

氏 名 藤田 慶二

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2302 号

学位授与の日付 2022 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
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Study on impurity transport by global neoclassical simulation

論文審査委員 主 査 菅野 龍太郎
核融合科学専攻 准教授
佐竹 真介
核融合科学専攻 准教授
小林 政弘
核融合科学専攻 准教授
小林 進二
京都大学 エネルギー理工学研究所 准教授
本多 充
京都大学 大学院工学研究科 教授

博士論文の要旨

氏名 藤田 慶二

論文題目 Study on impurity transport by global neoclassical simulation

The basic idea of magnetic confinement fusion is confining a plasma in a toroidal magnetic field and inducing nuclear fusion reaction. The energy released by the fusion reaction is expected as a clean energy resource. However, realizing the steady-state operation of fusion reactors is a challenging task. Particle and energy loss due to collisions and turbulence is one of the difficulties for the achievement. The collisional transport is described by neoclassical transport theory, while the transport due to microscopic turbulence is by gyro-kinetic transport theory. The primary purpose of the transport theories is identifying the detailed mechanism behind the particle and energy loss and contributing to improving the confinement properties of fusion reactors.

A fusion plasma generally contains several impurity ion species, ion species other than the fuel deuterium and tritium. In addition to helium generated by fusion reactions, moderate- Z to high- Z ions, such as carbon, iron, and tungsten are sputtered from the wall and contaminated into the plasma. Accumulation of such impurity ions in the core region can degrade the performance of the fusion reactor by diluting the fuel ions and radiating a significant amount of energy away. Ions with higher charges cause those unfavorable effects more significantly. Prevention of the impurity accumulation in the core region is thus a crucial task to realize the steady-state operation of fusion reactors.

Constant plasma surfaces of a torus plasma, which are called flux surfaces, form a set of nested tori, and the confining magnetic field lines lie on the flux surfaces. The confinement properties of a plasma are assessed by the radial particle and energy fluxes that flow across the flux surfaces. In a fusion-relevant stellarator plasma, neoclassical transport theory anticipates that a radial electric field E_r pointing inwardly (directed towards the center of the plasma) will be formed spontaneously and that the inward radial particle flux driven by the electric field is proportional to the impurity charge Z . Therefore, according to neoclassical transport theory, higher- Z impurity species are driven more strongly to the center of the plasma, and such an effect is confirmed by experiments. Therefore, accumulation of impurity ions in the core of a stellarator plasma in the presence of inward E_r seems to be unavoidable.

With such background, a remarkable phenomenon called “impurity hole formation” in the Large Helical Device (LHD) has been observed. An impurity hole is a hollow density profile of impurity species, typically carbon, formed in the core plasma where inward pointing (negative) E_r is predicted by the conventional neoclassical transport

models. The formation of the hollow impurity density profile contradicts against the prediction of neoclassical transport theory. Further, no satisfactory explanation for the mechanism behind the phenomenon has been provided by extensive gyro-kinetic turbulent transport studies to date as well. Thus, the necessity of the extensions of the transport models in the framework of neoclassical theory is indicated.

One of the most common approximations used in the conventional neoclassical simulation models is the radially local approximation. The radially local approximation neglects the radial drift velocity of guiding-center motion so that the equations of motion can be solved on each flux surface independently. The approximation is usually implemented by dropping the magnetic drift (grad-B and curvature drifts) entirely and neglecting the radial component of the $E \times B$ -drift in the guiding-center equations of motion. Another common approximation is neglecting the non-uniform part of electrostatic potential on each flux surface, Φ_1 , which is typically smaller than the uniform part by an order of magnitude or more. However, it is shown by recent studies that Φ_1 can be non-negligible for impurity transport. This is because electrostatic potential (or its derivative, electric field) is always multiplied by the charge Z when appearing in the equations of motion or kinetic equations. The radially local approximation also becomes invalid for low-collisionality plasmas with small E_r . The condition of the impurity hole discharge is found to be one of the cases in which the conventional models need to be reconsidered.

In this thesis, I thus investigated an impurity hole plasma with a radially global neoclassical simulation code including Φ_1 . In order to do so, I first extended and enabled the global neoclassical code FORTEC-3D to evaluate and consider the impact of Φ_1 on neoclassical transport. With the extended code, I simulated the impurity transport in the impurity hole plasma. The plasma is assumed to contain three ion species: hydrogen H^{1+} , helium He^{2+} , and carbon C^{6+} .

By the global simulation, it is shown that an ambipolar E_r that changes the sign from negative to positive along the radius direction is obtained as a solution of the ambipolar condition. It is also found that the radial carbon particle flux can be outwardly directed even where $E_r < 0$ and the carbon density profile is hollow. These are two of the most characteristic features of the impurity hole plasma that have been experimentally observed but not have been captured by local simulations. Further, it is found that the outward carbon flux is enhanced by considering the potential variation on the flux surfaces, Φ_1 .

Our result is consistent with that of a previous turbulent transport study in terms of the particle balance as well. It is known that the hydrogen density profile is almost unchanged before and after the impurity hole formation. This means that the neoclassical and turbulent hydrogen particle fluxes should cancel each other to keep the steady density profile. In order to sustain the impurity hole structure, the neoclassical and the turbulent carbon fluxes should balance as well. However, the

neoclassical hydrogen flux calculated by a local code is about an order of magnitude larger than the turbulent counterpart in the absolute value. Also, the turbulent carbon flux obtained in the turbulent transport study is inwardly directed and cannot be balanced by the inward neoclassical carbon flux obtained by a local neoclassical simulation. On the other hand, the neoclassical carbon flux obtained by my global simulation is outward and its value is comparable with that of the turbulent counterpart. The balance of the hydrogen fluxes between the global neoclassical and the turbulent simulation results is also achieved in the same accuracy. Without Φ_1 , the value of the neoclassical carbon flux is halved, and the accuracy of the particle balance decreases, so the significance of Φ_1 is confirmed in this comparison as well. This consistency is another outcome of the global simulation that has not been achieved by local neoclassical simulations.

By examining the global simulation results with several different conditions, it is indicated that the realization of the outward carbon particle flux under the negative E_r can be attributed to the large temperature gradient. However, in FORTEC-3D, as in other particle codes, it had not been possible to decompose the fluxes into components with respect to each driving force. If the local approximation is employed, it is possible to make the evaluation by setting all the driving forces other than the one of interest to zero on a specific flux surface and repeating this process. With FORTEC-3D, however, this is not a viable option since the global structure of the plasma parameters has the primary significance of global simulation. I thus have developed a new method to evaluate the impact of each driving force on neoclassical transport by a single global neoclassical simulation without modifying the background parameters. By this method, I indeed show that the ion temperature gradient and the ambipolar E_r contribute to the radial carbon flux in the same level, each in the opposite direction and that the cancellation between those driving forces enables the carbon impurities to be driven outwardly. It is consistent with the experimental evidence that the impurity hole is usually observed in high ion temperature gradient discharges.

The result in my thesis indicates that we have progressed one step closer to fully revealing the mechanism behind the impurity hole formation and ultimately to the complete understanding of impurity transport in fusion plasmas, which is our crucial task to realize fusion energy.

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 藤田 慶二Title
論文題目 Study on impurity transport by global neoclassical simulation

核融合炉の定常運転実現のため、燃料である水素に混入した不純物イオンを炉心プラズマから排出させることは、重要な課題である。出願者は、この課題に関連して大型ヘリカル装置 (LHD) 実験で発見された自発的な不純物イオン (炭素イオンなど) の吐き出し現象 (不純物ホール現象) において、磁場閉じ込めプラズマの荷電粒子の衝突拡散現象、その中でも特に新古典輸送現象が果たす役割を数値シミュレーションにより説明することを目標とした研究を進めてきた。従来 of 理論・シミュレーション研究において、不純物ホールが観測されるプラズマの条件 (各粒子種の温度・密度分布や磁場配位など) では、微視的乱流は不純物をより内側に蓄積させる向きに輸送すると評価されており、また新古典輸送も同様に内向き輸送になると予測されていた。これは LHD のような 3 次元磁場配位では、イオンと電子の粒子束が釣り合う両極性条件を満たすように形成される両極性径電場が、不純物ホールの条件では負になることが従来の新古典理論から予測され、電荷数 Z の大きいイオン種ほど、この負電場による内向きピンチ効果が強くなるためである。よって、これまでの研究では、実験で観測されたように、不純物密度が中心に向かって低くなるホロー分布に維持されることが説明できなかった。

従来 of 新古典輸送計算では、計算量を減らすための様々な近似が用いられている。そこで出願者は、従来 of 新古典輸送計算において近似により無視した効果を含めた、より高精度な計算法を開発し、不純物ホール現象の解析に適用した。具体的には、従来 of のいわゆる局所近似計算法で無視されてきた、磁力線を横切る方向の磁気ドリフトの効果を含んだ大域的新古典輸送シミュレーションコード FORTEC-3D を本研究において拡張・改良した。その際、高 Z イオンほど輸送計算に影響を及ぼす、磁気面上のポテンシャル非一様性 (いわゆる Φ_1 ポテンシャル) をシミュレーションにおいて各イオン種の空間分布から評価し、その影響を両極性径電場の決定を含め自己無撞着に新古典輸送計算に反映できるようにした。なお、3 次元磁場配位に対応した複数イオン種 (本研究では、水素・ヘリウム・炭素) の大域的シミュレーションで Φ_1 ポテンシャルの効果まで取り入れた計算は、出願者の研究が世界初である。

LHD で観測された不純物ホールプラズマの条件で、出願者が新古典輸送計算を行ったところ、以下のような新たな発見があった。1 : 従来 of 新古典輸送計算では全面的に負になると予測されていた両極性径電場が、プラズマ中心近くでは負だが、途中から正に遷移し、実験観測と整合する分布となること、2 : 径電場が負の領域を含め、炭素不純物イオンの粒子束が外向きになること、3 : Φ_1 ポテンシャルの効果は、径電場分布にはほとんど影響を与えないが、炭素不純物イオンの外向き粒子束を 2~3 倍高めること、4 : 別途計算した内向きの乱流粒子束と、 Φ_1 ポテンシャルを入れた場合の外向き新古典粒子束がほぼ

釣り合うこと、を見出した。1の結果は、連続的に負から正（または正から負）に反転する径電場分布を扱うことができる大域的計算法によって初めて得られたものであり、不純物ホール実験で観測された径電場分布と整合している。また、4の結果から、乱流粒子束と新古典粒子束のバランスによって、ホローな不純物密度分布の維持が説明できることを示した。さらに3および4の結果から、 Φ_1 ポテンシャルを考慮することが、粒子束バランスの定量的評価において重要であることが示された。このように、拡張された大域的新古典輸送計算法を用いることで、不純物ホール現象の観測結果と整合するシミュレーション結果を世界で初めて得ることに成功した。

出願者は、さらに、どのような物理的要因により外向き粒子束になるのかを評価するため、シミュレーションにおいて解いている各イオン種の分布関数のMaxwell分布からのずれの原因を、駆動力ごと（密度勾配、温度勾配、径電場）に分けて評価する新しい手法を考案した。このような評価法は、局所近似計算では容易に行うことができるが、大域的計算法で1度の計算で各駆動力からの寄与を分解して評価することを可能にしたところが出願者の新手法の独創的な点である。この手法を用いて、炭素不純物イオンの磁気面上における密度の2次元分布を駆動力ごとに分解した。その空間構造から、温度勾配に駆動されたポロイダル断面における上下非対称な炭素密度変動成分によって生じる外向き粒子束の寄与が、負の径電場に駆動される内向きの寄与を打ち消し、正味の外向き不純物粒子束をもたらすことが明らかになった。この結果は、不純物ホール現象がプラズマ中心のイオン温度勾配が強くなるプラズマにおいて観測されるという実験事実とも整合している。

以上のように、出願者の研究によって、不純物ホールプラズマにおける不純物イオンの粒子輸送の詳細が初めて数値シミュレーションによって明らかにされた。この研究で開発された数値シミュレーション手法は、LHDプラズマに限らず、様々な異なる磁場形状を持つ核融合炉の閉じ込め磁場配位に広く適用可能であり、今後核融合炉の実現に向けた研究を進めていく上で不純物新古典輸送を予測し、不純物蓄積を抑制する運転シナリオを構築する上でも重要な役割を果たすものと期待でき、学術的にも高く評価される。

以上の理由により、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するものと判断した。