

SIV-4

ITER研究計画からのLHD重水素実験に対するコメント Comments on LHD Deuterium Experiments from the view point of ITER Research Plan

草間 義紀

Yoshinori Kusama

原子力機構

Japan Atomic Energy Agency

ITERは、ファーストプラズマの達成後、H/Heを用いた運転を経て、D/DTを用いた核融合燃焼運転へ移行し、ITER計画の目標である核融合エネルギー増倍率 Q が10以上、核融合出力500WM、維持時間300-500秒の達成を目指す計画である。また、ハイブリッド運転による長時間燃焼や Q が5以上での完全非誘導電流駆動による長時間運転の実現を目指している。核融合工学技術の開発として、高い中性子壁負荷でのブランケットなどの炉工学機器の試験を行う計画である[1]。これらを達成するのは、運転の初期から導入される可能性が高いタングステンダイバータとプラズマとの整合性の確立、Hモードの実現とその特性の把握、ダイバータでの熱と粒子の制御、アルファ粒子などの高速イオンの閉じ込め特性の把握、電流駆動と燃焼プラズマの両立性など、プラズマの特性を解明しつつ、徐々にプラズマ性能を上げていく必要がある。

トカマクと同じトロイダル形状を有する大型ヘリカル装置LHDは、数年後に重水素実験を開始する計画である。取り組むべき研究課題として、閉じ込め改善と物理、MHD安定性の改善と高 β 領域の拡大、高速イオンの閉じ込め、ダイバータ最適化、プラズマ・壁相互作用、多様な実験手法の拡大、が挙げられている[2]。これまでも、トカマクプラズマと共通のあるいは類似した物理現象が多く観測されており、ITERの研究計画への貢献が期待される。そのため、Hモードとそのプラズマ特性、ダイバータ、高速イオンの閉じ込め、定常運転などを中心に、現在進めている軽水素／ヘリウム実験を含め、LHDの重水素実験に対してコメントしたい。

1) Hモードと周辺磁場効果

ITERにおける基本運転モードはHモードであり、先ずその実現が不可欠である。これまでHモード遷移閾パワーの比例則が構築されて来たが、“optimistic scaling”と“pessimistic scaling”には約2倍の差があるなど、不確定性が大きいのは事実である。データベースにはヘリカル型装置CHSのデータも含まれている[3]。現在、使われている比例則では低アスペクト比を持つCHSと球状トカマクのデータは除かれているが、両者は同じような領域にデータが存在していて、共通の物理を包含している可能性を示唆している。LHDの水素プラズマにおいてもHモードが観測されており[4]、LHDの重水素実験において遷移閾パワーデータの蓄積とITERの比例則との比較は、トロイダルプラズマのHモードへの遷移の包括的な理解に役立つ。ITERではD/DT運転に進む前の運転では、遷移閾パワーの評価から、よりHモードへの遷移の可能性が高いHeプラズマでの実験が想定されている。しかし、Heプラズマでの遷移閾パワーのデータが少なく、データの更なる蓄積による確度の向上が不可欠とされている。LHDにおけるHe実験での遷移閾パワーも貴重なデータとなると考えられる。

LHDの大きな特徴は、プラズマ周辺部に元々エルゴディック層があること、さらにLID (Local Island Divertor) コイルによりRMP (Resonant Magnetic Perturbation) を与えられることである。既に、これらによるペDESTALの形成、ELMの特性と制御、閉じ込めへの影響など、Hモードの重要な特性について研究が進められている[3]。ITERでもELM制御を目的にRMPを印可するためのELMコイルを導入する方向で進んでおり、LHDでのエルゴディック層／RMPがHモードへ及ぼす影響の物理機構の解明はITERの重要な基盤となる。

2) ダイバータ

ITERでは、当初、CFCをターゲット材としたダイバータで運転を開始する計画であったが、運転初期からタングステン製ターゲットを有するダイバータで運転を開始する可能性が高い。タングステンターゲットが溶融する可能性のある主要原因の一つがELMに伴う過渡的な高い熱流束であり、その制御が極めて重要である。ITERでは、設置が検討されているELMコイルやペレット入射によつ

てELMを制御し、ELMによるダイバータへの熱負荷を緩和する計画である。前述のようにLHDでは既にLID コイルを用いたELM制御の研究が進められている。研究を重水素実験に拡張し、ELMの制御性（回転変換、neなど、有効な領域の拡大を含め）やダイバータへの熱の排出制御への貢献を期待したい。また、ITERでは金属プラズマ対向機器への定常熱流束を受容可能にするデタッチダイバータ運転の開発が重要な課題となっている（高Ip/高核融合出力で）。LHDでは重水素実験に向けて周辺粒子制御のための閉ダイバータ化を進めており、閉ダイバータと不純物ガス注入による、高性能プラズマと両立するデタッチダイバータ運転の開発が期待できる。また、デタッチのシミュレーションと実験との比較が出来れば、ITERに対して重要な知見を与えることができる。

3) 長時間運転

ITERではハイブリッド運転や完全非誘導電流駆動運転により、1000秒～3000秒程度の長パルス運転を目指している。その達成には、熱と粒子の制御並びに電流駆動による電流分布制御が不可欠である。LHDでは、これまで、HeプラズマのECHやICRF加熱（Hの少数イオン加熱）により、約1時間の長時間運転を達成して来た。LHDでは重水素実験に備え、定常加熱パワーもECHが1MW、ICRFが2～3MWまで増力する計画であり、排気を備えた閉ダイバータ化と合わせ、長時間運転での高温・高密度化が期待できる。バルクイオンとして重水素を使用できることで（ICRF加熱とも両立）、リテンションが起こる状態での長時間運転やデタッチプラズマの長時間維持などの研究が実施できる。これらから、ITERの長時間運転のための熱と粒子の制御に関して重要な示唆を与えると思われる。

4) 高速イオン閉じ込め

アルファ粒子の閉じ込めとそれによるプラズマ加熱は、燃焼プラズマの根幹をなすもので、ITERにおいて確認すべき重要な研究課題の一つである。中でも、高速イオンの圧力の上昇に伴って励起されるアルヴェン固有モードなどと高速イオンとの相互作用及びそれによる高速イオン閉じ込めへの影響の評価は不可欠である。重水素運転時でも、プラズマ加熱で生成される高速イオン閉じ込めの把握が研究項目に挙げられている。ITERでのアルファ粒子やビーム入射イオンに対するELMコイルの影響が評価されているが、LHDでもLIDコイルを有しており、RMPが高速イオン閉じ込めに及ぼす影響の評価と損失物理機構の解明はITERでの重要な示唆となる。LHDにおいては、重水素実験が開始されれば、加熱により生成される高速イオンに加え、DD核融合反応で発生するT（1MeV）やP（3MeV）もアルファ粒子を模擬する粒子として研究対象になる。LHDは高速イオン計測が充実しており、損失機構の解明により、損失抑制、第一壁での局所的な熱負荷を抑制する手がかりを見出せる可能性は高い。

5) 閉じ込め特性と輸送研究

トカマクでは、バルクイオンの水素同位体の質量の増加に伴い、熱輸送が抑制され、概ね質量数の1/2乗程度閉じ込め性能が改善されることが知られている（水素同位体効果）。LHDにおいても同様の質量効果を確認することにより、トロイダルプラズマとしての共通の理解が進む。広く知られているように、これらの理解やトカマクを含めた装置間の比較などには、規格化ラーマー半径（ ρ^* ）、規格化衝突周波数（ ν^* ）、ベータ値（ β ）などの無次元量による比較が重要である。燃焼プラズマでのアルファ粒子加熱の場合、アルファ粒子のエネルギーのほとんどは先ず電子に移り、そこからイオンに分配される。そのため、電子熱輸送の閉じ込め特性への影響が極めて重要であり、これまでのトカマク研究との大きな違いがある。LHDでの電子加熱時に“電子ルート”として輸送が調べられて来たが、重水素の導入による輸送の変化が、前述の同位体効果と合わせて重要である。

6) おわりに

LHDの重水素実験の目的は、「ヘリカル型核融合炉設計を可能にすると同時に、トロイダルプラズマの総合的な理解に大きな学術的貢献を行う」とされている。トロイダルプラズマの総合的な理解、ひいてはITERへの貢献を念頭に置きながら研究を進めることを切に望む。

参考文献

- [1] ITER Research Plan v2.3 (2010).
- [2] 竹入康彦、「LHD 重水素実験計画の概要」、LHDにおける重水素実験計画の検討、2013年6月21日。
- [3] Y. R. Martin, et al., Journal of Physics: Conference Series 123 (2008) 012033.
- [4] K. Toi, et al., Fusion Science and Technology, Vol. 58, p61-p69.