

**双方向型共同研究のセンター間連携研究
「電子バーンシュタイン波加熱に向けたジャイロトロン開発」
“Development of Gyrotron for EBW Heating” as the Inter-Centre
Collaborative Research under the Bi-directional Collaboration Research**

今井剛、假家強、南龍太郎、沼倉友晴、出射浩¹⁾、関子秀樹¹⁾、
長崎百伸²⁾、佐野史道²⁾、金子修³⁾、日野友明⁴⁾
Tsuyoshi IMAI, Tsuyoshi KARIYA, Ryutaro MINAMI, et al.

筑波大プラ研、¹⁾九大応力研、²⁾京大エネルギー理工研、³⁾NIFS、⁴⁾北大
PRC Univ. of Tsukuba. ¹⁾RIAM Kyushu Univ.,
²⁾IAE Kyoto Univ., ³⁾NIFS, ⁴⁾Hokkaido Univ.

電子サイクロトロン加熱は核融合炉の加熱装置に極めて適した手法で、プラズマの加熱電流駆動のみならず、プラズマの制御、立ち上げ等にも効果的に適用できることから魅力的である。工学的にも導波管伝送とビーム伝送両方を組み合わせたハイブリッド伝送で、中性子シールドと制御性の両立が可能である。また、最近では、LHDで実現した超高密度（SDC）プラズマのような高密度プラズマに対して、コアプラズマの内部制御可能な唯一のツールとして期待されている。しかし、これに必要なパワー源ジャイロトロンの開発が大きな課題である。一方、双方向型共同研究では、H23年度より、新たな取り組みとしてセンターの特長を活かしたセンター間連携により、核融合炉に向けた重要課題に取り組むべく議論を重ね、1) ダイバータ熱粒子制御、及び、2) 電子サイクロトロン波による高密度加熱の2つのテーマを双方向型共同研究のセンター間連携研究テーマとして取り上げることとなった。本招待講演はこの2つ目のテーマで、中心となる「電子バーンシュタイン波(EBW)加熱」手法開発研究の推進の心臓部、ミリ波のパワー源ジャイロトロンの開発研究の進捗についての報告である。本共同研究は、3つのセンターとNIFSが特長を活かし協力し、ジャイロトロン開発を筑波大、QUESTでのEBW加熱の基礎実験を九大、Heliotron JでのEBW加熱実験を京大で行うことを目指している。第一ステップとしては、28GHzのジャイロトロン開発を筑波大で推進し、さらに、その成果を九大のEBW実験に適用し、明確なEBW加熱実験の検証をすることである。また、ヘリオトロ

ンJのEBW加熱実験で必要となる35GHzジャイロトロンの開発を推進する。さらに、第2ステップとして、共同研究に向けた28/35GHzの2周波数の新ジャイロトロンを開発し、GAMMA10、QUEST及びヘリオトロンJで装置に応じた仕様で発振させ、EBW研究等のセンター間連携研究を推進することである。

本報告では、これらの研究推進の中核となる28/35GHzの2周波数ジャイロトロン開発に向けた研究の進捗を述べる。

1. GAMMA10用28GHzジャイロトロン開発
筑波大学ではGAMMA 10用の200/500 kW-28GHzジャイロトロン開発の背景と最近のJAEAのITER用ジャイロトロンの開発進展をベースに、LHD用77GHz-1 MW超のジャイロトロン開発を、NIFSとの共同開発で、JAEAの協力も得ながら平成18年から実施し、秒レベルで世界最高性能のジャイロトロン開発に成功、また、154GHzへの展開も開始、さらに、GAMMA 10用28GHz-1 MW超ジャイロトロン開発を行い、1 MW以上の発振出力を得ている[1]。これらの成果を、他装置に活かすために、28GHz-1 MWジャイロトロンを九大QUESTのECH/ECCD用に使用すべく開発を進めている。図1にGAMMA 10用28GHzジャイロトロンの図を示す。また、図2に短パルスでのビーム電流と出力パワー特性結果(●)を示す。80kV、40Aで1MW以上の出力が得られている。ピッチ



図1 GAMMA 10用1 MW 28 GHz管

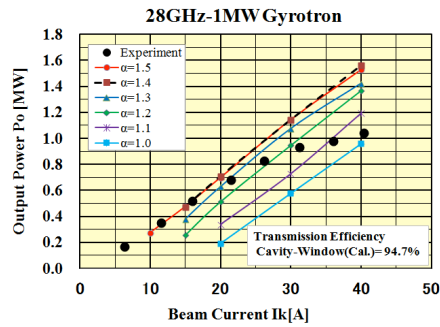


図2 GAMMA10 用 1MW ジャイロトロンのビーム出力特性。●が実験結果、他は計算。

数 (α : 電子ビームの磁場に垂直と平行速度比) ごとの計算も示している。このジャイロトロンでのQUEST電源容量 (70kV、25A) での試験を実施し、400kW以上の出力が得られることを確認した。また、今後のCW運転に向けた出力窓 (サファイア製) の性能を評価するために、450kW、2秒での発振試験を実施し、温度上昇が9℃程度であることを明らかにし、その結果10秒レベルでの運転では、問題なく使用できるとともに、ダイヤモンドを使用しないで、CW運転が可能との見通しがついた。

2. QUESTのEBW実験に向けたジャイロトロン開発

QUEST用では、連続 (CW) 運転が期待されていることから、低周波数ジャイロトロンのネックである回折損をできる限り抑制することが最重要課題である。図3に現状のモード変換器とCWに向けた高効率の新モード変換器の第1ミラーでのパワー分布の比較を示す。新変換器ではサイドローブを最小限に抑制し、共振器での出力に対して、出力窓までの伝送効率を94.7から98.5%のほぼ極限まで向上させた。170GHzなどに比較して波長が長い28GHzで、このような低損失設計を実現できたことから、CW運転が大いに期待できる。

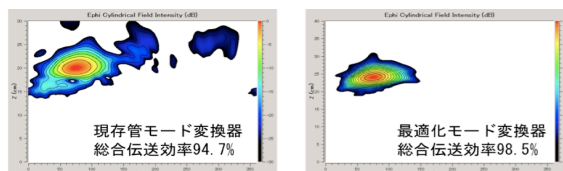


図3 既存管のモード変換器と最適化したモード変換器の設計性能比較

また、1. で少し述べたが、既存のジャイロトロンを用いた窓試験から、サファイア窓の28GHzでの誘電損失を大電力で測定し、その値を用いた窓温度上昇のシミュレーション計算から、サファイアのダブルディスク窓でフロリナート表面冷却により、450 kWのCW運転が問

題なく可能との結果を得た。また、既存管での電子銃を改良し、QUESTのECH電源で最大限の性能が発揮できるようにした。

3. Heliotron JのEBW加熱に向けたジャイロトロン開発

Heliotron Jでは、低磁場で2.45GHzを用いたEBWの基礎実験で、遮断密度越での加熱実験に成功し、また、標準磁場での本格的なEBW実験に向けた準備を進めている。これらの成果から35GHz帯がEBW実験の周波数として選択された。この周波数帯での高パワージャイロトロンを双方向型共同研究で開発することを目指し、QUEST用に開発している28GHzジャイロトロンを35GHz帯でも発振できる2周波数ジャイロトロン開発を開始した。

設計では、2周波数で空洞共振器、モード変換器、伝送ミラー、出力窓を共用できるよう設計する必要がある。このため、空洞のモードを28GHzではTE8,5、35GHz帯ではTE10,6が発振できる設計を進めている。このモードであれば、モード変換器についても、35GHzでも適切に伝送可能である。窓については、厚みを2倍にすることにより、35GHz帯で反射を抑制する。この2周波数ジャイロトロン発振の原理検証試験を現存管で行う準備も進めている。

4. 今後の計画と展望

現在、QUESTでのGAMMA10用28GHzジャイロトロンを用いたECH/ECCD実験に向けて機器の準備を進めており[2]、伝送系、トーラス窓の設置も完了した。改造ジャイロトロンは11月末に筑波大へ搬入され、試験調整後九大に移送し、来年2-3月には九大での発振テスト、その後QUESTでの入射実験、さらには、8GHz帯クライストロンによるEBW加熱・電流駆動と組み合わせた実験へと展開する予定である。この成果を踏まえて、今後のセンター関連機に向けたジャイロトロン開発をさらに推進し、順調に進めば新ジャイロトロンの製作も共同開発して行く計画である。

本研究はNIFS共同研究(NIFS11KUGM050, NIFS11KUGM053, NIFS11KUTR069, NIFS11 KUTR076, NIFS10KUHL030)によるものである。

- [1] R. Minami et. al., IAEA FEC2012, FTP/P1-20.
- [2] H. Idei et. al., IAEA FEC2012, EX/P6-17.