

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20240054

研究課題名（和文）

加速器中性子捕捉療法照射システム用の液体リチウム中性子発生ターゲットの開発

研究課題名（英文）

THE DEVELOPMENT OF A LIQUID LITHIUM NEUTRON GENERATING TARGET FOR ACCELERATOR BASED NEUTRON CAPTURE THERAPY

研究代表者

古林 徹（KOBAYASHI TOORU）

京都大学原子炉実験所 准教授

研究者番号：90089136

研究成果の概要（和文）：

がん細胞を選択的に治療できる特徴を持つホウ素中性子捕捉療法を、加速器を用いて行う時に必要な、安定で長寿命の中性子発生ターゲットを、液体リチウムを用いて実現できる見通しを得た。入射エネルギー2MeV、電流 20mA、直径 3cm の陽子ビームを用いて、 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応中性子が利用可能な液体リチウム流（40kW の発熱を除去できる流速 30m/s、幅 50mm、長さ 50mm、厚み 0.5mm）を、湾曲板表面に沿わせる方式で安定形成できることを実験的に確認した。実験を通じて、液体リチウム中性子発生ターゲット設計製作に有用な情報を収集した。

研究成果の概要（英文）：

The prospect of realizing a stable and long-lived neutron-generating target using liquid lithium was investigated for an accelerator-based system which can be used for the selective treatment of cancer via boron-neutron capture therapy. Using an incident proton beam energy of 2MeV at a current of 20mA and a beam diameter of 3cm to generate neutrons from the ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ reaction, it was confirmed that a stable liquid lithium flow (i.e., flow rate of 30m/s, 50mm in width, 50mm in length, thickness of 0.5mm) which can remove 40kW of heat, can be achieved along the inside surface of a cylindrical curved plate. From the experiments performed, the parameters necessary for the fabrication of the liquid lithium neutron generating target were determined

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成20年度	17,200,000	5,160,000	22,360,000
平成21年度	19,300,000	5,790,000	25,090,000
平成22年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	38,500,000	11,550,000	50,050,000

研究分野：医学物理工学、ホウ素中性子捕捉療法

科研費の分科・細目：総合領域・人間医工学・医用システム

キーワード：中性子捕捉療法、液体リチウムターゲット、加速器、低侵襲治療システム、放射線工学、熱流動、薄膜、ビーム応用

1. 研究開始当初の背景

本研究は、**ホウ素中性子捕捉療法** (Boron Neutron Capture Therapy: 以下 BNCT) を、加速器を利用した中性子照射システム (以下 **加速器 BNCT 中性子照射システム**) で行うことを目的とした開発研究の一環である。加速器 BNCT 用の中性子発生反応として、 **${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応** (しきい値: 1.881 MeV) が、発生中性子の最高エネルギーや反応断面積から、第一候補として検討されてきた。{Ref: T.Blue and J.Yanch, Accelerator-based epithermal neutron sources for boron neutron capture therapy of brain tumors, *J. of Neuro-Oncology* 62 (2003) 19-31.} この反応で発生する中性子の主な利用形態は、① 2.5 MeV 入射陽子で発生する中性子 (最大約 800 keV、平均 500 keV) を、減速体系を用いて **熱外中性子** (0.5 eV~数 10 keV) にして利用する方法 (以下 **減速利用法**) と、② 1.90 MeV 前後のしきい値近傍エネルギー陽子で発生する中性子 (最大約 80 keV、平均 40 keV) を直接利用する方法 (以下 **直接利用法**) である。研究代表者らは、②の方法に着目して研究開発を実施してきた。{Ref: K.Tanaka, T.Kobayashi, et al., Irradiation characteristics of BNCT using near-threshold ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ direct neutrons: application to intra-operative BNCT for malignant brain tumors, *Phys. Med. Biol.* 47 (2002) 3011-3032.}

BNCT 用照射場に必要ターゲットへの入射陽子電流 (発熱) は、減速利用法で 10~20 mA (発熱 25~50 kW)、直接利用法で 5~10 mA (発熱 10~20 kW) であり、発熱密度低減と照射損傷対策の両方からターゲット直径は 10 cm 程度と評価されている。{Ref: G.Bengua, T.Kobayashi, et al., TPD-based evaluation of near threshold mono-energetic proton energies for the ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ production of neutrons for BNCT, *Phys. Med. Biol.* 51 (2006) 4095-4109.} 直接利用法には、減速体系が不要か小さくて済むことから、照射方向が設定しやすい長所がある。その反面、しきい値近傍の中性子反応断面積の陽子エネルギー依存性が大きく、入射陽子を 1.90 ± 0.01 MeV に、また、 γ 線発生を抑えるため中性子発生ターゲット厚さを 0.002~0.010 mm にする必要がある。{Ref: T.Kobayashi, G.Bengua, et al., Variations in lithium target thickness and proton energy stability for the near-threshold ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ accelerator-based BNCT, *Phys. Med. Biol.* 52 (2007) 645-658.} 減速利用法には、中性子発生数が入射陽子エネルギーの変動の影響を受けにくく、医学利用で重要な安定性の面の長所がある。人間工

学的な配慮から、 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応を用いる場合、実績のある原子炉照射システムと同じ減速利用法を最初を実現するのが妥当である。

加速器 BNCT 照射システムの検討は、1980 年代始めから着手した欧米が先行し、日本は 1994 年の第一回加速器中性子捕捉療法国際会議からである。直接利用法の研究開発では研究代表者のグループが現在世界をリードしている。 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応を用いた研究開発は、ロシア (ISTC #1484 : 2000 年 10 月から 2.5 年間、#2569 : 2003 年 10 月から 2.5 年間) が世界に先駆けて検討を進めてきた。なお、研究代表者は ISTC#2569 では外国人共同研究者になっている。また、2004 年から日本の民間医療グループとベルギーの加速器メーカーが、 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応を用いた実用的な加速器 BNCT 照射システムを商業的に実現する計画を進めている。

一方、世界の他の主な研究開発計画は、米国 (MIT, LBL, BNL, INL)、欧州 (バーミンガム大学、トリノ大学) などであり、検討中の中性子発生反応は、Li や Be の (p,xn) 反応、Ta、W などの核破砕反応を利用するものなど様々であるが、現在は全て固体ターゲットを用いている。なお、どの開発計画もまだ実用には至っていない。このように本研究は、実施時期の面でも、また、中性子捕捉療法分野の世界的リーダーである日本の役割を果たす上でも、的を射たものであり、加速器利用 BNCT においても世界をリードする可能性のある課題といえる。

2006 年 10 月に開かれた第 12 回中性子捕捉療法国際学会において、予想されていた「固体ターゲットの寿命が BNCT 利用には短すぎる」ことが、上記商業プロジェクト検討などからハッキリと認識された。主に取り扱い面の課題から敬遠されてきた液体リチウムターゲットであるが、これを契機に実用化を具体的に検討するべきと判断をしたことも要因の一つである。しかし、今回の開発研究に着手する最大の理由は、医学利用に際し安定性、信頼性の確保が重要であるという認識、直接利用法の研究を通じて理解できた ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応中性子の特性の良さ、液体ゆえに照射損傷が無くまた被曝対策が不可欠な ${}^7\text{Be}$ の連続除去が可能、など多くの長所を持つ液体リチウム中性子発生ターゲットを実用化したいという思いからである。

2. 研究の目的

本研究は、加速器 BNCT 中性子照射システムの実現を目的とした開発研究の一環である。この中性子発生ターゲットには、現在リ

チウムやベリリウム等の固体が検討されており、入射粒子による数十 kW の発熱の除去と、入射粒子の照射損傷に起因する寿命の短さが検討課題になっている。従って、本研究の主な目的は、加速器 BNCT 中性子照射システムを実現するために不可欠な、長寿命の中性子発生ターゲットの開発である。その具体的な内容は、 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応を BNCT に特化して利用する液体リチウム中性子発生ターゲットの開発研究である。

具体的な目的は、 10^{-3}Pa 程度の真空中で液体リチウム膜流（中性子発生ターゲット）の形成条件（ノズル構造と液体リチウムの温度、圧力、流量の関係）を確認する。なお、 20°C の水と 250°C の液体リチウムの流動特性がほぼ近いことから、水と液体リチウムの両方の実験から安定形成できる条件を明らかにする。検討する液体リチウム膜流の条件は以下の通りである。

(1) 厚さ：(図 1 参照)

- ・ 0.50 mm 以上；2.5 MeV 入射陽子（飛程約 0.22 mm）を全て液体部分で受け止める。
- ・ 0.080~0.100 mm と 0.002~0.010 mm； γ 線発生を抑え効率的に中性子発生させる。

(2) 有効面積（幅 50 mm 長さ 50 mm）：発熱密度低減の視点から直径 3 cm ビームを仮定。

(3) 流速（平均 30 m/s）：液体リチウムを沸点（ 10^{-3}Pa で 344°C ）以下にする熱除去の視点。

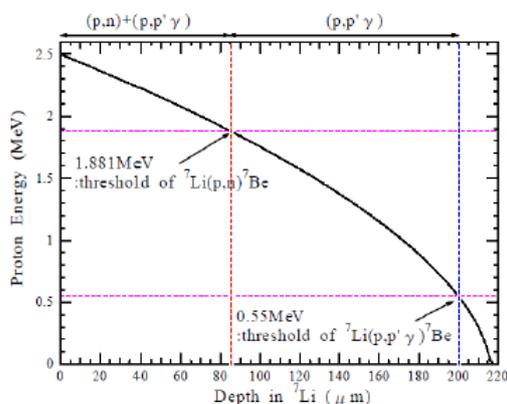


図 1 ターゲット内の中性子を発生する領域

膜厚 0.50 mm 以上の液膜流は 2.5 MeV 陽子の減速利用法による加速器 BNCT 照射システムを実現可能し、また 1.9 MeV 前後の陽子を用いる直接利用法にも、ターゲットで発生する γ 線を 3 cm 程度の鉛で遮蔽すれば利用できる。薄い膜流については実用的に何処まで形成可能かを実現しやすい直噴平流方式で明らかにする。なお、膜流表面波などによる厚さの変動は、BNCT 照射性能にほとんど影響しない。

3. 研究の方法

${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応を用いる加速器 BNCT 照

射システム用の液体リチウムターゲット形成条件を実験的に確認する。それに必要な膜流形成用ノズルの設計検討、試作などは、ノズルネットワーク社の協力を得て行った。

液体ターゲットの形成方法は、湾曲板に沿わせる方式（以下湾曲板流方式）で「液膜流」を形成させる方法と、直接空中に吹き出させて形成する方式（以下直噴平流方式）で「液幕流」を形成させる 2 つの方式で行った。液幕厚を測定する適当な方法が見つからなかったことから、ノズル出口形状と流量から出口の流速を推定した。実験方法の概要は以下の通りである。

(1) 水を用いた膜流形成実験概要

水の表面から水の蒸発を防ぐために、常温の飽和蒸気圧の水蒸気中で水を用いて形成実験を行った。（平成 20 年度に飽和蒸気圧下の形成実験ができる水試験ループを東工大に製作した。写真 1 参照）

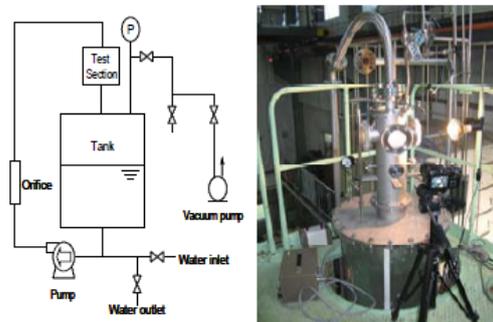


写真 1 水試験ループ系統図と試験部写真

膜厚 0.50 mm 以上は湾曲板流方式と直噴平流方式で行い、厚み 0.080~0.100 mm と 0.002~0.010 mm は直噴平流方式で計画していたが、直噴方式で 0.20mm 以下が形成出来なかったことから、厚み 0.080~0.100 mm と 0.002~0.010 mm の形成実験は断念した。ノズル出口の膜流の流速を、5 ~ 35 m/s の範囲で計画していたが、ポンプ容量の関係から上限はポンプ能力の上限の 25m/s までとした。

(2) 液体リチウム用いた膜流形成実験概要

上記の水の実験で良い結果を得た液膜流形成条件について、加速器の加速空洞と同じ圧力（ 10^{-3}Pa 程度）で液体リチウムを用いて確認を行った。平成 21 年度に減圧下の Ar ガス雰囲気中で液体リチウム液膜流形成実験ができる試験ループを東工大・原子炉工学研究所の大岡山北実験棟 1 にある既存の液体リチウムループを改造して製作した。限有するもの（循環ポンプ、流量計、ヒーターなど）を可能な限りそのまま利用した。少量危険物貯蔵取扱所（第 3 類金属リチウム）として目黒消防署予防課の再承認を平成 22 年 5 月に受けた。写真 2 参照。

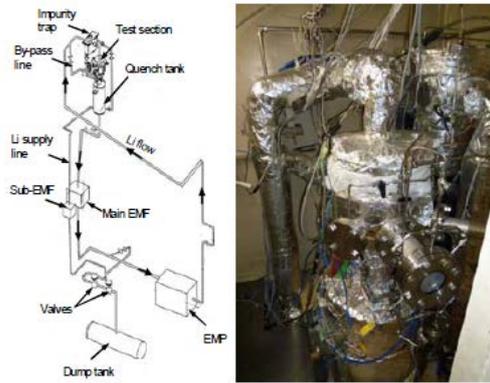


写真2 液体Li試験ループ立体配置図と試験部写真

液体リチウムの膜流形成特性測定は、現有の循環ポンプの性能の範囲において、250℃近辺で行い、水での実験と比較検討した。

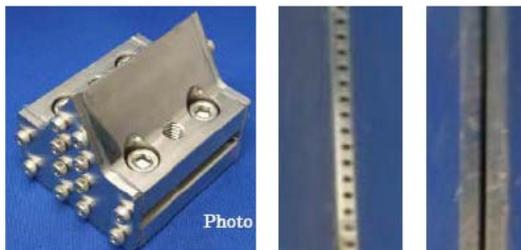
なお、ロシアのISTC No. 2036 で IFMIF プロジェクトが実施した液体リチウムを用いて行った幅70mm、厚さ10mm、流速20m/sの湾曲板流方式の液膜流の実験結果も参考にして進めた。

4. 研究成果

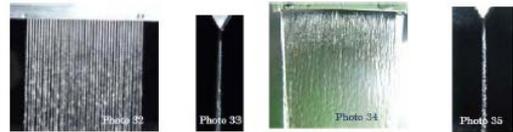
本研究は、加速器 BNCT 中性子照射システムを実現するために不可欠な、長寿命の中性子発生ターゲットの開発を目的とした、液体ターゲットの安定形成条件の確認である。具体的には、BNCT に優れた中性子照射特性を持っている ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応中性子を利用するために、安定で長寿命が期待できる液体リチウム液膜流の形成条件を、実用的な観点から明らかにした。

(1) 水による実験結果

平成20年度にまず2種類の多孔型ノズル {a) オリフィス径 $\Phi 0.33\text{mm}$ 、ピッチ 0.77、孔数 40 と b) オリフィス径 $\Phi 0.57\text{mm}$ 、ピッチ 2.31、孔数 13} を製作し、常温の水を用いた空気中で直噴平流方式と湾曲板流方式で流速 25m/s までの実験を行い、場所による厚みの不安定さなどから多孔ノズルは液体ターゲットに適していないことを確認した。そこで多孔ノズルを改造して、スリット型ノズル {出口の幅 50mm、隙間 0.14~0.5mm 可変} を製作した。図2 & 3 参照。それを用



水用ノズル本体 (多孔ノズル) (スリット)
図2 水用多孔ノズル及びスリットノズル



多孔ノズル(正面)(側面) スリット(正面) (側面)
図3 多孔ノズル及びスリットノズルの液幕流(空気中) いて常温の水で流速 8m/s~21m/s (流速はポンプ能力と隙間の関係から隙間幅に逆比例) を直噴平流方式と湾曲板流方式によって空気中で観測し、厚み 0.2mm 以上でそれぞれ滑らかで安定した液幕流と液膜流を確認した。図4 参照。

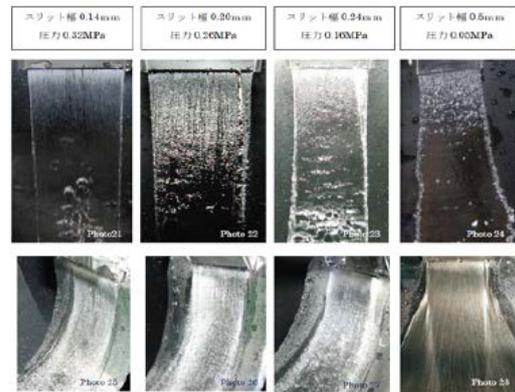


図4 スリットノズルによる水液幕流(上側)と湾曲板表面の液膜流(下側) <空気中>

平成21年度には飽和水蒸気中での水の実験を行うことに合わせて、ノズル出口形状とノズル内部の圧力損失を少なくする検討をするために数種類の R 構造の水用ノズルを新たに製作し、液幕流及び液膜流の形成条件を厚み 0.3~0.5mm で検討した。安定して得られた 0.5mm の結果を図5に示す。

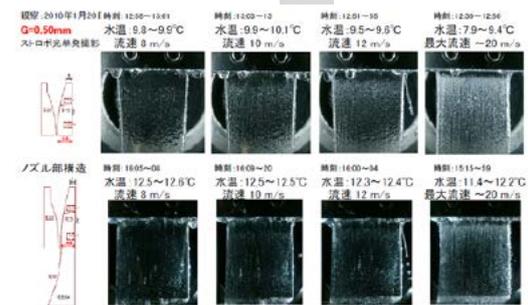


図5 スリットノズルによる水液幕流(上側)と湾曲板表面の液膜流(下側) <飽和水蒸気中>

なお、理論的なレイノルズ数評価の検討から、今回の形成条件では、水 10m/s が液体リチウム 30m/s に相当する。

(2) 液体リチウムによる実験結果

平成21年度に改造した液体リチウムループを用いて、水の実験で確認した形成条件から、ノズル出口を幅 50mm、隙間 0.5mm に固定して、平成22年度に 250℃前後の液体リチウムを用いて以下のことを確認した。

①最初にノズル内部が平行板型のスリットノズルを製作し、直噴平流方式で流速を 5 ~ 18 m/s の範囲で液幕流を確認した。図6参照。

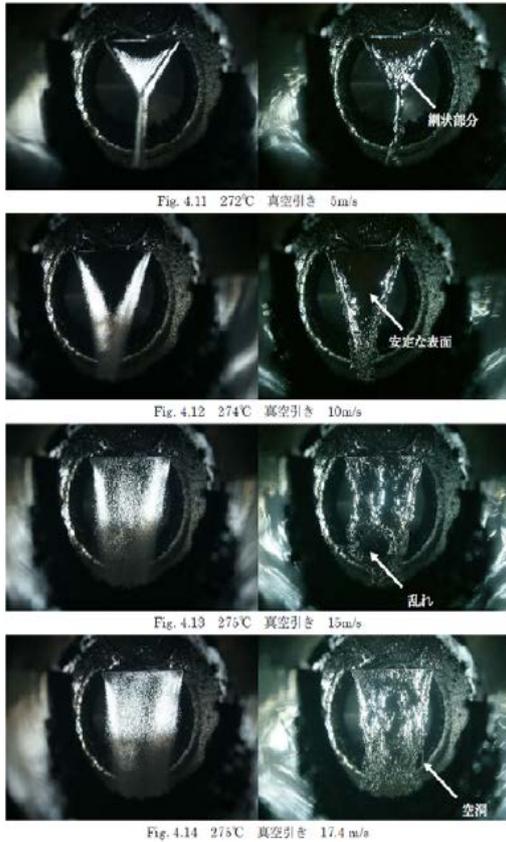


図6 液体リチウムの液幕流(真空引時)
(ストロボ撮影；左側=多発、右側=単発)

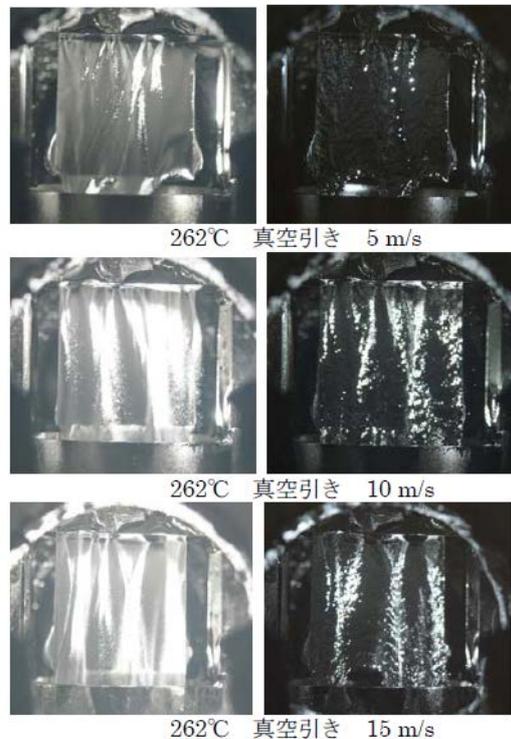


図7 液体リチウムの湾曲板上の液膜流(真空引時)
(ストロボ撮影；左側=多発、右側=単発)

②次に水用に製作したノズル内部が R 構造型スリットノズルを用いて、湾曲板流方式(湾曲板の曲率半径 10 cm)で流速を 5 ~ 15 m/s の範囲で液膜流を確認した。図7参照。なお、湾曲板流方式の液膜流には、混在した不純物によるノズル出口部の目詰まりのため、液膜流がスプリットした。

(3) まとめ

電磁ポンプの能力の関係から、直噴平流方式の液幕流及び湾曲板流方式の液膜流ともに目的とする流速 30m/s の実験による確認はできなかったが、流速 30m/s の実現の見通しは得られた。また、直噴平流方式に比べて湾曲板流方式が液体リチウムターゲットの安定形成に役立つことを確認した。

本液体リチウムループの実験体験を通じて、BNCT 中性子発生ターゲット用液体リチウムループ設計製作に有用な情報を収集できた。

5. 主な発表論文等

- [雑誌論文] (計 0 件)
- [学会発表] (計 25 件)
- 1. M.Takahashi, T.Kobayashi, M.Zhang, M.Mák, J.Stefanica, V.Dostál and W.Zhao, "Study on High Speed Lithium Jet for Neutron Source of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)" ICONE19-43192, (2011.5.16-19) Chiba, Japan
- 2. T.Kobayashi, "Medical Physics for BNCT with a Dream", Hatanaka Memorial Lecture 2010, 14th ICNCT, (2010.10.25-29) Buenos Aires
- 3. T.Kobayashi, G.Bengua, K.Tanaka, N.Hayashizaki, T.Katabuchi, T.Hattori and M.Aritomi, "Development of a BNCT Irradiation System using ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ Near Threshold Neutrons", 14th ICNCT, (2010.10.25-29) Buenos Aires
- 4. T.Kobayashi, G.Bengua, K.Tanaka, N.Hayashizaki, T.Katabuchi, T.Hattori and M.Aritomi, "A novel BNCT Irradiation System with an On-line Monitor using ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ Near Threshold Neutrons", SSD-16, (2010.9.19-24) Sydney
- 5. M.Takahashi, T.Kobayashi, M.Nakatsuka, T.Ardiansyah, M.Kulhánek, A.Vojáček, V.Dostál, S.Uchida and M.Zhang, "Study on Liquid Lithium Target System for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)" ICONE18-29516, (2010.5.17-21) Xi'an, CHINA
- 6. T.Kobayashi, "The Status on the Development of an Accelerator-based BNCT System in Japan", Neutrons for therapy sat. meeting of NEUDOS-11, (2009.10.12) Cape Town
- 7. T.Kobayashi, G.Bengua, K.Tanaka, "BNCT using the Near Threshold ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ with Thick Li-Target", NEUDOS-11, (2009.10.12-16) Cape

- Town
8. G.Bengua, T.Kobayashi, K.Tanaka, M. Ishikawa, "Beam Shaping Assembly with Thick Liquid Lithium Target for Neutron Production in BNCT", 13th ICNCT, (2008.11.2-7) Florence
 9. T.Kobayashi, G.Bengua, K.Tanaka, "Neutrons for BNCT from the Near Threshold ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ on a Thick Li-target", 13th ICNCT, (2008.11.2-7) Florence
 - 1 高橋 実, 古林 徹, 張 明光, Michael MAK, Jiri STEFANICA, 日野 彰, 長澤 雄真, 石原 信二, 「加速器中性子捕捉療法用液体リチウム液膜流ターゲットの開発 (2) リチウム平面噴流試験」原子力学会 2011 春の年会 (2011.3.28-30) 福井
 - 2 古林 徹, 高橋 実, 有富正憲, 中川順達, 林崎 規託, 片淵竜也, Bengua Gerard, 田中憲一, 服部俊幸, 井頭政之, 山本哲哉, 中村博雄, 「加速器中性子捕捉療法用液体リチウム液膜流ターゲットの開発 (1) 中性子捕捉療法用中性子発生ターゲットの概要」原子力学会 2011 春の年会 (2011.3.28-30) 福井
 - 3 中川 順達, 古林 徹, 高橋 実, 有富 正憲, 「加速器 BNCT ターゲット兼冷却材用リチウム液膜噴流・液膜流の運動量欠損」, 日本機械学会流体工学部門講演会(2010.10.30-31) 米沢。
 - 4 林崎 規託, 服部 俊幸, 松本 義久, 片淵 竜也, 塚原 剛彦, 古林 徹, 山本 哲哉, 熊田 博明, 「小型線形加速器を用いた BNCT 照射システムの開発」原子力学会 2010 秋の大会 (2010.9.15-17) 札幌
 - 5 高村 雅希, 林崎 規託, 服部 俊幸, 古林 徹, 「BNCT 用陽子線形加速器の研究」原子力学会 2010 秋の大会 (2010.9.15-17) 札幌
 - 6 中川 順達, 古林 徹, 高橋 実, 有富 正憲, 「加速器 BNCT ターゲット兼冷却材用リチウム液膜噴流・液膜流の安定性問題」, 100906-08 機械学会年次大会 2010 (2010.9.6-8) 名古屋。
 - 7 古林 徹, 「発生中性子エネルギーに依存する加速器 BNCT 照射システムの特性と将来性」, 第 7 回日本中性捕捉療法学会 (2010.8.5) 東京。
 - 8 中川 順達, 古林 徹, 高橋 実, 有富 正憲, 「加速器 BNCT ターゲット兼冷却材用リチウム液膜噴流・液膜流の熱水力学的限界仕様」, 日本混相流学会 2010 年会 (2010.7.18) 浜松。
 - 9 林崎 規託, 服部 俊幸, 松本 義久, 片淵 竜也, 塚原 剛彦, 古林 徹, 山本 哲哉, 「小型線形加速器による BNCT 照射システムの開発」原子力学会 2010 年会 (2010.3.28) 茨城
 - 10 中川 順達, 古林 徹, 高橋 実, 有富 正憲, 「加速器 BNCT ターゲット兼冷却材用リチウムの凹曲板流下液膜の遠心力不安定」, 日本機械学会 流体工学部門 (2009.11.7) 名古屋。
 - 11 古林 徹, 「加速器 BNCT 照射システム開発の経緯と今後」, 第 6 回日本中性捕捉療法学会 (2009.9.20) 京都。
 - 12 中塚 雅士, Teddy Ardiansyah, 高橋 実, 中川順達, 古林 徹, 「加速器中性子捕捉療法用液体リチウム液膜流ターゲットの開発 (1) 水液膜流模擬試験」原子力学会 2009 分科会 (2009.9.17) 仙台
 - 13 古林 徹, 田中憲一, ジェラード・ベングア, 服部 俊幸, 林崎 規託, 高橋 実, 片淵

- 竜也, 「陽子線加速器中性子によるホウ素中性子捕捉療法(BNCT)」原子力学会・加速器・ビーム利用部会企画セッション (2009.9.17) 仙台
- 14 中川 順達, 古林 徹, 高橋 実, 有富 正憲, 「加速器 BNCT ターゲット兼冷却材用リチウム液膜噴流の基本的安定性」, 日本機械学会 2009 年会 (2009.9.14) 岩手。
 - 15 中川 順達, 古林 徹, 高橋 実, 有富 正憲, 「加速器 BNCT ターゲット兼冷却材用液体リチウムの流動様式」, 日本混相流学会 2009 年会 (2009.8.9) 熊本。
 - 16 古林 徹, 「加速器 BNCT 照射システムの現状と見通し」, 第 5 回日本中性捕捉療法学会 (2008.7.25) 倉敷。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古林 徹 (KOBAYASHI TOORU)
京都大学・原子炉実験所・准教授
研究者番号: 90089136

(2) 研究分担者

有富 正憲 (ARITOMI MASANORI)
東京工業大学・原子炉工学研究所・教授
研究者番号: 60101002
高橋 実 (TAKAHASHI MINORU)
東京工業大学・原子炉工学研究所・准教授
研究者番号: 90171529
林崎 規託 (HAYASHIZAKI NORIYOSU)
東京工業大学・原子炉工学研究所・准教授
研究者番号: 50334537
片淵 竜也 (KATABUCHI TATSUYA)
東京工業大学・原子炉工学研究所・助教
研究者番号: 40312798
中川 順達 (NAKAGAWA MASAMICHI)
東京工業大学・原子炉工学研究所・助教
研究者番号: 10172280
田中 憲一 (TANAKA KENICHI)
札幌医科大学・医学部・講師
研究者番号: 70363075
ジェラード・ベングア (Gerard Bengua)
北海道大学・大学病院・特任助教
研究者番号: 50402954

(3) 連携研究者

服部 俊幸 (HATTORI TOSHIYUKI)
東京工業大学・原子炉工学研究所・教授
研究者番号: 50402954
井頭 政之 (IGASHIRA MASAYUKI)
東京工業大学・原子炉工学研究所・教授
研究者番号: 10114852
山本 哲哉 (YAMAMOTO TETSUYA)
筑波大学・人間総合科学研究所・講師
研究者番号: 30375505
中村 博雄 (NAKAMURA HIROO)
九州大学大学院総合理工学研究院・学術研究員
研究者番号: 20354665

(4) 研究協力者

麻川 博良 (ASAKAWA HIROYOSHI)
ノズルネットワーク株式会社・社長
石原 信二 (ISHIHARA SHINJI)
エンジニアリングメイト・代表