

論文の内容の要旨

論文題目 磁気中性点と合体を用いた高ベータ球状トカマク立上げ実験

氏名 今澤 良太

球状トカマク(ST)炉はベータ値(=プラズマの熱圧力をコイルの磁場圧力で規格化した値)が通常のトカマク配位よりも高くなるという特徴があり、経済性に優れた炉を実現する可能性があるとして期待されている。しかし、トラス内側のスペースが小さくなり炉の設計が困難であるという問題点があり、センターソレノイド(CS)無しの運転が望まれている。CS無しの運転では、(1)初期プラズマの立ち上げ、(2)NBI開始までの第1段ランプアップ、(3)燃焼開始までの第2段ランプアップ、(4)核燃焼プラズマの定常維持という各段階を達成しなければならない。(1)の初期プラズマ立ち上げに関しては、電磁波を用いた非誘導立上げ、同軸ヘリシティ入射、DCヘリシティ入射、プラズマ合体法などがあり、本研究はプラズマ合体法を用いた立ち上げを議論する。

合体法は真空容器の天井部と床部の上下2ヶ所で、ポロイダル磁場(PF)変化による電磁誘導により、同方向のトロイダル電流を持つSTプラズマを2つ発生させる。電磁力でそれらが互いに引き合い、赤道面付近で合体し1つのSTが生成される。合体の過程で磁気リコネクション現象がおき、磁気エネルギーの一部がプラズマの熱エネルギーに変換され高ベータプラズマが得られる可能性がある。この方法は、TS-3装置において最初実証され、その後イギリスのSTART/MASTでも採用されている。TS-3の場合は合体法によって15[MW]相等の加熱が得られており、合体直後にベータ値が50%という超高ベータ STが得られた。これらの装置では初期プラズマの生成・押し付けを行うのに真空容器内のPFコイルを使用しているが、中性子負荷の高い商用炉では内部コイルを用いる方法は使えない。そこで、真空容器外部のPFコイルでプラズマ合体法を実現する方法として、次のStep1から4で示されるDNM(Double Null Merging)法が提案された。(Step1)装置の上部と下部に2つのNull点(ポロイダル磁場が0であり、プラズマがつきやすい場所)を生成し、Null点付近の気体を予備電離しておく。(Step2)Null点付近は磁力線に沿った壁までの距離が長いのでプラズマが発生しやすい。従って、PFコイル電流を下げるとNull点でプラズマが点き、プラズマ電流が誘導されて2つのSTが生成される。(Step3)さらにPFコイル電流を下げ、電流の向きが反転すると、PFコイル電流とプラズマ電流の間に反発力が発生しミッドプレーンの方向へSTが押し出される。(Step4)押し出されたSTが合体する時に、磁気リコネクションによってプラズマ(主としてイオン)が加熱され高ベータSTが生成される。DNM法では外部PFコイルによるフラックススウィングでプラズマを生成するため、CSコイルなしでプラズマを生成できる。つまり、DNM法は高ベータとCSなし立ち上げという2つの重要な課題を扱えるため、魅力的なST立ち上げ方法であると考えられる。

プラズマ合体立ち上げ法を外部PFコイルを用いて、かつCSコイルなしの運転ができるDNM法が提案され、この方法を実証する為に実験装置UTSTが建設された。本研究ではUTSTの立ち上げ、磁場計測器と解析方法の確立、予備電離装置ワッシャーガンの開発、真空容器の渦電流解析を行い、Null点でのST立上げ実験を行った。

通常トカマク装置の磁場計測では、真空容器壁での磁場と磁束を計算し、それらを満たすようなプラズマの平衡解を計算するという事を行っている。しかし、この方法ではプラズマの合体過程において解が求まらないため、UTSTではプラズマ内にプローブを挿入し直接磁場の空間分布を計測した。トロイダル対象性を仮定することにより、トロイダル磁場と垂直磁場のR-Z分布を計測することで、ポロイダル磁気面、径方向磁場、トロイダル電場、プラズマ電流密度、プラズマ圧力を計算できる。しかし、トロイダル磁場が垂直磁場に対して10倍以上大きい為、必要な取り付け精度を満たすことができなかった。そこであらかじめコイルの取り付け角度を算出しておいて、角度を考慮して補正をかける事でトロイダル磁場と垂直磁場のR-Z分布が計測できるようになった。これらの計測値から電流密度の空間分布を求めるには、計測値を2次元空間上で補完する必要がある。これにはドロネー分割を用いて線形補間を行うのが一般的であるが、径方向内側のピックアップコイルが故障した場合などに十分な精度が得られなかった。そこで、プローブ毎にR方向にデータをスプライン補間してから、それらをZ方向にスプライン補間することで、ドロネー分

割に対して線形補間を行うよりも精度のよい解析が可能となった。

UTST装置は初期プラズマ生成付近の壁が1.5mmの薄肉の導体で作られており、16本の導体リブと繊維強化プラスチックコーティングで強度補強している。磁場の浸み込みに対する導体リブの影響を調べるために渦電流の解析コードを作成し、16本の導体リブの影響が無い事を確認した。そして、このコードを用いて解析した結果、PFコイルの巻き数を変更することで、現在使用しているバンクを用いてUTST内に高電場(20[V/m])以上を長時間発生させる事が可能であることがわかった。

予備電離装置であるワッシャーガンは、ミラー装置において種プラズマ供給の為に設計された物を使用した。絶縁の強化、磁場とガンの放電路を平行にするなどの対策が必要であった。そして、ワッシャーガンによって種プラズマを供給することでブレイクダウン時間が大幅に減少し、STの急速立ち上げが可能になった。これによって外部コイルによるDNM法に成功し、220[kW]の加熱パワーが得られた。また、内部コイルを用いていたTS-3/4装置では、生成されたSTが常磁性電流を有していたが、外部PFコイルを用いた場合はそれが見られなかった。これは、常磁性電流が生じるのはコイル近傍で発生したプラズマがコイル電流によって収縮されるからだと言える。

イギリスのカラム研究所にある球状トカマク実験装置MASTにおいて共同研究を行い、合体立上げ法において磁気リコネクションによる電子・イオン加熱が起きている事がわかった。TS-3という小型装置で発見された加熱効果が、MASTという大型装置においても実証できた意義は大きい。また、放電シーケンスがほぼ同じであるにも関わらず、合体後の電子温度はピークしている場合とホロウである場合とがある事がわかった。この理由として、不純物による放射冷却やIRE(internal reconnection event)による分布変化が考えられたが、それらでは説明がつかなかった。そこで、充填ガス圧によって初期STの生成過程が変わり、リコネクションポイントおよび電子加熱の場所が変わるといふ仮説を立てた。そして、それを検証する実験を行い、説を支持する結果を得た。また、この検証実験の結果から、リコネクションの電子加熱領域を推定し、シート幅が4.5[cm]と見積もられた。この結果はMRX(アメリカ、プリンストン研究所)で得られたトロイダル磁場が無い場合のシート幅に関するスケーリング則に合う結果となった。また、トロイダル磁場の大きさを変えて合体立上げ実験を行ったところ、トロイダル磁場が大きいほどリコネクションによる電子の加熱パワーが大きくなり、イオンの加熱パワーは変わらないという事もわかった。特に電子の加熱パワーに関しては、理論シミュレーション結果からは予想されていない結果であり、今後の研究課題である。

UTSTではDNM法に成功したもの、リコネクションによる加熱パワーは予想よりも小さかった。トロイダル磁場がTS-3装置に比べて3-4倍程度大きいことやプラズマサイズに対するラーマ半径の大きさが変わってしまった事で、リコネクションのメカニズムが変化してしまった(異常抵抗が起きない領域になってしまった)可能性などが考えられるが、MASTでの実験結果はこれを否定している。現在のUTSTでは合体前のプラズマ電流が小さい(リコネクションした磁場が小さい)ため、MASTのように150[kA]程度のSTを生成してから合体を行う事が可能になればリコネクションによる大きなプラズマ加熱が期待できる。

UTSTを立ち上げ、外部PFコイルのフラックススウィングによってプラズマの発生・プラズマ電流の誘導を行いながら、同時にPFコイルの磁場でプラズマ位置を安定させ、2つのSTが成長してから合体させるという事に成功した。また、MASTで行った実験結果から合体による加熱は十分期待できる事がわかった。以上より、本研究はDNM法がCTF(compact test facility)など将来の炉での魅力あるST立上げ法である事を示すものである。