

# 電子の集団運動から電磁波の発生、そしてプラズマの電子を加熱する —大電力ミリ波発振管ジャイロトロンによるプラズマの加熱—

下妻 隆

熱核融合反応により核融合炉を実現するためには、プラズマを数億度という超高温に加熱することが要求されます。プラズマは、イオンと電子がバラバラになった状態のことで、電子を電磁波によって高温まで加熱する手法の一つが「電子サイクロトロン共鳴加熱」です。強力な磁場によって容器の中に閉じ込められたプラズマ中の電子の旋回運動に共鳴するような周波数の電磁波を入射し、電子を加熱します。ここでは、この加熱法の特徴とそれに必要とされる技術、装置について説明します。

核融合科学研究所（NIFS）の大型ヘリカル装置（LHD）では、超伝導コイルによって発生した磁場により、プラズマを閉じ込めています。そのような磁場中では、プラズマを構成している電荷を持ったイオンや電子は、磁力線に巻きつくように旋回運動をしています。特に電子については、およそ1秒間に770億回の円形の旋回運動をしています。この旋回運動に共鳴するような電磁波、すなわち周波数が約77ギガヘルツ（ギガは10億）、またはその2倍の154ギガヘルツの電磁波を入射すると、これによって電子が加速され、電子の運動エネルギーが増加し、さらにプラズマ中のイオンとの衝突によってプラズマ全体が加熱されます。この現象は電子サイクロトロン共鳴加熱（ECRH）と呼ばれ、核融合炉でのプラズマの加熱手法の一つとして有望視されています。さらにECRHでは、電子の加熱だけではなく、核融合装置において、プラズマを生成したり、電流を駆動したりすることもできます。

このような高い周波数で、大きなパワーを持った電磁波を発生させるにはどのようにすればよいのでしょうか？ これは、上で述べた方法の逆の過程、すなわち電子の旋回運動から電磁波を発生させればよいのです。電子を集团的に加速させることで、強力な電磁波を得ることができます。これを実現するには、

共振器(キャビティ)というものを利用します。形は違いますが、ちょうど音叉の下についている共鳴箱のような役割をするものです。周波数が、数ギガヘルツから数百ギガヘルツ（電磁波の波長が数十センチメートルから数ミリメートル）で、大きなパワーの電磁波を発生させる発振器には、このような共振器と、電子ビームを発生する電子銃とを持つ大型の真空管、例えばマグネトロン、クライストロン、ジャイロトロンなどが用いられます。よく知られたマグネトロンは家庭用の電子レンジなどに、クライストロンはレーダーや通信、加速器などに使われています。出力は数キロワット級のものから、十万キロワット級まで発生できるものもあります。

ジャイロトロンは、さらに高い周波数百ギガヘルツ帯まで大きなパワー（千キロワット以上）が発生できる発振管として、ロシアとアメリカで1964-1965年頃に考案され、開発、改良が進められて今日に至っています。核融合プラズマでの電子加熱のためのパワー源として、一本のジャイロトロンで1,000~2,000キロワット出力で、1,000秒くらいの準定常運転ができるものが開発されてきています。

NIFSで使われているジャイロトロン発振管の写真とその概略構造を図1に示します。全長は約3

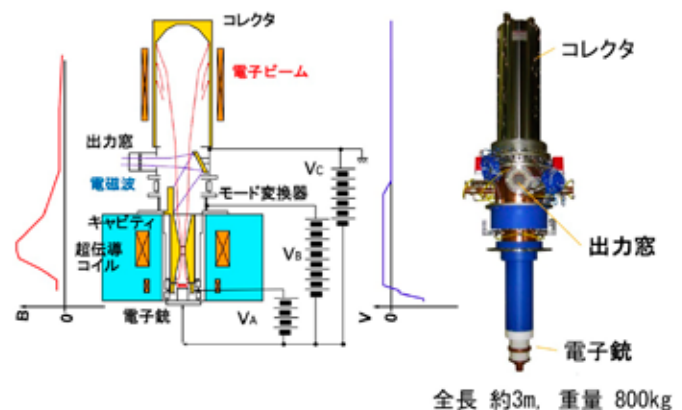


図1. 核融合用の大電力ジャイロトロン管の構造と写真。Bは管軸上での磁場強度分布を、Vは各部の電位分布を示す。

メートル、重さはおよそ0.8トンの巨大な真空管です。ジャイロトロンは、非常に強い磁場を発生する超伝導磁石の中に挿入されています。高電圧（約8万ボルト）により電子銃から電子ビームが引き出され、らせん運動をしながら高速に加速されます。電子が得た運動エネルギーは、キャビティ（空洞共振器）で、一部がマイクロ波のエネルギーに変換されます。発生したマイクロ波は強度の分布をいくつかの集光鏡により成形され、最終的には、電波の損失が非常に少ない人工ダイヤモンド製の真空窓を通して外に取り出されます。

NIFSでは、LHDでの強力な電子加熱とプラズマの制御を行うことを目的として、LHDの建設当初の1994年頃よりジャイロトロンの開発を開始しました。実験開始当初は、LHDの最大磁場強度3テスラに共鳴する周波数に合わせて、84ギガヘルツと168ギガヘルツの2種類の周波数のジャイロトロンを開発し、使用していました。現状では、加熱領域の自由度を上げるために少し周波数を下げ、筑波大学との共同研究で周波数が77ギガヘルツ、154ギガヘルツの5台のジャイロトロンを設計、製作し、LHDでのプラズマ実験に使用しています。初期プラズマの生成やプラズマの電子加熱、プラズマ中での電磁波による電流駆動などの実験に使われています。ジャイロトロンと超伝導マグネットの全体システムの写真を図2に示します。

77ギガヘルツのジャイロトロンでは、最大出力1,800キロワットで1秒、300キロワットで40分の連続運転に成功し、発振効率としても、入力電力の約40%を電磁波の出力として取り出すことに成功しています。これらのジャイロトロンを用いて、プラズマ中心での電子温度約1億5,700万度を、電子密度10兆個/cm<sup>3</sup>で達成しています。

最近の動向としては、1本のジャイロトロン管で、超伝導磁石の磁場強度を変えることによって、強力なパワーでの発振が、複数の周波数で可能となるものが設計、開発されています。例えば、154ギガヘルツと116ギガヘルツの周波数を、磁場強度を変えることによって選択的に発振することができます。これを使うと、プラズマ実験において、高調波（基本共鳴周波数の2倍や3倍）を組み合わせ



図2. LHDの加熱実験用として設置されたジャイロトロンシステム

た加熱手法で、相互に加熱を強めあうことがあり、プラズマの加熱の相乗効果が期待できます。

ジャイロトロン発振管は、非常に高い周波数帯において高出力で長時間運転ができる唯一の発振源です。また発振周波数もテラヘルツ帯（1兆ヘルツ、波長0.3ミリメートル）まで広がっています。その用途は、核融合分野にとどまらず、物性分野やバイオ・医療分野への応用、産業応用まで拡大しています。

図3は、ジャイロトロンの応用分野の拡がりを示しています。核融合分野でのプラズマ加熱やプラズマ計測への適用はもとより、産業分野では、セラミックや金属の焼結、通信手段として、またバイオや医療への適用など、その応用はますます広がっています。

（プラズマ加熱物理研究系 教授）

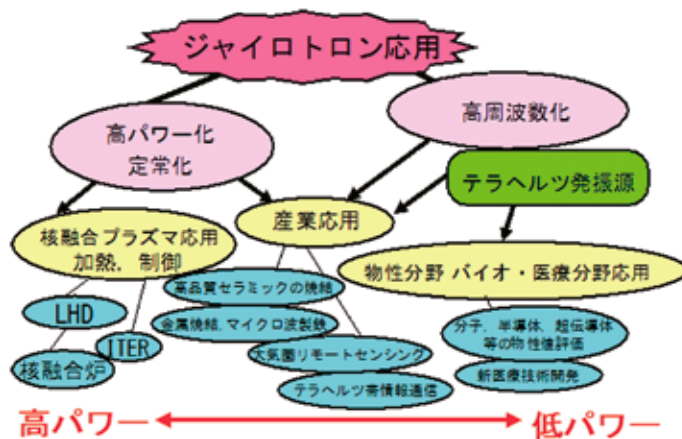


図3. ジャイロトロンの応用分野の拡大