

図 2.2-3 核融合三重積と放電時間平面上で表したプラズマ性能。緑の点線は大型トカマク等、LHD 以外の実験で達成された範囲を示す。

以下に重要課題についての成果を述べる。

2.2.2 エネルギー閉じ込め時間と熱輸送

ヘリカル系無電流プラズマの巨視的な閉じ込め、すなわちエネルギー閉じ込めについては、LHD 以前に中型装置実験からのデータベースに基づき、国際ステラレータスケールング 95 則 (International Stellarator Scaling 95, ISS95 と略す)

$$\tau_E^{ISS95} = 0.079 a^{2.21} R^{0.65} P^{-0.59} \bar{n}_e^{0.51} B^{0.83} t_{2/3}^{0.4}$$

が国際共同研究によって、提唱されていた。ここで τ_E^{ISS95} はスケールング則から予想されるエネルギー閉じ込め時間(秒)、 a 、 R 、 P 、 \bar{n}_e 、 B 、 $t_{2/3}$ はそれぞれ、小半径(m)、大半径(m)、吸収加熱パワー (MW)、線平均密度 ($10^{19}m^{-3}$)、磁場 (T)、規格化小半径が 2/3 の場所で評価した回転変換である。このスケールング則は閉じ込め物理の重要な要素となると考えられる無次元量、規格化ジャイロ半径 ρ^* 、衝突頻度 ν^* 、ベータ値 β で書き換えることができ、ボーム閉じ込め時間を τ_B とすると $\tau_B \rho_*^{-0.71} \beta^{-0.16} \nu_*^{-0.04}$ となる。規格化ジャイロ半径への依存性が -1 乗に近く、微視的乱流が支配するジャイロボーム型の輸送であると性格づけすることができる。この依存性はトカマクとも、H-mode スケールング則 (IPB98(y,2)) に見られる共通性がある。

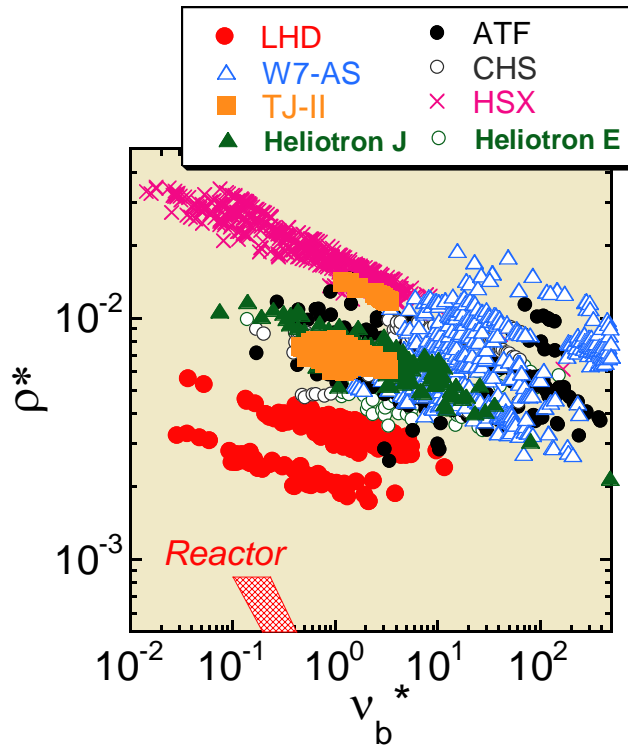


図 2.2-4 規格化ジャイロ半径 ρ^* と衝突頻度 ν_b^* で示したヘリカル系実験のデータ範囲。

LHDはそれまでの中型装置から核融合炉条件に向かって、無次元物理量として、数倍の進展を示した。規格化ジャイロ半径とバナナ軌道のバウンス周波数で規格化した衝突頻度で表した図を図 2.2-4 に示す。LHD のデータを含めたデータベースから得られる知見については後述するとして、LHD 実験で得られたエネルギー閉じ込め時間と熱輸送についてまず述べる。

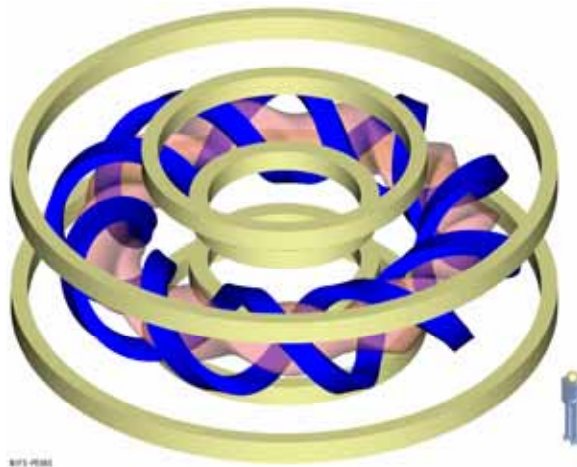


図 2.2-5 LHD の超伝導コイル。

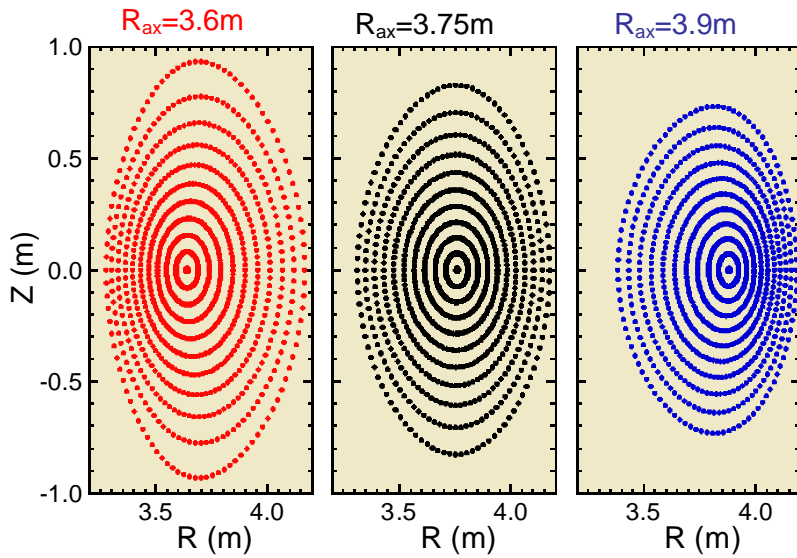


図 2.2-6 LHD の磁気面構造例。内側と外側にヘリカルコイルがくる、いわゆる縦長断面位置での磁気面。

LHD は図 2.2-5 に示すように1対のヘリカルコイルに加えて上下3対のポロイダルコイルを有している。これによって、垂直磁場、四重極磁場、漏れ磁場の3つを制御することができ、磁気面の水平方向位置(磁気軸の位置と言い換えることもできる)と磁気面の楕円度など、磁場の幾何学構造を多様に变化させることができる(図 2.2-6 参照)。

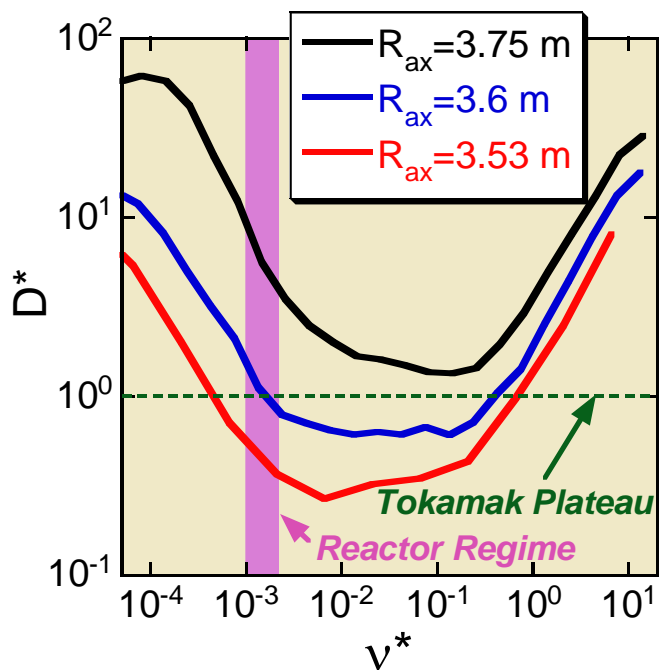


図 2.2-7 LHD における新古典拡散による熱輸送係数の衝突頻度依存性の評価

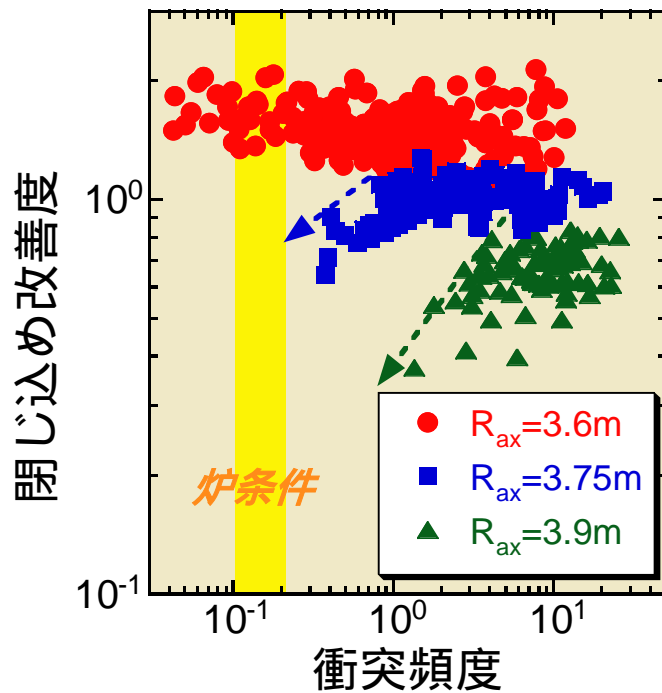


図 2.2-8 磁気軸位置を変えた3ケースについて実験で得られたエネルギー閉じ込め時間の衝突頻度依存性

ヘリカル系の閉じ込めを調べるに当たっては新古典拡散の性質を考えることが出発点となる。プラズマが高温になり、無衝突領域に入るとヘリカルリップルによる輸送の増大が予測されるためである。3次元の複雑な磁場配位においてもこの新古典拡散輸送を精度良く評価することができる数値計算コードが開発された。図 2.2-7 に GNET コード(京都大学、村上定義氏による)で評価した LHD における新古典拡散による熱輸送係数を示す。この図に示されているように無衝突領域に入ると v^* に反比例して輸送係数が増大するが、磁気軸位置を内側に寄せることによって、格段に輸送係数を抑えることができることが分かる。炉条件に対応する無衝突領域においても同じアスペクト比を持つトカマクのプラトー領域よりも低くすることさえ可能である。

さて、実験において、磁気軸位置を変化させた3ケースについてのエネルギー閉じ込め時間を衝突頻度に対して表示したものが図 2.2-8 である。エネルギー閉じ込め時間は ISS95 則の予想で規格化したもので、スケーリング則からの改善度を表す。これによると標準磁気軸位置 ($R_{ax}=3.75m$) および外寄せ ($R_{ax}=3.9m$) では衝突頻度が下がると閉じ込めが劣化することに対して、内寄せ ($R_{ax}=3.6m$) では閉じ込めが炉条件より衝突頻度が下がっても劣化しないことが明らかとなった。これは新古典拡散に対する磁場配位の最適化によって新古典拡散を抑えることに成功したことを示している。この研究において、さらに重大な意味は衝突頻度の高い領域、すなわち、磁場リップルによる新古典拡散が輸送の本質を担わない領域においても、磁気軸位置による閉じ込め性能の差異が明確に見られることである。衝突頻度の高い領域では異常輸送が支配的であることから、異常輸送の磁場配位に対する依存性が発見された。

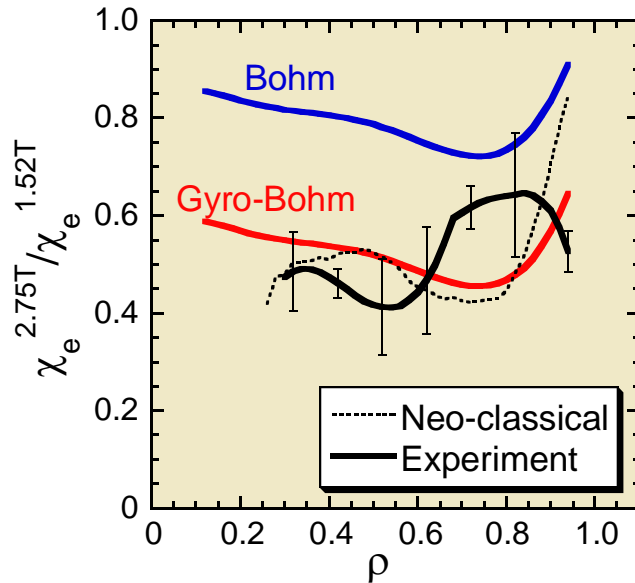


図 2.2-9 次元類似放電の熱輸送係数比の分布

エネルギー閉じ込めを決める熱輸送がどのような性質を持っているかについての研究も進められた。特に、炉条件への外挿という観点からは無次元量として最も飛躍の大きい規格化ジャイロ半径 ρ^* に対する依存性が重要である。図2.2-9は磁場を変化させ、密度と加熱入力を調整することにより、 v^* と β が同じで ρ^* のみが異なる放電を生成して、それらの輸送係数を比較したものである。磁場配位は良好な閉じ込めが観測された磁気軸位置 $R_{ax}=3.6m$ である。この比較によって、ジャイロ半径に依存しない Bohm 型よりも、ジャイロ半径に依存する Gyro-Bohm 型に近いことが分かった。この性質は巨視的なエネルギー閉じ込め時間のパラメータ依存性と矛盾しない。さらに付け加えて、新古典拡散からの予想と近いことが分かる。しかし、これは新古典拡散のジャイロ半径依存性が gyro-Bohm と類似することによるもので、熱輸送係数の絶対値の比較においては実験値が新古典拡散からの予想値より数倍大きい。したがって、異常輸送が支配的であると言える。ここにおいても新古典輸送を抑制することが、異常輸送の抑制と相関することが指摘された。

磁気軸位置の内寄せによる磁場配位の最適化により、新古典拡散を克服し、かつ異常輸送に対しても改善を示すことができた。この場合得られた実験値をトカマクの H モードプラズマと比較したものが図 2.2-10 である。横軸を $IPB(y,2)$ 則から q 依存性を除いたものとして比較した。トカマクと LHD では回転変換分布 (あるいは等価プラズマ電流分布) が大きく異なり、トカマクのプラズマ電流と LHD の回転変換を直接比較することにあいまいさがあるためである。この図から分かるように、LHD のプラズマは $q=4.5$ 程度の安全係数を持つトカマク H モードと等価な閉じ込め性能を有している。図 2.2-3 にある核融合三重積で表した性能において大型トカマクに対して LHD は一桁劣っているが、大型トカマクにおける性能上限は負磁気シアー磁場配位による内部輸送障壁を伴ったいわゆる先進トカマク運転モードによって得られており、ITER の標準運転とされる ELMy H モードと比較すれば、LHD のデータはほぼ同じ位置に当たる。

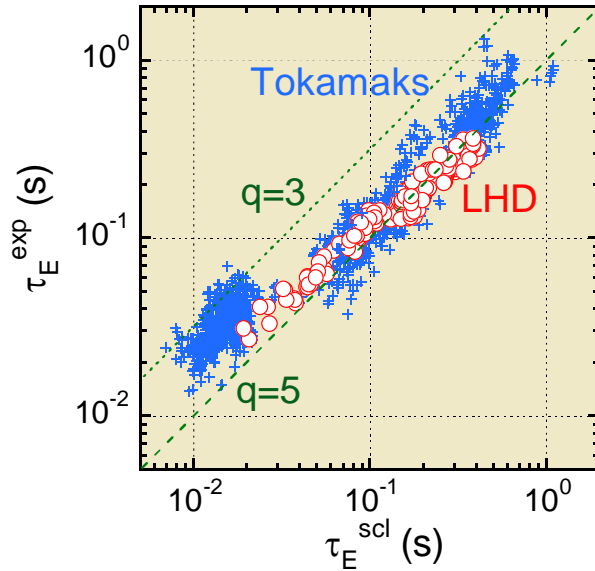


図 2.2-10 トカマク H モードと LHD 内寄せ配位でのエネルギー閉じ込め時間の H モードスケリング則との比較。但し、スケリング則から q 依存性は排除してある。

LHD のデータを ISS95 則に照らして、中型装置実験と比較したものが図 2.2-11 である。後述するように、LHD では磁気軸位置のシフトによって明瞭な閉じ込め改善が見られる。図 2.2-11 にあるように、磁気軸位置 3.6m といういわゆる内寄せ磁場配位では、ISS95 則から体系的に 1.5 倍の改善度があることが明らかとなった。

磁気軸位置以外にも楕円度を 0.8 から 1.4 まで変化させた磁場配位においてデータベースが蓄積された。これまで取得された閉じ込めデータベースは国際協力によって国際ステラレータ閉じ込めデータベースとして整理のうえ、蓄積されている。LHD を含めた最近までのデータを取り込むことによって ISS95 則を見直した ISS04 則

$$\tau_E^{ISS04} = f \times 0.134 \times a^{2.28} R^{0.64} \bar{n}_e^{0.54} P^{-0.61} B^{0.84} \iota_{2/3}^{0.41}$$

が提案された(図 2.2-12)。このスケリングの導出には、図 2.2-8 や図 2.2-11 に示された磁場配位による系統的な差異を定量化することが前提条件として必要であった。個々の実験において、ジャイロボーム的な輸送の性質が普遍的かつ系統的に観測される一方、これらのスケリング則にある物理量では表現できない磁場配位への依存性の存在が明らかとなったからである。

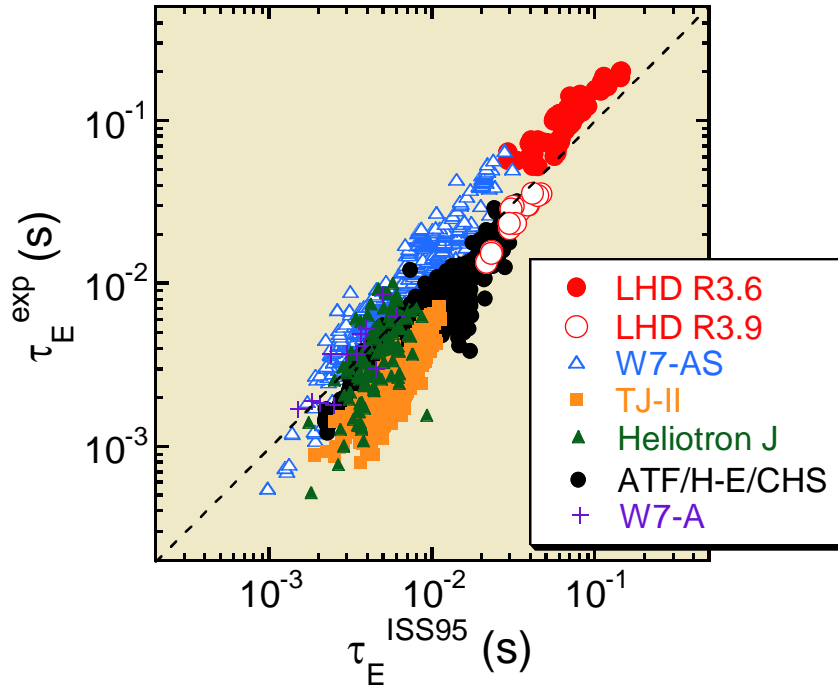


図 2.2-11 ISS95 から予測されるエネルギー閉じ込め時間と実験値の比較

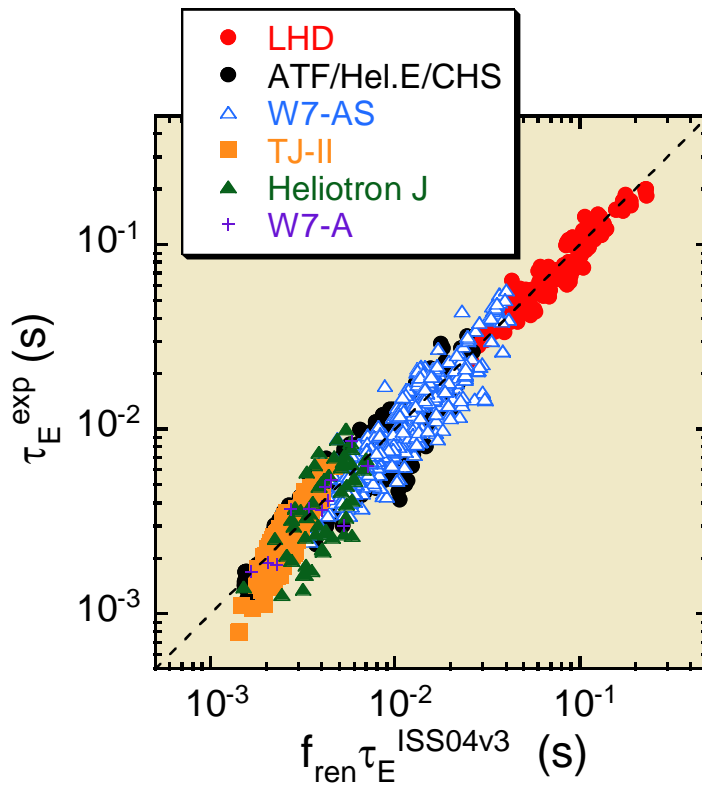


図 2.2-12 ISS04 則から予測されるエネルギー閉じ込め時間と実験値の比較

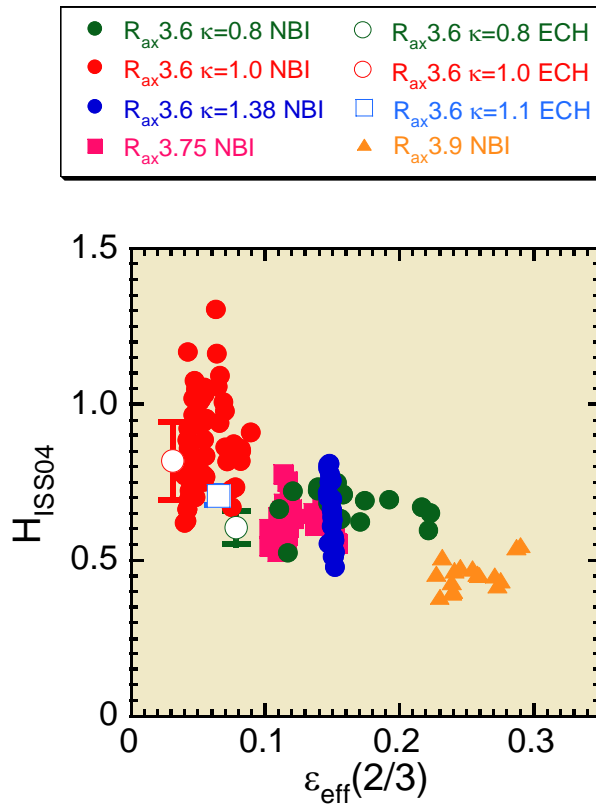


図 2.2-13 LHD における ISS04 からのエネルギー閉じ込め時間改善度の
実効ヘリカルリップル依存性

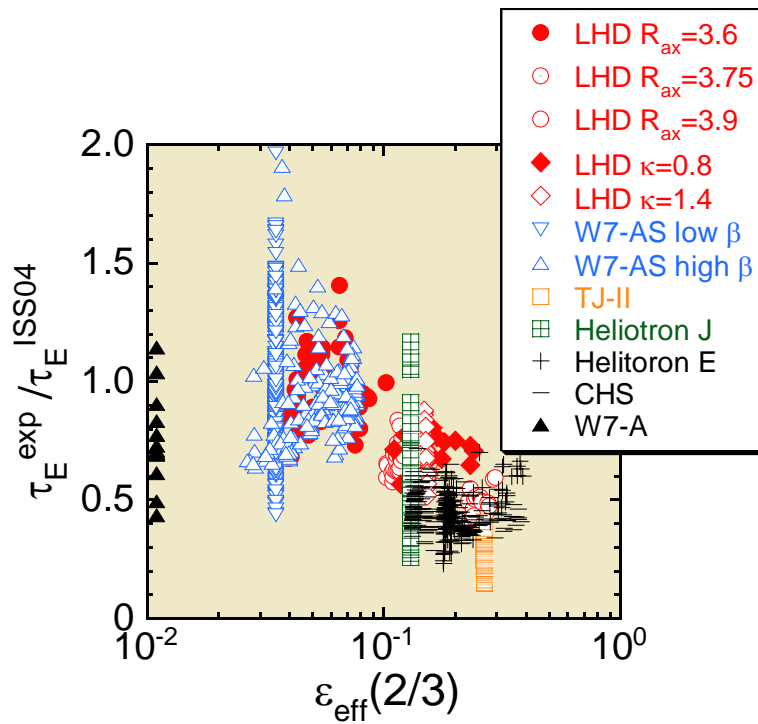


図 2.2-14 ISS04 からのエネルギー閉じ込め時間改善度の実効ヘリカルリ
ップル依存性

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