

| | | | | |
|-------------|------------------------------------------------|---------|---------|---------|
| 氏 名 | たけ 竹 | うち 内 | のぶ 伸 | なお 直 |
| 授 与 学 位 | 工 | 学 | 博 | 士 |
| 学位授与年月日 | 昭和 59 年 12 月 12 日 | | | |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第 5 条第 2 項 | | | |
| 最 終 学 歴 | 昭和 42 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻 修士課程修了 | | | |
| 学 位 論 文 題 目 | 磁化プラズマへの振率効果の実験的研究 | | | |
| 論 文 審 査 委 員 | 東北大学教授 | 佐藤 徳芳 | 東北大学教授 | 穴山 武 |
| | 東北大学教授 | 安達 三郎 | 東北大学教授 | 渡辺 博茂 |
| | 東北大学助教授 | 後藤 幸弘 | | |

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

制御された熱核融合反応炉がエネルギー源として実用化されるにあたってはその経済性が非常に重要な問題となる。現在までに数多くの装置が提案され建設されてきたが、このうち現在最も研究が進んでいるトカマク型は扱っているプラズマが低ベータであり、経済性やその他の理由により実用炉としては必ずしも最適なものとは考えられていない。そこでいままでの装置を改めて考え直し、質的により優れた型の研究を押し進める必要がある。すべての閉じた磁気閉じ込め装置はメルシェによれば原理的に次の四つに分類されるという。即ち(1)トカマク型、(2)平面軸ステラレータ型、(3)立体磁気軸装置、(4)バンビー・トーラスである。

この四つの型の中で立体磁気軸装置は高ベータ・プラズマの閉じ込めが可能であり且つ定常運転が実現できることが理論的に明らかにされている。しかしこの型の狙いに沿った実験装置は東北大学のアスペレータ以外殆ど無くまた立体軸の利点を明確に示す実験結果もごくわずしか得られない現状を考えると、この型の実験の立ち遅れは明らかである。このことは閉じた磁気閉じ込め装置の質的向上を計る際に大きな障害となるものと考えられるから、今後立体磁気軸装置の研究を強力に押し進める必要がある。

本論文の目的は立体磁気軸装置の本質である磁気軸の振率がどのようにプラズマの閉じ込めに影響するかを実験的に明らかにすることにある。

第2章 実験装置および測定器

実験装置の模式図を図1に示す。大半径が30 cmで小半径が3 cmの内面を絶縁したステンレス放電管とそれに沿って配置されたソレノイド・コイルが2個の半トラス部を形成し、上部の半トラス部が固定され、下部が自由に且つ容易に真空を破ることなく回転できるようにしてある。2個の半トラスをそれぞれの一端で結合し、その角度を変えることにより磁気軸の振率を幾何学的に変化できるようにしてある。装置の磁界配置が計算機を用いて予め求められている。

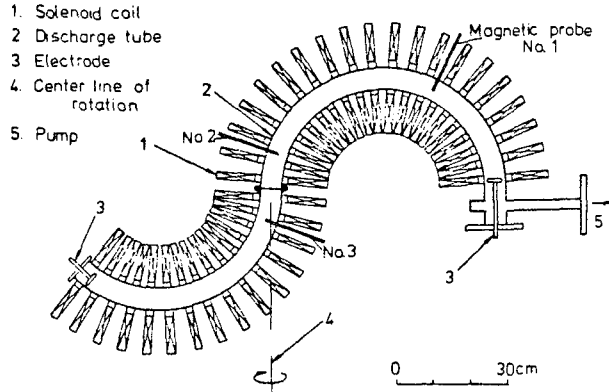


図1 装置の模式図（結合角は180度）

磁界は定常電源で作られその最大磁束密度は約3.8 kGである。両端面から挿入した電極を通じて時間幅約45 μsec の矩形波電流を流している。

測定には(1)磁気プローブ、(2)ログスキー・コイル、(3)複探針、(4)分圧器を用いている。各測定器に対しては静電シールドや電磁シールドを注意深く施し、観測波形に誘導や雑音が入ることを防止するのにつとめてある。この結果極めて明瞭な再現性の良いデータがえられた。

第3章 縦電流のある場合のプラズマの振舞

本装置のように端のある開いた場合には磁気軸が定義されないが、しかし縦電流を流すことにより等価的な磁気軸を考えることが可能である。

本章ではまず結合角を一定にしておいて縦電流 J かまたは縦磁界の磁束密度 B を変化した時にプラズマ柱がどのような状態になるかを詳しく測定した。実験結果を整理するのに $\mu_J = (L/4\pi r_p)$ (J/B)という量を定義する。ここで L は磁力線に沿っての電極間の距離、 r_p はプラズマ半径である。即ち μ_J は r_p をほぼ一定と考えれば方向も含めて J に比例し B に反比例する量として定義される。この値は縦電流によって作られる方位角方向磁界により、縦磁界の磁力線がどの程度回転するかを示しており、 $\mu_J = 1$ であればプラズマ柱に沿って両電極間でひとまわりすることになる。

この μ_J を変えていくとプラズマ柱にどのような変化が起こるかを調べた。磁気プローブの位置をプラズマ柱の中心に固定して方位角方向磁界の磁束密度 B_θ の出力を測定する。この μ_J が小さい時は B_θ は殆ど0であるが、ある臨界値 μ_{JC} を超えると急激に大きな出力が観測される。この臨界値は B を固定し J を増加させて求めても J を固定して B を減少させて求めてもその両者は良く一致している。また J と B の二つの方向を同時に逆転しても得られる臨界値は逆転前と同じである。この値は縦磁界の反磁性信号 b_z の急激な変化から求められるものとも良く一致する。この臨界値の前後でプラズマ柱の状態が異なることが各種の量の径方向分布の測定から明らかとなった。即ち B_θ ,

複探針によるイオン飽和電流 I_S (プラズマ密度にほぼ比例) および b_z の径方向分布おのおのが図2の(I)と(II)に示すような形状に分かれる。この図で(I) $\mu_J < \mu_{JC}$ の時プラズマ柱は放電管の中央部に壁から離れて存在するがその中心は管の幾何学的中心からずれている。ところが(II) $\mu_J > \mu_{JC}$ ではプラズマ柱は管壁まで広がりその中心はほぼ幾何学的中心にある。 B_θ と I_S の分布はこのことを良く示しているが b_z の出力は他のものと矛盾するようにみえる。しかしこのことは反磁性の本質を考えればうまく説明できる。即ち(I)の状態ではプラズマ柱が管壁から離れ磁界によって閉じ込められており b_z 信号が検出されるが(II)のようにプラズマ柱が管壁まで広がって壁で閉じ込められている時にはプラズマ粒子が壁で反射するために全体としては反磁性が打ち消されるためである。この二つの状態は次のように説明される。即ち(I)ではプラズマ柱は縦磁界により閉じ込められ安定に存在しているがある臨界値 μ_{JC} でヘリカル不安定が起こる。本来ヘリカル不安定が発生した後では縦電流はもはや流れられなくなるがこの実験では放電管壁は絶縁されており、また放電回路の電源インピーダンスはプラズマ柱のインピーダンスと比較して高いために強制的に電流が流され続け、プラズマ柱は別の電流分布で再び安定に存在することになる。

この臨界値は結合角を変えていくと図3に示すように違った値となる。即ち μ_{JC} が正の時には結合角が90度までは増加していくのに対して90度から180度までは逆に減少していく。負の時にはこの依存性が逆になっている。これは縦電流によって生じる方位角方

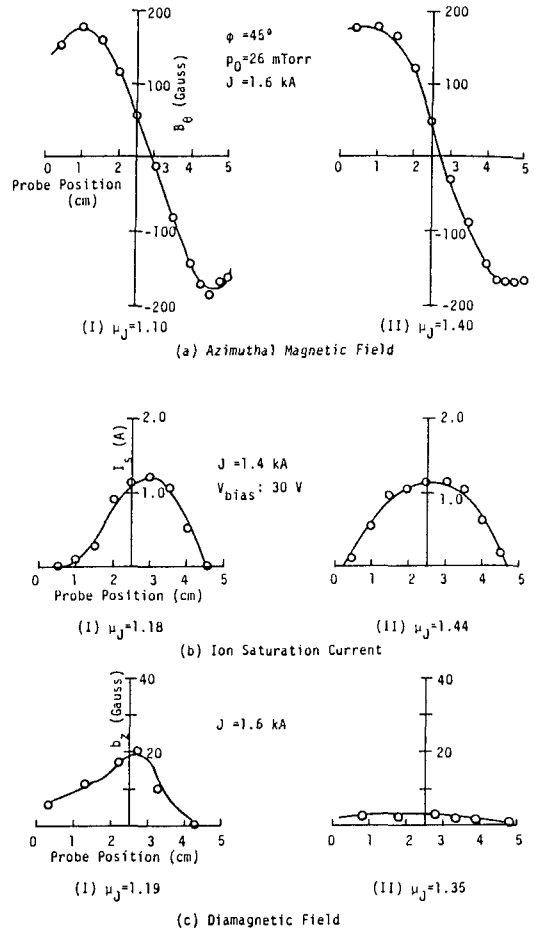


図2 B_θ , I_S と b_z の径方向分布

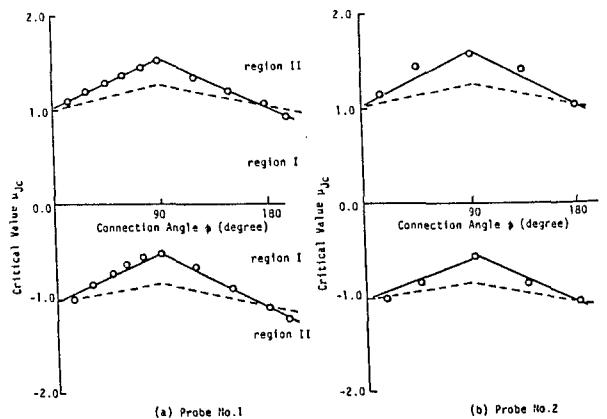


図3 μ_{JC} の結合角依存性

向磁界が、磁力線の振れを巻き戻す方向ならばこの臨界値は振れが無い時より増加するが、逆方向ならば減少することを示している。これは磁気軸に局所的な振れがあるだけでも磁力線に回転変換を起こすことができることを実験的に示している。

第4章 付加安定領域の存在

立体磁気軸装置ではシャフラノフらはフルート不安定に対して基本安定領域の他に縦電流をさらに増加した時に新たな安定領域が出現することを理論的に予測している。この章では前章で明らかにしたヘリカル不安定に対する基本安定領域の他に新たな付加安定領域が存在することを述べている。この付加安定領域の存在により、縦電流は平面軸の場合に比べてさらに余分に流せることになり、プラズマの加熱や高ベータ・プラズマの保持に非常に有利となる。

この新たな安定領域は縦電流を単純に増加しても実現できない。そこでこの付加安定領域を実現するために縦電流の流しかたとして図4(B)に

示すような方法を提案した。その結果、 B_θ 信号を解析して得られた安定領域を図5に示す。単一矩形波電流(A)を用いた場合、縦磁束密度を一定にして電流を増加していくと、ある臨界値で不安定が起り電流分布が変化してしまう。一旦電流分布が変化してしまうと、電流をさらに増加しても二度と不安定が起る以前の電流分布には戻らない。これに対して階段波電流(B)を流した場合、第1段電流の値を不安定を起こさない値以下にしておき、第2段電流を流すとその値によって三つの異なる状態ができる。即ち第2段電流の値が第1の臨界値 μ_{Jc1} 以上で第2の臨界値 μ_{Jc2} 以下であれば不安定が起ってプラズマ柱の状態は変化する。第2段電流の値が第2の臨界値と第3の臨界値 μ_{Jc3} の間にあれば、最初のプラズマ柱の状態が保たれ電流分布も殆ど変化しない。さらに電流を増加して μ_{Jc3} 以上に流すと、プラズマ柱は最初の状態から変化し、電流は管壁まで広がって流れるようになる。即ち $\mu_{Jc2} < \mu_J < \mu_{Jc3}$ の範囲に付加安定領域が存在する。結局、ヘリカル不安定に対する付加安定領域を実現するには、基本安定領域で不安定を起こさない電流を流し

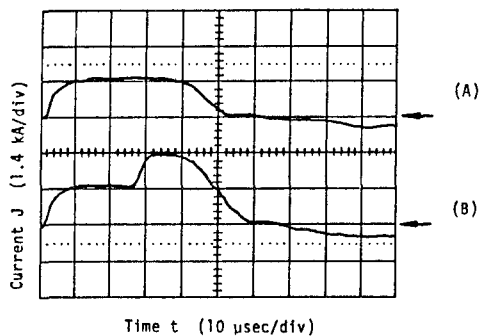


図4 二つの電流方式

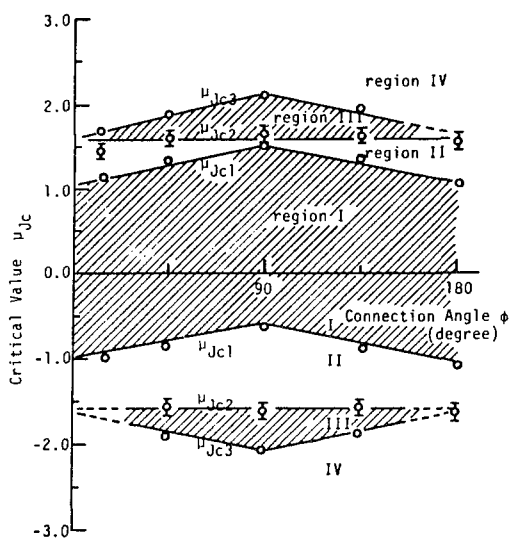


図5 μ_{Jc1} , μ_{Jc2} , μ_{Jc3} の結合角依存性

ておき，十分速い立ち上がりで電流値をこの付加安定領域に達するまで増加させればよい。この付加安定領域は磁気軸が立体的になっている時のみ存在する。

第 5 章 結 論

この章には本研究で扱ったプラズマの諸量について加えた検討および本論文全体にわたる結論を要約して述べた。本研究により立体磁気軸プラズマ閉じ込め装置を設計する上で極めて重要と考えられるプラズマ不安定に関して有用な知見を与えることができたものと考えられる。本論文の大部分が実験結果についてのみの記述になっている。これは立体磁気軸装置に関する研究は理論のみが先行して実験的研究が遅れており，装置の研究をさらに強力に押し進めるためには基礎的な実験事実の積み重ねが是非とも必要と考えるからである。

審査結果の要旨

長期的エネルギー源の開発をめざし、制御核融合の研究が国内外において積極的に推進されており、現在トカマク装置による臨界条件達成を目前にしている。しかし、実用核融合炉を考えると、現時点のトカマク装置には幾つかの欠点があり、その改良または他の方式の可能性を探究することが必要とされている。トーラス状磁界配位によるプラズマ閉じ込めにおいては、トーラス効果による電荷分離を除去するため、磁力線に回転変換を与える必要がある。立体磁気軸装置は、磁気軸を振ることによってこの回転変換を与えるもので、プラズマ電流によって回転変換を与えるトカマク装置と比較して、高ベータプラズマの閉じ込めが可能であること、定常運転が実現できることなどの長所を有し、その研究の必要性が力説されている。しかし、立体磁気軸配位中プラズマの基本的性質がいまだ明らかでなく、その有用性を実証する実験的研究が待たれている。本論文は、二つの半円状装置を一端で結合し、その結合角を変えることによって磁気軸の振率を変え、このような磁界配位中プラズマの安定性を実験的に解明し、プラズマ安定性に対する振率効果を明らかにしたもので、全文5章より成る。

第1章は序論である。

第2章では、実験装置、測定方法および磁界配位の振率について述べている。

第3章では、磁力線方向の電流 I 、磁束密度 B 、および二つの半円状装置の結合角 ϕ を変え、プラズマの安定性について得た詳細な実験結果を述べている。まず、一定の ϕ に対して I/B を増すと、ある臨界値以上でプラズマがヘリカル状不安定となり、プラズマが容器壁まで拡がることを見いだした。次に ϕ を変え、 $\phi = 90$ 度（振率最大）で臨界値が最大となることを明らかにした。これは、プラズマの安定性に対する振率効果を示しており、高く評価される成果である。

第4章では、電流を更に増したときに現われる付加安定領域を実証している。すなわち、安定領域を与える電流にある値以上のステップ状電流を重畳することによって新しい安定領域に到達できることを見いだしている。しかし、電流を単調に増してもこの安定領域に達することはできない。このような付加安定領域の存在は、立体磁気軸配位中のフルート不安定の検討において、シャフラノフが理論的に予言しており、同種のものであると考えられ、有用な知見を得たものと言える。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、磁気プラズマ閉じ込め方式の一つである立体磁気軸閉じ込め装置の基本的性質である振率効果をプラズマ安定性について実験的に解明したもので、電子工学、プラズマ工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。