

C-2U 装置における大型 FRC プラズマへの CT 入射実験 Compact toroid injection into large size FRC plasma on the C-2U device

○田中郁行¹, 江戸貴広¹, 細澤明好², 浅井朋彦³, 郷田博司⁴, Thomas Roche⁴, Ian Allfrey⁴, 松本匡史^{4, 5}
*F. Tanaka¹, T. Edo¹, A. Hosozawa², T. Asai³, H. Gota⁴, T. Roche⁴, I. Allfrey⁴, T. Matsumoto^{4,5}

Abstract: A repetitively driven compact toroid (CT) injector has been developed on the large field-reversed configuration (FRC) facility, C-2U, primarily for a particle refueling. The CT is formed and injected by a magnetized coaxial plasma gun, exclusively developed for the C-2U FRC. To sufficiently refuel particles of C-2U's long-lived FRCs, multiple CTs are necessary to be injected; thus, a multi-stage discharge circuit was developed for the multi-pulsed CT injection into FRC plasmas. C-2U experiments have demonstrated successful refueling with a significant density build-up of 20-30% of the FRC particle inventory per single CT injection without any disruptive effects on the C-2U FRC.

1. Introduction

大型 FRC (Field-Reversed Configuration) 装置 C-2U では、高出力な NBI (Neutral Beam Injection) により、高い閉じ込め性能をもつ FRC プラズマの生成に成功した^[1]。しかし、より長時間の高性能なプラズマの維持のためには、燃料粒子補給法の開発が重要な課題の一つである。これまで、核融合炉中心部への燃料供給法として CT (Compact Toroid) 入射法がトカマク型や逆磁場ピンチ型の核融合実験装置で研究されてきた^[2, 3]。

これらの知見を元に、我々は、C-2U 及び次期大型実験装置 C-2W での粒子供給を目的として、磁化同軸プラズマガンを利用した CT 入射装置の開発を行なっている。これまでに FRC に対して定常的な粒子供給を行うため、最大 1 kHz の繰り返し周波数で CT 入射が可能な放電回路を開発し、C-2U 装置で生成された FRC へ CT 入射実験を行った^[4]。

2. CT injector

本研究で用いる CT 入射装置^[5]は、同軸上に配置された内部電極と外部電極、バイアスコイル、ガス導入口で構成されている (Figure 1)。内部電極にはタングステンコーティングを施しており、不純物の溶出を防ぐ工夫がされている。また、バイアスコイルは内部電極の内部に設置され、外部電極の外側には銅製の導体シェルが設置されている。導体シェルにより、射出されるプラズモイドの鎖交磁束を変えずに放電開始部の磁場強度を増大でき、絶縁破壊を促す効果が示されている^[6]。

電極間で生成されたプラズマは、ローレンツ力により加速され、スフェロマック様の CT が射出される。

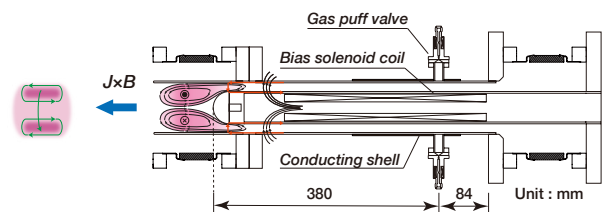


Figure 1. A schematic view of the developed CT Injector 射出された CT は、速度 ~ 100 km/s, 電子密度 $\sim 5 \times 10^{21}$ m^{-3} 程度であり、入射対象となる FRC コアに十分入射可能なパラメータを保有している (Table 1.)。

また、開発された繰り返し放電が可能な回路により、1 台の CT 入射装置から 2 発の CT を最小 1 ms のインターバルで射出可能である (Figure 2.)。

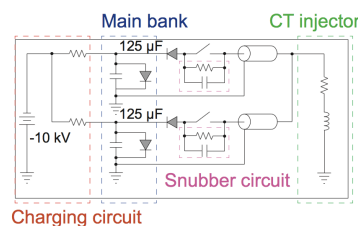


Figure 2. A schematic diagram of the multi-pulse discharge circuit

Table 1. CT parameters

Quantity	Value
n_e [m^{-3}]	5×10^{21}
T_e [eV]	20 - 30
ϕ [mWb]	0.4
v [km/s]	100
E_{tot} [kJ]	0.1 - 0.3
U_{peak} [kJ/m^3]	> 20

3. CT injectors installed on the C-2U facility

C-2U 装置は、対向した 2 つの生成領域で作られた FRC プラズマを装置中央の閉じ込め領域に高速移送し、衝突合体させることにより NBI に適したターゲットプラズマを生成している。最大 10 MW を超える高出力な NBI により、平衡配位持続時間は 5 ms、プラズマの寿命が 10 ms を超える FRC プラズマの生成に成功した^[1]。

1 : 日大理工・院 (前)・物理 2 : 日大理工・学部・物理 3 : 日大理工・教員・物理 4 : Tri Alpha Energy, Inc.
5 : University of California, Irvine

CT 入射装置は、中心断面から 1 m 離れた場所に位置し、射出された CT は閉じ込め領域の中心軸上を通るように角度をつけて設置されている (Figure 3.)

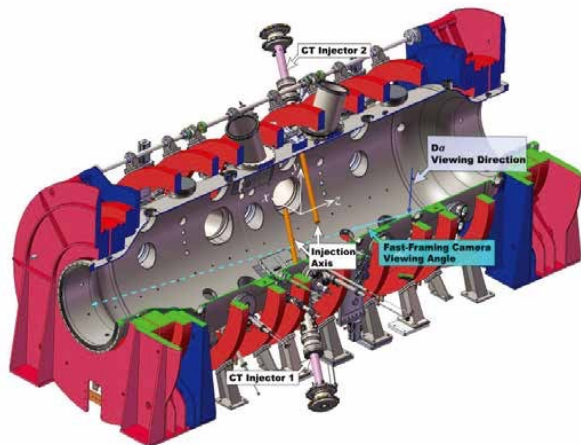


Figure 3. Arrangement of installed CT injectors on the C-2U confinement vessel

4. Demonstration of refueling by CT injection

入射された CT の軌道を明らかにするため、高速カメラによる撮影を行った (Figure 4.)。中性粒子ガスのみ入射では、FRC 外側で電離されている様子が観測され、CT 入射を行うと、FRC コア内部に CT が侵入できている様子が観測された。

多コード CO₂ レーザー干渉計により線積分電子密度を計測した (Figure 5.)。CT 入射によって線積分密度がおよそ 30% 増大し、入射された CT の粒子のおよそ 60% が入射されている。また、0.4 kHz の周波数での繰り返し入射を行い、粒子供給に成功した。

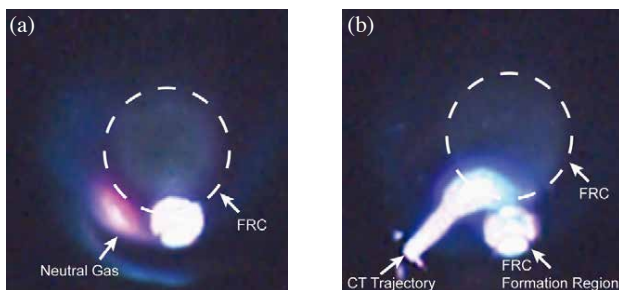


Figure 4. Fast-framing images of (a) neutral gas injection and (b) CT injection

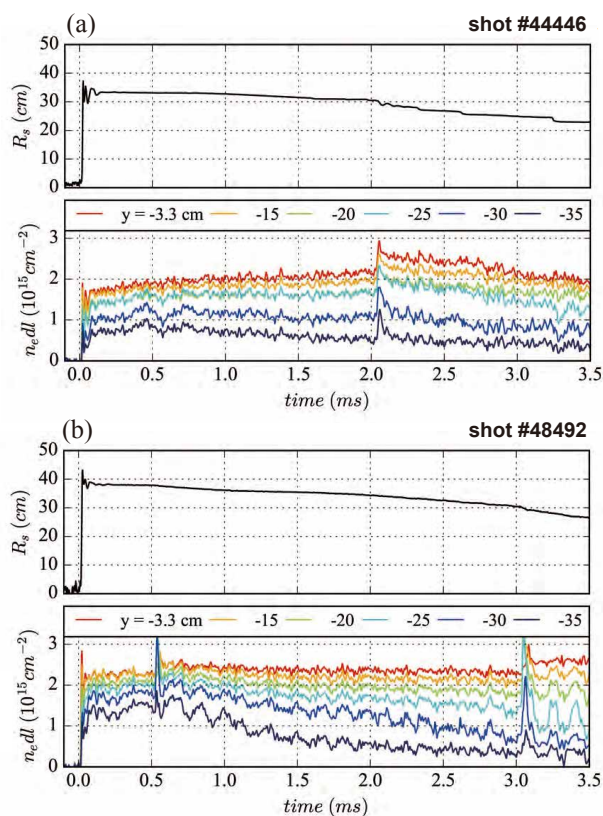


Figure 5. The time evolutions of the plasma radius and line-integrated electron density for (a) shot #44446 with an injection at 2.0 ms (single CT) and (b) shot #48492 with three CTs injected at 0.5 (single CT) and 3.0 ms (double CT)

5. Summary

ターゲットとなる FRC コアに十分入射可能な CT 入射装置および、最大 1 kHz の繰り返し周波数での CT 入射が可能な放電回路の開発を行った。C-2U 装置での CT 入射実験の結果より、電子密度や粒子数の増加など FRC 中心部への粒子供給効果が確認された。

今後は、次期大型 FRC 装置 C-2W への適用を目指し、入射エネルギーの向上へ向けた改良を行う。

6. Reference

- [1] M. Binderbauer *et al.*, AIP Conf. Proc. **1721**, 030003, 2016.
- [2] R. Raman *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 3101, 1994.
- [3] T. Ogawa *et al.*, Nucl. Fusion **39**, 1911, 1999.
- [4] T. Asai *et al.*, Nucl. Fusion **57**, 076018, 2017.
- [5] T. Matsumoto *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **87**, 053512, 2016.
- [6] T. Matsumoto *et al.*, Bull. Am. Phys. Soc. **60**, BP12.00022, 2015.