

## 磁化プラズモイド入射による FRC プラズマへの粒子供給

## Particle Refueling into a Field-Reversed Configuration Plasma by a Magnetized Plasmoid Injection

○松本匡史<sup>1</sup>, 浅井朋彦<sup>2</sup>, 郷田博司<sup>3</sup>, 田島俊樹<sup>4</sup>\*Tadafumi Matsumoto<sup>1</sup>, Tomohiko Asai<sup>2</sup>, Hiroshi Gota<sup>3</sup>, Toshiki Tajima<sup>4</sup>

Abstract: Recently, a field-reversed configuration (FRC) device developed at Tri Alpha Energy has achieved 10 ms of discharge duration by application of neutral beam injection (NBI). In the TAE's FRC operation, the energy input by NBI is just about equal to the system's energy loss, leaving the particles overall deficiency. Thus a particle refueling system is needed for long-lived FRCs, and we have developed a magnetized plasmoid injector for this purpose. The typical plasmoid parameters are as follows: average velocity  $\sim 100$  km/s, particle number  $0.1 - 1.0 \times 10^{19}$ , and electron temperature  $20 - 40$  eV. To refuel particles into the FRC, the kinetic energy density of the penetrated plasmoid must be higher than  $4$  kJ/m<sup>3</sup>, which is equal to the magnetic field energy density that surrounds the FRC. The resulting kinetic energy density of inject compact toroids was over  $20$  kJ/m<sup>3</sup>. Thus, the plasmoid can reach and collide with the FRC. The first result of successful refueling of FRC is reported.

## 1. はじめに

極限的に高い $\beta$ 値(プラズマの熱圧力/磁気圧力  $\sim 0.7$ )を有する磁場反転配位(Field-Reversed Configuration: FRC)プラズマは追加熱や電流駆動が困難なことから、その配位維持時間は数百マイクロ秒程度であった。しかし、世界最大の FRC 装置である C-2U 装置によって配位維持時間が  $10$  ms を達成したことで<sup>[1]</sup>, FRC による核融合炉の可能性が再注目され始めている。

Figure 1 に FRC の粒子損失を示す。C-2U FRC の粒子数は、 $1$  ms 間におよそ  $10\%$  損失することがわかる。それ故、長時間駆動を達成するためには、粒子供給が必要不可欠である。この粒子供給の手法として、電離された高温のプラズマの入射が可能で、急激な炉心プラズマの冷却がない磁化プラズモイド入射を採用し、開発を進めている<sup>[2]</sup>。この手法では、 $100$  km/s 以上に加速された磁化プラズモイドを入射することで、炉心プ

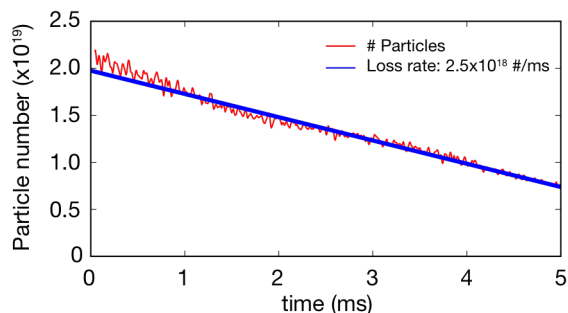


Figure 1. Time evolution of typical FRC's particle inventory in the C-2U device.

ラズマの中心部へ直接粒子を供給することが可能である。

開発した磁化プラズモイド入射装置の概要を第二節に、結果を第三節で述べる。

## 2. 磁化プラズモイド入射装置

我々が開発した磁化プラズモイド入射装置の概観を Figure 2 に示す。入射される磁化プラズモイドは、磁化同軸プラズマガン(Magnetized Coaxial Plasma Gun: MCPG)によって生成される。MCPG は同軸円筒電極構造をしており、電極間に中性ガスを封入後、高電圧を印加することで絶縁破壊が生じ、放電電流とその電流が作る自己磁場のローレンツ力によってプラズマが加速される。そしてバイアス磁場領域から射出されることでトロイダル電流が誘導され、閉じた磁力線構造を持った磁化プラズモイドが生成される。この磁化プラズモイドは、ドリフト管領域においてスフェロマック様の配位に緩和する。

開発した MCPG によって生成される磁化プラズモイ

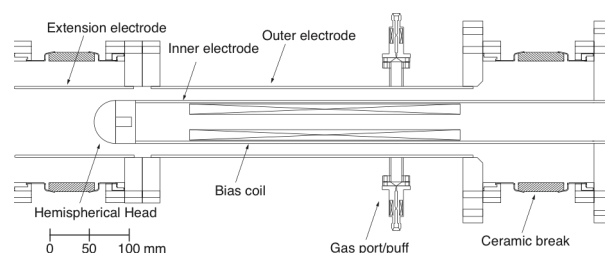


Figure 2. Schematic view of the developed magnetized coaxial plasma gun.

ドは、射出速度：100 km/s，電子温度：20–40 eV，粒子数： $0.1-1.0 \times 10^{19}$ である。また、電極間の封入ガスを調整することによって保有粒子数の制御が容易であることも特長である。

閉じ込め領域の外部磁場を通過しFRC中心部へ磁化プラズモイドが到達するためには、外部磁気圧よりも磁化プラズモイドの運動エネルギーが上回っている、つまり、 $\rho v^2/2 \geq B^2/2\mu_0$ の条件を満たす必要がある。ここで  $\rho$  は密度、 $v$  は磁化プラズモイドの入射速度、 $B$  は外部磁場強度である。C-2U 装置の外部磁場 ( $B_z \sim 1$  kG) のエネルギーは  $4 \text{ kJ/m}^3$  であるが、磁化プラズモイドの運動エネルギーは  $>20 \text{ kJ/m}^3$  であるため、磁化プラズモイドは外部磁場を横切り、FRC 内部へ容易に進入可能である。

### 3. FRC への磁化プラズモイド入射

Figure 3 に、C-2U 装置に設置された MCPG の概観を示す。本研究では MCPG を 2 台設置し、それぞれ独立に制御することで、任意の時刻に複数の磁化プラズモイドを入射することが可能である。また、開発した高速連射システムによって複数の磁化プラズモイド射出が可能であり<sup>[3]</sup>、この連射速度は最大 1 pulse/ms で、粒子供給を目的とした MCPG としては世界最速を達成した。

Figure 4 に、磁化プラズモイド入射による FRC 内の粒子数の変化を示す。時刻  $t = 1 \text{ ms}$  に両側の MCPG の主放電が起動される。入射された磁化プラズモイドは、閉じ込め磁場を横切り FRC に衝突後、FRC 内の総粒子数を 15% 以上急激に上昇させる。その後 1.5 ms の間、通常の FRC に比べ 10% 程度高い粒子数を保持させることに成功した。これによって磁化プラズモイド入射が FRC への粒子補給法の一つとなることが示された。

また、我々は片側入射、両側入射における FRC の揺

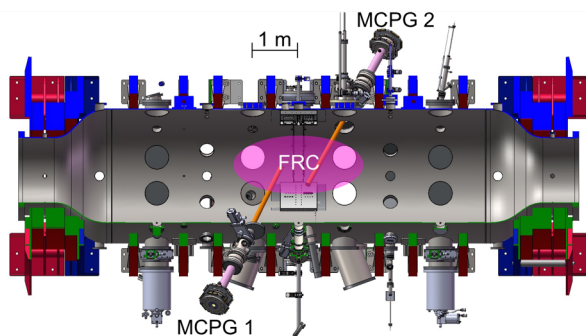


Figure 3. Installation of the MCPG on the C-2U confinement vessel.

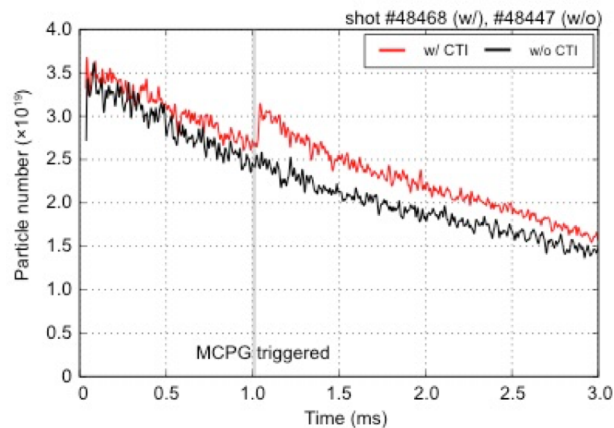


Figure 4. Comparison of the particle number between with and without magnetized plasmoid injection into FRC.

動計測を行った。片側入射の場合、磁化プラズモイドとの衝突によってFRCの周回方向の動きが確認された。一方で両側入射では、片側入射で確認されていた揺動の発生を抑制することに成功した。

### 4. まとめ

開発した MCPG によって、粒子供給の条件を満たす十分な粒子数を持ち、運動エネルギーの高い磁化プラズモイドを生成・射出することに成功した。また、FRC に大きな擾乱を与えることなく磁化プラズモイド入射により FRC 内の総粒子数を増加させることに成功した。この結果、FRC の粒子供給法として磁化プラズモイド入射が有用であることが示されたと言える。

この研究は、日本大学理工学部物理学科とカリフォルニア大学アーヴァイン校との連携の下で遂行されている。

### 5. 参考文献

- [1] M. Binderbauer *et al.*: “Recent breakthroughs on C-2U: Norman’s legacy”, AIP conference proceedings, Vol. 1721, No. 030003, 2016
- [2] T. Matsumoto *et al.*: “Development of a magnetized coaxial plasma un for compact toroid injection into the C-2 field-reversed configuration device”, Rev. Sci. Instrum. Vol. 87, No. 053512, 2016
- [3] I. Allfrey *et al.*: “Development of multi-pulse compact toroid injector system for C-2U”, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Bull. Am. Phys. Soc. **60**), BP12.00024, 2015.