

回転磁場による定常プラズマ源の開発

Development of steady plasma source by rotating magnetic field

○新藤友里¹, 川合静香², 小林大地², 浅井朋彦³, 井通暁⁴, 高橋俊樹⁵, 小口治久⁶*Yuri Shindo¹, Shizuka Kawai², Daichi Kobayashi², Tomohiko Asai³,Michiaki Inomoto⁴, Toshiki Takahashi⁵, Haruhisa Koguchi⁶

Abstract: A rotating magnetic field (RMF) is a technique to drive a toroidal electron current in a torus plasma. This method is expected to realize a compact static plasma source. The plasma sustained dominantly by the accelerated electron may have a low-temperature property which is suited for ion sources. To reduce inductive coupling between coils, which becomes conspicuous especially in small systems, a three-phase RMF system has been proposed and developed in this work. Prolonged duration of plasma discharge for 0.69 second has been experimentally observed by emission measurement in this system.

1. 研究背景・目的

回転磁場 (Rotating Magnetic Field : RMF) はプラズマ柱に方位角方向の電子電流を駆動する手法であり, コンパクトトロイド (Compact Toroid : CT) の最も重要な特徴である単連結構造を保持できるため, CT 実験において磁場配位の形成・維持のために広く利用される^[2,3].

また, RMF により駆動された電子電流の外部に軸方向磁場を適用することで, 径方向の圧力平衡を維持し, プラズマの閉じ込めを実現する磁場配位を形成できる。これにより RMF 形成のためのインバータ電源以外に特殊な装置を用いずプラズマの生成と維持, 閉じ込めが可能なコンパクトな定常プラズマ源の実現が期待される。さらに, 主に電子加速によってプラズマを維持する機構であることから, イオン源に適した低温特性を有し, また磁気形成に永久磁石を必要としない温度制限のないイオン源となり得る。

本研究では, イオン源への応用を目指し, RMF を用いた定常プラズマ源の開発を行った。

2. RMF 法

プラズマ柱にイオンのサイクロトロン周波数よりも十分に高い周波数で RMF を印加すると, 電子だけが選択的に RMF に捕捉され, トロイダル電子電流が駆動される (Figure 1.)。

$$\omega_{ci} < \omega_{RMF} \ll \omega_{ce} \quad (1)$$

(ω_{ci} : イオンサイクロトロン周波数, ω_{RMF} : RMF 周波数, ω_{ce} : 電子サイクロトロン周波数)

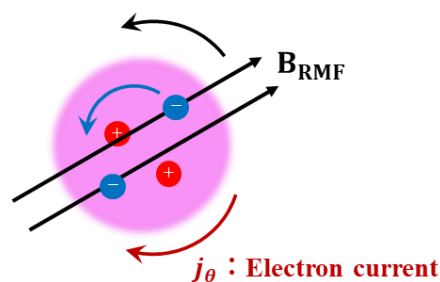


Figure 1. Azimuthal electron current driven by RMF.

また, ここに外部磁場を重畳することで磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration : FRC) 様の磁場配位を形成できる。

3. RMF 形成

Figure 2 に実験装置の概略図を示す。本装置は, 樹脂製フランジを有する石英製真空容器と, RMF 生成用アンテナコイルから構成される。本研究では, 誘導結合の低減を期待し, 三相アンテナコイルを導入した (Figure 3.)。

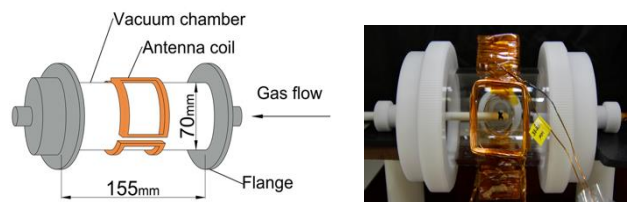


Figure 2. Schematic view of the developed RMF system.

Table 1. Coil Specifications

Shape	Rectangle (4cm×4cm)
Inductance	31μH
Number of turns	25 turns

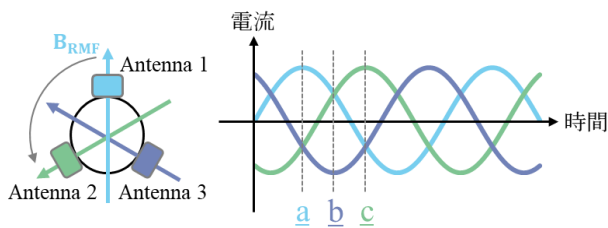


Figure 3. Ideal current waveform and conceptual diagram of RMF formation.

4. 実験結果

アンテナに駆動される電流を、ログスキーコイルにより測定した (Figure 4.)。この時の実験条件を Table 2 に示す。

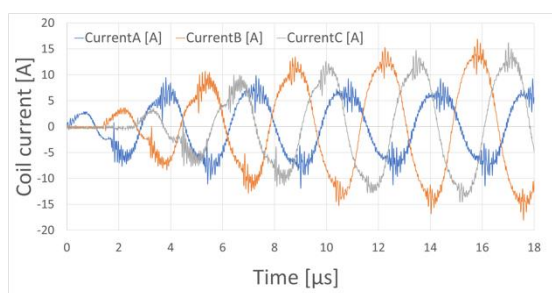


Figure 4. Waveforms of antenna current (Charging voltage : 250V).

Table 2. Experimental conditions

Frequency	~300 kHz
Phase difference	120°
Gas species	Argon
Pressure (vacuum)	4.5pa
Pressure (at gas filling)	25-30pa
Resonant capacitor	0.2μF

高速度カメラを用いて放電時のプラズマの発光の様子を観測した (Figure 5.)。

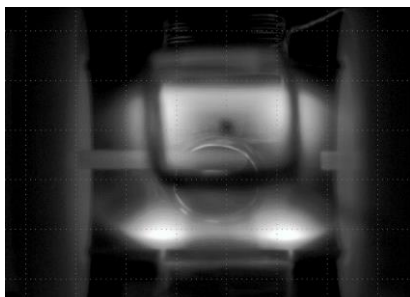


Figure 5. Optical image of RMF generated plasma (Framerate: 500fps, shutter speed: 2ms)

約 0.69 秒間のプラズマの発光が確認された。一方で、各アンテナに同位相の電流を駆動した場合は、約 0.25 秒と明らかに発光時間が減少した。このことから、

アンテナ電流に位相差を与え RMF を形成することで、長時間プラズマが維持できることが確認された。

5. 新装置

現装置による真空度の限界、計測の制限などを解決するため、新装置の開発・組み上げを行った (Figure 6.)。上記の課題解決に加え、外部磁場印加用ヘルムホルツコイルを設置できる設計とした。

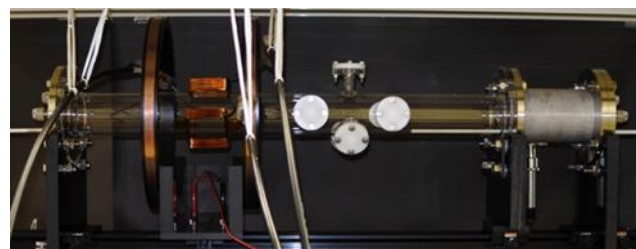
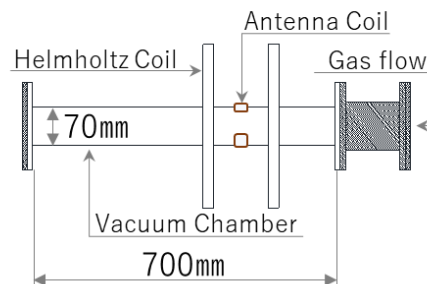


Figure 6. Schematic diagram and picture of the developed RMF system.

6. まとめ

開発した三相 RMF 装置の性能を評価するため、放電実験を行った。現装置では、約 0.69 秒間のプラズマの発光を観察した。

今後、立ち上げた新装置により真空度を改善、また装置壁によるプラズマ閉じ込めへの影響の低減を図る。これによりトロイダル電子電流が誘起する軸方向磁場の計測を行い、生成プラズマが RMF 駆動によるものであることを確認する。さらに本装置に外部磁場を導入し、閉じた磁力線配位を形成することで、放電時間の更なる伸長を目指す。

7. 参考文献

[1]宮本靖孝:「回転磁場による磁気プラズマセイルの開発」, 日本大学理工学部研究科 修士論文, 2014
 [2] 井通暁, 北野勝久:「3. FRC 研究の現状 3.2 回転磁場による定常維持」, プラズマ・核融合学会, 2008
 [3] J.T. Slough and K.E. Miller, “Enhanced Confinement and Stability of a Field-Reversed Configuration with Rotating Magnetic Field Current Drive” Phys.Rev.Lett.85, 1444 (2000)