

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26460716

研究課題名(和文) マルチセンサ型高感度リアルタイム患者被曝線量測定管理システムの開発

研究課題名(英文) Development of a new nontoxic dosimeter for real-time measurements of patient radiation doses

研究代表者

洞口 正之 (ZUGUCHI, MASAYUKI)

東北大学・医学系研究科・名誉教授

研究者番号：20172075

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：Interventional radiology (IVR)時の患者放射線被曝線量増加が重大な問題となっている。だがIVR時の正確な患者被曝線量をリアルタイムに測定できる線量計は現存していなかった。そこでX線シンチレータと光ファイバーケーブルとフォトダイオードを用いた、高感度でしかも「マルチセンサ型」のリアルタイム患者被曝線量計を試作した。そしてその諸特性を評価し良好な結果を得た。さらにIVR臨床にてリアルタイム線量計を使用し評価した結果、十分に利用できることを明らかにした。よって当線量計は、IVR時の患者放射線障害回避のために大いに役立つ可能性があると思われた。

研究成果の概要(英文)：There are no effective real-time direct skin dosimeters for interventional radiology (IVR). Therefore, we produced a prototype of a real-time dosimeter for patients undergoing IVR that uses a nontoxic phosphor. The basic characteristics of the real-time dosimeter prototype are comparable to those of the previously used skin dose monitor (SDM), with the exception that our prototype has the distinct advantage of including multichannel sensors. The novel dosimeter exhibited equivalent performance with respect to energy dependence and linearity, etc., compared with an SDM. To date, no feasible method exists for measuring the radiation dose to the patient in real-time during IVR. Therefore, the novel real-time dosimeter system is expected to be useful in measuring patients' exposure dose during IVR.

研究分野：放射線医学

キーワード：放射線被ばく

1. 研究開始当初の背景

(1) IVR 被曝

X線透視撮影下でのカテーテルインターベンション(IVR)は、患者の救命や生命予後改善およびQOLの維持向上に極めて有用であり、現在広く普及している。だがIVRは、X線透視撮影時間が非常に長くなる傾向にあるため、患者の放射線被曝線量増加が世界的に重大な問題となっている。

(2) リアルタイム測定

IVR時の患者放射線障害回避の為に、急性放射線障害の閾線量を超過する前にその皮膚面へのX線照射を中断する必要があり、そのためには正確な患者被曝線量をリアルタイムに測定することが望まれるが、この目的に叶うリアルタイム線量計は現存していない。例えばリアルタイム線量計として1998年にSkin Dose Monitor (SDM)の有用性が発表され世界的に普及したが、センサとして毒性が極めて強いカドミウム蛍光体を使用していたので、現在は製造が中止されている。

(3) シングルセンサ線量計

SDM等の従来のリアルタイム測定器は、線量検出部(センサ)が一つしかない(シングルセンサ)。マルチセンサ型のX線検出部をもつリアルタイム線量計を開発できれば、シングルセンサでは困難であった正確な最大被曝線量測定が期待できる。

2. 研究の目的

IVR時の患者放射線障害回避のための、「マルチセンサの高感度リアルタイム患者被曝線量測定器」は現存せず、その開発を行うことが目的である。そのために、(1)高感度センサの探索と評価、(2)マルチセンサ型リアルタイム患者被曝線量計の試作と特性検討、そして(3)マルチセンサ型リアルタイム患者被曝線量計のIVR臨床評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 高感度センサの探索と評価

現在入手可能な赤色発光蛍光体からX線照射で発光する可能性のある5品種を選定した。これらの蛍光体の毒性や法的規制の有無は蛍光体の製造者から「特定化学物質の環境への排出量の把握及び管理の改善の促進に関する法律」(化管法)に基づいて発行された安全データシート(Safety Data Sheet, SDS)を入手して確認した。いずれの蛍光体にも毒性や法的規制物質である旨の記載はなかった。

予備的検討結果から、 $Y_2O_3S:Eu,Sm$ 蛍光体が本研究に適していると判断し、次の測定評価を行った。蛍光体の基本的輝度特性すなわち、管電圧(エネルギー)依存性、線量率依存性等の諸特性は、蛍光体にX線装置の透視モードで管電圧60~120kVp、管電流1.7~2.1mA、線量率2.5~160mGy

min^{-1} のX線を照射して、このときの管電圧、輝度および線量率を測定することで評価した。

蛍光体の輝度測定は以下の方法で行った。X線装置のX線管焦点と蛍光体シート間距離が40cmとなる位置に輝度測定用蛍光体シートを配置し、輝度計はX線によるノイズ発生を避けるためX線束外に設置した。さらに、線量測定用の電離箱式線量計(日本品質保証機構:JQAにて校正されたもので測定毎に測定時の気温気圧補正を行った)を蛍光体シートと並べて配置し、蛍光体に照射されるX線の線量率を直接かつリアルタイムに把握できるようにした。輝度計の設定は測定視角 2° 、測定レンジは $0.01 \sim 1999 \times 10^1 cd m^{-2}$ とした。輝度計からアナログの直流電圧として出力される輝度データをパソコンで処理するため、輝度計からのアナログ出力はマルチメータ(三和電気計器PC773)でデジタルデータにA/D変換してパソコンに取り込むことでデータ処理の簡便性と測定精度向上を図った。

(2) マルチセンサ型リアルタイム患者被曝線量計の試作と特性検討

線量計の開発

センサに使用する蛍光体はシリコンフォトダイオードの分光感度が高い赤色発光の $Y_2O_3S:Eu,Sm$ 蛍光体を選定した。X線を光に変換する蛍光体センサ部と、光を電気信号に変換してX線量に換算する受光素子および演算部を装備した本体部を分離し、両者をプラスチック製の光ファイバーケーブルで接続する構造とした。本体部に複数の蛍光体センサを接続できるようにして、多チャンネル同時測定を可能とし、線量率、積算線量、測定時間をチャンネル(センサ)毎にリアルタイムに同時測定できるようにした。

本体で線量計の操作と測定結果の表示を可能とすると共に、外部のパソコンとも接続できるようにしてパソコンでのデータ取り込みを可能とした上、パソコンからも線量計の操作が行えるようにした。

試作線量計の基本特性評価

新規リアルタイム患者被曝線量計の基本特性は、新規線量計の測定値と同一条件で測定した比較用のSDMおよび基準となる電離箱式線量計の測定値と比較することで評価した。

・エネルギー(管電圧)依存性測定方法:
新規リアルタイム患者被曝線量計のエネルギー依存性は、新規線量計とSDMおよび電離箱式線量計にX線を同時に照射してそれぞれの線量計で測定された線量値を比較することで評価した。管電圧は60~120kVpの範囲で、60, 70, 80, 90, 100, 110 および120kVpと10kV毎に間隔で変化させた。管電流は250mAで一定とした。このときの線量は電離箱式線量計の測定値で60kVpのと

き 3.2 mGy (曝射時間 400 ms), 70 kVp 4.5 mGy (400ms), 80 kVp 5.7 mGy (400ms), 90 kVp 3.6 mGy (200ms), 100 kVp 4.2 mGy (200ms), 110 kVp 4.0 mGy (160ms), 120 kVp 3.6 mGy (120ms) であった。

・線量依存性測定方法:

エネルギー依存性と同様に新規リアルタイム患者被曝線量計, S D Mおよび電離箱式線量計に同時にX線を照射してそれぞれの線量計で測定された線量の値を比較した。X線の照射条件は、管電圧は 80 kVp とし、線量は電離箱式線量計の測定値で 0.19 ~ 590 mGy の範囲で変化させた。

・線量率依存性測定方法:

エネルギー依存性、線量依存性と同様に3種の線量計にX線を同時曝射したときの線量率の値を比較した。X線の照射条件は、管電圧は 80 kVp とし、線量率は電離箱式線量計の測定値で 0.4 ~ 40 mGy s⁻¹ の範囲で変化させた。

・角度(方向)依存性測定方法:

角度(方向)依存性はフラットパネルディテクタ付X線血管撮影装置で測定し、S D Mの角度依存性と比較した。線量計の蛍光体センサ部をX線装置のアイソセンター(X線管焦点から 75 cm)の位置に設置し、X線管を horizontal, vertical の両方向に 0°, ±10°, ±20°, ±30°, ±40°, ±50°, ±60°, ±70°, ±80° および ±90° に回転させたときの線量計の値を測定し、各線量計の 0°での測定値を1に正規化して角度依存性の検証をした。X線の照射条件は、管電圧は 80 kVp, 管電流 50 mA, パルス幅 5 ms, パルスレート 15 f s⁻¹ で照射時間は 10 s とした。このときの線量は S D Mの 0°の測定値で 2.8 mGy であった。

・胸部ファントム上の検出器および光ファイバーケーブルのX線写真映り込み評価方法:

臨床を模した条件で新規リアルタイム患者被曝線量計と S D Mおよび比較のための半導体検出器式線量計 P S Dの各センサ部とケーブルのX線像への映り込みを評価するために、胸部ファントムに各線量計のセンサを粘着テープで貼り付けてフラットパネル検出器でX線像を撮影した。

(3) マルチセンサ型リアルタイム患者被曝線量計の IVR 臨床評価

新規線量計の IVR 等での性能評価をするため、蛍光ガラス線量計をリファレンスとして、初期的な臨床評価を行った。

冠動脈カテーテル造影(CAG)冠動脈形成術(PCI)あるいはカテーテルアブレーション(ABL)を行った患者のうち、無作為に 63名の同意を得た患者を対象とした。患者は男性 48名、女性 15名、平均年齢は 62.1 ± 13.0 歳であった(表 1)。63症例のうち CAG が 26例、ABL が 30例、PCI が 7例であった。尚、倫理委員会に審査申請し承認を得た。血管撮影装置は平面検出器(Flat Panel

Detector: FPD)搭載の東芝社製 INFX-8000V, single-plane システムを主に使用した。パルス透視(15 p s⁻¹)を用い、デジタルシネ撮影のフレームレートも 15 f s⁻¹である。

線量測定は、患者背面位置に新規線量計のセンサ(原則的に4つ)を適宜貼付した。同時に蛍光ガラス線量計を新規線量計の蛍光体センサ部の 1 cm 以内の位置に貼付し、両者の線量測定値の比較および相関について検討した。使用した蛍光ガラス線量計素子は、GD-302M(千代田テクノル)である。GD-302Mは、読み取り値から初期値とバックグラウンドを差し引いた値にエネルギー校正定数を乗じ、更に皮膚面の吸収線量に変換するために吸収線量変換係数 1.06 を乗じて皮膚吸収線量を算出した。GD-302Mの測定/読み出しシステムは校正済みの Dose Ace FGD-1000(千代田テクノル)を用いた。素子が以前に積算したラジオフォトルミネセンス成分を除去するために、予めアニール処理を行った。

さらに使用性の検証として、線量計の蛍光体センサを患者に貼り付けた際に患者が違和感を訴えるか、また蛍光体センサのX線像への映り込みが術者の妨げにならないかの検証を行った。

表 1. 臨床評価の対象

	Total	CAG	ABL	PCI
n	63	26	30	7
年齢(才)	62±13	67±13	55±11	73±7
男性/女性	48/15	22/4	22/8	4/3
身長(cm)	165±10	164±9	168±9	155±10
体重(kg)	67±13	66±13	71±12	58±11
透視時間(分)	22±14	10±6	30±12	31±16
DAP(Gy*cm ²)	71±58	34±24	98±63	95±51

DAP: 面積線量

4. 研究成果

(1) 高感度センサの探索と評価結果

図 1 は赤色発光蛍 Y₂O₂S:Eu,Sm 蛍光体の線量率依存性である。線量率と輝度との間に相関係数 R²=0.998 の良好な比例関係があった。

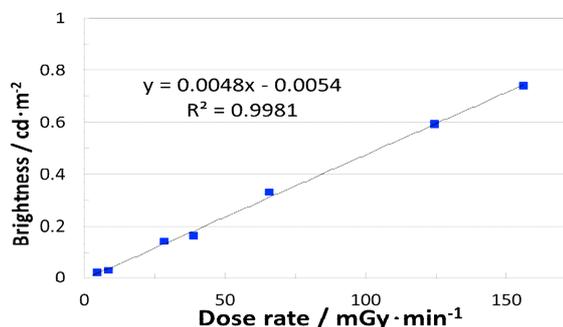


図 1. Y₂O₂S:Eu,Sm 蛍光体の線量率依存性

図 2 は赤色発光蛍 Y₂O₂S:Eu,Sm 蛍光体の管

電圧（エネルギー）依存性である。グラフの縦軸は単位線量率当たりの $Y_2O_2S:Eu,Sm$ 蛍光体の相対輝度である。管電圧依存性はそれほど大きくなく 120 kVp と 80 kVp の輝度の比は 10 % 程度であった。

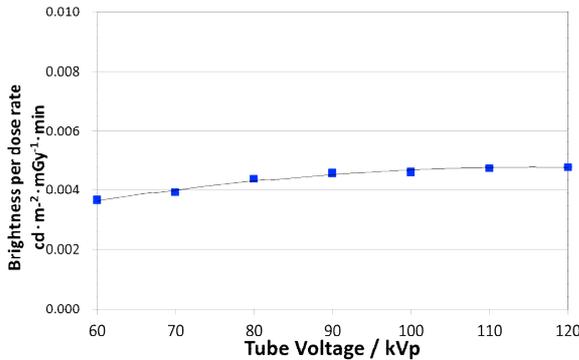


図 1. $Y_2O_2S:Eu,Sm$ 蛍光体の管電圧依存性

(2) マルチセンサ型リアルタイム患者被曝線量計の試作と特性検討結果

線量計の開発

新線量計は蛍光体センサ部 ($Y_2O_2S:Eu,Sm$) と本体部とから構成され、蛍光体センサ部と本体とは着脱可能な構造とした。蛍光体センサ部は X 線を赤色光に変換する $Y_2O_2S:Eu,Sm$ 蛍光体の蛍光体センサとプラスチック製の光ファイバーケーブルを一体化したもので、 $Y_2O_2S:Eu,Sm$ 蛍光体は円盤状の黒色プラスチック（直径約 20 mm）ので遮光された構造とした。X 線による $Y_2O_2S:Eu,Sm$ 蛍光体の赤色発光はプラスチック製の光ファイバーケーブルによって本体部に光伝送される。蛍光体センサ部とプラスチック製の光ファイバーケーブルは X 線吸収の大きな金属類を含まない素材で構成され、蛍光体センサ部が X 線像に映り込んで画像診断の妨げになりにくい仕様とした。新線量計の本体部は、プラスチック製の光ファイバーケーブルで伝送された蛍光体からの赤色光をシリコンフォトダイオードで光電変換する受光部と光電変換された電気信号を線量に変換する電子回路からなる演算部で構成した（図 3）。

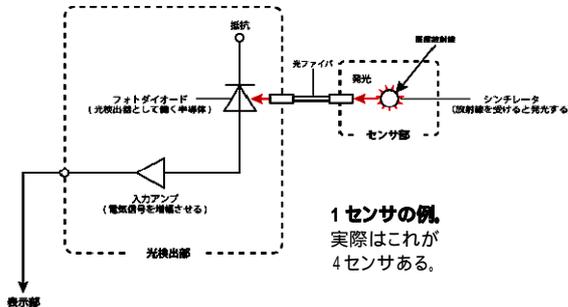


図 3. 新線量計の測定部の模式図

本体部には最大 4 個までの蛍光体センサを接続できるようにして、4 チャンネルの多チャンネル同時測定を可能とした。またチャンネル毎に線量率、積算線量、測定時間をリア

ルタイム測定できるようにした。本体にタッチパネル式の液晶ディスプレイを装備し、線量計の操作とチャンネル毎の測定結果を表示できるようにした。また、外部のパソコンとも USB ケーブルで接続できるようにしてパソコンでのデータ取り込みを可能とすると共にパソコンからも線量計の設定や操作が行えるようにした。電源は本体内蔵の乾電池もしくは AC アダプタの双方で駆動できるようにして測定環境の自由度を高くできる仕様とした。（図 4）



図 4. 新線量計の外観

試作線量計の基本特性評価結果

・エネルギー（管電圧）依存性
新規リアルタイム線量計、SDM とも基準となる電離箱線量計と比して若干のエネルギー依存性が認められた（図 5）。

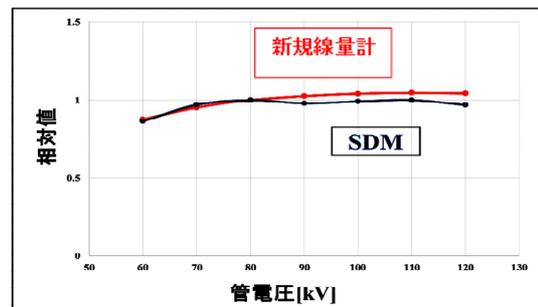


図 5. 新線量計のエネルギー依存性

・線量依存性

新規リアルタイム線量計、SDM とも電離箱線量計と良好な相関を示した。（図 6）

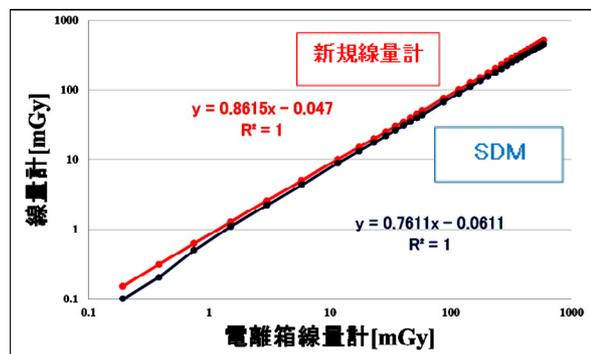


図 6. 新線量計の線量依存性

・線量率依存性

低線量率領域では新規リアルタイム線量計の方がSDMより良好な線量率依存性を示した。(図7)

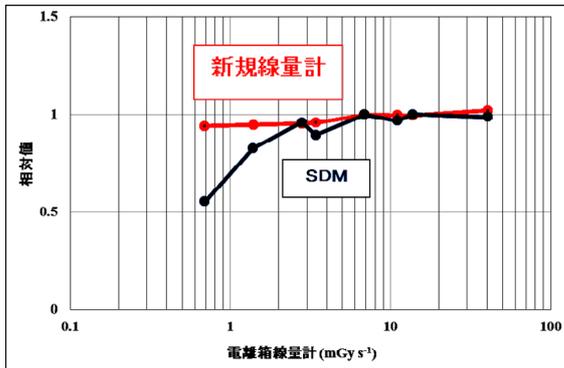


図7. 新線量計の線量率依存性

・角度(方向)依存性

新規線量計の角度依存性はSDMに比して若干劣るもののSDMの80~100%の範囲であった。(図8)

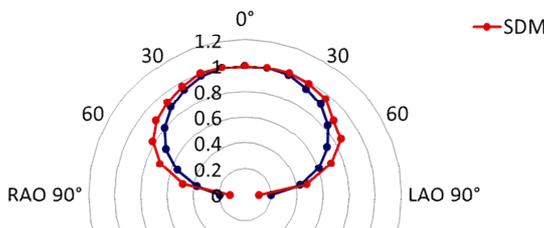


図8. 新線量計(青色)の水平方向角度依存性

・胸部ファントム上の検出器および光ファイバーケーブルのX線写真映り込み

新規線量計、SDMとも蛍光体センサ部の蛍光体がX線写真に映り込んだが光ファイバーケーブルは確認できなかった。一方PSDでは半導体検出器、金属ケーブルとも高コントラストでX線像に映り込んだ。(図9)

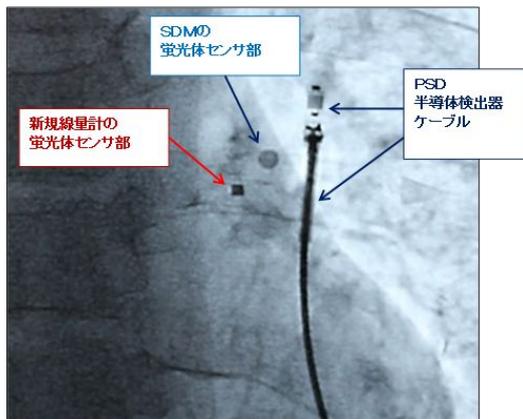


図9. 各センサの胸部ファントムX線像への映り込み

(3) マルチセンサ型リアルタイム患者被曝線量計のIVR臨床評価

図10の横軸は臨床で患者皮膚に貼付した新規リアルタイム線量計の測定値、縦軸はリファレンス線量計として新規線量計の近傍

1 cm以内に設置した蛍光ガラス線量計の測定値である。新規線量計はリファレンス線量計と高い相関があった。

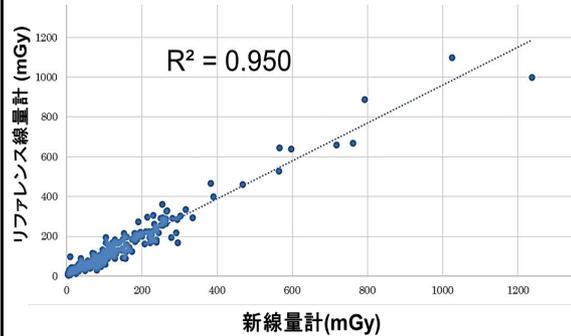


図10. 新規リアルタイム患者被曝線量計とリファレンス線量計の相関(臨床評価)

また新線量計の蛍光体センサを患者に貼り付けた際に患者が違和感を訴えることは無かった。また蛍光体センサのX線像への映り込みは許容できた。(図11)



図11. 新規リアルタイム患者被曝線量計の臨床評価例。

左冠動脈造影、左前斜位50度。2つのセンサ(赤矢印)が写っているが手技の妨げにはならない。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8件)

Chida K, Kato M, Inaba Y, Kobayashi R, Nakamura M, Abe Y, Zuguchi M. Real-time patient radiation dosimeter for use in interventional radiology. Phys Med. 2016 Nov;32(11):1475-1478. 査読有 doi: 10.1016/j.ejmp.2016.10.013.

Inaba Y, Chida K, Kobayashi R, Zuguchi M. A cross-sectional study of the radiation dose and image quality of X-ray equipment used in IVR. 査読有 J Appl Clin Med Phys. 2016 Jul;17(4):391-401. doi: 10.1120/jacmp.v17i4.6231.

Kato M, Chida K, Moritake T, Sato T, Oosaka H, Toyoshima H, Zuguchi M, Abe Y. Direct Dose Measurement On Patient During Percutaneous Coronary Intervention Procedures Using Radiophotoluminescence Glass Dosimeters. 査読有 Radiat Prot

Dosimetry. 2016 Sep 13. [Epub ahead of print] doi:10.1093/rpd/ncw263
Inaba Y, Chida K, Kobayashi R, Haga Y, Zuguchi M. Radiation dose of cardiac IVR x-ray systems: a comparison of present and past. 査読有 Acta Cardiol. 2015 Jun;70(3):299-306. DOI: 10.2143/AC.70.3.3080634
Nakamura M, Chida K, Zuguchi M. Novel Dosimeter Using a Nontoxic Phosphor for Real-Time Monitoring of Patient Radiation Dose in Interventional Radiology. 査読有 AJR Am J Roentgenol. 2015 Aug;205(2):W202-6. doi: 10.2214/AJR.14.13925.
Nakamura M, Chida K, Zuguchi M. Red emission phosphor for real-time skin dosimeter for fluoroscopy and interventional radiology. 査読有 Med Phys. 2014 Oct;41(10):101913. doi: 10.1118/1.4893534.

〔学会発表〕(計 6件)

Masaaki Nakamura, Koichi Chida, and Masayuki Zuguchi. What is the Most Useful Device for Real-time Measurement of the Maximum Radiation Dose to the Patient during Interventional Radiology? RSNA2014. 2014.11.30. Chicago, USA.

Masaaki Nakamura, Koichi Chida, and Masayuki Zuguchi. Real-time and Multichannel Patient Dosimeter that used red emission phosphor. 日本医学物理学会第109回学術大会. 2015.4.10. 横浜(パシフィコ横浜)

中村正明 千田浩一 洞口正之. リアルタイム患者被曝線量計の開発 Development of real time patient dosimeter. 日本放射線技術学会第42回秋季学術大会 2014.10.10. 札幌(札幌コンベンションセンター)

中村正明 千田浩一 洞口正之. 入射皮膚線量をリアルタイムに測定できる蛍光体の探索. 日本放射線技術学会第42回秋季学術大会. 2014.10.10. 札幌(札幌コンベンションセンター)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1件)

名称:線量計
発明者:洞口正之、千田浩一、中村正明、佐藤公悦
権利者:同上
種類:特許公開
番号:特開2014-173903
出願年月日:平成26年9月22日
国内外の別:国内

取得状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

洞口 正之(ZUGUCHI Masayuki)
東北大学・大学院医学系研究科・名誉教授
研究者番号:20172075

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

山田 章吾(YAMADA Shogo)
東北大学・大学院医学系研究科・名誉教授
研究者番号:60158194

千田 浩一(CHIDA Koichi)
東北大学・災害科学国際研究所・教授
研究者番号:20323123

(4)研究協力者

中村 正明(NAKAMURA Masaaki)
加藤 守(KATO Mamoru)
稲葉 洋平(INABA Yohei)