

氏 名 中 村 希一郎

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大甲第757号

学位授与の日付 平成16年3月24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 Development of a Two-dimensional Lithium  
Beam Probe for Edge Plasma Diagnostic in  
the Compact Helical System

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 岡村 昇一  
教授 加藤 隆子  
助教授 井口 春和  
教授 居田 克巳 (核融合科学研究所)  
助教授 大野 哲靖 (名古屋大学)

Diagnostics of edge plasma parameters are important because plasma properties in the region have key role to determine the global plasma confinement. In particular, transport barriers are of strong interest. Understanding and controlling edge plasmas are also important for the divertor design in fusion reactors. In order to study plasma structure in the area, two-dimensional measurements are essential.

A lithium beam probe (LiBP) is one of the best techniques for the measurement of edge plasma density profile. The LiBP utilizes the emission of the LiI resonance line (2s-2p, 670.8 nm) from the injected neutral lithium by electron impact excitation. The LiBP can probe plasmas from the edge to the core crossing the last closed flux surface (LCFS) without perturbation or contamination to the plasma. It has been used in many magnetic confinement devices, but all those measurements are in one dimensional along the fixed beam line.

A LiBP system that can measure two-dimensional plasma structure in the edge plasma region including the separatrix has been designed and installed on CHS. This system has a beam injector with variable injection angle and a multi-channel optical detection system. The beam injector is located on the upside of the torus, which consists of an ion gun with a Li source (6mm diameter) which is thermoionic emission type  $\beta$ -eucryptite, a Pierce extractor and cylindrical lens. This section is covered with magnetic shield in order to prevent the effect of CHS stray field. The beam energy is in the range from 10 to 20 keV with an equivalent neutral beam current of about 0.1 mA. The ion beam is neutralized in the Cs neutralizing cell operated at the temperature about 180 °C. The beam energy is selected so that it offers both adequate spatial resolution and beam penetration. For the 15 keV beam, the spatial resolution is less than 1.7 cm and beam penetration depth is characterized by the  $2 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$  of line-integrated density. The neutral beam diameter is about 20 mm in the CHS vacuum chamber.

Light collection optics, which detects the emission from the LiI resonance line, is located on the side port of the torus. The optical system consists of a lens, optical fibers, optical interference filters and Avalanche Photodiode (APD) detectors. Since the angle between beam line and sight line is not at right angle, the observed spectral line suffers Doppler shift. Maximum Doppler shift at beam energy of 15 keV is 0.9 nm. So the optical interference filters are selected with the bandwidth of 2.0 nm. Twenty-five couplers for optical fibers are prepared on the light collection lens

corresponding to twenty-five observation points along the beam with about 8 mm spacing. Eight channel optical fibers can select eight observation points by choosing eight couplers among those. The injection beam line angle can be varied between  $+18^\circ$  and  $-18^\circ$  in the major radius direction. Two-dimensional profile is obtained by changing the beam injection angle shot by shot. Since the signal to noise ratio for the present beam intensity is less than unity ( $S/N < 1$ ), signals from APD detectors are introduced to phase sensitive detectors with 4 kHz beam modulation. Typical time resolution is 10 ms in the present measurements. Taking the related atomic processes into account, the emission profile is converted to the electron density profile.

The CHS is a low-aspect-ratio helical device that has a major radius of 1.0 m and minor radius of 0.2 m. The pole number and the toroidal periodic number of the helical field coils are  $l = 2$  and  $m = 8$ , respectively. The maximum magnetic field strength is 1.8T. Magnetic field configuration can be varied over a wide range by controlling the coil current and its direction. Hydrogen plasmas are produced by electron cyclotron resonance (ECR) heating (170 kW) and additionally heated by the two neutral beam injectors (1.3 MW). The electron density is in the range of  $0.5\text{--}5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  and typical electron and ion temperatures are 1 keV and several hundreds of eV, respectively. Low aspect ratio helical device characterizes broken helical symmetry due to strong toroidicity forming ergodic magnetic field line structure outside the LCFS. In CHS, variety of edge magnetic field configuration can be realized by changing the position of the magnetic axis.

Beam emission profiles are obtained both for ECH and NBI heated plasmas of limiter configuration. Electron density is reconstructed from this emission profiles. In this study, multiple atomic processes related with transitions between 2s, 2p and ionized states are taken into account. There are two methods to convert the beam emission profile to the electron density profile. The first one is the beam attenuation method and the second one is the beam intensity method. When the plasma density is large, full emission intensity distribution is measured. Then the density profile can be reconstructed using the beam attenuation method. No calibration is necessary, which is the advantage of this method. The beam intensity method is used when the beam is not fully attenuated within the observation area. The electron density is derived from the beam emission intensity based on the atomic data, sensitivity of the optical system and the beam density. Two-dimensional electron density profiles are derived using those two methods depending on the beam penetration depth.

The experimental data suggests that the ECH plasma is well confined inside the LCFS. Plasmas with density above  $10^{18} \text{ m}^{-3}$  do not exist outside of it. In contrast, the NBI plasma is spreading outside the LCFS toward the separatrix region and noticeable amount of plasma is confined in this ergodic region even though the magnetic field line in the ergodic layer is cut by the vacuum chamber wall (inboard limiter configuration). The plasma with the density of  $10^{19} \text{ m}^{-3}$  exists even 4 cm apart from the LCFS along the equatorial plane.

Edge density profile steeping associated with H-mode like transitions (Edge Transport Barrier) is also observed. The characteristic scale length of the electron density gradient at the LCFS is reduced to 80 % of the original one.

Such 2D-diagnostics is expected to play a key role in understanding and the design of helical diverter in future.

## 論文の審査結果の要旨

本論文の研究テーマは、核融合閉じ込め実験の高温プラズマに対して、閉じ込め領域周辺部での密度分布の測定、特にその二次元分布計測を達成しようとするものである。プラズマ閉じ込め実験において、周辺部のプラズマの特性が閉じ込め装置の全体の性能を左右する現象は、よく知られた閉じ込め改善現象であるHモードを引き合いに出さないまでも、プラズマ閉じ込め実験では広く観測される。そのために周辺部の構造の測定は、炉において核融合反応が主に起きる領域であるプラズマ中心部の計測に劣らず重要な課題である。周辺部の計測の特殊性の一つは、プラズマの温度が中心部に比較して低いことで、そのために中心部測定と同じ手法が使用できない場合が多い。また一方そのために中心部よりも詳細な構造の計測ができる可能性もある。中村希一郎君は、プラズマの周辺部の密度計測法として広く用いられ、またそのために高い信頼性が確立している中性リチウムビームを用いて、これまで前例のない二次元分布の計測法を開発し、ヘリカル型実験装置の周辺部プラズマ密度分布の二次元構造を明らかにしている。

中性リチウムビームを用いた周辺密度分布の計測は、プラズマ中に打ち込んだ中性リチウム原子がプラズマによって励起され、密度にほぼ比例した共鳴線を発光することを利用して、ビーム軌道に沿った密度分布を得る手法である。レーザー等を用いた計測に比較して装置があまり大掛かりにならず、またビームを連続して発生できるように密度分布の時間変化も連続的に得ることができる等の点で、すぐれた特徴を持っている。これまではビームに沿った観測による一次元分布の測定例はあっても、二次元分布測定の例はなかった。トーラスプラズマの構造の理解は、プラズマの特性が磁気面上で一定と仮定したモデルによるものが一般的であり、トーラス小半径に沿った一次元分布で話しを済ませるケースが多い。しかしながらプラズマ周辺部においてはポロイダル方向の構造が強く出てくる要素もあり、特にヘリカル型閉じ込め研究においては、セパトリックス配位、並びにヘリカル・ダイバータ配位は本質的に三次元的構造を持っていて、プラズマ断面内の二次元分布の測定が非常に重要になってくる。

二次元リチウムビーム測定においては、トーラス上部に設置した中性リチウムビーム源の向きを変えることにより、プラズマ中のビーム軌道が測定範囲をカバーするように移動させ、ビーム軌道に沿った多点発光観測データを集積することによって二次元分布データを構成する。ビームエネルギーは 15keV を用いているが、その時に観測される発光線のドップラーシフトはビームの角度によって変化するために、分光フィルターとしては広めの幅のものを使用し位相同調検波手法でSN比を改善している。また、リチウムビーム源を動かすことから閉じ込め装置の漏れ磁場の影響が変化する問題点は、磁気シールドを工夫することで解決している。リチウムビームを用いた測定法の一つの有利な特徴は、真空容器中の中性ガスとの衝突による発光を用いた発光強度の較正ができることであるが、本論文ではプラズマ実験中に導入される中性ガスを利用して、実験のショットごとに較正データをとることで分布データの信頼性を向上させている。また、リチウムビームはプラズマの密度が高い場合、プラズマ中を進行する間に強く減衰を受ける。発光強度分布を得た

後には、この減衰を考慮してプラズマ密度に変換するための計算が必要となる。ビーム減衰のプロセスには数多くの素過程が関わっているが、それらの主要な要素を全て考慮した計算により密度分布の再構成にも成功している。

本測定装置をCHS装置でのプラズマ実験に実際に適用し、ビーム減衰量の少ない低密度プラズマと、減衰の大きい高密度プラズマに対して二次元密度分布データを得ることができた。測定範囲はトーラス外側のダイバータ領域を含んでいて、ヘリカル磁場配位のセパトリックス構造を議論するにはほぼ十分な範囲をカバーしている。特に高密度プラズマの場合は、プラズマ閉じ込め領域の外の領域において、明確な二次元構造を確認することができた。また閉じ込め改善モードの一つである境界輸送障壁が生成される放電においては、密度勾配がより急峻になる現象も明確に示されている。以上述べたように、世界で初めての取り組みである、リチウムビームを用いた二次元密度分布計測装置を開発し、それを実際にCHSプラズマ実験に適用して周辺部の二次元構造を明らかにした研究成果は、学位を与えるに十分のものであると判断した。