

LHD第17サイクル実験成果

— プラズマの運転領域が大きく拡大：超高温・長時間に —

山田 弘 司

我が国独自のアイデアによる世界最大の超伝導核融合実験装置である大型ヘリカル装置(LHD)では、平成25年10月2日から12月25日にかけて実施した第17サイクルプラズマ実験において、1億度に迫るイオン温度9,400万度を達成しました。この超高温状態の実現とともに、長時間運転の領域も拡大し、電子温度、イオン温度がともに2,300万度のプラズマを48分間、定常に維持することにも成功しました。得られた成果は4月2日から4日に研究所で開催しました、プロジェクト成果報告会においてご報告しました。この研究最前線では、そのあらましをご紹介します。

LHDは大学共同利用機関である核融合科学研究所の中心となる共同利用装置であり、日本だけでなく海外の大学や研究機関の研究者に開かれた研究施設です。第17サイクル実験では運転グループの不断努力と装置工学上の改善により、安全に滞りなく、7,000回以上のプラズマ放電を共同研究に供することができました。提案された約260の課題に、約700名の研究者や大学院生が取り組みました。海外からも約90名が実験に参加し、国際共同研究を進めました。

LHDでは核融合を目指した超高温プラズマの研究を進めています。近年、燃料粒子(水素あるいはヘリウム)の制御によりプラズマ性能が向上し、プラズマ運転領域が拡大してきています。高温化のカギは、イオンを加熱するための水素原子ビーム(中性粒子ビーム入射加熱と言います)をプラズマの中心までより多く届け、効率的な加熱が起こるようになることです。プラズマの燃料粒子はプラズマと金属の真空容器内壁との間で再循環し、余剰のガスを発生させます。この余剰のガスは、特にプラズマ外縁部の密度を上昇させるため、水素原子ビームのプラズマ中心部への注入を阻害します。電磁波を用いて生成したプラズマをあらかじめ容器内壁に当てて、容器内壁から余剰ガスをたたき出しておくことで、本実験のプラズマ生成中に余剰のガスが発生しないよう調整することが

できました。この結果、水素ビームがプラズマ中心により多く届きイオンの加熱効率を向上させることができました。長時間の定常運転においても、余剰のガスによってプラズマの密度の制御が阻害されます。今回、プラズマを加熱する電磁波を放出するアンテナを増設するとともに、燃料粒子供給の制御性能(帰還制御)を改善することにより、大幅な定常運転領域の拡大を実現しました。

平成25年度の第17サイクルプラズマ実験において、二つの新記録を得ることができました。イオン温度については、昨年度、記録された8,500万度を超える9,400万度を達成しました。図1にイオン温度9,400万度を記録した瞬間のプラズマの写真を示します。温度の高いプラズマは目に見える光として透明になり、温度の低いプラズマの外縁部が白く光っています。この時の、プラズマ内部の温度分布を図2に示します。

密度は1ccあたり10兆個でした。また、定常運転については、1,200キロワットの加熱電力によって約48分間のプラズマの保持に成功しました。この定常プラズマに注入された総エネルギー量はこれまでのLHDが持つ世界記録1.6ギガジュールの2倍以上である3.4ギガジュールに達しました。加熱電力とプラズマの保持時間で示した達成領域



図1 平成25年12月3日にイオン温度9,400万度を記録したプラズマ。目に見えない磁場によって容器壁から浮かせてプラズマを閉じ込めています。

を図3に示します。電磁石による磁場のみでプラズマを閉じ込めることができるヘリカル方式が、同じ磁場によるプラズマの閉じ込めですが、プラズマ中に電流を流す必要があるトカマク方式と比べて、定常運転に優れていることがお分かりいただけるでしょう。

プラズマ性能の向上には、装置としての能力を高めること、プラズマの中で何が起きているか、すなわち物理を、精密な計測とデータの解析に基づいて理解することがカギとなります。今回の大きな進展をもたらした燃料粒子の制御によるプラズマの性能の向上では、京都大学との、次の二つの共同研究の成果が大いに貢献しました。燃料粒子がプラズマ中にどこにどれだけ存在していることが計測できるようになったこと、この燃料粒子が水素原子ビームによる加熱にどれだけ影響を与えるかの正確な計算ができるようになったことです。これらによる理解の深まりは仮説から指導原理への展開をもたらし、プラズマの性能の拡大だけでなく、再現性が高く効率的な実験を可能としました。プラズマの性能の拡大と物理の理解は相照らしながら相乗して高まっていくものであり、これらの成果により、プラズマ性能の最終目標に数字だけでなく、理解としてもより近づいたと言えます。

発電実証を行う核融合炉を設計するためには、LHDにおいて核融合で燃えるプラズマを見通せるようになる必要があります。LHDの装置仕様(プ

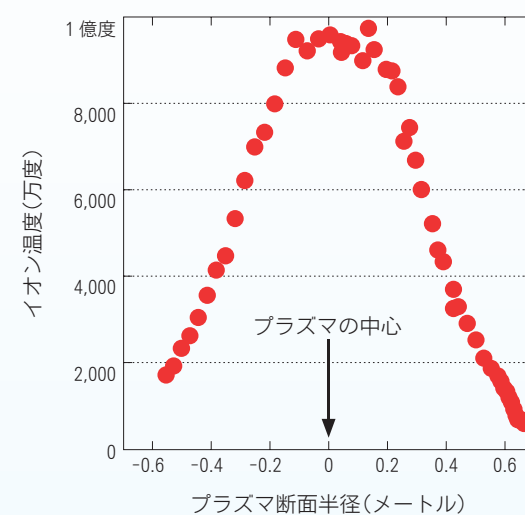


図2 最高イオン温度9,400万度を記録したプラズマ中のイオン温度分布。プラズマはおよそ0.6メートルの断面半径を持っていますが、加熱される中心部の温度が最も高くなります。

ラズマの大きさ、磁場の強さ、加熱電力等)で、最終目標として定めたイオン温度1億2,000万度を1ccあたり20兆個の密度で実証し、そのプラズマを詳しく調べることによって、発電実証を行う核融合炉の設計をより確実なものにすることができると期待されています。また、超高温プラズマの定常運転実証のために3,000キロワットの加熱電力で1時間保持することが必要です。これらの目標に向かって着実に前進することができました。

本報では第17サイクル実験の成果について、プラズマ性能を中心に、ご紹介しました。これらは得られた研究成果の一部です。プラズマが外部から印加された乱れた磁場を遮蔽する現象や、プラズマが自ら回転を始める現象等についての、世界に先駆けた物理の研究がいくつも進みました。さらに、核融合のみならず、天文学、半導体加工、細胞生体観測法の開発等のために、プラズマを光源として利用する基礎・応用研究もあります。実験データを科学的に吟味し、国際的に認められるよう国際会議や国際学術誌に発表していきます。

最後になりましたが、LHD実験をあたかく見守ってくださっている皆さまに改めて御礼申し上げます。今年11月6日開始予定の平成26年度の第18サイクル実験においても、引き続き、ご支援を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

(高密度プラズマ物理研究系 研究主幹)

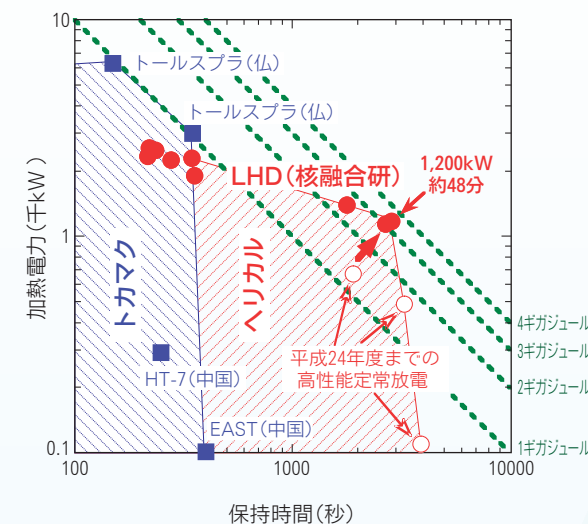


図3 加熱電力と保持時間で見えた定常運転達成領域。LHDの平成24年度までのデータを白抜き赤丸で示します。プラズマへの総注入エネルギー(電力×時間)で既に世界一でした。平成25年度のデータが塗りつぶし赤丸であり、これまでの記録を大きく上回ることができました。