

Optimization of RF-induced Breakdown of Plasma on the QUEST Spherical Tokamak

米田, 亮太

<https://doi.org/10.15017/1931947>

出版情報 : 九州大学, 2017, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏名 : 米田 亮太

Name

論文名 : Optimization of RF-induced Breakdown of Plasma on the QUEST Spherical Tokamak

Title (QUEST 球状トカマクにおける高周波プラズマ着火の最適化)

区分 : 甲

Category

論文内容の要旨

Thesis Summary

エネルギー問題の解決策の一つとして、磁場閉じ込め核融合プラズマは世界的に活発な研究が促進されている。その中でも、トカマク磁場配位は最も実用化に近いと言われ、フランス、カダラッシュに建設中の国際熱核融合実験炉 ITER にも採用されている。トカマク装置において、プラズマを発生（着火）する方法として、装置中心部に設置されているセンターソレノイド (CS) による誘導電場によって電子を加速させ、電子雪崩を起こす Ohmic 方式が一般的である。しかしながら、装置の工学的な制約により、励起できる電場の上限があるため、ガスを予備電離させるために高周波 (RF) を入射し、補助することで効果的な誘導電場の低減が可能である。RF 入射によりプラズマを加熱させる方法を非誘導方式と呼ぶが、CS の空間的な制約がさらに大きい球状トカマク (ST) 装置においては、非誘導方式のみを用いたプラズマ着火は非常に重要な課題である。以上を踏まえ、本研究では、九州大学設置の QUEST 球状トカマク装置における RF 入射による着火実験とモデル構築の両面から、トカマク装置における RF 着火の検証を行った。

本論文の構成と内容を下記に示す。

第一章では、序論として核融合研究の背景について述べた。そして、トカマク装置におけるプラズマ着火と加熱の課題を概観し、本研究の目標を導出した。ITER におけるプラズマ着火は、磁力線連結長の長さ L と水素の中性ガス圧によって必要な最低電場が決定されるとの仮定のもと、 L を長くするために磁場のヌル点を真空容器内に置くことに加え、数 MW の RF 入射による予備電離を重畳することで、誘導電場による着火を実現する計画である。しかしながら、ヌル点の制御は難しく、その磁場配位も電流立ち上げの観点から、適切ではあるとは言えない。一方、RF 加熱のみによる着火も多数報告されており、誘導電場加熱に比べて極端に短い L での着火が可能である。さらに、着火時の磁場配位は、電流立ち上げに最適な配位となっており、RF による着火を用いることは、CS による制約を無視できることから非常に有益である。しかしながら、RF 着火においてはその必要な入射電力や周波数や最適磁場配位について、体系的に調べた例は無く、殆どの実験結果が着火そのものではなく、立ち上がるプラズマ電流に注力している。そこで、本研究では、着火の有無を入射電力、周波数、磁場配位等について詳細に調べ、着火の最適化を行い将来の核融合炉への適応を目指すことを目的としている。

第二章では、本研究の RF 加熱の原理である、電子サイクロトロン共鳴によるプラズマ加熱 (ECRH) について述べた。トカマク配位において、一般的にトロイダル磁場に対して垂直に ECRH を入射する。よって、プラズマ中の波の垂直伝搬におけるモード (O, X) を示し、ECR 層における波と電子の共鳴によってエネルギーの受け渡しが起きる原理を示した。

第三章では、トカマク装置による誘導着火と RF による着火の原理の違いを示し、現在までの研究で得られている実験事実と知見を提示した。誘導電場による着火では、電子の加速方向が、磁場に対して並行であることを利用し、プラズマ粒子との衝突を経て、電子が一定の速度に加速されることを仮定している。さらに、粒

子の損失が L に支配されることを用いて、着火に必要な最低電場が見積もられている。一方、RF 着火においては、加熱の原理が違ふ。磁場に補足された電子は、磁場に垂直方向にサイクロトロン運動をしている。RF から電子に受け渡されるエネルギーはこの垂直方向のみであるため、誘導電場による着火における一定の速度に達するという仮定はこの場合には適応できない。そこで、ECR 層で加熱された電子は、マクスウェル分布を持つ温度に熱化されてから、磁力線方向に熱速度で移動すると仮定する。そして、その速度は、両極性拡散のために、イオン音速で支配されることになる。したがって、RF 着火では、 L がパラメータとなるものの、非常に短い距離でも着火できる。また、RF 加熱における周波数の違いと基本波と高調波の物理機構を考慮するために、非線形運動論による単一電子の、X モードによる加熱を示した。

第四章では、QUEST 装置および実験で用いられた計測器に関する概要を示した。

第五章では、RF プラズマ着火のモデルの構築方法を示した。水素プラズマの生成における反応式（励起、イオン化、再結合）と磁力線に沿った損失項（イオン音速）を組み込み、実験時の値を初期電子密度と温度として挿入することで、プラズマの時間発展を数値的に解いている。電子密度の増減により、電子雪崩によるプラズマ着火を評価することが可能となった。

第六章では、実験結果とモデルの比較を示した。 n -index を正負に変えた 2 つの磁場構造において、プラズマの着火条件が異なることを実験により見出し、 n -index が正の場合は開磁気面における閉じた電子の軌道が重要であることを示した。 n -index を正とした初期磁場は、プラズマ電流立ち上げの観点からも理想的である。 n -index が負の場合は、磁力線の連結長が決定因子となることから、第五章で構築したモデルとの比較を行うことで、着火に必要な最低電子温度を算出した。以上より、RF 着火の条件が、 L に依存することは、誘導電場の場合と一緒にあるが、 n -index が正の場合の結果により、単純に L の長さで評価すべきものではなく、電子の軌道を考慮した実効的な連結長を盛り込んだ検討が重要であるという結論を得た。

また、加熱周波数または基本波と高調波加熱実験を、第三章における非線形モデルとの比較によって検討した。周波数が低い方が加熱効率が良いという実験事実とモデルは整合している。さらに、高調波による加熱は基本波に比べ非常に効率が悪く、入射電力自体が着火の決定因子となることが言える。しかしながら、入射モードやアンテナの半値幅等が周波数によって異なるため、さらなる検討が必要である。

第六章では、本研究の結論と意義をまとめ、解明された事象と今後の課題を示した。