

LHD重水素実験を舞台とした学術研究

Advanced Academic Research and Deuterium Plasma Experiment on LHD

伊藤公孝^{1,2}, 伊藤早苗^{2,3}K. Itoh^{1,2}, S.-I. Itoh^{2,3}¹核融合科学研, ²九大極限プラズマ研究連携セ, ³九大応力研¹NIFS, ²Research Center for Plasma Turbulence, Kyushu U., ³RIAM, Kyushu U.,

1. はじめに - 何が問題か

プラズマの乱流輸送研究の多くの謎のうち、代表的なものが τ_E の水素同位体効果である。経験的には、 $\tau_E \propto A^{0.5}$ の様に重い水素同位体のプラズマほど τ_E が長くなることが広く知られている (A は水素同位体の質量数) [1]。一方、熱流 q_r と温度勾配の gyro-Bohm 型拡散関係式が採用される事が多い:

$$q_r = -n \chi_{gB} \text{grad } T, \chi_{gB} \sim \rho_i T / e B a \quad (1)$$

しかし、i) χ_{gB} では、水素同位体効果が観測と矛盾する。この他 (1) 式の描像では理解出来ない難問が多い。例えば、ii) τ_E のトロイダル磁場依存性が予測されるが、実際はプラズマ電流依存性が強い[2]。iii) コアプラズマの輸送が表面での遷移の後、極端に速く応答する[3]。iv) 装置の壁材が H-モードの τ_E に強く影響する[4]。このように常識的モデル(1)の枠を超えた難問が山積している。高温プラズマの乱流輸送研究は、抜本的な改革が急務である。

τ_E への水素同位体効果は、核融合炉の性能の正確な予測に必須だけでなく、学術のフロンティアの中で、プラズマ物理学・核融合科学の学問的な意義をアピールする試金石になっている[5]。

ここでは、「水素同位体効果」を考察する事により、既存のプラズマ輸送研究の方法論を拡張しプラズマの乱流輸送の描像を刷新する道筋を考える。

2. 現象論的考察と可能性

熱平衡状態からかけ離れた高温プラズマでは、乱流輸送が系のサイズや形に依存し、そこに法則が探究される。従来のモデル(1)式に対し、多スケール乱流や電場・揺動の構造形成機構[6,7,8]、L-H-mode 等の構造相転移[9]、輸送ヒステリシス[10]等、新しい描像が提示されて来ている。水素同位体効果の考察が物理的描像に収束して行く事を視野に入れつつ、現在までの観察を俯瞰してみよう。

トカマクの多くの観測では、

$$\tau_E \propto A^\eta \quad \eta \sim 0.5 \quad (2)$$

の様な観察、そして指数 η にはプラズマ閉じこめモードによる差違が大きい事などが報告されている[11]。ヘリカル系での観測は今迄限られているが、WS-AS のアイランドダイバーター配位では重水素で軽水素 1.2 倍になりうる事が示され[12]、CHS からは τ_E の A 依存性が弱いとの報告もある[13]。

今迄の現象論的な観測が相応の普遍性を持つとするなら (スケーリング則による外挿的予測などはその立場の典型例であるが)、プラズマ乱流輸送の法則を求める上の指標となる。

3. 物理機構考察へのインパクト

水素同位体効果の考察は、マイクロモデルの枠組みも拡張するインパクトがある。イオン回旋半径スケールの揺動ではなく、亜臨界不安定性により励起される電子表皮長スケール揺動では水素同位体効果現象やプラズマ電流への強い依存性が自然に説明出来[8]、検討も進んでいる[13]。実際に短波長揺動を観測する計画も検討されている。

輸送関係式はヒステリシスを持ち、(1)の様な一価関数ではなく、[14,15]。勾配・熱流のあいだのヒステリシスは加熱下の L-モードでも存在する (図 1a)。加熱 on-off 時に現れる速い揺動・熱流の変動を理解するため、「加熱が乱流を直接速く加熱する」過程の理論が示されている[10]。乱流輸送は加熱にも直接影響される。その理論では加熱による乱流輸送の増倍率は

$$1/(1-\Gamma_b) \quad (3)$$

であり、パラメタ Γ_b は加熱入力密度 P とマイクロ輸送係数の比に比例する。

水素同位体効果が組み合わせで生まれる機構を示唆する[16]。この考え方を敷衍し、勾配・流束関係のヒステリシスを作る速い熱流変動過程と χ_{gB} 型の局所拡散過程の双方が働き、上記(3)式の、加熱による乱流輸送の増倍率は $1/(1-\Gamma_b)$ において、パラメタ Γ_b は加熱入力密度 P とマイクロ輸送係数の比に比例する。輸送係数として χ_{gB} をとると、重い水

素ほど χ_{eB} の値が大きいので Γ_h が小さくなる。加熱過程による乱流輸送増倍率（ヒステリシスのジャンプ量）が下がる。図1bに示すように、重い水素（実線）では、軽い水素（点線）と比較し、ヒステリシスのジャンプが減る一方、勾配で増す成分が増える。両者の組み合わせで重い水素の実効的輸送が低下する可能性が理論的に示された[16]。実際に検証可能である。この考え方を敷衍すると、乱流輸送を左右する個々の機構の同位体効果を考えるのではなく、複数の機構の組合せの中から水素同位体効果を説明する研究へと展開して行く事ができる[17]。

原子分子過程とプラズマ乱流輸送の結合の研究も促す。プラズマ粒子の補給は、スクレイプオフ層での原子分子過程に強く依存する。そこで、原子分子過程とプラズマ乱流が結合するプロセスを通じて水素同位体効果が現れる。具体的には、中性粒子の主プラズマへの補給過程において、SoLの強い揺らぎが閉じ込め領域の周辺プラズマに運ばれ、表面近傍の強い揺らぎに寄与しうる。輸送ヒステリシスが heating heats turbulence[10]とも言うべき機構の現れとするなら、fuelling fuels turbulence のプロセスも働く[18]。壁材がプラズマ閉じ込めに影響する過程にも繋がる[19]。

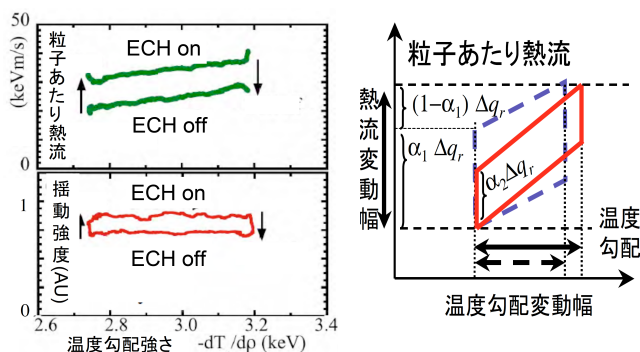


図1:(a)輸送ヒステリシスに関するLHDの実験観測 ([14]に基づく)。(b)理論から予測される輸送ヒステリシスの水素同位体効果[16]。

4. 展望

ここでは、水素同位体効果研究の持つ学問的牽引力を説明した。多スケール乱流・輸送ヒステリシス・原子分子プラズマ結合、等の新しい乱流物理の進歩を踏まえ、**それらの組合せ**で理解出来るのではないかとこの作業仮説を説明した。

エネルギー閉じ込め時間の水素同位体効果を始め、プラズマ乱流輸送の物理モデルには未解決の難問が山積している。水素同位体効果が解明されるためには、他の難問にも一括した理解を与えるべきであり、またそのように期待され、この研究

は、高温プラズマの乱流輸送研究に抜本的な改革をもたらす道である(図2)。また、プラズマ物理学・核融合科学の学問的な意義を明示する。

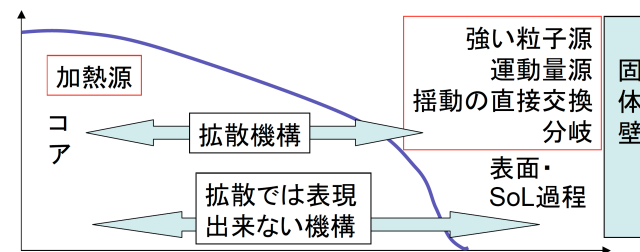


図2：プラズマの乱流が加熱や粒子補給を含む系の多様な励起と結合する。

本講演は、稲垣滋、居田克巳、藤澤彰英、山田弘司、U.Stroth、小林達哉、佐々木真、小菅祐輔、ほかの諸氏との共同研究に基づきます。鎌田裕、神谷健作、他の方々との議論に感謝します。また、科学研究費(JP16H02442, JP15H02155, JP15K17799)、九州大学応用力学研究所共同研究、核融合科学研究所共同研究、浅田奨学事業の支援に感謝します。

References

- [1] M. Bessenrodt-Weberpals, et al.: Nucl. Fusion **33** (1993) 1205
- [2] E. J. Doyle et al.: Nucl. Fusion **47** (2007) S18
- [3] J. G. Cordey, et al., Plasma Phys. Contr. Fusion **36** (1994) A267
- [4] F. Wagner et al.: Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (1990) Vol. 1 (Vienna, IAEA, 1991) 277
- [5] 文部科学省 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会： 大型研究計画に関する評価について(報告)「超高性能プラズマの定常運転の実証」(平成25年09月06日)
- [6] S.-I. Itoh, et al.: Plasma Fus. Res. **90** (2014) 793 (review)
- [7] P. H. Diamond: Plasma Phys. Contr. Fus. **37** (2005) R35
- [8] K. Itoh, et al. *Transport and structural formation in plasmas*, (IoP Publishing, UK, 1999)
- [9] S.-I. Itoh, et al.: Phys. Rev. Lett. **60** (1988) 2276
- [10] S.-I. Itoh, et al.: Sci. Rep. **2** (2012) 860
- [11] H. Yamada: presented at the 1st workshop on the planning of Deuterium plasma experiment on LHD (NIFS, 2014 April 25) private communication
- [12] K. Tanaka, et al.: Plasma Phys. Contr. Fus. **58** (2016) 055011
- [13] S. Ide, et al. EPS 2016 (2016, Leuven)
- [14] S. Inagaki et al.: Nucl. Fusion **53** (2013) 113006
- [15] S.-I. Itoh et al.: Plasma Fus. Res. **87** (2011) 371
- [16] S.-I. Itoh, et al.: Nucl. Fusion **57** (2017) 022203
- [17] S.-I. Itoh: submitted to JSPS (November 2016)
- [18] K. Itoh, et al.: submitted to Nucl. Fusion (2016)
- [19] K. Itoh, et al., Plasma Phys. Contr. Fus. **37** (1995) 491