

氏 名 KHLOPENKOV KONSTANTIN VICTOROVICH

学位（専攻分野） 博士(学術)

学位記番号 総研大甲第392号

学位授与の日付 平成11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 Impurity Transport Study by means of Tracer-Encapsulated
Pellet Injection

論文審査委員 主 査 教 授 松岡 啓介
教 授 須藤 滋
助 教 授 佐藤 國憲
教 授 近藤 克己（京都大学）
教 授 加藤 隆子（核融合科学研究所）

論文内容の要旨

Understanding of the heat and particle transport processes is highly important since it determines the feasibility of controlled fusion. The particle transport in plasma can be analyzed by observing the motion of impurity ions introduced artificially into plasma, which are different species from the main plasma ions. This can be done by impurity pellet injection when the source profile of the impurity is created along the path of the pellet ablation. The pellet should be made of a low Z material such as lithium in order to provide a fast and complete ionization of the injected impurity. This essentially simplifies the calculations as the source term in the particle balance equation can be neglected.

Experiments with Li pellet injection into Heliotron E plasma have brought important information about main characteristics of Li ions during the pellet ablation and also about the transport properties of Li ions after the injection. The transport coefficients have been calculated by simulating the experimental data by means of the impurity transport code, taking into account the impurity puffing from the wall and the impurity recycling. However, because of the non-local initial source of lithium ions, there is no clear transient process to analyze and the transport task requires an account of a variety of factors.

As an accurate diagnostic for local particle transport, a new method of TECPEL (tracer-encapsulated cryogenic pellet) injection is proposed, which provides reliable information about transport in plasmas without the need for complex measurements of all the plasma parameters. With this method, the local transport is measured directly by observing evolution of a small particle source as tracer, which is initially localized within a limited plasma volume. The tracer particles are deposited locally by the TECPEL, which consists of a small core as the tracer of a light atom and the major outer layer of a frozen hydrogen isotope. When such a pellet enters the plasma, the outer layer is ablated first, which allows the tracer core to reach the central plasma region with a higher temperature. This results in a more intensive ablation of the core providing the necessary localization of the deposited tracer ions. It is shown that in this case, the diffusion coefficient can be calculated analytically from experimentally observed evolution of the impurity density.

A device for production and acceleration of tracer-encapsulated cryogenic pellet has been constructed and tested experimentally. For a technical demonstration of the device operation, a $240\ \mu\text{m}$ diameter carbon sphere is encapsulated in a $\phi 3 \times 3\ \text{mm}$ cylindrical hydrogen pellet. The accelerated TECPEL is photographed from two perpendicular directions simultaneously.

From the obtained images, the 3D geometry of TECPEL has been reconstructed and found to be consistent with the projected dimensions. Thus, the proof-of-principle of the device operation has been successfully demonstrated.

As application for the existing fusion devices with a medium size plasma, an alternative configuration of the pellet made of non-cryogenic materials has been proposed. The idea of the tracer-encapsulated solid pellet (TESPEL) injection will be still advantageous if the emission of the core ions can be observed on the background emission of the major pellet ions. From various TESPEL configurations tested, the most appropriate one has been selected in the form of a polystyrene shell (300 μm diameter and 50 μm wall thickness) containing a lithium hydride core (50 μm diameter). This configuration has been experimentally realized and the produced TESPELs have been successfully accelerated with conservation of the TESPEL's integrity. Calculation of the TESPEL ablation rate has demonstrated that the obtained TESPEL dimensions and achieved pellet velocities are appropriate for injection into a medium size plasma.

For proving the essential concept of the new diagnostic method, a series of experiments with TESPEL injection has been carried out for the case of CHS plasmas. The light emission from the ablating pellet is registered in $\text{H}\alpha$ and Li I (or Li II) lines with high time resolution, and the space resolution is provided by the CCD photography. From these measurements, the information is obtained about the exact location and width of the deposition of tracer material, and this confirmed that a good localization of the tracer has been achieved. The experimentally measured TESPEL ablation rate is compared with the calculation based on the impurity pellet ablation model, and a good agreement has been found.

Behavior of the tracer ions deposited locally in the core plasma region was observed by CXRS method using the heating neutral beam as a source of neutral atoms for the charge-exchange reaction with Li^{+3} ions. The observed diffusion was found to be consistent with the theoretical calculations, and the experimental data have been simulated by means of the impurity transport code for obtaining the transport coefficients. The difference in the diffusion coefficient for various plasma configurations is discussed.

Thus, a new diagnostic method for particle transport study with TESPEL has been experimentally implemented for the first time. The results from CHS have proved the new diagnostic concept from the both viewpoints of the production method of a tracer-encapsulated pellet and observation of the transport properties of the tracer particles.

論文の審査結果の要旨

本学位論文は、プラズマの粒子輸送の実験的解明に関するものである。従来、この研究は、1) 水素、重水素などのプラズマ構成粒子の氷状ペレットの入射、2) 構成粒子とは異なる不純物ペレットの入射、3) これら粒子のガスパフや不純物のレーザーブローオフによる入射、によってそれら密度の外乱を与え、その後の時間変化を測定することによって行われてきた。しかしながら、これらいずれの方法においても単一組成のペレットなどを用いることのため、トレーサーとなるべき粒子をプラズマ中に局所的に注入することが出来なかった。クロペンコフ君は二層の不純物ペレットを開発することによって局所的な注入に成功し、小型ヘリカル装置CHSの実際のプラズマにおいて拡散係数などの評価を行った。この二層ペレット入射は世界で初めてのものである。

クロペンコフ君は、最初、京都大学の中型ヘリカル装置ヘリオトロン-Eにおいて単一組成のリシウム (Li) ペレットを入射し、粒子輸送解明の実験を開始した。この実験において、不純物を分光学的に計測し、不純物輸送計算コードとの比較を行うことによって拡散係数などの評価を行った。しかしながら、Li不純物がプラズマ周辺から溶発することによるLi粒子源の注入が空間的に広がっており、評価に曖昧さが残った。この後、不純物粒子をプラズマ中に局所的に注入するための開発に取り組み、炭素球 (直径約200 μm) を氷状水素 (直径1-3mm) の中に内蔵する二層ペレットを開発した。炭素が水素の氷の中央に位置しておれば、局所的な注入が出来ることになる。高速 (約 300m -1000m / sec) で飛行するペレットの2方向からの同時2次元撮影から3次元画像を求める方法を開発した結果、炭素が必ずしも氷の中央に内蔵されているとは限らないことが分かった。また、この方式のペレットはサイズが比較的大きく大型装置に適しているものの、中型・小型の装置のプラズマに対しては、入射によってプラズマそのものを輻射損失によって崩壊させてしまうことが分かった。これらの問題を解決するために、ポリスチレンの薄皮中空シェル

(厚さ数10 μm) の中に不純物粒子を内蔵する方法を開発した。一方、Liは化学的に活性であり扱いが容易でないことと均一なサイズのLi粒 (直径数10 μm) を作る事が困難なため、いくつかの候補の中からLiHを選択した。このTESPEL (tracer-encapsulated solid pellet) と呼ばれる二層ペレットの開発によって、トレーサー粒子のプラズマ中への局所的な注入が可能になった。なお、クライオ技術を必要としないため装置は簡便になるという長所も併せ持っている。これを用いた入射実験をCHSにおいて行った結果、

- 1) トレーサーイオンの拡散の空間分布を中性粒子入射加熱ビームを利用した荷電交換分光によって測定した結果は、計算とよく一致する。
- 2) 粒子拡散係数は、プラズマの小半径及び電子温度が大きくなるにつれて大きくなる。

ことなどが示された。

本論文では、粒子輸送解明のために従来から行われていた単一組成のペレット入射に伴う粒子注入の空間的曖昧さを二層ペレットを世界で初めて開発することに

よって解決した。二層ペレットを用いた実験において、新たな知見が得られている。LHDを含む将来の核融合実験装置における粒子輸送解明に新たな展望を開くものであり、本論文は学位論文としてふさわしい学術内容を持っていると認められる。

クロペンコフ君の学位論文に関して、専門分野、基礎分野について口述により学力を確認した。プラズマ粒子の輸送に関する基礎知識、分光計測、3次元画像作成技術、ペレット生成技術、粒子輸送コードの理解などについて広範囲の質問に的確に答えた。これにより、学位を与える上で十分な知識を有するものと判断できた。また、英文論文(top author)を2編発表している。本論文は英語で書かれており、英語についての学力も十分であると認められた。