

トカマクディスラプション時に発生する逃走電子のシミュレーション研究

原子力機構

松山顕之、矢木雅敏

トカマク装置では、ディスラプション時に MeV オーダーの逃走電子が観測されており、主プラズマの垂直移動現象で逃走電子ビームが対向機器に接触すると、高エネルギー電子照射による装置損傷が懸念される[1]。特に、ITER では Dreicer 加速で生じた 1 次逃走電子と熱電子の近接衝突が雪崩的増倍を引き起こすことが理論的に予測されており、逃走電子の発生回避、もしくは発生した逃走電子の影響緩和が重要な研究課題となっている。このような背景から、ディスラプション時の逃走電子発生・損失機構を解明することを目的として、逃走電子シミュレーションコード(ETC-Rel)の開発を進めている。

ディスラプション時の逃走電子挙動は、(1) 逃走電子の発生機構、(2) 発生した逃走電子の損失機構、の二つに分けて考えることができる。発生過程については、ディスラプション時の電場および逃走電子電流の時間発展を取り扱うのに有用なモデルとして、誘導方程式と逃走電子発生率の解析式を組み合わせた逃走電子発生モデルが定式化されている[2]。しかしながら、このモデルは逃走電子の径方向 1 次元分布のみを取り扱っているため、応用上重要となる逃走電子のエネルギー分布などの予測には適用できない。そこで、文献[2]のモデルに相対論的 Fokker-Planck 方程式[3]を組み合わせることで、逃走電子のエネルギー分布を評価することのできるモデルを開発した。ITER 規模のディスラプションに対する計算を行うと、逃走電子電流の大半は 2 次電子が占め、逃走電子は指数関数型のエネルギー分布を示すという理論予測が確認できる一方で、プラズマ電流が数 MA 程度であれば Dreicer 加速によって生じる 1 次逃走電子が逃走電子電流の支配的な成分となり、逃走電子エネルギーは単一エネルギーのビームに近い分布をとることが分かる。同様の結果は別のモデル計算 [4]でも示されており、エネルギー分布の違いが逃走電子制御手法の実効性に影響を与える可能性が示唆される。

逃走電子のエネルギー分布が評価できれば、これを初期条件とした軌道解析シミュレーションを行うことで逃走電子の軌道損失過程が議論できる。講演では、ETC-Rel コードにより ITER を模擬した平衡における 3 次元軌道追跡シミュレーションを行った結果を報告する。ここでは、JT-60U において観測された摂動磁場による逃走電子抑制[5]および巨視的磁場揺動による逃走電子電流の遮断[6]を模擬することを念頭において、(1) 摂動磁場印加によって周辺磁場がストキャスティック化し、実効的な閉じ込め体積が減少するケース、(2) $(m,n)=(2,1)$ 、 $(3,2)$ などの低次のモードが発生し、巨視的な磁気島のオーバーラップによってプラズマ内部にストキャスティック領域が発生したケース、という 2 種類の状況を考えたシミュレーションを行った結果を示す。最後に、ETC-Rel のシミュレーション結果を、発生モデルに基づく逃走電子エネルギー分布の予測と組み合わせることで、ディスラプション時に想定される磁場揺動による逃走電子損失の物理的な描像を既存の装置と ITER の比較の観点から議論する。

[1] K. J. Dietz, J. Nucl. Mater. **155-157**, 8 (1988).

[2] H. Smith, et al., Phys. Plasmas **13**, 102502 (2006).

[3] J. R. Martin-Solis, et al., Phys. Plasmas **5**, 2370 (1998).

[4] J. R. Martin-Solis, R. Sanchez, and B. Esposito, Phys. Plasmas **7**, 3369 (2000).

[5] H. Tamai, et al., Nucl. Fusion **42**, 290 (2002).

[6] R. Yoshino, et al., Nucl. Fusion **40**, 1293 (2000).