

LHD第14サイクル実験成果速報

山田 弘 司

核融合科学研究所が進めている大型ヘリカル装置(Large Helical Device、以下略してLHDと呼びます)計画は、核融合炉を見通すための超高温プラズマの実験研究プロジェクトです。LHDは世界最大規模のらせん(ヘリカル)状の超伝導磁石によって安定に高温のプラズマを閉じ込めることができます。平成10年の運転開始以来、14回目となる第14サイクルプラズマ実験を昨年10月14日から本年1月27日まで行いました。この間、7,000回を超えるプラズマ放電を行い、国内外の大学を中心とした先生方や研究者と共同研究を進めました。第14サイクル実験では、イオン温度を7,500万度、電子温度を2億3,000万度まで上げることに成功するなど、大きな成果を得ることができました。これらの研究成果についてご紹介いたします。

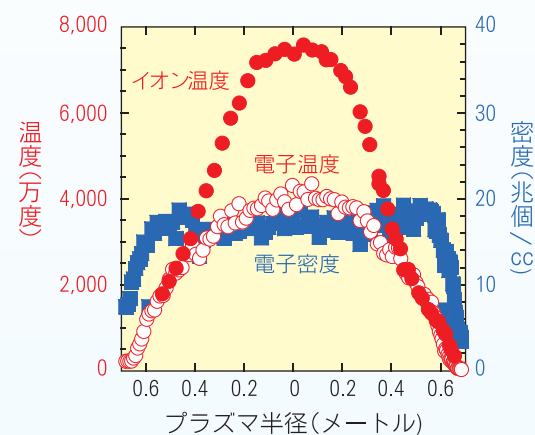
将来の発電を行う核融合炉では1億度以上の温度で重水素と三重水素の間で起こる核融合反応のエネルギーを用います。1万度以上の温度では、全ての物質はプラズマと呼ばれる、イオンと電子に分かれ電離した気体の状態になります。核融合は水素イオン同士が融合する反応ですが、イオンはプラスの電気を持っているため、このプラスの電気の間働く反発力に打ち勝って、イオン同士を融合する距離まで近づけないといけません。このためには、電気の反発力に打ち勝つスピード、すなわち高い温度が必要です。LHDでは水素ガスを用いたプラズマのイオン温度を7,500万度まで上げることに成功しました。この高温プラズマの性質を精密に調べることが、目標である1億度以上の温度を持ったプラズマの性質の予測を正確に行い、さらに核融合炉を現実のものとするにつながります。

温度を上げるためには熱を加えること(加熱)と、熱が漏れないようにすること(断熱)の両方が必要です。加熱については水素原子を電気で加速して高いエネルギーを持ったビームとして入射する装置(中性ビーム入射加熱装置)を整備し、最大加熱電力をこれまでの2万3,000キロワットから2万9,000キロワットに増やすことができました。一方、これまでの研究に基づいて、物

理的に断熱性能の高い状態にプラズマになる条件を磁場の整形、プラズマの燃料供給や加熱の手順などによって作りました。実際に得られたプラズマの中の温度分布を図に示します。LHDのプラズマはドーナツ型をしていて、ドーナツの差し渡しが8メートル近くあり、縦に切ったときの断面は直径が1.3メートルくらいです。図ではこのプラズマの断面を同心円になぞらえて表してあり、プラズマ半径ゼロがプラズマの中心になります。この条件ではイオンを集中的に加熱しているので、イオンの温度の方が高くなります。高い電子温度を得る運転についても大きな進展が得られました。こちらはすでに、NIFSニュースNo.198(2011年2月・3月号)において速報したとおりです。ジャイロトロンと呼ばれる電子を加熱することに適したマイクロ波発振器の整備と断熱に関する物理解理解を合わせることで、2億3,000万度に達することができました。

これまで得られたプラズマの性能を表にまとめました。核融合炉の設計を確実なものとするために必要な1億度以上の目標に一步、一步近づいています。

今後、最終目標に向けて、LHDを最高性能化していく計画の柱の1つとなるのが、ダイバータと呼ばれる排気装置の改良です。プラズマを



プラズマの中の温度と密度の分布。

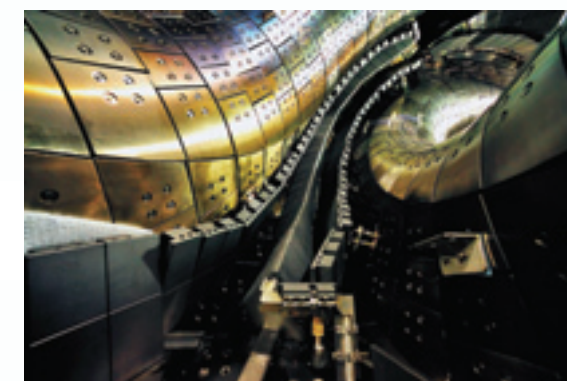
断熱するために、プラズマが容器の内壁と接触しないよう目には見えない磁場によって壁から離して宙に浮いた状態で閉じ込める形をとっています。一方、プラズマ中の水素や不純物を制御するための出口も必要であり、そのため磁場を作る磁力線を一部外へ引き出すものをダイバータ(英語で「そらす」の意)と呼んでいます。このダイバータはプラズマが直接当たり、高温になりますので、高い温度に耐えられる炭素材料で作ってあります。さて、プラズマがダイバータに当たるとガスになりますが、このガスがプラズマにそのまま戻るとプラズマを冷やしてしまうので、ガスを排気することがプラズマ性能の向上につながります。LHDでもこの措置を講ずるため、まずガスがプラズマにそのまま戻りにくいダイバータの形を確認することにしました。第14サイクル実験では、最先端の計算機シミュレーションを駆使した設計に基づいてダイバータの一部改良(写真)し、その効果を確認しました。実験において、設計どおりにガスがプラズマへ戻らずに留まることを確認することができました。これによって最終的な設計が固まり、次年度の第16サイクルには本格的な排気性能を持った改良ダイバータ(ガスが戻らないという意味で閉構造ダイバータと呼んでいます)の実験を開始することができます。また、複雑な理論モデルが正確な予測を与えることが実証されたことも、今後を展望する上で大変重要な成果と言えます。

第14サイクルでは、将来の核融合エネルギー

の実現に向けて、さらに前進することができる成果をあげられました。特に、プラズマ性能の向上や高温プラズマの複雑な現象を物理の法則として理解するためのデータを得ることができました。これらのデータをさらに詳しく調べ、その内容を吟味して、早く研究成果として世界に発表していきたいと考えています。

実験終了後には、マイナス269度(絶対温度4度)まで冷やしていた超伝導磁石を室温に戻す運転を2月中旬まで行いました。現在は、今年度の実験に向けて、保守点検作業を行っています。プラズマ実験期間中は見学に制限がありましたが、今年7月末から予定されている第15サイクルプラズマ実験開始までは、LHDを間近にご覧いただけます。ご来所をお待ちしております。

(大型ヘリカル装置計画 研究総主幹)



プラズマ真空容器内壁を改造して設置した改良ダイバータ。畝の間に磁力線を引き込む形になっている。

プラズマ性能	LHD達成値	LHD最終目標値	核融合条件の目安
イオン温度	7,500万度 (密度16兆個/cc)	1億2,000万度 (密度20兆個/cc)	1億2,000万度 100兆個/cc
電子温度	2億3,000万度 (密度2兆個/cc)	1億2,000万度 (密度20兆個/cc)	
密度	1,200兆個/cc (温度300万度)	400兆個/cc (温度1,500万度)	5% (磁場5テスラ)
ベータ値 (プラズマ圧力/磁場圧力)	5.1% (磁場0.425テスラ)	5% (磁場1-2テスラ)	
定常運転	54分28秒 (500kW) 13分20秒 (1,000kW)	1時間 (3,000kW)	定常 (1年)

プラズマ性能のLHDにおける達成値と最終目標および核融合条件の目安。赤字が第14サイクルプラズマ実験の成果です。