

逆磁場ピンチプラズマにおける自己磁場反転実験

Experiment of self-reversal of a magnetic field in Reversed Field Pinch plasma

○曾我祐人¹, 円谷大樹², 齋藤達雄¹, 渡部政行³*Yuto Soga¹, Daiki Tsumuraya², Tatsuo Saito¹, Masayuki Watanabe³

The RFP (Reversed Field Pinch) is one of the toroidal current carrying systems for the nuclear fusion research and its configuration is self-organized by dynamo effect. The self-reversal experiment of a toroidal magnetic field has been carried out in the ATRAS RFP plasma. In this research, the characteristics of dynamo effect are investigated in detail.

1. はじめに

1-1. 核融合

原子力エネルギーによる発電方法には核分裂反応を利用する方式と核融合反応を利用する方式の 2 種類がある。現在、問題とされている福島第一原子力発電所は核分裂反応を用いた原子力発電所である。核分裂反応と逆に、核と核が融合する核融合反応では、放出される 1 核子あたりのエネルギーが核分裂反応より大きく、また放射性核生成物の発生がないことから、全世界で次世代エネルギー源の 1 つとして開発が進められている。現在、核融合反応で発電をする原型炉として国際熱制御核融合炉 ITER 計画が進展している。

核融合反応を起こすためには、質量の軽い原子核同士をクーロン力に打ち勝って融合させる必要がある。また、核融合は放っておいても暴走の危険性は皆無であり、燃料が水であるからエネルギー源の枯渇恐れはいらないうえ、放射性物質拡散の恐れは少ない。

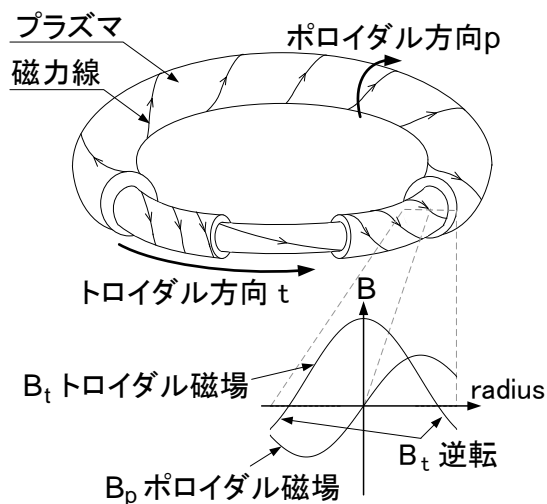


Fig 1: The magnetic field of the RFP plasma distribution.

1-2. 研究目的と逆磁場ピンチプラズマ

逆磁場ピンチプラズマ (RFP) はドーナツ状のプラズマを磁場によって閉じ込める方式の一つである。図 1 に RFP プラズマにおける磁場配位の概要図を示す。RFP ではトロイダル磁場がプラズマ中心部と外側でその方向が逆転していることがわかる。そのため磁気シア (磁力線のねじれの度合い) が大きく、弱い磁場でもプラズマを比較的安定に閉じ込めることが可能である。また RFP では磁場配位の形成・維持に必要な磁場の大部分をプラズマ自身が作り出す性質 (ダイナモ効果) に頼って生成している。

RFP プラズマの形成方法として以下の 2 通りがある。

①外部コイルで周辺磁場を強制的に反転させる。

(Added-reversal mode)

②プラズマが自発的に周辺磁場を反転させる。

(Self-reversal mode)

Added-reversal mode で生成した RFP プラズマでは高温・高密度のプラズマを効率よく閉じ込めることができる反面、磁場の反転機構を詳しく調べることは難しい。また Self-reversal mode で生成したプラズマは、高温のプラズマを形成しづらいため核融合に適したプラズマを閉じ込めることは難しいが、磁場反転の過程を詳しく調べる事が可能となる。本研究では RFP プラズマにおける磁場反転機構、磁場生成機構の解明に重点をおき、Self-reversal mode における無力磁場配位の形成、ダイナモ作用を調べる実験を開始した。

2. 無力磁場配位 (Force Free field)

磁気ヘリシティ K は磁力線の交差 (ねじれ) の度合いを表す物理量である。無力磁場配位はこのヘリシティ K が保存された状態のもと、エネルギー最小の条件で形成される。磁気ヘリシティが時間的に一定である時のプラズマが持つ最小のエネルギー W をもとめる

1 : 日大理工・院 (前)・量子 Graduate school of science and technology, Nihon University

2 : 日本大学・学部・物理, Department of physics, Nihon University

3 : 日大量科研 Institute of Quantum Science, Nihon University

には Lagrange の未定数法を用いる. この場合 $\delta K - \gamma \delta W = 0$ という条件を満たす. ここで, δK と δW はそれぞれ K と W の微小変化, γ は定数である. また, $K = \int \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} dV$, $W = (1/2\mu_0) \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{B} dV$ と定義される. ここで \mathbf{A} はベクトルポテンシャル, \mathbf{B} は磁場, μ_0 は真空の透磁率である. ベクトルポテンシャル \mathbf{A} と磁場 \mathbf{B} の微小変化を考えた時, 磁気ヘリシティの δK とエネルギー W の微小変化は $\delta K \approx \int (\mathbf{A} \cdot \delta \mathbf{B} + \mathbf{B} \cdot \delta \mathbf{A}) dV$, $\delta W \approx (1/\mu_0) \int \mathbf{B} \cdot \delta \mathbf{B} dV$ となる. この 2 式に上の Lagrange の未定数法の式を代入すると $0 = \delta K - \delta W = \int \delta \mathbf{A} \cdot \{2\mathbf{B} - (\gamma/\mu_0)(\nabla \times \mathbf{B})\} dV + (\gamma/\mu_0) \int \nabla \cdot (\mathbf{B} \times \delta \mathbf{A}) dV$ となる. これにガウスの定理を用いると, 右式第二項は 0 であるので, $\int \delta \mathbf{A} \cdot \{2\mathbf{B} - (\gamma/2\mu_0)(\nabla \times \mathbf{B})\} dV = 0$ を満たす解は $\nabla \times \mathbf{B} = \lambda \mathbf{B}$ になる. ここで, λ は定数であり, $\lambda = 2\mu_0/\gamma$ 置いている. マクスウェル方程式から $\lambda \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$ であることがわかり, つまり磁場と電流の向きが同じ, 平行な場合が無力磁場配位である. この配位ではローレンツ力が働かない, つまりは磁場がプラズマに影響を与えない配位である.

3. 実験装置

本実験で用いる ATRAS 実験装置は大半径 0.5m, 小半径 0.1m の真空容器を用いた, 高温のプラズマを磁場で閉じ込める実験装置である. 典型的な Added-reversal mode における放電では, プラズマ電流の最大値は約 60kA, 周回電圧の最小値は 100V, 放電時間の最大値約 1.6 ms である.

本研究の目的は Self-Reversal mode での RFP プラズマの形成および磁場反転機構の解明である. 低いトロイダル磁場においてトロイダル放電を形成する場合, 強力な予備電離が必要とされる. 本研究では計測用ポートから電極をプラズマ端まで挿入し電極とトロイダル放電管の間でグロー放電させることにより低トロイダル磁場におけるトロイダル放電を可能とした.

4. 実験結果

本実験では Self-Reversal mode による RFP プラズマの放電実験を行った. 比較的時間的に一定なトロイダル磁場の時間帯におけるトロイダル放電を行い, 徐々にトロイダル磁場の大きさを減少していった. 図 2 に典型的な放電波形を示す. 図は上からプラズマ電流, 平均のトロイダル磁束密度およびプラズマ周辺部のトロイダル磁束密度である. 黒線が放電時のトロイダル磁

束密度が約 0.22kG, また赤線が約 0.04kG である. 黒線は初期のトロイダル磁束密度が大きく, 自発的な磁場の自己反転ができず RFP 放電が形成できなかった場合であり, 赤線は初期トロイダル磁束密度が小さくプラズマの形成過程でプラズマ周辺部の磁場を反転することができた場合である. RFP プラズマが形成できない場合(黒線), プラズマには強い不安定性が生じプラズマ電流の増加は観測されないが, RFP プラズマが形成された場合(赤線), 急激なプラズマ電流の増加と, 強い磁場生成機構が働いていることがわかる.

5. 結論と今後の予定

低トロイダル磁場においてトロイダル電流駆動系プラズマを形成することに成功した. また印可するトロイダル磁場を徐々に減少していったところ, Self-Reversal mode における RFP プラズマの形成に成功した. 今後は放電の最適化を行い, ダイナモ効果に伴う磁場の反転機構の解明を行っていく予定である.

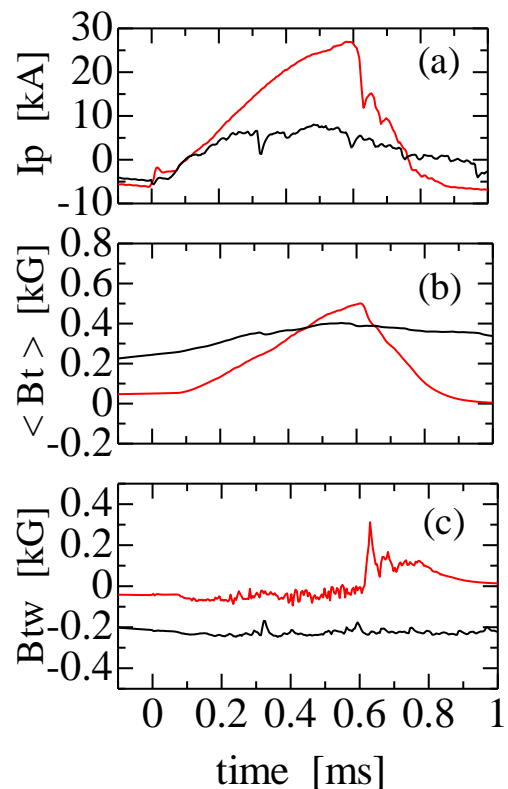


Fig 2: The typical waveform of the toroidal plasma discharge. The figure shows the plasma current (a), the average of toroidal magnetic fields (b) and the magnetic field near the plasma wall (c). The formation of the RFP plasma by a self-reversal mode are observed (red line)