

小型 RMF 装置における反転磁場構造の形成条件と電流駆動効率

Reversed Field Structure Formation and Toroidal Current Drive Efficiency in Compact RMF Devices

○武藤美輝<sup>1</sup>, 関太一<sup>2</sup>, 小林大地<sup>3</sup>, 浅井朋彦<sup>3</sup>

\*Miki Muto<sup>1</sup>, Taichi Seki<sup>2</sup>, Daichi Kobayashi<sup>3</sup>, Tomohiko Asai<sup>3</sup>,

Abstract: Rotating magnetic fields (RMF) are a method for driving toroidal-direction electron currents within cylindrical plasmas. Applying an external magnetic field enables the formation of closed magnetic structures such as field-reversed configurations (FRCs). In this study, a Hall probe was fabricated and measurements were performed to confirm the reversed-field structure of the plasma source generated by RMF and to evaluate the toroidal current drive efficiency.

1. 研究背景・目的

回転磁場 (Rotating Magnetic Fields: RMF) 法は円柱状のプラズマにトロイダル方向の電子電流を駆動する手法である。駆動されたトロイダル電子電流が誘起するポロイダル磁場が背景軸磁場と重畳して中心部で反転し、磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration: FRC) 様の閉じ込め磁場構造が形成される[1]。RMF 法は、外部アンテナを用いて回転磁場を印加するため、電極レス・非接触の電流駆動が可能である。電極損耗やスパッタによる不純物混入を避けることができ、定常的な運転に適している。さらに、電子が選択的に加熱されるためイオン温度の上昇を抑えながらプラズマ密度を高めることが期待される[2]。

本研究では、RMF により生成されたプラズマの反転磁場構造の形成とトロイダル電流の駆動効率を評価するためのホールプローブを開発する。

2. 実験装置

(1) RMF

式(1)のようにプラズマ柱にイオンサイクロトロン周波数 $\omega_{ci}$ よりも十分に高い周波数かつ電子サイクロトロン周波数 $\omega_{ce}$ よりも十分に低い周波数 $\omega_{RMF}$ で RMF を印加することで電子だけが選択的に捕捉され、トロイダル電子電流が駆動される。トロイダル電子電流により形成された軸方向磁場が背景軸磁場を中心部で反転させることによってFRC様の磁場閉じ込めが形成される。

$$\omega_{ci} < \omega_{RMF} \ll \omega_{ce} \tag{1}$$

ここで、各アンテナに電流 10 A を流すと、アンペールの法則により中心部で約1 mTの磁場が得られる。RMF 強度を用いて電子及びイオンサイクロトロン周波数を

求めると $f_{ci} \approx 384\text{Hz}$ ,  $f_{ce} \approx 28\text{MHz}$  となり、この条件を持たすように本研究では、 $f_{RMF} = 400\text{kHz}$  の回転磁場を印加した。

本研究では、RMF 法における回転磁場の生成に、IGBT フルブリッジインバータ回路と LC 直列共振回路を用いた。IGBT のペア 2 組を交互に動作させることでアンテナに正弦波状の電流を流すことができる。RMF を用いた多くの実験では比較的単純な 2 層 4 極構造のアンテナが多く用いられているのに対し、本研究では、3 相 6 極アンテナを採用した。位相差が  $2\pi/3$  となるように駆動することにより、合成磁場が回転して RMF が形成される。

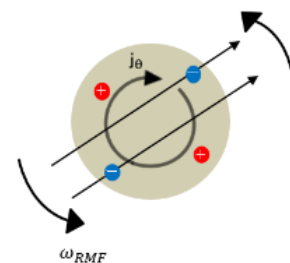


Figure 1. Mechanism of current drive by RMF

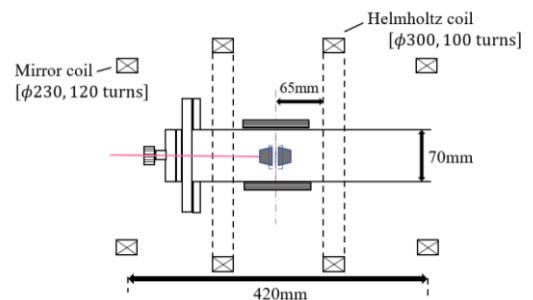


Figure 2. RMF Equipment Diagram

1 : 日大理工・学部・物理 2 : 株式会社 LINEA イノベーション 3 : 日大理工・教員・物理

(2) ホールプローブ

ホール効果の原理を利用したホール素子を用いたホールプローブにより、定常磁場の計測を行う[3].

本研究では、高精度な磁場計測を実現することを目的として、ホール素子を用いた回路設計を行い、必要に応じて回路の改良を行う。特に本研究でのホールプローブ計測は、準静的な反転磁場の計測を目的としたものである。また、ノイズ対策の手法として外部から混入する静電・電磁ノイズや電源雑音の影響を抑制するため、シールドやフィルタを導入するなどの対策を施し、安定した磁場測定が可能となるよう設計を行う。

3. 電源の増強

プラズマのエネルギーが小さく計測が困難であったことや、トロイダル電流が十分に駆動出来ていなかったという課題から、プラズマ生成時の投入エネルギーの増強を行った。現状のインバータ回路の最大充電電圧 (360 V) まで安定して運転できるように、電源系の調整を行った。充電電圧 360 V のとき、IGBT のコレクタ-エミッタ間の電圧がスイッチングノイズを含めておよそ 650 V であった。このことからスイッチングノイズ抑制のために接続しているスナバ回路が十分な性能を有しており、最大の充電電圧で運転させても IGBT の定格内で運転できることが確認された。

また、RMF の磁場出力を高くするため、充電電圧を上げて流れる電流の大きさを確認した。従来のオペレーションでは、充電電圧 100 V から 200 V 付近で実験を行っており、100 V で約 10 A、200 V で約 20 A の電流が流れることを確認した。充電電圧最大の 360 V では約 30 A の電流が流れ、充電電圧 360 V の時 100 V のときの約 3 倍の電流が流れるという結果が得られた。

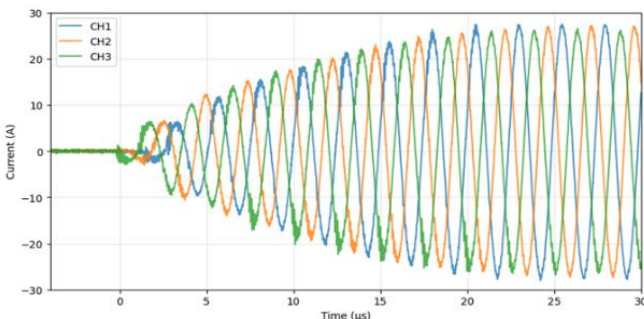


Figure 3. Three-phase coil currents of the RMF antenna

さらに、アルゴンガスを放電させてプラズマの生成を行った。充電電圧 300V で図のような発光が得られた。従来のオペレーション (充電電圧約 200 V ) と比

べ、光量が明らかに増しており、充電電圧の増加によってプラズマの発光強度が強くなることが確認された。

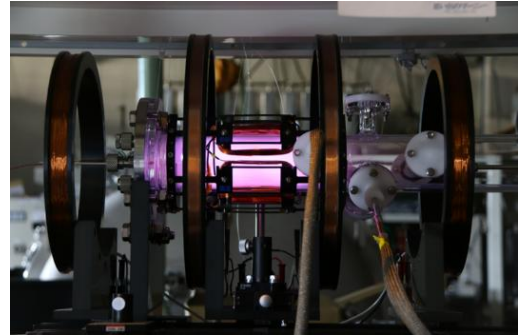


Figure 4. Argon plasma glow during RMF operation

4. 駆動効率の評価

RMF によって生成したプラズマ中のトロイダル電流の駆動効率 $\eta$ を定義するために、ホールプローブなどを用いた反転磁場の計測からトロイダル電流を導出する。このとき得られたトロイダル電流は、プラズマ中で駆動された電流量 $I_{tot}$ を表しており、RMF の作用による電流駆動の指標となる。また、RMF の印加条件から理論的に求められるトロイダル電流値の上限 $I_{max}$ を求める。式(2)において $n_0$ は電子密度、 $\omega_r$ は RMF 周波数、 $a$ はプラズマ半径である[1]。求めたトロイダル電流と RMF の上限のトロイダル電流の比から駆動効率を求めることができる。

$$I_{max} = \frac{1}{4} n_0 e \omega_r a^2 \tag{2}$$

$$\eta = \frac{I_{tot}}{I_{max}} \tag{3}$$

5. 参考文献

[1] A. L. Hoffman, “Rotating magnetic field current drive of FRCs subject to equilibrium constraints”, *Nuclear Fusion* **40**, 1523, (2000).  
 [2] S. Okada, Y. Ono, A. Ishida, T. Yamada, and Y. Hasegawa, “Sustainment and additional heating of high-beta field-reversed configuration plasmas”, *Nuclear Fusion* **45**, 1094, (2005).  
 [3] H. Y. Guo, M. Binderbauer, and T. Tajima, “Steady-State Plasmas Sustained by Rotating Magnetic Fields”, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 175001, (2006).