

氏 名 水 口 直 紀

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大甲第460号

学位授与の日付 平成12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 Simulation Study on Relaxation Phenomena in
Spherical Tokamak

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 佐藤 哲也
教 授 濱田 泰司
教 授 林 隆也
助 教 授 中島 徳嘉
教 授 高瀬 雄一（東京大学）

論文内容の要旨

It is well known that relaxation phenomena which take place in thermonuclear plasma have great influence on the confinement in not only that it is usually harmful to sustainment of configuration, but sometimes that the confinement is improved to much better state by relaxation. The Taylor's theory [*J.B. Taylor, Rev. Mod. Phys.* **58**, 741 (1986)] is one of the most successful and useful theory describing relaxation phenomena, in which the total magnetic energy is minimized under the constraint that the total magnetic helicity is conserved. However, it is not sufficient to be applied for real fusion plasma because it ignores the existence of plasma pressure. On the other hand, the achievable plasma beta value in experiments has been increasing in recent years. In particular, the spherical tokamak concept is attracting a great deal of attention because it has excellent properties in the confinement and the stability at high β , and the engineering economy. Therefore, a generalized theory on relaxation phenomena including the effect of plasma pressure is needed. In this thesis, we shall try to reveal the dynamics of pressure-driven relaxation phenomena observed in spherical tokamak plasma, which is so-called IRE (Internal Reconnection Event), by means of a numerical simulation. IRE is observed as a rapid fall in the soft X-ray signal and an increase in the net toroidal current, together with a drastic deformation in overall shape. However, the physical mechanism of IRE had not been clarified at all until this study was carried out. The simulation results are full of suggestion for both improving the confinement of spherical tokamak plasma and understanding the general nature of the pressure-driven relaxation phenomena.

The simulation is based on the nonlinear three-dimensional magnetohydrodynamic equations. It is executed in a full toroidal spherical tokamak geometry including an open external magnetic field region, so that the dynamical behavior of an IRE, such as a large distortion in overall shape, can be properly treated. The spontaneous time development of tiny perturbations applied on an initial unstable equilibrium is pursued by a high-accuracy scheme.

The simulation results successfully reproduce the key features of IRE in good agreement with experimental observations. The dominant linear eigenmodes for an initial condition including a $q=1$ rational surface are found to be a combination of several low- n modes. Especially, the $m=2/n=2$ and the $m=1/n=1$ pressure-driven interchange modes grow simultaneously with almost the same large growth rate. As a result of the nonlinear development of such low- n modes, which induce an elliptically elongating and shifting convection flow in the poloidal cross section, a pressure bulge appears on the surface of the torus in a toroidally localized region, where the radial positive displacements of each mode are aligned to each other. The localized deformation generates a current sheet structure near the separatrix, which induces magnetic reconnection between the internal and external magnetic fields. The reconnected field line links the core region at high pressure and the peripheral region at low pressure, so that a large pressure gradient is formed along the reconnected field line. The confined plasma is rapidly expelled out of the torus due to the flows induced by the pressure gradient. The expelled plasma extends in the periphery, forming a characteristic helically twisted conical layers at the top and the bottom of the torus, which is in good agreement with experimental results observed by using a CCD camera. On the other hand, the plasma pressure at

the center of the torus falls into about 40% of that at the initial state in a short time scale of several tens of Alfvén transit time, which also agrees well with experiments. After releasing a part of heat energy out of the separatrix, the system is once stabilized with respect to ideal modes. However, another kind of an instability, which has a nature of a resistive mode, is excited. This instability includes an $m=2/n=1$ component dominantly, and can be destructive compared to the linear modes. Due to the growth of this instability, the overall shape of the torus is largely distorted, which agrees with experimental observations, such as the tilting and the axis-asymmetric elongation of the torus.

More detailed analyses of the simulation results show several interesting dynamics on pressure-driven relaxation phenomena, such as an almost parallel magnetic reconnection, formation of a tunnel-like convective loss channel due to the magnetic reconnection between the internal and the external fields, and spontaneous phase alignment among multiple modes on weakly nonlinear development of pressure-driven instability.

論文の審査結果の要旨

プラズマ中に生起するエネルギー緩和現象やその結果として現れる自己組織化現象に関してはいわゆる Taylor のエネルギー変分原理による平衡理論などが知られているが、近年核融合プラズマで到達している高ベータプラズマに適用できるような普遍的理論ではない。特に、プラズマ圧力が重要な役割を果たすような緩和過程の普遍法則を探ることは、複雑なプラズマの振る舞いを理解する上で未開拓であり、重要な研究課題として残されている。申請者はこのような問題意識のもとに、計算機シミュレーションを用いた動的な方法論で取り組むにふさわしい現象をサーベイすることから研究をスタートし、最近高ベータプラズマの閉じ込めで注目を集めている球状トカマクに着目した。特に、その実験でしばしば観測されているエネルギー緩和現象 (IRE; Internal Reconnection Event と呼ばれている) の物理機構の解明を具体的課題として選び出した。本課題の対象とする緩和現象では短時間のうちにグローバルなプラズマ圧力構造の遷移および熱エネルギーの散逸が進行することが観測されており、全過程を無撞着に解明するには外部領域も含めた開いた系のモデリングの開発が必須であろうと着想した。その着想を実現する磁気流体シミュレーションモデルを開発し、複数モード数の圧力駆動型不安定性の非線形時間発展を追跡し、実験で観測されている奇妙な構造変化をきわめて忠実に再現するシミュレーション結果を得ることに成功した。トーラス内部の現象とトーラス外部領域の動的な相互作用が本質的に重要であるとの知見を得ることによって物理機構の解明にも大きな寄与を与えた。さらに、複数モード間の位相の自発的整列現象や、磁力線方向の高速プラズマ流の噴出を伴う磁気リコネクション発生、それに伴うトーラス内部での回廊状プラズマジェット流の形成に起因する熱エネルギーの急速な流出など、非線形過程として注目すべきいくつかの新しい現象を発見した。緩和現象に関する非線形時間発展全過程の解明というアプローチは、これまでの球状トカマク理論ではまったく行われていない斬新なものであったため、得られた成果は国際会議などの場において大きな注目を集めた。また、計算結果に含まれる複雑な3次元構造の物理を直感的に理解するために、仮想現実装置など先進的可視化装置を縦横に使いこなすなど、シミュレーション研究の進め方に新機軸を取り入れていることも特筆に価する。この3次元シミュレーション計算は最大級のスーパーコンピュータを用いても1ラン当たり百時間単位のCPU時間を必要とする大規模なものであるが、申請者は周囲の研究者と議論を重ねながらコード開発、実行、結果の解析と物理機構の理解、というサイクルを繰り返し、本研究を完成させた。

水口直紀氏の学位論文の審査は、本人による本論文の内容の説明と、これに引き続く詳細な質疑応答により行った。その結果、申請者は本論文の意義を明確に審査員を納得させるとともに、物理学一般、プラズマ物理学、数値解析など数物科学において広くしっかりした学術知識を身につけていることを確認した。また、2月4日に行われた公開発表会においても、1時間の発表を明解に行い、それに引き続く質疑応答に対しても的確な対応を行った。また、査読付き英文論文を5編(内2編は主著者)、和文論文を1編(主著者)を発表している。本論文は英語でまとめられたものであり、英語の学力に関しても十分であると認めた。

以上の結果により、本審査委員会は試験に合格と判定した。