

FRCの磁気ポンピング加熱のための放電回路の開発 Development of discharge circuit for magnetic pumping heating on FRC Plasma

○加藤拓人¹, 小林大地², 高橋努², 浅井朋彦²

*Takuto Katou¹, Daichi Kobayashi², Tsutomu Takahashi², Tomohiko Asai²

Abstract: Magnetic pumping is an effective heating methods for filed-reversed configuration (FRC) plasmas. However, when an oscillating magnetic field is applied, LCR circuits can potentially weaken the plasma confinement field. To address this, we designed a circuit that connects a gap switch and an inductor are in series, and is parallel to the LCR circuit. This configuration successfully generates a current of 13.5 kA with a waveform oscillating at 172 krad/s.

1. 背景・目的

磁場による閉じ込め方式の1つである磁場反転配位 (FRC : Field Reversed Configuration)は, 閉じ込め磁場の利用効率を表す指標である体積平均 β 値が極限的に高い, 局所的に磁場がゼロとなる場所が存在するという特徴をもつ. また, FRCは鎖交する構造物のない単連結構造であり, 軸方向への移送, 加速に対してロバストな安定性を持つ^[1].

核融合反応を起こすためには炉心プラズマの加熱が必要である. プラズマ抵抗によるジュール加熱では高温になるほど電気抵抗が減少し, 加熱効率が低下するため, 高温領域でも利用できる他の加熱法での追加加熱が必要である. FRCプラズマの追加加熱には中性粒子ビーム入射が有効であることが大阪大学のFIX装置で示された^[2]. さらに, TAE Technologies社のC-2Wの実験により全温度(イオン温度+電子温度)3keV以上で電子温度が500eVを超える定常FRCプラズマが30ms維持された^[3]. しかし, より高エネルギーのビーム粒子の捕捉には炉心プラズマのポロイダル磁束の増加が必須であり, 加熱・電流駆動のための補助手段が要求される. 磁気ポンピング加熱はプラズマの加熱とともにプラズマ電流を駆動し磁束量を増加させることが期待され, FRCの特徴である単連結構造を維持できるためこの補助手法としての利用が期待される. 本研究では独立して制御可能な振動磁場を印加する磁気ポンピング加熱装置の開発を行なった.

2. 磁気ポンピング加熱

磁気ポンピング加熱とはプラズマを閉じ込めている磁場を周期的に変化させることによりプラズマを加熱する手法である. プラズマを閉じ込めている磁場を強めたとき, 磁気モーメントの保存により磁場に対して垂直方向の粒子の速度が上昇する. そのとき何らかの

影響により, 粒子の運動エネルギーが熱エネルギーに変換されプラズマ加熱が起こる. エネルギーが変換される手法として衝突過熱^[4], 走行時間加熱^[4,5], ピッチ角混合加熱^[5]などが考えられている.

3. 磁気ポンピング加熱装置

振動磁場を印加する場合 LCR回路の減衰振動波形が主に用いられる. その場合, FRCを閉じ込めている磁場と重ね合わせるため, 閉じ込め磁場を弱めFRCの膨張による装置壁への接触, 崩壊が考えられる. そのため磁気ポンピング加熱を行なうには閉じ込め磁場と同じ向きに振動する振動磁場が必要である. そのため振動磁場を印加するコイル(L₂)からなるLCR回路と並列にLR回路に切り替えるためのギャップスイッチ(S_c)とインダクタンス調整用のインダクタ(L₄)を直列接続させた回路を作成した. 等価回路及び製作した回路をFigure1, に示す. Figure1についてL₁, R₁はコンデンサ及びLRC放電回路のインダクタンス, 抵抗. L₂, R₂は磁場印加用コイルのインダクタンス, 抵抗. L₃, R₃はクローバークギャップのインダクタンス, 及びクローバーク回路の抵抗. L₄は調整用インダクタンス. S_s, S_cはスタートスイッチとクローバークスイッチを表わす.この

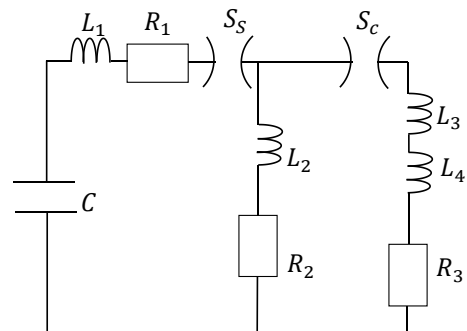


Fig.1 Magnetic pumping equivalent circuit

1 : 日大理工・院 (前)・物理 2 : 日大理工・教員・物理

回路では LCR 回路に最大の電流(I_0)が流れている時刻にクローバースイッチを起動させることにより、符号を変えない振動電流を作り出すことができる。

4. 回路解析

Figure1 で示した回路方程式を解くと、磁場印加用コイルに流れる電流は次の式(1)~(13)で表わされる^[6]。

$$\begin{aligned}
 i(t) = & I_0 e^{-\alpha' t} \cos \omega' t - \frac{\alpha'}{\omega'} I_0 e^{-\alpha' t} \sin \omega' t \\
 & + A_1 \left\{ \gamma' e^{-\alpha' t} \cos \omega' t + \frac{\alpha'^2 + \omega'^2 - \alpha' \gamma'}{\omega'} e^{-\alpha' t} \sin \omega' t \right. \\
 & \quad \left. - \gamma' e^{-\gamma' t} \right\} \\
 & - A_2 \left\{ e^{-\alpha' t} \cos \omega' t - \frac{\gamma' - \alpha'}{\omega'} e^{-\alpha' t} \sin \omega' t - e^{-\gamma' t} \right\} \\
 & + A_3 \left\{ - \left[-\gamma' + \frac{R_3}{L_3 + L_4} \right] e^{-\alpha' t} \cos \omega' t \right. \\
 & \quad + \frac{[\gamma' - \alpha'] \frac{R_3}{L_3 + L_4} + [\alpha'^2 + \omega'^2] - \alpha' \gamma'}{\omega'} e^{-\alpha' t} \sin \omega' t \\
 & \quad \left. + \left[-\gamma' + \frac{R_3}{L_3 + L_4} \right] e^{-\gamma' t} \right\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$A_1 = \left[\frac{L_2 R_{13} + L_1 R_3}{L_1 L_{234} + L_2 L_{34}} - \gamma' \right] \frac{I_0}{(\gamma' - \alpha')^2 + \omega'^2} \quad (2)$$

$$A_2 = \frac{L_2}{C} \frac{1}{L_1 L_{234} + L_2 L_{34}} \frac{I_0}{(\gamma' - \alpha')^2 + \omega'^2} \quad (3)$$

$$A_3 = \frac{L_3}{L_1 L_{234} + L_2 L_{34}} \frac{E_0}{(\gamma' - \alpha')^2 + \omega'^2} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 \alpha' &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{R_{13}}{L_{134}} \right. \\
 & \quad \left. + \frac{R_1 L_{234} + R_2 L_{134} + R_3 L_{12}}{(L_1 L_{234} + L_2 L_{34})(L_1 L_{234} + L_2 L_{34} + L_{34}^2)} L_{34}^2 \right\} \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\gamma' = \frac{R_{23}}{L_{234}} - \frac{2R_3}{L_1 L_{234} + L_2 L_{34} + L_{34}^2} L_{34} \quad (6)$$

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{\gamma' C \{L_1 L_{234} + L_2 L_{34}\}} - \alpha'^2} \quad (7)$$

$$R_{13} = R_1 + R_3 \quad (8), R_{23} = R_2 + R_3 \quad (9)$$

$$L_{12} = L_1 + L_2 \quad (10), L_{34} = L_3 + L_4 \quad (11)$$

$$L_{234} = L_2 + L_3 + L_4 \quad (12), L_{134} = L_1 + L_3 + L_4 \quad (13)$$

ここで、 I_0 はクローバースイッチ起動時の回路に流れる電流値、 E_0 はクローバースイッチ起動時のコンデンサに残っている電圧を表わす。回路解析により角周波数を変化させるには静電容量(C)及びクローバースイッチの調整用インダクタンス L_4 を変化させればよいことが分かる。振動電流値を変えるには、静電容量 C は、クローバースイッチの起動時間を変えればよい。

5. 実験結果

Figure2 に製作した回路での電流波形を示す。実験により最大電流値 13.5 kA、角周波数 172 krad/s で振動する電流波形を整形することができた。

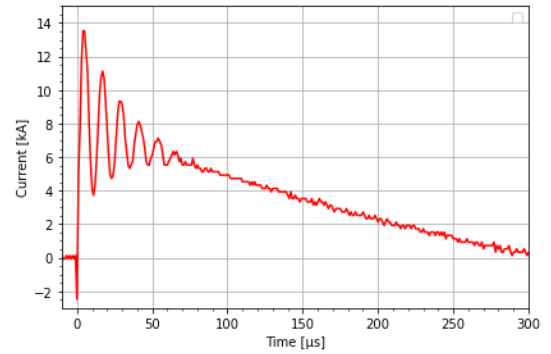


Fig.2 Time evolution of the developed discharge circuit

6. 参考文献

- [1] M. Tuszewski, : “Field reversed configurations” Nuclear Fusion, vol.28, No.11, pp.2033-2092, 1988
- [2] T.Asai *et al.*, : “Experimental evidence of improved confinement in a high-beta field reversed configuration plasma by neutral beam injection” *Phys. Plasmas*, vol.7, No.6, pp.2294-2297, 2000
- [3] H.Gota *et al.*, : “Overview of C-2W: high temperature, steady-state beam-driven field-reversed configuration plasma” Nuclear Fusion **61**, 106039, 2021
- [4] J.M.Berger *et al.*, : “Heating of a Confined Plasma by Oscillating Electromagnetic Fields” *Physics of Fluids* vol.1, No.4, pp.301-307, 1958
- [5] J.Egedal *et al.*, : “Theory of ion dynamics and heating by magnetic pumping in FRC plasma” *Phys. Plasmas* **25**, 072510, 2018
- [6] 中野義映 他, : 「放電回路クローバースイッチ」, 電気学会誌 Vol. 84-12 No. 915, pp.1971-1976 1964