

氏名	PIANPANIT, Theerasarn
学位(専攻分野)	博士(学術)
学位記番号	総研大甲第 1965 号
学位授与の日付	平成29年9月28日
学位授与の要件	物理科学研究科 核融合科学専攻 学位規則第6条第1項該当
学位論文題目	Particle simulation study on the formation of the detached plasma
論文審査委員	主査 教授 増崎 貴 教授 石黒 静児 准教授 菅野 龍太郎 教授 大野 哲靖 名古屋大学 教授 畑山 明聖 慶應義塾大学

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

The handling of the large heat flux from the core of the fusion reactor becomes a major issue in designing the future reactor. Due to the small area of the open magnetic field region or scrape-off-layer (SOL) that hits the divertor target, the parallel heat flux can go beyond 500 MW/m² in the present devices. The operation in detached regime in which the strong reduction of plasma heat and particle flux to the target is one of the favorable methods to solve the above issue. The experiments for the basic understanding of the detached plasma have been carried out in the linear devices. The simple geometry of linear devices gives a beneficiary in performing the experiment for the mechanism and the dynamics of the detached plasma. The linear devices experiment is carried out by injecting the neutral gas near the target. The neutral gas which does not tie to the magnetic field can freely spread the local heat load from the plasma to the wider area. Numerical simulation based on the fluid model of the collisional transport equations is widely used to study the particle and heat transport along the SOL region. These transport equations are derived based on linear perturbation of the Fokker-Planck kinetic equation and only valid for highly collisional plasma. The fully self-consistent kinetic simulation which is free from the assumption of the short mean free path is necessary for the verification of the existing fluid model.

In this work, Particle-in-Cell (PIC) simulation with ion-neutral, electron-neutral and Coulomb collision has been developed to study the formation of detached plasma. This simulation focuses on the plasma density and temperature that are in the region of the linear devices due to the limitation of PIC simulation in which the time and spatial scale need to be in the order of plasma frequency and Debye length. The simulation is introduced with the particle and energy sources that can give the constant input energy. The upstream density is fixed by varying the particle injection inside the source region. The plasma is bounded by particle absorbing and potential floating targets. However, the system can be divided into half of the size due to the symmetry of left and right target. The uniform neutral gas density region in front of the target is inserted with fixed temperature and pressure. Both energy and momentum are removed at this neutral gas region.

The first study is set with the same Coulomb collisionality as the linear device experiment. The results of the transformation from the attached to detached plasma when the neutral gas pressure increases can be seen. In the case of high neutral gas pressure, after reaching the steady state, the steep temperature gradient profile along the field line inside the neutral gas box is found. This is caused by the strong e-i energy relaxation process, the energy from electron transfer to ion, then the ion-neutral collision processes remove the energy and momentum from ion. This

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

reduces the total heat flux from the plasma. The plasma temperature near the target is almost constant and this gives rise to the large peak of plasma density near the target. This is caused by the constant particle flux along the field line. When temperature near the target is almost constant, the constant particle flux to the target can only be sustained by a positive slope in the plasma density because of the proportional of particle flux to the pressure gradient. The time evolution of plasma density profile exhibits the shifting of the plasma density peak from the ionization region to downstream during the detached state. The detached plasma formation is confirmed by the strong total pressure dropping inside the neutral gas region. The sheath structure is self-consistently formed in front of the target, and this structure can only be simulated by the fully PIC simulation. The kinetic effect on the electron and ion distribution functions can be observed at the target. In low neutral pressure case, the electron distribution function shows the departure from Maxwellian due to the energetic electron from the upstream plasma. The ion distribution function becomes narrow with the supersonic flow due to the acceleration of ion through the sheath. However, in high neutral gas pressure case, the deviation from the Maxwellian becomes small and we believe that in the strong detached state the plasma behavior will approach to fluid model. The relation between the particle fluxes and the neutral gas pressure shows a decrease in particle flux with increasing neutral gas pressure. This is caused by the fixed upstream condition in our model and also the removal of ion momentum that increases the confinement time of the plasma inside the system. Also, the shift of the ionization front from downstream to upstream can be observed with the strong reduction of the heat flux at the target as the neutral gas pressure increases.

The comparison between the high collisionality and low collisionality also is carried out. In low collisionality case, only a steep ion temperature gradient can be observed and electron temperature does not strongly decrease. The reduction of ionization flux cannot be observed and also the heat flux does not decrease. These results can be explained by the energy loss for each type of atomic processes where the electrons below 5 eV rarely lose their energy through ionization and excitation process. However, if the strong e-i energy relaxation process is triggered as in the high collisionality case, electron energy can be transferred to ion and lost their energy to other atomic processes such as the charge exchange. The deviation from the Maxwellian distribution function can be observed in moderate to low collisionality. The dependence of the formation of the detached plasma on the collisionality can be confirmed in our simulation. We obtained the first result of the detached plasma by using the fully kinetic model with self-consistent electrostatic potential and our simulation can cover the wider area of the collision mean free path.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

核融合炉研究において、プラズマ閉じ込め領域から流出するプラズマを中性化してヘリウム灰や不純物を排気するためのダイバータ板の熱負荷を軽減するため、プラズマと中性ガスの相互作用などを利用して高温プラズマとダイバータ板を引き離す「非接触プラズマ」運転が検討されている。非接触プラズマについては、生成条件、運動論的效果、接触・非接触状態の遷移機構など、多くの未解明な課題が存在し、環状プラズマ磁場閉じ込め装置や直線型プラズマ装置による実験研究とともに、シミュレーションによる研究が行われている。

PIANPANIT 氏は、上に述べた非接触プラズマに関する未解明の課題を、運動論的シミュレーションにより解明するため、プラズマを構成する荷電粒子の運動とそれらの作る場を自己無撞着に扱う Particle-in-Cell (PIC) 法に、荷電粒子と中性粒子の衝突に伴う原子過程及び荷電粒子同士の二体クーロン衝突過程を粒子的に組み込むとともに、実験装置に対応して空間的に広がりを持つ粒子源とダイバータ板、そしてダイバータ板前面に空間的に局在する中性ガス領域を備えた、これまでに無いシミュレーションコードを構築した。さらにこのコードについて、動的に計算領域を分割するアルゴリズムを導入して CPU 間のロードバランスを保つなど、並列型スーパーコンピュータに高度に最適化することで、扱えるシステムサイズを従来の PIC シミュレーションより大幅に拡大した。これにより、従来はダイバータ板直近の空間のみだった空間スケールを、実験に近い空間スケールで、また、実際のイオン・電子質量比を使って行うことに成功した。

PIANPANIT 氏は中性ガス圧などのパラメータを変えて多数のシミュレーションを実行した。その結果、ダイバータ板前面へ導入する中性ガス圧を増大させると、その領域に急峻な温度勾配が現れるとともに、ダイバータ板への熱流束が減少して非接触プラズマが生成されることを示した。この過程では、イオンと中性粒子間、及びイオンと電子間の衝突が本質的な役割を果たしている。プラズマイオンと中性粒子による荷電交換衝突によりイオンの散乱とイオン温度の低下が起こり、さらにイオンと電子のクーロン衝突により電子温度が低下し、その結果、ダイバータ前面が低温度・高密度プラズマ領域となる非接触プラズマが生成されてダイバータ板への熱流の低減が起こる。この過程は、実験結果の解釈から予測され、流体モデルでも示されているものであるが、本研究で構築した運動論的シミュレーションによっても確認された。一方本研究では、中性ガス圧が低い場合などに、ダイバータ板前面のイオン流速が、壁近傍に形成されるポテンシャル構造（シース）の安定条件であるボーム条件で示される下限値と一致しないことを示した。多くの流体モデルではシース領域前面でのイオン流速をボーム条件の下限値と仮定しているが、本研究の結果はこの仮定に対する問題提起となっている。

さらにイオン・電子間のクーロン衝突の効果を確認するために、衝突パラメータを変化させて非接触プラズマ生成過程の比較を行っている。その結果、イオンと電子のクーロン衝突に関する粒子の平均自由行程がシステム長に比べて長く、衝突が少ない場合は、たとえ中性ガス圧が十分に高くても非接触プラズマが生成されず、ダイバータ板への熱流の低減も起こらないことが明らかになった。つまり、イオン温度の低下が引き起こされても、

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

イオンと電子のエネルギー緩和が起こらないと電子温度の低下が起こらない。このことは、直線型実験装置における非接触プラズマ生成実験において非接触プラズマ生成条件がプラズマ密度に依存していることに対応している。

以上のように本研究では、世界で初めて、最も基礎的な方程式を用いたプラズマシミュレーション手法である PIC 法に粒子間衝突過程を組み込み、非接触プラズマ生成過程を明らかにした。また本研究は、将来、分子過程等を含むさらに実際に近いシミュレーションを行うための基盤を構築した。これらの結果はプラズマ・核融合科学の研究に対して大きな貢献をするものであり、本審査委員会は、本論文が博士学位論文として十分な価値を有しているものと判定した。