

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24561034

研究課題名(和文)高パワー長パルスジャイロトロンモード変換器及び内部ミラー系のマルチ周波数化

研究課題名(英文) Mode convertor and built-in mirror for multi frequency high power and long pulse gyrotron

研究代表者

梶原 健 (Kajiwara, Ken)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・企画調整室・研究主幹

研究者番号：90450311

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：核融合のためにプラズマを加熱する有効な手段として、非常に高い周波数の電磁波(ミリ波、波長がミリ程度の電磁波)を入射し、加熱する方法が有力である。本研究ではこのために必要な電磁波源であるジャイロトロン内部コンポーネントであるモード変換器と内部ミラー系の開発をおこなった。ジャイロトロンは通常、1つの周波数の電磁波を生成するよう設計されるが、もし選択的に2つ以上の周波数を生成することができれば、プラズマを加熱できる範囲が大きく広がると考えられる(プラズマを加熱する位置は周波数によるため)。本研究により当該コンポーネントを複数の周波数で使用できるよう改良することに成功した。

研究成果の概要(英文)：One of the effective way of heating the fusion plasma is the injection of the high frequency electromagnetic wave (so called millimeter wave which the wavelength is millimeter range). Such a high power millimeter wave can be generated by the gyrotron. This study is the development of the mode convertor and built-in mirrors for the gyrotron. The gyrotron is usually designed for single frequency generation, but if the gyrotron can generate the alternative frequency, it can expand the range of heating position (the heating position depends on the frequency). The development of these components were successfully finished.

研究分野：核融合

キーワード：ジャイロトロン 電子サイクロトロン加熱 マルチ周波数

### 1. 研究開始当初の背景

1MW レベルの高パワー及び数十秒以上の長パルス動作が可能な唯一のミリ波源であるジャイロトロンは特に核融合分野において電子加熱の手段及び、トカマクにおいては局所電流駆動の手段として必要不可欠な役割を担ってきた。これまでジャイロトロンは単一の周波数での出力を前提として設計、開発されてきた。しかしながら、プラズマ中のミリ波による電子加熱の位置は周波数と磁場により決定されるため、核融合を目指したプラズマ実験においてはジャイロトロンの周波数の選択が装置としての一つの境界条件となってしまう、実験の自由度を奪っている。

この現状を打破するためにジャイロトロンの出力周波数を変更することが可能なマルチ周波数ジャイロトロンの開発が急務となっている。特に将来のデモ炉及び核融合炉においてはトリチウム増殖率をかせぐためと、強力な中性子を遮断するために炉壁の開口は極小にする必要があるため、現状の実験炉のように可動ミラーにて入射位置を制御することは現実的でないと考えられる。従って、開口分は導波管のみとした入射装置を用いて、周波数を可変とすることによりその吸収位置を制御することが求められる。

核融合分野以外でも近年、様々な局面で高出力ミリ波サブミリ波の応用が進んでおり、同じミリ波源で様々な周波数を発振できるマルチ周波数が可能なミリ波源の開発により、新素材開発や医療技術、宇宙観測、航空宇宙などの関連分野での実験の効率及び可能性が飛躍的に上がると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、100GHz 以上のミリ波帯域で唯一の高出力長パルス電磁波源である、ジャイロトロン (図 1) のマルチ周波数化を最終的な目的とする。

ジャイロトロンはサイクロトロンメーザーの原理を用いた発振管で、磁場の強度に応じたサイクロトン周波数で発振する。ジャイロトロンの出力窓は反射を抑えるために半波長の整数倍の厚さに設計される。通常は数倍が選択されるため、例えば 170 GHz ジャイロトロンで厚さ 5 倍の窓を選択した場合、170 GHz の他に 136 GHz、102 GHz、68 GHz、34 GHz の周波数の電磁波の透過が可能であ

る。しかしながら、現在のジャイロトロンは発振モードである超高次モードを内部で伝送が可能なガウスビームにモード変換 (モード変換器) し、それを金属ミラー系にて出力窓まで伝送している。このため、異なる周波数に対応する異なる発振モードを同一のガウスビームに変換する事が可能なマルチ周波数対応のモード変換器の開発、及び金属ミラー系の設計が必要となる。本研究では 170 GHz、136 GHz、102 GHz の 3 つの周波数に対応した 3 つの超高次モードをガウスビームに変換する事が可能なモード変換器及び金属ミラー群の設計及び、実験による実証を目的とする。

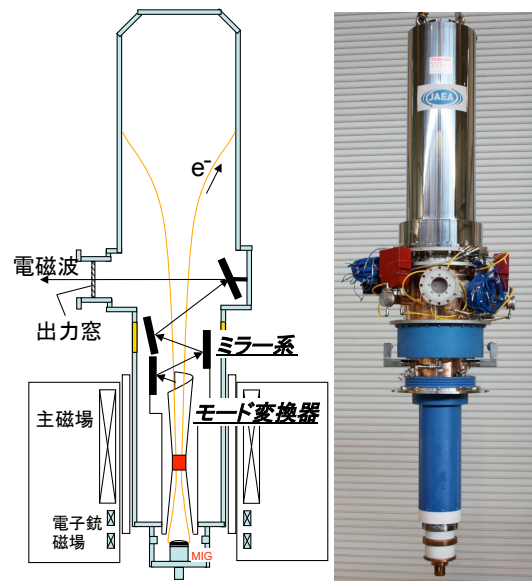


図 1: ジャイロトロン写真及び断面図

### 3. 研究の方法

モード変換器設計コードは円筒型の空洞から放出される超高次モード (例えば  $TE_{31,11}$ ) をさまざまなモードに分解し、そのモードをある形状のモード変換器を通過させたのちに、ふたたび足しあわせ、その放射パターンを計算する。その放射パターンが理想とするガウス分布からどの程度ずれているかを定量的に計算し、モード変換器の形状を微小に変化させ、そのずれが大きくなるか、小さくなるかを判定する。この繰り返しによる最適化により、最適な形状のモード変換器を得ることができる。このため、有限な時間内で行われる設計活動の結果えられるモード変換器の性能は、計算を行う計算機の数にも依存することとなる。また、対応させる周波数が増

える場合、2つ以上の周波数に対して、同時に最適化を行うこととなり、必要な計算時間は対応させる周波数の数に比例して増加する。

さらに、モード変換器より出力されたガウスビームを金属ミラー群で伝送させつつ集光させ、最適な大きさに出力窓を通過させる必要がある。周波数が異なるガウスビームはその発散角がことなることから、2つ以上の周波数のガウスビームをこのミラー群を通過させる場合、その曲率をミラー毎に調整し、最終的に全ての周波数で近い大きさのビームが出力窓で得られるよう工夫する必要がある。そこで、モード変換器より出力される電磁波の伝搬を計算し、ジャイロトロン出力窓位置での分布をもとめるミラー系伝搬コードを開発した。このコードを用いて、3つの周波数の3種類のモード変換器の出力分布に対して、ジャイロトロン出力窓分布を計算し、ミラー曲率が最適になるよう、反復計算を行った。

本研究では、まずは、現存する2周波数ジャイロトロンの出力パターンを測定し、2周波数での最適化コードの健全性を確認する。その後、必要であれば、コード及び最適化手法を改良し、上記、3つの周波数での最適化モード変換器設計コード及びミラー系伝搬コードを用いてモード変換器及びミラー系の最適化を行う。最終的には設計したモード変換器の低パワー試験、もしくはモード変換器及びミラー系を実機ジャイロトロンへ搭載し、その性能を確認する。

#### 4. 研究成果

(1) 2周波数ジャイロトロンの出力パターンの測定と計算結果との比較

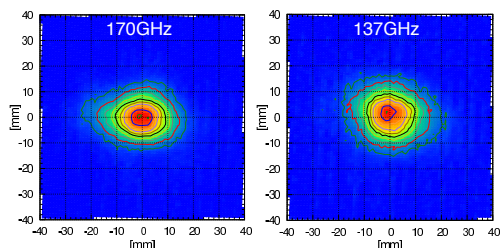


図2：大電力2周波数ジャイロトロン出力パターン測定結果

既存の大電力2周波数ジャイロトロンの出力パターンを1ms以下の短パルス運転により取得した。具体的には、ジャイロトロン出力窓の直近で固定した紙の温度上昇を高速赤外線カメラで撮影し、その温度上昇を記録する。温度上昇が電磁波のパワーに比例するため、パワー分布を得ることができる。図2に2つの周波数170GHz、137GHzの出力の測定結果を示す。また、本ジャイロトロンの出力をモード変換器設計コード及びミラー系伝搬コードで計算した結果を図3に示す。両者には大きな違いがみられず、計算コードが実験結果をよく再現することが確認できた。

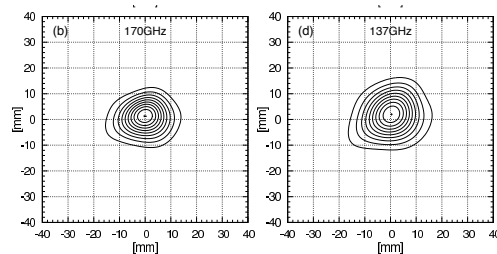


図3：モード変換器設計コードによる出力パターン計算結果

#### (2) 3周波数モード変換器の設計

モード変換器設計コードが170GHz、137GHzの2周波数にて適切に動作していることが確認できたため、170GHz、137GHz、104GHzの3周波数の設計を行なった。しかしながら、2周波数でのモード変換器最適化手法を、そのまま3周波数にあてはめると、性能が劣化することが分かった。これを打開するために、従来はモード変換器の形状をある多項式にて表現し、その係数を変化させることでモード変換器の最適化をおこなっていたところを、自由な形状の変化をとりうるモデルに変更して、再度最適化をこころみた。その結果、低周波数での損失が、大きくなるものの高パワージャイロトロンへの搭載が可能なモード変換器の設計に成功した。設計したモード変換器の内面形状および内面の電磁波分布を図4に示す。

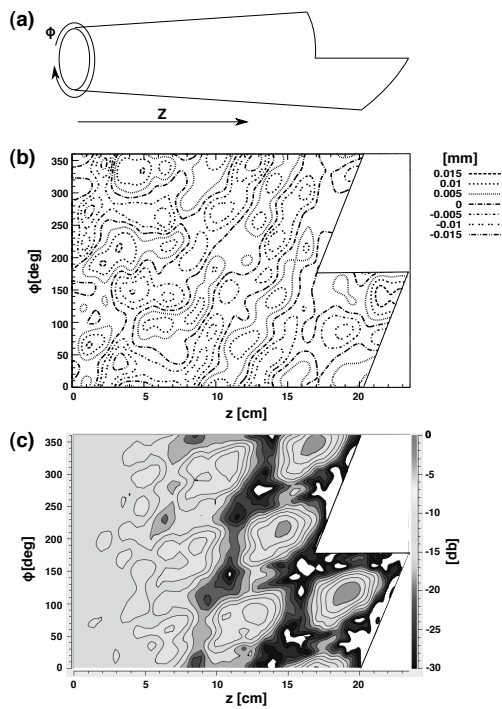


図 4：モード変換器の形状。(a)概観形状、(b)内面の凹凸、(c)内面の電磁波分布

### (3) 高パワー試験

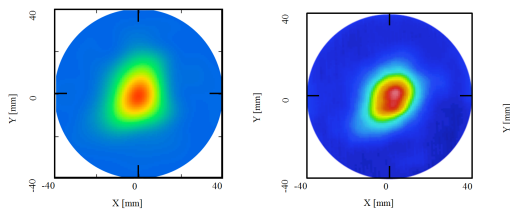


図 5：104GHz 発振出力窓パターン(左)と計算結果(右)との比較

設計したモード変換器を高パワー、長パルスジャイロトロンに搭載し、実験を行った。まず、最初に2周波数の場合と同様に出口でのパターンを取得した。3つ目の周波数である104GHz発振の場合について図5に示す。計算と同様な出力パターンが得られている。次にモード変換器の性能を調べるために、長パルス運転時の電磁波の損失の比較を行った。モード変換器の性能が悪いと、モード変換器から出力された電磁波は窓まで到達する前に散逸してしまう。その散逸した電磁波は、ジャイロトロンのコレクター部に逆電圧をかけジャイロトロンの運転効率を上げるために挿入されている、絶縁セラミック部(図1オレンジ部分)より、外部に放出される。この絶縁セラミックの外側は、冷却水に浸さ

れており、放出された電磁波はその冷却水により吸収される。従って各周波数の長パルス運転時にジャイロトン出力に対して、どの程度のパワーが絶縁セラミック部の冷却水に吸収されているかを測定することにより、モード変換器による電磁波の散逸の割合を測定することができる。以下のテーブルにその結果を示す。

いずれの周波数でも損失は低く、3周波数モード変換器として高パワー長パルスジャイロトンでの使用も可能である。しかしながら、低周波数での損失の増大は避けられておらず、今後の課題となっている。

	104GHz	137GHz	170GHz
絶縁セラミック部の損失/ジャイロトン出力	6.6%	4.1%	2.1%

テーブル 1：各周波数でのモード変換器による電磁波の損失

### 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)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① R. Ikeda, K.Kajiwara, Y.Oda, K.Takahashi, K.Sakamoto, “High-power and long-pulse operation of TE<sub>31,11</sub> mode gyrotron”, Fusion Engineering and Design, 査読有, 96-97, 2015, pp. 482-487, doi:10.1016/j.fusengdes.2015.05.016
- ② Y.Oda, K.Kajiwara, K.Takahashi, Y.Mithinaka, K.Sakamoto, “High efficiency coupling of radio frequency beams from the dual frequency gyrotron with a corrugated waveguide transmission system”, Review of Scientific instruments, 査読有, 84, 2013, pp. 01350(1-6), doi: 10.1063/1.4772572.

[学会発表] (計 8 件)

- ① K.Takahashi, Y.Oda, T.Kobayashi, R. Ikeda, G. Abe, M. Isozaki, H. Shidara, S. Moriyama, K.Kajiwara, K.Sakamoto, “Development of high power gyrotrons and Mm-wave launcher For ITER”, 40th

International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), 24th Aug., 2015, Hong Kong (China)

- ② K. Sakamoto, R. Ikeda, Y. Oda, T. Kobayashi, K. Kajiwara, H. Shidara, K. Takahashi, S. Moriyama, “Status of high power gyrotron development in JAEA”, 16th International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2015), 29th April, 2015, Beijing (China)
- ③ Y. Oda, K. Kajiwara, R. Ikeda, K. Ohshima, K. Hayashi, K. Takahashi, K. Sakamoto, D. Purohit, F. Gandini, T. Omori, C. Darbos, M. Henderson, “Prototype development of the ITER EC system with 170GHz gyrotron”, 25th IAEA Fusion Energy Conference, 15th October, 2014, Saint Petersburg (Russia)
- ④ R. Ikeda, K. Kajiwara, Y. Oda, K. Takahashi, K. Sakamoto, “Experiments of High Power Multi Frequency Gyrotron and Long Distance Transmission”, 28th Symposium of Fusion Technology, 1st October, 2014, San Sebastian (Spain)
- ⑤ K. Kajiwara, Y. Oda, R. Ikeda, K. Takahashi, K. Sakamoto, “Progress of Development for 170GHz Gyrotron and 5kHz Modulation Power Supply for ITER”, 20<sup>th</sup> Topical Conference on Radio Frequency Power in plasmas, 27th June, 2013, Sorrento (Italy)
- ⑥ K. Kajiwara, K. Sakamoto, Y. Oda, K. Hayashi, K. Takahashi, A. Kasugai, “Progress on the Development of High Power Long Pulse Gyrotron and Related Technologies”, 24th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2012), 8th October, 2012, San Diego (USA)
- ⑦ Y. Oda, K. Kajiwara, K. Takahashi, K. Sakamoto, “A Study of High Efficient Beam Coupling of High Power Gyrotron and Transmission Line”, The 37th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 25th September, 2012, Wollongong (Australia)
- ⑧ K. Sakamoto, K. Kajiwara, Y. Oda,

K. Hayashi, K. Takahashi, “Progress of high power long pulse gyrotron development in JAEA”, 39th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 6th July, 2012, Stockholm (Sweden)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

梶原 健 (KEN KAJIWARA)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・企画調整室・研究主幹

研究者番号：90450311

### (2) 研究分担者

小田 靖久 (ODA YASUIHSA)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・那珂核融合研究所・研究副主幹

研究者番号：60512209

### (3) 研究分担者

高橋 幸司 (KOJI TAKAHASHI)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・那珂核融合研究所・研究主幹

研究者番号：70354644

### (4) 研究分担者

坂本 慶司 (KEISHI SAKAMOTO)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・六ヶ所核融合研究所・部長

研究者番号：90343904