OB02

JT-60U 高性能プラズマにおける定常化研究の新展開
-長時間スケールでの課題の克服に向けて-

New developments of research for steady state operation in JT-60U high performance plasmas
- towards finding the solutions to issues for a long time scale -

竹永秀信（原研那珂研）、JT-60 チーム
TAKENAGA Hidenobu (JAERI Naka) and the JT-60 Team

JT-60U では、ITER 及び定常核融合炉に向けて、高性能プラズマの定常化に関する研究を多彩な加熱装置、高いプラズマ制御性のもと展開してきた。定常化のためには、電流拡散時間より十分に長い時間での高性能プラズマの定常維持、及びダイバータ板・第一壁での粒子吸収やダイバータ板損耗等のプラズマ壁相互作用の長時間スケールでの変化の解明が重要である。これらの長時間スケールでの課題克服のため、放電時間を従来の 15 秒から 65 秒へ、NB 加熱時間を 10 秒（30MW）から 30 秒（14MW）へそれぞれ伸長し、新領域への研究の拡大を図った。現在、大学等との協力研究のもと、以下の 3 つの時間スケールに着目して定常化研究をより広範囲にわたって展開している。

(1)電流拡散時間スケール：高ベータプラズマの長時間維持を妨げる要因の一つは、新古典テアリングモード（NTM）の発生である。NTM の発生は電流分布と密接に関連するため、電流拡散時間以上にわたって高ベータを維持することが重要である。長時間放電において加熱・電流駆動位置やプラズマ形状の最適化を進めた結果、図１に示すように NTM の発生なしに ITER 標準運転で必要な規格化ベータ値β_N=1.9 を 24 秒間（電流拡散時間の約 3 倍）、及び定常運転領域に相当するβ_N=2.5 を 15.5 秒間維持することに成功した。これらの成果は、これまで世界の装置で得られていた高β_N の維持時間を大きく伸長するものである。β_N>2.5 での長時間維持のためには、上記最適化以外に NTM 抑制手法の開発が重要である。電子サイクロトロン電流駆動による安定化手法の開発を行い、短時間であるがβ_N=3 での安定化を実証した。また、最大加熱パワーを用いた実験では、β_N=3 を 6.2 秒間（電流拡散時間程度）維持するとともに、75%の自発電流割合を持つ自律性の強い負磁気シアプラズマを高閉じ込め状態（HH_{y2}=1.7）にて 7.4 秒間（電流拡散時間程度）維持することに成功した。これらのプラズマでは、電流分布の制御が重要であり、現在モーショナルシュタルク効果を用いた電流分布の実時間測定と低域混成波による電流分布制御を組み合わせた電流分布実時間制御の開発を行っている。

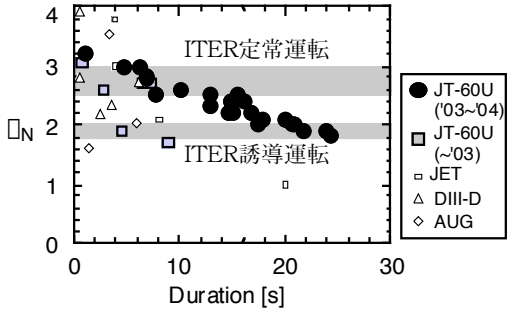

図１　高ベータ維持時間の進展

(2)壁飽和時間スケール：ダイバータ板・第一壁における粒子吸収の長時間スケールでの変化を解明するため、NB 加熱パワー10-12 MW において約 30 秒間 ELMy H モードを維持した放電での粒子バランスを定量的に評価した。密度を一定に保つために必要な粒子供給量（定常状態ではダイバータでの粒子排気とダイバータ板・第一壁での粒子吸収とバランスする）が放電途中から減少し、放電後半では粒子供給量がダイバータ排気量より小さいにもかかわらず密度が上昇することが観測された。これは、ダイバータ板・第一壁が飽和状態に近づくにしたがって、粒子吸収率が変化したためと考えられる。このように放電途中に粒子吸収率が大きく変化する現象が、放電・加熱時間を伸長することではじめて観測された。壁飽和が観測されることは、炭素との共堆積による粒子吸収の粒子バランスへの寄与が小さいことを示しており、JT-60U における再堆積層での水素吸蔵量が D/C<0.05 と小さいことと矛盾しない。JT-60U の運転時の壁温が高いことがその原因と考えられる。共堆積による水素吸蔵はトリチウム吸蔵の観点からも重要な研究課題である。今後、ダイバータ配位の最適化により粒子制御性の向上を図り、壁飽和状態での密度制御を実証することが重要である。

(3)ダイバータ板損耗時間スケール：長時間放電での総入力エネルギーは、従来の最大値 203 MJ を大きく超える 360 MJ に到達した。ダイバータ板の温度は、1000℃ 程度まで上昇しているが、炭素不純物の急激な上昇はこれまで観測されていない。ダイバータ板の温度変化に対して、炭素の化学スパッタリング率は弱い温度依存性を示している。ダイバータ板の損耗抑制のためには、ダイバータへの熱負荷低減が重要である。アルゴン入射により放射損失増大を図り、高密度（n_e/n_{GW}=0.92）にて高い閉じ込め性能（HH_{y2}=0.96）を維持しつつ加熱パワーの 90%の放射損失を先進トカマク放電において実現した。また、プラズマ電流と逆方向へのトロイダル回転を誘起したときに小振幅 ELM もしくは ELM が無い状態が観測され、プラズマ回転により ELM 制御が可能なことを示した。ELM 制御は、ダイバータ板への過渡的な高い熱負荷の低減のために重要である。さらに、ダイバータの一部に導入したタングステンコーティングタイルの損耗率が 10^{-4} 程度と評価された。

以上のように JT-60U では、放電・加熱の長時間化により高性能プラズマの定常化研究を新たな領域に展開した。今後、電流・圧力分布、粒子供給・排気等で構成する複合帰還制御の基盤形成を行いつつ、高ベータ・高総合性能の定常化研究を進めていく。