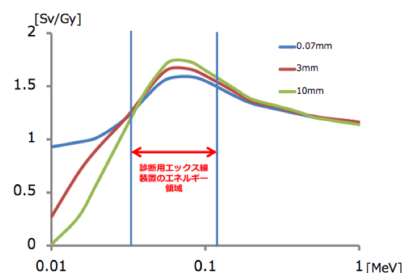
散乱線のスペクトルエネルギーの範囲が限られており、散乱線であっても Hp(3) の合理性が高くはなっていない。

(Hp(3)の事業所側の評価の必要性)

放射線審議会の意見具申は、廃炉作業関係では、今年度の進捗状況では年度当初よりも非東電社員の線量が高い事例があるものの β 線を直接、大量に照射される作業場はないと想定しているが、医療では Hp(0.07) を用いることで 3 倍程度過大評価している例(しかも線量限度近い曝露で)があるために、Hp(3)の整備の必要性が確信した認識が示されており、「したがって、関係行政機関においては、本報告書を踏まえた H'(3)又は Hp(3)を用いた測定や水晶体等価線量の算定について、所要の対応をとることが期待される。」となっているが、以上の検討からそのような事態はないとも考えられ、その観点からの議論が第二回の検討会でもなされた。

このため、放射線審議会の意見具申でのとあるところの「今後、正確に水晶体の等価線量を算定することが事業者等にとって必要

となる場合があると見込まれることを踏まえれば、現行規定を見直し、個人の外部被ばく線量の測定方法として Hp(3)を位置付けるとともに、Hp(3)で水晶体の等価線量を算定することを可能とするべきである。」での「事業者等にとって必要となる場合がある」は適切とは言えず、より正確に水晶体の等価線量を測定・算定することも可能となるように、リスク管理機関が対応するという整理(IAEA の TECDOC-1731 などに沿った)で良いのではないかと考えられた。



正確な水晶体被ばくの線量を評価するためには、水晶体の線量測定は 3mm 線量当量でも良いことを、「外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術的指針」等で明示すべきではないでしょうか。

11

図 1 眼の水晶体防護部会(第六回)での日本医師会提出資料

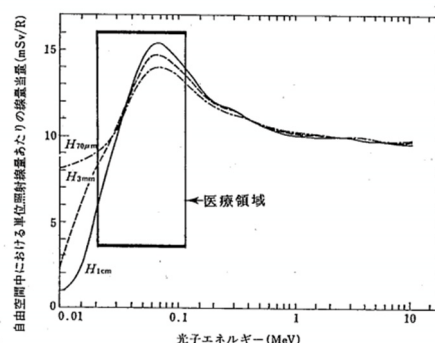


Fig. 1 法令が示した光子に対する自由空間中における照射線量あたりの線量当量への換算係数(丸山隆司, Isotope News, no 409, p 9, (1988) の図 3 に加筆)

図 2 照射線量あたりの線量当量への換算

係数

0.02	0.917	1.02
0.03	1.19	1.19

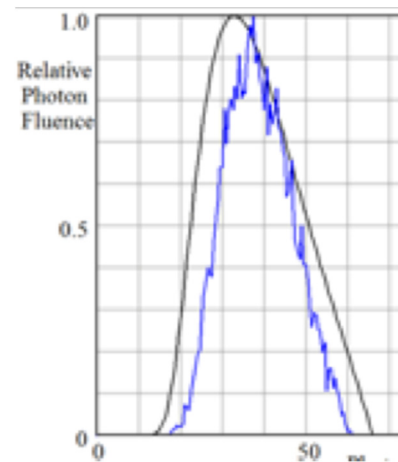


図 3 一次線と散乱 X 線のエネルギースペクトル(66kV の管電圧で発生させた場合)

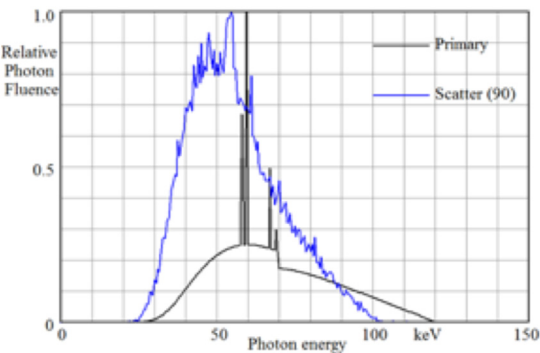


図 4 一次線と散乱 X 線のエネルギースペクトル(120 kV の管電圧で発生させた場合)

単位エネルギーあたりの最大のフルエンスで規格化している。計算は加藤秀起先生が作成したプログラムを利用した。

表 1 空気吸収線量から線量当量への換算係数(電子)

エネルギー(MeV)	H(3)	H(0.07)
0.01	0.27	0.93
0.015	0.686	0.974

(4)に対しては、「防護眼鏡の着用状態で防護効果がどう変化するか」という、課題に対し、

- ①具体的に何がパラメータか
- ②それをどう評価すべきか

を検討すべきであると考えられた。防護眼鏡の効果は、防護眼鏡による放射線の遮へいだけでは決定されず、防護眼鏡周囲からの回り込みの防止にも依存するが、作業時の体の向きなど幾何学的な条件（放射線審議会の部会では散乱線源に対して向き合う姿勢を取らないことから消化器医師でゴーグルの効果が 3 割にも満たない例が示されている⁹⁾ や、眼鏡のサイズも含めた防護眼鏡のデザインにもよる。ここで注意が必要なのは評価用のファントムの形状で、実際の頭部との違いにより、防護機能を過小評価したり過大評価したりする。また、労働者保護の観点から測定の法令要求事項の設定では説明責任が求められ、モニタリング手法による過小評価への懸念に対応する観点から労働者が受ける線量の大きさに合わせて、どこまでの考慮を求めるかを決定する必要があると考えられたことから次年度以降の報告書で基本的な考え方を提示したい。

4.4) 法令の整備に向けた実用量計測に関するその他の課題

(個人放射線モニタリングに関する労働者の義務)

9
<http://www.nsr.go.jp/data/00020542>

素子の紛失の罰則に関して、韓国等では労働者に義務を課す法令となっている。また、紛失した場合の線量の推計法もルール化されていた。フランスでも、測定素子の紛失に対して物理的な補償とデータ損失の罰則の二重規制が構築されており、線量計を注意深く扱うことや紛失しないことの観点から日本での法令整備で課題になり得ると考えられた。

(複数の事業所や複数の国での管理の協働)
各加盟国間 (MS) で労働者が移動して放射線業務に従事する状況となっている。EU 内の MS では医療従事者に関してもその可能性を考えた規制を明示的に設けている例があった。

(作業環境管理の第三者評価)

作業環境管理として、事前の評価も事業者にも求められているが、それを内部監査や医療法による医療機関への立入検査など外部監査などを利用し第三者が確認するというプロセスを利用することで、より現場の管理を改善させられるかもしれない。

Natinal dose registry も懸案課題となっており、各国でその制度が導入されており、EU においてそれぞれの国で医療機関も含めても一元化し、HERCA において海外を渡り歩いても被曝管理手帳で管理している一元化の現状も日本における制度整備の参考になると考えられた。

4.3) 個人用の放射線防護用具に関する法令要求事項のあり方

法令整備では、放射線防護眼鏡の技術的基

準のあり方も課題となる。その一方、現場での利用を考えると、防護性能と使いやすさが重要であると考えられた。また、感染症対策の観点から防護装具の種類によっては個人毎にそろえるのが理想であり、これらの質の確保も課題となると考えられた。

一方、防護装具の利用はトレードオフになるので、作業場の環境にも応じて段階的なアプローチを適用する必要があると考えられる。その際に偏った認知に基づいて形成された信念に対して認知の偏りを修正することも求められる。放射線の課題は、白内障だけではなく、白内障でも人工レンズにすることではカバーできない不利益もあることから、放射線の生物影響に関する情報の提供も重要だと考えられた。

6) 規制整備の課題の検討

(労使間での合意形成と行政による介入)

労働契約書は使用者と労働者の双方の合意を得てなされるもので、法令に従った労働管理が行われるように契約を結ぶことが基本になる。しかし、労働者側にリソースが乏しく、不利益を被るケースが想定されるために、労働者の権利保全のために労働者保護を尊重する必要があると考えられる。

とりわけ医療分野で配慮が求められるのは労働者が高い使命感を持ち患者の利益に沿うように自らを犠牲にしていることであり、職能団体が患者の不利益を懸念していることへの対応も求められる。

放射線審議会の意見具申は、適切な防護策及び測定を実施することにより、新たな水晶体の等価線量限度に対応可能であると考えられるとしているが、厚生労働省の検討会では、その見解への疑念が示される事態

となっている。

このうち救命活動に関して、これまで放射線審議会では議論の対象とはなっていないが米国 NCRP は報告書 168 の勧告 22 で医療行為としての救命活動での労働者の参考レベル（緊急被ばく状況での職業被曝の制御に用いられるのは、線量限度ではなく参考レベルであり、これが眼の水晶体でも取り入れられている例がある）の適用に関して、それが患者の命を救うことと衝突しうるとの認識の基に予め方策を定めておくことを推奨している。IAEA の SSG-46 でも医療分野での緊急事態への備えの必要が記されており、これらの取り組みも参考になると考えられた。

他方、リスク管理機関の助言（「是正勧告書」や「指導票」＝行政指導）は参考として示されるものであり従うかどうかは事業所側の判断による。その一方、是正命令は事業所としての権利を制約するもので事業所は従う義務がある。行政側の介入としては、これらを組み合わせて労働者保護を図ることになる。

第2回眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会では、日本放射線技術学会（JSRT）の研究班の調査結果が提示されたが、この調査は国立病院機構が対象とされ、救急医が欠落）、永井座長から救急領域の実情を危惧する指摘があった。

兵庫県災害医療センターでは今年度から救急救命士研修対応を契機として、看護師の方の防護法が変更されており、室内での防護衝立の裏側での待機が室外への退避に変更されていた。この防護の変更は、放射線部

の取り組みに触発された看護部からの問い合わせが契機となっており、放射線防護文化の重要性を示すものであり、センターが雇用しておらず、トレーニングの対象であった方々の放射線防護を考える観点から IAEA の考え方に沿っているだけではなく職場での放射線防護の見直しがなされたことも IAEA の考え方に沿っている良好事例と考えられた。今後、この方式は広がる可能性も秘めているとも考えられた。診療の種類や患者の状態などにもより、例えば緊急 IVR(脳梗塞における血栓回収等)などのスピードが求められる場合に、看護師が薬剤投与などを行うたびに室外からアプローチするのでは円滑な業務が進められない可能性もあるが、室外退避方式が広がる可能もある。ただし、どのような対策がよいかは施設の実情により異なり一概には言えないとも考えられる。どのような診療スタイルが望ましいかを判断するかは客観的な評価に限界があり主観的な価値観も関係する。

例えば、大阪急性期・総合医療センターでは来院し診療開始後 3 分（動脈血液ガス採取と平行して）で CT 検査が開始され 10 分で検査が終了している事例があった。このようなスピード感ではスタッフの室外退避に余裕を持たせることのトレードオフにもなる。このためそれぞれの職場で関係者による健全な取り組みとなるようなガバナンスやマネジメントを機能させる支援も求められる。

また、現場での放射線防護やモニタリングに関して関係者間で何らかの認知バイアスがあるとする、それに対する認知行動療法的なアプローチをどのように機能させるかもポイントになると考えられた。

(対策を講じることへの懸念への対応)

新しい線量限度への対応は、労働者が被る放射線のリスクと臨床面でのデメリットのバランスを取った上で、無理なく現場が対応できることが望まれるが、ここまでの検討で現場には多様性があり、最適化の結果、新しい線量限度の担保が可能であるとは言いきれておらず、今後、さらに検討を深める必要がある。

現場での防護は段階的な介入によりそれぞれ改善することが示された。それぞれの放射線防護法を、現場の実情に合わせて防護する対策は、まさに作業環境管理の一例になると考えられる。

介入前に「防護装具をしない理由」として13%の医師は、「検査に支障をきたす」と回答していたが、介入により防護装具の着用率はほぼ100%になった。観察した範囲では、その習慣はこの後の継続しており、診療放射線技師による介入が医師からも歓迎されていたことを裏付けていた。

この介入では、リスク情報を自らの線量を改めて提示することも有効であったことが示唆された。また、介入のうち「低線量モード」とは管電流を下げたり、パルス頻度を小さくしたりパルス幅を短くしたりビームサイズを絞るということであるが、患者の放射線安全に有益である一方、このことによる臨床面でのデメリットも懸念される、いずれにしても、このプロセスは放射線防護の最適化と考えられ、臨床でのデメリットを最小にメリットが最大になるように調整を施すことの余地が残っていると考えられた。

このことは、防護装具の装着が検査に支障

をきたすと考えていたのは錯覚であったり、装着法の工夫などでデメリットが低減されたことが考えられるが、自身の安全確保を優先し、診療へのデメリットをもたらしていることも否定できず、遮へい体の重さや空間を覆うことでのいまだに完璧な対策が講じられていない曇りも含めた視野への影響だけではなく、より包括的に放射線防護対策の負の部分の検証も試みる。

(対策への診療放射線技師の関わり)

日本放射線技術学会の研究班のデータからは、放射線科医の手技だと線量限度は超えないが、消化器内科・整形外科に手技では線量限度を超えることが危惧されている。

また、心臓と脳での診療でも従事する医師への線量が大きくなるが、医師による曝射のフットスイッチの踏み方によるところが大きく、その場での診療放射線技師の関わりだけでは限界もあると考えられる。

この他、放射線審議会の部会資料では、核医学検査・治療、小密封線源：IVR ほどではないがγ線による水晶体被ばくが課題になるとあったが、密封小線源治療での放射線曝露では、I-125線源に由来したものだけでなく透視に由来したものもあり、第二回眼の水晶体の被ばく限度等の見直しに関する検討会でも意見があったようにその対策を講じるには、I-125線源と透視での線量の寄与を知る必要もある。

このため、診療放射線技師のより包括的な関与が求められるが、医療放射線の適正管理に関する検討会での議論を経て、医療法施行規則が改正され、医療放射線安全に関して医療機関内に対応する組織を設け、その責任者に条件付きで診療放射線技師を

任ずることができるようになっており、この組織を医療安全だけでなく、労働安全にも活用することも考えられる。

とりわけ注意が必要なのは、放射線診療が集中している技能が優れた医療スタッフへの対応である。単純に1回あたりの線量をこのようなスタッフが従事する回数を考慮して年間の線量を推計すると現在取り入れられている放射線防護を考慮しても線量限度を超えることがありえると推定され、放射線審議会の意見具申の想定外になっているとも考えられた。また、現状でもモニタリング値が線量限度を超える労働者が医療分野で相当数存在するにも関わらず労働基準監督署にそのことが伝えられた事例は皆無である。さらに不均等被ばくモニタリングが適切に行われていることが客観的には示されておらず昨今の普及啓発活動に対応してモニタリング数が増加していることが示唆されている。

このことは現状で線量限度を超えたり、モニタリングが適切に行われていないことを示唆すると考えられるが、この現状を調査することは労働安全衛生法に違反していることを事業所が認めることになりかねないのでその実情の把握が困難なものとなっている。しかし、現場に役立つ規制整備を行うには、実情の把握が欠かせず、労働者防護の原則に立った上で、事業所が科学的な調査に協力しやすいような環境整備も求められる。

(関係機関の取り組み)

日本医師会、日本医学放射線学会、日本循環器学会、日本 IVR 学会、日本心血管インターベンショナル学会、日本整形外科学会、日本小児科学会、歯科放射線学会、日本産業衛生学会と共同でガイドラインを作成することが、各学会の理事会で承認されており、日本放射線技術学会、日本放射線看護学会からも参加が予定となっていた。このような取り組みも重要である。

(特別の教育の規制のあり方)

電離放射線障害防止対策要綱では、2. 作業管理の強化として、「(2) 放射線業務を適切に実施するための具体的な作業実施要領（緊急時における退避に関する事項を含む。）を作成し、その内容について、雇入れ時、放射線業務の配置替え時その他随時、徹底した教育訓練を行うこと。」とされている。

このうち、特定 X 線装置の除外規定に関しては、H13 以前は集団検診での胸部 X 線撮影を除外していたが、間接撮影でも撮影する労働者が被ばくするおそれがあるので被ばく低減が必要とされ、除外規定が削除されている。また、電離則で特別の教育が規定されており（第 52 条の 5）、教育時間は労働省告示第 50 号に規定されている。

労働安全衛生法に基づく特別教育の一部を障害防止法での教育訓練として行えることが、通知で明示されている¹⁰。ここで、放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律による平成 3 年第 10 号 教育及び訓練の時間数を定める告示が改正されることへの対応も求められる。

¹⁰ 基安労発第 0129003 号「透過写真撮影業務特別教育に係る科目の省略の取扱いに

係る周知について」平成 20 年 1 月 29 日

なお、
特別な教育は、診療放射線技師などに対し
ては、「当該業務に関し職業訓練を受けた者」
として省略されている現状にあるが、
医療法の省令改正で医療従事者への基礎
的な放射線に関する教育の義務化がなされ
たことにも留意する必要がある。

(将来的な課題)

ドイツでは排気中濃度限度が低く設定さ
れていたが、これは公衆の皮膚の等価線量
限度律速となっていたものである。同様の
ことが眼の水晶体の等価線量限度の引き下
げでも起こりえる。より高いエネルギーの
電子を放出する核種でサブマージョンとな
るものでは、実効線量ではなく、眼の水晶
体の等価線量が空気中濃度や排気中濃度誘
導の律速となるので注意が求められる。

また、患者の介助での放射線曝露はその
幾何学的条件が重要となる。近くで介助し
一次ビームに入ったり散乱体に近くなるこ
とを繰り返すと単純撮影でも線量限度を超
えうる。このため、障害歯科領域でも配慮
が求められると考えられた。

5) 現状把握のための統計データの検討

医療分野における従事者の眼の水晶体の
等価線量の実態(年次推移)を表 2 に示す。

これらのデータは NL だより(長瀬ラン
ダウア社)、FBNews 誌(千代田テクノ
ル社)でそれぞれ公表されたものを合算した
ものである。それぞれの基のデータをそれぞれ
図 5 医療分野における従事者の眼の水晶
体の等価線量の実態(年次推移)長瀬ラン
ダウア社、図 6 に示す。

各社において統計上の定義が異なっており
(例えば医療従事者の定義)、その比較や
合算には注意が必要である。実効線量が
20mSv/年を超えた者の割合も、測定会社間
で異なっているが、データの研究利用が認
められていないとして、詳細な分析はな
されていなかったが歴史的な経緯も反映し
ていると考えられた。

また、千代田テクノルのデータで 2014
年度の線量が高くなっているが、この解析
はなされておらず、このデータが日本の実
情を示すものとして UNSCEAR に提供さ
れることからデータの質の向上も課題と
なっている。

表 2 医療分野における従事者の眼の水晶
体の等価線量の実態(年次推移)

年線量区分(mSv)	平成23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度
20以下	303,229	313,508	325,278	335,440	345,444	353,725	362,519
20超～50以下	1,828	1,803	1,848	2,111	1,986	1,966	1,852
50超～100以下	361	402	366	428	395	380	335
100超～150以下	63	59	61	56	42	38	28
150超	23	14	9	9	6	8	6
合 計	305,504	315,786	327,562	338,044	347,873	356,117	364,740

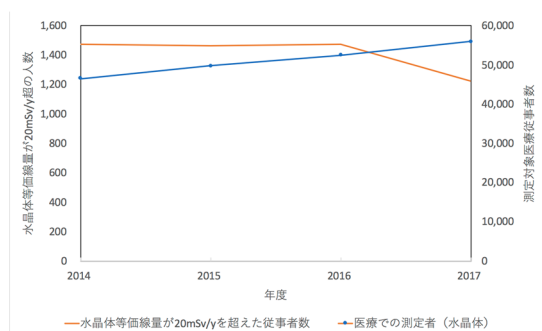


図 5 医療分野における従事者の眼の水晶
体の等価線量の実態(年次推移)長瀬ラン
ダウア社

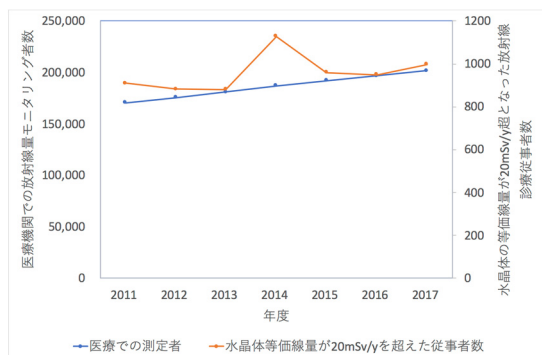


図 6 医療分野における従事者の眼の水晶体の等価線量の実態（年次推移）千代田テクノロ社

医療施設のデータの解析では 2006 年より「水晶体等価線量」が上昇傾向を見せている例があった。これは「不均等被ばく管理を開始した（増えた）」ことによるものであり、「実効線量」は増えていないことから裏付けられていたが、2012 年から線量が高い群での「実効線量」が明らかに上昇を見せており、血管造影装置やカテーテルの性能が上がり、より高度な血管内治療が盛んに行われるようになったことが原因だと推測されていた。このようにデータの解釈ではデータに影響を与えた要因を総合的に解析する必要がある。

D. 考察

本研究では、労働者保護の観点から眼の水晶体の等価線量限度引き下げに際しリスク管理機関が利害関係者を巻き込んで規制を整備するために必要となるリスク管理のあり方に関する考え方の整理や検討の材料となるデータを国際的な動向の把握を踏まえた提示を試みた。

線量限度は放射線防護の一つのツールに過ぎず、労働者の放射線防護を担保した上

で、最適化を図ることも重要とされていることから、現場での放射線安全確保が実践できるように基本的な考え方の整理を試みた。

眼の水晶体の放射線防護に関する技術文書である TECDOC-1731 を現場に適用する際の基本になるものとして、日本でも役立つと考えられた。国内規制整備の課題としては、基本的な枠組みでの段階的なアプローチや認証制度の確立や、対策を講じる手順としての意思決定支援技術、線量拘束値や調査レベルの確立が課題であると考えられた。その一方、最終ドラフトから刊行に時間を要しており、課題の困難さも物語っていた。

今後、IAEA の GSR part3 や GSG-7 を利用した規制整備が有益であると考えられるが、規制面では、Graded approach の適用が課題になると考えられた。

また、眼の水晶体等価線量評価に関して、IAEA の技術文書に具体的な記載のない管理方策を我が国の放射線作業の実情に合わせて測定の要否、頻度、手法等を検討する必要があるが、そのための準備を行った。

E. 結論

- ・国際原子力機関（IAEA）の放射線源にさらされた労働者の保護のための一般安全要件（GSG-7）では、基本的な枠組みが整理して提示されており、眼の水晶体の等価線量限度の引き下げへの対応に関して具体的な技術的要件を示した技術文書（TECDOC-1731）のベースになるものとして、日本でも役立つと考えられた。

- ・国内規制整備の課題として、対策の基本

的な枠組みとして求められる段階的なアプローチの導入や認証制度の確立が必要であり、対策を講じる手順を決定する意思決定支援技術、IAEAが放射線管理の基本的なツールとして提示している線量拘束値や調査レベルの規制等への導入が課題であると考えられた。その一方、GSG-7は最終ドラフトから刊行に時間を要しており、課題の困難さも物語っていた。課題の困難さを覚悟して取り組む必要がある。

・線量評価などを含む法令要件に関し、測定の要否、頻度、手法等も含めてEU諸国と比較し、EU指令にかかわらず、ベルギーとイタリアでは規制への取り入れが2018年12月現在ではなされておらず、フランスでは、規制適用が一部、猶予されており、それらは医療現場への配慮に基づくものであると考えられた。また、個人線量測定では認証制度の導入も課題となっていた。

謝辞

電力中央研究所原子力技術研究所放射線安全研究センターの浜田信行主任研究員にご示唆を頂きました。

F. 健康危険情報 なし

G. 研究発表

1. 論文発表

- 1) 山口一郎、医療放射線の安全管理に関する規制整備の議論から 線量の記録などどう向き合うべきか。医療放射

線防護 2018 ; (79) : 20-21.

2. 学会発表

- 1) 秋吉優史、宇藤茂憲、掛布智久、神野郁夫、小林育夫、谷口和史、野村貴美、藤淵俊王、宮川俊晴、山口一郎、横山須美、低エネルギーX線の評価と安全管理に関する問題点と現状日本放射線安全管理学会。第17回学術大会；2018年12月5-7日、東京、講演集。p19
- 2) 谷口 和史、青木 久美子、秋吉 優史、川島 紀子、小鍛冶 優、森山 正樹、宮川 俊晴、山口 一郎。教育現場での実態測定結果報告。第17回学術大会；2018年12月5-7日、東京、講演集。p21
- 3) 藤淵 俊王、秋吉 優史、小林 育夫、多田 順一郎、谷口 和史、山口 一郎。低エネルギーX線の放射線安全管理。第17回学術大会；2018年12月5-7日、東京、講演集。p22

3.その他

H. 知的財産権の出願・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

眼の水晶体の等価線量限度の引き下げに関する規制の国際比較

【フランス】

線量限度については *code de duval* (労働法) について記載されており、2018 年 6 月 5 日に労働者の保護に関する 2 つの法令が官報に掲載された。2018 年 7 月 1 日に 5 年間の移行実施期間はあるものの水晶体線量限度 (等価線量) における 18 歳以上の職業被ばく者は 20mSv /年 (150mSv /年から) に減少され、18 歳未満については 15mSv/年へと変更された。

第 2 款参考レベル (Sous-section 2 Niveau de référence) Art R4451-11 より緊急時の被ばく線量限度について水晶体での線量限度の記載はなく、人命救助等で被ばくする場合は実効線量 500mSv と明記されており、水晶体や皮膚などの等価線量での緊急被ばくに対する許容値の記載はない。

第 9 章 個々の労働者の暴露のモニタリング (Section 9: Surveillance de l'exposition individuelle des travailleurs) の個々の線量測定 (Surveillance dosimétrique individuelle) より、Hp (0.07) や Hp (3) などの詳しい線量測定の方法について示されておらず、具体的な線量計の種類、または水晶体の線量測定をする場合の条件や指定項目について記載されていない。条文の中には適切な線量計を用いてとの文言しか見当たらず、詳細について読み取ることはできなかった。外部被ばく算定方法については公衆衛生法 (*code de la santé publique*) Article R. 1333-24 に規定されている。

第 4 項 規定の実施 (Sous-section 4 Dispositions d'application) Art. R. 4451-49 より、記録保持については、少なくとも 10 年間の状況については協議を可能とするような形式で記録されなければならないとされている。

罰則規定について公衆衛生法 (*Code de la santé publique*) に記載されており、第七章刑事規定 (Chapitre VII : Dispositions pénales) の第 4 節電離放射線 (Section 4 : Rayonnements ionisants.) に刑事罰規定について示されている。その中で環境と仕事に関連する健康リスクの予防 (Titre III : Prévention des risques sanitaires liés à l'environnement et au travail) から労働者のリスクについて第 4161-1 条労働者に記載されており、危険な化学物質、高圧環境下など労働者を取り巻く危険な労働環境について記載されているが、放射線の項目は記されていない。また、線量限度を超えた場合の具体的な罰則規定について記載はされていない。労働法の第 5 章行政罰金 (Chapitre V : Amendes administratives) から罰金などの規定について記載されているが、労働法の中で行政機関の裁量によって罰則を決める、罰金を決めるという一文が記載されているものの実際にフランス国内でこの条文を根拠に罰金は適応されるかはウェブ上では確認できなかった。産業医は守秘義務を違反した際には、罰金は科せられる。

【ドイツ】

ドイツでは、2010年2月（ICRP ソウル声明よりも早く）に水晶体の線量測定方法の妥当性について SSK※1 で検討され、線量測定計が校正されており、後方散乱放射線が正しく測定されているといった条件保証されていれば Hp (0.07) でも光子に関して水晶体の測定は可能と判断している。しかし、約 1MeV よりも低エネルギーの β 線では Hp (0.07) は過大評価される側面があるとしている。^{a)}

β 線場および眼球の感受性の高い領域では、Hp (3) は水晶体の線量測定に最適と判断されたため、スラブファントムで較正された線量計で Hp (0.07) を導入し、電子線照射量で Hp (3) を導入する前に現場観察して、導入が適切であるか検討された。その後、個人線量計についての要件について検討され^{b)}、2015年7月3日に Hp(0.07)の線量計では水晶体線量の過大評価に繋がるため水晶体の測定には Hp (3) が適しているとの結論が出されている。しかし、水晶体の線量測定方法について眼用レンズ専用の線量計を用いて測定するとの記載は発見できず、水晶体の適切な測定方法として Hp (3) が推奨されており、ドイツ国内の現状では眼用レンズ専用の線量計を使用しているかは各種ホームページ上からは読み取ることはできなかった。

ドイツ国内では、2014年12月10日に 2013/59/Euratom を採択することを決定したものの^{c)}、すぐには導入されず水晶体の線量限度は 150mSv/年で運用してきた。しかし、2018年10月19日にドイツ連邦参議院で新しい放射線防護令が公布され、2018年12月31日より施行された^{d)}。新しい放射線防護令の水晶体線量限度は 18歳以上 20mSv/年、18歳未満 15mSv/年に変更されている。^{e)} また、新しい放射線防護令に伴い放射線防護レジスター制に移行している。^{f)} 職業上の放射線被ばくの監視のための線量登録簿であり、職業被ばくの線量管理、記録を行うことになり、各個人の身体線量限度の維持を継続的に管理することを目的としている。

以前の放射線防護登録簿に登録されている人は、新たに 2018年12月31日から実施される放射線防護令に伴い、新しく放射線防護登録番号（SSR 番号）を登録する必要がある。SSR 番号により、職業放射線被ばくから個々の線量値を割り当て、線量限度を管理することが可能になる。しかし、ドイツ国内の患者の線量測定結果を管理している放射線パスポートの制度^{g)} が新しい放射線防護令に施行に伴い制度は廃止となった。廃止に至る理由についての経緯はウェブ上では見つけることができなかったが、Bfs の見解としては放射線パスポートそのまま継続することを推奨している。

※1...SSK (Strahlenschutzkommission...ドイツ放射線防護委員会)

※2...Bfs (Bundesamt für Strahlenschutz...放射線防護局)

【イギリス】

イギリスでは、2018年1月1日より新しく電離放射線規制 2017 は施行された。その中のスケジュール 3 - 線量限度 (Schedule 3 Dose limits) より眼の線量限度は 20mSv/年、5 年間に於いて 100mSv で 1 年間に最大 50mSv の等価線量に変更された。

水晶体の線量測定に関しては、同規制の付録 2 外部放射線から実効線量と等価線量を推定 (APPENDIX 2 Estimating effective dose and equivalent) の項目より強く透過する放射線の場合は 10mm の深さが適切であり、弱く透過する放射線の場合の皮膚は 0.07mm、目は 3mm の深さが推奨されると記載されている。しかし、水晶体の線量評価についての記載はなく、イギリス国内で眼用レンズ線量計を使用して測定されているかウェブ上で確認には至らなかった。

外部照射からの実効線量を求める計算式や等価線量の計算式 ($H_{TR}=W_R D_{TR}$)、実効線量の見積もりについても同規制の付録 2 より、外部被ばくからの実効線量を推定する場合、個人線量当量 $H_p(d)$ を使用して推定すると記されている。

緊急時に於いて許容される実効線量限度、等価線量限度の値について記載はなく、規則 12 線量制限 (Regulation 12 Dose limitation) ^{h)} の項目 212 より、「線量限度を遵守することは絶対条件であり、日常的な曝露中のほとんどの場合、個人の線量が線量限度に近づくことは考えにくい」との記載があるため、緊急時の具体的な許容値を設定されていないことも考慮されるが、項目 225 から過度の暴露を受けた作業員に対して規則 27 の過度に暴露した作業員のための線量制限 (Dose limitation for overexposed employees) ⁱ⁾ から線量を超過した場合の対応は記載され、5 年間は線量限度を超えないよう事業者、雇用者は調整することを科せられている。さらに規則 13 の緊急時対応計画 (Regulation 13 Contingency plans) があることから緊急時の対応や防護策について講じられているが、こちらの規則に具体的な緊急時の被ばく許容量についての記載は見られなかった。

個人の線量測定について、規則 22 の線量評価と記録 (Dose assessment and recording) より全ての雇用者、事業者は線量測定した記録に関して労働者が 75 歳を迎えるまで、もしくは 30 年間記録保持することについて記されており、記録すべき案件や取扱について詳細に記載されている。線量超過しないよう事業者、雇用者は対策を講じつつ、超過した場合や疑われる場合は報告する義務が記されているものの、線量超過した場合の罰則規定や具体的な懲罰内容について記載は見当たらなかった。

【カナダ】

2018年9月27日にカナダの原子力安全委員会(CNSC)とカナダ放射線防護協会(CRPA)は、眼のレンズのICRP線量限度の実施についてウェビナーを開催された。ⁱ⁾ カナダでは原子力作業従事者は150mSv/年であり、それ以外の人は15mSv/年と放射線防護規則で明記されているため、多くの人は20mSv/年よりも低い規制値であるものの原子力作業従事者の等価線量限度を現在の限度の150 mSvから50 mSvに1年間の線量測定期間で変更すること、5年間の線量測定期間中に100 mSvの新しい線量限度を追加することについて検討されている。カナダ国内で2回同様の会議を実施し、新しい線量限度導入について検討しているが、現在(平成31年3月5日時点)もウェブ上のカナダの法律のデータベース上では新しい勧告値(20mSv/年)は確認できなかった。

放射線防護規則上では、水晶体における測定方法について詳しく指定されておらず、外部照射の測定深度での皮膚の定義はある。しかし、水晶体の測定深さ3mmの記載は見られなかった。

国民の線量測定データを管理しているのはカナダ保健省が行っており^{k)}、同省庁より線量測定サービスの技術的および品質保証要件、線量測定計に求められる要件や品質について記載されている^{l)}。その中で外部線量(Dose from External Source)より「Hp(0.07)の測定値は、皮膚と同等の線量として報告されなければならない。四肢または眼の水晶体への線量の測定は、それらの組織と同等の線量として報告しなければならない」との記載があり、水晶体での測定においてHp(3)で実施することの旨はこの書類からは見当たらない。現状ではカナダは水晶体の等価線量における測定はHp(0.07)と同等とみなしているものと思われる。

カナダ国内の緊急事態における被ばく線量限度については、最大で実効線量500mSv、皮膚での等価線5000mSvまでは許容されるが、水晶体における緊急被ばく線量限度について記載はされていない。

線量限度を超過した場合の罰則についてカナダ原子力安全委員会からの行政罰金規制に従って(A、B、Cの三段階のランクとカテゴリーとして個人と事業者の二つに大別に分けられる)罰金を科せられる。その中で、放射線防護規則の項目22「実効線量限度を超えていないことを確認できない」、項目23「等価線量限度を超えないよう失敗した」という項目は該当すると思われ、一番罰金額の重たいCランクに分類される。しかし、刑事罰についてこの規制には明記されておらず、ウェブ上で確認できたのは罰金刑のみであった。

【アメリカ】

アメリカ国内において、水晶体の線量限度引下げの検討について米国原子力規制委員会（以下 NCR）の依頼で米国放射線防護審議会（以下 NCRP）は科学委員会「眼の水晶体に対する放射線線量限度に関するガイダンス」を設置した。2015 年 3 月には審議が開始され、線量限度の引き下げは妥当ではないとの意見であった。しかし、ICRP の引き下げ勧告を受けて変更しないのは国際的調和性に欠けるとの判断により再検討する流れとなった。

2016 年 2 月 5 日から公開意見募集を実施して検討し、放射線作業者は 150mSv/年→50mGy/年に引き下げることが挙げられた。なお、組織反応の防止には吸収線量限度で考えるべきとの指針より単位も Sv から Gy へ変更となった。その後、2017 年 1 月 25 日には NCRP Commentary No.26 を WEB 上で公開し、NCRP は新水晶体線量限度（作業者 50mGy/年、公衆 15mGy/年）を勧告した。

一方の NCR は 2014 年 7 月から 2015 年 6 月の間で 150mSv/年→50mSv/年への引き下げ導入（作業者の実効線量限度 50mSv/年に合わせ、水晶体の等価線量を 50mSv/年に引き下げた）を検討して意見の公募を求めた。しかし、専門家やステークホルダからの反対（対費用効果の面から）により 2016 年 5 月の時点で断念し、導入しないことを 2016 年 12 月に正式に公知した。NCRP Commentary No.26 は NRC の依頼と CDC（疾病管理予防センター）との共同財政支援によって作成された文章であり、勧告内容は NRC も議論を検討する可能性はあるものの現時点での線量限度引き下げの見込みはない^{m)}。

アメリカ国内の現在は、NCRP が勧告した値（作業者 50mGy/年、公衆 15mGy/年）ではなく、現行の水晶体等価線量限度（作業者 150mSv/年、公衆 15mSv/年）が継続されることとなり、根拠となる法律として連邦規制法の中に放射線防護基準（Part20—Standards for protection against radiation）が定められており、§20.1201 成人の職業上の線量限度（Occupational dose limits for adults）より 18 歳以上の水晶体の年間線量限度は 15rems（0.15Sv）と記載されており、未成年に対しては § 20.1207 未成年者の職業線量限度（§ 20.1207 Occupational dose limits for minors）より成人労働者（18 歳以上）に指定されている年間線量限度の 10%と定められている。

また、同じく緊急被ばくについての記載も同条に記載されているが、緊急時許容される被ばく線量の具体的な数値の記載はない。

外部被ばくの測定について § 20.1003 定義（Definitions）より、水晶体の外部照射の測定は 0.3 cm（300mg/cm²）の組織深度における線量として解釈すると定められており、同条に実効線量の計算式（ $HE = \sum W_T HT$ ）で算定すると記載されている。NCRP Commentary No. 26 では組織反応に確率的影響のための放射線加重係数ではなく、RBE を使用して等価線量を使用しないという考えが示された。ICRP タスクグループ 79 も等価線量は実効線量算出の過程では今後も必要であるが、防護量としては廃止して組織反応の防止には吸収線量

限度の使用を提案している。

線量についての記録や保持については、§ 20.2102 放射線防護プログラムの記録 (Records of radiation protection programs) より 3 年間は保持することが明記されている。

罰則、違反について § 20.2401 違反 (Violations) に記載はあるものの、線量超過した場合に適応される法や規制については見当たらなかった。

参考 URL

a) Monitoring the Eye Lens Dose (眼のレンズ線量のモニタリング)

https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_E/2010/Ueberwachung_der_Auge_nlinsendosis.html;jsessionid=2EFE22C99172E5D0EBED5D44D45E8289.1_cid339?nn=2876304

b) 個人線量計の要件 (Personal Dosimeter Requirements)

https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_E/2011/Anforderungen_an_Personendosimeter.html?nn=2876304

c) 2013/59 / Euratom 指令をドイツの放射線防護法に移行する際の作業線被ばくを防ぐための線量制限の導入 (Introduction of dose constraints to protect against occupational radiation exposure when transposing Directive 2013/59/ Euratom into German radiological protection law)

https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_E/2014/DoseConstraints_e.html?nn=2876294

d) 有害な放射線に対するより良い防御 (Better protection against harmful radiation)

<http://www.bfs.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/BfS/EN/2018/1019-radiation-protection-ordinance.html>

e) 放射線防護法を近代化するための条例を可決 (Resolution passed for ordinance to modernise radiation protection law)

<http://www.bfs.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/BfS/EN/2018/0905-radiation-protection-law.html>

f) 放射線防護レジスター (Radiation Protection Register)

http://www.bfs.de/EN/topics/ion/radiation-protection/occupation/register/ssr_table.html

g) X線パスポート (X-ray record card)

<http://www.bfs.de/EN/topics/ion/medicine/diagnostics/x-rays/record-card.html>

h) 電離放射線規制 2017 (Ionising Radiations Regulations 2017) 規則 12 線量制限 (Regulation 12 Dose limitation) P50

<http://www.hse.gov.uk/pubns/books/l121.htm>

i) 電離放射線規制 2017 (Ionising Radiations Regulations 2017) 規則 27 過度に暴露した作業者のための線量制限 (Regulation 27 Dose limitation for overexposed employees) P113

<http://www.hse.gov.uk/pubns/books/l121.htm>

j) 注意：目のレンズに関するウェビナー9月27日(Riminder Webiner on lens of the eye September 27)

<https://nuclearsafety.gc.ca/eng/acts-and-regulations/consultation/history/dis-13-01-webinar.cfm>

k)全国線量レジストリ (National Dose Registry)

http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/occup-travail/radiation/regist/index_e.html

l) 線量測定サービスの技術的および品質保証要件 (Technical and Quality Assurance Requirements for Dosimetry Services)

https://nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/S106R1_e.pdf

m) NCRP Commentary No. 26「眼の水晶体に対する放射線線量限度に関するガイダンス」の概要 Outline of NCRP Commentary No. 26 “Guidance on radiation dose limits for the lens of the eye” Nobuyuki HAMADA Jpn. J. Health Phys., 52 (2), 77 ~ 87 (2017)

根拠となった各国の法律、規則

【フランス】

※1…労働法 (Code du travail)

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000036985602&categorieLien=id>

※2…公衆衛生法 (code de la santé publique)

https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do;jsessionid=3861FDE1A47218B782D09384FABF0BA9.tplgfr23s_3?cidTexte=LEGITEXT000006072665&dateTexte=20190311

※3…第 1 款暴露限界値 (Sous-section 1 Valeurs limites d'exposition) Art. R. 4451-6 (1) の (B) より

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000036985602&categorieLien=id>

※4…同上条文 R. 4451-8(2)の(B)より

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000036985602&categorieLien=id>

※5…第 2 款参考レベル (Sous-section 2 Niveau de reference) Art. R. 4451-11.I より

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000036985602&categorieLien=id>

※6…第 1 款個別線量モニタリング (Sous-section 1 Surveillance dosimétrique individuelle) R4451-65.1

別紙 1

より

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000036985602&categorieLien=id>

※7…公衆衛生法 (code de la santé publique) Article R. 1333-24 より

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006072665&idArticle=LEGIARTI000006910019&dateTexte=&categorieLien=cid>

※8…第4款適用規定 (Sous-section 4 Dispositions d'application) Art. R. 4451-49 より

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000036985602&categorieLien=id>

※9…Titre III : Prévention des risques sanitaires liés à l'environnement et au travail (環境と仕事に関連する健康リスクの予防)

Chapitre VII : Dispositions pénales (第七章:刑事規定)

Section 4 : Rayonnements ionisants. (セクション4 : 電離放射線)

https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do;jsessionid=32BDD69D367A60943888B10DF69A83F8.tplgfr41s_2?idSectionTA=LEGISCTA000006190347&cidTexte=LEGITEXT000006072665&dateTexte=20181108

0181108

別紙 1

※10…電離放射線のリスクに対する労働者の保護に関する 2018 年 6 月 4 日の法令第 2018-437 号

(Décret n° 2018-437 du 4 juin 2018 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants) より

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000036985602&categorieLien=id>

【ドイツ】

※11…電離放射線の有害な影響から保護するための行為 放射線防護法

(Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung – StrlSchG)

<https://www.gesetze-im-internet.de/strlschg/BJNR196610017.html>

※12…第 78 条 職業被ばく者に対する制限 (§ 78 Grenzwerte für beruflich exponierte Personen) より

<https://www.gesetze-im-internet.de/strlschg/BJNR196610017.html>

※13…第 114 条 緊急時における緊急サービスの保護 (§ 114 Schutz der Einsatzkräfte bei Notfalleinsätzen) より

<https://www.gesetze-im-internet.de/strlschg/BJNR196610017.html>

※14…附属書 18 (§ 171、197) 用量と測定量 パート A：外部放射線の測定量 (Anlage 18 (zu den §§ 171, 197) Dosis- und Messgrößen Teil A: Messgrößen für äußere Strahlung) より

https://www.gesetze-im-internet.de/strlschv_2018/StrlSchV.pdf

※15…附属書 18 (§ 171、197) 用量と測定量 パート B：身体線量の計算 (Anlage 18 (zu den §§ 171, 197) Dosis- und Messgrößen Teil B: Berechnung der Körperdosis) より

https://www.gesetze-im-internet.de/strlschv_2018/StrlSchV.pdf

※16…第 79 条 職業被ばくに関する条例認可、健康記録 (§ 79 Verordnungsermächtigung für die berufliche Exposition; Führung einer Gesundheitsakte) より

<https://www.gesetze-im-internet.de/strlschg/BJNR196610017.html>

※17…第 194 条 罰金 (§ 194 Bußgeldvorschriften) より

https://www.gesetze-im-internet.de/strlschg/_194.html

別紙 1

【イギリス】

※18…電離放射線規制 2017 (Ionising Radiations Regulations 2017) より

<http://www.hse.gov.uk/pubns/books/l121.htm>

※19…136P 線量限度 (Schedule 3 Dose limits) より

<http://www.hse.gov.uk/pubns/books/l121.htm>

※20…168P 付録 2 外部放射線より実効線量と等価線量を推定 (APPENDIX 2 Estimating effective dose and equivalent dose from external radiation) より <http://www.hse.gov.uk/pubns/books/l121.htm>

※21…167P 付録 2 外部放射線より実効線量と等価線量を推定 APPENDIX 2 (Estimating effective dose and equivalent dose from external radiation) より <http://www.hse.gov.uk/pubns/books/l121.htm>

※22…P92 規則 22 線量評価および記録 (Regulation 22 Dose assessment and recording) より

<http://www.hse.gov.uk/pubns/books/l121.htm>

【カナダ】

※23…放射線防護規則 SOR / 2000-203 (Radiation Protection Regulations) より

<https://laws.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-2000-203/page-1.html>

別紙 1

※24…等価線量限度 (Equivalent Dose Limits) より

<http://laws.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-2000-203/page-2.html#docCont>

※25…緊急事態 (Emergencies) より

<https://laws.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-2000-203/page-3.html#h-18>

※26…解釈とアプリケーション (Interpretation and Application) より

<https://laws.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-2000-203/page-1.html#h-1>

※27…解釈とアプリケーション (Interpretation and Application) の等価線量 (equivalent dose) より

<https://laws.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-2000-203/page-1.html#h-1>

※28…原子力労働者 (Nuclear Energy Workers) 10(e)より

<http://laws.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-2000-203/page-2.html#docCont>

※29…Justice Laws Website (カナダ法務省のウェブサイト)

Administrative Monetary Penalties Regulations Canadian Nuclear Safety Commission (行政罰金規制 カ
ナダ原子力安全委員会)

<https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/SOR-2013-139/page-1.html#docCont>

別紙 1

【アメリカ】

※30…連邦規則集（Code of Federal Regulations）より

<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/>

※31…20 項 放射線防護に対する基準（Part20—Standards for protection against radiation）

<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/>

※32…§ 20.1201 成人の職業線量限度（Occupational dose limits for adults）の（a）の（2）の（i）より

<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/part020-1201.html>

※33…§ 20.1207 未成年者の職業線量限度（§ 20.1207 Occupational dose limits for minors）

<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/part020-1207.html>

※34…§ 20.1201 成人の職業線量限度（Occupational dose limits for adults）の（b）より

<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/part020-1201.html>

※35…§ 20.1003 定義（Definitions）のレンズ線量当量（LDE）より

<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/part020-1003.html>

別紙 1

※36… § 20.1003 定義 (Definitions) の実効線量当量 (HE) より

<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/part020-1003.html>

※37… § 20.2102 放射線防護プログラムの記録 (Records of radiation protection programs) より

<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/part020-2102.html>

※38… § 20.2401 違反 (Violations) より

<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/part020-2401.html>

※39… § 20.2402 刑事罰 (Criminal penalties) より

<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/part020-2402.html>

※40… NCRP Commentary No. 26 「眼の水晶体に対する放射線線量限度に関するガイダンス」の概要

Outline of NCRP Commentary No. 26 “Guidance on radiation dose limits for the lens of the eye”

Nobuyuki HAMADA Jpn. J. Health Phys., 52 (2), 77 ~ 87 (2017)

表1 水晶体線量限度引下げの各国の状況

	フランス	ドイツ	イギリス	カナダ	アメリカ
関連法律・規則	労働法 ^{※1} 公衆衛生法 ^{※2}	放射線防護条例 ^{※11}	電離放射線規制 2017 ^{※18}	放射線防護規則 SOR / 2000 - 2003 ^{※23}	連邦規制集 ^{※30} 放射線防護基準 ^{※31}
水晶体線量限度	等価線量 <18歳以上> 100 mSv/5年 かつ 20mSv/年 ^{※3} <18歳未満> 15 mSv/年 ^{※4}	等価線量 <18歳以上> 100 mSv/5年 かつ 20mSv/年 <18歳未満> 15 mSv/年 ^{※12}	等価線量 <18歳以上> 100 mSv/5年 かつ 20mSv/年 <18歳未満> 15 mSv/年 ^{※19}	等価線量 <原子力作業従事者> 150 mSv/年 <原子力作業従事者以外の人> 15 mSv/年 ^{※24}	実効線量 15 rems (0.15Sv) / 年 ^{※32} (18歳未満 成人の10%) ^{※33}
緊急時被ばく状況での 参考レベル	水晶体の記載なし ^{※5} 実効線量 500 mSv(人命救助等)	水晶体の記載なし ^{※13} 実効線量 250 mSv - 500 mSv	水晶体の記載なし	水晶体の記載なし 実効線量 500 mSv 皮膚等価線量 5000 mSv ^{※25}	水晶体記載なし。緊急作業による線量 限度は用いない。 線量限度は平常時50mSv/年を用いる ^{※34}
水晶体の 外部被ばく測定方法	適切な線量計の推奨 具体的な記載なし ^{※6}	水晶体 Hp (3) 等価線量 ^{※14}	高エネルギー 低エネルギー 水晶体 10 mm 0.07 mm 3 mm 推奨 ^{※20}	水晶体の記載なし ^{※26}	0.3 cm (300 mg/cm ²) ^{※35}
外部被ばく算定方法	1. 外部被ばくに対する計算方法と使用する重み係数 2. 換算係数値 3. 採取または吸入された各放射性核種について、組み入れられた活動単位当たりの実効線量値 ^{※7}	$H_{T,R} = W_{D,T,R}$ ^{※15}	等価線量 ^{※21} $H_{T,R} = W_{D,T,R}$	等価線量は放射線の吸収線量に重み係数を掛けた値 (線量 κ) ^{※27}	実効線量 ^{※36} $H_E = \sum W_T H_T$ ^{※36}
記録及び保存	10年間 ^{※8}	30年間 及び 75歳まで ^{※16}	30年間 及び 75歳まで ^{※22}	原子力作業従事者において 現在の1年及び5年間の線量測定期間の線量記録 ^{※28}	3年間 ^{※37}
罰金及び罰則	線量超過の罰則規定見当たらず ^{※9}	線量超過の罰則規定見当たらず ^{※17}	罰則規定自体の記載見当たらず	線量超過での罰金規定あり ^{※29}	線量超過の罰則規定見当たらず ^{※38、39}
備考	電離放射線リスク保護法 2018年7月1日施行 ^{※10} (5年の移行期間)	2018年12月31日施行 ^{※11}	2018/1/1施行 ^{※18}		組織反応にRBE 使用 ^{※40} (等価線量は使用しない)

※の根拠となる法令、規則について別紙1のURL参照

	罰金及び罰則
フランス	線量限度を超過した場合の具体的な罰則規定について記載は見当たらず
ドイツ	罰金項目あり
イギリス	記載みつかあず
カナダ	線量限度を超過した場合、カナダ原子力安全委員会の行政罰金規制に従って罰金が科せられる。対象として個人と事業者の二つに大別し、項目ごとにA、B、Cの三段階のランクが決められ、ランクによって罰金が異なる。 刑事罰についてはカナダ※27
アメリカ	違反、罰則あり線量限度を超えた場合の罰則について明記されていない※35

国際原子力機関（IAEA：International Atomic Energy Agency）への視察報告書

目的

ICRP の計画的被曝状況における作業者に関する眼の水晶体の等価線量限度の引き下げに関する各国の動向について等の情報収集を行うこと

方法

IAEA に所属する放射線防護関連に携わっているスタッフへの面会による調査

結果

IAEA に所属する 3 名の研究者と日本の線量計測事業メーカーからの出向者 1 名と面会を行なった。2011 年 4 月 21 日に国際放射線防護委員会（ICRP）は、計画的被曝状況における作業者に関する眼の水晶体の等価線量限度の引き下げを支持する宣言を発表した。ICRP は、年間線量限度を 20 mSv とし、5 年間の平均線量が単一年度あたり 50 mSv を超えないよう推奨するとした。この勧告を受けて国際原子力機関（IAEA）は、放射線防護に関する国際基本安全基準（BSS）¹の改訂の際に、この新しい限度を採用した。これらを背景とし、またこの将来の指針の置換え作業の観点から、各国の関連規制当局等も IAEA 同様に新しい限度の取り入れに向けて動いているとのことであり、最新の情報として、Carinou らの報告³「ヨーロッパにおける、放射線防護衣着用中の実効線量算定と、眼の水晶体の等価線量算定の規制状況調査」の紹介を受けた。その概要を資料 1 に記す。

欧州原子力共同体（Euratom）では、条約の第 31 条が定める専門家グループは、この新しい限度を考慮することに好意的な意見を表明し、またそれに従い、公衆の許容線量限度 15 mSv/年は維持しながら、欧州指令「基本基準」の改訂計画にもこの限度を採用したとのことであった。

フランスに関する情報として、Nuclear Safety Authority（ASN—フランス原子力安全局）の情報として、2018 年 6 月 5 日付けの官報に労働者の保護に関する法令を公布し、電離放射線のリスクに対する労働者の保護に関する法令第 2018 号-437 号では、規制上の制限として眼の水晶体の線量限度は 5 年間の移行実施期間を設けている。この移行期間を設けた理由についての詳細な情報は得られなかった。

フランス原子力安全局（ASN）は関係する職業的実践のそれぞれについて、放射線防護に関する適正な実施ガイドラインを要望し（2013 年 4 月 8 日付の書簡 CODEP-DIS- 2013-018618）、その要求にフランス放射線防護原子力安全研究所（ISRN）は応え、水晶体に対する等価線量の規制限度の引き下げの観点からの作業者の放射線防護における適正な実施に関するガイドライン⁴を作成とのことであった（資料 2）。

米国に関する情報としては、NCR（米国原子力規制委員会）からの依頼で米国放射線防護審議会（NCRP）に「眼の水晶体の対する放射線線量限度に関するガイダンス SC1-23 を設置した。2015 年 3 月には、SC1-23 はコメンタリー草案を NCRP に協議し現行の 150 mSv/年を新しい勧告の 20 mSv への変更は妥当ではないとし、NCR は 2016 年 5 月に専門家やステークホルダーからの反対（対費用効果の面から）から断念し、その年の 12 月に正式に公知している。しかしながら、この流れは国際的な協調性に欠けるため再検討され、2017 年 1 月 25 日に NCRP Commentary No. 26 を WEB 上で公開し、作業者の水晶体線量限度は 50 mSv/年、公衆は 15 mSv/年を勧告した⁵。NCRP Commentary No. 26 は NRC と CDC（疫病管理予防センター）からの共同財政支援を受けて活動しており、勧告についても法的拘束力を持つことはできない。NCR も NCRP から出された Commentary No. 26 の勧告について検討する必要性について理解はしているものの、関係各所からの反対により引下げを断念せざる経緯があり、今後引下げについての必要性について理解して

¹ Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards – Interim Edition. General Safety Requirements Part 3. 2011.

² Proposal for a Council Directive laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. Doc 8682/2/13. Version 24 May 2013.

³ A European survey on the regulatory status for the estimation of the effective dose and the equivalent dose to the lens of the eye when radiation protection garments are used. Eleftheria Carinou et al. J.Radiol. Prot.39 126 2019.

いるものの現状では導入の見通しはない。この専門家の反対する根拠として、Thome らの論文⁶を紹介された。その概要を資料3に記す。

IAEA では、職業被ばくの管理・保存のために、国の中央登録制度を促進しており、NDR(National Dose Registry)の存在と統計的手法により放射線防護プログラムの有効性の確認とそれらの最適化に貢献することによって線量情報の安全性の保持につながると説明を受けた。EU の放射線防護分野の活動を行なっている『HERCA(HEADS OF THE EUROPEAN RADIOLOGICAL PROTECTION COMPETENT AUTHORITIES) についての情報を得た

(https://urldefense.proofpoint.com/v2/url?u=http-3A__www.herca.org_&d=DwIDaQ&c=KA9xyaKr5GHdnbpV5JfuK5pMD_aCBS4H6o1RgZvWCaw&r=Xfn2wTw_TGaB09XcB51uoa68E0iFRS30e0iP1rI5NPI&m=wm-KLESn9LMHZJsTwctnuJVj8XogB1k-Y7fIxxxR15I&s=GkB-r2zQ1QpYe7lnMD0tFNtfq49PXeWCPYqsoP355-M&e=)。』EU では、個人の記録手帳の保持とその記録をどこの国で働いても記録は保管されるシステムは存在するとのことであった。記録の内容の詳細については資料4を参照のこと。

水晶体の測定方法に関する研究として、3D プリンターを用いて作製した頭部ファントムによる線量測定に関する論文を紹介された⁷。

IAEA では、職員の個人測定に TLD 線量計を使用しているが、日本製のガラス線量計による測定管理に移行されるとのことである。

⁴ Recommandations sur les bonnes pratiques en matière de radioprotection des travailleurs dans la perspective de l'abaissement de la limite réglementaire de dose équivalente pour le cristallin. IRSN.Rapport PRP-HOM/2013-00010.

⁵ NCRP Commentary No.26 「眼の水晶体に対する放射線線量限度に関するガイダンス」の概要. Jpn.J Health Phys.,52(2).77-87(2017).

⁶ Deterministic effect to the lens of the eye following ionizing radiation exposure: Is there evidence to support a reduction in threshold dose?. Thome et.al. Health Physics 114.3 2018.

⁷Design of a head phantom produced on a 3D rapid prototyping printer and comparison with a RADON and 3M lucite head phantom in eye dosimetry applications. Homilka et al. Phys. Med. Biol.62.3158-3174.2017.

資料 1

ヨーロッパにおける、放射線防護衣着用中の実効線量算定と、眼の水晶体の等価線量算定の規制状況調査論文の概要について

Eleftheria Carinou et al 2018 J. Radiol. Prot. in press
<https://doi.org/10.1088/1361-6498/aaf456>

ヨーロッパにおける、放射線防護衣着用中の実効線量算定と、眼の水晶体の等価線量算定の規制状況調査について、Eleftheria Carinou らの報告の概要を以下に記す。

国際放射線防護委員会（ICRP）が眼の水晶体の線量限度引き下げ勧告を出し、国際原子力機関（IAEA）と欧州理事会がそれにならってから、ヨーロッパ各国では、国内規制による適切な被ばく線量モニタリング手法の実施と欧州内での整合性確保が大きな懸案事項となっている。欧州放射線計測グループ（EURADOS）は 2017 年末、各国の線量モニタリング規定に関するアンケート調査をインターネットで行った。質問では、線量計 2 個計測、実効線量算出のためのアルゴリズム、水晶体の等価線量を求める方法、国家線量記録簿の構成に関して調査した。2017 年の 10 月 16 日から 11 月 27 日の間に、26 カ国（ヨーロッパ各国とイスラエル、図 1 参照）の当局から、アンケートの回答を受けとった（図 1）。



Figure 1. Countries that responded to the questionnaire are marked in dark grey.

Eleftheria Carinou et.al Eleftheria Carinou et al 2018 J. Radiol. より抜粋
規制に関する状況について、回答した 26 カ国のすべてが、実効線量または個人モニタリング用の実用量、あるいは両者の算定のための規制の枠組みについて、一定の規定を持っていた。そのうちいくつかの国では政府レベルでそれを実行しており、他の国では、州レベルまたは所轄当局からの技術ガイダンスとしてこの規定を実行していた（図 2）。国によっては、2 つ以上の立法文書にその必要要件を定めていた。

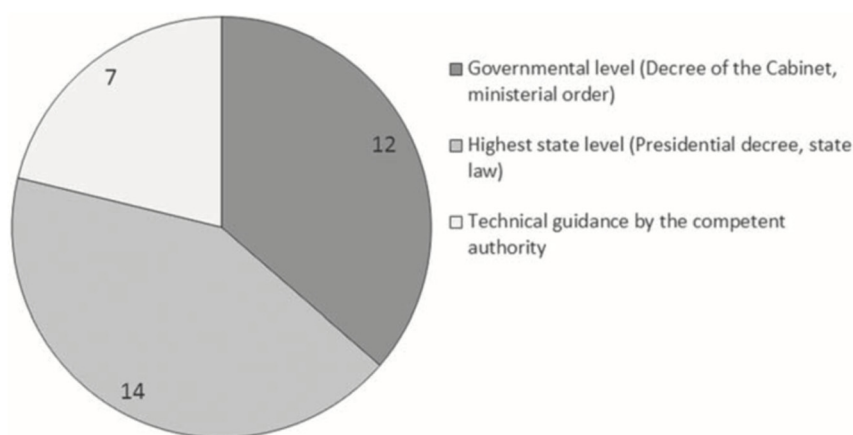


Figure 2. Number of countries and the respective legislative level of regulatory guidance for estimation of the effective dose and/or the operational quantities for individual monitoring. The legislative level of regulatory guidance in some countries is at more than one level.

Eleftheria Carinou et.al Eleftheria Carinou et al 2018 J. Radiol. より抜粋

26 カ国のうち、放射線防護衣（エプロンまたは甲状腺襟、あるいは両者）着用中の実効線量を求めるために使用される線量計の数と位置について法律で定めている国は 14 カ国（54%）だった。実効線量算定手法は、規制当局が定めているケースが二、三あったが、これ以外の国では、責任は他の団体、すなわち線量測定サービスプロバイダ、国家被ばく記録簿プロバイダ、放射線防護専門家・担当官が担っていた。

実効線量の算定は、回答が得られた国のうち半数以上の国で、放射線防護衣着用中の実効線量を求めるために使用される線量計の数と位置は法律で定められていた（表 1）。しかしながら、実効線量算定用アルゴリズムを国として定めているのは、26 カ国のうちたった 5 カ国であった（表 2）。さらに、水晶体の線量算定の必要性を法律で定めているのは、26 カ国のうち 14 カ国（54%）であった。ほぼ半数の国で、水晶体の線量を算定するのに、線量計は防護衣の外側で使用されていた。7 カ国（27%）で、水晶体に特化した線量計測が実施されていた。3 カ国で、手順は予想される水晶体の被ばくレベルまたはユーザの判断に拠っていた。6 カ国で、調査時点では、測定による水晶体線量算定について手順が存在していなかった。全身線量計の取り付け位置については、当局が図 3 に示すとおり定めている。

表 1: 各国を、規制の枠組みで定める線量計の位置によって分けると以下のとおりである。

線量計の指定位置	国
防護衣の内側に線量計 1 個	アルバニア、キプロス、ドイツ、ハンガリー、スロベニア、スウェーデン、英国
防護衣の外側に線量計 1 個	オランダ、ノルウェー、フィンランド
防護衣の内側に線量計 1 個、特定の状況で、防護衣の外側に線量計もう 1 個	ベルギー、エストニア、フランス、ギリシャ、イタリア、ルクセンブルク、モンテネグロ、ポーランド、ポルトガル、ルーマニア、セルビア、スペイン、スイス
線量計 2 個	イスラエル、リトアニア、マケドニア

Eleftheria Carinou et.al Eleftheria Carinou et al 2018 J. Radiol. より翻訳

表 2: 報告された実効線量 E を算定するための承認済みアルゴリズム

国	線量計 1 個	線量計 2 個
セルビア	回答なし	$E = H_p(10)^{\text{below}} + 0.05 \times H_p(10)^{\text{above}}$
スイス		放射線防護エプロンのみ:
ルーマニア	回答なし	$E = H_p(10)^{\text{below}} + 0.1 \times H_p(10)^{\text{above}}$ (14)
		放射線防護エプロンと甲状腺防護:
		$E = H_p(10)^{\text{below}} + 0.05 \times H_p(10)^{\text{above}}$ (14)
ギリシャ	$E = H_p(10)^{\text{above}} / 21$	$E = 1.64 \times H_p(10)^{\text{below}} + 0.075 \times H_p(10)^{\text{above}}$ (15)

Eleftheria Carinou et.al Eleftheria Carinou et al 2018 J. Radiol. より翻訳

J. Radiol. Prot. **39** (2019) 126

E Carinou et al

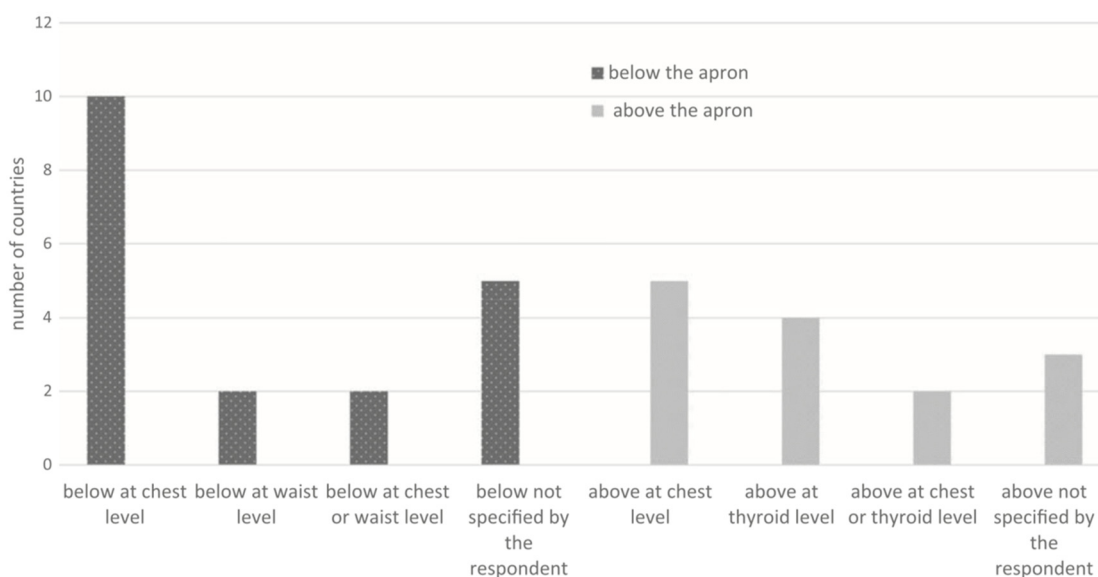


Figure 3. Prescribed wearing position for the whole body dosimeter.

Eleftheria Carinou et.al Eleftheria Carinou et al 2018 J. Radiol. より抜粋

水晶体の被ばく線量の算定

水晶体の被ばく線量算定用に示された方法の概略を図 4 に示す。26 カ国中 14 カ国 (54%) で、水晶体の線量を算定するための法的要件が、アンケート配布時点で存在していた。ほぼ半数の国で、水晶体の線量を算定するのに、線量計は防護衣の外側で使用されていた (図 4)。7 カ国 (27%) で、水晶体に特化した線量計測が実施されていた。3 カ国で、手順は予想される水晶体の被ばくレベルまたはユーザの判断に拠っていた。6 カ国で、調査時点では、測定による水晶体線量算定について手順が存在していなかった。放射線防護用眼鏡が使用されている時の水晶体の被ばく線量算定アルゴリズムを報告している国が 2 カ国あった。そのうちの 1 カ国では、補正係数として 0.5 が使われていたが、もう 1 カ国では、係数の値は示されていないかった。

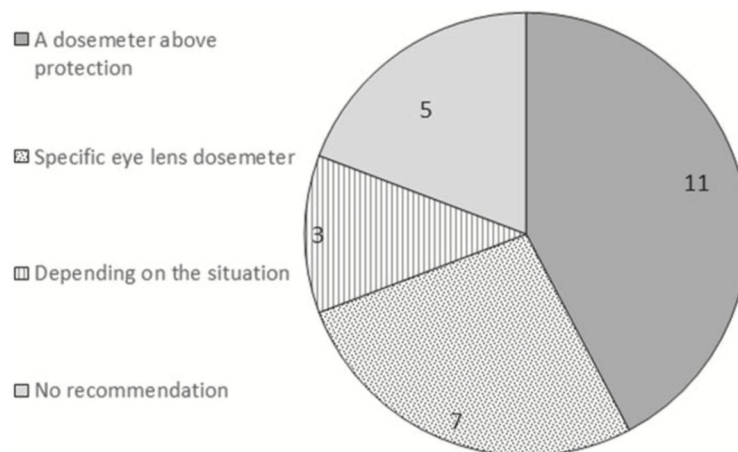


Figure 4. Specified method for estimation of the dose to the lens of the eye.

Eleftheria Carinou et.al Eleftheria Carinou et al 2018 J. Radiol. より抜粋

国家線量記録簿（NDR）については、回答のあったすべての国において、個人の被ばく線量モニタリングデータを保存するために何らかの国家データベースが運用されていたが、算定された実効線量値を記録しているのは26カ国中わずか12カ国であった。体表面からの深さ3mmでの個人線量を記録簿に記録していたのは、26カ国中7カ国にとどまった。筆者らは、図5にまとめたこのアンケート結果から、2017年末の時点で、指令に従うために真剣な努力が行われていなかったのは明らかであると指摘している。今後のシステム変更の予想として、多くの国（26カ国中15カ国）で、さらに多くのパラメータを記録できるよう、国家線量記録簿の変更を検討している。たとえば線量計2個計測の結果や、Hp(3)の測定値、適用された防護対策用補正ファクタ、水晶体線量用アラーム起動レベルなどがあるとしている。

本研究の結論として、欧州基本安全規格指令の施行直前に実施されたこの調査から、各国で最新の基本安全規格を満たし、欧州内での整合性を確保するために、各国の国内労働被ばくについての枠組みが、所轄官庁による調整のもと、集中的かつ迅速に構築される必要があると報告されている。

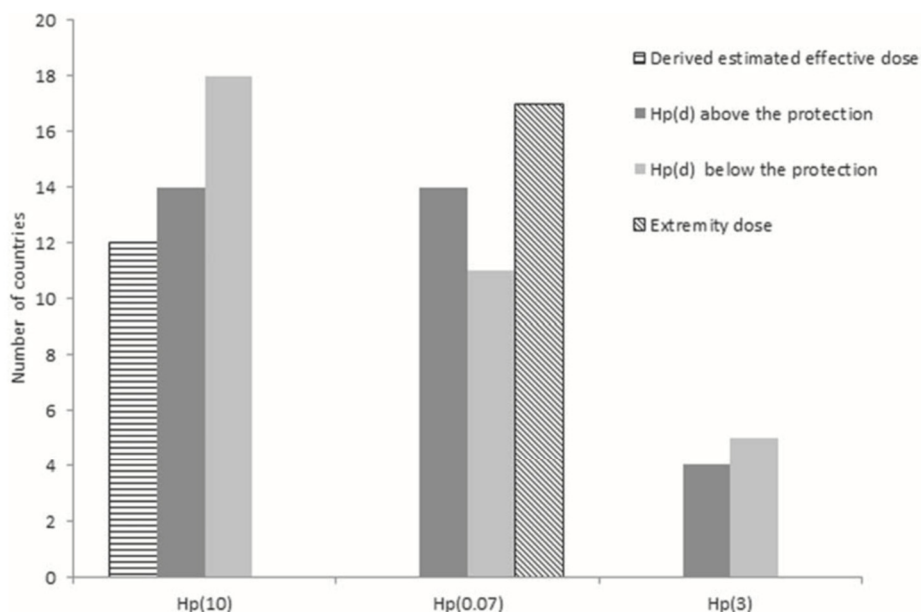


Figure 5. Recorded parameters in NDRs. $H_p(d)$ stands for the operational quantities at depth 10, 3 and 0.07 mm.

著者らの考察は以下の通りである。

- まず、ヨーロッパのすべての国から回答を得るために尽力したものの、すべての国から回答を得たわけではない。アンケートは、各国の労働被ばく担当者宛という注釈を付けて、EURADOS ネットワーク内で確認された担当者宛に送られた。欧州理事会指令 96/29 (16)に従っているにもかかわらず、医療分野での労働者の放射線防護システムの構成は、国によって極めてまちまちであり、この調査の結果の解釈をさらに限定的なものにしている。また、理由は不明ながら白紙のまま残されている回答欄が多かった。質問が適切ではなかったか、あるいは調査の時点ではっきりした回答がなかったものと考えられる。意味がはっきりしない回答や、アンケートの他の部分と矛盾する回答のいくつかについて、正しい情報を得るためにさらに説明を求める電子メールを送付した。
- この調査のもう 1 つの限界は、実施した時のスケジュールである。回答者の多くは調査の時点での、自国で実施されている状況を説明している。しかしながら、多くの国は、新しい欧州基本安全規格および国際規格(2, 3)により、労働被ばくおよび個人放射線被ばくモニタリング用のデータシステムの要件を満たすためのシステム変更を既に計画していた。
- この点を考慮しつつ、調査への回答は 25 のヨーロッパの国々とイスラエルから回答を得ており、ある程度代表的な結果が得られていると筆者らは述べている。
- 規制の枠組みに関して、すべての回答国で実効線量の算定および実用量の算定、あるいはそのいずれかで、異なるレベルの必要要件が定められているのは、好ましい点であった。しかしながら、実効線量または水晶体線量のいずれか、または両方の算定方法について、当局が定める水準については、ばらつきがあった。たとえば、線量計の数や場所に関する要件、それぞれのアルゴリズム、所轄省庁・権限組織・個々のモニタリング事業会社・放射線防護担当官に関連する責任などである。このようなばらつきは、ヨーロッパにおいて放射線防護システムの構成がさまざまであることを示している。IAEA(2)および欧州指令(3)による国際的な提言は、システムの一般的な概略を示しているが、各国がその独自の方針を採用する自由度は大きい。
- EURADOS の CONRAD (Coordination of Research on Internal Dosimetry、「内部線量研究のコーディネーション」) プロジェクト(17)の一環として、アンケートが 2008 年、ヨーロッパの 13 カ国の、13 の線量測定事業に送付された。それによれば、基本安全規格指令(17)の施行後 8 年経った 2008 年の時点でも、労働被ばくのモニタリング分野で、整合性のある規

制は存在しなかった。このプロジェクトは、実効線量の算定は、（13 カ国中 5 カ国で）防護エプロンの外側、および（13 カ国中 7 カ国で）内側に取り付けられた 1 個の線量計測定に拠っている。以前の調査(17)では 13 カ国中 1 カ国のみが E の値の算定のために 2 個の線量計を用いていたのに対し、今回の調査結果によれば、さらに多くの国（26 カ国中 16 カ国）において、被ばく状況の少なくとも一部で 2 個の線量計を使用している。しかしながら、放射線防護衣の外側（3 カ国）または内側（7 カ国）の何れかで線量計を 1 個だけ用いている国はまだまだ多い。2017 年末時点では、放射線防護エプロンの外側および内側で記録された線量値を組み合わせる公認のアルゴリズムが存在する国は、26 カ国中たった 5 カ国である（データについては表 2 参照）。関連するアルゴリズムは、文献(17)にも見られ、照射設定によって実効線量が 2 倍から 4 倍過剰に見積もられると見なされている。放射線防護エプロンの外側で線量計を 1 個のみ用いるケースでは、公認のアルゴリズムへの言及がなく（3 カ国）、したがって、NDR で実効線量を記録する公的な規定も存在しない。

- 欧州理事会指令 2013/59 (3) の附属書 X では、被ばく労働者の個人モニタリングの結果は、実効線量、およびばらつきのある被ばくの場合全身のさまざまな場所での等価線量も、公的な被ばく記録に含まれなければならないとしている。しかしながら、Hp(3) 値が NDR に記録されていたのは 7 ケースに留まった。図 5 にまとめたこのアンケート結果から、2017 年末の時点で、指令に従うために真剣な努力が行われていなかったのは明らかである。

資料 2

水晶体に対する等価線量の規制限度の引き下げの観点からの作業者の放射線防護における適正な実施に関するガイドライン(なお、翻訳は ISRN より許可を得ている)

報告書 PRP-HOM/2013-00010

放射線防護・環境・廃棄物・危機センター

目次

1. 緒言	11
2. 歴史的背景.....	11
3. リスクを伴う職業的活動の同定	12
3.1. 一般的側面	12
3.2. 介入的放射線医学	13
3.3. 近接照射療法、核医学及び医学研究	14
3.4. 産業的分野.....	16
4. 放射線防護の適正な実施	17
4.1. 一般的側面	17
4.2. 介入的放射線医学の分野	17
4.2.1. 介入的放射線医学における放射線防護手段	18
4.2.2. 介入的放射線医学において個人被曝量を最適化するための適正な職業的実践	19
4.3. 近接照射療法、核医学及び研究の分野	21
4.4. 産業的分野における放射線防護の適正な実施	21
5. どのような線量測定モニタリングを行うべきか	22
5.1. 線量当量	22
5.2. 水晶体の被曝量の推定方法	22
6. IRSN ガイドライン.....	25
7. 付録	27
8 参考文献	28

1. 緒言

2011 年 4 月 21 日に国際放射線防護委員会（ICRP）は、計画的被曝状況における作業員に関する眼の水晶体の等価線量限度の引き下げを支持する宣言を発表した [1]。今後において委員会は、年間線量限度を 20 mSv とし、5 年間の平均線量が単一年度あたり 50 mSv を超えないよう推奨する。

国際原子力機関（IAEA）は、放射線防護に関する国際基本安全基準（BSS）²の改訂の際に、この新しい限度を採用した。欧州原子力共同体（Euratom）条約の第 31 条が定める専門家グループは、この新しい限度を考慮することに好意的な意見を表明し、またそれに従い、公衆の許容線量限度 15 mSv/年は維持しながら、欧州指令「基本基準」の改訂計画にもこの限度が採用された。³

これを背景とし、またこの将来の指針の置換え作業の観点から、原子力安全当局は、特に介入的放射線医学及び介入的手技が実施される手術室における、作業員の放射線防護に関して期待される適正な実践について、放射線防護研究所及び原子力安全当局の見解を求めた。

医学的分野を越えて、フランス原子力安全局（ASN）は関係する職業的実践のそれぞれについて放射線防護に関する適正な実施ガイドラインを記述できるような目録の作成を希望した（2013 年 4 月 8 日付の書簡 CODEP-DIS- 2013-018618）。

本技術シートはこの要求に応え、イオン化放射線が使用される分野における作業員の放射線防護及び線量測定モニタリングに関するこの勧告の規制適用の実際的な影響についての IRSN の 2011 年 6 月 24 日付の見解を補完するものである。

2. 歴史的背景

過去には、被曝量が比較的に均一な状況において、実効線量限度 20 mSv/年を遵守することにより 150 mSv/年の限度を大幅に下回る水晶体の被曝量が保証されると一般的に考えられていた。又、被曝量が著しく不均一な状況のみが、場合によっては水晶体の特別な線量測定追跡を必要とすると判断されることがあった。

介入的放射線医学の分野は、一部の手技においては水晶体のかなりの被曝につながり得ることが古くから知られている。このような被曝といくつかの因子の影響を評価するために、多数の試験が 20 年以上前から実施されている。しかし、以下の事情から、発表された線量測定データの比較が、特に最も古いデータについては、時には困難であることに注意すべきである。その理由として：

- 同じ線量当量（Hp(10)、Hp(3)、Hp(0.07)）により表されていない、又は同じ測定点（前額部、頸部、眼角部）で測定されていない；
- 時には 1 回（又は複数回）の手術の実施中に術者において動的状態で、時には人体模型（ファントム）を用いて静的状態で測定されている；

² Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards – Interim Edition. General Safety Requirements Part 3. 2011.

³ Proposal for a Council Directive laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. Doc 8682/2/13. Version 24 May 2013.

- ・時に術者の位置を正確に模擬していない計算の結果である。

核医学、近接照射療法又は研究など、眼の被曝につながる可能性のあるその他の適用分野については、また産業的分野に関しても、データがはるかに少ない。主観的には「全身」線量測定が「水晶体」の現在の限度の遵守を保証していたという事実により、このことが確かに説明できる。

3. リスクを伴う職業的活動の同定

3.1. 一般的側面

IAEA は、水晶体の新しい線量限度⁴の職員の放射線防護に対する影響に関する TECDOC 草案文書において、職業的活動に応じて水晶体に有意な線量を受ける可能性のある職員を同定している。またこの文書は、実施すべきモニタリングの性質に関する手順、及び水晶体が曝される放射線の特徴に応じて使用すべき線量当量も提案している。IRSN は、特に測定（ICRU）及び線量計の校正（ISO）のために使用すべき線量当量を定義する権限のある国際機関がこれに関する基準をまだ制定していないことを考慮して、IAEA が採用する手順は実際的であると考えている。

IAEA の文書の中で言及される基準に従い、他の臓器と比較して水晶体が有意な被曝を受ける可能性のある状況として、IRSN は以下を同定している：

- 作業者が個人防護具を装着する（例えば介入的放射線医学において）
- 作業場の幾何学的構造により、頭部が体の残りの部分と比較してより多く曝露される（例えばグローブボックスでの作業）
- 作業者が透過性の低い放射線に直接曝露する（ベータ線エネルギー放出量の最大値が 700 keV 超、又は低エネルギー光子）

IAEA の文書が強調している通り、水晶体の被曝リスクに関係する可能性のある作業者の数は、医学的分野において最も多い。水晶体の有意な被曝につながる可能性があるとして最もよく引用される活動は、専用の部屋又は手術室のいずれにおいて実施されるかに関わらず、介入的放射線医学である（循環器科、神経放射線科、外科手術、X線透視など）。このことはさらに多数の発表文献により示されており、そのうちいくつかの結果は本報告書の続きの部分に再掲されている。

介入的放射線医学以外にも、考慮に値するその他の分野がある。医学的分野については、低エネルギー光子、及び／又は最大エネルギーが 0.7 MeV を超えるベータ線を放出する放射性核種が使用されることから、核医学（サイクロトロンを含む）、近接照射療法及び生物医学研究が該当する。産業的分野及び原子力分野に関しては、水晶体が全身よりも多く被曝するような活動（例えば、グローブボックスでの作業、設備の解体、プルトニウムの取扱い、一部のメンテナンス作業など）が該当し得る。

⁴ IAEA の TECDOC 文書（2013 年 6 月 5 日付の版）：Implications for occupational protection of the new dose limit for the lens of the eye [職業的防護に対する眼の水晶体の新しい線量限度の影響]（2013 年）。

3.2. 介入的放射線医学

介入的放射線医学は 40 年ほど前から存在するが、その最初から胸郭、甲状腺又は手など一部の臓器レベルにおける高い放射線被曝量に対して注意が向けられていた。

「全身」と「水晶体」との間における違いを考慮すれば、眼は特別な興味の対象とはならなかった。

介入的放射線医学の手技を実施する時には、また手術室においては、全身が患者及び手術台から拡散する放射線のみならず、管から漏れる放射線にも曝露する。術者は最低 0.35 mm の鉛の入ったエプロンで体系的に防護されるため、その被曝量は 20 mSv/年の限度よりはるかに低い。それに対し、水晶体は常に防護されるわけではなく（メガネ又は衝立）、そのため一部の手技については、新しい限度である 20 mSv/年に近い、場合によってはそれを超える線量に曝される危険性がある。

X 線束の高電圧は一般に、X 線撮影では 70～110 kV、スキャン撮影では 80～140 kV の範囲内で変動することを思い出してみよう。ここで、約 30～200 keV の範囲内のエネルギーを有する光子で、空気カーマ 1 単位当たりの最大線量を水晶体に送達するものがある[2]。

表 1 は、循環器科以外の様々な手技に関する米国放射線防護審議会（NCRP : National Council of Radiation Protection and Measurements）の報告書 168 [3]及び ICRP Publication 85 [4]の中で報告された文献の統合に対応するデータをまとめる。引用された大部分の手技による被曝量は、平均で 1 mSv 未満である。表 1 に記載されていないその他の文献においては、介入的神経放射線医学の 1 手技当たり 0.1 mSv 未満から肝臓の 1 手技当たり 3 mSv までの範囲内で非常にばらつきの大きい被曝量が報告されている[5-14]。

表 1：介入的放射線医学の様々な手技に関する眼の等価線量

手技	眼の被曝線量 (μ Sv/手技 1 回)	眼の防護*	参考文献
心臓循環器科の介入的手技	200/300	N	Vañó et al. Br J Radiol (1998) [15].
血管に対する手技	10	N	Ho et al. J Vasc Surg (2007) [16].
脳血管造影 動脈塞栓術	13	N	Marshall et al. Br J Radiol (1995) [17]
冠動脈造影／ステント術	13	O (L)	Efstathopoulos et al. Br J Radiol (2011) [18]
小児の心臓カテーテル術	88	?	Li et al. Health Phys (1995) [19]
心臓カテーテル術	15-53	O (E)	Pratt et al. Br J Radiol (1993) [20]
心調律異常の高周波療法	280	O (E)	Calkins et al, Circulation (1991) [21]
経皮的腎砕石術	1.9	?	Hellawell et al. J Urol (2005) [22]
経皮的腎砕石術	26	N	Safak et al. J Radiol Prot (2009) [23]
経皮的ドレナージ	12.5 (最大値 : 78)	?	Vehmas, Br J Radiol (1997) [24]
脊椎浸潤	4	N	Botwin et al. Arch Phys Med Rehabil (2002)
脊椎形成術	84	L ou E ?	Harstall et al. Spine (2005) [26]
逆行性胆道膵管造影	550	N	Buls et al. Br J Radiol (2002) [27]

逆行性胆道膵管造影	94-340	?	Olgar et al. J Radiol Prot (2009) [28]
逆行性胆道膵管造影	10-100	N	O'Connor et al, Br J Radiol (2012) [29]
整形外科	50	N	Tsalafoutas et al. Radiat Prot Dosi (2008) [30]
子宮卵管造影	220	N	Suliman et al. Radiat Prot Dosi (2008) [31]
* L: メガネ - E: 衝立			

表 1 のデータは、以下の試験により補完することができる。Vaño ら[32]の論文においては、著者らは循環器科以外の様々な介入的放射線医学の手技に関する眼の被曝線量を推定した。防護具（メガネ及び／又は衝立）を使用しなかった場合、典型的な水晶体の被曝線量は 1 手技当たり 0.4 mSv～11 mSv の範囲内である。防護具を使用した場合は、水晶体の被曝線量は 1 手技当たり 11 μSv から 336 μSv までの範囲で変動する。神経放射線科の分野における最近の IRSN の試験により、防護具を使用しなかった場合の水晶体の等価線量が、神経放射線科医の活動により 30～115 mSv/年の範囲で変動することが示された[33]。

IRSN が貢献した欧州の ORAMED プロジェクトの枠内で実施された広範な測定キャンペーンの総括[34]により、防護具を使用しなかった場合の水晶体に対する線量が線量当量 Hp(0.07)で循環器の介入的手技 1 回当たり約 0.05 mSv であり、循環器科以外の介入的放射線医学では 1 手技当たり 0.05～0.2 mSv の範囲内であることが示された。右眼及び左眼における被曝線量が術者に対する管の位置に応じて非常に異なることがあることに注意すべきである。

介入性心臓病学における Antic らによる最近の研究[35]は、1 手技当たりの水晶体に対する線量を Hp(3)で 121 μSv と報告している。心調律異常の治療に関する Theocharopoulos らの研究[36]においては、アプローチ経路に対する術者の位置により、眼の被曝量は 1 手技当たり 153～389 μSv の範囲で変動する。

スキャン撮影に関しては、脊髄、肺又は腹部の生検のような種類の介入的手技によりもたらされる眼の被曝線量は、1 手技当たり 7～48 μSv の範囲内である[37]。

3.3. 近接照射療法、核医学及び医学研究

今日に至るまで、イリジウム 192 の線源を使用した手動式の「低線量」近接照射療法の適用における水晶体の被曝線量を評価する機会がないかと問われることもあった。しかし、これらの線源は早く消滅する運命となり（2014 年初め）、残った近接照射療法の適用は線源照射器を用いて実施されるため、もはやその心配をする必要はなくなった。Gagna らによるヨウ素 125 の永久的インプラントによる治療時の放射線防護に関するフランスの研究は、防護具を使用しなかった時の水晶体の被曝量（線量計を前額部に装着）が 1 回の移植当たり 17 μSv 未満（6 回の移植で 100 μSv 未満）であり、また全身の被曝量も同様であることを示した [38]。著者らは、放射線学的点検フェーズのために場合により必要となる場合を除けば、個人防護具の装着は必要でないと結論している。

核医学及び医学研究において、使用される主な放射性核種は数十 keV（ヨード 125）から数百 keV（炭素 11、フッ素 18、ヨード 131 など）の範囲内の光子線を放出する。一部の放射性核種はベータ線をも放出し、そのうちエネルギーが最も大き

いのはイットリウム 90 で、最大 2.28 MeV のベータエネルギーを有する。しかし、水晶体（すなわち深度 3 mm）に達する可能性があるベータ線、つまり約 700 keV を超えるエネルギーの放出のみを考慮すべきである。

2012 年の論文において Summers らは、仕事の種類別の眼の被曝量及び業務の機能様式を考慮に入れた年間量への外挿に関する興味深い証拠を報告している（表 2）[39]。Hp(3)で表した眼の年間被曝線量は、放射性医薬品の調製及び注入を含む作業負荷についてはおよそ 4.5 mSv、またヨウ素 131 の 0.37 MBq 及び 3.7 MBq カプセルの投与についても同様であると思われる。しかし、^{99m}Tc 及び ¹⁸F の注入に関する Summers らのデータ及び Leide-Svegborn のデータを核医学部の従来の活動に外挿すると、眼の被曝線量が 20 mSv/年の限度をはるかに超える値に達することがある。表 3 は、この推定のために使用された様々なデータ[39,40]を再掲する。実際には、これらの活動は複数の介入者に分配される；従って、これらの注入を実施する職員が 5 名であるならば、眼の年間被曝線量の平均は約 22 mSv となる。

表 2：手技の種類別の眼の被曝線量及び術者の典型的な作業負荷に関する年間総被曝線量[文献 39 による]

手技	1 手技当たりの眼の 平均被曝線量	手技の頻度／回数	眼の年間被曝線量 (mSv)
放射性医薬品の調製	18 µSv/回	1 回/週	0.90
放射性医薬品の放出（ ¹³¹ I を除く）	18 µSv/回	1 回/週	0.90
¹³¹ I の放出	10 µSv/回	1 回/週	0.50
¹³¹ I（0.37 GBq カプセル）の投与	2 µSv/カプセル	2 カプセル/週	0.18
¹³¹ I（3.7 GBq カプセル）の投与	18 µSv/カプセル	10 カプセル/年	0.18
^{99m} Tc 放射性医薬品の注入	14 µSv/575 MBq		1.85

表 3：Summers ら及び Leide-Svegborn [39, 40]のデータに基づく、^{99m}Tc 及び ¹⁸F を使用した核医学手技に関する眼の被曝線量の推定。

放射性核種	眼の平均被曝線量 (µSv/GBq)	1 手技当たりの注入 放射能 (GBq)	手技の年間実施回数 (b)	眼の年間被曝線量 (mSv)
^{99m} Tc	22 ^(a)	0.7	1800	28
¹⁸ F	56	0.35	4000	78

^(a) [28]及び[29]から抽出された値の平均値。

^(b) Gustave-Roussy センター核医学部の 2012 年のデータによる。

しかし、作業者の被曝に関する IRSN の年間報告の中で発表されたデータ[42]など、その他のデータと比較すれば、これらの推定値は過剰であると思われる。この報告は、核医学及び研究の分野における全身被曝量が 20 mSv/年を大きく下回り、6 mSv/年よりも低いことを示している。核医学においては個人防護具の装着頻度が低いことから、受動線量計が示す、また場合によっては操作可能な線量計が示す全身被曝量は、問題となる放射線の種類を考慮して、水晶体の被曝量の指標とみなすことができる。さらに、これは主に光子放射物質に関して Kopec ら[41]が示したことであり、彼らによれば Hp(3)で表された眼の被曝量が Hp(10)で表された「全身」の被曝量とほぼ同じであった。

残る不確実性を考慮すれば、核医学における水晶体の有意な被曝を完全に除外することはできない。従って、この分野におけるあらゆる作業場調査に眼の被曝量の評価を含めることが不可欠であると思われる。この研究の結果に応じて、水晶体の線量測定、さらに防護メガネの装着を推奨する必要性、又は「全身」線量測定データの外挿に限定する可能性について検討すべきであろう。

3.4. 産業的分野

一般的に言えば、線源の幾何学構造及び術者の位置を考慮すれば、術者の眼に有意な放射線が到達する可能性があるような線源の近くに術者が位置する時点から、水晶体の被曝リスクが存在する。実際には、これはグローブボックスでの作業（特に顔が生物学的防護のないグローブのリングの前に位置する場合）、解体作業（廃棄物の調査、再処理、選別及びカッティング作業）、点検作業（燃料ペレット、燃料アセンブリの品質目視検査など；グローブボックスでのプルトニウム物質の調査など）及び通常運転における汚染設備のメンテナンス作業に該当することがある。一部の偶発的状況、特に眼の汚染につながる液体の飛沫又はエアロゾルの再懸濁により、水晶体が被曝することもある。

産業的分野に関わる希少な情報のうち、産業 X 線撮影に関する ISEMIR プロジェクトに由来する情報 [43] は、水晶体の被曝線量が管理されておらず、データが入手できないことを示している。このプロジェクトの作業グループは、本分野において以下のように考えている：

- 追加モニタリングを行う必要はない。
- 人体は均一に曝露している（遠距離線源）。
- 実効線量は水晶体の被曝線量の良い推定指標である。
- 防護の追加測定を行う必要はない。
- 水晶体の被曝線量は、実効線量に適用される線量の作用及び制約も受ける。

著者らによれば、偶発的状況のみが（保管の位置にない線源）、実効線量を超える水晶体の被曝線量をもたらす可能性がある。

原子力設備の分野においては、EDF の研究 [44]により以下のように結論されている：

- PZR トライアングルの修理と PZR 加熱ロッドの交換が、水晶体の被曝量のレベルにおいて監視すべき活動となる。
- リスクを伴う活動は、適切な線量計の装着を必要とする。

同様に、AREVA の研究[45]は、光子の平均エネルギーが約 60 keV である様々な作業場を対象とした。実施された測定により、一部のグローブボックスでの作業場所については水晶体において 20 mSv/年に近い値がみられ、さらに防護具を使用しない場合にはこの値を超えることが示される。また著者らは、実際の気道の防護マスクのバイザーによる減衰に関する試験が、それらの使用を検討できるほどに決定的

ではないことを知った上で、水晶体の放射線防護の可能性及び適切な線量計の装着について疑問を呈している。さらに、水晶体の被曝線量の評価を可能とする尺度として「全身」線量測定を使用できることを望んでいる。

最後に、断片的なデータにより、産業的分野の作業者に関する水晶体の線量測定モニタリングの需要を正確に評価することは困難であることが示される。リスクを伴う職場の同定を、第 3.1 項に記述された基準に基づいて継続しなければならないであろう。

4. 放射線防護の適正な実施

4.1. 一般的側面

放射線防護の適正な実施に関するあらゆる検討に先立ち、考慮する活動分野が何であれ、以下を念頭におくべきである：

- 放射線防護は、あらゆる曝露量を合理的に可能な限り低くするという基本的原則を最も良く適用するために、時間、距離、衝立というよく知られた 3 つの要素を基礎とする（ALARA）。
- 作業場調査は被曝リスクの制御と最小化を達成するための必須要素であるため、水晶体の被曝リスクは本研究の実施に際して明らかに考慮しなければならない。

作業者の全身、皮膚及び四肢における被曝リスクの管理方法から類推して、眼の防護と線量測定モニタリングは、公衆に対して定められた相当する規制限度（すなわち 15 mSv/年）を超える可能性がある状況においてのみ考慮するのが理にかなっていると考えられよう。さらに、あらゆる無用な曝露を避けることが望ましいとすれば、水晶体の被曝に関するリスクが確定的影響の出現リスクであり（全身に関する場合のように確率的な影響ではない）、それを避けるためには限度を遵守すれば十分であることを考えれば、水晶体の被曝量を「最適化することが合理的な範囲はどこまでか」について検討すべきである。多くの状況においては、実効線量を制限するために実施される最適化の手順、特に線源に対する措置もまた、水晶体の被曝に対してポジティブな影響を及ぼすこととなり、水晶体の被曝に対する特異的手順は必ずしも必要ではないだろう。

4.2. 介入的放射線医学の分野

この分野は何十年も前から水晶体に関するリスク分野として同定されていることから、介入的放射線医学のための防護の方法及び手段は今日ではよく知られている。しかし、眼の被曝の体系的モニタリングのための本当に人間工学的な機器は提案されていない。この状況が、150 mSv の限度を超過する恐れのある状況が稀であり、また白内障のリスクががんのリスクと同じ影響を持つわけでないという事実に関連していることは確かである。

4.2.1. 介入的放射線医学における放射線防護手段

リスクは比較的古くから同定されており、眼の防護のための器具は何種類も存在するが（含鉛メガネ、含鉛バイザー、キャビン、天井取付け式衝立など）、それらの使用に伴う制約があり、また水晶体の被曝に対する感化のレベルが不十分であるため、現在潜在的に利用可能なすべての手段が使用されているというには程遠い。実際、術者は自らの手術をその持続時間や複雑さに関わらず完遂しなければならないという事実を考慮すべきである。従って、防護器具が人間工学的なものでありながら、全く手技実施の邪魔とならないよう留意し、一部の術者には彼らの視力に合わせた防護メガネを用意する必要性を忘れないようにしなければならない。

衝立の防護効果は、材料の性質及びその厚さに直接的に依存する。表 4 は、X 線ジェネレーターから発せられる光子線の場合におけるその効果を、様々な高電圧のレベルと鉛厚に関して報告する。

表 4：鉛厚（mm）及び高電圧のレベル（kV）毎の X 線伝播の規模 [46]

鉛厚（mm）	高電圧レベル（kV）			
	60	8	90	100
0.25	0.003	0.025	0.05	0.07
0.5	0.0003	0.007	0.015	0.025
0.75	0.00005	0.002	0.006	0.01
1	0.00001	0.0008	0.003	0.005

防護は個人防護具（メガネ、バイザー及びキャビン）と集団的防護設備（天井取付け式衝立）の 2 種類に分類することができる

- 市販されている含鉛防護メガネは鉛等価厚 0.5 mm 又は 0.75 mm であり、90%以上の減衰率を提供し[47]（写真 1）、重量と効果との間の良い妥協点である。側面防護の鉛厚は 0.25～0.75 mm である。含鉛ガラスの面積が眼を大きく覆うために十分であり、含鉛側面防護を備えたメガネを優先すべきである。今日において、イオン化放射線に対する防護メガネに関する基準は存在しないことに注意すべきである。
- 顔全体を防護する、鉛等価厚 0.1 mm の含鉛アクリル製防護バイザー（写真 2）など、はるかに普及していないその他の個人装備が存在する。矯正用レンズ装用者にとって有用であるかもしれないこれらのバイザーは、製造元によれば 70 kV で約 90%から 140 kV で約 80%までの範囲の防護率を提供する
- 上肢を除く体全体を防護することができるキャビンも市販されているが、それらの使用はほとんど普及していない。さらに、それらの人間工学的特性により、使用は心調律異常の治療などの一部の介入的放射線医学の手技に限られる（写真 3）。
- 吊り下げ式含鉛衝立（天井取付け式又は天井吊り下げ式衝立とも呼ばれる）は、鉛等価厚 0.50 mm の含鉛アクリル板又は鉛等価厚 2 mm の含鉛ガラス板で構成されている（写真 4）。これらの装備は、その使用が臨床手技に対応し

ている時には、水晶体の被曝線量を 70～90 kV で 97%まで低減することができる[47]。



写真 1：ディフレクター付き防護メガネ
(Amray Medical protection 社)。



写真 2：含鉛アクリル製バイザー
(Proméga 社)。



写真 3：心調律異常の治療及び循環器科専用の一重又は二重の防護キャビン（Lemer Pax 社）。



写真 4：様々な種類の含鉛天井取付け式衝立（Amray Medical protection 社）。

4.2.2. 介入的放射線医学において個人被曝量を最適化するための適正な職業的実践

第 4.1.1 項に記載された術者の防護手段に加え、適正な職業的実践を遵守することにより術者の被曝量を低減することが可能である。これは管の位置のみならず、術者の曝露が患者の曝露と緊密に関連しているため、患者の曝露を最適化するすべての技術的パラメータにも関係する[48]。

4.2.2.1. 技術的パラメータの線量に対する影響

Vaño らは 2006 年の論文の中で、Philips 社の放射線設備を用いて介入的放射線医学の手技を行う際の、術者の曝露に対する様々な操作因子の影響を紹介した（表 5）[49]。

表 5：様々な操作パラメータの変化の職員の曝露に対する影響（文献[49]より）

技術的因子	術者の曝露の低減率
高線量率透視から低線量率透視に変更	2.6
厚さ 20 cm の患者に対して増幅器のフィールドを 23 cm から 17 cm に変更	1
X 線透視撮影法のシネモードを低線量率モードに変更	8.3

IRSN において実施された研究 [33]により、Siemens 社の設備に関しても、患者への線量及び術者の曝露を低減させるすべての技術的手段、及び期待される低減率を同定することができた（付録 1）。

最後に、参考として、患者の肥満も職員の曝露に対し影響を及ぼすことがわかる；例えば、厚さ 16～24 cm の患者を通過すると、職員の曝露が 4.2 倍増加する [49]。

4.2.2.2. 介入的放射線医学の放射線防護の適正な実施に関するガイドライン

このリストは、一般的に職員の曝露を、また特に水晶体の曝露を低減することのできるすべての介入的放射線医学の適正な実践を引用する[33, 47, 49]。これらの適正な実践は、第 4.1.1 項及び第 4.1.2 項に紹介された要素を再掲する。：

- ・ 介入的手技専用の器具及び部屋のみを使用しなければならない。
- ・ 集団防護設備が利用可能でなければならない。
- ・ その手技において可能であれば、X 線管を台の下に配置しなければならない。
- ・ 管が横向きに配置されている場合は、介入者が検出器の横に位置しなくてはならないことに注意すること（X 線イメージインテンシファイア又はフラットパネル型検出器）。
- ・ 天井取付け式防護設備及びヨークタイプの防護設備をなるべく多く使用すること。天井取付け式衝立は、患者の体のできるだけ近くに配置しなければならない。
- ・ バイプレーン式の装置を使用する時は、側方入射のために拡散される放射線から防護する補完的天井取付け式衝立の追加は、眼の防護のために非常に重要である。
- ・ 術者が術中に移動することになる場合は、天井取付け式衝立の効果的な配置を保存するために注意を維持しなければならない。
- ・ 個人防護具（エプロン、メガネ）を用意しておき、使用しなければならない。

- 手技に必要な画質を犠牲にせずに、X線透視及びX線撮影において最適な撮像頻度を調節する。
- 「低線量検査」モードを優先する。
- X線撮影モードの画像1枚当たりの線量を可能となり次第下げる。
- X線撮影の画像数を最大限に制限し、場合によっては避ける。
- X線透視撮像を使用し、記憶する。
- 患者と検出器との間の距離を最大限に小さくする。
- コリメーションを対象領域に合わせて調節する。
- 可能となり次第、X線画像撮影を遠隔的に開始させる。

4.3. 近接照射療法、核医学及び研究の分野

介入的放射線医学とは反対に、近接照射療法、核医学、また類推により医学研究の分野に関しては、水晶体の特異的防護に対する一般的な適正実践が同定されていない。

近接照射療法においては、一部の技術（セシウム 137 及び低線量イリジウム 192）の消滅、及び現在の技術の特異性（パルス線量及び高線量イリジウム 192、ヨウ素 125 シード）を考慮すれば、水晶体の防護が必要であるとは思われない。これは作業場調査の際に確認すべきである。

核医学においては、眼の汚染につながった最近の事例から、投射に対して防護メガネ（又はバイザー）を装着することが推奨される。さらに、第 3.3 項に報告されているデータは、活動及び／又は業務組織の種類（活動が分配される人員の数、自動注入器など）によっては、水晶体の被曝線量が 20 mSv/年を超えるリスクが除外できないことを示している。この結論により、水晶体の被曝線量の評価を統合する作業場調査の実施が推奨されるに至り、このような試験が最終的に含鉛ガラス装着の推奨につながる可能性がある。

4.4. 産業的分野における放射線防護の適正な実施

文書化された適正な実践法は今日において同定されない。グローブボックスでの作業場に関しては、設備の設計時にまずしなければならないことは、水晶体の被曝リスクを考慮することである。必要な場合は、実施される集団的防護法を含鉛メガネ又はその他の種類の個人防護具の装着により補完することとなる。第 3.1 項に定義される基準によりリスクがあるとして同定されたその他の作業場については、実施すべき適正な実践法が作業場調査の結論に基づいてケースバイケースで同定されることとなろう。防護メガネの装着のみは、その他の防護具（例えばマスク）に対応している限り、一般的に推奨することができる。

5. どのような線量測定モニタリングを行うべきか

水晶体の被曝量の測定に適した線量当量は Hp(3)である。しかし、今日において入手可能な線量計については、ほとんどすべてが Hp(10)及び／又は Hp(0.07) で校正されている。

水晶体の被曝量の測定条件に関しては、全国又は国際レベルの基準書は存在しない。水晶体（皮膚及び四肢も）の被曝線量の監視手順を記述した基準案が、現在 ISO において作成されており、2015 年に公表される見込みである。

5.1. 線量当量

水晶体の線量測定モニタリングは、Hp(3)で校正した線量計を眼のなるべく近くに装着し、必要であれば含鉛ガラスの防護具で補完的に用い、適切なファントムを使用することにより実施するのが理想的である [50-53]。水晶体の等価線量は、一部の状況においては、結果の不確実性はより大きいことを知った上で、Hp(0.07)又は Hp(10)で校正された線量計を使用することにより推定することもできる。IAEA の発表草案（第 3 章を参照）は、光子に関しては、放射線のエネルギーの向きに応じてこれら 2 種類の等価線量のいずれか、或いは両方を用いることにより、水晶体の等価線量の満足な推定を行うことができることを示している。それに対し、最大エネルギーが 0.7 MeV を超える電子の場合は、Hp(3)で測定を実施することが不可欠であるとの論文草案には明記されている。現在まで、医療環境において実施された大部分の作業場調査では、水晶体の被曝線量を推定するために線量当量 Hp(0.07)が使用された。

5.2. 水晶体の被曝量の推定方法

実際には、水晶体の被曝量を推定するための方法を定義するためには、以下の 2 種類の作業者の曝露状況が考えられる。

- 曝露が均一であるとみなすことができる。その場合は、推定すべき放射線に適した線量当量 Hp(0.07)又は Hp(10)の選択を条件として、水晶体の被曝量を胸部に装着された線量計により評価する全身の被曝量と同じとみなすことができる。
- 曝露が均一であるとみなすことができない。胸部が個人防護具又は集団的防護設備により防護されている場合、或いは作業場の幾何学構造により顔が体の残りの部分よりも多く曝露する場合がこれに当たる。このような場合は、胸部に装着される線量計の他に、眼になるべく近く配置する線量計を優先しなければならない。

後者の状況においては、線量計を眼の近くに配置しなければならず、それが介入者の作業の邪魔にならないようにし、場合により防護具（メガネ又はバイザー）を補完的に使用することが理想的である。今日において、すべての状況において水晶体の被曝量に関する信頼できる情報を保証する機器は存在せず、また一部の場合においては、正しく使用しなければ異常な結果が導かれることがある（例えば、欧州プロジェクト ORAMED において提案されたシステム[54]）。写真 4 は、フッ素 18 が取り扱われる遮蔽エンクロージャにおけるこのような状況を例示する。この写真に

において右の作業者は、眼がガラスの前にあるのに対し、線量計は鉛防護具の前に配置されているため、間違った情報につながる。

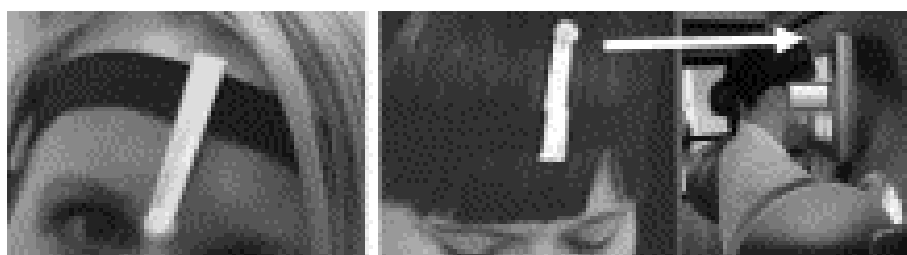


写真4: 「水晶体」線量計の配置の問題の例示。

左: 正しい配置、右: 線量計の悪い位置。術者の眼が含鉛ガラスの後ろにあるのに対し、線量計が鉛防護具の後ろに配置されている[54]。

均一とみなすことができない曝露状況のうち、古典的な1例として眼を防護しない个人防护具により胸部が防護されている場合が挙げられる。このような状況は、例えば介入的放射線医学において遭遇する。

これらの状況においては、線量計を眼のなるべく近くに装着することに代わる解決法として、2個の線量計の装着しばしば提案され、1個目の線量計は胸部の高さでエプロンの後ろに配置し、2個目は頸部の高さでエプロンの外に配置する[4,53]。この二重線量計の手法は、最初は実効線量をより良く測定するために提案されたが複数の著者により水晶体における線量を推定するために利用され、エプロンの外に配置される線量計の情報を眼（又は前額部）の高さで装着される線量計〔一般に熱ルミネッセンス線量計（TLD）〕の情報と比較することを可能とした。表6は、眼（又は前額部）における線量、及び様々な種類の介入的放射線医学の手技に対応する他の部位（頸部の甲状腺の高さ、又は左肩）における線量を示したいくつかの文献のまとめを紹介する。

表6: 様々な介入的放射線医学の手技に関し、異なる著者により報告された、眼（又は前額部）における線量と甲状腺又は左肩における線量との比較。

手技	参考文献	眼の被曝線量 (mSv/手技)	頸部の被曝線量 (mSv/手技)	左肩の被曝線量 (mSv/手技)
介入的放射線医学	[55]	右: 0.30 左: 0.28 前額: 0.30	0.33	0.28
循環器科以外の介入的放射線医学	[56]	前額: 8~16	20-25	31-56
介入的神経放射線医学手技	[57]	右: 0.03 左: 0.25	0.07	0.39
介入的神経放射線医学手技	[58]	0.08	0.07	
介入的神経放射線医学手技	[59]	22-114	14.4-44.7	
内視鏡的逆行性胆道膵管造影	[27]	前額: 0.55 (最大: 2.78)	0.45 (最大: 2.38)	
循環器科	[55]	右: 0.17 左: 0.29 前額: 0.24	0.27	0.25

このアプローチにより、Martin ら[60]は Hp(0.07)で表した甲状腺における線量を眼に対する線量に関係付けることができる以下の計算式を提案している。

$$\text{眼に対する線量} = 0.75 \times \text{甲状腺における線量}$$

この二重線量計の手法は、水晶体の被曝線量に関する情報を提供しながら、実効線量により良くアプローチできる長所を有する。しかしこの手法は、使用される修正係数が実際の設計に適していない場合は、誤った情報を提供する可能性がある。

IRSN が貢献した欧州プロジェクト ELDO において、人体模型（ファントム）の眼の高さで測定された線量が、このファントムの体幹部及び頸部（エプロンより上）の複数の点で測定された線量と比較された[61]。この研究の目的は、体幹部の高さで装着された線量計により測定されたデータに基づく介入性心臓病学専門医の水晶体に関する後ろ向きコホート疫学研究に、線量測定の要素を付加することであった。この研究の結論として、眼に対する線量と体幹部の様々な点における線量との間の相関については、結果の非常に大きなばらつきを考慮すれば、単純な方法で証明することが比較的困難である。それでも、より正確なデータが存在しないために重要な不確実性が依然として許容可能であるような後ろ向き試験の具体的な例においては、弱い相関であっても使用することができる。さらに、実施された手順に関係するパラメータに関する情報が存在する場合は、これらの不確実性を減少させることが可能である。この研究により、介入的放射線医学の分野においては、結果の非常に大きなばらつきを考慮すれば、この方法は後ろ向き研究にのみ適用可能であり、通常モニタリングには適用できないことが示された。

産業的分野においては、最初の測定キャンペーンは、MELOX 及び La HAGUE の施設にある AREVA NC 設備の管理者により実施された。方法は、胸部での線量測定の外挿により水晶体の線量計による測定を行わずに済ませる可能性を評価する目的で確立されていた。ガンマ線、中性子線及びベータ線による被曝リスクを考慮した作業場の同定後、一方ではグローブボックスの前に置かれたファントムに配置された線量計を用いて静的測定が、他方では作業中の職員の前額部又はマスクに配置された線量計を用いて動的測定が実施された。「水晶体」線量計の結果が、胸部の線量計によりエプロンの上と下で測定された線量と比較された。これらの結果は、水晶体に対する線量と胸部における線量（鉛エプロン装着時）との関係が、作業場により大きく異なることを示している。またこの測定キャンペーンは、一部の職員について、水晶体の被曝線量が外挿によれば 20 mSv/年を超過することも示している[45]。

Gualdrini らによれば、中性子の一部のエネルギー及び入射角については、「全身」線量計により線量の保守的な評価がおそらく得られない[62]。この場合は、水晶体の特異的な中性子線量測定が必要となろうが、これは TECDOC IAEA 草案文書によれば補完的調査により確認すべきである。

まとめとして、防護具による寄与も付加しながら Hp(3)で校正された線量計をなるべく眼の近くに装着することが、水晶体の被曝量を推定するための理想的な解決法であるならば、これには例えばマスクの装着又は一時的不快感を理由とする実際的な問題が伴う。従って、上述の留保条件はあるものの、適切に検証された外挿係数が

適用された別の線量計の測定値に基づく間接法により水晶体の被曝量を推定する可能性を検討すべきである。

6. IRSN ガイドライン

水晶体の線量限度が 150 mSv/年から 20 mSv/年、又は連続する 5 年間で 100 mSv、かつ年間最大 50 mSv を超えないこととする基準に移行することにより、以下が義務づけられる：

- 水晶体の線量測定モニタリングを必要とするようなリスクを伴う活動及び／又は状況を同定する。
- 線量測定モニタリングの種類及び使用すべき線量当量を定義する。
- 実践法の変化を考慮して、実施すべき個人的及び集団的防護手段を同定する。

全身曝露の場合における確率的リスクの予防を目的とする放射線防護のアプローチと比較して、水晶体の放射線防護は確定的影響の出現リスクを制限することを目的としなければならない。このような違いは、ALARA の原則の実施において異なるアプローチにつながるであろう。すなわち、この限度未満では原則として期待されるリスクは存在しないため、被曝量が規制限度未満である時から最も「合理的な」最適化手順に重点を置かなければならないであろう。

あらゆる活動分野に関わる IRSN ガイドラインは以下の通りである：

- 線源レベルでの設備の設計及び水晶体の個人防護具の配備の両方を通して、術者及び放射線防護の当事者を養成し、作業者の被曝線量を低減することを可能とするすべての「ツール」に対する意識を高める。
- 水晶体の被曝量が全く又はあまり知られていないすべての状況について、この曝露を評価するための試験を実施し、より一般的にあらゆる作業場調査において、水晶体の被曝線量を体系的に取り入れる。
- 作業場調査の際に評価された水晶体の被曝量が 15 mSv/年（公的限度）を超える可能性がある場合には、以下に記述するアプローチにより線量測定モニタリングを実施する。

胸部の線量計による水晶体の線量測定の正しい推定又は包絡線を明らかに証明することができない場合は、Hp(3)で校正された「水晶体」用個人線量計を使用する。但し、それを不可能とするような特別な制約、又は代表的でない測定値につながる状況のある場合を除く。

「水晶体」用個人線量計の使用が不可能な状況にある場合、或いはこのような線量計から得られる情報が誤っている可能性がある場合には（このような状況は適切に理由を挙げて正当化しなければならない）、水晶体の被曝量の推定は、以下のように実施しなければならない。

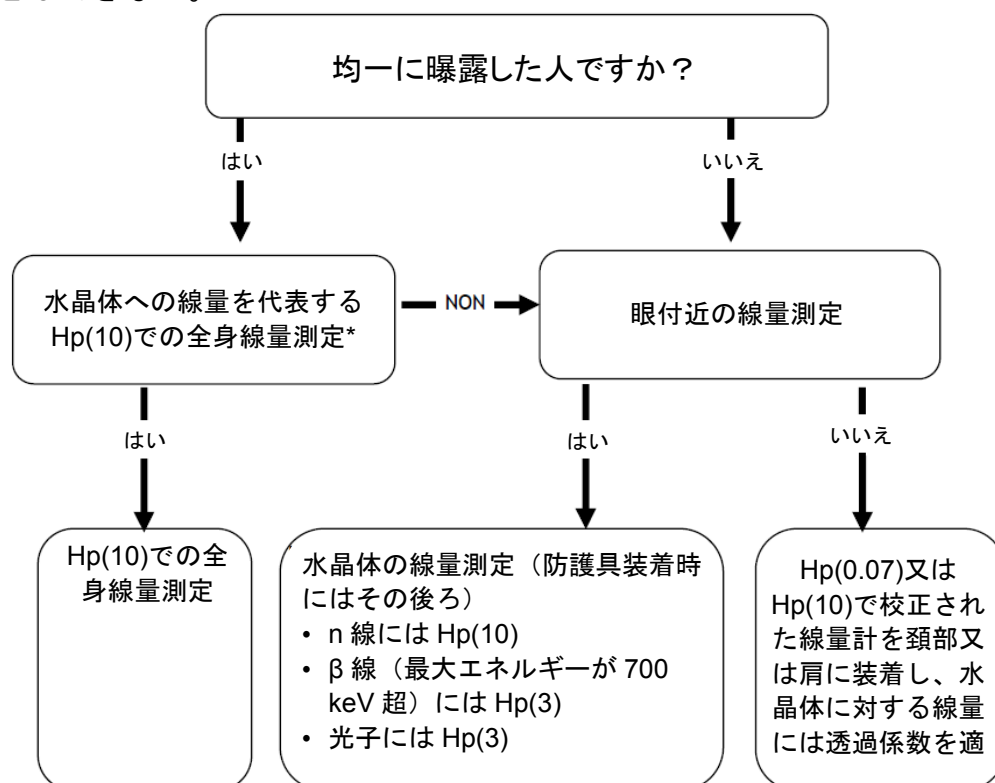
- ✓ 「全身」用線量計に基づき、推定の包絡線の特徴を保証する特異的試験により決定される修正係数を適用しながら

✓眼の近くに（例えば、頸部又は肩の高さに）配置される線量計に基づき、必要であれば、推定の包絡線の特徴を保証する特異的試験により決定される修正係数を適用しながら

上記の手順を図7のフローチャートに要約する。

- 水晶体の線量限度が確定的影響の出現を予防するために定義され、この限度に到達する又はそれを超過することはないであろうことが作業場調査により示されているとしても、'可能な最適化マージン'を評価すること。

医学的環境、及びより具体的に介入的放射線医学に関して、IRSNは患者の被曝線量のあらゆる最適化手順が職員の被曝に対して有益な影響を与えるであろうと呼びかけている。また、この手順を事前に又は同時に実施せずに、旧ガイドラインを検討することはできない。



* CE:全身

図7：水晶体の線量測定モニタリングの方法の定義に導く手順の原則。

7. 付録

曝露 de l'患者に対する線量及び術者の被曝量を低減させる技術的パラメータ[33]

技術的因子	初期撮影	Siemens 社技術の可能性	提案	線量低減率
透視モードでの撮像頻度	画像 5～30 枚/秒、できるだけ高い頻度で	画像 7.5、10、15、30 枚/秒	画像 7.5 又は 10 枚/秒	- 2
撮影モードでの撮像頻度	画像 2 枚/秒、できるだけ高い頻度で	画像 0.5、1、2 枚/秒	画像 0.5 又は 1 枚/秒	-2
X 線透視モード	透視及び血管造影撮影＋できるだけ高い頻度で	低線量率透視、血管造影撮影及び高線量率	低線量率透視	-1.5
X 線撮影画像 1 枚当たりの線量	3.6 µGy、但し一部の手術に関しては 5.4 µGy	0.8～5.4 µGy	1.8	>2
「撮影」モードでの撮影画像数（サブトラクション画像）	マルチ速度	-	サブトラクション画像の数を制限する	可変
患者と検出器との間の距離	患者及び管轄下の術者	手動調節	患者と検出器との間の距離を減少させる	距離が 30 cm から 10 cm に移行した場合は 1.5 倍（線源と患者との間の距離は一定）
X 線束のコリメーション	非体系的	手動調節	コリメーションを対象領域に合わせる	拡散放射線の低減
造影剤の注入を伴う X 線画像の撮像時における曝露の遠隔的な開始	管轄下の非体系的な術者	利用可能な方法	実施される手術に応じて遠隔撮像を優先する	術者に対する線量の低減（距離の逆二乗）
横向きの管の配置	術者及び管轄下の設備	手動調節	X 線管を術者に対するように配置する	-2
側方遮蔽付き／側方遮蔽なしの含鉛メガネ	装着していないが、用意されている	-	含鉛メガネを装着する	水晶体で 8～10／2～3
集団的防護設備	その手術で可能となり次第使用される	集団的防護設備の最適な位置	>2	
室内での職員の位置	管轄下の職員	-	チーム用に可動式含鉛衝立を使用する	-2

8 参考文献

- [1] ICRP, 2012 ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs - Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41(1/2).
- [2] ICRP, 1996. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3-4).
- [3] NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. Radiation Dose Management for Fluoroscopically Guided Interventional Medical Procedures. NCRP Report No.168, Bethesda, MD., NCRP (2010).
- [4] ICRP, 2000. Avoidance of Radiation Injuries from Medical Interventional Procedures. ICRP Publication 85. Ann. ICRP 30 (2).
- [5] AMIEL M. Irradiation du medecin, du patient et du personnel medical dans les explorations cardiaques et vasculaires. J Radiol Electrol Med Nuc, 58:815-816 (1977).
- [6] GUSTAFSSON M et al. Personal exposure to radiation at some angiographic procedures. Radiology, 140:807-811(1981).
- [7] SANTEN B C et al. Exposure of the radiologist to scattered radiation during angiography. Radiology, 140:807-811(1981).
- [8] JEANS S P et al. An investigation of the radiation dose to staff during cardiac radiological studies. Br J Radiol. 58, 1228-1229 (1985).
- [9] JOHNSON L W et al. Review of radiation safety in the cardiac catheterization laboratory. Catheterization and Cardiovascular Diagnosis (1992).
- [10] GERMANAUD J et al. Radioprotection des operateurs lors des cholangiopancreatographies retrogrades endoscopiques. Gastro Clin Biol (1993).
- [11] SAPOVAL M et al. Radioprotection in interventional radiology: should we be concerned? Radiology, 185P:364(1992),
- [12] BARTOLI J M et al. Radiation dose to the patient and operator in vascular radiology: a multicenter study. World Congress on medical Physics and Biomedical Engineering, Nice, 14-19 September (1997).
- [13] MORIKATE T et al. Dose Measurement on Both Patients and Operators during Neurointerventional Procedures Using Photoluminescence Glass Dosimeters. Am J Neuroradiol 29:1910-1917 (2008).
- [14] AUBERT B et al. Evaluation des expositions en medecine nucleaire et radiologie interventionnelle. XXXe congres de la SFPH (1991).
- [15] VANO E et al. Radiation Exposure to medical staff in interventional and cardiac radiology Br J Radiol 71: 954-960 1998.
- [16] HO P et al. Ionizing radiation absorption of vascular surgeons during endovascular procedures. J Vasc Surg. Sep;46 (3):455-9 (2007).

- [17]MARSHALL N W et *a/*. Patient and staff dosimetry in neuroradiological procedures. Br. J.Radiol. 68, 495-501 (1995).
- [18]EFSTATHOPOULOS P et *a/*. Occupational radiation doses to the extremities and the eyes in interventional radiology and cardiology procedures Br. J. Radiol. 84, 70-77 (2011).
- [19]LI L B et *a/*. Occupational exposure in pediatric cardiac catheterization Health Phys., 69,261-4 (1995).
- [20]PRATT T A et *a/*. Factors affecting the radiation dose to the lens of the eye during cardiac catheterization procedures Br. J. Radiol. 66, 346-350 (1993).
- [21]CALKINS H et *a/*. Radiation exposure during radiofrequency catheter ablation of accessory atrioventricular connections. Circulation. 84 (6), 2376-82 (1991).
- [22]HELLAWELL G O et *a/*. Radiation exposure and the urologist: what are the risks? J. Urol. 174 948-952 (2005).
- [23]SAFAK M et *a/*. Radiation doses of patients and urologists during percutaneous nephrolithotomy J.Radiol.Prot. 29 409-415 (2009).
- [24]VEHMAS T. Radiation exposure during standard and complex interventional procedures. Br J Radiol 70, 296-298 (1997).
- [25]BOTWIN K et *a/*. Radiation exposure of the spinal interventionalist performing fluoroscopically guided lumbar transforaminal epidural steroid injections Archives of Physical Medicine and Rehabilitation Vol. 83, 5 697-701, (2002).
- [26]HARSTALL R et *a/*. Radiation exposure to the surgeon during fluoroscopically assisted percutaneous vertebroplasty: a prospective study, Spine 30, 1893-1898 (2005).
- [27]BULS N et *a/*. Patient and staff exposure during endoscopic retrograde cholangiopancreatography Br J Radiol 75, 435-443 (2002).
- [28]OLGAR T et *a/*. Patient and staff doses for some complex X-Ray examinations, J.Radiol.Prot. 29, 393-407 (2009).
- [29]O'CONNOR U et *a/*. Occupational radiation dose to eyes from ERCP in light of the revised eye lens dose limit from the ICRP, Br J Radiol 86(2013).
- [30]TSALAFOUTAS I A et *a/*. Estimation of radiation doses to patients and surgeons from various fluoroscopically guided orthopaedic surgeons, Radiat.Prot.Dosim 128, 112-119 (2008).
- [31]SULIEMAN A et al, Radiation dose optimisation and risk estimation to patients and staff during hysterosalpingography, Radiat.Prot.Dosim. 128, 217-226 (2008).
- [32]VANO E et *a/*. Eye Lens Exposure to Radiation in Interventional Suites: Caution Is Warranted, Radiology 248, 945-953 (2008).

- [33]DILLENSEGER P. Analyse des postes de travail et détermination du zonage en neuroradiologie interventionnelle. Rapport de stage IRSN. Master Radioprotection Grenoble.(2010).
- [34]VANHAVERE F et *al.* Measurements of eyes lens doses in interventional and cardiology :final results of ORAMED project. Radiation Measurements 46, 1243-1247 (2011).
- [35]ANTIC V et *al.* Eye lens dosimetry in interventional cardiology: results of staff dose measurements and link to patient dose levels Radiat.Prot.Dosim 154, 276-284 (2013).
- [36]THEOCHAROPOULOS N et *al.* Occupational exposure in the electrophysiology laboratory:quantifying and minimizing radiation burden. Br. J. Radiol. 79, 644-651 (2006).
- [37]PAULSON E K et *al.* CT-Guided interventional procedures: technics, results and radiation exposure. Radiology 212, 673-681 (2001).
- [38]GAGNA G et *al.* Exposition radiologique de l'équipe opératoire au cours de curiethérapies de prostate par implants permanents d'iode-125. Radioprotection 46 (2), 189-208 (2011).
- [39]SUMMERS E C et *al.* Eye doses to staff in a nuclear medicine department. Nucl Med Commun. 33(5):476-480 (2012).
- [40]LEIDE-SVEGBORN S. External radiation exposure of personnel in nuclear medicine from ^{18}F , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ and ^{131}I with special reference to fingers, eyes and thyroid. Rad. Prot. Dosim. 149,196-203 (2012).s
- [41]KOPEC R. et *al.* On the relationship between whole body, extremity and eye lens doses for medical staff in the preparation and application of radiopharmaceuticals in nuclear medicine. Radiat. Measurements 46(11):1295-1298 (2011).
- [42]http://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Communiqués_et_dossiers_de_presse/Pages/20130723-Bilan_2012_expositions_professionnelles_rayonnements_ionisants.aspx
- [43]VAN SONSBECK R et *al.* Industrial Radiography. Technical Meeting on the The New Dose Limit for the Lens of the Eye - Implications and Implementation, Vienna, 2-4 October 2012.
- [44]HEBERT M. Prise en compte du risque d'exposition du cristallin dans les installations EDF.Congres national de radioprotection SFRP, Bordeaux, 11-13 juin 2013.
- [45]DEVIN P et *al.* La dosimétrie du cristallin. Congres national de radioprotection SFRP Bordeaux, 11-13 juin 2013.
- [46]Rapport DRPH n° 2011 – 11. Conséquences pratiques de l'abaissement de la limite de dose au cristallin pour les travailleurs (2011).

- [47]KOUKORAVA C et *al.* Study of the parameters affecting operator doses in interventionalradiology using Monte Carlo simulations. Radiat. Meas. 46,1216-1222 (2011).
- [48]DAUER L T et *al.* Unprotected operator eye lens doses in oncologic interventionalradiology are clinically significant: estimation from patient kerma-area-product data. J. VascInterv Radiol. 21:1859-1861 (2010).
- [49]VANO E et *al.* Influence of patient thickness and operation modes on occupational andpatient doses in interventional cardiology. Radiat. Prot. Dosimetry 118, 325–330 (2006).
- [50]BORDY J M et *al.* Proposals for the type tests criteria and calibration conditions ofpassive eye lens dosimeters to be used in interventional cardiology and radiology workplacesRadiat. Meas. 46,1235-1238 (2011).
- [51]BEHRENS R et *al.* Dose conversion coefficients for photon exposure of the human eye lensPhys. Med.Biol 56, 415-437 (2011).
- [52]BEHRENS R et *al.* Monitoring the eye lens: which dose quantity is adequate? Phys. Med.Biol. 55 4047-4062 (2010).
- [53]NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. Use of personalmonitors to estimate effective dose equivalent and effective dose to workers for externalexposure to low_LET radiation. NCRP Report No. 122, Bethesda, MD., NCRP (1995).
- [54]BILSKI P et *al.* The new *EYE-D*TM dosimeter for measurements of $H_p(3)$ for medical staff.Rad. Meas. 46, 1239–1242 (2011).
- [55]VANO E et *al.* Radiation exposure to medical staff in interventional and cardiacradiology. Br J Radiol 71 954-960 (1998).
- [56]KICKEN P J H. Dosimetry of occupationally exposed persons in diagnostic andinterventional arteriography Part I, Radiat. Prot. Dosimetry 82, 93–103 (1999).
- [57]MORITAKE T et *al.* Dose Measurement on Both Patients and Operators duringNeurointerventional Procedures using Photoluminescence Glass Dosimeters American Journalof Neuroradiology 29, 1910-1917 (2008).
- [58]KEMERINK G.J. et *al.* Patient and occupational dose staff in neurointerventionalprocedures. Neuroradiology (2002).
- [59]BOR D. Patient and staff doses in interventional neuroradiology Radiation ProtectionDosimetry 1-7, (2005).
- [60]MARTIN C J. A review of radiology staff doses and dose monitoring requirements. Radiat.Prot. Dosimetry 136, 140–157 (2009).
- [61]FARAH J et *al.* A correlation study of eye lens dose and personal dose equivalent forinterventional cardiologists. Radiat. Prot. Dosimetry 1-9 2013 (publication juillet 2013).

[62]GUALDRINI G., FERRARI P. and TANNER R. Fluence to $H_p(3)$ conversion coefficients for neutron from thermal to 15 MeV. Radiat. Prot. Dosim. (2013) doi:10.1093/rpd/cnt126.

資料3

「電離放射線被ばく後の眼の水晶体に対する確定的影響：
しきい線量の引き下げを裏付ける証拠は存在するか」の概要
Christopher Thome,*† Douglas B. Chambers,‡ Antony M. Hooker, §
Jeroen W. Thompson,** and Douglas R. Boreham*†**
Health Phys. 114(3):328–343; 2018

水晶体への電離放射線被ばくは、白内障形成の原因として知られている。歴史的に、白内障形成をもたらす急性しきい線量は 5 Sv と考えられ、水晶体への年間被ばく線量限度は 150 mSv に設定されていた。しかし最近、国際放射線防護委員会は確定的影響におけるしきい線量を 0.5 Gy まで引き下げ、年間平均の職業線量限度 20 mSv を勧告している。多くの組織は、放射線誘発白内障に関してデータの信頼性が低いことから、この新しいしきい値と線量限度が正当であるかどうか疑問を投げかけている。本レビューでは、この提案されたしきい値を評価するため、眼の水晶体への電離放射線被ばくに関して発表されたヒト疫学データすべてを要約する（表 1）。原爆被害者、チェルノブイリ事故処理従事者、医療従事者、および放射線治療患者を含むさまざまな被ばくコホートからのデータがレビューされている。全体として、白内障形成におけるしきい線量を 0.5 Gy まで引き下げる必要性を裏付ける決定的証拠はない。ここでレビューされた研究の多くは、線量測定、サンプル・サイズ、採点基準に矛盾があるため、総合的リスク・モデルに組み込むことが難しい。さらに、線量率、線質、被ばく時年齢、潜伏期間が異なることから、研究対象のコホートのリスク・レベルを職業的なシナリオに結びつけることができない。新しい研究では、線量しきい値と被ばく限度の適切なレベルを求めるため、信頼できる線量測定と水晶体の混濁度の格付け方法を使い、特に職業被ばくに重点を置くよう設計する必要がある。

表 1 電離放射線被ばく後の水晶体混濁に関するヒト疫学研究の要約^a

線質	線量範囲	被ばくタイプ	被ばく時年齢	潜伏期間 (年)	サンプル・ サイズ	終止点	リスク計算	結果	参照
原爆被害者									
中性子線および ガンマ線	0～10+ Gy ^b	急性	0～50+ 平均： HIR 29.1 NAG 23.9	18～19	2,468	混濁の存在	%増加およびしきい値	- 高線量群 (> 2 Gy) で皮質および PSC 混濁が増加 - しきい値：1.09 Gy (0.64～1.54)^c から 1.47 Gy (0～2.57)^c	Nefzger et al. 1969 ^d ; Otake and Schull 1982
中性子線および ガンマ線	0～6+ Gy ^b	急性	0～50+ 平均： HIR 29.3 NAG 23.4	37	1,983	混濁の存在	しきい値	しきい値：1.46 Gy (0～3.34)^c	Otake and Schull 1990 ^d
中性子線および ガンマ線	0～6+ Gy ^b	急性	0～30+	33～35	2,301 (被ばく ＜ 1,176)	混濁の存在	RR	3 Gy を超えるすべての年齢群で皮質および PSC 混濁が増加 1 Gy にて若年群 (< 15 y 被ばく時) で PSC 混濁が増加。RR：2.79	Choshi et al. 1983 ^d
中性子線および ガンマ線	0～3+ Sv ^b 平均：0.92 Sv	急性	0～40+ 平均： HIR 30.6 NAG 24.5	53	10,339 (被ばく ＜ 6,385)	白内障の存在	RR	1 Sv における RR：1.06 (1.01～1.11)^c	Yamada et al. 2004
中性子線および ガンマ線	0～2+ Sv ^b	急性	0～38 平均：8.8	55～57	873	LOCS II	OR およびしきい値	1 Sv における OR - 皮質：1.29 (1.12～1.49)^c - PSC：1.41 (1.21～1.64)^c - しきい値： - 皮質：0.6 Sv (< 0～1.2)^c - PSC：0.7 Sv (< 0～2.8)^d	Minamoto et al. 2004; Nakashima et al. 2006
中性子線および ガンマ線	0～3+ Gy ^b	急性	0～20+	55～57	3,761	白内障手術	OR およびしきい値	1 Gy における OR：1.39 (1.24～1.55)^c	Nerishi et al. 2007
中性子線および ガンマ線	0～5.14 Gy ^b 平均：0.5 Gy	急性	0～54 平均：20.4	41～60	6,066	白内障手術	ERR、EAR およびしきい値	- しきい値：0.1 Gy (< 0～0.8)^c 1 Gy における ERR：0.32 (0.2～0.47)^c 10,000 人年あたり 1 Gy の EAR - しきい値： - ERR モデル：0.5 Gy (0.1～0.95)^c	Nerishi et al. 2012 ^d

- EAR モデル : 0.45 Gy (0.1~1.05)
c

チェルノブイリ

ベータ線および

ガンマ線

0~1+Gyb
中央値 : 123 mGy

長期

< 25~40+
平均 : 32.7

12~14

8,607

修正
Merriam-Focht

OR および
しきい値

- 1 Gy における OR :
- ステージ 1 非核 : 1.52 (1.10~2.12) c
- ステージ 1~5 非核 : 1.65 (1.18~2.30) c
- しきい値 :
- ステージ 1 非核 : 0.50 Gy (0.17~0.69) c
- ステージ 1~5 : 0.50 Gy (0.17~0.65) c

Worgul et al.
2007

ベータ線および

ガンマ線

29~86 mSv^f

長期

0~17

0~9

1,787 (被ば
く 996)

FLD

%増加

- 被ばく群において無症状の PSC 水晶
体変化 (視力障害なし) で 3.6%増加

Day et al. 1995

放射線治療

X 線、Ra、Au シ

ード

0.2~66 Gy^b

分割

0.08~84

1.3~28.5

173

混濁の存在

最小白内障
発生線量

- 単回被ばく : 1.92 Gy
- 短期分割 (3 週間~3 カ月) : 3.84 Gy
- 長期分割 (> 3 カ月) : 5.28 Gy

Merriam 1956^d

⁶⁰Co、4 MV の X
線または 12
MeV の電子線

21~45 Gy^b

分割

< 1

0.5~21.6
中央値 :
10.6

33

白内障の存在
(臨床的に
有意)

%増加

- 治療後 1~4 年の間、照射を受けた眼
85%における PSC 白内障

Fontanesi et al.
1996^d

2~23 MV の X

線、⁶⁰Co、ま

たは ²²²Rn

0.3~22 Gy^b

分割

平均 : 1

16~86
平均 : 32

753

白内障手術

HR

- > 5 Gy における HR : 6 (1.33~
27.15) c
- 治療数に伴い増加する HR :
 - 1 治療 : 57.27 (5~656.5) c
 - 2 または 3 治療 : 332.7 (26.5~
4181.5) c

Chodick et al.
2009^d

外部光子線

0~40+ Gy^b

分割

0~20

➤ 5

14,362

白内障の存在

RR

- 線量 > 2 Gy における白内障の増加
- 2~5 Gy における RR : 3.2 (2.0~
5.2) c

Whelan et al.
2010^d

外部光子線

0~66 Gy^b

分割

0~21

平均 : 8.3

13,902

白内障の存在

EOR および
OR

- 1 Gy における EOR : 0.92 (0.65~
1.20) c

Chodick et al.
2016^d

外部光子線	平均： 21.4	分割	0～17 平均：4	1,833	白内障および 白内障手術 の存在	HR および ERR	0.5～1 Gy における OR：2.17 (1.29～3.67) ^c - 白内障リスクが 4.4 倍増加 (1.5～13) ^c - 潜伏期間中央値：18 年 0～0.5 Gy における HR：2.1 (0.6～7.3) ^c 0～0.5 Gy における手術の HR：1.4 (0.4～5.5) ^c 1 Gy における ERR：0.99 (0.06～1.91) ^c	Allojji et al. 2016 ^d
	平均： 2.5～2.6 Gy ^b							
ベータ線、ガンマ線、X 線または ²²⁶ Ra	0～8.4 Gy ^b 平均：0.4 Gy	分割	0～1.33 平均：0.41	573 (被ばく 484)	LOCSI	OR	1 Gy における年齢補正 OR - 皮膚：1.50 (1.15～1.95) ^c - PSC：1.49 (1.07～2.08) ^c	Hall et al. 1999
	1.1～8.4 Gy ^b	長期	0.2～1.1 中央値：0.5	20	8 等級方式	%増加	> 2 Gy の治療を受けた眼の軽度から中等度の PSC 白内障 - 未治療の眼の視力障害がないわずかな混濁 (0.06 ～ 0.12 Gy)	Wilde and Sjostrand 1997
	224Ra	分割	0～80	831	白内障の存在	しきい値	しきい値：0.5 MBq/kg	Chmelevsky et al. 1988
X 線	平均：0.47 Gy ^b	急性	平均：7	466 (被ばく 234)	わずかな混濁 の存在	OR	0.5 Gy における PSC 白内障の OR：5.9 (1.4～24) ^c	Albert et al. 1968
画像診断								
X 線	報告なし	急性	報告なし	4,926	混濁の存在	OR	- CT スキャンと PSC または核混濁間の相関： - PSC OR：1.45 (1.08～1.95) ^c - 核 OR：1.28 (1.02～1.61) ^c	Klein et al. 1993

次のページに続く

表 1 (続き)

線質	線量範囲	被ばく タイプ	被ばく時年齢	潜伏期間 (年)	サンプル・ サイズ	終止点	リスク計算	結果	参照
X 線	報告なし	急性	報告なし	> 5	3,684	混濁の存在	%増加	- CT スキャンと PSC 混濁間の相関 - 分析に他の頭部スキャンが含まれる場合相関なし	Klein et al. 2000 ^d
X 線	報告なし	急性	31～79	1～18	3,654 (被ばく < 651)	混濁の存在	OR	CT スキャンと白内障罹患率間の有意な相関なし	Hourihan et al. 1999
X 線	報告なし	急性	10～50 平均：40	平均：10	30,537 (被ばく < 2,776)	最初の白内障出現	HR	- 被ばく群における HR：1.76 (1.18～2.63)^e - 複数 CT スキャンに関わるリスクの増加	Yuan et al. 2013 ^d
医療専門家									
X 線	0～80 mGy ^b 中央値：28 mGy	長期	14～43	平均：19.2	35,705	白内障の存在	ERR および HR	1 Gy における ERR：1.98 (～0.69～4.65)^e - 低線量群 (平均：5.1 mGy) と比べた高線量群 (平均：60.1 mGy) の HR：1.18 (0.99～1.40)^e	Chodick et al. 2008
X 線またはガンマ線	0～236 mSv ^b 平均：70 mSv	長期	18～56 平均：25	平均：11.4	3,279 (被ばく < 1,401)	LOCS III	HR	- 皮質 HR：2.58 (1.36～3.82)^e - PSC HR：3.57 (1.27～4.79)^e - 統合 HR：3.64 (1.78～5.52)^e	Lian et al. 2015 ^d
X 線	10～300 mSv ^b 平均：60 mSv	長期	報告時平均年齢：58	> 15	57	LOCS II	EOR	放射線と皮質または PSC 混濁間に有意な相関なし	Mrena et al. 2011 ^e
X 線	平均：102 mSv ^f	長期	報告時平均年齢：54	> 15 平均：20	37 (被ばく 21)	LOCS II	ERR	放射線と皮質または PSC 混濁間に有意な相関なし	Auvinen et al. 2015 ^d
混合	平均：1.63 mSv yr ^{-1 f}	長期	報告時平均年齢：41～46	1～40	3,240 (被ばく < 1,560)	白内障の存在	RR	被ばく群における RR：4.6	Milacic 2009 ^d
X 線	0.1～27 Sv ^b 平均：1.5～6 Sv	長期	報告時年齢：20～69	1～40 平均：7～14	209 (被ばく 116)	修正 Merriam-Focht	RR	- インターベンシオン心臓専門医 (平均：6 Sv) における PSC 白内障の RR：3.2 (1.7～6.1)^e - 看護師/技師 (平均：1.5 Sv) に有意な RR なし	Vano et al. 2010

X 線	長期	報告時年齢： 20～66	平均： 8～16	215（被ばく 127）	修正 Merriam- Focht	%増加	対照（10%）と比べて心臓医（50%）と看護師（41%）の PSC 混濁の頻度が増加	Vano et al. 2013 ^d
X 線	長期	報告時年齢： 25～64	1～33 平均：6～ 9	89（被ばく 67）	修正 Merriam- Focht	RR	- インターベンション心臓専門医（平均：3.7 Gy）における PSC 白内障の RR：5.7（1.5～22）^c - 看護師（平均：1.8 Gy）における PSC 白内障の RR：5.0（1.2～21）^c - インターベンション心臓専門医（平均：1.1 Sv）における PSC 白内障の RR：2.6（1.2～5.4）^c - サポート・スタッフ（平均：1.8 Sv）における PSC 白内障の RR：2.2（0.98～4.9）^c	Ciraj-Bjelac et al. 2010
X 線	長期	報告時年齢： 19～67	1～20 平均：5～ 8	86（被ばく 52）	修正 Merriam- Focht	RR	- 被ばく作業者における白内障の OR：6.3（1.5～27.6）^c - 高被ばく群の OR：9.0（2～41）^c - PSC 混濁の OR：3.56（1.25～10.13）^c	Ciraj-Bjelac et al. 2012 ^d
X 線	長期	報告時の中央値 年齢：43～44	中央値： 10	746（被ばく 466）	白内障の存在	OR	- 被ばく作業者（1.67～73.37）の RR：11.06^c - リスクに有意な増加なし	Andreassi et al. 2016 ^d
X 線	長期	報告時の平均年齢：50	平均：21.9	205（被ばく 106）	LOCS III	OR		Jacob et al. 2013 ^d
X 線	長期	報告時の平均年齢：37～44	>4 平均： 5～10	95（被ばく 81）	LOCS III	RR	- 被ばく作業者（0.5～0.75 Sv）における RR：1.13（1.00～1.28）^c - 最高線量群（> 2 Sv）における RR：1.61（1.41～1.83）^c 1 Gy（ガンマ線のみ）における ERR：0.28（0.20～0.37）^c	Bitarafan Rajabi et al. 2015 ^d
X 線	長期	報告時の年齢： > 40 平均： 48.9	4～40 平均：15.3	66（被ばく 44）	LOCS III	%増加		Thrapsanioti et al. 2017 ^d
原子力従事者								
中性子線および ガンマ線	長期	18～60	0～13	847	混濁の存在	%増加	放射線と混濁間に有意な相関なし	Voelz 1967
中性子線および ガンマ線	長期	< 20～40+	26～60	21,060	白内障の存在	RR、ERR	- 低線量群（0.5～0.75 Sv）における RR：1.13（1.00～1.28）^c - 最高線量群（> 2 Sv）における RR：1.61（1.41～1.83）^c 1 Gy（ガンマ線のみ）における ERR：0.28（0.20～0.37）^c	Azizova et al. 2016 ^d

混合	0～600 mSv ^f	長期	報告時中央値： 76	報告なし	97	白内障の存在	%増加	• 1 Gy (ガンマ線および中性子線) における ERR : 0.31 (0.22～0.40) ^c • 低線量群 (< 200 mSv) 15.1%と比べて高線量群 (200～600 mSv) 37.5%と白内障頻度がより高い • 低線量群 (< 1.85 × 10⁶ Bq) 14.1%と比べて高線量群 (> 1.85 × 10⁶ Bq) 17.1%と白内障頻度がより高い	Jacobson 2005
²²⁶ Ra, ²²⁸ Ra	0～2 × 10 ⁸ Bq	長期	平均 : 19	> 50	813	白内障の存在	%増加	• 低線量群 (< 1.85 × 10⁶ Bq) 14.1%と比べて高線量群 (> 1.85 × 10⁶ Bq) 17.1%と白内障頻度がより高い	Adams et al. 1983 ^d
宇宙飛行士									
宇宙線	報告なし	長期	報告時年齢： 40～69	3～29 平均 : 15.3	416 (被ばく 21)	混濁の存在	%増加	• 年齢がマッチする参照集団と比べて宇宙飛行士では混濁度がより高い (有意性なし)。	Rastegar et al. 2002
宇宙線	0.2～91 mSv ^b	長期	39～45 平均 : 41.8	0～30	295 (被ばく 222)	混濁の存在	HR	• 低線量群 (< 8 mSv) と比べた高線量群 (> 8 mSv) の HR : - 年齢 60 : 2.35 (1.01～5.51) ^c - 65 : 2.44 (1.20～4.98) ^c	Cucinotta et al. 2001
宇宙線	0～130 mSv ^b 中央値 : 12.9 mSv	長期	報告時中央値： 41～53	0～41	418 (被ばく 171)	LOCS III	OR	• 高被ばく (> 10 mSv) における PSC 混濁の OR : 2.23 (1.16～4.26) ^c	Chylack et al. 2009

次のページに続く

表 1 (続き)

線質	線量範囲	被ばく タイプ	被ばく時年齢	潜伏期間 (年)	サンプル・ サイズ	終止点	リスク計算	結果	参照
宇宙線	0～270 mSv ^b	長期	> 5	0～42	227	LOCS III	進行速度	- 非有意 ($p = 0.062$) - 皮質白内障の進行度：$0.25 \pm 0.13\%$ $\text{yr}^{-1} \text{Sv}^{-1}$ ($-0.012 \sim 0.507$)^c	Chylack et al. 2012 ^d
飛行機パイロット									
宇宙線	1～48 mSv ^f	長期	報告時年齢：> 50	0～38	79	WHO	OR	1 mSv における核白内障の OR： 1.02 (1.00～1.03)^c - 放射線と皮質または PSC 白内障間に 有意な相関なし	Rafnsson et al. 2005 ^d
宇宙線	報告なし	長期	21～65	0～44	13,565,389 人 年	白内障の存在	%増加	- 軍パイロットと比べて宇宙飛行士の 白内障頻度がより高い - 宇宙飛行士と比べて軍パイロットの 白内障発生がより早い	Jones et al. 2007
汚染建物									
⁶⁰ Co	1.11～1,493 mSv ^f	長期	0～64	1～15	114 (全員被 ばく)	LOCS III と FLD	%増加	- LOCS III スコアに線量反応なし - 若年者 (< 20 y) の FLD スコアに有 意の線量反応あり - 年長者 (> 20 y) の FLD スコアに有 意の線量反応なし	Chen et al. 2001
⁶⁰ Co	0.1～2,206 mSv ^f	長期	0～18 平均：0.9	2～20	173 (被ばく 73)	LOCS III と FLD	%増加	- LOCS III スコアに線量反応なし - 被ばく後の時間で FLD スコア増加	Hsieh et al. 2010

^aHIR：広島、NAG：長崎、PSC：後囊下白内障、RR：相対リスク

LOCS：水晶体混濁度分類システム、OR：オッズ比、ERR：過剰相対リスク、EAR：過剰絶対リスク

FLD：単焦点レンズ欠損システム、HR：ハザード比、EOR：過剰オッズ比、

CT：コンピュータ断層撮影、WHO：世界保健機構

^b水晶体吸収または等価線量^c95%信頼区間^dICRP Publication 118 に記載のない参照^e90%信頼区間^f実効線量

資料 4 HELCA radiation passbook model version2



Title:	HERCA Radiation passbook model (Version 2)
Summary:	The model of radiation passbook produced by HERCA should be considered as a communication tool to visualize the required data as given in the guidance document (H10-9.d.2). Users are not obliged to use the model exactly as it is. Countries can use their own model as far as it meets the requirements contained in the guidance document and concerning the minimal data content (black fields) in the radiation passbook model.
Effective date:	2012-10 31

Document approval

<u>Review</u>	<u>Author</u>	<u>Approval</u>
2	HERCA Working Group Radiation Passbook & Outside workers	Board of Heads

Table of contents

SECTION 1 – Details of the radiation worker	4
SECTION 2 – Issuing details of the radiation passbook	4
SECTION 3 – General information	5
SECTION 4 - Current employer	6
SECTION 5 – Medical surveillance	7
SECTION 6 – Official dose record up to the radiation passbook issue date	8
SECTION 7 - Official dose record for the year (mSv) (To	10
SECTION 8 – Operational dose in the undertaking's controlled area(s) (mSv).....	11
SECTION 9 – Information regarding training in radiological protection.....	12

Document History Log

Review	Review approval date	Modification description
2	2012-10-31	To ensure coherence with the Guidance document (H10-9.d.2) as well as with the last Draft of the new Basic Safety Standards , the previous version (version 1, 31 May 2012) of the Radiation passbook model has been updated. Some other adaptations are accounting some constructive suggestions. In any case, these do not add any additional obligatory field.
1	2012-05-31	The new version (version 1) of the passbook submitted to the BoH for approval integrates the comments received from HERCA Radiation Protection Authorities and stakeholders following a consultation process launched by HERCA after approval of version 0 of the radiation passbook on 30 June 2010.
0	2010-06-30	The model of radiological passbook proposed by HERCA includes: an harmonised format and terminology; harmonisation of the requirements on data content with a distinction between minimum requirements or mandatory fields (based on annex I of the European Directive but including guidance on what is meant by the wording of the Directive) and optional requirements leaving some data optional to allow Member States some flexibility.

FRONT COVER (*Identification of Radiation Worker*)



*Window to allow to
see picture on next
page*

Radiation worker

[SURNAME] [2nd SURNAME]

[First name] [Middle names]

[Unique identification number of the worker]

Ref. of domestic Legislation under which Radiation Passbook is issued

RADIATION PASSBOOK

BELGIUM

**[Country code (ISO3166) - Passbook number – Passbook sequence
number]]**

[bar code or RFID]

If found, please return to last named employer (see section ..)

SECTION 1 – Details of the radiation worker

(Normally to be completed by the company or institution designated by the competent authority to issue the radiation passbook)

Surname(s)	[SURNAME] [2 nd SURNAME]	
First name	[First name] Middle name(s) [Middle names]	
Sex	[M/F]	
Date of birth	[date of birth]	
Place of birth	[Place of birth]	
Nationality	[Nationality]	
Address	[Address]	
Signature	[Signature]	
Unique identification number		
(unique number in the worker's employer's country, for example :		
National number	[National number]	
Social security number	[Social security number]	
Fiscal number	[Fiscal number]	
Relevant dose limits and period of the dose limits in country of issuance:		
Effective dose	[Effective dose/period]	
Eyes	[Equivalent dose/period]	
Skin	[Equivalent dose/period]	
Extremities	[Equivalent dose/period]	
Other	[]	

SECTION 2 – Issuing details of the radiation passbook

(to be completed by the entity issuing the radiation passbook)

Radiation passbook number	[Radiation Passbook number]	
Issuing date	[issuing date]	Valid until [expiry date]
Issuing body	[body issuing passbook]	
Address	[address]	Web address [Web address]
Tel number	[tel number]	Mark of endorsement
Fax number	[fax number]	
E-mail	[e-mail address]	

SECTION 3 – General information

(any information needed by foreign undertaking to interpret the conditions applying to this worker, depending on the nationality of his employer)

3.1. Contents

(to be completed by the Member States)

3.2. Guidelines to fill in the radiation passbook

(to be completed by the Member States)

3.3. General information

(to be completed by the Member States – including :

- purpose of the passbook
- conditions of use
- scope of application
- temporality
- conditions of issue/renewal
- loss of the radiation passbook/damage to the radiation passbook
- pursuit in case of fraudulent use/entries/amendments
- summary of the legal provisions relative to the operational protection of outside workers, including the definition or clarification of the following concepts :
 - undertaking
 - employer of outside workers
 - outside worker
 - official dosimetry
 - operational dosimetry
 - responsible party
 - issuing entity/responsible entity
 - responsible person
 - under apron/above apron
 - national dose limits (explanation)
- national requirements regarding health surveillance of outside workers

SECTION 4 - Current employer

(To be completed by the employer of the outside worker)

Employer (Name, Identification number, Address, Tel, Fax, e-mail address)	Employment			
	Start date ddmmyyy	Stamp and/or signature or identification number of the responsible party	End date ddmmyyy	Stamp and/or signature or identification number of the responsible party

SECTION 3 – General information

(any information needed by foreign undertaking to interpret the conditions applying to this worker, depending on the nationality of his employer)

3.1. Contents (to be completed by the Member States)	
3.2. Guidelines to fill in the radiation passbook (to be completed by the Member States)	
3.3. General information (to be completed by the Member States – including : - purpose of the passbook - conditions of use - scope of application - temporality - conditions of issue/renewal - loss of the radiation passbook/damage to the radiation passbook - pursuit in case of fraudulent use/entries/amendments - summary of the legal provisions relative to the operational protection of outside workers, including the definition or clarification of the following concepts : - undertaking - employer of outside workers - outside worker - official dosimetry - operational dosimetry - responsible party - issuing entity/responsible entity - responsible person - under apron/above apron - national dose limits (explanation) - national requirements regarding health surveillance of outside workers	

5 – Medical surveillance

(To be completed by the approved medical practitioner or approved occupational health service acting for the employer).

Date	Type of Examination	Medical classification (fit, not fit, fit subject to special conditions as shown)

Restrictions to work with radiations	Validation of result (name, signature and stamp or identification number of the approved medical practitioner, approved occupational health service or other designated instance/person)	Period of validity of the result (ddmmyyyy - ddmmyyyy)

SECTION 6 – Official dose record up to the radiation passport issue date

(To be completed by the entity issuing the radiation passport).

6.1. Occupational life time dose (mSv)

External dose					
Uniform			Non-uniform : equivalent dose to specific body location (extremities/other area's)		
ph/b * H _p (10) [a]	n ** H _p (10) [b]	Skin dose H _p (0.07) [b]	Lens dose H _p (3) [...]	Extremity dose [...]	Extremity dose [...]

6.2. Official doses (mSv) for the last 5 calendar years (not

including the current year – mandatory for persons having a 5 year dose limit.)

Year	External dose					
	Uniform			Non-uniform : equivalent dose to specific body location (extremities/other area's)		
	ph/b H _p (10) [a]	n H _p (10) [b]	Skin dose H _p (0.07) [b]	Lens dose H _p (3) [...]	Extremity dose [...]	Extremity dose [...]

Signature/stamp of the issuing entity/ responsible person for the employer and date	
---	--

Internal dose				Effective dose (sum of [a], [b] and [c])	Authorized signature/ stamp of the issuing entity and date
Committed effective dose from internally deposited radionuclides [c]	Radio-nuclide	Dose assessment method ***	Committed equivalent dose to specific individual organs or tissues		
				[...] [...] [...]	

Internal dose				Effective dose (sum of [a], [b] and [c])	Authorized signature/ stamp of the issuing entity and date
Committed effective dose from internally deposited radionuclides [c]	Radio-nuclide	Dose assessment method ***	Committed equivalent dose to specific individual organs or tissues		
			[...]	[...] [...]	[...]

* photon/beta - ** neutron - *** body counter, urine, faeces, air sampling,...

6.3. Details concerning the entity responsible for the record of the official dosimetry *(To be completed by the entity(ies) responsible for the record of the official dosimetry : approved dosimetry service, National Dose Register or other. Only if different from the entity issuing the passport.)*

Date	[Date]
Responsible entity	[name of the responsible entity]
Address	[Address of the responsible entity]
Contact person	[name and job title of contact person]
Tel number	[tel number]
Fax number	[fax number]
E-mail	[e-mail address]

Date	[Date]
Responsible entity	[name of the responsible entity]
Address	[Address of the responsible entity]
Contact person	[name and job title of contact person]
Tel number	[tel number]
Fax number	[fax number]
E-mail	[e-mail address]

Date	[Date]
Responsible entity	[name of the responsible entity]
Address	[Address of the responsible entity]
Contact person	[name and job title of contact person]
Tel number	[tel number]
Fax number	[fax number]
E-mail	[e-mail address]

SECTION 7 - Official dose record for the year (mSv) (To be completed by the entity issuing the passbook or by the employer or the health physics service or other person acting for him).

Period (ddmm yyyy- ddmm yyyy)	External dose							
	Uniform				Non-uniform : equivalent dose to specific body location (extremities/other area's)			
	ph/e * H _p (10) [a]	n ** H _p (10) [b]	Skin dose H _p (0.07)	Above apron	Under apron	Lens dose H _p (3)	Extre- mity dose [...]	Extre- mity dose [...]

[illegible]

* photon/beta - ** neutron - *** body counter, urine, faeces, air sampling,...

SECTION 8 – Operational dose in the undertaking's controlled area(s) (mSv) *(An estimate of any dose received by the outside worker, to be filled by the undertaking (or by the employer) after the end of any activity in the undertaking's controlled area)*

Period (ddmm yyyy- ddmm yyyy)	External dose					Non-uniform : equivalent dose to specific body location (extremities/ other area's)	
	Uniform						
	ph/b* H _p (10) [a]	n ** H _p (10) [b]	Skin dose H _p (0.07)	above apron	Under apron		
						Lens dose H _p (3) [...]	Extre- mity dose [...]
Name, address and unique identification number undertaking (tel, fax, e-mail) :							
Name, address and unique identification number undertaking (tel, fax, e-mail) :							
Name, address and unique identification number undertaking (tel, fax, e-mail) :							
Name, address and unique identification number undertaking (tel, fax, e-mail) :							
Name, address and unique identification number undertaking (tel, fax, e-mail) :							
Name, address and unique identification number undertaking (tel, fax, e-mail) :							

Committed effective dose from internally deposited radionuclides [c]	Radio- nuclide	Dose assess- ment method ***	Internal dose			Effective dose [sum of [a], [b] and [c)]	Signature/ stamp of the responsible person for the undertaking (or the employer) and date
			Committed equivalent dose to specific individual [...]	Committed equivalent dose to specific individual [...]	Committed equivalent dose to specific individual [...]		

* photon/beta - ** neutron - *** body counter, urine, faeces, air sampling,...

SECTION 9 – Information regarding training in radiological protection *(To be filled by the person or entity responsible for the training)*

9.1. Basic training in radiological protection *(obligation of the employer)*

Date (ddmmyyyy)	Number of hours	Description of the contents

Centre or training company	Signature and stamp of the responsible for the entity or delegated person	Valid until (ddmmyyyy)	Observations

9.2. Specific training in radiological protection (*obligation of the undertaking*)

Date (ddmmyyyy)	Number of hours	Description of the contents

Centre or training company	Signature and stamp of the responsible for the entity or delegated person	Valid until (ddmmyyyy)	Observations

平成 30 年度労災疾病臨床研究事業

分担研究報告書

不均等被ばくを伴う放射線業務における被ばく線量の実態調査と線量低減に向けた

課題評価に関する研究

水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査

(医療分野の放射線の計測評価と被ばく防護)

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

研究要旨

H30 年度は、次年度以降の詳細測定へ向けたフィールド調査・予備測定調査などを行い下記の基礎的検討を主に実施した。

- ・検査1件毎の水晶体線量を測定評価するためには高感度な RPL(ガラス)線量計にて測定することが望ましいこと、また水晶体線量ドジリスの測定感度はそれほど良くなく、検査1件毎の測定評価にはあまり適していないことが明らかになった。

- ・水晶体線量計の適切な着用部位についてファントム実験にて詳細に検討した。測定部位は左眼と右眼の中央表面位置の線量(左右の水晶体線量)、眼の近傍の線量(左眼横, 右眼横, 額中央の線量)にて評価し、血管 IVR を想定した各照射角度(Angulation)において術者医師位置と看護師位置にて測定した。その結果、医師位置では LAO 系の Angulation で X 線管が近づくために水晶体線量が高くなったが、看護師位置では散乱線源から離れていたために Angulation による影響は小さいことが分かった。医師位置では左眼(X 線管側)の線量が高く、水晶体線量計を左側頭部に着用することで過小評価することなく、ばらつきも小さくなることが分かった。看護師位置では左右差がほとんどなく、水晶体線量計を額中央に着用することで過小評価することなく、ばらつきも小さくなる傾向があることが分かった。なお、ファントムの眼の位置に直接入射する X 線量を測定し比較した研究論文は今まで無く、本研究が初の報告である。

A. 研究目的

医療施設等における従事者が受けている眼の水晶体の被ばく及び防護の実態を把握するとともに、被ばく線量の適切な推定方法を確立することで、新線量限度取り入れに資することを目的とする。30 年度はそのための基礎的検討（1. 線量計の基礎検討、2. 水晶体線量計着用部位の基礎検討）を主に実施した。

B. 研究方法

1. 線量計の基礎検討

基礎検討は一部の IVR 等において実施した。スタッフにドジリスと RPL（ガラス）線量計を試験的に装着して、1 検査毎に線量測定値を比較検討した。

2. 水晶体線量計着用部位の基礎検討

心臓 IVR では、長時間の透視や頻回の撮影により、患者のみならず従事者の被ばく線量も高い傾向にある。水晶体被ばく測定用 3mm 線量当量線量計（以下、水晶体線量計）も開発されているが、その適切な着用部位に関しては十分に検討されていない。本研究では、心臓 IVR に従事する医師と看護師における、水晶体線量計の最適な着用部位を、ファントム実験により検討した。

頭部ファントム（THRA1、京都科学）を医師および看護師の位置に、胸腹部ファントム（PBU-60、京都科学）を患者の位置に設置し、臨床用 X 線血管撮影装置（Infinix Celeve-i INFX-8000F、東芝）を用いて冠動脈シネ撮影を行った。焦点-検出器間距離を 100 cm、寝台の高さを 90 cm、視野サイズを 5"、フレームレートを 10 f/s、撮影時間を 15 s とし、管電圧、管電流、パルス幅、付加フィルタはオートとした。撮影方向 Projection は心臓 IVR（冠動脈造影）で一

般的に用いられる 8 方向（postero-anterior (PA), left anterior oblique (LAO), right anterior oblique (RAO), cranial (CRA) and caudal (CAU) angles) とした。頭部ファントムの 5 か所の線量をリアルタイム線量計（EDD-30、Unfors）で測定した。EDD-30 線量計は 70 μ m 線量当量（Hp(0.07)）で校正されている。防護眼鏡は使用しなかった（?）。

C. 研究結果

1. 線量計の基礎検討

比較的高線量である IVR においても、検査 1 件毎の水晶体線量を測定評価するためには高感度な RPL（ガラス）線量計にて測定することが望ましいことが分かった。

また、水晶体線量ドジリスの測定感度はそれほど良くなく、IVR 検査 1 件毎の測定評価にはあまり適していないことが明らかになった。

2. 水晶体線量計着用部位の基礎検討

Table 1 はオートで選択された X 線条件を示している。医師位置では LAO 系の撮影方向で線量が高く、看護師位置に比べておよそ 3 倍高かった。

Table 2 は水晶体線量計着用部位の線量（L-Side、Forehead、R-Side）に対する眼の位置の線量（L-Eye、R-Eye）の比およびそのばらつきを示している。医師位置では左眼の線量が右眼に比べて 1.54 倍（範囲 1.33-1.91）高く、左側頭部（L-Side）の線量が推定値として良好だった。看護師位置では 0.99 倍（範囲 0.94-1.02）と左右差は見られず、額中央（Forehead）の線量が推定値として良好だった。

D. 考察

1. 線量計の基礎検討

ドジリスの測定下限は製品カタログ上は 0.1mSv であるが、今回の測定結果から 0.05mSv 程度までは測定できることが分かった。しかしながら、IVR であっても 1 検査毎の線量測定を行うためには、感度が不十分であると思われた。

2. 水晶体線量計着用部位の基礎検討

医師と看護師の両位置で、ファントムの眼の水晶体の位置に入射する X 線量を測定したのは本研究が初である。実験結果から、LAO 系の撮影方向では X 線管が医師に近くなるために特に左眼の水晶体線量が高くなること、医師位置では看護師位置に比べて散乱体との距離が近いために水晶体線量がおおよそ 3 倍高くなることが分かった。水晶体線量計の着用部位として、過小評価を防ぎつつ測定のばらつきを小さくするためには、医師は左側頭部、看護師は額中央に着用するのが最適であると思われる。

E. 結論

線量計の基礎検討に関して、比較的高線量な IVR においてもドジリスは 1 検査毎に線量測定にはあまり相応しくなく、高感度な RPL（ガラス）検量計の使用が望ましい。

水晶体線量計着用部位の基礎検討では、心臓 IVR に従事する医師と看護師の水晶体線量をファントム実験により調べた結果、医師は過小評価を防ぐために水晶体線量計を左側頭部に着用すべきであり、看護師は額中央に着用するのが妥当である。ただしファントム実験であるため、今後さらなる検討（臨床評価）が必要である。

F. 論文報告

1. H. Ishii, K. Chida, K. Satsurai, Y. Haga, Y. Kaga, M. Abe, Y. Inaba, M. Zuguchi.

A PHANTOM STUDY TO DETERMINE THE OPTIMAL PLACEMENT OF EYE DOSEMETERS ON INTERVENTIONAL RADIOLOGY STAFF, *Radiation Protection Dosimetry* (2019), in press.

G. 研究発表

1. Ishii, H. Chida, K. Satsurai, K. Haga, Y. Kaga, Y. Abe, M. et al. Evaluation of Eye Lens Doses in Interventional Radiology Staff: Where Should the Eye Dosimeter be Optimally Placed? *Radiological Society of North America (RSNA2018)*, November 2018, Chicago

H. 知的所有権の取得状況

該当なし

Table 1. X線装置によりオートで選択されたX線条件

Projection	Tube voltage (kV)	Tube current (mA)	Pulse width (ms)	Filtration	KAP (Gy cm ²)
PA	72.90	251	4.4	0.2 mm Cu	0.759
LAO40 CAU10	75.51	310	5.4	0.2 mm Cu	1.284
CRA30	73.20	253	4.5	0.2 mm Cu	0.773
CAU30	74.80	292	5.1	0.2 mm Cu	1.078
RAO30 CRA30	73.31	255	4.5	0.2 mm Cu	0.781
RAO30 CAU30	76.80	342	5.9	0.2 mm Cu	1.424
LAO30 CAU30	80.61	436	7.5	0.2 mm Cu	2.521
LAO30 CRA30	76.36	331	5.8	0.2 mm Cu	1.291

Filtration は付加フィルタを示す。

KAP は Kerma-Area Product を示す。

Table 2. 水晶体線量計着用部位の線量に対する眼の位置の線量の比

		Physician			Nurse		
		L-Side	Forehead	R-Side	L-Side	Forehead	R-Side
Left eye	Mean ratio	1.00	1.19	1.60	1.22	1.04	1.36
	CV (%)	3.60	3.56	8.73	3.74	5.14	18.55
Right eye	Mean ratio	0.66	0.78	1.04	1.24	1.05	1.38
	CV (%)	15.18	13.36	7.12	4.15	4.90	16.74
Left eye/Right eye		1.54 (1.33–1.91)			0.99 (0.94–1.02)		

労災疾病臨床研究事業費補助
分担研究報告書

IVR を中心とした現場での線量評価と
医療実施との最適化に関する研究に関する研究

研究分担者	盛武 敬	産業医科大学産業生態科学研究所放射線健康医学研究室
研究協力者	阿部 利明	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
研究協力者	茂呂田 孝一	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
研究協力者	中上 晃一	産業医科大学産業生態科学研究所放射線健康医学研究室
研究協力者	永元 啓介	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
研究協力者	松崎 賢	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

研究要旨

2011 年 4 月 ICRP (国際放射線防護委員会) は、眼の水晶体しきい線量の大幅な下方修正に関する声明と、翌 2012 年 10 月に勧告 (Publication 118) がなされた。

医療機関での実情把握と対策の評価のために以下の 6 つの研究を実施した。

1. 病院における個人水晶体等価線量低減を目的とした業務改善計画策定のための被ばく線量の実態調査および解析

【目的】個人水晶体被ばく線量（水晶体等価線量）の低減を目的とした業務改善計画策定のための資料を得ることである。【対象および方法】2 箇所の病院において、過去 20 年間（1998 年度から 2017 年度まで）の放射線業務従事者の水晶体等価線量の実態調査を行った。調査対象者数は 5028 人であった。すべての放射線業務従事者、その内の線量を検出した者および線量が多い上位 3 名について、水晶体等価線量の平均値の年度ごとの推移を調査し解析を行った。【結果および考察】調査施設の個人水晶体等価線量は増加の一途であり、また線量の多い者ほど増加率が大きかった。【結語】被ばく線量を低減するための「業務改善」を計画し、実施することが早急な課題であることが確認された。

2. 脊髄腔造影施行医師の水晶体被ばくの調査

以前我々は、脊髄腔造影施行医師（以下、術者と記載）の眼の水晶体線量は高く、放射線防護メガネ（以下、防護メガネと記載）着用の必要性を報告した。しかし、防護メガネ単独の防護では限界があり、本研究では術者の眼の水晶体防護対策構築を目的とした。

3. ERCP 施行医師の水晶体被ばくの調査

また、2011 年 10 月の勧告(Publication 117)では、画像診断部門以外で行われる X 線透視ガイド下手技における放射線防護において、放射線防護措置の適応は総じて軽視されてきたと述べている。ここで言う画像診断部門以外とは、消化器内科医、泌尿器科医や外科医などを指し、具体的な手技としては、X 線透視ガイド下の内視鏡的逆行性胆管膵管造影法、尿管ステント留置やドレナージ術などを指す。実際、医療現場において実態調査をしたところ、防護装具の不適切な使用が認められた。本研究では、消化器内科医が行う ERCP について、術者の眼の水晶体線量を実測することにより、実態を明らかにし、放射線防護対策の必要性を検証した。

4. CT 介助者における水晶体被ばくの調査

本研究は CT 介助者における水晶体表面線量の調査をおこなった。調査期間は、2017 年 6 月から 10 月までの 50 症例であり、調査対象者は、CT 検査時に患者介助を行った医療スタッフとした。測定には放射線防護眼鏡の内外左右に蛍光ガラス線量計 (GD-352M) を装着した。介助を行なった職種は集中治療医師が 35 件(70%)の CT 介助を行い最も多かった。作業内容はバックバルブマスクを使用した換気補助作業が 30 件 (60%) であった。患者介助者の水晶体表面線量 (中央値) は防護眼鏡未使用時では 0.218 mGy、防護眼鏡使用時では 0.104 mGy であった。防護眼鏡を用いることにより水晶体表面線量 (中央値) が約 50%低減した

5. X 線可動絞りを防護カーテンで覆った Over-tube 型透視装置における空間線量低減効果の検討

本研究は Over-tube 型透視装置における術者水晶体位置の散乱線低減の為のファントム研究をおこなった。X 線可動絞りを覆う防護カーテンを開発し、散乱線低減率を測定した。散乱線測定は、蛍光ガラス線量計 (GD-302M) を使用し、稼働絞り前面を基準に床面に対して水平方向に 0-50cm 垂直方向に 20-70cm の合計 60 点を同時に測定した。カーテンなしと比較し 20cm のカーテン長では 0-74%の線量低減が認められた。30cm のカーテン長では 1-87%の線量低減が認められた。カーテン長が 30cm は 20cm と比較し線量低減効果が高かった。

6. 防護装具使用状況の実態調査と業務改善

Interventional Radiology (IVR) に従事する医師は被ばく線量が高く、防護装具の使用が不可欠であるが、使用しないことが多々みられる。そこで、IVR 施行医の防護装具使用状況調査を行い、装着の「声かけ」による使用状況改善効果を検証した。

2017 年 4 - 5 月に実施された放射線診療 140 症例を対象に、医師 8 名の個人線量計、防護衣、防護眼鏡の使用状況を調査した。次に 2017 年 5 - 7 月に実施された放射線診療 (非血管系のみ) 64 症例を対象に、医師 6 名の個人線量計、防護眼鏡の使用状況を調査した。業務改善として装着の「声かけ」を行ったのち、同年 11 - 2018 年 1 月に実施された 64 症例で同

様の調査を実施した。なお、使用率は放射線診療数に対する各防護装具の使用回数と定義した。

2017 年 4 - 5 月に実施された放射線診療の個人線量計、防護衣、防護眼鏡の使用率中央値は 72.3%、100%、26.5%であった。次に 2017 年 5 - 7 月に実施された放射線診療の個人線量計、防護眼鏡の使用率中央値は 37.5%、0%であり、医師は防護装具の必要性をほとんど理解していなかったが、診療放射線技師による装着の「声かけ」を行ったところ、全ての装具の使用率が 100%となった。

I. 目的

1. 病院における個人水晶体等価線量低減を目的とした業務改善計画策定のための被ばく線量の実態調査および解析

厚生労働省の通知¹⁾に示すとおり、数年以内に放射線業務従事者の水晶体の法令基準値が、現行の 150mSv/年から 100mSv/5 年（年平均 20mSv）に引き下げられる予定である。このため病院において、いままで通りの方法で放射線防護を行っていると、個人水晶体等価線量が、法令基準値を超える者が続出する恐れがある。これを防ぐには業務改善が必要となるが、改善計画の策定にあたっては、現状分析が必要であり、放射線業務従事者の被ばく線量の実態調査や解析が不可欠であると考え。本研究の目的は、水晶体等価線量低減を目的とした業務改善計画策定のための資料を得ることである。このため病院における個人水晶体等価線量低減を目的とした業務改善計画策定のための被ばく線量の実態調査および解析を実施した。

2. 脊椎腔造影施行医師の水晶体被ばくの調査

脊椎腔造影は、手技が簡単で検査時間も短く、これまで放射線被ばくに対して特段注意が払われる事がなかった。2011 年 ICRP よ

り水晶体しきい値と線量限度引き下げが勧告された事を契機に、本研究では脊椎腔造影施行医師の水晶体線量を調査し、放射線防護眼鏡着用の必要性を検証した。

3. ERCP 施行医師の水晶体被ばくの調査

ERCP は、内視鏡やカテーテル、ステントなどのデバイスの進歩により検査や治療が増えている。近年は ERCP の術者被ばくに対しての研究が進んでいるが、1 症例毎被ばく線量を測定した研究はほとんどない。2011 年 ICRP より水晶体しきい値と線量限度引き下げが勧告された事を契機に、本研究では ERCP 施行医師の水晶体線量を調査し、放射線防護眼鏡着用の必要性を検証した。

4. CT 介助者における水晶体被ばくの調査

CT 検査時に介助者が検査室内に留まり作業を行うことがあり、CT 装置が発生する X 線による介助者への散乱線被ばくが問題となっている。介助者が長期間繰り返し作業を行うと、数年から数十年後に発症する白内障や発がんのリスクの上昇が懸念されるが [6-8]、内外での CT 介助者被ばくの実態報告は皆無である。そこで、CT 検査室内で患者介助に従事する医師、診療放射線技師の水晶体表面線量を測定し、CT 検査時の患

者介助者の水晶体表面線量の実態を把握することを目的とする。

5. X 線可動絞りを防護カーテンで覆った Over-tube 型透視装置における空間線量低減効果の検討

Over-tube 型透視装置（以下、透視装置）は、術野が広く手技がしやすいと言った利点があり消化管造影や脊髓腔造影など様々な透視検査で使用されているが、術者の水晶体はコリメータ前面からの散乱線を受けている可能性がある。しかし、透視装置の可動絞り前面（以下、コリメータ前面）付近の線量分布の報告はほとんどなく、術者の水晶体が位置する地点の空間線量が明確になっていない。本研究では、透視装置のコリメータ前面付近の線量分布を明らかにすること、並びに X 線可動絞りを覆う小型防護カーテン（以下、カーテン）を開発し、術者の水晶体付近の空間線量低減効果の検証を行うことを目的とした。

6. 防護装具使用状況の実態調査と業務改善

放射線診療（検査・治療）は多岐にわたり、現代医療では欠かせないものとなっている。その反面、患者や放射線診療従事者の被ばくが問題となっている。特に治療（Interventional Radiology : IVR）に従事する医師は被ばく線量が高く、防護装具の使用が不可欠である。しかし、様々な理由により実際にはこれらを使用せずに業務を行う事が多々見られ、その実態については不明である。また、2017 年 4 月に厚生労働基準局安全衛生部長より通知（基安発 0418）があり、この中で放射線業務における作業の見

直しや再確認を行い、被ばく低減対策を行う事が示されている。そこで、本研究の目的は、放射線診療に従事する医師の防護装具の使用状況について明らかにする事並びに診療放射線技師主導による防護装具使用率向上の業務改善を行う事とする。

II. 研究方法

1. 病院における個人水晶体等価線量低減を目的とした業務改善計画策定のための被ばく線量の実態調査および解析

（ア）調査対象および調査期間

特定機能病院 1 箇所（病床数約 700）

および一般病院 1 箇所（病床数約 150）

の計 2 箇所とした。調査期間は 1998 年度から 2017 年度までの 20 年間とした。

（イ）対象者数

表 1 に調査施設での放射線業務従事者数および被ばく検出者（放射線業務従事者の内で検出下限値（0.05mSv）以上の被ばくを検出した者）数を示す。

（ウ）実効線量および水晶体等価線量の測定および算出方法

測定および算出は、株式会社千代田テクノル（以下「T 社」という。）の RPLD を用いた個人線量測定サービスを利用した。測定は 1 ヶ月あたりの積算で行っており、年間の測定回数は最大 12 である。1 回あたりの検出下限値は 0.05mSv である。線量は小数点以下第 1 位未満を四捨五入して報告される。年度内の線量は 1 ヶ月間の測定結果の合算で算出した。水晶体等価線量は、体幹部均等被ばくとして個人放射線被ばく線量測定を行っている者（以下「均等被ばく測定者」という。）では基本部位

(男性は胸部、女性は腹部)の $H1cm$ 又は $H70\mu m$ の最大値、体幹部不均等被ばくとして個人放射線被ばく線量測定を行っている者(以下「不均等被ばく測定者」という。)では頭頸部の $H1cm$ 又は $H70\mu m$ の最大値を以て示した。なお、実効線量は、均等被ばくの場合では、基本部位の $H1cm$ の値、不均等被ばくの場合では以下の式により求められる²⁾。

$$H_{EE}=0.08H_a+0.44H_b+0.45H_c+0.03H_m$$

… 式 1

ただし、 H_{EE} : 外部被ばくによる実効線量、 H_a : 頭頸部における 1 センチメートル線量当量 H_b : 胸・上腕部における 1 センチメートル線量当量、 H_c : 腹・大腿部における 1 センチメートル線量当量、 H_m : 上記のうち外部被ばくによる実効線量が最大となるおそれのある部位における 1 センチメートル線量当量で与えられる。

- (1) 被ばく線量の推移の調査
個人水晶体等価線量の平均値を、す

べての放射線業務従事者、被ばく検出者、被ばく線量上位 3 名について年度ごとに調査し、その推移を解析した。さらに解析結果は、線量測定事業を行う T 社が示している個人線量の実態データ³⁾と比較した。

2. 脊髄腔造影施行医師の水晶体被ばくの調査

調査期間は、2017 年 10 月から 2018 年 12 月までの 343 症例で、調査対象者は脊髄腔造影施行医師とした。標本数・調査機関・平均透視時間・患者年齢・患者体重は表 1 に示す。また、透視条件や撮影条件は患者体型に応じ自動調整される。水晶体被ばく測定には、放射線防護眼鏡 (Panorama shield ultra light 0.07 mmPb) と蛍光ガラス線量計 (GD-352M) を使用した。蛍光ガラス線量計は、放射線防護眼鏡のレンズ左右側方の内側と外側に配置した。(図 1)

表 1 水晶体被ばくの調査背景

	防護メガネ内側測定	防護メガネ外側測定	防護メガネ内側測定 0.5mmPb衝立併用	防護メガネ内側測定 0.5mmPb衝立・低線量モード併用
標本数(件)	78	97	88	80
調査期間	2017年10月 ～2018年1月	2018年1月 ～2018年4月	2018年5月 ～2018年8月	2018年8月 ～2018年12月
平均透視時間(sec/検査)	60.6 ± 22.7	57.8 ± 25.2	41.8 ± 19.5	33.6 ± 13.5
年齢(mean ± SD 歳)	65.4 ± 13.8	61.9 ± 17.3	67.5 ± 12.8	63.9 ± 15.0
体重(mean ± SD kg)	62.6 ± 13.0	64.3 ± 13.0	61.8 ± 14.3	64.1 ± 13.2

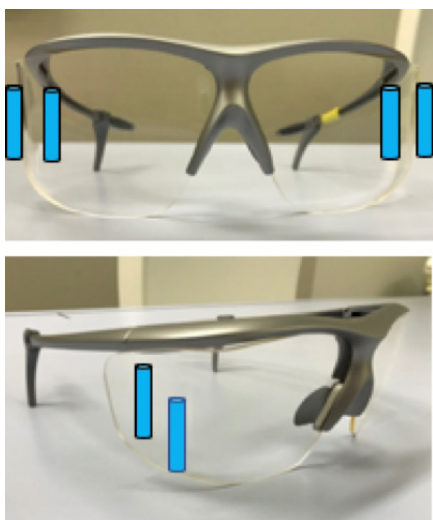


図 1 放射線防護メガネと蛍光ガラス線量計

3. ERCP 施行医師の水晶体被ばくの調査

調査期間は、2018 年 9 月から 2018 年 12 月までの 8 症例で、調査対象者は ERCP 施行医師とした。水晶体被ばく測定には、放射線防護眼鏡（Panorama shield ultra light 0.07 mmPb）と蛍光ガラス線量計（GD-352M）

$$\text{空間線量低減率(\%)} = \{(\text{カーテンなし} - \text{カーテンあり}) / \text{カーテンなし}\} \times 100 \cdots \text{式 2}$$

を使用した。蛍光ガラス線量計は、放射線防

護眼鏡のレンズ左右側方の内側と外側に配置した。(図 1) 当院の ERCP は、散乱線防護クロス (図 2) を使用している。



図 2 散乱線防護クロス（保科製作所社製）

4. CT 介助者における水晶体被ばくの調査

調査期間は、2017 年 6 月から 10 月までの 50 症例とする。調査対象者は、CT 検査時に患者介助を行った医療スタッフとした。



図 3 バックバルブマスクを使用した呼吸補助（Ambu-bag）



図 4 頭部を手で固定する場合 (Head support)

5. X 線可動絞りを防護カーテンで覆った Over-tube 型透視装置における空間線量低減効果の検討

まずコリメータ前面と術者の水晶体の位置関係を把握するため、2018 年 9 月から 12 月までの 4 ヶ月間に行われた透視検査のうち 149 例 (42%) を調査対象とし、寝台の高さ・術者の性別・検査内容を調査した。次に空間線量率の測定として、線量計は床面に対しコリメータ前面から水平方向に 0-50cm を 10cm 間隔、垂直方向に 0-90cm を 10cm 間隔に合計 60 個配置した (図 5)。検討項目として、①コリメータ前面付近の空間線量率の測定②カーテンの長さを

20cm/30cm としの空間線量率の測定を行った。空間線量の低減率は式 1 で求めた。開発したカーテンは、内側はアクリル板で外側は 0.13mmPb の含鉛シートで覆う構造とした (図 6)。使用機器は、透視装置 (SONIALVISION G4, 島津メディカル) で、線量測定には、蛍光ガラス線量計素子 (GD-302M, 千代田テクノル) を使用した。透視条件は、管電圧 88kV, 管電流 2.5mA, SID120cm, 照射野 12inch, 透視フレームレート 7.5f/s とし、散乱体として胸・腹部用 X 線水ファントム (PH-17, 京都科学) を設置し X 線透視を 20 分間行った。

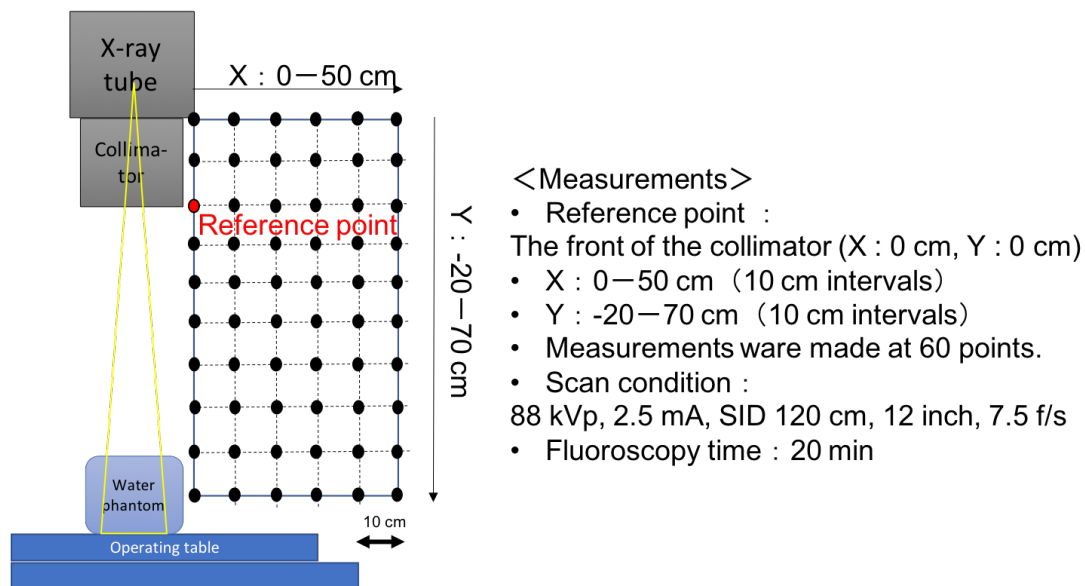


図 5 空間線量率の測定における蛍光ガラス線量計の配置図と測定条件

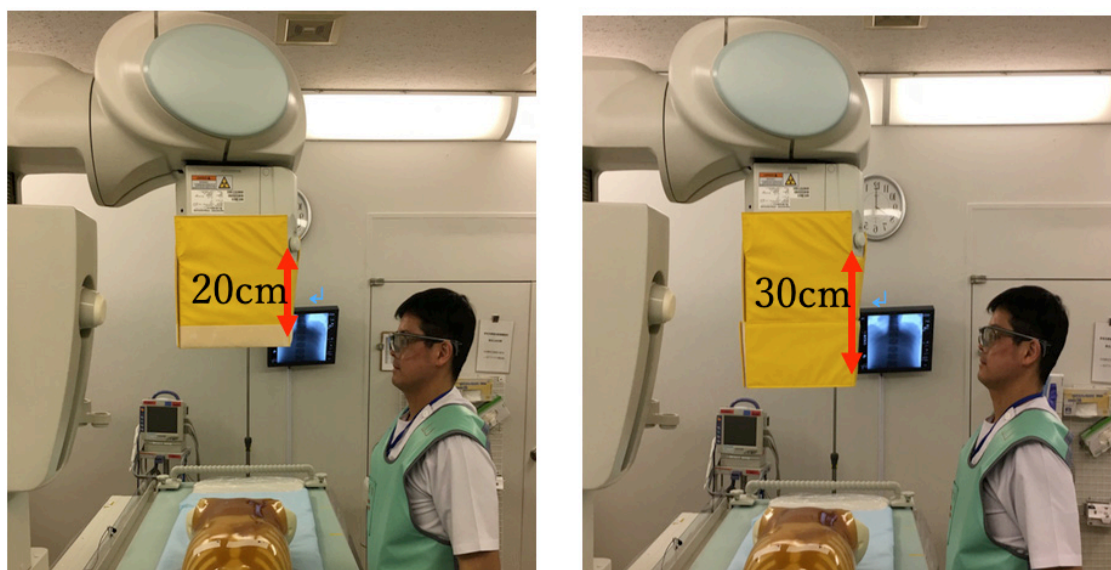


図 6 開発したカーテン（内側：アクリル板、外側：防護シート 0.13mmPb）

6. 防護装具使用状況の実態調査と業務改善

(ア) 防護装具使用状況の実態調査

調査期間は 2017 年 4 - 5 月に実施された放射線診療（140 症例）とし、対象者は放射線診療に従事した医師 8 名とした。防護装具は均等被ばく測定用の個

人線量計、防護衣並びに防護眼鏡とし、防護装具の使用状況を診療放射線技師が記録した。防護装具の使用率は式 3 を用いた。

$$\text{防護装具使用率}(\%) = \frac{\text{防護装具使用回数}}{\text{放射線診療従事回数}} \times 100 \cdots \text{式 3}$$

(イ) 業務改善

業務改善とは、防護装具使用率の向上と定義した。業務改善の方法は、診療放射線技師が医師に「声掛け」を行う事とした。対象となった放射線診療（64 症例）の調査期間は業務改善前が 2017 年 5 - 7 月、業務改善後が 2017 年 11 月 - 2018 年 1 月とした。対象者は放射線診療（非血管系）に従事した医師 6 名とした。防護装具は均等被ばく測定用の個人線量計と防護眼鏡とし、防護装具の使用状況を診療放射線技師が記録した。防護装具の使用率の算出は式 3 を用いた。防護装具を使用しない理由を調査する為に質問紙調査を行った。また、業務改善前後で実効線量の結果を比較した。

(倫理面の配慮)

本研究は、産業医科大学の研究倫理審査委員会の及び新小文字病院倫理委員会の承認を得て行った。

Ⅲ. 結果

1. 病院における個人水晶体等価線量低減を目的とした業務改善計画策定のための被ばく線量の実態調査および解析

(ア) 放射線業務従事者数および被ばく検出者数

表 2 に示すとおり、放射線業務従事者数は 20 年間で約 1.8 倍、被ばくの検出者数は約 4.8 倍になった。

(イ) 個人水晶体等価線量の平均値の推移

図 7 にすべての放射線業務従事者、被ばく検出者の平均線量の推移を示す。図中の回帰曲線は、一次回帰と二次回

帰ともに 1998 年度を 0 とし、年度と平均線量を回帰したところ、両平均線量とも、一次回帰と二次回帰ともに良好であった。すべての放射線業務従事者および被ばく検出者の平均線量は、ともに増加傾向が示された。増加率は検出者平均の方が大きかった（回帰曲線の一次回帰の X の係数：すべての放射線業務従事者の平均は 0.034 に対し、被ばく検出者の平均は 0.061）。一次回帰と二次回帰における相関係数は両結果ともそれぞれでほとんど同じであった。全国の医療施設と調査象施設の検出者平均（T 社の個人線量の実態データ）とを比較したところ、調査施設の方が低かった。

(ウ) 被ばく線量上位 3 名の平均水晶体線量の推移

図 8 に個人水晶体等価線量の上位 3 名の平均値の推移を示す。図中の回帰曲線は図 7 と同じ方法で示しており、また、回帰の結果は一次回帰と二次回帰ともに良好であった。各年度の上位 3 名は同一人物とは限らなかった。上位 3 名の平均線量は、被ばく検出者の平均と同様に増加傾向が示されたが、増加率は 6 倍程度であった。

（回帰曲線の一次回帰の X の係数：検出者平均は 0.061 に対し、上位 3 名の平均は 0.365）。一次回帰と二次回帰の相関係数は図 7 の場合と異なり、二次回帰の方が高かった（相関係数：一次回帰 0.903、二次回帰 0.915、AIC：一次回帰 105.5、二次回帰 103.5）。

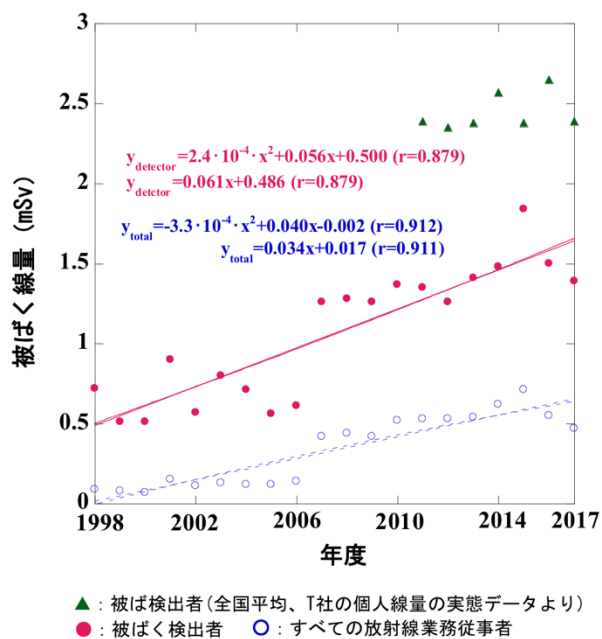


図 7 個人水晶体等価線量の平均値の推移

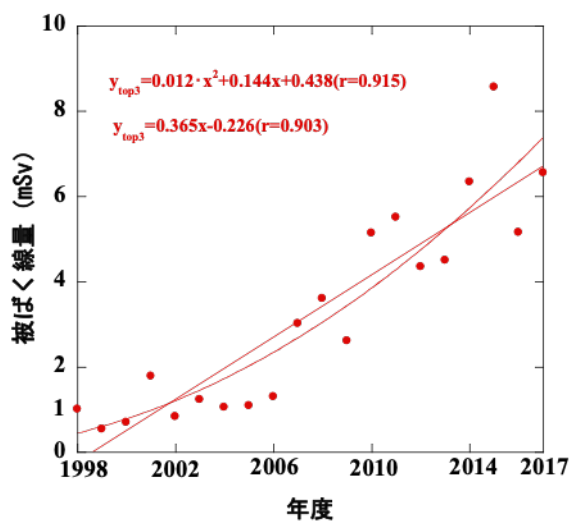


図 8 被ばく線量上位3名の平均水晶体線量の推移

表 2 調査対象病院における対象者数等

年度	放射線業務従事者数(人)	被ばく検出者数(人)	検出者の割合(%)
1998	196	25	12.8
1999	192	29	15.1
2000	208	29	13.9
2001	219	37	16.9
2002	214	41	19.2
2003	219	35	16.0
2004	210	37	17.6
2005	189	40	21.2
2006	213	46	21.6
2007	205	69	33.7
2008	224	77	34.4
2009	236	79	33.5
2010	245	94	38.4
2011	253	99	39.1
2012	279	117	41.9
2013	312	119	38.1
2014	349	146	41.8
2015	354	136	38.4
2016	353	129	36.5
2017	358	121	33.8

調査

年間 20mSv を超える件数 (20mSv ÷ 各条件下の術者水晶体線量) は、①の防護眼鏡を着用した時 262 件となり、①の防護眼鏡を未着用の時 118 件となった。②の衝立併用では 694 件となり、防護眼鏡単独から 62 %線量が低減した。③の衝立及び低線量モード併用では 1429 件となり、防護眼鏡単独から 82 %線量が低減した (表 3)。また、調査開始後、線量情報を脊椎腔造影施行医に線量情報をフィードバックした事で、透視時間が徐々に減少した。但し、透視時間の減少より、段階的防護による線量低減率の方が大きかった (表 3)。

2. 脊椎腔造影施行医師の水晶体被ばくの

表 3 脊椎腔造影施行医師の水晶体被ばくの調査

Myelography	調査期間	線量計装着位置	透視時間 (sec)	透視時間の減少率	術者水晶体線量 (μ Gy/検査)	防護メガネ単独からの低減率
① 防護メガネのみ	2017年10月 ～2018年1月	内側 (n=78)	60.6±22.7	—	76.4±46.2	
	2018年1月 ～2018年4月	外側 (n=97)	57.8±25.2	4.6%	169.5±114.6	
② 衝立併用	2018年5月 ～2018年8月	内側 (n=88)	41.8±19.5	31.0%	28.8±24.5	62.3%
③ 衝立及び低線量モード併用	2018年8月 ～2018年12月	内側 (n=80)	33.6±13.5	44.6%	14.0±8.9	81.7%

3. ERCP 施行医師の水晶体被ばくの調査

防護眼鏡の遮蔽率は 36.2 %であった。防護カーテンを使用しても X 線防護眼鏡は必要である事が判明した。防護眼鏡が未着用の場合、作業量が多いとき線量限度 (100mSv/5years) を超える事が予想され検

査数が多い施設ではその年数が短縮する。

4. CT 介助者における水晶体被ばくの調査

CT 介助を行った職種は集中治療部医師 35 件 (70%)、診療放射線技師 15 件 (30%) であった。作業の内訳はバックバルブマスクを使用した呼吸補助が 30 例 (60%)、頭部を手で固定するが 9 例 (18%)、CT 室内で患者を

観察するが 11 例 (22%) であった。各介助作業における水晶体表面線量の測定結果を示す (図 9、10)。

すべての作業の水晶体表面線量 (最大値) は、防護眼鏡未使用時では 1.51 mGy、防護眼鏡使用時では 0.64 mGy であった。水晶体

表面線量 (中央値) は防護眼鏡未使用時では 0.218 mGy、防護眼鏡使用時では 0.104 mGy であった。防護眼鏡の使用により、水晶体表面線量 (中央値) が約 50 % 低減した。

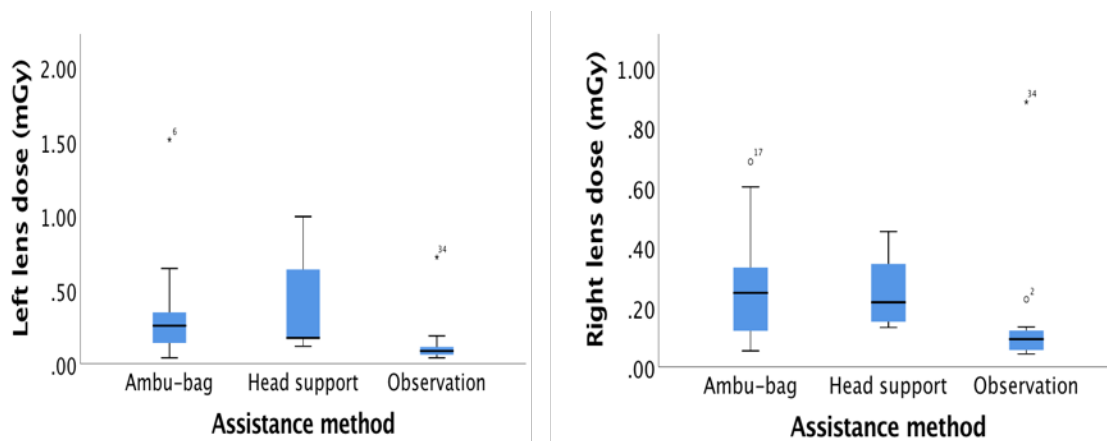


図 9 左右の水晶体被ばく (放射線防護眼鏡なし)

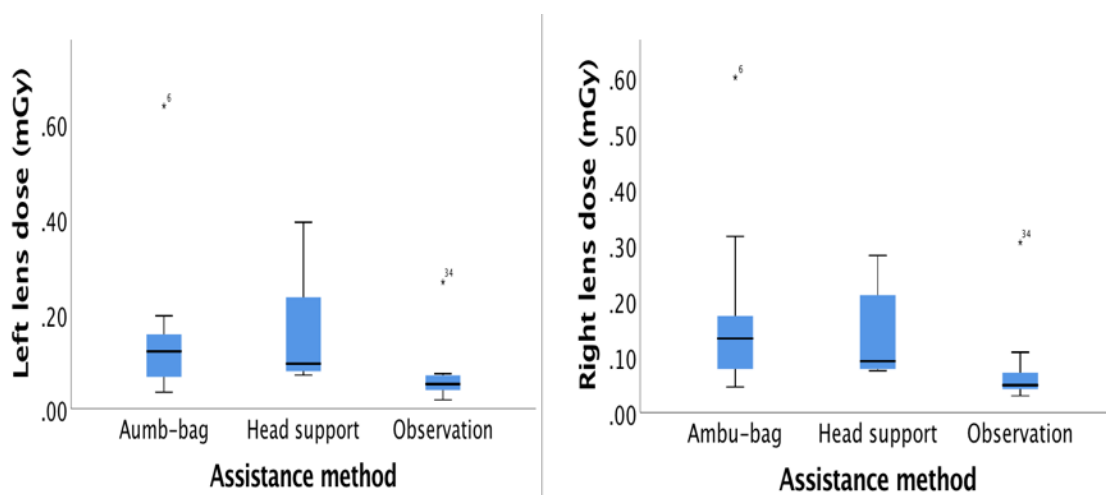


図 10 左右の水晶体被ばく (放射線防護眼鏡あり)

5. X 線可動絞りを防護カーテンで覆った Over-tube 型透視装置における空間線量低減効果の検討

透視検査の寝台の高さは 79-95cm で、術者は男性 92.7%女性 7.3%であり、術者の水晶体はコリメータ前面より低い

位置にあった（表 4）。特に脊髓腔造影は $95 \pm 5.2 \text{ cm}$ であり、他検査と比較し寝台が高い事が判明した（空間線量率の測定結果として、①コリメータ前面から水平方向 0cm、垂直方向にいくほど線量が高くなり最大 $263 \mu \text{ Gy/min}$ とな

っていた（表 5）。②カーテンなしと比較し 20cm のカーテン長では 0-74% の線量低減が認められた。30cm のカーテン長では 1-87% の線量低減が認められた。カーテン長が 30cm は 20cm と比較し線量低減効果が高かった（表 6）。

表 4 寝台の高さ

検査部位	検査数(件)	寝台の高さ 平均値(cm)	標準偏差
胸部	7	80	4.7
上肢	30	86	4.5
腹部	55	83	5.1
小児胸部	4	82	4.8
骨盤部	16	79	5.5
脊髓神経根	19	84	4.1
脊髓腔	18	95	5.2

表 5 空間線量率（カーテンなしの場合）

カーテンなし		X (cm)					
Y (cm)		0	10	20	30	40	50
	-20	3	18	12	14	12	11
	-10	11	23	19	16	14	12
	0	37	29	24	21	16	14
	10	84	54	36	27	20	15
	20	89	60	43	32	23	18
	30	103	73	51	35	24	18
	40	135	85	54	36	25	18
	50	194	102	59	35	24	17
	60	263	100	51	32	22	15
	70	251	87	46	29	19	14

($\mu \text{ Gy/min}$)

表 6 カーテンによる散乱線低減効果

20 cm Length		X (cm)					
		0	10	20	30	40	50
Y (cm)	0	74	4	9	13	0	5
	10	57	28	17	14	9	6
	20	32	20	18	15	11	13
	30	7	17	16	14	11	12
(%)							
30 cm Length		X (cm)					
		0	10	20	30	40	50
Y (cm)	0	87	37	4	16	1	8
	10	80	39	20	18	14	11
	20	70	28	19	16	16	15
	30	31	23	17	14	14	14
(%)							

6. 防護装具使用状況の実態調査と業務改善

(ア) 防護装具使用状況の実態調査 (図 11)

個人線量計の使用率は、最小値 12.5 %、最大値 100 %と二極化しており中央値 72.3 %であった。防護眼鏡の使用率は、最小値 0 %、最大値 100 %と二極化しており中央値 26.5 %であった。防護衣は全例で使用されていた。

(イ) 業務改善 (図 12, 図 13, 図 14)

質問紙調査の結果、防護装具を使用しない理由として「使用忘れ」や「面倒」といった

回答が 81 %であった。個人線量計、防護眼鏡の使用率は中央値 37.5 %、0 %であったが、業務改善後、どちらも 100 %となった。実効線量は業務改善前後で中央値 0 mSv から 0.2 mSv に変化した。図 13 での「8」と「10」はそれぞれ外れ値を示す。介入前、6 人中 5 人は防護眼鏡を使用していなかった。残りの 1 名 (症例番号が「8」) は 10 %程度 (約 10 回に 1 回) で防護眼鏡を使用していた。一方、介入後は全員が防護眼鏡を使用していた。ただし、1 名の方だけ、備えてあった防護眼鏡の数が足りず、1 例使用できなかった。それが、症例番号が「10」の事例となる。

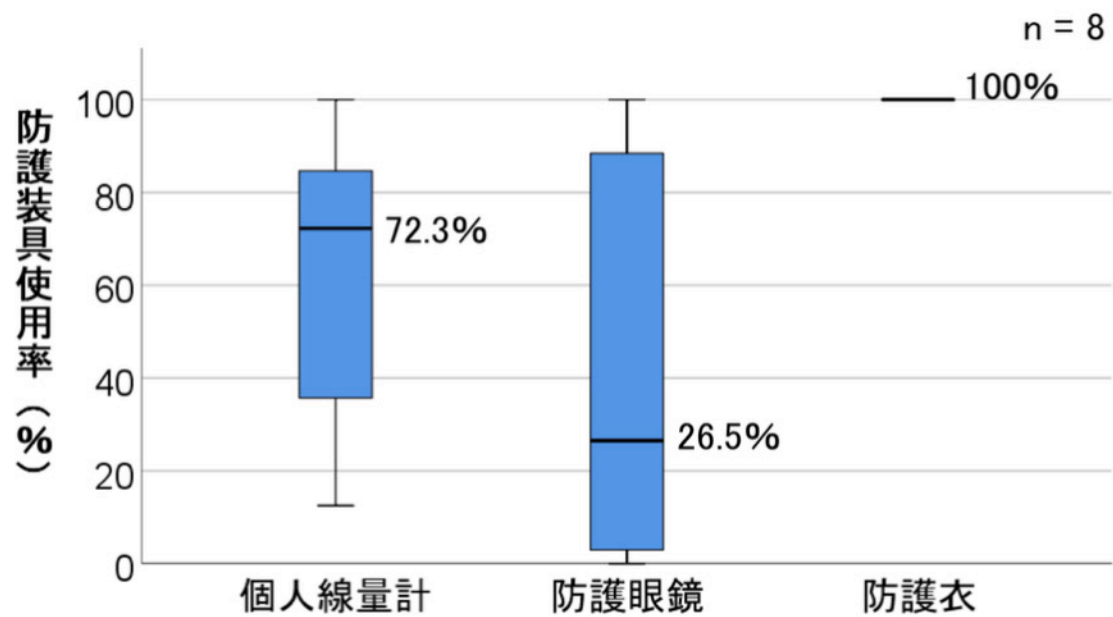


図 11 防護装具等の使用状況の実態調査

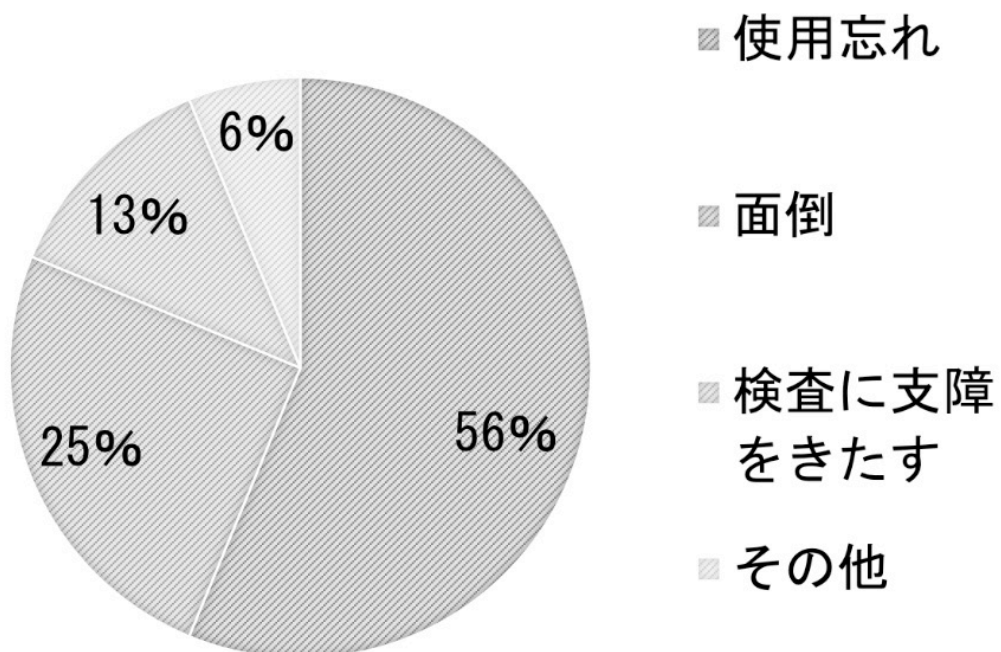


図 12 質問紙調査結果（問：防護装具をしない理由は？）

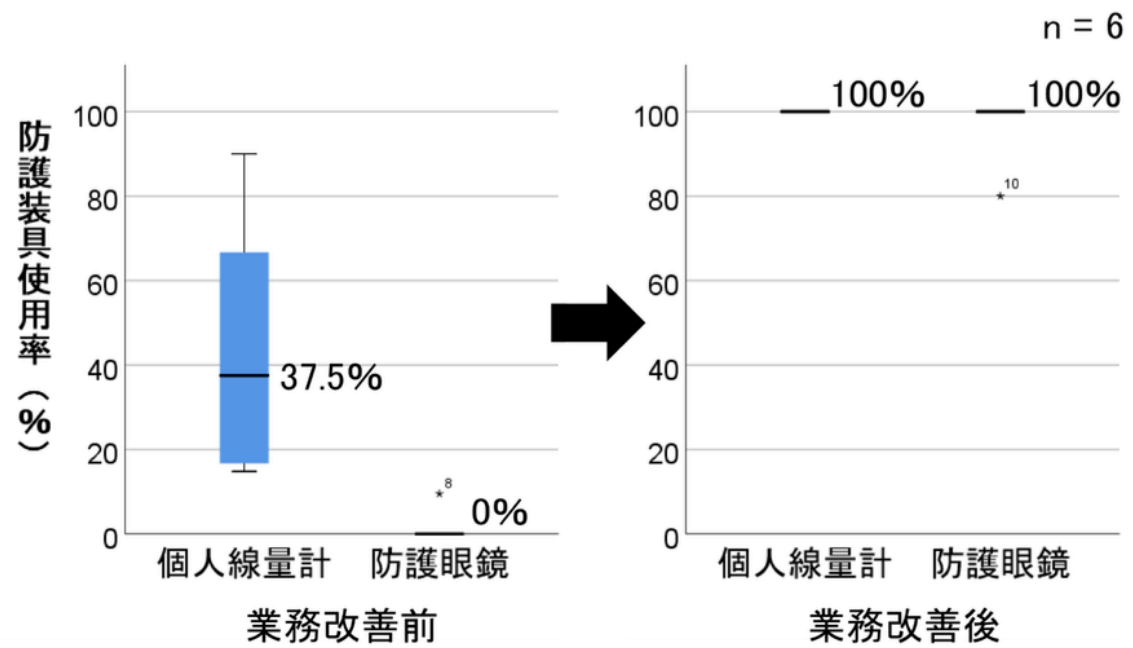


図 13 防護装具の実態調査と業務改善の結果

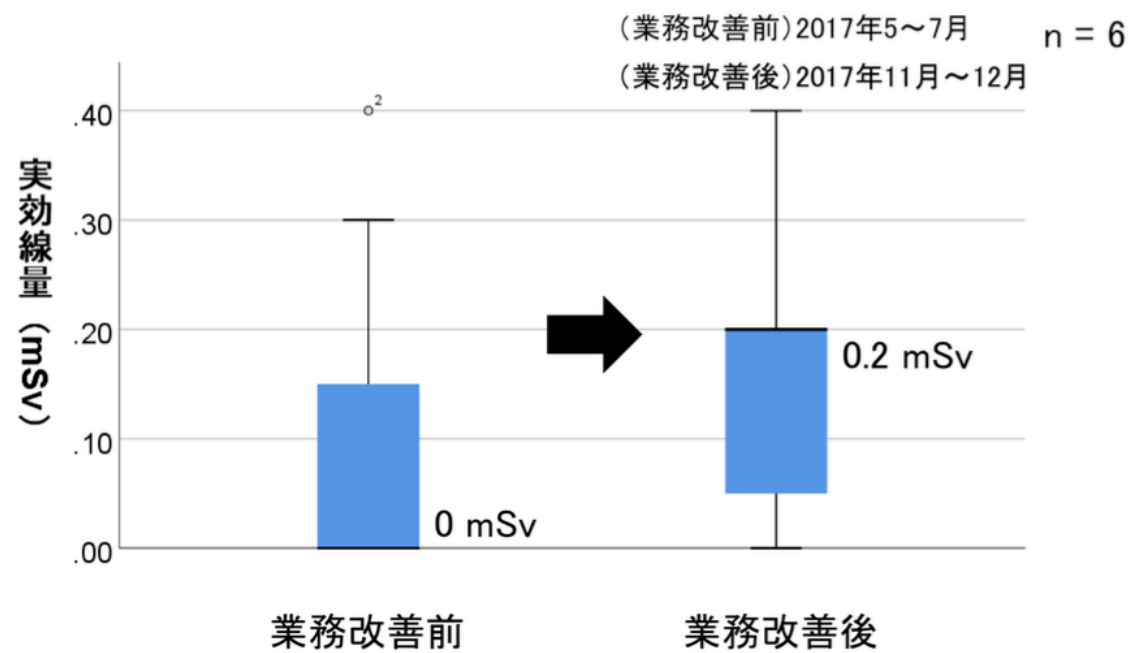


図 14 業務改善前後の実効線量の結果

IV. 考察

1. 病院における個人水晶体等価線量低減を目的とした業務改善計画策定のための被ばく線量の実態調査および解析

(ア) 個人水晶体等価線量の平均値の推移

調査施設の放射線業務従事者の個人水晶体等価線量の平均値は、図 7 に示したとおりすべての放射線業務従事者および被ばく検出者共に増加しており、また各平均値にあてはめた回帰曲線が一次回帰と二次回帰で相関係数に差がないことは、調査施設の被ばく線量の増加は、直線的で、増加率が年度の経過により変化していないことを表している。このことは、調査施設では、水晶体被ばく線量の低減対策を行わなければ、これから先も増加し続ける可能性があることを示唆している。なお、調査施設における被ばく検出者の平均値は全国平均より低いため、全国の医療機関には、調査施設より早急に改善に取り組むべき施設が多く存在する可能性も考えられる。

(イ) 被ばく線量上位 3 名の平均水晶体線量の推移

水晶体被ばく線量上位 3 名の平均値の増加率は、被ばく検出者の増加率と比較して 6 倍程度と大きな差があり、また指数関数的に増加していることが示唆された。このことから、水晶体被ばく線量の多い放射線業務従事者ほど優先的に速やかに業務改善を行い、線量の低減をはかる必要があるといえる。なお、本結果が、一般化できるかについては、他の病院の結果も解析する必要があるといえる。

(ウ) 今後の研究計画について

調査施設では、個人水晶体等価線量低減を目的とした業務改善システム構築の準備が進行中であり、ここで示した「被ばく線量の実態調査および解析」は、そのための現場調査として行ったものである。今後は、解析した結果を基に、被ばく防護の適正化に取り組む計画である。

2. 脊髄腔造影施行医師の水晶体被ばくの調査

防護眼鏡での遮蔽は 54.9 %であり、防護眼鏡未着用の時約 14.7 年で術者の水晶体線量が 0.5 Gy に到達する事が考えられる (表 7)。これは防護眼鏡を未着用するとき、100 mSv/5 year を超えることが予測され、水晶体防護のための防護眼鏡の着用は必須となる。今回我々は、線量低減対策として防護衝立や装置に搭載された低線量モードの使用が効果的であることを確認した。線量低減策を組み合わせることで実施することが効果的であると考えられる。

3. ERCP 施行医師の水晶体被ばくの調査

防護眼鏡の遮蔽率は 36.2 %であった。防護カーテンを使用しても X 線防護眼鏡は必要である事が判明した。防護眼鏡が未着用の場合、作業量が多いとき線量限度 (100mSv/5year) を超える事が予想され検査数が多い施設ではその年数が短縮する。

表 7 防護方法による被ばく低減によるしきい線量限度の遵守可能性

Myelography (調査期間)	① 防護メガネのみ 2017年10月 ～2018年4月	② 衝立併用 2018年5月 ～2018年8月	③ 衝立及び 低線量モード併用 2018年8月 ～2018年12月
防護メガネ内側 (μ Gy)	76.4	28.8	14.0
防護メガネ外側 (μ Gy)	169.5		
防護メガネ遮蔽率 (%)	54.9		
年間検査件数 (件)	200	200	200
5年間の積算線量 (mGy)	76.4	28.8	14.0
5年間の積算線量 (mGy)	169.5		

4. CT 介助者における水晶体被ばくの調査

集中治療医師がすべてのバックバルブマスクを使用した呼吸補助を行っていた。集中治療病室に入室中の多くの患者は人工呼吸器の管理中や全身状態が悪い患者が多いため、CT 介助中は人工呼吸器からバックバルブマスクを使用した呼吸補助に切り替えて撮影を行なっている。そのため、集中治療医師の CT 介助件数が増加し水晶体表面線量が高くなること考えられる。

頭部を手で固定する行為は水晶体表面線量の中央値はバックバルブマスクを使用した呼吸補助より低くなったが、四分位範囲は広がる傾向があった。頭部を手で固定する行為の多くは頭部 CT 撮影のため、撮影範囲は狭いが、頭蓋内の画像コントラストをつけるために、照射線量 (volume computed tomography dose index:CTDIvol) は高くなることから CT 介助者の水晶体表面線量が増加する。頭部を手で固定する作業の多くは診療放射線技師が行っていた。全作業の最大線量は、防護眼鏡未使用時では 1.51 mGy、防護眼鏡使用時では 0.64 mGy であった。防護眼鏡未使用時では 13 回、防護眼鏡使用時では 31 回の CT 介助で水晶体

等価線量限度 20mSv を超える恐れがある。

全作業の水晶体線量 (中央値) で年間 CT 介助可能回数を算出すると、防護眼鏡未使用時では 92 回、防護眼鏡使用時では 193 回の CT 介助で水晶体等価線量限度 20mSv を超えるため、介助者への注意喚起と防護眼鏡装着の徹底が必要である。

5. X 線可動絞りを防護カーテンで覆った Over-tube 型透視装置における空間線量低減効果の検討

これまで透視検査の被ばく防護では患者から散乱線防護が考えられてきたが、術者の水晶体は患者よりもコリメータ前面に近いことから、コリメータ前面からの散乱線をカーテンで防護する事も重要と考えられる。また、検査内容によって寝台の高さも変化し術者の水晶体とコリメータ前面との距離も変化するとことから、カーテンの長さを調整する事で最適な防護ができる可能性がある。しかし、術者は透視検査中に幹部の観察や患者の体位変換を行うため、術野が広く手技しやすい事を望む。よって本研究で開発したカーテンが術者の邪魔にならず使用の可否を今後検証が必要であると考ええる。

6. 防護装具使用状況の実態調査と業務改善

(ア) 防護装具使用状況の実態調査

被ばく線量低減の為に、医師は防護装具を使用する。しかし、様々な理由により実際にはこれらを使用せずに業務を行う事が多々見られ、その実態については不明であった。医師は防護衣の使用が 100 %であることから防護の必要性は理解していると考えられた。しかし、個人線量計や防護眼鏡の必要性に関してはその意義を理解していない為、防護衣と比較して使用率が低いと考えられた。本研究により、個人線量計の使用率が 100%でない者の被ばく線量は、正確な測定ができていない可能性があり、防護眼鏡は使用する習慣の無い者の方が多いことが明らかとなった。

(イ) 業務改善

個人線量計と防護眼鏡の使用率は、「声掛け」後どちらも 100 %となった。「声掛け」後、防護眼鏡で一例、使用していない例があったが（外れ値）、眼鏡の個数の問題であった。「声掛け」は、質問紙調査の結果において「使用忘れ」、「面倒」、「検査に支障をきたす」と思う医師に対する改善の動機付けとなったと考える。また、正確な被ばく線量を測定できるようになったと考えられた。

V. 結語

1. 病院における個人水晶体等価線量低減を目的とした業務改善計画策定のための被ばく線量の実態調査および解析

過去 20 年間に個人水晶体被ばく線量は増加の一途を辿っており、増加傾向は被ば

く線量が多い者ほど大きい結果となった。そのため、被ばく線量を低減するための「業務改善」を計画し、実施することが早急な課題であることが、現場の被ばく線量の調査および解析から明らかとなった

2. 脊髄腔造影施行医師の水晶体被ばくの調査

脊髄腔造影施行医師の水晶体線量は高いため、防護メガネの他に追加の遮蔽体と低線量モードの併用で 81.7 %の線量低減を達成できた。

3. ERCP 施行医師の水晶体被ばくの調査

現時点で症例数は少ないものの、散乱線防護クロスを使用したうえで防護メガネを着用しても、術者の眼の水晶体線量は $82.7 \mu\text{Gy}$ /検査、防護メガネ外側の線量、即ち、防護メガネ未着用時の水晶体線量は $129.6 \mu\text{Gy}$ /検査となり、決して少なくない線量と言える（表 8 ERCP の施行医師の水晶体被ばくの調査）。一般的に、オーバーチューブ型の透視装置は、X 線管の照射口が術者の眼に近く水晶体線量は高くなる傾向にある。散乱線防護クロスを使用すると約 9 割の散乱線除去が見込めるとの報告もあるが、実際の臨床では、患者の体位変換などで散乱線防護クロスに隙間があったり、適切に使用されていなかったりすることで、予想以上の散乱線に晒されていることも否定はできない。今回の研究では、術者の眼の水晶体線量が 5 年で 100 mGy を超えることはなかった。しかしながら、件数の多い施設では線量限度を超える可能性が示唆された。また、散乱線防護クロスの未使用や防護メガネの未装着は、少ない症例数でも線量限度を超え

る可能性があることが示された。

表 8 ERCP の施行医師の水晶体被ばくの調査

ERCP(散乱線防護クロス使用時) 調査期間 : 2018年9月～2018年12月 検査毎に防護メガネ内側・外側同時測定	
防護メガネ内側(n=8)(μ Gy)	82.7 $\pm$ 81.8
防護メガネ外側(n=8)(μ Gy)	129.6 $\pm$ 124.2
防護メガネ遮蔽率(%)	36.2
年間検査件数(件)	120
防護メガネ使用時の5年間の積算線量(mGy)	49.6
防護メガネ不使用時の5年間の積算線量(mGy)	77.8

4. CT 介助者における水晶体被ばくの調査

(ア)集中治療医師の CT 介助の割合が多かった。

(イ)バックバルブバスクを使用した呼吸補助時に水晶体表面線量(中央値)が高くなった。

(ウ)CT 検査における患者介助者の水晶体表面線量は、1 検査あたりの最大線量は防護眼鏡を未使用時では 1.51 mGy、防護眼鏡を使用時では 0.64 mGy であった。

(エ)防護眼鏡を使用することで約 50% の線量が低減できた。

5. X 線可動絞りを防護カーテンで覆った Over-tube 型透視装置における空間線量低減効果の検討

術者の水晶体が位置するコリメータ前面付近の空間線量率が明らかとなり、カーテンを使用することで術者の水晶体付近の空間線量率は減少し、カーテンを長くすることで空間線量率は大きく減少した。

6. 防護装具使用状況の実態調査と業務改善

(ア)防護装具使用状況の実態調査

個人線量計、防護衣、防護眼鏡の使用率に差が見られ、使用には個人差が認められた。個人線量計の使用率が 100%でない者の個人線量データは、正確な測定ができていない可能性がある。防護眼鏡を使用する習慣の無い者が多いことが明らかとなった。

(イ)業務改善

防護装具不使用の理由は「使用忘れ」や「面倒」といった回答が大多数であった。個人線量計と防護眼鏡はほとんど使用されておらず、その対策として、診療放射線技師主導による「声掛け」は使用率向上に効果的であった。また実効線量は過小評価されていた。

VI. 研究発表

著書

- 1) 盛武 敬：増補新訂 医療機関における産業保健活動ハンドブック（第 5 章 -2 レントゲン撮影等の放射線被曝対策），公益財団法人 産業医学振興財団，P298-306，2019 2.
- 2) 茂呂田 孝一：増補新訂 医療機関における産業保健活動ハンドブック（第 5 章 コラム：放射線単位のいろいろ），公益財団法人 産業医学振興財団，P307-308，2019 2.
- 3) 茂呂田 孝一：増補新訂 医療機関における産業保健活動ハンドブック（第 5 章 コラム：診断参考レベルを用いた患者被曝防護の最適化），公益財団法人 産業医学振興財団，P309，2019

- 2.
- 4) 茂呂田 孝一：増補新訂 医療機関における産業保健活動ハンドブック（第5章 コラム：診療放射線技師さんとの立ち話で役立つ線量値あれこれ），公益財団法人 産業医学振興財団，P310，2019 2.
- 5) 永元 啓介：増補新訂 医療機関における産業保健活動ハンドブック（第5章 コラム：水晶体等価線量限度（20mSv/年）引き下げの経緯），公益財団法人 産業医学振興財団，P311，2019 2.
- 6) 松崎 賢：増補新訂 医療機関における産業保健活動ハンドブック（第5章 コラム：いろいろな放射線防護具），公益財団法人 産業医学振興財団，P312-314，2019 2.

論文発表

- 1) Kawauchi S, Chida K, Moritake T, Matsumaru Y, Hamada Y, Sakuma H, Yoda S, Sun L, Sato M and Tsuruta W: Estimation of patient lens dose associated with c-arm cone-beam computed tomography usage during interventional neuroradiology. Radiation Protection Dosimetry, 2018 Nov 17（査読有）
- 2) 人見 剛，松原 俊二，盛武 敬，他：

脳血管撮影における患者被ばく防護の最適化への第一歩 血管撮影装置表示値による撮影目的・疾患群別診断参考レベル設定の可能性調査. 日本放射線技術学会誌, 75 (3) , 263-269, 2019.

学会発表

- 1) 阿部 利明，盛武 敬，馬田 敏幸，永元 啓介，中上 晃一，茂呂田 孝一，松崎 賢，岡崎 龍史：放射線施設におけるPDCAサイクルの実践方法の提案. 日本放射線安全管理学会第17回学術大会，名古屋大学（愛知県・名古屋市），12月5-7日，2018.
- 2) 川内 寛，千田 浩一，盛武 敬，濱田 祐介，佐久間 秀之，孫 略，松丸 祐司，鶴田 和太郎，細尾 久幸，田野 政勝：血流改変ステントを用いた脳動脈瘤治療における患者被ばく線量-患者因子・手術因子と被ばく線量の関係-. 第34回NPO法人日本脳神経血管内治療学会学術総会，仙台国際センター（宮城県・仙台市），11月22-24日，2018.
- 3) 中上 晃一，盛武 敬，細田 悦子：病棟ポータブルX線検査時に放射線技師が抱える不安の解消 ～看護師との取り組み事例報告～. 第56回日本医療・病院管理学会学術総会，ホテルハマツ（福島県・郡山市），10月27-28日，2018
- 4) 茂呂田 孝一，盛武 敬，松崎 賢，永元 啓介，孫 略，石原 隆宏，岡崎 龍史：脊髄腔造影施行医師の水晶体被ばく実態調査と放射線防護メガネの必要性. 第46回日本放射線技術学会秋季学術大会，仙

- 台国際センター（宮城県・仙台市），10月4-6日，2018.
- 5) 古場 裕介，盛武 敬，茂呂田 孝一：ボクセルファントムとモンテカルロ計算を用いた頭部IVRにおける臓器線量評価法の検討病室撮影における患者介助者の被ばく線量. 第116回日本医学物理学会学術大会，アイーナ（いわて県民情報交流センター）（岩手県・盛岡市），9月15-17日，2018
 - 6) 永元 啓介，盛武 敬，中上 晃一，茂呂田 孝一，松崎 賢，阿部 利明，高山 愛菜，孫 略，村上 誠一，岡崎 龍史：病室撮影における患者介助者の被ばく線量. 日本放射線看護学会第7回学術集会，長崎大学ポンペ会館・良順会館・医学部記念講堂（長崎県・長崎市），9月8-9日，2018
 - 7) 阿部 利明，盛武 敬，永元 啓介，茂呂田 孝一，松崎 賢，中上 晃一，馬田 敏幸，岡崎 龍史：視覚に訴える線量報告書「被ばく線量確認書」の試作について. 日本放射線看護学会第7回学術集会，長崎大学ポンペ会館・良順会館・医学部記念講堂（長崎県・長崎市），9月8-9日，2018
 - 8) 松崎 賢，盛武 敬，茂呂田 孝一，永元 啓介，孫 略，中上 晃一，阿部 利明，岡崎 龍史：血管撮影に従事する看護師の被ばく防護装具使用状況実態. 日本放射線看護学会第7回学術集会，長崎大学ポンペ会館・良順会館・医学部記念講堂（長崎県・長崎市），9月8-9日，2018
 - 9) 茂呂田 孝一，盛武 敬，松崎 賢，永元 啓介，孫 略，中上 晃一，阿部 利明，高川 恵美，田代 裕子，松尾 佳奈，岡崎 龍史：血管撮影に従事する看護師に最適な放射線防護衣の選択. 日本放射線看護学会第7回学術集会，長崎大学ポンペ会館・良順会館・医学部記念講堂（長崎県・長崎市），9月8-9日，2018
 - 10) Morota K, Moritake T, Matsuzaki S, Nagamoto K, Sun L, Ishihara T, Okazaki R: Evaluation of trend and reducing patient exposure dose with DICOM-RDSR. 5th Asian and Oceanic IRPA Regional Congress on Radiation Protection (AOCRP-5), Melbourne, Australia, May 20-23, 2018
 - 11) 永元 啓介，盛武 敬，茂呂田 孝一，松崎 賢，高山 愛菜，孫 略，渡辺 亮，村上 誠一，岡崎 龍史：CT検査における患者介助者の被ばく線量測定. 第91回日本産業衛生学会，市民会館シアーズホーム夢ルーム（熊本県・熊本市），5月16日-19日，2018
 - 12) 松崎 賢，盛武 敬，茂呂田 孝一，永元 啓介，孫 略，熊奈 津代，梶木 繁之，岡崎 龍史：病院血管系 IVR 施行医の被ばく防護に対する実態調査と業務改善. 第91回日本産業衛生学会，市民会館シアーズホーム夢ルーム（熊本県・熊本市），5月16日-19日，2018
 - 13) 永元 啓介，盛武 敬，茂呂田 孝一，松崎 賢，高山 愛菜，孫 略，渡辺 亮，村上 誠一，岡崎 龍史：CT 検査における患者介助者の被ばく線量測定. 第74回日本放射線技術学会総会学術大会，パシフィコ横浜（神奈川県・横浜市），4月12日-15日，2018
 - 14) 松崎 賢，盛武 敬，茂呂田 孝一，永元 啓介，孫 略，岡崎 龍史：IVR 施行医の被ばく防護に対する実態調査. 第74回日本放射線技術学会総会学術大会，パ

シフイコ横浜（神奈川県・横浜市），4月12日-15日，2018

- 15) 茂呂田 孝一，盛武 敬，松崎 賢，永元 啓介，孫 略，石原 隆宏，岡崎 龍史：DICOM-RDSR を用いた患者被ばくの傾向評価と低減対策．第 74 回日本放射線技術学会総会学術大会，パシフィコ横浜（神奈川県・横浜市），4月12日-15日，2018.
- 16) 阿部 利明，盛武 敬，中上 晃一：大学アイソトープ研究センターによる病院放射線管理業務支援．第56回日本医療・病院管理学会学術総会，ホテルハマツ（福島県・郡山市），10月27-28日，2018.
- 17) 松崎 賢．非血管系 IVR 施行医の被ばく防護に対する実態調査と業務改善．平成 30 年度日本産業衛生学会九州地方会学会．ウェルとばた（福岡県北九州市），6月29日-30日，2018.
- 18) 永元 啓介．X 線 CT 検査における患者介助方法の違いが医療従事者被ばく線量に与える影響．平成 30 年度日本産業衛生学会九州地方会学会．ウェルとばた（福岡県北九州市），6月29日-30日，2018.
- 19) 阿部 利明．放射線業務従事者教育訓練での PDCA サイクル実践．平成 30 年度日本産業衛生学会九州地方会学会．ウェルとばた（福岡県北九州市），6月29日-30日，2018.
- 20) 茂呂田 孝一．脊髄腔造影における医師の水晶体線量調査と防護メガネ着用の必要性．平成 30 年度日本産業衛生学会九州地方会学会．ウェルとばた（福岡県北九州市），6月29日-30日，2018.

- 21) 松崎 賢．IVR施行医の被ばく防護実態調査．第46回日本放射線技術学会秋季学術大会，仙台国際センター（宮城県・仙台市），10月4日-6日，2018.

VII. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む。）

- 1) 線量計ホルダ:特願 2018-149742(2018年8月8日出願)，発明者:盛武 敬，孫 略，永元啓介，小野洋彰，出願人:盛武 敬，孫 略，永元啓介，有限会社コスモテック，株式会社保科製作所

【講演】

- 1) 講演演題名:放射線行政の動向と診断参考レベル

集会名称:第 34 回 NPO 法人日本脳神経血管内治療学会総会 被ばく防護ミニ講習会
発表者:盛武 敬

開催場所:仙台国際センター(宮城県・仙台市)
開催日時:2018 年 11 月 22 日～11 月 24 日
発表日時:2018 年 11 月 24 日

主催:(NPO)日本脳神経血管内治療学会

【シンポジウム】

- 1) シンポジウム演題名:チーム医療で臨む医療放射線防護の実践

集会名称:第 46 回日本放射線技術学会秋季学術大会 多職種連携シンポジウム

座長:茂呂田 孝一，他

コメンテーター:盛武 敬，他

発表者:松崎 賢，他

開催場所:仙台国際センター(宮城県・仙台市)
開催日時:2018 年 10 月 4 日～10 月 6 日

シンポジウム日時:2018 年 10 月 4 日
主催:公益社団法人 日本放射線技術学会

VIII. 参考文献

- 1) 厚生労働省:放射線業務における
眼の水晶体の被ばくに係る放射線
障害防止対策について、基安発
0418 第 1-5 号 (2017)
- 2) 放射線審議会基本部会:外部被ば
く及び内部被ばくの評価法に係る
技術的指針、pp10-11 (1999)
- 3) 千代田テクノル、平成 29 年度個
人線量の実態、FBNews 501 (2018)
ほか
- 4) Morishima, Y., K. Chida, and
T. Meguro, Effectiveness of
additional lead shielding to
protect staff from scattering
radiation during endoscopic
retrograde
cholangiopancreatography
procedures. *J Radiat Res*, 2018.
59(2): p. 225-232.
- 5) Medici, S., et al., Eye lens
radiation exposure of the
medical staff performing
interventional urology
procedures with an over-couch X-
ray tube. *Phys Med*, 2017. 43:
p. 140-147.
- 6) I. Authors on behalf of, F.A.
Stewart, A.V. Akleyev, M. Hauer-
Jensen, J.H. Hendry, N.J.
Kleiman, T.J. Macvittie, B.M.
Aleman, A.B. Edgar, K. Mabuchi,
C.R. Muirhead, R.E. Shore, W.H.
Wallace, ICRP publication 118:
ICRP statement on tissue
reactions and early and late
effects of radiation in normal
tissues and organs--threshold
doses for tissue reactions in a
radiation protection context,
Ann. ICRP 41(1-2) (2012) 1-322.
- 7) G.P. Hammer, U. Scheidemann-
Wesp, F. Samkange-Zeeb, H. Wicke,
K. Neriishi, M. Blettner,
Occupational exposure to low
doses of ionizing radiation and
cataract development: a
systematic literature review
and perspectives on future
studies, *Radiat. Environ.
Biophys.* 52(3) (2013) 303-19.
- 8) G. Chodick, N. Bekiroglu, M.
Hauptmann, B.H. Alexander, D.M.
Freedman, M.M. Doody, L.C.
Cheung, S.L. Simon, R.M.
Weinstock, A. Bouville, A.J.
Sigurdson, Risk of Cataract
after Exposure to Low Doses of
Ionizing Radiation: A 20-Year
Prospective Cohort Study among
US Radiologic Technologists, *Am.
J. Epidemiol.* 168(6) (2008) 620-
631
- 9) E.H. Silva, Z. Knezevic, L.
Struelens, P. Covens, S. Ueno,
F. Vanhavere, N. Bols, Energy
and Angular Dependence of
Radiophotoluminescent Glass
Dosemeters for Eye Lens

- Dosimetry, Radiat Prot
Dosimetry 170(1-4) (2016) 208-
12.
- 1 0) E.H. Silva, L.
Struelens, P. Covens, S. Ueno,
Y. Koguchi, F. Vanhavere, N.
Buls, Optimization of a
Radiophotoluminescent Glass
Dosemeter for Occupational Eye
Lens Dosimetry in
Interventional
Radiology/Cardiology, Radiat
Prot Dosimetry 182(2) (2018)
177-18
- 1 1) ICRP PUBLICATION 117.
2011.
http://www.icrp.org/docs/P117_Japanese.pdf

「産業医科大学放射線健康医学 盛武敬准教授の指導により作成された松崎賢の修士論文（平成31年3月 産業医科大学 産業衛生学修士）を転載する」

目 次

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.1.1 IVRによる放射線診療従事者被ばく	1
1.1.2 X線による患者被ばくと職業被ばくの影響	1
1.1.3 眼の水晶体等価線量限度の引き下げについて	2
1.1.4 医療現場の実態	4
1.2 防護装具の着用実態に関する海外の研究事例	5
1.2.1 医師、看護師の防護装具の使用状況（Vanoらの報告）	5
1.2.2 医師の防護装具の使用状況（EURADOS報告）	5
1.2.3 看護師、診療放射線技師の防護装具の使用状況（Shinらの報告）	6
1.3 解明すべき事項	7

第2章 防護の原則

2.1 防護の基本的事項	9
2.1.1 被ばくによる影響	9
2.1.2 被ばく防護の3原則	11
2.1.3 実効線量と等価線量	12
2.1.4 外部被ばく防護の3原則	13

第3章 使用機器

3.1 個人線量計	15
3.2 防護具（防護衣、防護眼鏡、ネックガード、防護板（衝立））	16
3.3 X線透視装置（オーバーチューブ型、アンダーチューブ型、Cアーム型）	18

第4章 本研究の目的	21
------------	----

第5章 病院での防護装具使用率実態調査

5.1 方法	22
5.2 対象と定義	22
5.2.1 対象	22
5.2.2 使用率の定義	23
5.3 使用率の記録方法と解析	24
5.3.1 使用率記録法	24
5.3.2 医師の使用率	24
5.3.3 血管系診療医師と非血管系診療医師の使用率比較	24
5.3.4 診療種別医師使用率比較	24
5.3.5 経験年数別医師使用率比較	25
5.3.6 医師へのアンケート調査	25
5.3.7 看護師の使用率	26
5.3.8 その他放射線診療従事者の使用率比較	26
5.3.9 血管系診療従事者の職種別使用率比較	26
5.4 倫理的配慮	26
5.5 結果	26
5.5.1 医師の使用率	26
5.5.2 血管系診療医師と非血管系診療医師の使用率比較	29
5.5.3 診療種別医師使用率比較	30
5.5.4 経験年数別医師使用率比較	32
5.5.5 医師へのアンケート調査	33
5.5.6 看護師の使用率	35
5.5.7 その他放射線診療従事者の使用率比較	37
5.5.8 血管系診療従事者の職種別使用率比較	39

第6章 防護装具の使用率向上のための業務改善

6.1 方法	40
6.2 結果	40

第7章 考察	
7.1 使用率実態調査結果	42
7.1.1 医師の使用率	42
7.1.2 血管系診療医師と非血管系診療医師の使用率比較	42
7.1.3 診療種別医師使用率比較	43
7.1.4 経験年数別医師使用率比較	43
7.1.5 医師へのアンケート調査	43
7.1.6 医師と看護師の使用率比較	44
7.1.7 その他放射線診療従事者の使用率比較	45
7.1.8 血管系診療従事者の職種別使用率比較	46
7.1.9 過去の報告との比較	46
7.2 防護装具の使用率向上のための業務改善	47
7.2.1 放射線防護教育の実施とルールの継承	47
7.2.2 業務改善	49
7.2.3 工学的システムの構築	52
7.3 本研究の被ばく線量について	53
7.4 白内障リスクについて	55
7.5 本研究の産業医学的意義	55
第8章 総括	57

利益相反と倫理的配慮

謝辞

参考文献

資料

放射線診療従事者の防護装具使用状況実態調査

第1章 序論

1. 1 研究の背景

1. 1. 1 IVR による放射線診療従事者被ばく

近年、放射線（X 線透視）により体外から細い医療器具を挿入して目的部位にアクセスして行う検査・治療手技が増えている[1]。特に治療を目的としてこれらの手技を行うことを、インターベンショナル・ラジオロジー（Interventional Radiology ; IVR と略）と呼んでいる。IVR は主に血管病変を目的部位とした血管系診療と、その他の組織・臓器病変を目的部位とした非血管系診療に大別される。

IVR の主なメリットは、手術創が小さく低侵襲である点にある。外科手術のように患部を露出させるほどの大きな開創を必要とせず、数センチ程度の術創で済むため、手術の翌日より歩行可能であることが多い。また、手術室ほどの清潔操作を必要とせず迅速に手術できることから、救急現場でも多用されている。一方で、IVR 手技やデバイスの進歩に伴い、これまで困難とされてきた疾患への適応が増えており、結果として施術時間の延長と被ばく線量の増加を来している点がデメリットであると言える。この被ばく施術時間の延長と線量増加のデメリットは患者に対してだけでなく、放射線診療従事者の被ばく線量に対しても直接影響を及ぼしており、増加傾向にある従事者被ばくに関して多くの報告がなされている[2- 10]。特に放射線診療従事者の眼の水晶体被ばくとその防護について、近年、非常に大きな話題となっている。

1. 1. 2 X 線による患者の被ばくと放射線診療従事者の被ばく

X 線による透視や撮影により患者が放射線に被ばくすることを医療被ばくと呼んでいる。また、X 線による透視や撮影により放射線診療従事者が放射線に被ばくすることを職業被ばくと呼んでいる。被ばくの原因となる放射線には直接線と散乱線がある。直接線による被ばくとは、放射線発生装置から照射された放射線が空气中を通過し、患者に直接射入した放射線により患者が被ばくすることを指す。散乱線による被ばくとは、患者に射入した直接線が患者の体内でエネルギーと方向を変えて散乱し、患者の体外に出た一部の放射線により放射線診療従事者が被ばくすることを指す。散乱線は患者の体内だけでなく、装置本体や寝台、床面、壁、空気など、直接線が射入したあらゆる物質から発生し、その強度は直接線のエネルギーに比例する[11]。

直接線による患者被ばくでは、透視時間や撮影回数、拡大撮影の頻用、最新の患者機能評価技

術（perfusion, 流体計測など）の多用が被ばく線量を増大させる原因になっており、特に、冠動脈治療や脳血管内治療（動静脈奇形などの血管の走行が複雑なものなど）では照射部位に局限した皮膚紅斑や脱毛、皮膚潰瘍の発生が数多く報告されている[2]。一般に高線量被ばくであるほど被ばくから発症するまでの期間が短くなるが、遅発性（数年～数十年のち）に発生する放射線障害も報告[3]されているため、放射線との因果関係に注意する必要がある。

放射線診療従事者の被ばくは散乱線による被ばくであり、患者の被ばく線量に比例して増加する。一般に IVR では複数の術者で治療を行うことが多いが、患者の近くで、かつ X 線管球に近い場所に立って手技を行う医師（第 1 術者）は、散乱線の影響をより強く受けて被ばく線量が増す。また、看護師は常に患者に近づいていることはないが、患者の状態把握や薬剤投与のために患者に近づく場合、医師と同様に強い被ばくを受けることがある。

放射線診療従事者の被ばくでも組織反応を来した事例がいくつか報告されている。Vano らは、2 つのスペインの公立病院で IVR（冠動脈治療）に従事する医師、看護師各 2 名に放射線由来の眼の障害（水晶体混濁）が偶然発見されたと報告している[12]。オーバーチューブ型装置での診療であったことや防護装具（防護眼鏡や防護板）の準備が不十分であったことが両病院の共通点であり、IVR を行う上で最適な環境でなかった。そのため、1 日 2～5 件の検査数で推定水晶体等価線量は 450～900 mSv/年であった。放射線診療従事者の水晶体混濁を発見するのは難しく、最適化された防護設備や防護トレーニングの充実が肝要であることが報告されている[12]。また、本邦においても、長い間 IVR に従事した医師、看護師の手に皮膚がんが生じ、労災認定されている[13]。このように放射線診療を行うことによる被ばくの影響は、患者のみならず放射線診療従事者にも生じることがあるため、職業被ばくに対する防護対策は重要である[14-18]。

1. 1. 3 眼の水晶体等価線量限度の引き下げについて

2011 年 4 月にソウルで開催された国際放射線防護委員会（International Commission on Radiological Protection ; ICRP と略）の主委員会会合にて、組織反応に関する声明が発表された（ソウル声明）。その中で、白内障のしきい値（1 %の人に症状が現れる線量）は吸収線量で 0.5 Gy と従来の数値より大幅に下げられた（表 1-1）。これまで急性、分割、慢性被ばくで分けられていたしきい値は、放射線のダメージはキャンセルされずに蓄積されることからすべて同じ数値となっている。また、水晶体混濁は時間の経過と共に必ず白内障に移行することが分かったため、水晶体混濁と白内障でしきい線量を区別する必要がなくなった。カナダやヨーロッパなどでは、同声明に準じた法令が施行予定、あるいは施行されている[19]。一方、アメリカのように施行が予定されていない国もあり、国により対応が分かれているのが現状である（放影協ニュース[19]（表 1-2））。

表 1-1 現行法令のしきい値と今後の変更点

現象		しきい値	
症状	被ばく状況	変更前	変更後
混濁	急性被ばく	0.5-2.0 Gy	0.5 Gy
	分割被ばく	5 Gy	
	慢性被ばく	0.1 Gy/年	
白内障	急性被ばく	5 Gy	
	分割被ばく	8 Gy	
	慢性被ばく	0.15 Gy/年	
脳・心臓血管疾患		なし	

表 1-2 水晶体等価線量の引き下げに対する国外動向

法体系取り入れ済み	審議中	取り入れ予定なし
フランス	カナダ	アメリカ
ノルウェー	タイ	
オーストラリア	中国	
	韓国	

このようななか本邦においても、2017 年 4 月 18 日に厚生労働省労働基準局安全衛生部長により「放射線業務における眼の水晶体の被ばくに係る放射線障害防止対策について」と題した通知がなされた（基安発 0418）[20]。これによると、今後放射線審議会にて議論ののち、眼の水晶体の法令基準値の引き下げが予定されており、それまでの間、以下の対応を行うよう、事業者推奨している。通知の主な内容は、①放射線業務の作業方法の見直し、②被ばく低減対策の検討、③防護具の適切な使用についての教育を行うこと、④眼の水晶体に係る健康不安の申出があった場合は産業医の面接や放射線健康影響の専門家などと話し合って対応を検討すること、⑤現在実施している眼の水晶体の等価線量測定について、放射線測定器を適切な位置に装着しているか確認すること、⑥引き続き線量管理に努めることであった。

なお、2018 年 8 月現在、原子力規制委員会の放射線審議会や眼の水晶体の放射線防護検討部会などにより眼の水晶体の防護に関する議論がなされている。

1. 1. 4 医療現場の放射線防護の実態

白内障のしきい値の大幅な引き下げが、実際の医療現場での被ばく線量の測定や管理に当面の混乱が予想される。赤羽らは、あらかじめ被ばく線量が高いと予想される場合や煩わしいなどの理由で、意図的に個人線量計を装着していない場合がある可能性を指摘している[7]。また岩井らは自施設の線量データから、IVR 従事者の被ばく線量が全く検出されない、同じ職種のうち女性の方が被ばく線量が高い傾向であることを指摘している[15]。調査の結果、個人線量計を正しく使用していないことや男性は着替えの際に着け忘れたこと、さらに女性の方が放射線防護に対する意識が高いことなどを原因として挙げている[15]。放射線診療従事者の被ばくを適切に管理するために、防護や線量測定の重要性について啓蒙活動を継続することが肝要だと指摘している[15]。その他、奥山らも自施設の内視鏡的逆行性胆管膵管造影（Endoscopic Retrograde Cholangiopancreatography ; ERCP と略）での調査で、個人線量計を正しく使用していない可能性を報告している[16]。このように、個人被ばく線量の測定や管理が不十分であることが予想される。

本邦の医師の被ばく線量は、毎年報告されているが（FBNews[21]）、その平均値は5年間、ほぼ横ばいで推移している（図 1-1）。前述の赤羽[7]、岩井[15]、奥山[16]らの報告を考えると、医師の被ばく線量が横ばいであることは正しく評価されていない可能性があるため、さらなる検証が必要であると考えている。自身の診療放射線技師としての日々の業務経験からも、個人被ばく線量計などの防護装具の使用が不十分であることは実感しており、放射線診療従事者の防護装具の使用実態について改めて調査する必要があることに気づき本論文での説明を試みることにした。

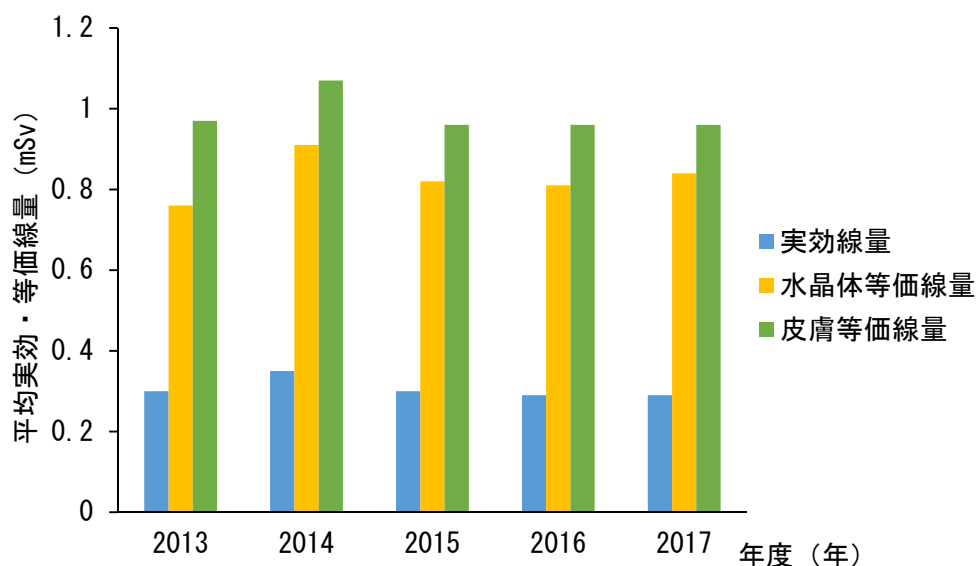


図 1-1 医師の被ばく線量の推移

1. 2 防護装具の着用実態に関する海外の研究事例

海外での防護装具の着用実態調査について以下に紹介する。

1. 2. 1 医師、看護師の防護装具の使用状況（Vano らの報告）

ブエノスアイレスにおいて冠動脈治療に従事した医師 54 名と看護師及び診療放射線技師 69 名の水晶体混濁の有無と被ばく線量の関係について調査している[22]。その結果、医師の 50%、看護師及び診療放射線技師の 41%に水晶体混濁が観察されている。その時の推定累積水晶体等価線量は、水晶体混濁無し群と比較して高かった。また、防護装具（個人線量計、防護眼鏡、防護板）の使用についてアンケート調査を行っており、医師の防護装具の使用率は、水晶体混濁有り群で総じて低くなっていた（表 1-3）。以上のことから、被ばく線量を下げするための防護教育や特に防護眼鏡の使用が必要であると報告している。

表 1-3 医師と看護師及び診療放射線技師の水晶体混濁の有無と被ばく線量（Vano らの報告[22]より一部変更して引用）

		水晶体混濁有り	水晶体混濁無し
医師	人数（人）	27	27
	推定累積水晶体等価線量（mean±SD）Gy	8.3±5.4	3.0±2.9
	年齢（歳±SD）	47.7±8.8	41.5±9.5
	経験年数（年±SD）	16.6±9.3	10.4±8.9
	防護板使用率（%）	46	59
	防護眼鏡使用率（%）	41	52
	個人線量計使用率（%）	48	52
看護師及び 診療放射線技師	人数（人）	28	41
	推定累積水晶体等価線量（mean±SD）Gy	2.7±2.0	1.8±1.9
	年齢（歳±SD）	43.3±11.2	35.4±8.8
	経験年数（年±SD）	12.1±8.5	8.4±6.7
	防護板使用率（%）	31	25
	防護眼鏡使用率（%）	24	15
	個人線量計使用率（%）	89	88

1. 2. 2 医師の防護装具の使用状況（EURADOS 報告）

2012 年に Vanhavere らによって、放射線診療従事者の線量評価と線量低減を目的とした報告がされている[23]. そのうち線量評価では、ヨーロッパ 6 ヶ国（ベルギー、ギリシャ、フランス、スイス、ポーランド、スロバキア）の IVR（冠動脈治療、頭部・下肢血管治療）や ERCP など 1329 症例に従事した医師の詳細な測定を行っている。その結果、被ばく線量は診療種、測定部位（眼、手や足など）や防護板の使用によって異なっており、特に頭部血管塞栓術の水晶体等価線量が他と比較して高いことが特徴的であった。また、防護具（防護衣、防護眼鏡、ネックガード、防護手袋）の使用についても調査されており、ERCP では防護眼鏡をほぼ使用していないことが指摘されている（表 1-4）。その他、線量低減のための方策について眼の線量計の開発、教育訓練、ガイドラインの策定など報告されている。

表 1-4 医師の放射線診療時の防護装具使用状況（Vanhavere らの報告[23]より一部変更して引用）

	使用状況	使用率（％）
冠動脈治療	防護衣のみ	9
	防護衣＋ネックガード	54
	防護衣＋ネックガード＋防護眼鏡	34
	防護衣＋ネックガード＋防護眼鏡＋防護手袋	2
	防護衣＋ネックガード＋防護板	1
頭部・下肢血管治療	防護衣のみ	6
	防護衣＋ネックガード	61
	防護衣＋ネックガード＋防護眼鏡	31
	なし	2
内視鏡的逆行性胆管膵管造影 (ERCP)	防護衣のみ	33
	防護衣＋ネックガード	61
	防護衣＋ネックガード＋防護眼鏡	6

1. 2. 3 看護師、診療放射線技師の防護装具の使用状況（Shin らの報告）

ERCP 中の看護師と診療放射線技師の防護装具（個人線量計、防護衣、防護眼鏡、ネックガード）の使用状況と防護意識を明らかにすることを目的とした調査が Shin らによって行われている[24]. 方法はメールを利用した質問調査で、韓国の 38 の病院のうち 78 名より回答を得ている。その結果、防護眼鏡は他の防護装具の使用率と比較して低かった。さらに防護装具を使用しない

理由として「煩わしい」という回答が半数近くを占めていた（図 1-2，表 1-5）。ERCP 中の防護の必要性を認識している者は多いが，防護装具の使用率は低いため，継続した防護教育と管理が重要であることが報告されている。

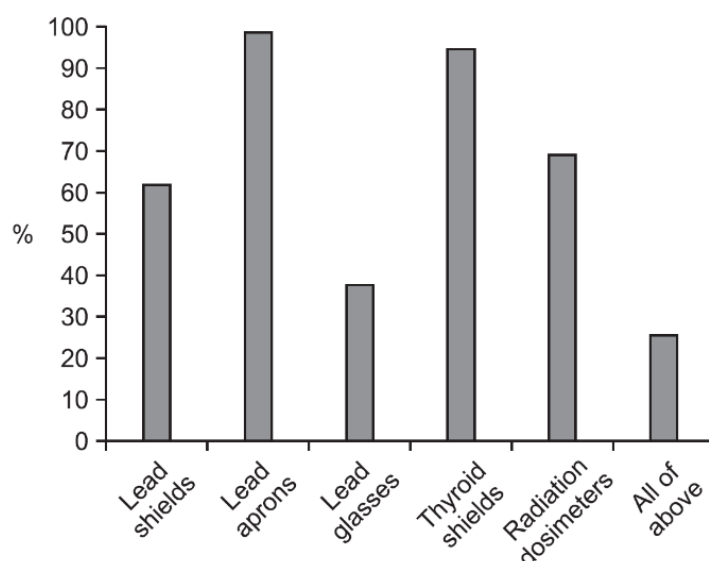


図 1-2 看護師と診療放射線技師の ERCP 時の防護装具使用状況（Shin らの報告[24]より引用）

表 1-5 看護師と診療放射線技師の ERCP 時の防護装具をしない理由（Shin らの報告[24]より一部変更して引用）

理由	回答率 (%)
重要であると知っているが煩わしい	45.7
忘れる	26.1
放射線被ばくを意識していない	21.7
忙しい	4.3
効果があると思えない	2.2

1. 3 解明すべき事柄

このように防護装具の必要性を認識していない者が多く，さらに個人によっても被ばく防護の意識が異なることが確認できる。しかしながら，被ばく防護の観点からは必要不可欠なものである。また，放射線診療従事者の職種によって防護装具の必要度は異なってくる。例えば，医師は散乱線源の近くで作業をすることが多いため，すべての防護装具を使用する必要があると考えられる。また，看護師も患者に近づいて作業を行う場合があり，その際にはすべての防護装具の使用が必要かもしれない。一方，診療放射線技師が一番遠い位置や X 線照射室外での作業となるた

め、すべての防護装具を使用する必要はない。このように必要度に応じて、防護装具を選択的に使用すべきである。なぜなら、過度の防護装具の使用は、重さなどにより、作業効率の低下や腰痛などの身体的影響を招く恐れがあるからである。そこで、基安発 0418 にあるような作業方法の見直しの第一歩として、どの職種がどのように防護装具を使用しているか、実態を調査する必要がある。そのため、本研究で解明すべき事柄は、放射線診療従事者の防護用具使用状況である。

第2章 防護の原則

2. 1 防護の基本的事項

2. 1. 1 被ばくによる影響

1895年にレントゲンによってX線が発見された数ヶ月後には、被ばくによる影響が報告されている。当初は急性皮膚炎であったが、数年のうちには脱毛や造血臓器の障害などが報告されるようになった。これに対応するため防護が考えられるようになり、1928年に国際X線ラジウム防護委員会（International X-ray and Radium Protection Committee；IXRPと略）が設立され、1950年には国際放射線防護委員会（International Commission on Radiological Protection；ICRPと略）と名称を改めた。その中で、1958年のPublication1で放射線従事者に対して線量規制が勧告された[25]。さらに1965年のPublication 9などを経て、1977年のPublication 26では現行法令の基準値に近い値（実効線量当量 50 mSv/年、眼の水晶体 150 mSv/年、皮膚その他 500 mSv/年）が線量規制値として勧告された[26]。なお、実効線量当量とはPublication26で導入された概念であり、放射線リスクの定量的評価のために用いられている。

それでは、具体的に被ばくすると人体にはどのような影響があるのか。放射線が細胞に照射された場合、直接DNAを損傷させる直接作用と、水分子を活性酸素に変化させ、その活性酸素がDNAを損傷させる間接作用が起こる[27]。DNA損傷があっても大多数は修復されるが、一部は細胞死を起こすか、DNA損傷の痕が残ったまま転写、増殖のサイクルを繰り返していく。このDNA損傷が蓄積されることでがん化、遺伝的影響として現れてくる。また、放射線による人体への影響は、確率的影響と組織反応とに分けられ、この2つの大きな違いはしきい値の有無である。

確率的影響とはしきい値のない影響のことである。放射線が細胞に照射されるとDNA損傷が生じる[27]。その際、数Gy以上であれば増殖することができなくなる。ただし、線量が低ければ、DNA損傷を起こしたまま転写され、それが増殖する。つまり、確率的影響には線量の増加で症状の重篤度は変わらず、発生確率だけが增加する。なお、低線量（100 mSv以下）における発がんリスクは解明されていないため、安全側に考慮されたしきい値の無い直線（linear No-Threshold；LNTと略）仮説が採用されている。この影響としては、主に発がんや遺伝的影響が挙げられる。発がんは広島長崎の原爆被爆者調査に基づき評価されており、統計的に有意ながん増加は100 mSvを超えることで認められる。さらに年齢、性別、対象臓器などによりリスクが異なる。また、遺伝的影響はヒトでは確認されていないが、動物や植物などでは認められており、先天性奇形や機能損失、若年死といったものがある。これにより幾世代にわたって影響を及ぼすと考えられる必要がある。なお、ICRP 103では適応応答やバイスタンダー効果、遺伝子不安定性などを考慮しつつ、発がんや遺伝的影響の発生確率は等価線量に比例するという仮定が科学的に妥当であるとされている。

る[28-30].

組織反応とはいわゆる確定的影響のことで、しきい値のある組織障害反応のことである[27]。これは確率的影響と異なり、線量が大きくなれば重篤度は上がる一方、発症頻度は放射線感受性の影響を受けて S 字型に増加する。

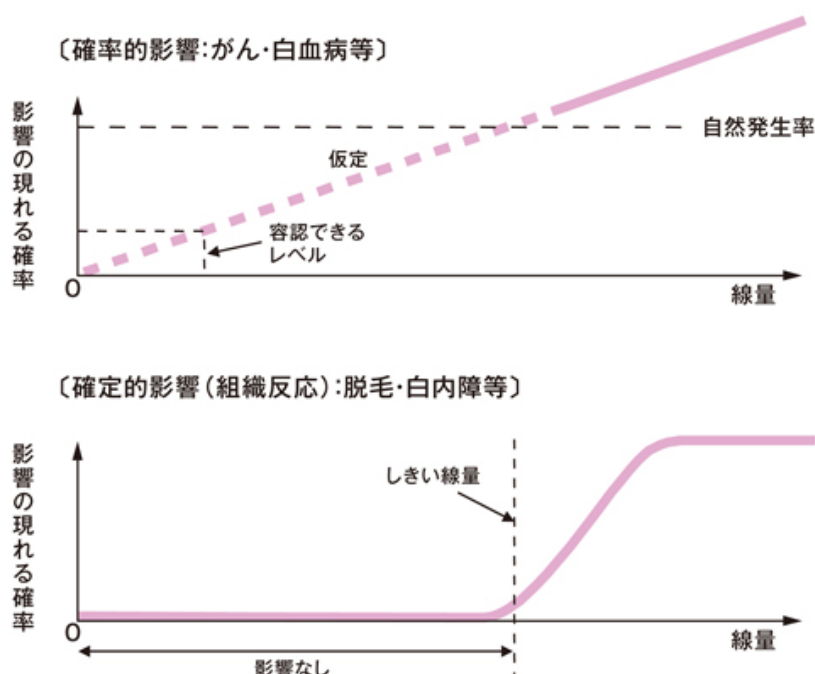


図 2-1 組織反応と確率的影響の線量依存 (出典：原子力エネルギー図面集[30])

ここでいう放射線感受性の影響とはベルゴニー・トリボンドーの法則のことであり、細胞分裂の頻度の高いもの、将来行う細胞分裂の数が多いもの、形態・機能が未分化のもの程、放射線感受性が高いことを示している。また、しきい値は個々の臓器ごとに依存する。その他、障害の発現時期により急性期障害と慢性期障害に分けられる。急性期障害には、放射線宿酔や皮膚紅斑、脱毛、不妊、皮膚潰瘍など症状の軽いものから重篤なものまである。特に近年 IVR が広く行われるようになり、難しい症例などで時間を要し、被ばく線量が増加することで皮膚紅斑や脱毛などの症状が患者にも認められるようになってきている。一方、慢性期障害には白内障や緑内障などの症状が挙げられる。白内障は感受性の高い眼の水晶体の障害であり、放射線由来の白内障として、後囊下白内障が挙げられる[10]。ソウル声明以前では、急性被ばくは 5 Gy、分割被ばくは 8 Gy、慢性被ばくは 0.15 Gy/年のしきい値を設定しており、それとは別に眼の水晶体の白濁に関しても、しきい値を設けていた。しかし、最新の研究により、白濁は白内障に移行すること、眼の水晶体のダメージは蓄積されることが分かってきており、しきい値は一律 0.5 Gy に修正された。また、ソウル声明では、放射線診療従事者の法令基準値である線量限度も 150 mSv/年から 20 mSv/

年に引き下げるよう推奨している。

その他の被ばくの影響の強い臓器として、甲状腺が挙げられる。甲状腺は他の内分泌臓器に比較して放射線感受性の高い臓器であり、被ばくによる症状としては甲状腺機能低下症や急性甲状腺炎などがある。特に小児期は被ばくによる影響を受けやすい[27]。

2. 1. 2 被ばく防護の3原則

被ばくの影響を防ぐためには何らかの対策を行う必要がある。ICRP Publication 60 や 103 で区分されている医療被ばく（患者が意図的に受けるものであり、直接的な便益のための被ばく）、職業被ばく（操業管理者の責任であると合理的にみなすことができる状況の結果として仕事上で受ける放射線被ばく）、公衆被ばく（職業被ばくと医療被ばく以外の公衆のすべての被ばくであり、妊娠中の胎児の被ばくはこちらに区分される）は各区分に則った防護が必要となる[28,29]。いわゆる防護の3原則であり、行為の正当化、防護の最適化、線量限度の適用が挙げられる。

行為の正当化とは、医療被ばくに適用され、放射線を取り扱う行為において便益がリスクを上回る場合のみ認められるという原則のことである。

防護の最適化とは、すべての正当化された放射線を取り扱う行為に対して、経済的要因を考慮にいれながら合理的に達成可能な限り低く抑えるべきである（As Low As Reasonably Achievable : ALARA と略）という原則のことである[26]。すべての状況下で防護措置を施し、適切な防護レベルが確立されるべきである。決して被ばく線量の最小化ではなく、個人の被ばく線量の低減や被ばくする個人の数減らすことなどを考慮すべきである。個人線量を制限するものとして線量拘束値と参考レベルがある。線量拘束値とは、職業被ばくや公衆被ばくにおける計画被ばく状況（予め計画された状況）での上限値のことで、参考レベルとは、職業被ばくや公衆被ばくにおける緊急時被ばく状況（計画された状況でなく、緊急の対策を要する状況）や現存被ばく状況（すでに存在する緊急事態の後の長期被ばく状況を含む被ばく状況）での事情に依存する。そのため、緊急時被ばく状況や現存被ばく状況では、個人の線量限度は適応されない。また参考レベルは定期的に見直しをすることで被ばくの低減に繋がる[29]。

線量限度とは現存被ばく状況に適用され、職業被ばく、公衆被ばくに適用される。法令によって定められており、管理の対象となるあらゆる放射線からの被ばくの合計値がその値を超えないように管理される。また、その数値は被ばくの許容値でなく、できる限り低くする努力が求められる。なお、線量限度は医療被ばくには適応されない[28, 29]。このため、医療被ばくにより、IVRで皮膚紅斑や脱毛などが起こった事例が存在し、本当に放射線照射を伴う診療が必要であったかを考慮する必要がある。そこで国内では、厚生労働省が医療放射線の適正管理に関する検討会を

2017 年から始めており、今後何らかの規制を受ける可能性がある。

2. 1. 3 実効線量と等価線量

職業被ばくは、上述した線量限度の適応によって厳正な管理がされている。この線量限度は、実効線量と等価線量に大別される（表 2-1）。実効線量は人体の総合的な影響、等価線量は対象となる臓器の影響を表しており、それぞれ確率的影響と組織反応のリスク評価に用いられる[31]。これらの値は正確に測定することが困難であるため、実際に測定された値である物理量を人体の影響を加味し、安全側で簡易な代用方法にて換算した実用量（1 cm 線量当量，70 μ m 線量当量）として用いる。ただし、このままでは防護量と定義が異なり、対比できないため、実用量を法令によって防護量と同一定義とした行政線量とし、それをリスク評価に用いている[7, 31]。これらの値は、医療法施行規則第 30 条の 18 や電離放射線障害防止規則（以下、電離則）第 8 条で規定されており、さらには同法にて線量測定義務が、電離則第 9 条にて線量測定結果の保存の義務がある[32, 33]。

表 2-1 医療被ばくにおける線量限度（放射線概論[27]より一部変更して引用）

線量限度	
実効線量	100 mSv/5 年（4 月 1 日以降 5 年ごとに区分した各期間） 50 mSv/年（4 月 1 日以降を始期とする 1 年間）
女子	5 mSv/3 月
妊娠中の女性	内部被ばくについて 1 mSv（妊娠中）
等価線量	
眼の水晶体	150 mSv/年
皮膚	500 mSv/年
妊娠中の女子の腹部表面	2 mSv（妊娠中）

この実効線量、等価線量の臨床における一般的な測定手段として、個人線量計による測定がある。この個人線量計の種類として、1 業務ごとに測定するもの（電子式ポケット線量計など）と、1 ヶ月の積算で測定するもの（ガラス線量計、光刺激ルミネセンス（Optically Stimulated Luminescence ; OSL と略）線量計など）がある。医療現場においては後者が多用されている。

個人線量計の使用箇所は、全身に均等に被ばくをする場合、体幹部を「頭頸部」、「胸部」、「腹

部及び大腿部」と3つの部分に分けた箇所内、男性では胸部の1箇所、女性では腹部の1箇所となる。また体幹部が不均等な被ばくをする場合、均等被ばくの際の測定箇所以外で、3つに分けた体幹部の最も線量が多くなる部分に1箇所、末端部の被ばくが最も高くなる場合には、さらに末端部にも使用しなければならない。個人線量計は通常、防護衣の内側で使用するが、不均等被ばく測定の際には、防護衣の外側で使用しなければならない。不均等被ばくを複数の線量計で測定した際の実効線量の算出は、それぞれの箇所で計測された値に応じた重み付けをして算出している[31]。現行法令上の実効線量の算出は、以下の式により行う。

$$H_E = 0.08H_a + 0.44H_b + 0.45H_c + 0.03H_m \quad (1)$$

ただし、 H_E ：実効線量、 H_a ：頭頸部の1cm線量当量、 H_b ：胸部及び上腕部の1cm線量当量、 H_c ：腹部及び大腿部の1cm線量当量、 H_m ： $H_a \cdot H_b \cdot H_c$ のうち線量当量が最大となるおそれのある部分における1cm線量当量とする。なお、通常 $H_b = H_c$ 、 $H_a = H_m$ となるので、以下の式で表される。

$$H_E = 0.11H_a + 0.89H_b \quad (2)$$

また等価線量は、皮膚では体幹部均等被ばく測定における70 μ m線量当量の最大値、眼の水晶体では不均等被ばく測定における1cm線量当量と70 μ m線量当量のうち、最大となる値で表している。また、不均等被ばく測定を行っていないければ均等被ばく測定における1cm線量当量と70 μ m線量当量のうち、最大となる値を眼の水晶体の被ばく線量としている。なお、1cm、70 μ m線量当量とは、皮膚表面からの深さに相当した線量であり、測定された値より人体模擬ファントムを使用して、それぞれの深さにあった値に換算したものである。

したがって、この不均等被ばくを測定するかどうかで眼の水晶体の測定値が変わってくる。千田の報告によれば、不均等被ばく測定を実施しない場合と比較し、実施した場合では約3.8倍高くなると示している[8]。それゆえ、IVRなど、頭部に多くの被ばくを伴う可能性のある場合には、不均等被ばくの測定を実施するのが望ましい。また、測定する機器には方向依存性があるため、正しく使用する必要がある。

2. 1. 4 外部被ばく防護の3原則

外部被ばくに対する防護の3原則とは、「遮蔽」、「距離」、「時間」である。「遮蔽」とは、放射

線源と放射線診療従事者の間に遮蔽物を置くことで被ばく線量を低減させることである。遮蔽物には防護衣や防護眼鏡、ネックガード、防護板（衝立）などが挙げられる。次いで「距離」とは、放射線源より距離をとることであり、距離が倍になれば線量は $1/4$ になるという距離の逆二乗の法則に従って被ばく線量を低減できる。また「時間」とは照射時間の短縮による被ばく低減効果のことである。これらの原則に従うことは大前提であるものの、業務の性質上実施できないもある。例えば、IVR に従事する医師の場合、「距離」による被ばく線量の低減は刺入部位やデバイスの選択によって限局され、「時間」も難しい手技であれば短縮することはできない。よってこのような状況下では、「遮蔽」の徹底が重要となる。

第3章 使用機器

3. 1 個人線量計

調査実施病院では OSL 線量計と呼ばれる線量計を使用している（図 3-1）。OSL 線量計は、放射線を受けた素子に励起された電子が集められ、そのエネルギーが蓄積され、これに光を当てることにより積算した線量に比例した量の蛍光が発せられる現象（OSL 現象）を利用し、線量測定を行っている [34]。この蛍光を読み取ることで線量が測定でき、また、素子に当てる光量を調節することで、放出される蛍光は蓄積エネルギーの一部だけとなり、ほとんどの電子は読み取り前の状態に戻る。つまり、繰り返し測定できるという大きなメリットとなる。

OSL 線量計には、発光効率の良い炭素を含んだ酸化アルミニウムが放射線の検出器として用いられている。酸化アルミニウム結晶の粉末をポリエステルシートに薄膜状にコーティングしたものが円形状に 4 つ並べられている。その内 3 つにはフィルタ（銅、アルミニウム、プラスチック）が追加され、フィルタを通過した放射線の量が測定される。これら 4 つの窓の検出器によって被ばく線量は測定される。測定範囲は 0.01 mSv～10 Sv であり、線量直線性も良い。また、熱にも強く、非常にコンパクトで使い勝手が良いため、広く普及している。反面、特定角度以上では方向依存性があり、線量計間のばらつきの変動係数は低線量において少し大きい。また、繰り返しの測定により読み取り値が減少することがあるなどのデメリットもある。



(a) OSL 線量計外観

(b) OSL 線量計内部構造

図 3-1 個人線量計（OSL 線量計 出典：外部被ばく個人線量測定用 OSL 線量計の諸特性 [34]）

3. 2 防護具（防護衣，防護眼鏡，ネックガード，防護板（衝立））

放射線はその種類により透過する力が異なる（図 3-2） [30]。放射線診療従事者を散乱線から

遮蔽するための防護具はいくつかあり、放射線のエネルギーを吸収するのに適した金属が含有されている。特に医療現場で用いられる放射線はX線や γ 線であるため、遮蔽するための金属として原子番号の大きい鉛が用いられることが多い。また、放射線は、遮蔽物質の厚さに対し、指数関数的に減少する。実際の使用では、放射線の量を減らすことを目的としているため、必ずしも100%防護する必要もない。

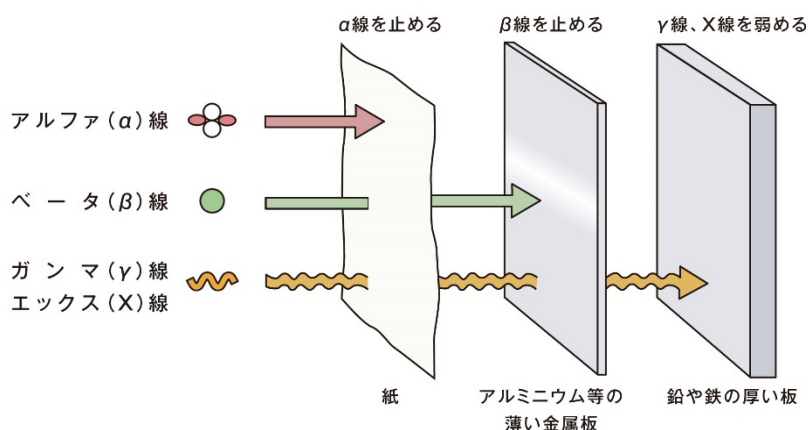


図 3-2 放射線の種類と透過力（出典：原子力エネルギー図面集 [30]）

防護衣（図 3-3（a））は胴体部を護るための防護具であり、体全体を覆うような構造（コートタイプ）や、体前面だけを護る構造（エプロンタイプ）、上半身と下半身を切り分けて使うことができる構造（セパレートタイプ）のものなどがある [35]。また、鉛の含有量で遮蔽できる放射線の量は変化し、含有量が多くなれば遮蔽効率が高くなるものの、防護衣自体も重くなる。主に前面が 0.35mmPb 以上の厚さのものを重装防護衣（コートタイプの含鉛のもので約 4.5 kg）、0.25 - 0.35 mmPb のものを軽装防護衣（コートタイプの含鉛のもので約 3.8 kg）と日本工業規格（Japanese Industrial Standards：JIS と略）では規格している [35]。なお、0.25 mmPb のものでも、散乱線に対して 90%程度の防護率がある [8]。鉛厚が大きいほど遮蔽効率が良くなるが、防護衣自体が重くなるため、体の負担が大きくなり、作業効率が低下すると考えられる。そこで腰痛などを防ぐためのベルトの着用や、鉛の代わりに軽量な物質（無鉛）を使用している防護衣の使用など、対策がとられている。無鉛物質を使うことにより防護衣の重量の約 30%軽量化することができる。このような防護衣には、鉛の厚みに相当する値として「鉛当量」と表記されており、表記されている鉛と遮蔽能力は変わらないため、広く用いられている。

防護眼鏡（図 3-3（b））は眼を防護する装具であり、最新の研究により、IVR 従事者は眼の水晶体の防護が必要であることが示されている [5]。しかし、視界に直結する防護具であるため、その煩わしさから敬遠する放射線診療従事者も少なくない。防護眼鏡も防護衣同様、重さや遮蔽能

力が含有鉛の量によって異なり、形状も一般的な眼鏡と同じ形のスタンダードタイプや、横側まで覆われたゴーグルタイプなどさまざまである。また、軽装、重装にもわけられ、軽装防護眼鏡は側面を含めた眼鏡全体の減弱比が 2 以上であるもので、反対に重装防護眼鏡は 0.5 mmPb 以上の鉛当量のものと規定されている [35]。なお、減弱比とは指定した線質並び配置の中で照射された放射線ビーム中に遮蔽物質を置いた場合の放射線量率に対する、置かない場合の放射線量率の比率のことである [36]。防護眼鏡は形状によって隙間ができるため、使用者の視線によって遮蔽できる被ばく線量が変わってくる。このため、理論上の防護効果を得るには、放射線源の方向に顔がまっすぐ向いていなければならない。実際の臨床現場において、芳賀らは、冠動脈治療時の防護眼鏡の被ばく低減効果は 50%程度と報告している [37]。

ネックガード（図 3-3 (c)）は防護衣だけでは十分遮蔽できない甲状腺を防護する目的で使用され、鉛当量が 0.25 mmPb 以上のものと規格化されている [35]。硬質、軟質の種類があり、衛生面の問題から使い捨てのカバーがある。

防護板（衝立）（図 3-3 (d)）、(e) は、この中で唯一、身に着けない防護具であるため、放射線診療従事者の防護装具による身体的負担なく使用できる。防護板は天井から吊り下げられているタイプで、放射線源から自身の放射線感受性臓器（眼の水晶体など）の被ばくをピンポイントで防ぐことができる。また、防護衝立は体全体を防ぐことができる大きさと、含有鉛の量が多いもの（鉛当量が 3.0 mmPb のものなど）を使用すれば、遮蔽効率は非常に高い。その他にも寝台の周りに柵状、カーテン状に取り付けられるものや、毛布のように掛けるものなど、追加で使える防護具はさまざまある。



(a) 防護衣 (エプロンタイプ)



(b) 防護眼鏡



(c) ネックガード



(d) 防護板



(e) 防護衝立

図 3-3 (a) 防護衣, (b) 防護眼鏡, (c) ネックガード, (d) 防護板, (e) 防護衝立 (出典: 株式会社 保科製作所)

3. 3 X 線透視装置 (オーバーチューブ型, アンダーチューブ型, C アーム型)

今回の防護装具の使用の実態調査では, 放射線透視機能を有した装置で行われた放射線診療を対象とした。放射線透視機能とは, 人体を透過した放射線を捉えてモニターに画像をリアルタイムで映像化できる機能であり, 現在の医療では幅広く使用されている。近年, X 線検出器に X 線平面検出器 (Flat Panel Detector : FPD と略) が使用されるようになり, 高画質 (高い空間分解能や残像の少なさ, 優れた入出力特性など) で小型という特徴を有しており, さらに X 線利用効率も

高い。また、オフセット補正（キャリブレーションのように検査前に画像を収集しておき、画像収集後、減ずることで画質を補正する）やゲイン補正（画像の均一化の補正）を行うことで、長期わたって画質が担保される [38]。このような特徴を有しているため、従来使用されていた X 線検出器（Image Intensifier : I.I. と略）よりも被ばくを低減することが可能となっている。また、X 線透視装置はその特徴から、X 線管が寝台の上部あるオーバーチューブ型（図 3-4 (a)）と下部にあるアンダーチューブ型、X 線管を回転させることができる C アーム型（図 3-4 (b)）に分類される [38]。



(a) オーバーチューブ型



(b) C アーム型

図 3-4 X 線透視装置 ((a)オーバーチューブ型と (b) C アーム型)

オーバーチューブ型は寝台と X 線管に距離があり、寝台も広いため、患者の体位変換が容易である。また、寝台自体を立位にできるため、さまざまな角度からの観察が可能となる。他にも、寝台が広いため作業スペースが確保でき、他の装置（内視鏡装置や超音波装置など）との干渉も少ない。したがって、さまざまな診療科のニーズに対応しやすく、汎用性が高い装置である。そのため、国内ではアンダーチューブ型よりもオーバーチューブ型の方が多く、とりわけ非血管系診療で使用されている。その反面、デメリットとして放射線診療従事者の被ばくが多いことが挙げられる。X 線管が寝台の上部についているため、主に患者からの散乱線の影響を多く受けてしまい、頭頸部の被ばくはアンダーチューブ型に比べ 10 倍以上になる可能性がある [39]。そのため、防護具の使用は必須である [38]。

アンダーチューブ型は X 線検出器を患者に近づけることができるため、オーバーチューブ型に比べ良好な画質（ボケの少ない画像）が得られるといった特徴を有する [38]。その反面、患者と

X 線検出器の空間が狭くなれば、診療が行いにくいといったことも考えられる。また、放射線診療従事者の上半身より下半身（足元）の方が散乱線の影響を多く受けるが、下半身の防護は診療の妨げにならないため、対策をたてやすい。

C アーム型は主に、血管系診療で使用され、X 線管を回転させることができる。そのため、X 線管を下部にすることができ、かつ、患者の体動なくさまざまな角度からの観察が可能である。一般的には放射線診療従事者の頭頸部の被ばくは、アンダーチューブ型と同様、オーバーチューブ型より低いが、X 線管の回転位置により同等近くになる可能性もある。

X 線透視装置には検査に応じたさまざまな画像処理技術や解析がある。画像処理技術の代表的なものとして、あらかじめ撮影した画像（マスク画像）から造影剤注入後、血管が映し出された画像（ライブ画像）を減じた DSA（Digital Subtraction Angiography）処理がある。さらに血管に造影剤を注入しつつ X 線管も回転させながら撮影することにより 3 次元画像を作成する回転 DA（Digital Angiography）や回転 DSA がある。解析の代表的なものとして、造影剤の流入で脳機能評価を行う perfusion 解析、動脈瘤の血流流入、流出方向などを解析し、破裂のしやすさなどの評価を行う数値流体力学解析がある。これらは患者の治療方針を決定するうえで、重要な判断材料となりうる。一方、3 次元画像の取得や解析のための追加撮影に伴い患者の被ばく線量は増加する。その結果、放射線診療従事者の被ばく線量も増加する可能性があるため、多用することは望ましくないと考えられる [38]。

第4章 本研究の目的

前述の通り、放射線診療従事者は外部放射線防護の3原則のうち、「時間」、「距離」を管理することは難しい。「時間」は手技の難易度や術者の熟練度に依存する。また、患者の血管や臓器の構造により難易度は上がるため、それによって所要時間も変わってくる。X線管からの「距離」は使用するデバイスにより決定される。どちらも治療に必要な選択の結果であるため、これらを変えることは難しいと考えられる。そこで自らを護るために必要となるのが「遮蔽」である。その「遮蔽」を行うための防護装具として、自身の被ばく線量を測定する個人線量計、体を護る防護衣、眼を保護する防護眼鏡、防護衣だけでは足りない首元（甲状腺）部分を防護するネックガード、その他追加で眼や体全体を強く防護する防護板（衝立）などが挙げられる。これらの使用が放射線診療を行う上で必須であるが、さまざまな理由によりこれらを使用していないことが多々見受けられる。理由としては、個人線量計の使用忘れ、防護衣の重さによる疲労度の増大や重ね着による暑さや眼鏡の曇りによる視界不良や耳の痛みなど使用に伴う不快感からの忌避が考えられる。これらの要因により、防護装具が使用されていない可能性があり、厚生労働省の通知により関係法令改正に向けて、まずは放射線診療に対して防護装具の使用に関する教育などが求められている今、実際に防護装具が正しく使用されているか調査する必要がある。特に調査実施病院では新規法令に移行した場合、水晶体等価線量限度を超える者がいるため、喫緊の調査が必要である。

そこで、本研究の目的は、「防護装具の使用の実態調査」とした。もし、防護装具の使用が不十分であれば、改善を行う必要がある。本研究は、その改善を行う上で重要となる基礎調査であり、その実態を明らかにすることは放射線診療従事者の被ばく管理に一石を投げえんと考えている。さらに、その調査を踏まえて、防護装具の使用率向上のための業務改善も試みた。この試みは、眼の水晶体の被ばく限度引き下げなど、今後厳格化されると考えられる放射線診療従事者の被ばく管理に、解決策を提示できる可能性があり、産業医学的にも意義があると考えている。

第5章 病院での防護装具使用率実態調査

5. 1 方法

放射線診療を行う上で使用されるであろう防護装具は個人線量計，防護衣，防護眼鏡，ネックガード，防護板（衝立）の5つである．これらの使用の有無が放射線診療従事者の身体を護る上で重要である．これらの使用状況を把握することで，防護装具の使用が不十分であれば注意喚起し，不必要に使用している場合は助言することができる．また，現状を把握することで被ばく防護に対する知識習得度合いも測れる．そこで，方法として，まずは放射線診療時の防護装具の使用状況を記録する．その後，現状での防護意識についてのアンケートをとる．

以上の手順により，被ばく防護調査を行い，実態を明らかに，さらに改善の方法について検討する．

5. 2 対象と定義

5. 2. 1 対象

調査対象は単施設の病院で実施した．概要は表 5-1 に示す（いずれも 2018 年 11 月 25 日現在の数値）．

表 5-1 調査病院概要

許可病床数	214 床	手術件数	約 2,400 例／年
ICU	8 床	冠動脈造影検査	約 250 例／年
HCU	20 床		

調査対象期間は 2017 年 4 月から 8 月までの 5 ヶ月間とした．調査対象の放射線診療は，調査対象期間内に実施された放射線透視を使った診療（検査や治療）576 症例中，欠落値のなかった 350 症例（60.8%）とした．その内訳は表 5-2 に示す．

表 5-2 調査期間中に施行された放射線診療

血管系診療	頭・腹部・下肢血管造影検査, 冠動脈造影検査, 経皮的血栓回収術, 脳動脈瘤コイル塞栓術, 頸動脈ステント留置術, 経皮的冠動脈形成術, 経皮的動脈塞栓術
非血管系診療	脊髓腔造影検査, 硬膜外自家血注入療法, 気管支鏡検査, 経気管支肺生検, 肝膿瘍造影検査, ERCP, 経皮経肝胆道ドレナージ, 上部・下部消化管検査, チューブ挿入術, 胃・腸瘻(造影)チューブ交換, 腎瘻造設術, 膀胱尿道造影検査, 逆行性腎盂尿管造影検査, 経尿道的尿管ステント留置術

調査対象の放射線診療従事者は医師, 看護師, 臨床工学士, 診療放射線技師とした。その詳細を表 5-3 に示す。

表 5-3 調査対象放射線診療従事者

	医師	看護師	臨床工学士	診療放射線技師
年齢 ((mean±SD) 歳)	38.7±7.8	31.1±8.0	28.8±2.9	32.0±6.2
男:女	15:1	2:5	4:0	4:3
経験年数 ((mean±SD) 年)	11.9±7.5	7.4±5.0	4.8±2.9	9.7±6.0

調査対象の防護装具について方法に示す。なお, 防護装具のうち個人線量計については, 胸部(または腹部)の測定用に 1 つだけを使用している者と胸部(または腹部)の測定以外に頸部用も合わせて使用している者が混在していた。また, 防護板の使用は第一施術医のみであった。

5. 2. 2 使用率の定義

評価の値である使用率の算出方法を以下に示す。得られた集計結果を式 (3) - (5) を用いて求めた。

$$\text{各防護装具の個人使用率} \quad (Dp(\%)) = \frac{N_i}{T_i} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{各防護装具の全体の使用率} \quad (Da(\%)) = \text{対象群}a\text{の } Dp\text{の平均} \quad (4)$$

$$\text{各防護装具の各種診療使用率} \quad (Ds(\%)) = \frac{N_s}{T_s} \times 100 \quad (5)$$

ここで、 N_i ：個人 p が調査期間内に使用した防護装具 i の使用回数、 T_i ：個人 p が調査期間内に従事した放射線診療従事回数、 i ：個人線量計，防護衣，防護眼鏡，ネックガード，防護板（衝立）， p ：医師 $A \sim P$ ，看護師 $A \sim G$ ，臨床工学士 $A \sim D$ ，診療放射線技師 $A \sim G$ （アルファベットは個人の識別番号とする）， a ：医師，看護師，…，血管系診療，非血管系診療， N_s ：個人 p が各種診療にて調査期間内に使用した防護装具 i の使用回数， T_s ：個人 p が各種診療にて調査期間内に従事した放射線診療従事回数とした。

5. 3 使用率の記録方法と解析

5. 3. 1 使用率記録法

調査は，独自に選択式のチェックシートを作成し，診療ごとに記録した．記録は診療放射線技師に依頼し，その記録をもとに解析を行った．

5. 3. 2 医師の使用率

医師の個人および全体の使用率をそれぞれ式 (3) および (4) により算出し，比較を行った．比較した防護装具は，個人線量計，防護衣，防護眼鏡，ネックガード，防護板とした．なお，男性は胸部に女性は腹部の位置で個人線量計を使用した（均等被ばく測定用）．

5. 3. 3 血管系診療医師と非血管系診療医師の使用率比較

医師について血管を主病変として取り扱うグループ（血管系診療）と，臓器を主病変として取り扱うグループ（非血管系診療）に分け，式 (4) により全体の使用率を算出し，両者の比較を行った．比較した防護装具は，個人線量計，防護眼鏡，ネックガードとした．なお，調査対象の血管系診療は 148 症例，非血管系診療は 202 症例であった．また各診療の内訳は表 5-2 の通りである．なお，2 群間の有意差検定には t 検定を使用し， $p < 0.05$ を有意差ありとした．

5. 3. 4 診療種別医師使用率比較

医師について，各種診療（検査や治療）を 13 のグループに分け，各グループで防護装具の使用率を式 (5) により算出し，グループ間の比較を行った．比較した防護装具は，個人線量計，防護眼鏡，ネックガード，防護板とした．その他，各種診療使用率と平均透視時間の相関（Pearson の相関）を求めた．なお，相関係数の有意差検定には無相関の検定を使用し， $p < 0.05$ を相関ありと判断した．また，区分けした 13 グループは表 5-4 に示す．

表 5-4 診療種の内訳

頭部血管検査	頭部血管検査
頭部血管治療	経皮的血栓回収術，脳動脈瘤コイル塞栓術
頸部血管治療	頸動脈ステント留置術
冠動脈検査	冠動脈検査
冠動脈治療	経皮的冠動脈形成術
腹部血管検査	腹部血管検査
腹部血管治療	経皮的動脈塞栓術
脊髄腔造影検査	脊髄腔造影検査
気管支鏡検査	気管支鏡検査，経気管支肺生検
消化管検査	肝臓瘍造影検査，上部・下部消化管検査
消化管治療	ERCP，経皮経肝胆道ドレナージ，チューブ挿入術，胃・腸瘻（造影）チューブ交換
泌尿器造影検査	膀胱尿道造影検査，逆行性腎盂尿管造影検査
泌尿器治療	腎瘻造設術，経尿道的尿管ステント留置術

5. 3. 5 経験年数別医師使用率比較

医師の経験年数と個人使用率の相関（Pearson の相関）を求めた．個人使用率は式（3）により算出した．対象とした防護装具は，個人線量計，防護眼鏡，ネックガードとした．

5. 3. 6 医師へのアンケート調査

医師の防護意識についてアンケート調査を行った．質問項目は以下の 5 項目とした（表 5-5）．

表 5-5 アンケート質問事項

Q1	自身の毎月の被ばく線量を確認しているか
Q2	自身の被ばくに対して不安はないか
Q3	自身の被ばくを少なくするための工夫をしているか
Q4	放射線防護の 3 原則を知っているか
Q5	法令で定まっている放射線診療従事者の線量限度を知っているか

5. 3. 7 看護師の使用率

医師と同様に、看護師の個人および全体の使用率をそれぞれ式 (3) および (4) により算出し、比較を行った。比較した防護装具は、個人線量計、防護衣、防護眼鏡、ネックガード、防護衝立とした。なお、男性は胸部に女性は腹部の位置で個人線量計を使用した (均等被ばく測定用)。

5. 3. 8 その他放射線診療従事者の使用率比較

臨床工学士と診療放射線技師についても個人および全体の使用率をそれぞれ式 (3) および (4) により算出し比較した。比較した防護装具は、個人線量計、防護衣、防護眼鏡、ネックガードとした。なお、男性は胸部に女性は腹部の位置で個人線量計を使用した (均等被ばく測定用)。

5. 3. 9 血管系診療従事者の職種別使用率比較

医師、看護師、臨床工学士、診療放射線技師の全体の使用率を式 (4) により算出し比較を行った。比較した防護装具は、個人線量計、防護衣、防護眼鏡、ネックガードとした。なお、医師とその他の職種間の有意差検定には Steel-Dwass 検定を使用し、 $p < 0.05$ を有意差ありとした。

5. 4 倫理的配慮

本研究にあたり倫理委員会における承認を得た (承認番号 : 2017009, 2018005)。

5. 5 結果

5. 5. 1 医師の使用率

医師の個人および全体の使用率の結果を表 5-6 に示す。この結果、防護衣は全体の使用率が 100%であったが、その他の防護装具の全体の使用率は防護板を除き 50%程度かそれ以下で、対象間でのばらつきが大きいことが認められた。防護眼鏡とネックガードの個人使用率を比較すると、医師 J を除きいずれの医師も、ネックガードの値が防護眼鏡の値と同じか高かった。また、両防護装具とも、個人使用率が高い者は、血管系診療従事者であった。

個人線量計についてみると、個人使用率は個人差が大きく、医師 F と N は 100%であったものの、その他は 80%に達していなかった。特に医師 G は使用率が最も低く、0%であった。また、防護眼鏡とネックガードは、ほとんど使用していない者とほぼ毎回使用している者にわかれ、さらにほとんど使用していない者の方が多かった。なお、頸部用の個人線量計を使用している医師 A~F は、体幹用と頸部用の両方を使用していた。

防護眼鏡とネックガードについてみると、前述の通り個人使用率の高い医師と低い医師に

別れ、特に医師 G はどちらも 100%使用していたのに対して、医師 H, I, K, L, P に関しては両方とも使用することなく診療を行っていることが認められた。

防護板についてみると、個人使用率の最も高い医師は 100%であるのに対し、最も低い医師は 20%程度であった。なお、非血管系診療の検査室には防護板が設置されていなかったため、個人使用率は血管系診療の医師の数値のみとなった。

図 5-1 に防護装具の個人使用率の分布を示す。なお、使用率の分布は、0- 33%, 33- 67%および 67- 100%で区切った範囲に入る人数の分布で表している。この結果、個人線量計では、個人使用率がどの区分けにも均等に分布していた。また、防護眼鏡では 0- 33%の範囲に入る者が 70%と多く、反対に防護板では、67- 100%の範囲に入る者が 60%と多かった。その他、ネックガードでは 33- 67%の範囲に入る使用率の者が少なく、使用率の低い範囲と高い範囲に入る使用者が多かった。

表 5-6 放射線診療従事者（医師）の防護装具使用状況

医師	経験年数 (年)	従事回数 (回)	個人線量計 (胸部／腹部)		個人線量計 (頸部) *	防護衣		防護眼鏡		ネックガード		防護板 **
			回数 (%)	回数 (%)		回数 (%)	回数 (%)	回数 (%)	回数 (%)	回数 (%)	回数 (%)	
A	11	14	9 (64)	9 (64)	9 (64)	14 (100)	13 (93)	13 (93)	13 (93)	2 (22)		
B	8	35	27 (77)	27 (77)	27 (77)	35 (100)	33 (94)	33 (94)	34 (97)	20 (69)		
C	2	42	19 (45)	19 (45)	19 (45)	42 (100)	30 (71)	30 (71)	40 (95)	9 (60)		
D	16	32	19 (59)	19 (59)	19 (59)	32 (100)	9 (28)	9 (28)	32 (100)	27 (100)		
E	27	36	26 (72)	26 (72)	26 (72)	36 (100)	3 (8)	3 (8)	29 (81)	11 (92)		
F	6	59	59 (100)	59 (100)	59 (100)	59 (100)	58 (98)	58 (98)	59 (100)	45 (98)		
G	18	3	0 (0)	0 (0)	-	3 (100)	3 (100)	3 (100)	3 (100)	1 (33)		
H	13	16	1 (6)	1 (6)	-	16 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	-		
I	4	93	15 (16)	15 (16)	-	93 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	-		
J	13	58	46 (79)	46 (79)	-	58 (100)	13 (22)	13 (22)	2 (3)	-		
K	10	9	1 (11)	1 (11)	-	9 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	-		
L	7	15	2 (13)	2 (13)	-	15 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	-		
M	20	6	4 (67)	4 (67)	-	6 (100)	0 (0)	0 (0)	2 (33)	-		
N	2	2	2 (100)	2 (100)	-	2 (100)	0 (0)	0 (0)	1 (50)	-		
O	26	10	5 (50)	5 (50)	-	10 (100)	0 (0)	0 (0)	5 (50)	-		
P	8	6	3 (50)	3 (50)	-	6 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	-		
mean±SD	12±8	27±25	15 (51±32)	15 (51±32)	27 (70±17)	27 (100±0)	10 (32±41)	10 (32±41)	14 (50±43)	16 (68±27)		

* G～P の医師は頸部用の個人線量計を所持していない。

** 非血管系の検査室に防護板を設置しておらず、第一施術者しか使えない。なお、A～G の第一施術回数はそれぞれ 9, 29, 15, 27, 12, 46, 3 回であった。

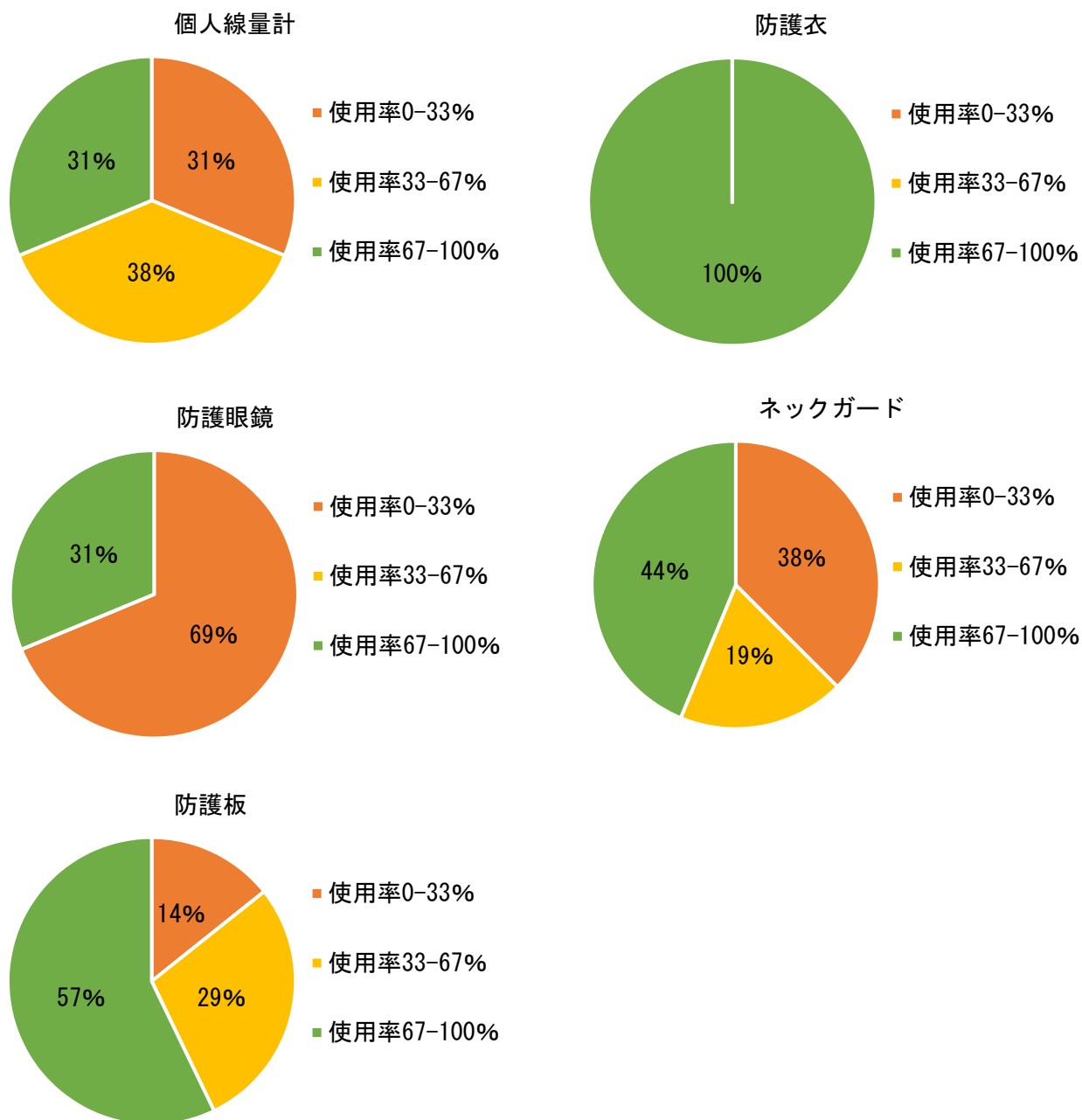


図 5-1 医師の防護装具の個人使用率の分布

5. 5. 2 血管系診療医師と非血管系診療医師の使用率比較

血管系診療と非血管系診療の比較を図 5-2 に示す。個人線量計の全体の使用率は、両診療の間に有意差がなかった。しかし、防護眼鏡、ネックガードの全体の使用率は血管系診療の方が有意に高かった（防護眼鏡： $p=0.003$ ，ネックガード： $p<0.001$ ）。

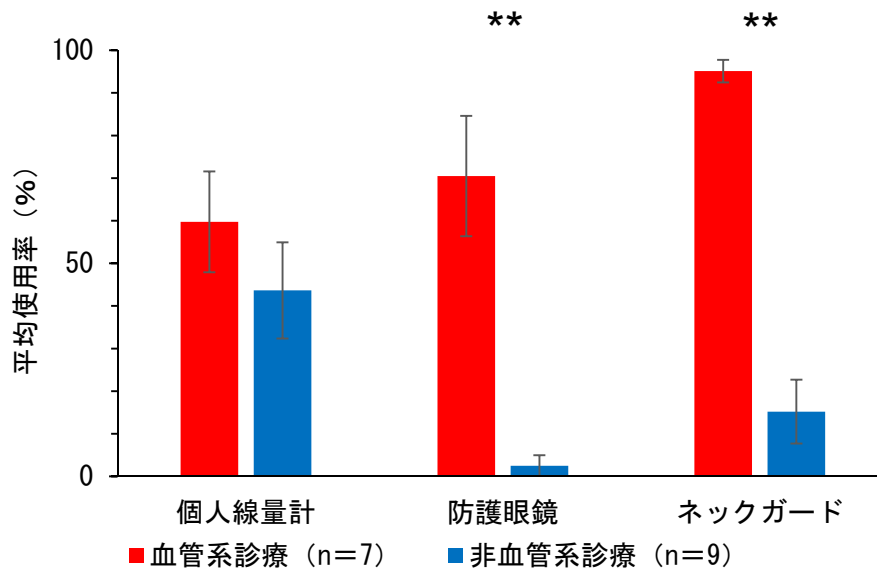


図 5-2 血管系と非血管系の診療における個人線量計, 防護眼鏡およびネックガードの全体の使用率. エラーバーは標準誤差. 有意差検定は student の t 検定を使用した (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$).

5. 5. 3 診療種別医師使用率比較

診療の種類による使用率の比較を表 5-7 に示す. 個人線量計の使用率は冠動脈治療が 83%と高かったのに対し, 腹部血管造影検査では 0%であった. 反対に防護眼鏡とネックガードの使用率は腹部血管造影検査が 100%と高かった. また, 防護眼鏡の使用率は気管支鏡検査, 消化管検査・治療, 泌尿器造影検査・治療で 0%であった. その他, ネックガードの使用率も消化管検査・治療は 0%であった. また, 防護眼鏡とネックガードの使用率を比較すると, 脊髓腔造影検査以外では, どのグループでもネックガードの使用率の方が高かった.

平均透視時間と使用率との関係を図 5-3 に示す. 防護眼鏡とネックガードは正の有意な相関が認められた (防護眼鏡: $r=0.639$, $p=0.019$, ネックガード: $r=0.619$, $p=0.024$). 一方, 個人線量計および防護板では弱い負の相関 (個人線量計: $r=-0.219$, $p=0.472$, 防護板: $r=-0.426$, $p=0.340$) が認められた.

表 5-7 放射線診療従事者（医師）の各種診療使用率と平均透視時間

診療種	使用率 (%)					透視時間 mean±SD (秒)
	個人線量計	防護眼鏡	ネックガード	防護板		
頭部血管検査	69.8	86.0	95.3	34.9		485.1±293.6
頭部血管治療	48.0	80.0	100	40.0		2005.8±1164.9
頸部血管治療	62.5	93.8	100	37.5		1120.1±176.1
冠動脈検査	81.1	64.2	92.5	88.7		506.9±397.7
冠動脈治療	83.1	47.7	96.9	53.8		2516.3±1897.5
腹部血管検査	0	100	100	33.3		3636.3±751.7
腹部血管治療	66.7	66.7	83.3	66.7		1199.8±912.8
脊髓腔造影検査	37.1	8.2	2.4		59.9±30.7	
気管支鏡検査	75.0	0	37.5		116.5±45.1	
消化管検査	10.0	0	0		456.9±364.5	
消化管治療	15.4	0	0		708.7±662.5	
泌尿器造影検査	54.5	0	27.3		322.2±238.6	
泌尿器治療	40.0	0	40.0		255.4±134.7	

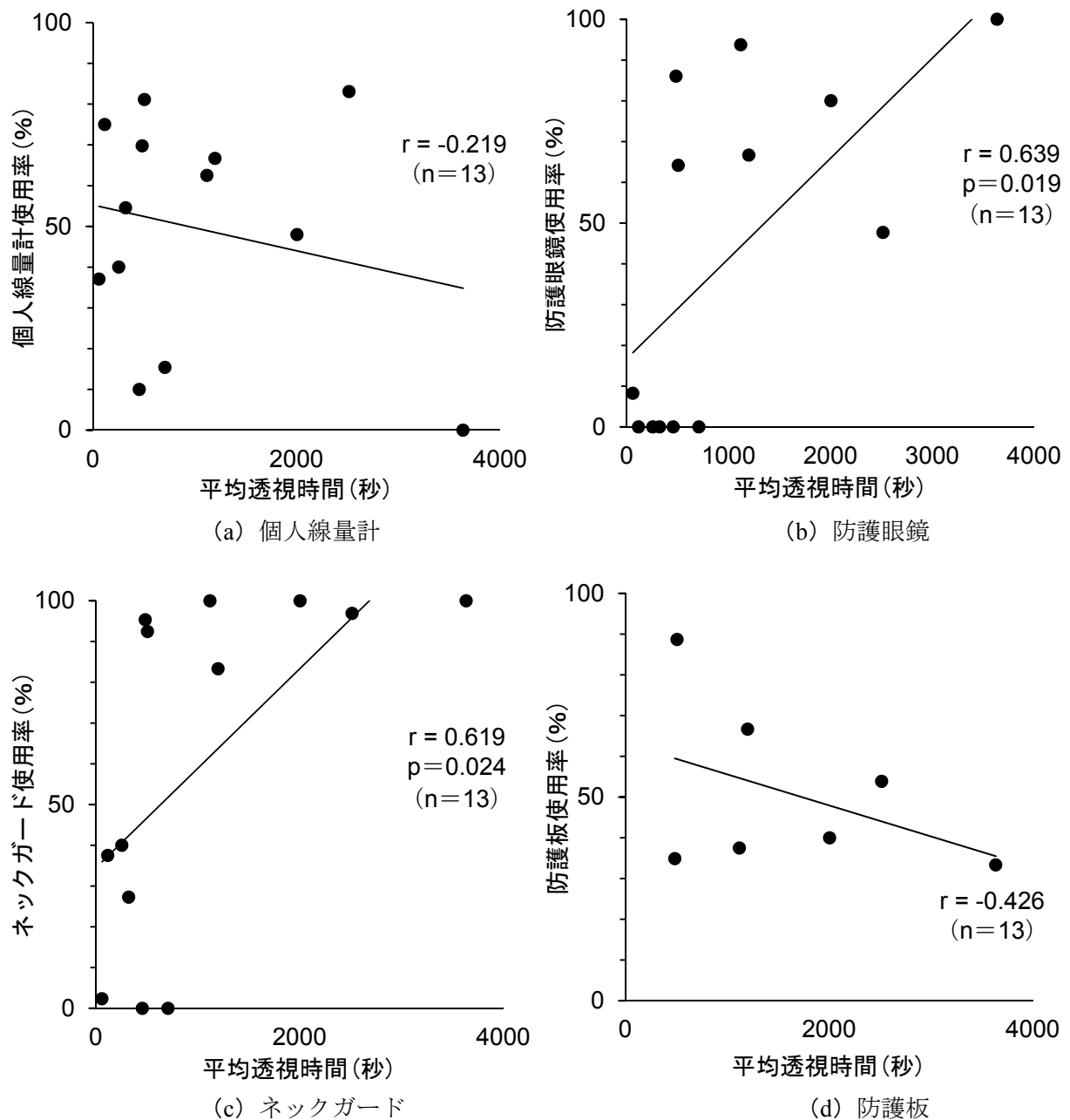


図 5-3 (a) 個人線量計, (b) 防護眼鏡, (c) ネックガードおよび (d) 防護板の各種診療使用率と平均透視時間の Pearson 相関.

5. 5. 4 経験年数別医師使用率比較

医師の経験年数と全体の使用率の関係を図 5-4 に示す. 医師の経験年数と全体の使用率の間には相関はほとんど認められなかった (いずれも $-0.2 < r < 0.2$).

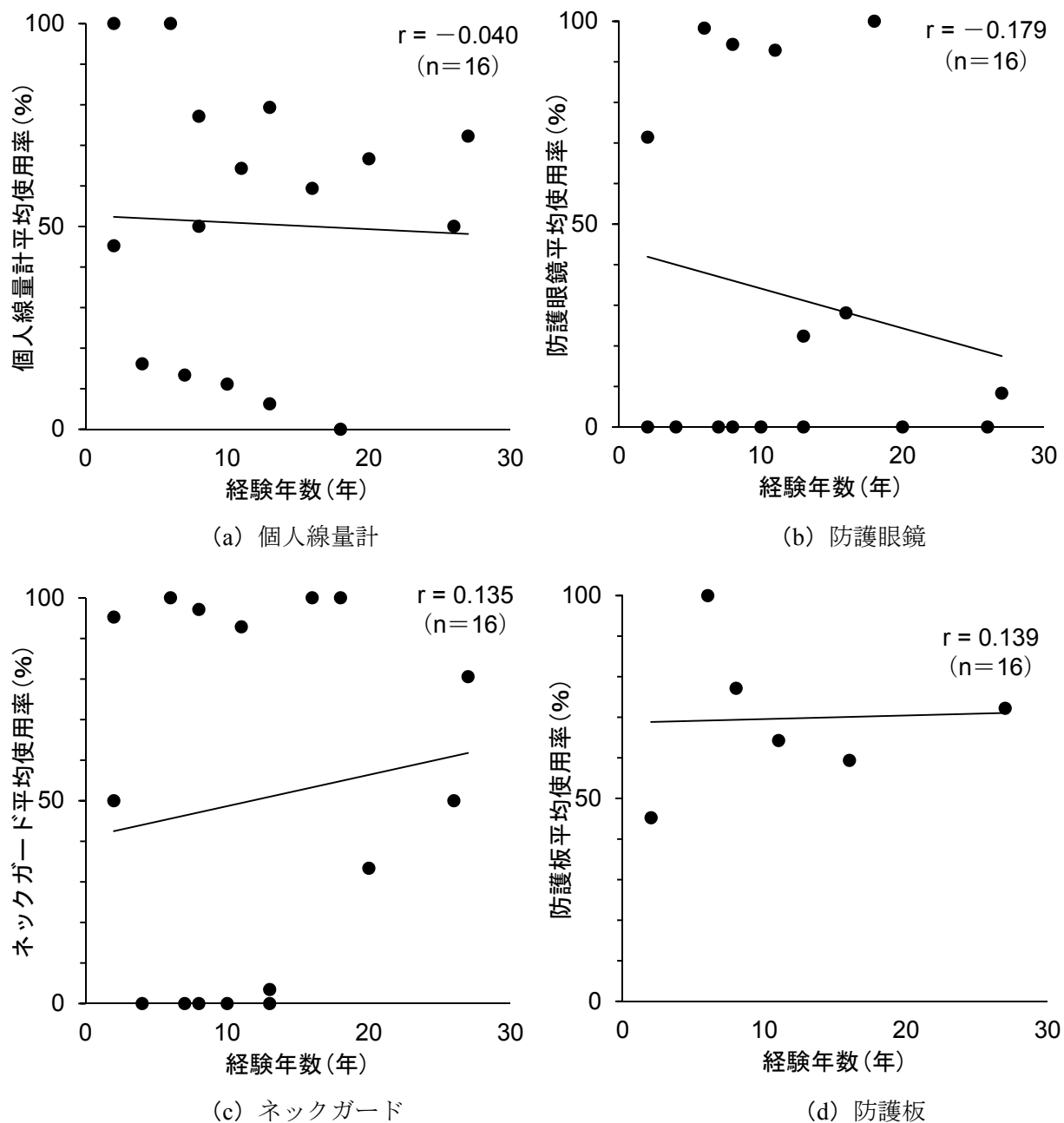
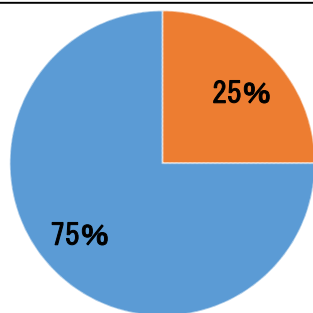


図 5-4 経験年数と (a) 個人線量計, (b) 防護眼鏡, (c) ネックガードおよび (d) 防護板の個人使用率の Pearson 相関

5. 5. 5 医師へのアンケート調査

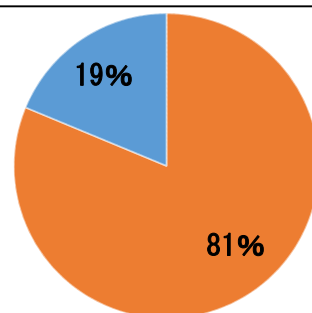
アンケート結果を図 5-5 に示す. 調査対象の医師のうち 75%が自身の被ばく線量を確認していないことが分かった. また, 80%以上が被ばくに対する不安を抱えており, 75%が何らかの対策を講じていることが分かった. その他, 放射線防護の 3 原則については約 40%, 線量限度も約 70%が知らないことが分かった.

Q 1 毎月の被ばく線量を確認しているか



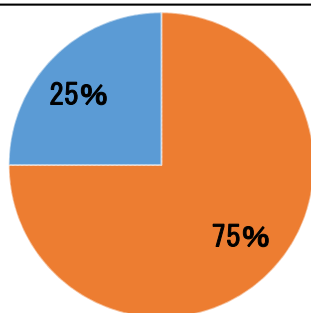
■ 確認している ■ 確認していない

Q 2 被ばくに対して不安はな
いか



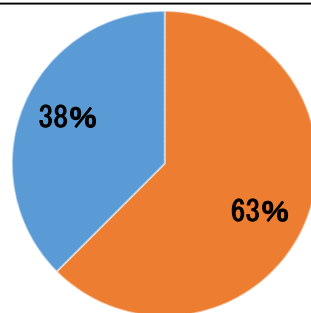
■ 不安がある ■ 不安はない

Q 3 被ばくを少なくするための工夫をしているか



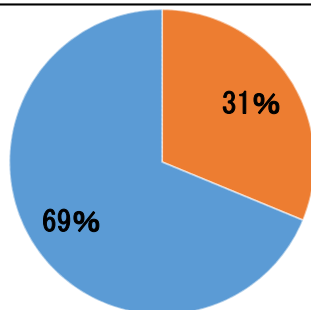
■ している ■ していない

Q 4 放射線防護の 3 原則を知
っているか



■ 知っている ■ 知らない

Q 5 放射線診療従事者の線量
限度を知っているか



■ 知っている ■ 知らない

図 5-5 医師の防護意識についてのアンケート調査結果 (n=16)

5. 5. 6 看護師の使用率

表 5-8 に看護師の防護装具の個人および全体の使用率を示す。個人線量計の個人使用率は、1 名（82%）をのぞいて 100%であった。また、防護衣の個人使用率は全員 100%であり、防護衝立も 100%か、それに近い値であった。防護眼鏡とネックガードの全体の使用率は低く、対象間でのばらつきが大きかった。医師同様、ほとんど使用していない者とほぼ毎回使用している者に二極化し、さらにほとんど使用していない者の方が多かった。防護眼鏡とネックガードの全体の使用率を比較すると、ネックガードの使用率の方が高かった。

図 5-6 に防護装具の個人使用率の分布を示す。なお、使用率の分布は、0- 33%、33- 67% および 67- 100%で区切った範囲に入る人数の分布で表している。この結果、防護眼鏡とネックガードは、33- 67%の範囲に入る使用率の者がおらず、使用率の低い範囲と高い範囲に入る使用者のみであった。

表 5-8 放射線診療従事者（看護師）の防護装具使用状況

看護師	経 験 年 数 (年)	従 事 回 数 (回)	個人線量計 (体幹)		防護衣		防護眼鏡		ネックガード		防護衝立	
			回 数	回数 (%)	回 数	回数 (%)	回 数	回数 (%)	回 数	回数 (%)	回 数	回数 (%)
A	14	11		9 (82)	11 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	11 (100)	11 (100)		
B	3	18		18 (100)	18 (100)	1 (6)	5 (28)	17 (94)				
C	16	14		14 (100)	14 (100)	10 (71)	11 (79)	13 (93)				
D	3	15		15 (100)	15 (100)	0 (0)	1 (7)	15 (100)				
E	3	26		26 (100)	26 (100)	0 (0)	0 (0)	26 (100)				
F	7	19		19 (100)	19 (100)	1 (5)	16 (84)	17 (89)				
G	6	4		4 (100)	4 (100)	0 (0)	1 (25)	4 (100)				
mean±SD	7±5	15±6	15 (97±6)	15 (100±0)	2 (12±24)	5 (32±33)	15 (97±4)					

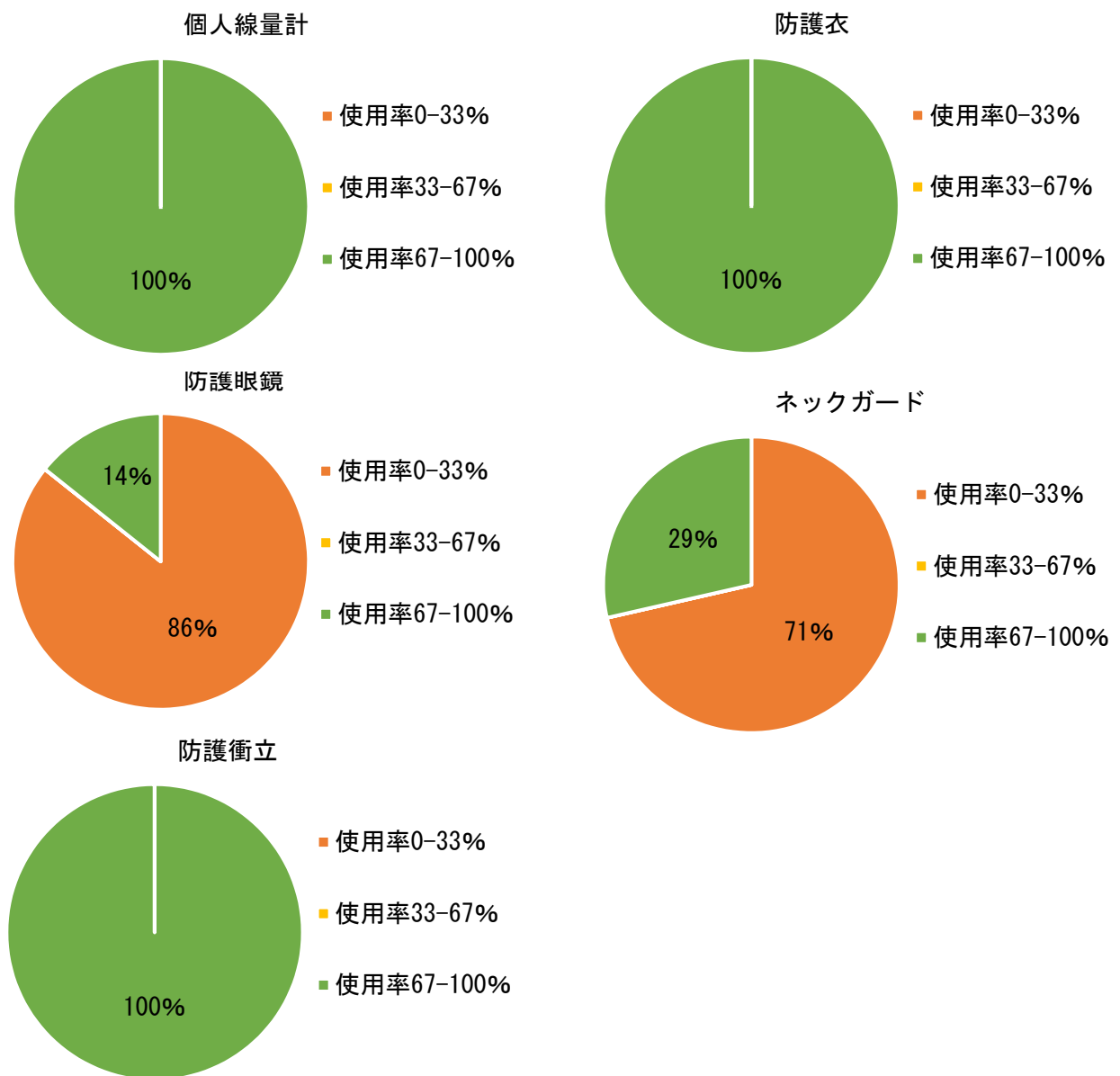


図 5-6 看護師の防護装具の個人使用率の分布

5. 5. 7 その他放射線診療従事者の使用率比較

臨床工学士と診療放射線技師の個人および全体の使用率の結果を表 5-9 に示す。

臨床工学士の個人線量計の個人使用率は、1 名（69%）をのぞき 100%であった。また、防護衣の個人使用率は全員 100%であった。防護眼鏡とネックガードの全体の使用率は低く、対象間でのばらつきが大きかった。防護眼鏡とネックガードの個人使用率を比較すると、すべての者でネックガードの使用率の方が同率が高かった。

診療放射線技師の個人線量計の個人使用率は、全員 100%であった。また、防護衣の個人使用率も 100%であり、防護眼鏡とネックガードの全体の使用率は 0%であった。

表 5-9 放射線診療従事者（臨床工学士，診療放射線技師）の防護器具使用状況

臨床 工学士	経 験 年 数 (年)	従 事 回 数 (回)	個人線量計 (体幹)		防護衣		防護眼鏡		ネックガード	
			回 数 (%)	回数 (%)	回数 (%)	回数 (%)	回数 (%)	回数 (%)	回数 (%)	回数 (%)
A	9	13	9 (69)	13 (100)	13 (100)	5 (3)	5 (38)			
B	6	27	27 (100)	27 (100)	27 (100)	3 (11)	12 (44)			
C	2	35	35 (100)	35 (100)	35 (100)	4 (11)	13 (37)			
D	2	31	31 (100)	31 (100)	31 (100)	3 (10)	3 (10)			
mean±SD	5±3	27±8	26 (92±13)	27 (100±0)	4 (18±12)	8 (32±13)				

診療 放射線技師	経 験 年 数 (年)	従 事 回 数 (回)	個人線量計 (体幹)		防護衣		防護眼鏡		ネックガード	
			回 数 (%)	回数 (%)	回数 (%)	回数 (%)	回数 (%)	回数 (%)	回数 (%)	回数 (%)
A	15	15	15 (100)	15 (100)	15 (100)	0 (0)	0 (0)			
B	10	5	5 (100)	5 (100)	5 (100)	0 (0)	0 (0)			
C	2	20	20 (100)	20 (100)	20 (100)	0 (0)	0 (0)			
D	14	34	34 (100)	34 (100)	34 (100)	0 (0)	1 (3)			
E	8	16	16 (100)	16 (100)	16 (100)	0 (0)	0 (0)			
F	18	34	34 (100)	34 (100)	34 (100)	0 (0)	0 (0)			
G	1	20	20 (100)	20 (100)	20 (100)	0 (0)	0 (0)			
mean±SD	10±6	21±10	21 (100±0)	21 (100±0)	0 (0±0)	0 (0±1)				

5. 5. 8 血管系診療従事者の職種別使用率比較

医師，看護師，臨床工学士および診療放射線技師の全体の使用率を図 5-7 に示す．個人線量計は医師の使用率が最も低く，特に看護師，診療放射線技師との差には有意差が認められた（看護師： $p=0.027$ ，診療放射線技師： $p=0.016$ ）．反対に防護眼鏡とネックガードは医師以外の職種が医師に比べ低かった．特に防護眼鏡では看護師，診療放射線技師が，ネックガードでは医師以外の全職種が有意に低かった（防護眼鏡 看護師： $p=0.023$ ，診療放射線技師： $p=0.005$ ，ネックガード 看護師： $p=0.014$ ，臨床工学士： $p=0.038$ ，診療放射線技師： $p=0.006$ ）．

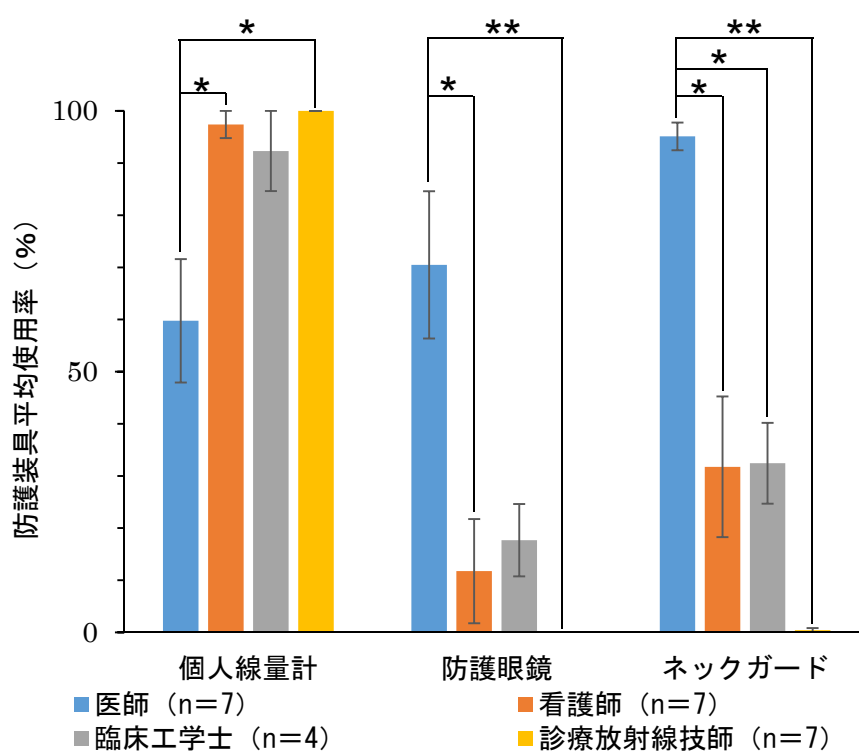


図 5-7 多職種における個人線量計，防護眼鏡およびネックガードの全体の使用率．エラーバーは標準誤差．有意差検定は Steel- Dwass 検定を使用した（*： $p<0.05$ ，**： $p<0.01$ ）．

第6章 防護装具の使用率向上のための業務改善

6. 1 方法

使用促進の声掛けを担当の診療放射線技師が行うことにより、防護装具の使用率の改善を試みた。声掛けの対象は、図 5-2 で使用率の低かった非血管系診療に従事する医師 6 名とした。声掛け前の防護装具の使用率の調査期間は 2017 年 6 月から 7 月の 2 ヶ月間とし、その間実施された 61 症例を対象とした。

続いて、声掛け対象医師の防護装具を着用しない理由について、アンケート調査を実施した。調査時期は、防護装具の使用率の 2017 年 9 月から 10 月とした。質問内容は不使用の理由とし、「使用忘れ」、「面倒」、「検査に支障をきたす」、「その他」の選択肢を用意した（複数回答可）。

その後、2017 年 11 月から 12 月の 2 ヶ月間に使用促進の声掛けを実施し、再度防護装具の使用率の調査を行った。声掛けは、診療前に防護装具を使用していない医師に対して行ったが、状況に応じ、声掛けだけではなく、防護装具を直接手渡しすることも行った。かける言葉は「着けて下さい」、「忘れていますよ」など、ごくありふれた言葉とした。調査対象症例数は、声掛け実施前とほぼ同数である 57 症例であった。なお、各防護装具の期間内の個人および全体の使用率は、式 (3)、(4) により求めた。

6. 2 結果

図 6-1 に、声掛け実施前後の各種防護装具の使用率を示す。声掛けを行った結果、すべての防護装具の使用率がほぼ 100% となった。なお、防護眼鏡について 1 例のみ使用していない事例があったが、同時に行われた他の検査で使用しており、数が足りなかったためであった。

防護装具を使用しない理由についてのアンケート結果を図 6-2 に示す。この結果、「使用忘れ」及び「面倒」などの理由が 80% 以上であった。また、「業務に支障をきたす」と「その他」の理由は 10% 程度にとどまった。

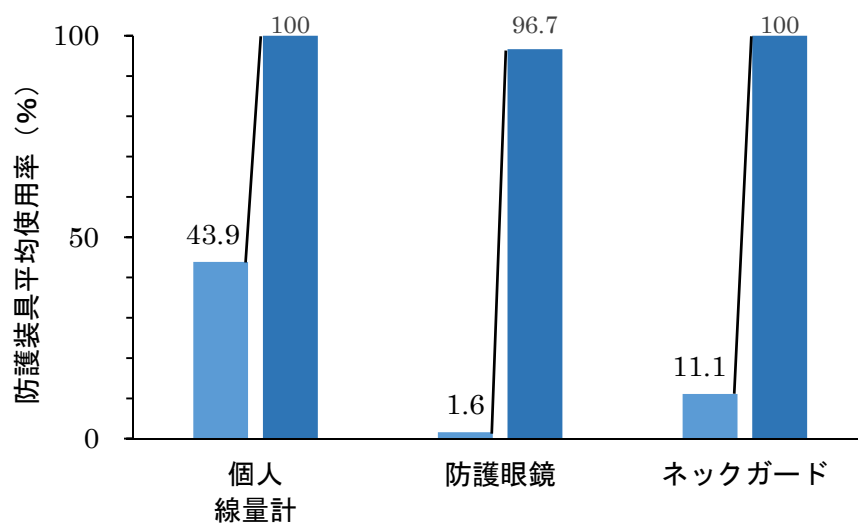


図 6-1 声掛け前後の防護装具の使用率. 防護衣は全期間を通して 100%であった.

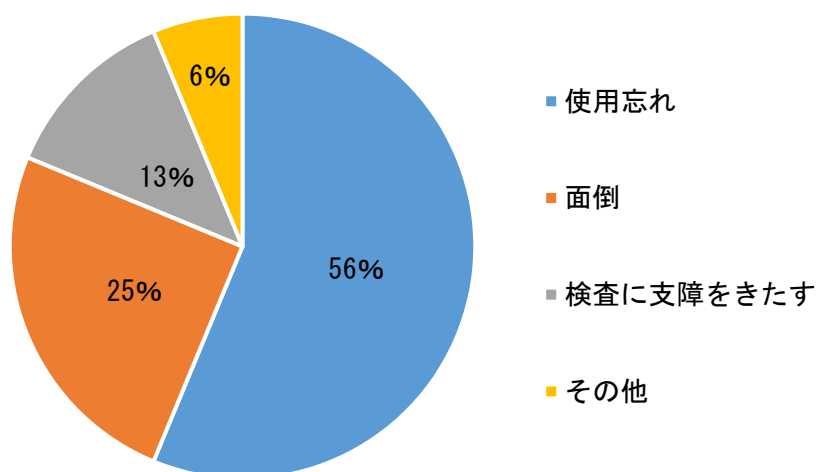


図 6-2 防護装具を着用しない理由について (複数回答可)

第7章 考察

7. 1 実態調査

7. 1. 1 医師の使用率

医師 16 名の放射線診療時における防護衣全体の使用率は 100%であり、放射線防護における防護衣の重要性を十分認識していることを示している。それに対し、他の防護装具の全体の使用率は低く、重要性への認識が低いことを示している。特に、防護眼鏡の全体の使用率は 32%と低く、放射線防護における重要性の認識が不十分であることが明らかとなった。しかし、「研究の背景」でも述べた通り、眼の水晶体の特殊性を考慮すると、防護眼鏡の使用は非常に重要である。眼の水晶体の法令基準値引き下げも近々予定されており、今後は防護眼鏡の使用に関して教育など入るため使用率が向上すると予想される。一方、ネックガードの防護対象である甲状腺は、放射線感度の高い臓器であるが、成人の被ばくによる影響は未だ解明されていない。光武らの報告では「小児期の被ばくの影響が成人期に甲状腺がんとして現れる。また、成人後さらに被ばくしても、発がんリスクは増加しないものの、そのリスクは生涯続く」とある [40]。よって、ネックガードの必要性については今後慎重に検討し、不快感を伴うならば不使用でもよいと考えている。

IVR 分野での卒前教育に関する大学講義内容の実態に関して、最上らが全国の 67 大学で行なった調査 [41] では、放射線科の全講義のうち、IVR に関する講義の割合はわずか 10%程度であり、内容も手技に関するものが多く、被ばくに関連するものは非常に少ないと報告されている。さらに、推奨の教科書などが無いために教育内容が標準化されておらず、講義内容は各大学の講師に委ねられているとの報告もある。出身大学の教育格差によって個人の防護意識に差が生じることとを考慮すると、現場での追加教育が必要不可欠である。各個人の防護意識を高め、防護装具の使用状況を改善するために、病院内での防護教育の実施や、学会などによる防護教育の支援などが望まれる。

なお、個人線量計に関してはその使用が法令で義務付けられており、放射線診療従事者全員の使用が必須である。単なる使用忘れとも考えられるが、早急に改善すべき事例である。

7. 1. 2 血管系診療医師と非血管系診療医師の使用率比較

防護眼鏡とネックガードの個人使用率は二極化しており、全体の使用率が高い者の大半は血管系診療の医師であった。このことは、診療内容の性質によって生じた習慣であると推測できる。血管系診療に関しては、放射線診療従事者の被ばくの危険性が早くから報告されており [2, 8] , さらには防護に対するガイドライン [11] や学会教育などがある。それらのことが現場に浸透しているため、比較的に防護意識が高く、このような差が生じたと考えられる。

しかし、非血管系診療においても眼の水晶体の危険性は存在する [4]。特にオーバーチューブ型の透視装置の使用時には、その構造上、患者により発生した散乱線が上向きに飛んでくるため、術者の手や頸頭部の被ばく線量が多い傾向にある。したがって、非血管系診療においても血管系診療と同様に被ばくの危険性を認識すべきであり、情報収集や防護教育が必要である。

7. 1. 3 診療種別医師使用率比較

各種診療において、防護装具の全てを使用する診療、防護衣のみを使用する診療など、それぞれに特色が見られた。これは診療科ごとの防護傾向を現していると推察されるが、ICRP の報告にもあるように、各医師が当該科で師事した指導医や先輩医師の防護法がそのまま反映された結果であると考えられる [4]。

また、平均透視時間と防護眼鏡およびネックガードの使用率には正の相関が認められ、透視時間が短いほど防護眼鏡およびネックガードが使用されなくなる傾向にあることが示唆された。一方、平均診療時間と個人線量計および防護板の使用率には、弱い負の相関が認められた。診療時間が長いほど被ばく量が増大するにも関わらず、防護装具使用率が低下することは不自然であるが、被ばく線量が法令基準値を超えると業務に制限が加えられるため、それを恐れて個人線量計をあえて使用しない者がいる可能性も否定できない。また、防護板については視認性の問題も要因のひとつと考えられる。

なお、最新の研究で水晶体の被ばくは蓄積されることが分かっており、たとえ短時間であっても防護眼鏡を使用することが望ましいといえる。

7. 1. 4 経験年数別医師使用率比較

経験年数と防護装具の使用率に明確な相関は認められなかった。これは、防護意識が経験年数により培われるものではないことを示しており、経験が浅い内に正しい防護意識を身につけることは、被ばく低減において重要なことと考えられる。

7. 1. 5 医師へのアンケート調査

アンケート調査により、自身の被ばく線量を確認していない医師が大多数であることが明らかとなった。これは、線量報告書の見方が解りづらく、書かれた数値をどう判断すべきか分からないことが原因であると考えられる。また今回の調査で、線量報告書を毎月ではなく、数ヶ月分まとめて本人に渡しているという実態も判明した。このようなシステムでは、自身の被ばくに対する関心が失せる上、改善しようにも、いつ、何が悪かったのか分からない可能性もある。さらに、

線量限度を知らない医師が大多数であることや、防護意識の低さにより月ごとの個人線量計の交換に積極的でない者が多いことは、教育により速やかに改善すべき事柄である。

奥山らによる医師の被ばくに対する恐怖感の調査では 20%の者が、渡辺らによる看護師の透視時介助の不安についての調査では 54%の者が不安を感じると回答した [16, 42]。しかし、本研究では被ばくに対する不安感が 81%と高く、何らかの被ばく低減対策を行っている医師が 75%いることが明らかとなった。不安を感じている医師が多いということは、適切な教育を受ける機会さえあれば、防護装具の使用率が向上する可能性が高いと推測される。現状では、防護の基礎知識である放射線防護の 3 原則を知っている医師が 63%にとどまるため、正しい被ばく低減対策をとれていない可能性がある。今後、線量報告書の見方や正しい被ばく防護法などの教育が必要不可欠であるといえる。

7. 1. 6 医師と看護師の使用率比較

看護師の防護衣の全体使用率は 100%であり、医師と同様、看護師にも放射線防護における防護衣の重要性が認識されていることが分かった。また看護師は、マニュアルなどが無いにも関わらず、個人線量計や防護衝立の全体の使用率が医師よりも高く、100%もしくはそれに近い数値であった。看護師の方が医師よりも個人線量計を使用しているという傾向は Vano らの報告でもみられており [22]、看護師が個人線量計や防護衝立の重要性を認識していることを示している。看護学部では 1990 年代から大学設立に向けたカリキュラムの見直しが行われ、放射線教育の機会が激減している [42] が、先に述べた通り（本文 7.1.1）、医学生への講義回数や内容も不十分であり、学校での放射線防護教育が不足しているという点において、医師と看護師に差はないと考えられる。

しかし現場では、定期的に放射線安全管理講習が行われたり、学会等で教育の場が設けられたりするなど、防護知識を得る機会が多分にある。しかし、すべての放射線診療従事者が参加しているわけではなく、特に、医師はそういった講習会の出席率が悪いように見受けられる。奥山らの報告では、医師と比較して、看護師の方が被ばくに対して負の意識があること（表 7-1）や研修会後の意識の変容（表 7-2）が強いといったアンケート結果があり [16]、看護師が被ばくに対して敏感であることが推察される。反対に、医師は「患者のためなら被ばくは仕方ない」という自己犠牲が強いことが示されており（表 7-1）、このことが防護への無関心を招き、「バッチの必要性の理解度」の低さ（表 7-2）に繋がったと推察される。したがって、被ばくに対する意識の差が講習会の出席率にも影響し、防護知識の差が生まれ、両者に使用率の差を生じさせたと考えられる。そこで今後は、防護教育に対して興味を持つように講習方法を工夫し、医師に対する現場での教育を徹底する必要がある。各科の症例検討会等にこちらから出向き、その対象者の業務に特徴的

かつ適切な情報を短時間で提供し、防護に繋がる効率的な講習会の実施が理想的であると考えている。

表 7-1 医師と看護師の放射線被ばくに関するアンケート（奥山らの報告 [16] より一部変更して引用）

	医師（n=10）	看護師（n=12）
被ばくすることが怖い	20%	50%
できれば被ばくしたくない	60%	83%
患者のためなので被ばくは仕方がないと思っている	50%	17%

表 7-2 放射線被ばくに関する研修会後の意識の変容（奥山らの報告 [16] より一部変更して引用）

	医師（n=10）	看護師（n=12）
自分の被ばくに関しての意識が変化した	100%	100%
自分の被ばく低減方法を考えようと思う	100%	100%
ガラスバッチの着脱・必要性について理解が高まった	50%	100%

一方、防護眼鏡およびネックガードに関して見ると、看護師の全体使用率は医師よりも低く、さらにその個人使用率は、医師と同様に二極化していた。他の職種においてもいえることであるが、防護眼鏡やネックガードの使用によって生じる視認性の低下や暑苦しさなどの不快感には個人差があり、それによって個人使用率に差が生じた可能性がある。

看護師の被ばく線量は医師と比較すると低いが、X 線装置のそばで患者看護や状態観察などを行う場合には被ばく線量が高くなる可能性があるため [43]、正しい防護装具の使用は看護業務においても重要であるといえる。

7. 1. 7 その他放射線診療従事者の使用率比較

臨床工学士においても防護衣の全体の使用率は 100%であり、医師、看護師と同様に、放射線防護における防護衣の重要性が認識されていることが分かった。また、個人線量計の全体の使用率は医師よりも高く、看護師同様、個人線量計の重要性を認識していることを示している。一方、防護眼鏡およびネックガードの全体の使用率は医師よりも低く、個人使用率は最も高い者で 50%以下であった。このことは、看護師と同様に使用習慣の有無によるものとも考えられるが、臨床

工学士の作業場所は患者や X 線装置から離れているため、必ずしもすべての防護装具を使用する必要はない場合もあり [43, 44]，そのことが個人使用率の低さに繋がったと考えられる。

診療放射線技師においては、防護装具の個人使用率にばらつきは認められなかった。全員が個人線量計と防護衣を使用していたが、防護眼鏡とネックガードは使用していなかった。診療放射線技師は、学校教育において放射線に対する講義数が多いため、個人線量計と防護衣の必要性をより強く認識していると考えられる。また、作業場所が他の職種よりも X 線透視装置から離れているため、防護衣のみの軽装防護で良く、防護眼鏡やネックガードは不要であると判断していると考えられる [43, 44]。

7. 1. 8 血管系診療従事者の職種別使用率比較

血管系診療従事者における個人線量計の全体の使用率について、医師と医師以外の職種を比較してみると、医師が 60%程度なのに対し、医師以外の職種ではほぼ 100%であり、特に看護師、診療放射線技師と比較すると、医師の使用率は有意に低かった。そのため、医師の実際の被ばく線量は測定値よりも大きい可能性がある。正確な被ばく線量の把握のためにも使用率の向上が望まれる。

一方、防護眼鏡およびネックガードの使用率は医師が有意に高く、特にネックガードの個人使用率はほぼ 100%であった。一般に医師の被ばく線量は他の職種よりも高いといわれているため [6]，他の職種よりも防護意識がより強く働いたと推察されるが、それでも医師の防護眼鏡の使用率は 70%程度であり、上述したように個人線量計の使用率も低い。今後は各防護装具の使用意義を十分に理解し、今以上に防護意識を高める必要がある。

7. 1. 9 過去の報告との比較

2013 年、Vano らによりアルゼンチン（ブエノスアイレス）の冠動脈治療時における医師および看護師の個人線量計、防護衣、防護眼鏡、防護板の使用率に関するアンケート調査が報告されている [22]。その報告では、放射線診療従事者を水晶体混濁が認められた群と認められない群とに分けて調査しており、医師の個人線量計使用率はそれぞれ 48%，52%，防護眼鏡は 41%，52%，防護板は 46%，59%であった。それに対し、看護師の個人線量計使用率は 89%，88%で医師よりも高く、防護眼鏡使用率は 24%，15%で医師よりも低かった。これらの調査結果と本研究とを比較すると、看護師の防護眼鏡使用率が同程度、医師の防護装具使用率と看護師の個人線量計使用率は本研究の方が高かった。しかし、医師と看護師の使用率の比較において、その傾向は本研究と共通しており、どの病院においても職種による違いに同様の傾向がみられることが推察される。

また、ヨーロッパ6ヶ国（ベルギー、ギリシャ、フランス、スイス、ポーランド、スロバキア）で行われたIVR時の被ばくに対する調査 EURADOS Report [23] では、本研究と多少解析方式が異なるものの、冠動脈治療よりも消化管治療の方が防護眼鏡とネックガードの使用率が低いという共通した結果が報告されている。冠動脈治療時の防護眼鏡とネックガードの使用率自体は本研究の方が高かったが、これは、医師個人の被ばく防護意識の差が現れた結果と推察される。

さらに、Shin らによる韓国での ERCP 時の看護師と診療放射線技師の個人線量計、防護衣、防護眼鏡、ネックガードの使用についての調査 [24] と本研究とを比較すると、ネックガード使用率は本研究の方が圧倒的に低く、個人線量計使用率は本研究の方が高かった。本研究では血管系診療に限定して看護師と診療放射線技師の使用率を調査したため、彼らの調査結果と直接比較はできないが、防護衣使用率が高く、防護眼鏡使用率が低いという傾向は共通しており、医師以外の職種においても防護意識の差が伺える結果となった。

これらにより、本研究においても放射線防護が不十分な状況にあることが認められた。

7. 2 防護装具の使用率向上のための業務改善

7. 2. 1 放射線防護教育の実施とルールの継承

本研究によって、すべての職種において防護教育が重要であることが改めて確認された。「放射線診療従事者が防護衣を100%使用していた」ことや、「放射線被ばくに対して不安がある医師は80%であった」ことから、放射線診療従事者がその有害性を認識していることが推察できる。しかし、実際には防護装具の使用率は低く、その有害性から自身を護る手段（防護）についての知識は乏しいといえる。これは、先行研究においても類似した傾向（防護装具の使用率が低い）であり [22]、どの施設でも同様であることが推察される。原因として、放射線の安全利用についての訓練を受ける機会が少なく、ほとんどの放射線診療従事者が防護に対する知識の少ない状態で診療に従事していることが考えられる [2, 4]。患者の放射線防護は正当化と最適化で管理されるのに対し、放射線診療従事者の放射線防護は線量限度で管理される。さらに、組織反応を避けるための等価線量、将来の発がん等の影響を評価するための実効線量、放射線を表現する様々な単位、医療放射線、公衆衛生、放射線災害など、条件によって異なる対応が必要となる。こうした様々なロジックを整理して理解する必要があることも、放射線防護に対する理解を困難にしている原因と思われる。そこで、診療や職種ごとに、必要な防護装具の指導やマニュアルの作成が必要であると考えている。

実際の現場では、診療の種類によって、一部の防護装具の使用が難しい場合や不必要な場合があり、適宜必要なものを選択する必要がある（表 7-3）。例えば、脊髓腔造影検査では立位撮影が

あるため、一般的なオーバーチューブ型透視装置で使用されている防護カーテン（図 7-1）を使用することはできない。泌尿器診療においては、長さのある治療器具を使用することで患者や機械から距離をとることができるため、防護眼鏡やネックガードを使用せずに短時間で診療を行った方が被ばく低減に繋がる可能性が考えられる [17]。

表 7-3 診療ごとに使用可能な防護装具の一例

診療種	使用可能な防護装具
血管系診療	個人線量計，防護衣，防護眼鏡，ネックガード，防護板（衝立）
脊髓腔造影検査	個人線量計，防護衣，防護眼鏡，ネックガード，防護衝立
泌尿器診療	個人線量計，防護衣，防護カーテン，（防護眼鏡，ネックガード）
上記以外の非血管系診療	個人線量計，防護衣，防護眼鏡，ネックガード，防護カーテン



図 7-1 オーバーチューブ型透視装置で使用されている防護カーテン

また、職種や作業位置によっても被ばく線量は大きく異なる。例えば冠動脈診療時、医師は散乱線が発生する患者や機械の近辺で作業するため、防護装具のすべてを使用する必要がある。看護師や臨床工学士も、患者や機械の近辺で作業する場合には、医師と同様に防護装具のすべてを

使用する必要がある。しかし、診療放射線技師は患者や機械から離れて作業するため、必ずしもすべての防護装具を使用する必要はなく、個人線量計や防護衣のみの使用でよい。Haga らの報告によると、冠動脈治療時の医師の眼の等価線量は 19.59 ± 12.59 (mean $\pm$ SD) mSv/年であるのに対し、看護師は 4.01 ± 2.36 (mean $\pm$ SD) mSv/年と 5 倍程の差がある [37]。

このように、診療ごと、職種ごとに必要な防護装具が異なるため、実際に診療に従事する際に混乱する可能性がある。したがって、産業医や放射線技師が中心となって巡視を行い、「医師は防護装具を必ず使用する」、「看護師はできるだけ防護衝立を使用して作業する」、「患者や機械に近づく場合は防護装具の使用を徹底する」など具体的な回避策を指導すべきであり、必要な防護措置をマニュアル化するなど、現場の環境を整理することも必要であると考えている。

さらに、こうしたルールを各部署で継承していくことが重要である。ICRP でも報告されているように、指導医の防護方法はそのまま部下に受け継がれる。また本研究から、経験年数を重ねても防護意識は培われないことが明らかとなった。そのため新人のみを教育しても意味がなく、全ての放射線診療従事者に定期的な教育をする必要がある。具体的には、全ての放射線診療従事者に自身の線量を把握させ、低減に向けた適切な防護方法を指導すべきであり、場合により線量低減のための環境巡視などを行ってもよいと考えている。

またさらに、指導を行える放射線防護の専門家を擁立し、各職種の放射線関連の専門職（放射線技師であれば IVR 認定技師、看護師であればインターベンションエキスパートナースなど）において、教育や継承の核となる人材を育成することが重要であると考えている。そして、放射線診療に関わるすべての職種で構成した医用放射線安全管理委員会を開催し、定期的に情報共有を行い、新しい防護知識を現場にフィードバックする、つまり、現場に PDCA サイクルを構築することが、放射線防護対策の向上と継承において理想的である。

しかし、医療機関の現場では多忙な職種も多く、皆が一同に集まって教育を受けることは困難である。そのため、各部署において短時間で行う講義が、効率よく防護教育を実践できる方法の 1 つだと考えている。これは、専用教材を用いた 5 分程度の講義で、内容をジャンルごと（例えば、防護眼鏡に関することや立ち位置による被ばく線量に関することなど）で複数回に分けたり、e-Learning 方式を取り入れたりするなどの工夫をしたものである。防護教育は一朝一夕では叶わない。少しずつの積み重ねが重要である。

7. 2. 2 業務改善

防護装具使用促進の声掛け後、調査対象の防護装具の使用率はほぼ 100% となった。防護装具を使用しない理由の大半が「使用忘れ」あるいは「面倒」であったことに加え、被ばくに不安を感

じている医師や被ばくを少なくする工夫をしている医師の割合が元々高かった（図 5-5）ことが、声掛けによる使用率向上の要因と考えられる。これにより、医師の防護装具使用率向上には声掛けが大変有効であり、即効性もあることが明らかとなった。特に、放射線防護意識が比較的低いと考えられる非血管系診療の医師に効果があったことは、同様の業務改善を検討している医療機関にとって大いに参考となる事例といえる。よって、使用促進の声掛けは、今後も続けていくべき活動であると考えている。現状では、医師、看護師、臨床工学士は防護知識が乏しく、どの防護装具が必要かを理解していないことが本研究によって明らかとなったため、防護の目的と意義を一番理解している診療放射線技師が声掛けを行うことが望ましいと考えている。また、この声掛けは、診療が始まってからでは清潔準備のやり直しなどによって診療の進行に支障をきたす恐れがあるため、診療前の検査室に入るタイミングで行われるべきと考えている。しかし、「声掛け」が何らかの負荷になることは想像に難くない。実際、診療放射線技師の作業中に新たな人員が加わった際に対応できなかった事例も散見されている。あまり交流のない相手であれば、声掛けを行う者の負荷になる可能性もある。また、診療放射線技師は1～2名で検査や治療に従事していることが殆どなため、関わる多くのスタッフ全員に声掛けすることや、緊急時に声掛けすることは、時間的に難しいと考えられる。そこで、日頃から他職種とのコミュニケーションをとって防護知識や情報を共有し、チーム医療の一環として相互的に声掛けすることが大切であると考えている。

また現在、個人線量計の使用忘れ防止策として、オリジナルのストラップを作成して提供している（図 7-2）。これは、不均等被ばく用線量計にリングを取り付けたもので、左右どちらの首元でも使用可能となっている。



(a) 作成ストラップ



(b) 実際の使用例

図 7-2 使用忘れ防止ストラップ

さらに、医師に使用促進対策についての意見をアンケート調査したところ、「ポスター掲示」が挙げられた（図 7-3）ため、現在、検査室の入り口に被ばく低減策を盛り込んだポスター（図 7-4 [45]）を掲示している。今後は使用促進に特化したポスターの作成も検討している。

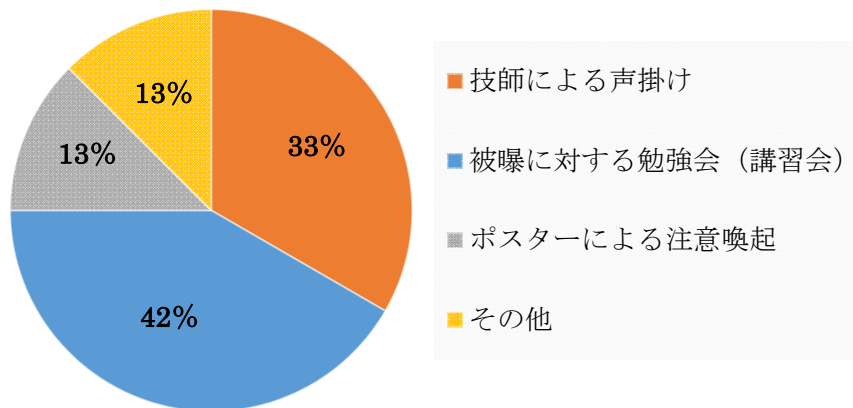


図 7-3 使用促進のための対策についてのアンケート調査（n=16）

エックス線透視における 従事者防護の要点: 10

1 防御デバイスの使用

90%以上の遮蔽能力

前合わせのプロテクター
0.25mm鉛当量を
使用すれば、
前方0.5mm鉛当量、
後方0.25mm鉛当量
の遮蔽能力を持つ。

スカートタイプ
のプロテクター
重さを分散できる。

防護メガネ
側面まで防護可能

頸部の防護

2 時間・距離・遮蔽の3原則

時間
短い時間で

距離
放射線発生源からの
距離を取る

遮蔽
遮蔽板・
防護衣の
活用

3 遮蔽板の利用

90%以上の遮蔽能力

これらの活用により、
散乱線を90%以上低減
できます。

可動型の遮蔽板

X rays

テーブルカーテン板

シネ血管撮影時は、可動型の
遮蔽板が望ましい。

**4 透視の視野に
手を入れないように
にする**

透視の中央部に手を入れることは、照射条件 (kV, mA) の増加につながり、患者とスタッフの放射線被ばくが増加します。どうしても避けることができない場合は、手を入れないようにします。

5 患者に照射された線量の1～5%だけが患者を通り抜ける

X線検出器（受像面）側に立つこと。検出器側の線量は入射線量のわずか1～5%となり、そこから散乱線も同様に減少しています。

正解 X線球 X線管球 X線管球 X線管球

誤り X線球 X線管球 X線管球 X線管球

6 X線管球は常にテーブルの下にあること

テーブルの上側にX線管球が設置する状態では、できる限り使用しない。アンダーチューブシステムは、散乱線の防止に効果的です。

正解 X線管球 X線管球 X線管球 X線管球

誤り X線管球 X線管球 X線管球 X線管球

7 個人線量計を着用する

少なくとも2つの線量計を装着すること

1個目 ▶ 胸部レベルの防護衣内側

2個目 ▶ 頸部または目のレベル

防護衣の外側で、さらに手がX線直接線源の近くで作業する場合、指リング線量計の追加使用がおすすめです。リアルタイム線量測定システムは、術者が手技毎に線量を確認できるため、被ばくの低減に有効です。

天井吊結線量計

2個目 頸部または目のレベルに装着

1個目 胸部のレベルで防護衣の内側に装着

防護衣

防護用テーブルカーテン

8 放射線被ばくに関する、あなたの知識を常に更新すること

9 放射線防護上の疑問点については「放射線科専門医」へ相談する

QA

10 透視装置の品質管理を怠らず、また特性に沿った適切な使用を心がけ、安全かつ安定した性能を保つこと

患者被ばくの減少は、つねに医療従事者の被ばく軽減につながります

IAEA

RPOP
Radiation Protection of Patients

ISEMIR
International System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research

日本医学放射線学会
日本インターベンショナルラジオロジー学会
医療放射線防護連絡協議会

図 7-4 掲示ポスター（日本医学放射線学会 [45] より引用）

しかし、防護装具そのものに衛生上の問題がある場合、声掛け・ストラップ・ポスターなどの対策を講じても使用率向上に繋がらない可能性もある。才田らより、使用後の防護装具は汗等により不衛生となり得ることが明らかとなっている[46]。皮膚の常在菌には黄色ブドウ球菌、アクネ桿菌、表皮ブドウ球菌などがあり、特に黄色ブドウ球菌は様々な感染症の原因となる[47]ため、共同利用の場合、人が媒体となって感染が広がる恐れがある。不衛生な防護装具の共同利用は、従事者に心理的抵抗感を持たせ、使用率の低下に繋がると考えられる。衛生面から考えて最も理想的なのは、個人で防護装具一式を購入することであるが、その費用は高額なため、現実的ではないと思われる。一部の者が防護眼鏡を個人使用している場合も見られるが、多くの施設が共同利用の防護装具を使用している。

そこで現状、できる限り従事者が心理的抵抗感を持たないように、使用後の手入れと整頓を徹底し、清潔感の維持に努めることが必要であると考えている。調査実施病院では、5S（整理、整頓、清掃、清潔、躰）活動に対する定期的な見回りを行い、整理整頓を維持している。また、ネックガードはディスプレイザブルカバーに入れて使用し、使用後に毎回カバーを廃棄することで、衛生面へ配慮している（図 7-5）。



(a) ネックガード



(b) ディスプレーザブルカバー



(c) ネックガード挿入位置

図 7-5 ネックガードとディスプレイザブルカバー

7. 2. 3 工学的システムの構築

人間は必ずミス（「忘れる」）を起こしてしまう。声掛けやストラップなどの業務改善だけでこういったヒューマンエラー [48] を完全になくすことはできない。特に緊急時等は診療放射線技

師も自身の持ち場の対応で余裕がなかったりする場合もあり得る。そこで、ミスを起こすことを前提として、それを防ぐためのシステム（機械的設備の開発等）が必要であると考えている [48-49]。これはリスク低減措置の優先順位で考えれば教育よりも上位にあたり [49]（表 7-4）、本来であれば教育よりも先に検討すべき事項である。しかし、涉猟した限りそのようなシステムはない。新たに作成するべく、今後の検討課題として取り組んでいきたいと考えている。

表 7-4 リスク低減措置の優先順位(中央労働災害防止協会の記載[49]より一部変更して引用)

優先順位	対策
高	設計や計画の段階における措置（危険な作業の廃止・安全な方法への変更等） 工学的対策（インターロック・安全装置） 管理的対策（マニュアルの整備・ばく露管理・教育訓練）
低	個人用保護具の使用（上記の措置を講じた場合において、除去・低減できなかったリスクに対して実施）

7. 3 本研究の被ばく線量について

本研究において、一番線量の高い医師の診療数は 115 症例／12 ヶ月で、実効線量は 13.9 mSv／年であった。この実効線量値は、年間の線量限度である 50 mSv/年を大きく下回っており、現状としては安全に管理されていることが明らかとなった。しかし、岩谷らの報告（表 7-5）と比較すると [18]，診療数が少ないにも関わらず、実効線量が高いことが明らかとなった。これは機械や手技の熟練度等の影響であると考えられる。

表 7-5 冠動脈診療と均等被ばく測定の線量（岩谷らの報告 [15] より一部変更して引用）

	冠動脈診療数（症例）	個人線量 (mSv／年)
医師 A	205	4.7
医師 B	221	4.5

また、同医師の眼の水晶体等価線量は 46.2 mSv／年であり、これが現行法令上の防護眼鏡をしていない場合のばく露量と推定される。この数値も、現行法令である 150 mSv／年を下回っているが、新規法令で予定されている線量限度の 100 mSv／5 年を大きく上回るペースであることが明らかとなった。測定した線量が法令上の線量限度を超えると、就労制限がかかる可能性がある。

Haga らは冠動脈診療時の眼の水晶体等価線量を測定しており [37] (表 7-6), 現行法令で定められた不均等被ばく測定より算出される数値は, 過大評価されていると報告している. なお, 水晶体の等価線量は測定位置によって変わってしまうため, できるだけ眼の近傍で測定することが望ましいと考えられる.

表 7-6 冠動脈診療時の眼の水晶体等価線量 (Haga らの報告 [37] より一部変更して引用)

	直接測定した水晶体等価 線量 mean±SD (mSv) *	現行法令での水晶体等価 線量 mean±SD (mSv) **	診療数 (症例)	透 視 時 間 mean±SD (分)
防護眼鏡有り (n=9)	3.1±1.3	11.4±6.4	134.1±80.2	1323±771
防護眼鏡無し (n=3)	6.3±5.1	5.0±2.6	84.0±64.2	1014±606

*眼の付近に線量計を配置して測定した線量

**個人線量計 (不均等被ばく 推定) より算出された線量

表 7-6 では防護眼鏡の有無に関する結果も示されており, 冠動脈診療時における防護眼鏡の被ばく低減効果は 50%程度であると推定される [37]. さらに他の先行研究では, CT 検査の介助者における防護眼鏡の被ばく低減効果は約 40%, 脊椎造影検査の施行医師における防護眼鏡の被ばく低減効果は約 40%であったと報告されている [50]. 水晶体等価線量は検査種や従事する頻度で異なり, 防護眼鏡を使用しないと年間の線量限度を超える可能性が大いにあるため, 放射線診療において防護眼鏡の使用は必須であると考えられる.

防護眼鏡は, 診療種, 鉛の厚さ, 眼鏡の形状によって被ばく低減効果が異なる. 一般的な眼鏡と同じ形のスタンダードタイプや, 側面まで覆われたゴーグルタイプなど様々な形状のものがあ
り, 中には, 使用者の向きによって隙間ができ, 防護効果が下がるものもある. また, 左右の眼で被ばく線量が異なることも報告されている [50]. そのため, 理論上の被ばく低減効果を得るには, 放射線源の方向に顔がまっすぐ向いていなければならず, 実際の使用における低減効果は理論値よりも低いものと思われる. 本研究において一番線量の高かった医師の水晶体等価線量を用いて, 白内障しきい値到達予測年数を概算すると, 防護眼鏡を使用した場合は 21.6 年, 使用しなかった場合は 10.8 年となる. つまり, 防護眼鏡の使用だけでは白内障を防ぐことはできず, 手技の熟練度向上や追加の被ばく低減措置をとる必要がある.

さらに, リスクを見積もるためにも, 個人の線量管理が必要である [49]. 個人線量測定を行う

際は、均等被ばく測定であるか、不均等被ばく測定であるかも大変重要である。種類（含鉛量）にもよるが、防護衣は約 90%の散乱線をカットすることができるため、防護衣の内側でのみ個人線量計を使用（均等被ばく測定）した場合、推定される水晶体等価線量はかなりの過小評価になると考えられる。千田の報告では、不均等被ばく測定を実施した場合、その水晶体等価線量は均等被ばく測定の場合と比較して約 3.8 倍高くなると示している [8]。そのため、防護衣を使用する際は、胸部もしくは腹部といった基本部位（防護衣の内側）以外にも一つ、頭頸部（防護衣の外側）にも個人線量計を使用（不均等被ばく測定）する必要がある。

7. 4 白内障リスクについて

放射線由来の白内障は、しきい値のある組織障害反応のことで、線量に依存する。また、被ばくから 30 年余り経たのちに発症する [27] 慢性期障害である。確率的影響とは異なり、線量が大きくなれば重篤度も上がるが、その発症頻度は放射線感受性の影響を受けて S 字型に増加する [27]。Vano らによる、IVR 従事者の眼の水晶体混濁についての報告（表 1-3）[22] では、水晶体混濁の有無は眼の水晶体等価線量に依存することが示唆されており、このような事例が、現在進められている法改正審議の契機となっている。

IVR は 1980 年代にアメリカで始まり、本邦では 80 年代中頃より普及した。現在では様々な疾患に適応可能となっており、その診療件数は爆発的に増加している。難しい症例では IVR に長い時間を要するため、被ばく線量が増加し、患者だけでなく IVR 施行医にも大きく影響を及ぼすが、普及当初は防護知識が不十分で、適切な対策がとられていなかった可能性がある。また、従来の透視装置は、その受像システムの構造から、経年劣化による輝度の低下を線量の増加で補うことが一般的であったため、同じ検査を行っても、装置の設置状況によって数倍の線量差があった可能性がある。Vano らの報告 [22] では、X 線管が上部にあった場合、IVR 施行医への影響が大きくなり [4]、水晶体混濁を生じさせる一因となると述べている。

以上により、放射線由来の白内障になる率の差は、機械の特性や防護対策の有無によって生じた線量の差によるものであると予測され、普及当初に適切な対策をとっていなかった者は、近年もしくは今後、白内障や水晶体混濁を発症する可能性が高いと推察される。放射線診療に長く従事する者は、十分な防護対策をした上で、電離健診で専門家による眼の検査を受ける必要があると感じている。

7. 5 本研究の産業医学的意義

本邦の過去の報告では、個人線量計から見た被ばく線量が低い理由を、「個人線量計を使用して

いない」，「間違った方法で使用している」，「場合によってはわざと使用していない，またそのような形跡がある」と推測していた [7, 15, 16, 18]．しかし，実際に現場で調査した報告はなく，その真偽は不明であった．また，その他の防護装具の使用状況を調査した報告は，これまでに国内には存在しない．本研究は，防護装具の使用状況を現場で実際に調査・分析した唯一の報告である．基安発 0418 では放射線診療時に防護装具を適切に使用させるよう通知しており，その遵守に際し，実際の使用状況の把握は必要不可欠である．本研究は，現状把握のための調査例として非常に意味があるといえる．

また，近々予定されている水晶体の法令基準値引き下げは，放射線被ばくによる白内障を引き起こす線量が，従来考えられていた値より大幅に低い（1/7 以下）ことを受けての措置であり，まさに職業病の発生を防ぐための措置であるといえる．本研究は，実際の防護具使用率データに加え，声掛けという簡易な方法で使用率を劇的に改善できることを示しており，職業病発生の防止策の事例として大いに参考になるため，産業医学的意義も大きいといえる．

第8章 総括

本研究では、本邦で初めてとなる「放射線診療における防護装具使用率に関する実態調査」を行なった。その結果、医師の防護衣以外の防護装具の使用率は低く、個人差が認められた。特に、非血管系診療や透視時間の短い検査に従事する医師は使用率が低く、その改善が今後の課題である。また、看護師や臨床工学士は防護眼鏡やネックガードの使用率が低く、個人差が認められた。看護師は患者介助などで被ばく線量が高くなる可能性があるため、医師同様に改善が必要である。一方、診療放射線技師は個人線量計と防護衣のみの軽装防護であり、個人差は認められなかった。

しかし、調査対象が1施設のみであるため、その使用率は本邦の現状を反映していない可能性も否定できない。今後、より多くの施設で調査することが必要であると考えている。

また、本研究によって得た、現場での放射線防護教育方法やルール継承（本文 7.2.1）の継続に加え、効果の高かった声掛けやポスター掲示などの放射線防護装具の使用率向上策（本文 7.2.2）を徹底し、今後さらに増加すると思われる放射線診療において、放射線診療従事者の放射線防護を促進していきたい。

さらに、現場でのミス（防護装具の装着を忘れる）を想定した、機械設備などの工学的防止システムの開発も視野に入れ、様々な対策方法を検討していきたい。

利益相反

本研究における利益相反はありません。

参考文献

1. JSIR (2018) : IVR って、なに？. JSIR, 埼玉 <http://www.jsir.or.jp> (Accessed on 09 October 2018)
2. Valentin J (2000): Avoidance of Radiation Injuries from Medical Interventional Procedures. ICRP Publication 85. Ann. ICRP 30 (2). 1st edition. Pergamon Press, Oxford. 日本アイソトープ協会 (2003), IVRにおける放射線傷害の回避. ICRP Publication85. 初版. 丸善株式会社, 東京 pp1-52
3. C.H.Clement (2012): Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs –Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context-. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41 (1-2). 1st edition. ELSEVIER, Amsterdam. 丹波太貫監修 (2017), 組織反応に関するICRP声明 正常な組織・臓器における放射線の早期影響と晩発影響-放射線防護の視点から見た組織反応のしきい線量-. ICRP Publication118. 初版. 日本アイソトープ協会, 東京 pp1-327
4. C.H.Clement (2010): Radiological Protection in Fluoroscopically Guided Procedures Performed Outside the Imaging Department. ICRP Publication 117. Ann. ICRP 40 (6). 1st edition. ELSEVIER, Amsterdam. 米倉義晴監修, 内山眞幸訳 (2017), 画像診断部門以外で行われる X 線透視ガイド下手技における放射線防護. ICRP Publication117. 初版. 日本アイソトープ協会, 東京 pp1-89.
5. 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 他 (2014) : 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (Ⅲ) -海外における放射線業務従事者の水晶体被曝レベルと防護に関する研究-. Jpn. J. Health Phys 49 (4) : 171-179
6. 千田浩一 (2012-3) : 医療被ばく・職業被ばくの現状と対策. 日本臨床 70 (3) : 479-484
7. 赤羽恵一 (2006) : 放射線従事者の被ばく線量評価. 臨床画像 22 (2) : 168 (36) -177 (45)
8. 千田浩一 (2008) : IVR 術者被曝の計測評価と防護. 日本放射線技術学会雑誌 64 (8) : 1009-1014.
9. 坂本肇, 小林寛, 池川博昭, 大島信二, 相川良人, 佐野芳知, 荒木力 (2006) : 面積線量計による術者被曝線量推定に関する検討. 日本放射線技術学会雑誌 62 (7) : 951-960
10. 佐々木洋 (2015) : 放射線による細胞死 白内障. 病理と臨床 33 (1) : 44-49
11. 永井良三, 栗井一夫, 谷樹昌, 他 (2012) : 循環器診療における放射線被ばくに関するガイドライン (2011年改訂版). http://www.j-circ.or.jp/guideline/pdf/JCS2011_nagai_rad_h.pdf (Accessed on 09 October 2018)
12. E. Vano, L. Gonzalez, F. Beneytez & F. Moreno (1998): Lens injuries induced by occupational exposure in nonoptimized interventional radiology laboratories. Br. J. Radiol 71: 728-733
13. 厚生労働省 (2018) : 電離放射線障害防止規則等について～医療従事者に係る事項～. 厚生労働省, 東京 <https://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-10801000-Iseikyoku-Soumuka/0000191785.pdf> (Accessed on 09 October 2018)
14. 木曾まり子, 古川善也, 篠原芙美, 齋宏, 坂野文香, 松本能里 (2014) : ERCP検査時の放射線防護具の作成とその効果について. 胆道 28 (1) : 59-65
15. 岩井計成, 河端京介, 嵯峨根満, 口井信孝 (2017) : 個人線量計 (ガラスバッジ) による放射線被ばく管理. 日本赤十字社和歌山医療センター医学雑誌 34 : 79-87
16. 奥山祐右, 奥山智緒, 川上巧, 中津川善和, 山田真也, 鈴木隆裕, 戸祭直也, 佐藤秀樹, 吉田憲正 (2016) : ERCP 施行時の被曝線量評価と放射線防護教育. 日本消化器内視鏡学会雑誌 58 (4) : 991-998
17. 工藤大輔, 岡田真介, 藤田雅一郎, 伊波恵, 本宿基一, 三浦浩康 (2014) : f-TUL における X 線透視 : 術者被ばく低減についての検討. Japan Journal of Endourology 27 : 193-199
18. 岩谷佳美, 加賀勇治, 芳賀喜裕, 荒井剛, 山田文夫 (2011) : 術者の被曝線量 : 左橈骨アプローチにおける術者の被曝管理. 心臓 43 (1) : 25-30
19. 浜田信行 (2018) : 眼の水晶体に関する生物学的・疫学・放射線防護. 公益財団法人 放射線影響協会, 東京 http://www.rea.or.jp/kikaku/rea_news/news/2018_95.pdf (Accessed on 09 October 2018)
20. 厚生労働省 (2017) : 放射線業務における眼の水晶体の被ばくに係る放射線障害防止対策について. 厚生労働省, 東京 (Accessed on 09 October 2018)
21. 千代田テクノル (2014-2018) : 個人線量の実態 (FBNews 第453～501号). 千代田テクノル, 東京 <http://www.c-technol.co.jp/fbnews> (Accessed on 09 October 2018)
22. Eliseo Vano, Norman J. Kleiman, Ariel Duran, Mariana Romano-Miller & Madan M. Rehani (2013): Radiation-associated Lens Opacities in Catheterization Personnel: Results of a Survey and Direct Assessments. Journal of Vascular and Interventional Radiology 24(2) : 197-204

23. F. Vanhavere, E. Carinou, G. Gualdrini, et al. (2012): Optimization of radiation protection of medical staff. EURADOS report 2012-02. 1st edition. Braunschweig: European Radiation Dosimetry e. V. pp1-132
24. Jae Min Shin, Tae Hoon Lee, Sang-Heum Park (2013): A Survey of the Radiation Exposure Protection of Health Care Providers during Endoscopic Retrograde Cholangiopancreatography in Korea. Gut and liver 7(1) : 100-105
25. ICRP (1959): Recommendations of the international Commission on Radiological Protection. Now known as ICRP Publication 1. 1st edition. Pergamon Press, New York. 山崎文男編集 (1960), 国際放射線防護委員会勧告. ICRP Publication1. 初版. 日本放射性同位元素協会, 東京 pp1-56
26. ICRP (1977): Recommendations of the international Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1 (3). 1st edition. Pergamon Press, Oxford. 日本アイソトープ協会訳 (1977), 国際放射線防護委員会勧告. ICRP Publication26. 初版. 丸善株式会社, 東京 pp1-90
27. 柴田徳思 (2016) : 放射線概論-第1種放射線試験受験用テキスト-. 第9版. 通商産業研究社, 東京 pp1-874
28. ICRP (1990): Recommendations of the international Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3). 1st edition. Pergamon Press, Oxford. 日本アイソトープ協会訳 (1991), 国際放射線防護委員会の1990年勧告. ICRP Publication60. 初版. 丸善株式会社, 東京 pp1-231
29. ICRP (2007): The 2007 Recommendations of the international Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4). 1st edition. ELSEVIER, Amsterdam. 日本アイソトープ協会訳 (2009), 国際放射線防護委員会の2007年勧告. ICRP Publication103. 初版. 丸善株式会社, 東京 pp1-277
30. 日本原子力文化財団 (2018) : 原子力エネルギー図面集. 日本原子力文化財団 <https://www.ene100.jp/zumen> (Accessed on 09 October 2018)
31. 松本進 (2013) : 被ばく線量と個人線量計. 日本放射線技術學會雑誌 69 (7) : 795-805
32. 厚生労働省 (2018) : 電離放射線障害防止規則. 厚生労働省, 東京 http://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=347M50002000041&openerCode=1 (Accessed on 09 October 2018)
33. 厚生労働省 (2018) : 医療法. 厚生労働省, 東京 http://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=323AC0000000205&openerCode=1 (Accessed on 09 October 2018)
34. 鈴木朗史, 鈴木武彦, 高橋聖, 仲田亨, 村山卓, 角田昌彦 (2015) : 外部被ばく個人線量測定用 OSL 線量計の諸特性. 初版. 日本原子力研究開発機構, 茨城 pp1-19
35. 日本画像システム工業会 (2016) : 診断用 X 線に対する防護用具 第 3 部 : 防護衣, 防護眼鏡及び患者用防護具. 日本画像システム工業会, 東京 <http://kikakurui.com/t6/T61331-3-2016-01.html> (Accessed on 09 October 2018)
36. 日本画像システム工業会 (2016) : 診断用 X 線に対する防護用具 第 1 部 : 材料の減弱特性の決定方法. 日本画像システム工業会, 東京 <http://kikakurui.com/t6/T61331-1-2016-01.html> (Accessed on 09 October 2018)
37. Haga Yoshihiro, Chida Koichi, Kaga Yuji, Sota Masahiro, Meguro Taiichiro, Zuguchi Masayuki (2017) : Occupational eye dose in interventional cardiology procedures. Scientific Reports 7(1) , 569
38. 日本画像システム工業会 (2007) : 医用画像・放射線機器ハンドブック. 日本画像システム工業会, 東京 http://www.jira-net.or.jp/publishing/files/publishing_handbook2007.pdf (Accessed on 09 October 2018)
39. 石口恒男 (2002) : IVR の被ばくとその対策-放射線科医の立場から. 日本医学放射線学会雑誌 62 (7) : 356-361
40. 光武範吏, 山下俊一 (2010) : 放射線被曝と甲状腺癌. 日本内科学会雑誌 99 (4) : 104-109
41. 最上拓児, 小野澤志朗, 西尾福英之, 中島康雄, 興梠征典, 荒井保明 : (2016) 放射線科 IVR 分野の卒前教育に関する実態調査. 日本インターベンショナルラジオロジー学会雑誌 31 (4) : 366-369
42. 渡辺明美, 寺崎敦子, 鎌田雅子 (2015) : 看護師の放射線に関する知識と不安の現状と関連性について. 日本放射線看護学会誌 3 (1) : 54-64
43. 森泰成, 越田吉郎, 藤井友則, 市川勝弘 (2007) : IVR に従事する看護師の被ばく形態の把握と管理手法の検討. 日本放射線技術學會雑誌 63 (4) : 401-411
44. 大登邦充, 栗井一夫, 鶴田, 隆雄 (2003) : X 線撮影装置周辺における散乱線量率の簡易計算法. 日本放射線安全管理学会誌 2 (2) : 58-67.

45. 日本医学放射線学会（2017）：エックス線透視における従事者防護の要点 10. 日本医学放射線学会，東京 <http://www.radiology.jp/content/files/20170111.pdf> (Accessed on 01 January 2019)
46. 才田壽一，吉岡孝之，清水幸三，荒井剛，高橋健，佐藤俊光，吉岡大輔（2006）：IVR における術者負担の少ない防護用具の開発（第 2 報）．全国循環器撮影研究会誌 18：14-19
47. 小林寛伊編集（2003）：皮膚常在菌について．ヨシダ製薬，東京 <http://www.yoshida-pharm.com/2003/letter17/> (Accessed on 01 January 2019)
48. 谷口勇仁（2009）：企業事故研究におけるヒューマンエラー研究の構図と課題．経済学研究（北海道大学） 58（4）：261-270
49. 中央労働災害防止協会（2018）：リスクアセスメント．中央労働災害防止協会，東京 <https://www.jisha.or.jp/oshms/ra/about02-05.html> (Accessed on 01 January 2019)
50. 盛武敬（2017）：第 4 回眼の水晶体の放射線防護検討部会．原子力規制委員会，東京 <http://www.nsr.go.jp/data/000209654.pdf> (Accessed on 04 January 2019)

放射線従事者被ばくに対する意識調査

この度、放射線従事者の作業環境を良くすること、将来の健康を護ることを目的として、アンケートを実施することになりました。つきましては、以下のアンケートにお答えいただき、率直なご意見・ご要望をお聞かせください。よろしくお願い致します。

Q1 あなたのお名前をお知らせください。

()

Q2 あなたの性別をお知らせください。

☐男性 ☐女性

Q3 あなたの年齢をお知らせください。

(歳)

Q4 あなたの職種をお知らせください。

☐医師 ☐看護師 ☐診療放射線技師
☐臨床工学士 ☐臨床検査技師 ☐その他 ()

Q5 あなたの経験年数（学校卒業後）をお知らせください。

(年目)

Q6 ご自身の毎月の被ばく線量を確認していますか。

☐確認している ☐確認していない

Q7 確認していない理由は何ですか。（Q6で確認していないを選んだ方のみで結構です）

☐忘れてしまう ☐面倒 ☐興味がない ☐存在・手段を知らない
☐その他 ()

Q8 ご自身の被ばくに対して不安はありませんか。

☐ 不安がある ☐ 不安はない

Q9 ご自身の被ばくを少なくするために何か意識していることはありますか。
また、それは何ですか。あれば、() に記載して下さい。

☐ している ☐ していない

()

Q10 放射線防護三原則を知っていますか。

☐ 知っている ☐ 知らない

Q11 法律で決まっている放射線従事者に対する線量限度を知っていますか。

☐ 知っている ☐ 知らない

Q12 被ばくに対して知りたいこと等ありましたら、ご自由にお書きください。

--

*今回得られた集計結果は、後日、報告する予定にしております。今後の参考にして頂ければ幸いです。

ご協力ありがとうございました。

平成30年度厚生労働省労災疾病臨床研究事業費補助金

平成30年度 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（180501-1）

分担研究者 古渡 意彦

（日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課 主査）

平成31年（2019年） 3月

目次

I． 分担研究報告 1

II． 分担研究報告 3 1

以上

I. 分担研究報告

除染等業務に従事する作業者の眼の水晶体等価線量の適切な評価 に関する研究

分担研究者 古渡 意彦

(日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課 主
査)

研究要旨

ICRP の 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、年間 150 mSv から 5 年平均で年 20 mSv の大幅な引き下げを取り入れた。我が国においても、放射線審議会眼の水晶体の放射線防護検討部会において検討された結果、計画被ばく状況における職業被ばくに関する水晶体の等価線量限度を 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、と意見具申された。

本研究では、特に除染等業務に従事する作業者について、体幹部で評価された線量から適切な等価線量評価手法について検討した。事業の初年度である 2018 年度は、以下のとおり課題を設定し、研究を遂行した。

(1) 作業者の被ばく源となる線源について検討し、主に放射性セシウムによるものであることが確認された。

(2) 除染等業務に従事する作業者の被ばく状況について検討を行った。検討の結果、内部被ばくによる寄与は小さく、外部被ばくが中心であり、主に放射性セシウムからの γ 線からの外部被ばくが中心であった。さらに、除染等業務の具体的な作業により均等被ばく及び不均等被ばく状況の両方が考慮されることが分かった。

(3) 体幹部線量と眼の水晶体及び末端部等価線量との相関について、均等被ばく及び不均等被ばく状況での評価を行った。ISO 及び ROT 照射条件で均等被ばく状況を模擬して評価した結果、 γ 線に対する体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、60 keV~1.25 MeV の範囲内で、1.2~1.3 となった。さらに不均等被ばく状況の評価のため、面状及び体積線源を導入して評価を行った結果、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、1.0~1.9 で評価可能であった。このことから、現行法令が指定する眼の水晶体線量の推定手法を用いた場合でも、ISO publication 75 のいう factor 1.5 程度で推定できる可能性が確認できた。

A. 研究目的

本研究は、除染等業務に従事する作業者

が受ける眼の水晶体における被ばく等価線量を適切に評価する手法の開発を目的としている。除染等業務に従事する作業者に限

らず、放射線及び放射線源を取り扱う放射線業務従事者の被ばくの現状を考慮すると、眼の水晶体のみ、あるいは手指、足等末端部のみ極端に被ばくするような、特殊な被ばく事例は少ない[1]。現状では、眼の水晶体及び末端部等価線量の推定手法は提示されている。(電離放射線障害防止規則では、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。)しかしながら、後述のとおり眼の水晶体等価線量の年間線量限度の引き下げを考慮すると、現行の眼の水晶体等価線量の推定手法についての適応範囲とその限界については議論されるべきである。

本研究の背景には、国際放射線防護委員会(ICRP)による2011年ソウル声明で眼の水晶体被ばく線量限度が一年間で150mSvから年平均20mSvへと大幅に下げることが勧告されたことを契機に、国際原子力機関(IAEA)、EU及び米国においても、眼の水晶体等価線量の線量限度引き下げを導入したことにある[2],[3]。我が国においても、以前より放射線業務従事者の眼の水晶体被ばくに対する包括的な調査が開始されており[1],[4]、放射線審議会においても検討部会での審議の結果、「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、ソウル声明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。」と意見具申された[5]。

2019年3月現在において、我が国では、放射線業務従事者の眼の水晶体及び手指等

の末端部における等価線量は、眼の水晶体を含めた頭頸部、または手指、足等の末端部について、「最も多く放射線にさらされるおそれのある部位」である場合、当該放射線業務従事者に対して専用の線量計が準備され、それぞれの部位に対する等価線量の評価に供される。一方で、除染等業務を含む、工業・原子力・学術分野における放射線業務従事者に対しては、そのような特殊な被ばくを受ける作業は非常に限られており、一般的に実施されている個人モニタリングについていうと、放射線業務時に体幹部で測定された1cm線量当量を実効線量として外部被ばく線量としている。

本研究では、放射線業務従事者のうち、除染等業務に従事する作業者に注目し、眼の水晶体の等価線量を体幹部での測定により得られた1cm線量当量、70 μ m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、眼の水晶体における被ばく等価線量の相関を詳細に検討することで、体幹部線量から眼の水晶体等価線量が推定可能か検討を行う。

上述の研究目的と目的達成のための課題解決のため、以下の課題を設定する。

- (a) 除染等業務に従事する作業者はどのような放射性核種によりどのような状況で被ばくするのか
- (b) 実際の除染等業務における作業環境下での体幹部線量と眼の水晶体等価線量の間にはどのような相関があるか。
- (c) 現在行われている個人モニタリングにおける眼の水晶体等価線量の推定方法は、どの状況において適応可能か。特に不均等被ばく状況下では、作業者の不均等被ばくはどの程度か。

上記の課題に解答するため、次項B. 研究方法に挙げる4テーマを設定し、研究を遂行した。

なお、本分担研究において、「除染等業務」は、「除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン」[6]に示された定義に従うものとする。

ガイドラインによれば、

「(1)「除染等業務」とは、土壌等の除染等の業務、特定汚染土壌等取扱業務又は廃棄物収集等業務をいうこと。

なお、汚染対処特措法に規定する除染特別地域等における平均空間線量率が $2.5\mu\text{Sv/h}$ を超える場所で行う除染等業務以外の業務（以下「特定線量下業務」という。）を行う場合は、除染電離則の関係規定及び「特定線量下業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン」（平成24年6月15日付け基発0615第6号）が適用されること。

(2)「土壌等の除染等の業務」とは、原発事故により放出された放射性物質（電離放射線障害防止規則（昭和47年労働省令第41号。以下「電離則」という。）第2条第2項の放射性物質に限る。以下「事故由来放射性物質」という。）により汚染された土壌、草木、工作物等について講ずる当該汚染に係る土壌、落葉及び落枝、水路等に堆積した汚泥等（以下「汚染土壌等」という。）の除去、当該汚染の拡散の防止その他の措置を講ずる業務をいうこと。」とされている。

B. 研究方法

研究期間3か年内で体幹部線量から眼の水晶体の組織等価線量の合理的な評価手法を確立するため、本事業初年度にあたる平成30年度では、除染等業務に従事する作業員について、以下に示す(a)、(b)及び(c)の3テーマを並行して進め、(d)の予備調査を実施した。

(a) 除染等業務における被ばく源となる線源

(b) 除染等業務に従事する作業員が被る被ばく形態に関する検討

(c) 除染等業務における作業員の被ばく状況に関する検討

(d) 各業務における作業員の体幹部線量に対する眼の水晶体被ばく線量の比についての評価

本研究において、初年度の平成30年度は、(a)の除染等業務における被ばく源となる線源について、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故によって放出された放射性物質について検討を進めた。(b)及び(c)について、除染等業務に従事する作業員の具体的な作業を、聞き取り及び文献調査を行うことで、作業員が受ける放射線被ばくの形態及び被ばく状況に評価した。上記の項目についての評価を終えたのち、

(d) 各業務における作業員の体幹部線量に対する眼の水晶体被ばく線量の比に関する検討

を、分担研究者らが開発した計算シミュレーションによる手法を適応して求めた。

(a) 除染等業務における被ばく源となる線源

本研究では、前述の通り「除染等業務」は、「除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン」[6]の定義に従うこととする。したがって、本分担報告書中では、放射線業務従事者が放射性物質等による汚染を除去する行為を指す、広義の「除染」についての評価までは行わない。これにより、除染等業務において作業者の被ばく源となる線源の対象が絞られる。

2011年(平成23年)3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う福島第一原子力発電所事故によって放出された放射性物質により、環境への甚大な汚染が生じ、平成23年8月30日に「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」(平成23年8月30日法律第110号。以下、「放射性物質汚染対処特措法」という。)が公布された。この法令は、前記の東京電力福島第一原子力発電所事故によって放出された放射性物質による人の健康又は生活環境に及ぼす影響を速やかに低減することを目的としている。したがって、本研究における除染等業務において作業者が被ばくする放射線源として、東京電力福島第一原子力発電所事故に起因して環境中に放出された放射性物質が対象となる。

本研究では、福島第一原子力発電所事故に伴い放出された放射性物質について、放出源である原子炉からの放出量を、原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)電離放射線の線源、影響およびリスク UNSCEAR 2013 年報告書 国連総会報告書 第I巻 科学的附属書A 2011年東日本大震災後の原子力事故による放射

線被ばくのレベルと影響 [7] から引用する。(表1参照)

さらに、東京電力福島第一原子力発電所事故直後に文部科学省によって実施された緊急時モニタリングで得られた土壌中の放射能濃度[8]についても適宜引用し評価を進める。なお、本研究においては、緊急時モニタリングによる土壌中放射能濃度の測定結果については、東京電力福島第一原子力発電所事故による放射性物質放出の一か月後にあたる平成23年4月11日以前に試料採取された測定結果を用いることとした。

(b) 除染等業務に従事する作業者が被る被ばく形態についての評価

一般に、放射線業務従事者の被る被ばく形態には、①外部被ばく及び②内部被ばくに大別される。

「除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン」[9]によると、除染等事業者に対し、作業場所の平均空間線量率が追加線量で、 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ (週40時間、52週換算で、 5mSv/年 相当)を超える場所において除染等作業を行わせる場合、除染等業務に係る作業に従事する作業者の外部及び内部被ばく線量測定が求められる。これらは、

- ・ 外部被ばく線量：個人線量計による測定
- ・ 内部被ばく線量測定：作業内容及び取り扱い汚染土壌等の放射性物質の濃度等に応じた測定

となっている。特に、放射性セシウムの濃度が 50万 Bq/kg を超える汚染土壌等(高濃度汚染土壌等)を取り扱い、粉じんの濃度が 10mg/m^3 を超える作業(高濃度粉じん作業)に従事する場合には、3月に1回の内部被ばく測定が求められる。

本研究では、除染等業務に従事する作業者が、外部及び内部被ばくのいずれを被るのか、文献及び聞き取り調査を中心に検討を行った。

文献調査は、次の2つの報告書を用いて進めた。

- ・福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務 報告書 [10]
- ・東京電力福島第一原子力発電所事故により放出された放射性物質汚染の除染事業誌 [11]

聞き取り調査については、文献[10]の受託先である日本原子力研究開発機構の担当

(c) 除染等業務における作業者の被ばく状況

本研究の目的は、除染等業務に従事する作業者が受ける、眼の水晶体等価線量がどの程度になるか、適切に評価する手法を見出し、妥当な眼の水晶体等価線量を推定できる手法構築の一助となることを目標としている。

一般に眼の水晶体への放射線被ばくを考慮する場合、放射線業務従事者の、身体内部からの放射線及び身体外部から到達する放射線による被ばくに大別されうる。このう

表1 大気中に放出された被ばく上重要な放射性核種の推定総放出量
UNSCEAR2013年報告書からの引用[7]

放射性核種	半減期	大気中への総放出量 (Bq)
^{132}Te	3.204 day	2.85×10^{16}
^{131}I	8.0252 day	1.24×10^{17}
^{132}I	2.295 hour	2.85×10^{16}
^{133}I	20.83 hour	9.56×10^{15}
^{133}Xe	5.2475 day	7.32×10^{18}
^{134}Cs	2.0652 year	9.01×10^{15}
^{136}Cs	13.04 day	1.77×10^{15}
^{137}Cs	30.08 year	8.83×10^{15}

者及び文献[11]の除染事業を担当した環境省の担当者への聞き取り調査を行った。なお、聞き取り調査については、人を対象とする医学系研究に関する倫理指針等の倫理への配慮について、研究対象となる除染等業務に従事する作業員及び事業者等に対し、直接的かつ具体的な聞き取りは行っておらず、公開文書である報告書の記載についてのみ聞き取りを行っている。したがって、当該倫理指針等で配慮すべき倫理等に該当しない。

ち、放射線業務従事者の身体内部に取り込まれた放射性物質からの放射線による眼の水晶体への被ばくは、放射線業務従事者の全身にβ線及びγ線放出核種が均一に取り込まれた際、またはβ線のみ放出する核種の場合は眼の水晶体近傍に取り込まれた場合(または制動放射によって)には十分に起こりうる。しかしながら、このような状況は原子力事故時の緊急時対応者が放射線防護装備を一切装着していない状況のような、非常に極端な事例を考慮する必要がある。

本研究で取り扱う作業者は、除染等業務に従事する作業者であり、当該作業者は計画被ばく状況における放射線業務従事者といえる。この場合、より注目すべきは、作業者の外部からの放射線被ばくであり、特にβ線及びγ線からの外部被ばくの評価が行われるべきである。外部被ばくの状況としては、①均等被ばく状況及び②不均等被ばく状況に大別される。不均等被ばく状況については、電離放射線障害防止規則第八条第3項において、以下の記述があり、体幹部で測定された個人線量当量が、全身に均等に被ばくした状況下で得られた測定値と想定されない場合の記載があり、そのような場合を②不均等被ばく状況と定義できる。「3 第一項の規定による外部被ばくによる線量の測定は、次の各号に掲げる部位に放射線測定器を装着させて行わなければならない。ただし、放射線測定器を用いてこれを測定することが著しく困難な場合には、放射線測定器によつて測定した線量当量率を用いて算出し、これが著しく困難な場合には、計算によつてその値を求めることができる。

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

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

三 最も多く放射線にさらされるおそれのある部位が頭・頸部、胸・上腕部及び

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

前述の通り、現状において、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。これは、①放射線業務従事者の被ばく状況が均等被ばく状況に当てはまりうる、②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、及び③現行の個人モニタリング手法での眼の水晶体等価線量の推定がある部分で有効に機能している、という点から考慮して十分に妥当である。

しかしながら、除染等業務においては作業者が行うあらゆる作業が、作業者の全身に均一に放射線にばく露されるものとは言えない（例えば局所的な除染であるホットスポット除染等）。ホットスポットを点線源のようなものと仮定すれば、点線源が顔面近傍に存在し、眼の水晶体一点線源間の距離が、個人線量計を取り付けた体幹部一点線源間の距離より近い場合、眼の水晶体等価線量がより強調される状況、すなわち不均等被ばく状況が考慮される。

そこで、除染等業務に従事する作業者の均等被ばく及び不均等被ばく状況について、前述の(b)と同様の文献及び聞き取り調査を中心に検討を行った。

(d) 各業務における作業者の体幹部線量に対する眼の水晶体被ばく線量の比に関する検討

本研究では、除染等業務に従事する作業者が受ける、眼の水晶体等価線量がどの程

度か、適切に評価する手法を見出し、妥当な眼の水晶体等価線量を推定できる手法構築の一助となることを目標としている。

現行の個人被ばく線量モニタリングでは、除染等業務に従事する作業者の被ばくは、均等被ばく状況で十分仮定されると位置づけられており、作業者の体幹部で測定された被ばく線量を適切にモニタリングすることに注力されてきた。そのため、除染等業務の各作業において、作業者の眼の水晶体等価線量がどの程度になるか、特段注意が払われてこなかった。

そこで、分担研究者らが別途整備した計算シミュレーションを用いて評価を行った[12],[13]。放射線業務従事者の被ばくの不均等の度合いは、眼の水晶体及び末端部線量/体幹部線量の比で評価することとし、ここでは喫緊の課題である眼の水晶体線量/体幹部線量の比に着目した。

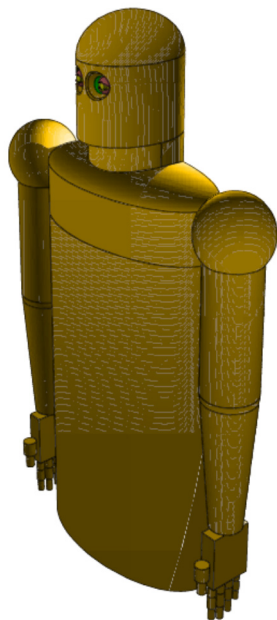


図1 計算シミュレーションに使用した数学ファントム

計算シミュレーションに使用したコードは、我が国で開発され、医療分野のみならず種々の分野で使用実績の豊富な PHITS であり、除染等業務に従事する作業者の人体を人体模擬数学ファントム（以下、「数学ファントム」という。）で模擬した。数学ファントムには、ICRP116で眼の水晶体の防護量に係る換算係数を計算するのに使用されたファントムを採用し、当該ファントムに腕及び手指を追加して、腰から上までを模擬した。数学ファントムは、モニタリングで使用される実用量である線量当量を正當に評価することを考慮し、ICRUの指定する人体等価物質とした。（図1参照）

数学ファントムを用いた体幹部及び眼の水晶体線量評価では、現行の個人モニタリングの線量計測の枠組みで用いられている、1cm 線量当量、3mm 線量当量及び $70\mu\text{m}$ 線量当量の定義に従って、数学ファントム内に吸収線量を測定する領域を設定した。体幹部における 1cm 線量当量、3mm 線量当量及び $70\mu\text{m}$ 線量当量の評価のため、数学ファントム左胸部中央深さ 10 mm、3 mm 及び $70\mu\text{m}$ の位置での線量を求めた。眼の水晶体等価線量評価に用いられることが検討されている眼の水晶体における 3mm 線量当量は、数学ファントムの眉間中央部分の深さ 3 mm 位置での線量を求めた。吸収線量計算に使用した領域は、眼の水晶体位置で、 $1.0\text{ cm}^{(L)}\times 3.69\text{ cm}^{(W)}\times 0.01\text{ cm}^{(D)}$ であり、体幹部では、 $1.0\text{ cm}^{(L)}\times 6.18\text{ cm}^{(W)}\times 0.01\text{ cm}^{(D)}$ である。なお、吸収線量領域のサイズは、計算シミュレーション時の単位輸送粒子当たりの吸収線量に与える統計精度と線量評価の深さ位置への影響が小さくなることを考慮して選択された。線源

表2 大気中に放出された被ばく上重要な放射性核種の総放出量の経時変化。各放射性核種の半減期による減衰のみ考慮。

放射性核種	半減期	計時変化後の大気中への総放出量 (Bq)			
		2011年4月11日 1か月後	2011年9月11日 6か月後	2012年3月11日 1年後	2013年4月11日 2年後
^{132}Te	3.204 day	3.49×10^{13}	1.47×10^{-01}	1.17×10^{-18}	—
^{131}I	8.0252 day	8.52×10^{15}	1.55×10^{10}	2.31×10^{03}	4.71×10^{-11}
^{132}I	2.295 hour	—	—	—	—
^{133}I	20.83 hour	1.69×10^{05}	0—	—	—
^{133}Xe	5.2475 day	1.22×10^{17}	2.04×10^{08}	7.39×10^{-03}	8.51×10^{-24}
^{134}Cs	2.0652 year	8.76×10^{15}	7.61×10^{15}	6.44×10^{15}	$4.60 \times 10^{+15}$
^{136}Cs	13.04 day	3.41×10^{14}	1.00×10^{11}	6.29×10^{06}	2.36×10^{-02}
^{137}Cs	30.08 year	8.81×10^{15}	8.73×10^{15}	8.63×10^{15}	8.43×10^{15}

からの光子が数学ファントムに直接付与されるエネルギー沈着を単純かつ保守的に推定する目的で、線源光子のエネルギーの違いによる、空気に対する光子の散乱及び吸収の違いが数学ファントムに入射する光子の量及びエネルギーに与える影響を除外するため、計算体系からは空気を除いて計算した。そのため、実際の被ばく状況とは空気の存在による違いが生じることが考えられる。具体的には、体表面に到達する光子成分に、散乱成分の混入が考慮されるが、後述の通り、ベンチマーク試験の結果では、有意に違いは見られなかった。

計算シミュレーションで求めた体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の妥当性については、複数のアクリル製水槽を組み併せて人体を模した簡易物理ファントムを用いた基準校正場における照射試験及び実際の放射線作業が行われる放射線作業場での実験により得られた結果との比較により検証された。計算シミュレーションで得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比と、基準放射線校正場での照射試験及び

放射線作業場での照射試験において、体幹部及び眼に相当する箇所に取り付けた OSL 線量計から得られた、体幹部線量に対する、眼の水晶体及び末端部等価線量の比が、不確かさの範囲内で一致している。

C. 研究結果

(a) 除染等業務における被ばく源となる線源

本研究において評価の対象とする除染等業務に従事する作業者は、東京電力福島第一原子力発電所事故に起因して環境中に放出された放射性物質によって被ばくすることは明らかである。そこで、表1に東京電力福島第一原子力発電所事故に伴い環境に放出された放射性物質のうち被ばく評価上重要であるものについて引用する [7]。表1では放出量に加え、半減期についても記載した。

表2では、環境中に放出された各放射性物質の総放出量の経時変化を示す。この評価では除染等による効果は考慮せず、単純

表3 文部科学省による緊急時土壌モニタリング結果 [8]。

単位 Bq / kg					
核種	半減期	採取地点	福島市大波	田村市都路町古道	いわき市久之浜町 久之浜
		試料採取日時	2011/4/2 9:33	2011/4/10 12:00	2011/4/4 12:51
^{132}Te	3.204 day		3,500	57	370
^{131}I	8.0252 day		53,000	4,400	19,000
$^{129\text{m}}\text{Te}$	33.6 day		18,000	1,500	2,400
^{134}Cs	2.0652 year		17,000	2,100	1,400
^{136}Cs	13.04 day		1,500	87	100
^{137}Cs	30.08 year		20,000	2,600	1,700
^{140}La	1.6781 day		Not Detectable	33	Not Detectable

に半減期による減衰分のみ考慮した。また、各放射性物質が放出された起点を全て平成23年3月11日として評価している。

放出後6か月経過後には、放射性セシウムの残存のほかに、有意に影響を示す可能性のある放射性物質として、 ^{131}I 及び ^{133}Xe がある（表2参照）。さらに時間が経過した1年後では放射性セシウム以外に有意に放射線被ばくに影響を与えうる放射性物質がないことが示唆される。

表3では、文部科学省が実施した緊急時モニタリングにより得られた各採取地点での土壌中放射能濃度を、表4ではそれらの計時変化の推定値を示す。なお、本報告書においては、緊急時モニタリングにおける試料採取地点のうち3点のみを記載するにとどめる。前掲の表2の評価と同様に、表4で行った評価では除染等による効果は考慮せず、単純に半減期による減衰分のみ考慮した。また、半減期による減衰を考慮するため、放射能濃度の測定日時を全て平成23年4月11日と仮定して評価している。また、評価においては0.01 Bq / kg 未満の量

をーとして記載した。

除染等業務に従事する作業員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（a）で詳細に評価する。

表4 緊急時土壌モニタリングで得られた土壌中放射能濃度の経時変化の例。

採取地点：福島市大波 単位 Bq / kg

核種	半減期	試料採取日時		経過時間	
		2011/4/2 9:33	5 か月後	1 年後	2 年後
^{132}Te	3.204 day	3,500	0	0	0
^{131}I	8.0252 day	53,000	0.1	0	0
$^{129\text{m}}\text{Te}$	33.6 day	18,000	770	9.5	0
^{134}Cs	2.0652 year	17,000	15,000	12,100	8,700
^{136}Cs	13.04 day	1,500	0.4	0	0
^{137}Cs	30.08 year	20,000	19,800	19,200	19,100
^{140}La	1.6781 day	Not Detectable	Not Detectable	Not Detectable	Not Detectable

採取地点：田村市都路町古道 単位 Bq / kg

核種	半減期	試料採取日時		経過時間	
		2011/4/10 12:00	5 か月後	1 年後	2 年後
^{132}Te	3.204 day	57	0	0	0
^{131}I	8.0252 day	4,400	0	0	0
$^{129\text{m}}\text{Te}$	33.6 day	1,500	64	0.8	0
^{134}Cs	2.0652 year	2,100	1,820	1,500	1,070
^{136}Cs	13.04 day	87	0	0	0
^{137}Cs	30.08 year	2,600	2,580	2,540	2,480
^{140}La	1.6781 day	33	0	0	0

採取地点：いわき市久之浜町久之浜 単位 Bq / kg

核種	半減期	試料採取日時		経過時間	
		2011/4/4 12:51	5 か月後	1 年後	2 年後
^{132}Te	3.204 day	370	0	0	0
^{131}I	8.0252 day	19,000	0	0	0
$^{129\text{m}}\text{Te}$	33.6 day	2,400	102	1.3	0
^{134}Cs	2.0652 year	1,400	1,220	1,000	715
^{136}Cs	13.04 day	100	0.03	0	0
^{137}Cs	30.08 year	1,700	1,680	1,660	1,620
^{140}La	1.6781 day	Not Detectable	Not Detectable	Not Detectable	Not Detectable

(b) 除染等業務に従事する作業者が被る被ばく形態についての評価

本研究において、除染等業務に従事する作業者が、外部及び内部被ばくのいずれを優位に被るのか、文献及び文献に対する担当者への聞き取り調査を中心に検討を行った。

文献調査は、次の2つの報告書を用いて進めた。

- ・福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務 報告書 [10]
- ・東京電力福島第一原子力発電所事故により放出された放射性物質汚染の除染事業誌 [11]

文献に対する担当者への聞き取り調査については、文献[10]の受託先である日本原子力研究開発機構の担当者及び文献[11]の包括的な除染事業を担当した環境省の担当者への聞き取り調査を行った。上述の通り、ヒトを対象とする医療系等の研究倫理等への配慮に該当しないことを確認済みである。

福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務 報告書によると、除染作業における放射線管理体制の整備を行ったのち、除染作業に係る事前モニタリングを進めていることが分かる。特に、実際に除染等業務を行う区域を作業区域と呼称し、入域にあつては作業者に適切な放射線防護装備(タイベックスーツ、半面マスク、ゴム手袋等)の装着を求め、特に内部被ばくについて厳重な管理体制を敷いていることが明らかである。除染モデル事業では、作業者の外部被ばくについてはすべての作業者に積算型の個人被ばく線量計(ガラス線量計又はOSL線量計)を着用させている。内部被ばく管理については、防護装備の徹底に加え、作業前にホールボディカウンタ

により作業者の体内放射能の有無を測定し、作業終了後に同様の測定を実施し、除染作業における放射性物質の取り込みの有無を確認していた。

モデル事業後に広域にわたって行われた除染事業でも同様の放射線防護施策がとられていたが、内部被ばく測定について、モデル事業ほど厳重に行われていたかについての記載はなかった。しかしながら、「国として檜葉町(現在は富岡町に移設)及び南相馬市に各1箇所ずつホールボディカウンタの検査所を開設し、除染作業に従事する者は無償で利用することが可能であった。」[11]と、内部被ばく測定を義務付け、それに対する実効性のある施策が行われていたほか、より実践的に除染電離則に基づき、放射性物質による汚染源を作業場から持ち出さないように、表面汚染検査(スクリーニング)を実施することが義務付けられており、スクリーニングが徹底されていた旨の記載がある [11]。

(c) 除染等業務における作業者の被ばく状況

本研究の目的は、除染等業務に従事する作業者が受ける、眼の水晶体等価線量がどの程度になるか、適切に評価する手法を見出し、妥当な眼の水晶体等価線量を推定できる手法構築の一助となることを目標としている。

そこで、除染等業務に従事する作業者の均等被ばく及び不均等被ばく状況について、前述の(b)と同様の文献及び聞き取り調査を中心に検討を行った。

除染等業務は、①面的除染、②局所除染、③森林除染及び④除去物の保管等に分類でき、それぞれの業務についての被ばく状況

について考察した。

①面的除染は、耕作地、公園等の公共施設を含んだ居住環境に対する除染であり、放射性物質（実効的には放射性セシウム。理由は後述する。）の存在を広く面でとらえて、それらを取り除くものである（家屋の屋根、庭、公園、道路等）。これらの具体的な作業としては、図2に示すような開けた平らな場所において立位で作業する状況が中心である。



図2 面的除染の例（公園の除染）

一方、②局所除染はいわゆるホットスポットを対象に、特定の場所に集積した放射性Csを取り除く（雨樋、雨水枡等）除染である（図3参照）。



図3 局所除染の例（雨樋の除染）

③森林除染は、生活環境における空間線量率低減のため、住居等の近隣の森林で落葉等の堆積有機物の除去等を実施されるもので、除染を行う範囲としては、林縁から20 m程度の範囲を目安としている。

④除去物の保管等については、土壌等を

フレキシブルコンテナに詰め、それらを移動、集積、管理等に従事するものである。

（d）各業務における作業者の体幹部線量に対する眼の水晶体被ばく線量の比に関する検討

除染等業務に従事する作業者の眼の水晶体の被ばく状況を詳細に考察するため、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、評価を進めることとした。

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。本研究で用いる評価手法は、分担研究者のグループにおいて検証された手法であり、 ^{137}Cs 及び ^{60}Co γ 線校正場での前方－後方照射ジオメトリ（AP ジオメトリ）での均一照射条件下での検証の結果、OSL 線量計を使用した線量評価と数学ファントムを用いる理想的な評価とは若干のずれが見られたが、（1）OSL がいずれも体表面に張り付けられていること、（2）数学ファントムにおける線量が体表面から内部の領域で評価されていること、及び（3）眼の水晶体線量/体幹部線量の比を評価するために OSL の線量評価には換算係数がかけられていないこと、を考慮すると、数学ファントムによる計算シミュレーションでの、体幹部線量に対する眼の水晶体線量比の値は妥当であると評価された。詳細は文献[12]及び[13]に記載済みである。

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、除染等業務に従事する作業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 μ m）の各単位で求められる。

後述のD．考察（c）で詳細に示す通り、除染等業務の大部分は均等被ばく状況に位置づけられる。均等被ばく状況は、ICRP 74[14]で示される照射ジオメトリのうち、放射線源からの放射線が作業者に入射する照射条件としては、等方照射ジオメトリ（ISO ジオメトリ）及び回転照射ジオメトリ（ROT ジオメトリ）が実際の作業を反映していると考えられる。

評価に用いた線種は γ 線であり、主に原子力施設において、放射線業務従事者が受ける可能性のあるエネルギー範囲で選択した。 γ 線については、0.06 ～ 1.25 MeV の単色の γ 線を選択した。

表5では、ISO 及び ROT 照射条件での γ 線照射下における体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を示す。ISO 照射条件では、表に示す通り 0.06 ～ 1.25 MeV の範囲で、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、1.2 前後の範囲内で得られた。ROT 照射条件での体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、同様のエネルギー範囲で 0.06 ～

これらの比が、作業者の眼の水晶体被ばくについてのどのような影響を与えうるかについての議論には、次項D．考察（d）で詳述する。

作業者の被ばく状況を等方及び回転照射ジオメトリと定義できない作業についても、文献及び聞き取り調査によって明らかとなっている。今年度の研究において特に注目した作業は次の（1）～（5）の作業である。

- （1）雨水枡の除染
- （2）住宅の雨樋の除染
- （3）住宅地等の側溝の除染
- （4）住宅壁面の除染
- （5）住宅地のコンクリートブロック塀の除染

（6）フレキシブルコンテナ輸送時のタグ付け

（1）の雨水枡の除染については、作業者が腕を伸ばして雨水枡内の堆積物を除去する等、ホットスポット除染の主要な作業の一つとなる（図4に類似の作業事例を紹介）。本研究では、雨水枡除染作業を、数学ファントムを用いて、正方形の線源を導入し、作業者が正方形の面状線源に対して正対する状況で被ばくする状況を模擬して評価を行った（図5参照）。正方形の面状線源のサイズは 50 cm × 50 cm であり、正方形の面状

表5 γ 線エネルギーの違いによる ISO 及び ROT 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

核種	^{241}Am	^{137}Cs	^{60}Co
γ 線エネルギー (MeV)	0.06	0.662	1.25
$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$ ROT 照射条件 (計算値)	1.02 ± 0.01	1.22 ± 0.01	1.22 ± 0.01
$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$ ISO 照射条件 (計算値)	1.21 ± 0.10	1.25 ± 0.06	1.17 ± 0.04

1.25 MeV に対し、1.0 ～ 1.2 となった。こ

線源と作業者の顔面との距離は 30 cm とした。これは実際の作業においても長時間行われない位置関係であることは除染モデル実証事業を担当した日本原子力研究開発機構の職員からの聞き取り調査及び文献調査により確認済みである。



図4 ホットスポット除染の例 [15]

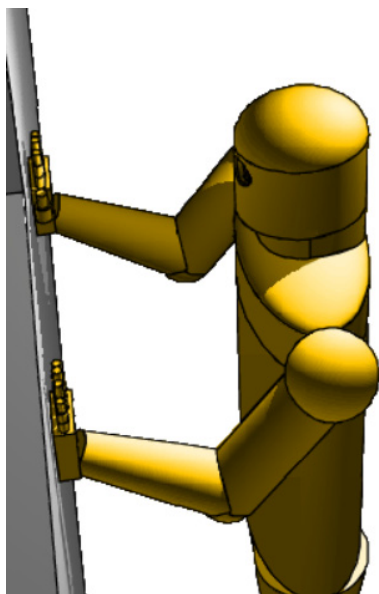


図5 除染等業務における作業者の雨水枡除染を模擬した計算シミュレーションのジオメトリ。正方形面状線源を導入。

上記の計算ジオメトリを使用し、線種として γ 線を、エネルギーは 0.662 MeV とし、線源を導入した場合の、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を表6に示す。

表6 除染等業務における作業者の雨水枡除染を模擬した計算で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比

作業名	眼の水晶体 / 体幹部
	$H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$
雨水枡除染	1.93 ± 0.09

表6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。眼の高さに正方形の面状線源がある場合、眼の水晶体線量は体幹部で観測される線量の約 1.9 倍程度になると評価された。

(2)に示す住宅の雨樋の除染について、図3に示す通り、線上の線源に正対することとなる。本研究では、雨樋における除染作業を、図5に示したものと同様のジオメトリの数学ファントムを用い、数学ファントムに対して平行に横長の線状線源を導入し、作業者が線状線源に対して正対する状況で被ばくする状況を模擬して評価を行った。線状線源のサイズは長さ 500 cm × 幅 5 cm とし、作業者の眼の高さと一致させて線源を設置した。線状線源と作業者の顔面との距離は 40 cm とした。

本計算ジオメトリを使用し、単色の γ 線(エネルギー:0.662 MeV)を選択した場合の、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を表7に示す。

表7 除染等業務における作業者の雨樋除染を模擬した計算で得られた、体幹部線量

に対する眼の水晶体線量の比

作業名	眼の水晶体 / 体幹部
	$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$
雨樋の除染	1.55 ± 0.08

眼の高さに線状線源があるにも関わらず、眼の水晶体線量は体幹部で観測される線量の約 1.6 倍程度にとどまることが示された。

(3) に示す住宅地等の側溝の除染について、図 6 に示す通り、側溝に作業者が入って堆積物を除去する場合がある。この状況を模擬するため、(1) 及び (2) の作業と同様のジオメトリの数学ファントムを用い、線源形状を変更して、作業を模擬した。



図 6 側溝の除染の例

(2) の作業と異なり、数学ファントムに対して平行に縦長の長方形線源を導入し、作業者が長方形線源に対して正対する状況で被ばくする状況を模擬して評価を行った。長方形線源のサイズは高さ 500 cm × 幅 40 cm とし、線源と作業者の顔面との距離は 40 cm に設定した。

上記の計算ジオメトリを使用し、単色の γ 線エネルギーを 0.662 MeV に設定した場合の、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を表 8 に示す。

表 8 除染等業務における作業者の側溝の

除染を模擬した計算で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比

作業名	眼の水晶体 / 体幹部
	$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$
側溝の除染	1.13 ± 0.05

(3) の作業に係るジオメトリでは、眼の水晶体及び体幹部での線量評価位置と、長方形線源の距離が、40 cm でほぼ等しいため、体幹部で観測される線量に対する眼の水晶体線量の比は約 10% 程度増加するだけであることが分かった。

(4) 住宅壁面の除染及び (5) 住宅地のコンクリートブロック塀の除染を模擬する体系も図 5 に示した体系の数学ファントムを用いた。図 7 及び図 8 に示す通り、壁面の除染は、作業者が壁面に正対し、手で壁面の放射性物質をふき取る事例があることが分かる。



図 7 住宅壁面の除染の例 [11]



図8 コンクリートブロック塀の除染の例 [10]

図7及び図8に示した作業状況を模擬するため、数学ファントムが長方形線源に正対する状況で被ばくする状況を模擬して評価を行った。長方形線源のサイズについては、(4)の住宅壁面を模擬する場合、幅 500 cm × 高さ 450 cm の長方形線源を仮定した。(5)のコンクリートブロック塀の除染に係る長方形線源は、幅 1000 cm × 高さ 200 cm 作業者の眼の高さと一致させて線源を設置した。線状線源と作業者の顔面との距離は 30 cm とした。

本計算ジオメトリを使用し、単色の γ 線（エネルギー：0.662 MeV）を選択した場合の、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を表9に示す。

表9 除染等業務における作業者の壁面除染を模擬した計算で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比

作業名	眼の水晶体 / 体幹部
	$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$
住宅壁面の除染	1.18 ± 0.08
コンクリートブロック塀の除染	1.03 ± 0.07

(4)の作業に係るジオメトリでは、壁面が上方まで続いている影響もあり、体幹部

で観測される線量に対する眼の水晶体線量の比は約 20%程度増加するにとどまった。一方で、線源が横長に配置されることになる、(5)のコンクリートブロック塀の除染に従事する作業者の場合、体幹部で観測される線量に対する眼の水晶体線量の比はほぼ同じであることが分かった。

(6)で示した、フレキシブルコンテナ輸送時のタグ付け作業については、土壌等の除去物を集積所へ運ぶ際に、作業者が手作業でタグ付けを行う事例がある。図9では作業による除去物へのICタグ取付作業の模式図を示す。

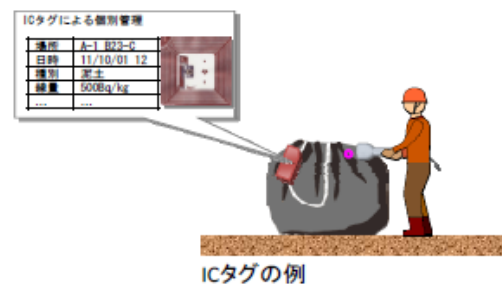


図9 フレキシブルコンテナへのICタグ取付事例の模式図 [11]

上図の作業を模擬するため、数学ファントム前面に直径 100 cm × 高さ 100 cm の円筒形線源が重機でつるさ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10参照）

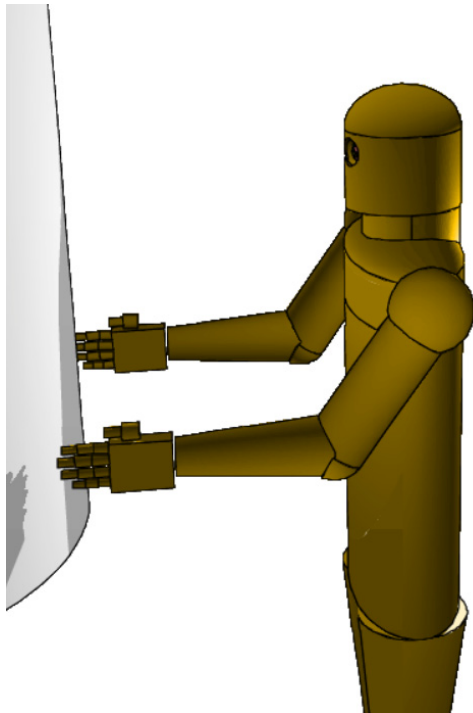


図 1 0 除染等業務における作業者のフレキシブルコンテナへの I C タグ付けを模擬した計算シミュレーションのジオメトリ。円筒形線源を導入。

本計算ジオメトリを使用し、放射性セシウム (^{134}Cs 及び ^{137}Cs) が 1:1 で存在する場合の γ 線に対し、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を表 1 0 に示す。

表 1 0 除染等業務における作業者の側溝の除染を模擬した計算で得られた、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比

作業名	眼の水晶体 / 体幹部
	$H_p(3)_{\text{eye}} / H_p(10)_{\text{trunk}}$
側溝の除染	1.02 ± 0.03

(6) のフレキシブルコンテナへのタグ付け作業に係る評価では、体幹部で観測される線量に対する眼の水晶体線量の比はほぼ等しくなることが明らかとなった。

D. 考察

(a) 除染等業務における被ばく源となる線源

本研究における評価対象である除染等業務に従事する作業者は、東京電力福島第一原子力発電所事故に起因して環境中に放出された放射性物質によって被ばくする。本項においては、除染等業務に従事する作業者の被ばく源となりうる放射性物質について考察する。

上述 C. 研究結果 (a) で示した通り、東京電力福島第一原子力発電所事故に伴い環境に放出された放射性物質の全放出量の計時変化を評価した結果、放出後 6 か月経過後には、放射性セシウムの残存のほかに、有意に影響を示す可能性のある放射性物質として、 ^{131}I 及び ^{133}Xe が残存することが示唆される (表 2 参照)。土壌に沈着した放射性物質の測定結果 (表 3 参照) からは、 ^{131}I について観測されているが、希ガスであり化学的に不活性である ^{133}Xe は土壌中では観測されていない。除染等業務においては、環境中に残存する放射性物質が除去の対象となるため、全放出量が大量であっても、半減期が短く地表面への沈着が観測されなかった ^{133}Xe の除染については考慮する必要はない。

前掲の表 4 では、各採取地点での土壌中放射能濃度の経時変化の推定値を評価したが、福島第一原子力発電所事故発生後 6 か月 (平成 23 年 4 月 11 日を起点とした場合は 5 か月) 経過した時点で、採取時点で観測された ^{131}I は土壌中にほとんど残存していないことが明らかとなった。本研究で取り扱う除染等業務は、平成 23 年 8 月 30 日公布の放射性物質汚染対処特措法に基づ

き実施されており、事故後6か月経過以降に行われている除染等業務が対象となる。したがって、 ^{131}I についても除染対象とはならない。

以上の考察から、除染等業務に従事する作業者の被ばく源となりうる放射性物質は、半減期の長い放射性セシウムの2核種、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs となることが示された。除染等業務は、平成24年度から平成29年度まで継続的に実施されており、その間にも放射性セシウムはそれぞれの半減期に従い減衰している。そのため、半減期が30年を超える ^{137}Cs に対する ^{134}Cs の割合は時間を経過するごとに変化する。 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs はいずれも β 線及び γ 線を放出する核種であるが、除染等業務に従事する作業者が被ばくする放射線については、後述の通り γ 線による被ばくが優位である。しかしながら、 γ 線のエネルギーについては、作業時期により変化することについての評価も必要である。この点については、後述の考察、(d) で取り扱う。

(b) 除染等業務に従事する作業者が被る被ばく形態についての評価

本研究において、除染等業務に従事する作業者が、外部及び内部被ばくのいずれを優位に被るのか、文献及び聞き取り調査を中心に検討を行った。前述の(a)に示す通り、除染等業務に従事する作業者は放射性セシウムによる被ばくが支配的であることが分かった。作業者の内部被ばくについては、「福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務 報告書」によると、「除染作業者はスクリーニング判定用のホールボディカウンタにより、内部被ばくの測定を行った。この結果、記録レベル(1mSv)を超える作業者はいなかった。」及び「身体汚染も確認されなかった。」とのことであった[10]。これは、文献[11]の記述とも一致する。なお、除染等業務に従事する作業者が被る被ばくについては、今般その存在が明らかとなった不溶性(難溶性)放射性微粒子からの内部・外部被ばくについての検討も十分に考慮されるべきである。当該不溶性放射性微粒子が眼の水晶体等価線量に影響を与える状況は、他の物理形態の放射性核種と同様に、内部被ばく及び外部被ばくに分けられる。内部被ばくについては、前記の通り、測定により顕著に被ばくした

表 1 1 除染対象となる放射性セシウムの比較

核種	^{134}Cs	^{137}Cs
半減期 (year)	2.0652	30.08
β 線 (MeV)	0.658 (70.2%)	0.514 (94.4%)
*最大残余エネルギーで表記	0.415 (2.5%)	1.176 (5.6%)
	0.0886 (27.3%) 他	
γ 線 (MeV)	0.563 (8.4%)	
	0.569 (15.4%)	
	0.605 (97.6%)	0.662 (85.1% from $^{137\text{m}}\text{Ba}$)
	0.796 (85.5%)	
	0.802 (8.7%) 他	

アイソトープ手帳 1 1 版 pp.63,64 より引用

作業者がいないことから、上記の不溶性放射性微粒子による内部被ばくの影響も低いと考えられる。一方で、不溶性放射性微粒子が直接眼球に沈着する場合には、外部被ばくは生じうるが、除染等業務において作業に従事する作業者の一般安全保護の観点から、ゴーグルの着用が義務付けられている作業もある [10],[11]。ゴーグルが着用されている場合、不溶性放射性微粒子を含めた除染対象となる飛沫の侵入は十分に防護されていると考察される。

以上により、除染等業務に従事する作業者については、主に外部被ばくを評価対象とすることが合理的であることが示された。

除染等業務に従事する作業者の被ばく線量については、それぞれの除染事業者が除染電離則に基づき管理を行っている。平成 25 年 11 月に「除染等業務従事者等被ばく線量登録管理制度」が発足し、公益財団法人放射線影響協会放射線従事者中央登録センターにおいて、除染等業務従事者の被ばく線量を一元的に管理することとなった。中央登録センターの記録から、除染等業務に従事した作業者(平成 24 年～平成 28 年の 5 年間で延べ 76,951 名)のうち、約 67% については、1.0 mSv を超えておらず、除染等業務に伴う被ばくは 5 年間の平均で約 1.0 mSv であった [16]。また、その中で最も被ばく線量が高い作業者については、20 mSv 以下であった(最大 13.9 mSv)。

(c) 除染等業務における作業者の被ばく状況

本項では前述の(b)と同様に、除染等業務に従事する作業者の均等被ばく及び不均等被ばく状況について、文献及び聞き取り調査を中心に検討を行った結果について考

察する。

本研究では、除染等業務に従事する作業者についての眼の水晶体線量に係る評価を行っているが、IAEA-TECDOC-1731 中では、追加モニタリング要否も含め、場合分けに応じた適切な線量当量と線量計による個人モニタリング手法が提案されている [17]。IAEA TECDOC-1731 によると、被ばく源となる放射線の線種による場合分けのあと、Impact factor の A から C の順に、条件分岐を行うことを提案している。Impact factor は、(A) 放射線のエネルギーと入射方向、(B) ジオメトリ、(C) 防護装備の有無、となっている [17]。本項において、除染等業務に従事する作業者の外部被ばくについて、上述の(A) 放射線のエネルギーと入射方向、及び(B) ジオメトリ、の観点から考察を進める。

(A) 放射線のエネルギーと入射方向、については、前述の通り、放射性セシウムからの β 線及び γ 線が被ばく源となる。表 1 1 では除染対象となる放射性セシウムについて比較した。いずれも β 線及び γ 線を放出する核種であり、 β 線及び γ 線による作業者の外部被ばくについても考慮されなければならない。放射性セシウムから放出される β 線による除染等業務に従事する作業者の被ばくについていうと、文献[10]及び[11]に示されている通り、十分な放射線防護装備を装着したうえで、作業が実施されている。作業者の表面汚染についても有意な汚染がないことが、除染等業務の作業後には確認されている(されていた)。これらの点から、 β 線により眼の水晶体のみならず、体幹部に対しても、 β 線により過剰に被ばくすることは考えられない。除染等業務従事者の眼の水晶体被ばくにおいて β 線による

被ばくが考えられるのは、 β 線の飛程を考慮すると（水中における β 線の飛程、約0.23 cm (0.658 MeV ^{134}Cs)及び約0.5 cm (1.176 MeV ^{137}Cs))、作業者の眼球に直接放射性物質が沈着する場合である。ただし、飛沫が飛び散るような、高圧洗浄機による除染、刈払い機による下草等の除去に従事する作業者には、一般安全装備としてゴーグルの着用が義務付けられており、事故等を考慮しない限り、上記の被ばく状況は考慮できない。ただし、事故により直接目に放射性Csが入る状況が考慮される場合のみ、 ^{137}Cs の β 線(1.176 MeV)に対する被ばく線量評価は必要であるといえる。

以上の検討から、(A) 放射線のエネルギーと入射方向のうち、除染等業務に従事する作業者が被ばくする放射線のエネルギーについては、放射性セシウムからの γ 線を考慮すべきである。

(A) 放射線のエネルギーと入射方向のうちの入射方向、及び(B) ジオメトリは、作業者の放射線被ばくを考慮する場合、密接に関連している。前述のとおり、除染等業務は、①面的除染、②局所除染、③森林除染及び④除去物の保管等に分類でき、それぞれの業務について、放射線の入射方向と作業者と線源との位置関係を示すジオメトリについて考察した。

①面的除染については、前述のとおり、開けた平らな場所において立位で作業する状況が中心である。具体的な作業については、耕作地、公園等での重機の操作を伴う除染、高圧洗浄機による舗装道路の除染、除染等業務の立ち合い等があげられる。前述の通り、除染対象核種である放射性セシウムは、土壌等に均一に広く分布していると考えさ

れる。この場合の作業者の被ばくは、下方にある面状線源から一様に受けることとなる。これは均等被ばく状況に含まれるといえる。この被ばく状況を適切に表現する照射ジオメトリは、回転照射ジオメトリとなる。(図11参照)

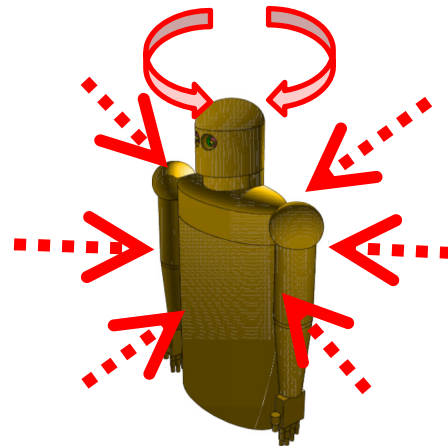


図11 均等被ばく状況を模擬する回転照射ジオメトリ(ROT geometry) [14] の模式図

③森林除染の場合、樹木への放射性物質の沈着が確認されているため、除染の対象となる下草や表土からの放射線のみならず、作業者は樹木からの放射線被ばくにさらされることとなる（例として図12参照）。



図12 森林除染の例 [11]

この場合、作業者の被ばく状況は、側方からの放射線入射のみならず上方からの放射線入射についても考慮される必要がある。この被ばく状況は、ICRP が定義する照射ジオメトリのうち、後述の等方照射 (ISO 照射) ジオメトリが最もよく模擬できる (図 1 3 参照)。

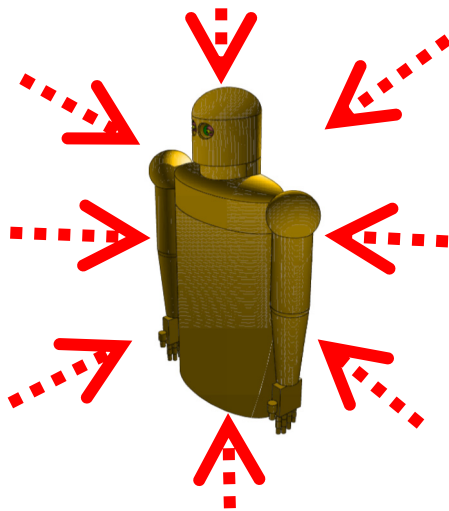


図 1 3 均等被ばく状況を模擬する等方照射ジオメトリ (ISO geometry) [14] の模式図

②局所除染、及び④除去物の保管等の作業については、除去する対象の分布が実効的に制限されるため、線源が一様に分布する状況から作業者が均一に放射線にばく露される状況である、といえない。したがって上述の均等被ばく状況である、回転及び等方照射ジオメトリに含まれるとは考慮されない。しかしながら、除去する対象となる放射性セシウムの分布については、「ホットスポット」と呼称される通り、放射性セシウムが点状に分布していると考えすることはできず、本研究において前述の C. 研究結果 (d)

で行った通り、面状線源及び体積線源からの被ばくを考慮することが合理的な評価につながるといえる。

(d) 各業務における作業者の体幹部線量に対する眼の水晶体被ばく線量の比に関する検討

本項では、除染等業務に従事する作業者の被ばく状況について、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、評価を進めることとした。

均等被ばく条件での放射線業務従事者の体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比に注目し評価を行った。表 5 では、ROT 及び ISO 照射条件下における体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の γ 線エネルギーに対する変化を示している。表 5 に示す通り、0.06 ~ 1.25 MeV の γ 線の場合、 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$ は 1 より大きく見積もられた。これは体幹部で観測された $H_p(10)_{trunk}$ を眼の水晶体等価線量の推定値とした場合、過小評価することになる。除染等業務に従事する作業者が除染の対象とする核種は前述のとおり放射性セシウムであり、長期的には ^{137}Cs である。0.662 MeV の γ 線に対し、 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$ が 1.2~1.3 と評価されていることから、 $H_p(10)_{trunk}$ を用いて、眼の水晶体等価線量を推定した場合、推定値は、実際に観測されうる眼の水晶体等価線量に対し 0.83(=1/1.2)倍となることが示唆される。このことは、今後引き下げられる眼の水晶体等価線量の年間線量限度近傍 (年平均で年間 20 mSv または単年度で 50 mSv)、又は除染等事業者が独自に定める被ばく線量管理目標値近傍で被ばくすることが想定される作業を行う場合、具体的な作

業が均等被ばく状況であっても、追加線量計を用いる追加モニタリングが必要であろう。しかしながら、除染等業務に従事した作業者の被ばく線量の最大値は、年間 13.9 mSv [16]であり、そこから推定される眼の等価線量は、約 17 mSv(=13.9 × 1.2)といえる。この点から、眼の水晶体等価線量の推定値は、5年平均で年間 20 mSv 以下にとどまっていたといえる。また、前述の通り、除染等業務に従事した作業者の年間の被ばく線量は 97.9%が年間 5 mSv 以下である[16]。仮に、現行の個人モニタリングを踏襲して、体幹部の線量から眼の水晶体等価線量について同一の数値を用い、眼の水晶体等価線量の推定値とした場合であっても（例として、体幹部での外部被ばく線量が年間で $H_p(10)=1.0$ mSv の場合、眼の水晶体等価線量を 1.0 mSv と推定する）、今後低減される年間線量限度を超えることはないと思われ。

原子力分野においては、放射線業務従事者の被ばくにおける、放射線の入射方向に関する包括的な研究がなされており、「(1)身体前面の線量(A)と身体後面の線量(P)の比(P/A)は、0.31~1.34 ですべての作業者の平均値は、0.85 であった。」及び「(3)個人モニタの装着期間が長くなるにしたがって、身体前面と身体後面の線量の比のばらつきは小さくなり、1.0 より小さい平均値の近傍に収束することがわかった。」[18]という知見が得られている。

同様に、除染等業務に従事した作業者の定常作業における被ばくについても、森林除染時に想定される ISO 照射条件よりむしろ ROT 照射条件のほうがより被ばく状況の実態に近い可能性がある。

②局所除染及び④除去物の保管等の作業に従事する作業者の被ばく状況の再現のため、本研究では、面状線源及び体積線源からの被ばくを考慮して計算シミュレーションにより、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比について計算した。考慮した作業は以下の(1)～(6)であり、線源には ^{137}Cs からの γ 線である、0.662 MeV の単色の γ 線を考慮した。

- (1) 雨水桝の除染
- (2) 住宅の雨樋の除染
- (3) 住宅地等の側溝の除染
- (4) 住宅壁面の除染
- (5) 住宅地のコンクリートブロック塀の除染
- (6) フレキシブルコンテナ輸送時のタグ付け

(1) 雨水桝の除染、及び(2) 雨樋の除染を除き、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、1.2 前後と評価された。これは、前述の均等被ばく状況で評価した値とほぼ等しい。ICRP 75「作業者の放射線防護に対する一般原則」によれば、「作業場においては、放射線場のエネルギースペクトル方向は一般に良くわかっておらず、個人線量計で測られた測定値の不確かさは著しく大きいであろう。放射線場が均質でなく、方向がはっきりしないことによって、標準モデルの使用には誤差が生じる。関連する線量限度付近の実効線量を推定する際の 95%信頼度での総合的な不確かさは、光子についてはプラスマイナスどちらかの方向についても係数 1.5 となり、エネルギー不明の中性子、及び電子についてはもっとずっと大きくなる。(251)」[19]、とある。この点から、ホットスポット除染を行う作業者についても、実効的には均等被ばく状況によ

り近い被ばく状況で作業を行う（行った）と想定される。

前述の通り、除染等業務に従事する作業者の被ばく源が放射性セシウムであり、これらは時間の経過により、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の割合が変化する。ここでは、放射性セシウムからの γ 線成分が変化する場合は、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比について検討を行った。問題を単純化するため、上述の面状線源及び体積線源は使用せず、直立する数学ファントムに点線源を導入し、 ^{134}Cs または ^{137}Cs からの γ 線を模擬して、それぞれの線源条件での体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を求めた。なお、点線源は数学ファントムの眼の高さに置き、顔面一点線源間距離を変化させて評価した。（図 1 4 参照）

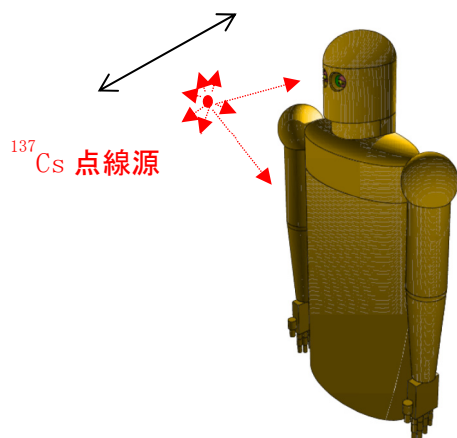


図 1 4 点線源を導入した場合の計算シミュレーションのジオメトリ

表 1 2 では、放射性セシウムの割合の計時変化を示す。ここでは ^{137}Cs に対する ^{134}Cs の割合を評価した。なお、福島第一原

子力発電所事故直後の放射性セシウムの放出割合は、簡単のため、 $^{134}\text{Cs} : ^{137}\text{Cs} = 1:1$ とし、放出の起点を平成 2 3 年 3 月 1 1 日とした。また、除染及びウェザリングの効果は考慮せず、単純に半減期のみによる減衰を考慮している。

表 1 2 放射性セシウムの割合の計時変化

経過時間	放射性セシウムの割合
	$^{134}\text{Cs} / ^{137}\text{Cs}$
1 か月後	0.97
6 か月後	0.85
1 年後	0.73
2 年後	0.53
3 年後	0.39

図 1 5 では、放射性セシウムの違いによる、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比について、点線源と顔面との距離に対する変化を示す。点線源は、数学ファントムの眼の高さに置き、平行に移動した。線源は点線源を導入し、 ^{137}Cs 及び ^{134}Cs それぞれに対して評価を行った。不確かさは、計算シミュレーションに伴う、数学ファントム内部の線量評価領域に沈着した単位質量あたりのエネルギーに係る統計誤差のみを考慮している。図 1 5 からは、いずれの放射性セシウムからの γ 線であっても、線源と顔面との距離が遠ざかるほど、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、いずれの線源でも 1.0 に近づき、均等被ばく状況に近づくことが分かる。一方で、線源と顔面との距離が近い場合では、 ^{137}Cs のほうが ^{134}Cs に対してより大きな比を取ることが分かった。

表 1 3 では、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比について、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs か

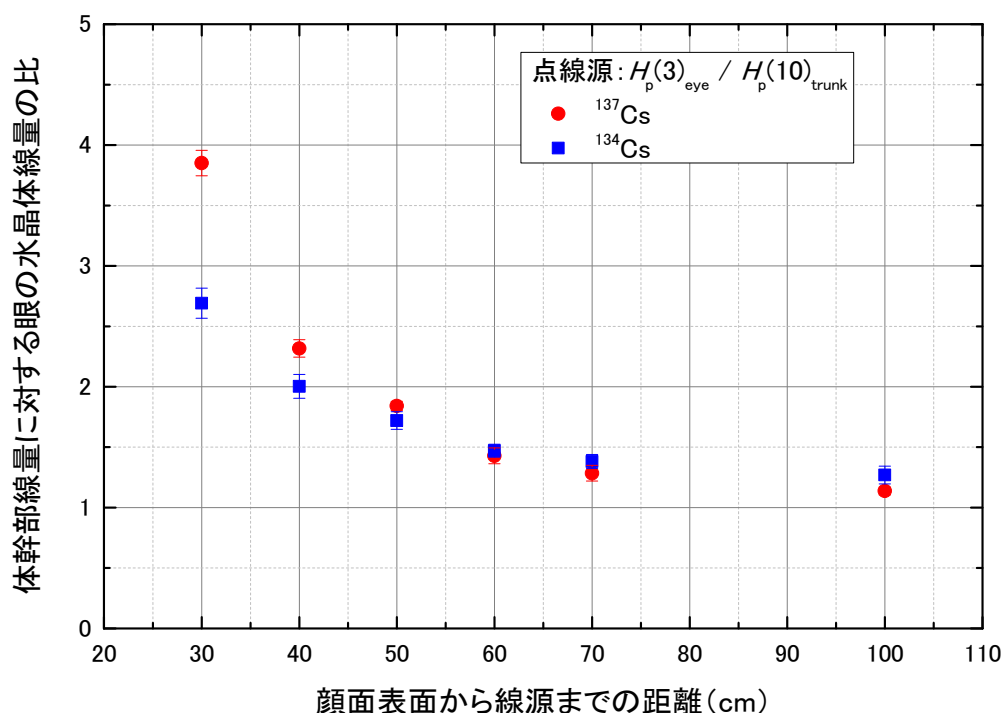


図 1 5 体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の線源距離に対する変化
(^{137}Cs 及び ^{134}Cs γ 線源)

らの γ 線による線量を積算した場合の計時変化を示す。評価にあたっては、各放射性セシウムの γ 線の被ばくにより得られた体幹部及び眼の水晶体の吸収線量を合算した。

表 1 3 放射性セシウムの割合の計時変化に伴う体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比の変化

経過時間	放射性セシウムの割合	線源との距離	
	合	100 cm	30 cm
	$^{134}\text{Cs} / ^{137}\text{Cs}$		
0	1.00	1.20 ± 0.08	3.36 ± 0.18
1 month	0.97	1.20 ± 0.08	3.36 ± 0.18
6 month	0.85	1.19 ± 0.08	3.40 ± 0.18
1 year	0.73	1.19 ± 0.08	3.44 ± 0.18

		0.08	
2 year	0.53	1.18 ± 0.08	3.52 ± 0.19
3 year	0.39	1.17 ± 0.07	3.59 ± 0.19
5 year	0.21	1.16 ± 0.07	3.70 ± 0.20
10 year	0.04	1.14 ± 0.07	3.81 ± 0.20

半減期に応じて ^{134}Cs 及び ^{137}Cs からの γ 線による吸収線量を減弱して合算し、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比を求めた。

表 1 2 から、線源と顔面からの距離がある場合、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比に大きな変動がない一方で、線源と顔面との距離が近い場合の評価では、放出日(平成 2 3 年 3 月 1 1 日)を起点とした時

点で得られた比 (3.36 ± 0.18) に対し、10 年経過した場合、10 % 以上大きい値 (3.81 ± 0.20) を取ることが分かった。これは、時間経過により放射性セシウムのうちより長期間残存する ^{137}Cs からの γ 線による影響が支配的になることを反映している。以上のことから、今後行われる除染等業務については、特に ^{137}Cs からの γ 線に注目して評価を進めるべきであることが明らかとなった。

E. 結論及び今後の課題

本研究の目的は、除染等業務に従事する作業員について、体幹部線量から眼の水晶体の組織等価線量の合理的な評価手法を確立することである。目的の達成のため、研究期間3か年内のうち本事業初年度にあたる平成30年度では、除染等業務に従事する作業員について、以下に示す(a)、(b)及び(c)の3テーマの検討を並行して進め、(d)の予備調査を実施した。

(a) 除染等業務における被ばく源となる線源

(b) 除染等業務に従事する作業員が被る被ばく形態に関する検討

(c) 除染等業務における作業員の被ばく状況に関する検討

(d) 各業務における作業員の体幹部線量に対する眼の水晶体被ばく線量の比についての評価

本研究において、(a)の除染等業務における被ばく源となる線源について、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故によって放出された放射性物質のうち、除染等業務において被ばく源となりうる核種の特定に注力した。(b)及び(c)

について、除染等業務に従事する作業員の具体的な作業を、文献調査及び除染等業務の作業監督を行った担当者への文献に対する聞き取り調査を行うことで、作業員が受ける放射線被ばくの形態及び被ばく状況に評価した。上記の項目についての評価を終えたのち、

(d) 各業務における作業員の体幹部線量に対する眼の水晶体被ばく線量の比に関する検討

を、分担研究者らが開発した計算シミュレーションによる手法を適応して求めた。

以下では今年度得られた結論について簡潔に述べる。

(a) 除染等業務における被ばく源となる線源

本研究における評価対象である除染等業務に従事する作業員は、東京電力福島第一原子力発電所事故に起因して環境中に放出された放射性物質によって被ばくするが、除染等業務に従事する作業員の被ばく源となりうる放射性物質について考察した。その結果、除染等業務に従事する作業員の被ばく源となりうる放射性物質は、半減期の長い放射性セシウムの2核種、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs となることが示された。なお、除染等業務は、平成24年度から平成29年度まで継続的に実施されており、その間にも放射性セシウムはそれぞれの半減期に従い減衰している。そのため、半減期が30年を超える ^{137}Cs に対する ^{134}Cs の割合は時間を経過するごとに変化する。作業員の被ばく評価上、この点を考慮しておく必要がある。

(b) 及び (c) について、除染等業務に従事する作業員の具体的な作業について、文献調査及び聞き取り調査を行い、作業員

が受ける放射線被ばくの形態及び被ばく状況に評価した。

その結果、除染等業務に従事する作業者は放射性セシウムによる被ばくが支配的であることが分かった。また、除染等業務に従事する作業者の被ばくについては、主に外部からの被ばくによるものが支配的であることが明らかとなった。作業者の内部被ばくについては、「福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務報告書」によると、「除染作業者はスクリーニング判定用のホールボディカウンタにより、内部被ばくの測定を行った。この結果、記録レベル(1mSv)を超える作業者はいなかった。」及び「身体汚染も確認されなかった。」とのことであった [10]。これは、除染等業務に従事する作業者について、体表面に対する放射性物質による有意な汚染ないことを示すと同時に、体外計測により内部被ばくが有意に生じていないことの直接的な評価であるといえる。

作業者の外部被ばくの状況について、除染等業務に従事する作業者が実際に行う具体的な作業について、各作業の被ばく状況を文献及び聞き取り調査を行って特定した。

①面的除染及び③森林除染については、いずれも均等被ばく状況と考慮すべきであることが分かった。①面的除染については、前述のとおり、開けた平らな場所において立位で作業する状況が中心である。除染対象核種である放射性セシウムは、土壌等に均一に広く分布していると考慮される。この場合の作業者の被ばくは、下方にある面状線源から一様に受けることとなる。これは均等被ばく状況に含まれるといえる。この被ばく状況を適切に表現する照射ジオメトリは、回転照射ジオメトリとなる。一方

の、③森林除染の場合、樹木への放射性物質の沈着が確認されているため、除染の対象となる下草や表土からの放射線のみならず、作業者は樹木からの放射線被ばくにさらされることとなる。作業者の被ばく状況は、側方からの放射線入射のみならず上方からの放射線入射についても考慮される必要がある。この被ばく状況は、ICRP が定義する照射ジオメトリのうち、後述の等方照射 (ISO 照射) ジオメトリが最もよく状況を反映しているといえる。

②局所除染、及び④除去物の保管等の作業については、除去する対象の分布が実効的に制限されるため、線源が一様に分布する状況から作業者が均一に放射線にばく露される状況である、といえない。したがって上述の均等被ばく状況である、回転及び等方照射ジオメトリに含まれるとは考慮されない。しかしながら、除去する対象となる放射性セシウムの分布については、「ホットスポット」と呼称される通り、放射性セシウムが点状に分布していると考慮することはできず、本研究において前述の C. 研究結果 (d) で行った通り、面状線源及び体積線源からの被ばくを考慮することが合理的な評価につながるといえる。

(d) では、本項では、除染等業務に従事する作業者の被ばく状況について、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、評価を進めることとした。

均等被ばく条件での放射線業務従事者の体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比に注目し評価を行った。ROT 及び ISO 照射条件下における体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、0.06 ～ 1.25 MeV の γ 線

の場合、 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$ は 1 より大きく見積もられた。これは体幹部で観測された $H_p(10)_{trunk}$ を眼の水晶体等価線量の推定値とした場合、過小評価することになる。除染等業務に従事する作業者が除染の対象とする核種は前述のとおり放射性セシウムであり、長期的には ^{137}Cs による γ 線が評価対象となる。 0.662 MeV の γ 線に対し、 $H_p(3)_{eye} / H_p(10)_{trunk}$ が 1.2~1.3 と評価されていることから、 $H_p(10)_{trunk}$ を用いて、眼の水晶体等価線量を推定した場合、推定値は、実際に観測されうる眼の水晶体等価線量に対し 0.83(=1/1.2)倍となることが示唆される。このことは、今後引き下げられる眼の水晶体等価線量の年間線量限度近傍（年平均で年間 20 mSv または単年度で 50 mSv）、又は除染等事業者が独自に定める被ばく線量管理目標値近傍で被ばくすることが想定される作業を行う場合、具体的な作業が均等被ばく状況であっても、追加線量計を用いる追加モニタリングが必要であろう。しかしながら、除染等業務に従事した作業者の被ばく線量の最大値は、年間 13.9 mSv [16]であり、そこから推定される眼の等価線量は、約 17 mSv(=13.9 × 1.2)といえる。この点から、眼の水晶体等価線量の推定値は、5年平均で年間 20 mSv 以下にとどまっていたといえる。また、前述の通り、除染等業務に従事した作業者の年間の被ばく線量は 97.9%が年間 5 mSv 以下であるため [16]、現行の個人モニタリングを踏襲し、追加モニタリングが不要であることは言を俟たない。

②局所除染、及び④除去物の保管等の作業に従事する作業者の被ばく状況の再現のため、本研究では、面状線源及び体積線源からの被ばくを考慮して計算シミュレーショ

ンにより、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比について計算した。考慮した作業は以下の（１）～（６）であり、線源には ^{137}Cs からの γ 線である、 0.662 MeV の単色の γ 線を考慮した。

- （１）雨水枡の除染
- （２）住宅の雨樋の除染
- （３）住宅地等の側溝の除染
- （４）住宅壁面の除染
- （５）住宅地のコンクリートブロック塀の除染
- （６）フレキシブルコンテナ輸送時のタグ付け

（１）雨水枡の除染、及び（２）雨樋の除染を除き、その他の作業では、体幹部線量に対する眼の水晶体線量の比は、1.2 前後と評価された。これは、前述の均等被ばく状況を想定して評価された値とほぼ等しい。

以上の系統的な評価から、除染等業務に従事した作業者の定常作業における外部被ばくの状況は、作業に従事する時間全体としては、回転照射（ROT 照射）条件を想定した均等被ばく状況で、0 次近似的には十分説明できる可能性があることが示唆される。

また、今後の課題として次のようなことが挙げられる。

- （１）除染等業務に従事する作業者について、体幹部線量から眼の水晶体の組織等価線量の合理的な評価手法の確立

除染等事業は、平成 29 年度をもって完了しているが、帰宅困難区域の復興のために再建される復興拠点の準備のため、除染作業は今後も継続される。帰宅困難区域の放射性セシウムの沈着量は他の地域と比較しても多いため、作業者に対しては十分な

放射線防護施策がとられるべきである。上述の通り、作業者の年間計画被ばくが、線量限度近傍である場合、眼の水晶体等価線量が意図せずに年間線量限度を超過する可能性がある。このような事態を未然に防ぐ必要がある。

(2) 福島第一原子力発電所事故直後に辞しされた除染等業務に従事した作業者の体幹部線量からの眼の水晶体の組織等価線量の予測

本研究では、除染等業務において被ばく源となる放射線源の評価を行った。組織的に行われた除染等業務は、平成24年度から行われているが、事故直後から除染は散発的に行われていた。それらに従事した作業者についての評価も必要となろう。

F. 健康危機情報
なし

G. 研究発表

1. 論文発表
なし
2. 学会発表
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] 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏,

大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会追加報告 (I) —わが国における水晶体線量評価に関する研究と原子力発電所の線量管理の現状— Jpn. J. Health Phys., 50 (4), 249 - 256 (2015).

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

- [3] European Union (EU). Basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionizing radiation. Council Directive 2013/59/EURATOM.

- [4] 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 岩井 敏, 大口裕之, 大野和子, 川浦稚代, 立崎英夫, 辻村憲雄, 浜田信行, 藤通有希, 堀田 豊, 山崎 直, 横山須美; 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書 (V) —わが国の各分野における従事者の水晶体被ばく及び防護の現状— Jpn. J. Health Phys., 50 (1), 76 - 89 (2015).

- [5] 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 2nd March 2019.

- [6] 厚生労働省, 「除染等業務に従事する労

- 働者の放射線障害防止のためのガイドライン <https://www.mhlw.go.jp/new-info/kobetu/roudou/gyousei/anzen/dl/120118-01.pdf> access on 1st March 2019.
- [7] 原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR), UNSCEAR 2013 年報告書 国連総会報告書 第 I 巻 科学的附属書 A 2011 年東日本大震災後の原子力事故による放射線被ばくのレベルと影響, UNSCEAR 2013 Report Vol.1 Scientific annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami.
- [8] 原子力規制庁, 原子力規制庁及び福島県による土壌試料の測定結果土壌モニタリングの測定結果(平成 23 年 5 月 31 日まで) 平成 24 年 09 月 12 日 access at http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5080/24/Readings%20of%20soil%20monitoring_All%20Results%20for%20May_2011_20120912.pdf available on 2nd March 2019.
- [9] 厚生労働省, 除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン, access at <https://www.mhlw.go.jp/new-info/kobetu/roudou/gyousei/anzen/dl/120118-01.pdf>. available on 2nd March 2019.
- [10] 日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門, 福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務 報告書, access at <https://fukushima.jaea.go.jp/fukushima/result/entry02.html>. Available on 2nd March 2019.
- [11] 環境省除染事業誌編集委員会, 東京電力福島第一原子力発電所事故により放出された放射性物質汚染の除染事業誌, access at <https://www.env.go.jp/press/files/jp/108735.pdf>. Available on 2nd March 2019.
- [12] Hiroshi Yoshitomi et al. “Assessment of equivalent dose of the lens of the eyes and the extremities to workers under nonhomogeneous exposure situation in nuclear and accelerator facilities by means of measurements using a phantom coupled with Monte Carlo simulation”, the 14th international congress of the International Radiation Protection Association (May 2016, Cape Town, South Africa).
- [13] Hiroshi Yoshitomi et al. “QUANTITATIVE ESTIMATION OF EXPOSURE INHOMOGENEITY IN TERMS OF EYE LENS AND EXTREMITY MONITORING FOR RADIATION WORKERS IN THE NUCLEAR INDUSTRY”, Radiation Protection Dosimetry (2018), pp. 1-10 doi:10.1093/rpd/ncy197.
- [14] International Commission on

- Radiation Protection. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26(3-4) (1996).
- [15] 大熊町復興通信, access at <https://www.town.okuma.fukushima.jp/site/fukkou/2002.html>. Available on 3rd March 2019.
- [16] 放射線従事者中央登録センター, 除染等業務従事者等被ばく線量登録管理制度における統計資料の公表について, access at <http://www.rea.or.jp/chutou/jyosen/jyosenseido.htm>. available on 3rd March 2019.
- [17] International Atomic Energy Agency (IAEA). implications for occupational radiation protection of the new dose limit for the lens of the eye. IAEA-TECDOC-1731. (2013), ISBN 978-92-0-115213-8.
- [18] 被ばく線量の測定評価マニュアル, 原子力安全技術センター, 東京 (2000) .
- [19] ICRP, 1997. General Principles for the Radiation Protection of Workers. ICRP Publication 75. Ann. ICRP 27 (1).

II. 分担研究報告（調査報告）

放射線業務従事者の眼の水晶体等価線量の線量計測 に関する国際規格の動向

分担研究者 古渡 意彦

（日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課 主
査）

調査要旨

本調査では、国際規格の記載内容及び規格の策定動向を中心に調査した。放射線防護及び線量計測については、国際間の規格を策定する機関には、大きく国際電気標準会議(IEC)と国際標準化機構(ISO)がある。本項では IEC 及び ISO で策定された規格で放射線防護及び線量計測に関連したもののうち、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、内容等について報告する。

ISO15382:2012 には、「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、等について具体的な記載がある。

ISO4037 series では、線量計が正しく動作するために必要な、線量計に関する要件があり、眼の追加モニタリングで評価される実用量とされる 3mm 線量当量のための放射線標準について追記される。

IEC IEC62387:2012 「X・ γ 線及び β 線用受動形個人及び環境線量計測装置」でも改訂が行われ、眼のモニタリングに使用される受動型個人線量計の技術仕様に係る要求事項が追記されている。

A. 調査目的

本調査は、放射線業務従事者の眼の水晶体及び手指等の末端部の被ばく線量の適切な評価に資するため、工業・原子力・学術分野における放射線業務従事者に対して実施されている個人モニタリングに関し、国際規格等で放射線業務従事者の個人モニタリングがどのように要求されているかに着目し、調査を行ったものである。なお、本稿では、労働者の外部被ばくモニタリングに関

連した研究を遂行する関係上、放射線業務従事者の外部被ばくモニタリングに関連して議論を進める。

労働者の放射線防護については、電離放射線防止規則第八条に事業者により、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。

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。」

放射線業務従事者の外部被ばく線量は、現行の法令では、実用量と呼ばれる単位で測定が求められており、この量は放射線業務従事者が装着する放射線の線量計（個人線量計と呼ばれる）によって測定される。測定により得られた線量の年間の積算値は、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。ここで問題となるのは、測定により得られた線量の測定値が、「正しい」値であるかどうかである。不正確な値、例えば実際よりも過小に評価された線量を積算した場合、実際には意図せずして年間の線量限度を超えていた、という事例も生じるため、労働者は不利益を被ることとなる。そのため、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。通常、個人の外部被ばくモニタリングは、現行法令のとおり、実用量と呼ばれる 1cm 線量当量または 70 μ m 線量当量で行われており、適切な放射線防護を提供している。しかしながら、後述の通り眼の水晶体等価線量の外部被ばくモニタリングのため、3mm 線量当量を復活させ、状況に応じてこの量で眼の水晶体被ばくのモニタリングを行うよう求め

ている。

これらを確保するのが、個人線量計の適切な仕様であり、定期的な校正であり、また測定のトレーサビリティという概念である。これらすべてについて、国際規格が定められており、国際規格の中では、個人線量計が有すべき仕様及び定期的な校正手法に加え、それらを試験する組織（校正機関、試験所等と呼称される）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具体的に決められている。

本稿では、体幹部モニタリングと眼の水晶体モニタリングに関連した国際規格について、眼の水晶体被ばくに関する放射線防護及び線量計測について調査した。

B. 調査方法

本調査では、国際規格の記載内容及び規格の策定動向を中心に調査した。放射線防護及び線量計測については、国際間の規格を策定する機関には、大きく国際電気標準会議(IEC)と国際標準化機構(ISO)がある。本項では IEC 及び ISO で策定された規格で放射線防護及び線量計測に関連したもののうち、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、内容等について報告する。

C. 調査結果

本項では IEC 及び ISO で策定された規格で放射線防護及び線量計測に関連したもののうち、特に放射線業務従事者の眼の水晶体被ばくに関連したいくつかの規格について紹介する。

1. 国際標準化機構(ISO)の動向

1. 1 ISO 15382: 2015 の改訂

「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」

Procedures for monitoring the dose to the lens of the eye, the skin and the extremities

改訂前の規格である、ISO 15382:2002 Nuclear energy – Radiation protection -- Procedure for radiation protection monitoring in nuclear installations for external exposure to weakly penetrating radiation, especially to beta radiation

のうち、眼の水晶体モニタリング手法について追記されている。規格は 2017 年 1 月改訂が完了している。以下に内容について述べる。なお、眼の水晶体等価線量の線量限度を 5 年平均 20 mSv/年、かつ、1 年最大 50 mSv を支持している。

(内容)

4.2 Dose limits and monitoring levels においてモニタリングレベルを設定

b) for the lens of the eye, monitoring should be undertaken if there is a reasonable probability to receive a dose in a single year greater than 15 mSv or in consecutive years greater than 6 mSv per year. (一年間で 15 mSv かつ連続して 6 mSv 以上)

4.3 Monitoring period

The choice of the length of the monitoring period is related to the levels of the expected doses and to the relevant dose limit.

For doses above the monitoring level, a monitoring period of one month is

recommended.

本規格に限らず、IAEA-BSS [1]、IAEA-TECDOC 1731 [2]、欧州指令 [3]では、個人モニタリングを行うために、放射線業務従事者が受けるであろう予測線量に応じたモニタリング施策をとらなければならないとされており、本規格もその考え方に準じている。本規格では、個人被ばく線量を計測するモニタリングレベル以上の線量を被ばくすることが予想される場合、モニタリング間隔は一月が望ましい、とある。

6.2 Monitoring of the lens of the eye に水晶体線量モニタリングの記載

モニタリング用線量計取り付け位置について

6.2 Monitoring of the lens of the eye

6.2.1 Locations to monitor

The dosimeter for the lens of the eye shall be worn as close as possible to the eye, if possible in contact with the skin, and facing towards the radiation source. In case of usage in interventional radiology, the side closest to the X-ray tube shall be chosen.

ー 線源側に線量計が来るように装着 (例: IVR 術者の場合、X 線管球側に線量計を装着)

(左眼の被ばく線量が高い、と想定されている場合、術者の左眼側に線量計を装着する、ということから、両目のうちどちらの線量が高いか判断できる場合は、線量が高くなる側に線量計を装着する、という趣旨)

When using protective lead glasses or face masks, the dosimeter shall be worn preferably behind them.

ー 防護用鉛含有眼鏡または顔面マスクを

利用する場合、線量計はそれらの内側に装着

This is often not very practical, and a dosimeter on the outside or next to the lead glasses can be chosen. In this case, some correction factors should be applied (see 6.2.4).

- － 実際の運用を考慮すると、線量計は防護眼鏡または顔面マスクの外側（及びその近傍）に装着することが考慮される。その場合には、線量評価の際に補正が必要

6.2.4 Application of correction factors

If the dosimeter for the lens of the eye is not worn optimally (not close to the lens of the eye or behind shielding like e.g. lead glasses), then appropriate correction factors shall be applied. These factors shall normally be determined by means of measurements, possibly accompanied by numerical simulations.

- － 補正方法については測定による補正係数(correction factor)が適応されるべきである。

1. 2. ISO 4037 の改訂

「線量計・線量率計校正用及び光子エネルギー特性決定用参照 X 線・ γ 線」

ISO 4037-1:1996 (X 線・ γ 線標準発生方法)

ISO 4037-2:1997 (X 線・ γ 線標準構築手法・線量計測手法)

ISO 4037-3:1999 (X 線・ γ 線標準での線量計校正方法)

ISO 4037-4:2004 (低エネルギー光子標準)

いずれも改訂最終段階 (Final Draft International Standards (FDIS)であり、2018 年 11 月末に投票予定。)

ISO4037-3 には、光子に対する校正及び

線量当量換算係数が掲載されている。眼の水晶体モニタリング用線量計校正に供する、ICRU 組織等価シリンダーファントムに対する 3mm 線量当量 ($H(3)$ 及び $H_p(3)$) 換算係数が掲載される。IAEA TECDOC 1731 ではアクリル製水槽円筒形ファントムでの眼の水晶体線量計校正が推奨されている。上記の 3mm 線量当量換算係数を用いることで、大きな追加作業なしで、放射線校正場の設定が可能であると考えられる。

2. 国際電気標準会議(IEC)の動向

IEC62387:2012 の改訂

「X・ γ 線及び β 線用受動形個人及び環境線量計測装置」

Passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation

2016 年 3 月に改訂決定。

本規格では、眼の水晶体被ばく線量モニタリング用線量計校正手法等の技術要件について追記される。

(内容)

(In addition, for the quantity $H_p(3)$, the cylinder phantom will be adopted instead of the slab phantom)

眼の水晶体の線量測定(3mm 線量当量、 $H_p(3)$)に関する個人線量計が具備すべき技術要件について記載されている。

Table 9 - Performance requirements for $H_p(3)$ dosimeters

Table 9 中の内容は、現行の $H_p(10)$ 用線量計 (OSL、ガラスバッチ、TLD 線量計等)の規格要件と同じであるが、校正手法は多少変更されている (放射線の入射角度等)。

また、前記の ISO4037-3 で掲載されている眼の水晶体モニタリング用線量計校正に

供する、ICRU 組織等価シリンダーファントムに対する 3mm 線量当量 ($H(3)$ 及び $H_p(3)$) 換算係数が掲載されている。

D. 考察

本調査で得られた結果のうち、特筆すべき点について以下に述べる。

(1) 線量限度と管理基準

放射線防護及び線量計測に係る国際規格は、新しい科学的知見を提供し続ける、原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR)、国際放射線防護委員会 (ICRP) 及び国際原子力機関 (IAEA) から発行される報告書、声明を受けて、しばしば改訂される。2011年4月の ICRP によるいわゆるソウル声明以降、改訂作業中であつた IAEA BSS は、直ちに、放射線業務従事者の計画被ばく状況における眼の水晶体等価線量の年間線量限度の引き下げを行っている。その動きに合わせ、欧州指令及び IAEA TECDOC も同様に、引き下げられた線量限度を、事業者及び放射線業務従事者の双方が遵守できるような形での管理基準と線量計測に関する技術基準を提供した。これを具体的な線量計 (例えば頭頸部モニタリング用の TLD 等) の具備すべき性能を策定したものが、IEC62387:2012 と位置付けられる。

線量計については、前述の通り正しく線量を指示するように、適切かつ定期的に校正がなされなければならない。線量計の校正には、高度な線量計測技術と精緻な線量評価手法を有する試験事業者によって行われなければならない、試験事業者が整備すべき放射線標準 (放射線校正場とも呼ばれる) の満たす要件について記載されているのが

ISO 4037 series である。この一連の規格においても、3mm 線量当量での線量計校正が可能であるよう、線量換算係数を準備している。

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。我が国における追加モニタリングの要件については、上述の電離放射線防止規則第八条第3項の記載に基づき行われることが求められている。一方で、ISO 15382: 2015 及び IAEA TECDOC1731 では、放射線業務従事者が被ばくしうる予測線量に応じたモニタリング施策を整えるべきである、旨の記載がある。我が国においては、ICRP Publication 75 で記載のある記録レベル (「委員会は現在、個人モニタリングの記録レベルは、モニタリング期間と、1 mSv を下回らない年実効線量、又は、関連する線量限度の約 10 % の年等価線量から導かれるべきであると考えている。」) という考え方で放射線管理が行われてきた事業所が多い。ISO 15382: 2015 及び IAEA TECDOC1731 は、IAEA BSS 及び欧州指令を基準に構築しており、放射線業務従事者がどの程度被ばくするか事前に予測し、その予測線量に対してカテゴリズを行ったうえで、カテゴリー別に異なる管理方針を導入し、放射線業務従事者全員の放射線防護を達成する、という原則に基づいている。

同規格には、インターベンショナルラジオロジー (IVR) を取り扱う術者に対しての詳細な記載があり、「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。同規格を我が国に導入する場合は、海外での導入事例についての調査が必要であると同時に、モニタリングの要否に係る判断基準、適切な線量計の使用、及び線量評価・補正手法について、詳細な検討が必要であろう。

E. 結論

本調査では、国際規格の記載内容及び規格の策定動向を中心に調査した。放射線防護及び線量計測については、国際間の規格を策定する機関には、大きく国際電気標準会議(IEC)と国際標準化機構(ISO)がある。本項では IEC 及び ISO で策定された規格で放射線防護及び線量計測に関連したものうち、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、内容等について報告する。

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] International Atomic Energy Agency (IAEA). implications for occupational radiation protection of the new dose limit for the lens of the eye. IAEA-TECDOC-1731. (2013), ISBN 978-92-0-115213-8.

[3] European Union (EU). Basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionizing radiation. Council Directive 2013/59/EURATOM.

平成 30 年度労災疾病臨床研究事業

分担研究報告書

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

医療従事者の放射線防護への労働安全衛生マネジメントシステムの応用

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

研究要旨

【目的】労働安全衛生マネジメントシステム (Occupational Health and Safety Management System: OHSMS) の導入を前提として、医療従事者の放射線防護への応用について検討することとした。

【方法】他の分担研究で検討されている不均等被ばくのモニタリングや被ばく管理等の知見をもとに、医療従事者の放射線防護のための管理手法への労働安全衛生マネジメントシステムの応用のあり方を検討した。

【結果】まず、放射線防護へのマネジメントシステムの応用において、その前提となるマネジメントシステムの骨格を整理した。マネジメントシステムの骨格は、基本方針、体制、目標、計画、評価、監査、マネジメントレビュー、改善である。次に、マネジメントシステムを利用した安全衛生リスクの管理手法について整理した。マネジメントシステムは、目的を達成するために必要十分な事項を確実に実行するために、継続的改善を図る仕組みである。したがって、目的を達成のための必要十分事項が明確であれば、いくつかの条件を整えればマネジメントシステムの運用によってその目的は達成することができる。

医療従事者の放射線防護は、作業環境管理、作業管理、健康管理、労働衛生教育の労働衛生管理の基本を応用することによって、必要十分事項を明確にできるため、マネジメントシステムの応用が有効であると考えられた。併せて、法令順守のための仕組みと必要十分事項および法令事項の調整について検討した。その上で、医療従事者の放射線防護のためのマネジメントシステムの構築について、①基本方針の策定と宣言、②手順および基準の策定、③体制の構築、④計画の策定、⑤目標の設定、⑥実行と記録、⑦目標および実施状況の評価、⑧システム監査、⑨継続的改善ごとに整理した。

【考察】放射線防護を対象としたマネジメントシステムが確実に実行されるためには、リーダーシップの存在と PDCA の運用、関係者の連携が可能となるような体制の整備が必要であると考えられる。また、放射線防護システムの OHSMS や医療機関の経営管理の仕組みとの統合を検討する必要があると考えられる。

【結語】組織トップのリーダーシップや関係者の連携を前提とすれば、管理方法が明確である放射線防護にはマネジメントシステムが有効に働くことは明らかである。今後、マネジメントシステムを利用した放射線防護の好事例の集積が待たれる。

A. 研究目的

労働安全衛生マネジメントシステム (Occupational Health and Safety Management System: OHSMS) の国際規格 ISO45001 が、長期にわたる検討の結果、ついに 2018 年 3 月に発行され、その後日本国内向けに JISQ45001 として JIS 化が図られている。JIS 化に当たっては、日本特有の安全衛生活動を盛り込んだ JISQ45100 も作られている。このことを前提に、現在、厚生労働省において、労働安全衛生マネジメントシステムの指針の見直し作業も進んでおり、これを契機に、日本でも OHSMS の導入が進むと考えられる。その際、ISO45001 は国際的に通用する規格であるが、各企業や法人で OHSMS を導入する際、それ以外の選択肢があることを理解しておく必要がある。ISO45001 を基盤としても外部認証を取得しないという選択肢もあるし、マネジメントシステムの本質を理解したうえで ISO45001 にはこだわらない OHSMS の導入も可能である。

これまでも一部の企業では、国際規格としての OHSAS(Occupational Health and Safety Assessment Series) 18001 が導入されてきたが、二つの大きな課題が存在している場合が少なくなかった。労働安全衛生管理体制を英語に翻訳すると、Occupational Health and Safety Management System となる。すなわち OHSMS は労働安全衛生管理体制そのものであり、マネジメントシステム規格を導入するということは、その規格に則って労働安全衛生管理体制を再構築することに他ならない。それにもかかわらず、OHSMS とは関係なく、労働安全衛生管理が行われているといった、すなわちダブルスタンダードになっている状況が存在することが第一の

課題である。第二に、本来 OHSMS では、労働者の“健康”と“安全”の確保を図るための取組みがバランスよく行われることが必要であるが、著しく安全に偏っているマネジメントシステムが少なくないことである。OHSAS18001 が 2007 年に改訂された際に、健康に関する要素の強化が行われたが、諸要因によって十分に対応できていないまま認証が与えられている。

これまで一部の医療機関において、品質管理 (ISO9001) や環境管理 (ISO14001) を目的にマネジメントシステムが導入された事例は多く存在するが、本格的に OHSMS が導入された事例はほとんどない。それは、OHSMS が医療機関になじまないということではない。マネジメントシステムの考え方は、すべての業種で有効であり、もちろん医療機関においても様々な形で利用可能である。

そこで、OHSMS の導入を前提として、医療従事者の放射線防護への応用について検討することとした。

B. 研究方法

他の分担研究で検討されている不均等被ばくのモニタリングや被ばく管理等の知見をもとに、医療従事者の放射線防護のための管理手法への OHSMS の応用のあり方を検討した。

C. 研究結果

1. マネジメントシステムの骨格の理解

放射線防護へのマネジメントシステムの応用において、その前提となるマネジメントシステムの骨格を整理した。

マネジメントシステムの骨格は、基本方針、体制、目標、計画、評価、監査、マネジメントレビュー、改善である。組織が何を達成しようとするのか、その目的を組織トッ

プが基本方針として表明し、それを組織内外に周知するとともに、目的達成を可能とするシステムを構築する。その際に用いるのが、マネジメントシステム規格である。しかし、マネジメントシステム規格は業種にかかわらず利用可能な設計図であり、その中には具体的な活動の記述はほとんどない。そのため目的達成のために必要な体制や取組について、基本方針を具体化して各組織で検討する必要がある。

基本方針が目的であれば、次に目的を達成するための必要十分条件を明らかにしなければならない。マネジメントシステムは、その必要条件を明確にでき、その実行が現実的であれば機能する。その上で、必要十分条件を満たすために必要な体制を構築し、取組みやルールを、マネジメントシステムの設計図に載せることによって目的の達成を図る。

しかし、どのような活動でもすぐに目的を達成できるわけではない。そこで一定の期間、例えば1年間を決めて、当面の到達点を明確にした目標を立てる。目標が決まれば、目標を達成するために必要な取組を計画として策定する。そして計画に基づき活動を行った上で、目標の達成度を評価し、目標が達成できれば次の期間に向けてより高い目標の設定を検討し、目標が達成できなければその原因を分析し、システムを見直す。併せて、マネジメントシステムの実行性、妥当性、有効性をシステム監査の方法で確認して、その知見を合わせてシステムの改善を検討する。これがマネジメントレビューである。そして改善計画に基づき改善を図る。目標の設定からシステムの改善を繰り返すことによって、当初、基本方針で表現した目的を達成するというのが、マネジメントシステムの骨格である。

2. マネジメントシステムを利用した安全衛生リスクの管理

医療従事者の放射線被ばくは、存在する安全衛生リスクの一つである。労働安全衛生分野では、種々の安全衛生リスクに対する管理手法の原則が存在する。OHSMSにおいても、それらの原則を用いて安全衛生リスクを管理する。すなわち OHSMS においては、前述のマネジメントシステムの骨格が持つ継続的改善の仕組みに、安全衛生上のリスク管理の手法を載せて、運用することによって安全衛生リスクの適切な管理を達成する。そこで、マネジメントシステムを利用した安全衛生リスクの管理手法について整理した。

安全衛生リスク管理のために必要な実施事項をマネジメントシステムに載せるためには、以下のいずれかに分類する必要がある。

- ① 安全衛生リスクを評価したうえで、リスク低減計画を策定して実行する。
- ② 適用法令やその他の外部・内部基準を明確にしたうえで、順守のための計画を策定して実行する。
- ③ 緊急事態等を定義して、その事態に対応するための準備を計画に盛り込み実行する。
- ④ 目標を設定して、目標達成のための計画を策定して実行する。
- ⑤ 諸変更に対して、適切にリスクが管理されるような手順を策定して実行する。
- ⑥ インシデントや不適合等を定義して、その事態が発生した場合には、原因分析を行い、再発防止策に関する計画を策定して実行する。

たとえば、健康障害を発生する可能性のある化学物質を利用する場合、

- ① 化学物質に対するリスクアセスメントを実施して、許容できないリスクが存在していると判断される場合には、使用物質の変更、密閉化、局所排気装置の改善等のリスク低減策、従業員教育等を計画して実行する。
- ② 労働安全衛生法令には、有害性情報の入手、リスクアセスメント、設備基準、作業環境測定、特殊健康診断、作業主任者の選任、記録の保存等の諸規定がある。また、各事業場においては、保護具の着用や管理ルール、設備の利用ルールなどを明確にする。それらを順守するための計画を策定して実行する。
- ③ 化学物質の漏洩や高濃度曝露など、緊急事態を定義して、緊急事態に備えて体制や備品の整備、訓練を計画して実行する。
- ④ 化学物質の健康障害の発生、リスクの状態、保護具の着用、教育の実施など、年間目標を設定して、目標達成のための取組を計画に盛り込み重点的に行う。
- ⑤ 新規化学物質の導入、製造工程の変化など、変更に際して、変更前にリスクの変化を評価して、必要な対応を行うための手順を明確にして、実行する。
- ⑥ 高濃度曝露や健康障害の発生、保護具使用ルールの不順守等が発生した際、原因分析を行い、再発防止策に関する計画を策定して実行する。

このような取組を確実に行うにあたっては、手順等のルールを定めるだけでは不十分である。ISO45001では、多くのプロセスの存在を要求事項としているが、プロセス＝「手順」＋「手順を実行できる力量を持った人」＋「手順を実行できる適切な機械設備等」と定義している。つまり、手順だけでなく、その手順を実行できる力量を持った要員の存在や環境整備も欠かせない。そのため、組

織体制づくり、教育、備品の配置やメンテナンスが重要となる。

3. 放射線防護のための必要十分事項

マネジメントシステムでは、目的を達成するために必要十分な事項を確実に実行するために、継続的改善を図る。したがって、目的を達成のための必要十分事項が明確であれば、いくつかの条件を整えればマネジメントシステムの運用によってその目的は達成することができる。そこで、今回の目的となる医療従事者の放射線防護に関して、その必要十分事項の明確化を試みる。

マネジメントシステムでは基本方針で宣言した内容とは、組織トップがマネジメントシステムを用いて達成したいと考えるシステムの目的そのものである。次に検討すべきことが、その目的を達成するために必要十分な事項を明確化することである。基本方針として、「医療従事者の放射線防護を適切に実施し、健康障害を防止することの徹底を図ること」および「関連する法令を確実に順守すること」を挙げたとする。それでは、「医療従事者の放射線防護を適切に実施し、健康障害を防止することの徹底を図ること」を達成するためには、何をしていればいいのか。また、「関連する法令を確実に順守している」と言えるためには、どのような手順が必要であろうか。

一般に健康障害要因による健康障害を防止するためには、労働衛生リスクに対するリスクマネジメントの手法が用いられる。多くの健康障害要因では曝露限界値や許容濃度・基準といった形で、専門機関から勧告が出されている。放射線被ばくにおいては、線量限度が相当する。医療従事者の放射線防護は、基本的に線量限度を超えないことを全体的な基準とするとともに、可能な被

ばく低減を図ることが必要となる。労働衛生分野では、そのためのアプローチとして、5管理に分類された管理手法を利用する。5管理とは、総括管理、作業環境管理、作業管理、健康管理、労働衛生教育であるが、このうち総括管理とは、OHSMS そのものであり、また健康管理は主に健康影響の早期発見のための特殊健康診断が相当するため、被ばく低減の手法として作業環境管理、作業管理、労働衛生教育の3管理の手法を考えればよい。

まず作業環境管理とは、照射装置の条件の最適化や保護板等による遮蔽によって、術者等の医療従事者が曝される放射線量を低減する方法である。作業管理とは、1回の作業時間や作業回数の管理、被ばく量が小さい立ち位置や手順の利用、防護眼鏡や防護エプロン等の保護具の適切な使用によって、医療従事者の被ばくを低減する方法である。労働衛生教育は、法令や各医療機関で決められた手順の説明や被ばく低減の手法、被ばく線量のモニタリング方法に関して実施することになる。後述のように、院長や診療科長等の管理者、術者や補助者、診療放射線技師等によって役割が異なるため、それぞれに合った教育内容にする必要がある。さらに、適切な保護具や線量計の着用を、放射線施設の入口付近に写真で掲示するなどの認識の維持向上を図る取組を行う。その上で、適切な場所に、適切な個人線量計を装着して、被ばく量をモニタリングし、作業記録と被ばく量記録を管理する。これらの対策の方法が適切で、確実に実行されれば、線量限度以下の被ばく管理が可能となる。その上で、予測しない被ばくや管理不良によって発生しうる健康影響を発見するために、健康管理に分類される特殊健康診断を実施する。

4. 法令順守のための仕組み

OHSMS では、法令順守も重要な目的となるが、多くの規格やガイドラインの要求事項として求められている。放射線防護についても、様々な法的要求事項がある。これらの法的要求事項は、被ばく管理のために必要なリスクマネジメントの要素を反映しているが、状況によっては法令以外の管理方法がより有効な場合もありうるし、リスクマネジメント上は必ずしも必要ではない事項もありうる。法令順守は OHSMS の重要な目的であるから、リスクマネジメントのための必要十分事項のうち法令事項が有効なものについては法令に基づいて行い、そうでない場合でも法令順守の取組を行うことが必要となる。そのため、必要十分事項と法令事項の調整が必要である。

ところで、マネジメントシステムにおける法令順守の取組とは、法令事項を手順や計画に盛り込み実施することだけではない。法令順守のための仕組みを作り、それを確実に実施することを含む。具体的には、以下の項目を確実に実行することを法令順守のための取組が必要となる。

- ① 適用される法令の条文をリストアップする。
- ② 適用条文を事業場の作業環境や労働条件に適用する。
- ③ 安全衛生計画に盛り込み実行する。
- ④ 適用条文のリストを用いて、法令遵守の状況を定期的に確認する。
- ⑤ 非遵守が見つかった場合には、改善を図る。

一度、適切な管理が行われても、設備や組織の変更などによってリスクレベルや法令順守状況が変動しうる。そのような変更時には、変更に関し先立ち変更の影響を想定して

対応することが求められる。法令順守についても、法令改正に対応できる体制を整えておかなければならない。さらには、高線量被ばくが発生した場合を想定して措置の準備を行うとともに、高線量被ばくやそれに繋がるニアミス状態が発生した場合には再発防止策を検討することが必要となる。

5. 医療従事者の放射線防護のためのマネジメントシステムの構築

マネジメントシステムを活用して医療従事者の放射線防護を行おうこととは、“マネジメントシステムの骨格”と“安全衛生リスクの管理の手法”を組み合わせ、運用することに他ならない。具体的に盛り込む内容をマネジメントシステムの要素に従って、順に検討していきたい。

(1) 基本方針の策定と宣言

マネジメントシステムは、運用する組織のトップのリーダーシップが何よりも問われる仕組みである医療機関の場合、ほとんどの場合、院長がそれに相当する。まずは院長が、「医療従事者の放射線防護を適切に実施し、健康障害を防止することの徹底を図ること」、「関連する法令を確実に順守すること」を宣言するとともに、明文化して周知を図る。もし、院長の意識が十分ではなく、この宣言が形だけのものであるとすれば、どのようによい仕組みを設計しても、決して目的を達成することはできないことを、まず認識すべきである。

(2) 手順および基準の策定

マネジメントシステムでは、人によらず標準的に実施すべき手順を文書化する必要がある。また、明確にすべきルールも基準として文書化する。上述の放射線防護のための必要十分事項および法令順守のための仕組みについても同じである。手順については、各検査や装置・備品の管理、被ばくモニタリングなどの手順がある。基準について

は、曝露限界値や保護具の基準などがある。ただし、手順や基準が増えれば増えるほど、その適用のための努力や順守状況の評価も必要になるため、優先順位を考えて文書化する数を減らすことも重要である。

(3) 体制の構築

マネジメントシステムにおける体制は、組織トップを含む各階層の役割、担当者の役割などの明確化、役割に合った教育訓練、資格者の配置、システム運用上の必要事項を検討する会議体等から成る。

教育訓練を年間計画に盛り込み実施するとともに、放射線取扱者ごとの確実な受講を果たすための仕組みを構築する必要がある。資格者について、放射線防止法上の放射線取扱主任者や電離放射線障害予防規則上のエックス線作業主任者及びガンマ線透過写真撮影作業主任者の養成を計画的に行う必要がある。会議体に関して、医療従事者であっても労働者である以上、労働者代表が参加する安全衛生委員会またはそれに準ずる組織で審議することが望ましい。一方、技術的な事項を安全衛生委員会で議論することは現実的ではないことから、専門知識を有するメンバーで議論を行う場の確保が有効である。

(4) 計画の策定

実行すべき事項のうち、1年間の中で時期を定めて実施する事項は年間計画に、リスク低減の取組や問題発生時の原因分析など期限を決めて実施すべき事項は別途管理計画を策定する。いずれも、実施責任者を明確にして、その進捗を定期的開催される安全衛生委員会等の会議体で確認して、必要に応じて体制の増強や計画の見直しを図る必要がある。

(5) 目標の設定

マネジメントシステムにおいて継続的改善のための仕組みの一つが目標の設定とその達成

状況の評価である。目標は、評価指標と目標値で設定する。つまり、一定期間の後に目標値の達成の成否が評価できる仕組みである。評価指標は、システム目的の達成状況とともに、各組織における重点課題を評価指標とすることが有効である。

放射線防護のためのマネジメントシステムでは、少なくとも線量限度を超えた被ばくがないこと、手技ごとの平均被ばく量などのアウトカム評価指標とともに、教育受講率、保護具着用順守率などのプロセス評価指標などが選定される。

これらの目標は、年間目標といったように、一定期間ごとに設定して、その達成状況に応じて見直される。

(6)実行と記録

手順、基準、そして計画に基づき、実行する。その過程や結果のうち、評価および改善に用いるものについては、記録を残す必要がある。記録においては、記録を取ることに負担を可能な限り小さくする工夫が必要である。また高線量被ばく、保護具未着用の発覚等の問題事象を定めておき、そのような事象が発生した場合に、報告、原因分析、再発防止を図る。

(7)目標および実施状況の評価

評価は、目標の評価と実施状況の評価で行う。目標の評価とは、設定した目標が達成できたかどうかの評価である。仮に、線量限度を超える被ばくが“ゼロ”という目標があったとすれば、“ゼロ”であれば達成であり、1件でもあれば不達成である。不達成であれば、その原因分析を行い、マネジメントシステムの内容や運用を改善することを検討しなければならない。

実施状況の評価とは、システムの運用が計画通り行われたか、手順や基準が守られているかの評価である。そのためには、実施状況の記録が必要である。また、実施状況は全数の確認は困難な場合も少なくないため、サンプリングをして確認を行うことも検討する。

(8)システム監査

マネジメントシステムにおける継続的改善（Plan-Do-Check-Act : PDCA）の最強のツールは、システム監査または第三者認証のための外部監査に対して内部監査と呼ばれるものである。監査は、システムの日常的な運用から離れて、システムの状況を客観的に確認して、実行性、妥当性、有効性の評価を行う機会である。認証機関が行う外部監査は、あくまでも規格の適合性を審査することが目的であることに対して、内部監査では、監査チームが幅広い視点から改善の機会を検討し、改善推奨事項が記された監査報告書を作成する。それに組織トップが署名をすることによって、改善の検討を約束することになる。システム監査を受けて、改善事項の内容や方法について検討を行うが、組織トップが約束したことが何もなくされないマネジメントシステムは、まったく機能していないに等しいと言える。したがって、内部監査は改善のための強力な機会になる。

(9)継続的改善

マネジメントシステムのすべての記録、評価結果、システム監査の結果をもとに、必ず組織トップが関わり、改善すべき事項を検討して、改善計画を作成する。改善の対象は、マネジメントシステムのすべての項目となる。立てられた計画は、年間計画や管理計画とともに、進捗管理されることになる。

D. 考察

放射線防護を対象としたマネジメントシステムについて、確実な実施のための事項および OHSMS や経営管理への統合の2つの側面について考察したい。

1. マネジメントシステムで決めたことが確実に実施されるための重要事項

放射線防護は、線量限度の達成及び最適化、法令順守の目標が明確であり、それらを達成するための必要十分事項がリストアップできるため、マネジメントシステムによる管理が適した対象であることは明らかである。それにもかかわらず、マネジメントシステムは運用の方法によっては、形骸化する可能性がある。マネジメントシステムで決めたことが確実に実施されるための重要事項として、リーダーシップの存在とPDCAの運用、関係者の連携が挙げられる。

(1) リーダーシップの存在

マネジメントシステムとは、文書と人材で構築された、特定の目的を達成するための仕組みである。どのような仕組みも、作っただけでは成果を上げられない。マネジメントシステムで決められたことが確実に実施されるためには、いくつかのポイントがある。

すでに何度も述べてきたように、マネジメントシステムは、組織トップのリーダーシップを前提として成果を上げるためのシステムである。組織トップのリーダーシップは、目的の達成のための継続的取組みにコミットすること、経営資源を投資することが含まれる。すなわち組織トップのリーダーシップが発揮されればマネジメントシステムに推進力が高まるし、トップが無関心であればまったく成果を上げることができない。したがって、放射線防護の仕組みにおいても、どのように院長等の組織トップの関心や意欲を高めるかが最も重要な事項である。

(2) PDCAの運用

マネジメントシステムには、特定の目的を達成するために継続的改善を図るための仕組み、すなわちPDCAサイクルが組み込まれていることである。具体的には、以下のようなPDCAサイクルがある。

① 計画を立て、その実施状況を評価し、そ

の結果に基づき計画を見直すこと

- ② 目標を立て、目標達成の成否を評価し、その結果に基づき改善を図ること
- ③ 問題事象を想定しておき、発生時に原因分析を行い、その結果に基づき改善を図ること
- ④ システム監査を行い、マネジメントシステム全体に対して改善事項を抽出し、その結果に基づき改善を図ること

以上のようなサイクルを確実に廻すことによって、取組みをやりっぱなしにすることなく、継続的な改善を図ることが成果を上げる上で不可欠である。

(3) 関係者の連携

マネジメントシステムは、関係者がそれぞれの役割を果たすことで、歯車のように手順を動かすことができる仕組みである。放射線防護においても、医師、放射線技師、看護師、放射線取扱主任者などが、放射線防護の重要性に対して共通の認識を持ち連携することが重要となる。医療従事者間にあるヒエラルキーが、手順の実行に影響しないように、それぞれに明確な役割と権限を持たせなければならない。

2. 放射線防護システムの OHSMS や医療機関の経営管理の仕組みとの統合

(1) OHSMSでの統合

放射線防護は、医療従事者の健康影響を防止することが目的であるが、通常的安全衛生管理とは切り離されて実行されることが少なくない。これは、患者の被ばく低減を目的とした医療管理と重なり合いの大きい管理対象であることが影響していると考えられる。このことは、感染制御においても同じである。しかし、日本の労働安全衛生法では、事業場においてOHSMSの導入が推奨されている。OHSMSの対象は、労働者が曝されるすべての安全リスクや健康リスクが対

象である。OHSMS の導入が導入されている医療機関においては、放射線防護の仕組みを一つのマネジメントシステムに統合して運用することが望ましい。統合を選択しない場合でも、医療管理で扱う事項のうち、医療従事者の安全と健康に関わる事項については、安全衛生委員会への報告が必要であり、併せて OHSMS にその関係を明記することが望ましい。

日本では、医療機関において OHSMS を導入して労働安全衛生管理が実施されている例は多くはない。しかし、ISO45001 が発行し、国の労働安全衛生マネジメントシステム指針の改訂作業が行われている中、今後の導入が期待される。

(2) 経営管理の仕組みとの統合

労働安全衛生は、事業者の責任のもと実施されるべき重要な経営事項であり、その結果によっては経営に大きな影響を与える。また、その達成には、様々な経営資源を投入することが求められる。したがって、労働安全衛生の取り組みは、その他の経営管理の仕組みと統合されることが重要である。例えば、理事会等の議題として状況を確認する、監事監査の対象とするなどである。

いずれにしても、マネジメントシステムは、魔法の杖ではないことを十分に認識し、組織のトップが目的達成に対する高い意欲を持ち、そのもとで手順や基準の作成、教育研修、監査の実施等のための、人的資源が投入されなければならない。また、マネジメントシステムの運用で役割を持つすべての構成員の間で、目的および目標が共有されていなければならない。それらが存在しなければ、マネジメントシステムは機能しないことを念頭に置かなければならない。

E. 結論

放射線防護を、マネジメントシステムを利用して実施するため方策について検討した。現時点では、OHSMS を導入する医療機関は限られており、また医療管理との関係で放射線防護が労働安全衛生管理に統合されていないことがあり、有効な実施事例が存在するわけではない。しかし、組織トップのリーダーシップや関係者の連携を前提とすれば、管理方法が明確である放射線防護にはマネジメントシステムが有効に働くことは明らかである。今後、マネジメントシステムを利用した放射線防護の好事例の集積が待たれる。

F. 参考文献

1. 森 晃爾. 産業保健専門職・衛生管理者のためのマネジメントシステムによる産業保健活動
2. 平林良人. ISO 45001:2018(JIS Q 45001:2018)労働安全衛生マネジメントシステム 要求事項の解説 (Management System ISO SERIES)

G. 研究発表

平成 30 年度なし

H. 知的所有権の取得状況

該当なし

I. 分担研究報告

放射線被ばくと白内障発生の基礎的知見の整理

分担研究者 志村 勉

(国立保健医療科学院 生活環境研究部 衛生環境管理研究領域 上席主任研究官)

研究要旨

放射線の白内障リスクを検討する上で重要な発症メカニズムについて、生物学的な研究による知見を整理し、疫学研究の動向も交えて放射線誘発白内障について解説する。水晶体を構成する線維細胞は水晶体上皮細胞から分化し、最終的に、細胞核やミトコンドリアなどの全ての細胞小器官を消失してクリスタリン (Crystallins) たんぱく質からなる透明な構造になる。放射線の標的は、増殖している水晶体上皮細胞と考えられている。白内障は解剖学的に、発生場所による違いから、核型、皮質型、前囊下型、後囊下型に分類される。核型と皮質型では、病理的变化が水晶体線維細胞に観察され白内障を発症する、一方、後囊下型は、胚細胞体の水晶体上皮細胞の異常が関与する。この後囊下白内障が、主な放射線白内障と考えられている。従来の国際放射線防護委員会 (ICRP) と米国放射線防護審議会(NCRP)が策定した眼の放射線防護基準では、放射線白内障は組織反応に該当し、しきい線量を超えた時にのみ起こると仮定された。従って放射線防護の目的としては放射線利用にあたって線量をしきい値以下に抑え、白内障の発生を防止することであった。しかし、その後の動物モデルでの実験研究や被ばくヒト集団の遅発性、進行性の放射線白内障などの最近のヒトの疫学解析結果から、白内障のしきい線量は従来よりも低く、一部の放射線誘発白内障では、しきい線量がなく確率的影響であることが示唆された。以上のことから、ICRP では、白内障のしきい線量について新たに 1%の白内障の出現率として、線量・線量率効果は採用せずに 0.5Gy を提唱し、従来よりも大幅に低減された。放射線誘発白内障の発症機構に関する生物学的データは少なく、ICRP では、ヒトの疫学データを基に、白内障の線量限度が提唱されている。このため、白内障形成のメカニズムに関する研究が必要とされている。ICRP による水晶体の線量限度に引き下げの勧告により、各国での対応が検討されている。本稿では、これまでの生物学的な研究による知見を整理し、放射線誘発白内障の発症メカニズムについて解説した。放射線白内障に関する情報を整理することにより、リスク評価に役立てることができれば幸いである

A. 研究目的

国際放射線防護委員会(ICRP)では、放射線による視覚障害性白内障を防止するために、眼の水晶体線量限度を勧告している。従来の広島・長崎原爆被ばく者や加速器作業者の疫学調査から、放射線白内障はしきい線量を持つ組織反応と考えられ、水晶体の線量限度を公衆では 15mSv/年、作業員では、150mSv/年を勧告していた。しかし、その後のヒトの疫学調査や原爆被ばく者の再評価などの科学的知見の蓄積により、白内障は従来考えられていたしきい線量よりも低い線量で誘発されることが予想され、2011 年の ICRP 勧告では、作業員の水晶体線量限度を、150mSv/年から 5 年平均で 20mSv/年、かつ、何れの年も<50mSv/年に引き下げるよう勧告している。本稿では、放射線の白内障リスクを検討する上で重要な発症メカニズムについて、生物学的な研究による知見を整理し、疫学研究の動向も交

えて放射線誘発白内障について解説する。

B. 研究方法

これまでの放射線被ばくと白内障発生の基礎的知見をもとに、放射線の白内障リスクを検討する上で重要な発症メカニズムについて整理しまとめた。

C. 研究結果

水晶体の特徴と機能

水晶体は、外界からの光を屈折させ網膜に像を写すレンズの役割とともに紫外線による網膜の損傷を抑える防護機能を持つ。水晶体は外胚葉組織から形成され、前方に虹彩、後方には、硝子体と網膜が存在する。水晶体は透明な被膜に包まれており、外側から、水晶体上皮、水晶体皮質、水晶体核からなる（図 1）。最前方の単一層には、生涯活発に分裂する水晶体上皮細胞が存在し、germinative zone (GZ: 胚細胞体)で増殖す

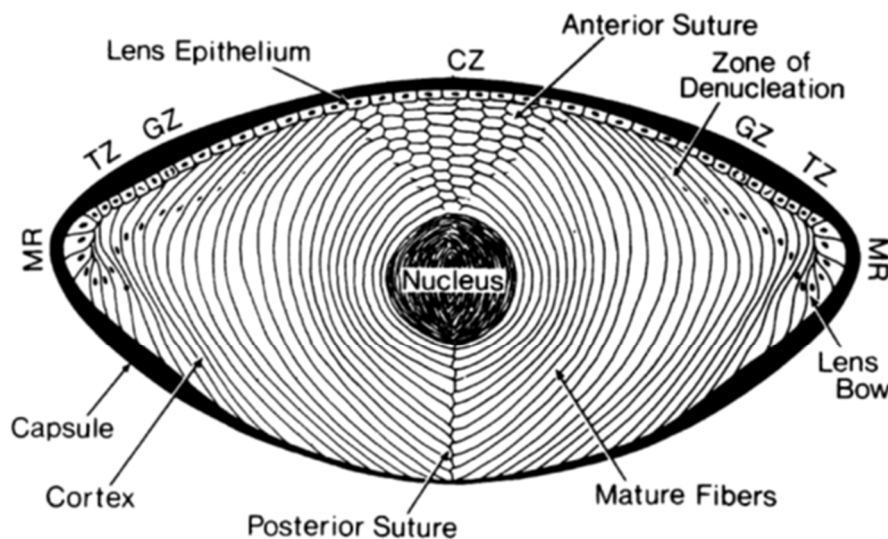


図1 A diagram of a sagittal section of a human lens illustrating the various cellular relationships in that tissue. MR = Meridional Rows, GZ = Germinative Zone, TZ = Transitional Zone, CZ = Central Zone.

G. R. Merriam, Jr and B. V. Worgul Bull N Y Acad Med. 1983 May; 59(4): 372–392.

る。放射線の標的はこの増殖している水晶体上皮細胞と考えられている。水晶体上皮細胞は、分裂後に **transitional zone (TZ: 移行帯)** に移動し、線維細胞への分化を開始する。水晶体の線維細胞は、最終的に、細胞核やミトコンドリアなどの全ての細胞小器官を消失し、クリスタリン (**Crystallins**) たんぱく質からなる透明な構造となる。水晶体には、血管や神経はなく、栄養は血液からではなく、角膜と水晶体の間にある房水から供給される。水晶体の代謝は、水晶体上皮と核を持つ若い水晶体繊維細胞に限られる。加齢とともに水晶体は堅くなり、厚みを持つ。

白内障の発症機序

水晶体は骨髄のように放射線に高感受性の組織の一つである。白内障は、水晶体の混濁化が原因であり、視覚障害を引き起こす。そのリスク因子としては、加齢（老人性白内障）、遺伝組成、紫外線暴露、糖尿病（糖尿病性白内障）、ステロイド（ステロイド白内障）などが知られている。現在までに、白内障の形成を防止する効果的な方法は分かっていないが、水晶体の混濁部を外科的に摘出する治療法により、視覚は改善される。白内障は解剖学的に、発生場所による違いから、核型、皮質型、前囊下型、後囊下型に分類される（図2）。核型と皮質型では、病理的变化が水晶体線維細胞に観察され白内障を発症する、一方、後囊下型は、胚細胞体の水晶体上皮細胞の異常が関与する。この後囊下白内障が、主な放射線白内障と考えられている。しかし、放射線に限らず、加齢やステロイドなどによって、後囊下白内障は誘発される。また、宇宙放射線の被ばくによる

飛行機のパイロットの核型白内障や原爆被爆者の皮質白内障の報告から、放射線は、後囊下白内障以外でも関与することが示唆される。

白内障の病因や発症機構は未解明であり、遺伝要因や環境要因など、多因子が関わると考えられている。放射線誘発白内障では、放射線が胚細胞体の分裂能を持つ水晶体上皮細胞に損傷を与え、細胞死の誘導や細胞分裂を阻害し、その後の回復過程での異常な細胞分裂が、形態異常の細胞が後囊下に蓄積することに関与すると考えられている。

様々な白内障	・老人性白内障 ・糖尿病性白内障 ・ステロイド白内障 ・外傷性白内障 ・放射線白内障
発生場所による分類	・核白内障 ・皮質白内障 ・前囊下白内障 ・後囊下白内障

図2 白内障の分類

白内障に関する組織反応と確率的影響

放射線の人体への影響は、組織反応と確率的影響に分けられる。ICRP, Publication 118において、しきい線量を持つ確定的影響と呼ばれていたいくつかの影響は、単に照射時だけでなく被ばく後に修飾されうることから確定的という表現ではなく、組織反応に変更された[1]。従来、ICRP と米国放射線防護審議会(NCRP) が策定した眼の放射線防護基準では、放射線白内障は組織反応に該当し、線量・反応関係においてしきい値を持ち、それぞれの症状においてある一定レベルの線量までは影響の発生はないが、しきい線量を超えた時

にのみ起こると仮定された。従って放射線防護の目的としては放射線利用にあたって線量をしきい値以下に抑え、白内障の発生を防止することである。1950年代から1960年代にかけての解析から、水晶体の混濁が検出されるしきい線量は線量・線量率効果を考慮し、急性照射で2Gy、分割照射や長期慢性照射で5Gyとされた。視覚障害については、前者で5Gy、後者で8Gy以上とされた。しかし、その後の動物モデルでの実験研究や被ばくヒト集団の遅発性、進行性の放射線白内障などの最近のヒトの疫学解析結果から、白内障のしきい線量は従来よりも低く、一部の放射線誘発白内障では、しきい線量がなく確率的影響であることが示唆された。また、白内障の線量・線量率効果は不確かな要素が含まれることから、ICRP新勧告では採用していない（図3）。眼の水晶体に関する放射線防護の歴史的背景や経緯については、電力中央研究所 浜田氏の総説論文に詳しく紹介されており[2-6]、本報告書の取りまとめにおいて、参考にした。ICRP新勧告しきい線量(0.5Gy)の科学的根

拠

ICRPの旧勧告では、水晶体の微小混濁が必ずしも視覚障害性白内障に進行しないと仮定し、白内障と微小混濁にわけて、線量率効果があるとして、それぞれのしきい線量を勧告した。しかし、被ばくから数十年後に発症する遅発性の放射線白内障の報告から、進行性の白内障の存在が示唆された。ICRP 118では、原爆被爆者の疫学調査から急性被ばくのしきい線量0.5Gy [7, 8]を、また、チェルノブイリ事故清掃員の疫学調査から分割・遷延被ばくのしきい線量では、<0.5Gyを推定した[9]。動物モデル(マウス)を用いた実験研究では、急性照射と比較して、分割照射と遷延照射のしきい線量は高い値が示唆されている。しかし、寿命、視覚に関わる解剖学的、生理学的特性、遺伝的背景などマウスと人での違いから、ヒトの白内障の線量・線量率効果については未解明である。慢性被ばくについては水晶体混濁を指標にしており、白内障への進行に関する不確実性からしきい線量は不明である。以上のことから、ICRPでは、白内障のしき

	組織反応	確率的影響
発症機構	臨床的な水晶体混濁が観察されるのに最小数の損傷細胞が必要と仮定	1個の水晶体上皮細胞が損傷を受け、その細胞が分裂、分化し、損傷水晶体線維細胞の集団を形成し、臨床的混濁となると仮定
科学的根拠	急性被ばくによる早発性の後囊下白内障には明確なしきい線量がある	被ばくから長年経過後に生ずる遅発性で、進行性の放射線白内障の報告 動物モデルと被ばくヒト集団の新たなデータから、白内障を誘発すると一般的にみなされているよりもはるかに低い線量で水晶体混濁が生じる（線量しきい値がない、または小さい） 動物実験より放射線白内障には細胞分裂が必要
しきい線量	検出可能な微小混濁が急性被ばくで0.5~2Gy、慢性被ばくで5Gy 視覚障害性白内障では、急性被ばくで2-10Gy、慢性被ばくで8Gy	進行性の後囊下白内障と遅発性皮質白内障には、しきい線量がないことを示唆（Jpn. J. Health Phys. 藤通ら）

図3 白内障に関する組織反応と確率的影響

い線量について新たに 1%の白内障の出現率として、線量・線量率効果は採用せずに 0.5Gy を提唱し、従来よりも大幅に低減された

多色性変化などの水晶体所見に線量との関係が認められたが、周辺部混濁（所謂、老人性白内障）には線量との関連は認めなかった。しかし、これに反する知見が、その後、得られている。Wide らは、血管腫に対し放

	ICRPの旧勧告	旧勧告からの変更点
微小混濁と視覚障害白内障	微小混濁は、必ずしも視覚障害性白内障に進行しない	微小混濁が視覚障害性白内障に進行すると仮定する
線量率効果	線量率効果があるとして、しきい線量を視覚障害性白内障と微小混濁に分けて勧告 微小混濁が急性被ばくで0.5~2Gy、慢性被ばくで5Gy 視覚障害性白内障では、急性被ばくで2-10Gy、慢性被ばくで8Gy	水晶体の生物影響は、急性被ばく、多分割・遷延被ばく、慢性被ばくで同じと考え、視覚障害性白内障と微小混濁を分けずに、しきい線量 0.5Gy を勧告

図4 新勧告しきい線量 (0.5Gy) の科学的根拠

疫学的な研究に関して、限界や課題

放射線取扱作業者の線量限度は、眼の水晶体に対して 150mSv/y であり、これは、原爆被爆者に被ばく後 2~3 年後頃から発症した原爆白内障の知見に基づく。しかし、その後、放射線の遷延性の影響として老人性白内障があることが明らかになり、原爆被爆者の白内障の再評価が始まっている。この再評価は、水晶体に対する放射線影響の新たな生物学的事実の発見、新しい眼科障害評価法の開発、新しい疫学的交絡因子や危険因子の発見などに基づいている。従来、放射線の眼の水晶体への影響は、被曝後、主として 2-3 年 (0.5-35 年) で細隙灯顕微鏡検査により観察される後囊下部軸混濁が出現し、その閾値は、0.5-2.0Gy であり、視力障害をきたすことなく長期に安定しているとされてきた。また、より高い線量では、視力障害を伴う放射線白内障を発症するが、その閾値は、5Gy であるとされてきた。このように被爆者の後囊下部軸混濁や

射線治療 (1-8Gy) を幼児期に受けた患者の照射を受けなかった側の眼に (最小で 0.1Gy)、照射 30-45 年後に、後囊下部軸混濁の水晶体変化があることを認めた。Brown は放射線に起因した水晶体上皮細胞障害がかなりの年数を経て偏在化する可能性を指摘した。Klein らは、Beaver Dam Eye Study で、調査対象の 4926 人のうちコンピューターX 線体軸撮影法(CAT)834 人と 16.9%のみではあるが、水晶体後囊下部混濁 (95% CI: 1.08-1.95)と水晶体核混濁 (95% CI: 1.02-1.1.61)で検査履歴と関係があることを認めた。ここで、CAT で水晶体が受ける線量は 6-80mSv (眼の水晶体の等価線量として示されている) とも推定している。鍊石和男らは、白内障で手術を受けた症例 479 人を含む、2000 年から 2002 年に健康診断を受けた推定線量の判明している原爆被爆者 3,761 人を対象に、線量反応を推定するためロジスティック回帰解析を行い、尤度プロファイル法を用い最適閾値モ

デルの決定を試みている。その結果、1Gy 当たりのオッズ比 1.39、95%信頼区間 1.24-1.55 で手術となった白内障の有病率に統計的に有意な線量反応増加が認められた。線量を 0-1Gy に限定すると線量反応は示唆的となり、有意ではない閾値 0.1Gy (95%信頼区間 <0-0.8) が認められ、これまで推測されている閾値 2-5Gy よりかなり低く、全く閾値がないという考えとも統計学的には矛盾しない結果を得ている。また、宇宙飛行士を対象にした調査では、Cucinotta らは、NASA の Longitudinal Study of Astronaut Health (LSAH) と個人の職業上の被ばく情報を組み合わせることで、水晶体に 8mSv を超える曝露があった宇宙飛行士で、白内障のリスク増加を検出している。さらに、後囊下部軸混濁だけではなく、周辺部混濁と放射線との関係でも新しい知見が得られている。重度の周辺部混濁は一般集団では 52-64 歳で 5%、65-74 歳で 18%、75-84 歳で 46% に観察され、軽度の混濁はそれぞれ 41%、73%、91%出現しており、これらはいわゆる老人性白内障といわれているものである。1980 年代初めの放射線影響研究所が実施した成人健康調査 (AHS) 対象者に対する眼科調査では、水晶体周辺部の皮質混濁 (いわゆる老人性白内障) には原爆被爆の影響はないとされてきた。しかし、2000 年 6 月から 2002 年 9 月まで成人健康調査 (AHS) 対象者に対し行われた眼科調査では、873 人について解析が行われ、その結果、原爆被爆後 30 数年以降に発生した後囊下混濁および水晶体周辺部皮質混濁の二つの型の白内障に新たに放射線の影響があることが分かった。この結果は、小児期に血管腫の放射線治療を受けた人において、30-40 年後に

上記の型の白内障が増加したというスウェーデンの研究報告に合致する。

一方、医療従事者へのリスクに関しては、血管内治療を行う医師に白内障やレンズ内の混濁が発生するリスクが高いという報告が 2004 年の RSNA でなされ、わが国でも日本脳神経血管内治療学会放射線防護委員会では、学会中に学会参加者を対象に実態を調査した。

この調査は、第 20 回日本脳神経血管内治療学会で 191 人の脳血管内治療医を対象に水晶体を検査した。被ばく線量と水晶体の混濁の関係は見いだされていないが、差の検出力が十分ではないことや水晶体の混濁を無散瞳で眼科検査装置を用いて判断していることの限界がある。また、第 35 回日本 IVR 学会で IVR 学会防護委員会が IVR 術者の水晶体への被ばくによる影響を金沢医科大学眼科学教室の協力を得て調査した。対象は、主として腹部 IVR を施行し、IVR 件数が 500 件を超える医師である。左眼を散瞳させて、眼科医による診察を行った。平成 18 年度の測定データでは、長瀬ランダウア社で計測した医療従事者 89,232 人のうち、診療放射線技師の平均水晶体線量は、3.37 mSv と医師の 2.32 mSv と比べて高く、検出限界を下回った割合も、21.6%と医師の 60.0%に比べて低い。平成 20 年度のデータでは、医師の 0.6%が頭頸部の 1cm 線量当量が ICRP が勧告する線量限度である 50 mSv を上回った。また、千代田テクノル社で計測した医師 50,454 人、診療放射線技師 23,904 人では、平均水晶体線量はそれぞれ 0.59 mSv、1.12 mSv と診療放射線技師の方が高い。

高橋が、平成 19 年度日本学術振興会科学研

究費補助金により、診療放射線技師の人員を調査したところ約 4 万人が病院等に就業しており、そのうち女性技師は約 6,000 人を占め、放射線を利用した職業ではかなり多くの割合になると思われる。これは、その被ばくに伴う不安やストレスを感じている女性技師が多数いるのではないかと予想される。また、就業期間中は、電離放射線障害防止規則により健康診断が実施されているが、定年後はまったくフォローされておらず長年の低線量被ばくによる影響は不明である。

その後の知見としては、(1,2)米国での診療放射線技師を対象にした調査と(3)ロシアのマヤックでの労働者の調査、それに(4)中国の高自然放射線環境での疫学研究の結果を整理する。

(1) 米国の診療放射線技師の前向きコホート研究者の参加者を対象にした追跡調査

5 年間の累積水晶体吸収線量の平均値は 56 mGy (四分位範囲 24-69 mGy)であり、5 年間の累積水晶体吸収線量は自己申告白内障発症と強い関係にあった。過剰ハザード比は $0.69 \times 10^{-3}/\text{mGy}$ (95% CI 0.27×10^{-3} to 1.16×10^{-3} , $p < 0.001$)であり、100 mGy 未満に限定しても白内障リスクと線量関係が検出されていた($p = 0.03$)。一方、白内障の手術歴とは有意な関係は検出されていなかった (0.34×10^{-3} (95% CI -0.19×10^{-3} to 0.97×10^{-3} , $p = 0.22$))。

本研究の特徴を浜田は、『本研究は、疾病の情報が自己報告に基づいており、発症部位別(後囊下など)の情報がないなどの弱みはあるが、コホートサイズが大きい低線量・低線量率・遷延被ばく集団であり、水晶体線量も

推定されており、重要な疫学データを供する。』とまとめている(浜田信行. 放影協ニュース 2018. 4, No.95)。

(2) 米国での核医学診療に従事する診療放射線技師を対象にした追跡調査

核医学に従事することは有意な白内障発症のリスクであった (HR, 1.08; 95% confidence interval [CI]: 1.03, 1.14)。1980 年代から 2000 年代初期の診断核医学従事はリスクがより高いことが判明した (HR, 1.30; 95% CI: 1.08, 1.58)。特別な放射線防護との関係では、1980 年代に放射線治療に従事でリスク増加 1980s (HR, 1.32; 95% CI: 1.04, 1.67)があった以外は関係を見いだせなかった。この研究では個別の眼の水晶体の線量評価がなされていなかったことから、今後、眼の水晶体の等価線量との関係を明らかにすることが求められるとされた。

(3) ロシアでのマヤックの労働者を対象にした追跡調査

マヤック作業者は、初期の線量率が高いことや、線量計測に弱みがあるものの、コホートサイズが大きい慢性被ばく集団で、線量範囲が広く、症例数も多いことから、重要な疫学データを提供するとされており(浜田信行. 放影協ニュース 2018. 4, No.95)、0.25Gy 以上では、白内障全体のリスクが直線的に増加することが 2016 年に報告されていた。

第 2 報として、発症部位別(後囊下、皮質、核)の白内障リスクが発表されたものであり、後囊下だけではなくいずれの発症部位でも線量に応じたリスクが観測されている。

(4) 中国での高自然放射線地域での疫学研究

慢性被ばく集団の他の疫学としては、2015年に、中国陽江市の高自然放射線地域の45歳の住民における知見が報告されている。皮質白内障と核白内障のリスクは増加しなかったが、後嚢下白内障のリスクは有意に増加していることが確認されている。生涯累積線量は、最大でも数100mSv程度であると考えられ、更なる解析が期待されている（浜田信行．放影協ニュース 2018. 4, No.95）。

D. 考察

生物学的な研究に関して、新しい知見による機序解明の進展度を解説

放射線誘発白内障の発症機構に関する生物学的データは少なく、ICRPでは、ヒトの疫学データを基に、白内障の線量限度が提唱されている。このため、白内障形成のメカニズムに関する研究が必要とされている。放射線の標的細胞は増殖している細胞で、水晶体では、唯一、水晶体嚢の前方(角膜側)の増殖体に存在する水晶体上皮細胞であると考えられる。ヒト胎児から作成されたヒト正常水晶体上皮細胞（human lens epithelial cell）を用いた、*in vitro*での細胞レベルの解析から、この細胞は、一般的に用いられているヒト正常繊維芽細胞と放射線感受性が同等であることや、放射線照射後に過増殖する細胞が存在することが報告されている。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。放射線誘発白内障には、抗酸化能の低下に

よる酸化ストレスが関与することが報告されている。動物実験により、ATMを欠損すると放射線誘発白内障が早期に観察されることから、ATMによるDNA損傷応答と白内障との関係が示されている。水晶体はクリスタリンと呼ばれる線維たんぱく質線維が秩序だって配置され、高度に構造化された形を形成し、水晶体の透明性を維持している。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。

ヒト不死化水晶体上皮細胞を用いて、線維細胞に分化誘導し、水晶体の再構築モデルの作製が試みられている。従来の培養フラスコでの単層培養ではなく、三次元水晶体の再構築が取り組まれ、より生体内での現象を反映した解析が可能であると考えられる。このような系を利用し、放射線による細胞凝集体の異常やクリスタリントンパク質の異常の解析を行い、放射線白内障の発症機構について、今後のさらなる解析が必要である

疫学研究に関しては、最近の研究でもリスクが検出されており、100 mGy未満に限定しても白内障リスクと線量関係が検出され、後嚢下以外に、皮質や核でも白内障リスクが見いだされていることに着目すべきであると思われた。

E. 結論

ICRPによる水晶体の線量限度に引き下げの勧告により、各国での対応が検討されている。本稿では、これまでの生物学的な研究による知見を整理し、放射線誘発白内障の発症メカニズムについて解説した。また、最

近の疫学研究の知見のうち注目すべきこととして 100 mGy 未満に限定しても白内障リスクと線量関係が検出され、後囊下以外に、皮質や核でも白内障リスクが見いだされていることを提示した。放射線白内障に関する情報提供により、リスク評価に役立てることができれば幸いである。

謝辞

電力中央研究所原子力技術研究所放射線安全研究センターの浜田信行主任研究員に有益なご示唆を頂きました。

F. 参考文献

1. 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*. 2012; **41**(1/2).
2. Ainsbury, EA, Barnard, S, Bright, S, *et al*. Ionizing radiation induced cataracts: Recent biological and mechanistic developments and perspectives for future research. *Mutation research*. 2016; **770**(Pt B): 238-61.
3. Hamada, N. Ionizing radiation sensitivity of the ocular lens and its dose rate dependence. *International journal of radiation biology*. 2017; **93**(10): 1024-34.
4. Hamada, N, Fujimichi, Y. Classification of radiation effects for dose limitation purposes: history, current situation and future prospects. *Journal of radiation research*. 2014; **55**(4): 629-40.
5. Hamada, N, Fujimichi, Y. Role of

carcinogenesis related mechanisms in cataractogenesis and its implications for ionizing radiation cataractogenesis. *Cancer letters*. 2015; **368**(2): 262-74.

6. Hamada, N, Fujimichi, Y, Iwasaki, T, *et al*. Emerging issues in radiogenic cataracts and cardiovascular disease. *Journal of radiation research*. 2014; **55**(5): 831-46.
7. Minamoto, A, Taniguchi, H, Yoshitani, N, *et al*. Cataract in atomic bomb survivors. *International journal of radiation biology*. 2004; **80**(5): 339-45.
8. Neriishi, K, Nakashima, E, Minamoto, A, *et al*. Postoperative cataract cases among atomic bomb survivors: radiation dose response and threshold. *Radiation research*. 2007; **168**(4): 404-8.
9. Worgul, BV, Kundiyev, YI, Sergiyenko, NM, *et al*. Cataracts among Chernobyl clean-up workers: implications regarding permissible eye exposures. *Radiation research*. 2007; **167**(2): 233-43.
10. Little MP *et al*. Occupational radiation exposure and risk of cataract incidence in a cohort of US radiologic technologists. *Eur J Epidemiol*. 2018 Dec;33(12):1179-1191.
11. Bernier MO *et al*. Cataract Risk in a Cohort of U.S. Radiologic Technologists Performing Nuclear Medicine Procedures. *Radiology*. 2018 Feb;286(2):592-601.
12. Tamara V. AzizovaE, Nobuyuki Hamada, Evgeniya S. Grigoryeva. Risk of various types of cataracts in a cohort of

Mayak workers following chronic occupational exposure to ionizing radiation. European Journal of Epidemiology. 2018, 33(12), 1193–1204.

13 Wang Yan, Akiba S, Sun Quanfu. Survey of lens opacities of residents living in high background radiation area in Yangjiang, Guangdong province. Chinese Journal of Radiological Medicine and

Protection, 2015, 35(2):130-133.

G. 研究発表

平成 30 年度なし

H. 知的所有権の取得状況

該当なし

III. 研究成果の刊行に関する一覧表

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（180501-1）

研究成果の刊行に関する一覧表：刊行書籍又は雑誌名（雑誌の時は、雑誌名、巻数、論文名）、刊行年月日、刊行書店名、執筆者氏名

刊行書籍又は雑誌名（雑誌の時は、雑誌名、巻数、論文名）	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
増補新訂 医療機関における産業保健活動ハンドブック（第5章-2レントゲン撮影等の放射線被曝対策）	2019年 2月	公益 財団 法人 産業 医学 振興 財団	盛武 敬
増補新訂 医療機関における産業保健活動ハンドブック（第5章 コラム：放射線単位のいろいろ）	2019年 2月	公益 財団 法人 産業 医学 振興 財団	茂呂田 孝一
増補新訂 医療機関における産業保健活動ハンドブック（第5章 コラム：診断参考レベルを用いた患者被曝防護の最適化）	2019年 2月	公益 財団 法人 産業 医学 振興 財団	茂呂田 孝一
増補新訂 医療機関における産業保険活動ハンドブック（第5章 コラム：診療放射線技師さんとの立ち話で役立つ線量値あれこ	2019年 2月	公益 財団 法人	茂呂田 孝一

れ)		産業 医学 振興 財団	
増補新訂 医療機関における産業保健活動 ハンドブック（第5章 コラム：水晶体等価 線量限度（20mSv/年）引き下げの経緯）	2019年 2月	公益 財団 法人 産業 医学 振興 財団	永元 啓介
増補新訂 医療機関における産業保健活動 ハンドブック（第5章 コラム：いろいろな 放射線防護具）	2019年 2月	公益 財団 法人 産業 医学 振興 財団	松崎 賢
Radiation Protection Dosimetry, 2018 Nov 17: Estimation of patient lens dose associated with c-arm cone-beam computed tomography usage during interventional neuroradiology.	2019年 11月17 日		Kawauchi S, Chida K, Moritake T, Matsumaru Y, Hamada Y, Sakuma H, Yoda S, Sun L, Sato M and Tsuruta W
日本放射線技術学会誌, 75 (3) , 263-269, 2019 脳血管撮影における患者被ばく防護の最適 化への第一歩 血管撮影装置表示値による撮 影目的・疾患群別診断参考レベル設定の可 可能性調査..	2019年 3月1日		人見 剛, 松原 俊二, 盛武 敬, 他
Radiation Protection Dosimetry (2019), A PHANTOM STUDY TO DETERMINE THE OPTIMAL PLACEMENT OF EYE DOSEMETERS ON	in press.		H. Ishii, K. Chida, K. Satsurai, Y. Haga, Y. Kaga, M. Abe, Y.

INTERVENTIONAL CARDIOLOGY STAFF,			Inaba, M. Zuguchi.
医療放射線防護 2018 ; (79) : 20-21. 医療放射線の安全管理に関する規制整備の 議論から 線量の記録などどう向き合う べきか.	2018年 8月1日		山口一郎

研究成果による知的財産権の出願・取得状況:知的財産の内容、種類、番号、出願年月日、
取得年月日、権利者

- 1) 線量計ホルダ:特願2018-149742(2018年8月8日出願), 発明者:盛武 敬, 孫 略, 永元啓介,
小野洋彰, 出願人:盛武 敬, 孫 略, 永元啓介, 有限会社コスモテック, 株式会社保科製作
所

