

氏 名 Evgeny VESHCHEV

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大甲第 1088 号

学位授与の日付 平成 19 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 Development of Fast Neutral Particle Diagnostics and
Study of Suprathermal Ion Behaviors in LHD Plasmas

論文審査委員 主 査 教授 佐貫 平二
教授 須藤 滋
教授 岡村 昇一
准教授 尾崎 哲
准教授 村上 定義（京都大学）

論文内容の要旨

Analysis of energy-resolved spectra of neutral particles escaped from plasma can provide important knowledge about ion confinement and ion distribution function during different types of plasma heating such as neutral beam injection (NBI), ion cyclotron heating (ICH) or electron cyclotron heating (ECH). Such knowledge is very important for the successful development of a fusion reactor. Effective ion heating and good fast ion confinement are essential for ignition. Compared with tokamaks, studying the fast particle confinement properties in heliotrons is more complex mainly due to more complex magnetic configuration. Such a complex 3D geometry of the Large Helical Device (LHD) may lead to appearance of additional types of confined particles (such as helically trapped particles), additional confinement effects (presence of loss-cones) and may result in more complicated drift motions. For studying fast ion confinement properties in plasma, a variety of neutral particle analyzing diagnostics have been developed on modern fusion devices. In LHD these are one-chord Compact Neutral Particle Analyzer (CNPA) and six-chord Silicon-Detector NPA (SDNPA), *etc.* E || B type CNPA utilizes one array of 40 detectors and measures energy and time resolved neutral particle fluxes in the energy range 1-170 keV. CNPA can be used in a combination with Tracer Encapsulated Solid Pellet (TESPEL) injector. Sightline of CNPA is very close to the nominal TESPEL trajectory, and thus active localized measurements can be made by the pellet charge exchange method. SDNPA can provide the measurements in the energy range 25-4000 keV and the aim of it is to make angle-resolved passive measurements of fast particles.

According to some theoretical estimations, in heliotron devices the transition particles may be lost from the confinement region through loss cones. The loss cones of fast particles in LHD plasmas could not be measured so far by the existing diagnostics mainly due to the poor angular resolution (to make angle resolved measurements either a long time discharge or several shots with exactly similar parameters are required). To clarify the situation with loss-cones and to improve the angular resolution versus the existing SDNPA analyzer, a novel diagnostic with a much better angular resolution is required. The overview of currently used NPA diagnostics in tokamaks and heliotrons will be made in the Introductory chapter I. Among the preceding multi-sightline NPA

systems used in magnetic confinement fusion devices the maximum sightline NPA systems with 6 chords of view are on LHD (currently operating SDNPA) and on former TFTR (discontinued). Thus a novel 20-sightline diagnostic based on an Angular Resolved Multi-Sightline NPA (ARMS-NPA) described in this thesis may become a new powerful tool in fast ion physics studies. It can provide energy-, angle-, and time-resolved spectra of escaped fast neutral particles from the plasma. In addition, a precise radial scan of the plasma column can be realized. The data obtained by this new ARMS-NPA diagnostic in addition to CNPA and SDNPA experiments will help in understanding of fast particle physics in helical systems.

First measurements by ARMS-NPA diagnostic have been made on LHD for a variety of plasma heating conditions. Angularly resolved measurements were made for co-, counter- and perpendicularly directed NBI, for ICRH and ECH regimes. Measurements were made for a wide range of plasma parameters such as electron density, magnetic axis position, positive and negative magnetic field directions, and magnetic field strength. Obtained data demonstrate angular dependence of fast particle distribution for the type of heating and plasma parameters. Magnetic axis shift effect on loss-cones has been noticed. Inward shifted magnetic axis configuration lead to improved fast ion confinement and uniform angular distribution (reduction of the loss-cone). Since the naturally occurring charge exchange neutral particle source is not localized in contrast to the diagnostic neutral beam or pellet charge exchange methods, the correct interpretation of such measurements in a complex toroidal asymmetric geometry requires a careful numerical modeling of the neutral flux formation and the knowledge of the charge-exchange target distributions, relevant cross sections and the magnetic surface structure. The measured chord integral neutral flux calculation scheme for the LHD magnetic surface geometry is given. Calculation results are shown for measurable atomic energy spectra corresponding to heating-induced fast ion distributions from simplified Fokker-Planck models. The behavior of calculated and experimental suprathreshold particle distributions in NBI and ICRF heated plasmas is discussed in the context of the experimental data interpretation. The geometry effect on the measured spectra interpretation is discussed. Results of experimental measurements are also compared with simulation results made by different codes with taking fast particle orbits into account.

論文の審査結果の要旨

エフゲニ・ベシェフ君の論文の特徴は、LHDでこれまで十分には検証されてこなかったロスコーンに関連する現象についての詳細な研究を行う目的で、X線用多チャンネル検出器をイオン計測に応用すること、及び集積度の高いプリアンプを採用することにより、空間分解能及び小型化の点ですぐれた角度分解型多チャンネル中性粒子検出器（ARMS-NPA）を開発したこと、さらにこの検出器をLHDの様々なプラズマに適用することで中性粒子発生角度分布の変化を明らかにし、ロスコーンの観測とその低減について具体的に検討したことである。

本論文は5章から構成されており、1章でこれまでの中性粒子分析器とその問題点を整理し、2章では本研究で新たに開発したARMS-NPAの詳細説明、3章では様々なLHDプラズマに対する実験結果について論じ、4章で詳細なデータ解析を行い、5章で結論をまとめている。

ベシェフ君はARMS-NPAを一から設計、製作するとともに、エネルギーを正確に同定できるX線源を用いて較正を綿密に行い計測器として完成させた。また、関連する真空システム、制御システムならびにデータ処理システムの構築を自ら行った。本研究で開発したコンパクトで高性能な中性粒子多チャンネル検出器が実機に応用された例はなく、その試みは十分チャレンジングなものと言える。本研究により空間、時間及びエネルギー分布を単一ショットで同時計測できるようになった点は注目される。また、多チャンネル化によってスペクトルの角度分布についても、従来のスペクトル図だけではなく、ピッチ角分布の3次元表示を採用する事により、ロスコーンの速度空間での構造について、シミュレーション結果との比較がし易くなった。

LHDでは、この計測システムを磁場方向、磁気軸位置、磁場強度などの異なるさまざまなNBI及びICHプラズマに応用し、実空間及び速度空間でのロスコーン分布の構造解析を行った。ここで、LHDプラズマは形状が3次元的で複雑であるため、磁気軸位置を変えただけでピッチ角などが変化してしまうことに注意する必要がある。ベシェフ君の解析では、この点を考慮してピッチ角分布を解析している。その結果、エネルギースペクトルは、各NBIの入射方向、磁場の方向、観測の位置関係、ICHの印加方法などにより概ね理論的に予測できる範囲で説明できること、これらのNBI及びICHプラズマにおいてもロスコーンは80度から85度付近に存在すること等を明らかにしている。LHDにおいて、ロスコーンについて角度分布を含めた実験結果を得たのは初めてであり、ヘリカル装置の設計や物理機構の解明に重要な指針を与えるものと考えられる。

また垂直入射のNBI印加時ではロスコーン領域に直接粒子を注入するが、異なる磁気軸位置でのエネルギースペクトルの角度分布を測定した場合に、磁気軸内寄せで80度から85度付近にあったロスコーンが低減することを観測しており、シミュレーションの結果と定性的に一致した結果を得ている。ECH加熱においては、上記のロスコーンが消滅する事を実験的に観測し、電場形成と関連づけられる事、そのとき急峻な電子温度分布も確認した事から、更に、NBIとICH加熱プラズマ時の電子温度分布を対比し、温度分布がよりピークするような分布の場合に、ロスコーンの低減が顕著に起きることを明らかにした。以上の結果はヘリカル装置において、電場とロスコーンの関連性を研究する道を

拓くものとも言えよう。

研究結果を要約すると、(1) 従来にないコンパクトな中性粒子多チャンネル検出器を開発し、ロスコーンの測定法を新たに進展させた、(2) 磁場強度、磁気軸位置、NBI, ICRF 及び ECH 等の加熱方法の違いに対して観測を実施し、その結果について検討を加えた、(3) ロスコーンが低減する現象を見だし、ロスコーンと電場の関連性についての研究を行うための観測手法を示した、などにより当該分野の進展に貢献した。このように本論文は、測定装置の開発、実験結果の物理的な解析の両方において、十分な新規性を見出すことができる。

以上により、審査委員会は、提出論文は博士論文として十分な価値があると認め、審査委員全員一致で合格と判断した。