

氏 名 宮 沢 順 一

学位（専攻分野） 博士(学術)

学 位 記 番 号 総研大乙第125号

学位授与の日付 平成15年9月30日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 Study of Fueling on the Large Helical Device
by Gas Puffing and Compact Toroid Injection

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 金子 修
教授 加藤 隆子
教授 山崎 耕造
助教授 永田 正義 (姫路工業大学)
助教授 坂本 瑞樹 (九州大学)

論文内容の要旨

Establishment of a fueling method in hot and large plasmas is one of the important issues to realize the fusion reactor. An ideal fueling system for the steady-state fusion reactor should be as simple as the gas puffing, simultaneously achieving high fueling efficiency as the ice-pellet injection. Furthermore, the fueling method that can improve the confinement property of the main plasma is favorable. In this thesis, two fueling methods in the Large Helical Device (LHD) are studied. One is the gas puffing, which is the most basic fueling method, and another is the Compact Toroid (CT) injection, which is the most advanced fueling method. For reliable density control by gas puffing, it is important to understand the response of the plasma density to the gas puff flux. The fueling efficiency of gas puffing in LHD has not been known, while it has been estimated as $\sim 10\%$ in diverted tokamaks. Determination of the fueling efficiency is often complicated and one should carefully consider the particle balance. Investigation of the confinement improvement is one of the important themes of the fusion plasma experiment. Making use of the flexibility of gas puffing that the working gas can be changed from hydrogen to other high-Z gasses, it is possible to change the plasma property. The confinement improvement due to the high-Z gas puffing has been reported from tokamaks as known as the radiative improved mode. The high-Z gas puff experiment can be more easily carried out in currentless LHD plasmas, since there is no concern about the dangerous current disruption. In the meanwhile, gas puffing is not capable of the direct fueling into the hot plasma core, which is thought to be favorable for the fusion reactor. One of the possible methods is the CT injection, where a high-density magnetized plasmoid is accelerated and injected into the target plasma. CT injection has been carried out in small/medium tokamaks. However, it has not been obvious if this can be applied to the large helical plasmas. Technically, the critical pass of CT injection in LHD lies in the long-distance transfer of CT. The distance from LHD port to plasma center is about 4 m. Since such a long distance transfer has not been reported, it is necessary to carry out the experiment for proof.

In this thesis, the fueling efficiency of gas puffing in LHD has been estimated for the first time. The 'effective' fueling efficiency of hydrogen gas puffing ranges from 10 to 50 %, in LHD. Here, the effective fueling efficiency is defined as the time derivative of the total number of electrons divided by the electron flux supplied by gas puffing. The particle balance analysis reveals that the recycling flux increases during the gas puffing and causes the high effective fueling efficiency. At the limit of small recycling flux, the effective fueling efficiency decreases to $\sim 10\%$, which can be taken as the 'real' fueling efficiency of gas puffing in LHD. In the helium gas puff discharge, where the recycling flux is large, the effective fueling efficiency is

larger than the hydrogen gas puffing and approaches 100 %. This can be related to the large recycling coefficient of more than 0.95.

Two representative examples of the high-Z gas puff experiment in LHD are also presented. The particle confinement was improved in the high-density pellet shot after the methane mixed hydrogen gas puff discharges. Only four discharges introducing $\sim 20 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3$ of methane caused the reduction of the radiation loss and the level of metal impurities as expected as the real time carbonization effect. Decay rate of the electron density was mitigated in the pellet shot after methane discharges. Transport analysis shows 60 % reduction in the particle transport coefficient at the half of the averaged minor radius. In the neon gas puff experiment, reduced ion number density resulted in the higher ion temperature than that obtained in hydrogen plasmas. The electron energy confinement of neon plasmas is highlighted and revealed to be similar to that of hydrogen plasmas. In both cases, the global electron energy confinement strongly depends on the electron gyro-radius. A new scaling law that describes the global electron energy confinement of hydrogen and neon plasmas in LHD has been derived.

The possibility of CT injection experiment on LHD has been researched based on the CT orbit calculation and the development of a CT injector named SPICA (SPheromak Injector using Conical Accelerator). CT trajectories in the helical magnetic field were calculated and the possibility of central fueling was confirmed with a model CT of 0.2 m diameter, 10^{22} m^{-3} electron density, and 300 km/s initial velocity, in the case of CT injection into LHD magnetic field of 1.5 T. A CT of spheromak-type magnetic configuration can be formed using co-axial plasma gun. Optimization of the CT injector for LHD has been carried out and a conical electrode for CT compression is adopted in the design. Point-model of CT acceleration in a co-axial electrode was solved to optimize the electrode geometry and the power supplies. Based on the results, SPICA was developed and the CT acceleration experiments have been carried out. SPICA is the largest CT injector in the world, which aims at fueling. In the experiment, high speed CT of over 200 km/s was obtained. It was also demonstrated that the CT could be transferred more than 3.6 m after the acceleration. These results indicate that SPICA has enough performance to carry out the CT injection experiment on LHD.

The basic objective of this thesis is to extend our knowledge on the fueling and the related physics problems. Although the knowledge obtained here is limited, it will be available for understanding the fueling physics. In the investigation of other fueling methods, such as the pellet injection, and the neutral beam injection, the information presented in this thesis will give the basis for comparison. Even for the complementary study of tokamak plasmas with helical plasmas, the results of this thesis can afford the basic database.

論文の審査結果の要旨

宮澤順一氏の申請論文は、核融合炉において持続的な核融合反応維持のために灰除去と共に無くてはならない核融合プラズマへの効率的な燃料供給方法について、現在の代表的な粒子供給手段である燃料ガス注入システム（ガスパフ）を用いたプラズマ生成実験と、将来的にプラズマ中心への直接粒子供給が可能と期待される「コンパクトトロイド（CT）入射装置」の開発について、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）の大口徑プラズマを適用対象として論じたものである。論文は英文で書かれた5章120ページの構成で各課題について要領よく述べられている。内容は以下の通りである。

申請者はまず従来精密な評価をされてこなかったガスパフによるプラズマ生成効率（導入した水素ガス量のプラズマ密度増加に寄与した割合）を、LHDでの標準的な水素放電に於いて実験的に求めることを行った。リサイクリングの影響をダイバータへの粒子束の評価から求め、ガスパフ量との相関を評価することにより、①リサイクリングはガスパフ導入時に小さくなること、②実効的なプラズマ生成効率はリサイクリングが大きくなると良くなること、③リサイクリングが小さな時は10%程度に落ち着くこと、を明らかにした。これらはいずれも従来は変化のないものと考えられがちであったものであり、その傾向も含め明らかにした意義は大きい。さらに申請者はガス種の変更が容易であるというガスパフの持つ利点を利用し、①メタンガスをプラズマ中に導入することにより実時間カーボナイズーションを行い不純物流入の抑制とリサイクリングを促進すると粒子閉じ込めの改善を見たことや、②ネオンガス導入によるネオン（高Z）プラズマ生成を行い電子の閉じ込めが水素プラズマと電子の規格化ラーマー半径に対して同じ依存性を持つことなど興味ある現象を見いだすことにも成功している。これらは大きな放射損失を伴う原子価数の大きなガス種のプラズマを比較的安定に生成できるLHDの特徴を活かして初めて実現できる実験でもある。

このように取り扱いの容易なガスパフは、しかしながらプラズマが高温・高密度となる将来の核融合炉ではプラズマ中心部への燃料供給が困難になると考えられ、代わってそれを実現させる手法として期待されているのがCT入射である。この方法は自身の持つ磁場で閉じ込められた高密度プラズマの固まり（CT）を燃料として直接核融合プラズマ中心へ入射しようというものである。申請者はスフェロマクタイプのCTを大口徑プラズマへ入射することをめざし装置開発に着手した。具体的にはLHDを対象とし、要求されるCTの条件（体積、粒子密度、速度、入射場所など）をシミュレーションにより求めた。次にそれを実現するためのCT生成および入射システムの設計と製作を行った。そして初期実験により目標とする仕様を持ったスフェロマクタイプのCTが生成されることを確認した。これはCT入射装置としては現時点で世界最大のものである。この実績を基にさらに、CT入射を大型核融合装置に適用する上で必須となるCTの空間輸送実験に取り組んだ。そしてCTの密度を上げるため円錐型の加速圧縮電極を考案し、射出された磁化プラズマを200 km/sの速度で4m下流まで導くことに初めて成功した。この結果は大型核融合装置へのCT入射実現への道を開くものとして高く評価できるものである。

審査委員会では以上のような論文内容について物理的、工学的に吟味した結果、論文は核融合研究の最前線において十分な学術的価値を持っていると判断した。申請者は関連す

るテーマで6編の査読付第一著者論文をいずれも核融合科学分野では名の通った英文雑誌に発表しており、研究内容が国際的に評価されていることを示している。また、申請者は他にも42件の査読付き論文に共著者として関わっており、研究者としての実績を十分挙げていると判断できる。以上のことから審査委員会は本論文が本学の博士号を授与するに値するものであると判断し、審査員全員一致で合格とした。