

この磁場配位依存性を表す物理量は未だ同定されていないが、磁場配位による差異が実効ヘリカルリップル ε_{eff} と良く相関していることが示された。図 2.2-13 が LHD のデータについてであり、ほぼ ε_{eff} の-0.4 乗の依存性が見られる。さらに図 2.2-14 は国際ステラレータデータベースに登録された多様なヘリカル系実験と比較したものである。データのばらつきはあるがその上限の包絡線は明確な ε_{eff} 依存性を示している。

ここで、注意すべきことは、中型装置においては衝突頻度の高いデータが多いこと、LHD では磁気軸内寄せによって新古典輸送は克服されていることから、ヘリカル系の閉じ込めは新古典拡散ではなく、異常輸送が支配的であることである。そして、注目すべきことは、新古典拡散自体による輸送が本質的でないにも関わらず、エネルギー閉じ込めおよび熱輸送が実効ヘリカルリップルの大きさと相関していることである。これは実効ヘリカルリップルの低減が異常輸送の抑制に関連していることを示唆している。この相関は、偶然の符合ではなく、その物理機構をつなぐものがあるという作業仮説に基づき、流れによる異常輸送の低減などの検討を進めている。これによって、磁場のリップル構造が環状プラズマの閉じ込めに与える影響を普遍的に定式化し、ヘリカル系の閉じ込め最適化の指導原理を確立できる可能性がある。



図 2.2-15 摂動磁場コイル(ローカルアイランドダイバータコイル)

2.2.3 高密度および閉じ込め改善

ローカルアイランドダイバータ(LID: Local Island Divertor)は強力な周辺粒子排気等、物理設計で期待された基本性能を有し、周辺プラズマ制御に有用であることが示された。この結果をもとに、LIDによる閉じ込め改善を達成すべく実験を行ってきた。図 2.2-15 に示すように、LHD は閉じ込め磁場を形成する超伝導コイルの他に上下10対の常伝導の摂動磁場コイル(ローカルアイランドダイバータコイル)を有している。これによって周辺部での $m=1/n=1$ 共鳴面を活かし、図 2.2-16 に示すような磁気島を発生させることができる。この磁気島内に

図 2.2-17 に示すダイバータヘッドを挿入し、粒子束を磁気島のセパトリックスを利用してダイバータヘッド裏面へ導くことができる。ダイバータヘッドは図 2.2-18 に示すように排気ダクト (baffle) に囲われており、ダイバータヘッド裏面でリサイクルした中性粒子は主プラズマへ戻りにくく、排気チャンバへ流れ込む。排気チャンバにはクライオポンプが設置され、排気速度は約 $200\text{m}^3/\text{s}$ であり、 $20\text{Pam}^3/\text{s}$ 以上の排気粒子束が得られている。

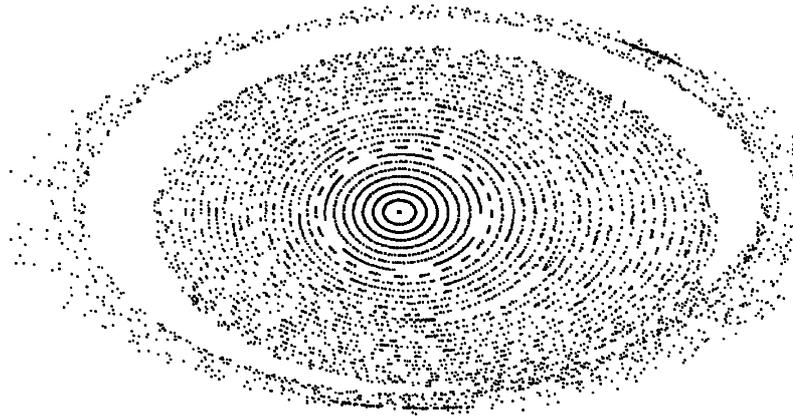


図 2.2-16 ローカルアイランドダイバータコイルによって生成される $m/n=1/1$ 磁気島

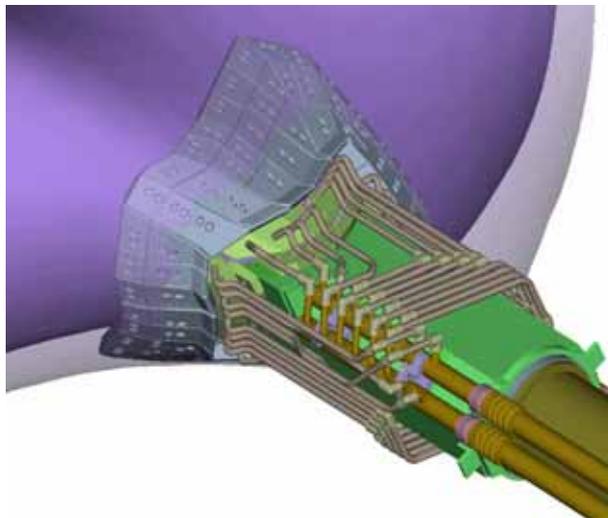


図 2.2-17 ローカルアイランドダイバータヘッドの磁気島への挿入

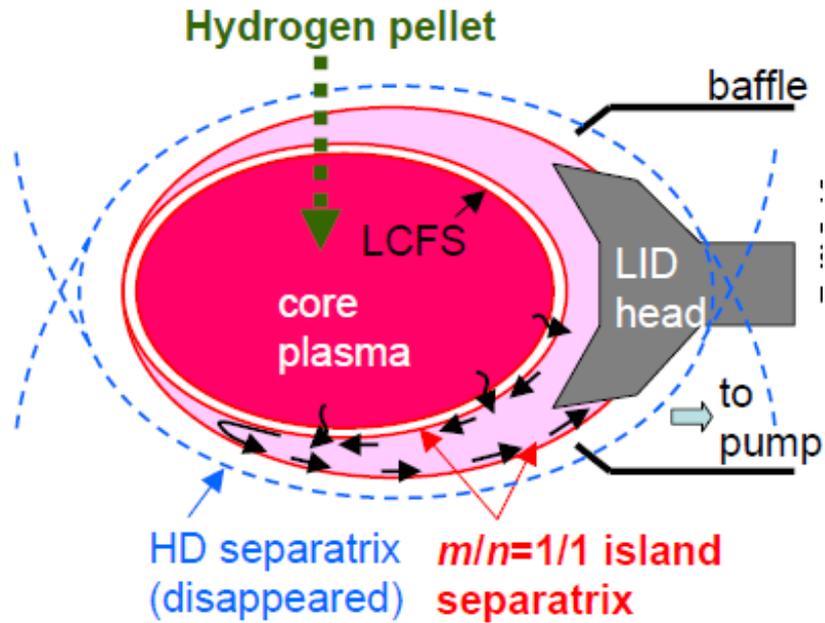


図 2.2-18 ローカルアイランドダイバータ運転の概念図

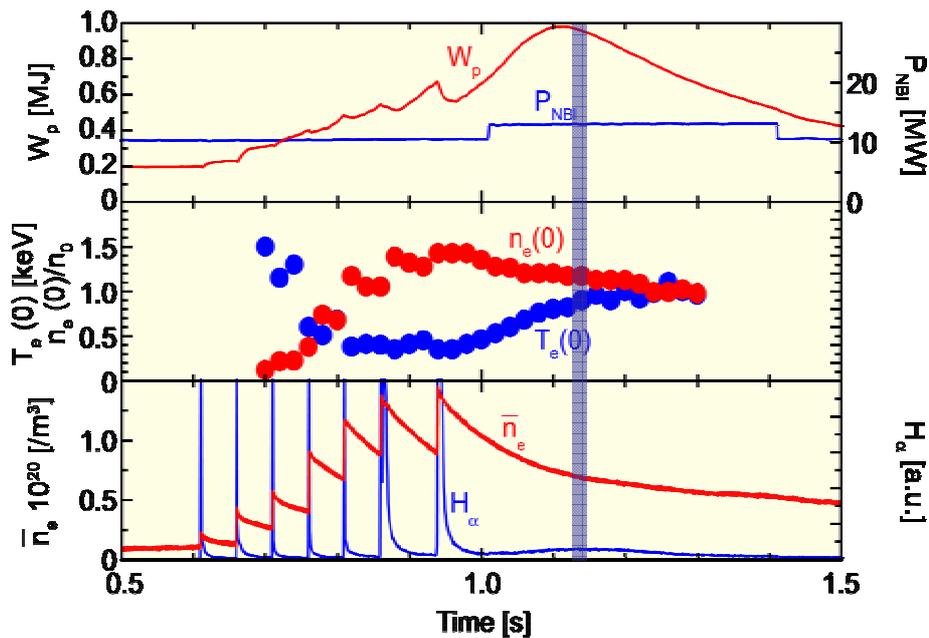


図 2.2-19 内部拡散障壁(IDB)の形成を伴う典型的な放電波形

LID 配位では、その良好な粒子制御性により、リサイクリング率の極めて低い状況を実現することが可能である。図 2.2-18 に示すように、この状態において固体水素ペレット入射によってプラズマコアに直接燃料供給を行う(放電波形を図 2.2-19 に示す)と、図 2.2-20 に示すような急峻な密度勾配を伴った中心密度が $5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ に達する高密度プラズマを得ることができた。このような密度勾配を持つプラズマは、粒子拡散が著しく抑制されており、内部拡散障壁(Internal Diffusion Barrier、IDB)と呼ばれている。

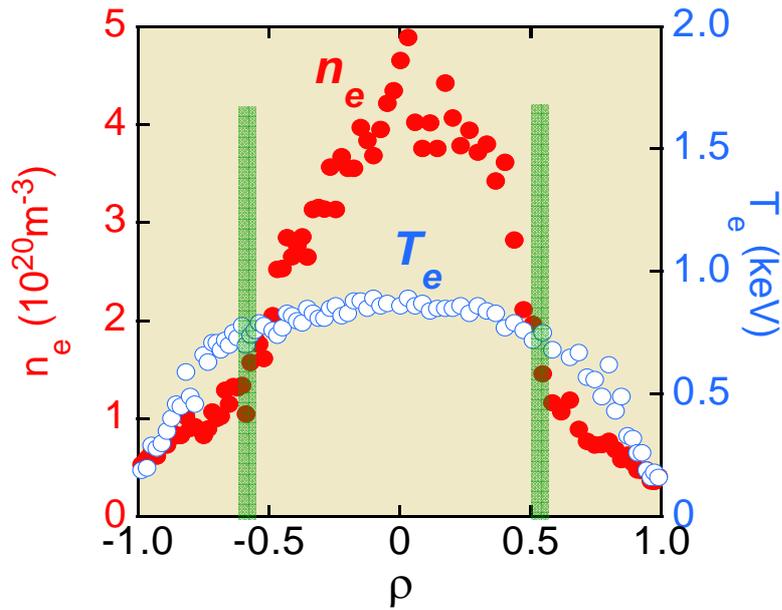


図 2.2-20 IDB(内部拡散障壁)プラズマの典型的な電子密度、電子温度分布

IDBを持つプラズマは運転領域が高密度側へ大きく拡大されており、ISS95 則で表現されるような密度依存性が保持されている(図 2.2-21)。さらにこの IDB プラズマは巨視的なエネルギー閉じ込め時間においても優れた性能を示している(図 2.2-22)。これらによって、核融合三重積の最高値 $4.4 \times 10^{19} \text{m}^{-3} \text{skeV}$ が達成された。高い中心密度の達成により、中心ベータ値は高い磁場(2.64T)にも関わらず 4.4%に達している。

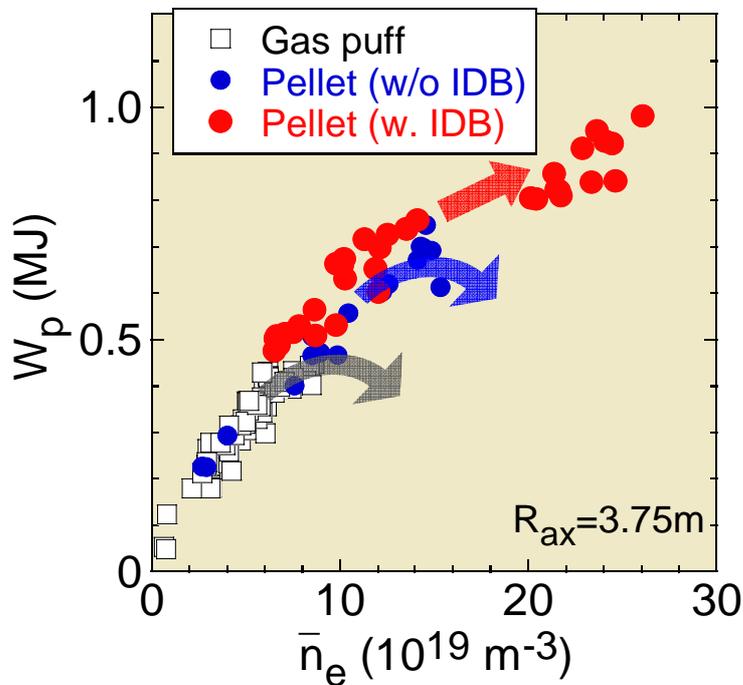


図 2.2-21 ガスパフ、ペレット入射、IDB プラズマの蓄積エネルギー (W_p) の密度依存性

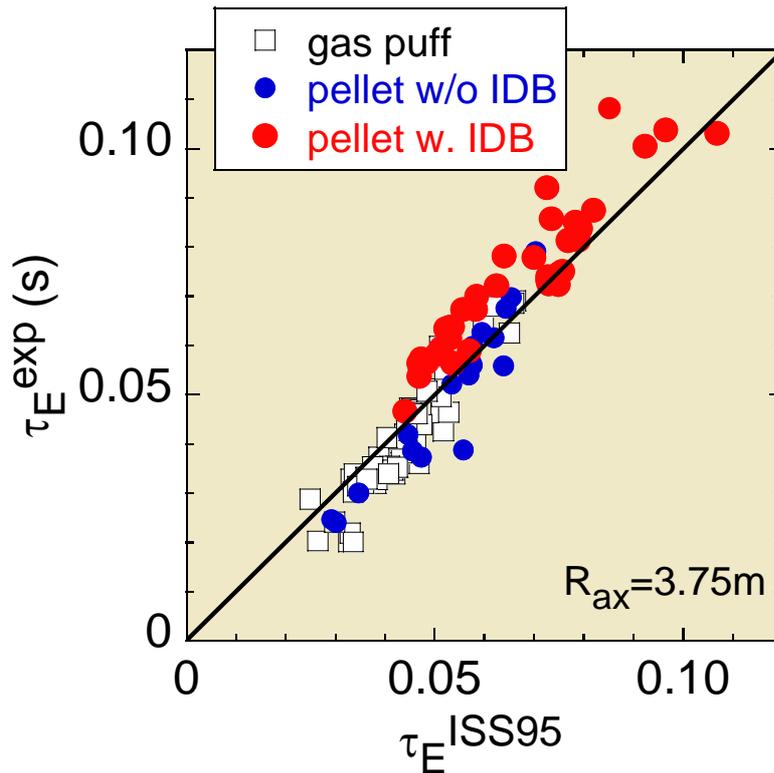


図 2.2-22 ガスパフ、ペレット入射、IDB プラズマのエネルギー閉じ込め時間の ISS95 則との比較

この IDB に伴って生成される超高密度プラズマは、これまでの比較的低密度なプラズマでの核融合炉設計に新しいシナリオを与える。トカマクでは高密度でのディスラプションや閉じ込め劣化、および電流駆動の必要性から、このようなシナリオを取れない。高密度運転はエロージョンなどの工学的要請を劇的に軽減でき、衝突頻度もプラトー領域となるため、ヘリカル系特有の新古典拡散の懸念もなくなる。ヘリカル系はこれまでも密度限界が高いなど、高密度での運転に有利とされていたが、IDB の発見はこの特長をさらに伸長させるものである。

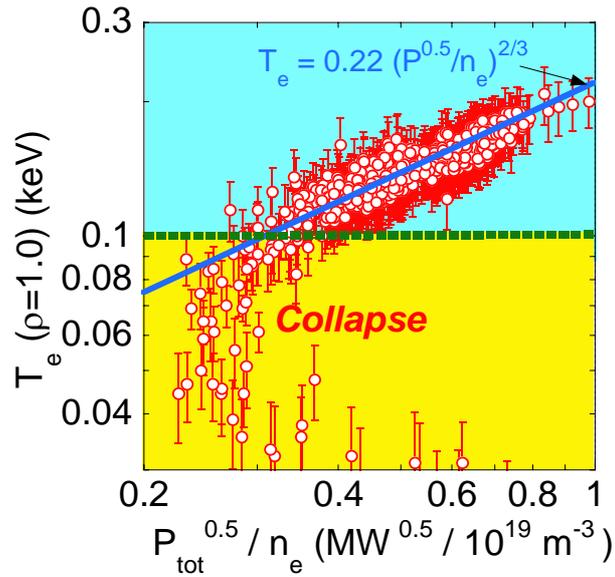


図 2.2-23 最外殻磁気面での電子温度の加熱パワーおよび周辺電子密度に関する依存性。

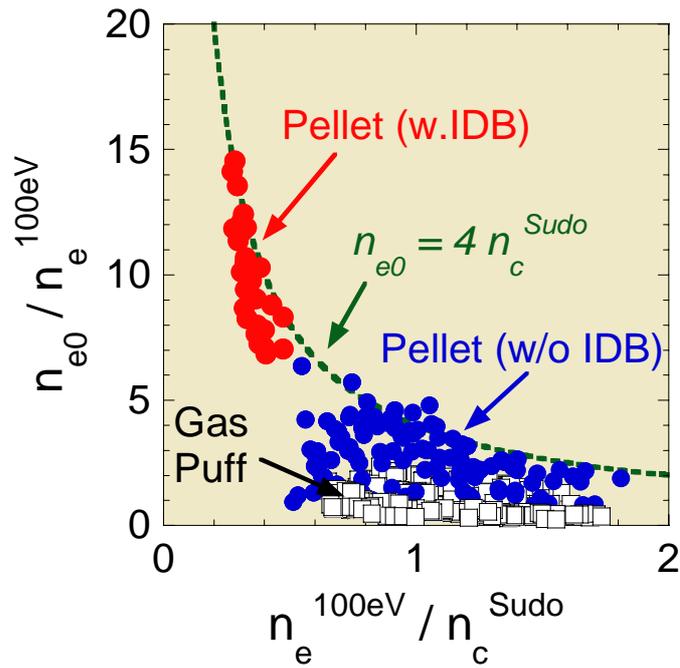


図 2.2-24 電子温度が 100eV となる周辺密度に注目した分布の尖塔化度と須藤密度限界で規格化した運転範囲。

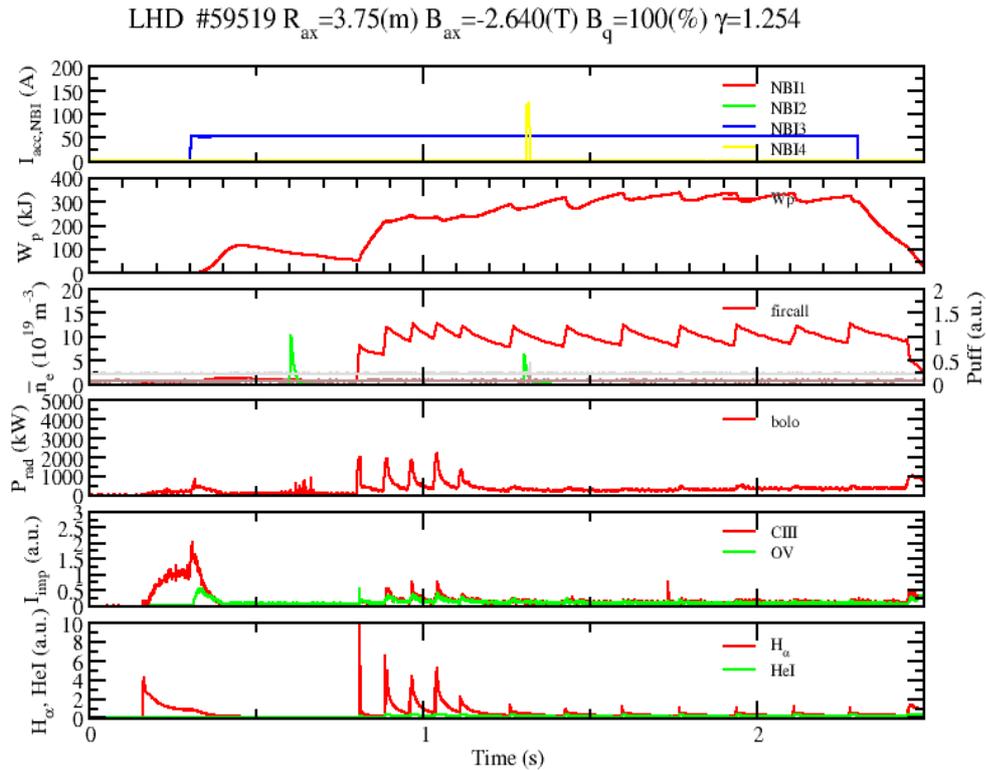


図 2.2-25 連続ペレットによる IDB プラズマの維持。

密度限界については、後述するような多様な条件において、100eV まで電子温度が下がる場所での密度が重要であることが見出されている。図 2.2-23 に示すように、周辺部の温度は $P^{0.5}/n_e$ でスケールすることができ、100eV を切った辺りから物性が変化し、急激に温度が下がり、放射崩壊に至る。IDB プラズマの運転領域を密度分布の尖塔度と須藤密度限界で規格化した密度で示したものが図 2.2-24 である。このように、IDB プラズマでは密度分布が大きく尖塔化しており、その中心密度が須藤密度限界の4倍に達しているが、周辺部の密度は低く抑えられているため、通常のプラズマに比して密度限界に対してまだ余裕があると言える。

IDB の維持には固体水素ペレットによる中心補給が欠かせないが、図 2.2-25 に示す通り、連続ペレット入射によって準静的に IDB 状態を維持することに成功している。

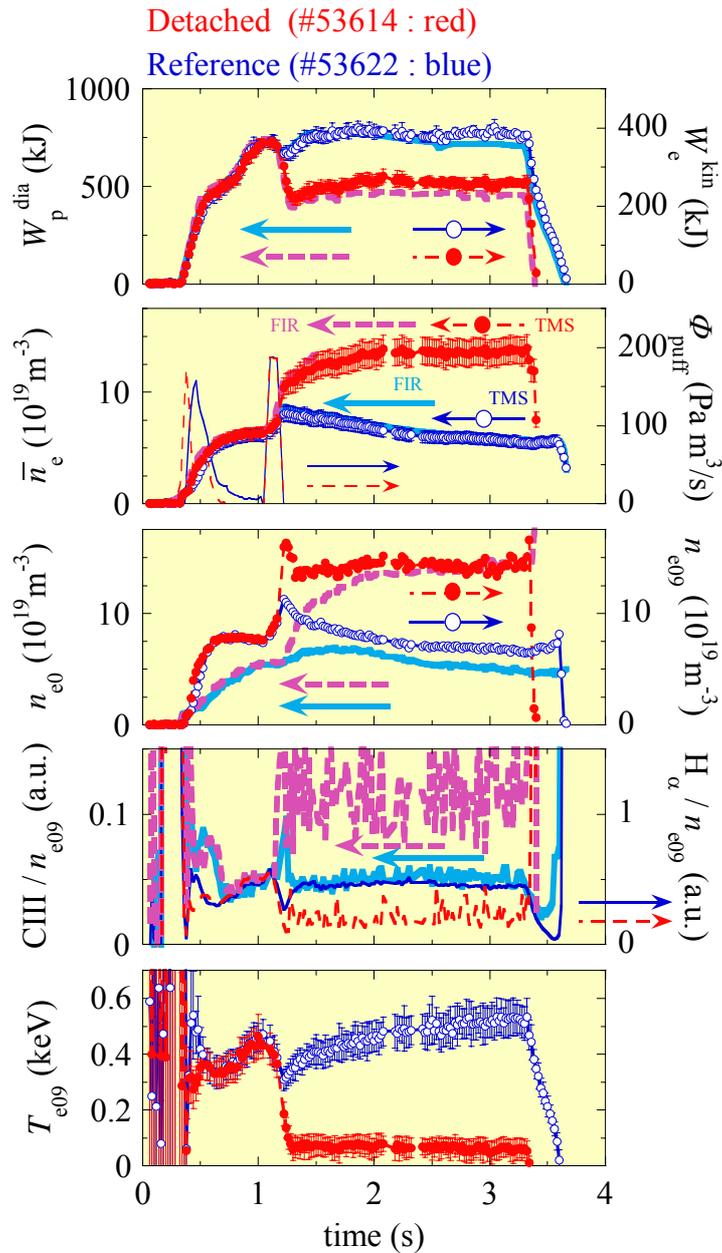


図 2.2-26 準静的なデタッチ放電の波形 (赤線)。青線はデタッチを生じなかった参照放電波形。

この IDB に代表されるように、LHD では既に平均プラズマ密度で $3 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ を越える高密度プラズマが得られている一方、真空容器の高磁場側に取り付けた大流量のガスパフによる周辺プラズマの冷却条件を探り、プラズマがダイバータから離れたいわゆる「デタッチ」状態を準静的に維持できる条件を見出した。典型的な放電例を図 2.2-26 に示す。デタッチした放電(#53614、赤色)とデタッチしなかった放電(#53622、青色)を重ねて示している。ガスパフの密度フィードバックにより、 $t = 1$ 秒までに $\sim 6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ とした後、1 秒からの大流量ガスパフ(約 $190 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)によりデタッチさせている。この場合は両放電とも同じ大流量ガスパフであるが、フィードバック時の密度が若干低い #53622 ではデタッチしていない。#53614 で、

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 ne_{09} 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 (ne_{09} 及び Te_{09}) 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。

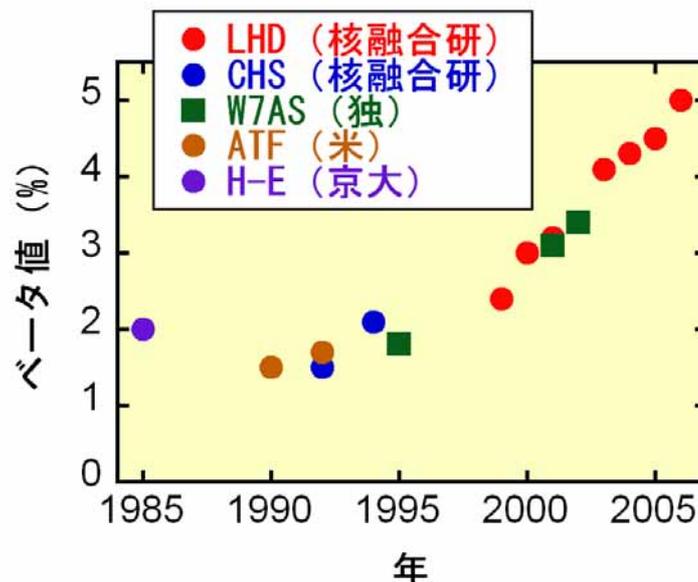


図 2.2-27 ヘリカル系装置実験における達成ベータ値の推移。

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