

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340080

研究課題名(和文) 8 - 10 MeV 陽子ビームを用いた医療産業用小型中性子源標的の開発

研究課題名(英文) Development of a Target System for Compact Neutron Source using 8-10 MeV Proton Beam for Medical and Industry Application

研究代表者

小林 仁 (Kobayashi, Hitoshi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・名誉教授

研究者番号：80133099

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000 円、(間接経費) 4,320,000 円

研究成果の概要(和文)：低エネルギー陽子ビーム(8MeV)を用いたベリリウム標的を開発した。ビームエネルギーを下げるとベリリウム標的が薄くなり、水圧に耐えるだけの厚さを確保できなくなりその結果、背面からの水による直接冷却が出来なくなる。そこでベリリウムの厚さを0.5mmとし、陽子ビームは透過させることとした。陽子ビームはベリリウムの裏に接合されたプリスタリングに強い金属中で停止するように設計された。この二層構造にさらに銅製ヒートシンクを接合する三層構造の標的を開発した。結果として残留放射能が非常に低く、熱伝導率の高いプリスタリングに強い中性子標的を開発できた。

研究成果の概要(英文)：In the Tokai BNCT facility, an 8-MeV proton accelerator is used to realize very low residual radioactivity. An 80-kW beam power is required to generate very intense neutron flux. Target development is a key issue to realize both low residual radioactivity and high blistering tolerance. A beryllium plate with 0.5-mm thickness and 180-mm diameter is bonded on the blistering tough metal in which proton beam is stopped. We use a heat sink made of copper to remove very high heat density of 4.5 MW/m². Thus this two tier (beryllium and blistering tough metal) has been bonded of a copper heat-sink. Three tier target has a heat conductivity of 200W/m.K, which is about half of pure copper. We successfully have developed the three tier blistering tolerant neutron target for BNCT.

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ホウ素中性子捕捉療法 陽子加速器 中性子発生 水素脆化 プリスタリング 拡散接合 ハイパワーターゲット

1. 研究開始当初の背景

BNCT(ホウ素中性子捕捉療法)は、ホウ素薬剤をガン細胞に選択的に蓄積させた状態で中性子を照射し、ホウ素を粒子とリチウム粒子に核変換し、がん細胞のみを選択的に死滅させる。そのメカニズムから究極のターゲティングと言われる。長い間、そのメカニズムからガン治療の有力な一方法ととらえられ研究が進められてきた。一方それが研究的な治療の域を出なかったのは中性子源が原子炉に限定され、病院に併設できなかったからである。近年の陽子ビーム大強度加速器の進展により原子炉で得ていた中性子強度が、加速器によって実現できる可能性が出てきたことで多くの機関でその開発が開始されている。医療という特性をよく考えた BNCT 施設の実現が強く望まれる。

2. 研究の目的

これらのいくつかの提案の中で見落とされがちで非常に重要なこととして、病院に併設された場合の加速器の放射化である。原子炉はその原理から中性子の発生に最も適しており、その強度は非常に強い。同じだけの中性子を加速器で発生することは非常に困難が伴う。もっとも強度のみであれば加速器のエネルギーを上げさえすれば比較的簡単に実現できる。加速器はエネルギーを上げることは向いているからである。そこで高エネルギーの陽子ビームを中性子発生に用いると高エネルギー中性子による放射化が非常に大きな問題となる。本研究で提案する 8MeV の陽子ビームを用いた場合の標的システムと、仮に 30MeV の陽子ビームを用いたその放射化について定量的に比較する。寿命品である標的の交換を想定して、その近傍での放射線の強度は、前者が 30センチ離れて毎時 10 ミリシーベルト程度であるのに対し、後者はその 3 桁以上高いことが想定される。同時に通常の使用状態でも、患者の位置合わせ等の作業時の

環境も放射線のバックグラウンドが高くなる。低放射化を実現するには低エネルギーの陽子ビームを用いて中性子を発生すれば良いことはわかっているが、エネルギーを下げると中性子の発生効率が下がり必要となる電流量は大幅に増える。また、低エネルギーの陽子の飛程は短く、標的内の短い距離で陽子は止められる。これは標的物質内での熱密度が非常に高くなることを意味する。さらに陽子は元々が水素ガスからその電子を剥ぎとって作るものであり、物質内で止められると近傍の電子を捕まえて水素ガスに戻る。陽子の大きさと同程度の大きさの電子の大きさは 5 桁ほどの違いがあり、ある深さで止まった陽子が水素に戻ると急激に圧力が上昇し物質が破壊される。この現象をここではプリスタリングと総称する。

このように病院設置に向いている低エネルギーで大電流の陽子加速器を用いての BNCT 装置の開発では、大電流陽子加速器そのものが技術的困難を伴うとともに、この標的に非常にハードルの高い技術的開発要素が存在する。つまり、高熱負荷に耐え、プリスタリングに強い標的の開発が病院に設置して安心して使用できる BNCT 装置の実現にとって非常に重要でかつ大きな課題である。この課題解決が本研究の目的である。

1. 研究の方法

(1) 高熱負荷対策

高熱負荷に対しては、まず核融合の第 1 壁の冷却方式に注目した。ここでは $10\text{MW}/\text{m}^2$ を超える熱密度の冷却の研究を進めている。要点は冷却水の流速である。通常加速器の冷却等では水によるエロージョン、コロージョンは大きな問題と考えられ、流速を例えば $2\text{m}/\text{秒}$ 程度を推奨する。ここでは $10\text{m}/\text{秒}$ 以上の高速での冷却を用いることとした。つまり、核沸騰領域での冷却を用いることとし、検討を行う。

(2) プリスタリング対策と 3 層構造標的

高いエネルギーの陽子ビームを用いると放射化が大きいことは前述のとおりであるが、標的製作の面では、標的材料

であるベリリウムを厚く出来る。何故ならば、高いエネルギーの陽子ビームは透過力が高く、厚いベリリウムも通り抜ける。つまり機械強度のある厚いベリリウムで標的を作り、その裏に水を流すことで冷却効率がよく、ビームが通り抜け、ベリリウム内で陽子が止まらないことからプリスタリングが起きない標的の製作が可能となる。繰り返すが放射化は非常に大きい。

一方、低エネルギービームでは放射化が少ない。このことは何ものにも代えがたいメリットであるが、低エネルギービームはごく薄いベリリウム中で止まってしまふ。ベリリウム中でビームが止まると、短時間でガス圧によってベリリウムが2層に割れてしまふ。これはアメリカのインディアナ大学で多くの故障例を残した。つまりその機械的な強度が不足で、ベリリウムの裏面を水で直接冷却することができない。

そこで我々はまずベリリウムはビームが透過する厚さとなる0.5ミリとし、その裏にプリスタリングに強い金属、つまり水素吸蔵金属を貼る。それを先に述べた高速流水で冷却する銅のヒートシンクに取り付けることとした。つまり3層構造の標的を開発することとした。

(3) プリスタリング実験装置の開発

プリスタリングの研究はあまり進んでいるとは言いがたい。勿論同様な現象は核融合では非常に深刻な問題となることからその観点で研究が進められている。しかし、その結果を直接利用することは出来ない。ここでは幸い3層のそれぞれの役割を分担できる。第1層はベリリウムで中性子発生を行う。2層目はビームをその金属中で止め陽子を貯蔵する。3層目は高い冷却効率を受け

持つ。前述のようにプリスタリングのデータが非常に乏しい。そこで高エネルギー加速器研究機構の750kVのコッククロフトウォルトン加速器を用いて金属のプリスタリングについて研究した。金属表面に陽子ビームを照射し、その表面の変化を非常に高感度で検出する装置の開発を行った。

4. 研究成果

(1) 3層構造の開発と成果

技術的課題となる3層構造の標的の製作技術の開発を行った。この開発は多くの材料メーカー、接合技術の専門メーカーの協力のもとに行われた。ベリリウムとプリスタリング対応の金属そして銅のヒートシンクの3層を拡散接合で接続することが出来た。プリスタリング対策に用いる金属の候補は、ニオブ、チタンその他数種類をリストアップしそれらを接合して特性を調べた。基本的には調べたほとんどの金属で接合は可能である。また、重要なこととしてこの3層構造の熱伝導率である。その計測にはレーザーフラッシュ法を用いた。3層の試験片のベリリウム側から短パルスの強力なレーザー光線を照射し、裏側の銅の表面の温度の時間変化から熱伝導度を計測した。もっとも有力と考えられる組み合わせの3層構造で銅の熱伝導率の半分という高い熱伝導率が得られた。これは3層が理想的に接合されたと仮定して得られる熱伝導率と一致している。

(2) プリスタリング研究の成果

表面の変化をレーザービームの偏向を利用して(P波とS波)高感度で測定できる装置の開発を行い、金属表面の変化とビーム量の定量的な確認を行うことが出来た。主要な金属のデータを取ったが、コッククロフトウォルトン加速器の管理上の都合から当面実験継続をストップせざるを得ない状況である。

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 1 件)

吉岡正和、小林仁、松本浩、栗原俊一，“加速器をベースとしたホウ素中性子 捕捉療法施設の開発～いばらき BNCT 計画に即して～”，加速器 Vol. 9, NO. 4, 2012 (229-241) J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 9, No. 4, 229, 241, 2012

査読有り。

〔学会発表〕(計 2 件)

H. Kobayashi, T. Kurihara, H. Matsumoto, M. Yoshioka, H. Kumada, A. Matsumura, H. Sakurai, F. Hiraga, Y. Kiyonagi, T. Nakamura, H. Nakashima, T. Shibata, T. Hashirano, F. Inoue, K. Sennyu, T. Sugano, T. Ohba, Su. Tanaka, "CONSTRUCTION OF A BNCT FACILITY USING AN 8-MeV HIGH POWER PROTON LINAC IN TOKAI", Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, 4083, 4085, 2012

Hitoshi Kobayashi, Toshikazu Kurihara, Hiroshi Matsumoto, Masakazu Yoshioka, Noriyuki Matsumoto, Hiroaki Kumada, Akira Matsumura, Hideyuki Sakurai, Fujio Hiraga, Yoshiaki Kiyonagi, Takemi Nakamura, Hiroshi Nakashima, Tokushi Shibata, Tatsuomi Hashirano, Tomei Sugano, Fumiaki Inoue, Katsuya Sennyu, Susumu Tanaka, Toshiyuki Ohba, " CONSTRUCTION OF A BNCT FACILITY USING AN 8-MeV HIGH POWER PROTON LINAC IN IBARAKI ", 第9回加速器学会年会,2012, Proc. of the 9th annual meeting of the Particle Accelerator Society of Japan, FRUH12, 278, 281, 2012

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称:複合型ターゲット,複合型ターゲットを用いる中性子発生方法、及び複合ターゲットを用いる中性子発生装置
発明者:松本 浩,小林 仁,吉岡正和,栗原俊一
権利者:高エネルギー加速器研究機構
種類:
番号:2012-074598
出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6.研究組織
(1)研究代表者
小林 仁 (高エネルギー加速器研究機構・名誉教授)

研究者番号:80133099

(2)研究分担者
栗原 俊一 (高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設・准教授)

研究者番号:60215069

吉岡 正和 (高エネルギー加速器研究機構・名誉教授)

研究者番号:50107463

松本 浩 (高エネルギー加速器研究機構・名誉教授)

研究者番号:90132688