

## 論文の内容の要旨

論文題目 球状トカマクの合体立ち上げの最適化と  
電子加速・加熱機構の解明

氏 名 山崎 広太郎

真空容器外に配置されたコイルのみで合体立ち上げを行い、磁気リコネクションによる加熱を用いて高ベータ値を持つ球状トカマク(ST)を生成することを目的として、高ガイド磁場中において生じる磁気リコネクションにより電子やイオンに対するエネルギー付与が生じる素過程を解明することと、合体立ち上げにより生成したSTの維持時間を長くするために長周期で合体立ち上げの初期プラズマ生成を行う手法の開発を行った。合体立ち上げ中に生じる高ガイド磁場磁気リコネクションにおいてはイオンよりも電子へのエネルギー付与が多くなることが分かり、またトロイダル磁場が強いほど電子へのエネルギー付与が多くなることが判明した。また外部コイルを用いて2~3msec程度の時間で初期プラズマを立ち上げることが可能であることを実験的に示し、さらにダイバータ板への熱負荷を低減するために導入が検討されているsnowflakeダイバータに用いられるinboard側のコイルを用いると真空容器上下の領域により安定に、かつ広いNull点を形成できることが示されたため、実際の核融合炉に近い条件においても合体立ち上げが行える可能性を提示した。さらに、inboard側に磁束を保存する導体を上下に配置することで外部コイルのみでも真空容器上下に広いNull点を形成できることが渦電流計算により示された。

まず、UTSTにおける合体立ち上げにおいてX点周辺の浮遊電位分布を計測することにより、合体立ち上げの際に生じる高ガイド磁場磁気リコネクションが生じる領域を特定した。X点からはなれた領域では静電場と誘導電場の磁力線方向成分が相殺し理想MHD条件が満たされているが、X点周辺では誘導電場の磁力線方向成分が静電場の磁力線方向成分よりも支配的であり、理想MHD条件が破れていることが確認できた。また、ガイド磁場の強さのみを変化させてもこの散逸領域の大きさは変化しないことが判明した。これは高ガイド磁場リコネクションにおいては散逸領域の大きさは電子やイオンのジャイロ半径に依存しないことを示唆しており、高ガイド磁場リコネクションにおける磁気リコネクション進行過程に関して新たな知見を示す結果となった。得られた磁場と電場の値を用いてX点周辺における電子の挙動を調査したところ、電子は散逸領域で誘導電場により磁力線方向に加速されることが判明し、X点近傍において特に運動エネルギーを効率よく得ることが判明した。ガイド磁場のみを変化させたケースにおいても同様の解析を行ったところ、ガイド磁場が強いほど電子へのエネルギー付与が大きくなることが分かり、ガイド磁場が強いほど合体立ち上げ時の電子加熱や加速が行われやすいことを示す結果となった。

現在UTSTで行っている合体立ち上げSTは100kA程度のプラズマ電流に達するものの200~300 $\mu$ sec程度で減衰してしまうため合体立ち上げSTの特性について議論する段階に至っていない。

合体立ち上げSTの実用性を評価するためにはSTを立ち上げ、STが平衡状態に達した段階での特性を知る必要があるため、合体立ち上げSTの維持時間を伸ばすことはUTSTにおける合体立ち上げSTの研究において必要不可欠である。UTSTにおける合体立ち上げSTの寿命を決定する原因を調べたところ、L/R時間が他装置に比べて2桁程小さいことと、真空容器壁の一部に渦電流が集中し径方向位置不安定になる可能性があることが判明した。また、渦電流解析を行ったところ現在行っている合体立ち上げにおいてはブレイクダウンが生じるNull点およびプライベートフラックスの形成において真空容器壁に流れる渦電流が大きな役割を担っていることが分かった。したがって、初期プラズマ温度を向上し合体後STの径方向位置安定性を向上するためには初期プラズマの立ち上げを長周期で行うことで初期プラズマをOhmic加熱し、さらに渦電流を減らすことが必要であると考えられる。また、真空容器内上下に独立したNull点を形成する場合、装置上部に配置されたコイルが真空容器内に生成するポロイダル磁束がほとんどの領域で径方向に単調増加するため、外部コイルのみでは壁面から十分離れた位置に広いNull点を形成することが不可能であることが判明した。そのため本研究では壁面の渦電流に依存せず壁面から十分離れたNull点とプライベートフラックスを形成する手法を考案し、渦電流計算コードによる解析と実験を行った。渦電流計算により、この手法では現在の合体立ち上げの際よりも大きなNull点を形成できること、またNull点の維持時間が長くなることが判明した。実際に実験を行うと、PF#1,4コイルで形成したNull点の位置でリング状の発光が確認できたため、外部コイルのみを用いた合体立ち上げを長周期でも行えることが示された。またこの立ち上げではMid領域にも広いNull点を形成するという特徴もあり、外部PFコイルを用いた立ち上げに適合した磁場配位を作れることも示された。初期プラズマ電流をより駆動しやすい磁場配位を形成するためのコイル配置の検討を行い、その結果inboard側のダイバータコイルに用いるような位置にコイルを配置することでNull点をさらに2~3倍の大きさにすることが可能であることが示された。さらに、inboard側に配置したダイバータコイルの代わりに導体リングをinboard側上下に一对配置することでNull点の拡大を図る手法を考案した。この手法では典型的なダイバータ配位を実現するために装置の上下に配置したコイルを用いて導体リングを励磁し、このコイル電流を立ち下げることでinboard側の導体リングのみにポロイダル磁束を保持させる。この手法により磁束を保った導体リングと外部コイルの磁束により真空容器の上下の領域に幅40cm高さ25cm程度の広いNull点が形成でき、この領域内の広い範囲で連結長20mを越える条件を満たすことが確認できた。またこの導体を用いたNull点形成は、垂直位置安定性を向上させるために導入されるpassive conductorを用いることでも行うことが可能であることが判明した。

以上をまとめると、STの合体立ち上げを行う際に電子加熱が行われることが期待でき、トロイダル磁場と初期プラズマ電流が大きいほど加熱が見込めることが判明し、長周期で合体立ち上げを行うのに適した磁場配位を形成するためには外部コイルとダイバータコイル、もしくは垂直位置安定性向上のために導入される導体壁を用いることで合体立ち上げを長周期で行うことが可能であることが判明したため、実際の核融合炉においても合体立ち上げを適用できる可能性を示せた。