

高速イオンによって励起されるイオンサイクロトロン波と
低域混成波の粒子シミュレーション

**Particle simulation of ion cyclotron waves and
lower hybrid waves excited by energetic ions**

樋田美栄子, 伊神弘恵, 斎藤健二, 秋山毅志, 神尾修治, 關良輔
M. Toida, H. Igami, K. Saito, T. Akiyama, S. Kamio, R. Seki

核融合研
NIFS

大型ヘリカル装置 (LHD) のプラズマでは、加熱用の高速中性粒子 (NB) の入射時に、イオンサイクロトロン周波数から低域混成周波数に及ぶ様々な周波数の電磁波の放射が観測されている [1]。これらの波は、NB 入射によって生成された高速イオンによって励起されたものと考えられる。本研究では、波の励起機構を、電磁粒子シミュレーションを用いて調べている。これまでの研究で、磁場が 1.57 テスラで、電子密度が $0.2 \sim 2.0(10^{19} \text{m}^{-3})$ の場合、トーラスプラズマに垂直方向の NB 入射によって生成される高速イオンが励起する低域混成波は、低域混成共鳴周波数 ω_{LH} よりも少し小さい周波数を持つことを示した [2]。ここで、 ω_{LH} は次のように定義される。

$$\omega_{\text{LH}} = \sqrt{\Omega_i \Omega_e} [(1 + \Omega_i^2 / \omega_{pi}^2) / (1 + \Omega_e^2 / \omega_{pe}^2)]^{1/2}$$

今回の講演は、電子密度が 10^{19}m^{-3} 以下の場合に注目する。LHD では、電子サイクロトロン加熱用の電力入射と接線方向の NB 入射をほぼ同時に開始してプラズマを立ち上げ、密度を徐々に増加させた場合に、放射電磁波の周波数が階段状に増加するという現象が観測されている。この現象のメカニズムを調べるために、空間 1 次元・速度 3 次元の電磁粒子コードを用いて、プラズマの密度を時間とともに増加させ、そのプラズマに高速粒子を注入し続けるシミュレーションを行った。磁場に対してほぼ垂直方向に伝播する波の発展を追跡した結果、実験と同様に、シミュレーションにおいても、電磁擾乱の周波数が階段状に増加する現象を観測した。さらに、詳細なスペクトル解析を行って、次のような機構を明らかにした。この現象に関わる波は、高速イオンが励起する $n\Omega_i$ (n は整数) の周波数を持つ波と、背景プラズマ中のバーンスタイン波の中で、 ω_{LH} に近い周波数を持つ波である。また、低域混成共鳴周波数 ω_{LH} は時間とともに増加するが、 ω_{LH} が $n\Omega_i$ と一致する時刻 t_n が、周波数変化の分岐点となる。 t_n より少し前に、 $n\Omega_i$ の波が不安定化して成長を始め、 t_n を過ぎると、背景プラズマのバーンスタイン波とカップリングを起こす。このような波の不安定性と非線形結合の結果、階段状の周波数増加がシミュレーションで観測されることが分かった。

[1] K. Saito *et al.*, Plasma and Fusion Research **13**, 3402043 (2018).

[2] M. Toida *et al.*, Plasma and Fusion Research **13**, 3403015 (2018).