

衝突合体実験装置：FAT-CM の各回路パラメータの評価と放電回路シミュレーション

Estimation of discharge circuit parameters and analysis of equivalent circuit for FAT-CM device

○小林大樹¹, 小野直人², 渡部慎太郎², 関口純一³, 浅井朋彦³, 高橋 努³

Daiki Kobayashi¹, Naoto Ono², Shintato Watanabe² Junichi Sekiguchi³, Tomohiko Asai³, Tsutomu Takahashi³

Abstract: FAT -CM device has been developed for a supersonic translation and collisional merging experiments. The discharge circuit parameters of field-reversed theta pinch (FRTP) devices (R- and V-Formation) have been estimated. The FRTP device has three discharge circuits (Bias, Theta pre-ionized and Main compression field circuit) and each discharge circuit is LCR one, of which current waveform is a damped oscillatory one. The oscillation frequency and the damping constant have been determined. Circuit inductance and resistance are estimated from the frequency and constant. The equivalent circuits have been constructed using the obtained circuit parameters and the equivalent circuit has been analyzed by the circuit simulator A SPICE and self-build program. The operation condition of FAT-CM device will be optimized.

1. はじめに

中性子がほとんど発生しない核融合(Aneutronic Fusion) の実現を目指す基礎的な研究として、逆磁場テータピンチ (Field-Reversed Theta-Pinch : FRTP) 法によって生成したコンパクトトロイド (Compact Toroid :CT) を衝突合体させて磁場反転配位 (Filed-Reversed Configuration : FRC) プラズマを生成する実験を開始した. FRTP 装置で生成した二つの CT プラズマを閉じ込め磁場の磁気圧差によって移送し、準定常的な磁場をしみこませた金属チェンバー内で衝突合体させ FRC を生成し閉じ込める方法である. この方法で長寿命・高温・高密度を持つ FRC プラズマが生成するための放電回路の運転条件を最適化することがこの研究の目的である.

CT 生成装置は、放電管とそれを覆う 27 個のコイル素子からなる一巻き銅コイル,コレクタープレートから構成され、3 系統の放電回路 (Bias 回路,θ 予備電離回路,主圧縮磁場回路) が、a-b 間、c-d 間でそれぞれ並列接続される.

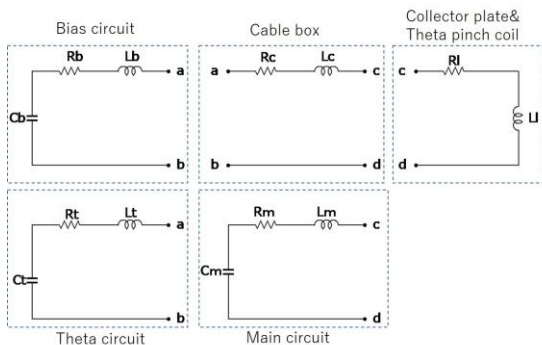


Fig.1 Equivalent Circuit of Field-reversed theta pinch device

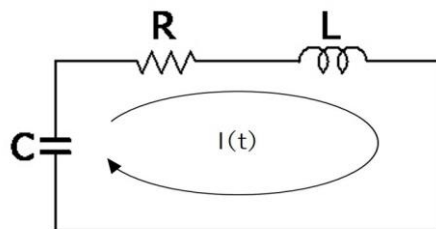


Fig. 2 LRC Circuit

Fig.1 に FRTP 装置の等価回路示す. ケーブルボックスの a-b 間にバイアス回路の a-b, θ 予備電離回路 a-b が並列接続, ケーブルボックスの c-d 間に θ ピンチコイル-コレクタープレートと主圧縮磁場回路の c-d が並列接続される. 各回路の抵抗 R_i , インダクタンス L_i は, コンデンサ, ケーブル, スイッチなどを含めた直列等価的な抵抗 R_i , インダクタンス L_i ($i=b, c, m, t$) を表す.

本報告では、Fig. 1 に示す各放電回路の直列接続の等価回路パラメータを求め、その値を使った等価回路をシミュレートし電流の時間変化を求めることにより、実験条件としての主圧縮磁場強度、バイアス磁場強度、その強度を得るために必要な充電電圧の見積、回路間での電流の流れ込み量 (カップリング) を知ることができると思われる.

2. 各放電回路パラメータを求める方法[1]

放電回路は、LRC 回路とみなすことことができる (Fig. 2 参照).

$$L \frac{d^2 Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0 \quad (1)$$

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{t=0} = 0, Q(0) = CV_0$$

を減衰振動する条件で解くことによって、

$$I(t) = \frac{V_0}{\omega L} \exp(-at) \sin \omega t \quad (2)$$

$$a = \frac{R}{2L}, \omega^2 = \omega_0^2 - a^2, \omega_0^2 = \frac{1}{CL}$$

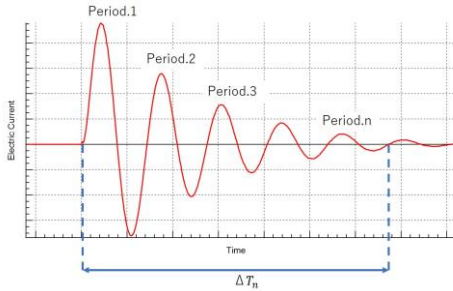


Fig.3 Typical electric current waveform of damping oscillation

が得られる (Fig. 3 参照)。これらの関係からコンデンサの電気容量 C を既知とすることにより減衰率 α 、および角振動数 ω を実験的に決めることにより、 L_i 、 R_i を求めることができる。各回路を単独で放電する。さらに、バイアス回路と θ 予備電離回路の場合、a-b 間を短絡した放電と a-b 間および c-d 間を並列接続した放電を行う。また、主圧縮磁場回路では、c-d 間を短絡、c-d 間を並列接続した放電をそれぞれ行う。c-d 間を短絡させた放電と c-d 間を並列接続した放電の角振動数 ω と減衰率 α を比較することから L_l 、 R_l が求まる。また、短絡波形から L_m 、 R_m が求まる。 θ 予備電離回路の a-b 間短絡と a-b、c-d 間並列接続と主圧縮磁場回路のそれぞれの放電の角振動数 ω と減衰率 α の比較から、 R_c 、 L_c が求まる。また、短絡放電から R_b 、 L_b が求まる。また、バイアス回路についても a-b 間短絡と a-b、c-d 間並列接続の

角振動数 ω と減衰率 α の比較から、 R_b 、 L_b が求まる。

また、バイアス回路には主圧縮磁場回路および θ 予備電離回路の放電の際にカップリングによって発生する誘導起電力から放電スイッチ (イグナイトロン) を保護するための絶縁インダクタンスが挿入されている。このコイルのインダクタンスと抵抗値を求めるために、このインダクタンス有無による a-b 間短絡放電の比較から絶縁コイルのインダクタンスと抵抗値を求める。

各放電 (減衰振動波形) の減衰率 α 、および角振動数 ω は以下のように求める。n 周期の経過時間 ΔT_n を波数 n で割ると、減衰振動の平均周期 \bar{T} が求まる。この

平均周期から角振動数 $\omega = 2\pi/\bar{T}$ が求まる。次に任意のピークから $\bar{T}/2$ ずつ後の点をプロットし、 $A \exp(-\alpha t)$ の近似曲線を最小二乗法でフィットし減衰率 α を求める。 \bar{T} から ω が既知なので次の (3) 式から、

$$\frac{1}{CL} = \omega^2 - a^2 \quad (3)$$

C は既知なのでインダクタンス L が求まる。

L が求まると減衰率 α の定義式 (2 式参照) から抵抗値 R が求まる。各回路に流れる放電電流は、ログスキコイルを用いて測定した [1]。

以上の方法により求めた 2 つ FRTP 装置の各等価回路のパラメータををまとめると Table. 1 のようになる。

3. まとめ

FAT-CM 装置の短絡放電実験および負荷として θ ピンチコイルを用いた放電実験から 2 つの FRTP 装置の等価回路のパラメータを求めることができた。今後、求めたパラメータの値を用いた等価回路シミュレーションをから、FAT-CM 装置に流れる放電電流をシミュレーションし、この実験で得られた放電波形と比較し、より正確な等価回路パラメータ推定とともに、様々な運転条件での放電電流を推定する。

4. 参考文献

[1] 黒柳貴子: 「逆バイアステーパピンチ装置の回路定数の評価」, 日本大学理工学部研究科 修士論文, 2015.

Table 1. Circuit parameters of FAT-CM device

	Bias Circuit	Theta Circuit	Main Circuit	Cable box	Collector plate&Theta pinch coil
Resistor(R-Formation)	13.3[m Ω]	26.4[m Ω]	4.12[m Ω]	22.2[m Ω]	1.05[m Ω]
Capacitor(R-Formation)	2000	9.6[μ F]	57.6[μ F]	-	-
Inductance(R-Formation)	3.81[μ H]	0.125[μ H]	0.0171[μ H]	0.1079[μ H]	0.0699[μ H]
Resistor(V-Formation)	14.1[m Ω]	25.6[m Ω]	4.22[m Ω]	21.4[m Ω]	3.16[m Ω]
vCapacitor(V-Formation)	2000[μ F]	9.6[μ F]	67.5[μ F]	-	-
Inductance(V-Formation)	3.90[μ H]	0.116[μ H]	0.0184[μ H]	0.0976[μ H]	0.0720[μ H]