

O-4

磁場反転配位プラズマにおける磁気ポンピング加熱のための放電回路開発

Development of discharge circuit for magnetic pumping heating of a field-reversed configuration plasma

田中豊諭¹, 長田昌之¹, 浅井朋彦², 高橋努²

*Tanaka Toyoyosugu¹, Nagata Masayuki¹, Asai Tomohiko², Takahashi Tsutomu²

Abstract: Magnetic pumping heating is one of the effective heating methods for field-reversed configuration plasmas. The discharge circuit of the LCR circuit in magnetic pumping heating is damped vibration. However, the confinement magnetic field of the plasma is affected by the applied magnetic field of magnetic pumping and can be weakened. Therefore, we have developed the magnetic pumping circuit with a gap switch coupled through a transformer and a gap switch and optimized the circuit parameters.

1. はじめに

磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration: FRC) プラズマは, プラズマ閉じ込めにおける磁場の利用効率示すベータ値が極限的に高く, 熱核融合炉のコンパクトな炉心としての可能性をもつ.核融合を起こすには追加加熱が必要であり, その1つの方法に磁気ポンピング加熱がある.これは, プラズマの衝突時間よりも長い周期で外部磁場をパルス的に変化^{[1][2]}させ, 磁気モーメントの保存からイオンを加速, 粒子間衝突によって熱化させプラズマを加熱する.

本研究では, FAT-CM 装置における磁気ポンピングの条件であるイオン-イオンの衝突時間(18μs)よりも長い周期で振動する磁場を発生させる放電電源の開発する.

2. 放電回路

通常の LCR からなる放電回路では, $1/LC > (R/2L)^2$ の条件の場合, 電流波形は減衰振動となる.しかし電流が負に振れる時プラズマの閉じ込め磁場を弱め, プラズマの閉じ込め特性に大きな影響を与える可能性がある.そこで, LCR 回路にトランスとギャップスイッチを用いて Fig.1 のような放電回路に改良する.改良した回路

は, 1次側の LCR 回路のみで放電した際には電流波形が減衰振動になる.1次側の電流のピークで2次側の回路を閉じる (ギャップスイッチを ON する) 場合の最適化した1次側と2次側の電流波形を Fig.2 に示す.このとき回路パラメータは, Table1 である.この回路では, 電流波形が指数関数で減衰する電流($I_{21} = \exp(-\alpha t)$)と減衰振動波形($I_{22} = \exp(-\beta t) \sin(\omega t + \phi_0)$)を示す電流の和となる.

3. 放電回路の解析

磁気ポンピング加熱実験において, I_2 のピーク電流値(I_{21}, I_{22}), 振動角周波数(ω), 減衰率(α, β)は重要なパラメータとなっており, 回路パラメータ(C, L_1, L_2, R_1, R_2)を変化させることによりピーク電流値, 角振動数, 減衰率などのパラメータが変化していくのかわる必要がある.改良した放電回路の回路方程式は以下のようになる.

$$0 = \frac{1}{C} \int i_1 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + R_1 i_1 \quad \dots (1)$$

$$0 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + R_2 i_2 + L_A \frac{di_2}{dt} \quad \dots (2)$$

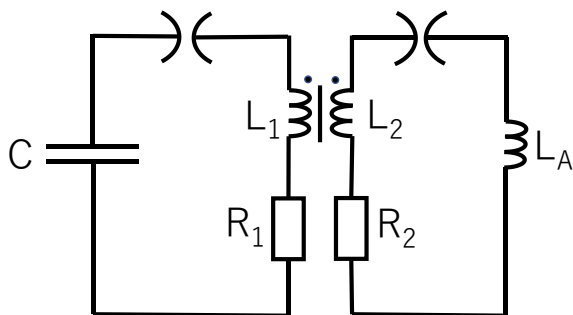


Fig.1 Improved circuit for magnetic pumping

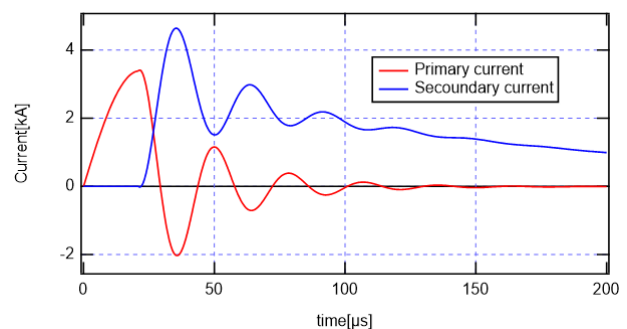


Fig.2 Primary and Secondary side current waveform

1 : 日大理工・院 (前)・物理 2 : 日大理工・教員・物理

ここで、 $t=t_0$ において1次側の電流波形のピークで2次側の回路を閉じた時の1次側の電流 $I_1(t_0)$ と、電荷 $Q(t_0)$ および2次側の電流 $I_2(t_0)$ を初期条件とすると以下のようになる。

$$Q(t_0) = \frac{V_0(\alpha \exp(-\alpha_0 t_0) \sin \omega_0 t_0 + \omega_0 \exp(-\alpha_0 t_0) \cos \omega_0 t_0)}{\omega_0 L_1 (\alpha_0^2 + \omega_0^2)} \quad \dots (3)$$

$$I_1(t_0) = \frac{V_0}{\omega_0 L_1} \exp(-\alpha_0 t_0) \sin(\omega_0 t_0) \quad \dots (4)$$

$$\alpha_0 = R_1 / 2L_1 \quad \dots (5)$$

$$\omega_0 = 1 / L_1 C - (R_1 / 2L_1)^2 \quad \dots (6)$$

$$I_2(t_0) = 0 \quad \dots (7)$$

これより式(1), (2)にラプラス変換を行い、回路方程式を解くと次のようになる。

$$I_1(t) = A_1 \exp(-\alpha t) + B_1 \exp(-\beta t) \sin(\omega t) + C_1 \exp(-\beta t) \cos(\omega t) \quad \dots (8)$$

$$I_2(t) = A_2 \exp(-\alpha t) + B_2 \exp(-\beta t) \sin(\omega t) + C_2 \exp(-\beta t) \cos(\omega t) \quad \dots (9)$$

ここで、減衰率 α , β と周波数 ω , 係数 A_1 , B_1 , C_1 , A_2 , B_2 , C_2 は次のようになる。

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2 + L_A} \quad \dots (10)$$

$$\beta = \frac{R_1(L_2 + L_A) + R_2 M}{2L_A M} \quad \dots (11)$$

$$\omega = \left(\frac{L_2 + L_A}{C L_1 L_A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots (12)$$

$$A_1 = \frac{(\alpha^2 L_A - \alpha R_2) i_1(t_0)}{L_A (\beta^2 + \omega^2)} \quad \dots (13)$$

$$B_1 = \frac{R_2 Q(t_0)}{\alpha \omega C M L_A} \quad \dots (14)$$

$$C_1 = i_1(t_0) \quad \dots (15)$$

$$A_2 = \frac{\alpha M Q(t_0) - M i_1(t_0)}{C L_A M (\beta^2 + \omega^2)} \quad \dots (16)$$

$$B_2 = \frac{i_1(t_0)}{\alpha \omega C L_A} - \frac{(\beta^2 + \omega^2)(\alpha^2 L_A - \alpha R_2) i_1(t_0)}{\alpha \omega L_A} \quad \dots (17)$$

$$C_2 = \frac{(\alpha R_2 - \alpha^2 L_A) i_1(t_0)}{L_A (\beta^2 + \omega^2)} \quad \dots (18)$$

4. 放電回路の最適化

磁気ポンピング加熱ではイオン-イオンの衝突時間より磁場の周期 ω を長い時間にする必要がある。また、プラズマが存在する間、加熱する。これらの条件を満たすためには、角周波数 ω と減衰率 β , 係数 C_2 となる。式(12)の角周波数 ω は、コンデンサー容量に依存しており、容量が大きければ ω が小さくなると考えられる。次に、減衰率 β を考える。これが小さ

Table 1. Optimized discharge circuit parameters

Capacitance[μ F]	2.4	Antenna's inductance[μ H]	10
Primary resistance[Ω]	0.3	Primary inductance of trance[μ H]	79.7
Secondary resistance[Ω]	0.55	Secondary inductance of trance[μ H]	79.7

ければ、2次側の電流波形の振動の減衰が小さくなるのでプラズマが存在する間に、磁場の振動をプラズマに与えることができる。式(11)では、減衰率 β は1次側と2次側の抵抗 R_1 , R_2 に依存している。また、電流のリングングの振幅は、磁場の振動の振幅の大きさに関係している。式(18)では、振幅は減衰率 α , β を小さくまたは、初期条件 $i_1(0)$ が大きければ大きくなる。これらの条件で角周波数 ω , 減衰振動 β と係数 C_2 を考えると回路パラメータはTable 2のようになり、1次側(赤実線)と2次側(青実線)の放電波形はFig.2ようになる。このときの電流の周期は 28μ sである。これより、磁気ポンピング加熱の条件を満たしている。

5. まとめと展望

改良した放電回路の回路のパラメータから角周波数や減衰率を求めることができた。これにより、磁気ポンピング加熱実験に適当な周期で放電を予測することができる。今後はトランスとギャップスイッチの改良した放電回路の製作、磁気ポンピング実験を行う。

6. 参考文献

- [1] J.M.Berger, W.A.Newcomb : "Heating of a Confined Plasma by Oscillating Electromagnetic Fields", Physics of Fluids B, The Physics of Fluids 1, 301, 1958.
- [2] M. Laroussi and J. Reece Roth : "Theory of first-order plasma heating by collisional magnetic pumping", Physics of Fluids B, Plasma Physics 1, 1034, 1956.