

|          |   |
|----------|---|
| 氏 名      | 神保 成昭   |
| 学位（専攻分野） | 博士（学術）  |
| 学位記番号    | 総研大甲第 841 号   |
| 学位授与の日付  | 平成 17 年 3 月 24 日  |
| 学位授与の要件  | 物理科学研究科 核融合科学専攻<br>学位規則第 6 条第 1 項該当                                       |
| 学位論文題目   | The Strike Point Pattern on the Local Island Divertor<br>in LHD           |
| 論文審査員    | 主 査 教授 大藪 修義<br>教授 岡本 正雄<br>教授 州鎌 英雄<br>教授 大西 正視（関西大学）<br>助教授 高丸 尚教（中部大学） |

## 論文内容の要旨

The Local Island Divertor (LID) is one of the divertor concepts involved in the Large Helical Device (LHD) configuration and it utilizes an  $m/n=1/1$  island formed at the edge region of the LHD. The LID has been proposed to control the edge plasma of the LHD. Control of the edge plasma by means of the LID aims to achieve high temperature divertor operation (HT-operation). It is important to investigate whether or not the particle flux, in particular the ion flux, cross the island separatrix is successfully guided to the rear side of the island where the target plates are placed to receive the particle load. If the particles strike on the front part of the LID head, then the particles neutralized on the front part cannot be pumped out, because the front part is not covered by the pumping duct. Thus, optimization of the particle orbits in the island region is the key to realize HT-operation by means of the LID. In here performance of LID is defined in the ratios of the test particles striking the front and rear parts of LID head. In order to estimate the performance of the LID system, we should investigate strike point patterns on the LID head.

Assuming HT-operation is achieved it is expected that the neoclassical effect on the edge transport becomes important. Since the edge plasma in HT-operation is collisionless, the orbits of charged particles become complex compared to the field lines; i.e. the effect of the Coulomb collision causes the transition between a passing particle orbit in the 3D field line structure and a trapped particle orbit in toroidal and helical ripples (localized and/or blocked particle orbits). Thus, according to the ratio of the mean free path to the connection length, the pitch angles of the particles which contribute the particle flux to the LID head is expected to vary; in the present study it is called the neoclassical effect on the edge transport phenomena. Here, the connection length is given as a length along a field line connecting the core region to the LID head estimated as  $L_c=100$  m. Monte Carlo simulation based on test particle representation is carried out in order to investigate on strike point patterns of ions on the LID head in the 3D field line structure, the edge plasma transport under HT-operation.

The strike point patterns on the LID head have been numerically observed by tracing the orbits of the guiding centers in the fixed magnetic field under the effects of the Coulomb collisions and the anomalous diffusion.

The change in strike point pattern was seen according to the change in  $\lambda_{mfp}/L_c$ . When the mean free path  $\lambda_{mfp}$  is estimated as  $\lambda_{mfp}/L_c=3$ , the strike point pattern becomes almost symmetric, and peak of strike point pattern corresponds to the intersection of the island separatrix on the LID head, where the collision frequency of the edge plasma is estimated as  $\nu=9.0\times 10^3: s^{-1}$ . In this case, the passing particles mainly contribute the particle flux to the head, thus the particles contributing the transport follow the orbits along field lines of the island separatrix. When the mean free path  $\lambda_{mfp}/L_c$  is estimated as  $\lambda_{mfp}/L_c=0.03$ , the particles escaping into the island region suffer the pitch angle

scattering sufficiently and are carried to a far region from the island separatrix. In this case the particles strike mainly the inside in front of the LID head and decrease the number of particles that reach rear side separatrix. When the mean free path  $\lambda_{\text{mfp}}/L_c$  is estimated as  $\lambda_{\text{mfp}}/L_c=0.3$ , the strike point pattern becomes not symmetric, and peak of the strike point pattern is located at the edge of the head. In this case, the particles transit between a passing particle orbit and a trapped particle orbit in toroidal and helical ripples. So trapped particle orbits escaping into the island region suffer the pitch angle scattering and are carried to inside of region from the island separatrix. Passing particle orbits move along field lines of the island. Around the head,  $\mathbf{B} \times \nabla B$  motion of particles are downward. Therefore, the particle that approaches the head from the upper part reaches the head easily, and the particle that approaches from the lower side doesn't reach the head easily. Broken symmetry of strike point pattern is caused by this effect.

The neoclassical effect plays the important role in determining the strike point patterns on the LID head. The performance is improved according to the rise of  $\lambda_{\text{mfp}}/L_c$ . The above results are not easily treated in fluid representation.

## 論文の審査結果の要旨

大型ヘリカル装置（LHD）におけるダイバータの概念の一つである局所磁気島ダイバータ（LID）では、中性粒子の高効率排気のためコアから流出してきたプラズマがダクトに覆われているLIDヘッド背面に導かれる必要がある。このためコアから流出した粒子のストライクポイント分布の物理特性を理論的に理解することが重要である。本論文では、LHDのLIDダイバータのイオン（プロトン）によるストライクポイント分布をテスト粒子シミュレーションによって解析した。多数のイオン粒子の案内中心軌道を追跡し、モンテカルロ法でピッチ角散乱を与え、ストライクポイント分布に対する新古典的な粒子輸送の効果を主として調べた。また、磁力線に垂直方向の異常輸送の効果も考慮した。

まず、LIDヘッド上のストライクポイント分布特性の衝突領域に対する依存性については、粒子の平均自由行程と、磁力線の結合長（プラズマ粒子がコアから磁気島に流出する位置とLIDヘッドの位置とを繋ぐ磁力線の長さ）の比に従い、分布が大きく変化し、LIDヘッドにストライクする主要な粒子軌道の種類（補足、非補足）の割合が変化することを見出した。粒子の平均自由行程が比較的長い場合は、ストライクポイント分布は主として磁気島セパトリクスの磁力線に沿った通過粒子軌道により特徴づけられるが、比較的短い場合は、捕捉粒子軌道が主として決める。つまり、コアから磁気島へ流出した粒子が、捕捉粒子軌道に乗ってバウンスモーションを繰り返し、トーラス外側方向に磁気島内部深く輸送され、LIDヘッドの端に主にストライクすることが分かった。結果として、粒子の平均自由行程が結合長と比べて長くなればLIDヘッドへの粒子束に寄与する主要な粒子軌道はLIDヘッド背面へ導かれ、LIDがその目的通りに機能することが理論的に示された。

また、本論文では、ストライクポイント分布に非対称性があることを初めて明らかにした。粒子の平均自由行程が短い場合、幾何学的に等価に機能するLIDヘッドの上部と下部ではストライクする粒子の分布に大きな差が見出された。このことは、従来の流体モデルによる解析では予想できない結果であった。この分布の非対称性が、粒子軌道に対するgradBドリフトの効果により物理的に説明できることも明らかにした。

磁力線に垂直方向の異常輸送の効果については、乱れた磁場中でのプラズマ輸送をガウス過程としてモデル化し、イオン粒子の案内中心運動にブラウン運動を加えた確率微分方程式を解くことにより調べた。異常輸送によりストライクポイント分布はLIDヘッド上で拡がり、gradBドリフトの効果が大幅に軽減されると予想されるが、数値解析の結果、異常輸送の効果も考慮してもストライクポイント分布に対する新古典輸送の効果は有意であり、分布の特性を理解する上で不可欠であることが示された。

さらに、本論文において開発されたシミュレーションコードは、LID配位における周辺プラズマの粒子輸送解析のみならず、一般的な3次元磁場中での

輸送に対する新古典効果の数値解析にも応用できる極めて汎用性が高いコードであり、将来における広範な研究テーマへの活用も予見される。本研究のシミュレーションコード開発においては、高度なベクトル化・並列化技法が駆使され、多数のイオン粒子の運動計算とL I Dヘッドへのストライクポイント分布導出をハイパフォーマンスコンピュータにおいて高効率に処理できるように工夫が行なわれ、このことによりL I Dヘッドへの粒子輸送に対する正確かつ高速な数値解法が実現された。

本論文は、L I Dヘッドへのストライクポイント分布に対する新古典効果を初めて研究し、流体モデルによる従来の解析では予想できない分布の非対称性を明らかにし、その物理的理解を深めた。また、広範な研究テーマへの活用も予見される汎用性の高いシミュレーションコードの開発も行なった。このように核融合周辺プラズマ研究に寄与する新しい知見を得ており、よって、博士論文としての価値を十分に有し、合格であると判断する。