

デタッチは  $t = 1.3$  秒までに完了しており、その後は加熱 NBI が停止するまで ( $t = 3.3$  秒) ガスパフ無しでデタッチを維持している。デタッチしているかどうかはダイバータ上のイオン飽和電流  $I_{sat}$  をモニターすることで判別するが、これは  $H\alpha$  信号とほぼ同じ振舞いをしているため、図には示していない。大流量ガスパフによって、まず  $\rho=0.9$  における周辺密度  $n_{e09}$  が増大し(ホロー分布)、その後数百 ms の時定数で中心密度も増大して ( $t = 1.3 \sim 2$  秒)、最終的にはフラットな密度分布が形成される。デタッチ中 ( $t = 1.3 \sim 3.3$  秒)、 $\rho=0.9$  における周辺部の密度と温度 ( $n_{e09}$  及び  $T_{e09}$ ) は定常的に保持されている。デタッチ時の  $H\alpha$  信号は、アタッチ時と比較して半分以下に減少しており、この時イオン飽和電流  $I_{sat}$  は数分の 1 以下になっている。また、周辺部が低温であることを反映して CIII の発光強度も大きい。デタッチ時の蓄積エネルギーは、アタッチ時と比較して低い。デタッチ時の蓄積エネルギー低下の第一要因として挙げられるのは、電子圧力分布がデタッチ時に縮んでいるということである。アタッチ時 (1.0 s 及び 1.2 s) の電子温度分布は、 $\rho = 1$  まで広がっているのに対し、デタッチ時 (1.5 s 及び 3.0 s) の電子温度分布は  $\rho = 0.9$  程度までしか広がっていない。この位置における回転変換は 1 であり、縮んだプラズマ柱の半径が有理面と関係して離散的に決まる可能性を示唆している。デタッチプラズマのエネルギー閉じ込めを改善し、高蓄積エネルギーと高密度を同時に、かつ安定に維持することが今後の課題であると同時に、これらのプラズマは過渡的に捉えられてきた放射崩壊の過程を調べる新たな実験対象として期待される。

#### 2.2.4 高ベータ領域の拡大および MHD 特性

LHD においてベータ値は確実に進展し、平成 18 年度の実験までに体積平均ベータ値は 5.0% に達した。この間の推移を図 2.2-27 に示す。

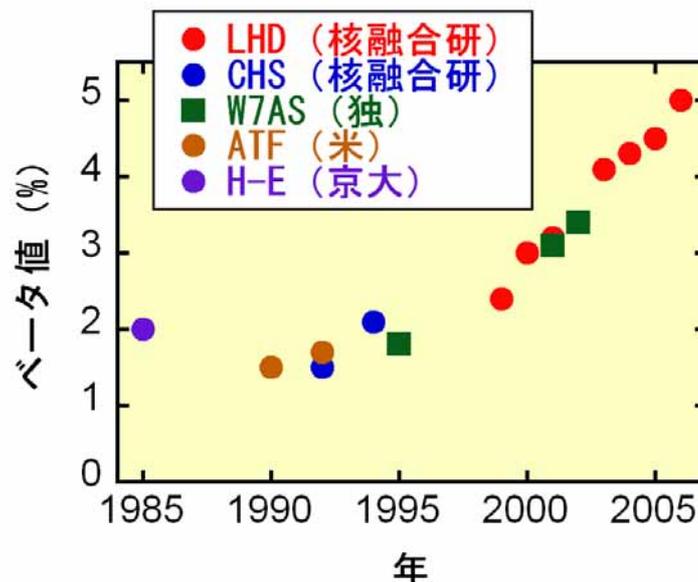


図 2.2-27 ヘリカル系装置実験における達成ベータ値の推移。

LHD の高ベータ実験において最も顕著な発見は磁気丘における MHD の安定性が交換型線形安定性理論を越えたところでも確保できることを示したことである。磁気軸を内寄せに

すると前述したように新古典輸送と異常輸送がともに抑制され、優れた閉じ込め特性を得ることができるが、この配位では磁気丘が強調され、MHD 安定性が破れることが懸念された。理想線形 MHD 理論は理論としての完成度が高く、また、トカマクの運転領域を予測することに実際、非常に高い精度を示していた。これに対して、LHD の無電流プラズマでは図 2.2-28 に示すように、メルシェ条件が破れたところでもプラズマは崩壊することなく、その不安定領域を通過して圧力を高めていくことができた。これは、線形 MHD 理論モデル自体の飛躍と非線形飽和の検討を強く喚起するものである。この発見によって、良好な閉じ込め状態と MHD 安定性を両立することができ、5.0%に象徴される高ベータプラズマが得られた。

さらに、コア部は高ベータによるシャフラノフシフトが磁気井戸を自発的に作り、これによって、交換型不安定性に対して安定な状態(第2安定領域)を実現した。図 2.2-28 に、この機構によってコア部に共鳴を持つ  $m/n=2/1$  モードが完全に抑制されることが示されている。

磁気軸の内寄せに加えて、プラズマの高 化を目指すには、MHD、輸送特性及び加熱吸収特性に対する磁場配位の最適化が重要となった。LHDにおける磁場配位は、磁気軸位置、磁場強度、プラズマのアスペクト比等を制御することにより幅広く変化させることが可能であり、これまでの実験で得られた知見および理論的予測から高 プラズマ生成に最適な磁場配位を見出す必要があった。最適な磁気軸位置については、これまでの実験及び理論計算により(1)輸送特性(新古典輸送):  $R_{ax} = 3.53m$ (計算)、(2)加熱吸収効率:  $R_{ax} = 3.6m$  近傍、(3)MHD安定性:  $R_{ax} > 3.5m$ 、との知見が得られている。(3)については、 $R_{ax} = 3.5m$  配位において閉じ込めに影響を与えるコア領域のMHDモードが観測されており、磁気井戸形成による安定化が困難であると予測されるためである。 $R_{ax} = 3.6m$  では、コアMHDモードは高 領域で安定化されることを確認している。結果として  $R_{ax} = 3.6m$  近傍で、かつ磁気軸シフトを可能な限り抑制することがプラズマの高 化に望ましいことから、ヘリカルコイルのパラメータである  $\alpha$  値を下げる(アスペクト比を上げる)ことにより自発的なシフトを制御することとした。ここで、 $\alpha$  は  $M/n \cdot a_c/R$  で定義されるヘリカルコイルのピッチパラメータであり、 $M$  と  $n$  はそれぞれコイルの周期数と極数(LHDは  $M/n=5$ )、 $a_c$  と  $R$  はそれぞれヘリカルコイルの小半径と大半径である。LHDは3層のヘリカルコイルを持つことから、その電流分布を制御することにより、実効的に小半径  $a_c$  を変えることができる。結果としてプラズマのアスペクト比を制御することが可能である。

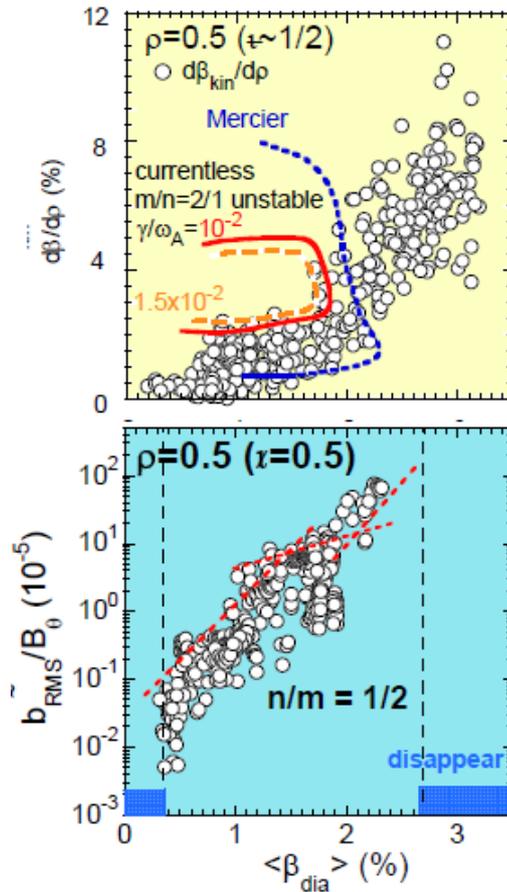


図 2.2-28  $\iota \sim 1/2$  にほぼ対応する  $\rho=0.5$  での圧力勾配および  $n/m=1/2$  モードの磁場揺動のベータ依存性。

図 2.2-29 に示すように、広範なアスペクト比  $A_p$  の比較を行い、 $A_p=6.6$  において、最大のベータ値が得られた。この時、図 2.2-30 に示されるように磁気軸のシフトが抑えられ、その結果として、図 2.2-31 に示されるように、ベータ値が上昇したときの加熱効率の劣化が抑えられている。アスペクト比がさらに大きくなるとベータ値は減少し始める。アスペクト比が大きくなるとシャフラノフシフトが抑制されて磁気井戸の生成が効率良く行われなるとともに、最も低次の共鳴を持つ  $m/n=1/1$  モードが磁気シアの弱い中心領域へ移動していく。結果として、このモードが大きく成長することにより、閉じ込めの劣化が発生する。

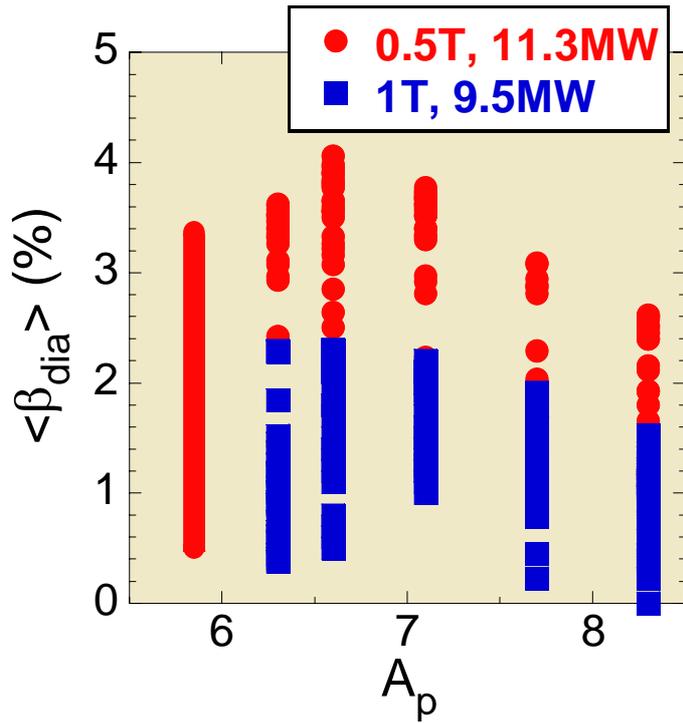


図 2.2-29 達成ベータ値のアスペクト比依存性。

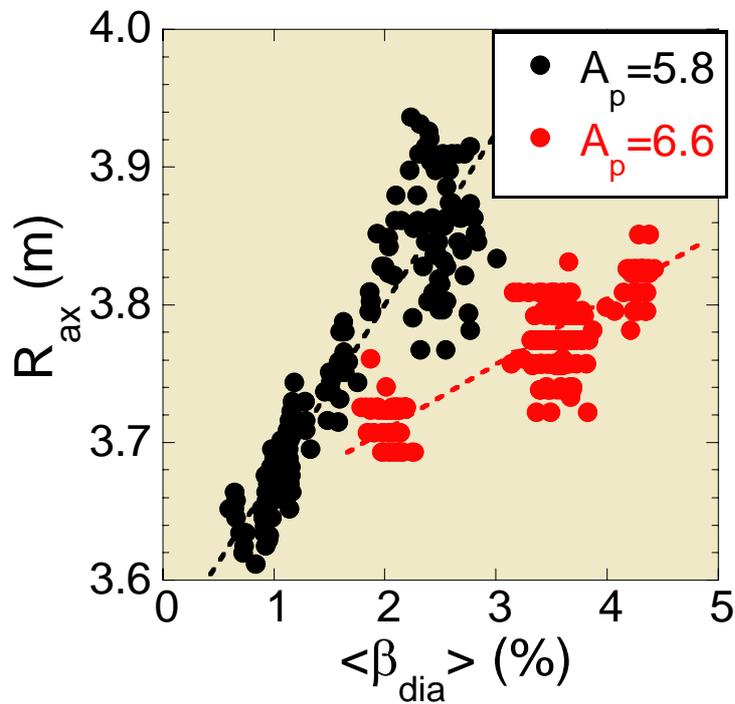


図 2.2-30 異なったアスペクト比での有限ベータ効果による磁気軸のシフト(シャフラノフシフト)。

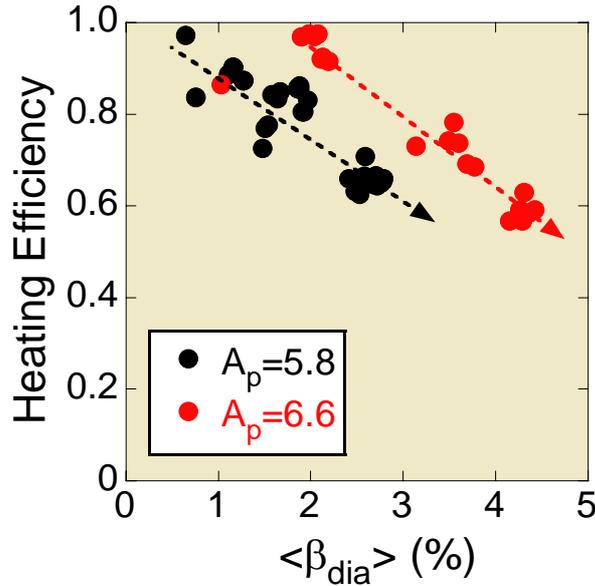


図 2.2-31 異なったアスペクト比での NBI 加熱効率のベータ値依存性。

図 2.2-32 に典型的な高ベータ放電を示す。4%を越えるベータ値がエネルギー閉じ込め時間の50倍以上維持されており、これは加熱パワーの維持時間によって制限されている。 $m/n=1/1$ より内側の共鳴を持つモードは安定化されており、観測される磁場揺動はプラズマ端部に共鳴するものに限られている。これらの領域では強い磁気シアによって理想モードは安定であり、観測されている揺動は抵抗性モードであると判断される。

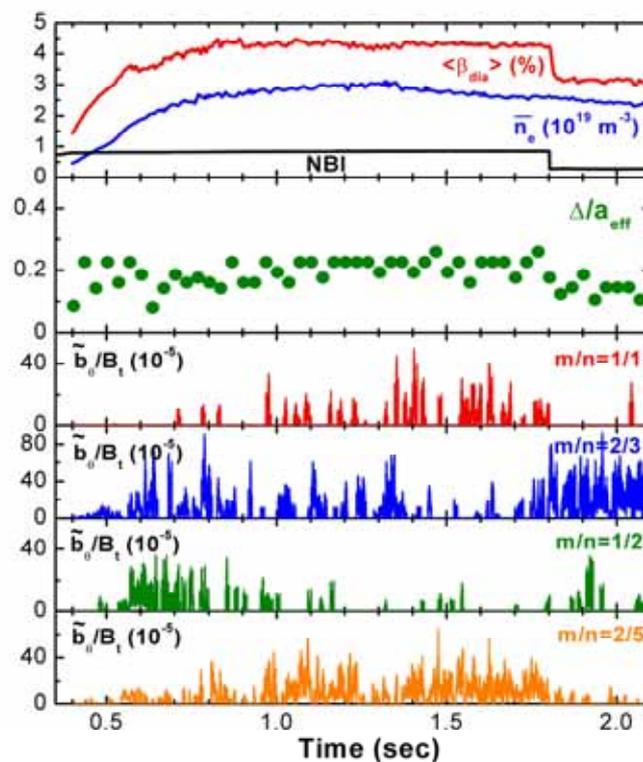


図 2.2-32 ベータ値が4%を越える典型的な放電波形

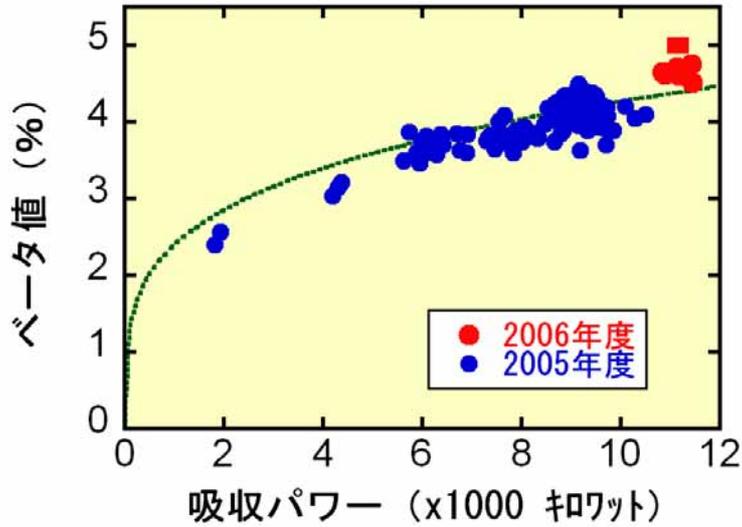


図 2.2-33 達成ベータ値の NBI 加熱パワー依存性

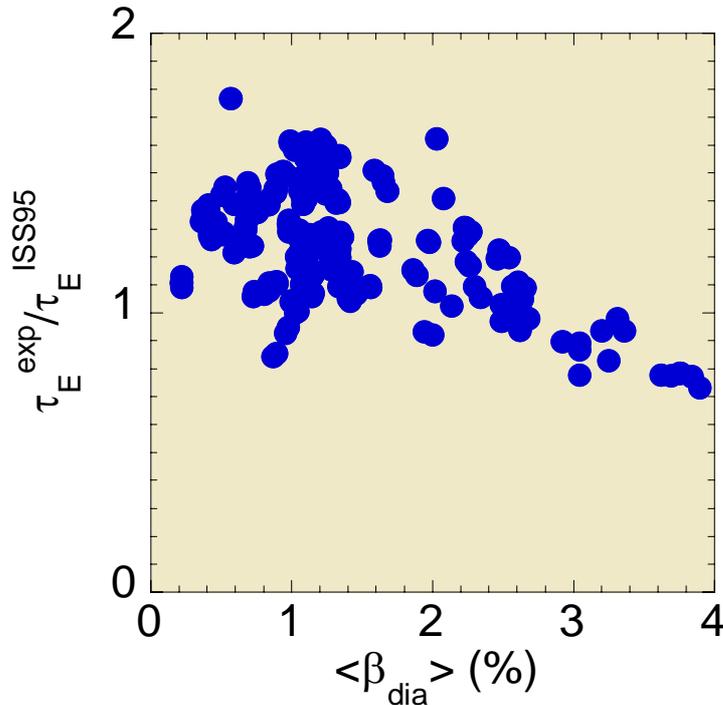


図 2.2-34 エネルギー閉じ込め時間の改善度のベータ値依存性

ベータ値は図 2.2-33 に示されるように、加熱パワーの増加によって上昇しているが、高ベータ領域では加熱パワーの0.25乗程度とスケーリング則から期待される0.4乗程度からの劣化が見られる。実際、エネルギー閉じ込め時間は図 2.2-34 に示されるように、スケーリング則に比して緩やかに劣化している。この劣化の原因として、一つは図 2.2-35 に示されるように、シャフラノフシフトがもたらす実効ヘリカルリップルの増大が考えられる。異常輸送が実効ヘリカルリップルと相関のあることは前述したとおりである。ベータ値の上昇は与えられた加熱パワーに対して密度の上昇によって得られているが、この高密度に伴う閉じ込めの劣

化が二つ目の原因に考えられる。前者はベータ値上昇に合わせた垂直磁場の制御により磁気軸を戻すことによって、改善されることが予想され、近い将来に実施する電源増強後の実験が期待される。

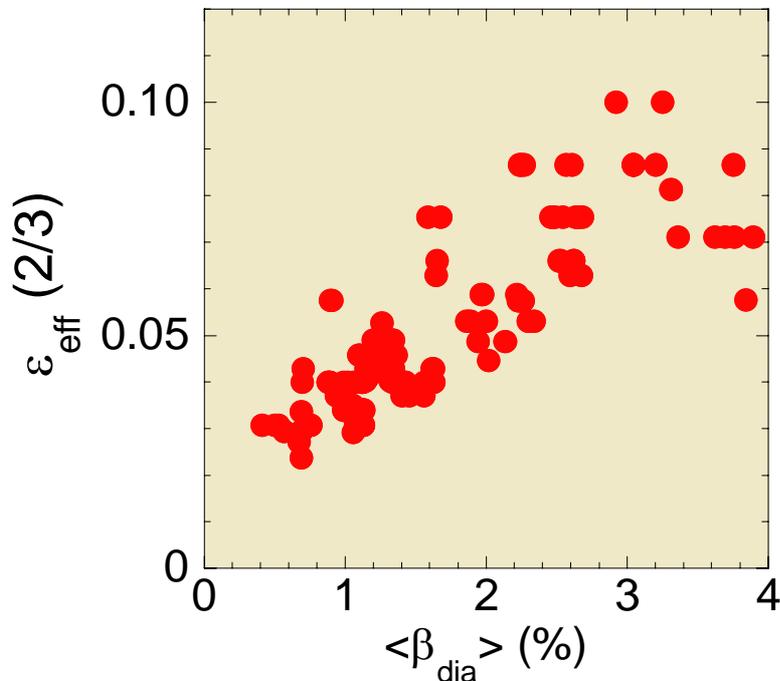


図 2.2-35 実効ヘリカルリップル( $\rho=2/3$  で評価)のベータ値依存性。

MHD に関わる物理実験課題は多岐にわたっているが、大きくまとめると、(1)配位の閉じ込め性能への影響、(2)MHD 不安定性の閉じ込めへの影響、(3)MHD 平衡同定法の探求、(4)トロイダル電流の特性評価に分けられる。

(2)では回転変換を上げる方向(順方向)のトロイダル電流が大きくなった場合に  $m/n=1/1$ 、 $2/2$ の磁気揺動モードが発現し、 $m/n=1/1$ モードの磁気揺動がバースト状に増大し、電子温度の急激な減少が起こり、電子温度減少後、輸送のタイムスケールでプラズマエネルギーが回復していく様子が観測され、理論予測との比較検討を進めた。逆に回転変換を下げる方向に最大 1T あたり 100kA を超えるプラズマ電流を流す放電を行った。そして、低回転変換時に予測される大きなシャフラノフシフトに付随する深い磁気井戸と強い磁気シア配位の実現による高安定性と高閉じ込め領域の探索、トカマクと類似の電流ホールの安定性と閉じ込めに共通する物理機構の解明、 $\neq 0$  共鳴面に関連した磁気島形成の研究を行った。MHD 平衡の特定には回転変換分布の同定が重要であることから MSE による計測も行った。また、より電流分布を尖塔化させる試みとして ECCD も印加した。 $\neq(0) \sim 0$  が期待される  $-130\text{kA/T}$  を実現したが、大きな不安定性は観測されなかった。一方、周辺 MHD モードの安定化や周辺での輸送障壁、 $m/n=0/0$  揺動等が観測された。

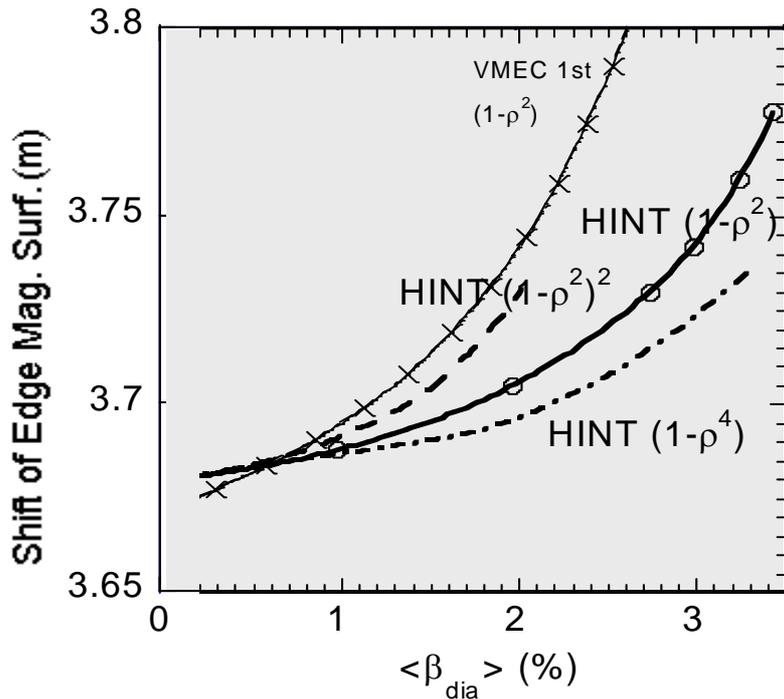


図 2.2-36 最外殻磁気面中心の有限ベータ効果によるシフト

(3)については、MHD 安定性解析と 1 次元輸送解析と基礎となる平衡配位の再構成の検討が進んだ。MHD 平衡は圧力分布、電流分布、境界条件が決まれば、一意に決定されることが知られているが、対称性のない 3 次元の磁場配位では数学的な意味での厳密な磁気面の存在が保証されておらず、MHD 平衡解を得るにはプラズマ境界の決め方や磁気面の存在の有無等の何らかのモデルを仮定する必要がある。特に LHD では周辺部のエルゴディック層の役割や磁気島の発生やヒーリングもあって境界条件の設定が難しい。計測結果と矛盾のない有限ベータでの周辺磁気面シフトの理論モデルの構築を目的とし、分布計測、平衡計測データと理論予測の比較を行っている。図 2.2-36 は  $R_{ax}=3.6\text{m}$ 、 $B_q=100\%$ 、 $\gamma=1.254$  配位における電子温度分布から評価した周辺磁気面のシャフラノフシフトと理論予測(VMEC、HINT)の比較結果である。入れ子状の磁気面をア priori に仮定することが必要な VMEC コードとその仮定を必要としない HINT コードで理論予測値に違いがあるが、これはプラズマ境界の決め方や磁気面の存在の有無等の仮定が異なっているためと考えられる。現在のところ HINT コード予測の方が実験結果との矛盾が少ないが、これらを確認するために圧力分布や電流の効果も含めた平衡解析を行っている。また、圧力の非等方度のサドルループ測定による定量的評価に向けた検討が進んだ。MSE による磁力線ピッチ変換の測定から相対的な変化を評価することによって回転変換と結び付けられ議論できるようになってきた。例えば、上で述べた大きな  $Co$  方向のトロイダル電流による大きな MHD 不安定性が起る場合と起らない場合の回転変換の違いが示され、電子温度分布の平坦化の位置と MSE 計測による有理面の位置に整合性のあることが確認された。