

高性能長時間放電が拓く新たなプラズマの世界

笠原 寛 史

核融合炉の実現のためには、社会に受け入れられる核融合炉の設計を行う必要があります。核融合炉では容器内は十分に熱平衡に達した状態で発電が行われていますが、プラズマ点火及び停止を繰り返すことで生じる熱サイクルによる疲労は無視できません。そのため、核融合炉は定常運転であることが望まれ、高性能定常プラズマを安定に維持することが非常に重要となります。10秒程度のプラズマ放電を用いて高温プラズマを閉じ込める研究が世界中で進められ、真空容器の内壁の状態が高性能プラズマを達成するのに非常に重要な役割を果たすことが分かっています。しかし、粒子制御に影響を及ぼす程に容器壁の状態が変わるためには、数百秒から数千秒の時間が必要です。容器内において熱平衡及び定常的な壁条件が達成された状態で、制御された粒子及び熱負荷下における高性能プラズマ維持が核融合炉の実現のために重要であると考えられています。本質的に安定な定常放電を可能とするヘリカルプラズマにおいて、数千秒に及ぶ長い時間スケールを持つプラズマ物理の解明が期待されています。

核融合科学研究所にある大型ヘリカル装置(LHD)は、プラズマを閉じ込める磁場を長時間にわたり安定に維持することを可能とする超伝導コイルを備えているため、定常運転の研究を行うのに最適な実験装置です。2005年度の実験では、イオンと電子のサイクロトロン周波数帯の電磁波を用いてプラズマを加熱することで、約54分のプラズマ維持を達成しました。サイクロトロン周波数とは、電荷を帯びた粒子が磁場の周りに巻き付き、螺旋運動して動く時の回転周波数です。その大きさは磁場に比例し、粒子の質量に反比例します。電磁波の周波数をイオンサイクロトロン周波数に合わせた加熱をICH、電子サイクロトロン周波数に合わせた加熱をECHと呼びます。プラズマの維持時間が3秒から10秒程度の物理実験を繰り返すことによる電磁波を用いた加熱の最適化、加熱機器の改造及び増強、プラズマ運転時の熱処理及び粒子制御等の定常運転に欠かせない様々な研究を進め、2013年度の実験では約48分間プラズマを維持することができました。LHDでは、既に54分のプラズマ維持を達成しているため、48分のプラズマ維持にはあまりインパクトがないと感じるかも知れませんが、48分のプラズマ放電は54分のプラズマ放電

の約3倍の電子密度で、プラズマの温度は2倍、平均加熱入力も2.4倍の高性能なプラズマ放電でした。図1に48分のプラズマ放電の代表的な物理パラメータの時間発展を記載しました。このプラズマ放電は、ICHとして38.5メガヘルツ(FM放送の周波数帯)、ECHとして77及び154ギガヘルツ(携帯電話の30倍以上の周波数)の電磁波を用いてプラズマを加熱しています。その総加熱電力は約1,200キロワット(家庭用電気ストーブ1,200台相当)に上ります。達成した電子密度は12兆個/ccで、温度は2,000万度のプラズマ

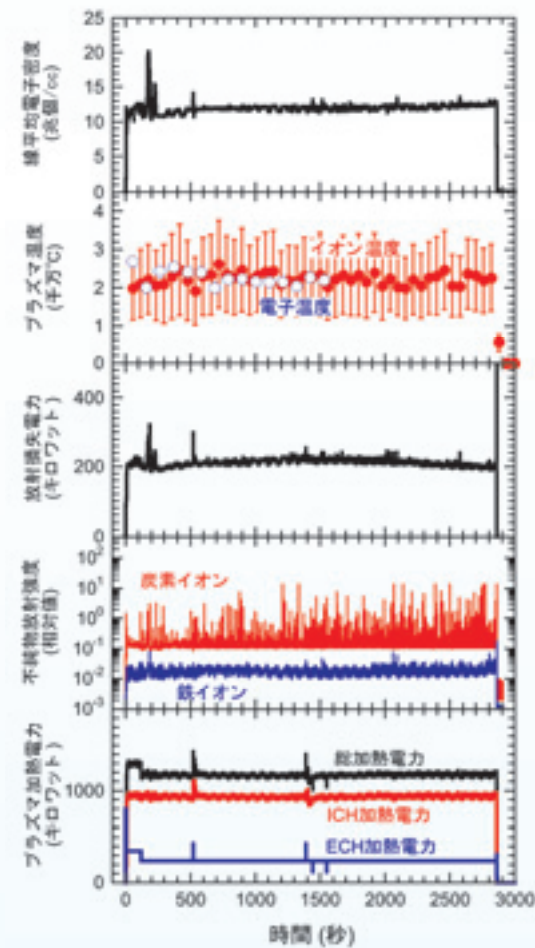


図1 48分放電の代表的なプラズマパラメータ。上から線平均電子密度、温度、放射損失電力、不純物放射強度、加熱電力。

放電です。総加熱入力エネルギーは、今まで核融合科学研究所が達成した16億ジュールから33.6億ジュールへと世界記録を更新しました。大電力加熱による高性能プラズマの維持を行うと、真空容器壁からの不純物が徐々に蓄積していき、放射損失が徐々に増えていくのではないかと考えられていましたが、LHDの定常実験ではそのような兆候は今のところ観測されておりません。LHDの定常放電における代表的な不純物の一つとして炭素があります。図1の不純物の放射強度の時間変化から分かりますように、放電時間が進むにつれ、非常に多数のスパイク状の信号を発生するようになりますが、放射損失量は一定で、放電に従い増加はしていません。これは、定常放電中に不純物が混入して蓄積しているわけではないことを表しており、将来のLHDタイプの核融合炉に対して心強い実験結果になっています。以前の長時間放電では、鉄の混入によりプラズマが放射崩壊していましたが、今回の長時間放電では、放電時間全体にわたり鉄の混入は非常に少なく、プラズマの性能が高くなることでプラズマ崩壊の原因が変わってきたようです。

図2は長時間プラズマ放電が崩壊する時のダイバータタイル(プラズマ終端部と接する炭素材料でできた板)周辺の連続写真です。ダイバータタイル上で上下方向に伸びている発光は、プラズマの終端部とダイバータタイルとの接触部で生じ、定常的な熱負荷により灼熱がおきています。重要なことは、この写真の右下部から小さく発光が始まり、その後多量のダスト(塵)によるものと思われる発光が観測され続け、0.2秒程度でプラズマが小さくなり、崩壊しています。実験後にダスト源と思われる場所を確認すると、

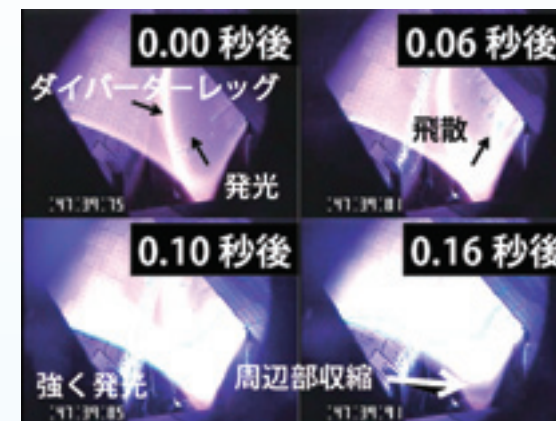


図2 放電終了を引き起こした大量の炭素の堆積層の剥離。継続的に堆積層の剥離が続くことによりプラズマが小さくなっていきます。この開始時刻を0秒後として、発光が続きプラズマが崩壊して行く過程を0.16秒後までの載せた連続写真です。

10 cm×12 cmにわたって炭素の堆積層が剥離し、周辺部は現在も剥離しやすく、浮いた状態になっていることが確認されました。解析が進むにつれ、継続的に堆積層が剥離され、それがプラズマの端を冷却して崩壊に至っていることが分かりました。加熱入力を増加させることで、このような冷却現象に対してプラズマを元の状態に復帰できることも分かっているため、今後更に加熱入力を増加させることで、より安定で高性能なプラズマ維持を行う予定です。特に定常加熱機器の改善及び増強により、2013年度の実験では約3,000キロワットの定常実験も開始しています。前回のNIFSニュース(217号)にも掲載されましたが、図3に示した実験結果のとおり、3,000キロワットの実験では、まだプラズマの維持時間としては数百秒程度の放電ですが、この加熱入力量はLHDの定常運転の設計値であり、定常運転による各機器の健全性を確認することができました。また、この大電力定常加熱実験により、最大電子密度40兆個/ccに迫る定常プラズマ維持が行えるようになってきました。これは、トカマク装置の定常運転で達成されているパラメータに近い放電を、LHDではより長く維持できることを意味します。LHDの定常グループでは、2014年度以降、3,000キロワットに近い加熱電力を用いた高性能定常プラズマ維持実験を計画しており、この実験結果により、核融合炉実現に必要な制御・材料研究が大幅に促進されることを期待しています。(プラズマ加熱物理研究系 助教)

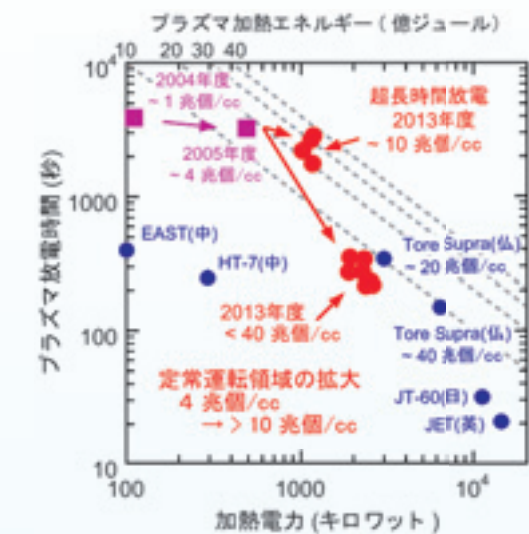


図3 長時間放電のプラズマ性能の向上。10兆個/ccを超える密度における長時間放電の運転領域の拡大。青色は代表的なトカマクプラズマの放電例を示す。ピンクは一昨年度までのLHDでの定常放電の代表的な値を示す。