

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：32661

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K19238

研究課題名（和文）最先端プロセスによる次世代型高精度水吸収線量計測法の確立

研究課題名（英文）Establishment of next-generation high-accuracy dosimetry of absorbed dose to water using the most advanced process

研究代表者

志田 晃一（SHIDA, Koichi）

東邦大学・医学部・非常勤研究生

研究者番号：50734050

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、従来、水吸収線量計測に用いられている空気電離箱線量計と比較し、より不確かさが小さく、計測精度が高いであろうと考えられる液体電離箱線量（liquid ionization chamber: LIC）を用いた、新しい水吸収線量計測法の確立を目指した。電離箱空洞内の媒質が液体であるLICの水吸収線量計測法の可能性を探り、新しい絶対線量計測の確立を目指した。

この結果、放射線の線質に対するLICの各特性を把握し、使用印加電圧の最適化、温度効果、イオン再結合、線質変換係数等の補正係数を導き出した。これにより、LICを用いての精度の高い水吸収線量の計測を可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、放射線治療における水吸収線量の計測では、空気電離箱線量計を用いることがグローバル・スタンダードである。

しかし、空気で満たされた線量計内で発生するイオン対を収集し、その電荷を計算により水の吸収線量として変換するという原理は、ある一定の不確かさが生じる。そこで今回、電離箱空洞内が液体で満たされた液体電離箱線量計による吸収線量の導出に挑戦した。この電離箱は空気電離箱と比べ独特の特性を有しているため、元来吸収線量の導出は難しいとされてきたが、今回各補正係数を導出することにより、従来より不確かさの小さな水吸収線量を導き出すことに成功した。今後の水吸収線量計測法にインパクトを与えることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the liquid ionization chamber (LIC), which is expected to have less uncertainty and higher measurement accuracy than the air ionization chamber that has been conventionally used for water absorbed dose measurement, is used. We aimed to establish a new absolute dosimetry by exploring the possibility of water absorbed dosimetry for LIC, where the medium in the ionization chamber cavity is liquid.

As a result, we grasped each characteristic of LIC for radiation quality, and derived the correction factors such as optimization of applied voltage, temperature effect, ion recombination, and quality conversion factor. This enabled highly accurate measurement of absorbed water dose using LIC.

研究分野：医学物理学・放射線技術学

キーワード：医学物理学 高精度放射線治療 水吸収線量 液体電離箱線量計 標準計測法 イオン再結合補正 線質変換係数

1. 研究開始当初の背景

三大疾病の1つである“がん”（悪性新生物）は、現在、2人に1人が罹患し、3人に1人が死亡すると言われている。三大がん治療（内科療法、外科療法、放射線療法）の中の1つである放射線療法（放射線治療）は、体を切ることなくがんを死滅させることができる治療法として認知され、近年では技術の進歩により定位放射線治療（stereotactic radiotherapy: SRT）や強度変調放射線治療（intensity modulated radiotherapy: IMRT）といった高精度な治療法が日本全国に提供されつつある。

放射線治療では、標的（がん病巣）にいかにか正確な線量を投与できるかががん病巣の局所制御率を大きく左右する。我々は治療装置が出力する放射線量を水中での吸収線量（水吸収線量）であるグレイ（ $Gy = J/kg$ ）で定義し[1]、この水吸収線量を計測・評価することで治療の精度を保証してきた。また、標的とするがん病巣を95%制御するためには投与される吸収線量の不確かさは5%以内にすべきであり、そのためには治療装置から出力線量つまり水吸収線量の不確かさを2.5%以内にしなければならないと提言されている[2,3]。

水吸収線量の計測では「空気電離箱線量計」を用い、空気から水の吸収線量へ計算で導出するのが現在も世界標準である。しかしながら、「空気の吸収線量」から「水の吸収線量」へ変換する過程において、様々な係数による補正が行われるがこれらの係数には多くの不確かさが潜在しており、少なからず水吸収線量の精度を低下させる一因となっている。

2. 研究の目的

今回、研究代表者は電離箱空洞内を液体で充填した「液体電離箱線量計」に着目した。空気電離箱と比し、この液体電離箱線量計の空洞内には有機媒体（イソオクタン：2,2,4-trymethilepentan）が充填された完全密封型の平行平板形電離箱線量計である。イソオクタンは水等価性に優れるだけでなく、測定感度が非常に高く、電離容積を非常に小さくしても十分な電荷量を得ることができる。また、空気に比べ、水との質量阻止能比が放射線のエネルギーの変化に対し穏やかであり、放射線のエネルギー（線質）に対する補正を無視できる可能性を秘める（図1）。つまり、従来の空気電離箱を用いた計測法で生じる不確かさを低減し、高い精度で水吸収線量を計測できる可能性がある。本研究の目的は、液体電離箱線量計の特性を詳細に検討することにより、新規プロセスによる最先端高精度水吸収線量計測法を確立することである。

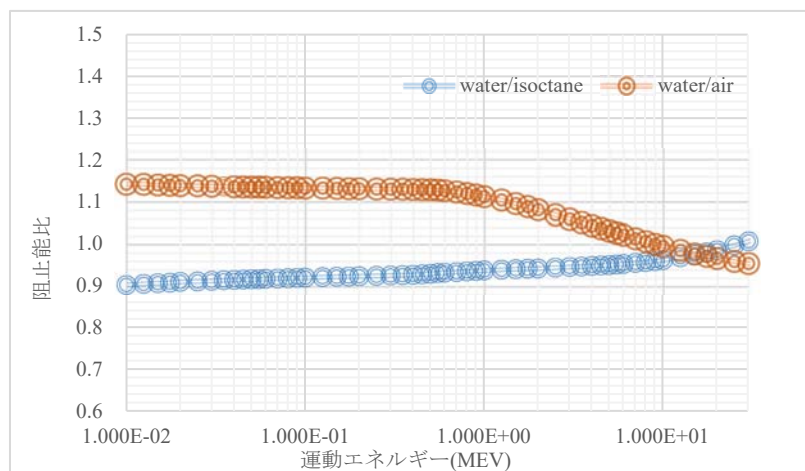


図1 水と物質との阻止能比（NIST・ESTAR より）

3. 研究の方法

本来は液体電離箱線量計を国内一次標準または二次標準機関によって直接校正を行い、吸収線量校正定数を得ることを予定していたが、液体電離箱線量計を直接計測するための治具が存在しないことや液体電離箱線量計を計測する体制が整っていないなどの理由で断念せざるを得なかった。そのため、当施設にある高エネルギー放射線発生装置（リニアック）のX線を今回の研究の標準場とすることとした。

当施設のリニアックにおけるX線場と二次線量標準機関によって校正を受けた円筒形リファレンス線量計 TN 30013 (PTW, Freiburg, Germany) を使用することで、従来実施されている⁶⁰Co-γ線による水吸収線量標準場および線量トレーサビリティ体制と同等の条件を整えた。

当施設の高エネルギーX線場を利用して様々な条件での各電荷の収集を行った。今回、研究に使用した液体電離箱線量計は TN 31018 (PTW, Freiburg, Germany)、3D 水ファントムは BeamScan (PTW, Freiburg, Germany)、リニアックは TrueBeam (Varian, Palo Alto, USA) である。使用したX線のエネルギーは 4MV (TPR_{20,10} = 0.617)、6MV (TPR_{20,10} = 0.664)、10MV (TPR_{20,10} = 0.736)、6MV-FFF (TPR_{20,10} = 0.627)、10MV-FFF (TPR_{20,10} = 0.703) である。照射条件は source-chamber distance (SCD) 100cm、照射野 10cm × 10cm で行った。また、電位計は液体電離箱線量計の公称使用電圧である 800V を印加するために EMF521 (EMF ジャパン、兵庫、日本) を使用した。この電位計

は現在、単体で 1000V まで印加可能な電位計である。

TN31018 については、研究代表者がいくつかの先行研究でその特性を発表しているが[4]、今回はそれ以外の条件での電荷収集を行い、最終的には TN31018 単体での絶対線量計測を目標とした。そのために下記の順番で必要となるデータを収集し、各補正係数を導出した。

1) 液体電離箱温度補正

液体電離箱線量計は密封型のため、空洞内の液体量が変化することはない。そのため、気圧の変化による電荷量の増減は一般的に無視できる。しかしながら、温度の変化により収集電荷量が増減することが知られており、その補正が必要である。そこで、ファントム内の水温を 5℃から 33℃まで変化させたときの収集電荷量を測定し、そこから温度補正係数を求めた。

2) 極性効果補正・イオン再結合補正

一般に電離箱線量計は印加電圧の極性を変えることで収集電荷量が増減する可能性がある。また、印加電圧の増減によってイオン再結合が発生し、収集電荷量が増減する。これらの現象を各線質で詳細に計測し、補正係数の導出を行った。

3) 線質変換係数・水吸収線量校正定数・絶対線量測定

リニアックの各エネルギー（線質）を標準条件とし、液体電離箱線量計の水吸収線量校正定数および線質変換係数を求めた。

また、上記計測・導出した電荷・各補正係数を用いて、液体電離箱線量の吸収線量を求め、円筒形電離箱線量計で計測した値と比較・評価を行った。

4. 研究成果

1) 液体電離箱温度補正

液体電離箱線量計は半導体などの個体検出器と同様に収集電荷が温度によって変化する。液体電離箱線量計を水ファントム中に設置し、水温を変化させた際の結果は以下のとおりである（図 2）。電荷量の変化はほぼ線形を示し、22℃を基準とした場合、±5℃でおよそ±2%の変化が起こることが分かった。これを補正するための係数を温度補正係数 k_T と定義した。水温を T (℃) とした場合、 k_T は以下の式で表される。

$$k_T = 0.00352 \times T + 2.03877 \quad (\text{式 1})$$

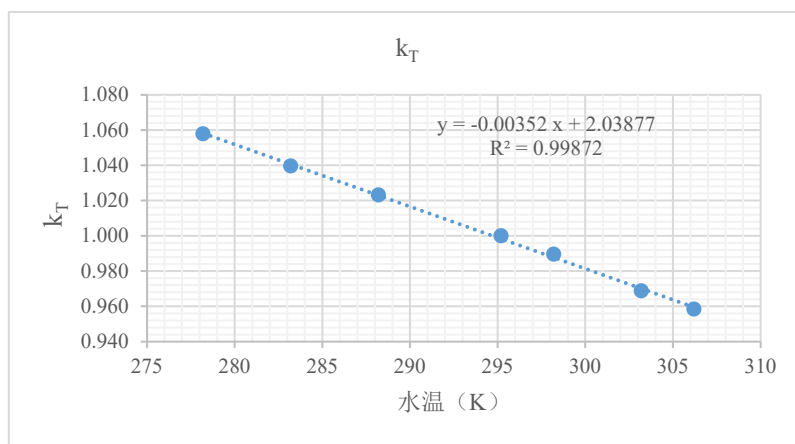


図 2 水ファントム水温による収集電荷の変化

2) 極性効果補正・イオン再結合補正

印加電圧を ±50V から ±1000V まで変化させたときの極性効果とイオン再結合を計測・評価した。なお、今回の液体電離箱線量計 TN31018 では、どの印加電圧においても明らかな極性効果は見られなかった。

イオン再結合の結果を以下に示す（図 3～図 7）。横軸を印加電圧の逆数 $1/V$ (V^{-1})、縦軸を収集電荷の逆数 $1/M$ (nC^{-1}) としていわゆる Jaffe plots で評価を行った。図から分かるように、Jaffe plots を用いた場合、リファレンスクラスの空気電離箱であれば、プロットした値は強い線形性を示すのに対し、液体電離箱線量計では電圧が高くなるに従い ($1/V$ が小さくなるに従い) 近似直線から乖離を認めた。これは電圧を高くしすぎるために起こる、イオンの増幅と考えられる。つまり、メーカーが推奨する 800V という高い印加電圧ではイオン再結合補正が難しいということになる。

近年、AAPM（米国医学物理学会）でも、電離箱線量計を使用する際は Jaffe plots の近似直線から逸脱するような高い印加電圧は推奨しないとの報告がある通り、特に液体電離箱では再結合を抑える目的で高い電圧を使用すると、収集される電荷量が不確かなものに

なることが証明された。研究代表者が評価を行った結果、どのエネルギーにおいても 300V までならば直線性を示すことが明らかであり、この電圧までであれば通常イオン再結合補正に用いられる 2 点電圧法が使用できるのではないかと考える。

以下に、各エネルギーにおける極性効果補正係数と Jaffe plots から導かれたイオン再結合補正係数の値を示す（表 1）。

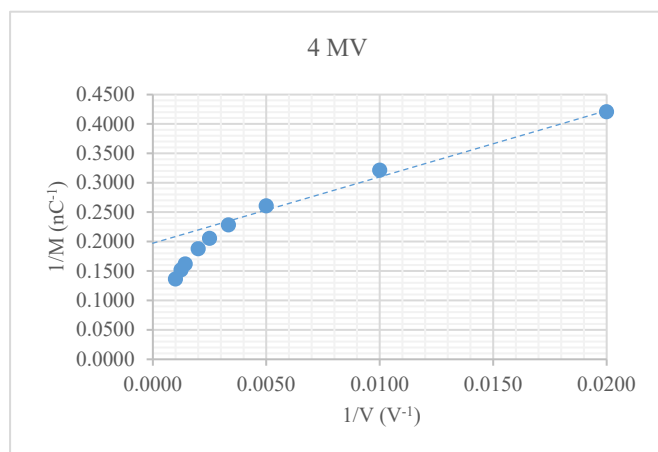


図 3 4 MV における収集電荷量の変化

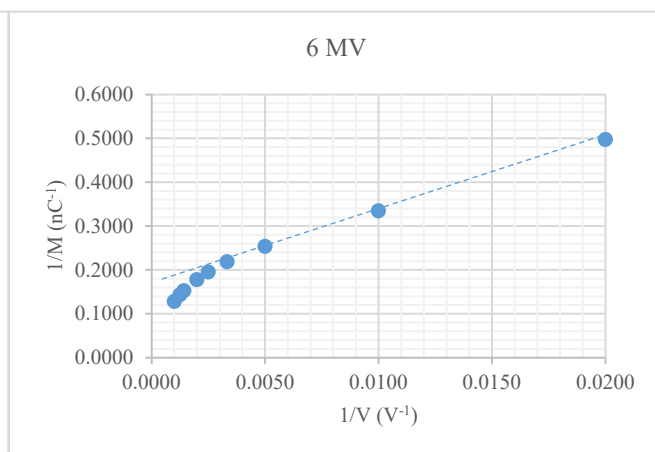


図 4 6 MV における収集電荷量の変化

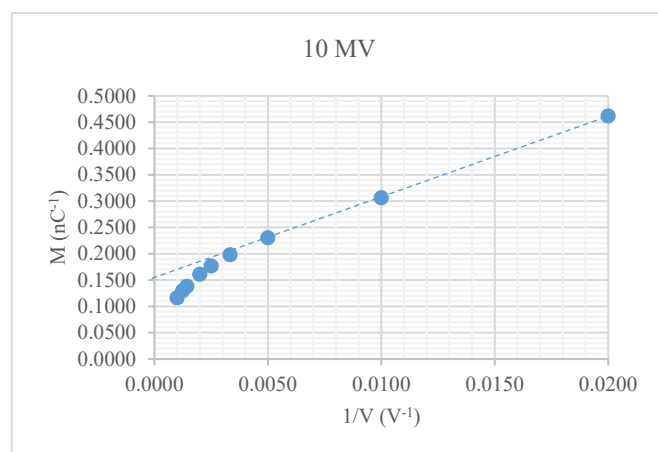


図 5 10 MV における収集電荷量の変化

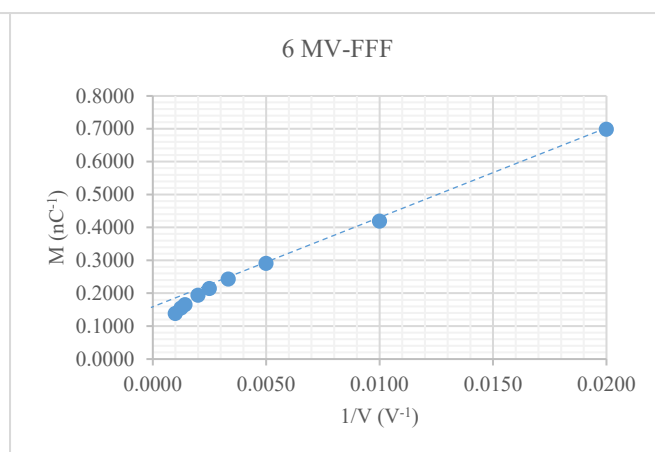


図 6 6 MV-FFF における収集電荷量の変化

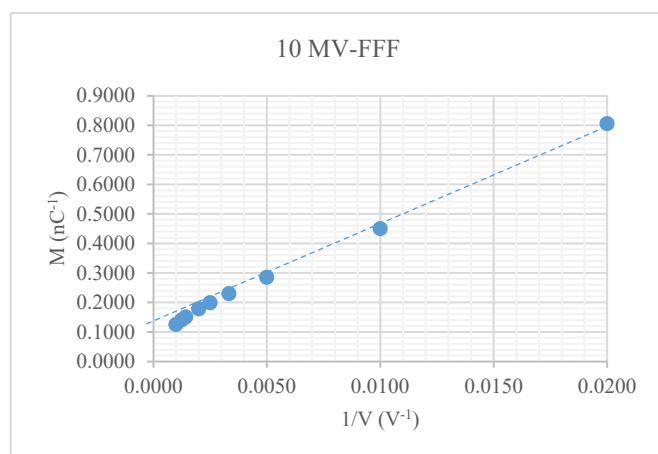


図 7 10 MV - FFF における収集電荷量の変化

表 1 イオン収集率とイオン再結合補正係数

	f (収集率)	k_s (イオン再結合補正係数)
4MV	0.8770	1.1403
6MV	0.7666	1.3045
10MV	0.7521	1.3297
6MV-FFF	0.6243	1.6017
10MV-FFF	0.4833	2.0689

3) 線質変換係数・水吸収線量校正定数・絶対線量測定

以上の結果と先行研究から、液体電離箱線量計を用いた時の各線質における線質変換係数を導きだした（表 2）（図 8）。また、水吸収線量校正定数および各エネルギーの絶対線量（水吸収線量：Gy）を計算した。以下に各エネルギーにおける校正深（10 cm）と最大深における結果を示す（表 3）。

表 2 各線質における線質変換係数 (TN31018, TrueBeam)

	4 MV	6 MV	10 MV	6 MV-FFF	10 MV-FFF
TPR _{20,10}	0.617	0.664	0.736	0.627	0.703
$k_{Q,Q0}^{field}$	0.996	0.991	0.977	0.995	0.984

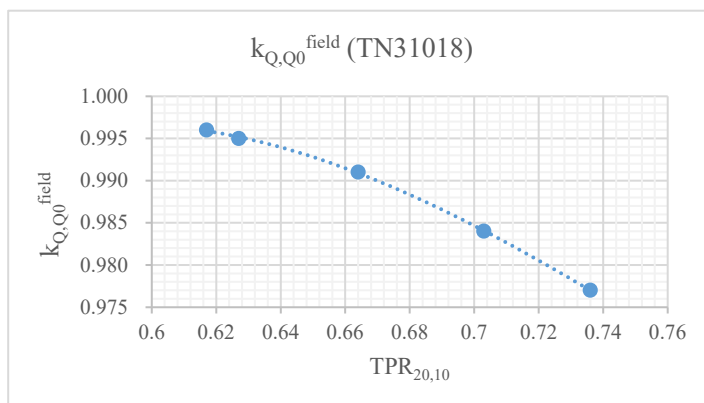


図 8 液体電離箱線量計 (TN31018) の当施設における線質変換係数

表 3 各エネルギーにおける補正係数と吸収線量

	4 MV	6 MV	10 MV	6 MV-FFF	10 MV-FFF
M_Q (nC)	4.380	4.583	5.061	4.119	4.363
T (°C)	21.400	21.400	21.400	21.300	21.400
P (hPa)	999.7	999.6	999.7	999.8	999.8
k_T	1.002	1.002	1.002	1.003	1.002
k_{pol}	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
k_s	1.140	1.305	1.330	1.602	2.069
k_{elec}	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
M_Q^{field} (nC)	5.005	5.991	6.744	6.614	9.045
$N_{D,W,Q0}^{field}$ (Gy/nC)	0.148	0.131	0.128	0.112	0.091
$M_Q^{field} \cdot N_{D,W,Q0}^{field}$ (Gy)	0.739	0.784	0.866	0.743	0.827
$k_{Q,Q0}^{field}$	0.996	0.991	0.977	0.995	0.984
$D_{w,Q}$ (Gy)	0.736	0.777	0.846	0.739	0.814
D_c (Gy) at 10 cm	0.736	0.777	0.846	0.739	0.814
TMR_{10}	0.731	0.772	0.842	0.735	0.809
D_r (Gy) at d_{max}	1.0069	1.0066	1.0053	1.0054	1.0056

[引用文献]

- [1] 日本医学物理学会編: 外部放射線治療における吸収線量の標準計測法 (標準計測法 12) . 通商産業研究社, 東京, 2012.
- [2] CRU: Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma rays in Radiotherapy Procedures, Rep. 24, ICRU, Bethesda, MD (1976).
- [3] AAPM Report 13: Physical Aspects of Quality Assurance in Radiation Therapy in Radiation Therapy. American Institute of Physics for American Association of Physicists in Medicine, 1984.
- [4] Koichi SHIDA, Daisuke KOBAYASHI, Hiraku FUSE, Keiji SUZUKI, Hideki TAKAHASHI, Naoto KAWASHIMA, Tatsuya FUJISAKI: Effect of temperature characteristics of a micro liquid ion chamber. The 71st Annual Scientific Congress of the JSRT (Kanagawa, Japan), 2015.4.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 篠田 和哉, 志田 晃一, 畑中 星吾	4. 巻 76
2. 論文標題 IMRT コミッショニングのためのMLC パラメータの多施設間比較	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本放射線技術学会雑誌	6. 最初と最後の頁 404-409
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.6009/jjrt.2020_JSRT_76.4.404	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 3件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 志田晃一, 大隅千鶴, 古賀剛輝, 千葉利昭, 清水友里, 吉田匡宏
2. 発表標題 表計算グラフを応用した独立検証の可能性～120枚MLC照射野のために～
3. 学会等名 日本放射線腫瘍学会第31回学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 志田 晃一
2. 発表標題 今さら聞けない放射線基礎 ～えっ！？こんなところに放射線！？～
3. 学会等名 令和元年度 自治体向け原子力研修講座（一般財団法人 日本原子力文化財団）（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 志田晃一
2. 発表標題 高精度のための、RTPSコトハジメ
3. 学会等名 第5回つくばRTカンファレンス（招待講演）
4. 発表年 2017年

1．発表者名 志田晃一
2．発表標題 記述式問題の解答の仕方
3．学会等名 日本医学物理士会（招待講演）
4．発表年 2016年

1．発表者名 志田晃一，西村千夏
2．発表標題 「気になりますか？シェルと固定具と線量・・・～ビルドアップ領域でのRTPSモデリング精度～」
3．学会等名 第12回茨城放射線腫瘍研究会
4．発表年 2016年

1．発表者名 志田晃一，篠田和哉，西村知夏，宮本勝美，藤崎達也
2．発表標題 今さら悩んでみる，「シェルのこと，どうかんがえますか？IMRT・・・」
3．学会等名 第112回日本医学物理学会学術大会
4．発表年 2016年

1．発表者名 三浦季子，志田晃一，篠田和哉，宮本勝美
2．発表標題 Lung-stereotactic body radiation therapyにおける正常組織線量および照射効率の検討
3．学会等名 第44回日本放射線技術学会秋季学術大会
4．発表年 2016年

1．発表者名 菊地拓海，真壁晴香，志田晃一，篠田和哉，宮本勝美
2．発表標題 乳房温存療法における心疾患のある心臓に対する線量の評価
3．学会等名 第44回日本放射線技術学会秋季学術大会
4．発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1．著者名 榮 武二、櫻井 英幸、磯辺 智範、志田 晃一、他	4．発行年 2016年
2．出版社 金原出版	5．総ページ数 312
3．書名 放射線治療 基礎知識図解ノート	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6．研究組織	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
--------	---------------------------	-----------------------	----