

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390114

研究課題名(和文)大強度陽子加速器のビーム窓におけるガス生成断面積測定

研究課題名(英文) Measurement of gas production cross section of beam window for high intensity proton accelerator

研究代表者

明午 伸一郎 (Meigo, Shin-ichiro)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究主幹

研究者番号：80354728

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：J-PARCセンターの様な大強度陽子加速器に用いられるビーム窓の寿命評価のため、アルミの核種生成断面積と炭素のガス生成断面積の測定を行った。

実験は、J-PARCセンターの3GeV陽子加速器を用いて行った。本実験で得られた結果は、高精度に校正されたモニタやビーム制御システムのために、従来の実験より高い精度で得ることができた。本実験結果と核計算モデルによる比較検討を行い、モデルの高精度化を図った。

研究成果の概要(英文)：For the lifetime evaluation of the beam window used for high-intensity accelerators such as J-PARC center, a nuclide production cross section of an aluminum and a gas production cross section of carbon were measured.

The experiment carried out by using 3-GeV proton accelerator of the J-PARC center. Owing to well-calibrated beam monitors and a precise beam control system, we obtained accuracy experimental data than those of previous experimental ones. The present experimental results were compared with the nuclear calculation model aimed to be improved the model.

研究分野：原子核工学

キーワード：放射化断面積 ガス生成断面積 アルミ 炭素 核内カスケードモデル 統計崩壊モデル 核データ

1. 研究開始当初の背景

日本原子力研究開発機構(JAEA)と高エネルギー加速器研究開発機構(KEK)が進められている世界最大強度となるJ-PARCでは、加速器側の超高真空領域と核破砕中性子源側のヘリウム領域の隔壁となる「ビーム窓」にはアルミニウム合金(AlMg₃)が使用されている[1]。陽子ビーム窓の概念を図1に、核破砕中性子源での設置状況を図2にそれぞれ示す。このビーム窓の寿命を決める要因の一つがヘリウムガスの生成過程である。J-PARCと同様に0.8GeVの大強度陽子ビームを核破砕ターゲットに入射するスイスのポールシェラー研究所(PSI)の核破砕中性子源(SINQ)でもアルミニウム合金(AlMg₃)がビーム窓として用いられている[2]。SINQでは照射後のビーム窓を切断し観察したところ、ブツブツとした気泡上のガス生成跡が表面に多く見られた[3]。一方、J-PARCの陽子ビーム窓は2013年の夏に交換したが、この陽子ビーム窓においても気泡上のガス生成跡が観測され、ガスの生成過程を正しく評価することは大強度陽子ビームを取り扱う施設において重要である。

大強度の加速器施設ではビームを照射される機器の合理的な寿命を予測することは重要である。特に廃棄物の保管場所が限られる我が国において、できるだけ廃棄物を出さないことが施設において重要な課題である。その一方、ビーム窓等の機器が故障した場合には加速器の運転を長期間停止する必要がある。特にビーム窓は多重の構造にするのが除熱の観点から困難であるので、故障する前に交換しなければならない。このために精度の高い寿命を予測することは重要である。これらの経緯からSINQでは切断したサンプルを昇温し、ヘリウムの生成量を直接的に測定した[4]。このヘリウム生成量が寿命の一つの基準となるが、SINQとJ-PARCでは入射陽子のエネルギーが異なるので寿命評価のためにはエネルギーの違いを考慮する必要がある。しかしながら、3GeV陽子に対するヘリウム生成断面積の測定は極めて重要である。

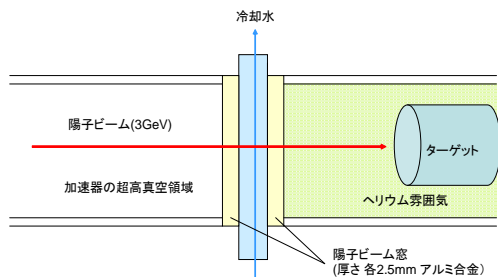


図1: 陽子ビーム窓の概念図

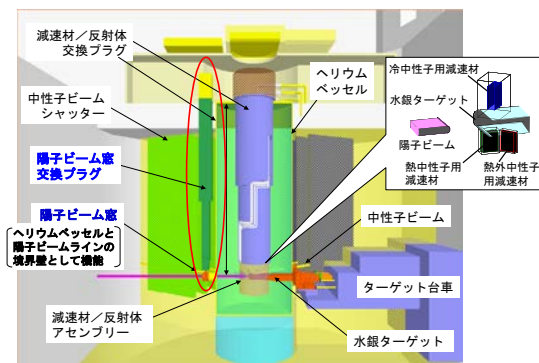


図2: 核破砕中性子源における陽子ビーム窓の配置

<引用文献>

- [1] S. Meigo, et al., Nucl. Instr. Meth. A600, pp 41-43 (2009)
- [2] G. S. Bauer, Nucl. Instr. Meth., A463, pp 505-543 (2001)
- [3] D. Hamaguchi, Y. Dai, Nucl. Mater. 329, pp 958-962 (2004)
- [4] B. Oliver, Nucl. Mater. 356 pp 14-156 (2006)

2. 研究の目的

本研究では、J-PARCの陽子加速器を用いて、アルミに3GeV陽子入射の核種生成断面積及びガス生成断面積及び核種生成断面積を測定する。ガス生成断面積の測定は四重極質量分析器を真空ダクトに設置し、生成するガスの量を測定する。

これらの結果を評価済み核データファイル及び核子中間子輸送計算コード(PHITS)との比較検討により計算モデルの高度化に資することが本研究の主目的である。PHITSの計算では核内カスケードモデル及び量子論的動力学(QMD)を用いて計算を行う。

この結果により、大強度陽子加速器施設のビーム窓の寿命予測が合理的に行えることが可能となり、さらに加速器駆動型未臨界炉(ADS)等におけるビーム窓の適切な寿命予測及びビーム窓の設計の合理化に資する。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、核種生成断面積及びガス生成断面積測定のためにJ-PARCセンターの3 GeV陽子シンクロトロンから出射するビームを用いて実験を行った。測定は、ビームの捨て場所となるビームダンプの直前で行い、真空となる陽子ビームラインにサンプルを設置して行った。実験では、サンプルには厚さ0.5 mmの矩形(25mm x 45mm)のアルミを用い、サンプルへの陽子の照射条件を明確にするために、フォイルを駆動できるサンプルチェンバを用いた。実験に用いた真空チェンバ及びサンプルチェンジャを図3に示す。サン

プルの駆動は、加速器トンネル外部から行うことが可能であり、ビーム調整が終了した後にサンプルを照射位置に移動し、ビームを照射した。照射後の取り出しとガンマ線の計数率を考慮し、サンプルへの照射した陽子ビームの量は 5×10^{14} 個と決定した。3 GeVシンクロトロンでは入射エネルギーが 400 MeVとなるため、加速を行わない 400 MeVと最大限度まで加速を行った 3 GeVの陽子に対する測定を行った。

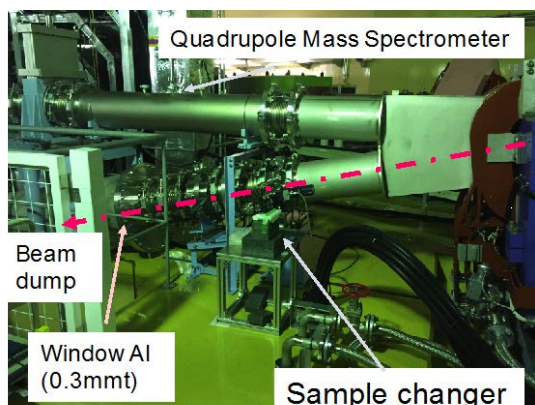


図 3: サンプルチェンジャとビームダンプ

(2) 核種生成断面積の測定は、陽子ビームをサンプルに照射した後に、サンプルを取り出しJ-PARCセンターの物質・生命科学実験施設 (MLF) 内に設置してある高純度ゲルマニウム検出器を用いてサンプルから放出されるガンマ線により生成核種分析を行った。測定で得られたガンマ線の分布を図 4 に示す。ガンマ線の計測は数回にわたって行い、 ${}^7\text{Be}$ 、 ${}^{22}\text{Na}$ 及び ${}^{24}\text{Na}$ から生成するガンマ線の計測し、これら核種生成断面積を測定した。

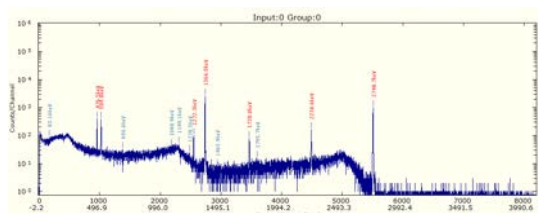


図 4: 測定で得られたガンマ線スペクトル

(3) ガス生成断面積の測定は、四重極質量分析器を設置して行う予定であった。ダンプ等から生成する放射線のため、四重極質量分析器が故障したため、本実験では使用することができなかった。そこで、本研究では MLF のターゲット健全性の確認に使用している、四重極質量分析器 (MKS Microvision2) を用い、MLF 内部に設置している炭素のミュオン生成ターゲットから生成するガス生成断面積を

測定した。

(4) 実験で得られた断面積を用いて、核データファイル (JENDL/HE-2007) 及び核子中間子輸送計算コードによる断面積の比較検討を行った。核子中間子輸送計算コード (PHITS) では、原子核内部の核子 (陽子及び中性子) の散乱に基づく核内カスケード計算を行う。核内カスケードに引き続き、核の励起エネルギーに基づき核子の蒸発過程を統計崩壊モデルにより計算する。本研究では、PHITS に用いられる様々な核内カスケードモデルを用いて比較検討を行った。

4. 研究成果

(1) 核種生成断面積

本実験で得られた、核種生成断面積の結果を表 1 に示す。本測定ではよく校正されたビーム強度モニタを用いたことと、精度の高いビーム制御のため精度の高い実験データを得ることができた。3 GeV シンクロトロンとその下流のビーム輸送系は、大強度ビーム運転のためによく制御されビーム損失が無視できるほど低いため、信頼性の高いビーム強度がシンクロトロン周回中に複数回行うことが可能なため、ビーム強度は既存の施設に比べ高い精度で測定することが可能となる。断面積の誤差の殆どはガンマ線検出器の絶対検出効率から生じており、全体として 3% 程度となった。

入射陽子ビームのエネルギーはシンクロトロンの高周波と高精度に測定されたシンクロトロンの周長から決定できるため、エネルギーの誤差は 0.3%程度となり既存の実験と比較し高いエネルギー精度で得ることができた。

表 1: 核種生成断面積の実験結果

| 生成核種 | 陽子エネルギー [MeV] | エネルギー誤差 [MeV] | 断面積 [mb] | 断面積誤差 [mb] |
|--------------------|---------------|---------------|----------|------------|
| ${}^7\text{Be}$ | 400 | 1.08 | 2.96 | 0.11 |
| | 2984 | 8.06 | 8.50 | 0.31 |
| ${}^{22}\text{Na}$ | 400 | 1.08 | 15.42 | 0.56 |
| | 2984 | 8.06 | 10.57 | 0.38 |
| ${}^{24}\text{Na}$ | 400 | 1.08 | 11.25 | 0.41 |
| | 2984 | 8.06 | 9.54 | 0.34 |

サンプル位置のビーム径はビーム輸送ラインに設置したビームプロファイルモニタとビーム光学により計算した。ビームプロファイルモニタは 3GeV シンクロトロンを出射してビームダンプに至るまでに 3 箇所あるために、これらのデータを基準に導出することが可能である。図 4 にシンクロトロンを出射してビームダンプに至るまでのビームの振

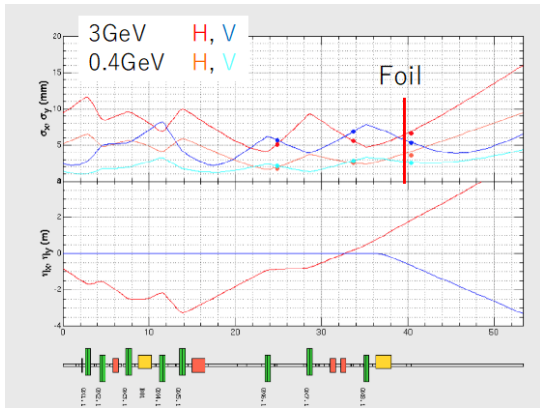


図 5: 陽子ビーム輸送におけるフォイル位置でのビーム径

る舞いを示す。図 5 では 400 MeV 及び 3 GeV の結果を示している。図 4 よりサンプル位置のビーム径は垂直方向で大きく更に 3 GeV 陽子の方が大きいものの最大でも 7 mm (1σ) となることがわかった。

図 6 に $\text{Al}(p, x)^7\text{Be}$ の測定結果を励起関数としての結果を示す。図では他の実験結果も示す。本測定により今までになかった 3 GeV の結果を得ることができた。更に本結果は他の実験と比較し、高い精度で得ることができた。

核データ及び核内カスケードモデルによる計算との比較を図 5 に示す。核データは概ね実験と良い一致を示すものの高いエネルギー領域で 15% 程度の過大評価が見られる。核子中間子輸送計算コード (PHITS) の計算値は、核内カスケードモデルによらず 600 MeV 以上の高エネルギー領域では過小評価を示す。最新の核内カスケードモデルである INCL4.6 の場合には 500 MeV 以下のエネルギー範囲では実験と良い一致を示すものの、600 MeV 以上の領域では INCL4.6 のモデルにおいても過小評価を示すことが判明した。

この原因の究明のため、他の研究に関して調査した。PHITS では降旗 [5] が開発した、GEM コードを統計崩壊モデルに用いている。降旗等の研究では、Bertini カスケードモデルの計算の後に、GEM コードを用いることで

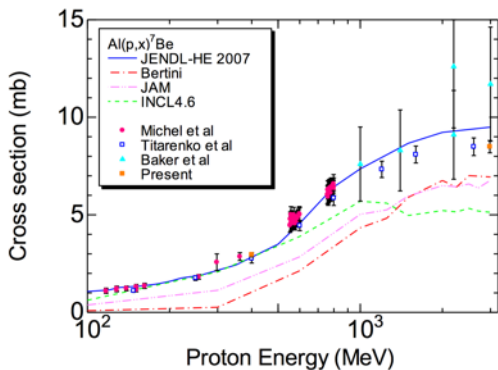


図 6: 本実験の $\text{Al}(p, x)^7\text{Be}$ 反応断面積測定結果と核データファイル、核子中間子輸送計算コードの計算結果及び他の実験値との比較

図 7 に示すように実験と良い一致を示されている。一方、PHITS ではすべての核内カスケードを用いても、過小評価している。この原因を追求するため、PHITS の核内カスケードモデルの計算の後に励起エネルギーのデータをファイルにダンプし、そのデータを GEM コードに入力し計算した。その結果、降旗等の結果と良い一致を示すことが確認され、PHITS コードに内蔵される GEM モデルに問題が発生していると考えられる。この内容に関しては、引き続き検討する予定としている。

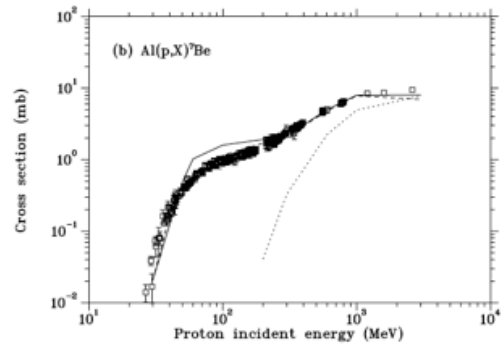


図 7: $\text{Al}(p, x)^7\text{Be}$ 断面積の GEM の計算 (実線) と他の実験との比較 [5]

<引用文献>

[5] S. Furihata, Nucl. Instr. Meth. B 171, pp 251-258 (2000)

(2) ガス生成断面積測定

MLF でミュオン生成のために用いられる炭素ターゲット (厚さ 2 cm) を用いて測定した。炭素ターゲットは回転ターゲットとなり、冷却は輻射のみで実施するため、照射中には数 100 度の温度となりガスを発生する。ターゲット健全性を確認するための四重極質量分析器を用いて、発生ガスの圧力を測定した。この分析器は陽子ビーム輸送ラインの下流側の真空ダクト中に設置しており、放射線の影響を避けるためにダクトから遠方に設置

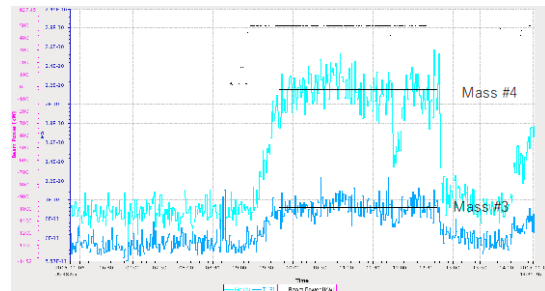


図 8: 陽子ビームを炭素ターゲット照射中の質量分析器の測定結果 (質量数 3, 及び 4 の圧力の時間的振る舞い)

し、更にポリエチレン及び鉛の遮蔽を施した。この遮蔽を行わない場合には、照射開始後に直ぐに読み出しが不可能となったが、遮蔽により長期間の読み出し可能となった。照射前に、ヘリウム校正リークソースを用いて質量分析器で観測された圧力とガスの発生量の校正をした。

500 kWの陽子ビーム照射中の質量分析器の測定結果を図8に示す。照射開始約1時間後に質量が3, 4のガスが飽和することが観測された。この飽和圧力が入射陽子の強度で発生するガス量となり、この量より各粒子を生成する反応断面積を導出した。実験で得られた結果を表2に示す。

表2 炭素のガス生成断面積の実験結果

| 生成ガス | 陽子エネルギー [MeV] | エネルギー誤差 [MeV] | 断面積 [mb] | 断面積誤差 [mb] |
|------------------------------------|---------------|---------------|----------|------------|
| ${}^3\text{T} \cdot {}^3\text{He}$ | 2984 | 8.06 | 53.2 | 20 |
| ${}^4\text{He}$ | 2984 | 8.06 | 141.0 | 35 |

本測定で得られたヘリウム生成断面積(即ち $C(p, x\alpha)$ 反応断面積)の結果と核データファイル、及び核子中間子輸送計算コードによる比較を図9に示す。質量数4の結果は、 α しか無く簡単に比較できるが、質量数3の場合にはT及び ${}^3\text{He}$ の合算値の比較が必要となる。

JENDL/HE-2007及びENDF/B-VI.8 HEの核データファイルは本実験結果と実験誤差以内で良い一致を示している。核内カスケードの計算では、Bertiniモデルを用いた計算が実験と誤差内で良い一致を示す。INCL4.6モデルは約60%の過大評価を示し、JAMモデルは更に過大評価を示すことがわかった。計算モデル及び核データファイルにおいて数百MeV領域の断面積のばらつきが顕著となるため、今後はこのエネルギー領域の測定を行うこと

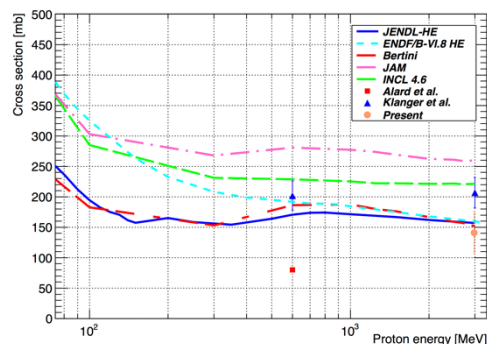


図9: 本実験の $C(p, x\alpha)$ 反応断面積の測定結果と核データファイル、核子中間子輸送計算コードの計算結果及び他の実験値との比較

により計算モデルの更なる詳細な検証がで

きるものと考えられる。

(3) まとめ

以上で得られた実験データにより核データ及び核子中間子輸送計算コードの断面積の精度向上に繋がるデータを得ることができた。今後は、他の核種の測定を行うことにより広い厳格システムティックな検討が行えるようになり、更に核データやモデルの精度向上に繋がるものと期待される。更にガス生成断面積の測定は、サンプルから放出される寄与が少ないことが計算により判明したため、今後サンプルを取り出し加熱することにより測定できることが期待される。

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)

- ① 明午 伸一郎, 西川 雅章, 岩元 大樹, 松田 大樹, "Measurement of aluminum activation cross section and gas production cross section for 0.4 and 3-GeV protons", to be published EPJ Web of Conferences, 査読有 (2017)

[学会発表] (計 3 件)

- ① 明午 伸一郎, 西川 雅章, 岩元 大樹, 松田 大樹, "Measurement of aluminum activation cross section and gas production cross section for 0.4 and 3-GeV protons", ND2016, 2016/9/14, ブルージュ、ベルギー
- ② 明午 伸一郎, 他, "High power target instrumentation at J-PARC for neutron and muon sources", HB2016, 2016/7/6, マルメ、スウェーデン
- ③ 明午 伸一郎, 他, "Beam profile monitor at the 1 MW spallation neutron source", IBIC2015, 2015/9/15, メルボルン、オーストラリア

6. 研究組織

(1) 研究代表者

明午 伸一郎 (MEIGO Shin-ichiro)
 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
 原子力科学研究部門・J-PARC センター
 研究主幹
 研究者番号: 80354728

(2) 連携研究者

岩元 大樹 (IWAMOTO Hiroki)
 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
 原子力科学研究部門・J-PARC センター

一・研究職

研究者番号：50589744

(平成 28 年度より連携研究者)

松田 洋樹 (MATSUDA Hiroki)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機
構・原子力科学研究部門・J-PARC センタ

一・博士研究員

研究者番号：70782960

(平成 28 年度より連携研究者)

(3) 研究協力者

西川 雅章 (NISHIKAWA Masaaki)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機
構・J-PARC センター・技術開発協力員