

令和 4 年 9 月 13 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03799

研究課題名(和文) コルゲート導波管によるメガワット定常ミリ波伝送での反射ミリ波の低減研究

研究課題名(英文) Reduction of reflected millimeter-waves in a corrugated-waveguide during steady-state Mega-Watt millimeter-wave transmission

研究代表者

下妻 隆 (Shimozuma, Takashi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：80270487

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：所有ジャイロトロンのもう一つの周波数帯154GHz帯用として、不要反射波フィルター装置を設計し、製作を行った。本154GHz用不要反射波フィルター装置の設計においては、このフィルター装置で使用している対向した2本の円形コルゲート導波管間のギャップ間隔を、さらに長く取ることができ、高周波数帯での不要モードフィルターとしての性能を向上できるように設計、製作した。対向する円形コルゲート導波管のギャップ間隔は、300mmとした。この場合、HE₁₁モードでの入射波に対して、導波管ギャップでの損失は、約2%と計算で予測されている。不要反射波フィルターとしての性能評価を行ってゆく。

研究成果の学術的意義や社会的意義

将来の電力源として有望な核融合反応による発電炉では、高温プラズマの生成、加熱、制御が不可欠である。プラズマの加熱方法として、波長がミリメートル級の電磁波を使った電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)によるプラズマの電子加熱が有望である。高パワーの電磁波をLHD装置まで伝送する際に、伝送電磁波の一部は、導波管壁やプラズマから反射等により、発振器のジャイロトロン動作に悪影響を与え、発振の停止などが起こる。本研究では、不要反射電磁波の低減フィルター装置の開発、性能評価を行った。

研究成果の概要(英文)：A new unwanted-mode-filter device for 154GHz frequency range was designed and manufactured. The gap length of two corrugated-waveguides could be set longer. In this case, the gap length between two corrugated waveguides can be set 300mm. In this case, gap-loss between two corrugated wave-guides is about 2%. This device of unwanted mode filter should be tested for several gap length of the corrugated waveguides

研究分野：プラズマ加熱物理

キーワード：ジャイロトロン サイクロトロン共鳴加熱 プラズマ加熱 円形コルゲート導波管 反射波フィルタ
単向管 大電力ミリ波 反射電磁波

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマの点火及び加熱に使用される 100 - 200GHz 帯のミリ波を用いた電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH) は、入射アンテナに対するポート専有面積も小さく、またミリ波パワー源であるジャイロトロンを核融合炉本体から十分離れたところに設置できる利点がある。将来の核融合炉でのプラズマ生成・加熱法として、また局所加熱、電流駆動によるプラズマの制御手段として注目されている。現状、出力がメガワット級のミリ波は、ジャイロトロンによって発生され、コルゲート導波管により約 100 メートル程度の伝送が行われ、準光学ミラー系からなる入射アンテナによりプラズマ真空容器内に入射集光され、プラズマ加熱や電流駆動の実験に使用されている。

このような大電力ミリ波の伝送としては、主に、波長に比べて管径がはるかに大きいオーバーサイズで、管内壁周方向に細かい溝を掘ったコルゲート導波管による伝送法が用いられている。このような伝送路においては、伝送モードをできるだけ単一モードで、かつ低損失で伝送することが必要不可欠である。コルゲート導波管では、通常 HE11 モード(電界強度分布はガウス分布に近く、偏波は直線偏波) でミリ波を伝送するが、このモードは導波管壁面電流がほとんど流れず、長距離伝送でも減衰が少ないという利点がある。さらに、導波管内を真空化することにより、メガワット級の大電力でも伝送路内でのアーキングを防止できる利点もある。他方、オーバーサイズであるために、コルゲート導波管のアラインメントが不十分な場合、他の高次モードへのモード変換が発生し、パワーの大きな減衰、導波管内でのアーキング、伝搬波位相の乱れを引き起こす可能性がある。

我々はこれまで、真空排気されたコルゲート導波管内を伝搬するメガワット級のミリ波のパワー分布を、ほぼリアルタイムでかつその場測定できるシステムを構築してきた。それは、90 度マイターバンドの反射板の大気側に取り付けられ、定電流駆動されたペルチェ素子 2 次元アレイの電圧変化から反射板の温度変化情報を取得し、熱除去と同時にミリ波パワー分布を取得できるという画期的なミリ波パワー分布モニターである。

近年、ジャイロトロンパワーの増大と、加熱対象となるプラズマの高密度化、入射方向の多様化、それと長時間入射化に伴って、プラズマからの反射ミリ波が問題となってきている。プラズマなどからミリ波の導波管への反射波については、高次モードの場合は伝送系での減衰が大きいですが、プラズマからの反射波において、HE11 モードに近い HE21, HE31, HE12 などの低次モードは、比較的減衰せずにジャイロトロンまで戻る可能性がある。実際、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)での ECRH システムにおいては、ジャイロトロンからの高パワー定常入射時において、プラズマや伝送系からの反射波によるジャイロトロン管内の管壁部などの加熱によって、ジャイロトロン管内の真空度の劣化がおさまらず、長時間入射が制限されることがある。他方、プラズマへの入射ではなく、反射の少ないダミーロードへの入射の場合には、ジャイロトロン管内の真空度はある一定レベルで定常値に達する。そこで、負荷側(プラズマ側)からのジャイロトロン側への反射波を低減する単一方向ミリ波モードフィルタ(一種の単向管)が必要となっている。

本研究では、導波管系に一種の導波管ギャップを設け、ミリ波のモードによる伝搬特性の違いを利用することにより、基本波である HE11 モードは負荷方向へ伝搬できるが、HE11 モードを含めた減衰の少ない低次モードからなる反射波を減衰させて、ジャイロトロン側に戻らないような単一方向ミリ波モードフィルタを開発することはできないかと考えた。

2．研究の目的

本研究では、核融合プラズマの ECRH（電子サイクロトロン共鳴加熱）システムにおいて、大電力ミリ波を長距離伝送するコルゲート導波管系において、実際のシステム稼働条件（真空、メガワット電力、定常伝送）で、ジャイロトロン安定動作のために、プラズマからの不要な反射ミリ波を低減する単方向ミリ波モードフィルタからなる「反射ミリ波フィルタ装置システム」の構造を考案し、実際にミリ伝送システムでその機能を実証することにある。

通常低パワーの基本導波管（開口部が波長程度の矩形導波管）からなる伝送系においては、フェライト等を用いた単向管と呼ばれる素子、またはサーキュレーターを用いることによって、負荷からの反射波を低減させたり、負荷側から発振器側に戻らないようにしたりしているが、メガワット級のミリ波パワーを伝送するオーバーサイズのコルゲート導波管では、このようなシステムは構築されていない。

3．研究の方法

本研究で構築された反射ミリ波フィルタ装置システムは、既存のジャイロトロン発振器、ミリ波パワー分布モニターに加えて構築された。本システムは、コルゲート導波管をある間隔で対向させた構造を持ち、正確に管軸とその傾きを合わせて、間隔を持って対向した導波管の端部に、必要ならば、ミリ波ビームを成形して結合するものである。導波管ギャップ部は、不要反射波を処理するために、冷却水を流したテフロンチューブのコイルをフィルタ装置内面に取り付けて、不要電磁波を冷却水に吸収させるようにしている。導波管ギャップ間隔を長くとることができるため、プラズマ側からのランダム位相の反射波が出射側に戻りにくい構造になっている。散乱された反射波は、冷却水が流れるテフロンチューブを通り抜け、冷却水に吸収処理される。冷却水の出入り口には、温度センサーを取り付け、処理された反射ミリ波パワーを水温の上昇により測定できるようになっている。

本研究では、まず精密にアラインメントされたコルゲート導波管ギャップにおいて、主伝搬モード HE11 および、候補となる低次伝搬モード HE21, HE31, HE12 などの電磁波の伝搬特性を調べた。以上の検討より、反射ミリ波フィルタ装置としての性能を最大限に発揮できるように設計を行い、実機を製作した。その際ギャップ形状について、いくつかの取り替え可能な構造とした。実機 ECRH 伝送システムに組み込み、高パワーの動作での確認を行い、反射波によるジャイロトロンへの影響を調査した。

4．研究成果

ジャイロトロンからの電磁波のコルゲート導波管伝送においては、導波管ギャップについて、そのギャップ距離を変化させることによって、電磁波が十分伝搬できる距離を検討した。それによれば、導波管径が 88.9mm の現状のシステムでは、77GHz のギャップ間伝搬では、200 mm のギャップでも、98.8% のパワーが対向するコルゲート導波管に結合することが計算でも示されており、77GHz 系と 154GHz 系の伝送路中に設置した実機フィルター装置においても、実機試験において、反射波や漏洩波による異常発熱などは見られず、不要モードフィルタとしても十分機能している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tsujiyama T.I., Yanai R., Mizuno Y., Tanaka K., Yoshimura Y., Tokuzawa T., Nishiura M., Sakamoto R., Motojima G., Kubo S., Shimozuma T., Igami H., Takahashi H., Yoshinuma M., Ohshima S., The LHD Experiment Group	4. 巻 61
2. 論文標題 Improved performance of electron cyclotron resonance heating by perpendicular injection in the Large Helical Device	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 026012 ~ 026012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/abc977	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ii Tsujimura T., Mizuno Y., Yanai R., Tokuzawa T., Ito Y., Nishiura M., Kubo S., Shimozuma T., Yoshimura Y., Igami H., Takahashi H., Tanaka K., Yoshinuma M., Ohshima S.	4. 巻 153
2. 論文標題 Real-time control of the deposition location of ECRH in the LHD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 111480 ~ 111480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2020.111480	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nishiura M., Tanaka K., Kubo S., Saito T., Kenmochi N., Nuga H., Seki R., Shimozuma T., Yoshimura Y., Igami H., Takahashi H., Tsujimura T.I., Yanai R., Tatematsu Y.	4. 巻 15
2. 論文標題 Collective Thomson scattering with 77, 154, and 300 GHz sources in LHD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C01002 ~ C01002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/15/01/C01002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Goto Yuki, Kubo Shin, Igami Hiroe, Nishiura Masaki, Shimozuma Takashi, Yoshimura Yasuo, Takahashi Hiromi, Tsujimura Toru Ii	4. 巻 58
2. 論文標題 Development of the calibration method for a fast steering antenna for investigating the mode conversion window used in EBW heating in the LHD plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 106001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab3e58	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Saito, S. Tanaka, R. Shinbayashi, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, M. Fukunari, S. Kubo, T. Shimozuma, K. Tanaka and M. Nishiura	4. 巻 14
2. 論文標題 Oscillation Characteristics of a High Power 300 GHz Band Pulsed Gyrotron for Use in Collective Thomson Scattering Diagnostic	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1406104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.1406104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ii Tsujimura T., Mizuno Y., Yanai R., Tokuzawa T., Ito Y., Nishiura M., Kubo S., Shimozuma T., Yoshimura Y., Igami H., Takahashi H., Tanaka K., Yoshinuma M., Ohshima S.	4. 巻 153
2. 論文標題 Real-time control of the deposition location of ECRH in the LHD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 111480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2020.111480	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Tanaka, Y. Ohtani, M. Nakata, F. Warmer, T. Tsujimura, Y. Takemura, T. Kinoshita, H. Takahashi, M. Yokoyama, R. Seki, H. Igami, Y. Yoshimura, S. Kubo, T. Shimozuma, T. Tokuzawa, T. Akiyama, I. Yamada, R. Yasuhara, H. Funaba, M. Yoshinuma, K. Ida, M. Goto, et al	4. 巻 59
2. 論文標題 Isotope effects on energy, particle transport and turbulence in electron cyclotron resonant heating plasma of the Large Helical Device	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 126040
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab4237	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Kariya, R. Minami, T. Imai, M. Okada, F. Motoyoshi, T. Numakura, Y. Nakashima, H. Idei, T. Onchi, K. Hanada, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Takahashi, S. Kubo, Y. Oda, R. Ikeda, K. Sakamoto, M. Ono, K. Nagasaki, T. Eguchi, Y. Mitsunaka	4. 巻 59
2. 論文標題 Development of high power gyrotrons for advanced fusion devices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 66009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab0e2c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Takashi SHIMOZUMA, Satoshi ITO, Yasuo YOSHIMURA, Masaki NISHIURA, Hiroe IGAMI, Hiromi TAKAHASHI, Toru TSUJIMURA, Ryoma YANAI, Naoki KENMOCHI, Toshitaka TAKEUCHI, Yoshinori MIZUNO, Sakuji KOBAYASHI, and Shin KUBO
2. 発表標題 Design and Construction of a Filter Device of Unwanted Reflected Waves in Oversize Corrugated Waveguides for ECRH
3. 学会等名 29th International Toki Conference Ceratopia Toki ,Poster-3-F405 (2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Nishiura, S. Kubo, Y. Yoshimura, R. Yanai, S. Ito, H. Igami, T. H. Tsujimura, T. Shimozuma, H. Takahashi, N. Kenmochi
2. 発表標題 Improved heating efficiency of ECH near cut off density with a new injection scheme in the LHD
3. 学会等名 62nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics November 9 CP19.00027 (2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shun Adachi, Masaki Nishiura, Kenji Tanaka, Shin Kubo, Naoki Kenmochi, Takashi Shimozuma, Ryoma Yanai, Teruo Saito, LHD experiment group
2. 発表標題 Sensitivity calibration of a receiver for Collective Thomson scattering in the LHD
3. 学会等名 29th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasuo YOSHIMURA, Ryosuke SEKI, Hiroshi KASAHARA, Tetsutaro OISHI, Kenichi NAGAOKA, Katsumi IDA, Mikiro YOSHINUMA, Ichihiko YAMADA, Tokihiko TOKUZAWA, Takashi SHIMOZUMA, Hiroe IGAMI, et al
2. 発表標題 Time evolution of electron and ion temperatures in electron-heated long pulse discharges in LHD
3. 学会等名 29th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryoma Yanai, Toru Tsujimura, Shin Kubo, Ryota Yoneda, Yasuo Yoshimura, Masaki Nishiura, Hiroe Igami, Hiromi Takahashi, Takashi Shimoizuma
2. 発表標題 Upgrading LHDGauss code by including obliquely propagating wave absorption effect for ECH
3. 学会等名 29th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. I. Tsujimura, R. Yanai, K. Tanaka, Y. Yoshimura, T. Tokuzawa, M. Nishiura, R. Sakamoto, G. Motojima, S. Kubo, T. Shimoizuma, H. Igami, H. Takahashi, M. Yoshinuma, S. Ohshima, and the LHD Experiment Group
2. 発表標題 Improvement of performance of ECRH by real-time deposition location control and perpendicular injection in LHD
3. 学会等名 28th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西浦正樹, 鈕持尚輝, 奴賀秀男, 關良輔, 久保伸, 田中謙治, 足立迅, 下妻隆, 矢内亮馬, 齊藤輝雄, Moseev D., Salewski M., LHD experiment group
2. 発表標題 協同トムソン散乱計測により得られた散乱スペクトルの速度空間トモグラフィ法
3. 学会等名 76th 日本物理学会(春) 13pB2-11 (2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Igami, K. Tanaka, K. Ida, M. Yoshinuma, T. Tsujimura, T. Kobayashi, R. Yanai, N. Kenmochi, M. Nishiura, Y. Yoshimura, T. Shimoizuma, and Shin Kubo
2. 発表標題 ECCDによる回転変換分布制御が電子系内部輸送障壁を伴う電子温度分布に与える影響
3. 学会等名 76th 日本物理学会(春)2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 足立 迅, 西浦 正樹, 田中 謙治, 久保 伸, 鈿持 尚輝, 下妻 隆, 矢内 亮馬, 斉藤 輝雄, LHD実験グループ,
2. 発表標題 LHDにおける協同トムソン散乱のための受信機感度較正
3. 学会等名 37th プラズマ・核融合学会 年会(JSPF Annual Meeting) (2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西浦正樹, 久保伸, 吉村泰夫, 矢内亮馬, 伊藤哲, 伊神弘恵, 辻村亨, 下妻隆, 高橋裕己, 鈿持尚輝
2. 発表標題 LHDにおける遮断密度近傍の電子サイクロトロン加熱の高加熱効率化
3. 学会等名 37th プラズマ・核融合学会 年会(JSPF Annual Meeting) 01Cp01 (2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西浦正樹, 鈿持尚輝, 奴賀秀男, 關良輔, 久保伸, 田中謙治, 足立迅, 下妻隆, 矢内亮馬, 斉藤輝雄, Moseev Dmitry, Salewski Mirko, LHD実験グループ
2. 発表標題 協同トムソン散乱計測により得られた散乱スペクトルの速度空間再構成：非熱化速度分布への拡張
3. 学会等名 日本物理学会(秋)2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, M. Nishiura, H. Igami, H. Takahashi, T. Tsujimura, R. Yanai, S. Ito, Y. Mizuno, H. Takubo, S. Kobayashi, T. Numakura, R. Minami, T. Kariya, M. Sakamoto
2. 発表標題 Present Status of the LHD-ECRH System and Activities of Gyrotron and Transmission-line Improvement
3. 学会等名 US-EU-JPN RF Heating Technology Workshop Freiburg, Germany September 8-12 T09 (2019). (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tsujimura, S. Kubo, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, R. Yanai, K. Yanagihara
2. 発表標題 Real-time injection control of electron cyclotron resonance heating power in LHD
3. 学会等名 Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下妻 隆, 伊藤 哲, 水野 嘉識, 田窪 英法, 小林 策治, 吉村 泰夫, 伊神 弘恵, 高橋 裕己, 辻村 亨, 矢内 亮馬, 久保 伸
2. 発表標題 ECRH用コルゲート導波管ミリ波伝送系における不要高次反射波モードフィルタ装置の開発
3. 学会等名 第36回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西浦正樹, 鈿持尚輝, 奴賀秀男, 關良輔, 久保伸, 田中謙治, 下妻隆, 斉藤輝雄, LHD実験グループ
2. 発表標題 協同トムソン散乱計測における高速イオンの速度空間と計測スペクトルの関係
3. 学会等名 第36回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Nishiura, S. Kubo, K. Tanaka, M. Iizawa, N. Kenmochi, T. Shimozuma, H. Takahashi, T. Saito, LHD experiment group
2. 発表標題 Evaluation of collective Thomson scattering spectra in the LHD
3. 学会等名 74th 日本物理学会(春)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------