

小特集

高出力ジャイロデバイスの最近の展開

5. 高出力ジャイロトロンの高効率動作

坂 本 慶 司

(日本原子力研究所)

(1996年12月10日受理)

High Efficiency Operation of High Power Gyrotron

SAKAMOTO Keishi

Naka Fusion Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaraki 311-01, Japan

(Received 10 December 1996)

Abstract

Studies of the high efficiency operation of the high power, 100GHz band gyrotron are surveyed. In recent R&Ds of the gyrotron, high power and high efficiency oscillations were realized in very high order oscillation modes. And a significant efficiency enhancement, *i.e.*, greater than 50%, was attained with the introduction of a depressed collector. These results provide a prospect for the realization of a high power ECH/ECCD system for a fusion reactor.

Keywords:

high efficiency oscillation, high order oscillation mode, depressed collector, ECH/ECCD system

5.1 はじめに

ジャイロトロンは、大電力、長パルスのミリ波源として現在のところ最も成功したデバイスであり、これまでの主要なプラズマ装置の電子サイクロトロン共鳴による加熱／電流駆動 (ECH/ECCD) の実験には、周知のように主にジャイロトロンが用いられてきた。国際熱核融合炉 (ITER) でも ITER 工学 R&D の 1 項目として、ECH/ECCD 用 170GHz/1MW/ 長パルス (目標連続出力) のジャイロトロンが開発が進行中であり[1]、現在、日本およびロシアを中心にその開発にあたっている。ITER のように、電流駆動のために 50MW もの入射電力が要求されるシステムでは、建設コスト、ランニングコストを下げるためにジャイロトロン効率を上げることが非常に重要なテーマとなる。ジャイロトロン自身の効率を決める要素として、発振効率、モード変換器効率 (最近の大電力ジャイロトロンでは発振モードをジャイロトロン内部で電磁ビームモードに変換して出力する方

式が主流である[2]) がある。発振効率は、これまでのジャイロトロンでは大体30%~40%であるが、大電力、長パルス化のために発振モードとして極めて高次のものを選択する必要がある、これに伴う電子ビームと RF の結合係数の低下、発振時の近傍モード間の競合等の問題を解決する必要がある。また、モード変換器効率としては、導波管型放射器を用い、95%程度が可能である。また、これらとは独立に、発振相互作用後の電子ビームのエネルギーを静電的に回収し、ジャイロトロン全体の効率を上げる方法 (電圧降下型コレクタ方式、あるいは電子ビームエネルギー回収方式) があり、1994年に日本原子力研究所において大電力ジャイロトロンにおいて初めて実証されて以来、多くの研究機関でその開発研究が進行中である。以下、これらの 100GHz 帯大電力ジャイロトロンの高効率化研究の現状について、原研において、東芝との共同研究のもとに行われた研究開発の成果を交えながら記述する。

5.2 100GHz 帯ジャイロトロンの高効率発振

原研で開発中のジャイロトロン概念図を Fig. 1 に示す。電子銃で円筒型の回転電子ビームを作り磁場でミラー圧縮した後、ジャイロトロン心臓部である空胴共振器に打ち込む。円筒ビームの厚みは数100ミクロン程度で、その半径は発振させたい電磁波モードとの結合が最も高い位置に合わせる。この電磁波はモード変換器、出力窓を介して外部に準光学的に出力される。空胴共振器は、長さが波長の数倍から10数倍程度、半径が $a \sim c\chi_{mn}/f$ (例えば 170GHz/TE_{31,8} モードで約 18mm) の直管で、軸方向にガウス状の電界分布を持つ。この短い距離を通過する間にサイクロトロン共鳴メーザの原理で電磁波が発生し、電子はその分の回転運動エネルギーを失う。ここで、 c は光速、 f は周波数である。また、 χ_{mn} は $dJ_m(x)/dx = 0$ の 0 を除く n 番目の解で、TE _{m n} モードに対応する ($J_m(x)$ は m 次のベッセル関数)。発振設計にあたっては、空胴共振器への熱負荷がピーク値で 2kW/cm² 程度に収まることを条件に、発振モードや空胴共振器の Q 値 (空胴内の電界強度)、空胴の長さ (電子ビームと空胴電界の相互作用距離) 等を決定する [3]。発振モードは、最近のジャイロトロンではモード変換器の効率を考慮して、TE_{19,5}、TE_{22,6} (500kW レベル対応)、TE_{27,7}、TE_{28,8}、TE_{31,8} (170GHz/1MW 対応) 等が選択されている。ジャイロトロンでは、回転電子ビームのエネルギーが電磁波に変換されるが、その変換効率 η_{eff} は相互作用長、空胴電界強度のパラメータで決定され、最大でも 70% 程度である。これに、電子ビームの回転エネルギー成分の割合 $\eta_{\text{el}} = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{1+\alpha^2} \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)$ をかけたものがジャイロトロン効率となる。ここで、 γ は電子ビームの相対論的ファクタ、 α は電子ビームのピッチファクタ $v_{\text{perp}}/v_{\text{para}}$ であり、 α の高い方が発振効率は高くできることがわかる。しかし、一方で α が高くなるにつれ、電子ビームの不安定が起こりやすい、モード競合 (対象モードが高効率を得る領域で近傍モードが発振してしまう現象) が起こりやすい、空胴の熱負荷が高くなる等の側面があり、電子ビームのパフォーマンスを考慮に入れながら設計/実験を行う必要がある。Table 1 にこれまでに得られている 100GHz 帯ジャイロトロン代表的な結果を示す。一般に、周波数が低いほど、また発振モード次数が低いほど高 α の動作ができており、効率も高くなっている。ロシア (GYCOM) では TE_{22,6} モード (TE 波の 279 番目の高次モード) で 40% を超える効率が得られている [8]。Fig. 2 は、原研で得られた 170GHz/TE_{31,8} モードの実験結果である [9]。この TE_{31,8} モード (536

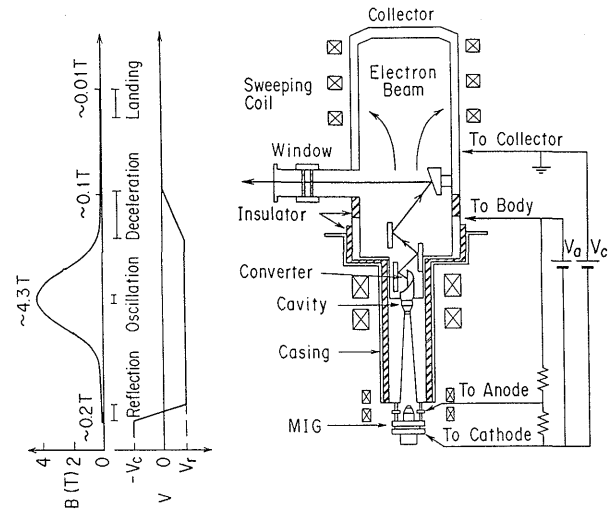


Fig. 1 Conceptual view of gyrotron with depressed collector and its configurations of magnetic field and static potential in the gyrotron [4].

番目の高次モード) は ITER ジャイロトロン (170GHz/1MW/長パルス) に対応するモードで、ビームエネルギー 87keV、ビーム電流 $I \sim 45A$ で 1.15MW の単一モード発振が得られている。ピッチファクタはビーム不安定を避けるため、さらに空胴共振器の熱負荷を下げるために $\alpha \sim 1$ と低く設定しているが、効率は 30% に達している。これは約 65% の回転ビームエネルギー成分が変換されたことに対応し、高次モードでの高効率発振が可能であることを示している。Fig. 3 は、出力の空胴での磁場および空胴内でのビーム位置に対する依存性の実験結果を示したものである。電子ビーム位置を固定し磁場をスキャンすると、そのサイクロトロン共鳴磁場に応じた共鳴周波数を持つモード TE_{29,8}、TE_{30,8}、TE_{31,8} が連続して出現する。それぞれ、近傍モードとの競合なしに設計どおりの効率 (約 30%) が得られている。また、ビーム半径を小さくすることにより、電子と逆回転のモード (+) から順回転のモード (-) へ移行する。これは、電子ビームと RF との結合係数 $C_{m,n} \propto J_{m \pm 1}(\frac{\chi_{m,n}}{a} r_b)$ が電子ビーム半径 r_b により変化するためである。このように、かなりの高次モードであっても磁場、電子ビーム位置、あるいは電圧の立ちあげシナリオ [10] 等の制御により所定のモードを選択的に高効率で発振させることが可能である。

Table 1 Present status of high power gyrotron development.
Frequency > 100GHz. pulse duration > 0.1sec.
(D/C: depressed collector) .

Institute	Frequency	Mode	Power(MW)	Eff.(%)	Pulse dur.(sec)
JAERI/Toshiba	110GHz	TE22,2	0.4	50(D/C)	4.0
	170GHz	TE31,8	0.5	32(D/C)	0.6
CPI [5]	110GHz	TE22,6	0.68	31	0.5
			0.35	26.5	10.0
FZK [6]	140.5GHz	TE10,4	0.46	51(D/C)	0.2
GYCOM (SALUT/IAP)	140GHz	TE22,6	0.8	48(D/C)	0.6
GYCOM [7] (TORII/IAP)	140GHz	TE22,6	1.0	42	1.0
THOMSON/CEA/ CRPP/FZK [8]	118GHz	TE22,6	0.49	30	5.0

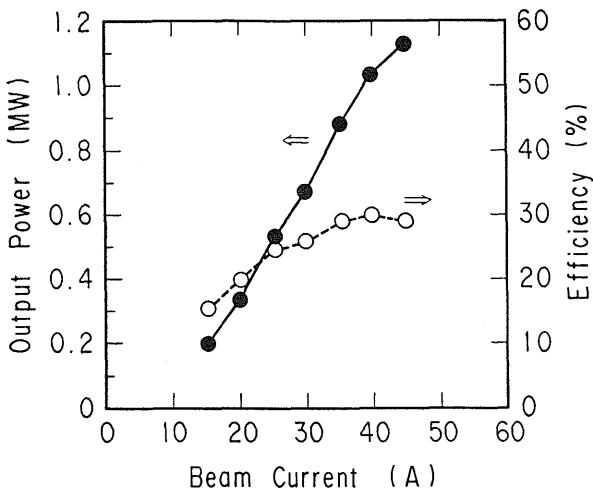


Fig. 2 Experimental result of the dependence of output power and efficiency on the beam current [9]. The experiment was performed using a gyrotron without built-in mode converter. Oscillation mode is TE_{31,8}(+), and the beam voltage is nearly equal to 88kV.

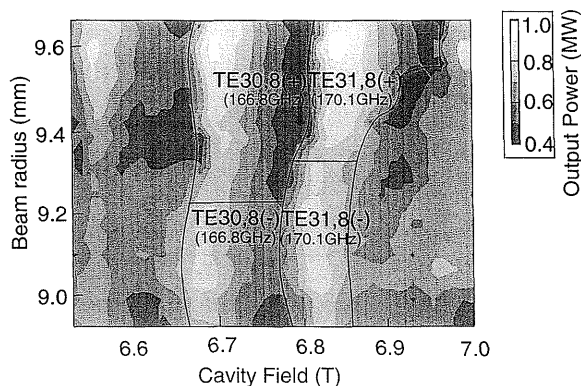


Fig. 3 Experimental result of dependence of contours of output power on the beam radius and the magnetic field at the cavity[9]. Beam voltage is nearly equal to 88kV.

5.3 電子ビームエネルギー回収による効率向上

ジャイロトロンは、5.2節に述べたように電子ビームの回転エネルギー成分を電磁波のエネルギーに変換するもので、発振効率は30%~40%程度であるから、残りの60%~70%のエネルギーを持つ電子ビームエネルギーはそのままコレクタに吸収され熱に変わる。ここで、Fig.1に示した電位をジャイロトロン内につくり、このいわゆる使用済み電子ビームに減速電圧を印加することによりそのエネルギーを静電的に回収し、全体効率を大幅に向上させることが可能である。減速電圧を V_r 、初期ビーム電圧を V_a 、発振効率を η_{osci} とすると、総合効率は $\eta_{total} = \eta_{osci} V_a / (V_a - V_r)$ となる。印加できうる減速電圧（回収電圧）は、相互作用後の電子ビームの持つエネルギーの最小値に対応する。この値は電子ビームの直進エネルギーに分散があったとしても、正常なCRM動作を行うかぎり大体ビームの平均直進エネルギー程度であるため、大きなエネルギー回収効果が期待できる。この意味でもジャイロトロンは極めてエネルギー回収に適したデバイスといえる。1994年に原研で行われたエネルギー回収実験では、周波数110GHz、出力610kWにおいて、初期ビームエネルギー77keVに対し30kVの回収電圧印加により、効率が30%から50%に改善された[4]。その後、複数の研究機関でもエネルギー回収実験が行われ、高い効率が得られている。エネルギー回収のもたらす効果として、まず必要な電源容量が大幅に下がる（特に主電源の電圧が50kV以下に下がる）、ジャイロトロンコレクタの熱負荷の大幅な減少およびこれによるコレクタの小型化ができる、冷却系容量の大幅な削減ができる、使用済みビームエネルギーの低下による発生X線が大幅に減少する等があげられる。これらは、大型核融合装置システムを考えた場合その経済性、実現性に大きなインパクトを与えるものである。特にITERのECRFシステムでは、20%の効率向上が80MWの電力節約に相当するため、その効果は非常に大きい。また、従来のジャイロトロンでは、電源の電圧自身がRF発振の重要なパラメータであったため、高い安定度が求められていたが、エネルギー回収システムでは、低容量の加速電源さえ安定化できていればよく、その結果主電源を大きく簡素化できるというメリットもある[11]。

さらに、エネルギー回収の採用はジャイロトロンの発振設計に大きな自由度を与える。すなわち、これまでの設計では5.2節に述べたようになるべくピッチファクタを高く取り発振効率そのものを向上させることに主眼をおいていた。ところが、エネルギー回収を採用すると、

以前は避けられていた低 α 領域の発振でも、発振効率自体は高くなくとも、その分効率改善係数 $V_a/(V_a - V_r)$ が高くとれるため、総合効率として高 α 設計と遜色のない効率を得ることができる。現在原研では、5.2.2節で述べた実験結果をもとに比較的低 α 領域における発振にエネルギー回収を組み合わせた $TE_{31,8}$ モードの 170GHz ジャイロトロンを開発中である。これまでに初期結果として、500kW、0.6 秒の出力を得ており、50% 以上の高効率を目指して実験が行われている[12]。

5.4 むすび

以前 ECH/ECCD は効率が低く、結果として高価であるという評価があったが、効率50%以上の実証等により、そのイメージはなくなりつつある。また、170GHz/1MW に対応する高次モードでも設計どおりの発振効率が実証されており、エネルギー回収と組み合わせて ITER ジャイロトロンで想定されている50%以上の効率をクリアすべくその努力がなされている。今後、必要であれば2段以上のエネルギー回収を採用し、またモード変換器の改良等ともあわせてさらなる改善も可能である。

参考文献

- [1] M. Makowski, IEEE Trans. on Plasma Science **24**, 1023 (1996).
- [2] G. G. Denisov, A. N. Kuftin, V. I. Malygin *et al.*, Int. J. Electronics **72**, 1079 (1992).
- [3] K. E. Kreischer, B. G. Danly, J. B. Schtkeker and R. J. Temkin, IEEE Trans. on Plasma Science PS-**13**, 364 (1985).
- [4] K. Sakamoto, M. Tsuneoka, A. Kasugai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 3532 (1994); K. Sakamoto, M. Tsuneoka, A. Kasugai *et al.*, J. Plasma and Fusion Research **71**, 1029 (1995).
- [5] K. Felch, P. Borchard, T. S. Chu *et al.*, *Digest of the 20th Int. Conf. on Infrared and MM Waves*, Orlando, 191 (1995).
- [6] B. Piosczyk, C. T. Iatrou, Guenter Dammertz and M. Thumm, IEEE Trans. on Plasma Science, PS-**26**, 364 (1996).
- [7] V. E. Mjasnikov, N. V. Agapova, V. V. Alikaev, A. S. Borshchegovsky *et al.*, *Digest of the 21st Int. Conf. on Infrared and MM Waves*, Berlin, ISBN3-00-000800-4, ATh1 (1996).
- [8] S. Alberti, O. Braz, P. Garin *et al.*, *Digest of the 21st Int. Conf. on Infrared and MM Waves*, Berlin, ISBN3-00-000800-4, AF1 (1996).
- [9] K. Sakamoto, A. Kasugai, K. Takahashi *et al.*, J. Phys. Soc. Japan **65**, 1888 (1996).
- [10] D. R. Whaley, M. Q. Tran, S. Tran *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75**, 1304 (1996).
- [11] M. Tsuneoka, H. Fujita, K. Sakamoto, A. Kasugai *et al.*, *to be published in Fusion Engineering*.
- [12] K. Sakamoto, A. Kasugai, M. Tsuneoka *et al.*, *Digest of the 21st Int. Conf. on Infrared and MM Waves*, Berlin, ISBN3-00-000800-4, ATh1 (1996).