

氏 名 岩 瀬 誠

学位（専攻分野） 博士(学術)

学 位 記 番 号 総研大甲第267号

学位授与の日付 平成9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 Electron Power Deposition Profile in Electron
Cyclotron Heated Plasmas

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 藤原 正巳
教 授 大久保 邦三
教 授 松岡 啓介
教 授 岡本 正雄
教 授 前川 孝（京都大学）
助 教 授 久保 伸（核融合科学研究所）

論文内容の要旨

The transport phenomena by electrons and ions in the magnetic field are important for the plasma confinement in toroidal magnetic configurations. This study is on the heat transport by electrons in the plasma confined in CHS (Compact Helical System) which employs a toroidal helical magnetic configurations. The plasma is produced and heated by the fundamental electron cyclotron resonance heating(ECH) using a high power microwave 100KW at 53.2GHz.

The microwave from the gyrotron is injected into CHS plasma from the low magnetic field side. For the normal ECH experiment in CHS, the plasma is not optically thick enough to absorb the heating power completely during one passage of the launched wave. In the plasma the local heat diffusivity at a certain radius is evaluated by the ratio of the total absorbed power within the radius to the local temperature gradient.

From this view point, the power absorption profile plays a very important role not only in the heating study but also in the transport one. In these experiments the estimation of the power absorption profile by electrons is extensively studied to understand the heating mechanism and the diffusive processes in the optically thin, ECH plasma.

In order to estimate the local power deposition, the ECH power is modulated and the change in the electron temperature associated with the modulation is studied. The second harmonic electron cyclotron emission (ECE) is observed to measure the local electron temperature by means of multi-channel heterodyne radiometer. The power balance analysis is applied to ECE data for each channel. The analysis assumes that the heating power is absorbed by electrons in the plasma and is diffused away from the deposited region by the diffusion processes, the convection losses and the relaxation with ions. Because the change in the electron density is considerably slower than that in the temperature, the absorbed power by electrons is determined from the temporal change in the electron temperature. To estimate the real value of the absorbed power, the time interval of the power balance analysis must be short enough to neglect the effect of the diffusive term. On the other hand, from the statistical point of view, the short time interval reduces the amount of data and increases the ambiguity in the analysis. To increase the amount of data, the modulated ECE data of every cycle (the electron temperature) are superposed in phase with the modulation of the gyrotron power during the steady state of the plasma. The statistical treatment of the obtained data is introduced to figure out the confidence interval of the absorbed power.

The analyses are examined for various time intervals to determine the optimum time interval that is short enough to reject the diffusive effect and is long enough to determine the power absorption correctly. The time interval of 0.15 ms used is found to be valid for this study, because it is much shorter than the characteristic time scale, 'adiabatic time' in which plasma loses the energy due to the diffusion. The typical values of this 'adiabatic time' are of the order of milli second in the almost whole region of the plasma.

The ray tracing code is used generally to calculate the power deposition profile of the plasma for ECH experiment. This code gives the local deposition profile for the first passage of the ECH wave. However, the power of the microwave is absorbed partially through the first passage in

the plasma, which is optically thin, and the residual wave is reflected at the vessel wall. When the microwave is reflected, the polarization and the direction are changed. Therefore, the reflected wave interacts with electrons in the whole region of the plasma. In this way, the cyclotron absorption occurs everywhere in the plasma. The 'multi-reflection' model is introduced to predict the power deposition profile for the optically thin plasma. The probability of the resonance at a certain radius depends on the total amount of the resonance area in the plasma column and on the optical depth for each radius. In the model employed in this study, the absorption of ECH power is separated by two terms. The absorption by the first passage of the microwave is calculated by the ray tracing code and the remaining power is deposited in the whole region obeying the probability determined by the resonance area and the optical depth as described above. Both the ordinary and the extraordinary modes are absorbed by the cyclotron resonance, so that the mode conversion and the mode mixing effects at the vessel wall are not distinguished in the model. The power deposition profile calculated by this model can explain well the experimentally obtained power deposition profile.

In addition, the polarization of the injecting microwave is varied from the ordinary mode to extraordinary mode to confirm the accuracy of the 'multi-reflection' model. The profile of the electron temperature changes from the sharp shape to the broad one for the change of the polarization from the ordinary mode to the extraordinary one. The theoretical calculation used above can also explain these experimental results. The confidence intervals of 90% obtained from the local analysis that is done for each ECE channel independently include the results of the 'multi-reflection' model for all polarization cases.

In conclusion, by integrating the power deposition profile of the model, the total power absorbed by the multi-reflection becomes about 40% of the total input power for the ordinary mode injection case. The electron thermal diffusivity is derived by using the power deposition profile of the 'multi-reflection' model. The accuracy in the estimation of the thermal diffusivity is also studied taking into account of the error in the estimation for the absorbed power and for the electron pressure gradient. The mean value becomes in the order of m^2/s and is consistent with other results for ECH experiment in CHS.

論文の審査結果の要旨

本学位論文はヘリカル磁場系プラズマ閉じ込め装置において電子サイクロトロン共鳴加熱により生成されたプラズマからの電子サイクロトロン第二高調波放射信号に統計処理を加えて、入射された電子サイクロトロン波の電子による電力吸収の分布を決定し、それに基づいた電子の熱輸送の実験的研究を論述したものである。

高温プラズマの閉じ込め性能は電子、イオンの熱拡散係数に強く依存し、この電子の熱拡散係数は加熱電力の吸収分布の積分により決定される熱流束と電子温度勾配に関係する。加熱電力の吸収分布の実験的測定は電子の熱拡散係数の正確な評価をもたらす、プラズマの閉じ込めと加熱機構の解明に役立つ。

本研究では低アスペクト比のヘリカル磁場系プラズマ閉じ込め装置CHSへ、電子サイクロトロン共鳴によるプラズマ生成と加熱のために入射される周波数53.2GHzの大電力ガウスビームの電力変調を行い、かつ、8チャンネルのラジオメータを用いて、電子サイクロトロン第二高調波放射からプラズマ断面内6点の位置にて電子温度の時間変化を測定した。本研究の特徴は、電力変調に同期する電子温度変調の各周期毎のデータを重畳することにより、電子サイクロトロン加熱による電子温度の時間変化のデータについて飛躍的な測定精度の向上を図っていることとそのデータに対する統計的解析にある。この実験の研究の主な結論は以下の通りである。

- (1) 電子温度の時間的変化の実験データから吸収電力を求めるため、電力収支解析を基礎に回帰解析手法を構築した。この結果、統計的信頼区間を含めた電子サイクロトロン加熱の吸収分布の導出が可能となった。
- (2) 電力収支解析を行う際、加熱電力の切断時前後における電子温度の時間微分差を計算する時間幅の重要性をプラズマの断熱時間を導入し評価した。必要な解析の時間幅は断熱時間より十分短い。
- (3) 統計評価した解析結果にプラズマ中での電子サイクロトロン波基本波の多重反射モデルと正常モードの確率的な吸収モデルを適用することにより、吸収分布の理論的な結果を求めた。
- (4) 実験的な電力吸収分布は電子サイクロトロン波の光線軌跡法に基づいた一回通過モデルの結果とは異なり、入射電力の40%が多重反射を起こし、プラズマ周辺部にもかなりの電力吸収を生じるモデルを追加することにより説明できることが判った。
- (5) 電子サイクロトロン基本波の入射モードを正常モードから異常モード成分を増やすとともに電力吸収分布が広がる。上記の吸収モデルからの計算結果はこの分布を説明できる。

本論文では上記の研究成果以外に電子サイクロトロン第二高調波加熱時における電子温度計測に必要な電子サイクロトロン第二高調波放射の受信に加熱波の混入を防ぐためのリジェクションフィルターの新しい設計法と製作、プラズマ計測への適用を論じている。

本論文に記述された研究成果で多重通過路での吸収過程を含む電力吸収の議論が光学的にグレーなプラズマに対する局所輸送解析には避けられないこと、及びプラズマ中心部以外にもかなりの電力が吸収されることを指摘したことは評価される。また、ボックスカー的な手法を可能にする加熱電力の変調の導入とデータ解析に統計的な回帰解析の導入は今

後のプラズマ大電力加熱実験の標準的入射モードにもなりうる典型的な例を示した点で意義深い。本論文は上記の観点から学位論文としてふさわしい学問的価値をもっていると認められる。

岩瀬誠君に対する学位申請論文に関わる専門分野、基礎となる分野、および周辺分野について口述により試験を行った。プラズマの磁場閉じ込めの基礎、プラズマ波動論、電磁波放射計測などについての基礎的、専門的学識や、実験と解析手法についての知識について満足な応答が得られた。また、本論文や投稿論文が英語で書かれていて、英語の学力についても十分であると認められた。