

論文の内容の要旨

論文題目 球状トーラス実験装置 TS-4 における各種プラズマ配位の 合体生成に関する研究

鶴田 繭子

磁気核融合プラズマ研究において球状トーラスと呼ばれるアスペクト比（トーラスの主半径÷副半径）が 1.6 程度以下の内部電流系、軸対象トーラス閉じ込め方式が着目されている。球状トーラスには磁場構造の違いから球形トカマク (ST)、コンパクト ULQ/VLQ、スフェロマク、逆転磁界配位 (FRC) および、コンパクト逆磁界ピンチ (コンパクト RFP) 等の配位が含まれ、それらの生成と閉じ込め性能を研究することが将来の発展にとって必要とされている。本論文においては新規プラズマ合体実験装置である TS-4 を用いて上記の各種球状トーラスの生成実験、特に各配位の合体および単体生成を達成し、それぞれの配位の相互比較および、過去に蓄積されたプラズマ合体実験装置 TS-3 による結果との比較を行った。

第 1 章は序章であって研究の背景が述べられている。特に合体実験において内部トロイダル磁界に向きに関し同極性合体および異極性合体について説明している。

第 2 章では新実験装置である TS-4 について説明している。

第 3 章では $n=1$ トロイダルモードが軸対称性を仮定した磁気面計測に与える影響について理論的考察を行っている。ここでは $n=1$ モード不安定性が磁気プローブ 2 次元アレイの計測面に対し平行あるいは垂直方向であるとした場合にそれぞれ誤って算出される特徴的な磁気面形状および磁界分布を特定し、それより不安定性に存在に対して評価を行う手法を検討した。さらに実測データとの比較を行った結果、 $n=1$ モードはティルトとシフトの二種類のモードがあるが、いずれかの不安定が生じる場合には、計算により特定された一方の磁気面変形の特徴が算出結果に表われることがわかった。また算出された磁気面変形から $n=1$ モード不安定性に係る種類 (ティルト、シフト) の推定を試みたところ、計測面に対し $n=1$ モード不安定性がほぼ平行または垂直方向に生じている場合には、計測面に対し平行方向のティルト不安定性は明解に推定可能であることが分った。ただし、計測面に対し平行方向のシフト、垂直方向のティルト不安定性は磁気面再構成に与える傾向が類似しているためそれのみによる判別は難しく、多くの場合トロイダルモードプローブの計測結果も含めて総合的に考慮して初めて判別可能であるとの結論に達した。計測面に対し $n=1$ モード不安定性が傾いた方向に生じている場合は、いずれかの磁気面形状の特徴がやはり計測結果に表われるので、 $n=1$ モード不安定性が生じていることは同じく判別可能である。ただしその種類の推定は難しい。以上の考察により、TS-3 および TS-4 装置で採

用される磁気面計測において特定された磁気面変形および磁界分布が計測される場合、 $n=1$ モード不安定性によって生じる計測データの解釈についての混乱を回避し、さらにその変形の原因についての同定がある程度可能であることが判明した。

第4章では TS-4 装置の初動実験として行ったスフェロマクを用いた同極性および異極性合体実験について述べている。実験の結果、TS-3 装置の3倍の装置規模を持つ TS-4 装置においても TS-3 装置と同様、合体する配位の内部トロイダル磁界が互いに同方向である同極性合体の場合にはスフェロマク配位、互いに逆方向である異極性合体の場合には FRC 配位がそれぞれ合体後形成されることが確認された。同極性合体においては、合体によって過剰となったトロイダル磁束 Φ からの磁束変換によるポロイダル磁束 Ψ の増加が予測されていたが、その現象が本実験によって初めて観測された。TS-4 装置におけるスフェロマクの最小固有値はその内部寸法により $\lambda_p \sim 6$ [1/m]ですなわち、この固有値を持つプラズマが TS-4 装置内において生成される最大の寸法を有するスフェロマクである。TS-3 装置におけるプラズマと比較するとそのプラズマサイズは2~2.5倍であり、低次のトロイダルモード不安定が抑制され完全に自然減衰した場合には、寿命もそれに比例して延びていることがわかった。一方、異極性合体においては磁力線のつなぎ変り（磁気リコネクション）によるリコネクション点周囲のポロイダル磁力線のオーバーシュートが生じると期待され、実際 TS-3 装置の場合と同様 TS-4 装置においても磁力線のオーバーシュートが観測されることがわかった。また合体する両プラズマの磁気エネルギー差 K_{diff} と合体によって生成された配位の持つ λ_p との関係から、合体生成配位が FRC に緩和する限界は $K_{diff} < \sim 0.1$ で TS-3 装置の結果と比較して小さく、スフェロマクに緩和する境界は TS-3 と同程度で $K_{diff} > \sim 0.4$ であった。これより TS-4 装置では合体後に一方に緩和することなく FRC とスフェロマクの間中間的な状態となる範囲が比較的広いといえる。

第5章では中心導体アセンブリーが導入された TS-4 装置において外部トロイダル磁界による生成配位の比較を行った結果について述べている。その結果、アスペクト比 $A \sim 1.23$ のコンパクト RFP から ST に至る各種配位の同極性合体生成に成功した。コンパクト RFP からスフェロマク、ST と外部トロイダル磁界を変化させ生成実験を行った結果、端部において安全係数 q_a の大きい ST ($q_a > \sim 3$) はコンパクト RFP およびスフェロマクの最大およそ3倍のプラズマ減衰時定数を持つことがわかった。コンパクト RFP の同極性合体生成では、スフェロマクの場合と同様、合体途中から合体後にかけて Ψ の増加が観測された。また、 Ψ の増加と同時にトロイダルモード $n=2$ の増加が観測され、この場合の磁束変換において $n=2$ モードが主要なダイナモ機構の原因であることが示唆された。合体終了後からの緩和過程を示す $F-\theta$ 曲線から判定すると、合体終了直後に θ の最大値を示し、その後 θ 値は低下し無力磁界配位（テーラー状態）の理論曲線へ近づく。この過程でコンパクト RFP は、(1) 合体直後 Φ が過剰であるが、(2) それが Ψ へと磁束変換した高ベータ状態での平衡、(3) 理論曲線近傍まで緩和した低ベータ状態での平衡、と3つの過程を経ることがわかった。一方、ST の同極性合体生成では、コンパクト RFP およびスフェロマ

クの場合と異なり合体に際し Ψ 、 $n=2$ モード共にその増加は小さく、代りに磁気軸における安全係数 q_0 の増加が観測された。また、合体終了後からの緩和過程を示す $F\cdot\theta$ 曲線においては、合体終了直後にはコンパクト RFP およびスフェロマクの場合と同様に θ の最大値を示したものの、その後低ベータ配位へ緩和していく過程では無力配位理論曲線へ接近することはなく代りに、単体生成固有の $F\cdot\theta$ 値へと緩和した。この結果より、ST の場合には合体による加熱効果により高ベータ配位が形成され、その後時間の経過と共に単体生成された場合と同様低ベータな状態へ移行することがわかる。ただしその平衡状態はコンパクト RFP およびスフェロマクの場合のようにテーラー平衡状態ではない可能性が示唆された。また、ST の生成領域においては ST の同極性合体および単体生成どちらの場合においても外部トロイダル磁界コイル電流 $I_{tfc}=10\sim 20[\text{kA}]$ においてプラズマ減衰時定数が極端に小さくなるという興味深い現象が観測された。この原因を突き止めるためフラックスコア周辺の磁界分布を概算で見積もったところ、初期プラズマ生成に失敗しているのではなく、フラックスコアから初期プラズマにエネルギーが注入される過程でプラズマ表面において $q=1$ 磁気面による不安定性が発生し崩壊している可能性が示唆された。

第 6 章では外部トロイダル磁界中の異極性合体実験を試みた結果について報告している。異極性合体による生成配位である FRC は高ベータではあるがその閉じ込め特性は劣る。そこで、これに外部トロイダル磁界を付加することによりその安定性向上を図るものである。この場合、合体する二つの配位はそれぞれコンパクト RFP と ST となる。実験はコンパクト RFP に比較的有利な低 q 領域 $I_{tfc}=8[\text{kA}]$ および ST に有利な高 q 領域 $I_{tfc}=40[\text{kA}]$ に分けて行った。その結果合体によりまず、コンパクト RFP の様な磁界構造をもつ配位が生成され、その後次第に外部トロイダル磁界と逆向きのトロイダル磁界を失い、最終的には内部トロイダル磁界の割合が小さい、いわゆる反磁性を示し高ベータを有する ST に類似した磁界構造となった。しかしこの磁界構造は過渡的なもので平衡配位としては長時間維持されず、合体後の配位形成維持が定常的に行われるかは不明である。高 q 領域では、ST を先に生成することによってコンパクト RFP 対し外部トロイダル磁界を実効的に弱める方法をとった。これによって高 q 領域における異極性合体に成功した。しかし異極性合体には一応成功したものの、ST およびコンパクト RFP 双方の生成時刻をずらすことによって左右のトロイダル磁界コイルの反転電流にアンバランスが生じ、配位が不安定に移動するという問題点が明らかとなった。これを防ぐには各内部コイルの電流を最適化し、生成前後の配位の位置を適当に制御する必要があることを指摘した。以上の実験の結果、どちらの場合にも合体配位生成に成功したが最終的にある程度高い q 値によって安定化された配位を生成することが望ましいことが明らかとなっていることを考えると、高 q 領域における実験は今後各種の工夫によって加熱効果が見られるよう研究を展開することが期待される。

第 8 章は結言であり、本研究によって得られた主要な成果をまとめている。本実験装置によって各種球状トラス装置の合体研究の基礎が確立した。