

O-42

## FRC スクレイプオフ層におけるトロイダル流速とその時間変化 Time evolution of toroidal flow in a scrape-off region of a field-reversed configuration

○郷田みどり<sup>1</sup>, 藤川透雅<sup>2</sup>, 松永宏幸<sup>2</sup>, 浅井朋彦<sup>3</sup>, 高橋努<sup>3</sup>

\*Midori Gouda<sup>1</sup>, Yasuyuki Fujikawa<sup>2</sup>, Hiroyuki Matsunaga<sup>2</sup>, Tomohiko Asai<sup>3</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>3</sup>

Abstract: A field-reversed configuration (FRC) plasma formed by a field-reversed theta pinch method generally rotates in the toroidal direction after the formation phase. A FRC is terminated due to the rotational instability with a toroidal mode number  $n = 2$ . To reveal the mechanism of this toroidal spin-up, toroidal flow and its time evolution in a scrape-off layer has been experimentally measured. The measured time evolution of toroidal flow is increasing with a relatively higher frequency of oscillation. Relation of this oscillation with end-shorting has been discussed.

### 1. 背景・目的

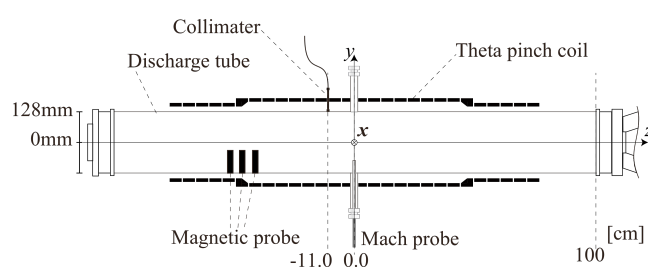
逆磁場テータピンチ法で生成される磁場反転配位 (Field-reversed configuration : FRC) プラズマは生成直後からトロイダル方向に回転することが知られている。この回転によりプラズマの断面がトロイダルモード数  $n = 2$  の変形を起こす回転不安定性が発生し、変形が成長することで FRC の配位を崩壊させる。この FRC プラズマの回転駆動のメカニズムとして、いくつかのスピンアップ理論が提案されている。

また、過去の実験において、トロイダル流速の径方向分布を測定され、速度、温度が周期的に振動している結果が得られている。これが、スピンアップ理論の一つである、装置端部において電場が短絡することによって周期的なトルクが発生する、いわゆる電場短絡効果によるものである可能性について検証する。

### 2. NUCTE-III

本研究は、NUCTE (Nihon University Compact Torus Experiment) -III を用いて行う (Fig.1)。本装置のシータピンチコイルは、中央部では内径 340mm のセンターコイル、端部では内径 300mm のミラーコイル、ともに 1 回巻きの幅 50mm を 55mm 間隔で並列に接続された 28 個のコイル素子から形成されている。真空容器には、全長 2.0m、外径 256mm の透明石英放電管を使用する。また、中央部 ( $z = 0$ ) には内径 30mm の枝管が 2 本設置されており、プローブによるプラズマの直接的な測定が可能である。

FRC プラズマの生成方法を示す。まず、放電管内部を  $1 \times 10^{-6}$  torr 程度の高真空状態にし、重水素を封入する。次に、コイルに比較的 low 周波の電流を印加しバイアス磁場を生成し、 $6\mu s$  程の周期で減衰振動する  $\theta$  方向の電流を印加し予備電離を行う。その後、バイアス



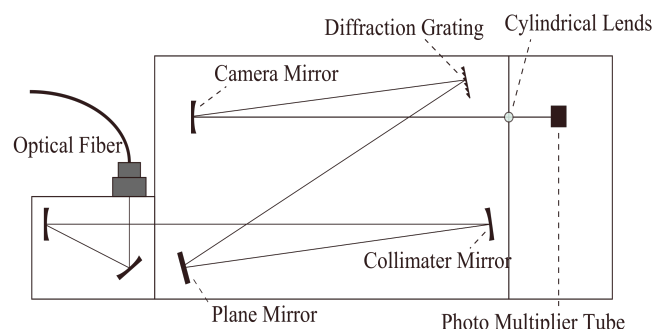
**Figure.1** Schematic diagram of the experimental device NUCTE-III.

磁場とは逆向きに立ち上がり時間の早い主圧縮磁場を印加することで、コイル端部では磁気再結合が生じ、閉じた磁力線が形成される。磁力線の張力による軸方向収縮を経て、FRC プラズマは平衡状態に達する。

### 3. ドップラー分光器

プラズマ中に不純物として混入する炭素の線スペクトルを用いたドップラー分光法により、トロイダル流速の空間分布および時間発展を観測する。

分光器の概略図を Fig.2 に示す。実験で用いた分光器はツェルニ・ターナー型分光器で、マルチアノード光



**Figure.2** Schematic diagram of Doppler shift spectroscope

1 : 日大理工・学部・物理 2 : 日大理工・院(前)・物理 3 : 日大理工・教員・物理

電子増倍管によりポロクロメータとしている。光電子増倍管のチャンネル毎の分解能は約 0.011nm に設定して測定を行った。

4. スピンアップ理論—電場短絡効果<sup>[2][3]</sup>

FRC プラズマの密度平衡は、電子とイオンのラーモア半径の差から生じる内向きの電場と、開いたの磁力線の  $E \times B$  ドリフトと開いた磁力線に対するイオン反磁性方向の和で決まると考えられている<sup>[4]</sup>。密度平衡が崩れて、FRC プラズマ内部から粒子が損失すると、電子とイオンのラーモア半径の差から荷電分離状態となる。これが、装置端部の金属フランジなどで短絡され、アルヴェーン波が励起される。このアルヴェーン波が FRC 周辺の開いた磁力線を伝播することで磁力線はねじられるが、装置端部に到達すると磁力線は元の直線状に戻る。アルヴェーン波によって生じた外向き電流による  $-j_r \times B$  方向の力から FRC はトロイダル方向のトルクを受ける。また、このとき装置端部で発生したアルヴェーン波がもう一方の装置端部で反射される。反射されたアルヴェーン波により磁力線は反対向きにねじられる。その磁力線のねじれに伴い、さらにトルクが発生すると考えられている。アルヴェーン波は装置両端から放たれるため、それらがすれ違うときには、波の重ね合わせよりトルクは最大となる。このアルヴェーン波の伝播が繰り返されることにより、結果的にトルクは周期的に変化する。

5. 検証方法

電場短絡により励起されたアルヴェーン速度は、外部磁場  $B$ 、透磁率  $\mu_0$ 、イオンの質量数  $m_i$ 、プラズマの密度  $n$  を用いると、

$$v_A = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 m_i n}} \quad (1)$$

と表される。装置の両端で発生したアルヴェーン波によって生じるトルクが最大となる周期は、アルヴェーン波が往復する距離を  $L$  として、

$$\tau_A = \frac{L}{2v_A} \quad (2)$$

と表される。これの式から NUCTE-III のアルヴェーン速度と周期を求めると、 $v_A = 44.5 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 、 $\tau_A = 4.5 \mu\text{s}$  となる。これは Fig.3 に示されたイオン速度の時間変化

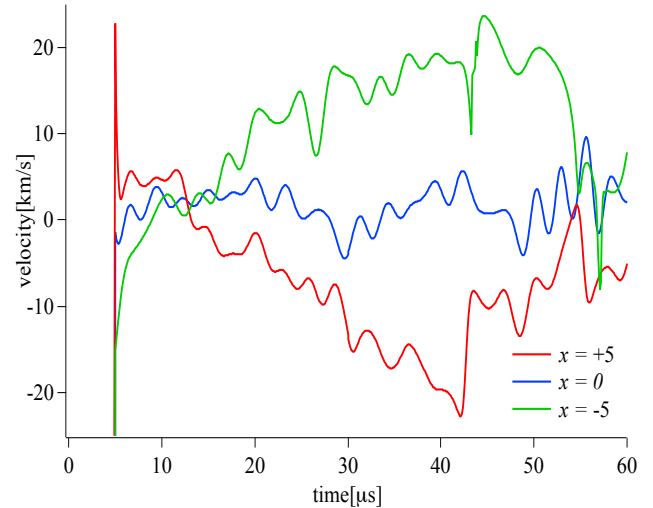


Figure.3 Time revolution of toroidal flow

に見られる振動周期に非常に近いことがわかる。

これまでの実験から、装置端部に磁化同軸プラズマガン<sup>[5]</sup>を設置した場合などに、このトロイダル流速の時間発展に見られる振動が変化することがわかっている。これらの実験事実から、FRC のトロイダルスピンアップに対する電場短絡の寄与を評価することで、FRC のスピンアップ機構について検証を進めている。

6. 参考文献

[1] 平山泰行, 「FRC プラズマにおけるトロイダル流速空間分布」, 日本大学大学院理工学研究科 修士論文, 2010.  
 [2] C.Ekdahl, R.R.Bartsch, R.J.Commisso, R.F.Gribble, K.F.Mckenna, G.Miller, and R.E.Siemon, Phys.Fluids, **23**, 1832(1980).  
 [3] Loren C. Steinhauer, Phys.Fluids, **24**, 328(1981).  
 [4] D.S.Harned, D.W.Hewett, Nucl.Fusion, **24**, 201(1984).  
 [5] 小森谷勇樹, 「磁気ヘリシティ注入に対する磁場反転配位プラズマの応答特性」, 日本大学大学院理工学研究科 修士論文, 2010.