

LHD の定常 ECH システムの構築

伊藤哲^{A)}、小林策治^{A)}、多喜田泰幸^{A)}、水野嘉識^{A)}、久保伸^{A)}、下妻隆^{A)}、吉村泰夫^{A)}、

野竹孝志^{B)}、大久保邦三^{A)}

^{A)}核融合科学研究所

^{B)}名古屋大学エネルギー理工学部

1 はじめに

核融合科学研究所では 1998 年から LHD(Large Helical Device : 大型ヘリカル装置)を用いてプラズマ実験を行っている。この LHD の特徴は、ドーナツ型真空容器の外部に螺旋状に巻かれたプラズマを閉じ込めるための超伝導コイルによって作り出される定常磁場の配位により、プラズマ自身を維持させるための内部電流が不要なため、定常プラズマを生成、維持することが容易であることである。現在までこの定常プラズマの最大保持時間は約 2 分半で、これはプラズマ閉じ込め法ではなく、プラズマ自体を生成維持する加熱法にほぼ依存している。LHD ではプラズマを加熱するのに 3 つの方法を用いており、そのうちプラズマ生成と追加熱に重要な役割を担っているのが ECH(Electron Cyclotron Heating : 電子サイクロトロン加熱)といわれる加熱法で、LHD 磁場強度と電子の共振周波数を持つ強力なマイクロ波を LHD のプラズマに入射して電子を選択的に加熱するという方法である。今までの実験では ECH は前述の目的のためパルス波のみを出力する発振器しか導入しておらず、定常プラズマ実験にはほとんど寄与していなかったが、今回、ECH のみでさらなる定常のプラズマ実験を遂行するため、定常マイクロ波を出力するための発振器を導入し、そのためのシステムを構築することとした。

2 ECH システム

現在の ECH システムは図 1 に示すように、マイクロ波を作り出す発振器、それを LHD まで伝える伝送系、運転のための制御系、モニターのための計測監視系、ログ作成のデータ収集系などからなり、LHD 実験時に初期プラズマの生成のため日常的に使われている。発振器はジャイロトロンと呼ばれ、現在の LHD 最大磁場強度との共鳴加熱効果をもつ周波数のものを 2 種類用意している。1 つは LHD 磁場 3 T (Tesla : テスラ) 付近での共鳴加熱用周波数の 168GHz で出力 500kW/1s (図 1 左側青) のスペックのもので 4 本あり、もう 1 つは 3 T および 1.5T 付近用の同じく 84GHz/800kW/3s × 2 本 (図 1 黄)、82.7GHz/500kW/2s × 2 本 (図 1 緑) で計 8 本運用している。今回はさらに 84GHz/200kW/CW (図 1 桃) 仕様の連続運転(CW : Continuous Wave)用を新規導入した。

ジャイロトロンから出力された特定の発振モードを持つマイクロ波は、減衰の少ない伝送モードである HE₁₁ モードに変換されて伝送路に結合される必要がある。このジャイロトロンと伝送路 (内径 88.9 または 31.75 のコルゲート導波管) との結合部を MOU(Matching Optics Unit : 光学的結合器)と呼び、通常 2 ~ 4 枚のミラーを用いてジャイロトロンからのマイクロ波を準光学的にガウシアンビームへと変換する。このとき変換効率を上げるため、2 ~ 3 枚のミラーに入射波と反射波との位相を補正した位相補正鏡といわれるものがよく用いられている。他のミラーは集光鏡および導波管伝送軸との結合差調整用の平面鏡である。この MOU から後は前述の導波管 (図 1 灰色の線) の中を LHD まで伝送される。導波管には円形のコルゲート導

波管が採用され、伝送中のマイクロ波の減衰を抑えるため、周方向にピッチ 0.8mm 幅 0.2mm 深さ 0.6mm の矩形溝が刻まれている。さらに内径 31.75mm の導波管は内部でのマイクロ波の不要モード、反射などによるアーキング（放電）を抑えるため内部を真空状態（ $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-5}$ Pa）にして使用される。また、マイターバンドといわれる 90° ベンドが直角に伝送方向を変えるために伝送路中に設置してあり直線導波管との組合せにより LHD まで導かれる。この、マイターバンドのミラー面に、マイクロ波のカットオフになる 1 mm 以下の穴をあけ、それを利用して光によるアーキングの検出と伝送マイクロ波の検出を行っている。ジャイロトロンから出力された固有の電場方向（偏波面）をもつマイクロ波はプラズマに吸収されやすいようにこの偏波面を変えてやる必要がある。この役割をする偏波器と呼ばれるものが伝送路のマイターバンドの代わりに 2ヶ所設置してあり、偏光面が伝送モードの電場方向を変換できるようコルゲーションをもち、回転制御をしている。これらを 4分の1波長と8分の1波長の2つ1セットで用いて偏波の電場方向と楕円度を調整している。

導波管によって LHD 真空容器に導入されたマイクロ波は最終的に入射アンテナで LHD 内のプラズマに放射吸収される。ECH は LHD の磁場強度分布に依存するため、正確に共鳴磁気面を狙わなくてはならない。このため、導波管モードによって伝送させられてきたマイクロ波は LHD 内で再び準光学化され、2枚の収束、平面可動鏡で共鳴層に打ち込まれる。

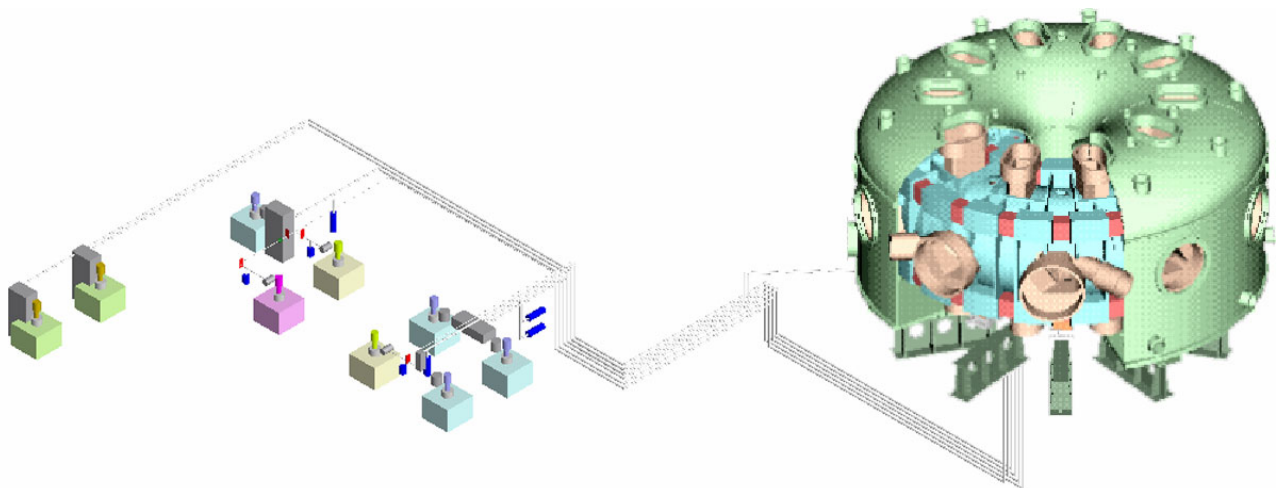


図 1. LHD-ECH システム 右側が LHD、左がジャイロトロン（9台）それらをつなぐのが伝送路（導波管）

3 システムの定常化

今までの運転はすべてパルス（～1秒）であったためこれを超える定常実験の経験はほとんどない。今回は 200kW のパワーを 5 分間程度運転する必要があり、パルス運転時にはほとんど影響のなかった伝送マイクロ波のロスによる伝送路およびジャイロトロンの発熱、真空度の劣化などが大きな問題になると予想される。また、緊急時には即運転を中断できることが必要である。よってジャイロトロンおよび伝送路の運転状態の監視、冷却の強化、インターロックの整備、安定した連続運転を目指すために新たなシステムを構築することとした。

定常用ジャイロトロンは新規のものを使用するが、伝送路は既存のものを併用することとなった。具体的には 84GHz ジャイロトロンの 1 つの伝送路を切り換えて使用する。これは周波数が同じであるため偏波器や

LHD との真空をとりあう真空窓を交換する必要がなく、また導波管を真空で使用しているため、アーキングも起きにくくなっている。必要な冷却系は冷却水流量を増やすなどできるだけ対応をとってはいるが、LHD 真空容器内のミラーアンテナだけは、もともとパルス用のため冷却水配管が準備されていないため、今回は導波管アンテナシステムを新規設置することにした。それはミラーを使って共鳴層を狙えるものではないが、先端部をテーパで広げることにより壁面での損失を低減しているものもある。ただし可動性がないためプラズマの 1 点しか狙えない。

ジャイロトロン周辺装置も今回定常用にいくつか改造を行った。特に、出力パワーを測定し、コンディショニング時にはマイクロ波の出力端末となるダミーロード (Dummy Load : 水負荷) (図 1 青色の円柱) といわれるものは、200kW のマイクロ波を反射させずに熱として回収するために必要不可欠なものである。そのため現在既存のダミーロードで最も高いパワーを吸収できる 500kW/2s の仕様のもを 2 つ連結し、終端部の反射板を改良し、真空でも使用できるように排気ポートフランジを追加し製作した。また、ジャイロトロンとセットで用いられる、電磁波を発生させるための共鳴磁場に必要超伝導マグネット (中心磁場 3T) を他のジャイロトロンで実績のあった無冷媒型超伝導マグネットに変更した。通常超伝導マグネットはコイルを超伝導状態にするため液体ヘリウムを用いて冷却するが、このタイプはコイルを直接液体ヘリウムで冷却するのではなく、金属の熱伝導体を通して冷却するものである。この冷凍機の動作ガスとして必要なヘリウムの量はマグネットの大きさに比べて極わずかで済む上、冷凍機は 4K まで冷却する能力をもっているため液体ヘリウムの補充が不要である。また永久電流モード (永久磁界モード) にしておけば電流リードを切り離せるため供給電力が必要なく、また外乱によって磁場が影響を受けなくなる。以前は外部ノイズで磁場電源が誤動作し、それがジャイロトロンのマイクロ波発振に影響を与えていたが、この無冷媒型にしてからはその問題は解消された。

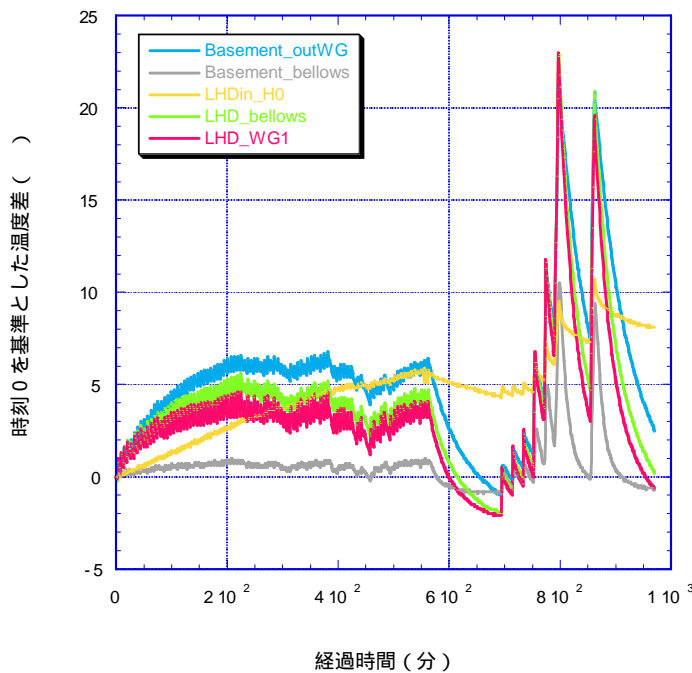
連続運転時の監視およびインターロックシステムもパルス運転時とは異なり、新しいシステムが必要となってくる。伝送路やジャイロトロン近傍の温度を監視するため各所に熱電対を付け、導波管全体を見渡すために赤外線温度カメラを導入した。これらは遠隔制御室で監視でき、異常時にはすぐに運転停止できるようになっている。伝送路は真空状態で使用するため真空度のモニターが必要でかつ、悪化した真空度によるポンプの保護を兼ねてジャイロトロンの運転を停止できるようにインターロックを取った。なお、この伝送路中には前述の真空状態でも使用できるアーク検出器やマイクロ波モニターを設置しており、これらも異常時には運転停止のインターロックを取ってジャイロトロンと伝送路の保護に努めている。運転時の監視として、電源や負荷のリアルタイムモニタが必要である。パルス時は運転直後でも充分役割を果たすが、連続運転時は常に状況変化を監視する必要があるためリアルタイム表示が必要である。そのため電源電圧や負荷電圧、電流、ダミーロードなどの冷却水の温度上昇の現在値を表示し、データ収集するための新規システムを構築した。

4 定常実験

この構築した定常システムを用いて第 1 回の ECH のみによる LHD 定常プラズマ実験を行った。LHD 入射パワーでおよそ 100kW、入射時間 3 分を目標とした。これまでにこのパワーではダミーロードに 1000 秒近く入射しており、ジャイロトロンの性能に関して問題はなかった。しかし、伝送路に関しては全く未知の領域で、しかも伝送路コンディショニング用 LHD 側ダミーロード付近のベローズでの発熱が大きく、長時間運転時にはさらなる冷却が必要であった。この発熱はジャイロトロンから発振されたマイクロ波と伝送軸との結合がうまくいかず、乱反射したマイクロ波が原因であるようだが、はっきりとした因果関係は説明できて

いない。とりえず発熱で不安のありそうな部分を外部から強制空冷し、熱電対で温度をモニターしながら運転することとした。第1回実験は運転上大きな問題は見つからなかったが、LHD 本体の壁コンディショニングが悪かったため2分程度しかプラズマを維持できなかった。

続く第2回はさらにパワーを上げて5分近くのプラズマ維持を目標とし、前回同様冷却強化し実験に望んだ。結果的には3分半を超えることに成功したのだが、その時間で終わった原因は不安のあった伝送路の部分の熱負荷と思われる真空度異常であった。この原因で伝送路での真空リークのような状態となり、真空ポンプも過負荷で停止してしまったため、運転のための真空維持が不可能となり実験は途中で終了した。この



ときの伝送系の熱電対による代表的な計測値を図2のグラフに示す。実験前半部(図2:600分まで)は3分周期の短いパルスによるもので発熱は大きくないが、後半部(図2:700分以降)は5分を目指して徐々に運転時間を延ばしていったため発熱量は大きい。パルス運転時にも温度が上がらなかったジャイロトロン側のベローズでさえ10近く上がり、空冷を施していたLHD側ベローズも他の所と同じような温度となり、最後はほとんどの部分で温度が上がった。なお、その後ジャイロトロンやその他の伝送路の異常は見られず、コンディショニングにも影響はなかった。

図2. 定常実験日の伝送路中の温度上昇(時刻0は室温:約25度)

凡例上より順に、MOU出口、MOUのベローズ、LHDテーパーアンテナ、LHD側ベローズ、LHD近傍の導波管の温度上昇

5 まとめ

定常プラズマ実験のため、定常用ジャイロトロンを導入し、その伝送システムを構築した。伝送路に関しては一部既存のものを流用し、冷却強化と保護監視で乗り切ろうとした。その他定常実験に必要なダミーロードなどは適宜開発を進め、実機に用いた。これらの定常実験のためのシステムは開発実験の期間がなかったことから、LHD実験をしつつデータを取り、また次の実験に修正をかけるという姿勢で臨むしかなかった。そのため原因がはっきりしない伝送路の温度上昇やそれにより招いた真空度異常を充分調査解析することができず、原因部を空冷することでしか対処できなかった。来期の実験までには開発用の電源、伝送路を設け、長時間運転時の各コンポーネントのマイクロ波吸収による発熱、それによる真空度劣化の関連などを測定し、冷却強化やアンテナ改造などを施し、LHD定常プラズマ実験に貢献したい。