

磁場反転配位プラズマ衝突合体実験のための FAT-CM 装置電源の開発

Development of FAT-CM device for collisional merging experiment of Field-Reversed Configuration plasma

○渡部慎太郎¹, 関口純一², 浅井朋彦², 高橋努²* Shintaro Watanabe¹, Junichi Sekiguchi², Tomohiko Asai², Tsutomu Takahashi²

Abstract: FAT-CM device has been developed for collisional merging experiments of a field-reversed configuration. The device has two field reversed biased theta pinches, which have almost the same electric circuit parameters and magnetic field characters. The two theta pinch devices have been easily synchronized for the merging experiments. The merging experiments will be performed with the relative velocity of $\sim 400\text{km}$, the mass of $\sim 5 \times 10^{-8}\text{kg}$, the total temperature of $\sim 200\text{eV}$

1. 背景及び目的

磁場反転配位(Field-Reversed Configuration:FRC)で閉じ込められるプラズマは、磁場の利用効率を表す体積平均 β 値が極めて大きいという特徴があるが、不安定性等で配位維持時間が $100\mu\text{s}$ 程度と短い。炉心プラズマとして利用するためには、閉じ込め特性の改善が急務であった。しかし、近年米国のベンチャー企業 Tri Alpha Energy(TAE)社が2つの FRC プラズマを衝突合体させることで配位維持時間が 1ms を超える FRC プラズマの生成に成功した。^[1] この結果を踏まえ、日本大学では高ベータプラズマの新たな加熱法の開発を行うためのターゲットプラズマを生成するために、衝突合体実験装置(FAT-CM)の開発を行ってきた。その概略図を Fig.1 に示す。

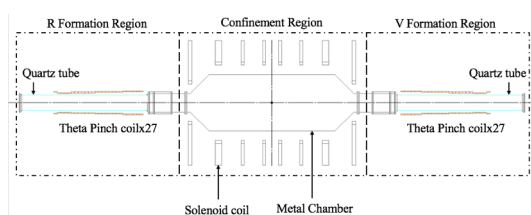


Figure.1 Overview of FAT-CM

FAT-CM は、2つの FRC プラズマを逆バイアステータピンチ装置で同時に生成し(以降 V 生成部, R 生成部), 中央部の金属チェンバーからなる閉じ込め領域に、磁気勾配を利用して移送し、相対速度最大 400km/s で衝突合体させる。

両生成部では逆磁場テータピンチ(Field-Reversal Theta Pinch:FRTP)法で FRC プラズマを生成しており、Fig.2 に示すように3つの回路(Bias, Theta, Main)を集電

板に接続し、集電板から θ ピンチコイルに周期の異なる3種類の電流を流すことで、 θ コイル内に磁場を作り、プラズマの生成、閉じ込めを行う。各回路は LCR 直列回路のコンデンサ放電と等価である。Bias 回路は、周期の長い電流を流す、かつ Main 回路からの流入電流を減らす目的で保護コイルと呼ばれる L 負荷を直列に接続している。Theta 回路は、放電管内のガスを電離するために周期の短い振動磁場を印加する回路である。Main 回路は、予備電離プラズマを圧縮加熱するため、Bias 磁場とは逆向きかつ立ち上がり早い大きな磁場を印加する回路で、磁場の振動で FRC プラズマの配位を破壊しないように、電流がピークになるタイミングで Crowbar スイッチをかけ、振動を抑えている。

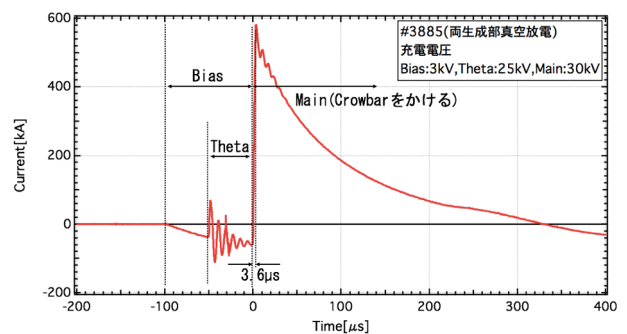


Figure2. The typical Current Waveform in the Vacuum Discharge (Red: V formation, Blue: R formation)

本研究では、FRC プラズマの衝突合体実験に向けた FAT-CM の開発及び装置の評価を行う。

2. 開発した FAT-CM について

FRC プラズマの衝突合体実験を行うには、以下の2点が重要となる。

1. 両生成部で同等のプラズマパラメータを持つ FRC プラズマを生成すること
2. 両生成部で同時に Main 回路を始動し、FRC プラズマの生成と閉じ込め領域への移送のタイミングを合わせること

そのため、両生成部の Bias 回路で同じインダクタンスと抵抗値を持つ保護コイルを使用し、Bias, Theta 回路で同じコンデンサを使用した。また、Bias 回路は Main 回路に電流が流れるタイミングを基準として始動するため、Bias 回路のスイッチを始動特性のよいイグナイトロンスイッチを採用した。

Table.1 に各回路のコンデンサ及びスイッチを示す。

Table. 1 Capacitor and Switch of each circuit

回路\生成部	V	R
Bias	400 μ Fx5 -ignitoron	400 μ Fx5 -Ignitoron
Theta	2.4 μ Fx4-Gap	2.4 μ Fx4-Gap
Main	3.75 μ Fx18-Gap	2.4 μ Fx24-Gap

3. 装置の評価

開発した装置の評価をするため、各回路を単独でコレクタープレートに接続し、 θ ピンチコイルを負荷にして放電を行った。実験から得られた各回路で流れる電流の周期、最大値等を Table.2 に示す。

Table. 2 Period and maximum current of each circuit

	Bias		Theta		Main	
	V	R	V	R	V	R
周期[μ s]	574	563	8.80	8.91	15.6	14.1
充電電圧 [kV]	2	2	20	18	15	15
-最大電流 [kA]	35.2	36.0	118	106	353	349
半径 15cm コイルの 中心磁場	28.3 mT	28.9 mT	94.7 mT	85.1 mT	0.286 T	0.283 T
減衰時間	-	-	-	-	95 μ s	125 μ s

また、V 生成部で Bias, Main を起動させ、Crowbar スイッチをつけた場合の電流波形、R 生成部で Bias, Main を起動させた際の波形を Fig.3 に示す。

以上から、両生成部の Bias, Theta 回路はほぼ同等の回路特性を持つことが示された。また、Main 回路の立ち上がり時間は同等であるため、両生成部で同等の FRC プラズマが生成可能であることが見込まれる結果とな

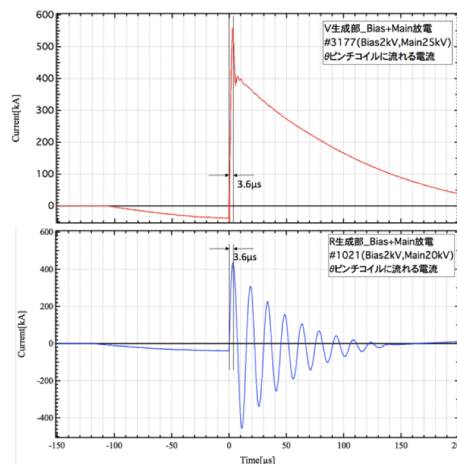


Figure.3 Current Waveform (Red : V , Blue : R)

った。但し、Crowbar スイッチを起動させた際の減衰時間が、V 生成部の方が 20 μ s 長かった。原因を調べるため、コレクタープレートと θ ピンチコイルの抵抗とインダクタンスを調べたところ、V 生成部の抵抗が R 生成部の約 7 倍であり、この差が原因であることが示された。コレクタープレート、 θ ピンチコイルの形状に大差はないため、 θ ピンチコイルの配置の違いによるコレクタープレートを流れる電流分布の差が、抵抗となったことを示唆する結果となった。

更に実験結果から、Bias 回路の始動時間のジッタによるバラツキは 0.1 μ s 以下で抑えられているため、Main 回路を同時に始動することが可能であることが示された。

4. まとめと今後の展望

FRC プラズマの衝突合体実験に向け開発した 2 つの生成装置は、同等のスペックで、同等の FRC プラズマを同時に生成し、閉じ込め領域に移送することが可能であることが見込まれる結果となった。また、今回開発した装置は衝突実験前に使用していた装置(NUCTE-III)と同等のパラメータであり、今後は、開発した装置を用いて衝突合体実験を行う予定である。また、減衰時間の差の原因の特定や開発した装置に回路シミュレーションを行い、その結果を基に、オペレーションの最適化を行う予定である。

5. 参考文献

[1]H.Y.Guo , M.W.Binderbauer , D.Barnes : “Formation of a long-lived hot field reversed configuration by dynamically merging two colliding high- β compact toroids”, Physics of Plasma, Vol.056110, No.3, pp1-10, 2011.