

氏名 磯部光孝

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大甲第193号

学位授与の日付 平成8年3月21日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 NEUTRON DIAGNOSTICS IN TOROIDAL FUSION PLASMA

論文審査委員 主査 教授 藤田順治

教授 松岡啓介

教授 濱田泰司

助教授 笹尾眞實子

教授 中澤正治（東京大学）

論文内容の要旨

The neutron measurement on a nuclear fusion device provides not only the plasma ion temperature and the fusion reaction rate but also the information on behaviors of fast ions in a plasma. However, the application of neutron diagnostics has ever been limited only to high temperature plasmas. In this thesis, with consideration for an advantageous arrangement of neutron counters in a helical system, an efficient neutron diagnosing system was established on the Compact Helical System(CHS) heliotron/torsatron. By using this system, the confinement of neutral beam-injected fast ions was first investigated from neutron measurement in a small helical device.

A calibration experiment was carefully carried out with a ^{252}Cf neutron source. A total of 64 toroidal angles along the magnetic axis were surveyed by moving the neutron source. To obtain the volume-averaged efficiency(calibration factor), the spatial distributions of local point efficiency on three poloidal cross-sections with elongated orientations of 0° , 45° and 90° were also investigated. The toroidal line efficiency of the BF_3 counter on CHS, obtained by averaging the point efficiency over all the toroidal angles, was 4.1×10^{-4} counts/neutron, which is about two orders of magnitude higher than the values of most of fusion devices. In addition, it first turned out that the toroidal line efficiency was nearly equal to the volume-averaged efficiency even in a helical device. It is also pointed out that the calibration factor does not depend on variations of the plasma profile as long as the magnetic axis remains the same. By using this system, the ion temperature, as low as several hundred electron volts, was estimated from the neutron emission with a time resolution of 1 ms in the ICRF heating regime of CHS.

In order to study fast ion confinement in a fusion device, a diamagnetic loop or a neutral particle analyzer has so far been employed. However, the former is an indirect measurement for fast ion confinement and the latter reflects mainly the information in the peripheral region rather than that in the core region. In the present work, the neutron diagnostics has been employed to the study of fast ion confinement. The experimental method is based on a short pulse injection of a hydrogen beam doped with 1% deuterium. The neutron emission rate begins to decay just after the beam termination. Comparing the experimental decay rate with that of calculation assuming the classical slowing down without ion loss, the fast ion confinement time τ_c is deduced. The dependence of τ_c on the toroidal magnetic field strength B_t was investigated for ions generated from tangentially co-injected neutral beams. In the operation with B_t of 0.88 T, τ_c was deduced to be about 3 ms. By strengthening B_t to 1.7 T, the fast ion confinement was improved and τ_c was increased up to about 8 ms.

The same technique was applied to the JT-60U tokamak plasma. The perpendicular short pulse neutral beam was injected into low density plasmas to investigate the relation between the ion ∇B drift direction and the ripple-induced fast ion loss in

plasmas with the up-down asymmetric ripple. The experimental results show that the total ion loss does not depend on the ion ∇B drift direction. A tokamak fusion reactor having a single null divertor has inevitably an up-down asymmetric ripple well, because of the requirement of a long divertor leg. This result, therefore, suggests the possibility for B_t -reversal operation in future fusion tokamaks.

In summary, it turned out from two experiments, one on a small helical device, CHS, and one on the largest tokamak, JT-60U, that the fast ion confinement can be clearly studied by using an efficient neutron measuring system and a short pulse injection of a neutral beam, when the time-resolution is high enough to follow the decay time. The neutron diagnosing system like the one on CHS is applicable to other small as well as large helical devices and will contribute to the ion temperature measurement and the study of the confinement characteristics of fast ions.

論文の審査結果の要旨

核融合反応の結果放出される中性子の測定は、近年の大型トカマクなどでの重水素を用いる高温プラズマの生成に関する実験において、核融合出力測定・イオン温度測定の手段として、また、プラズマ中での高エネルギー粒子の閉じ込めを調べるための手段として非常に重要である。しかし、従来の中性子計測装置は、プラズマ発生装置の外側に設置されていたため検出効率が低く、多量の中性子を発生するような高温プラズマへの適用に限られ、また、計測システムの較正についても多くの問題点を抱えていた。

申請者は、比較的小型なヘリカル装置で、中性子発生量も僅かな CHS (Compact Helical System) 装置での中性子計測に取り組み、トーラス中心部に検出器を設置できるという、ヘリカル装置の特徴を活かし、なおかつ強い磁場中での中性子検出器の動作特性を確認し、従来のシステムに比べて2桁以上も効率の良い計測システムを確立した。従来、小型装置における高速イオン計測には、主に中性粒子エネルギー分析器が用いられていたが、プラズマ中心よりも周辺の情報に反映してしまうという問題がある。この高効率の中性子計測システムを用いることにより、小型装置では初めて、核融合中性子計測から、中心近傍の高速イオン閉じ込めの情報を直接的に得ることができた。また、CHSのような小型かつ中性子発生量の僅かな装置においても、1ショット中のイオン温度をミリ秒オーダーの時間を追って測定することを可能とした。

この中性子計測システムの精度と信頼性の鍵となる較正実験においては、トロイダル線効率と体積平均効率がほぼ等しいことをヘリカル装置において初めて示した。加えて、ヘリカル系における計測に特有な問題を取り上げ、中性子輸送計算とも併せて、ヘリカルコイル導体の存在が中性子の輸送に与える影響を調べた。これらの成果は、今後ヘリカル系装置において中性子検出器の較正実験を行う際の貴重なデータとなるものである。

申請者は、この中性子計測システムを用い、中性粒子ビーム入射加熱を停止させた後の中性子発生率の時間変化から、高エネルギービーム粒子の閉じ込め時間を測定し、これがヘリカル磁場配位のみ依存し、プラズマのパラメータには依存しないという実験結果を得た。これにより、実験結果が単一粒子の理論的な軌道計算と対応し得ることを示した。

申請者は、また、同様の手法により、日本原子力研究所のJT-60Uトカマクにおいて、高エネルギー粒子の損失量を測定した。この実験においては、2種の上下非対称な磁場リップル井戸領域を持つプラズマを形成し、磁場方向を逆転させて、イオンドリフト方向を変えたときに高エネルギー粒子損失量がどのように変化するかを調べた。現在検討が進んでいる国際熱核融合実験炉(ITER)では、炉の構造上必然的に上下非対称な磁場リップル井戸領域を持つために、本研究はその運転のための貴重な実験的参照データとなるものである。

以上述べたとおり、申請者はヘリカル型核融合実験装置において初めて本格的な中性子検出システムを構築し、その較正実験を行い、今後のヘリカル型閉じ込め装置での中性子計測に対して貴重なデータと知見を得たのみならず、高エネルギービーム粒子の閉じ込め時間のヘリカル磁場中の挙動を定量的に調べた。本研究において確立されたシステム及び手法は、他のヘリカル装置にも適用可能であり、そこでのイオン温度計測や高速イオン閉じ込めの研究に新たに貢献しうるものである。以上のことから、本委員会は、その独創性と当該分野への貢献から判断して、本論文は学位授与の対象として十分な内容を持っている

るものと認めた。

試験は、審査員全員の出席のもとに、出願者に対し、論文内容及び基礎学力に関する質疑応答の形式で行った。出願者は質問に対して的確に答え、プラズマ物理学の基礎、専門的知識、実験技術等を十分習得しており、研究の意義や研究内容についても良く理解していることが確認された。また、提出論文が英語で書かれていること、何編かの英文の論文を投稿していること、いくつかの国際会議での発表の実績から考えて、本人の外国語に関する能力は十分であると判定した。

公開発表会において、出願者は研究内容を詳細に説明し、質問に対する回答も適切であった。

以上のように、口述試験、公開発表の内容はいずれも十分評価に値するものであり、合格と認定した。