

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03513

研究課題名（和文）トリトン燃焼測定のための14MeV中性子2次元イメージ検出器の開発

研究課題名（英文）Development of the 14-MeV neutron two-dimensional detector for triton burn-up study

研究代表者

西谷 健夫（Nishitani, Takeo）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・特任教授

研究者番号：30354608

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,500,000円

研究成果の概要（和文）：大型ヘリカル装置(LHD)で14MeV中性子を測定し、LHDの重水素実験における高速トリトンの閉じ込め研究を行うことを目的として、14MeV中性子の計測においてバックグラウンドとなる2.5 MeV中性子と線をその発光軌跡で弁別する新たな14MeV中性子検出器を開発した。キャピラリープレートに液体シンチレータを充填して検出器ヘッドとし、中性子による発光軌跡を電子増幅CCDカメラで撮影し、発光軌跡の形状と長さから粒子の種類、エネルギーを識別することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した中性子検出器は、入射粒子による発光軌跡の形状と長さから、入射粒子の種類とエネルギーを識別するという全く新しい検出器である。重水素を用いる核融合研究において新たな14MeV中性子の検出器として有望であるばかりでなく、その詳細な位置分解能を利用して、高速中性子を用いたラジオグラフィ用にも適用可能であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：New 14 MeV neutron detector using capillary plate with liquid scintillator has been developed aiming at the study of the energetic triton confinement on the deuterium plasma experiment of the Large Helical Device (LHD). The scintillating light trajectory is measured by an Electron-Multiplying CCD. We can identify the kind of the incident particle and the energy s by the trajectory length and the shape.

研究分野：プラズマ計測学

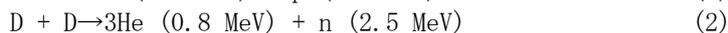
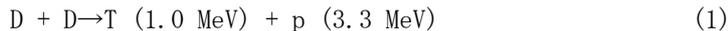
キーワード：キャピラリープレート 14MeV中性子 大型ヘリカル装置 液体シンチレータ 発光軌跡 電子増幅CCD
カメラ PHITSコード

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

重水素プラズマでは、



の反応がほぼ同じ確率で起きる。(1)の反応で生成する 1 MeV トリトンはプラズマ中で減速しつつ D と反応して 14 MeV 中性子を放出する。2.5 MeV 中性子は 1 MeV トリトンとほぼ同じ数だけ生成するので、14 MeV 中性子数と 2.5 MeV 中性子数の比は、1 MeV トリトンが減速中に DT 反応を起こす割合 (これをトリトン燃焼率と呼ぶ) を示している。これまでの JT-60U, JET 等のトカマク型装置での測定では、トリトン燃焼率は 1% 程度であった [1]。トリトン燃焼率を精度よく測定するためには、バックグラウンドとなる 2.5 MeV 中性子の 1/100 程度の 14 MeV 中性子を測定する必要がある。大型ヘリカル装置 (LHD) の DD 実験のシミュレーションでは、トリトン燃焼率は 0.1-0.5% オーダーと予測されている [2]。したがって LHD の 14 MeV 中性子の測定では、2.5 MeV 中性子と 14 MeV 中性子との弁別性能をさらに向上させた検出器が必要である。

2. 研究の目的

これまで核融合プラズマの中性子発生分布測定には液体シンチレータ、プラスチックシンチレータなどの有機シンチレータが使用されてきた。有機シンチレータは中性子ばかりでなく γ 線にも感度があり、かつ同じエネルギーでは γ 線の方がシンチレーションの光出力が大きい。LHD などの核融合装置周辺では、減速した中性子と真空容器などの構造材料との (n, γ) 反応により γ 線が多量に発生するため、重水素プラズマでトリトン燃焼により発生する 14 MeV 中性子を測定するためには、多くを占める 2.5 MeV 中性子を弁別するとともに、 γ 線も弁別する必要がある。これまで中性子と γ 線による発光波形のわずかな違いによって γ 線と中性子を弁別することが行われているが、弁別性能は十分とは言えない。中性子の場合、反跳陽子によって有機シンチレータが発光し、その軌跡は直線になるのに対し、 γ 線の場合、光電効果やコンプトン散乱による電子により発光するためその軌跡は曲がりくねった軌跡になる。この軌跡の形状の違いにより入射粒子を弁別する新たな中性子検出器を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

大阪大学レーザー科学研究所では、本研究課題の先行研究として、キャピラリープレート (ガラス細管の集合体) に液体シンチレータを充填したものを検出器ヘッドとした新たな中性子検出器 (以下キャピラリープレート検出器と呼ぶ) を開発している。本研究課題では、大阪大学レーザー科学研究所で開発を進めてきたキャピラリープレート検出器をベースに LHD 等の磁場核融合装置における 14 MeV 中性子計測に適する時間分解能を有したキャピラリープレート検出器の開発を進めた。

図 1 に開発するキャピラリープレート検出器の原理を示す。発光軌跡を精度良く測定するために、キャピラリープレートには液体シンチレータを充填している。キャピラリープレートのガラス壁はできるだけ薄いものを用いることによって、高速中性子によって散乱された反跳陽子が γ 線によって生成された電子はガラス壁を突き抜けて複数のキャピラリー中の液体シンチレータを発光させる。キャピラリーのガラスと液体シンチレータの屈折率の違いにより、シンチレーション光はキャピラリーのガラス壁で全反射して伝搬する。つまりキャピラリーと液体シンチレータは光ファイバーの働きをする。その発光軌跡の画像をリレーレンズを介して高感度 CCD カメラで測定する。

以下の開発の方法を示す。

1) 検出器開発

先行研究である大阪大学レーザー科学研究所で開発を進めてきたキャピラリープレート検出器をベースに、検出器ヘッドの設計、高感度 CCD カメラの選択等を行う。

2) 発光軌跡のシミュレーション

PHITS コードを用いて、14 MeV 中性子、2.5 MeV 中性子及び γ 線に対する検出器ヘッドの発光軌跡のシミュレーション計算を行う。

3) 検出器の試験

γ 線 (硬 X 線) や加速器等による中性子を用いてキャピラリープレート検出器の発光軌跡の測定を行う。

4) LHD への取り付けと LHD 重水素実験における実証

開発したキャピラリープレート検出器を LHD に取り付けて、LHD の重水素プラズマ実験において 14 MeV 中性子の測定を行う。

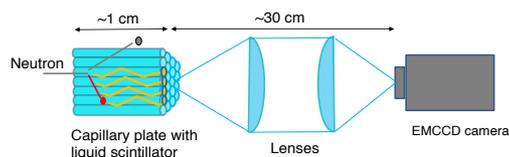


図 1 キャピラリープレート検出器の原理

4. 研究成果

4.1 検出器開発

実際に製作したキャピラリープレート検出器の写真を図2に示す。検出器ヘッドからEMCCDカメラまでの全長は約600 mmである。14 MeV中性子及び2.5 MeV中性子による反跳陽子の液体シンチレータ中での最大飛程はそれぞれ約2 mmと0.1 mmである。発光軌跡の十分な解像度を得るにはできるだけピッチが小さくかつキャピラリーのガラス壁が薄いキャピラリープレートが必要である。そこで本研究では、キャピラリーピッチ10 μm 、キャピラリーガラス壁厚約2 μm 、厚さ10 mm、直径25 mmのものを特注で製作した。シンチレーション光は、キャピラリー内を全反射して伝搬するが、ある程度減衰するためできるだけ発光量の多い液体シンチレータが必要である。表1に主な液体シンチレータの1 MeV電子に対する発光量を示す。ここでは一番発光量の多いEJ309を採用した。高感度CCDカメラには、イメージインテンシファイアを使用したICCDカメラとCCDの電荷輸送の段階で電荷を増幅するEMCCDカメラがある。典型的な量子効率(ICCDカメラが約10%、EMCCDカメラが約70%)である。本研究では、できるだけ量子効率が高いことが好ましいのでEMCCDカメラを採用した。採用したEMCCDカメラはANDOR社DU897U-CSO-EXFで、画素数は512 \times 512ピクセル、最大フレーム速度は56フレーム/sである。したがって時間分解能は17.8 msである。ただし、1フレームあたりの露光時間(シャッター速度)は10 μs まで絞ることができる。レンズは、市販のカメラ用レンズを使用した。拡大率は1であり、キャピラリープレート検出器ヘッドの発光軌跡は同じサイズでEMCCD面に結像する。

表1 主な液体シンチレータの1 MeV電子に対する発光率

液体シンチレータ	発光率
EJ309	532 photons
Ultima Gold F	435 photons
Ultima Gold	333 photons
TriMethylBenzene	129 photons
MethylNaphthalene	308 photons
PhenylNaphthalene	285 photons

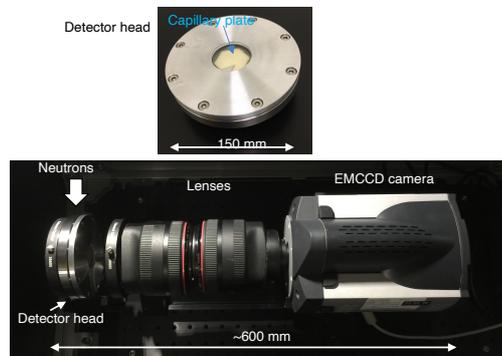


図2 製作したキャピラリープレート検出器

4.2 発光軌跡のミュレーション

14 MeV中性子、2.5 MeV中性子及び γ 線に対する検出器ヘッドでの発光軌跡のシミュレーションをPHITS(Particle and Heavy Ion Transport code System)コード[1]を用いて行った。PHITSコードは、中性子、荷電粒子、光子、重イオンなどほとんどの粒子の物質内での輸送や反応を計算することができる。図3に計算モデルを示す。検出器ヘッドは、キャピラリーピッチ10 μm 、キャピラリーガラス壁厚約2 μm のハニカム構造とし、外径は25 mm、厚さ10 mmとした。液体シンチレータEJ309の水素、酸素の素性比は4.34:5.3とした。またキャピラリーのガラスはSiO₂とした。中性子による反跳陽子の軌跡が明確になるように、中性子及び γ 線が、キャピラリーの軸に対して垂直方向から入射させた。陽子の液体シンチレータにおける単位吸収エネルギーあたりの発光効率(電子の1/2以下)であり、かつ吸収エネルギーに対して非直線性がある。しかしここでは、発光の絶対量ではなく、軌跡の長さや形状に着目しているため、液体シンチレータにおける発光が吸収エネルギーに比例するものとして発光軌跡を計算した。

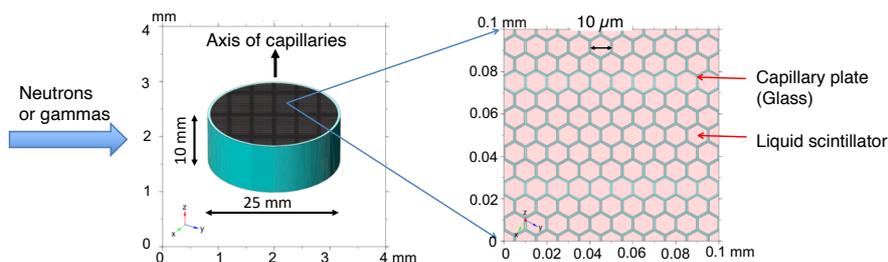


図3 キャピラリープレート検出器ヘッドにおける発光軌跡シミュレーションの計算モデル

図4に2.5 MeV中性子、14 MeV中性子及び2.2 MeV γ 線がキャピラリープレート検出器ヘッドに入射した場合の発光軌跡の計算結果を示す。開発したキャピラリープレート検出器はLHDの本体室地下に設置する予定であるが、本体室地下における γ 線のエネルギースペクトルを中性子モンテカルロ計算で評価したところ[4]、コンクリート中の水分として含まれる水素による中性子の捕獲反応 $H(n, \gamma)D$ で生成する2.2 MeV γ 線が主であったため2.2 MeV γ 線を計算対象とした。2.5 MeV中性子による反跳陽子の飛程は10-100 μm であり、それはEMCCDカメラの1-10ピクセルに対応する。また14 MeV中性子による反跳陽子の飛程は2 mmまたはそれ以下である。一方、2.2 MeV γ 線で生成される電子の飛程は2 mmよりはるかに長く、かつ複雑な曲線を描いていることがわかる。液体シンチレータEJ309における2.5 MeV陽子、14 MeV陽子及び2.2 MeV電子の理論的な飛程はそれぞれ0.1 mm、2.2 mm及び11.0 mmであり、PHITSの計算結果はこれと矛盾しない。また14 MeV中性子の感度は0.022 counts/(n/cm²)であることがわかった。

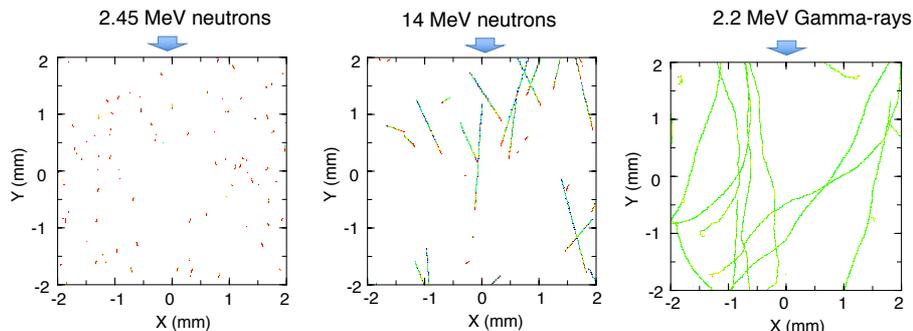


図4 PHITSコードによって計算した2.5 MeV中性子、14 MeV中性子及び2.2 MeV γ 線に対するキャピラリープレート検出器ヘッドにおける発光軌跡

4.3 検出器の試験

キャピラリープレート検出器の特性測定を、フォトンファクトリーにおいて行なった。キャピラリープレート検出器ヘッドの発光をEMCCDカメラと光電子増倍管で測定し、発光軌跡と発光全量の関係を測定した。EMCCDカメラで測定した発光軌跡の長さや光電子増倍管で測定した全発光量との関係を図5に示す。直線性は強くないが、発光軌跡の長さや全発光量には相関があることがわかる。また中性子に対する特性測定は大阪大学OKTAVIANで実施した。

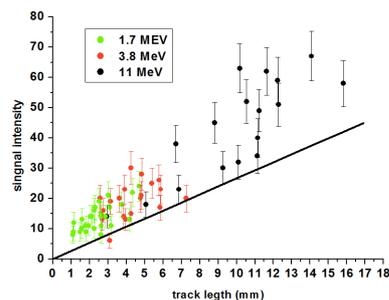


図5 EMCCDカメラと光電子増倍管で測定した発光軌跡と発光全量の関係

4.4 LHDへの取り付けとLHD重水素実験における実証

開発したキャピラリープレート検出器は2018年11月にLHDに取り付けた。できるだけバックグラウンドとなる γ 線が少ない場所としてLHD本体室の地下に取り付けることとした。LHDにおけるキャピラリープレート検出器の配置を図6に示す。検出器ヘッドが垂直中性子カメラ[5]の多チャンネルコリメータの空きチャンネルの延長上になる様に配置した。垂直中性子カメラの多チャンネルコリメータは1500 mm厚の重コンクリート(密度3.5 g/cm³)に50 mm径の貫通孔を並行に複数開けたものである。検出器は遮光のためアルミ製の箱の中に取り付けた。

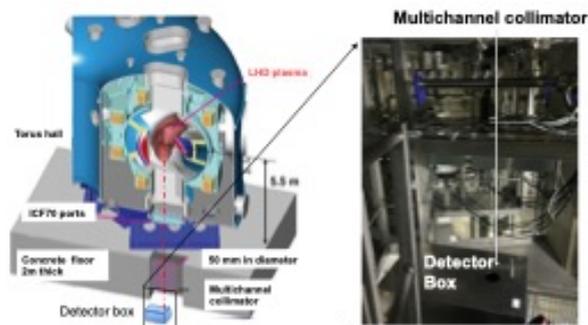


図6 LHDにおけるキャピラリープレート検出器の配置

LHDの典型的な中性子発生率 1×10^{15} n/cm²・sのときに、トリトン燃焼率が0.5%と仮定すると14 MeV中性子発生率は 0.5×10^{13} n/cm²・sである。モンテカルロコードMCNP6[6]で計算した検出器位置における14 MeV中性子フラックスは $\sim 10^2$ n/cm²・sである。PHITSコードで評価した14 MeV中性子感度から予想される計数率で数カウント/sであり、14 MeV中性子の時間変化を調べるには不十分であるが、キャピラリープレート検出器による14 MeV中性子の測定の実証に主眼をおいた。

図7に LHD の重水素プラズマ実験で得られたキャピラリープレート検出器の画像を示す (γ 線遮蔽なし)。EMCCD カメラでは、通常の CCD より大きな電場をかけて電荷を増幅しながら電荷を輸送する。 γ 線が直接 CCD にヒットし、大きな電荷を与えた場合に電荷を輸送する過程でアバランシェが生じ、電荷輸送の経路 (ここでは垂直方向) に白い筋となって現れる。そこで EMCCD カメラを 5 mm 厚のタングステン γ 線遮蔽シートを二重にしたもので覆った。その結果得られたキャピラリープレート検出器の画像を図8に示す。 γ 線によるものと思われる垂直方向の線はまだ見られるものの、垂直方法でない約 300 μm の直線状の軌跡を観測した。2.5 MeV 中性子による反跳陽子の最大飛程 100 μm よりはるかに長い。これだけでこの軌跡が 14 MeV 中性子によるものとは断定できないが、LHD の重水素プラズマ実験では 2.5 MeV 中性子よりエネルギーの高い中性子はトリトン燃焼による 14 MeV 中性子のみであるので、この軌跡は 14 MeV 中性子または 14 MeV 中性子が散乱により減速した中性子によるものと考えて良い[7]。

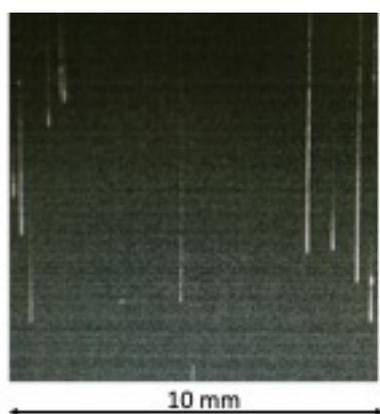


図7 LHD の重水素プラズマ実験で得られたキャピラリープレート検出器の画像 (γ 線遮蔽なし)

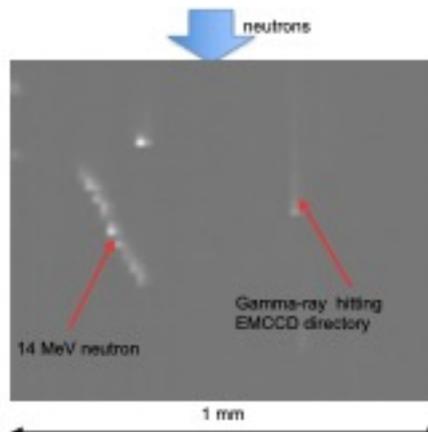


図8 LHD の重水素プラズマ実験で得られたキャピラリープレート検出器の画像 (γ 線遮蔽有り)

4.5 まとめと今後の展望

キャピラリープレートに液体シンチレータを充填したものを検出器ヘッドとした新たな中性子検出器を開発した。開発したキャピラリープレート中性子検出器を LHD に取り付け、重水素プラズマ実験において 14 MeV 中性子によると思われる発光軌跡を観測した。しかしまだ γ 線遮蔽は不十分であり今後さらに強化する必要がある。また据付位置における 14 MeV 中性子フラックスが小さく、時系列で 14 MeV 中性子の発生率を測定することは至らなかった。時系列で 14 MeV 中性子の発生率を測定するには検出器を LHD 本体室内に移設し、EMCCD カメラに対してさらに大きな γ 線及び中性子遮蔽を施す必要がある。発光軌跡の形状、長さを自動解析するプログラムの開発も今後必要となる。

<参考文献>

- [1] T. Nishitani et al., *Triton Burnup Measurements Using Scintillating Fiber Detector on JT-60U*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **38** (1996) 355.
- [2] K. Ogawa et al, *Time-resolved triton burnup measurement using the scintillating fiber detector in the Large Helical Device*, *Nucl. Fusion* **58** (2018) 034002.
- [3] T. Sato et al., *Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55** (2018) 684.
- [4] T. Nishitani et al., *Monte Carlo calculation of the neutron and gamma-ray distributions inside the LHD experimental building and shielding design for diagnostics*, *Progress in Nucl. Sci. and Technol.* **6** (2019) 48.
- [5] M. Isobe et al., *Fusion neutron production with deuterium neutral beam injection and enhancement of energetic-particle physics study in the Large Helical Device*, *Nucl. Fusion* **58** (2018) 082004.
- [6] D. B. Pelowitz (Ed.), *MCNP6 user's Manual*, LA-CP-13-00634, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos 2013.
- [7] T. Nishitani et al., *Development of capillary plate neutron detector filed with liquid scintillator by using recoiled-particle trajectory analyses*, *JINST* **14** (2019) C10026.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Takeo Nishitani, Hidetaka Kishimoto, Yasunobu Arikawa, Kunihiro Ogawa, Isao Murata
2. 発表標題 Development of 14 MeV neutron detector using capillary plate with liquid scintillator
3. 学会等名 34th Meeting of the ITPA Topical Group on Diagnostics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeo Nishitani, Hidetaka Kishimoto, Yasunobu Arikawa, Kunihiro Ogawa, Mitsutaka Isobe
2. 発表標題 Development of 14 MeV neutron detector using capillary plate with liquid scintillator
3. 学会等名 36th Meeting of the ITPA Topical Group on Diagnostics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸本秀隆、有川安信、安部勇輝、松原秋登、中島希、村田勲、宮本修治、西谷健夫、坂田匠平、Alessio MORACE、小島完興、李昇浩、松尾一輝、Law King Fai Farley、森田大樹、上林祥平、余語寛文、西村博明、中井光男、疇地宏、藤岡慎介
2. 発表標題 Development of the neutron counting detector
3. 学会等名 Plasma Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	有川 安信 (Arikawa Yasunobu) (90624255)	大阪大学・レーザー科学研究所・講師 (14401)	