



Title	ミラー型テーダピンチにおけるプラズマの回転
Author(s)	安友, 雄一; 小川, 宏明; 谷津, 茂男; 姫野, 俊一; 小澤, 保知; 榎戸, 武揚
Citation	北海道大學工學部研究報告, 99, 59-65
Issue Date	1980-08-11
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/41619
Type	bulletin (article)
File Information	99_59-66.pdf



[Instructions for use](#)

ミラー型テーatapinチにおけるプラズマの回転

安友雄一* 小川宏明* 谷津茂男**
姫野俊一* 小澤保知* 榎戸武揚***

(昭和55年3月31日受理)

Plasma Rotation in a Mirror Type Theta Pinch

Yuichi YASUTOMO Hiroaki OGAWA Shigeo YATSU
Shun-ichi HIMENO Yasutomo OZAWA Takeaki ENOTO

(Received March 31, 1980)

Abstract

Plasma rotation in a mirror type theta pinch with a reverse magnetic field has been detected by magnetic probes and image-converter camera. Angular frequency of 2.5×10^6 rad/s in the direction of electron larmor gyration was observed during implosion. Experimental evidence in which the rotational motion in a theta pinch with reverse field configuration occurs in a direction of electron larmor gyration has only been mentioned a few times to the present, and no physical explanation has been given. Measurement on B_θ by magnetic probe indicated that the maximum magnitude of the current flowing in the axial direction (j_z) was about 3 kA/cm. Because the magnetic field configuration was of a mirror type, a large transverse magnetic field component (B_r) normal to the plasma axis was present at the mirror throat. So, it was concluded that the plasma rotation occurring in the present type of mirror field configuration was induced by the torque due to the interaction of the axial current with the transverse field. Experimental data agreed with above reported model.

1. ま え が き

将来の核融合炉の候補として重要視されている実験装置は、磁場閉じ込め方式に於ては、ベータ値(ベータ値=プラズマ粒子圧/磁気圧)の低いものが多い。しかし、炉のエネルギー密度は、 $\rho \propto \beta^2 B^4$ であり、エネルギー効率という実用上の観点から考えると、ベータ値は出来るだけ高い炉型式が望まれている。低ベータ装置の高ベータ化の研究が行なわれる理由は主にこの点にある。一方で、本来高ベータ装置であるピンチ装置は、1960年代の初頭には、炉の実現を目ざす最有力候補と目され、その後さかんに研究されて来たが¹⁾、磁力線方向への ∇p によって生ずるプラズマの端損失が非常に大きく²⁾、端損失の抑制なしにはピンチ装置を用いた炉の実現はむずかしいことが明らかとなった³⁾。しかるに、有力な端損失抑制法も見い出されないまま、しだいにト

* 工学部原子工学科 エネルギー変換工学講座

** 工学部附属直接発電実験施設

*** 瞬間強力パルス状放射線発生装置研究室

ーラス化に向った。しかし、トーラス化することにより、新たな不安定が発生する等、さまざまな問題が発生し、最近では逆にピンチ装置の低ベータ化が余儀なくされて来ている面もある。

1971年、Eberhagen and Grossman⁴⁾は、逆転磁場配位(FRC)の場合には、ベータ値が1に近い場合においてもピンチプラズマの保持がきわめて安定(通常のリニアピンチに比べて保持時間が1桁のびる)であることを実験的に示した。その後、1976年頃から、米国ロスアラモス研究所に於ても、FRX-A, FRX-B装置によってFRCの閉じ込め特性に関する研究が行われた結果⁵⁾、プラズマは安定に保持されているが、結局プラズマの回転によって発生する $m=2$ の不安定性により、FRC配位の破壊が起こっていた。この様に、FRCに於ては、プラズマの回転がその安定保持に制限を与えていると考えられ、プラズマの回転のメカニズムを調べる事が重要になって来ている。一方、リニア型テータピンチ装置に於るプラズマの回転及び不安定に関する理論と実験的研究は、古くから行われて来ているが、これまでに完全に理解されているとは言えない。

著者等は、FRCの安定性に関して、プラズマの回転が重要な働きをしているとの観点からテータピンチ装置を使用し、逆転磁場配位で運転し、さらに磁場がミラー配位の場合について、特にプラズマの圧縮の起こる初期相でのプラズマの振舞を主に磁気プローブを使用して調べた。その結果、放電の初期に於てこれまでのFRC配位もしくはテータピンチに関する報告にある向き(イオンのラーマー回転の向き)とは逆に回転しているというデータが得られた。

本研究に使用している実験体系は、図-1に示した如く、両側のピンチコイル部及びミラー部から構成されており、注目する時間領域で磁力線方向へのプラズマの流れがみられる等、プラズマの挙動がかなり複雑で、现阶段ではデータが十分とは言えず、はっきりとしたプラズマの回転のメカニズムは解明されているとは言えないが、粗い近似として、ホール効果(B_r, j_z の相互作用)により回転するというモデルを考え、解釈を試みた。

表-1 テータピンチ装置パラメータ

Table	theta pinch parameter	
Coil length	40	cm
Coil bore	6.5	cm
Bank voltage	30	kV
Bank capacitance	22.5	μF
Maximum magnetic field	1.8×10^4	Gauss
Maximum \dot{B}	1.4×10^{10}	G/sec
Half period of discharge	4.0	μsec
Tube inner diameter	5.5	cm
Discharge gas	Helium	

2. 実験装置及び実験法

本実験に使用したリニアテータピンチのパラメータを表-1に示す。放電コイルは、ステンレス製の全長40cm、内径6.5cmのワンターンコイルで10分割されている。中央のコイルを1本抜き取ることにより、ミラー磁場を形成しており、この部分のミラー比は $R \approx 2.4$ (図-3参照)である。コンデンサーバンクは、容量が22.5 μF で、30kV充電にて運転される。放電ガスは、ヘリウムを使用し、放電の再現性を良くする目的で、ガスフロー方式を採用した。このためには、実験中、常時排気を行うと同時に、リークバルブ(エドワーズ社)を使用し、ヘリウムガスの流量調節により放電管内ガス圧力を一定に保っている。放電半周期は4.0 μs であり、本装置には予備電離回路がないので第1、第2半周期は予備電離相とし、第3半周期のプラズマを測定対象としている(図-2参照)。本実験では、ヘリウム充填圧力は注目する第3半周期に於て安定に逆磁場がトラップされる100m Torrとした⁶⁾。また、本実験を行う以前、に十分な予備放電を行うことによりプラズマの再現性が良いことを確かめた。さらに、本装置はクローバー回路は付属し

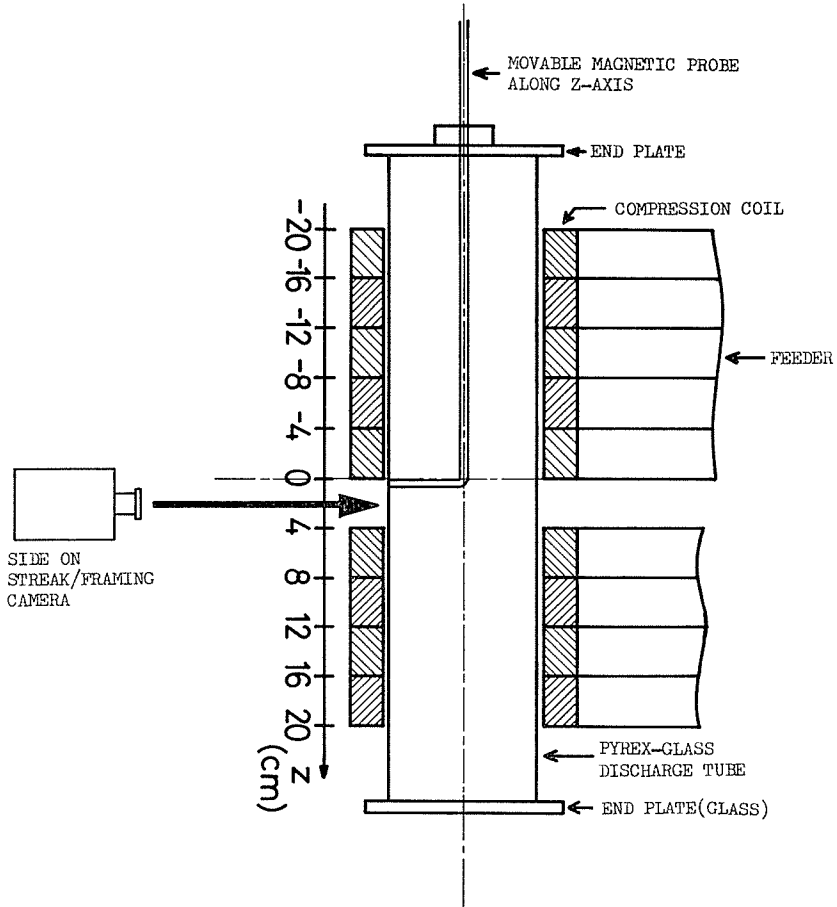


図-1 実験及び測定体系

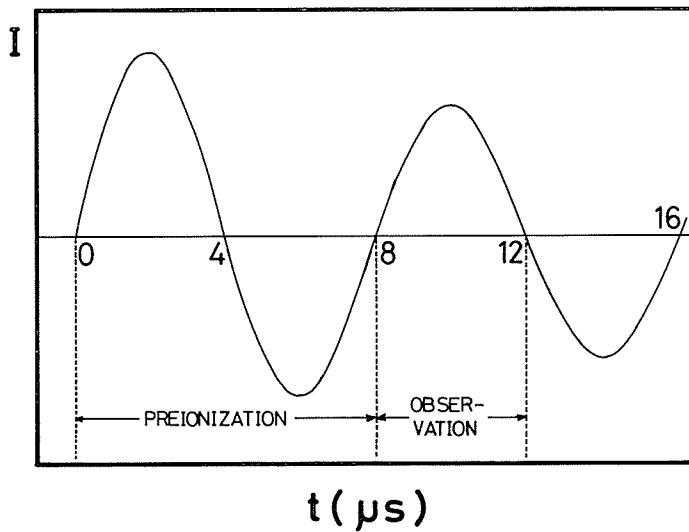


図-2 コンデンサバンク放電電流波形観測時間域; $8.0 \leq t \leq 10.0 \mu s$

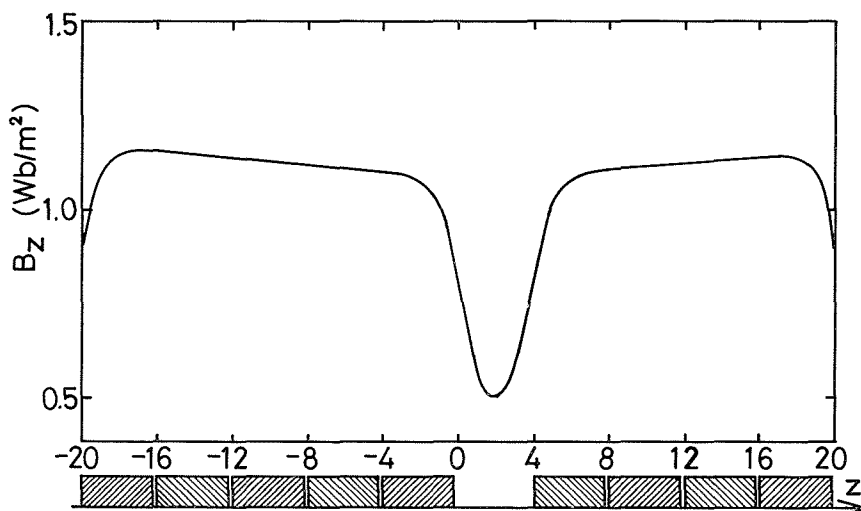


図-3 印加磁場分布, ミラー比; $R \approx 2.4$

ていないが、注目している観測時間領域が $8.0 \mu\text{s} \leq t \leq 10.0 \mu\text{s}$ なので問題はない。図-2 に、放電電流波形、及び各相の関係を示した。

本実験で使用したプラズマ計測法 (図-1 参照) は、磁気プローブ (B_r , B_θ , B_z プローブ) とイメージコンバータカメラである。磁気プローブは、 B_r , B_θ , B_z プローブとも外見は同一で、放電管軸方向 (以下 z 方向と記す) に可動の L 型のものである。プローブ素子数は、 B_z プローブは 7 素子、 B_r 及び B_θ プローブは 4 素子であり、磁場の半径方向分布 (以下 r 分布) の同時測定が可能である。プローブの較正は、ヘルムホルツコイルによる標準磁場で行った。

放電初期に発生する静電ノイズ、パルス強磁場を使用することにより発生する磁気誘導ノイズは、それぞれ静電しゃへい、ならびに鉄パイプを使用した磁気しゃへい等により実験上問題のない値まで減衰させている。プローブをそう入することによりプラズマに与えられると予想されるじょう乱は、Keilhacker⁸⁾ の結果によると、本実験の場合測定時間帯 ($8.0 \leq t \leq 10.0 \mu\text{s}$) では十分小さい。また、プローブ出力の再現性は、放電開始から $10.0 \mu\text{s}$ までは非常に良かった。

3. 結果及び考察

図-4 は、コンデンサバンク充電電圧 30 kV、放電ガス充填圧力 100 m Torr の条件で、 $z = 0.0 \text{ cm}$ (図-1 もしくは図-3 参照) すなわちミラー端部に於ける B_z の r 分布を時間をパラメータとして示したものである。図-2 から明らかな如く、印加磁場は第 3 半周期である $8.0 \mu\text{s}$ 以降 $12.0 \mu\text{s}$ までは正の値をとるが、図-4 からプラズマ中には第 2 半周期でトラップした磁場が残っており、いわゆる逆転磁場配位となっている。 B_z の半径方向変化率はその場所における j_θ に比例するので、時間の経過とともに逆磁場をトラップしたままプラズマ電流層がピンチしているのがわかる。すなわち、ミラー部に於て、FRC 配位が $9.0 \mu\text{s}$ 以降まで保持されていると推定される。

図-5 は、 B_z 測定用の磁気プローブを 30 度ずつ回転させ、 B_z の方位角方向 (θ 方向) 分布を測定した結果を示したものである。実線及び破線はそれぞれミラー端 ($z = 0.0 \text{ cm}$)、ミラー中心 ($z = 2.0 \text{ cm}$) の点に於ける $B_z = 0.2 \text{ Wb/m}^2$ の点をつらねたものである。図中に示した数字は、放電開始からの時間を示している (第 3 半周期、図-2 参照)。図-5 に於て、 $z = 0.0 \text{ cm}$ のデータより、 $8.4 \mu\text{s}$ から $8.6 \mu\text{s}$ の 200 ns の間に矢印で示した如く、約 30 度回転していると解釈される。 B_z の

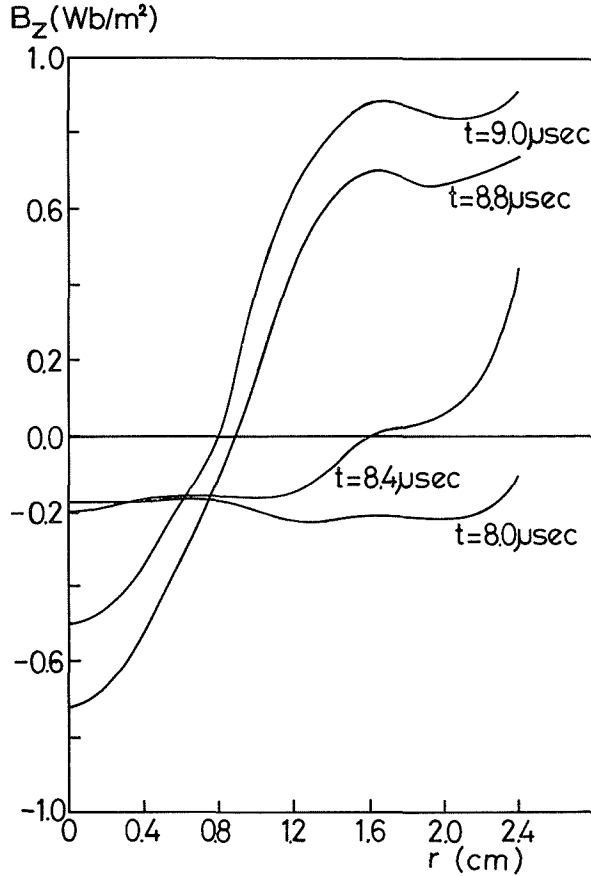


図-4 B_z の r 分布, 放電条件; 充電電圧; 30 kV, ヘリウム充填圧力; 100 m Torr

向きは、紙面上方から裏面に向かっており、矢印の向きは電子のラーマー回転の向きと一致している。図-6には、ミラー端に於けるプラズマの角速度の時間依存性を示した。図より、 $8.5 \mu\text{s}$ から $8.7 \mu\text{s}$ までは、電子のラーマー回転の方向に約 $2.5 \times 10^6 \text{ rad/s}$ で回転している。 $8.0 \mu\text{s}$ から $8.5 \mu\text{s}$ までは、回転の存在は不明であるが、これは第3半周期のごく初期には磁場が弱く磁気プローブの精度が悪いこと、さらにはデータの時間分解能が 200 ns 程度であるため、 $\omega < 2 \times 10^6 \text{ rad/s}$ の回転が検出されないことによると解釈される。これまで報告されているプラズマの回転の向きは、宮本ら⁹⁾の報告を除き、著者の知る限り電子のラーマー回転の向きというものは見当たらない。宮本らの研究は、本実験装置と同じく、かなり大きなミラー比を有すと装置を用いて行なわれているが、回転のメカニズムに関して何はらふれられていない。我々の装置は、比較的大きなミラー比 ($R \approx 2.4$) を有しており、 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ からミラー端に於てかなり大きな B_r が存在する。一方、 j_z は B_θ の測定の結果から推定することが出来、最大で約 3 kA/cm^2 となっている。但し、 B_r 、 B_θ の測定では、 B_z の影響を完全に排除することが出来なかった¹⁰⁾。 j_z の発生するメカニズムはこれまでの所不明であるが、 j_θ が数十 kA/cm^2 、 B_r が 0.2 Wb/m^2 程度であるので、ホール効果によって j_z が発生している可能性が強い。

以上の B_r と j_z によるホール効果で時間 Δt の間にプラズマが得る角速度 $\Delta \omega$ は、近似的に、

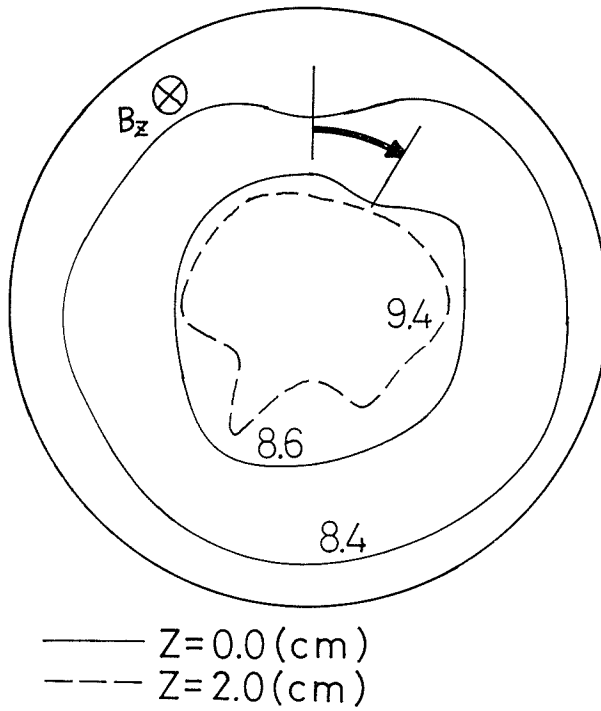


図-5 B_z の方位角方向分布 (B_z = 0.2 wb/m²)

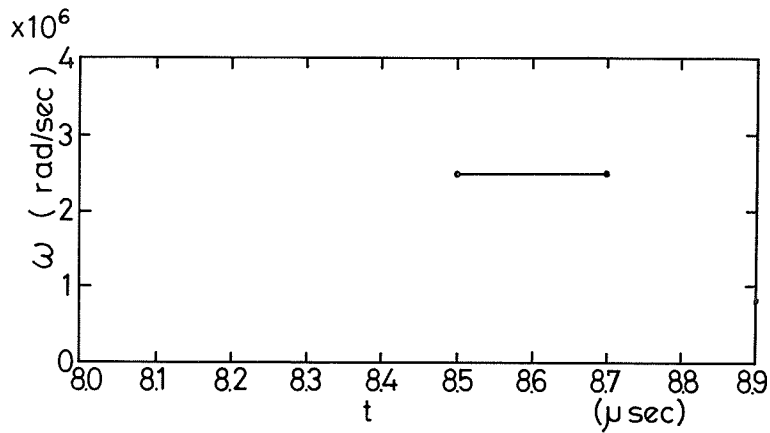


図-6 プラズマ回転角速度の時間変化

$$\Delta\omega \approx \frac{j_z \max B_r \max}{r\rho} \omega^2 \Delta t^3 \tag{1}$$

であらわせる。ここで

- $j_z \max$; j_z の最大値
- $B_r \max$; B_r の最大値
- ω ; バンク放電周波数
- r ; プラズマの平均半径
- ρ ; プラズマの質量密度

(1)式から $8.6 \mu\text{s}$ における角速度を求めると、 $\Delta\omega \sim 1.2 \times 10^6 \text{ rad/s}$ となる。この値は、各測定値の精度を考慮すると比較的良く一致しており、 $j_z \times B_r$ のホール効果がプラズマの回転に大きく寄与しているものと考えられる。しかし、本研究で使用したピンチ装置は、ミラー配位を伴っており、挙動が複雑である。高速度カメラによる発光パターンの測定結果によると、 z 方向への大きなプラズマの流れが観測されているが、今回のモデルでは流れの効果は無視されている。今後、実験精度の向上、ならびにモデルの精密化が課題である。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、懇篤な指導助言を賜った粥川助教授（原子工学科エネルギー変換工学講座）に、つつしんで感謝の意を表します。また、助言啓発を下された、青木助手、北川技官（同講座）に厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Hintz, E.: Nucl. Fusion, (1962), Supplement, Part 2.
- 2) McKenna, K. F. and York, T. M.: Phys. Fluids, **20**, 1556 (1977).
- 3) Ellis, W. R.: Nucl. Fusion, **15**, 255 (1975).
- 4) Eberhagen, A. and Grossmann, W.: Z. Physik, **248** 130 (1971).
- 5) Linford, R. K., *et al.*: LA-UR-78-1914.
- 6) Bodin, H. A., *et al.*: Nucl. Fusion, (1962), Supplement, Part 2, p. 521.
- 7) W. Lochte-Loltgreven: *Plasma Diagnostics*, Chap. 10.
- 8) Keilhacker, M.: Nucl. Fusion, **4**, 287 (1964).
- 9) Miyamoto, T. *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn., **19**, 2237 (1964).
- 10) Ashby, D. E. T. F. *et al.*: J. Sci. Instrum., **40**, 364 (1963).