

核融合プラズマにおける閉じ込め遷移現象の物理機構

Physical mechanism of confinement transition in fusion plasmas

小林達哉^{1,2}, 伊藤公孝^{3,1,4}, 井戸毅¹, 神谷健作⁵, 佐々木真^{4,6}, 伊藤早苗^{4,6,3}, 三浦幸俊⁷,
永島芳彦^{4,6}, 藤澤彰英^{4,6}, 稲垣滋^{4,6}, 居田克巳¹

T. Kobayashi¹, K. Itoh^{3,1,4}, T. Ido¹, K. Kamiya⁵, M. Sasaki^{4,6}, S.-I. Itoh^{4,6,3}, Y. Miura⁷,
Y. Nagashima^{4,6}, A. Fujisawa^{4,6}, S. Inagaki^{4,6}, K. Ida¹

¹核融合研, ²総研大, ³中部大, ⁴九大極限プラズマ研究連携セ, ⁵量子研, ⁶九大応力研, ⁷原子力研
¹NIFS, ²SOKENDAI, ³Chubu U., ⁴Center for Plasma Turb. Kyushu U., ⁵QST, ⁶RIAM Kyushu U.,
⁷JAEA

核融合プラズマでは、一定以上の加熱パワーを印加すると閉じ込め状態が自発的に改善する「LH遷移」と呼ばれる現象がある。将来の大型実験炉や実証炉ではLH遷移を積極的に利用したオペレーションが考えられているが、その物理機構は完全には明らかにされていない。本発表では、径電場と乱流の直接観測から、電場形成機構や乱流輸送抑制機構などの基礎物理過程を明らかにするデータ解析を実施した結果を議論する。

実験は、JFT-2Mトカマクで行われた。700kWの中性ビーム加熱で維持した線平均密度 $1.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ のプラズマ(大半径 $\sim 1.3 \text{ m}$ 、小半径 $\sim 0.3 \text{ m}$)を対象とした。中性ビーム入射後約300msの sawtooth crash時にLH遷移が観測された。Hモードプラズマでは、 $r-a = -1 \text{ cm}$ 程度の位置に -20 kV/m 程度の電場構造が形成される[1]。遷移過程の電場、密度勾配、乱流を重イオンビームプローブを用いて計測した。

トラスプラズマ中での径電場は、荷電分離を引き起こす径電流によって励起される。径電場と径電流の関係は、 $J_r = -\epsilon \epsilon_0 \partial E_r / \partial t$ の様に表される。ここで ϵ_{\perp} はプラズマの比誘電率係数を示す[2]。即ち、径電流の実験値は計測した径電場の時間発展により与えられる。図1は、LH遷移時の逆勾配長、径電場、径電流の時間発展を示す。ここで t_{LH} は、LH遷移の開始時間を示す。径電場の時間発展を見ると、 $t - t_{LH} \sim 0 \text{ ms}$ と $\sim 3.5 \text{ ms}$ の2つの時間で電場が成長し、径電流がピークしていることがわかる。一方、理論解析より、径電流は、

$$J_r = J_i^{BV} + J_i^{LC} + J_i^{VV} - J_{e-i}^{wave} + J_i^{CX} + \text{others} \quad (1)$$

ようにモデル化されている[2]。右辺の各項は新古典バルク粘性電流、ロスコーンロス電流、レイノルズストレス電流、波動対流電流、荷電交換ロスを表す。本研究では、プラズマパラメータより式(1)の1-3項を評価し、実験値と比較することで、モデルの妥当性を検証した。

図2は、径電流の規格化電場 $X(=e\rho_p E_r/T_e)$ 依存性を示す。プラズマがLモードである場合、径電場

は0に近い値となり、電場の時間発展がないため径電流も0となる。プラズマがHモードに遷移する際は、正の径電流が発生し、負の電場が成長する。式(1)を評価すると、第1、2項の新古典バルク粘性電流とロスコーンロス電流の和が遷移時に実験値とよく一致することが示された[3]。一方、第3項のレイノルズストレス電流の寄与は小さいことがわかった。この結論は、リミットサイクル揺動における解析結果とも整合する[4,5]。また、Lモードでは、理論値として正の電流が得られており、実験値との大きな隔たりが存在する。オーダー計算により、式(1)第4項の波動対流電流がこの不一致を説明し得ることが示された。

本研究は、科研費(15H02155, 26887047, 16H02442)、量子科学技術研究開発機構及び九州大学応用力学研究所共同研究の支援を得た。

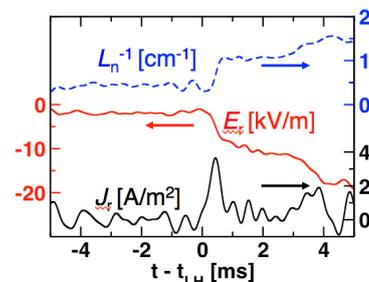


図1：LH遷移時の逆スケール長、径電場、径電流の時間発展。

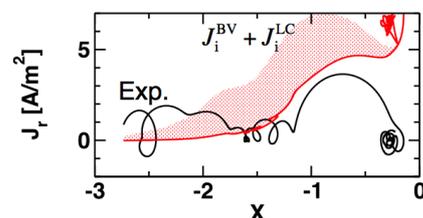


図2：径電流の規格化電場依存性。

[1] T. Kobayashi, et al, Nucl. Fusion 55 (2015) 063009

[2] K. Itoh and S.-I. Itoh Plasma Phys. Control. Fusion 38, 1 (1996).

[3] T. Kobayashi, et al, Sci. Rep. 6 (2016) 30720

[4] T. Kobayashi, et al, Phys. Rev. Lett., 111, 035002 (2013)

[5] T. Kobayashi, et al, Nucl. Fusion 54 (2014) 073017