

# ITERディスラプション緩和装置開発に向けたプラズマ物理研究の進展

## Progress in plasma physics research towards ITER disruption mitigation system development

松山 顕之  
MATSUYAMA Akinobu

量研六ヶ所  
QST Rokkasho

ITERは熱と磁場についてそれぞれ353 MJ、395 MJ [1]という膨大なエネルギーを保有し、ディスラプションが発生した場合の影響は既存装置に比べて甚大である。ITERでは対策としてディスラプション緩和装置(DMS; Disruption Mitigation System)の開発を進めている。ITERの運転においてDMSによる熱や電磁力の緩和はエネルギー増倍率10のフルスペックの運転以前から必須で、DMSの性能試験は初期実験から多くのマシンタイムを割いて実施される。

ITERにおけるディスラプション緩和の目標は次のように設定されている:

- ① 電流の減衰時間を50-150 msの範囲に制御
- ② 蓄積エネルギー(熱及び磁場)をできるだけ高い割合で放射損失に変換する
- ③ 逃走電子発生を完全に回避、若しくは発生した逃走電子による壁の負荷を緩和する

これらの目標を満たす手法として、気体や液体、固体の入射による冷却が検討され、ITERのベースラインには米国が考案したペレット粉碎入射(SPI: Shattered Pellet Injection)が選定された。SPIは図1に概念図を示すように通常のペレット入射のflight tubeの先端に衝突ターゲットを設け、ペレットを粉碎してスプレー状にしたものをプラズマへ入射する。SPI以前に研究された大量ガス入射(MGI: Massive Gas Injection)に比べ、入射装置をプラズマから比較的遠くに設置して中性子負荷を回避しつつ、物質のプラズマへの侵入がMGIに比べて速く深いことでディスラプション緩和のための応答時間を短縮することが実証されている[2]。現在は2023年に予定されている最終設計レビューに向け、最大28.5mmのペレット生成や粉碎の試験、シミュレーションによる粉碎過程のモデリング、計測機器の設計などの工学開発が本格化している。

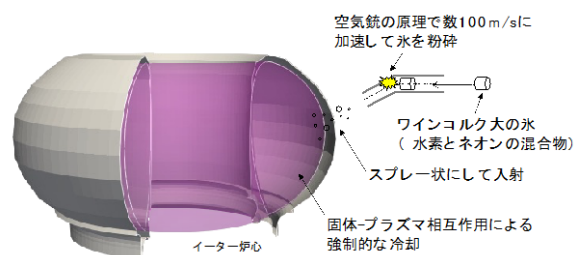


図1. ディスラプション緩和装置(概念図)

DMSの設計と調達にはITER機構が担当し、コミュニティはITER DMS Task Force [3]を通じて実験・理論・工学の各側面から開発をサポートしている。2018年以降、SPIによるディスラプション緩和性能を実証するための実験的・理論的研究が進展した。SPI実験はDIII-D [4], KSTAR [5], JET [6]など世界各国のトカマク装置で行われ、レスポンス時間や熱負荷緩和、電流減衰制御など必要な性能の確認が進められている。実験のポイントは、ITERで想定される赤道面の複数ポートからの入射を行なった場合にジッターや遅れがあり、先行したペレットでプラズマが冷却されると後続のペレットはそれ以上、溶発しない可能性があることである。ジッターへの制限の緩和に加えて逃走電子回避のための密度上昇を最適化する目的で、水素を先行して入射し、冷却性能の高いネオンを遅らせて入射するStaggered Injection [7]が提案されている。

ディスラプション緩和の総合性能の研究と並行してSPI溶発の研究が進展した。DIII-Dではペレットのプラズマへの侵入時と入射後のトムソン散乱計測が実施され、Staggered Injectionの第一段階である水素ペレット入射において、燃料供給ペレットで観測されるのと同様のプラズモイドのExBドリフトによる顕著な粒子供給効率の劣化が観測された[8]。更に、5-10%程度のネオンを混合したペレットではネオン原

子の放射がペレット溶発雲の圧力を抑え、ExBドリフトを抑制する可能性が理論[9]とLHDの実験[10]で実証された。

増幅ゲイン(電流値)の小さな既存装置ではITERの逃走電子回避の実証は難しいため、理論が研究をリードしている。理論モデルは過去10年で精密化され[11]、2022年時点での最新の予測[12,13]では、MHDによる顕著な粒子損失を考えない限り、2018年のベースライン[14]に比べ、SPIによるDT運転時の逃走電子回避には悲観的な予測がなされている。この原因はトリチウムのベータ崩壊とガンマ線のコンプトン散乱が幅広い密度領域で相補的に種電子を生成するためである。既存装置で検証方法がないことは、DMSの設計が大きなマージンを必要とする原因にもなっている。

MHDによる逃走電子損失の重要性から、熱崩壊の機構も改めて見直されている。大型装置では熱崩壊中の磁気面の破壊は部分的で、熱崩壊後には磁気面が再形成すると考えられている[15]。系統的な理解は難しいが、ITERに向けては磁気面が破壊された際の熱伝導のモデル[16]や壁の電気伝導度が熱崩壊に与える影響[17]が注目されている。後者の効果はITERにおける熱崩壊を緩やかする可能性があり、この点ではPFPOフェーズにおける実機での研究がFPOでのDMS運用にポジティブな知見を与える可能性もある。導体壁の効果やDEMOを睨んだ内部輸送障壁がある場合の熱崩壊の研究についてはJT-60SAの貢献が期待される。

逃走電子回避が難しい場合、発生したビームによる壁の損傷を回避する必要があるがこれに関しては大量の水素入射が有効である可能性が示された[18]。ビームに大量の水素を入射すると低温の背景プラズマは再結合プラズマになり、電子密度が低下するがこれと同時にビームに含まれていたアルゴンやネオンなどの高Z不純物がビームから排出される[19]。その後、逃走電子電流の増加とともに大振幅のMHD不安定性が発生し、ビーム放電が終端するが濡れ面積が大きいため壁には有意な損失が観測されなかった。壁負荷低減の機構は完全には理解されていないことや増幅ゲインの大きなITERでの有効性が明らかではないため、更なる研究が望まれる。

ITER DMSはITER規模のディスラプション特性の不確実なファクターを考慮して設計に必要な裕度を持たせつつ、将来の拡張や代替案のオプションを残した形で開発が進められてい

る。ITER DMS Task Forceで得られた知見をもとに2023年の最終設計に向け、ITERで使用する最適なペレットサイズ、破片サイズ、入射速度、入射方法、許容されるジッターなどが欧州の3次元MHDコードJOREK [20]や量研が開発した1次元統合輸送コードINDEX [21]を用いて検討されている。逃走電子に関する問いをDT運転に先駆けて答えるためには物理的理解の深化と、理論・シミュレーション研究が重要であることも強調したい。熱崩壊後は原子分子過程が支配的な低温状態でダイバータ物理とも関連が深く、逃走電子を含めた熱崩壊の理解には3次元MHDシミュレーションに加え、外部3次元磁場[22]や高周波の効果[23]の理解も必要である。ペレット溶発は運動論、シース、高エネルギー電子効果、圧縮性流体物理などはレーザープラズマ物理とも共通項が多いが、現象の時定数が大きく異なる点が課題である[24]。

#### 謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(21H01070)の支援を受けて実施されました。

#### 参考文献

- [1] T.C. Hender *et al.*, Nucl. Fusion **47**, S128 (2007).
- [2] N. Commaux *et al.*, Nucl. Fusion **51**, 103001 (2011).
- [3] M. Lehnen *et al.*, Proc. 27th IAEA Fusion Energy Conf. Ahmedabad, India, EX/P7-12 (2018).
- [4] D. Shiraki *et al.*, Phys. Plasmas **23**, 062516 (2016).
- [5] J. Kim *et al.*, Proc. 28th IAEA Fusion Energy Conf. Virtual Event, May 10-15, 2021, EX/5-3Ra (2021).
- [6] S. Jachmich *et al.*, Nucl. Fusion **62**, 026012 (2022).
- [7] E. Nardon *et al.*, Nucl. Fusion **60**, 126040 (2020).
- [8] D. Shiraki *et al.*, 63<sup>rd</sup> Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Pittsburgh, November 8-12, 2021.
- [9] A. Matsuyama *et al.*, Phys. Plasmas **29**, 042501 (2022).
- [10] A. Matsuyama *et al.*, to appear in Phys. Rev. Lett. (2022).
- [11] B.N. Breizman *et al.*, Nucl. Fusion **59**, 083001 (2019).
- [12] L. Hesslow *et al.*, Nucl. Fusion **59**, 084004 (2019).
- [13] O. Vallhagen *et al.*, J. Plasma Phys. **86**, 475860401 (2020).
- [14] J.R. Martin-Solis *et al.*, Nucl. Fusion **57**, 066025 (2017).
- [15] V.A. Izzo *et al.*, Nucl. Fusion **51**, 063032 (2011).
- [16] X.-Z. Tang, Y. Zhang, H. Mao, and J. Li, 2<sup>nd</sup> IAEA Technical Meeting on Plasma Disruptions and Their Mitigation, ITER HQ, July 19-22 (2022).
- [17] H. Strauss, Phys. Plasmas **28**, 072507 (2021).
- [18] C. Reux *et al.*, Phys. Rev. Lett. **126**, 175001 (2021).
- [19] E. M. Hollmann *et al.*, Nucl. Fusion **59**, 106014 (2019).
- [20] D. Hu *et al.*, Nucl. Fusion **58**, 126025 (2018).
- [21] A. Matsuyama *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **64**, 105018 (2022).
- [22] G. Papp *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **53**, 095004 (2011).
- [23] Chang Liu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 2650018 (2018).
- [24] Y. Sentoku, *private commun.*