

JT-60U における負イオン源中性粒子ビームが 駆動するアルベン固有周波数帯不安定性 Instability in the frequency range of Alfvén eignemode induced by Negative-ion-based Neutral Beam in JT-60U

篠原孝司, 石川正男, 武智学, 草間義紀, 藤堂泰¹⁾, N.Gorelenkov²⁾, C.Z.Cheng²⁾, 福山淳³⁾ G.J.Kramer²⁾, R. Nazikian²⁾, 小関隆久
原研那珂, 核科研¹⁾, PPPL²⁾, 京大工³⁾

SHINOHARA Kouji, ISHIKAWA Masao, TAKECHI Manabu, KUSAMA Yoshinori, TODO Yasushi¹⁾
GORELENKOV Nikolai²⁾, CHENG C Z²⁾, FUKUYAMA Atsushi³⁾,
KRAMER Gerrit²⁾, NAZIKIAN Raffi²⁾, OZEKI Takahisa
JAERI Naka, NIFS¹⁾, PPPL²⁾, Graduate School of Engineering, Kyoto University³⁾

炉心プラズマ中では核融合反応で生成された高エネルギーイオンと主プラズマとの相互作用によりアルベン固有周波数帯に不安定性が発生する可能性がある。現在の実験においてもいくつかの不安定性が観測され、理論的にも同定されている。例としてトロイダルアルベン固有モード TAE や楕円形度誘導アルベン固有モード EAE などがある[1]。これらの不安定性が発生すると、高エネルギーイオンと相互作用して高エネルギーイオンの輸送を助長し、その結果、プラズマ中心部の加熱効率の低下や、損失イオンが壁にダメージを与えることなどの悪影響を引き起こす可能性がある[2]。一方、この輸送が定常高性能運転に適した負磁気シア配位を生成するのに役に立つ可能性もある[3]。また、高エネルギーイオンは電子を加熱するが、アルベン周波数帯の不安定性を仲介して、効率的にイオンを加熱できれば、燃焼効率をあげられる可能性もある[4]。このようにアルベン固有周波数帯の不安定性とこれによる高エネルギーイオン輸送機構はプラズマの燃焼性能に影響すると予想されるため、その解明が ITER に向けた重要な研究課題となっている。JT-60 では、ICRF 加熱装置[5]や負イオン源中性粒子ビーム(NNB)を用いて、これらの不安定性の研究を行ってきた[6]。特にトーラス接線方向に 300 - 400 keV の高エネルギーイオンを生成できる NNB は、ITER 級のトカマクの接線方向に運動する α 粒子を模擬できる世界で唯一の高エネルギーイオン発生源であり、JT-60 でのアルベン固有周波数帯不安定性の実験の重要な特徴となっている。

NNB を用いて高エネルギーイオンの圧力の高い状態を作るとアルベン固有周波数帯にバースト状で数十ミリ秒以下の時間スケールの周波数掃引をともなった不安定性 (Fast Frequency Sweeping mode; Fast FS や Abrupt Large-amplitude Event; ALE と呼んでいる) が観測された[6]。これらの不安定性により高エネルギーイオンの径方向輸送が助長されていることが、中性子発生量分布[7]や中性粒子束の計測で明らかになった。最近、自然組成ダイヤモンド検出器(NDD)を用いた中性粒子束分布計測[8]により、輸送されている高エネルギーイオンの共鳴的エネルギー依存性が初めて明確に観測された。観測された結果は、輸送が、高エネルギーイオンと不安定性とが共鳴的に相互作用し、不安定性の電磁場を静的に感じて起きていることを示唆している。また、Fast FS の周波数掃引についても、粒子-MHD 混成数値計算コード[9]により、最近、実験結果を再現する結果を得ており、波動による粒子捕捉領域の軌道周回周波数が変化すること(hole-clump pair creation)によって生じる現象であると考えられる。高エネルギーイオンの圧力の高い状態で発生するこのような非線形現象について高エネルギーイオン圧力分布との関連について報告する。

さらに、負磁気シアプラズマでは、負磁気シア誘導アルベン固有モード(Reversed Shear-induced AE; RSAE)の発生を TASK/WM コードにより理論的に予測していたが[10]、MSE による詳細な q 分布計測等を用いて JT-60 においてこれを同定した[11]。NOVA-K コードを用いて、新たにビーム駆動を考慮した RSAE の発生条件 (安定性) 解析を行い、実験と数値計算の比較を報告する。

References

- [1] K. L. Wong, Plasma Phys. Control. Fusion 41, (1999) R1
- [2] D J Sigmar et al, Phys. Fluids B 4 (1992) 1506
- [3] K. L. Wong et al., in 8th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems (2003)
- [4] N J Fisch and M C Herrmann, Nuclear Fusion 34 (1994) 1541.
- [5] H. Kimura et al., Nuclear Fusion 38 (1998) 1303.
- [6] Y. Kusama et al., Nuclear Fusion 39 (1999) 1837. K. Shinohara et al., Nuclear Fusion 42 (2002) 942.
- [7] M. Ishikawa, et al., Rev. Sci. Instru. 73 (2002) 4273
- [8] M. Ishikawa et al., submitted to Rev.Sci. Instrum.
- [9] Y. Todo et. al., J. Plasma Fusion Res., 79 (2003) 1107
- [10] A. Fukuyama et al., in 6TH IAEA Technical Committee Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, 12-14, October, 1999, Naka (IAEA, Vienna, 1999)
- [11] M. Takechi et. al., Fusion Energy 2002 (Proc. 19th Int. Conf. Lyon, 2002), IAEA-CN-94/EX/W-6, IAEA