

省エネでプラズマを加熱する

— 電子サイクロトロン共鳴加熱の入射最適化 —

辻村 亨

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）には電子サイクロトロン共鳴加熱（ECH）と呼ばれるプラズマ加熱装置があります。限られた加熱パワーの中で無駄無く効率良くプラズマを加熱するために、理論的に最適な加熱条件を放電ごとに計算するプログラムの開発と実験への適用を行っています。LHDのECHでは、波長がミリメートル帯の電磁波であるミリ波を用います。ミリ波の入射方向、及び電場の振動の方向（偏波）の2つを適切な条件にしてプラズマへ入射する必要があります。ここでは、偏波の向きは入射方向に垂直な面内においてトロイダル方向に対する回転角度をほぼ表します。それら2つの設定が適切でない場合、ミリ波のパワーの一部分はプラズマに吸収されず、プラズマを透過してしまいます。我々の扱うミリ波のパワーは1000キロワットのレベルで、かつ将来の核融合炉では更に大きくなる見込みです。ちなみにご家庭で使われる電子レンジの電磁波のパワーは1キロワットのレベルです。従って、プラズマに吸収されなかったミリ波はプラズマを十分に加熱しないだけでなく、炉内の機器にダメージを与える可能性もあります。ミリ波の入

射方向と振動方向を適切に設定するためには、ターゲットであるプラズマ中の磁場の大きさや方向、そしてプラズマの電子温度や密度の情報が必要になります。光が空気から水に斜めに入射すると進行方向が変わる（屈折）現象と同様に、プラズマ中でもミリ波は屈折し進行方向が変わります。また、ミリ波の振動方向がプラズマ中の磁場の方向に対して適切な関係がないと共鳴加熱条件から外れ、プラズマを十分に加熱することはできません。最近それらの計算に必要な情報が放電ごとに取得できるようになり、次の放電に向けて、最適な加熱条件を即座に計算できるようになってきています。図1にミリ波の入射方向を最適化計算する前とした後のプラズマ中でのビーム軌道を示します。「改善前」では、屈折の効果でミリ波がプラズマ中で曲がってしまい、プラズマ中の共鳴層と呼ばれるミリ波パワーが吸収されるエリアに進入できなかったために、ミリ波は吸収されずプラズマを素通りしてしまいました。それに対して、「改善後」では、屈折効果やプラズマの中心位置の情報などを考慮して、ミリ波の入射方向を調整することで、結果的にプラズマ中に吸収されるようになりました。

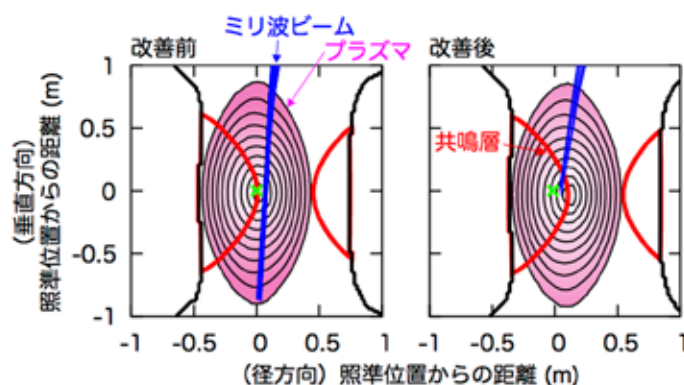


図1：入射方向の改善前後におけるミリ波ビームのLHDプラズマ中での軌道。
図中のバツ印は照準位置を表します。

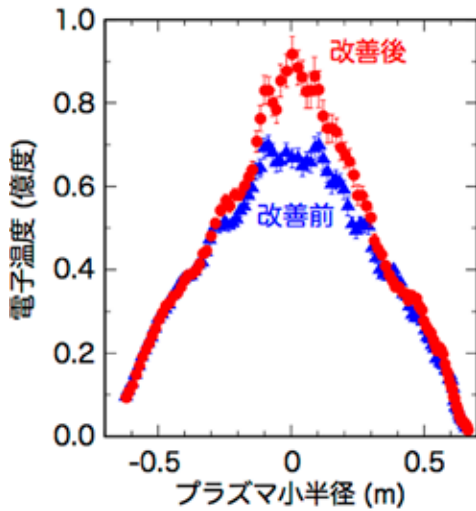


図2：入射方向の改善前後における電子温度分布

図2に改善前後における電子温度分布を示します。「改善後」にてミリ波パワーがプラズマのほぼ中心に吸収されたことで、プラズマ中心の電子温度が約2千万度増加していることが分かります。また、図1に示す上側からの入射（垂直方向）だけでなく、横側からの入射（水平方向）のECHに対しても同様に入射方向を調整することで中心加熱性能の向上に寄与し、電子温度の増加を後押ししています。

一方、ミリ波の偏波に関しては、放電中にリアルタイムで最適設定することを目指して、これまでに、ミリ波の振動方向を放電中にスキャンする実験を行い、実験結果と計算結果を比較しました。

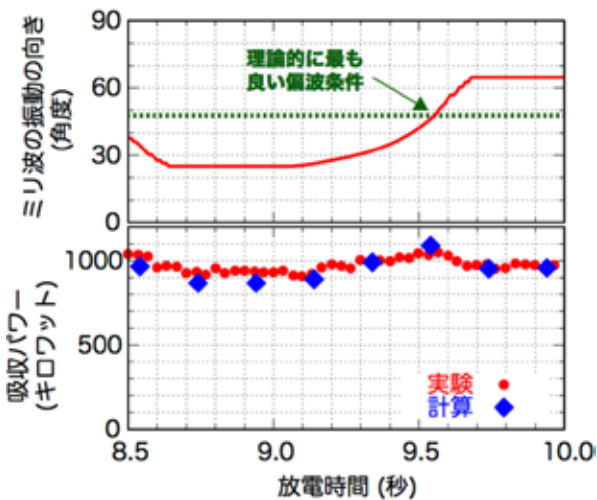


図3：プラズマに吸収されるミリ波パワーの入射偏波依存性。ミリ波の振動方向を放電中に高速変化させました。

図3にプラズマに吸収されるミリ波パワーの入射偏波依存性を示します。ミリ波の振動方向の時間的变化に伴い、吸収パワーも増減していることが分かります。そして実験結果と計算結果が良い一致を示しており、理論的に最も良い偏波条件（プラズマを加熱する波動が最も励起される条件）と予測される約45度のときに、吸収パワーが最大値を示しています。吸収されなかったミリ波パワーの一部は真空容器内で多重反射（乱反射）を繰り返し、最終的にはプラズマに吸収されます。それでも吸収されなかった成分は真空容器内に充満します。省エネルギーの観点から言えば多重反射後に吸収された成分は結果的には良いように見えますが、狙った位置を精度良く加熱できていないという観点では良くありません。従って、ミリ波の入射方向と振動方向を適切に設定して、ミリ波パワーが単一パスで狙った位置に100%吸収されるのが理想です。

ところで、図3に示す計算結果は実験結果と良い一致を示していますが、この計算結果はプラズマと真空との境界の扱い方に大きく影響されます。図1に示すように閉じた磁気面の中のみプラズマが存在し、その外に存在しないならば、境界ははっきりしています。しかし、実際の実験では閉じた磁気面の外側にも低密度のプラズマが存在しているので、ミリ波入射の最適化にはこの影響を考慮する必要があります。特にLHDにおいては、その領域において磁場の方向が変化しやすい特性を持っており、その領域の取り扱いは入射するミリ波の振動方向の最適設定において重要な役割を果たします。今回の計算では、閉じた磁気面を更に外へ仮想的に拡張させるモデルを使用し、プラズマと真空との境界をなくし、電子密度の大きさが外へ向かって小さくなる分布を用いています。この放電については実験値との良い一致が見られました。今後は閉じた磁気面より外のプラズマをより厳密に扱うモデルに発展させて、ミリ波の加熱効果を比較していく予定です。

将来の核融合炉においてECHは主要な加熱源となる見込みです。長時間の定常運転において、リアルタイムECH入射最適化による加熱機器の効率的な運用を行っていきたいと考えています。

（プラズマ加熱物理研究系 助教）