



## 研究技術ノート

# 核融合実験装置用大電力マイクロ波管の開発

林 健一

東芝電子管デバイス株式会社

(原稿受付：2009年9月14日，原稿受理：2010年1月19日)

核融合プラズマの生成，加熱，電流駆動の高周波源として使用される大電力マイクロ波管，クライストロンとジャイロトロンについて，動作機構，設計手法，東芝電子管デバイス株式会社における開発の変遷，および今後の課題について述べる．クライストロンでは，プラズマ生成用に開発した X バンド 25 kW 連続出力管を例として，電子銃からコレクタまでの直流電子ビームの軌道計算と空洞部でのマイクロ波と電子ビームの相互作用をシミュレートする計算コードを用いた設計手法を示す．また，最近開発した韓国 KSTAR 向け 5 GHz, 500 kW プロト管の開発の要点と成果について述べる．ジャイロトロンでは，MIG 型電子銃の設計に必要な諸量とそれらの関係，単一モード/コールドモデルに基づいたスケーリング則による基本設計を示す．大電力化と高周波数化に向けて，軸対称モード管，回廊モード管，モード変換器内蔵管，電位コレクタ搭載管と進んだ開発の歴史と各段階で発生した問題点と解決策を示すとともに，主要コンポーネントごとに開発の要点と今後の課題について述べる．

### Keywords:

microwave tube, klystron, gyrotron, ECH, LHH

## 1. 序

マイクロ波管は，通信やエレクトロニクス分野において固体素子に主役の座を引き渡して以来，電子管でなければ実現できない大電力と高周波数が必要とされる分野で発展してきた．衛星放送・通信用進行波管，癌治療器用マグネトロンやクライストロン，高エネルギー物理研究用クライストロン，そして核融合研究用クライストロンとジャイロトロンである．図 1 は，東芝電子管デバイス株式会社 (TETD, Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd.) が，最近製造した核融合実験装置用の大電力マイクロ波管である．これまで開発してきた様々なキー技術を取り入れた世界最高性能をもつマイクロ波管である．

図 1 (a) は，5 GHz クライストロンで，韓国の超伝導トカマク実験装置 KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) の低域混成波加熱 (LHH, Lower Hybrid Resonance Heating) 用に開発したプロト管である．KSTAR の LHH では，5 GHz, 500 kW CW クライストロンを 4 本使用する計画で，プロト管としての設計で 500 kW, CW 出力を，性能で 400 kW, 10 秒動作を目標として開発した [1]．CW クライストロンとしては，比較的周波数の高い 5 GHz での連続動作を達成するために，出力空洞には進行波形 3 セル空洞を採用し空洞内の電界を下げることによって，ジュール損失による空洞壁の熱負荷を軽減するなどの施策を盛り込んだ結果，350 kW の連続動作，450 kW の 10 s 動作を達成し，510 kW, 0.5 秒の最高出力を確認した．

一方，ジャイロトロンについては，日本原子力研究開発機構 (JAEA, Japan Atomic Energy Agency) の開発プロ

ジェクトに 1980 年代から協力し，共同開発により多くの成果が得られた．図 1 (b) は，国際熱核融合実験炉 (ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor) の電子

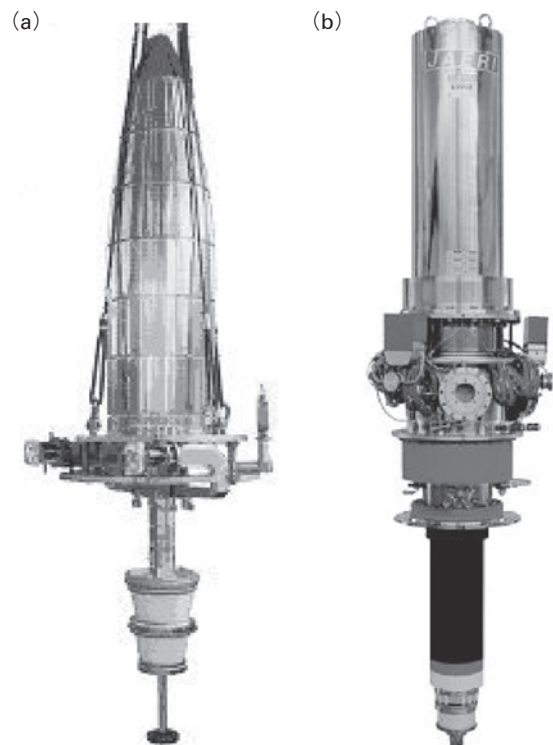


図 1 核融合実験装置用大電力マイクロ波管 (a) KSTAR 向け 5 GHz クライストロン E3762 (b) ITER 用 170 GHz ジャイロトロン E3993.

*Development of High-Power Microwave Tubes for Fusion Experimental Devices*  
HAYASHI Kenichi

author's e-mail: kenichi1.hayashi@toshiba.co.jp

サイクロトロン共鳴加熱 (ECH, Electron Cyclotron Resonance Heating) 用 170 GHz, 1 MW 準定常出力ジャイロトロンである。JAEA において ITER の目標仕様 1 MW - 500 秒動作を上回る 1 MW - 800 秒の出力が達成された。ITER 用の 170 GHz ジャイロトロンは、ロシア, EU, 日本の三極で開発を行っているが、ITER の目標仕様を達成したのは、この管が唯一である [2]。

このように、TETD では、JAEA, 核融合科学研究所 (NIFS, National Institute for Fusion Science), 筑波大学をはじめとする国内外の大学や研究機関からの受注や共同研究を通して、大電力マイクロ波管の開発を精力的に続けている。TETD は、名前のお通り、X 線管、X 線イメージング装置、送信管、マイクロ波管、ガス検出器などのいろいろな電子管の製造を生業としている。電子管製造専門メーカーとして 2003 年 10 月に (株) 東芝から独立した。1915 年に国内初の X 線管を、1917 年に送信管を製造し始めて以来、2007 年に X 線管製造 90 周年、2008 年にはクライストロン製造 50 周年を迎えるなど、電子管製造メーカーとしての歴史は古い。本稿では、70 年代後半から本格的に開発を開始した核融合実験装置用のクライストロンとジャイロトロンの開発を振り返り、その時々直面した問題やブレークスルー技術について述べる。以下、両管について、基本構造、動作原理、設計指針、核融合実験装置用大型管としての開発について、それぞれ、2 章と 3 章に述べる。

## 2. クライストロン

### 2.1 大電力クライストロンの基本構造、動作原理と設計

電子ビームの形態とマイクロ波電磁界との結合の仕方によって、いろいろなマイクロ波管が実用化されているが、「一様な密度とエネルギーをもつ電子ビームが、マイクロ波電磁界によって集群 (バンチング) され、集群された電子群がマイクロ波電界の減速位相に入ることによって、その運動エネルギーあるいは位置エネルギーがマイクロ波に変換される」というメカニズムはどのマイクロ波管も変わらない。主なマイクロ波管には、クライストロン、進行波管と後進波管、マグネトロン、ジャイロトロンがあるが、これらのマイクロ波管の動作原理と実際については、本誌においても武藤等による詳しい解説がある [3]。

クライストロンは、直進する電子ビームの進行方向へのバンチングを利用するマイクロ波管である。クライストロンでは、電子はまず、入力空洞に励振されているマイクロ波電界によって速度変調を受け、ドリフト領域を進行するにしたがって速度の速い電子が遅い電子に追いつくことによって集群する。この電子群の電荷によって、出力空洞に誘導電界が発生し、電子群の運動エネルギーの大部分がマイクロ波に変換される。共振空洞を使用するため、瞬時動作帯域は狭いが高利得で高効率である。また、空洞の冷却が構造上比較的簡単なので、大電力化に向いている。

図 2 に、クライストロンの基本的な構造を示す。電子銃、複数個の共振空洞からなる相互作用部とコレクタが直線状に配置されている。熱陰極から放出された電子は、カソードとボディ間の静電界により所定のエネルギーまで加速さ

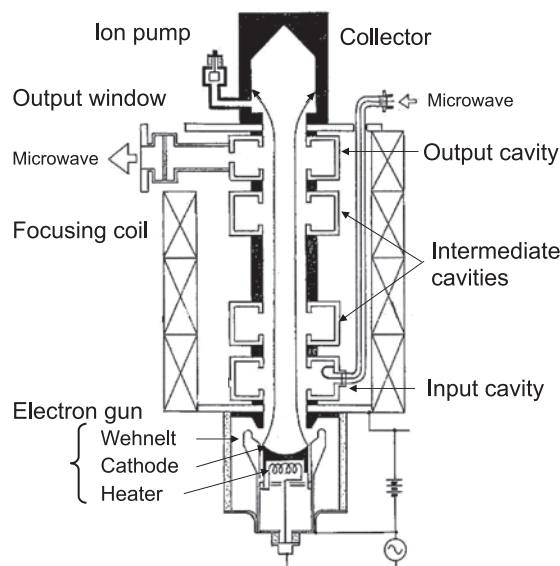


図 2 多空洞クライストロンの構造。

れて相互作用部に入り、運動エネルギーをマイクロ波に与えて、最終的にコレクタで捕集される。一方、入力空洞から入力されたマイクロ波は、相互作用部で増幅された後、出力空洞、出力窓を経て外部回路に出力される。

クライストロンでは、電子銃は空間電荷制限領域で動作する。したがって、電子ビームのビーム電圧  $V_b$ 、ビームパービアンスを  $G_b$ 、効率を  $\eta$  とすると、マイクロ波の出力  $P_0$  は、

$$P_0 = \eta G_b V_b^{\frac{5}{2}}$$

で表される。大電力を得るには、電子ビームの加速電圧を上げるか、パービアンスの大きい電子ビームを発生するか、あるいは効率を高くすることが考えられる。しかし、パービアンスと効率の間には、

$$\eta (\%) = 90 - 20 \cdot G_b (\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}) \quad (1)$$

の関係がある [4]。図 3 は、関係式と TETD の代表的な管 (後節で詳しく述べる) について示したもので、パービアンスが大きくなると効率は低くなる。これは、パービアンスの大きい (ビーム電流密度の大きい) 電子ビームでは、空間電荷効果によりマイクロ波による集群作用が乱されるためである。

図 3 において、E3730A と E3712 は、線形加速器に用いられる S バンドのパルス管で、それぞれ、50 MW と 80 MW のパルス出力をもつ。大電力を得るために、高動作電圧 (312 kV と 400 kV) と大電流が必要で、パービアンスを大きくとらざるを得ない。したがって、効率は 40 % 程度である。これに対して、CW 管の場合は、空洞、ドリフトチューブ、コレクタ、出力窓などの熱的な問題で出力が制限される。熱的な制約があまり問題とならない比較的動作周波数の低いクライストロン、E3732 (508.6 MHz, 1.2 MW, CW 管) や E3740A (324 MHz, 3 MW, 長パルス管) は、50 % 以上の効率が得られている。周波数の高い C バンド管 E

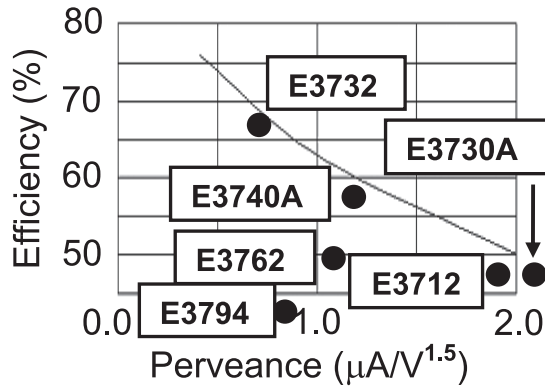


図3 TETD 主要クライストロンのパービアンズと効率。

3762やXバンド管E3794では、空洞やドリフトチューブでのマイクロ波あるいは電子の損失による発熱のために、効率に対して動作パラメータを最適化できない。したがって、図3において、(1)式で与えられる値よりかなり低い動作効率となっている。

図4は、XバンドCWクライストロンE3794の直流電子ビーム軌道を示している。電子銃は、球面状の熱陰極、ウェネルト電極、陽極（ボディ）で構成されるピラス形の電子銃である。ウェネルト電極は、陰極と同電位の電極で、空間電荷効果による電子ビームの発散を相殺する集束電界を形成するためのものである。相互作用部において、空間電荷効果による電子ビームの拡がりを抑えるために、集束マグネットにより図4のような分布の静磁界が軸方向に印加される。逆に、コレクタでは、空間電荷効果を積極的に利用し電子ビームを拡げることによって、コレクタ壁の熱負荷を平滑化している。したがって、集束磁界は、相互作用部出口で急激に減少するように構成されている。

図5は、電子ビームとマイクロ波の相互作用のシミュレーションで、E3794の相互作用部である。この例のように、相互作用部は、通常5つの空洞で構成する。特に広い瞬時帯域あるいは高い利得が必要な場合は、6空洞構成を用いる場合もある。図5において、左から入力空洞（第1空洞）、第2空洞、……出力空洞（第5空洞）の順に並んでいる。入力空洞は文字通り、増幅しようとするマイクロ波を入力する空洞、出力空洞は、電子ビームの運動エネルギーをマイクロ波のエネルギーに変換し外部回路に取り出すための空洞である。それ以外の空洞、中間空洞は、外部回路につながっておらず、共振電界は電子ビームによって励振される。

図5は、軸対称2次元の電子ビーム軌道を1/4周期ごとの時間間隔で追ったもので、電子ビームの集群が形成される様子、出力空洞では、電子群が減速されることによって

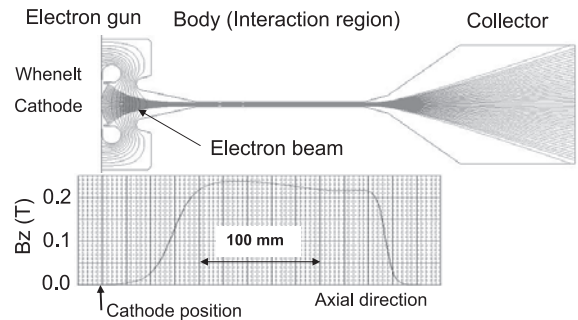


図4 XバンドクライストロンE3794の直流電子ビーム軌道と外部磁場プロファイル。

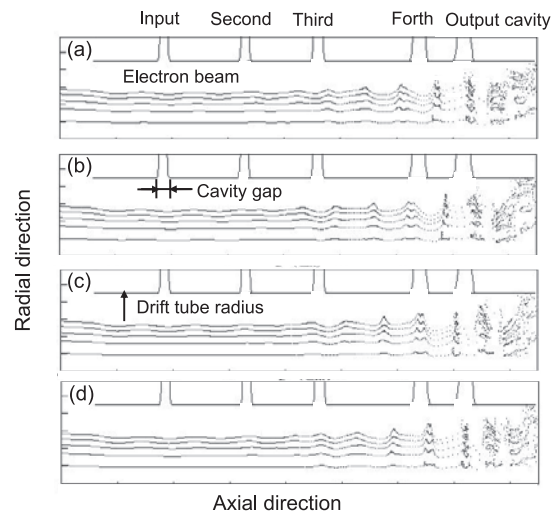


図5 XバンドクライストロンE3794の電子ビームとマイクロ波との相互作用のシミュレーション。

空間電荷効果が顕著になり、電子ビームが軸方向に急激に広がる様子が見られる。計算機シミュレーションを用いた多空洞クライストロンの相互作用部の設計については、様々な研究機関で議論され、固有の設計手法が存在する[5]。効率、利得、瞬時帯域幅などの要求仕様に対して、空洞の配置、離調周波数（動作周波数と空洞の共振周波数との差）、Q値などのパラメータを決定するが、基本的には、電子ビームの集群をどのように形成するかということなる。例えば、周波数の高い側に離調すると集群は強くなり低い側に離調すると集群は弱くなるので、出力空洞に近い中間空洞は高い方に離調するなどである。

2.2 核融合実験装置用大電力クライストロン

表1に、TETDがこれまでに核融合実験装置用に開発してきたクライストロンを示す。これらの管とは別に、高エネルギー加速器研究機構(KEK)、理研のご指導を受けて、加速器用の大電力クライストロンを開発してきた。これら

表1 TETD 開発の核融合実験装置用大電力クライストロン。

開発年	型式	周波数(MHz)	出力(kW)	効率(%)	利得(dB)	パルス幅(s)	備考
1977	E3765	650-750	50			CW	JAEA 向け
1980	E3778	1700-2000	1400	55	49	10	遠隔機械式同調空洞
2004	E3794	8200	25	17	41	1	100 kW 短パルス出力
2005	E3762	5000	400	50	48	10	3セル進行波形出力空洞



のクライストロンの開発については、KEKトリスタンリング用に開発した世界最大の連続出力をもつ500 MHz、1.2 MW クライストロン E3786 (後の SPring-8, KEKB リング用 E3732) と線形加速器用の 2856 MHz、100 MW S バンドパルスクライストロン E3712 の開発に関する回想録が、加速器学会誌に掲載されている [6, 7].

TETD が最初にプラズマ実験用に開発したクライストロン E3765 は、周波数 650-750 MHz、50 kW 出力の CW クライストロンで、当時量産していた UHF-TV 放送用クライストロンのアップグレードとして製作された。日本原子力研究所 (原研, 現 JAEA) のプラズマ加熱実験において、4 本並列運転した 200 kW 装置がプラズマ実験に供された。この頃から、高周波実験用ドライバとしてクライストロンが使われるようになり、名古屋大学プラズマ研究所では、日本電気製の 800 MHz、200 kW 管 LD4262 を 2 本並列運転した 200 kW 装置がプラズマ加熱実験に使用された。

放送用クライストロンは 80 年代半ばに全半導体送信装置が開発されたのを機に徐々に消えていったが、競合の日本電気との性能向上に関する競争の中でクライストロンの性能は向上し、60-70% の効率が得られるまでになった。余談になるが、国内では UHF-TV 放送用として、現在も関西の放送局で TETD クライストロン 1 AV95 が 1 台運用されているが、2011 年の地上デジタル放送への移行とともに完全に姿を消すことが決まっている。

E3778 は、JT-60 装置の LHH 用として開発した 2 GHz、長パルス 1 MW クライストロンである。図 6 はその外観写真で、全長約 3 m、重さ 900 kg の大型管である [8]。1980 年に、TETD と日本電気 (管名 LD4444) が別々に開発を進め、それぞれ、1983、84 年に、1 MW、10 秒の目標性能を達成した [8]。

開発の最大の課題は、出力窓の温度上昇と熱応力による熱的破壊である。クライストロンでは、窓材の誘電損失に加え、真空側の窓表面に発生するマルチパクタ放電により、窓の温度が上昇がする。マルチパクタ放電は、管構造材表面からの二次電子がマイクロ波電界によって往復運動をすることによって発生する。二次放出係数が 1 を超える



図 6 2 GHz、1 MW 長パルスクライストロン E3778.

表面において、放出された電子が二次電子をたたき出すように、マイクロ波の周波数と電子の移動距離がマッチすると放電は維持される。また、電子の往復運動中に管内ガスの電離によって発生する電子により、放電は助長される。これに対処するために、管材料の表面処理、真空処理、コンディショニングの方法などの根本的技術を再検討し、4 年間の開発期間を費やして目標性能を達成した。ほぼ時期を同じにして開発した KEK 向け CW クライストロン E3786 とこの E3778 の開発で培った設計技術、プロセス技術、試験評価技術が、現在の TETD の CW クライストロン開発の基本となっている。

80 年代の後半から ECH が注目されるようになり、プラズマ実験用大電力管の開発の主体は、クライストロンからジャイロトロンに変わった。クライストロンについては、高い動作周波数のものが要求されるようになり、TETD では、ここ最近、X バンドと C バンドの 2 種類のクライストロンを開発した。動作周波数が高くなると、波長に比例して寸法が小さくなるため、相互作用部においては、不要電子ビームによるドリフトチューブの熱負荷密度の増大と出力空洞壁のジュール損失による熱負荷密度の増大の 2 つの要因により、大電力化と高効率化が難しくなる。

E3794 は、動作周波数 8.2 GHz の長パルスクライストロンで、東大 RT-1 装置のプラズマ発生用の RF ドライバとして 2004 年に開発した。X バンドということもあり、全長 1.1 m、重さ 150 kg と長パルス管としては小型で、5 空洞で構成された相互作用部も長さも 250 mm 程度と短い。電子ビームとマイクロ波との結合を強くするためには、できるだけ空洞ギャップ径に近い電子ビームが必要となる。電子ビームの径を大きくするほどドリフトチューブに落ちる電子ビームが増え、これによる熱負荷密度も増大する。この管では、真空リークなどの致命的損傷を防ぐことを優先して、25 kW - 1 秒の長パルス動作と、100 kW 出力を目標として設計した。パルス幅 20  $\mu$ s での動作確認試験において、出力 100 kW、効率 37%、利得 41 dB を達成した。パルス幅 1 秒の長パルス動作においては、出力 25 kW、効率 17%、利得 41 dB での安定動作を確認し、RT-1 装置のプラズマ発生用に使用されている。

冒頭に述べたように、E3762 は KSTAR の LHH 用のプロト管として開発された。2003 年に、韓国 POSTEC (Pohang University of Science & Technology) から開発要請を受けたが、5 GHz の動作周波数で 500 kW の連続出力の仕様に対して、二の足を踏んでいた。この仕様は、ITER の第 2 オプションとして検討されている LHH 用マイクロ波源の仕様と同じものであり、開発のハードルは高いという認識であった。TETD はこれより前に、原研の指導のもと、5 GHz の短パルス管 E3720 を開発し、パルス幅 15  $\mu$ s で 700 kW の出力を得ていたが、熱的な検討は実施していなかった。社内において、熱的な実現可能性について検討を重ねた結果、設計目標として 500 kW 連続出力を満足することと、400 kW 以上の出力で 10 s 以上動作を実証することで POSTEC と合意し開発を開始した。

図 1 (a) に示すように電子銃は三極タイプで、定格 68 kV

-15.5 A, ガンパービアンスは  $1.01 \mu\text{A}/\text{V}^{1.5}$  である。CW 動作を考慮してカソードローディングが  $1 \text{ A}/\text{cm}^2$  になるようにカソード径を選んでいる。効率を高くするためには、出力空洞において集束した電子ビームが一気に高いマイクロ波電界強度を通過する必要があるが、このためには空洞の Q 値をある程度確保しなければならない。周波数が高くなると空洞の寸法も波長に比例して小さくなり空洞壁のジュール損失による熱負荷密度が増大する（空洞の熱負荷密度は周波数の 2.5 乗に比例する）。これを防ぐために、本クライストロンでは、3セルの進行波形空洞を採用することによって、効率を低下させることなく空洞中のマイクロ波電界強度を下げることを試みた。出力 500 kW, 効率 50% において、単空洞の熱負荷  $350 \text{ W}/\text{cm}^2$  に対して、採用した空洞では  $60 \text{ W}/\text{cm}^2$  と十分に小さい値となった。ただし、各セルへの冷却チャンネルは複雑になり、試作モデルにより、前もって実際の冷却水の流れと変形を評価した。もう一つの課題、出力窓の誘電損失による発熱と熱応力による破壊に対しては、2ポート出力形式を採用するとともに、低誘電損失かつ高熱伝導率材としてベリリア窓を使用した。

図7は、飽和出力、効率、ドライブ電力のビーム電圧依存性を示す試験結果である。出力 350 kW までは連続動作、455 kW までは10秒パルス（デューティ 16.7%）、510 kW までは 0.5 秒（デューティ 10%）の動作である。出力空洞は 500 kW 出力に対して最適化しているため、効率は出力が高くなるにつれて大きくなり、設計どおりビーム電圧 68 kV において 50% が得られた。また、ボディ損失と出力窓の温度上昇も、それぞれ、300 kW 連続動作に対して 5 kW と 0.5 deg と予測どおりの値となり、今後の 500 kW 連続動作への展望を得た。本プロト管は、2006年に韓国大田の KSTAR サイトに搬入された。

### 3. ジャイロトロン

#### 3.1 ジャイロトロンの基本構造

ジャイロトロンの基本構成を図8に示す[9]。MIG (Mag-

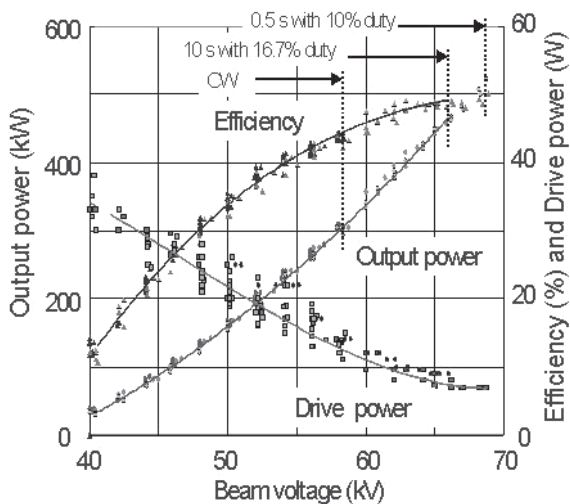


図7 5 GHz, CW クライストロン E3762 の飽和出力、効率、ドライブ電力のビーム電圧依存性。

netron Injection Gun) と呼ばれる電子銃部, ビームトンネル, 空洞共振器, 出力導波管を兼ねるコレクタ, および出力窓から構成される。発振に必要な外部磁場は、電子銃部から空洞にかけて緩やかに増大し空洞で最大となる分布をもつ。発振周波数は電子の旋回周波数とほぼ同じであるため、高い周波数になるほど強い磁場が必要となり、一般に 30 GHz 以上のジャイロトロンでは、超伝導マグネットが使用される。

MIG から出射した中空の旋回電子ビームは、ビームトンネル内を管軸方向の外部磁場にガイドされて次第に旋回方向の速度を大きくしながら走行し空洞に入射する。空洞では、電子の旋回周波数より少し高い周波数をもつ円形 TE モードのマイクロ波と相互作用を行い、電子の旋回エネルギーの一部がマイクロ波電力に変換される。エネルギー変換を終えた電子ビームはコレクタに捕集され残りの運動エネルギーは熱に変わる。一方、空洞で発振したマイクロ波はテーパ導波管, コレクタを通して出力窓から取り出される。

ジャイロトロンは、ミリ波領域の大電力管であるとともに、高調波発振によるサブミリ波領域の発振源としても注目されており、物性研究, イメージング, 新機能性材料創成などへの応用研究も盛んに行われているが[10]、本稿では、大電力向きの基本波動作について述べる。以下、空洞での発振動作に必要な電子ビーム条件と MIG を設計するために必要な諸量の関係を示す。次に、MIT による単一モード/コールドモデルでの解析手順に従って、発振動作の記述とスケールリングに必要な諸量（電子効率, 横方向効率, 規格化された電界強度と空洞長, 電子ビームとマイクロ波の結合強度, 発振開始電流）の関係を記述する[11]。

#### 3.1.1 電子銃

図9に 168 GHz, 500 kW 管 E3980 の MIG の構造と電子ビーム軌道計算の一例を示す[12]。MIG は、円環状のエミッションベルトとカソード近傍の電界を整形するためのノーズと支持部から成るカソード, アノードとボディ（ビームトンネル, 空洞）で構成される。図9のエミッションベルト中心での磁場を  $B_k$ , 電界を  $E_k$  とすると、エミッションベルトから放出された電子は、磁場  $B_k$  に垂直な電界成分  $E_k \cos\theta_k$  によって磁力線に巻きつく旋回運動を得、アノードとボディ間の電界によって所定のエネルギーまで加速され、その後、ビームトンネルから空洞にかけてのミラー磁場の断熱圧縮効果により、空洞で所定の旋回速度を得る。

空洞入口での電子の旋回速度を  $v_{\perp 0}$ , 進行速度を  $v_{\parallel 0}$ ,

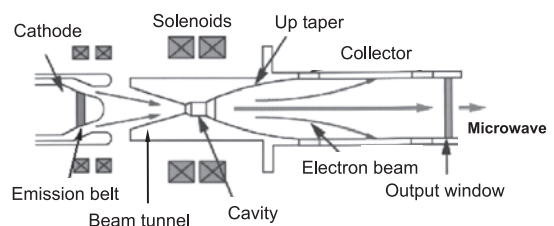


図8 ジャイロトロンの基本構成。

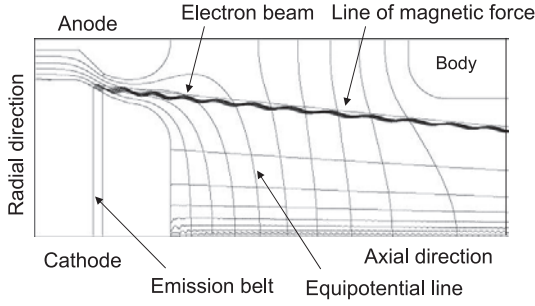


図9 MIGの構造と電子ビーム軌道。

ローレンツ因子を  $\gamma_0$  とすると、空洞での電子ビームのパラメータは、

$$\beta_{\perp 0} = R^{\frac{3}{2}} \frac{e}{m_e c} \frac{E_k}{\gamma_0^2 \omega_{c0}} \cos \theta_k$$

$$\beta_{\parallel 0} = \sqrt{\left(1 - \frac{1}{\gamma_0^2}\right) - \beta_{\perp 0}^2}$$

$$\gamma_0 = 1 + \frac{eV_b}{m_e c^2}$$

で与えられる。ここで、 $R = B_0/B_k$  はミラー比、空洞磁場と電子銃磁場との比である。 $\omega_{c0} = eB_0/\gamma_0 m_e$  は空洞入口での電子の旋回周波数、 $V_b$  はビーム電圧、 $\beta_{\parallel 0} = v_{\parallel 0}/c$ 、 $\beta_{\perp 0} = v_{\perp 0}/c$ 、 $e$  は電荷素量、 $m_e$  は電子の静止質量、 $c$  は光速である。また、旋回速度と進行速度の比  $v_{\perp 0}/v_{\parallel 0}$  をピッチファクタ（あるいはピッチ角）と呼び  $\alpha$  で表わす。ジャイロトロンでは、電子の旋回エネルギーをマイクロ波の発振と増幅に利用するから、ピッチファクタはできるだけ大きいことが望まれる。

旋回速度はエミッションベルト上での電界  $E_k$  に比例するから、MIG は温度制限領域で動作させる。エミッションベルト上の温度均一性、表面粗さ、電界の一様性、ビーム自身の空間電荷効果などが影響して、MIG で生成した電子ビームには、旋回速度にばらつきが生じる。一般にピッチファクタを大きくすると速度分散を小さくすることは相反するため、ピッチファクタが大きい電子ビームを得ることは難しい。特に、 $\beta_{\perp 0} < (1 - 1/\gamma_0^2)$  となる電子は、ミラー磁場により反射され空洞には到達できない。このような電子は、電子銃内の電位障壁とミラー磁場によってビームトンネル内に振動しながら留まることになり、ジャイロトロンの不安定動作の要因となる。

上式において、電界強度  $E_k$  は放電に対する耐電圧で制限される。したがって、一定のピッチファクタを得るには、動作周波数が高くなるにつれてミラー比を大きくする必要がある。それだけ電子の反射条件に対するマージンがなくなるから、より速度分散の小さい電子ビームが必要となる。これらの事情から、ピッチファクタは、60 GHz 以下の 200 kW 級のジャイロトロンで 1.5–2.0、100 GHz 以上の MW 級のジャイロトロンでは 1.1–1.4 程度である。

### 3.1.2 空洞

ジャイロトロンでは、電子の旋回エネルギーがマイクロ波のエネルギーに変換されるため、発振効率  $\eta$  は、

$$\eta = \eta_{el} \cdot \eta_{\perp}$$

で表される。 $\eta_{el}$  は電子効率と呼ばれ、電子ビームの全エネルギーに対する旋回エネルギーの割合を表している。したがって、電子ビームの特性だけで決まり、

$$\eta_{el} = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{1 + \alpha^2} \left(1 + \frac{1}{\gamma_0}\right) \quad (2)$$

で与えられる。

$\eta_{\perp}$  は横方向効率と呼ばれ、電子ビームの旋回運動成分からマイクロ波へのエネルギー変換の割合を示すもので、空洞通過時の電子のエネルギー損失を計算することによって求められる。空洞内の電子の運動は、電子の規格化された運動量  $p$  と電子の旋回角  $\vartheta$  に対する微分方程式 (Yulpatov の方程式)

$$\frac{dp}{d\xi} = -Ff(\xi) \sin \vartheta$$

$$\frac{d\vartheta}{d\xi} = -(\Delta + p^2 - 1) - \frac{F}{p} f(\xi) \cos \vartheta \quad (3)$$

で与えられる [13]。ここで、 $\xi = \pi(\beta_{\perp 0}^2/\beta_{\parallel 0}) (z/\lambda)$  は規格化された軸方向位置である。 $F$  は規格化された電界強度、 $\Delta$  はデチューニングパラメータ（電子の旋回周波数とマイクロ波の発振周波数のずれ）で、

$$F = 5.42 \times 10^{-5} \frac{1}{\gamma_0 \beta_{\perp 0}^3} \sqrt{K \left(\frac{L}{\lambda}\right) S_{mn} P}$$

$$\Delta = \frac{2}{\beta_{\perp 0}^2} \left(1 - \frac{\omega_{c0}}{\omega}\right)$$

で表わされる。また、規格化された空洞長  $\mu$  として、

$$\mu = \pi \left(\frac{\beta_{\perp 0}^2}{\beta_{\parallel 0}}\right) \left(\frac{L}{\lambda}\right)$$

を定義する。ここで、 $P$  は空洞からのマイクロ波出力、 $\omega$  と  $\lambda$  はマイクロ波の角周波数と波長、 $L$  は空洞長、 $K$  は空洞出口テーパでの反射係数で、開発当初の直線テーパを使用した空洞形状では 1.2–1.5 程度、非線形テーパを用いた最近の低 Q 値空洞形状では 1.0 に近い値である。

$$S_{mn} = \frac{J_{m+1}^2(k_{\perp 0} R_e)}{(\chi_{mn}^2 - m^2) J_m^2(\chi_{nm})}$$

は電子ビームとマイクロ波との結合強度である。 $J_m$  は第一種ベッセル関数、 $\chi_{mn}$  は  $J_m(x) = 0$  の解で、円形 TE モードの固有値である。式中の  $\pm$  の符号はマイクロ波の回転方向を示しており、電子の旋回と逆向きに回転する (+) モードと同じ向きに回転する (-) モードを表している。空洞に励振されるマイクロ波は動径方向 ( $\theta$  方向) に進行する波 ( $\propto \exp(\mp j\theta)$ ) が存在し、旋回中心で波を展開すると、それぞれ電子の旋回運動と共鳴するモードが存在するためである。結合の度合いを大きくするには、分子のベッセル関数が極値をとるようにビーム入射位置  $R_e$  を選ぶことになる。ベッセル関数は第 1 ピークが最大値をとるので、通



常  $J_{m\pm 1}^2(k_{\perp 0}R_e)$  が最大となる  $k_{\perp 0}R_e = \chi_{m\pm 1,1}$  を満たすように  $R_e$  を選ぶ。しかし、前述したようにミラー比をむやみに大きくすることは難しいため、選択したモードによっては、第2, 第3ピークに電子ビームを入射する。

入射位置の選択は発振モードを選択的に発振させることにつながるため、主モードに隣接するモードとの分離、モード競合の抑制に重要な役割をする。開発当初に発振モードとして使用された  $TE_{0n}$  モードは、空洞壁の熱負荷では有利なモードであるにもかかわらず、高周波数化と大電力化に際して発振モードとして適さなかったわけは、第1ピークへの入射が難しいことと、第2ピークあるいは第3ピークへの入射では、競合モードの  $TE_{2n}$  モードとのモード競合が回避できなかったからである。

$f(\xi)$  はマイクロ波電界の軸方向のプロファイルを表わす関数(軸モード関数)で、与えられた空洞形状に対して数値的に求めることができる[14]。しかし、コールドモデル、特にスケーリング則では、求めた軸モード関数を直接用いないで、空洞長が定義できるサイン分布, ガウス分布, あるいはこれらを組み合わせたプロファイルを使用する。ここでは、

$$f(\xi) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{2}{\mu}\xi\right)^2} & -\infty < \xi \leq 0 \\ \cos\frac{\sqrt{2\pi}\xi}{\mu}, & 0 < \xi \leq \frac{1}{2} \end{cases}$$

で与えている。

横方向効率 $\eta_{\perp}$ は、空洞入口で旋回位相に対して一様に分布した電子の空洞出口での横方向のエネルギー損失の平均から求められ、 $F, \mu$  と  $\Delta$  の関数となる。求めた横方向効率に対して必要となる規格化されたビーム電流  $I$  は、空洞の定常状態のパワーバランス  $F^2 = \eta_{\perp} I$  から求められる。規格化されたビーム電流と実際のビーム電流  $I_b$  との間には、

$$I = 2.24 \times 10^5 S_{\text{min}} \frac{K}{\gamma_0 \beta_{\perp 0}^4} \left(\frac{L}{\lambda}\right) I_b$$

の関係がある。

あるモードが発振するのに必要な最低のビーム電流、発振開始電流は、空洞の電界強度が小さい ( $F$  が小さい) 線形領域で Yulpatov の方程式(3)の  $p$  と  $\theta$  を  $F$  で展開することによって陽に求めることができる。規格化された発振開始電流は、

$$I_{\text{st}} = \left[ \Im \left\{ \frac{\partial}{\partial \Delta} \left( \int f(x) e^{i\Delta x} dx \right)^2 \right\} - \left| \int f(x) e^{i\Delta x} dx \right|^2 \right]^{-1}$$

で与えられる[15]。ここで、 $\Im\{\dots\}$  は虚数部を表わす。

### 3.2 初期の開発

表2に、TETDがこれまで開発してきた主な核融合実験装置用の大電力ジャイロトロンを開発年順に示す。表には、出力、パルス幅、発振モード、出力モード、放射器と出力窓の種類、および開発した管の位置づけを表すトピックを示した。大電力ジャイロトロン開発においては、日本を代表してITER向けジャイロトロン開発を主導しているJAEAの役割が大きい。JAEAは、1988年に100GHz帯大電力ジャイロトロン開発プロジェクトを立ち上げた。これ以来、JAEAとTETDは共同研究をすすめ、JAEAの開発シナリオに沿って、ITERやJT-60用ジャイロトロン開発を行ってきた。相当する開発管については、JAEAでの管の名称を表に示した。

1994年に開発した電位降下形コレクタ搭載ジャイロトロンにおいて、現在の大電力ジャイロトロン形式が整った。これ以前は、個々の開発において発生した問題、課題と解決方法を示し、形式の変遷について述べる。それ以降は、各コンポーネント別に、開発の主要テーマを述べる。

表2 TETD開発の核融合実験装置用大電力ジャイロトロン。

開発年	型式	周波数	出力	パルス幅	発振モード	出力モード	放射器	出力窓	備考
1979	E3952	22 GHz	25 kW	5 ms	TE01	TE01	-	アルミナ	国産1号機
1983	E3955D	28	200	75 ms	TE02	TE02	-	ベリリア	筑波大ガンマ10用
1986	E3956	56	200	100 ms	TE02	TE02	-	アルミナ	京大 WT-III用
1988	E3958	120	170	10 ms	TE03	TE03	-	アルミナ	JA-G1
1989	E3960	120	500	1 ms	TE12.2	TE12.2	-	アルミナ	JA-G2, 回廊モード
1989	E3962	41	200	100 ms	TE02	TE02	-	アルミナ	筑波大ガンマ10用
1990	E3970	120	460	100 ms	TE12.2	TEM00	ブラソフ- $\alpha$	アルミナ	JA-G3, モード変換器内蔵
1993	E3971	110	410	1.3 s	TE22.2	TEM00	ブラソフ- $\alpha$	サファイヤ	JA-G4, 蒸発冷却コレクタ
1994	E3972	110	500	3.5 s	TE22.2	TEM00	ブラソフ- $\alpha$	サファイヤ	JA-G5, CPD ジャイロトロン
1995	E3974	170	450	50 ms	TE22.6	TEM00	ブラソフ- $\alpha$	サファイヤ	IJ 1
1998	E3976	170	450	8 s	TE31.8	Flat	単らせん	ダイヤモンド	IJ2MD, ダイヤモンド窓
1999	E3980	168	500	1 s	TE31.8	Flat	単らせん	窒化珪素	NIFS/LHD 用
2001	E3978E	170	900	9 s	TE31.8	TEM00	単らせん	ダイヤモンド	IJ3M5, SiC ビームトンネル
2001	E3990	110	1000	3 s	TE22.6	TEM00	単らせん	ダイヤモンド	JT-D1, JT-60U 用
2001	E3992	170	500	30 s	TE31.8	TEM00	単らせん	ダイヤモンド	IJ4, 300 kW-60 s
2005	E3955SU	28	500	100 ms	TE4.2	TEM00	最適化形状	アルミナ	筑波大ガンマ10用
2006	E3993B	170	1000	800 s	TE31.8	TEM00	最適化形状	ダイヤモンド	IJ5M2, ITER 仕様達成
2007	E3988	77	1000	5 s	TE18.6	TEM00	最適化形状	ダイヤモンド	NIFS/LHD 用
2008	E3990E	110	1000	(100 s)	TE22.6	TEM00	最適化形状	ダイヤモンド	JT-D5, JT-60SA 用

### 3.2.1 国内初の封じ切りジャイロトロン E3952

TETDにおけるジャイロトロンの開発は、1979年に京都大学理学部の指導のもと22 GHz ジャイロトロン E3952 の試作に始まった。既に、ソ連ではT-10トカマクのECH実験に84 GHz, 200 kW–100 ms ジャイロトロンが使用され、米国においては、バリアン社（現CPI社）が28 GHz, 200 kW 管の開発結果を発表しており、完全に後追いの形で開発を開始した。日本においては、1977年に京都大学理学部でジャイロトロンの開発が開始され、日本電気が35 GHz 管を試作したが、組立式であったため真空度が上がらず、安定な発振が得られていなかった。

E3952は国内初の封じ切りジャイロトロンである。図10の外観写真において、電子銃の左側に排気管を設けている。排気ベーキング後に排気管を圧接・切断（チップオフ）し管を封止する。管自体に真空リークはなく管内圧力は $10^{-8}$  Pa程度であるが、動作時のカソードやコレクタからのアウトガスを排気するために排気管の先端にイオンポンプが装備されている。これにより高真空が維持できるようになり、最大40 kV–3 Aの電子ビームが得られた。エミッションベルトには、直径22.4 mm、幅6 mmのTETD製のバリウム含浸カソードを使用した。これ以来、TETDはジャイロトロンのカソードの開発を続けている。その発展については後述のとおりである。発振モードはTE<sub>01</sub>モードで、共振周波数22.15 GHz、外部Q値は800である。ビーム電圧34 kV、ビーム電流1.75 Aで、25 kW–5 msの出力が得られた。効率は29%であった。出力は、コレクタを兼ねた内径28 mmの出力導波管から外部伝送系に接続され、WT-1トカマクのECH実験に使用された。

### 3.2.2 軸対称モードジャイロトロン

1980年代に入ると多くのプラズマ実験装置でECH実験が計画されるようになり、TETDも本格的にジャイロトロン開発に着手した。1983年に筑波大学ガンマ10装置のECH用に、28 GHz ジャイロトロン E3955の開発を開始した。さらに、京大WT-3用56 GHz ジャイロトロン E3956の受注をきっかけに、MIGの電子ビーム軌道解析コード、円形開口空洞に励振されるマイクロ波の固有周波数、外部Q値、軸モード関数を計算するコード、このマイクロ波中を走行する電子ビームのエネルギー損失から発振効率、発振開始電流を計算するコードなどを整備し、設計に用いるようになった。E3955とE3956は、当時の標準的な性能のTE<sub>02</sub>モードを発振する出力200 kW、パルス幅100 ms級のジャイロトロンである。性能確認のための短パルス試験では、ほぼ設計どおりの発振周波数、出力、効率が得られ、設計コードの有効性を確認したが、パルス幅100 msまでのパルス伸長試験や伝送系と接続した実試験では、いろいろな問題が発生した。

E3955は、1991年に管の製作性の向上とモード純度の向上を目的として管の空洞からコレクタまでのアップテーパに非線形テーパを採用した改良管E3955Dを開発したが、伝送系での放電が問題となった。ガンマ10では、口径62.5 mmの円形導波管を基本とするTE<sub>02</sub>モードの伝送系を構成していたが、モード選択性を向上させるために方向性



図10 22 GHz ジャイロトロン E3952.

結合器には口径37 mmのものを使用していた。放電は円形導波管からのダウンテーパ出口付近で頻発し、径方向に電界の存在する非軸対称モードの存在が疑われた。k-スペクトロメータによるモード純度の測定結果、主モードTE<sub>02</sub>のモード純度は96%で、他の軸対称モードのTE<sub>03</sub>が1.5%、TE<sub>04</sub>が0.5%、他は非軸対称モードのTE<sub>24</sub>等であることが明らかになった。m値の異なるモードへの変換はDCブレーク等での軸ずれによるものと考え、円筒形状のSiC製管壁で構成した不要モードフィルタをジャイロトロンの出力部に取り付けることによって放電を抑制した。

E3956では、ダミーロード（水負荷）が問題となった。ジャイロトロンからの出力は、最終的にダミーロードに吸収され熱として処理される。マイクロ波吸収材に水を用いると、マイクロ波の入射面近くで水が沸騰する突沸という現象が発生する。ミリ波領域では、波の吸収の深さが短く、水の表面にマイクロ波のエネルギーが集中するためである。突沸の衝撃によりマイクロ波透過面に使用するセラミックやガラスが割れることがあるが、当時このような知識はなく、最初に用意したガラス製の自作水負荷はパルス幅数ms程度で使用できなくなり、次に製作した塩化ビニール製のものも10ms程度で熱により溶けて水漏れが発生した。結局、ヘリオトロン核融合研究センターからヒューズ社製の長パルス水負荷を借用したが、突沸防止のためこの水負荷には200 l/s程度の流量の水が必要であった。

これを機に、ダミーロードの開発にも取り組み、マイクロ波吸収剤にSiCを使用したものや、円筒状の金属壁を覆うようにテフロンチューブをコイル状に巻き、このテフロンチューブに流した水にマイクロ波を吸収させるタイプなど、ジャイロトロンの出力レベルにあわせていろいろな大きさのものを製作した。SiCを使用したダミーロードは、SiCの導電率のバラツキのため、マイクロ波の吸収が大きすぎて割れることもあったが、冷却水の突沸がなく流量が少なくすむという利点があり、200 kWレベルのジャイロトロンの試験で活躍した。テフロンチューブを使用したものは、入射マイクロ波をセンター部に設けたコーンで反射させ、壁面に配置したテフロンチューブ内を流れる水にマイクロ波を吸収させる。コーン形状を工夫して均等にマイクロ波を反射させることとマイクロ波入射面積を大きくすることで、現在でも、1 MW–1秒までのマイクロ波のエンジニアリングと出力測定に使用している。

### 3.2.3 高周波数化と回廊モードジャイロトロン

1988年に、日本原子力研究所（原研、現JAEA）がECH



用の大電力ジャイロトロンを開発することを決定した。大型プラズマ実験装置のECH実験に必要な周波数100 GHz以上、単管出力500 kW - 1秒以上のジャイロトロンの開発が、目標として掲げられた。当時、西側でジャイロトン開発をリードしていたバリアン社では、既に140 GHz, 100 kW, CW出力を達成し、回廊(Whispering Gallery Mode)モードのTE<sub>22,2</sub>モードを発振モードとして選択し、110 GHz, 500 kW, CW管の開発を進めていた[16]。

後述するように空洞の熱負荷密度は周波数の2.5乗に比例すること、TE<sub>0n</sub>モードは径方向の次数が上がると周波数が低い側に存在するTE<sub>2n</sub>モードとのモード競合が厳しくなることから、軸対称モードジャイロトロンのスケールアップでこの目標を達成することはできないことは明らかであったが、欧米の開発レベルに追いつくことを念頭に二段階の開発を進めることになり、まず、150 kWまでの出力で高い周波数の安定動作を得ること、次に、500 kWレベルの発振を確認することを目標に、2種類の120 GHz ジャイロトン E3958 と E3960 の開発を開始した。

E3958では150 kW - 10 ms出力を目標とした。発振モードはTE<sub>03</sub>モードである。初号管では、空洞入口を階段形状にしたため、この部分で大きなモード変換が発生し、主モードTE<sub>03</sub>の安定発振が得られなかった。空洞形状を変更した2号管では、主モードの周波数に整合した窓では競合モードの反射の影響により主モードの発振が得られないことが明らかになり、主モードTE<sub>03</sub>に対して反射が存在するように出力窓にアダプタを付加して、最終的に170 kW - 10 msの出力(効率は24%)を達成した[17]。

E3960は、500 kWの短パルス出力を目標とした回廊モードジャイロトロンで、発振モードはTE<sub>12,2</sub>モードである。回廊モードは、円形TE<sub>mn</sub>モードで $m \gg n, n = 1, 2$ のモードの総称である。電界が導波管(空洞壁)境界近くに集中していることが特長で、表面モードとも呼ばれている。電子ビームの入射位置が空洞壁に近い位置になるため、他の $n$ の大きいモード(体積モード)とのモード競合が少なく、空洞を大きくできるので熱負荷が軽減できる。さらに、ビームの電位降下が少なく、またビーム断面積が広くとれるので大きなカソードを使って大電流が得られることから、大電力化に適したモードとして注目された。バリアン社などで既にこのモードのジャイロトロンの開発が始められていたことは上述のとおりである。TETDも、ヘリオトン核融合研究センターの106 GHz, 500 kW ジャイロトロンの調達に対応し、設計提案書を作成することから回廊モードジャイロトロンの開発を始めた。結局のところ、このジャイロトロンはバリアン社が受注したが、これがE3960の設計のもととなった。製造・試験においては、3.3節に述べるように、電子銃の熱絶縁の不備によって発生した不要ビームのアノード過電流やビームトンネルでの寄生発振などのいくつかの課題が発生し、最終的に3回目の作りかえで仕様の500 kW以上の発振を得た[18]。

### 3.2.4 モード変換器内蔵ジャイロトン E3970

E3960では、短パルス試験において500 kWの回廊モード出力を達成したものの、その後の長パルスエージングで

は、コレクタの局部加熱などによりパルス伸長が進まなかった。回廊モードジャイロトロンの開発で先行していたバリアン社でも同様の認識がされていた。また、伝送系に複雑なモード変換器を設ける必要があるという問題もあった。そこでこれらを打開するために、原研がモード変換器内蔵形ジャイロトロンの開発を決定し、その製作を受注し共同で開発を進めた。

回廊モードは伝送損失が大きく、円形導波管での伝送に適さないため、ブラソフ形放射器などで空中に放射した後ミラーで集束しながら伝送する準光学的伝送方法が、ジャイロトロン開発と平行して検討されていた[19]。TETDにおいても、原研と共同でコールド試験でのブラソフ形放射器からの放射パターン測定、集束用の放物面鏡の構成方法の検討、ミラー伝送の解析コードの開発を進めていたが、これらを管に内蔵する放射器とミラー伝送系の設計に適用した。

E3970は西側初のモード変換器内蔵ジャイロトロンで、図11はその構造である[20]。電子銃、ビームトンネルと空洞はE3960と同じ形状で、ブラソフ形放射器の一種である $\alpha$ -cut形放射器と5枚の伝送鏡から成る準光学的モード変換器を空洞の下流に配置した。5枚の伝送鏡のうち、放射器と対面する鏡と最終段の鏡は放物筒面鏡、他の3枚は平面鏡である。超伝導マグネットの常温ボア空間の制約から、管軸方向に波を伝送する必要があり、3枚の平面鏡を使用した。放射器から出力窓までの光路長は約1 mで、管の測定に管軸と平行に取り付けられている出力窓の位置で、出力波ビームの強度プロファイルが円形ガウス分布になるように放物筒面鏡の曲率を決定した。伝送鏡の設置誤差による光軸のずれを修正するために、最終放物筒面鏡には傾き調整用の可動機構がついている。

伝送鏡群の設計には、Kirchhoff-Huygensのスカラ回折

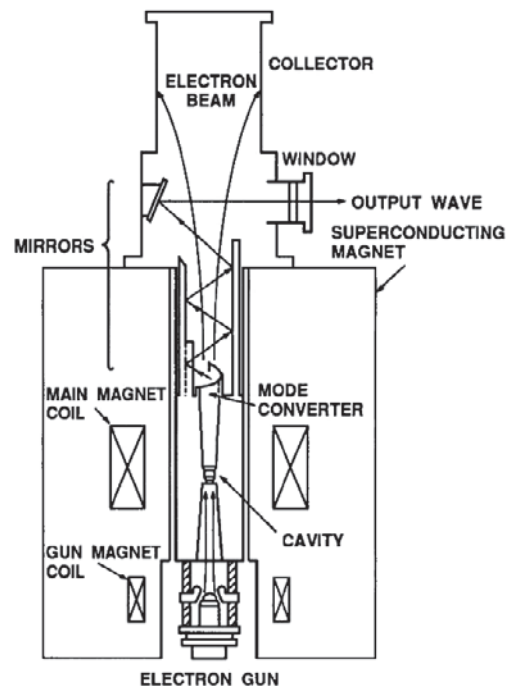


図11 モード変換器内蔵ジャイロトン E3970 の構造。

公式に基づいた計算コードを作成した。当時議論になったのが、波源、即ち、放射器出口での波の強度分布である。計算コードでは、放射器の直線上の切口と管軸とで囲まれた長方形の部分を波源とし、波源上で軸方向に一様分布、径方向には円形 TE モードの電界分布を仮定した。この仮定の妥当性が定かでなかったため、カット形状が異なるブラソフ形放射器を数種類作成し、コールド試験により放射パターンを測定した。測定結果が計算結果に最も近かった  $\alpha$ -cut 形のカット形状を放射器形状として採用した。最終的には、管に搭載するものと同じ構造のモード変換器を製作し、出力されるマイクロ波の電界プロファイルが計算どおりに得られることを確認した。本モード変換器の伝送効率（計算値）は 80 % で、そのうちの半分が放射器と第一放物面筒鏡の間の回折損失、残りがそれ以降の伝送鏡での回折損失である。この回折損失は効率を低下させるだけでなく、管内の局所加熱による損傷の原因にもなるため、その後の大電力化において、解決すべき課題の一つとなった。

E3970 では、モード変換器内蔵の実証を第一目標にしたので、電子ビームや空洞パラメータは実績のある E3960 と同じにし、モード変換効率 80 % を考慮して、目標出力を 400 kW - 100 ms としたが、モード変換器を内蔵することによって発振特性が改善され、548 kW - 1 ms の短パルス発振と、450 kW - 100 ms の長パルス動作を達成した。ブラソフ形モード変換器は、カット面の形状からわかるように伝送モードの回転方向に選択性をもっている。主モード  $TE_{12,2}^{(-)}$  に対して最適化したモード変換器では、回転方向が逆の競合モードの  $TE_{6,4}^{(+)}$  と  $TE_{9,3}^{(+)}$  は、放射器と第一ミラーにおいて集束されず出力窓まで伝送されない。これによって、E3958 や E3960 で発生した出力窓からの競合モードの反射によってモード競合が悪化する現象はなくなり、本来の目的である電子ビームとマイクロ波の分離によるコレクタの大容量化に加えて、モード変換器内蔵の有力な利点であることが明らかになった。

ジャイロトロンの開発とともに原研において開発が進められていた 100 kV - 35 A - 10 s の準定常電圧電源が 1991 年に完成し、1992 年に実施した 450 kW - 100 ms までの長パルス試験が、この電源での最初の本格的な試験となった。これ以降、TETD から原研那珂研究所に 1-2 名出張・滞在して、原研との共同チームでジャイロトロンの実験・長パルス化研究を進めるスタイルが続き、その間に多くの成果が生み出された。この高周波工学試験装置は、原研によって改良や増強が施され、現在では日本でのジャイロトロンや ECH 用主要コンポーネントの開発において中心的役割を果たしている。

### 3.2.5 大電力化と低効率

E3970 の成功を受けて、秒オーダーの長パルス動作をめざした大型ジャイロトロンを開発を行った[21]。図12に E3971 の外観を示す。全長 2.85 m、重量 1.5 t の大型電子管である。JT-60U への応用を考えて、周波数は 110 GHz となった。500 kW - 1 s 出力の本格的な長パルス管ということで、主要コンポーネントの熱負荷の低減と冷却に重点をおいた設計を行った。発振モードには高次の回廊モードの  $TE_{22,2}$

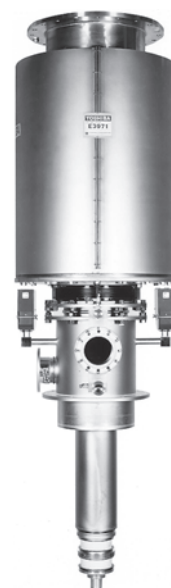


図12 110 GHz, 500 kW 長パルスジャイロトロン E3971.

モードを選択し、外部 Q 値を低く設定することによって、空洞のピーク熱負荷を 500 kW 出力時に 1.4 kW/cm<sup>2</sup> と低く抑えた。3次元 ABAQUS コードによる熱解析の結果では、500 kW - 1 s 動作後の最大熱応力は 240 MPa で、平行して実施していた電子ビームを負荷とした空洞模擬熱負荷試験結果から 2000 ショット程度の繰り返し寿命を予測していた。

コレクタの冷却には、クライストロンと同様、蒸発冷却を採用した。ジャイロトロンでは、スペントビームは超伝導マグネットで発生する磁力線にそってコレクタに入射するため、コレクタ位置で十分に磁力線を拡げることは幾何学的に難しい。そのため、コレクタ周りに複数のソレノイドコイルを配置し、電子ビームを時間的に軸方向に掃引することによって熱負荷を軽減する方法を採用した。コレクタ壁に流れる渦電流によってコレクタ内部に発生する磁界強度が減少することを防ぐために、掃引用コイルは 1 Hz 程度交流で駆動した。掃引を行わない場合は、コレクタでの電子ビームの広がり 40 mm 程度で、無発振時の最大入力電力 2.4 MW に対して 2.2 kW/cm<sup>2</sup> の熱負荷密度となるが、掃引によってランディング位置を 430 mm に拡げることができ、熱負荷は平均で 0.3 kW/cm<sup>2</sup>、ピークで 0.65 kW/cm<sup>2</sup> に低減される。

出力窓は、サファイヤ製のダブルディスク窓である。2枚ディスク間に低誘電損失媒体のフッ化炭素 (FC-75) を流すことによってディスク面を冷却する方式で、円周部を水冷するシングルディスク窓に比べて大きなエネルギーのマイクロ波を通すことができ、長パルス管では一般的な方式であった。出力窓でのマイクロ波の電界分布は、長軸方向 29.5 mm、短軸方向 29.2 mm ビームスポットサイズの楕円形状のガウシアン分布となるが、この電界分布に対して、500 kW - 1 s 動作後においても FC-75 の沸騰しない温度に抑えられ、また、熱応力もサファイヤの破壊強度の 1/10 以下になるよう設計を行った。

大電力発振試験と長パルス化研究のため、高周波工学試験装置に新たに5 T超伝導マグネット、真空排気可能なコルゲート導波管によるHE<sub>11</sub>モード大電力伝送系、金属製ダミーロードなどが整備された。パルス幅2 msの短パルス試験において550 kW、効率23%の出力を確認した後、長パルスエージング試験を実施し、約1ヶ月半のエージングで、410 kW-1.3 sの長パルス動作を達成した[22]。

目標の秒オーダーの長パルス動作は何とか達成したが、効率が低いという問題が残った。短パルス試験においても、得られた最高効率は24% (400 kW出力時)である。設計では、E3970と同様の $\alpha$ -cut形放射器を用いたモード変換器の変換効率80%を考慮して、空洞の発振効率を36%とした。空洞壁の熱負荷軽減を優先するため外部Q値を低く設定し、これによる効率低下は電子ビームのピッチファクタを1.8と高くすることで補償することを設計のポイントとした。しかし、実際の動作においては、「ビーム異常」と呼んでいるビーム電流が突然跳ね上がる現象が発生し、ピッチファクタの高い動作ができなかった。

最初は、電子銃の放電によるビーム過電流と認識していたが、ビーム異常発生時には、温度制限領域で動作しているはずのカソードから、著しい場合、空間電荷制限領域に達する電流が瞬時に供給されていることが、測定により明らかになった。また、ビーム異常は、アノード電圧が高いほど出やすくなり、あるアノード電圧以上では必ず発生することが判明した。ビーム電源の立ち上がり時に現象が頻発していたが、ビーム電源の立ち上がり時には、浮遊容量のためにアノード電圧の分圧比が設定値より高くなることがわかり、アノード分圧器にコンデンサを付加するなどの対策を講じた。さらに、当時製造していたE3955やE3956などの中出力管においてもこの現象が発生していることが判明した。当時変更したインプレカソードの製造プロセスを疑い、エミッタ材のバリウムを含浸するポーラスタングステンの粒径を変更した。これに関しては、ビーム異常との関連が見出せないとのカソード技術者の見解であったが、このプロセスを見直すことで現象が緩和されたのも事実である。

これらのことから、ビーム異常にはピッチファクタとカソードが関係していると考え、現在では、以下のような発生のメカニズムを推定している。

1. 電子ビームに速度分散が存在するため、巡回速度成分がしきい値より高い電子はビームトンネル内でミラー磁場によって反射され電子銃側に逆行する。高いピッチファクタでは、速度分散も大きいため、逆行する電子も多くなる。
2. 逆行する電子は、ビームトンネル内に存在する寄生発振のマイクロ波からエネルギーを得て加速され、電子銃内の逆電位を乗り越えてカソード表面に入射する。
3. 電子で叩かれたカソード表面から二次電子が放出され、電子ビーム電流が増加する。

インプレカソードの二次電子放出率は、エミッタ材の構成

比やコーティングする金属材料によって変化することが知られている。ポーラスタングステンの粒径を変えることは、エミッタ材の表面状態を変えることになるので、二次電子放出率が変化することはあり得ないことではないというのがカソード技術者の現在のコメントである。

### 3.3 電位降下形コレクタ搭載モード変換器内蔵ジャイロトロン

E3971の開発においては、設計ポイントとして掲げたピッチファクタの高い動作は実現できず、結果として、安定動作を得るためにはピッチファクタは高くても1.4程度に設定すべきとの認識となり、さらに全体のエネルギー変換効率を上げるための手段として、原研がCPD (Collector Potential Depression) の採用を決定した。図13に示すE3972は、世界初の電位降下形コレクタ搭載ジャイロトロンである。電子銃、空洞、モード変換器などの基本構造は変更しないでCPD動作ができるようにE3971を改造したが、電子ビームの質や空洞での発振効率に関する電子銃や空洞の詳細形状については、原研が、独自に開発した計算コードを用いて最適化設計を行った。これ以降、ジャイロトロンの電気設計は原研で実施されている。

図13において、出力窓の下側には、ボディとコレクタ間を絶縁するアルミナセラミック製の絶縁円筒を配置している。また、ボディと超伝導マグネット (接地電位) との絶縁には、樹脂系の絶縁体 (黒くみえる部分) を使用した。短パルス (50 ms) で実施したCPD検証試験で、ビーム電圧77 kV、ビーム電流26 Aで、回収電圧 (ボディ-コレクタ間電圧) を最適化し、回収電圧30 kVで出力610 kW、効率50%を得た。長パルス動作では、ほぼ2週間のエージング



図13 電位降下形コレクタ搭載モード変換器内蔵ジャイロトロン E3972.



で、350 kW-5 s の出力に到達した。CPD による電子ビームのコレクタへの入射エネルギーが減少したことにより、E3971 に比べてエージング時間は大幅に短縮された。効率向上に加えて、CPD の実用上の大きな利点である [23, 24]。

モード変換器の内蔵と電位降下形コレクタの搭載によって、現行の大電力ジャイロトロンの形が確立した。これ以降、主要コンポーネントに対して、原研を中心に改良や新しいアイテムの導入を行いながら開発を続け、2006 年末に、冒頭で紹介した 170 GHz ジャイロトロンで ITER の目標仕様が達成された。また、ECH 実験用として、LHD 用 168 GHz 管 E3980、6 本を 1999 年に、JT-60U 用の 110 GHz 管 E3990 を 1998 年以降計 5 本、ガンマ 10 用に 28 GHz 管 E3955SU、3 本を製作し、各研究施設に納入した。

3.3.1 CPD

CPD ジャイロトロンでは、スペントビームの運動エネルギーをボディ-コレクタ間に印加した減速電界によって電氣的に回収し、総合効率を改善する。実際には、図 14 に示す構成の電源を使用する（アノードは省略）。発振に必要なビーム電圧  $V$  はカソード-ボディ間に接続された高インピーダンスの加速電源（ボディ電源）によって印加され、ビーム電流はカソード-コレクタ間の主電源（コレクタ電源）によって供給される。空胴で発振するマイクロ波電力を  $P$  とすると、加速電源に電流が流れない（ボディに電子ビームが流入しない）場合は、効率  $\eta_t$  は、

$$\eta_t = \frac{V}{V_k} \cdot \frac{P}{VI} = \frac{1}{1 - \frac{V_R}{V}}$$

となる。前項は CPD による効率の向上分を表し、 $V_R$  ( $= V - V_c$ ) は回収電圧（コレクタ-ボディ間電圧）である、回収電圧を大きくするほど効率も大きくなるが、スペントビームはエネルギー分布をもつため回収電圧にはしきい値が存在する。ジャイロトロンの場合は、進行方向の電子ビームの運動エネルギーは発振に寄与しないから、少なくともこの分だけは回収できると考えると、このしきい電圧は、(2) 式から、概略

$$V_{cr} = V \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{1 + \alpha^2} \left( 1 + \frac{1}{\gamma_0} \right) \right\}$$

で与えられる [25]。

CPD の他の利点は、電源の固体化とコスト低減である。発振原理からわかるように、ジャイロトロンでは安定な発振を得るためにはサイクロトロン角周波数に影響を与

える外部磁場とビーム電圧の安定度が必要で、ジャイロトロン電源には、ビーム電圧を 0.5 % 以下の安定度で定電圧制御することが要求されている。また、電子銃の放電に対して、流入エネルギーを 10-30 J に抑えるための高速遮断機能も要求される。これを満足するために、初期の電源は、直流側に定電圧制御と管放電時の高速遮断のために EI-MAC 製 X2062 などのテトロードを使用した高価な大容量電源であった。

CPD の場合、安定度の必要な加速電源は 100 kV-100 mA 程度の小容量電源でよいので、インバータ電源が使用される。また、回収電圧に多少の裕度を持たせることで電圧安定度を緩和できるので、交流側のサイリスタ電力調整装置と直流側の半導体スイッチ（GTO, IGBT など）に、それぞれ、定電圧制御と高速遮断機能を持たせる方式が、主電源に採用されている [26, 27]。JT-60U の ECH システムでは、JAEA で開発された IGBT スイッチを使用した電源システムにおいて、110 GHz、1 MW ジャイロトロン E3990 が運転されている。また、LHD の ECH システムでは、東芝府中工場が製作した 65 kV、126 A の主電源、90 kV、100 mA のボディ電源、50 kV、50 mA のアノード電源で構成された CPD 電源システムと 168 GHz、500 kW ジャイロトロン E3980 を組み合わせた。CPD ジャイロトロンシステムとして初めて実用化したものである。この電源システムでは、主電源において、IGBT スイッチの保護用のインダクタによってビーム電流（アノード電源）立ち上げ時に出力電圧が一旦降下する。この電圧降下によってボディ電源の出力電圧（加速電圧）が浮遊容量を介して振られることが、ジャイロトロンと電源システムとの組み合わせ試験の最終段階で判明し、ボディ電源と主電源の接続点の変更やボディ電源へのインダクタの追加などの回路変更を実施した。その他、上記インダクタの逆起電力防止用のダイオードアレイがジャイロトロンの放電時に破損するなどの課題を解決し、実用運転を達成した [28]。現在は、77 GHz、1 MW ジャイロトロン E3988 が、ECH 実験に使用されている。

3.3.2 電子銃

電子銃開発のポイントは、エミッションベルトの熱絶縁である。図 15 は、カソードアセンブリの状態では、真空加熱処理（ガス出し、温度測定など）を行っているときのもので、(a) は E3958 用の小型カソード、(b) は E3960 用の大型カソードである。(a) の小型カソードでは、エミッションベルトを熱絶縁していないため、ノーズ部とスカート部もエミッションベルトとあまり変わらない温度に加熱されている。スカート部へのエミッタ材の熱拡散によって発生する不要電子ビームは、電極形状を工夫することによってアノードに流入しないようにできること、小型故に熱絶縁が難しいことが、積極的に熱絶縁をとらなかった理由である。

E3960 では、不要電子ビームのアノード流入を形状で回避できないことはわかっていたが、熱絶縁構造が不十分のまま初号カソードを製作し、アノード過電流を引き起こした。(b) は熱絶縁対策後のもので、エミッションベルトだ

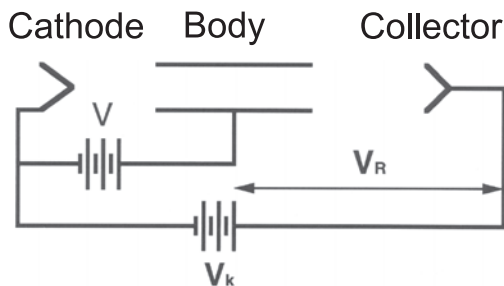


図 14 CPD ジャイロトロンの電源構成。

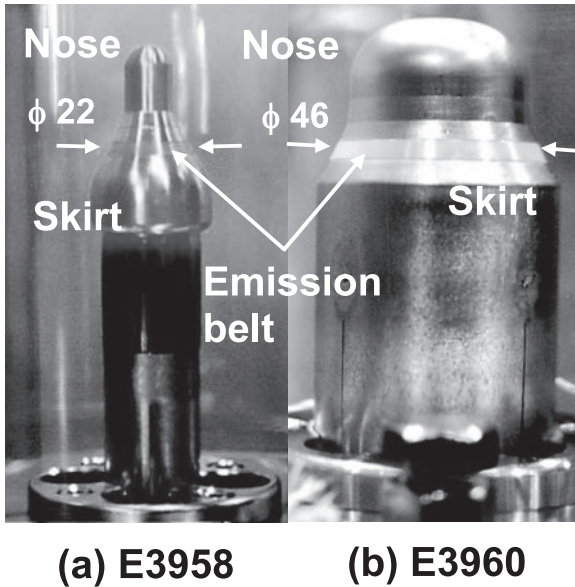


図15 ジャイロトロンのカソードエミッションベルトの熱絶縁  
(a) E3958用小型カソード (b) E3960用の熱絶縁対策後のカソード。

けが加熱されていることを示している。エミッション面の温度分布の一意性も要求されており、エミッション材を含浸するポーラスタングステン焼結体の空孔率を適切に管理している。エミッタには、CW クライストロンのカソード用に開発したMタイプ(Irをエミッタ表面にコーティングしたもの)を使用している。エミッタ材の酸化バリウムだけを含浸した標準タイプのエミッタに比べ、動作温度が100度程度低いため、電子銃の放電を少なくでき、かつ長寿命の利点を持っている。

ジャイロトロンのカソードは温度制限領域で動作するため、ビーム電流はカソード温度によって変化する。エミッタから熱電子が放出される時には仕事関数分のエネルギーを消費しなければならぬため、この分カソード温度が低下する。この現象をエミッションクーリングと呼んでいる。秒以上の長パルス運転では、これによるビーム電流の低下が顕著になりマイクロ波出力も低下する。これを解決するために、ヒータ電力の増減によるカソード温度(ビーム電流)の制御を試みているが、カソードの熱容量が大きいため、カソード温度(ビーム電流)の追従が遅いのが現状である。エミッタ表面温度の均一性が良く、熱容量の小さいエミッタの開発が今後の課題である。

### 3.3.3 ビームトンネル

ビームトンネルは、その名のとおりに、電子銃から空洞に電子ビームを導くトンネルとのイメージが強く、ジャイロトロンを開発を始めた頃は、何が問題になるのかを明確に把握できていなかった。E3960の開発において、マイクロ波吸収材としてダミーロードやモードフィルタに使用していたSiCの装荷を検討した。モリブデンの表面にSiCを蒸着したものとバルクSiCについてテストピースを製作し、ろう付け強度や耐熱性を評価したが、いずれも電子管製造プロセスに耐えうとの結果は得られず、マイクロ波吸収材のビームトンネルへの装荷は見送った。

このE3960開発の過程で、寄生モードの発振が発生した。E3960の発振モードは回廊モードTE<sub>12,2</sub>であるが、最初に確認した発振は、空洞での発振ではないことが判明した。管から出力されるマイクロ波の周波数やモードパターンの解析から、ビームトンネルに存在する直線円筒部での発振とわかった。直線円筒部において、両側のテーパでの反射によってQ値の高い領域を形成したため、この部分の磁場強度に対して発振条件を満足するモードが発振した。対策として採用したテーパ形状が、これ以降のジャイロトロンビームトンネル形状としてしばらく定着した。

しかし、1995年から周波数を170GHzとして開発を始めたITER向け開発管においては、発振効率は設計値に比べて5-10%低い20%台に止まり、また、数秒を越える長パルス運転では、ビーム電流が時間とともに増大する現象が観測された。この原因について、

1. 発振効率が低いのは、ビームトンネルでの寄生発振によって、空洞に入射する前に電子ビームのエネルギー分散や速度分散が大きくなるため。
2. 発生したマイクロ波によってカソードが加熱され、ビーム電流が増大する。
3. 速度分散が大きくなることによってミラー磁場による反射電子の量が増え、マイクロ波からエネルギーを得た反射電子によるカソードの加熱によって、ビーム電流が増大する。反射電子量が多い場合は「ビーム異常」を引き起こす。

との推定のもと、原研がSiCによる寄生発振の抑制効果を短パルス管において調べた。その結果、1MWの出力においても30%以上の効率が得られることがわかり、図16に示すような内面がテーパ形状のSiCシリンダで構成したビームトンネルをE3978Eに搭載した[29]。当時は、ろう付け時の昇温降温によるクラック発生を抑える方法が見つからず、SiCを機械的にはめ込む構造を採用したが、後に、SiCバルクをCu薄肉筒にろう付けする方法を開発した。

E3978Eの試験では、短パルス試験において、最高出力1.2MW(効率27%)および最高効率30%(出力1MW)を得、このビームトンネルの効果を確認した。また、長パルス試験において、ビーム電流の時間的増大がない(エミッションクーリングによりビーム電流は低下する)ことを確認し、0.9MW-9.2sの動作を実証した[30]。

### 3.3.4 空洞と発振モード

表2の発振モードの推移が示すように、最近のMW級のジャイロトロン発振モードには、体積モードを選択している。空洞壁の熱負荷の低減に体積モードが適していることが最大の理由である。また、伝送あるいはモード変換が困難、電子ビームによるビーム電圧降下が大き、モード競合が厳しいなどの体積モードには不都合な事項が、解決あるいはあまり問題とならなくなったことも理由の一つである。モード競合については、後で詳しく述べるが、各項目については次のとおりである。

軸対称モードは円形導波管伝送路での低損失伝送に、回廊モードはブラソフ形放射器でのモード変換に適したモー



ドであることが、モード選択の理由の一つであった。しかし、放射器や準光学伝送系の著しい進展によって、体積モードでも最終的に円形コルゲート導波管内を伝搬するHE<sub>11</sub>モード（伝送ロスが最も小さいモード）に変換できるようになった。

空洞に入射する電子ビームの実効的なビーム電圧は、電子ビーム自身の空間電荷によって動作開始時低下する。ビーム電圧降下は、電子ビームを内側に入射するほど大きくなるため、体積モードではかなり大きな値になる。この分だけ電源電圧が余分に必要となるため効率の低下を招くが、CPDの導入によって効率の低下はなくなった（図14に示すようにビーム電圧を与える加速電源は仕事をしない）。さらに、長パルス動作においては、電子ビームと管内のアウトガスとの衝突で発生するスロイオンによって電子ビームが中和されるため、実効的なビーム電圧は、最初の数100 msで回復することが判明した。この間のビーム電圧の振舞は、ビーム電流やアウトガス量により変化するため、エージング初期には発振動作が安定しないなどの事象が発生するが、管内真空度を電子銃が放電しないくらいの圧力に保ちながら、徐々にビーム電流とパルス幅を増やしていくエージング手順によって対処している。

空洞壁の平均熱負荷  $\rho$  (kW/cm<sup>2</sup>) は、

$$\rho = 1.48 \frac{1}{\sqrt{\sigma}} \frac{K \cdot P [\text{MW}] \cdot \mu \cdot f^{2.5} [\text{GHz}]}{(\chi_{mn}^2 - m^2) a \beta_{\perp 0}}$$

で与えられる[11]。ここで、 $\sigma$ は空洞材料の導電率で、無酸素銅(250℃)では $3.0 \times 10^7$  S/mである。上式からわかるように、熱負荷は発振周波数の2.5乗に比例するため、高周波数化が最も厳しい要求となる。発振モードに関しては、 $\rho$ は $(\chi_{mn}^2 - m^2)$ に反比例するため、同じ $m$ の値に対しては $n$ の大きいモード(体積モード)の方が熱負荷の軽減に有利になる。繰り返し熱疲労などの寿命と信頼性に関するデータの蓄積は今後の課題であり、熱負荷の許容値もこれらのデータから評価すべきものであるが、現在の設計では、1.0–1.5 kW/cm<sup>2</sup>を平均熱負荷密度の上限としている。

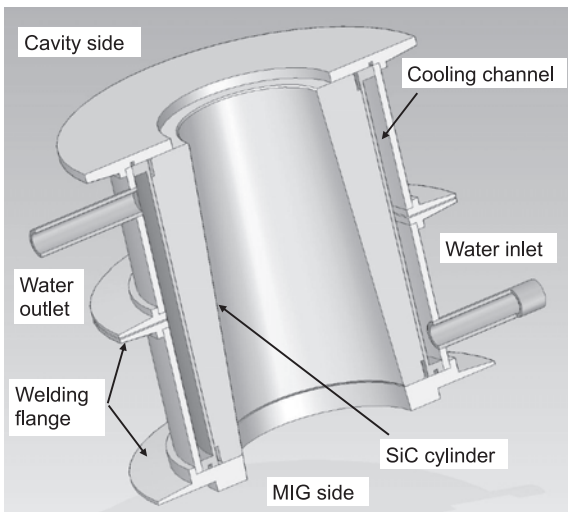


図16 SiC シリンダを装加したビームトンネルの構造。

図17は、前節に述べた規格化された電界強度  $F$  と空洞長  $\mu$  に対する横方向効率の依存性を示している。ここで、 $F$  と  $\mu$  の各点において横方向効率が最大になるようにデチューニングパラメータを最適化している。また、図の灰色の領域はソフトスタート領域を、白色の領域はハードスタート領域を示している。各動作点において定常発振に必要な電流  $I$  と発振開始に必要な電流  $I_{st}$  の大きさによって、ソフトスタートは  $I_{st} < I$ 、ハードスタートは  $I_{st} > I$  で定義される。ソフトスタート領域では自励発振が可能である。一方、ハードスタート領域で発振を達成するためには、ソフトスタート領域で発振させた後、発振を維持しながらビーム条件あるいは磁場条件を変え動作点に近づけることが必要である。

黒丸は、表2に示した主なジャイロトロン $F$ と $\mu$ の設計値である。上記熱負荷条件の制約のため、横方向効率が70%以上の領域では動作できず、横方向効率60%の周りを三日月上に分布している。 $F$ 値が大きい側では低次モードが、 $\mu$ が高い側では高次モードが選択されている。周波数と出力が大きくなるにつれて、熱負荷条件を満たすために高次モードを選ぶ必要があるが、高次モードになるほど結合強度が小さくなるため、高効率動作を得るには $\mu$ の値を大きくしなければならない。また、ソフトスタート領域あるいはそれに近い動作点を選択したいことから、必然的にこのような分布となる。

### 3.3.5 モード競合

発振モードが高次数になるにつれて空洞内のモード密度が大きくなる。したがって、発振周波数の違いによって、各々のモードの発振領域を分離することが難しくなる。即ち、モード競合が厳しくなる。図18はE3958の主モードTE<sub>03</sub>(発振周波数120.17 GHz)と競合モードTE<sub>23</sub>(117.76 GHz)の競合状態を示したもので、TE<sub>03</sub>モードの効率と発振開始電流、TE<sub>23</sub>モードの発振開始電流の主磁場強度への依存性を示している。ここで、主モードの効率は、ビーム電流は6 Aと9 Aの場合である。この図は、各モードが単独に発振した場合の計算結果であるが、高効率の主モードの単独発振を得ることが設計の目的であることと、多モード解析や実験結果から、2つのモードが同時に定常発振することはほとんどなく、どちらかのモードが単独に発振す

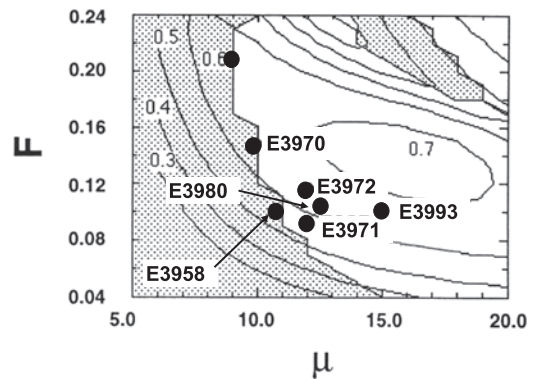


図17 規格化された電界強度と空洞長に対する横方向効率と主要ジャイロトロン $F$ と $\mu$ の動作点。



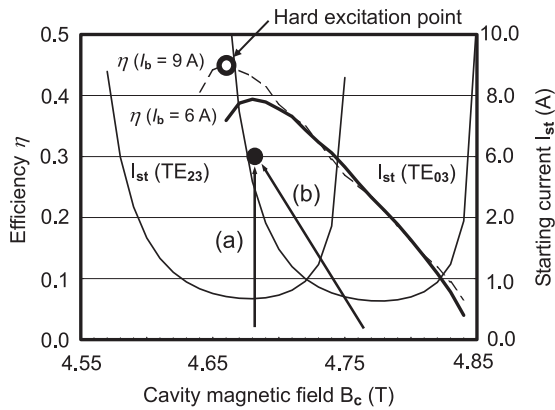


図18 E3958での主モード TE<sub>03</sub> の効率と発振開始電流、競合モード TE<sub>23</sub> の発振開始電流の主磁場強度依存性。

ることが大半であることが知られていることから、モード競合の議論には、この図のような計算結果を用いている。なお、2つのモードの同時発振については参考文献[31]などで議論されている。

ここでの要点は、発振開始電流が小さい方のモードが定常発振するということである。最初は理論的なことで、発振に必要なすべてのパラメータ（ビーム電圧、ピッチファクタ、ビーム電流、主磁場強度）が与えられた状態で、空洞内に波の揺らぎが生じた時に、どちらのモード（あるいは両方）が発振するかという問題である。これは、2つのモードに対する定常状態が、揺らぎに対して安定か不安定を解析する問題と同じである。図19はこの状況を説明した図である。TE<sub>03</sub>モードとTE<sub>23</sub>モードの電界強度  $a_1$  と  $a_2$  平面の定常解とその状態を表わしている。丸印が定常解で、原点は無発振状態、 $a_1$ 軸上の丸印はTE<sub>03</sub>モードの単独発振状態、 $a_2$ 軸上の丸印はTE<sub>23</sub>モードの単独発振状態を示している。黒丸印は安定な定常解、白丸印は不安定な定常解で、矢印は、定常解の周りに生じた揺らぎによって状態がどう遷移するかを表わしている。

図18において、ビーム電圧75 kV、ビーム電流6 Aが与えられた状態で、原点周りに揺らぎが生じた場合を考える。 $B_c = 4.75$  Tでの動作は、図19 (a)に相当する。ビーム電流6 Aでは、TE<sub>23</sub>モード発振開始電流8.6 Aを超えていないため、TE<sub>23</sub>モードは発振せず、必ずTE<sub>03</sub>モードの発振が得られる。即ち、 $4.58 \text{ T} < B_c < 4.68 \text{ T}$ ではTE<sub>23</sub>モードが、 $4.74 \text{ T} < B_c < 4.84 \text{ T}$ ではTE<sub>03</sub>モードが必ず発振する。

$4.68 \text{ T} < B_c < 4.74 \text{ T}$ では、初期値（揺らぎ成分の大きさ）次第で、どちらのモードも発振状態に到達する可能性がある。図19 (b)は  $B_c = 4.70 \text{ T}$ の状態を表している。どちらのモードも発振のしきい値は超えているが、TE<sub>23</sub>モードの閾値の方が低い状態にある。図19 (b)の一点鎖線は、それぞれのモードが単独発振に移行する初期値の領域の境界を示しており、その傾きは、線形領域での波の成長率 ( $\propto I_b/I_{st} - 1$ ) の比によって決まる。例えば、外部磁場が低い側  $B_c = 4.68 \text{ T}$ では、この傾きはより小さくなり、TE<sub>03</sub>モードの発振は困難となる。揺らぎの成分がどちらかだけの場合はそのモードが発振する。

次は実際的なことで、ビーム電源の立ち上げや長パルス

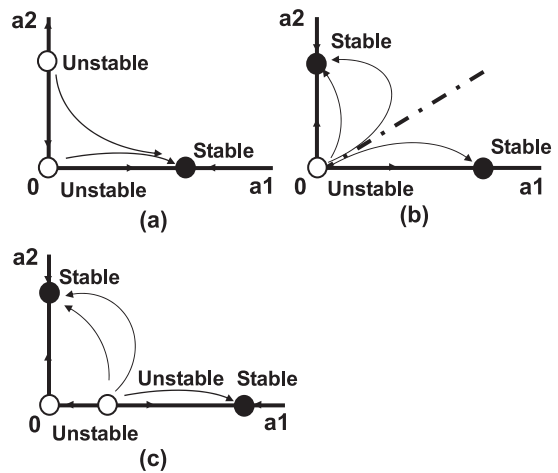


図19 2つのモードの電界強度平面での定常解と状態。

動作時の電源制御による発振パラメータの変化に関係する。これらのパラメータが変化する時間は、ビーム電流の立ち上がりの数μ秒オーダーから長パルス動作時の外部磁場制御の秒オーダーで、波が成長あるいは減衰する時間（減衰の時定数は数ナノ秒から数十ナノ秒）と比べると長い。したがって、発振パラメータの変化とともに定常発振が連続的に変化していると考えるのが妥当で、前の定常状態を初期値として次の定常発振状態がどう変化するかを考えることになる。

ビーム電源の立ち上げ時には、ビーム電流は零から立ち上がる。したがって、発振開始電流が小さいモードが先に発振条件を確立する。その後、例えば、図19の  $a_1$  軸上を、ビーム電流に相当する定常解が動作点に向かって移動する、即ち、単独発振の定常状態を維持しながら目標の動作点に到達するように電源の立ち上げシナリオを考える必要がある。

ジャイロトロン電子ビーム電源の立ち上げ方式には、ダイオード形立ち上げとトライオード形立ち上げの2つがある。トライオード形立ち上げでは、加速電源でビーム電圧を動作電圧まで立ち上げた後で、アノード電源によってビーム電流を立ち上げる。したがって、ビーム電圧一定（動作電圧）で、ピッチファクタとともにビーム電流が立ち上がる。一方、ダイオード形立ち上げでは、ビーム電圧を抵抗などで分割してアノード電圧を与える。立ち上げ時には分割比が一定に保たれることになるので、この方式では、ピッチファクタ一定（動作値）で、ビーム電圧とともにビーム電流が立ち上がる。

図18に、高効率動作の可否が立ち上げ方式によって異なることを示す。ビーム電流6 Aの時の主モードの最大効率39.4%は  $B_c = 4.68 \text{ T}$ で得られる。図中の黒丸へのビーム電流のパスは、トライオード立ち上げ（矢印a）とダイオード立ち上げ（矢印b）で異なる。トライオード立ち上げでは  $B_c = 4.68 \text{ T}$ 上を立ち上がり、先にTE<sub>23</sub>モードの発振開始電流を超えるため、TE<sub>23</sub>モードの発振が維持され主モードTE<sub>03</sub>の発振は得られない。一方、ダイオード立ち上げでは、矢印bのように  $B_c$ も変化しながら動作点に近づくため（効率や発振開始電流は、電子ビームのサイクロトロン角

周波数  $\omega_{c0} = eB_c/\gamma m_e$  に依存するので、 $B_c$  が下がることと  $\gamma = 1 + eV_b/m_e c^2$  (即ちビーム電圧  $V_b$  が上がることは同じ効果を与える)、 $TE_{03}$  モードの閾値を先に超えることになり、主モードの高効率動作が可能となる。このようなビーム電源の立ち上げシナリオは短パルス発振においては有効であるが、長パルス動作においては、電子ビーム自身の空間電荷による実効的なビーム電圧の変化、空洞径の熱膨張による発振周波数の変化、エミッションクーリングによるビーム電流の低下などの発振パラメータの変化が起こり、一般に発振効率は短パルス動作に比べて低くなる。

図19(c)は、図18の白丸  $B_c = 4.66$  T,  $I_b = 9$  A の発振状態を示している。主モード  $TE_{03}$  の最高効率45.2%が得られる条件であるが、 $I_{st} > I_b$  のハードスタート領域にあり、通常は  $TE_{23}$  モードが発振する。しかし、図19(c)において、この動作点 ( $a1$  軸の最右点) は安定な定常解であるので、 $a1$  軸上の不安定定常解よりも大きな値を初期値として与えることができれば、この点での動作は達成可能となる。実際に、JAEAは、170 GHz管において、長パルス動作中にビーム電源と外部磁場電源の制御によって、競合モードの発振領域にありかつハードスタート状態にある主モード  $TE_{31,8}$  の最大効率が得られる動作点での運転を実証した[2]。

### 3.3.6 モード変換器

モード変換器については、ジャイロトロン開発の各局面において要求される性能を満たすことで開発を進めたが、モード変換効率の向上が最大の課題であった。モード変換効率は、放射器から出射したマイクロ波のミラー伝送系での回折損失によって決まる。表2において、最初のモード変換器内蔵管 E3970以降、170 GHz,  $TE_{22,6}$  モード, 500 kW管 E3974までは、ブラソフ形放射器を使用したモード変換器を搭載したが、放射器の矩形開口面によって発生するサイドローブをなくすことができないため、モード変換効率は80%に止まっていた[19]。

放射器出口でガウス分布をもつマイクロ波ビームを放射する放射器として、ロシアにおいてデニソフ形放射器が開発された[32]。この放射器は二重螺旋形とも呼ばれ、2つの交差する螺旋に囲まれた平行四辺形状の小さな反射鏡を並べた凹凸状の内面をしている。導波管内面で反射を繰り返しながら進む光線が、放射器入口から振幅が徐々に大きくなっていく凹凸鏡によって集束と発散を繰り返しながら進み、放射器出口でガウスモードに形成されるものである。モード変換効率は95%以上であるが、放射器長が長い場合電子ビームと干渉する、放射器入口付近では、凹凸がほとんどない長い直線部を形成するため、寄生発振を起こしやすい等の欠点も持っていた。そこで、円周方向への集束だけを行う単らせん形放射器と軸方向の整形を強化したミラー系で構成したモード変換器を開発し、E3976やE3980に搭載した。モード変換効率も91%まで向上した。

これらの管の開発においては、モード変換効率の向上の他に、管内ミラー系に2枚の位相補正鏡を組みこむことによって出力窓上のマイクロ波の強度分布を平坦化することを試みた。出力窓の電力透過能力を上げるため、誘電損失による熱応力を軽減することを目的とした。位相補正鏡

は、鏡の表面に反射方向の異なる多数の小さな平面鏡を配置して、入射光線の方向を個々の場所でするることによって入射波の位相を含めた分布を整形するものである。入力と出力分布を与えた場合に位相補正鏡の面形状関数を求めるプログラムを開発し、ミラー系の設計に使用した。

モード変換器内蔵ジャイロトロンを用いる ECH システムでは、出力マイクロ波を伝送系に使用されているコルゲート導波管を伝搬する  $HE_{11}$  モードに結合させるための整合器 (MOU, Matching Optical Unit) を、ジャイロトロンと伝送系の間に設置している。平坦化分布をコルゲート導波管に効率良く結合させるために、MOUにも2枚の位相補正鏡を搭載した[33]。E3980は、168 GHz, 500 kW - 1秒管としてNIFS/LHD装置に6本納入したが、6本とも設計通りの出力窓上の平坦化分布は得られず、しかも、電力分布形状は管によりかなりの違いがあった[28]。一方、MOUの設計においては、出力窓上ではほぼ理想的な平坦分布をしていることを入力条件としたため、実際の出力波分布では  $HE_{11}$  モードへの結合効率は、設計値94%に対して管によっては82%まで低下していることが判明した。そこで、出力窓から距離の異なる4つの位置で出力マイクロ波の電力分布を赤外線カメラで測定し、出力窓上での電界強度と位相分布を求める手法を考案した[34]。いくつかの管において、この方法で算出した出力窓上でのマイクロ波分布を用いてMOUの位相補正鏡を再製作した結果、結合効率は90%程度まで向上した。

しかし、これらの実験結果は、位相補正鏡を管内ミラー系に使用し出力窓上のマイクロ波プロファイルを制御することは事実上困難であること示唆するものであった。管製造時のろう付けやベーキングなどの熱処理で生じるミラー系のアライメントずれを許容できるだけの位相補正鏡の製作・設置精度を緩和するロバストな設計結果を得ることはできなかった。E3980と平行して開発を続けていたITER向け170 GHz管 E3976においても、同様に設計どおりの出力波形状が得られなかったが、結局、改造管 E3976Dへの人工ダイヤモンド窓の搭載により、出力窓上での平坦化は必要なくなった。E3976Dでは、450 kW - 8秒の長パルス動作を達成した。

モード変換効率は91%まで向上したが、1 MW級の長パルス動作においては9%の回折損失は大きく、後続の開発管 E3992では、900 kW - 9秒の長パルス動作が得られたが、ボディ・コレクタ間のアルミナ製のDCブレークの熱的破壊を引き起こした。また、改造管においても、最終ミラーの可動機構が散乱波によって局所的に加熱されることによるガス放出により、750 kW - 17秒で動作が制限されることが判明し、モード変換器の変換効率の向上が必須の課題となった。

JAEAは、米国CCR社から放射器設計コードを導入し、放射器長が適度に短く、放射器入口で寄生モード発振がなく、出口でガウス分布をもつマイクロ波ビームを出射する放射器を設計した。このコードは、放射器内面形状をフーリエ級数で展開し、放射器の入射モードに対してガウスビームが放射される場合の係数を数値的に計算し、最適な



内面形状を求めるものである。これによって、モード変換器のモード変換効率は97%以上にまで向上した[35]。

### 3.3.7 出力窓

出力窓は、製造工程、エージング試験、実動作において、真空リークのリスクが最も高いコンポーネントである。動作状態では、伝送系側の窓ディスク表面でのマイクロ波放電による損傷と誘電損失による熱的破壊が真空リークの原因となる。ジャイロトロンの場合、動作周波数が高いため、クライストロンで問題となるマルチパクタ放電は発生しないが、伝送系内でのマイクロ波放電に誘起されて窓表面に強い定在波が立った場合などにアーク放電が発生する。ディスク表面が局所的に高温になり、溶けてピンホールリークにつながる。E3980に使用している窒化珪素のシングルディスク窓では、100 ms程度のアーク放電によって真空リークが発生した。MW級伝送系では伝送系内も高真空に保たれているのであまり問題にならなくなったが、アークセンサによる窓表面のモニタとインタロックは不可欠である。

熱的許容電力は、使用するディスク材料の温度上昇と熱応力破壊で制限される。誘電体ディスクの発熱量は、周波数、マイクロ波電力、パルス幅に比例するから、出力窓の形式とディスク材料は、これらの値によって選択されている。形式については、エッジ冷却のシングルディスク窓と面冷却のダブルディスク窓の2種類がある。ダブルディスク窓は、2枚のディスク間にFC-75を流しディスク面を冷却する形式である。ディスク材料では、機械的強度が強い、熱伝導性が良い、誘電損失が小さいという窓材として本来の特性に加えて、メタライズ強度が強いこと、ろう付けと相性が良いことなどの製造プロセスから要求を考慮して、材料を決定している。さらに、手に入りやすい(価格を含めて)ことが重要で、現在は、アルミナ、ベリリア、サファイヤ、窒化珪素、それに人工ダイヤモンドを使用している。

E3955やE3956などの周波数が比較的低い中規模管では、アルミナ製のシングルディスク窓を使用している。大電力クライストロンの開発において、純度の高いアルミナディスクのろう付けに対する構造や炉の温度制御などの製造プロセスが確立され、現在では、歩留まりも安定した最も信頼性の高い窓である。100 GHz以上の周波数で500 kW級出力ジャイロトロン用にサファイヤのダブルディスク窓を開発した。E3960の開発時にサファイヤのろう付けなどのプロセス技術の確立から始めたが、最初の頃は、炉の降温時にサファイヤと金属部との温度差によってディスクが割れる事象が頻発した。E3971において実用化し、その後、E3972やE3974に使用した。E3980では、NIFS開発の窒化珪素のシングルディスク窓を使用した。機械的強度に優れた窒化珪素と窓面上のマイクロ波分布を平坦化することにより、500 kW級の長パルス出力を達成した。

しかし、MW級定常出力に耐える出力窓はなく、サファイヤの誘電損失が低温で小さくなる特性を利用した極低温窓、冷却用の金属パイプとサファイヤをすだれ状に交互に配置したDistributed窓、低誘電損失のシリコンの使用、モード変換器によってマイクロ波を分割し2つの出力窓か

ら出力する方式など様々な方法が提案・検討されたが、結局、1998年に開発された人工ダイヤモンド窓によって、この困難な課題が解決された[36]。

## 4. まとめ

核融合プラズマ実験装置に使用する大電力電子管、クライストロンとジャイロトロンのTETDでの開発について、年代別あるいは主要コンポーネント別に記述した。クライストロンにおいては、加速器向けの開発を割愛した。また、筆者がジャイロトロン開発者としての経験が長いことから、ほとんどの紙面をジャイロトロン関係に費やした。

クライストロンは、発明以来60年経過し、当社においても50年の開発と製造の歴史がある。民生用から核融合や加速器の科学技術分野で使用される大電力管へ発展してきた。固体化が進む中、特に国内においては、放送や通信分野での需要がなくなり、科学技術用途が中心となっている。最近、理研SCSS (SPRING-8 Compact SASE Source) 計画用にCバンドパルスクライストロンを開発し、現在、総計64本を製造中である。また、J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) 計画には、324 MHz、3 MWの長パルスクライストロンを既に23本納入し、さらに、今後23本使用される予定の972 MHz管の開発を終了し、生産を開始しているところである。一方、ジャイロトロンは、プラズマ実験装置用に開発され、ともに発展してきた。最近では、ITER用170 GHz管の開発はもちろんのこと、NIFS/LHD用に人工ダイヤモンド窓を搭載した77 GHz、1 MW管を開発し、3本がプラズマ試験に供している。

このように、クライストロンやジャイロトロンの需要は科学技術用が中心となり、民生用に比べて特殊なものとなってきた。建設段階では限られた時間内に大量の数を準備する必要があるが、運用段階に入ると、寿命に関係して必要数が激減する。もちろん、企業として、安定な需要の見込める産業分野への応用を迫り、例えば、加速器分野で発展してきたSバンド、Cバンドの小型パルスクライストロンは、癌治療、滅菌、非破壊検査などの産業分野での応用が増大している。ジャイロトロンの産業応用に関しては、大電力のミリ波を使用することの利点がなかなか見出せない状況であるが、セラミックの焼結やESR、NMRなどの計測分野に徐々にひろがりをみせている。

核融合や加速器分野のプロジェクトは、今後ますます大きくなり、計画が大きくなるほど計画自体の数は少なくなり、計画から運用を開始するまでの期間が長くなる。リニアコライダ計画やITER計画は世界に1台であり、運用を含めるとさらに20年近くの年月がかかることと見込まれる。このような状況において、一企業の努力だけで、製造や試験設備への投資や、エンジニアやテクニシャンの育成と維持をしていくことは、経済的にかなり困難なことである。確実な実行計画の立案と遂行とともに、国家的な取組みや国際協力によるリスクの分散をお願いする。

この研究技術ノートは、科学研究費特定領域研究「日本における技術革新」の公募研究課題「日本の技術革新が核



融合の進展に果たした役割の研究」(代表者：松岡啓介，分担者：西谷健夫，中村幸男)のサポートによるものであり，プラズマ・核融合学会50周年記念行事の一環としても位置づけられる．科研費研究の関係者との有意義な議論に感謝します．本稿に取り上げたクライストロンとジャイロトロンにおいて，E3778，E3958，E3960，E3970，E3971，E3972，E3974，E3976，E3990，E3992，E3993はJAEAと，E3955とE3988は筑波大学との共同研究に基づいて開発を実施した．特に，ジャイロトロンの開発において，現在日本が世界のトップクラスを誇るようになったのは，JAEAのITER用ジャイロトン開発研究の成果が大きい．開発のそれぞれの局面において有益な助言と心温かい励ましを頂いた大学・研究機関，産業界の研究者や技術者の方々に心から謝意を表します．また，古い写真や適切な資料の準備に協力いただいた大久保良久氏，満仲義加氏を始めとする東芝電子管デバイス株式会社電力管技術部のスタッフにお礼を申し上げます．

### 参考文献

- [1] K. Hayashi *et al.*, *Proceedings of PAC07 THIBKI03*, Albuquerque, New Mexico, USA (2007).
- [2] K. Sakamoto *et al.*, *Nat. Phys.* **3**, 411 (2007).
- [3] 武藤 敬，下妻 隆：プラズマ・核融合学会誌 **82**, 376 (2006).
- [4] R.S. Symons, *1986 International Electron Devices Meeting*, 156 (1986).
- [5] P.J. Tallerico, *IEEE Trans. Electron Devices* ED-18, 374 (1971).
- [6] 高田耕治：加速器 **1**, 109 (2004).
- [7] 米澤 宏，三宅節雄，大久保良久：加速器 **1**, 63 (2005).
- [8] 岡本 正 他：信学技報 **83**, 213 (1983).
- [9] V.A. Flyagin, A.V. Gaponov, M.I. Petelin and V.K. Yulpatov, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* MTT-25, 514 (1977).
- [10] 斎藤輝雄 他：プラズマ・核融合学会誌 **84**, 853 (2008).
- [11] K.E. Kreischer, B.G. Danly, J.B. Schutkeker and R.J. Temkin, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **13**, 364 (1985).
- [12] M. Caplan and C. Thorington, *Int. J. Electronics* **51**, 415 (1981).
- [13] B.G. Danley and R.J. Temkin, *Phys. Fluids* **29**, 561 (1986).
- [14] A.W. Fliflet and M.E. Read, *Int. J. Electronics* **51**, 475 (1981).
- [15] E. Borie and B. Jodicke, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **16**, 364 (1988).
- [16] K. Felch *et al.*, *17th International Conference on Infrared and Millimeter Waves Digest*, 184 (1992).
- [17] Y. Okazaki *et al.*, *International Electron Devices Meeting Digest*, 148 (1988).
- [18] T. Sugawara *et al.*, *14th International Conference on Infrared and Millimeter Waves Digest*, 336 (1989).
- [19] S.N. Vlasov, L.I. Zagryadskaya and M.I. Petelin, *Radio Eng. Electron. Phys.* **21**, 14 (1975).
- [20] 林 健一 他：プラズマ・核融合学会誌 **70**, 659 (1994).
- [21] 林 健一 他：信学技報 ED92-107, 7 (1992).
- [22] K. Kasugai *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **26**, 281 (1995).
- [23] K. Sakamoto *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 3532 (1994).
- [24] K. Sakamoto *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.* **71**, 1029 (1995).
- [25] 林 健一：信学技報 ED94-108, 35 (1994).
- [26] M. Tsuneoka *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **36**, 281 (1997).
- [27] M. Tsuneoka *et al.*, *Int. J. Electronics* **86**, 245 (1999).
- [28] K. Hayashi *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **53**, 457 (2001).
- [29] H. Syoyama *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, L906 (2001).
- [30] K. Sakamoto *et al.*, *Nucl. Fusion* **43**, 729 (2003).
- [31] K.E. Kreischer, R.J. Temkin, H.R. Fetterman and W.J. Mulligan, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* MTT-32, 481 (1984).
- [32] G.G. Denisov *et al.*, *Int. J. Electronics* **72**, 1079 (1992).
- [33] Y. Hirata, Y. Mitsunaka, K. Hayashi and Y. Itoh, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **45**, 72 (1997).
- [34] Y. Hirata *et al.*, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47**, 1522 (1999).
- [35] R. Minami *et al.*, *Int. J. Infrared Milim. Waves* **27**, 13 (2006).
- [36] K. Sakamoto *et al.*, *Rev. Sci. Inst.* **70**, 208 (1999).