

2019年度成果報告：大型ヘリカル装置計画プロジェクト — 最先端の機器群が支えるLHD実験研究 —

森崎友宏

令和になって初めての「大型ヘリカル装置 (LHD)」実験が2020年2月6日に終了し、実験グループは現在、データ解析とそれに基づく次の実験計画の策定、装置のメンテナンスを進めています。今回も多くの重要な結果が得られ、その成果は、核融合関連で最大の国際会議である「国際原子力機関 (IAEA) 核融合エネルギー会議」で発表されます。2年ごとに開催されるこの会議は、各国から1,000人以上の核融合研究者が一堂に会し、最新の研究成果について熱い議論を交わす“核融合研究のオリンピック”です。今回は、本年の10月にフランス・ニースで開催される予定でしたが、東京オリンピック同様に延期となり、来年5月開催予定となりました。本会議における発表の殆どは、トピックごとに分かれて行われる“ポスターセッション”という形式をとりますが、重要な成果に限っては、“総合セッション”という全参加者の前でプレゼンテーションを行う機会が与えられます。毎回、この少ない発表枠の獲得を目指し、各国がトップクラスの成果をアピールします。今年は事前審査の結果、LHDから4件の論文が選ばれました。2年前 (インド開催) からは1件増です。

今回の「研究最前線」では、上述の総合セッションの発表に選ばれた4件の成果について“速報”します。これらは当然、LHDで生み出された成果で

すが、プラズマを生成・維持するLHD本体とともに、様々な周辺機器の働きでもたらされました。そこで、実験結果とともに、これらの機器についても紹介します。

第一の成果は、重水素を使用することによるプラズマ性能の向上です。LHDでは、重水素実験第1年次に当たる2017年に、プラズマのイオン温度が核融合発電の実現に必要な1億2,000万度に達しました。ただし、その時の電子温度は4,200万度でした。3年次となる今回の実験では、イオン温度を1億度に近い8,000万度に保ったまま、電子温度を1億5,000万度まで高めることに成功しました。プラズマの温度を上げるためには様々な条件を最適化する必要がありますが、これまでの研究で、真空容器の壁面に付着した水素の量をできる限り少なく抑えることが、高い温度のプラズマ生成につながるということが分かっています。壁面の水素を除去するために、LHDでは薄いプラズマを生成し、それを真空容器表面に僅かに接触させる「放電洗浄」という手法を導入しています。薄いプラズマは、FMラジオに近い周波数を持つ電磁波で生成します。電磁波は「FAITアンテナ」と呼ばれる、研究所で開発されたアンテナから放射されます。図1は、真空容器内に設置されたFAITアンテナで、上下に分かれた構造になっています。

将来の核融合炉では、上述したようにイオン温度1億度以上の高温プラズマを長時間維持する必要があります。但し、プラズマの周辺部は1億度になっている必要は無く、むしろ不純物の除去をしやすくするために、可能な限り低い温度になる



図1 FAITアンテナ。上下二つのアンテナから電磁波を放射する。



図2 LHDの上部に設置されたコイル (赤い四角)

ことが望ましいとされています。「中心は高温に、しかし周辺は低温に」という困難な要求に応える研究にも大きな進展がありました。LHDでは、プラズマを閉じ込める磁力線の“カゴ”の周辺部を、少しだけ変形することで、この要求に応えることに成功しました。カゴの縁の部分だけを僅かに変形させるために用いるのが図2に示す電磁石（コイル）です。LHD本体の上下に、直径1.5mほどのコイルが10個ずつ設置されています。このコイルが生み出す磁場は、LHDの強力な超伝導コイルが作るカゴ本体の磁場の1,000分の1程度です。磁場の变化は僅かですがプラズマは敏感に反応し、カゴの周辺部で放射冷却が促進され、温度が低下することが分かりました。これは、将来の核融合炉の実現に向けた大きな進展です。

使用するガスを水素から重水素に替えることで、プラズマ性能が向上すること（同位体効果）の理由は未だ明らかになっていません。この原因を追究する実験を進める中で、最近興味深い現象が観測されました。水素と重水素は質量が異なる以外、化学的な性質は全く同じです。両者を混合すると、室温では気体（ガス）として混じり合っていますが、イオン化して水素プラズマ、重水素プラズマになると、イオン化する場所（中心部か周辺部か）によっては混じり合わずに、両者が別々に振る舞うことが明らかになりました。スーパーコンピュータを使用した大規模なシミュレーションを行ったところ、そのような振る舞いの違いは、プラズマ中に発生する“揺らぎ”が大きく関与していることも分かってきました。これらの知見は、同位体効果のメカニズム解明に重要な手掛かりを与えてくれるものと期待されています。今回の発見に大きく貢献したのが、研究所で開発された高性能分光器（図3）です。分光器は、太陽の光を7色に分けることで知られる三角柱のプリズムと同様な働きをする機器ですが、この分光器は光を分解する能力が格段に優れています。水素と重水素は、プラズマ中で赤い光を出しますが、両者の質量が僅かに

違うために光の波長が僅かに異なります。高性能分光器にはこの違いを短時間で見分けるための工夫が凝らされています。五角形の黒い箱の中心部に設置されたひし形の光学素子で光を分解し、手前に見える大口径レンズを装着した高感度検出器でデジタル信号に変換します。この信号の時間変化を詳細に解析することにより、水素と重水素がプラズマ中でどのように振る舞うかが分かります。

重水素実験の最重要課題の一つである、高エネルギー粒子の閉じ込めに関する研究でも大きな進展がありました。プラズマ中を非常に高速で動き回る粒子の振る舞いを調べるため、研究所では、プラズマを垂直方向から観測する高性能中性子分布計測器「垂直中性子カメラ」を開発しました。この計測器を用いることで、プラズマを加熱する高エネルギー粒子が、プラズマ中の“揺らぎ”に乗って外側に運ばれる様子を可視化することに成功しました。図4は、LHD本体の下に当たる、実験室の地階に設置された垂直中性子カメラです。本体下部から延びるガイドチューブ（細いパイプ）が地階天井部に見えます。その下に検出器があります（太いパイプ）。パイプオルガンのパイプのようにも見える、その1本1本がカメラの画素に当たります。スマホのカメラと比べると遥かに少ない画素数ですが、高エネルギー粒子の振る舞いを撮影するには十分です。

このようにLHDの実験では、研究所で開発された加熱機器や計測器等、多くの周辺装置が活躍しています。LHD自身も研究所で開発された装置であることは言うまでもありません。

（大型ヘリカル装置計画プロジェクト 研究総主幹／高密度プラズマ物理研究系 教授）

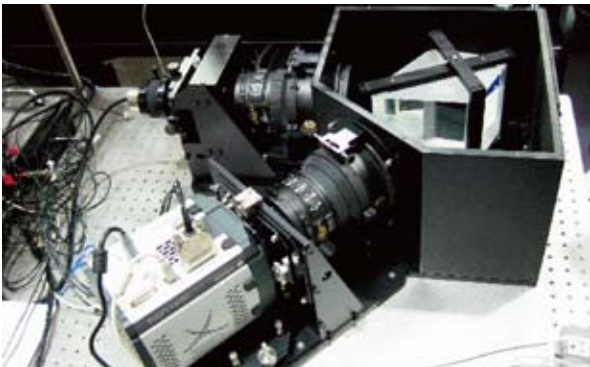


図3 高性能分光器。実験時は五角形の箱の蓋をしめて邪魔な光が入らないようにします。



図4 実験室地階天井部に設置された垂直中性子カメラ