

学 位 論 文 の 要 旨

球状トカマクへの小型トーラスプラズマ移送合体による燃料供給法の実現可能性検証のためのシミュレーション研究

(Simulation study for feasibility verification of merging fueling method by translating a small torus plasma into a spherical tokamak)

氏 名 小池 晋太郎 印

磁気閉じ込めプラズマを利用した核融合発電を実現するためには、高温プラズマの定常維持が不可欠である。特に、核融合反応によって失われた燃料粒子を供給する技術（つまり燃料供給技術）の開発は定常維持に向けた必須課題である。しかしながら、核融合反応を起こすために必要な 10 keV（約 1 億度に相当）を超える高温のプラズマでは、燃料粒子がプラズマの周辺領域で電離し付与されるため、プラズマ中心にまで燃料粒子を供給することができないという大きな問題が残されている。本学位論文では、新たな燃料供給技術の実現可能性を明らかにするために、モンテカルロシミュレーション、電磁流体力学（MHD）シミュレーション、および粒子軌道計算を実行し、その結果と考察が論述される。球状トカマク（ST）の合体燃料供給法を中心に、高ベータ磁気閉じ込めプラズマの移送技術を応用した燃料供給法に関する研究成果が示される。

高ベータ磁場反転配位（FRC）プラズマは内部に構造体を持たない単連結構造であるため、軸方向移送が可能である。中性ガスを封入した領域へ FRC プラズマを秒速 100 km で高速移送すると、電離反応や荷電交換反応により中性粒子がイオン化しプラズマ内部に供給されるため、粒子供給技術の一つであるガスフロー入射と等価的な役割を果たす。中性ガス領域への FRC 移送燃料供給法について、粒子供給・磁束供給・加熱効果を、シミュレーションにより検証した。モンテカルロ法による電離判定とそこからのイオンの粒子軌道シミュレーションモデルを構築し、中性ガス密度 $1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、FRC の最大プラズマ密度 $2.3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ の条件で重水素、ヘリウム、アルゴンに対してシミュレーションを実行したところ、中性ガスはどの粒子種でもほぼ 100% プラズマ内部で電離した。これを受けた軌道計算の結果、質量の大きいアルゴンはプラズマへのエネルギー供給効果は高いものの、一方で慣性力も大きいため FRC の閉じた磁力線への捕捉効率が低く、放射損失を誘起することを考慮するとヘリウムが適していることが示された。また、供給プロセスの詳細なメカニズムを検証するための 2 次元 MHD シミュレーションを行ったところ、FRC の捕捉磁束増

大も観測され、プラズマ圧力が増大して径方向フローが誘起されたことが原因であることを明らかにした。

STプラズマ（以下、主プラズマ）への小型トラスプラズマ（以下、副プラズマ）移送合体過程の3次元MHDシミュレーションを実施し、粒子供給効率を調べた。副プラズマの励起・生成が完了した状態からの外部コイルによる初期加速、プラズマ移送、主プラズマとの衝突合体の過程を明らかにした。本シミュレーションにおけるプラズマの初期分布は、Grad-Shafranov方程式の解を2つ軸方向に並べて配置し、初期加速用の外部コイル磁場を重畳することで副プラズマの移送をモデル化した。

シミュレーションの結果、副プラズマが移送され、主プラズマと衝突した後、吸収される合体過程が再現された。移送合体過程について以下の3点について知見が得られた。1) 主と副プラズマ間に働く力の体積平均を調べた結果、合体時の加速はプラズマ電流による引力が支配的であることが確認された。2) 移送過程において、主と副双方のプラズマ内部にポロイダル方向の回転流速が発生していることが明らかにされた。3) 移送の初期段階で、不安定性の発生が確認された。磁力線を追跡しポアンカレマッピングによって磁気面構造を観測したところ、不安定性の発生と同時に磁気面構造が崩壊していることが判明した。主と副プラズマの磁力線が結合していることも確認された。

不安定性の発生は、閉じた磁気面に捕捉されていたプラズマ粒子が磁気面構造の崩壊とともに損失し、開いた磁力線領域へ排出されるため、粒子供給の観点から好ましくない。不安定性の発生が合体现象を駆動しているかを確認するため、3次元シミュレーションとの比較を行った。この結果、2次元シミュレーションでも合体は確認できるため、必ずしも不安定性の発生が合体现象を駆動している訳ではないことが明らかになった。また、プラズマの電気抵抗率をパラメータとする複数の計算結果より、抵抗性バルーニング不安定性であることが示された。

以上の結果より、本研究のケースでは、抵抗性バルーニング不安定性の発生による磁気面構造の崩壊が起きているものの、再結合過程やローレンツ力による合体の促進といった合体燃料供給法で期待される現象の確認はなされた。バルーニング不安定性に対する安定平衡の研究を進めつつ、燃料供給効果の評価を行う意義は十分存在すると結論付けられた。

しかしながらMHDシミュレーションでは、副プラズマに保持される粒子を主プラズマに供給する際の粒子供給効率を定量的に評価できない。なぜなら、主と副のどちらのプラズマに含まれる粒子であるかを、MHDモデルではラベリングできないからである。そこで、磁場の時間変化を逐次反映した粒子軌道計算を行うことで粒子供給効率を定量化するシミュレーション技法を開発した。この技法を用いて合体现象により主プラズマに供給された粒子数を調べたところ、本研究のケースでは最大で、副プラズマが初期に保持する30.5%に相当する粒子数を供給できることが明らかにされた。

学 位 論 文 の 要 旨

Simulation study for feasibility verification of merging fueling method by translating a small torus plasma into a spherical tokamak

(球状トカマクへの小型トーラスプラズマ移送合体による燃料供給法の実現可能性検証のためのシミュレーション研究)

Shintaro Koike

(小池 晋太朗)

In order to realize nuclear fusion power generation using magnetically confined plasma, steady state maintenance of high temperature plasma is indispensable. In particular, the development of technology to supply fuel particles lost by nuclear fusion reaction is an essential task for maintaining a steady state. However, in high-temperature plasma exceeding 10 keV (corresponding to about 100 million degrees) necessary for causing a nuclear fusion reaction, fuel particles are ionized in the peripheral region of the plasma and supplied thereto. Therefore, the nuclear fusion research remains a serious problem that fuel particles cannot be supplied to the core of the plasma. In this thesis, Monte Carlo simulation, magnetohydrodynamics (MHD) simulation, and particle trajectory calculation are performed to clarify the feasibility of a new fueling technology, and the results and considerations are discussed. Research results on the fueling method applying the transfer technology of high beta magnetic confined plasma are shown, centering on the merging fueling method of spherical tokamak (ST).

Since the high beta field-reversed configuration (FRC) plasma is a singly-connected structure with no structure inside, it can be translated in the axial direction. Neutral particles are ionized by ionization reaction or charge exchange reaction and supplied to the inside of the plasma when FRC plasma is translated at a high speed of 100 km/sec to the region filled with neutral gas. Therefore, it plays an equivalent role to gas flow injection which is one of particle supply techniques. Particle supply, magnetic flux supply, and heating effect by FRC translation fueling method to neutral gas area was verified by simulation. In this study, simulation of the ionization reaction by the Monte Carlo method and construction of a particle orbit simulation model of ions that received ionization calculation result were made. Simulation was performed on deuterium, helium, and argon under the conditions of neutral gas density of $1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ and maximum plasma density of FRC of $2.3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$. As a result, nearly 100% of the neutral gas is ionized inside the plasma in any particle species. From the orbit calculation, it was found that argon having a larger mass has a higher energy supply amount to the plasma. However, due to its larger inertia force, the trapping efficiency to the closed magnetic force line of FRC is low. Considering the induction of radiation loss, it was shown that helium is suitable. In addition, when two-dimensional MHD simulation was performed to verify the detailed mechanism of the supply process, an increase in trapped magnetic flux of FRC was also observed. It was found that this is due to the fact that the

plasma pressure increases and consequently the radial flow is induced.

Three-dimensional MHD simulation of the translation process of a compact torus plasma (hereinafter referred to as sub plasma) to an ST plasma (hereinafter referred to as main plasma) was carried out to examine the particle fueling efficiency. From the state where the excitation and generation of the sub plasma is completed, the initial acceleration by the external coil, the plasma translation, and the process of the collision merging with the main plasma were clarified. The initial equilibrium of plasma in this simulation was reproduced by arranging solutions of the Grad-Shafranov equation in two axial directions and modeled translation of sub plasma by superimposing the external coil magnetic field for initial acceleration.

As a result of the simulation, the sub plasma is translated, and after colliding with the main plasma, the merging process in which the sub plasma is absorbed was reproduced. Findings are obtained on the following three points on the translation merging process. 1) As a result of investigating the volume averaged forces acting between the main and sub plasma, it was confirmed that the attraction by plasma current is dominant in acceleration at the time of merging. 2) In the translation process, it was revealed that the rotating flow velocity in the poloidal direction is generated inside both the main and sub plasmas. 3) At the initial stage of translation, the occurrence of instability was confirmed. Tracking of magnetic lines of force and observation of the magnetic surface structure by Poincare mapping showed that the magnetic surface structure collapsed at the same time as instability occurred. It was also confirmed that magnetic lines of force of the main and sub plasma are connected to each other.

The occurrence of instability is undesirable from the viewpoint of particle supply since the plasma particles confined in the closed magnetic surface region are lost with the collapse of the magnetic surface structure to the open magnetic force line region. In order to confirm whether the occurrence of instability drives the merging phenomenon, a two-dimensional MHD simulation with no occurrence of three-dimensional instability was executed and compared with three-dimensional simulation results. As a result, it was clarified that the occurrence of instability does not necessarily drive the merging phenomenon, since merging can be confirmed also in two-dimensional simulation. In addition, from the results of several calculations using the electrical resistivity of the plasma as a parameter, the instability observed in this study was shown to be resistive ballooning instability.

From the above results, in the case of this study, although the collapse of the magnetic surface structure is caused by the occurrence of the resistive ballooning instability, the key phenomena of the merging fueling method such as the magnetic recombination process and the promotion of merging by the Lorentz force are observed. It was concluded that there is sufficient significance of evaluating fueling effect while promoting research on stable equilibrium against ballooning instability.

However, in the MHD simulation, it is impossible to quantitatively evaluate the particle fueling efficiency when supplying the particles held in the sub plasma to the main plasma. This is because the MHD model cannot label which particles are confined in the main and sub plasmas. Therefore, we developed a simulation technique to quantify the particle fueling efficiency by performing particle trajectory calculation

reflecting temporal change of the magnetic field successively. Using this technique, the number of particles supplied to the main plasma by the merging phenomenon was investigated. As a result, in the case of this study, it was revealed that the number of supplied particles corresponds to a maximum of 30.5% of the number of particles initially held by the sub plasma.