

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26460727

研究課題名(和文) X線CTでの被ばく線量を精密かつ高速に推定する研究

研究課題名(英文) A study on accurately and rapidly estimate exposure dose in X-ray CT

研究代表者

小山 修司 (Koyama, Shuji)

名古屋大学・脳とこころの研究センター・准教授

研究者番号：20242878

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)：X線CTを正確に模擬して、モンテカルロシミュレーションを行うために、8チャンネルX線エネルギー測定器と1チャンネル球形半導体線量計を開発した。前者は、X線CTの機種・撮影条件ごとに異なるX線ファンビームのファン角ごとのX線エネルギーと線量強度を測定するもので、後者はCTスキャン中に照射線量を変化させるX線管電流変調の様子を正確に測るものである。これらを使って得た各種CT装置の基礎データを、シミュレーションコードに組み込み、人体ファントムによる実測と計算が一致することを確認した。最後に、実際の被験者データを用いて、並列計算によるモンテカルロシミュレーションを行い臓器線量の推定を行った。

研究成果の概要(英文)：In order to perform accurate Monte Carlo simulation of X-ray CT, we developed an 8-channel X-ray energy analyzer and a single-channel spherical semiconductor dosimeter. The former is for measuring the X-ray energy and dose intensity for each fan angle of X-ray fan beams which are different for each model and scan condition of X-ray CT, and the latter is for accurately measuring the state of the X-ray tube current modulation during the CT scan. The basic data of various CT units obtained using these instruments were incorporated into the simulation code, and it was confirmed that the actual measurement and the calculation by the anthropomorphic phantom are consistent. Finally, Monte Carlo simulation by parallel calculation based on actual subject data was performed to estimate the organ dose.

研究分野：放射線計測学

キーワード：放射線技術学 医療被ばく 放射線計測 X線CT モンテカルロシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 我が国は、医療保険制度が充実し、国民誰もが高水準の医療を受けられるようになっており、これにより国民の平均寿命も世界でトップクラスとなっている。一方、医療制度の充実とともに、X線診療機器の稼働数も世界の中で非常に多く、文献によれば、X線検査数とそれによる発がんのリスクとも先進15カ国で1番となっている(図1)。

X線検査の中でも、検査数の割合が大きく、1回の検査における被ばく線量が比較的大きいのがX線CT検査(以下、CTと略す)であり、これによる被ばく線量を低減することが急務であると考えられ、そのためには、患者被ばく線量を正確に知ることが重要と考えている。

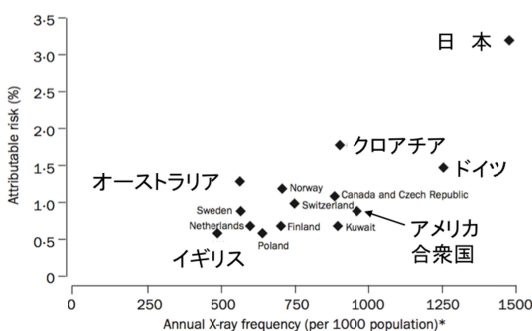


図1 診断用 X 線被ばくに起因するがんのリスクと年間の X 線検査頻度の関係(文献)

現在、CTの被ばくを評価する方法として標準化されている方法は、図2の形状をしたアクリル樹脂製のファントムと呼ばれる人体の模擬物質に放射線量(吸収線量)を測定する検出器を挿入して、ファントム中の平均線量を測定するというものである。この値を用いることで、CTの被験者の大まかな被ばく線量は推定できるが、画一の大きさのものを使っているため、被験者の体型の違いや体内の詳細な被ばくの様子は不明のままである。

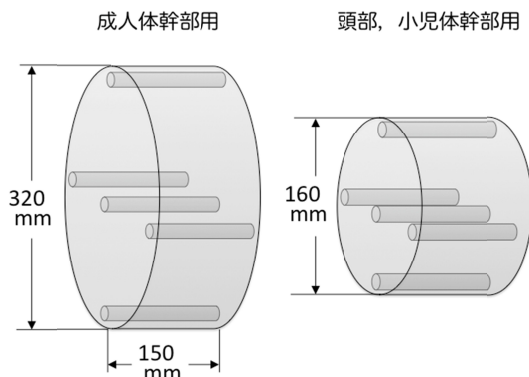


図2 X線CT被ばく測定用ファントム

そこで、研究的にはいろいろな試みがされており、より人体に近い形状をした人体型ファントムの中に放射線検出器を配置して臓器位置での放射線量を実測したり、モンテ

カルロシミュレーションという手法を用いてコンピュータの中で人体内臓器線量を推定したりしようということが行われている。

本学においても、以前の科研費補助金の助成を受けて完成させた人体組織・臓器吸収線量測定システムを保有しており、これにより各種X線検査での被ばく線量の測定をおこなって来ている。

現在、患者個々の画像データが放射線情報システムに保存される際、他の情報と合わせて被ばく線量が記録されることも進められており、そうした流れの中でも、被ばく線量を詳細に把握することが重要となってくると考えられる。

(2) 本学では、前述したモンテカルロシミュレーションを使用して、あらゆるX線検査に対して様々な解析を行ってきた。モンテカルロシミュレーションは、実際には測ることのできないような部分での線量の推定や細かい解析ができる反面、プログラミングさえしてしまえば何らかの結果が出てしまい、場合によってこれが誤っている場合も考えられる。

モンテカルロシミュレーションを正確に行うためには、そのプログラミングコードにX線装置の構造やX線束の情報、被験者の画像情報などを正確に組み込むことが重要である。後者の被験者の情報については、診断に使われる画像データが使用できるため良いが、装置に関わることについては、一般的に装置メーカーが社外秘にしていることが多く、ユーザには把握が困難なことが多い。したがって、本学ではこれらデータをできる限り、実測できる手法の開発に取り組んで来ている。

さらに、モンテカルロシミュレーションでの課題には、計算スピードに関するものがある。すなわち、1つ1つの光子や電子の輸送を、各空間的な位置で起こりうる確率を基に行っていくことになるため、本質的に多量の計算時間が必要となる。近年、個々の集中処理装置(CPU)で複数の計算を同時に走らせることができるようになってきており、さらに1台のパーソナルコンピュータ(PC)の中に複数のそうしたCPUが載せられるものが市販されている。さらに、PCの台数を増やし、同時に複数の粒子輸送計算を行えば、より高速な計算が可能となる。

2. 研究の目的

(1) モンテカルロシミュレーションに組み込むためのCT装置の基礎的なデータを実測する測定器を開発する。

1つ目は、CTのX線ファンビームの特性を調べるものである。CTでは、スキャンしたとき、被験者を透過して画像データ検出器に到達するX線のエネルギーをそろえるためにX線管の射出口付近に複雑な形状のビーム整形フィルタが装着されている(図3)。

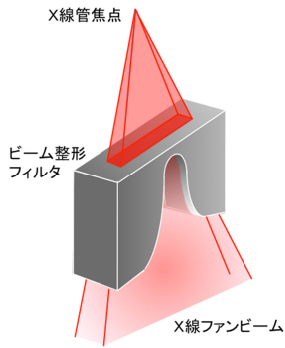


図3 X線ファンビームとビーム整形フィルタ

そこでファンビームの各ファン角を透過して被験者に入射する前のX線エネルギーや線量強度を簡便に測定する装置を開発する。

2つ目は、現在行われているCT検査で通常使用されているCT-AEC (CT-Auto Exposure Control) によるスキャン中の各時刻での線量強度変化を測定する装置を開発する。

以上の装置を使用し、現在臨床で使用されている主要なCT装置のデータを取得する。

(2) 実際の患者データを使用し、PC内に被験者を空間的に構築して、前述で取得されたデータを組み込んだモンテカルロシミュレーションを行い、被験者の臓器線量を推定する。なお、実際の患者データの使用については、本学の生命倫理委員会の許可を得て行う。また、臓器線量の取得にはそれらの輪郭が必要となるが、岐阜大学大学院医学系研究科原武史准教授との共同研究に基づく臓器の自動輪郭抽出技術を使用する。

3. 研究の方法

(1) X線ファンビームの特性をしらべるために開発した8チャンネルX線エネルギー測定器の詳細について図4に示す。(a)は検出器として使用したPinフォトダイオード(浜松ホトニクス S2506-04), (b)はこれを二層に重ねてエネルギー検出器としたもの, (c)はそれをさらに1箇所スリット状窓を施した鉛ケースに入れたもの, (d)はこれを8個並べた写真を表す(文献)。

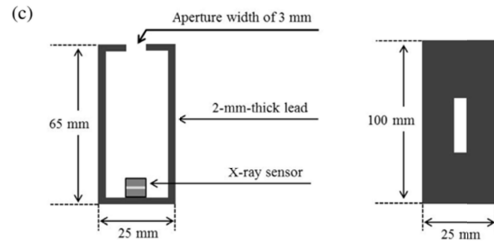
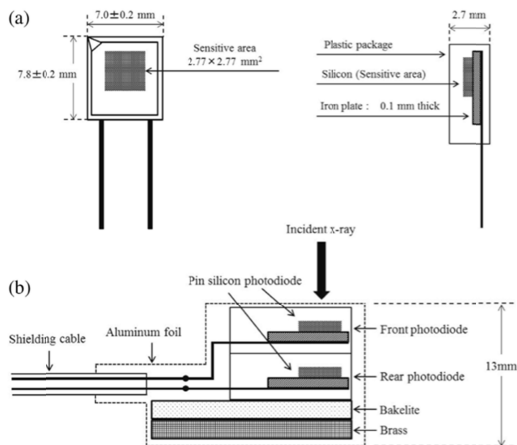


図4 開発した8チャンネルX線エネルギー測定器(文献)

(b)において、上層の検出器を透過したX線が下層の検出器で捉えられるが、このときエネルギーの強弱によって上層の出力対下層の出力の比が、入射するX線エネルギーと一定の関係を持つことから、エネルギー分析が可能となる。また、(c)の鉛ケースに入れること、(d)の多数用意することについては、図5で示すように、通常のCTスキャン状態で1回もしくは数回のスキャンにおいて、各ファン角のX線エネルギーおよび、線量強度が得られるようにするためである。

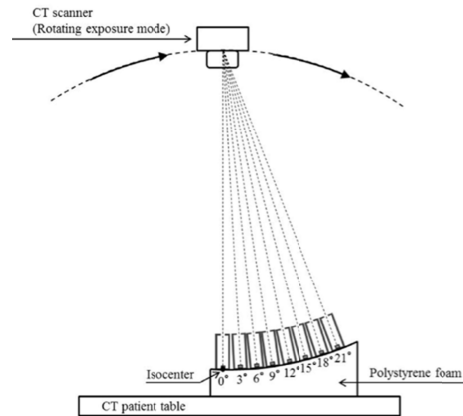


図5 8チャンネルX線エネルギー測定器によるCTのファンビームの測定(文献)

つぎに、さきに説明したCT-AECによるスキャン中の線量変化を測定するための1チャンネルの検出器とその使用について図6に示す。

検出器に使用した素子は、太陽電池として開発された球形の半導体(京セラ KSPD1840C2)で、その形状から端子方向の一部を除く各方向からのX線に対し、感度の方向依存性がきわめて小さいものである。これを、図下の様にCTのアイソセンターで体軸方向のX線束中心に固定して配置する。測定時には、患者寝台は実際の被験者が撮影された位置で移動する。CT-AECの制御も被験者の

データを用いてスキャンを行うことによって、被験者ごとの線量変化を測定することができる。

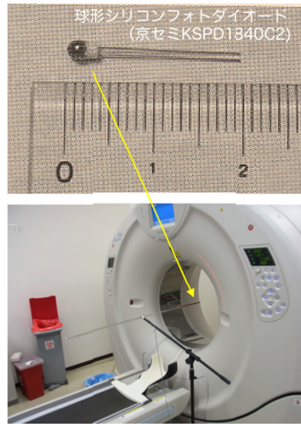


図6 1チャンネルの検出器に用いた半導体素子とCT-AECによる線量変化の測定の様子

以上を用いて、臨床で使用されている主要な4メーカーの基礎データを取得する。

(2) 被験者データについては、過去に撮影された標準、小柄、大柄の3名の患者の画像データ(DICOM形式)から画像のみ取り出して使用する。これも前述したとおり、臓器線量を求めるためには、臓器ごとの輪郭が必要となる。輪郭抽出を人の手で行うことも可能であるが、大量の時間を消費する。そこで、岐阜大学原准教授の手法で、自動輪郭抽出を短時間で行う。なお、CT画像は縦512ピクセル、横512ピクセルであるが、このサイズではモンテカルロシミュレーションを行う際、大量のメモリを消費してしまうので効率が悪い。そこで、さきの自動輪郭抽出に合わせ、画像サイズを縦160ピクセル、横160ピクセルに変換、体軸方向も5mm間隔から10mm間隔に変換してデータを用意する(図7)。これらのデータとさきのCT基礎データをモンテカルロシミュレーションコードに組み込み、被験者個々の臓器線量の推定を行う。

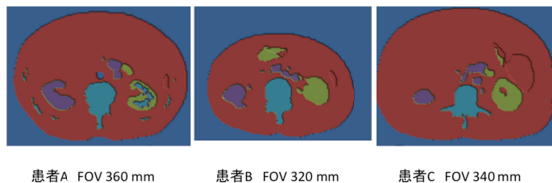


図7 モンテカルロシミュレーションに用いた3名の被験者データ

4. 研究成果

(1) 図8にCT装置2機種の体幹部条件としたときのX線ファンビームのファン角ごとのエネルギーと相対線量強度を示す(紙面の関係上別の2機種は掲載していない)。エネルギー、線量強度とも、大まかに似かよっているが、同じ管電圧同士で比較して微妙な違いが見てとれる。

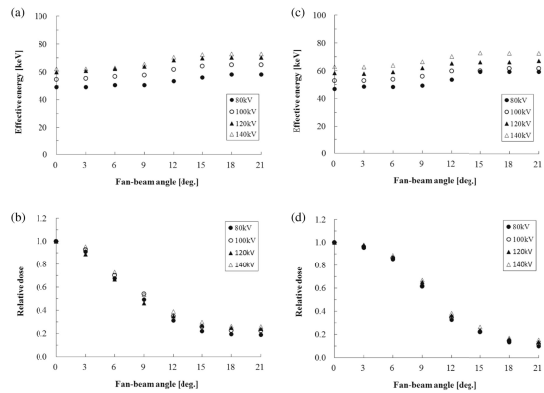


図8 CT装置4機種のX線ファンビームのファン角ごとの実効エネルギーと相対線量強度(a-b, c-d)が機種ごとのエネルギーと線量強度のグラフの組合せ)

図9に、1チャンネル球形検出器で測定されたCT-AECによるCTスキャン中の線量変化の例を示す(これも残りの3機種について紙面の関係で掲載していない)。

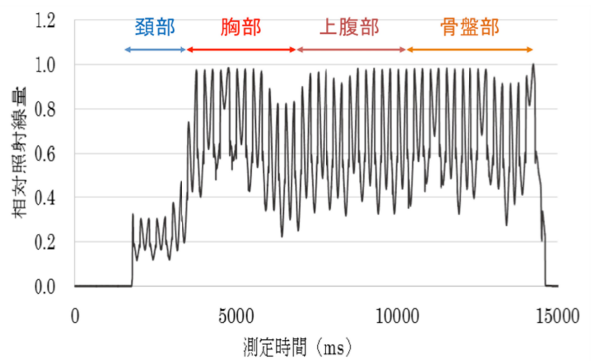


図9 1チャンネル球形検出器で測定されたCT-AECによるCTスキャン中の線量変化の様子

これについては、X線管電流の変化が機種によりかなり異なっていることがわかった。また、CT装置ではスリップリング機構によりX線管が同一方向に高速回転している状態から、操作者のボタンによりX線照射が開始されるため、その開始角度が毎回変わるため、同一機種同一条件でも、測定たびに電流変化が微妙に変わることもわかった。

(2) 3名の被験者について、実際のCTスキャンによる、臓器の吸収線量の計算結果を図10に示す。

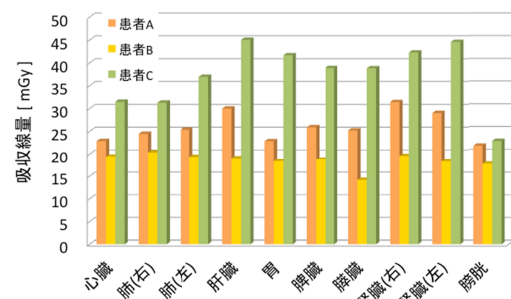


図10 3名の被験者の臓器線量の計算結果

この結果より，一般的なCT検査で，臓器の吸収線量が数十ミリグレイ（mGy）程度となること，被ばく線量が被験者の体型と大きく関係し，大柄な被験者ほど多くの線量を吸収することがわかった．

現在，本研究で購入したPCで，1名あたりのモンテカルロ計算に半日かそれ以下の時間がかかるが，PCを増設してさらなる並列計算を行ったり，計算の一部をGraphics Processing Unit（GPU）に行わせたりするなどすれば，さらなる高速化が期待できる．

<引用文献>

Amy Berrington de González, Sarah Darby, Risk of cancer from diagnostic X-rays: estimates for the UK and 14 other countries, LANCET, 363, 2004, 345-351

HABA Tomonobu, KOYAMA Shuji, AOYAMA Takahiko, KINOMURA Yutaka, IDA Yoshihiro, KOBAYASHI Masanao, KAMEYAMA Hiroshi, TSUTSUMI Yoshinori, Pin-photodiode array for the measurement of fan-beam energy and air kerma distributions of X-ray CT scanners, Physica Medica, 32, 2016, 905-913

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10件)

HABA Tomonobu, KOYAMA Shuji, AOYAMA Takahiko, KINOMURA Yutaka, IDA Yoshihiro, KOBAYASHI Masanao, KAMEYAMA Hiroshi, TSUTSUMI Yoshinori, Pin-photodiode array for the measurement of fan-beam energy and air kerma distributions of X-ray CT scanners, Physica Medica, 査読有, 32, 2016, 905-913

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27371973>

HABA Tomonobu, KOYAMA Shuji, KINOMURA Yutaka, IDA Yoshihiro, KOBAYASHI Masanao, Influence of 320-detector-row volume scanning and AAPM report 111 CT dosimetry metrics on size-specific dose estimate: a Monte Carlo study, Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine, 査読有, 39(3), 2016, 697-703

<http://doi.org/10.1007/s13246-016-0465-7>

小山修司, CTにおける医療被曝の指標, 日獨医報, 査読無, 61(1), 2016, 13-25
http://radiology.bayer.jp/static/pdf/publications/nichidoku_iho/2016_61_01/61_01_03.pdf

SHIBAHARA Tomoki, KOYAMA Shuji, INOUE

Masaki, HABA Tomonobu, Relationship between the Tube Voltage Dependence of Cross-sectional Absorbed Profile and Exposed Dose of Superficial Radiosensitive Organs, Proceedings of the Twenty-Second EGS Users' Meeting in Japan, 査読無, 2015(6), 2015, 25-32
<http://rcwww.kek.jp/egsconf/proceedings/22egsumj.pdf>

INOUE Masaki, KOYAMA Shuji, HABA Tomonobu, SHIBAHARA Tomoki, A Monte Carlo Simulation based on Measured Tube Current Modulation Data in X-Ray Computed Tomography, Proceedings of the Twenty-Second EGS Users' Meeting in Japan, 査読無, 2015(6), 2015, 17-24
<http://rcwww.kek.jp/egsconf/proceedings/22egsumj.pdf>

NAKAGAMI Tetsuya, TODA Naohiro, YAMAZAKI Yoichi, YOSHIOKA Hirotaka, KOYAMA Shuji, Use of Scattered X-Rays for the Estimation of the Attenuation Coefficient, Proceedings of the Twenty-Second EGS Users' Meeting in Japan, 査読無, 2015(6), 2015, 11-16
<http://rcwww.kek.jp/egsconf/proceedings/22egsumj.pdf>

小山修司, モンテカルロシミュレーションの応用 - CT 領域, 日本放射線技術学会雑誌, 査読無, 71(4), 2015, 371-379
http://doi.org/10.6009/jjrt.2015_JSRT_71.4.371

中神徹也, 山崎陽一, 戸田尚宏, 吉岡博貴, 小山修司, X線CTにおける散乱線利用の原理的検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読有, 114(514), 2015, 63-68
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110010021669>

井上政輝, 小山修司, 角田尚矢, 堤貴紀, 遠藤真紀, X線CTにおける深部線量分布の実測とモンテカルロシミュレーション, Proceedings of the JSCT, 査読有, 2, 2014, 48-50
http://www.kuba.co.jp/jsct-tech/pdf/meeting/2014/jsct2014_program.pdf
http://www.jsct-tech.org/index.php?page=member_journal

INOUE Masaki, KOYAMA Shuji, KAKUTA Naoya, HABA Tomonobu, An examination of difference in absorbed dose profile between measurement and calculation in X-ray computed tomography, Proceedings of the Twenty-First EGS User's Meeting in Japan, 査読無, 2014(6), 2014, 13-17
<http://rcwww.kek.jp/egsconf/proceedings/21egsumj.pdf>

〔学会発表〕(計15件)

羽場友信, 小山修司, 小林正尚, 井田義宏, 木野村豊, X線CTにおける円柱状水ファントム内部の実効エネルギーの解析, 第9回中部放射線医療技術学会, 2016/11/6

羽場友信, 小山修司, 小林正尚, 木野村豊, Weighted CTDI における最適な荷重係数の検討, 第44回日本放射線技術学会秋期学術大会, 2016/10/14, 大宮

小山修司, 汎用コード EGS5 と X線 CT の応用, 第43回日本放射線技術学会秋季学術大会, 2015/10/10, 金沢

芝原与喜, 小山修司, 井上政輝, 羽場友信, X線CTにおけるファントム内線量分布の管電圧依存性と体表部臓器被ばくの関係, 第22回EGS研究会, 2015/8/4, つくば

井上政輝, 小山修司, 羽場友信, 芝原与喜, X線CT装置での実測管電流変調データに基づくモンテカルロシミュレーション, 第22回EGS研究会, 2015/8/4, つくば

小山修司, 最新のX線CT線量測定の動向, 第46回岐阜県診療放射線技師会X線CT研究会, 2015/5/16, 三重県養老

井上政輝, 小山修司, 芝原与喜, 堤貴紀, 古川梯史, X線CTで実測によって得られた管電流変調データを用いた人体ファントムの表面線量の評価, 第71回日本放射線技術学会学術大会, 2015/4/18, 横浜

羽場友信, 小山修司, 角田尚矢, 小林正尚, 井田義宏, 木野村豊, Development of Multichannel Semiconductor Sensors to Measure Effective Energies with Rotating Exposure Mode in X-ray CT, 第71回日本放射線技術学会学術大会, 2015/4/18, 横浜

中神徹也, 山崎陽一, 戸田尚宏, 吉岡博貴, 小山修司, X線CTにおける散乱線利用の原理的検討, 電子情報通信学会MEとバイオサイバネティクス研究会, 2015/3/16, 東京

角田尚矢, 小山修司, 亀山裕司, 堤貴紀, 平井雄大, 近藤晋平, X線CTでX線管回転中に実効エネルギーの測定が可能な検出器の開発, 第7回中部放射線医療技術学会, 2014/11/1, 名古屋

羽場友信, 小山修司, 井上政輝, AAPM Report 111によるCTDI測定法がSSDE補正係数に与える影響について, 第42回日本放射線技術学会秋季学術大会, 2014/10/11, 札幌

井上政輝, 小山修司, 角田尚矢, 堤貴紀, 古川梯史, X線CT装置における半導体線量計を用いた管電流変調データの取得, 第42回日本放射線技術学会秋季学術大会, 2014/10/11, 札幌

INOUE Masaki, KOYAMA Shuji, KAKUTA Naoya, HABA Tomonobu, An examination of difference in absorbed dose profile between measurement and calculation in X-ray computed tomography, 第21回EGS研究会, 2014/8/5, つくば

井上政輝, 小山修司, 角田尚矢, 堤貴紀, 遠藤真紀, X線CTにおける深部線量分布の実測とモンテカルロシミュレーション, 日本CT技術研究会第2回学術大会, 2014/6/28, 名古屋

INOUE Masaki, KOYAMA Shuji, ISHII Takanori, NUMAMOTO Hitomi, TSUTSUMI Yoshinori, ENDO Maki, Measurement and calculation of the absorbed dose profile curve along the depth direction in X-ray computed tomography, 日本放射線技術学会第70回総会学術大会, 2014/4/12, 横浜

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小山修司 (KOYAMA Shuji)
名古屋大学・脳とこころの研究センター・
准教授
研究者番号: 20242878

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

羽場 友信 (HABA Tomonobu)
井上 政輝 (INOUE Masaki)
芝原 与喜 (SHIBAHARA Tomoki)
角田 尚矢 (KAKUTA Naoya)
堤 貴紀 (TSUTSUMI Yoshinori)
亀山 裕司 (KAMEYAMA Hiroshi)
戸田 尚宏 (TODA Naohiro)