

O-13

磁場反転配位プラズマの電流駆動のための磁気ポンピング加熱装置の開発 Development of Magnetic Pumping Heating System for Plasma Current Drive in Field-Reversed Configurations

田中豊諭¹, 浅井朋彦², 高橋努²Tanaka Toyotsugu¹, Asai Tomohiko², Takahashi Tutomu²

Abstract: Magnetic pumping heating has been developed to provide additional heat and current driven magnetic flux to the FRC plasma. In the magnetic pumping discharge circuit, a damped oscillating LCR circuit is employed to drive the oscillating current to the antenna. However, if the external magnetic field is weakened by the negative swing of the oscillating current, the FRC may collapse. Therefore, two circuits, a transformer coupling circuit and a coupling circuit of damped oscillation and clover, were developed to make the positive current oscillation. In the presentation, I will describe whether the two circuits developed satisfy the conditions for magnetic pumping (collision frequency > frequency of the oscillating magnetic field).

1. はじめに

磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration:FRC) プラズマは最もシンプルな磁場構造を持った磁場閉じ込めプラズマ方式であり, プラズマの閉じ込めにおける磁場の利用効率を示すベータ値が極限的に高い. 近年, 中性粒子ビーム入射 (NBI) と径方向電場制御による準定常な配位維持に成功し, 高効率核融合炉心プラズマを実現し得る候補として注目を浴びている^[1]. NBI により入射された高エネルギー粒子を効率よく捕捉するためには, ターゲットとなるプラズマがより大きな磁束量を持つことが要求される^[2]. 本研究では, FRC プラズマの追加熱および電流駆動による磁束供給を目的に, 磁気ポンピング加熱手法を開発した. 磁気ポンピングでは, プラズマ中のイオン同士の衝突周波数より低い周波数で外部磁場を振動させる. 磁気モーメントが保存される場合, イオンを加速, 粒子間衝突により熱化することでプラズマが加熱される^[3]. また, プラズマ自身を流れる電流が増加する可能性がある. 本発表では, 開発した磁気ポンピング加熱装置の概要と初期実験結果について報告する.

2. 放電回路の開発

振動磁場を FRC プラズマへ印加するためのアンテナとその駆動回路を開発した. 駆動回路には LCR 放電回路を採用し, 振動電流をアンテナへ流す. しかし, 振動電流が負に振れることにより外部磁場が弱められると, FRC が膨張することで装置壁へ接触し, 配位の崩壊に繋がる恐れがある. そのため, 図 1 に示すように, 正電流が振動するような工夫を施した. 具体的には, トランス結合回路と減衰振動とクローバーの結合回路の二つの方法を提案した.

2-1. トランス結合回路

図 2 に開発したトランス結合回路の回路図を示す. まず, トランスの 1 次側の回路のみを放電し, この時の電流がピークする時刻で 2 次側の回路のスイッチを閉じると 2 次側の回路に接続したアンテナには図 3 に示すような電流が流れる. この回路では, 2 次側の電流波形は指数関数で減衰する電流 ($I_{21} = \exp(-at)$) と減衰振動波形 ($I_{22} = \exp(-bt)\cos(\omega t + \phi_0)$) を示す電流の和となり, 次のように表せる.

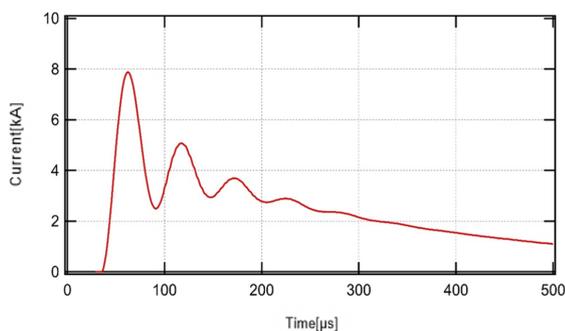


Figure.1 Positive oscillation waveform

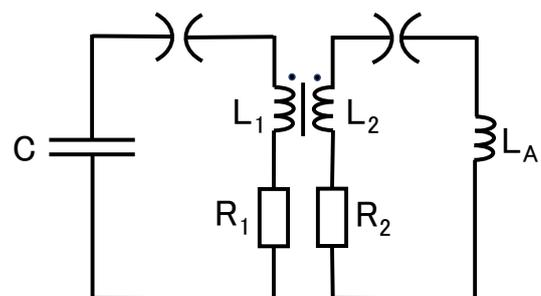


Figure.2 Transformer coupling circuit

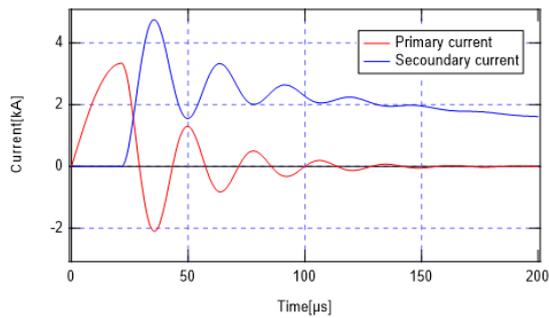


Figure.3 Primary and Secondary side current

$$I_2 = A_2 \exp(-\alpha t) + B_2 \exp(-\beta t) \cos(\omega t) \dots (1)$$

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2 + L_A} \dots (2)$$

$$\beta = \frac{R_1(L_2 + L_A) + R_2 M}{2L_A M} \dots (3)$$

$$\omega = \left(\frac{L_2 + L_A}{CL_1 L_A} \right)^{\frac{1}{2}} \dots (4)$$

$$A_2 = \frac{\alpha M Q(t_0) - M i_1(t_0)}{CL_A M (\beta^2 + \omega^2)} \dots (5)$$

$$B_2 = \frac{(\alpha R_2 - \alpha^2 L_A) i_1(t_0)}{L_A (\beta^2 + \omega^2)} \dots (6)$$

ここで、 M はトランスの相互インダクタンスであり、 $i_1(t_0)$ は2次側の回路を閉じた時の1次側の電流値である。各回路パラメータ (C, L_1, L_2, R_1, R_2)は磁気ポンピング加熱のための条件 (衝突周波数>振動磁場の周波数) を満たすように設計する必要がある。このためには、角周波数 ω と減衰率 β 、係数 B_2 が重要な要素となる。

2-2. 減衰振動とクローバーの結合回路

図4に考案した減衰振動回路とクローバー回路の結合させた回路図を示す。減衰振動回路とは図4の S_1 スイッチのみを閉じた時の回路であり、電流は図5の実線のような減衰振動波形となり、次のように表すことができる。

$$I_s = I_0 \exp(-\alpha t) \sin(\omega t) \dots (7)$$

$$I_0 = \frac{V_0}{\omega L}, \alpha = \frac{R}{2L}, \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \dots (8)$$

ここで、 V_0 はコンデンサーの充電電圧である。

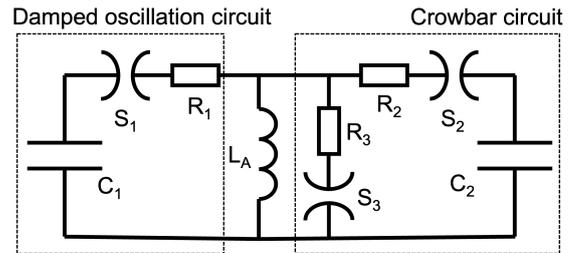


Figure.4 Coupling circuit between damped oscillation and crowbar circuit

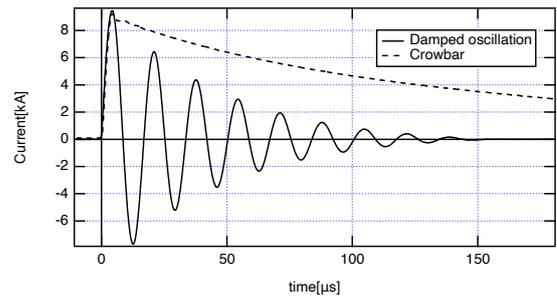


Figure.5 The respective currents of the start circuit

また、クローバー回路とは、最初に S_2 のみを放電し、この時の電流がピークする時刻で S_3 を閉じると図5の点線のような電流が流れる。この二つの回路を組み合わせることで電流を足し合わせ、図1に類似した電流を再現する。そして、トランス結合回路と同様に磁気ポンピング加熱の条件 (衝突周波数>振動磁場の周波数) を満たすように設計する必要がある。この回路の周波数は減衰振動回路の回路パラメータ (C, L_1, R_1) に依存している。

3. まとめ

考案した二つの回路の放電実験を行った。

本発表では、考案した二つの放電回路の角周波数を用いて磁気ポンピング加熱実験の条件 (衝突周波数>振動磁場の周波数) を満たすような回路評価を報告する。

4. 参考文献

[1]. H.Gota : "Formation of hot , stable , long-lived field-reversed configuration plasmas on the C-2W device" Nucl.Fusion, Vol.59, 112009, 2019.
 [2]. 浅井朋彦他 : 「極限的高ベータ配位 : FRC の閉じ込め」・安定性をどう理解するか?」, J.Plasma Res, Vol96, No.4, 165-173, 2020.
 [3]. J.M.Berger : "Heating of a Confined Plasma by Oscillating Electromagnetic Fields", Physics of Fluids B, The Physics of Fluids 1, 301, 1958.