

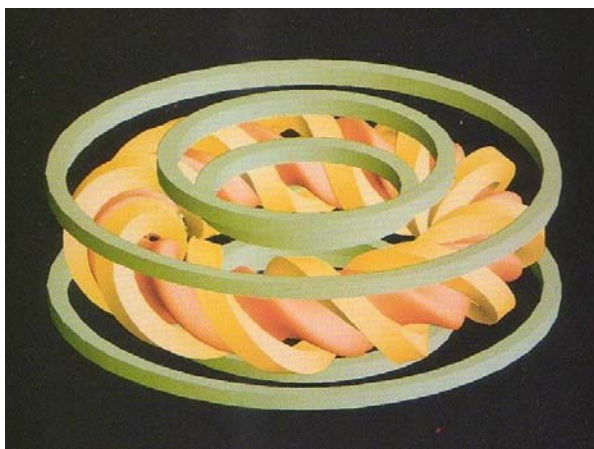
LHDにおけるMHD研究とその課題

核融合科学研究所

榊原 悟



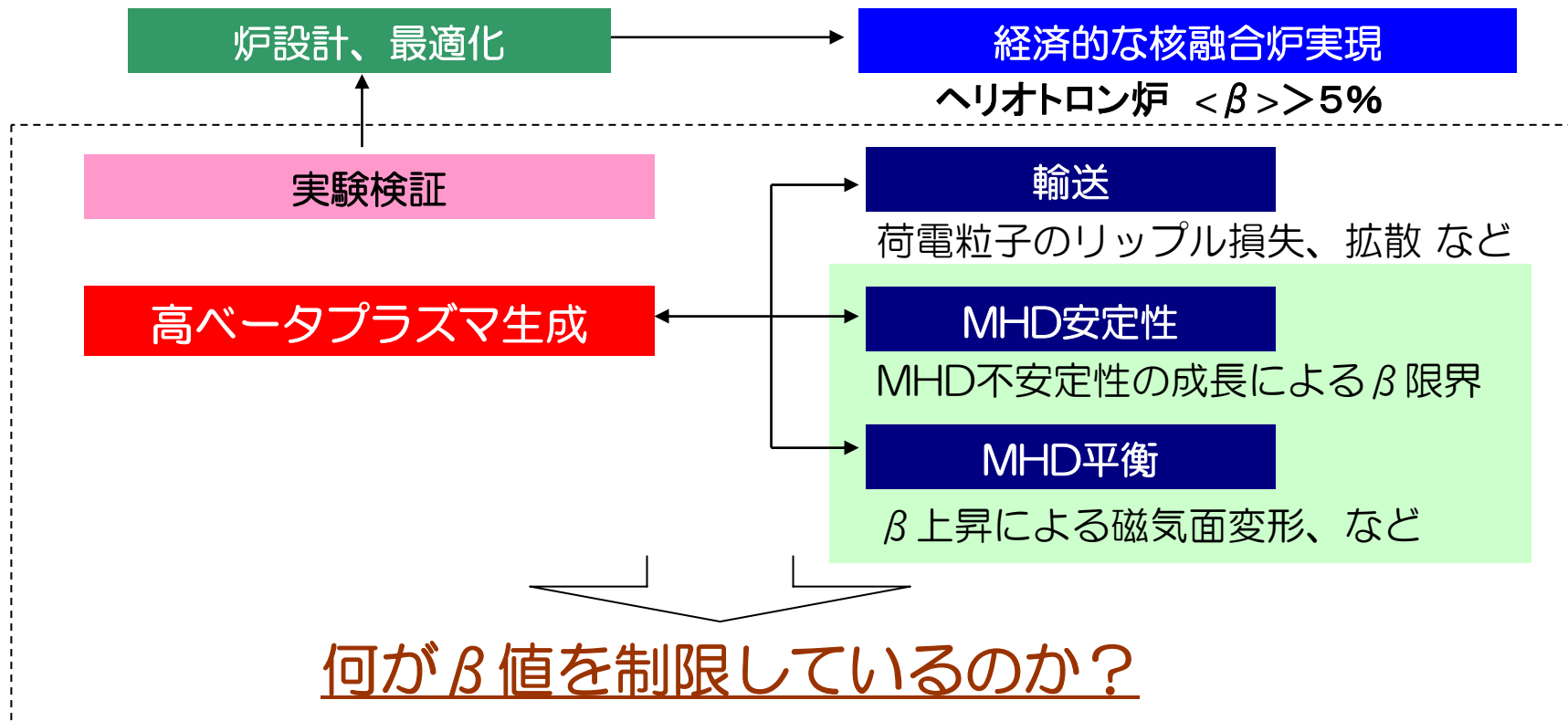
- はじめに
- MHD研究の意義
- ヘリオトロン配位における平衡・安定性の課題
- MHD安定性の高ベータ特性、及びパラメータ依存性
- まとめと課題



MHD研究の重要性



MHD特性と高 β プラズマ生成は大きな関係を持つ



トカマク：MHD不安定性（NTM、RWM）等による β 限界→制御が課題

ヘリカル： β 限界は存在するのか？

MHD平衡研究に関する課題

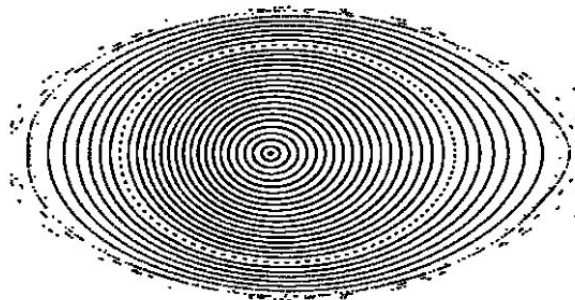


・有限ベータ効果による磁場構造変化（磁気面崩壊）による閉じ込めへの影響 ⇒ 平衡ベータ限界の概念

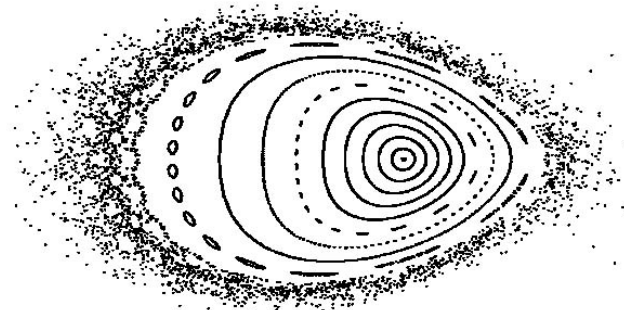
※昔の定義：磁気軸シフト $\Delta \sim a/2$ ⇒ 本質は閉じ込め磁気面崩壊

・磁気島の成長、緩和現象など ⇒ 高 β での磁場構造変化、NTM物理
⇒ 安定性の評価には平衡再構築が重要

HINT Code



$\langle \beta \rangle \sim 0\%$



$\langle \beta \rangle \sim 4\%$

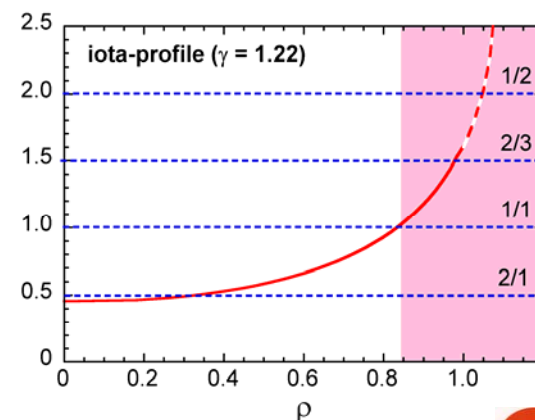
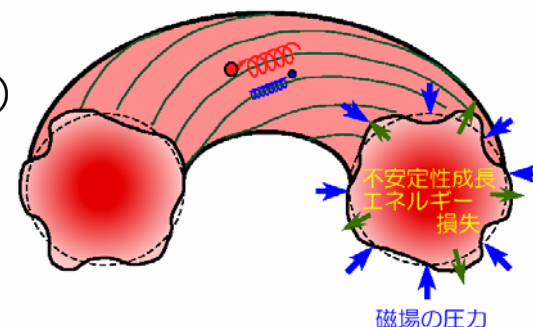
MHD安定性に関する課題



- ・ 閉じ込め磁場は外部コイルにより形成される＝プラズマ電流は不要
→プラズマ電流をエネルギー源として成長する不安定性は発生しない
※ただし自発的に流れる電流は存在（BS電流）
- ・ プラズマ圧力に起因する不安定性が課題

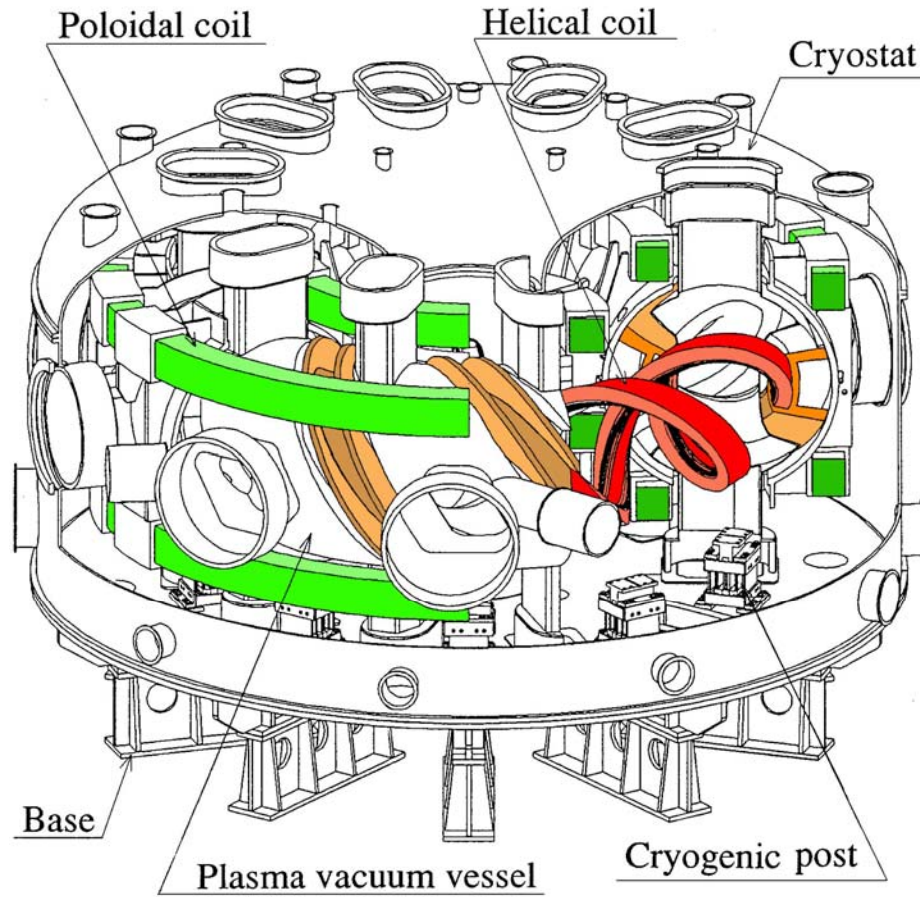
（プラズマ内部における圧力差が原因で擾乱が成長）

- ・ ベータ値の上昇による圧力差（圧力勾配）の上昇
⇒成長、緩和は磁場構造、プラズマパラメータに依存
⇒まずは理想、抵抗性交換型モードが課題
- ・ 高 β 領域でのバルーニングモード
- ・ 高エネルギー粒子と相互作用する不安定性



MHDモードの ∇p , I_p , 磁気レイノルズ数に対する依存性について紹介する

Large Helical Device



- 仕様 :

$R = 3.9 \text{ m}$, $a \sim 0.65 \text{ m}$

$B_t < 3 \text{ T}$

(コイルは全て超伝導)

- 加熱入力 :

N-NBI 14 MW (3 beams)

ICRF < 3 MW

ECH $\sim 2 \text{ MW}$

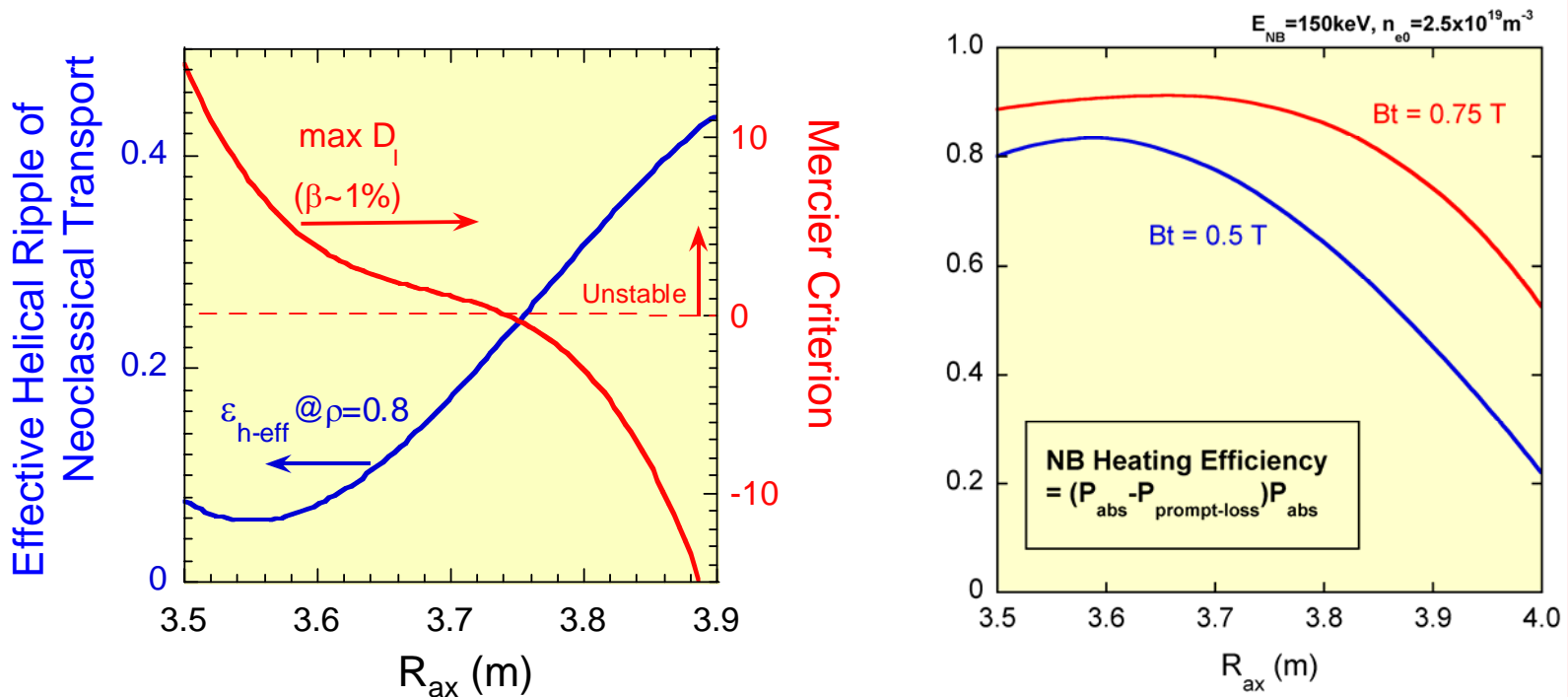
- 1998年3月実験開始

- 第8サイクル実験終了 (今年2月)

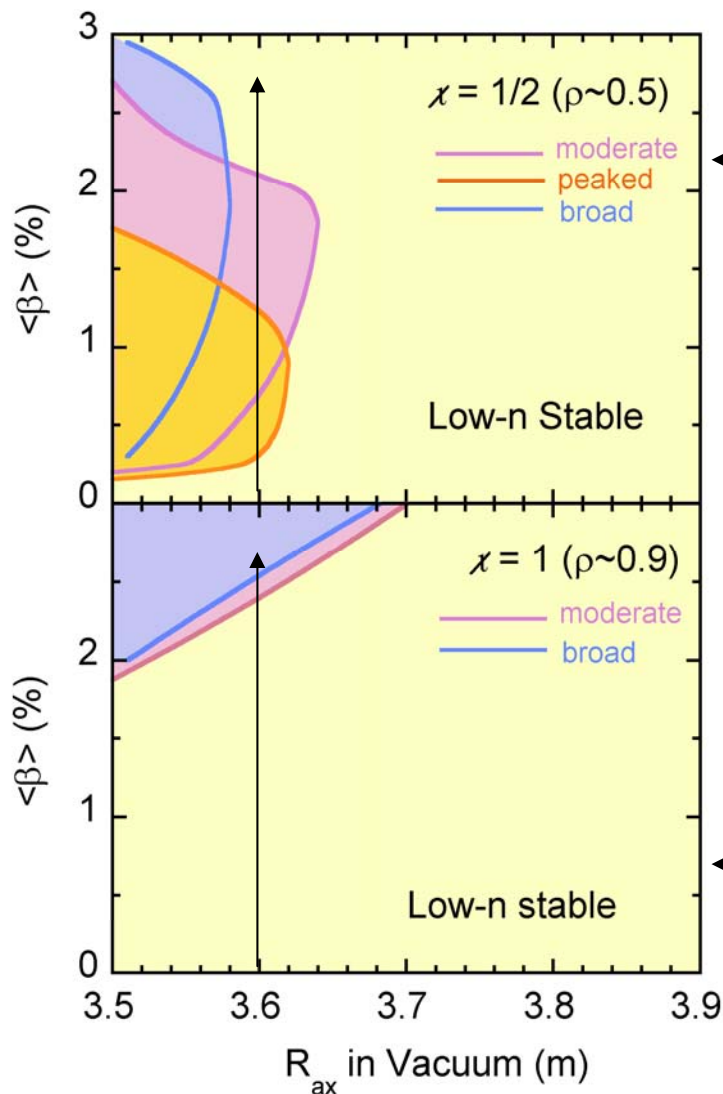
LHDの磁場配位 —磁気軸位置—



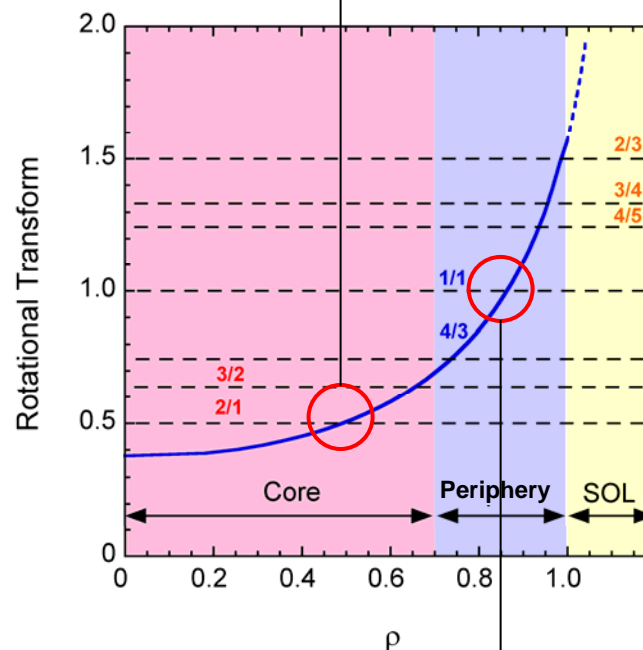
- MHD、輸送、加熱効率は磁場配位に強く依存する
 - 粒子閉じ込め：内寄せでヘリカルリップル損失低下
 - 安定性：外寄せで磁気井戸配位形成
- 実験での閉じ込め特性は $R_{ax} = 3.6$ mが最良 (ISS95実験則)



MHD不安定性の R_{ax} , β 依存性



コア: 弱い磁気シア, 磁気井戸形成

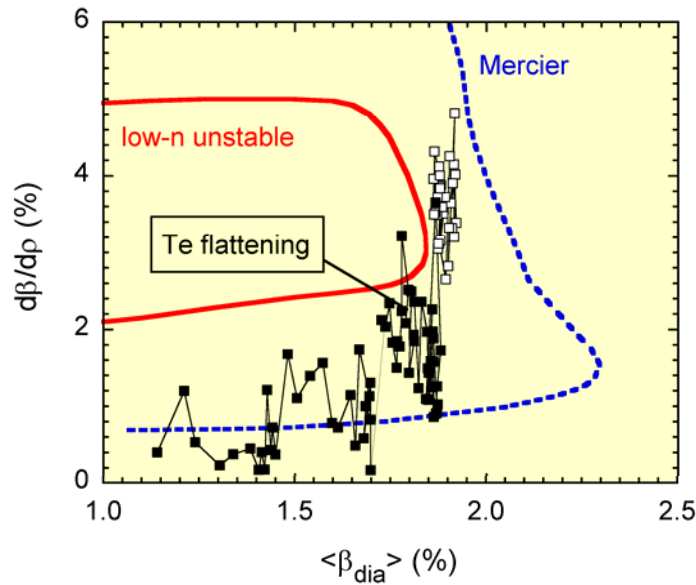


周辺部: 強い磁気シア, 磁気丘配位

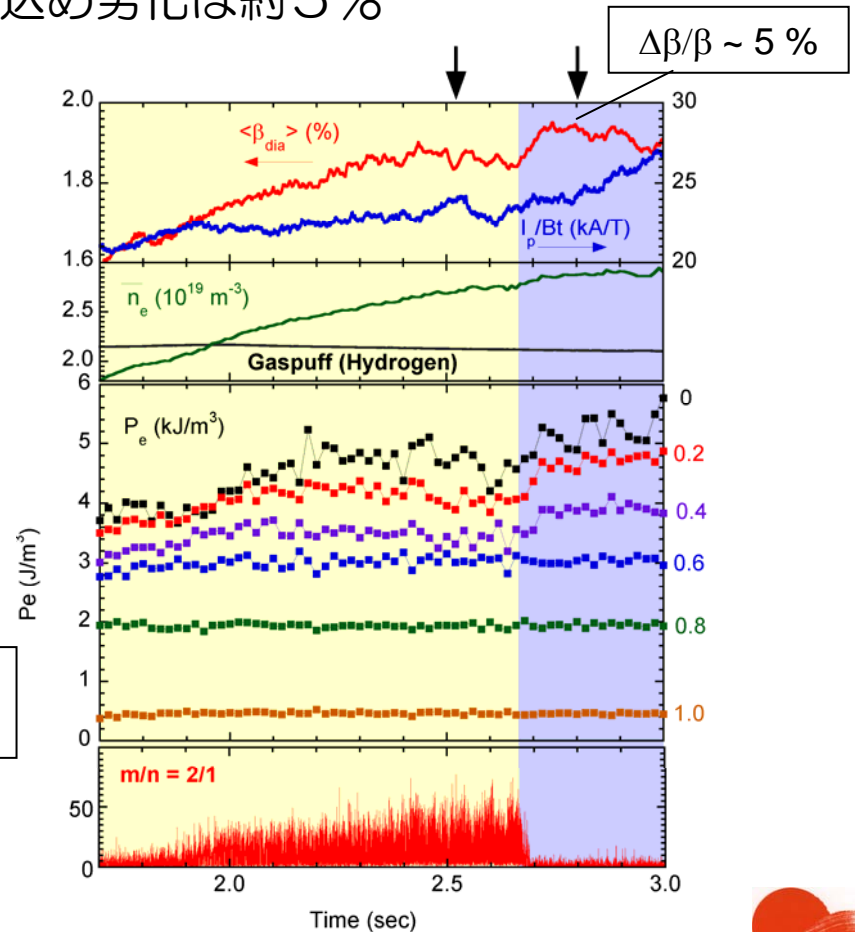
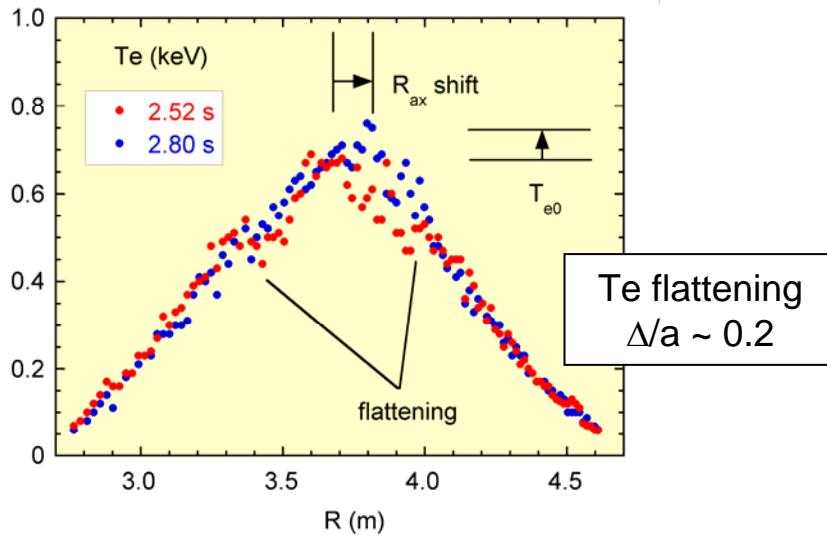
※抵抗性モードは磁気丘配位である限り不安定



コア部不安定性の ∇p 依存性 –ガスパフ放電–



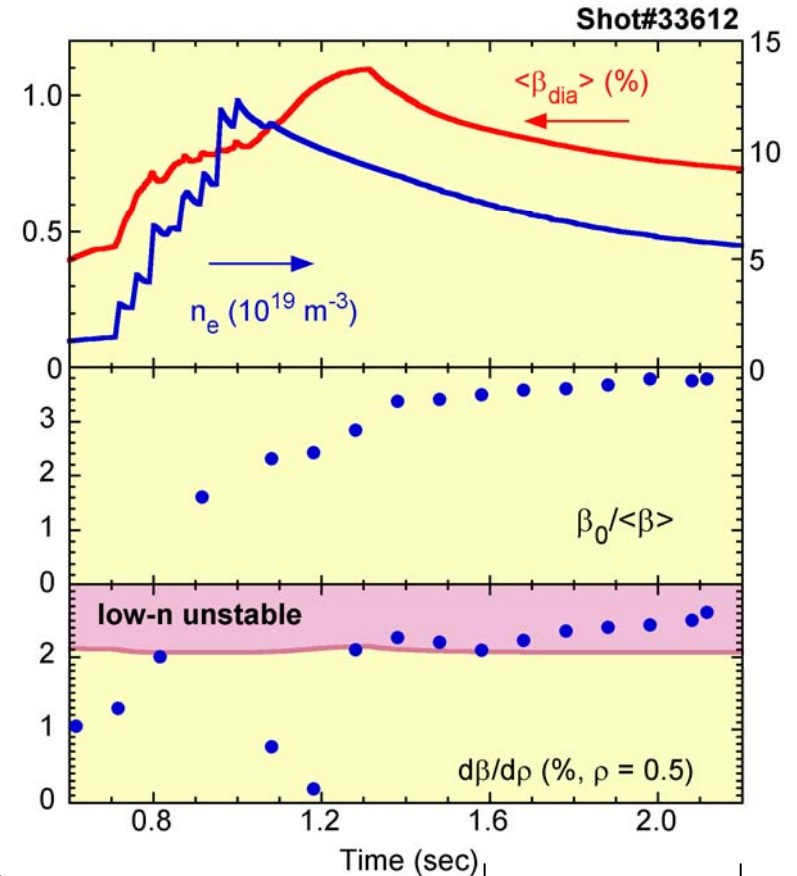
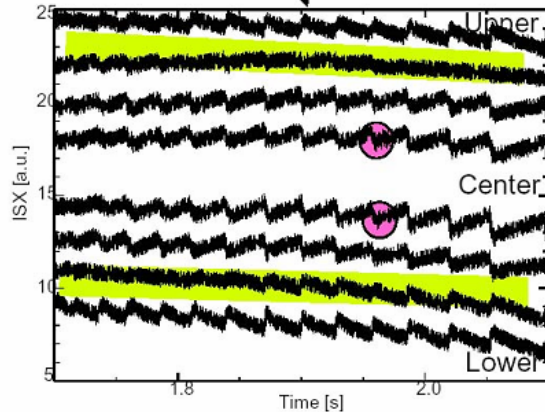
- 低n不安定域を通過する際、 $m/n=2/1$ の大きな振幅、電子温度の平坦化を観測
- 閉じ込め劣化は約5%



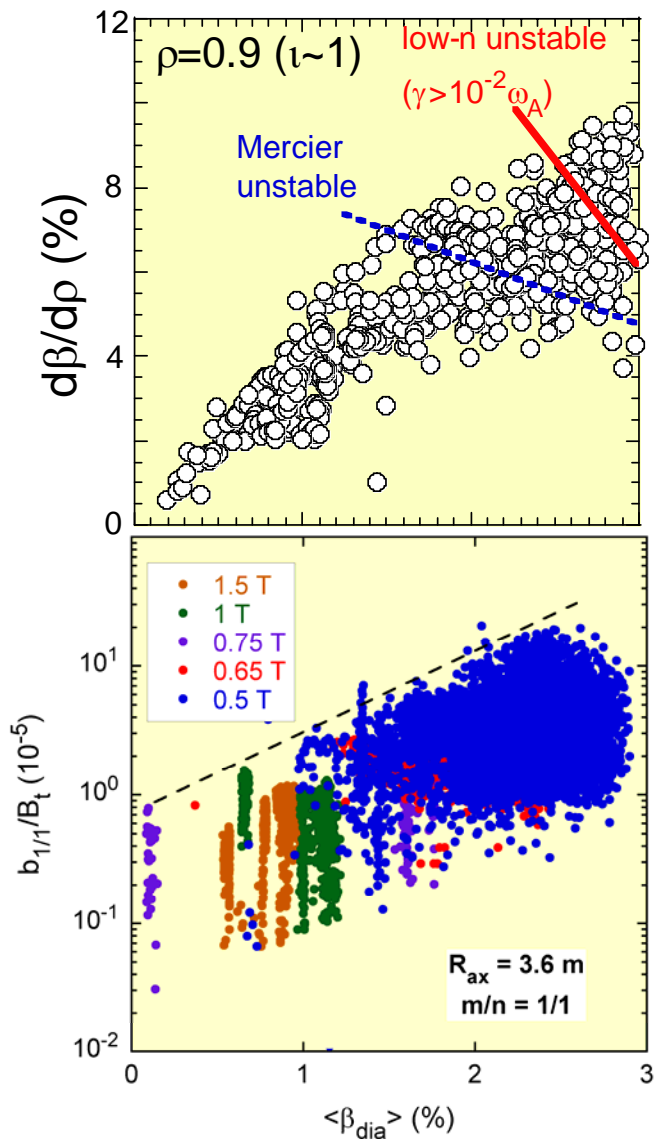
コア部不安定性の ∇p 依存性 —ペレット放電—



- ペレット入射後に $m/n = 2/1$ 鋸波振動発生
- ペレット入射後、ピークな圧力分布が形成され、 $m/n=2/1$ 共鳴面近傍の圧力勾配が増加
- プラズマが低 n 不安定領域に入り、鋸波振動発生



周辺部不安定性の β , ∇p 依存性 ($\langle \beta \rangle < 3\%$)

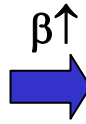


- 周辺部の圧力勾配上昇に伴い、 $m/n = 1/1$ 揺動強度は指数関数的に上昇
 - ※ $\langle \beta \rangle < 3\%$ 、 $I_p \sim 0$ kA
- 理想モードに対する安定性限界
 - 有限 β 効果によるシア低下、磁気丘配位
- 揺動強度のばらつき
 - ⇒磁気レイノルズ数依存性（後出）

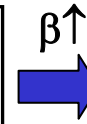
β の上昇に伴う周辺モードの変化 ($\langle \beta \rangle > 3\%$)



Suppression of
 $1/2\pi < 1$ modes



Suppression of
 $1/2\pi \leq 1$ modes



Suppression of
 $1/2\pi \leq 2$ modes

$\langle \beta_{\text{dia}} \rangle, n_e$

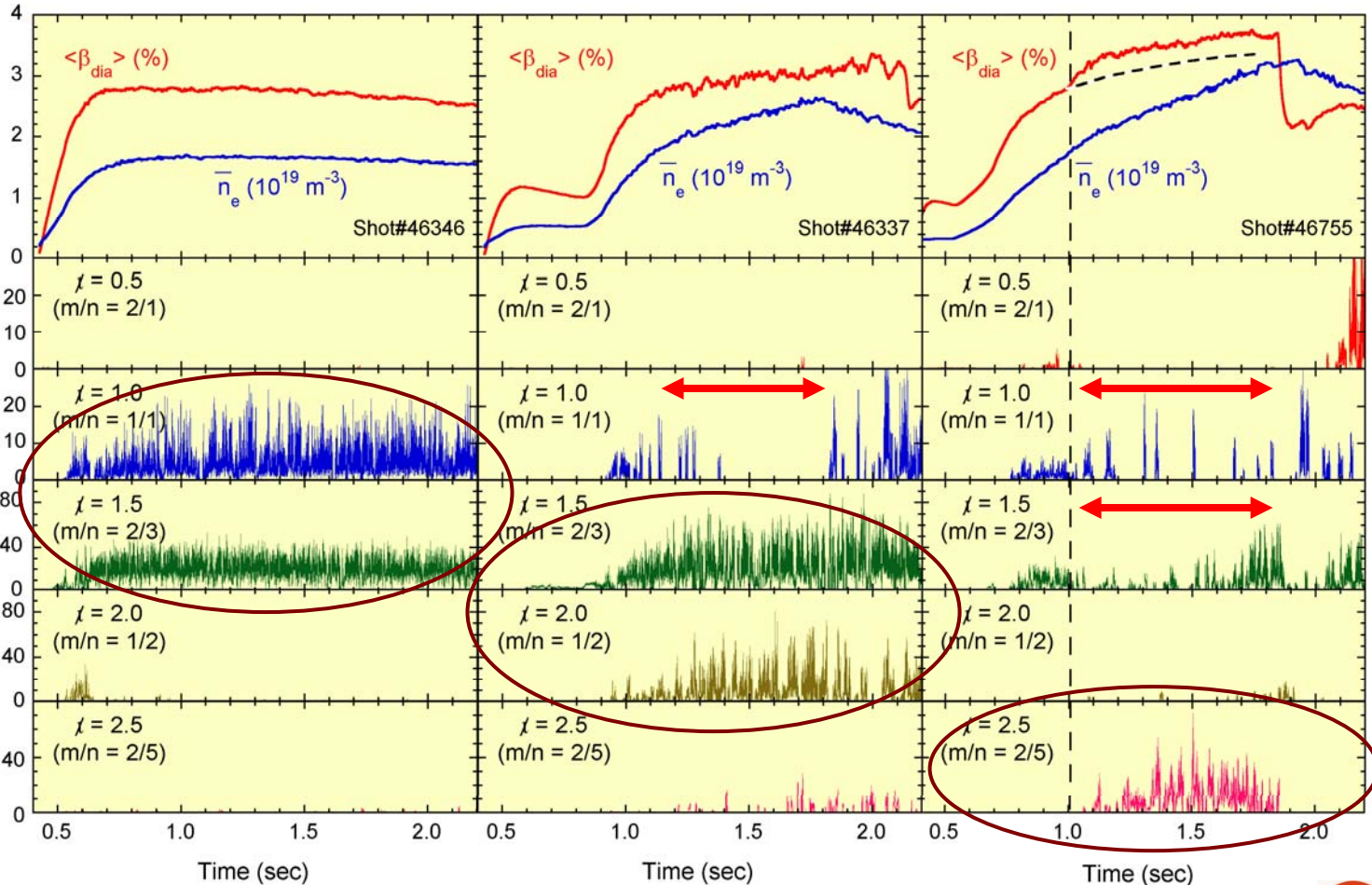
$1/2\pi = 1/2$

$1/2\pi = 1$

$1/2\pi = 3/2$

$1/2\pi = 2$

$1/2\pi = 5/2$



周辺部MHDモードの安定化



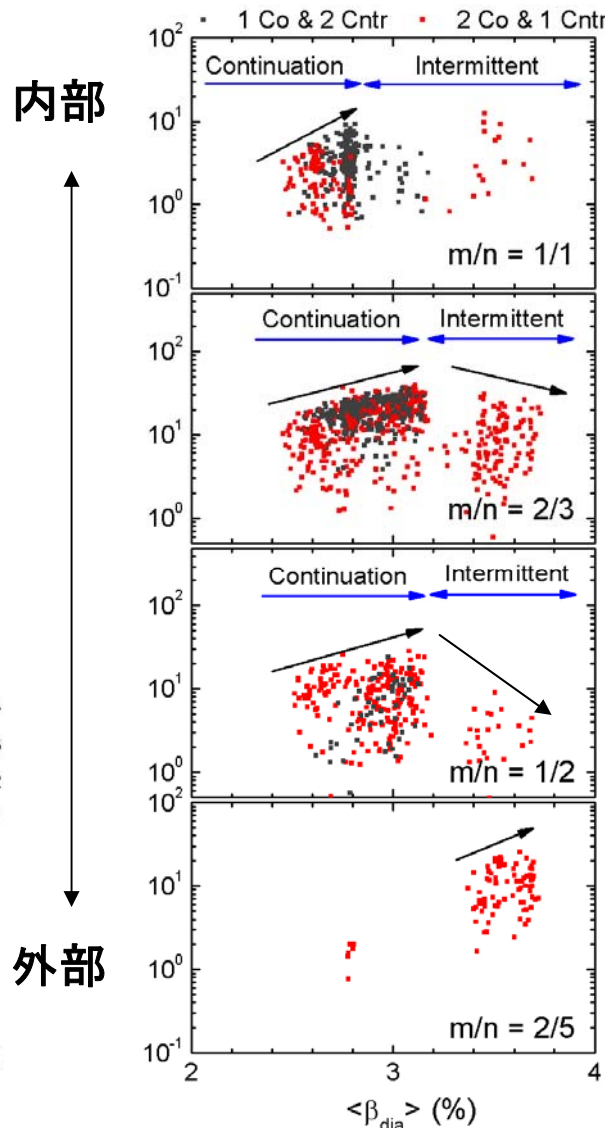
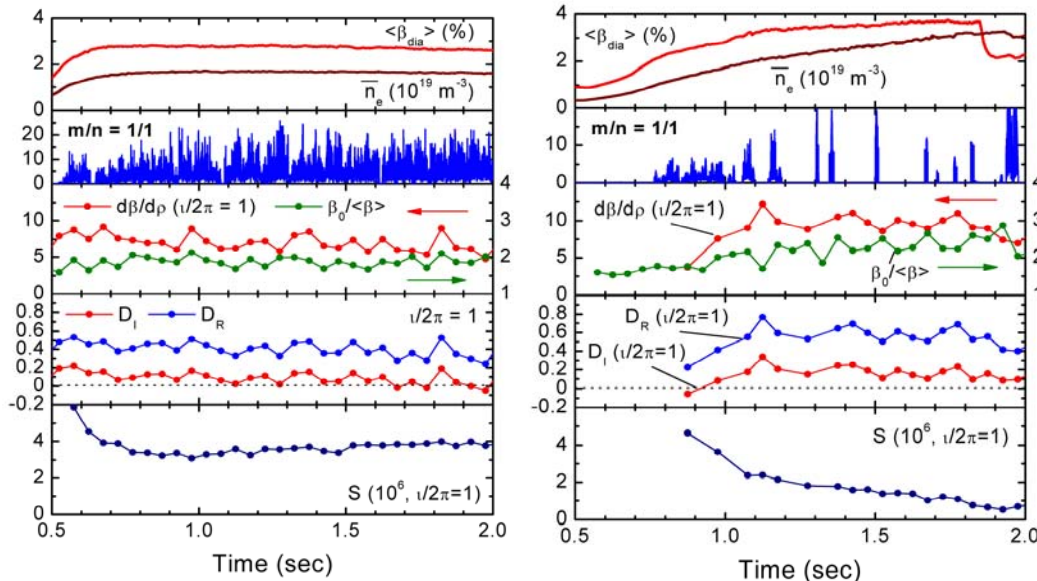
– β 値の上昇に伴い、内部から外部にかけてMHDモードが安定化

安定性解析：

$D_R > 0$ ：抵抗性モード不安定

$D_I < 0.2$ ：理想モード境界

⇒なぜ安定化？



電子温度分布の非対称構造

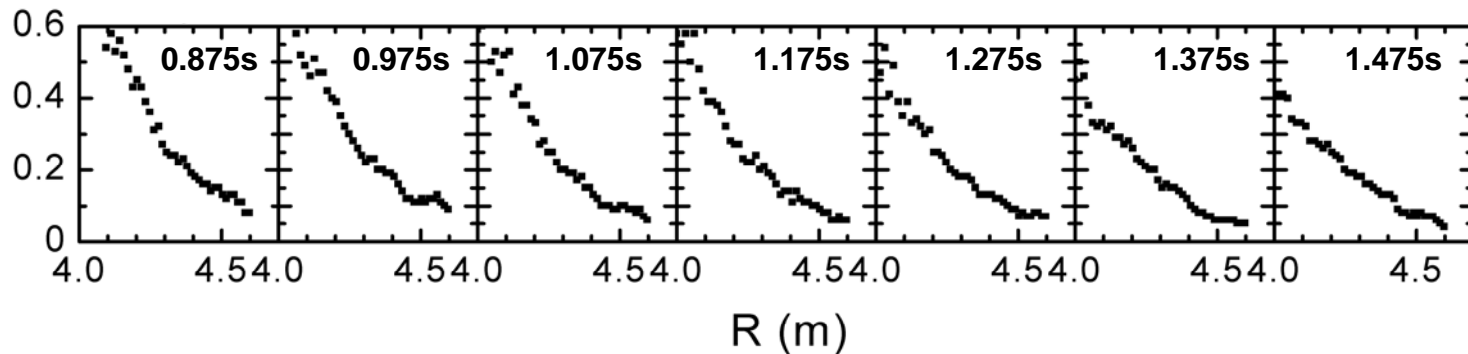
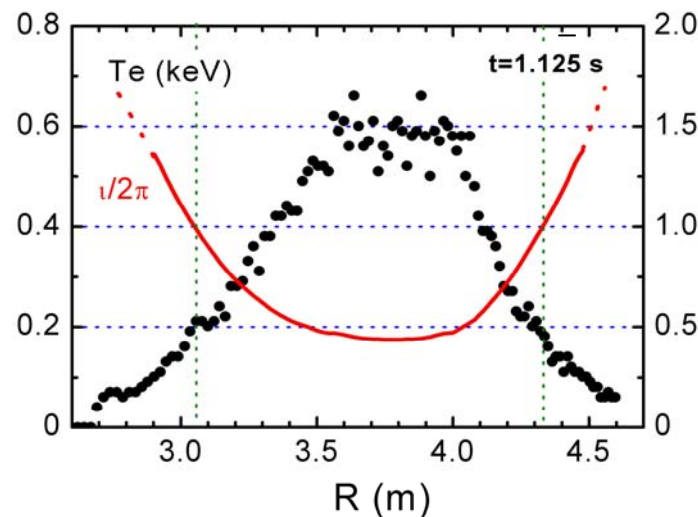
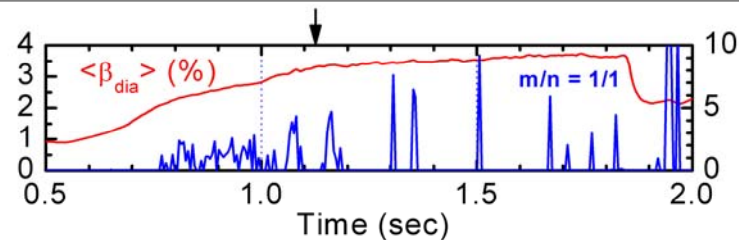


- 高 β 放電では、周辺部電子温度分布に平坦化がよく観測される

→ 平坦化がモード安定化に寄与?

- 現在の安定性解析手法 (VMEC) では、磁気島等を扱えない

⇒ HINTコードでの解析が必要



モード安定化に対する考察(1)



- 分布の平坦化が安定性化に寄与
 - 分布平坦化により理想、抵抗性モードが安定化
 - 平坦化が生じた時、すぐ外側の共鳴面近傍の圧力勾配が急峻になり、外側のモードが不安定化する
 - 実験結果と定性的に一致

- ・ 分布平坦化に対する推測：
 - (1) 自発的な安定化
 - MHDモードの非線形発展により自発的に安定化、分布構造が平坦化⇒揺動が完全に消滅
 - (2) モード回転の停止
 - 放電中に周波数の低下は全く観測されない
 - (3) 有限 β 効果による平衡変化
 - β 値の上昇に伴い、高 n 磁気島が発生し、圧力勾配が低下

モード安定化に対する考察(2)



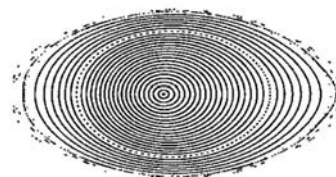
Calculation by HINT code

$$P = P_0(1-\rho^2)(1-\rho^8), I_p = 0$$

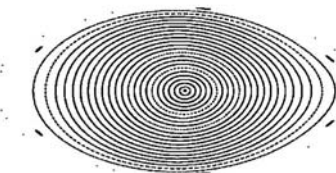
有限 β 効果による磁気面の変化

- 周辺部磁場構造がエルゴディックに変化
- 形成される圧力勾配はどのように変化するか？

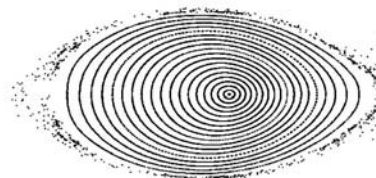
⇒詳細な実験との比較が必要



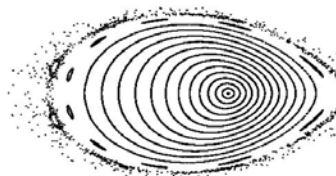
$\langle \beta_{\text{dia}} \rangle \sim 0\%$



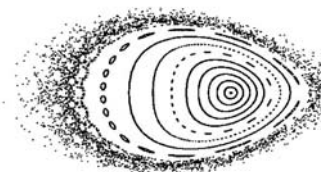
$\langle \beta_{\text{dia}} \rangle \sim 1\%$



$\langle \beta_{\text{dia}} \rangle \sim 2\%$



$\langle \beta_{\text{dia}} \rangle \sim 3\%$



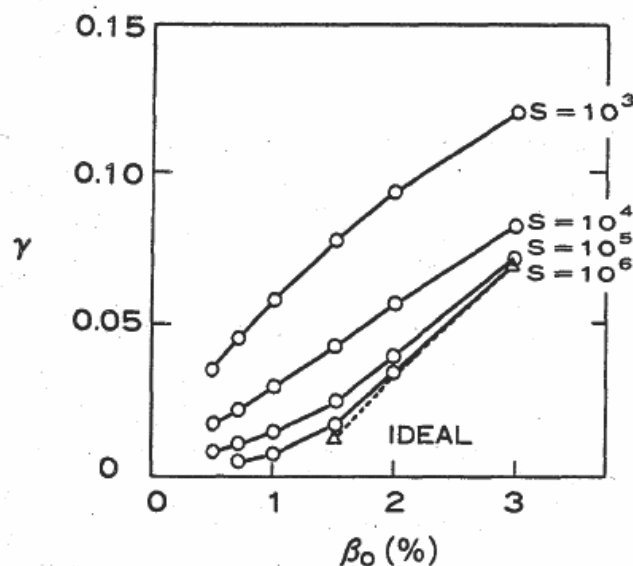
$\langle \beta_{\text{dia}} \rangle \sim 4\%$

磁気レイノルズ数の重要性



- 抵抗性交換型モードの成長率は磁気レイノルズ数に依存 ($\gamma_{\text{MHD}} \propto S^{-1/3}$).

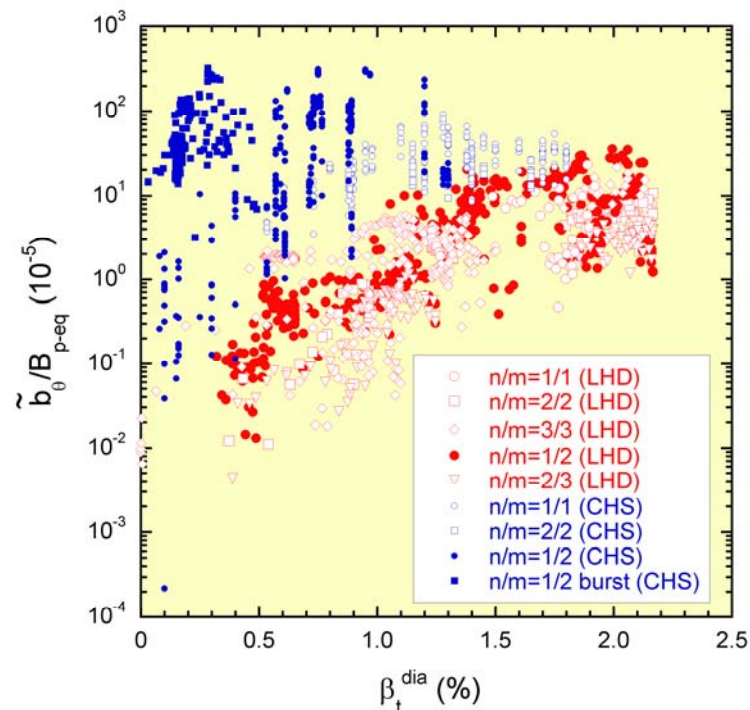
$$S = \frac{\tau_R}{\tau_A} \propto \frac{aBT_e^{3/2}}{ZA^{1/2} \sqrt{n_e}}$$



Growth rate of n=1 mode
(K.Ichiguchi et al., NF 1989)

CHS: $S=10^3 \sim 10^5$

LHD: $S=10^6 \sim 10^8$



Comparison of MHD activities
in between LHD and CHS

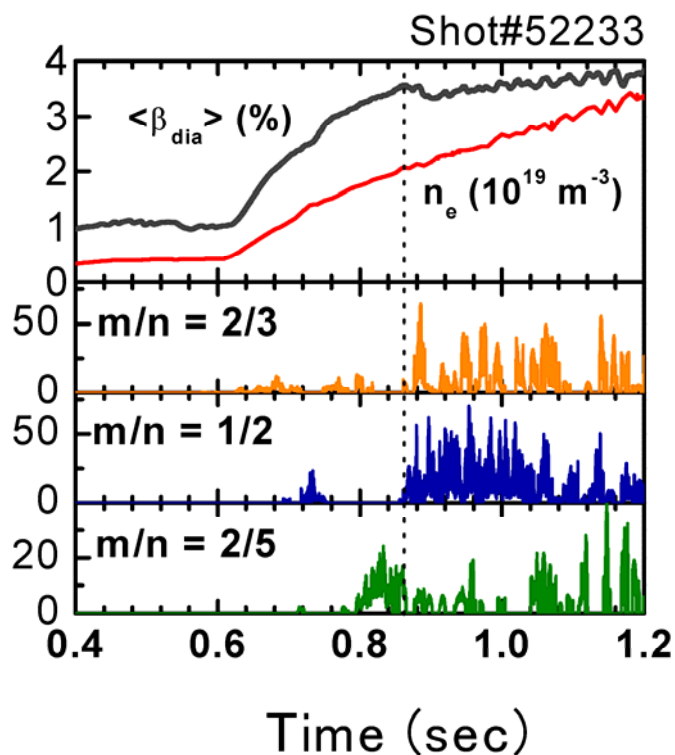
(S.Sakakibara et al., NF 2000)



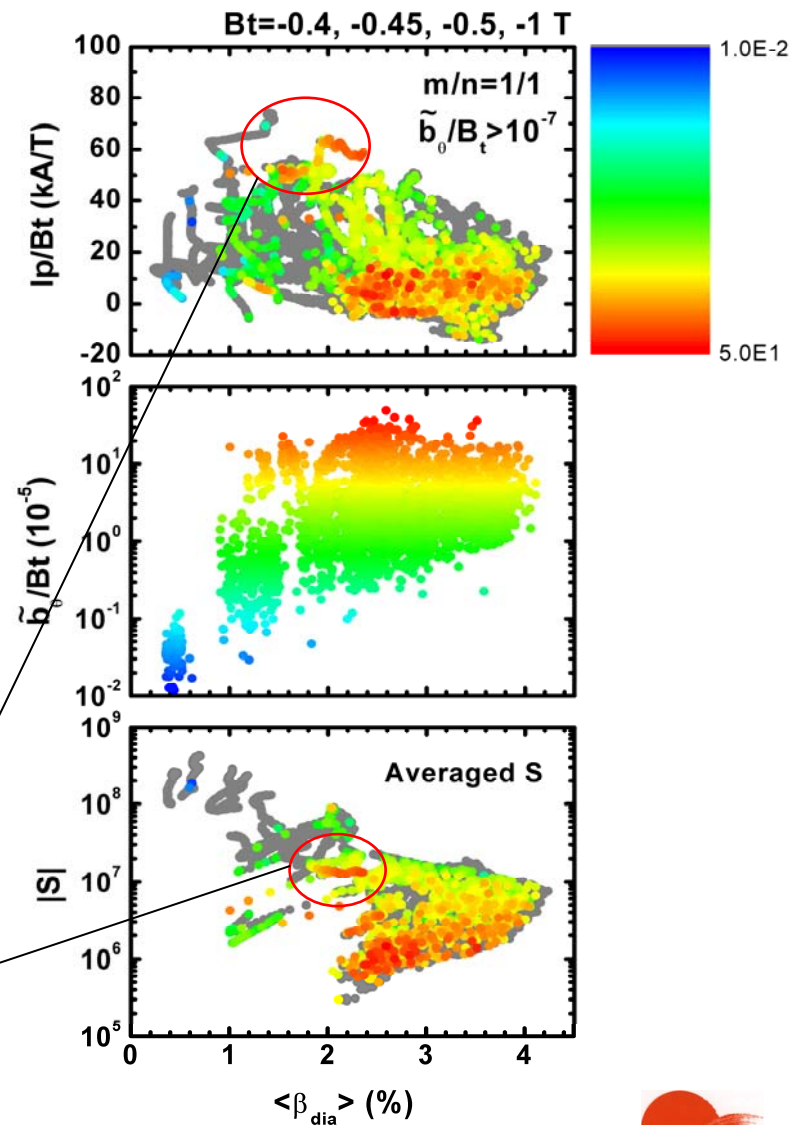
MHDモードの磁気レイノルズ数依存性



- MHDモードの飽和レベルは ∇p 及び磁気レイノルズ数に強く依存



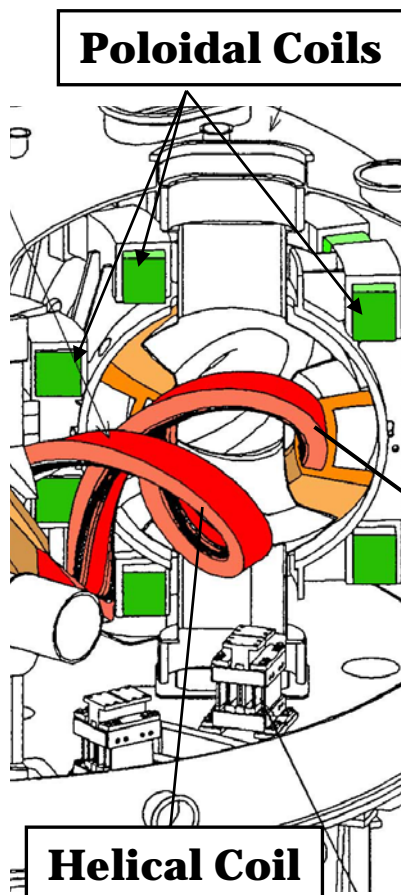
MHDモードはプラズマ電流（磁気シア低下）によっても不安定化



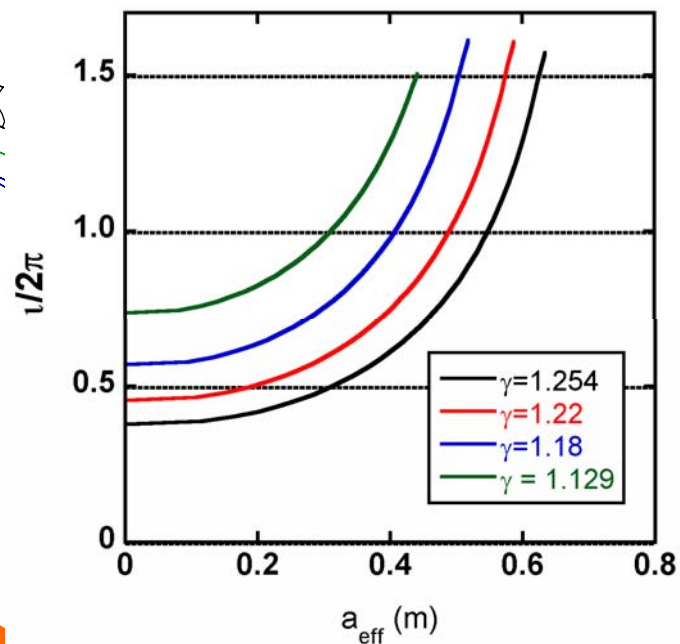
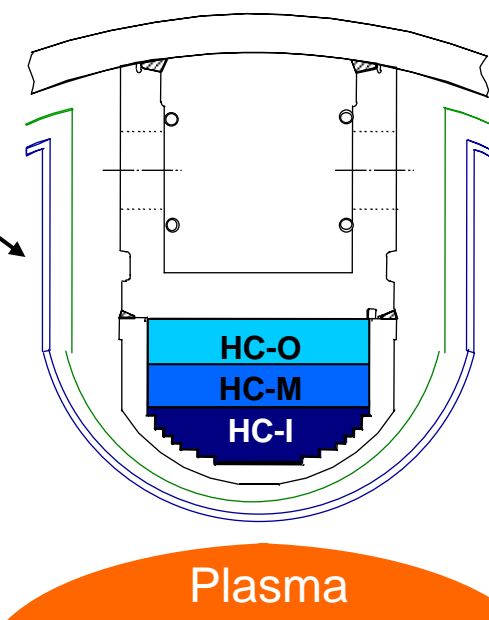
回転変換分布制御実験



ヘリカルコイルの電流比を変えることにより回転変換分布を制御



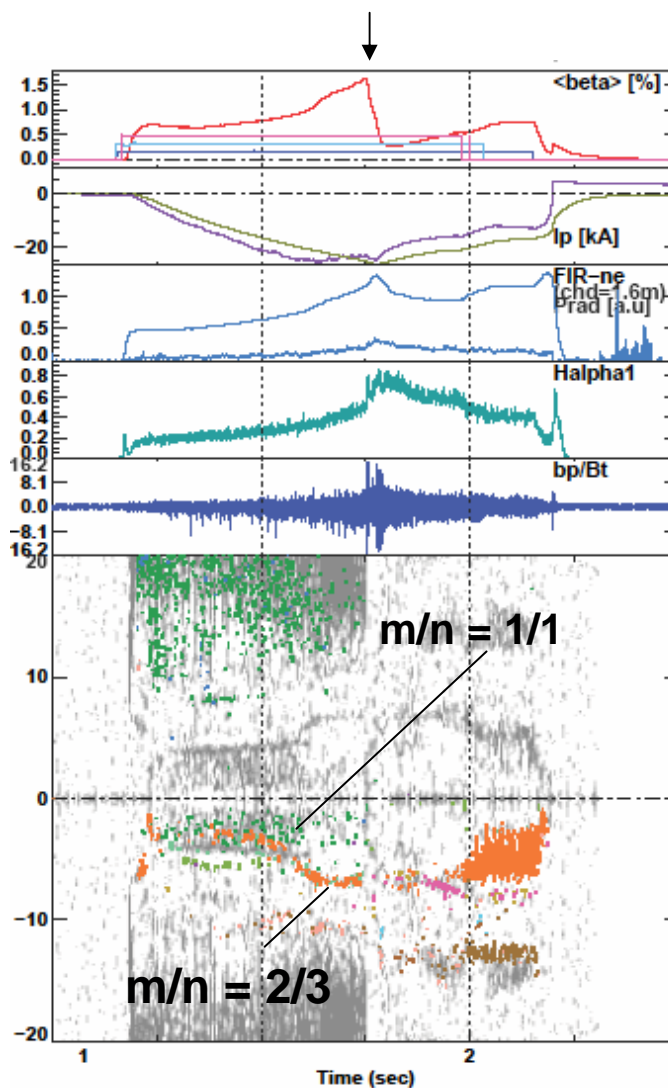
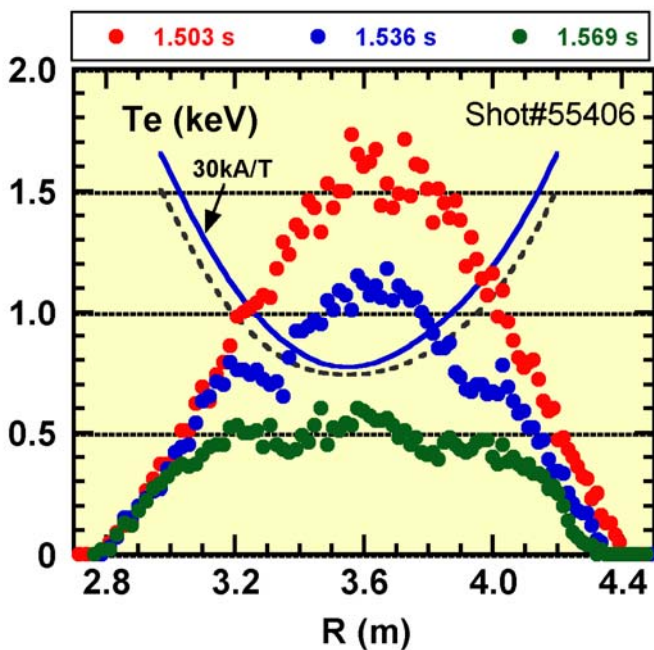
- アスペクト比を上げることにより、回転変換分布を上昇、磁気シアを低下
- 磁気軸シフト抑制⇒加熱効率上昇、磁気井戸形成抑制



プラズマ電流による内部崩壊現象の発生



- プラズマ電流が30kA/Tを超えた時, $m/n = 1/1$ モードによる内部崩壊現象が発生
- 崩壊により損失 $\Delta\beta/\beta \sim 70\%$!
- 強いシアを有する周辺部は大きな劣化なし



内部崩壊時のプラズマ電流

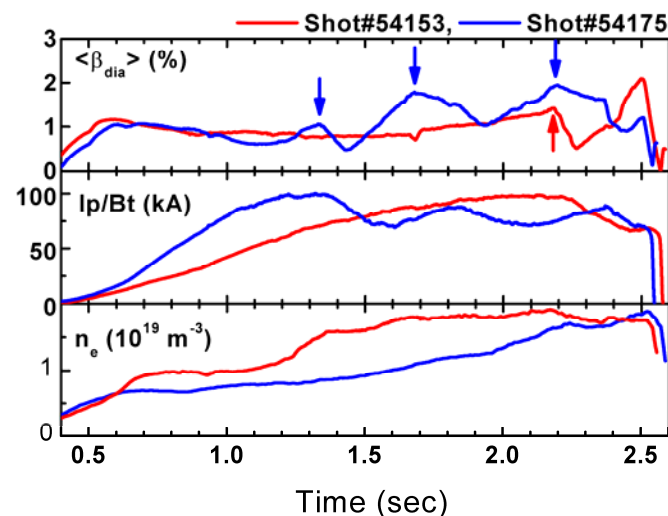


- γ の異なる配位では内部崩壊現象が生じる電流値が異なる

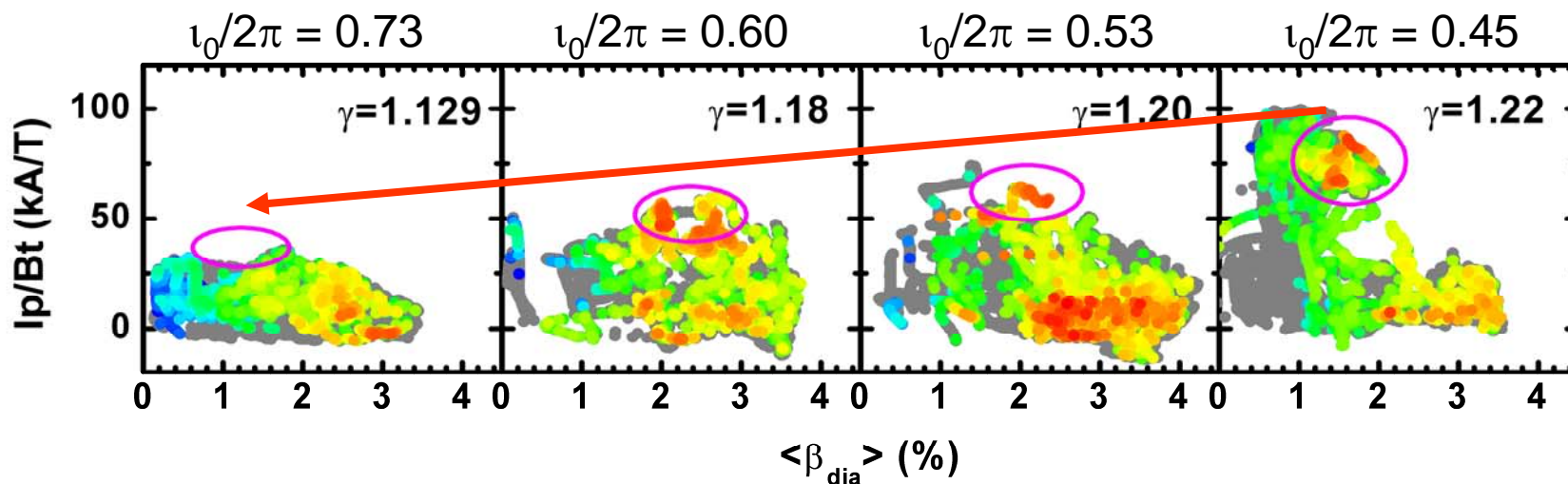
$$\gamma = 1.129 \quad (i_0/2\pi = 0.73) \quad : \sim 30 \text{ kA/T}$$

$$\gamma = 1.22 \quad (i_0/2\pi = 0.45) \quad : \sim 100 \text{ kA/T}$$

- 崩壊の性質はほぼ同じ ($\rho \sim 0.5$)



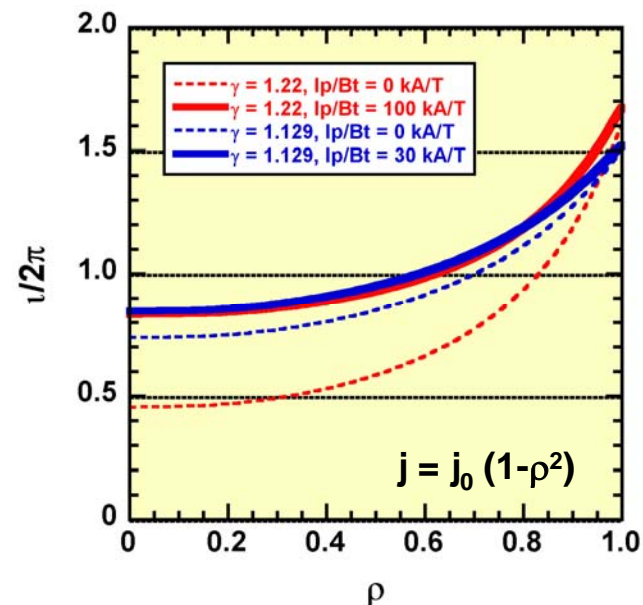
m/n = 1/1 activity



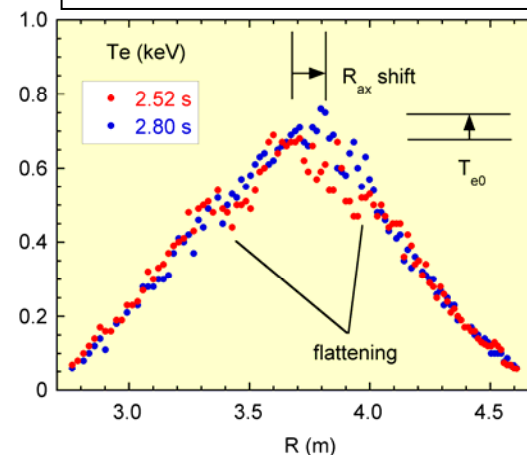
内部崩壊現象に対する考察



- 内部崩壊現象が発生する時、回転変換分布はほぼ同じ形状となる
- 電流分布がさらにピークであれば、double resonance配位となる可能性あり
- 磁気丘、磁気シアの低下により交換型モードが不安定化
 - シア低下によるモード構造の拡がり、など
- 磁気面が存在するため、disruptionには至らない



Affect of $m/n = 2/1$ mode



$m/n = 1/1$ による崩壊現象のインパクト

$m/n = 2/1$: $< 10\%$, $\Delta/a \sim 0.2$

$m/n = 1/1$: $> 50\%$, $\Delta/a > 0.4$

→ 崩壊の程度に m 数依存性あり

不安定性に関するまとめ



- LHDで観測されるMHD拳動は、圧力勾配及び磁場配位の構造に起因する交換型不安定性の枠組みで説明可能（AEを除く）：
 - コア近傍の不安定性は、ベータ値上昇に伴う磁場構造の自発的な変化（磁気井戸形成）により安定化される。
 - 周辺部MHD拳動はベータ値がある閾値を超えた時、安定化する傾向が見られる。有限ベータ効果による磁場構造の変化、不安定性の自己安定化などを視野に入れて検討を進めている。
 - MHD拳動は密度、温度（レイノルズ数）依存性を持つ。プラズマの高温化によるモード安定化により、さらなる高ベータ化が期待できる。
 - 磁気シアの低下は閉じ込めの劣化をもたらし、閉じ込めへの影響度はモードの空間的構造に依存する。
 - 大きな閉じ込め劣化が生じた場合でも、平衡破壊には至らない。

⇒ヘリオトロン炉設計、運転領域に対し有益な情報

MHDモードの成長、飽和及び平衡特性を説明する実験・理論解析

(1) 詳細な三次元MHD平衡の再構築

- 1-1 Ergodic領域を扱える平衡コードの整備、実験との比較
- 1-2 非等方圧力を有するMHD平衡の性質→ポスターで発表

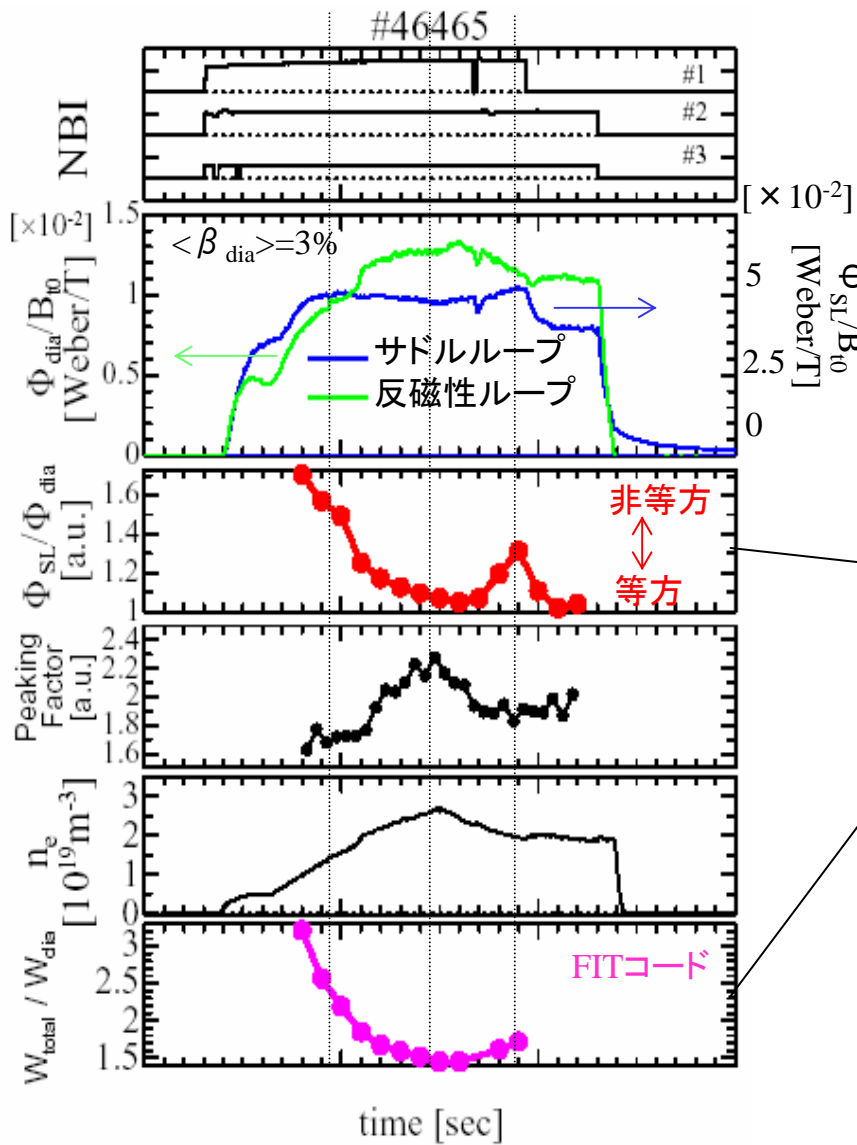
(2) 不安定性特性

- 2-1 (1) をベースとした線形安定性の見直し
- 2-2 非線形飽和現象を説明する理論モデル

(3) 実験観測

- 3-1 周辺部計測の強化
- 3-2 閉じ込めに対する定量評価 (輸送との関係)

磁気計測による非等方圧力の定量評価



・ プラズマ圧力の非等方性の定量評価は、MHD平衡・安定性解析を行う上で重要
(LHDではビーム成分が有為に存在)

・ j_{dia} , j_{PS} による磁束を計測することにより、圧力の非等方度を定量評価し、詳細な平衡再構築を行う

Φ_{dia} , Φ_{PS} の比から非等方度を評価

定性的に一致

粒子軌道計算による評価

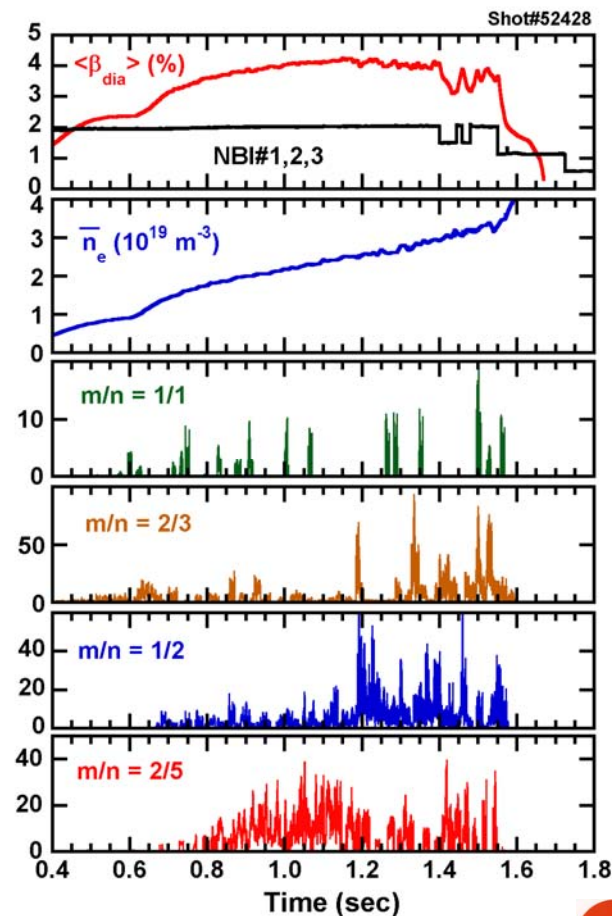
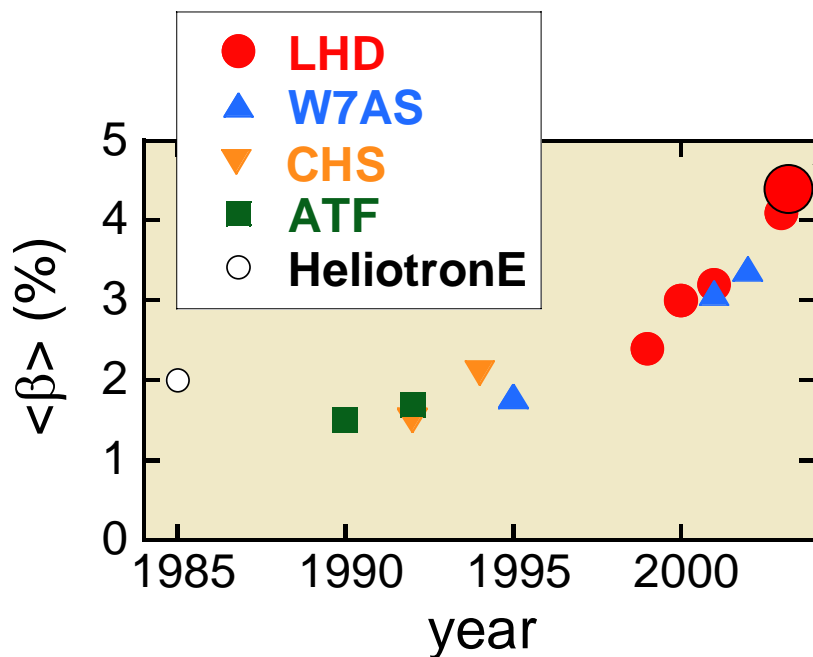
詳細はポスター講演にて



ヘリカル装置におけるベータ値の進展



- ・磁場配位最適化、加熱パワー増強によりベータ値4.3%を達成
- ・閉じ込め劣化を引き起こす強い不安定性は発生していない
- ・周辺部に共鳴する不安定性が支配的に観測
- ・密度上昇による不安定化は磁気レイノルズ数の低下によるもの⇒より高温化で抑制？



高ベータプラズマ生成の意義



- プラズマの高ベータ化

→ 経済的な核融合炉を実現する上で重要

$$\text{ベータ値} = \text{プラズマ圧力} / \text{磁場の圧力}$$

より小さい磁気エネルギーでプラズマエネルギーを効率よく定常的に保持することが重要

(核融合出力 $\propto \beta^2 B^4$)

→ 磁場閉じ込め装置共通の課題

LHD目標値：5%以上

