

論文の内容の要旨

論文題目 プラズマ合体を用いた球状トーラスの高性能化

氏名 植田 喜延

核融合開発研究はトカマク方式を中心に進められており、現在プラズマの「核融合三重積 ($n\tau T_i$)」が約 $10^{21}[\text{keV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sec}]$ 程度まで得られ、零出力炉 ($Q = 1$) の条件が満たされる段階まで到達した。また国際熱核融合実験炉計画 (ITER) 等における物理、工学研究によりこれまでの実績の外挿による核融合炉実現も十分に展望できる。しかしながら現状のトカマク方式を用いた核融合炉では、十分な核融合出力を得るためには非常に大きくならざるを得ず、経済的であるとは言えない。外部コイルによる磁場をあまり必要とせず、よりコンパクトでかつ閉じ込め性能も高い方式が必要とされている。その要求に応え得る核融合磁気閉じ込め配位として球状トーラスが注目されている。球状トーラスは球状トカマク、スフェロマック、低アスペクト比逆磁場ピンチ、逆転磁場配位などの低アスペクト比内部電流系配位の総称であり、各配位毎に特徴、到達パラメータや課題は様々であり、これらの統一的な理解も必要である。

トーラスプラズマを軸対称に合体させると、磁束の保存からポロイダル磁束は二つのプラズマの持つポロイダル磁束の大きい方の値となり、トロイダル磁束は両者の和となる。このことからプラズマ合体をトロイダル磁束量の調整に適用できると考えられる。また、合体に際し古典抵抗拡散を遥かに上回る速度で磁力線の繋ぎ変わりが生じ、失われる磁気エネルギーが熱エネルギーに変換されることからプラズマの加熱手法としても有力である。本研究では、軸対称合体を球状トーラスに適用し、磁束(電流)駆動および加熱効果を実証した。またこれらの効果を利用して各種球状トーラスの安定性、閉じ込め時間の向上を試み、さらにより大型装置での合体実験の有効性を示す磁場スケールリング作成を行った。

プラズマ合体を用いたトロイダル磁束注入実験ではスフェロマックや低アスペクト比逆磁場ピンチといった安全係数の低いプラズマで問題となるダイナモ現象の発生を抑制し、ダイナモに起因する低次トロイダルモードの低下を確認した(図1)。急速加熱実験では、合体(磁気リコネクション)によりプラズマのイオンが選択的に加熱されること、イオン温度上昇は安全係数の低いプラズマ程高いこと、加熱に要する時間と熱エネルギー増加量から、平均の加熱パワーにして最大 20 [MW] 得られることなどが明らかになった(図2)。

合体加熱された球状トーラスのトロイダル電流分布を計測すると、従来の磁気軸でピークを持つ分布から磁気軸周辺で電流密度の低下するホローな分布に変化することが分かった。また、球状トカマクではプラ

ズマ電流のポロイダル成分がつくり出すトロイダル磁場の常磁性成分も低下する。これらの特徴は配位の高ベータ化 (ベータ = プラズマ熱圧力 / 磁気圧) に寄与し、体積平均ベータ、ポロイダルベータ共に 2-3 倍上昇することが分かった。

合体により生成した高ベータ配位を用いてプラズマが高ベータ化した際に問題となる圧力駆動型の電磁流体力学的不安定性であるバルーニングモードの検証を実験および数値解析により行った。実験からは合体後長時間維持されるケースと、プラズマ端部に局所的に大きな磁場揺動を伴って早く消滅するケースが観測された。各々の圧力勾配を比較すると、早く減衰するケースの方が強い圧力勾配を持っていることが分かり、バルーニング不安定の発生が示唆された。両者の圧力分布を数値計算によって解析した結果、寿命の長いケースはバルーニングに対し安定であり、崩壊するケースは広範囲でバルーニング不安定性を示すことが確認された。

スフェロマックの異極性合体によって生成される逆転磁界配位はベータ値が非常に高く、さらに後から外部トロイダル磁場を印加した球状トカマクはプラズマ内部のトロイダル磁場が外部トロイダル磁場よりも小さくなる反磁性を示し、交換不安定性の安定化に有利な絶対極小磁界配位を形成することからバルーニング第二安定化を実現する可能性が高い。本研究では数値解析により反磁性球状トカマクが実際に第二安定化領域に存在していることを実証し、常磁性球状トカマクよりもその安定領域が拡大していることを見出した。

より大型の装置への適用性を検討するために合体加熱の磁場スケールリングを評価した。スフェロマックの異極性合体実験において、初期スフェロマックの磁気圧を 0.6-4 [kPa] の間で変化させた結果、合体後生成される逆転磁界配位のイオン温度は 10-100 [eV] の範囲で磁気圧に応じて変化した。プラズマ合体による電子温度、密度の変化はほとんど見られないことを考慮すると、合体後の熱圧力は合体前の磁気圧にほぼ比例して上昇する。これは 1 [T] の磁場を持つ球状トラスを軸対称合体することで 10 [keV] のイオン温度を持つ配位が生成され得ることを意味する。

以上、球状トラスにプラズマ合体を組み合わせることで経済的な核融合炉心プラズマとして魅力的な配位の候補となることを実験、数値解析を組み合わせることで実証した。

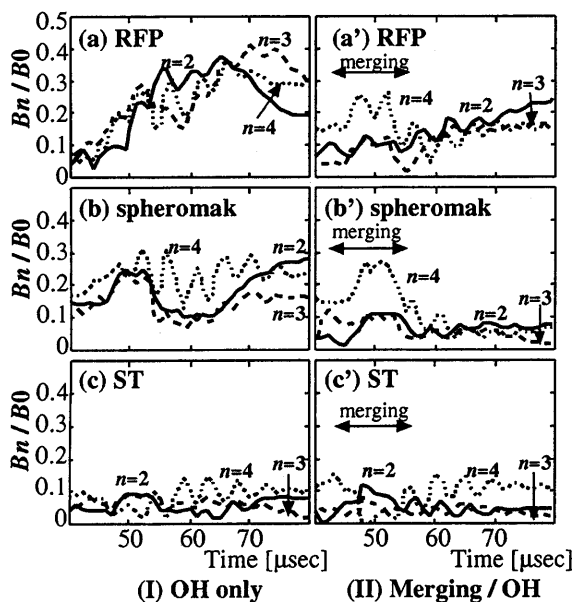


図 1: (a) 低アスペクト比逆磁場ピンチ、(b) スフェロマック、(c) 球状トカマクのトロイダルモードの磁場強度。ダッシュは合体を行った場合。

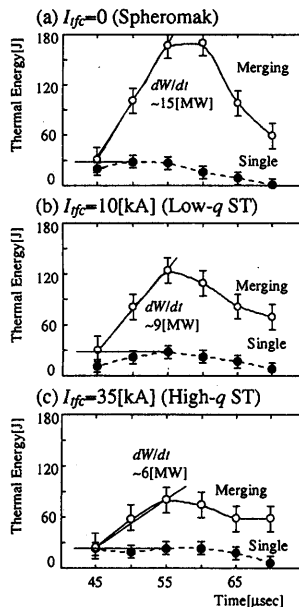


図 2: 熱エネルギーの時間変化。(a) スフェロマック、(b) 低 q ST、(c) 高 q ST。実線は合体、破線は単一生成の場合。