O-40

磁場反転配位プラズマの回転不安定性の安定化

Stabilization for N=2 rotational instability of a field-reversed configuration

○蜂須賀拳¹, 高橋努²

*Ken Hachisuka¹, Tsutomu Takahashi²

Abstract: Afield-reversed configuration plasma has been formed by several methods, for example, field reversed t heta pinch method, translation trapping, spheromack merging and rotating magnetic field. All of FRC plasmas hav e rotational instability. But, the instability has been suppressed by externally applied multipole field or the interna l weak toroidal field. These critical magnetic fields B_{sc} has the same formulation, $B_{sc} = k \sqrt{\mu_0 \rho} r_s \Omega$, k is the factor d epending of the stabilization methods. The physical sense of the above equation in each stabilization method is d iscussed and the stabilized mechanism of rotational instability understood.

1.背景・目的

磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration: FRC) は、 様々な方法 (FRTP 法、反平行トロイダル磁場を持つス フェロマックプラズマ合体法、高速移送法、回転磁場生 成法) で生成されている。共通する現象として自発的に 発生するトロイダルフローにより回転を始め、トロイダ ルモード2の変形を起こし崩壊する不安定性の発生が ある。この不安定は、それぞれの方法で特長のある阻止 法がある。FRTP 法の場合、多極磁場による安定化法や 開いた磁力線領域の定イオンプラズマの制御、高速移送 法や回転磁場法の場合は、内部に発生する B_{θ} 磁場によ る安定化である。それぞれの方法における安定化条件は 以下のようになる[1-4]。

$$B_{sc}(n=2) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu_0 \rho}{m-1}} r_s \left| \Omega \right| \tag{1}$$

$$B_{sc}(n=1) = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{\mu_0 \rho}{2(m-1)}} r_s \Omega_{n=1}$$
(2)

$$B_{sc}(n=2) = 0.66\sqrt{\mu_0 \rho} r_s \left|\Omega\right| \tag{3}$$

$$B_{sc}(n=2) = 1.14\sqrt{\mu_0\rho}r_s \left|\Omega\right| \tag{4}$$

ここで、 $m, \mu_0, p, r_s, \Omega, f$ は、それぞれ多極磁場の局数、 真空透磁率、質量密度、セパラトリックス半径、プラズ マ回転周波数,減衰パラメーター(NUCTE3 の場合 (f=0.3) となる(1), (2)式は,多極磁場を用いて安定化できるト ロイダルモード2および1の場合の安定化条件, (3)式 は、高速移送で発生する B_θ 磁場による安定化条件、(4) 式は回転磁場法でプラズマ内部に発生する B_θ 磁場によ る安定化条件である。

1:日大理工・学部・物理 2:日大理工・教員・物理

プラズマの外部から加える $B_{ heta}$ 磁場と内部に発生する $B_{ heta}$ 磁場の違いがある

もののどの安定化条件も以下の式で表せることは興味 深い点である。

$$B_{SC} = k \sqrt{\mu_0 \rho} r_s |\Omega| \tag{5}$$

この点に注目して回転不安定性の安定化法を見直そう というのが本研究の目的の一つです。



Fig.1 Experimental setup of NUCTE-III and Helical coil

まず、外部から加える多極磁場の B_{θ} 磁場の効果と内 部で発生する B_{θ} 磁場の効果を考えるために多極磁場の 磁場構造を調べることにした。

2. 多極磁場の作る磁気面

FRC生成装置NUCTE(Nihon University Compact Torus Experiment) III で生成されるFRCを想定して多極磁場 の作る磁気面を計算する。Fig.1に装置概略図を示す。 プラズマを閉じ込める石英管(直径258mm)の表面に ヘリカル状にピッチ角αで多極磁場コイルを巻く.こ こでピッチ角とはコイル導線をヘリカル状に一周巻 いたときのZ軸の長さをLとして $\alpha = \frac{2\pi}{L}$ となる値で ある.完全導体と仮定した円柱プラズマを置いたとき 四重極磁場の磁気面を導出しピッチ角 α の依存性を 調べた. このときの磁気面の関数 ψ は、式(6)のように なる[5,6]。ここでのパラメーターは、z = 0(装置中 心)、 $B_0 = 0.7 T$ (一様磁場)、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ (真 空の透磁率)、J = 10 kA(電流)、a = 0.128 m(ヘリ カルコイル径の半径)、 $r_s = 0.06 m$ (円柱プラズマの半 径)である。また、n = m(2p + 1)の関係があり、ここ では四重極の場合m本の極数を踏まえるとm = 2とな る.

$$\psi = \frac{1}{2}\alpha r^{2}B_{0}$$
$$-\frac{2\mu_{0}am\alpha^{2}}{\pi}rJ\sum_{p=0}^{\infty}\frac{K^{\prime}(n\alpha a)}{K^{\prime}(n\alpha r_{s})}\{I^{\prime}(n\alpha r)K^{\prime}(n\alpha r_{s})$$
$$-\Gamma(n\alpha r_{s})K^{\prime}(n\alpha r)\}cosn(\theta - \alpha z)$$

(6)

この関数を算出するためにプラズマ表面に対して の境界条件を考える.プラズマを完全導体と仮定して いるので、プラズマ内に鏡像電流が流れると考える. このとき、逆向きの鏡像電流と実際に流した電流によ るプラズマ境界面でのベクトルポテンシャルの足し 合わせは0となるようにした。このように計算した結 果をFig.2にまとめる.(a)は、直線四重局磁場の磁気面、

(b)は、α=1.5 rad/mのヘリカル多極磁場、(c)は、α=7.0 rad/mのヘリカル多極磁場である。(c)の場合のヘリカル多極磁場は、閉じた磁力線配位が形成されていることがわかる。

3.まとめと今後の方針

Fig.2 に示した通りピッチ角 α を変化させていくとだ んだんプラズマ周辺の磁束が一定になっている.(α ≈ 0 の場合は直線電流である.)平均化されたプラズマ周辺 の磁束は直線電流のときの周辺の磁束より強くなって いるように見える.ヘリカル電流の場合の方が直線のと きよりも電流の強さが少なくても安定化効果を望める. 電流が強すぎると新たな不安定性が発生してしまうの で、ヘリカル電流の利用が良いと考えられる.

今後は、プラズマパラメータを考慮して内部にしみ込んでいる B_{θ} 成分の強度を推定し、内部磁場 B_{θ} 成分に直して安定化条件を見直し、内部 B_{θ} 磁場による安定化条件と比較・検討する。また、多極磁場による安定化条件は、これまでの行われた実験結果と安定化条件を比較すると B_{sc} の実験値は小さい値になっている。これらを検証するために、今後、四重極磁場を加えた場合の FRC

プラズマのトロイダルフロー速度の測定及び安定化閾 値磁場 BSC の実験を計画している。



(a) $\alpha \approx 0$ rad/m



(b) $\alpha = 1.5 \text{ rad/m}$



(c) $\alpha = 7$ rad/m Fig.2 Calculated quadrupole flux contours

4、参考文献

- [1] T. Ishimura, Phys. of Fluids 27, 2139 (1984)
- [2]K. Fujimoto, et al., Phys Plasmas 9, 171 (2002)
- [3]R. D. Milroy, et al., Phys Plasmas 15, 022508 (2008)
- [4]H. Y. Guo, et.al., Phys. Rev. Lett. 94,185001 (2005)
- [5] A.I. Morosov and L. S. Solovev Rev. of Plasma Physics 2
- [6] S. Shimamura, et al., Fusion Technology 9, 69 (1986),
- D.J.Rej, et al., Phys. Fluids 29, (1986)