

電子バーンシュタイン波を用いた高密度プラズマの加熱

吉村 泰夫・伊神 弘 恵

大型ヘリカル装置(LHD)では、磁場の中で電子が回転運動する性質を利用し、電子の回転運動の振動数と同じかその倍数の振動数の波動をプラズマに入射することでプラズマ中の電子を加熱することができます。これはブランコが揺れるのに合わせて繰り返し背中を押すことで揺れを大きくできることと同じです。電子加熱が起きる条件を満たす場所を電子サイクロトロン共鳴層(Electron Cyclotron Resonance: ECR層)といいます。ここでは、電子密度の非常に高いプラズマで電子加熱を実現するための電子バーンシュタイン波加熱について説明します。

プラズマ加熱によく使われる波動として異常波(eXtraordinary wave: X波、エックス波)があります。プラズマを家に、波動をそこに住む住人に例えます。X波はプラズマの密度が低い場合は簡単に家の中に入れてもらえて、家の中にあるECR層にも近付けるので加熱に使えます。しかしプラズマの電子密度が高くなると、玄関の扉を閉められてしまい家に入れてもらえなくなります。これは、電場が振動しているという

のがすなわち波動があるということなのですが、電子密度が高くなってくると、X波の電場の振動に電子の動きが追いついて電場を打ち消してしまい、X波を追い返してしまうためです。玄関の扉が閉まってしまふ時の電子密度を遮断密度といいます。

さて電子密度が高くて玄関の扉が閉まっているけれど家の中に入り込んで電子加熱をしたい。どうしたらいいかということで、元々家の中にいる波動を使おう、というのが最近の流行となっています。この波動は、発見者の名前を取って電子バーンシュタイン波(Electron Bernstein Wave: EB波)と呼ばれています。EB波はそもそも磁場のあるプラズマ中の電子が協調的に動くことで生まれます。これは高い密度のプラズマでも同じなので、EB波は密度が高くて追いつかれるとか家に居られないとかということがありません。それどころか、家の中でしか生きていけないのです。ここで重要なのが、EB波とX波は性格も生き方も全然違う(X波は波の進む方向と電場の変化の方向がほぼ垂直な横波ですが、EB波は

波の進む方向と電場の変化の方向が平行な縦波です)のですが、実は同じ母親(分散関係:波動が生きていける条件を表す式)から生まれた兄弟だということです。年齢を強引に波の山と山の間隔(波長)に例えると、生まれて間もない(波長が短い)時にはEB波とX波は見分けがつかないほどそっくりなのです。しかしX波はそのうちに年を取って波長が長くなりますが、EB波は家の中で生まれたあとは赤ちゃんの(波長が短い)まま過ごします。

プラズマの中には、X波が若返る(波長が短くなる)特別な場所があって、高域混成共鳴層と呼ばれます。X波が高域混成共鳴層にやってくると若返ってEB波と区別がつかなくなり、さらにはEB波となってプラズマを加熱することができます。高密度ではX波は普通には玄関を通過して家の中のECR層や高域混成共鳴層に近づくことができません。しかし、玄関の扉を強引に突き破る(fast X-B法: X波からEB波への変換)か、鍵の空いている裏口から忍び込む(slow X-B法)か、X波ではなくまた別の兄弟である正常波(Ordinary wave: O波、オー波)として、縁側の空いた窓から家の中に通してもらった後で、X波に変身することでX波を高域混成共鳴層に近付け、EB波に変えることができます(O-X-B法)。玄関を突き破るやり方は条件が合わないためLHDでは使えません。以下では、最近LHDで行われているslow X-B法とO-X-B法による高密度のプラズマを加熱する実験について紹介します。

<slow X-B法>

X波が忍び込める裏口は、LHDの磁場を作るヘリカルコイルに近い、磁場強度の強い部分にあります。ヘリカルコイルの近くに新しい反射鏡を置くことで、その反射鏡で反射されたX波が磁場の強い側からプラズマ中に入って行くように工夫しました。高域混成共鳴層に到達したX波はモード変換によりEB波になった後プラズマ中を進み、プラズマを加熱します。2011年度に行われた第15サイクル実験ではX波の遮断密

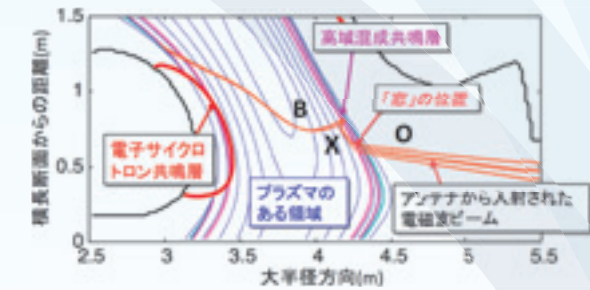


図2 LHDを上からの視線で見た場合の、赤道面から25cm下の水平断面図。プラズマから離れた位置から入射された電磁波(O波)が「窓」を通過してX波に、そしてEB波(図中のB)へと「変身」し、電子サイクロトロン共鳴層の近くまで伝わって行きます。青色の等高線はプラズマのある領域、水色の線はプラズマの外側からX波が近づいた場合に追い返される位置(遮断)を示しています。

度以上の高い密度のプラズマ中心領域での加熱(=温度上昇)を得ることができました(図1)ので、今後詳しくその実現条件を明らかにして行く予定です。

<O-X-B法>

「O波として縁側の空いた窓から家の中に通してもらった後で、X波に変身する方法(O-X-B法)」では、O波をこの「窓」に向けてアンテナから入射します。LHDではこの窓の幅が非常に小さいので、精度の良い入射方向制御が必要になります。図2は、LHDの弱磁場側にある水平ポートアンテナから入射されたO波が「窓」を通過した後でX波に「変身」し、さらにEB波に変わってプラズマ中を伝わり電子サイクロトロン共鳴層の近くで吸収される様子を示しています。第15サイクル実験では、プラズマ遮断密度を越える密度のプラズマにおいて、この「窓」に向けたO波の入射を行い、蓄積エネルギーと電子温度の上昇を確認しました。

電子バーンシュタイン波を用いたこれらの高密度プラズマ加熱実験を通し、将来の核融合炉で求められる高い密度でのプラズマ加熱の手法を確立するための研究をさらに進めていきます。

吉村泰夫 プラズマ加熱物理研究系 准教授
伊神弘恵 プラズマ加熱物理研究系 助教

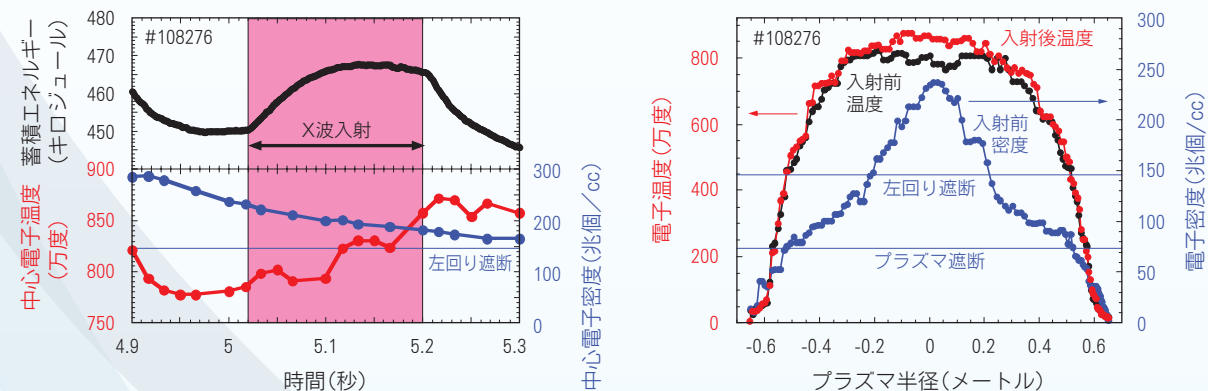


図1 左図は、slow X-B法を適用したプラズマ放電の基準時間から4.9~5.3秒の間の、プラズマに蓄積されたエネルギー(太い黒線)と、プラズマ中心部での電子温度(赤線)と電子密度(青線)の時間変化を示したものです。ピンク色で示された時間帯(X波を入射している間)に、X波の遮断密度(図中、左回り遮断と表示)を大きく超えるプラズマ中心部での電子温度に上昇が見られます。右図は、プラズマ中心(横軸0)からの電子温度(赤線と黒線)と電子密度(青線)の分布を示したものです。