

平成30年6月5日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18303

研究課題名(和文) マイクロ波後方散乱計による低域混成波高密度限界の研究

研究課題名(英文) Studies of the density limit of the lower-hybrid waves with microwave back-scattering

研究代表者

辻井 直人 (Tsujii, Naoto)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：20707351

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：低域混成(LH)波の球状トカマクプラズマ内部における伝搬・吸収特性を解明するため、LH波の微小な密度揺動を計測できるマイクロ波散乱計の開発を行った。計測結果の定量的な解析と散乱計設計の最適化のため、マイクロ波散乱シミュレーションを新たに開発した。散乱シミュレーションによる予測をもとに2つの異なるパラメータ領域に感度を持つ散乱計を設計・製作し、計測を行ったが、研究期間内にはノイズレベル以上の信号は観測できなかった。引き続き、数値シミュレーションの精度を改善しながら、LH波を直接計測できるマイクロ波計測の開発を行っていく予定である。

研究成果の概要(英文)：To investigate the propagation and absorption of lower-hybrid waves in the spherical tokamak plasma, we attempted to develop a microwave scattering diagnostic which can measure small density fluctuations of the lower-hybrid waves. We have newly developed a microwave scattering simulation to analyze the measurement result quantitatively, and to optimize the scattering diagnostic design. We have built two scattering diagnostics which are sensitive to different parameter spaces and attempted to detect LH waves, but we were not able to measure any signal above the noise floor during the project period. We will continue to improve the accuracy of our numerical simulations and develop a microwave diagnostic which can measure LH waves directly.

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：核融合 球状トカマク プラズマ 低域混成波 マイクロ波診断

1. 研究開始当初の背景

球状トカマク (Spherical Tokamak, ST) は従来型のトカマクよりもアスペクト比を小さくすることで、高ベータ (プラズマ圧力の磁場圧力に対する比) プラズマの安定な閉じ込めを可能としたものである。ST 型核融合炉は、従来型トカマクに比べて低い磁場で経済的な核融合炉を実現できる可能性がある。一方、通常、トカマクで誘導的に電流を駆動するのに使われるセンターソレノイドを設置することが困難であるため、比誘導的な電流駆動によるプラズマ立ち上げ手法の確立が解決すべき課題である。

本研究グループでは、東京大学の TST-2 球状トカマク装置において、高い電流駆動効率を持つ低域混成 (Lower-Hybrid, LH) 波によるプラズマ立ち上げ手法の確立を目標に研究を行なっている。本応募研究の開始当初には LH 波を用いて 16 kA のプラズマ電流立ち上げに成功していたが、より高いプラズマ電流を実現するためには、数値シミュレーションによる電流駆動シナリオの最適化が必要であった。一方、当初の数値計算による駆動電流の予測値は実験結果よりも一桁大きく、信頼できる解析を行うためには波動シミュレーションと電子分布関数シミュレーションの妥当性検証が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、TST-2 の非誘導放電においてマイクロ波後方散乱計により LH 波を直接計測し、波動シミュレーションの予測と比較することで、シミュレーションの予測精度を改善することとした。当初は、シミュレーションにおいて LH 波の高密度限界付近における振る舞いを正確に記述できていないことが問題と考え、LH 波動伝搬の密度依存性を実験的・理論的に明らかにすることを目指した。

定量的に正確な数値シミュレーションを整備することで、実験結果を精密に解析することが可能となる。また、駆動電流を最適化する電流駆動シナリオをシミュレーションにより調べることで、より高性能な LH アンテナの設計を行うことができる。

3. 研究の方法

核融合プラズマ内部の LH 波を非接触で直接計測できる、マイクロ波計測の開発を行った。マイクロ波は LH 波の密度揺動によりブラッグ散乱されるため、マイクロ波の周波数を掃引し、散乱光を計測することで、LH 波の波数・空間構造を推定することができる。

反射計を転用したマイクロ波の後方散乱計によって LH 波を計測できることが知られていたため (S.G. Baek et al., Phys. Plasmas 21, 012506 (2014))、本研究でも、まず後方散乱のジオメトリから計測を試みた。

同時に、散乱信号を定量的に解析するための、全波計算によるマイクロ波散乱シミュレ

ーションコードの開発を行った。散乱シミュレーションの精度を改善していくことで、より高性能の散乱計を設計・製作し、LH 波の検出を目指した。

4. 研究成果

(1) 全波計算によりマイクロ波散乱を 3 次元でシミュレーションするコードを開発した。ここでは、プラズマの背景電子密度が無視できると仮定して、マイクロ波の波動方程式から、電子密度揺動による散乱を摂動により解いた (ボルン近似)。得られた解析的な表式を 3 次元で実装した。マイクロ波の周波数がプラズマ周波数に対して十分高く、入射光、散乱光の回折が小さい場合には、計測器で受信される散乱光を正確に予測できる。

LH 波の伝搬は、軸対称プラズマにおける高周波の全波シミュレーションコード AORSA (E.F. Jaeger, L.A. Berry et al., Phys. Plasmas 8, 1573 (2001)) を用いて計算した。AORSA から得られた電子密度揺動に、本研究で開発した散乱シミュレーションを適用することで、実験における散乱信号を絶対強度を含めて、正確に予測することが可能となった。

(2) プラズマ内部の LH 波の空間構造計測に適した、周波数掃引多点マイクロ波散乱計を新たに開発した。装置の模式図を図 1 に示す。マイクロ波源としては、電圧制御発振器を用いた。マイクロ波の周波数を高速で掃引することで、計測する LH 波の波長を掃引することができる。また、散乱光を多点計測することで、様々な方向に伝播する LH 波を検出することができる。プローブ光の入射方向を変えて計測を行えば、プラズマ全体の LH 波の構造に関するほぼ完全な情報を得ることが可能である。

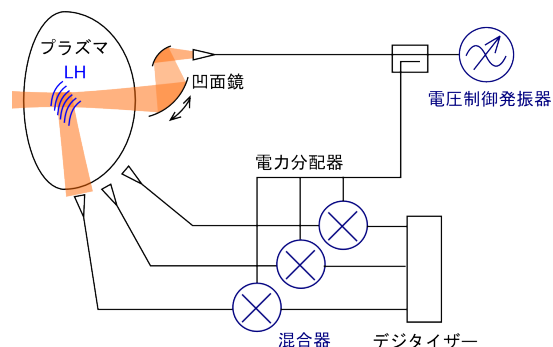


図 1 周波数掃引多点マイクロ波散乱計の模式図。

(3) Ka バンド (26.5-40 GHz) マイクロ波散乱計を製作し、-90 dB の感度を達成した。TST-2 装置において LH 波を用いて立ち上げた 12 kA の放電に対して散乱計測を行った。26.5 GHz の固定周波数において、計測された信号強度と、散乱シミュレーションによる予測を図 2 に示す。シミュレーションでは最大-70

dB 程度の信号が予測されているが、実験ではノイズレベル (-90 dB) を超える信号は観測されなかった。ここで観測が期待された信号は、トロイダル方向に 2 周以上伝搬した LH 波からの散乱である。そのため、LH 波が期待される場所に存在しない、あるいは、既にほとんど吸収されてしまっている可能性が否定できない。この知見が次の Ku バンドシステムの設計・製作につながった。

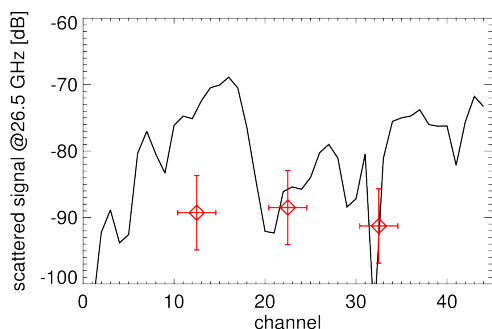


図 2 Ka バンドシステムにおける散乱シミュレーション (黒実線) と実験で観測された信号強度 (赤シンボル)。

(4) Ku バンド (12-18 GHz) マイクロ波散乱計を製作し、-82 dB の感度を達成した。このシステムは、アンテナから入射された直後の LH 波を観測できるように設計した。18 kA の放電に対して散乱計測を行った際の、信号強度と散乱シミュレーションによる予測を図 3 に示す。ここでもシミュレーションでは最大 -50 dB 弱の信号が予測されているが、実験ではノイズレベル (-82 dB) を超える信号は観測されなかった。特に横軸の channel 40 近傍で 13.5-16 GHz の全域に渡って予測されている信号は、アンテナから入射された直後の LH 波によるものであり、波動シミュレーションの予測精度の不確定性を考慮しても計測できる可能性が高いと考えていた。現在のところ散乱信号が観測されない理由はわかっていない。

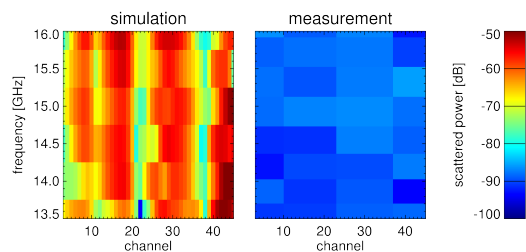


図 3 Ku バンドシステムにおける散乱シミュレーション (左) と実験で観測された信号強度 (右)。

(5) 周波数が低い場合、入射光・散乱光の背景電子密度による回折が大きくなるため、(1)で述べた散乱シミュレーションのように背景電子密度を無視する近似が妥当である

か否かは自明ではない。そこで、有限要素法による汎用物理シミュレーションソフト COMSOL (www.comsol.com) を用いて、マイクロ波散乱シミュレーションの 2 次元モデルを構築した。13.5 GHz における入射光、散乱光の伝播を背景密度がある場合とない場合で計算したものを図 4 に示す。13.5 GHz ではマイクロ波の入射光、散乱光、共に多少の回折を受けるが、その影響は信号が受からなくなる程大きくはないことがわかった。

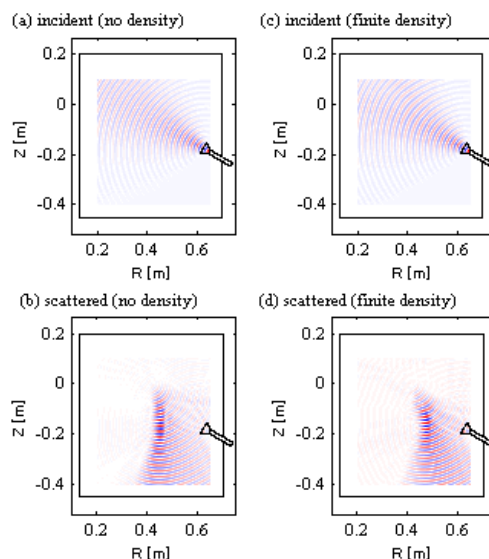


図 4 背景電子密度がない場合の入射光 (a) と散乱光 (b)、有限の場合の入射光 (c) と散乱光 (d)。

(6) 本研究期間ではマイクロ波散乱計により LH 波を検出することはできなかった。現在のところ原因を特定することはできていない。ただ、LH 波の検出を目指して、より精密なモデリングを行い、その予測精度を検証していく過程で、内部磁場構造の不確定性に起因する波動伝搬の不確定性が非常に大きいことが明らかとなった。電流駆動予測も平衡磁場分布に強く依存するため、偏光計等の内部磁場計測による平衡磁場の正確な推定が不可欠であることがわかった。これは散乱計測による直接の成果ではないが、散乱信号の解析の過程で初めて得られた知見である。引き続き、数値シミュレーションの精度を改善し、LH 波を直接計測できるマイクロ波計測の開発を行っていく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計 5 件)

辻井 直人 他、TST-2 における低域混成波計測用マイクロ波散乱計の開発、第 33 回プラズマ・核融合学会年会、2016 年 11 月 29-12 月 2 日。

辻井 直人 他、TST-2 における低域混成波計測用マイクロ波散乱計の設計、第 11 回核融合エネルギー連合講演会、2016 年 7 月 14-15 日。

辻井 直人 他、TST-2 におけるマイクロ波後方散乱を用いた低域混成波による非誘導プラズマ立ち上げの研究、第 32 回プラズマ・核融合学会年会、2015 年 11 月 24-27 日。

N. Tsujii, et al., Design of a microwave back-scattering diagnostic for lower-hybrid waves on TST-2, 57th Annual Meeting of the APS DPP, Savannah, November 16-20, 2015.

N. Tsujii, et al., Measurement of lower-hybrid waves with microwave back-scattering on TST-2, 18th International ST Workshop, Princeton, November 3, 2015.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

辻井 直人 (TSUJII, Naoto)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：20707351