

核融合プラズマ加熱のための 大電力マイクロ波伝送系コンポーネントの改良

プラズマ研究センター 南 龍太郎

1. はじめに

プラズマ研究センターでは、世界最大のタンデム・ミラー型核融合実験装置ガンマ10を用いて、人類の究極的エネルギーである「プラズマ核融合エネルギー」に関する最先端の研究とそれを通じた人材育成に取り組んでいる。また、第III期中期目標・中期計画における大学の方針に沿って「開放端磁場と電位/電場効果を活かしたプラズマ輸送制御と境界プラズマ現象の解明研究」をテーマとして掲げ、双方向型共同研究を活用し、実験的・理論的研究を推進している。これまで、閉じ込め領域を有する開放端プラズマの特長を生かして、境界プラズマの様々な現象とその物理機構の解明、それらを通じたダイバータ熱負荷の軽減法とプラズマ壁相互作用の研究を実施してきた。さらに研究のもう一つの柱として、大出力・長パルスジャイロトロンを開発を進めている。

プラズマは、正の電荷を持ったイオンと負の電荷を持った電子が集まって出来ている。核融合を起こすには、反発し合うイオンとイオンを、ぶつかるまで近づける必要がある。そのために、外部からプラズマにエネルギーを投入して加熱することが必要である。しかし、電子が冷たいままでは、イオンから電子への熱輸送が発生し、イオンの温度上昇が妨げられる。そこで、積極的に電子を加熱することで、間接的にイオンの温度を上げることが必要となる。この電子を加熱する方法の一つが、電子サイクロトロン加熱 (ECH) である。

ECH は、電子のサイクロトロン周波数（電子が磁場中で 1 秒間に旋回する回数）またはその整数倍に近い周波数の強力なマイクロ波・ミリ波を、ア

ンテナを使ってプラズマに入射し、マイクロ波・ミリ波の作る電場の振動を、プラズマの電子の旋回運動に共鳴させてそのエネルギーを電子に与え、加熱する方法である。ECH は、世界中の多くのプラズマ実験装置で用いられており、現在では、将来の核融合炉加熱装置の有力候補として注目されている。ガンマ10においては、28 GHz の大電力マイクロ波を使って、プラズマの ECH を行っている。プラズマ実験に必要な ECH 装置は、①大電力のマイクロ波を発振する発振源（ジャイロトロン）、②発生したマイクロ波を真空容器まで伝送する伝送系（コルゲート導波管、マイターバンド）、③マイクロ波をプラズマへ入射するアンテナ系（ミラー・アンテナ）で構成される。大きなパワー（メガワット級）を扱うために、それぞれ開発が必要となる。

2. 大電力 ECH システムの開発

効率よく ECH を行うためには、ジャイロトロンで発振した大電力マイクロ波を効率良く伝送し、プラズマ加熱に適した偏波、分布を持った軸対称マイクロ波ビームを高効率入射する必要がある。そのため、高効率に軸対称マイクロ波ビームを最適位置に入射するための可動式アンテナ・システム等の開発を行っている。図 1 に、ガンマ10西プラグ部における ECH システムの概略図を示す。

メガワット級ジャイロトロンから発振した周波数 28 GHz の大電力マイクロ波は、マイクロ波整合器 (MOU) により電磁波モードから導波管モードに変換された後、コルゲート導波管やマイターバンド等の伝送系により長距離伝送され、ガンマ10真空容器まで伝送される。ガンマ10真空容器内で、大電

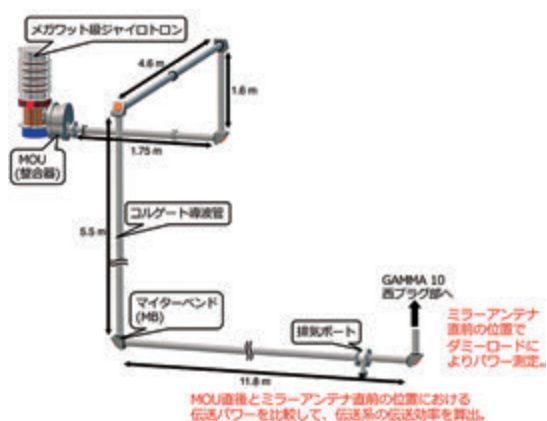


図1 ガンマ10西プラグ部ECHシステム概略図

力マイクロ波は、プラズマ加熱に適した分布形状のマイクロ波ビームに変換された後、プラズマに入射される。大きなパワーの伝送時の放電を防ぐために、伝送系内部は、真空排気される。また、高効率な伝送のため、コルゲート導波管及びマイターバンドの伝送系、及びミラー・アンテナ系の製作においては、比較的高い精度の加工が必要となる。これまでに、ジャイロトロン出力窓位置において、1.65 MW の出力を既に達成している。

3. 工作部門における大電力 ECH システム用コンポーネントの製作と改良

ガンマ10における ECH システム構築のため、大電力マイクロ波コンポーネントのいくつかを工作部門にて製作して頂いた。図2、図3に、マイターバンドの断面図及び製作したマイターバンドを示す。

マイターバンドは、伝送されるマイクロ波をミラーにより反射させ、マイクロ波の進行方向を90度曲げるためのコンポーネントである。マイターバンドでは、モード変換が起りやすく、製作や接続の位置合わせは非常に重要である。伝送効率の低下や放電を要因となり易いため、マイターバンドの製作には、比較的高い製作精度が必要となる。

次に、製作されたマイクロ波伝送系コンポーネント、及び、メガワット級ジャイロトロンを、ガンマ10西プラグ部の ECH システムへ適用するために、必要な伝送系の製作・組立を行った。構築したメガワッ

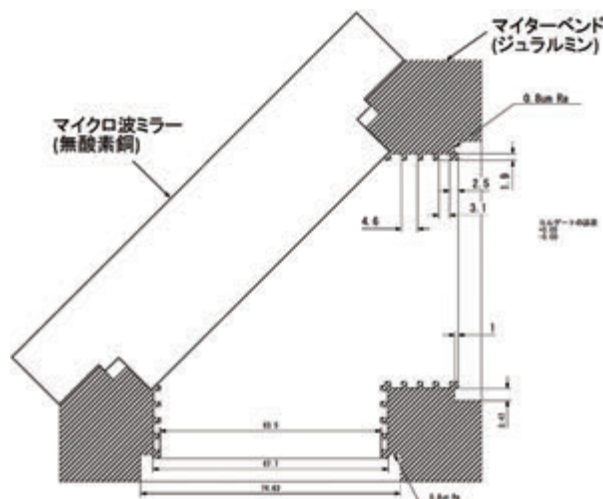


図2 マイターバンドの断面図

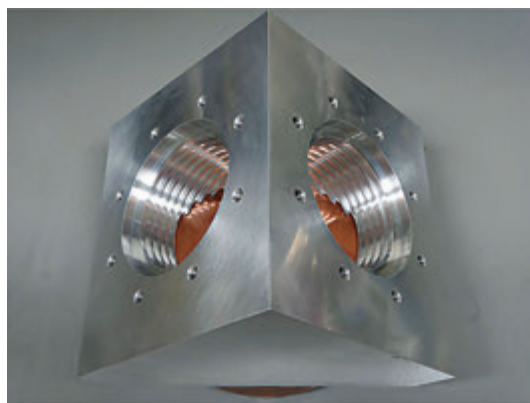


図3 工作部門で製作されたマイターバンド及びマイターバンド用マイクロ波ミラー

ト級ジャイロトロンを用いた新しい ECH 伝送系のマイクロ波パワー伝送実験を実施し、マイクロ波パワー伝送効率、放電やアウトガス等の大電力パワー伝送時の問題点などの基礎データを取得した。初期伝送実験の結果、アンテナ直近までの伝送効率として64%が得られた。この結果は、材質・設計から想定される値と比較して低かった。パワー伝送実験後にマイターバンドを取り外して内部を確認したところ、放電痕が確認された。また、コルゲート導波管内部において、伝送系組立時に混入したと考えられる異物痕が確認された。図4に、確認されたマイターバンドの放電痕を示す。

効率低下の要因として、伝送系内部の放電による損失が考えられる。製作精度によるマイターバンド

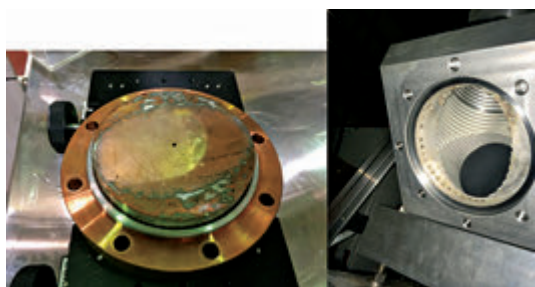


図4 マイターバンド放電痕

の本体とミラーとの間の数百マイクロン程度のギャップが、放電発生の原因として挙げられる。この結果に基づき、工作部門において、マイターバンドでの放電の要因となるギャップを無くす改良を行った。具体的には、複数のマイターバンド各々で、本体とミラーの組み合わせを固定し、本体とミラーの現物合わせによりギャップを無くす追加加工を行った。その後、コルゲート導波管内部の異物を取り除くクリーニングを実施し、再度伝送系組立てを行い、伝送効率の改善を図った。伝送系コンポーネントの改良を行い、再度伝送実験を行った結果、アンテナ直近までの伝送効率として130 kW 出力時に88%程度までの改善が見られたが、出力が高くなるにつれて伝送効率の低下が見られた。

4. 大電力マイクロ波伝送実験による性能試験とプラズマ実験への適用

メガワット級ジャイロトロンを用いた新しいECHシステムをプラズマ実験へ適用し、間欠的な高熱負荷生成実験を行った。本研究は、ダイバータ模擬プラズマの、ELM (Edge Localized Mode と呼ばれる不安定性で、周期的 (10~100 Hz 程度) な熱や粒子の放出現象が発生する) 様高熱流負荷による動的応答のデータを取得することを目的として、ガンマ10ミラー装置において、メガワット級の大電力ECHのパワー変調を行うことにより、間欠的な高熱流束を生成する実験を行う。これにより、ELM状の端損失を発生させ、その間欠的な熱流をELMによるものと模擬することで、非接触プラズマとの

相互作用のデータ取得を目指す。これまでに開発されたメガワット級ジャイロトロンを、既存のガンマ10西プラグ部のECHシステムへ適用するために、必要な伝送系の製作・組立を行った。次に、メガワット・レベルの28 GHz ジャイロトロンを用いたECHシステムによる伝送・プラズマ入射実験を実施し、高エネルギー電子流束生成制御の初期実験を行い、そのプラズマ流の特性の基礎データを取得した。初期伝送実験の結果、伝送パワーが高いほど、伝送系内での放電が確認された。繰り返しエージングを行うことにより、放電抑制の改善が見られ、現時点でアンテナ直近において、550 kW のパワー入射を実現できた。今後の更なるエージングにより、より高パワーの入射が期待出来る。また、西プラグ部のみのECH入射実験を行った結果、入射パワーの増大により、エンド・プレート電位は線形に高くなっており、新ECHシステムの健全性を確認できた。高エネルギー電子流束生成制御の初期実験の結果、入射パワーの増大により、高エネルギー電子は増大したが、全電子電流密度は大きく変わらなかった。エンド・プレート電位は、高くなっており、生成された電子熱流束は、増大したと考えられる。

今後、より詳細な生成電子流束の解析を行う。また、ECHとガス・パフとの重畳により、生成される高エネルギー電子の制御実験等 (電子温度、電子電流量のパラメーター領域の拡大・制御) を行う予定である。

以上、製作された伝送系コンポーネントは、必要な性能を十分に満たし、プラズマ実験における基幹コンポーネントとして使用されている。

5. おわりに

工作部門の皆様においては、今回、本報告で紹介した製作物品以外にも、数回にわたる追加加工の飛び込み依頼にも迅速丁寧に対応して頂いた。また、製作が困難な製作物品についても、真摯に対応して頂いた。ここに、この場を借りて深謝いたします。プ

研究ノート

ラズマ研究センターは、これまで長年に亘って工作部門に大変お世話になっている。昨今の厳しい予算状況もあり、プラズマ研究センターからの製作依頼

件数は、以前より減少傾向にあるかもしれませんが、工作部門の皆様には、今後ともご協力を賜りますようお願い申し上げます。