

1億度のイオン温度をめざして

永岡 賢一

核融合科学研究所では、ヘリカル型と呼ばれる磁場を発生させてプラズマを閉じ込めることができる大型ヘリカル装置(LHD)を用いて、核融合を目指した高性能プラズマの研究を行っています。核融合を実現するためには、高温・高密度プラズマの定常保持が必要となります。ヘリカル型プラズマは、高密度プラズマの性能と定常保持性能は非常に優れており、LHDを用いたこれまでの研究で、他の閉じ込め方式を凌ぐ成果を挙げてきました。そのため、ヘリカル方式の研究では核融合炉心プラズマに必要な1億度の高温プラズマ生成の実証が、残された非常に重要な課題の一つとなっています。この記事では、LHDを用いて高いイオン温度を実現する取り組みについて紹介します。

2012年に行われた第16サイクルのLHD実験では、「8,500万度のイオン温度の実現」及び「5,800万度のイオン温度の定常保持」という2つを目標に掲げて取り組みました。この実験では、外部から入射するビームによってプラズマを加熱します。図1は、ビーム加熱電力の増加により

イオン温度が上昇する傾向を示しています。第16サイクルの実験では、入射ビームの電力は第15サイクルと変わらないため、さらにイオン温度を上げるためには、このビーム加熱電力を効率よくプラズマ中心部へ集めることが鍵となりました。そこで、プラズマを閉じ込める真空容器内側の表面状態を調整するために、ヘリウムプラズマ放電を大電力のビーム加熱実験の直前に繰り返し行いました。この壁の調整の手法は、一昨年度の第15サイクルの終了間際にその効果が確認されたもので、第16サイクルで更なる最適化を進めました。プラズマが接する壁の調整は、壁表面に付着している水素を除去することにより、水素プラズマ放電におけるプラズマ周辺部の背景ガス圧力を下げる効果があります。背景ガス圧力が高いと入射したビームの損失を増加させるため、その抑制がビーム加熱の効率を向上させる効果があると考えられています。

このヘリウムプラズマによる壁調整放電を入念に行った後の実験で、目標であった8,500万度のイオン温度のプラズマ生成に成功しました(図

2参照)。このプラズマは、微量な炭素ペレット(1ミリメートルサイズの粒)をプラズマ中に高速で打ち込んだ後に得られたものです。現在のところ8,500万度の高温プラズマは、40ミリ秒という短い時間しか維持できていません。炭素ペレットを導入することで得られる瞬間最大風速のような記録です。この炭素不純物の効果は、瞬間的にイオン加熱効率を高めることが予想されていますが、プラズマ中の熱エネルギーの伝わり方にも影響している可能性があり、その併用には更なる研究が必要な課題です。

このように瞬間的な高い温度の実現ができましたが、将来の核融合炉では、定常的に高温のプラズマを保持することが必要なため、高温プラズマの定常保持にも取り組みました。8,500万度のイオン温度実現に有効であったヘリウムプラズマによる壁調整は、高イオン温度プラズマの定常保持にも大変有効でした。炭素ペレット入射を行わない放電で、6,400万度のイオン温度を1秒間保持することができました(図3参照)。16サイクル以前の記録は5,200万度の1秒間保持でしたので、20%程度記録を更新することができました。1秒間という時間は、プラズマの閉じ込め性能を表すエネルギー保持時間(この実験では、50ミリ秒から100ミリ秒程度)の10倍以上であるため準定常的に保持することができたと考えることができます。また、この保持時間は、

外部から入射している加熱ビームにより制限されているため、より長いビーム入射を行うことにより更に長時間の保持が期待されています。

ビーム加熱電力の増力がなかった第16サイクルでも、ヘリウム放電による壁調整効果を高めることで、イオン温度に関する目標を達成することができました。最終目標である1億度以上のイオン温度への見通しをより確かなものにするができたと考えています。さらに、次の第17サイクルの実験からは、高イオン温度のプラズマと高電子温度のプラズマを統合することにも挑戦する予定です。図4に示すように、これまでの実験では、高イオン温度プラズマと高電子温度プラズマは独立に生成されており、その両立には至っていません。イオン温度と電子温度が共に高いプラズマは、プラズマ中の熱の伝わり方が複雑になることが理論的に予測されているため、プラズマ物理としても大変興味深い研究対象です。このように核融合を目指したプラズマの高性能化研究と関連するプラズマの物理研究を2本柱として、今後も研究を進めていく予定です。

(プラズマ加熱物理研究系 助教)

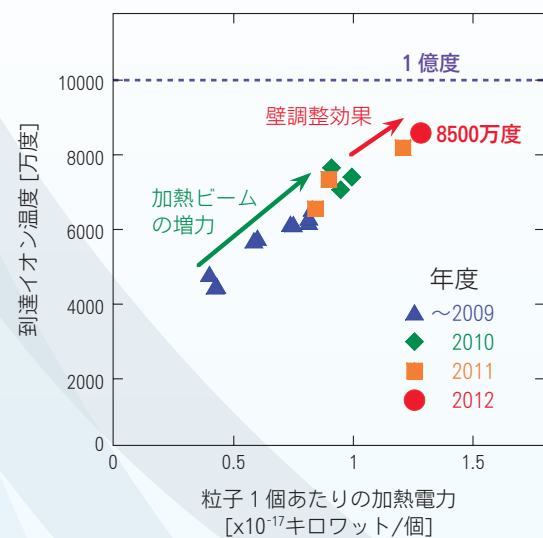


図1 イオン加熱電力の増加によるプラズマ中心部のイオン温度の上昇。

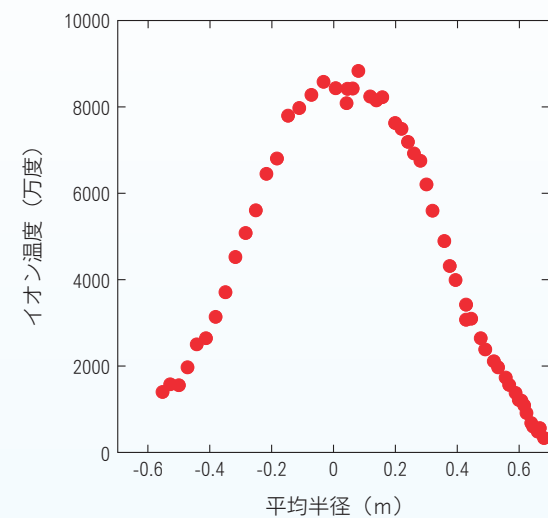


図2 8,500万度を達成したプラズマのイオン温度分布。

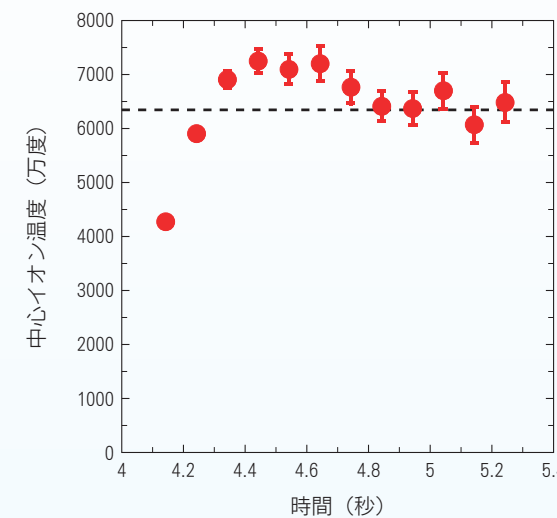


図3 6,400万度の1秒間保持に成功したプラズマの中心イオン温度の時間変化。

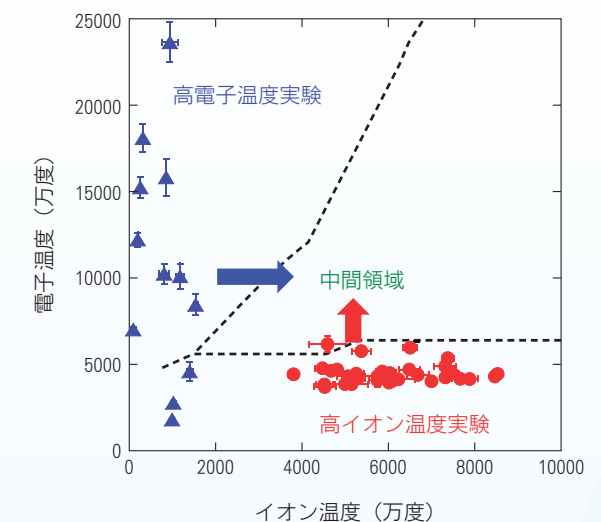


図4 これまでの実験で得られた高イオン温度プラズマと高電子温度プラズマの温度領域。今後は、両者の中間領域の開拓に挑戦する予定です。点線は、プラズマ中の熱の伝わる性質が異なると理論的に予想される境界線。中間領域では、複雑な熱の伝わり方が予想されています。