

# ECRH 用 28GHz-1MW ジャイロトロン長のパルス化及び出力窓の性能評価

中林 英隆 江口 濯  
筑波大学プラズマ研究センター

## 1. 要旨

筑波大学プラズマ研究センターのタンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置 GAMMA 10 では、電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) により閉じ込め電位の生成と電子加熱を行っている。過去の実験により、マイクロ波源であるジャイロトロン出力増大に伴い閉じ込め電位の上昇やエンド部での熱流束の増加が確認されている。このため、高性能なジャイロトロン開発はプラズマ実験において非常に重要な役割を持っており、プラズマパラメータの向上やダイバータ模擬実験における高熱流束生成のために GAMMA 10 用 28GHz-1MW ジャイロトロンを開発し、現在試験を行っている。

また、28GHz ジャイロトロンは他のプラズマ研究機関の ECH システムでも有用であり、九州大学 QUEST 装置では 0.4MW-CW、プリンストン大学 NSTX 装置では 1~2MW-数秒のジャイロトロンがそれぞれ求められている。

ここでは、GAMMA 10 用 1MW ジャイロトロン長のパルス化の現状と、他の研究機関での使用に向けた出力窓の性能評価の結果について紹介する。

## 2. 28GHz-1MW ジャイロトロン長のパルス試験

まず、長パルス試験に先駆けてジャイロトロン短パルス試験を行った。これまでに 2009 年度には超伝導マグネット (SCM) として SCM#3、2010 年度には SCM#1 を用いて短パルス試験を行った。2009 年度には設計目標の 1MW を達成した。しかし、2010 年度に行った短パルス試験では、SCM の磁場分布の微妙な違いによる電子銃部でのラミネーションの悪化により  $I_c > 20A$  の領域で出力の低下が起こり、最大出力は 0.69MW に留まった。今回 SCM#3 と同形状の磁場分布を持った SCM を用いて試験を行い、最大出力 0.91MW の発振を確認した (図 1)。

続いてジャイロトロン長のパルス試験を行った。図 2 にジャイロトロン出力のパルス幅依存性を示す。2010 年度では出力 0.4MW においてパルス幅 1 秒、今回行った長パルス試験で出力 0.45MW・パルス幅 2 秒の安定な長パルス化に成功した。出力、パルス幅の制限は試験スケジュールや電源/ダミーロードの制限によるものである、この動作範囲内では耐電圧等の大きな問題は見られなかった。

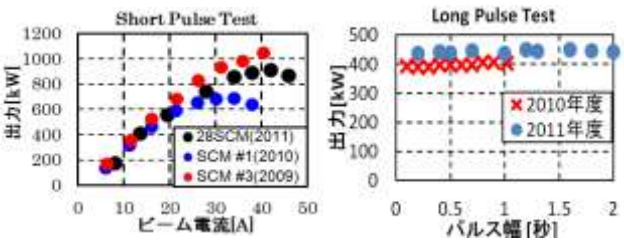


図 1. 出力のビーム電流依存性 図 2. 到達パルス幅 vs. 出力

## 3. 出力窓性能評価

GAMMA 10 用 1MW ジャイロトロンには、出力窓にサ

ファイア製シングルディスク窓を用いている。ジャイロトロン発振時の出力窓の温度上昇を IR カメラを用いて測定した。その結果、出力 0.45MW・パルス幅 2s の発振に対して約 9°C の温度上昇を観測した。この測定結果を新たに開発した計算コードを用いて解析した結果、28GHz-約 20°C 下での  $\tan \delta$  が  $2.1 \times 10^{-5}$  であることが分かった。

この結果に  $\tan \delta$  の温度依存性を考慮しサファイア製シングルディスク窓の温度変化を計算した (図 3)。出力 2MW ではパルス幅 5 秒に対し出力窓最高温度は約 140°C に収まっているおり、サファイア製シングルディスク窓を用いて 2MW-数秒の動作が可能であることが分かった。一方出力 0.4MW ではパルス幅の増加に伴い窓温度は飽和せず上昇し続け、サファイア製シングルディスク窓では 0.4MW-CW の動作は不可能であることが分かった。

次に、サファイア製ダブルディスク窓での 0.4MW-CW 動作時の温度変化を計算した (図 4)。ダブルディスク窓は冷却効率を上げるために、2 枚の平行に配置したサファイア板間に RF 吸収の少ない冷却材を流す構造であり、冷却材の沸点 (約 100°C) が動作限界となる。サファイア-冷却材間の熱伝達係数  $h$  が  $0.03 [W/cm^2K]$  の場合出力窓温度は約 90°C で飽和しており、冷却材の流速を上げることで熱伝達係数を  $0.03 [W/cm^2K]$  以上にできれば 0.4MW-CW の動作が可能であることが分かった。

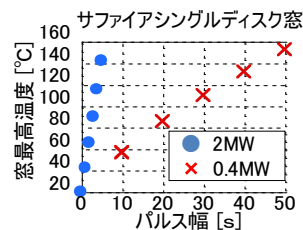


図 3. シングルディスク窓温度変化

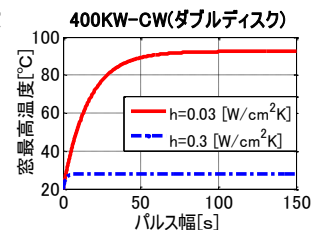


図 4. ダブルディスク窓温度変化 (0.4MW-CW)

## 4. まとめと今後の課題

28GHz ジャイロトロンにおいて、発振効率にとって電子ビームのラミネーションが大きく影響することが分かった。長パルス試験においては出力 0.45MW でパルス幅 2 秒の長パルス動作を達成した。

また、ジャイロトロン発振時の出力窓温度上昇を IR カメラを用いて測定することで、0.45MW・2s の発振に対して約 9°C の出力窓温度上昇を観測できた。この測定結果を解析してシミュレーションを行うことで、サファイア製シングルディスク窓を用いて 2MW-数秒、サファイア製ダブルディスク窓を用いて 0.4MW-CW ( $h > 0.03 [W/cm^2K]$ ) の動作が可能であることが分かった。

ジャイロトロン出力やパルス幅は電源の容量やダミーロードの耐熱性による制限を受けるため、現在使用しているシステムではこれ以上高出力、長パルスでの試験は行えない。今後、これらを強化していくことでさらなる高出力・長パルスでの試験を行っていく予定である。