

## 論文の内容の要旨

氏名：松 本 匡 史

博士の専攻分野の名称：博士（理学）

論文題名：Development of a Compact-Toroid Injection System for Field-Reversed Configuration Particle Refueling (FRC 装置の粒子供給のための CT 入射法の開発)

本論文は、中性粒子ビーム入射 (NBI) によって配位継続時間が伸びた C-2/C-2U 磁場反転配位 (FRC) 装置への粒子供給を目的としたコンパクトトロイド (CT) 入射装置の開発についてまとめたものである。この論文において、FRC への粒子供給を目的とした CT 入射を世界で初めて実施し、その有用性を示した。また、CT の連続入射 ( $\leq 1$  kHz) によって配位時間中に複数発の CT 入射を実施した。更には CT 入射装置で欠点となったガスパフに与えるガス圧を 30%以上の減圧が可能となり、閉じ込めへの影響を減らすことに成功した。

本論文は以下に要約する 8 章から構成される。

第 1 章では、FRC 装置への粒子供給法として CT 入射法を採用する研究背景について述べる。現在、核融合炉の開発は、国際協力によって D-T (D: 重水素, T: 三重水素) 反応を燃料としたトカマク方式の国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画が進められている。しかし、三重水素は水素の放射性同位体であり、D-T 反応 ( $D+T \rightarrow {}^4\text{He}+n$ ) では、運転中に発生する中性子によって装置が放射化する。中性子の発生が少ない反応として、 $D-{}^3\text{He}$ ,  $p-{}^{11}\text{B}$  反応があるが、これらは D-T 反応に比べ、炉心プラズマをより高温・高密度にする必要がある。それらの反応による核融合炉が実現可能な唯一の炉心プラズマとして FRC プラズマの研究が古来進められてきた。FRC プラズマは、トロイダルモード数  $n=1, 2$  の不安定性によって崩壊してしまう特性があるため、配位持続時間が数百マイクロ秒と短く、炉心プラズマとして扱うには困難とされてきた。しかし近年、Tri Alpha Energy, Inc. (米国) が開発した FRC 装置 C-2 によって、不安定性の制御および大幅な閉じ込め性能の改善が示された。その結果、10 ミリ秒を超える配位維持が可能になった。長時間の維持には、中性粒子ビーム入射 (NBI) が大きな役割を果たしている。NBI は、高エネルギー中性粒子を入射しプラズマを加熱する。同時に粒子も供給できるが、その量は粒子損失に対して十分ではない。また、プラズマ粒子数の減少に伴い、入射した中性粒子が FRC を透過し、プラズマへのエネルギー付与の効率が下がる。それ故に、長時間維持のためには粒子供給が必要となる。粒子供給は、トカマク方式において先行研究があり、ガスパフ法、ペレット入射法、CT 入射法が一般的な手法である。ガスパフ法は室温の中性ガスを高速 (1, 2 km/s 程度) で炉心プラズマに吹き付ける。また、ペレット入射法は極低温に冷却した固体状の粒子 (ペレット) を打ち込む。しかし、両者とも炉心プラズマ表面付近で高温のプラズマによって電離するため、プラズマ中心への供給は困難である。CT 入射法はそれらに代わる手法として研究が進められている。これは、磁化した準中性のプラズマ塊を電磁力で加速し、超高速で入射する手法で、小・中型のトカマク装置において炉心プラズマ中心部への粒子供給が確認されている。本論文では、FRC 装置への粒子供給法として CT 入射装置を採用する。

第 2 章では、入射に用いる CT、および入射対象である FRC プラズマの磁場構造について簡単に説明する。コンパクトトロイドは、入射対象とする FRC 型プラズマと入射に用いるスフェロマック型プラズマの二種類がある。FRC 型はポロイダル磁場のみでプラズマを閉じ込めるため磁場利用効率を表す平均ベータ値  $\langle \beta \rangle$  が 100%に近いのに対し、スフェロマック型はポロイダル磁場とトロイダル磁場の両磁場を保有するため、 $\langle \beta \rangle$  は幾分小さくなるが、プラズマ入射に向けた磁場構造を持っている。

第 3 章では、入射するスフェロマック型の CT を生成する磁化同軸プラズマガン (MCPG) の原理について述べる。MCPG は同軸円筒電極から構成され、電極間に流れる電流とその電流が作る磁場による自己ローレンツ力により、生成したプラズマが MCPG の先端に向かって加速される。加速されたプラズマは電極間を鎖交しているパイアス磁場を取り込み、磁気リコネクションを経てスフェロマック型のプラズモイドとなり射出される。生成された CT を FRC プラズマ中に入射させるためには、CT の持つ運動エネルギー密度が入射経路上の閉じ込め磁場の磁気エネルギー密度の総和より大きい ( $\int \rho v^2/2 dl > \int B^2/2\mu_0 dl$ ) 必要がある。C-2/C-2U の場合、閉じ込め磁場は 0.1 T 程度であるた

め、CT に要求される運動エネルギー密度はおよそ  $4 \text{ kJ/m}^3$  以上となる。

第4章では、開発した MCPG の概要を示す。特徴として、内部電極は電極由来の不純物を低減させることを目的とし、タングステンコーティングが施されている。また、内部電極先端は取り外しが可能となっており、長い先端部を設置することで、プラズマを加速させるための電極間長を変えることができる。外部電極にはガスポートが4つ接線方向に取り付けられている。FRC への間欠的な CT 入射を目的として、複数発の放電が可能な回路を作製した。これにより MCPG 1 台あたりの CT は最大で 1 ミリ秒間隔で 2 発射出させることが可能になった。更には、MCPG の主放電印加時の絶縁破壊条件を制御することを目的として、導体シェルを用いた。これにより電極間のバイアス磁場分布を制御し、主放電印加から絶縁破壊が起きるまでの時間が短縮された。

第5章では、開発した MCPG のプラズマ特性の調査結果を詳解している。CT 特性を調査するために、ドリフト管および垂直磁場発生コイルを有したガラス管から構成されているテストスタンドを構築した。ドリフト管領域では CT の速度、電子温度、電子密度の計測が可能である。ドリフト管領域を抜けた CT は、垂直磁場に突入し、磁場中の CT の振る舞いを観測することが可能である。開発した MCPG によって射出される CT のパラメーターは、速度  $>100 \text{ km/s}$ 、粒子密度  $1.5 - 3.5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 、保有粒子数  $>5 \times 10^{18}$ 、そして得られた運動エネルギー密度は  $50 \text{ kJ/m}^3$  であった。垂直磁場中に入射された CT について、磁気プローブによる磁場の揺動計測、ファイバーによる光計測、高速カメラによる巨視的な振る舞いの観測をおこなった。結果として、CT は垂直磁場を横切り、大きく軌道を変化することなく進行すること、また、磁場内に突入後、30 cm 以上進行することも確認された。

第6章では、C-2/C-2U FRC 装置への CT 入射実験について論じている。CT 入射装置は、FRC の閉じ込め容器に 2 台を対角線上に設置され、両入射装置の入射軸は装置中心軸上で交わる。閉じ込め磁場のみの領域への CT 入射実験を行った結果、閉じ込め容器下部に設置した高速カメラによって、CT は閉じ込め容器の中心軸まで到達することが確認された。また、装置中心における CT の直径は、入射時の直径と大きな変化が見られなかった（磁場による圧縮は、観測されなかった）。FRC への入射実験として、2 台の入射装置を用い、片側・対向からの入射を実施した。片側入射の場合、粒子数は 15% 程度の上昇が確認された。しかし、CT の持つ運動量が FRC の  $n=1$  不安定性を誘起していることが確認された。対向入射の場合、粒子数の密度は 20% 程度の上昇が確認され、片側入射において発生していた不安定性は、入射される運動量が打ち消されることで抑制されることを確認した。FRC プラズマの線積分電子密度分布を計測するために設置されている 6 本のレーザー干渉計により、中心コードの線積分電子密度が最も上昇率が高く、FRC の配位が保たれている間、高い密度が維持されていることが観測された。一方、セパトリックス近傍のコードでは、数十マイクロ秒で通常の FRC 密度と同程度に低下した。この結果から、入射した CT は FRC 中心部に進入し、また供給された粒子は FRC 中心部で保持されていると考えられる。次に、CT の連続入射回路を利用し、FRC の配位が維持されている時間内に複数発の入射を行った。連続入射回路は高速な繰り返し回数を実現しており、最速で 1 ミリ秒の間隔で入射できる。これにより FRC の配位時間内に間欠的な入射が可能となった。複数発の CT 入射実験では、各入射時刻においておよそ 20% 程度の粒子数の増加が見られた。この結果、CT の間欠的な入射が可能であることが確認された。更には、FRC の密度の上昇に伴い、NBI の透過率も同時に減少していることから、NBI のパワーが FRC に付与されていると考えられる。しかし、高速カメラの計測から、CT 入射装置から CT 生成の際に供給する中性ガスの一部が CT に追従して閉じ込め容器内への流入が確認された。この中性ガスは、セパトリックス内外を旋回する高速イオンと荷電交換反応を起こし、高速イオンを大幅に減少させていることが判明した。

第7章では、第6章の実験結果で問題となった、不要な中性粒子の流入に対する対策について詳解している。C-2/C-2U FRC では、NBI により形成される高速イオンが配位の安定性を向上させている。高速イオンは FRC の内外を旋回しており、FRC のトロイダル電流および径方向の圧力平衡、MHD 的な不安定性を抑止する効果がある。そこで、中性ガスを削減させるために MCPG 用の予備電離源を開発した。予備電離源は円筒同軸電極により構成され、絶縁を取るためにテフロンが充填されている。低ガス量下においてもこのテフロンを介して初期プラズマを容易に生成可能となるため、MCPG の主放電の始動が迅速に引き起こされるようになり、ガスバフに与えるガス圧を 30% 減圧でき、FRC の閉じ込め容器内への中性ガスの流入を抑制することに成功した。この結果、高速イオンの減少は起こらなくなった。

第8章では、各章で得られた成果をまとめ、本研究の結論が述べられている。