

核融合炉へ向けた大電力ジャイロトロンの開発研究 Development of High Power Gyrotron for Nuclear Fusion Reactor

假家強¹、今井剛¹、南龍太郎¹、津村康平¹、江橋優斗¹、岡田麻希¹、中嶋洋輔¹、出射浩²、花田和明²、下妻隆³、久保伸³、小田靖久⁴、池田亮介⁴、坂本慶司⁴、小野雅之⁵
KARIYA Tsuyoshi¹, IMAI Tsuyoshi¹, MINAMI Ryutaro¹, TSUMURA Kohei¹, EBASHI Yuto¹,
OKADA Maki¹, NAKASHIMA Yosuke¹, IDEI Hiroshi², HANADA Kazuaki²,
SHIMOZUMA Takashi³, KUBO Shin³, ODA Yasuhisa⁴, IKEDA Ryosuke⁴, SAKAMOTO Keishi⁴,
ONO Masayuki⁵

¹筑波大プラ研(PCR)、²九大 応力研、³核融合研、⁴量研機構、⁵プリンストン大
¹PCR Univ. of Tsukuba, ²AFRC, RIAM Kyushu Univ., NIFS, ⁴QST, ⁵PPPL

筑波大学 PRC では、核融合原型炉に向けた核融合プラズマ加熱研究のための多様な大電力ジャイロトロンの開発を進めている。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で、ECH、ECCD、EBW 加熱等を行う上で重要な電力源である。

これまでに、28GHz-1MW ジャイロトロンを開発し、最大出力 1.2MW、長パルス運転で 0.6MW-2秒を達成した。本ジャイロトロンは、共同研究として、九州大学の QUEST に適用され、70kA のプラズマ電流立上げや、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ンスプラズマの生成等の成果を得た[1]。NIFS とのジャイロトロン共同研究において、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(electron ITB)実験等に大きく貢献している[2]。

1. 28/35GHz 2 周波数ジャイロトロンの開発

筑波大学の GAMMA10/PDX におけるダイバータ模擬実験において、より高い熱流束を生成するためにジャイロトロンの開発を進めている。このジャイロトロンは、共同研究を有効に進めるため、QUEST、PPPL の NSTX-U、京都大学の Heliotron J 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 2 周波ジャイロトロンである。28GHz 帯の 2 号管となる 2 周波ジャイロトロンは、2016 年 6 月に製作を完了し、試験を開始した。

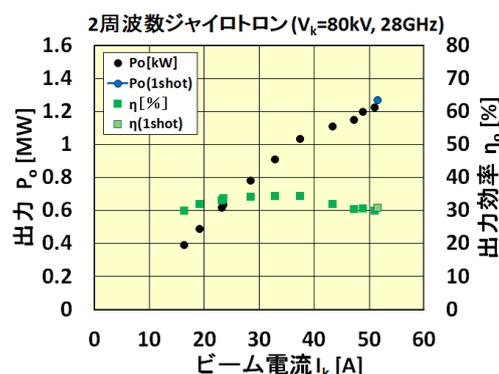


図 1 28GHz 出力と効率のビーム電流依存性

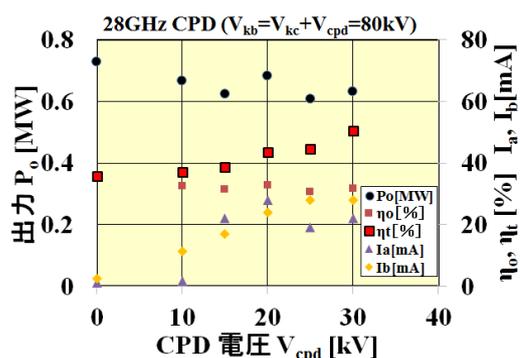


図 2 28GHz 出力 (P_o)、出力効率 (η_o)、総合効率 (η_t)、アノード電流 (I_a)、ボディ電流 (I_b) のビーム電流依存性

図 1 に出力窓に取付けた短パルス用ダミーロードにより測定した、ビーム電圧 $V_k=80\text{kV}$ における RF 出力と効率のビーム電流依存性を示す。周波数 28.045GHz において 1.27MW のガウス状ビーム出力が得られた。又、34.83GHz において、0.48MW のガウス状ビーム出力を確認した。更に 28GHz 発振における、RF 出力の空洞共振器磁場強度に対する依存性、RF 出力のアノード電圧に対する依存性を取得し、大きな問題が無いこと

を確認した。本2周波数ジャイロトロンは、発振相互作用を終えた後の電子ビームのエネルギーを回収する電位降下型コレクタ(CPD)を採用している。図2にCPD電圧特性を示す。CPD電圧 V_{cpd} とともに発振出力は減少しているが、エネルギー回収により $V_{cpd}=30kV$ において、総合効率 $\eta_t=50\%$ が得られた。

現在、ダブルディスク窓の性能評価(出力、冷却媒体流速に対する窓温度上昇)を行うべく、長パルス化のためのエージングを進めている。

2. 154/116GHz 2周波数ジャイロトロンの設計

NIFSとの共同研究において、LHDにおけるプラズマ実験領域拡大のため、154GHzと116GHzの両方で動作可能な2周波数ジャイロトロンの設計を開始した。154GHzと115.5GHz近傍の両周波数に対し、同一電子銃で良い電子ビームパラメータが得られ、同一空洞共振器で発振可能で、同一放射器で同じ放射角を持ち、同一出力窓でマッチングが取れ、同一コレクタで低熱負荷運転が可能な空洞発振モードの組み合わせを検討し、154GHzで $TE_{28,9}$ モード、116GHzで $TE_{21,7}$ モードを採択した。空洞共振器のQ値を下げ、ビームで電流10A程度の低電流では発振しないが、50A以上の大電流での発振効率を上げ、両周波数において2MW以上の発振が可能な設計とした。

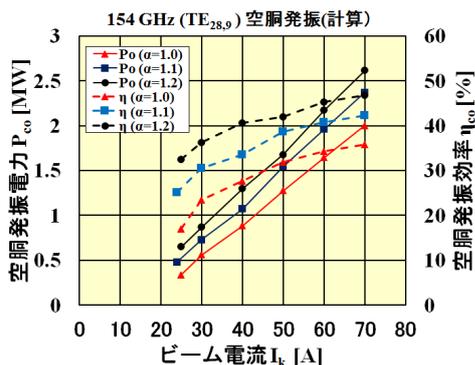


図3 154GHz 空洞発振特性 ($V_k=80kV$)

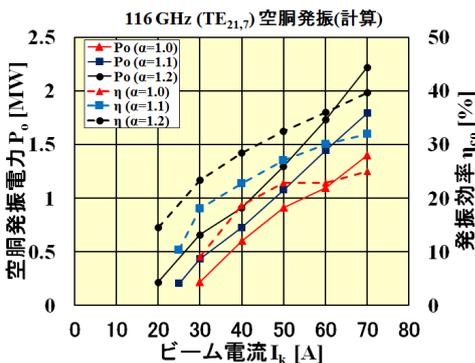


図4 116GHz 空洞発振特性 ($V_k=80kV$)

図3に154GHz、図4に116GHzにおける、発振電力と発振効率のビーム電流依存性の計算結果を示す。電子ビームのピッチファクタ $\alpha=1$ 、ビーム電流 $I_k=70A$ で、1.5MW以上の発振が期待される。その他、電子銃、放射器、コレクタの設計を完了している。

3. 300GHz 帯ジャイロトロンの開発

QSTとの共同研究として、Demo炉用300GHz帯ジャイロトロンの開発を進めている。2015年の動作試験において、299.84GHzで522kW、295.65GHzで542kW、301.8GHzで528kWが得られた。300GHz帯における500kWを超えるmsオーダーの発振は、世界で最初の成果である。

2016年には、240GHz近傍の発振試験を実施し、磁場調整範囲において300kW程度の7つの発振モードを確認した。空洞磁場強度、電子ビーム入射位置、RF出力の電力ピーク半径/回転方向より、発振周波数は226~254GHzであると推定でき、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確認した。図5は、各周波数で得られた出力である。

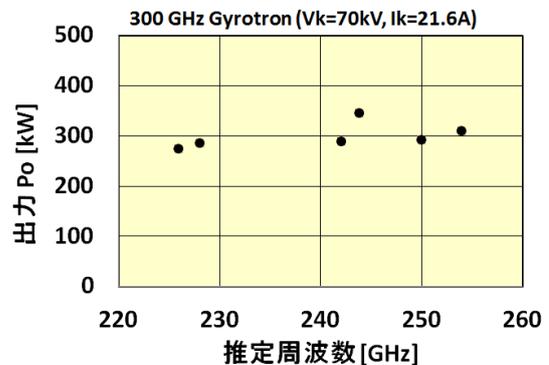


図5 300GHz ジャイロトロンにおける220~260GHz帯発振試験(推定周波数に対する出力)

本研究の遂行にあたり御助力いただいた、東芝電子管デバイス株式会社、株式会社IDX、QST、NIFSの関係各位に感謝いたします。

本研究は、NIFS双方向型共同研究(NIFS13KUGM080, NIFS16KUGM106:筑波大-九大間センター連携研究、及びNIFS14KUGM095, NIFS14KUGM086)、NIFS-筑波大間ジャイロトロン開発共同研究(COD27077)、科研費補助金(26249141, 15H05770, 25249135)による。

- [1] H. Idei, et al., in Proceedings of the 26th IAEA Fusion Energy Conf., (2016).
 [2] H. Takahashi, et al., Phys. Plasmas 21 (2014) 061506.