

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686103

研究課題名(和文) 高速点火核融合実験のための中性子画像計測器の開発

研究課題名(英文) Development of neutron imaging detector for fast ignition 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・講師

研究者番号：90624255

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,500,000円

研究成果の概要(和文)：高速点火レーザー核融合実験において、燃料のどの部分が核融合を起こしているかを画像計測するための計測器を開発し、一定の成果を得た。中性子の画像計測には計測器の開発以外に、中性子発生数を上げるためのトリチウム含有ターゲットの開発も必要になる。ターゲット開発に関しては、トリチウムドーピング技術の開発が進んだが未だ目標濃度までは実現しておらず、従って十分な中性子発生数を得られていない。中性子画像計測器に関しては、試作機が完成し、加速器を用いて中性子の代わりにX線を発生させる画像が観測できる事を確認した。中性子結像用のペナブラ型コリメータも2種類開発しX線画像が鮮明に結像できる事が示された。

研究成果の概要(英文)：The authors have a great progresses in developing a neutron imaging detector for fast ignition experiment. The tritium-doped target is also necessary for this diagnostics to increase the number of neutron generated in the experiment. We progressed in processing tritium doping to the plastic target. So far, the density of tritium is not enough, thus we cannot generate neutron yield as required for detecting neutron image. The imaging system was completed and tested by using X-ray (alternative to the neutron) generated by electron linear accelerator. The clear x-ray image was observed so that we confirmed neutron imaging system was completed. Neutron imaging collimator is also developed and tested by using X-ray generated in the fast ignition experiment. The clear image was observed thus reconfirmed neutron collimator was well worked.

研究分野：レーザー核融合

キーワード：中性子画像 トリチウム

1. 研究開始当初の背景

高速点火核融合実験が本格的に開始され、核融合燃料の温度や、その温度分布の計測手法の開発が求められていた。特に中性子の画像計測はその目的に最も強力な手法であるとして開発が望まれて来た。しかしながら、中性子を画像として捉えるには、まず現状の重水素のみの核融合実験では中性子発生数が100倍程度足りなかった。そのために三重水素含有ターゲットを開発し、重水素-三重水素核融合反応を起こして中性子発生数を100倍まで上げる必要があった。三重水素は放射性物質であるため、出来るだけ少量を使用して、かつ十分な量をターゲット材に含有させる技術開発が必要であった。三重水素のドーピング技術については、過去に先行研究実績があり応用を考えた。中性子画像計測には、中性子結像用コリメーター(ペナンプラ型コリメーター)と中性子画像計測器の開発が必要である。また計測データが取得した後に、コンピュータで画像処理をする必要がある。従って、本プロジェクトは、①. 三重水素ターゲットの開発、②. 中性子用コリメーターおよび中性子画像計測器の開発、③. 画像処理技術の開発が必要となる。

2. 研究の目的

本研究プロジェクトでは、高速点火レーザー核融合実験における中性子画像計測技術を確立し、核融合燃焼領域の画像診断を行なう事で、核融合開発に不可欠な情報を取得し、核融合研究に貢献する事である。開発は①. 三重水素ターゲットの開発、②. 中性子用コリメーターおよび中性子画像計測器の開発、③. 画像処理技術の開発に分類される。

3. 研究の方法

①. 三重水素ターゲットの開発、
重水素含有プラスチックに三重水素をドーピングする技術を開発する。三重水素ガス中に重水素プラスチック製ターゲットカプセルを設置し、外から紫外線を照射する事で重水素と三重水素の置換反応を起こす。三重水素の置換率10%程度を目標とする。過去の研究成果で、水銀ランプによる置換反応実験があり、10%以上の置換が実現されていたが、紫外線の波長の最適化が行われていなかったために、カプセルの外側ばかりに三重水素がドーピングされており、不完全な物であった。本研究では、波長を選択したLEDまたはレーザー

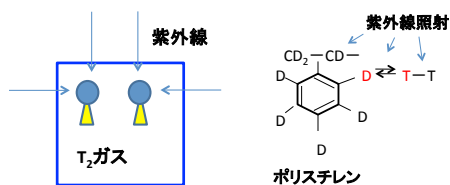


図1 三重水素ターゲットへの三重水素のドーピング技術の原理

を用いて、カプセルに均一に三重水素をドーピングする技術を開発する。その為に、三重水素-重水素置換反応の紫外線波長依存性についての研究を行う。

②. 中性子用コリメーターおよび中性子画像計測器の開発、

中性子輸送を計算するモンテカルロシミュレーションコード PHITS などを使用し、中性子結像に最適な構造を決定し製作する。中性子画像計測器に関しては中性子を光に変えるシンチレーターアレーと、イメージインテンシファイア CCD カメラからなる装置を開発する。

③. 画像処理技術の開発

中性子ペナンプラコリメーターで結像すると、にじんだ画像が得られるが、これを画像処理によって元の画像に戻す必要がある。デコンボリューション演算によって行なわれるのが従来の方法であるが、得られた画像データにノイズが多いと、うまく再構成できないという問題があった。高速点火ではノイズが多い特徴があるため、新たにヒューリスティック法を取り入れた画像処理方法を開発する。

4. 研究成果

①. 三重水素ターゲットの開発

LED 光源によって重水素カプセルに三重水素をドーピングする事に成功した。LED の光量が足りず目標までのドーピング量には至らなかった。次に、三重水素置換率と紫外光の波長依存性の関係を調べた。従来の予測では、ポリスチレンの結合エネルギーに依存する置換効率のピークが観測されると考えられていたが、大きなピークは観測されなかった。図2にその結果を示すグラフを示す。

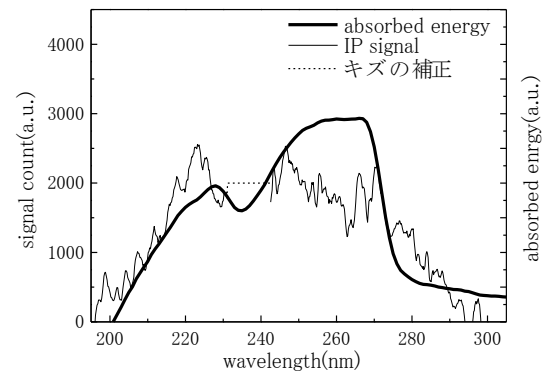


図2 三重水素のドーピング量と紫外線波長の依存性

これは予想外の結果ではあったが、ポリスチレンにとって透過率の高い比較的長波長でも三重水素ドーピングできる事が示され、研究を促進する結果となった。またより強力な光源として紫外レーザー光を用いて三重水素添加実験を行なった。図3に示す様に、レーザー照射位置に強い三重水素が観測され、従って紫外レーザー光源による三重水素ドーピング出来る事を証明した。しかしながらレーザー

一光を当てすぎるとターゲットが溶けるなどという問題も明らかになり、未だ目標の三重水素置換率を達成できていない。今後はレーザー照射条件を変えながらターゲットを損傷させずに三重水素をドーピングする条件の最適化を目指す。

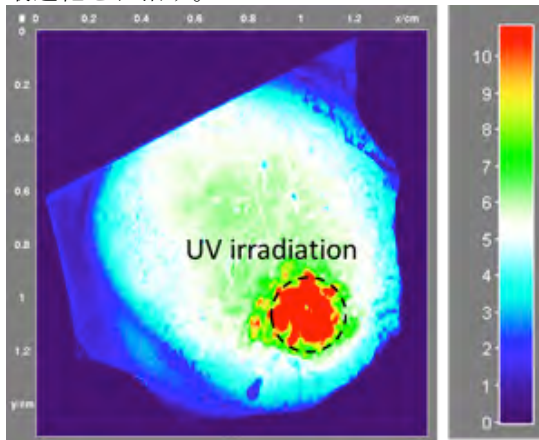


図3 平板ポリスチレンに三重水素をドーピングしたときの三重水素の濃度分布。点線で囲んだ部分に紫外レーザーが照射された。

この課題に関して博士後期過程学生岩佐氏が日本学術振興会 DC 1 に採択された。また岩佐氏による修士論文、岩佐氏が筆頭著者で申請者有川と共著で国内学会 4 件、国際学会 2 件で成果発表、学術論文に 1 件投稿され、査読段階に至って居る。

② 中性子用コリメーターおよび中性子画像計測器の開発

中性子結像用のコリメーターは試作機を製作し、高速点火核融合実験で試験を行った。

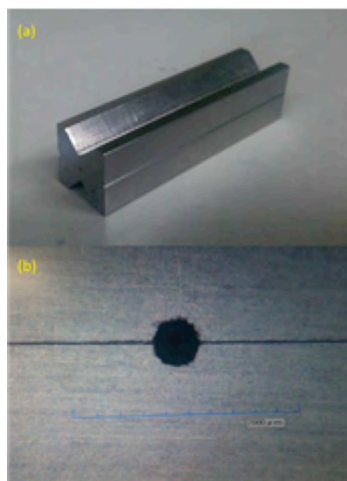


図4 試作ペナブラ中性子コリメーター

中性子発生数の代わりに高エネルギーX線での試験を行った。X線の結像性能は $10\mu\text{m}$ を達成した目標を達成した。今後は中性子での性能評価を行う。

本研究課題に関連して、修士学生井上氏の修士論文によって成果が報告された。

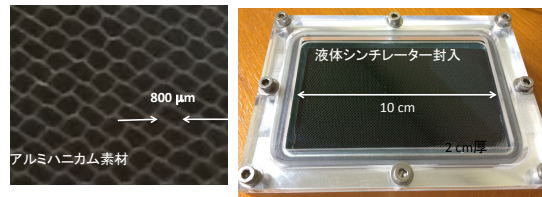
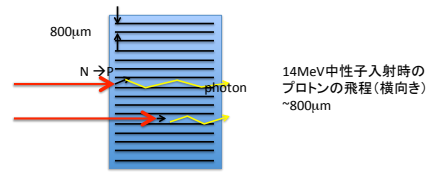


図5 開発したシンチレーターアレイ

中性子検出効率を上げるために分厚く、分解能を上げるためにファイバー構造をした新シンチレーターアレイが必要になる。図5のように、液体シンチレーターを微細構造アルミハニカム材とともに封入したシンチレーターアレイを製作した。このシンチレーターアレイを用いて、X線の画像撮影実験を行なった。実験は大阪大学産業科学研究の電子直線加速器を使用し、電子ビームを鉛板に当てて、高エネルギーX線を発生させた。鉄製10cm厚の光学マグネットベースをシンチレーターの前に置くと、マグネットベースのX線によるシャドウグラフ撮影画像が観測された。今後中性子での撮影実験にすすむ。

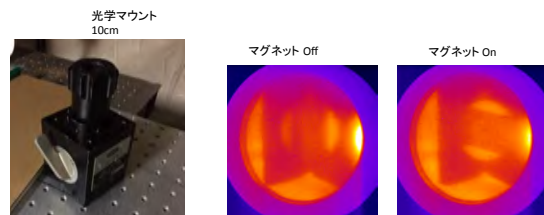


図6 数 MeV X 線によるシンチレーターアレイの画像撮影試験。10cm サイズの光学マグネットベースを透過して来た X 線を画像に変換して撮影できている事を示す。

③ 画像処理技術の開発

結像された中性子画像は半影画像であり、この画像をコンピューター処理によって再生する技術の開発が必要である。予め実験および計算で求めておいた、ペナブラコリメーターの点拡がり関数(ポイントスプレッドファンクション、PSF)を、対象と反影画像からデコンボリューション演算するというのが基本原理である。従来のデコンボリューションを主アルゴリズムとする手法では、ノイズが多い画像からの細かいパターンの再生が困難であった。そこで、ヒューリスティックと呼ばれる手法を導入した画像処理方法を開発した。図7に計算による従来のデコンボリューション法とヒューリスティック法の比較試験結果を示す。(a)テストパターン (b) テストパターンをペナブラピンホールで結像した際に得られる半影画像(計算)、(c) (b)をデコンボリューションで再構成した画像、(d) (b)をヒューリスティックで再構

成した画像、(e) (b)に実験環境を模したノイズを全体的に付加した半影画像、(f) (e)をデコンボリューションして再構成した画像、(g) (e)をヒューリスティック法で再構成した画像。この計算的試験によって、今回開発したヒューリスティック法による再構成法が、特にノイズの多い環境下に置いて、細かなパターンまで再構成できている事がわかる。

本研究課題に関して、修士学生井上氏が国際学会1件、国内学会2件に参加し、査読付き英文学術論文1本が出版された。

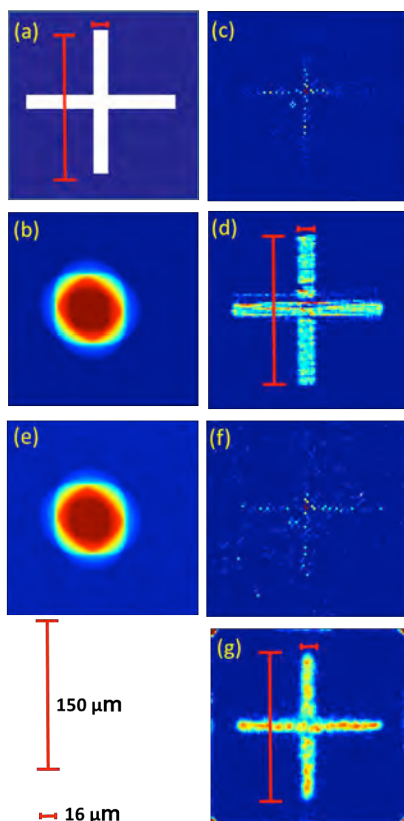


図7 (a)テストパターン (b) テストパターンをペナンプラピンホールで結晶した際に得られる半影画像 (計算)、(c) (b)をデコンボリューションで再構成した画像、(d) (b)をヒューリスティックで再構成した画像、(e) (b)に実験環境を模したノイズを全体的に付加した半影画像、(f) (e)をデコンボリューションして再構成した画像、(g) (e)をヒューリスティック法で再構成した画像。この計算的試験によって、今回開発したヒューリスティック法による再構成法が、優れている事がわかる。

成果全体のまとめと評価

上述のように、当初計画されていた課題に対して、要素技術の開発に関して大変多くの研究成果が出ており、技術開発に関してはほとんどが完成した。しかしながら三重水素ターゲットのみがまだ完成しておらず、したがっ

てレーザー核融合の中性子発生数がいまだ十分ではない。レーザー核融合における中性子画像計測はいまだ完了していない。後1年のうちにターゲットを完成させ、2年以内に中性子画像計測を実現させる計画である。

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 20 件)

Y. Abe, H. Hosoda, Y. Arikawa, T. Nagai, S. Kojima, S. Sakata, H. Inoue, Y. Iwasa, K. Iwano, K. Yamanoi, S. Fujioka, M. Nakai, N. Sarukura, H. Shiraga, T. Norimatsu, H. Azechi, (2014). Characterizing a fast-response, low-afterglow liquid scintillator for neutron time-of-flight diagnostics in fast ignition experiments). Review of Scientific Instruments, 85(11), 11E126-1~11E126-3. doi:10.1063/1.4896957

Y. ABE, H. HOSODA, Y. ARIKAWA, T. NAGAI, S. KOJIMA, S. SAKATA, H. INOUE, Y. IWASA, K. IWANO, GEKKO-XII & LFEX Team, S. FUJIOKA, H. SHIRAGA, M. NAKAI, T. NORIMATSU and H. AZECHI. (2014). Development of Multichannel Time-of-Flight Neutron Spectrometer for the Fast Ignition Experiment, Plasma and Fusion Research, 9, 4404110-1~4404110-3, (2014)

Y Arikawa, T Nagai, Y Abe, S Kojima, S Sakata, H Inoue, M Utsugi, Y Iwasa, T Murata, N Sarukura, M Nakai, H Shiraga, S Fujioka, H Azechi (2014). Development of multichannel low-energy neutron spectrometer. Review of Scientific Instruments, 85(11), 11E125-1~11E125-3. doi:10.1063/1.4895826

H. Inoue, Y. Arikawa, S. Nozaki, S. Fujioka, T. Nagai, S. Kojima, Y. Abe, S. Sakata, A. Kinjo, M. Nakai, Mitsuo (2014). The Neutron Imaging Diagnostics and Reconstructing Technique for Fast Ignition, Plasma and Fusion Research, 9, 4404108-1~4404108-3.

S. Kojima, Y. Arikawa, T. Ikenouchi, T. Nagai, Y. Abe, S. Sakata, H. Inoue, T. Namimoto, S. Fujioka, M. Nakai, H. Shiraga, Tetsuo Ozaki, M. Asakawa, R. Kato, H. Azechi (2014). Development of Compton X-ray spectrometer for fast ignition experiment. Plasma and Fusion Research, 9(SPECIALISSUE. 3), 4405109-1~4405109. doi:10.1585/pfr.9.4405109

T. Nagai, M. Nakai, Y. Arikawa, Y. Abe,

S. Kojima, S. Sakata, H. Inoue, S. Fujioka, H. Shiraga, N. Sarukura, T. Norimatsu, H. Azechi. The Development of the Neutron Detector for the Fast Ignition Experiment by using LFEX and Gekko XII Facility, Plasma and Fusion Research: 9, 4404105-1~4404105-4. (2014)

S. Kojima, Y. Arikawa, Y. Nishimura, H. Togawa, Z. Zhang, T. Ikenouchi, T. Ozaki, A. Morace, T. Nagai, Y. Abe, S. Sakata, H. Inoue, M. Nakai, H. Nishimura, H. Shiraga R. Kato, S. Miyamoto, M. Yamaguchi, A. Takemoto, S. Fujioka, and H. Azechi (2014). Accuracy of Compton X-ray Spectrometer Evaluated with Bremsstrahlung X Rays Generated by 6 MeV electron bunch. Review of Scientific Instruments, . 85, 11D634-1~11D634-3(2014), doi:10.1063/1.4894447

S. Sakata, Y. Arikawa, S. Kojima, T. Ikenouchi, T. Nagai, Y. Abe, H. Inoue, A. Morace, M. Utsugi, R. Kato, H. Nishimura, M. Nakai, H. Shiraga, S. Fujioka, H. Azechi (2014). Photonuclear reaction based high-energy x-ray spectrometer to cover from 2 MeV to 20 MeV. Review of Scientific Instruments, 85(11), 11D629-1~11D6293. doi:10.1063/1.4893943

Y. Arikawa, M. Utsugi, M. Alessio, T. Nagai, Y. Abe, S. Kojima, S. Sakata, H. Inoue, S. Fujioka, Z. Zhang, H. Chen, J. Park, J. Williams, T. Morita, Y. Sakawa, Y. Nakata, J. Kawanaka, T. Jitsuno, N. Sarukura, N. Miyanaga, M. Nakai, H. Shiraga, H. Nishimura, H. Azechi (2015). High-Intensity Neutron Generation via Laser-Driven Photonuclear, Plasma and Fusion Research, 10, 2404003-1~2404003-3, 学会誌

中井光男 有川安信 宇津木卓 西村博明
宮永憲明 疇地宏 Hui Chen
「高強度レーザーを用いた光核反応中性子発生」、レーザー研究 43, 2, pp 98-102、2015

有川安信 長井隆浩 安部勇輝 宇津木卓
山ノ井航平 清水俊彦 猿倉信彦 西村博明
中井光男 疇地宏、「超高強度レーザーを用いたレーザー核融合中性子計測技術」、レーザー研究 43, 2, pp103-107, 2015

中井光男 有川安信 古賀麻由子 安部勇輝 長井隆浩 前川修 藤岡慎介 白神宏之 疇地宏「高速点火実験における高ノイズ過酷環境下での X 線並びに中性子計測」、Journal of Plasma Fusion Research, 90, 11, 659-664, (2014)

有川安信 Zhe Zhang 池之内孝仁 小島完興 坂田匠平 尾崎哲 藤岡慎介 西村博明「高速点火実験における硬 X 線絶対分光と電子計測」、Journal of Plasma Fusion Research, 90, 11, pp 665-671, 2014

Y. Arikawa, H. Hosoda, T. Nagai, K. Watanabe, K. Yamanoi, M. Cadatal-Raduban, T. Shimizu, N. Sarukura, M. Nakai, T. Norimatsu, H. Azechi, N. Izumi, T. Murata, T. Suyama, A. Yoshikawa, K. Kamada, Y. Usuki, N. Satoh, H. Kan, “Multichannel down-scattered neutron detector for areal density measurement”, European Physical Journal: Web of Conferences, 59, 13011, (2013)

Hui Chen, M. Nakai, Y. Sentoku, Y. Arikawa, H. Azechi, S. Fujioka, C. Keane, S. Kojima, W. Goldstein, B. R. Maddox, N. Miyanaga (大阪大学教授), T. Morita, T. Nagai, H. Nishimura, T. Ozaki, J. Park, Y. Sakawa, H. Takabe, G. Williams, Z. Zhang, “New insights into the laser produced electron-positron pairs”, NEW JOURNAL OF PHYSICS, Vol. 15 pp. 065010, (2013)

M. Tsuboi, K. Takeda, T. Nakazato, M. Kono, K. Yamanoi, M. Cadatal-Raduban, K. Sakai, R. Nishi, Y. Minami, M. V. Luong, Y. Arikawa, T. Shimizu, N. Sarukura, T. Norimatsu, M. Nakai, H. Azechi, T. Murata, S. Fujino, H. Yoshida, A. Yoshikawa, N. Sato, H. Kan, K. Kamata ” Electronic States of Trivalent Praseodymium Ion Doped in 20Al(PO₃)₃-80LiF Glass”, JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vol. 52, No. 6, pp. 062402, JUN (2013)

S. Fujioka, Z. Zhang, N. Yamamoto, S. Ohira, Y. Fujii, K. Ishihara, T. Johzaki, A. Sunahara, Y. Arikawa, K. Shigemori, Y. Hironaka, Y. Sakawa, Y. Nakata, J. Kawanaka, H. Nagatomo, H. Shiraga, N. Miyanaga, T. Norimatsu, H. Nishimura, and H. Azechi, “High-energy-density plasmas generation on GEKKO-LFEX laser facility for fast-ignition laser fusion studies and laboratory astrophysics”, PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED FUSION Vol. 54, No. 12 pp. 124042, DEC (2012)

Y. Arikawa, T. Nagai, H. Hosoda, Y. Abe, S. Kojima, S. Fujioka, N. Sarukura, M. Nakai, H. Shiraga, T. Ozaki, and H. Azechi, “The photonuclear neutron and gamma-ray backgrounds in the fast ignition experiment”, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS Vol. 83, No. 10, pp.

10D909, OCT 2012

T. Murata, Y. Arikawa, K. Watanabe, K. Yamanoi, M. C. Raduban, T. Nagai, M. Kouno, K. Sakai, T. Nakazato, T. Shimizu, N. Sarukura, M. Nakai, T. Norimatsu, H. Nishimura, H. Azechi, A. Yoshikawa, S. Fujino, H. Yoshida, N. Izumi, N. Sato, H. Kan, "Fast-Response and Low-Afterglow Cerium-Doped Lithium 6 Fluoro-Oxide Glass Scintillator for Laser Fusion-Originated Down-Scattered Neutron Detection", IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE Vol. 59, No. 5, pp. 2256-2259, OCT (2012)

H. Shiraga, S. Fujioka, M. Nakai, Y. Arikawa, "Integrated experiments of fast ignition targets by Gekko-XII and LFX lasers", HIGH ENERGY DENSITY PHYSICS Vol. 8, No. 3, pp. 227-230, SEP (2012)

〔学会発表〕（計 49件）

〔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 0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
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
(大阪大学レーザーエネルギー学研究センター)

研究者番号：90624255