

ディスラプション統合コード INDEX における  
逃走電子発生・緩和のモデリング

Modeling of runaway electron generation and mitigation  
for the disruption integrated code INDEX

山本泰弘, 松山顕之

Y. Yamamoto and A. Matsuyama

量研機構

QST

トカマクプラズマではディスラプション時に MeV オーダーのエネルギーをもつ逃走電子が発生する可能性があり、逃走電子ビームが第一壁に衝突することによる装置損傷を低減することは核融合炉の設計に関わる重要な課題の 1 つである。ITER ではディスラプションに伴う装置への負荷を緩和するため、ペレット入射やガスパフなどによる大量重水素・不純物入射を行い、放射によって熱エネルギー及び磁気エネルギー（プラズマ電流）を散逸させつつ、逃走電子の発生を抑制する手法が研究されてきた。先行研究において入射する物質の組成によって逃走電子の生成率や電流減衰時間が変化することが知られていたが (B.N. Breizman Nucl. Fusion(2019), O. Vallhagen J. Plasma Phys.(2020)), 最近の DIII-D の実験において、大量重水素入射を行うことで壁への逃走電子熱負荷が低減する現象が観測された。実験では重水素の入射に伴って MHD 不安定性が観測されているが物理機構は十分に理解されておらず (C. Paz Soldan Nucl. Fusion (2021)), ITER や原型炉における逃走電子の有効な緩和手法を確立するため、シミュレーションによる物理機構の解明が期待されている。

これまで量研では様々な時空間スケールの物理現象を含むディスラプション緩和シナリオの評価を行うために、ディスラプション統合シミュレーションコード INDEX (A. Matsuyama IAEA-FEC2020 (2021)) の開発を行ってきた。同コードは 1.5 次元輸送モデルに基づいた平衡計算と輸送計算、外部導体系の渦電流計算を連携したコードであり、近年の開発により垂直移動現象 (VDE) やペレット入射などのディスラプション緩和に関連する重要な現象を取り扱うことが可能となっている。

本研究では、大電流トカマクのディスラプションにおける逃走電子発生とその影響を評価するため、INDEX コードのための逃走電子モデルを開発した。

逃走電子の 1 次電子発生機構としては、軽水素プラズマにおいても生じるドライサージ機構に加え、壁が中性子捕獲することによって発生するガンマ線のコンプトン散乱やトリチウムのベータ崩壊を取り入れた (J.R. Martín-Solís Nucl. Fusion(2017))。また、熱クエンチ後はプラズマ温度が数 eV 程度まで低下し、部分電離プラズマとみなされるため、逃走電子と背景プラズマとの衝突過程のモデル化において、相対論的電子が束縛電子の電子雲に深く侵入する部分遮蔽の効果を導入した (L. Hesslow J. Plasma Phys.(2018))。部分遮蔽の効果によって逃走電子の運動量が大きいほど逃走電子の感じる衝突周波数は増加し、結果として 2 次電子の増倍率や閾値電場に大きく影響を与える。図 1 は開発した逃走電子モデルによる ITER 相当のパラメータにおける逃走電子発生量の評価の一例である。本研究において逃走電子のモデルを実装したことにより、INDEX コードによる逃走電子の壁負荷の評価の見通しが得られた。

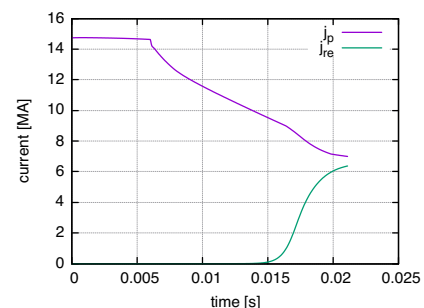


Fig. 1: 先行研究 (O. Vallhagen, J. Plasma Phys.(2020)) と同一のパラメータで計算した ITER におけるプラズマ電流と逃走電子電流の時間発展。