臨床技術

放射性医薬品取り扱い時の水晶体被ばく線量推定と
X 線防護メガネを用いた被ばく低減松友紀和^{1,2*} 深見光葉¹ 小池貴久^{1,2} 山本智朗^{1,2}

抄 録

【目的】本研究では、放射性医薬品を取り扱う際の水晶体被ばく線量の推定と X 線防護メガネの必要性を検証した。【方法】水晶体等価線量を推定するため、線源 (^{99m}Tc , ^{111}In , ^{123}I) を蛍光ガラス線量計から 30 cm と 60 cm の位置に設置して 3 mm 線量当量率を測定した。また、シリンジシールドと含鉛防護板、X 線防護メガネ (0.07, 0.50, 0.75 mmPb) の有無で線量低減率を評価した。【結果】防護具を使用しない場合の 3 mm 線量当量率は、 ^{99m}Tc で $6.13 \pm 0.13 \mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$, ^{111}In で $23.08 \pm 0.19 \mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$, ^{123}I で $11.07 \pm 0.11 \mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$ となった。シリンジシールドと含鉛防護板を使用した場合の線量低減率はすべての放射性核種で 90% 以上となった。また、鉛当量 0.75 mmPb の X 線防護メガネの線量低減率は ^{99m}Tc で 68.8%, ^{111}In で 60.6%, ^{123}I で 68.1% を示した。【結語】放射性医薬品を取り扱う際の推定等価線量は水晶体の等価線量限度を超えない数値であった。鉛当量 0.75 mmPb の X 線防護メガネは、放射性医薬品 (^{99m}Tc , ^{111}In , ^{123}I) を取り扱う際の水晶体被ばく線量低減に必要である。

Key words: X-ray protective goggles, eye lens protection, radiation dose, radiation shielding and single photon emission computed tomography (SPECT)

緒 言

水晶体は放射線感受性が高いため高い組織の一つであり、発症機構は未だ明らかでないものの放射線被ばくが起ることで水晶体上皮細胞が増殖して放射線誘発性白内障を引き起こすとされている^{1,2)}。これまで水晶体被ばくの等価線量限度は年間 150 mSv を越えないこととされていた。しかし、2011 年 4 月に国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection: ICRP) が発表した、組織反応に関わる声明 (ソウル声明) で計画被ばく状況下にある職業被ばくのうち、水晶体の等価線量に対して「5 年間の平均が 20 mSv/年を超えず、いかなる 1 年間においても 50 mSv/年を超えないようにすべきである」ことが示され³⁾、厚生労働省は電離放射線障害防止規則の改訂を行い、令和 3 年 4 月 1 日から施行・適用した。このような背景を受けて interventional radiology (IVR) をはじめとするさまざまな放射線検査で水晶体被ばくの実態調査が行われ、水晶体線量の管理と最適化が重要課題となっている⁴⁻⁶⁾。

これまで核医学検査スタッフの被ばく (実効線量) について、核医学治療では準備・投与でそれぞれ 0.08 mSv 程度、核医学検査では検査内容によって異なるものの 11.1 μSv から 0.12 mSv と報告されている^{7,8)}。また、金谷は心臓核医学検査に携わる医療従事者の被ばく線量を推定しており、検査件数が多くなれば問題になるほどの被ばく線量には達しないと報告している⁹⁾。しかし、これら報告の中に水晶体の被ばく線量に関する記述はない。核医学検査では、放射性医薬品を投与された患者が線源になるため、接遇と被ばく低減を考慮した施設設計や行動が重要となる。しかし、核医学検査スタッフが受ける被ばくは、患者のみならず放射性医薬品を取り扱う際にも生じる。特に放射性医薬品の調製作業や投与時は、線源から十分な距離を取れない場合も多い。また、single photon emission computed tomography (SPECT) 撮像の標準化を目的に作成されたガイドライン^{10,11)}や positron emission tomography (PET) 撮像施設認証では、ファントム試験による評価¹²⁾が指定されており、このような状況下では高放射線量の線源をシールドなしで扱うことになる。Kopecらは、放射性医薬品使用時 (調整・投与・検査) の水晶体被ばく線量 (3 mm 線量当量) の測定を行い、SPECT 製剤 (^{99m}Tc , ^{153}Sm , ^{131}I) では 0.9 から 3.5 $\mu\text{Sv}/\text{GBq}$, PET 製剤 (^{18}F) では 1.1 から 6.1 $\mu\text{Sv}/\text{GBq}$ 程度と報告している¹³⁾。この報告から放射性医薬品を取り扱う際の水晶体被ばくは等価線量限度を超えないと予想される

論文受付: 2021 年 5 月 31 日

論文受理: 2021 年 11 月 7 日

早期公開: 2022 年 3 月 8 日

¹ 杏林大学保健学部診療放射線技術学科² 杏林大学大学院保健学研究科

* 連絡先著者: 〒181-8612 東京都三鷹市下連雀 5-4-1

杏林大学保健学部 松友紀和

E-mail: nmatsutomo@ks.kyorin-u.ac.jp

doi: 10.6009/jjrt.2022-1201

が、シリンジシールドや鉛ガラスなど防護措置を講じた結果であり、防護が困難な場合を想定した水晶体被ばく線量の推定は必要不可欠と考える。また、Bernierらは、核医学業務を少なくとも一回行った診療放射線技師の白内障発症リスクが高くなることを報告しており¹⁴⁾、水晶体被ばくを把握すると同時に、防護措置についても考える必要がある。

X線防護メガネは、水晶体被ばく低減を目的にIVRなどX線透視を用いる手技で使用されており、適切に使用することで水晶体の被ばく低減に効果的と報告されている¹⁵⁾。核医学においても、Bruchmannらは、鉛当量0.5 mmPbのX線防護メガネを用いることで^{99m}Tcを使用した場合の水晶体被ばく線量を1/3に低減できたと報告している¹⁶⁾。このようにX線防護メガネは、調製時やファントム試験など含鉛防護板やシリンジシールドでの防護が困難な場合に効果的と考えられる。しかし、¹⁸Fや¹³¹Iなど高エネルギーの放射性核種ではX線防護メガネの効果が低く¹⁶⁾、加えて本邦の医療機関において使用頻度の高い¹¹¹Inや¹²³Iに対する評価は行われていない¹⁷⁾。また、2020年に発行された「医療スタッフの放射線安全に係るガイドライン」¹⁸⁾では、核医学領域の放射線安全利用について述べられておらず、放射性医薬品を取り扱う際の水晶体防護をどのように行うか、どのような場面でX線防護メガネを使用するか、その実用性や必要性について検証を行う必要がある。

本研究では、蛍光ガラス線量計 (radiophotoluminescent glass dosimeter: RPLD) を用いて放射性医薬品 (^{99m}Tc, ¹¹¹In, ¹²³I) を取り扱う際の3 mm線量当量の推定とX線防護メガネの効果ならびに有効性を検証した。RPLDは、フェーディングが極めて少なく素子間の均一性が優れており、領域(部位)を限定した測定が可能のため、本研究で使用した¹⁹⁾。また、従来から用いられている含鉛防護板やシリンジシールドの被ばく低減効果と合わせて、X線防護メガネの必要性について考察した。

1. 方法

1-1 使用機器

線量測定は、蛍光ガラス線量計・小型素子システムDose Ace FGD-1000 (ACGテクノグラフィクス、静岡)で行った。RPLDは、測定可能範囲10 μGy (μSv)~10 Gy (Sv)のGD-352 M (エネルギー補償フィルタあり)で、CT撮影用全身ファントムPBU-60 (京都科学、京都)の両眼球部に張り付けて測定を行った。本研究で使用する素子間のばらつきは、メーカー公称値で4.5%以内(¹³⁷Cs, 1 mGy)²⁰⁾、診断X線領域では平均3.5%と報告されて

いる²¹⁾。校正は、2021年4月6日に放射線計測協会にて6.00 mGy フリーエア照射(¹³⁷Cs)した素子(スタンダード線量計素子)を使用して行い、計測時には蛍光ガラス線量計リーダーに内蔵されている内部キャリブレーションガラスにより自動校正を実施した。アニール処理は400度で20分間行い、プレヒートは測定(照射)後、速やかに70度で30分間実施した。また、すべてのRPLDについて測定(照射)前にプレドーズ測定を実施した。線源の遮蔽には、シリンジシールドUG-WS-25 (ユニバーサル技研、神奈川)と鉛当量20 mmPbの含鉛防護板ラムダープロテクター (岡部製作所、東京)を使用した。また、X線防護メガネには、パノラマシールド(タイプ1; 保科製作所、東京)、HAGOROMO (タイプ2; マエダ、青森)、エックスガードゴーグル(タイプ3; 昭和光電、東京)の3種類を用いた。使用したシリンジシールドと含鉛防護板、X線防護メガネの外観をFig. 1に、それぞれの仕様をTable 1に示す。本研究で用いたX線防護メガネの散乱X線に対する遮蔽率は、測定条件により異なるが60%から85%程度と報告されている²²⁾。使用した放射性核種は、放射性医薬品の調製やファントム試験などを考慮して^{99m}Tcと¹¹¹In, ¹²³Iとした。

1-2 3 mm 線量当量の推定

放射性医薬品を取り扱い時の水晶体被ばく等価線量を推定するために、線源とRPLDの距離を変えて空気カーマを測定し、Gy/Sv換算係数を乗じて3 mm線量当量率を求めた。使用した線源は^{99m}Tc (0.275 GBq), ¹¹¹In (0.0844 GBq), ¹²³I (0.283 GBq)で、日本人の腕の平均の長さ、男性で約73 cm、女性で約67 cmと報告されていることから²³⁾、腕を曲げることを考慮して放射性医薬品を取り扱う際の距離(線源間距離)を30 cmと60 cmとした。それぞれの測定地点にRPLDを付けたファントムを配置し(Fig. 2)、統計誤差や減衰の影響を軽減するため、すべて同時に1時間の測定(照射)を行った。また、バックグラウンド測定のために測定(照射)を行う区画から十分離れた場所にRPLDを配置した。線量の読み取りは、一つのRPLDに対して5回行い、空気カーマ(μGy)で示された測定値から式(1)を用いて放射能当たりの3 mm線量当量率(μSv/min/GBq)を算出した^{24,25)}。

$$E = \frac{k}{0.9} \times D \times \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda \cdot t}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここでEは放射能当たりの3 mm線量当量率(μSv/min/GBq)で、Dは空気カーマ(μGy)、λは崩壊定数(/min)、

Fig. 1 Radiation protection devices

(a) X-ray protective goggle type 1 with 0.07-mm lead equivalent, (b) X-ray protective goggle type 2 with 0.5-mm lead equivalent, (c) X-ray protective goggle type 3 with 0.75-mm lead equivalent, (d) Lead shield with 20.0-mm lead equivalent, (e) Syringe shield

a	b	c
d	e	

Table 1 Characteristic of radiation protection devices

	Lead shield	Syringe shield	Protection goggles		
			Type1	Type2	Type3
Name	Lambda protector	UG-WS-25	PANORAMA SHIELD	HAGOROMO	X-GUARD Goggles
Lead equivalent [mmPb]	20.0 (0.511 MeV)	—	0.07	0.50 (front) 0.60 (side)	0.75
Material	Glass	Tungsten (thickness: 1.8 mm)	Acrylic	Glass	Glass

Fig. 2 Setup of the radiophotoluminescent glass dosimeter (RPLD) and radioactive source
The RPLD was set at distances of 30 and 60 cm from the radiation source.

B は測定開始時の放射エネルギー (GBq), t は測定時間 (min) である. k は空気カーマから 3 mm 線量当量への換算係数で, ^{99m}Tc と ^{123}I は 1.449, ^{111}In は 1.372 とした²⁶⁾. なお, ^{123}I と ^{111}In は 30 keV 付近に放出割合の高いエネルギーピークを有しているが, 測定値の過少評価を避けるため, 換算係数の高い 150 keV と 200 keV の値を採用した. また, 放射性核種のエネルギーに対する RPLD の相互レスポンス値 (^{137}Cs) は, メーカー公称値として 40 keV から 80 keV で 1.0, 100 keV から 400 keV で 0.9 程度となっており, 各放射性核種のエネルギーピークを考慮して 0.9 とした²⁰⁾.

1-3 シリンジシールドと含鉛防護板の効果

シリンジシールドと含鉛防護板の有無で 3 mm 線量当量率を求めて遮蔽効果を評価した. 測定距離は ^{99m}Tc 線源から 30 cm で, 測定時間は 1 時間とした. 各線源の放射エネルギーは ^{99m}Tc で 0.238 GBq, ^{111}In で 0.0817 GBq, ^{123}I で 0.238 GBq とした. 含鉛防護板は線源から 10 cm の位置に配置し, シリンジシールドの有無でそれぞれ測定を行った (Fig. 3). 3 mm 線量当量率は式 (1) から算出し, 遮蔽効果は式 (2) から線量低減率 (percent reduction dose rate: %RD) を求めて評価した.

$$\%RD = \frac{E_{\text{ref}} - E_{\text{shield}}}{E_{\text{ref}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで, %RD は線量低減率(%), E_{ref} は遮蔽なしの 3 mm 線量当量率 ($\mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$), E_{shield} は遮蔽ありの 3 mm 線量当量率 ($\mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$) である.

1-4 X線防護メガネの効果

X線防護メガネと線源 (^{99m}Tc ; 0.256 GBq, ^{111}In ; 0.0826 GBq, ^{123}I で 0.252 GBq) の配置を Fig. 4 に示す. 測定距離は線源から 30 cm で, 測定時間は 1 時間とした. RPLD は, X線防護メガネの中心となるよう両眼部に配置した. X線防護メガネの効果は, シリンジシールドと含鉛防護板と同様に式 (1) から 3 mm 線量当量率, 式 (2) から線量低減率を求めて評価した.

2. 結果

2-1 線源距離と 3 mm 線量当量率の関係

各線源距離における放射性核種ごとの 3 mm 線量当量率を Table 2 に示す. 線源から距離を離すことで 3 mm 線量当量率は減少し, 線源から 30 cm の 3 mm 線量当量率は, ^{99m}Tc で $6.13 \pm 0.13 \mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$, 60 cm で $1.50 \pm 0.10 \mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$ であった. また, ^{111}In は距離 30 cm で $23.08 \pm 0.19 \mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$, 距離 60 cm で $6.31 \pm 0.30 \mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$, ^{123}I は距離 30 cm で $11.07 \pm 0.11 \mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$, 距離 60 cm で $3.07 \pm 0.07 \mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$ となった.

2-2 シリンジシールドと含鉛防護板の効果

シリンジシールドと含鉛防護板を使用した場合の 3 mm 線量当量率と線量低減率を Table 3 に示す. シリンジシールドを使用した場合の 3 mm 線量当量率は, ^{99m}Tc で $0.44 \pm 0.17 \mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$, ^{111}In で $2.49 \pm 0.22 \mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$, ^{123}I で $0.81 \pm 0.07 \mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$ となった. シリンジシールドの線量低減率は ^{99m}Tc で 92.8%, ^{111}In で 89.2%, ^{123}I で 92.7% となった. 同様に含鉛防護板を使用した場合の 3 mm 線量

Fig. 3 Details of the measurement setup for the syringe shield and lead glass plate RPLDs were placed at a distance of 30 cm.

Fig. 4 Setup with three X-ray protective goggles and RPLDs
The source without the syringe shield was positioned at a distance of 30 cm from the X-ray protective goggles.

Table 2 Comparison of 3-mm dose equivalent rate at each distance

Distances	3-mm dose equivalent rate [$\mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$]		
	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	^{111}In	^{123}I
30 cm	6.13 ± 0.13	23.08 ± 0.19	11.07 ± 0.11
60 cm	1.50 ± 0.10	6.31 ± 0.30	3.07 ± 0.07

Background: 0.04 ± 0.02 [$\mu\text{Sv}/\text{min}$]

Table 3 Comparison of 3-mm dose equivalent rate with and without radiation protection

Radioactive source	Protection	3-mm dose equivalent rate [$\mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$]	Reduction [%]
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	None	6.13 ± 0.13	—
	Syringe shield	0.44 ± 0.17	92.8
	Lead Shield	0.24 ± 0.11	96.1
^{111}In	None	23.08 ± 0.19	—
	Syringe shield	2.49 ± 0.22	89.2
	Lead Shield	0.75 ± 0.28	96.7
^{123}I	None	11.07 ± 0.11	—
	Syringe shield	0.81 ± 0.07	92.7
	Lead Shield	0.55 ± 0.07	95.0

Background: 0.04 ± 0.02 [$\mu\text{Sv}/\text{min}$]

当量率は, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ で 0.24 ± 0.11 $\mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$, ^{111}In で 0.75 ± 0.28 $\mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$, ^{123}I で 0.55 ± 0.07 $\mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$ となった。シリンジシールドの線量低減率は $^{99\text{m}}\text{Tc}$ で 96.1%, ^{111}In で 96.7%, ^{123}I で 95.0% となった。

2-3 X線防護メガネの効果

Table 4 に X 線防護メガネの有無による 3 mm 線量当量率の変化と線量低減率を示す。X 線防護メガネを使用

することですべての放射性核種に対して 3 mm 線量当量率が大きく低下した, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ に対する線量低減率は, タイプ 1 (0.07 mmPb) で 48.1%, タイプ 2 (0.50 mmPb) で 67.4%, タイプ 3 (0.75 mmPb) で 68.8% となり, 鉛当量が大きいほど線量低減率は高くなった。同様に ^{111}In と ^{123}I に対する線量低減率は, タイプ 1 (0.07 mmPb) で 38.6% と 38.9%, タイプ 2 (0.50 mmPb) で 54.6% と 64.1%, タイプ 3 (0.75 mmPb) で 60.6% と 68.1% となった。

Table 4 Effect of each set of X-ray protective goggles on radiation exposure from a radioactive source without a syringe shield

Radioactive source	Protection goggles	3-mm dose equivalent rate [$\mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$]	Reduction [%]
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	None	6.13 ± 0.13	—
	Type1	3.18 ± 0.12	48.1
	Type2	2.00 ± 0.07	67.4
	Type3	1.91 ± 0.07	68.8
^{111}In	None	23.08 ± 0.19	—
	Type1	14.16 ± 0.25	38.6
	Type2	10.48 ± 0.26	54.6
	Type3	9.09 ± 0.21	60.6
^{123}I	None	11.07 ± 0.11	—
	Type1	6.76 ± 0.10	38.9
	Type2	3.97 ± 0.12	64.1
	Type3	3.65 ± 0.07	68.1

Background: 0.04 ± 0.02 [$\mu\text{Sv}/\text{min}$]

Lead equivalent: Type1 (0.07 mmPb), Type2 (0.50 mmPb), Type3 (0.75 mmPb)

3. 考 察

本研究では、放射性医薬品取り扱い時 ($^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{111}In , ^{123}I) の水晶体被ばく線量の推定と X 線防護メガネの効果について検討を行った。放射性医薬品取り扱い時を想定した水晶体の等価線量は、等価線量限度を超えないものの、適切な遮蔽と距離を取ることの重要性を再確認できた。また、X 線防護メガネは X 線検査と比較して効果は下がるものの核医学検査においても有用であることが示された。

線源からの距離が離れるほど 3 mm 線量当量率は低下し、線源から 30 cm 以上離れることで急激に低下した。これは距離の逆二乗則によるものであり、基本的なことではあるが放射性医薬品を取り扱う際には線源を眼からできるだけ離して取り扱うことの重要性を示している。医療スタッフの放射線安全に係るガイドラインでは、核医学検査時の水晶体被ばくは、多くの場合で 0.1 mSv/月以下となったが、核医学治療を担当した場合に高い値を示したとされている。本研究において $^{99\text{m}}\text{Tc}$ や ^{111}In , ^{123}I を放射線防護がない状態で扱った場合の 3 mm 線量当量率はおよそ 6.0 から 23.0 $\mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq}$ と推定された。この結果から、骨シンチグラフィ用放射性医薬品 (0.950 GBq) の調製を 1 日 5 分間、年間 241 日 (2020 年度所定労働日数)、距離 30 cm で行ったと仮定すると、水晶体表面の推定積算等価線量は、 $6.13 \mu\text{Sv}/\text{min}/\text{GBq} \times 0.950 \text{ GBq} \times 5 \text{ min} \times 241 \text{ day} = 7.02 \text{ mSv}/\text{年}$ となる。また、シリンジシールドを使用した場合は 0.50 mSv/年となる。いずれも水晶体の等価線量限度である 20 mSv/年を超えないが、核医学検査では放射性医薬品を投与した患者からも被ばくをするため²⁷⁾、毎日の調製作業のみでミリ

シーベルト単位を超える量となるのは無視できるものではなく、調製を行う際は放射線防護が必要と考える。また、 ^{111}In や ^{123}I は投与量の調整や実投与量の測定が主であり、取り扱う時間は短いものの、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ に比較して 1.8 から 3.8 倍の 3 mm 線量当量率となるため、特にファントム試験などでは放射線防護が必要となる。

シリンジシールドや含鉛防護板を使用することで、3 mm 線量当量率をおおむね 90% 以上低減することができた。日本アイソトープ協会によると、調製作業従事者はバイアル、シリンジに鉛やタングステンなどのシールドをすることで遮蔽し、被ばくの軽減に努めることが必要としている²⁸⁾。福永らは、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ に対してシリンジシールド (タングステン) を使用することで 99% 以上の遮蔽効果が得られたと報告している²⁹⁾。また、含鉛防護板の線量低減効果と有効性についても既に報告されており³⁰⁾、本測定の結果とあわせて放射性医薬品の調製は、シリンジシールドや含鉛防護板を用いて行うのが望ましいといえる。しかし、実際にすべての調製作業を含鉛防護板やシリンジシールドで完全に防護した状態で行うことは難しく、実投与量の測定やカプセル包装剤の取り扱い、ファントム試験ではシリンジシールドや含鉛防護板を使用することができない。このような場合を想定すると、水晶体防護を目的とした簡便でかつ調製作業の妨げにならない防護具が必要になると考える。

X 線防護メガネは、血管内治療や各分野の IVR を行う術者の水晶体を被ばくから守るために使用される³¹⁾。Haga らは、心臓 IVR において鉛当量 0.07 mmPb の X 線防護メガネで約 60% の線量低減効果が得られたと報告

している³²⁾。核医学検査に用いるガンマ線は、IVRなどで用いられているX線と比べて高エネルギーであり、X線用防護具の効果が低いと予想された。しかし、放射性医薬品を取り扱う距離において、3 mm線量当量率を38.6%から75.3%低減することができた。特に鉛当量0.75 mmPbのX線防護メガネは、測定したすべての放射性核種で60%以上の防護効果を示した。現在、放射線防護の最適化といった観点から実投与量による管理が行われており³³⁾、キット製剤のみならず標識済製剤を使用する際にもシリンジシールドを外して放射性医薬品を取り扱う機会が増えている。また、神経内分泌腫瘍の核医学治療薬として臨床使用が期待されているルテチウム-177標識ソマトスタチンアナログは、投与量が1回当たり7.4 GBqと多いため、飛沫防護メガネの使用を推奨している³⁴⁾。Jacobらは、職歴の75%以上の期間に鉛メガネを着用すれば白内障発症リスクが減少する傾向にあると報告している³⁵⁾。X線防護メガネを用いることで水晶体の被ばく低減に加え、放射性医薬品の飛沫防止にもなるため、核医学領域におけるX線防護メガネの役割は高いと考える。

放射線防護の三原則は、行為の正当化・防護の最適化・線量限度の適用であり、防護の最適化についてはas low as reasonably achievableの原則に基づいて、合理的に達成できる限り被ばく線量を低く制限することとしている。しかし、「医療スタッフの放射線安全に係るガイドライン」や「放射性医薬品取り扱いガイドライン第3.1版」³⁶⁾では、核医学領域の水晶体被ばく防護について具体的に述べられていない。本研究の結果から、放射性医薬品(放射性核種)を取り扱う際には、可能な限り水晶体被ばくを低減させるために鉛当量で0.75 mmPb程度以上のX線防護メガネを用いる必要があると考える。特に光子のエネルギーが高い¹¹¹Inや¹²³Iは、検査に用いる放射エネルギーが少ないものの、^{99m}Tcよりも3 mm線量当量率が高くなるため、X線防護メガネを使用することが望ましい。

本研究では、国内で比較的多く使用されている^{99m}Tc、¹¹¹In、¹²³Iを対象とした。しかし、核医学検査で用いられる放射性核種は多種多様であり、光子のエネルギー領域も70 keVから511 keVと幅広いため、今後はさまざまな放射性核種で測定を行う必要がある。特に¹³¹Iや¹⁸Fでは、X線防護メガネによる防護効果が十分に得られないこと¹⁶⁾や、0.25 mm含鉛タイプ診断用X線防護衣を用いることで体表面線量の増加が報告されており³⁷⁾、その適応を慎重に判断する必要がある。また、水晶体の等価線量は放射線の種類とエネルギーに応じて1 cm線量当量、3 mm線量当量または70 μ m線量当量で管理することが標準的な手法であるが、本研究ではジオメトリ等の都合上、空気カーマを計測して3 mm線量当量率を算出した。今後は実際の業務において不均等被ばく測定用個人線量計による水晶体の等価線量を把握する必要がある。

4. 結 語

放射性医薬品取り扱い時を想定した水晶体被ばく線量の推定とX線防護メガネの効果を検証した。遮蔽を行わない状態で放射性医薬品を取り扱った際の1年間の積算等価線量は水晶体の等価線量限度を超えないが、職業被ばく低減の観点から適切な被ばく低減措置は必須である。また、X線防護メガネは核医学領域においても効果があり、放射性医薬品を取り扱う際には鉛当量が0.75 mmPb程度以上のX線防護メガネを使用して水晶体被ばく線量低減に努める必要がある。

本研究の要旨は第41回日本核医学技術学会総会学術大会(2021年、名古屋)にて発表した。

利益相反

筆頭著者および共著者全員に開示すべき利益相反はない。

参考文献

- 1) 青山喬, 丹羽太貫 編. 放射線基礎医学第12版. 京都: 金芳堂, 2013.
- 2) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 他. 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書(1)—水晶体, 白内障, ICRPが勧告した新たな水晶体等価線量限度の概要—. Jpn J Health Phys 2014; 49 (3): 145–152.
- 3) Authors on behalf of ICRP. ICRP publication 118: ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs—threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. Ann ICRP 2012; 41(1-2): 1–322.
- 4) 武俊夫, 佐藤香織, 木内克典, 他. 脳血管IVRにおける水晶体被曝に対する防護シールドの作成と被曝低減効果. 日放技学誌 2007; 63(11): 1246–1252.
- 5) 加藤守, 千田浩一, 石田嵩人, 他. 脳神経血管および心臓電気生理手技のインターベンションに携わる医師の水晶体線量評価. 日放技学誌 2020; 76(1): 26–33.
- 6) 廣田勝彦, 田中拓郎, 岩田直樹, 他. シンチレーション光ファイバ線量計による心臓カテーテル術者のリアルタイムな水晶体被ばく線量測定の試み. 日放技学誌 2020; 76(8): 817–827.
- 7) 日本医学放射線学会, 日本核医学会, 日本核医学技術学

- 会, 他; 放射性ヨウ化 (I-131) ナトリウムカプセルを用いた内用療法の適正使用マニュアル 改訂第 3 版. 2013.
- 8) 赤羽恵一, 飯本武志, 伊知地猛, 他. 水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書(V)ーわが国の各分野における従事者の水晶体被ばく及び防護の現状ー. *Jpn J Health Phys* 2015; 51 (1): 76–89.
- 9) 金谷信一. 心臓核医学検査に従事する者の被ばく. *日心臓核医* 2015; 15(1): 10–11.
- 10) 日本核医学技術学会 SPECT 標準化委員会. 骨 SPECT 撮像の標準化に関するガイドライン 1.0. *核医技* 2017; 37(4): 517–530.
- 11) 日本核医学技術学会 SPECT 標準化委員会. 脳血流 SPECT 撮像の標準化に関するガイドライン 1.0. *核医技* 2017; 37(4): 505–516.
- 12) ^{18}F -FDG を用いた全身 PET 撮像のためのファントム試験手順書 第 3 版. http://jsnm.sakura.ne.jp/wp_jsnm/wp-content/themes/theme_jsnm/doc/FDG_WBscan_Phantom_Test_20180117.pdf (2021 年 9 月 20 日アクセス).
- 13) Kopec R, Budzanowski M, Budzyńska A, et al. On the relationship between whole body, extremity and eye lens doses for medical staff in the preparation and application of radiopharmaceuticals in nuclear medicine. *Radiat Meas* 2011; 46(11): 1295–1298.
- 14) Bernier MO, Journy N, Vilhoing D, et al. Cataract risk in a cohort of US radiologic technologists performing nuclear medicine procedures. *Radiology* 2018; 286(2): 592–601.
- 15) 宮島隆一, 藤淵俊王, 宮地優介, 他. X 線 CT 撮影の介助時における医療従事者被ばくの効果的な防護方法について. *日放技学誌* 2018; 74(4): 326–334.
- 16) Bruchmann I, Szermerski B, Behrens R, et al. Impact of radiation protection means on the dose to the lens of the eye while handling radionuclides in nuclear medicine. *Z Med Phys* 2016; 26(4): 298–303.
- 17) 公益社団法人日本アイソトープ協会. アイソトープ等流通統計 (第 3 版), 2021. https://www.jrias.or.jp/pdf/ryutsutokei2021_ver3.pdf
- 18) 日本医学放射線学会, 血管撮影・インターベンション専門診療放射線技師認定機構, 日本医学物理士会, 他. 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～. http://jns.umin.ac.jp/jns_wp/wp-content/uploads/2020/10/suisyoutai_pnf_0807final.pdf (2021 年 9 月 20 日アクセス).
- 19) 村上茂樹, 江本貴, 森泰成, 他. 核医学検査に用いる市販シリンジ用プランジャシールドの試作. *日放技学誌* 2008; 64(8): 922–929.
- 20) AGC テクノグラス株式会社. 蛍光ガラス線量計・小型素子システム Dose Ace 基本特性資料. 2014; 1–5.
- 21) 春井章吾, 松本光弘, 小縣裕二. 蛍光ガラス線量計小型素子システムにおける素子タイプ別エネルギー依存性と線量補正の検討. *日放技学誌* 2010; 66(5): 509–514.
- 22) 塚本篤子. 医療におけるスタッフの水晶体被ばくと課題. *日白内障会誌* 2018; 30(1): 63–64.
- 23) 人間生活工学研究センター. 日本人の人体計測データ Japanese body size data 1992–1994. 大阪: 人間生活工学研究センター, 2003.
- 24) 粕谷新音, 松田篤典, 夏堀雅宏, 他. ^{18}F -FDG および $\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ を投与した水ファントムにおける. 空間線量分布の測定技術に関する検討. *NMCC 共同利用研究成果報文集* 13. 2005; 283–303.
- 25) 樺田尚樹. 十分な放射線防護を行っても, なお高い被ばく線量を眼の水晶体に受ける可能性のある労働者に関する実態調査について. 第 6 回 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 資料. 2019.
- 26) Vanhavere F, Carinou E, Gualdrini G, et al. EURADOS Report 2012-02. ORAMED: Optimization of radiation protection of medical staff. *European Radiation Dosimetry e. V., Braunschweig*, 2012.
- 27) 藤淵俊王. 医療分野における職業被ばくと放射線防護ー放射線診療従事者の不均等被ばく管理ー. *日本保健物理学会誌* 2018; 53(4): 247–254.
- 28) 日本アイソトープ協会医学・薬学部会放射性医薬品専門委員会. 標識キット方式による $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 放射性医薬品の調製について. *Radioisotopes* 2004; 53(3): 155–178.
- 29) 福永義純, 松岡信弘, 前忠, 他. シリンジシールドおよびプランジャーの遮蔽効果の評価法. *日核医* 2001; 38(2): 89–97.
- 30) Chiesa C, De Sanctis V, Crippa F, et al. Radiation dose to technicians per nuclear medicine procedure: comparison between technetium-99m, gallium-67, and iodine-131 radiotracers and fluorine-18 fluorodeoxyglucose. *Eur J Nucl Med* 1997; 24(11): 1380–1389.
- 31) 飯塚崇文, 松本一真, 萩原芳明, 他. CT ガイド下 IVR における術者頭頸部被ばくの測定. *日放技学誌* 2019; 75(7): 625–630.
- 32) Haga Y, Chida K, Kaga Y, et al. Occupational eye dose in interventional cardiology procedures. *Sci Rep* 2017; 7(1): 569.
- 33) J-RIME. 日本の診断参考レベル (2020 年版). http://www.radher.jp/J-RIME/report/JapanDRL2020_jp.pdf (2021 年 9 月 20 日アクセス).
- 34) 日本核医学会. Lu-177-DOTA-TATE の適正使用に関する報告書と適正使用マニュアル (第 2 版). http://jsnm.org/wp_jsnm/wp-content/themes/theme_jsnm/doc/Lu_houkokusho_manual_20160520.pdf (2021 年 9 月 20 日アクセス).
- 35) Jacob S, Boveda S, Bar O, et al. Interventional cardiologists and risk of radiation-induced cataract: results of a French multicenter observational study. *Int J Cardiol* 2013; 167(5): 1843–1847.
- 36) 日本核医学会, 日本核医学技術学会, 日本診療放射線技師会. 放射性医薬品取り扱いガイドライン第 3.1 版. [http://jsnm.org/wp_jsnm/wp-content/uploads/2018/04/放射性医薬品取り扱いガイドライン第 3.1 版. pdf](http://jsnm.org/wp_jsnm/wp-content/uploads/2018/04/放射性医薬品取り扱いガイドライン第3.1版.pdf) (2021 年 9 月 20 日アクセス).
- 37) 福田篤志, 越田吉郎, 山口一郎, 他. 511 keV 消滅放射線および $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ガンマ線に対する診断用 X 線防護衣および防護用鉛ガラス衝立の遮蔽能力評価. *日放技学誌* 2004; 60(12): 1723–1729.

Estimation of Eye Lens Dose during the Handling of Radiopharmaceuticals and Using X-ray Protective Goggles for Dose Reduction in Nuclear Medicine

Norikazu Matsutomo,^{1,2} Mitsuha Fukami,¹ Takahisa Koike,^{1,2} and Tomoaki Yamamoto^{1,2}

¹ Department of Medical Radiological Technology, Faculty of Health Sciences, Kyorin University

² Graduate School of Health Sciences, Department of Medical Radiological Technology, Faculty of Health Sciences, Kyorin University

Received May 31, 2021; Revision accepted November 7, 2021; Published online March 8, 2022

Abstract

Purpose: The purposes of this study were to estimate the eye lens dose during the handling of radiopharmaceuticals and to validate the requirement of X-ray protective goggles in nuclear medicine. **Method:** Simulated eye lens radiation exposure (3-mm dose equivalent rate) was measured using a radiophotoluminescent glass dosimeter (RPLD) positioned at distances of 30 and 60 cm from ^{99m}Tc, ¹¹¹In, and ¹²³I radiation sources. Reduction rates were evaluated for the following means of radiation protection: X-ray protective goggles (0.07-, 0.50-, and 0.75-mm lead equivalent), a syringe shield, and a lead glass plate. **Result:** 3-mm dose equivalent rates without protection were obtained at $6.13 \pm 0.13 \mu\text{Sv/min/GBq}$ for ^{99m}Tc, $23.08 \pm 0.19 \mu\text{Sv/min/GBq}$ for ¹¹¹In, and $11.07 \pm 0.11 \mu\text{Sv/min/GBq}$ for ¹²³I. Reduction rates for each source were over 90% for the syringe shield and the lead glass plate. The 0.75-mm lead equivalent X-ray protective goggles decreased the 3-mm dose equivalent rate by 68.8% for ^{99m}Tc, 60.6% for ¹¹¹In, and 68.1% for ¹²³I. **Conclusion:** Although the estimated eye lens equivalent dose during the handling of radiopharmaceuticals did not exceed the threshold dose, our results suggest that 0.75-mm lead equivalent X-ray protective goggles are needed to reduce the exposure of the lens while handling ^{99m}Tc, ¹¹¹In, and ¹²³I radiation sources.

Key words: X-ray protective goggles, eye lens protection, radiation dose, radiation shielding and single photon emission computed tomography (SPECT)