

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：63902

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06836

研究課題名(和文)電子サイクロトロン共鳴加熱の加熱特性評価

研究課題名(英文)Evaluation of electron cyclotron resonance heating properties

研究代表者

牧野 良平(Makino, Ryohei)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：00755118

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：磁場閉じ込め核融合では約1億度の超高温プラズマを生成し長時間維持することが必要とされる。これを実現させるためには高効率・大電力な電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)と、核融合プラズマの熱・粒子輸送の制御が必須である。加熱の高効率化及びECRHによる輸送制御のためには、加熱特性を正確に評価する必要がある。そのため、(1)入射ミリ波の電力及び偏波モニターの高時間分解能化、(2)プラズマに吸収される加熱電力の空間分布評価のための電子サイクロトロン放射計測の計測領域拡張、(3)プラズマ中の電子熱速度の非等方性計測のための偏光分光計測器の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：It is necessary to produce high temperature plasmas which are more than 100 million degrees for magnetic confinement fusion device. To realize the condition for nuclear fusion, high power and high efficiency heating is essential. It is important to evaluate the properties of heating for improvement of heating efficiency and control of heat/particle transport. We developed measurement systems for heating evaluation as follows; (1) improvement of power and polarization monitor for millimeter-wave which is used for electron cyclotron resonance heating, (2) expansion of the measurement area of the electron cyclotron emission system, (3) development of polarimeter to measure an isotropy in the electron velocity space.

研究分野：核融合

キーワード：核融合 プラズマ加熱

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合では約1億度の超高温プラズマを生成し長時間維持することが必要とされる。これを実現させるためには高効率な大電力加熱と、核融合プラズマの熱・粒子輸送の制御が必須である。電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)は局所加熱性を持ち、加熱としてだけでなくプラズマの輸送特性の能動的な制御法としても期待されている。加熱の高効率化及びECRHによる輸送制御のためには、加熱特性を正確に評価する必要がある。これまで、加熱特性評価は入射したミリ波のレイトレース計算結果を基に行われており、理論シミュレーションに大きく依存していた。しかし、近年の研究の進展により、実験条件によっては従来のレイトレースでは実験結果を正しく再現できない場合があることが指摘されており、プラズマ加熱の最適化の面で大きな問題となっている。以上から、加熱特性の実験的評価が求められているが、実験的にはプラズマに吸収される総電力及び加熱中心位置のみしか評価されておらず、加熱特性評価としては不十分である。加熱特性の実験的な評価法を確立することが極めて重要な課題となっている。

2. 研究の目的

大型ヘリカル実験装置(LHD)において、加熱特性として重要なパラメータである(1)入射ミリ波の電力及び偏波、(2)プラズマに吸収される加熱電力の空間分布、(3)プラズマ中の電子熱速度の非等方性及び高速電子、について実験的に評価できる実用可能な手法を確立することに向けて下記3点を目的とする。

(1)入射ミリ波の電力及び偏波モニターの高時間分解能化

(2)プラズマに吸収される加熱電力の空間分布評価のための電子サイクロトロン放射計測の計測領域拡張

(3)偏光分光計測器によるプラズマ中の電子熱速度の非等方性及び高速電子の明確化

3. 研究の方法

(1)入射 EC 波の電力及び偏波計測モニター開発

本研究開始時には、既に研究代表者が開発した図1のモニターにより入射ミリ波の電力及び偏波計測には成功している。しかし、LHD で実用するためには計測の時間分解能として100マイクロ秒サンプリング以上の性能が要求されており、研究開始当初は実時間計測時において20ミリ秒サンプリング程度となっていたため、高時間分解能化が必要であった。計測のサンプリング周波数は本モニターで検出器として使用しているFPGA(Field Programmable Gate Array)付き高速ADC(Analog-to-Digital Converter)からPCへ

データ転送する時間により制限されている。FPGA プログラムを改良することにより、時間分解能を電力及び偏波計測モニターとして必要とされる100マイクロ秒サンプリングまで向上させる。

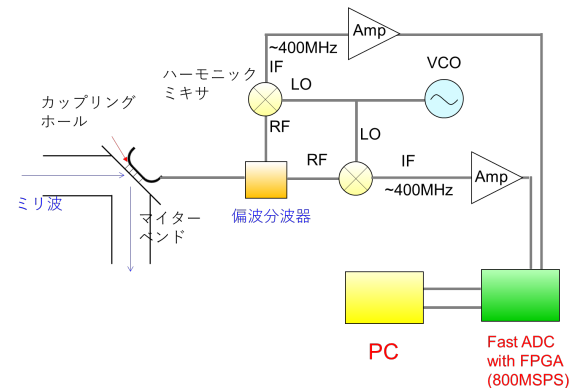


図1: 入射ミリ波の電力及び偏波計測モニターの概略図

(2)プラズマに吸収される加熱電力の空間分布評価のための電子サイクロトロン放射計測の計測領域拡張

加熱吸収分布評価のためには電子温度の高時間応答計測が必要となる。LHDにおいてECE(電子サイクロトロン放射)計測により高時間分解能で電子温度が測定されている。しかし、ECE計測装置では電子サイクロトロン共鳴加熱用電磁波の混入による受信器の破損や飽和を防ぐため、ECRHの周波数帯をバンド阻止フィルタにより除去しているが、その阻止帯域幅が広く計測範囲が制限されており、特に重要となるEC加熱位置近傍の電子温度応答が計測できない状況が多く、狭帯域ノッチフィルタの開発が必要不可欠である。そのため、加熱吸収分布評価に用いる電子温度データを計測するECE計測の加熱位置付近での計測領域を広げるために、ノッチフィルタの開発・評価を進めた。本ノッチフィルタは研究協力者である東京大学の西浦正樹准教授と共同で試作、試験した。このノッチフィルタは導波管型のものであり、cavityのサイズをネジの差し込み具合により変化させることで遮断中心周波数を調整できる構造となっている。

核融合科学研究所において、図2のようにベクトルネットワークアナライザを用いてヘテロダイン法を利用してノッチフィルタの特性を評価した。

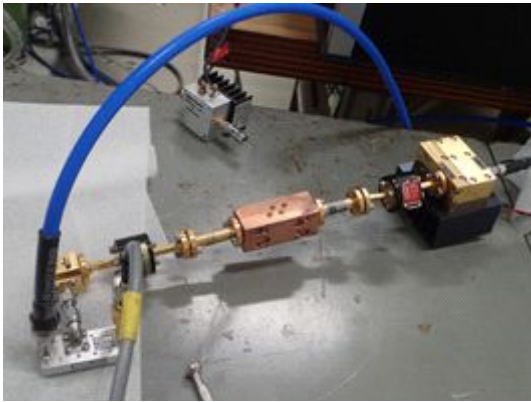


図2 ノッチフィルタ試験の様子

(3)プラズマ中の電子熱速度の非等方性及び高速電子計測のための偏光分光計測の開発

ECRH によりプラズマ中の電子は直接的には磁場垂直方向へ加速され、電子の速度成分に非等方性が現れる可能性がある。LHD においてもトムソン散乱計測及び電子サイクロトロン放射(ECE)計測により ECRH 時に電子の速度成分がマクスウェル速度分布からずれていることが示唆されている。プラズマ中の電子の速度成分の非等方性を計測可能な装置として偏光分光計測がある。研究開始当初より偏光分光計測器はおよそ一通り完成していたが、使用する光学素子の特性試験をする必要があった。分子科学研究所 UVSOR にて高反射ミラーなどの反射率等の光学特性を評価した。光学特性を明らかにした上で、開発した偏光分光計測器を LHD に実装し試験した。

4. 研究成果

(1)入射 EC 波の電力及び偏波計測モニター開発

図 3 に示すように約 20 ミリ秒サンプリングであった計測の時間分解能を約 200 マイクロ秒に向上させることに成功した。今後のフィードバック制御に向けて、計測をリアルタイム化・高時間分解能化・高精度化するために検出部に使用しているプログラムを書き込める回路 FPGA の改良を進めている。また、本モニターの検出部 FPGA 付 ADC を韓国の核融合研究機関 NFRI でも適用できるように開発を進めた。

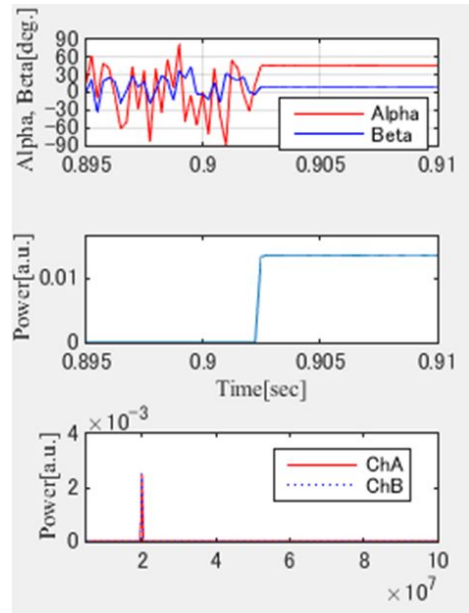


図 3 入射ミリ波電力及び偏波計測モニターにより計測された偏波特性(偏光角 α 、楕円度 β)、入射電力、パワースペクトル。

(2)プラズマに吸収される加熱電力の空間分布評価のための電子サイクロトロン放射計測の計測領域拡張

図 4 はネジを調整して遮断中心周波数を 71.2GHz、74.3GHz、77GHz にした場合の結果を示している。ネジを回すことでノッチする周波数が変化させられ、帯域幅及び減衰率とともに ECE 計測用に要求性能を満たしたものであることが確認できた。加熱位置付近での高時間分解能な電子温度計測は加熱分布評価に極めて重要であり、さらには、加熱位置での輸送現象の明確化などの物理機構解明にも貢献する。

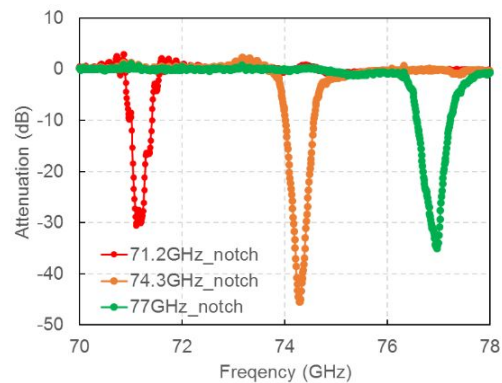


図 4 ネジ調整後の減衰量。71.2GHz、74.3GHz、77GHz に減衰量のピークを持って行った場合を示している。

(3)プラズマ中の電子熱速度の非等方性及び高速電子計測のための偏光分光計測の開発

プラズマ中の電子熱速度の非等方性及び高速電子を計測する機器である偏光分光計測器の光学素子の特性を明らかにし、計測器が完成した。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置で行われるプラズマ実験において、本計測器を用いて初期データを取得した。現在、偏光度などの解析を進めている。

5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計4件)

牧野良平、他、「LHDにおけるFPGAを用いた大電力ミリ波用パワー及び偏波モニターの開発」, 第33回プラズマ・核融合学会年会、2016年11月21-24日、東北大学青葉山キャンパス(宮城県・仙台市)

R. Makino *et. al.*, “Recent progress in the ECRH system on LHD”, Japan-Korea Workshop on “Physics and Technology of Heating and Current Drive”, December 21 - 22 (2015), Hitachi Civic Center, Hitachi-City, Japan,

牧野良平、他、「LHDにおける大電力ミリ波用電力及び偏波実時間計測モニターの開発」, 第32回プラズマ・核融合学会年会、2015年11月24-27日、名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂(愛知県・名古屋市)

R. Makino *et. al.*, “Development of a power and polarization monitor on the ECRH transmission line”, JA-EU-US RF Heating Technology Workshop, Tokyo, Japan, August 31 - September 2, 2015

6 . 研究組織

(1)研究代表者

牧野 良平 (MAKINO, Ryohei)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号：00755118

(2)研究協力者

西浦 正樹 (NISHIURA, Masaki)

東京大学・新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号：60360616