

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420915

研究課題名(和文)レーザー駆動プロトン誘起中性子の計測

研究課題名(英文)Detection of neutrons produced by laser induced proton

研究代表者

小倉 浩一(OGURA, Koichi)

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 量子ビーム応用研究センター・研究副主幹

研究者番号：30354971

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー駆動プロトンと中性子コンバーターによって発生する中性子のエネルギーから、プロトンのエネルギーを知るための知見を得るため、コンバーターの無いときのレーザー駆動プロトン発生時の中性子の計測を行った。プロトンを繰り返し発生し、中性子だけに感度のあるバブル検出器で、中性子を計測した。約0.1Sv/ショットであることを明らかにした。その中性子のエネルギーを知るためシンチレータを使用したTOF型検出器でも中性子の検出を試みた。また、中性子コンバート時の中性子スペクトルを計算した。今後、プロトン起因の中性子のみを選別して計測し、プロトンのエネルギー計測としての有効性を明らかにしてゆく。

研究成果の概要(英文)：A neutron energy distribution is expected to provide information of a laser-driven proton energy during neutron generation with the laser-driven proton and neutron converter. In order to comparison, the neutrons were measured during laser-driven proton generation without neutron-converter. Laser protons were produced repeatedly and measured a neutron with a bubble detector which is sensitive only towards neutrons. The dose of the neutron was approximately 0.1Sv/shot. A time-of-flight-type neutron detector integrated with a the scintillator was used to detect the neutrons to determine the neutron energy. Furthermore, a neutron spectrum at the time of the neutron conversion was calculated. I will clarify the effectiveness as the proton energy measurement method.

研究分野：原子力

キーワード：高強度レーザー プロトン 加速 中性子

1. 研究開始当初の背景

チャープパルス増幅技術の開発によってテラワットの高強度のレーザーが開発された。このレーザー光を集光すると高いエネルギーの電子、イオン、X線、プロトンを発生でき、比較的コンパクトな量子源ができることが期待されていた。

たとえば、超高強度レーザーを薄膜(金属、プラスチック)に集光するとプラズマが生成され、レーザー場中の電子はレーザー進行方向に加速され、高速電子となる。薄膜から飛び出した高速電子群と薄膜ターゲットとの間に電荷分離が起こり、電場が生成される。この電場によって水素イオンが加速される。(これら水素イオンは、薄膜表面の付着物に起因する。)このようにして生成されるプロトンをがん治療、同位元素生成、中性子源などに利用しようという研究も行われている。がん治療では200MeVのプロトンが必要であり、それを目標として高エネルギー化の研究がなされている。

我々は、これまでに、レーザー光の伝搬中の波面均一性を向上させることによって集光性能を向上させ、 $\sim 10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$ の集光強度を実現した。これによって、厚さ $0.8\mu\text{m}$ のアルミニウム薄膜に、パルス幅40fsのレーザー光を集光し、集光強度が約 $1 \times 10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$ のとき、最大エネルギー40MeVのプロトンを発生することを可能にした。このエネルギーは大型ガラスレーザーの世界最高記録約68MeVには届かないが、医療応用など実用化に適した小型高強度レーザーと薄膜ターゲットを使用した中では、これまでの世界最高エネルギー25MeVを超えた値であった。医療用200MeVプロトンを目指して、エネルギーの増加を行うときに、エネルギーの値を確かなものにするために、複数の方法で計測することが必要である。

2. 研究の目的

現在、レーザー駆動プロトンの低いエネルギー測定にはいくつかの方法が使用されている。本研究では、プロトンのエネルギーが200MeVなど高エネルギーになったときにも有効な簡便な方法に関する知見を得ることを目的とする。

ここでは、50MeVプロトンの発生を行うと同時に高エネルギーのプロトンのエネルギーを測定するための新規な方法として、(p,n)反応を使用して放出される中性子を計

測することによって、プロトンの特性を評価する新たな方法の有効性を明らかにすることを目的とする。(1)50MeVプロトンビーム発生の集光強度依存性(集光強度が $10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$ を超えるところでもスケールング則が成立するか実験的に明らかにする。(2)プロトンエネルギー評価の中性子検出方法の有効性(プロトンのエネルギーが200MeVなど、高いエネルギーになると磁石でのエネルギー分析も大掛かりとなる。より簡便な中性子検出法の有効性を明らかにする。)

3. 研究の方法

(1) レーザー駆動プロトンビームの発生

日本原子力研究開発機構のJ-KARENレーザーを使用する。当該年度は、連続的にテープ状の薄膜ターゲットを供給できる装置を使用し、プロトン発生実験を行う。このとき、半値全幅が $3\sim 4\mu\text{m}$ でピークの集光強度が $10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$ 以上に相当する条件で実験する。

(2) プロトン発生実験時の中性子測定(比較データの取得)

中性子変換材料を用いた場合の中性子スペクトルを明らかにするために、変換材を使用しない場合の中性子エネルギースペクトルデータ、および中性子線量データを取得する。そのために、線に影響されないバブル検出器や飛行プラスチックシンチレーターを使用した飛行時間型中性子エネルギー計測器を使用する。

(3) 中性子スペクトル、角度分布の計算

実験から得られる中性子スペクトルからプロトンのスペクトルを推定するためや、実験で得られる中性子スペクトルを予想するために、簡易計算ならびにモンテカルロ計算コードを使用して、中性子のスペクトルや角度分布を推定する。

(4) プロトンビームと変換材による中性子変換

発生したプロトンビームをLiFターゲットに照射する。前方の $2\sim 3\text{m}$ 離れた場所に中性子検出用のプラスチックシンチレータ検出器を設置する。シンチレータの光は光電子像倍管で増倍し、オシロスコープでシグナルを観測する。トリガー信号としてレーザーの光をピンフォットで検出した信号を用いる。シンチレータはX線にも感度があるので、X線を

遮蔽するためにシンチレータ検出器の周囲は厚さ 20cm の鉛ブロックで覆う。LiF からシンチレータまでの距離と飛行時間から中性子のエネルギーを見積もる。

4. 研究成果

(1) レーザー駆動プロトンによる中性子発生スペクトルの零度方向の計算

これまで、実験的に得られた 40MeV プロトンスペクトルをもとにして、最大エネルギー 70MeV までのプロトンスペクトルを仮定して、フッ化リチウムターゲットに照射した場合の、前方方向に放出される中性子のエネルギースペクトルを計算した。

計算は、フッ化リチウムをプロトンの入射方向にセグメントに分割し、そこに入射するプロトンエネルギーとそのセグメントで失うエネルギーを飛程から推測し、セグメント出口のプロトンエネルギーを求めた。このセグメント中の計算をプロトンが直線的に進むとして順次計算し、プロトン束がエネルギーを失うか、あるいは反応断面積がゼロになるまで計算を行った。放出される反応を起こしたプロトンは計算体系から失われるとした。それぞれのセグメントでの反応率を計算した。中性子のエネルギーは、反応が起こったときのプロトンのエネルギーに等しいとした。プロトンスペクトルを幾つかのエネルギーに計分割し、それぞれのエネルギーでの中性子スペクトルを計算、相対強度強度を掛けて、レーザー駆動プロトンによるスペクトルを求めた。算結果を図 1 に示している。図

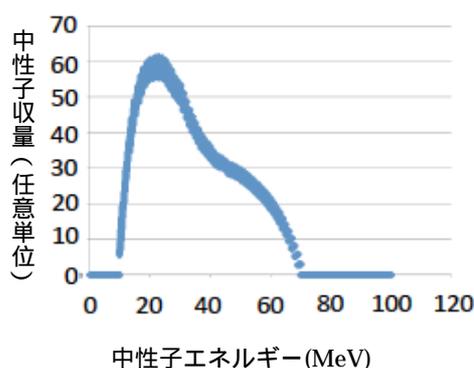


図 1 レーザー駆動プロトンの最大エネルギー 70MeV のときの中性子のエネルギースペクトル (簡易計算)

は、プロトンのエネルギースペクトルの最大値が 80MeV の場合である。最大エネルギーが入射プロトンの最大エネルギーと等しい。中性子スペクトルが得られた。

(2) GEANT4 モンテカルロ軌道計算コードによる中性子エネルギースペクトルと空間分布の計算

(1)では、零度方向のみを実験値の断面積をもとに計算を行った。ここでは、空間分布も計算するために GEANT4 コードを使用してシミュレーションを行った。実験時には、零度方向に必ずしも検出器を設置できない場合が、考えられるので、空間分布がどのようになるかシミュレーションを行った。

計算コードは、いくつかの理論計算モデル

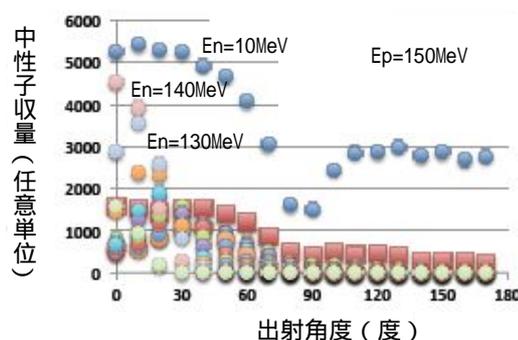


図 2 モンテカルロ軌道計算コード (GEANT4) で計算したレーザー駆動プロトン誘起中性子の角度分布

に対応したパッケージがあり、そのうちの、半実験モデルを反応断面積に使用しているモデルを使用して計算を行った。モデルは、

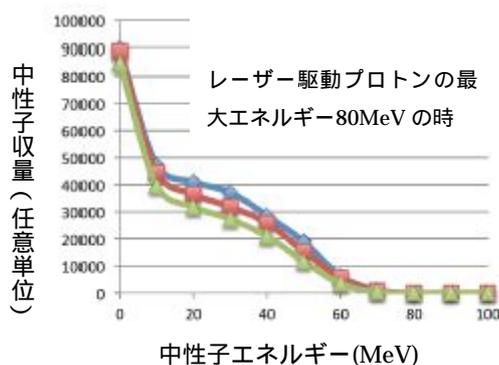


図 3 モンテカルロ軌道計算コード (GEANT4) で計算したレーザー駆動プロトン誘起中性子のスペクトル

高いエネルギーによく合う計算であるが、低いエネルギー (10MeV) 領域でも比較的良好に実験値を再現できるモデルである。また中性子の計算も低いエネルギー (熱エネルギー)

までも計算できるモデルを使用して計算を行った。計算結果の例を図 2, 図 3 に示す。図 2 は、中性子の角度分布を示している。入射プロトンのエネルギーがより高いと入射エネルギーに近い中性子が零度方向で得られることがわかった。レーザー駆動で生成する中性子の 0, 10, 20 度方向エネルギー分布を図 3 に示す。入射プロトンの最大エネルギーが入射プロトンエネルギーに近く、中性子のスペクトルを得ればプロトンの最大エネルギーを推測できる。

(3) バブル検出器による中性子の検出

本実験で使用する高強度レーザーを 30 秒に一回程度で繰り返しショットした。これにより、連続的にターゲットを供給するテーブターゲットを使用して繰り返しプロトン発生を行った。プロトンおよび、線による中性子が発生する。このとき、中性子コンバーターは設置していない。中性子をバブル型検出器で測定を行った。検出器は、真空容器の壁に取り付け、44 ショット後に泡の数を数えた。この泡の数から中性子による線量を推定することができる。この検出器は、線などの放射線に感度はなく、中性子だけに感度がある。図 4 に検出器中に泡が生じた様子を示している。この泡の数に線量が比例する。ここでは、約 $4 \mu\text{Sv}$ であることがわかった。この計測している所のエネルギー範囲は 0.2~15MeV まで積算したものである。中性子コンバーターによる中性子量の増加を比較するための中性子計測技術が得られた。

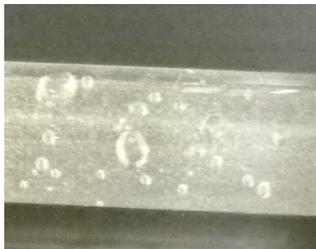


図 4 バブル検出器で検出したレーザー駆動による中性子(レーザーを 44 回ショット)

(4) シンチレータによる中性子検出

中性子のエネルギースペクトルを計測するために、TOF 型中性子検出器を作成して中性子の検出を試みた。シンチレータの大きさは $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ である。このシンチレータから放出される蛍光をオプティカルガイドによって直径 50mm の光電子増倍管に導いて検出を試みた。高エネルギー線の信号にトリガーとして検出するようにした。信号は

オシロスコープで計測した。得られた信号、わずかな高まりが有り、これが、中性子の信号を推測している。エネルギーに換算すると数 MeV のエネルギーに対応している。TOF による中性子計測の手がかりが得られた。

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 3 件)

M. Nishiuchi, H. Sakaki, T. Zh. Esirkepov, K. Nishio, T. A. Pikuz, A. Ya. Faenov, I. Yu. Skobelev, R. Orlandi, H. Sako, A. S. Pirozhkov, K. Matsukawa, A. Sagisaka, K. Ogura, M. Kanasaki, H. Kiriyama, Y. Fukuda, H. Koura, M. Kando, T. Yamauchi, Y. Watanabe, S. V. Bulanov, K. Kondo, K. Imai, and S. Nagamiya, "Acceleration of highly charged GeV Fe ions from a low-Z substrate by intense femtosecond laser", *Physics of Plasma*, 査読有, Vol.22, 2015, 033107-1,8. DOI:10.1063/1.4913434.

M. Nishiuchi, I. W. Choi, H. Daido, T. Nakamura, A. S. Pirozhkov, A. Yogo, K. Ogura, A. Sagisaka, S. Orimo, I. Daito, S. V. Bulanov, J. H. Sung, S. Lee, T. J. Yu, T. M. Jeong, I. J. Kim, C. M. Kim, S. W. Kang, K. H. Pae, Y. Oishi and J. Lee, "Projection imaging with directional electron and proton beams emitted from an ultrashort intense laser-driven thin foil target", *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 査読有, Vol.57, 2015, 025001-1,15. DOI:10.1088/0741-3335/57/2/025001

A. S. Pirozhkov, M. Kando, T. Zh. Esirkepov, P. Gallegos, H. Ahmed, E. N. Ragogin, A. Y. Faenov, T. A. Pikuz, T. Kawachi, A. Sagisaka, J. K. Koga, M. Coury, J. Green, P. Foster, C. Brenner, B. Dromey, D. R. Symes, M. Mori, K. Kawase, T. Kameshima, Y. Fukuda, L. Chen, I. Daito, K. Ogura, Y. Hayashi, H. Kotaki, H. Kiriyama, H. Okada, N. Nishimori, T. Imazono, K. Kondo, T. Kimura, T. Tajima, H. Daido, P. Rajeev, P. McKenna, M.

Borghesi, D. Neely, Y. Kato and S. V. Bulanov, "High order harmonics from relativistic electron spikes", New Journal of Physics, 査読有, Vol.16, 2014, 093003-1,30.
DOI:10.1088/1367-2630/16/9/093003

〔学会発表〕(計4件)

K. Ogura, H. Sakaki, M. Nishiuchi, A. Sagisaka, Y. Fukuda, A. S. Pirozhkov, T. Zh. Esirkepov, A. Kon, and M. Kando
"Angular and Energy Distributions of Neutron for Li(p,xn) Reaction Driven by High Intensity Laser" International Conference on High energy Density Science 2016 (HEDS2016), Pacifico Yokohama (Kanagawa, Yokohama), May 17-20, 2016.

K. Ogura, H. Sakaki, M. Nishiuchi, A. Sagisaka, Y. Fukuda, A. S. Pirozhkov, T. Zh. Esirkepov, A. Kon, M. Kanasaki, K. Kondo, "Neutron Yield of ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ Reaction with Laser-Driven Proton" International Conference on High energy Density Science 2015 (HEDS2015), Pacifico Yokohama (Kanagawa, Yokohama), April 22-24, 2015.

K. Ogura, H. Sakaki, M. Nishiuchi, A. Sagisaka, Y. Fukuda, A.S. Pirozhkov, T. Esirkepov, T. Morita, M. Kanasaki, A. Kon, K. Kondo, "Neutron Generation with Repetitive High Intensity Laser Induced Protons", Plasma Conference 2014 (Plasma2014), Toki Messe (Niigata, Niigata) November 18-21, 2014.

K. Ogura, H. Sakaki, N. Nishiuchi, A. Sagisaka, Y. Fukuda, A. S. Pirozhkov, A. Faenov, T. Pikuz, M. Kanasaki, S. Maeda, K. Kondo, "Neutron Measurement in Experiment of Laser Induced Proton Source" International Conference on High Energy Density Science 2014 (HEDS2014), Pacifico Yokohama (Kanagawa, Yokohama), April 21-25, 2014.

6. 研究組織

(1)研究代表者

小倉 浩一 (OGURA, Koichi)

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 量子ビーム応用
研究センター・研究副主幹
研究者番号：30354971