

博士論文

嚥下造影検査時の従事者被ばく防護と患者被ばく低減に関する研究

東北大学大学院医学系研究科保健学専攻

放射線技術科学

生体応用技術科学領域

放射線検査学分野

森島貴顕

## 目次

第 1 章	要約	4～6
第 2 章	研究背景	7～14
2-1	血管系造影検査時の従事者被ばく防護	
2-2	非血管系造影検査時の従事者被ばく防護及び患者被ばく低減	
2-3	嚥下造影検査時の従事者被ばく防護及び患者被ばく低減	
2-4	VF までに至る過程と追加鉛防護具の開発経緯	
2-4-1	VF までに至る過程	
2-4-2	追加鉛防護具の開発経緯	
第 3 章	研究目的	14
第 4 章	研究方法	14～21
4-1	VF 時の従事者の実効線量 (ED) と等価線量 (DE) 測定	
4-2	ファントム実験	
4-2-1	使用機器	
4-2-2	測定方法	
4-2-2-1	人体ファントムを用いた VF 施行時の患者皮膚表面線の推定と従事者が受ける散乱線量の測定	
4-2-2-2	VF 時の患者皮膚表面線量の推定と従事者が受ける散乱線量の推定	
4-2-2-3	追加付加フィルタを用いた患者皮膚表面線量低減と追加鉛防護具・追加付加フィルタを用いた従事者被ばく防護	
4-3	VF 時の患者被ばく線量測定 (臨床測定)	
4-3-1	使用機器	
4-3-2	測定方法	

第 5 章	研究結果	21～25
5-1	従事者の実効線量 (ED) と等価線量 (DE)	
5-2	VF 時の患者皮膚表面線量 (ESD) の推定、従事者が受ける散乱線量の推定	
5-3	追加付加フィルタを用いた患者皮膚表面線量 (ESD) 低減と追加鉛防護具・追加付加フィルタを用いた従事者被ばく防護；人体ファントムを用いた推定	
5-4	VF 時の患者被ばく線量測定 (臨床測定)	
第 6 章	考察	25～35
6-1	従事者の実効線量 (ED) と等価線量 (DE) と VF 時の患者皮膚表面線量 (ESD) の推定と従事者が受ける散乱線量の推定	
6-2	追加付加フィルタを用いた患者皮膚表面線量 (ESD) 低減と追加鉛防護具・追加付加フィルタを用いた従事者被ばく防護	
6-3	VF 時の患者被ばく線量の測定 (臨床測定)	
6-4	本研究の限界	
第 7 章	結論	35～36
	謝辞	37
	参考・引用文献	38～47
	図・表	48～67

## 第 1 章 要約

X 線造影検査時における医療従事者の被ばく防護は重要である。特に、放射線業務従事者の水晶体の被ばく線量限度（等価線量限度）は、年間 150 mSv から、5 年間の平均が 20 mSv、または年間 50 mSv を超えないようにすべきであると ICRP（国際放射線防護委員会）より勧告が発表された。また、日本摂食嚥下リハビリテーション学会医療検討委員会 2014 版案において、嚥下造影検査 (Videofluoroscopy; VF) 時の線量測定の推奨しているように、患者および従事者の被ばく線量の低減が課題となっている。さらに VF においてはこれまで従事者と患者の被ばく線量の報告がほとんどないのが現状である。VF は同一の従事者により実施されることが多く、また VF を繰り返し施行する患者も少なくなく、従事者と患者の被ばくは無視できない状況であると思われる。

本研究は、①VF 施行時の従事者及び、患者の被ばく線量を推定し、その結果から、②従事者被ばく防護と患者被ばく低減のための追加の鉛防護具と追加付加フィルタを開発すること。③さらに、追加鉛防護具と追加付加フィルタを用いた場合の、従事者と患者の被ばく線量を評価し、被ばく低減の程度を明らかにすることを目的とした。

はじめに、VF 時の患者線量の推定と従事者被ばく線量を測定した。人体ファントムを用いて患者皮膚表面線量の推定を行うとおよそ

12.79 mGy であり、従事者の立ち位置での散乱線量は 255  $\mu$ Sv/h であった。この被ばく線量は、他の内視鏡的逆行性胆管膵管造影 (ERCP) や胃透視などの上部消化管撮影などの X 線透視を用いた検査・治療に比べても、明らかに低い。しかし、VF が施行される患者は複数回施行されていることが多く、注意が必要である。

また、個人線量計 (クイクセルバッジ ; 長瀬ランダウア社製) を用いた従事者の被ばく線量測定結果は従事者の実効線量は 0.9 mSv/年であり、等価線量 (水晶体線量) は 2.3 mSv/年であった。

この結果から、新たな 2 つの追加鉛防護具を作製し従事者被ばく防護、追加付加フィルタを用いた患者被ばく低減を試みた。X 線照射口に付加フィルタを取り付け、患者の皮膚線量の低減を試みる。追加鉛防護具と追加付加フィルタを製作することにより、VF 時における従事者と患者の被ばく線量を低減することが期待できる。開発した 2 つの追加鉛防護具である「VF Shielding Box」 (1.0 mmPb、重量約 6kg)、「スライド式防護板」 (0.3 mmPb、50 cm $\times$ 50 cm $\times$ 0.8 mm、重量約 6kg) を組み合わせると、散乱線量は、防護具を追加しない場合に比べて従事位置にて 60.3%減少した。加えて追加付加フィルタ (1.0、2.0、3.0 mm Al、0.5 mm Cu) を X 線照射口に取り付け、床上 150 cm での散乱線量を評価したところ、散乱線除去率は最大で 79.4%であった。

人体ファントムを用いて VF 施行時の追加付加フィルタを用いた患者皮膚表面線量 (ESD) 低減について検討した。追加付加フィルタ無しの場合に比べ 1.0 mm Al を使用した場合 ESD は 15.4%、2.0 mm Al で 30.8%、3.0 mm Al で 43.6%、0.5 mm Cu で 55.1%低減した。

VF 時の実際の患者被ばく線量 (臨床測定) について検討した。被験者 20 名の皮膚表面線量は平均で 18.62 mGy (平均透視時間 4.3±1.4 分) であった。この結果はファントム実験よりもやや高い数値であった。その理由としてファントムによる被ばく線量の推定では X 線管とファントム表面までの距離が 110 cm であったのに対し、今回の研究では X 線管と患者皮膚表面までの距離がおおよそ 90~100 cm とやや皮膚表面線量が X 線管に近かったためであると推測される。さらに、透視条件もファントム実験よりも高かったことが考えられる。臨床測定では追加付加フィルタは使用しなかったが、追加付加フィルタを用いると皮膚線量が低減できると考える。

本研究の結果から、追加鉛防護具を用いると立位・座位検査での術者の被ばく線量の低減が可能となる。また、追加付加フィルタを用いることにより患者線量の低減も期待できる。2 つの追加鉛防護具と追加付加フィルタの使用は従事者被ばく防護、患者被ばく低減に非常に効果的であると考えられる。

## 第2章 研究背景

### 2-1 血管系造影検査時の従事者被ばく防護

循環器疾患の増加により、心臓カテーテル検査(心カテ検査)も冠動脈インターベンション(percutaneous coronary intervention; PCI)等のカテーテル治療(interventional radiology; IVR)の件数が増加しており、X線透視時間が長くなる傾向にある<sup>1)~4)</sup>。また2000年、国際放射線防護委員会(International Commission on Radiological Protection; ICRP) Publication85においてIVRの放射線障害からの回避が国際的に重要な問題となっている<sup>5)</sup>。

心カテ検査等の血管系造影検査時の従事者の被ばく線量調査はこれまでも実施されており、従事者の被ばくを防護するために寝台横型鉛防護具や、天井走行式鉛防護具などの追加の防護具の使用により被ばく低減がなされてきた<sup>6),7)</sup>。無鉛タイプのX線防護衣は比較的軽量であり、かつ遮蔽能力も維持されているので、IVR従事者被ばく防護に適している<sup>8)</sup>。またX線防護衣に加えて含鉛メガネやネックガードの使用も従事者被ばく低減に有用であると報告されている<sup>9)</sup>。これらの先行論文の中で、寝台横型鉛防護具や天井走行式鉛防護具の使用で散乱線除去率が床上100cmの高さで80%以上であったこと、寝台横型鉛防護具や天井走行式鉛防護具導入前後1年間の従事者の被ばく線量が実効線

量で約45%、等価線量で約42%減少しているということが示されている。また鉛当量0.07 mmPbの防護眼鏡の使用で約60%の防護効果があり、鉛当量0.25 mmPbのネックガードで約90%の防護効果があることが示されている<sup>6)~9)</sup>。

## 2-2 非血管系造影検査時の従事者被ばく防護及び患者被ばく低減

追加鉛防護具は心カテ検査のような血管系造影検査のみならず非血管系造影検査に携わる従事者の被ばく低減にもつながると考えられる。

非血管系造影検査の従事者被ばく防護の基礎研究として一般に市販されている内視鏡的逆行性胆管膵管造影（endoscopic retrograde cholangiopancreatography ;ERCP）用追加鉛防護具の遮へい効果が示されている<sup>10)</sup>。

先行研究では、ERCP用追加鉛防護具を使用した場合、従事者（医師）位置にて最大約90%散乱線が遮へいでき<sup>10)</sup>、追加鉛防護具を取り付けると水晶体線量を線量限度以下に抑えられると報告している<sup>10)</sup>ことから、追加鉛防護具の使用は重要である。

## 2-3 嚥下造影検査時の従事者被ばく防護及び患者被ばく低減

医療現場において、X線造影検査は、多くの疾患の検査に使用されており、X線造影検査時における従事者の被ばく防護は、大変重要である。特に、従事者の水晶体の被ばく線量限度（等価線量限度）は、



年間 150 mSv から、5 年間の平均が 20 mSv、または年間 50 mSv を超えないようにすべきであると 2012 年に ICRP（国際放射線防護委員会）の勧告<sup>11)</sup>が発表されたことにより、従事者の水晶体の被ばくを低減するための放射線防護具の開発が急がれている。特に、X 線管が寝台より上にあるオーバーテーブル形透視撮影台では、X 線管が寝台より下にあるアンダーテーブル形透視撮影台に比べ、従事者の水晶体線量が高いと報告されており<sup>10)</sup>、従事者の水晶体への被ばく線量の低減のための防護具の開発が不可欠であるが、これまでに、オーバーテーブル形透視撮影台では、横置きで使用する場合の防護具しか開発されていない。しかし、嚥下造影検査 (Videofluoroscopy; VF) はオーバーテーブル形透視撮影台を縦置きの状態で施行される。縦置きの状態で使用される検査には防護具がない。嚥下障害の患者の嚥下状態の評価方法には、VF のほかに、超音波検査、CT 検査、嚥下内視鏡検査 (Videoendoscopy ; VE) などがあるが、VF は嚥下障害の患者が嚥下の過程を画像診断評価にて行う標準的な生理検査方法である<sup>12,13)</sup>。嚥下状態を連続して観察でき、誤嚥を評価できることも特長である。

VF は、バリウムを含む食物を飲み込む際に口腔、咽頭、上部食道の動態を X 線透視装置で観察し嚥下状態を録画装置で記録する。その際、患者及び従事者の被ばく線量の増加が懸念されている<sup>14,15)</sup>。

患者は椅子や車椅子または、角度可変の椅子（通称：VF チェア）を使用し、座った状態で、バリウムを含むゼリー、寒天、とろみ水、とろみなし水、クッキーの順番で従事者の指示のもと飲食する。しかし、患者の嚥下状態に応じて従事者の指示により途中で中止することもある。なお、角度可変の椅子（通称：VF チェア）は、通常患者が飲食している角度、もしくは従事者が必要であると判断する角度で検査を施行する。

東北医科薬科大学病院（病床数466）における年間のVF件数は2011年から2016年の平均で約50件である。前述のごとく、VFは嚥下障害のある患者の嚥下異常の過程を明らかにするためにとっても重要であることが示されている<sup>12,13),16)</sup>。東北医科薬科大学病院ではVFは、①従事者は患者の近くで患者に飲食させながら透視像で嚥下状態を確認しながら施行すること。（患者が自ら飲食するのではない）②患者状態によっては、透視時間が長くなることから従事者被ばくのリスクが懸念されている<sup>17)~19)</sup>。従って、VF従事者の放射線防護は重要な問題である<sup>20)~22)</sup>。

患者の放射線被ばくに関しては VF の問題点として指摘されており<sup>16)</sup>、これまで人体ファントムを使用した患者被ばく線量推定や<sup>23)</sup>、装置表示値を利用した計算から患者被ばく線量推定は報告されてきた。しかし実際の患者線量を報告したものはほとんどない。

VFの手技時間が長くなると従事者と患者両方とも高線量にさらされる可能性がある<sup>5),24)~28)</sup>。

日本摂食嚥下リハビリテーション学会医療検討委員会 2014 版案<sup>16)</sup>において、VF 施行時の適正な管電圧、管電流の使用、施設ごとの線量測定<sup>16)</sup>の推奨、X 線防護衣と甲状腺用のネックガードの着用と個人線量計の装着が提唱されており、患者および従事者の被ばく線量の低減が重要課題となっている。

アメリカ食品医薬品局 (FDA) と国際放射線防護委員会 (ICRP) は各患者が受ける被ばく線量を測定して記録することを推奨している<sup>29),30)</sup>。

また、「European Society of Gastrointestinal Endoscopy (EGSE) ガイドライン 2012」によると、0.5 mm 鉛当量以上の防護具を X 線管とスタッフの間に設置することを推奨している (外科用イメージ C アーム使用時も同様である)<sup>31)</sup>。防護具を使用することにより、従事者の被ばく線量が低減したと報告している<sup>32)</sup>。

従って、VF 施行中、従事者は X 線防護衣を着用しなければならない。

たとえ X 線防護衣を着用しても放射線障害を負う可能性がある<sup>31)</sup>。従事者は水晶体障害のリスクを負う可能性がある<sup>31)</sup>ので、水晶体の防護も必要である<sup>33)</sup>。さらに、VF を複数回施行される患者もいるので、患者の被ばく量を注意深く気にかける必要がある<sup>34),35)</sup>。

ERCP 施行時のように、寝台横置きで施行する際の散乱線防護のための追加鉛防護具はすでに市販されており、防護効果を実証されているが<sup>36)</sup>、VF のような寝台縦置きの場合の追加鉛防護具はない。寝台縦置きの検査の場合も、横置きの場合と同様に、手技中は散乱線にさらされており、VF 時の散乱線防護のための専用の追加鉛防護具の開発が望まれる。しかし、VF 施行時の従事者被ばく防護のため、追加鉛防護具を開発し、患者線量低減のための追加付加フィルタを使用した研究は報告されていない。

今回、VF 時の散乱線防護するために新規に鉛防護具 (VF Shielding Box) と追加付加フィルタを開発した。

これにより、従事者の被ばく防護と追加付加フィルタを使用することで低エネルギー X 線領域を除去することにより、患者の皮膚線量の低減につながる事が予想される。

オーバーテーブル形透視撮影台を使用した立位等での造影検査は、VF をはじめ消化管造影など、多くの造影検査手技で行われており、縦置きが可能な防護具が開発されれば、立位での検査のみならず半立位等での被ばく低減において有用性が大きく、また波及効果が非常に高いと思われる。

#### 2-4 VF までに至る過程と追加鉛防護具の開発の経緯

#### 2-4-1 VF までに至る過程

嚥下障害の疑われる患者は、入院病棟にて医師と言語聴覚士立会いの下で患者の身体状態を把握し、患者自身で唾液を飲み込んでもらうなどのスクリーニング検査を実施する。その後、嚥下検査が必要と判断した場合は、患者状態により VF もしくは、VE を施行するか判断する。急性期患者で透視室まで移動不可能な患者は病室内で施行可能な VE を選択することが多い。VE は経鼻より施行するが、経鼻挿入困難と判断した場合や認知症患者は VF を選択することが多い。

#### 2-4-2 追加鉛防護具の開発の経緯

追加鉛防護具を開発するにあたり、透視装置を使用した際の従事者の被ばくの原因となる散乱線発生部位を把握しなければならない。先行研究から、透視装置を使用した従事者の被ばくの大部分は、①X線照射口付近から、②患者からの散乱線であると報告されている<sup>34)</sup>。この報告より、これら2箇所からの散乱線を防護するように追加鉛防護具を開発しようと考えた。①からの散乱線を防護具として、まずダンボールを用いてX線照射口に取り付けるように試作し、これに不要となった防護衣を巻きつけた(試作1号)。次に、この試作をもとに防護具作製会社に依頼し、X線照射口を巻きつけるように防護具を試作した(鉛当量0.125 mmPb:試作2号)(図1a、b)。

②からの散乱線防護具として、すでに心カテ室などで使用されている防護衝立を参考にした。VF 施行時は従事者と患者が近いため、検査の妨げにならないように、防護衝立型ではなく、透視寝台に取り付ける形状とした。患者からの散乱線を防護するのに十分である大きさと寝台に負担にならない重量を考慮し開発した。

### 第 3 章 研究目的

本研究の目的は、透視装置を使用した VF の患者被ばく線量を推定し、被ばく低減を試みること、従事者被ばく線量を明らかにして、被ばく線量低減のための防護具を開発することである。また、新たに開発した追加付加フィルタと追加鉛防護具がどの程度患者と従事者の被ばく線量低減に寄与するかについて検討することである。さらに、実臨床において患者被ばく線量を明らかにすることである。

### 第 4 章 研究方法

#### 4-1 VF 時の従事者の実効線量 (ED) と等価線量 (DE) 測定

従事者は VF 施行時 2 つの個人線量計 (クイクセルバッジ ; 長瀬ラウンドア社製) を装着する。1 つは X 線防護衣の内側で実効線量の評

価を、もう 1 つは X 線防護衣の外側で X 線防護衣に覆われていない部分の襟首に装着し、等価線量（水晶体）の被ばく線量を評価する。

実効線量（ED）と等価線量（DE）は以下の式を用いて計算する<sup>37)</sup>。

$$ED = 0.89 \text{ Hp}(10)_{in} + 0.11\text{Hp}(10)_{out}$$

$$DE = 1.00 \times \text{Hp}(0.07)_{out}$$

$\text{Hp}(10)_{in}$  は X 線防護衣（0.35 mmPb）の内側（男性：胸部、女性：腹部）に装着し 1 cm 線量当量を評価する。

$\text{Hp}(10)_{out}$  は X 線防護衣に覆われていない頭頸部に装着し 1 cm 線量当量を評価する。

$\text{Hp}(0.07)_{out}$  は頭頸部に装着し 70  $\mu\text{m}$  線量当量を評価する。

測定は長瀬ランダウア社に依頼する。

## 4-2 ファントム実験

### 4-2-1 使用機器

オーバーテーブル形透視撮影台は東芝社製ZEXIRAを使用する。この透視装置の固有ろ過は2.5 mmアルミニウムである。人体ファントムは京都科学社製PBU-50を使用する。患者皮膚表面線量（The entrance skin dose ;ESD)の推定はSkin Dose Monitor (SDM) (104-101型;マクマホンメディカル社製)を使用する。サーベイメータ

(日立アロカ社製ICS-321測定範囲：1  $\mu$ Sv/h～300 mSv/h) を用いて実施する。

#### 4-2-2 測定方法

##### 4-2-2-1 人体ファントムを用いた VF 施行時の患者皮膚表面線量と従事者が受ける散乱線量の測定

SDM は人体ファントムの頸部に取り付ける。また SDM は人体ファントムからの後方散乱線の値を含んでいる。

I.I.サイズは 10 インチ、SID は 148 cm、X 線管とファントム表面までの距離はおよそ 110 cm である。透視 X 線の照射野は人体ファントムの水晶体位置にかからないように実施し、X 線管に対し側面の状態で実施する。

従事者が受ける散乱線量の測定は、患者皮膚表面線量推定に使用した人体ファントムとサーベイメータを用いて実施する。ファントムとサーベイメータの配置と透視像を図 2 に示す。

従事者の立ち位置における散乱線量の測定は、通常 VF 時の従事者の立ち位置に相当する人体ファントムから約 60 cm の位置でサーベイメータを用いて測定する。ファントム実験の幾何学的配置図の平面方向を図 3a に垂直方向を図 3b 示す。従事者位置における散乱線量測定は測定の高さは床上 100 cm とする。ファントム実験から患者あたりの透



視時間と線量の推定と、従事者位置における散乱線量から線量の推定を実施する。

#### 4-2-2-2 VF 時の患者皮膚表面線量の推定と従事者が受ける散乱線量の推定

平成 26 年 4 月から平成 27 年 4 月まで東北薬科大学病院（現：東北医科薬科大学病院）にて施行された VF 56 件を対象として、VF の平均透視時間を測定する。

人体ファントムを用いた測定の透視管電圧と管電流はそれぞれ 70～71 kV 1.0～1.1 mA である。

患者皮膚表面線量測定は 5 分測定で 3 回の測定の平均値を測定する。

#### 4-2-2-3 追加付加フィルタを用いた患者皮膚表面線量低減と追加鉛防護具・追加付加フィルタを用いた従事者被ばく防護

透視条件はABC（自動輝度制御；Auto Brightness Control）機構を使用し、管電圧は71～83 kV、管電流は1.1～1.7 mA、連続透視で実施する。

追加付加フィルタ(1.0、2.0、3.0 mm Al、0.5 mm Cu)をX線照射口に取り付ける。本研究では、ESDを追加フィルタの有無で測定を実施する(図4)。

次に、今回新たに開発した2つの追加鉛防護具の有無にて散乱線量の測定を実施する。1つはX線照射口を覆うように取り付ける「VF Shielding Box」を開発し防護効果を検討する。VF Shielding Boxの写真及び、作製図を図5に示す。VF Shielding Boxを使用した場合の散乱線測定配置図を示す(図6)。測定点は床上90 cmと150 cmである。(90 cmは生殖腺の位置、150 cmは水晶体の位置を想定する。) VF Shielding Boxは透視台を縦置きにした場合を想定して作製したものであり、X線管開口部が覆われており、鉛当量は1.0 mm Pb、重量は約6 kg、長さは40 cmである(図5b)。

さらにVF Shielding Boxに追加付加フィルタ(1.0、2.0、3.0 mm Al、0.5 mm Cu)をX線照射口に取り付け散乱線量を測定する。

VF Shielding Boxと追加付加フィルタの有無における散乱線線量除去率の式は以下を用いて計算する。

散乱線除去率(%) =  $100 - \frac{(\text{VF Shielding Boxの有無、追加付加フィルタの有無})}{(\text{VF Shielding Box} \cdot \text{追加付加フィルタ無し})} \times 100$

次に、従事者被ばく防護が可能であると考え、従事者の水晶体被ばく防護のための追加防護具として「スライド式防護板」（50 cm×50 cm×0.8 mm で鉛当量は0.3 mmPb、重量は約6 kg）を開発し防護効果を検討する。使用方法は、従事者と患者を隔てるように、寝台手すりに装着する。従事者は、スライド式防護板越しに患者に飲食させ、嚥下状態を観察する。スライド式防護板とファントムの位置関係、VF Shielding Boxとの位置関係を図7a、b に示し、スライド式防護板の概略を図7c に示す。2つの防護具における散乱線防護効果を検討するために、防護具の有無における散乱線測定を実施する。

測定点は術者（P）をはじめあらかじめ定めた測定点（水平方向15箇所）床上150 cm（水晶体位置想定）において防護具の有無で散乱線量を測定した。散乱線測定の測定図を図8aに示す。また、従事者位置の垂直方向9箇所（従事者位置の床上150 cm、100 cm、50 cmと従事者位置から50 cm、100 cmの位置）の散乱線量を測定する（図8b）。

散乱線量の測定は、人体ファントムと半導体式サーベイメータ（RTI社製Piranha）を用いて行い<sup>38)</sup>、散乱線量を可視化するために空間線量分布ソフト（エスエス技研社製 SS-3030）を使用し、床上 150 cm（水晶体位置）での水平方向2つの追加防護具有無のそれぞれの場合の空間線量分布図と、垂直方向での空間線量分布図を水平方向と同様に作成する。

「VF Shielding Box」と「スライド式防護具板」に加えて追加のフィルタ(1.0、 2.0、 3.0 mm Al 、 0.5 mm Cu) をX線照射口に取り付け、防護具と組み合わせて散乱線量を測定する。

#### 4-3 VF 時の患者被ばく線量測定 (臨床測定)

##### 4-3-1 使用機器

オーバーテーブル形透視撮影台はファントム実験と同様の装置を使用する。ESD の測定に用いた線量計は MIDSOF (SCH01 型 ; アクロバイオ社製 測定範囲 : 10  $\mu$ Gy ~ 1000 Gy) を使用した。MIDSOF の値は後方散乱の値を含んでいる。

##### 4-3-2 測定方法

平成 28 年 10 月から平成 29 年 4 月まで東北医科薬科大学病院にて承諾の得られた患者 20 名を対象に患者の頸部に線量計を取り付け VF 施行中の患者皮膚表面線量を測定する。

患者背景として、男女比は 11 : 9、平均体重は  $52.5 \pm 15.9$ kg、平均年齢は  $80.55 \pm 10.8$  歳である。疾患内訳は、脳出血・脳梗塞後遺症 6 名、誤嚥性肺炎 4 名、頸部がん、認知症がそれぞれ 2 名、多発性筋炎、皮膚筋炎、廃用症候群、歯状核赤核ルイ体萎縮症、進行性核上性まひ、大腿骨頸部骨折術後がそれぞれ 1 名ずつである。

透視条件は ABC 機構を使用し、管電圧は 67～97 kV、管電流は 0.9～2.5 mA である。追加付加フィルタは使用せず、2.5 mmAl の固有フィルタのみを使用する。

I.I.サイズは 10 インチ、SID は 148 cm、X 線管と患者皮膚表面までの距離はおよそ 90～100 cm である。X 線照射野は患者水晶体にかからないようにする。

なお、本研究は患者被ばく線量を測定するにあたり、東北医科薬科大学病院倫理委員会の承認を得ている（承認番号 2016-2-036）。

## 第 5 章 結果

### 5-1 従事者の実効線量（ED）と等価線量（DE）

平成 25 年 4 月から平成 26 年 3 月までの 1 年間の個人線量計の結果から従事者の実効線量（ED）は 0.9 mSv/年であり、等価線量（DE）は 2.3 mSv/年であった（表 5）。

### 5-2 VF 時の患者皮膚表面線量（ESD）の推定、従事者が受ける散乱線量の推定

ファントム実験の結果を表 1 に示す。ESD は 7.8 mGy/5min であった。従事者の立ち位置での散乱線量は 255  $\mu$ Sv/h であった。

また、平成 26 年 4 月から平成 27 年 4 月まで東北薬科大学病院（現：東北医科薬科大学病院）にて嚥下造影検査 56 名の患者の平均透視時間は 8 分 14 秒（1 分 56 秒～17 分 23 秒）であった。この結果から平均患者線量を求めると VF 1 件当たり 12.79 mGy（7.8/5×8.2 分）であり、VF 1 件当たりの術者位置での散乱線量はおよそ 34.85  $\mu$ Sv（255  $\mu$ Sv/h×1/60×8.2 分）であった。

5-3 追加付加フィルタを用いた患者皮膚表面線量（ESD）低減と追加鉛防護具・追加付加フィルタを用いた術者被ばく線量防護；人体ファントムを用いた推定

表 2 は追加のフィルタの有無における患者皮膚表面線量（ESD）を示す。追加付加フィルタ無しに比べて、1.0 mm Al を使用した場合 ESD は 15.4%、2.0 mm Al で 30.8%、3.0 mm Al で 43.6%、0.5 mm Cu で 55.1%低減した。

次に、VF Shielding Box 及び追加付加フィルタの有無での従事者位置における散乱線を表 3 に示す。

VF Shielding Box 無しでの従事者の位置(point b)での散乱線は 300  $\mu$ Sv/h (床上 90 cm)、255  $\mu$ Sv/h (床上 150 cm)。VF Shielding Box 有りの場合はそれぞれ 273、235  $\mu$ Sv/h であった。従って散乱線量はそれぞれ 9.0%、7.8%減少した。

VF Shielding Box 無しで 1.0 mm Al フィルタを使用した場合の散乱線量は 280  $\mu\text{Sv/h}$  (床上 90 cm)、235  $\mu\text{Sv/h}$  (床上 150 cm)。VF Shielding Box 有りの場合はそれぞれ 266、199  $\mu\text{Sv/h}$  であった。従って散乱線量は床上 90 cm で 6.7% 及び 11.3%、床上 150 cm で 7.8% 及び 22.0% 減少した。

VF Shielding Box 無しで 2.0 mm Al フィルタを使用した場合の散乱線量は 246  $\mu\text{Sv/h}$  (床上 90 cm)、210  $\mu\text{Sv/h}$  (床上 150 cm)。VF Shielding Box 有りの場合はそれぞれ 225、170  $\mu\text{Sv/h}$  であった。従って散乱線量は床上 90 cm で 18.0% 及び 25.0%、床上 150 cm で 17.6% 及び 33.3% 減少した。

VF Shielding Box 無しで 3.0 mm Al フィルタを使用した場合の散乱線量は 224  $\mu\text{Sv/h}$  (床上 90 cm)、184  $\mu\text{Sv/h}$  (床上 150 cm)。VF Shielding Box 有りの場合はそれぞれ 194、142  $\mu\text{Sv/h}$  であった。従って散乱線量は床上 90 cm で 25.3% 及び 35.3%、床上 150 cm で 27.8% 及び 44.3% 減少した。

VF Shielding Box 無しで 0.5 mm Cu フィルタを使用した場合の散乱線量は 182  $\mu\text{Sv/h}$  (床上 90 cm)、160  $\mu\text{Sv/h}$  (床上 150 cm)。VF Shielding Box 有りの場合はそれぞれ 167、141  $\mu\text{Sv/h}$  であった。従って散乱線量は床上 90 cm で 39.3% 及び 44.3%、床上 150 cm で 37.3% 及び 44.7% 減少した。

これらの値はすべて 1cm 線量当量で示した。

次に、「スライド式防護板」の有無による散乱線量測定の結果を表 4 に示す。

床上 150 cm における VF Shielding Box を取り付けた場合の従事者位置での散乱線除去率は 11.0%程度であったが、これに新たな「スライド式防護板」を使用した場合は 60.3%であった。さらに追加付加フィルタ (1.0、2.0、3.0 mmAl および 0.5 mmCu) を使用した場合の散乱線除去率はそれぞれ 67.6%、65.4%、70.5%、79.4%であった。

床上 100 cm における VF Shielding Box を取り付けた場合の従事者位置での散乱線除去率は 15.4%であった。さらに追加付加フィルタ (1.0、2.0、3.0 mmAl および 0.5 mmCu) を使用した場合の散乱線除去率はそれぞれ 30.1%、30.1%、42.9%、62.8%であった。

床上 50 cm における VF Shielding Box を取り付けた場合の従事者位置での散乱線除去率は 16.7%であった。さらに追加付加フィルタ (1.0、2.0、3.0 mmAl および 0.5 mmCu) を使用した場合の散乱線除去率はそれぞれ 32.1%、30.7%、43.6%、62.8%であった。

次に、あらかじめ定めた測定点の散乱線量を可視化するためにこれらの結果を空間線量分布ソフトを使用し、床上 150 cm における水平方向の 2 つの追加防護具有無のそれぞれの場合の空間線量分布図 (図 9、図 10) と、垂直方向の 2 つの追加防護具有無のそれぞれの場合の空間



線量分布図（図 11、図 12）を作成した。

#### 5-4 VF 時の患者被ばく線量測定（臨床測定）

患者 20 名のうち男女比は（11:9）であり、平均体重は  $52.5 \pm 15.9$  kg。平均透視時間は  $4.26 \pm 1.4$  分であった。透視条件は、ABC 機構を使用し、管電圧は 67~97 kV であり、管電流は 0.9~2.5 mA であった。患者皮膚表面線量は平均で  $18.62 \pm 8.7$  mGy であった。なお、臨床測定を実施するにあたり、患者の入室から退出まで通常の検査に比べ時間が長くなるなどのことはなかった。

## 第 6 章 考察

### 6-1 従事者の実効線量（ED）と等価線量（DE）と VF 時の患者皮膚表面線量（ESD）の推定

VF は嚙下障害を評価する標準的な検査である。本研究で、VF 施行中の患者線量の推定と従事者の被ばく線量の推定を行った。

放射線被ばくは人体に様々な副作用をもたらす<sup>39)</sup>。従って、被ばく量の正確な測定は患者や従事者（医師やその他のスタッフ、言語聴覚士を含む）の安全においても重要である。

放射線の影響には 2 つのタイプがある。確率的影響と確定的影響である。実効線量（ED）は確率的影響（例えば発がん）のリスク評価に用いられる。そして実効線量限度は 50 mSv/年であり 5 年で 100 mSv を超えないという定義がなされている。確率的影響の発生を容認できるレベル内に維持されていることが望ましい<sup>40)</sup>。

確率的影響の発生を防ぐためには、ICRP（国際放射線防護委員会）が発表した「どんな被ばくでもある程度の危険を伴うことがあるので、いかなる不必要な被ばくも避けるべきであること、また、経済的及び社会的な考慮を計算に入れたうえ、すべての線量を容易に達成できる限り低く（as low as readily achievable：ALARA の原則）保つべきである」とした勧告に基づき<sup>41)</sup>、被ばく低減を検討すべきである。

一方、等価線量（DE）は確定的影響（白内障など）の発生リスクを推定するために用いられる。確定的影響はしきい値以上の場合に生じる。等価線量限度は水晶体線量限度で 150 mSv/年であり、確定的影響の発生回避のために使用される<sup>40)</sup>。

VF の場合、従事者の被ばく量は透視時間に直接影響を受ける<sup>42)</sup>。本研究は 1 人の従事者が VF を担当している。

VF の従事者被ばくに関する報告をした先行研究はほとんどない。本研究で実際の VF 施行時の従事者被ばくを測定した。

その結果、従事者実効線量は 0.9 mSv/年であり、等価線量（水晶体線

量) は 2.3 mSv/年であった。以前は従事者被ばく線量を 1 つの個人線量計で評価していたが、千田ら<sup>43)</sup>の報告で 1 つの個人線量計では実効線量が過小評価しており、2 つの個人線量計の着用を推奨している。

このことから東北医科薬科大学病院では平成 25 年から 2 つの個人線量計を用いて従事者被ばくを評価している。

この結果から従事者の実効線量は放射線業務従事者の線量限度である 50 mSv/年よりはるかに低く線量限度内であることが明らかになった。X 線検査を受ける患者は皮膚障害の回避のため、ALARA の原則に基づいて被ばく量を維持する必要がある<sup>23),24),44)</sup>。

等価線量 (水晶体線量) (2.3 mSv/年) も線量限度の 150 mSv/年よりも相当低いことが示された。

本研究の結果から VF は X 線透視を用いた他の検査・治療に比べても、相当低い線量で実施されていることが明らかになった。さらに VF の放射線被ばくからの放射線障害のリスクは他の一般的な放射線を用いた検査に比べて比較的少ないと言える。しかし、水晶体被ばくに関しては注意が必要である。追加鉛防護具の使用等で確定的影響からの回避が期待できると考える<sup>45)</sup>。

これまで、患者が受ける被ばく線量<sup>32)~35),42)</sup>と従事者が受ける散乱線量に関する先行研究論文はいくつかあり<sup>22)</sup>、患者線量に関する先行研究では、面積線量 (dose-area product : DAP) を用いた計算による

患者線量の推定を実施した研究がある。

Wright ら<sup>42)</sup>の研究では、透視時間は 4.77 分であり、ED は 0.4 mSv であり、DAP は 4 Gy $\text{cm}^2$  と報告しており、Zammit-Maempel ら<sup>46)</sup>の研究では、透視時間は 3.02 分であり、ED は 0.2 mSv であり、DAP は 1.6 Gy $\text{cm}^2$  と報告しており、Kim ら<sup>25)</sup>の研究では、透視時間は 4.82 分であり、ED は 1.23 mSv であり、DAP は 9.62 Gy $\text{cm}^2$  と報告しており、Chau ら<sup>26)</sup>の研究では、透視時間は 4.23 分であり、ED は 0.31 mSv であり、DAP は 2.42 Gy $\text{cm}^2$  と報告している。

本研究では透視時間は先行研究よりも長かった。その理由として飲食する種類が先行研究と比べて多かったことが考えられ、結果として患者が受ける被ばく線量も多くなると思われる。

人体ファントムと SDM と用いて VF 時の患者表面線量 (ESD) の推定を行ったのは本研究が初めてである。

ファントム実験においては、患者皮膚線量は 7.8 mGy/5 min であった。この結果から、VF 1 件あたりの患者皮膚線量はおおよそ 3.0~27.9 mGy であり、平均 12.79 mGy (7.8/5 $\times$ 8.2 分) と推定された。

この被ばく線量は ERCP や上部消化管撮影などの X 線透視を用いた他の検査・治療に比べても、明らかに低い<sup>42)</sup>。しかし、VF を受ける患者は複数回検査を受けていることが多く、放射線障害に対し注意が必要である<sup>26)</sup>。

一方、従事者が受ける散乱線量に関しては、Chan ら<sup>14)</sup>は患者の頸部から 60 cm 離れた位置での散乱線量を 8.42  $\mu\text{Sv}$  と報告している。本研究では、患者から 60 cm 離れた従事者位置（床上 100 cm）で VF 1 件当たりの散乱線量は 34.85  $\mu\text{Sv}$  ( $255 \mu\text{Sv/h} \times 1/60 \times 8.2$  分) と推定した。この結果は先行研究に比べておよそ 4.1 倍高い値である。その理由として、使用したファントムは先行研究では頸部の厚さを 10 cm と想定していた、縦 30 cm×横 30 cm×厚さ 10 cm のものを使用したのに対し、本研究は人体ファントムの厚さは（頸部位置で）およそ 18 cm であり、本研究で使用したファントムのほうが厚くその分、散乱線量も多かったと考えられる。

また、2012 年に ICRP から水晶体等価線量の大幅な引き下げが勧告された<sup>11)</sup>。白内障の発生しきい値が 0.5 Gy と発表され、これまでのしきい値（急性被ばく：5 Gy、分割被ばく：8 Gy 以上）よりかなり低いと考えられており、水晶体の線量限度が現在の年間 150 mSv から 5 年間の平均が 20 mSv、または、年間 50 mSv を超えない値へ引き下げがおこなわれる可能性がある（表 6）。ここで、水晶体線量限度を 20 mSv/年とした場合に、前述した VF 1 件当たりの従事者位置での散乱線量から計算すると、測定点が床上 100 cm であり、あくまでも近似値であるが、1 人の従事者の VF 施行件数がおよそ年間 600 件を超えない限り線量限度を超えることはない。今のところ線量限度を超える恐れは

ないと考えるが、検査件数の増加や、患者状態により、被ばく線量は増加することがあるので注意が必要である。

透視時間は患者の嚥下状態により左右される<sup>14)</sup>。VF を施行する患者の多くは複数回実施している。頸部（甲状腺）の位置の被ばく線量は極力抑えなければならないと考える。

## 6-2 追加付加フィルタを用いた患者皮膚表面線量（ESD）低減と追加鉛防護具・追加付加フィルタを用いた従事者被ばく防護

本研究は、追加付加フィルタと、追加鉛防護具を用いて、VF における、患者と従事者の両方の被ばく低減について検討した最初の研究である。

Fetterly ら<sup>47)</sup> は、0.1 mmCu フィルタを使用すると、ファントムの空気カーマ（皮膚線量率）が 40%低下することを報告している。

本研究では、追加付加フィルタ（1.0、2.0、3.0 mmAl および 0.5 mmCu）を使用し、患者の被ばく低減を試みたところ、5 分間測定で患者の ESD が 15.4%～55.1%減少したことが示された。なお、本研究では、VF の平均時間はおよそ 8.2 分であったので<sup>33)</sup>、5 分間測定での被ばく線量評価は適切であると考ええる。

フィルタを厚くすると患者の線量が減少するが、銅フィルタを使用する場合は、アルミニウムフィルタを使用する場合よりも透視条件が高

くなるため、管電圧と管電流を考慮してフィルタを選択する必要があると思われる。追加付加フィルタは患者の ESD を低減するのに非常に有効であると考えられる。患者被ばくに線量限度はないが、放射線障害の一時紅斑のしきい値線量を 2 Gy と示されていることから<sup>5)</sup>、ALARA の原則に基づいて患者被ばく低減に注意を払うべきである。本研究では、追加付加フィルタを使用することで最大約 50% 皮膚線量を低減することが可能であることが示された。

X 線透視装置を用いた検査・治療は広く用いられている反面、散乱線による従事者被ばくのリスクあることに注意しなければならない<sup>48)</sup>。従って、VF 時の従事者の放射線防護は重要であると考えられる。

オーバーテーブル形透視撮影台を横置きで使用する ERCP 検査の際に、追加防護具を使用し従事者を放射線被ばくから防護することが報告されている<sup>10),36)</sup>。しかし、これまで、VF 施行時の従事者防護に関する報告はほとんどない。VF 施行時の従事者被ばく防護が重要であると考え、ファントム実験から従事者位置の散乱線量と、毎月の個人線量計のデータから従事者の実効線量、等価線量の結果を 5-1 で報告した。本研究では、VF 施行時に新たに開発した追加鉛防護具を使用して、従事者の被ばく低減に関して検討した。このような検討はこれまで報告がなく、本研究が初めてである。医師以外の従事者（特に看護師や言語聴覚士など）は患者から距離をとることで散乱線から防護すること

はできるが、医師は不可能である<sup>23)</sup>。従って、追加鉛防護具等を使用し散乱線から防護することが重要である。新たに開発した追加鉛防護具である VF Shielding Box では、人体ファントムを使用して測定した散乱線量は、VF Shielding Box を使用しない場合に比べて約 10% 減少した。この結果は ERCP の追加防護具を途中で折り曲げて使用した先行研究の散乱線防護効果とほぼ同等であった<sup>49)</sup>。ERCP の追加防護具と同様に寝台と追加防護具の間に空間ができるため、遮蔽効果が少なかったと考える。

そこで本研究では、VF Shielding Box と追加付加フィルタを組み合わせさせて散乱線を測定したところ、従事者の位置で最大約 45% の散乱線を減少することができた。低エネルギーの X 線が追加付加フィルタによって除去され、X 線線量が減少したためと思われる。患者からの散乱線をさらに遮蔽できれば、従事者の被ばく量はさらに減少するであろうと考えた。従事者被ばく、特に水晶体の被ばく防護のための追加鉛防護具として「スライド式防護板」を作製した。この「スライド式防護板」単独、または VF Shielding Box や追加付加フィルタの組み合わせの有無において、従事者被ばく低減効果について検討した。

VF Shielding Box のみの使用では、散乱線防護効果は約 10% 程度であったのに対し、VF Shielding Box と新たに追加した「スライド式防護板」を組み合わせると、散乱線量は、スライド式防護板を追加し



ない場合に比べて従事者位置にて 60.3%減少した。

また、「VF Shielding Box」と寝台取り付け型の「スライド式防護板」に加えて追加付加フィルタを X 線照射口に取り付け、水晶体の高さに相当する床上 150 cm で散乱線量を評価したところ、散乱線除去率は最大で 79.4%であった。

この結果は、ERCp 時に使用する追加鉛防護具の従事者位置での散乱線遮へい効果とほぼ同等であった<sup>49)</sup>。

VF Shielding Box、スライド式防護板、追加付加フィルタを組み合わせ使用することが、従事者被ばく防護に非常に効果的であると考えられる。

### 6-3 VF 時の患者被ばく線量測定（臨床測定）

VF の患者線量に関する先行研究では、DAP を用いた研究がある<sup>25),26),42),46)</sup>が、実際の VF 施行時に患者に線量計を取り付け被ばく線量を測定したのは本研究が最初である。

患者被ばく線量では被験者 20 名の平均透視時間は  $4.26 \pm 1.4$  分、平均線量は 18.62 mGy であった。ファントム実験による皮膚線量推定値 (12.79 mGy) に比べやや高い値を示した<sup>33)</sup>。その理由として、ファントムによる被ばく線量の推定では X 線管とファントム表面までの距離を 110 cm としたのに対し、実臨床では X 線管と患者皮膚表面まで

の距離がおよそ 90~100 cm とファントム実験に比して X 線管に近かったためであると推測される。さらに、透視条件もファントム実験が管電圧と管電流はそれぞれ 70~71 kV、1.0~1.1 mA であったのに対し、実臨床では管電圧と管電流はそれぞれ 67~97 kV、0.9~2.5 mA であり、透視条件は実臨床の方がファントム実験に比べ高かったことが考えられる。

また、平成 26 年 4 月から平成 27 年 3 月までの 56 名の VF 件数の平均透視時間は約 8.2 分であるのに対し、平成 28 年 10 月から平成 29 年 4 月までの 20 名の平均透視時間は 4.26 分と約 2 倍近い差があった。この理由は、回復期型と急性期型で患者症例の違いがある。前者の期間は東北薬科大学病院では、VF は回復期リハビリテーション患者が大多数を占め、VF 施行時においては、嚥下状態を VF チェアの角度を変化させて施行することも多く、角度を変えるごとに飲食をバリウムの含むゼリー、寒天、とろみ水、とろみなし水、クッキーの順で施行しており、検査時間、透視時間が長くなる傾向があった。それに対し、後者の期間は名称も東北医科薬科大学病院に変更になり、回復期リハビリテーション患者から急性期患者へ患者層が変化し、VF よりも病室で施行可能な、VE を施行する機会も増えた。また、VF 施行時においても、長時間の検査に耐えることが困難な患者が多く、VF チェアの角度も可変させることなく、少ない種類の飲食で終了することが多くな

った。その結果、透視時間も前者の期間に比べて短くなったと考える。

#### 6-4 本研究の限界

本研究は、透視線量データは 1 施設のみであること、X 線管とファントムを用いた実験と実臨床での患者皮膚表面の距離が異なること、ファントム実験と実臨床での透視条件が異なることである。今後は、実臨床において VF Shielding Box、スライド式防護板、追加付加フィルタを組み合わせて使用した場合の被ばく線量の検討を実施したいと考えている。

## 第 7 章 結論

本研究では、X 線透視装置と人体ファントムを使用した VF の患者被ばく線量を推定し、被ばく低減を試み、さらに、従事者被ばく線量を明らかにし、被ばく線量低減のための追加鉛防護具を開発し防護効果を検討した。また、実臨床において患者被ばく線量を測定した。

追加付加フィルタを使用すると、追加付加フィルタ無しに比べて ESD は、最大で 55.1%低減した。

新規に 2 つの追加鉛防護具「VF Shielding Box」と「スライド式防護板」開発した。VF Shielding Box とスライド式防護板を組み合

わせると、散乱線量は、防護板を追加しない場合に比べて、従事者位置にて 60.3%減少した。加えて追加のフィルタを X 線照射口に取り付け従事者の水晶体位置を想定した床上 150 cm での散乱線量を評価したところ、散乱線除去率は最大で 79.4%であった。

2 つの個人線量計を用いて従事者被ばくを評価した。この結果から従事者の実効線量は放射線業務従事者の線量限度である 50 mSv/年よりはるかに低く線量限度内であることが明らかになった。また、等価線量（水晶体線量）（2.3 mSv/年）も線量限度の 150 mSv/年よりも相当低いことが示された。

実臨床での患者被ばく線量について検討した。臨床測定では平均透視時間  $4.26 \pm 1.4$  分であり、患者皮膚表面線量は平均で  $18.62 \pm 8.7$  mGy であった。

本研究では、VF 施行時における患者被ばく線量と従事者被ばく線量が明らかになった。追加鉛防護具と追加付加フィルタを製作し、新たに開発した追加鉛防護具と追加付加フィルタが ESD を大幅に低減することができ、従事者位置においても大幅に散乱線量を低減できた。本研究は VF の患者、従事者の被ばく線量を評価した新しい試みである。

## 謝辞

本研究を結ぶにあたり、適切な御指導、御助言、御鞭撻御配慮を賜りました、東北大学大学院医学系研究科保健学専攻放射線検査学分野、千田浩一教授に深く御礼申し上げます。

本論文の審査に対し、種々の観点から大変貴重な御意見を賜りました、東北大学大学院医学系研究科保健学専攻画像診断学分野、石橋忠司教授に深く御礼申し上げます。

本研究に対しまして御助言御協力を賜りました東北大学大学院医学系研究科保健学専攻放射線検査学分野稲葉洋平先生に深く御礼申し上げます。

本研究に対しまして御助言御協力を賜りました、東北医科薬科大学病院リハビリテーション科、室谷嘉一先生、内海由也先生、放射線部、千葉浩生技師長並びにスタッフの皆様、仙台リハビリテーション病院渡邊裕志先生に深く御礼申し上げます。

本研究に対しまして研究にご協力いただきました伊達シールド（株）早坂良様に深く御礼申し上げます。

## 参考・引用文献

1. 山本秀也, 今津通教 : 循環器系疾患 狭心症. 日本臨床増刊号 2001 ; 59(8) : 702-708.
2. 三浦傳, 津谷裕之 : 循環器系疾患 心筋梗塞. 日本臨床増刊号 2001 ; 59(8) : 709-717.
3. 森島貴顕, 千田浩一, 片平美明, 他 : 新型リアルタイム患者皮膚被曝線量計の性能評価. 臨床放射線 2011 ; 56 (6) : 779-785.
4. 千田浩一 : 医療被ばく・職業被ばくの現状と対策. 日本臨床 2012 ; 70 (3) : 479-484.
5. International Commission on Radiological Protection. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. ICRP Publication 85 2000;Ann ICRP :30 (2) .
6. 森島貴顕, 千田浩一, 佐々木昌浩, 他 : 心臓カテーテル検査における術者被曝防護—追加シールド（鉛防護具）の有用性—. 東北大学医保健学科紀要 2004 ; 13 (1) : 11-21.
7. 飯田泰治, 堀井純清, 茶島光浩, 他 : 血管造影検査における術者の被曝線量評価と放射線防護用具による被曝低減. 日本放射線技術学会雑誌 2004 ; 60(12) : 1713-1722.
8. Zuguchi M, Chida K, Tamura M, et al : Usefulness of non-

- lead apron in radiation protection for physician performing interventional procedures . Radiat Prot Dosimetry 2008;131(4):531-538.
9. 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.  
Circulation Journal 2006; 70: 1316-1321.
  10. Muniraj T, Aslanian HR, Laine L, et al : A double-blind, randomized, sham-controlled trial of the effect of a radiation-attenuating drape on radiation exposure to endoscopy staff during ERCP. Am J Gastroenterol 2015;110:690-696.
  11. 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 2012 ; Ann. ICRP41:1-322.
  12. Palmer JB, Kuhlemeier KV, Tippet DC, et al : A protocol for the videofluorographic swallowing study. Dysphagia 1993; 8: 209-214.
  13. Martin-Harris B, Logemann JA, McMahon S, et al : Clinical utility of the modified barium swallow.

- Dysphagia 2000; 15:136-141.
14. Chan CB, Chan LK, Lam HS : Scattered radiation level during videofluoroscopy for swallowing study. Clinical Radiology 2002; 57:614-616.
  15. Crawley MT, Savage P, Oakley F : Patient and operator dose during fluoroscopic examination of swallow mechanism. The British Journal of Radiology 2004; 77:654-656.
  16. 日本摂食嚥下リハビリテーション学会医療検討委員会 : 嚥下造影の検査法 (詳細版) 日本摂食・嚥下リハビリテーション学会医療検討委員会 2014 版案 日本摂食嚥下リハビリテーション学会雑誌東京 2014 ; 18(2) : 166-186.
  17. Vano E, Rosenstein M, Liniecki J, et al: ICRP Publication 113. Education and training in radiological protection for diagnostic and interventional procedures. Annals of the ICRP 2009;39:7-68.
  18. Efstathopoulos EP, Pantos I, Andreou M,et al: Occupational radiation doses to the extremities and the eyes in interventional radiology and cardiology procedures. The British journal of radiology



2011;84:70-77.

19. Thibault B, Andrade JG, Dubuc M, et al : Reducing radiation exposure during CRT implant procedures: early experience with a sensor-based navigation system. Pacing and clinical electrophysiology .PACE 2015;38: 63-70.
20. Chida K, Kato M, Kagaya Y, et al : Radiation dose and radiation protection for patients and physicians during interventional procedure. Journal of radiation research 2010;51:97-105.
21. Chida K, Inaba Y, Saito H, et al : Radiation dose of interventional radiology system using a flat-panel detector. AJR American journal of roentgenology 2009;193:1680-1685.
22. Balter S, Hopewell JW, Miller DL, et al : Fluoroscopically guided interventional procedures: a review of radiation effects on patients' skin and hair. Radiology 2010;254:326-341.
23. Morishima Y, Chida K, Katahira Y, et al : Need for radiation safety education for interventional cardiology

- staff, especially nurses. *Acta Cardiol* 2016;71:151-155.
24. Chida K, Saito H, Otani H, et al : Relationship between fluoroscopic time, dose-area product, body weight, and maximum radiation skin dose in cardiac interventional procedures. *AJR American journal of roentgenology* 2006;186:774-778.
  25. Kim HM, Choi KH, Kim TW : Patients' radiation dose during videofluoroscopic swallowing studies according to underlying characteristics. *Dysphagia* 2013; 28:153-158.
  26. Chau KH, Kung CM : Patient dose during videofluoroscopy swallowing studies in a Hong Kong public hospital. *Dysphagia* 2009; 24:387-390.
  27. Hersh C, Wentland C, Sally S, et al : Radiation exposure from videofluoroscopic swallow studies in children with a type 1 laryngeal cleft and pharyngeal dysphagia: A retrospective review. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol* 2016;89:92-96.
  28. Vano E, Gonzalez L, Fernandez JM, et al : Eye lens exposure to radiation in interventional suites: caution is

- warranted. *Radiology* 2008; 248:945-953.
29. Chida K, Kagaya Y, Saito H, et al : Evaluation of patient radiation dose during cardiac interventional procedures: what is the most effective method? *Acta Radiologica* 2009; 50: 474-481.
  30. Duran A, Hian SK, Miller DL, et al : Recommendations for occupational radiation protection in interventional cardiology. Catheterization and cardiovascular interventions: Official Journal of the Society for Cardiac Angiography & Interventions 2013; 82: 29-42.
  31. Dumonceau JM, Garcia-Fernandez FJ, Verdun FR, et al : Radiation protection in digestive endoscopy: European Society of Digestive Endoscopy (ESGE) guideline. *Endoscopy* 2012;44:408-421.
  32. Ertel A, Nadelson J, Shroff AR, et al : Radiation Dose Reduction during Radial Cardiac Catheterization: Evaluation of a Dedicated Radial Angiography Absorption Shielding Drape. *ISRN cardiology* 2012: 769167.
  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;31:574-578.
34. Chida K, Takahashi T, Ito D, et al : Clarifying and visualizing sources of staff-received scattered radiation in interventional procedures. *AJR American journal of roentgenology* 2011;197:W900-903.
35. Brambilla M, Cerini P, Lizio D, et al : Cumulative radiation dose and radiation risk from medical imaging in patients subjected to endovascular aortic aneurysm repair. *La Radiologia medica* 2015;120:563-570.
36. Minami T, Sasaki T, Serikawa M, et al:Occupational Radiation Exposure during Endoscopic Retrograde Cholangiopancreatography and Usefulness of Radiation Protective Curtains. *Gastroenterol Res Pract.* 2014;
37. Chida K, Morishima Y, Masuyama H, et al:Effect of radiation monitoring method and formula differences on estimated physician dose during percutaneous coronary intervention. *Acta radiologica* 2009;50:170-173.
38. 猪岡由行, 有賀英司, 西尾直美, 他 : 非接続形 X 線出力アナライザ

の精度評価. 日本放射線技術学会雑誌 2013 ; 69 (10) : 1153-1160.

39. Chida K, Kagaya Y, Saito H, et al: Total entrance skin dose: an effective indicator of the maximum radiation dose to a patient's skin during percutaneous coronary intervention. Am J Roentgenol 2007; 189: W224-227.
40. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. Annals of the ICRP. 2007;37:1-332.
41. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. Annals of the ICRP. Ann.ICRP 21 (1-3):1-201.
42. Wright RE, Boyd CS, Workman A : Radiation doses to patients during pharyngeal videofluoroscopy. Dysphagia 1998;13:113-115.
43. Chida K, Kaga Y, Haga Y, et al : Occupational dose in interventional radiology procedures. AJR American journal of roentgenology 2013;200:138-141.
44. Chida K, Inaba Y, Morishima Y, et al : Comparison of dose at an interventional reference point between the

- displayed estimated value and measured value.  
Radiological physics and technology 2011;4:189-193.
45. Haga Y, Chida K, Kaga Y, et al: Occupational eye dose in interventional cardiology procedures. Scientific reports. 2017;7:569.
  46. Zammit – Maempel I, Chapple CL, Leslie P : Radiation dose in videofluoroscopic swallow studies. Dysphagia 2007;22:13-15.
  47. Fetterly KA : Investigation of the practical aspects of an additional 0.1 mm copper x-ray spectral filter for cine acquisition mode imaging in a clinical care setting. Health physics 2010;99:624-630.
  48. Morishima Y, Chida K, Muroya Y, et al: 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;33:109-114.
  49. Morishima Y, Chida K, Meguro T : Effectiveness of additional lead shielding to protect staff from scattering radiation during endoscopic retrograde

cholangiopancreatography procedures. J radiation  
research 2018; 59: 225-232.

図・表

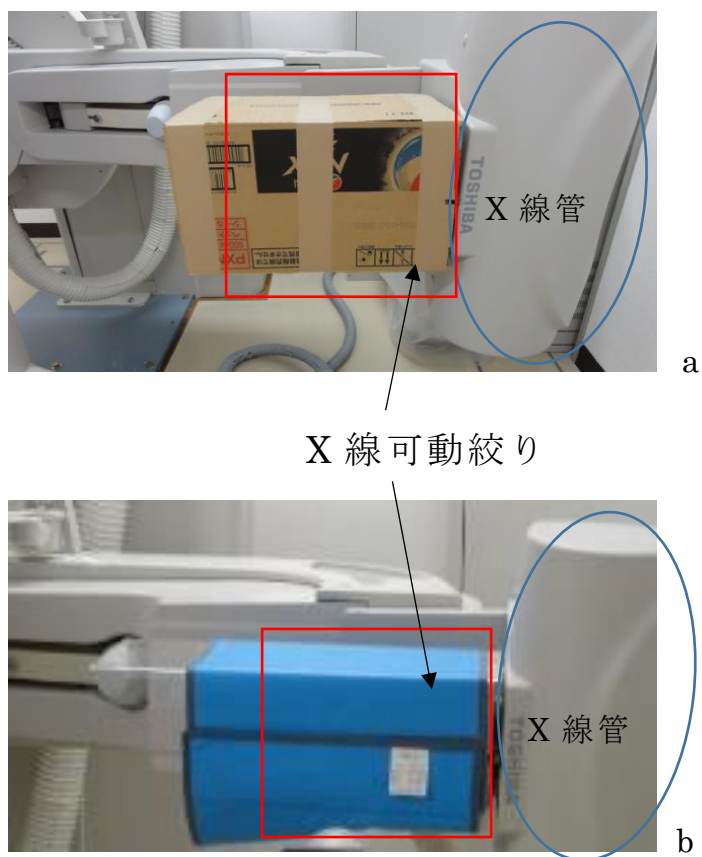


図1. VF shielding Boxの試作

a : ダンボールを用いた防護具の試作。X線可動絞りを覆うように自作した。これに不要となった防護衣を巻きつけた（試作1号）。

b : 防護具会社に依頼した防護具の試作。写真aの自作防護具を元に作製した。（鉛当量0.125 mmPb）（試作2号）。



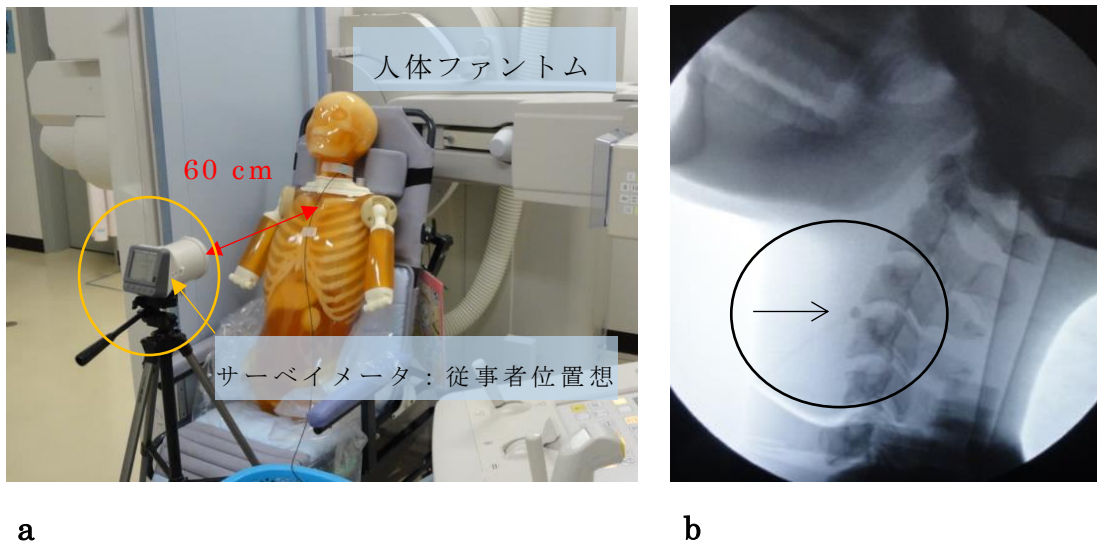


図2. 嚥下造影検査時の患者皮膚表面線量測定及び、従事者位置における散乱線測定の人体ファントム実験

人体ファントムとSkin Dose Monitor (SDM)、サーベイメータの配置図 (a)、と透視像(b).サーベイメータの位置が通常に従事者位置想定。  
 図a : 人体ファントムはX線管に対し側面の状態で設置した (60 cm) 。  
 図b : skin-dose monitor (矢印→) は人体ファントムの頸部に装着した。

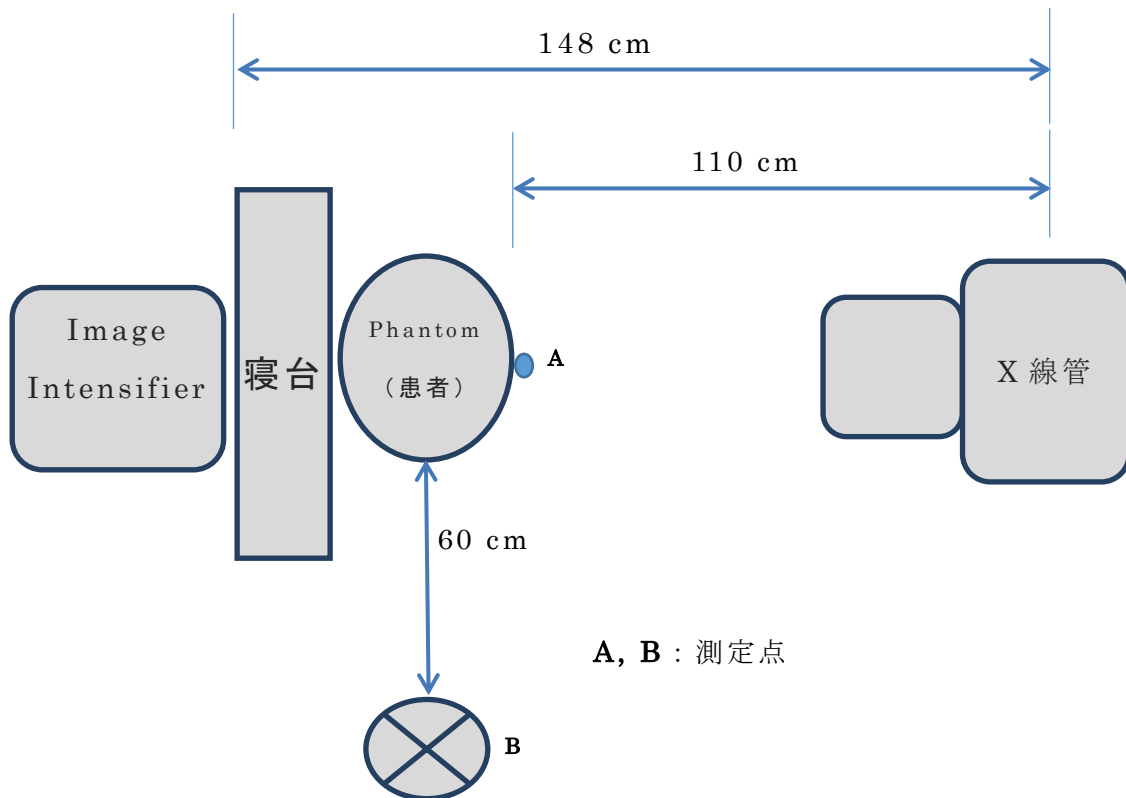


図 3a. 患者皮膚表面線量測定及び、従事者被ばく線量測定のための人体ファントム実験の幾何学的配置図（平面方向）

患者皮膚表面線量（Entrance Skin Dose : ESD）はSkin Dose Monitor (SDM)を用いて測定（A）。

サーベイメータは人体ファントムから60 cmの位置に、高さは床上100 cm設置した(B)。

この測定点は通常VF施行時の従事者の立ち位置に相当する。

A: SDM位置      B: サーベイメータ位置

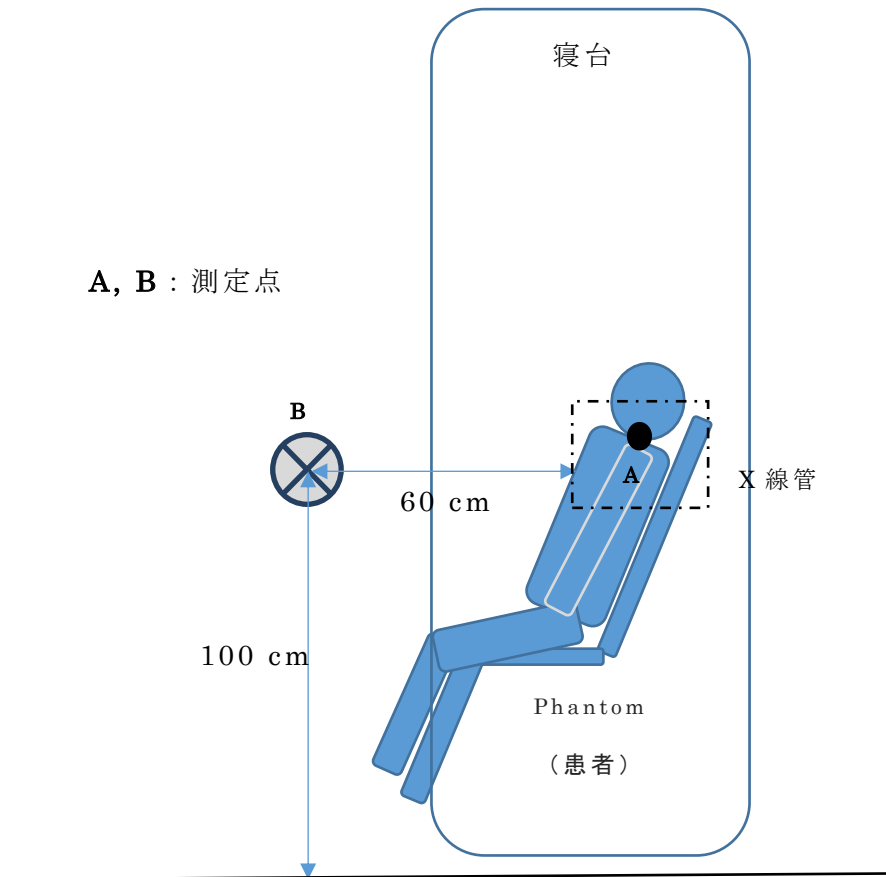


図 3b. 患者皮膚表面線量測定及び、従事者被ばく線量測定のための人体ファントム実験の幾何学的配置図（垂直方向）

サーベイメータは人体ファントムから60 cmの位置に、高さは床上100 cm設置した(B)。

この測定点は通常VF施行時の従事者の立ち位置に相当する。

A: SDM位置      B: サーベイメータ位置



a



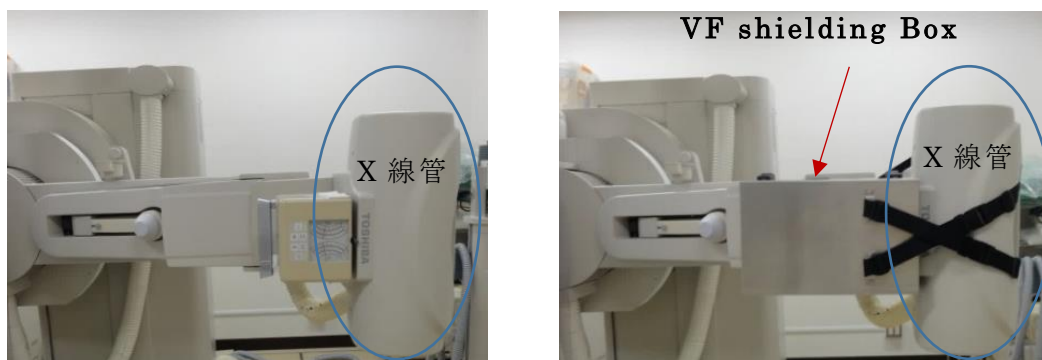
b

図 4. ファントム実験

a ファントムとサーベイメータの配置

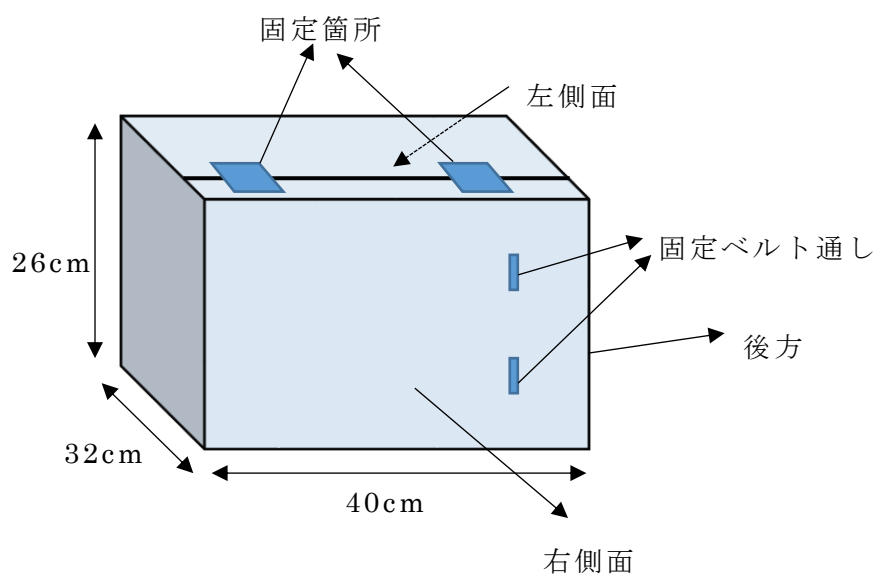
b 追加付加フィルタ (矢印← 1.0、 2.0、 3.0 mm Al 、 0.5 mm Cu)

を X 線照射口に追加フィルタを取り付ける。



a

b



c

図 5. VF 施行時の透視装置

a : VF Shielding Box なし.

b : VF Shielding Box あり.

VF Shielding Box (1.0 mm 鉛当量 長さ= 40 cm) (矢印) は X 線管の開口部にとりつけてある。

c : VF Shielding Box の概略

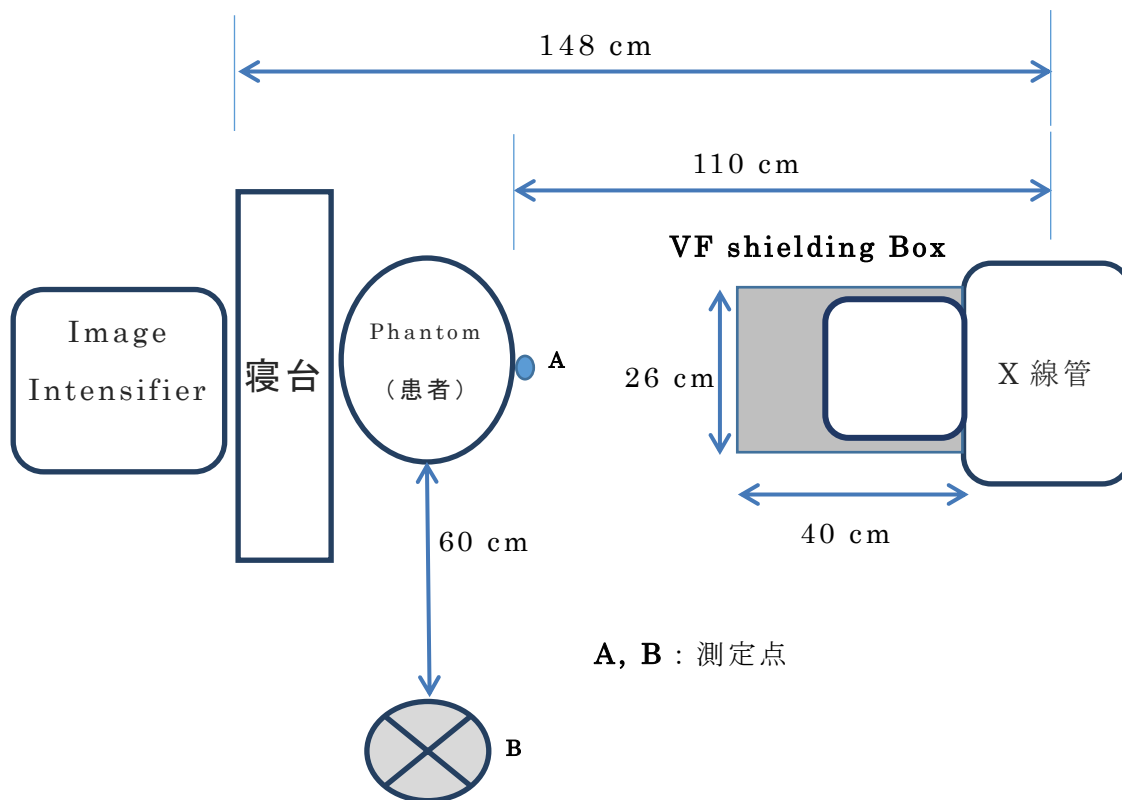


図 6. VF Shielding Box 設置下での患者及び従事者被ばく線量測定のための人体ファントム実験の幾何学的配置図

VF Shielding BoxはX線照射口を覆うように設置（網掛け位置）。

ESD はSkin Dose Monitor (SDM)を用いて測定（A）。

ファントム実験の散乱線測定点(B)。サーベイメータは人体ファントムから60 cmの位置で測定し、高さは床上90 cm、150 cmの位置に設置し、測定した。この測定点は通常VF施行時の従事者の立ち位置に相当し、床上90 cmは生殖腺、150 cmは水晶体の位置に相当する。

A: SDM位置      B: サーベイメータ位置



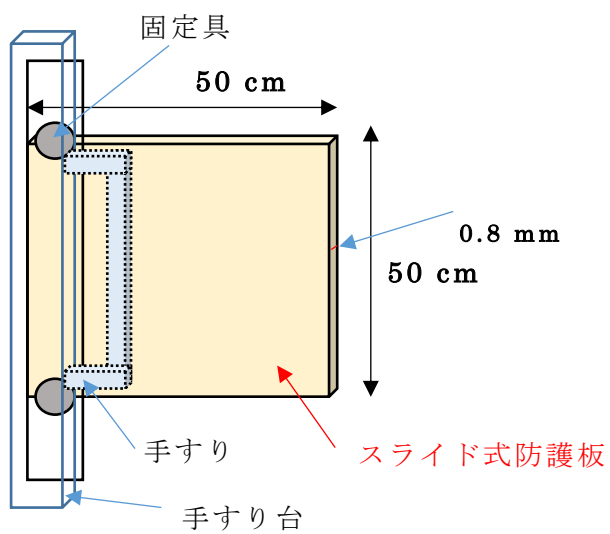
a

b

図7 人体ファントムと追加防護具

スライド式防護具と人体ファントム(a)

VFSS Shielding Box 付き (b)



50 cm×50 cm×0.8 mm 鉛当量：0.35 mmPb

寝台手すり台に取り付ける

c スライド式防護板の概略

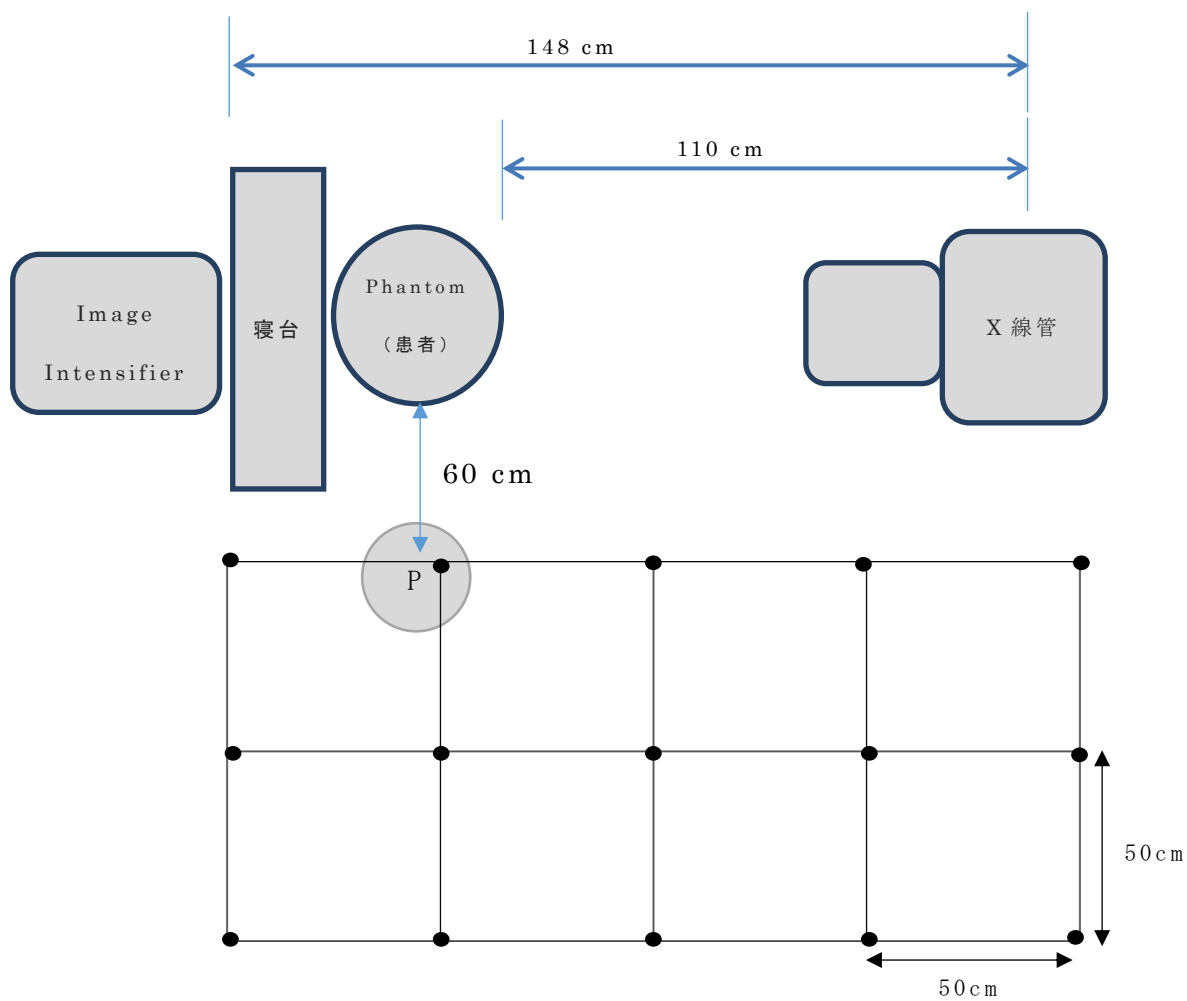


図8a 追加鉛防護具（スライド式防護板及び、VF Shielding Box）の有無による散乱線測定配置図（水平方向）

測定点は黒点で表示（15点）。P点は通常VF施行時の従事者の立ち位置。

床上150 cmの位置で測定。



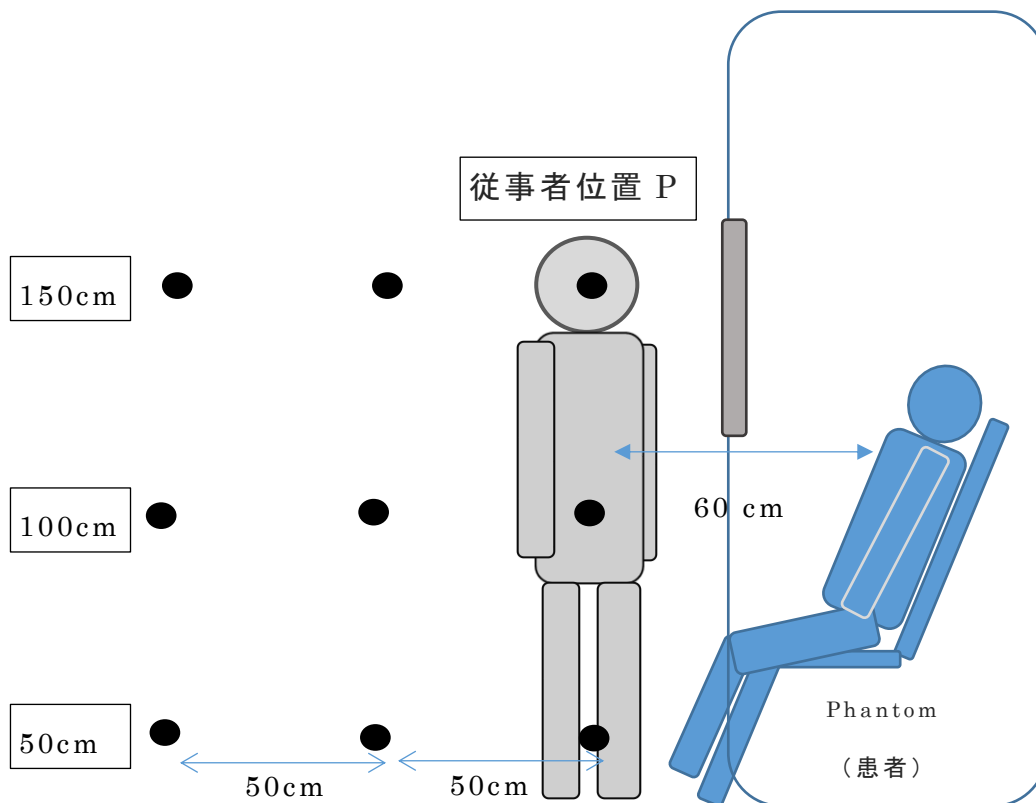


図8b 追加鉛防護具（スライド式防護板及び、VF Shielding Box）の有無による散乱線測定配置図（垂直方向）

測定点は従事者位置の床上150 cm、100 cm、50 cmと従事者位置から50 cm、100 cm離れた点を黒点で表示（9点）。

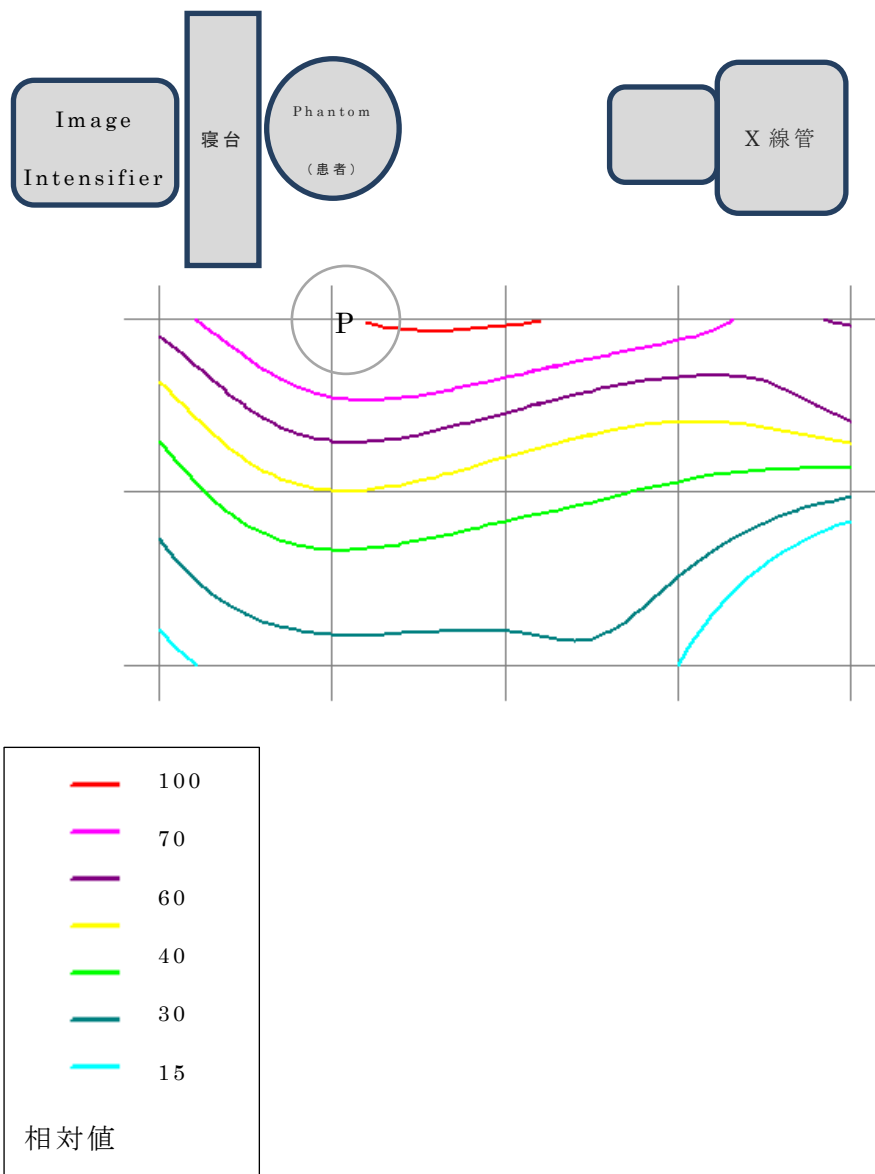


図9 防護具なしの場合の散乱線分布図(水平方向 床上150cm)

最高値を100の相対値で示す。図10～図12も同様。P:従事者位置

空間線量分布ソフト: エスエス技研社製「SS-3030」使用。

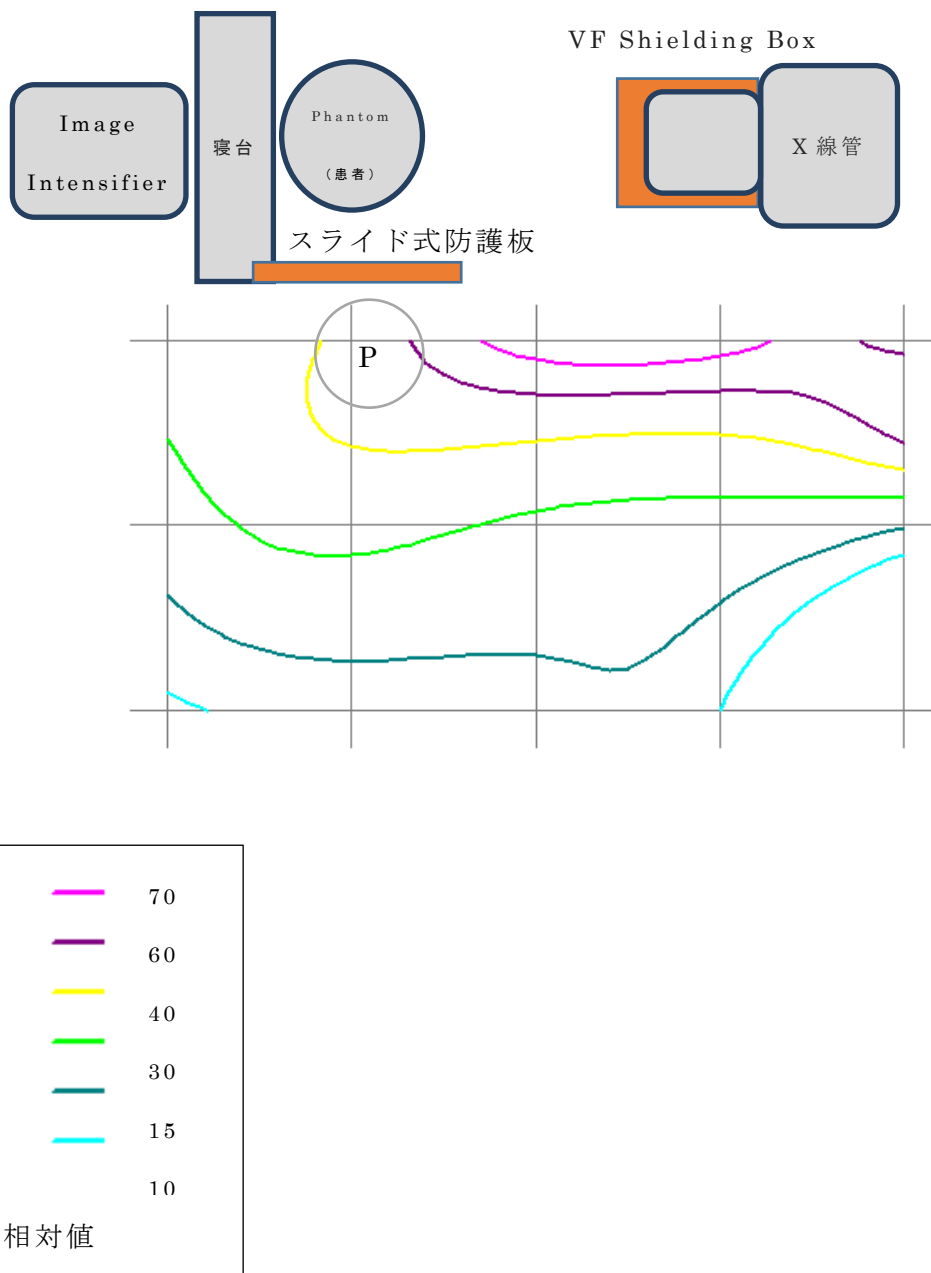


図10 追加鉛防護具（スライド式防護板及び、VF Shielding Box）

を用いた場合の散乱線分布図（水平方向 床上150 cm）

P: 従事者位置

空間線量分布ソフト：エスエス技研社製「SS-3030」使用。

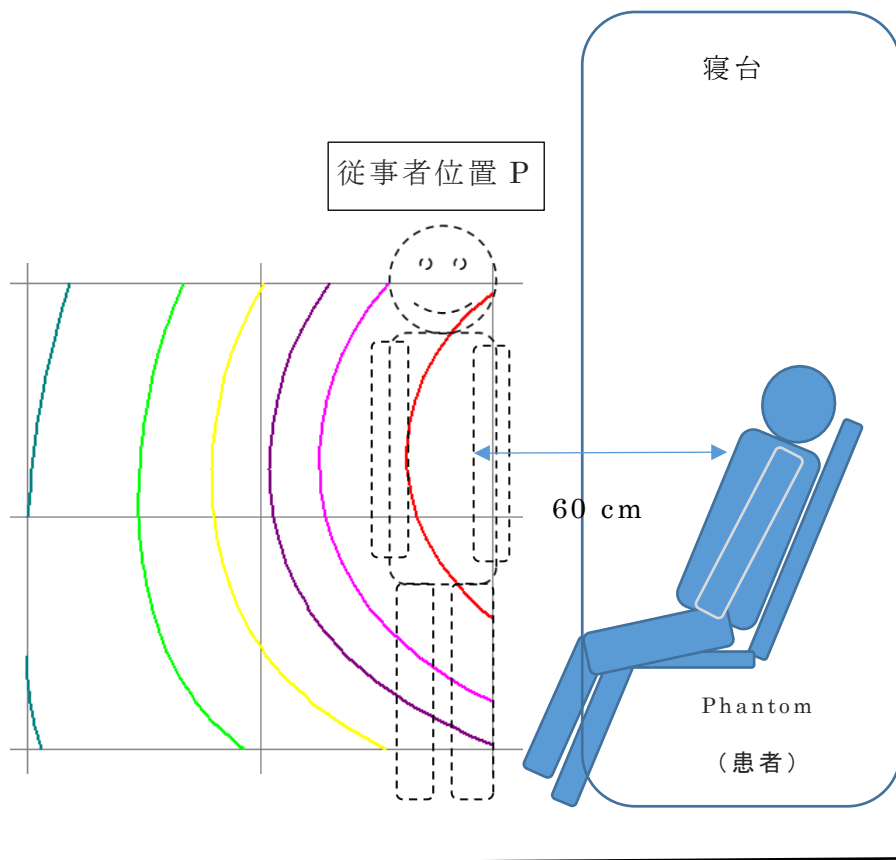


図11. 防護具なしの場合の従事者位置での散乱線分布図(垂直方向)

空間線量分布ソフト：エスエス技研社製「SS-3030」使用。

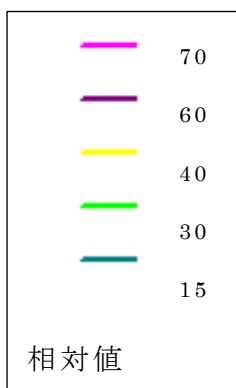
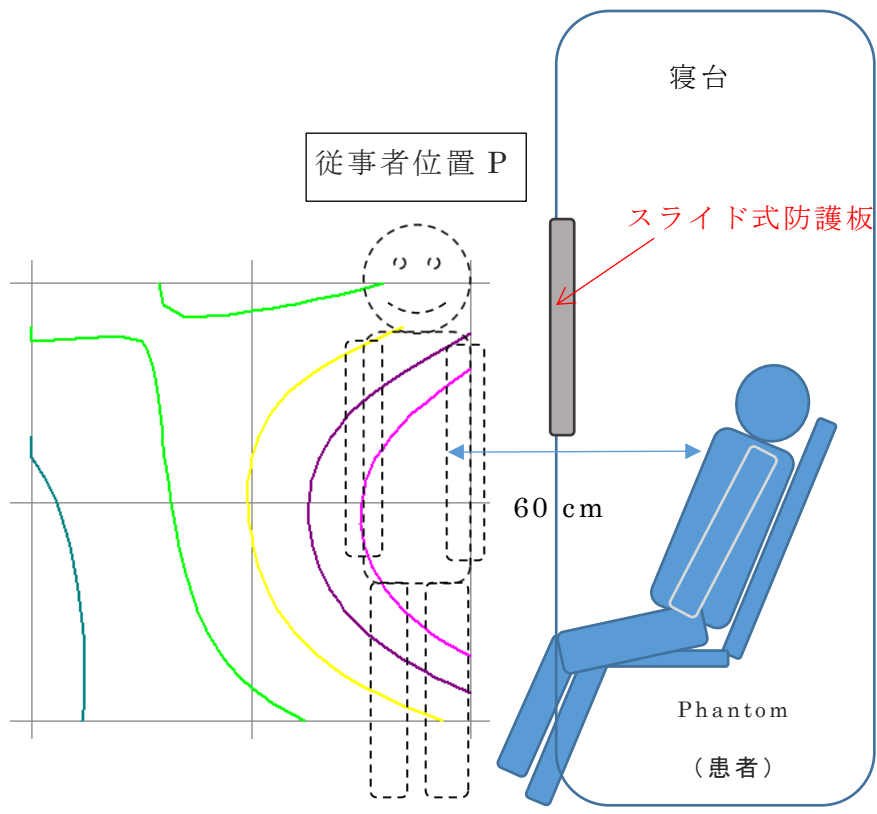


図12 追加鉛防護具（スライド式防護板及び、VF Shielding Box）

を用いた場合の従事者位置での散乱線分布図（垂直方向）

空間線量分布ソフト：エスエス技研社製「SS-3030」使用。

表 1. ファントム実験での線量, 平均時間, VF 時の患者線量推定値

ファントム実験	
ファントム皮膚表面線量: A	7.8 mGy (5 分間測定)
散乱線量: B	255 $\mu$ Sv/h
VF1 件あたりの平均時間、患者線量推定値および従事者の散乱線量推定値	
平均透視時間	8.2 $\pm$ 0.12 min
患者線量推定値	12.79 mGy (7.8 $\times$ 1/5 $\times$ 8.2)
従事者の散乱線量推定値	34.85 $\mu$ Sv (255 $\times$ 1/60 $\times$ 8.2)

表 2. 追加付加フィルタの有無における患者皮膚表面線量 (ESD)

追加付加フィルタ (—)    1.0mm Al    2.0 mm Al    3.0 mm Al    0.5mmCu

---



---

kV	71	72	72	72	83
----	----	----	----	----	----

---

mA	1.1	1.1	1.1	1.1	1.7
----	-----	-----	-----	-----	-----

---

ESD	—	15.4	30.8	43.6	55.1
-----	---	------	------	------	------

ESD は追加フィルタ無しに比べての減衰率 (%)

---

表3. VF Shielding Box の有無と追加付加フィルタの有無における  
従事者位置の床上90 cm及び150 cmでの散乱線量と散乱線除去率

VF Shielding Box	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)
追加付加 フィルタ	(-)	(-)	1.0 mm Al	1.0 mm Al	2.0 mm Al	2.0 mm Al	3.0 mm Al	3.0 mm Al	0.5 mmCu	0.5 mmCu
床上 90 cm ( $\mu\text{Sv/h}$ )	300	273	280	266	246	225	224	194	182	167
散乱線除 去率(%)	-	9.0	6.7 ※	11.3	18.0	25.0	25.3	35.3	39.3	44.3
床上 150 cm ( $\mu\text{Sv/h}$ )	255	235	235	199	210	170	184	142	160	141
散乱線除 去率(%)	-	7.8	7.8	22.0	17.6	33.3	27.8	44.3	37.3	44.7

(-) : 無し、 (+) : 有り

散乱線除去率 (%)

$= 100 - (\text{VF Shielding Boxの有無、追加付加フィルタの有無}) /$

$(\text{VF Shielding Box、追加付加フィルタ無し}) \times 100$

例 : VF Shielding Boxの無し (-) と1.0 mmAl 有り (+) の場合

の床上90cmの散乱線除去率 (%) (表中の※)

$= 100 - (280/300) \times 100 = \underline{6.7 (\%)}$



表4. 追加鉛防護具（スライド式防護板及び、VF Shielding Box）、追加付加フィルタの有無における術者水晶体位置での散乱線除去率

単位（％）

高さ 150 cm

	スライド式 防護板（-）	スライド式 防護板（+）
VF Shielding Box（-）		51.5
VF Shielding Box（-） 1.0 mmAl（+）	14.0	55.1
VF Shielding Box（-） 2.0 mmAl（+）	5.9	50.0
VF Shielding Box（-） 3.0 mmAl（+）	16.9	52.2
VF Shielding Box（-） 0.5 mmCu（+）	50.0	75.1
VF Shielding Box（+）	11.0	60.3
VF Shielding Box（+） 1.0 mmAl（+）	25.0	67.6
VF Shielding Box（+） 2.0 mmAl（+）	25.7	65.4
VF Shielding Box（+） 3.0 mmAl（+）	36.0	70.6
VF Shielding Box（+） 0.5 mmCu（+）	55.9	79.4

表 5. VF 施行従事者の 1 年間の実効線量と等価線量

実効線量 (mSv/年)	0.9
等価線量 (mSv/年)	2.3

表 6. ICRP 国際放射線防護委員会勧告：白内障のしきい値

1990 ICRP Publication60

組織	症状	しきい値		線量限度
		急性被ばく	分割被ばく	作業者
水晶体	白濁	0.5–2.0 Gy	5 Gy	
水晶体	白内障	5 Gy	> 8 Gy	150 mSv/年

2012 ICRP Publication118

組織	症状	しきい値		線量限度
		急性被ばく	分割被ばく	作業者
水晶体	白内障	0.5 Gy	0.5 Gy	20 mSv/年