

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26293281

研究課題名(和文) 中性子捕捉療法の4線質3次元分布の品質保証 - ゲルを用いた弁別測定法の開発 -

研究課題名(英文) Quality assurance of 3 dimensional distribution of 4 beam components of neutron capture therapy - measurement with gel detector -

研究代表者

田中 憲一 (Kenichi, Tanaka)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70363075

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,200,000円

研究成果の概要(和文)：中性子捕捉療法では、照射する領域(照射野)の寸法形状の制御が重要となる。治療の品質保証・品質管理(QA/QC)としては、中性子捕捉療法に有用な熱・熱外中性子、並びに有害な高速中性子・線の3次元分布測定が望まれる。本研究ではこのため、ゲル検出器に、これら4つのビーム成分それぞれを増感する材料を組み合わせ、4成分の3次元空間分布を簡便に弁別測定し、中性子捕捉療法の照射場の各成分強度分布を品質保証する条件を明らかにした。今後、実用に向け、精度検証とさらなる改良の研究に取り組む予定である。

研究成果の概要(英文)：In neutron capture therapy (NCT), an essential factor is how to control the dimensions of the irradiation field. From the viewpoint of quality assurance and quality control (QA/QC), it is important to measure the three dimensional distribution of the thermal and epithermal neutrons, which are useful in NCT, and fast neutrons and gamma rays, which are not desirable for NCT. This project proposes the utilization of the gel detector as a three-dimensional radiation detector, combined with the enhancers to detect the aimed beam component for this purpose. Consequently, the required condition of the methodology was revealed. The research is still ongoing to realize the method in clinical trials, by evaluating the accuracy and improving the procedure.

研究分野：医学物理学

キーワード：医学物理学 放射線科学 放射線技術学 中性子捕捉療法 品質保証

1. 研究開始当初の背景

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) は、予め腫瘍細胞内にホウ素 (^{10}B) を取り込ませ、中性子照射で $^{10}\text{B}(n, \gamma)^7\text{Li}$ 反応を起こし、生成する短飛程の α 粒子及び ^7Li で腫瘍細胞を選択して破壊する療法である。BNCT は、原理的に細胞レベルの治療選択性を持ち、臨床で患者の生活の質が高い点で評価されている。

照射する放射線領域 (照射野) の寸法形状の制御が重要となるが、その確認法としては、ガフクロミックフィルム (Hsiao et al, Proc. 14th Int. Conf. NCT. (2010) 203-206) などが研究されている。一方、研究代表者は、繰り返し利用可能なイメージングプレート (IP) を用いて、中性子・ γ 線混在場から BNCT に有用な熱中性子を弁別測定する手法を確立した (K.Tanaka et al. Appl. Rad. Isot. 69 (2011) 1885-1887)。治療の品質保証・品質管理 (QA/QC) としては、BNCT に有用な熱外中性子、並びに有害な高速中性子・ γ 線の分布測定が望まれるが、IP は水素濃度が低いため高速中性子測定が難しい事が明らかになった。そこで、水素が豊富なポリマーゲルにこれまでに培った材質組み合わせによる線質弁別法を応用し 3 次元評価に発展するとの着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、BNCT の品質保証ツールとして、ゲルを用いた 3 次元放射線分布測定手法を開発する。熱・熱外・高速中性子、 γ 線の 4 成分を簡便に弁別測定するため、各成分のためのゲルの材質と、それに適したデータ処理法を明らかにする。これにより、各成分を乱さず相対分布を、また更には絶対値を評価できるシステムの構築にチャレンジする。最低目的としては、分布を乱してでも、分布の経時変化を検出する機構を目指す。

3. 研究の方法

申請当初は、まず(1)熱・高速中性子と γ 線の 3 成分の弁別に取り組み、その後、(2)熱外中性子の評価に取り組む予定であった。

(1)の熱・高速中性子と γ 線の 3 成分弁別では、高速中性子にはゲルに含まれる水素の $^1\text{H}(n,n)^1\text{H}$ 反応 (反跳陽子) で、熱中性子は ^6Li 入りゲルを用いて $^6\text{Li}(n, \gamma)^3\text{H}$ 反応で増感することを想定した。

具体的には、まず模擬計算により増感材への ^6Li 添加濃度を最適化する。計算は、PHITS コードに、これまでに有効性を示し照射場設計にも用いられた線源項 (Y.Sakurai et al. NIM 94 (1994) 433-440) を組み合わせで行う。最適化の指標は、増感作用の大きさ、即ちエネルギー付与の増感材の有無による差 (大きいほど良い)、ゲル及び増感材による各成分分布の乱れ (小さいほど良い) とする。

(2)の熱外中性子評価では、 $^{33}\text{S}(n, \gamma)^{30}\text{Si}$ 反応などで増感することを想定した。(1)と同様に、増感材の濃度を最適化した

4. 研究成果

4(1) 熱・高速中性子及び γ 線を増感する核反応の探索

ゲルにどのような核種をどの程度の濃度で添加すれば、熱・高速中性子及び γ 線を弁別測定できるか、PHITS コードを用いた計算で検討した。

照射場としては、5MW 運転時の京都大学研究炉重水中性子照射設備 (KUR-HWNIF) の基準熱外中性子照射モードを想定した。200mmφ×200mm の円筒形ゲルの円形面中心に 100mm 角のビームが入射するとした。

ゲルは標準的な MAGAT タイプとした。添加する Li の化学形は、熱中性子遮蔽でよく使われる LiF とした。 ^6Li を原子数比 95% に濃縮とし、 ^6Li 濃度で 0~10% とした。水への LiF の溶解度を考えると、実現できる濃度は 100ppm オーダーがせいぜいであるが、LiCl などもっとよく解ける化合物を用いれば高い濃度は実現できるであろう。より高い濃度を実現する必要があるかを考察するため、100ppm 以上の濃度も条件に入れた。

3 つの成分を増感する、すなわちエネルギー付与寄与が大きくなるゲル組成の組み合わせについて、次の 3 つの視点から検討した。

- 特定の成分を効率よく増感する。IP を用いた過去の経験より、着目する成分によるゲルへのエネルギー付与が全エネルギー付与の 10% 以上となれば、その成分が弁別測定される可能性があるとした。
- ゲル中での分布が、生体中の分布からずれないのが望ましい。
- 組み合わせるゲル間のフルエンス分布のずれが少ない。

Li 濃度を上げると $\alpha + T$ の寄与が増す。80ppm 以上では 100mm 程度までは $\alpha + T$ が支配的で、そこを超えるとほかの寄与が増した。

結果として 100ppm 以下の濃度を組み合わせれば可能性があることが明らかになった。具体的には、深さ 80mm まででは 0, 10, 100ppm で熱・熱外中性子と γ 線が、80mm 以深では熱中性子と γ 線が弁別評価できる可能性がある。このとき、結果は図示しないが成分フルエンス比のゲル間ずれは 80mm まででは 20% 以内、80mm 以上では 60% 以内であり、これを補正すれば利用可能性がある。いずれも水中本来の分布ではないが、経時変化の品質保証には有用である。以後、深さ 80mm までに着目し、0, 10, 100ppm の ^6Li を添加した MAGAT により熱・高速中性子および γ 線を弁別することを主眼に検討を進めることとした。

4(2) 熱外中性子を増感する核反応の探索

基礎検討として、増感材を混ぜ込んだゲルの線量計算をし、熱外中性子成分を選択的に増感する条件を探した。まず、近年、ホウ素中性子捕捉療法の腫瘍線量増強のため熱外中性子との反応寄与が着目されている $^{33}\text{S}(n,$

^{30}Si 反応を第一候補とした。これを基点に、JENDL4.0の核データをサーベイした。 (n, γ) 、 (n,p) など、中性子入射で荷電粒子が発生する反応に着目した。熱・熱外・高速領域それぞれの断面積の最大値を集計し、熱・高速領域に対する熱外領域の値の比を指標とし、両指標がある程度高い ^{35}Cl および ^{65}Zn を選別した。

なお、 $^{33}\text{S}(n, \gamma)^{30}\text{Si}$ 反応については、JENDL 4.0に13.4keV共鳴(ピーク21b)としてC. Wagemansのデータを加えて用いた。

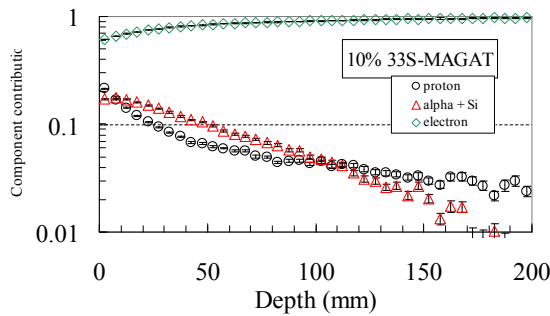


図1 エネルギー付与に占める粒子成分の相対寄与

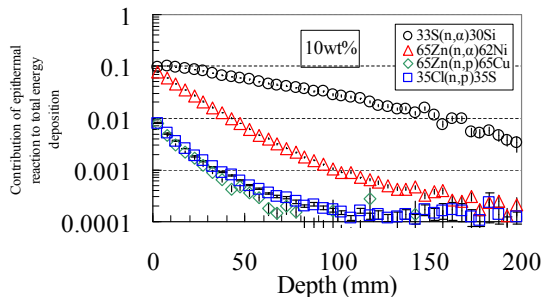


図2 全エネルギー付与に占める熱外中性子由来のエネルギー付与の相対寄与

次に、エネルギー付与計算により熱外中性子成分を増感・弁別できるか検討した。具体的には、前節と同じくMAGATタイプのゲルにKUR-HWNIFの熱外中性子照射モードビームを入射した。核種の添加は、着目核種単体(原子数比100%に濃縮)を想定し、MAGATと添加物全体に対する濃度を10wt%とした。ここでZnなど不安定な核種もあり、10wt%が実現困難な例も想定されるが、断面積・ゲル中濃度の必要条件を見積もるため、濃度の一例を仮定し計算した。

結果として ^{33}S では図1より、全エネルギー付与に対する $^{33}\text{S}(n, \gamma)^{30}\text{Si}$ によるエネルギー付与の寄与は、深さ50mmより浅いと10%以上であった。このうち熱外中性子由来のものは、40mmより浅いと10%以上であった。これらより、熱外成分による $^{33}\text{S}(n, \gamma)^{30}\text{Si}$ 反応が全エネルギー付与に占める寄与を求め、図2に示す。これを深さ50mmまでの領域で10%以上とするには、濃度は20wt%程度が必要となる。

同様に、 ^{65}Zn に対しては20wt%濃度が実現

できても深さ10mm程度までしか熱外を弁別できないであろう。 ^{35}Cl に至っては、濃度をあげてもエネルギー付与10%を実現できない。

どのような増感剤があればよいかを考えると、 $^{33}\text{S}(n, \gamma)^{30}\text{Si}$ で20wt%までゲル中に混ぜ込めるなら50mm程度の深さまで、熱外弁別の可能性がある。図示しないが熱外領域の共鳴の幅が大きな核種があればと望ましい。 $^{65}\text{Zn}(n,p)^{62}\text{Ni}$ はそれに合致し、反応数で言っても熱外寄与が支配する。熱・高速中性子と線の弁別に用いる ^6Li のように100ppmオーダーの添加での利用を考えると、 $^{65}\text{Zn}(n,p)^{62}\text{Ni}$ 反応でピークで5b程度であるが、3桁ほど断面積が高い核反応が必要となる。

このように、熱外成分の増感・弁別に必要な核反応と添加濃度の指針を得た。現状では実現が難しいと考え、また、ゲルによる体内ビーム強度評価では優先順位が低いため、実験的な検証は後回しとし、他の3成分の評価に優先的に取り組むこととした。加えて、熱外弁別については助成期間後に継続して取り組むこととした。

4(3) 増感材として用いるLi化合物の選別

4(1)で選択した熱・高速中性子および線を弁別するための ^6Li をどのような化学形でゲルに添加すれば良いか、検討した。候補として、天然組成LiからなるLiBr, LiOH, Li_2SO_4 , LiCl, LiNO_3 , $\text{C}_2\text{H}_3\text{LiO}_2$, $\text{Li}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ を、 ^6Li 濃度100ppmにして用いた。比較対象としてLiFを ^6Li 濃度40ppmで混入したゲルを用いた。広島大学工学部の ^{60}Co -線照射装置で線量・線量率を変えた照射をした。測定は広島国際大学の0.3TのMRIを用いて行い、横緩和速度 R_2 を解析し、信号強度として用いた。

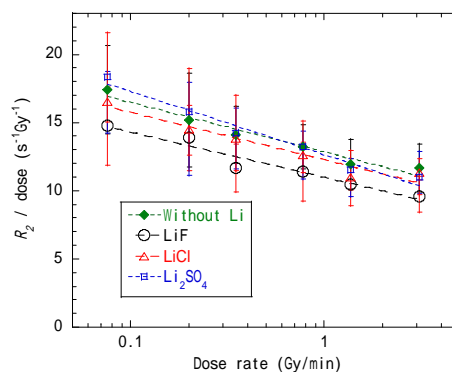


図3 線量率応答の化合物による違い

結果として、どのゲルも線量に対して応答している。本手法への適用を考えると、線量応答の違いは別途補正をすることになるが、補正における誤差の影響を減らすには用いるゲル間の線量応答が近いことが望ましい。本検討で用いた化合物においては、LiF, Li_2SO_4 , LiClが比較的、似た応答をしている。これらについて線量率応答を比較すると、図

3のように実験上の誤差の範囲で一致した。また、エネルギー付与の成分寄与を4(1)同様に求めると、LiClで電子寄与が3%ほど高いものの、弁別能を左右するほどの変化ではない結果となった。これらより、LiF、Li₂SO₄、LiClを候補として選別した。このうちLiFは溶解度が低いため、⁶Li濃度100ppmを実現するには⁶Liを同位体濃縮する必要がある。入手し易さの点ではLi₂SO₄、LiClが好ましい。

4(4) フルエンス分解能の評価

QAへの適用を考えると、対象とする成分のフルエンス分布自体の評価よりも、その経時変化の検出が重要となる。どの程度小さなフルエンス分布の乱れ(寸法・フルエンス差の両面で)が検出できるかを検討した。均一な照射をしてもゲル信号強度分布は図4のようにばらつくこととなるが、本検討ではaどの程度の大きさの領域の信号強度を集計すれば、bどの程度の信号強度差を見分けられるか、ならびにc照射をした強度(フルエンスならびに線量)が急峻に変化した際に、信号強度が追従するにはどの程度の距離が必要かを検討した。ここで、bは信号強度の分解能に相当し、ばらつき(標準偏差)の3倍以上の強度差が見分けられると想定した。

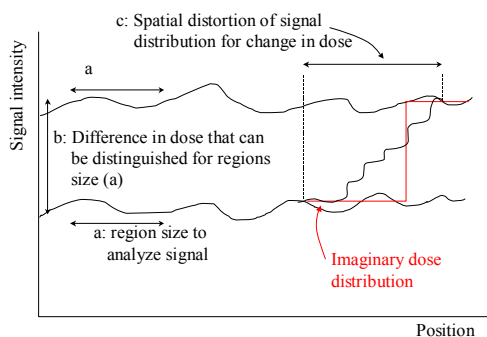


図4 分解能の概念図

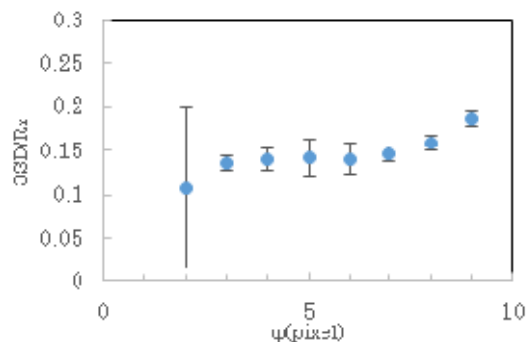


図5 信号強度を集計する領域の直径に依存した信号強度分解能

信号強度を集計する領域の直径に依存した分解能の一例を図5に示す。図5のように直径の大きさ、即ち集計する画素 pixel の数が大きいほど分解能が大きくなる例も見られたが、一定した依存性を示さない例も見られた。分解能の評価値の不確かさを考慮して

も、直径3pixel(4mm程度)の領域で集計すれば、10-30%程度の線量差を見分けられると結論した。

このゲルの端での信号強度変化を図6に示す。位置5mm程度がゲルの端であり、それ以遠は空気の信号強度を測っていることになる。ゲルの端から信号強度が10-30%変わるには1-2mm程度の距離が、空気の信号強度と思われる値になるには5mm程度が必要となる。

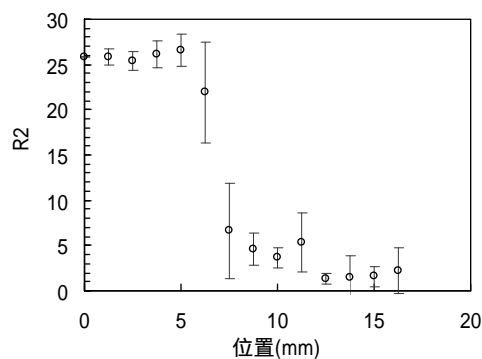


図6 ゲル信号の位置分布

ここで図示しないが、PHITS計算により高速中性子・線のフルエンス分布と反跳陽子・電子経路のエネルギー付与の分布がそれぞれ概ね一致することを確認している。これらよりQAにおいては、フルエンスが10-30%以上異なる領域の大きさが6-14mm以上であれば、フルエンス分布の変化をゲル検出器により検出できる可能性があると推定した。

4(5) 京都大学原子炉熱外モードでの検証

京都大学原子炉(KUR)重水中性子照射設備基準熱外中性子照射モードでの照射実験により、⁶Li添加MAGATによる成分寄与の可能性を検証した。

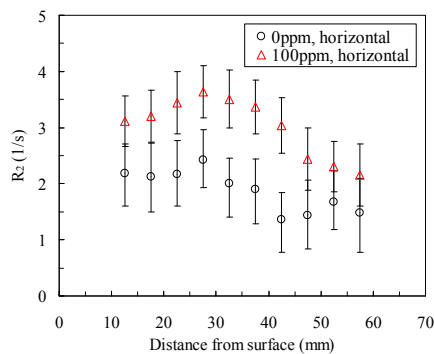


図7 ゲル中心軸上の信号強度 深さ分布

化合物は天然組成のLiClとした。まず、照射に対して応答するか確認として、ゲル全体での⁶Liの濃度は0, 100ppmのみとした。20cm立方のアクリルフantom中に、7cmの立方体のゲルを配置した。

ゲル中心軸上の信号強度分布を図7に示す。

ばらつきは大きいものの、深さ及び⁶Li濃度の変化にตอบสนองしている様子が確認できた。現在、これを解析して、また10ppmでの実験を加えて熱・高速中性子と線の相対分布の変化が検出できるか、検証に取り組んでいる。

今後の課題

一連の研究の結果、熱・高速中性子と線を弁別測定するシステムを提案することができた。しかし現段階では、弁別測定できるという基本性能を計算または実験で示したに過ぎない。今後、以下の研究を計画している。

- 京都大学原子炉での照射実験で、提案手法の実用性を示し、性能を評価する。
- データの解析において、感度と成分強度の連立方程式を解析的に解く方法に加え、ベイズ推定などの手法を検討し、是非を判断する。

まとめ

3成分(熱・高速中性子、線)の三次元空間分布を簡便に弁別測定し、BNCTの照射場の各成分強度分布を品質保証する手法を提案することができた。今後、実用に向け、精度検証とさらなる改良の研究に取り組む予定である。

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13件)総説1件

1. K. Tanaka, Y. Sakurai, S. Hayashi, T. Kajimoto, R. Uchida, H. Tanaka, T. Takata, G. Bengua, S. Endo, “Computational investigation of suitable polymer gel composition for the QA of the beam components of a BNCT irradiation field”, *Applied Radiation and Isotopes*, 127, 査読有, 2017, 253-259.
2. K. Tanaka, Y. Murakami, R. Maruta, S. Hayashi, T. Kajimoto, Y. Sakurai, H. Tanaka, S. Endo, “Investigation of ⁶Li compound suitable for beam component measurement using polymer gel detector for BNCT”, *Japanese Journal of Medical Physics*, 37 (3), 査読無, 2017, 43.
3. Y. Murakami, K. Tanaka, T. Kajimoto, Y. Sakurai, S. Hayashi, H. Tanaka, S. Endo, “Survey on nuclide enhancing sensitivity of gel detector to epithermal neutron for neutron capture therapy”, *Japanese Journal of Medical Physics*, 37 (3), 査読無, 2017, 155.
4. K. Tanaka, Y. Sakurai, T. Kajimoto, H. Tanaka, T. Takata, M. Suzuki, S. Endo, “Calculational survey of converter configuration for quality assurance of beam component distribution at KUR using

imaging plate”, *KURRI Progress Report*, 2016, 査読無, 2017, 37.

5. K. Tanaka, Y. Sakurai, T. Kajimoto, H. Tanaka, T. Takata, I. Murata, S. Tamaki, S. Endo, “Quality assurance of spatial beam component distribution in neutron capture therapy using imaging plate”, *Radiation*, 43, 査読無(総説), 2017, 3-7.
6. K. Tanaka, Y. Sakurai, T. Kajimoto, H. Tanaka, T. Takata, S. Endo, “Design study of multi-imaging plate system for BNCT irradiation field at Kyoto university reactor”, *Applied Radiation and Isotopes*, 115, 査読有, 2016, 212-220.
7. 田中憲一, 櫻井良憲, 林慎一郎, 梶本剛, 田中浩基, 高田卓志, 高田純, 遠藤暁, ポリマーゲル検出器を用いた中性子捕捉療法ビーム成分測定法の検討 2, *Japanese Journal of Medical Physics*, 36(1), 査読無, 2016, 94.
8. 田中憲一, 櫻井良憲, 林慎一郎, 梶本剛, 田中浩基, 高田卓志, 高田純, 遠藤暁, ポリマーゲル検出器を用いた中性子捕捉療法ビーム成分測定法の検討, *Japanese Journal of Medical Physics*, 35(3), 査読無, 2015, 68.
9. K. Tanaka, Y. Sakurai, T. Kajimoto, H. Tanaka, T. Takata, J. Takada, M. Suzuki, S. Endo, “Quality assurance of irradiation field for BNCT using twin imaging plate system”, *KURRI Progress Report*, 2015, 査読無, 2016, 47.
10. K. Tanaka, Y. Sakurai, H. Tanaka, T. Kajimoto, T. Takata, J. Takada, S. Endo, “Measurement of spatial distribution of neutrons and gamma rays for BNCT using multi imaging plate system”, *Applied Radiation and Isotopes*, 89, 査読有, 2015, 125-128.
11. K. Tanaka, Y. Sakurai, S. Endo, J. Takada, “Study on detecting spatial distribution of neutrons and gamma rays using multi imaging plate system”, *Applied Radiation and Isotopes*, 88, 査読有, 2014, 143-146.
12. K. Tanaka, Y. Sakurai, S. Endo, H. Tanaka, J. Takada, “Experimental trial of measuring spatial distribution of neutrons and gamma rays in BNCT using multi imaging plate system” *Proceedings of 16th International Congress of Neutron Capture Therapy*, 査読無, 2014, 109-110.
13. 田中憲一, 櫻井良憲, 遠藤暁, 田中浩基, 高田純, イメージングプレートを用いたビーム成分ごとの二次元強度分布測定法の検討, 第11回日本中性子捕捉療法学会学術大会抄録集, 査読無, 2014, 88.

[学会発表](計15件)招待講演2件

1. 田中憲一「BNCTに関する測定技術」、日本応用物理学会放射線分科会医療放

- 射線技術研究会「放射線検出器の研究シリーズと医療現場ニーズに関するシンポジウム」～ホウ素中性子捕捉療法に関する測定技術と検出器開発～, 2018年1月6日、東京。(招待講演)
2. K. Tanaka, Y. Murakami, R. Maruta, S. Hayashi, T. Kajimoto, Y. Sakurai, H. Tanaka, S. Endo, "Investigation of ⁶Li compound suitable for beam component measurement using polymer gel detector for BNCT", 8th Japan-Korea Joint meeting on Medical Physics, 18 September 2017, Osaka, Japan.
 3. Y. Murakami, K. Tanaka, T. Kajimoto, Y. Sakurai, S. Hayashi, H. Tanaka, S. Endo, "Survey on nuclide enhancing sensitivity of gel detector to epithermal neutron for neutron capture therapy", 8th Japan-Korea Joint meeting on Medical Physics, 18 September 2017, Osaka, Japan.
 4. 丸田理温、田中 憲一、梶本 剛、遠藤 暁, 「ポリマーゲル検出器を用いた中性子捕捉両方の照射場評価」日本原子力学会中国・四国支部 H29 年度研究発表会, 2017年9月22日、松山.
 5. K. Tanaka, Y. Sakurai, T. Kajimoto, S. Hayashi, H. Tanaka, T. Takata, J. Takada, S. Endo, Investigation of beam component monitor for BNCT using gel detector, 17th International Congress of Neutron Capture Therapy, 8-12 October 2016, Missouri, USA.
 6. K. Tanaka, Y. Sakurai, T. Kajimoto, T. Takata, H. Tanaka, S. Endo, Study on irradiation field monitor for BNCT using multi imaging plate system, 17th International Congress of Neutron Capture Therapy, 8-12 October 2016, Missouri, USA.
 7. 村上裕堂、田中憲一、梶本剛、遠藤暁, 中性子捕捉療法ビーム成分測定のためのポリマーゲル検出器の検討、日本原子力学会中国・四国支部 H28 年度研究発表会, 2016年9月18日、坂出.
 8. 田中憲一, イメージングプレートを用いた BNCT ビーム成分測定の進展、第 78 回日本応用物理学会学術講演会, 2016年9月14日、新潟(招待講演).
 9. 田中憲一、櫻井良憲、林慎一郎、梶本剛、田中浩基、高田卓志、高田純、遠藤暁, ポリマーゲル検出器を用いた中性子捕捉療法ビーム成分測定法の検討 2, 第 111 回日本医学物理学会学術大会, 2016年4月14-17日、横浜.
 10. 田中憲一、櫻井良憲、林慎一郎、梶本剛、田中浩基、高田卓志、高田純、遠藤暁, ポリマーゲル検出器を用いた中性子捕捉療法ビーム成分測定法の検討 2, 第 110 回日本医学物理学会学術大会, 2015年9月17-20日、札幌.
 11. 田中憲一、櫻井良憲、林慎一郎、梶本剛、田中浩基、高田卓志、高田純、遠藤暁, 中性子捕捉療法ビーム成分測定のためのポリマーゲル検出器の設計検討, 第 12 回日本中性子捕捉療法学会学術大会, 2015年9月4-5日、神戸.
 12. 田中憲一、櫻井良憲、林慎一郎、梶本剛、田中浩基、高田卓志、高田純、遠藤暁, 中性子捕捉療法ビーム成分測定のためのポリマーゲル検出器の検討、第 4 回 3 次元ゲル線量計研究会, 2015年11月22-23日、札幌.
 13. K. Tanaka, Y. Sakurai, T. Kajimoto, S. Endo, H. Tanaka, J. Takada, Investigation of irradiation field monitor for BNCT using multi imaging plate system, International Congress of Radiation Research 2015, 22-26 May 2015, Kyoto, Japan.
 14. K. Tanaka, Y. Sakurai, S. Endo, H. Tanaka, J. Takada, Experimental trial of measuring spatial distribution of neutrons and gamma rays in BNCT using multi imaging plate system, 16th International Congress of Neutron Capture Therapy, 22-26 June 2014, Helsinki, Finland.
 15. 田中憲一、櫻井良憲、遠藤暁、田中浩基、高田純, イメージングプレートを用いたビーム成分ごとの二次元強度分布測定法の検討、第 11 回日本中性子捕捉療法学会学術大会、2014年7月7-9日、大阪
- 〔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
田中 憲一(TANAKA KENICHI)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 70363075
- (2)研究分担者
遠藤 暁(ENDO SATORU)
広島大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 90243609
梶本 剛(KAJIMOTO TSUYOSHI)
広島大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 70633759
櫻井 良憲(SAKURAI YOSHINORI)
京都大学・原子炉実験所・准教授
研究者番号: 20273534
田中 浩基(TANAKA HIROKI)
京都大学・原子炉実験所・准教授
研究者番号: 70391274
高田 純(TAKADA JUN)
札幌医科大学・医療人育成センター・教授
研究者番号: 00274134