

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K08203

研究課題名(和文) 血管内治療の被ばく低減に向けた皮膚線量モニタシステムの開発と体内線量分布の可視化

研究課題名(英文) Development of dose monitoring system and visualization of dose distributions, for the exposure reduction in interventional radiology

研究代表者

荒木 不次男 (Araki, Fujio)

熊本大学・大学院生命科学研究部(保)・教授

研究者番号：00295148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、血管内治療(Interventional Radiology: IVR)における皮膚線量の直接計測、およびIVRに内蔵された面積線量計による皮膚線量の推定から皮膚線量モニタシステムの開発を行った。具体的には、以下の項目について研究した。(1)水等価固体ファントムを用いた皮膚線量の簡便な直接計測法の確立、(2)各社IVR装置による治療部位(頭部、腹部)の皮膚線量計測と線量比較、(3)面積線量計による皮膚線量の推定、(4)各社IVR装置のX線ビームモデリングによる表面線量の推定、(5)蛍光ガラス線量計と光刺激蛍光線量計による皮膚線量の評価

研究成果の学術的意義や社会的意義

血管内治療(Interventional Radiology: IVR)における皮膚線量の簡便で直接測定による標準計測法を確立し、IVR手技中の皮膚線量リアルタイムモニタシステムを開発する。また、各IVR装置による治療部位の皮膚線量計測とモンテカルロ計算による体内線量分布の可視化から照射条件の適正化を行い、被ばく低減を図る。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed entrance skin dose (ESD) monitoring system based on the direct measurement of ESD in Interventional Radiology (IVR) and the estimation of ESD by an air kerma area-product (KAP) meter built into IVR. Specifically, the following items were studied. (1) Establishment of a simple direct ESD measurement method using a water-equivalent solid phantom, (2) ESD measurements and the dose comparison of treatment sites (head and abdomen) using different IVR systems, (3) ESD estimation using the KAP, (4) Estimation of ESD by x-ray beam modeling of IVR systems, (5) Estimation of ESD by radiophotoluminescent glass dosimeter and an optically stimulated luminescent dosimeter for ESD estimation.

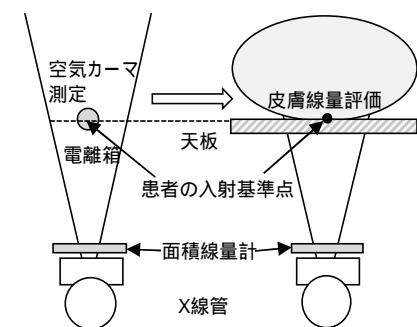
研究分野：放射線線量計測学

キーワード：血管内治療 皮膚線量 面積線量計 モンテカルロ計算 被ばく線量

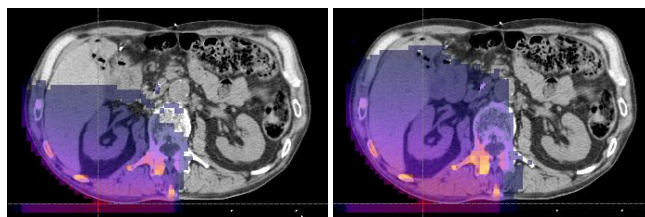
## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、血管内治療(Interventional Radiology: IVR)の増加に伴い、放射線被ばくによる皮膚障害や二次誘発がんが懸念されている。この対策に、ICRP(国際放射線防護委員会)やIAEA(国際原子力委員会)は、医療被ばくの適切な線量管理を目的に「線量指標として「診断参考レベル(DRL)」を勧告した。本邦でも2015年にDRLが策定され、不要な被ばくを避ける「防護の最適化」が図られている。しかし、現状のIVRの線量モニタは、単に空気カーマで校正された面積線量計(図1(a))による患者の入射基準点での空気カーマ( $\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$ )測定によって行われており、IVR手技中に皮膚線量をリアルタイムに把握することが困難である。実際には、図1(b)に示すように、IVR手技中に直接に面積線量計によって皮膚線量のリアルタイムモニタが可能になれば、被ばくりスクの適正な監視が可能となり、医師を含む医療従事者の被ばく低減の意識の向上に繋がる。



(a)面積線量計の校正 (b)皮膚線量評価  
図1. IVRの患者入射基準点の皮膚線量



低い線質：3 mm Al 半価層  
深部線量は低減するが、皮膚線量は増加する。  
高い線質：8 mm Al 半価層  
皮膚線量は低減するが、深部線量は増加する。

図2. 線質の違いによるIVRの体内線量分布の比較  
線量分布はモンテカルロ計算による。

現在の皮膚線量計測の問題は、(i)空気カーマを皮膚線量へ変換するのに、多くの物理定把握するのが困難な点である。海外でも、ICRPやIAEA等の放射線防護の勧告や指針を基に、面積線量計による空気カーマ( $\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$ )測定が推奨されているが、皮膚線量への変換はユーザ責任に負っている。したがって、(ii)IVRにおける治療部位の個々の患者皮膚線量が、多くの施設で把握されておらず、照射条件の適正化による被ばく低減が十分に実施されていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、以下の研究項目を目的とする

(1)皮膚線量の簡便で直接測定による計測法を確立し、IVR手技中に面積線量計の表示値から患者皮膚線量をリアルタイムにモニタするシステムを開発する。本計測法では、これまで開発した診断用X線エネルギーの吸収線量計測法[文献]を用いて、IVR装置の面積線量計の表示値を直接に皮膚線量に校正することで、面積線量計の線質依存を考慮した皮膚線量の直接評価が可能となる。また、近年X線の線質を高くすることで皮膚線量低減が試みられているが、深部線量は増加する(図2)。したがって、(2)照射条件の異なる各社IVR装置(Canon, Philips, Siemens)を用いた治療部位(頭部、腹部)の皮膚線量計測とモンテカルロ計算による体内線量分布の可視化から被ばく線量を定量的に評価することで、照射条件の適正化を行い、被ばく低減を図る。

### 3. 研究の方法

#### 3.1. 平行平板形電離箱線量計の校正

コバルト水吸収線量で校正されたファーマ形電離箱(PW 30013)を用いて、図3に示すような幾何学的配置で、水等価ファントム(PWDT)1 cm深さにおいて平行平板形電離箱(PW 23344)の比較校正を行った。X線管電圧50-140 kV 半価層(HVL)2.24-9.22 mm Alの線質で行われ、 $Q_1$ 値(実効 $I_{\text{ref}}$  / 最大 $I_{\text{ref}}$ )0.4, 0.5, 0.6に分類された。ファーマ形電離箱の線質変換係数 $k_{\text{Qx}}$ は、モンテカルロ計算によって求められた(文献)。

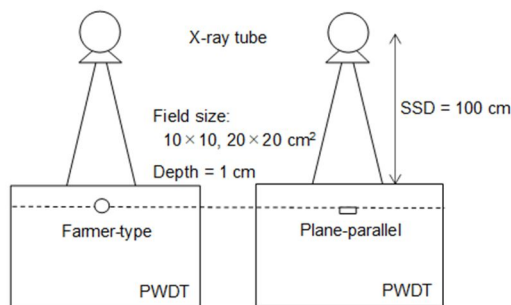


図3. 平行平板形電離箱の比較校正

#### 3.2. IVR装置の入射表面線量の直接測定

3.1項で校正された平行平板形電離箱を用いて、図4に示す幾何学的配置でIVR基準点(IRP)での入射表面線量(ESD)を測定した。IVR装置は4施設のCanon 3台、Siemens 2台、Philips 1台が使用された。各IVR装置の照射条件は、撮影(Digital acquisition: DA)と透視(Fluoroscopy: F)モードの自動露出機構(AEC)に基づいて決定された。腹部と頭部のESDは、それぞれ20 cmと16 cm厚のPWDTファントムを用いて測定され、すべての装置で線源-Flat panel

間距離(SID)100 cmに設定された。また、IPRでの照射野がXR-QA2 ガフクロミックフィルムで測定された。

撮影と透視条件における管電圧とHVL(mm Al)はダイオード検出器を用いて測定された。さらに、測定された管電圧とHVLに基づいて SpekCalc ソフトウェアによって X 線フルエンススペクトルを作成し、スペクトルから実効エネルギー( $E_{eff}$ )、平均エネルギー( $E_{ave}$ )、および QI を算出した。

得られたこれらの線質パラメータと X 線フルエンススペクトルを用いて ESD との関係进行分析した。

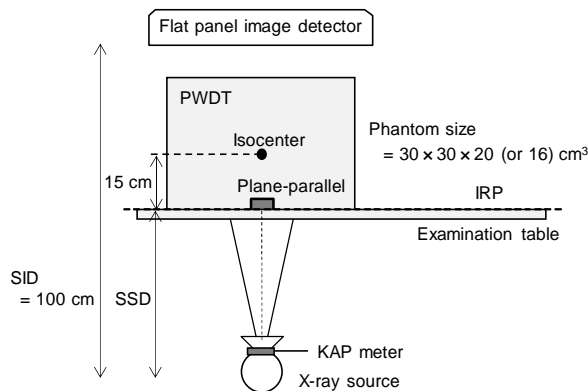


図4. 平行平板形電離箱を用いた IVR の各照射条件における IPR での表面線量の測定

### 3.3. 面積線量計を用いた IVR 装置の入射表面線量の推定

各 IVR 装置に内蔵された面積線量計の校正は、3.2 項で測定された IPR での基準照射野( $A_{ref}$ )における ESD(mGy)と面積線量計の読み値  $P_{KA}$ (mGy cm<sup>2</sup>)の比較で行った。また、 $P_{KA}(A)$ は照射野サイズ( $A$ )に依存するために、照射野補正係数  $FF(A)$ を導入した。 $FF(A)$ は、IPR での検査テーブルによる吸収と散乱、ファントム散乱による ESD、そして X 線コリメータからの散乱線による  $P_{KA}(A)$ の照射野依存性を補正するために X 線コリメータからの散乱とファントムこの影響を考慮した。

## 4. 研究成果

### 4.1. 平行平板形電離箱線量計の校正

図5に、HVL(mm Al)の関数としての平行平板形電離箱の校正定数  $N_{D,w,pp}$ (mGy/pC)を示す。 $N_{D,w,pp}$ は、PWDT ファントムの深さ 1 cm、照射野 10 cm × 10 cm および 20 cm × 20 cm、SSD 100 cm で校正されている。X 線フルエンススペクトルは、QI = 0.4, 0.5, 0.6 の 20 種類が使用された。 $N_{D,w,pp}$  値は、0.0822 - 0.0836(mGy/pC)の範囲内でほぼ一定であり、平均で 0.0828(mGy/pC) ± 0.46%( $k = 1$ )であった。

平行平板形電離箱の校正定数は、エネルギー依存性がなく、ファントムの後方散乱係数や水/空気の質量エネルギー吸収係数比、および検査テーブルの吸収・散乱を考慮することなく、IVR の ESD を簡便に直接測定することが可能である。

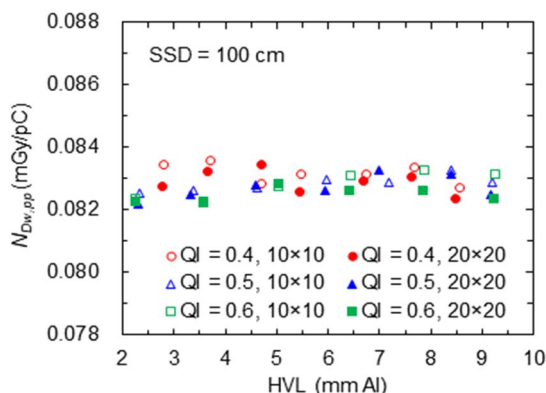


図5. HVL(mm Al)の関数としての平行平板形電離箱の校正定数

### 4.2. IVR 装置の入射表面線量の直接測定

図6(a)-(c)に、平行平板形電離箱を用いて測定された6台のIVR装置における撮影モードの管電流時間積 mAs あたりの ESD を示す。ESD/mAs は、4 施設の Canon 3 台、Siemens 2 台、Philips 1 台について、QI をパラメータとした HVL (mm Al) の関数として表されている。また、Siemens と Philips における SSD は、Canon の SSD と一致するように距離の逆二乗で補正され、同一幾何学的条件での ESD と線質の関係が示された。

すべての管電圧と HVL の組み合わせにおいて、ESD を低減するには管電圧を低くし、付加フィルターを使用することで、線質を硬くする必要がある。しかし、X 線フルエンスの低下によって画質が低下するため、画質を考慮して X 線ビームの線質を決定することが重要である。

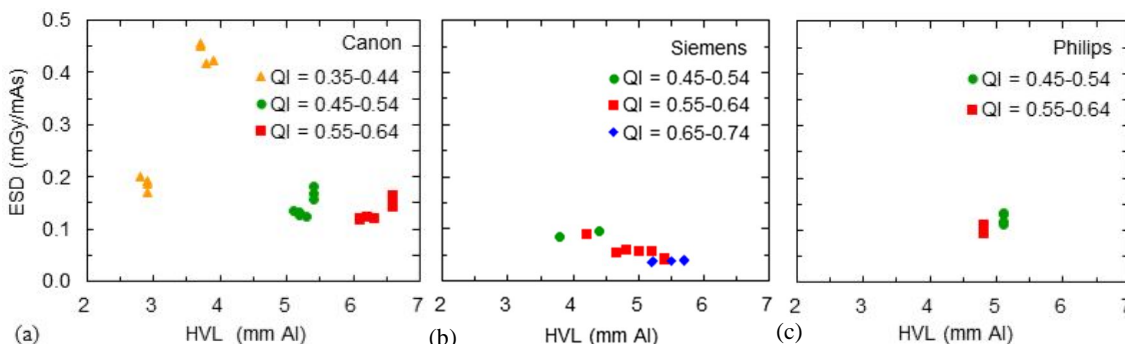


図6. HVL(mm Al)の関数としての平行平板形電離箱の校正定数：撮影モード



図 7(a)-(c)は透視モードの mAs あたりの ESD を示す。透視モードでは、撮影モードに比べて全体的に線質が高くなった。これは、各施設で長時間の透視による被ばくを考慮して、より高い線質に設定してあるためである。ESD は、高管電圧と低 QI で増加し、高 HVL で QI が 1.0 に近い線質で減少した。ESD と管電圧, HVL, および QI との関係は、撮影モードと同様な傾向を示した。

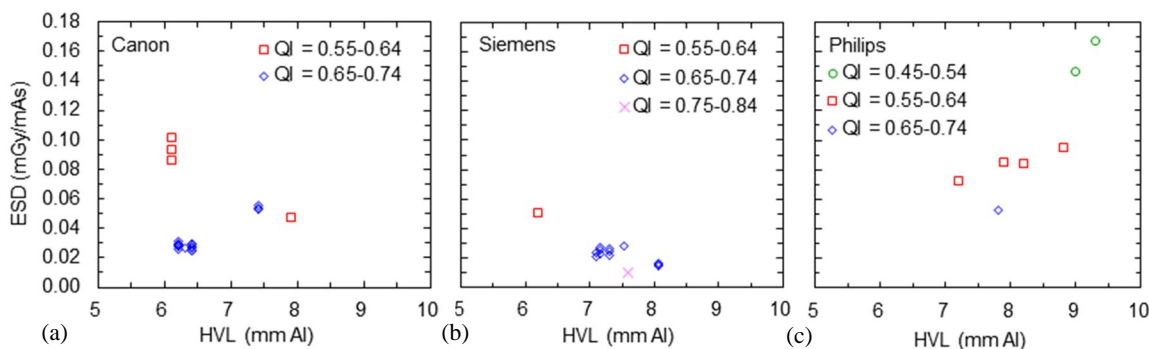


図 7. HVL(mm Al)の関数としての平行平板形電離箱の校正定数：透視モード

#### 4.3. 面積線量計を用いた IVR 装置の入射表面線量の推定

##### 4.3.1. 面積線量計の校正

図 8 に、6 台の IVR 装置の撮影モードと透視モードにおける IRP での mAs あたりの ESD ( $A_{ref}$ ) と  $P_{KA}(A_{ref})$  の関係を示す。各 IVR 装置の両者の関係は、同一 SSD での評価になるように、Siemens と Philips では、Canon の SSD と一致するように逆二乗則によって補正された。

ESD ( $A_{ref}$ ) は、QI 値の増加で直線的に減少し、同一 QI では管電圧の増加とともに増加した。とくに、QI が 0.399 の条件 (Abdomen: 92 kV, 3.7 mm Al) では、管電圧が非常に高く、ESD ( $A_{ref}$ ) が増加した。ESD と  $P_{KA}$  の線形関係は、X 線ビームの線質にはほぼ依存せず、同一線質での線形近似からのデータポイントの偏差は、各 IVR 装置における検査テーブルによる吸収と散乱、照射野によるファントム散乱、および幾何学的配置による違いに起因する。

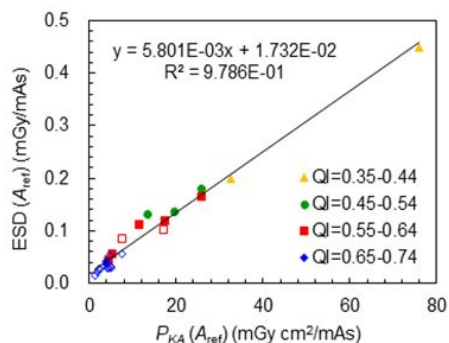


図 8. 6 台の IVR 装置の撮影モードと透視モードにおける IRP での mAs あたりの ESD ( $A_{ref}$ ) と  $P_{KA}(A_{ref})$  の関係

図 9(a)-(c)に、各 IVR 装置における撮影モードと透視モードの IRP での FF ( $A$ ) と照射野の関係を示す。FF ( $A$ ) の値は X 線コリメータからの散乱線による  $P_{KA}$  の照射野依存性が補正されている。FF ( $A$ ) は、各 IVR 装置における各照射モードの検査部位 (腹部または頭部) の基準照射野 ( $A_{ref}$ ) においてそれぞれ正規化された。一定の照射条件の場合、FF ( $A$ ) は照射野サイズに比例して増加する。各データポイントと FF ( $A$ ) の線形近似との偏差は、線質に起因している。これは、照射条件が AEC によって決定され、同一照射モードの同一検査部位でわずかに異なる場合があるためである。偏差が最も大きかった Canon において、最大  $\pm 4\%$  であった (図 9(a))。さらに、偏差には面積線量計のエネルギー依存性が含まれる。

本法による面積線量計の表面線量校正と照射野補正係数 FF ( $A$ ) を考慮することで、 $P_{KA}$  から直接 ESD を精度良く推定することが可能となった。これによって、IVR における ESD のリアルタイム評価が期待できる。

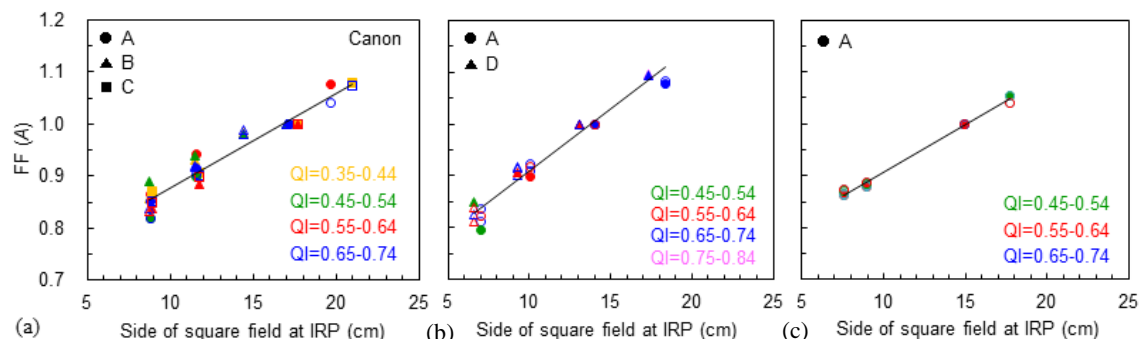


図 9. 6 台の IVR 装置の撮影モードと透視モードにおける IRP での照射野補正係数 FF ( $A$ )

#### 引用文献

Ionization chamber dosimetry based on  $^{60}\text{Co}$  absorbed dose to water calibration for diagnostic kilovoltage x-ray beams, Fujio Araki, Takeshi Ohno, Suzuna Umeno, Physics in Medicine and Biology, 63,185018(14pp),2018

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Ryuki Tanabe, Fujio Araki   | 4. 巻<br>77          |
| 2. 論文標題<br>Determination of backscatter factors based on the quality index for diagnostic kilovoltage x-ray beams | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>Physica Medica  | 6. 最初と最後の頁<br>48-53 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1016/j.ejmp.2020.07.032   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-           |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Chihiro Nakatake, Fujio Araki  | 4. 巻<br>82            |
| 2. 論文標題<br>Energy response of radiophotoluminescent glass dosimeter for diagnostic kilovoltage x-ray beams | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>Physica Medica   | 6. 最初と最後の頁<br>144-149 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1016/j.ejmp.2021.01.076  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-             |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Fujio Araki  | 4. 巻<br>84            |
| 2. 論文標題<br>Monte Carlo determination of a nanoDot OSLD response using quality index for diagnostic kilovoltage X-ray beams | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>Physica Medica   | 6. 最初と最後の頁<br>101-108 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1016/j.ejmp.2021.03.031  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-             |

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Ryuki Tanabe, Fujio Araki   | 4. 巻<br>84                  |
| 2. 論文標題<br>Determination of the surface dose of a water phantom using a semiconductor detector for diagnostic kilovoltage x-ray beams | 5. 発行年<br>2021年             |
| 3. 雑誌名<br>Physica Medica  | 6. 最初と最後の頁<br>198&#8211;204 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1016/j.ejmp.2021.04.009   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                   |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Fujio Araki  | 4. 巻<br>188          |
| 2. 論文標題<br>Determination of an ionization chamber response using quality index for kilovoltage x-ray beams | 5. 発行年<br>2021年      |
| 3. 雑誌名<br>Radiation Physics and Chemistry  | 6. 最初と最後の頁<br>109595 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.radphyschem.2021.109595  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-            |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Ryuki Tanabe, Fujio Araki   | 4. 巻<br>89            |
| 2. 論文標題<br>Real-time estimation of surface dose based on incident air kerma in diagnostic radiology | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>Physica Medica  | 6. 最初と最後の頁<br>176-181 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.ejmp.2021.07.031  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-             |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Fujio Araki, Suzuna Umeno   | 4. 巻<br>195           |
| 2. 論文標題<br>Surface dose estimation by a KAP meter for kilovoltage x-ray beams | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>Radiation Protection Dosimetry                                      | 6. 最初と最後の頁<br>124-131 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/rpd/ncab122                               | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-             |

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 12件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Ryuki Tanabe, Fujio Araki, Takeshi Ohno  |
| 2. 発表標題<br>Determination of backscatter factors based on the quality index for diagnostic kilovoltage x-ray beams |
| 3. 学会等名<br>2020 VIRTUAL JOINT AAPM COMP MEETING (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Chihiro Nakatake, Fujio Araki, Takeshi Ohno  |
| 2. 発表標題<br>Response of radiophotoluminescent glass dosimeter for diagnostic kilovoltage x-ray beams |
| 3. 学会等名<br>2020 VIRTUAL JOINT AAPM COMP MEETING (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Ryuki Tanabe, Fujio Araki, Takeshi Ohno   |
| 2. 発表標題<br>Determination of the phantom surface dose using a diode detector for diagnostic x-ray beams |
| 3. 学会等名<br>2021 AAPM Annual Meeting (Virtual Meeting) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Chihiro Nakatake, Fujio Araki, Takeshi Ohno   |
| 2. 発表標題<br>Direct measurement of the surface dose using a plane-parallel ionization chamber for interventional radiology |
| 3. 学会等名<br>2021 AAPM Annual Meeting (Virtual Meeting) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                    | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                        | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 大野 剛<br><br>(Ohno Takeshi)<br><br>(20646971) | 熊本大学・大学院生命科学研究部(保)・助教<br><br><br><br>(17401) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|