

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360402

研究課題名（和文） 硼素中性子捕捉療法のためのガス放射化を利用したビームプロファイルモニターシステム

研究課題名（英文） Beam-profile monitor system using gas activation for boron neutron capture therapy

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：硼素中性子捕捉療法のためのガス放射化を利用したビームプロファイルモニターシステムの構築し、その特性および有効性の確認を行った。本システムでは、照射時間 30～90 分の典型的な BNCT 臨床時において、最大 1 分毎に線量測定・評価が可能であることが確認された。他の測定・評価手法と比較したところ、本システムによる線量評価の不確かさは±5%程度であることが確認された。安全性および安定性を確認しながら、実際の BNCT 臨床時に使用する予定である。

研究成果の概要（英文）：Beam-profile monitor system using gas activation for boron neutron capture therapy was constructed, and its characteristics and validity were confirmed. It was confirmed that this system could measure and estimate the dose during a typical BNCT clinical study with the irradiation time of thirty to ninety minutes. It was confirmed that the uncertainty for the does estimation by this system was almost five percent, compared with the other dose measurement and estimation methods. It is planned that this system is used under the actual BNCT clinical studies, with confirming its safety and stability.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2011年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：原子力計測・放射線物理、硼素中性子捕捉療法

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 京都大学研究炉(KUR)重水中性子照射設備においては、2006年2月のKUR休止時点で275例の硼素中性子捕捉療法(BNCT)の臨床が行われてきている。1990年の臨床開始当初は開頭の悪性脳腫瘍および悪性皮膚黒色腫を対象に熱中性子照射によるBNCTが

行われていた。

(2) 本設備が改修された1996年以降、より深部の治療効果改善のために、熱および熱外中性子の混合照射が主流となった。そして、2001年12月に、さらに深部の治療に適した熱外中性子の単独照射が開始され、非開頭の脳腫瘍および難治性頭頸部腫瘍への適応が

始まった。2005年には体幹部の腫瘍への適応も開始され、多発性肝腫瘍、中皮腫等に適応拡大がなされている。

(3) このように適応拡大が進む一方で、BNCTのさらなる高度化のために、新たな課題が生じてきている。物理工学分野においては、線量評価技術および手法の改善がその一つである。現在のBNCTにおいては、患部表面の中性子に関する線量評価は金の放射化法を、 $\gamma$ 線については熱ルミネセンス線量計(TLD)を用いている。これらの手法は照射場を乱さないという利点があるものの、「点」での評価でしかなく、また、評価結果は照射終了後に得られる。

(4) そこで、実際に患部に入射する中性子ビームの線質およびプロファイル等の特性を、可能であればリアルタイムで評価できる手法およびシステムの構築が期待されている。

(5) これらを背景に、研究代表者はBNCT用のビームプロファイルモニターの検討・開発を行っている。当該研究「ガスの放射化を利用したビームプロファイルモニターシステム」の構築は、その一例である。本システムは「放射線および可視光に対する透明性」を有する簡易なシステムであり、BNCT臨床における評価精度の向上の観点で有望なものであると考えている。

## 2. 研究の目的

(1) 運転再開後の京都大学研究炉(KUR)重水中性子照射設備の照射特性評価を行い、本研究に必要な基礎データの取得を行う。

(2) 「ビームプロファイルモニターシステム」の可能性について基礎的な検討を行う。典型的なBNCT臨床時の照射時間が30~90分であることから、最大1分毎に計測できるシステムを目指す。

(3) 基礎的な検討に基づいて、本システムを試作し、特性試験を行う。「ガス放射化ケース」内の各セグメントの容積、セグメント内を流すガスの種類、流速、等について最適化を行う。

(4) 最終的には、臨床時の照射野(コリメータ)端部において $\pm 5\%$ 程度の評価精度のシステムの構築を目指す。

## 3. 研究の方法

(1) アルゴンを用いて、放射化の量(すなわち線量計で得られる電流値)とガスの流量および流速ならびにケース直径の関係についてサーベイ実験を行う。また、ケースを置く位置を変えることで中性子ビーム強度を調整し、検出限界等の確認も行う。

(2) ここで用いるガス放射化ケースはセグメントを有しない円柱型のものとする。ケースの材質は0.2mmの透明アクリル板とする。ケースの内寸は、高さ(厚さ)については1cm

とし、1cmから10cmまで1cmごとに直径の異なるものを作成する。ケース外でのガスの放射化の低減と、ガスのケースでの滞留時間の増加の観点から、ケースへのガスの流入部、流出部には細い径のチューブを使用する。

(3) 放射化ケースから流出した放射化ガスは線量計に導かれる。電離箱を通過したガスは、HPGe半導体検出器を用いて誘導 $\gamma$ 線スペクトルを測定し、生成核種の確認を行う。最終的な放射化ガスは、KURのアルゴン対策ルートに排気する。

(4) ガスの種類によるシステム特性を確認するために、ネオン、クリプトン、キセノンについて、上記と同様のサーベイ実験を行い、放射化量と流量および流速ならびにケース直径との関係をサーベイする。特に、生成核種の半減期による応答特性の違いに着目して、各ガス間で比較を行う。

(5) 上記の結果を踏まえて、ガス放射化ケース内のセグメント数および形状を決定し、プロファイルモニターの作成を行う。ケースの中心軸を基準に、同心円状のセグメントを配置することを考えている。これは、現状のBNCT用治療計画シミュレーションソフトが、同心円状の線源を扱っていることに対応させている。各セグメントへのガスの流入部、流出部に用いるガスチューブについても、上記の結果を踏まえて選定する。

(6) 作製したプロファイルモニターについて、ガスの種類を変えて特性評価実験を行い、従来の金の放射化法による結果と比較する。

(7) ファントム実験および実験を模擬したシミュレーションを行い、完成したシステムの有効性の確認を行う。ファントム内の中性子束評価には、従来と同様、金の放射化法を用いる。

(8) ケースを多層化し、ビームの方向性評価の可能性の確認を行う。

## 4. 研究成果

(1) 運転再開後のKUR重水中性子照射設備の照射特性評価を行い、本研究に必要な基礎データの取得を行った。燃料低濃縮化により、中性子エネルギースペクトルについてはやや軟らかくなり、中性子ビーム強度については10~30%増加したことが確認された。しかしながら、相対的な観点からは、これらの照射特性変化はBNCT臨床に影響を及ぼすほどではないと結論づけられた。

(2) アルゴンを用いて、放射化の量すなわち線量計で得られる電流値とガスの流量および流速ならびに放射化ケース直径の関係について、KUR重水中性子照射設備においてサーベイ実験を行った。直径10cmのケースの場合、KUR1MW運転時の混合中性子照射モードで2ml/minの流量で5pA程度の電流値が得られた。一方、熱外中性子照射モード

では、2ml/min の流量で 1pA 程度の電流値であった。

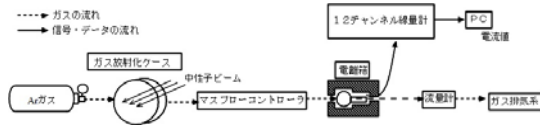


図1 放射化量と流量・流速の関係確認のための実験体系

(3) 放射化ケースを置く位置を変えることで中性子ビーム強度を調整し、検出限界等の確認を行った。ビーム強度の検出限界は熱中性子に対して  $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  程度、熱外中性子に対して  $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  程度であることが確認された。

(4) 電離箱を通過した放射化ガスの、HPGe 半導体検出器による誘導  $\gamma$  線スペクトル測定を行った。ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノンそれぞれのガスに応じた放射性核種の生成が  $\gamma$  線ピークのエネルギーおよび半減期から確認された。特に、キセノンについては、中性子のエネルギーに応じて多数の核種の生成が確認され、流量を調整することによる中性子エネルギースペクトル評価が期待できることが分かった。

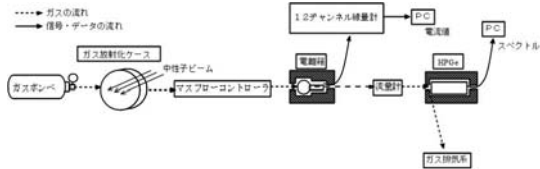


図2 誘導  $\gamma$  線スペクトル測定のための実験体系

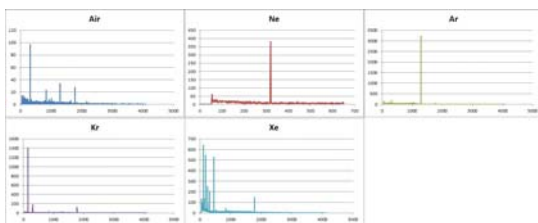


図3 誘導  $\gamma$  線スペクトル測定結果の一例

(5) プロファイルモニターの試作を行った。ガス放射化ケースの形状および寸法については、上記の検討結果を参考に決定した。ケースの中心軸を基準に同心円状のセグメントを配置し、外直径 34、64、95、110mm の4つのセグメントを有するガス放射化ケースを作成した。

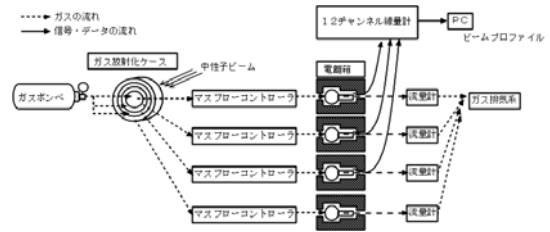


図4 試作したプロファイルモニターの概要

(6) KUR 重水中性子照射設備において、試作したプロファイルモニターの特性評価実験を行った。アルゴンとネオンの2種類のガスについて評価を行った。各セグメントでのガス流量については、これまでのデータを踏まえて、0.5~5ml/min の間で調整した。プロファイルモニターで得られたプロファイルを、金等の放射化法や光ファイバー検出器による測定結果と比較したところ、相対的には良い一致を示すことが確認された。

(7) 同じ形状および寸法のケースを三層に多層化して、ビームの方向性の確認実験を行った。本プロファイルモニターによるコリメータ出口での  $J/\phi$  の評価値は 0.6~0.7 であり、従来の公称値 0.67 を誤差の範囲内に含む結果が得られた。また、患者を模擬したファントム実験を行い、プロファイルモニターの出力とファントム内中性子束分布との関係の確認を行った。

(8) 各セグメントで得られる情報を事前シミュレーション結果にフィードバックするソフトウェアの作成を行い、ビームプロファイルモニターシステムを完成させた。最終的なガス放射化ケースの形状および寸法は、ケースの中心軸を基準に同心円状のセグメントを配置し、各セグメントの外直径は 34、64、95、110mm とした。各セグメント中のガスの厚さは 1cm とし、4層に多層化した。

(9) KUR 重水中性子照射設備や若狭湾エネルギー研究センターの中性子照射場等でフリーインエアおよびファントム実験を行い、さまざまな中性子照射場における本プロファイルモニターの有効性を検証した。アルゴンとネオンの2種類のガスについて評価を行った。各セグメントでのガス流量については、0.5~5ml/min の間で調整した。15° 程度の分解能で、ビームの方向性評価が可能であることが確認された。

(10) ファントムに対する治療計画シミュレーションにおいて、プロファイルモニターのセグメントに対応した線源を作成し、各セグメント線源ごとに計算を行った。作製したソフトウェアを用いて、プロファイルモニターにより評価された各セグメントの中性子強度をシミュレーション結果にフィードバッ

クし、全セグメント線源の寄与を重ね合わせたファントム内線量分布を計算した。この結果と金等の放射化法による測定結果と比較したところ、不確かさ±5%程度で補正が可能であることが確認された。

(11) このように、3年にわたる研究成果から、「ビームプロファイルモニターシステム」の特性および有効性が確認された。典型的なBNCT臨床時の照射時間30~90分を想定した、最大1分毎に計測できるシステムを構築することができた。

(12) 本システムによりオンラインで得られる情報から、治療計画で推定したビーム特性を確認および補正することは、BNCTにおける品質保証(QA)の観点から重要である。本システムの構築は、BNCTの高度化の一端を担うものであると考えている。

(13) 現在、BNCT臨床は、国内では京都大学原子炉実験所のみで、国外ではフィンランド、アルゼンチン、台湾等で行われている。いずれの施設でも線量評価の精度向上を試みているが、プロファイルモニターの検討はあまり行われていない。BNCTのコミュニティーは小さいことから、有効性が示されれば他の施設でも本システムが採用される可能性がある。

(14) 今後は、本システムの安全性および安定性を確認しながら、BNCT臨床の場で使用する予定である。

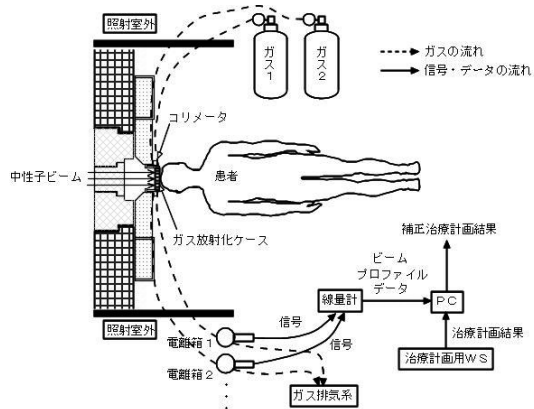


図5 プロファイルモニターシステムのBNCT臨床時での使用イメージ

### 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2件)

- ① H. Ueda, H. Tanaka, A. Maruhashi, K. Ono and Y. Sakurai, "The optimization study of Bonner sphere in the epi-thermal neutron irradiation field

for BNCT", Appl. Radiat. Isot. 69, 査読有, 2011, pp.1657-1659.

- ② Y. Sakurai, T. Fujii, H. Tanaka, M. Suzuki, Y. Liu, G. Kashino, Y. Kinashi, S. Masunaga, K. Ono and A. Maruhashi, "A study on QA-phantom for boron neutron capture therapy", Proceedings of the 14th International Congress on Neutron Capture Therapy, Comision Nacional de Energia Atomica, 査読有, 2010, pp. 254-256.

[学会発表] (計11件)

- ① Y. Sakurai, H. Tanaka, M. Suzuki, S. Masunaga, Y. Kinashi, N. Kondo, K. Ono and A. Maruhashi, "Dose estimation for internal organs in body-trunk BNCT", 15th International Congress on Neutron Capture Therapy, 2012年9月11日, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba.
- ② T. Fujii, T. Ageishi, H. Tanaka, A. Maruhashi, K. Ono, M. Hino and Y. Sakurai, "Response evaluations of ionization chambers to develop multi ionization-chamber system for boron neutron capture therapy", 15th International Congress on Neutron Capture Therapy, 2012年9月10日, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba.
- ③ Y. Sakurai, H. Tanaka, M. Suzuki, S. Masunaga, Y. Kinashi, N. Kondo, K. Ono and A. Maruhashi, "Present status and future plans of boron neutron capture therapy at Kyoto University Research Reactor Institute", World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (WC2012), 2012年5月29日, Beijing International Convention Center, Beijing, China.
- ④ T. Fujii, T. Ageishi, H. Tanaka, A. Maruhashi, K. Ono and Y. Sakurai, "A fundamental research on multi ionization-chamber system for BNCT", World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (WC2012), 2012年5月29日, Beijing International Convention Center, Beijing, China.
- ⑤ 藤井孝明, 上石達也, 田中浩基, 丸橋 晃, 小野公二, 櫻井良憲, 「BNCT用多重電離箱システムに関する基礎的研究」, 日本医学物理学会第103回学術大会, 2012年4月14日, パシフィコ横浜, 横浜.
- ⑥ Y. Sakurai, H. Tanaka, M. Suzuki, S.

Masunaga, Y. Kinashi, N. Kondo, K. Ono and A. Maruhashi, “ Updated irradiation characteristics of the BNCT facility in Kyoto University Reactor after the fuel low-enrichment” , 6th Young Researchers Boron Neutron Capture Therapy Meeting, 2011年12月7日, National Tsing Hua University, Hsinchu, Chinese Taipei.

- ⑦ 櫻井良憲, 田中浩基, 吉永尚生, 鈴木 実, 増永慎一郎, 木梨友子, 近藤夏子, 岡本賢一, 小野公二, 丸橋 晃, 「京大炉BNCT照射設備の照射特性再評価および改造検討」, 日本中性子捕捉療法学会 第8回学術大会, 2011年9月16日, 徳島大学蔵本キャンパス長井記念ホール, 徳島。
- ⑧ Y. Sakurai, H. Tanaka, M. Suzuki, S. Masunaga, Y. Kinashi, N. Kondo, K. Ono and A. Maruhashi, “ Present status of boron neutron capture therapy at Kyoto University Research Reactor Institute” , 18th International Conference on Medical Physics (ICMP2011), 2011年4月19日, Events Center - PUCRS, Porto Alegre, Brazil.
- ⑨ Y. Sakurai, T. Fujii, H. Tanaka, M. Suzuki, Y. Liu, G. Kashino, Y. Kinashi, S. Masunaga, K. Ono and A. Maruhashi, “A study on QA-phantom for boron neutron capture therapy” , 14th International Congress on Neutron Capture Therapy, 2010年10月29日, Centro Cultural Borges, Buenos Aires, Argentina.
- ⑩ 櫻井良憲, 田中浩基, 小野公二, 丸橋 晃, 「燃料低濃縮化後の京大炉BNCT設備の照射特性(D)」, 日本医学物理学会 第100回学術大会, 2010年9月24日, 学術総合センター, 東京。
- ⑪ 櫻井良憲, 田中浩基, 小野公二, 丸橋 晃, 「京大炉運転再開後の重水中性子照射設備の照射特性」, 日本中性子捕捉療法学会 第7回学術大会, 2010年8月5日, 学習院大学目白キャンパス, 東京。

[その他]

ホームページ等、特になし。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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