

インターベンショナル・ラジオロジーにおける
術者（循環器内科，脳神経外科，放射線科）の
水晶体被ばく線量の検討

名古屋大学大学院医学系研究科
総合保健学専攻

大澤 充晴

2022 年度学位申請論文

インターベンショナル・ラジオロジーにおける
術者（循環器内科，脳神経外科，放射線科）の
水晶体被ばく線量の検討

名古屋大学大学院医学系研究科

総合保健学専攻

（小山 修司 准教授）

大澤 充晴

インターベンショナル・ラジオロジーにおける術者
(循環器内科, 脳神経外科, 放射線科)の水晶体被ばく線量の検討

総合保健学専攻 医療技術学コース

学生番号:582012007 氏名:大澤充晴

指導教員:小山修司

要旨

【背景】

国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection, ICRP) 118th 勧告では, 白内障発症の閾値が 8Gy から 0.5Gy に大幅に引き下げられた. 放射線業務従事者の水晶体等価線量限度については, その後, 各国において見直しが行われている. インターベンショナル・ラジオロジー (Interventional Radiology, IR) は, 手術に比べて侵襲性が低く, 広く普及しているが, 患者だけでなく, 術者を含むスタッフへの被ばくも懸念されている. また現状では, 正確な被ばく線量が不明で, 放射線防護の啓蒙に役立つ資料がないのが問題である.

【目的】

放射線防護の啓蒙に役立たせるため, 循環器内科医, 脳神経外科医, 放射線科医を想定した術者の水晶体近傍の線量を人体ファントムによる測定により, 各診療科の主な手技ごとに術者の水晶体線量を算出することを目的とした.

【方法】

今回の測定では人体ファントムに OSL 線量計 (nanoDot) を貼付し, 防護メガネ(以下, メガネ)や天井吊下げ式防護板(以下, 防護板), 放射線防護キャビン(以下, キャビン)といった防護具の有無でそれぞれ測定・評価した. なお nanoDot は, メガネの左右レンズの外側 (lateral side) と内側 (medial side) の各々の外面 (outside) と内面 (inside) の計 8 カ所(顔の中央と側面), 頸部の 1 カ所, 合計 9 カ所に取り付けた.

【結果・考察】

メガネ右外側 (lateral side) の内面 (inside) の測定値が外面 (outside) よりも大きく, メガネを着用していても右外側の内面は防護されていないことがわかった. これは, 使用したメガネの形状によるものと考えられた. メガネの下側と中央(鼻付近)には人体ファントムとの間に隙間があり, この隙間から散乱線が入射したと考えられた. また左目の左外面は右目の右外面に比べて一桁水晶体線量が大きく, 左目に放射線が集中していることがわかった. これは, 左目が X 線管や患者の散乱体に近接しているためだと考えられた. さらにメガネの左目外側と頸部の線量を比較した Haga らの報告では, 頸部の線量は左目外側の約 1.5 倍であった. しかし, 本研究において, 経皮的冠動脈インターベンション (percutaneous coronary intervention, PCI-IR), 心臓電気生理インターベンション (electrophysiology intervention, EP-IR), 脳神経外科インターベンション (neurosurgical intervention, Neuro-IR), 放射線科イ

インターベンション (radiology intervention, Rad-IR) を想定した頸部の測定値は、それぞれ左目外側の 1.1, 1.4, 1.7, 1.7 倍であることが判明した。これは、プロトコルによって付加フィルタを含む透視・撮影条件が異なるため、放射線の線質など様々な要因の違いが影響しているものと推察された。したがって、各診療科で手技ごとに使用する透視・撮影条件が異なるため、本研究のように個々の条件ごとに水晶体線量を測定することが理想的である。

EP-IR では、キャビンを使用した場合、第一助手の水晶体線量が術者の 2 倍以上となった。これは、多重散乱効果によるものと考えられた。キャビンを含む防護具を使用した場合、散乱線は防護具の周囲に散乱するため、防護具から少し離れた第一助手は、防護具に近い術者に比べて被ばく線量が大きくなる可能性がある。したがって、術者はキャビン使用時に鉛エプロンやメガネなどの防護具を使用する必要はないが、防護具に隣接する第一助手は、被ばく量は非常に少ないが、術者の 2 倍以上の放射線量を受けることを念頭に置いて防護具の使用を検討する必要がある。Neuro-IR では、動静脈奇形・動静脈婁 (arteriovenous malformation・arteriovenous fistula, AVM・AVF) は他の Neuro-IR に比べ、2 倍以上の水晶体線量であった。この理由は digital subtraction angiography (DSA) 回数、透視時間が他の手技に比べて多かったためと考えた。そのため、AVM・AVF 治療時は特にメガネの使用に加えて、防護板などの防護具の使用が必須である。また cone-beam computed tomography (CBCT) は DSA よりも被ばく量が多く、撮影中に術者が装置から退避できない場合、術者の水晶体線量は約 2 倍となる。したがって、CBCT 撮影中、術者は装置から退避することが望ましい。特に脳血管内治療後に脳出血の有無を確認するための CBCT 撮影は、装置の最大視野で行われることが多い。そのため、照射面積が大きく、散乱線が多く発生するので、撮影前に術者や他のスタッフが装置から十分に離れることが必要と考えられた。

Rad-IR の経カテーテル動脈化学塞栓術 (transcatheter arterial chemo-embolization, TACE) については、CBCT 撮影時に術者を装置から退避させた場合、1 例あたりの術者の水晶体線量は、他の診療科の IR 手技よりも小さかった。放射線科では、術者が装置から離れられるかどうかで、回転軌道の異なる 2 種類の CBCT モード (close モードと open モード) を使い分けている。全ての測定点において、open モードは close モードに比べ、術者の水晶体線量を約 10~40%低減することができた。TACE では、造影剤を手動で注入する CBCT 撮影時など、術者が装置から距離をとることができない場合は、放射線量が高くなる可能性がある。術者の水晶体線量を効果的に低減するためには、メガネや防護板の使用に加えて、CBCT の撮影モードも考慮する必要があると考えられた。

防護板の配置の検討では、術者の水晶体の高さが 150 cm のとき、防護板上端の高さが 165 cm の場合は、155 cm の場合に比べて被ばく線量が約 80~90%低減した。これは、上方からの散乱線の影響によるものと考えられた。したがって、上方からの散乱線の影響を低減するためには、防護板上端が術者の身長よりも高くなるように配置することが望ましい。しかし、術者は上半身だけに集中し、下半身を疎かにするようなことがあってはならない。そこで、L

字型のプロテクターやベッドの下に取り付ける防護カーテンなどを併用することで全身を防護し、被ばく線量を減らすことが推奨される。術者と防護板との距離が 20 cm の場合は、30 cm の場合に比べて被ばく線量が約 70～80%低減した。これは EP-IR の第一助手が術者より線量が大きかった理由でもあり、散乱線の多重散乱が原因であると考えられた。放射線防護のために、できるだけ術者の近くに防護板を使用することが必要である。防護板の長辺方向角度については、床に対して水平方向は垂直方向よりも被ばく線量が約 80～90%低減した。これは、防護板を水平方向に配置した方が、側面からの散乱線を防ぐことができたためと考えられた。防護板の角度を変えられる場合は、横からの散乱線を防ぐために、防護板を水平にして使用することが推奨される。防護板とベッドの距離が 0 cm の場合は、防護板とベッドからの距離が 20 cm の場合に比べて、被ばく線量が約 80～90%減少した。これは、散乱線がベッドと防護板の間の隙間から入射するためと考えられた。したがって、ベッドと防護板の間の隙間をできるだけ小さくし、患者からの散乱線をカットできるように防護板を配置することが必要である。

【結語】

各診療科の主な手技ごとに術者の水晶体線量が異なることがわかった。診療科によって使用するプロトコルの透視条件や撮影条件が異なっており、透視と撮影の比率も異なるため、本研究のように診療科ごとに水晶体線量を測定する必要があると考えられた。また、各種防護具の防護効果の違いや防護板の適切な使用方法を明らかにした本研究は、術者をはじめ、放射線業務従事者の水晶体線量の低減に貢献できるものと考えられた。

Examination of lens exposure doses of cardiologists, neurosurgeons, and radiologists in interventional radiology

Program in Radiological and Medical Laboratory Sciences

Mitsuharu Osawa

Academic advisor: Shuji Koyama

Summary

Background

The International Commission on Radiological Protection (ICRP) 118th Recommendation significantly lowered the threshold for cataract incidence from 8Gy to 0.5Gy. The lens equivalent dose limits for radiation workers have been revised in various countries. Interventional radiology (IR) is less invasive than surgery and is widely used, but there are concerns about radiation exposure not only to the patient but also to the staff, including the operator.

Purpose

The purpose of our study was to measure the dose near the operator's lens using a human phantom, assuming a cardiologist, neurosurgeon, and radiologist, to calculate the operator's lens dose for the main procedures in each department, and to help manage the operator's lens dose.

Methods

In this measurement, OSL dosimeters (nanoDot) were attached to the human phantom, and the results were measured and evaluated with and without protective equipment such as protective goggles (glasses), ceiling-suspended protective board (protective plate), and radiation protection cabin (cabin), respectively. The nanoDot was attached to the lateral side and medial side of the left and right lenses of the spectacles at eight locations (the center and sides of the face) and one location on the neck, for a total of nine locations.

Results and Discussion

Measurements of the inside of the right eye spectacles were larger than those of the outside of the spectacles, indicating that the inside of the right outer eye was not protected even when the spectacles were worn. This was thought to be due to the shape of the spectacles used. There is a gap between the human phantom and the bottom and center (around the nose) of the spectacles, and scattered rays were thought to have entered through this gap. The left outer lens of the left eye had an order of magnitude higher lens dose than the right outer lens of the right eye, indicating that radiation was concentrated in the left eye. This was thought to be due to the proximity of the left eye to scatterers such as X-ray tubes and patients. Furthermore, in a report by Haga et al., which compared the dose to the outer left eye and the neck of a spectacle, the dose to the neck was approximately 1.5 times greater than that to the outer left eye. However, in the present study, the

neck dose measured in the cardiovascular (ischemia), cardiovascular (electrophysiology), neurosurgery, and radiology departments was found to be 1.1, 1.4, 1.7, and 1.7 times that of the outer left eye, respectively. This was thought to be due to differences in fluoroscopy and radiography conditions, including additional filters, depending on the protocol, as well as differences in various factors such as radiation quality. Therefore, since the fluoroscopic and radiographic conditions used for each procedure differ in each department, it is ideal to measure the lens dose for each individual condition as in this study.

In EP-IR, the first assistant's lens dose was more than twice that of the operator when the cabin was used. This was thought to be due to the multiple scattering effect. When a protective device including a cabin is used, the scattered rays are scattered around the protective device, and the first assistant who is a short distance away from the protective device may have a larger exposure dose than the operator who is close to the protective device. Therefore, the operator does not need to use protective equipment such as a lead apron or glasses when using the cabin, but the first assistant who is adjacent to the protective equipment should consider the use of protective equipment, bearing in mind that the radiation dose to the first assistant is more than twice that of the operator, although the exposure dose is very small. AVM • AVF was more than twice the lens dose compared to other Neuro-IR procedures, possibly because the number of DSA and fluoroscopy time were higher than for other procedures. Therefore, the use of protective equipment such as protective plates is essential during AVM • AVF treatment, especially in addition to the use of glasses. CBCT has a higher exposure dose than DSA, and if the operator does not evacuate during imaging, the operator's lens dose is approximately twice that of DSA. Therefore, the operator should leave the room during CBCT. In particular, CBCT imaging to confirm the presence of cerebral hemorrhage after endovascular treatment is often performed at the maximum field of view of the device. Therefore, the radiated area is large and scattered radiation is frequently generated, therefore it is necessary for the operator and other staff members to leave the room well before imaging.

For Rad-IR TACE, the operator's lens dose per case was smaller than that of IR procedures in other departments when the operator was evacuated during CBCT imaging. The radiology department uses two different CBCT modes (close mode and open mode) with different rotation trajectories, depending on whether the operator can leave the device or not. At all measurement points, the open mode reduced the operator's lens dose by approximately 10-40% compared to the closed mode, which may result in higher radiation doses when the operator cannot maintain a distance from the device, such as during CBCT imaging when the contrast agent is injected manually. To effectively reduce the operator's lens dose, the mode of CBCT imaging should be considered in addition to the use of glasses and protective plates.

In the study of the placement of the protective plate, when the height of the operator's lens was

150 cm, the height of the top of the protective plate, 165 cm, reduced the exposure dose by approximately 80-90% compared to 155 cm. This was thought to be due to the effect of upward scattered rays. Therefore, to reduce the effect of upward scattered rays, it is desirable to place the upper edge of the protective plate higher than the height of the operator. However, the operator should not concentrate only on the upper body and neglect the lower body. Therefore, it is recommended that an L-shaped protector or a protective curtain attached under the bed be used to protect the entire body and reduce the radiation dose. The distance between the operator and the protective plate, 20 cm, reduced the dose by about 70-80% compared to 30 cm. This is also the reason why the first assistant in EP-IR had a higher dose than the operator, which may be due to multiple scattering of scattered rays. For radiation protection, it is necessary to use a protective plate as close to the operator as possible. The longitudinal angle of the protective plate was about 80% to 90% lower in the horizontal direction than in the vertical direction. This was considered to be due to the fact that the horizontal placement of the protective plate prevented scattered radiation from the sides of the plate. If the angle of the protective plate can be changed, it is recommended that the board be used in a horizontal position to prevent scattered rays from the side. When the distance between the protective plate and the bed was set to 0 cm, the exposure dose was reduced by about 80-90% compared to the distance between the protective plate and the bed, which was 20 cm. This was thought to be due to the fact that the scattered rays enter the bed through the gap between the bed and the protective plate. Therefore, it is necessary to make the gap between the bed and the protective plate as small as possible and to position the protective plate in such a way that scattered rays from the patient can be cut off.

Conclusion

It was found that the operator's lens dose was different for each of the major procedures in each department. Because the fluoroscopic and radiographic conditions of the protocols used by different departments differ, and the ratio of fluoroscopy to radiography also differs, it is necessary to measure the lens dose for each department as in this study. This study, which clarified the difference in the protective effect of various types of protective equipment and the appropriate use of protective plates, was thought to contribute to the reduction of lens doses for operators and other radiation workers.

目次

第1章 序論	1
第2章 方法	
2.1. 使用機材	3
2.2. 術者の水晶体線量の評価.....	3
2.2.a. PCI-IR 術者.....	3
2.2.b. EP-IR 術者.....	5
2.2.c. Neuro-IR 術者.....	8
2.2.d. Rad-IR 術者.....	8
2.3. 防護板の配置の評価.....	9
第3章 結果	
3.1 術者の水晶体線量の評価.....	11
3.1.a. PCI-IR 術者	11
3.1.b. EP-IR 術者.....	14
3.1.c. Neuro-IR 術者.....	16
3.1.d. Rad-IR 術者.....	17
3.2. 防護板の配置の評価.....	19
第4章 考察	21
第5章 結論	23
参考文献.....	24
研究業績.....	26
謝辞.....	27

第1章 序論

インターベンショナル・ラジオロジー (interventional radiology, IR) は、外科的手術に比べて侵襲性が低いため、広く用いられている¹⁾。しかし、IRの主な欠点は、患者およびスタッフへの高い放射線被ばくである²⁻⁶⁾。2012年の国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection, ICRP) の Publication 118では、白内障発症の閾値を8Gyから0.5Gyに下げ、放射線業務従事者の水晶体の等価線量限度を20 mSv/年 (5年平均) に制限し、いかなる年も50 mSvを超えないように勧告した⁷⁾。白内障の閾値が変更になった理由として、主に5つが挙げられる⁷⁾。1つ目は新しい眼科検査評価方法が開発され、白内障の検出率が向上したこと、2つ目は疫学的な評価方法が向上したこと、3つ目は放射線白内障の定義は原爆被爆者によるデータが基になっており、以前は被ばく後、2~3年で発症するとされていたが、最近の知見で潜伏期間が30年以上であることが判明したこと、4つ目は放射線の遅延性の影響として加齢性白内障 (皮質白内障) の増加が起こることが判明したこと、5つ目は水晶体に対する放射線影響の新たな生物学的事実の発見があったこと (全ての水晶体の白濁が視覚障害性白内障へ進行すること) である。さらに、2013年のICRPの Publication 120⁸⁾において、心臓領域のインターベンションは増加傾向にあり、患者の医療被ばくの中でも大きな割合を占めているとし、複雑な経皮的冠動脈インターベンション (percutaneous coronary intervention, PCI-IR) は患者の被ばくの要因となる可能性があるとしている。PCI-IRや心臓電気生理介入術 (electrophysiology intervention, EP-IR) では、放射線量 (臓器線量と実効線量) が高くなり、放射線障害や発がんのリスクが高まる可能性がある。さらに、これらの高放射線量手技では、スタッフが高放射線量に曝される可能性がある⁸⁻¹⁰⁾。したがって、水晶体線量の低減と、術者や他のスタッフの水晶体を放射線被ばくから防護することが必要になってきている。近年、ICRPの勧告に従った水晶体線量の測定と管理についていくつかの研究が報告されている。人体ファントムを用いた測定や、実際の臨床現場でのスタッフによる測定など、1つの診療科での水晶体線量の測定に関する研究が多く発表されている。診療科ごとに透視・撮影条件が異なり、透視線量と撮影線量の内訳が異なるため、各診療科のIR医の水晶体線量を同じシステムで測定し、把握することが重要である。線量計については、水晶体の3 mm線量当量を直接評価できる線量計 (以下、水晶体用線量計) を用いた測定報告^{5, 6)}があるが、検出限界が0.1 mSvであり、防護具を使用した場合の被ばく量測定に多くの時間が必要であった。一方で、光刺激ルミネッセンス (optically stimulated luminescence, OSL) 線量計である nanoDot^{11, 12)}は、検出限界が10 µGyであり、水晶体用線量計を用いる場合と比較して、X線の照射時間を短くできるので、比較的容易に術者の水晶体線量を測定することが可能である。防護具については、防護メガネや天吊り防護板の使用により、スタッフの被ばく量を低減できることが報告されている¹³⁾。しかし、その適切な配置に関する詳細な報告はない。また心臓電気生理手技においては放射線防護キャビンのような防護具もあり、それらの防護具を使用することにより、術者は被ばく線量増加の心配がなく、放射線防護衣による発汗、重さによる疲労も軽減できる¹⁴⁾。

本研究では、循環器内科、脳神経外科、放射線科のIR医の水晶体近傍の被ばく線量を評価

することを目的とした。人体ファントムを用いて水晶体付近に nanoDot を貼付し、防護具着用時と非着用時における線量を測定・評価した。また、防護板の配置を変えて術者の水晶体近傍での線量(以下、水晶体線量)を測定し、最適な配置方法を決定した。

第2章 方法

2-1.使用機材

PCI-IR には, flat panel detector (FPD) 搭載のバイプレーン血管撮影装置 Azurion 7 B12/12 (PHILIPS, Netherlands) を使用した. EP-IR には, FPD 搭載の Artis Zee BA (Siemens Healthineers, Germany) バイプレーン血管撮影装置を使用した. 撮影は digital angiography (DA) で 7.5 frames/sec, 透視は 3 pulses/sec, field of view (FOV) サイズは 32 cm に設定した. 脳神経外科インターベンション (neurosurgical intervention, Neuro-IR) には, FPD 搭載の Artis Q twin (Siemens Healthineers, Germany) バイプレーン血管撮影装置を使用した. 撮影は digital subtraction angiography (DSA) 4 frames/sec, 透視は 7.5 pulses/sec, FOV サイズは 32 cm と 16 cm を使用した. cone-beam computed tomography (CBCT) の FOV サイズはそれぞれ 48 cm と 22 cm を用いた.

放射線科インターベンション (radiology intervention, Rad-IR) には, FPD 搭載のシングルプレーン血管撮影装置 Azurion 7 C20 with Flexarm (PHILIPS, Netherlands) を使用した. 撮影は DSA で 2 frames/sec, 透視は 3.75 pulses/sec, FOV サイズは 22 cm を用いた.

OSL 線量計は nanoDot(長瀬ランダウア, 日本), 読み取り装置は micro star(長瀬ランダウア, 日本)を使用した. 測定条件はすべて nanoDot の検出下限値を下回らないように設定したが, 本研究では最小値を考慮して100分に統一した. 被写体として, 300 × 300 × 10 mm の poly methyl methacrylate: PMMA(京都科学, 日本)を 20 枚用いた. 防護具については, 防護メガネは 0.07 mmPb のパノラマシールド(以下メガネ, 東レ, 日本), 天吊り防護板は 0.5 mmPb のマービック X 線防護板 (MAVIG, Germany), 2 mmPb の放射線防護キャビン(以下キャビン, CathPax LAMER PAX, France)を使用した.

2-2.術者の水晶体線量の評価

a) PCI-IR 術者

術者を想定した位置にメガネをかけた人体ファントムを置き, 防護板を使用した場合と防護板を使用しない場合の測定をそれぞれ行った. メガネの左右レンズの外側 (lateral side) と内側 (medial side) の各々の外面 (outside) と内面 (inside) の計 8 カ所と頸部 1 カ所の合計 9 カ所に nanoDot を取り付けた. (Fig. 1).

レンズ内側 (medical side) の外面 (outside)、内面 (inside) の被ばく線量は、各々左右の平均値とした. また, 愛知医科大学病院 (以下当院)のルーチン角度で nanoDot の検出下限値を下回らないように, 透視と撮影を正面と側面の 2 方向で行い (Table 1), その積算値を測定した. 透視, 撮影それぞれ 3 回測定し, その平均値を算出した. 各診療科での測定値を比較する際, 平均値を透視時間 100 分あたりの値に換算し, 各測定点での傾向を評価した.

一方, PCI-IR の比較では, 術者の水晶体線量を算出しやすくするために, 透視は 10 分あたり, DA は 1 分あたりの値に換算した. これらの測定値から 1 症例あたりの透視時間である, 冠動脈造

影 (coronary angiography, CAG) 9 分, 経皮的冠動脈インターベンション (percutaneous coronary intervention, PCI) 40 分および 1 回あたりの撮影時間 (7.3 秒) から, CAG および PCI 各症例の術者の水晶体線量推定値を算出した. nanoDot の検出下限値を下回らないように測定を 3 回行い, その平均値は不確かさが小さいと判断した.

CAG 1 症例あたりの術者の水晶体線量を算出するための計算式は, 以下の合計である.

$$DA_{9\text{directions}} + \text{Fluoro}_{9\text{min}} \dots (1)$$

$DA_{9\text{directions}}$ は各方向の被ばく量の合計 (1 方向: 7.3 秒×9 方向), $\text{Fluoro}_{9\text{min}}$ は 9 分間の透視線量を示す.

PCI 1 症例あたりの術者の水晶体線量を算出するための計算式は, 以下の合計である.

$$DA_{36\text{times}} + \text{Fluoro}_{40\text{min}} \dots (2)$$

$DA_{36\text{times}}$ は 9 方向の被ばく量の平均値の合計×36 回, $\text{Fluoro}_{40\text{min}}$ は 40 分間の透視線量を示す.

測定値は mGy で表示されるので, mSv に換算するため, 放射線加重係数として 1 を乗じた. 防護具の線量低減率を算出し, 各防護具の防護効果を比較した. 線量低減率は, (防護具外の測定値 - 防護具内の測定値) / 防護具外の測定値 × 100 で算出した. また, 頸部と水晶体近傍 (左外側) の測定値を比較した.

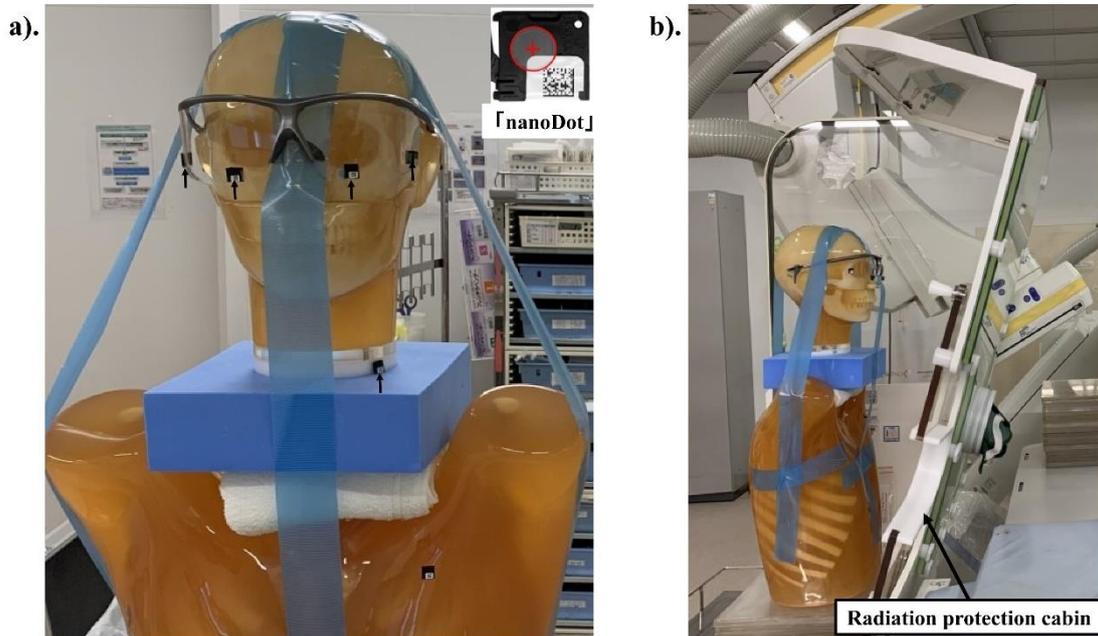


Figure 1. a) layout of dosimeters, b) radiation protection cabin

A small arrow in a) indicates nanoDot, and a large arrow in b) indicates a protection cabin.

Table 1. Routine angles used at our facility (percutaneous coronary intervention, PCI-IR)

CAG angle (left coronary artery)				
RAO30°CRA30°	RAO30°CAU30°	CRA30°	LAO40°CRA30°	LAO60°CAU30°
CAG angle (right coronary artery)				
RAO30°	LAO30°	RAO30°CAU30°	LAO40°CRA30°	

There are five directions for the left coronary artery and four directions for the right coronary artery.

CAG, coronary angiography; RAO, right anterior oblique; LAO, left anterior oblique; CRA, cranial; CAU, caudal

b) EP-IR 術者

a)の PCI-IR 術者と同じ方法で, 肺静脈隔離術 (pulmonary vein isolation: PVI) と非肺静脈隔離術 (none of pulmonary vein isolation: non-PVI) の術者の水晶体線量推定値を算出した. 測定角度は, 当院で PVI, 非 PVI を行う際に使用している RAO30°, LAO45°で行った.

PVI 1 症例あたりの術者の水晶体線量を算出するための計算式は, 以下の合計である.

$$DA_{6\text{times}} + \text{Fluoro}_{36\text{min}} \dots (3)$$

$DA_{6\text{times}}$ は 2 方向の被ばく量 (0.67 秒) の平均値×6 回の総和, $\text{Fluoro}_{36\text{min}}$ は 36 分間の透視線量を示す.

非 PVI 症例あたりの術者の水晶体線量を算出するための計算式は, 以下の合計である.

$$DA_{9\text{times}} + \text{Fluoro}_{30\text{min}} \dots (4)$$

$DA_{9\text{times}}$ は 2 方向の被ばく量 (0.67 秒) の平均値×9 回分の合計, $\text{Fluoro}_{30\text{min}}$ は 30 分間の透視線量を示す.

当院では, EP-IR 時にキャビンを使用することがあるため, 防護板に加えて, キャビンを使用した場合と使用しない場合の術者の水晶体線量を測定した (Fig.1). また, 術者ととも, 第一助手を想定して水晶体線量を測定した (Fig.2). 防護具なしで水晶体線量を測定した後, 各防護具を使用した場合の水晶体線量を測定した. その後, それらの値を防護具なしの水晶体線量で正規化し, 防護具の効果を比較検討した.

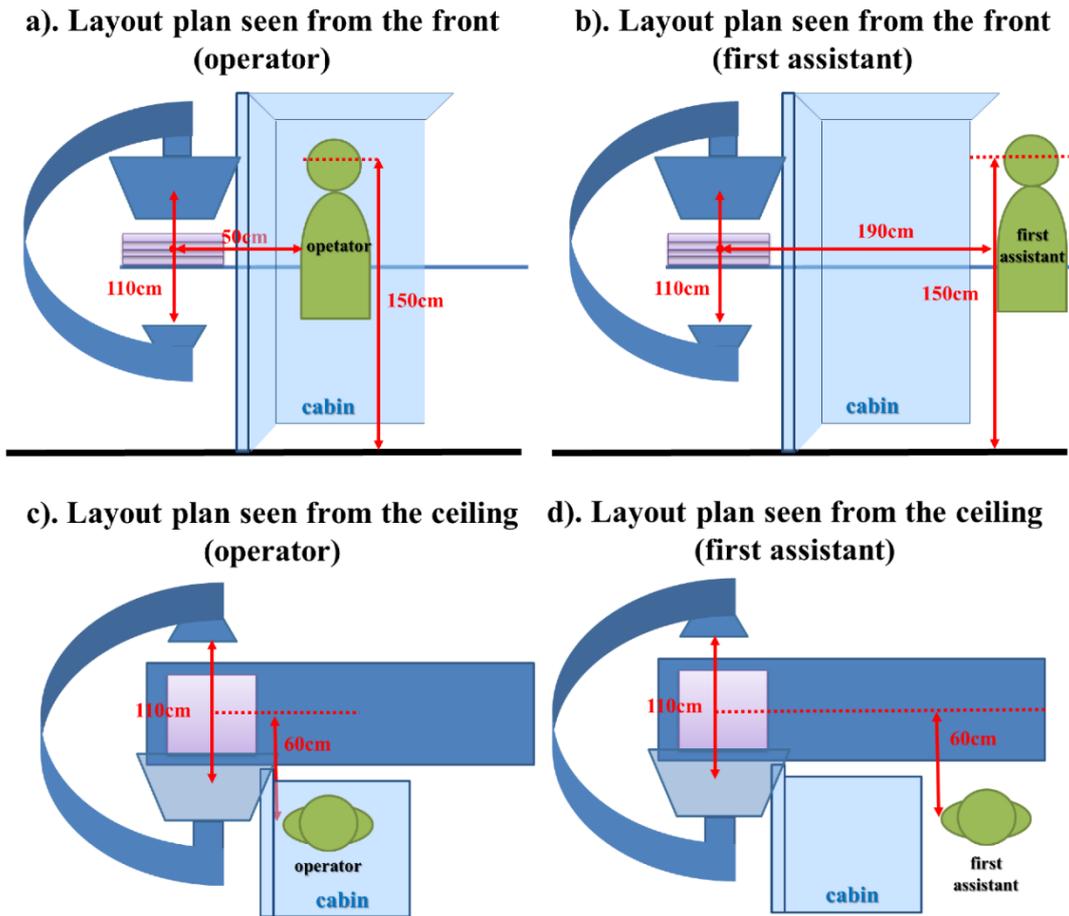


Figure 2. Layout of the cabin when in use electrophysiology intervention (EP-IR).
 a, c) Operator, b, d) First assistant. The configuration is for EP-IR

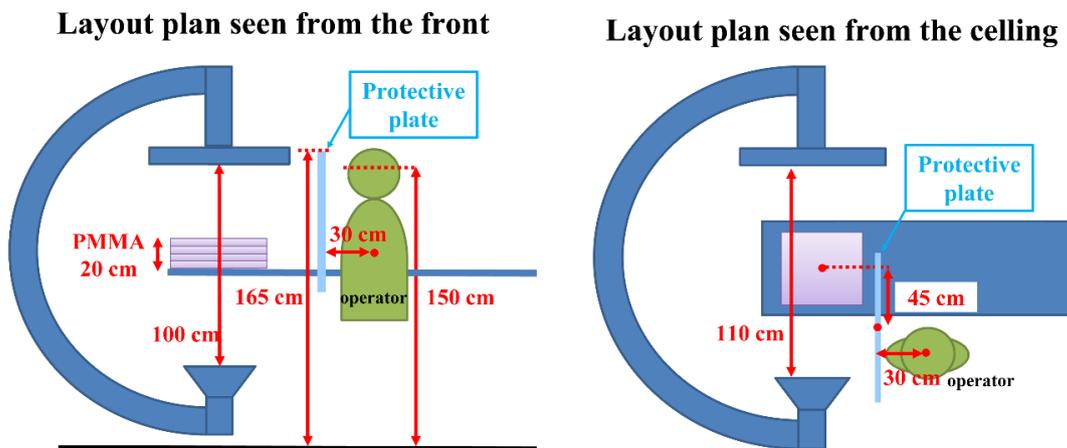


Figure 3. Arrangement of IR neurosurgeons during lens dosimetry. The figure refers to neurosurgical intervention (Neuro-IR) procedures.

Table 2. Number of radiography and fluoroscopy time in each clinical department

a) PCI-IR

	No. of radiography (DA)	Fluoroscopic time (min)
Coronary angiography	9	9
Percutaneous coronary intervention	36	40

b) EP-IR

	No. of radiography (DA)	Fluoroscopic time (min)
Pulmonary vein isolation	6	36
Non-pulmonary vein isolation	9	30

c) Neuro-IR

	No. of radiography			Fluoroscopic time (min)
	One shot	DSA	CBCT	
Cerebral angiography	0	8	1	9.7
Coil embolization	7	21	3	38.8
Coil embolization (stent assisted)	13	20	4	38.8
Carotid artery stenting	4	9	1	21.6
Cerebral vascular thrombus retrieval	4	12	1	24.0
arteriovenous malformation • arteriovenous fistula	4	37	2	53.7

d) Rad-IR

	No. of radiography		Fluoroscopic time (min)
	DSA	CBCT	
Transcatheter arterial chemoembolization	12	6	35.6

DA, digital angiography; DSA, digital subtraction angiography; CBCT, cone-beam computed tomography; PCI-IR, percutaneous coronary intervention; EP-IR, electrophysiology intervention; Neuro-IR, neurosurgical intervention; Rad-IR, radiology intervention

c) Neuro-IR 術者

a)の PCI-IR 術者と同じ方法で、6 つの手技「脳血管撮影, コイル塞栓術, コイル塞栓術(ステントアシスト), 頸動脈ステント留置術 (carotid artery stenting, CAS), 脳血管血栓回収術, 動静脈奇形・動静脈婁 (arteriovenous malformation・arteriovenous fistula, AVM・AVF) 塞栓術」ごとに、術者の水晶体線量推定値を計算した (Fig. 3). 各手術の撮影回数と透視回数を Table 2 に示す. AVM・AVF は他の術式と比較して、DSA 撮影回数, 透視回数が多い傾向にあった. 尚, 正面像と側面像の2方向で測定した.

d) Rad-IR 術者

a)の PCI-IR 術者と同じ方法で、経カテーテル動脈化学塞栓術 (transcatheter arterial chemo embolization, TACE) 1 回あたりの術者の水晶体線量を算出した. 測定は正面 0°で行った.

TACE1 症例あたりの術者の水晶体線量を算出するための計算式は、以下の合計である.

$$DSA_{12times} + Fluoro_{35.6min} + CBCT_{6times} \dots (5)$$

$DSA_{12times}$ は DSA 撮影時間 (10.0 秒) ×12 回, $Fluoro_{35.6min}$ は 35.6 分の透視線量, $CBCT_{6times}$ は CBCT 線量×6 回を示す.

放射線科では、術者が装置から離れられるかどうかで回転軌道の異なる2種類の CBCT (close モードと open モード) を使用している (Fig. 4). それぞれのモードについて、術者の水晶体線量を測定した.

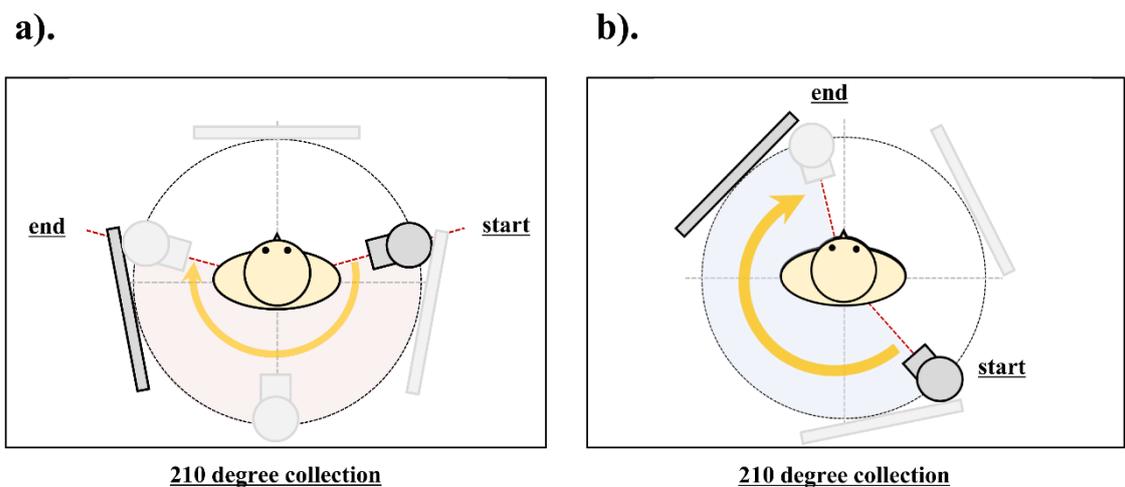
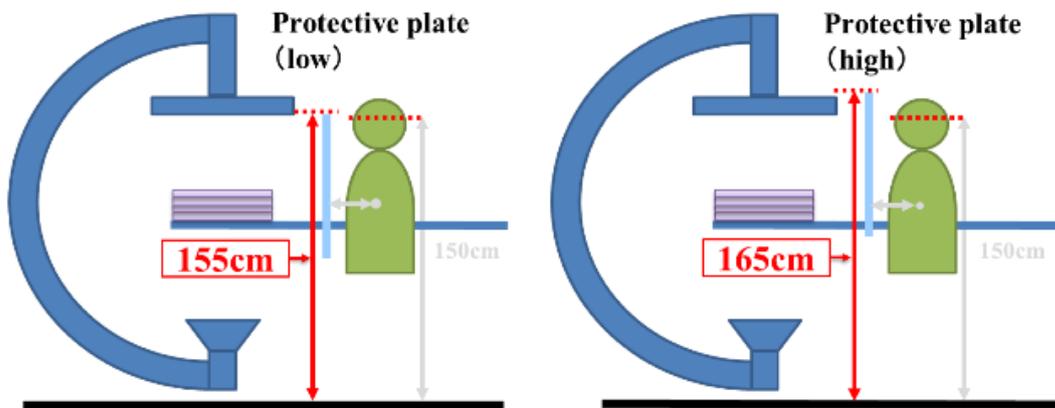


Figure 4. Two cone-beam computed tomography (CBCT) modes with different rotation orbits; a) close mode, b) open mode. The configuration corresponds to radiology intervention (Rad-IR) procedures.

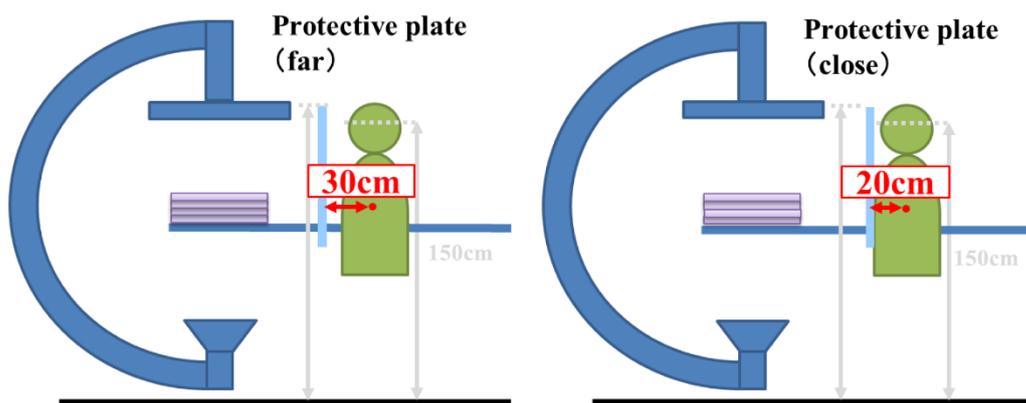
2-3.防護板の配置の評価

防護板の位置を変更した場合の術者の水晶体線量を計算し、防護板の最適な配置を検討した (Fig. 5). 検討したのは、防護板上端の高さ(術者の目の高さを 150 cm と仮定して 155 cm と 165 cm)、術者と防護板の距離 (20 cm と 30 cm)、防護板の角度(垂直と水平)、防護板とベッド間の距離(ベッドより 20 cm と 0 cm)の 4 項目である. 4 つの項目それぞれについて水晶体線量を測定し、比較した.

a). Examination of the height of the protective plate



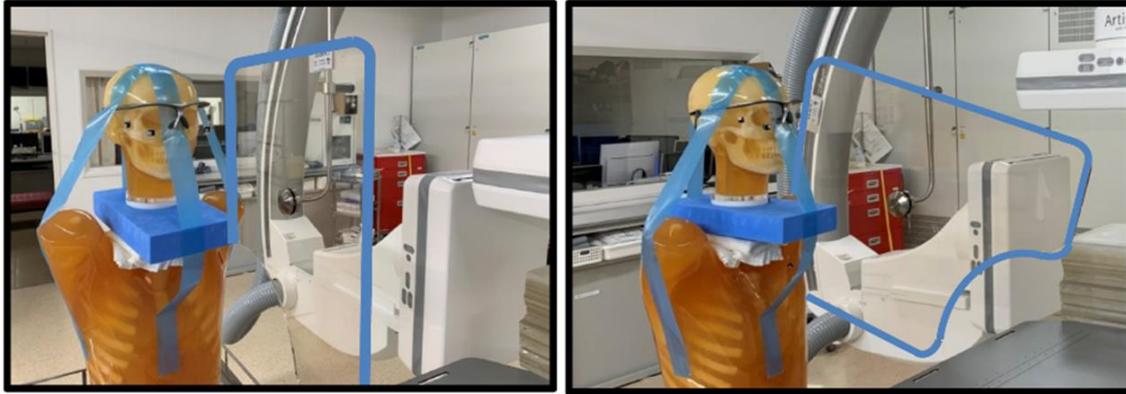
b). Examination of the distance between the protective plate and the operator



c). Examination of the angle of the protective plate

vertical

horizontal



d). Examination of the distance between the protective plate and the bed

**Protective plate
(far)**

**Protective plate
(close)**

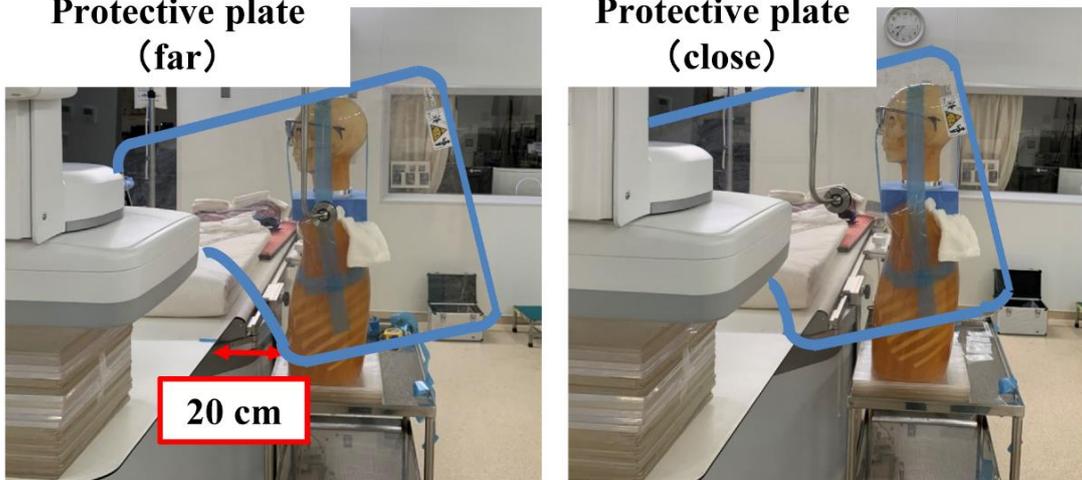


Figure 5. Exposure dose to the lens of the operator following a change in the placement of the protective plate.

(a) Examination of the height of the protective plate, (b) examination of the distance between the operator and protective plate, (c) examination of the angle of the protective plate, and (d) examination of the distance between the protective plate and bed.

第3章 結果

3-1.術者の水晶体線量の評価

a) PCI-IR 術者

各測定点での測定結果を Table 3～5 に示す。Table 3, 4 より、レンズの内面の線量低減率は、レンズの外面に比べ、約 60～80%以上であった。但し、右目の外側 (lateral side) の線量については、レンズ内面 (inside) の測定値はレンズ外面 (outside) の測定値に比べて大きく、メガネをかけても右目の内面は保護されていないことがわかった。また防護板を使用した場合、右レンズ内面の測定値は右レンズ外面の測定値よりも高くなる傾向にあったが、増加率は 332%から 125%に減少した (Table 4)。続いて、左右の線量を比較した (Table 3, 4)。防護板を使用しない場合、左外面の線量は右外面の線量より 1 桁高く、左目に放射線が集中していることがわかる (Table 3)。しかし、防護板を使用した場合、左右の外面線量の差は約 9 倍から 1.5 倍に縮まった (Table 3, 4)。さらに、メガネの左外面と頸部の線量を比較したところ、頸部の線量は防護メガネの左外面の約 1.1 倍であることが確認された (Table 3)。

Table 5 より、防護板を使用した場合、線量低減率は約 90%以上であった。また防護メガネの線量低減率は約 60～80%であり、保護板の使用はメガネよりも効果的であることがわかった。

防護具なし、左外側の防護メガネをかけてのルーチン角度の測定結果を Table 6 に示す。測定値は nanoDot の検出下限値を下回らないようにして、透視は 10 分ごと、撮影は 1 分ごとに換算した。測定値が最も高かったのは LAO 60° Caudal 30°、最も低かったのは RAO 30° Caudal 30°で、透視と撮影の線量差はそれぞれ約 23 倍、約 60 倍であった。CAG は 1 例あたり 0.071 mSv、PCI は 1 例あたり 0.32 mSv であり、ICRP の Publication 118 ⁷⁾が推奨する 20 mSv/年で実施可能な検査はそれぞれ 281 件、62 件であった。なお、実際の臨床では、個人線量計を使用した場合、その検出下限値が 0.1 mSv であり、検出下限値 (CAG の 1 症例あたり 0.071 mSv) を下回り、不確実性が残ることになる。

Table 3. Comparison of exposure dose to the lens at each measurement point (mGy, without protection plate)

a) converted to 100 minutes of fluoroscopy

	Right outside	Right inside	Middle outside	Middle inside	Left outside	Left inside	Neck
PCI-IR	0.310	1.340	2.290	1.040	2.890	1.270	3.230
EP-IR	0.055	0.262	0.380	0.140	0.384	0.185	0.531

b) converted to 10 minutes of DA

	Right outside	Right inside	Middle outside	Middle inside	Left outside	Left inside	Neck
PCI-IR	0.160	1.160	2.085	0.475	2.680	0.89	3.040

PCI-IR, percutaneous coronary intervention; EP-IR, electrophysiology intervention; Neuro-IR, neurosurgical intervention; Rad-IR, radiology intervention

Table 4. Comparison of exposure dose to the lens at each measurement point (mGy, with protection plate)

a) converted to 100 minutes of fluoroscopy

	Right outside	Right inside	Middle outside	Middle inside	Left outside	Left inside	Neck
PCI-IR	0.040	0.050	0.150	0.055	0.060	0.010	0.100
EP-IR	0.013	0.038	0.046	0.037	0.023	0.012	0.071
Neuro-IR	0.020	0.130	0.380	0.050	0.040	0.050	0.160
Rad-IR	0.0140	0.024	0.078	0.015	0.014	0.006	0.070

b) converted to 10 minutes of DA

	Right outside	Right inside	Middle outside	Middle inside	Left outside	Left inside	Neck
PCI-IR	0.060	0.180	0.305	0.075	0.140	0.040	0.260

PCI-IR, percutaneous coronary intervention; EP-IR, electrophysiology intervention; Neuro-IR, neurosurgical intervention; Rad-IR, radiology intervention

Table 5. Dose reduction rate (%) at each measurement point with protection plate

a) fluoroscopy

	Right outside	Right inside	Middle outside	Middle inside	Left outside	Left inside	Neck
PCI-IR	87	96	88	93	97	99	96
EP-IR	76	85	84	85	94	94	87
Neuro-IR	93	84	92	88	93	93	94
Rad-IR	90	95	91	94	98	98	94

b) DA

	Right outside	Right inside	Middle outside	Middle inside	Left outside	Left inside	Neck
PCI-IR	77	84	85	84	95	95	93

PCI-IR, percutaneous coronary intervention; EP-IR, electrophysiology intervention; Neuro-IR, neurosurgical intervention; Rad-IR, radiology intervention; DA, digital angiography

Table 6. Lens doses for PCI-IR

a) Lens doses (mGy, left outside of glasses, no protective equipment, converted to 10 minutes of fluoroscopy and 1 minute of exposure) at the routine angles (PCI-IR)

	RAO30CRA30	RAO30CAU30	CRA30	LAO40CRA30	LAO60CAU30	RAO30	LAO30
Fluoro 10 minutes	0.041	0.007	0.080	0.024	0.160	0.019	0.007
Exposure 1 minute	0.033	0.003	0.061	0.019	0.182	0.012	0.003

On comparing the highest dose "LAO60° CAU30°" and the lowest dose "RAO30° CAU30°", the dose difference was approximately 23 times and 60 times higher in fluoroscopy and radiography, respectively.

b) operator's lens dose per CAG and PCI case, and number of examinations possible (left outside of glasses without protective equipment).

No. of treatments available within the ICRP recommendation			
	Lens dose (estimated value)	Before ICRP118 recommendation: 150 mSv	After ICRP118 recommendation: 20 mSv
CAG 1 case	0.071 mSv	2112 cases/year	281 cases/year
PCI 1 case	0.32 mSv	468 cases/year	62 cases/year

RAO, right anterior oblique; LAO, left anterior oblique; CRA, cranial; CAU, caudal; CAG, coronary angiography; PCI, percutaneous coronary intervention; ICRP, International Commission on Radiological Protection

b) EP-IR 術者

PCI-IR と同様, nanoDot の検出下限値を下回らないような測定を行った。左外面の測定値を中心に, 防護効果の結果を Table 7 に示す。Table 7a は, 防護具を使用しない場合の水晶体線量で正規化したときの, 各防護具単独で使用した場合の水晶体線量の相対値, Table 7b は, 防護具を使用しない場合の水晶体線量で正規化したときの, 防護具(メガネ+防護板)を併用した場合の水晶体線量の相対値を示している。

キャビンは, 他の防護具(メガネ, 防護板)よりも効果が高いことがわかった。しかし, 防護具(メガネと防護板)の組み合わせは, キャビンの防護効果に近いものであった (Table 7)。また, キャビンを使用した場合の術者と第一助手の水晶体線量を, PVI と非 PVI でそれぞれ算出した (Table 8)。これらの値は, 測定値を 1 症例あたりの値に換算したため, 非常に低い値となった。計算式については, PCI-IR と同様, PVI, 非 PVI 1 症例あたりの術者の水晶体線量推定値を算出した。非常に値が小さいが, 第一助手の水晶体線量は, 両手技とも術者の 2 倍以上であった。ICRP の Publication 118⁷⁾で推奨されている 20 mSv/年で実施可能な検査数は, 術者が PVI で 50,000 件, 非 PVI で 58,823 件, 術者がキャビンを使用した場合の第 1 助手の実施可能な検査数は, PVI で 21,276 件, 非 PVI で 25,000 件だった (Table 8)。

Table 7. Lens doses for electrophysiology intervention (electrophysiology intervention, EP-IR)

	Measured value (left outside: mGy)	Relative value
Without protective equipment	0.384	1.000
Protective glasses	0.185	0.481
Protective plate	0.008	0.021
Protective glasses + protective plate	0.005	0.013
Cabin	0.005	0.013

Relative dose for each protective equipment when the dose without protective equipment is normalized to 1 (EP-IR)

Table 8. Comparison of lens doses between the operator and first assistant (from left lateral measurements) (electrophysiology intervention, EP-IR)

a) Operator's lens dose without protective equipment

Procedure name	「Left outside」Operator's lens dose (Without protective equipment, mGy)			Number of treatments available
	Fluoro	DA	Total	
PVI	2.9×10^{-2}	0.3×10^{-2}	3.2×10^{-2}	625
Non-PVI	2.4×10^{-2}	0.45×10^{-2}	2.85×10^{-2}	702

b) Operator's lens dose

「Left outside」 Operator's lens dose (when using the cabin, mGy)				
Procedure name	Fluoro	DA	Total	No. of treatments available
PVI	3.8×10^{-4}	0.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}	50000
Non-PVI	3.1×10^{-4}	0.3×10^{-4}	3.4×10^{-4}	58823

c) Lens dose of the first assistant

「Left outside」 First assistant's lens dose (when using the cabin, mGy)				
Procedure name	Fluoro	DA	Total	No. of treatments available
PVI	8.9×10^{-4}	0.5×10^{-4}	9.4×10^{-4}	21276
Non-PVI	7.3×10^{-4}	0.7×10^{-4}	8.0×10^{-4}	25000

Although the doses were low, the first assistant's exposure was more than twice that of the operator.

PVI, pulmonary vein isolation; Non-PVI, non-pulmonary vein isolation; DA, digital angiography

c) Neuro-IR 術者

a)のPCI-IR術者と同様に、6つの手技の術者の水晶体線量推定値を算出した。1例あたりの術者の水晶体線量(CBCT撮影時に術者が退避した場合で、防護具なし、左外側で測定)は、脳血管撮影、脳動脈瘤コイル塞栓術、脳動脈瘤コイル塞栓術(ステントアシスト)、CAS、脳血管血栓回収術、AVM・AVF塞栓術がそれぞれ0.58 mSv, 0.71 mSv, 0.74 mSv, 0.60 mSv, 0.90 mSv, 2.69 mSvとなった。防護具なしの左外面の測定値から、ICRPのPublication 118の範囲内で実施可能な検査は、それぞれ34, 28, 27, 33, 22, 7であった(Table 9)。AVM・AVF塞栓術の術者の水晶体線量は、撮影と透視の回数が多いため、他のIR手技よりも高くなった。撮影プロトコル別の被ばく線量の比率は、CBCTが他よりも高かった。

Table 9. Lens dose of IR physicians in neurosurgery per case (estimated values)

Procedure name	Lens dose (left outside, without protective equipment, mGy)					No. of treatments available within the ICRP recommendation		
	Fluoro	One shot	DSA	CBCT	Total	Without protective equipment	With protective glasses	With protective plate
Cerebral angiography	0.150	-	0.430	0.150	0.58	34	77	604
Coil embolization	0.310	0.005	0.390	0.860	0.71	28	34	181
Coil embolization (stent-assist)	0.310	0.005	0.420	1.180	0.74	27	30	172
CAS	0.180	0.002	0.420	0.740	0.60	33	41	236
Thrombus recovery	0.190	0.002	0.710	0.740	0.90	22	33	188
AVM•AVF	0.440	0.002	2.250	0.800	2.69	7	16	88

CAS, carotid artery stenting; AVM•AVF, arteriovenous malformation•arteriovenous fistula, AVM•AVF; DSA, digital subtraction angiography; cone-beam computed tomography, CBCT; ICRP, International Commission on Radiological Protection

d) Rad-IR 術者

a)の PCI-IR 術者と同様, 測定値から TACE の 1 症例あたりの術者の水晶体線量推定値を算出した. TACE の 1 例あたりの水晶体線量(CBCT 撮影時の退避を想定した防護具なしの左外側の測定値)は 0.11 mSv であり, ICRP の Publication118 の範囲内で実施可能な検査数は 182 件であった (Table 10). 軌道の異なる 2 種類の CBCT を使用した場合の術者の水晶体線量(防護具なし, CBCT 撮影中の退避なしの場合)の結果を Table 10 に示す. 全ての測定点において, open モードは close モードと比較して, 術者の水晶体線量を約 10~40%低減させることができた.

Table 10. Lens doses for Rad-IR

a) Lens dose in mGy (without protective equipment, glasses left outer side), IR physicians in the radiology department

	Operator's lens dose per case (mGy)	No. of treatments available within the ICRP recommendation
There is evacuation	0.11	182
No evacuation: Without protective equipment	1.87	11
No evacuation: With protective plate	0.16	125

b) The operator's lens dose and dose per 10 CBCT sessions (mGy, no protective equipment, glasses on the left outer side) when using closed and open modes

	Right outside	Right inside	Middle outside	Middle inside	Left outside	Left inside	Neck
close	0.125	0.408	0.671	0.278	0.787	0.390	0.892
open	0.093	0.249	0.564	0.236	0.649	0.340	0.672
Reduction rate (%)	26	39	16	15	18	13	25

ICRP, International Commission on Radiological Protection

3-2.防護板の配置の評価

防護板(防護板上端の高さ: 165 cm)と防護板(防護板上端の高さ:155 cm)の線量低減比を Table 11a に示す. 術者の目の高さが 150 cm のとき, 防護板上端の高さ(165 cm)は防護板上端の高さ(155 cm)よりも約 80~90%低くなっていることがわかった. 術者と防護板の間の距離が 20 cm の場合は, 30 cm の場合に比べて約 70~80%減少した (Table 11b). 防護板の水平方向の角度は, 垂直方向の角度に比べて約 80~90%小さかった (Table 11c). 防護板からベッドまでの距離が 0 cm の場合は, ベッドからの距離が 20 cm の場合と比較して約 80~90%減少した (Table 11d).

Table 11. Study on the placement of the protective plate

a) Height of the protective plate

	Right outside	Right inside	Middle outside	Middle inside	Left outside	Left inside	Neck
Protective plate (low)	0.040	0.190	0.295	0.075	0.140	0.050	0.230
Protective plate (high)	0.020	0.040	0.020	0.010	0.030	0.010	0.060
Reduction rate (%)	50	79	93	87	79	80	74

b) Distance between the plate and operator

	Right outside	Right inside	Middle outside	Middle inside	Left outside	Left inside	Neck
Protective plate (far)	0.066	0.089	0.250	0.091	0.120	0.054	0.250
Protective plate (near)	0.010	0.0150	0.074	0.034	0.034	0.016	0.053
Reduction rate (%)	85	83	70	63	71	70	78

c) Angle of the plate

	Right outside	Right inside	Middle outside	Middle inside	Left outside	Left inside	Neck
Protective plate (Vertical)	0.112	0.309	1.110	0.323	0.464	0.150	0.608
Protective plate (Horizontal)	0.015	0.133	0.108	0.052	0.040	0.048	0.156
Reduction rate (%)	87	57	90	84	91	68	74

d) Distance between the plate and bed

	Right outside	Right inside	Middle outside	Middle inside	Left outside	Left inside	Neck
Protective plate far (20 cm from bed)	0.029	0.160	0.182	0.048	0.123	0.058	0.434
Protective plate near (0 cm from bed)	0.010	0.024	0.033	0.007	0.022	0.006	0.034
Reduction rate (%)	65	85	85	79	82	90	92

第4章 考察

2011年のソウル会合におけるICRP声明では、眼の組織反応(白内障など)が従来よりも低い線量で発生することが報告された。2012年には、ICRP Publication 118で、新しい水晶体の線量限度が勧告された⁷⁾。2014年、国際原子力機関(International Atomic Energy Agency: IAEA)はICRP勧告を受けたガイドライン(TECDOC 1731)を発表し¹⁵⁾、水晶体の線量を眼の近くで測定して評価するよう勧告した。各施設に水晶体用線量計を設置し、放射線業務従事者が装着して測定することが望ましいが、コスト等の問題から設置できない施設も多い。したがって、人体ファントムを用いて水晶体近傍の線量を測定し、各診療科の主な手技ごとに水晶体線量の推定値を導き出すことが臨床的に有用である。

右目の外側(lateral side)の線量については、メガネのレンズ内面(inside)の測定値がレンズ外面(outside)よりも大きく、メガネをかけていても右目の内面は防護されていないことがわかる。これは、使用したメガネの形状に起因すると推察される。メガネの下側と中央(鼻付近)には人体ファントムとの間に隙間があり、この隙間から散乱線が入ったと考えられる¹⁶⁾。近年開発されたメガネの中には、個人の顔型に合わせて、レンズと顔の隙間を最小にできるものもあり、術者の水晶体線量を大きく低減することが可能である¹⁷⁾。

メガネ左レンズ外側(lateral side)の外面(outside)線量はその内面(inside)線量より1桁大きく、左目に放射線が集中していることがわかった。これは、左目がX線管や患者などの散乱体に近接しているためと考えられる。Roguinらは、頭頸部がんを発症したIR医師31名において、がん発症部位の85%が左側に集中していたことを示し、IR手技中の術者の被ばくと、IR手技中の左側への放射線被ばくの集中が1つの要因と考えられると結論付けた¹⁸⁾。したがって、左水晶体への線量や術者の被ばくを低減するために、メガネや防護板などの各種防護具を使用することが必要である。また、放射線防護に関する啓発ポスターの掲示はもちろんのこと、さらに一步踏み込んで、術者に防護具着用の声掛けや、定期的に院内研修を行うなど、繰り返し積極的に行うことが求められる。

メガネの左目外側と頸部の線量を比較すると、Hagaらの報告¹⁶⁾にあるように、頸部の線量は左目外側の約1.5倍であった。しかし、本研究では、PCI-IR、EP-IR、Neuro-IR、Rad-IRの頸部の測定値は、左目外側に比べてそれぞれ1.1、1.4、1.7、1.7倍であった。これは、プロトコルによって付加フィルタを含む透視・撮影条件が異なるため、放射線の線質など様々な要因の違いが影響していると思われる。したがって、各科で手技ごとに使用する透視・撮影条件が異なるため、本研究のように個々の条件ごとに水晶体線量を測定することが理想的である。

EP-IRの場合、キャビン使用時の第一助手の水晶体線量は術者の2倍以上であり、これはキャビンの多重散乱効果に起因する¹⁹⁾。キャビンを含む防護具を使用した場合、散乱線は防護具の周囲に散乱するため、防護具から少し離れた第1助手は、防護具に近い術者の被ばく量より高くなる可能性がある。したがって、術者はキャビン使用時に鉛エプロンやメガネなどの防護具を使用する必要はないが、防護具に隣接する第一助手は、被ばく量は非常に少ないが、術者の2倍以

上であることを念頭に置いて防護具の使用を検討する必要がある。

Neuro-IR では、AVM・AVF は他の Neuro-IR に比べ、2 倍以上の水晶体線量を伴う。そのため、メガネの使用に加えて、防護板などの防護具の使用が必須である。CBCT は DSA よりも被ばく量が多く、撮影中に術者が装置から退避しないと、術者の水晶体線量は DSA の約 2 倍となる (Table 9)。したがって、CBCT の撮影中、術者は装置から退避することが望ましい。脳出血の有無を確認するために、照射面積が大きく、散乱線が多く発生する装置の最大照射野で CBCT 撮影を行うことが多い。撮影前に術者や他のスタッフが装置から十分な距離をとることが必要である。

Rad-IR の TACE については、CBCT 撮影時に術者を退避させた場合、1 例あたりの術者の水晶体線量は他の診療科の IR 手技に比べ小さい。しかし、造影剤を手動で注入する CBCT 撮影時など、術者が装置から距離を保てない場合は、放射線量が高くなる可能性がある。術者の水晶体線量を効果的に低減するためには、メガネや防護板の使用に加えて、撮影モードも考慮する必要がある。

防護板の配置の検討では、術者の水晶体の高さが 150 cm のとき、防護板上端の高さ: 155 cm より 165 cm は、被ばく低減効果が高かった。これは、多重散乱した上方からの散乱線の影響によるものと考えられる。したがって、上方からの散乱線の影響を低減するためには、防護板上端が、術者の身長の高さより上になるように防護板を配置することが望ましい。しかし、術者は上方ばかりに気を取られ、下方を疎かにするようなことがあってはならない。そこで、全身を防護し、被ばくを低減するために、L 型プロテクターやベッド下に取り付ける防護カーテンの使用を推奨する。術者と防護板との距離が 20 cm の場合は、30 cm の場合に比べて約 70-80%線量低減効果があった。これは EP-IR の第一助手が術者より線量が大きかった理由とともに説明でき、散乱線の多重散乱に起因している。防護のためには、できるだけ術者の近くに防護板を使用することが必要である。防護板の角度については、水平方向は垂直方向よりも約 80~90%線量低減効果があった。これは、側方からの散乱線の影響によるものと思われる。防護板の角度を変更できる場合は、側面からの散乱線を防ぐために、防護板を水平にして使用することを推奨する。ベッドと防護板の間の隙間を最小にすると、線量が減少する。その結果、本研究では、防護板とベッドの距離を 0 cm とした場合、ベッドからの距離を 20 cm とした場合に比べ、約 80-90%の線量低減効果があった。患者からの散乱線をカットできるように防護板を配置することがより効果的である。

本研究は、ファントムによる測定のみであるため、限界がある。この結果は、実際の臨床現場での実測値と今回のファントムでの測定値を比較するために、術者が水晶体用線量計を装着した更なる研究で検証されるべきである。

第5章 結論

本研究により, 術者の水晶体付近の線量を評価し(循環器内科, 脳神経外科, 放射線科), 各診療科の主な手技ごとの術者の水晶体線量を推定することができた. これらは推定値に過ぎないが, 術者の水晶体線量を推定したことは, 放射線防護の啓蒙, および水晶体線量の管理に役立つことができたと考える. また, 防護板の適切な配置を検討し, 臨床にフィードバックすることで, 術者の被ばく低減に貢献できたと考える.

参考文献

1. Chida, K., Ohno, T., Kakizaki, S., Takegawa, M., Yuuki, H., Nakada, M., Takahashi, S. and Zuguchi, M. Radiation dose to the pediatric cardiac catheterization and intervention patient. *AJR Am. J. Roentgenol.* 195(5), 1175–1179 (2010).
2. Balter, S. and Miller, D. L. Patient skin reactions from interventional fluoroscopy procedures. *AJR Am. J. Roentgenol.* 202(4), W335–W342 (2014).
3. Kato, M., Chida, K., Moritake, T., Sato, T., Oosaka, H., Toyoshima, H., Zuguchi, M. and Abe, Y. Direct dose measurement on patient during percutaneous coronary intervention procedures using radiophotoluminescence glass dosimeters. *Radiat. Prot. Dosim.* 175(1), 31–37 (2017).
4. Chida, K., Kaga, Y., Haga, Y., Kataoka, N., Kumasaka, E., Meguro, T. and Zuguchi, M. Occupational dose in interventional radiology procedures. *Am. J. Roentgenol.* 200, 138–141 (2013).
5. Efsthopoulos, E. P., Pantos, I., Andreou, M., Gkatzis, A., Carinou, E., Koukorava, C., Kelekis, N. L. and Brountzos, E. Occupational radiation doses to the extremities and the eyes in interventional radiology and cardiology procedures. *Br. J. Radiol.* 84, 70–77 (2011).
6. Martin, C. J. and Magee, J. S. Assessment of eye and body dose for interventional radiologists, cardiologists, and other interventional staff. *J. Radiol. Prot.* 33, 445–460 (2013).
7. International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 118: statement on tissue reactions/early and late effects of radiation in normal tissues and organs—threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. *Ann. ICRP* 41(1/2), 1–322 (2012).
8. International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 120: radiological protection in cardiology. *Ann. ICRP* 42(1), 1–125 (2013).
9. Chida, K., Takahashi, T., Ito, D., Shimura, H., Takeda, K. and Zuguchi, M. Clarifying and visualizing sources of staff-received scattered radiation in interventional procedures. *AJR Am. J. Roentgenol.* 197(5), W900–W903 (2011).
10. Vanhavere, F. et al. Measurements of eye lens doses in interventional radiology and cardiology: final results of the ORAMED project. *Radiat. Meas.* 46(11), 1243–1247 (2011).
11. Okazaki, T., Hayashi, H., Takegami, K., Okino, H., Kimoto, N., Maehata, I. and Kobayashi, I. Fundamental study of nanoDot OSL dosimeters for entrance skin dose measurement in diagnostic X-ray examinations. *Radiation Protection and Research* 41(3), 229–236 (2016).
12. Asahara, T., Hayashi, H., Goto, S., Kimoto, N., Takegami, K., Maeda, T., Kanazawa, Y., Okazaki, T. and Hashizume, T. Evaluation of calibration factor of OSLD toward eye lens exposure dose measurement of medical staff during IVR. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* 21(11), 263–271 (2020).
13. Sakamoto, H. Survey of the actual condition of the operator's lens dose in endovascular treatment of the cranial nerves. *JNET* 8(6), 66 (2014).

14. Savage, C., Seale, T. M. IV, Shaw, C. J., Angela, B. P., Marichal, D. and Rees, C. Evaluation of a suspended personal radiation protection system vs. conventional apron and shields in clinical interventional procedures. *Open Journal of Radiology* 03, 143–151 (2013).
15. International Atomic Energy Agency. Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye. Vol. 1731. (VIENNA: IAEA TECDOC) (2013).
16. Haga, Y., Chida, K., Kaga, Y., Sota, M., Meguro, T. and Zuguchi, M. Occupational eye dose in interventional cardiology procedures. *Sci. Rep.* 7(1), 1–7 (2017).
17. Endo, M. et al. Evaluation of novel X-ray protective eyewear in reducing the eye dose to interventional radiology physicians. *J. Radiat. Res.* 62(3), 414–419 (2021).
18. Roguin, A., Goldstein, J., Bar, O. and Goldstein, J. A. Brain and neck tumors among physicians performing interventional procedures. *Am. J. Cardiol.* 111(9), 1368–1372 (2013).
19. Arakawa, H., Tokumori, K., Kamezawa, H. and Fujibuchi, T. Visualization of radiation scattering in an X-ray room for teaching radiation protection. *Radioisotopes* 67(1), 11–15 (2018).

研究業績

博士後期課程期間における研究業績の一覧を示す。

原著論文

Osawa M, Tawada Y, Kaneda N, Fujita N and Koyama S.

Examination of lens exposure doses of cardiologists, neurosurgeons, and radiologists in interventional radiology.

Radiat Prot Dosimetry. 2022 Dec 7;198(20):1585-1597.

発表

「当院の血管撮影装置における術者の水晶体の被ばく線量に関する検討」

◎大澤充晴, 他. 第 84 回日本循環器学会学術集会

「カテーテルアブレーションにおける術者を想定した水晶体の放射線防護方法に関する検討」

◎大澤充晴, 他. 第 85 回日本循環器学術集会

「当院の脳外科領域における術者の水晶体の被ばく線量に関する検討」

◎大澤充晴, 他. 第 36 回日本脳神経血管内治療学会学術集会

「回転軌道の異なるコーンビーム CT の被ばく線量と画質の検討」

◎大澤充晴, 他. 第 28 回日本脳神経血管内治療学会

謝辞

本研究は、筆者が名古屋大学大学院医学系研究科博士後期課程在学中に、同大学脳とこころの研究センター准教授 小山修司先生の指導の下に行ったものです。本研究の遂行および本論文の作成にあたり、終始熱心なる御指導とご鞭撻を賜りましたことを心から厚く御礼申し上げます。

本研究の大部分は愛知医科大学病院 血管内治療センターで行ったものです。日常診療業務と研究活動の両立にあたり、御理解と御支援を賜りました愛知医科大学病院 放射線部部長 鈴木耕次郎先生、愛知医科大学病院 中央放射線部 診療放射線技師長 金田直樹先生に深謝の意を表します。

本研究に関して、種々有益な御討論及び御激励を頂いた名古屋大学大学院医学系研究科 教員各位、同大学脳とこころの研究センター 小山研究室 関係諸氏、名古屋大学 医学部附属病院医療技術部放射線門 藤田尚利先生ならびに愛知医科大学病院 中央放射線部 関係諸氏に心から感謝致します。

最後に、博士後期課程進学にあたり、温かく見守ってくれた両親と家族に感謝します。