

2.2.5 定常実験

定常実験においては最終的に 3MW の加熱入力によって1時間の運転を行うことが目標とされている。これは 10GJ の加熱入力の制御を意味し、核融合炉の点火の目安となる量に対応している。



図 2.2-37 真空容器内に設置された ICRF ループアンテナ

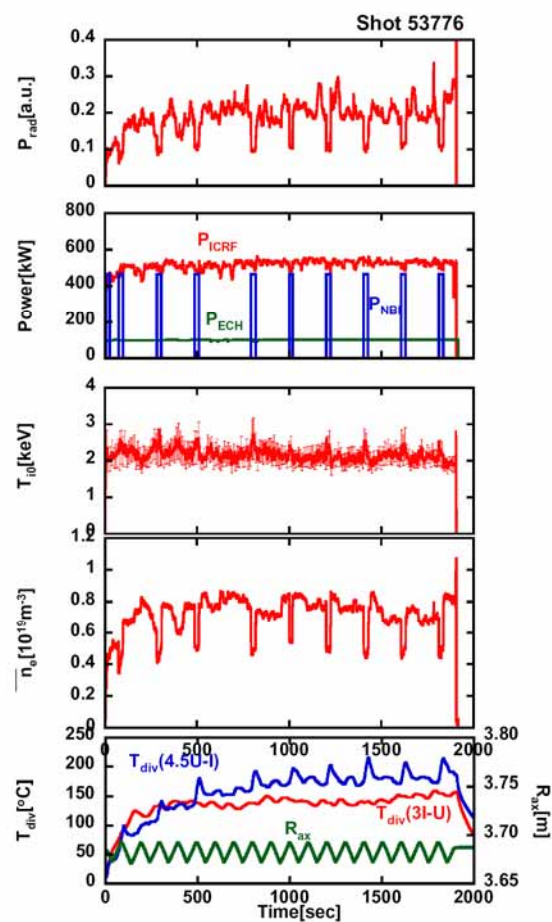


図 2.2-38 31 分 45 秒の長時間放電波形

磁場配位の制御によってヘリオトロン磁場配位で課題とされた粒子損失を抑え、高エネルギー

ギー粒子の高い閉じ込め性能を達成したことを基盤とし、定常運転に適したプラズマを高周波で加熱するイオンサイクロトロン加熱法による大電力定常加熱実験を重点的に行ってきた。結果として、真空容器内に設置されたアンテナ(図 2.2-37)からの高周波電磁波を主力として約 700 kW を入力することにより、プラズマの温度は 2keV 程度、密度は $(0.7-0.8)\times 10^{19}\text{m}^{-3}$ の高温プラズマを 31 分 45 秒に亘り連続して保持することに成功した。放電波形を図 2.2-38 に示す。平均加熱パワーは 680kW で、ICRF(520kW)と ECH(100kW)を定常的に入射している。NBI は約 3 分間隔で 25 秒間の繰り返し入射を行った。中心イオン温度は 2keV 以上であり、電子温度は 1.5-2keV 程度に維持されている。電子密度はガスパフにより自動制御したパラメータであり、おおよそ $0.7-0.8\times 10^{19}\text{m}^{-3}$ に保たれている。時々 $0.5\times 10^{19}\text{m}^{-3}$ 程度まで減少しているのは、NBI 加熱により入射パワーが増加し、自動制御の範囲を超えた環境変動により密度が減少したものである。

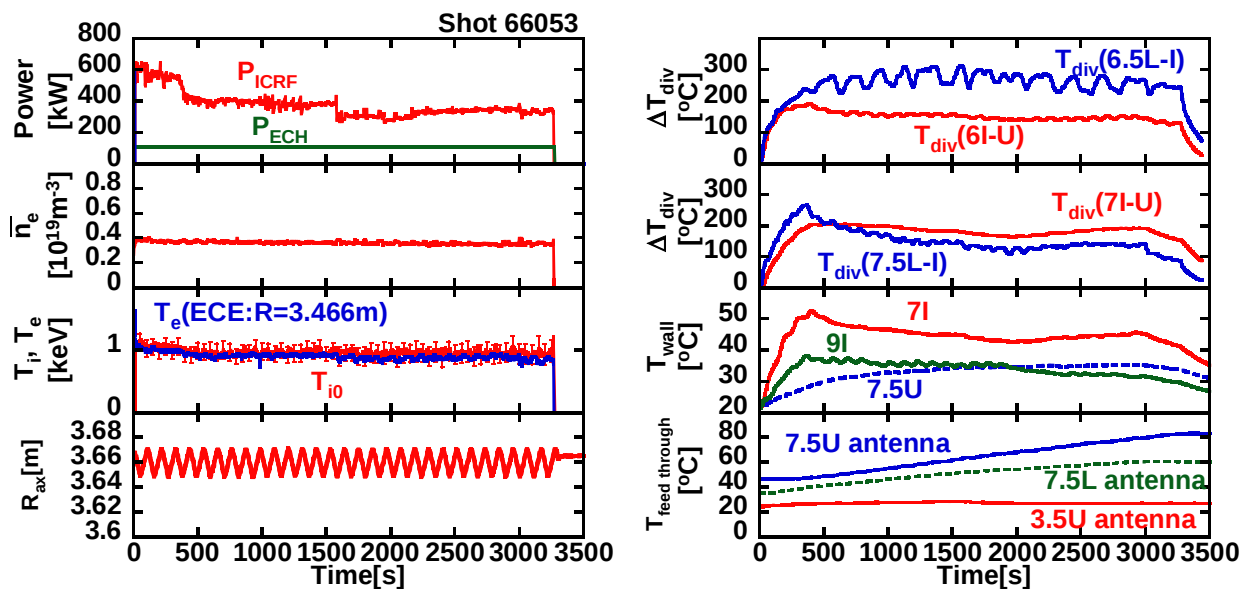


図 2.2-39 54分28秒の長時間放電波形。

この長時間運転には、閉じ込め磁場の最適化、ダイバータ機構の理解に加えて、プラズマと壁の相互作用における原子分子過程や固体表面に関わる物理研究から加熱や除熱に関わる工学研究に至る学術研究の積み重ねが活かされている。プラズマに入力したエネルギー値としては核融合研究にとって新しい領域となる 1.3GJ(13 億ジュール)を達成した。

この結果は以下の各種装置の改良や実験手法の開発により達成された。

- ・ 定常加熱機器の性能向上
 - ICRF 加熱の全般的性能向上
 - ECH の伝送路改良
 - NBI のイオン源改良による長パルス安定入射
- ・ ダイバータの除熱性能の改良
- ・ 磁気軸スweepによる熱流束の空間分散

さらに、加熱パワーを 490kW まで下げた状態で 54 分 28 秒の運転に成功し、入力エネルギーは 1.6GJ に達した。この時の放電波形を図 2.2-39 に示す。ECH 単独では加熱入力

110kW で 65 分の運転を達成している。

今後、最終目標を目指す予定である。以下にこれらの内容を述べる。

1) 加熱の性能向上について

定常実験では、ICRF 加熱、ECH 加熱、NBI 加熱を組み合わせる実験をおこなった。そのうち 8 割程度の入力エネルギー値を ICRF 加熱が担っており、これを主加熱装置として実験をおこなった。ECH 加熱は放電中に数回発生するダスト状固形物落下時のプラズマ維持の安定性を増すために効果があり、NBI はプラズマをトラス外側にスイングしたときの密度上昇抑制とヘリウムプラズマ中の水素イオン比の維持に効果的であった。ICRF 加熱はマイノリティイオン加熱モードで運転しており、ヘリウムプラズマ中の水素イオン密度の安定維持が必要である。

ICRF 加熱装置は第 7 サイクル(平成 15 年度)では、プラズマ実験をおこなわず、1 年間をかけてアンテナ、発振器、伝送路を含めた全ての機器の全面改修をおこなった。また高周波発振器は定常運転用の発振器を 2 台から 4 台に増強し、安定に安全に運転できるように整備をおこなった。同軸伝送路も内外導体共に水冷構造にして冷却能力を向上させた。これにより長時間運転による伝送路の熱伸びの影響を小さく抑えることが出来た。

ECH 加熱は定常運転用のジャイロトロン管の安定運転が可能になり、また真空排気型の導波管伝送路の冷却と排気系を改良したことにより、安定に定常 100kW レベルの入射が可能である。

NBI 加熱は 2 台のイオン源の冷却構造を長パルス仕様に変更したことにより、イオン源 1 台あたり 500kW/25 秒の入射が約 6 分間隔で安定におこなえるようになり、2 台のイオン源を交互に使用することにより、3 分間隔での入射が可能となった。

これらの加熱機器の性能向上と LHD 真空容器内の受熱板であるダイバータ板の温度上昇を抑えることに成功したことで、長時間プラズマ維持に成功した。

2) ダイバータ熱負荷の軽減について

第 6 サイクル(平成 14 年度)までの ICRF 加熱では標準磁場配位(磁気軸 3.6m)において 3 分以上の運転をおこなうとアンテナ近傍のトラス内側のダイバータ板が 300℃ 以上に局所的に上昇し、ダイバータ板や壁からの脱ガスによると見られるプラズマ密度上昇がおり、放射崩壊して放電が終了していた。第 8 サイクル(平成 16 年度)からは、アンテナやダイバータ板の温度をモニターしながら、温度上昇を抑えるように運転をおこなった。トラス内側(図 2.2-38 の Tdiv(3I-U))のダイバータ板の温度上昇を抑えるには磁気軸を 3.7m 以上にする外側シフトが有効であるが、この場合は、トラス上方向のダイバータ板の温度(Tdiv(4.5U-I))の上昇が大きく、またアンテナのサイドプロテクタの温度上昇も大きくなるため、磁気軸を 3.65m から 3.7m 近傍でスweepさせることにした。最終的には磁気軸を 3.67 から 3.7m の間で往復動作させ、スクレイプ層からダイバータに出てくる熱粒子束を分散させて温度上昇を抑えることに成功した。図 2.2-38 左下段に磁気軸の位置と右上段にダイバータ板の温度が示されているが、磁気軸のスweepにより、ダイバータ板温度の上昇が飽和していることがわかる。2 か所のダイバータ板温度の変化は磁気軸の変化と同期して位相が反転し

ており、LHD のダイバータ熱流束の空間分布がこの磁気軸変化により大きく変化していることがわかる。また、4.5U-I のダイバータ温度は NBI の入射に同期してより大きく上昇している。

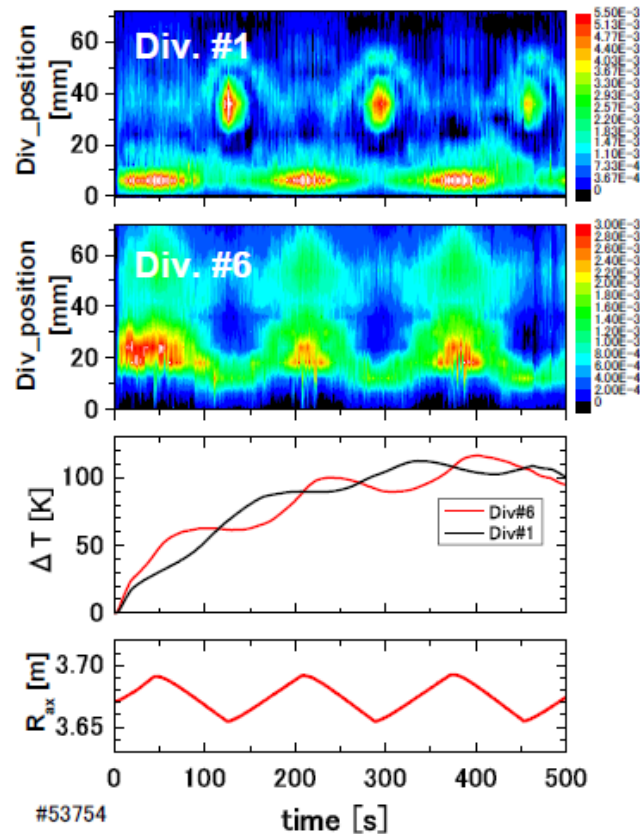


図 2.2-40 磁気軸掃引によるダイバータ熱粒子束の分散と温度上昇の抑制

3) 長時間放電のためのダイバータ板の改良と熱負荷分散および壁コンディショニング

平成16年度の第8サイクルに長時間の高入力エネルギー放電が可能となった理由として、定常加熱装置の改善に加えてダイバータ板の除熱性能の向上と熱負荷分散に成功した点が挙げられる。これには以下の3つの要素があげられる。これらの総合的な実験環境の向上により、長時間プラズマ維持が実現されたといえる。

- (1) プラズマからの熱流束を受ける受熱板を改良し、受熱板の温度上昇により大量のガスが噴出するのを防止した。温度上昇の顕著な受熱板位置に高速イオン束の集中が起きていることが粒子軌道計算との比較によって確認された。これにより、熱負荷の大きい場所を同定することができた。
 - 熱伝導率の良い高性能受熱板を一部の熱負荷の大きい位置に設置した。
 - 受熱板と冷却配管の間に、熱伝導率の良い、ガスの噴出し難いスーパーカーボンシートを挟むことにより、受熱部から冷却配管までの高熱伝導率を実現した。
- (2) 受熱板上の熱負荷が特定の場所に集中しないよう分散させ、受熱板の温度上昇により大量のガスが噴出するのを防止した。

- 受熱板にプラズマが当たるよう、閉じ込め磁場を最適化した(プラズマ主半径を 3.67m から 3.70m とした)。
- 熱負荷が分散するように、放電中、プラズマの当たる位置を時間的に変化させた(磁気軸掃引、熱負荷の大幅な分散が可能になった)。

図 2.2-40 にその実証を示す。

(3) 壁コンディショニングの手法を改善

壁調整のため、プラズマに面した壁にボロン、チタン等をコーティングし、壁から鉄などの不純物やガスが放出され難くした。

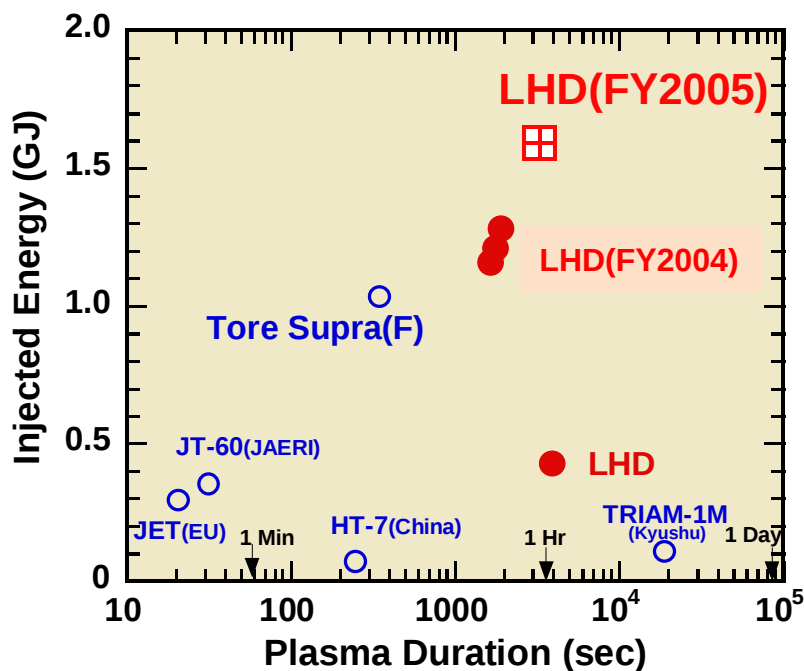


図 2.2-41 入力エネルギーとプラズマ維持時間で見た定常プラズマ達成領域

4) LHD の長時間記録の位置付け

図 2.2-38 および図 2.2-39 の長時間プラズマの入力エネルギー値はそれぞれ 1.3GJ および 1.6GJ に達した。この値は今までフランスの Tore Supra 装置が持っていたプラズマ維持世界記録 1.07GJ を上回る値になった。

図 2.2-41 に LHD とトカマク装置について、プラズマ維持時間とプラズマ入力エネルギー値のグラフを示す。図には高温プラズマを閉じ込めることのできる大型装置のデータが主に示してあり、100 秒以上のデータは LHD および超伝導トカマク装置で、数分から数時間のプラズマ維持が達成されている。JET や JT-60 のデータは高加熱入力で数 10 秒の実験である。LHD の実験データが世界の大型装置に比べても長時間運転の新しい領域に進んでいることがわかる。

今後は、より高い加熱入力で 2GJ 以上の入力エネルギー値を実現し、世界にインパクトを与えることの出来る実験をめざす予定である。

この長時間記録により、プラズマ電流を必要としないヘリカル型閉じ込め装置が、定常核融合炉へ高いポテンシャルを持つことを示すことが出来たといえる。また特筆すべきは、この実験は主にICRF加熱で実現したことである。イオンの閉じ込めに問題があると話題になり易いヘリオトロン配位で、磁場に垂直方向加速のマイノリティイオン加熱モードで、この記録を達成したことは特に意義深いものがある。

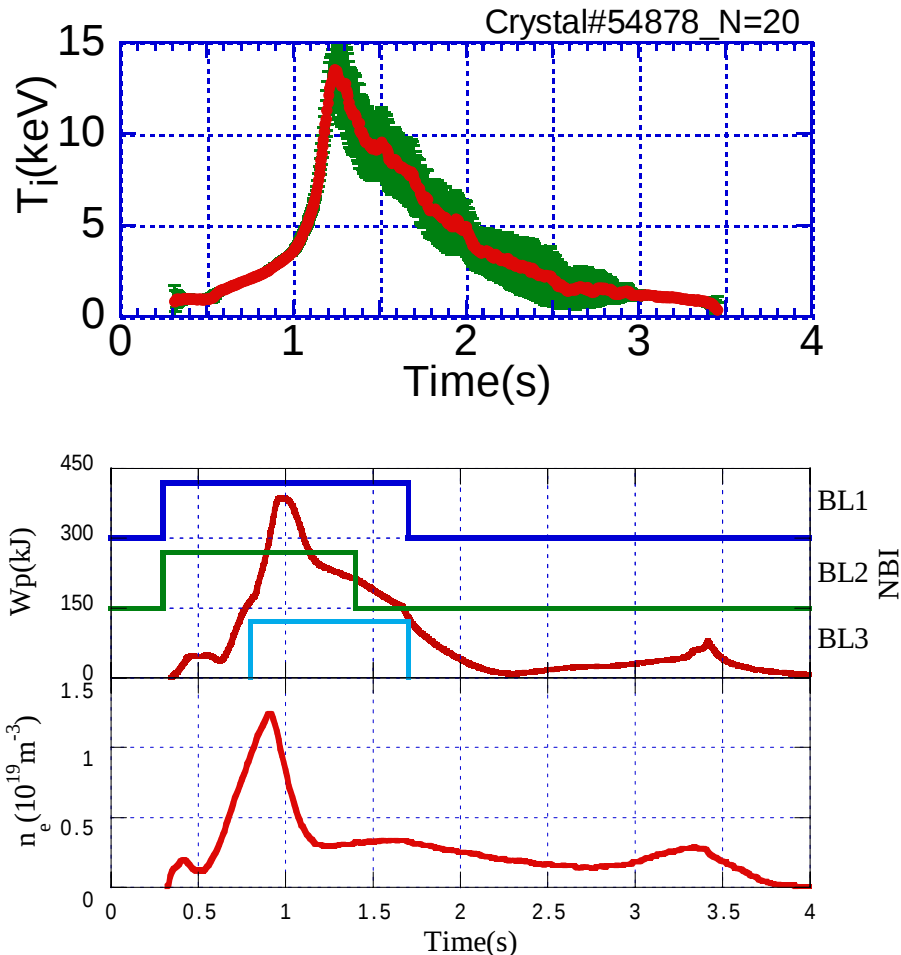


図 2.2-42 高 Z 放電による高イオン温度プラズマ生成の放電波形

2.2.6 高イオン温度

高イオン温度実験では、大電力中性粒子入射(NBI)加熱装置を用いた高イオン温度プラズマの生成、および高イオン温度プラズマの物理的特性を調べる研究を進めてきた。

高イオン温度プラズマの生成には中性粒子加熱入力パワーの増大ならびに閉じ込め性能の改善が重要になる。高エネルギービーム入射における入射ビームの透過成分を小さくし、プラズマへの加熱入力増加を狙って、アルゴン等を用いた高 Z 放電を行った。図 2.2-42 に代表的な放電波形を示す。閉じ込め磁場強度は 2.676T、磁気軸 3.7m であり、 $t=0.3\text{s}$ から NBI の入射によってプラズマを生成し $t=0.5\text{s}$ からアルゴンパフで密度を上昇させる。そして、密度の下降にともない急峻なイオン温度上昇が現れ、 $t=1.2 - 1.3\text{s}$ の間で最高イオン温度 $13.5\text{keV} \pm 2\text{keV}$ のイオン温度を達成した。また電子温度も 4keV を超えており、中心部で平