

LHD 第18サイクル実験成果 —プラズマよ、熱く濃く！—

森崎友宏

大型ヘリカル装置（LHD）第18サイクル実験は、平成26年11月6日から44日間に約6,400回の放電（プラズマ生成）を行って、平成27年2月5日に終了しました。この間、“分”単位の緻密な実験計画に従って、所員及び全国の大学、研究機関、国外の共同研究者から寄せられた228件の研究提案に基づいた実験が行われました。平成26年度の実験においても、新しい発見、記録の更新等、多くの成果が得られましたが、今回の「研究最前線」では、その中でも18サイクル実験のハイライトとも言える2つの重要な成果について述べます。

第一の成果は最高温度の更新です。温度といっても、プラズマには複数の温度が存在します。プラズマを構成するイオンと電子が別々の温度になることがあるからです。私たちの周りにある空気も酸素と窒素で構成されていますが、両者は何度も衝突するうちにエネルギーのやり取りを行って、同じくらいの温度に落ちています（緩和）。ところが、プラズマ中の電子とイオンは、そもそも加熱機構が異なることに加え、質量が極端に違う（水素イオンの質量は電子の1,836倍）ため、なかなか緩和せずに両者は異なる温度になることがあります。

電子温度に関しては、今サイクルの実験で、1億2,000万度を16兆個/ccという高い密度で達成しました（図1）。今回の実験では中心部の密度が周辺より低い凹分布になったため、LHDの最終目標値である「同温度を20兆個/ccで」には僅かに及びませんでしたが、平均密度としては20兆個/ccであったため肉薄した値であったといえるでしょう。今回の記録達成には、筑波大学と共同で開発した、ジャイロトロンと呼ばれる加熱装置の増強が奏功しました。ジャイロトロンは、高い周波数の電磁波（マイクロ波）を発生させる装置で、家庭用電子レンジと同じ原理でプラズマ中の電子を加熱します。図2は、LHDに新たに設置された154GHzジャイロトロンの写真です。中に超伝導コイルが組み込まれた全長約3mの巨大な真空管で、家庭用電子レンジの1,000倍以上のパワーのマイクロ波を出力することができます。今回

の実験では、新設の1本を含む計5本のジャイロトロンが電子加熱に用いられました。これらのジャイロトロンで発振されたマイクロ波は、アンテナを介してプラズマに入射されるわけですが、今回、その入射方法も精密な計算に基づいて最適化されました。この点も電子温度の最高値が更新された理由の一つです。

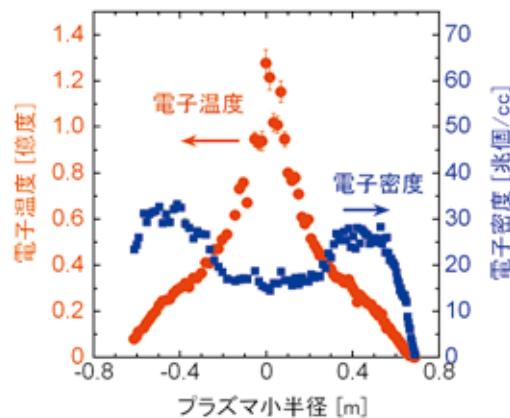


図1 最高電子温度を達成した放電の電子温度及び密度分布。

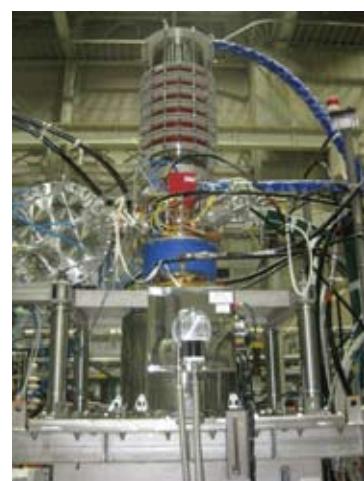


図2 新たに設置された154GHzジャイロトロン。

イオン温度に関しても大きな進展がありました。核融合反応が起きるためには、電子温度とともにイオン温度も1億2,000万度に達する必要があ

ります。核融合を起こすのは、電子ではなくイオンですので、至極当然な話です。実際、定常状態に入った核融合炉では両者の温度差は小さくなると予想されるため、より燃焼プラズマに近い条件で実験を行うためには、電子とイオンが同時に高い温度を達成している必要があります。ところが、イオン温度を上げることはそれほど容易ではありません。これまでにLHDで得られている最高イオン温度は9,400万度ですが、その時の電子温度は、イオン温度よりかなり低い4,000万度程度でした。今回の実験では、高イオン温度が得られている放電に、前述の新設ジャイロトロンからのマイクロ波を重畠する方法で電子温度の上昇を試みました。結果は期待通りで、イオン温度、電子温度ともに7,000万度以上のプラズマを得ることに成功しました。図3はイオン温度7,000万度、電子温度8,800万度を達成した時のプラズマをCCDカメラで撮影した写真です。捻じれたドーナツ状のプラズマを接線方向から観察しています。交差する白い筋はプラズマ周辺部の温度の低い領域です。丸で囲んだ黒い領域は一見温度が低そうですが、プラズマは温度が高くなると可視光を発しなくなるため、温度の高い中心部に相当します。

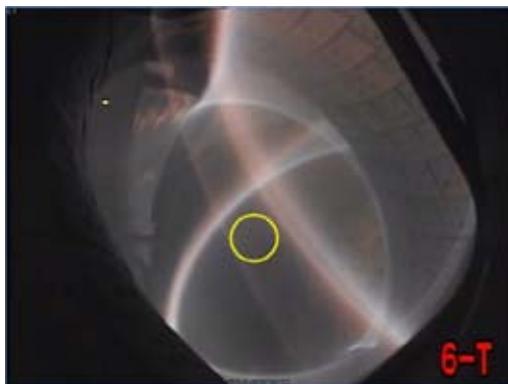


図3 電子温度、イオン温度ともに7,000万度以上を達成したプラズマ。

第二の成果はプラズマの圧力に関する新しい記録です。プラズマの圧力というと少々抽象的な感がありますが、通常の気体の圧力と同じです。酸素や二酸化炭素、空気といった私たちの身の周りにある気体の圧力は、その温度と密度の積に比例します。プラズマの場合も全く同じで、圧力はプラズマを構成するイオンや電子の温度と密度の積に比例します。従って、温度が高く密度の高いプラズマほど圧力が高く、内部に蓄えているエネルギーが高いことを意味します。つまり、核融合反応を

起こすには、プラズマの圧力を高める必要があるわけです。一方、圧力の高い“高性能プラズマ”はその圧力に打ち勝つ力で閉じ込めておかなければ、すぐに拡がってしまいます。この「閉じ込めておく力」とは、いわゆる磁場の圧力（磁気圧）で、磁場強度を高くするほど高くなりますが、装置の建設コストもそれ以上のスケールで増加します。従って、プラズマのコストパフォーマンスの指標として、プラズマ圧と磁気圧の比、「ベータ値」（ $\beta = \text{プラズマ圧} / \text{磁気圧}$ ）がしばしば用いられます。ただ、ベータ値が高くても極端に磁場が弱いと閉じ込め性能も劣化するため、実際の核融合炉を想定した場合、現実的にはある程度以上の磁場は必要です。LHDではこれまで0.5テスラ以下の弱磁場で最高ベータ値5.1%を達成しています。そこで18サイクル実験では、1テスラにおける高ベータプラズマの生成に挑戦しました。通常使用する中性粒子ビーム入射加熱装置に加えて、電磁波でイオンを加熱する装置も投入して高パワー加熱を行ったところ、これまでの記録を更新する4.1%を達成しました。今回得られた値は最高ベータ値ではないものの、核融合炉に近い条件で得られた値として大変重要な意味をもっています。

LHDは平成28年度中に重水素実験を開始する予定です。重水素は水素の2倍の質量を持っていることから、プラズマの挙動が変化し、閉じ込め性能が向上することが期待されています。18サイクルで得られた上述の成果が、重水素実験でどのように進化するか大変興味深いところです。

〔大型ヘリカル装置計画 研究総主幹
高密度プラズマ物理研究系 研究主幹〕