

LHD 閉じ込め研究の新しい展開  
 New Development of Confinement Study in LHD  
 LHD グループ (発表: 松岡啓介)  
 核融合科学研究所  
 LHD Group (presented by Keisuke Matsuoka)  
 National Institute for Fusion Science

LHD を用いた実験・理論研究では、炉心プラズマに外挿できるプラズマパラメータを達成し、閉じ込め改善などに関連する研究からトロイダルプラズマに普遍的な理解をもたらすことが、その使命である。現在までのパラメータの達成度は、以下のようになっている。

- 電子温度：達成度 100% (ECH による  $T_e$  1 億度達成、密度  $5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 、)
- イオン温度：達成度 50% (NBI による  $T_i$  5800 万度達成、密度  $7 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 、)
- 閉じ込め時間：達成度 100% ( $\tau = 0.36$  秒、中心温度 1.3keV、高温ととの両立)
- 三重積：達成度 25% ( $B=2.89\text{T}$  で、 $T_e(0)=T_i(0)=1.3\text{keV}$ 、 $n=4.8 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、 $\tau=0.36\text{sec}$ )
- 値：達成度 60% ( $B=0.5\text{T}$  で  $\beta < \beta_{\text{lim}}=3.2\%$  達成)
- 定常実験：達成度 <30% (ICRF により  $T_e(0)=T_i(0)=1.3\text{keV}$  で 120sec 保持)
- 磁場強度：達成度 93% ( $R=3.5\text{m}$  で  $B=3\text{T}$  達成)

物理研究では、トカマクや W7-X との比較も念頭に置く必要がある。以下に示すようなテーマにおいて成果があがり、今後とも新しい展開を図る。

### 1. 閉じ込めに関する研究

炉条件と等価な衝突頻度及び、3 倍程度の規格化ジャイロ半径を持つ無電流プラズマにおいて、閉じ込め特性はやや弱いジャイロポーム的性質を持つことが明らかになった。新古典拡散の抑制に対する磁場配位の最適化 (磁気軸の内寄せ) と異常輸送の抑制に対する磁場配位の最適化が両立する事が実験で明らかになり、スケーリング則からの予測を 50% 上回る閉じ込め性能が実証された。周辺部においてペDESTAL 構造が形成され、そこではジャイロポーム的輸送が支配的であることが分かった。トカマクでは MHD 不安定性で制限されており、差異がある。

### 2. MHD 安定性に関する研究

新古典輸送・乱流輸送を最適化した磁場配位 (磁気軸内寄せ配位) は MHD 線形安定性解析から不安定性の影響が懸念されたが、ベータ値 3% までの領域で、閉じ込めの劣化および放電を破壊するような強い不安定性が見られていない。LHD プラズマのベータが MHD 線形安定性限界を超えられることを示し、ヘリカルプラズマのベータ限界の考察に大きな影響を与えた。

### 3. 高エネルギー粒子の閉じ込めに関する研究

LHD の ICRF 加熱の成功は、ピッチ角が大きい高エネルギー粒子も新古典的理論の予想に従い、LHD 配位においても閉じ込められる事が実証され、アルファ加熱への展望を切り開いた。

### 4. 電場と閉じ込め改善に関する研究

高エネルギー電子がない NBI 加熱プラズマにおいて、イオンルートから電子ルートへの遷移現象が観測され、新古典理論の予想と一致することが確認された。さらに、正電場の形成に伴い、イオンの輸送が改善されることを確かめた。ヘリカルリップルによる損失が電場で抑制できる事が実験的に検証された。低密度プラズマの中心部に ECH の局所加熱を行うことにより内部輸送障壁が形成され高電子温度が達成された。この内部輸送障壁を伴うプラズマにおける電場分布は、中心部付近に大きな電場シアを持ち、内部輸送障壁形成の物理過程が明らかになった。電子系の内部輸送障壁のトカマクとの差異・類似性の研究は、内部輸送障壁の物理的理解に大きく貢献した。電子系内部輸送障壁形成については、理論的予測、CHS での先行実験と LHD における高加熱密度実験の実施、高精度計測の各側面からの成果が統合してその実現に結びついた。この研究成果は、学術的な研究方法があって生まれたものであり成果として特筆される。

### 5. 磁気島に関する研究

新古典テアリングモードによる磁気島の拡大が、トカマクの高 プラズマの閉じ込め性能に悪影響を与えている。LHD では、外部から加えた誤差磁場による磁気島がプラズマ内の自発的な電流によって消滅する現象 (磁気島の自己修復) が観測された。この磁気島の自己修復の物理機構に関する知見は今後重要となるであろう。磁気島内で、ポテンシャル分布を計測した結果、磁気島の幅が小さい時には、磁気島内にプラズマ流はなく、ポテンシャル分布は平坦であるが、磁気島の幅が大きくなると、磁気島境界部の粘性により磁気島内のプラズマ流が発生し、ポテンシャルの自律形成が促されていることが分かった。高温プラズマの特徴である構造の自律形成に関する物理を進展させた。磁気島内のパルス伝播の速度が磁気島外に比べ 1 桁程度遅いことが観測された。磁気島内の温度分布は平坦化されているが、これはトポロジーによるもので、熱輸送係数は磁気島外に比べ 1 桁も小さいということがわかった。磁気島内では圧力勾配による揺動と輸送が存在しないので、磁気島内外の輸送の比較は輸送の中で圧力勾配によるものを分離研究することになり、乱流輸送解明に新しい知見を与えるものと期待される。TESPEL による磁気島観測及び ECE との組み合わせによる過渡応答計測に基づく熱輸送係数の導出などを今後行う。

### 6. 密度限界に関する研究

ヘリカルプラズマはトカマクよりも高い密度限界を持つが、LHD での密度限界は非対称な放射崩壊がきっかけとなる事が示された。