

核融合プラズマ加熱のための大電力マイクロ波 伝送システムの開発

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。学内はもとより、国内・国外の研究機関との連携・協力を行うとともに、特に大学共同利用機関である自然科学研究機構核融合科学研究所との連携を強めて、各大学並びに各研究センターとの双方向型共同研究を推進している。これまで、プラズマ電位の形成及びそれに基づく閉じ込め向上、高ベータ化などのプラズマの高性能化を中心課題として研究を進め、現在、双方向型共同研究を柱として、電位・電場によるプラズマ閉じ込め向上とその物理の解明、マイクロ波加熱装置であるジャイロトロンの開発、開放端磁場配位を活かしたダイバータ模擬研究、直接発電・プラズマ基礎基盤研究等について幅広く進めている。

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の温度も上がらず、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出来る。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秒間に回転する回数)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プラグ部におけるECHシステムの概略図を示す。

定格出力28 GHz, 0.5 MWのジャイロトロンから発振した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

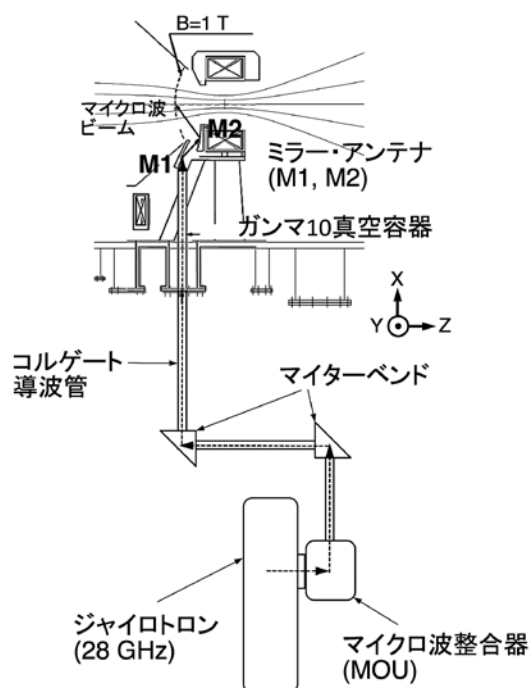


図1 ガンマ10プラグ部におけるECHシステムの概略図。

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。

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

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 に、コルゲート導波管接続部の組立図、図3 に、製作したクランピング・リング、アライメント・リングを示す。

コルゲート導波管の接続は、各導波管の間に真空封止のためのメタルOリングを取付け、アライメント・リングによりコルゲート導波管の位置を合わせ、両側のクランピング・リングとともに共締めして固定

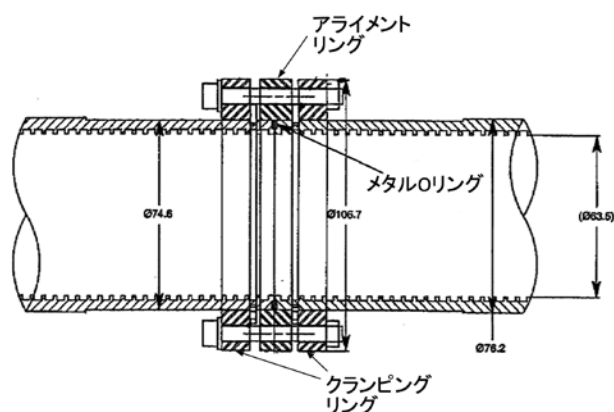


図2 コルゲート導波管接続部の組立図。

する。導波管の接続に位置ずれが生じると、モード変換による伝送効率の低下や放電の要因となるため、精度良く接続固定する必要がある。

図4 に、マイターバンドの断面図、図5 に、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、モード変換が起こりやすく、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。

図6 に、新型ミラー・アンテナ M2の断面概略図、図7 に、新型ミラー・アンテナ M2の三次元イメージを示す。

第2期中期計画からガンマ10 は、電位制御とダイバータ・プラズマ模擬を指向する、ガンマ10 /PDX 計画として新展開している。ガンマ10 /PDX 計画の重点課題におけるプラグ部 ECH の役割としては、(1)端損失プラズマ流の制御、(2)ELM 様高熱流負荷の生成、等がある。本研究の目的は、核融合炉で大きな課題となっている ELM 時のダイバータ板への高熱負荷の緩和、熱流制御を目指し、ガンマ10 ミラー装置において、ECH のパワー変調を行うこ

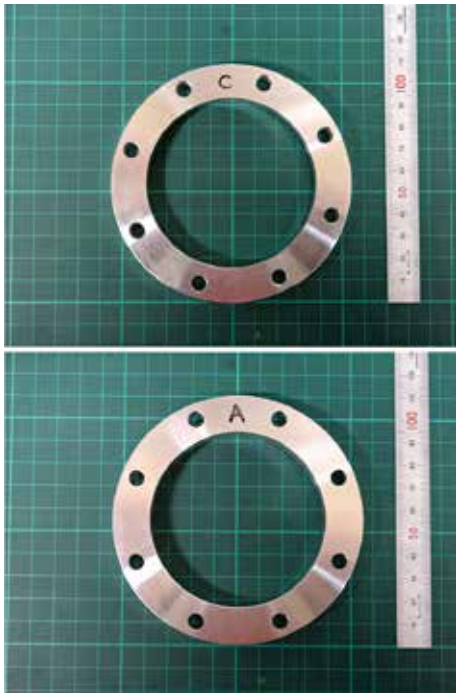


図3 製作したクランピング・リング (上)、アライメント・リング (下)。

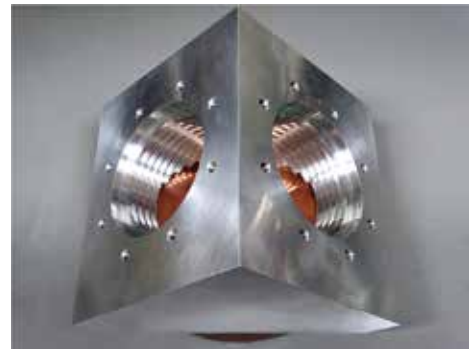


図5 製作したマイターバンド、マイターバンド用マイクロ波ミラー。

プラグ部M2ミラー 方程式

$$z = 15 + L(x - 110) + P - \sqrt{D}$$

$$D = My^2 + N(x - 110)^2 + O(x - 110) + P^2$$

$$0 \leq x \leq 220, -90 \leq y \leq 90$$

$L = -0.066$
 $M = -0.2$
 $N = -0.4$
 $O = 12$
 $P = 145$

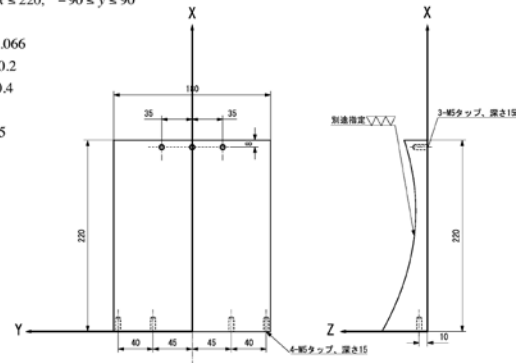


図6 新型ミラー・アンテナM2の断面図。

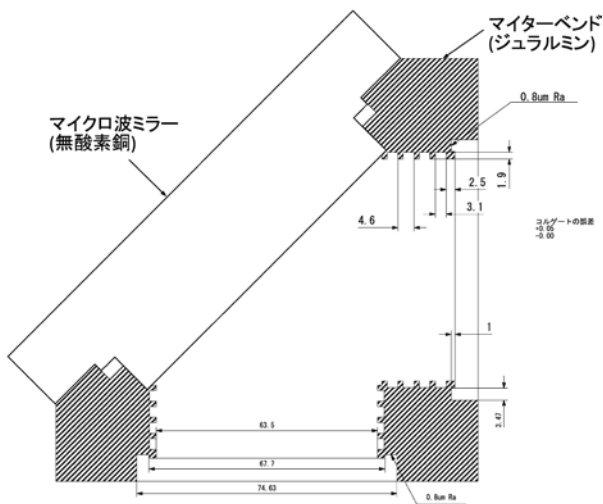


図4 マイターバンドの断面図。

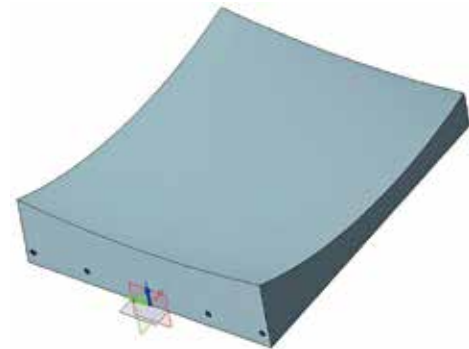


図7 新型ミラー・アンテナM2の三次元イメージ図。

とにより、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、ダイバータ模擬プラズマの、ELM 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する、これまでに、既存の0.5 MW 大電力ジャイロトロン のECHシステムを使用したパワー変調入射実験を実施し、0.05 MJ/m²を超えるエネルギー密度を達

成した(既存ECHシステムにおけるミラー・アンテナは、以前、工作部門において製作して頂いたものである)。また、ECHにより生成される端損失高温電子は、ECH パワーに対しておおよそ線形に増大する事が明らかとなった。そこで今回、より高い端損失エネルギー密度を得るため、ECH マイクロ波ビームを細くし、中心におけるパワー密度を上げ



図8 ガンマ10プラグ部に適用した
新型ミラー・アンテナM2。

る新アンテナの設計、製作を行った。図8に、ガンマ10 プラグ部の ECH システムのため新規に製作したミラー・アンテナ (M2) を示す。

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

筑波大学プラズマ研究センターでは、九州大学との共同研究として、28 GHz, 0.4 MW, 連続発振のジャイロトロンを新たに開発し、加熱実験を行う計画を進めている。その事前検証実験として、筑波大学用に開発された28 GHz, 1 MW ジャイロトロンを九州大学球状トカマク装置 QUEST に持ち込み、プラズマ加熱実験を行う計画に基づき、その事前実験を行った。実際にジャイロトロンに伝送系を取り付けた際に、プラズマ中に入射するのに必要な出力・パルス幅・効率を得る事が出来るかどうか、実験による検討を行った。その際、製作されたマイターバンド等の伝送系を用いて、MW ジャイロトロンの長パルス発振試験を実施した。プラズマ加熱実験で要求されている出力とパルス幅は、0.4 MW, 1秒である。その結果、伝送されたマイクロ波時において、製作されたコンポーネントを用いて性能試験を実施した。

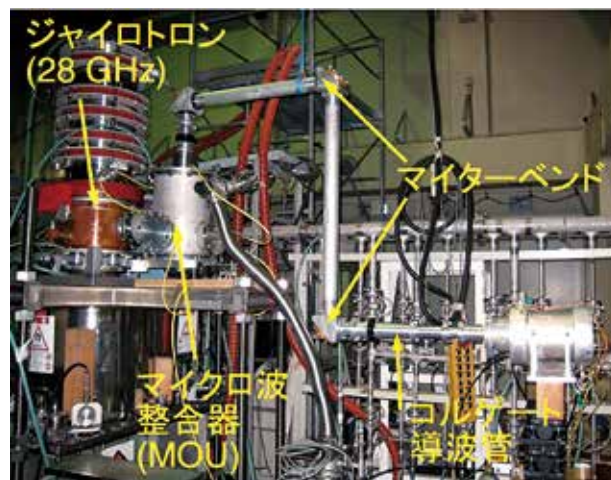


図9 筑波大学における大電力マイクロ波長パルス伝送実験配位。

図9に、筑波大学で行ったマイクロ波伝送実験配位を示す。

その結果、0.45 MW, 1秒の大電力マイクロ波の伝送が、コンポーネント内で放電せずに達成し、また、伝送損失を考慮しても、0.4 MW 以上のマイクロ波パワーをプラズマ中に入射できることが確認された。以上により、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、問題無く製作されていることが分かった。

また、新型ミラー・ミラーアンテナ M2を、ガンマ10 プラグ部の ECH システムに適用し、ECH パワー (P_{P-ECH}) 変調実験を実施した。その結果、 $P_{P-ECH} = 0.45$ MW, 3 ms のプラグ部 ECH 入射で、 30 MW/m²を超える高熱流束が得られた。新型ミラーの適用により、既存システムの2倍程度の電子熱流束の増大が確認され、パワー密度局所化効果を確認する事が出来た。これにより、1パルス当たり
に得られたエネルギー密度は、0.09 MJ/m²程度と見積もる事が出来る。ITER の Type I ELM のエネルギー密度は、0.2 - 2 MJ/m²と想定されており、それと比較すると数倍程度低い
が、軸上に局所化した

入射パワーの増大に伴い、エネルギー密度が、飽和することなくおおよそ線形に増大することが明らかとなった。以上により、製作された新型ミラー・アンテナは、必要な性能を十分に満たし、問題無く製作されていることが分かった。

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、ガンマ10 セントラル部用ミラーの、数回にわたる追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の意を表す。

プ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ないが、工作部門の皆様には、今後とも協力を賜りますようお願い申し上げます。