

ITERに向けたJT-60Uにおける最近の実験結果について

大山直幸、JT-60チーム（原子力機構）

ITERで想定されている運転モードは、 $Q=10$ の燃焼プラズマを誘導運転で400秒維持する「標準運転シナリオ」、工学試験用に中性子フルエンスの増大を目指し $Q=5-10$ を1000秒以上維持する「ハイブリッドシナリオ」、 $Q>5$ の定常燃焼プラズマを実現する「定常運転シナリオ」の3つに大別できる。本講演では、それぞれの運転シナリオにおける課題を概観し、その解決に向けたJT-60Uにおける炉心プラズマ研究開発について紹介する。

ELM研究

Edge Localized Mode(ELM)は、Hモードプラズマ周辺部に局在した周期的崩壊現象である。ELMによるダイバータ板への熱負荷はペDESTAL部の蓄積エネルギーが増えるに連れて大きくなるため、ITERではJT-60Uの全蓄積エネルギー以上のELMが発生する可能性がある。そのため、ELMによる熱負荷がダイバータ板の寿命を決定すると考えられている。JT-60Uでは、中性粒子ビーム入射(NBI)の組み合わせを変えることでプラズマのトロイダル回転を能動的に制御できることに着目し、トロイダル回転がELM特性に与える影響について研究を行った。

ITERで想定されている通常のELMであるType I ELMでは、プラズマ電流と逆方向のトロイダル回転(CTR回転)が増加すると、ペDESTAL部の蓄積エネルギーで規格化したELMの大きさ($\Delta W_{ELM}/W_{ped}$)が減少することを明らかにした。このとき、 W_{ped} の減少割合が ΔW_{ELM} の減少割合に比べてゆるやかであるため、 $\Delta W_{ELM}/W_{ped}$ を回転で制御することが可能である。ただし、ITERの許容範囲である $\Delta W_{ELM}/W_{ped}<5\%$ を満足するためには2kHz程度のCTR回転が必要である。

JT-60Uで発見された小振幅ELMであるGrassy ELMもトロイダル回転依存性があることが分かってきた。そこで、Grassy ELMの発生しやすい領域($\delta>0.52$, $q_{95}>6$)でトロイダル回転とポロイダルベータ値(β_p)の依存性を調べた。その結果、~1kHzのCO回転でType I ELMに遷移する閾値があること、CTR回転の上昇により β_p に依存せずにELM周波数が増加することが明らかになった。このとき、閾値近傍で周波数の低いGrassy ELMであっても $\Delta W_{ELM}/W_{ped}$ は1%以下とITERの許容範囲であった。

高 β プラズマの長時間維持

JT-60Uでは、定常トカマク炉の実現に向け、高い規格化ベータ値(β_N)と高いブートストラップ電流割合(f_{BS})を持つ先進トカマク放電の開発を、正・弱磁気シア配位と負磁気シア配位で行っている。今年度の実験では、フェライト鋼設置による高速イオンの閉じ込め改善の結果、密度制御性の向上によるITBの維持とCO回転による電子系ITBの性能向上によって、閉じ込め性能(H_H)を0.82から1.1へと大幅に改善することができた。この放電では、 $\beta_N=2.3$ で $H_H\sim 1$ の高性能プラズマを電流拡散時間($\tau_{tr}\sim 2s$)の12倍程度の23.1秒間維持した。また、低安全係数領域($q_{95}\sim 3.3$)のためエネルギー増倍率の指標であるGファクタ($\beta_N H_H/q_{95}^2$)もITERの標準運転と同じ0.2を維持するとともに、 $f_{BS}\sim 40\%$ が得られており、ITERのハイブリッドシナリオの候補である。

NTM安定化

前述の放電における $\beta_N=2.3$ の維持時間28.6sは、NBI加熱装置の入射時間で制限されている。そこで、今後の先進トカマク放電開発では、更に高い β_N での長時間維持実証が重要である。そのような高 β プラズマの開発では、新古典テアリングモードの発生による閉じ込め性能劣化を回避することが重要である。JT-60Uでは、 $m/n=3/2$ NTMのECCDによる完全安定化や早期ECCDによる発生回避をこれまでに実証してきた。最近の実験において、より大きな磁気島が発生する $m/n=2/1$ NTMを自発電流の半分程度の局所ECCDによって完全安定化できることを実証した。ECCD位置による安定化条件を詳しく調べた結果、ECCD位置が磁気島幅の半分以内であれば安定化するが、磁気島幅以上離れた位置にECCDを行うと逆に不安定化されることを明らかにした。この実験結果を、修正ラザフォード方程式を組み込んだ1.5D輸送コードTOPICSで定量的に再現することに成功した。これらの実験・解析結果から、磁気島中心における局所的なECCDを行うことが効率の良いNTM安定化に重要であることを明らかにした。