

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24561028

研究課題名(和文)中性子バックライト手法を用いた慣性核融合爆縮コア計測の可能性の探求

研究課題名(英文) Possibility research of core areal density measurement in ICF by using neutron back light method

研究代表者

尾崎 哲 (Ozaki, Tetsuo)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：50183033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：慣性核融合爆縮コアの面密度計測を最終目標に中性子バックライト計測の可能性を探求することを目標とした。中性子源は高強度レーザーをターゲットに照射したとき発生する n 中性子である。研究開始当時、発生機構が不明であり本研究ではその発生機構の解明と中性子計測器、発生を駆動する高速電子の計測並びに挙動の解明に重点が置かれた。研究を通じて中性子が n 中性子であること、高速電子とターゲットとの相互作用により中性子の発生が大きく変わること、計算機シミュレーションを通じて挙動を解明したこと、 γ 線と中性子を弁別できる計測器を開発したこと、およびコア面密度に必要な厚みを実験的に明らかにしたことなどが主な成果である。

研究成果の概要(英文)：We aimed to explore the possibility of neutron backlight measurement with final density target of inertial fusion implosion core surface density measurement. A neutron source is a n neutron generated when a target is irradiated with a high intensity laser. At the time of the start of the study, the mechanism of occurrence was unknown, and in this research, emphasis was focused on elucidation of the mechanism of its occurrence and measurement of neutron measurement instruments, high-speed electrons that drive generation, and elucidation of behaviors. Through research, we have found that neutrons are n neutrons, that neutron generation greatly changes due to high-speed electron and target interaction, elucidation of behavior through computer simulation, development of measuring instruments capable of discriminating γ -rays and neutrons, And experimentally clarified the thickness necessary for the core surface density.

研究分野：プラズマ計測

 キーワード：コア面密度 レーザー n 中性子 高速電子 中性子弁別 電子分析器 中性s遮蔽 シミュレーション 高強度

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初の背景として、米国国立点火施設のNIFが点火を近々達成するという見通しがあった。NIFでは爆縮コアの密度は固体密度の1万倍にも達するためコア密度をX線その他の方法で測定することは困難と考えられた。一方1990年代に大強度レーザーが發明され様々な研究産業への応用が期待されてきた。研究を進めるうちにこれを用いて比較的容易に中性子は発生できることが分かった。この中性子を測定に用いることがアイデアとして浮上してきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、慣性核融合爆縮コアの面密度計測を目標に中性子バックライト計測の可能性を探索することである。これまで加熱用レーザーを用いて爆縮コアを追加加熱する高速点火核融合実験を共同研究として進めてきた。その過程で金をコートしたポリスチレンに強力な加熱用レーザーの照射することにより多量の中性子を観測した。中性子は当初の予想に反して軽水素ポリスチレンでも発生しておりそのメカニズムの解明が急がれる。この中性子は高速点火核融合実験ではノイズにしかならないが、爆縮コアの面密度計測という観点からは中性子バックライト計測の可能性を秘めており、さらに産業応用も期待できる。ここでは発生メカニズムの解明、発生最適化を重点に進めながら、爆縮コアの面密度計測への適用を最終的な目的とする。

3. 研究の方法

加熱用レーザーの1年間の利用回数は極めて限られているため、以下の実験に絞って行った。

金コートした軽水素のポリスチレンコーンに対して超高強度レーザーを入射する実験を行った。爆縮プラズマを用いない超高強度レーザー単体での実験で重水素を用いていないが多量の中性子を観測した。考えられる中性子源は金から発生するX線と金とのn反応中性子であった。しかしながら、このときのX線量は必ずしも多いとは言えず

不可解な現象である。中性子の測定は液体シンチレータ、銀放射化検出器など複数を用いており中性子の発生を疑うものではない。しかしながら発生機構が確定できないためより改良された中性子検出器を用いて再現実験を行った。

(2) 中性子が金(若しくはポリスチレン)以外のところから発生していないことを確認するために、ターゲット全体を中性子の遮蔽に対して十分厚いプラスチックで覆い、発生場所を特定した。中性子発生がどのようなメカニズムで起きるのかを解明することが次の課題である。このためには、金コーンの有無による違い、金コーンの厚みの違い、平板との比較、プラスチックの代わりにアルミなどを用いた場合の変化、重水素ポリスチレンを用いた場合の違いなどを比較した。

(3) 並行してシミュレーションを行い、発生する高速電子、X線の発生分布、X線とターゲットとの核反応について考察した。現在知られている高速イオン、電子の加速モデルと、関係する核反応から中性子数をシミュレーションでもとめ実験と比較した。

3年目あたりから安定的に加熱用レーザーの出力が最大化した。ターゲットに加熱用レーザーの出力を変化させて照射し中性子発生量との依存性を得ることができた。また、中性子エネルギースペクトルの最適化のためにレーザー強度との相関を取ることができた。得られた中性子スペクトルをもとに並行して計測のための中性子イメージング装置を製作した。ここでの中性子バックライトは中性子イメージングに加えて通常の飛行時間を用いてエネルギー分解すなわち時間分解を得るものである。従って中性子イメージ像の時間変化を取るのではなくエネルギー分解することによって極めて時間分解能のよい中性子イメージングが可能になる。このため最適な中性子減速材と中性子用イメージングプレートをスタック状に重ねた検出器を設計した。以上をもとにコアに該当する厚みの疑似的ターゲットを置き統合実験を行った。この計測を爆縮コアの標準的な計測として確立していく。

4. 研究成果

(1) 各種ターゲットによる中性子発生
LFEXレーザーをターゲットに照射して強力な中性子を発生させることができた。レーザーのエネルギーは1kJを越え、パワーは 10^{19} W/cm^2 を越える。用いたターゲットは、アルミ、金、銅の薄膜、金コーン、DLCコーン、金およびDLCコーンにポリスチレンのシェルを付加したものをを用いた。高速点火の実験と並行して行ったため、コーンシェルターゲットでは必要に応じて激光12号により爆縮を行った。

中性子の計測は、液体シンチレータ光電子増倍管のほかバブル検出器、マンダラ中性子検出器(図1)を用いた。また、高速電子とX線の計測のため電子分析器を設置した。発生のメカニズムは、重水素ターゲットを用いたときに起こるDD核反応中性子のほかにn中性子がある。これは激光12号レーザーによる高速電子がターゲット中で停止し強力なX線を発生し、そのX線が周辺の鉄などと

n反応を起こし中性子を発生するものである。しかしながら、実験を進めていくうちに、X線が明らかに少ないのにDD反応中性子ではなく中性子発生量の増加が観測された。この原因を精査したところ、高速電子に伴って加速された陽子や重陽子などがターゲットに衝突し核破砕を起こしている可能性が疑われた。これは過去の実験でポリスチレンなどの低Zターゲットで多量の中性子が観測されたり、重水素ターゲットを用いない場合でも中性子が観測された原因が理解できるようになった。

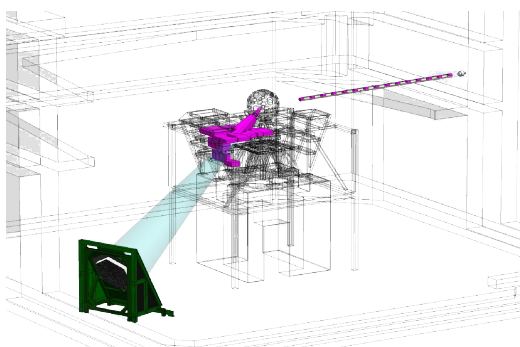


図1. マンダラ中性粒子検出器

(2) 中性子空間分布測定

LFEXレーザーをターゲットに照射して発生する中性子の空間分布の観測を行った(図2)。また発生の源である電子のスペクトル

の計測を並行して行った。この中性子を計測に用いる場合の最大の問題は同時に発生するX線である。今回イメージングプレートをチャンバーの各場所に張り付けてX線の空間分布を観測した。その結果、高Zの強度は金ターゲットでは前方方向に偏っているのに対して、ダイヤモンド様炭素ではX線の強度は弱く角度広がりを持つことがわかった。ただ中性子発生量はエネルギー依存性はあるもののX線量に対して正の相関を持つので、S/N比を勘案しながら最適のターゲットを模索していく必要がある。角度分布に関しては中性子は概ね全立体角に広がっているのでことを実験的に確認できており、LFEXの入射側に中性子検出器を配置することでX線ノイズを低減できイメージングが可能であることが明らかになった。ターゲットからの高速中性子をバブル検出器で測定し画像計測に耐えうる粒子数を観測できた。n中性子はターゲットからだけではなくチャンバーからも発生する。主な発生源はLFEX対向側の電子分析器である。強力なX線および高速電子がここに照射されて発生する新たなX線とのnにより中性子が発生すると考えられる。今後、この部分を低Z物質に交換してX線の発生ならびに中性子のターゲット部分に局在化させS/Nの改善を行う。高速中性子に対して高い感度があるがX線に対する感度がほとんどないバブル検出器の利用の検討も進めている。バブル検出器は試験管に封入されているため、画像が行いにくい。平板状のバブル検出器が可能かどうか検討している。また中性子用イメージングプレートも市販されているが、こちらは熱中性子用であるため高速中性子に適用するためには熱化する必要がある。これによる低下した空間分解能とバブル検出器の空間分解能を比較している。

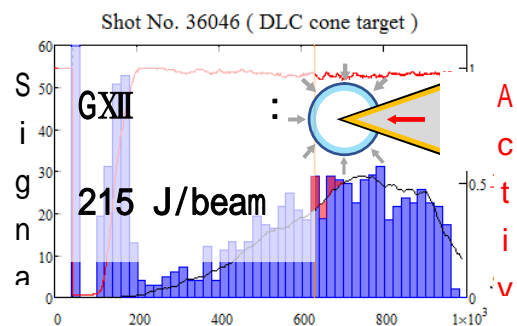


図2. n中性子

(3) 高速電子の挙動

これまでの実験ではレーザーのプレパルスが想定以上に大きくその結果、高速電子が高温化しガンマ線を多数放出した。その結果ガンマ中性子が多数発生し、この中性子を用いた実験が画策された。しかしながらこれは LFEX 本来の目的である高速点火には相応しくないためプレパルスの除去が積極的に図られた。その結果プレプラズマの発生が抑制され、高速電子の低速化に成功した。しかしながらこれは、n 中性子を発生する立場からは逆効果である。LFEX 全体の研究計画から大きくはずれた実験を行うのは難しいので、少し視点を変えて LFEX の性能が向上 (= プレパルスが小さい) した環境下で中性子バックライトを試みる方向に転換することを考える。このような高強度レーザーで中性子を多量に出す方法を電子エネルギー分析器の実験結果と計算機シミュレーションを比較することによって模索した(図3)。

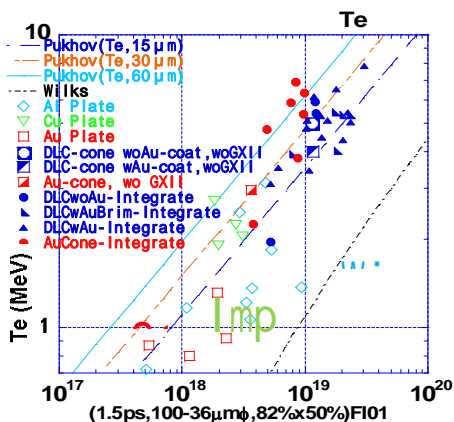


図3 .実効電子温度のレーザー強度依存性

電子エネルギー分析器を2台設置して電子のスペクトルを測定したところ極めて興味深い結果が得られた。実効電子温度つまり電子のエネルギーが低い程電子の空間広がりには平坦になるのである。これを平板ターゲットにおけるシミュレーションと比較する。発生した高速電子は表面付近で自己磁場によりターゲットに侵入できず周回していることが分かった。この傾向はエネルギーが低い程大きい。つまり電子電流が大きいので自己磁場が大きいためである。このことは実効電子温度を下げると通常のターゲットでは加熱しにくいことを示している。そこで、球殻の内面に照射することを試すことにした。

これなら表面を周回してもターゲットを十分加熱できるはずである。予備実験を激光XIIで行ったところ 10^7 の中性子が容易に観測できた。今後は LFEX にこれを適用して十分は中性子発生源として用いることができるかと期待される。

(4) 中性子検出器

2つの大きな進展があった。一つは有川等により開発製作された平面タイプ2次元シンチレータアレイを導入した。これを大阪大学産業科学研究所のLINACを用いて加速された電子をターゲットに照射することにより発生するガンマ中性子を利用して2次元の中性子画像のテスト撮影に成功したことである。この実験では真空ポンプを被写体にしたところ、予測通り中性子の遮蔽効果の大きい低Z部分でくっきりした画像を観測することができた。もう一つは、安倍及び尾崎により LFEX レーザーのターゲット照射により発生するガンマ中性子を用いた実験である。被写体画像を2次元シンチレータアレイ「マンダラ」でとらえることができた。この実験において n 中性子の発生場所が当初考えられていたターゲットチャンバーよりもターゲット自身から発生していることが明らかになった。また、ポリエチレンの遮蔽体の厚みを変えて実際の中性子がどの程度の厚みで目的に合うかを実験した。現在得られた結果を解析中である。この実験では同時に小型化を目指した平面型の2次元中性子検出器(図4)も用いたがこれはうまくいかず今後の進展が期待される。

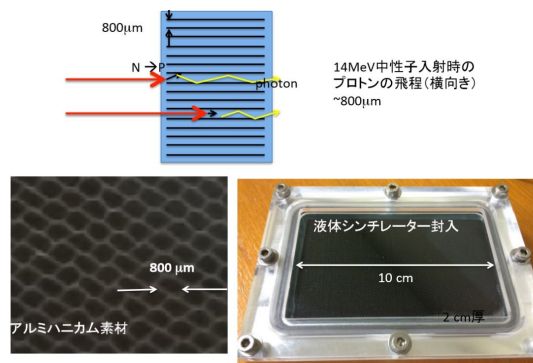


図4 . 2次元中性子検出器

いずれの検出器でも巨大なX線を飛行時間法を用い時間的に弁別して中性子画像を得

ることができた。以上の結果はターゲットの面密度測定の可能性について指針を与えるものである。

(5) 中性子の発生機構に関わる高速電子の挙動

第一は LFEX でこれまで行われた実験の解析を行い、中性子発生の起源である高速電子の挙動でワイベル不安定性が大きな役割を示すことを全く異なる2つの実験結果から類推できたことである。高強度レーザーを平板ターゲットに照射したときの高速電子の実効電子温度や発散角が材質によって変化するが、これをウォームデンスマター領域での電気伝導に依存すると考えると説明がつく。(ウォームデンスマター領域での電気伝導は核融合科学研究所の一般共同研究として長岡技術大学の佐々木氏等が行っている研究成果である。)高速電子電流に違いが生じワイベル不安定性に変化をもたらすそれが発散角の違いとして観測されるというものである。例えば、ダイヤモンド様炭素と金では常温では前者に比して後者は電気伝導が大きいウォームデンスマター領域では逆転する。つまり金ではレーザー照射強度が弱い時は電子電流が比較的大きいが、強くなると小さくなる。従って、強くなるとワイベル不安定性が相対的に生じにくくなることを意味する。つまりこのことは発散角を小さくし実効電子を大きくすることを意味する、これは計算機シミュレーション(図5)でも傍証が得られている。

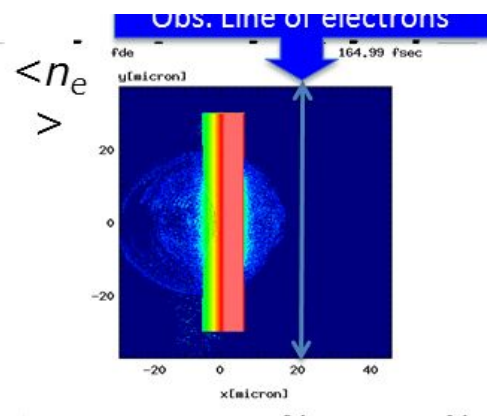


図5 . PIC シミュレーション

第2はLHDに設置している中性粒子分析器の中性子遮蔽の設計を行った。この遮蔽プログラムにより中性子の遮蔽体での減衰が理解でき、本研究に応用できることが分かった

ことである。これによれば建物構造の影響が無視できず LFEX で実験する場合も注意が必要であることが分かった。

(6) 爆縮コアの面密度を測定するまでには至らなかったが、一連の研究を通じて高強度レーザー照射時の中性子の発生機構とこれに深く関係する高速電子の挙動を解明することができた。

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15件)

“Large aperture fast neutron imaging detector with 10-ns time resolution”, Y. Arikawa, Y., Matsubara, S., Abe et al, Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, 10328,103280T (2017).

“Hot electron spectra on advanced targets in FIREX”, T. Ozaki, Y. Arikawa, S. Fujioka, et al.

Journal of Physics: Conference Series vol.688 012083 March (2016).

“Ultrahigh-contrast kilojoule-class petawatt LFEX laser using a plasma mirror”, Arikawa, Y., Y., Kojima, S., Morace, A., et al. Applied Optics 55(25), pp. 6850-6857 (2016).

“The diagnostics of the energy coupling efficiency in the Fast Ignition integrated experiment”, Arikawa Y., Fujioka, S., Morace, A., et al. Journal of Physics: Conference Series 688(1),012004(2016).

“Electron transport estimated from electron spectra using electron spectrometer in LFEX laser target experiments”, T. Ozaki, M. Hata, K. Matsuo, S. Kojima Y. Arikawa et al., Journal of Physics: Conference Series vol.717 012043 May 2016.

“Direct heating of a laser-imploded core by ultraintense laser-driven ions”, Kitagawa, Y., Mori, Y., Komeda, O., Ozaki, T., Noda, A. et al Physical Review Letters 114 (19), 195002(2015)

“High-intensity neutron generation via laser-driven photonuclear reaction”, Arikawa Y., Y., Utsugi, M., Morace, A., et al, Plasma and Fusion Research 10(SpecialIssue.1),2404003 (2015).

“Development of multichannel low-energy neutron spectrometer“, Y. Arikawa, Nagai, T., Abe, et al. Review of Scientific Instruments 85(11),18C513 (2014).

“An Electron/Ion Spectrometer with the Ability of Low Energy Electron Measurement for Fast Ignition Experiment“, T. Ozaki, S. Kojima, Y. Arikawa, et al., Review of Scientific Instruments vol.85 11E113 November (2014).

“Hot electron spectra in hole-cone shell targets and a new proposal of the target for fast ignition in laser fusion“, T. Ozaki, A. Sunahara, H. Shiraga, Y. Arikawa, et al. Physica Scripta, vol.2014 014025 May (2014.)

“Hot Electron Spectra in Plain, Cone and Integrated Targets for FIREX-I using Electron Spectrometer“, T. OZAKI, H. SHIRAGA, Y. ARIKAWA, et al., Plasma and Fusion Research vol.8 2404125-1-2404125-4 (2013).

“Multichannel down-scattered neutron detector for areal density measurement“, Y. Arikawa, Y., Hosoda, H., Nagai, et al. EPJ Web of Conferences 59,13011(2013).

“Perpendicular and tangential angularly resolved multi-sight neutral particle analyzer system in LHD“, T. Ozaki, E. Veshchev, T. Ido, et al., Review of Scientific Instruments, vol.83 10D920-1-10D920-3 (2012).

“Improved Pellet Charge Exchange Measurements in Large Helical Device“, T. Ozaki, N. Tamura, T. Seki, et al.

Plasma and Fusion Research vol.7 2402138-1-2402138-4 (2012).

“The photonuclear neutron and gamma-ray backgrounds in the fast ignition experiment“, Arikawa Y., Nagai, T., Hosoda, H., et al. Review of Scientific Instruments 83(10),10D909(2012).

[学会発表](計11件)

「高速点火核融合加熱実験における中性粒子計測」, 有川安信, 尾崎哲他 2017.3.17 物理春 大阪・豊中 阪大

「LHD 重水素実験に向けたコンパクト中性粒子分析器の遮蔽」尾崎哲他 33th プラズマ・核融合学会 年会 (2016.11.28) 宮城・仙台 東北大

「FIREX に於ける高速電子計測から予想される高速電子の挙動」尾崎哲, 有川安信他 11th 核融合エネルギー連合講

演会 (2016.7.14) 福岡・伊都 九大

「Hot Electron Behavior in Targets Observed by the Electron Spectral Meter on FIREX」, Tetsuo OZAKI, et al., Fast Ignition Workshop6 (2016.5.18), Yokohama (Japan)

「高速点火核融合における縦磁場印加時の高速電子の挙動(2)」, 尾崎哲, 有川安信他 プラズマ・核融合学会 年会 (2015.11.24) 愛知・名古屋 名大

「コーン内面プレプラズマが高速電子発生に与える影響」, 有川安信, 尾崎哲他 プラズマ核融合学会 2015.11.24 愛知・名古屋 名大

「爆縮プラズマが高速電子発生に与える影響」, 有川安信, 尾崎哲他, 2015.9.16 物理学会秋 大阪・吹田 関大

「Hot electron spectra on advanced targets in FIREX」, T. Ozaki, Y. Arikawa et al., Inertial Fusion Sciences and Applications (2015.9.22) Seattle (USA).

「Electron and Ion Spectra on Integrated Targets in FIREX」, T. Ozaki, Y. Arikawa, et al., Plasma Conference (2014.11.19) Niigata (Japan)

「Hot electron spectra measured by the electron spectrometer in various laser irradiated targets」, 尾崎哲他 Fast Ignition Workshop (2014.9.16) Oxford (UK)

「Hot electron spectra on advanced targets in FIREX」, T. Ozaki, Y. Arikawa, et al., Inertial Fusion Sciences and Applications (2013.9.10) Nara (Japan)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎哲 (OZAKI Tetsuo)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部
・准教授

研究者番号：50183033

(2) 研究分担者

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

(3) 研究協力者

坂田匠平 (SAKATA Shohei)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究
センター・研究員