

氏名	明 廷凤(MING TINGFENG)
学位(専攻分野)	博士(学術)
学位記番号	総研大甲第 1544 号
学位授与の日付	平成24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 high-speed vacuum ultraviolet imaging camera system for high-temperature plasma diagnostics
論文審査委員	主 査 教授 森田 繁 教授 渡邊 清政 准教授 大館 暁 客員教授 岩間 尚文 自然科学研究機構 准教授 稲垣 滋 九州大学

論文内容の要旨

In order to achieve economical fusion reactors, high beta operation is required. When the plasma beta, i.e. the plasma pressure divided by the magnetic pressure, increases, induced pressure gradient drives MHD instabilities. Therefore, the understanding of the MHD instabilities is a key issue to realize high beta plasmas. The spatial structure of the instabilities is essential in understanding of their characteristics. Computed tomography (CT) using the soft X-ray emission is one of the standard techniques for that purpose. In the Large Helical Device, the arrangement of detectors suitable for the CT is difficult; due to the superconducting coil systems, it is not possible to arrange the detectors in a way that the plasma is observed from different directions. The tangentially viewing imaging system has been thus used for observation of the core MHD activities. Similar tangentially viewing imaging systems have been also developed on many devices around the world. However, those imaging systems are using soft X-ray emission, which are good for observation of the core plasma activities, but not good for the edge plasma activities. A newly developed high speed imaging system using VUV emission from the edge LHD plasma is presented in this study.

The imaging system is composed of a telescope made of Mo/Si multi-layer mirrors, micro-channel plate (MCP) and a high speed visible CMOS camera. With Mo/Si mirrors, VUV photons with wavelength of 13.5 nm can be selectively measured. A telescope optics rather than a pin-hole optical system is selected; the solid angle of the mirror viewed from the plasma is much larger than the solid angle of a pinhole system. Therefore, a faster optics, suitable for fluctuation study can be constructed. A Zr filter is installed to cutoff the low energy VUV photons which can also be reflected by the Mo/Si mirrors. The image is then detected by the MCP and recorded by the high speed camera. By measuring the C VI line emission around 13.5nm, edge MHD activities are directly visualized by this device. Additionally, since the time evolution of line emission of C VI is selectively measured, it is possible to carry out carbon impurity transport study with this imaging system.

Data analysis methods for imaging data have been developed in this thesis. Since the imaging data are line-integrated ones, tomographic reconstruction of a local emission profile from the line-integrated data are required. Construction of the so-called geometry matrix by which the local emission is related with the line-integrated image is discussed. If an arbitrary three-dimensional emission profile is assumed, reconstruction from a two-dimensional image is not possible. An assumption that the emission along the magnetic field line is constant is made. Thereby a new method to construct the geometry matrix is developed. In this method, sight lines are projected to curved sight lines on a cross section (horizontally elongated section in this thesis). The line elements in a sight line are connected to the line

elements in the curved sight line along the magnetic field lines. Then the CT problem for tangentially viewing case is reduced to a standard 2D tomography problem with peculiar sight lines. HINT2 equilibrium code is used to estimate the magnetic field lines. With HINT2 code, the magnetic field lines are traced in finite beta conditions. Magnetic field lines outside the last closed magnetic surface (LCFS) can be also estimated by this. This is good for the VUV imaging diagnostics since it is possible that C VI emission may come from the stochastic region which is outside the LCFS. After the construction of geometry matrix, synthetic images can be calculated according to the relation of line-integrated image and local emission profile.

The performance of the tomographic reconstruction method is investigated in LHD configuration. Several algorithms have been tested, such as Phillips-Tikhonov (PT) method, maximum entropy method (MEM), truncated singular value decomposition (TSVD). According to the phantom test results, PT gives the best performance, and the spatial mode structure with high mode number ($m \sim 10$) has been shown to be reconstructed even with a complex LHD configuration. The noise level where the reconstruction is available is investigated. The maximum noise level is about 6%. The quality of the reconstruction results is however more sensitive to the accuracy of the equilibrium magnetic field than the noise in images

A simple transport model has been constructed to study the behavior of the carbon impurity. In this modeling, transport process, ionization and recombination process are included. With this transport model, time evolutions of the C VI emissivity are estimated assuming a transport coefficient profile. It is confirmed that the C VI emission is peaked in the edge region of LHD plasma in normal experimental condition.

Using this model, the penetration depth of injected carbon pellets is estimated from the imaging data. The ionization process is dominant just after the pellet ablation. Therefore, the image just after the deposition is used to study the initial deposition profile. The estimated penetration depth is qualitatively consistent with the estimation made by the pulse width of the H alpha emission signal that is caused by the ablation of the carbon pellet.

MHD activities with low frequency (about 0.75 kHz) have been successfully measured by the VUV imaging system. The amplitude of the MHD activities is fairly large and degradation of the confinement is observed with this MHD modes. The poloidal mode number ($m=1$) and the location of the mode ($r/a \sim 0.9$) is estimated by comparing the synthetic images assuming the spatial structure of the mode and images experimentally measured. The mode number is consistent with the magnetic probe signal and the location is consistent with $q=1$ rational surface.

The proof of concept, this type of imaging system can detect fluctuations localized in the edge region, is shown successfully. Although the maximum sampling rate of this device is as low as 2kHz at the present moment, it is limited only by the

intensity of the plasma emission. Upgrade of the mirror system is in plan. The data analyzing technique developed in this study is shown to be quite useful in analyzing the MHD activities. There are many applications of this technique. Verification of the MHD model related with the resonant magnetic field penetration is an important example and will be investigated in future.

博士論文の審査結果の要旨

高温プラズマの MHD 安定性に関する研究は磁場閉じ込め核融合研究の中心課題として位置づけられており、特に周辺プラズマの MHD 不安定に関する特性は閉じ込め改善に直接的な影響を与えるため重要な物理研究課題となっている。

MHD 不安定性の特性をより深く理解するためには不安定性に起因した揺動の空間構造を計測することが不可欠である。そこで出願者は水素様炭素イオン ($C5+$) が放射する CVI 発光線について真空紫外 (VUV) 領域にある遷移スペクトル ($4s-2p$ 及び $4d-2p$: 91.7eV) の放射強度分布を多層膜反射鏡を用いて光学結像する新しい手法を採用することにより、従来の軟 X 線制動放射を用いた計測法では実現できなかった高い空間解像度 (1.2cm) と高い時間応答 (2kHz) を有する MHD 揺動の空間構造計測法の開発に着手した。従来手法に比べ今回の新しい手法は以下の利点を有する。(1) $C5+$ 炭素イオンは $C4+$ と $C5+$ の二つの電離エネルギー ($392\text{eV}-490\text{eV}$) で決定されるプラズマ周辺部の狭い磁気面領域内に存在しているため、高い空間解像度を有する。(2) VUV 光をマルチチャンネルプレートを用いて増幅し、蛍光板で可視光に変換することにより従来の CCD 検出器と比較して圧倒的に時間分解能の高い C-MOS 検出器が 2 次元画像検出器として利用できる。(3) LHD 環状プラズマの接線方向を見込む観測位置に検出器を設置することで、ポロイダル断面上の 2 次元揺動分布解析を可能にすると共に、非常に明るい光学系を構築した。(4) 迷光を遮断するために VUV 金属フィルタを使用し、スリットサイズ・各コンポーネント形状を最適化することにより空間解像度と時間応答が改善された。

周辺プラズマの 2 次元揺動分布を得るためには環状プラズマの接線方向に視線積分された CVI スペクトル発光強度分布をポロイダル断面上の 2 次元局所発光分布に再構成する必要がある。出願者は LHD プラズマの有限ベータ MHD 平衡計算から得られた 3 次元磁気面構造データを基に観測発光強度分布を特定のポロイダル断面に投影する手法を開発することにより、3 次元形状を有する LHD プラズマにおいても視線積分画像を局所発光強度の線形和で記述し、ポロイダル断面放射強度分布の計算モデルと観測画像を直接比較することを可能にした。この技法を活用し、LHD プラズマの画像データから高い相関を持つコヒーレントな成分のみを抽出することにより、長波長の交換型 MHD 不安定性を明瞭に示す空間構造の可視化に世界に先駆けて成功した。

出願者は更に高い MHD モード数を有する周辺プラズマ揺動観測へ適用可能性を検討した。Phillips-Tikhonov 正則化型の解析手法を採用することで、 $m=10$ という高いポロイダルモード数を有する短波長揺動の 2 次元空間構造が観測可能であることを示し、バルーニングモードを代表とする短波長 MHD モードや周辺局在モード (ELM) を抑制するための外部共鳴擾動磁場 (RMP) により生成される磁気島の可視化計測においても有効に機能することを示した。更に出願者は開発した計測手法が不純物炭素ペレット入射の侵入長計測に応用できることを発案し、CVI 放射強度分布から不純物輸送モデルを用い炭素ペレットの初期溶発分布を解析した。首尾よく侵入長を数 cm の空間精度で決定することに成功し、粒子供給源の径方向位置制御を通じた分布制御による高温プラズマ生成研究への基盤を確立した。

以上のように、出願者は CVI の VUV 光を用いた周辺プラズマ 2 次元揺動計測器を開発し、

環状プラズマの接線方向からの画像計測法を発展させると共に、MHD 研究の進展に大きな貢献をした。よって本論文の内容は学位の授与に十分値すると判断した。

7月26日の論文審査では書類上の資格審査を行い、問題がないことを確認した後、英語で口述試験を実施した。論文の論旨をより明快にし、内容をより分かりやすく理解できるよう努力した出願者の工夫が見られた。審査委員からは、有限ベータを考慮した3次元磁気面構造の誤差の要因、検出器に含まれる雑音と解析結果との関係、不純物輸送コードにおける拡散係数や対流速度の物理的意味等、研究の基礎知識について質問が出された。出願者は検出器の詳細構造やLHDの磁気面構造等を示す図面を用いて具体的な事柄に言及しながら、それぞれの質問に対して的確な返答を行った。また、マイクロチャンネルプレートを増幅特性、迷光除去のためのEUV金属薄膜フィルターの透過特性、検出器全体の感度特性等、実験研究の詳細に関する質問にも機器開発の経験を交えながら較正実験結果や計算結果を提示することにより的確に答え、基礎から専門に至る十分な知識を有していることを示した。出願者は8月21日に行われた公開発表会においても、発表時間内に内容を要領よくまとめ、計測手法やデータ解析に関する質問やMHD揺動や不純物輸送に関する物理的質問に関して的確に返答した。

出願者は英文学術雑誌に第一著者として2編を既に公表しており、他1編が投稿中である。また、国際会議にも3回の発表があり、本審査会も英語で行われたことから、英語発表における十分な意見交換能力を有していることを確認した。以上により、審査委員全員一致で試験を合格とした。