

LHDの新たなフェーズにおける学術研究成果 Academic research results in the new phase of LHD

居田克巳
Katsumi Ida

核融合科学研究所
National Institute for Fusion Science

2020年度の実験によって、1億度に達するプラズマの生成法を確立することができました。2021年度以降、LHDの研究は超高温プラズマを使った学術研究を推進するという新たなフェーズに入りました。共同研究をさらに進め、国際共同研究者による実験提案者数が3分の1を占めるようになり、所外共同研究者による実験提案者数が半数を超えました。

乱流に関する研究について大きな進展がありました。マックスプランク物理研究所との共同で行われた、閉じ込め磁場の構造が異なる装置間の比較実験の結果が発表されました[1]。ドイツのヴェンデルシュタイン7-Xと核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)は共に、外部磁場でプラズマを閉じ込める装置です。ヴェンデルシュタイン7-Xでは衝突拡散に起因する新古典輸送はLHDよりも低いレベルに抑えられています。しかしながら、乱流に起因する異常輸送はLHDよりも高く、トータルの輸送の大きさはヴェンデルシュタイン7-XとLHDで同程度となっています。この比較実験は、新古典輸送と異常輸送を同時に低減することの難しさを示しています。

アメリカのプリンストン大学との共同で行った、ホウ素粉末による閉じ込め改善実験の結果が発表されました[2]。プラズマの周辺部に加えられたホウ素粉末によって、プラズマの乱流の状態が変化し、それに伴う温度上昇が観測されました。ホウ素粉末はプラズマ周辺部のリサイクリングに影響を与える事は知られていましたが、さらに乱流の周波数特性にまで及ぶことが、今回の研究で明らかになりました。これは、乱流周波数特性の変化が

輸送に与える影響、プラズマの周辺部とコア部との乱流輸送の結合等、興味深い結果となっています。

将来の磁場閉じ込めプラズマにおいては、プラズマの熱除去のためのダイバータ板への熱負荷が大きくなり損傷を引き起こすことが懸念されています。このダイバータ板への熱負荷の制御に大きな指針を与える実験結果が得られました。プラズマ中に磁気島という閉じた領域がMHD不安定性で生じる事はよく知られています。磁気島が大きくなるとダイバータ板への熱負荷が減り、磁気島が小さくなるとダイバータ板への熱負荷が増えることが観測されました。この磁気島のサイズとダイバータ板への熱負荷との間に、「捕食者と被食者」の関係があることが発表されました[3]。これは、磁気島を使ったダイバータ板への熱負荷の制御の難しさ、すなわち自励振動の発生を示唆しています。

プラズマ中で発生した乱流は、発生場所から他の場所に移動していくという乱流伝播があることが近年注目されています。この乱流伝播を利用してダイバータ板への熱負荷を低減させる実験結果が発表されました[4]。プラズマの周辺部に生じたMHD振動が乱流伝播を誘起し、その結果として増加したダイバータ領域の乱流が熱負荷を低減させていることが発見されました。この乱流伝播によるダイバータ板への熱負荷の制御は、今後重要視されるテーマです。

このように乱流に関しては、プラズマの中心部と周辺部で全く異なる制御を必要として

いることを見出しました。プラズマ中心部では、乱流を小さくすることで急峻な温度勾配の形成ができるのに対し、周辺部では、乱流を大きくすることで、ダイバータ板への熱負荷が減ることがわかりました。したがって、プラズマ中心部で乱流を抑制し、周辺部では逆に増大させるという制御が望ましいことが明確になりました。核融合にとってマイナス面が強調されてきた乱流に、プラス面があることを実験で明らかにしました。

プラズマの加熱パワーを増加させていくと、プラズマ中心部では乱流を小さくすることで急峻な温度勾配ができ、この領域は輸送障壁と呼ばれています。この輸送障壁の形成に必要なパワーの値が、重水素プラズマと水素プラズマで異なることが明らかになりました[5]。重水素プラズマの方が、形成に必要なパワーの値が小さいという同位体効果が実験で得られました。

圧力勾配が急峻になると発生するプラズマの不安定性には、緩やかに現れて持続するものと、突然現れるものがあります。突然現れる不安定性は、地震のように「いつ起こってもおかしくないが、いつ起こるかかわからない」という性質を持っています。この突発型については、「プラズマへの影響」の解明に、重要な実験結果が得られました。

その急峻な温度勾配が突然小さくなる現象があり、これは輸送障壁の崩壊と呼ばれています。輸送障壁の崩壊に伴い、熱パルスがプラズマの中心部から周辺部に伝わる事は知られていましたが、乱流が熱パルスよりも高速に伝わる実験結果が発表されました[6]。従来考えられていた「雪崩モデル」では、熱パルスと乱流パルスは同じスピードで伝播すると考えられていました。この実験結果は、この「雪崩モデル」では説明できない新しい現象であり、大変興味深いものです。

プラズマの乱流と不安定性に関する物理実験により、将来の核融合プラズマの乱流と不安定性の制御法の開発につながる重要な知見を得ることができました。乱流や突発型不安定性は、核融合プラズマだけでなく、宇宙や地球で生起する様々な現象にも深く関わって

いると考えられています。今後はそのような学際的な研究にも推進していきます。

参考資料

[1] 2021年11月5日 プレスリリース
核融合プラズマの乱流抑制に新たな可能性
F.Warmer et. al., Impact of Magnetic Field Configuration on Heat Transport in Stellarators and Heliotrons, Physical Review Letters 127 (2021) 225001

[2] 2022年1月17日 プレスリリース
ホウ素粉末のふりかけでプラズマの温度が上昇
F.Nespoli et. al., Observation of a reduced-turbulence regime with boron powder injection in a stellarator, Nature Physics 18 (2022) 350

[3] 2022年2月18日 プレスリリース
プラズマ中の「食べる食べられる」の関係
T.Kobayashi et. al., Self-sustained divertor oscillation driven by magnetic island dynamics in torus plasma, Physical Review Letters, 128 (2022) 085001

[4] 2022年3月30日 プレスリリース
プラズマのかごを揺らすと熱負荷低減
M.Kobayashi et. al., Turbulence spreading into an edge stochastic magnetic layer induced by magnetic fluctuation and its impact on divertor heat load, Physical Review Letters 128 (2022) 125001

[5] 2022年4月27日 プレスリリース
重水素を用いてプラズマ断熱層の高性能化に成功
T.Kobayashi et. al., Hydrogen isotope effect on self-organized electron internal transport barrier criticality and role of radial electric field in toroidal plasmas, Scientific Reports 12 (2022) 5507.

[6] 2022年5月19日 プレスリリース
高速で移動するプラズマ乱流を世界で初めて発見
N.Kenmochi et. al., Preceding propagation of turbulence pulses at avalanche events in a magnetically confined plasmas, Scientific Reports 12 (2022) 6979.

ホームページ <https://www.nifs.ac.jp>