

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630419

研究課題名(和文) 高速点火核融合実験における高速電子測定用ガンマ線スペクトロメーターの開発

研究課題名(英文) The development of the gamma-ray spectrometer for electron measurement on fast ignition laser fusion experiment

研究代表者

有川 安信 (Arikawa, Yasunobu)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・講師

研究者番号：90624255

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では2種の高エネルギーX線スペクトロメーターを開発した。1つ目はコンプトン散乱によるX線分光器で、計測エネルギー領域は0.5MeV～5MeVである。2つ目は光核反応を利用したX線分光器で、計測エネルギー領域は3MeV～30MeVである。本研究開発により計画通り2種とも計測器の開発に成功し、高速点火核融合研究に導入された。高速点火実験において発生した電子ビームからの制動放射X線スペクトルを測定する事で、加熱電子ビームのスペクトルが測定され、高速点火効率の低下原因である10MeV以上の高エネルギー電子が発生している事が初めて明らかになり、高速点火に大きな貢献を果たした。

研究成果の概要(英文)：In this study we developed two kinds of high energy X-ray spectrometer. One is Compton scattering X-ray spectrometer with the detective energy region of 0.5~5 MeV. The other is photo nuclear X-ray spectrometer with the detective energy region of 3~30 MeV. After this study we succeeded to develop two detectors as planned, and they were implemented to fast ignition laser fusion experiment. The electron energy spectrum was measured via bremsstrahlung X-ray spectrum by them, and we firstly found the generation of the electrons with the energy above 10 MeV which was origin of the low energy coupling efficiency of the fast ignition. The two X-ray spectrometer gave a great progress on the fast ignition laser fusion science.

研究分野：fast ignition laser fusion

キーワード：X-ray spectrometer fast ignition

1. 研究開始当初の背景

高速点火レーザー核融合において加熱電子ビームの絶対量エネルギースペクトルの評価が重要であった。従来より電子を直接計測するだけでは、高速電子は元来ターゲット付近で大半が吸収され、出て来られない物である。したがって電子エネルギースペクトルの計測方法の確立が大きな課題とされていた。電子ビームを直接測定する代わりに制動放射X線のエネルギースペクトル計測を行なう事でそれを測定しようとする計画があった。X線のスペクトル計測器に関して従来の手法を用いて 1MeV 以下までは計測できていたが、それ以上のエネルギーを分光計測できる手法が無かった。そこで本研究では2つの手法で 0.5MeV から 30MeV までを計測できるようにする計測器開発を行なった。

2. 研究の目的

2つの計測器を開発する事で 0.5MeV から 30MeV までのX線の分光計測を可能にする。その為に2つの異なる手法の計測方法を新規に開発する。

1. コンプトン散乱を用いた計測器。

2. 光核反応による中性子発生を用いた計測器を開発する。

これらを高速点火レーザー核融合実験に導入し、従来計測器と比較する事で計測性能評価を行う。またこの計測によって得られたX線スペクトルからシミュレーション計算を介して電子スペクトルを導出する。

3. 研究の方法

2種の計測器の設計・製作を行なった。

1. コンプトン散乱を用いた計測器。X線をコリメーターで直線ビームにし、薄い低Z番号の板に入射させそこでコンプトン散乱電子を発生させる。コンプトン散乱電子のうち前方に散乱した物だけをコリメーターで選択し、その電子のエネルギーを磁場式の電子ス

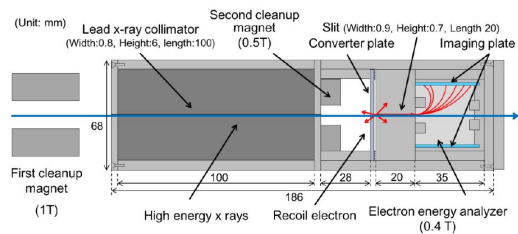


図1 コンプトン散乱X線分光器の構造図

ペクトロメーターで分光する。コンプトン散乱電子のエネルギーからX線のエネルギーを導出する物である。

2. 光核反応中性子発生を用いるもの。

あらゆる元素はX線によって光核反応で中性子を放出する反応がある。その反応断面のX線エネルギー依存は元素により異なり、い

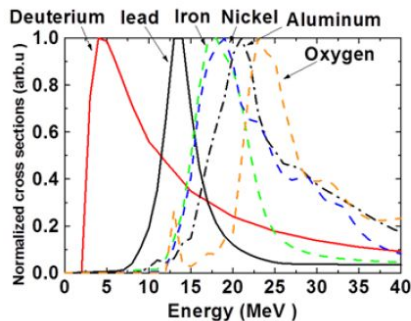


図2. 様々な元素の光核反応断面積をピーク規格化したもの。重水素、鉛、鉄、ニッケル、アルミニウム、酸素の順に巨大共鳴のエネルギー域が高くなる。

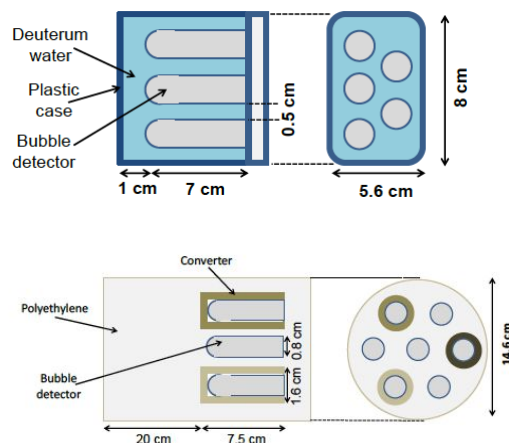


図3 光核反応X線分光器の構造図。重水の中に中性子バブルカウンターがあるものと、金属の中に中性子バブルカウンターが有るものが導入された。

ずれも 1 MeV-3MeV 程度の比較的広い共鳴的な反応断面積を持つ事が知られている(巨大共鳴)。低Z番号の材料ほど低エネルギーに巨大共鳴があり、鉄などの原子核的に安定材料ほど高いエネルギーに巨大共鳴を持つ事が知られている。中性子の発生数からその元素の巨大共鳴エネルギー範囲内のX線の数を見積もる事が出来る。数種類の異なる金属と、そこから発生する中性子をカウントする計測器によって、計測器が設計されている。

それぞれ完成した計測器はレーザー核融合実験に導入する前に、阪大の電子加速器LINACを用いて試験を行った。既知のエネルギーで単色性にすぐれた電子ビームを鉛などの単金属に撃ち込む事で既知スペクトルの制動放射X線を発生させ、実験評価を行った。ここで計測器のノイズや感度など問題点を洗い出し、改善を行った。

次に高速点火核融合に導入した。LINAC 実験で経験したノイズ対策を十分に取り入れ、1 発 1 発条件の全く違うレーザー核融合実験でデータが取れる様に工夫を行なった。

4. 研究成果

計画通り 2 種の計測器が完成し、高速点火核融合に導入した。両者とも X 線スペクトルの計測に成功した。これらの X 線スペクトルは両者が綺麗に繋がり、従来計測器で得られたスペクトルとも繋がった。高速点火核融合で発生する X 線スペクトルは制動放射であるから基本的に (特性 X 線のラインを除いて) 連続的なスペクトルである。したがってこれらが滑らかに繋がった事は、計測器としてきちんと機能した事が示された。図 1 にコンプトン散乱 X 線分光器で計測された X 線スペクトルを示す。図 2 に光核反応 X 線分光器で得られた X 線スペクトルを記す。

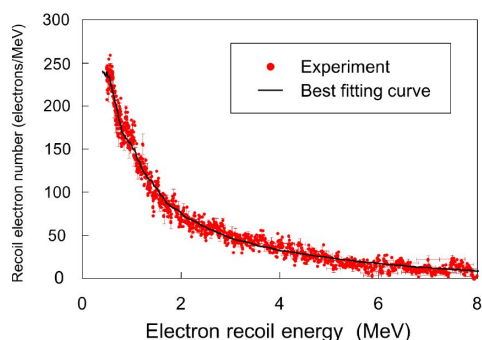


図 1 コンプトン散乱 X 線分光器で得られた X 線スペクトル。

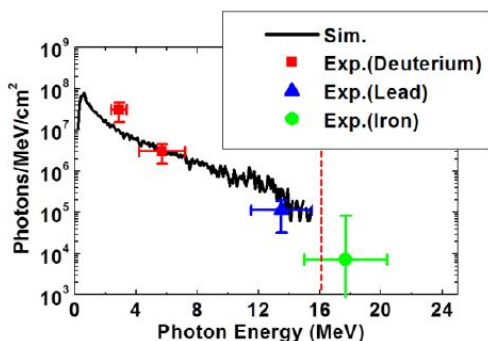


図 2 電子ライナック実験で得られた、光核反応 X 線分光器の X 線スペクトル信号と入射 X 線 (シミュレーション計算であらかじめ予測したもの)

この計測結果から得られた高速点火電子ビームスペクトルは、これまでよりも広い範囲のエネルギーレンジをカバーし、非常に強力な証拠となった。これにより、高速点火にとっては好ましくない 10MeV 以上の電子が発生している事を明らかにした。この電子の発生メカニズムはターゲット表面の希薄なプ

レプラズマと超高強度レーザーによる物である事が分かった。このようにこれらの計測器の開発によって 高速点火レーザー核融合に直接的に大きな貢献を果たした。

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 10 件)

1. Sadaoki Kojima, Takahito Ikenouchi, Yasunobu Arikawa, et al., "Development of Compton X-ray spectrometer for high energy resolution single-shot high-flux hard X-ray spectroscopy", Review of Scientific Instrument, (accepted) 2016

2. Shinsuke Fujioka, Yasunobu Arikawa, et al., "Fast Ignition Realization Experiment with High-Contrast Kilo-Joule Peta-Watt Laser LFX and Strong External Magnetic Field" Physics Plasma, accepted, (2016)

3. Yasunobu ARIKAWA, et al., "High-Intensity Neutron Generation via Laser-Driven Photonuclear Reaction", Volume 10, 2404003 (2015),

4. Zhang, Z ; Nishimura, H ; Fujioka, S ; Arikawa, Y; et al., "Quantitative K alpha line spectroscopy for energy transport in fast ignition plasma driven with LFX PW laser", HIGH ENERGY DENSITY PHYSICS, Vol. 15 pp. 78-81, (2015),

5. Kojima, S; Arikawa, Y; et al., "Accuracy evaluation of a Compton X-ray spectrometer with bremsstrahlung X-rays generated by a 6 MeV electron bunch", REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS , **85**, 11, p.11D634 (2014),

6. Ozaki, T; Kojima, S; Arikawa, Y; et al., "An electron/ion spectrometer with the ability of low energy electron measurement for fast ignition experiments", REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS , **85**, 11, p.11E114, (2014)

7. Sakata, S; Arikawa, Y; et al., "Photonuclear reaction based high-energy x-ray spectrometer to cover from 2 MeV to 20 MeV", REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS **85**, 11, p. 11D629, (2014),

8. Ozaki, T; Sunahara, A; Shiraga, H;

Arikawa, Y; et al., "Hot electron spectra in hole-cone shell targets and a new proposal of the target for fast ignition in laser fusion", PHYSICA SCRIPTA, **T161**, p. 14025, (2014),

9. Zhang, Z; Nishimura, H; Namimoto, T; Fujioka, S; Arikawa, Y; et al., "Quantitative measurement of hard X-ray spectra from laser-driven fast ignition plasma" HIGH ENERGY DENSITY PHYSICS, **9**, 3, p. 435, (2013),

10. Chen, H; Nakai, M; Sentoku, Y; Arikawa, Y, et al., "New insights into the laser produced electron-positron pairs", NEW JOURNAL OF PHYSICS, **15**, p. 65010, (2013),

[学会発表](計12件)

1. 小島完興, 中井光男, 有川安信, 他、"高速点火核融合実験に用いるコンプトン散乱を用いた線スペクトロメーターの開発", 第29回プラズマ核融合学会 グローバルプラザ(春日市)福岡

2. 坂田匠平, 有川安信, 他、"(, n)反応を用いた高エネルギー線スペクトロメーターの開発", 第29回プラズマ核融合学会 グローバルプラザ(春日市)福岡

3. 小島完興, 中井光男, 有川安信, 他、"高速点火プラズマからの高エネルギー放射光測定", 小島完興^A, 中井光男^A, 有川安信、日本物理学会 2013年春期大会 広島大学

4. 坂田匠平, 有川安信、他、"(, n)反応を用いた高エネルギー線スペクトルの測定", 日本物理学会 2013年春期大会 広島大学

5. 小島完興, 中井光男, 有川安信、他、"高速点火プラズマからの高エネルギー放射光測定", 日本物理学会 2013年秋期大会 徳島大学

6. 坂田匠平, 有川安信, 他 "(, n)反応を用いた高エネルギーX線スペクトロメーターの改良", 日本物理学会 2013年秋期大会 徳島大学

7. 井上裕晶, 有川安信、他、"高速点火核融合プラズマからの高エネルギーX線画像計

測および再構成法", 日本物理学会 2013年秋期大会 徳島大学

8. 池之内孝仁, 波元拓哉, 西村博明, 藤岡慎介, 有川安信, "超高強度レーザー生成プラズマ放射硬X線の分光観測", 第30回プラズマ核融合学会 東京工業大学

9. 坂田匠平, 有川安信、他、"高速点火核融合実験における高エネルギーX線スペクトル計測", 第30回プラズマ核融合学会 東京工業大学

10. 小島完興, 中井光男, 有川安信、他、"高速点火プラズマからの放射光測定による高速電子計測", 第30回プラズマ核融合学会 東京工業大学

11. 小島完興, 池之内孝仁, 藤岡慎介, 有川安信, 他、"高速点火基礎プラットフォームを用いた高速電子へのエネルギー変換効率計測", 日本物理学会 2014年春季大会, 東海大学

12. 池之内孝仁, 小島完興, 西村博明, 藤岡慎介, 有川安信, "高エネルギーX線分光器を用いた超高強度レーザー生成高速電子の絶対スペクトル評価", 日本物理学会 2014年春季大会, 東海大学

13. Zhang Zhe, 藤岡慎介, 有川安信, 他、"Quantitative K line spectroscopy for hot electrons in hot dense mater", 日本物理学会 2014年春季大会, 東海大学

14. 尾崎哲, 小島完興, 有川安信、他、"高速点火実験における高速電子およびイオンスペクトル計測", 日本物理学会 2014年春季大会, 東海大学

15. 坂田匠平, 有川安信, "高速点火基礎実験における高エネルギーX線分光計測", 日本物理学会 2014年春季大会, 東海大学

16. 井上裕晶, 有川安信, "高速点火核融合における高エネルギーX線画像計測", 日本物理学会 2014年春季大会, 東海大学

17. S.Sakata, Y.Arikawa et al., "Photonuclear reaction based high-energy

x-ray spectrometer to cover from 2 MeV to 20 MeV” High Temperature Plasma Diagnostics 2014, Atlanta U.S.A.

18. S.Kojima, Y.Arikawa, et al., “Accuracy evaluation of a Compton X-ray spectrometer with bremsstrahlung X-rays generated by a 6-MeV electron buncha” High Temperature Plasma Diagnostics 2014, Atlanta U.S.A.

19. Y.Arikawa, et al “Fast electron generation for fast ignition experiment on LFEX” EPS conference of Plasma Diagnostics,2015, Frascati, Italy

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
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

有川 安信 (ARIKAWA, Yasunobu)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・講師
研究者番号：90624255

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：