労災疾病臨床研究事業費補助金

眼の水晶体の放射線防護に資する機材開発推進および被ばく低減のための多角的研究

令和２年度～令和４年度 総合研究報告書

研究代表者 千田 浩一

令和５年（2023 年）３月

I. 総合研究報告

眼の水晶体の放射線防護に資する機材開発推進および被ばく低減のための
多角的研究
千田　浩一・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5

II. 資料（各分担者報告）

1. 放射線防護機材の技術的課題等の情報について調査・収集
およひ放射線防護機材等の改良などに関する研究
千田　浩一・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 31
2. 労働衛生の5管理に則った多角的被ばく低減対策
盛武　　敬・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 85
3. 水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査
佐々木　洋・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・147
4. 水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査
雑賀司珠也・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・153
5. 眼の水晶体の放射線防護に資する実態調査
黒坂大次郎・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・157
6. 防護眼鏡改良研究
赤羽　正章・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・161
7. 放射線診療従事者向け放射線防護教育コンテンツの開発
藤淵　俊王・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・167
8. 国内外の開発上の技術的課題等の情報についての調査・収集
赤羽　恵一・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・195

III. 研究成果の刊行に関する一覧表

・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・203

I. 総合研究報告

労災疾病臨床研究事業

（総合）研究報告書【令和 2 年度～令和 4 年度】

眼の水晶体の放射線防護に資する機材開発推進および被ばく低減のための多角的研究

（200701-01）

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

研究要旨

令和 2 年度～令和 4 年度において、(1)放射線防護機材の技術的課題等の情報について調査・収集（含む臨床研究）、(2)放射線防護機材の改良等に関する研究、(3)水晶体線量計等の改良に関する研究、並行して放射線防護教育研究、国内外の開発上の技術的課題等の情報について調査・収集等について取り組んだ。 3 年間で下記の成果を挙げた。

リアルタイム線量計 i3 の IVR 臨床おいての有用性を確認でき、本検討により天吊り防護板の不適切使用例が 8 割程度もあることなど重要な結果が分かり、天吊り防護板の位置の重要性を再認識することができた。心血管 IVR 看護師の水晶体の被曝線量を安全側に評価するためには、PCI では左眼近傍、ABL では右眼近傍に線量計を装着して測定することが適切であると思われた。PET 看護師が線量限度の 1 年平均値である 20mSv/年を超過する可能性は低いと考えらた。改良新型 0.07mmPb 当量防護眼鏡は高い遮蔽率となったが、まだ十分な防護効果を有しているとは言えないため、今後、遮蔽能力向上、IVR 術者の水晶体被曝の低減を目指して、さらなる防護眼鏡の改良と種々の検討を行う必要がある。今回試作した X 線防護壁付放射線シールドドレープ単体の評価では、透視や撮影の角度によって十分な遮蔽効果が得られないことがあるため、さらなる改良や天吊り防護板など他の防護具との併用が重要であると考えられた。IVR 医師の放射線防護には 0.35mmPb 当量の無鉛防護エプロンがより適していると思われた。IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）の試作品の着用時における装着感に関しては、全く問題無く十分に実用可能であると思われた。IVR 術者の水晶体被ばくを低減するために開発した試作放射線防護具（突出型）は、効果的に水晶体を防護できることが確認できた。DOSIRIS の改良試作型ヘッドセットの使用感に関する初期検討を行った結果、改善点はあるものの改良試作型ヘッドセットでは、特に圧迫感及び違和感を覚えにくい構造へと変化しており、使用感の向上が見られた。このように、改良試作型ヘッドセットの有用性について示された。頭部から発生する後方散乱線が水晶体被ばくに及ぼす影響について検討した結果、水晶体被ばく線量における後方散乱線含有率は約 20%であり、含有率は管電圧の増大に伴い増加した。

水晶体等価線量が定常的に 20 mSv/年を超える医師の実態調査結果から、経験年数に応じて水晶体等価線量は下がっておらず、むしろ難しい放射線診療に従事することから、さらに高くなる可能性が明らかとなった。オーバーテーブル透視装置用のショートカーテンの開発に

関して、ショートカーテン単体では水晶体線量低減率は低いが、汎用性の高さから、すべての透視手技における集団水晶体等価線量を低減することが期待できる。放射線防護教育研究に関して、血管造影検査室の散乱線を AR アプリケーションで可視化し、医療スタッフに対して天井懸架型防護板の適切な使用方法を理解させる教材を開発し評価したところ、医師・看護師・診療放射線技師・臨床工学技士すべてのスタッフから高い評価を得ることができた。IVR 開始直前のブリーフィングにて、個人線量計と個人保護装具を正しく装着されているかを確認すると、それらの装着率は劇的に上昇し、100％に近づいた。

令和 2 年度～令和 4 年度において、脳神経血管造影検査・血管内治療の従事者および IVR 従事者を対象にした白内障調査を行い、放射線被ばく量との関連を検討した。全対象者のうち 9 割以上は視力良好であり、顕著な視力低下をともなう白内障は認められなかった。放射線白内障の初期病変とされる後嚢中心の Vacuoles の有病率は左右眼とも 15%程度であり、これらが今後視力低下をともなう放射線白内障につながる可能性も考えられるため、長期での詳細な観察が必要である。

ZERO-GRAVITY の遮蔽効果は従来の防護デバイスより高く、使用感などの課題は残るものの、次世代のデバイス開発の参考になる特長を有していた。天吊り防護板の遮蔽効果は、防護板下縁と患者との隙間が小さいほど高まった。防護板を更に下げる場合、弛んだ鉛カーテンの下縁を患者頭側に折り返すと遮蔽効果が低下するので、患者尾側へ折り返すべきである。防護板下縁と患者との隙間の大きさに応じて防護板をやや術者寄りに配置することで、遮蔽効果を高められる可能性がある。

WebXR を用いた新たな放射線防護教育手法を開発した。WebXR により仰臥位での X 線照射時の散乱線の広がりを視覚的に観察し、理解することができ、利用者の放射線防護に対する興味、理解、自信が向上することを確認した。今後は、より良い教育効果を得るために、利用者の放射線防護の習熟度や使用目的に合わせて、より効果的な放射線防護教育教材を開発することが望まれる。

国内外の開発上の技術的課題等の情報について調査・収集に関して、各種防護具の有用性だけでなく、課題も示されており、状況に応じて包括的に選択し、合理的低減を図ることが重要である。防護と線量評価が業務で求められるようになってきており、実務的・効果的な防護方法及び線量評価法への関心が高いと言える。

複数以上の防護具を併用することで防護効果がより期待できるが改良の余地がある防護具も存在する。症例の難易度に合わせて適切な防護具を用いることも必要である。引き続き新発想の防護具開発や各種の防護具の臨床評価や改良が必要である。今後リアルタイム評価症例を重ね IVR 術者の行動解析を行い、防護戦略を立案する必要がある。白内障の実態調査についても貴重なデータが収集されており長期での継続調査等が必要である。常に被ばく低減に意識をしながら IVR 手技に臨むことが必要であり、そのためにも放射線防護教育研究の重要性は高い。

【研究体制】 代表 千田　浩一　東北大学・災害科学国際研究所/医学系研究科・教授

研究分担者

盛武 敬	量子科学技術研究開発機構・部長（前　産業医科大学・准教授）
赤羽 正章	国際医療福祉大学・医学部・教授
佐々木 洋	金沢医科大学・眼科学講座・教授
雑賀 司珠也	和歌山県立医科大学・眼科学講座・教授
黒坂 大次郎	岩手医科大学・眼科学講座・主任教授
藤淵 俊王	九州大学・医学研究院・教授
赤羽 恵一	量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所・研究統括

主な研究協力者

欅田　尚樹	産業医科大学・産業保健学部・教授
稲葉　洋平	東北大学・災害科学国際研究所・助教
初坂　奈津子	金沢医科大学・眼科学講座・助教
喜多村 紘子	産業医科大学産業医実務研修センター・准教授
茂呂田　孝一	新小文字病院　技師長
加藤　守	秋田県立循環器・脳脊髄センター　技師長
山田　雅亘	国立循環器病センター　主任技師
芳賀　喜裕	仙台厚生病院　主任技師
江口　陽一	日本血管撮影 IVR 専門放射線技師認定機構　監事(前理事長)
栗山　智子	産業医科大学　大学院生
松崎　賢	産業医科大学　大学院生
永元　啓介	産業医科大学　大学院生
中上　晃一	産業医科大学　大学院生
太田　洋一	東北大学　大学院生
曽田　真宏	東北大学　大学院生
遠藤　美芽	東北大学　大学院生
村林　優樹	東北大学　大学院生
大友　一輝	東北大学　大学院生
巻　周星	東北大学　大学院生
大森　悠斗	東北大学　大学院生　ほか

さらに放射線防護機材の開発等を行う事業場の担当者として、日本画像医療システム工業会（JIRA）から保科匠氏（グローバルエンブレイスメディカル）、前田賢氏（株マエダ）、尾池千穂氏（東レ・メディカル）らが参画。

A. 研究目的
B. 研究方法
C. 研究結果
D. 考察
E. 結論
F. 論文報告等
G. 研究発表
H. 知的所有権の取得状況
I. 健康被害情報
J. 関係団体等との連携および行政への貢献
K. 多角的研究の取り纏め

A. 研究目的

眼の水晶体の新しい等価線量限度取入れ運用に際し医療分野は特に課題が多い。本研究は医療施設の従事者が受けている眼の水晶体被ばくの防護状況の実態を詳細に把握すること、さらに本申請課題は医療施設の労働者の水晶体被ばく低減を図るため、放射線防護機材に求められるニーズ等の情報を収集し、今後の機材開発に資する検討、すなわち機材開発の推進のための課題整理を行うことを目的とする。

そのために、(1) 放射線防護機材の技術的課題等の情報について調査・収集（リアルタイム線量評価、水晶体被ばく実態調査、白内障の実態調査）、(2) 放射線防護機材の改良等に関する研究、さらに (3) 水晶体線量計等の改良等に関する研究を実施する。また並行して、放射線防護教育研究、そして関係学会及び団体との連携研究および国内外の開発上の技術的課題等の情報について調査・収集を行う。

3年間で、具体的に下記の項目について主に取り組み成果を挙げた。

B. 研究方法

1. 千田担当研究（リアルタイム線量評価、水晶体被ばく実態調査、放射線防護機材の改良等に関する研究、水晶体線量計等の改良等に関する研究）

リアルタイム線量評価について、まずリアルタイム線量計（RaySafe i2 および i3）の基本性能評価を行った。安定性、管電圧依存性、線量依存性、線量率依存性、電波特性、角度依存性、後方散乱、透過率、パルス透視応答などについて調べた。次にリアルタイム線量計を用いた IVR 術者の初期臨床研究を行った。心臓 IVR での、術者（医師）の IVR 手技中の水晶体と頸部の線量の測定を、RaySafe i3 を用いてリアルタイムに行った。水晶体線量測定の際は、IVR 術者の頭部にヘアバンドを装着しその上に i3 を術者の左眼近傍に取り付けた（すなわち防護眼鏡の外側の線量測定）。頸部位置の場合は、IVR 術者の左頸部付近のプロテクターの上に i3 を装着した。

水晶体被ばく実態調査に関して、IVR 看護師および PET 看護師について調査した。IVR 看護師は蛍光ガラス線量計を用いた手技 1 件ごとの線量評価と、さらに水晶体線量計と個人線量計を用いた長期間測定も実施した。PET 検査に従事する看護師に関しては、4名について6か月間の線量測定を実施した。線量計は水晶体線量計と個人線量計を用い、両者の違いについても検討した。さらに年間水晶体線量と線量限度の 1 年平均である 20 mSv を超過する件数を推定した。

放射線防護機材の改良等に関する研究に関して、0.07mmPb メガネ改良に関する基礎検討、放射線シールドドレープ改良研究、IVR 医師の無鉛エプロン放射線防護効果研究、IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）の試作、IVR 術者水晶体被ばく

低減用試作放射線防護具開発について実施した。新型 0.07mmPb 防護眼鏡の初期臨床評価は心臓 IVR 術者 7 名にて水晶体用線量計 DOSIRIS を装着して測定評価した。放射線シールドドレープ改良研究は、橈骨動脈アプローチ用の X 線防護壁付放射線シールドドレープを試作し、その遮蔽効果に関するファントム実験を行った。IVR 医師の無鉛エプロン放射線防護効果研究は、IVR 臨床での遮蔽効果と手技中の医師の快適度について比較評価した。IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具(フェイスシールド)の試作については、ファントムを用いた初期検討を行った。IVR 術者水晶体被ばく低減用試作放射線防護具開発(突出型)については、ファントムを用いた基礎的実験を実施した。

水晶体線量計等の改良等に関する研究については、水晶体用線量計 DOSIRIS®の改良試作型ヘッドセットに関する初期検討を実施した。ポータブル X 線撮影及び血管撮影に従事する診療放射線技師 7 名を対象とし、改良試作型ヘッドセットの使用感に関するアンケート調査を実施した。つぎに頭部から発生する後方散乱線が水晶体被ばくに及ぼす影響について、蛍光ガラス線量計と各種ファントムを用いて調査した。

2. 盛武分担研究(水晶体被ばく実態調査、放射線防護機材の改良等に関する研究、放射線防護教育研究)

水晶体等価線量が定常的に 20 mSv/年を超える医師の実態調査について検討した。調査病院における水晶体等価線量が 20 mSv/年を超える医師は 1 名のみであった。その医師を対象とし、過去 4 年間(2016-2019 年)の水晶体等価線量、血管造影検査・IVR 件数、および透視時間の推移を調査した。

放射線防護機材の改良等に関する研究についてはオーバーテーブル透視装置用の放射線防護カーテン(ショートカーテン)の開発と効果の検証を行った。ショートカーテンは 100×30×0.5 cm の含鉛カーテン部分と、X線管コリメーターとの接着部で構成されている。ショートカーテンの水晶体線量低減率は、ファントムを使用して測定した。

放射線防護教育研究について、Augmented Reality(AR)を利用し、血管造影検査室の天井懸架型防護板の正しい使い方を学習するためのアプリケーションの開発と評価を行った。また、インターベンショナルラジオロジー医師に対する術前ブリーフィングが個人線量計および個人保護装具の使用に与える影響について調査した。調査者の目視による正確な実態調査を実施し、適切に装着されていない場合は、術前ブリーフィングによる個人線量計と個人保護装具の装着を促す介入を行うという、実践力に特化した教育を行った。

3. 佐々木、雑賀、黒坂分担研究(水晶体被ばく実態調査:白内障の実態調査研究)

白内障学会の全面的協力のもと、国内の診療放射線従事者(医師・診療放射線技師・看護師)の水晶体被ばくの実態を把握するために、対象者らが集う学会において詳細な白内障検診を行い、放射線被ばくと各種白内障混濁病型の関連を調査した。眼科医による散瞳下での細隙灯顕微鏡検査のほか、Scheimpflug slit カメラおよび徹照カメラを用いた水晶体撮影画像による画像診断や Optical Coherence Tomography(光干渉断層撮影;以下 OCT)も含めた調査とした。白内障は進行例において視機能低下を生じる 3 主病型(皮質、核、後嚢下)と 2 副病型 Retrodots、Waterclefts、放射線白内障の初期病変である微小混濁 Vacuoles の 6 病型について検討した。

4. 赤羽正章分担研究（放射線防護機材の改良等に関する研究）

血管撮影室で用いられる防護デバイスの遮蔽効果や臨床使用における課題を取りまとめ、新たなデバイス開発へ向けたデザインの検討を行った。ZERO-GRAVITY の散乱線遮蔽効果および周囲の線量分布をファントム実験にて明らかにし、さらに臨床使用経験をまとめた。血管撮影室で用いられている防護デバイスの中で最も有用なもののひとつである天吊り遮蔽板について、ファントム実験にて、適切な使用や性能向上のために必要な知見を収集した。

5. 藤淵分担研究（放射線防護教育研究：放射線防護教育コンテンツ開発）

X 線を患者に照射した際の散乱線分布の広がりの認識が重要である。ウェブブラウザ上で散乱線分布をクロスリアリティ（X-reality:XR）により観察できる放射線防護教材を作成、実際の使用方法の構築および有効性の評価した。仰臥位で寝台に寝ている患者に対して X 線を照射した際のモンテカルロシミュレーションに基づくデータから、スマートフォンや PC で使用できる散乱線可視化教材を作成した。放射線技術科学または看護学を専攻する学部学生を対象とした授業で使用し、教材評価モデルを基としたアンケートでモチベーションへの影響を評価した。またテキストマイニングを用いて感想を解析した。

6. 赤羽恵一分担研究（国内外の開発上の技術的課題等の情報について調査・収集）

国際機関及び世界各国における状況を調査した。具体的には、規制内容・被ばく線量測定機器・測定方法・校正方法・被ばくの実態・防護手法等について、インターネット上に公開された、関連団体等のガイドライン等の情報を収集した。また、PubMed 等により文献を検索した。更に、ウェブでも開催された国内外の国際学会に参加し、発表内容の情報を得た。

（倫理面への配慮）

本研究・調査にあたっては、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」の基づき、各研究分担者等の機関における倫理委員会に申請・承認を経て実施した。

利益相反情報は必要に応じて各研究機関の COI 委員会の審査を受けた。

C. 研究結果

1. 千田担当研究（リアルタイム線量評価、水晶体被ばく実態調査、放射線防護機材の改良等に関する研究、水晶体線量計等の改良等に関する研究）

リアルタイム線量計 i3 は、十分な基本性能を有していると思われた。リアルタイム線量計を用いた IVR 術者の初期臨床研究結果から、天吊り防護板の不適切使用例が 8 割程度もあることなど、防護板の位置の重要性を再認識することができた。また、モニターの確認のために前かがみになるといった無意識下の行動であっても、被ばく線量の増加につながることなど重要な知見が得られた。IVR 看護師の手技 1 件ごと測定結果から、心血管 IVR に従事する看護師は PCI 時には左眼近傍、ABL 時には右眼近傍に線量計を装着することが望ましいと思われた。IVR 看護師の長期間評価結果から、測定期間において年間 20mSv を超える看護師はいなかったが、看護師への放射線防護教育が重要

性が示唆された。PET 検査における看護師の水晶体被ばくに関する検討結果から、PET 検査看護師が水晶体等価線量限度を超過する可能性は低いと考えられ、また水晶体線量と担当検査数および薬剤投与量には相関が認められた。

0.07mmPb メガネ改良に関する臨床評価結果から、改良型メガネの医師 7 名の平均遮蔽率は 61.4％であり、眼鏡のサイズによって遮蔽率への大きな差は生じなかった。試作した放射線シールドドレープは橈骨動脈アプローチの心臓 IVR において想定した IVR 術者の被ばく線量を、平均 60％、最大 90％低減できる可能性があることが示唆された。そして防護壁の使用により遮蔽効果が上昇することが確かめられた。IVR 医師における無鉛エプロンの放射線防護効果の臨床評価結果から、0.35mmPb 当量の無鉛防護エプロンの性能（遮蔽率 98.5%、快適度良好）が優れていた。IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）の試作品の着用に関しては、全く問題無く、十分に実用可能あると思われた。さらに IVR 術者用のフェイスシールド試作品は、十分な遮蔽効果を有していた。IVR 術者水晶体被ばく低減用試作放射線防護具（突出型）開発については、ファントム実験結果から顔面から前方へ 4cm 以上突出させることによって、80％以上の防護効果が確認できた。

水晶体用線量計 DOSIRIS®の改良試作型ヘッドセットに関する初期検討アンケート調査の結果から、改良試作型ヘッドセットでは、従来型に比べ、圧迫感や違和感が少ない構造へと変化していることが分かった。頭部から発生する後方散乱線が水晶体線量に与える影響は小さくなく、正確な線量評価のためには水晶体線量計は皮膚に密着させる必要があることが分かった。

2. 盛武分担研究（水晶体被ばく実態調査、放射線防護機材の改良等に関する研究、放射線防護教育研究）

水晶体等価線量が定常的に 20 mSv/年を超える医師の実態調査について、2016 年は水晶体等価線量は高く、最大の月間水晶体等価線量は 6.3 mSv であった。2019 年頃より放射線防護委員会の指導の結果、年間の水晶体等価線量は 23.9 mSv となり、過去 3 年間と比較しても、半分近くまで低減できた。

オーバーテーブル透視装置用のショートカーテンの開発に関して、遮蔽効果はショートカーテンよりもロングカーテンの方が高かった。しかし、集団水晶体等価線量低減率は、すべての透視手技にショートカーテンを利用した時の方が高くなった。

放射線防護教育研究に関して、AR による血管造影検査室の天井懸架型防護板の正しい使い方を学習するためのアプリケーションを開発した。そしてその評価を行った結果、全職種の下位尺度ごとの平均得点は、すべて高かった。また、インターベンショナルラジオロジー医師に対する術前ブリーフィングが個人線量計および個人保護装具の使用に与える影響について調査した結果、主個人線量計、追加個人線量計の装着率は、それぞれ 100％、85％であり、介入前と比較して統計学的有意に増加した。

3. 佐々木、雑賀、黒坂分担研究（水晶体被ばく実態調査：白内障の実態調査研究）

2020 年および 2021 年には日本脳神経血管内治療学会（JSNET）、2022 年には日本 Interventional Radiology（IVR）学会において白内障調査を行い、3 年間での参加者は 334 名であった。対象者の重複等を考慮し、

解析可能対象者は 279 名となった。対象者の内訳は医師 209 名、技師 48 名、看護師 22 名であった。白内障有病率（右眼，左眼）は、皮質白内障（2.2%，1.8%）、核白内障（1.1%，0.4%）、後嚢下白内障（2.5%，1.4%）、Retrodots(2.5%，2.2%)、Waterclefts(2.5%，2.9%)、微小混濁である Vacuoles（23.7%，24.0%）、後嚢下白内障の初期変化とされる後嚢中心に局在する Vacuoles（16.1，18.6%）であり、顕著な視力低下につながるような白内障はほとんど確認されなかった。また眼科医師による検眼鏡的眼底検査や OCT 検査の有用性をアピールすることは重要であると思われた。

4. 赤羽正章分担研究（放射線防護機材の改良等に関する研究）

防護メガネ（HF-380、東レ）が 57%、ZERO-GRAVITY が 93%であった。臨床使用経験に基づいた ZERO-GRAVITY の利点として、天吊りによる重量負担軽減、良好な通気性や曇りの無さ、が挙げられた。一方欠点としては、移動範囲の制限、他の天吊りデバイスとの干渉、複数人同時使用不可、下方の視野制限、姿勢の制限、背面防護無し、自分の声の反響、清潔カバー取り付けの手間と費用、が挙げられた。天吊り防護板の遮蔽効果は、防護板下縁と患者との隙間が小さいほど高まった。防護板を更に下げる場合、弛んだ鉛カーテンの下縁を患者頭側に折り返すと遮蔽効果が低下し、患者尾側へ折り返すと高まった。

5. 藤淵分担研究（放射線防護教育研究：放射線防護教育コンテンツ開発）

受講者に対して放射線防護に関する演習問題を実施したところ、看護学生において演習問題の正答率が優位に向上した。XR は、アンケートから使用者のモチベーションを向上させ、テキストマイニングから放射線防護の理解と自信を向上させることが分かった。

6. 赤羽恵一分担研究（国内外の開発上の技術的課題等の情報について調査・収集）

眼の水晶体の防護に関するガイドラインは、日本保健物理学会、令和元年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費事業、日本放射線看護学会、日本適合性認定協会である。国内の関連学会等は、日本放射線技術学会総会学術大会、日本放射線技術学会秋季学術大会、日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会、日本医学物理学会学術大会である。国際関連として、IRPA、韓日医学物理学会、IAEA、UNSCEAR、OECD/NEA、EU である。以上について調査収集した。

D. 考察

1. 千田担当研究（リアルタイム線量評価、水晶体被ばく実態調査、放射線防護機材の改良等に関する研究、水晶体線量計等の改良等に関する研究）

リアルタイム線量計 i3 は、特に角度依存性が良好であり十分な基本性能を有していることが示唆された。リアルタイム線量計を用いた IVR 術者の初期臨床研究結果から、まだ症例は少ないものの、前かがみなることで被ばく線量率が増加すること、X 線管の角度によって線量率が変化すること、天吊り防護板の位置によって線量率が変化することなどが分った。天吊り防護板の不適切使用例が 8 割程度もあることなど重要な結果が分かり、今後症例を重ねた詳細検討や行動解析の必要性が示唆された。IVR 看護師の水晶体線量を正確に評価するためには、眼に直接水晶体用線量計を装着することが

望ましいと思われた。PET 検査看護師の水晶体線量と担当検査数および薬剤投与量には相関が認められたため水晶体被ばくを低減するためには業務のローテーションを定期的に行うなどして看護師一人当たりの担当検査数を少なくすることが有効であると考える。

新型 0.07mmPb 当量の防護眼鏡を用いた IVR 臨床測定を行った結果、平均で 61.4%という良好な遮蔽効果があり、従来型 0.07mmPb 当量防護眼鏡を用いた場合と比較して 5%(5 ポイント)以上高い値となった。新型 0.07mmPb 当量眼鏡は眼鏡の柄の角度が細かく調整できること等の遮蔽率を上げるための形状の工夫がなされていることが要因であると考えられる。だが、形状の工夫のみによって遮蔽率を大幅に向上させることには限界があることも示唆された。今回試作した X 線防護壁付放射線シールドドレープの基礎的ファントム実験の結果から、従来の壁無し放射線シールドドレープよりも、X 線防護壁付放射線シールドドレープは平均 20%、最大 60%高い遮蔽効果を有することが示された。X 線防護壁の高さを高くすることでより高い遮蔽効果を得られることが分かったが、IVR 手技等において高い X 線防護壁が障害や邪魔になる危険性もある。無鉛防護エプロンは、主にタングステンとスズからなる複合材料によって作られているため、鉛防護エプロンより約 20%軽量である。IVR 臨床における無鉛防護エプロンと鉛防護エプロンの放射線防護効果を比較した結果、無鉛防護エプロンが IVR 医師の放射線防護に臨床的に有効であることを証明した。IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）は、防護眼鏡を装着しなくても、水晶体を防護できるようにデザインされている。すなわち、IVR 術者用の新しいフェイスシールドを装着していれば、防護眼鏡は不要である。一方、新たに開発試作した放射線防護具(突出型)は、顔面から前方へ 4cm 以上突出させることによって、80%以上の防護効果が発揮することを確認できたが、前方に突出させることで、前面への重みが増し、ヘアバンドの固定では不安定感があり改良が必要である。

水晶体用線量計 DOSIRIS の改良試作型ヘッドセットに関する初期検討から、改良試作型の方が有意に評価は高くなった。改良試作型では、ヘッドセット部分の末端が少し開いている構造により、肌に触れる面積が減少している点や、βチタンの伸縮性のある材質により様々な頭のサイズに適合しやすい点が理由として考えられる。一方、頭部から発生する後方散乱線が水晶体線量に与える影響は無視できない。本研究の結果から、自身の頭部を防護することにより後方散乱線の発生量を低減でき、それが水晶体被ばくの低減につながる可能性が示唆された。

2. 盛武分担研究（水晶体被ばく実態調査、放射線防護機材の改良等に関する研究、放射線防護教育研究）

水晶体等価線量が定常的に 20 mSv/年を超える医師の実態調査について、放射線防護に特化した教育を実施した結果、水晶体等価線量は 50%近くまで低減することができた。天井懸架型防護板を以前より有効に活用できていると推察される。しかし、依然として年間 20 mSv を超えており、今後、さらなる多角的な防護方策を講じる必要がある。

オーバーテーブル透視装置用のショートカーテンの開発に関して、カーテン単体の水晶体線量低減率は、ロングカーテンの方

がショートカーテンよりも圧倒的に高いが、術者の集団水晶体等価線量の観点から見れば、低減率は逆転する。これは、ロングカーテンの利用が限定的であり、結果として、透視手技の12%にしか利用できないことが要因として考えられる。

放射線防護教育研究について、ARによる血管造影検査室の天井懸架型防護板の正しい使い方を学習するためのアプリケーションは、天井懸架型防護板の使用方法を学習するのに有用な教材であることが示された。今後、職種、被ばくの状況に応じた様々なARアプリケーションの作成と、その教育効果の検証が必要であると考える。また、インターベンショナルラジオロジー医師に対する術前ブリーフィングが個人線量計および個人保護装具の使用に与える影響について調査したが、個人線量計と個人保護装具の装着率を、自己回答式アンケートではなく、目視による調査をしたことと、個人被ばく線量率という観点から介入効果を客観的に評価したことが新規性となる。術前ブリーフィングを行い、そこで個人線量計と個人保護装具が適切に装着されているかを目視により確認し、装着されていない場合は装着の促しをすることで、これらの装着率を劇的に上げることに成功した。

3. 佐々木、雑賀、黒坂分担研究（水晶体被ばく実態調査：白内障の実態調査研究）

微小混濁であるVacuoles（後嚢中心）の有病率は、右眼16.1%に対し左眼18.6%とほんの少し左眼の有病率が高くなる傾向を示した。既報では診療放射線従事者の白内障は右眼に比べて左眼の有病率が高くなるとされており、今回の結果が初期の放射線白内障の影響を示している可能性があるが、さらに慎重な検討が必要である。今回の調査結果では、医師の平均被ばく量は技師・看護師に比べ有意に高く、医師は技師や看護師に比べ左眼のVacuolesのリスクが高くなる可能性が示された。今後は比較対象として年齢を一致させたControlの計測も必要であり、診療放射線従事者の白内障発症との関連を追及する必要がある。また医療従事者には、高度近視例が多く、通常よりも緑内障などの有病率が高い可能性があった。今後、調査を継続する必要がある。

4. 赤羽正章分担研究（放射線防護機材の改良等に関する研究）

ZERO-GRAVITY の使用感は良好とは言えないが、遮蔽効果は圧倒的であり、水晶体線量の高い術者を保護する手法の一つとして有望な方向性であることは間違いない。使用感の問題点のうち特に、下方の視野制限と姿勢の制限については手技時間の延長や質の低下に結びつく可能性が懸念され、改善を期待したい。天吊り防護板が患者から15㎝離れた状態では1割も線量を低減できないのに対し、防護板の高さを0cmすなわち患者と近接させると7割以上の線量低減が得られた。防護板下縁と患者との隙間が残る場合、隙間の大きさに応じて防護板をやや術者寄りに配置することで、遮蔽効果を高められる可能性がある。

5. 藤淵分担研究（放射線防護教育研究：放射線防護教育コンテンツ開発）

保健学科の放射線技術科学専攻、看護学専攻の学生を対象に放射線防護教育教材の有効性を評価した。放射線診療に係る医学科の学生や、放射線診療従事者である医師、看護師、診療放射線技師等の医療スタッフにも実際に使用していただき教育効果を検証することで、臨床現場での有効性がより

明確になる。また使用者から教材に対するフィードバックを得ることで、教材に対する課題が明らかになり、その点を改善することで機能の強化につながり、より充実した教材にすることが出来ると考えられる。放射線診療従事者でも、職種により放射線に対する知識の差が大きく、職種毎の学習の目標をを明確にした教材を作成することで、より効果的な教材内容とすることが期待される。

6. 赤羽恵一分担研究（国内外の開発上の技術的課題等の情報について調査・収集）

ガイドラインは、フロー図で測定方法を決定することができ、また防護メガネの遮蔽効果の有効性と、被ばくが少ない場合は軽いメガネの利用が推奨されている。UNSCEAR は、2023 年に放射線被ばくによる眼の水晶体混濁の評価を開始することを計画し、次の職業被ばく調査で、多くの国がデータを提供することを期待していることを述べている。EU の MEDIRAD プロジェクトが 2021 年に出した報告書では、五種類の防護用具に対し、モンテカルロシミュレーション計算、スタッフ及びファントム測定でデータを出しており、非常に多くのデータが示され、それぞれの防護効果を定量的に知ることができる貴重な報告となっている。しかしながら、防護効果は条件によって異なり利用しやすさも考慮する必要があると考える。

E. 結論

本研究は、実際の被ばく管理を効果的に実施するために国内では未だ数少ない専門家が結集して、さらに放射線防護機材の開発を行う事業場の開発担当者も加わって、水晶体放射線被ばく防護に関する多角的研究を実施した。そして問題点を明らかにするとともに、課題解決のための方策を提供し非常に有用な成果を得ることができた。

リアルタイム線量計 i3 の IVR 臨床おいての有用性を確認でき、本検討により、天吊り防護板の不適切使用例が 8 割程度もあることなどが分かり、天吊り防護板の位置の重要性を再認識することができた。心血管 IVR 看護師の水晶体の被曝線量を安全側に評価するためには、PCI では左眼近傍、ABL では右眼近傍に線量計を装着して測定することが適切であると思われた。
PET 看護師が線量限度の 1 年平均値である 20mSv/年を超過する可能性は低いと考えらた。

改良新型 0.07mmPb 当量防護眼鏡は高い遮蔽率となったが、まだ十分な防護効果を有しているとは言えないため、今後、遮蔽能力向上、IVR 術者の水晶体被曝の低減を目指して、さらなる防護眼鏡の改良と種々の検討を行う必要がある。今回試作した X 線防護壁付放射線シールドドレープの有効性は確認でき特許出願も行った。だが壁付ドレープ単体の評価では、透視や撮影の角度によって十分な遮蔽効果が得られないことがあるため、さらなる改良や、天吊り防護板など他の防護具との併用が重要であると考えられた。

IVR 医師の放射線防護には 0.35mmPb 当量の無鉛防護エプロンがより適していると思われた。

IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）の試作品の着用時における装着感に関しては、全く問題無く、十分に実用可能あると思われた。

IVR 術者の水晶体被ばくを低減するために開発した試作放射線防護具(突出型)は、

効果的に水晶体を防護できることが確認でき、さらに特許を出願した。

DOSIRIS の改良試作型ヘッドセットの使用感に関する初期検討を行った結果、改善点はあるものの改良試作型ヘッドセットでは、特に圧迫感及び違和感を覚えにくい構造へと変化しており、使用感の向上が見られた。このように、改良試作型ヘッドセットの有用性について示された。

頭部から発生する後方散乱線が水晶体被ばくに及ぼす影響について検討した結果、水晶体被ばく線量における後方散乱線含有率は約20%であり、含有率は管電圧の増大に伴い増加した。

水晶体等価線量が定常的に 20 mSv/年を超える医師の実態調査結果から、経験年数に応じて水晶体等価線量は下がっておらず、むしろ難しい放射線診療に従事することから、さらに高くなる可能性が明らかとなった。

オーバーテーブル透視装置用のショートカーテンの開発に関して、ショートカーテン単体では水晶体線量低減率は低いが、汎用性の高さから、すべての透視手技における集団水晶体等価線量を低減することが期待できる。

放射線防護教育研究に関して、血管造影検査室の散乱線をARアプリケーションで可視化し、医療スタッフに対して天井懸架型防護板の適切な使用方法を理解させる教材を開発し評価したところ、医師・看護師・診療放射線技師・臨床工学技士すべてのスタッフから高い評価を得ることができた。

IVR開始直前のブリーフィングにて、個人線量計と個人保護装具を正しく装着されているかを確認すると、それらの装着率は劇的に上昇し、100%に近づいた。

令和 2 年度～令和 4 年度において、脳神経血管造影検査・血管内治療の従事者および IVR 従事者を対象にした白内障調査を行い、放射線被ばく量との関連を検討した。全対象者のうち 9 割以上は視力良好であり、顕著な視力低下をともなう白内障は認められなかった。放射線白内障の初期病変とされる後嚢中心のVacuolesの有病率は左右眼とも15%程度であり、これらが今後視力低下をともなう放射線白内障につながる可能性も考えられるため、引き続き長期での詳細な観察研究が必要である。

ZERO-GRAVITY の遮蔽効果は従来の防護デバイスより高く、使用感などの課題は残るものの、次世代のデバイス開発の参考になる特長を有していた。天吊り防護板の遮蔽効果は、防護板下縁と患者との隙間が小さいほど高まった。防護板を更に下げる場合、弛んだ鉛カーテンの下縁を患者頭側に折り返すと遮蔽効果が低下するので、患者尾側へ折り返すべきである。防護板下縁と患者との隙間の大きさに応じて防護板をやや術者寄りに配置することで、遮蔽効果を高められる可能性がある。

WebXR を用いた新たな放射線防護教育手法を開発した。WebXRにより仰臥位でのX線照射時の散乱線の広がりを視覚的に観察し、理解することができ、利用者の放射線防護に対する興味、理解、自信が向上することを確認した。今後は、より良い教育効果を得るために、利用者の放射線防護の習熟度や使用目的に合わせて、より効果的な放射線防護教育教材を開発することが望まれる。

国内外の開発上の技術的課題等の情報に

ついて調査・収集に関して、各種防護具の有用性だけでなく、課題も示されており、状況に応じて包括的に選択し、合理的低減を図ることが重要である。防護と線量評価が業務で求められるようになってきており、実務的・効果的な防護方法及び線量評価法への関心が高いと言える。

常に被ばく低減に意識をしながら放射線手技に臨むことが必要である。だが唯一絶対的な防護具は無いため、様々な防護具を併用することで、術者の被ばく低減に繋がると考える。IVR 術者等のリアルタイム行動解析による防護戦略立案や、引き続き新発想の防護具開発改良、ラインナップした防護具について、どのような用途環境下での使用（どのような防護具の組み合わせ）を推奨するのかなどについて、今後も継続した研究が重要である。

F. 論文報告等

1) Kawauchi S, Chida K, Moritake T, Hamada Y, Tsuruta W: Radioprotection of eye lens using protective material in neuro cone-beam computed tomography: Estimation of dose reduction rate and image quality. Physica Medica. 2021 Feb 27; 82: 192-199.

2) Sun L, Inaba Y, Kanzaki N, Bekal M, Chida K, Moritake T: Identification of Potential Biomarkers of Radiation Exposure in Blood Cells by Capillary Electrophoresis Time-of-Flight Mass Spectrometry. Molecular Endocrinology and Metabolism. 2020, 21, 812. doi: 10.3390/ijms21030812.

3) Kawauchi S, Chida K, Moritake T, Hamada Y, Matsumaru Y, Tsuruta W, Sato M, Hosoo H, Sun L: Treatment of internal carotid aneurysms using pipeline embolization devices: measuring the radiation dose of the patient and determining the factors affecting it. Radiat Prot Dosimetry. 2020 Jun 24;188(3):389-396. doi: 10.1093/rpd/ncz298.

4) Mime Endo, Yoshihiro Haga, Masahiro Sota, Akiko Tanaka, Kazuki Otomo, Yuuki Murabayashi, Mitsuya Abe, Yuji Kaga, Yohei Inaba, Msatoshi Suzuki, Taiichiro Meguro and Koichi Chida. Evaluation of novel X-ray protective eyewear in reducing the eye dose to interventional radiology physicians. Journal of Radiation Research, 62（3）, 414-419, 2021, doi: 10.1093/jrr/rrab014

5) 曽田 真宏, 芳賀 喜裕, 荒井 剛, 鈴木 新一, 加賀 勇治, 阿部 美津也, 千田 浩一. X 線防護壁付掛布による心臓 IVR 術者の被ばく低減に関する基礎的検討. 臨床放射線 66巻5号 501-507. 2021.

6) 山田歩実, 大友一輝, 佐藤文貴, 芳賀喜裕, 曽田真宏, 加賀勇治, 阿部美津也, 加藤砂江子,稲葉洋平, 千田浩一. 心臓カテーテルインターベンションに携わる看護師の水晶体被ばく－水晶体線量の左右差に関する比較検討－. 日本放射線安全管理学会誌, 20(2), 2021 年 11 月.52－60. doi: 10.11269/jjrsm.20.52

7) Mamoru Kato, Koichi Chida, Masato Munehisa, Tadaya Sato, Yohei Inaba, Masatoshi Suzuki, and Masayuki Zuguchi. Non-lead protective aprons for the protection of interventional radiology physicians from radiation exposure in clinical settings: An initial study. Diagnostics, 2021, 11, 1613. doi: 10.3390/diagnostics11091613

8) 加藤 聖規、藤沢 昌輝、服部 兼進、山田 歩実, 芳賀 喜裕, 加賀勇治, 阿部 美津也, 稲葉 洋平, 千田 浩一. PCI 術者の水晶体線量のリアルタイム測定に関する初期検討. 日本放射線安全管理学会誌, 2023 年 印刷中

9) 藤沢昌輝, 芳賀善裕, 曽田真宏, 加賀勇治, 阿部美津也, 稲葉洋平, 鈴木正敏, 細井義夫, 千田浩一. PET 検査に従事する看護師の水晶体被ばく線量に関する基礎検討. 臨床放射線, 67 巻 10 号 1075-1083, 2022 年 10 月
10) Hattori K, Inaba Y, Kato T, Fujisawa M, Yasuno H, Yamada A, Haga Y, Suzuki M, Zuguchi M, Chida K. Evaluation of a New Real-Time Dosimeter Sensor for Interventional Radiology Staff. ***Sensors***. 2023 Jan 3;23(1):512. doi:10.3390/s23010512.
11) Chida K. What are useful methods to reduce occupational radiation exposure among radiological medical workers, especially for interventional radiology personnel? ***Radiol Phys Technol.*** 2022 Jun;15(2):101-115. doi: 10.1007/s12194-022-00660-8.
12)坂本 肇, 五十嵐 隆元, 加藤 守, 川内 覚, 加藤 英幸, 塚本 篤子, 盛武 敬, 赤羽 正章:DRLs 2015 の血管撮影・IVR 分野における効果検証および追加項目の検討. 日本放射線技術学会誌. 2020; 76(2):210-217. doi: 10.6009/jjrt.2020_JSRT_76.2.210. (査読有り)
13)Morota K, Moritake T, Nagamoto K, Matsuzaki S, Nakagami K, Sun L, Kunugita N: Optimization of the Maximum Skin Dose Measurement Technique Using Digital Imaging and Communication in Medicine-Radiation Dose Structured Report Data for Patients Undergoing Cerebral Angiography. Diagnostics (Basel). 2020 Dec 23;11(1):E14. doi: 10.3390/diagnostics11010014. (査読有り)
14)Nagamoto K, Moritake T, Nakagami K, Morota K, Matsuzaki S, Nihei S, Kamochi M, Kunugita N: Occupational radiation dose to the lens of the eye of medical staff who assist in diagnostic CT scans. Heliyon. 2021 January 30;7(1):e06063. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06063. (査読有り)
15) K. Nakagami, T. Moritake, K. Nagamoto, K. Morota, S. Matsuzaki, T. Kuriyama, N. Kunugita, Strategy to Reduce the Collective Equivalent Dose for the Lens of the Physician's Eye Using Short Radiation Protection Curtains to Prevent Cataracts, Diagnostics 11(8) (2021) 1415. (査読有り)
16) S. Matsuzaki, T. Moritake, K. Morota, K. Nagamoto, K. Nakagami, T. Kuriyama, N. Kunugita, Development and assessment of an educational application for the proper use of ceiling-suspended radiation shielding screens in angiography rooms using augmented reality technology, European Journal of Radiology 143 (2021) 109925. (査読有り)
17)盛武 敬. 医療従事者の水晶体被ばく防護. Rad Fan. 19(10) (2021) 53-57.
18)茂呂田 孝一. DICOM-RDSR の活用が放射線安全管理にもたらす影響 . Rad Fan. 19(10) (2021) 65-68.
19)K. Nagamoto, T. Moritake, K. Nakagami, K. Morota, S. Matsuzaki, N. Kunugita, A multicenter study of radiation doses to the eye lenses of clinical physicians performing radiology procedures in Japan, J Occup Health, 63 (1), (2021) e12305. (査読有り)
20)茂呂田 孝一. 被ばく低減システム・放射線防護機器はコレがベスト！. Rad Fan. 20(8) (2022) 65-68.
21)中上晃一. 最終結論！放射線防護眼鏡の使い方と選び方. Rad Fan. 22(10) (2022) 71-74.
22)S. Matsuzaki, T. Moritake, L. Sun, K. Morota, K. Nagamoto, K. Nakagami, T. Kuriyama, G. Hitomi, S. Kajiki, N. Kunugita: The Effect of Pre-Operative Verbal Confirmation for Interventional Radiology Physicians on Their Use of Personal Dosimeters and Personal

Protective Equipment, IJERPH, 19(24) (2022) 16825-16825. (査読あり)
23)J-RIME, National Diagnostic Reference Levels in Japan (2020) -Japan DRLs 2020-, 2020. http://www.radher.jp/J-RIME/report/DRL2020_Engver.pdf (accessed on 8 Feb. 2021).
24)盛武 敬:脳血管内治療に関する診断参考レベル構築のための医療被ばく実態調査(Re-JDRL study)について. 教育講座 第 33 回全国循環器撮影研究会総会・学術発表大会(2019 年 4 月 13 日)医師講演. 全国循環器撮影研究会誌, 32, 5-12, 2020.(査読無し)
25)松崎 賢:Augmented Reality 技術を利用した放射線被ばく防護のための学習ツールの開発と効果の検証. 産業医科大学大学院博士論文(産業衛生学), 2023.
26)盛武 敬:医療放射線防護学(第 4 章 放射線の生物影響・リスク 第 1 節〜第 3 節), 国際文献社 医学物理学教科書シリーズ, 赤羽恵一・遠藤真広編著, 日本医学物理学会監修, P52-84, 2020 年 8 月
27)盛武 敬:ICRP Publication 121 小児の放射線診断と IVR における放射線防護. 翻訳, 原子力規制委員会, 2021 年 1 月 27 日
28)初坂奈津子. 東電福島第一原発緊急作業従事者に対する白内障調査. 金沢医科大学雑誌 2020;45(1):14-15
29)初坂奈津子, 宮下久範, 喜多村紘子, 大久保利晃, 佐々木洋.「東電福島第一原発緊急作業従事者に対する疫学的研究」白内障全国調査について. 日本白内障学会誌 2020;32(1):49-51
30)Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development of an application to visualize the spread of scattered radiation in radiography using augmented reality. 2020 J. Radiol. Prot 40, 1299–1310.
31)Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development of scattered radiation distribution visualization system using WebAR. 2021 Journal of Physics: Conference Series. 1943.
32)Fujibuchi T, Radiation protection education using virtual reality by visualization of scatter distribution in radiological examination, Journal of Radiological Protection, 10.1088/1361-6498/ac16b1, 41, 4, S317, 2021.07.
33)Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development and evaluation of the effectiveness of educational material for radiological protection that uses augmented reality and virtual reality to visualise the behaviour of scattered radiation. 2022 J. Radiol. Prot. 42, 011506.
34)Kosuke Matsubara, Yasutaka Takei, Hiroshige Mori, Ikuo Kobayashi, Kimiya Noto, Takayuki Igarashi, Shoichi Suzuki, Keiichi Akahane. A multicenter study of radiation doses to the eye lenses of medical staff performing non-vascular imaging and interventional radiology procedures in Japan. Physica Medica, 74, 83 - 91, 2020-06, DOI:10.1016/j.ejmp.2020.05.004

G. 研究発表等

1) 千田浩一. 放射線医療従事者の水晶体被ばくの実態. 2020 年度日本放射線技術学会九州支部放射線防護・計測セミナー(WEB 開催). 教育講演(招待講演). 2020 年 11 月

2) 服部兼進、加藤聖規、藤沢昌輝、安野ひかる、山田歩実、千田浩一. 術者被ばく評価における最新型リアルタイム線量計の基礎的検討 第36回日本診療放射線技師学術大会(WEB 開催). 2021 年 1 月

3) Mamoru Kato, Koichi Chida, et al. Occupational eye lens dose measurement using

direct eye dosimeters in interventional cardiac electrophysiology procedures . European Congress of Radiology ECR2020. 令和 2 年 7 月, ウイーン、オーストリア, (Web)

4) Mamoru Kato, Koichi Chida, et al. Evaluation of usefulness of neurovascular interventional radiology procedure supported using MR-3D road-mapping. 第 76 回日本放射線技術学会 JRC2020. 令和 2 年 5 月, 横浜 (Web)

5) Kentaro Sakamoto, Mamoru Kato, Noriyuki Takahashi, Koichi Chida, et al. Evaluation of Patient Radiation Dose in Percutaneous Coronary Intervention Using Radiophotoluminesence Dosimeter. 第 76 回日本放射線技術学会 JRC2020. 令和 2 年 5 月, 横浜 (Web)

6) Morishima Y, Chida K, et al. Radiation Protection Effect of Novel Pb Plate in Videofluoroscopic Swallowing Study. Radiological Society of North America (RSNA2020),令和 2 年 11 月 シカゴ アメリカ合衆国 web 開催.

7) Mamoru Kato, Koichi Chida, et al. Occupational eye lens dose measurement using direct eye dosimeters in interventional cardiac electrophysiology procedures . European Congress of Radiology ECR2020. 令和 2 年 7 月, ウイーン、オーストリア, (Web)

8) Mamoru Kato, Koichi Chida, et al. Evaluation of usefulness of neurovascular interventional radiology procedure supported using MR-3D road-mapping. 第 76 回日本放射線技術学会 JRC2020. 令和 2 年 5 月, 横浜 (Web)

9) Kentaro Sakamoto, Mamoru Kato, Noriyuki Takahashi, Koichi Chida, et al. Evaluation of Patient Radiation Dose in Percutaneous Coronary Intervention Using Radiophotoluminesence Dosimeter. 第 76 回日本放射線技術学会 JRC2020. 令和 2 年 5 月, 横浜 (Web)

10) Morishima Y, Chida K, et al. Radiation Protection Effect of Novel Pb Plate in Videofluoroscopic Swallowing Study. Radiological Society of North America (RSNA2020),令和 2 年 11 月 シカゴ アメリカ合衆国 web 開催.

11) 加藤聖規, 藤沢昌輝, 服部兼進, 山田歩実, 芳賀喜裕, 加賀勇治, 阿部美津也, 千田浩一.従事者被ばく測定用新型半導体リアルタイム線量計を用いた IVR 術者の被ばく状況の基礎的検討. 第 49 回日本放射線技術学会秋季学術大会. 2021 年 10 月.熊本

12) 加藤聖規, 藤沢昌輝, 服部兼進, 山田歩実, 芳賀喜裕, 加賀勇治, 阿部美津也, 千田浩一. IVR 助手(セカンドオペレーター)の被ばく状況の初期検討 ～従事者被ばく測定用新型半導体リアルタイム線量計を用いて～. 第 11 回東北放射線医療技術学術大会. 2021 年 10 月.福島

13) 山田歩実, 大友一輝, 佐藤文貴, 芳賀喜裕, 曽田真宏, 加賀勇治, 阿部美津也, 千田浩一. 心臓・血管系 IVR に従事する看護師の水晶体用線量計装着位置に関する検討. 日本放射線技術学会第４９回秋季学術大会. 2021 年 10 月. 熊本

14) 山田歩実, 大友一輝, 佐藤文貴, 芳賀喜裕, 曽田真宏, 加賀勇治, 阿部美津也, 加藤砂江子,稲葉洋平, 千田浩一. 心血管インターベンションに携わる看護師における水晶体被ばく線量の推定方法. 第 11 回東北放射線医療技術学術大会. 2021 年 10 月. 福島

15) 日野隆喜, 山崎智香, 佐藤俊光, 信夫章宏, 才田壽一, 江口陽一, 千田浩一. 新しい頭頸部用放射線防護具による頭部及び頸部の防護効果. 第 78 回日本放射線技術学会総会 JRC2022 令和 4 年 4 月, 横浜 (ハイブリッ

ド）
16) 藤沢昌輝, 加藤聖規,服部兼進,山田歩実,芳賀喜裕,加賀勇治,阿部美津也,稲葉洋平,千田浩一.バイプレーン型血管撮影装置使用時の IVR 術者におけるリアルタイム水晶体線量測定.第 50 回日本放射線技術学会秋季学術大会.2022 年 10 月
17) 加藤聖規,藤沢昌輝,服部兼進,山田歩実,芳賀喜裕,加賀勇治,阿部美津也,稲葉洋平,千田浩一.被ばく防護の実際と実践 - 水晶体被ばく線量のリアルタイム解析について -.第 12 回東北放射線医療技術学術大会. 2022 年 11 月
18) 加藤聖規,藤沢昌輝,服部兼進,山田歩実,芳賀喜裕,加賀勇治,阿部美津也,稲葉洋平,千田浩一. 心臓IVR術者における水晶体等価線量のリアルタイム測定に関する基礎的検討.第 4 回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同大会. 2022 年 11 月
19) 山田歩実, 芳賀喜裕, 曽田真宏, 加賀勇治, 阿部美津也, 稲葉洋平, 千田浩一. 心臓・血管系 IVR 看護師の長期間測定による水晶体被ばく線量評価に関する検討. 日本放射線技術学会第 50 回秋季学術大会. 2022 年 10 月.
20) 初坂奈津子、柴田哲平、岩西宏樹、田中才一、喜多村紘子、盛武敬、千田浩一、雑賀司珠也、黒坂大次郎、佐々木洋. 脳神経血管造影検査・血管内治療従事者の放射線白内障、第 76 回日本臨床眼科学会、2022/10/13-16、東京
21) 初坂奈津子、柴田哲平、岩西宏樹、盛武敬、千田浩一、雑賀司珠也、黒坂大次郎、佐々木洋；インターベンショナル・ラジオロジー従事者の放射線白内障と水晶体被ばく線量との関係、第 127 回日本眼科学会総会（2023 年 4 月、東京）で発表予定（演題採用済）である。
22) 今田聡恵, 芳賀喜裕, 曽田真宏, 阿部美津也, 加賀勇治, 稲葉洋平, 千田浩一. 水晶体用線量計 DOSIRIS®の改良型ヘッドセットに関する初期検討. 第 4 回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同大会. 2022 年 11 月
23)盛武 敬：被ばく防護ミニ講習会「医療放射線被ばくの最新トピックス～DRLs 2020 と電離則改正～」脳血管内治療に関する診断参考レベル構築のための医療被ばく実態調査（Re-JDRL study）報告, 第 36 回 NPO 法人日本脳神経血管内治療学会総会, 国立京都国際会館（京都市・京都府）, 11 月 19-21 日, 2020.
24)茂呂田孝一：どうしてる？アンギオ部門−線量管理は義務化へ「血管撮影室における線量管理の実際とこれから」, 第 37 回 NPO 法人日本脳神経血管内治療学会総会, 福岡国際会議場（福岡市・福岡県）, 11 月 25–27 日, 2021.
25)盛武 敬：被ばく防護ミニ講座「電離放射線障害防止規則改正の概要と対応のポイント」大丈夫ですか？水晶体の被ばく, 第 37 回 NPO 法人日本脳神経血管内治療学会総会, 福岡国際会議場（福岡県・福岡市）, 11 月 25-27 日, 2021.
26)茂呂田 孝一：チーム医療で実践する放射線防護. (Web 開催) 山口 IVR 懇話会, 1 月 22 日, 2022.
27)盛武 敬：IVR 術中被ばくの現状と課題. 第 81 回日本医学放射線学会総会, 日本医学放射線学会, パシフィコ横浜（横浜市・神奈川県）, 4 月 16 日, 2022.
28)茂呂田 孝一：第5回 医療機関に於ける放射線管理研修会（医療放射線安全管理責任者の育成に向けて)特別公演: 実践医療放射線防護 ～診療放射線技師だからこそできること～. （Web 開催)兵庫県放射線技師会, 7 月 16 日, 2022.
29)茂呂田 孝一：放射線被ばく教育訓練 ～診療放射線技師の役割と可能性～, 第 38 回

日本診療放射線技師学術大会 HART 企画教育講演 3 被ばく, 神戸コンベンションセンター(兵庫県・神戸市), 9 月 16–18 日, 2022.
30)盛武 敬:医療機関における放射線業務従事者の健康管理と被ばく影響の実態. 日本放射線公衆衛生学会 第 36 回講習会, 日本放射線公衆衛生学会, Web 開催, 12 月 10 日, 2022.
31)石原 隆宏, 萩田 智明, 松崎 賢, 松村文代, 熊 奈津代, 太田 篤志, 茂呂田 孝一: PACS 保存による X 線防護衣の保守管理の確立. (第 76 回日本放射線技術学会総会学術大会), パシフィコ横浜 Web 開催, 5 月 15 日-6 月 14 日, 2020.
32)阿部 利明, 盛武 敬, 馬田 敏幸, 中上 晃一, 永元 啓介, 欅田 尚樹: 病院における個人水晶体等価線量低減を目的とした業務改善計画策定のための職業被ばく線量の実態調査. 日本保健物理学会第 53 回研究発表会 WEB 大会, 6 月 29-30 日(Web 配信 6 月 29 日-7 月 31 日), 2020.
33)松浦 康晃, 隅倉 有美子, 中上 晃一, 盛武 敬, 永元 啓介, 茂呂田 孝一, 松崎 賢, 栗山 知子, 欅田 尚樹: スチューデント・ドクター制度における放射線診療実習での医学生の被ばく. 第 38 回産業医科大学学会, 第 32 回産業医学推進研究会全国大会, 産業医科大学ラマツィーニホール(北九州市・福岡県), 10 月 10 日(一部 Web 配信), 2020.
34)大田 元, 盛武 敬, 茂呂田 孝一, 入佐 剛, 齋藤 清隆, 末松 裕貴, 河野 智樹, 堀之内 翔一, 小笠原 奈月, 武石 剛, 山下 真治, 渡邊 孝, 横上 聖貴, 竹島 秀雄: 脳血管内治療時における医療被ばく線量の術中モニタリング—被曝量低減に向けた当施設の取り組み—. 日本脳神経外科学会第 79 回学術総会, 岡山コンベンションセンター(岡山市・岡山県), 10 月 15-17 日(Web 閲覧期間: 10 月 15 日-11 月 30 日), 2020.
35)大田 元, 盛武 敬, 茂呂田 孝一, 入佐 剛, 齋藤 清隆, 末松 裕貴, 河野 智樹, 堀之内翔一, 小笠原 奈月, 山下 真治, 横上 聖貴, 竹島 秀雄: 当院における脳血管内治療時の医療被ばくの現状とその防護対策について. 第 36 回 NPO 法人日本脳神経血管内治療学会総会, 国立京都国際会館(京都市・京都府), 11 月 19-21 日, 2020.
36)Munehiko Kowatari, Keisuke Nagamoto, Koich Nakagami, Miho Itonaga, Yoshihiko Tanimura, Takashi Moritake, Naoki Kunugita: Experimental evaluation of scattered X-ray spectra due to X-ray therapeutic and diagnosis equipment for eye lens dosimetry of medical staff. IRPA15, 15th International Congress of the International Radiation Protection Association. COEX, Seoul, Korea, Jan 18-Feb 5, 2021.
37)松原 俊二, 盛武 敬, 人見 剛, 滝田 好宏, 石垣 陽, 宇野 昌明: 脳血管内治療患者の水晶体を防護する外付けX線遮蔽装置の開発. STROKE 2021 (第 46 回日本脳卒中学会学術集会, 第 50 回日本脳卒中の外科学会学術集会, 第37回スパズム・シンポジウム), 福岡国際会議場(福岡市・福岡県), 3 月 11-13 日, 2021.
38)松崎 賢, 盛武 敬, 中上 晃一, 永元 啓介, 茂呂田 孝一, 栗山 知子, 人見 剛, 欅田 尚樹: 放射線管理区域で従事する看護師の個人被ばく線量計装着実態調査. (日本放射線看護学会第 10 回学術集会), Web 開催, 9 月 18-19 日, 2021.
39)中上 晃一, 盛武 敬, 永元 啓介, 茂呂田孝一, 松崎 賢, 欅田 尚樹: 心臓カテーテル検査時の立ち位置の違いによる放射線業務従事者の水晶体等価線量. (第 31 回日本心血管インターベンション治療学会九州沖縄地方会), 北九州国際会議場 (北九州市・福岡県), 10

月 1-2 日 (一部 Web 配信), 2021.
40)栗山 知子, 中上 晃一, 茂呂田 孝一, 人見 剛, 松崎 賢, 永元 啓介, 盛武 敬, 欅田尚樹: カテーテルアブレーションにおける看護ケア時の水晶体被ばくの評価. (第31回日本心血管インターベンション治療学会九州沖縄地方会), 北九州国際会議場 (北九州市・福岡県), 10 月 1-2 日 (一部 Web 配信), 2021.
41)永元 啓介, 盛武敬, 中上晃一, 茂呂田孝一, 松崎賢, 欅田尚紀:循環器診療に従事する医師の眼の水晶体線量. (第 31 回日本心血管インターベンション治療学会九州沖縄地方会), 北九州国際会議場 (北九州市・福岡県), 10 月 1-2 日 (一部 Web 配信), 2021.
42)栗山 知子, 盛武 敬, 茂呂田 孝一, 人見 剛, 中上 晃一, 永元 啓介, 松崎 賢, 欅田尚樹: 血管造影室で放射線業務に従事する看護師の水晶体被ばく実態調査. (第 39 回産業医科大学学会, 第 47 回産業医学推進研究会九州地方会), 産業医科大学ラマツィーニホール (北九州市・福岡県), 10 月 9 日(一部 Web 配信), 2021.
43)松崎 賢, 盛武 敬, 中上 晃一, 永元 啓介, 茂呂田 孝一, 栗山 知子, 人見 剛, 欅田 尚樹: 管理区域で働く放射線業務従事者の個人被ばく線量計装着の実態調査. (第 49 回日本放射線技術学会秋季学術大会), 熊本城ホール (熊本市・熊本県), 10 月 15-17 日 (一部 Web 配信), 2021.
44)永元啓介, 盛武敬, 二瓶俊一, 中上晃一, 茂呂田孝一, 松崎賢, 欅田尚樹: 診断 CT 撮影における患者介助方法の違いが医療従事者の手指線量に与える影響, (第 77 回日本放射線技術学会総会学術大会), パシフィコ横浜 (横浜市・神奈川県), 4 月 11 日-14 日, 2022.
45)栗山 知子, 盛武 敬, 人見 剛, 中上 晃一, 永元 啓介, 茂呂田 孝一, 松崎 賢, 欅田 尚樹:中央手術室で放射線診療に携わる看護師の水晶体被ばく実態調査ー高線量率群と低線量率群における業務に関連した条件の比較ー(第 11 回日本放射線看護学会), Web 開催, 9 月 1-18 日, 2022.
46)永田竜朗, 栗山 知子, 喜多村紘子, 掛田伸吾, 欅田 尚樹, 盛武 敬, 近藤 寛之:簡易型徹照カメラを用いた放射線業務従事者の水晶体検診. (第 92 回九州眼科学会), 沖縄市町村自治会館(沖縄県那覇市), 5 月 28 日, 2022.
47)栗山 知子:シンポジウム 17 医療従事者の妊娠と被ばく 第二部;看護師の水晶体被ばく線量と血管造影室内の環境因子ー3 病院のデータ解析からー(第 38 回日本脳神経血管内治療学会学術集会), 大阪国際会議場(大阪府大阪市)10 月 10-12 日, 2022.
48)初坂奈津子, 宮下久範, 久保江理, 大久保利晃, 佐々木洋.「放射線業務従事者の健康影響に関する疫学的研究」白内障全国調査報告, 第 60 回日本白内障学会総会, 2021/11/26-27, 横浜
49)初坂奈津子, 柴田哲平, 宮下久範, 武田峻, 渋谷恵理, 三田哲大, 清田優希也, 水戸毅, 久保江理, 佐々木洋. AI を使った水晶体 Vacuoles 検出モデルの開発と評価, 第61回日本白内障学会総会・第 48 回水晶体研究会, 2022/8/27-28, 宇都宮
50)初坂奈津子, 柴田哲平, 岩西宏樹, 田中才一, 喜多村紘子, 盛武敬, 千田浩一, 雑賀司珠也, 黒坂大次郎, 佐々木洋. 脳神経血管造影検査・血管内治療従事者の放射線白内障, 第 76 回日本臨床眼科学会, 2022/10/13-16, 東京
51)関克哉, 山内紘作, 三登将平, 石田浩之, 中西宏太朗, 五十嵐隆元, 赤羽正章. 放射線防護用移動式バリア装着時における水晶体近傍の線量分布. 第 38 回 秋季日本診療放射線技師学術大会, 2022.9.18.

52)Kazuki Nishi, Toshioh Fujibuchi. Development of application to visualize the spread of scattered radiation using augmented reality. The 76th annual meeting of the Japanese Society of Radiological Technology (JSRT), Web, May 15-June 14, 2020.
53)Kazuki Nishi, Toshioh Fujibuchi, Takashi Yoshinaga. Development of scattered radiation distribution visualization system using WebAR. The 10th International Seminar on New Paradigm and Innovation on Natural Science and Application (ISNPINSA), Web, September 24-25, 2020.
54)西和紀, 藤淵俊王, 吉永崇. ウェブブラウザ上での拡張現実を利用した散乱線分布の可視化システムの開発. 第 19 回日本放射線安全管理学会学術大会, Web, 2020 年 12 月 9-11 日.
55)Kazuki Nishi, Toshioh Fujibuchi. Development of application to visualize the spread of scattered radiation in radiography using Augmented Reality. The 15th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA), Web, January 18-22, 2021.
56)Kazuki Nishi, Toshioh Fujibuchi, Takashi Yoshinaga. Development of a System for Scattered Radiation Distribution Visualization Using Augmented Reality in Web Browser. The 77th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 15-18, 2021.
57)西和紀, 藤淵俊王, 吉永崇. クロスリアリティによる散乱線挙動可視化教材の放射線教育効果の評価. 日本放射線技術学会(JSRT)第 49 回秋季学術大会, 2021 年 10 月 15-17 日)

H. 知的所有権の取得状況

1) 放射線被ばくによる皮膚炎発生の予測：特願 2020-072182(2020 年 4 月 14 日出願)；発明者：孫　略, 盛武　敬, 千田　浩一, 稲葉　洋平；出願人：産業技術総合研究所, 産業医科大学, 東北大学

2) 芳賀喜裕, 千田浩一ほか. 放射線防護具.(突出型).特願 2022-144770, 令和 4 年 9 月 12 日

3) 加賀勇治, 千田浩一ほか. 放射線防護具. 特願 2023-072373, 令和 5 年 4 月 26 日

4) 線量計ホルダ：特願 2018-149742(平成 30 年 8 月 8 日出願), 特許第 7120569 号(令和 4 年 8 月 8 日取得)；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 Global Embrace Medical

I. 健康被害情報

なし

J. 関係団体等との連携および行政への貢献

1. 関係団体等との連携

・本研究班は、医工学的な線量測定・評価、保護具・線量計の改良開発、放射線教育、医療放射線業務の現場に精通した放射線防護・管理のスペシャリストが参加する研究班を形成し、各研究者が所属する学会にて数多くの関連講演を行うなど積極的に連携して研究を推進してきた。さらにそれだけでなく、関係機器メーカ団体である日本画像医療システム工業会（JIRA）までも統合した研究班を形成し活動してきた。

・JIRA から保科匠氏（グローバルエンブレイスメディカル）、前田賢氏（株マエダ）、尾池千穂氏（東レ·メディカル）らが千田班に参画し、放射線防護機材の開発を行う

事業場の開発担当者の立場として班会議に毎回出席して情報共有や意見交換を精力的に行った。
・班会議以外にも、JIRA から参加者と関連学会開催時などに研究打合せ等を実施し、製品像の探求や課題の抽出を行った。
・以上のように、JIRA から参加者と強固な連携の結果、一部については製品開発や改良等へ向けて大きく進捗した。

2. 行政への貢献

・班会議には、厚労省担当官に必ず出席してもらい、成果や課題について情報共有や討議を行い、さらに必要に応じて E メールや電話で意見交換を行うなど、厚労省担当官と密接に連携し、政策立案等に関する見解を示すことができた。
・厚労省の放射線防護分野研究班合同連絡会議にて情報共有や討議を行い、千田班成果についても連携して厚労省への提言等に活用された。
・2 つの欅田班研究（労災疾病臨床研究事業： 1.不均等被ばくを伴う放射線業務における被ばく線量の実態調査と線量低減に向けた課題評価に関する研究、2.放射線防護マネジメントシステムの適用と課題解決に関する研究）とも密接に連携して活動し、その結果、千田班成果の一部について欅田班を通して意見具申等に活用された。
・日本放射線技術学会の関係法令委員会の放射線管理フォーラムにて、行政を交えて千田班成果について情報共有や討議を行い、提言へ向けた意見交換ができた。

K. 多角的研究の取り纏め

千田班研究は、実際の被ばく管理を効果的に実施するために国内では未だ数少ない専門家が結集して、水晶体放射線被ばく防護に関する多角的研究を実施した。これらの調査･研究は、現状の医療分野における問題点を明らかにするとともに、課題解決のための方策を提供し、非常に有用な成果を得ることとなった。以下に、分析結果を踏まえ、多角的視点から、放射線防護機材の開発等に資する検討を行い、体系的に取り纏めた。

血管撮影領域は患者・術者共に放射線被ばくが多い領域である。患者の医療被ばくには線量限度は無いが、医師は正当化の大原則に則り放射線検査を行うことが必要である。さらに ALARA の原則に基づき防護の最適化が行われていることが必要である。術者における被ばくは線量限度で管理されており、特に眼の水晶体等価線量限度が新法令により引き下げられ、厳しく管理する必要がある。このような状況下で、被ばくに向けた取り組みとして、千田班研究では様々な防護具の改良や開発が行われている。しかし、唯一絶対的な防護具は存在しなく、様々な防護具を併用することで、術者の被ばく低減に繋がると考える。

1. 検査前に関する事

日本循環器学会の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では、医療従事者の被ばく線量管理に関する推奨とエビデンスレベルは、不均等被ばく管理、放射線防護衣の着用、放射線防護眼鏡の着用が推奨クラス「I」、エビデンスレベル「A」である。甲状腺防護具の着用は推奨クラス「IIa」、エビデンスレベル「B」である。

血管撮影の術者は放射線防護衣を着用するが、軽量な 0.25mm 鉛当量のエプロンタイプが好まれている。長時間を要する複雑

病変に対しては、身体的な疲労も手技のプロセスに影響を及ぼすことは容易に考えられる。近年は鉛を用いない（無鉛）0.25mm鉛当量の防護衣が開発され、更なる軽量化が図られている。しかし最も軽量な0.25mm鉛当量の無鉛防護衣は0.35mm鉛当量の無鉛防護衣に比べ散乱線の遮蔽率が低い。千田班の結果から、重量は1kgほど重くなるが、被ばく防護を優先し0.35mm鉛当量の無鉛防護衣の使用が望ましいいと考える。また、防護衣はエプロンタイプとコートタイプがあるが、術者はデバイスの扱いでX線管に背を向ける場合もあるので、コートタイプの着用が望ましい。

防護眼鏡はレンズ部分の鉛当量が異なる製品が様々開発販売されている。鉛当量が多くなれば、遮蔽効果が上がるが重量が大きくなり、装着感が悪くなり疲労感が増すといった欠点もある。臨床における0.75mm鉛当量の防護眼鏡と0.07mm鉛当量の防護眼鏡を比較した報告では、0.75mm鉛当量の防護眼鏡の遮蔽率が80%、0.07mm鉛当量の防護眼鏡は60%と示されていた。遮蔽率では0.75mm鉛当量の防護眼鏡が20%高値であるが、装着感や好感度は0.07mm鉛当量の防護眼鏡が圧倒的に支持を集めていた。防護眼鏡だけで散乱線を遮蔽するのではなく、防護板などの併用を考えた場合、遮蔽効果の20%の差はさほど意味を持たず、むしろ使用感の良い眼鏡を用いて防護眼鏡の装着率を高める方が有意義とされていた。現在最も臨床で使用されているのは0.07mm鉛当量の防護眼鏡であるが、その形状の改良も行われている。従来、防護眼鏡のサイズは1サイズのみであったが、自分の顔にフィットするようにS、M、Lの3サイズが選択可能となっている。鼻あてとテンプル（つる）の部分が可動式になり、更に顔にフィットできるように微調整することが可能となった。千田班の臨床研究では、これらの工夫で5%の遮蔽率向上が得られたことを明らかにした。

甲状腺防護具（ネックガード）も着用率が上がってきてる。防護衣と同様に0.25mm鉛当量と0.35mm鉛当量のネックガードが主流である。千田班研究ではこのネックガードに顔面を防護する目的でフェイスシールドを取り付けて更なる頭頚部の被ばく防護を可能とした防護具が開発された。このシステムを用いれば防護眼鏡が不要と言うデータもあるが、装着感の良い防護眼鏡と併用することで更なる水晶体防護効果が期待できる。

2.　血管撮影装置に関する事

現在の血管撮影装置は低パルスレート・低フレームレートが標準化している。更に、軟線除去フィルタも複数装備され、患者被ばく低減に大きく寄与している。また、寝台には下方のX線管からの散乱線を防護するために鉛カーテンが標準装備され、加えて天吊り防護板も装備され、術者の放射線防護に配慮した装置となっている。天吊り防護板は日本循環器学会の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で、推奨クラス「I」、エビデンスレベル「A」である。防護板と防護眼鏡の組み合わせで水晶体被ばく低減に大きく貢献している。しかし、防護板の正しい使用方法を理解していない術者も多い。千田班研究では、初期臨床研究結果として、防護板不適切使用例が約8割もあることを明らかにした。防護板をC-armに近づけて設置すると壁からの散乱線や防護板を周り込んだ散乱線によって被ばくし、本来の効果を十分発揮できない場合がある。防護板は手

技の邪魔にならない程度で、自分の近くに設置する必要がある。また、心血管 IVR と脳血管 IVR では防護板の設置方法に差が出来る。穿刺部位（アプローチ部位）を大腿動脈と仮定すると、心臓に C-arm を設置し大腿部で術者がカテーテル操作した場合、頭部に C-arm を設置し大腿部で術者がカテーテル操作をする場合より、C-arm（X 線管）と術者の距離が短い傾向にある。そのため心血管 IVR 術者の被ばく線量は多くなり、更に防護板の設置に苦渋することがある。特に心血管系 IVR は C-arm を複雑な角度にして検査・治療が行われるため、防護板を設置できない場合がある。この状況はバイプレーンシステムで顕著である。循環器バイプレーン用防護板の新たな開発が必要と考える。

心血管系 IVR の穿刺部位は止血の容易性や患者侵襲度が低いことなどにより、90%以上が橈骨動脈アプローチとなっている。橈骨動脈アプローチは大腿動脈アプローチに比べ、術者被ばくが多くなる傾向にある。そこで、術者被ばく低減に腹部を含鉛ドレープで覆う被ばく低減方法がある。患者からの散乱線を減少させる方法で、更に千田班研究では、含鉛ドレープの患者頭側を立ち上げ壁状にすることにより、更なる被ばく低減効果を示した。しかし、慢性完全閉塞症例は対側造影が行われるため、橈骨と大腿部の両方がアプローチ部位となる。また、PCI の場合、橈骨アプローチで行われるが、緊急時に備えて大腿部の消毒が行われる場合もある。このような症例では残念ながら壁付含鉛ドレープは使用できず、更なる工夫が必要である。

3.　　検査中に関する事

患者の被ばく線量を低減することは術者の被ばく低減にも繋がる。例えば、撮影の代わりに透視保存をする。患者を X 線管から出来るだけ離す。被写体厚が厚くなる深い角度を避けるなどが挙げられる。検査中の被ばく低減は術者の意識に大きく左右される。天吊り防護板も適切な位置に設置することが重要である。しかし、臨床では手技に集中するあまり、撮影時に無意識にモニターを注視するなどで、前傾姿勢となり防護板から外れることが多くあり、被ばくを増加させる要因となっていることを千田班研究で明らかにした。セカンドオペレータ等が防護板の位置を修正するか、声掛けをすることで防げる場合もある。

心臓 IVR 領域では造影剤自動注入器による冠動脈造影が広く用いられるようになった。インジェクターのスイッチを用手で操作することで造影が可能である。造影時はアプローチ部位から造影するのではなく、少しでも離れたところから造影剤注入器のスイッチ操作を行う事で被ばく低減に繋がる。

まとめ

様々な防護具が開発され、臨床に用いられているが、複数の防護具を併用することで防護効果がより期待できる。しかし、現時点でも改良の余地がある防護具も存在する。症例の難易度に合わせて適切な防護具を用いることも必要である。引き続き新発想の防護具開発や各種の防護具の臨床評価や改良が必要である。天吊り防護板の不適切例が約 8 割あるなど、防護の問題点が明らかになった。よって今後リアルタイム評価症例を重ね IVR 術者の行動解析を行い、防護戦略を立案する必要がある。

白内障の実態調査についても貴重なデータが収集されており長期での継続調査等が必要である。

常に被ばく低減に意識をしながらIVR手技に臨むことが必要であり、そのためにも放射線防護教育研究の重要性は高い。

※ 各個別課題の概要は、資料（各分担者報告）の形式でより詳細を記述した。

II. 資料（各分担者報告）

労災疾病臨床研究事業
分担研究報告書【総合(令和 2 年度～令和 4 年度)】

眼の水晶体の放射線防護に資する機材開発推進および被ばく低減のための多角的研究
(200701-01)

【放射線防護機材の技術的課題等の情報について調査・収集および放射線防護機材等の改良などに関する研究】

研究者　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)
研究協力者　芳賀喜裕、稲葉洋平、加藤守ほか

研究要旨
令和 2 年度～令和 4 年度において、(1)放射線防護機材の技術的課題等の情報について調査・収集(含む臨床研究)、(2)放射線防護機材の改良等に関する研究、さらに(3)水晶体線量計等の改良等に関する研究について主に取り組んだ。

3 年間で、主に下記の成果を挙げた。

新型リアルタイム線量計である RaySafe i3 は、各種の放射線医療業務に従事する者(医師や看護師等)の防護具使用状態等をリアルタイムに評価分析するための個人線量計として、十分な基本性能を有していると思われた。さらに新型リアルタイム線量計 i3 が IVR 臨床の現場において問題なく使用できることが確認できた。そして i3 の IVR 臨床おいての有用性を確認でき、本検討により天吊り防護板の不適切使用例が 8 割程度もあることなどが分かり、防護板の位置の重要性を再認識することができた。またモニターの確認のために前かがみになるといった無意識下の行動であっても、被ばく線量の増加につながることが分かった。天吊り防護板の位置調節を含めた放射線防護教育を改めて行う必要がある。また術者水晶体と頸部の線量の傾向には、防護板による遮蔽の差や撮影透視の角度等によって大きな差が見られ、頸部線量から水晶体線量の推定は難しいと思われた。

心血管 IVR に従事する看護師の水晶体用線量計の適切な装着位置を明らかにすることは、正確な線量測定のために重要である。PCI では左眼位置、ABL では右眼位置が最も高線量となり、PCI・ABL の線量比較では ABL の方が有意に高い結果となった。したがって、看護師の水晶体の被曝線量を安全側に評価するためには、PCI では左眼近傍、ABL では右眼近傍に線量計を装着して測定することが適切であると思われる。長期間測定による IVR 看護師の水晶体被ばく線量調査結果から、年間 20mSv を超える看護師はいなかったが、看護師間の手技中の意識差や行動差が明らかになった。したがって、看護師への放射線防護教育が重要である。

PET 検査における看護師の水晶体被ばくに関する基礎検討結果から、PET 検査を行う看護師が線量限度の 1 年平均値である 20mSv/年を超過する可能性は低いと考えられる。しか

し件数や投与量といった条件の違いによっては水晶体の線量がさらに高くなることが想定される。また左眼水晶体位置に装着した DOSIRIS と左頸部に装着したガラスバッジとでは計測値に違いが生じたが、PET 薬剤投与時の水晶体位置と頸部位置の防護状況の違いが大きく影響していると考えられる。

改良新型 0.07mmPb 当量防護眼鏡は鉛当量を 0.07mmPb に抑え軽さを維持しながらも、形状の工夫により従来型の 0.07mmPb 当量防護眼鏡と比較して高い遮蔽率となった。しかしまだ十分な防護効果を有しているとは言えないため、今後、遮蔽能力向上、IVR 術者の水晶体被曝の低減を目指して、さらなる防護眼鏡の改良と種々の検討を行う必要がある。

試作した放射線シールドドレープは橈骨動脈アプローチの心臓 IVR において想定した IVR 術者の被ばく線量を、平均 60%、最大 90%低減できる可能性があることが示唆された。特に IVR 術者の頭部、水晶体の被曝低減において、従来型の放射線シールドドレープ（壁無しタイプ）よりも効果的であると思われた。すなわち壁を使用することによって遮蔽効果が上昇することが確かめられた。一方、今回試作した X 線防護壁付放射線シールドドレープ単体の評価では、透視や撮影の角度によって十分な遮蔽効果が得られないことがあるため、さらなる改良や、天吊り防護板など他の防護具との併用が重要であると考えられた。つまり撮影方向や設置の位置によっては十分な遮蔽効果が得られないことや、手技の邪魔になることも考えられた。そのためドレープおよび壁の設置位置や使用する状況など適切な使用法について、今後も検討が必要である。

IVR 医師における無鉛エプロンの放射線防護効果等の検討結果から、IVR 医師の放射線防護には 0.35mmPb 当量の無鉛防護エプロンがより適していると思われた。無鉛防護エプロンは、鉛防護エプロンと異なり毒性がなく軽量である。また、IVR スタッフは主に散乱線によって被ばくしている。これらのことから、無鉛防護エプロンは医師をはじめとした IVR スタッフの放射線防護により好まれるだろうと思われた。

IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）の試作品の着用時における装着感に関しては、全く問題無く、十分に実用可能あると思われた。さらに IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）試作品は、十分な遮蔽効果を有していることが、初期測定結果から明らかになった。

IVR 術者の水晶体被ばくを低減するために開発した試作放射線防護具（突出型）は、心血管 IVR 術者に対し、効果的に水晶体を防護できることが確認できた。試作放射線防護具は、頭部に固定するため、放射線防護眼鏡のような重さや視界への影響がない上、他の放射線防護具や感染防護用フェイスシールド、外科用ルーペ、外科用ヘッドライト等の併用が可能なため、さまざまな領域で利用可能と考える。なお開発した試作放射線防護具（突出型）について、特許出願を行うことができた。

DOSIRIS®の改良試作型ヘッドセットの使用感に関する初期検討を行った結果、改良試作型ヘッドセットでは、特に圧迫感及び違和感を覚えにくい構造へと変化しており、使用感の向上が見られた。このように、改良試作型ヘッドセットの有用性について示されたが、臨床現場

の意見から、改善点もいくつか示された。

頭部から発生する後方散乱線が水晶体被ばくに及ぼす影響について検討した結果、水晶体被ばく線量における後方散乱線含有率は約 20%であり、含有率は管電圧の増大に伴い増加した。また、防護眼鏡の放射線防護効果を評価する際は、後方散乱線の影響を考慮するために、人体等価ファントムを使用したうえで線量計を眼の近傍に装着するべきである。発泡スチロールファントムを使用した場合、放射線防護効果を過大評価してしまう可能性がある。

A. 研究目的

眼の水晶体の新しい等価線量限度取入れ運用に際し医療分野は特に課題が多い。本研究は医療施設の従事者が受けている眼の水晶体被ばくの防護状況の実態を詳細に把握すること、さらに本申請課題は医療施設の労働者の水晶体被ばく低減を図るため、放射線防護機材に求められるニーズ等の情報を収集し、今後の機材開発に資する検討、すなわち機材開発の推進のための課題整理を行うことを目的とする。

そのために、(1) 放射線防護機材の技術的課題等の情報について調査・収集（含む臨床研究)、(2) 放射線防護機材の改良等に関する研究、さらに (3) 水晶体線量計等の改良等に関する研究を実施する。

3 年間で、具体的に下記の項目について主に取り組んだ。

B. 研究方法

(1) 放射線防護機材の技術的課題等の情報について調査・収集（含む臨床的研究）

① リアルタイム線量評価

様ざまなシチュエーションでの医療施設従事者（特に IVR 従事者）の眼の水晶体被ばくの防護状況の実態を詳細確実に把握するためには、リアルタイム線量測定が必要である。すなわち IVR 従事者の被ばく線量に影響する因子である、撮影条件や術者の立ち位置のように手技の間で変化するものについては、経時的なリアルタイム評価が必要である。そのため今回、新しいリアルタイム個人線量計 i3 が、臨床現場での使用に耐え得る基本性能を有しているかどうか確認するため、詳細に基礎測定評価を実施した。

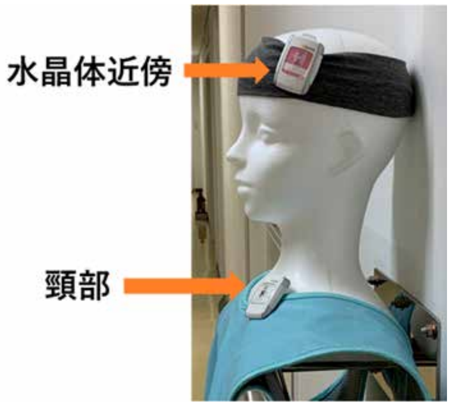
さらに IVR においてどのような行為が術者被ばくのリスクを高めているのか検討するため、新型リアルタイム個人線量計 i3 を実際の IVR 臨床で使用して、初期的な検討を行った。

・リアルタイム線量計計の基礎研究

電離箱線量計、RaySafe i2 などと比較して、新しいリアルタイム個人線量計 RaySafe i3 の基本性能評価に関する基礎的検討を行った。主な評価項目は、安定性、管電圧依存性、線量依存性、線量率依存性、電波特性、角度依存性、後方散乱、透過率、パルス透視応答などである。

・リアルタイム線量計を用いた IVR 術者の初期臨床研究

心臓 IVR での、術者（医師）の IVR 手技中の水晶体と頸部の線量の測定を、新しいリアルタイム個人線量計 RaySafe i3 を用いてリアルタイムに行った。水晶体の線量測定の際は、IVR 術者の頭部にヘアバンドを装着し、その上に i3 を術者の左眼近傍に取り付けた（すなわち防護眼鏡の外側の線量を測定している)。頸部位置の場合は、IVR 術者の左頸部付近のプロテクターの上に i3 を装着した。



リアルタイム線量計 i3 を装着した様子

② 看護師の水晶体被ばくの基礎的評価検討

放射線被ばくが一般的に高いといわれている IVR 等に携わる看護師の防護策を講じ

るため、その実態を明らかにした。心血管IVR に従事する看護師の水晶体被ばくの実態把握、そして水晶体用線量計装着位置の検討、および看護師の水晶体被ばく線量測定の簡便化を図るために看護師の水晶体線量と患者線量パラメータ（透視時間、Air Kerma(AK)、Kerma Area Product (KAP) ）との相関を検討した。

・IVR 看護師（手技１件ごと測定）

１２名の IVR 看護師の眼の線量の職業被ばくについて、経皮的冠動脈インターベンション (Percutaneous Coronary Intervention：PCI）および経皮的心筋焼灼術（Catheter Ablation：ABL）において評価した。蛍光ガラス線量計を看護師の左眼近傍、眉間中央、右眼近傍に装着し、手技１件ごとに測定を行った。また、線量と同時に装置に記録された患者線量パラメータのデータを回収し、水晶体線量と患者線量パラメータの相関も調査した。

・IVR 看護師（長期間評価）

8 名の IVR 看護師の眼の線量の職業被ばくについて、18 か月～24 か月間測定した。水晶体用線量計（DOSIRIS）を看護師の左眼近傍、頸部線量計（ガラスバッジ）を左頸部に装着した。また、線量と同時に装置に記録された患者線量パラメータのデータを収集分析し、水晶体線量・頸部線量と患者線量パラメータの相関も調査した。

・PET 検査に従事する看護師

PET 検査における看護師の水晶体被ばくに関する基礎検討、実態調査を行った。調査対象はPET検査を担当する看護師４名とし、6か月間の線量測定を実施した。線量計は水晶体線量計（DOSIRIS）と個人線量計（ガラスバッジ）を用い、両者の違いについても検討した。看護師が担当した PET 検査の件数と患者に投与した薬剤投与量も記録し、水晶体被ばくとの関係を調査した。さらに年間水晶体線量と線量限度の１年平均である 20 mSv を超過する件数を推定した。

(2) 放射線防護機材の改良等に関する研究

① 0.07mmPb メガネ改良に関する基礎検討

0.07mmPb 当量防護眼鏡は、装着感が良く軽量であるため、特に手技時間が長くなるような IVR において有用である。しかしながら、0.07mmPb 当量防護眼鏡の臨床における水晶体線量低減効果は十分とは言えず、さらなる遮蔽効果の向上が望まれていた。そこで、遮蔽率の向上を図るため、軽量眼鏡の形状等に改良を加えた、新型 0.07mmPb 当量防護眼鏡が開発された。本研究では、その改良された新型 0.07mmPb 当量防護眼鏡の初期的臨床評価結果や防護効果について検討した。対象は心臓 IVR 術者（医師）７名である。水晶体線量測定は、防護眼鏡の左水晶体近傍の内側と外側に１つずつ水晶体用線量計 DOSIRIS を装着した。そして 3mm 線量当量にて測定評価した。

② 放射線シールドドレープ改良に関する研究

放射線シールドドレープの使用は医療スタッフの職業被ばくを低減するための比較的シンプルで有用な方法であるが、防護能力をさらに改善する必要があると考えられる。さらに術者水晶体防護において、放射線シールドドレープの遮蔽効果を明らかにした報告は今までない。そこで本研究では放射線シールドドレープ改良に関する検討を実施した。具体的には、橈骨動脈アプローチ用の X 線防護壁付放射線シールドドレープを試作し、その遮蔽効果に関する初期的検討を行った。0.25mm 鉛当量の含鉛ビニル製（縦 75cm 横 35cm）の放射線シールドドレープが基本となっており、それに X 線防護壁

を装着できるようにした。X 線防護壁は、高さ 7cm 幅 5cm 長さ 55cm でマジックテープで貼り付けることで X 線防護壁付放射線シールドドレープを構成した。基礎実験は、胸腹部ファントム（京都科学）と 20cm×20cm のアクリルファントムを配置して行った。ファントムの腹部位置に、X 線防護壁付放射線シールドドレープを置いた場合、壁無し放射線シールドドレープを置いた場合、何も置かない場合について測定した。それぞれでシネ撮影を行い、電離箱線量計を用いて散乱 X 線量を測定し遮蔽効果の比較した。

また X 線防護壁付放射線シールドドレープをさらに改良し、その遮蔽効果について検討を行った。改良したドレープは、含鉛ビニル製の放射線シールドドレープと、高さが異なる防護壁から構成され、マジックテープにて放射線ドレープに防護壁を装着して使用する。上記同様の条件等で実験を行い、放射線シールドドレープおよび各高さの防護壁の使用による遮蔽効果を比較した。また鉛当量の異なる X 線防護壁付放射線シールドドレープ（0.25mm 鉛当量、0.125mm 鉛当量）の遮蔽効果も比較した。

改良型 X 線防護壁付放射線シールドドレープ（0.25mm 鉛当量）の外観

③ IVR 医師における無鉛エプロンの放射線防護効果

本研究では、0.25mmPb 当量と 0.35mmPb 当量の無鉛エプロンについて、IVR 臨床での遮蔽効果を評価した。無鉛防護エプロンは、鉛防護エプロンより高価であるものの、より軽量である。0.25mmPb 当量と 0.35mmPb 当量の無鉛防護エプロンと鉛防護エプロンについて、心臓カテーテル臨床での防護効果を比較した。医師が着用した防護エプロンの内側・外側の胸部に 2 つのポケット線量計を装着し、線量を測定した。また、手技中の医師の快適度についても評価した。

④ IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）の試作

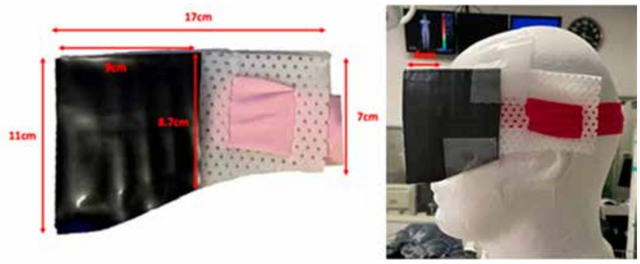
IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）の試作に関する初期検討を行った。試作した放射線防護具は、甲状腺プロテクタを上下逆にしたような形状のフェイスシールドを、甲状腺プロテクタの左側に付加し、被写体から発生する散乱 X 線を効果的に防護するデザインである。つまり従来に無いユニークな発想の水晶体も防護できる IVR 術者用の新しい鉛防護具である。

IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）試作品の外観

⑤ IVR 術者の水晶体被ばくを低減するための試作放射線防護具の開発

側方下方の散乱線から水晶体を防護することをコンセプトに、心血管 IVR に従事す

る術者（医師）の水晶体被ばくを低減する試作放射線防護具（突出型）を開発し、装着方法と鉛当量の違いによる防護効果について検討した。素材は、プラスチック板（前面高さ 11cm×後面高さ 7cm×長さ 17cm）と鉛等を含有した塩化ビニル樹脂等の放射線遮へいシート（前面高さ 11cm×後面高さ 8.5cm×長さ 9cm）、ヘアバンドを利用し作製した。新たに開発試作した放射線防護具は、装着方法に関しては 0.175mmPb の放射線遮へいシートを用い、顔面から 2、4、6cm 前方に突出するように配置し、防護効果を検討した。また、放射線遮へいシートの鉛当量に関しては、0.175mmPb と 0.25mmPb で防護効果を検討した。



試作放射線防護具（突出型）の概要と装着法

（3）水晶体線量計等の改良等に関する研究
① 水晶体用線量計 DOSIRIS®の改良試作型ヘッドセットに関する初期検討

水晶体用線量計 DOSIRIS®の改良試作型ヘッドセットの使用感に関するアンケート調査を行い、その有用性について検討した。DOSIRIS®は、長時間装着後に装着感に不満を訴える従事者が少なくないことが問題点としてあるため、ヘッドセット部分の形状が変更された改良試作型 DOSIRIS®が開発された。そこで本研究では、ポータブル X 線撮影及び血管撮影に従事する診療放射線技師 7 名を対象とし、DOSIRIS®の従来型及び改良試作型ヘッドセットを装着した際の使用感について、アンケートに回答してもらい、改良試作型ヘッドセットの有用性について評価した。

DOSIRIS®の改良試作型ヘッドセットと線量計

② 頭部から発生する後方散乱線が水晶体被ばくに及ぼす影響

水晶体被ばくについて、自身の頭部から発生する後方散乱線の影響を評価した。本研究では、発泡スチロールと人体等価ファントムの左眼位置に蛍光ガラス線量計を装着して実験を行った。また、0.07mm 鉛当量の防護眼鏡を使用して、後方散乱線が防護眼鏡の放射線防護効果に与える影響についても検討した。

C. 研究結果

（1）放射線防護機材の技術的課題等の情報について調査・収集（含む臨床的研究）
① リアルタイム線量評価
・リアルタイム線量計の基礎研究

新しいリアルタイム個人線量計 i3 は、旧型のリアルタイム線量計である RaySafe i2 と比較して、今回検討したすべての項目について同等以上の性能を有していた（特に角度依存性については優れていた）。さらにその他のリアルタイム線量計と比較して、i3 は線量の把握を詳細に行うことが容易で、計測後にパソコンに接続して解析することで、より詳しい線量率等のデータが得られるという利点があった。

よって i3 は、各種の放射線医療業務に従事する者（医師や看護師等）の防護具使用状態等をリアルタイムに評価分析するための

個人線量計として、十分な基本性能を有していると思われた。

・リアルタイム線量計を用いた IVR 術者の初期臨床研究

新型リアルタイム線量計 i3 が IVR 臨床の現場において問題なく使用できることが確認できた。さらに初期的検討結果から、照射方向の違いや患者との距離によって術者と助手および水晶体と頸部の線量に差がみられ、LAO 方向では術者、助手共に水晶体、頸部で線量が高くなり、CAU 方向では頸部での線量が特に高くなる傾向があることなどが明らかになった。

また本検討により、天吊り防護板の不適切使用例が 8 割程度もあることなど重要な結果が分かり、防護板の位置の重要性を再認識することができた。また、モニターの確認のために前かがみになるといった無意識下の行動であっても、被ばく線量の増加につながることが分かった。よって意識的に防護板を遮蔽ができる位置に移動させる必要がある。また、Lateral 管の使用と被ばく線量に関係があることが示唆されており、Lateral 管使用時は、より被ばくに意識を向ける必要があることが分かった。

② 看護師の水晶体被ばくの基礎的評価検討

・IVR 看護師（手技 1 件ごと測定）

PCI では装着位置によりあまり差はなかったが左眼近傍で最も高い線量、ABL では右眼近傍において最も高線量の傾向を示した。このことから看護師は、PCI では左眼近傍、ABL では右眼近傍に線量計を装着することが望ましいと考えられる。また、PCI において各装着位置における水晶体線量と各患者線量パラメータに相関が認められた。ABL では AK および KAP において、PCI より弱い相関が認められた。したがって、PCI では患者線量パラメータから看護師の水晶体線量を推定できる可能性が明らかになった。しかしながら、看護師の挙動、手技の内容・難易度が毎回異なるため、水晶体線量および患者線量パラメータが大きく変動する恐れがある。よって、水晶体線量を正確に評価するためには、眼の近傍に線量計を直接装着して測定することが望ましいことが確認できた。本研究の結果から、心血管 IVR に従事する看護師は PCI 時には左眼近傍、ABL 時には右眼近傍に線量計を装着することが推奨される。

・IVR 看護師（長期間評価）

長期間測定による IVR 看護師の水晶体被ばくに関する検討結果から、測定期間において年間 20mSv を超える看護師はいなかったが、看護師により線量差が認められた。手技件数や透視時間、AK がほぼ同等の看護師を比較した場合にも看護師で線量差が認められたため、看護師間の手技中の意識や行動の差が明らかになった。このことから、看護師への放射線防護に関する教育が重要であると考えられる。

・PET 検査に従事する看護師

PET 検査における看護師の水晶体被ばくに関する基礎検討結果から、PET 検査を担当する看護師が水晶体等価線量限度を超過する可能性は低いと考えられる。また水晶体線量と担当検査数および薬剤投与量には相関が認められた。

(2) 放射線防護機材の改良等に関する研究

① 0.07mmPb メガネ改良に関する基礎検討

改良型メガネの医師 7 名の平均遮蔽率は 61.4％、遮蔽率が最高であった医師は 63.4％、最低遮蔽率であった医師に関しても 58.9％の遮蔽率となった。また、眼鏡のサイズによって遮蔽率への大きな差は生じ

なかった。

② 放射線シールドドレープ改良に関する研究

試作した放射線シールドドレープは橈骨動脈アプローチの心臓 IVR において想定した IVR 術者の被ばく線量を、平均 60%、最大 90%低減できる可能性があることが示唆された。特に IVR 術者の頭部、水晶体の被曝低減において、従来型の放射線シールドドレープ（壁無しタイプ）よりも効果的であると思われた。

防護壁の使用により遮蔽効果が上昇することが確かめられた。しかし撮影方向や防護壁の設置位置によっては手技の妨げになること、十分な遮蔽効果が得られないことが予想されるため、適切な使用位置について今後さらなる検討が必要である。また放射線シールドドレープの鉛当量を変えて測定を行ったが、遮蔽効果に顕著な差はみられなかった。これには防護壁の設置角度の再現性が起因していると考えられる。

③ IVR 医師における無鉛エプロンの放射線防護効果

4つの防護エプロンの中では、0.35mmPb 当量の無鉛防護エプロンの性能（遮蔽率 98.5%、快適度良好）が優れていた。また、0.35mmPb 当量の無鉛防護エプロンと鉛防護エプロンの放射線防護効果は同等であった。よって、遮蔽率と快適度がどちらも優れていた 0.35mmPb 当量の無鉛防護エプロンが IVR 医師の防護に適していると言える。また、無鉛防護エプロンは毒性がなく、鉛防護エプロンより軽量であるため、医師をはじめとした IVR スタッフの防護にはより好まれるだろうと考えられる。

④ IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）の試作

IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）の試作品の着用に関しては、全く問題無く、十分に実用可能あると思われた。さらに IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）試作品は、十分な遮蔽効果を有していることが、初期測定結果から明らかになった。以上から IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）は、IVR 手技中の放射線防護に有用であると考えられる。なお、この成果については東北大学からプレスリリースされた（画像下治療（IVR）術者用の新しい放射線防護具を開発　放射線白内障等の発生リスク低減へ https://www.med.tohoku.ac.jp/5187/）。

⑤ IVR 術者の水晶体被ばくを低減するための試作放射線防護具（突出型）の開発

新たに開発試作した放射線防護具（突出型）は、装着方法は顔面から前方へ 4cm 以上突出させることによって、80%以上の防護効果が確認できた。前方に突出させることで、前面への重みが増し、ヘアバンドの固定では不安定感が確認された。IVR はさまざまな態勢で手技を行うため、安定した固定具が必要と考える。放射線遮へいシートの鉛当量は、0.175mmPb と 0.25mmPb ともに 80%以上の防護効果を認めた。しかし、防護効果が約 60%の放射線防護眼鏡とほぼ同等の 0.075mmPb の差にもかかわらず、4.2%しか違いが見られなかったことより、0.175mmPb が妥当と考える。なお試作放射線防護具（突出型）の特許出願を行うことができた。

(3) 水晶体線量計等の改良等に関する研究

① 水晶体用線量計 DOSIRIS®の改良試作型ヘッドセットに関する初期検討

アンケート調査の結果から、改良試作型ヘッドセットでは、従来型に比べ、圧迫感や違和感が少ない構造へと変化していることが分かった。

これは、改良試作型ヘッドセットの形状の変更により、肌に触れる面積が減少している点や、βチタンの伸縮性のある材質により、様々な頭のサイズに適合しやすい点が理由として考えられる。さらに、シリコンの滑り止めが付属されていることにより、髪の毛とのずれが軽減されていることも考えられる。一方で、線量計部分に関し、改良試作型と従来型で評価に大きな差異は見られなかった。これは、双方の型で、同じ線量計のアタッチメントを装着しているため、使用感向上には寄与しなかったことが考えられる。また、装着感に関する自由記述回答においても、改良試作型の使用感向上に言及する意見が多数得られたが、一方で、少数ではあったが、改善点もいくつか挙げられた。

② 頭部から発生する後方散乱線が水晶体被ばくに及ぼす影響

頭部から発生する後方散乱線が水晶体線量に与える影響は小さくなく、その影響は管電圧の増大に伴い大きくなった。また、発泡スチロールファントムを使用して防護眼鏡の性能評価を行った場合、放射線防護効果を過大評価してしまった。防護眼鏡の放射線防護効果をファントム実験によって評価する際は、後方散乱線の影響を考慮するために人体等価ファントムを使用するべきである。

D. 考察

(1) 放射線防護機材の技術的課題等の情報について調査・収集（含む臨床的研究）

① リアルタイム線量評価

・リアルタイム線量計の基礎研究

各種の放射線業務に従事する者（医師や看護師等）の防護具使用状態等をリアルタイムに評価分析すること、すなわちリアルタイム線量測定システムを使用することで、防護状況を詳細に把握し改善点を抽出できる。様ざまなシチュエーションでの医療施設従事者の眼の水晶体被ばくの防護状況の実態を詳細確実に把握するためにはリアルタイム線量測定が必要でる。そこで、新しいリアルタイム個人線量計 i3 が、臨床現場での使用に耐え得る基本性能を有しているかどうか確認するため、詳細に測定評価を実施した。その結果、新しいリアルタイム個人線量計 i3 は、角度依存性が優れているなど IVR 臨床での使用に耐え得る十分な基本性能を有していることが示唆された。

・リアルタイム線量計を用いた IVR 術者の初期臨床研究

照射方向が LAO であるとき線量の増加が顕著となり、さらに Caudal(CAU)方向での照射でも、頸部の線量が高くなる場合があることなどが分かった。また、照射野への接近などにより防護板での遮蔽が不十分であるときに、術者の水晶体被ばく線量が高くなる傾向が見られた。これらのことから、IVR 装置の操作後に適宜防護板の角度を調節するように意識づけることが重要であることなどが明らかになった。

まだ症例は少ないものの、前かがみなることで被ばく線量率が増加すること、X 線管の角度によって線量率が変化すること、天吊り防護板の位置によって線量率が変化することなどがわかった。特に前かがみになることが多かったのは、X 線画像モニターを確認する際であった。これらは無意識下での行動であることも考えられるため、フィードバックを行うなどして、術者に被ばく線量を増加する行動であると意識してもらうことが重要であると考える。

X 線装置の線量データとの比較では、右冠動脈、左冠動脈の治療において、Lateral 管の使用と被ばく線量の間に強い相関がみられることが多かった。これは、Lateral 管を

使用する場合は、主にLAO方向の透視、撮影を行うため、X線管が術者の近くに来ることが多くなり、X線管からの散乱線の影響を受けたことが原因であると考えられる

また術者において水晶体線量と頸部線量の相関係数は0.51、助手については0.84と正の相関がみられた。そのことから症例や手技の血管、アプローチ経路、使用装置等で細かく条件を分けることができれば頸部の線量から水晶体の線量を推定することができる可能性がある。助手については相関係数 0.84 と優位に正の相関がみられており、線量の推定が可能であると考えられる。

② 看護師の水晶体被ばくの基礎的評価検討

・IVR看護師（手技1件ごと測定）

PCIにおいて、左眼、中央、右眼の順で高線量となったが、その差はわずかであった。ABLにおいては、右眼、中央、左眼の順で高線量となった。また、外れ値の影響を受けにくい中央値で左眼線量と右眼線量の比を算出したところ、PCIが1.13、ABLが0.56とABLにおいて右眼線量が高い傾向を示した。ABLにおいて右眼線量が最も高くなった要因として、看護師が患者の様子確認やカテーテル挿入時に患者に近づいたことが要因であると考えられる。このときABL看護師の右眼が患者およびテーブルに近くなり、散乱線により線量が高くなったのだと考えられる。

全体を通して、ABLの方がPCIより被ばく線量が有意に高いこと、特に右眼位置において顕著にABLの方がPCIより高線量であることから、ABLに従事する看護師は右眼近傍に線量計を装着することを推奨する。

・IVR看護師（長期間評価）

長期間測定によるIVR看護師の線量調査結果から、水晶体線量と頸部線量にはあまり相関が認められなかったこと、看護師の行動や処置（状況）により結果が異なる可能性があることが分かり、よって頸部線量から水晶体線量を推定することは困難であると考えられる。したがって、心臓血管系IVRに従事する看護師の水晶体線量を正確に評価するためには、眼に直接水晶体用線量計を装着することを推奨する。水晶体線量と患者線量パラメータに相関は認められなかったため、患者線量パラメータから水晶体線量を推定することは難しいと考えられる。

・PET検査に従事する看護師

水晶体線量と担当検査数および薬剤投与量には相関が認められたため水晶体被ばくを低減するためには業務のローテーションを定期的に行うなどしてPET看護師一人当たりの担当検査数を少なくすることが有効であると考える。水晶体用線量計と個人線量計の比較については、個人線量計での水晶体線量の過小評価の可能性が示唆される結果となった。これは薬剤投与時の防護状況が影響していると考えられ、薬剤投与時の線量の変化を今後調査していく必要がある。

(2) 放射線防護機材の改良等に関する研究

① 0.07mmPbメガネ改良に関する基礎検討

新型0.07mmPb当量の防護眼鏡を用いたIVR臨床測定を行った結果、平均で61.4%という良好な遮蔽効果があることを明らかにした。この値は従来型0.07mmPb当量防護眼鏡を用いた場合と比較して5%(5ポイント)以上高い値となった。これは新型0.07mmPb当量眼鏡が従来製品と比較して、3つのサイズのうちから術者個人が自分に合ったものを選べること、眼鏡の柄の角度が細かく調整できること、鼻あて部の角度調整が可能であること等の遮蔽率を上げるための形状の工夫がなされていることが要因であると

考えられる。しかしまだ十分な防護効果を有しているとは言えないため、更なる改良が必要である。だが、形状の工夫のみによって遮蔽率を大幅に向上させることには限界があることも示唆された。

② 放射線シールドドレープ改良に関する研究

試作開発した X 線防護壁付放射線シールドドレープは、従来の X 線防護掛布に高さ 7cm の壁を付けた簡便な防護具である。今回試作した X 線防護壁付放射線シールドドレープの基礎的ファントム実験の結果から、従来の壁無し放射線シールドドレープよりも、X 線防護壁付放射線シールドドレープは平均 20%、最大 60%高い遮蔽効果を有することが示された。X 線防護壁の高さを高くすることでより高い遮蔽効果を得られることが期待できるが、IVR 手技等において高い X 線防護壁が障害や邪魔になる危険性もある。

さらに防護効果を高めるため、高さの異なる防護壁と鉛当量の異なる放射線シールドドレープを用いて検討を行った。手指位置ではドレープのみの使用にて平均で約 44％の遮蔽効果、壁の使用でさらに約 14～34％の遮蔽効果の増加が確認できた。術者位置ではドレープのみの使用にて平均で約 25％の遮蔽効果、壁の使用でさらに約 1.7～26％の遮蔽効果の増加が確かめられた。手指位置においては RAO30° CAU30° 以外の撮影方向では測定高さ 140cm よりも 120cm で空間散乱線量が少なくなった。これは高さ 120cm の位置はファントム表面付近であり、ファントムそのものによって遮蔽されたためだと思われる。空間散乱線量は RAO30°、RAO30° CRA30° で相対的に多くなった。これは被写体からの散乱線だけでなく、X 線管からの散乱線が手指位置に設置した線量計に直接射入したためであると考えられる。

手指位置における X 線防護壁付放射線シールドドレープの遮蔽効果は、術者位置の遮蔽効果と比べ全体的に高い結果となった。これは手指位置の測定点から見ると、被写体の大部分がドレープで覆われており、また低い壁であっても遮蔽される面が大きいため、高い遮蔽効果が得られたと考えられる。

③ IVR 医師における無鉛エプロンの放射線防護効果

重い防護エプロンの装着によって腰痛などの筋骨格の障害を引き起こすリスクが高いため、個人にあった防護エプロンを選ぶことが非常に重要となる。無鉛防護エプロンは、主にタングステンとスズからなる複合材料によって作られているため、鉛防護エプロンより約 20%軽量である。ファントム実験では、無鉛防護エプロンと鉛防護エプロンの散乱線に対する性能は同程度であると報告されている。しかしながら、臨床条件での防護エプロンの性能が十分であるかについては、いまだ明かされていない。本研究では、IVR 臨床における無鉛防護エプロンと鉛防護エプロンの放射線防護効果を比較した。その結果、無鉛防護エプロンが IVR 医師の放射線防護に臨床的に有効であることを証明した。本研究の結果は、0.35mmPb 当量の無鉛防護エプロンの性能が臨床条件において優れているということを示している。よって、IVR 医師の放射線防護には 0.35mmPb 当量の無鉛防護エプロンが適していると言える。

④ IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）の試作

この試作品は、防護眼鏡を装着しなくても、水晶体を防護できるようにデザインされている。すなわち、IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）を

装着していれば、防護眼鏡は不要である。一方、IVR や PCI の術者は左側の頭頸部に癌が多いという報告がなされている。今回開発した、IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）は、水晶体だけでなく、IVR 術者の頭部の放射線防護が可能なことも大きな特長である。よって、IVR 術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）は、IVR 術者の頭頸部腫瘍の発生の軽減にも効果的であると思われる。

⑤ IVR 術者の水晶体被ばくを低減するための試作放射線防護具（突出型）の開発

新たに開発試作した放射線防護具（突出型）は、顔面から前方へ 4cm 以上突出させることによって、80％以上の防護効果が発揮することを確認できた。前方に突出させることで、前面への重みが増し、ヘアバンドの固定では不安定感が確認された。IVR はさまざまな態勢で手技を行うため、安定した固定具が必要と考える。放射線遮へいシートの鉛当量に関しては、0.175mmPb と 0.25mmPb ともに 80%以上の防護効果を認めた。しかし、両者は 0.075mmPb（防護効果 60%程度の放射線防護眼鏡とほぼ同等の鉛当量）も鉛当量が違うにもかかわらず、4.2%しか違いが見られなかったことより、0.175mmPb が妥当と考える。

(3) 水晶体線量計等の改良等に関する研究

① 水晶体用線量計 DOSIRIS®の改良試作型ヘッドセットに関する初期検討

ヘッドセット部分において、改良試作型の方が有意に評価は高くなった。これは、改良試作型では、ヘッドセット部分の末端が少し開いている構造により、肌に触れる面積が減少している点や、βチタンの伸縮性のある材質により、様々な頭のサイズに適合しやすい点が理由として考えられる。さらに、シリコンの滑り止めが付属されていることにより、髪の毛とのずれが軽減されていることも予想できる。DOSIRIS®の重量は従来型で約 12g、改良試作型で約 15g であり、双方で重量に大きな差はなく、装着感の差に寄与しなかったと思われる。また、安定感に関しても大きな差異は認められなかった。線量計部分において、いずれに関しても有意な差は見られなかった。これは、双方の型で、同じ線量計のアタッチメントを装着しているため、使用感向上には寄与しなかったことが考えられる。従来型及び改良試作型 DOSIRIS®の全体評価について、改良試作型の方が従来型よりも優位に評価が高かった。これより、全体を通した評価においても、改良試作型の使用感の向上が認められた。

② 頭部から発生する後方散乱線が水晶体被ばくに及ぼす影響

頭部から発生する後方散乱線が水晶体線量に与える影響は無視できない。また、発泡スチロールファントムを使用して防護眼鏡の性能評価を行った場合、後方散乱の寄与を評価できないため放射線防護効果を過大評価する。防護眼鏡の放射線防護効果をファントム実験によって評価する際は、後方散乱線の影響を考慮するために人体等価ファントムを使用するべきである。本研究の結果から、自身の頭部を防護することにより後方散乱線の発生量を低減でき、それが水晶体被ばくの低減につながる可能性が示唆された。

E. 結論

新型リアルタイム線量計である RaySafe i3 は、各種の放射線医療業務に従事する者（医師や看護師等）の防護具使用状態等をリアルタイムに評価分析するための個人線量計として、十分な基本性能を有していると思われた。さらに新型リアルタイム線量

計 i3 が IVR 臨床の現場において問題なく使用できることが確認できた。i3 の IVR 臨床おいての有用性を確認でき、本検討により天吊り防護板の不適切使用例が 8 割程度もあることなどが分かり、防護板の位置の重要性を再認識することができた。また、モニターの確認のために前かがみになるといった無意識下の行動であっても、被ばく線量の増加につながることが分かった。天吊り防護板の位置調節を含めた放射線防護教育を改めて行う必要があると考える。また術者水晶体と頚部の線量の傾向には、防護板による遮蔽の差や撮影透視の角度等によって大きな差が見られた。

心血管 IVR に従事する看護師の水晶体用線量計の適切な装着位置を明らかにすることは、正確な線量測定のために重要である。PCI では左眼位置、ABL では右眼位置が最も高線量となり、PCI・ABL の線量比較では ABL の方が有意に高い結果となった。したがって、看護師の水晶体の被曝線量を安全側に評価するためには、PCI では左眼近傍、ABL では右眼近傍に線量計を装着して測定することが適切であると思われる。

長期間測定による IVR 看護師の水晶体被ばく線量調査結果から、年間 20mSv を超える看護師はいなかったが、看護師間の手技中の意識差や行動差が明らかになった。したがって、看護師への放射線防護教育が重要である。

PET 検査における看護師の水晶体被ばくに関する基礎検討結果から、PET 検査を行う看護師が線量限度の 1 年平均値である 20mSv/年を超過する可能性は低いと考えられる。しかし件数や投与量といった条件の違いによっては水晶体の線量がさらに高くなることが想定される。また左眼水晶体位置に装着した DOSIRIS と左頚部に装着したガラスバッジとでは計測値に違いが生じたが、PET 薬剤投与時の水晶体位置と頚部の防護状況の違いが大きく影響していると考えられる。

改良新型 0.07mmPb 当量防護眼鏡は鉛当量を 0.07mmPb に抑え軽さを維持しながらも、形状の工夫により従来型の 0.07mmPb 当量防護眼鏡と比較して高い遮蔽率となった。しかしまだ十分な防護効果を有しているとは言えないため、今後、遮蔽能力向上、IVR 術者の水晶体被曝の低減を目指して、さらなる防護眼鏡の改良と種々の検討を行う必要がある。

試作した放射線シールドドレープは橈骨動脈アプローチの心臓 IVR において想定した IVR 術者の被ばく線量を、平均 60%、最大 90%低減できる可能性があることが示唆された。特に IVR 術者の頭部、水晶体の被曝低減において、従来型の放射線シールドドレープ（壁無しタイプ）よりも効果的であると思われた。すなわち壁を使用することによって遮蔽効果が上昇することが確かめられた。一方、今回試作した X 線防護壁付放射線シールドドレープ単体の評価では、透視や撮影の角度によって十分な遮蔽効果が得られないことがあるため、さらなる改良や、天吊り防護板など他の防護具との併用が重要であると考えられた。つまり撮影方向や設置の位置によっては十分な遮蔽効果が得られないことや、手技の邪魔になることも考えられる。そのためドレープおよび壁の設置位置や使用する状況など適切な使用法について今後も検討が必要である。なお改良型放射線シールドドレープについて特許出願した。

IVR 医師における無鉛エプロンの放射線防護効果等の検討結果から、IVR 医師の放射

線防護には0.35mmPb当量の無鉛防護エプロンがより適していると思われた。無鉛防護エプロンは、鉛防護エプロンと異なり毒性がなく軽量である。また、IVRスタッフは主に散乱線によって被ばくしている。これらのことから、無鉛防護エプロンは医師をはじめとしたIVRスタッフの放射線防護に有用である。

IVR術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）の試作品の着用時における装着感に関しては、全く問題無く、十分に実用可能あると思われた。さらにIVR術者用の新しい頭頸部用放射線防護具（フェイスシールド）試作品は、十分な遮蔽効果を有していることが、初期測定結果から明らかになった。

IVR術者の水晶体被ばくを低減するために開発した試作放射線防護具（突出型）は、心血管IVR術者に対し、効果的に水晶体を防護できることが確認できた。試作放射線防護具は、頭部に固定するため、放射線防護眼鏡のような重さや視界への影響がない上、他の放射線防護具や感染防護用フェイスシールド、外科用ルーペ、外科用ヘッドライト等の併用が可能なため、さまざまな領域で利用可能と考える。なお開発した試作放射線防護具（突出型）について、特許出願を行うことができた。

DOSIRIS®の改良試作型ヘッドセットの使用感に関する初期検討を行った結果、改良試作型ヘッドセットでは、特に圧迫感及び違和感を覚えにくい構造へと変化しており、使用感の向上が見られた。このように、改良試作型ヘッドセットの有用性について示されたが、臨床現場の意見から、改善点もいくつか示された。

頭部から発生する後方散乱線が水晶体被ばくに及ぼす影響について検討した結果、水晶体被ばく線量における後方散乱線含有率は約20%であり、含有率は管電圧の増大に伴い増加した。また、防護眼鏡の放射線防護効果を評価する際は、後方散乱線の影響を考慮するために、人体等価ファントムを使用したうえで線量計を眼の近傍に装着するべきである。発泡スチロールファントムを使用した場合、放射線防護効果を過大評価してしまう可能性がある。

F. 論文報告

1) Kawauchi S, Chida K, Moritake T, Hamada Y, Tsuruta W: Radioprotection of eye lens using protective material in neuro cone-beam computed tomography: Estimation of dose reduction rate and image quality. Physica Medica. 2021 (in press).

2) Sun L, Inaba Y, Kanzaki N, Bekal M, Chida K, Moritake T: Identification of Potential Biomarkers of Radiation Exposure in Blood Cells by Capillary Electrophoresis Time-of-Flight Mass Spectrometry. Molecular Endocrinology and Metabolism. 2020, 21, 812. doi: 10.3390/ijms21030812.

3) Kawauchi S, Chida K, Moritake T, Hamada Y, Matsumaru Y, Tsuruta W, Sato M, Hosoo H, Sun L: Treatment of internal carotid aneurysms using pipeline embolization devices: measuring the radiation dose of the patient and determining the factors affecting it. Radiat Prot Dosimetry. 2020 Jun 24;188(3):389-396. doi: 10.1093/rpd/ncz298.

4) Mime Endo, Yoshihiro Haga, Masahiro Sota, Akiko Tanaka, Kazuki Otomo, Yuuki Murabayashi, Mitsuya Abe, Yuji Kaga, Yohei Inaba, Msatoshi Suzuki, Taiichiro Meguro and Koichi Chida. Evaluation of novel X-ray

protective eyewear in reducing the eye dose to interventional radiology physicians. Journal of Radiation Research, 62（3）, 414-419. 2021, doi: 10.1093/jrr/rrab014
5) 曽田 真宏, 芳賀 喜裕, 荒井 剛, 鈴木新一, 加賀 勇治, 阿部 美津也, 千田 浩一. X 線防護壁付掛布による心臓 IVR 術者の被ばく低減に関する基礎的検討. 臨床放射線 66巻5号 2021. 印刷中
6) 山田歩実, 大友一輝, 佐藤文貴, 芳賀喜裕, 曽田真宏, 加賀勇治, 阿部美津也, 加藤砂江子,稲葉洋平, 千田浩一. 心臓カテーテルインターベンションに携わる看護師の水晶体被ばく－水晶体線量の左右差に関する比較検討－. 日本放射線安全管理学会誌, 20(2), 2021 年 11 月.52－60. doi: 10.11269/jjrsm.20.52
7) Mamoru Kato, Koichi Chida, Masato Munehisa, Tadaya Sato, Yohei Inaba, Masatoshi Suzuki, and Masayuki Zuguchi. Non-lead protective aprons for the protection of interventional radiology physicians from radiation exposure in clinical settings: An initial study. Diagnostics, 2021, 11, 1613. doi: 10.3390/diagnostics11091613
8) 加藤 聖規、藤沢 昌輝、服部 兼進、山田歩実, 芳賀 喜裕, 加賀勇治, 阿部 美津也, 稲葉 洋平, 千田 浩一. PCI 術者の水晶体線量のリアルタイム測定に関する初期検討. 日本放射線安全管理学会誌, 2023 年 印刷中
9) 藤沢昌輝, 芳賀善裕, 曽田真宏, 加賀勇治, 阿部美津也, 稲葉洋平, 鈴木正敏, 細井義夫, 千田浩一. PET 検査に従事する看護師の水晶体被ばく線量に関する基礎検討. 臨床放射線, 67 巻 10 号 1075-1083, 2022 年 10 月
10) Chida K. What are useful methods to reduce occupational radiation exposure among radiological medical workers, especially for interventional radiology personnel? Radiol Phys Technol. 2022 Jun;15(2):101-115. doi: 10.1007/s12194-022-00660-8.
11) Hattori K, Inaba Y, Kato T, Fujisawa M, Yasuno H, Yamada A, Haga Y, Suzuki M, Zuguchi M, Chida K. Evaluation of a New Real-Time Dosimeter Sensor for Interventional Radiology Staff. Sensors. 2023 Jan 3;23(1):512. doi:10.3390/s23010512.

G. 研究発表

1) 千田浩一. 放射線医療従事者の水晶体被ばくの実態. 2020 年度日本放射線技術学会九州支部放射線防護・計測セミナー（WEB 開催）. 教育講演（招待講演）. 2020 年 11 月
2) 服部兼進、加藤聖規、藤沢昌輝、安野ひかる、山田歩実、千田浩一. 術者被ばく評価における最新型リアルタイム線量計の基礎的検討 第３６回日本診療放射線技師学術大会（WEB 開催）. 2021 年 1 月
3) Mamoru Kato, Koichi Chida, et al. Occupational eye lens dose measurement using direct eye dosimeters in interventional cardiac electrophysiology procedures . European Congress of Radiology ECR2020. 令和 2 年 7 月, ウイーン、オーストリア, （Web）
4) Mamoru Kato, Koichi Chida, et al. Evaluation of usefulness of neurovascular interventional radiology procedure supported using MR-3D road-mapping. 第 76 回日本放射線技術学会 JRC2020. 令和 2 年 5 月, 横浜 （Web）
5) Kentaro Sakamoto, Mamoru Kato, Noriyuki Takahashi, Koichi Chida, et al. Evaluation of Patient Radiation Dose in Percutaneous Coronary Intervention Using Radiophotoluminesence Dosimeter. 第 76 回日本放射線技術学会 JRC2020. 令和 2 年 5 月, 横浜 （Web）

6) Morishima Y, Chida K, et al. Radiation Protection Effect of Novel Pb Plate in Videofluoroscopic Swallowing Study. Radiological Society of North America (RSNA2020),令和 2 年 11 月 シカゴ アメリカ合衆国 web 開催.

7) Mamoru Kato, Koichi Chida, et al. Occupational eye lens dose measurement using direct eye dosimeters in interventional cardiac electrophysiology procedures . European Congress of Radiology ECR2020. 令和 2 年 7 月, ウイーン、オーストリア, (Web)

8) Mamoru Kato, Koichi Chida, et al. Evaluation of usefulness of neurovascular interventional radiology procedure supported using MR-3D road-mapping. 第 76 回日本放射線技術学会 JRC2020. 令和 2 年 5 月, 横浜 (Web)

9) Kentaro Sakamoto, Mamoru Kato, Noriyuki Takahashi, Koichi Chida, et al. Evaluation of Patient Radiation Dose in Percutaneous Coronary Intervention Using Radiophotoluminesence Dosimeter. 第 76 回日本放射線技術学会 JRC2020. 令和 2 年 5 月, 横浜 (Web)

10) Morishima Y, Chida K, et al. Radiation Protection Effect of Novel Pb Plate in Videofluoroscopic Swallowing Study. Radiological Society of North America (RSNA2020),令和 2 年 11 月 シカゴ アメリカ合衆国 web 開催.

11) 加藤聖規, 藤沢昌輝, 服部兼進, 山田歩実, 芳賀喜裕, 加賀勇治, 阿部美津也, 千田浩一.従事者被ばく測定用新型半導体リアルタイム線量計を用いた IVR 術者の被ばく状況の基礎的検討. 第 49 回日本放射線技術学会秋季学術大会. 2021 年 10 月.熊本

12) 加藤聖規, 藤沢昌輝, 服部兼進, 山田歩実, 芳賀喜裕, 加賀勇治, 阿部美津也, 千田浩一. IVR 助手(セカンドオペレーター)の被ばく状況の初期検討 ～従事者被ばく測定用新型半導体リアルタイム線量計を用いて～. 第 11 回東北放射線医療技術学術大会. 2021 年 10 月.福島

13) 山田歩実, 大友一輝, 佐藤文貴, 芳賀喜裕, 曽田真宏, 加賀勇治, 阿部美津也, 千田浩一. 心臓・血管系 IVR に従事する看護師の水晶体用線量計装着位置に関する検討. 日本放射線技術学会第４９回秋季学術大会. 2021 年 10 月. 熊本

14) 山田歩実, 大友一輝, 佐藤文貴, 芳賀喜裕, 曽田真宏, 加賀勇治, 阿部美津也, 加藤砂江子,稲葉洋平, 千田浩一. 心血管インターベンションに携わる看護師における水晶体被ばく線量の推定方法. 第 11 回東北放射線医療技術学術大会. 2021 年 10 月. 福島

15) 日野隆喜, 山崎智香, 佐藤俊光, 信夫章宏, 才田壽一, 江口陽一, 千田浩一. 新しい頭頸部用放射線防護具による頭部及び頸部の防護効果. 第 78 回日本放射線技術学会総会 JRC2022 令和 4 年 4 月, 横浜 (ハイブリッド)

16) 藤沢昌輝, 加藤聖規,服部兼進,山田歩実,芳賀喜裕,加賀勇治,阿部美津也,稲葉洋平,千田浩一.バイプレーン型血管撮影装置使用時の IVR 術者におけるリアルタイム水晶体線量測定.第 50 回日本放射線技術学会秋季学術大会.2022 年 10 月

17) 加藤聖規,藤沢昌輝,服部兼進,山田歩実,芳賀喜裕,加賀勇治,阿部美津也,稲葉洋平,千田浩一.被ばく防護の実際と実践 - 水晶体被ばく線量のリアルタイム解析について -.第 12 回東北放射線医療技術学術大会. 2022 年 11 月

18) 加藤聖規,藤沢昌輝,服部兼進,山田歩実,芳賀喜裕,加賀勇治,阿部美津也,稲葉洋平,千田浩一. 心臓IVR術者における水晶体等価線

量のリアルタイム測定に関する基礎的検討.第4 回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同大会. 2022 年 11 月

19) 山田歩実, 芳賀喜裕, 曽田真宏, 加賀勇治, 阿部美津也, 稲葉洋平, 千田浩一. 心臓・血管系 IVR 看護師の長期間測定による水晶体被ばく線量評価に関する検討. 日本放射線技術学会第 50 回秋季学術大会. 2022 年 10 月.

20) 初坂奈津子、柴田哲平、岩西宏樹、田中才一、喜多村紘子、盛武敬、千田浩一、雑賀司珠也、黒坂大次郎、佐々木洋. 脳神経血管造影検査・血管内治療従事者の放射線白内障、第 76 回日本臨床眼科学会、2022/10/13-16、東京

21) 初坂奈津子、柴田哲平、岩西宏樹、盛武敬、千田浩一、雑賀司珠也、黒坂大次郎、佐々木洋;インターベンショナル・ラジオロジー従事者の放射線白内障と水晶体被ばく線量との関係、第 127 回日本眼科学会総会(2023 年 4 月、東京)で発表予定(演題採用済)である。

22) 今田聡恵, 芳賀喜裕, 曽田真宏, 阿部美津也, 加賀勇治, 稲葉洋平, 千田浩一. 水晶体用線量計 DOSIRIS®の改良型ヘッドセットに関する初期検討. 第 4 回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同大会. 2022 年 11 月

H. 知的所有権の取得状況

1) 放射線被ばくによる皮膚炎発生の予測:特願 2020-072182(2020 年 4 月 14 日出願);発明者:孫 略, 盛武 敬, 千田 浩一, 稲葉 洋平;出願人:産業技術総合研究所, 産業医科大学, 東北大学

2) 芳賀喜裕, 千田浩一ほか. 放射線防護具.(突出型)、特願 2022-144770, 令和 4 年 9 月 12 日

3) 加賀勇治, 千田浩一ほか. 放射線防護具. 特願 2023-072373, 令和 5 年 4 月 26 日

I. 今後の課題、展望

・コロナ禍により IVR 臨床時のリアルタイム線量評価が十分ではなかったため、今後リアルタイム評価を推進する。リアルタイム初期評価において、天吊り防護板の不適切例が約 8 割あるなど、防護の問題点が明らかになった。よって今後症例を重ね IVR 術者の行動解析を行い、防護戦略を立案する。また看護師等のアルタイム線量評価も推進する。

・引き続き新発想の防護具開発を目指す。さらに開発試作した各種の防護具について、臨床評価および改良を重ねる。そして実用可能な防護具を選び出す。ラインナップした防護具について、どのような用途環境下での使用(どのような防護具の組み合わせ)を推奨するのか、および被ばく低減レベルなどに関する表示を添付文書やケースに付す事等の規格化を推進する。

・産業保健的なアプローチ、すなわち上流側である X 線発生源を低減する検討を進め、低減対策について提示する。

※ 次頁以降に参考資料を示す。

Radiological Physics and Technology (2022) 15:101–115
https://doi.org/10.1007/s12194-022-00660-8

REVIEW ARTICLE

What are useful methods to reduce occupational radiation exposure among radiological medical workers, especially for interventional radiology personnel?

Koichi Chida[1,2]

Received: 15 January 2022 / Revised: 20 April 2022 / Accepted: 20 April 2022 / Published online: 24 May 2022
© The Author(s), under exclusive licence to Japanese Society of Radiological Technology and Japan Society of Medical Physics 2022

Abstract
Protection against occupational radiation exposure in clinical settings is important. This paper clarifies the present status of medical occupational exposure protection and possible additional safety measures. Radiation injuries, such as cataracts, have been reported in physicians and staff who perform interventional radiology (IVR), thus, it is important that they use shielding devices (e.g., lead glasses and ceiling-suspended shields). Currently, there is no single perfect radiation shield; combinations of radiation shields are required. Radiological medical workers must be appropriately educated in terms of reducing radiation exposure among both patients and staff. They also need to be aware of the various methods available for estimating/reducing patient dose and occupational exposure. When the optimizing the dose to the patient, such as eliminating a patient dose that is higher than necessary, is applied, exposure of radiological medical workers also decreases without any loss of diagnostic benefit. Thus, decreasing the patient dose also reduces occupational exposure. We propose a novel four-point policy for protecting medical staff from radiation: patient dose Optimization, Distance, Shielding, and Time (pdO-DST). Patient dose optimization means that the patient never receives a higher dose than is necessary, which also reduces the dose received by the staff. The patient dose must be optimized: shielding is critical, but it is only one component of protection from radiation used in medical procedures. Here, we review the radiation protection/reduction basics for radiological medical workers, especially for IVR staff.

Keywords Interventional radiology (IVR) · Radiation safety · Occupational exposure dose · Radiation protection and shielding · Radiation injury (Cataracts) · As low as reasonably achievable (ALARA)

1 Introduction

The Japanese public has become more sensitive to the risks of radiation exposure since the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant after a major earthquake [1–3]. Consequently, many patients have become anxious about exposure to medical radiation [4–7].

The medical uses of radiation constitute a large source of human-made ionizing radiation. This includes both patient radiation doses and occupational exposure, which are major issues in modern medicine [8–15]. The radiation dose must be as low as reasonably achievable (ALARA) [16]. There is extensive literature concerning radiation exposure [17–23], and various methods that reduce/optimize patient doses have been discussed [24–30].

On the other hand, almost all medical radiological medical workers are subject to daily radiation exposure. Therefore, the protection of such workers is essential [31–33]. The potential for overexposure is greatest during fluoroscopically guided procedures (i.e., interventional radiology [IVR]) [34–41], and IVR staff are at high risks of radiation-induced injuries (e.g., cataracts) [42–46]. Vano et al. reported ophthalmologically confirmed lens injuries in IVR physicians and nurses [47].

In 1993, Niklason et al. found that only 10% of IVR physicians consistently wore protective lead glasses [48]. In 2013, Lynskey et al. reported that 54% of the staff wore

✉ Koichi Chida
chida@med.tohoku.ac.jp

1 Department of Radiological Technology, Tohoku University Graduate School of Medicine, 2-1 Seiryo, Aoba-ku, Sendai 980-8575, Japan

2 Division of Disaster Medicine, International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 468-1 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8572, Japan

lead glasses, suggesting that awareness is increasing [49]. However, radiation protection for radiological medical workers remains inadequate, particularly among IVR staff. The International Commission on Radiological Protection (ICRP) has drastically reduced the recommended maximum annual lens dose, which is the occupational dose limit from 150 to 20 mSv/year (100 mSv/5 years) [50]. Overall, it has become increasingly important to protect radiological medical workers and reduce radiation doses, especially to the eyes [51–54]. The following discussion reviews the radiation protection/reduction basics for radiological medical workers, especially for IVR staff.

2 Radiation protection/reduction methods

2.1 Shielding devices

2.1.1 Personal protective aprons

Almost all IVR physicians should wear personal protective aprons. However, IVR staff, especially physicians, are reluctant to wear such aprons for long periods because they are heavy and can trigger orthopedic problems [55–58]. Recently, non-lead aprons, which are made of composites (mainly tungsten and tin) and are lighter than lead, have been developed. Such aprons are approximately 20% lighter than lead aprons, and they also lack lead-associated toxicity. Table 1 lists the data from a phantom study of non-lead personal aprons [59]. The relative protective effect of a non-lead apron was calculated as: (the shielding effect of a non-lead apron/the shielding effect of a lead apron) × 100. Non-lead aprons attenuate direct X-rays with an effectiveness similar to lead aprons (within 2%). However, at tube voltages > 100 kV, non-lead aprons provide less protection. Figure 1 shows the mass attenuation coefficient curves for lead and tungsten (non-lead material) [60]. The K-absorption edge of lead (88 keV) is higher than the absorption edges of non-lead materials (e.g., tungsten, 69.5 keV) [60], so the shielding ability of

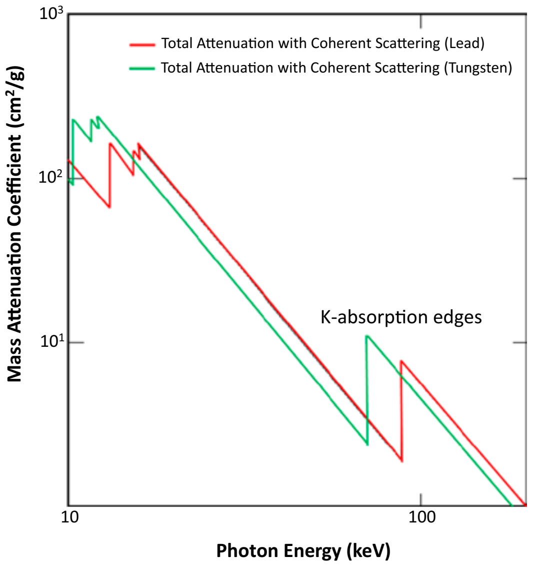


Fig. 1 Mass attenuation coefficient curves for lead and tungsten (Modified from The National Institute of Standards and Technology (NIST), XCOM, [60])

lead aprons increases at higher X-ray energies (> 100 kV). For scattered X-rays, the protection afforded by both non-lead and lead aprons is similar, as the energy of scattered X-rays is lower than the energy of direct X-rays at the same tube voltage, suggesting that the K-absorption edge of lead does not affect its protection capability. Because most staff are exposed to scattered X-rays, non-lead personal aprons provide sufficient protection.

Generally, the shielding effects of protective aprons exceed 90% [59]. In clinical settings, including IVR, the shielding capabilities of non-lead and lead personal aprons (0.25- and 0.35 mm lead-equivalents) in terms of scattered radiation were evaluated using electric personal dosimeters (EPDs) [61]. Non-lead 0.35 mm-lead-equivalent aprons may be optimal for the IVR procedures, and both shielding and comfort were acceptable (Table 2). Kato et al. suggested that non-lead 0.35-mm-lead-equivalent

Table 1 Relative protective effects of non-lead personal aprons (0.25- and 0.35 mm-lead-equivalent) in a phantom study. Modified from Radiat Prot Dosim. 2008; 131:531–4 [59]

Tube voltage	Relative protective effect of non-lead aprons (%)			
(kV)	0.25 mm-lead-equivalent		0.35 mm-lead-equivalent	
	Direct X-rays	Scattered X-rays	Direct X-rays	Scattered X-rays
80	96.9	98.3	98.7	99.3
100	96.2	98.6	98.1	99.4
120	93.5	98.3	95.5	99.0

Comparison to 0.25 mm Pb and 0.35 mm Pb respectively for the non-lead 0.25 mm and 0.35 mm lead-equivalent aprons

Relative protective effect of non-lead apron (%) = (shielding effect of non-lead apron / shielding effect of lead apron) × 100

Table 2 Performances of personal protective aprons in clinical settings (cardiac catheterizations, including PCI). Modified from Diagnostics 2021;11(9):1613 [61]

Protective apron	Lead-equivalent (mm)	Apron weight (kg)	Number of procedures	Shielding effects (%)
Non-lead	0.25	1.8	78	96.1
Non-lead	0.35	2.9	51	98.5
Lead	0.25	3.0	50	97.3
Lead	0.35	3.8	50	98.9

The shielding effect of each apron was determined as follows:
Shielding effect (%) = [(no-apron measurement – with apron measurement)/no-apron measurement] × 100

protective aprons may be the preferred type for the protection of IVR physicians against radiation [61].

A double dosimeter—two monitoring badges (one outside the apron [on the neck or head] and one under the apron [on the chest or waist])—is preferable for IVR personnel. The radiation that reaches the under-apron badge is far less than the radiation that reaches the exposed badge [62, 63]. However, the double dosimeter may not always be necessary due to the following reasons. In ICRP Publ.139, although the double-dosimeter approach generally provides better accuracy, the authors argue that it has several limitations: lack of international consensus concerning a combination algorithm, leading to difficulty interpreting comparisons of effective doses; uncertainty concerning consistently correct use of the two dosimeter device; and the higher cost of using two dosimeters. In practice, IVR physicians may sometimes reverse the positions of the two dosimeters, thus leading to a substantial overestimate of the effective dose. IVR physicians may also forget to wear one or both dosimeters [64]. Martin and ICRP Publ.139 suggested a pragmatic approach in which a single dosimeter is placed at the collar over the apron [64, 65]. The reading of the collar dosimeter, corrected by a factor that considers the protected organs, could provide an indication of the effective dose. Martin also recommended the use of the double dosimeter when doses exceed a certain threshold [65].

2.1.2 Ceiling-suspended shields and examination table curtain shields

Many angiographic X-ray systems feature ceiling-suspended shields (leaded glass screens) and bedside curtain shields. When positioned appropriately, ceiling-suspended shields can reduce radiation exposure, particularly to the upper portion of the body, including the eyes. Domienik et al. reported that a ceiling-suspended shield afforded a 2.3-fold reduction of the dose to the eye lens proximal to the X-ray tube [66]. Meanwhile, Maeder et al. found that such a shield efficiently reduced scattered radiation to the eyes, but not to the hands [67]. However, these shields must be carefully positioned to the side of the IVR physician. But this is often difficult to do in clinical settings, in which the shield becomes an obstacle. Notably, some physicians fail to appropriately adjust the position of the shield.

The regulatory annual dose limits for occupational exposure are specified as an occupational effective dose limit of 100 mSv/5 years, with no single year exceeding 50 mSv. The occupational eye lens equivalent dose limit is 100 mSv/5 years, with no single year exceeding 50 mSv. The occupational extremities equivalent dose limit is 500 mSv/year. Examination table curtain shields hang from the side of the fluoroscopy couch down to the floor, and they effectively reduce the radiation dose to the lower part of the physician's body. Shortt and colleagues reported significant lower limb extremity dose reductions using this type of shields, and recommended that curtains be used routinely on all C-arm interventional radiological equipment [68].

Our previous study investigated the shielding effects of ceiling-suspended and examination table curtain shields during cardiac catheterization (Fig. 2) [69]. With additional shielding (ceiling-suspended and examination table curtain shields), the fluoroscopy scatter radiation measured using the human phantom was reduced by up to 98%, with average scatter dose reduction of approximately 95%, compared to a dose without the additional shielding [69]. The effective dose of the four physicians during cardiac catheterization tended to be lower with additional shielding devices (ceiling-suspended and examination table curtain shields) than without such devices (2.55 ± 1.65 vs. 4.65 ± 1.21 mSv/year). Similarly, the dose equivalent of the eye lens tended to be lower with the additional shielding devices than without such devices (15.0 ± 9.3 vs. 25.73 ± 5.28 mSv/year) [69]. Therefore, although the physicians were protected by the shielding devices, the shielding effects were less than expected based from the phantom study results (phantom study: > 90%; clinical study: < 50%) [69]. This was probably because there are instances when ceiling-suspended shields were not positioned appropriately during the procedure [69]. Thus, more ergonomic protection devices (particularly ceiling-suspended shields) may be required.

Fig. 2 Additional lead shielding devices. **A** Lead acrylic shields (0.8 mm-lead-equivalent) suspended from the ceiling. **B** Table side drapes (0.3 mm-lead-equivalent)

Fig. 3 Mobile shield

2.1.3 Mobile shields

Mobile shields are often used by radiological medical workers (Fig. 3). Chung et al. reported that mobile shields reduce the scattered radiation exposure during endoscopic retrograde cholangiopancreatography (ERCP) [70]. Mobile shields are extensively employed in IVR. Specifically, the anesthesiologists and nurses rely heavily on mobile shields for protection against scattered radiation. However, in some cases, routine use of such shields may be somewhat difficult for IVR physicians in C-arm angiographic units; in this context, fluoroscopic views are required from multiple angles and in some cases the larger size of the mobile shield may be an obstacle.

2.1.4 Protective CT gantry shields

The number of computed tomography (CT) examinations is steadily increasing, so it is important to consider the radiation doses involved in this procedure [71–76]. Although not common, there are some IVR suites equipped with a CT scanner in the same room. Medical staff are also exposed to radiation during fluoroscopically-guided CT procedures (e.g., CT-biopsy) and when assisting patients [77, 78]. Thus, occupational radiation protection is essential. Recently, a protective CT gantry shield has been developed (Fig. 4). Ota et al. reported that this shield is very effective, but it is also expensive to acquire, install, and maintain [79].

2.1.5 Radiation protection cabin

A radiation protection cabin (Fig. 5) is sometimes used during catheter ablation through a right femoral approach. This markedly decreases operator radiation exposure and eliminates the need for a lead apron [80, 81]. However, the cabin is generally large and therefore, cannot be used when performing percutaneous coronary intervention (PCI), due to the many variations of fluoroscopic angles that are needed to be applied.

2.1.6 Zero-gravity™ devices

The Zero-Gravity™ device is a unique protection system for IVR physicians (Fig. 6). It provides enhanced radiation protection and improves the IVR physician's ergonomics and

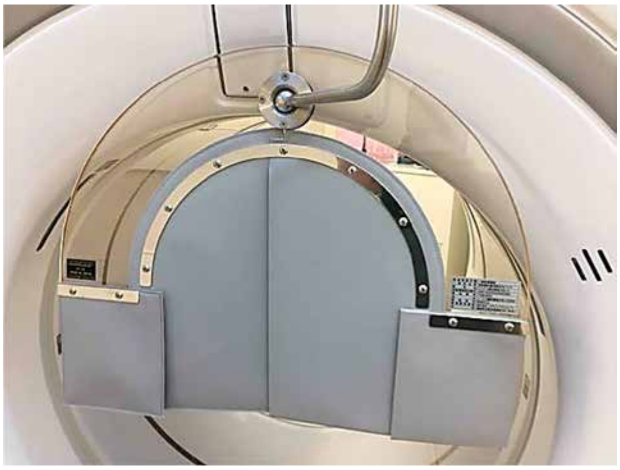


Fig. 4 Computed tomography (CT) shielding. Shields made of 0.5 mm-lead-containing acrylic and 0.25 mm-rubber; the lower parts are soft and do not interfere with couch motion during CT

Fig. 5 Radiation protection cabin

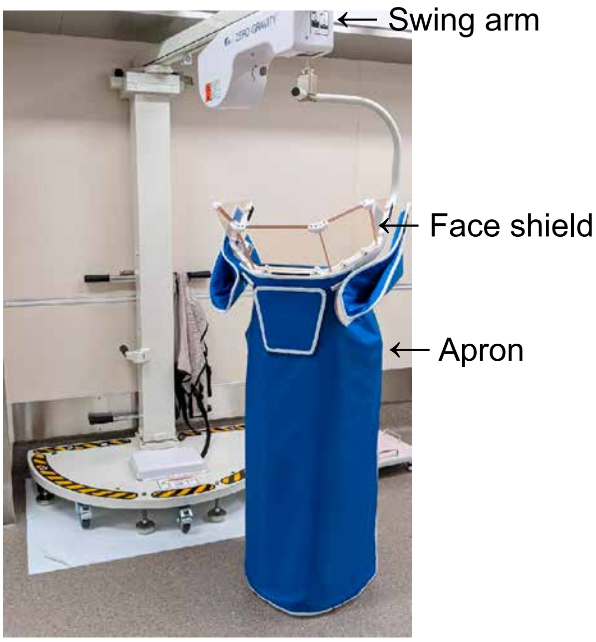


Fig. 6 Zero-Gravity device. This weightless protective garment system is suspended on a swing arm and snaps onto the user (physician) via a magnetic belt. It features an apron and an acrylic face shield

Fig. 7 Protective lead shield (a curtain) for an over-the-couch-tube X-ray unit

comfort [82–84]. Savage et al. concluded that more in-depth evaluation of the ergonomic benefits and cost-effectiveness of this particular system is required [85].

2.1.7 Protective curtains for over-the-couch X-ray units

Generally, it is preferred that IVR examination is performed with dedicated equipment, providing a PA-projection. However, in non-vascular IVR (e.g., ERCP), overcouch geometry is employed with a protective curtain to limit staff doses [86–88]. This kind of curtain features four lead sheets: the hood is placed over the X-ray tube, while the other sheets (four lead sheets) hang down to the surface of the fluoroscopy couch (Fig. 7). The curtain is useful, but it is difficult

to use when the fluoroscopic angle is varied [89, 90], and it cannot be used when an under-the-couch X-ray unit is employed (Fig. 7).

2.1.8 Protective eyeglasses

Protective eyeglasses are often used to protect the eyes of radiological medical workers. Various types of protective eyeglasses have been used in clinical settings. Frontal and side shields are required because IVR physicians also receive scattered radiation from the lateral side. The thickness and the lead equivalent both affect shielding [91]. Lead-equivalent 0.75 mm eyeglasses with side shields work well, and the shielding effect [shielding effect $= (D_{out} - D_{in}) / D_{out} \times 100\%$, where D_{out} and D_{in} represent the outside and inside doses of the lead eyeglasses, respectively] is approximately 80% in the IVR setting [92]. However, such eyeglasses are heavy and uncomfortable, which is why IVR staff are reluctant to wear them during long procedures. Furthermore, an increase in the lead equivalent thickness to > 0.35 mm has a negligible effect on eye dose reduction [91, 93].

IVR staff tend to favor the 0.07 mm-lead-equivalent eyeglasses with side shields, since these eyeglasses are light and comfortable [94–96]. However, they provide a shielding effect of < 60% (45–60%) in the IVR setting [94–96], which is less than the protection afforded by heavier eyeglasses. Additionally, the eyes require protection from below, as well as from the sides. Some recent improvements have been made to 0.07 mm-lead-equivalent eyeglasses; they are still light but can now also protect against radiation from below (Fig. 8). The mean shielding effect for the improved 0.07 mm-lead-equivalent eyeglasses is 61.4% [97]. But with the use of Monte Carlo simulations, Koukorava et al. determined a shielding effect of 74% for "wrap-around" 0.07 mm-lead eyeglasses [98]. This suggests that further improvements in the 0.07 mm-lead-equivalent eyeglasses are required.

Notably, Doria et al. reported a visor protective tool, which has a nominal thickness of 0.1 mm lead; the visor provided a different X-ray protection approach because of its shape [99].

The International Atomic Energy Agency recommends that eye radiation monitors should be worn as close as possible to the eye to enable accurate monitoring [100]. Monitoring badges to measure occupational exposure provide three values: Hp(0.07), Hp(3), and Hp(10), which represent the personal dose equivalent in soft tissues at 0.07, 3, and 10 mm, respectively, below the body's surface [101]. The Hp(3) is desirable to accurately monitor the dose to the eye. Eye dosimeter systems, such as DOSIRIS™ (IRSN, France) and Vision™ (Landauer, USA), are suitable lens dose [Hp(3)] monitors and can be worn behind protective eyeglasses [102–104].

Fig. 8 Novel protective eyewear. The angles of the sides (at the temples) can be adjusted in four 9 steps. The nose pad can also be adjusted. The lead-acrylic (0.07 mm-lead-equivalent) lens: front, side, and below. Modified from J. Radiat. Res. 2021;62(3):414–419 [97]

Schueler et al. indicated that further follow-up studies of staff lens opacification are recommended, along with eye lens dose measurements under current clinical practice conditions, for IVR [105]. Martin et al. reported that dose monitoring is necessary to confirm eye dose levels; the major challenge is ensuring that clinicians wear dosimeters consistently and in the appropriate location for accurate dose assessment, particularly with regard to the eyes [106].

2.1.9 Shield drapes

Pelvic/abdomen lead shielding (draping) of a patient is a simple procedure and has been used to reduce operator radiation exposure (Fig. 9). This shield drape differs from gonadal shields for the patient [107]. Ordiales et al. reported that the median radiation dose received by the interventional cardiologist was reduced by 50% with a shield drape [108]. The upper body of the physician is also particularly well protected using the shield drape [109, 110]. Notably, many of these shield drapes are only good for a single use and carry a substantial cost.

Such shielding reduces occupational radiation exposure during catheterization (including IVR), especially when trans-radial/brachial access is required. This shielding approach has also been employed during trans-femoral access [111–113], but the drape may potentially interfere with the radiation beam. If the drape attenuates the primary beam, the "Automatic Exposure Control" of the X-ray equipment will be activated and result in an inappropriate dose. Consequently, this could increase the dose received by the patient and/or may produce low-quality images. Thus, the

Fig. 9 Pelvic/abdomen lead shielding (drape), a traditional shield that is not for single use

drape may not be appropriate in procedures involving transfemoral access.

2.1.10 Protective lead gloves

Fluoroscopy-guided orthopedic (spinal) surgery often exposes the surgeon's hands to radiation [114, 115]. Omi et al. reported that the use of protective lead gloves (Fig. 10) and forceps greatly decreased radiation exposure to the surgeon's index finger [116]. Badawy et al. also suggested that the hands be kept as far from the primary X-ray beam as possible to improve protection [117].

Available surgical protective lead gloves have a lead coating only on the palm side of the hand and not on the back. This type of glove can be harmful, rather than beneficial, for the physician's hands if the physician does not correctly judge whether the X-ray is in the posterior-anterior or anterior–posterior projection mode. Furthermore, when the hand protected by the lead glove strays into the X-ray field, the "Automatic Exposure Control" will increase the output due to attenuation by the glove [118].

ICRP Publ.139 provides guidance concerning the use of thin protective gloves; however, the cited protective effects of the gloves vary (15–60%) [64]. Wagner et al. reported that if the hand protected by a glove strays into the X-ray field, the dose rate will automatically increase to compensate for the attenuation, which increases patient exposure without achieving any protection for the interventionalist's hand [118]. McCaffrey et al. reported that new shielding materials (e.g., bismuth) have been proposed as a hand cream for hand protection, prior to surgical glove cover that encloses the cream material [119]. This cream has the same potential for an increased dose if the hand is placed in the X-ray field. Additionally, NCRP Report No.168 stated that the reduction in tactile feedback from the radiation-attenuating material may lead to increases in fluoroscopy time or CT exposure time for delicate procedures [120].

2.1.11 Radioprotective neck guards

The use of a radioprotective neck guard (Fig. 11), such as a thyroid shield, for physicians may be essential during fluoroscopy. Lee et al. reported that the use of a radioprotective neck guard reduced scattered radiation to the thyroid by at least 85% [121]. Badawy and colleagues also emphasized the need to minimize the gap between the radioprotective neck guard and the personal lead apron [117].

2.2 Decreasing the patient dose decreases the exposure of radiological medical workers

Scattered radiation doses were investigated in cardiac catheterization laboratories using various PCI angiographic

Fig. 10 Protective lead glove

Fig. 11 Radioprotective neck guard (thyroid shield)

systems [122]. The scattered radiation from a phantom (representing the patient) was measured using an EPD. The X-ray outputs were the outputs normally used during PCI.

Empirical assessment indicated that the physician may receive between 1/1000 and 1/500 of the patient entrance dose. Depicted in (Fig. 12) is the relationship between the surface dose (mGy) to the phantom (the patient) and the scattered radiation (μSv) at the physician location in 12 X-ray units performing cardiac IVR (via fluoroscopy). The scattered radiation at the physician position was well correlated ($r = 0.86$) with the phantom surface dose [122]. Therefore, this implies that decreasing the patient dose also reduces the staff dose in many cases (Fig. 12).

Careful collimation of the primary beam is also important; this decreases the exposure of both the patient and radiological medical workers. Collimation to the area of interest reduces exposure by reducing the volume of patient tissue that is irradiated. This reduces radiation scatter within the patient, as well as the radiation received by the staff. Beam collimation should confine the X-ray beam size to the minimum area needed for effective diagnosis.

2.3 Radiation safety education and radiation monitoring

Wagner et al. reported that for long procedures, dose differences of ≥ 8 Gy are possible for some combinations of operational techniques. Appropriate adjustment of operational parameters substantially reduces the dose to the patient's skin [123, 124]. To avoid nonstandard practices, radiological medical workers should receive an annual radiation safety/protection education and training that covers radiation physics, biology, safety, monitoring, and health risks [125, 126].

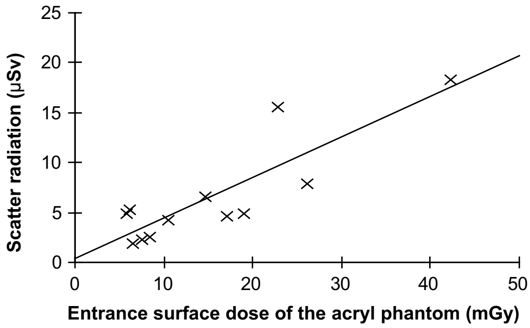


Fig. 12 Scattered radiation at the physician position and the phantom (patient) surface dose in posteroanterior view. The surface dose for a 20 cm-thick acryl phantom was measured using a skin dose monitor. The scattered radiation at the physician position from the acryl phantom was measured using an EPD placed 100 cm horizontally from the X-ray focus at a height of 50 cm above the floor. A significant correlation was observed between the surface dose of the acryl phantom and the amount of scattered radiation ($r = 0.86$). Modified from Radiat Prot Dosimetry. 2012;149(4):410–6 [122]

Augmented and virtual reality education methods may also be valuable for this [127, 128].

It is also essential to properly maintain and control the quality of the X-ray equipment [129, 130]. Optimal maintenance and quality control (QC) procedures for X-ray equipment can help avoid unnecessary radiation exposure, so X-ray units should be checked periodically for optimal imaging performance, appropriate radiation dose, etc. [131, 132]

Robust radiation monitoring is also necessary [62, 133–135]. Awareness of the present dose can help reduce future doses. The knowledge of occupational exposure (awareness of the radiation dose) is closely related to reducing the radiation dose, as staff become more mindful of potential exposure risks and ways to reduce exposure with the appropriate safety training.

3 Discussion

IVR procedures tend to be complex, which may sometimes increase the fluoroscopy time and the resultant radiation doses to both patients and staff [136, 137]. Currently, fluoroscopy patient exposure and tracking of such exposure is required in many countries.

There are two-types of radiation injuries: acute radiation injury (e.g., erythema) and long-term injury (e.g., cataracts). Skin radiation injuries have been reported in many patients, so the evaluation of the IVR patient radiation dose is required [138, 139]. Some IVR physicians also have been injured, with some reports on physicians having developed cataracts [140, 141]. The ICRP has greatly reduced the acceptable, occupational annual eye dose limit. Eye protection is critical, particularly for IVR physicians [142–145].

Schueler et al. emphasized that ideal protective devices block all radiation from the personnel; they do not impede access to or communication with the patient, or cause physical discomfort for the patient or staff [146]. Unfortunately, current protective equipment does not consistently achieve this ideal scenario [146].

3.1 Sources of staff-received scattered radiation

Medical staff are exposed to two main sources of scattered radiation in X-ray procedures: the patient (including the examination tabletop) and the front cover of the X-ray beam-collimating device (not the X-ray tube housing and shroud of the collimator; the X-ray tube housing and shroud absorb almost all X-rays, except those emanating from the exit port.) (Fig. 13) [143]. Scattered radiation from the patient has high intensity because the patient's surface receives the highest dose when the incident beam has not been attenuated and is also the main source of staff-received scattered radiation. The scattered radiation from the front cover of the

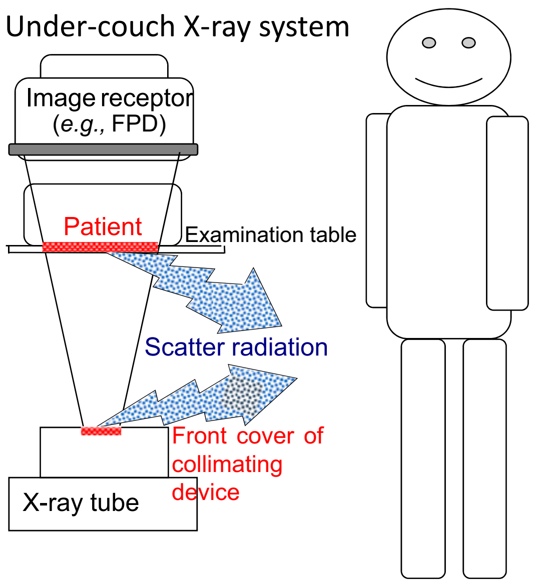


Fig. 13 Sources of medical scatter radiation. The two principal sources are the patient and the surface cover (exit port) of the X-ray beam-collimating device. Modified from J. Radiat. Res. 2010;51(2):97–105. [46]

X-ray beam collimating device cannot be ignored. [143]. Usually, the front cover is fabricated from thin acrylic, so the attenuation is small. However, the distance between the front cover of the beam-collimating device and the X-ray source is also small, so the radiation intensity is high at the front cover. Therefore, the amount of scattered radiation is high given that the percentage attenuation is small. Thus, this source of scattered radiation received by the staff cannot be ignored.

When an under-couch X-ray system (posteroanterior view) is used, the lower part of the physician's body receives a high level of scattered radiation. In the lateral view, if the physician stands to the side of the X-ray tube, s/he may receive high levels of scattered radiation (i.e., backscattered radiation from the patient). Therefore, the physician should stand on the image receptor (e.g., flat-panel detector (FPD)) side for the lateral view, such as in neuro-angiography. However, in cardiac angiography, it is difficult for the physician to stand on the FPD side for the lateral view. Importantly, the left lateral view (i.e., FPD to the left side of the patient) is generally used in cardiac angiography, due to the short distance between a patient's heart and the FPD. If the FPD is too far from the patient's heart, the sharpness of the radiographic images is degraded.

3.2 Distance, shielding, and time (the three-point policy)

The three-point policy of external radiation protection features Distance, Time, and Shielding. The concept involves increasing the distance from the radiation source, reducing exposure time, and using shielding for protection. For point sources, the inverse square law states that X-ray intensity is inversely proportional to the distance squared:

$$\text{Exposure} \propto 1/\text{distance}^2$$

If the distance from the source is doubled, the exposure is reduced to one quarter (because the inverse square law is for point sources, the relationship differs somewhat for scattered rays). However, IVR physicians work near the source of the scattered radiation (i.e., the patient). The distance between the patient and the IVR physician is typically 50 to 75 cm. The IVR procedure also tends to be lengthy. Therefore, in the three-point policy of external radiation protection features, "Distance and Time" are rather difficult conditions to meet during IVR procedures. Hence, effective shielding is critical, particularly for physicians. However, there is still no ergonomic or comfortable shielding device available for radiological medical workers. Thus, there is a great need for ergonomic and economical protection devices for such workers.

3.3 A novel four-point policy for external radiation protection for medical staff: patient dose optimization, distance, shielding, and time

As mentioned above, the three-point policy of external radiation protection features Distance, Shielding, and Time. As discussed before, staff-received scatter radiation is correlated with the entrance surface dose of the patient, so a reduction in patient radiation will also decrease occupational radiation. Hence, patient radiation-reduction methods are nearly identical to staff dose-reduction methods. As such, the importance of optimizing the dose to the patient for the benefit of both the patient and the radiological medical worker has been emphasized by international radiation protection associations [147]. A central theme of this review paper is the reinforcement of this concept.

A decrease in the image receptor (e.g., FPD) input dose reduces patient exposure, but it also increases image noise. Furthermore, in an IVR angiographic X-ray system, if the radiation dose is to be reduced, the recording speed (i.e., the fluoroscopy pulse rate and acquisition frame rate) must also be decreased. But these reductions in recording speed are associated with a loss in temporal resolution. The need to minimize patient exposure requires that the dose be reduced to the minimum level that will generate an image with an acceptable balance between radiation dose and image noise/temporal resolution. Patient radiation dose management/optimization is also important when seeking to reduce medical staff doses. An optimized dose to the patient has become one of the most basic requirements when seeking to reduce

the dose to medical staff; patient dose reduction based on the optimization principle also significantly reduces the occupational dose. Therefore, here we present a novel four-point policy for protecting medical staff from external radiation: patient dose Optimization, Distance, Shielding, and Time (pdO-DST). Patient dose optimization means that the patient never receives a higher dose than is necessary, which also reduces the dose received by the staff. Eliminating the unnecessary patient dose will also always result in staff dose reduction. Shielding is very important particularly with the IVR procedure, but it is only one component of protection from radiation used in medical procedures.

Staff education and occupational dose monitoring are vital components of reducing the risk of radiation injury for both patients and radiological medical workers. Among medical radiation workers, "non-essential personnel" should not be in the procedure room and "essential personnel" need to perform their duties with the maximum distance from sources of radiation as much as possible. Radiation safety education for medical radiation workers (both essential and non-essential personnel) is important. Le Heron et al. highlighted the importance of radiation protection training programs in hospital settings. These programs include those medical personnel who are outside the radiology department but who are involved in X-ray imaging procedures [148].

Bartal et al. reported that artificial intelligence (AI) tools should have an impact on dose management in IVR [149]. AI will contribute to image quality improvement, noise reduction, higher resolution, and real-time radiation dose estimation and reduction; it will also aid in patient-specific and staff dosimetry [149].

The key focus of this review paper are radiation protection in X-ray imaging and IVR procedures. Further reviews and investigations are desirable for nuclear medicine and radiation therapy departments.

4 Conclusion

Protecting radiological medical workers from radiation is a critical problem. Many shielding devices are available but no definitive shielding method has yet been developed, particularly designed for IVR personnel. It is essential to combine various protection/reduction methods (tools), and also to continue developing more ergonomic protection devices (e.g., lead glasses and ceiling-suspended shields). Reduction of the patient dose decreases occupational exposure, and the methods used to reduce the patient dose are often identical to those employed to reduce the staff dose. Optimizing the dose to the patient (i.e., eliminating a patient dose that is higher than necessary) is critical to reducing doses to medical staff. Instead of the traditional three-point policy (Distance, Shielding, and Time), we propose a novel four-point policy for protecting medical staff from external radiation: patient dose Optimization, Distance, Shielding, and Time (pdO-DST). Thus, shielding is only one component of radiation protection. Several components are required to reduce/optimize patient exposure level, as well as staff exposure. Medical radiation workers must be educated and trained, and occupational radiation must be monitored, to avoid radiation injuries.

Acknowledgements The author is grateful to Dr. Momoru Kato (Akita Medical Center), Dr. Yoshihiro Haga (Sendai-kousei Hospital), Dr. Masaaki Akahane (International University of Health and Welfare), Dr. Takashi Moritake (National Institutes for Quantum Science and Technology), and Dr. Yohei Inaba (Tohoku University) for their invaluable assistance.

Funding This work was supported in part by the Industrial Disease Clinical Research grant (200701–01), Japan.

Declarations

Conflict of interest The author declares no conflict of interest.

References

1. Shibahara S. The 2011 Tohoku earthquake and devastating tsunami. Tohoku J Exp Med. 2011;223(4):305–7. https://doi.org/10.1620/tjem.223.305.
2. Suzuki M, Suzuki H, Ishiguro H, Saito Y, Watanabe S, Kozutsumi T, Sochi Y, Nishi K, Urushihara Y, Kino Y, Numabe T, Sekine T, Chida K, Fukumoto M. Correlation of radiocesium activity between muscle and peripheral blood of live cattle depending on presence or absence of radiocontamination in feed. Radiat Res. 2019;192(6):589–601. https://doi.org/10.1667/RR15418.1.
3. Egawa S. Progress of disaster medicine during ten years after the 2011 great east Japan earthquake. Tohoku J Exp Med. 2021;253(3):159–70. https://doi.org/10.1620/tjem.253.159.
4. Kashimura Y, Chida K. Nuclear reactor accident fallout artifacts: unusual black spots on digital radiographs. AJR Am J Roentgenol. 2015;205(6):1240–3. https://doi.org/10.2214/AJR.15.14557.
5. Sun L, Inaba Y, Sogo Y, Ito A, Bekal M, Chida K, Moritake T. Total body irradiation causes a chronic decrease in antioxidant levels. Sci Rep. 2021;11(1):6716. https://doi.org/10.1038/s41598-021-86187-1.
6. Sun L, Inaba Y, Kanzaki N, Bekal M, Chida K, Moritake T. Identification of potential biomarkers of radiation exposure in blood cells by capillary electrophoresis time-of-flight mass spectrometry. Int J Mol Sci. 2020;21(3):812. https://doi.org/10.3390/ijms21030812.
7. Yashima S, Chida K. Effective risk communications through personalized consultations with pregnant women and parents by radiologic technologists after the 2011 Fukushima Daiichi nuclear disaster. Tohoku J Exp Med. 2022. https://doi.org/10.1620/tjem.2022.J001.
8. Nishizawa K, Nishizawa K, Moritake T, Matsumaru Y, Tsuboi K, Iwai K. Dose measurement for patients and physicians using a glass dosemeter during endovascular treatment for brain disease. Radiat Prot Dosim. 2003;107:247–52.

9. Vano E, Escaned J, Vano-Galvan S, Fernandez JM, Galvan C. Importance of a patient dosimetry and clinical followup program in the detection of radiodermatitis after long percutaneous coronary interventions. Cardiovasc Intervent Radiol. 2013;36(2):330–7.
10. FDA, Food and Drug Administration. Recording Information in the Patient's Medical Record that Identifies the Potential for Serious X-ray-Induced Skin Injuries Following Fluoroscopically Guided Procedures. Food and Drug Administration Important Information for Physicians and Other Health Care Professionals, September 15. 1995.
11. Chida K, Inaba Y, Morishima Y, Taura M, Ebata A, Yanagawa I, Takeda K, Zuguchi M. Comparison of dose at an interventional reference point between the displayed estimated value and measured value. Radiol Phys Technol. 2011;4(2):189–93.
12. Matsunaga Y, Haba T, Kobayashi M, Suzuki S, Asada Y, Chida K. Novel pregnant model phantoms for measurement of foetal radiation dose in x-ray examinations. J Radiol Prot. 2021. https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac125c.
13. Inaba Y, Chida K, Shirotori K, Shimura H, Yanagawa I, Zuguchi M, Takahashi S. Comparison of the radiation dose in a cardiac IVR X-ray system. Radiat Prot Dosim. 2011;143(1):74–80.
14. Chida K, Ohno T, Kakizaki S, Takegawa M, Yuuki H, Nakada M, Takahashi S, Zuguchi M. Radiation dose to the pediatric cardiac catheterization and intervention patient. Am J Roentgenol. 2010;195:1175–9.
15. Nemoto M, Chida K. Reducing the breast cancer risk and radiation dose of radiography for scoliosis in children: a phantom study. Diagnostics (Basel). 2020;10(10):753. https://doi.org/10.3390/diagnostics10100753.
16. International Commission on Radiological Protection (ICRP). The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP publication 103. Ann ICRP. 2007;37(2–4):1–332.
17. Borrego D, Marshall EL, Tran T, Siragusa DA, Bolch WE. Physical validation of UF-RIPSA: a rapid in-clinic peak skin dose mapping algorithm for fluoroscopically guided interventions. J Appl Clin Med Phys. 2018;19(3):343–50.
18. Tanaka T, Matsubara K, Kobayashi S. Evaluation of peak skin dose during percutaneous coronary intervention procedures: relationship with fluoroscopic pulse rate and target vessel. Radiol Phys Technol. 2021;14(1):34–40. https://doi.org/10.1007/s12194-020-00599-8.
19. Chida K, Inaba Y, Masuyama H, Yanagawa I, Mori I, Saito H, Maruoka S, Zuguchi M. Evaluating the performance of a MOSFET dosimeter at diagnostic X-ray energies for interventional radiology. Radiol Phys Technol. 2009;2:58–61.
20. Nakamura M, Chida K, Zuguchi M. Red emission phosphor for real-time skin dosimeter for fluoroscopy and interventional radiology. Med Phys. 2014;41(10): 101913.
21. Chida K, Zuguchi M, Saito H, Otani H, Shirotori K, Kumagai S, Nakayama H, Matsubara K, Kohzuki M. Does digital acquisition reduce patients' skin dose in cardiac interventional procedures? An experimental study. Am J Roentgenol. 2004;183:1111–4.
22. Kato M, Chida K, Sato T, Oosaka H, Tosa T, Kadowaki K. Evaluating the maximum patient radiation dose in cardiac interventional procedures. Radiat Prot Dosim. 2011;143:69–73.
23. Inaba Y, Chida K, Murabayashi Y, Endo M, Otomo K, Zuguchi M. An initial investigation of a wireless patient radiation dosimeter for use in interventional radiology. Radiol Phys Technol. 2020;13(3):321–6. https://doi.org/10.1007/s12194-020-00575-2.
24. Vañó E, Gonzalez L, Fernandez JM, Guibelalde E. Patient dose values in interventional radiology. Br J Radiol. 1995;68:1215–20.
25. Moritake T, Matsumaru Y, Takigawa T, Nishizawa K, Matsumura A, Tsuboi K. Dose measurement on both patients and operators during neurointerventional procedures using photoluminescence glass dosimeters. AJNR Am J Neuroradiol. 2008;29(10):1910–7. https://doi.org/10.3174/ajnr.A1235.
26. Nakamura M, Chida K, Zuguchi M. Novel dosimeter using a nontoxic phosphor for real-time monitoring of patient radiation dose in interventional radiology. Am J Roentgenol. 2015;205:202–6.
27. Kato M, Chida K, Nakamura M, et al. New real-time patient radiation dosimeter for use in radiofrequency catheter ablation. J Radiat Res. 2019;60(2):215–20.
28. Kato M, Chida K, Sato T, Oosaka H, Tosa T, Munehisa M, Kadowaki K. The necessity of follow-up for radiation skin injuries in patients after percutaneous coronary interventions: radiation skin injuries will often be overlooked clinically. Acta Radiol. 2012;53:1040–4.
29. Haga Y, Chida K, Sota M, Kaga Y, Abe M, Inaba Y, Suzuki M, Meguro T, Zuguchi M. Hybrid operating room system for the treatment of thoracic and abdominal aortic aneurysms: evaluation of the radiation dose received by patients. Diagnostics (Basel). 2020;10(10):846. https://doi.org/10.3390/diagnostics10100846.
30. Inaba Y, Nakamura M, Zuguchi M, Chida K. Development of novel real-time radiation systems using 4-channel sensors. Sensors (Basel). 2020;20(9):2741. https://doi.org/10.3390/s20092741.
31. Terasaki K, Fujibuchi T, Murazaki H, Kuramoto T, Umezu Y, Ishigaki Y, Matsumoto Y. Evaluation of basic characteristics of a semiconductor detector for personal radiation dose monitoring. Radiol Phys Technol. 2017;10(2):189–94. https://doi.org/10.1007/s12194-016-0384-z.
32. Nakamura T, Shoichi S, Takei Y, Kobayashi M, Cruz V, Kobayashi I, Asegawa S, Kato K. A more accurate and safer method for the measurement of scattered radiation in X-ray examination rooms. Radiol Phys Technol. 2020;13(1):69–75. https://doi.org/10.1007/s12194-019-00550-6.
33. Morishima Y, Chida K, Watanabe H. Estimation of the dose of radiation received by patient and physician during a videofluoroscopic swallowing study. Dysphagia. 2016;31(4):574–8.
34. Hwang E, Gaxiola E, Vlietstra RE, Brenner A, Ebersole D, Browne K. Real-time measurement of skin radiation during cardiac catheterization. Cathet Cardiovasc Diagn. 1998;43:367–70.
35. ICRP. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. ICRP publication 85. Ann ICRP. 2000;30(2):9–51.
36. Tsapaki V, Balter S, Cousins C, Holmberg O, Miller DL, Miranda P, Rehani M, Vano E. The international atomic energy agency action plan on radiation protection of patients and staff in interventional procedures: achieving change in practice. Phys Med. 2018;52:56–64. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.06.634.
37. Chida K, Kato M, Inaba Y, Kobayashi R, Nakamura M, Abe Y, Zuguchi M. Real-time patient radiation dosimeter for use in interventional radiology. Phys Med. 2016;32:1475–8.
38. Inaba Y, Nakamura M, Chida K, Zuguchi M. Effectiveness of a novel real-time dosimeter in interventional radiology: a comparison of new and old radiation sensors. Radiol Phys Technol. 2018;11(4):445–50.
39. Chida K, Kagaya Y, Saito H, Ishibashi T, Takahashi S, Zuguchi M. Evaluation of patient radiation dose during cardiac interventional procedures: what is the most efective method? Acta Radiol. 2009;50(5):474–81.
40. Chida K, Kagaya Y, Saito H, Chiba H, Takai Y, Takahashi S, Yamada S, Kohzuki M, Zuguchi M. Total entrance skin dose: an efective indicator of the maximum radiation dose to a patient's skin during percutaneous coronary intervention. Am J Roentgenol. 2007;189:W224–22727.
41. Chida K, Inaba Y, Saito H, Ishibashi T, Takahashi S, Kohzuki M, Zuguchi M. Radiation dose of interventional radiology system using a flat-panel detector. Am J Roentgenol. 2009;193:1680–5.

42. International commission on radiological protection (ICRP). Radiological protection in cardiology, ICRP publication 120. Ann ICRP. 2013;42(1):29–78.
43. Matsubara K, Takei Y, Mori H, Kobayashi I, Noto K, Igarashi T, Suzuki S, Akahane K. A multicenter study of radiation doses to the eye lenses of medical staff performing non-vascular imaging and interventional radiology procedures in Japan. Phys Med. 2020;74:83–91. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.05.004.
44. Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development of an application to visualize the spread of scattered radiation in radiography using augmented reality. J Radiol Prot. 2020. https://doi.org/10.1088/1361-6498/abc14b.
45. Coppeta L, Pietroiusti A, Neri A, Spataro A, De Angelis E, Perrone S, Magrini A. Risk of radiation-induced lens opacities among surgeons and interventional medical staf. Radiol Phys Technol. 2019;12(1):26–9.
46. Chida K, Kato M, Kagaya Y, et al. Radiation dose and radiation protection for patients and physicians during interventional procedure. J Radiat Res. 2010;51:97–105.
47. Vañó E, González L, Beneytez F, Moreno F. Lens injuries induced by occupational exposure in non-optimized interventional radiology laboratories. Br J Radiol. 1998;71(847):728–33. https://doi.org/10.1259/bjr.71.847.9771383.
48. Niklason LT, Marx MV, Chan HP. Interventional radiologists: occupational radiation doses and risks. Radiology. 1993;187:729–33.
49. Lynskey GE, Powell DK, Dixon RG, Silberzweig JE. Radiation protection in interventional radiology: survey results of attitudes and use. J Vasc Interv Radiol. 2013;24:1547–51. https://doi.org/10.1016/j.jvir.2013.05.039.
50. ICRP. ICRP statement on tissue reactions / early and late effects of radiation in normal tissues and organs – threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP publication 118. Ann ICRP. 2012;41(1–2):11–24.
51. Matsubara K, Yoshida S, Hirosawa A, Chusin T, Furukawa Y. Characterization of small dosimeters used for measurement of eye lens dose for medical staff during fluoroscopic examination. Diagnostics (Basel). 2021;11(2):150. https://doi.org/10.3390/diagnostics11020150.
52. Hirata Y, Fujibuchi T, Fujita K, Igarashi T, Nishimaru E, Horita S, Sakurai R, Ono K. Angular dependence of shielding effect of radiation protective eyewear for radiation protection of crystalline lens. Radiol Phys Technol. 2019;12(4):401–8. https://doi.org/10.1007/s12194-019-00538-2.
53. Kawauchi S, Chida K, Moritake T, Hamada Y, Tsuruta W. Radioprotection of eye lens using protective material in neuro cone-beam computed tomography: estimation of dose reduction rate and image quality. Phys Med. 2021;82:192–9. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.02.001.
54. Haga Y, Chida K, Kimura Y, Yamanda S, Sota M, Abe M, Kaga Y, Meguro T, Zuguchi M. Radiation eye dose to medical staff during respiratory endoscopy under X-ray fluoroscopy. J Radiat Res. 2020;61(5):691–6. https://doi.org/10.1093/jrr/rraa034.
55. Ross AM, Segal J, Borenstein D, Jenkins E, Cho S. Prevalence of spinal disc disease among interventional cardiologists. Am J Cardiol. 1997;79:68–70.
56. Goldstein JA, Balter S, Cowley M, Hodgson J, Klein LW. Occupational hazards of interventional cardiologists: prevalence of orthopedic health problems in contemporary practice. Catheter Cardiovasc Interv. 2004;63:407–11.
57. Dixon RG, Khiatani V, Statler JD, Walser EM, Midia M, Miller DL, Bartal G, Collins JD, Gross KA, Stecker MS. Society of interventional radiology: occupational back and neck pain and the interventional radiologist. J Vasc Interv Radiol. 2017;28:195–9. https://doi.org/10.1016/j.jvir.2016.10.017.
58. Cornelis FH, Razakamanantsoa L, Ammar MB, Lehrer R, Haffaf I, El-Mouhadi S, Gardavaud F, Najdawi M, Barral M. Ergonomics in interventional radiology: awareness is mandatory. Medicina. 2021;57:500. https://doi.org/10.3390/medicina57050500.
59. Zuguchi M, Chida K, Taura M, Inaba Y, Ebata A, Yamada S. Usefulness of non-lead aprons in radiation protection for physicians performing interventional procedures. Radiat Prot Dosim. 2008;131:531–4.
60. The National Institute of Standards and Technology (NIST), XCOM, https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html. Accessed: 29 Mar 2022.
61. Kato M, Chida K, Munehisa M, Sato T, Inaba Y, Suzuki M, Zuguchi M. Non-lead protective aprons for the protection of interventional radiology physicians from radiation exposure in clinical settings: an initial study. Diagnostics. 2021;11(9):1613. https://doi.org/10.3390/diagnostics11091613.
62. Chida K, Morishima Y, Masuyama H, Chiba H, Katahira Y, Inaba Y, Mori I, Maruoka S, Takahashi S, Kohzuki M, Zuguchi M. Effect of radiation monitoring method and formula differences on estimated physician dose during percutaneous coronary intervention. Acta Radiol. 2009;50(2):170–3. https://doi.org/10.1080/02841850802616745.
63. Chida K, Kaga Y, Haga Y, Kataoka N, Kumasaka E, Meguro T, Zuguchi M. Occupational dose in interventional radiology procedures. AJR Am J Roentgenol. 2013;200(1):138–41. https://doi.org/10.2214/AJR.11.8455.
64. ICRP. Occupational radiological protection in interventional procedures. ICRP publication 139. Ann ICRP. 2018. https://doi.org/10.1177/0146645317750356.
65. Martin CJ. Personnel dosimetry in UK radiology: is it time for a change? J Radiol Prot. 2012;32:E3–6. https://doi.org/10.1088/0952-4746/32/1/E03.
66. Domienik J, et al. The impact of various protective tools on the dose reduction in the eye lens in an interventional cardiology—clinical study. J Radiol Prot. 2016;36–2:309–18. https://doi.org/10.1088/0952-4746/36/2/309.
67. Maeder M, Brunner-La Rocca HP, Wolber T, Ammann P, Roelli H, Rohner F, Rickli H. Impact of a lead glass screen on scatter radiation to eyes and hands in interventional cardiologists. Catheter Cardiovasc Interv. 2006;67(1):18–23. https://doi.org/10.1002/ccd.20457.
68. Shortt CP, Al-Hashimi H, Malone L, Lee MJ. Staff radiation doses to the lower extremities in interventional radiology. Cardiovasc Intervent Radiol. 2007;30:1206–9. https://doi.org/10.1007/s00270-007-9071-0.
69. Chida K, Morishima Y, Katahira Y, Chiba H, Zuguchi M. Evaluation of additional lead shielding in protecting the physician from radiation during cardiac interventional procedures. Nihon Hoshasen Gijutsu Gakkai Zasshi. 2005;61(12):1632–7. https://doi.org/10.6009/jjrt.kj00004022974.
70. Chung KH, Park YS, Ahn SB, Son BK. Radiation protection effect of mobile shield barrier for the medical personnel during endoscopic retrograde cholangiopancreatography: a quasi-experimental prospective study. BMJ Open. 2019;9:e027729. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2018-027729.
71. Matsunaga Y, Chida K, Kondo Y, Kobayashi K, Kobayashi M, Minami K, Suzuki S, Asada Y. Diagnostic reference levels and achievable doses for common computed tomography examinations: results from the Japanese nationwide dose survey. Br J Radiol. 2019;92(1094):20180290. https://doi.org/10.1259/bjr.20180290.
72. Matsunaga Y, Kawaguchi A, Kobayashi M, Suzuki S, Suzuki S, Chida K. Radiation doses for pregnant women in the late pregnancy undergoing fetal-computed tomography: a

comparison of dosimetry and Monte Carlo simulations. Radiol Phys Technol. 2017;10(2):148–54. https://doi.org/10.1007/s12194-016-0377-y.
73. Matsunaga Y, Kawaguchi A, Kobayashi K, Kobayashi M, Asada Y, Minami K, Suzuki S, Chida K. Effective radiation doses of CT examinations in Japan: a nationwide questionnaire-based study. Br J Radiol. 2016;89(1058):20150671. https://doi.org/10.1259/bjr.20150671.
74. Matsunaga Y, Haba T, Kobayashi M, Suzuki S, Asada Y, Chida K. Fetal radiation dose of four tube voltages in abdominal CT examinations during pregnancy: a phantom study. J Appl Clin Med Phys. 2021;22(2):178–84. https://doi.org/10.1002/acm2.13171.
75. Izoe Y, Nagao M, Tokai M, Hashimoto H, Tanaka I, Chida K. Radiation dose for 320-row dose-modulated dynamic coronary CT angiography. J Appl Clin Med Phys. 2021;22(9):307–12. https://doi.org/10.1002/acm2.13390.
76. Ota J, Yokota H, Takishima H, Takada A, Irie R, Suzuki Y, Nagashima T, Horikoshi T, Chida K, Masuda Y, Uno T. Breast exposure reduction using organ-effective modulation on chest CT in Asian women. Eur J Radiol. 2019;119:108651. https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2019.108651.
77. Inaba Y, Hitachi S, Watanuki M, Chida K. Occupational radiation dose to eye lenses in CT-guided interventions using MDCT-fluoroscopy. Diagnostics. 2021;11(4):646. https://doi.org/10.3390/diagnostics11040646.
78. Suzuki A, Matsubara K, Chusin T, Suzuki Y. Radiation doses to the eye lenses of radiologic technologists who assist patients undergoing computed tomography. Radiol Phys Technol. 2021;14(2):167–72. https://doi.org/10.1007/s12194-021-00613-7.
79. Ota J, Yokota H, Kawasaki T, Taoka J, Kato H, Chida K, Masuda Y, Uno T. Evaluation of radiation protection methods for assistant Staff during CT Imaging in high-energy Trauma: lens dosimetry with a phantom study. Health Phys. 2021;120(6):635–40. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001391.
80. Dragusin O, Weerasooriya R, Jaïs P, Hocini M, Ector J, Takahashi Y, Haïssaguerre M, Bosmans H, Heidbüchel H. Evaluation of a radiation protection cabin for invasive electrophysiological procedures. Eur Heart J. 2007;28:183–9.
81. Ploux S, Ritter P, HaÏssaguerre M, Clementy J, Bordachar P. Performance of a radiation protection cabin during implantation of pacemakers or cardioverter defibrillators. J Cardiovasc Electrophysiol. 2010;21:428–30.
82. Marichal DA, Anwar T, Kirsch D, Clements J, Carlson L, Savage C, Rees CR. Comparison of a suspended radiation protection system versus standard lead apron for radiation exposure of a simulated interventionalist. J Vasc Interv Radiol. 2011;22(4):437–42. https://doi.org/10.1016/j.jvir.2010.12.016.
83. Haussen DC, van der Bom IMJ, Nogueira RG. A prospective case control comparison of the ZeroGravity system versus a standard lead apron as radiation protection strategy in neuroendovascular procedures. J Neurointerv Surg. 2016;8(10):1052–5. https://doi.org/10.1136/neurintsurg-2015-012038.
84. Etzel R, König AM, Keil B, Fiebich M, Mahnken AH. Effectiveness of a new radiation protection system in the interventional radiology setting. Eur J Radiol. 2018;106:56–61. https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2018.07.006.
85. Savage C, Seale T IV, Shaw C, Angela B, Marichal D, Rees C. Evaluation of a suspended personal radiation protection system vs conventional apron and shields in clinical interventional procedures. Open J Radiol. 2013;3(3):143–51. https://doi.org/10.4236/ojrad.2013.33024.
86. Kurihara T, Itoi T, Sofuni A, Itokawa F, Tsuchiya T, Ishii K, Tsuji S, Ikeuchi N, Moriyasu F. Novel protective lead shield and pulse fluoroscopy can reduce radiation exposure during the ERCP procedure. Hepatogastroenterology. 2012;59(115):709–12. https://doi.org/10.5754/hge11764.50.
87. Minami T, Sasaki T, Serikawa M, Kamigaki M, Yukutake M, Ishigaki T, Ishii Y, Mouri T, Yoshimi S, Shimizu A, Tsuboi T, Kurihara K, Tatsukawa Y, Miyaki E, Chayama K. Occupational radiation exposure during endoscopic retrograde cholangiopancreatography and usefulness of radiation protective Curtains. Gastroenterol Res Pract. 2014;2014: 926876. https://doi.org/10.1155/2014/926876.
88. Morishima Y, Chida K, Meguro T. Effectiveness of additional lead shielding to protect staff from scattering radiation during endoscopic retrograde cholangiopancreatography procedures. J Radiat Res. 2018;59:225–32. https://doi.org/10.1093/jrr/rrx039.
89. Morishima Y, Chida K, Muroya Y, Utsumi Y. Effectiveness of a New lead-shielding device and additional filter for reducing staff and patient radiation exposure during videofluoroscopic swallowing study using a human phantom. Dysphagia. 2018;33(1):109–14. https://doi.org/10.1007/s00455-017-9839-6.
90. Nakagami K, Moritake T, Nagamoto K, Morota K, Matsuzaki S, Kuriyama T, Kunugita N. Strategy to reduce the collective equivalent dose for the lens of the physician's eye using short radiation protection curtains to prevent cataracts. Diagnostics. 2021;11(8):1415. https://doi.org/10.3390/diagnostics11081415.
91. van Rooijen BD, de Haan MW, Das M, Arnoldussen CW, de Graaf R, van Zwam WH, Backes WH, Jeukens CR. Efficacy of radiation safety glasses in interventional radiology. Cardiovasc Intervent Radiol. 2014;37(5):1149–55. https://doi.org/10.1007/s00270-013-0766-0.
92. Endo M, Haga Y, Abe M, et al. Clinical study on the shielding effect of the 0.75mmPb glasses in cardiac IVR procedures. Rinsho Hoshasen. 2020;65:71–5. https://doi.org/10.18888/rp.0000001113 (**in Japanese**).
93. Mao L, Liu T, Caracappa PF, Lin H, Gao Y, Dauer LT, Xu XG. Influences of operator head posture and protective eyewear on eye lens doses in interventional radiology: a Mont Carlo study. Med Phys. 2019;46(6):2744–51. https://doi.org/10.1002/mp.13528.
94. Haga Y, Chida K, Kaga Y, Sota M, Meguro T, Zuguchi M. Occupational eye dose in interventional cardiology procedures. Sci Rep. 2017;7(1):569. https://doi.org/10.1038/s41598-017-00556-3.
95. Kato M, Chida K, Ishida T, Toyoshima H, Yoshida Y, Yoshioka S, Moroi J, Kinoshita T. Occupational radiation exposure of the eye in neurovascular interventional physician. Radiat Prot Dosimetry. 2019;185(2):151–6. https://doi.org/10.1093/rpd/ncy285.
96. Kato M, Chida K, Ishida T, Sasaki F, Toyoshima H, Oosaka H, Terata K, Abe Y, Kinoshita T. Occupational radiation exposure dose of the eye in department of cardiac arrhythmia physician. Radiat Prot Dosimetry. 2019;187(3):361–8. https://doi.org/10.1093/rpd/ncz175.
97. Endo M, Haga Y, Sota M, Tanaka A, Otomo K, Murabayashi Y, Abe M, Kaga Y, Inaba Y, Suzuki M, Meguro T, Chida K. Evaluation of novel X-ray protective eyewear in reducing the eye dose to interventional radiology physicians. J Radiat Res. 2021;62(3):414–9. https://doi.org/10.1093/jrr/rrab014.
98. Koukorava C, Farah J, Struelens L, et al. Efficiency of radiation protection equipment in interventional radiology: a systematic Monte Carlo study of eye lens and whole body doses. J Radiol Prot. 2014;34:509–28.
99. Doria S, Fedeli L, Redapi L, Piffer S, Rossi F, Falivene A, Busoni S, Belli G, Gori C, Taddeucci A. Addressing the efficiency of X-ray protective eyewear: proposal for the introduction of a new comprehensive parameter, the eye protection effectiveness (EPE). Phys Med. 2020;70:216–23. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.01.028.

100. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye, IAEA-TECDOC-1731, IAEA, Vienna (2013)
101. Vano E, Fernandez JM, Resel LE, Moreno J, Sanchez RM. Staff lens doses in interventional urology. A comparison with interventional radiology, cardiology and vascular surgery values. J Radiol Prot. 2016;36(1):37–48. https://doi.org/10.1088/0952-4746/36/1/37.
102. Ishii H, Haga Y, Sota M, Inaba Y, Chida K. Performance of the DOSIRIS™ eye lens dosimeter. J Radiol Prot. 2019;39(3):N19–26. https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab2729.
103. Martin CJ. Protecting interventional radiology and cardiology staff: are current designs of lead glasses and eye dosemeters fit for purpose? J Radiol Prot. 2018;38(2):E22–5. https://doi.org/10.1088/1361-6498/aabd4c.
104. 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 cardiology staff. Radiat Prot Dosimetry. 2019;185(4):409–13. https://doi.org/10.1093/rpd/ncz027.
105. Schueler BA, Fetterly KA. Eye protection in interventional procedures. Br J Radiol. 2021;94(1126):20210436. https://doi.org/10.1259/bjr.20210436.
106. Martin CJ. Eye lens dosimetry for fluoroscopically guided clinical procedures: practical approaches to protection and dose monitoring. Radiat Prot Dosimetry. 2016;169(1–4):286–91. https://doi.org/10.1093/rpd/ncv431.
107. AAPM PP 32-A: AAPM Position Statement on the Use of Patient Gonadal and Fetal Shielding. (2019). https://www.aapm.org/org/policies/details.asp?id=468&type=PP&current=true. Accessed: 29 Mar 2022.
108. Ordiales JM, Nogales JM, Vano E, López-Mínguez JR, Alvarez FJ, Ramos J, Martínez G, Sánchez RM. Occupational dose reduction in cardiac catheterisation laboratory: a randomised trial using a shield drape placed on the patient. Radiat Prot Dosimetry. 2017;174(2):255–61. https://doi.org/10.1093/rpd/ncw139.
109. Koenig AM, Maas J, Viniol S, Etzel R, Fiebich M, Thomas RP, Mahnken AH. Scatter radiation reduction with a radiation-absorbing pad in interventional radiology examinations. Eur J Radiol. 2020;132:109245. https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2020.10924.
110. Sota M, Haga Y, Arai T, et al. Phantom study on radiation protection with the L—shaped lead drape for cardiac IVR operators. Rinsho Hoshasen. 2020;66:501–7. https://doi.org/10.1888/rp.0000001603 (**in Japanese**).
111. Kherad B, Jerichow T, Blaschke F, Noutsias M, Pieske B, Tschöpe C, Krackhardt F. Efficacy of RADPAD protective drape during coronary angiography. Herz. 2018;43(4):310–4. https://doi.org/10.1007/s00059-017-4560-7.
112. Marcusohn E, Postnikov M, Musallam A, Yalonetsky S, Mishra S, Kerner A, Poliakov A, Roguin A. Usefulness of pelvic radiation protection shields during transfemoral procedures—operator and patient considerations. Am J Cardiol. 2018;122(6):1098–103. https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2018.06.003.
113. Vlastra W, Delewi R, Sjauw KD, Beijk MA, Claessen BE, Streekstra GJ, Bekker RJ, van Hattum JC, Wykrzykowska JJ, Vis MM, Koch KT, de Winter RJ, Piek JJ, Henriques JPS. Efficacy of the RADPAD protection drape in reducing operators' radiation exposure in the catheterization laboratory: a sham-controlled randomized trial. Circ Cardiovasc Interv. 2017;10(11):e006058. https://doi.org/10.1161/CIRCINTERVENTIONS.117.006058.
114. Sotoh T. Skin cancer of the thumb induced by occupational exposure: a case report. J Jpn Orthop Assoc. 2019;93:793–6 (**in Japanese**).
115. Yamane K, Kai N, Miyamoto T, Matsushita T. Exposure of the examiner to radiation during myelography versus radiculography and root block: a comparative study. J Orthop Sci. 2017;22(2):243–7. https://doi.org/10.1016/j.jos.2016.11.018.
116. Omi H, Itabashi T, Nagaoki T, Ogawa T, Tomita T, Sato H, Ito J. Protecting surgeons' fingers from radiation exposure during lumbosacral selective nerve root block. Spine Surg Relat Res. 2018;3(2):178–82. https://doi.org/10.22603/ssrr.2018-0056.
117. Badawy MK, Deb P, Chan R, Farouque O. A review of radiation protection solutions for the staff in the cardiac catheterisation laboratory. Heart Lung Circ. 2016;25(10):961–7. https://doi.org/10.1016/j.hlc.2016.02.021.
118. Wagner LK, Mulhern OR. Radiation-attenuating surgical gloves: effects of scatter and secondary electron production. Radiology. 1996;200(1):45–8. https://doi.org/10.1148/radiology.200.1.8657942.
119. McCaffrey JP, Tessier F, Shen H. Radiation shielding materials and radiation scatter effects for interventional radiology (IR) physicians. Med Phys. 2012;39(7):4537–46. https://doi.org/10.1118/1.4730504.
120. NCRP. Radiation Dose Management for Fluoroscopically Guided Interventional Medical Procedures. NCRP Report No. 168. National Council on Radiation Protection and Measurements. 2010:125–132. Accessed 29 Mar 2022.
121. Lee SY, Min E, Bae J, Chung CY, Lee KM, Kwon SS, Park MS, Lee K. Types and arrangement of thyroid shields to reduce exposure of surgeons to ionizing radiation during intraoperative use of C-arm fluoroscopy. Spine. 2013;38(24):2108–12. https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3182a8270d.
122. Chida K, Morishima Y, Inaba Y, Taura M, Ebata A, Takeda K, Shimura H, Zuguchi M. Physician-received scatter radiation with angiography systems used for interventional radiology: comparison among many X-ray systems. Radiat Prot Dosimetry. 2012;149(4):410–6. https://doi.org/10.1093/rpd/ncr312.
123. Wagner LK, Archer BR, Cohen AM. Management of patient skin dose in fluoroscopically guided interventional procedures. J Vasc Interv Radiol. 2000;11(1):25–33. https://doi.org/10.1016/s1051-0443(07)61274-3.
124. Wagner LK, McNeese MD, Marx MV, Siegel EL. Severe skin reactions from interventional fluoroscopy: case report and review of the literature. Radiology. 1999;213(3):773–6. https://doi.org/10.1148/radiology.213.3.r99dc16773.
125. Morishima Y, Chida K, Katahira Y, Seto H, Chiba H, Tabayashi K. Need for radiation safety education for interventional cardiology staff, especially nurses. Acta Cardiol. 2016;71(2):151–5. https://doi.org/10.2143/AC.71.2.3141844.
126. ICRP. Education and training in radiological protection for diagnostic and interventional procedures. ICRP publication 113. Ann ICRP. 2009;39(5):9–49.
127. Matsuzaki S, Moritake T, Morota K, Nagamoto K, Nakagami K, Kuriyama T, Kunugita N. Development and assessment of an educational application for the proper use of ceiling-suspended radiation shielding screens in angiography rooms using augmented reality technology. Eur J Radiol. 2021;143:109925. https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.109925.
128. Fujibuchi T. Radiation protection education using virtual reality for the visualisation of scattered distributions during radiological examinations. J Radiol Prot. 2021. https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac16b1.
129. Chida K, Sai M, Saito H, Takase K, Zuguchi M, Sasaki M, Sato T. Relationship between the pixel value in digital subtraction angiography and iodine concentration: study in high iodine concentration with original phantom. Tohoku J Exp Med. 2000;190(3):169–76. https://doi.org/10.1620/tjem.190.169.
130. Chida K, Saito H, Ito D, Shimura H, Zuguchi M, Takai Y. FFT analysis of the X-ray tube voltage waveforms of

high-frequency generators for radiographic systems. Acta Radiol. 2005;46(8):810–4. https://doi.org/10.1080/02841850500335069.
131. Haga Y, Chida K, Inaba Y, Kaga Y, Meguro T, Zuguchi M. A Rotatable quality control phantom for evaluating the performance of flat panel detectors in imaging moving objects. J Digit Imaging. 2016;29(1):38–42. https://doi.org/10.1007/s10278-015-9816-2.
132. Chida K, Kaga Y, Haga Y, Takeda K, Zuguchi M. Quality control phantom for flat panel detector X-ray systems. Health Phys. 2013;104(1):97–101. https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3182659c72.
133. Inaba Y, Chida K, Kobayashi R, Kaga Y, Zuguchi M. Fundamental study of a real-time occupational dosimetry system for interventional radiology staff. J Radiol Prot. 2014;34(3):N65-71. https://doi.org/10.1088/0952-4746/34/3/N65.
134. Murat D, Wilken-Tergau C, Gottwald U, Nemitz O, Uher T, Schulz E. Effects of real-time dosimetry on staff radiation exposure in the cardiac catheterization laboratory. J Invasive Cardiol. 2021;33(5):E337–41.
135. Vano E, Fernandez JM, Sanchez R. Occupational dosimetry in real time. Benefits for interventional radiology. Radiat Meas. 2011;46:1262–5. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2011.04.030.
136. Chida K, Saito H, Otani H, Kohzuki M, Takahashi S, Yamada S, Shirato K, Zuguchi M. Relationship between fuoroscopic time, dose–area product, body weight, and maximum radiation skin dose in cardiac interventional procedure. Am J Roentgenol. 2006;186:774–8.
137. Chida K, Fuda K, Saito H, Takai Y, Takahashi S, Yamada S, Kohzuki M, Zuguchi M. Patient skin dose in cardiac interventional procedures: conventional fluoroscopy versus pulsed fluoroscopy. Catheter Cardiovasc Interv. 2007;69(1):115–21. https://doi.org/10.1002/ccd.20961 (**discussion 122**).
138. Inaba Y, Chida K, Kobayashi R, Zuguchi M. A cross-sectional study of the radiation dose and image quality of X-ray equipment used in IVR. J Appl Clin Med Phys. 2016;17(4):391–401.
139. Chida K, Saito H, Kagaya Y, Kohzuki M, Takai Y, Takahashi S, Yamada S, Zuguchi M. Indicators of the maximum radiation dose to the skin during percutaneous coronary intervention in different target vessels. Catheter Cardiovasc Interv. 2006;68(2):236–41. https://doi.org/10.1002/ccd.20830.
140. Haskal ZJ, Worgul BV. Interventional radiology carries occupational risk for cataracts. RSNA News. 2004;14:5–6.
141. Vano E, Gonzalez L, Fernández JM, Fernández JM, Haskal ZJ. Eye lens exposure to radiation in interventional suites: caution is warranted. Radiology. 2008;248:945–53. https://doi.org/10.1148/radiol.2482071800.
142. Kawauchi S, Chida K, Hamada Y, Tsuruta W. Lens dose reduction with a bismuth shield in neuro cone-beam computed tomography: an investigation on optimum shield device placement conditions. Radiol Phys Technol. 2021. https://doi.org/10.1007/s12194-021-00644-0.
143. Chida K, Takahashi T, Ito D, Shimura H, Takeda K, Zuguchi M. Clarifying and visualizing sources of staff-received scattered radiation in interventional procedures. AJR Am J Roentgenol. 2011;197(5):W900–3. https://doi.org/10.2214/AJR.10.6396.
144. Inaba Y, Hitachi S, Watanuki M, Chida K. Radiation eye dose for physicians in CT fluoroscopy-guided biopsy. Tomography. 2022;8(1):438–46. https://doi.org/10.3390/tomography8010036.
145. Ishii H, Chida K, Satsurai K, Haga Y, Kaga Y, Abe M, Inaba Y, Zuguchi M. Occupational eye dose correlation with neck dose and patient-related quantities in interventional cardiology procedures. Radiol Phys Technol. 2022. https://doi.org/10.1007/s12194-022-00650-w.
146. Schueler BA. Operator shielding: how and why. Tech Vasc Interv Radiol. 2010;13(3):167–71. https://doi.org/10.1053/j.tvir.2010.03.005.
147. IAEA (International Atomic Energy Agency), 10 Pearls: Radiation protection of staff in fluoroscopy. Reducing patient dose always results in staff dose reduction. https://www.iaea.org/sites/default/files/documents/rpop/poster-staff-radiation-protection.pdf
148. Le Heron J, Padovani R, Smith I, Czarwinski R. Radiation protection of medical staff. Eur J Radiol. 2010;76(1):20–3. https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2010.06.034.
149. Bartal G, Vano E, Paulo G. Get protected! recommendations for staff in IR. Cardiovasc Intervent Radiol. 2021;44(6):871–6. https://doi.org/10.1007/s00270-021-02828-y.

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

sensors

Communication

Evaluation of a New Real-Time Dosimeter Sensor for Interventional Radiology Staff

Kenshin Hattori [1,†], Yohei Inaba [1,2,†], Toshiki Kato [1], Masaki Fujisawa [1], Hikaru Yasuno [1], Ayumi Yamada [1], Yoshihiro Haga [1,3], Masatoshi Suzuki [1,2], Masayuki Zuguchi [1] and Koichi Chida [1,2,*]

[1] Course of Radiological Technology, Health Sciences, Graduate School of Medicine, Tohoku University, 2-1 Seiryo, Aoba-ku, Sendai 980-8575, Japan
[2] Department of Radiation Disaster Medicine, International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 468-1 Aramaki Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-0845, Japan
[3] Department of Radiology, Sendai Kousei Hospital, 4-5 Hirose-machi, Aoba-ku, Sendai 980-0873, Japan
* Correspondence: chida@med.tohoku.ac.jp; Tel.: +81-22-717-7943
† These authors contributed equally to this work.

Abstract: In 2011, the International Commission on Radiological Protection (ICRP) recommended a significant reduction in the lens-equivalent radiation dose limit, thus from an average of 150 to 20 mSv/year over 5 years. In recent years, the occupational dose has been rising with the increased sophistication of interventional radiology (IVR); management of IVR staff radiation doses has become more important, making real-time radiation monitoring of such staff desirable. Recently, the i3 real-time occupational exposure monitoring system (based on RaySafe™) has replaced the conventional i2 system. Here, we compared the i2 and i3 systems in terms of sensitivity (batch uniformity), tube-voltage dependency, dose linearity, dose-rate dependency, and angle dependency. The sensitivity difference (batch uniformity) was approximately 5%, and the tube-voltage dependency was <±20% between 50 and 110 kV. Dose linearity was good (R^2 = 1.00); a slight dose-rate dependency (~20%) was evident at very high dose rates (250 mGy/h). The i3 dosimeter showed better performance for the lower radiation detection limit compared with the i2 system. The horizontal and vertical angle dependencies of i3 were superior to those of i2. Thus, i3 sensitivity was higher over a wider angle range compared with i2, aiding the measurement of scattered radiation. Unlike the i2 sensor, the influence of backscattered radiation (i.e., radiation from an angle of 180°) was negligible. Therefore, the i3 system may be more appropriate in areas affected by backscatter. In the future, i3 will facilitate real-time dosimetry and dose management during IVR and other applications.

Keywords: radiation protection and safety; fluoroscopy; interventional radiology (IVR); fluoroscopically guided interventional procedures; percutaneous coronary intervention (PCI); eye lens dose; occupational radiation exposure; X-ray examination; real-time radiation sensor

check for updates

Citation: Hattori, K.; Inaba, Y.; Kato, T.; Fujisawa, M.; Yasuno, H.; Yamada, A.; Haga, Y.; Suzuki, M.; Zuguchi, M.; Chida, K. Evaluation of a New Real-Time Dosimeter Sensor for Interventional Radiology Staff. *Sensors* **2023**, *23*, 512. https://doi.org/10.3390/s23010512

Academic Editor: Flavio Esposito

Received: 11 November 2022
Revised: 20 December 2022
Accepted: 28 December 2022
Published: 3 January 2023

Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Medical radiation (patient radiation doses and occupational exposure) is a major problem in radiation medicine [1–10].

Interventional radiology (IVR) plays a major role in disease diagnosis and treatment. IVR is performed using X-ray imaging equipment, catheters, and needles [11–14].

The procedural times of sophisticated IVR and other procedures have lengthened, increasing the radiation dose and making radiation control very important [15–22].

The 2011 statement of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) reduced the eye-lens exposure limit (the occupational dose) from 150 to 20 mSv/year [23]. It is expected that some medical staff will exceed this, and thus it is essential to evaluate the dose to the lens. Currently, in Japan, radiation doses delivered to medical staff during IVR and other procedures are assessed principally using radiation-monitoring badges attached to the neck, chest, or abdomen. Such badges measure cumulative doses over a long period

(e.g., 1 month), not the dose associated with each examination or procedure. We think that it may be difficult to reduce the occupational dose further in the absence of real-time radiation monitoring in IVR. Originally, the RaySafe i2 (i2) real-time dosimeter was used (Figure 1a). This has been replaced by the RaySafe i3 (i3) (Figure 1b) [24,25]. According to the manufacturer, the i3 is better than the i2 in terms of scattered-radiation detection, easy battery replacement, and analytical performance. Here, we compared the i3 and i2 dosimeters (sensors) [26].

(**a**)

(**b**)

Figure 1. (**a**) The RaySafe i2 sensor (44 × 45 mm); (**b**) The RaySafe i3 sensor (40 × 58 mm). Recently, the i3 sensor has replaced the former i2 sensor.

2. Materials and Methods

2.1. The i3 Dosimeter

Like the i2 dosimeter, the i3 measures scattered radiation (1 cm dose equivalent) in real-time, displaying both the dose rate and the cumulative dose (Figure 2). The dose rate is displayed as a red, yellow, or green bar, from the highest to the lowest dose, that is refreshed at 1-s intervals; a glance is sufficient to determine whether the dose rate is high. The i3 system stores dose data; a chronological dose history can be viewed and subjected to time-series analysis using a PC running dedicated software. Additionally, the i3 dosimeter uses a replaceable battery as opposed to the i2 dosimeter model in which the battery is non-replaceable.

Figure 2. A schematic of the i3 system (left: base station with 10.4-inch display; right: i3 dosimeter sensor). The system comprises a wireless i3 sensor (solid-state semiconductor detector) that transmits the scattered-radiation dose to the base station. The i3 sensor is small (40 × 58 mm, 34 g) and thus easy to carry during interventions.

2.2. Fundamental Evaluation

We used a diagnostic X-ray system featuring a high-frequency inverter generator (DHF-155H, Hitachi) to evaluate the i3 system. The total filtration of this X-ray system was 3.6-mm-aluminum equivalent. The distance from the X-ray tube to the i3 system was 180 cm, and the exposed area (the radiation-field size) at the i3 entrance was 30 × 30 cm. Variation in the sensitivity (batch uniformity) of i3 systems was evaluated by directly irradiating four i3 systems and an ionization chamber dosimeter simultaneously (Figure 3). Fluoroscopy was performed for 1 min under three conditions: (1) 65 kV tube voltage and 1 mA tube current, (2) 65 kV tube voltage and 0.1 mA tube current, and (3) 40 kV tube voltage and 0.1 mA tube current. These X-ray output conditions were to simulate scattered radiation (i.e., a low dose rate). To confirm reproducibility, all measurements were performed 10 times. An ionization chamber calibrated using the Japan national standard exposure dose (thimble type 6 mL; Model-9015, Radcal) was used to confirm the stability of the instrument.

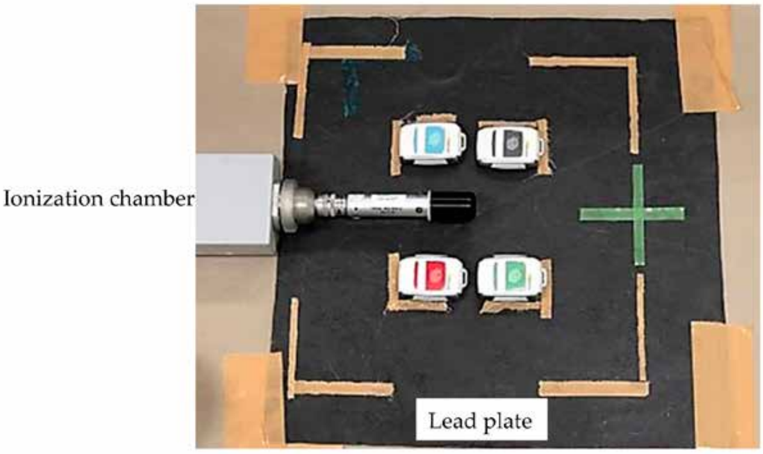


Figure 3. Experimental layout. The exposed area (radiation field) at the i3 entrance was 30 × 30 cm.

The tube-voltage dependency of the i3 system was evaluated under the same geometric conditions as employed when assessing batch uniformity. Fluoroscopy was continuous over 1 min, as shown in Table 1. Three measurements were made at each tube voltage, and the averages were calculated. The tube-voltage dependency for the i3 dosimeter was the ratio of the average i3 value to that of the ionization chamber dosimeter.

Table 1. Fluoroscopic X-ray tube voltage and half value layer.

Tube Voltage (kV)	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**	**100**	**110**
Half value layer (mmAl)	2.0	2.4	2.8	3.2	3.7	4.15	4.7

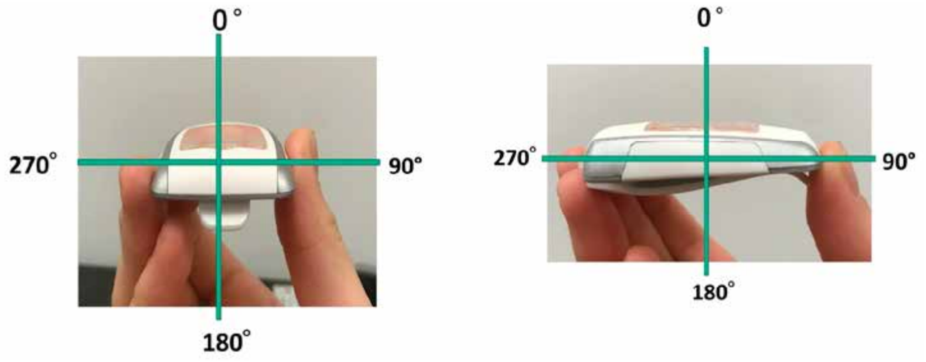
Dose linearity was measured using the integrated dose for X-ray irradiation of the four i3 systems under the same geometric conditions employed to evaluate batch uniformity. The fluoroscopy conditions were a 65 kV tube voltage, 1.6 mA tube current, and 15 min fluoroscopy time. The i3 integrated doses were recorded at 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, and 15 min after fluoroscopy commencement. The experiment was repeated three times. For each dataset, the coefficient of determination (R^2) was calculated by approximating linearity using the least-squares method in Microsoft Excel.

The dose-rate dependency of the i3 system was measured at 11 different dose rates ranging from 20–500 mGy/h. The dose-rate dependency was the ratio of the mean i3 value to that of the ionization chamber dosimeter. Copper plates were attached to the X-ray tube

entrance when measuring low dose rates. The i2 dosimeter was evaluated under the same conditions, and the dose-rate dependencies of the i2 and i3 systems were compared.

The limit of radiation detection of the i2 and i3 systems was evaluated using fluoroscopy scatter radiation from an acrylic phantom. The fluoroscopy tube voltages were 60, 80, and 100 kV, and the fluoroscopy durations were 3, 10, and 60 s.

A digital cine single-plane X-ray system (Infinix Celeve-I: INFX-8000F, Toshiba Medical) was used to measure angle dependency. The i3 sensor was placed 75 cm from the focal point of the X-ray tube and irradiated in free air. The dependency of the i3 sensor on the X-ray beam angle in air was measured at 0, ±15, ±30, ±45, ±60, ±75, ±90, ±135, and 180° along the vertical and horizontal axes under identical X-ray conditions (70 kV, HVL, 2.7 mm aluminum, 10 mA, 5 ms); the 0° measurement served as the reference value. The experiment was repeated five times at each angle (Figure 4). This method is that of Inaba et al. [26].



(**a**) (**b**)

Figure 4. Experimental layout for evaluation of angle dependency: (**a**) Horizontal; (**b**) Vertical.

3. Results

3.1. Fundamental Evaluation

Table 2 shows the variations in sensitivity (batch uniformity). For the first condition, the reproducibility of each detector (average coefficient of variation (CV), CV = standard deviation/mean measurements) was 2.099% (range 1.380–3.192%), and the batch uniformity (CV of each i3 sensor measurement) was 3.239%. For the second condition, the reproducibility of each detector was 2.216% (range 1.934–2.398%) and the batch uniformity was 3.431%. For the third condition, the reproducibility of each detector was 4.847% (range 2.291–6.913%) and the batch uniformity was 8.141%.

Table 2. Variations in sensitivity (reproducibility, batch uniformity).

	Reproducibility (%)	Batch Uniformity (%)
condition (1)	2.099 (range 1.380–3.192)	3.24
condition (2)	2.216 (range 1.934–2.398)	3.43
condition (3)	4.847 (range 2.291–6.913)	8.14

Figure 5 shows the i3 tube-voltage dependency with respect to that of the ionization chamber dosimeter. Although the i3 value decreased with decreasing tube voltage, the difference in the i3 and chamber dosimeter values was <±20%, using the 70 kV measurement as the reference value.

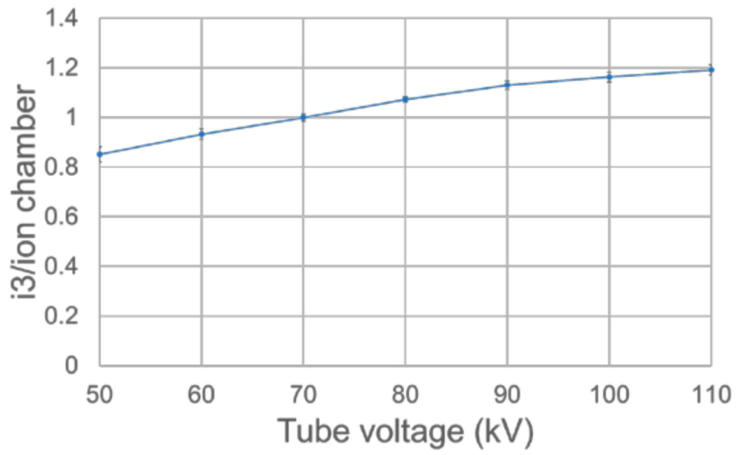


Figure 5. Tube-voltage dependencies of the i3 system (vertical axis: i3 measurements/ionization chamber measurements; horizontal axis: tube voltage).

Figure 6 shows the dose linearities. The R^2 was 1.00.

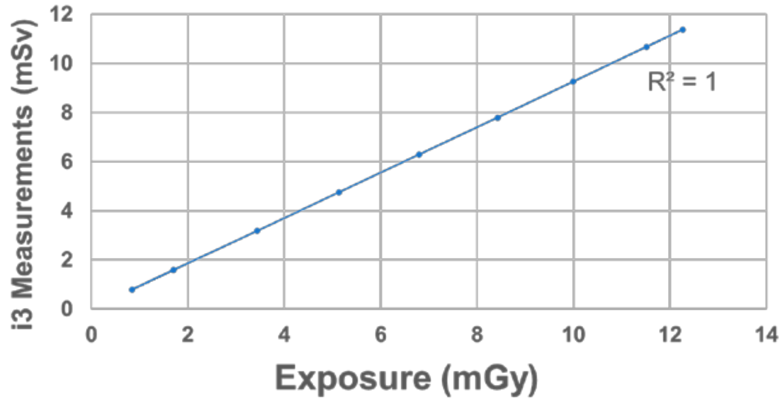


Figure 6. Dose linearities of the i3 system (vertical axis: i3 measurements; horizontal axis: ionization-chamber measurements).

Figure 7 shows the dose-rate dependencies. The dose per hour is shown on the horizontal axis, and the ionization-chamber dosimeter reading divided by those of the i2 or i3 is shown on the vertical axis. At low dose rates, the i2 and i3 responses were similar. At very high dose rates (250 mGy/h), both the i2 and i3 evidenced dose-rate dependency (~20%).

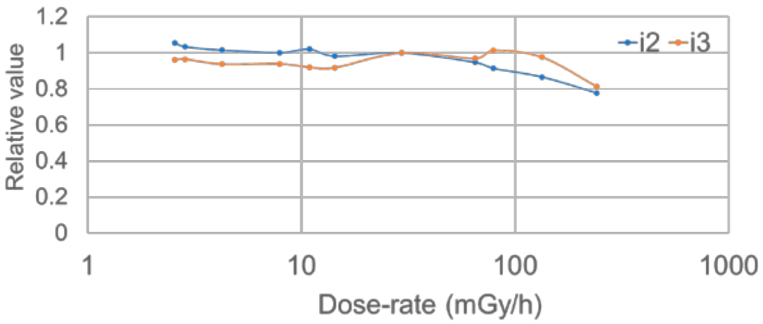


Figure 7. Dose-rate dependencies (vertical axis: i3 or i2 measurements/ionization-chamber measurements; horizontal axis: ionization-chamber measurements).

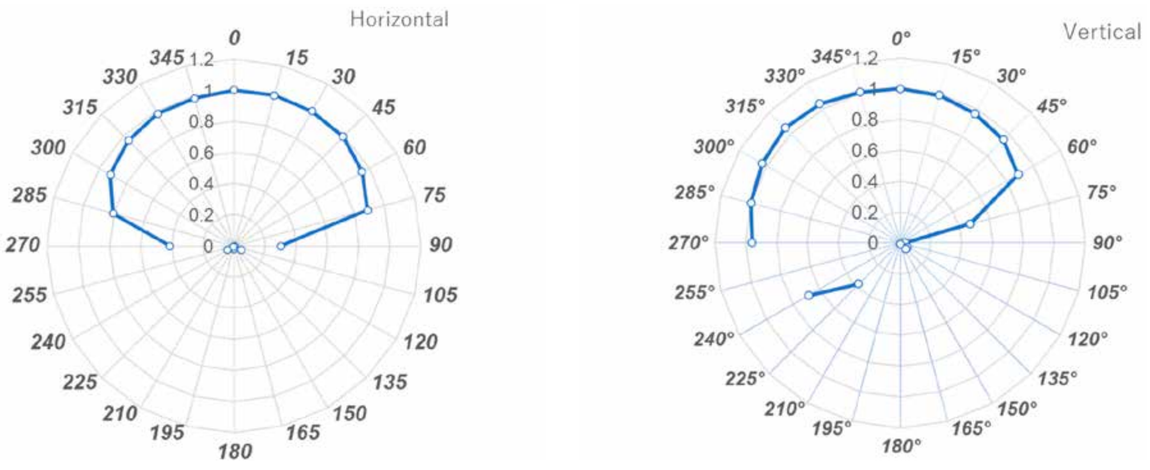
Table 3 shows the limit of radiation detection of the i3 and i2 dosimeters. The i3 dosimeter showed better performance for the lower radiation detection limit compared with the i2 system.

Table 3. Low radiation detection limit of the i2 and i3 systems.

Tube Voltage	**60 kV**			**80 kV**			**100 kV**		
Fluoroscopy Duration	3 s	10 s	60 s	3 s	10 s	60 s	3 s	10 s	60 s
i3 measurements (μSv/h)	57.5	30.5	19.5	59.6	34.5	21.3	48.4	27.3	16.6
i2 measurements (μSv/h)	185.7	46.3	41.3	101.3	31.2	35.2	99.8	39.8	22.2

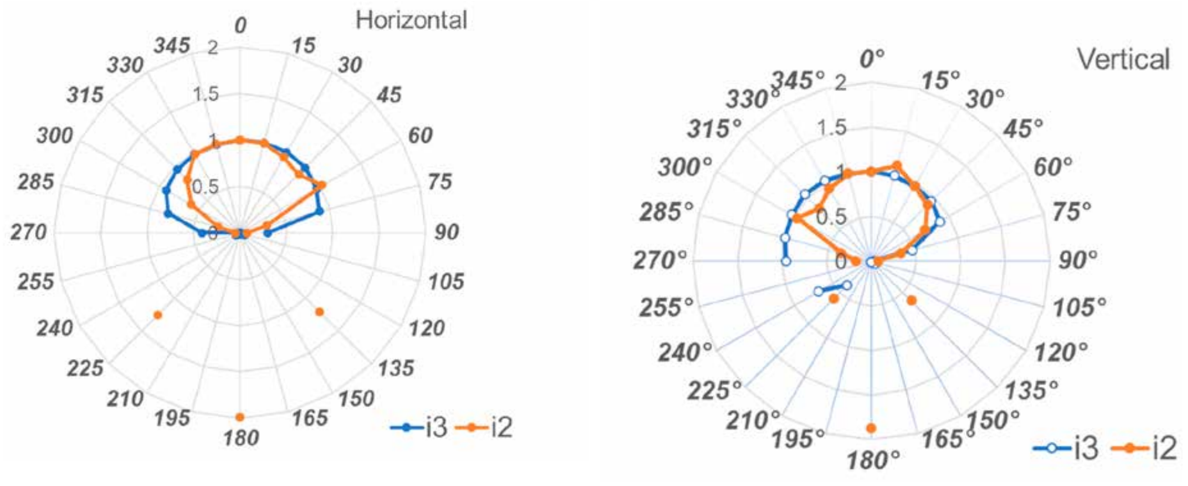
3.2. Angle Dependency

Figure 8a,b show the results in the horizontal and vertical directions, respectively. All doses are expressed as relative values, where 1 is the dose at 0°. In the horizontal direction, the i3 exhibited a reliable dose response from 0 to ±75° with a sensitivity >80%. In the vertical direction, the i3 exhibited a reliable dose response from 0 to +65° and 0 to +270° (−90°) with a sensitivity >80%. Figure 9a,b show the i2 sensitivities in the horizontal and vertical directions, respectively. i3 evidenced better angle dependency than that of i2. Furthermore, using the i2 sensor, the influence of backscattered radiation must be considered.



(**a**) (**b**)

Figure 8. Angle dependency of the i3 sensor: (**a**) Horizontal plane; (**b**) Vertical plane.



(**a**) (**b**)

Figure 9. Angle dependencies of the i3 and i2 sensors: (**a**) Horizontal plane; (**b**) Vertical plane.

4. Discussion

Safety measures to prevent radiation exposure are important due to the risk of radiation-induced injuries, such as skin damage in patients and cataracts in medical staff [27–37]. Therefore, increasing attention is being paid to radiation safety and protection for patients and medical staff, particularly related to IVR [38–47].

Radiation monitoring badges (e.g., glass badges) and pocket dosimeters are used extensively to assess radiation doses to medical staff. Glass badges measure long-term exposure, but they cannot be used for real-time measurements. Pocket dosimeters measure doses in real-time, but must be constantly checked. Unlike the i3 system, pocket dosimeters do not display doses in real-time on a monitor. Dosimeters placed in the vicinity of the lens, such as the Eye-D and DOSIRIS, can also be used [26,48–52]; the passive DOSIRIS dosimeter, which does not provide real-time monitoring, was designed to measure the lens dose, but the real-time i3 system may be more effective for reducing occupational doses. The use of dosimeters such as the i3 will be valuable in situations such as IVR, in which exposure doses are high and instantaneous monitoring is required [53–58].

Real-time monitoring is important to minimize the exposure of medical staff and to ensure adequate protection [59–64]. To the best of our knowledge, this is the first detailed fundamental study of the ability of the i3 dosimeter to monitor the real-time occupational doses of IVR staff. The reproducibility of each i3 system and the batch uniformity among the systems were both approximately 5%, thus comparable with or better than those of the i2 system.

In terms of tube-voltage dependency, the lower the tube voltage, the slightly lower the i3 value. However, if the ratio of the values measured at 70 kV was set to 1, the difference between the 50 and 110 kV values was <±20%, thus well within the ±25% range of the Raysafe instruction manual [25].

The dose linearity of the i3 system was good (R^2 = 1). It was reported previously (Inaba [26]) that the i2 dose linearity is also good (R^2 = 1). The i2 and i3 systems may be similar in this respect.

In terms of the dose-rate dependency, a decrease in sensitivity was observed at high dose rates (e.g., 250 mGy/h) for both dosimeters. As the scattered radiation received by an IVR physician is lower than this, we do not perceive a clinical problem. In detail, the diagnostic reference level (DRL) of the patient reference fluoroscopy dose rate during IVR in Japan (Japan DRL2020 [65]) is 17 mGy/min (i.e., 102 mGy/h). An IVR physician may receive between 1/1000 and 1/500 of the patient entrance dose, so, it has been thought that IVR physicians are not exposed to high dose rates (e.g., 250 mGy/h).

The angle dependency of the i3 system was good in both the horizontal (0 to ±75°) and vertical (0° to +65° and –90°) axes. The angle dependency of the i3 was better than that of the i2. Regarding the semiconductor sensor and the internal structure of the dosimeter, there is no detailed information disclosure from the manufacturer. Figure 10 shows X-ray photographs from the i3 and i2 dosimeters. We speculate that the X-ray sensor of the i3 dosimeter has improved angle dependency by being placed at the bottom of the sensor compared to the i2 dosimeter in which the sensor is located at the upper right side.

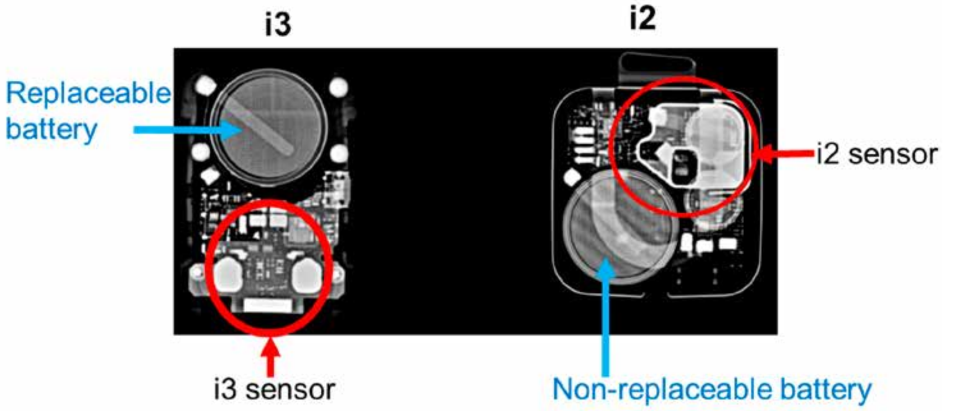


Figure 10. X-ray photographs for the i3 and i2 dosimeters.

Behind the sensor, i2 sensitivity almost doubled, whereas i3 was insensitive. When a dosimeter is mounted on the head or neck, backscattering must be considered. As the i3 is insensitive behind the sensor, such effects can be ignored.

The basic performance of the i3 system was thus equal to or better than that of the i2 system; the i3 should be preferred by medical staff. Although pocket dosimeters can measure doses in real-time, the i3 dosimeter is better because a glance at the display reveals the current dose, increasing radiation awareness.

In summary, the dose limits for medical personnel have been reduced in many countries; in Japan, the dose limit was significantly reduced from 150 to an average of 20 mSv/year over a 5-year period. Personal dose management is becoming increasingly important. Currently, badges (e.g., glass badges) and pocket dosimeters are used by medical staff; in the future, real-time dosimeters may become more important, especially in IVR. We previously reported the basic performance of the former i2 system (i2 sensor). Recently, a new i3 dosimeter (sensor) was developed to replace the i2 sensor. Here, we evaluated the basic performance of the new sensor (i3 system). The results show that the basic performance of the new i3 sensor is the same as or better than that of the i2 sensor. To date, it has not been possible to determine the chronological dose history (e.g., the dose rate, and exposure duration); the i3 system enables history determination at a glance. The i3 dosimeter is appropriate for clinical use, exhibiting especially good angle dependency. Such dosimeters will remain important in the future.

5. Conclusions

The i3 dosimeter performs as well as, or better than, the i2 dosimeter. The angle dependency of the i3 is particularly good. Furthermore, unlike the i2, the i3 can be used in areas exposed to backscatter. In the future, i3 will facilitate real-time dosimetry and dose management during IVR and other applications.

Author Contributions: Conceptualization, Y.I., M.Z. and K.C.; methodology, Y.H., Y.I. and K.C.; software, K.H., Y.H. and M.S.; validation, K.H., Y.I., M.S., M.Z. and K.C.; formal analysis, K.H., T.K., M.F., H.Y., A.Y., Y.I., M.S. and K.C.; investigation, K.H., T.K., M.F., H.Y., A.Y. and K.C.; resources, Y.H., Y.I. and K.C.; data curation, K.H., T.K., M.F., H.Y., A.Y., Y.I. and M.S.; writing—original draft preparation, K.H., T.K., M.F., H.Y., A.Y. and K.C.; writing—review and editing, K.H., M.Z., Y.I., M.S.

and K.C.; visualization, K.H., Y.I. and M.S.; supervision, Y.H., M.Z. and K.C.; project administration, Y.I., M.Z. and K.C.; funding acquisition, K.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This study was supported in part by the Industrial Disease Clinical Research Grants (200701-1), Japan.

Institutional Review Board Statement: "Not applicable" for studies not involving humans or animals.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: We would like to express our deepest gratitude to Masahiro Sota, Mitsuya Abe and Yuji Kaga of the Sendai Kosei Hospital for their assistance with the study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Vano, E.; Escaned, J.; Vano-Galvan, S.; Fernandez, J.M.; Galvan, C. Importance of a patient dosimetry and clinical followup program in the detection of radiodermatitis after long percutaneous coronary interventions. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* **2013**, *36*, 330–337. [CrossRef] [PubMed]
2. Chida, K.; Inaba, Y.; Masuyama, H.; Yanagawa, I.; Mori, I.; Saito, H.; Maruoka, S.; Zuguchi, M. Evaluating the performance of a MOSFET dosimeter at diagnostic X-ray energies for interventional radiology. *Radiol. Phys. Technol.* **2009**, *2*, 58–61. [CrossRef] [PubMed]
3. Matsunaga, Y.; Haba, T.; Kobayashi, M.; Suzuki, S.; Asada, Y.; Chida, K. Novel pregnant model phantoms for measurement of foetal radiation dose in x-ray examinations. *J. Radiol. Prot.* **2021**, *41*, N12–N21. [CrossRef] [PubMed]
4. Inaba, Y.; Chida, K.; Kobayashi, R.; Zuguchi, M. A cross-sectional study of the radiation dose and image quality of X-ray equipment used in IVR. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* **2016**, *17*, 91–401. [CrossRef] [PubMed]
5. Chida, K.; Ohno, T.; Kakizaki, S.; Takegawa, M.; Yuuki, H.; Nakada, M.; Takahashi, S.; Zuguchi, M. Radiation dose to the pediatric cardiac catheterization and intervention patient. *Am. J. Roentgenol.* **2010**, *195*, 1175–1179. [CrossRef]
6. Nemoto, M.; Chida, K. Reducing the breast cancer risk and radiation dose of radiography for scoliosis in children: A phantom study. *Diagnostics* **2020**, *10*, 753. [CrossRef]
7. Chida, K.; Saito, H.; Otani, H.; Kohzuki, M.; Takahashi, S.; Yamada, S.; Shirato, K.; Zuguchi, M. Relationship between fluoroscopic time, dose—Area product, body weight, and maximum radiation skin dose in cardiac interventional procedures. *Am. J. Roentgenol.* **2006**, *186*, 774–778. [CrossRef]
8. Inaba, Y.; Nakamura, M.; Zuguchi, M.; Chida, K. Development of novel real-time radiation systems using 4-channel sensors. *Sensors* **2020**, *20*, 2741. [CrossRef]
9. Matsuzaki, S.; Moritake, T.; Morota, K.; Nagamoto, K.; Nakagami, K.; Kuriyama, T.; Kunugita, N. Development and assessment of an educational application for the proper use of ceiling-suspended radiation shielding screens in angiography rooms using augmented reality technology. *Eur. J. Radiol.* **2021**, *143*, 109925. [CrossRef]
10. Sato, T.; Eguchi, Y.; Yamazaki, C.; Hino, T.; Saida, T.; Chida, K. Development of a New Radiation Shield for the Face and Neck of IVR Physicians. *Bioengineering* **2022**, *9*, 354. [CrossRef]
11. International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Radiological Protection in Cardiology*; ICRP Publication 120; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2013; Volume 42, Available online: https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_42_1 (accessed on 1 November 2022).
12. Chida, K.; Kato, M.; Kagaya, Y.; Zuguchi, M.; Saito, H.; Ishibashi, T.; Takahashi, S.; Yamada, S.; Takai, Y. Radiation dose and radiation protection for patients and physicians during interventional procedure. *J. Radiat. Res.* **2010**, *51*, 97–105. [CrossRef]
13. Haga, Y.; Chida, K.; Sota, M.; Kaga, Y.; Abe, M.; Inaba, Y.; Suzuki, M.; Meguro, T.; Zuguchi, M. Hybrid operating room system for the treatment of thoracic and abdominal aortic aneurysms: Evaluation of the radiation dose received by patients. *Diagnostics* **2020**, *10*, 846. [CrossRef]
14. Chida, K. What are useful methods to reduce occupational radiation exposure among radiological medical workers, especially for interventional radiology personnel? *Radiol. Phys. Technol.* **2022**, *15*, 101–115. [CrossRef]
15. Vañó, E.; Gonzalez, L.; Fernández, J.M.; Haskal, Z.J. Eye lens exposure to radiation in interventional suites: Caution is warranted. *Radiology* **2008**, *248*, 945–953. [CrossRef]
16. Kato, M.; Chida, K.; Sato, T.; Oosaka, H.; Tosa, T.; Kadowaki, K. Evaluating the maximum patient radiation dose in cardiac interventional procedures. *Radiat. Prot. Dosim.* **2011**, *143*, 69–73. [CrossRef]
17. Inaba, Y.; Chida, K.; Shirotori, K.; Shimura, H.; Yanagawa, I.; Zuguchi, M.; Takahashi, S. Comparison of the radiation dose in a cardiac IVR X-ray system. *Radiat. Prot. Dosim.* **2011**, *143*, 74–80. [CrossRef]

18. International Commission on Radiological Protection (ICRP). *ICRP Statement on Tissue Reactions/Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs, Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context*; ICRP publication 118 Ann. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2012; Volume 41, pp. 1–322. Available online: https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20118 (accessed on 1 November 2022).
19. Chida, K.; Morishima, Y.; Inaba, Y.; Taura, M.; Ebata, A.; Takeda, K.; Shimura, H.; Zuguchi, M. Physician-received scatter radiation with angiography systems used for interventional radiology: Comparison among many X-ray systems. *Radiat. Prot. Dosim.* **2011**, *149*, 410–416. [CrossRef]
20. Zuguchi, M.; Chida, K.; Taura, M.; Inaba, Y.; Ebata, A.; Yamada, S. Usefulness of non-lead aprons in radiation protection for physicians performing interventional procedures. *Radiat. Prot. Dosim.* **2008**, *131*, 531–534. [CrossRef]
21. Ishii, H.; Chida, K.; Satsurai, K.; Haga, Y.; Kaga, Y.; Abe, M.; Inaba, Y.; Zuguchi, M. Occupational eye dose correlation with neck dose and patient-related quantities in interventional cardiology procedures. *Radiol. Phys. Technol.* **2021**, *15*, 54–62. [CrossRef]
22. Chida, K.; Takahashi, T.; Ito, D.; Shimura, H.; Takeda, K.; Zuguchi, M. Clarifying and visualizing sources of staff-received scattered radiation in interventional procedures. *Am. J. Roentgenol.* **2011**, *197*, W900–W903. [CrossRef]
23. International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Statement on Tissue Reactions*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2011. Available online: http://www.icrp.org/docs/ICRP%20Statement%20on%20Tissue%20Reactions.pdf (accessed on 1 November 2022).
24. RaySafe i3 Real-Time Radiation Dosimeter | RaySafe. Available online: https://www.raysafe.com/products/real-time-staff-dosimetry/raysafe-i3-real-time-radiation-dosimeter (accessed on 1 November 2022).
25. RaySafe i3. Available online: https://www.raysafe.com/sites/default/files/2020-07/RaySafe%20i3%20OSD%20Instructions%20for%20Use%20%28multilingual%29.pdf (accessed on 1 November 2022).
26. Inaba, Y.; Chida, K.; Kobayashi, R.; Kaga, Y.; Zuguchi, M. Fundamental study of a real-time occupational dosimetry system for interventional radiology staff. *J. Radiol. Prot.* **2014**, *34*, 65–71. [CrossRef] [PubMed]
27. Coppeta, L.; Pietroiusti, A.; Neri, A.; Spataro, A.; Angelis, E.D.; Perrone, S.; Magrini, A. Risk of radiation-induced lens opacities among surgeons and interventional medical staff. *Radiol. Phys. Technol.* **2019**, *12*, 26–29. [CrossRef] [PubMed]
28. Magee, J.S.; Martin, C.J.; Sandblom, V.; Carter, M.J.; Almén, A.; Cederblad, Å.; Jonasson, P.; Lundh, C. Derivation and application of dose reduction factors for protective eyewear worn in interventional radiology and cardiology. *J Radiol Prot.* **2014**, *34*, 811–823. [CrossRef] [PubMed]
29. Omar, A.; Kadesjö, N.; Palmgren, C.; Marteinsdottir, M.; Segerdahl, T.; Fransson, A. Assessment of the occupational eye lens dose for clinical staff in interventional radiology, cardiology and neuroradiology. *J. Radiol. Prot.* **2017**, *37*, 145–159. [CrossRef] [PubMed]
30. Božović, P.; Ciraj-Bjelac, O.; Petrović, J.S. Occupational eye lens dose estimated using whole—Body dosemeter in interventional cardiology and radiology: A Monte Carlo study, *Radiat. Prot. Dosim.* **2019**, *185*, 135–142. [CrossRef]
31. Kato, M.; Chida, K.; Sato, T.; Oosaka, H.; Tosa, T.; Munehisa, M.; Kadowaki, K. The necessity of follow-up for radiation skin injuries in patients after percutaneous coronary interventions: Radiation skin injuries will often be overlooked clinically. *Acta Radiol.* **2012**, *53*, 1040–1044. [CrossRef]
32. Vañó, E.; González, L.; Beneytez, F.; Moreno, F. Lens injuries induced by occupational exposure in non-optimized interventional radiology laboratories. *Br. J. Radiol.* **1998**, *71*, 728–733. [CrossRef]
33. Vigneux, G.; Pirkkanen, J.; Laframboise, T.; Prescott, H.; Tharmalingam, S.; Thome, C. Radiation-Induced Alterations in Proliferation, Migration, and Adhesion in Lens Epithelial Cells and Implications for Cataract Development. *Bioengineering* **2022**, *9*, 29. [CrossRef]
34. Chida, K.; Kaga, Y.; Haga, Y.; Kataoka, N.; Kumasaka, E.; Meguro, T.; Zuguchi, M. Occupational dose in interventional radiology procedures. *Am. J. Roentgenol.* **2013**, *200*, 138–141. [CrossRef]
35. Chida, K.; Morishima, Y.; Masuyama, H.; Chiba, H.; Katahira, Y.; Inaba, Y.; Mori, I.; Maruoka, S.; Takahashi, S.; Kohzuki, M.; et al. Effect of radiation monitoring method and formula differences on estimated physician dose during percutaneous coronary intervention. *Acta Radiol.* **2009**, *50*, 170–173. [CrossRef]
36. Koenig, A.; Maas, J.; Viniol, S.; Etzel, R.; Fiebich, M.; Thomas, R.; Mahnken, A. Scatter radiation reduction with a radiation-absorbing pad in interventional radiology examinations. *Eur. J. Radiol.* **2020**, *132*, 109245. [CrossRef]
37. Yokoyama, S.; Suzuki, S.; Toyama, H.; Arakawa, S.; Inoue, S.; Kinomura, Y.; Kobayashi, I. Evaluation of eye lens dose of interventional cardiologists, *Radiat. Prot. Dosim.* **2017**, *173*, 218–222. [CrossRef]
38. Morishima, Y.; Chida, K.; Katahira, Y. The effectiveness of additional lead-shielding drape and low pulse rate fluoroscopy in protecting staff from scatter radiation during cardiac resynchronization therapy (CRT). *Jpn. J. Radiol.* **2019**, *37*, 95–101. [CrossRef]
39. Inaba, Y.; Chida, K.; Murabayashi, Y.; Endo, M.; Otomo, K.; Zuguchi, M. An initial investigation of a wireless patient radiation dosimeter for use in interventional radiology. *Radiol. Phys. Technol.* **2020**, *13*, 321–326. [CrossRef]
40. Morishima, Y.; Chida, K.; Meguro, T.; Hirota, M.; Chiba, H.; Fukuda, H. Lens equivalent dose of staff during endoscopic retrograde cholangiopancreatography: Dose comparison using two types of dosemeters. *Radiat. Prot. Dosim.* **2022**, *198*, 1368–1376. [CrossRef]
41. Matsunaga, Y.; Chida, K.; Kondo, Y.; Kobayashi, K.; Kobayashi, M.; Minami, K.; Suzuki, S.; Asada, Y. Diagnostic reference levels and achievable doses for common computed tomography examinations: Results from the Japanese nationwide dose survey. *Br. J. Radiol.* **2019**, *92*, 20180290. [CrossRef]

42. Endo, M.; Haga, Y.; Sota, M.; Tanaka, A.; Otomo, K.; Murabayashi, Y.; Abe, M.; Kaga, Y.; Inaba, Y.; Suzuki, M.; et al. Evaluation of novel X-ray protective eyewear in reducing the eye dose to interventional radiology physicians. *J. Radiat. Res.* **2021**, *62*, 414–419. [CrossRef]
43. Fujibuchi, T. Radiation protection education using virtual reality for the visualisation of scattered distributions during radiological examinations. *J Radiol Prot.* **2021**, *41*. [CrossRef]
44. Kato, M.; Chida, K.; Munehisa, M.; Sato, T.; Inaba, Y.; Suzuki, M.; Zuguchi, M. Non-Lead Protective Aprons for the Protection of Interventional Radiology Physicians from Radiation Exposure in Clinical Settings: An Initial Study. *Diagnostics* **2021**, *11*, 1613. [CrossRef]
45. Matsubara, K. Assessment of Radiation Dose in Medical Imaging and Interventional Radiology Procedures for Patient and Staff Safety. *Diagnostics* **2021**, *11*, 1116. [CrossRef]
46. Chida, K.; Inaba, Y.; Morishima, Y.; Taura, M.; Ebata, A.; Yanagawa, I.; Takeda, K.; Zuguchi, M. Comparison of dose at an interventional reference point between the displayed estimated value and measured value. *Radiol. Phys. Technol.* **2011**, *4*, 189–193. [CrossRef] [PubMed]
47. International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Avoidance of Radiation Injuries from Medical Interventional Procedures*; ICRP Publication 85; Pergamon: Oxford, UK, 2000; Volume 30. Available online: https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_30_2 (accessed on 1 November 2022).
48. Haga, Y.; Chida, K.; Kaga, Y.; Sota, M.; Meguro, T.; Zuguchi, M. Occupational eye dose in interventional cardiology procedures. *Sci. Rep.* **2017**, *7*, 569. [CrossRef] [PubMed]
49. Kato, M.; Chida, K.; Ishida, T.; Toyoshima, H.; Yoshida, Y.; Yoshioka, S.; Moroi, J.; Kinoshita, T. Occupational radiation exposure of the eye in neurovascular interventional physician. *Radiat. Prot. Dosim.* **2019**, *185*, 151–156. [CrossRef] [PubMed]
50. Haga, Y.; Chida, K.; Kimura, Y.; Yamada, S.; Sota, M.; Abe, M.; Kaga, Y.; Meguro, T.; Zuguchi, M. Radiation eye dose to medical staff during respiratory endoscopy under X-ray fluoroscopy. *J. Radiat. Res.* **2020**, *61*, 691–696. [CrossRef]
51. O'Connor, U.; Walsh, C.; Gallagher, A.; Dowling, A.; Guiney, M.; Ryan, J.M.; McEniff, N.; O'Reilly, G. Occupational radiation dose to eyes from interventional radiology procedures in light of the new eye lens dose limit from the International Commission on Radiological Protection. *Br. J. Radiol.* **2015**, *88*, 20140627. [CrossRef]
52. Ishii, H.; Haga, Y.; Sota, M.; Inaba, Y.; Chida, K. Performance of the DOSIRIS™ eye lens dosimeter. *J. Radiol. Prot.* **2019**, *39*, N19–N26. [CrossRef]
53. 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 cardiology staff. *Radiat. Prot. Dosim.* **2019**, *185*, 409–413. [CrossRef]
54. Inaba, Y.; Hitachi, S.; Watanuki, M.; Chida, K. Occupational radiation dose to eye lenses in CT-guided interventions using MDCT-fluoroscopy. *Diagnostics* **2021**, *11*, 646. [CrossRef]
55. Yashima, S.; Chida, K. Awareness of Medical Radiologic Technologists of Ionizing Radiation and Radiation Protection. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2023**, *20*, 497. [CrossRef]
56. Martin, C.J.; Magee, J.S. Assessment of eye and body dose for interventional radiologists, cardiologists, and other interventional staff. *J. Radiol. Prot.* **2013**, *33*, 445–460. [CrossRef]
57. Imai, S.; Akahane, M.; Ogata, Y.; Tanki, N.; Sato, H.; Tameike, K. Occupational eye lens dose in endoscopic retrograde cholangiopancreatography using a dedicated eye lens dosimeter. *J. Radiol. Prot.* **2021**, *41*, 579–589. [CrossRef]
58. Inaba, Y.; Hitachi, S.; Watanuki, M.; Chida, K. Radiation Eye Dose for Physicians in CT Fluoroscopy-Guided Biopsy. *Tomography* **2022**, *8*, 438–446. [CrossRef]
59. Inaba, Y.; Nakamura, M.; Chida, K.; Zuguchi, M. Effectiveness of a novel real-time dosimeter in interventional radiology: A comparison of new and old radiation sensors. *Radiol. Phys. Technol.* **2018**, *11*, 445–450. [CrossRef]
60. Chida, K.; Kato, M.; Inaba, Y.; Kobayashi, R.; Nakamura, M.; Abe, Y.; Zuguchi, M. Real-time patient radiation dosimeter for use in interventional radiology. *Phys. Med.* **2016**, *32*, 1475–1478. [CrossRef]
61. Haskal, Z.J.; Worgul, B.V. 2004 Interventional radiology carries occupational risk for cataracts. *RSNA News.* **2004**, *14*, 5–6.
62. Ainsbury, E.A.; Bouffler, S.D.; Dörr, W.; Graw, J.; Muirhead, C.R.; Edwards, A.A.; Cooper, J. Radiation cataractogenesis: A review of recent studies. *Radiat. Res.* **2009**, *172*, 1–9. [CrossRef]
63. Nakamura, M.; Chida, K.; Zuguchi, M. Novel Dosimeter Using a Nontoxic Phosphor for Real-Time Monitoring of Patient Radiation Dose in Interventional Radiology. *AJR Am. J. Roentgenol.* **2015**, *205*, W202–W206. [CrossRef]
64. Nakamura, M.; Chida, K.; Zuguchi, M. Red emission phosphor for real-time skin dosimeter for fluoroscopy and interventional radiology. *Med. Phys.* **2014**, *41*, 101913. [CrossRef]
65. Diagnostic Reference Level in Japan (2020 Version). Available online: http://www.radher.jp/J-RIME/report/JapanDRL2020_jp.pdf (accessed on 1 November 2022).

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

PCI 術者の水晶体線量のリアルタイム測定に関する初期検討

加藤　聖規[1)]*，藤沢　昌輝[1)]，服部　兼進[1)]，山田　歩実[1)]，芳賀　喜裕[1,2)]，
加賀　勇治[2)]，阿部　美津也[2)]，稲葉　洋平[1,3)]，千田　浩一[1,3)]

1）東北大学大学院医学系研究科　放射線検査学分野　　2）仙台厚生病院　放射線部
3）東北大学災害科学国際研究所　災害放射線医学分野

論文受付日：2022年12月６日，受理日：2023年４月10日

Initial Considerations for Real-Time Measurement of Lens Dose in PCI Surgeons

Toshiki KATO[1)]*, Masaki FUJISAWA[1)], Kenshin HATTORI[1)], Ayumi YAMADA[1)], Yoshihiro HAGA[1,2)], Yuji KAGA[2)], Mitsuya ABE[2)], Yohei INABA[1,3)], Koichi CHIDA[1,3)]

1）Department of Radiological Technology, Graduate School of Medicine, Tohoku University
2）Department of Radiology, Sendai Kousei Hospital
3）Division of Disaster Medicine, International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

The Regulations for the Prevention of Ionising Radiation Hazards have been revised in 2021. In line with this, lens equivalent dose management's importance is increasing in Japan. Therefore, we assessed and analyzed the lens dose of six percutaneous coronary intervention（PCI）surgeons in real-time using a new type of personal dosimeter. We found that the dose rates varied according to the different X-ray irradiation directions, the surgeon's face position, and the ceiling protective plate. In addition, the percentage of incorrect use of the ceiling protective plate could be calculated. This study showed the value of real-time analysis and the need to pay attention to the conscious use of the ceiling protective plate.

Key words: PCI, eye lens dose, occupational dose

［doi:10.11269/jjrsm.22.10］

1.　序論

令和２年の高血圧性のものを除いた心疾患による死亡者数は20万人を超え，死因の約15％を占めている[1)]．心疾患は加齢がリスク因子となっており[2)]，これらの治療は超高齢社会を迎えた日本の重要な課題となっている．心疾患の治療法の一つとしてPCI（経皮的冠動脈インターベンション）があげられる．PCIとは大腿動脈や橈骨動脈などを通して2～3 mm径ほどの筒状カテーテルを血管内に入れ，X線イメージングや造影剤などを利用して画像ガイド下で検査，治療を行う処置である．PCIは開胸手術と比べて低侵襲であることから，高齢者にも優しく，多くの施設で行われている．しかし，複雑な手技においてもPCIが用いられることが多くなり，手技時間が延長している．これにより，手技中の撮影回数や透視時間が増加しており，術者を中心としたスタッフや患者の被ばく線量の増加が問題となっている[3-5)]．患者においては皮膚障害が報告され[6)]，スタッフにおいては水晶体の混濁が報告されている[7-8)]．これを受け，国際放射線防護委員会（ICRP）は2011年に職業被ばくにおける眼の水晶体の等価線量限度を「5年平均で20 mSv/年，かついずれの1年においても50 mSvを超えない」と勧告した[9)]．従来の同等価線量限度は1年間で150 mSvであったため，線量限度の大幅な引き下げが行われており，ICRPも職業被ばくを重要な課題として認識していることがわかる．上記の理由より，PCIを行う医療従事者の職業被ばくに関する研究は数多く行われている[10-21)]．日本においてもこのICRPの勧告を受け，電離放射線障害防止規則を改正し，線量限度を2021年4月より2023年3月まで1年間につき50 mSvとした[22)]．これにより，本邦においても被ばく線量管理の重要性が高まっている．

現在，熱ルミネッセンス線量計を用いるもの[15)]，や光刺激ルミネッセンス線量計を用いるもの[16)]，従来の半導体線量計を用いるもの[12)]など様々な線量計を用いて被ば

*〒980-8575　宮城県仙台市青葉区星陵町 2-1
東北大学　大学院医学系研究科　放射線検査学分野
電話番号　022-717-7943
メールアドレス　chida@med.tohoku.ac.jp

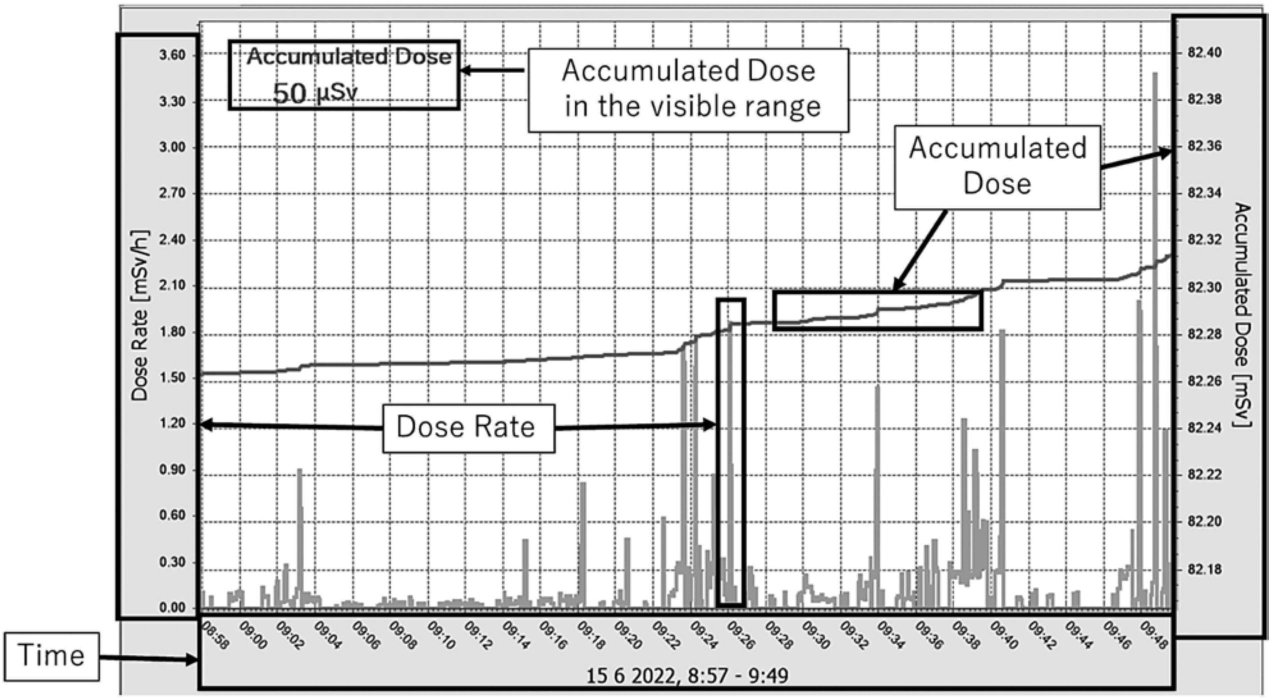


Fig. 1　RaySafe Dose Viewer review (Screenshot)

く線量計測が行われているが，これらは積算線量を計測している．積算線量では，実臨床での手技中でどのような行動が被ばく線量増加因子となるのかを判断ができない．そこでリアルタイム線量計を用いて経時的な線量評価を行う必要がある．リアルタイム線量計を用いた研究として，頸部位置にリアルタイム線量計を設置し，リアルタイムでの線量率表示による被ばく低減を試みたものはある[18–19]が，水晶体位置に線量計を設置し，手技 1 件ごとに，手技中の水晶体被ばく線量増加に関わる行動評価を行った報告はまだない．

そこで本研究では，新型半導体リアルタイム線量計を用いて，PCI を行う術者の，水晶体のリアルタイムでの被ばく線量測定と手技中の線量増加に関わる行動について初期的な検討を行った．

2.　方法

2–1　測定方法

リアルタイム被曝測定システム RaySafe i3（RaySafe 社）を使用した．i3 の個人線量計（以降 i3 と呼ぶ）のサイズは40×58×17 mm，34 g である．i3 の角度依存性は良好であり，後方散乱の影響，取り付ける位置や向きによる違いは少ないと考えられる．また，30 keV～120 keV のエネルギー範囲での測定が保証されており，線量範囲は40 μSv/h～500 mSv/h である．リアルタイムでの測定が可能であり，積算線量，線量率がディスプレイ上に表示される．このときの線量率は 1 秒間あたりの線量である[23]．また，i3 とコンピュータを接続し，専用の解析ソフトである RaySafe Dose Viewer を用いることで詳細な線量データを確認することができる．実際に Dose Viewer を用いた様子を Fig. 1 に示す．黄色の線が左の縦軸と対応しており，線量率を示している．青色の線が右の縦軸と対応しており，積算線量を示している．横軸は時間を示しており，経時的な解析が可能である．リアルタイム線量計を用いて水晶体被ばく線量を計測している研究は，被験者の左こめかみ付近に線量計を装着しているため[24]，同様にこの i3 を術者の左水晶体近傍（左側頭部の左眼付近）に取り付けた．術者の内，複数名は防護眼鏡を使用していたが，本研究では左側頭部に線量計を装着しているため，防護眼鏡の外側の被ばく線量を測定している．また i3 は 1 cm 線量当量を計測しているが，これらを水晶体線量（Eye lens dose）とみなし，解析を行った．使用した X 線装置は Infinix Celeve-I INFX-8000V（東芝メディカルシステムズ社製）である．透視パルスレートは7.5 p/s，撮影フレームレートは10 f/s で手技を行った．i3 の装着図及び手技中の簡単な配置図を Fig. 2 に示す．線量ディスプレイは術者が確認できない位置に置いていた．測定を行った手技は無作為に選ばれた 9 件である．治療部位は右冠動脈（RCA）が 5 件，左前下行枝（LAD）が 3 件，LAD と回旋枝（LCX）を同時に治療した手技が 1 件であった．このうち，右冠動脈治療で左橈骨動脈アプローチ（Left radial）による手技が 4 件，右大腿動脈アプローチ（Right femoral）による手技

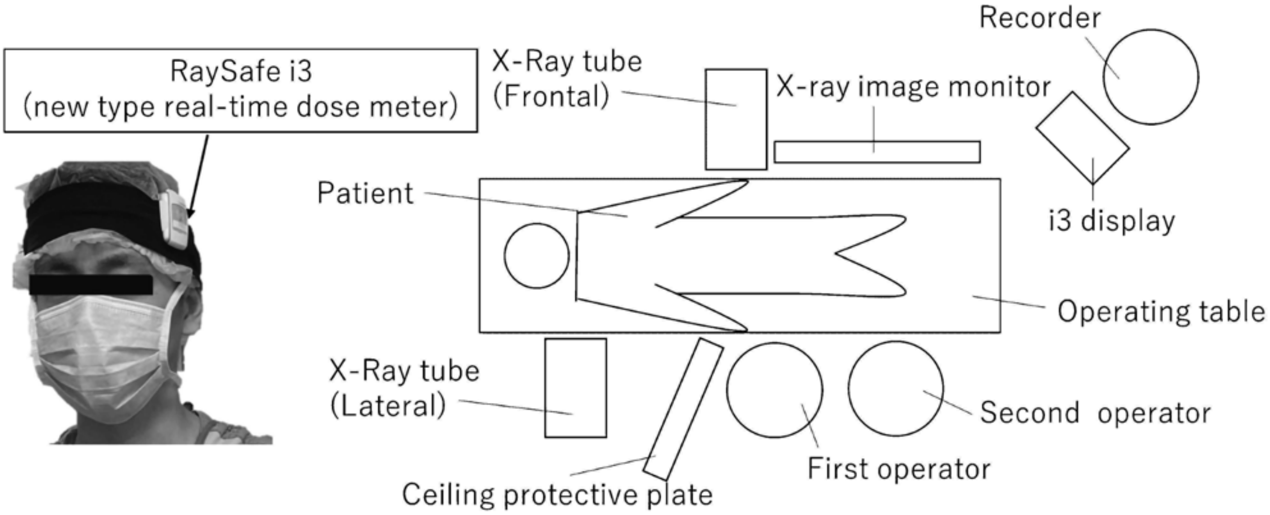


Fig. 2　Front image of wearing RaySafe i3 (Left) and position of the person when performing PCI (Right)

Table 1　Basic patient information.

Procedure NO.	Sex	Age[years]	Height[cm]	Weight[kg]	BMI[kg/m^2]
Procedure 1	Female	77	152	59.7	25.8
Procedure 2	Male	71	159	54.0	21.4
Procedure 3	Female	56	175	87.0	28.4
Procedure 4	Male	84	173	65.5	21.9
Procedure 5	Male	67	164	83.0	30.1
Procedure 6	Male	71	164	65.4	24.3
Procedure 7	Male	62	170	82.0	28.4
Procedure 8	Male	78	160	67.0	26.1
Procedure 9	Female	74	153	55.0	23.5
Average(±SD)		71.1(±8.6)	163.3(±8.2)	68.7(±12.4)	25.6(±3.2)

が1件であった．左前下行枝の治療においては，すべてにおいて左橈骨動脈アプローチであり，前下行枝と回旋枝を同時に行った治療のみ，右橈骨動脈アプローチ(Right radial)であった．なお，実験に参加した術者(first operator)は(A～F)の6人であった．患者の平均年齢は71.1±8.6歳，平均身長は163.3±8.2 cm，平均体重は68.7±12.4 kg，平均BMIは25.6±3.2 kg/m^{2}であった．このうち，女性患者は2名，男性患者は7名である(Table 1)．

2-2　分析方法

手技後にビデオカメラを用いて撮影した手技の様子と術者の水晶体近傍に設置したi3に記録されている線量データをDose Viewerを用いて確認した．透視，撮影時の術者の顔の位置をFig. 3に示す3パターンに分けた．赤色の矢印で示す線を基準線(Baseline)とし患者に近い場合を前(near)，患者に遠い場合を後(far)，その中間であるものを中(middle)と分けた．また，天吊り防護板の位置が水晶体位置(i3の位置)を完全に覆えており，かつ患者の近くに置いている場合をCase1，両方ができていない場合をCase3，どちらかができている場合をCase2と分け，その際の線量率を確認した(Fig. 4)．

また，統計解析ソフトとしてJMP Pro 16.2 (SAS Institute社)を使用した．PCIは様々な方向から撮影を行うが，今回は右前斜位—尾頭方向撮影(RAO-Caudal)と右前斜位—頭尾方向撮影(RAO-Cranial)と左前斜位—尾頭方向撮影(LAO-Caudal)と左前斜位—頭尾方向撮影(LAO-Cranial)の4方向に分類し，解析を行った(Fig. 5)．RAO-CaudalとRAO-Cranialの線量率差及びLAO-CaudalとLAO-Cranialの線量率差の2群間比較をWilcoxon検定にて行い，p値で評価した．また，術者頭部位置による3群間の比較及び，防護板の位置による3群

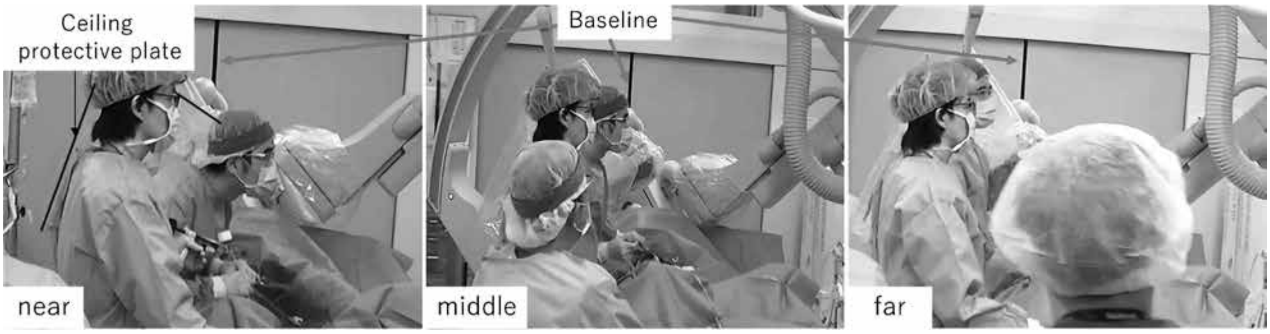


Fig. 3　Position of operator's head (Left: near, Middle: middle, Right: far)

Fig. 4　Position of ceiling protective plate (Left: Case1, Middle: Case2, Right: Case3)

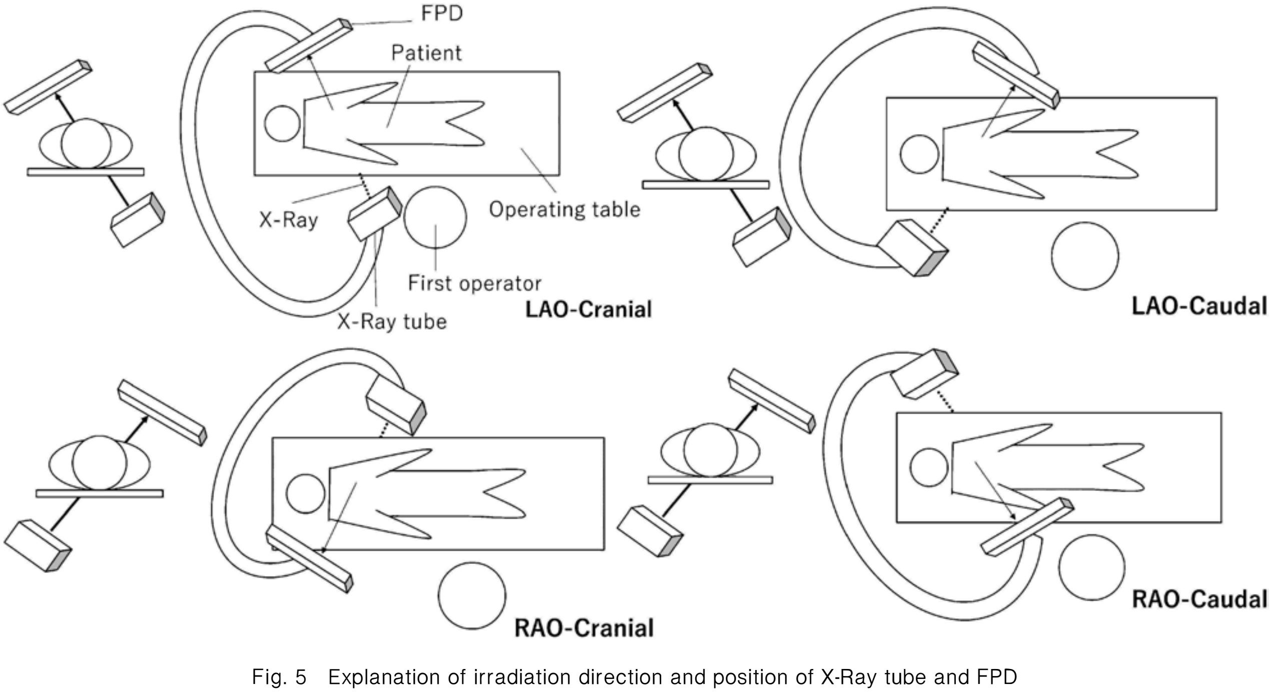


Fig. 5　Explanation of irradiation direction and position of X-Ray tube and FPD

間比較に Kruskal-Wallis 検定を用い，p 値が0.05未満であった場合，有意差があると判断した．Kruskal-Wallis 検定において，有意差ありと判断した場合，多重比較法として Steel-Dwass 検定を使用した．

3.　結果

3-1　線量データと手技の様子による解析

手技毎の術者，治療部位，アプローチ方法，左水晶体線量を Table 2 に，手技毎の撮影時線量と透視時線量の

Table 2　Information on procedures performed and their accumulated dose.

Procedure NO.	Operator	Treatment	Approach	Left eye lens dose [μSv]
Procedure 1	A	LAD	Left radial	62.2
Procedure 2	B	RCA	Left radial	113
Procedure 3	B	RCA	Right femoral	118.3
Procedure 4	C	RCA	Left radial	119.8
Procedure 5	A	LAD	Left radial	175.3
Procedure 6	A	RCA	Left radial	42.4
Procedure 7	D	RCA	Left radial	292.9
Procedure 8	E	LAD	Left radial	66.9
Procedure 9	F	LAD LCX	Right radial	50.4
			Average(±SD)	115.7(±78.9)

Table 3　Comparison of radiation dose and fluoroscopy dose.

Procedure NO.	Radiation dose [μSv]	Radiation dose rate [%]	Fluoroscopy dose [μSv]	Fluoroscopy dose rate [%]
Procedure 1	24	38.6	38.2	61.4
Procedure 2	30	26.5	83	73.5
Procedure 3	54	45.6	64.3	54.4
Procedure 4	30	25.0	89.8	75.0
Procedure 5	73	41.6	102.3	58.4
Procedure 6	26	61.3	16.4	38.7
Procedure 7	31	10.6	261.9	89.4
Procedure 8	18	26.9	48.9	73.1
Procedure 9	24	47.6	26.4	52.4
Average(±SD)	34.4(±17.6)	36.0(±15.1)	81.2(±73.8)	64.0(±15.2)

割合を Table 3 に示す．左水晶体線量の累積線量の平均値は126.7±75.9 μSv であり，中央値は118.3 μSv であった．撮影時線量の平均値は34.4±17.6 μSv であり，中央値は30 μSv であった．撮影時線量を透視時線量と撮影時線量の和で除したものを撮影時線量割合とすると，その平均値は36.0±15.2％であり，中央値は38.6％であった．

3-2　照射方向の関係

照射方向の違う撮影による線量率差につい Wilcoxon 検定を行った．Frontal 管の照射方向が RAO-Caudal と RAO-Cranial のものを比較し，Lateral 管の照射方向が LAO-Caudal と LAO-Cranial のものを比較した．結果を Fig. 6 に示す．Frontal 管の角度による比較では，$p<0.01$と有意差が認められ，RAO-Caudal 方向を含む撮影のほうが線量率は低い結果となった．Lateral 管の比較では，$p=0.8395$となり，有意差は認められなかった．

3-3　術者・防護板位置による解析

手技毎の撮影時の術者位置，天吊り防護板の位置の関係を調査した．術者の顔の位置による線量率の分布を Fig. 7 に，天吊り防護板位置による線量率の分布を Fig. 8 に示す．Kruskal-Wallis 検定において，ともに$p<0.01$となり，両分布で有意差が認められた．そこで，Steel-Dwass 検定を行った．PCI 術者の顔の位置による線量率差では，すべての組み合わせで$p<0.01$となり，すべての組み合わせで有意差が認められた．術者の顔の位置が前の場合の線量率の中央値は3.41 mSv/h，中の場合の中央値は2.46 mSv/h，後の場合の線量率の中央値は1.16 mSv/h であった．天吊り防護板位置による線量率差では，Case1 と Case2 において$p<0.01$となり，Case1 と Case3 および Case2 と Case3 においてともに p

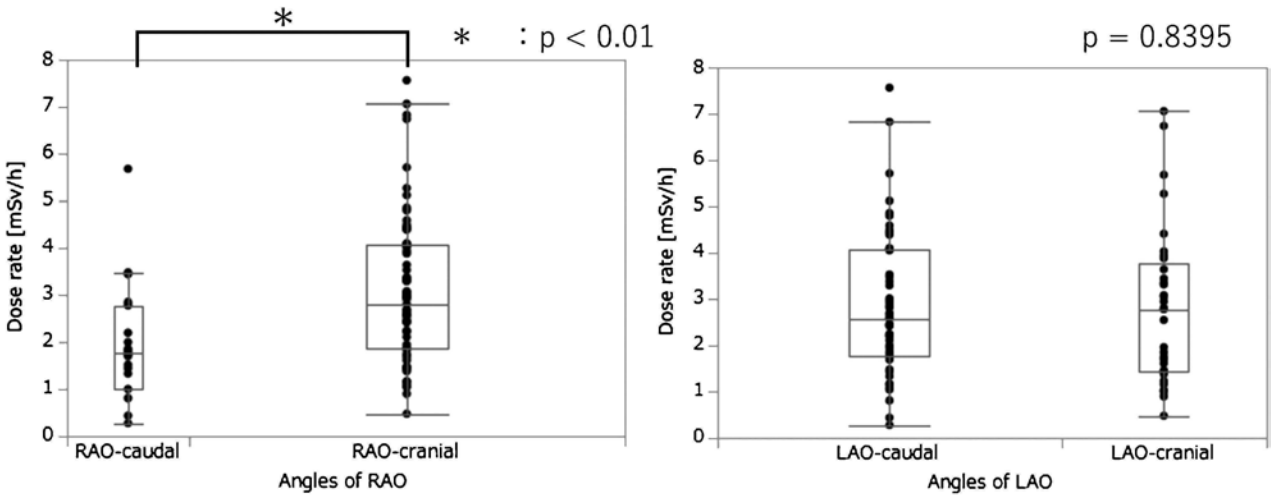


Fig. 6　Investigation of dose rate differences due to different irradiation directions. The result between RAO-caudal and RAO-cranial is left. Right is the result between LAO-caudal and LAO cranial.

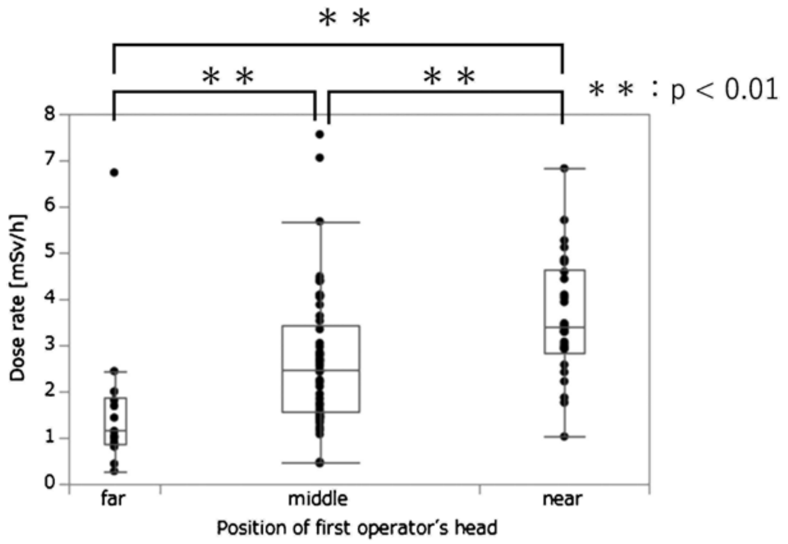


Fig. 7　Relationship between dose rate and position of first operator's head (Examples of head positions: Fig. 4)

＜0.05となり，すべての組み合わせで有意差が認められた．また，Case1 の線量率の中央値が1.16 mSv/h，Case2 の線量率の中央値が3.17 mSv/h，Case3 の線量率の中央値が2.06 mSv/h であった．

4.　考察

今回は，新型半導体リアルタイム個人線量計である i3 を用いて，被ばく線量計測を行った．i3 を用いた研究として，リアルタイムモニタリングを行うことで，PCI 術者の被ばく線量低減を試みているものはある[18–19]が，手技を 1 件ごとに解析することで，被ばく線量増加の原因を評価しているのは，本研究が初めてである．また，天吊り防護板の使用率を経時的な線量率の変化と共に評価している研究は未だにない．

4–1　線量データと手技の様子による解析

本研究で得られた術者の水晶体被ばく線量の最大値は 292.9 μSv であり，最小値は42.4 μSv であった．術者，手技内容により水晶体被ばく線量が大きく変わるため，それぞれに合わせた放射線防護対策が必要であり，今後も被ばく線量増加に繋がる行動を詳細に検討する必要がある．また，今回の解析では，撮影線量は全体の線量の約 3 分の 1 を占めており，撮影枚数が増加するにつれて被ばく線量がそれ以上の値になることが予想される．そのため，撮影時にはより被ばく防護に意識を向ける必要がある．

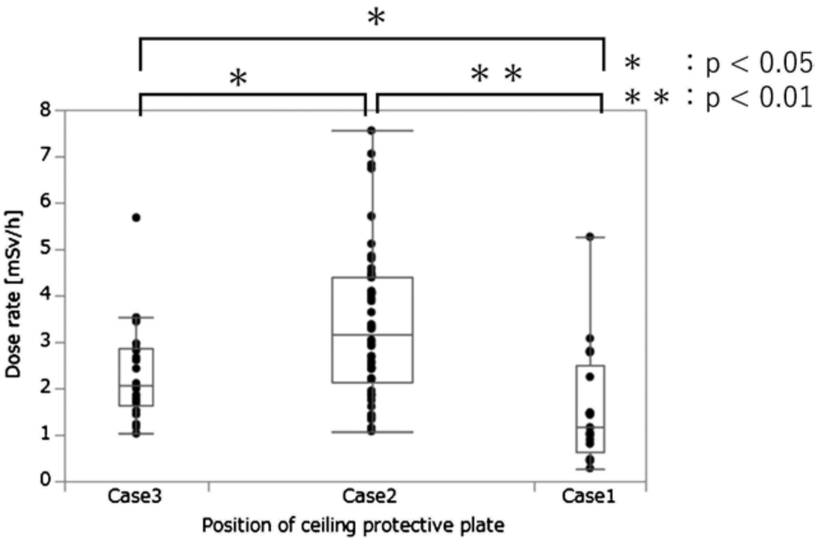


Fig. 8　Relationship between dose rate and position of ceiling protective plate (Example of ceiling protective plate positions: Fig. 5)

4–2　照射方向による線量率差の考察

照射方向に RAO-Caudal を含んだ撮影においては，RAO-Caudal を含まない撮影よりも線量率が低くなる結果となった．Tarighatnia らは，冠動脈造影検査を行う一人の術者に注目し，大腿動脈アプローチと橈骨動脈アプローチの被ばく線量差についての研究を行ったが，照射方向が RAO-caudal の際に術者の被ばく線量が低下したことを示した[17]．本研究でも RAO-Caudal 方向の撮影において術者の被ばく線量が低くなるという結果となった．先行研究では，術者の経験による偏りを防ぐため，術者 1 人のみを対象としていたが，本研究結果によって，この方向では術者の経験によらず被ばく線量が低下することが示唆された．これは，RAO-Caudal 方向にしている X 線管（Frontal）と連動しているフラットパネルディテクタ（FPD）が遮蔽体となり，患者からの散乱線を減少させたためであると考えられる．

4–3　術者の顔の位置による線量率差の考察

術者の顔の位置の線量率を比較すると，Fig. 7 に示すように，顔の位置が患者に近いほど有意に線量率が増加していることがわかった．特に，術者の顔の位置が前にある場合の線量率の中央値と，後にある場合の線量率には約2.94倍の差が生じている．Chida らのイメージングインテンシファイアと FPD の違いによる術者被ばく線量と入射表面線量の比較による研究[10]や，2021年に日本循環器学会により改定された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[19]によると，医療従事者の被ばく線量の多くは患者から発生する散乱線であるとされており，本研究の術者の顔の位置による線量率差も散乱線源である患者に近づいたためであると考えられる．また，前かがみになることで天吊り防護板の防護範囲から外れてしまい，散乱線を受けやすくなることも線量率増加の一因であると考えられる．天吊り防護板の位置による線量率では，天吊り防護板が適切に入っている場合に有意に線量率が低いことがわかった．これにより，前かがみになるなど，術者の何気ない行動が被ばく線量増加に繋がってしまうため，被ばく線量を低減するためには，天吊り防護板の適切な利用が重要であることが示された．

4–4　天吊り防護板の使用効果

天吊り防護板の使用状況は，Case1 が24.7％，Case2 が56.2％，Case3 が19.1％であった．本研究では，Case2 の線量率の中央値と Case3 の線量率の中央値で Case3 の中央値のほうが低い結果となった．これは，大きく二つの原因が考えられる．一つは患者の BMI である．BMI が高いと，画像を得るに必要な X 線量が増加し，それに伴い，発生する散乱線も増加する．本研究では BMI が高い患者の手技において Case2 と分類された場合が多かったため，線量率が高くなってしまったと考えられる．対して Case3 の割合が高い手技では，BMI が低い傾向にあり，これにより線量率差が生じたと考えられる．二つ目はアプローチ手段の違いである．本研究の手技では，術者が患者の右側に立っており，左橈骨動脈アプローチと右橈骨動脈アプローチでは，散乱線源である患者との距離に違いが生じる．右橈骨動脈アプローチのほうが患者との距離が遠いため，被ばく線量が低くなる傾向にある．よって右橈骨動脈アプローチを行った手技 9 中の Case3 の線量率が，その他のアプローチによる手技の Case2 と比べて低くなったと考えられる．今回分類した Case の中では，Case1 が最も適した防護ができている状態であると考え，これを基準とし，線量低減効

果を計算した．Case1 の線量率の中央値は1.16 mSv/h であり，これを Case2，Case3 の線量率の中央値である 3.17 mSv/h，2.01 mSv/h で除すると，Case2 の場合，0.366，Case3 の場合，0.582となる．よって Case2 では約63.4％，Case3 では，約42.8％の線量低減がされていた．富田らの研究で，血管撮影装置を用いて，術者位置を想定し，防護板の有無による遮蔽率を測定したファントム実験では，天吊り防護板による低減効果が33.3％とされている[25]．本研究により，天吊り防護板の有無だけでなく，天吊り防護板の位置で放射線防護効果が大きく変化することが示された．

4-5　天吊り防護板の不適切利用率について

実臨床において，リアルタイム線量計を用いて線量計測を行ったことにより，天吊り防護板の不適切利用率を算出することが可能となった．

手技 1～9 の撮影時における天吊り防護板の不適切使用率は Table 4 のようになった．この不適切使用率は天吊り防護板の位置が Case2（やや不適切），Case3（不適切）となった撮影回数の和を総撮影回数で除した値である．不適切使用率の平均値は78.4±24.5％であり，中央値は92.9％であった．全体として不適切利用率が高い値であるといえ，これは天吊り防護板の位置を直す頻度が低いことが原因であると考えられる．天吊り防護板が手技の邪魔になり一時的にずらすが，その後しばらく透視，撮影を行ってから天吊り防護板の位置を調整することが多かった．したがって，こまめに天吊り防護板の位置を調整することで，被ばく線量を低減できると考えられる．特に，PCI 術者は手技に集中しているため，セカンドオペレーターや，放射線技師などが率先して位置調節に動くことが重要であると思われる．天吊り防護板の利用状況は従来の個人線量計では得ることができないため，リアルタイム測定ならではの結果であるといえ，この結果を術者にフィードバックすることで放射線防護教育という観点からも高い効果を発揮できると考える．

総じて，リアルタイムによる被ばく線量計測の有用性と天吊り防護板の適切利用の重要性が提示されたと思われる．しかし，天吊り防護板が適切に使用されているように見えても，線量率が高くなってしまうこともあるため，今後も詳細な検討を続けていく必要がある．なお，本研究は 1 施設のみを対象としており，また手技件数が少ないため，今後さらに症例数を増やして検討を行いたい．

Table 4　Percentage of incorrect use of ceiling protective plate.

Procedure No.	Percentage of incorrect use of ceiling protective plate [%]
Procedure 1	44.4
Procedure 2	100
Procedure 3	93.3
Procedure 4	60
Procedure 5	92.9
Procedure 6	100
Procedure 7	100
Procedure 8	75
Procedure 9	40
Average (±SD)	78.4 (±24.5)

5.　結論

PCI を行う術者の水晶体被ばく線量を，リアルタイム線量計を用いて評価した．撮影時に透視時と比べて被ばく線量，線量率が高くなることが示された．また，X 線画像モニターを確認する際や，手技に集中して前かがみになる際に線量率が増加する傾向がみられた．術者の顔の位置が前にある場合と後ろにある場合とで，約2.94倍の線量率差が生じていた．前かがみになることで，検出器や眼が，天吊り防護板の遮蔽範囲からはずれてしまい，線量率が増加したと考えられる．したがって，セカンドオペレーターや，放射線技師がこまめに天吊り防護板の位置を調節することで，PCI 術者の被ばくを低減できると考えられる．RAO-Caudal 方向を含んだ撮影時は，RAO-Caudal 方向を含まない撮影よりも有意に線量率が低くなった．この理由として，FPD が遮蔽体となり，患者からの散乱線を低減している可能性が示唆された．天吊り防護板の不適切使用率の平均値は78.4％程度と高い値であった．よって，意識的に天吊り防護板を使用するようにしなければならない．また，本検討では，撮影時の線量を主に扱ったが，透視時の線量が撮影時の線量と比べて多くなった．したがって，今後は，透視時の被ばく線量も検討していく必要がある．

謝辞

本研究の一部は，厚生労働省労災疾病臨床研究事業費補助金（200701-1）の支援を受けて行った．

また，本研究は仙台厚生病院で実施させて頂いた．ご協力頂いた医師の皆様に深く感謝申し上げます．

なお，本論文の内容の一部は第 4 回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同大会にて発表した．

■文　献

1）厚生労働省：令和２年（2020）人口動態統計月報年計（概数）の概況　結果の概要
https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/geppo/nengai20/dl/kekka.pdf
（閲覧日　Feb. 18, 2022）

2）上嶋健治，平盛勝彦：高齢者の循環器病：加齢が虚血性心疾患の発症に及ぼす影響，日本循環器予防学会誌，36（3），170–173（2001）

3）ICRP Publication 85: Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures, Annals of the ICRP, 30（2），7–67（2000）

4）Rehani MM, Ortiz-Lopez P.: Radiation effects in fluoroscopically guided cardiac interventions—Keeping them under control. Int J Cardiol, 109, 147–151（2000）

5）Vano E et al.: Radiation cataract risk in interventional cardiology personnel. Radiat. Res., 174（4），490–495（2010）

6）Vano E et al.: Skin radiation injuries in patients following repeated coronary angioplasty procedures, Br J Radiol, 74, 1023–1031（2001）

7）Ciraj-Bjelac O et al.: Risk for radiation-induced cataract for staff in interventional cardiology—is there reason for concern?, Catheter. Cardiovasc. Interv, 76（6），826–834（2010）

8）Jacob S et al.: Interventional cardiologists and risk of radiation-induced cataract: results of a French multicenter observational study, Int J Cardiol, 167（5），1843–1847（2013）

9）ICRP Publication 118: ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation on normal tissues and organs—threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context, Annals of the ICRP, 41（1–2），116–139, 293–302（2012）

10）Chida K et al.: Physician-received scatter radiation with angiography systems used for interventional radiology: comparison among many X-ray systems, Radiat Prot Dosimetry, 149（4），410–6（2012）

11）Ciraj-Bjelac O, Rehani M.: Eye dosimetry in interventional radiology and cardiology: currentc hallenges and practical considerations, Radiat. Prot. Dosim, 162（3），329–337（2014）

12）Abdelaal E et al.: Interventional Cardiologists at Quebec Heart-Lung Institute.: Effectiveness of low rate fluoroscopy at reducing operator and patient radiation dose during transradial coronary angiography and interventions, JACC Cardiovasc Interv, 7（5），567–574（2014）

13）Kallinikou Z et al.: Radiation Exposure of the Operator During Coronary Interventions（from the RADIO Study），Am J Cardiol, 118（2），188–194（2016）

14）Domienik J et al.: The impact of various protective tools on the dose reduction in the eye lens in an interventional cardiology-clinical study, J Radiol Prot, 36（2），309–318（2016）

15）Haga Y et al.: Occupational eye dose in interventional cardiology procedures, Sci Rep, 7（569），1–7（2017）

16）Krisanachinda A et al.: The current status of eye lens dose measurement in interventional cardiology personnel in Thailand, Radiol Phys Technol, 10（2），142–147（2017）

17）Tarighatnia A et al.: Beam projections and radiation exposure in transradial and transfemoral approaches during coronary angiography, Anatol J Cardiol, 18（4），298–303（2017）

18）Olschewski M et al.: Effectiveness of a Real-Time X-ray Dosimetry Monitor in Reducing Radiation Exposure in Coronary Procedures: The ESPRESSO-Raysafe Randomized Trial, J Clin Med, 10（22），5350（2021）

19）Murat D et al.: Effects of Real-Time Dosimetry on Staff Radiation Exposure in the Cardiac Catheterization Laboratory, J Invasive Cardiol, 33（5），337–341（2021）

20）Chida K.: What are useful methods to reduce occupational radiation exposure among radiological medical workers, especially for interventional radiology personnel?, Radiol Phys Technol, 15（2），101–115（2022）

21）日本循環器学会ほか：2021年改訂版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
https://www.j-circ.or.jp/cms/wp-content/uploads/2021/03/JCS2021_Kozuma.pdf
（2021）（閲覧日　Jan. 29, 2023）

22）厚生労働省：令和２年厚生労働省令第82号　改正電離則
https://www.mhlw.go.jp/content/11300000/000689525.pdf
（閲覧日　Feb. 21, 2022）

23）RaySafe™: RaySafe i3 Instructions for Use, Stand-alone Display
https://www.raysafe.com/sites/default/files/5001106-RaySafe-i3-IFU-3.30.pdf
（閲覧日　Feb. 22, 2022）

24）Wilson-Stewart KS et al.: Taller staff occupationally exposed to less radiation to the temple in cardiac procedures, but risk higher doses during vascular cases, Sci Rep, 10（1），（2020）

25）富田博信：医療分野における放射線防護と被ばく低減効果，https://www.mhlw.go.jp/content/11201000/000477107.pdf，厚生労働省，第２回 眼の水晶体被ばく限度の見直しに関する検討会，資料 6,（2019）（閲覧日　Jan. 28, 2023）

労災疾病臨床研究事業

分担研究報告書【総合（令和 2 年度～令和 4 年度）】

眼の水晶体の放射線防護に資する機材開発推進および被ばく低減のための多角的研究

（200701-01）

労働衛生の 5 管理に則った多角的被ばく低減対策

研究分担者　盛武　敬（国立研究開発法人　量子科学技術研究開発機構/量子生命・医学部門　放射線医学研究所　放射線規制科学研究部　部長）

研究協力者　喜多村　紘子（産業医科大学実務研修センター）、栗山　知子（産業医科大学産業保健学部産業・地域看護学）、茂呂田　孝一（新小文字病院・産業医科大学訪問研究員）、中上　晃一（産業医科大学病院放射線部）、永元　啓介（産業医科大学病院放射線部）、人見　剛（川崎医科大学附属病院中央放射線部）、松崎　賢（新小文字病院放射線科）

研究要旨

令和 2～4 年度において、当該研究分担では、眼の水晶体の被ばく状況の実態を把握するとともに、労働衛生の 5 管理（労働衛生管理体制の確立、作業環境管理、作業管理、健康管理、労働衛生教育）に則った放射線防護に資する機材開発および被ばく低減のための多角的研究を行った。主に 6 課題について実施し、有用な成果を得ることができた（査読付き英語論文:3、和文学術誌:4）。以下に、6 課題についての要旨を示す。

1．水晶体等価線量が定常的に 20 mSv/年を超える医師の実態調査（作業環境管理）：一般的に、放射線被ばくが高いといわれている IVR を行う医師の実態を明らかにした。対象医師の過去 4 年間（2016-2019 年）における水晶体等価線量の推移を調査した結果、2016-2018 年の年間水晶体等価線量は 40 mSv を超えていた。いっぽう、2019 年は、天井懸架型防護板を効果的に使用することで、水晶体等価線量は 50%近くまで低減できていた。しかし、依然として年間 20mSv を超えているため、今後、さらなる防護方策を講じる必要がある。

2．水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査（健康管理）：医療施設で放射線診療に従事する者が受けている眼の水晶体被ばくの実態を詳細に把握し、白内障（水晶体混濁）との関連を明らかにすることを目的とした。2020-2021 年の日本脳神経血管内治療学会において、水晶体混濁調査を実施した。調査協力に承諾を得られた参加者に、視力検査、散瞳下での細隙灯顕微鏡検査および簡易型徹照カメラでの水晶体撮影を実施し、それらの総合的な所見から、放射線白内障の主病、副病型に関する解析、判定を行った。また、職業歴、放射線診療の経験年数、被ばく線量情報も聴取した。今後、水晶体被ばくを低減するための放

射線防護装置開発に関連する工業団体等との情報交換に資する研究データ収集・研究フィールドの開拓に繋げていく。

3. オーバーテーブル透視装置用の放射線防護カーテンの開発と効果の検証(作業管理):日本で広く普及しているオーバーテーブル透視装置用の放射線防護具として、既存の丈の長い放射線防護カーテン(ロングカーテン)の汎用性の低さを改善した丈の短い放射線防護カーテン(ショートカーテン)を開発し、その水晶体線量低減効果を検証した。その結果、ロングカーテンおよびショートカーテンの水晶体線量低減率は、それぞれ 88.9%、17.7%となり、ロングカーテンの方が高かったが、集団水晶体等価線量低減率は、それぞれ 9.8%、17.7%と、ショートカーテンの方が高くなった。汎用性の高いショートカーテンを導入することで、透視手技全般の集団水晶体等価線量の低減効果が期待できた。

4. Augmented Reality Technology を活用した血管造影検査室の天井懸架型防護板の正しい使い方教育アプリケーションの開発とその評価(労働衛生教育):血管造影検査室の散乱線分布を AR(Augmented Reality)技術で可視化させ、天井懸架型防護板を効果的に使用する技術を学習するための AR アプリケーションを作成し、その有用性を検証した。散乱線分布は、蛍光ガラス線量計(GD-302M)を用いて測定し、その結果のカラーマップを AR で表現したのちに、アプリとして iPad にインストールした。それを医療スタッフに学習させ、評価として 5 段階の無記名式質問紙調査(ARCS 動機づけモデルに基づく学習意欲調査)を行った。結果、下位尺度ごとの平均点は Attention:4.77、Relevance:4.64、Confidence:4.57、Satisfaction:4.69 と高得点となり、職種間の有意差も認められなかった。結論として、血管造影検査室の散乱線を AR アプリケーションで可視化させ、医療スタッフに対して天井懸架型防護板の正しい使用方法を理解させる教材は、動機づけの観点から高い評価を得た。

5. インターベンショナルラジオロジー医師に対する術前ブリーフィングが個人線量計および個人保護装具の使用に与える影響(労働衛生教育):IVR を行う医師の個人線量計と個人保護装具の装着率を向上させるための実践的な方策について検証した。まず、装着に関する実態把握した。そして、実践的な方策(介入)として術前ブリーフィングを実施し、装着を促した。介入前期間では、防護衣以外の装着率は総じて低かったが、介入により、装着率は顕著に改善され、ほぼ 100%となった。さらに、実効線量率(実効線量/透視時間)、水晶体等価線量率(水晶体等価線量/透視時間)ともに、統計学的有意に被ばく量が増加し、これまで見逃されていた被ばくが加算されるようになったことと、個人線量計の管理方法が変更されたことに伴う線量算定法の違いと考えられた。

6. 最適な被ばく低減システムと放射線防護機器の提案(作業管理):主として眼の水晶体防護に関連する放射線防護機器として 5 つ(放射線防護眼鏡、天井懸架型防護板、甲状腺プロテクタ、X 線 TV 装置散乱線防護クロス(X 線透視装置用散乱線防護ロングカーテン)、X 線 TV 装置散乱線防護クロス(X 線透視装置用散乱線防護ショートカーテン))を提示し、とりわけ、個人防護装具である放射線防護眼鏡と甲状腺プロテクタについて、使用する意義や特徴について解説した。

A. はじめに

2021 年 4 月 1 日より、眼の水晶体の被ばく線量限度に関する電離放射線障害防止規則の改正が施行、適用された。しかし、特に医療分野においては、眼の水晶体に対する放射線防護の運用に様々な課題を残しているのが現状である。そこで、当該研究分担では、眼の水晶体の被ばく状況の実態を把握するとともに、労働衛生の 5 管理(労働衛生管理体制の確立、作業環境管理、作業管理、健康管理、労働衛生教育)(表 1)[1]に則った放射線防護に資する機材開発および被ばく低減のための多角的研究を行った。

具体的には、以下に挙げる研究計画に記載された 4 つの実施項目 6 課題に着目し、調査ならびに研究を実施した。

放射線防護機材の技術的課題等の情報について調査・収集

1. 水晶体等価線量が定常的に 20 mSv/年を超える医師の実態調査
2. 水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査

放射線防護機材の改良等に関する研究

3. オーバーテーブル透視装置用の放射線防護カーテンの開発と効果の検証

放射線防護教育研究

4. Augmented Reality Technology を活用した血管造影検査室の天井懸架型防護板の正しい使い方教育アプリケーションの開発とその評価
5. インターベンショナルラジオロジー医師に対する術前ブリーフィングが個人線量計および個人保護装具の使用に与える影響

体系的取り纏めと産業保健的アプローチ

6. 最適な被ばく低減システムと放射線防護機器の提案

これらの調査および研究成果について、下記に報告する。

表 1 労働衛生の 5 管理に則った放射線管理。文献[1]より引用。

労働衛生の 5 管理	放射線管理でなすべき内容
1. 労働衛生管理体制の確立	放射線に係る安全管理体制を院内で構築し、放射線 QA 委員会等の設置や統括安全管理責任者、実務担当者の選任など
2. 作業環境管理	放射線診療室内やその周辺の放射線量の計測、個人線量計を用いた実効線量や等価線量の個人モニタリング等の管理など
3. 作業管理	放射線診療の手技毎の手順書の作成や防護用具の整備など
4. 健康管理	放射線診療従事者を対象として、一般定期健康診断に追加する特殊健康診断の実施など
5. 労働衛生教育	放射線診療に従事する者への配置前と定期の教育訓練など

B. 調査、研究

1. 水晶体等価線量が定常的に 20 mSv/年を超える医師の実態調査

IVR(Interventional Radiology)を行う医師の被ばく線量は高いと言われている。とりわけ、水晶体等価線量が 20 mSv/年を超える者が一定数存在することが知られており、その医師の被ばく状況を明らかにすることは、今後の防護方策を講じるためにも必要不可欠である。そこで、作業環境管理として IVR を行う医師の被ばくの実態を明らかにすることを目的とした調査を行った。

方法

調査病院(病床数:214、年間血管造影検査数:250、年間 IVR 数:220)における、水晶体等価線量が 20 mSv/年を超える医師は、1 名のみであった。その医師を対象とし、過去 4 年間(2016−2019 年)の水晶体等価線量、血管造影検査・IVR 件数、および透視時間の推移を調査した。

水晶体等価線量は、不均等被ばく管理(個人被ばく線量計を 2 個使用、電離放射線障害防止規則第 8 条第 3 項第 2 号に該当)で測定した値を採用した。個人被ばく線量計は OSL(Optically Stimulated Luminescence)線量計(ルミネスバッジ、長瀬ランダウア株式会社、日本)を使用した。水晶体等価線量の測定データは、個人被ばく線量報告書より抽出した。1 ヶ月ごとの血管造影検査・IVR 件数、および透視時間は、RIS(Radiological Information System)を利用して抽出した。その際、得られたデータは、主術者、助手、その他といった役割ごとに集計・解析した。

結果

調査対象医師は 2015 年より血管造影検査・IVR などの放射線診療に従事しており、同年 8 月より不均等被ばく管理となったため、2016 年からの調査とした。医師が行った主な放射線診療は、冠動脈造影(Coronary Angiography: CAG)、経皮的冠動脈形成術(Percutaneous Coronary Intervention:PCI)、末梢血管形成術(Endovascular Treatment:EVT)、経皮的動脈塞栓術(Transcatheter Arterial Embolization: TAE)などであった。

2016-2019 年における水晶体等価線量の推移を表 2-5 に示す。2016 年の医師は放射線診療に従事し始めて 2 年目となり、様々な診療を行なっていた。そのため、水晶体等価線量は高く、最大の月間水晶体等価線量は 6.3 mSv であった。年間の水晶体等価線量も 46.0 mSv と非常に高く、1 年あたりの水晶体等価線量限度である 50 mSv に迫る程であった。この傾向は、2017-2018 年も続き、年間の水晶体等価線量は 46.4 mSv、41.6 mSv と非常に高い値で推移をしていた。

2019 年頃より、放射線防護委員会の指導(水晶体等価線量が非常に高い状態であることを通知して自覚を促し、さらに、天井懸架型防護板の効果的な使用法についての講習を実施)が入った。その結果、2018 年より年間件数が 10 件程少ないものの、年間の水晶体等価線量は 23.9 mSv となり、過去 3 年間と比較しても、半分近くまで低減できた。

表 2 2016 年における水晶体等価線量と透視時間・件数の推移

	水晶体等価線量 (mSv)	透視時間(時間)				血管造影検査・IVR件数			
		主術者	助手	その他	合計	主術者	助手	その他	合計
1月	0.9	0.88	0	0	0.88	8	0	0	8
2月	4.0	1.92	0.08	0	2.00	10	1	0	11
3月	0.2	2.50	1.71	0	4.21	20	4	0	24
4月	5.5	5.00	3.09	0.34	8.43	22	5	1	28
5月	2.5	5.16	1.95	0.24	7.35	12	4	1	17
6月	4.1	6.76	1.68	0	8.44	15	3	0	18
7月	5.5	6.91	1.14	0	8.06	21	4	0	25
8月	5.1	3.21	1.24	0.60	5.05	9	1	2	12
9月	4.3	3.44	4.14	0	7.58	12	8	0	20
10月	6.3	4.33	0.56	0.42	5.31	16	2	1	19
11月	4.0	4.63	1.35	0	5.97	15	3	0	18
12月	3.6	1.69	3.25	0	4.94	8	7	0	15
合計	46.0	46.42	20.21	1.60	68.23	168	42	5	215

表 3 2017 年における水晶体等価線量と透視時間・件数の推移

	水晶体等価線量 (mSv)	透視時間(時間)				血管造影検査・IVR件数			
		主術者	助手	その他	合計	主術者	助手	その他	合計
1月	7.0	6.00	1.57	0.66	8.24	20	4	1	25
2月	3.0	4.72	1.86	0	6.57	15	7	0	22
3月	1.9	2.44	1.67	0	4.11	10	4	0	14
4月	6.6	4.04	2.01	0.49	6.54	16	1	1	18
5月	3.4	7.16	3.27	0.73	11.16	15	6	1	22
6月	5.8	11.92	0.22	0	12.14	23	1	0	24
7月	2.8	6.11	0.41	0	6.84	11	1	1	13
8月	5.1	7.76	0.98	0	8.75	19	4	0	23
9月	6.1	5.75	0.65	0	6.40	14	2	0	16
10月	2.2	1.91	0.21	0	2.11	7	1	0	8
11月	1.1	2.25	0.74	0	2.99	12	3	0	15
12月	1.4	0.89	1.04	0	1.94	5	5	0	10
合計	46.4	60.96	14.63	2.20	77.79	167	39	4	210

表 4 2018 年における水晶体等価線量と透視時間・件数の推移

	水晶体等価線量（mSv）	透視時間（時間）				血管造影検査・IVR件数			
		主術者	助手	その他	合計	主術者	助手	その他	合計
1月	2.9	3.41	0.04	0.00	3.45	13	1	0	14
2月	6.3	3.98	3.05	0	7.03	15	8	0	23
3月	2.5	1.96	0.71	0.67	3.34	8	3	1	12
4月	1.5	2.50	2.16	0	4.65	6	2	0	8
5月	3.2	2.12	1.66	0	3.78	11	4	0	15
6月	6.1	3.17	3.63	0	6.80	7	4	0	11
7月	4.5	5.23	0.96	0	6.19	12	2	0	14
8月	4.9	3.59	4.47	0	8.06	12	8	0	20
9月	2.2	2.90	1.27	0	4.16	10	2	0	12
10月	3.0	4.12	1.73	0	5.85	15	4	0	19
11月	1.9	2.91	0.90	0	4.16	8	1	1	10
12月	2.6	4.39	0.49	1.99	6.87	12	1	1	14
合計	41.6	40.27	21.06	3.02	64.36	129	40	3	172

表 5 2019 年における水晶体等価線量と透視時間・件数の推移

	水晶体等価線量（mSv）	透視時間（時間）				血管造影検査・IVR件数			
		主術者	助手	その他	合計	主術者	助手	その他	合計
1月	1.2	1.13	0.70	0.05	1.88	5	1	1	7
2月	3.2	1.84	2.22	0	4.06	10	6	0	16
3月	4.9	8.11	4.45	1.12	13.67	16	6	1	23
4月	2.4	3.98	1.85	0	5.83	12	2	0	14
5月	1.1	2.49	1.48	0	3.97	6	2	0	8
6月	1.2	3.69	0.66	0	4.35	9	2	0	11
7月	0.6	1.51	0.24	0	1.75	7	1	0	8
8月	0.8	2.33	0	0	2.33	9	0	0	9
9月	2.0	3.26	1.35	0	4.61	18	3	0	21
10月	3.4	6.16	0.83	0	6.99	13	3	0	16
11月	2.3	6.92	0.53	0	7.46	12	4	0	16
12月	0.8	1.97	0.05	0	2.02	14	1	0	15
合計	23.9	43.39	14.36	1.17	58.92	131	31	2	164

考察

2016-2018 年の年間の水晶体等価線量は非常に高く、1 年あたりの水晶体等価線量限度である 50 mSv に迫る線量であった。この要因として、2016 年は、放射線診療に従事し始めて経験も少なく、手技に時間を要してしまう症例が散見されたことが挙げられる（主術者時の最大月間透視時間：6.9 時間）。そして経験値を上げるため、放射線診療に従事する件数も増加してしまうであろう。いっぽう、手技に慣れてきた 2017-2018 年は、難しい放射線診療に従事することが多くなったことが要因と推察される。実際、2017 年では、主術者での透視時間が 11.9 時間であった月も認められ、年間の透視時間も調査した 4 年間で一番長く、61.0 時間であった。このように、経験値の上昇に伴い、透視時間が延長する原因が異なるため、被ばく線量が高くなる要因を適切に分析する必要があると考えられる。

これらを受けて、放射線防護に特化した教育を実施した結果、水晶体等価線量は 50％近くまで低減することができた。主術者での年間の透視時間は、2018 年と比較して高いことを考慮すると、天井懸架型防護板を以前より有効に活用できていると推察される。しかし、依然として年間 20 mSv を超えており、今後、さらなる多角的な防護方策を講じる必要がある。

結論

IVR を行う医師の水晶体等価線量の実態を調査した。経験年数に応じて水晶体等価線量は下がっておらず、むしろ難しい放射線診療に従事することから、さらに高くなる可能性が明らかとなった。また、天井懸架型防護板を効果的に使用することで、水晶体等価線量は 50％近くまで低減できることが確認できた。しかし、対象医師は、未だ年間 20 mSv を超えているため、今後、さらなる防護方策が求められる。

2. 水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査

医療従事者の放射線被ばくは、避けられない部分も多いため、最終的には適切な健康管理を実施しなければならない。しかしながら、電離放射線障害防止規則第 56 条に規定されている眼の水晶体の健康診断は標準化された評価方法がなく、現状、簡単な問診などで終えることがほとんどであろう。そこで、今後、白内障やその前段階にある所見と、職業被ばくとの関連を明らかにすることを目的に、放射線診療に従事する者の眼の水晶体に関する実態調査を実施した。

方法

調査は、2020 年 11 月 19-21 日と 2021 年 11 月 25-27 日に開催された日本脳神経血管内治療学会（以下、JSNET）の学術集会会場内に、水晶体混濁調査企画「白内障調査キャンペーン」と題して会場を設け、通常の眼科診療で行われる眼の健康診断を実施した。調査対象者は、20 歳以上のすべての学術集会の参加者および関係者とした。なお、同意が得られない者と人工の眼内レンズが挿入されている者については除外した。

具体的な実施項目は、①（放射線診療に関する）アンケート、②視機能検査、③散瞳用点眼、④（蓄積線量の推定と白内障のリスク因子の抽出を目的とした）問診、⑤水晶体の観察、⑥角膜、隅角、虹彩、網膜の断面画像等の観察、⑦専門医による診察、⑧白内障の判定、⑨被ばく線量データの取得（後日、対象者に情報提供依頼）、といった 9 項目とした。眼科専門医が、放射線白内障の初期病変である水晶体の水泡（Vacuoles）、白内障 3 主病型（核、皮質、後嚢下）および、Retrodots、Water clefts の 2 副病型を、視力検査、細隙灯顕微鏡の画像（図 1）の肉眼的所見、および水晶体徹照像

をもとに診断した。視機能（視力・眼屈折・眼圧）に関する検査結果および白内障の診断結果については、その場で各対象者に伝えられた。診断で治療が必要な場合や、治療を希望される場合は後日、自ら保険診療を受けてもらった。

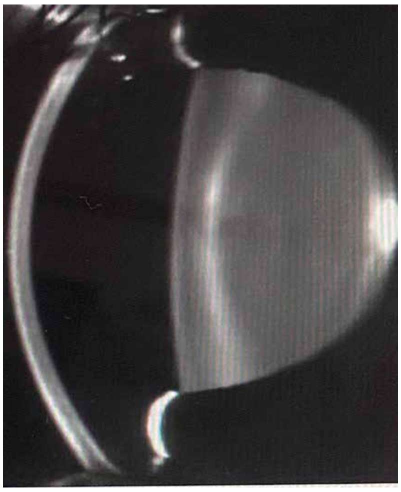


図 1 細隙灯顕微鏡画像（左眼）

結果

2020 年、2021 年の JSNET 学術総会にて、84 名と 85 名の対象者に調査協力の承諾を得られた（表 6-7）。

表 6 2020 年の JSNET 学術集会における調査協力者

			（人）	（%）
年代	39 歳以下		23	27.4
	40-59 歳		55	65.5
	60 歳以上		4	4.8
性別	男性		77	91.7
	女性		7	8.3
職種	脳神経外科	専門医	21	25.0
		指導医	29	34.5
		非指導医	14	16.7
	診療放射線技師		13	15.5
	その他（未記入含む）		7	8.3

表 7 2021 年の JSNET 学術集会における調査協力者

			（人）	（%）
年代	39 歳以下		23	27.1
	40～59 歳		58	68.2
	60 歳以上		3	3.5
	（不明）		1	−
性別	男性		69	81.2
	女性		16	18.8
職種	脳神経外科	専門医	18	21.2
		指導医	19	22.4
		非専門医	15	17.6
	診療放射線技師		23	27.1
	看護師		8	9.4
	その他		2	2.3

眼科医による水晶体徹照画像（図 2）の判定により、後嚢下にみられた vacuoles の個数と瞳孔領 3 mm 内・外にて評価を行った結果、対象者の一部に白内障の初期病変である Vacuoles や混濁初見が認められた。その他、緑内障など、他の眼疾患所見が認められる者も数名存在した。現在、詳細な解析作業や白内障所見に関する集計が行われている。また、聴取の際、対象者から自らの放射線診療時の放射線被ばく防護状況の振り返りや、眼の被ばく影響に対する関心の声が複数聞かれた。なお、被ばく線量については、情報提供の依頼準備を行なっている。

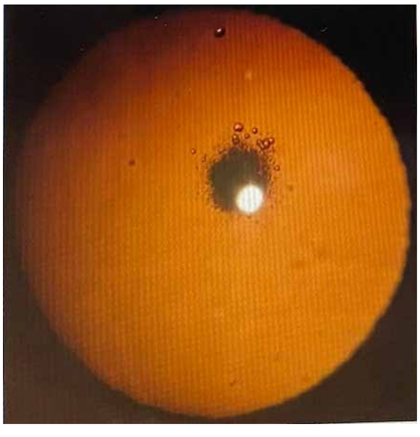


図 2 簡易型徹照カメラを用いた水晶体徹照画像（左眼）

考察

本調査で実施された眼の水晶体検査により、対象者の一部に Vacuoles や後嚢下の多色点状混濁所見が認められた。放射線誘発白内障は、Vacuoles や混濁を初期病変とし、時間と共に進行して視機能低下を生じさせる混濁に至ると考えられている。後嚢下白内障は、視覚障害性が特徴的であるが、初期段階では視機能への影響はほとんどなく、自覚症状としては認めにくい。つまり、後嚢下中心の Vacuoles を認めた対象者は、視覚障害につながる可能性を考慮して、長期的な調査が求められる。さらに、白内障の初期病変等が認められた者に対しては、医療現場での眼の水晶体への被ばくとの関連を検証するため、被ばく線量の多寡と高線量被ばくを生じる状況の原因を調査する必要がある。なお、本調査では視機能低下があった場合に、その要因が白内障によるものか否かの判定ができるよう眼底状態も観察し、その他の眼疾患についても記録している。そのなかで、対象者には緑内障など他の眼疾患所見が見出されている。

職業被ばくによる眼組織への影響も水晶体に限定的に生じるものとは言い切れず、調査結果を通じ、放射線被ばくと水晶体以外の眼の組織障害との関連についても検証する必要がある。また、分析結果を踏まえた上で、最終的に、放射線防護機材（防護眼鏡や天井懸架型防護板、防護シートなど）の改良・開発のアプローチについても提案する必要がある。

結論

本調査で実施された眼の水晶体検査により、対象者の一部に白内障の初期病変である Vacuoles や混濁所見が認められた。さらに本調査のデータ解析により、低線量の放射線被ばくと水晶体混濁の関連を検証するとともに、高線量被ばくの可能性がある従事者を抽出し、追加の線量調査で実態を把握することが求められる。そして、医療施設の放射線防護に関する機材開発を含めた、効果的な眼の水晶体の被ばく低減策を模索する。

3. オーバーテーブル透視装置用の放射線防護カーテンの開発と効果の検証

作業管理では、放射線診療の手順書の作成や防護装具の整備が求められる。また、具体的な放射線防護を実践するには、①放射線源の除去、②工学的対策（放射線源の遮蔽）、③管理的対策（作業者の管理）、④個人防護装具の使用、といった手順が原則となる。放射線診療では①は難しいため、それ以外の対策が求められる。そこで、工学的対策として、日本で広く普及しているオーバーテーブル式透視装置の保護具に着目した。既存の丈の長い放射線防護カーテン（以下、ロングカーテン）の汎用性の低さを改善した丈の短い放射線防護カーテン（以下、ショートカーテン）を開発し、ロングカーテンとの放射線防護効果を比較した。その際、主術者の水晶体線量低減率と、オーバーテーブル式透視装置で行われる放射線診療（透視手技）の主術者全体の集団水晶体等価線量低減率の 2 つの観点から検証した。また、透視手技における集団水晶体等価線量の低減について、ロングカーテンとショートカーテンの最適な使用方法を提案する。

方法

ショートカーテンは 100×30×0.5 cm の含鉛カーテン部分と、X線管コリメーターとの接着部で構成されている（図 3a）。使用時には、X 線管コリメーターを包むことにより（図 3b）、そこから発生する散乱線を低減できる。ショートカーテンの重さは 1.6 kg あるため、寝台を傾けても形状が変化しないよう、0.2 cm 厚の Acrylic plate と Lead sheet（0.13 mm 鉛厚相当）を

Urethane sheet の表面材で挟み込む構造となっている(図 3c)。また、傾けても使用できるよう、X 線管との接続部分には面ファスナーのフック部分を縫い付け、面ファスナーのループ部分は強力な両面テープによって X 線管コリメータに取り付けることができる(図 3d)。

ショートカーテンの主術者の水晶体線量低減率は、ファントムを使用して測定した空間線量率(図 4)と、時間水晶体存在率を用いて算出した。また、主術者の集団水晶体等価線量低減率は、単施設における2017 年に行われた透視手技毎の集団面積空気カーマ積算値から導かれた集団水晶体等価線量値に、カーテンの水晶体線量低減率を乗じた値を積算して推定した。これらの値より防護効果を検証した。

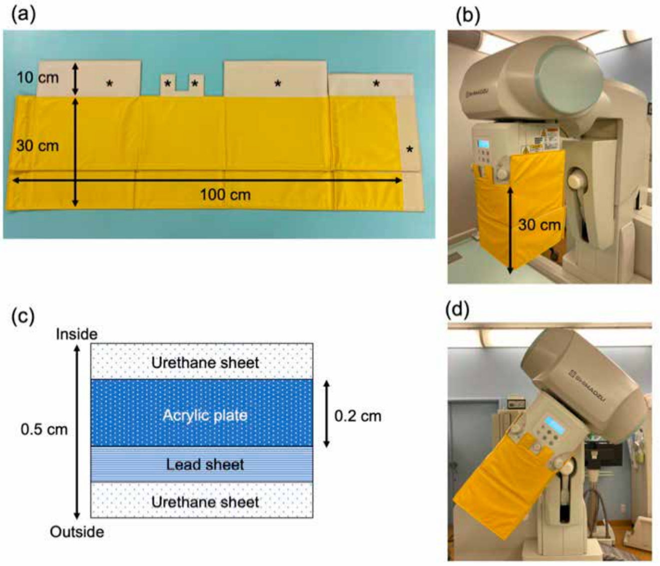


図 3 ショートカーテンの素材と構造。(a)ショートカーテンの構成。(b)X 線コリメーターに取り付けられた状態。(c)ショートカーテンのシールド材の断面。(d)ショートカーテンを取り付け、X 線管が傾いている状態。文献[2]より引用。

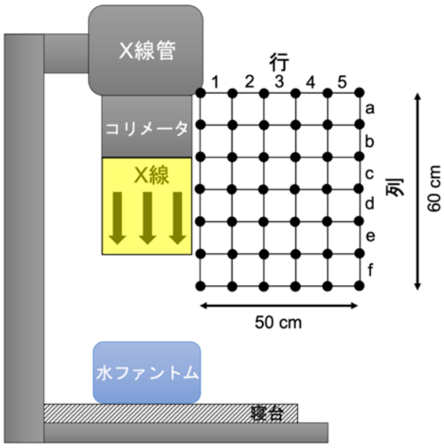


図 4 空間線量率の測定配置図(●は測定点)。文献[2]より和訳して引用。

結果

主術者が寝台の横で直立して手技を行う際、水晶体は領域(c, 5)、もしくは領域(d, 5)に位置していた(表 8)。また、主術者がドレーンの抜き刺しなどで、手元を注視するときは前屈みの姿勢となるため、水晶体は領域(e, 4)、もしくは領域(d, 4)に位置していた。それらの結果をもとに、加重平均したショートカーテンの水晶体線量低減率は、17.7%となった(表 8)。

遮蔽効果はショートカーテンよりもロングカーテンの方が高かった。しかし、集団水晶体等価線量低減率は、すべての透視手技の中でロングカーテンが適応可能な透視手技(例 Endoscopic Retrograde Cholangiopancreatography(ERCP)など)のみに利用する時よりも、すべての透視手技にショートカーテンを利用した時の方が、高くなった(表 9)。さらに、すべての透視手技に対してロングカーテンもしくはショートカーテンのいずれかを必ず利用した場合、集団水晶体等価線量低減率は最大で 25.6%となった(表 9)。

表 8 ショートカーテンによる主術者の総水晶体線量低減率

主術者の水晶体位置, 領域(行, 列)	領域 (4, d)	領域 (4, e)	領域 (4, f)	領域 (5, c)	領域 (5, d)	領域 (5, e)	総水晶体線量低減率 (%)
時間水晶体存在率 (%)	1.5	4.9	13.3	18.3	58.2	5.8	17.7
ショートカーテンによる水晶体線量低減率 (%)	18.2	18.8	19.6	13.2	18.4	19.5	

表 9 ショートカーテンとロングカーテンによる術者の集団水晶体等価線量低減率

カーテン	集団水晶体等価線量 (Sv)	集団水晶体等価線量低減率 (%)
無し	6.239 t	–
ロングカーテン	5.625 t	9.8
ショートカーテン	5.135 t	17.7
ショートカーテンもしくはロングカーテン	4.643 t	25.6

考察

カーテン単体の水晶体線量低減率は、ロングカーテンの方がショートカーテンよりも圧倒的に高いが、術者の集団水晶体等価線量の観点から見れば、低減率は逆転する。これは、ロングカーテンの利用が限定的(術者が患部を皮膚の上から直接叩いたり押したりする手技、透視を見ながら経皮ドレナージチューブの抜き刺しを行う手技、ベッドを傾ける手技ができない)であり、結果として、透視手技の 12%にしか利用できないことが要因として考えられる。単体の低減率が低くとも、利用範囲の広さという観点から、ショートカーテンがロングカーテンに勝るという示唆的な結果を得ることができた(図 5)。

結論

ショートカーテン単体では水晶体線量低減率は低いが、汎用性の高さから、すべての透視手技における集団水晶体等価線量を低減することができる。その観点から、ショートカーテンは、既存のロングカーテンよりも高い水晶体等価線量低減効果が期待できる。

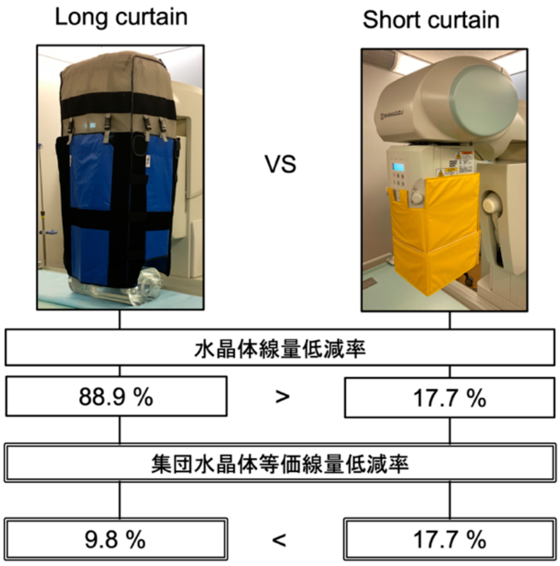


図 5 カーテンの水晶体線量低減率と集団水晶体等価線量低減率の比較。文献[2]より和訳して引用。

4. Augmented Reality Technologyを活用した血管造影検査室の天井懸架型防護板の正しい使い方教育アプリケーションの開発とその評価

放射線診療に従事する者に対して、被ばく低減のための労働衛生教育を定期的に行う必要がある。この教育は、知識を高めるための教育と実践力を養うための教育の2つに大別される。両者とも被ばく低減のためには重要な意味を持つが、現状の医療現場では、法令で定められた年に 1 時間程度の座学による、基礎的な放射線防護教育を受けるのがせいぜいであり、被ばくレベルに応じた特別な放射線防護教育やトレーニングを受けることなく放射線診療に従事している者が殆どであろう[3-6]。そこで、知識と実践力を高めるための特別な教育としてAugmented Reality (AR)を利用し、血管造影検査室の天井懸架型防護板の正しい使い方を学習するためのアプリケーションの開発と評価を行った。

方法

天井懸架型防護板の効果的な使用方法を学習するため、①天井懸架型防護板を使用しない(Scene 1)、②天井懸架型防護板下縁と患者の体幹との間に隙間がある(Scene 2)、③天井懸架型防護板下縁と患者の体幹との間に隙間がない(Scene 3)の 3 つシーンを設定した。想定した 3 つのシーンについて、血管造影検査室の散乱線分布の測定を行い、AR 画像の元となる線量データを取得した。測定では水ファントムを使用し、シングルプレーンの血管透視装置にて、透視パルスモード(管電圧 70 kV、管電流 16.8 mA、パルスレート 15 pulses/s)で 20 分間の照射を行った。臨床現場に近づけるため、術者側には、下肢の被ばくを防護する 0.5 mm 鉛相当の防護カーテンを設置した。線量測定には蛍光ガラス線量計(GD-302M)を用い、段ボール製の柱に 20 cm 間隔(床からの高さ 0.2-1.8 m の範囲)で貼り付け、血管造影検査室内(4.0 m×5.4 m)に 20 cm 間隔で配置した。

測定した 3 つのシーンの散乱線分布は、表示ポイントが 10 cm 間隔となるように測定点の間を線形補間処理し、相対線量(%)を53段階のカラーで表現した。そして、それをAR表示させ、Mobile 端末(iPad Air, Apple Inc., Cupertino, USA)上にインストールした。

血管造影検査室に従事する医療スタッフ 33 名に、実際の血管造影検査室上に投影される 3 つのシーンの散乱線の AR 画像を任意の方向から閲覧してもらい、天井懸架型防護板の必要性と正しい使用方法について視覚的に学習させた。その後、AR アプリケーションを、教材に対する動機づけという観点から評価するため、無記名式質問紙調査を実施した。質問紙調査はARCS動機づけモデル[7, 8]に基づく学習者の学習意欲調査(IMMS: Instructional Materials Motivation Survey)[8-11]を利用した。質問は36項目で構成され、4つの下位尺度 Attention、Relevance、Confidence、Satisfaction に分類される。回答はリッカート尺度(1:まったくあてはまらない、2:わずかにあてはまる、3:半分くらいあてはまる、4:かなりあてはまる、5:とてもあてはまる)を使用し、得られた下位尺度ごとの点数から、平均と標準偏差を職種別に算出した。また、下位尺度ごとの職種間の差をKruskal-Wallis testにて、有意差検定を実施した($p<0.05$)。なお、否定的な文章の質問に関しては、点数を反転(5→1、4→2、3→3)して評価した。

結果

血管造影検査室内の患者ベッドより低い部分を投影した AR 画像を図 6[12]に示す。散乱線は患者の体幹部で最も強く、離れるにつれて弱まっていた（図 6C、D）。また、看護師や臨床工学技士が位置する側（図 6A、C）には防護カーテンがないため、術者側（図 6B、D）に比べて線量が高くなっていた。

天井懸架型防護板に関する 3 シーンの AR 画像を図 7[12]に示す。天井懸架型防護板と患者の体幹の間に隙間があると、散乱線がその隙間を通って術者の腰部から腹部へ漏れ出ていたが（図 7E）、隙間なく設置することで、漏れ出ていた部分の散乱線が減少した（図 7F）。

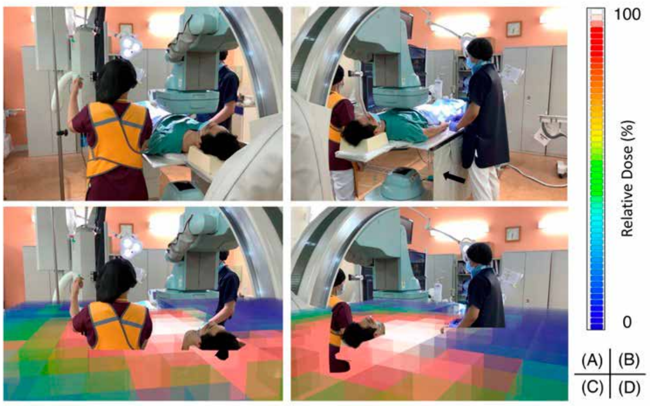


図 6 血管造影検査室の散乱線の広がりの AR 画像（線形補間処理なし）。(A)看護師や臨床工学技士の立ち位置。(B)医師の立ち位置。(C)看護師や臨床工学技士の立ち位置の AR 画像。(D)医師の立ち位置の AR 画像。文献[12]より和訳して引用。

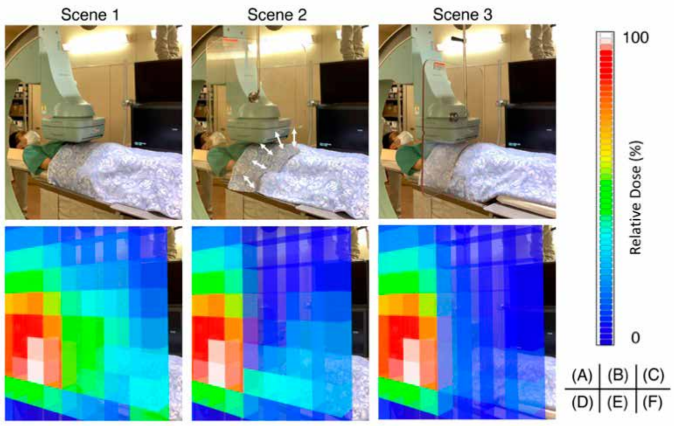


図 7 天井懸架型防護板の使い方シーン別 AR 画像。(A)防護板を使用していない（Scene 1）。(B)防護板下縁と患者の間に隙間あり（Scene 2）。(C)防護板下縁と患者の間に隙間なし（Scene 3）。(D)Scene 1 の AR 画像。(E)Scene 2 の AR 画像。(F)Scene 3 の AR 画像。文献[12]より和訳して引用。

IMMS の結果を表 10[12]に示す。全職種の下位尺度ごとの平均得点は、すべて高かった（Attention：4.77、Relevance：4.64、Confidence：4.57、Satisfaction：4.69）。また、下位尺度ごとの職種間比較の結果は、医師の得点が他の職種の得点よりも低い傾向にあった。しかし、p 値は Attention：0.313、Relevance：0.879、Confidence：0.379、Satisfaction：0.397 と有意差は認められなかった。

表 10 IMMS の下位尺度別平均得点と職種間比較。文献[12]より一部改変して引用。

下位尺度	Score（平均±標準偏差）				
	医師 (n = 7)	看護師 (n = 11)	診療放射線技師 (n = 7)	臨床工学技士 (n = 8)	合計 (n = 33)
Attention	4.55±0.42	4.88±0.15	4.80±0.27	4.78±0.31	4.77±0.30
Relevance	4.46±0.68	4.70±0.31	4.73±0.34	4.65±0.35	4.64±0.42
Confidence	4.57±0.33	4.45±0.38	4.70±0.31	4.60±0.62	4.57±0.42
Satisfaction	4.40±0.53	4.79±0.27	4.74±0.36	4.77±0.31	4.69±0.38
合計	4.51±0.37	4.71±0.25	4.74±0.28	4.70±0.32	4.67±0.30

考察

IMMS で評価した結果、職種に依らず高得点であったことから、AR アプリケーションは、天井懸架型防護板の使用方法を学習するのに有用な教材であることが示された。いっぽう、職種間で有意差はないものの、医師の得点が低い傾向にある要因は、難易度であろう。すなわち、医師にとって今回の内容が既知のことであり、他職種ほどの関心や満足感を得ることができなかったためと推察される。しかし、医師の得点は 4 点を超えており、医師の得点が低いというより、むしろ他の職種に対して強い関心と満足感を与えたと言える。これは、看護師や臨床工学技士らの立ち位置が、医師の防護の良し悪しに関係なく、散乱線の影響を強く受けることを示しているためと考えられる。看護師や臨床工学技士らを防護するには、新たな防護方策を講じるか、X線照射時に患者に近づかないような退避行動を実施する必要がある。ICRP では被ばくのレベルにあった教育を行うことを推奨しており[3]、今後、職種、被ばくの状況に応じた様々な AR アプリケーションの作成と、その教育効果の検証が必要であると考える。また、本研究では、AR アプリケーションを使用した者の学習意欲の観点から評価をしたに過ぎず、医療スタッフの被ばく低減が達成できたかどうかは、今後の個人被ばく線量の解析結果を待たねばならないことが本研究の限界である。

結論

本研究において、血管造影検査室の散乱線を AR アプリケーションで可視化し、医療スタッフに対して天井懸架型防護板の適切な使用方法を理解させる教材を作成した。この教材を ARCS 動機づけモデルに基づく IMMS で評価したところ、医師・看護師・診療放射線技師・臨床工学技士すべてのスタッフから高い評価を得ることができた。

5. インターベンショナルラジオロジー医師に対する術前ブリーフィングが個人線量計および個人保護装具の使用に与える影響

作業管理として、個人防護装具（防護衣、防護眼鏡、防護甲状腺カラー）を整備しても、装着されないことが散見される。この要因として、労働衛生教育の実践力を養うための教育が不足していることが考えられる。そこで、個人線量計ならびに個人保護装具の装着状況について、第 3 者である調査者の目視による正確な実態調査を実施し、適切に装着されていない場合は、術前ブリーフィングによる個人線量計と個人保護装具の装着を促す介入を行うという、実践力に特化した教育を行った。

方法

日本国内の急性期病院（214 床、救急件数 300-340 件/月）を対象に、5 ヶ月間（介入前期間:2017 年 4-8 月、介入期間:2017 年 10 月-2018 年 2 月）調査を実施した。調査期間中に医師が行った放射線診療 964 件（介入前:549 件、介入期間:415 件）の診療（X 線透視を用いた検査・治療）すべてを調査した。このうち、介入前の 340 件は、診療に従事した診療放射線技師が調査員として、個人線量計と個人保護装具の装着状況目視で調査した。なお、装着回数を目視調査回数で除した値を装着率と定義した。介入期間の 321 件でも、同様の目視による調査を実施し、個人線量計と個人保護装具を装着していない場合には、術前のブリーフィング時に診療放射線技師による装着の促しが実施された。介入効果の判定に利用する医師の個人被ばく線量（実効線量と水晶体等価線量）と被ばく関連指標（放射線診療の従事回数と透視時間）は、診療記録から抽出した。

個人線量計の管理方法において、2 個管理では、医師は防護衣の内側に主個人線量計、防護衣の外側に追加個人線量計をそれぞれ 1

個ずつ装着した。また、1 個管理では、防護衣の内側に主個人線量計を 1 個装着した。なお、個人線量計の値は 1cm 個人線量当量で校正した。

実効線量(E)は以下(1)(2)式で算出した。

2 個管理:$E = 0.89 \times D_{main} + 0.11 \times D_{additional}$ ・・・・・・(1)

1 個管理:$E = D_{main}$ ・・・・・・・・・・・・・・・・・(2)

ただし、D_{main}は主個人線量計の値、$D_{additional}$は追加個人線量計の値とした。

水晶体等価線量(H_{eye})は以下(3)(4)式によって算出した。

2 個管理:$H_{eye} = D_{additional}$ ・・・・・・(3)

1 個管理:$H_{eye} = D_{main}$ ・・・・・・・・・・・(4)

統計解析は BellCurve for Excel(version 3.22, Social Survey Research Information Co., Tokyo, Japan)を使用した。2 群間の比較には、Wilcoxson の符号付順位検定または Mann-Whitney の U 検定を実施し、$p<0.05$ を有意とした。

結果

対象者(医師)は 14 名(男性 13 名、女性 1 名)、平均年齢 38.9±8.0 歳(平均±標準偏差:S.D.)、平均経験年数 12.1±7.5 年(平均±S.D.)であった。

介入前期間の医師の個人線量計と個人保護装具の装着率を表 11[13]に示す。主個人線量計、防護眼鏡、防護甲状腺カラーの装着率(中央値)は、それぞれ 57%、15%、69%と低く、個人差も大きかった。また、防護衣はすべての医師が装着していた。

介入期間の個人線量計ならびに個人保護装具の装着率を表 11[13]に示す。主個人線量計、追加個人線量計の装着率は、それぞれ 100%、85%であり、介入前と比較して統計学的有意に増加した(主個人線量計:p = 0.002、追加個人線量計:p = 0.008)。また、介入期間中に、4 人の医師の個人線量計の管理方法が 1 個管理から 2 個管理に切り替わった。防護衣の装着率は介入期間でも変化なかったが、防護眼鏡、防護甲状腺カラーの装着率はどちらも 100%になり、統計学的有意に増加した(防護眼鏡:p = 0.003、防護甲状腺カラー:p = 0.008)。

表 12[13]に個人被ばく線量の結果を示す。介入前と介入期間の診療回数の差を補正するため、各医師の実効線量(mSv)と水晶体等価線量(mSv)を総透視時間(min)で割って、実効線量率(Sv/min)と水晶体等価線量率(Sv/min)を算出した。その結果、介入期間ではいずれの値も、統計学的に有意な増加を示した(実効線量率:p = 0.033、水晶体等価線量率:p = 0.003)。

表 11 介入前後における個人線量計と個人保護装具の装着率。文献[13]より一部改変して引用。

		主個人線量計	追加個人線量計	防護衣	防護眼鏡	防護甲状腺カラー
中央値	介入前	57 [0-100]	0 [0-100]	100	15 [0-100]	69 [0-100]
[範囲](%)	介入後	100 [67-100]	85 [0-100]	100	100 [67-100]	100 [89-100]
p value		0.002	0.008	1.000	0.003	0.008

表 12 介入前後における実効線量率と水晶体等価線量率。文献[13]より一部改変して引用。

		実効線量 (mSv)	実効線量率 (μSv/min)	水晶体等価線量 (mSv)	水晶体等価線量率 (μSv/min)
中央値	介入前	0.4 [0.0-6.3]	1.3 [0.0-13.6]	0.7 [0.0-23.7]	2.4 [0.0-15.9]
[範囲](%)	介入後	1.1 [0.0-4.8]	3.1 [0.0-33.0]	1.7 [0.1-13.9]	7.5 [3.1-167.0]
p value		0.345	0.033	0.124	0.003

考察

これまで、患者の被ばく線量低減に術前ブリーフィングが非常に有効であることが証明されているが、医師の放射線安全性に及ぼす影響を客観的に評価した研究はない。本研究は、個人線量計と個人保護装具の装着率を、自己回答式アンケートではなく、目視による調査をしたことと、個人被ばく線量率という観点から介入効果を客観的に評価したことが新規性となる。

介入前期間では、主個人線量計、追加個人線量計、防護眼鏡、防護甲状腺カラーの装着率が、総じて低いことが明らかとなり、この傾向は過去の報告と同様であった。個人線量計を装着すること、放射線感受性の高い眼の水晶体や甲状腺を防護することは、いずれも IVR を行う医師にとって欠かすことができないため[14-16]、適切な改善策を施すことが必要不可欠である。

追加個人線量計を装着し忘れる理由として、「外来や病棟では必要ない追加個人線量計を、机の引き出しに入れたままにしていた」という回答を良く耳にする。しかし、介入前期間から ICRP の推奨[6]に従って手術室のラックに主個人線量計と追加個人線量計を 2 つ並べて保管しており、2 個管理されている医師が追加個人線量計を装着し忘れるということはなかった。また、独自の取り組みとして、複数カ所で放射線診療を行う医師に対しては、個人線量計をラックで保管するのではなく、図 8[13]に示すような主個人線量計と追加個人線量計を連結するストラップを用意したため、両者の携行、装着忘れを防ぐことができた。

介入前期間では、個人線量計と個人保護装具の装着は医師個人の判断に委ねられており、防護衣以外の装着率は総じて低かった。これは従前の病院内で実施される年に 1 回程度の放射線防護教育だけでは、放射線防護意識を高め、自ら個人線量計や個人保護装具の装着を実践させることは無理であったと認めざるを得ない。しかし、術前ブリーフィングを行い、そこで個人線量計と個人保護装具が適切に装着されているかを目視により確認し、装着されていない場合は装着の促しをすることで、これらの装着率を劇的に上げることに成功した（表 11）。

(A)

(B)

図 8 紛失、携帯忘れ防止ストラップ。(A)ストラップの先端には主個人線量計が装着され、ストラップにはリングを介して自由に位置が調整可能な追加個人線量計が装着されている。(B)実際の使用例。Matsuzaki らの報告[13]より引用。

また、4 人の医師の個人線量計は元々1 個管理であったが、介入後、彼らの透視時間がさほど長くないにも関わらず、個人の被ばく線量が高いことに気づき、介入期間中に、個人線量計は 2 個管理に切り替えられた。このように、より望ましい個人線量管理法に修正されることも、本介入の副次的効果であると言えよう。

術前ブリーフィングやタイムアウトを行う際に、被ばく量に注意した結果、患者の被ばく量を有意に減少させたことが報告されている[17-19]。しかし本研究では、それとは反対に、従事者の実効線量率と水晶体等価線量率は、いずれも統計学的有意に増加した(表 12)。実効線量率と水晶体等価線量率を増加させる主な要因として、①個人線量計装着率の向上、②個人線量計の管理方法が1個管理から2個管理へ変更の2つが考えられた。個人線量計装着率が上がれば、それまで数値に上がらなかった被ばく線量が加算されるため、実効線量率も水晶体等価線量率も増加するのは自明である。また、個人線量計が 1 個管理の場合、式(2)より $E = D_{main}$、式(4)より $H_{eye} = D_{main}$ であるが、個人線量計を 2 個管理に変更した場合、防護衣による遮蔽率を 90%と仮定すれば、式(1)より $E = 0.89 \times D_{main} + 0.11 \times D_{additional} = 1.99 \times D_{main}$、式(3)より $H_{eye} = D_{additional} = 10 \times D_{main}$ となり、実効線量率も水晶体等価線量率も値が大きくなる可能性がある。実際、Chida らは線量計管理方法を1個管理から2個管理に変更した場合、平均実効線量が 2.9 倍、水晶体等価線量が 19.8 倍に増加することを報告している[20]。同様に、本研究においても、1 個管理から 2 個管理に変更された 4 人の医師は、平均実効線量率が4.4倍、平均水晶体等価線量率は18.9倍増加している(平均実効線量率:16.9/3.8 = 4.4、平均水晶体等価線量率:83.0/4.4 = 18.9 倍)。

本研究で実施した装着率の目視調査は、全数調査ではなく、単施設のサンプリング調査となっているため、必ずしも本邦の現状を反映していない可能性がある。また、他国の医療文化や傾向によっては、異なる結果が得られる可能性もある。その他、介入により、医師らの放射線防護意識が高まることで、さまざまな被ばく低減措置(透視時間の短縮や照射野のタイトな絞り、天井懸架式防護板の積極的利用)により、実効線量率や水晶体等価線量率を押し下げる方向に作用する可能性は否定できないが、得られたデータからこの作用を除外することは不可能である。さらに、本研究終了後に術前ブリーフィングによる介入を止めてしまうと、実効線量率や水晶体等価線量率はどう変化するか、果たして個人線量計や個人保護装具の装着が「防護文化」として根付くかどうかは不明であるため、今後の注意深い経過観察が必要である。この対策として、個人線量計や個人保護装具が適切に使用されているかを自動的に確認する技術の導入が、本研究の結果を発展させるためにも必要不可欠と考える。

結論

本研究でIVR医師の個人線量計と個人保護装具の装着率を目視で調査したところ、防護衣以外の装着率は総じて低かった。しかし、IVR開始直前のブリーフィングにて、個人線量計と個人保護装具を正しく装着されているかを確認すると、それらの装着率は劇的に上昇し、100%に近づいた。また、透視時間で補正した実効線量率と水晶体等価線量率の値は、いずれも介入により増加したが、その要因はこれまで見逃されていた被ばくが加算されるようになったことと、個人線量計の管理方法が2個管理へ変更されたことに伴う線量算定法の違いが影響したものと考えられた。

6. 最適な被ばく低減システムと放射線防護機器の提案

作業管理で実施される防護装具の整備の中で、下流に位置する個人防護装具の使用には、いくつかの課題がある。その課題を整理しつつ、最適と考えられる個人防護装具を提案する。

放射線防護眼鏡

防護眼鏡の課題には、フィット感、視野、重さといった使用に関するものが挙げられる。放射線診療は、画像を見ながらデバイスの操作や患者の観察を行うため、眼鏡がずれない・視野が広い・視野の歪みがない・レンズが曇らない・長時間の装着でも疲れない適度な軽さといった使用感が重要となる。その上で、適切な遮蔽率を、前方だけでなく側方からの防護も含め考慮されることが求められる。これら使用感や防護効果といった条件を満たす防護眼鏡として、東レのパノラマシールド（図 9）[21]がある。

図 9 放射線防護眼鏡 東レ パノラマシールド（鉛当量：0.07 mmPb）。文献[21]より引用。

パノラマシールドは約 50 g であり、循環器内科医や脳血管内治療医、消化器内科医の水晶体被ばく低減率は、それぞれ約 56%、47%、70%と、一定の防護効果を有していると報告されている[22]。また、パノラマシールドは、眼鏡のアングルを散乱線の発生方向に対し、任意に調節することができるため、隙間なく顔にフィットさせることができる。顔の輪郭にフィットすることは、眼の防護に重要とされている[6]。いっぽう、欠点として耐久性が挙げられ、落下による破損が散見される[22]。今後の改善に期待する。

防護甲状腺カラー

甲状腺の放射線感受性は高いが、線量限度は定まっていない。さらに、甲状腺癌発症リスクは被ばく時年齢に強く影響され、30 歳を超える男性と 40 歳を超える女性のリスクは小さいと報告されている[23]。しかし、医療従事者が受ける低線量被ばくについて、甲状腺機能低下症のリスクが高まる可能性が報告されており[16]、年齢に関係ない甲状腺防護が求められる。なお、NCRP（National Council on Radiation Protection and Measurements）は、若年者及び頚部レベルの個人線量計の値（Hp（10））が 4 mSv/月を超えるすべての従事者に、甲状腺防護を推奨している[24]。

防護甲状腺カラーは、鉛製と非鉛製の製品が存在し、前者は硬くて重い。いっぽう、非鉛製であるラドネック（図 10）[21]は、遮蔽材料に酸化セリウムが利用され、鉛製と同等の防護効果でありがら、柔らかく軽量（約 78 g）である。そのため、不快感が軽減され、長時間の作業でも疲れず、さらに、ディスポーザブルカバーの交換により、衛生面の問題もない。

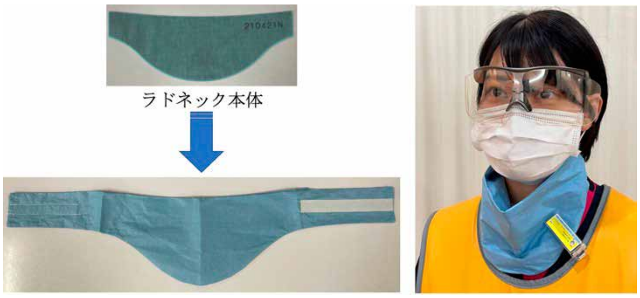


図 10 防護甲状腺カラー ラドネック（鉛当量：0.28 mmPb）。文献[21]より引用。

結論

放射線防護の手順は、放射線発生源対策を実施し、それでもリスクが残る場合に、個人防護装具を使用するという考えが原則となる。その際、防護効果だけに着目するのではなく、使用感や衛生面を考慮した個人防護装具が

選定されるべきである。また、放射線発生源対策の手順が間違っていた場合、個人防護装具を使用しても、十分な効果を得ることはできないため、注意が必要である。

C. 今後の課題

当該研究成果を踏まえ、今後、解決すべき課題を以下に示す。

1. 放射線診療（業務）従事者の被ばく線量の一元管理
2. 眼の水晶体の健康管理システムの確立
3. 利用者の使い心地を考慮した放射線防護機材の改良
4. レベルに応じた教育を行うための放射線防護教育センターの設立

D. おわりに

当該研究分担では、眼の水晶体の被ばく状況の実態調査、作業環境管理や作業管理、健康管理、労働衛生教育といった労働衛生の 5 管理に則った放射線防護に関する多角的研究を実施した。これらの調査・研究は、現状の医療分野における問題点を明らかにするとともに、課題解決のための方策を提供し、非常に有用な成果を得ることとなった。今後、眼の水晶体の放射線防護のために、さらなる発展を期待する。

参考文献

1. 盛武 敬 (2021): 医療従事者の水晶体被ばく防護. Rad Fan. 株式会社メディカルアイ, 東京都, pp 53-57
2. Nakagami Koichi, Moritake Takashi, Nagamoto Keisuke, Morota Koichi, Matsuzaki Satoru, Kuriyama Tomoko, Kunugita Naoki (2021): Strategy to Reduce the Collective Equivalent Dose for the Lens of the Physician's Eye Using Short Radiation Protection Curtains to Prevent Cataracts. Diagnostics 11: 1415
3. International Commission on Radiological Protection (ICRP 2010): Education and training in radiological protection for diagnostic and interventional procedures. ICRP publication Ann 113.
4. International Commission on Radiological Protection (ICRP 2012): Radiological protection in fluoroscopically guided procedures performed outside the imaging department. ICRP publication Ann 117.
5. International Commission on Radiological Protection (ICRP 2018): Ethical foundations of the system of radiological protection. ICRP Publication Ann 138.
6. International Commission on Radiological Protection (ICRP 2018): Occupational radiological protection in interventional procedures. ICRP publication Ann 139.
7. Keller John M. (1987): Development and use of the ARCS model of instructional design. Journal of instructional development 10: 2
8. Keller John M. (2010): Motivational Design for Learning and Performance. Springer Science+Business Media
9. Annamalai Subashini. (2016): Implementing ARCS Model to Design a Motivating Multimedia E-Book for Polytechnic ESL Classroom. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering 8: 57-60
10. Huang Biyun, Hew Khe (2016): Measuring Learners' Motivation Level in Massive Open Online Courses. International Journal of Information and Education Technology 6: 759-764

11. Jamil M., Ningrum E., Yani Ahmad (2019): Level of Learning Motivation Student Based on ARCS Model on Geographic Subject. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 286: 012010
12. Matsuzaki Satoru, Moritake Takashi, Morota Koichi, Nagamoto Keisuke, Nakagami Koichi, Kuriyama Tomoko, Kunugita Naoki (2021): Development and assessment of an educational application for the proper use of ceiling-suspended radiation shielding screens in angiography rooms using augmented reality technology. European Journal of Radiology 143: 109925
13. Matsuzaki Satoru, Moritake Takashi, Sun Lue, Morota Koichi, Nagamoto Keisuke, Nakagami Koichi, Kuriyama Tomoko, Hitomi Go, Kajiki Shigeyuki, Kunugita Naoki (2022): The Effect of Pre-Operative Verbal Confirmation for Interventional Radiology Physicians on Their Use of Personal Dosimeters and Personal Protective Equipment. International Journal of Environmental Research and Public Health 19: 16825
14. International Commission on Radiological Protection (ICRP 2012): 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. ICRP publication Ann 118.
15. Vimercati Luigi, De Maria Luigi, Mansi Francesca, et al. (2018): Prevalence of Thyroid Diseases in an Occupationally Radiation Exposed Group: A Cross-Sectional Study in a University Hospital of Southern Italy. Endocrine, Metabolic & Immune Disorders - Drug Targets 18
16. Cioffi Dante, Fontana Luca, Leso Veruscka, Dolce Pasquale, Vitale Rosalba, Vetrani Ilaria, Galdi Aniello, Iavicoli Ivo (2020): Low dose ionizing radiation exposure and risk of thyroid functional alterations in healthcare workers. European Journal of Radiology 132
17. Barakat Monique T., Thosani Nirav C., Huang Robert J., Choudhary Abhishek, Kochar Rajan, Kothari Shivangi, Banerjee Subhas (2018): Effects of a Brief Educational Program on Optimization of Fluoroscopy to Minimize Radiation Exposure During Endoscopic Retrograde Cholangiopancreatography. Clinical Gastroenterology and Hepatology 16: 550-557
18. Aizer Anthony, Qiu Jessica, Cheng Austin, et al. (2019): Utilization of a Radiation Safety Time-Out Reduces Radiation Exposure During Electrophysiology Procedures. JACC: Clinical Electrophysiology 5
19. Choi Beatrix Hyemin, Yaya Kamalou, Prabhu Vinay, Fefferman Nancy, Mitchell Beverly, Kuenzler Keith A., Ginsburg Howard B., Fisher Jason C., Tomita Sandra (2019): Simple preoperative radiation safety interventions significantly lower radiation doses during central venous line placement in children. Journal of Pediatric Surgery 54: 170-173
20. Chida Koichi, Kaga Yuji, Haga Yoshihiro, Kataoka Nozomi, Kumasaka Eriko, Meguro Taiichiro, Zuguchi Masayuki

(2013): Occupational Dose in Interventional Radiology Procedures. American Journal of Roentgenology 200: 138-141
21. 茂呂田 孝一 (2022): 被ばく低減システム・放射線防護機器はコレがベスト！. Rad Fan. 株式会社メディカルアイ, 東京都, pp 65-68
22. 中上 晃一 (2022): 最終結論! 放射線防護眼鏡の使い方と選び方軽くて歪まない放射線防護眼鏡　～パノラマシールド～. Rad Fan. 株式会社メディカルアイ, 東京都, pp 71-74
23. ICRP (2007): The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 Ann ICRP 37: 1-332
24. NCRP (2010): Radiation Dose Management for Fluoroscopically-Guided Interventional Procedures. NCRP Report No. 168. LWW

E. 論文・雑誌報告

1. Kawauchi S, Chida K, Moritake T, Hamada Y, Matsumaru Y, Tsuruta W, Sato M, Hosoo H, Sun L: Treatment of internal carotid aneurysms using pipeline embolization devices: measuring the radiation dose of the patient and determining the factors affecting it. Radiat Prot Dosimetry. 2020 Jun 24;188(3):389-396. doi: 10.1093/rpd/ncz298. (査読有り)
2. 坂本 肇, 五十嵐 隆元, 加藤 守, 川内 覚, 加藤 英幸, 塚本 篤子, 盛武 敬, 赤羽 正章：DRLs 2015 の血管撮影・IVR 分野における効果検証および追加項目の検討. 日本放射線技術学会誌. 2020; 76(2):210-217. doi: 10.6009/jjrt.2020_JSRT_76.2.210. (査読有り)
3. Morota K, Moritake T, Nagamoto K, Matsuzaki S, Nakagami K, Sun L, Kunugita N: Optimization of the Maximum Skin Dose Measurement Technique Using Digital Imaging and Communication in Medicine-Radiation Dose Structured Report Data for Patients Undergoing Cerebral Angiography. Diagnostics (Basel). 2020 Dec 23;11(1):E14. doi: 10.3390/diagnostics11010014. (査読有り)
4. Nagamoto K, Moritake T, Nakagami K, Morota K, Matsuzaki S, Nihei S, Kamochi M, Kunugita N: Occupational radiation dose to the lens of the eye of medical staff who assist in diagnostic CT scans. Heliyon. 2021 January 30;7(1):e06063. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06063. (査読有り)
5. Kawauchi S, Chida K, Moritake T, Hamada Y, Tsuruta W: Radioprotection of eye lens using protective material in neuro cone-beam computed tomography: Estimation of dose reduction rate and image quality. Physica Medica. 2021 Feb 27; 82: 192-199. (査読有り)
6. K. Nakagami, T. Moritake, K. Nagamoto, K. Morota, S. Matsuzaki, T. Kuriyama, N. Kunugita, Strategy to Reduce the Collective Equivalent Dose for the Lens of the Physician’s Eye Using Short Radiation Protection Curtains to Prevent Cataracts, Diagnostics 11(8) (2021) 1415. (査読有り)
7. S. Matsuzaki, T. Moritake, K. Morota, K. Nagamoto, K. Nakagami, T. Kuriyama, N. Kunugita, Development and assessment of an educational application for the proper use of ceiling-suspended radiation

shielding screens in angiography rooms using augmented reality technology, European Journal of Radiology 143 (2021) 109925. (査読有り)
8. 盛武 敬. 医療従事者の水晶体被ばく防護. Rad Fan. 19(10) (2021) 53-57.
9. 茂呂田 孝一. DICOM-RDSR の活用が放射線安全管理にもたらす影響 . Rad Fan. 19(10) (2021) 65-68.
10. K. Nagamoto, T. Moritake, K. Nakagami, K. Morota, S. Matsuzaki, N. Kunugita, A multicenter study of radiation doses to the eye lenses of clinical physicians performing radiology procedures in Japan, J Occup Health, 63 (1), (2021) e12305. (査読有り)
11. 茂呂田 孝一. 被ばく低減システム・放射線防護機器はコレがベスト！. Rad Fan. 20(8) (2022) 65-68.
12. 中上晃一. 最終結論！放射線防護眼鏡の使い方と選び方. Rad Fan. 22(10) (2022) 71-74.
13. S. Matsuzaki, T. Moritake, L. Sun, K. Morota, K. Nagamoto, K. Nakagami, T. Kuriyama, G. Hitomi, S. Kajiki, N. Kunugita: The Effect of Pre-Operative Verbal Confirmation for Interventional Radiology Physicians on Their Use of Personal Dosimeters and Personal Protective Equipment, IJERPH, 19(24) (2022) 16825-16825. (査読あり)

F. 総説その他

1. J-RIME, National Diagnostic Reference Levels in Japan (2020) -Japan DRLs 2020-, 2020. http://www.radher.jp/J-RIME/report/DRL2020_Engver.pdf (accessed on 8 Feb. 2021).
2. 盛武 敬：脳血管内治療に関する診断参考レベル構築のための医療被ばく実態調査（Re-JDRL study）について. 教育講座 第 33 回全国循環器撮影研究会総会・学術発表大会（2019 年 4 月 13 日）医師講演. 全国循環器撮影研究会誌, 32, 5-12, 2020.（査読無し）
3. 松崎 賢：Augmented Reality 技術を利用した放射線被ばく防護のための学習ツールの開発と効果の検証. 産業医科大学大学院博士論文（産業衛生学）, 2023.

G. 著書

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

H. 招待講演

1. 盛武 敬：被ばく防護ミニ講習会「医療放射線被ばくの最新トピックス～DRLs 2020と電離則改正～」脳血管内治療に関する診断参考レベル構築のための医療被ばく実態調査（Re-JDRL study）報告，第36回NPO法人日本脳神経血管内治療学会総会，国立京都国際会館（京都市・京都府），11月19-21日，2020.
2. 茂呂田孝一：どうしてる？アンギオ部門ー線量管理は義務化へ「血管撮影室における線量管理の実際とこれから」，第37回NPO法人日本脳神経血管内治療学会総会，福岡国際会議場（福岡市・福岡県），11月25-27日，2021.

3. 盛武　敬：被ばく防護ミニ講座「電離放射線障害防止規則改正の概要と対応のポイント」大丈夫ですか？水晶体の被ばく，第37回NPO法人日本脳神経血管内治療学会総会，福岡国際会議場（福岡県・福岡市），11月25-27日，2021.
4. 茂呂田　孝一：チーム医療で実践する放射線防護.（Web開催）山口IVR懇話会，1月22日，2022.
5. 盛武　敬：IVR術中被ばくの現状と課題. 第81回日本医学放射線学会総会，日本医学放射線学会，パシフィコ横浜（横浜市・神奈川県），4月16日，2022.
6. 茂呂田　孝一：第5回　医療機関に於ける放射線管理研修会（医療放射線安全管理責任者の育成に向けて）特別公演：実践医療放射線防護　～診療放射線技師だからこそできること～.（Web開催）兵庫県放射線技師会，7月16日，2022.
7. 茂呂田　孝一：放射線被ばく教育訓練　～診療放射線技師の役割と可能性～，第38回日本診療放射線技師学術大会　HART企画　教育講演3　被ばく，神戸コンベンションセンター（兵庫県・神戸市），9月16-18日，2022.
8. 盛武　敬：医療機関における放射線業務従事者の健康管理と被ばく影響の実態. 日本放射線公衆衛生学会　第36回講習会，日本放射線公衆衛生学会，Web開催，12月10日，2022.

I. 研究発表

1. 石原　隆宏，萩田　智明，松崎　賢，松村文代，熊　奈津代，太田　篤志，茂呂田孝一：PACS保存によるX線防護衣の保守管理の確立.（第76回日本放射線技術学会総会学術大会），パシフィコ横浜　Web開催，5月15日-6月14日，2020.
2. 阿部 利明，盛武 敬，馬田 敏幸，中上晃一，永元 啓介，欅田 尚樹：病院における個人水晶体等価線量低減を目的とした業務改善計画策定のための職業被ばく線量の実態調査. 日本保健物理学会第53回研究発表会WEB大会，6月29-30日（Web配信6月29日-7月31日），2020.

3. 松浦 康晃，隅倉 有美子，中上 晃一，盛武 敬，永元 啓介，茂呂田 孝一，松崎　賢，栗山　知子，欅田 尚樹：スチューデント・ドクター制度における放射線診療実習での医学生の被ばく．第38回産業医科大学学会，第32回産業医学推進研究会全国大会，産業医科大学ラマツィーニホール（北九州市・福岡県），10月10日（一部Web配信），2020.
4. 大田 元，盛武 敬，茂呂田　孝一，入佐剛，齋藤 清隆，末松 裕貴，河野 智樹，堀之内 翔一，小笠原 奈月，武石 剛，山下　真治，渡邊 孝，横上 聖貴，竹島秀雄：脳血管内治療時における医療被ばく線量の術中モニタリング—被曝量低減に向けた当施設の取り組み—. 日本脳神経外科学会第79回学術総会，岡山コンベンションセンター（岡山市・岡山県），10月15-17日（Web閲覧期間：10月15日-11月30日），2020.
5. 大田 元，盛武 敬，茂呂田 孝一，入佐剛，齋藤 清隆，末松 裕貴，河野 智樹，堀之内 翔一，小笠原 奈月，山下 真治，横上 聖貴，竹島 秀雄：当院における脳血管内治療時の医療被ばくの現状とその防護対策について．第36回NPO法人日本脳神経血管内治療学会総会，国立京都国際会館（京都市・京都府），11月19-21日，2020.

6. Munehiko Kowatari, Keisuke Nagamoto, Koich Nakagami, Miho Itonaga, Yoshihiko Tanimura, Takashi Moritake, Naoki Kunugita: Experimental evaluation of scattered X-ray spectra due to X-ray therapeutic and diagnosis equipment for eye lens dosimetry of medical staff. IRPA15, 15th International Congress of the International Radiation Protection Association. COEX, Seoul, Korea, Jan 18-Feb 5, 2021.
7. 松原 俊二, 盛武 敬, 人見 剛, 滝田 好宏, 石垣 陽, 宇野 昌明: 脳血管内治療患者の水晶体を防護する外付けX線遮蔽装置の開発. STROKE 2021 (第 46 回日本脳卒中学会学術集会, 第 50 回日本脳卒中の外科学会学術集会, 第 37 回スパズム・シンポジウム), 福岡国際会議場(福岡市・福岡県), 3 月 11-13 日, 2021.
8. 松崎 賢, 盛武 敬, 中上 晃一, 永元 啓介, 茂呂田 孝一, 栗山 知子, 人見 剛, 欅田 尚樹: 放射線管理区域で従事する看護師の個人被ばく線量計装着実態調査. (日本放射線看護学会第 10 回学術集会), Web 開催, 9 月 18-19 日, 2021.
9. 中上 晃一, 盛武 敬, 永元 啓介, 茂呂田 孝一, 松崎 賢, 欅田 尚樹: 心臓カテーテル検査時の立ち位置の違いによる放射線業務従事者の水晶体等価線量. (第 31 回日本心血管インターベンション治療学会九州沖縄地方会), 北九州国際会議場 (北九州市・福岡県), 10 月 1-2 日 (一部 Web 配信), 2021.
10. 栗山 知子, 中上 晃一, 茂呂田 孝一, 人見 剛, 松崎 賢, 永元 啓介, 盛武 敬, 欅田 尚樹: カテーテルアブレーションにおける看護ケア時の水晶体被ばくの評価. (第 31 回日本心血管インターベンション治療学会九州沖縄地方会), 北九州国際会議場 (北九州市・福岡県), 10 月 1-2 日 (一部 Web 配信), 2021.
11. 永元 啓介, 盛武敬, 中上晃一, 茂呂田孝一, 松崎賢, 欅田尚紀:循環器診療に従事する医師の眼の水晶体線量. (第 31 回日本心血管インターベンション治療学会九州沖縄地方会), 北九州国際会議場 (北九州市・福岡県), 10 月 1-2 日 (一部 Web 配信), 2021.
12. 栗山 知子, 盛武 敬, 茂呂田 孝一, 人見 剛, 中上 晃一, 永元 啓介, 松崎賢, 欅田 尚樹: 血 管造影室で放射線業務に従事する看護師の水晶体被ばく実態調査 . (第 39 回産業医科大学学会, 第 47 回産業医学推進研究会九州地方会), 産業医科大学ラマツィーニホール (北九州市・福岡県), 10 月 9 日 (一部 Web 配信), 2021.
13. 松崎 賢, 盛武 敬, 中上 晃一, 永元 啓介, 茂呂田 孝一, 栗山 知子, 人見 剛, 欅田 尚樹: 管理区域で働く放射線業務従事者の個人被ばく線量計装着の実態調査. (第 49 回日本放射線技術学会秋季学術大会), 熊本城ホール (熊本市・熊本県), 10 月 15-17 日 (一部 Web 配信), 2021.
14. 永元啓介, 盛武敬, 二瓶俊一, 中上晃一, 茂呂田孝一, 松崎賢, 欅田尚樹: 診断 CT 撮影における患者介助方法の違いが医療従事者の手指線量に与える影響, (第 77 回日本放射線技術学会総会学術大会), パシフィコ横浜 (横浜市・神奈川県), 4 月 11 日-14 日, 2022.
15. 栗山 知子, 盛武 敬, 人見 剛, 中上晃一, 永元 啓介, 茂呂田 孝一, 松崎賢, 欅田 尚樹 : 中央手術室で放射線診

療に携わる看護師の水晶体被ばく実態調査−高線量率群と低線量率群における業務に関連した条件の比較−(第 11 回日本放射線看護学会)，Web 開催，9 月 1-18 日，2022.
16. 永田竜朗，栗山　知子，喜多村紘子，掛田　伸吾，欅田 尚樹，盛武　敬，近藤寛之：簡易型徹照カメラを用いた放射線業務従事者の水晶体検診．（第 92 回九州眼科学会），沖縄市町村自治会館（沖縄県那覇市），5 月 28 日，2022.
17. 栗山　知子：シンポジウム 17　医療従事者の妊娠と被ばく　第二部；看護師の水晶体被ばく線量と血管造影室内の環境因子−3 病院のデータ解析から−(第 38 回日本脳神経血管内治療学会学術集会)，大阪国際会議場（大阪府大阪市）10 月 10-12 日，2022.

J. 知的所有権の取得状況

1) 放射線被ばくによる皮膚炎発生の予測: 特願 2020-072182(2020 年 4 月 14 日出願);発明者:孫　略, 盛武　敬, 千田　浩一, 稲葉　洋平;出願人:産業技術総合研究所, 産業医科大学, 東北大学
2) 線量計ホルダ:特願 2018-149742(平成 30 年 8 月 8 日出願), 特許第 7120569 号(令和 4 年 8 月 8 日取得);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 Global Embrace Medical

※ 次頁以降に参考資料を示す。

様式1

博　　士　　論　　文

(令和　5年　2月　24日　提出)

論文題目　Augmented Reality 技術を利用した放射線被ばく防護のための学習ツールの開発と効果の検証

大学院医学研究科

産業衛生学専攻　　産業疫学・医学概論　　領域

学生番号　　193301

氏　　名　　松崎　賢

指導教員　　欅田　尚樹

産業医科大学大学院

様式第2号

論　　文　　要　　旨

大学院医学研究科　産業衛生学専攻　博士後期課程

学生番号　　193301

氏　　名　　松崎　賢

論文題目

Augmented Reality 技術を利用した放射線被ばく防護のための学習ツールの開発と効果の検証

論文要旨

【背景】医療従事者は，Interventional Radiology（IVR）に従事する際，被ばくを伴う．そのため，天吊り式防護板の使用方法に熟知する必要がある．しかし,今までの教育課程が職種によって異なるため，必ずしも適切な使用方法ができていない現状がある．

【目的】IVRに従事する医療従事者が，天吊り式防護板の適切な使用方法を学習するためのAugmented Reality（AR）applicationを作成し，その有用性について学習者の動機づけの観点から検証する．

【方法】天吊り式防護板を使用しない（不適切），防護板下縁と患者の体幹との間に隙間がある（不適切），防護板下縁と患者の体幹との間に隙間がない（適切）の3つのシーンでの血管造影室内散乱線分布を測定し，それらをAR applicationで可視化した．このAR applicationを37名の医療従事者（平均年齢33.6±8.2歳，血管造影検査室での従事年数8.0±6.6年）に見てもらい，36項目で構成されたARCS動機づけモデルに基づくInstructional Materials Motivation Survey（IMMS）を実施し，5段階リッカート尺度で評価した．

【結果】IMMSの回収率は100%であった．医療従事者全体の得点は4.65±0.31（平均±標準偏差）と高得点であった．また，IMMSの下位尺度別平均得点はAttention: 4.75，Relevance: 4.61，Confidence: 4.54，Satisfaction: 4.66と偏ることなく高かった．さらに，職種の違いよる得点の有意差はなかった．

【考察】作成したAR applicationは，天吊り式防護板の適切な使用方法を学習するに際し，視覚に直接訴えることから，有用な教材であることが示唆された．今後，個人の被ばく線量が低減できたかどうか，解析の結果が待たれる．

【結論】天吊り式防護板の適切な使用方法を学習するためのAR applicationは，学習者の動機づけの観点から高い評価を得ることができた．

目　次

第１章 序論 1
1-1． 放射線診療 1
1-2． 法令改正と医療における放射線被ばく 2
1-2-1． ソウル声明 2
1-2-2． ソウル声明後の国際動向 4
1-2-3． 電離放射線障害防止規則の改正 4
1-3． 医療分野における職業被ばく線量 5
1-4． 医療従事者の放射線被ばくによる健康リスクと対策 7
1-5． 医療従事者の放射線被ばく防護教育 8
第２章 本研究における基礎的事項 10
2-1． 放射線診療を行う上で必要な労働衛生の5管理 10
2-2． 放射線防護具 11
2-3． 放射線防護教育の課題 13
2-4． 放射線防護教育のデザイン (学習意欲と動機づけ) 13
2-5． 体験学習が有効である根拠 14
2-6． XR 技術 15
第３章 関連研究 17
3-1． 天吊り式防護板の適切な使用方法の検証 17
3-2． 放射線防護教育実施による効果 19
3-3． 散乱線測定法 23
第４章 目的 25
4-1． 理想的な学習教材と放射線防護教育の問題点 25
4-2． 本研究における目的 25
第５章 方法 27

5-1． 散乱線分布測定のための機材の開発 27
5-2． 段ボールの放射線減弱率の検証 27
5-3． 血管造影検査室内の散乱線分布の測定 28
5-3-1． 血管造影検査室内の散乱線分布の測定方法の選定 28
5-3-2． 使用機器 30
5-4． 天吊り式防護板の正しい使用方法を学習するための AR application の開発 31
5-5． AR application の評価 31
5-6． 統計的解析 33
第６章 結果 34
6-1． 散乱線分布測定のための機材の開発 34
6-2． 段ボールの放射線減弱率の検証 34
6-3． 血管造影検査室内の散乱線分布の測定 35
6-4． 天吊り式防護板の正しい使用方法を学習するための AR application の開発 36
6-5． AR application の評価 39
6-5-1． 本研究の対象者の内訳と質問紙調査の詳細 39
6-5-2． 医療従事者全体の得点結果 41
6-5-3． 職種間の得点結果の比較 43
6-5-4． 医療従事者の下位尺度別得点比較 44
第７章 考察 47
7-1． 散乱線分布測定のための機材の開発 48
7-2． 段ボールの放射線減弱率の検証 48
7-3． 血管造影検査室内の散乱線分布の測定 48
7-4． 天吊り式防護板の正しい使用方法を学習するための AR application の開発 49
7-5． AR application の評価 49
7-5-1． 医療従事者全体の得点結果に対する考察 50
7-5-2． 職種間の得点結果の比較に対する考察 50

7-5-3． 医療従事者の下位尺度別得点比較に対する考察 51
7-6． 先行研究との比較 53
7-7． 本研究におけるリミテーションと展望 53
第８章 総論 56
本研究の公開 56
利益相反 57
研究倫理 57
研究費の資金源 57
謝辞 57
第９章 参考文献 58
付録 付録-1
A-1. ARCS モデルにおける注意 (Attention) 付録-1
A-2. ARCS モデルにおける関連性 (Relevance) 付録-2
A-3. ARCS モデルにおける自信 (Confidence) 付録-3
A-4. ARCS モデルにおける満足感 (Satisfaction) 付録-5

Augmented Reality 技術を利用した放射線被ばく防護のための学習ツールの開発と効果の検証

第１章 序論

1-1．放射線診療

放射線を使った診療は，現代の医療では欠かすことのできないものとなっている．特に診断分野において, CT (Computed Tomography) や MRI (Magnetic Resonance Imaging) の利用は多い．しかし CT に関しては，簡便に検査が行えるというメリットの反面，被ばく線量が多いというデメリットが問題となっており，診断のための検査が，患者の健康被害をもたらす可能性が指摘されている [1-5]．そのため, CT を利用した診断を行う場合には，患者被ばく線量を考慮する必要がある．他の検査で代替できないかを含め，必要不可欠な検査かどうかを考える行為の「正当化」，撮影条件を適正に設定し，すべての被ばく低減技術を駆使した「防護の最適化」を行うことが放射線防護を熟考する上で重要となる [6].

また近年，X 線透視を使って体外から細い医療器具を挿入し，標的となる部位の検査，並び治療を行う手技が世界的に広く普及している．その中でも特に，治療を目的として行う手技を IVR (Interventional Radiology) と呼んでいる [7]．この IVR は，主に血管系診療（血管病変を目的部位）と，非血管系診療 (その他の組織・臓器病変を目的部位) に大別され，現代医療の様々な場面で広く利用されている．原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR) においても，他の放射線を利用した検査と比較すると，検査件数自体は少ないものの増加率は高く, 2008 年から現代までに，およそ 6.6 倍に手技が増加していることが報告されている (表 1-1) [8]．今後ますます，多くの場面での増加が予想される．

表 1-1 UNSCEAR 2008 年報告と現代の IVR 件数と集団線量の比較（UNSCEAR の報告 [8]より一部改変して引用）

	手技件数 (millions)	集団線量 (1000人Sv)
UNSCEAR 2008 レポート	3.6	41
UNSCEAR 2020/2021 レポート	23.6	334
増加割合	6.6倍	8.1倍

IVR の主要となるメリットは，患部を露出させるほどの大きな手術創を必要とせず，外科手術と比較して低侵襲である点にある [7]．IVR における手術創は，数センチ程度で済むため，場合によっては手術の翌日より歩行可能となる．また，迅速に手術できることから，救急現場 (臓器損傷の止血や梗塞の要因となる血栓除去) でも利活用されている [7]．そのようなメリットの一方で，被ばく線量の増加というデメリットがある．UNSCEAR は, 2008 年から現代までに，およそ 8.1 倍に集団線量が増加していることを報告している (表 1-1) [8]．これは CT に次いで高く [8]，患者の被ばく線量は医療従事者にも影響するため，医療従事者の被ばくは必然的に高いことが推察される．さらに, CT は検査室内の作業で術者が被ばくすることは少なく，そのことを考慮すると，放射線を利用した検査の中で，医療従事者が一番被ばくをする環境である．このような線量増加の背景には, IVR 手技やデバイスの進歩があり，これまで困難とされてきた疾患への適応拡大の結果，施術時間 (X 線透視時間) の延長を来していることが考えられる．この被ばく線量増加のデメリットは，患者の被ばく線量だけでなく，医療従事者の被ばく線量にも影響を及ぼしており，適切な防護体系が求められている [9-18].

1-2．法令改正と医療における放射線被ばく

1-2-1．ソウル声明

2011 年，国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection: ICRP) は，以下のような組織反応に関する声明を発表した [9].

1. 急性，慢性被ばくに関係なく，眼の水晶体の疾患である白内障についてのしきい線量値は、0.5 Gy である
2. 循環器疾患 (心血管疾患または脳血管疾患) におけるしきい線量値は，不確実性が残るものの 0.5 Gy である

この眼の水晶体の疾患である白内障についてのしきい線量が下方修正された経緯を以下に述べる. 1940 年代後半に，放射線白内障は加速器の作業者と原爆被爆者で認められたことを受けて [19, 20]，ICRP によって，放射線の影響として勧告された [21]．その後 1954 年に，作業者に 3 mSv/週とする水晶体への最大許容線量が勧告され [22], Publication 26 では作業者の線量限度として, 150 mSv/年が勧告された [23]．なお，最大許容線量の根拠は，白内障ではなく，皮膚紅斑に関する線量であった．さらに，白内障は，Publication 14 でしきい値を持つ線量応答を示すことが [24], Publication 26 は組織反応に分類されることが [23], Publication 41 にて分割・遷延被ばくによる視覚障害性白内障へのしきい線量は 8 Sv を超えることが [25]，それぞれ勧告された．その後，Publication 92 により，白内障のしきい線量が 0.5 Gy 程度である可能性が指摘された [26]．また，そもそも，しきい線量がない，確率的影響である可能性も触れられた.

このような経緯の中, Publication 118 にて，しきい線量の改変が勧告された [9]．その根拠は，原爆被爆者における 2 つの調査である．一つ目は Nakashima らの報告であり，後嚢下白内障では 0.7 Sv (90%CI: ＜0.0–2.8 Sv)，皮質白内障では 0.6 Sv (90%CI: ＜0.0–1.2 Sv) がしきい値である可能性を明らかにした [27]. 2 つ目は, Neriishi らの報告で, 0.8 Gy を超えるしきい値とはデータとの整合性がなく, 0.0-1.0 Gy の低線量域では線量反応の傾向があることを明らかにした [28]．その他，チェルノブイリ原発事故の清掃員を対象とした白内障としきい線量の関係の調査により，白内障のしきい値が 0.7 Gy を超えない，長期間の被曝による白内障のしきい値を 5 Gy とする根拠は弱いことが明らかとなった [29]．これら 3 本の先行研究により，白内障のしきい値は 0.5 Gy より高くないと判断された．なお，原爆被爆者の調査は急性期，チェルノブイリ原発事故の調査は分割・慢性期被ばくのしきい線量の根拠となった．また，慢性期被ばくのしきい線量は，微小混濁を分析している研究が多く，微小混濁が白内障に移行する，被ばく時年齢は依存する，など疫学的知見に不確実な部分が多いため，しきい線量の同定は困難とされた．そのため，急性期被ばくと同様であると仮定し，すべての被ばく状況の名目しきい線量は 0.5 Gy と判断されている．このような科学的知見に基づき, 2011 年にソウルで開催された主委員会にて，視覚障害性白内障のしきい線量を 0.5 Gy に下げるとともに，作業者の水晶体等価線量限度を 150 mSv/年から 5 年で 100 mSv/年 (単年で 50 mSv を越えない) に引き下げる声明が発出された.

これらの声明により，従来のしきい線量値は大幅に低減し (表 1-2)，患者ならびに医療従事者の疾患に対する不安といった心理的影響は多大なものとなった．さらに，循環器疾患のしきい線量値のような，不確実な要素も未だ多く，今後の動向が注視されている.

表 1-2 旧しきい線量と現行しきい線量の相違点

疾患		旧しきい線量			現行
		急性期被ばく状況	分割被ばく状況	慢性期被ばく状況	しきい線量
眼の水晶体	混濁	0.5-2.0 Gy	5 Gy	0.1 Gy/年	
	白内障	5 Gy	8 Gy	0.15 Gy/年	0.5 Gy
心血管または脳血管疾患			なし		

1-2-2．ソウル声明後の国際動向

ICRP はソウル声明を発表の後に，計画被ばく状況における職業被ばくである眼の水晶体等価線量限度について，年 150 mSv から 5 年平均で年 20 mSv (ただし，いずれの 1 年においても 50 mSv を超えないこと) へ引き下げることを勧告した [9]．また，国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency: IAEA) は，この勧告を General Safety Requirements (GSR) Part3 に取り入れ，2018 年には General Safety Guide-7 (GSG-7) である「職業上の放射線防護」を刊行した [30]．

ソウル声明後の欧米の反応として，2013 年，ヨーロッパでは Council Directive 2013/59/EURATOM が発行された [31]．この中で，新たな眼の水晶体等価線量限を下位尺度 A (水晶体等価線量 15 mSv/年を超える) と下位尺度 B (水晶体等価線量 15 mSv/年を超えない) に分けて管理することが，EU 指令として発出された．この指令により，ヨーロッパの多くの国で，新たな眼の水晶体の線量限度が採用された．また，アメリカにおいても米国放射線防護審議会 (National Council of Radiation Protection and Measurements: NCRP) にて，従来の水晶体等価線量 150 mSv/年から 50 mSv/年に低減することが勧告された [32]．しかしながら，ステークホルダーによる反対を受け，従来の線量限度からの改定は実施されなかった．

1-2-3．電離放射線障害防止規則の改正

一方，我が国においても，医療分野における適切な放射線防護体系の運用を行うため，眼の水晶体の放射線防護検討部会放射線審議会 (原子力規制委員会，2017 年 7 月～2018 年 2 月，全 7 回) や眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 (厚生労働省，2018 年 12 月～2019 年 8 月，全 6 回) が実施された．このような関連省庁における審議を経て，我が国で関連する国内法令である電離放射線障害防止規則 (以下，電離則) において，電離則第 3 条第 3 項並びに第 8 条第 5 項及び第 9 条第 2 項の規定に基づく厚生労働大臣が定める限度及び方法を定める件の一部の改正が妥当だと判断された．そして，2020 年 10 月 27 日，労働基準局長名で発する通達 (基発 1027 第 4 号) がされ，2021 年 4 月より水晶体等価線量限度の引き下げを実施することとなった (表 1-3)．今後，ますます適切な放射線防護体系の運用が求められている．

表 1-3　電離則における眼の水晶体等価線量限度の改正前後の違い

	改正前	改正後（2021年以降）
眼の水晶体の等価線量限度	150 mSv/年	100 mSv/5年（4月1日以降5年ごとに区分した各期間）かつ、50 mSv/年（4月1日以降を始期とする1年間）

1-3．医療分野における職業被ばく線量

医療従事者が受ける被ばく線量は，他の分野の職域と比較して高いと言われており，従事者の被ばく線量に関する具体的報告が数多くされている (表 1-4) [33-39]．

表 1-4 医療従事者の被ばく線量まとめ

著者	対象	実効線量 (mSv/year)	眼の水晶体等価線量 (mSv/year)
Vano et al. (2006) [33]	循環器内科医	1.2–11.6	18–259
Chida et al. (2013) [34]	循環器内科医	3.00±1.50	19.84±12.45
	看護師	1.34±0.55	4.73±0.72
	診療放射線技師	0.60±0.48	1.30±1.00
奥山ら. (2016) [35]	消化器内科医	1.2–4.8	1.2–18
	看護師	1.2–15.6	1.2–57.6
岩井ら. (2016) [36]	医師	0.2–10.6	1.2–13.8
Haga et al. (2017) [37]	循環器内科医	N/A	19.59±12.59
	看護師	N/A	4.01±2.36
Kato et al. (2019) [38]	循環器内科医	N/A	3.08–27.98
Nagamoto et al. (2021) [39]	循環器内科医	N/A	15.2–51.7
	脳神経外科医	N/A	11.9–14.5
	消化器科医	N/A	0–75.3
	整形外科医	N/A	0.5–0.8
	放射線科医	N/A	3.9–9.0

N/A: not available

Vano らは，17 名の循環器内科医 (フェローを含む) の 15 年間にわたる職業線量を評価している [33]．長期追跡期間の中で，血管撮影装置が，より安全な構造となるよう設備改善されており，さらに放射線防護教育も行われている．その結果，5–11 mSv/月であった線量が平均 1.2 mSv/月まで，およそ 90%低減されるようになった．併せて，危険域にあった眼の水晶体線量も低減された．この被ばく線量低減の中で，一番効果的であった行動は，放射線防護の実践訓練，撮影条件の見直し，放射線防護具 (特に天井吊り下げ式防護板) の体系的使用であったと，報告している．

Chida らは，長い X 線透視時間になりがちである IVR に従事する医療従事者（循環器内科医 18 名，看護師 7 名，診療放射線技師 8 名）の線量を評価している [34]．従事者の被ばく線量は，医師，看護師，診療放射線技師の順で高かった．また，個人被ばく線量計 1 個使用の場合には，防護衣の下に装着することにより，2 個使用の時よりもかなり低く測定される．そのため，IVR に従事する医療従事者の線量評価には，2 個の個人被ばく線量計を使用すべきであることが報告されている．

奥山らは，内視鏡的逆行性胆道膵管造影（Endoscopic retrograde cholangiopancreatography: ERCP）時における，医療従事者（消化器内科医11名，看護師6名）の被ばく線量を評価している [35]．従事者の個人被ばく線量と意識を調査した結果，被ばくに対する認識が不十分であることが判明した．そこで，講習会を行い，さらには，付属の防護衝立や掛布を使用した時の検査室内の散乱線測定を行い，各防護具の評価をしている．そして，備え付けられている防護具の使用により，個人被ばく線量を低減できるという結果を講習会にて伝達している．その結果として，一部の看護師の被ばく線量低減を達成したことを報告している．

岩井らは，放射線診療を行う医師（10名）に対しての被ばく線量の評価を行なっている [36]．放射線診療を行う医師に対して，放射線防護に関する講習会を実施し，かつ電子カルテ上の放射線科ページにて被ばく防護に関する注意喚起を行なっている。その結果，間違った個人被ばく線量計の装着が減り，適切な被ばく線量の評価ができるようになっている．適切な管理のため，管理を担う診療放射線技師の被ばく防護に関する啓発活動の重要性を報告している．

Hagaらは，IVRに従事する医療従事者（循環器内科医12名，看護師11名）の眼の水晶体線量を評価している [37]．その結果として，医師の線量は看護師よりも高く，医師は法令で定められた線量限度を超える恐れがあることが述べられている．この対策として，防護効果が60%近くある放射線防護眼鏡（0.07 mm Pb）の着用が必要不可欠である．さらには，従来行われてきた首元の個人被ばく線量計での測定と比較して，眼の近傍での直接線量測定は，正確な眼の被ばく線量の評価が可能となる．そのため，その直接測定法が推奨されることを報告している．

Kato らは，IVR に従事する医療従事者（循環器内科医 3 名）の眼の水晶体線量を評価している [38]．評価した放射線診療は，不整脈治療やペースメーカー留置などであり，X 線透視によるデバイスの視認性の高さから，Haga らの報告 [37]よりも，個人の被ばく線量が低いことを示している．また，放射線防護眼鏡を使用することの重要性を報告している．

Nagamoto らは，多施設における医師（循環器内科医，脳神経外科医，消化器科医，整形外科医，放射線科医）の眼の水晶体線量を評価し，線量限度を超過する可能性があることから，労働衛生の管理に則った被ばく防護の提案を行なっている [39]．具体的に行なった提案は，撮影条件の見

直しや適切な天吊り式防護板の使用の促しであり，その結果として，中央値 53%（範囲：37-79%）の被ばく線量低減効果が認められている．放射線防護を適切に行うことで，法令で定められた眼の水晶体等価線量限度内に抑えられることを報告している．

これら医療従事者の被ばく線量は，主術者の経験値と放射線防護意識，使用機器，放射線診療種とそれを施行する診療科，職種，測定器により様々である．特に近年では，最新の被ばく線量を低減させた機器が開発されており，その影響もあって，従事者の被ばく線量も減少傾向であるといえる（表 1-4）．しかしながら，いまだに高止まりしており，眼の水晶体等価線量においては，適切な放射線防護をしなければ，法令で定められた線量限度を超過する可能性がある．

1-4．医療従事者の放射線被ばくによる健康リスクと対策

医療従事者の被ばくは未だ高いため，それに伴う健康への影響が問題となっている．その健康影響はさまざまであるが，近年，眼の水晶体（混濁に伴う白内障）が問題がとなっている．眼の水晶体は，従来では慢性（分割）被ばくで 5 Sv，急性期被ばくで 0.5–2.0 Sv で検出可能な混濁を生じるとされてきた [40]．しかし，最新の疫学調査により，そもそもしきい値がない可能性と共に，不確実性が残るものの，従来考えられてきた値よりも大幅にしきい値が低い可能性が報告された [9]．これに伴い，世界中で眼の水晶体に対する線量限度の低減について議論され，日本においても，その線量限度が受け入れられた．また，Hijikata らは医師の爪甲色素線条や皮膚がんの罹患の可能性 [41]や，生殖腺への影響として女系の子供が生まれやすいこと（オッズ比: 4.40, 95%信頼区間 1.60-2.48）を報告している [42]．その他にも，Cioffi らは低線量被ばくである医療従事者の甲状腺の影響として甲状腺機能低下症を [43]，Vimercati らは甲状腺結節といった甲状腺有病率のリスクが高まる可能性を示唆している [44]．このように，医療従事者への被ばくによる健康の影響は多数報告されている．

そこで，放射線診療に伴う被ばくから，医療従事者の健康を守るためには，放射線防護装具が重要になる．備え付けの防具装具である天吊り式防護板や防護カーテン，防護衝立などを適切に利用する必要がある．しかしながら，天吊り式防護板の使用は，適切に行われているとは言い難い [39, 45]．この改善として，Nagamoto らは，天吊り式防護板や個人防護装具の使用の励行，透視条件の変更などを行うことで，IVR 術者の水晶体等価線量を 53% (range: 37–79%) 低減できたと報告している [39]．このように，放射線防護装具の適切な使用や照射条件の改善といった防護措置は，放射線診療を行う医療従事者にとって必要不可欠であることが窺える．また，個人の防護装具の利用には，個人差が伴う（表 1-5）[46]．それは，今までの学習や被ばく防護への取り組み方などが影響する．しかしながら，医師に関しては，被ばくに対する影響が強いため，防

護への知識や実践力が上がるのを待つことはできない．そこで, Matsuzaki らは，放射線診療前のブリーフィングを利用し，個人防護装具の装着への声掛けをすることで，個人の防護装具の装着率を上げる取り組みを行っている (表 1-5) [46]．このような，改善案も現場に取り入れることが肝要だと考える．

表 1-5 介入前後の防護装具装着率の比較 (Matsuzaki らの報告 [46]より一部改変して引用)

個人防護装具	介入前中央値(%)	介入後中央値(%)	*p* value
主個人線量計	57 [0–100]	100 [67–100]	0.002
追加個人線量計	0 [0–100]	85 [0–100]	0.008
防護衣	100	100	1.000
防護眼鏡	15 [0–100]	100 [67–100]	0.003
甲状腺防護カラー	69 [0–100]	100 [89–100]	0.008

1-5．医療従事者の放射線被ばく防護教育

このように，現場での改善策は重要であるが，前提として，被ばく防護に関する基礎知識が培われた上で成り立つ対策である．そのため，被ばく防護に関する教育が適切に実施されていることが求められる．一般的に医療従事者は，被ばく防護に関する基礎知識を学習した後，放射線診療に従事している．しかし，専門性の高い被ばく防護の教育は，全体的に十分でない可能性がある．例えば医師は，全国の 80 大学中 67 大学でのアンケート調査にて, 70%の大学では，放射線に関する講義のうち, IVR に関する講義の割合は 10%未満であり，さらに内容も，手技に関する講義が大半を占めていると報告されている [47]．また看護師は，大学設立に向けたカリキュラムの見直しに伴い, 1990 年代以降に卒業した看護師の放射線に関する教育の機会は激減している [48]．そのため，現在，臨床現場に従事する看護師は，ほとんど放射線教育を受けていないことが実情であろう．なお, 2022 年度より，看護師教育のカリキュラムが見直され，再び放射線に関する教育を行うことが定められており [49]， 今後，改善が見込まれる．また，診療放射線技師も，専門学部での教育は行われているものの，勤務する職場環境によって，知識量は異なることが報告されている [50]．それぞれのモダリティに関する学習が優先され，他の職種と同様，被ばく防護の学習が疎かになっている可能性も窺える．したがって，学校での教育過程において，まったく教育されていないわけではないが，放射線防護教育は不足していると考えられる．いずれの医療従事者も，自身を守る被ばく防護の内容よりも，患者を治療するための技術的教育が優先されていると考えられる．

一方，どの職種においても，臨床現場における定期的な放射線安全講習が設けられている．また，各職種における専門技術者の認定や学会など，放射線被ばくに特化した学習をする機会もあるであろう．そのような，数少ない学習機会が，現状の放射線防護の知識，実践力を支えている．

第２章　本研究における基礎的事項

2-1．放射線診療を行う上で必要な労働衛生の 5 管理

労働を行う上で，事業者並びに作業者は，労働衛生管理に基づくプログラムを踏襲することが重要となる．このプログラムは，リスクや課題が異なる労働環境において，労働環境を見直し，典型的な職業病の予防から個人の健康増進まで幅広くカバーするためのものである．これらの活動を支持するため，労働衛生の 5 管理があり，放射線診療においても 5 つの労働衛生活動（労働衛生管理体制の確立，作業環境管理，作業管理，健康管理，労働衛生教育）に分類される（表 2-1）[51].

表 2-1 放射線診療における医療従事者のための労働衛生の 5 管理

労働衛生の5管理	放射線診療における管理内容
労働衛生管理体制の確立	放射線診療に係る安全管理体制（労働安全委員会や放射線防護委員会）の設置や産業医，衛生管理者の選任など
作業環境管理	放射線診療室内における環境放射線量測定や個人モニタリングの実施，放射線源からの遮蔽など
作業管理	放射線診療の手順書の作成や遠隔作業の実施，個人保護装具の整備など
健康管理	就業前（配置前）の放射線特殊健康診断の実施など
労働衛生教育	放射線業務就業前（配置前）と，その後の定期的な教育訓練など

労働衛生管理体制の確立の主な役割は，安全管理体制に関わる組織の立ち上げや整備，手順書の作成，産業医などの核となる人材の選任，外部組織との連携など多岐にわたる．他の 4 管理に比べて組織の運営の要素が強く，統括的な管理を行っている．作業環境管理は，主に労働環境の有害因子の把握と管理を役割としている．放射線診療においては，作業環境や個人の放射線量測定を行い，放射線源の防護に向けた防護具の設置などを行う管理を指す．作業管理は，作業条件の最適化や個人防護具の管理を行う役割がある．遠隔作業を考慮した手順書の作成など，有害業務からのばく露や負荷を適切に管理できるような実臨床に即した作業方法を定めている．健康管理は，労働者の健康状態を定期的に確認し，異常がないかを早期発見することや個人の心身ともの健康を増進させるための措置を講じる役割を持っている．放射線診療においては，放射線由来の疾病を発見するため，6 ヶ月ごとに電離放射線健康診断を行うことが，電離則第 56 条にて定められている．労働衛生教育は，労働環境由来の健康障害に関する教育だけでなく，一般的な健康

教育も行う役割を担っている．放射線防護教育では，理論的側面と実践的側面から成り立つ．理論だけでは，いずれ忘れてしまう可能性があり，実践的なトレーニングを行うことの重要性が報告されている [11, 52].

これらの管理のうち，作業環境管理，作業管理，労働衛生教育は医療従事者の被ばく線量を低減させることに直接関係している．放射線診療で高い被ばく線量が測定される医療従事者がいるのならば，この 3 つの管理を主に実践し，PDCA サイクルを回して，より良い管理をすべきであると考える．なお，リスク低減措置の優先順位は，①危険性や有害性の除去，②工学的対策，③管理的対策，④個人防護具の使用となり，まずは根本を断ち，最終手段として個人防護具を使用することが望まれる．しかし，放射線診療を考える場合，根本を完全に断つことは難しいため，工学的対策や管理的対策，個人保護具の使用が主要な措置となる．

2-2．放射線防護具

医療従事者が散乱してくる放射線から自身を守ために防護具がある．放射線の種類で遮蔽できる素材は異なり，一般的に医療現場で問題となる散乱線は，原子番号の高い金属である鉛を用いている．しかし近年では，鉛の重みを改善するため，代替品であるタングステンなどの金属が防護具に使用され，無鉛化が進んでいる．また，実際の使用では 100%放射線を防護する必要はなく，その被ばくする量を減弱させることを目的としている．このことを ALARA の原則（as low as reasonably achievable）と呼び，すべての被ばくは社会的，経済的要因を考慮に入れながら合理的に達成可能な限り低く抑えるべきという防護の最適化の概念となっている [23].

実際の臨床現場では，身に着けるための防護具である防護衣，防護眼鏡，ネックガードなどがある(図 2-1 A–C)．いずれも軽量化されており，長時間の手技中でも身体的負荷を少なくするため，0.25–0.5 mm の鉛相当の防護具がほとんどである．それに対し，天吊り式防護板や防護カーテン，防護衝立といった備え付けられた防護具がある（図 2-2 A–C)．これらは，放射線源から医療従事者を極めて高く防護する構造となっており，0.5–3.0 mm の鉛相当といった鉛含有量の多いものが使用される．そのため遮蔽効率は非常に高いものの重量があり，その場に固定して使用されることが多く，備え付けらえた範囲内でしか強い効果を発揮しない．

(A) (B) (C)

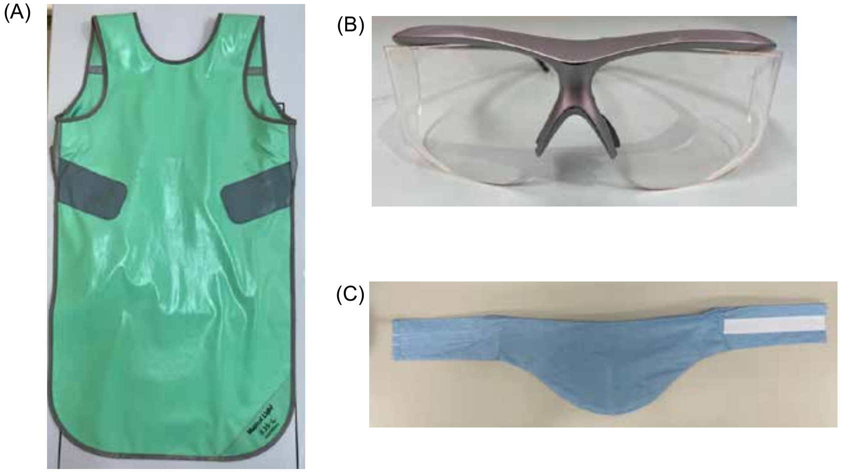


図 2-1 身に着けるタイプの放射線防護具. (A) 防護衣, (B) 防護眼鏡, (C) ネックガード. 使いやすい形状や重さ対策を施したものなど, 多数の種類がある.

(A) (B) (C)

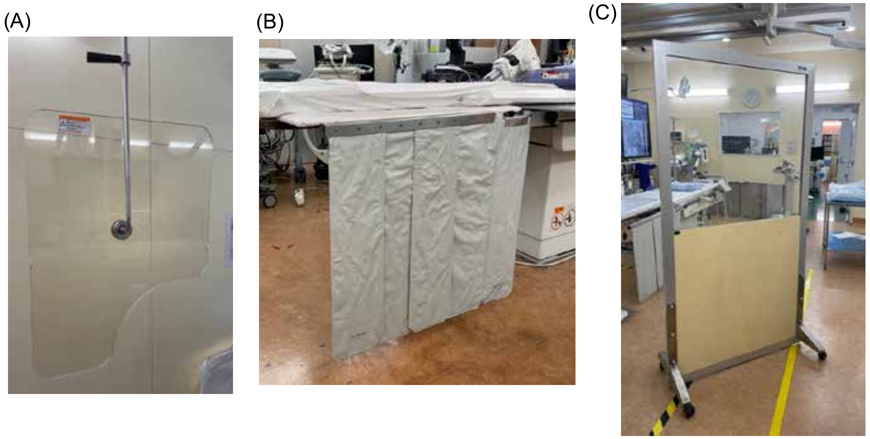


図 2-2 備え付けるタイプの放射線防護具. (A) 天吊り式防護板, (B) 防護カーテン, (C) 防護衝立. 防護効率は高いが固定して使用されるため, 備え付けられた範囲でしか効果がない.

2-3．放射線防護教育の課題

医療従事者は, 臨床現場に配置される前に, 装置の取り扱いだけでなく, 電離放射線の生体に与える影響や関係法令といった放射線安全に関係する特別な教育を受けることが求められている [53]. しかし, 理論的な教育で終わることが多く, 時間経過と共に風化されているのが現状であろう [52]. 仮に実践的なトレーニングを受けたとしても, 主術者の技量や対象疾患, 新しい治療法の確立によって IVR の適応が変化するため, その都度, もしくは定期的に適切なトレーニングを受ける必要がある. しかしながら, IVR といった治療法自体の学習をすることはあっても, 防護に特化した学習をすることは少ない. また, IVR は医師をはじめとした多くの職種のスタッフによるチーム医療が不可欠であるが, そのスタッフらが受けてきた放射線教育の内容は様々である. 例えば, 看護師の 29–63%が学生の時に放射線教育を受けておらず [54, 55], 看護師ライセンス取得後も 35–91%が放射線に関する講習会やトレーニングに参加していないという報告がある [54-57]. このように, 放射線教育が限定的なものになっていることは, 放射線の影響がすぐに出ないため, 興味を持てないといった要因があると考えられる. その他, 放射線は, 目に見えず, 触ることもできないため, どう防護したら良いのかわからないといった側面もあるかもしれない. そこで, 放射線防護教育を実施する者には, 誰しも理解しやすく, 学習意欲を持続させるような教育方法が求められる.

2-4．放射線防護教育のデザイン (学習意欲と動機づけ)

教育を実施し, 学習を成功させる上で必要な要素は何か. それは意欲である. 意欲は, 行動の方向性 (何を望み, 欲するか) と, その大きさ (何に全力を傾けるか) を表現する概念である [58]. 意欲は非常に複雑で曖昧なものあるが, 高ければ, どんな困難をも乗り越えることが可能である. すなわち, 目的達成に向けての努力量が, 学習者の持つ知識やスキルと組み合わされば, パフォーマンスに高い影響を与えることができる (図 2-3) [58]. そのような観点から, 学習意欲を高め, 放射線防護学習に向けた動機づけを学習者にさせることが, 放射線防護教育を実施する者 (教育実践者) に必要となってくる.

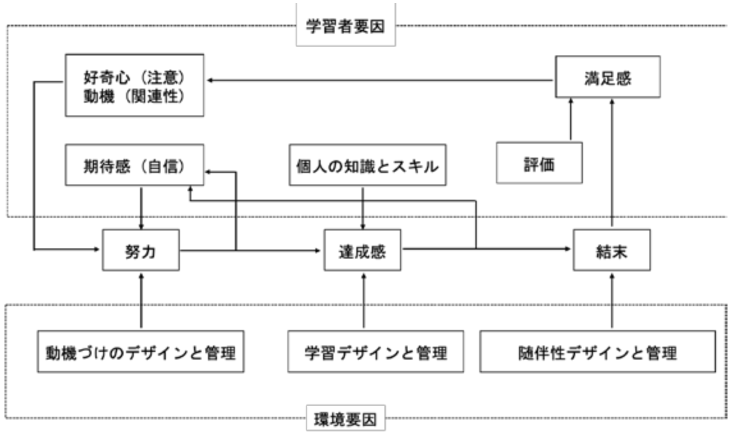


図 2-3 Keller の動機づけとパフォーマンスのマクロモデル (Keller の書籍 [58]より一部変更して引用).

Keller は, 学習意欲をデザインするために 4 つの概念をクラスタリングした [58, 59]. その概念は, 注意 (Attention), 関連性 (Relevance), 自信 (Confidence), 満足感 (Satisfaction) である. これらは, ARCS モデルと呼ばれ, 学習意欲に影響する主要な要因を網羅している. さらに, 動機づけの概念と理論とを統合し, 学習意欲へのシステム的アプローチを可能とした [58].

このように ARCS モデルの理論は, 学習を行う上で, 必要不可欠な考え方である. この理論をうまく利用し, さまざまな教育課程を経た医療従事者に対して, 適切な意義のある放射線防護教育を行うために, 内発的な動機づけを行い, 満足感を持たせるような学習方法を実践することが肝要である. 本研究は, Keller の提唱する ARCS モデル [58-60]を参照に実施しており, その概要は付録にて述べる.

2-5. 体験学習が有効である根拠

講義学習は, 他者から与えられた知識を獲得することが主な目的である. 単に, 教えられたことを暗記するための学習は, 学習者にとって付加価値がなく, 学習が発見と能動的な参加によって行われ, 知識構築の発展には経験が重要であると Kolb は提唱した [61]. この本質は, 経験と概念, 観察, 行動を統合するプロセスとしての学習を強調するという Dewey や Lewin の考え方を踏襲している. Dewey と Lewin 相違点は, Dewey の考える学習が, 具体的な経験の衝動, 感情, 欲求をどのように高次の目的ある行動に変換するかを論じた点である.

Kolb は, 4 つの学習サイクルを経ることで, 経験から知識への変換が行われることを提唱している (図 2-4) [61]. この考え方は Piaget の子供の認知の成長過程のモデルに類似している. その学習サイクルの 1 つ目は, 具体的経験である. 具体的な経験では, 学習者が積極的に課題に取り組む (関与する) ことが重要となる. 2 つ目は, 内省的観察である. 取り組んだ課題を多様な観点から振り返ることで, 学習者は自身の理解と体験の間にある矛盾を認識できる. 3 つ目は抽象的概念化である. 経験したことを自分なりに解釈, 分類することで, 他の状況でも応用できるようなルール作りを行うことを指す. そして最後に, 能動的実験である. 作り上げたルールを新しい経験に実践させ, 理論の実証とともに, さらに新しいサイクルを循環させる.

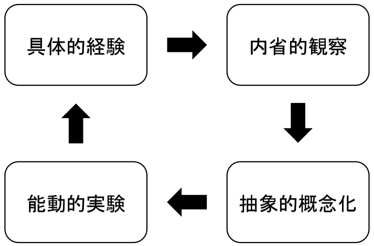


図 2-4 Kolb の経験学習理論のサイクル

このような 4 つのサイクルを循環させることで, 学習者が環境との相互作用を通じて知識を創造することができるため, 体験学習は重要である.

2-6. XR 技術

XR (Extended Reality) は, VR (Virtual Reality), AR (Augmented Reality), MR (Mixed Reality), SR (Substitutional Reality) といった画像処理技術の総称である [62]. SR 技術はまだ発展途上であるものの, 他の技術は近年, さまざまな分野で爆発的に広がっている. 以下に VR, AR, MR の違いについてまとめる (表 2-2).

表 2-2 VR, AR, MR の違い

	VR (仮装現実)	AR (拡張現実)	MR (複合現実)
主となる空間	仮想空間	現実空間	仮想空間
使用機器	ヘッドマウントディスプレイなど	モバイル端末など	ヘッドマウントディスプレイなど
特徴	仮想空間で３D 情報を表示させる	現実空間で３D 情報を表示させる	現実空間に仮想空間を表示させる
活用事例	手技のトレーニングや不動産	観光や小売業	手術シミュレーションや会議

VR 技術は仮想現実と呼ばれ, 3D (3- Dimensional), CG (Computer Graphics) 技術によって作られた仮想現実の世界を体験できる技術である [62]. 専用のヘッドマウントディスプレイやゴーグルが必要であるものの, 限りなく実体験に近く, 主に医療手技のトレーニングや不動産業などに活用されている (表 2-2). また, 放射線防護教育の教材として散乱線の挙動を, VR を用いて表現した報告もある [63-66].

AR 技術は拡張現実と呼ばれ, 現実世界にコンピューターで作成した画像や文字などを重ね合わせる (拡張させる) 技術である [62]. VR と異なり, スマートフォンやタブレットを利用することで体験が可能であるため, 観光や小売業における説明などに活用されている (表 2-2). また, 放射線防護教育の教材として AR を用いて散乱線を表現した報告もある [66-69].

MR 技術は複合現実と呼ばれており, 現実世界に仮想現実を重ね合わせた技術である [62]. 専用のヘッドマウントディスプレイやゴーグルが必要であるものの, さまざまな分野での活用が期待されている. 特に医療における手術シミュレーションや会議など, より実務的な利用がされている (表 2-2).

SR 技術は代替現実と呼ばれており, 過去の出来事などを現実世界に映し出す技術である [62]. まだ発展段階の部分が多く, 今後の活用に期待がされて技術である.

このように XR 技術は, それぞれの特徴を活かして様々なフィールドで利活用されている. 近年では, 医療分野での利用も多くなっており, 患者ケア [70, 71]だけでなく, 手技トレーニングといった技術を学ぶための利用 [72-74],や, 画像支援 [75-79],など用途は多岐に及んでいる.

第３章　関連研究

3-1．天吊り式防護板の適切な使用方法の検証

放射線防護を実践する上で重要な防護具に天吊り式防護板がある. 適切に使用することで, 被ばく線量の大幅な低減が期待できる. しかしながら, 実際の臨床現場では, その使用方法を適切に行えていない事例が散見されており, 効果的な使用方法の教育を実施する必要がある.

Fetterly らは, 患者を模擬したファントムによる実験において, 防護具の使用方法を検討した [80]. その結果, 天吊り式防護板は術者に近く, 患者に近づけ隙間を無くすことで上半身 (床から 125cm 以上) を 80%以上防護できることがわかった. 反対に, 術者より 20cm X 線管に寄せて, 5cm 患者から離して隙間を作ることにより, 上半身は最大 40%も防護できていないことが判明した. また, この報告の中で, 患者穿刺時の術者の立ち位置ごとの適切な防護方法の提案を行っている (表 3-1).

表 3-1 術者の立ち位置ごとの最適な上半身の防護方法 (Fetterly らの報告 [80]より一部変更して引用).

患者穿刺部位ごとの立ち位置	上半身の推奨防護方法
大腿部	立ち位置の頭側で、患者の体表に密着するように配置する
手首	一部の手順 (可能な範囲) で大腿部と同様の方法が推奨される
右頸静脈	X線管により手技の妨げとなる
左前胸部	手技の妨げとなる

Jia らは, 患者を模擬したファントム実験により, 防護具の適切な使用方法を検討した [81]. その結果, 主術者と X 線管の間の主術者側に寄せることで天吊り式防護板の低減効果が高いことが認められた (表 3-2). この効果は, 天吊り式防護板を使用していない時および, 他の配置位置と比較して, 有意差を持って高かった ($p<0.013$). また, セカンド術者の低減率も同様な傾向を示しており, 主術者の防護方法は, 他の従事者に波及することが認められた.

表 3-2 天吊り式防護板の配置位置による低減率 (Jia らの報告 [81]より一部変更して引用).

天吊り式防護板の配置位置	主術者の放射線低減率	セカンド術者の放射線低減率
術者とX線管の間のX線管側	76.8%	70.3%
術者の左横	81.9%	76.7%
術者とX線管の間の術者側	93.5%	90.0%

Koukorava らは，モンテカルロシミュレーションを用いて，天吊り式防護板の配置位置の検討を行った [82]. その結果，天吊り式防護板を術者側に寄せ，患者表面との隙間を無くすことで，最大の線量低減効果が 92% (左眼) であった (表 3-3). これは，放射線防護眼鏡を使用した場合 (87%) よりも高かった (表 3-3). さらに，天吊り式防護板と患者表面の隙間を無くすことは，術者の手や手首の被ばく線量を 68%低減した. 天吊り式防護板の適切な使用は，眼だけでなく，上半身の全体の防護に役立つことが認められた.

表 3-3 天吊り式防護板の配置位置における左眼と手部の低減率 (Koukorava らの報告 [82]より一部変更して引用).

天吊り式防護板の配置位置	術者の左眼の放射線低減率	術者の左手と手首の放射線低減率	防護眼鏡の放射線低減率
術者とX線管の間のX線管側 (患者表面に3cmの隙間あり)	77%	21%	
術者とX線管の間のX線管側 (患者表面に15cmの隙間あり)	72%	14%	87%
術者とX線管の間の術者側 (患者表面に隙間なし)	92%	68%	

このように放射線診療に従事する術者が効果的な放射線防護を実践するためには，天吊り式防護板，防護カーテン，防護眼鏡といった防護具の適切な使用が大きな意味を持つ. さらには，できるだけ線源から距離をとるといった行為も考慮すべきであり，これらの措置は主術者だけでなく，

他の従事者にも波及する. そのため，正しい知識を身につけて実践することが医療従事者者に求められる (図 3-1).

図 3-1 適切な放射線防護の実践. 防護カーテンを設置し，天吊り式防護板は術者近くの患者表面にできる限り寄せる. さらに術者は，防護眼鏡を装着し，できる限り線源から距離をとる.

3-2. 放射線防護教育実施による効果

放射線防護に関する教育を行った報告は，多数ある. 放射線防護教育を行う上で重要なことは，理論的教育と実践的トレーニングの融合である [52]. 理論だけでは，時間の経過と共に記憶が薄れてしまう可能性があり [52]，実践だけでは応用力が培われない. 定期的な放射線防護教育とトレーニングを行うことで防護文化が醸成され，適切な放射線被ばく防護が達成できると考えられている [11].

奥山らは, ERCP に従事する医師や看護師に放射線防護に関する教育を行い，アンケートと個人の被ばく線量で評価を行った [35]. その結果，最適な被ばく防護の方法を取得できたというアンケート結果を得ることができた. また，個人の被ばく線量の結果は教育後で多様性を持っており，被ばく線量計をそもそも着用していなかった従事者は線量が高くなり，被ばく防護を徹底できるようになった従事者は線量低減が認められた. 被ばく線量低減のための防護教育は，単に理論的なことや実践的なことだけでなく，適切な評価を行うための個人の線量測定の実施を促すことも重要であることが窺い知ることができた.

Brun らは，手術室における麻酔科と外科の医師の放射線防護教育を行い，その前後でのテストを実施して評価を行った [83]. この時行われた教育は，年間線量限度，放射線障害, X 線透視装置

の最適化といった，放射線診療に従事する前に知っておくべき知識を項目ごとに系統立てて，適切に実施された．その結果，テストの合計得点は有意差を持って高くなったものの ($p<0.001$)，実践に対する得点は変わっておらず，知識のみの向上に留まった (表 3-4)．今後，実践を改善するような教育戦略が求められる．

表 3-4 教育前後のテスト結果 (Brun らの報告 [83]より一部変更して引用).

	教育前	教育後	p
知識	5.5	9.5	< 0.001
実践	3.2	3.3	0.666
合計	8.7	12.8	< 0.001

Lundvall らは, IVR を行う医師 (n = 6) と診療放射線技師 (n = 4) を対象に，理論的，実践的教育の実施とリアルタイム線量計を用いた手技中の線量確認を行うことで，被ばく線量の低減を試みた [30]．その結果，理論的，実践的教育の実施では有意な被ばく線量の低減が認められ，さらにその効果は 5 ヶ月後も持続していた (表 3-5)．この教育の中で, X 線管の傾きや術者の立ち位置による散乱線の広がりを学習できたことは，効果的な放射線防護を行う上で，必要なことであったと報告されている．

表 3-5 教育前後の IVR に従事する医師と診療放射線技師 (n = 10) の被ばく線量の変化 (Lundvall らの報告 [52]より一部変更して引用).

	従事者の被ばく線量中央値 (μSv/Gycm^2)	p 値(教育前との比較)
教育前	0.789	
教育後	0.077	0.011
リアルタイム線量計設置後	0.121	0.173
5ヶ月後	0.237	0.021

隅らは，診療放射線技師が心臓カテーテル検査を施行する医師に対して，放射線防護教育を実施し，医師の水晶体被ばく線量の低減を試みている [45]．その結果，臨床の検査において，水晶体被ばく線量の低減率は 26–35%となり，さらに右眼は有意差を持って低くなった (表 3-6)．診療放射線技師による防護教育で被ばく低減を可能にすること，そして教育の重要性を証明した．

表 3-6 放射線防護教育前後の医師の眼の水晶体被ばく線量低減率 (隅らの報告 [45]より一部変更して引用).

術者測定位置	放射線低減率	p値(教育前との比較)
右眼外側	32%	< 0.05
右眼内側	35%	< 0.05
左眼外側	28%	0.12
左眼内側	26%	0.11

Nagamoto らは，日本の多施設研究にて，いくつかの具体的な防護方策 (防護板の適切な使用法や防護眼鏡の着用，透視パルスレートを下げるなど) の提案を行うことで，実際の臨床における医師の眼の被ばく線量を低減させることを検証した [39]．その結果，眼の被ばく線量を 37－79% 低減することができた (表 3-7)．実臨床での防護の実践の難しさが残るものの，適切な防護方法を行うことで，線量低減を実現できることを証明した．

表 3-7 推奨防護方法の実践における医師の眼の被ばく線量低減率 (Nagamoto らの報告 [39]より一部変更して引用).

医師	低減率
Cardiologist A	42%
Cardiologist B	53%
Cardiologist C	79%
Neurosurgeon D	37%
Neurosurgeon E	53%
Gastroenterologist F	59%
Gastroenterologist G	45%
Gastroenterologist H	39%
Gastroenterologist I	46%
Orthopedic Surgeon J	78%
Orthopedic Surgeon K	62%
Radiologist L	68%
Radiologist M	41%

藤淵らは，一般撮影やCT撮影, IVR時の散乱線の広がりを, VRを用いて可視化し，専門資格を有した学生 (看護師，診療放射線技師，臨床工学技士) の学習教材として利用した [63, 64]. その結果，演習の難しさが残るものの，放射線の挙動や防護板の最適な利用など，放射線防護教育のコアとなる部分の学習に効果的であった. またARCSモデルでの評価を行っており，注意 (Attention)，関連性 (Relevance)，自信 (Confidence)，満足感 (Satisfaction) の平均値は3.2–3.8と高評価であった (表3-8) [63]. また，自由記載のアンケートをテキストマイニング分析した結果，理解，簡単，良いといった意見が多く使用されていた [64].

表 3-8 VR を用いた学習の ARCS モデルによる評価 (藤淵らの報告 [63]より一部変更して引用).

	得点 (平均値±標準偏差)
注意 (Attention)	3.4±1.1
関連性 (Relevance)	3.8±0.9
自信 (Confidence)	3.2±1.1
満足感 (Satisfaction)	3.7±0.8

大屋らは，胸部，腹部における移動型 X 線撮影時の散乱線の広がりを，プロジェクションマッピングを利用して可視化し，看護学生に教育教材として応用した [84]. 散乱線の広がりを可視化することで，実際の被ばく線量の高い立ち位置を体験でき，撮影時の安全だと思う退避距離への理解が促進された. このような体験型学習は高い学習効果が期待でき，放射線防護教育への動機づけに繋がることが推察された.

Süncksen らは，手術室における X 線透視を用いた手技を行う医師 (整形外科，外科) らにおいて，散乱線の挙動を学ぶための学習教材として VR を利用し，その効果をアンケートにて評価した [65]. その結果，散乱線の挙動を学習するのに VR は有効であったとの意見が 95%以上であり，その効果の高さを実証した.

Nishi らは，散乱線の広がりにおける学習について，インターネットを介した AR, VR 教材 (WebAR, WebVR) を開発し，その学習効果を，診療放射線技術学を学ぶ大学生の講義に使用した [66]. このメリットは，ヘッドマウントディスプレイといった特殊な機器を必要とせず，インターネットの利用とスマートフォンやタブレットといった端末のみで利用できることである. この 2 つの教材を ARCS 動機づけモデルで評価した結果，平均点が WebAR で 4.17–4.36, WebVR で 4.21–4.44 と全体的に高く，また，有意差はないものの WebVR の方が高く評価された (表 3-9). また，ネガティブな意見として意外性がないことが挙げられたが，これは放射線学を学ぶ学生が対象のためであった. 本報告で, 2 つの教材が学習意欲を促進させる教材であることが認められた.

表 3-9 WebAR, WebVR の ARCS 動機づけモデルにおける評価 (Nishi らの報告 [66]より一部変更して引用).

ACRSモデル	WebAR (平均値±標準偏差)	WebVR (平均値±標準偏差)	p値
Attention	4.25 ± 0.23	4.21 ± 0.38	0.582
Relevance	4.24 ± 0.22	4.25 ± 0.37	0.723
Confidence	4.36 ± 0.27	4.44 ± 0.25	0.536
Satisfaction	4.17 ± 0.24	4.25 ± 0.34	0.296

3-3. 散乱線測定法

IVR における医療従事者の被ばくは，主に患者や機器などに直接線が当たって散乱することによって発生する散乱線の影響である. そのため，この散乱線を防ぐための防護方策が重要である. Lundvall らの報告では，この散乱線を測定し，立ち位置や X 線管の傾きによる変化を医師に観察してもらい，教育としての高い評価を得ている [52]. そこで, IVR 室内の散乱線を測定し，立ち位置や天吊り式防護板の利用法による線量の過多を，知識として知らしめる必要がある. しかし，散乱線の線量測定には，従来，電離箱線量計が用いられてきたが，一度に 1 点しか測定できないことや測定者の被ばくなどの問題点が挙げられている.

そこで, Nakamura らは，紙製の管やプラスチック製のジョイントを組み合わせたジャングルジムに，線量計を貼り付けて行う方法 (JG 法) の評価を行った [85]. この JG 法の最大のメリットは測定者の被ばくがないことであり，他にも再現性が良いことが挙げられる. しかしながら，紙製の管やプラスチック製のジョイント部分に，それぞれ 13–24%, 15–21%といった一定の X 線吸収があり，必ずしも正確な測定とは言えない可能性が示唆された (表 3-10).

表 3-10 血管撮影室を想定した JG 法の紙製の管とプラスチック製のジョイント部分の放射線吸収値 (Nakamura らの報告 [85]より一部変更して引用).

管電圧	紙製の管の X線吸収値	プラスチックジョイント部分の X線吸収値
40	24%	21%
60	20%	19%
80	17%	17%
100	16%	16%
120	14%	16%
140	13%	15%

第４章　目的

4-1．理想的な学習教材と放射線防護教育の問題点

ARCS 動機づけモデルの理論に則り，放射線防護教育を行う上で重要となるのが学習教材の選択だと考える．学習者は，放射線診療に携わる医療従事者であるため，自身の被ばくに対して関連性を持っている．そこで，真新しさや興味を引き，簡便であり，正しい知識といった報酬 (満足感) を与えられるような学習教材が求められる．

放射線防護を行う上で，天吊り式防護板の使用が重要である [11, 13]．しかし，主術者である医師は，それを適切に使用できていない事例が散見されている [39, 45]．さらに，臨床において，他の医療従事者も最適な防護を行なっているとは言い難いのが現状である．この要因として，医療従事者が，各学部生時代から現在に至るまでに，適切な放射線防護教育を受けていないことが挙げられる [47, 54-57]．さらに，医療従事者は日頃の業務に忙殺され，働く傍らで放射線防護に特化した教育を受ける機会は少ないであろう．つまり，放射線診療を行う医師は，法令で定められた年に 1 時間程度の座学による，旧来型な放射線防護教育を受講しているが十分ではなく，被ばくレベルに応じた特別な放射線防護教育やトレーニングを受けることなく放射線診療を行っていることが殆どである [11-13, 46, 86]．一方，放射線防護教育を受けるにあたり，散乱線の挙動を知ることは重要である．しかし，散乱線は直接見ることや触れることができないため，学習方法は単に数値を見るといった座学による限定的な学習方法しかないのが現状である．このような放射線防護教育だけでは，散乱線から効果的に自身を防護する方法を理解することは困難であり，天吊り式防護板も適切に使用できていないのはやむを得ない．

4-2．本研究における目的

学習に限らず，人が得ることのできる情報の 80%以上は視覚からである [87]．また Dale らは，見ることや聞くことだけでなく，経験することが人の記憶に定着しやすいと報告しており [88]，従来から行われている座学による学習には限界があると考えられる．そこで，散乱線の挙動を学習する上で，経験しながら学習できる教材の開発が必要であり，その技術には，XR 技術を応用することが理想的であると推察される．特にヘッドマウントディスプレイといった特殊な機器を必要とせず，身近なスマートフォンやタブレットを用いてできる AR 技術は，誰しもが簡便に使用でき，受け入れやすいと考えられる．

そこで，本研究では血管造影検査室の散乱線分布を AR 技術で可視化し，実際の現場で使用されている天吊り式防護板を用いて，散乱線を遮蔽する技術を効果的に学習するための AR application を作成することを第一の目的とした．そして，実際にそれを臨床現場で働く医療従事

者に放射線防護教育として活用し，その有用性について検証した．また，実際の医療現場では，多くの職種が関わっているが，皆が一様に被ばく防護のスペシャリストではない．しかしながら，現場での教育は一様であるため，学習が成功したか， 教育のレベルが適切であったか，判断することができないままである．そこで第二の目的として，従事者の知識量を職種という項目でカテゴライズし，それを比較することで，誰しもが (どの知識レベルでも) 被ばく防護を学習するための動機づけができる教材であったことを証明するために，職種間比較を行った．なお，本研究は労働衛生の 5 管理における労働衛生教育に相当する．

第５章　方法

5-1．散乱線分布測定のための機材の開発

Nakamura らの報告にあるように，組み立て式の JG 法を使用すれば，簡便かつ測定者の被ばくを伴わずに測定が可能である [85]．しかしながら，部品に若干の X 線吸収を伴うため，線源から離れれば離れる程，２重，3 重にその影響を受けてしまい，正確な測定とは言い難くなる．したがって，X 線吸収の少ないものだけを利用した散乱線分布測定のための機材を作成する必要がある．一般的に X 線は透過力が強いため，鉛や鉄のような原子番号の大きい物質で遮蔽材を作ることが多い．反対に紙などであれば，X 線は簡単に透過してしまう．そこで，原材料が紙をベースとした身近な素材である段ボールを使用し，散乱線分布測定のための機材を開発することとした．

散乱線分布測定用機材は，人の身長と眼の高さを考慮して，高さ 2 m とした (図 5-1A)．その段ボールの高さの中で，1.8 m の高さまでを 20cm 間隔，合計 9 ポイントで測定を行う計画とした．さらに，作成した段ボールを，何個も並べて散乱線分布の測定をすること，そして安定して立つことを考慮して，縦 10cm，横 10cm の柱状の構造とした．また，2 m の高さがあると，X 線発生装置や寝台，天吊り式モニターといった検査室にある機器に干渉する恐れがあるため，30cm, 1 m といった数種類の高さの段ボールを作成した (図 5-1B)．

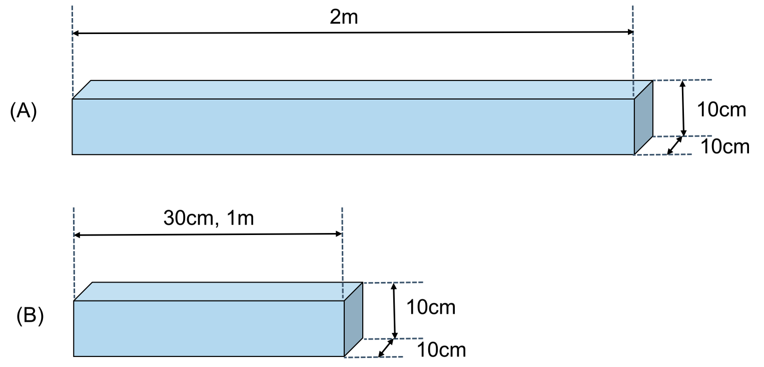


図 5-1　散乱線分布測定用柱状段ボールの模式図. (A)高さを 2m, (B)高さを 30cm, 60cm, 1 m と複数設定した．また，縦は 10cm，横は 10cm とし，横に並べても干渉しないサイズとした．

5-2．段ボールの放射線減弱率の検証

段ボールの材質は紙に近く，放射線減弱率は限りなく低いと予想される．しかしながら，加工過程で何らかの影響を受けて，放射線減弱率が一般的な紙よりも高くなっている可能性もある．

そこで基礎検討として，段ボールの放射線減弱率を測定した．血管造影検査室にて，プラスチック容器 (26cm×26cm×30cm) に水かさが 10cm になるように水を入れた簡易水ファントムを X 線中心に設置して，簡易水ファントムと測定器の間に，段ボールが無い時と有る時で測定を行った．測定には電離箱線量計 (日本レイテック株式会社 (Aloka)，東京，日本) を使用し，作成した簡易水ファントムから 50cm 離れた位置での線量を，管電圧 50–80kV の範囲でそれぞれ 10 回測定した．なお，段ボールの放射線減弱率 (DRR) は，以下のように定義した．

$$DRR = (1-Din/Dex) \times 100 \quad (1)$$

この時, Din は段ボールがある時の線量, Dex は段ボールが無い時の線量とした.

5-3．血管造影検査室内の散乱線分布の測定

5-3-1．血管造影検査室内の散乱線分布の測定方法の選定

調査病院内で従事者登録しているスタッフの中で，血管造影検査室での業務に従事しいている医療従事者が，最大の人数であった．そのため，医療従事者に放射線防護教育を行うことには大きな意義がある．すなわち，放射線防護教育を行うことで多数の従事者の線量が下がれば，病院全体における集団線量を下げることに繋がる．そこで本研究では，血管造影検査室の業務に従事している医療従事者を対象とした．

散乱線の挙動を理解する助けとなる教材を作成するためには，血管造影検査室の散乱線分布を測定する必要がある．その測定には電離箱などの様々な機器の選択があるが，測定者の被ばくがない点や多数の位置での測定する必要性を考慮し，今回は蛍光ガラス線量計 (Radio-photoluminescence glass dosimeters: RPLGDs) (GD-302M, Chiyoda Technol Corporation, Tokyo, Japan) を用いて行った (図 5-2)．なお，近年，直接測定を行わず，モンテカルロシミュレーションを用いて，散乱線の線量分布を導き出す方法が多く行われている [63, 64, 66, 68, 69, 82, 89, 90]．今回もその選択肢を考えたが，天吊り式モニターや防護具の位置といった実際の血管造影検査室の配置による散乱線分布を，よりリアリティを持って表現することに主眼を置いたため，直接測定する方法を選択した．蛍光ガラス線量計は作成した柱状段ボールの床からの高さ 0.2−1.8 m の範囲に 20cm 間隔, 9 ポイントに貼り付けた．この RPLGD を貼付した柱状段ボールを血管造影検査室内に 20cm 間隔で配置し，散乱線の測定を行った (図 5-3.A–C)．配置した場所は，医療従事者が業務の際に位置する主要部分 (3.8 m × 5.4 m)とした．

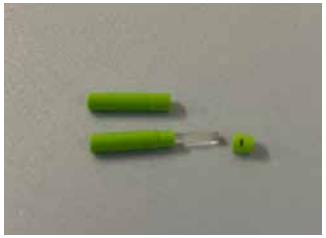


図 5-2 使用した蛍光ガラス線量計.

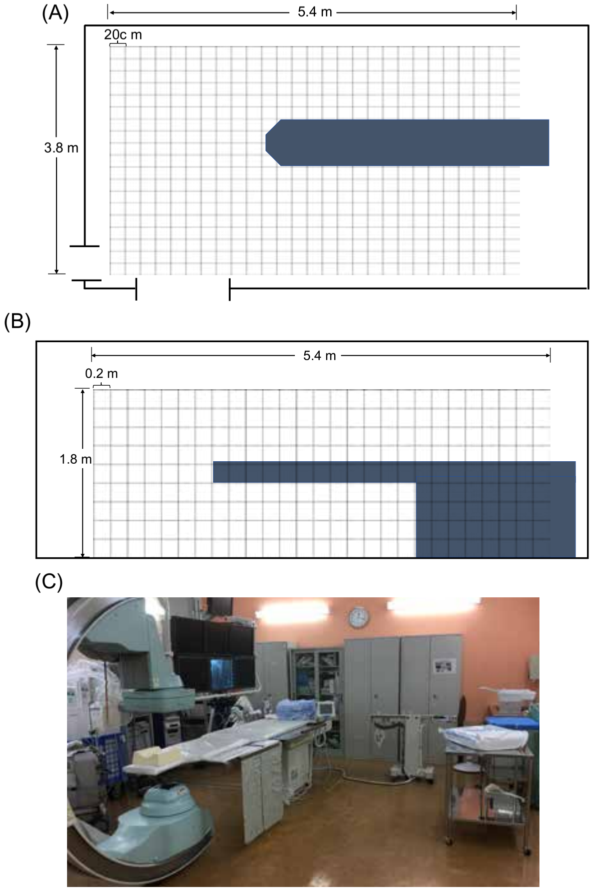


図 5-3 血管造影検査室内. (A) 概略図 (x-y 方向), (B) 概略図 (x-z 方向), (C) 実際の室内.

5-3-2．使用機器

X 線装置はフラットパネルを装備したシングルプレーン血管造影装置 (BRANSIST Safire VC9 Slender, Shimadzu Co., Kyoto, Japan) (図 5-4.A) を用いて行った．患者用ベッドの術者側の横には，下肢への散乱線被ばくを防護するための 0.5 mm 鉛厚相当 (0.5-mm-Pb) の防護カーテン (MAVIG GmbH, Munich, Germany) (図 5-4.B) を設置した．また，患者の代わりとなる X 線散乱体として，Water body phantom (Miwa Electric Medical Co., Nagoya, Japan) (図 5-4.C) を患者ベッドに置いて測定を行った. X 線撮影方向は, Water body phantom の背面−前面 (posterior–anterior: PA) 方向に照射した．照射は通常，胸腹部で使用する条件である透視パルスモード (管電圧 70Kv，管電流 16.8mA，パルスレート 15 pulses/s) を使用し，線量計に検出されるよう 20 分間照射した．これらの装置や撮影条件は，実際の臨床で使用しているものであり，日常業務により近い配置にすることで，実際の放射線防護に役立つよう心がけた.

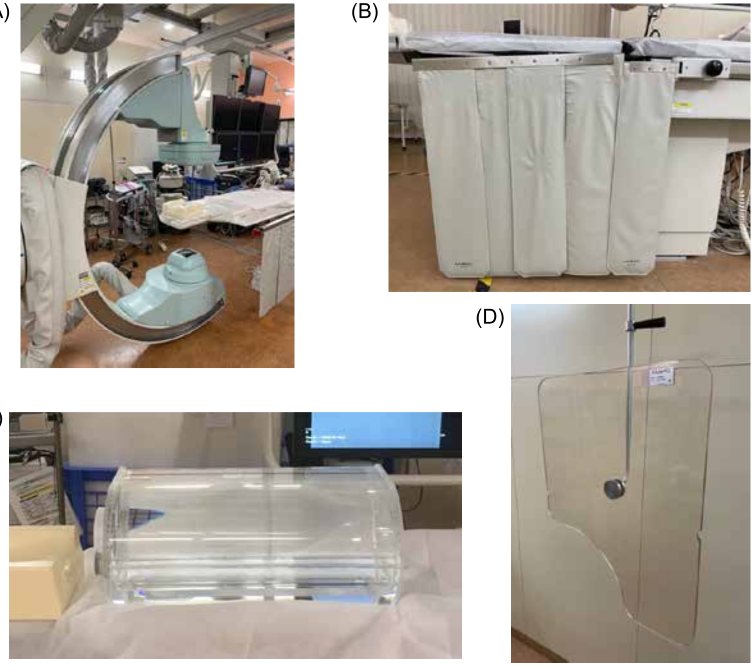
(A) (B) (C) (D)


図 5-4 ファントム撮影に使用した装置. (A) 血管造影装置, (B) 防護カーテン, (C) Water body phantom, (D) 0.5 mm 鉛厚相当の天吊り式防護板．実際の臨床においても，同様な配置で利用されている.

5-4．天吊り式防護板の正しい使用方法を学習するための AR application の開発

血管造影検査室の手技において，天吊り式防護板を正しく使用することは，医療従事者の被ばく線量を大幅に下げるため，身につけるべき技術の一つとして重要である．しかし，その重要性を知識として知っていても，実際の臨床では実践されていない事例が散見されている．そこで，天吊り式防護板の重要性と，その効果的な使用方法を学習するために，実際に使用されている 0.5 mm 鉛厚相当の天吊り式防護板 (MAVIG GmbH, Munich, Germany) (図 5-4. D) の適切でない使用方法を含んだ以下の 3 つのシーンを設定した.

a) 適切でない使用方法: 天吊り式防護板をまったく使用しない (シーン 1).

b) 適切でない使用法: 天吊り式防護板下縁と患者の体幹との間に隙間 (約 5–10cm) がある (シーン 2).

c) 正しい使用法: 天吊り式防護板下縁と患者の体幹との間に隙間がない (シーン 3).

これら 3 つのシーンにおける散乱線分布の測定を行った．その後，表示ポイントが 10cm 間隔となるように RPLGD 測定点の中間を線形補間処理し，相対線量 (%) を 53 段階のカラーマップ表示に変換した.

この 53 段階のカラーマップで表示した散乱線分布図を，拡張現実開発 software (ARKit 3, Apple Inc., Cupertino, USA) を用いて AR 表現した．その後，作成した AR 画像を Mobile 端末 (iPad Air, Apple Inc., Cupertino, USA) 上で見ることができるよう，統合開発環境 (Integrated Development Environment: IDE) software (Xcode 11.5, Apple Inc., Cupertino, USA) を用いて, AR application を作成した．最後に，作成した AR application は，誰しもが簡便に学習できるように iPad Air にインストールした.

5-5．AR application の評価

一般病院 (病床数 214，血管造影検査 250 件/年，血管系 IVR220 件/年) の血管造影検査室にて従事する医療従事者を対象に, AR application による学習を行った．学習対象者には，適切でない天吊り式防護板の使用方法を含む 3 つのシーンの散乱線分布を可視化した AR application をインストールした iPad を持たせた．そして，実際の臨床現場の血管造影検査装置上に投影される散乱線の AR 画像を任意の方向から眺めてもらった．この学習は，体験学習が主となる標準化された手順で，すべての学習者に実施された．その最初の手順として，下半身の散乱線の広がりを AR 表示させたものを，学習者に任意の位置で閲覧してもらった．その際，ポイントとなる位置である，①医師の立ち位置，②看護師や臨床工学技士の立ち位置，③診療放射線技師の立ち位置，④X 線の C アームやモニターといった装置の後ろなど，を閲覧してもらった．特に①と②に関しては,

防護カーテンがあるため対照的な線量 (医師は低く, 看護師, 臨床工学技士らは高い) となっており, 自身らの被ばく線量を考える上で, 重要な位置となる. また, ③, ④を閲覧することで, 距離や遮蔽による減弱ついて学習することができ, それはすなわち, 外部放射線防護の 3 原則を理解することができる. 続いて, 上半身も同様のポイントとなる位置を閲覧してもらい, 下半身との違いを考察してもらった. 特に, 医師の立ち位置では, 上半身は防護カーテンがないため, 下半身と比較して線量が高くなっていることが理解できる. そして, 天吊り式防護板をそもそも使用しないことの危険性, 適切に使用することの必要性, そして正しく使用することで大きく放射線防護を達成できることについて視覚的に学ばせた. 学習は, 30 分程度で終了するような内容であった.

その後, AR application の有用性を評価するために, 学習を終了した対象者に無記名式質問紙調査を行った. 質問紙調査は ARCS 動機づけモデル [59, 58]に基づく, 学習者の教材に対する反応を学習意欲の観点から測定する教材の学習意欲調査(Instructional Materials Motivation Survey: IMMS) [58, 91-93]を用いた. IMMS は 36 項目の質問で構成されており, 4 つの下位尺度 Attention, Relevance, Confidence, Satisfaction に分類される. したがって, 学習者が特定の学習に対して, どう動機づけられたかを測定することができる [58]. なお, IMMS の開発プロセスには, さまざまな議論を経ており, Satisfaction の項目に否定的な質問はないが, 質問の曖昧さや回答の難しさを排除した結果であると予想される. 実際, さまざまな先行研究にて IMMS が利用され, 信頼性などに問題がないことが検証されている [58, 91-93]. この IMMS を本研究に適用できるよう質問内容を調整し, 有識者で文言に対する妥当性を検証した. また, 回答にはリッカート尺度 (1: まったくあてはまらない, 2: わずかにあてはまる, 3: 半分くらいあてはまる, 4: かなりあてはまる, 5: とてもあてはまる) を採用し, 得られた点数から平均と標準偏差を算出した. 否定的な文章で述べられている質問は, 得点を反転 (5→1, 4→2, 3→3, 2→4, 1→5) して評価した. この得点評価に関して, 本研究の医療従事者は, 複数の職種から構成されているため, その職種間の比較についても実施した. なお, IMMS は状況依存の測定であるため, 正規分布をすることは期待できない [58].

なお, 被ばく防護は学習し難い領域であるため, 本研究では, 被ばく防護の学習教材として AR を使った方略が, 学習の動機づけという観点から適切であるか, 理論的に判断するための評価方法が求められた. そのような観点より, ARCS 動機づけモデルが妥当であると判断し, 評価方法として選択をした. また, IMMS は, 学習者が教材に対してどのように動機づけられたかを測定することを主たる目的としている [58, 60]. そのような観点より, 教材を理論的に説明し, どのように動機づけられたか, もしくは否かを判断できる IMMS は適切であったため, 本研究における教材の測定ツールとして採用した.

5-6. 統計的解析

統計解析には, 専用ソフトである SPSS software version 28 (SPSS Inc., Chicago, USA) を使用した. IMMS の信頼性の指標である Cronbach’s coefficient Alpha を, ARCS 下位尺度別, または職種別に算出した. なお, Cronbach’s coefficient Alpha は下記式で求めることができる.

$$Cronbach's\ coefficient\ Alpha = \frac{k}{k-1} \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{k} \sigma_i^2}{\sigma_j^2}\right) \cdot\cdot\cdot \quad (2)$$

k は質問項目数, σ_i^2 は各質問項目の対象者間の分散, σ_j^2 は質問項目の合計点数の対象者間の分散となる. さらに, ARCS 下位尺度ごとの職種間の差の検定を Kruskal-Wallis test で実施した. 最後に, $p<0.05$ を統計的に有意であるとした.

第６章　結果

6-1．散乱線分布測定のための機材の開発

散乱線分布を測定するため，柱状段ボールを作成した。2 m の高さの段ボールはサイズがなく，作成できなかったため，1 m のものを組み合わせて使用した．また，用途に合わせて，30cm と 1 m の段ボールを組み合わせたり，サイズ調整したりして使用した (図 6-1).

図 6-1 実際に使用した柱状段ボール

6-2．段ボールの放射線減弱率の検証

作成した段ボールの放射線減弱率を検証した. X 線透視で測定するにあたり，管電圧の設定は 50–90kV を 10kV ずつ変化させ 10 回測定した．その際，管電流も管電圧ごとに自動で設定された．その結果を表 6-1 に示す．段ボールの放射線減弱率は，中央値が 0.00–1.32%程度であり，最大でも 4.76%であった．

表 6-1 段ボールの放射線減弱率測定結果

撮影条件		DRR (%)			
管電圧 (kV)	管電流 (mA)	平均±標準偏差	中央値	最大値	最小値
50	4.0	0.85±1.10	0.00	2.17	0.00
60	6.4	0.54±1.50	0.00	4.76	0.00
70	11.2	1.18±0.74	1.32	2.60	0.00
80	15.0	1.29±0.89	1.16	2.30	0.00
90	14.8	1.30±1.22	1.28	2.63	0.00

6-3．血管造影検査室内の散乱線分布の測定

血管造影検査室内の散乱線分布を測定するため，血管造影検査室内に 20cm 間隔でマーカーを貼り付けた (図 6-2)．このマーカー上に段ボールを設置することで，測定の際の再現性の向上を考慮した．

図 6-2 血管造影検査室内に設置したマーカー

このマーカー上に段ボールを設置し, 20cm 間隔での測定を行った (図 6-3)．測定の際，機器が設置されている箇所は測定できないので，最終的に 5247 点の測定を行った．

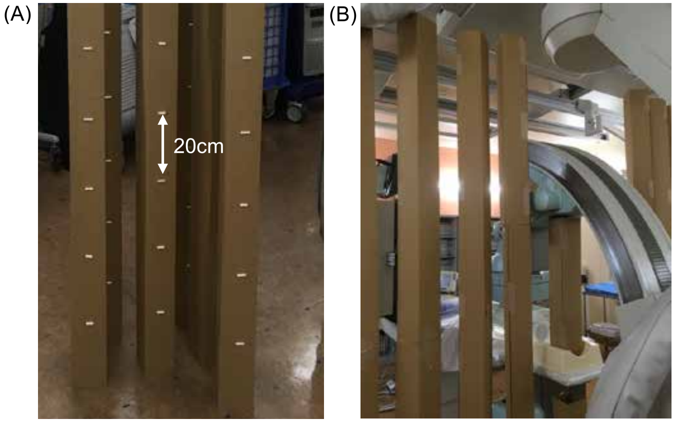
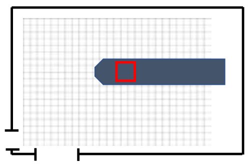


図 6-3 血管造影検査室内に配置した柱状段ボール. (A) 柱状段ボールに床から 0.2–1.8 m の高さに 20cm 間隔で蛍光ガラス線量計を貼り付けた. (B) この柱状段ボールを血管造影検査室内の主要領域 (3.8 m×5.4 m) に 20cm 間隔で設置した．

測定後，図 6-4 のような結果を得た. X 線照射中心からその近辺が非常に高く，そして離れるにつれて徐々に低下していく散乱線の挙動を数値として捉えることができた.

(A)



(B)

166	285	217	224	277	255	205
207	280	298	309	353	278	173
286	823	434	409	495	403	80
383	505	594	581	626	480	77
484	691	907	959	970	729	543
642	926	1511	1686	1670	1073	704
987	1306	2852	3745	3254	1384	748
920	1647	5117	23516	6864	1564	537
737	1809	5906	606774	6465	1883	515
1262	2989	6395	22119	5281	1589	537
1043	1750	4268	4585	2221	1223	2273
863	1130	1457	1589	1025	621	230
608	784	773	849	578	343	311
510	488	474	491	378	201	267
372	290	319	316	232	108	268
257	206	221	233	216	42	231
195	171	176	173	134	109	119
146	131	129	137	115	106	117
106	84	100	108	82	110	125
92	104	115	56	82	92	112

図 6-4 高さ 1m における中心部の測定値. (A)は測定範囲の概略図. (B)は X 線管中心の 1 時間あたりの吸収線量 (単位は μGy). 赤枠は X 線管からの主線束部分 (9 インチの矩形).

6-4. 天吊り式防護板の正しい使用方法を学習するための AR application の開発

測定して得た血管造影検査室内の散乱線の値を相対値変換し，カラーマップを作成した.その後, AR 画像の作成には ARKit を使用した. ARKit では，立方体を測定点の分だけ作成し，カラーマップ化した血管造影検査室内の散乱線の値を割り当て, AR 表現するための 3D 画像を作成した (図 6-5.A). その 3D 画像を AR コードに反映させ, AR application を作成した (図 6-5.B).

(A) (B)

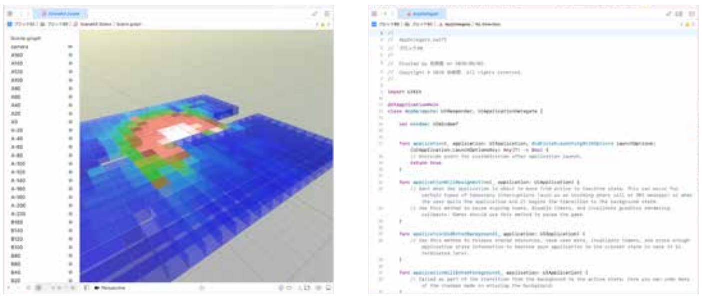


図 6-5 AR application 作成過程. (A)は ARKit を使って作成した 3D 画像で，これを AR 表現させる. (B)は AR application のプログラミングの一部.

作成した AR application を用いて血管造影検査室を投影した時の画像の一例を図 6-6 に示す. 散乱線は直接 X 線が照射される患者の体幹部で最も強くなり，離れるにつれて弱まっていることがカラーマップとして確認できる (図 6-6B, D). また，血管造影検査室内の患者ベッドより低い部分の散乱線分布において，看護師や臨床工学技士の立ち位置側の患者ベッド下には防護カーテンが設置されていないため，主術者の立ち位置側 (図 6-6B) に比べて，看護師や臨床工学技士の立ち位置側 (図 6-6D) の方が，線量が高くなっていることが認められた.

(A) (B) (C) (D)

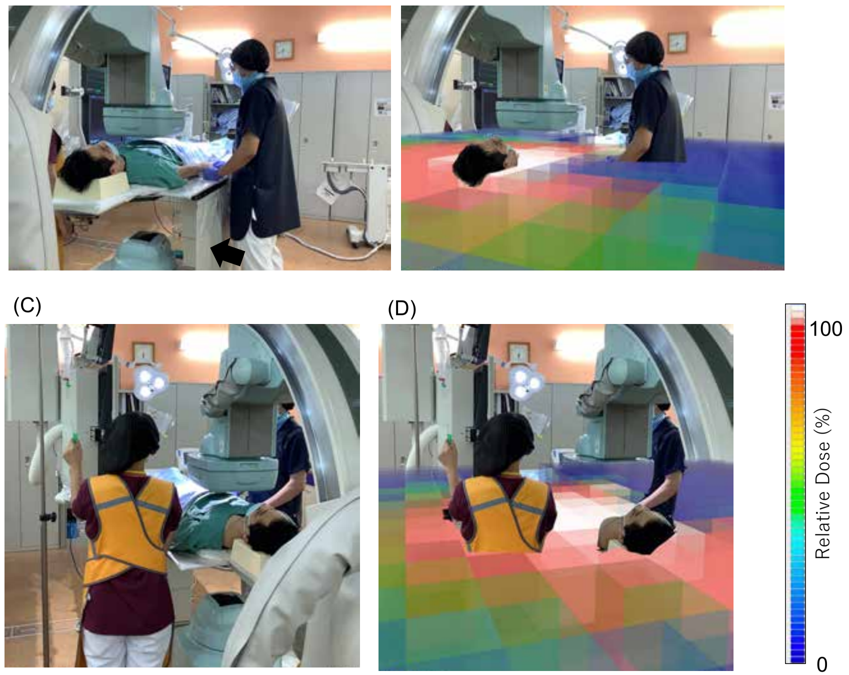


図 6-6 血管造影検査室内の患者ベッドより低い部位の散乱線分布 AR 画像（線形補間なし）. (A) 主術者立ち位置側のイメージ画像. 患者ベッド下に防護カーテン (矢印) が設置されている. (B) 主術者立ち位置側の散乱線分布 AR 画像. (C) 看護師，臨床工学技士立ち位置側のイメージ画像. (D) 看護師，臨床工学技士立ち位置側の散乱線分布 AR 画像. 散乱線強度は相対値をカラースケールで示している.

適切でない天吊り式防護板の使い方を含む 3 つのシーンにおけるイメージ画像と AR 画像を図 6-7 に示す．天吊り式防護板を使用することで，シーン 1 と比較して，主術者の頭の位置における散乱線強度が，シーン 2 で 66%，シーン 3 で 73%低減していた (図 6-7D, E, F)．また，患者の体幹と天吊り式防護板下縁の間に隙間を残してしまうと，直接 X 線が入射した患者の体幹 (付近の患者ベッド等の構造物も含む) から発生した散乱線が，その隙間を通って主術者の腰部〜腹部へ到達していた (図 6-7E)．しかし，天吊り式防護板下縁を患者の体幹に隙間なく接するように設置 (シーン 3) すると，主術者側へ漏れ出る頭の位置での散乱線は，シーン 2 に比較して，22%減少していた (図 6-7F).

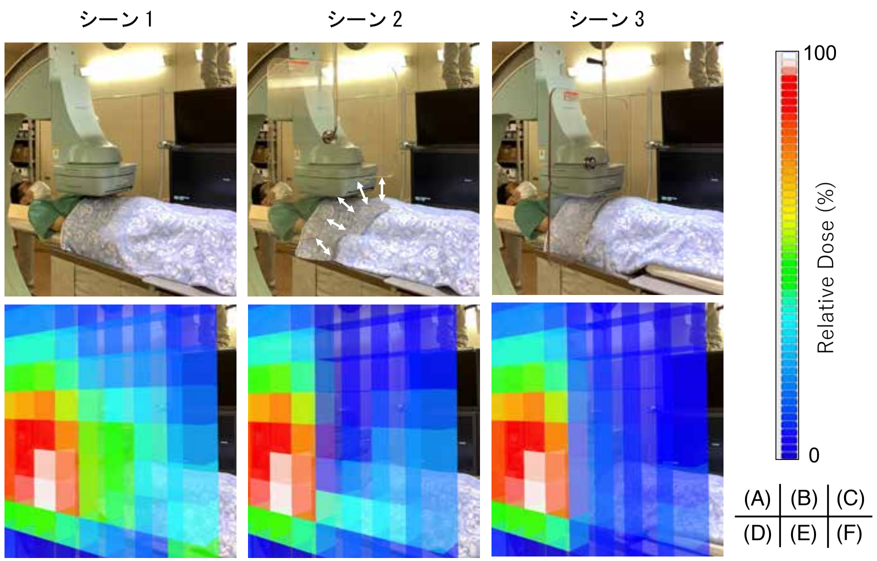


図 6-7 天吊り式防護板の適切な使い方を学習するための AR application. (A) 天吊り式防護板を使用していない状態 (シーン 1) のイメージ画像. (B)天吊り式防護板下縁と患者の体幹との間に隙間 (5–10 cm) が残った適切でない使用法 (シーン 2) でのイメージ画像. (C)天吊り式防護板下縁と患者の体幹との間に隙間のない適切な使用法 (シーン 3) でのイメージ画像. (D) シーン 1 の AR 画像. (E) シーン 2 の AR 画像. (F) シーン 3 の AR 画像．両矢印は天井懸架式防護板下縁と患者の体幹との間の隙間を示す．散乱線強度は表示範囲における最大値に対する相対値 (%) をカラースケールで示している (Matsuzaki らの報告 [67]より一部変更して引用).

6-5．AR application の評価

6-5-1．本研究の対象者の内訳と質問紙調査の詳細

AR application を血管造影検査室に従事するスタッフに閲覧してもらい，室内の散乱線の挙動を学習してもらった．学習を行った医療従事者の内訳を表 6-2 に示す．職種は医師，看護師，診療放射線技師，臨床工学技士の 4 職種であり，合計 37 名が AR application の学習を行った．また，平均年齢は, 33.6±8.2 歳で，血管造影検査室での従事年数は 8.0±6.6 年であった.

表 6-2 AR application を使った学習を行った医療従事者の内訳

職種	調査人数 (男性)	年齢 (平均±標準偏差)	従事年数 (平均±標準偏差)
医師	8 (7)	43.0±8.7	15.3±8.4
看護師	12 (5)	31.4±5.8	6.0±4.0
診療放射線技師	8 (5)	33.8±7.0	8.1±5.8
臨床工学技士	9 (8)	28.0±4.2	4.1±2.7
合計	37 (25)	33.6±8.2	8.0±6.6

AR application の学習についての評価するため，質問紙調査 (IMMS) を行った. IMMS の内容を本研究用で利用できるよう，質問項目の文章を作成し直した．その後，複数の有識者で質問項目の内容を調整し，それを実際の調査に使用した (表 6-3)．なお，実際に行った質問内容の調整点は簡易なものとした．具体的には，「この教材は」というような文言を「AR 学習ツールは」といったように，抽象的な表現を修正し，具体的な表現である「AR 学習ツール」といった文言に置き換えを行った (表 6-3)．修正を施すことによって, IMMS における質問項目の本質を変えないように細心の注意を払った．そのため，今回行った調整による IMMS の解析結果への影響はない，もしくは影響があっても非常に軽微なもので，本研究の結論に影響を及ぼさないと考えられる.

表 6-3 実際に使用した質問紙調査 (IMMS)

下位尺度	質問番号	質問
Attention	A1	AR学習ツールの開始時に，注意をひきつけられる何かおもしろいことがあった.
	A2	AR学習ツールは人目をひく.
	A3	学習内容の説明が注意をひきつける助けとなっていた.
	A4*	AR学習ツールは非常に抽象的で，注意を保ち続けることが困難であった.
	A5*	AR学習ツールは，無味乾燥で魅力が足りないようにみえた.
	A6	AR学習ツールの情報提示方法は，あなたの注意をひきつけておくことに役立った.
	A7	AR学習ツールは好奇心を刺激した.
	A8*	AR学習ツールの繰り返しの量が，ときにはあなたをうんざりさせた.
	A9	AR学習ツールでは，驚きのある意外なことをいくつか学んだ.
	A10	様々な説明，体験によって, AR学習ツールに注意をひきつけられた.
	A11*	AR学習ツールは退屈であった.
	A12*	言葉が多くあって，イライラさせられた.
Relevance	R1	AR学習ツールの内容とあなたがすでに知っていることの関連性が，明らかになった.
	R2	AR学習ツールがいかに重要であるかを示すためのストーリーや例があった.
	R3	AR学習をうまく完了することは，あなたにとって重要であった.
	R4	AR学習ツールは，あなたの興味と関連していた.
	R5	AR学習ツールの知識を人々がどのように利用するのかに関する説明や例があった.
	R6	AR学習ツールの内容は，知る価値があるという印象を受けた.
	R7*	内容の大部分をすでに知っていたので，あなたのニーズとは合わなかった.
	R8	これまでの仕事の中で見たり，施行したり，考えたりしたことと, AR学習ツールの内容を関係づけることができた.
	R9	AR学習ツールの内容はあなたにとって役立つだろう.
Confidence	C1	はじめてこのAR学習ツールを見たとき，簡単に使用できるという印象を持った.
	C2*	AR学習ツールは，あなたが期待した以上に理解することが難しかった.
	C3	導入の説明を受けたあとで, AR学習ツールから何を学習するのかを確信した.
	C4*	大量の情報があり過ぎて，重要なポイントを拾い出して覚えることは難しかった.
	C5	AR学習ツールで学習した時に，内容を習得できる自信があった.
	C6*	AR学習ツールの使用は非常に難しかった.
	C7	AR学習ツールでしばらく学習した後に，その内容のテストに合格する自信があった.
	C8*	AR学習ツールの内容をまったく理解できなかった.
	C9	AR学習ツールの内容が適切に整理されていたことは，防護について学習できるという自信につながった.
Satisfaction	S1	AR学習ツール使用後，十分な達成感を得た.
	S2	この分野についてもっと知りたいと思うほどAR学習ツールを楽しんだ.
	S3	AR学習ツールで学習することが本当に楽しかった.
	S4	AR学習ツール使用後のフィードバックやその他のコメントが，あなたにとっての本学習の意義と感じた.
	S5	AR学習ツールの内容を理解でき修了できたことに大変満足した.
	S6	うまく設計された教材で学習できてよかった.

＊否定的な質問のため，得点を反転 (5→1, 4→2, 3→3, 2→4, 1→5) した.

6-5-2. 医療従事者全体の得点結果

AR application での学習後に実施された IMMS の回収率は 100% (n = 37) であった.

IMMS の医療従事者全体の得点結果を表 6-4 に示す. 全質問項目 (36 項目) の得点は 4.65±0.31 (範囲: 3.92–4.97) と高く, Cronbach's coefficient Alpha も 0.92 と信頼性の高い結果となった. 質問項目の詳細を見ると，一番得点の低かった質問は「AR 学習ツールでしばらく学習した後に，その内容のテストに合格する自信があった」であった. なお，この質問項目以外の得点は，すべて得点 4.0 を超えていた. 一方，一番高い得点の質問は「言葉が多くあって，イライラさせられた (回答反転質問)」であり，その他の得点 4.9 以上の質問に「AR 学習ツールは，無味乾燥で魅力が足りないようにみえた (回答反転質問)」,「AR 学習ツールの内容をまったく理解できなかった (回答反転質問)」などがあった. さらに，下位尺度別の平均得点は Attention: 4.75, Relevance: 4.61, Confidence: 4.54, Satisfaction: 4.66 と偏ることなく高く, Cronbach's coefficient Alpha も 0.78 以上と高い信頼性を示した.

表 6-4 医療従事者全体の IMMS の得点結果と Cronbach's coefficient Alpha

カテゴリー	質問番号	医師 (n = 8)		看護師 (n = 12)		診療放射線技師 (n = 8)		臨床工学技士 (n = 9)		全体 (n = 37)	
		平均±標準偏差	α value	平均±標準偏差	α value	平均±標準偏差	α value	平均±標準偏差	α value	平均±標準偏差	α value
Attention	A1	4.50±0.53		4.92±0.29		4.50±0.76		4.78±0.44		4.70±0.52	
	A2	4.38±0.74		4.92±0.29		4.13±1.46		4.89±0.33		4.62±0.83	
	A3	4.25±1.04		4.92±0.29		4.50±0.76		4.78±0.44		4.65±0.68	
	A4	5.00±0.00		4.75±0.62		4.88±0.35		4.44±0.73		4.76±0.55	
	A5	4.88±0.35		5.00±0.00		5.00±0.00		4.89±0.33		4.95±0.23	
	A6	4.75±0.46		4.75±0.62		4.75±0.46		4.89±0.33		4.78±0.48	
	A7	4.50±0.76		4.83±0.39		4.63±0.52		5.00±0.00		4.76±0.49	
	A8	4.75±0.46		5.00±0.00		4.88±0.35		4.56±0.73		4.81±0.46	
	A9	4.00±1.41		4.75±0.45		4.75±0.46		4.78±0.44		4.59±0.80	
	A10	4.25±0.71		4.83±0.39		4.38±1.06		4.56±0.53		4.54±0.69	
	A11	4.63±0.74		5.00±0.00		5.00±0.00		4.89±0.33		4.89±0.39	
	A12	5.00±0.00		5.00±0.00		5.00±0.00		4.89±0.33		4.97±0.16	
	小計	4.57±0.32	0.81	4.89±0.10	0.59	4.70±0.28	0.83	4.78±0.17	0.88	4.75±0.14	0.80
Relevance	R1	4.88±0.35		4.33±0.89		4.63±0.74		4.44±0.53		4.54±0.69	
	R2	4.13±0.99		4.75±0.45		4.63±0.52		4.44±0.53		4.51±0.65	
	R3	4.38±0.74		4.75±0.45		4.50±0.76		4.78±0.67		4.62±0.64	
	R4	4.38±0.74		4.50±0.67		4.38±0.92		4.44±0.53		4.43±0.69	
	R5	4.38±1.06		4.42±0.79		4.63±0.52		4.44±0.73		4.46±0.77	
	R6	4.25±1.04		4.83±0.39		4.88±0.35		5.00±0.00		4.76±0.60	
	R7	4.25±1.04		4.83±0.39		4.38±0.52		4.44±0.73		4.51±0.69	
	R8	4.50±0.53		4.92±0.29		5.00±0.00		4.67±0.50		4.78±0.42	
	R9	4.63±0.52		5.00±0.00		4.88±0.35		4.89±0.33		4.86±0.35	
	小計	4.42±0.23	0.92	4.70±0.23	0.71	4.65±0.22	0.83	4.62±0.22	0.79	4.61±0.16	0.83
Confidence	C1	4.00±1.07		3.67±1.50		4.75±0.46		4.33±1.00		4.14±1.16	
	C2	4.75±0.46		4.75±0.45		4.88±0.35		4.78±0.67		4.78±0.48	
	C3	4.38±0.52		4.58±0.51		4.63±0.52		4.89±0.33		4.62±0.49	
	C4	4.88±0.35		4.83±0.39		5.00±0.00		4.56±0.73		4.81±0.46	
	C5	4.25±0.46		4.17±0.94		4.50±0.53		4.44±0.73		4.32±0.71	
	C6	4.75±0.46		4.67±0.65		4.88±0.35		4.44±1.01		4.68±0.67	
	C7	3.88±1.13		4.00±0.74		3.75±0.71		4.00±0.71		3.92±0.80	
	C8	5.00±0.00		4.92±0.29		5.00±0.00		4.78±0.44		4.92±0.28	
	C9	4.63±0.52		4.83±0.39		4.50±0.53		4.78±0.44		4.70±0.46	
	小計	4.50±0.40	0.72	4.49±0.44	0.68	4.65±0.39	0.88	4.56±0.28	0.94	4.54±0.34	0.80
Satisfaction	S1	4.50±0.53		4.92±0.29		4.50±0.76		5.00±0.00		4.76±0.49	
	S2	3.75±1.04		4.67±0.65		4.38±1.06		4.67±0.71		4.41±0.90	
	S3	4.13±0.99		4.92±0.29		4.63±0.52		4.78±0.44		4.65±0.63	
	S4	4.50±0.53		4.67±0.49		4.63±0.74		4.56±0.53		4.59±0.55	
	S5	4.63±0.52		4.67±0.49		4.63±0.52		4.78±0.44		4.68±0.47	
	S6	4.75±0.46		5.00±0.00		4.88±0.35		4.89±0.33		4.89±0.31	
	小計	4.38±0.37	0.78	4.81±0.16	0.72	4.60±0.17	0.82	4.78±0.16	0.72	4.66±0.16	0.78
Total		4.48±0.35	0.91	4.73±0.25	0.90	4.66±0.36	0.95	4.68±0.30	0.93	4.65±0.31	0.92

＊否定的な質問のため，得点を反転 (5→1, 4→2, 3→3, 2→4, 1→5) した.

6-5-3．職種間の得点結果の比較

医師，看護師，診療放射線技師，臨床工学技士の IMMS の得点結果を表 6-4 に示す．全質問項目 (36 項目) の得点は 4.48±0.35 (範囲: 3.75–5.00), 4.73±0.25 (範囲: 3.67–5.00), 4.66±0.36 (範囲: 3.75–5.00), 4.68±0.30 (範囲: 4.00–5.00)と高かった．また, Cronbach's coefficient Alpha も 0.90–0.95 と信頼性の高い結果となった.

質問項目の詳細を見ると，医師の一番得点の低かった質問は「この分野についてもっと知りたいと思うほど AR 学習ツールを楽しんだ」であった．また，得点 4.0 を下回るその他の質問項目として「AR 学習ツールでしばらく学習した後に，その内容のテストに合格する自信があった」が挙げられ，得点は 3.88 であった．その他，看護師は「はじめてこの AR 学習ツールを見たとき，簡単に使用できるという印象を持った」，診療放射線技師と臨床工学技士は，「AR 学習ツールでしばらく学習した後に，その内容のテストに合格する自信があった」が一番低い得点となった．なお，医師以外の職種では，得点 4.0 を下回る質問項目はなかった.

一方，一番高い得点の質問は「AR 学習ツールは非常に抽象的で，注意を保ち続けることが困難であった (回答反転質問)」，「言葉が多くあって，イライラさせられた (回答反転質問)」，「AR 学習ツールの内容をまったく理解できなかった (回答反転質問)」，「AR 学習ツールは，無味乾燥で魅力が足りないようにみえた (回答反転質問)」，「AR 学習ツールの繰り返しの量が，ときにはあなたをうんざりさせた (回答反転質問)」，「AR 学習ツールは退屈であった (回答反転質問)」，「AR 学習ツールの内容はあなたにとって役立つだろう」，「うまく設計された教材で学習できてよかった」，「これまでの仕事の中で見たり，施行したり，考えたりしたことと, AR 学習ツールの内容を関係づけることができた」，「大量の情報があり過ぎて，重要なポイントを拾い出して覚えることは難しかった (回答反転質問)」，「AR 学習ツールは好奇心を刺激した」，「AR 学習ツールの内容は，知る価値があるという印象を受けた」，「AR 学習ツール使用後，十分な達成感を得た」であった.

下位尺度別の平均得点は Attention: 4.57–4.89, Relevance: 4.42–4.70, Confidence: 4.49–4.65, Satisfaction: 4.384.81 と偏ることなく高かった．また, Cronbach's coefficient Alpha は，どの職種の下位尺度も 0.70 以上と高い信頼性を示したが，看護師の Attention と Confidence が，それぞれ 0.59, 0.68 となった.

6-5-4．医療従事者の下位尺度別得点比較

下位尺度ごとの職種間の差の比較を，図 6-8–11 に示す．職種間での比較の結果， p 値は Attention: 0.233, Relevance: 0.809, Confidence: 0.737, Satisfaction: 0.252 (Kruskal-Wallis test) と，有意差は認められなかった．また，いずれの下位尺度においても医師の平均得点が一番低い傾向にあった．一方, Attention, Relevance, Satisfaction は看護師, Confidence は診療放射線技師の平均得点が高かった.

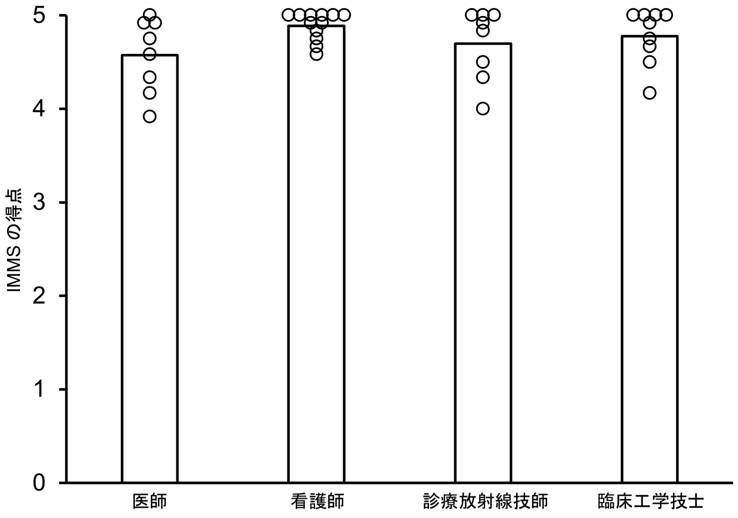


図 6-8 下位尺度 Attention における職種間の平均得点の比較

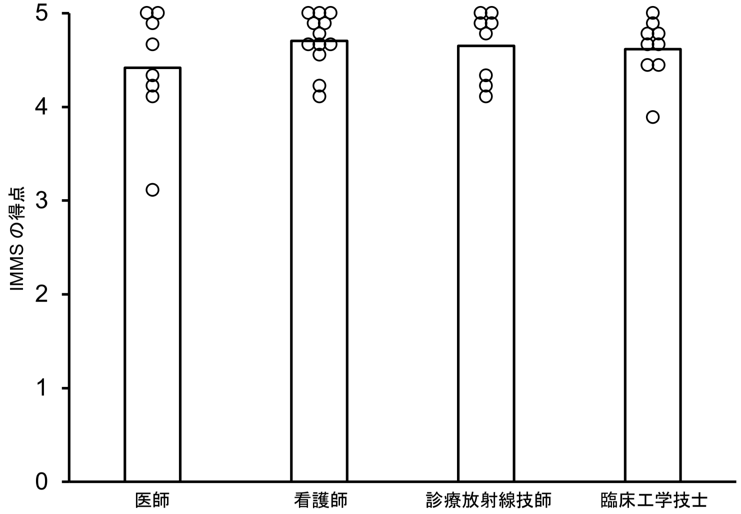


図 6-9 下位尺度 Relevance における職種間の平均得点の比較

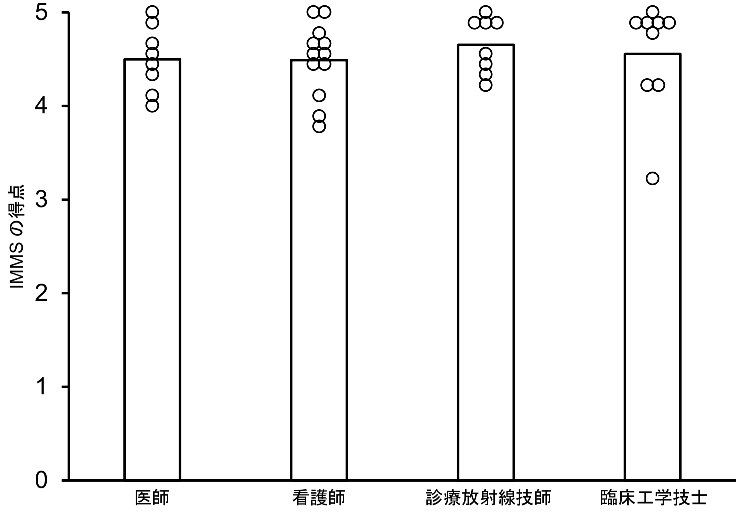


図 6-10 下位尺度 Confidence における職種間の平均得点の比較

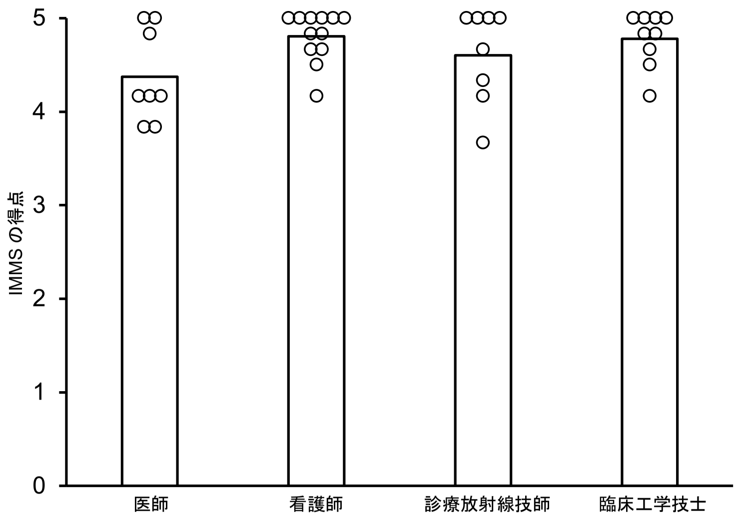


図 6-11 下位尺度 Satisfaction における職種間の平均得点の比較

第７章　考察

ICRP は, IVR に関与するスタッフに放射線防護に関する教育と訓練を求めている. その内容に関して, 患者の周囲の散乱放射線レベルの分布, 様々な要因がどのように線量分布に影響を与えるかの理解, 被ばくモニタリングと線量評価の戦略, 天吊り防護板, 鉛入り防護眼鏡, 防護カーテンやドレープなどの防護具の効果的な使用方法に関する知識が含まれるべきであると述べている [86]. しかしながら, 放射線は見たり, 聞いたり, 触れたりすることができない. そのため, 従来通り, 座学による放射線被ばくの数値情報を利用した学習しか手段はなかった. 直接 X 線と違って, 散乱線がどこで発生し, どのように拡がっていくかをイメージさせるのは難しく, 結果として IVR で発生する散乱線から医療従事者が効果的に自身の体を防護する方法が正しく習得ができていない現状が生じているのかもしれない.

このような中, 近年, 医療分野において VR や AR 技術が飛躍的に進歩しており, 手術手技のトレーニング [72-74], 手術支援 [75-79], 患者の疼痛緩和 [70, 71]など, 誰しもが各分野に取り入れ利用できるほど一般的になりつつある. また, 動物実験レベルではあるが, AR 画像を皮膚穿刺針の位置確認に利用することで透視線量を減らし, 対象の被ばくを面積線量 (dose-area product) の値で 37%低減させたとする報告がある [94]. その他, Dorey らは, AR グラスに透視画像を表示させ, 術者の視線を放射線源に向けさせ, 放射線防護眼鏡の利用効率を上げることで, 眼の水晶体の被ばくを低減させることができる可能性を報告している [95]. また, 医療現場における散乱線分布を, VR [63, 64, 66], AR [66-69, 90], プロジェクションマッピング [84]の技術を活用して可視化することが, 医療従事者の被ばく意識の向上や, 防護教育効果の向上につながる可能性についても報告されている.

このように様々な分野で利用されている VR, AR といった XR 技術の本質は, “情報の可視化” であると考えている. すなわち, XR 技術を利用した放射線防護教育は, 自身が被ばくすることなく, 散乱腺分布情報を瞬時に, かつ立体的に視覚で捕らえることで, 自身の感覚として情報をインプットすることができる. このことは, 従来の座学のみでの学習方法とは大きく異なっている. 誰しもがレベルの高い放射線防護を実践するためには, 効果, 効率, そして魅力を伴った放射線防護教育が必要であり, XR 技術はそれらを満たすものだと確信している. しかしながら, 過去の報告を調査する限り, IVR を行うスタッフの放射線防護に不可欠な装備とされる天吊り式防護板の有用性や正しい使い方を, 実際の臨床現場で働く医療従事者への教育に AR application を用いて実施し, 評価した研究は Matsuzaki らの報告 [67]以外ない.

7-1．散乱線分布測定のための機材の開発

散乱線分布の測定において，測定点を増やせば増やすほど精密な分布となる反面，労力が増す．そのため，効率を上げるために機材を使用することが望ましい．しかし，一般的に推奨される機材はなく，自身の被ばくを伴いつつも直接測定する方法や高価な機材を使用する方法しかないのが現状である．そこで今回，誰しもが簡便に手に入れることができ，かつ比較的低コストである段ボールという素材を利用する方法を考案した．この方法であれば，被ばくのリスクが全くないという最大のメリットを受領できる．また測定に際し，血管造影検査室にある機器などが干渉する恐れがあるため，さまざまなサイズを作成し，対応できるようにした．その結果，機器自体が配置されているところ以外の測定は可能であり，線量計も段ボールに添付できることから，測定者自身の被ばくもない安全な機材の開発に成功した．

7-2．段ボールの放射線減弱率の検証

Nakamura らの報告である JG 法では 13–24%の減弱があったのに対し [85]，本研究で使用した機材はすべて，主な原材料が紙ベースの段ボールであるため，理論上，測定される散乱線の減弱率は 0%に近いと想定される．実際に放射線減弱率を測定すると，中央値 0.00–1.32%であり，機材による減弱はほぼ無いと推察される．紙はセルロース (分子式: $(C_6H_{10}O_5)n$) を主成分としており，炭素や水素，酸素といった比較的原子番号の低いもので構成されている．つまり，鉄や鉛といった原子番号の高いものに依存する X 線減弱を考慮して散乱線を測定するに際し，段ボール素材は最適であったと考えられる．

なお，測定の際に段ボールが極力重ならないように設置したため，その影響は少ないことが推察される．仮に，距離の減弱を無視し，単純に段ボールによる減弱のみを考え，さらに減弱率を 1.32%とした場合，本研究では最大 9 個の重なりがあるため，放射線減弱率は 1.32–11.24%程度変動すると考えられる．しかし，減弱率が高い場所は放射線源から離れた場所であり，そもそも線量が低い場所であるため，減弱の影響も低く，教育ツールとして活用しても問題にならないと考える．

7-3．血管造影検査室内の散乱線分布の測定

散乱線を測定することで，X 線管中心部の吸収線量が他のポイントに比べ，100 倍以上高いことが確認できた．これは，中心部の線量が直接線を測定しているためであり，このことからも照射野に手を入れたりする行為の危険性が推察される．一方，中心部から離れることで線量が下がっていることも認められた．このような，線源から離れれば線量は下がるという一般的な放射線の

挙動に関しては，数値だけ見ても理解することが可能だと推察される．しかしながら，この数値を血管造影検査室内のレイアウトに当てはめ，どこのポイントが低いかを確認することは容易ではない．また，数値だけ見ても記憶には残りにくい．いわゆる従来型の座学による学習方法の難しさがあると考えられる．

7-4．天吊り式防護板の正しい使用方法を学習するための AR application の開発

作成した AR 画像でも，防護カーテンや天吊り式防護板を使用することで，線量低減できることが確認できた．また，天吊り防護板とファントムの間の隙間を極力なくすことで，効果的に防護できることが確認できた. AR application を使用することで，防護カーテンや天吊り式防護板の効果を視覚的に確認できることは，放射線防護技術を学ぶ上で，非常に理解しやすいと推察された．特に，単に数値情報で表現するのではなく，カラーマップで表示させることで，視覚からの情報として誰しもが簡単に理解できるようになったと考えられる．

7-5．AR application の評価

今回，開発した AR application の評価として，ARCS 動機づけモデルに基づく IMMS を利用した質問紙調査を行った．この IMMS を利用した質問紙調査は，学習者の教材に対する反応を測定するツールであり，どのように動機づけされたかを判定することができる [58, 91-93]．また，IMMS を利用した質問紙調査は，ARCS モデルに分類することができる. ARCS モデルは，学習意欲に影響を及ぼす要素であり，意欲を刺激・保持するための方略を作り出すことに必要な概念である [59, 58]．また，ARCS モデルは Attention, Relevance, Confidence, Satisfaction の 4 つの下位尺度に分類される．それぞれ，学習者の関心を獲得する，学習者のニーズを満たす，学習成功への自信を構築させる，内的，外的報奨によって達成を強化させると定義され，Attention, Relevance, Confidence の達成によって，学習の動機づけがされたとみなされ，Satisfaction の達成によって，学習意欲を持続させることができるとされている [58]．文言を変えることで，どのような教材に対しても対応可能である [58]．なお，澁谷らは，否定的な質問項目には躊躇なく否定するが，肯定的な項目には遠慮して回答する傾向があり，その結果，否定的な項目で構成された得点は高くなると報告している [96]．本研究において，Satisfaction に否定的項目があれば，さらに高い得点の傾向となった可能性もある．しかし，Satisfaction はすでに高い得点圏であることから，仮に否定的項目があったとしても，採点結果に大きな影響を与えないと考えられる．

7-5-1．医療従事者全体の得点結果に対する考察

本研究における 36 項目の質問紙調査の医療従事者全体の得点結果では, 4.65±0.31 と比較的高得点であった. AR application が魅力的であること, カラーマップが視覚に直接訴え, 学習しやすくなったことが要因として考えられる. それゆえ, AR application は放射線防護を学習するうえで, 非常に有用な教育ツールだと推察される. また, 一番得点の低い質問項目は, 「AR 学習ツールでしばらく学習した後に, その内容のテストに合格する自信があった」であった. これは学習者なら誰しも抱えている, 確認テストに対するネガティブな思考 (テストに合格するために必要な知識や自信の不足からくる不安など) が要因にあったと考えられる. 一方, 得点の高い質問項目は, AR の表現や魅力, 学習内容の理解に関するものが多く, ポジティブな意見が大多数であった. また, ARCS モデルに基づいた本研究の評価の結果, 下位尺度 Attention, Relevance, Confidence, Satisfaction は高得点であった. AR application は, 下位尺度 Attention により好奇心が刺激され, Relevance により個人のニーズが満たされ, Confidence により学習成功への期待感が適当であることから, 学習への動機づけがバランスよく達成できていると推察される. さらに, 学習意欲を継続させるために必要な Satisfaction も得られており, AR application は複雑な人間の学習意欲を高める教育ツールであることが示唆された. なお, Cronbach’s coefficient Alpha の結果より, 質問紙調査の信頼性は妥当であったと考えた.

7-5-2．職種間の得点結果の比較に対する考察

すべての職種の質問紙調査の得点結果は, 比較的高得点であった. また, 医師の一番得点の低い質問項目は, 「この分野についてもっと知りたいと思うほど AR 学習ツールを楽しんだ」であった. これより, 開発した AR application は, 医師の期待を満たしていなかったことが推察される. その要因として, 今回の学習内容は既知のことであり, 医師にとって新しく学ぶ要素は少なかったことが考えられる. ICRP ではレベルにあった教育を行うことを推奨しており [11], 今後, 職種やレベルに応じた教育内容の作成が必要であることが示唆された. また, 看護師の一番得点の低い質問項目は, 「はじめてこの AR 学習ツールを見たとき, 簡単に使用できるという印象を持った」であった. これより, 開発した AR application は, 操作が難しいと感じた看護師が存在していることが示唆された. 本研究では, 診療放射線技師や臨床工学技士など, 機器を対象とする職種の者が多く, その者らは機器の操作に長けていると推察される. 対して看護師は, 人を対象とした職種であり, そのため, 普段あまり使用しない機器の操作に難しさを感じたと考えられた. また, 診療放射線技師や臨床工学技士は, テストに関する質問項目が低かったが, 単にテストの合否に伴う不安が生じたためと考えられる.

一方, 得点の高い質問項目は, すべての職種でポジティブな意見が大多数であった. 放射線防護学習が自身に関連する内容であったこと, AR application が放射線防護を理解する自信と達成感を生じさせたと推察される. また, 診療放射線技師は, 放射線防護に関する基本的知識は持っているが, どちらかといえば, 撮影技術に対する学習の割合が多いのが実情である. したがって, 本研究による AR application による学習は, 今までの基礎知識を関連づけ, 放射線防護の重要性を再認識することができたという要素が強かったと推察される.

なお, 看護師の下位尺度 Attention, Confidence における Cronbach’s coefficient Alpha の結果は 0.59, 0.68 と低値であったが, IMMS による評価法は確立されているため, 質問項目の削除などの調整は行わなかった [58].

7-5-3．医療従事者の下位尺度別得点比較に対する考察

職種間での各下位尺度を比較した結果, すべての職種間で有意差がなく, 得点は高かった. これより, 視覚に直接訴える AR application は, 天吊り式防護板の使い方を学習するのに教育課程の異なる職種に関係なく, 対象者に高い学習意欲を持たせることができる有用な教材であることが示唆された. また, 医師に関しては他の職種に比べ, 得点が低い傾向にあった. これは AR application で設定した学習シーンが, 医師にとっては既知の内容であったため, 医師は他職種ほどの関心や満足感を得ることができなかったことが要因として考えられる. そこで, 今後, 医師の得点が低い下位尺度である Relevance と Satisfaction を補強する方略として, Relevance においては, 医師の関連性とニーズを結びつけること, Satisfaction においては, 内発的, 外発的報酬を上げることが望ましいと考える. 具体的には, 医師に被ばくによる健康影響を説明し, 防護の必要性と内発的な満足感を与える. 次に, どのように防護すべきかを議論し, さまざまなシチュエーションによる天吊り式防護板の使い方を教育することで, 医師のニーズを満たすことに繋がると考える. そして, 医師個人の被ばく線量の推移を利用して, 医師の被ばく防護に対する努力の成果を提示し, 実践力の有効性を証明することで, 外発的満足感を高めることができると推察される. このように, さまざまな方略を用いることで, 学習意欲を刺激することが肝要である.

しかしながら, 医師の得点が他の職種と比べて低かったと言っても, 高いことに変わりはなく, AR application のメインターゲットである医師に対してよりも, むしろ医師以外の職種に対して強い関心と満足感を与えたと考えることもできる. なぜなら, 開発した AR application では, 医師の立ち位置とは反対側の, 通常看護師や臨床工学技士らが普段立つ側の散乱線の方が, 医師の立ち位置の散乱線よりも強いことを明瞭に示している. そのため, 仮に天吊り式防護板を正しく用いて医師を防護することはできても, 看護師や臨床工学技士らを防護することはできず, 看護師や

臨床工学技士らを防護するためには，新たな防護設備を導入するか，X線照射時に患者に近づかないように行動を変える必要性に改めて気付かされたからである．今後，それぞれに職種に準じた放射線防護の提案を含め，学習内容の検証が必要だと考える．

看護師や臨床工学技士らの立ち位置における下半身の防護装具には，医師同様，防護カーテンの設置や移動式の防護衝立などを効果的に利用することが推奨される (図 7-1). 追加の防護具の利用促進のために，それらの減弱効果に関しても AR application を作成し，学習ツールとして利用することが望ましいと考える．しかしながら，コストの問題があるため，必ずしも防護具の設置ができないことが予想される．その他，防護カーテンなどを設置できたとしても，上半身の被ばく防護は達成することができない．そのようなシチュエーションを想定して，作業管理の面からアプローチすることが推奨される．まずは，作業手順を見直し，X 線透視や撮影がされている時には，散乱線分布で高線量域であった場所には近づかないように定めるべきである．また，緊急を要する場合で，近づく必要が出た場合は，防護眼鏡や甲状腺防護カラーといった個人防護具を装着するべきである．他方，X 線透視や撮影をする医師が声を掛け，看護師や臨床工学技士を退避させることも有効な手段と考える．実際，本研究の教育により，医師は看護師や臨床工学技士らが想定以上に被ばくしている可能性を知ることができた．その対策として，退避を促す声掛けを始め出した．このような効果は，本研究の良好な影響といえる．その他，透視の線量を下げる，撮影回数を減らすなど，X 線源からの発生を抑え込む手段も考慮すべきである．

図 7-1 移動式防護衝立 (縦 100cm，横 90cm)

7-6．先行研究との比較

藤淵らは，血管造影検査室や Computed tomography (CT) 検査室の散乱線分布を，VR を使用して四次元で可視化し，それを各自の Personal computer を操作して，任意の位置から仮想の室内を観察した放射線防護教育について報告をしている [63]. 対象は，看護師，診療放射線技師，臨床検査技師の免許を有する修士課程の大学院生であり，その評価として IMMS を使用している．この時の下位尺度 Attention, Relevance, Confidence, Satisfaction は，それぞれ 3.4 ± 1.1, 3.8 ± 0.9, 3.2 ± 1.1, 3.7 ± 0.8 点であり，本研究の方が得点は高かった．対象など異なるため，純粋な比較はできないが，実際の現場で直接確認できるという，AR application ならではのメリットが高得点に繋がったと考えられる．さらに，Matsuzaki らは，AR を利用し，天吊り式防護板の適切な利用法に関する放射線防護教育を，医療従事者に対して行っている [67]. その結果，職種によらず，IMMS の下位尺度の得点は 4 点 (5 段階評価) を超えていた．また，Nishi らは Web を利用して，誰しもが利用できる AR, VR の放射線防護アプリケーションの開発を行い，診療放射線技術学を学ぶ大学生に対し，IMMS による評価を行っている [66]. その結果，すべての下位尺度の得点で 4 点 (5 段階評価) を超えていた．これら 2 つの報告の得点の高さは，本研究と同様の傾向であり，視覚化に対する強い効果とアプリケーションの有用性を示唆していると考える．さらに，大屋らは，病室における移動型 X 線撮影装置の胸部および腹部撮影を想定した散乱放射線を，プロジェクションマッピングを利用して可視化させ，看護学生を対象とした放射線防護教育に利用している [84]. その中で，プロジェクションマッピングでの体験型学習は，学習に対して興味，関心を持つ学習者には有効であったものの，学習意欲の低い学習者の動機づけができていなかった．それと比較し AR application は，すべての学習者に高い興味，関心を持たせており，プロジェクションマッピングよりも動機づけが行える教材であったと考えられた．これらより，放射線防護の教育ツールとして，AR application は非常に適していることが示唆された．

7-7．本研究におけるリミテーションと展望

本研究では，天吊り防護板の使用について学習できる AR application を作成し，評価した．しかしながら，今回の検証である ARCS モデルにもとづく IMMS では，AR application を使った者の学習意欲の観点から application を評価したに過ぎず，放射線防護教育の最終目的である「医療スタッフの被ばく低減」が達成できたかどうかについては，今後の個人被ばく線量動向の解析結果を待たねばならないことが本研究の限界である．さらに，本研究では，従来の座学による被ばく防護の学習コンテンツとの比較を行ったわけではない. IMMS での評価は，被ばく防護を学習するための動機づけを理論的に説明したに過ぎず，AR application の不十分さがあれば，どのように改

善すべきかの方略を探るためのツールでしかない [58, 60]. 従来の学習コンテンツと潜在的に比較している可能性はあるが，単に, AR application による学習により，被ばく防護の学習に対する動機づけを評価したのみである．すなわち，教育実施前後での評価の差を見たものではない．本来の教育効果の判定では，教育実施前から実施後の推移を評価するべきであろう．したがって，従来の学習コンテンツと比較して，被ばく防護の理解が促進したかどうかは不明であり，リミテーションの一つとなる．また，本研究では, 4 つの職種に分けて評価を実施したため，職種の標本数が少なくなった点も本研究の限界である．その他, IMMS の評価結果に影響を与える可能性がある因子として経験年数や環境が挙げられる．血管造影検査や IVR に従事する年月は，職種に関係なくバラバラである．その中で，放射線防護は，指導者の影響を強く受けると報告されており [12]，被ばく防護に無関心の指導者のもとで経験を積むことになれば，被ばく防護への取り組みは悪くなる可能性が考えられる．反対に, IVR 専門医やインターベンションエキスパートナース，日本血管造影・インターベンション専門診療放射線技師，心血管インターベンション技師など，学会が認定するスペシャリストからの指導を受けるならば，被ばく防護についての知識を，より深めることができるであろう．このように，経験値や環境によって，被ばく防護の知識量は異なり，その影響により, IMMS の評価，特に満足感の評価は変動すると予想される．しかし，経験年数を適切にカテゴライズする基準が難しいため，本研究では検証を行わなかった．なお, IMMS の評価の変動は予想されるものの，本研究では，どの教育レベルでも一様に動機づけできたことから，カテゴライズされた間に有意差は認められないと推察される．さらに，作成した AR application 自体の汎用性は低い．各施設における血管造影装置，防護設備，それらの検査室内のレイアウトは異なっているため，施設ごとの線量データの取得が必要不可欠であり，今回作成した AR application を他の施設にそのまま使えない点も本研究の限界である．そこで，汎用性を高めるためには，放射線外部被ばく防護の 3 原則といった基礎教育をする前提のもと，モンテカルロシミュレーションによる散乱線分布の作成が望ましいと考える [63, 64, 66, 68, 69, 82, 89, 90]. さらに，理解を促進させるために X 線 C アームや人体を模擬した AR を表示させることが必要と推察される (図 7–2). このような対策が，今後の汎用性を高める展望となる．

(A)

(B)

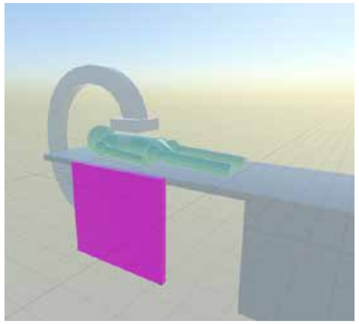


図 7-2 血管造影検査室の寝台と人体の AR 化. (A)実際の臨床現場のイメージ図. (B) 臨床現場の AR 画像. 紫の立方体は防護カーテンを表現している.

今後は，各種の血管造影装置や防護設備，様々な X 線入射方向や防護設備の使い方など，職種，被ばくの状況やレベルに応じた様々なシチュエーションにおける AR application を作成し，放射線防護教育教材としての教育効果の検証をしたいと考えている．さらに, AR 画像を作成する際は，視覚化された散乱線分布の色合いにも注意を払うべきである．色合いには，一目で被ばくの多寡の理解ができる働きがあるが，学習者次第で感じ方が異なる．それぞれの国の文化や見え方に合った色の使用が望ましいと考える．その他，医療分野全体の被ばく低減を達成できるような活動や，医療従事者だけでなく，病院で働く他の従事者 (事務員など) の職員教育，一般公衆を対象とした放射線への不安を軽減するようなアウトリーチ活動を積極的に行うことが，本研究の社会への還元であり，展望となる．また，作成した教育教材を利用することで，放射線防護マネジメントシステムの運用にも貢献できると考えられる．

第８章　総論

現代の医療において，放射線診療は欠かすことのできない．特に IVR は，その社会的合理性，利便性の高さから，さまざまな領域で利活用されている．しかしながら, IVR に携わる医療従事者には被ばくという問題が生じる．それを限りなく低くするために放射線防護具，とりわけ天吊り式防護板の使用は重要であるが，実際の臨床では適切に利用されていないのが現状である．そこで本研究では，従事者の労働環境の改善のために，労働衛生の 5 管理のうち労働衛生教育に焦点を当て，目に見えない放射線を視覚化し，正しい天吊り式防護板の使用を行えるような AR application の開発とその評価を行うこととした．

AR application の開発にあたり，散乱線分布の測定, AR application の作成という工程が必要となる．まず，散乱線分布の測定では，測定器具の放射線減弱が影響するため，適切な測定器具の選定が重要となる．できるだけ放射線減弱の少ない素材として段ボールを選び，血管造影検査室内の線量測定を実施した．得られた結果をカラーマップで表現し, AR 化した．その後, AR application を作成し，簡便に利用できるよう iPad 端末にインストールした．医療従事者の適切な天吊り式防護板の使用の学習のために, 3 つのシーン (天吊り式防護板を使用しない，不適切な天吊り式防護板の使用，適切な天吊り式防護板の使用) を用意した．

作成した AR application を実際の臨床に携わる医療従事者に，任意の方向から見てもらい，適切な天吊り式防護板の使用方法を学習してもらった．その結果を ARCS 動機づけモデルに基づく IMMS によって評価した．その結果，散乱線の視覚化の反響は大きく, IMMS による評価も高かった．ただし，今までの教育レベルに応じて，満足度も低くなる傾向が見られた．今後は，学習内容を精査し，教育レベルやさまざまなシチュエーションといった幅広い対応ができるような学習教材の作成が求められた．

結論として，血管造影検査室の散乱線を AR application で可視化し，医療従事者に対して天吊り式防護板の防護効果と正しい使い方を理解させる教材を作成することができた．この教材を ARCS モデルにもとづく IMMS で評価したところ，医師・看護師・臨床工学技士・診療放射線技師すべての職種のスタッフから高い評価を得ることができた．今後は，医療従事者の個人被ばく線量の動向を解析することで, AR application の被ばく低減効果を検証することが必要である．

本研究の公開

天吊り式防護板の適切な利用に関する教育のための AR application の開発とその評価について，「European Journal of Radiology」に投稿を行い, 2021 年 8 月 13 日にアクセプトされた．

利益相反

本研究に関する利益相反はない．

研究倫理

本研究は，当大学の倫理委員会によって承認され (受付番号：R4-033)，個人情報を一切含まない匿名化された情報のみを用いて実施した．

研究費の資金源

本研究の一部は，労災疾病臨床研究事業費補助金 (180501-1 研究代表：欅田尚樹, 200601-1 研究代表：千田浩一) および，科学研究費助成事業 (18H03376 研究代表: 盛武敬) の助成を受けて実施した．

謝辞

本稿を終えるにあたり，このような研究の機会を与えて下さった指導教官の産業医科大学 産業保健学部長 欅田尚樹教授に深く感謝申し上げます．また，本研究に関わる学会活動や論文作成にあたり，多大なご指導，ご助言をいただきました国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子生命・医学部門 放射線医学研究所放射線規制科学研究部部長 盛武敬先生に深く感謝申し上げます．また，研究全般に適切なご助言をいただきました産業医科大学病院 永元啓介氏，中上晃一氏，新小文字病院 茂呂田孝一氏，産業医科大学アイソトープセンター 阿部利明氏，産業医科大学 産業保健学部 栗山知子氏，川崎医科大学付属病院 人見剛氏に深く感謝申し上げます．また，様々なご支援，ご配慮頂きました産業医科大学 産業保健学部の児成智美氏，川越富美子氏，木原貴美氏，北島由子氏，産業医科大学 アイソトープセンター 糸長美穂氏に心より感謝申し上げます．

皆様のご支援があったからこそ，このような研究ができましたこと，心より感謝申し上げます．

第９章　参考文献

1. Berrington de González A., Darby S. (2004): Risk of cancer from diagnostic X-rays: estimates for the UK and 14 other countries. Lancet 363: 345-351
2. Pearce M. S., Salotti J. A., Little M. P., 他 (2012): Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. Lancet 380: 499-505
3. Mathews J. D., Forsythe A. V., Brady Z., 他 (2013): Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. Bmj 346: f2360
4. Journy N., Rehel J. L., Ducou Le Pointe H., Lee C., Brisse H., Chateil J. F., Caer-Lorho S., Laurier D., Bernier M. O. (2015): Are the studies on cancer risk from CT scans biased by indication? Elements of answer from a large-scale cohort study in France. Br J Cancer 112: 185-193
5. Krille L., Dreger S., Schindel R., 他 (2015): Risk of cancer incidence before the age of 15 years after exposure to ionising radiation from computed tomography: results from a German cohort study. Radiat Environ Biophys 54: 1-12
6. International Commission on Radiological Protection (ICRP 2008): Radiological protection in medicine. ICRP publication 105. Ann.
7. IVR って，なに？. https://www.jsir.or.jp/shimin/about_ivr/what_ivr/Accessed 5 Sep 2022)
8. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2022): SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2020/2021 Report, Volume I REPORT TO THE GENERAL ASSEMBLY SCIENTIFIC ANNEX A: Evaluation of medical exposure to ionizing radiation. United Nations
9. International Commission on Radiological Protection (ICRP 2012): 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. ICRP publication 118. Ann.
10. International Commission on Radiological Protection (ICRP 2000): Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. ICRP publication 85. Ann.
11. International Commission on Radiological Protection (ICRP 2010): Education and training in radiological protection for diagnostic and interventional procedures. ICRP publication 113. Ann.
12. International Commission on Radiological Protection (ICRP 2012): Radiological protection in fluoroscopically guided procedures performed outside the imaging department. ICRP publication 117. Ann.
13. International Commission on Radiological Protection (ICRP 2018): Occupational radiological protection in interventional procedures. ICRP publication 139. Ann.
14. 赤羽 恵一 (2006): 放射線従事者の 被ばく線量評価. 臨床画像 22: 168(136)-177(145)
15. 千田 浩一 (2008): IVR 術者被曝の計測評価と防護. 日本放射線技術學會雜誌 64: 1009-1014
16. 千田 浩一 (2012): 医療被ばく・職業被ばくの現状と対策 (特集 放射線障害) -- (放射線防護と安全対策). 日本臨床 70: 479-484
17. 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 (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). 保健物理 49: 171-179
18. 佐々木 洋 (2015): 白内障. 病理と臨床 33: 44-49
19. Abelson P. H., Kruger P. G. (1949): Cyclotron-induced radiation cataracts. Science 110: 655-657
20. Cogan D. G., Martin S. F., Kimura S. J. (1949): Atom bomb cataracts. Science 110: 654
21. International Commission on Radiological Protection (ICRP 1951): 1950 Recommendations Revised by the International Commission on Radiological Protection at the Sixth International Congress of Radiology. Br. J. Radiol
22. International Commission on Radiological Protection (ICRP 1955): 1954 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Br. J. Radiol, London
23. International Commission on Radiological Protection (ICRP 1977): Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press
24. International Commission on Radiological Protection (ICRP 1969): Radiosensitivity and Spatial Distribution of Dose. Pergamon Press, Oxford
25. International Commission on Radiological Protection (ICRP 1984): Nonstochastic Effects of Ionizing Radiation. 41. Ann.
26. International Commission on Radiological Protection (ICRP 2003): Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor (wR). ICRP Publication 92. Ann.
27. Nakashima E., Neriishi K., Minamoto A. (2006): A reanalysis of atomic-bomb cataract data, 2000-2002: a threshold analysis. Health Phys 90: 154-160
28. Neriishi K., Nakashima E., Minamoto A., Fujiwara S., Akahoshi M., Mishima H. K., Kitaoka T., Shore R. E. (2007): Postoperative cataract cases among atomic bomb survivors: radiation dose response and threshold. Radiat Res 168: 404-408
29. Worgul B. V., Kundiyev Y. I., Sergiyenko N. M., 他 (2007): Cataracts among Chernobyl clean-up workers: implications regarding permissible eye exposures. Radiat Res 167: 233-243
30. International Atomic Energy Agency (2018): Occupational Radiation Protection. International Atomic Energy Agency
31. Directives, Council directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013. https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2014:013:0001:0073:EN:PDF (Accessed 5 September 2022 5 September 2022)
32. National Council of Radiation Protection and Measurements: NCRP (2018): Management of exposure to ionizing radiation: radiation protection guidance for the United States (2018), NCRP Report No. 180
33. Vano E., Gonzalez L., Fernandez M. J., Alfonso F., Macaya C. (2006): Occupational radiation doses in interventional cardiology: a 15-year follow-up. The British Journal of Radiology 79: 383-388
34. Chida Koichi, Kaga Yuji, Haga Yoshihiro, Kataoka Nozomi, Kumasaka Eriko, Meguro Taiichiro, Zuguchi Masayuki (2013): Occupational Dose in Interventional Radiology Procedures. American Journal of Roentgenology 200: 138-141
35. 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: 991-998
36. 岩井 計成, 河端 京介, 雌峨根 满, 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= Medical journal of Japanese Red Cross Wakayama Medical Center 34: 79-87
37. Haga Y., Chida K., Kaga Y., Sota M., Meguro T., Zuguchi M. (2017): Occupational eye dose in interventional cardiology procedures. Sci Rep 7: 569
38. Kato Mamoru, Chida Koichi, Ishida Takato, Sasaki Fumiaki, Toyoshima Hideto, Oosaka Hajime, Terata Ken, Abe Yoshihisa, Kinoshita Toshibumi (2019): OCCUPATIONAL RADIATION EXPOSURE DOSE OF THE EYE IN DEPARTMENT OF CARDIAC ARRHYTHMIA PHYSICIAN. Radiation protection dosimetry 187
39. Nagamoto Keisuke, Moritake Takashi, Nakagami Koichi, Morota Koichi, Matsuzaki Satoru, Kunugita Naoki (2021): A multicenter study of radiation doses to the eye lenses of clinical physicians performing radiology procedures in Japan. Journal of Occupational Health 63
40. International Commission on Radiological Protection (ICRP 2007): The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. Ann.
41. Hijikata Yasukazu, Kamitani Tsukasa, Yamamoto Yosuke, 他 (2021): Association of occupational direct radiation exposure to the hands with longitudinal melanonychia and hand eczema in spine surgeons: a survey by the society for minimally invasive spinal treatment (MIST). European Spine Journal 30: 3702-3708
42. Hijikata Yasukazu, Nakahara Masayuki, Kusumegi Akira, Morii Junji, Okubo Naoki, Hatano Nozomi, Takahashi Yuichi (2021): Association between occupational testicular radiation exposure and lower male sex ratio of offspring among orthopedic surgeons. PLOS ONE 16: e0262089
43. Cioffi Dante, Fontana Luca, Leso Veruscka, Dolce Pasquale, Vitale Rosalba, Vetrani Ilaria, Galdi Aniello, Iavicoli Ivo (2020): Low dose ionizing radiation exposure and risk of thyroid functional alterations in healthcare workers. European Journal of Radiology 132
44. Vimercati Luigi, De Maria Luigi, Mansi Francesca, 他 (2018): Prevalence of Thyroid Diseases in an Occupationally Radiation Exposed Group: A Cross-Sectional Study in a University Hospital of Southern Italy. Endocrine, Metabolic & Immune Disorders - Drug Targets 18
45. 隅 真一郎, 安田 光慶, 大谷 浩樹, 石本 陽平, 若林 公平, 崔 昌五, 佐藤 久弥, 加藤 京一 (2021): 心臓カテーテル検査における術者の水晶体放射線被ばく防護教育の効果. 日本放射線技術学会雑誌 77: 710-717
46. Matsuzaki Satoru, Moritake Takashi, Sun Lue, Morota Koichi, Nagamoto Keisuke, Nakagami Koichi, Kuriyama Tomoko, Hitomi Go, Kajiki Shigeyuki, Kunugita Naoki (2022): The Effect of Pre-Operative Verbal Confirmation for Interventional Radiology Physicians on Their Use of Personal Dosimeters and Personal Protective Equipment. International Journal of Environmental Research and Public Health 19: 16825
47. 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:

366-369
48. 渡辺 明美, 寺崎 敦子, 鎌田 雅子, 武田 沙江加, 家弓 丸子 (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: 54-64
49. 看護学教育モデル・コア・カリキュラム. www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/koutou/078/gaiyou/__icsFiles/afieldfile/2017/10/31/1397885_1.pdf (Accessed 2023 Feb 5)
50. Yashima Sachiko, Chida Koichi (2022): Awareness of Medical Radiologic Technologists of Ionizing Radiation and Radiation Protection. International Journal of Environmental Research and Public Health 20: 497
51. Mori Koji, Takebayashi Toru (2002): The Introduction of an Occupational Health Management System for Solving Issues in Occupational Health Activities in Japan. INDUSTRIAL HEALTH 40: 167-174
52. Lundvall L. L., Sandborg M. (2022): Occupational doses in interventional angiography after radiological protection training and use of a real-time direct display dosimeter. J Radiol Prot 42
53. 電離放射線障害防止規則. https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=347M50002000041_20210401_502M60000100082Accessed 22 Nov 2022)
54. Morishima Yoshiaki, Chida Koichi, Shigeizumi Kazuhiko , Katahira Yoshiaki , Seto Hatsue , Chiba Hiroo (2012): Importance of Radiation Education for Nurse. Japanese Journal of Radiological Technology 68: 1373-1378
55. Thambura Muchui J., Vinette Conradie I., Klopper Sune’ (2019): Nurses’ Knowledge of Ionizing Radiation in Northern Gauteng State Hospitals in South Africa. Journal of Radiology Nursing 38: 56-60
56. Badawy Mohamed, Mong Kam, Lykhun U., Deb Pradip (2016): An assessment of nursing staffs’ knowledge of radiation protection and practice. Journal of Radiological Protection 36: 178-183
57. Hirvonen L., Schroderus-Salo T., Henner A., Ahonen S., Kääriäinen M., Miettunen J., Mikkonen K. (2019): Nurses’ knowledge of radiation protection: A cross-sectional study. Radiography 25: e108-e112
58. Keller John M. (2010): Motivational Design for Learning and Performance. Springer Science+Business Media
59. Keller John M. (1987): Development and use of the ARCS model of instructional design. Journal of instructional development 10: 2
60. Keller John M. (2010): 学習意欲をデザインする ：ARCS モデルによるインストラクショナルデザイン. 北大路書房, 京都市 (参考文献 58 の訳書)
61. Kolb David (1984): Experiential Learning: Experience As The Source Of Learning And Development.
62. 今注目の xR（クロスリアリティ）って何？活用事例や XR エンジニアになるコツを紹介. https://type.jp/et/feature/16416/Accessed 18 Sep 2022)
63. 藤淵 俊王, 上田 昂樹, 門柳 紗妃, 上野 大輝, 中村 千裕 (2019): 仮想現実を利用した放射線検査における散乱線分布の四次元可視化による放射線防護教育への活用法の検討. 日本放射線技術学会雑誌 75: 1297-1307
64. Fujibuchi Toshioh (2021): Radiation protection education using virtual reality for the visualisation of scattered distributions during radiological examinations. Journal of Radiological Protection 41: S317-S328
65. Süncksen M., Bott O. J., Dresing K., Teistler M. (2020): Simulation of scattered radiation during intraoperative imaging in a virtual reality learning environment. Int J Comput Assist Radiol Surg 15: 691-702
66. Nishi Kazuki, Fujibuchi Toshioh, Yoshinaga Takashi (2022): Development and evaluation of the effectiveness of educational material for radiological protection that uses augmented reality and virtual reality to visualise the behaviour of scattered radiation. Journal of Radiological Protection 42: 011506
67. Matsuzaki Satoru, Moritake Takashi, Morota Koichi, Nagamoto Keisuke, Nakagami Koichi, Kuriyama Tomoko, Kunugita Naoki (2021): Development and assessment of an educational application for the proper use of ceiling-suspended radiation shielding screens in angiography rooms using augmented reality technology. European Journal of Radiology 143: 109925
68. Nishi K., Fujibuchi T., Yoshinaga T. (2020): Development of an application to visualise the spread of scattered radiation in radiography using Augmented Reality. J Radiol Prot
69. Nishi K., Fujibuchi T., Yoshinaga T. (2021): Development of scattered radiation distribution visualization system using WebAR. Journal of Physics: Conference Series 1943: 012057
70. İnangil Demet, Sendir Merdiye, Buyukyilmaz Funda (2020): Efficacy of Cartoon Viewing Devices During Phlebotomy in Children: A Randomized Controlled Trial. Journal of PeriAnesthesia Nursing
71. Atzori Barbara, Hoffman Hunter, Vagnoli Laura, Patterson David, Alhalabi Wadee, Messeri Andrea, Lauro-Grotto Rosapia (2018): Virtual Reality Analgesia During Venipuncture in Pediatric Patients With Onco-Hematological Diseases. Frontiers in Psychology 9

72. Cai Yiyu, Chui Cheekong, Ye Xiuzi, Wang Yaoping, Anderson James H. (2003): VR simulated training for less invasive vascular intervention. Computers & Graphics 27: 215-221
73. Heredia-Pérez Saúl A., Harada Kanako, Padilla-Castañeda Miguel A., Marques-Marinho Murilo, Márquez-Flores Jorge A., Mitsuishi Mamoru (2019): Virtual reality simulation of robotic transsphenoidal brain tumor resection: Evaluating dynamic motion scaling in a master-slave system. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery 15: e1953
74. Leary Marion, McGovern Shaun, Chaudhary Zainab, Patel Jaldhi, Abella Benjamin, Blewer Audrey (2019): Comparing bystander response to a sudden cardiac arrest using a virtual reality CPR training mobile app versus a standard CPR training mobile app. Resuscitation 139
75. Carl Barbara, Bopp Miriam, Voellger Benjamin, Saß Benjamin, Nimsky Christopher (2019): Augmented Reality in Transsphenoidal Surgery. World Neurosurgery 125
76. Chen Xiaojun, Xu Lu, Wang Yiping, Wang Huixiang, Wang Fang, Zeng Xiangsen, Wang Qiugen, Egger Jan (2015): Development of a surgical navigation system based on augmented reality using an optical see-through head-mounted display. Journal of Biomedical Informatics 55: 124-131
77. Le Roy B., Ozgur E., Koo B., Buc E., Bartoli A. (2019): Augmented reality guidance in laparoscopic hepatectomy with deformable semi-automatic computed tomography alignment (with video). Journal of Visceral Surgery 156: 261-262
78. Bartella A. K., Kamal M., Scholl I., Schiffer S., Steegmann J., Ketelsen D., Hölzle F., Lethaus B. (2019): Virtual reality in preoperative imaging in maxillofacial surgery: implementation of “the next level”? British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery 57: 644-648
79. Das Marco, Sauer Frank, Schoepf U. Joseph, Khamene Ali, Vogt Sebastian K., Schaller Stefan, Kikinis Ron, vanSonnenberg Eric, Silverman Stuart G. (2006): Augmented Reality Visualization for CT-guided Interventions: System Description, Feasibility, and Initial Evaluation in an Abdominal Phantom. Radiology 240: 230-235
80. Fetterly Kenneth A., Magnuson Dixon J., Tannahill Gordon M., Hindal Mark D., Mathew Verghese (2011): Effective Use of Radiation Shields to Minimize Operator Dose During Invasive Cardiology Procedures. JACC: Cardiovascular Interventions 4: 1133-1139
81. Jia Qianjun, Chen Ziman, Jiang Xianxian, Zhao Zhenjun, Huang Meiping, Li Jiahua, Zhuang Jian, Liu Xiaoqing, Hu Tianyu, Liang Wensheng (2017): Operator Radiation and the Efficacy of Ceiling-Suspended Lead Screen Shielding during Coronary Angiography: An Anthropomorphic Phantom Study Using Real-Time Dosimeters. Scientific Reports 7: 42077
82. Koukorava C., Carinou E., Ferrari P., Krim S., Struelens L. (2011): Study of the parameters affecting operator doses in interventional radiology using Monte Carlo simulations. Radiation Measurements 46: 1216-1222
83. Brun A., Mor R. A., Bourrelly M., Dalivoust G., Gazazian G., Boufercha R., Lehucher-Michel M. P., Sari-Minodier I. (2018): Radiation protection for surgeons and anesthetists: practices and knowledge before and after training. J Radiol Prot 38: 175-188
84. 大屋 富彦, 小林 正尚 (2020): プロジェクションマッピングを利用した看護職者への放射線防護教育. 日本放射線看護学会誌 8: 3-10
85. Nakamura T., Shoichi S., Takei Y., Kobayashi M., Cruz V., Kobayashi I., Asegawa S., Kato K. (2020): A more accurate and safer method for the measurement of scattered radiation in X-ray examination rooms. Radiol Phys Technol 13: 69-75
86. International Commission on Radiological Protection (ICRP 2018): Ethical foundations of the system of radiological protection. ICRP Publication 138. Ann.
87. 教育機器編集委員会 (1972): 産業教育機器システム便覧. 日科技連出版社
88. Dale Edgar (1969): Audiovisual methods in teaching
89. Ferrari Paolo, Becker Frank, Carinou Eleftheria, Chumak Vadim, Farah Jad, Jovanovic Zoran, Krstic Dragana, Morgun Artem, Principi Sara, Teles Pedro (2016): Monte Carlo study of the scattered radiation field near the eyes of the operator in interventional procedures. Journal of radiological protection : official journal of the Society for Radiological Protection 36: 902-921
90. Loy Rodas N., Padoy N. (2015): Seeing is believing: increasing intraoperative awareness to scattered radiation in interventional procedures by combining augmented reality, Monte Carlo simulations and wireless dosimeters. Int J Comput Assist Radiol Surg 10: 1181-1191
91. Annamalai Subashini. (2016): Implementing ARCS Model to Design a Motivating Multimedia E-Book for Polytechnic ESL Classroom. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering 8: 57-60
92. Huang Biyun, Hew Khe (2016): Measuring Learners’ Motivation Level in Massive Open Online Courses. International Journal of Information and Education Technology 6: 759-764

93. Jamil M., Ningrum E., Yani Ahmad (2019): Level of Learning Motivation Student Based on ARCS Model on Geographic Subject. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 286: 012010
94. Racadio John M., Nachabe Rami, Homan Robert, Schierling Ross, Racadio Judy M., Babić Draženko (2016): Augmented Reality on a C-Arm System: A Preclinical Assessment for Percutaneous Needle Localization. Radiology 281: 249-255
95. Dorey S., Gray L., Tootell A., Higgins R., Al-Islam S., Baxter H., Dixon P., Hogg P. (2019): Radiation protection value to the operator from augmented reality smart glasses in interventional fluoroscopy procedures using phantoms. Radiography 25: 301-307
96. 澁谷 泰秀; , 渡部 論;, 吉村 治正;, 小久保 温 (2014): 肯定的項目と否定的項目が社会調査データの分析に及ぼす影響:古典的テスト理論を用いた分析. 青森大学付属総合研究所紀要 Vol. 16, No. 1, 1-13

付録

以下に ARCS 動機づけモデル [58, 60] の概要を述べる.

A-1. ARCS モデルにおける注意 (Attention)

ARCS モデルの注意 (Attention) とは, 学習者の好奇心と興味を刺激することである [58]. ただし, 過度の刺激 (ストレス) を与えることはパフォーマンスの低下を招いてしまう. そのため, 適度な刺激による最適な覚醒と行動を目指すことが肝要である.

この分類で重要なキーワードである好奇心とは何か. それは, 生理学的な好奇心 (驚くべき刺激によって引き起こされるものなど) と認知的な好奇心 (科学的興味など) に大別される [58]. この好奇心は, 真新しいものに対しては刺激を受けるが, 時間経過とともに減衰してしまう. また, 知性とは相関が認められないものの, 学習とは有意な正の相関がある [58]. すなわち, 高い好奇心は与えられた知識を習得できることを示している. 一方, 好奇心はポジティブな感情だけでなく, 不安感を創出するような不快な状態であるというネガティブな側面もある. また, 年齢に伴い減じる傾向がり, その他, 環境的不安感 (環境によるストレスなど) が大きいと, 好奇心は抑制される. このように好奇心には多くの側面があり, 個々による大きな関心が関係しているといえる. それゆえ, 個々の好奇心を理解し, それぞれにあった促進方法を検討することが重要である.

学習を進める上で, 好奇心と相対する, 最大の障壁となるのが退屈である. 退屈は, 覚醒, 単調, 拘束, 不愉快さの 4 つの概念で構成される [58]. 低いレベルの覚醒状態, 高い拘束, そして単調な反復作業による不愉快さは, 密接に退屈と関連する. つまり, 退屈は最適な刺激レベルに達していないといえる. そこで, 新奇性や変化への欲求といった感情を満足させるような刺激追求への欲求を与える必要がある. ただし, 個人により刺激欲求量は異なるため, 学習者にとって最適となるバランスを見つけることが重要である.

好奇心をバランスよく刺激し, 注意に関する支援方策をするために, 知覚的喚起, 探究心の喚起, 変化性といった 3 つの下位分類がある (表 A-1) [58]. 知覚的喚起は, 興味の獲得を意味し, その手段が重要となる. 音や動きといった刺激は瞬間的な注意には役立つものの, 長期的な興味獲得の維持はできない. そのため, より具体性を持った感情的な言論が必要である. 探究心の喚起とは, 新しいことへの学びにおける純粋な学習者の欲求である. したがって, 学習者への探究心に焦点を合わせた話題提供, 調査, 回答と意見の抽出といった一連の流れが高水準の好奇心を学習者に与えることができる. 変化性は, 注意の持続を意味し, 退屈を克服することで, 刺激追求への欲求を満たすことが重要となる. 視覚や聴覚へのアプローチ, ペースの変更といった多様性がカギとなる.

表 A-1 注意に関する下位分類と具体策 (Keller の書籍 [58]より一部変更して引用).

下位分類	具体的方策
知覚的喚起	抽象的な表現を避け，具体的な事例を用いて表現する
	リストや略図，フローチャートを用いて，具体的に表現する
	アイコンタクなど，熱意を持って表現する
探究心の喚起	トピックを問題に含ませ，探究心を刺激する
	矛盾を感じさせないように好奇心を刺激する
	未解決の問題を取り上げる（ミステリー感覚を利用する）
変化性	様々な資料のレイアウトに多様性を持たせる
	声調や講義の順序に多様性を持たせる

A-2. ARCS モデルにおける関連性 (Relevance)

関連性の目指すところは，学習体験が自身に意義のあることだと理解させることにある [58]. 人は期待される結果が自身にとって有用であり，そして達成可能である場合に，その行動を選ぶ. すなわち，期待と価値の組み合わせが行動理念となり，どちらかが欠ければ，行動する可能性はゼロに近くなる. 逆説的に考えるならば，魅力的であればあるほど，また学習内容と個人的興味が一致した時ほど，行動する選択となりえる. 関連性は，純粋に実用的な観点 (自身の目的，動機，価値など) に基づく感情や認知である [58].

行動を起こすには，目的が関連づけられる. この行動の目的には，到達するまで努力を続ける継続性，習慣化してストレスを軽減するパターン化，最も効率的な手段の選択といった 3 つの傾向がある [58]. これらをうまく活用し，学習者の持っている目的と学習内容を関連づけることが，教育実践者に求められる. また，人は欲求を満たすために目的行動をとるが，その欲求から導かれた動機を持っている. 目的を達成することに対して，強く動機づけられていれば，困難も乗り越えることができる. この動機づけには，自らの内なる欲求による内発的動機づけ (興味) と，環境からの圧力による外発的動機づけ (努力) にわけられる [58]. 前者は積極的行動に結びつき，後者は退避行動に結びつくため，内発的な興味を持つことが望ましいと考えられている.

高度の内発的動機づけがされ，他のものに意識が阻害されることなく，タスクに完全に没頭している状態をフロー状態と呼ぶ [58]. このフロー状態の要因は，関心，集中，喜びであり，最大の関連性が認識された状態である. フロー状態の獲得は，異なる個々のタスクを別々に実行するのでなく，統合された 1 つのタスクとして捉えて実行することが可能となるため，過剰学習によって促進される [58].

学習意欲を刺激するためには，学習者の背景，興味，ゴールに関連づけて構築することが重要である. その方策として，目的指向性，動機との一致，親しみやすさ，といった下位分類がある (表 A-2) [58]. 目的指向性とはゴールと関連づけることである. その方法は 2 つあり，学習前と後を比較する方法と，学習者が自ら将来の欲求やゴールに結びつきの可能性を生成する方法 (未来の車輪) である. 後者は，学習者が将来の価値を認識し難い場合に利用される. 動機との一致は，興味との一致とも言い換えることができる. さまざまな学習法を利用することで，多様性のある学習者のニーズに合致していることを認識させ，強く動機づけることを目指す必要がある. また，親しみやすさと，学習者の見識を広げるといった，相反する欲求を同時に満たすためには，新しく馴染みのない内容と学習者の過去の知識，経験とを結びつけることが必要となる [58]. 学習者の見識を広げるという行為は教育の主な目的であり，親しみやすさとは矛盾しているように感じるが，新しい知識，考え方へ結びつけることで，より意欲的に関連性の感覚を伝えることができる [58]. ARCS モデルの中でも関連性は，最も重要な動機づけの要素である.

表 A-2 関連性に関する下位分類と具体策 (Keller の書籍 [58]より一部変更して引用).

下位分類	具体的方策
目的指向性	学習者が学習を終えた後に何ができるようになるか書き出す
	学習者が将来必要となる知識やスキルを明確に関連づけさせる
	学習者に将来の目的成就との関連を伝える
動機との一致	達成努力とその結果を，事例をもって説明する
	問題解決や達成努力の行動を刺激する内容のタスクを含める
	ロールモデル (人物や事象) を取り上げる
親しみやすさ	学習が学習者の知識やスキルに基づいているかを明確に説明する
	学習が学習者に馴染みのあるプロセスや概念を結びつける
	学習の内容やタイプを学習者自身に選択させる

A-3. ARCS モデルにおける自信 (Confidence)

自信は，学習者の成功への期待を適切に動機づけさせることであり，成功に関する肯定的な期待感を持たせ，支援することである [58]. この期待感は，学習者が自身の行動による結果をコントロールできると感じることであるが，個々によって感覚が異なる. この特性を統制の所在と呼び，内的な統制の所在と外的な統制の所在に分かれる [58]. 前者は，目に見える成果などの見返りを得ることができると信じていることであり，後者は，努力をしても，運といった制御不能な

影響によって見返りを享受できると信じていることである．つまり，自身の行動に伴う結果に対して，自身がコントロールできると信じる度合いともいえる．また，高い期待感を持つ者は，成功を内的要因 (能力や努力)，失敗を外的要因 (運やタスクの難易度) に帰属させる [58]．反対に低い期待感を持つ者は，成功を外的要因，失敗を内的要因に帰属させる [58]．

自分自身に与えられたタスクの実行を成功裏に終えることができるという信念を自己効力感という [58]．一般的に高い自己効力感を持つ者は，低い者に比べ良い成果を上げることができると言われている [58]．ただし，高い自己効力感を持つ者は，簡単なタスクに対して過度の自信を持つため，努力を怠り，良い成果を上げることができない．自己効力感は，認知した個人の能力不足が大きな影響を及ぼすといえる．また，自己効力感は学習者だけでなく，教育者にも影響を与える [58]．この自己効力感を構成する要因に，達成度，代理経験，言葉による説得，感情的な喚起がある [58]．達成度は，繰り返されるタスクの成功により肯定的な自己効力感を持つ反面，失敗し続けると下がっていくことである．また，代理経験は，共通点を感じる他者との比較が自己効力感に影響を及ぼすことである．言葉による説得は，他者もしくは自己より誘導され，低い自己効力感においては強い情報源にもなるが，実際の成功が伴わない場合，長期的な影響を及ぼさない．また，感情的な喚起が高過ぎると，失敗への恐怖といった負の要素を高くする．そのため，自己効力感の低い者には逆効果 (否定的な感情) となり，タスクを実行する上で阻害となる．

自己成就予言とは，はじめは正しくない信念が，信じ続けることによってそのまま真実になってしまうことである [58]．つまり，教育実施者が肯定的な期待を持って学習者の教育を行えば，高い成果を上げることになる．これは肯定的な指向性を持っている．

このように，不安感を持つ学習者には不安を和らげつつ自信をつけさせ，自信のある学習者には損なわないようにすることが重要となる．また，自信過剰な学習者には，学習の必要性を説くことが肝要である．

自信の主な特徴は，コントロールの認識である．つまり，学習者の能力についての認識であり，コントロールできない場合，不安となる．これを解決するため，言い換えれば，学習者に自信を持たせるための方策は，学習欲求，成功の機会，個人的なコントロールに分類される概念が必要となる (表 A-3) [58]．学習欲求は，成功への期待を支援することが重要となる．学習者に学習することを明確にする，もしくは学習者自身で目標設定することで，より自信が高くなる傾向にある．成功の機会とは，多種多様な経験を提供することで，学習者自身の能力への信頼を高めることである．学習者の期待感を増幅させ，原因不明の不安感を減らすことが肝要である．また，自信は意欲において重要なピースであり，個人のコントロール不足によって，学習に対して無関心にもな

りえる．そのため，成功する能力が自身に備わっていることを信じさせることで，成功への期待感は強くなる．

表 A-3 自信に関する下位分類と具体策 (Keller の書籍 [58]より一部変更して引用)．

下位分類	具体的方策
学習欲求	成功の学習の証明として，学習者に期待されることを明確にする
	学習者にゴールや目標を設定させる
成功の機会	ステップアップ方式でタスクを整理する
	学習者に見合った適切なレベルを設定する
	自己評価のための方法を用意し，フィードバックさせる
個人的なコントロール	学習者のペースで学習させる
	学習者に環境活動や順序づけといった学習方法の選択肢を与える
	学習者の能力を提示させる機会を与える
	学習者に学習に対するコメントをさせる

A-4. ARCS モデルにおける満足感 (Satisfaction)

学習への動機づけが成功し，学習意欲の持続のための満足感を与えることができれば，満足感の獲得につながる [58]．この満足感には内発的満足感と外発的満足感がある [58]．前者は，ARCS モデルの最初の 3 つの構成要素が示すように，目新しさ，自身の優秀さを感じること，自身に関連するスキルを取得することなどが備わっていることで，後者は，報酬や罰といった評価者からの評定によって与えられる [58]．内発的満足感はすべての条件が満たされない場合，学習者は興味を失う．また外発的強化は，行動に強力な影響力を与える．すなわち，内発的満足感の状況を作りながら，外発的強化を利用することが学習にとって肝要である．しかし，外発的強化と内発的動機づけには複雑な関係がある．外発的な報酬が，内発的な動機づけを減少させると言われている [58]．

価値ある結果に関連するような学習された行動をオペラント条件づけという [58]．そして，その望ましい行動と結果の関係を随伴性管理という [58]．この随伴性管理には，正の強化，負の強化，正の罰，負の罰といった 4 つのタイプがある [58]．正の強化とは，報酬を与えることであり，負の強化とは，不快なものと取り除くことである．どちらも望まれた行動であることに注意が必要である．一方，正の罰とは，不快と感じるものを押し付けることであり，負の罰は，快いものを取り除くことである．これらは，どちらも罰則的な意味合いの方が強い．

満足感は，自身の期待と社会的比較に基づいて行う結果の主観的な評価に大きく影響する [58]．すなわち，学習者は個人的な評価，結果を他の学習者と比較することで，自身の報酬が公平かを確かめる．この公平，不公平感には，課題の難易度や学習の内容といった結果に対するものも含まれる．したがって，学習者の満足感を考える上で，多種多様なバランスをとり，すべて学習者にとって公平に保つことが肝要となる [58].

満足感の最も重要な要素は，内発的動機づけである [58]．しかし，外発的満足感を主目的としていた場合，それを達成できなければ，満足感は減少する．さらに，社会的比較にて作業量や時間が見合うものではなかった場合や，他の学習者と比べて不公平感があるようであれば，やはり満足感は低下してしまう．これらをバランスよく調整することが満足感にも求められる．そのための方策として，内発的な強化，外発的な報酬，公平感の 3 つが挙げられる (表 A-4) [58]．内発的な強化とは，個人的な努力と達成に対する肯定的な気持ちを強化することであり，高いレベルの内発的動機づけを学習者に対して持たせることに重点をおくことが肝要である．これにより，高いレベルの満足感を達成できるといえる．外発的な報酬は，人に最も満足感を感じさせる概念である．ただし，当たり前になると，その強力な価値が失われてしまう．公平感は，文化の違いもあるが，一般的には他者と自身の期待値の比較により発生する．受け取る報酬や努力による成果が釣り合っていなければ，満足感は低下する．

表 A-4 満足感に関する下位分類と具体策 (Keller の書籍 [58]より一部変更して引用).

下位分類	具体的方策
内発的な強化	新たに獲得したスキルを使用する機会を与える
	難易度が高い課題を達成したこと (それに伴う内発的プライドの醸成) への賞賛する
	関連する分野や新しい分野に関する情報の提供する
外発的な報酬	退屈なタスクに対する外発的な報酬の提供する
	外発的な報酬を利用したタスクの強化する
	タスク達成後，個人的な注目を学習者に与える（コメントも含める）
	新しいタスク取得時には，強化を断続的に行う
	学習コースの終了時，証明書などといった報酬を授与する
公平感	取得させた内容と取得した内容 (知識やスキル) が一致するか確認する
	学習者のタスクと達成に一貫した測定標準を用いる

労災疾病臨床研究事業
分担研究報告書【総合(令和 2 年度～令和 4 年度)】

眼の水晶体の放射線防護に資する機材開発推進および被ばく低減のための多角的研究
(200701-01)

水晶体被ばく線量評価手法の開発と実態調査

研究分担者　佐々木洋(金沢医科大学眼科学講座・主任教授)
研究協力者　初坂奈津子、柴田哲平

研究要旨

水晶体は生体内で最も放射線感受性が高い組織の 1 つであり、低線量被ばくでも放射線白内障を生じる可能性があることが議論されてきた。当グループでは、国内の診療放射線従事者(医師・診療放射線技師・看護師)の水晶体被ばくの実態を把握するために、対象者らが集う学会おいて詳細な白内障検診を行い、放射線被ばくと各種白内障混濁病型の関連を明らかにすることを目的とした。

令和 2 年度～令和 4 年度において、脳神経血管造影検査・血管内治療の従事者および Interventional Radiology:IVR 従事者を対象にした白内障調査を行い、放射線被ばく量との関連を検討した。3 年間の検診参加者は 334 名で、対象者の各所属機関から被ばく線量についての回答があったものは 100 名(平均年齢 45.7±10.6 歳、男性 84 名、女性 16 名)であった。平均水晶体線量は、直近 5 年 13.2±18.3mSv、直近 1 年 2.8±4.9mSv であった。100 名の白内障有病率(右眼，左眼)は、皮質白内障(4.0%，4.0%)、核白内障(3.0%，1.0%)、後嚢下白内障(3.0%，2.0%)、Retrodots(4.0%，4.0%)、Waterclefts(4.0%，3.0%)、微小混濁である Vacuoles(29.0%，34.0%)、後嚢下白内障の初期変化とされる後嚢中心に局在する Vacuoles(18.0，16.0%)であり、顕著な視力低下につながるような白内障はほとんど確認されなかった。水晶体線量と白内障各病型との関係をロジスティック回帰分析により検討した結果、左右眼とも線量との有意な関連は認められなかった。対象者を医師 74 名と放射線技師・看護師 26 名に分けて検討した結果、医師の平均被ばく量は技師・看護師に比べ有意に高く($p<0.01$)、年齢と性別を考慮したロジスティック回帰分析では医師の左眼 Vacuoles の発症リスクが、技師・看護師より 2.8 倍と高くなる傾向を示した($p=0.075$)。3 年間の放射線従事者の調査結果から、視力低下につながるような顕著な白内障は認められなかったが、医師は技師や看護師よりも水晶体線量が高く、医師は左眼の Vacuoles のリスクが高くなる可能性が示された。今後はさらに被ばく線量の多い診療放射線従事者での白内障調査は必要であり、機材の改良や教育など水晶体被ばくの低減につなげていく必要がある。

A. 研究目的

本研究部グループでは、国内の診療放射線従事者（医師・技師・看護師）の水晶体所見および水晶体被ばくの実態を調査し、被ばく線量と白内障の関連を明らかにすることを目的とし、医療従事者の水晶体被ばく低減を図ることにつなげる。

B. 研究方法

白内障調査は眼科医による散瞳下での細隙灯顕微鏡検査が主であるが、本研究ではScheimpflug slit カメラおよび徹照カメラを用いた水晶体撮影画像による画像診断も含めた調査とした。白内障は進行例において視機能低下を生じる3主病型（皮質、核、後嚢下）と2副病型Retrodots、Waterclefts、放射線白内障の初期病変である微小混濁Vacuolesの6病型について検討した（図1）。対象者の被ばく線量については、検診終了後に各所属施設宛に「被ばく線量提供に関する依頼文」を郵送し、提供があったものを解析した。調査内容の詳細は各年度の報告書に記載した。

なお本研究は、金沢医科大学医学研究倫理審査委員会の承認（承認番号：I552）を得て実施した。

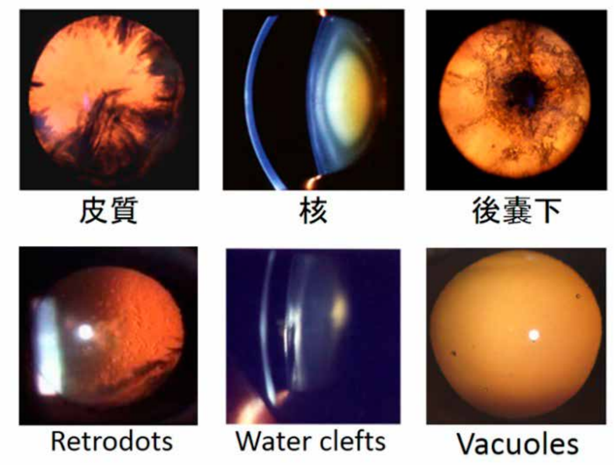


図1. 本研究で検討された白内障6病型

C. 研究結果

2020年および2021年には日本脳神経血管内治療学会（JSNET）、2022年には日本Interventional Radiology（IVR）学会において白内障調査を行い、3年間での参加者は334名であった（表1）。対象者の重複等を考慮し、解析可能対象者は279名となった。対象者の内訳は医師209名、技師48名、看護師22名であり、年代別では20代10名、30代82名、40代96名、50代71名、60代以上20名であった。白内障有病率（右眼，左眼）は、皮質白内障（2.2%，1.8%）、核白内障（1.1%，0.4%）、後嚢下白内障（2.5%，1.4%）、Retrodots（2.5%，2.2%）、Waterclefts（2.5%，2.9%）、微小混濁であるVacuoles（23.7%，24.0%）、後嚢下白内障の初期変化とされる後嚢中心に局在するVacuoles（16.1，18.6%）であり、顕著な視力低下につながるような白内障はほとんど確認されなかった。そのうち100名（平均年齢45.7±10.6歳、男性84名、女性16名）から被ばく線量の提供が得られた。提供された平均水晶体線量は、直近5年13.2±18.3mSv、直近1年2.8±4.9mSvであった。表2に線量別の人数分布を示す。対象者の多くは直近1年で5mSv未満、直近5年でも20mSv未満であったが、一番多い対象者では1年で31.7mSv、5年では96.7mSvと法改正後の限度値（5年間につき100mSv）と同等の対象者も含まれていた。水晶体線量と白内障各病型との関係をロジスティック回帰分析により検討した結果、両眼とも線量との有意な関連は認められなかった。

サブ解析による医師と技師・看護師との比較では、直近1年の平均水晶体線量は技師・看護師 0.8±1.2mSv に対し医師 3.5±5.5mSvと有意に高く（$p<0.01$，t検定）、直近5年の被ばく量も技師・看護師5.6±7.4mSvと比べ

て医師 15.8±20.1mSv が有意に高いことが確認された(p<0.05, t 検定)。そこで技師・看護師に対する医師の白内障リスクの検討として、年齢と性別を考慮したロジスティック回帰分析を行った結果、左眼の Vacuoles 発症リスクが約 2.8 倍と高くなる傾向を示した(p=0.075, 表 3)。一方、右眼は有意な関連は確認されなかった。

表 1. 本研究の検診と参加者の内訳

年度	検診会場 (学会名、場所)	検診参加人数
2020	JSNET（京都）	84
2021	JSNET（福岡）	85
2022	IVR（神戸）	165

表 2. 100 名の水晶体線量の分布

直近 5 年		直近 1 年	
水晶体線量	人数	水晶体線量	人数
＜ 20mSv	74	＜ 5mSv	80
20-40 mSv	17	5-10 mSv	13
40-60 mSv	5	10-20 mSv	5
≧ 60 mSv	4	≧ 20 mSv	2

表 3. 左眼 Vacuoles 発症に関するロジスティック回帰分析結果

	Odds ratio	**95% CI**	**P 値**
年齢	1.02	0.98-1.06	0.381
性別 *1	0.78	0.22-2.70	0.691
職業 *2	2.76	0.90-8.44	0.075
定数	0.12		0.051

*1 性別=女性に対する男性のリスク
*2 職業=技師・看護師に対する医師のリスク

D. 考察

今回の 279 名の対象者のうち、微小混濁である Vacuoles（後嚢中心）の有病率は、右眼 16.1%に対し左眼 18.6%とほんの少し左眼の有病率が高くなる傾向を示した。既報では診療放射線従事者の白内障は右眼に比べて左眼の有病率が高くなるとされており（Worgul BV et al, Radiation Research 2007）、今回の結果が初期の放射線白内障の影響を示している可能性があるが、さらに慎重な検討が必要である。

提供された平均水晶体線量は、直近 5 年 13.2±18.3mSv、直近 1 年 2.8±4.9mSv であり、全体的には比較的低いことがうかがえる。直近 1 年で最も多い線量は 31.7mSv であり 1 年間の等価線量限度である 50mSv 未満ではあるが、同程度の線量を毎年浴びていると仮定すると、5 年間の線量限度である 100mSv を超えることになるため、注意が必要である。今回の対象者では、被ばく線量と各種白内障病型に有意な関連は認められなかった。被ばく線量と白内障との関連については、線量の提供件数が全対象の 1/3 程度と少なく、線量評価がどの程度の精度であるかも確認できていないので、両者の関係についても正確な評価が出来ていない可能性がある。調査方法として、個人線量計による評価の難しさも示された。

今回の調査結果では、医師の平均被ばく量は技師・看護師に比べ有意に高く、医師は技師や看護師に比べ左眼の Vacuoles のリスクが高くなる可能性が示された。今後は比較対象として年齢を一致させた Control の計測も必要であり、診療放射線従事者の白内障発症との関連を追及していきたい。

E. 結論

令和 2 年度～令和 4 年度において、脳神経血管造影検査・血管内治療の従事者および IVR 従事者を対象にした白内障調査を行い、放射線被ばく量との関連を検討した。全対象者のうち 9 割以上は視力良好であり、

顕著な視力低下をともなう白内障は認められなかった。放射線白内障の初期病変とされる後嚢中心のVacuolesの有病率は左右眼とも15%程度であり、これらが今後視力低下をともなう放射線白内障につながる可能性も考えられるため、長期での詳細な観察が必要である。本研究の被ばく線量の提供者100名の平均水晶体線量は低く、白内障発症との有意な関連は認められなかった。しかし医師の平均被ばく量は技師・看護師に比べ有意に高く、放射線白内障の初期変化とされる左眼のVacuolesのリスクが高くなる可能性が示された。今回、国内の診療放射線従事者の水晶体所見および水晶体被ばくの実態調査として、関連学会において白内障調査を実施したが、対象者の重複や片寄り、線量提供件数の少なさや線量評価の精度など調査の限界も確認された。今後は線量評価の他にも、累積線量の代替指標の検討などが必要とされる。

今後も診療放射線従事者の白内障調査を継続することで、放射線被ばくと白内障発症の関連を明らかにするとともに、医療施設での労働者の水晶体被ばくの低減につなげていきたいと考えている。

F. 論文報告

1. 初坂奈津子. 東電福島第一原発緊急作業従事者に対する白内障調査. 金沢医科大学雑誌 2020;45(1):14-15
2. 初坂奈津子, 宮下久範, 喜多村紘子, 大久保利晃, 佐々木洋.「東電福島第一原発緊急作業従事者に対する疫学的研究」白内障全国調査について. 日本白内障学会誌 2020;32(1):49-51

G. 研究発表

1. 初坂奈津子, 宮下久範, 久保江理, 大久保利晃, 佐々木洋.「放射線業務従事者の健康影響に関する疫学的研究」白内障全国調査報告, 第 60 回日本白内障学会総会, 2021/11/26-27, 横浜
2. 初坂奈津子, 柴田哲平, 宮下久範, 武田峻, 渋谷恵理, 三田哲大, 清田優希也, 水戸毅, 久保江理, 佐々木洋. AI を使った水晶体 Vacuoles 検出モデルの開発と評価, 第 61 回日本白内障学会総会・第 48 回水晶体研究会, 2022/8/27-28, 宇都宮
3. 初坂奈津子, 柴田哲平, 岩西宏樹, 田中才一, 喜多村紘子, 盛武敬, 千田浩一, 雑賀司珠也, 黒坂大次郎, 佐々木洋. 脳神経血管造影検査・血管内治療従事者の放射線白内障, 第76回日本臨床眼科学会, 2022/10/13-16, 東京

H. 知的所有権の取得状況

該当なし

I. 今後の課題、展望

本研究の検討において個人線量計をベースとした調査を行ったが、提供件数の少なさなど課題も多く見られた。直接線量を評価する以外に、累積手技数や勤続年数など、累積被ばくの代替指標を用いることも有用と考えられる。また今回の対象者は全体的に被ばく線量が少なかったため、放射線白内障との関連が示されなかった可能性が考えられる。今後は、被ばく線量が高いとされているインターベンショナル心臓外科医（循環器内科）、消化器内科医、整形外科医の白内障調査が必要である。

今回の白内障検診では全て散瞳下での白内障評価を行った。白内障の診断基準となるWHO分類（WHO Simplified Cataract Grading System）では、瞳孔径が6.5mm以上必要とされている。通常は散瞳薬を点眼するが、狭隅角眼は散瞳できないこと、散瞳後は調

節力が低下し高次収差が増加するため 3 時間程度視力が低下することなどの問題がある。今後の検診手法を考えた場合、業務時間内での検診など、散瞳が難しい状況下での方法も考慮する必要がある。その解決方法の 1 つとして無散瞳での検査が考えられる。無散瞳の場合は明所での瞳孔は 3 ㎜以下になるため水晶体観察は困難であるが、暗所では 5 ㎜程度まで散瞳することも多く、本検診で使用している無散瞳カメラである程度の水晶体所見は得られる可能性がある。放射線白内障とされる後嚢下白内障や放射線による Vacuoles は瞳孔領 3 ㎜以内の所見が重要であり、暗所での無散瞳撮画像でも評価できる可能性がある。予備調査として 50 歳以上の中高齢者に対し暗所（30-40Lux）で徹照カメラを使用した無散瞳撮影を行い、平均約 5.2mm の瞳孔径が得られ水晶体撮影が可能であることが確認できた。一部の対象者では十分な瞳孔径が得られなかったため撮影できなかったが 90％以上で撮影可能であった。無散瞳での水晶体撮影画像により放射線白内障の検出が可能であれば、今後の放射線業務従事者の白内障検診における画像スクリーニングに応用可能であることも示された。今後は無散瞳撮影画像と散瞳での撮影画像を比較し、その精度を評価していく予定である。

本研究のような調査を継続することで、診療放射線従事者の放射線被ばくと白内障発症との関連を明らかにするとともに、医療施設での労働者の水晶体被ばくの低減につなげるためには、スタッフへの啓発活動が必要と考えられる。

労災疾病臨床研究事業

分担研究報告書【総合(令和2年度～令和4年度)】

眼の水晶体の放射線防護に資する機材開発推進および被ばく低減のための多角的研究

(200701-01)

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　雑賀司珠也(和歌山県立医科大学眼科学講座・教授)

研究協力者　白井久美、岩西宏樹

研究要旨

水晶体被ばく線量と白内障発症の関連性を知る目的で、令和2年度～令和4年度において、国内の放射線医療従事者（医師・技師・看護師等）に対し年一回の検診事業をおこなった。

本調査では白内障調査を主とする眼科検診を行い、白内障の判定は金沢医科大学眼科学講座（佐々木洋教授）が担当した。和歌山県立医科大学眼科学講座は、検診において視能訓練士による視力検査、眼底写真撮影および三次元の眼底データ、具体的にはOptical Coherence Tomography（光干渉断層撮影；以下OCT）の撮影を担当し、医師による検眼鏡的眼底検査と得られた検査結果から検診における眼底所見の判定と口頭での結果説明をおこなった。

検診参加者の増加を目的に眼底写真、OCT検査、および医師による検眼鏡的眼底観察と口頭説明いう充実した眼底検診内容を企画実行した。検診参加者への検査と説明には時間を割いたが、本来の目的とは異なるために疑い病名を含めた異常所見に対する眼科受診後の結果フィードバックは行っておらず、眼底疾患検出率に対する具体的な効果検討はおこなっていない。研究分担者の金沢医科大学眼科学講座が提唱された無散瞳下での白内障判定が可能または一般的になれば、本来の目的である放射線被ばく量と放射性白内障の関連を明らかにすることへの寄与は大きいことが予想される。近年の眼底検査機器は非散瞳下においても撮影および評価が可能であるために非散瞳下での白内障評価の確立が望まれる。

A. 研究目的

国内の放射線医療従事者（医師・技師・看護師等）の水晶体被ばくの実態を詳細に把握し、白内障との関連を明らかにすることを目的とした。

B. 研究方法

放射線被ばく量と放射性白内障の関連を明らかにする目的で、放射線医療従事者（医師・技師・看護師等）を対象に、白内障調査を主とする眼科検診を実施した。具体的には、第36回日本脳神経血管内治療学会（以下、JSNET）(2020年11月19日～21日、京都)、第37回 JSNET（2021年11月26日～27日、福岡）そして第51回 日本IVR学会総会(2022年6月4日～6日、神戸)において「IVR従事者の白内障調査」の題目で学会長の協力を得て毎年一回合計三回の検診事業をおこなった。

眼科検診は、眼屈折検査、視力検査、散瞳下での細隙灯顕微鏡検査、白内障カメラ（徹照カメラ)、Scheimpflug slit カメラでの水晶体撮影、眼底検査（眼底写真撮影、Optical Coherence Tomography（光干渉断層撮影；以下OCT）の撮影、医師による検眼鏡的眼底検査と得られた検査結果から検診における眼底所見の判定と口頭での結果説明）をおこなった。細隙灯顕微鏡での所見および水晶体撮影画像から、白内障判定を研究分担者の佐々木洋教授（金沢医科大学眼科学講座）が担当された。

さらに問診による聞き取り調査として、職歴・放射線に係る手技についての経験年数、年間あたりの件数、その他放射線に関わる作業歴を聴取し、被ばく線量の実態を調査した。また放射線被ばく以外の白内障発症リスクとされる喫煙歴、糖尿病の有無、ステロイド内服の有無、紫外線被ばく歴についても合わせて聴取した。

後日、被ばく線量提供に同意のあった対象者には、所属施設宛に「被ばく線量提供に関する依頼文と被ばく線量提供書類」を郵送し、対象者個人の実効線量、水晶体等価線量の提供を依頼し、得られた線量から放射線被ばく量と放射性白内障の関連を検討した。

C. 研究結果

放射線被ばく量と放射性白内障の関連については、研究分担者の佐々木洋教授（金沢医科大学眼科学講座）の研究結果に記載する。当教室は白内障調査において、視能訓練士による視力検査、眼底写真撮影、眼底OCT撮影、医師による検眼鏡的眼底検査と総合的な眼底異常所見の判定と口頭での説明を担当した。疑い病名を含めた眼底所見の検診結果をもとに、眼科受診したあとの診断結果をフィードバックしていない(本来の目的ではない)ために、直接的な研究成果はない。

D. 考察

今回、当教室は、放射線被ばく量と放射性白内障の関連を明らかにする目的で、放射線医療従事者（医師・技師・看護師等）を対象に放射線被ばく量が多いと予測される被験者が出席する学会中に眼科検診（白内障調査）をおこなった。正確な白内障判定は散瞳下でおこなうのが望ましいために、眼底担当としては検診**参加者を増やす目的も兼ねて、充実した眼底検査体制で臨み**、また口頭での説明も併用した。眼底疾患の検出率の向上は明らかではないが、疑い病名を含め眼底疾患が複数検出された。

E. 結論

放射性白内障に限らず白内障判定は散瞳下でおこなうことが現時点では望ましいとされるため、散瞳処置を理解し白内障調査に参加された方に対し、眼科医師による検眼鏡的眼底検査や OCT 検査の有用性をアピールすることは有用性あると思われた。

F. 論文報告

なし

G. 研究発表

初坂奈津子、柴田哲平、岩西宏樹、盛武敬、千田浩一、雑賀司珠也、黒坂大次郎、佐々木洋;インターベンショナル・ラジオロジー従事者の放射線白内障と水晶体被ばく線量との関係、第127回日本眼科学会総会で発表予定である。

H. 知的所有権の取得状況

なし

I. 今後の課題、展望

今回我々は水晶体被ばくの実態を詳細に把握し、白内障との関連を明らかにすることを目的とし、比較的放射線被ばくが高いことが予想される国内の放射線医療従事者（医師・技師・看護師等）を対象に（手始めとして）白内障調査をおこなった。

水晶体周辺部まで判定をするために散瞳処置後の検査判定をおこなったが、散瞳処置は一定時間の羞明と調節力低下を伴うために各医療機関で同様の検診をおこなうと業務への支障が予想される。研究分担者の金沢医科大学眼科学講座（佐々木洋教授）が示された無散瞳下での白内障判定が可能または一般化されれば、本来の目的である放射線被ばく量と放射性白内障の関連の解明に大いなる貢献が期待できる。幸い近年の眼底検査機器は非散瞳下においても十分撮影および判定は実用的であり、非散瞳下での白内障判定における眼底検査の精度、検出率はほぼ保たれる。

労災疾病臨床研究事業

分担研究報告書【総合（令和 2 年度～令和 4 年度）】

眼の水晶体の放射線防護に資する機材開発推進および被ばく低減のための多角的研究

（200701-01）

眼の水晶体の放射線防護に資する実態調査

研究分担者　黒坂大次郎（岩手医科大学眼科学講座・教授）

研究要旨

令和 2 年度では、放射線白内障の精度の検討を行った。

スリットを用いた水晶体診察において白内障の診断・評価基準を一定とすることが重要である。そこで、放射線白内障の「判定マニュアル」の講習会を開き、判定が一致するか検討した。その結果、主な 6 病型のうち 4 病型は一致したが、2 病型で不一致が一部にみられた。検診の精度を上げるためにも、放射線白内障の「判定マニュアル」の習熟が大切と思われた。

令和2年度～令和3年度に行われた日本脳神経血管内治療学会の参加者を対象として行った眼科検診のうち、白内障以外の他の眼疾患にどのようなものがあったのかを検討すると、全参加者169名（平均年齢 45.7 歳）で、この中で白内障以外で精査が必要と思われる眼疾患は、緑内障疑い 24 例（14.2%）、その他網膜疾患など 21 例（12.4%）で両者で 44 例（1 例は両疾患を合併）26.0%であった。屈折値は、両年度とも平均-4.0D であった。

令和 4 年度に行われた日本 IVR 学会の参加者を対象として行った眼科検診で、白内障以外の疾患の検討ができた例は 142 名（平均年齢 43.8 歳）で、このうち緑内障疑い 17 例（11.2%）、その他網膜疾患など 17 例（11.2%）で両者で 32 例（2 例は両疾患を合併）22.5%に認められた。屈折異常は、平均屈折値が-4.4D であり、近視を多く認めた。さらに緑内障などにつながる高度近視例は、48 例 33.8%と多く認められた。

これらの検討により年度や学会での大きな違いはないと思われたが、医療従事者には、高度近視例が多く、通常よりも緑内障などの有病率が高い可能性があった。白内障の検診の参加者を増やすためには、本検診が緑内障などの重篤な眼疾患の早期発見につながる可能性の啓蒙が重要と思われた。

A. 研究目的

白内障の診断精度を上げるために、眼科医の白内障診断精度を確認することと白内障以外の他の眼疾患にどのようなものがあったかを検討し、本検診が白内障以外の重要な疾患の早期発見につながるか検討すること

B. 研究方法

１．白内障の評価方法を一定とすることが重要である。そこで、放射線白内障の「判定マニュアル」(図 1)の講習会を開き、検査する医師間に共通の判断基準を熟知させ、それらを実際の症例を用いて一致するかの検討を行った。

2. 令和 2 年度と 3 年度で行った日本脳神経血管内治療学会の参加者のデータ並びに令和4年度日本IVR学会の参加者を対象として行った眼科検診のデータうち、白内障以外の他の眼疾患にどのようなものがあったのかを比較検討する。

C. 研究結果

１．マニュアルをあらかじめ眼科医師 30 名に配布し、WEB による解説を行った。その後、その中の 5 名に対して、白内障の写真を供覧して、その診断・程度判定が一致するか確認を行った。

その結果、主要 3 病型および waterclefts の診断は、全員が一致したが、vacuoles, retrodots は、相互に間違えるものがあり、60%の正解率となった。

２．令和 2，3 年度の日本脳神経血管内治療学会の参加者では、全参加者１６９名（平均年齢 45.7 歳）で、この中で緑内障疑い 24 例（14.2%）、その他網膜疾患など 21 例（12.4%）で両者で 44 例（1 例は両疾患を合併）26.0%であった。屈折値は、両年度とも平均-4.0D であった。

令和 4 年度の日本 IVR 学会検診参加者のうち、白内障以外の疾患の検討ができた例は 142 名（平均年齢 43.8 歳）であった。このうち白内障以外で精査が必要と思われる眼疾患は、緑内障疑い 17 例（11.2%）、その他網膜疾患など 17 例（11.2%）で両者で 32 例（2 例は両疾患を合併）22.5%に認められた。

これらのデータは、年度ごと、各学会ごとで大きな違いはないものと思われた。

D. 考察

白内障の診断は、眼科医は日常的に行っているために、自己流になっている場合が多い。検診における白内障診断の精度を上げるためには、特に、徹照法を用いての検査が重要な vacuoles, retrodots は、見逃されやすく、注意が必要と思われる。正確な水晶体の評価には、マニュアルを用いてのチェックが、一般診療を行っている眼科医であっても望ましいと思われた。

日本脳神経血管内治療学会と日本 IVR 学会の参加者は、多くは異なると思われるが、白内障以外の屈折値・緑内障疑い・網膜疾患の有病率などには差が認められなかった。

緑内障や一部の網膜疾患は失明につながる病気であり、その早期発見は、視機能を維持するうえで重要である。白内障は、治療可能な病気として知られ、検診受診の強い動機にはならないかもしれないが、緑内障や一部の網膜疾患が見つかることを啓蒙することにより、検診への参加の動機になりうるものと思われる。また、これらの有病率は、年齢を考慮しても高く、近視が強い人が多いことが背景にあるのかもしれない。日本脳神経血管内治療学会と日本 IVR 学会ともに、高度近視の率が高く、医療従事者にこのことを啓蒙することでも検診の参加者を増

やすきっかけになる可能性が考えられる。

E. 結論

白内障の検診の精度を高めるために、放射線白内障「判定マニュアル」は有用と思われ、検診の前に確認することが重要と思われた。

また、医療従事者には、高度近視例が多く、通常よりも緑内障などの有病率が高い可能性がある。白内障の検診の参加者を増やすためには、本検診が緑内障などの重篤な眼疾患の早期発見につながる可能性の啓蒙が重要と思われた。

F. 論文報告

なし

G. 研究発表

なし

H. 知的所有権の取得状況

なし

労災疾病臨床研究事業
分担研究報告書【総合(令和 2 年度～令和 4 年度)】

眼の水晶体の放射線防護に資する機材開発推進および被ばく低減のための多角的研究
(200701-01)

防護眼鏡改良研究

研究分担者　赤羽 正章(国際医療福祉大学医学部放射線医学/成田病院・教授)
研究協力者　関 克哉、五十嵐 隆元 (国際医療福祉大学成田病院放射線技術部)

研究要旨

令和 2 年度～令和 4 年度において、血管撮影室で用いられる防護デバイスの遮蔽効果や臨床使用における課題を取りまとめ、新たなデバイス開発へ向けたデザインの検討も行った。

血管撮影室で用いられる新しい防護デバイスとして有効性が期待されている ZERO-GRAVITY の散乱線遮蔽効果および周囲の線量分布を明らかにし、臨床使用経験をまとめた。右大腿動脈経由の IVR 手技を模して散乱線を発生させるファントム実験にて、防護メガネと ZERO-GRAVITY の線量低減率は各々57%と 93%であった。目の前上方を遮蔽しないデザインでも高い遮蔽効果が得られることは、防護メガネの進化形など今後のデバイス開発において参考にすべき知見と考えられた。ZERO-GRAVITY を臨床で使用した結果、姿勢と視野の制限による使いにくさや助手が使用する際の不都合が明らかとなった。高い遮蔽効果と快適な使用感を両立した、次世代の防護メガネの開発が期待される。

血管撮影室で用いられている防護デバイスの中で最も有用なもののひとつである天吊り遮蔽板について、適切な使用や性能向上のために必要な知見を収集した。天吊り防護板の遮蔽効果は、防護板下縁と患者との隙間が小さいほど高まった。防護板を更に下げる場合、弛んだ鉛カーテンの下縁を患者頭側に折り返すと遮蔽効果が低下し、患者尾側へ折り返すと高まった。防護板下縁と患者との隙間が残る場合、隙間の大きさに応じて防護板をやや術者寄りに配置することで、遮蔽効果を高められる可能性がある。

A. 研究目的

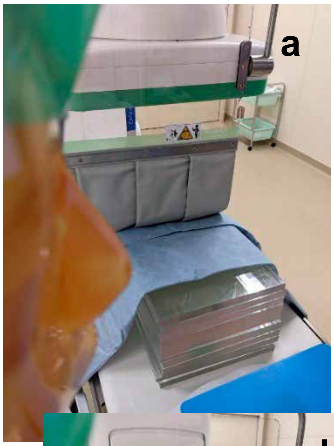
水晶体等価線量限度の引き下げを受けて、特に水晶体等価線量の高さが懸念される X 線透視を用いた治療手技の術者に関する最適化の推進が期待されている。治療手技の質や量を維持しつつ術者の被ばくを低減するためには、防護デバイスの活用が欠かせない。防護デバイスの主役は天吊り防護板と防護メガネであるが、前者については不適切な配置、後者については顔面とグラスの隙間により充分な効果が得られない場合があり、改善の余地がある。近年導入された天吊り型エプロン「ZERO-GRAVITY」の高い遮蔽能力には見るべきものがあり、その有用性有効性や使用上の課題に関する検討は水晶体防護のための新たなデバイス開発に資するものと期待される。本研究では、「ZERO-GRAVITY」の散乱線に対する遮蔽効果を防護眼鏡と比較し、臨床使用経験に基づいて利点や欠点を取りまとめ、「ZERO-GRAVITY」使用時の水晶体近傍の線量分布を測定する。また、天吊り防護板の遮蔽効果を測定し、防護板の位置や下縁の鉛カーテンの向きが遮蔽効果に与える影響を評価する。更に、市販の感染防護デバイスのデザインの利点や欠点について放射線防護の観点から考察し、新たな防護メガネのデザインを試作して新規デバイス開発の可能性を探索する。

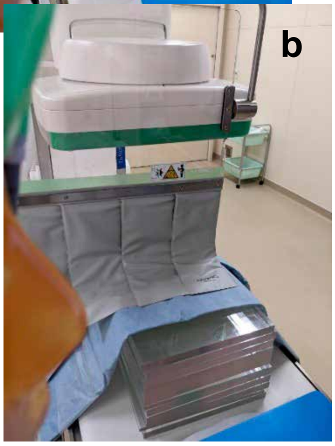
B. 研究方法

防護デバイスの遮蔽効果を測定するにあたり、右大腿動脈経由の体幹部透視手技を模して、患者を模したファントムや術者を模した頭部ファントムを配置した。線量計は Accu-Gold+を使用、イオンチェンバーを頭部ファントムの左目表面に配置した。

空間線量分布は、ZERO-GRAVITY のアクリルグラスに取り付けたウレタンフォームに格子状に差し込み口を設け、イオンチェンバーを順次差し込んで測定した。

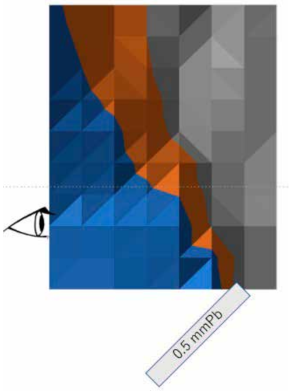
天吊り防護板の高さが遮蔽効果に与える影響の評価は、患者前縁と防護板下縁との距離を 15cm から-10cm まで 5 cm刻みで変化させて、それぞれ測定し比較した。なお、-5cm と-10cm については、防護板下縁の鉛カーテン部分を患者頭側に折り返した状態（右図 a）と患者尾側に折り返した状態（右図 b）の両方を測定した。防護板の患者側の面が、フラットパネル検出器に接する配置と 5 cm離れる配置とを比較した。患者前縁と防護板下縁との距離を 10cm および 5cm の条件で、それぞれ測定した。





C. 研究結果

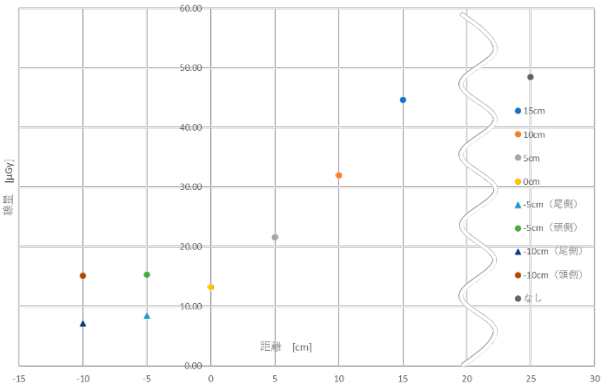
防護デバイスによる水晶体の遮蔽効果は、防護メガネ（HF-380、東レ）が 57%、ZERO-GRAVITY が 93%であった。



ZERO-GRAVITY 周囲の線量分布は右図のような結果となり、遮蔽効果の高い範囲と低い範囲の境界面はアクリルグラス前縁から術者へ向かって斜め上方へ分布していた。

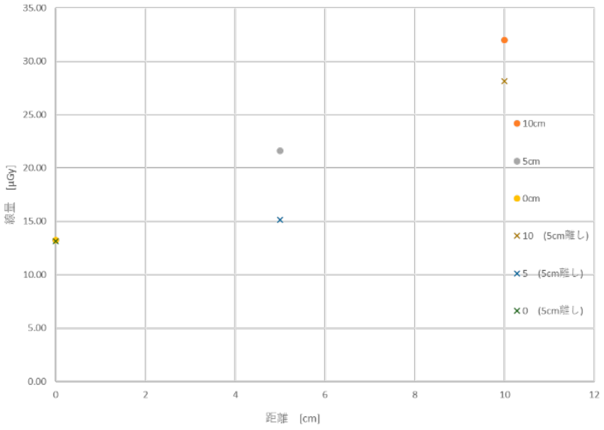
臨床使用経験に基づいた ZERO-GRAVITY の利点として、天吊りによる重量負担軽減、良好な通気性や曇りの無さ、が挙げられた。一方欠点としては、移動範囲の制限、他の天吊りデバイスとの干渉、複数人同時使用不可、下方の視野制限、姿勢の制限、背面防護無し、自分の声の反響、清潔カバー取り付けの手間と費用、が挙げられた。

患者前縁と防護板下縁との距離が 15cm, 10cm, 5cm, 0cm, -5cm（尾側折り返し）, -10cm(尾側折り返し), -5cm(頭側折り返し), -10cm（頭側折り返し）のときの線量は、遮蔽板無しの状態と比較してそれぞれ、92.1%, 66.0%, 44.6%, 27.4%, 17.5%, 14.7%, 31.7%, 31.4%であった。



防護板がフラットパネル検出器に接する配置において、患者前縁と防護板下縁との距離が 10cm, 5cm, 0cm のときの線量は、遮蔽板無しの状態と比較してそれぞれ、66.0%, 44.6%, 27.4%であった。

防護板がフラットパネル検出器から 5 cm 離れる配置ではそれぞれ、58.0%, 31.3%, 27.1%であった。



市販の防護シールドの改造や、針金等を用いて、既存の防護メガネと併用するアタッチメント、目の下で支えるタイプ、鼻の下で支えるタイプ、自分のメガネに装着するタイプ、などを試作した。

D. 考察

ZERO-GRAVITY の使用感は良好とは言えないが、遮蔽効果は圧倒的であり、水晶体線

量の高い術者を保護する手法の一つとして有望な方向性であることは間違いない。使用感の問題点のうち特に、下方の視野制限と姿勢の制限については手技時間の延長や質の低下に結びつく可能性が懸念され、改善を期待したい。

ZERO-GRAVITY は頭頸部を防護するデバイスと体幹部を防護するデバイスが一体型となっているため、一般の防護メガネで問題となるグラス下縁と顔面の隙間が原理的に生じないことが、高い遮蔽効果をもたらしていると考えられる。一方、アクリルガラス上縁については、術者顔面から大きく離れているばかりか、ガラス上縁の高さが術者の目の高さよりむしろ低いにも関わらず、これほど高い遮蔽効果をもたらすことは、新規デバイス開発の上で参考とすべき事実であろう。防護メガネの延長線上に新規デバイスを開発するならば、上縁が低いことや顔面から離れていることで快適さを保ちつつ、グラス下縁を尾側へ延長し顔面との隙間を減らすことで、よい結果が得られる可能性がある。この点を考慮して試作した新たなデザインの幾つかは、将来性を感じさせるものであった。

天吊り防護板が患者から 15 cm離れた状態では 1 割も線量を低減できないのに対し、防護板の高さを 0cm すなわち患者と近接させると 7 割以上の線量低減が得られた。高さを更に下げて、弛んだ防護板下縁の鉛カーテン部分を患者尾側に折り返すと 8 割以上の線量低減が得られたが、患者頭側に折り返した状態だと線量低減効果が薄れ、高さ 0cm よりもむしろ高線量となった。頭側に折り返すと大腿からの散乱線が遮蔽されないだけでなく、鉛カーテンの湾曲によって防護板直下に隙間が生じる形となるためと考えられる。臨床状況により天吊り防護板と患者の間がどうしても離れてしまう状況では、防護板を術者側へ移動することで、水晶体線量を下げられる可能性がある。隙間の大きさと話すべき距離の関係については今後の課題である。

E. 結論

天吊り防護板の遮蔽効果は、防護板下縁と患者との隙間が小さいほど高まった。防護板を更に下げる場合、弛んだ鉛カーテンの下縁を患者頭側に折り返すと遮蔽効果が低下するので、患者尾側へ折り返すべきである。防護板下縁と患者との隙間の大きさに応じて防護板をやや術者寄りに配置することで、遮蔽効果を高められる可能性がある。

ZERO-GRAVITY の遮蔽効果は従来の防護デバイスより高く、使用感などの課題は残るものの、次世代のデバイス開発の参考になる特長を有していた。高い遮蔽効果と快適な使用感を両立した、次世代の防護メガネの開発が期待される。

F. 論文報告

該当なし

G. 研究発表

関克哉, 山内紘作, 三登将平, 石田浩之, 中西宏太朗, 五十嵐隆元, 赤羽正章. 放射線防護用移動式バリア装着時における水晶体近傍の線量分布. 第 38 回 秋季日本診療放射線技師学術大会, 2022.9.18.

H. 知的所有権の取得状況

該当なし

I. 今後の課題、展望

防護メガネについては、グラス下縁～外縁と顔面との隙間やその個人差を最小限に抑制しつつ、曇りにくさや良好な視野を確保するような、新規デザインの開発が望まれる。

防護メガネと相補的役割を果たす天吊り防護板については、使用方法が遮蔽効果に与える影響について知見を集積するとともに、多様な臨床状況においても遮蔽効果を保ちやすいデザインに関し更なる検討が必要である。

労災疾病臨床研究事業

分担研究報告書【総合(令和 2 年度～令和 4 年度)】

眼の水晶体の放射線防護に資する機材開発推進および被ばく低減のための多角的研究

(200701-01)

放射線診療従事者向け放射線防護教育コンテンツの開発

研究分担者　藤淵 俊王(九州大学/大学院医学研究院保健学部門医用量子線科学分野・教授)

研究協力者

冨澤 登志子 (弘前大学弘前大学大学院保健学研究科 看護学領域 教授)

西 和紀(九州大学大学院医学系学府保健学専攻医用量子線科学分野 修士課程)

研究要旨

目的:放射線診療従事者の放射線防護方法の理解のため、X 線を患者に照射した際の散乱線分布の広がりの認識が重要であるが、既存の散乱線の表示法としては紙ベースであり 3 次元的な理解をすることは困難である。本研究の目的は、ウェブブラウザ上で散乱線分布をクロスリアリティ(X-reality:XR)により観察できる放射線防護教材を作成、実際の使用方法の構築および有効性の評価である。

方法:仰臥位で寝台に寝ている患者に対して X 線を照射した際のモンテカルロシミュレーションに基づくデータから、スマートフォンや PC で使用できる散乱線可視化教材を作成した。放射線技術科学または看護学を専攻する学部学生を対象とした授業で使用し、教材評価モデルを基としたアンケートでモチベーションへの影響を評価した。またテキストマイニングを用いて感想を解析した。

結果:受講者に対して放射線防護に関する演習問題を実施したところ、看護学生において演習問題の正答率が優位に向上した。XR は、アンケートから使用者のモチベーションを向上させ、テキストマイニングから放射線防護の理解と自信を向上させることが分かった。

結論: WebXR を用いた新たな放射線防護教育手法を開発した。WebXR により仰臥位での X 線照射時の散乱線の広がりを視覚的に観察し、理解することができ、利用者の放射線防護に対する興味、理解、自信が向上することを確認した。今後は、より良い教育効果を得るために、利用者の放射線防護の習熟度や使用目的に合わせて、より効果的な放射線防護教育教材を開発することが望まれる。

A. 研究目的

A.1 背景

放射線を用いた新しい医療機器や技術の開発が進み、医療現場において放射線を用いた検査や治療の利用が拡大している。放射線診療従事者は、水晶体の被ばくによる白内障など被ばくによる健康影響のリスクがある[1, 2]。そのため、適切な放射線防護方法を理解し、被ばく低減のために十分な対策を講じることが重要である。また自身の被ばくだけではなく、放射線診療に携わる他の医療スタッフや介助者に対しても同様に、被ばく低減のために説明や放射線防護策を行う必要がある。したがって、放射線防護に関する知識を得る放射線防護教育は重要なものである。特に外部放射線の防護において、被ばくの主な原因である散乱線の挙動や分布を理解することは大切である。

A.2 散乱線分布の可視化研究

散乱線は実際には目に見えないため、散乱線の分布を学ぶためには可視化を行う必要がある。散乱線の分布の可視化研究には、拡張現実（Augmented Reality：AR）や仮想現実（Virtual Reality：VR）といった可視化技術であるクロスリアリティ（X Reality：XR）を用いる研究がある[3, 4]。VR は、コンピュータ上の仮想空間内に仮想の 3D モデルを用意し、使用者の目にリアルに見える仮想世界を構築するものである。AR は、現実空間にコンピュータグラフィックスによる 3D モデル等の情報を重ねることで、現実世界を拡張するものである。

放射線を用いた検査時の散乱線を AR により様々な形で可視化する研究がある。J. Kilian-Meneghin らの研究[5]では、AR により血管造影の検査時の散乱線分布の二次元の断面を実際の検査室と装置上に専用のカメラを用いて表示している。複数の断面を観察することができて、実際の大きさで表示されるため検査室内の散乱線の空間分布が把握できるようになっている。Nicolas Loy Rodas らの研究[6]では、血管造影の検査における散乱線の広がりや、検査時の術者の被ばく線量が AR によりタブレット端末の画面に表示されている。専用のカメラを用いて動体追尾を行うことにより、装置の動きに合わせて散乱線分布も変化させることができる。VR を用いて散乱線の分布を学習できる研究もある。Matthias Süncksen らの研究[7]では、手術時の C アームを用いた X 線撮影時に散乱線がどのように広がっているのかヘッドマウントディスプレイを装着することで観察でき、専用のコントローラを使用して放射線検査に用いる装置の操作も体験できるものとなっている。またヘッドマウントディスプレイの映像は、別のモニタで観察することができる仕組みになっている。Toshioh Fujibuchi らの研究[8]では、専用のソフトウェアを使用し X 線 CT 検査室や血管造影室内の散乱線分布を PC 上で表示、観察できるものとなっている。線量値を指定して任意の広がりや、指定した範囲の散乱線の断面を観察できるようになっている。

AR や VR を用いることで、散乱線分布を教科書のような二次元的な観察ではなく、三次元的な観察が可能となる。また、AR や VR を教材に用いることで使用者の興味、関心が向上したという報告がある[4, 8, 9]。しかし、AR や VR を用いた散乱線の可視化を行う研究のほとんどが専用のカメラやヘッドマウントディスプレイのような特別な装置が必要であることが多い[10, 11]。そのため、使用できる施設や環境が制限されてしまい、放射線防護教育に用いるのは困難である。

A.3 ウェブブラウザ上での可視化

先行研究[12]では、スマートフォンやタブレットで使用できる可視化アプリケーションの開発を行ったが、アプリケーションのインストールの必要性があること、開発したアプリケーションが iOS の端末でしか使用できなかったことが課題として挙げられる。そのため放射線防護教育で多くの人に利用してもらうためには、より使いやすい散乱線分布可視化システムを開発する必要があった。そこで特別な機器ではない現在多くの方が所持しているタブレット端末または PC で XR による散乱線の挙動の観察が可能な方法として、ウェブブラウザ上で AR や VR を使用できる WebXR というものがある。

WebXR は特別な機器を用いずインストール不要でインターネット環境があれば、散乱線の挙動を可視化、観察することが可能である。WebXR には WebAR と WebVR が含まれる。WebAR はカメラが付いた端末（例：スマートフォン、タブレット等）で使用することができる。また、端末を動かすだけで好きな方向から観察することができるため、直感的な簡単な操作での観察が可能である。使用例に WebAR を用いてたんぱく質の構造を可視化し学ぶことができる研究がある[13]。WebVR は、インターネットが使用できればカメラが付いていなくてもどの端末でも使用ができる。WebVR を用いて血管の走行を観察、学習できるようにした研究がある[14]。WebAR や WebVR を用いた放射線防護教育の効果を調べた研究はほとんどない。また、専門的な知識を持つ大学院生に対する WebVR の利用効果を調べた研究[4]はあるが、知識の少ない学部生に対する WebXR の利用効果を調べた研究は無い。

A.4 目的

本研究の目的は、WebXR を使用した X 線撮影における散乱線の挙動を可視化するシステムを用いた放射線防護教育教材を基とした演習方法の提案、WebXR を用いることでどのような教育的効果があるのかを調査することである。

B. 研究方法

B.1　シミュレーション精度の確認

本研究の散乱線分布のシミュレーションには Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) ver3.20[15]を使用しており、シミュレーションの統計誤差は 5%以内であった。散乱線分布の可視化において、誤った情報を使用者に与えないためにシミュレーションの精度は重要である。

そこで、本研究のシミュレーションにおける散乱線の挙動の再現性の精度を調べるために、実測との比較を行った。実測の X 線照射はポータブル X 線装置である IME-100A（キヤノンメディカルシステムズ株式会社、栃木県）を用いた。入射表面線量と散乱線量の測定は、半導体 X 線測定器具である RaySafe X2（Unfors RaySafe, Uggledalsvägen, Sweden）を用いて行った。Ray Safe X2 は校正済みであった。照射条件は胸部仰臥位 X 線撮影の条件とした。管電圧 80 kV、2.7 mm Al、焦点-検出面間距離 120 cm、管電流時間積 2.0 mAs、照射野サイズ 35.4×43 cm^2 とした[16]。被写体は，30×30×15cm^3 の水ファントムを用いた。測定は，各測定点で 3 回行い、その平均値を測定値とした。始めに、水ファントム表面中心に測定器をおき、入射表面線量を測定した。次に、水ファントムの表面の高さにおいて、図 1 に示すように水ファントムの中心から 1m，1.5m，2m の距離で、0 度、45 度、90 度の方向（それぞれ A、B、C）

に計 9 点を測定した。同様に、水ファントムの高さ 80cm において、水ファントムの中心から 1m、1.5m、2m の距離で、0 度、45 度、90 度の方向（それぞれ A、B、C）に計 9 点を測定した。

実測の後、同じ幾何学定期配置を PHITS で再現した。診断領域の X 線エネルギースペクトル計算ソフトである X-Tucker's formula Version 4（X-Tucker-4）[17]を用いて、管電圧 80 kV、内部濾過 2.7 mm Al の連続エネルギースペクトルを 0.5 keV 間隔で計算し、得られたデータを放射線源として使用した。一辺が 1cm の立方体を作り、立方体を通過する光子の数をカウントし ICRP74[18]の光子フルエンスから周囲線量当量への換算係数によって線量を求めた。最後にシミュレーション結果と測定結果を比較し精度の検証を行った。

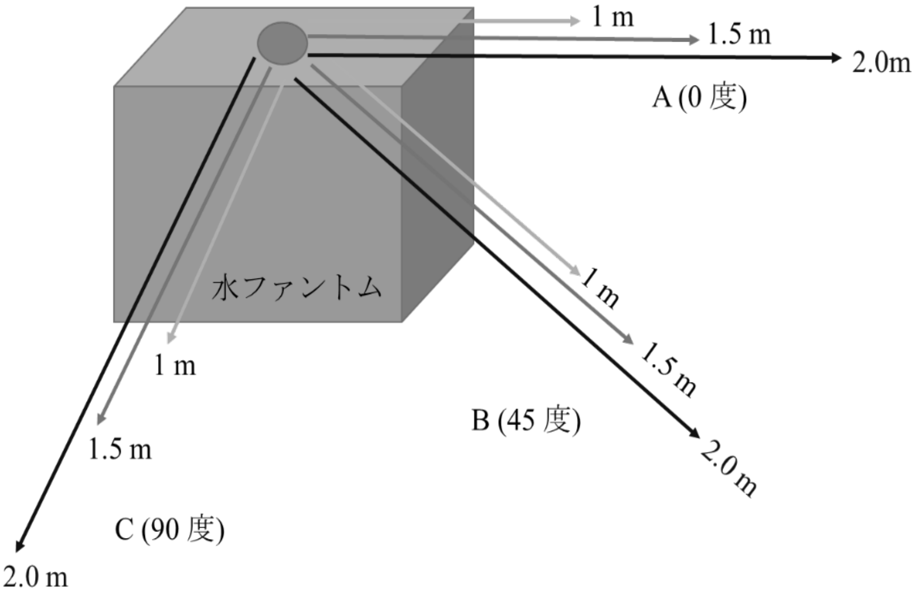


図 1：実測の配置図

B.2 散乱線の挙動のシミュレーション

散乱線の挙動のシミュレーションは、先行研究[12]で行った仰臥位正面の胸部および骨盤の放射線検査時の散乱線分布のデータを用いた。追加で、胸部仰臥位正面撮影時の照射条件で、防護エプロンを用いた際の遮蔽効果を見るために図 2 に示すような鉛当量 0.35 mmPb の鉛で作った板を患者の側においてシミュレーションした。本研究のシミュレーションでは、当初想定していた医療従事者が多くかかわる 1 例としてポータブル X 線撮影装置が 3D モデルとして表示される。散乱線の広がりは同じ撮影条件であれば他のモダリティでの撮影と同様であるため、ポータブル X 線撮影の散乱線分布としてだけでなく同条件の他のも撮影時の散乱線分布としてもとらえることができる。

シミュレーションのデータを WebXR の作成に使用できる 3D オブジェクトに変換するために三次元可視化ソフトウェアである ParaView version 5.6.0[19]を使用した。散乱線分布は指定した線量値範囲毎に表示した。

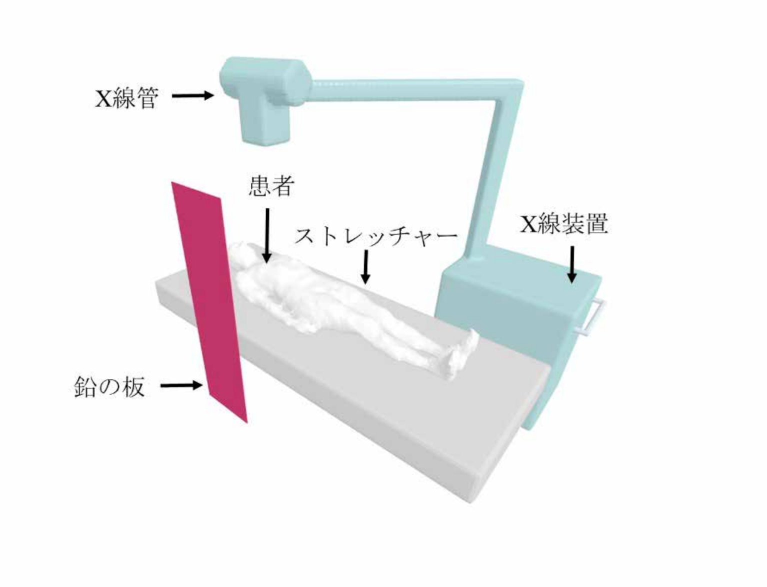


図２：シミュレーションの配置

図３： AR マーカー

B.3　WebXR の作成

シミュレーションで作成した 3D データをもとに、WebXR を作成した。ウェブブラウザ上のアプリケーションを作成、開発可能な無料のサービスである Glitch[20]を用いて本研究専用の Web ページを作成した。作成した Web ページで AR や VR を利用できるようにした。

本研究では、AR と VR を教育に用いた際に使用者に与える影響が異なるかを調べるために WebAR と WebVR の両方を作成した。WebAR の作成にはウェブフレームワークの A-Frame[21]と Javascript ライブラリの AR.js[21]を使用した。WebAR は AR を利用できる Web ページに接続した後、起動するカメラで図 3 に示す専用の AR マーカーを認識することで、図２に示すような 3D オブジェクトが表示される。WebVR は WebAR と同様の A-Frame を使用して作成した。WebXR を利用する Web ページへの接続方法は URL へのハイパーリンクまたは URL が埋め込まれた QR コードが記載された資料を使用者に渡すという方法をとった。

B.4　WebXR の様々な端末での動作確認

WebAR を異なる端末で使用した場合の動作の違いを調べた。動作確認に用いた端末の一覧を表 1 に示す。今回使用した端末は、研究室が所有している端末で、カメラが外向きの端末を使用した。今回 WebAR の作成に用いた AR.js は WebGL と WebRTC を使用するため、動作させるためには Android 5.1 以降の Google Chrome、または iOS 11 以降の Safari の環境が求められる[22]。WebAR を用いて、表示する 3D データのデータサイズの違いによるシステムの起動時間の違い、AR マーカーを認識するトラッキングの度合いを端末毎に調べた。

表１： 動作確認に用いた端末

OS	使用端末	使用ウェブブラウザ

iOS 13.6.1	iPhone XR A2106	Safari 13.1.2
iOS 13.2	iPad Pro (12.9 inch) A1584	Safari 13.0.3
Android7.1.1	Nexus 9	Google Chrome 75.0.3770.101
Microsoft Windows 10 Home 32bit	Arrows Tab QH30/W	Microsoft Edge 85.0.564.41 Google Chrome 84.0.4147.135

B.5　WebXR の機能紹介

WebAR と WebVR の機能は同じであり、それぞれの表示画面を図 4、5 に示す。図 4 は気胸部正面仰臥位の X 線検査時の散乱線分布を観察するための WebXR システムを起動した際に表示される画面である。WebAR はスマートフォン、WebVR は PC で表示した画面である。図 5 はシステムを起動した際に表示されるいくつかのボタンの機能を用いた際の WebVR の表示画面である。各々のボタンの機能は、まず散乱線 3D 表示ボタンを押すと、ボタンに示された線量値の散乱線が 3D 表示される（Direct X-ray は X 線管からの直接線を主として示している）。Animation ボタンを押すと、低い線量値の散乱線の等高線までを連続的に表示して、散乱線が広がる様子を二次元の断面アニメーションで表示する。Scale ボタンを押すと、患者表面の高さで照射野中心からの距離と、介助者の胸の高さにおける A（50cm）、B（100cm）、C（150cm）の距離の線量値が表示される。Coronal、Axial ボタンを押すと、散乱線分布の二次元断面が表示される。3 つの検査の切替えボタンは、胸部正面仰臥位、防護エプロンを用いた際の胸部正面仰臥位、骨盤正面仰臥位撮影の 3 つの検査時の散乱線分布を切り替えて観察することができます。WebAR には、Rotation ボタンがあり、押すと表示物が回転する（この機能を使わなくても、表示端末を動かすだけで様々な方向から観察することができる）。WebVR の表示物は、PC のマウスの左クリックで回転、右クリックで移動、ホイールで拡大縮小が可能である。

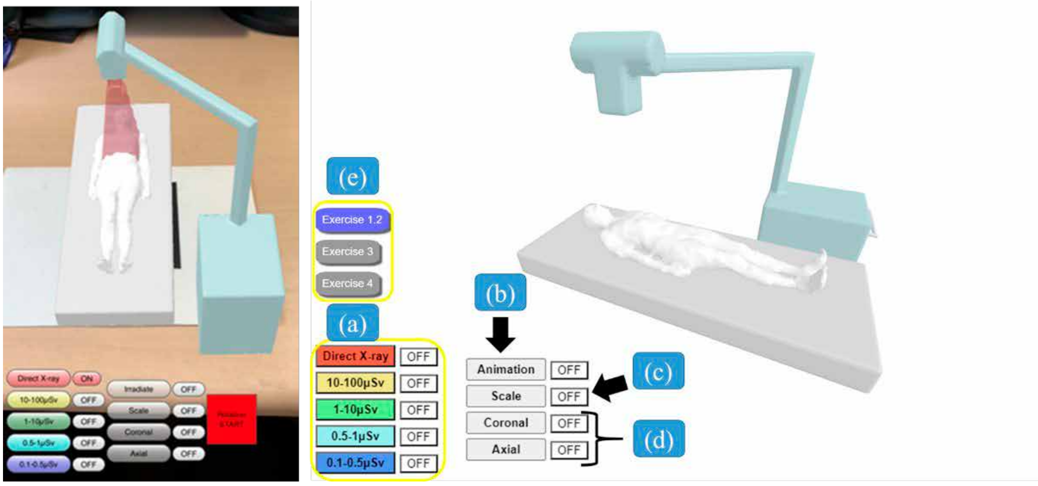


図 4：作成したシステムの表示画面と機能の説明（左：WebAR、右：WebVR）
(a) 散乱線 3D 表示ボタン、 (b) Animation ボタン、(c) Scale ボタン (d) Coronal, Axial ボタン (e) 3 つの検査の切替えボタン：胸部正面仰臥位、防護エプロンを用いた際の胸部正面仰臥位、骨盤正面仰臥位

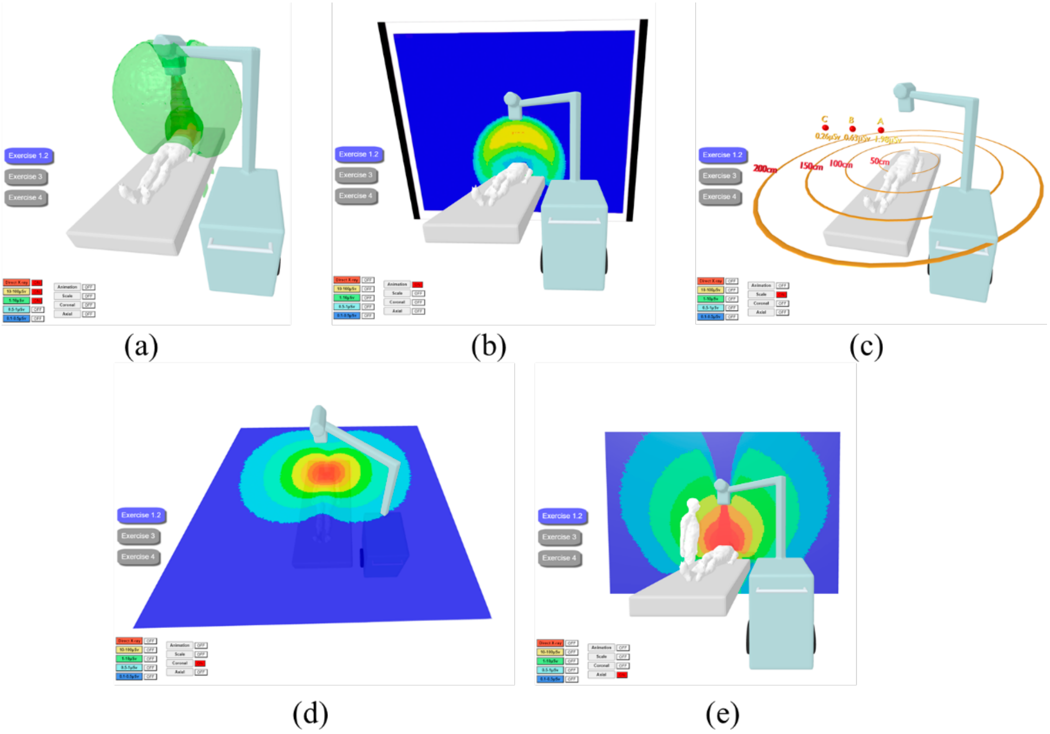


図 5：WebVR の各々の機能の表示画面

(a) 散乱線分布の 3D 表示 (b) 散乱線のアニメーション表示 (c) 照射野中心からの距離および各点の線量値表示 (d) 二次元散乱線分布の冠状断面 (e) 二次元散乱線分布の水平断面

B.6　WebXR を用いた教材の作成

開発した WebXR システムを基に、放射線防護教育用の教材を作成した。教材の内容は、外部放射線防護の三原則[23]である「距離」「時間」「遮へい」に基づいた観察項目や演習問題である。作成した教材は、以上の内容と WebXR を使用できる Web ページにつながる QR コードやハイパーリンク、AR マーカーを記載し、紙または PDF としてまとめた。使用した AR マーカーの記載された紙は、付録 1 に添付する。演習問題は表 1 に示す通り、全部で 9 問用意した。授業で使用した演習問題が記載された資料は、付録 2 に添付する。

教材使用者の授業に対するモチベーションへの影響を評価するためにアンケートを作成した。アンケートは、ARCS モデル[24,25]を基に作成した。ARCS モデルは、学習意欲を「Attention : A」「Relevance : R」「Confidence : C」「Satisfaction : S」の 4 つの要因でとらえ、授業や教材における学習者の学習意欲の分析や、学習意欲を高めるために提案されたモデルである[24,25]。アンケートの質問項目は Attention が 12 問、Relevance が 9 問、Confidence が 9 問、Satisfaction が 6 問の計 36 問である。質問項目の内容の詳細は結果に示す。アンケートは各項目 5 段階（1 が最小、5 が最高）で回答してもらい、A、R、C、S の各項目の平均値を求めて評価した。ただしアンケートの質問には否定的な質問も含まれており、その質問に関しては評価スコアを逆にして集計した。言い換えると、多くの人が否定的な質問に賛同した場合アンケートには高い値の数字が記入されるが、評価値は低い値となる。そして WebAR と WebVR の使用者への影響の違いを調べるために、演習問題の正答率と ARCS モデルの 4 つの項目に関して帰無

仮説を WebAR と WebVR で評価に違いがないとして Mann-Whitney の U 検定を用いた。有意水準は 0.05 とした。Mann-Whitney の U 検定は、統計ソフトウェアの EZR[26]を用いた。各検定において、サンプルサイズが十分であるかどうかを調べるために、EZR を使用し検出力を求めた。

アンケートに、2 つの自由記述の質問項目を追加した。内容は WebXR のシステムに関する感想と、WebXR を使用した授業全体に対する感想を記載してもらうものである。感想の内容を客観的に評価するために、文章データを解析し特徴を抽出するテキストマイニング解析を用いた。解析には KHCoder [27] というソフトウェアを用いた。KHCoder は日本の立命館大学の Higuchi.K によって開発された、統計処理に特化したプログラミング言語「R」と、入力文を単語単位に分割し品詞を付与する言語形態解析システム「ChaSen」をバックエンドプログラムとして、文章型のデータを統計的に分析するためのフリーソフトである[28,29]。感想で記入された文章内に多く記入されていていた言葉、今回は 3 回以上出現した言葉を抽出してまとめた。その後、抽出した言葉の関係性を明確にするためにクラスター解析を用いて、関係性を図にしてまとめた。クラスター解析では単語同士の関係性を、2 つの集合に含まれる要素のうち共通する要素の割合を示す Jaccard 係数に基づく数値で表示し、2 つの単語の類似性の指標としている。Jaccard 係数に基づく数値が小さいほど、単語間の関係性が強いことを意味する。また、関連性の強い単語は線でつながれ色でグループ化される。

B.7　放射線技術科学専攻の学生への授業

九州大学医学部保健学科放射線技術科学専攻の学部 3 年生 35 名を対象として作成した Web 教材を用いて放射線防護の授業をした。前半 18 名、後半 17 名の二回に分けて授業を行った。本研究では WebAR と WebVR で使用者に与える影響に違いがあるのかを調べるために、前半は WebAR を用いて、後半は WebVR を用いて演習した。授業の流れを図 6 に示す。まず始めに放射線を扱う検査における職業被ばくの説明をした。そして授業の目的、WebAR または WebVR の使用方法について説明した。操作説明、動作確認を行った後 WebXR を用いた観察および演習問題に取り組んでもらった。今回は、WebAR は各自のスマートフォン、タブレット端末で使用し、WebVR は PC またはタブレット端末で使用してもらった。演習問題の回答を解答用紙に記入してもらい回収した後に、演習問題の解答解説をした。その後、全体を二つのグループに分けて放射線防護に関して知識をより深めてもらうための追加の演習をした。片方のグループは、実際の放射線防護エプロンや放射線防護眼鏡を身につけて、どういったものかを体験してもらった。もう片方のグループは、作成した AR アプリ [12]を使って実際のストレッチャー上に実物大の散乱線の挙動を表示して観察をしてもらった。AR アプリが使用できるタブレット端末が 1 台であったため、生徒には交代で使用してもらった。そして全員が二つの追加の演習を終えたら、最後にアンケートに回答してもらった。なお、この研究は九州大学医系地区部局臨床研究倫理審査委員会の許可（許可番号 2020-793）を得て行った。

表 2：演習問題の内容

設問	演習問題の内容
1	散乱線の広がり方に関して正しいものを選べ。
2	胸部正面仰臥位撮影の介助時において、図に示す 4 つのうち被ばく線量が少ない場所を選べ。

3	高さによる被ばく線量の違いについて正しいものを選べ。
4	照射野中心からの距離とその地点での線量値の関係として正しいものを選べ。
5	照射野中心から 200 ㎝の地点での線量値に近いと考えられるものを選べ。
6	防護具（鉛当量 0.35 mmPb の放射線防護エプロンを想定）を用いた際の散乱線の広がりに関して正しいものを選べ。
7	防護具の後方での地点 A（照射野中心からの距離 50 cm）での線量に関して正しいものを選べ。
8	骨盤撮影時の散乱線の広がりについて胸部撮影と比較してどのように違うのか正しいものを選べ。
9	骨盤撮影時の A, B, C 地点での線量値について胸部撮影時の線量値と比べてどのように違うのか撮影条件も参考に正しいものを選べ。

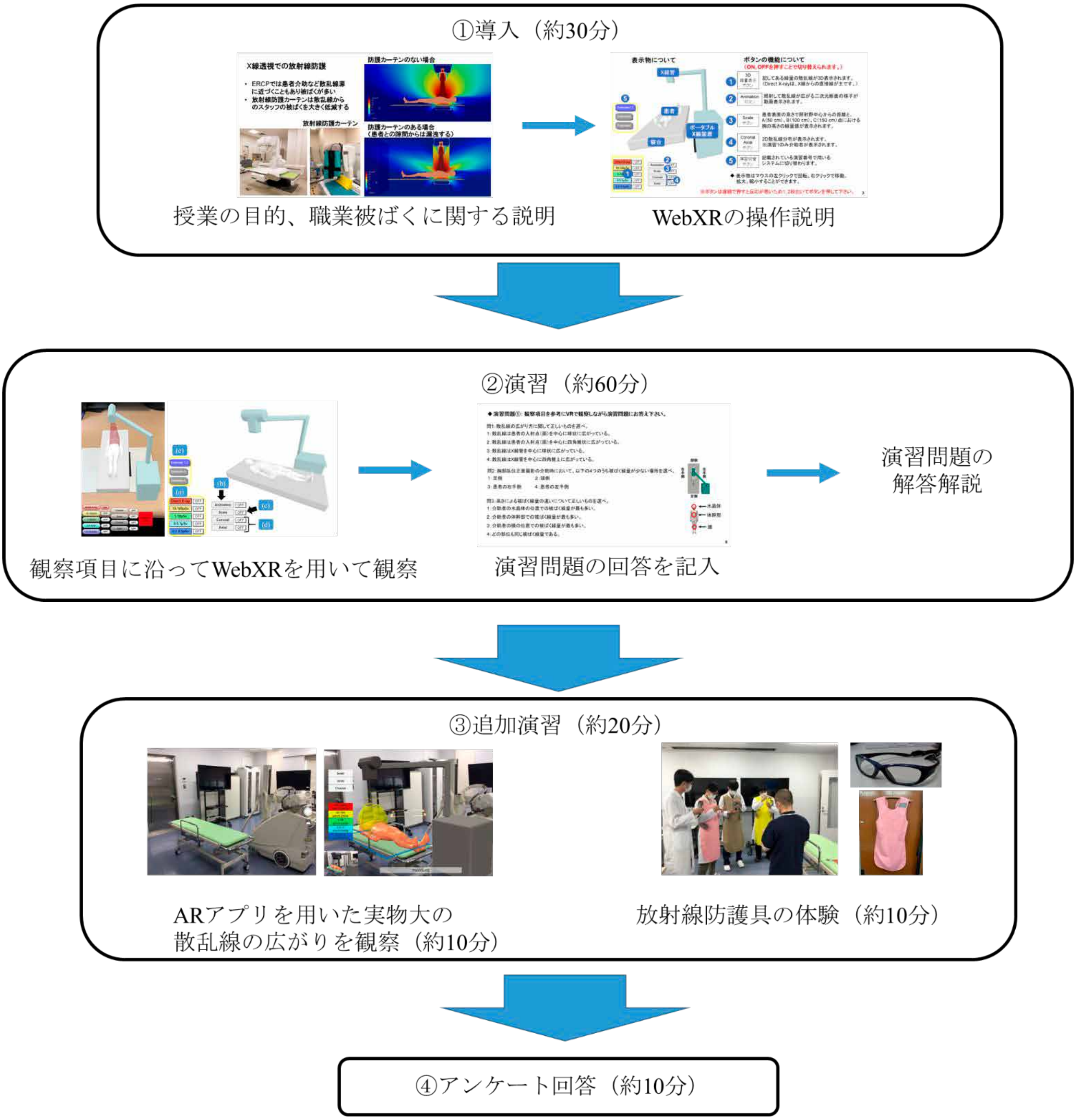


図 6：放射線技術科学専攻に対して行った WebXR を用いた放射線防護の授業の流れ

B.8 看護学専攻の学生への授業による教材の効果比較

使用者による教材の効果の違いを調べるために、放射線技術科学専攻の学生に比べて放射線に関する知識が少なく、将来放射線業務に関わる看護学生を対象に授業を行った。弘前大学医学部保健学科看護学専攻の学部 2 年生 34 名を対象として、作成した Web 教材を用いた放射線防護の授業を行った。使用した可視化システムおよびアンケートの内容は同じである。ただし演習問題は、表 2 に示した問 1 から

問 8 までの計 8 問で行った。流れは、まず授業の 1 か月前に WebVR を用いずに演習問題を解いてもらい集計した。その 1 か月後に放射線技術科学専攻の学生と同様の流れで授業を行った。演習問題は 1 か月前と同じ問題を解いてもらい集計した。看護学専攻の学生の追加演習では、放射線防護具の体験は行わず、AR アプリ[12]による散乱線の広がりの観察のみを行った。そのため放射線技術科学専攻の学生よりも長い時間 AR アプリを使用していた。また、AR アプリを使用できるタブレット端末が複数台あったため、3～5 人のグループごとで使用、観察してもらった。

WebXR の使用前後での正答率の違いや、放射線技術科学専攻の学生の結果と比較してどのような違いがあるのかを調べた。比較の際は放射線技術科学専攻の学生の結果は、WebAR または WebVR を使用した結果をひとまとめにして用いた。ただし、放射線技術科学専攻と看護学専攻の学生で使用した演習問題の数が異なっていたため、演習問題の正答数の比較の際は各生徒の点数を正答率に変換してから U 検定を用いた。

C. 研究結果

C.1 シミュレーションの精度検証

図 7 に実測値とシミュレーション結果を示す。高さ 0 ㎝、距離 1m の地点での線量値を 1 として他の地点での相対値を示す。図 7 より今回の PHITS でのシミュレーション結果は、実際の散乱線分布と差が 5%以内で再現できていることが分かった。

C.2 WebAR の動作検証

動作検証の結果を表 3 に示す。表示する 3D オブジェクトのデータサイズは、表 3 に示す 2 つで比べた。表示した 3D オブジェクトは図 8 に示す。小さいデータサイズの表示物は、スムージング処理を行っていないファントムで、大きいデータサイズのものはスムージング処理を行ったファントム、散乱線のオブジェクト、X 線装置等である。データサイズが小さい場合、iPhone XR と iPad Pro の WebAR の起動時間が最も短く、次いで Nexus 9 となった。起動時間が 10 秒を超えたのは Arrows Tab QH30/W のみで、Microsoft Edge と Google Chrome の起動時間にほとんど差は無かった。いずれのデバイスでも、表示データサイズが大きいほど、WebAR システムの起動時間が長くなった。表 3 に示すように、表示データサイズが大きい場合、起動時間が最も短かったのは iPad Pro で、最も長かったのは Arrows Tab QH30/W だった。Nexus 9 と Arrows Tab QH30/W で、データサイズが大きくなると表示が不安定になった。Nexus 9 が端末の向きを横にしたときの 3D オブジェクトの表示位置が、端末の向きを縦にしたときの表示位置と異なった。

マーカーのトラッキングについては、iPhone XR、iPad Pro、Nexus 9、Arrows Tab QH30/W の順に、端末が AR マーカーを認識しながら動かせる範囲が大きかった。マーカーの認識度合は、Arrows Tab QH30/W だけが悪く、それ以外は安定して認識した。

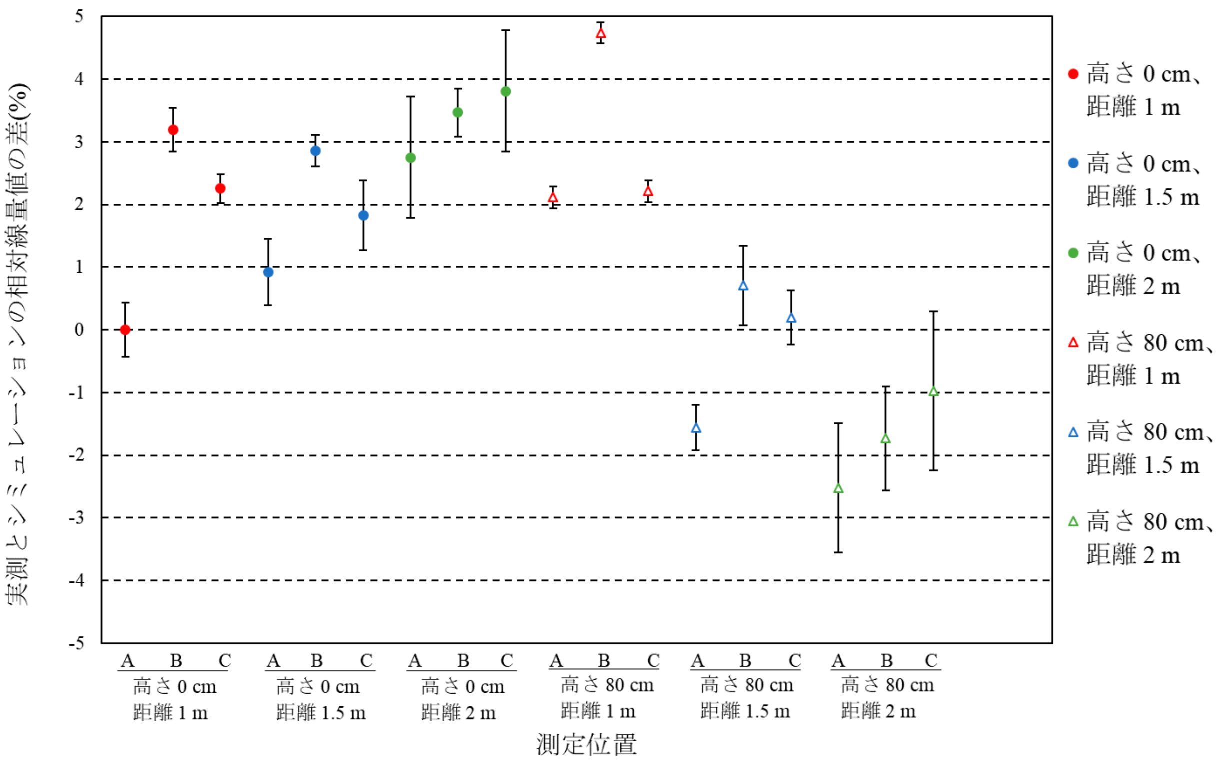


図 7：(a) 実測とシミュレーションの線量値の差

(b) 点 A, B, C の位置関係（高さ 0 cm、距離 1 m を基準とする）

表 3：WebAR の起動までの時間（単位：秒）

表示端末	表示物のデータサイズ	
	小さい (453 KB)	大きい (83436 KB)
iPhone XR A2106	1.81	11.41
iPad Pro (12.9 inch) A1584	1.44	10.55
Nexus 9	4.39	13.06
Arrows Tab QH30/W Edge	11.73	20.37
Arrows Tab QH30/W Chrome	12.23	20.74

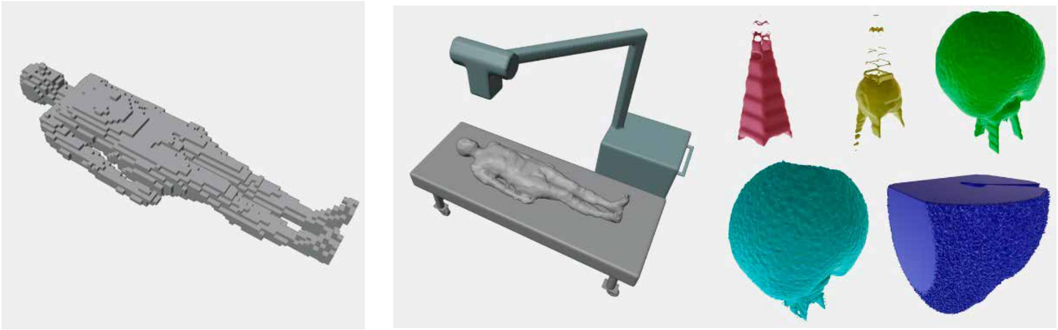


図 8：動作検証に用いた表示物
（左）小さいデータサイズの表示物（ファントム）
（右）大きいデータサイズの表示物（ファントム、X 線装置、ベッド、散乱線）

C.3　放射線技術科学専攻の学生に対する授業の結果

C.3-1. 演習問題の正答率

表 2 に示す演習問題の正答数を最高 9 点として評価した。WebAR を用いた 18 名の学生の授業では、演習問題の正答数の平均点は 8.89 点で、正答率は 99%であった。WebVR を用いた 17 名の学生の授業では、正答数の平均点は 8.71 点で、正答率は 97%であった。WebAR と WebVR を使用した際の学生全員の演習問題の正答数に対する U 検定の結果、P 値は 0.19 となり、有意水準の 0.05 より大きい値となったため、帰無仮説は棄却されなかった。したがって、WebAR と WebVR の演習問題の正答数に有意差は無かった。

また WebAR と WebVR の検出結果の検出力を EZR で求めたところ、27.8%であった。

C.3-2. ARCS モデルの評価

ARCS モデルの評価結果を表 4 に示す。最大値 5 の評価値の平均値が、全ての項目で 4 以上となった。WebAR と WebVR の両方で最も高い値を示したのが Confidence の項目であった。各項目に関して行った U 検定の結果、P 値は A の項目で 0.582、R の項目で 0.723、C の項目で 0.536、S の項目で 0.296 となった。全ての項目で P 値は有意水準の 0.05 より大きな値となり帰無仮説は棄却されなかった。したがって、本研究では ARCS モデルの評価値に関して、WebAR と WebVR に有意差は見られなかった。また、WebAR または WebVR を使用した授業のそれぞれの ARCS モデルの結果内で A、R、C、S 同士で U 検定を用いて比較した結果も P 値は有意水準の 0.05 より大きな値となり有意差は見られなかった。また、各々の検定結果の検出力は、A が 6.28%、R が 3.45%、C が 14.6%、S が 10.4%となった。

アンケートの質問内容及び各質問の評価値を表 5 に示す。質問項目の中で WebAR と WebVR の両方で、他に比べて高い評価（平均値が 4.5 以上）となった質問項目が 3 つあった。ただし、否定的な質問項目の場合は評価値が高いほど、学生はその質問に賛同しないという意味である。1 つ目の質問は否定的な質問で「この教育コンテンツは、情報量が多すぎて、重要なポイントを拾い上げて覚えることが難しかった。」であった。2 つ目の質問は肯定的な質問で「この教育コンテンツを使用して、散乱線の防護方法を学ぶことができた。」であった。3 つ目の質問は否定的な質問で「この実習で、この教育コンテンツの大部分を理解できなかった。」であった。一方、WebAR と WebVR の両方ともに低い評価（平均値が 4 未

満）となった質問項目が2つあった。1つ目の質問項目は肯定的な質問で「この教育コンテンツを通じて驚くべきこと、もしくは、予想外のことを学んだ。」であった。2つ目の質問は肯定的な質問で「トレーニング後の助言等のフィードバックは、自分の努力が報われたように感じた。」であった。
また､36問の各質問に対してU検定を行ったが全てのP値は有意差の0.05より大きな値となりWebARとWebVRの間に有意差は見られなかった。

表4： ARCSモデルの評価の結果

	平均値		P値
	WebAR	WebVR	
A：Attention	4.25 ± 0.23	4.21 ± 0.38	0.582
R：Relevance	4.24 ± 0.22	4.25 ± 0.37	0.723
C：Confidence	4.36 ± 0.27	4.44 ± 0.25	0.536
S：Satisfaction	4.17 ± 0.24	4.25 ± 0.34	0.296

表5：アンケートの質問内容および各質問の評価値の平均値

アンケートの質問内容	平均値	
	WebAR	WebVR
1. この教育コンテンツを最初に見た時、扱いやすい印象を受けた。	3.83	4.00
2. この教育コンテンツの冒頭の説明に注意を引く興味深い内容があった。	4.44	4.18
3. この教育コンテンツは、考えていたよりも理解しづらかった。	4.44	4.65
4. この教育コンテンツの説明を聞き、このシステムで何を学ぶべきか理解した。	4.50	4.47
5. この教育コンテンツで実習後、満足のいく達成感が得られた。	4.28	4.53
6. この教育コンテンツの内容は、既知の内容と関係が明らかだった。	4.44	4.71
7. この教育コンテンツは､情報量が多すぎて､重要なポイントを拾い上げて覚えることが難しかった。	4.50	4.53
8. この教育コンテンツは目を引くものだった。	4.33	4.47
9. この教育コンテンツが誰にとって重要かを示す説明や事例があった。	4.17	4.06
10. この教育コンテンツを目的通りに終えることは、私にとって重要だった。	4.33	4.35
11. この教育システムの質や内容は、私の目を引き付けた。	4.44	4.47
12. この教育コンテンツはとても抽象的で、私の注意を引きつけるのは難しかった。	4.44	4.47
13. この教育コンテンツを使用して、散乱線の防護方法を学ぶことができた。	4.61	4.71

14. 私はこの教育コンテンツをとても楽しめたので、散乱線の防護方法についてもっと知りたいと思った。	4.17	4.29
15. この教育コンテンツは退屈で、魅力的ではなかった。	4.39	4.59
16. この教育コンテンツの内容は、私の興味に関係していた。	4.22	3.82
17. このシステム上の情報の提示方法は、注目しやすかった。	4.17	4.29
18. この教育コンテンツで、放射線診療に携わる医療従事者がどのように知識を活用するかの説明や例があった。	4.28	4.59
19. この教育コンテンツで、散乱線の防護方法の理解は難しかった。	4.39	4.29
20. この教育コンテンツは、私の好奇心を刺激した。	4.28	3.88
21. 私はこの教育コンテンツを本当に楽しんでいた。	4.17	4.24
22. この教育コンテンツの繰り返しの内容は、時々退屈になった。	4.06	3.88
23. この教育コンテンツの内容と形式は、散乱線の防護方法を知る価値があるという印象を与えた。	4.44	4.29
24. この教育コンテンツを通じて驚くべきこと、もしくは、予想外のことを学んだ。	3.67	3.24
25. しばらく教育コンテンツを使用すると、確認問題に正解することができるだろうと思った。	4.06	4.41
26. 既に教育コンテンツの大部分の内容を知っていたため、私のニーズに関係なかった。	4.17	3.59
27. トレーニング後の助言等のフィードバックは、自分の努力が報われたように感じた。	3.72	3.59
28. 実習の冒頭の教育コンテンツの説明資料に注意を引かれた。	4.11	4.35
29. この教育コンテンツの形式が退屈だった。	4.33	4.47
30. この教育コンテンツの内容をこれまでの学習で見たこと、やったこと、あるいは考えたことに関連付けることができた。	3.72	4.29
31. この教育コンテンツは、非常に多くの説明があり、いらいらした。	4.39	4.24
32. この教育コンテンツを上手く完了でき、良かったと感じた。	4.44	4.35
33. この教育コンテンツの内容は私にとって役に立つだろう。	4.39	4.59
34. この実習で、この教育コンテンツの大部分を理解できなかった。	4.67	4.76

35. この教育コンテンツ優れた内容の構成が、私が散乱線の防護方法の内容を学習できたという自信をつけるのに役立った。	4.28	4.18
36. このようにうまく設計された教育コンテンツに取り組むのは楽しいことだった。	4.28	4.47

C.3-3 テキストマイニングの結果

まず、WebAR と WebVR に対する感想に含まれる単語のうち 3 回以上記載されたものを抽出した。その結果を表 6 に示す。両方の感想において「見る」「感じる」「理解」が学生の感想に多く含まれていた。それらの単語の前後の文脈を確認すると、すべて肯定的な意味で使われていた。

次に、WebXR を用いた授業に対する感想に対しても同様に頻出語を抽出した。その結果を表 7 に示す。両方の感想において「理解」が学生の感想に多く含まれていた。単語の前後の文脈を確認すると、肯定的な意味で使われていた。

そして、WebXR および WebXR を用いた授業に対する感想に対してクラスター解析を行い、抽出した単語の関係を図 9、10 にまとめた。図 9、10 の横軸の値は Jaccard 係数に基づいて算出された単語間の関係の距離を表している。線と線が交わる点での値が小さいほど、関係性が強いことを意味する。図中の破線は抽出した単語を 3 つのグループに分ける線で、同じ色のグループは関係が強いことを意味する。図の左側にある棒グラフは、単語の出現回数を示していて、その回数は表 6、7 に示すものと同じである。色は自動で選ばれるものであるため、図 9 と図 10 で同じ色であることには意味はありません。

図 9 において、WebAR も WebVR も「散乱線」「広がり」「感じる」の単語が強い関係性を持っている。図 10 において、WebAR は AR を初めて使うことが放射線防護理解の単語とつながりを持っていた。WebVR は「防護」「理解」「内容」という単語が最終的に結びついていた。

表 6：WebXR に対する感想内の頻出語および出現回数（() 内の数字は回数）

WebAR system	WebVR system
理解（6）	見る（5）
散乱（5）	理解（5）
使う（5）	感じる（4）
AR (4)	散乱（4）
感じる（4）	使う（4）
見る（3）	実際（4）
広がり（3）	起動（3）
実際（3）	広がり（3）
	新しい（3）

表 7：WebXR を用いた授業に対する感想内の頻出語および出現回数（() 内の数字は回数）

WebAR を用いた授業	WebVR を用いた授業
理解（9）	理解(8)

放射線（7）	防護（4）
防護（5）	散乱（3）
AR (3)	視覚（3）
散乱（3）	内容（3）
使う（3）	
初めて（3）	
深まる（3）	

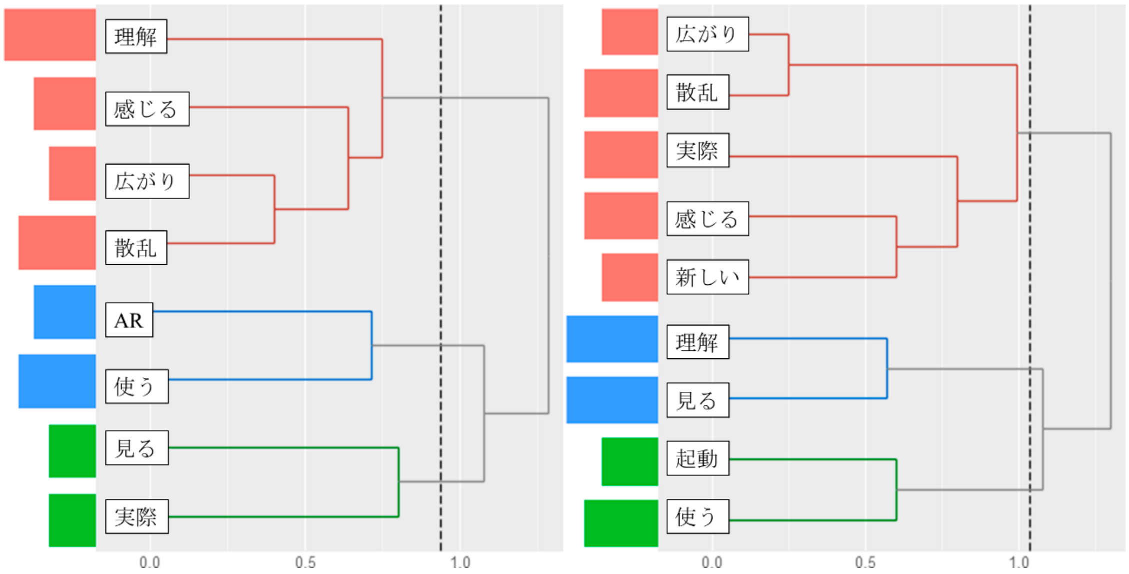


図 9： WebXR に対する感想内の頻出語の関係（左：WebAR、右：WebVR）

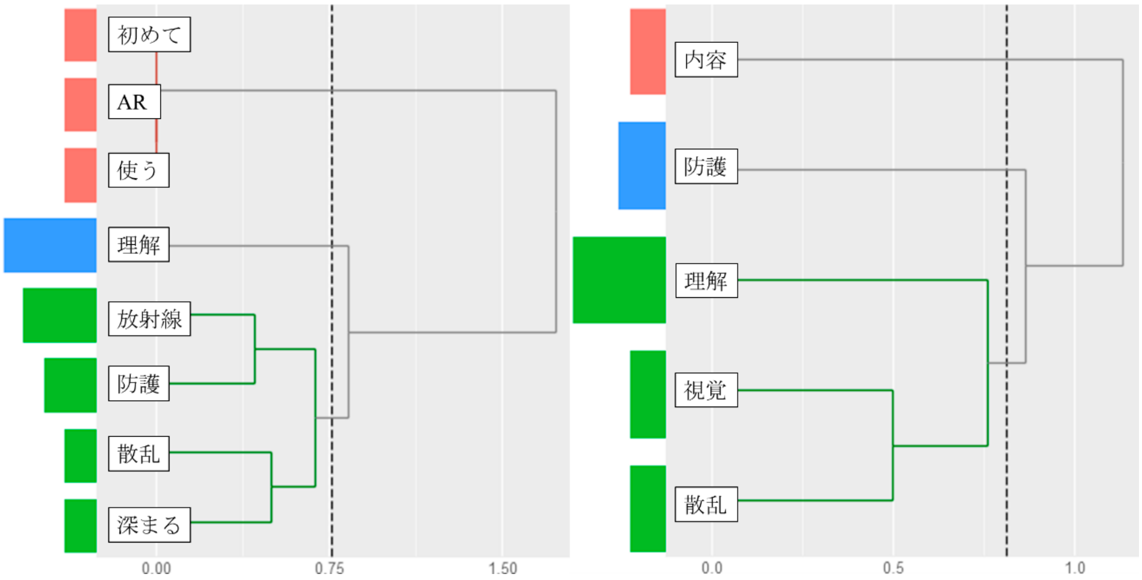


図 10： WebXR を使用した授業に対する感想内の頻出語の関係（左：WebAR、右：WebVR）

C.4 看護学専攻の学生に対する授業および比較結果

C.4-1 演習問題の正答率

看護学専攻計 34 名の学生に対する合計 8 問の演習問題の正答数を最高 8 点として評価した。WebVR を使用前の看護学生に行った演習問題の正答数の平均点は 3.6 点で、正答率は 45%であった。WebVR を用いた観察の後での演習問題の正答数の平均点は 6.8 点で、正答率は 85%であった。WebVR 使用前後の正答数に対して Wilcoxon 符号順位和検定を用いた結果、P 値は 4.89E-7 となり、有意水準の 0.05 より小さい値となったため帰無仮説は棄却された。したがって WebVR の使用前後の演習問題の正答率に有意差があった。また検定結果の検出力は 100%であった。

放射線技術科学専攻の学生の WebAR または WebVR を使用した計 35 名の演習問題の正答率は 98%であった。看護学専攻と放射線技術科学専攻の学生の正答率に対して U 検定を用いた結果、P 値は 1.52E-10 となり有意水準より大きい値であるため帰無仮説は棄却された。したがって看護学専攻と放射線技術科学専攻の学生の正答率には有意差があった。また検定結果の検出力は 100%であった。

C.4-2　ARCS モデルの評価

看護学専攻の学生の ARCS モデルの評価結果を表 8 に示す。最大値 5 の全ての項目において平均値が 4 以上となった。最も高い評価を得た項目は Confidence の項目であった。各項目に関して U 検定を行った結果、P 値は A の項目で 0.933、R の項目で 0.381、C の項目で 0.797、S の項目で 0.815 となった。全ての項目で有意水準の 0.05 より大きい値となり、看護学専攻と放射線技術科学専攻の学生の 4 つの項目に関しては有意差が見られなかった。また看護学専攻の授業の ARCS モデルの結果内で A、R、C、S 同士で Wilcoxon 符号順位和検定を用いて比較した結果も P 値は有意水準の 0.05 より大きな値となり有意差は見られなかった。

看護学専攻と放射線技術科学専攻の学生のアンケート全 36 問の各質問の評価結果に関して U 検定を用いて比較した結果、P 値が有意水準の 0.05 より小さな値となり有意差が見られた質問が 4 つあった。その質問項目を表 9 に示す。1 つ目は肯定的な質問で「この教育コンテンツを最初に見た時、扱いやすい印象を受けた。」であり、P 値は 0.039 であった。2 つ目は否定的な質問で「この教育コンテンツは、考えていたよりも理解しづらかった。」であり、P 値は 6.27E-3 であった。3 つ目は肯定的な質問で「この教育コンテンツが誰にとって重要かを示す説明や事例があった。」であり、P 値は 0.0286 であった。4 つ目は否定的な質問で「既に教育コンテンツの大部分の内容を知っていたため、私のニーズに関係なかった。」であり、P 値は 0.023 であった。

表 8：ARCS モデルの評価の結果

	平均値		
	看護学専攻	放射線技術科学専攻	P 値
A：Attention	4.25 ± 0.25	4.23 ± 0.31	0.933
R：Relevance	4.35 ± 0.24	4.25 ± 0.30	0.381
C：Confidence	4.39 ± 0.20	4.40 ± 0.26	0.797

S：Satisfaction	4.19 ± 0.28	4.21 ± 0.28	0.815

表 9：看護学専攻と放射線技術科学専攻の学生の評価で差が見られた質問項目

アンケートの質問内容	平均値	
	看護学専攻	放射線技術科学専攻
1. この教育コンテンツを最初に見た時、扱いやすい印象を受けた。	4.28	3.91
3. この教育コンテンツは、考えていたよりも理解しづらかった。	4.08	4.54
9. この教育コンテンツが誰にとって重要かを示す説明や事例があった。	4.54	4.11
26. 既に教育コンテンツの大部分の内容を知っていたため、私のニーズに関係なかった。	4.33	3.89

C.4-3 テキストマイニングの結果

看護学専攻と放射線技術科学専攻の学生の授業で使用した WebXR システムに対する感想および授業全体に対する感想に含まれていた頻出語を表 10、11 に示す。集計数の増加に伴い 3.3-3 では 3 回以上出現した言葉を頻出語としたが、この章（3.4-3）では出現回数が多かった単語の上位 10 個を頻出語として示す。ただし、出現回数が同じものが多数あったため、表 10、11 に示す単語数は 10 個より多くなっている。

まず看護学専攻の学生の感想において、WebXR システムと授業全体に対する感想で共通して、「理解」「放射線」「距離」という単語が多く使用されていた。それらの単語の前後を確認すると、全て肯定的な意味で使われていた。次に、放射線技術科学専攻の学生の結果と比較すると、全体的に単語の出現回数が多くなっている。特に「理解」の単語の出現回数に関して、看護学専攻の WebXR システムと授業全体の感想の両方で、放射線技術科学専攻の結果の約 2 倍の出現回数となっていた。

表 10：WebXR に対する感想内の頻出語および出現回数（() 内の数字は回数）

看護学専攻 34 名、WebXR	放射線技術科学専攻 35 名、WebXR
理解（25）	理解（11）
放射線（24）	散乱（9）
距離（14）	使用（9）
感じる（12）	感じる（8）
見る（11）	見る（8）
実際（10）	実際（7）
線量（10）	広がり（6）
実際（10）	新しい（5）

患者（9）	AR (4)
思う（9）	確認（4）
	起動（4）
	思う（4）

表 11：WebXR を用いた授業に対する感想内の頻出語および出現回数（() 内の数字は回数）

看護学専攻 34 名、授業	放射線技術科学専攻 35 名、授業
理解（35）	理解（17）
放射線（29）	放射線（9）
演習（15）	防護（9）
説明（19）	散乱（6）
距離（9）	AR (4)
学ぶ（7）	視覚（4）
線量（7）	深まる（4）
防護（7）	内容（4）
可視（6）	確認（3）
感じる（6）	感じる（3）
講義（6）	使う（3）
今回（6）	実際（3）
思う（6）	初めて（3）
時間（6）	頭（3）
実際（6）	入る（3）

そして、WebXR および WebXR を用いた授業に対する感想に対してクラスター解析を行い、抽出した単語の関係を図 11、12 にまとめた。図 11 において、看護学専攻の学生は「放射線」「患者」「距離」「理解」がより強い関係がある。一方で放射線技術科学専攻の学生は「散乱」「広がり」「理解」「見る」がより強い関係がある。図 12 において、看護学専攻と放射線技術科学専攻の学生の両方で、「放射線」「防護」「理解」の関係性が強かった。

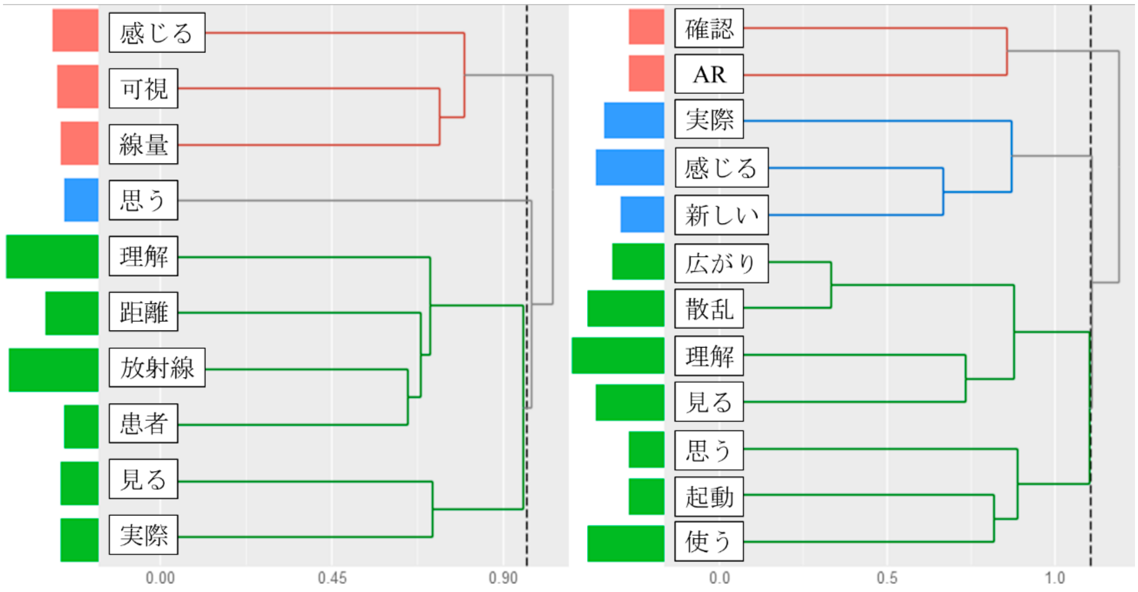


図 11：WebXR に対する感想内の頻出語の関係
（左：看護学専攻、右：放射線技術科学専攻）

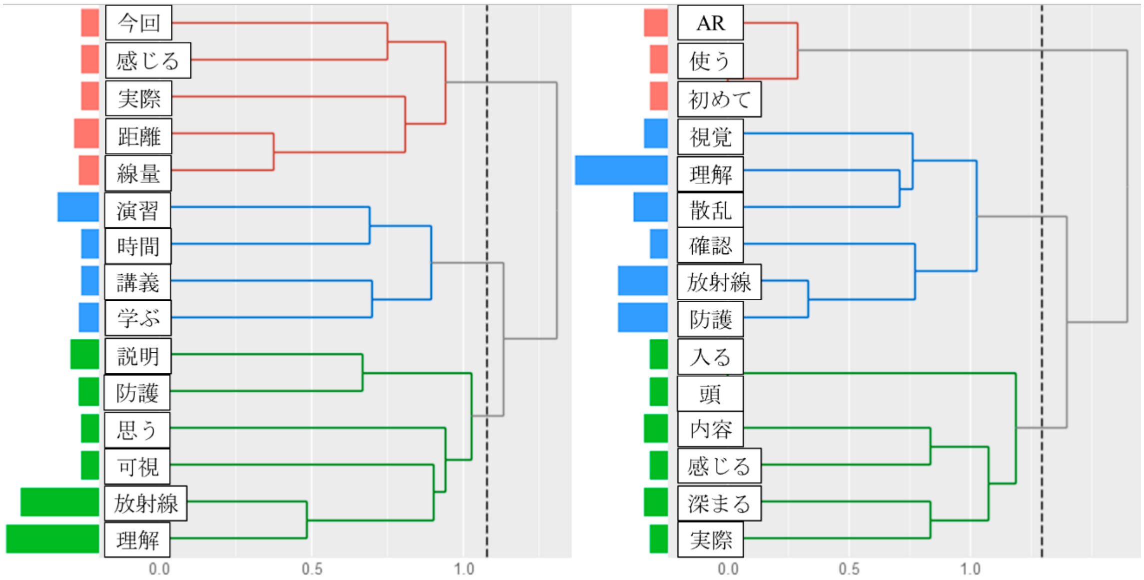


図 12：WebXR を使用した授業に対する感想内の頻出語の関係
（左：看護学専攻、右：放射線技術科学専攻）

C.5 要望コメント

放射線技術科学専攻および看護学専攻の学生のすべての感想の中に、いくつか要望コメントがあった。大きく分けて 2 つあった。1 つ目は、WebXR システムの起動時間に関してであった。起動時間をもっと早くしてほしい、起動までに時間がかかった等である。2 つ目は、WebXR の機能に関してである。他の検査、他の撮影部位、照射条件での散乱線の広がりを観察したいというものであった。

D. 考察

D.1　シミュレーションの精度

PHITS によるシミュレーション値と線量計による実測値の差は、いずれも 5%以内であった。この差は、実際の測定における線量計の位置精度、シミュレーションの精度や X-Tucker 等のソフトウェアの精度が影響していると考えられる。今回使用した線量計は、エネルギー依存性、線量依存性、方向依存性を有している[30]。シミュレーションでの測定点の向きと実測の線量計の向きの違いによっても差が生じたと考えられる。したがって、本研究の PHITS のシミュレーションは再現良くできていると考えられる。

D.2　WebAR の動作確認

表示する 3D データのデータサイズが大きくなると、データの読み込み時間が長くなるため、WebAR システムの起動時間も長くなったと考えられる。また表示データサイズが大きくなると使用端末への負荷が大きくなるため 表示が不安定になったと考えられる。これらの問題は、表示 3D のポリゴン数を減らしデータサイズを小さくすることで改善できると考えられる。他の改善方法としては、より高性能なプロセッサを搭載する端末を使用することがある。しかし、高性能プロセッサの端末を準備することが困難であったり、そもそも利用できなかったりする可能性がある。そのため、表示する 3D オブジェクトのポリゴン数削減によるデータサイズの縮小がより望ましいと考える。そして端末毎に起動時間が異なっていたのは、端末に搭載されているプロセッサに違いがあったためと考えられる。

Nexus 9 の端末の向きによって表示位置がずれたのは、画面サイズの比率が変わったためと考えられる。3D オブジェクトの表示位置は、AR マーカーからの指定された距離で表示されているが、画面のサイズや iOS と Android などの OS の違いによって、原点の位置に違いが生じているため、表示位置が異なったと考えられる。その位置のずれは、指定した距離ではなく、指定した画面サイズとの兼ね合いの距離の比率を指定することで改善可能である。AR マーカーを認識度合の違いは、AR マーカーが白と黒のコントラストで認識されるため、このコントラストを認識する能力がカメラによって異なるため生じたと考えられる。そのため AR マーカーの認識度合を改善するためには、より良いカメラの性能であることが望ましい。また今回の AR マーカーが紙に印刷したものであったためコントラストが低下していた可能性もあり、電子媒体に表示してコントラストを向上させることで認識が良くなる可能性がある。そして今回 WebAR の作成に AR.js を用いたが、システムの起動時間やマーカーの認識度合を改善するために他の WebAR 開発ライブラリを用いることで改善する可能性がある。

D.3 放射線技術科学専攻の学生に対する授業の結果

D.3-1 演習問題の正答率

演習問題の正答率は高い値であり、使用者が放射線防護に関する問題に対して高い理解を得たと考えられる。ただし、放射線技術科学の学生に関しては WebXR に使用前後での演習問題の正答率の比較が行えなかったため、この正答率が WebXR により得られたものであるかは断言ができない。また WebAR と WebVR で正答率に有意差がなかったが、本研究では 1 クラスの人数を半分に分けて検証したため、データサイズが小さい。そのため検出力が 27.8%と標準の 80%よりも小さい値であるため差が見られなかっ

た可能性がある。そのため、より多くの人に使用してもらいデータサイズを大きくして再検討すると差が見られる可能性がある。

D.3-2　ARCS モデルの評価

ARCS モデルによる評価では、すべての項目で平均点が 4 以上と高く、WebXR を用いた放射線防護教材が授業への関心や意欲を高めたことがわかった。特に、放射線防護に対する自信に関するアンケート項目の評価が高かったため、WebXR 教材が利用者の放射線防護に対する自信を高めたと考えられる。また、教育内容の重要性や概要が理解しやすいという内容の項目の評価が高かったことから、XR 技術の活用により理解が深まることが示された。

低評価の項目が 2 つあった。まず、「この教育コンテンツを通じて驚くべきこと、もしくは、予想外のことを学んだ。」という項目が低く評価されていたが、これは利用者が放射線技術科学専攻の学生であり、演習問題の内容が基本的な問題であったことが原因であると考えられる。次に「トレーニング後の助言等のフィードバックは、自分の努力が報われたように感じた。」という項目は評価が低かったが、これは演習内容が利用者にとって基本的なものであり、答えを知っている人が多かったためと考えられる。この 2 つの質問項目の評価を上げるには、WebXR を使用する対象や目的に合わせて演習内容や演習方法を変更する必要がある。また、WebAR と WebVR の評価の間に有意差は無かったが、検出力が小さかったため、サンプル数が十分でなく差が見られなかった可能性がある。

今回は、実際に放射線防護エプロンやメガネを着用し、AR で実物大の散乱線の広がりを観察するといった追加演習を実施した。それらの演習が ARCS モデルの評価結果に影響を与えた可能性が考えられる。そのため、WebXR システムのみを用いた授業を行い、比較・検討する必要がある。

D.3-3 テキストマイニングの結果

出現数の多い単語としては、「理解」がすべての感想に含まれており、WebAR や WebVR システムの利用が教育内容の理解に重要な役割を果たしたと考えられる。そして、「感じる」「見る」という言葉も含まれていることから、WebXR システムは直感的・視覚的に理解しやすいと考えられる。

クラスター解析における WebXR システムに関する感想の単語の関係図から、「散乱」「広がり」「感じる」の単語が強い関係を持っていた。故に使用者が実際に見て感じることで散乱線の広がりを理解でき、その結果、放射線防護に関する理解を深めることができたと考えられる。つまり、WebXR を用いることで、散乱線の挙動を直感的・視覚的に理解することができ、放射線防護の理解を深めることができると考えられる。また、WebAR は「初めて」「AR」「使う」という意味の単語と理解の単語が結ばれていたことから使用者により新鮮さを提供すると考えられる。理由としては AR が使用者にとって経験の少ない新たなものであったためと思われる。WebVR は「内容」という単語が結ばれていたことから、より観察内容への理解に影響すると考えられる。原因は、AR に比べて目新しさは少ないが安定して 3D 表示で観察に集中できたためと思われる。

D.4 看護学専攻の学生に対する授業および比較結果

D.4-1 演習問題の正答率

まず看護学専攻の学生において WebVR を使用することで、使用前より演習問題の正答率が有意に向上していた。また、今回 WebVR の使用前の演習問題の正答率が 45%と低いことから、放射線防護の知識が比較的少ない使用者であった。そのことから WebVR を用いることで、放射線防護に関する知識が比較的少ない使用者に対して、放射線防護に関する理解が向上すると考えられる。

次に、放射線技術科学専攻の学生の正答率に比べて看護学専攻の学生の正答率が有意に低かった。これは演習問題の内容が、放射線技術科学専攻の学生と看護学専攻の学生の今までの講義や元々の放射線防護の知識が異なることが原因であると考えられる。そのため演習問題の内容は、使用者の放射線防護に対する習熟度、使用目的によって調整すべきであると考える。

D.4-2 ARCS モデルの評価

ARCS モデルの評価は、すべての項目で平均点が 4 以上と高く、WebVR を用いた放射線防護教材が授業への関心や意欲を高めたことがわかった。同様に放射線技術科学専攻の学生でも評価が高かったことから使用者の習熟度によらず、WebXR は使用者の放射線防護教育への関心や意欲を高めると考えられる。

放射線技術科学専攻と看護学専攻の学生の ARCS モデルの評価で有意に差があった質問項目が 4 つあった。まず「この教育コンテンツを最初に見た時、扱いやすい印象を受けた。」と「この教育コンテンツが誰にとって重要かを示す説明や事例があった。」という 2 つの質問が看護学生の方が高い評価を得ていた。今回放射線技術科学専攻の学生に対して授業を行った人と看護学専攻の学生に授業を行った人は異なっていたため、WebXR を使った観察以外の授業内容が多少異なっていた。そのため以上の 2 つの質問の評価の差は、授業中の放射線防護に関する説明や WebXR の紹介の違いにより生じた差だと考えられる。

次に「この教育コンテンツは、考えていたよりも理解しづらかった。」と看護学専攻の学生がより感じていて、「既に教育コンテンツの大部分の内容を知っていたため、私のニーズに関係なかった。」と放射線技術科学専攻の学生がより感じていた。これは演習問題の内容や WebXR システムにより観察できる内容が、放射線技術科学専攻の学生にとって既知の内容で簡単であったため、このような評価になったと考えられる。そのため、WebXR システムの観察内容や、演習の難易度の調整が重要であると考えられる。看護学専攻の学生が、考えていたよりも理解しづらい内容であったが、ニーズには関係していたことから単に難易度を下げるのではなく、使用者の習熟度や授業の目的に合わせた内容の調整が大切であると考える。また、看護学専攻の学生が WebXR に対して考えていたよりも理解しづらかったと感じたのは、PC 等の電子機器を講義で扱っている放射線技術科学専攻の学生に比べて、看護学専攻の学生が操作に不慣れであったため、理解しづらかった可能性が考えられる。

D.4-3 テキストマイニングの結果

まず頻出語に関して、看護学専攻の学生の感想において「理解」「放射線」「距離」という単語が多く使われていた。「理解」という単語から WebVR を用いたことで、放射線に対する理解に対して影響があったと考えられる。「距離」という単語は放射線技術科学専攻の学生の感想には無かった。これは看護学専攻の学生の講義で、実物大での散乱線の可視化アプリケーションを用いた時間が放射線技術科学専攻の学生よりも長く、より印象を与えたためと考えられる。

放射線技術科学専攻の学生と頻出語の比較を行うと、共に「理解」という単語が多く使われていた。このことから使用者の放射線防護に対する習熟度に関わらず、WebXR システムを用いることで教育内容の理解を向上させることができると考えられる。また、全ての頻出語において放射線技術科学専攻の学生よりも看護学専攻の学生の単語の出現数が約二倍になった。特に「理解」という単語が WebXR システム、授業に対する感想の両方で看護学専攻の学生が多く記述していた。これより看護学専攻の学生の方がより授業の内容に対する理解の向上を感じていたためと考えられる。したがって、今回作成した WebXR システムを用いた放射線防護教育教材は、放射線防護に関する知識が少ない人ほど理解の向上度合を感じやすいものであると考えられる。

次に看護学専攻に対するクラスター解析の結果で、WebXR システムに対する感想では看護学専攻の学生は「理解」の単語に「距離」「患者」という単語が強い関係を持っていた。理由として看護学専攻の学生にとって患者さんを検査の際にサポートする際の距離ということに対する関心が放射線技術科学専攻の学生よりも高かったためと考えられる。今回は同じ WebXR システムを用いたが、使用者のニーズに合わせた観察ができる WebXR システムを用意することが大切であると考えられる。授業に対する感想では、看護学専攻と放射線技術科学専攻の学生の両方で「放射線」「防護」「理解」の単語の関係が強かった。そのため、WebXR システムを用いた授業が使用者に対して放射線防護の理解を促していたと考えられる。したがって、WebXR システムを用いた授業は放射線防護教育の理解を向上させることができると考えられる。

D-5 要望コメント

1 つ目の要望コメントの起動時間に関しては、4.2 章でも述べたように表示する 3D オブジェクトのデータサイズをオブジェクト編集ソフト等を用いて小さくすることで起動時間短縮が可能である。しかしデータサイズを小さくすると、オブジェクトのリアリティが減少すると考えられる。起動時間に影響する他の要因として使用端末が考えられる。使用端末が 2.4 章に示した条件を満たす必要がある。条件を満たす端末がない場合は使用が難しく、本研究の制限の 1 つである。

2 つ目の要望コメントは他の条件での散乱線の広がりを観察できるようにしてほしいというものであった。これは他の条件でシミレーションし 3D データを用意できれば可能である。本研究では胸部・骨盤正面仰臥位撮影時の散乱線の広がりしか観察できなかった。そのため、より良い放射線防護教材にするためには使用者のニーズに合わせた観察が可能な WebXR システムに改良すべきであると考える。

D-6 今後の課題、展望

本分担研究では保健学科の放射線技術科学専攻、看護学専攻の学生を対象に放射線防護教育教材の有効性を評価した。放射線診療に係る医学科の学生や、放射線診療従事者である医師、看護師、診療放射線技師等の医療スタッフにも実際に使用していただき教育効果を検証することで、臨床現場での有効性がより明確になる。また使用者から教材に対するフィードバックを得ることで、教材に対する課題が明らかになり、その点を改善することで機能の強化につながり、より充実した教材にすることが出来ると考えられる。

放射線診療従事者でも、職種により放射線に対する知識の差が大きく、職種毎の学習の目標をを明確にした教材を作成することで、より効果的な教材内容とすることが期待される。

E. 結論

WebXR を用いた新たな放射線防護教育手法を開発した。WebXR により仰臥位での X 線照射時の散乱線の広がりを視覚的に観察し、理解することができ、利用者の放射線防護に対する興味、理解、自信が向上することを確認した。今後は、より良い教育効果を得るために、利用者の放射線防護の習熟度や使用目的に合わせて、他のモダリティ・撮影条件における散乱線分布を WebXR で観察できるようにし、演習問題の内容を調整することで、職種に応じたより効果的な放射線防護教育教材を開発することが望まれる。

参考文献

1: Brun A, Mor RA, Bourrelly M, Dalivoust G, Gazazian G, Boufercha R, Lehucher-Michel MP and Sari-Minodier I. Radiation protection for surgeons and anesthetists: practices and knowledge before and after training. 2018 *J Radiol Prot.* 38(1), 175-188.

2: Hirata Y, Fujibuchi T, Fujita K, Igarashi T. Angular dependence of shielding effect of radiation protective eyewear for radiation protection of crystalline lens. 2019 *Radiological Physics and Technology*, 12(2).

3: Brian J. P, Stephen J. H, Gregory J. N and Terence P.G. Augmented reality improves procedural efficiency and reduces radiation dose for CT-guided lesion targeting: a phantom study using HoloLens 2. 2020 *Scientific Reports.* 10, 18620.

4: Fujibuchi T. Radiation protection education using virtual reality by visualization of scatter distribution in radiological examination. 2021 *J Radiol Prot.* 41 S317.

5: Meneghin J. K, Xiong Z, Guo C, Rudin S and Bednarek D. R. Evaluation of Methods of Displaying the Real-Time Scattered Radiation Distribution during Fluoroscopically-Guided Interventions for Staff Dose Reduction. 2018 *Proc SPIE Int Soc Opt Eng.*

6: Nicolas L R, Fernando B and Nicolas P. See It With Your Own Eyes: Markerless Mobile Augmented Reality for Radiation Awareness in the Hybrid Room. 2017 *IEEE transactions on bio-medical engineering.* 64(2), 429-440.

7: Matthias S, Oliver J. B, Klaus D and Michael T. Simulation of scattered radiation during intraoperative imaging in a virtual reality learning environment. 2020 *Nternational Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery.* 15, 691-702.

8: Fujibuchi T, Ueda K, Kadoyanagi S, Ueno D and Nakamura C. Examination of Application to Radiation Protection Education by Four-dimensional Visualization of Scatter Distribution in Radiological Examination Using Virtual Reality. 2019 *Jpn. J. Radiol. Technol.* 75(11), 1297-1307.

9: Yuh-Shihng C, Kuo-Jui H, Cheng-Wei C and Artur L. Applying Mobile Augmented Reality (AR) to Teach Interior Design Students in Layout Plans. Evaluation of Learning Effectiveness Based on the ARCS Model of Learning Motivation Theory. 2019 *Sensors* 20(1), 105.

10: Yi G, Li M, Gongsen Z, Zhi C, Xi P and X George X. Conceptual Design and Preliminary Results of a VR-based Radiation Safety Training System for Interventional Radiologists. 2020 *Radiation*

Protection Dosimetry 190, 58-65.
11: Takata T, Nakabayashi S, Kondo H, Yamamoto M, Furui S, Shiraishi K, Kobayashi T, Oba H, Okamoto T and Kotoku J. Mixed Reality Visualization of Radiation Dose for Health Professionals and Patients in Interventional Radiology. 2021 *Journal of Medical Systems.* 45(4), 38.
12: Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development of an application to visualize the spread of scattered radiation in radiography using augmented reality. 2020 *J. Radiol. Prot* 40, 1299–1310.
13: Chin-Pang B. Y, Yu W. C. Molecular Data Visualization with Augmented Reality (AR) on Mobile Devices. 2020 Structural Genomics. 2199, 347-356.
14: Žiga K, Ciril B, Matija M. A web-based virtual reality environment for medical visualization. 2018 *IEEE.*
15: Sato T, Iwamoto Y, Hashimoto S, Ogawa T, Furuta T, Abe S, Kai T, Tsai P, Matsuda N, Iwase H, Shigyo N, Sihver L and Niita K. Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02. 2018 *J. Nucl. Sci. Technol* 55(5-6), 684-690.
16: Takaki T, Fujibuchi T, Murakami S, Aoki T and Ohki M. The clinical significance of modifying X-ray tube current-time product based on prior image deviation index for digital radiography. 2019 *Phys. Med.* 63, 35-40.
17: Kato H. Introduction of Self-made Software on Radiological Technology. 2019 *Jap J Rad Tech.* 75(1), 104-110.
18: ICRP. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. 1996 *Ann. ICRP.* 26(3-4).
19: Paraview, https://www.paraview.org/; [Accessed 25 October 2022].
20: Glitch, https://glitch.com/; [Accessed August 26 2022.]
21: A-Frame, https://aframe.io/; [Accessed 25 October 2022].
22: AR-js-org, https://github.com/AR-js-org/AR.js; [Accessed 25 October 2022].
23: Jae H. K. Three principles for radiation safety: time, distance, and shielding. 2018 *Korean J Pain* 31(3), 145-146.
24: Keller, J. M. Motivation, Learning, and Technology: Applying the ARCS-V Motivation Model. 2016 *Participatory Educational Research (PER)* 3(2), 1-13.
25: Kawakami Y, Kogo C. Making an Evaluation of the Japanese Edition of Course Interest Survey Scale Based on ARCS Motivational Model. 2013 *JSET.*
26: Kanda Y. Investigation of the freely available easy-to-use software 'EZR' for medical statistics. 2013 *Bone Marrow Transplantation.* 48, 452-458.
27: KH Coder, https://khcoder.net/en/; [Accessed 25 October 2022].
28: Higuchi K. A two-step approach to quantitative content analysis: KH Coder tutorial using Anne of Green gables (part Ⅰ). 2016 *Ritsumeikan Social Sci Rev* 52, 77-91.
29: Higuchi K. A two-step approach to quantitative content analysis: KH Coder tutorial using Anne of Green gables (part Ⅱ). 2017 *Ritsumeikan Social Sci Rev* 53, 137-147 (2017).
30: Ishii H, Satsurai K, Uesugi N, Kato M, Sannohe M, Miyata K, Inaba Y and Chida K. Fundamental

Characteristics of a Semiconductor Survey Meter. 2018 *Jpn. J. Radiat. Saf. Manage.* 17, 2-8.

F. 論文報告

1. Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development of an application to visualize the spread of scattered radiation in radiography using augmented reality. 2020 *J. Radiol. Prot* **40**, 1299–1310.
2. Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development of scattered radiation distribution visualization system using WebAR. 2021 *Journal of Physics: Conference Series.* 1943.
3. Fujibuchi T, Radiation protection education using virtual reality by visualization of scatter distribution in radiological examination, Journal of Radiological Protection, 10.1088/1361-6498/ac16b1, 41, 4, S317, 2021.07.
4. Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development and evaluation of the effectiveness of educational material for radiological protection that uses augmented reality and virtual reality to visualise the behaviour of scattered radiation. 2022 *J. Radiol. Prot.* 42, 011506.

G. 研究発表

1: Kazuki Nishi, Toshioh Fujibuchi. Development of application to visualize the spread of scattered radiation using augmented reality. The 76th annual meeting of the Japanese Society of Radiological Technology (JSRT), Web, May 15-June 14, 2020.

2: Kazuki Nishi, Toshioh Fujibuchi, Takashi Yoshinaga. Development of scattered radiation distribution visualization system using WebAR. The 10th International Seminar on New Paradigm and Innovation on Natural Science and Application (ISNPINSA), Web, September 24-25, 2020.

3: 西和紀, 藤淵俊王, 吉永崇. ウェブブラウザ上での拡張現実を利用した散乱線分布の可視化システムの開発. 第 19 回日本放射線安全管理学会学術大会, Web, 2020 年 12 月 9-11 日.

4: Kazuki Nishi, Toshioh Fujibuchi. Development of application to visualize the spread of scattered radiation in radiography using Augmented Reality. The 15th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA), Web, January 18-22, 2021.

5: Kazuki Nishi, Toshioh Fujibuchi, Takashi Yoshinaga. Development of a System for Scattered Radiation Distribution Visualization Using Augmented Reality in Web Browser. The 77th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 15-18, 2021.

6: 西和紀, 藤淵俊王, 吉永崇. クロスリアリティによる散乱線挙動可視化教材の放射線教育効果の評価. 日本放射線技術学会（JSRT）第 49 回秋季学術大会, 2021 年 10 月 15-17 日）

H. 知的所有権の取得状況

なし

労災疾病臨床研究事業

分担研究報告書【総合(令和 2 年度～令和 4 年度)】

眼の水晶体の放射線防護に資する機材開発推進および被ばく低減のための多角的研究

（200701-01）

国内外の開発上の技術的課題等の情報についての調査・収集

研究分担者　赤羽　恵一

（量子科学技術研究開発機構・人材育成センター・研究統括）

研究要旨

令和 2 年度～令和 4 年度において、国内外における眼の水晶体の放射線防護に関する情報を収集した。具体的には、次の通りである。

・国内学会等

ガイドライン等

○日本保健物理学会:眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン

○令和元年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費事業:医療スタッフの放射線安全に係るガイドライン～水晶体の被ばく管理を中心に～

○日本放射線看護学会:看護職のための眼の水晶体の放射線防護ガイドライン

○日本適合性認定協会:『認定の基準』についての指針―放射線個人線量測定試験分野―

学術発表

日本放射線技術学会、日本医学物理学会、日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会

・国際学会等

○国際放射線防護学会(International Radiation Protection Association: IRPA)第 15 回大会

○国際原子力機関(International Atomic Energy Agency: IAEA)”(Virtual event) International Conference on Radiation Safety: Improving Radiation Protection in Practice”、”International Conference on Occupational Radiation Protection”

○第 9 回韓日医学物理学会学術合同大会(KJMP)

○原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR) UNSCEAR 2020/2021 Report

○経済協力開発機構／原子力機関 (Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency: OECD/NEA) 眼の水晶体の線量限度に関する NEA 専門家グループ(EGDLE)

○欧州連合(European Union: EU)EU MEDIRAD レポート

・文献調査

眼の水晶体の放射線防護に関する文献を調査した

A. 研究目的

国際機関及び世界各国における状況を調査する。具体的には、規制内容・被ばく線量測定機器・測定方法・校正方法・被ばくの実態・防護手法等について、情報を得る。

国内外の学会等に参加して、放射線防護機材の技術的課題等の情報について調査収集する。

B. 研究方法

インターネット上に公開された、関連団体等のガイドライン等の情報を収集した。また、PubMed 等により文献を検索した。更に、ウェブでも開催された国内外の国際学会に参加し、発表内容の情報を得た。

C. 研究結果

C-1. 国内学会等

C-1-1. ガイドライン等

眼の水晶体の防護に関するガイドラインを以下に挙げる。

〇日本保健物理学会：眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン

〇令和元年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費事業：医療スタッフの放射線安全に係るガイドライン～水晶体の被ばく管理を中心に～

〇日本放射線看護学会：看護職のための眼の水晶体の放射線防護ガイドライン

〇日本適合性認定協会：『認定の基準』についての指針―放射線個人線量測定試験分野―

C-1-2. 学術発表

国内の関連学会の学術大会において、眼の水晶体防護に関する発表をまとめた。

◯2021 年度

C-1-1. 第 77 回日本放射線技術学会総会学術大会(2021 年 4 月 15 日～18 日:横浜)

C-1-2. 第 49 回日本放射線技術学会秋季学術大会(2021 年 10 月 15 日～17 日:熊本、ハイブリッド開催)

C-1-3. 第 3 回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会
(2021 年 12 月 1 日～3 日:Web 開催)

◯2022 年度

C-1-1. 第 78 回日本放射線技術学会総会学術大会(2022 年 4 月 14 日～17 日:横浜)

C-1-2. 第 124 回日本医学物理学会学術大会(2022 年 9 月 15 日～17 日:長崎)

C-1-3. 第 50 回日本放射線技術学会秋季学術大会(2022 年 10 月 7 日～9 日:東京)

C-1-4. 第 4 回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同大会(2022 年 11 月 24 日～26 日:福岡)

C-2. 国際学会等

国際関連として、関連国際学会学会および国際機関の報告等を以下に示す。

・2020 年度

◯IRPA

国際放射線防護学会（International Radiation Protection Association: IRPA）第 15 回会議

・2021 年度

◯C-2-1. 第 9 回韓日医学物理学会
(2021 年 9 月 9 日～10 日:Web 開催)

- ◯IAEA（国際原子力機関）Safty Reports Series No.104 ”Radiation Protection and Safety in Veterinary Medicine”（獣医療における放射線防護と安全）

◯UNSCEAR（原子放射線の影響に関する国連科学委員会）

- Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
- Sixty-seventh and sixty-eighth sessions (2020年11月2日～6日、2021年6月21日～25日

◯OECD/NEA (経済協力開発機構/原子力機関)
・NEA専門家グループ
◯EU
・MEDIRAD: IMPLICATIONS OF MEDICAL LOW DOSE RADIATION EXPOSURE
EU: Deliverable 2.19
Report on effectiveness of protective devices for staff in interventional procedures (8 January 2021)
・2022年度
◯原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR)
UNSCEAR 2020/2021 Report
UNSCEAR 2020/2021 Report が2022に公開された。UNSCEAR 2020/2021 Report Volume IV Annex D - Evaluation of occupational exposure to ionizing radiation
◯International Conference on Occupational Radiation Protection (IAEA)
IAEA の "International Conference on Occupational Radiation Protection"
◯Regulatory Implementation of the Equivalent Dose Limit for the Lens of the Eye for Occupational Exposure (OECD/NEA)

C-3. 文献調査
眼の水晶体の放射線防護に関する文献を調査した。PubMedで、次のキーワードでヒットした文献数と推移を示す。
2021年度
- eye lens radiation protection : 51
- Eye lens radiation exposure : 62
- Eye lens radiation dose : 78
- Eye lens dosimetry : 53
- Eye lens glasses radiation protection : 17
- Eye lens radiation exposure intervention : 37

2022年度
- eye lens radiation protection: 852
- eye lens dose limit: 376
- eye lens dose: 2,212
- eye lens glasses protection: 257
- eye lens dosimetry: 1,536
- eye lens radiation exposure intervention : 37

D. 考察
ガイドラインについては、国内では、日本保健物理学会から出されたガイドラインは、フロー図で測定方法を決定することができ、管理基準に近づく又は超えるおそれがある場合と、より正確に眼の水晶体の等価線量を算定する場合は、1 cm又は70 μm線量当量のいずれかの値の高い方を眼の水晶体の等価線量としてもよいとされている。「医療スタッフの放射線安全に係るガイドライン～水晶体の被ばく管理を中心に～」では、防護メガネの遮蔽効果の有効性と、被ばくが少ない場合は軽いメガネの利用が推奨されている。日本放射線看護学会のガイドラインは、日本保健物理学会及び推進事業の両ガイドラインを考慮したものになっている。日本適合性認定協会の指針では、Hp(10)とHp(0.07)に基づく眼の水晶体の線量の計算式が示されている。

国際的には、IRPA 15におけるIRPAタスクグループの活動報告や測定に関するデータ、実際の医療現場における眼の水晶体の被ばく線量、放射線防護手法の効果など

に関する発表があった IAEA の放射線安全に関する国際会議では、医療現場での眼の水晶体の被ばく線量に関するものや、ファントムに関する発表が出されていた。また、IAEA が獣医療における放射線防護と安全の Safety Report を出した。また、International Conference on Occupational Radiation Protection では、眼の水晶体防護関係の発表があった。ICRP が「獣医療における放射線防護」の Task Group 110 を作っており、獣医療に関する防護活動も今後増えていくことと思われる。UNSCEAR は、第 67 回・68 回会合の報告書で、2023 年に放射線被ばくによる眼の水晶体混濁の評価を開始することを計画し、次の職業被ばく調査で、多くの国がデータを提供することを期待していることを述べている。UNSCEAR 2020/2021 Report が 2022 に公開された。UNSCEAR 2020/2021 Report Volume IV Annex D - Evaluation of occupational exposure to ionizing radiation に、眼の水晶体に関する記述がある。OECD/NEA は、眼の水晶体の線量限度に関する NEA 専門家グループ（EGDLE）眼の水晶体の線量限度に関する NEA 専門家グループ（EGDLE）は、情報収集やミーティングを行っており、それぞれデータ収集を継続している。Regulatory Implementation of the Equivalent Dose Limit for the Lens of the Eye for Occupational Exposure (OECD/NEA)の報告書では、アプローチに対する成功と課題を含む、職業被ばくに対する眼の水晶体の等価線量限度を実施する際の世界中の規制当局と利害関係者の実際の経験をまとめている。EU の MEDIRAD プロジェクトが 2021 年に出した報告書では、五種類の防護用具（帽子、マスク、ドレープ、エプロン、無重力吊り下げシステム）に対し、モンテカルロシミュレーション計算、スタッフ及びファントム測定でデータを出している。非常に多くのデータが示され、それぞれの防護効果を定量的に知ることができる貴重な報告となっている。しかしながら、防護効果は条件によって異なり、利用しやすさも考慮する必要がある。よくまとめられており、大変参考になる報告書である。

眼の水晶体防護関連の文献では、インターベンショナル手技における被ばく線量が多い。核医学に関する報告も出されていた。

関連文献調査では、PubMed で眼の水晶体、放射線防護、線量測定、眼鏡等のキーワードをいくつか組み合わせて検索した結果、多くの文献がヒットした。PubMed における文献数のトレンドは、2016 年あたりにピークが見られるが、継続して論文が出されており、被ばくのデータや線量評価技術に関する知見が蓄積されていることが見て取れる。被ばく線量については、個々の医療施設での事例報告がなされており、線量が高いグループの存在も示されている。防護については、防護用具の開発とその効果の報告がなされているが、いずれも、既存の方法を改良することで、より効果的に防護をすることを目指したものが多い。眼の水晶体の職業被ばく（及び医療被ばく）の実態把握、被ばく線量が高いグループの同定、より効果が高く診療に支障を与えない防護用具及び手法の開発と実践が求められていると言える。

E. 結論

これまで、医療における眼の水晶体の線量評価、専用の線量計の開発、防護用具等の開発及び効果などに関する多くの報告がなされている。眼の水晶体の線量を評価する手法は、Hp(3)を直接測定するというよりは、従来の Hp(10)及び Hp(0.07)に基づくものが

多い。被ばく線量は、医療、特にインターベンショナル手技における被ばくに対する関心が高く、新しい線量限度を超える事例の報告もなされている。評価手法としては、線量計による測定だけではなく、モンテカルロ計算データを利用した推定方法も提案されている。防護手法の効果に関するデータも出されており、これらの状況に関する情報を確認した。国内の医療施設における眼の水晶体の放射線防護に有用な情報を与え、実践に役立つことが期待される。有用性だけでなく、課題も示されており、状況に応じて包括的に選択し、合理的低減を図ることが重要である。眼の水晶体の新等価線量限度が国際基準や各国の関連規制法令に取り入れられてから、被ばくの現状に関する多くのデータが報告され、防護方法の検討もなされてきている。防護と線量評価が業務で求められるようになってきており、実務的・効果的な防護方法及び線量評価法への関心が高いと言える。

F. 論文報告

・Kosuke Matsubara, Yasutaka Takei, Hiroshige Mori, Ikuo Kobayashi, Kimiya Noto, Takayuki Igarashi, Shoichi Suzuki, Keiichi Akahane. A multicenter study of radiation doses to the eye lenses of medical staff performing non-vascular imaging and interventional radiology procedures in Japan. Physica Medica, 74, 83 - 91, 2020-06, DOI:10.1016/j.ejmp.2020.05.004

G. 研究発表

特になし。

H. 知的所有権の取得状況

特になし。

III.　研究成果の刊行に関する一覧表

別紙４

研究成果の刊行に関する一覧表【総合（令和2年度～令和4年度）】

研究分担者　盛武 敬（国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構/量子生命・医学部門
放射線医学研究所　放射線規制科学研究部　部長）

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書　籍　名	出版社名	出版地	出版年	ページ
盛武 敬	第4章 放射線の生物影響・リスク 第1節～第3節	赤羽恵一・遠藤真広 日本医学物理学会監修	医学物理学教科書シリーズ 医療放射線防護学	国際文献社	東京都	2020	P52-84
盛武 敬	小児の放射線診断とIVRにおける放射線防護（翻訳）	米倉　義晴監修 ICRP刊行物翻訳委員会	ICRP Publication 121	原子力規制委員会	東京都	2021	P1-49

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
Kawauchi S, Chida K, Moritake T, Hamada Y, Matsumaru Y, Tsuruta W, Sato M, Hosoo H, Sun L	Treatment of internal carotid aneurysms using pipeline embolization devices: measuring the radiation dose of the patient and determining the factors affecting it	Radiat Prot Dosimetry	188(3)	389-396	2020
坂本 肇, 五十嵐 隆元, 加藤 守, 川内 覚, 加藤 英幸, 塚本 篤子, 盛武 敬, 赤羽 正章	DRLs 2015の血管撮影・IVR分野における効果検証および追加項目の検討	日本放射線技術学会誌	76(2)	210-217	2020
Morota K, Moritake T, Nagamoto K, Matsuzaki S, Nakagami K, Sun L, Kunugita N	Optimization of the Maximum Skin Dose Measurement Technique Using Digital Imaging and Communication in Medicine-Radiation Dose Structured Report Data for Patients Undergoing Cerebral Angiography	Diagnostics (Basel)	11(1)	E14	2020
Nagamoto K, Moritake T, Nakagami K, Morota K, Matsuzaki S, Nihei S, Kamochi M, Kunugita N	Occupational radiation dose to the lens of the eye of medical staff who assist in diagnostic CT scans	Heliyon	7(1)	e06063	2021
Kawauchi S, Chida K, Moritake T, Hamada Y, Tsuruta W	Radioprotection of eye lens using protective material in neuro cone-beam computed tomography: Estimation of dose reduction rate and image quality	Physica Medica	82	192-199	2021

Nakagami K, Moritake T, Nagamoto K, Morota K, Matsuzaki S, Kuriyama T, Kunugita N	Strategy to Reduce the Collective Equivalent Dose for the Lens of the Physician’s Eye Using Short Radiation Protection Curtains to Prevent Cataracts	Diagnostics (Basel)	11(8)	1415	2021
Matsuzaki S, Moritake T, Morota K, Nagamoto K, Nakagami K, Kuriyama T, Kunugita N	Development and assessment of an educational application for the proper use of ceiling-suspended radiation shielding screens in angiography rooms using augmented reality technology	European Journal of Radiology	143	109925	2021
盛武 敬	医療従事者の水晶体被ばく防護	Rad Fan	19(10)	53-57	2021
茂呂田 孝一	DICOM-RDSRの活用が放射線安全管理にもたらす影響	Rad Fan	19(10)	65-68	2021
Nagamoto K, Moritake T, Nakagami K, Morota K, Matsuzaki S, Kunugita N	A multicenter study of radiation doses to the eye lenses of clinical physicians performing radiology procedures in Japan	Journal of Occupational Health	63	e12305	2021
茂呂田 孝一	被ばく低減システム・放射線防護機器はコレがベスト！	Rad Fan	20(8)	65-68	2022
中上晃一	最終結論！放射線防護眼鏡の使い方と選び方	Rad Fan	22(10)	71-74	2022
Matsuzaki S, Moritake T, Sun L, Morota K, Nagamoto K, Nakagami K, Kuriyama T, Hitomi G, Kajiki S, Kunugita N	The Effect of Pre-Operative Verbal Confirmation for Interventional Radiology Physicians on Their Use of Personal Dosimeters and Personal Protective Equipment	International Journal of Environmental Research and Public Health	19(24)	16825	2022
Sun L, Inaba Y, Kanzaki N, Bekal M, Chida K, Moritake T	Identification of Potential Biomarkers of Radiation Exposure in Blood Cells by Capillary Electrophoresis Time-of-Flight Mass Spectrometry.	Molecular Endocrinology and Metabolism	21	812	2020
Mime Endo, Yoshihiro Haga, Masahiro Sota, Akiko Tanaka, Kazuki Otomo, Yuuki Murabayashi, Mitsuya Abe, Yuji Kaga, Yohei Inaba, Msatoshi Suzuki, Taiichiro Meguro and Koichi Chida.	Evaluation of novel X-ray protective eyewear in reducing the eye dose to interventional radiology physicians.	Journal of Radiation Research	62（3）	414-419	2021

曽田　真宏，　芳賀　喜裕，　荒井　剛，　鈴木　新一，　加賀　勇治，　阿部　美津也，　千田　浩一	X線防護壁付掛布による心臓IVR術者の被ばく低減に関する基礎的検討	臨床放射線	66(5)	501-507	2021
山田歩実，大友一輝，佐藤文貴，芳賀喜裕，曽田真宏，加賀勇治，阿部美津也，加藤砂江子,稲葉洋平，千田浩一	心臓カテーテルインターベンションに携わる看護師の水晶体被ばく－水晶体線量の左右差に関する比較検討－	日本放射線安全管理学会誌	20（2）	52-60	2021
Mamoru Kato, Koichi Chida, Masato Munehisa, Tadaya Sato, Yohei Inaba, Masatoshi Suzuki, and Masayuki Zuguchi	Non-lead protective aprons for the protection of interventional radiology physicians from radiation exposure in clinical settings: An initial study.	Diagnostics	11	1613	2021
加藤　聖規、藤沢　昌輝、服部　兼進、山田　歩実，芳賀　喜裕，加賀勇治，阿部　美津也，稲葉　洋平，千田　浩一	PCI術者の水晶体線量のリアルタイム測定に関する初期検討. 日本放射線安全管理学会誌	日本放射線安全管理学会誌	22（1）	印刷中	2023
藤沢昌輝，芳賀善裕，曽田真宏，加賀勇治，阿部美津也，稲葉洋平，鈴木正敏，細井義夫，千田浩一.	PET検査に従事する看護師の水晶体被ばく線量に関する基礎検討.	臨床放射線	67（10）	1075-1083	2022
Chida K.	What are useful methods to reduce occupational radiation exposure among radiological medical workers, especially for interventional radiology personnel?	Radiol Phys Technol.	15（2）	101-115	2022
Hattori K, Inaba Y, Kato T, Fujisawa M, Yasuno H, Yamada A, Haga Y, Suzuki M, Zuguchi M, Chida K.	Evaluation of a New Real-Time Dosimeter Sensor for Interventional Radiology Staff.	Sensors	23（1）	512	2023
初坂奈津子.	東電福島第一原発緊急作業従事者に対する白内障調査	金沢医科大学雑誌	45（1）	14-15	2020
初坂奈津子，宮下久範，喜多村紘子，大久保利晃，佐々木洋.	「東電福島第一原発緊急作業従事者に対する疫学的研究」白内障全国調査について	日本白内障学会誌	32（1）	49-51	2020

Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T.	Development of an application to visualize the spread of scattered radiation in radiography using augmented reality.	J. Radiol. Prot	40	1299-1310	2020
Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T.	Development of scattered radiation distribution visualization system using WebAR.	Journal of Physics	Conference Series.	1943	2021
Fujibuchi T	Radiation protection education using virtual reality by visualization of scatter distribution in radiological examination	Journal of Radiological Protection	41（4）	S317	2021
Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T.	Development and evaluation of the effectiveness of educational material for radiological protection that uses augmented reality and virtual reality to visualise the behaviour of scattered radiation.	J. Radiol. Prot	42	011506	2022
Kosuke Matsubara, Yasutaka Takei, Hiroshige Mori, Ikuo Kobayashi, Kimiya Noto, Takayuki Igarashi, Shoichi Suzuki, Keiichi Akahane.	A multicenter study of radiation doses to the eye lenses of medical staff performing non-vascular imaging and interventional radiology procedures in Japan.	Physica Medica	74	83-91	2020