

乱流駆動輸送の磁場配位効果と同位体効果 Configuration and isotope effects in anomalous transport

田中謙治^{1,2}
Kenji TANAKA^{1,2}

核融合科学研究所¹、九州大学総理工²
NIFS¹, IGSES Kyushu University²

本講演では、ヘリカル/ステラレーター型の核融合炉の実現するために、現在行われているヘリカル/ステラレーターにおける研究が、どのように貢献できるかという観点に立ち、最新の研究成果について議論する。

ヘリカル/ステラレーター型の研究において、新古典輸送、乱流駆動輸送を低減するための磁場配位の最適化は重要な研究課題である。理論的アプローチとしては、磁場構造パラメーターを幅広くスキャンし、新古典輸送および MHD 的な不安定性を抑えたコイル配位を数値的に算出し、これらの配位における乱流駆動輸送の特性を明らかにする。または、乱流駆動輸送を低減する磁場構造因子を明らかにし、それを低減する手法が用いられている。しかし、これら数値計算による最適化が、実際に良好な閉じ込めを実験で実現できるかは、必ずしも明確ではない。よって、現在稼働中のヘリカル/ステラレーターの実験から輸送を低減するために必要な磁場構造因子を明らかにすることは重要である。そこで、磁場配位効果を明らかにする目的で LHD と W7-X の比較実験を行った。両装置は多くの磁場構造因子が異なる。LHD は、MHD 安定性と新古典輸送の低減の両立を目指し、一方、W7-X は新古典輸送の徹底的な低減を目指した装置である。両装置ともプラズマ体積は $20m^3$ であり、磁場強度も同程度 (LHD は 2.75T, W7-X は 2.5T) である。

ECRH の加熱パワーを 2MW にそろえた分布の比較を図 1 に示す [1]。密度分布は LHD では新古典輸送の非対角項の影響により凹型の分布となるが、W7-X では新古典輸送が LHD より一桁程度低いため、トカマクと同様の凸型の分布となる。電子温度は W7-X の方が中心付近で高く、LHD の方が周辺付近で高い。イオン温度は全領域で LHD の方が高い。巨視的な閉じ込め時間は同程度であり、イオンの熱伝導係数 (χ_i) の全量から新古典輸送成分を差し引いた異常輸送の成分 χ_{iano} は図 1 (d) に示すように LHD の方が低い値である。この結果は、図 1 (a) に示すように規格化位置 0.5 および 0.6 で比較したジャイロ運動論による非線

形シミュレーションの値とほぼ一致した [1]。これまで LHD の実験結果では実効ヘリカルリップル (ϵ_{eff}) が小さく新古典輸送が小さい磁気軸寄せ配位が閉じ込めがよいことが明らかになっている [2]。また、 ϵ_{eff} を下げることにより、新古典輸送を低減するだけでなく、帯状流が強く生成され、乱流駆動輸送が抑制されることがシミュレーションにより示されている [3]。しかしながら、LHD と W7-X の比較実験では、 ϵ_{eff} は、異常輸送の低減に関しては支配的な磁場構造因子でないことを示唆している。

LHD において、乱流駆動輸送を低減する磁場構造因子を明らかにするうえで、水素同位体による比較実験から新たな知見を得ることができた [4]。ECRH の加熱条件 (パワー、加熱位置) を一定にした条件下において、電子密度をショットごとにスキャンし、軽水素 (H)、重水素 (D) における乱流揺動の計測と線形解析、およびパワーバランスによる輸送解析を行った。図 2(a) に二次元位相コントラストイメージング (Two-dimensional phase contrast imaging; 2D-PCI[5]) を用いて計測したコア領域 $\rho = 0.5 - 0.7$ のイオンスケール ($k_{\perp}\rho_i = 0.1 - 1$; k_{\perp} は磁力線垂直方向の波数、 ρ_i はイオンラーモア半径) の乱流揺動レベルを示す。乱流揺動レベルは H において $1.7 \times 10^{19}m^{-3}$ 、D において $2.7 \times 10^{19}m^{-3}$ までは密度の増加とともに減少し、これらの敷居密度を超えると増加に転じる。一定加熱条件下の密度スキャン実験において、多くのプラズマパラメーターは一方向に増加、または減少する。一方、乱流揺動レベルは特定の密度において最小値を持つことから、敷居密度の前後で乱流の性質が異なることを示唆している。また、敷居密度より低い領域では H, D で乱流揺動レベルに差がないが、敷居密度より高い領域では D の方が乱流揺動レベルが低い。図 2(b) にジャイロ運動論コード GKV[6] を用いたイオンスケールの線形成長率の密度依存性を示す。全ての計算領域において支配的な乱流はイオン温度勾配不安定性 (ITG) であった。H, D ともに ITG の線形成長率は密度の増

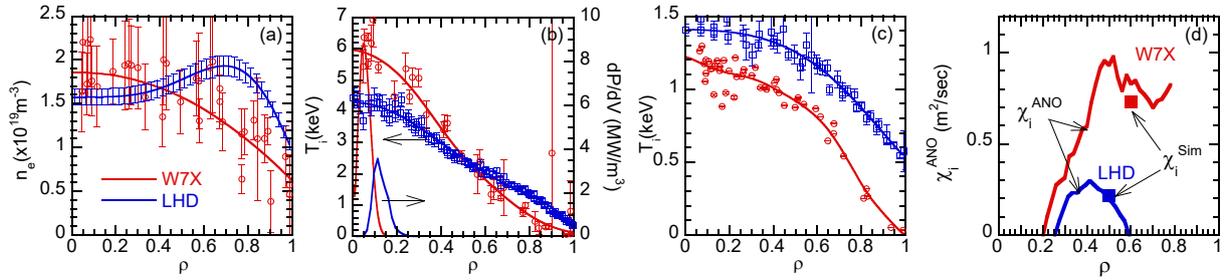


図 1 W7-X と LHD の ECRH プラズマの比較 (a) 電子密度、(b) 電子温度と ECRH 吸収加熱、(c) イオン温度、(d) χ_i 異常輸送成分と非線形シミュレーション値 [1]

加とともに減少する。ITG の線形成長率が密度の増加に伴い、ほぼ単調に減少することは、乱流揺動レベルが敷居密度以上で増加することに反する。よって、敷居密度以上では、観測された乱流は ITG ではないことを示唆している。そこで、我々は抵抗性交換型不安定性 (resistive interchange; RI) 乱流に注目した。本実験を行った内寄せ配位 (磁気軸位置 3.6m) では、すべての空間領域で磁気丘配位となっており、RI が不安定となる。図 2(c) に二流体 MHD コード [7] による RI 乱流の線形成長率の密度依存性を示す。ITG と異なり、敷居密度以上で不安定となり、また、D の方が成長率が低く、乱流揺動レベルの計測結果と定性的に一致する。よって、敷居密度より低い領域では支配的な乱流は ITG であり、敷居密度より高い領域では支配的な乱流は RI である可能性が高い。パワーバランス解析において、 χ_{eano} 、 χ_{iano} は遷移密度で最小となり、ほぼ、揺動レベルと同等な密度依存性を持つ [4]。これらの結果は、異常輸送を低減するためには ITG/TEM のようなドリフト波タイプの乱流揺動だけでなく、RI のような MHD 不安定に起因するイオンスケールの乱流揺動も考慮する必要がある。

LHD と W7-X の比較を行ったのは敷居密度よりも低い ITG 領域である。この領域では LHD の磁場構造パラメーターにおいて W7 - X より ITG 乱流を低減する要素を持つ。一方、LHD において敷居密度が高い RI 領域になると乱流揺動が増大し、閉じ込めが劣化する。将来のヘリカル型核融合炉において、LHD タイプの配位を追求するのであれば、RI 領域に入らないような運転が必要であろう。また、磁場配位の最適化という観点に立てば、MHD 的な安定性だけでなく、輸送を低減するという観点からも、RI が不安定となる磁気丘配位は避けるべきであろう。

References

[1] F. Warmer *et al.*, Physical review letters **127**, 225001 (2021).

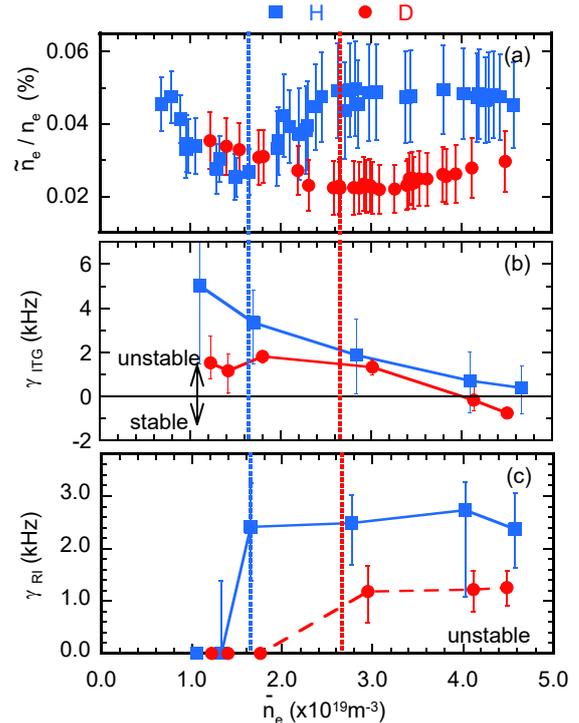


図 2 LHD における (a) 乱流揺動レベル $\rho = 0.5 - 0.7$ (b)ITG $\rho = 0.5 - 0.7$, (c)RI の線形成長率 $\rho = 0.55$ の密度依存性 [4]

[2] H. Yamada *et al.*, Nuclear Fusion **45**, 1684 (2005).
 [3] T.-H. Watanabe, H. Sugama, and S. Ferrando-Margalet, Physical review letters **100**, 195002 (2008).
 [4] T. Kinoshitsa *et al.*, in *Proc. FEC2023, London, UK, 2023*.
 [5] K. Tanaka *et al.*, Review of Scientific Instruments **79**, 10E702 (2008).
 [6] T.-H. Watanabe and H. Sugama, Nuclear Fusion **46**, 24 (2005).
 [7] M. Sato and A. Ishizawa, Physics of Plasmas **24**, 082501 (2017).