

大型ヘリカル実験装置（LHD）における電子共鳴加熱（ECH）装置のマイクロ波伝送路の冷却と真空化

○小林策治^{A)}、伊藤哲^{A)}、水野嘉識^{A)}、岡田光司^{A)}、彗喜田泰幸^{A)}、ECHグループ^{B)}

核融合科学研究所 ^{A)}技術部、^{B)}大型ヘリカル研究部 高周波加熱プラズマ研究系

概要

核融合科学研究所では大型ヘリカル装置（LHD）を用い磁場閉じ込めプラズマを生成し高温に加熱して核融合反応を目指した基礎研究を行っている。我々が担当している電子を加熱する装置である電子サイクロトロン加熱（ECH）システムについての概要と最近のジャイロトロン発振管増力とそれに伴うマイクロ波伝送路の冷却と真空化について報告する。

1 ECH システム

LHDでは中心磁場強度をおおよそ3テスラまで励磁することができる。我々は3テスラ実験で使用する磁場に対応した周波数のジャイロトロン発振管を多数保有しており、基本波となる84GHz、2次高調波となる168GHz、その近傍の82.4・77GHzがある。最近は筑波大学との共同研究により開発が進められている77GHzジャイロトロンの導入が始まり高出力・長パルス化へと進展している。

1.1 77GHz ジャイロトロン発振管

77GHzジャイロトロンは平成19年度から導入され第11サイクル実験より運用が開始された。本年度までに計3本のジャイロトロンを導入した。1号機は1MW・5秒（0.3MW・3600秒）の発振能力がある。開発目標仕様の一覧を表1に示す。また、図1は加熱装置室内での77GHzジャイロトロン設置状況である。これは超伝導マグネット上に据えられた発振管と横向きに出力されるマイクロ波を導波管に結合させるミラー（2枚）ユニット（MOU）、そしてLHDまで伝送させる導波管コンポーネント等である。

1.2 コルゲート導波管

導波管はジャイロトロンから出力されたマイクロ波をLHDまで入射するための伝送路である。77GHzジャイロトロン用の伝送路は3.5inchコルゲート導波管を使用している。伝送路長は1本あたり約50m~90mあり管内は真空状態で使用している。管内部は伝送ロスを小さくするためにコルゲート溝が施してあり、図2.

表1. 77GHz ジャイロトロン基本仕様

周波数(GHz)	77	
主要出力モード	TEM ₀₀	
電子銃形式	3極管型	
コレクタ形式	電位降下型	
出力窓材	CVDダイヤモンド	
出力/パルス幅 (MW/sec)	1-r 号機	1.0/5 0.3/3600
	2 号機	1.2/10 0.3/3600
	3 号機	1.5/2, 1.2/10 0.3/3600

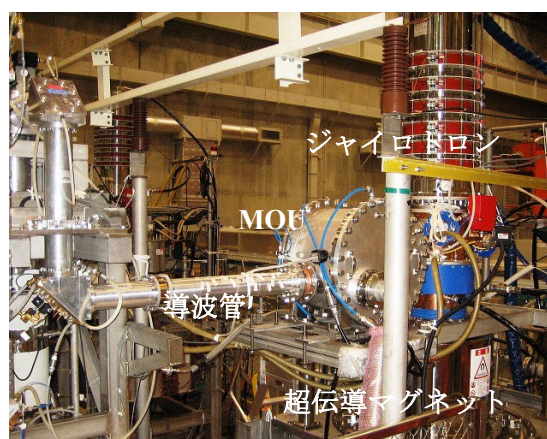


図1. 77GHz ジャイロトロン設置状況

に示すように寸法は 0.8m ピッチで幅 0.6m 深 0.6mm となっている。この伝送路は 1m 単位の導波管と、直角に方向を変えるマイターバンド、2 方向に向きを変えられる切換器、そして通過パワーを検波するパワーモニターや管内アークを検出するためのアークセンサーなどの部品により構成されている。図 3. に代表的な 77GHz ジャイロトロン用導波管伝送路構成図を示す。

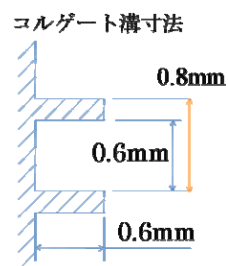


図 2. 3.5inch 導波管内溝寸法

2 マイクロ波伝送路改良

当初 3.5inch 導波管部品は大気での使用を前提に作られていた。しかしながらジャイロトロンの高出力・長パルス化に伴い安定性の高い伝送路が必要となった。また保護システムの充実や伝送ロスにより生じる温度上昇の除去が不可欠になってきた。以上の理由より既設の導波管システムを真空化し、冷却構造を待った導波管コンポーネントに改良した。以下に改良品の代表例を紹介する。

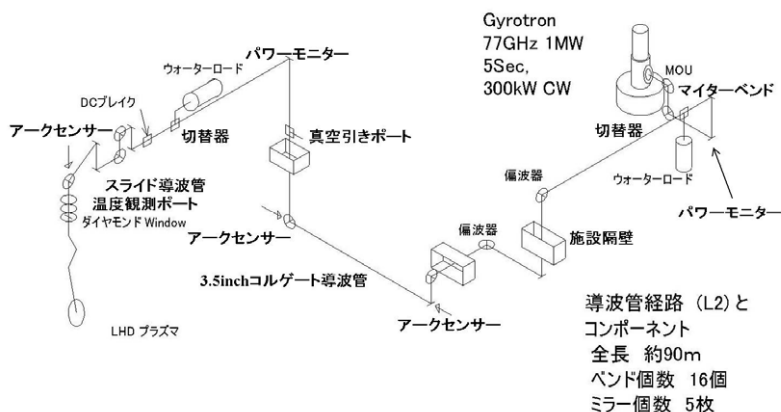


図 3. 導波管伝送路構成図

2.1 導波管継手の改良

導波管は最長 90m にも及ぶ。新規に真空対応の導波管を製作すると高額となるため従来の導波管を再利用して結合フランジと O リング固定部品を変更するだけで真空対応に変更できる構造を採用した。図 4. は導波管継手部の変更前と後の写真である。軸方向に強固な力で固定するためにボルト固定とした。この変更には作業性の向上にもつながっており以前より取り付け・取り外しが容易になったと好評である。

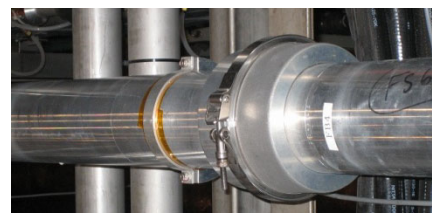


図 4. 上:大気用導波管継手部
下:真空対応用改良継手部

2.2 コンポーネントの冷却強化

真空対応のほかに導波管の冷却強化も行った。導波管外側に冷却水配管を取り付け熱伝導により除熱する。比較的伝送ロスの大いマイターバンドではバンド本体と反射板に直接冷却構造を設けた。反射板に付属しているパワーモニターやアークセンサー検出部、偏波器なども冷却構造を設けた部品になっている

2.3 マイターバンドの改良

マイターバンドは伝送向きを直角に変更するための部品である。しかし以前のマイターバンドは大気圧仕様であるのと同時に、コルゲート導波管部が組み立て式のため直角固定があいまいで固定の度に方向がわずかにずれる要素があった。改良型ではマイターバンドを一体構造にし、真空気密の確保と同時にコルゲート溝加工を製作時に行い機械加工精度範囲で直角を確保することにした。これにより導波管設置の際苦労していた設置精度の確保が比較的容易に行えるようになった。図 5. に導波管に取り付けられたマイターバンドを

示す。マイターベンドの溝が合流する部分には必ず鋭利な突起がある。この突起が管内アークを引き起こす要因になる恐れがある。スムーズな曲線で合流部の溝加工を終わらす工夫を施すことにより鋭利な突起部をできるだけ少なくし不安要素を低減させた。冷却構造は反射板と 90° ブロック内に設けている。これらの加工をすべて所内加工でおこない製作総数は 30 ユニット以上にも及ぶ。

2.4 導波管切換器(冷却付)の製作

ジャイロトロンはコンディショニング運転を行って徐々にパラメーターを向上させて立ち上げていく。その際プラズマ負荷に入射できない場合は模擬負荷に入射向きを変更する必要がある。今回の改良マイターベンドの加工法と同じ 90° ブロックと直線導波管とを組み合わせスライドさせることによりマイクロ波進行向きを変える切換器を作成した。図 6. は組み合わせたブロックの写真である。90° ブロックの反射板部はビームが直接反射するため熱が発生する。それを除去するために反射板内部に冷却水を外部より導入した。反射板の材料に銅とステンレスの合わせ材料を使用し反射面側に無酸素銅、冷却水パ

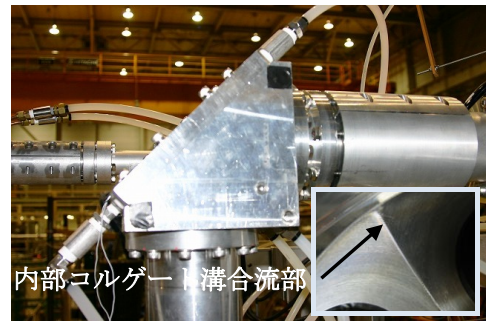


図 5. マイターベンド設置状態とコルゲート溝の拡大



図 6. 切換器内部の直線部と冷却反射板付マイターベンドセット

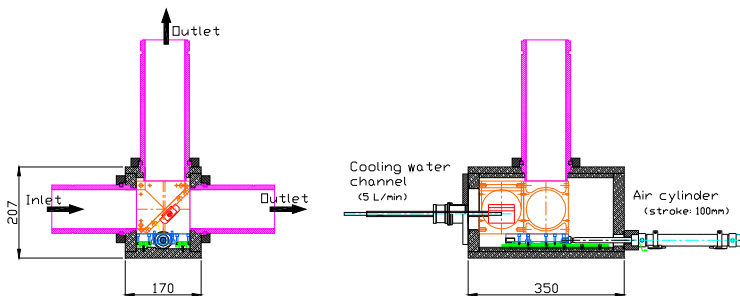


図 7. 導波管切換器(冷却付)組み立て後

イブ取り付け面にはステンレスの面を利用した。これらをレールに取り付け真空対応の箱(350x170x207)に組み込んだ。図 7.は組み立てられたときの切換器の略図と外観である。冷却水パイプとエアシリンダーの突起が目立つが箱体としては大変コンパクトに仕上がった。単体での到達真空度は $1 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 以下を確認した。駆動(ストローク:100mm)は圧縮空気をを用い遠隔操作が行える。

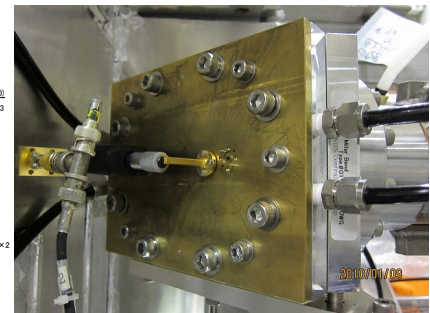
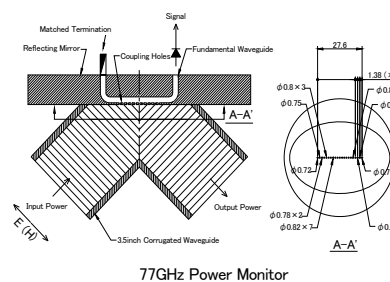
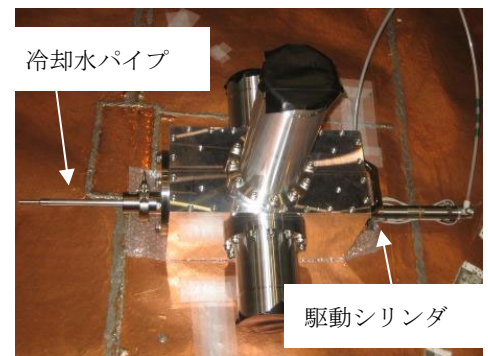


図 8. パワーモニターの構成図と外観

2.5 パワーモニター

伝送路内部を伝搬するマイクロ波を把握するためにモニターが必要である。そこで、マイターバンドの反射板部分の中央に進行方向に一系列の微小な孔をあけ、そこをわずかに通過してくるマイクロ波を外側に取り付けた副導波管により検出するパワーモニターを作成した。構成図と設置時の外観を図 8. に示す。今回の孔の寸法は $\phi 0.72\sim\phi 0.82$ 、ピッチ 1.38mm、個数 21 個である。冷却水路は穴の両側に施し真空は副導波管出口にカプトンシートを挟み込み閉止した。

2.5.1 パワーモニター検出信号

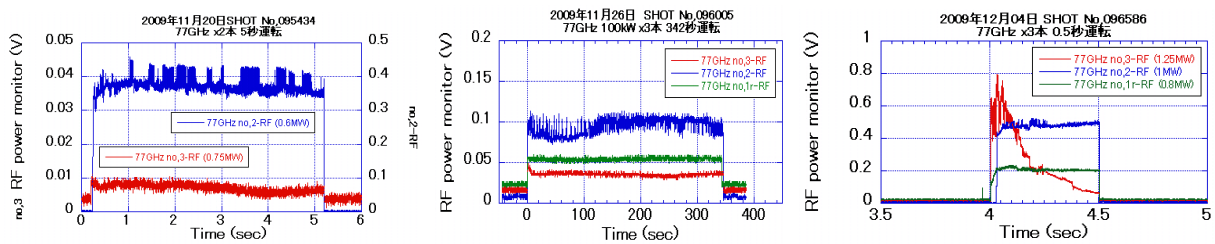


図 9. パワーモニター検出信号

ジャイロトロン運転時にこのパワーモニターを使い信号を確認した。MOU から出てすぐのマイターバンドに取り付け反射方向に応じた波面(電界・磁界)を測定した。今のところパワーとの校正は行っていないが発振に応じ波形が確認できている。図 9. に約 0.6MW 5 秒発振時・100kW 345 秒発振時・0.8~1.25MW 500ms 発振時の波形を示す。ほとんどの波形は矩形波形状の信号が得られているが、77GHz no.3 1.25MW の信号波形は他と違って矩形波になっていない。実験終了後 no.3 のパワーモニターを取り外し確認したところ中央に 1 列あけた微小穴に亀裂と歪みが確認できた。微小穴部の拡大写真を図 10.に記載する。上記の波形はこの亀裂と関係があると思われる。

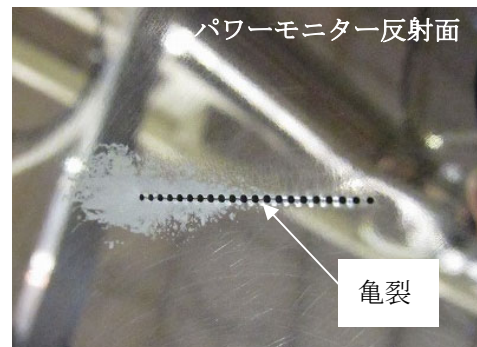


図 10. パワーモニター反射板中心にあげた孔の亀裂

3 実績とまとめ

第 11~13 サイクルは真空化された 3.5inch 導波管を用いてマイクロ波伝送を行った。到達真空度は約 4×10^{-2} Pa 以下で運用できた。また、1 MWを超える発振においても LHD 本体へマイクロ波を伝送でき、100kW 549 秒の長時間運転でも過剰な温度上昇や真空度の劣化が occurることなく安定運転ができた。図 11.には 100kW 345 秒運転時の真空度を示す。しかしながらパワーモニターはハイパワー運転では問題があることが分かった。

今後も改良を行いより高出力長パルスに耐えるものを開発していきたい。そして、次サイクル以降も LHD プラズマ実験にマイクロ波加熱を安定供給できることをめざし準備を進めていく。

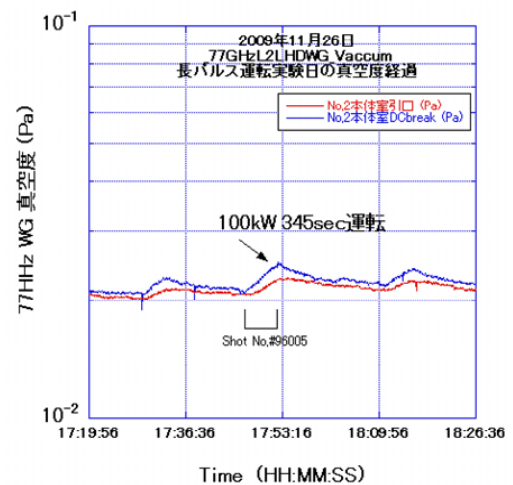


図 11. 長時間運転時の導波管内真空度変化