

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360413

研究課題名(和文)新素材シンチレーターを用いた散乱中性子計測器の開発

研究課題名(英文)The development of down scattered neutron detector by using new material scintillator

研究代表者

畦地 宏 (Azechi, Hiroshi)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号：90135666

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円、(間接経費) 4,170,000円

研究成果の概要(和文)：慣性核融合実験で発生する核融合中性子が高密度燃料内で弾性散乱を受けて、エネルギー減速した散乱中性子を計測する事が目的であった。散乱中性子の計測は非常に困難であり、以下のような条件をクリアしなければ成らなかった。散乱中性子は数が少ないために計測器には高感度が必要、散乱中性子はエネルギーが低いために低エネルギー中性子に高感度が必要、散乱中性子はそれにくらべて1000倍程度多い一次中性子のピークの直後に到来する為、強い一次中性子ピークと散乱中性子を分離できるだけの分解能が必要であった。3年の研究の結果、すべての要求を満たす装置が完成し、散乱中性子の検出に成功した。今後は核融合研究に用いられる。

研究成果の概要(英文)：The down scattered neutron (DSN) which is generated in the inertial confinement fusion (ICF) experiment, has been aimed to be measured. The DSN is generated by elastic collision between fusion neutron and fuel deuterium atom, thus the energy of the DSN is low. The detection of the DSN has been a challenging subject because, the amount of DSN is quite low thus the high sensitivity is required, the energy of DSN is low thus the high sensitivity for low energy neutron, the DSN will arrive at the detector after the primary neutron which amount is 1000 times higher than DSN thus very excellent time resolution is necessary. We have been developed the DSN detector in three years, and finally we succeeded to detect DSN. This detector will be utilized into the ICF experiment.

研究分野：総合工学

科研費の分科・細目：慣性核融合

キーワード：散乱中性子 シンチレーター

### 1. 研究開始当初の背景

本研究課題は2010年11月に申請された物である。当時、米国ローレンスリバモア研究所のNational Ignition Facility(NIF)において中心点火方式で点火燃焼の実証実験が開始された所であり、2012年10月第一を目標にプロジェクトが進められていた。一方、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心において従来装置である激光XIIレーザー装置および全4ビームのうち2ビームが完成したLFEXを用いた高速点火方式の原理実証実験計画(FIREXプロジェクト)が進められていた。どちらの手法に置いても燃料を高密度に圧縮する事が必要である。特に燃料の密度の径方向積算(燃料面密度、 $R$ と表記、単位は $g/cm^2$ )は、レーザー核融合の燃焼率を決定する重要な物理パラメータである。面密度が高い燃料コア内部からは中性子以外は外に出て来られないため、燃料面密度の計測は原理的に困難であり未だ決定的な手法は確立されていなかった。散乱中性子計測法は大阪大学で行なわれている実験クラスの燃料コア( $\rho R=0.1g/cm^2$ )から点火・燃焼クラスの燃料コア( $\rho R=1.5g/cm^2$ )までの燃料面密度が観測できる優れた手法として期待されていた。

散乱中性子とは核融合反応によって生成した中性子が、燃料中を飛行する間に燃料原子と弾性衝突しエネルギー減速を受けた中性子の事である。散乱中性子の生成確率は燃料面密度に比例するため、散乱中性子を計測する事で燃料面密度計測が可能となる。散乱中性子計測は当時、NIFも大阪大学も実現していなかった。更に、当時両研究所で行なわれていた重水素燃料のみの核融合(DD反応)では、散乱中性子のエネルギーが低く検出が困難であると言う問題も合った。一次中性子(非散乱の中性子)と散乱中性子は計測される時間差を利用して計測するしか無い。散乱中性子はエネルギーも低く、数が少なく、大量の一次中性子の後に観測するしかない為、その検出が大変困難であった。

### 2. 研究の目的

研究の目的は散乱中性子計測器を開発し、この計測手法を実現する事である。この計測によって燃料密度の高精度なモニタリングを可能にし、高密度爆縮の実現に貢献する事を目標とした。

### 3. 研究の方法

散乱中性子計測を実現する為には、高速で応答する、散乱中性子だけに感度の高いシンチレーター材料が必要であった。本課題申請の前に著者らはAPLF80+3Prという ${}^6Li$ ガラスシンチレーターを開発した。APLF80+3Prは従来型の同種のシンチレーターよりも我々の使用方法にとっては100倍応答速度が速く、この材料を用いて散乱中性子計測を実現させよう計画した。NIFの実験では $\rho R$ が高く、また中性子の数も多く、真空チャンバーの直

径が大きい為バックグラウンド中性子が少ない、という条件が楽である事から、APLF80+3Prを用いたシングルチャンネル中性子計測器を作れば散乱中性子が観測される。しかしながら、大阪大学の実験の場合、 $\rho R$ が低く、中性子発生数が少なく、真空チャンバーの大きさが小さい為、一次中性子が散乱して計測器にやってくる成分が深刻である、という悪条件であるため、計測器にはさらなる分解能向上策が必要であった。そこで多チャンネルシングルヒット方式という方式が考案された。APLF80+3Prを200チャンネル程度の多チャンネルに仕上げ、各々のチャンネルに一次中性子が1個程度しか検出されないようにし、数チャンネルに散乱中性子が検出されるような仕組みにする事で、一次中性子と散乱中性子の分離を測る。

本課題内で、NIF実験やそれに準じた環境での計測を想定したシングルチャンネル計測器と、大阪大学での実験を想定した多チャンネル計測器の2種を開発する事を目標とした。

### 4. 研究成果

シングルチャンネル計測器を設計製作した。残念ながらNIFの実験は国防研究に関連する事から、日本の計測器を持ち込む事はできず、論文発表、学会発表を通じた技術提供にとどまった。その後NIFでは液体性のシンチレーターを用いて散乱中性子の測定に成功し、現在では標準的な計測として、その計測結果が用いられるようになった。この計測器は大阪大学でも核融合以外の中性子発生実験では主力装置として用いられるようになった。

図1に装置の写真を掲載する。

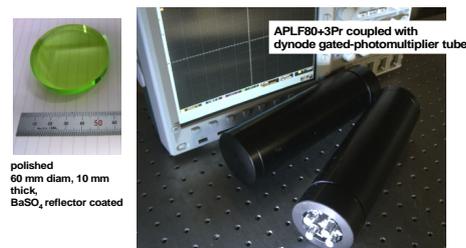


図1 左上 APLF80+3Pr シンチレーターと、右シングルチャンネル散乱中性子計測器

一方、多チャンネル計測装置は2013年によやく完成した。当初申請書に記載した手法では、時間分解能とシンチレーション光の検出効率が不足し、計測は出来ない事が明らかになったため、設計を変更した。2013年に10発の核融合実験での実地試験を行う事が出来た。うち、いくつかのショットでは散乱中性子が検出された。燃料 $\rho R$ を解析するには、検出数が不足したが、次回実験には実用化さ

れる見込みである。図2に完成した多チャンネル計測器の構造図と写真を掲載する。



図2 上段多チャンネル散乱中性子計測器の構造図、中段に検出器部の写真、下段に多チャンネル信号記録用アナログデジタルコンバーター列の写真

### 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 8件)

- [1] Y. Arikawa, T. Shimizu, N. Sarukura, H. Azechi, et al., "Multichannel down-scattered neutron detector for areal density measurement," European Physical Journal, Web of Conference, 59, 13011, (2013)
- [2] Y. Abe, M. Nakai, H. Azechi, et al., "Development of multichannel TOF neutron spectrometer for the Fast Ignition Experiment", Plasma and Fusion Research, 9, 掲載ページ未定, (2014)
- [3] M. Tsubota, Y. Arikawa, T. Shimizu, M. Nakai, N. Sarukura, H. Azechi, "Electronic states of trivalent praseodymium ion doped in 20 Al<sub>2</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>-80LiF glass", Japanese Journal of Applied Physics, 52, 6, 62402, (2013)

- [4] K. Yamanoi, Y. Arikawa, T. Shimizu, N. Sarukura, M. Nakai, H. Azechi, et al., "Luminescence properties of Nd<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup>-doped glasses in the VUV region" Optical Materials, 35, 11, 1962, (2013)
- [5] H. Inoue, Y. Arikawa, M. Nakai, H. Azechi, et al., "The neutron imaging diagnostics and reconstructing technique for Fast Ignition" Plasma Fusion Research, 9, 掲載ページ未定, (2014)
- [6] Y. Arikawa, M. Nakai, H. Azechi, et al., "The photonuclear neutron and gamma-ray backgrounds in the fast ignition" Review of Scientific Instruments, 83, 10D909, 2012,
- [7] K. Watanabe, Y. Arikawa, N. Sarukura, T. Shimizu, M. Nakai, H. Azechi, "Pr or Ce-doped, fast-response and low-afterglow cross-section-enhanced scintillator with Li-6 for down-scattered neutron originated from laser fusion" journal of Crystal Growth, 362, 288, (2013)
- [8] T. Murata, Y. Arikawa, T. Shimizu, N. Sarukura, M. Nakai, H. Azechi, "Fast-Response and Low-Afterglow Cerium-Doped Lithium 6 Fluoro-Oxide Glass Scintillator for Laser Fusion-Originated Down-Scattered Neutron Detection" IEEE Transaction of nuclear science, 59, 2256, (2012)

〔学会発表〕(計 34 件)

多数の為、主要なもののみ記載

- [1] H. Azechi, "Fast Ignition Realization Experiment (FIREX) for Inertial Fusion Energy" 8th Inertial confinement fusion science and applications (IFSA), (招待講演) 奈良県新公会堂、2013年9月8日
- [2] Y. Arikawa, N. Sarukura, M. Nakai, H. Azechi, "The advanced neutron diagnostics in the fast ignition experiment by using GEKKO XII", Laser and Accelerator Neutron Science and Applications, (LANSA '13)、パシフィコ横浜、2013年4月24日
- [3] 有川安信、猿倉信彦、中井光男、疇地宏、et al., 散乱中性子計測法による高密度爆縮実験、日本物理学会秋季大会、徳島大学、2013年9月26日
- [4] 有川安信、猿倉信彦、中井光男、疇地宏、et al., "新素材シンチレーターを用いたレーザー核融合中性子計測の最前線"、レーザー学会、(招待講演) 2013年1月30日、姫路

[5]H. Azechi, " Present Status of FIREX project and the way of iLIFT " Optics&Photonics International 2012/OPIC2012( 招待講演 ),パシフィコ横浜、2012年4月24日

[6]H. Azechi, "Present Status of Fast Ignition Realization Experiment (FIREX) and Inertial Fusion Energy Development" The 24th IAEA Fusion Energy Conference(IAEA FEC 2012), San Diego, 2012年10月8日

[7]Y. Arikawa, T. Shimizu, N. Sarukura, M. Nakai, H. Azechi, " Multi channel down-scattered neutron detector for areal density measurement ", 7th Inertial confinement fusion science and applications (IFSA), 2011年9月13日, フランス ボルドー、

( 招待講演 )

[ 図書 ] ( 計 0 件 )

[ 産業財産権 ]

出願状況 ( 計 1 件 )

名称 : 中性子検出用シンチレータ及び中性子測定装置

発明者 : 疇地宏、猿倉信彦、中井光男、有川安信

権利者 : 大阪大学

種類 :

番号 : 5 1 5 8 8 8 2

取得年月日 : 2 0 1 2 年 1 2 月 2 1 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 疇地宏 (レーザーエネルギー学研究センター センター長 教授)

研究者番号 : 9 0 1 3 5 6 6 6

(2)研究分担者 猿倉信彦 (レーザーエネルギー学研究センター 教授)

研究者番号 : 4 0 2 6 0 2 0 2

研究分担者 中井光男 (レーザーエネルギー学研究センター 教授)

研究者番号 : 7 0 2 0 1 6 6 3

研究分担者 清水俊彦 (レーザーエネルギー学研究センター 助教)

研究者番号 ; 8 0 4 1 5 1 8 2

研究者番号 :