

氏 名 梁 雲 峰

学位（専攻分野） 博士(学術)

学位記番号 総研大甲第493号

学位授与の日付 平成12年9月29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 Soft x-ray Imaging with CCD Camera for Magnetically
Confined High Temperature Plasma

論文審査委員 主 査 教授 松岡 啓介
教授 須藤 滋
助教授 居田 克巳
教授 近藤 克己（京都大学）
助教授 長山 好夫（核融合科学研究所）
主任研究 杉江 達夫
員

論文内容の要旨

A new technique of soft x-ray imaging with photon counting CCD camera has been applied to measure a shape of magnetic flux surface and two-dimensional electron temperature in magnetically confined high temperature plasma. Various diagnostics for x-ray imaging of plasma have been used especially in tokamaks. Pin diode array has been widely used to reconstruct plasma image with tomography technique for MHD study in most tokamaks. Direct measurement of x-ray image from tangential view by using the micro-channel plate (MCP) detector coupled to video camera has been done in tokamaks in order to measure internal shape of the magnetic flux surfaces and to estimate a current density profile. Two-dimensional hard x-ray image was also measured with a hard x-ray camera to study the distribution of suprathermal electrons during lower hybrid heating in PBX-M tokamak. However, there is no energy resolution in these diagnostics. The energy range measured can be selected only by arranging the Be or Al filter in front of the detector. As a conventional measurement of x-ray with good energy resolution, the pulse height analysis (PHA) has been well developed to measure electron temperature and the concentration of high-Z impurity from the x-ray energy spectra. However, PHA system has a relatively small number of spatial channel and accordingly poor spatial resolution.

The soft x-ray CCD camera has been widely used in astronomy as an instrument of x-ray imaging because of its good energy and spatial resolution. Recently, the photon counting x-ray CCD camera was applied to inertial confinement fusion (ICF) plasma. However, there is no application of this CCD camera to magnetically confined fusion plasma, because the frame rate has been considered to be too slow to measure x-ray from the short pulse discharge. Recent experiments in the Large Helical Device (LHD) demonstrate the discharge can be sustained for more than a minute, which encourages us to apply the soft x-ray CCD to the measurement of two-dimensional profile of electron velocity distribution as well as a shape of the magnetic flux surface.

In general, there are two different operation modes in the soft x-ray CCD camera, imaging mode and photon counting mode, depending on the magnitude of photon flux. When the flux of soft x-ray is low enough to the level of one photon per pixel per frame (photon counting mode), an amount of charge in each pixel of CCD created by the individual x-ray photon is proportional to the energy of x-ray. Therefore, the x-ray energy spectra can be obtained by counting the number of photons at given intensity (photon counting mode). When the soft x-ray flux is much higher than the level of photon counting mode, the intensity of each pixel is proportional to the total emission of x-ray (imaging mode). Since the total emission of x-ray is considered to be constant on magnetic flux surface, the shape of magnetic flux can be reconstructed from the soft

x-ray image. The magnetic axis moves outward due to the vertical field created by the asymmetric toroidal current (Pfirsch-Schlüter current) produced by the plasma pressure gradient in a finite-beta toroidal plasma, which is well known as a Shafranov shift.

The measurement of Shafranov shift due to the Pfirsch-Schlüter currents is important to study equilibrium beta-limit on plasma confinement. The tangential soft x-ray image has been measured by using the soft x-ray CCD camera in the imaging mode with good spatial resolution in the Compact Helical System (CHS). The Shafranov shift of the plasma magnetic axis is derived from the best fit of the intensity contour of soft x-ray emission calculated by using equilibrium code with various pressure profiles to that measured with soft x-ray CCD camera. It is found that the measured Shafranov shifts are larger than those expected from diamagnetic measurements at low-density plasma with tangential NBI, because of a significant fraction of beam pressure parallel to magnetic field. The Shafranov shift (Δ_{CCD}) measured with CCD camera corresponds to the total pressure p including thermal pressure, and parallel (p_{\parallel}^b) and perpendicular (p_{\perp}^b) beam pressures. The Shafranov shift can be derived from the stored energy measured with diamagnetic loop. However, isotropic pressure profile (i.e. $p_{\parallel}^b = p_{\perp}^b$) should be assumed to calculate the Shafranov shift from the stored energy, because the diamagnetic loop detects only the perpendicular pressure. Therefore, anisotropy of plasma pressure can be evaluated from the difference in Shafranov shift measured with CCD camera and that estimated from diamagnetic loop. The pressure anisotropy is found to increase as the electron density is decreased from $4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ to $0.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ in the NBI heated plasma. The large anisotropy is consistent with the fact that energy confinement time ($\sim 1 \text{ ms}$) is much shorter than the slowing down time ($\sim 0.1 \text{ s}$) of neutral beam at low electron density plasma in CHS. Therefore, the pressure anisotropy disappears in ECH plasma even at the low electron density ($n_e \sim 0.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) or high density NBI plasma ($n_e \sim 4.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$). On the other hand, there is no anisotropy observed in LHD plasma, where the energy confinement time is comparable to the beam slowing down time of neutral beam.

When the soft x-ray CCD camera is operated with photon counting mode, the full image area of CCD detector is divided to 512 zones (32x16), which gives two-dimensional spatial channels. One energy spectrum corresponding to one spatial channel is derived by counting the number of photons in one zone (32x32 pixels). The energy calibration of soft x-ray CCD detector has been done with Fe K-alpha and K-beta lines from iron target soft x-ray source. The energy resolution of each pixel is calibrated to be 16eV/ADC count, and the instrumental width, full width of half maximum (FWHM), is 0.21keV at 6.4keV. It is very important to optimize the level of

x-ray flux good for photon counting mode, since the number of pixels in one zone (32x32 pixels) is only 1024 and the number of photons acceptable is limited. The number of x-ray photon should be adjusted just below the critical photon number for “pile-up”. The ratio of photon number to pixel number ($\eta \equiv N_{\text{photon}}/N_{\text{pixel}}$) should be below $1/\sqrt{N_{\text{pixel}}}$ to avoid “pile-up”. Since the one zone consists to 1024 pixels in our measurements, the critical η for the pile-up is 0.03. In our experiment, the energy spectra measured with CCD camera agree with those estimated from electron temperature and density profiles measured with YAG Thomson scattering, when the ratio η is below the critical value (0.03). Two-dimensional energy spectra of x-ray emission have been measured by using x-ray CCD camera with photon counting mode in CHS. The energy spectrum measured with CCD camera agrees with that estimated from electron temperature and density profiles measured with YAG Thomson scattering in the energy region of 2~8keV. The two-dimensional electron temperature profiles (32x16 channels) are derived from the slopes of x-ray continuum with 512 spatial channels (32x16).

The two-dimensional intensity profiles of titanium (Ti), chromium (Cr) and iron (Fe) K-alpha lines have been measured with x-ray CCD camera as well as the two-dimensional electron temperature when the electron temperature is high enough (~3keV) with additional ECH to NBI plasma. The source of Ti impurity is Ti gettering, while the source of Cr and Fe impurities is stainless steel of vacuum vessel. The radial profiles of impurity line intensity can be reconstructed from the best fit of the contour of impurity line intensity calculated using equilibrium code to that measured with CCD camera. The reconstructed radial profiles of Ti, Cr and Fe K-alpha line intensity are localized at $\rho < 0.4$, where the electron temperature exceeds 1.0keV as predicted by the temperature dependence of emission cross section of Ti, Cr and Fe. The concentrations of Ti, Cr and Fe measured with CCD camera are 0.2%, 0.07% and 0.06%, respectively. The radial intensity profiles of Ti K-alpha and Fe K-alpha lines agree with those calculated with the assumption of constant impurity concentration ($n_{\text{Fe}}/n_e = 0.06\%$, $n_{\text{Cr}}/n_e = 0.07\%$; $n_{\text{Ti}}/n_e = 0.2\%$).

論文の審査結果の要旨

本学位論文は、ヘリカル型プラズマ閉じ込め装置CHS及びLHDにおける軟X線CCDカメラを用いたプラズマ測定に関するものである。軟X線CCD検出器を利用したX線エネルギー分布計測は、天体観測では10年以上前から広く行われていたが、今回磁場閉じ込めプラズマ測定用に初めて導入された。X線CCDカメラはX線の強度が強い場合には画像モードとなりエネルギー分解能を持たないが、X線の強度が弱い場合には光子計数モードとなりエネルギー分解能を持つ。画像モードによる測定によって、有限 β (β =プラズマ圧力/磁気圧) プラズマのシャフラーノフ・シフトが従来に比べてより簡便に、且つ、より正確に測定出来るようになった。また、光子計数モードによる測定によって、従来の測定方法では得られなかった電子温度や不純物線の $K\alpha$ 線強度の2次元分布が初めて得られるようになった。

梁君は、CCDカメラの画像モード、或いは、光子計数モードに適合するように、タングステンのピンホール (0.03, 0.1, 0.3mm^{*}, 0.5mm[†]) とベリリウムフィルター (10, 30, 70, 140, 300, 800 μ m[†]) を用いることによってプラズマからのX線の量を調節した。高エネルギーのX線がタングステンの板を透過するのを防ぐために、タンタルのアーチャー (0.5mm^{*}, 12mm[†]) をピンホールの前面に取り付けた。同カメラの1024×512ピクセルは、プラズマの横長断面を主半径方向、高さ方向、各々57cm×29cm (CHS)、188cm×94cm (LHD) の範囲に対応し、プラズマのほぼ全断面を観測することが出来る。まず、CHSプラズマのシャフラーノフ・シフトを観測した。シャフラーノフ・シフトはプラズマの圧力によって、プラズマが主半径方向外側にシフトする現象である。従来は、電子温度やイオン温度分布のピーク位置から評価していた。フィルターを通した後の軟X線発光強度分布は電子温度 (イオン温度) 分布よりもピーキングするので、視線方向積分の測定であるという不利を差し引いても、本方法は、電子温度分布のピーク位置からシャフラーノフ・シフトを求める方法よりも正確である。具体的には、以下の手順による。広く用いられている3次元平衡コードVMECによって有限 β プラズマの磁気座標 (等圧力面) と実座標との対応を求めた。各ピクセルにわたって、平衡計算結果からの発光強度の視線積分と測定結果の差の二乗和が最小となるように、磁気座標の関数としてのX線発光強度分布を最適化した。プラズマの平均 β 値と β 分布をスキャンすることによって、最小二乗和の最小値を与える磁気軸 (真空磁気面の磁気軸位置との差がシャフラーノフ・シフト) を計測値とした。ここで、VMECコードに入力として与えるプラズマの β を測定する方法として反磁性測定があるが、この方法は磁場に垂直方向の圧力のみを測定しているため、測定できない平行方向の圧力は垂直方向の圧力に等しいと仮定せざるを得ない。中性粒子ビーム (NB) の接線入射によってプラズマを加熱することは一般的に行われているが、ビームの減速時間がプラズマの閉じ込め時間よりも長い場合には、接線方向のビーム圧力がプラズマの平衡を決める上で重要になる。実際、CHSにおいてプラズマ密度が低い場合には、ビームの減速時間が閉じ込め時間よりも長くなり平行方向圧力が垂直方向圧力の数倍になってしまう。そのために、反磁性測定からの圧力を用いた平衡計算からのシャフラーノフ・シフトは実測値よりも小さくなる。CHSにおいて、この差、即ち、プラズマ圧力の非等方性を密度の関数として求めることが出来た。一方、LHDにおいては、プラズマ閉じ込め時間が長く、ビームの減速時間と同程度となるため、プラズマの圧力は密度に関係なくほぼ等方であることが分かった。光子計数モードによる測定では、X線の波高分析により、電子温度、不純物の $K\alpha$ 線の強度の2次元分布が得られた。

不純物の $K\alpha$ 線として、鉄、チタン、クロミウムの $K\alpha$ 線が観測され、これら $K\alpha$ 線の強度から、プラズマ中に含まれる鉄、チタン、クロミウムの量を評価した。これらの不純物は、真空容器の材質であるステンレスと壁のコンディショニングに使用されるチタンからスパッタされたものである。電子温度の2次元分布は電子サイクロトロン共鳴加熱時の電子輸送解析に、また、不純物線発光強度分布は不純物輸送解析に、貴重な情報を提供するものと考えられる。

本論文では、軟X線CCDカメラの画像モードによって、シャフラノフ・シフトが従来よりも正確に且つ簡便に求められることが示され、また、NB接線入射プラズマの圧力の非等方性を密度の関数として測定することが出来た。これらは、プラズマの平衡を議論する上で最も重要な情報である。一方、光子計数モードでは、電子温度分布、不純物の $K\alpha$ 線強度の2次元分布が初めて測定された。従って、本論文は学位論文としてふさわしい学術内容を持っていると認められる。

また、梁君の学位論文に関して、専門分野、基礎分野について口述により学力を確認した。CCDカメラの原理、電子回路、プラズマの平衡及びVMECコード、X線の波高分析、不純物ライン、などに関する基礎知識について、広範囲の質問に的確に答えた。第一著者としての査読付き英文論文2編がすでに出版されている。本論文は英語で書かれており、英語についての学力も十分であると認められた。また、公開発表会でも指定時間内に要領良く発表し、質疑に対する的確に対応した。

これにより、学位を与える上で十分な知識を有するものと判断できた。