

直交磁場中に入射したCTの侵入距離の評価

Penetration depth of a Compact Toroid injected into transverse magnetic field

○柳凌太郎¹, 関太一³, 小林大地², 浅井朋彦², 郷田博司⁴, Thomas Roche⁴, 松本匡史⁴*Ryotaro Yanagi¹, Taichi Seki³, Daichi Kobayashi², Tomohiko Asai², Hiroshi Gota⁴, Thomas Roche⁴, Tadafumi Matsumoto⁴

Abstract: CT injection has been proposed for a fueling technique on the large FRC(field-reversed configuration) facility of C-2W. An experiment was conducted on a test stand for CT injection to evaluate the fuel supply to the FRC. The test stand consists of a developed CT injector and a large quartz chamber with applied transverse magnetic field simulating the confinement magnetic field of C-2W. Electron density and velocity of the CT were measured to estimate the penetration depth of the injected CT in transverse magnetic field.

1. 背景

近年、核融合炉の実現を目指したスタートアップ企業による核融合開発が活発化している。カリフォルニア州に所在する TAE Technologies 社は、理論上最も高効率な閉じ込め方式である磁場反転配位 (Field Reversed Configuration: FRC) を利用した先進燃料核融合の実現を目指して研究開発を行っている。核融合炉心となる FRC は、圧力勾配と直交するポロイダル磁束のみからなり、秒速数百 km に達する速度での衝突合体でも配位が崩壊しないロバストな磁場配位である^[1]。日本大学では、FRC を炉心とする核融合炉へコンパクトトロイド (Compact Troid: CT) 入射による FRC 核融合炉心への燃料供給の実証を目指した CT 入射実験を TAE Technologies 社と共同で進めている。これまでに C-2U 装置で行われた CT 入射実験では、秒速 100km 超に加速された CT を、FRC の装置軸に対して対向して入射することにより入射される運動量を相殺し、FRC に大きな擾乱を与えることなく粒子供給することに成功している^[2]。CT 入射法は中性子排出の少ない先進燃料を含めたすべての種の燃料をプラズマ状態で核融合炉心中心領域に供給することができ、固体ペレット法などの他の手法と比較して核融合炉心を冷却しにくいというメリットがある。

2. 原理

核融合炉心への燃料供給のためには、CT が核融合炉心プラズマの閉じ込め磁場に打ち勝ち、中心領域に到達する必要がある。導体球モデルでは、CT 表面に渦電流が誘起され、CT は自身の持つ運動エネルギーと核融合炉心プラズマの閉じ込め磁場の磁気エネルギーが等しくなる点まで侵入する。これは以下に示す式 (1) で表すことができる^[3]。

$$\int \frac{1}{2} \rho_{CT} v_{CT}^2 dV_{CT} = \int \frac{B_{ct}^2}{2\mu_0} dV_{CT} \quad (1)$$

ただし、 ρ_{CT} 、 v_{CT} 、 V_{CT} をそれぞれ CT の密度、速度、体積とし、 B_T を到達点での磁場とする。

本研究では、CT 入射装置と石英チャンバー、直交磁場コイルから構成されるテストスタンドにより、ドリフトチューブを進行する CT や直交磁場中に入射した CT の侵入距離の評価を行う。

3. 実験装置

CT 入射のテストスタンドは、Figure 1 に示すように、CT 入射装置、大型石英チャンバー、直交磁場コイルから構成される。

CT 入射装置は CT を生成し、加速する磁化同軸プラズマガン、速度計測に用いる磁気プローブアレイなどの計測器を設置するドリフトチューブから構成される。磁化同軸プラズマガンは同軸電極間に噴射したガスを介して放電させることによって、ガスをプラズマ化する。その後、プラズマを流れる電流と同軸電極が誘起

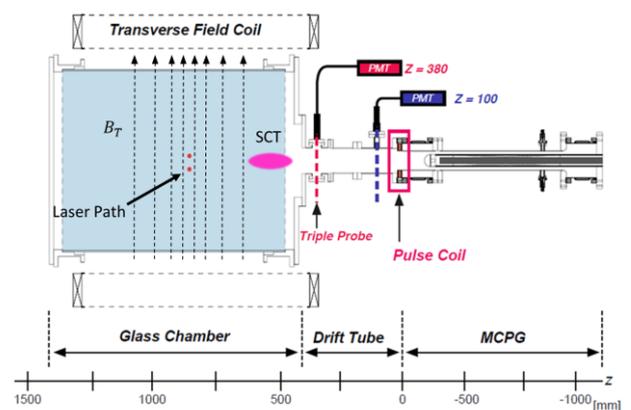


Figure 1. Test Stand for CT Injection

する磁場により、プラズモイドは自己ローレンツ力を受けて加速される。中心導体にはバイアス磁場を誘起するためのバイアスコイルを内蔵し、自己ローレンツ力によって加速されたプラズモイドがバイアス磁場を獲得してスフェロマック様CTが生成される。

直交磁場に入射するCTを外部から直接観測することができる直径800mm、長さ1000mmの透明石英チャンバーはCTに対して十分に大型であり、大型FRCまでの距離をほぼ実寸で再現できる。また、石英は干渉計に使用されるレーザー（赤外域）に対して良好な透過特性を持つ。

核融合炉心プラズマの閉じ込め磁場を模擬するための直交磁場コイルを石英チャンバーの両側に設置することで、CT入射軸に対して直交する磁場を印加する。この直交磁場コイルはC-2U装置のFRCの閉じ込め磁場とほぼ等しい強度である0.1T程度の磁場を形成することができる。

直交磁場中に入射したCTの電子密度を計測するため、Figure 2に示すように、石英チャンバーの上下にレーザー光を透過させるヘテロダイン型レーザー干渉計を製作した。レーザーが透過する位置におけるCTの電子密度を 10^{21}m^{-3} 、直径を10cmと仮定し、位相変化量が1フリンジ以内となる波長 $3.39\mu\text{m}$ のHe-Neレーザーを使用した。また、製作したヘテロダイン型レーザー干渉計はキャストによって移動させることができ、軸方向に複数の測定点を設定して直交磁場中を侵入するCTのふるまいを評価することができる。

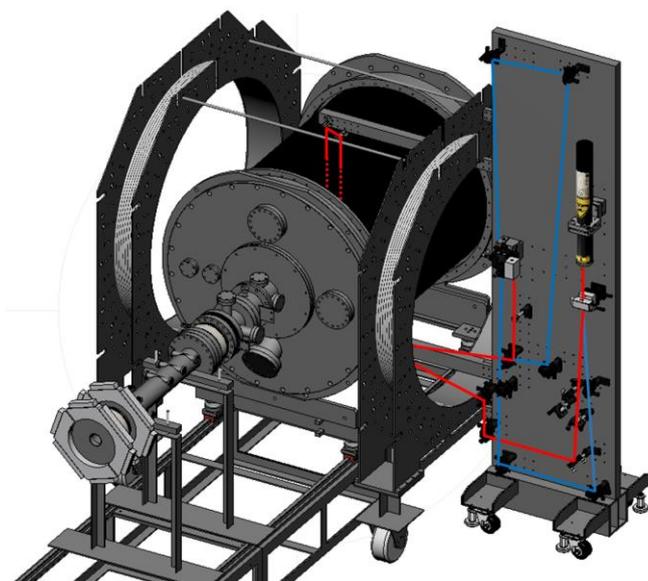


Figure 2. Electron Density Measurement for CT

4. まとめ

核融合炉心プラズマの閉じ込め磁場を模擬するために、石英チャンバーに内にCT入射軸に対して直交する磁場を形成し、磁化同軸プラズマガンによって生成したCTを入射した。磁化同軸プラズマガンのドリフトチューブに磁気プローブアレイを設置し、CTを直接観測できる大型の石英チャンバーにはヘテロダイン型レーザー干渉計を設置することで、生成されたCTの速度と直交磁場中に入射したCTの電子密度を計測する。本研究では、CT入射装置と石英チャンバーの両側に配置された直交磁場コイルから構成されるテストスタンドにより、ドリフトチューブを進行するCTや直交磁場中に入射したCTの評価を行う。CT入射法はFRCに対する燃料供給法として有望であり、本研究のテーマであるCTの侵入距離の評価やCTのパフォーマンス向上は核融合実験炉のアップグレードによる閉じ込め磁場増加の対応に貢献するものである。

5. 参考文献

- [1] 郷田博司, M. Binderbauer : 「トリアルファエナジー社による核融合研究」, J. Plasma Fusion Res, Vol.84, No.11, pp.487-498, 2008
- [2] T. Asai, T. Matsumoto, T. Roche et. al. : “Compact toroid injection fueling in a large field-reversed configuration”, Nucl. Fusion, Vol.57, No.7, 076018, 2017.
- [3] Y. Suzuki, T. Hayashi, Y. Kishimoto : “Deceleration mechanism of spheromak-like compact toroid penetrating into magnetized plasmas”, Physics of Plasmas, Vol.7, No.12, pp.5033, 2000.