

令和元年6月13日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06933

研究課題名(和文) 周波数変調が必要ない電子サイクロトロン電流駆動用大電力ミリ波帯高速スイッチの開発

研究課題名(英文) Development of new triangle fast directional switch for high power millimeter wave without frequency modulation

研究代表者

三枝 幹雄 (Saigusa, Mikio)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授

研究者番号：10292476

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉の電子サイクロトロン波帯加熱電流駆動装置用に、大電力ミリ波帯高速スイッチの開発を行った。その原理は、リング共振器内の反射板を振動させてリング共振器の共振周波数を高速に変調することで、共振および非共振の出力ポート間を高速に切り替える。2016年度は原理の実証として、小型振動試験機を用いて2枚の反射鏡を300Hzで同期して振動させ、600Hzまでの切り替えを確認した。2017年度はより高速化を目指して、固有振動を利用した反射鏡の開発研究を行なった。2018年度は、高速スイッチ本体の小型化低損失化を目指して、3角形の新型のスイッチを設計・製作し、低電力試験で良好な切り替え特性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合炉の電子サイクロトロン加熱電流駆動装置用に、固定周波数でMW級大電力ミリ波の高速切替が行えるスイッチを世界で初めて開発した。また切替周波数は600 Hz以下までだが、kHzまでの高速切替を可能にする固有振動を利用した反射鏡のアイデアを生み出し、またスイッチのコストダウンのための小型化、冷却を容易にする低損失化も実現した。これらの成果により、大電力ミリ波源であるジャイロトロンの高圧電源のon/off運転によるプラズマの安定化実験は半分の電力で実現可能になり、将来の核融合炉の電子サイクロトロン電流駆動装置のコストは約半分までに削減できる。

研究成果の概要(英文)：A new fast directional switch for high power millimeter waves without frequency modulation was proposed for electron cyclotron current driving system in fusion reactor. The principle is the ring resonator of circular corrugated waveguide with vibrating reflectors. The operation frequency of switch can be adjusted by the thermal expansion using a precision chiller. In 2016, the switching frequency was obtained up to 600 Hz by the two synchronized vibration mirrors. In 2017, the natural vibration reflector was developed for higher frequency operation. In 2018, the new triangle switch which has smaller transmission loss and lighter weight than previous one, was developed. The basic properties of the new triangle switch were measured in low power test. The parasitic resonances were observed at large amplitude vibration of the reflector.

研究分野：核融合理工学

キーワード：核融合 電子サイクロトロン ミリ波 高速スイッチ 固定周波数 固有振動 リング共振器

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

トカマク型核融合炉ではプラズマ圧力の上昇により新古典ティアリングモード(NTM)の発生と閉じ込めの劣化が予測されており、その安定化には磁気島内部への局所的な電子サイクロトロン電流駆動(ECCD)が有効である事が理論と実験で確認されている。安定化効率は磁気島の O 点に電流駆動する場合が高く、X 点に電流駆動すると逆に不安定になる。この磁気島は数 kHz 程度で高速回転している為、従来はミリ波の電子発振管であるジャイロトロンの高圧電源を高速で on/off 制御する事で O 点付近の電流駆動を実現してきた。しかし、ドイツのシュツツガルト大学とロシアの応用物理学研究所の共同研究グループは、反射型回折格子と多くの反射鏡を組み合わせた大電力ミリ波帯スイッチを開発し、ジャイロトロン周波数変調で近接する 2 周波数(数十 MHz 程度)を高速に切り替えることにより、電磁ビームの高速切替えに成功した。これにより 2 本のアンテナから放射される電磁ビームを高速で切替えれば常に磁気島 O 点への入射が可能になり安定化効率が 2 倍になる。一方、近年トカマク型核融合炉の ECCD システムには、様々な磁場配位に対応して複数周波数での運転が求められており、ドイツのマックスプランク研究所の中型トカマク ASDEX-U では 105 GHz と 140 GHz、日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所の超電導トカマク JT-60SA の電子サイクロトロン加熱電流駆動装置用に開発されたジャイロトロンでは、110 GHz と 138 GHz で 1 MW、100 秒の出力が報告されている。

2. 研究の目的

本研究課題では世界で初めての周波数変調を必要としない広帯域大電力ミリ波帯高速スイッチの開発を目指す。トカマク型核融合炉のエネルギー閉じ込めの上限を与える不安定性に新古典ティアリングモードがある。このモードの抑制には、磁気島中心への局所的な電子サイクロトロン電流駆動が有効であることが実験と理論から確認されている。この磁気島は数 kHz 程度で高速回転しており、現在まではこの回転に追従してミリ波源であるジャイロトロン高圧電源の on/off 制御でモード抑制を行ってきた。しかし電磁波ビームの高速切り替えスイッチがあれば 100%有効に電力が使える。既に本申請グループで周波数変調を用いた広帯域高速スイッチを提案・試作してきたが、ここでは世界で初めての固定周波数用高速スイッチの開発を目指す。

3. 研究の方法

2016 年度はリング共振器の設計を中心に行う。共振周波数調整機能、リング共振器内に蓄積された電力測定システムの最適設計を行い製作する。また、音響周波数帯の振動素子を用いて、共鳴周波数を実時間制御する為の振動素子の低電力試験を行う。2017 年度には実時間制御が可能なリング共振器型高速スイッチを組み立て、日本原子力研究開発機構との共同研究で低電力高周波特性試験により高周波特性を確認した後、冷却水の温度制御による周波数調整試験を行う。2018 年度は数値解析と 2 年目の実験結果を反映して改良し、170 GHz にて高速切り替え試験を行い、広く海外に成果の発表を行う。

4. 研究成果

核融合炉の電子サイクロトロン波帯加熱電流駆動装置用に、大電力ミリ波帯高速スイッチの開発を行った。その原理は、リング共振器内の反射板を振動させてリング共振器の共振周波数を高速に変調することで、共振および非共振の出力ポート間を高速に切り替える。2016 年度は原理の実証として、小型振動試験機を用いて 2 枚の反射鏡を 300 Hz で同期して振動させ、600 Hz までの切り替えを低電力試験で確認した。2017 年度はより高速な切り替えを目指して、固有振動を利用した反射鏡の開発研究を行った。市販の有限要素法を用いた解析コード(村田ソフトウェア製 femtet)を用いて固有振動のモード解析を行い、kHz 帯に固有振動が存在することを確認し、真空封止可能な全金属反射鏡を設計製作し振動試験を行なった。2018 年度は、高速スイッチ本体の小型化・低損失化を目指して、3 角形の新型のスイッチを設計・製作し、有限差分時間領域法を用いた電磁界解析コード(Remcom 社製 XFDTD)を用いて数値シミュレーションを行うと同時に、那珂核融合研究所での低電力試験で、振動鏡による良好な切り替え特性を確認した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

Mikio Saigusa, Kenji Sekiguchi, Toshihiko Honzu, Junya Mori, Hiroki Shozu, et al., "High power test of a temperature controlled diplexer for electron cyclotron current drive system" Fusion Engineering and Design, Vol. 123 pp.385-389, 2017. 査読あり
DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.03.146

〔学会発表〕(計 13 件)

三枝幹雄、他 10 名、「大電力ミリ波帯伝送機器の開発」平成 30 年度核融合科学研究所一般共同研究「ギガヘルツ・テラヘルツ帯における要素開発とその応用」研究会、土岐、NIFS、2019.

井上史章、三枝幹雄、他 5 名、「固有振動を利用した大電力ミリ波帯高速スイッチの開発」プラズマ・核融合学会 第 35 回年会、大阪大学吹田キャンパス、4Pa64 (2018).

Hiroki Shozu, (Mikio Saigusa), et al., "Research and Development of Broadband Fast Switching Device of High-Power Millimeter Wave" The 14th International Student Conference in Ibaraki, Mito Campus, Ibaraki University, Ibaraki, Japan, 2018.

Fumiaki Inoue, (Mikio Saigusa), et al., "Development of Fast Switching Device of High Power Millimeter Wave Using Natural Vibration for Electron Cyclotron Current Drive System" The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research& The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference, Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2018.

生頭広稀、(三枝幹雄)、他 5 名、「核融合プラズマの電子サイクロトロン電流駆動用大電力ミリ波帯高速スイッチの高性能化研究」第 26 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、日立シビックセンター、2018.

横山花奈、(三枝幹雄)、他 5 名、「三角形型大電力ミリ波帯高速スイッチの伝送損失の推定」第 26 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、日立シビックセンター、2018.

三枝幹雄、「大電力ミリ波帯デバイスの開発研究」、量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所との連携協力ワークショップ、茨城大学日立キャンパス、小平記念会館、2018.

Hiroki Shozu, Toshihiko Honzu, Junnya Mori, Mikio Saigusa, et al., "Research and Development of High-Power Millimeter Wave Broadband Fast Switching Device", Plasma Conference 2017, Himeji, 2017.

井上 史章、生頭 広稀、三枝 幹雄、「固有振動を用いた大電力ミリ波帯高速スイッチの提案」、第 25 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、日立シビックセンター、2017.

生頭 広稀、(三枝幹雄) 他 5 名、「周波数変調が必要ない大電力ミリ波帯高速スイッチの研究開発」、第 24 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、日立シビックセンター、2016.

① Toshihiko Honzu, Junnya Mori, Hiroki Shozu, Mikio Saigusa, et al., "Research and development of fast switching device for high power millimeter wave without frequency modulation", The 12th International Student Conference at Ibaraki University, 2016.

② 森 純哉、(三枝 幹雄) 他 5 名、大電力ミリ波帯周波数固定 T 字型スイッチの数値解析、第 33 回プラズマ・核融合学会年会、2016.

③ Mikio Saigusa, et al., "High power test of a temperature controlled diplexer for electron cyclotron current drive system", 29th Symposium on Fusion Technology (SOFT 2016), 2016.

6 . 研究組織

(1)研究分担者 なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：今井 剛、

ローマ字氏名：Tsuyoshi Imai、

研究協力者氏名：高橋 浩司、

ローマ字氏名：Koji Takahashi、

研究協力者氏名：小田 靖久、

ローマ字氏名：Yasuhisa Oda、

研究協力者氏名：池田 亮介、

ローマ字氏名：Ryosuke Ikeda、

研究協力者氏名：本圖 理彦、

ローマ字氏名：Toshihiko Honzu、

研究協力者氏名：森 純哉、

ローマ字氏名：Junnya Mori、

研究協力者氏名：生頭 広稀、

ローマ字氏名：Hiroki Shozu、

研究協力者氏名：井上 史章、

ローマ字氏名：Fumiaki Inoue、

研究協力者氏名：横山 花奈、

ローマ字氏名：Kana Yokoyama、

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。