

成果報告：大型ヘリカル装置計画研究プロジェクト ～20周年を迎えた大型ヘリカル装置実験～

森崎友宏

平成10年3月31日午後2時13分、白くか細いプラズマの映像が僅か0.1秒間だけ制御室のモニターに映りました（写真1）。大型ヘリカル装置（LHD）のプラズマが産声を上げた瞬間です。この時、制御室に集まった来賓や実験関係者から大きな拍手と歓声が上がりました。本当に一瞬の出来事でしたが、装置を作ってきた私たち実験関係者は、LHDの磁力線が生まれたばかりのプラズマをしっかりと包み込んでいることを確認し、安堵したのを覚えています。

記念すべきファーストプラズマの点火から遡ること8年、核融合科学研究所は核融合発電の実現を見通すことが可能なプラズマ実験を行うために、岐阜県土岐市において我が国独自のアイデアに基づく超伝導プラズマ実験装置・LHDの建設を開始しました。市街地から数キロメートルほど離れた丘陵地を造成した新キャンパスに、当時最先端の技術と多くの人材が投入され、LHDは平成9年12月に完成しました。実験開始後は毎年数多くの研究成果を挙げ、以降今日までの20年間、プラズマ物理・核融合研究の発展に貢献してきました。例えば平成25年度には、イオン温度9,400万度、連続運転48分などの記録を達成しています。これらの記録は、加熱電力（パワー）の増強を主とする装置の改良・最適化等に加えて、様々な学術研究の進展に支えられています。

百聞は一見に如かず、写真2をご覧ください。

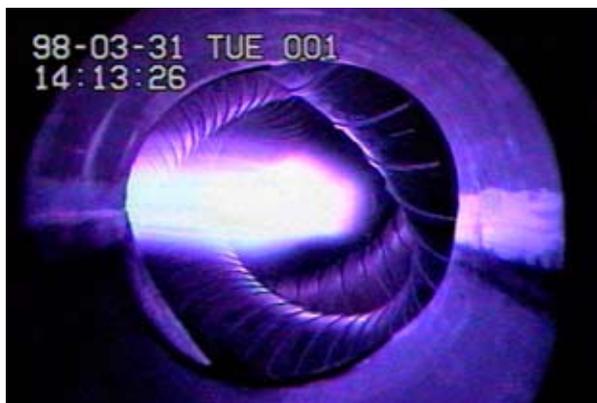


写真1 ファーストプラズマ（平成10年3月31日午後2時13分、水素プラズマ）



写真2 実験開始当時のLHD

これは実験開始直後の実験室の様子です。LHDの周りはすっきりしています。当時は計測器も必要最低限のものしか設置されていなかったため、ファーストプラズマの正確な温度は不明です。恐らく数10万～数100万度程度と推定されます。一方、写真3は最近撮影されたものですが、加熱装置や計測器が“所狭し”と設置されており、LHD本体が見えなくなるほどです。プラズマの挙動も手に取るように分かってきました。これにより不安定性の発生といったプラズマの高性能化を阻む原因を突き止めるとともに、それを回避・抑制するための方策として、例えば閉じ込め磁場の形状や加熱方法に工夫を施す等によりプラズマの性能を徐々に高めることに成功しました。図1は加熱パワーと電子温度、イオン温度（プラズマ性能）の変遷を示しています。加熱パワーの増加とプラズマ性能の向上は必ずしも連動しておらず、プラズマ性能にはしばしば停滞が見られるものの、科学的な解決策が施された後、上昇に転じていることが分かります。

このように、名実ともに世界のヘリカルプラズマ研究のフロントランナーとして走り続けてきたLHDですが、20歳の誕生日を迎える年（平成29年度）に大きな転機を迎えました。実験で用いるガスを、それまでの軽水素から重水素に変更することで、プラズマ性能を更に一段上に引き上げる計画です。各国の中・大型のトカマク装置が既に

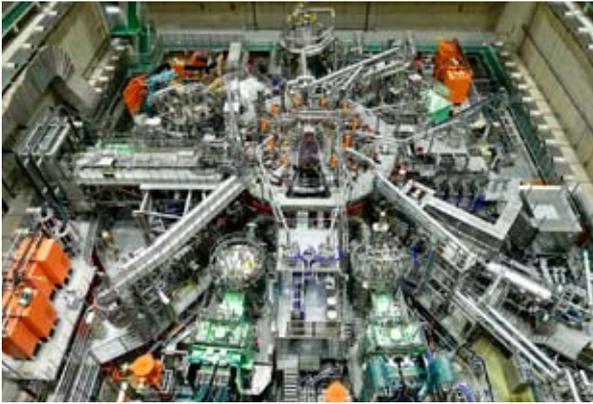


写真3 最近のLHD

重水素実験を進める中、20歳になったLHDもその仲間入りを果たしたわけです。そして期待通りにLHDは重水素実験開始早々、自身が軽水素実験時に打ち立てたイオン温度9,400万度を上回る、1億2,000万度を達成しました。これは核融合発電の実現に必要な三つの条件の一つであり、LHDがこの値を達成したことは、ヘリカル型核融合炉研究の大きな前進を意味します。平成29年度は、ヘリカル装置で初めて得られたこの1億2,000万度のプラズマの性質を調べる実験を集中的に行いました。私たちが一番気になることは、重水素プラズマ中の熱の伝わり方です。もっと端的に言うと重水素プラズマの“冷えやすさ”です。熱が伝わりやすく冷えやすいプラズマは、いくら加熱パワーを投入してもなかなか熱くなってくれません。LHDは世界最高性能を誇る温度計測器を備えています。これを使ってプラズマ中心から周辺部に至る詳細な温度分布を測定し、京都大学と共同で開発した解析プログラムを用いて、プラズマの熱輸送係数と呼ばれる冷えやすさの指標を導出したところ、予想通りプラズマの全領域にわたって、重水素プラズマの方が軽水素プラズマより冷えにくい性質を持っていることが分かりました。また、プラズマ粒子（イオン）の振る舞いも軽水素と重水素で異なることが観測されました。初年度だけでも新しい知見が数多く得られており、次回以降の実験も大いに期待されるところです。

LHDは、重水素実験によって核融合炉の条件に近い性能のプラズマを用いた研究を行うことが可能になりました。今後は高性能化した重水素プラズマを用いて、更なる課題に取り組んでいきます。例えば、イオン温度1億2,000万度を記録したプラズマの電子温度は4,100万度程度です。より核融合条件に近づけるためには加熱方法や運転方法

の最適化を進め、電子温度もイオン温度に近い値まで高めていかなければなりません。また、プラズマ内で生成される高エネルギーイオンは、プラズマ全体を加熱する役割を担うことから、それが逃げないように閉じ込めておくことが肝要です。重水素実験で高エネルギーイオンの閉じ込め状態を直接計測することが可能となったことから、高エネルギーイオンの閉じ込め状態が明らかになるものと思われます。さらに「なぜ重水素プラズマは軽水素プラズマより性能がよいのか」といった根本的な問いに対する答えも未だに得られていないことから、その謎を解き明かすための学術的な面からの貢献もLHDに求められています。

高いレベルで研究を遂行するためには、多くの研究者間の情報共有と協力が欠かせません。そのため研究所は、LHDの研究成果を学術論文や国際会議の発表等を通じて広く世界に発信してきました。その結果、国内外から多くの注目を集め平成29年度末現在、29の大学や研究機関と国際学術交流協定を締結して共同研究を行っています。特に重水素実験開始後は海外からの関心が高まっており、LHD実験への参加者数は大幅に増加しました。今後更に共同研究を活性化させ、最先端の成果を東濃の地から世界に発信していきます。

(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 教授)

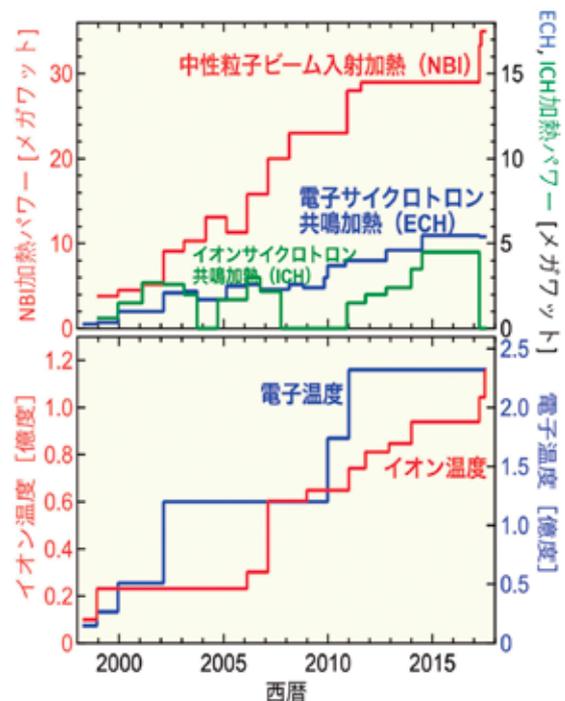


図1 加熱パワー（上）とプラズマ性能（下）の変遷