

MHD・トポロジーの物理

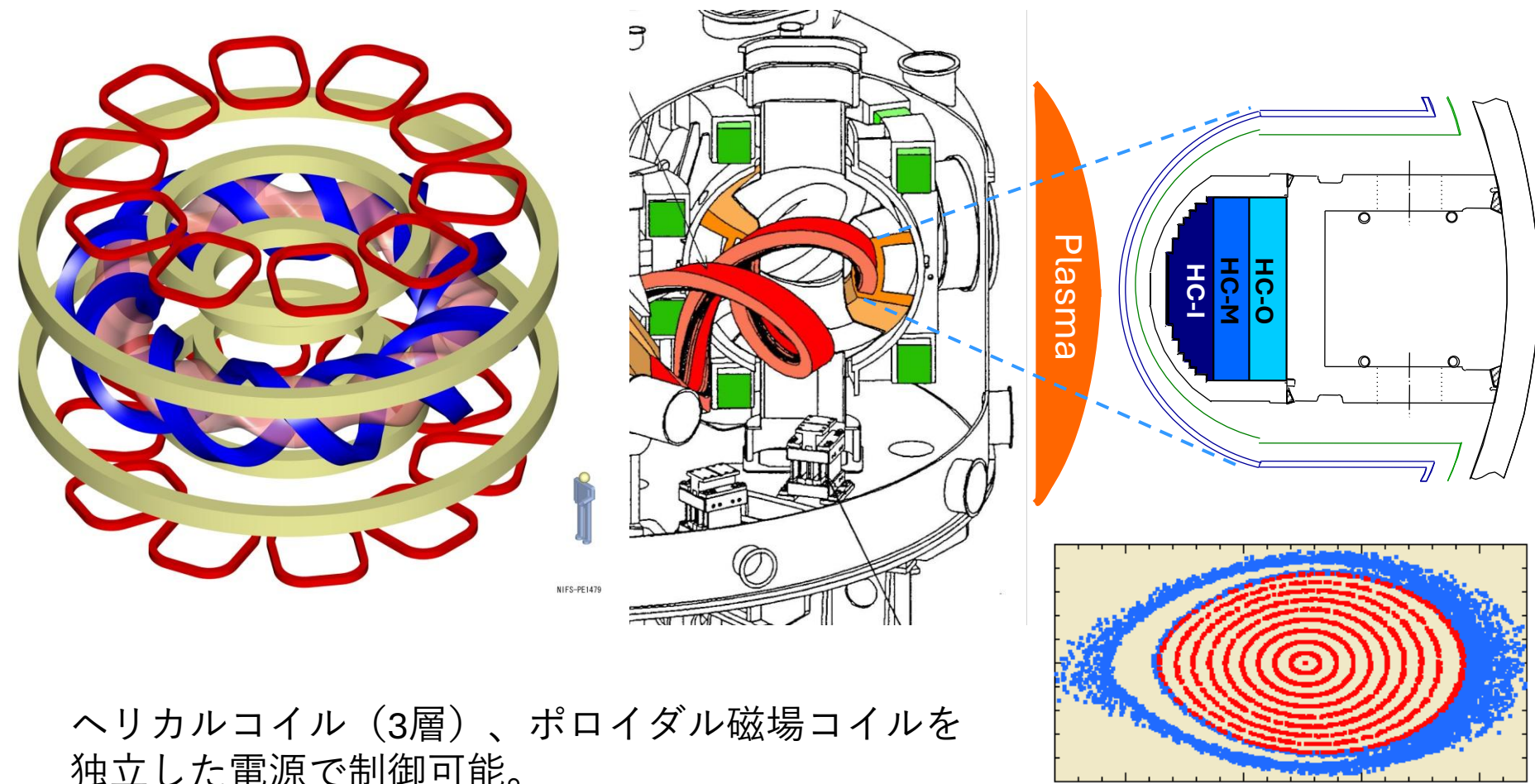
広島大学・大学院先進理工系科学研究科

鈴木康浩

謝辞：武村勇輝氏、渡邊清政氏、榊原悟氏、大舘暁氏、LHD実験グループの皆様



広島大学



ヘリカルコイル（3層）、ポロイダル磁場コイルを独立した電源で制御可能。

ポロイダル磁場コイル

- ➔ （動的）磁気軸位置制御
- ➔ 楕円度

ヘリカル磁場コイル

- ➔ プラズマアスペクト比
- ➔ 回転変換分布

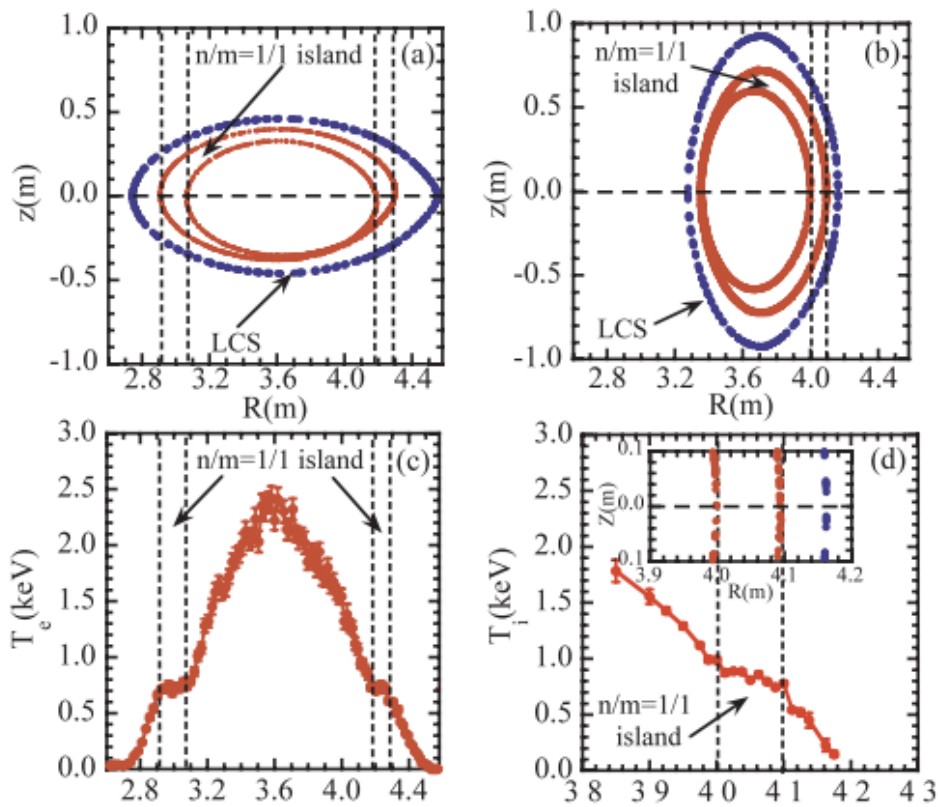
LID (RMP) コイル

- ➔ $m/n=1/1$ or $2/1$
共鳴摂動磁場生成
- ➔ 磁気島生成

様々な磁場配位＋磁気島により、MHDやトポロジーの物理を可能とした。

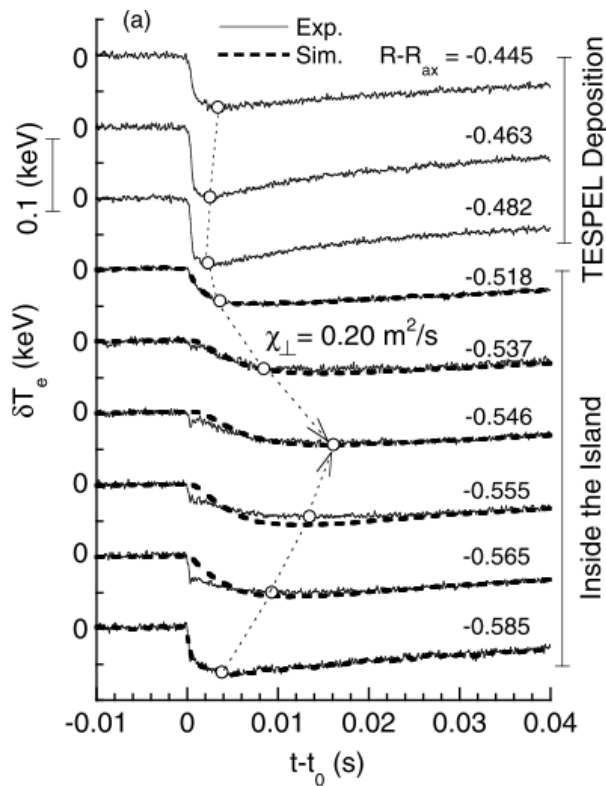
充実した計測器がMHD・トポロジー研究を可能とする

Thomson散乱計測および荷電交換分光による磁気島の観測

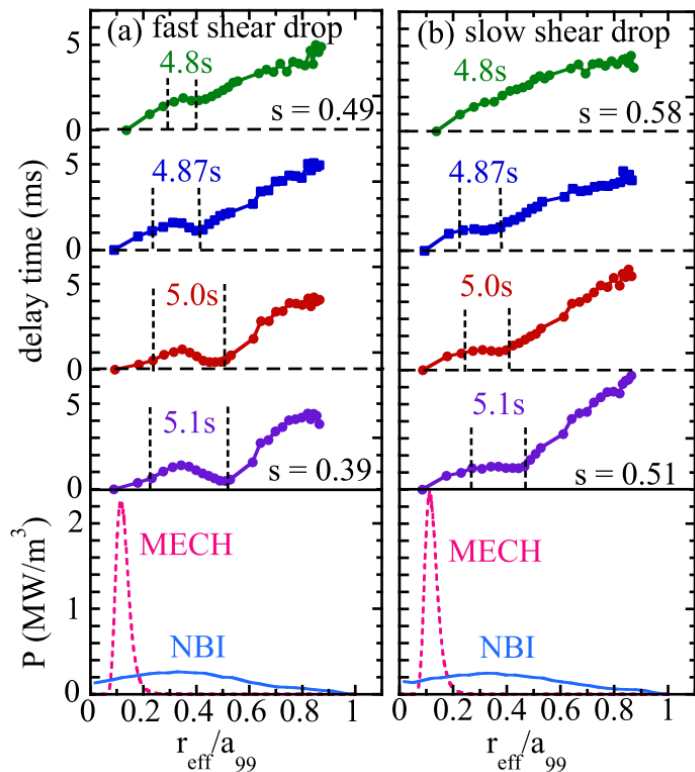


Ida, et al., FST2010

TESPELによるコールドパルス、MECHによるヒートパル伝搬を観測することで磁気島の振る舞いを明らかにする。



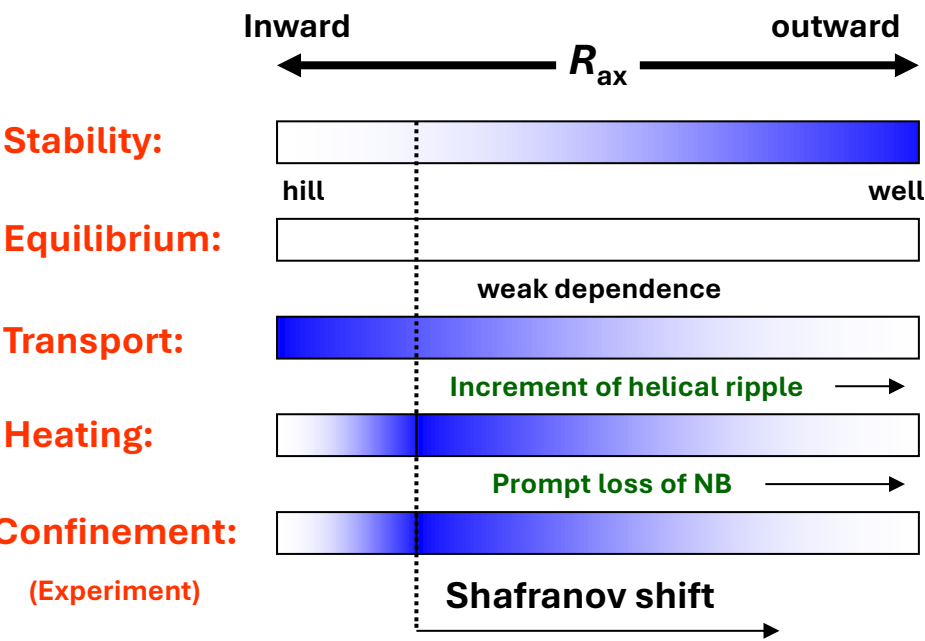
Inagaki, et al., PRL2004



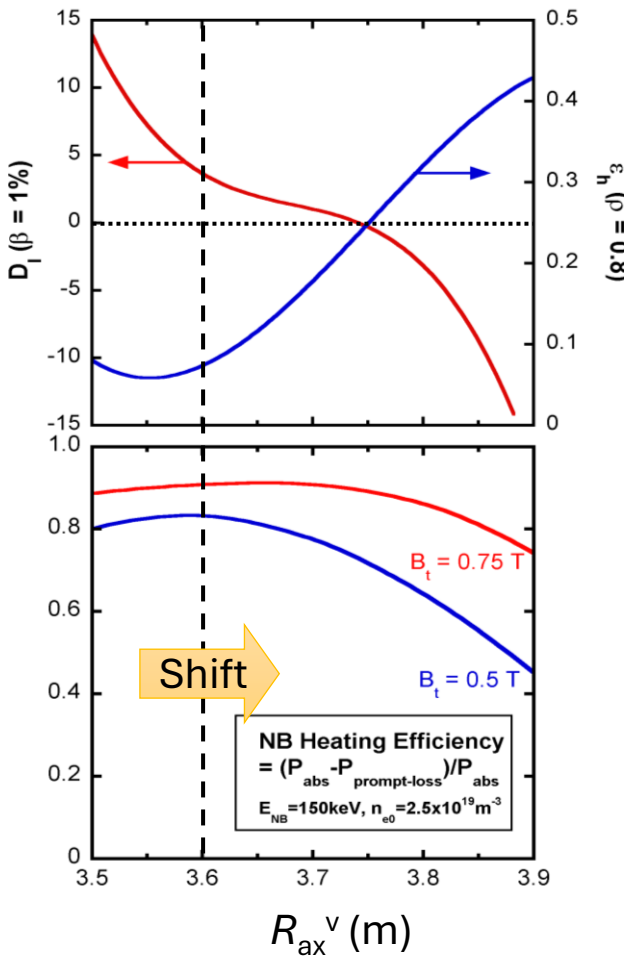
Ida, et al., NJP2013

真空磁気軸位置はLHDの物理特性を決める重要なパラメータ

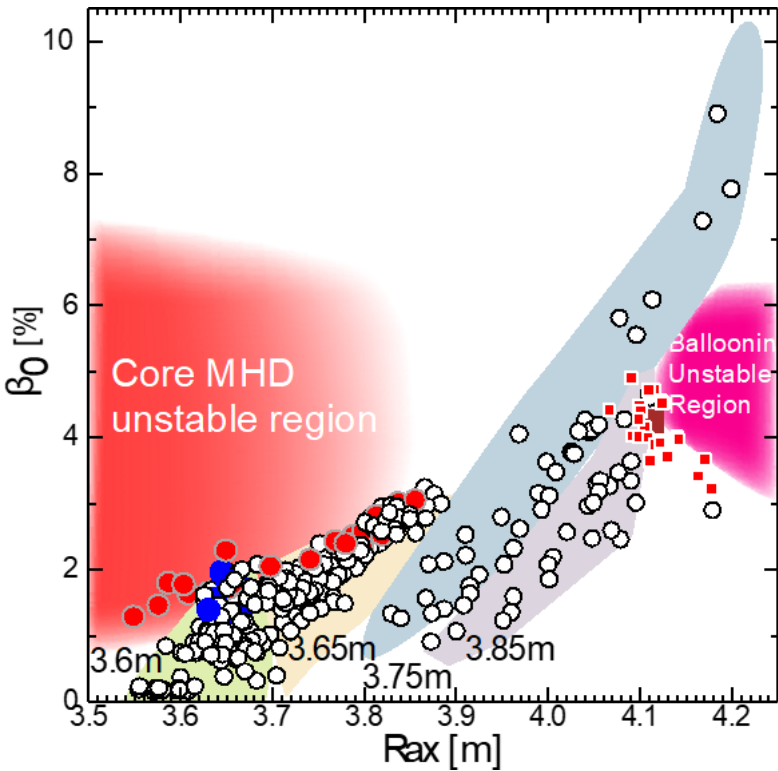
R_{ax}^v （真空磁気軸位置）は、MHD、輸送、加熱を最適化するために重要なパラメータ。



有限ベータ効果によるShafranov shiftは、磁気井戸形成によりMHDにとっては良い効果をもたらす一方、輸送や加熱効率を悪化させる。

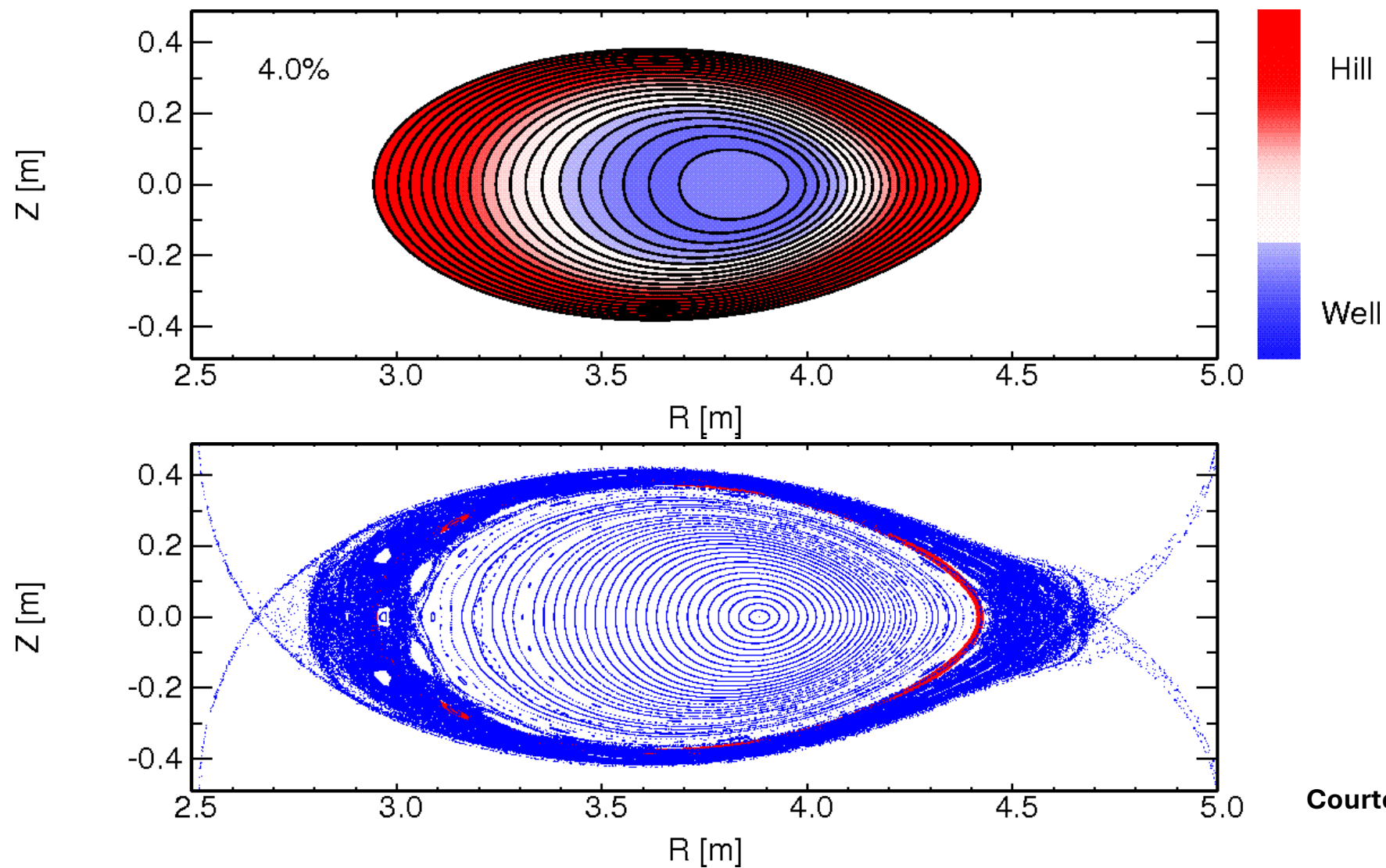


真空磁気軸位置と到達ベータ値の関係



Courtesy to S. Ohdachi

有限ベータ効果による磁場配位と周辺磁場トポロジーの変化

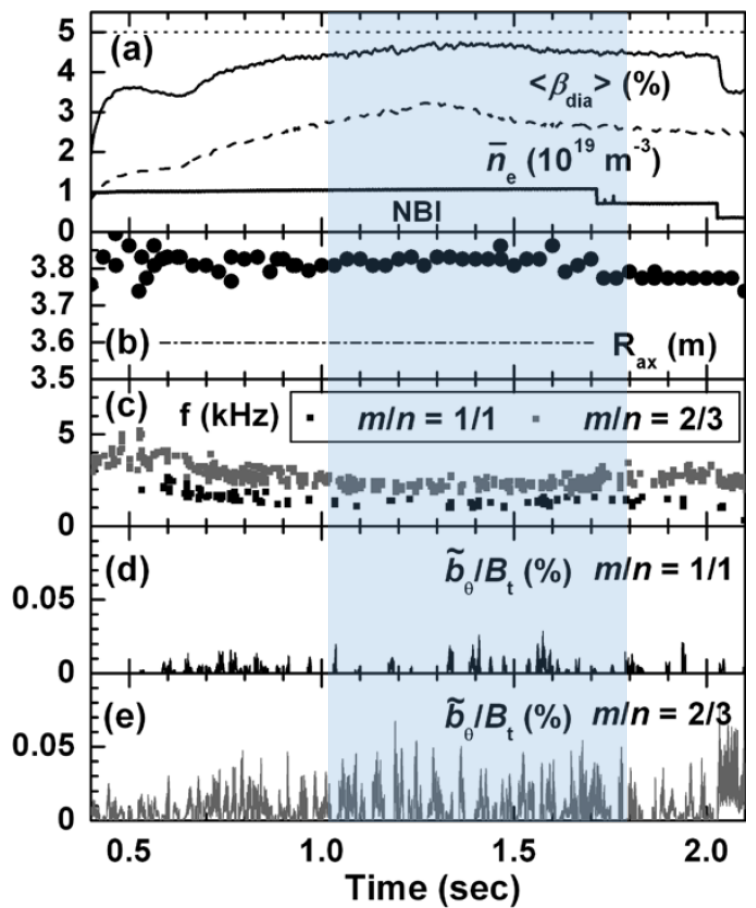


Courtesy to S. Ohdachi

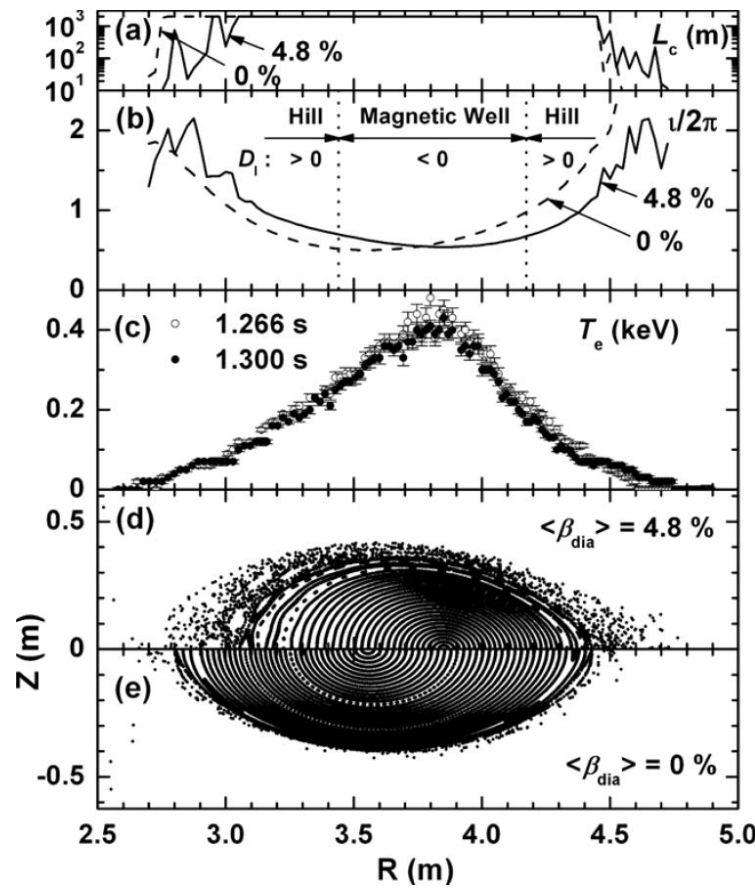
- Introduction
- 高ベータ領域の拡大
- 磁気島物理
- 突発現象
- まとめ

磁場配位のファインチューニングにより準定常4.8%の高ベータ放電を実現

放電波形



磁場構造と径方向分布の変化



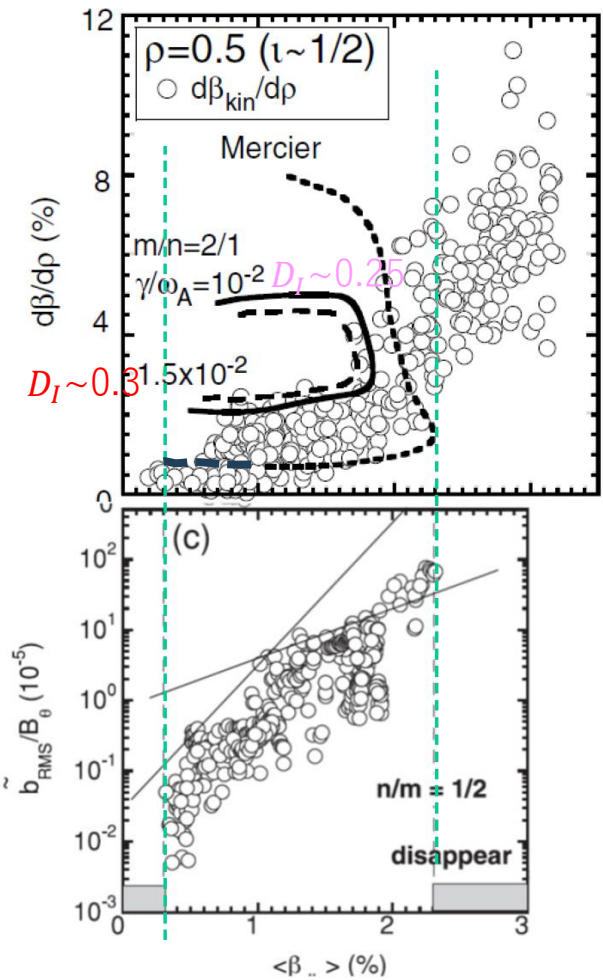
高ベータ放電の特徴

- 加熱パワーは**13.8MW** (接線**NBI**のみ)
- 破壊的な(disruptive)現象なしに**4.5%を超えるプラズマが長い時間 (50 τ_E)**維持されている
- プラズマ小半径で規格化して**40%程度のシャフラノフシフト**を観測
- Low-n磁気揺動を観測
 - ✓ コア領域に共鳴するモードは観測されない
 - ✓ 周辺領域($\rho > 0.9$)に共鳴するモード ($m/n=2/3, 1/1$)のみが観測されている。
- 電子温度分布に平坦化や非対称な細かい構造は見られるが、巨視的閉じ込め性能に大きな影響を与えるような広い範囲に渡る電子温度分布の平坦化は観測されていない。

S. Sakakibara, et al., 2008, Plasma Phys. Control. Fusion **50** 124014

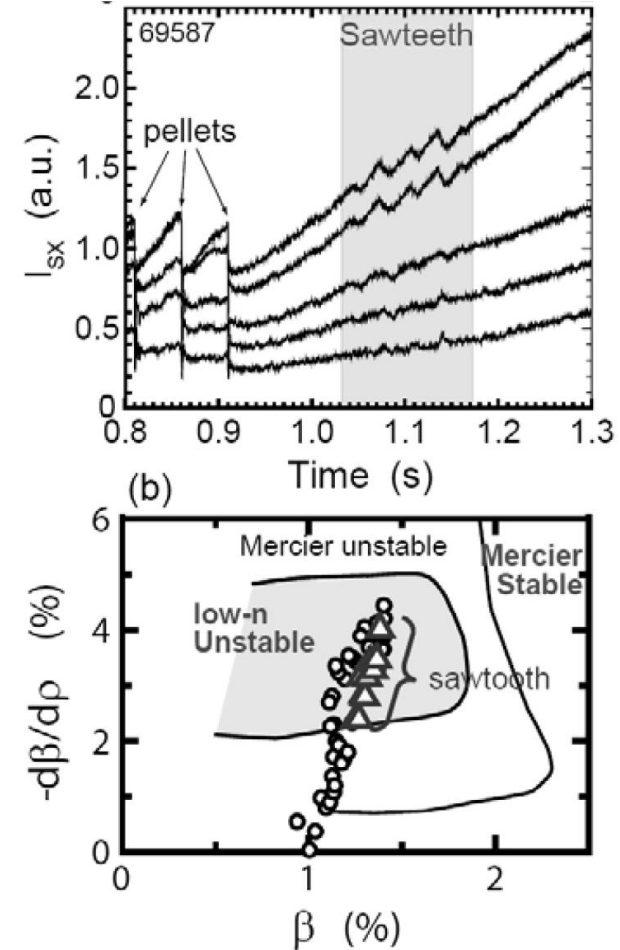
高ベータへのアクセスはコア部のMHD不安定性により制限される

準定常放電のコア部の圧力勾配と共鳴磁場揺動強度のベータ依存



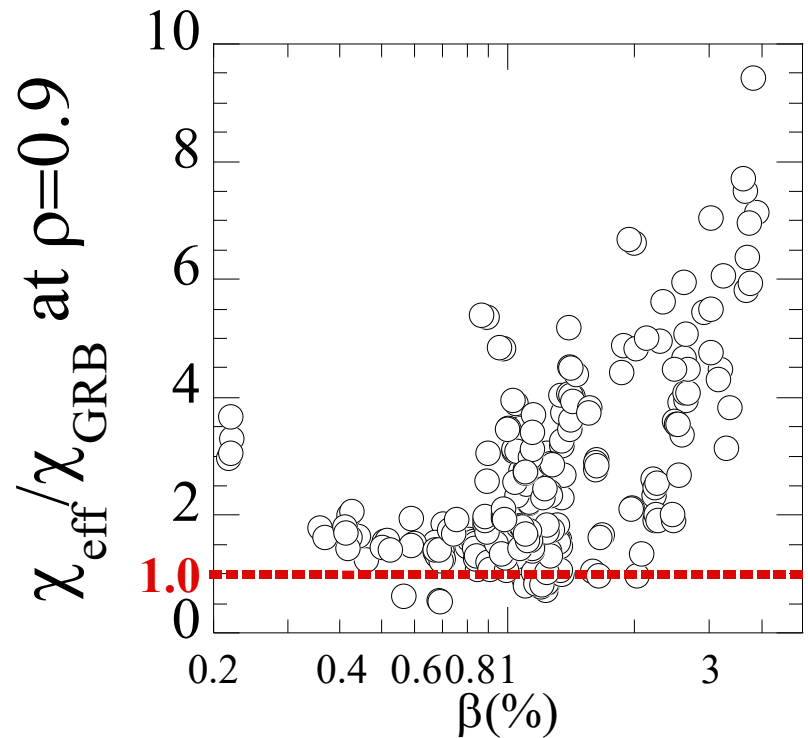
- コア領域の磁気揺動は、メルシエ不安定領域で観測
- 準定常的なプラズマの圧力勾配は、メルシエ不安定領域にアクセス可能。
- メルシエパラメータが $D_I=0.2\sim0.3$ を超える領域にはアクセス不可。
- コア領域の不安定性は理想交換型不安定性が支配的
- メルシエパラメータがあるある値より高い圧力勾配領域には、準定常的にアクセス不可。
- 過渡期には $D_I = 0.2\sim0.3$ を超える領域にはアクセス。ただし、sawtooth等の活動が観測。

ペレット入射前後のコア部の圧力勾配とSX揺動強度

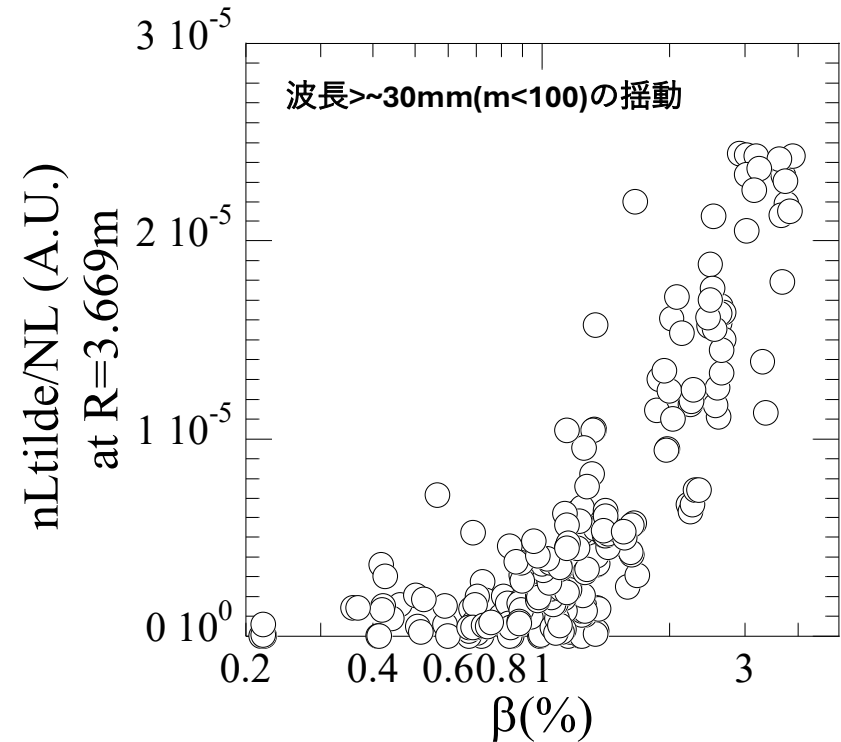


高ベータプラズマで現れる輸送劣化 ～電磁乱流の効果～

スケーリング（ジャイロボーム的）で予測される χ_{eff} に比した劣化の割合



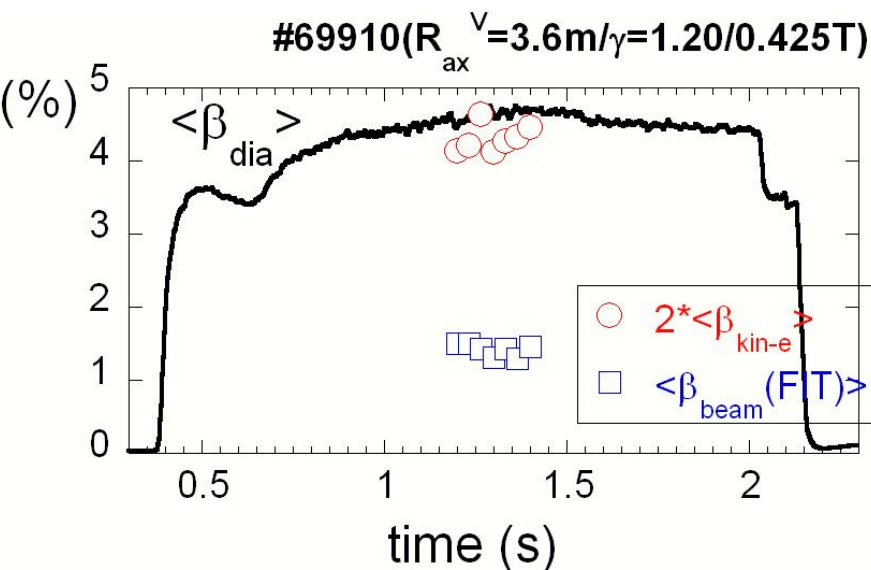
干渉計で計測した密度揺動レベル(視線はほぼすべての ρ)



$\beta > 1\%$ で β の増加に伴い周辺の閉じ込めの劣化と比較的長波長揺動強度を観測(2つのデータに相関あり)

低 β と同じ閉じ込め特性を保つなら $\chi_{eff}/\chi_{GRB} = 1$ のはず。
 $\chi_{eff}/\chi_{GRB} \sim \beta^1 \rightarrow$ 抵抗性交換型モード（抵抗性gモード）駆動乱流か？

低磁場高ベータプラズマではビーム成分が顕著に表れる



Port-through power tan-NBI ; 13.8MW

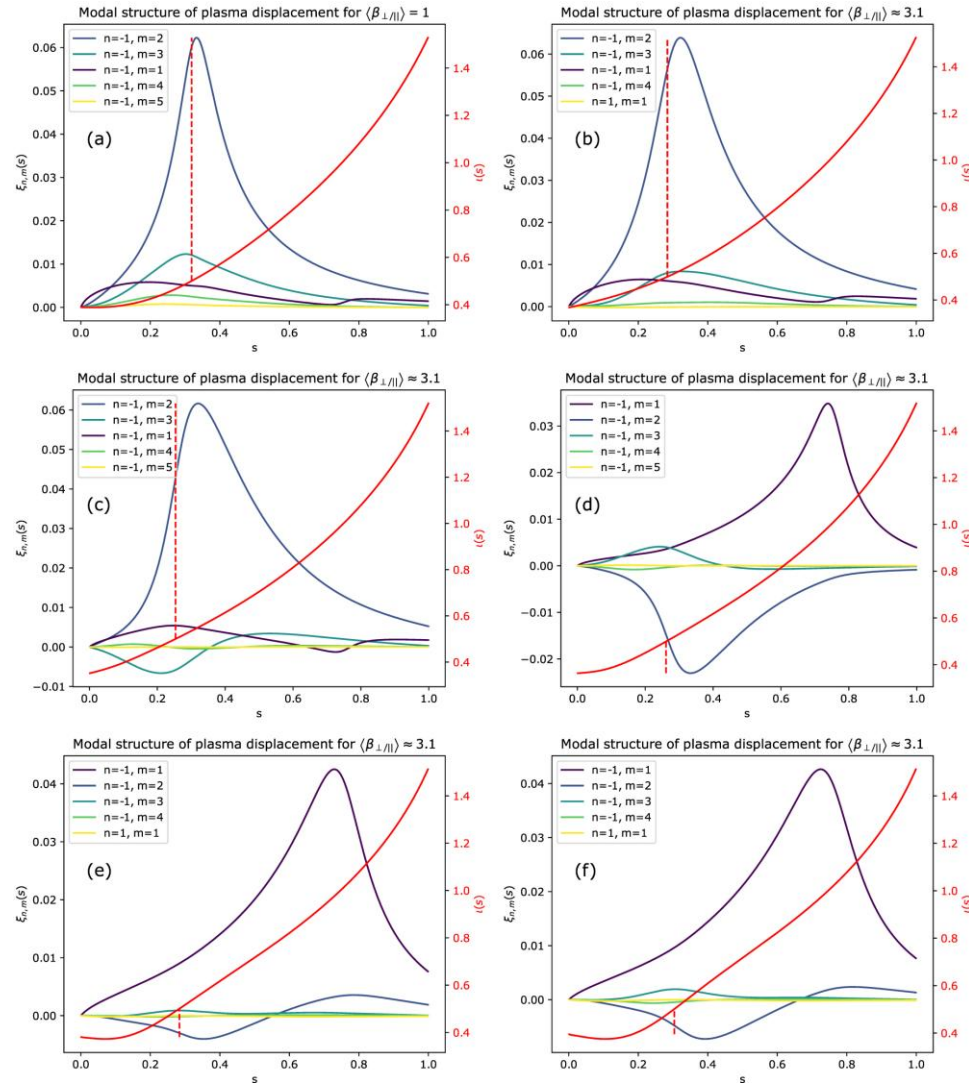
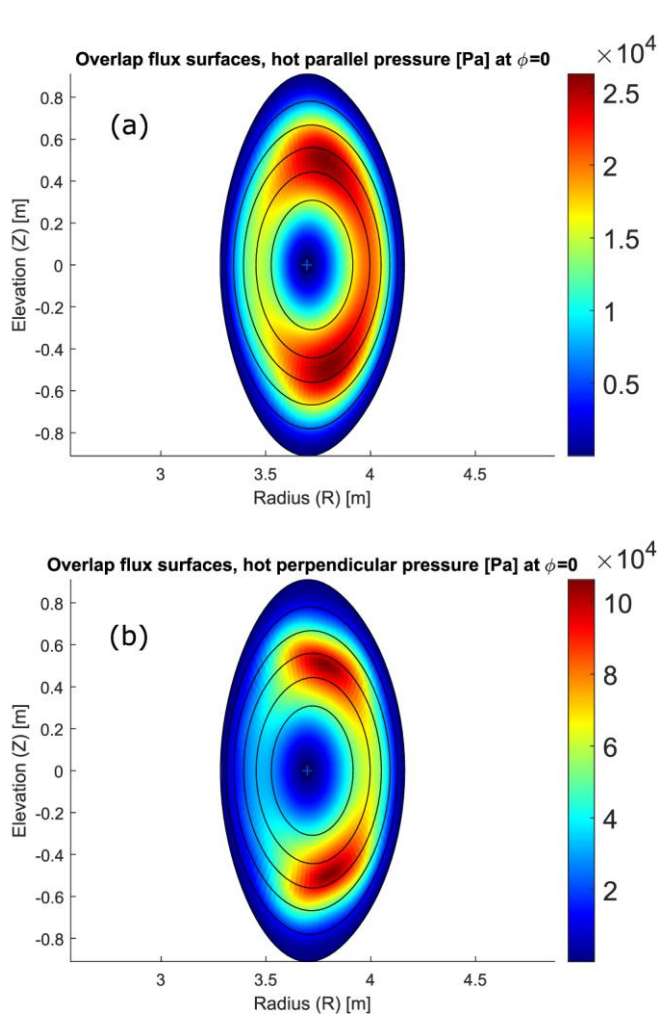
- $\langle \beta_{dia} \rangle$; 4.8% ($\beta_{\perp} \sim 3.2$)
- $\langle \beta_{kin} \rangle$; 3.6% ($Z_{eff} = 2.5$)
- $(2 \times \langle \beta_{kin-e} \rangle)$; 4.3%
- $\langle \beta_{beam} \rangle$; 1.5% (Cal. by FIT code)

Relatively low n_e and low B_0 leads to large ratio of β_{beam}

$\langle \beta_{dia} \rangle$; based on the diamagnetic measurement.
 $2 \times \langle \beta_{kin-e} \rangle$; based on the T_e and n_e profile measurements $Z_{eff} = 1$ and $T_i = T_e$ are assumed.
(When $Z_{eff} = 2.5$, $\langle \beta_{kin} \rangle \sim 3.6\%$ ($\beta_{\perp} \sim 2.45$), $\langle \beta_{beam} \rangle_{\perp} \sim 0.75\%$, $\langle \beta_{beam} \rangle_{\parallel} \sim 0.75\%$; 推定値OK??)
 $\langle \beta_{beam} \rangle$; based on the calculation with Monte Carlo technique.

低磁場で高パワーNBIにより生成された高ベータプラズマは非等方圧力
(速度空間の歪み) の観点からも興味深い考察対象。

非等方圧力の場合、モードのピークが有利面とは限らない



- NBIによる高速イオン圧力成分は磁気面量ではない。
- 等方圧力の場合は、変位ベクトルのモードピークと有利面の位置が一致。
- しかし、非等方圧力成分が大きくなるにつれて、モードピークと有利面の位置がずれ始める。



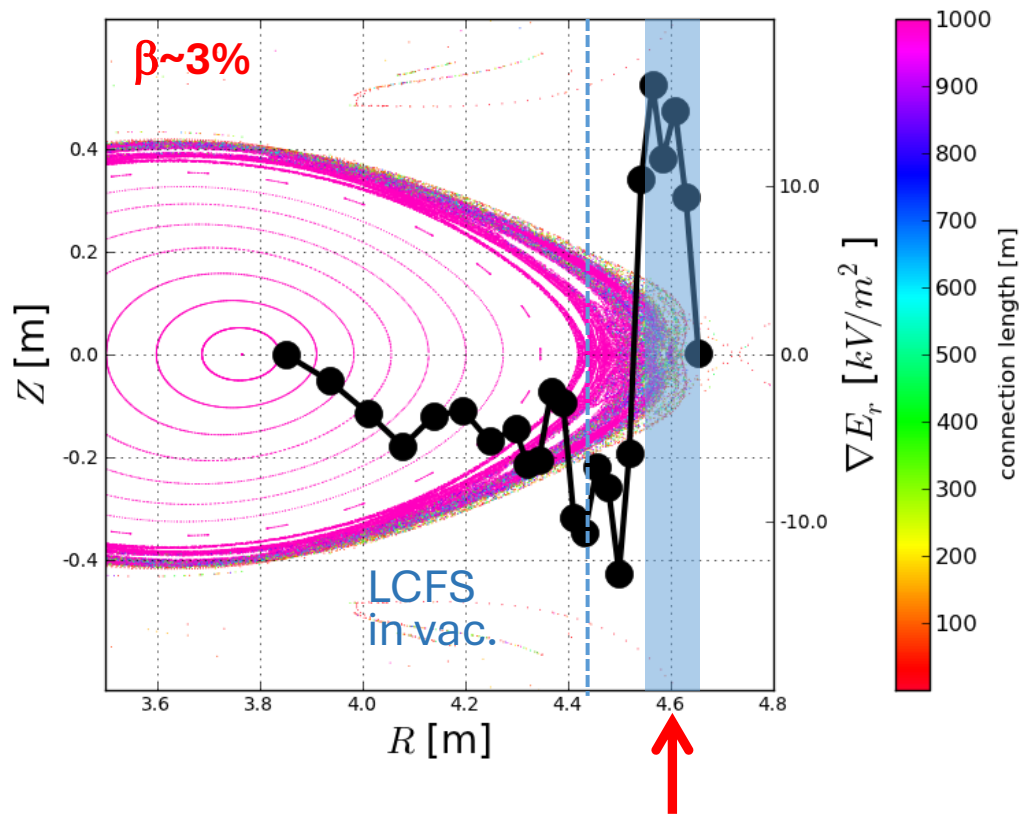
CHSでも、高ベータ実験では大きなビーム成分が観測されている（Yamada, Ida, et al., NF1992）。CHDでも重要な課題。

Moen and Suzuki, NF2023



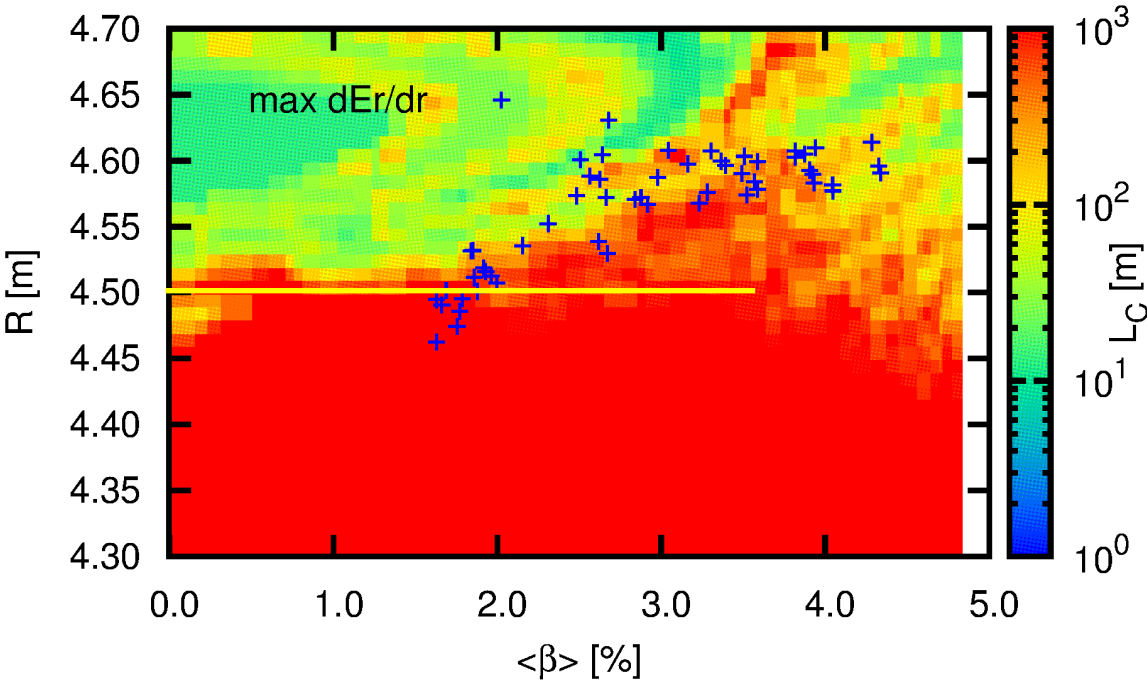
荷電交換分光計測による電場計測により、高ベータプラズマ時の周辺磁場トポロジーと実効プラズマ境界を定義

Comparison with HINT modeling



max E_r shear appears in stochastic region

Contours of connection length with different β



- L_C はトーラスの外側で長くなっている。
- β の増加により、短い L_C が現れる。
- E_r シア最大値の位置は、 L_C の等高線と相関している。
- E_r シア最大値の位置は、短い L_C に見られる。

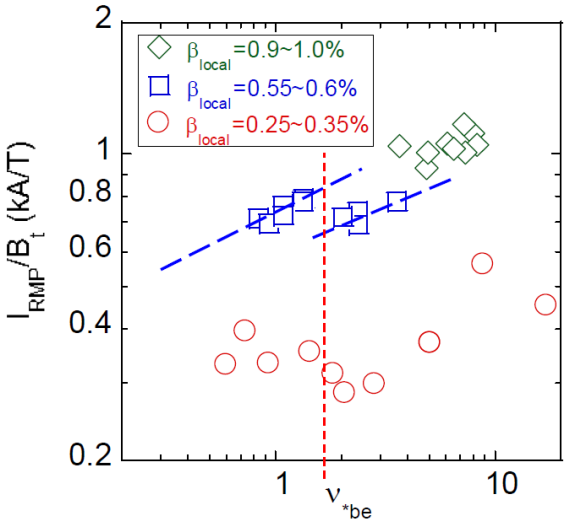
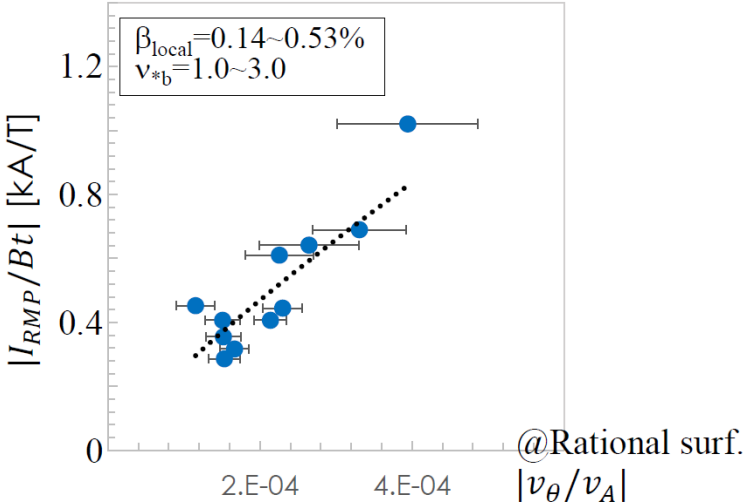
高ベータプラズマ時の磁場トポロジーを同定

Suzuki, et al., NF2013

外部RMP浸透閾値を決める物理 ～ プラズマ回転の役割～

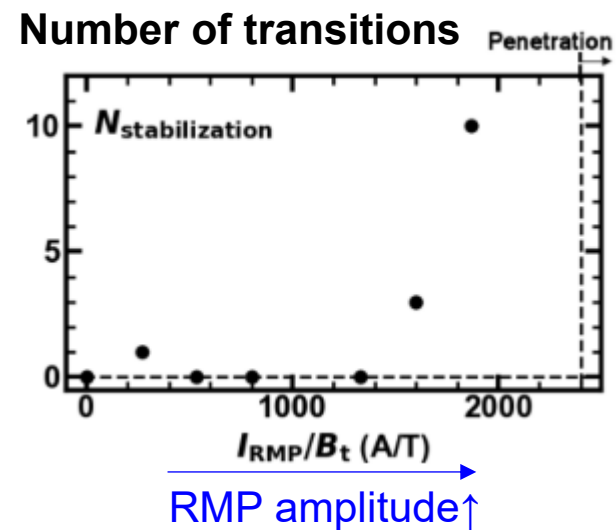
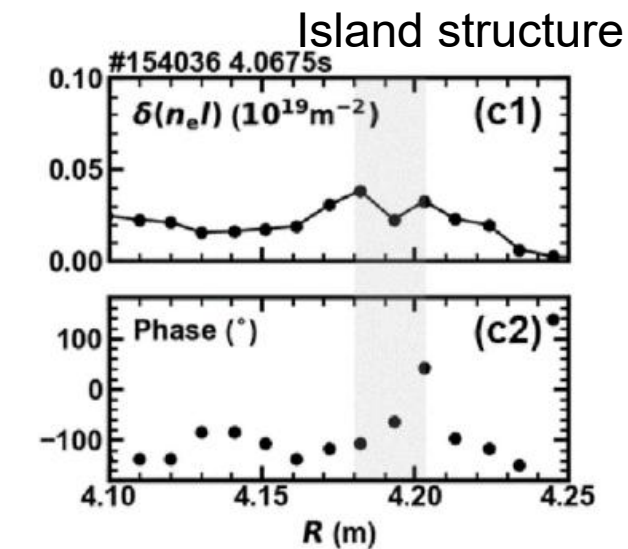
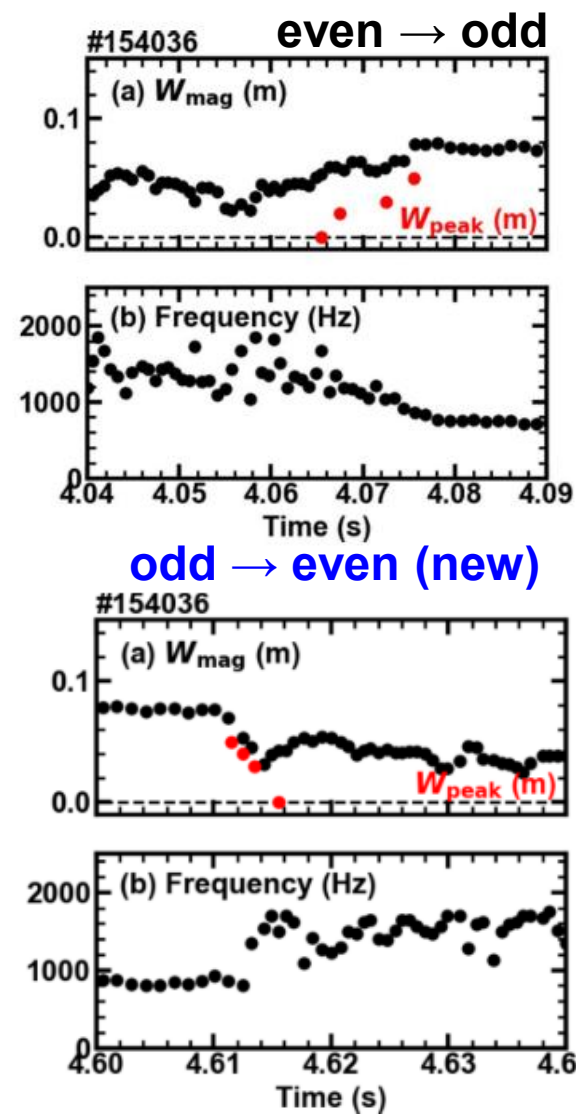
- 外部RMPを印加しても**一定強度以下では遮蔽され、閾値を超えると磁気島が形成**
 - RMP ramp-up実験からpenetration thresholdを評価
 - ポロイダル流速が大きいほど浸透閾値は増加、RMP浸透後はポロイダル流速がゼロの漸近

⇒ポロイダル方向の回転速度が浸透閾値を決める可能性大
(トルクバランスモデル)
- **衝突領域により、衝突依存性が変化**
 - 新古典ポロイダル粘性が浸透閾値を決めている可能性大
- **高衝突(プラトー)領域では浸透閾値の新古典ポロイダル粘性理論予測と実験値は強く相関するが、低衝突($1/\nu$)領域では相関が逆相関となる**
 - 低衝突領域での浸透機構の解明が今後の課題



磁気島トポロジーの新たな自発的遷移現象の観測

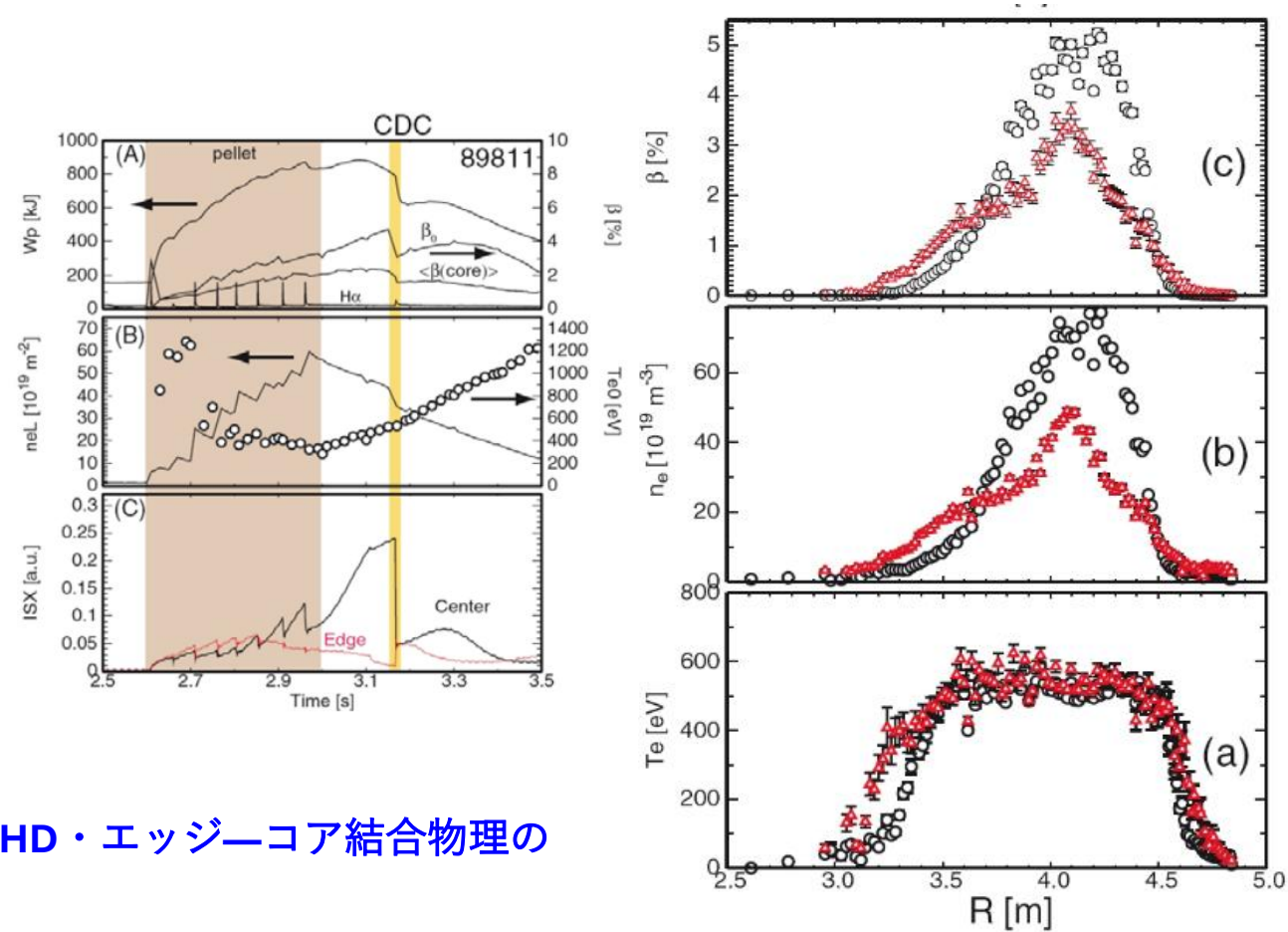
- MHD揺動の径方向構造の **even / odd parity** は磁気島の有無に関係
 - even parity : 磁気島を形成しない
 - odd parity : 磁気島を形成
 - **even $\leftrightarrow$ odd parity間を自発的に遷移する現象を初観測 [Takemura+ NF 2025]**
 - 外部アクチュエータを変化させることなく、磁場トポロジーが自発的に変化
 - 高空間分解能干渉計により、小振幅の磁気島構造の同定に成功
 - 外部RMP印加時に**Parity遷移**が顕著
 - RMPが浸透していない条件でもRMP強度の増加に伴い、遷移頻度が増加
- 外部RMPは浸透せずとも、自発的な磁場トポロジー遷移に影響する？
- RMP環境下における自発的トポロジー遷移の機構を現在検証中



LHDで観測される突発現象

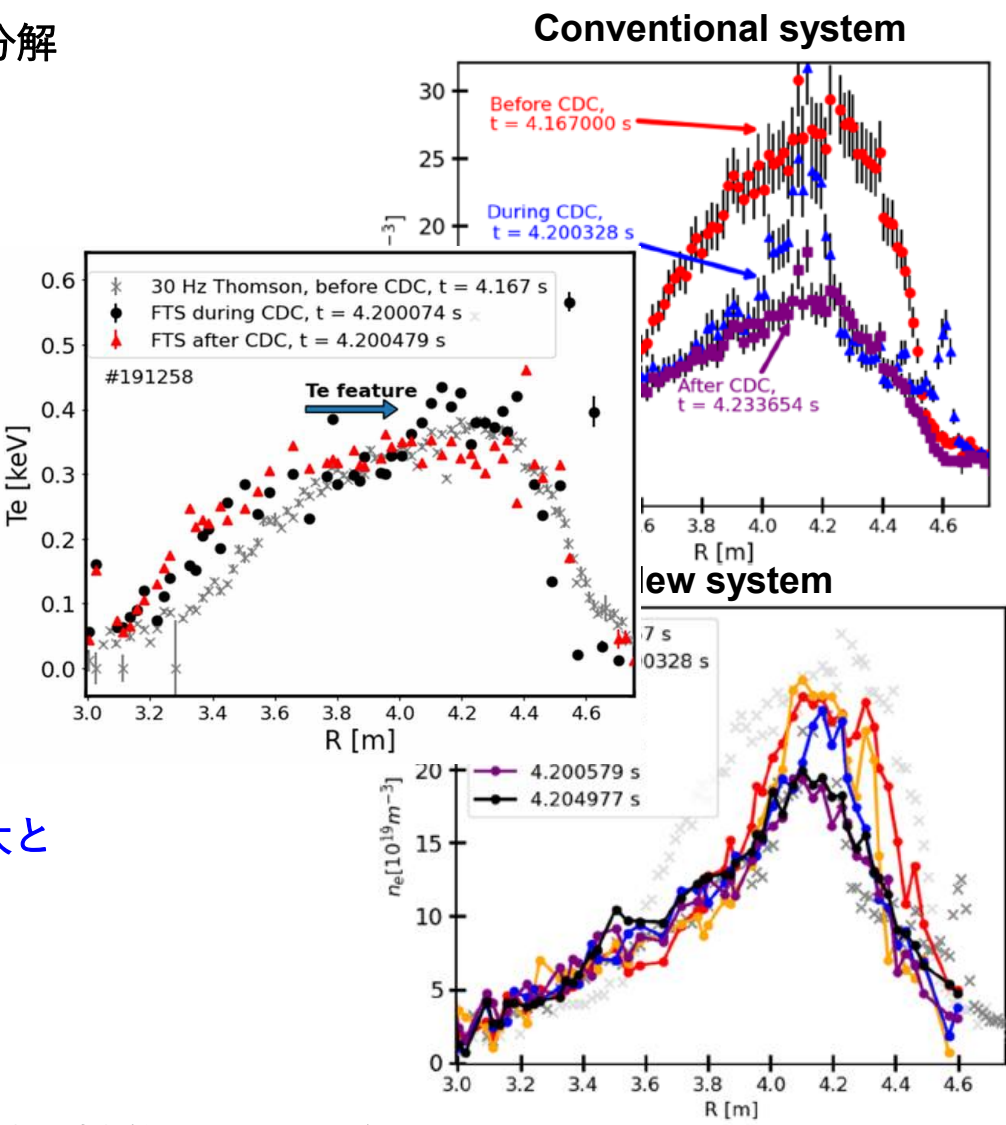
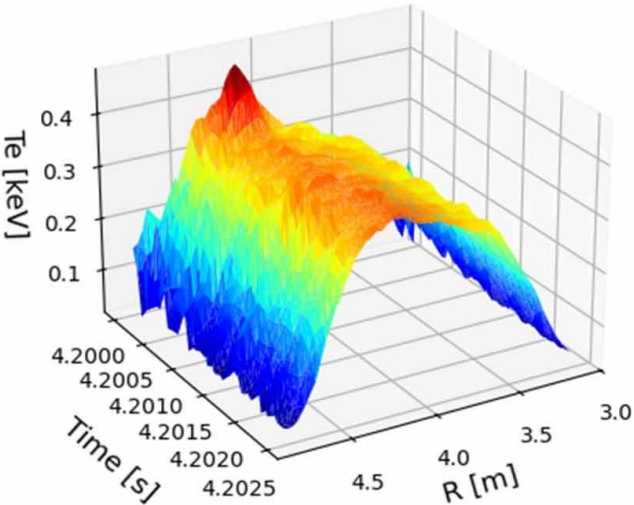
- LHDでは高尖塔密度分布をもつ **Super Dense Core (SDC) plasma** を形成
 - Outward-shifted配位 + マルチペレット入射
 - 中心密度 $\sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 、中心 $\beta \sim 10\%$ (高ベータシナリオの一つ)
- 一方、SDCでは **Core Density Collapse (CDC)** が発生
[Ohdachi+ CPP 2010]
 - $< 1 \text{ ms}$ でコア密度・蓄積エネルギーが急減
 - Outward-shifted配位における高密度運転の制限要因
- CDC直前に周辺部で前兆振動を観測
 - 空間構造から高 n ballooning modeの関与を示唆
[Ohdachi+ NF 2017]
- 非線形MHDシミュレーションが示すCDC発現過程
[Varela+ NF 2026]
 - high- n ballooning modeが周辺部で不安定化
 - 非線形結合・inverse energy cascadeによりlow- n core modeが成長
 - stochastic regionが周辺部からコアへ拡大 $\rightarrow$ CDC

$\rightarrow$ CDCの物理機構の解明は、高密度運転領域の拡大と非線形MHD・エッジコア結合物理の理解につながる



高速トムソン散乱で捉えたCDCのサブミリ秒ダイナミクス

- 従来のThomson scattering (33 ms) では、**< 1 msのCDC内部の時間発展を分解できない**
- Wisconsin大学との共同研究で**20 kHz高速Thomson scattering**をLHDに導入 [Funaba+ Sci. Rep. 2022]
 - 50 μ s / frame、約3 cm間隔、70点
- CDC中の密度分布発展を初めて高時間分解 [Sassella+ PPCF 2026]
- Outer coreから n_e が先に低下
- 中心密度を維持したまま、density pe
- 最後にinnermost coreが崩壊
- Peak-density collapse : 200–250 μ s
- CDCの密度崩壊が外側から内側へ進展する様子を実験的に観測
- 非線形MHD計算で予測される、stochastic regionの周辺部からコアへの拡大と整合



引き続き、解析を進めるとともに、CHDでも重要なトピック。

- LHDは柔軟な配位制御、強力な加熱、充実した計測器により、MHD・トポロジー研究にとって優れたプラットフォームであった。
- 配位制御、加熱スキームの最適化により、ステラレータとして最高到達ベータ値4.8%を準定常で実現した。
- 運転領域を制限する物理の考察から、コア部のMHD、周辺部の電磁乱流による閉じ込め劣化を明らかにした。
- 摂動磁場コイルを活用した磁気島物理の理解が進展した。
- 新しい計測器による突発現象の理解進展した。
- これらの成果は、今後も解析の進展が望まれるとともに、CHDにおいても重要な研究トピックとなり得る。