

氏 名 Neng PU

学位(専攻分野) 博士(学術)

学位記番号 総研大甲第 2177 号

学位授与の日付 2020 年 9 月 28 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Measurement of 14 MeV neutron for triton burnup study on  
the Large Helical Device

論文審査委員 主 査 教授 長壁 正樹  
教授 磯部 光孝  
准教授 小川 国大  
准教授 田中 照也  
核融合科学研究所  
教授 高田 英治  
富山高等専門学校 電気制御システム工学科  
上席研究員 落合 謙太郎  
量子科学技術研究開発機構  
准教授 LIU Haifeng  
西南交通大学

(Form 3)

## Summary of Doctoral Thesis

Name in full Neng PU

Title

Measurement of 14 MeV neutron for triton burnup study on the Large Helical Device

The deuterium plasma experiments have been conducted since March 2017 on LHD. This is the first time D-D experiment in a large stellarator/heliotron in the world. Neutrons are the primary product of the D-D reaction and carry the most energy of the fusion reaction. To evaluate the accurate data of neutron yield, *in situ* calibrations was performed by using an intense  $^{252}\text{Cf}$  neutron source for NFM and NAS on the LHD before the D-D experiment. To simulate a ring-shaped neutron source, a railway was installed inside the LHD vacuum vessel, where a train loaded with the  $^{252}\text{Cf}$  source run along a typical magnetic axis position continuously.

The detection efficiencies of NFM for the  $^{252}\text{Cf}$  ring source are derived from the total counts in the continuous rotation of the neutron source. The detection efficiencies for the plasma neutron source are evaluated from detection efficiencies for the  $^{252}\text{Cf}$  ring source with assistance of the MCNP calculations. The final uncertainty in the neutron emission rate measurement is evaluated to be  $\pm 7\%$  and  $\pm 9\%$  in the pulse counting mode and the Campbell mode, respectively.

On the other hand, the activation response coefficients for the  $^{252}\text{Cf}$  neutron source, where the detection efficiency of the HPGe detector which was evaluated by the PHITS code, were in good agreement with the MCNP result. The activation response coefficients for 2.45 MeV neutrons and secondary 14.1 MeV neutrons from the D-D plasma were evaluated from the MCNP calculation with correction by using the *in situ* calibration results. This is the first time to evaluate the activation response coefficients of the NAS for a toroidal source on a fusion device in the world. The difference of the activation response coefficients between the *in situ* calibration and the MCNP calculation for the  $^{252}\text{Cf}$  neutron ring-source is only 7%. This *in situ* calibration will be a good reference for future calibration experiments of fusion devices such as ITER.

In the LHD experiment, NAS has been utilized to perform cross checking of the absolute total neutron yield measured by NFM. By using the activation response coefficients evaluated by the MCNP calculation with correction by the *in situ* calibration results, the neutron yield evaluated by NAS on 8-O port is consistent with that measured with FC#1 of NFM. Most relative deviations between the measurement of NAS on 8-O port and FC#1 are less than 10%. The 14 MeV neutron yields is the first time measured by NAS from a large stellarator/heliotron in the world.

The triton burnup ratios were evaluated by the NAS measurement for the triton

burnup study. Triton burnup ratio increases with line-averaged electron density in the low-density region, and decreases with electron density in the high-density region. Meanwhile, the triton burnup ratio decreases as the magnetic axis ( $R_{ax}$ ) positions shift outward, which can likely be explained by the orbit of helically trapped energetic tritons. And the triton burnup ratio strongly depended on the magnetic field  $B_t$  at the same  $R_{ax}$ .

Two Sci-Fi detectors successfully worked to measure the time evolution of the 14 MeV neutron emission rate for the triton burnup study on LHD. By using a fast digitizer, the shaping information of each pulse was obtained for the off-line analysis on the pulse height spectrum and the time evolution of 14 MeV neutrons. By the cross calibration of the shot integrated counts of Sci-Fi detectors with the absolute 14 MeV neutron measured by NAS, the triton burnup ratio has been evaluated shot-by-shot by the measurement of Sci-Fi detectors. In addition to this, the compact design for the NIFS Sci-Fi detector will be helpful for the development of a 14 MeV neutron camera in the future.

The accelerator experiment and PHITS calculation have been carried out to study the pulse height property of Sci-Fi detector. In the accelerator experiment, the gamma-ray rejection ability of the 0.5 mm Sci-Fi detector has been confirmed to be higher than that of the 1 mm Sci-Fi detector, but the detection efficiency of the 0.5 mm Sci-Fi detector is lower than that of the 1 mm Sci-Fi detector. Obviously, for experiments with a higher 14 MeV neutron flux, the 0.5 mm Sci-Fi detector will give a better performance advantage. The function of the Sci-Fi detector has been confirmed by using the measurement of the 0.5 mm Sci-Fi detector, the 1 mm Sci-Fi detector, the 1 mm Sci-Fi w/o Al detector, and the plastic scintillator detector. It is found that the property of Sci-Fi without the Al matrix is the same as that of plastic scintillator. The Al matrix for the Sci-Fi detector is beneficial to enhance the edge effect of Sci-Fi and gamma-ray rejection ability of the Sci-Fi detector.

For the measurement of the Sci-Fi detector in the LHD experiment, the first decay component of the PHS in low-pulse-height region has been found to be corresponding to the signal induced by 2.45 MeV neutrons and gamma-rays by the PHITS calculation. The recoil proton edge induced by triton burnup 14 MeV neutron in the LHD deuterium experiment has been confirmed by both the accelerator experiment and the PHITS calculation. The threshold level of the 1 mm Sci-Fi detector with HV of -1700 V is evaluated to be corresponding to the proton energy. The detection efficiencies of the 1 mm Sci-Fi detector for 14 MeV neutron are obtained with different threshold for the LHD experiment. By setting suitable threshold, the Sci-Fi detector can completely eliminate gamma-rays and low-energy neutrons. Therefore, the Sci-Fi detector can be a standard 14 MeV neutron detector for future D-T experiment.

The calculation by the FBURN code was carried out for the triton burnup study on LHD. The diffusion coefficient of the energetic triton was evaluated by the calculation of the time evolution of the secondary D-T reactivity with different diffusion

coefficients to obtain a good agreement with the measured by Sci-Fi detectors. Also, the shot-integrated triton burnup ratios were calculated by the FBURN code, which decrease with diffusion coefficients of the energetic triton.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 Neng PU

Title  
論文題目 Measurement of 14 MeV neutron for triton burnup study on the Large Helical Device

将来の核融合炉では、超高温の重水素・三重水素混合プラズマ中において、重陽子-三重陽子間で起きる所謂 d-t 核融合反応により、3.5 MeV の高い初期エネルギーを持つヘリウム原子核（アルファ粒子）が生成される。アルファ粒子の減速に伴いプラズマを自己加熱することで核燃焼状態が維持されることから、高エネルギー粒子の良好な閉じ込めは、核融合炉を実現する上で絶対条件の一つであり、核融合炉の成立の可否に直結する最重要課題の一つである。

出願者は、我が国独自のアイデアに基づく優れた定常性を備える大型ヘリカル装置（LHD）における重水素ガスを用いたプラズマ実験（重水素実験）において、高エネルギー粒子閉じ込めの実証研究を展開した。LHD では、重水素実験開始以前から高温プラズマの生成及び定常プラズマの保持に成功していたが、軽水素ガスを用いた実験であったことから、高エネルギー粒子に係る情報は限定的であり、ヘリカル系における高エネルギー粒子閉じ込め研究の拡大・高度化という点で LHD の重水素実験が世界的にも待たれていた。2017年3月に LHD において重水素実験が開始され、核融合中性子が新たな計測対象となった。d-d 核融合反応の結果初期エネルギー1 MeV で生成される三重陽子（1 MeV トリトン）は、減速過程において背景プラズマ中の重陽子と僅かながらも2次的な d-t 核融合反応を起こし、所謂 14 MeV 中性子が発生する。出願者は、d-d 核融合反応の結果生成される 1 MeV トリトンのラーマー半径や捕捉粒子軌道を描いた際の歳差ドリフト周波数等の運動パラメータが、d-t 反応生成アルファ粒子とほぼ同じであることに着目した。1 MeV トリトンに起因して僅かながらも 14 MeV 中性子が発生することから、圧倒的多数の d-d 核融合反応に伴う 2.45 MeV 中性子の中から存在割合において 1%にも満たない 14 MeV 中性子を選択的に計測するシステムを構築し、14 MeV 中性子測定を通じて LHD における 1 MeV トリトンの閉じ込め、即ちアルファ粒子閉じ込めを実証するとともに、その磁場配位依存性等を明らかにし、ヘリカル型核融合炉の実現に向けて展望を与えた。

本論文は、全8章で構成されている。序章で核融合の必要性、核融合プラズマ実験装置、過去にトカマクの重水素実験において先行して行われたトリトン燃焼実験等について触れている。第2章で、核融合反応断面積、速度分布を考慮した2粒子間の核融合反応度、中性子輸送、粒子軌道等、本研究を遂行するにあたり重要となる基礎的な部分について詳述した後、第3章以降にて、LHD 及び中性子計測システムについて詳述するとともに、本研究で特に重要な役割を果たした中性子放射化箔システム（NAS）のその場校正やシンチレーティング光ファイバー（Sci-Fi）検出器の性能評価試験、これらシステムを対象とする3次元中性子輸送計算に基づく解析等について述べた後、LHD 重水素実験において行っ

た実験及び得られた成果についてまとめている。

本研究の実施において、NAS が特に重要な役割を果たしている。出願者は、LHD 重水素実験の開始に先立ち 2016 年 11 月に行われた  $^{252}\text{Cf}$  中性子源を用いた中性子計測システムのその場較正実験において、インジウム箔を用いた NAS のその場較正を行った。 $^{252}\text{Cf}$  は、平均エネルギー 2.1 MeV の中性子を放出する。 $^{252}\text{Cf}$  から放出される中性子は、エネルギーにおいて d-d 核融合反応に伴い発生する 2.45 MeV 中性子のそれに近いが、プラズマから発生するほぼ単色の d-d 中性子とは異なりスペクトルに幅を持っていることから、中性子・光子輸送モンテカルロコード MCNP を駆使して、その場較正実験で得た較正係数に補正を与えると同時に、14 MeV 中性子を計測対象とする際に用いるシリコンディスクに対する係数を得るなど、d-d 中性子及びトリトン燃焼 d-t 中性子の発生量評価を行える測定環境を整備した。次いで、プラズマ中における 1 MeV トリトンの挙動をより詳細に追跡すべく、トリトン燃焼 d-t 中性子の時間変化を測定可能な Sci-Fi 検出器の中性子エネルギーや入射角度に対する応答を 3 次元粒子・重イオン輸送計算コード PHITS によりシミュレーションするとともに、東北大学高速中性子実験室のダイナミトロン加速器にて d-d 反応、d-Li 反応を用いた実験を行い、シミュレーション結果との比較検証を行うなど、LHD においてトリトン燃焼実験を遂行できるハードウェア環境を整えた。LHD の重水素実験では、その場較正された NAS、及び NAS で値付けされた Sci-Fi 検出器を駆使し、ヘリカル型装置において世界で初めてトリトン燃焼 d-t 中性子の検出に成功した。これにより、ヘリカル型装置において世界で初めて 1 MeV トリトン、即ちアルファ粒子の閉じ込めを実証し、ヘリカル型核融合炉の実現に向けて明るい展望を与える成果を得た。更に、申請者は、d-d 中性子発生量に対する 2 次的に発生する d-t 中性子発生量の比で定義されるトリトン燃焼率の磁気軸位置、磁場強度等、高エネルギー粒子の閉じ込めと密接に関係するパラメータに対する依存性について調べる中、トリトン燃焼率の磁気軸位置依存性を精査した実験では、トリトン燃焼率は、ヘリカルリップル捕捉粒子のドリフト面が磁気面とほぼ一致する LHD の内寄せ磁場配位で最大となることを示し、内寄せ磁場配位が高エネルギー粒子の閉じ込めに有効に働くことを明確に示した。

以上の研究成果は、博士論文の内容として相応しく、本審査委員会は本論文が博士論文として適切であると判断した。