

論文の内容の要旨

論文題目 Studies of stabilization technique for field-reversed configuration by using magnetized plasmoid injection

(磁化プラズモイド入射による磁場反転配位プラズマの安定化手法に関する研究)

氏名 板垣 宏知

1. 背景

磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration : FRC) プラズマはコンパクトトラスと呼ばれる磁場閉込め方式に含まれ、非常に高いベータ値 (プラズマ熱圧力を外部磁気圧で除いたもので、磁場閉込め効率の指標となる) を持つことが知られている。また、FRC の代表的な生成法である逆磁場テータピンチ (Field-Reversed Theta Pinch : FRTP) 法を用いることで、高温・高密度な FRC の生成が可能であり、将来的な D-D ないし D-3He 核融合炉心プラズマとして期待される。しかしながら、FRTP 法で生成される FRC は追加熱の方法や安定化手法が未だ十分に確立されていないため、配位の維持時間が短い。特に FRTP 法で生成される FRC はトロイダル断面の楕円変形を伴うトロイダルモード数 $n=2$ の回転不安定性により、その持続時間が制限される。そのため、この不安定性の発生機構の解明および制御は FRC を炉心 (プラズマ) とする核融合炉を実現する上で非常に重要である。

これまで、多重極磁場を FRC に対して印加することにより回転不安定性による楕円変形の抑制に成功している [1]。しかし、多重極磁場は非軸対称成分を有しており、それが FRC の閉込めを劣化させる問題が報告されている。一方で FRC の高速移送実験では、多重極磁場の能動手段がなくても回転不安定性の発生が抑制されていることが報告されており、その理由の一つとして移送中の FRC には少量のトロイダル磁束が誘起されており、そのトロイダル磁束による回転抑制の可能性があると報告されている [2]。そのため、本研究では磁化同軸プラズマガン (Magnetized Coaxial Plasma Gun : MCPG) を用いることによって、トロイダル磁束の注入を含めた様々な能動制御を FRC に施し、回転不安定性の安定化手法の確立を目指す。

2. MCPG による磁化プラズモイド生成および入射

MCPG により生成される磁化プラズモイドは、同程度のトロイダル磁束およびポロイダル磁束をもつスフェロマック様の磁場構造に緩和することが知られている。また、生成されたプラズマは電磁力で容易に加速され、音速を超えた速度での磁化プラズモイドの射出が可能である。これらの特徴から、MCPG により生成される磁化プラズモイドは、FRC に対して運動エネルギーや熱エネルギー、磁気エネルギー、トロイダル磁束、ポロイダル磁束、磁気ヘリシティなどを FRC の軸対称性を損なうことなく入射することができ、持続時間の短い FRC の能動制御手法として有力であると考えられる。本研究では、FRC 放電管の両端に装着した 2 台の MCPG の極性を変化させることによって、FRC に入射される物理量を制御し、安定化効果への寄与を検証する。

3. NUCTE-III 装置

NUCTE-III 装置では、FRTP 法で生成される FRC の安定化や不安定性の研究が行われている。本装置は石英放電管とそれを囲む 32 本の銅製のテータピンチコイルおよび真空排気系で構成される。テータピンチコイルは 22 本のセンターコイル、装置両端でミラー磁場を生成する 4 本のミラーコイル、センターコイルとミラーコイルを滑らかにつなぐ 2 本のテーパーコイルから成る。また、石英製放電管を採用しているため、光学計測の自由度が非常に大きく各種光学計測装置がコイル間の隙間を利用して設置されている。また、FRC のセパトリクス半径やポロイダル磁束などのパラメータの空間分布や時間発展を観測するための磁気プローブやフラックスループが放電管外部に設置されている。電子密度計測には He-Ne レーザーを用いた干渉計が用いられ、イオン温度やイオン流速はイオンドップラー分光計測装置により計測される。

4. 磁化プラズモイドの評価

FRC への入射実験を行う前に、テストチャンバーを用いた磁化プラズモイドの評価実験を行った。図 1 に、磁気プローブを用いて計測された磁化プラズモイドの磁場の径方向分布を示す。 B_z (ポロイダル磁場) は中心付近で最大値を持っており、外側で極性の反転がみられる。加えて、 B_t (トロイダル磁場) は $r = 2 \sim 3$ cm で最大値をとり中心付近を境に極性の反転がみられる。これより本研究の条件で、MCPG により生成された磁化プラズモイドはスフェロマック様の磁場分布をもつことが実証された。また計測された磁場分布より磁化プラズモイドがもつおおよその磁束量が計算でき、本実験での最大値はそれぞれ、 $30 \mu\text{Wb}$ (ポロイダル磁束)、 $25 \mu\text{Wb}$ (トロイダル磁束) であった。また、重水素の輝線である D_α の光学計測を用いた TOF (Time Of Flight) 法により最大射出速度は約 100 km/s、静電プローブによる電子温度および密度計測では最大で $T_e = 23$ eV、 $n_e = 1.2 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ が得られた。磁化プラズモイドに関して得られた諸量を表 1 に示す。

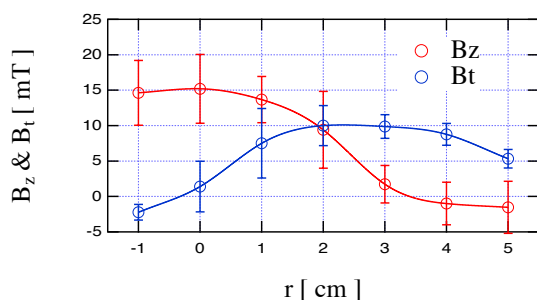


図 1. 磁化プラズモイドの閉込め磁場径方向分布

表 1 FRC と磁化プラズモイドの比較

	Magnetized plasmoid	FRC
ψ_{p}	$30 \mu\text{Wb}$	$200\text{-}650 \mu\text{Wb}$
ψ_{t}	$25 \mu\text{Wb}$	0
N	$\sim 10^{17}$	$\sim 10^{19}$
T	$23 \text{ eV}(T_e)$	$\sim 250 \text{ eV}$
E_{thermal}	2.6 J	2640 J
E_{kinetic}	0.28 J	-

5. FRC への磁化プラズモイド入射

MCPG により生成した磁化プラズモイドを、装置両端から FRC に入射し、回転不安定性に与える影響を検証する。このとき、MCPG の電極に印加する電圧あるいはバイアス磁場の極性を変化させることによって、それぞれの磁化プラズモイドのポロイダル磁束あるいはトロイダル磁束の符号を変更することが可能であり、さらに両側の MCPG の極性の組み合わせを選ぶことによって FRC に注入されるポロイダル/トロイダル磁束量を制御することができる。本研究で実施したプラズモイド入射の条件を表 2 に示す。表内において FRC のポロイダル磁場の向きを+としている。PI (Poloidal flux Injection)、PTI(Poloidal flux and Toroidal flux Injection)では両 MCPG から射出される磁化プラズモイドのポロイダル磁場の向きは FRC と同じ向きをもち、PI では入射後にトロイダル磁束が打ち消される方向になり、PTI ではトロイダル磁束が残る向きになる。

表 2 本実験における MCPG の入射条件

	Poloidal flux		Toroidal flux		Injected toroidal flux
	MCPG-A	MCPG-B	MCPG-A	MCPG-B	
PI	+	+	-	+	Canceled
PTI	+	+	+	+	Remained

図 2 に各条件で計測されたポロイダル磁束の時間発展を示す。図 2 に示すように、各条件ともに磁化プラズモイドを入射しない場合に対して、ポロイダル磁束の増加および維持している時間帯がみられており、また配位維持時間の伸長がみられている。加えて、各条件において回転不安定性が生じた際の回転周期と発現時間(回転不安定性が発現するまでに要する時間)についての比較を行った結果を図 3 に示す。磁化プラズモイドを入射した場合には、各条件で回転不安定性の発現時間の遅延や、回転周期の低下、成長時間の増加がみられている。本結果において PI および PTI でポロイダル磁束の増加や回転不安定性を抑制させる効果が出ており、PI でより顕著に不安定性の抑制効果がみられている。これより本研究において、入射されたトロイダル磁束すなわち磁気ヘリシティは FRC の回転不安定性の抑制には大きな影響を与えておらず、ポロイダル磁束の注入が不安定性を抑制させたと考えられる。両条件では、2 基の MCPG が生成する磁化プラズモイドのプラズマ電流は FRC のプラズマ電流の向きと同方向であり、ポロイダル磁束減衰の低減により配位の持続時間が伸びたと考えられる。これに加えて、ポロイダル磁束の増幅は、FRC のプ

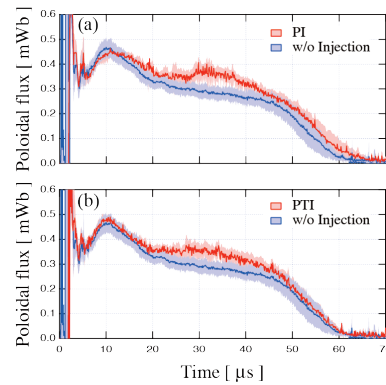


図 2 (a)PI および(b)PTI のポロイダル磁束の時間発展

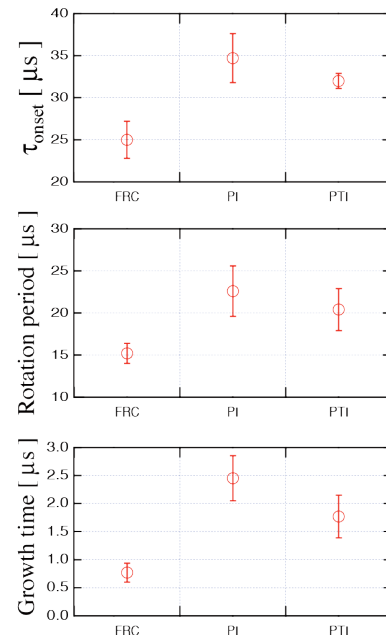


図 3 回転不安定性の諸パラメータ

ラズマ電流が MCPG により電流駆動された可能性を示唆すると考えられる。

また、図4にイオンドップラー分光計測で得られた各条件の角速度の時間発展を示す。回転不安定性の閾値として実験および理論から、FRCの角速度をイオン反磁性ドリフト周波数で除した値 ($\alpha = \Omega / \Omega_*$) が与えられており、 $\alpha > 1.0-1.2$ で回転不安定性が発生すると考えられている。また、 $\alpha > 1.5-1.6$ で成長率が速くなる。図4において水色の帯が成長を始める閾値帯を表し、橙色の帯が不安定性の成長率が速くなる閾値帯をあらわす。この結果から、磁化プラズモイドを入射しない場合、角速度は時間とともに加速しているのに対し、入射を行った場合の角速度は 20 ms 前後を境に加速せずに、角速度が維持されている時間帯が観測された。これにより、入射しない場合は成長率が速くなる閾値を超えてしまうのに対し、入射した場合は回転不安定性が発生する閾値は超えるが成長率が速まる閾値を超えないことが観測された。この結果より、この FRC の角速度の時間発展の違いが回転不安定性の成長時間を増加させた原因であると考えられる。

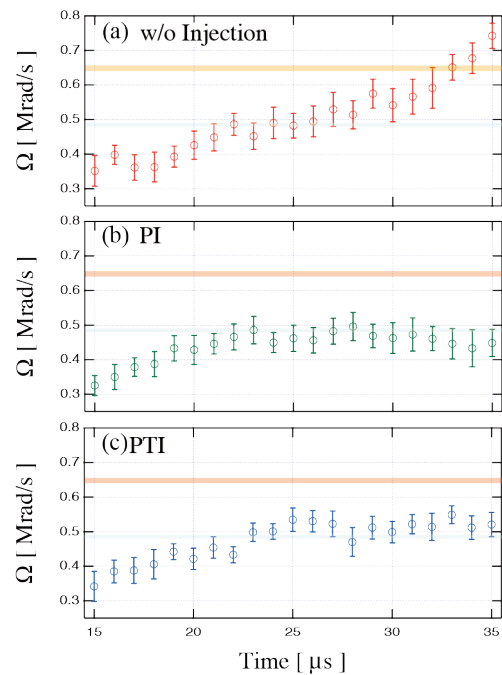


図4 (a)w/o injection (b)PI (c)PTI での角速度の時間発展

6. まとめ

本研究では FRC の回転不安定性を安定化するための MCPG 装置を開発し、実際に FRC 装置にプラズモイドを入射することによって安定化効果の評価およびそのメカニズムの検証を行った。いずれの条件においてもプラズモイド入射は FRC の磁束減衰を低減させ、回転不安定性を抑制する効果が確認されたが、特に2つのプラズモイドのトロイダル磁束がキャンセルするような PI が最も顕著な安定化効果を示した。これは、本実験においては、従来考えられているようなトロイダル磁束 (磁気ヘリシティ) 注入以外の効果が支配的であることを示唆している。特に、ポロイダル磁束注入 (=プラズマ電流駆動) によって回転不安定性の発現時間が有意に伸長されたとの結果は、FRC の磁束減衰が回転不安定性をもたらす可能性を示すものである。磁束減衰の低減は、また密度減衰の低減や FRC 角速度の低減をももたらすことから、最終的に発現した回転不安定性の成長率も低く抑えられていると考え得られる。

[1]D. J. Rej, et al, Phys. Fluids **29**(8) 1986

[2]R. D. Milroy and L. C. Steinhauer: Phys. plasma. **15**, 022508 (2008)