

核融合炉用大電力ジャイロトロンの開発と今後の展開 Development of High Power Gyrotrons for Fusion Reactors and Future Evolution

高橋 幸司
Koji Takahashi

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
National Institutes for Quantum and Technological Science and Technology

はじめに

大電力高周波による核融合プラズマ加熱方式として、最も有望視されている 100GHz 帯高周波（ミリ波）による電子サイクロトロン波加熱（ECH）システムは、ミリ波発生源であるジャイロトロン、ジャイロトロンからの高出力ビームをプラズマ中に入射するための伝送系および入射系から構成される。ジャイロトロンは、サイクロトロンメーザー原理を用いて高周波数マイクロ波を発振する真空管である（図 1）。そのジャイロトロン開発は、1960 年年代にロシアで始まり[1, 2]、1980 年代には米国の Varian 社（現 CPI 社）が、60GHz/200kW/CW のジャイロトロン開発に成功している[3]。量子科学技術研究開発機構（QST）では、旧日本原子力研究所時代から、国際熱核融合実験炉（ITER）や JT-60U/SA プラズマ実験装置用の大電力ジャイロトロン開発を進めてきた。1990 年代の ITER 工学設計活動期には、100GHz 帯ジャイロトロンを開発を精力的に進め、エネルギー回収技術による総合効率 50%の達成[4]、高次体積モード（TE_{31,8}）発振による 170GHz/1MW 発振の成功[5]、ジャイロトロンに人工ダイヤモンド窓を搭載し[6]、1MW 以上の大電力を取り出すことが可能となるなど、様々な技術ブレークスルーを実現した。その結果、ITER ジャイロトロンとして、世界で初めて 1MW/800 秒の長パルス運転に成功した[7, 8]。

ITER, JT60U/SA 用ジャイロトロン開発

ITER および JT-60U/SA 用ジャイロトロン共に 1MW 出力という性能仕様であり、空胴における熱負荷低減の観点から必然的に高次モード発振設計が必要であった。当初、ITER 用は TE_{31,8} モードで、JT-60SA 用は TE_{22,6} モードで 1MW 出力に成功した。その他の技術として、Built-in モードコンバーターの高効率化による散乱 RF 低減、回転電子ビームのピッチファクタの向上による発振効率の向上等により上述の長パルス運転に成功した。さらに、



図 1 ITER ジャイロトロン

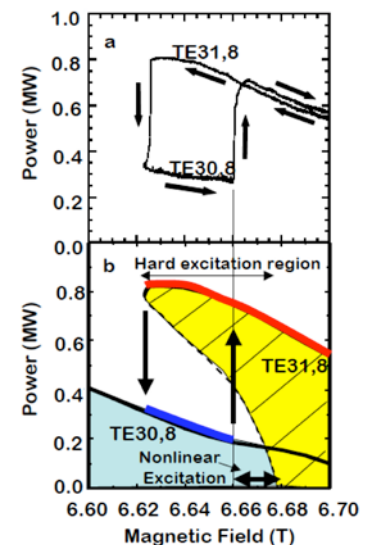


図 2 ジャイロトロン出力の空胴磁場依存性

回転電子ビームのサイクロトロン周波数とピッチファクタを発振中に制御することにより、高効率発振が可能な難発振開始領域（Hard-excitation region）への移行に成功し、電力総合効率 55%で 1MW 定常発振を得た[7]。図 2(a)は出力の空胴磁場依存性を示す実験値、(b)は対応する計算値である。TE_{31,8} モードの成長領域（斜線部）で発振させながら磁場を下げると、近傍モード（TE_{30,8}）との競合もなく難発振領域に入り、その結果出力も向上する。このように、高出力/高効率発振を得るにはサイクロトロン周波数のダイナミック制御が必須となる。

ITER ジャイロトロン実機設計では、空胴の熱負荷の更なる低減化を図るため、更にモード数を上げて TE_{31,11} モードとした。それにより、競合モード（Ctr-TE_{28,12}, TE_{30,11}, TE_{29,12}, etc...）が発振しやすくなったが、空胴に打ち込む電子ビーム径やピッチファクタを制御することで TE_{31,11} モードのみを安定に発振させることに成功した。2017 年 2 月までに ITER ジャイロトロン実機の 2 基が完成し、どちらも

170GHz で設計とほぼ同じビーム出力分布(図 3)が得られることを確認した。また、1MW 出力性能も実証した(図 4)。2 基中 1 基については、ITER 機構からの要求条件、

- 1MW/300 秒/効率 50%
- 5kHz 変調/60 秒
- 1MW/≥60 秒ショットの繰り返し運転成功率 95%以上

を満足する性能を実証し、ITER 機構への輸送前の受入れ試験に合格している。

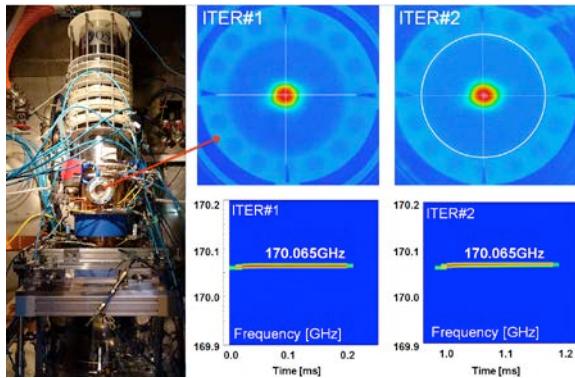


図 3 出力窓でのビーム強度分布と発振周波数

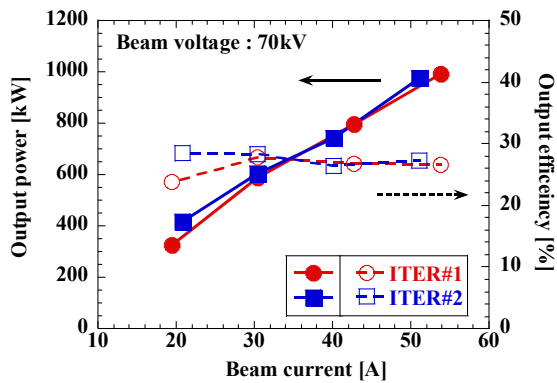


図 4 発振パワーと効率のビーム電流依存性

原型炉用ジャイロトロン開発の展開

どのようなアプローチで核融合エネルギー出力を実証するかにより原型炉設計は異なるが、プラズマ中心磁場強度は、概ね 5T 後半～10T の範囲にある。それに対応するジャイロトロンの発振周波数は、180GHz～300GHz となる。240GHz 程度までの 1MW 出力管であれば、後述するが ITER ジャイロトロン開発の延長線上での開発が可能である。さらに高周波数の 300GHz 帯ジャイロトロン開発については、筑波大学と共同で開発を進めているが、これまでに従来の円筒形空洞を有するジャイロトロンでパルス幅は数ミリ秒ではあるものの、300GHz で 520kW (TE_{32,18})、302GHz で 530kW (TE_{30,19})を得ており、従来の開発路線も可能性がある。一方、高

次モード発振では、固有値に近いモードが多く競合が起きやすく、モード競合対策として、

- 同軸空洞の採用や外部から主要モードを打ち込んでモードロックする
- ビーム電圧の立ち上げを制御して近接モード発振を回避する

などの技術開発を同時に進めていくことが重要となる。

ITER や JT-60SA 用 ECH システムの入射機器(ランチャー)は、前方に設置する金属製ミラーを回転させることによって、ミリ波ビームの入射方向を変えられることができ、プラズマ中での吸収位置を制御する。しかしながら、原型炉では ITER とは桁違いの中性子照射を受けることから、ミラーの回転機構は適用できない可能性が高い。従って、ミリ波ビームの吸収を変えるためには、周波数を変えて入射する必要がある。それに対応するためには複数周波数発振ができ、かつ同一方向/角度にビームを放射するジャイロトロン開発が不可欠である。QST が開発した ITER ジャイロトロンは、4 周波数で同一方向/角度に放射可能で、いずれの周波数でも 1MW 出力を実証しているが(図 5)、周波数間隔を狭める場合には、モード競合回避技術と共どの周波数でも出力ビームが透過可能なブリュースター窓の開発も重要である。

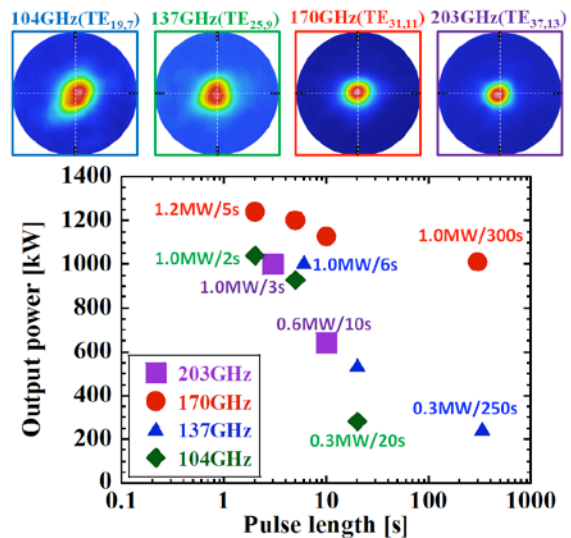


図5 ITERジャイロトロンによる4周波数発振性能

[1] D. V. Kisel', et al., Radio Engineering and Electronic Physics, Vol. 19, Apr. 1974
 [2] N. I. Zaytsev, et al., Vol. 19, May 1974
 [3] H. Jory, et al., Int'l Elec. Dev. Meeting 1983
 [4] K. Sakamoto, et al., Phys. Rev. Lett. **73**, 3532 (1994).
 [5] K. Sakamoto, et al., J.Phys. Socil Jpn. **65**, 1888 (1999).
 [6] K. Sakamoto, Rev.Sci.Instrum. **70**, 208 (1999).
 [7] K. Sakamoto, et al., Nat. Phys. **3**, 6, 411 (2007).
 [8] A. Kasugai, et al., Nucl. Fusion **48**, 054009 (2008).