

核融合炉におけるヘリウムリサイクリングの影響とQUEST 実験

Impact of helium recycling on fusion power plants and plan of related experiments on QUEST

花田 和明
Kazuaki Hanada

九州大学応用力学研究所
Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

地上で実現しようとしている核融合反応では、核燃焼（核融合増倍率 $Q=\infty$ ）と呼ばれる、太陽等の天体でも実現されていない極限状態が存在する。核燃焼が実現できればエネルギー源としての核融合炉の経済性を飛躍的に向上させることが期待されているが、それ以上にプラズマという強い非線形を持つ媒質が自律的にある種の定常状態を維持するという学術的に魅力ある研究対象を提供している。

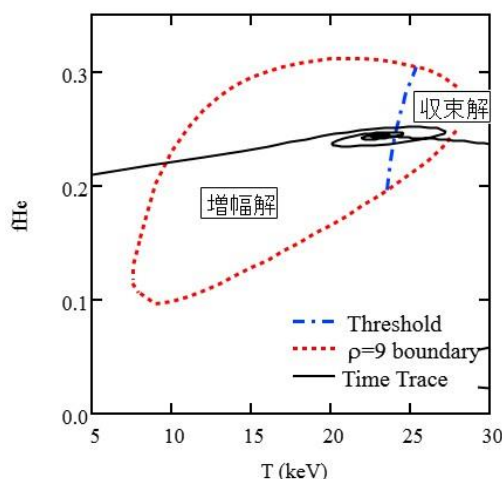


図1 $\rho=9$ での電子密度に対する He 密度比 f_{He} とイオン温度 T で記載された核燃焼領域（点線内部）と増幅・収束解のしきい値（一点鎖線）。

核燃焼では、燃料である水素同位体（重水素（D）・三重水素（T）：以下H同位体と呼ぶ。）はプラズマ周辺部でイオン化されたのちに燃焼領域へ輸送される。一方、核燃焼により生じたヘリウム（He）が α 加熱後に核燃焼領域に滞留すると燃料粒子密度を低下させる“燃料希釈”を誘起するとともに“放射損失”を増大させて核融合反応の効率を下げ、核燃焼は維持されない。このことは古くから知られており、エネルギー閉じ込め時間 τ_E に対するHeの滞留時間

τ_{He} の比 ρ により核燃焼の定常解の範囲が限定される（図1点線内）^[1]。実験的にはJT-60Uで評価された ρ の値は4^[2]で、比較的広い核燃焼可能領域が存在することが確認された。しかしHeはプラズマ中の滞留分だけではなく壁に吸蔵されたHeのリサイクリングによる核燃焼領域への還流分の評価が必要で、上記実験では放電時間が短くこの効果は十分に含まれていない。

粒子循環とエネルギーバランスを連立させた核燃焼ダイナミクス計算を行うと、Heリサイクリングの増加により自励振動が発現して解の収束性に分岐が生じ、しきい値（図1一点鎖線）より低温側だと増幅解（核燃焼領域から逸脱する解）となり、核燃焼が維持できない。実際、QUEST壁モデルとHeの反射を想定し、プラズマ中の粒子輸送の粒子種依存性がないと仮定すると増幅解となり、核燃焼領域から離脱する解となる（図1実線）。このことはH同位体とHeのリサイクリング特性とプラズマ中での輸送の粒子種依存性を調べるのが核燃焼の研究にとって重要であることを示している。

QUESTは、世界でも唯一の能動的壁制御装置である高温壁（最大壁温450度）^[3,4]を有する全金属壁装置であり、これまで燃料水素のリサイクリングに関して、再堆積層と金属母材間に水素が透過できない輸送障壁が存在し^[5]、壁飽和に至る特徴的な時間スケールが予想できること^[6]、及び表面再結合係数の温度依存性により粒子リサイクリングが制御可能であること^[3]等を見い出してきた。これまでの研究のまとめとして壁温と放電維持時間の関係を図2に示す。プラズマ対向壁の損耗領域であるセンタースタックのカバーを溶射タングステン（APS-W）からステンレスに交換することで壁排気を促進させること、放電中に壁温を降下させて粒子吸蔵を促進することやトロイダル磁場を反転させて排気ポンプの効率が高い方向にイオンドリフト方向を合わせた上で入射パワーを制

限することで、これまでに3度の6時間の長時間放電維持^[7]を実現している。このことは金属壁装置での水素リサイクリングの主要な素過程が把握されつつあることを意味している。

燃料リサイクリングはプラズマの粒子輸送にも大きな影響を与える。米国のNSTX装置や中国のEAST装置ではLiをプラズマ中に滴下して低リサイクリングを実現することで高いプ

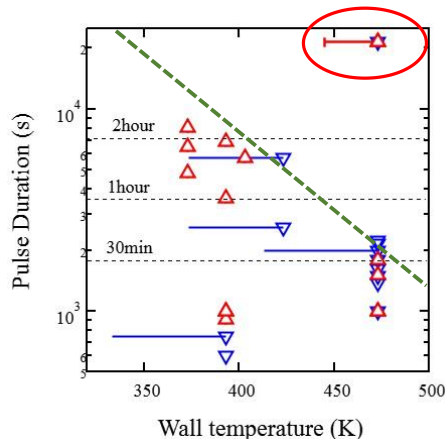


図2 高温壁による放電時間と壁温の関係。
△はイオンドリフトが上向き、▽は排気ポンプが多く設置されている下向きのトロイダル磁場。

ラズマ性能を得ることに成功している。NSTX実験のジャイロ運動論計算から低リサイクリングが周辺部の電子温度勾配を変化させて乱流モードが変化することで閉じ込めが改善されたと説明している^[9]。QUESTでは高リサイクリングで高電子密度の持続時間が長くなることが観測されている。これは他の装置とは異なる傾向ではあるが、リサイクリングの変化が粒子輸送に影響することは同様である。

一方、Heの金属内での挙動はH同位体とは大きく異なる。核燃焼に影響を与えるHe還流は核燃焼領域を取り巻くプラズマ中のHe密度に依存する。プラズマ中のHe密度は核燃焼で生じるHeが壁に反射・吸蔵され、粒子源としてプラズマに戻ってくる割合（リサイクリング率）で決まる。Heが金属中に侵入して欠陥に凝集する性質からバブル（図3）を形成し、バブルの成長はバブル内のHe/欠陥濃度比と壁温で決まる。Hは金属中で可動性を持ち、表面で再結合過程を経てリサイクリングされるため、表面でのHeバブル形成はHリサイクリングにも大きな影響を与えられとされる。

特に大きな影響を与えられとされるのは、Heバブル中へのHの混入と高エネルギーのH粒

子が衝突することによるHeの誘導放出である。高温壁設置前にQUESTで実施されたHeプラズマ実験後のH放電時に観測された排気ガスに含まれていたHeは4度の1000秒放電で徐々に減少することが観測されたが、放電間よりも放電中のHe放出が大きいことが確認された。これはH放電により、Heの放出が促進されていることを意味しており、H-He相互作用の一端を表していると考えられる。

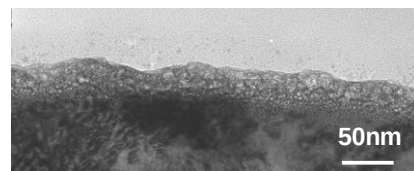


図3：QUESTのHeプラズマに暴露された金属表面の断面写真。表面近傍の白い粒がHeバブル。

将来の核融合炉の経済性向上と自律性の高い核燃焼状態の定常性に関する学術的意義からH-He混合プラズマでの粒子循環研究の重要性を示した。プラズマ中の輸送と及び金属内でのH-He挙動の差が大きな課題となることをQUESTのこれまでの実験から示した。今後は実機実験と基礎実験、理論・シミュレーションの融合研究が必須であると考えられる。

謝辞

本原稿まとめるにあたりQUESTに関連する教職員・共同研究者・学生に実験の遂行、データ解析について多大な貢献をしていただきましたことに感謝いたします。

本研究の一部は科学研究費（24656559, 16H02441, 19H05526）及び核融合科学研究所双方向型共同研究（NIFS14KUTR103, NIFS19KUTR136）、九州大学応用力学研究所共同研究の支援を受けています。ここに感謝いたします。

参考文献

- [1] D.Reiter, et al.; NF **30** (1990) 2141
- [2] A.Sakasai, et al.; JNM (1999) **266-299** 312
- [3] K.Hanada, et al.; NF **57** (2017) 126061
- [4] M.Hasegawa, et al. FED **129** (2018) 202
- [5] K.Hanada, et al, JNM **463** (2015) 1084.
- [6] K.Hanada, et al.; NF **59** (2019) 076007
- [7] K.Hanada, et al.; NME (投稿中)
- [8] M.Hasegawa, et al.; PFR (投稿中)
- [9] S. A. Sabbagh, et al., NF **53** (2013) 104007