



## 5. 百ギガヘルツ帯ミリ波の利用 —電子サイクロトロン共鳴加熱装置技術—

下 妻 隆

核融合科学研究所

(原稿受付：2006年5月15日)

百ギガヘルツ帯ミリ波の核融合プラズマ加熱への適用として、電子サイクロトロン共鳴加熱法について、そのシステムに関する関連技術を図や写真を使って解説した。システムの構成に始まり、ジャイロトロン、高電圧電源、伝送系コンポーネントなどについて説明している。特にシステムの主要部を占めるジャイロトロン管については、発振原理とその動作特性について実際に運転する立場にたって記述した。その際には基本となる数式や図表を用いて主要パラメータどうしの依存関係を示し、直感的に相互関係が理解できるように配慮した。また大電力ミリ波の伝送系についても、それを構成する主要コンポーネントについてなるべく平易に説明した。

### Keywords:

ECH, gyrotron, corrugated waveguide, MOU (Matching Optics Unit), millimeter wave, miterbend, power monitor, dummy load, ITER, polarizer, remote steering antenna

### 5.1 はじめに

電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動 (Electron Cyclotron resonance Heating & Current Drive: ECH & ECCD) の核融合プラズマでの役割は、プラズマ生成と電子加熱とそれによるプラズマの温度・電流分布制御に集約される。ITER では初期プラズマの生成や加熱、電流駆動や新古典テアリングモードの抑制に必要な装置として 170 GHz で 24 ユニット (1 ユニットは発振出力として 1 MW である)、20 MW の入射パワーが、またプラズマスタートアップ用として 120 GHz の 3 ユニットが当初から計画されている [1]。また、現在すでに 6 - 9 本のジャイロトロン管を同時運転し数 MW のパワーを入射してプラズマ実験を行っている研究所が多数存在している [2]。例えば、核融合科学研究所 (NIFS) の LHD 装置における 9 台のジャイロトロンシステムや、スイスローザンヌプラズマ研究センター (CRPP) の TCV 装置における 9 台のジャイロトロンシステムが挙げられる。建設中のものとしてはドイツマックスプランクプラズマ物理研究所 (IPP) の W7-X 装置での 10 台ジャイロトロンシステムや米国 DIII-D 装置における 6 台のジャイロトロンシステムがある。

ジャイロトロン管はその性能が日々更新されているものであるが、現時点で高い総合性能を上げているジャイロトロン管の性能をまとめておく。まず、ITER 用として 170 GHz のものが開発されており、出力 0.9 MW でパルス幅 9 秒、0.6 MW で 1000 秒 (日本: JAEA)、0.9 MW でパルス幅

21 秒、0.5 MW で 80 秒 (ロシア: GYCOM) の出力が得られている。また、W7-X 用として 140 GHz のジャイロトロン管が開発されており、0.92 MW で 1800 秒 (EU: FZK-MPP)、0.9 MW で 1800 秒 (米国: CPI) のものが報告されている。単管として 1 メガワット出力で数十分の連続運転が可能なジャイロトロン管の実現はもう間近である。さらに、ITER 用の次期ジャイロトロンとして単管出力 2 MW の同軸キャビティ型ジャイロトロンが開発が着手されている (FZK-CRPP)。

本章では、ECH のシステムについて、技術的見地よりその構成、コンポーネントを図や写真を使って解説する。特に主要部を占めるジャイロトロン管については、発振原理とその動作特性について実際に運転する立場になって記述する。その際には基本となる数式や図表を用いて、主要パラメータどうしの依存関係を示し、直感的に相互関係が理解できるように配慮した。また、大電力ミリ波の伝送系についても、それを構成する主要コンポーネントについてなるべく平易に解説した。これらを通読して ECH のシステム構成の骨子の部分を理解していただき、これらを利用、運用していく上で少しでも参考になれば幸いである。

### 5.2 ECH システムの構成

Fig. 1 は、一般的な ECH のシステム構成を模式的に示したものである。百ギガヘルツ帯の大電力ミリ波はジャイロトロンと呼ばれる電子管で発生する。そのミリ波は準光学

5. Fusion Plasma Application of Electromagnetic Waves with Hundred Giga Hertz Range of Frequency - Technologies of Electron Cyclotron Resonance Heating Devices -

SHIMOZUMA Takashi

author's e-mail: shimozuma.takashi@LHD.nifs.ac.jp

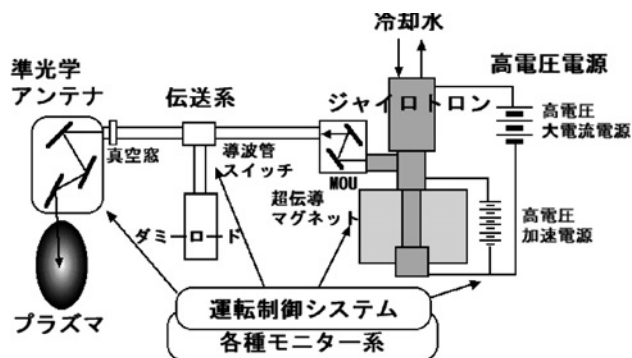


Fig. 1 ECH システム構成の概要を示す。

的結合器（Matching Optics Unit: MOU）と呼ばれる複数枚のミラーによって、伝送系のコルゲート導波管に導かれる。長距離に渡って伝送されたミリ波は、真空窓を介してプラズマ容器内に導入され、集光鏡、可動鏡から構成される準光学アンテナによって、プラズマ中のある設定された位置に集光され加熱することになる。ECHシステムにおいては各構成部品間相互に協調がとられ、高度に集約されたシステムとして成り立っていることに注意しなければならない。例えば、ジャイロトロンは真空管であり、これを動作させるためには60–90 kVの高電圧、数十アンペアの電流を供給する必要がある。さらに数種類の高電圧電源、ヒータ電源、イオンポンプ、超伝導マグネット、油絶縁タンクなどが必要となる。またジャイロトロン各部の冷却のための冷却水設備、とりわけ定常動作ともなると冷却水として1000 l/minにも及ぶものが必要となることがある。伝送系では、長距離伝送のためのコルゲート導波管をはじめ、パワーを測定するためのダミーロードやパワーモニター、偏波器、導波管スイッチ等のミリ波帯でハイパワー使用可能な各種コンポーネントが必要となる。一般に市販されているものは少なくそれぞれに開発要素がある。プラズマ装置への入射窓は、ジャイロトロン出力窓と同様に、ミリ波帯で損失の少ない丈夫な材質が要求されており、近年ではプラズマCVDで作製される多結晶人工ダイヤモンドが使用されるようになってきている。アンテナは、集光鏡または平面鏡のミラー列から構成され、真空容器内に導かれたミリ波は、設計されたビームウエストサイズで、プラズマの加熱位置に集光される。通常は最終ミラーを可動鏡として、プラズマ中での加熱位置を変化できるようにになっている。ジャイロトロンは異常のみならず、伝送路中でのアーキングや真空度異常、温度異常などが発生した場合には、即座に運転を停止するようなインターロック系も完備しなければならない。

### 5.3 ジャイロトロン構造、発振原理とその特性

#### 5.3.1 ジャイロトロン構造

ECHシステムのなかで最も重要で、現在も高パワー化、長パルス化の開発が進められているのが、ジャイロトロン発振管である。Fig. 2に最近使用されている出力1 MW級、数から数十秒の運転が可能なジャイロトロン管の典型的な構造を、主要な構成部の名称とともに示す。図中には、

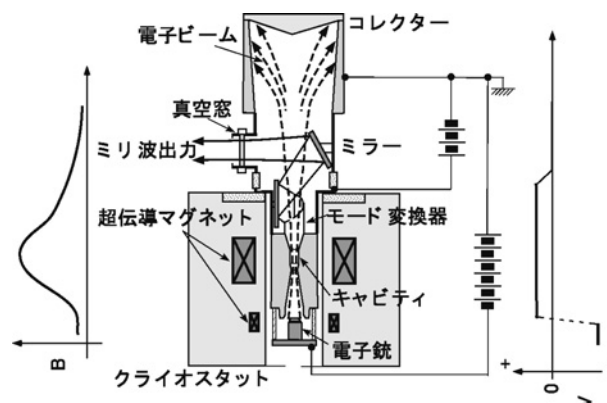


Fig. 2 最近の1 MW級のジャイロトロン構造を示す。

印加されている軸方向磁界の強度分布と軸上の電位の変化を模式的に示した。以降の説明の助けとして各部の名称と機能を箇条書きに記す。

- ・ **電子銃**：マグネトロン入射型電子銃（Magnetron Injection Gun: MIG）と呼ばれる。円環状の電子放出帯より熱電子放射によって飛び出した電子は、軸方向磁界と半径方向の電界により磁界と垂直方向に旋回しながらキャビティ部に引き出され、中空状の電子ビームを形成する。電界磁界の配位がマグネトロン発振器と同様のためこう呼ばれる。
- ・ **キャビティ**：円筒空洞共振器である。電子ビームの入り口側の直径を少し小さくし、出口側に広がるテーパーを持つ。これにより入り口側には電磁波が漏れず、出口側より電磁波の一部が取り出される。この共振器内において電子ビームの磁界と垂直方向のエネルギーの一部が電磁波に変換される。
- ・ **超伝導マグネット**：電子銃部からキャビティ部に向かって強くなる軸方向磁界（ミラー磁界）を発生する（Fig. 2の左側プロファイル）。キャビティ部では電子のサイクロトロン周波数がキャビティの共振周波数に近くなるような磁界の強度に調整される。電子銃で放出された電子はこのミラー磁界中で磁界に垂直方向のエネルギーを増大する。
- ・ **モード変換器**：キャビティで発生した電磁波は通常円形の  $TE_{m,n}$  モードの複雑な電磁界分布を持つ。これを直線偏波のガウス分布電磁波に変換するものである。円筒状またはテーパー状の導波管壁面に周方向、軸方向に周期的な変形を与え、伝搬電磁波の強度分布を成型する。導波管を適当な境界で切断するとほぼガウス分布の強度分布を持つ直線偏波電磁波が得られる。放射された電磁波はミラーによって適当に集光され出力真空窓より取り出される。
- ・ **真空窓**：真空管であるジャイロトロンと大気とを隔て、かつ大電力ミリ波を取り出すための誘電体窓である。百ギガヘルツ帯においても誘電損失が小さく、真空特性や冷却特性の優れた材料が要求される。近年CVDダイヤモンドの使用により、メガワット定常化が画期的に進展した。

- ・コレクター：相互作用を終えた電子を最終的に捕集する電極である。キャビティに対して逆電圧をかけ、電子を減速して捕集するエネルギー回収型コレクター (Collector Potential Depression: CPD) が一般に使用される (Fig. 2 の右側プロファイル)。相互作用に寄与しない磁界と平行方向のエネルギーを回収して総合的な効率を向上させる。

### 5.3.2 ジャイロトロンの発振原理[3-5]

ジャイロトロンは制動放射型の発振器の一種であることはすでに第2章で述べた。電子のサイクロトロン角周波数  $\Omega_c = eB/\gamma m_0$  が、電子質量の相対論的な速度依存性により変化することで、電子からの電磁波放射がコヒーレントになるというサイクロトロン共鳴メーザー作用を利用している。ここで  $\gamma$  は相対論的係数である。この作用を説明するために磁界中でサイクロトロン運動する電子と高周波電磁界との相互作用の様子を Fig. 3 に示した。

電子群は紙面手前方向の磁界中でラーモア半径  $r_L$  で旋回運動をしているとする。図の左上時刻  $t=0$  の図にはラーモア円上に配置した電子群を示してある。電子はサイクロトロン角周波数  $\Omega_c$  で反時計回りに旋回運動する。また高周波電界ベクトル  $E = E_0 \exp(j2\pi t/T_0)$  はこの時刻で下方向を向いているとする。サイクロトロン角周波数  $\Omega_c$  と高周波電磁界の角周波数  $\omega_0 = 2\pi/T_0$  は次の関係を満たすように設定する。

$$\omega_0 \geq \Omega_c \quad (1)$$

このように周波数を選ぶと、図中に「減速電子」と示した電子は常に減速電界を感じ、また「加速電子」と示した電子は常に加速電界を感じるようになる。しかしながら、電子質量の相対論的変化を通じて減速電子は  $\Omega_c$  が大きくなることにより旋回の位相が進み、一方加速電子は旋回の位相が遅れるようになる。図中時刻  $t=8T_0$  付近で、電子がラーモア円の下方領域に集群しているのはこの事情を反映して

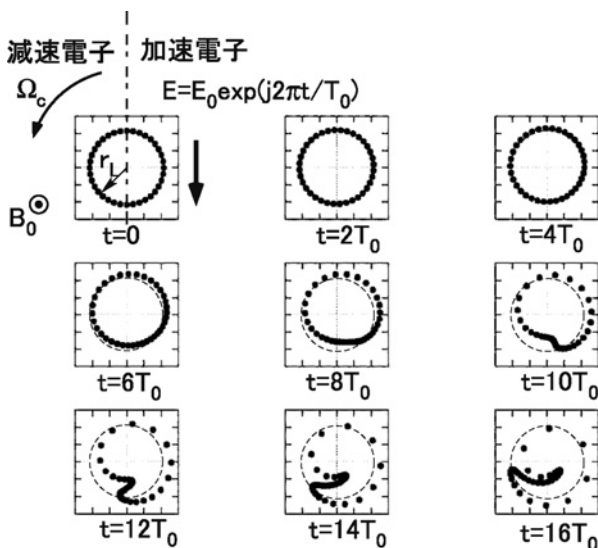


Fig. 3 電子群と高周波電磁界との相互作用による位相バンチングの様子。

いる。位相の進んだ減速電子は周波数差  $\Delta\omega = |\omega_0 - \Omega_c|$  が小さくなるために同期して旋回するようになる。ところが、位相の遅れる加速電子は位相差  $\Delta\omega$  がますます大きくなり、ついには減速位相領域にまで入ってくることになる (中の  $t=12T_0-16T_0$ )。こうしてある適当な周期の間だけ電子と高周波電磁界との間に相互作用させれば、大半の電子を減速位相に入れることができることになる。減速位相領域でラーモア半径が初期値に比べて小さくなっていることは、電子がエネルギーを失っている、すなわち電磁波としてエネルギーを放出していることを示している。

実際のジャイロトロンにおいては、電子は管軸方向に並進運動をしているので、条件としてはドップラーシフトを考慮して、

$$\omega_0 - k_{\parallel} v_{\parallel} \geq \Omega_c \quad (2)$$

となる。ここで  $k_{\parallel}$  と  $v_{\parallel}$  はそれぞれ磁界と平行方向の波動の波数と電子の速度である。ただしキャビティにおいては  $k_{\parallel}$  は小さい。

### 5.3.3 ジャイロトロンの動作とパラメータ依存性

ジャイロトロンを実際に使用するものにとっては、封じられた真空管は全くのブラックボックスであり、外部から制御できるパラメータ (磁界強度や電圧) によって動作がどのように変化するかは、なかなか理解しにくいものである。本節では、ジャイロトロンの構造から導かれる簡単な関係を使って、その動作がどのように変化するかを直感的に理解できるように説明を試みたい。

ジャイロトロンの構造の節で述べたように、ジャイロトロンにおいて電子ビームの制御は重要な課題である。これらの特性はいくつかのパラメータによって記述できる。Fig. 4 はマグネトロン入射型電子銃の模式図を軸方向磁界強度分布とともに示している。電子は電子放出帯と呼ばれるベルト状の部分から熱電子放出される。カソードとアノード間に印加された電圧  $V_b$  により電子は加速され、旋回運動しながらキャビティ部に導かれる。こうして中空状の電子ビームが形成される。

キャビティ部での電子ビームの諸量は、以下の考察により電子銃領域の諸量と関連づけられる。以下の議論においては、添え字  $k$  はカソード部での、添え字  $c$  はキャビティ部での諸量を表すものとする。

軸対称系における一般化角運動量の保存により、次式が

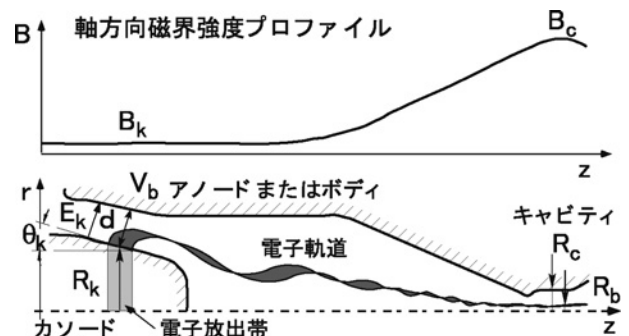


Fig. 4 電子銃および関連パラメータ。

成り立つ。

$$\gamma m_e r^2 \frac{d\phi}{dt} - e r A_\phi = \text{一定} \quad (3)$$

ここで、 $m_e$  は電子の静止質量、 $e$  は電荷、 $A_\phi$  は円筒座標系  $(r, \phi, z)$  における  $\phi$  方向のベクトルポテンシャルである。対称軸に近い領域を考え、 $\mathbf{B} = (0, 0, B(z))$  で、 $A_\phi = rB(z)/2$  となることを使うと式(3)は、

$$\gamma m_e r^2 \frac{d\phi}{dt} - e r^2 B/2 = \text{一定} \quad (4)$$

となる。電子放出帯部表面と、キャビティ部の  $r = R_b$  の位置で  $d\phi/dt = 0$  となることを利用して上式を適用することにより、

$$B_k R_k^2 = B_c R_b^2 \left(1 - \frac{r_b^2}{R_b^2}\right) \approx B_c R_b^2 \quad (5)$$

が成り立つ。これは中空状電子ビームの断面を貫く磁束が保存していることを意味している。これより

$$R_b \approx R_k \sqrt{\frac{B_k}{B_c}} = R_k F_m^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

ここで、 $F_m = B_c/B_k$  はミラー比である。通常、電子放出帯の半径  $R_k$  は固定、またキャビティ部の磁界強度  $B_c$  はサイクロトロン共鳴条件でほぼ決定されるので、キャビティにおける電子ビーム半径  $R_b$  はカソード部磁界  $B_k$  の平方根に比例して変化することがわかる。

キャビティ部における電子の旋回速度、さらには速度比  $\alpha_c = v_{\perp c}/v_{\parallel c}$  が以下のように求められる。まず電子放出帯からスタートする電子の初速度  $v_{\perp k}$  が  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフト速度になることより、

$$v_{\perp k} = \frac{E_k \cos \theta_k}{B_k} = \frac{V_b \cos \theta_k}{dB_k} \quad (7)$$

である。諸量が断熱的に変化する系においては以下の量が保存される。

$$\frac{p_{\perp}^2}{B} = \text{一定} \quad (8)$$

この量は非相対論的な極限では磁気モーメントに相当し、磁気モーメントの保存に対応する、 $\gamma_k \approx 1$  であるので、この関係を使うとキャビティ部における磁界に垂直方向速度  $v_{\perp c}$  は、

$$v_{\perp c} = v_{\perp k} \frac{\gamma_k}{\gamma_c} \sqrt{\frac{B_c}{B_k}} \approx v_{\perp k} \frac{F_m^{\frac{1}{2}}}{\gamma_c} = \frac{F_m^{\frac{1}{2}}}{\gamma_c} \left( \frac{V_b \cos \theta_k}{dB_k} \right) \quad (9)$$

で与えられ、さらに重要な量である速度比  $\alpha_c$  は次式で与えられる。

$$\alpha_c = \frac{v_{\perp c}}{v_{\parallel c}} = \frac{\beta_{\perp c}}{\beta_{\parallel c}} = \frac{\beta_{\perp c}}{(1 - \gamma_c^{-2} - \beta_{\perp c}^2)^{1/2}} \quad (10)$$

ここで、

$$\gamma_c = \frac{1}{(1 - \beta_{\perp}^2 - \beta_{\parallel}^2)^{1/2}} \approx 1 + \frac{V_b}{511} (\text{keV}) \quad (11)$$

である。ただし  $\beta = v/c$ 、 $c$  は光速である。速度比  $\alpha_c$  は、ジャイロトロンの発振に有効に使える磁界と垂直方向速度を表しているの、 $\alpha_c$  を高めることは発振出力の増大につながる。依存性は単純ではないが、式(9)より一般に  $V_b$  を増加、または  $B_k$  を減少させることにより出力を増やすことができる。

次に発振周波数がどのように決まるかを考える。Fig. 5 は、相互作用空間すなわちキャビティの形状、電子ビームの位置、高周波電界の軸方向および径方向の分布を模式的に示したものである。キャビティは半径  $R_c$  を持ち直線部の長さ  $L$  を持つ円筒形状である。中空状の電子ビームは、ミラー磁場により半径を  $R_b$  に圧縮され、また磁場に垂直方向、平行方向速度比  $\alpha_c$  をおよそ 1.5 程度まで高められた状態で、キャビティ中に入射される。このような円筒状キャビティは、TE モードに対して以下のようなとびとびの共振周波数  $f_{c,mn\ell}$  を持つ。

$$f_{c,mn\ell} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\nu'_{mn}}{R_c}\right)^2 + \left(\frac{\pi\ell}{L}\right)^2} \quad (12)$$

ここで、 $\nu'_{mn}$  はベッセル関数の微分  $J'_m(x) = 0$  の  $n$  番目の根であり、 $\ell$  は軸方向モード数である。したがって、キャビティの幾何学的形状を決めると固有値  $\nu'_{mn}$  に対応した無数の共振周波数が存在することになる。そこでキャビティ部に印加する磁界強度を、サイクロトロン共鳴周波数がおよ

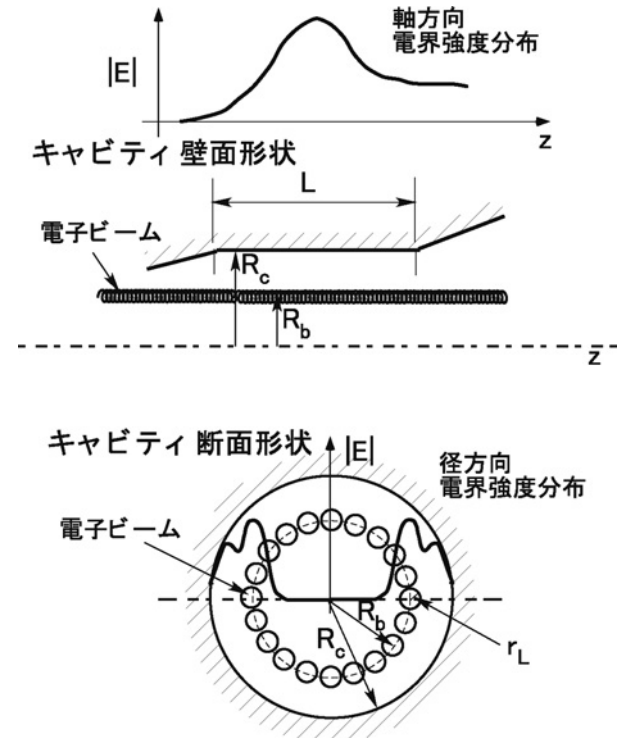


Fig. 5 ジャイロトロンにおけるキャビティの形状、軸方向高周波電界強度分布、キャビティ断面と径方向電界強度分布を電子ビームとともに表示した。

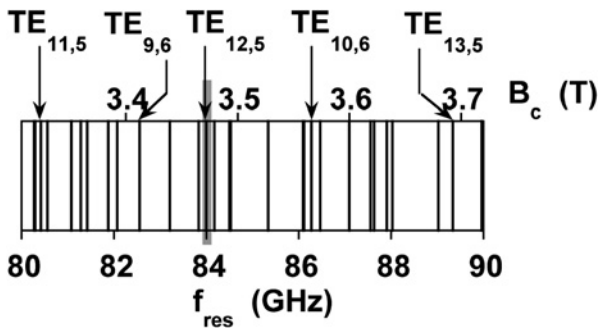


Fig. 6 キャビティの共振周波数と磁界強度の関係。

その共振周波数になるように設定することによって、発振モードを選択できることになる。Fig. 6 は、84 GHz ジャイロトロンのキャビティを例として、その共振周波数スペクトルを棒線で示したものである。代表的なモードを  $TE_{m,n}$  の形で指示してある ( $\ell=1$  とした)。灰色の帯で示したところに磁界強度を合わせると、例えば  $TE_{12,5}$  モードが選択されたことになる。この時  $R_c$  と  $L$  は共振周波数が 84 GHz になるように選んである。キャビティ部に印加する磁界強度を変化させることにより次々とモードが選択され、異なる周波数の発振が起こる可能性がある。ただし発振が起こるかどうかは後述する電子ビーム半径とも関連する。

ジャイロトロンの発振のしやすさは線形理論から導かれる発振開始電流  $I_{ST}$  によって判断できる[6]。ここでは、 $I_{ST}$  の表式は省略するが、84 GHz 付近の発振について計算した結果を Fig. 7 に示す。キャビティの幾何学的形状としては、周波数 84 GHz で  $TE_{12,5}$  モードに共振するような半径  $R_c$  と長さ  $L$  を選んである。

図中に示した数字の組  $(m, n)$  は、発振モードが  $TE_{m,n}$  モードであることを示している。例えば、磁界強度を  $B \approx 3.33$  T に固定し、電流をゼロから上昇してゆくと、およそ 20 A のところで発振が始まることになる。電子ビームと電磁界との非線形な解析によれば[7]、一般に図中のハッチで示したような低磁場側の緑のところに最大効率となる動作点が存在するので、このような点で通常運転することになる。ただし、運転中に電流値が減少するような可能性がある場合には、出力は低下するが、より運転マージンの広い高磁場側で運転しなければならない。

さらにこの図は、電流値が増加してくると、周波数の近いモードである例えば  $TE_{9,6}$  モードと発振の競合を起こす可能性があることを示唆している。このモード競合を避ける一つの方法として、キャビティ内での電子ビームの半径を変える方法がある。Fig. 8 は、キャビティにおける電磁界と電子ビームの結合の強さを規格化した半径についてプロットしたものである。 $TE_{12,5}$  モードと  $TE_{9,6}$  モードについて計算した結果である。この値が大きい位置に電子ビームを合わせると発振がしやすくなる。 $TE_{12,5}$  モードに対しては  $r/R_c = 0.427$  に最大点が存在するが、この位置では  $TE_{9,6}$  モードの結合係数もかなり大きい。したがってモード競合を避けるには、ビーム位置をむしろ  $r/R_c = 0.45$  くらいの少し外側に設定した方が有利であることがわかる。

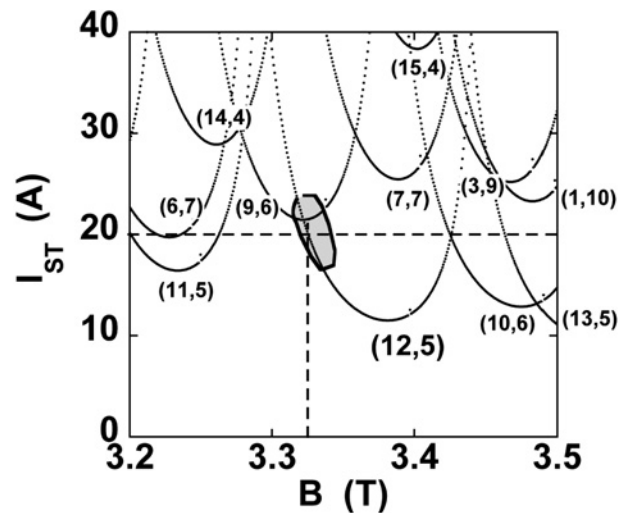
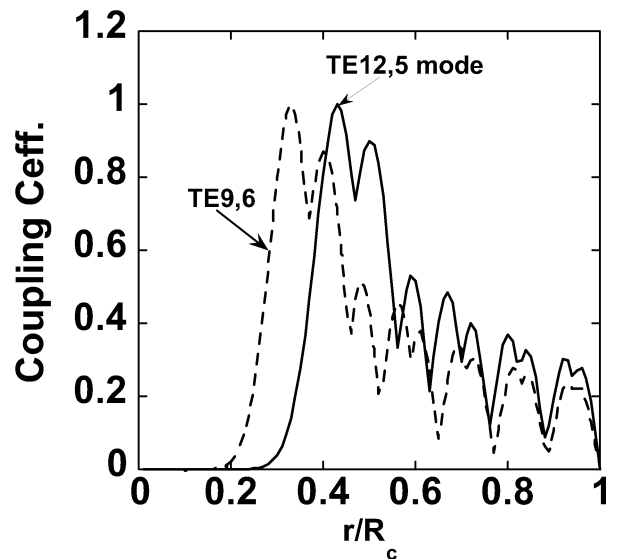
Fig. 7 線形理論で計算された発振開始電流  $I_{ST}$ . 84 GHz 近傍の発振モードについてジャイロトロンの発振が起こる電流値をキャビティ部の磁界強度に対してプロットした。図中  $(m, n)$  は  $TE_{m,n}$  モードを示す。

Fig. 8 電子ビームとキャビティ中での電磁界との結合係数。

ビーム位置を少し外に広げるにはもちろん式(6)よりカソード磁界強度  $B_k$  を少し強くすればよい。

加速電圧  $V_b$  についてはどうであろうか。ドップラーシフトした電子サイクロトロン共鳴条件を表す式(2)によれば、 $V_b$  を増加させて相対論的係数  $\gamma$  が大きくなった場合でも共鳴条件を満たすには、キャビティ部の磁界強度を同様に増加させる必要があることも自明である。

最後に、発振効率について言及する。ジャイロトロンの発振効率  $\eta$  は次のように3つの部分に分解できる。

$$\eta = \eta_{el} \eta_{\perp} \eta_{dc} \quad (13)$$

ここで、 $\eta_{el} = \alpha_c^2 / (1 + \alpha_c^2)$  は電子ビームの持つ磁界に垂直方向のエネルギーの割合であり、 $\eta_{\perp}$  は純粋に電子の垂直方向エネルギーから電磁波に変換される効率、そして  $\eta_{dc} = V_b / V_c$  はエネルギー回収型コレクターを用いることに

よって回収されるエネルギーの割合である。通常この全効率 $\eta$ は50%程度まで向上できる。

最後に、高効率運転での注意を述べておく。ジャイロトロンが運転中に発振を停止した場合、例えば電流値が発振開始電流以下になった場合等に起こりうるが、発振効率が50%の場合には、本来50%程度の熱負荷しか考えていないコレクター部への電子のエネルギー入力が瞬時に100%に上昇してしまうことになる。最悪の場合にはコレクター電極を損傷してしまう可能性もある。ジャイロトロンを発振させない状態、または不要なモードで発振させた状態で長時間運転することのないように極力注意する必要がある。

#### 5.4 高電圧電源の構成

ジャイロトロンの運転には複数の高電圧電源が使用される。文献[8]に詳細な記述があるので参考にしてほしい。近年、ジャイロトロンは、二極電子銃や三極電子銃のタイプ、エネルギー回収型コレクターを持つもの持たないものなど多様化が進んでいる。それに合わせて電源の構成も変化している。また固体素子化も進められている。Fig. 9は典型的な高電圧電源の構成を示したものである。通常安全性の観点より、大量の冷却水を使うコレクター(図中Cで示した)を接地電位で用いる。図(a)は二極電子銃を備えたジャイロトン用であり、70 kV 以上の高電圧で40 A 程度の大電流を供給できる一種の電源のみが必要であり最もシンプルである。ただし、CPD を使用しないためジャイロトロンの発振効率はせいぜい30%程度となり、電源の使用効率は悪い。(b)は、三極型電子銃と CPD を備えたジャイロトン用の典型的な電源構成である。65 kV、40 A 程度の大容量電源の他に、小容量の35 kV、0.1 A 程度の電子引き出し用電源(図中Aで示したアノードに印加)と85 kV、0.1 A 程度の電子加速用高電圧電源(図中Bで示したボディに

印加)とが必要になる。大容量の電源は精度の高い電圧安定度は必要なく数%程度で十分であり、ローコスト化が可能である。図(c)と(d)は二極電子銃を備えたCPDジャイロトン用の電源構成である。ジャイロトンボディ部BはカソードKに対して85 kV 程度までの電位差が必要であるが、(c)ではカソード基準でプラス電圧を印加し、また(d)ではコレクター基準でプラス電圧を印加している。(d)の場合、低電圧、小容量の電源ですむので経済的であるが、65 kV の大容量電源の電圧安定度を向上する、またはフィードバックによりK-B間の電位差を一定に保つような工夫が要求されることになる。ただし、いずれの場合においても、ジャイロトンや高周波系を保護するために、高速の電流遮断機能が不可欠である。最近では経済性と信頼性の観点から、65 kV 程度の大容量電源を固体素子で構成し、電圧安定化をはかり、複数台のジャイロトンに電力を供給し、20 kV 程度の小容量ボディ電源を各々のジャイロトンに個別に設置する方式で、二極電子銃型CPDジャイロトロンを複数台一度に駆動するという方向に向かいつつある。

#### 5.5 大電力ミリ波伝送系とアンテナの構成

ミリ波伝送系は、ジャイロトンで発振した大電力ミリ波をプラズマ装置まで低損失で長距離伝送する重要なシステムである。世界的には、第2章で説明したコルゲート導波管を用いる伝送方式と、ミラー列によるビーム伝送方式が用いられている。コルゲート導波管伝送は、ミリ波を空間的に狭い領域に閉じ込めておくことができる反面、パワー密度が比較的高いので真空化や十分な冷却が必要となることがある。大規模なシステムとしては、LHDをはじめDIII-D(米国)、ASDEX(ドイツ)、TCV(スイス)、Tore Supra(フランス)等のプラズマ装置で採用されている。ビーム伝送方式は、大きなミラーを使用することにパワー密度を下げ大気中でも伝送が可能である。また伝送損失が比較的小さいと言われている。欠点としては電磁波遮蔽として大きなダクトが必要になり、規模が大きくなる傾向がある。TJ-II(スペイン)や建設中のW7-X(ドイツ)で採用されている[9]、

ここでは、LHDで採用されているコルゲート導波管伝送について、主要なコンポーネントを含めて概要を説明する。尚、詳細な解説は[10]に記述されている。Fig. 10にLHDにおける84 GHz ジャイロトロンの写真を示した。ジャイロトン本体は超伝導マグネットに挿入され、電子銃部は油絶縁タンク内に浸っている。多数の冷却水配管によりジャイロトン各部を強制水冷している。出力窓からのミリ波はMOU内に納められているミラー列によりコルゲート導波管に導かれている。

##### (1) MOU

ジャイロトンからのミリ波出力は、出力窓の温度上昇を緩和するために、通常真空窓上でのパワー分布を平坦化して取り出している。したがって、ジャイロトン出力を効率良くコルゲート導波管に結合するには、位相補正鏡を用いて出力電磁波の強度および位相を修正して、最適の強

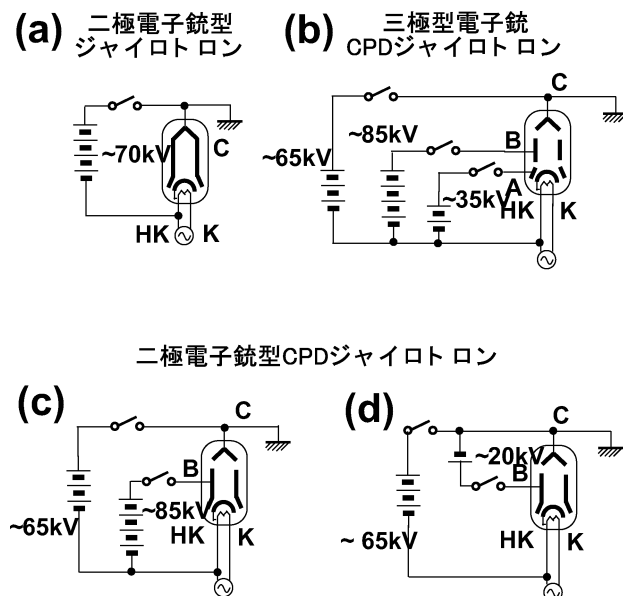


Fig. 9 主な高電圧電源の構成。(a)二極電子銃ジャイロトン用 (b)三極電子銃エネルギー回収型コレクタ(CPD)を備えたジャイロトン用電源 (c)二極電子銃CPDジャイロトン用、(d)同ジャイロトン用電源の異なる構成。



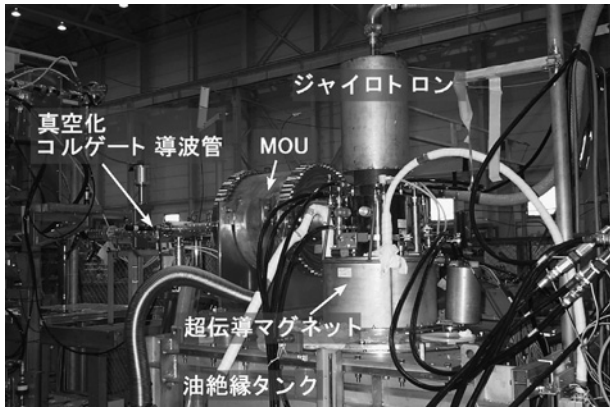


Fig. 10 ジャイロトロンシステム、ジャイロトロン本体と超伝導マグネット、油絶縁タンク、MOU、コルゲート導波管を示す。

度、位相分布で導波管入り口に結合しなければならない。位相補正鏡の設計には、ジャイロトロンからの出力分布を複数箇所測定し、その強度分布より位相情報を再構成するという方法で位相情報を知り、それによって位相補正鏡を設計している[11-14]。計算によれば原理的には結合効率95%を超えるような値が得られている。

## (2) コルゲート導波管

LHDで使用されているコルゲート導波管をFig. 11に示す。8系統の伝送路があり、そのうち6系統が図に示した直径88.9 mmの導波管であり（1系統が真空排気されている）、残り2系統が直径31.75 mmの真空排気された導波管である。双方ともアルミニウム製であり、1 mまたは2 mのものを複数接続して使用している。特に直径88.9 mmのコルゲート導波管は、コルゲーションのピッチが0.8 mm、リブの幅が0.2 mm、高さが0.6 mmになっており、80-180 GHzに渡る広帯域において損失が少ない。コルゲート導波管についてはその特性について理論的、実験的検討がなされており[15, 16]、ミリ波のオーミック損失は2 dB/km以下であることが実験的に検証されている。一般に、導波管径が大きくなるほど損失は減少し、また損失の小さい周波数帯域が広がる傾向にある。

第2章にあるようにコルゲート導波管の主伝搬モードはHE<sub>11</sub>モードであり、このモードは真空中のガウスビームに近い強度分布と偏波を持っている。この2つのモードの結合効率を最大にするには、導波管入り口においてガウスビームのビームウエストを設定し、そのウエスト半径 $w_0$ と導波管の半径 $R$ との間に $w_0/R = 0.643$ の関係が成り立つ必要がある[17]。ここで、 $w_0$ はガウスビームの電界についてのウエスト半径である。

ガウスビームを有効にコルゲート導波管に結合するためには、次の3つの条件を満足しなければならない。1) ガウスビームの伝搬軸は、導波管軸に一致させなければならない。2) ビームの中心は、導波管開口の中心に一致させなければならない。3) ガウスビームのウエストサイズは、上記のように導波管に適合した半径を持って入射させなければならない。これらの条件からのずれは、導波管の傾き、オ



Fig. 11 内径88.9 mmのコルゲート導波管列。

フセット、径変化につながり、結合効率の低下を招く。この結合効率については詳細な検討がなされており、次式のようなスケーリングが得られている。最適ビームウエストを持つガウスビームを導波管中のHE<sub>11</sub>モードと結合する場合に、導波管とビームの軸ずれと傾きによって発生する変換損失は、

$$L_{\text{offset}} = 2.3 \left( \frac{r_d}{a} \right)^2 - 2.2 \left( \frac{r_d}{a} \right)^4 \quad \text{for } r_d/a < 0.45 \quad (14)$$

$$L_{\text{tilt}} = 3.9 \left( \frac{a\theta}{\lambda} \right)^2 - 5.6 \left( \frac{a\theta}{\lambda} \right)^4 \quad \text{for } \left| \frac{a\theta}{\lambda} \right| < 0.43 \quad (15)$$

で与えられる。ここで $a$ は導波管半径、 $r_d$ は軸ずれ、 $\theta$ （ラジアン）は傾き、 $\lambda$ は波長を表す[17]。例えば、周波数168 GHzで直径88.9 mmのコルゲート導波管にガウスビームを入射する際に、モード変換損失を1%以下に抑えるためには、軸ずれは2.9 mm以下、傾きは0.1度以下に抑えなければならないことになる。ガウスビームの導波管への導入や、導波管系の精密なアラインメントに関しては、ビームパタンのモーメントや位相情報に基づいて行う新しい方法が提案されている[18]。

## (3) マイターバンド

マイターバンドは、コルゲート導波管系において電磁波を典型的には90度曲げるコンポーネントである。Fig. 12に示したように、一般に90度でつぎあわされた円形コルゲート導波管と平面の反射板から構成される。マイターバンドにおける損失には次の3種類がある。まず反射板におけるオーミック損失。理想的な状態でも起こるモード変換損失。それとミスアラインメントによるモード変換損失である。反射板へ入射角 $\psi$ で入射した平面波のオーミック損失は、次のように偏波に依存する。

$$\text{オーミック損失} = 4 \frac{R_s}{Z_0} \cos \psi$$

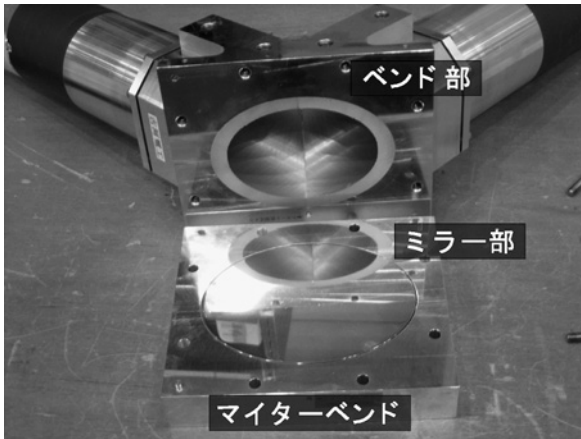


Fig. 12 マイターベンドの構造.

：電界の方向が反射面に垂直の場合 (16)

$$\text{オーミック損失} = 4 \frac{R_s}{Z_0} / \cos \psi$$

：電界の方向が反射面に平行の場合 (17)

ここで、 $R_s$  は反射板の表面抵抗、 $Z_0$  は真空のインピーダンス  $377 \Omega$  である。

理想的な状態でのモード変換損失とは、反射面に対して導波管を折り返してみればわかるように、波動がマイターベンドに入射するとき、ちょうど導波管直径だけギャップを隔てて伝搬するように見えることから起こるものである。この損失は、導波管直径を  $D$ 、ギャップ長さを  $L$  としたときのギャップ損失と考えられ、

$$\text{ギャップでの損失} = 1.1 (\lambda L / D^2)^{3/2} \quad (18)$$

から、 $L = D$  とおいて得られる。導波管のコルゲーションを反射板まで加工した場合には、損失は上記のおよそ半分になると考えられる。これは理想的な90度ベンドの場合であり、反射板のミスアラインメントによって90度からずれることがあるとともに損失は増加することになる。これは式(15)で与えられる損失が付加されることになる。

Fig. 13(a)は、マイターベンド部において導波管ギャップができることによる損失を、反射板でのオーミック損失とあわせてパーセントで表示した。周波数が低いほど、また導波管径が小さいほどビームの広がりが大きくなり損失は増大する。管径の小さな導波管では、マイターベンド前後にモード変換器をつけるなどしてこのギャップ損失を低減する必要がある。オーミック損失は、反射板材料を銅とし、その抵抗率を常温時の2倍の値を採用しているが、それほど大きくはない。図(b)は、マイターベンドでの導波管角度が90度からずれた場合のモード変換損失を示している。図では角度のずれを0.1度としている。この場合、周波数が高いほど、また導波管径が大きいほど損失が増加する。これは伝搬できるモード数が増加すること起因している。これらの損失をすべて考慮すると百ギガヘルツ帯の伝搬では、1マイターベンドあたり最低でも1%程度の損失を覚悟しなければならず、全系での伝送効率の向上にはマイ

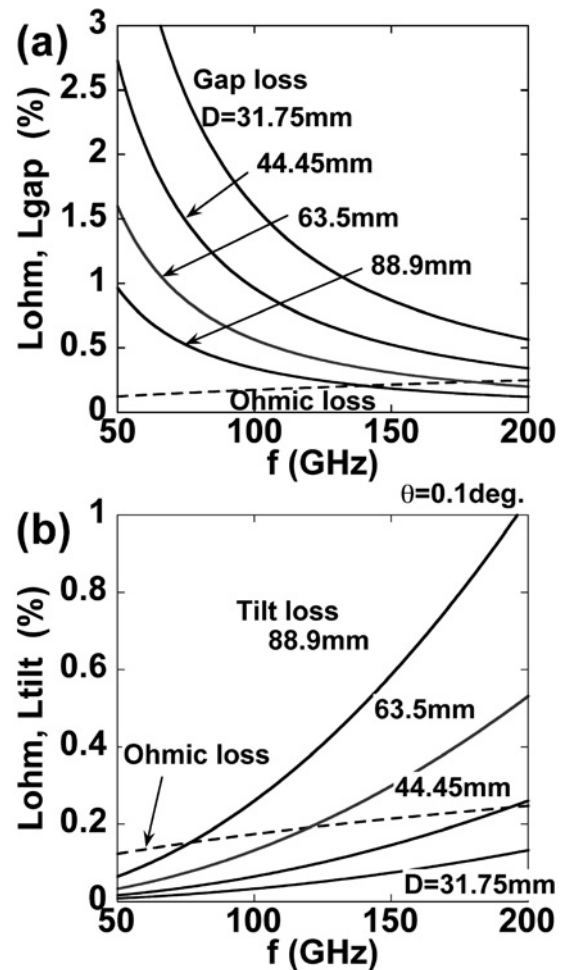


Fig. 13 マイターベンドにおけるミリ波の損失。(a) ベンド部で導波管にギャップができることによる損失、および反射板でのオーミック損失をパーセントで表示。(b) ベンド部で角度が90度からずれることによる損失。ずれを0.1度とした場合。

ターベンド数を減らす努力をしなければならない。

#### (4) 偏波器

ECHによる有効なプラズマ加熱のためには、入射電磁波の偏波を加熱モードや入射角に合わせて適切に設定する必要がある。一般には入射電磁波の楕円偏波度とその主軸を制御する必要がある。構成としてはおよそ1/4波長の溝を加工したコルゲート反射板と、1/8波長の溝を加工したコルゲート反射板の組み合わせで任意の主軸を持った楕円偏波を形成させる。偏波器の原理的な記述は[19-21]に詳しいので割愛する。マイターベンドの反射板を上記のコルゲート反射板で置き換えて構成した偏波器の実験をFig. 14に示す。コルゲート反射板はモーター駆動で回転できるようになっている。さらにコルゲート反射板は長パルス運転時の冷却のために水冷できる構造になっている。

#### (5) ダミーロード

ダミーロードは、ジャイロトロンからの出力の測定や、伝送系での伝送効率の評価、プラズマ装置への入射パワーの評価など、大電力長パルスのミリ波パワーを測定するために必要な装置である。通常、間接的または直接的に水に電磁波を吸収させ、その温度上昇からパワーを求めるもの



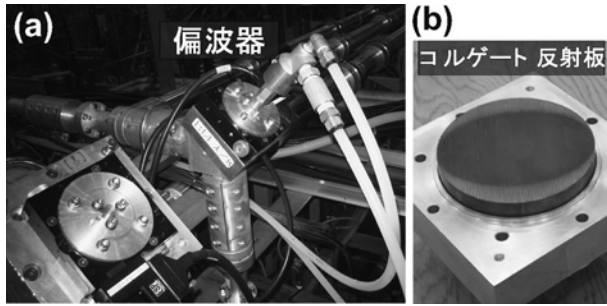


Fig. 14 (a)マイターバンド部に組み込まれた偏波器。(b)反射板は銅製のコルゲート反射板になっている。この反射板を回転することによって偏波を変更できる。反射板は水冷できるようになっている。

である。Fig. 15はその構造を模式的に示したものである。(a)は間接吸収型であり、アルミニウムの表面に二酸化チタンなどをプラズマ溶射しキャビティを構成させたものであり、多重反射によってミリ波パワーを吸収する。その熱はアルミニウム容器の外側を流れる冷却水に吸収され、その入口、出口の温度差と冷却水量によりパワーを算出する。(b)は、ミリ波を低損失セラミックなどを介して直接冷却水に吸収させるものである。短パルス用としてはテフロンチューブを巻いたものを用いるが、長パルスから定常用としては低損失窒化珪素材などを用いる。(c)はパワーの測定はできないが、長パルスの大電力のミリ波の無反射終端としてコンディショニング用として用いるものである。ミリ波の吸収体としては耐火レンガなどを用いる。Fig. 16は実際のダミーロードを示している。パルスダミーロードは間接吸収型、定常用ダミーロードは直接吸収型である。

#### (6) パワーモニター

実際にプラズマ装置にパワーを入射しているときに、入射パワーをモニターしておく必要がある。ジャイロトロン出力などは、MOUに取り付けられた小孔などを通して漏れ出てくる電磁波をクリスタル検波器で受信してモニターする、しかしながらこの信号はMOU内の進行波や反射波の影響を受けその振幅は必ずしもパワーに比例したものではなく、ジャイロトロンが一定のパワーを発振していたとしても、伝送系での反射の仕方、ジャイロトロン微小な周波数の変化などによって時間的に激しく変動してしまう。伝送出力に比例するパワーモニターとして考案され、製作されたものをFig. 17に示す。これはマイターバンドの反射板に組み込まれたものであり、反射板の中心付近に小孔列を孔径を変化させながらあける。その反対側には副導波管となる標準矩形導波管を作りつけ、反射板で反射する電磁波の一部を結合させ、その信号をクリスタル検波器で受信するものである[22]。主コルゲート導波管内の電磁波の進行方向に対して指向性があり進行波と反射波の区別が可能である。また、小孔列を2列に作り2つの副導波管の各々H面とE面が接するようにすると、2つの方向の電界強度をモニターでき、それらの信号より伝搬電磁波の偏波がリアルタイム判別できるような装置も開発されている[23]。

#### (7) その他のコンポーネント

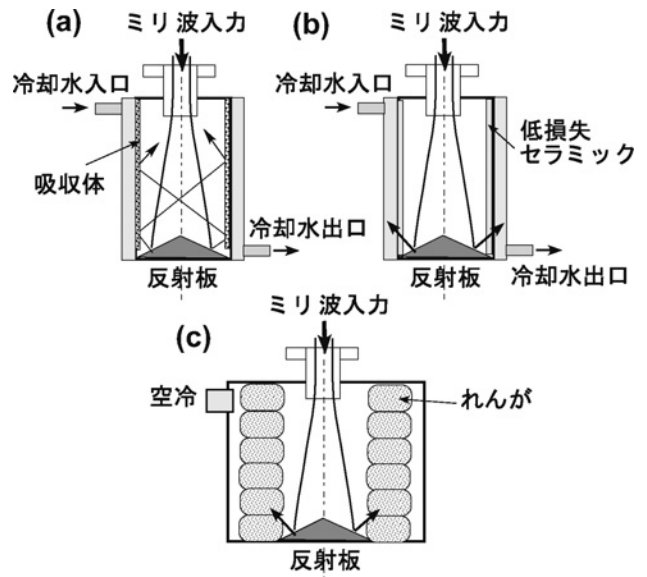


Fig. 15 ダミーロードの概念図。(a)間接吸収型、(b)直接吸収型、(c)コンディショニング用ダミーロード。

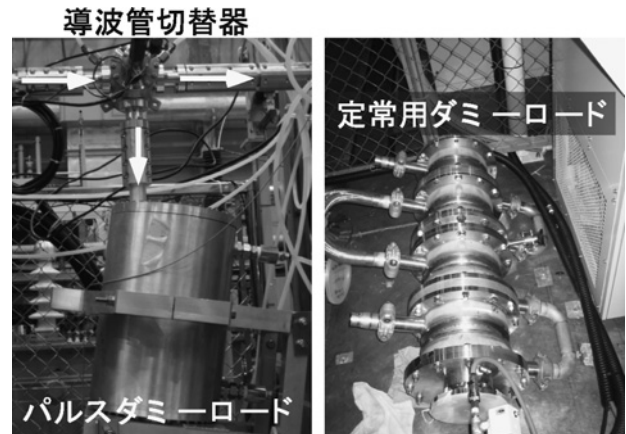


Fig. 16 パワー評価用ダミーロード。パルスと定常(CW)で使用可能なもの。

その他のコンポーネントとして挙げられるものは、伝送系内でのアーキングを光学的に検知しジャイロトロン発振を停止させるアークディテクタ、導波管の経路を変更する導波管切替器、プラズマ装置などと電気的に絶縁するDCブレイク、真空排気用導波管セクション、プラズマ装置への入射真空窓などがある。残念ながら紙面の都合上これらを詳細に記述できないが、これらのコンポーネントは高パワーミリ波用という特殊な用途のため、現在も日々開発、改良が進められているものであることを付け加えておく。

#### (8) アンテナ

コルゲート導波管によってプラズマ装置に導かれたミリ波は、導波管端よりガウスビームの形で放射される。第2章で述べたように、ガウスビームは放射後ガウスビーム光学に従って伝搬することになる。ミリ波は構成される部品サイズに比べて十分波長が短いため、準光学的に取り扱うことができ、プラズマ加熱用のアンテナは、通常複数枚のミラー系によって構成できる。入射配置によって固定鏡や可動鏡、集光鏡や平面鏡から構成されることになる。しか

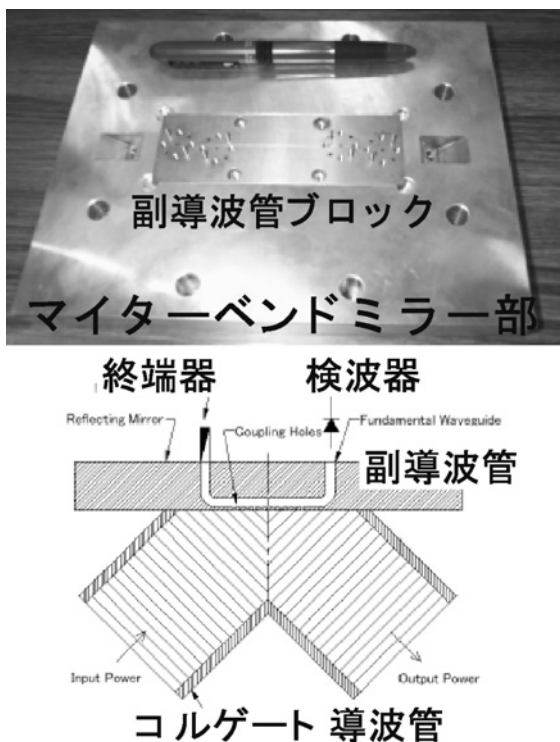


Fig. 17 (a) マイターバンド部に組み込まれたパワーモニタ. (b) 構造図. パワーモニタはマイターバンドミラー中心部に複数の穴を開け、反対側に密着させられた副導波管にミリ波の一部を結合させて、ミラーを反射するパワーを評価するものである。

しながら、可視光に比べて十分波長は長いので、通常の鏡ではなく、金属の機械加工面で十分鏡として機能する。面粗度としては $\lambda/100$ を要求するとしても $10\mu\text{m}$ 程度である。ただし、規則的な加工痕はグレーティングとして働くこともあるので光学研磨を施した方がよい。Fig. 18は、LHD装置において使用されている上部ポートアンテナの模式図を示している。一つのポートより2ビームの入射が可能である。アンテナは4枚のミラーから構成され、2枚の集光鏡と2枚の平面鏡からなる。ミリ波ビームはLHDプラズマの縦長断面に入射されるため、赤道面でトロイダル方向に長く、半径方向に短い楕円形状（ビームウエスト半径で $50\text{mm} \times 15\text{mm}$ ）に集光されるようになっている。プラズマに一番近いミラーは可動鏡でありトロイダル方向、半径方向に焦点位置を移動できる。

近年、ITER用のECH、ECCDアンテナとして遠隔ミラー駆動型アンテナ（Remote Steering Antenna: RSA）の研究が進められている。有効なプラズマ加熱や、電流駆動を行うためには、可動鏡をできるだけプラズマに近く設定する必要がある。ITERではブランケットの背面部に可動水冷部を備える最終ミラーを設置しなければならない。そこで、長い導波管の入口である角度をつけてミリ波ビームを入射したら、出口において適当な角度で放射できないかという発想に基づいて考案されたのがRSAである。Fig. 19にその概念図を示す。一辺の長さが $a$ 、全長 $L$ の矩形コルゲート導波管の入口に可動鏡を設置し、これによってミリ波ビームの入射角を炉の外から制御する。

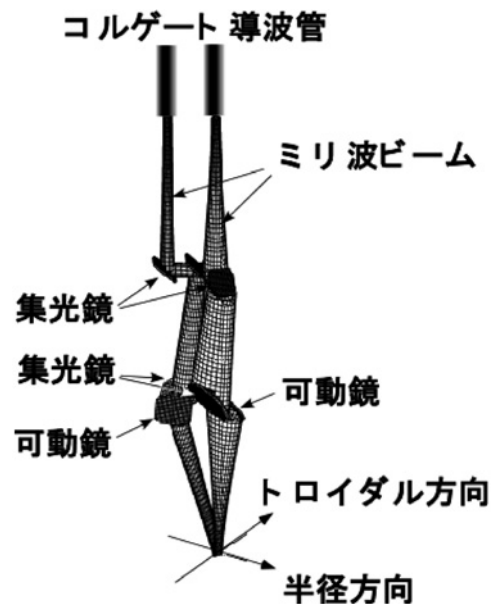


Fig. 18 LHD装置のECH用上部ポートアンテナの模式図。

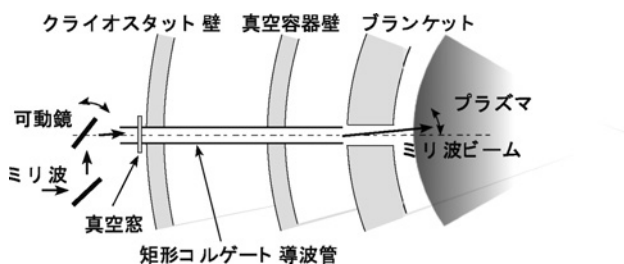


Fig. 19 遠隔ミラー駆動型アンテナ（リモートステアリングアンテナ）の概念図。

$L = 8a^2/\lambda$  の関係が満たされるとき、入射角に等しい角度で導波管出口からミリ波ビームが放射される[24, 25]。これによって可動水冷部をプラズマ近くに設置する必要がなくなる。導波管の長さが上記の半分である $L = 4a^2/\lambda$ の場合には、反対称な放射となって、角度の絶対値が等しく、方向が入射方向とは反対になる。

## 5.6 技術的課題と将来展望

ITER等の大規模ECHシステムの構築は、パワーソースであるジャイロトロン管の地道な研究開発により、当初の目標であった単管1MW定常運転がほぼ実現され、大きく前進した。ECHは核融合プラズマの加熱手段として、またプラズマ制御のための手段として確固たる地位を築いている。システム構築の技術課題は、大電力を取り扱うための工学的な課題に移行しつつある。

ジャイロトロン管の効率化は、高効率化が図られたとしても50%程度であり、残りの半分のパワーは大規模な冷却設備などで処理する必要がある。またミリ波伝送の効率もどんなに最適化が進められても15%程度の伝送損失は発生してしまう。メガワット級の設備においては数百kW定常の発熱を処理してゆくのは大変なことになる。したがって今後の課題としては、すべてのコンポーネントに対して一層の高効率化を進めることが重要である。

ECH 装置の場合どうしても複数台のジャイロトロンを同時運転していかなければならないので、安定性、信頼性の高いシステムの構築が大事である。それにはシステムをできるだけシンプルに構成するのがよい。

ジャイロトロンの単管出力を向上し、同時運転すべき台数を減らしていくのも肝心である。必要とされる高電圧電源を共通化したり、簡略化してトラブルの少ないものにし、固体素子化を進めて信頼性を高め、メンテナンスしやすくし、装置としての寿命を延ばしていく必要がある。伝送系としては、スペースファクタと安全性からコルゲート導波管伝送が基本であろう。もちろん準光学的なコンポーネントは併用することになる。経路なども複雑にならず、屈曲が少なく、できるだけ簡略化して一層の伝送効率向上をめざしていくことが肝要である。

### 参考文献

- [ 1 ] T. Imai, J. Plasma Fusion Res. **81**, 178 (2005) (in Japanese).
- [ 2 ] Y. Ikeda and S. Kubo, J. Plasma Fusion Res. **81**, 160 (2005) (in Japanese).
- [ 3 ] Edited by C.J. Edgcombe, *Gyrottron Oscillators* (Taylor & Francis Ltd, 1993).
- [ 4 ] T. Okamoto and K. Sugimori, Kakuyugo Kenkyu **51**, 369 (1984) (in Japanese).
- [ 5 ] K. Sakamoto and T. Imai, J. Plasma Fusion Res. **71**, 5 (1995) (in Japanese).
- [ 6 ] K.E. Kreischer and R.J. Temkin, Int. J. Infrared and Millim. Waves **2**, 175 (1981).
- [ 7 ] B.G. Danly and R.J. Temkin, Phys. Fluids **29**, 561 (1985).
- [ 8 ] K. Ohkubo, J. Plasma Fusion Res. **73**, 613 (1997) (in Japanese).
- [ 9 ] V. Erckmann, P. Bland *et al.*, *Proc. on 16th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas* (AIP 2005) p.371.
- [10] S. Kubo, Kakuyugo Kenkyu **66**, 581 (1991) (in Japanese).
- [11] A.V. Chirkov, G.G. Denisov and N.L. Aleksandrov, Optics Communications **115**, 449 (1995).
- [12] Y. Hirata, K. Komuro, Y. Mitsunaka *et al.*, IEEE Trans. on Microwave Theo. Tech. **47**, 1522 (1999).
- [13] D.R. Denison, T.S. Chu, M.A. Shapiro and R.J. Temkin, IEEE Trans. on Plasma Science **27**, 512 (1999).
- [14] M.A. Shapiro, T.S. Chu, D.R. Denison *et al.*, Fusion Eng. Des. **53**, 537 (2001).
- [15] J. Doane, *Infrared and Millimeter Waves*, **13**, Chap. 5 (Academic Press, New York 1985).
- [16] K. Ohkubo, S. Kubo *et al.*, Int. J. Infrared and Millim. Waves **15**, 1507 (1994).
- [17] K. Ohkubo, S. Kubo *et al.*, Int. J. Infrared and Millim. Waves **18**, 23 (1997).
- [18] T. Shimosuma, H. Idei *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **81**, 191 (2005).
- [19] M. Saigusa J. Plasma Fusion Res. **79**, 844 (2003) (in Japanese).
- [20] J. Doane, Int. J. Infrared and Millim. Waves **13**, 1727 (1992).
- [21] K. Nagasaki, A. Isayama and A. Ejiri, Rev. Sci. Instrum. **66**, 3432 (1995).
- [22] W. Kasperek, Int. J. Infrared and Millim. Waves, **24**, 451 (2003).
- [23] T. Notake, H. Idei, S. Kubo *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **76**, 023504 (2005).
- [24] A. V. Chirkov, G. G. Denisov *et al.*, Fusion Eng. Des. **53**, 465 (2001).
- [25] K. Ohkubo, S. Kubo *et al.*, Fusion Eng. Des. **65**, 657 (2003).

## 百ギガヘルツ帯のミリ波の応用：ミリ波レーダーを利用した車両の安全システム

藤田浩一（トヨタ自動車株式会社 第2電子技術部）

現在、世界中で120万人が毎年交通事故で亡くなっており、交通事故死傷者低減は、大きな課題である。日本国内の交通事故解析結果によると、死亡・重傷事故の約70%は前方不注意、安全不確認など、ドライバーの認識遅れが原因となっている。また、同じく交通事故解析結果より、事故時、ブレーキやハンドル操作等のドライバーの事故回避操作がないまま衝突に至る場合が約40%もあることがわかる。したがって、レーダー等の周辺監視技術を用いてドライバーの認知、判断、操作を支援するシステムは、交通事故件数および死傷者の大幅な低減に大きな効果をもたらす可能性を持っており、世界中で精力的に研究開発が行なわれている。

周辺監視技術を応用した代表的な安全システムは、プリクラッシュセーフティ（PCS）であり、このシステムは、プリクラッシュセンサ（Pre-Crash Sensor）と衝突警報そして衝突被害軽減システムであるプリクラッシュシートベルト（Pre-Crash Seat Belt）、プリクラッシュブレーキ（Pre-Crash Brake）、プリクラッシュブレーキアシスト（Pre-Crash Brake Assist）およびサスペンションコントロール（Suspension Control）等で構成されている。プリクラッシュセンサは、ミリ波レーダーとヨーレートセンサ等の各種センサおよび衝突判断コンピュータ、さらにカメラ等も組み合わせ構成されている。障害物との距離、相対速度および方向、物体の大きさ等を検知し、衝突までの予測時間と自車の進路や相手車両の予想進路等から衝突を予測する。プリクラッシュセンサにより衝突の可能性があると判断された場合、警報音と共にメータ内に“ブレーキ”と表示し、ドライバーにブレーキ操作を促す。そしてドライバーがブレーキ操作を行なった場合、プリクラッシュブレーキアシストを作動させ、通常のブレーキの約2倍の制動力を発生させる。同時にショックアブソーバーの減衰力を適正化し、ブレーキ時

車両搭載状態のミリ波レーダー



ミリ波レーダーの仕様

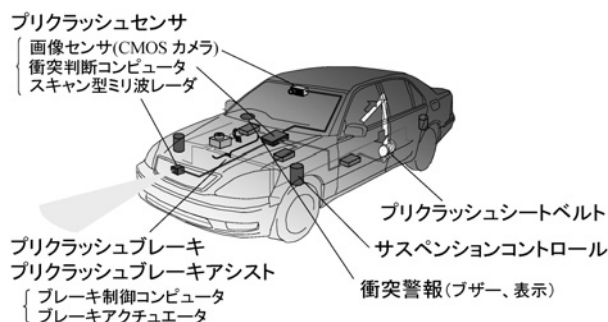
項目	仕様
方式	電子式ビームスキャン
発振周波数	76GHz帯
検知距離	150m程度
検知範囲	左右各約10°
検知速度範囲	-200～+100km/h
外形寸法	幅107×高さ77×奥行53mm

のフロントノーズダイブ量等を抑制する。万一ドライバーがブレーキ操作を行なわなかった場合でも、衝突不可避なタイミングでブレーキを作動させ（プリクラッシュブレーキ）、衝突速度を低減する。さらに、乗員に対しては、プリクラッシュシートベルトを作動させ、衝突前にモーターでシートベルトを巻き取り、衝突があった場合の乗員初期拘束力を高め、前方移動量を低減し、乗員の傷害を軽減する[1,2]。

プリクラッシュセーフティシステムに使われているレーダーは、前方障害物検知センサとして、悪天候や汚れ等の環境要因の影響を受け難く対向車等も検知可能なミリ波が採用されている。ミリ波レーダーの構成は、フェーズドアレイ方式による電子スキャン型で、ミリ波回路や信号処理回路をIC化することにより小型でかつ高性能化が図られ、車両への搭載を容易にしている。また、車間距離を制御し設定速度の範囲内で前車に追従走行するアダプティブクルーズコントロール（ACC）用と兼用することで、低コスト化、センサ規模の簡素化が図られている。フェーズドアレイ方式とは、受信（あるいは送信）アンテナの隣接アンテナ間の電氣的位相差を制御することで、ビームスキャンしたり、位相差を解析することで検出物体の方向を特定する手法である[3]。

プリクラッシュセーフティは、まだ第一歩ではあるが、事故のない社会実現に向け、前面の衝突にとどまらず、今後側突、後突などの様々な形態の事故にも応用可能な交通事故低減技術として更に発展することが期待されている。

### プリクラッシュセーフティの構成



### 参考文献

- [1] 自動車技術 59, No.12 (2005).
- [2] "Pre-Crash Safety System", 11th World Congress on ITS (Nagoya, Aichi, Japan 2004) No.3352.
- [3] "Electronically Scanned Millimeter-wave Radar for Pre-Crash Safety and Adaptive Cruise Control System" IEEE IV2003, June 9-11, 304-309(2003).