

## ミリ波ジャイロトロンの開発と応用 Development and Application of Millimeter Wave Gyrotron

假家強<sup>1</sup>、南龍太郎<sup>1</sup>、沼倉友晴<sup>1</sup>、岡田麻希<sup>1</sup>、本吉郁哉<sup>1</sup>、北條俊孝<sup>1</sup>、八房拓也<sup>1</sup>、  
出射浩<sup>2</sup>、恩地拓己<sup>2</sup>、花田和明<sup>2</sup>、下妻隆<sup>3</sup>、久保伸<sup>3</sup>、小田靖久<sup>4</sup>、池田亮介<sup>4</sup>、坂本慶司<sup>4</sup>、  
長崎百伸<sup>5</sup>、小野雅之<sup>6</sup>、小紫公也<sup>7</sup>、嶋村耕平<sup>8</sup>、満仲儀加<sup>9</sup>、江口濯<sup>9</sup>、今井剛<sup>1</sup>

KARIYA Tsuyoshi<sup>1</sup>, MINAMI Ryutaro<sup>1</sup>, Numakura Tomoharu<sup>1</sup>, OKADA Maki<sup>1</sup>,  
MOTOYOSHI Fumiya<sup>1</sup>, HOJO Toshitaka<sup>1</sup>, YABUSA Takuya<sup>1</sup>, IDEI Hiroshi<sup>2</sup>, ONCHI Takumi<sup>2</sup>,  
HANADA Kazuaki<sup>2</sup>, SHIMOZUMA Takashi<sup>3</sup>, KUBO Shin<sup>3</sup>, ODA Yasuhisa<sup>4</sup>, IKEDA Ryosuke<sup>4</sup>,  
SAKAMOTO Keishi<sup>4</sup>, NAGASAKI Kazunobu<sup>5</sup>, ONO Masayuki<sup>6</sup>, KOMURASAKI Kimiya<sup>7</sup>,  
SHIMAMURA Kohei<sup>8</sup>, MITSUNAKA Yoshika<sup>9</sup>, EGUCH Taku<sup>9</sup>, IMAI Tsuyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>筑波大プラ研、<sup>2</sup>九大 応力研、<sup>3</sup>核融合研、<sup>4</sup>量研機構、<sup>5</sup>京大 エネ研、<sup>6</sup>プリンストン大  
<sup>7</sup>東大 航空宇宙工学、<sup>8</sup>筑波大 構造エネルギー工学、<sup>9</sup>キャノン電子管デバイス  
<sup>1</sup>PRC Univ. of Tsukuba, <sup>2</sup>RIAM Kyushu Univ., <sup>3</sup>NIFS, <sup>4</sup>QST, <sup>5</sup>IAE Kyoto Univ.,  
<sup>6</sup>PPPL, <sup>7</sup>Tokyo Univ., <sup>8</sup>Univ. of Tsukuba, <sup>9</sup>CETD

ジャイロトロンは、数 10～数 100GHz の周波数において MW レベルの電磁波を発振可能な大型電子管である。ここ数十年の間、国際熱核融合炉 (ITET) 用ジャイロトロンを中心としたプラズマ核融合研究用電力源の開発を目指し、幾つかのブレークスルー技術を取入れることにより、ジャイロトロン性能は飛躍的に進歩してきた。それに伴い、電子サイクロトロン加熱/電流駆動 (ECH/ECCD)、電子バーンシュタイン波 (EBW) 加熱等の有用性が立証され、ジャイロトロンを用いた核融合研究が盛んに行われるようになった。

### 1. 筑波大学におけるジャイロトロン共同研究開発

筑波大学プラズマ研究センターでは、図 1 に示す様に、各大学/研究機関との共同研究として、14GHz～300GHz の広い範囲の周波数において、MW 出力のジャイロトロン開発を進めてきた [1]。図 1 において、黒棒は各周波数におけるパルス幅が数 ms での達成出力、斜線棒は 1 秒以上のパルス幅における達成出力、白棒は設計出力を示す。

これまでに、筑波大学の GAMMA10 装置用に 28GHz-1MW ジャイロトロンを開発し、最大出力 1.36MW、長パルス運転で 0.6MW-2 秒を達成した。次のステップとして、GAMMA10 のみならず、九州大学の QUEST 装置、プリンストン大学の NSTX-U、京都大学の Heliotron J 装置で必要と

される性能 (28GHz-2MW-3 秒、28GHz-0.4MW-CW、35GHz-1MW-3 秒) を 1 本のジャイロトロンで動作可能な 28/35GHz 2 周波ジャイロトロンの開発を進めている。これまでに 28.04GHz において 1.65MW、34.83GHz において 1.21MW の短パルス出力を達成した。図 2 に 28GHz における出力と効率のビーム電流依存性を示す。28GHz#1 ジャイロトロンでは 1MW で数秒の動作を目標としてサファイアのシングル窓を用いたが、本 2 周波数ジャイロトロンでは、0.4MW で連続 (CW) 動作を目標としておりサファイア製ダブルディスク窓を採用した。0.45MW-2s 出力時の窓温度の時間変化を赤外線 (IR) カメラで測定し、計算結果と比較を行うことにより、0.4MW-CW 動作が可能であることを確認した。また、コレクタの熱負荷を軽減するため電位降下型 (CPD) コレクタを採用しており、0.65MW の出力で総合効率 50% を達成している。今後 0.4MW-準 CW 動作の実証を行う予定である。

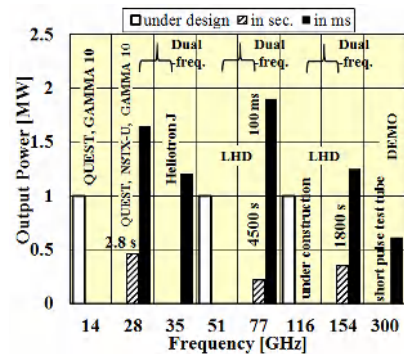


図 1 共同研究ジャイロトロンの開発

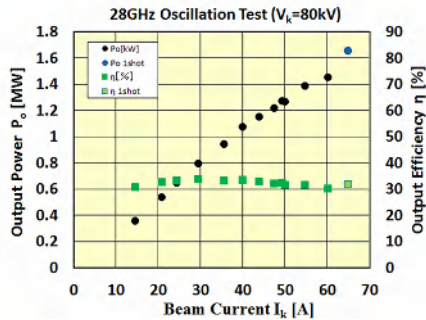


図2 28GHz 出力と効率のビーム電流依存性

NIFS とのジャイロトロン開発共同研究に基づき、77GHz と 154GHz ジャイロトロンの開発を行ってきた。77GHz ジャイロトロンでは、最大出力 1.9MW や 0.22MW-75 分の準定常運転、154GHz ジャイロトロンでは、最大出力 1.25MW や 0.35MW-30 分を達成している。

また、LHD におけるプラズマ実験領域拡大のため、154GHz と 116GHz の両方の周波数で動作可能な 2 周波数ジャイロトロンの設計を完了し、現在製造に向けての部品製作を数年かけて行っているところである。加えて、LHD 重水素実験におけるプラズマのスタートアップ用として、77GHz と 51GHz の 2 周波数ジャイロトロンの設計検討も行っている。

QST との共同研究において、核融合発電に向けた原型炉である DEMO (DEMONstration power plant) 用 300GHz ジャイロトロン試験管の性能評価を行った。モード変換器を内蔵せず、コレクタが導波管をかね、円形導波管モード  $TE_{32,18}$  を出力する旧型ジャイロトロンであるが、0.62MW の出力を得た。モード競合が厳しい、300GHz 帯における 500kW を超えるミリ秒オーダーの発振が、単純な円筒型共振器で成功したことは、DEMO 用 MW 級、CW ジャイロトロン開発に向けての大きなステップである。更に、226~254GHz の範囲で 300kW 程度の 7 つモードでの発振モードを確認し、サブミリ波領域での周波数可変ジャイロトロンの基礎となる多周波数の発振を示した。

GAMMA10/PDX、QUEST への適用を目指し、14GHz-1MW ジャイロトロンの開発を進めている。14GHz は波長が約 21mm と長いため、MW レベルのジャイロトロンはこれまでに開発されていない。表 1 に示す様に、低周波数においては、高周波数に比べ RF ビームの発散が大きいこと、磁場強度が弱いことによる開発課題がある。ジャイロトロン管内 RF ビームの光路長の最小化、導波管カップリング位置の内蔵化等の

新規設計を行い、現状 94% の RF 伝送効率を得ている。設計と並行して、部品製作を開始した。

表 1. 低/高周波数における設計課題

モード変換器内蔵/CPD型/MWジャイロトロン				
	低周波数		高周波数	
電子銃	磁場強度が低く ラマ半径大	アノード電流大 AK間距離を縮す必要有 →α上げ難い		
空間共振器	$X_{\text{mode}}$ の輻散性大 電子ビーム径/空間径/ SCMポア径の制限	発振モード選択の制限 多周波数発振難しい	熱負荷大	高次発振モードの選択 →モード競合大 発振効率低下
放射器/ ミラー系	放射器径大 波長が長く RFビーム発散大	第1ミラー設置位置の制限 RFビームとの干渉 管内RF伝送損失大 →ミラーの大径化/ミラー 間光路長の縮小要	高磁場SCMポア径制限	300GHz/MW/CW用内蔵放射 器は困難 管内伝送損失RFによるDC ブレイク等の不要加熱、 ガス放出
出力窓	波長が長い	誘電体の厚み大/径大(タイ ヤモンド高価/製造不可?) 多周波数動作の選択枝小		周波数帯域狭い 誘電体損失大 →タイヤモンド窓必須

## 2. ジャイロトロンの核融合研究への応用

28GHz-1MW ジャイロトロンは、共同研究として、九州大学の QUEST に適用され、80kA を超える世界最大のプラズマ電流立上げや [2]、8.2GHz のカットオフ密度より高い  $1 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$  を超えるオーバードレンスプラズマの生成等の成果を得た。

2014 年度までに開発した 3 機の 77GHz ジャイロトロンと 2 機の 154GHz ジャイロトロンは、LHD 実験に供されている。全入力電力は 5.4MW に達し、高密度での高電子温度達成 ( $T_e=10\text{keV}$ ,  $2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ )、39 分の定常プラズマ保持 ( $T_e=2.5\text{keV}$ ,  $1.1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ )、電子系内部輸送障壁実験等に大きく貢献している [3]。

28/35GHz 2 周波数ジャイロトロンを用いた、GAMMA10/PDX におけるプラズマ実験も開始したところである。

## 3. ジャイロトロンの他分野研究への応用

ジャイロトロンの開発により、無線電力伝送やレーダー等の幾つかの分野での研究開発の進展が期待される。大電力電磁波を空間伝送し、ロケットの推進力を得るマイクロ波ロケットや、宇宙太陽光発電/電気飛行機への電力供給などに利用できる電磁波からの発電技術開発等が一例として挙げられる。

本研究は、NIFS 双方向型共同研究(センター連携研究 NIFS16KUGM106, NIFS16KUGM111)、NIFS-筑波大間ジャイロトロン開発共同研究(COD30735)、科研費補助金(26249141, 15H05770)による。

- [1] T. Kariya, et al., in Proceedings of the 27th IAEA Fusion Energy Conf., (2018).
- [2] H. Idei, et al., in Proceedings of the 27th IAEA Fusion Energy Conf., (2018).
- [3] H. Takahashi, et al., Phys. Plasmas 21 (2014) 061506.