

電磁波を可視化する ～透過ミリ波モニターの開発～

高橋 裕 己

磁場に閉じ込められたプラズマは、磁力線に巻き付いてらせん運動をする性質があります。このらせん運動をサイクロトロン運動と呼びます。プラズマはとても温度が高いため、そのままでは容器に閉じ込めることはできませんが、プラズマが磁力線に巻き付いて運動することを利用して、高温のプラズマを容器に接触させずに、空中に浮いた状態で保持することができます。電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)は、電子のサイクロトロン運動の周波数(電子が磁力線を1秒間に旋回する回数)、または、その整数倍の周波数の強力なミリ波(波長がミリメートルの範囲の電磁波)をプラズマに入射し、ミリ波の作る電場の振動をプラズマ中の電子の旋回運動に共鳴させて、ミリ波のエネルギーを電子に与えることで加熱する方法です。通常、強い磁場でプラズマを閉じ込める核融合プラズマ実験装置では、周波数で数十から数百メガヘルツ(1ギガヘルツは1秒間に10億回の振動)、波長でいうと2ミリメートルから10ミリメートル程度のミリ波が使用されます。

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)では、プラズマを閉じ込める磁場の大きさに合わせて、77ギガヘルツと154ギガヘルツのミリ波を使用して、プラズマの生成や電子の加熱を行っています。ミリ波がプラズマに効率良く吸収される条件は、計算によってあらかじめ求めることはできますが、実際の実験ではプラズマの温度や密度の影響でミリ波の進行方向が曲げられたり、最適な偏波の向き(波の振動の向き)が変わったりしてしまい、ミリ波がプラズマに十分に吸収されなくなります。従って、ECHによって効果的なプラズマ加熱を行うためには、プラズマ中でミリ波がどれくらい曲がるのか、最適な偏波の向きがどれくらい変化するかを明らかにする必要があります。

プラズマに吸収されなかったミリ波は、プラズマをすり抜けて進んでいきますので、ミリ波の進

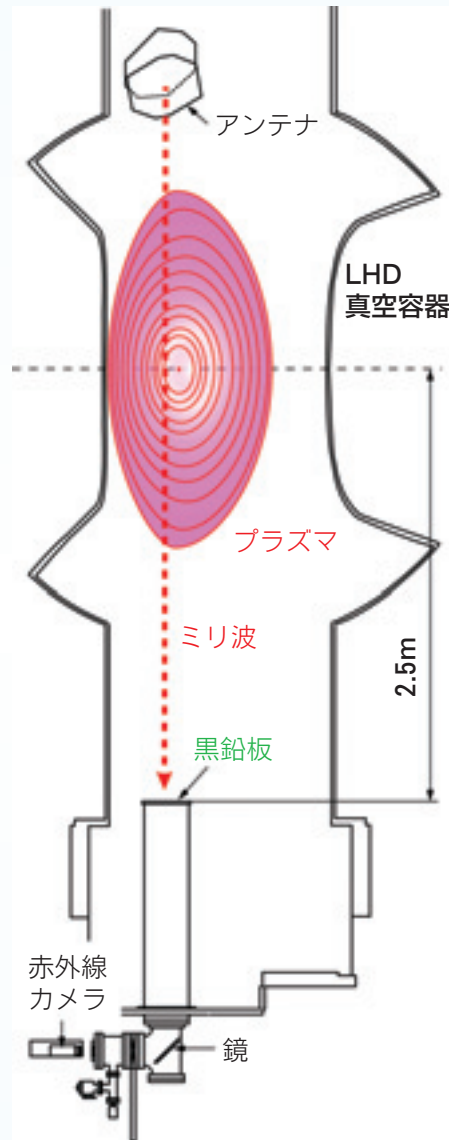


図1 透過ミリ波計測システム。プラズマを通り抜けたミリ波は黒鉛板に照射されます。

行方向の先に、ミリ波を吸収しやすいターゲットを設置しておくことで、プラズマに吸収されずに透過してきたミリ波を測定することができます。本研究では直径約36cm、厚み0.5cmの黒鉛製の円盤をLHD内部に設置して、透過ミリ波の計測を行

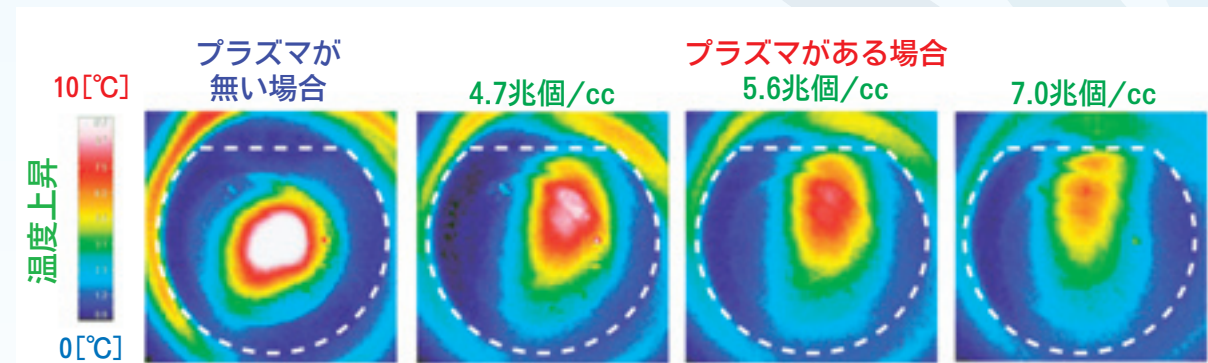


図2 プラズマを透過したミリ波の計測例。プラズマの密度が増加するとプラズマに吸収されるミリ波の電力が大きくなるので、透過波による黒鉛板の温度上昇が小さくなっています。また、プラズマ中でのミリ波の進行方向の曲がり方が変わり、透過ミリ波の分布や照射位置が複雑に変化しています。

いました(図1)。プラズマを透過してきたミリ波が黒鉛板に当たることによって、黒鉛板が温められます。透過ミリ波が当たる面の反対側の温度上昇を赤外線カメラで測定することによって、ミリ波がプラズマによってどれくらい曲げられたのか、ミリ波の電力がどれくらいプラズマに吸収されたのかを調べることができます。赤外線カメラを用いた計測例を図2に示します。図中で白の点線で囲まれている部分がミリ波ターゲットの黒鉛板です。プラズマの密度上昇に伴って、黒鉛板の温度上昇が小さくなっていることから、プラズマへのミリ波吸収が増加していることが分かります。また、プラズマ中でミリ波の進行方向が曲がることに応じて、透過ミリ波の分布や照射位置が複雑に変化していくことが分かりました。

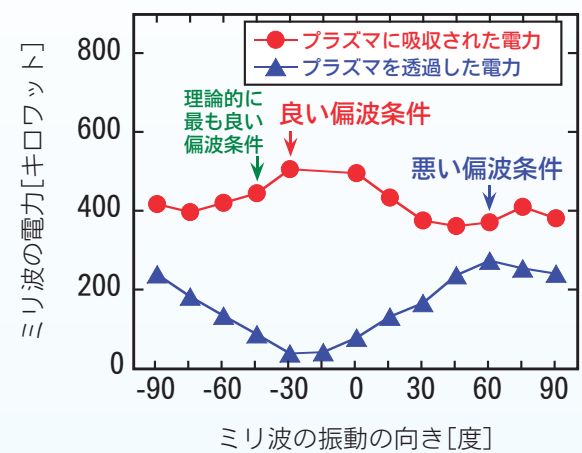


図3 プラズマに吸収されたミリ波電力と透過したミリ波電力の偏波依存性。適切な偏波の条件ではプラズマへの吸収電力が大きくなるので、透過してくるミリ波の電力は小さくなります。

さて、先述のとおり、ECHでプラズマを加熱するためには電子のサイクロトロン運動の旋回の向きと、入射するミリ波の偏波の向きを適切に合わせなければいけません。透過ミリ波計測システムを使用して、プラズマに吸収されたミリ波とプラズマを透過したミリ波の電力収支を調べた一例を図3に示します。ミリ波の偏波が最適な条件でプラズマに入射されると、ミリ波の電力の大部分がプラズマに吸収されるため、透過するミリ波の電力は小さくなりますが、逆に偏波が適切でなければプラズマへの吸収電力が小さく、透過してくるミリ波の電力が大きくなることが分かります。また、この時の実験では、最もミリ波の吸収が良い偏波条件は、理論的に予測される値から15度程度のずれがあることが分かりました。プラズマを透過した波の電力は、プラズマに吸収されなかった無駄な電力と言えます。ミリ波を用いて効果的にプラズマを加熱するためには、いかにこの無駄な電力を少なくするかがカギであり、透過ミリ波の直接計測はそのための有用な手段です。

透過ミリ波計測で得られた知見は、ECHによるプラズマ加熱モデルに反映させることで、ミリ波がプラズマ中のどの位置を加熱しているのか、どのような条件でミリ波を入射すればプラズマへの吸収電力が大きくなるのかを、より高い精度で評価することができるようになります。これによって、ECHを用いたプラズマ制御の高精度化や、より高い電子温度のプラズマの実現が期待されます。

(プラズマ加熱物理研究系 助教)