

## LHD第13サイクル実験成果速報

山田 弘 司

核融合エネルギーの実現を目指す学術研究を推進している本研究所では、大型ヘリカル装置 (Large Helical Device、以下略してLHDと呼びます) の第13サイクルプラズマ実験を昨年10月1日から開始し、同年12月24日に終了しました。LHDは世界最大規模のらせん(ヘリカル)状の超伝導コイル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。第13サイクル実験においてはプラズマを約6,000回発生させ、大学等の研究者と、これらのプラズマを対象とした共同研究を進めました。

第13サイクル実験では大きな成果が二つありました。一つは、電子の温度が1億7,000万度に達する高温のプラズマを生成することに成功したこと、もう一つは、温度が上がるとともに燃料である水素以外の不純物がプラズマの外へ排除される現象について、原子番号が大きいほど吐き出し効果が大きくなる関係を見出したことです。この二つはいずれも将来の核融合発電炉に求められる重要な条件を満足させるものです。LHDはらせん状の電磁石を用いて高温のプラズマを閉じ込める磁場を定常に発生することができ、すでに1,000万度以上のプラズマを1時間保持することに成功しています。したがって、LHDによる実験計画では、現在、プラズマの温度を上げることに力を注ぎ、その性質を調べています。

では、この二つを詳しく、ご説明しましょう。まず、電子温度1億7,000万度についてです。温度を上げるためには加熱を増やすことと、プラズマから熱が逃げないように断熱することの両方が必要です。片方だけではうまくいきません。プラズマは電離した気体であり、電子とイオンからなっています。これらの性質を利用

した固有の加熱方法があります。筑波大学と共同で、電子を加熱する手段である電子サイクロトロン共鳴加熱を行う装置の研究開発を進め、3,000キロワットを超える加熱電力をLHDの実験に用いることができるようになりました。具体的には77ギガヘルツの周波数を持つマイクロ波を発生するジャイロトロンと呼ばれる装置です。ちなみに、ご家庭にある電子レンジもマイクロ波を使っていますが、この周波数は2.45ギガヘルツです。さて、このマイクロ波をプラズマに入射すると、磁場中の電子の回転運動と共鳴し、電子を加熱します。この大電力マイクロ波加熱を、これまでの実験研究で明らかになったプラズマから熱が逃げにくい閉じ込め磁場に組み合わせることによって、図1にあるようにプラズマの中心の電子温度を1億7,000万度にまで上げることに成功しました。これまでの最高記録である1億2,000万度を大きく更新したことになります。核融合反応は温度のほぼ2乗に比例して起こりやすくなります。したがって、

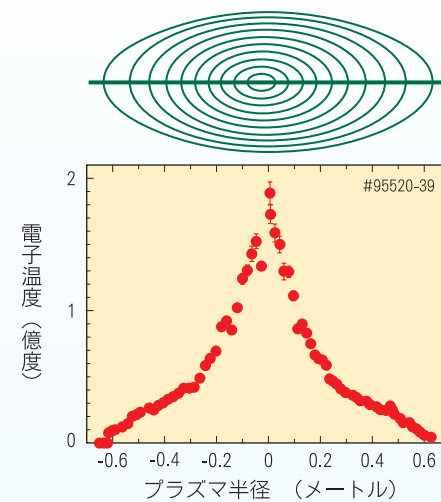


図1 プラズマの断面(上図)の水平軸に沿って測定した電子の温度分布(下図)。

より好ましい高い温度条件でも、これまでの考え方でうまくいくことを証明することができました。

つぎに、不純物の排除についてです。平成20年度の実験で、温度の高いプラズマ中心部では、不純物として炭素の小粒を意図的にプラズマ中へ入射しても、イオン温度の上昇に伴って自動的にこの炭素が排除されるという現象を発見していました。平成21年度には、炭素以外の元素(ヘリウムとネオン)を注入することにより、この現象を詳細に調べました。その結果、原子番号が大きくなるほど、この排除の効果が強まるという関係を見出しました。図2はヘリウム(原子番号2)、炭素(同6)、ネオン(同10)のプラズマ中での割合の分布を示したものです。主たる燃料の水素に対し、中心部ではヘリウムは2%、炭素は0.3%程度、ネオンは0.03%程度になっています。不純物の割合自体が原子番号とともに大きく減少し、また、その分布が外側へ寄っていることに注目してください。図3はドーナツ形状のプラズマを斜め方向から見た画像で、(a)は可視画像、(b)、(c)はX線です。X線は不純物からの放射によるものですが、温度が上がると、(b)か

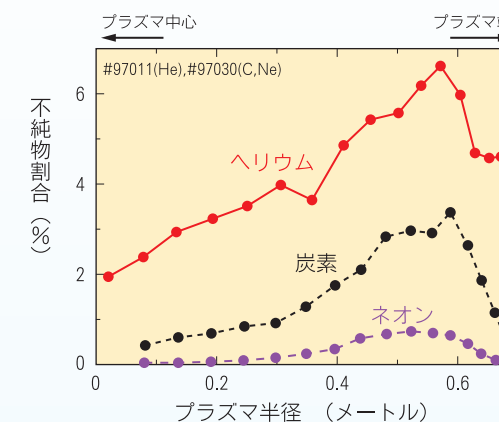


図2 プラズマ中の不純物割合の分布。左端がプラズマの中心、右端がプラズマの端です。原子番号が2のヘリウムから、6の炭素、10のネオンと大きくなるにつれて、外側へ排除される効果が強まります。

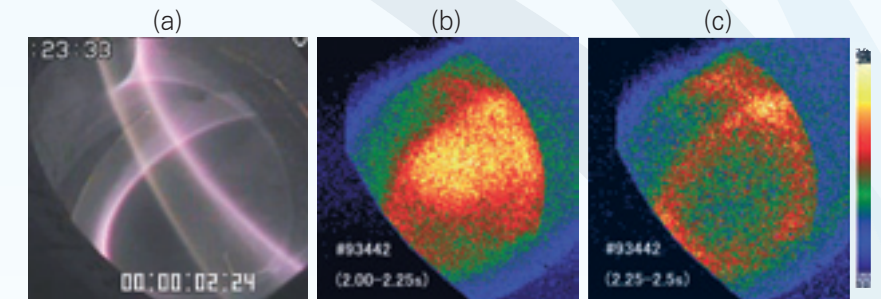


図3 プラズマをドーナツ形状に接する方向から見た画像。(a)可視画像。(b)、(c)X線画像(色はX線の強度)。X線は不純物からの放射によるものです。温度が上がると、(b)から(c)に変化し、不純物が外に排除されていることが分かります。

ら(c)に変化し、ここでも不純物が外に排除されていることが分かります。将来の核融合発電炉では、水素の同位体がヘリウムに変わる核融合反応を利用します。また、プラズマ中には水素以外の元素(炭素、酸素、金属など)が壁からどうしてもいくらかは混入します。これらのヘリウムや不純物は水素燃料の純度の低下をもたらすとともに、原子は原子番号が大きいほど高温になるとより強い光を出してプラズマを冷やします。目安として、燃料水素に対して、ヘリウムは5%程度、炭素は1%程度、金属は0.01%(1万分の1)程度に抑える必要があります。LHDの実験結果はヘリウムと炭素については既に条件を満たしており、金属については代表的な鉄の原子番号が26ですから、確認された原子番号との関係(法則)から十分に抑えることができると予測ができます。この成果はLHDにおいて、プラズマの温度をさらに向上させる上でも、明るい見通しを与えるものであり、将来の核融合発電炉において、極めて好ましい性質の発見です。

この他にも超高密度の定常保持や磁場の乱れの影響の理解など、数多くの成果を上げることができています。これらの成果をさらに深く理解するための解析を進めるとともに、さらなる成果につなげるべく、今年の10月6日からの第14サイクル実験に向けて、現在、準備を進めています。最後に、この場をお借りして、LHD運営グループによる円滑な運転遂行に謝意を表し、広くLHD実験にご理解ご支援をくださった方々へ御礼申し上げます。

(大型ヘリカル装置計画 研究総主幹)