

JT-60SA におけるディスラプション緩和と電流減衰の関係 Relationship between disruption mitigation and current quench in JT-60SA

横山達也, 松山顕之, 山本泰弘, 井上静雄, 小島信一郎, 中村誠俊, 若月琢馬, 吉田麻衣子
Tatsuya Yokoyama, Akinobu Matsuyama, Yasuhiro Yamamoto, Shizuo Inoue,
Shinichiro Kojima, Shigetoshi Nakamura, Takuma Wakatsuki, and Maiko Yoshida

量研
QST

本研究では JT-60SA でディスラプション緩和のために不純物を入射した際のプラズマの挙動を模擬し、不純物入射と電流減衰の時定数の関係を整理した。得られた関係を用いて、JT-60SA の不純物入射実験についても検討した。

トカマクプラズマにおいて、プラズマ電流が瞬間的に消失してプラズマが崩壊するディスラプション現象は、プラズマの定常運転を妨げるだけでなく、装置の健全性を脅かす重大な課題である [1]。JT-60SA では、ディスラプションの影響を緩和する手法として、大量ガス入射装置 (MGI) が設置される予定である [2]。MGI は大量の不純物をプラズマに入射することでエネルギーを散逸させ、プラズマ対抗機器の熱負荷を軽減すると同時に、プラズマ電流を速やかに消滅させてハロー電流や VDE の影響を緩和する。また重水素ガスを同時に入射することで逃走電子の抑制を図る。

過剰な不純物の入射で電流崩壊が加速されすぎると過大な渦電流による電磁力負荷を生じるため、電流崩壊の速さを適切な範囲に制御する必要がある。そこで本研究では、MGI 実験における適切な入射条件を得ることを目的とし、L/R モデルとディスラプション統合コード INDEX [3] を用いて、JT-60SA における不純物入射によるディスラプションの特性を、電流減衰に着目して評価した。

電流減衰の時定数 $\tau_{CQ} = |I_p / (dI_p/dt)|$ は熱崩壊後のプラズマの温度や不純物量で決まると考えられているが、ディスラプション中のプラズマの状態を直接計測することは難しい。そのため実験では電流減衰の時定数 τ_{CQ} がプラズマのインダクタンス L と抵抗 R の比に等しいとする「L/R モデル」を用いてプラズマの抵抗率 η を求め、電子温度と不純物密度を推定する手法がよく用いられる。ここで、JT-60SA や ITER といった装置は真空容器の抵抗 R_v が小さく、渦電流の減衰する時定数 τ_w が大きくなることから、外部インダクタンス L_e の寄与が小さくなり電流減衰が高速化すると考えられている。

INDEX では、JT-60SA の真空容器・安定化板を導体要素として模擬しており、それらに流れる渦電流を加味してディスラプションの様子を再現することができる。そこで、JT-60SA で予定されているプラズマ電流 $I_p = 5.5$ MA の放電中に MGI によって Ne 不純物が入射されることを想定して MGI 実験における崩壊の状況を模擬し、電流崩壊の時定

数と不純物量・電子温度の関係を整理した。図 1 に、 τ_{CQ} と体積平均電子温度 $\langle T_e \rangle$ の関係を示す。INDEX による計算の結果と L/R モデルによる推定は定性的に一致し、外部インダクタンス L_e を考慮した推定 (破線) よりも考慮しない推定 (実線) に近い電子温度が得られた。計算と L/R モデルによる推定の整合性を評価するため、壁の抵抗を仮想的に変えた計算も行った。

JT-60SA では Ne 以外の希ガスを入射することも可能である。そこで、Ne よりも価数の大きい Ar に着目し、入射不純物を Ne から Ar へ変更して同様の計算を行うことで、不純物イオン種が電流減衰に与える影響を調べた。

さらに、得られた不純物量と電流減衰時定数の関係を用いて、JT-60SA において ITER のディスラプション緩和システム (DMS) の制御目標 [4] に相当する電流減衰の実験が可能であると示した。

本研究は QST 六ヶ所研究所国際核融合エネルギー研究センター 計算機シミュレーションセンターのスーパーコンピュータ JFRS-1 を使用して実施された。

- [1] A. H. Boozer. Phys. Plasma, **19**(5):058101 (2012).
[2] M. Dibon *et al.* Fusion Eng. Des., **176**:113042 (2022).
[3] A. Matsuyama *et al.* In *28th IAEA Fusion Energy Conference*, 2021.
[4] M. Lehnen *et al.* J. Nucl. Mater., **463**:39-48 (2015).

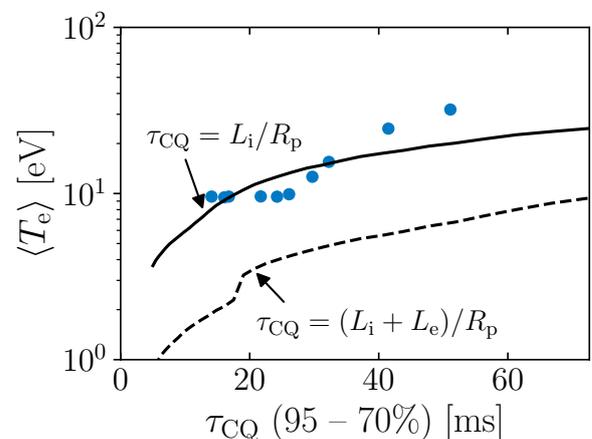


図 1: INDEX で計算した電流減衰の時定数と熱崩壊後の電子温度の関係。外部インダクタンスを考慮しない場合・考慮した場合の L/R モデルによる電子温度の推定をそれぞれ実線・破線で示す。