

## 論文審査の結果の要旨

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)

審査委員：（主査） 教授 高 橋 努

（副査） 教授 木 村 元 昭 准教授 浅 井 朋 彦

東京大学大学院准教授 井 通 暁

本論文が研究対象とする磁場反転配位 (FRC) 方式は、高温プラズマを閉じ込める閉じた磁力線構造とその外側領域にダイバータとなる開いた磁力線構造を持つ、軸対称な単連結構造の磁場閉じ込め方式で、磁場閉じ込めコイルが扁長なトーラス形状 (竹輪状) であるプラズマ環と鎖交していないため、開いた磁力線に沿って移送できるなど、核融合炉心プラズマとして魅力的な利点を数多く持っている。特に、閉じ込め磁場の利用効率を示すベータ値が、あらゆる磁場閉じ込め方式の中で最も高く、 $D^3He$  反応、 $p^{11}B$  反応など炉材料を放射化する中性子の発生がほとんどない先進燃料核融合反応を用いた炉となる可能性を持つとして注目され研究が進められている。さらに、この方式で閉じ込められるプラズマイオンは、閉じ込められたプラズマの半径程度もしくはそれより大きい平均ラーマー半径を持ち、このイオンの運動論的效果により、FRC プラズマで発生する様々な不安定性や閉じ込め特性に対する異常 (アノマリー) 因子が抑制される。しかし FRC では、生成後自発的に成長するトロイダルモード  $n=2$  の回転不安定により、配位の寿命が数百マイクロ秒に制限されるため、閉じ込め性能の研究を行うことは困難であった。

しかし、米国 Tri Alpha Energy, Inc. の C-2 装置において開発された生成法 (逆バイアスシートピンチ法で生成される 2 つの FRC プラズマを相対速度 500 km/s で衝突・合体させ一つの FRC プラズマを生成)、および不安定性抑制法 (装置両端に設置された高エネルギープラズマガンにより、開いた磁力線領域のスクレイプオフプラズマ経路で電場等を能動的に制御する方法) により不安定性が抑止され、閉じ込め特性の飛躍的な改善が示された。さらに装置軸に対して接線方向から高エネルギー中性粒子を入射 (NBI) することにより、プラズマ加熱、電流駆動、高エネルギーイオンの注入が行われプラズマの配位持続時間が 2ms まで伸長した。さらなる配位時間の伸長をはかるため、C-2U 装置では、効率良く高エネルギーイオン粒子を生成し加熱、電流駆動を行うために時間経過に伴い FRC から損失するプラズマ粒子を補給する入射装置の開発が必要となった。

本論文の目的は、この世界最大の FRC である C-2U 装置を対象とした粒子補給装置を開発し、FRC 核融合炉を対象とした粒子補給技術として実証することにある。開発される粒子補給装置のパフォーマンスは以下の通りである。

- (1) FRC 中心部まで燃料粒子を補給 (CT の入射距離 0.3m 以上、エネルギー密度  $4kJ/m^3$ ) でき、損失粒子 (損失レート  $2.5 \times 10^{18}/ms$ ) を十分に補える供給量を持つこと
- (2) 中性粒子ビームの入射時間である 10ms の配位維持時間の間、繰り返し運転 (1kHz 以上) できること
- (3) 粒子補給により不安定性を励起しないこと、FRC の配位維持に必要な高エネルギーイオンが失われないこと

この論文では、上記条件を満たす粒子供給手法として、トカマクプラズマなどでその効果が実証されている粒子補給法の中からコンパクトトロイド (CT) 入射による粒子補給法を採用した。CT 入射を採用した理由、および粒子補給法の先行研究の内容は、入射装置に用いるコンパクトトロイドおよび入射対象となる磁場反転配位プラズマの磁場構造の紹介などとともに第 1 章 (Introduction) および第 2 章 (Compact Trooids) で明確に記述されている。更に、核融合炉としての FRC 方式の位置付け及び本論文で用いる FRC 実験装置 C-2、C-2U 装置の概略およびそれらの装置で生成される FRC プラズマパラメータ、中性粒子入射ビームによるプラズマ加熱の原理についてもこれらの章で簡潔にまとめられている。

CT 入射法の原理および入射装置の設計については、第 3 章 (Concept of a Compact Toroid Injection) および第 4 章 (Designed CT Injector System) で詳しく説明されている。入射に用いる CT 生成および加速には磁化同軸ガン (MCPG) を用いる。本論文では、前述の 3 条件を達成できるように

- (1) 内部電極の損耗を防ぐために内部電極をタングステンコーティングおよびガス導入法の最適化 (ガスポート 4 個を外部電極接線方向に配列)
- (2) CT 加速の制御 (電極間長を可変)
- (3) 絶縁破壊開始時刻の制御 (内部電極内の磁化コイルと外部電極を囲む導体シエルの設置)
- (4) 1 ミリ秒間隔で放電可能な主放電回路

が開発されたことが、第 4 章で詳述されている。磁化コイルの充電電圧 400V で放電遅れ時間が  $1 \mu\text{s}$  以内になり、また、最高で 1 kHz の繰り返し周波数が実現されたことが示されている。

次に開発された CT 入射装置のパフォーマンスを調べるため、C-2/C-2U 装置を模擬した直交磁場を持つテストスタンドにより、生成された CT のプラズマパラメータ、直交磁場入射時の CT の振る舞いが調べており、第 5 章 (Characteristics Evaluation for Compact Toroid Injector) に結果の詳細がまとめられている。入射速度  $100\text{km/s}$ 、1 回の入射で  $4\text{kJ/m}^3$  のエネルギー密度 (プラズマ温度:  $20\text{--}40\text{ eV}$ 、プラズマ密度:  $1.9 \times 10^{21}\text{ m}^{-3}$ 、質量:  $12\text{ }\mu\text{g}$ 、総粒子数:  $5 \times 10^{18}$  個の重水素プラズマ) の入射が確認されている。また、最大のエネルギー密度は、 $20\text{ kJ/m}^3$  に達する。CT は、ヘリカル形状を保ちながら装置中心軸に沿って直交磁場中を直進する。その進入距離は  $0.5\text{m}$  以上であることが確認された。これらの結果は、開発された FRC 方式の粒子補給装置として、CT 入射法に要求される前述の条件が達成されることを明確に示している。

さらに論文では、開発した CT 入射装置を C-2U 装置に 2 台設置した入射実験を行っている。各入射装置は FRC 装置中央面に対して対称に、また方位角方向に  $180$  度離して配置された。それぞれの入射軸は、対向に配置され FRC 装置軸で CT が衝突するように設置されている。1 台は繰り返し入射回路を持ち、計 3 個の CT 入射が可能である。入射実験結果の詳細については、第 6 章 (Compact Toroid Injection into FRC) に述べられている。結果の概要を以下に示す。

- (1) C-2 および C-2U 装置の真空磁場入射実験で、テストスタンドで確認された CT 入射距離と同様の入射が確認された。直交磁場によりプラズマが圧縮されることなく FRC 装置軸まで入射されることが確認された。6 チャンネルの干渉計から FRC 中心部への粒子供給が確認された。
- (2) CT 入射間隔を  $2\text{ }\mu\text{s}$  以下にすると、供給に必要な  $2 \times 10^{18}$  個/ms を達成できる。また、およそ 20 % の総粒子数の補給が確認された。さらに、粒子補給により高エネルギー中性粒子から高エネルギーイオンへの変換の向上が確認された。
- (3) CT の片側入射では、 $n=1$  の wobble 運動が励起されるが対向入射の場合入射 CT の運動量がキャンセルされるため、wobble 運動が励起されないことが確認された。
- (4) およそ周波数 1 kHz での連続 3 個の CT 入射を実現した。
- (5) CT 入射に伴って CT 生成時の余分な中性粒子が流入することが確認された。この中性粒子により、FRC に閉じ込められた高エネルギーイオンが損失されることが確認された。
- (6) CT 入射後プラズマ温度の若干の低下が確認されたが  $1\text{ ms}$  程度での緩和時間で回復することが確認された。これに伴い若干のプラズマ半径などの減少があるものの、入射に伴うプラズマ崩壊は確認されなかった。

これらの成果は、FRC 方式を対象とした粒子補給としての CT 入射法の基本技術が開発されたことを示す。また、解決すべき課題として、CT 生成時の中性粒子低減が示されている。この課題に対する解決策として本論文の第 7 章 (Upgrade of CT Injector) で MCPG 装置への予備電離源の設置を提案し、改良された CT 入射装置を用いた C-2U 装置へ入射実験の結果がまとめられている。予備電離源は、Pulsed Plasma Truster (PPT) で用いられている技術を導入したもので、CT 生成時の封入ガス圧を CT のパフォーマンスを損なうことなく 35% 程度減圧でき、CT 入射時に問題になっていた中性粒子の流入量の低減が計れた。この結果、高速イオン粒子の損失を抑え、さらに FRC プラズマパラメータの低下も減少した。開発された CT 入射装置は、C-2U 装置における配位持続時間の  $10\text{ms}$  超の伸長に大きな貢献をしたと考えられる。

第 8 章 (Summary) では、この論文によって得られた成果が簡潔にまとめられている。この開発された装置は、入射速度  $100\text{km/s}$ 、1 回の入射で  $20\text{kJ/m}^3$  のエネルギー密度 (プラズマ温度:  $20\text{--}40\text{ eV}$ 、プラズマ密度:  $1.9 \times 10^{21}\text{ m}^{-3}$ 、質量:  $12\text{ }\mu\text{g}$  の重水素プラズマ) の入射を達成できた。エネ

ルギー密度は必要とされる密度の約5倍であり、繰り返し入射周波数1kHzで3個のCTを連続入射できる。FRCプラズマへの入射には、運動量をキャンセルするために対向（カウンター）入射を行うことが必要である。また、入射時の中性ガスの流入を極力抑え、効率良く高エネルギー中性粒子ビームから高エネルギーイオンを生成するために、MCPGの予備電離装置を開発した。開発された粒子補給装置を用いることで、閉じ込め特性を損なうことなくFRCプラズマの総粒子数の20%の補給を1kHzで行い、高エネルギー中性粒子の入射継続時間に等しい10msを超える配位持続時間が達成されることが示された。またこの間、高エネルギーイオン生成効率が低下することがなかった。これは、世界初の成果であり、FRCにおいて最長の配位持続時間である。この開発された粒子供給装置は、FRCはもとより、トカマク、ヘリカル、逆磁場ピンチ等、他の磁場閉じ込め装置の粒子供給装置としても利用可能である。また、主放電回路のエネルギーを最適化することにより新材料創成用のイオン補給装置への応用も可能と考えられる。

以上が本論文に示された研究成果であり、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、また高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（理学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成29年2月16日