



第7回 若手科学者によるプラズマ研究会
「燃焼プラズマに向けた研究の現状と展望」
平成16年3月17(水)～19日(金)
〒311-0193 茨城県 那珂郡 那珂町 向山801 - 1
日本原子力研究所 那珂研究所 制御棟2階 大会議室



ヘリカル型装置における MHD実験研究の現状

成嶋 吉朗

核融合科学研究所

〒509-5292

岐阜県土岐市下石町322-6

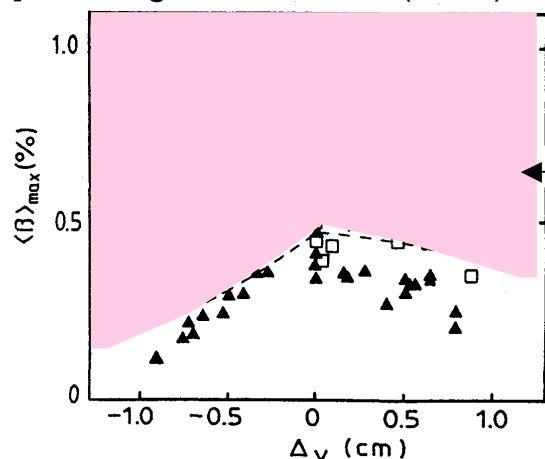
これまでのヘリオトロン実験

低 n -MHDがヘリオトロン装置の運転領域に与える影響 (古キ良キ時代ノ実験)

Heliotron DR

不安定領域には突入しない
理論と実験の一致

[N.Yanagi et al., N.F.32(1992)1264]

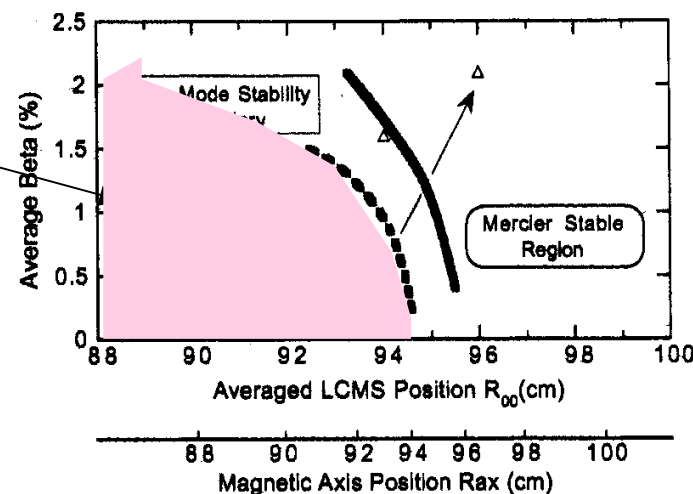


low- n MHD unstable

CHS

不安定領域でも運転可能
理論と実験の相違

[S.Okamura et al., N.F.9Y(1999)1337]



何が違うのか？

磁場配位の相違？

=> LHD はH-DRよりもCHSに似ている。

入射パワーの違い？

=> H-DR 2MW/m³、CHS ~ 2MW/m³、LHD ~ 0.5MW/m³

不安定領域の計算法の違い？ (STEP code, Mercier parameter; $D_1 > 0.2$)

=> 3D MHD 安定性解析コード (TERPSICHORE) and D_1

LHDのMHD概要



磁場配位

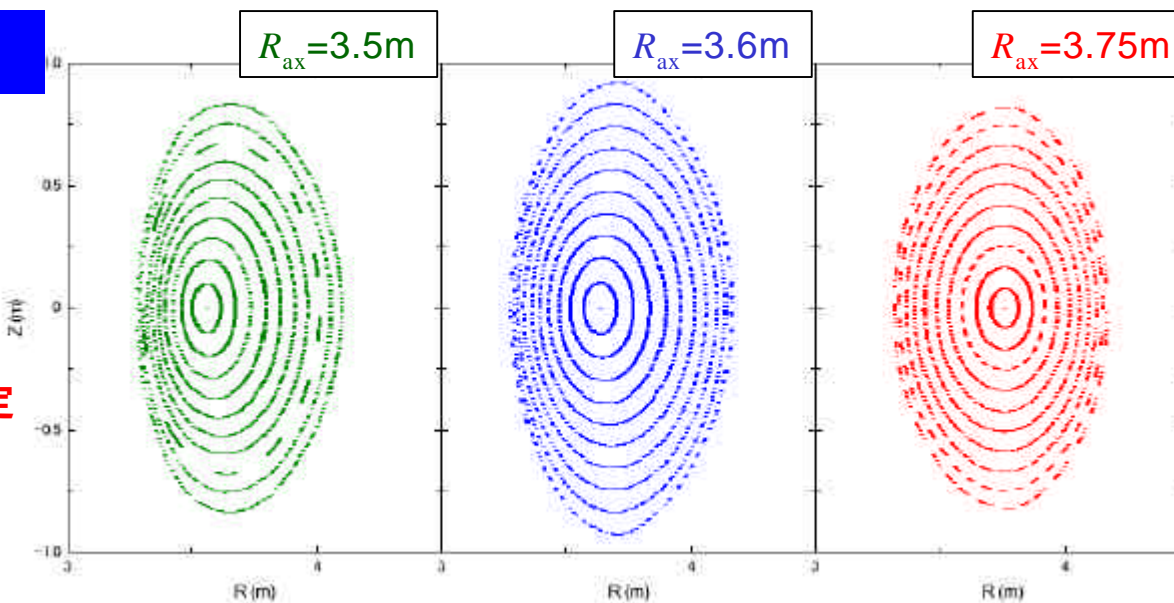
磁気軸位置 R_{ax} の『内側シフト』

- ? リップルの低減
- 良好な粒子閉じ込め
- 良好な新古典輸送

? 磁気丘の形成 ? **MHD 不安定**

実験

4%に達するベータ値が得られている。



理論予測

良好
悪化

粒子閉じ込め

悪化
良好

MHD 安定性

実験

良好

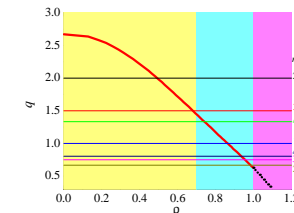
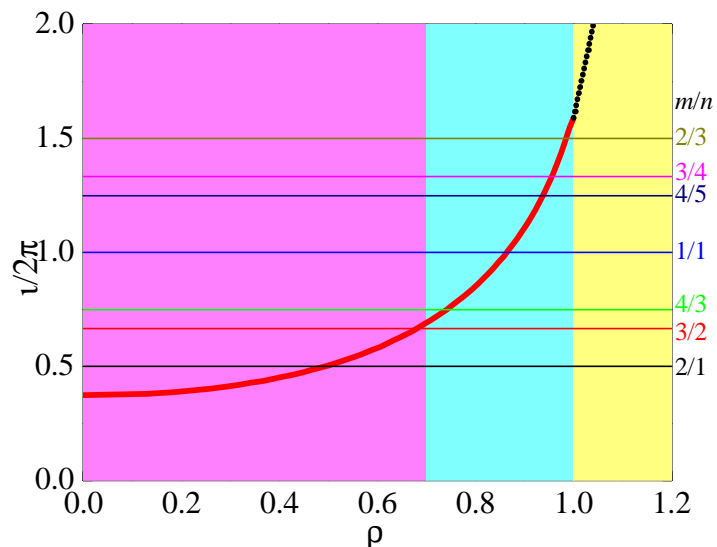
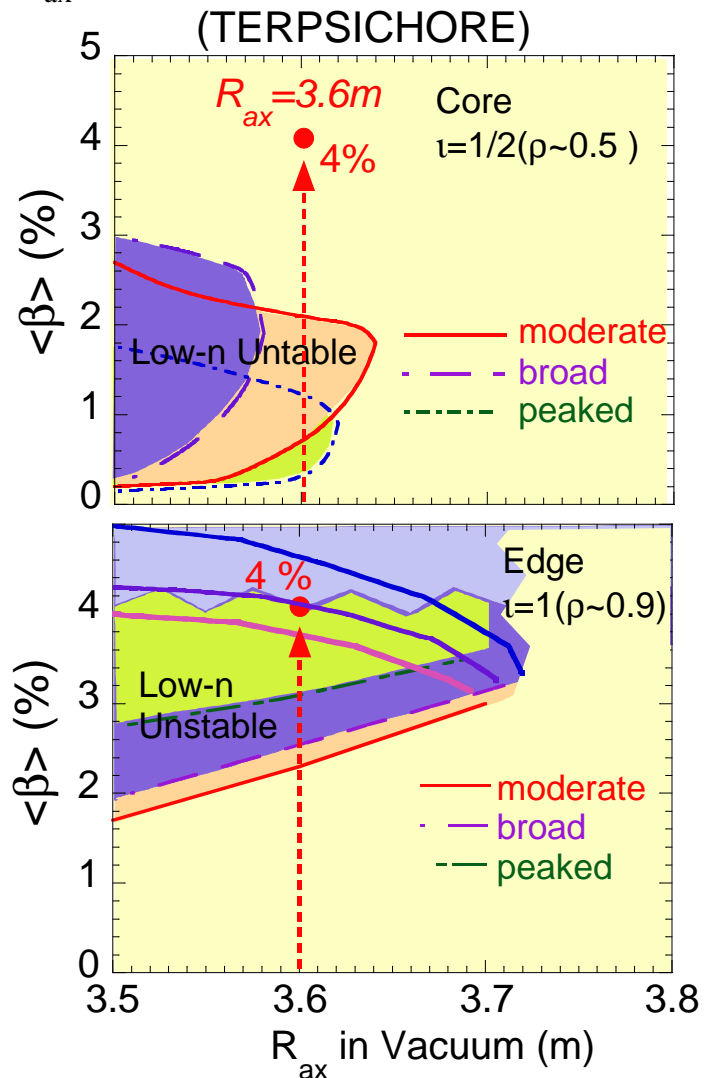
エネルギー閉じ込め

悪化

LHDのMHD概要

理想交換型モードに対する理論予測 ~ 磁気軸位置依存性 ~

β - R_{ax} ダイアグラム上での低 n 不安定化領域



標準配位 $R_{ax} = 3.6m$
コア: 高 β 領域で($\beta > 2\%$)安定
周辺: $\beta \sim 3\%$ で不安定化が懸念される。

高 b 放電でもディスラプションは観測されていない。

LHDにおける高 β 実験で用いる配位



磁場配位 : (標準配位)

磁気軸位置 $R_{ax}=3.6$ [m]

コイルピッチパラメータ $\gamma=1.254$

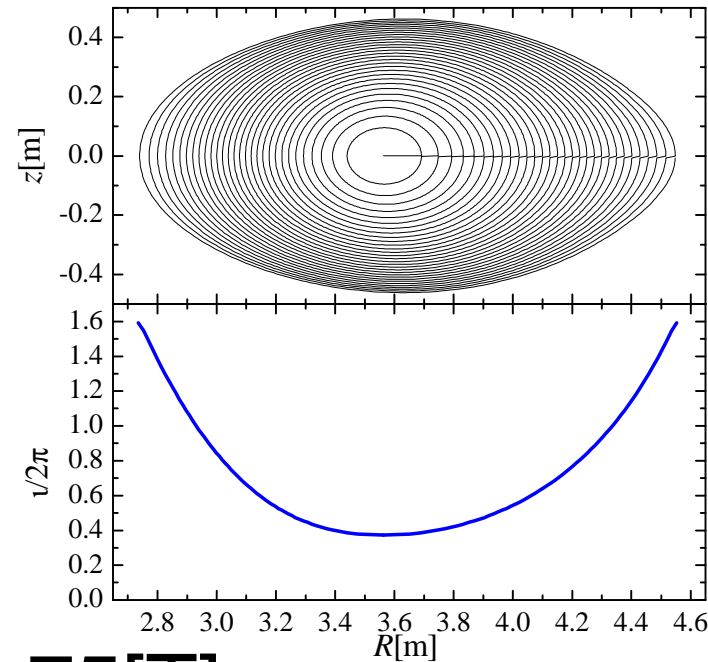
$$\gamma = Ma_c/LR$$

M : ヘリカル周期数(10)

L : ヘリカル極数(2)

a_c : コイル小半径(0.897 ~ 1.053)

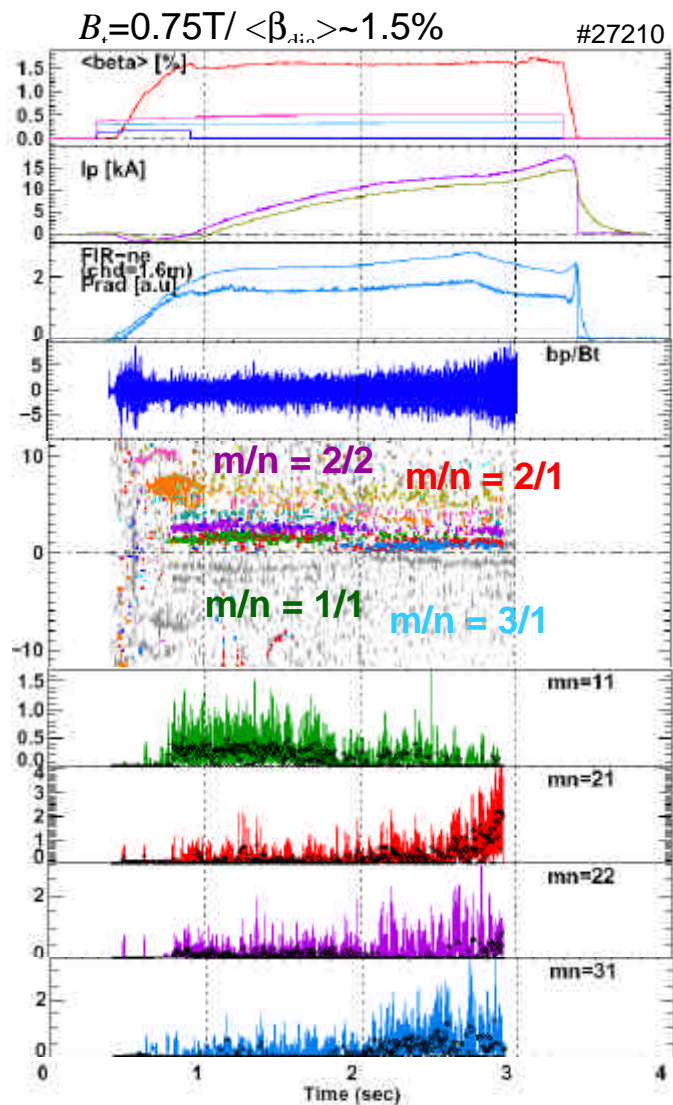
R : コイル主半径(3.9)



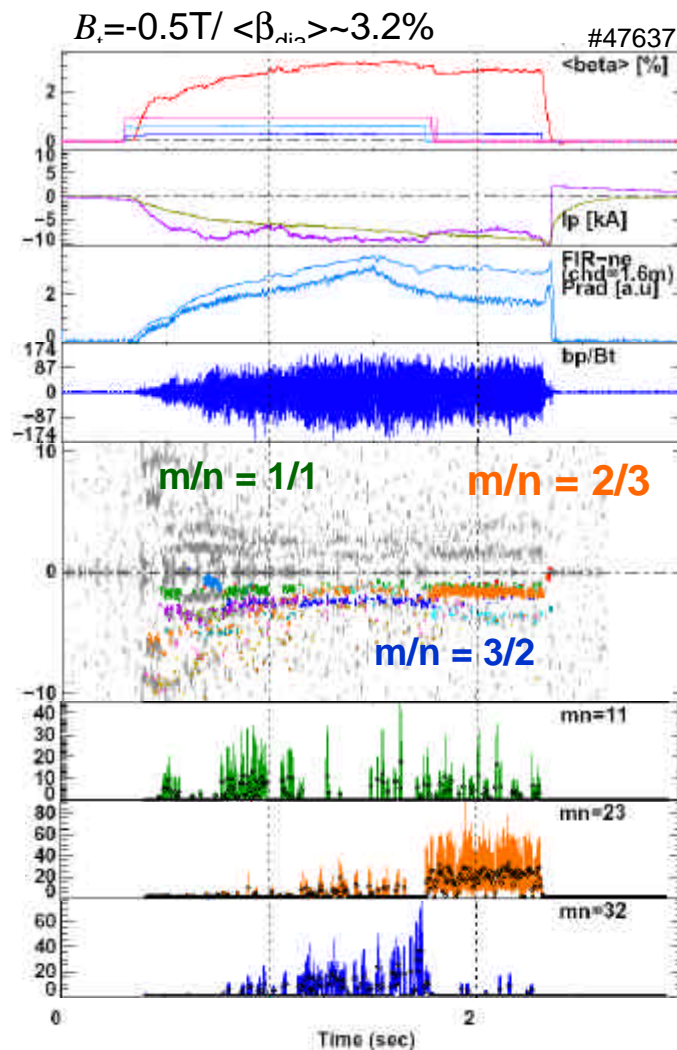
磁場強度 : $|B_t|=0.5 \sim 0.75$ [T]

加熱 : NBIプラズマ

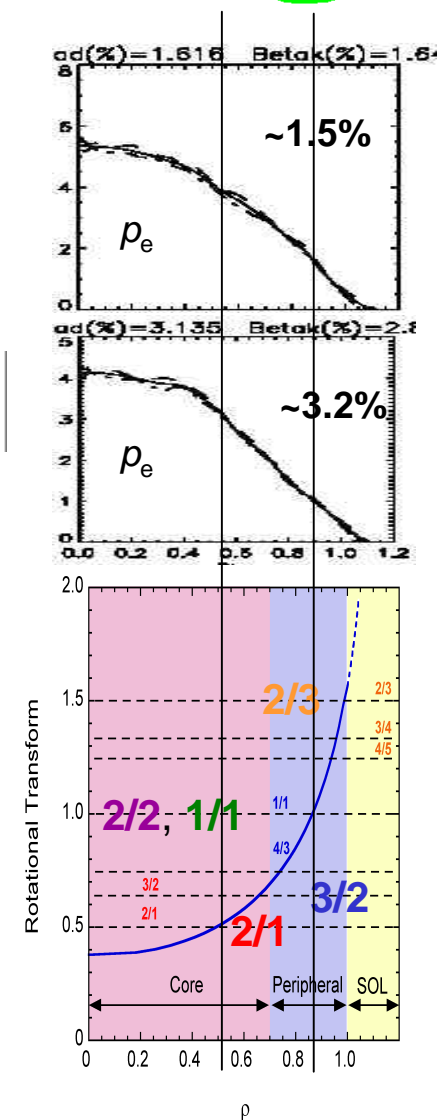
高β実験 磁場揺動の典型例 ($R_{ax}=3.6m$)



$m/n=2/1, 1/1, 2/2$ モードが観測される



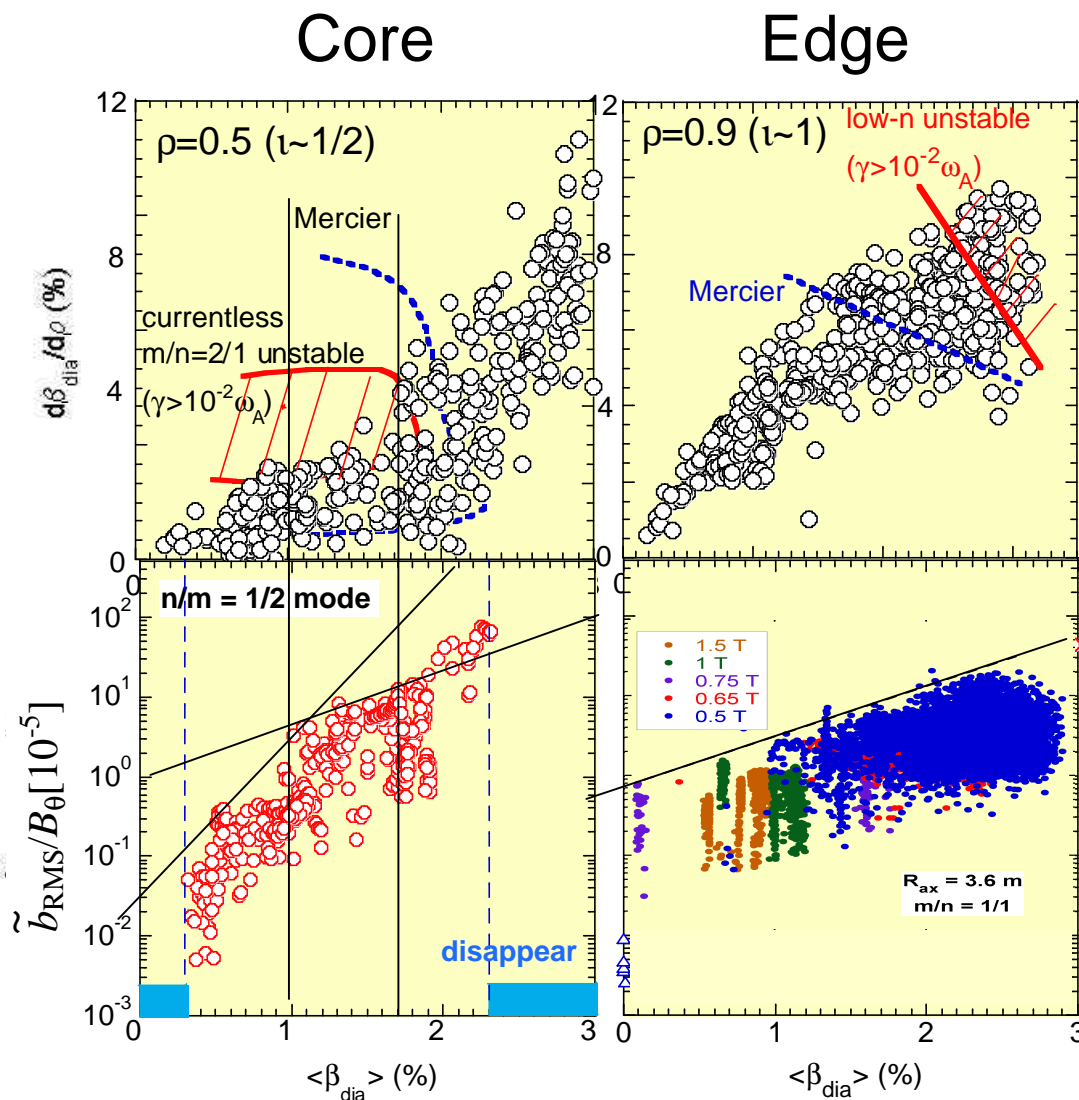
$m/n=2/1$ モードが消失、 $2/3$ モードが出現。



磁場揺動と圧力勾配の特性

典型的な共鳴面($\nu/2\pi=0.5, 1.0$)における
磁場揺動と圧力勾配の β 依存性。

$$B_t = 0.5 - 1.5 \text{ T} / R_{ax} = 3.6 \text{ m}$$

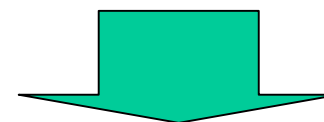


Core

圧力勾配
低 n 不安定領域を避けている(ように見える)
飽和 $1 < \beta < 1.8\%$
増加 $\beta > 1.8\%$
磁場揺動
メルシェ安定領域では観測されない。

Edge

圧力勾配
 β とともに増加
磁場揺動
メルシェ安定領域でも観測される。

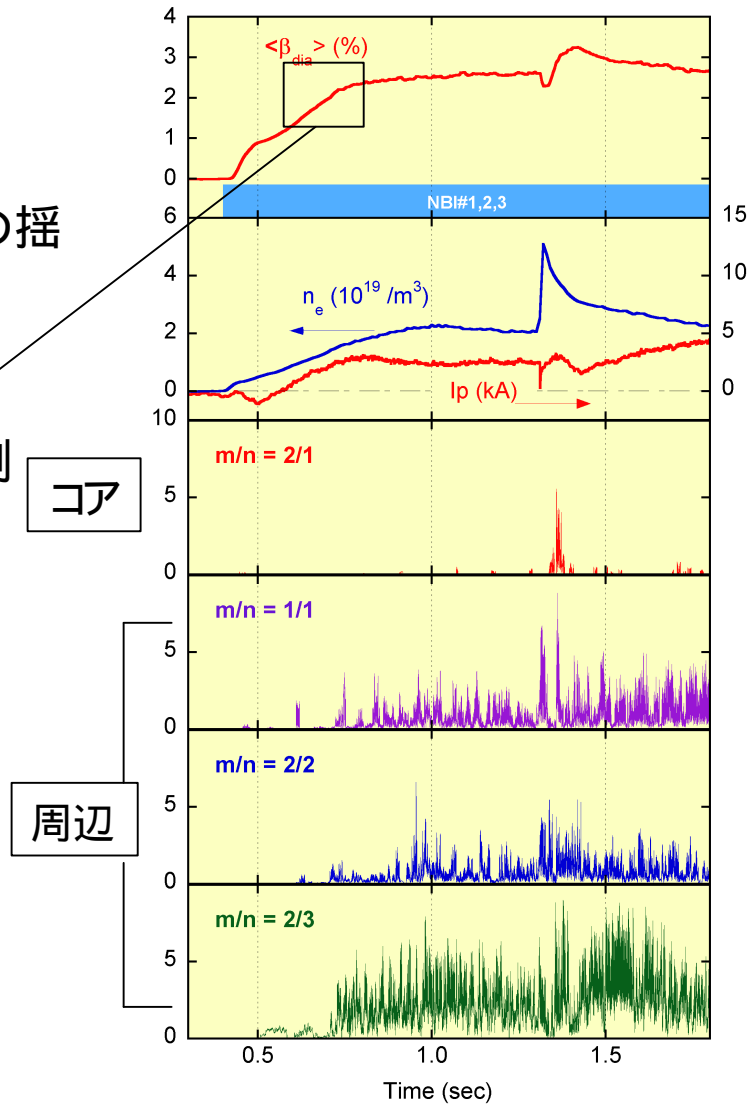
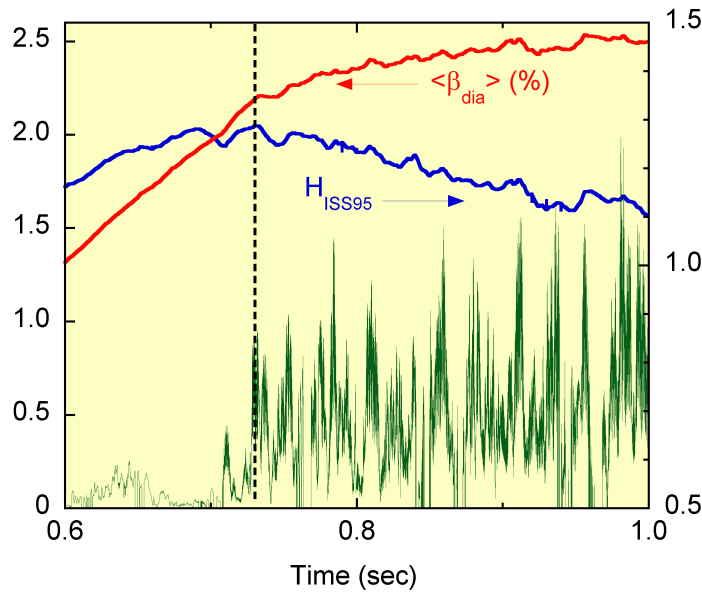


高 β プラズマでは周辺モード
の不安定化が懸念される。

高βプラズマでの周辺部MHD挙動

高β放電 ($R_{ax}=3.6m, B_t=0.5T, \gamma=1.254$)

- $\langle \beta \rangle > 2.5\%$ における $m/n=2/1$ モードは安定
- β に伴う圧力勾配の上昇とともに $m/n=1/1$ モードの揺動強度が指数関数的に増加
- 低 n 不安定領域の出現
- 周辺MHDモードが 上昇を制限する放電も観測



$\langle \beta \rangle > 3\%$ 領域での周辺部MHD挙動が重要

$\gamma=1.22$ 配位における高 β 実験

$\gamma=1.22$ 配位 :

標準配位よりも高い回転変換

Shafranov shiftが起きにくい

加熱吸収の観点から有利

磁気井戸が形成されにくい

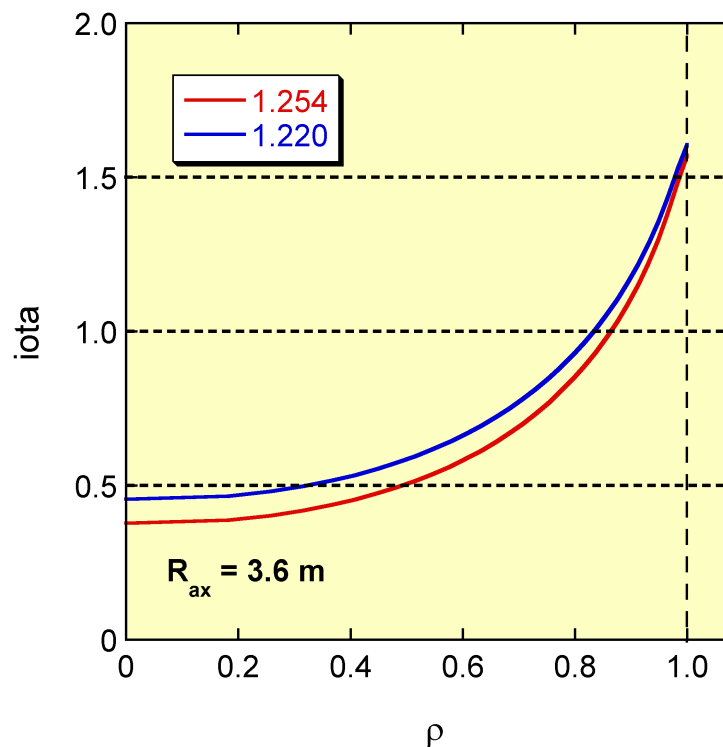
理想モード不安定 (磁気シアも小)

γ スキャン実験 (2003/10/17)

$\gamma=1.22$ 配位において、高い β 値、

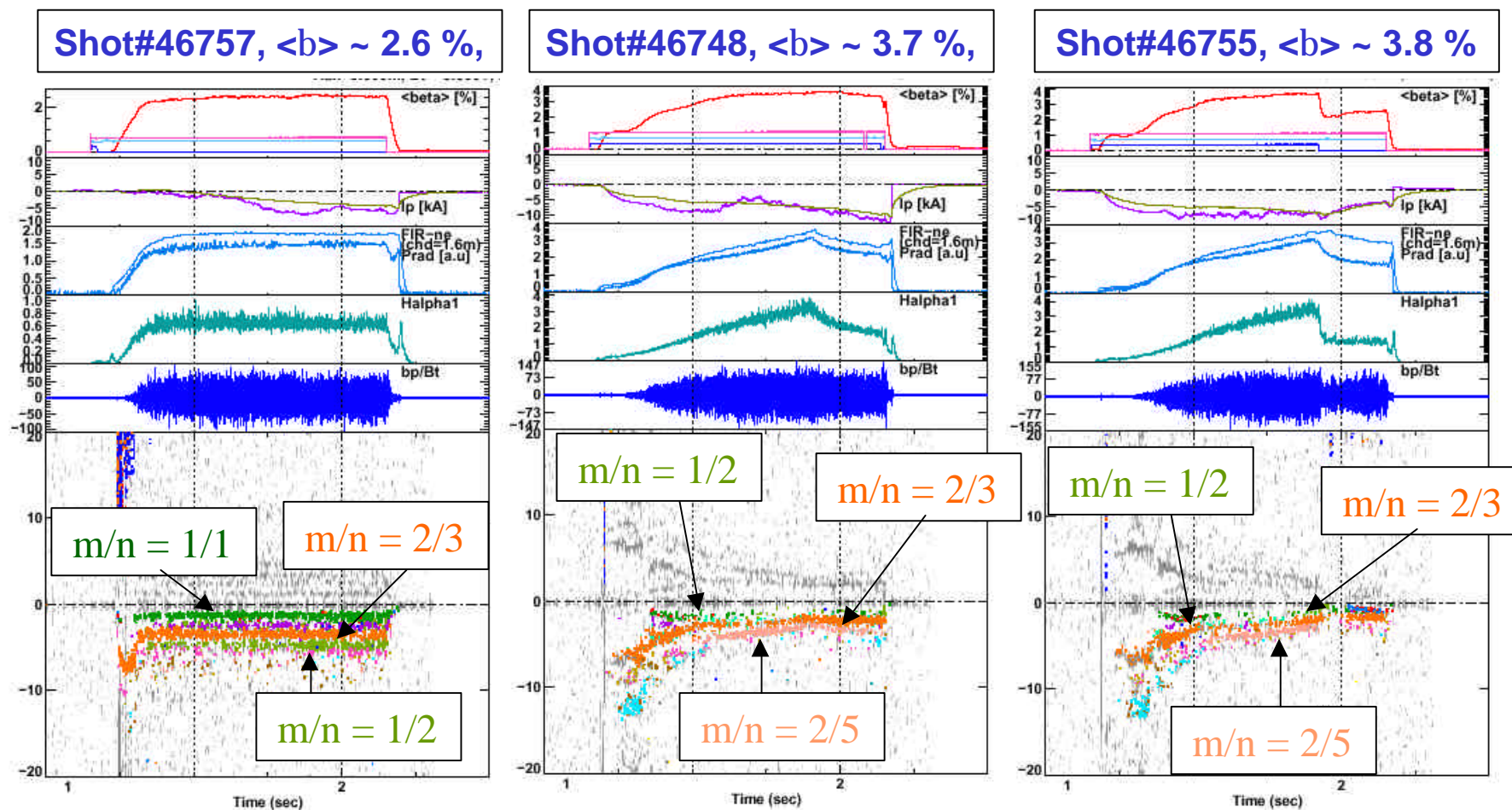
大きな遷移現象を観測

	1.254	1.22
V_p (m ³)	29.3	25.0
R_{00} (m)	3.68	3.67
a (m)	0.64	0.59
B_{ave} (T)	0.863	0.866



$\gamma=1.22$ 配位における高 β 放電 ($B_t = -0.5$ T)

高 β 領域にて、 $m/n = 1/1$ モードの消滅、 $1/2$, $2/5$ などの周辺モードを観測



$m/n = 1/1$ モードの消滅

$t = 1.2\text{s}$ にて $\langle\beta\rangle$ の上昇が抑制

1/1共鳴面近傍に T_e の分布平坦化

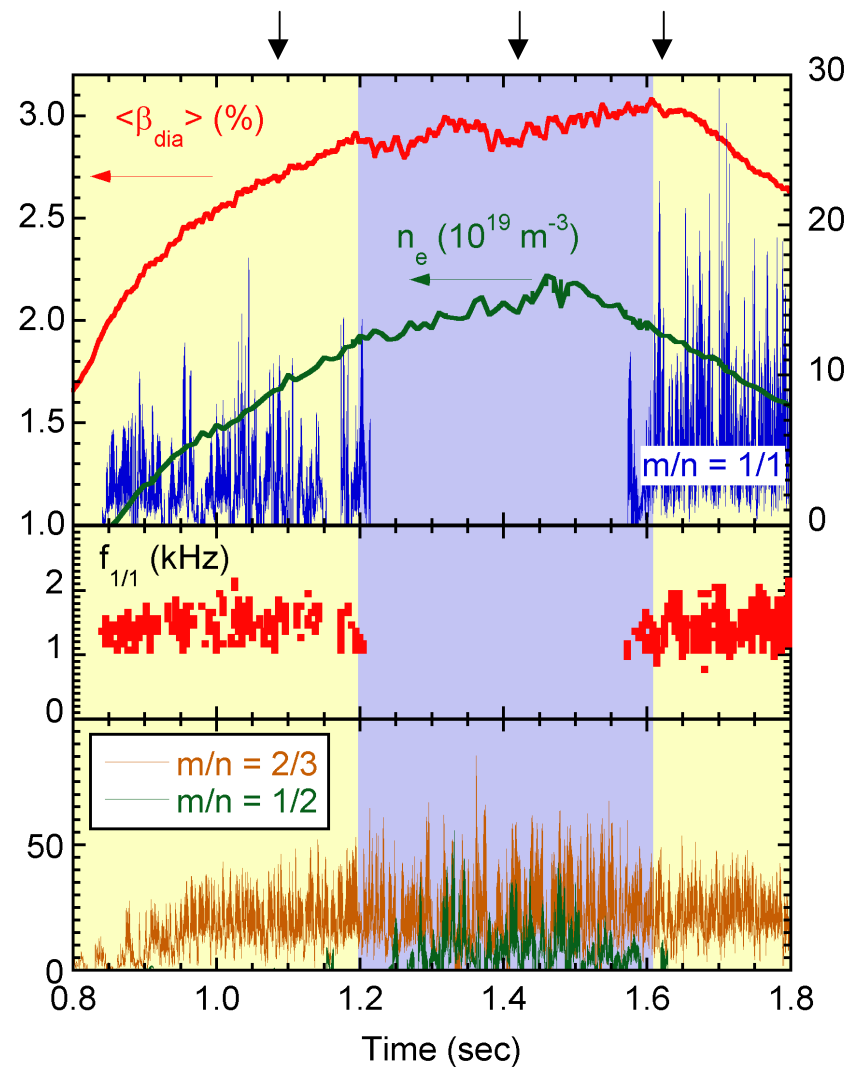
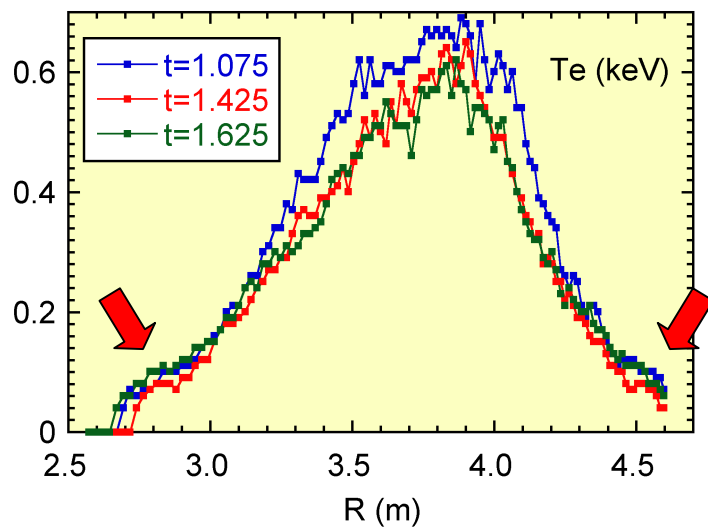
static island? MHD?

$m/n = 1/1$ モードが消滅 (B_θ 信号)

• $m/n = 2/3$ に加えて 1/2モード発生

1/1共鳴面外側に急峻な圧力勾配

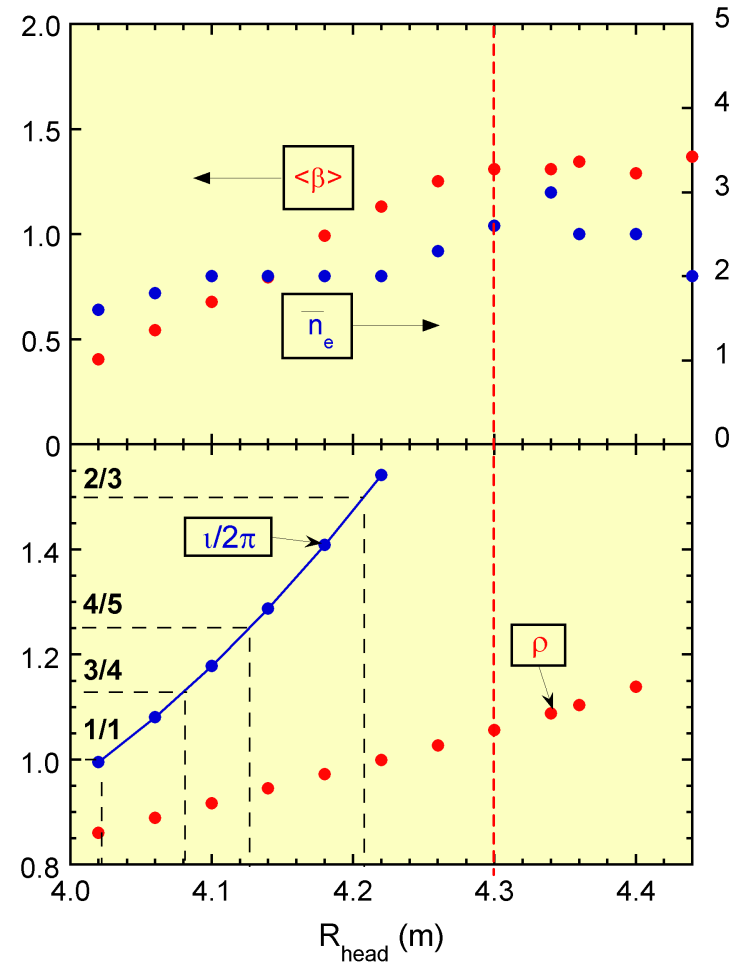
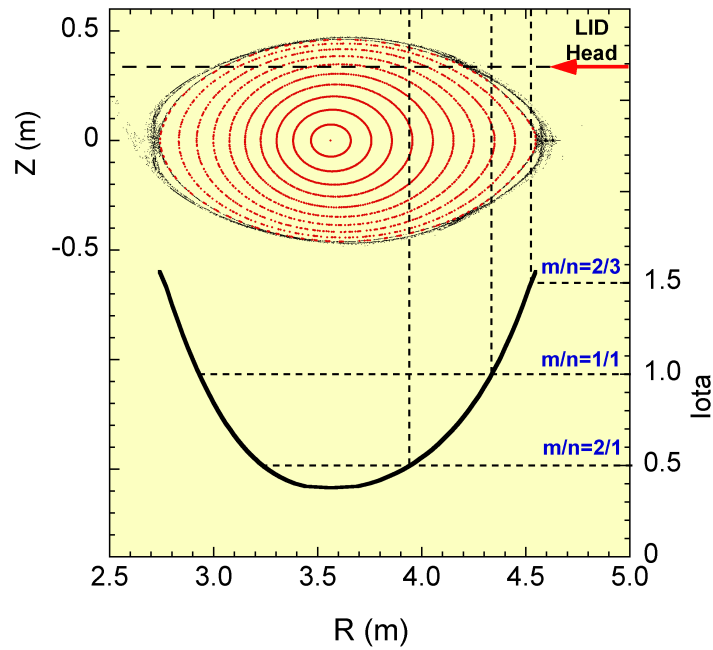
磁気島が存在したとしても $\langle\beta\rangle$ は上昇



高 プラズマ生成の可能性 (リミター)

$R_{ax} = 3.6 \text{ m}, Bt = 0.75 \text{ T}, \gamma = 1.254$
 $R_{head} = 4.40 \text{ 4.02 m, NBI\#2, 3}$

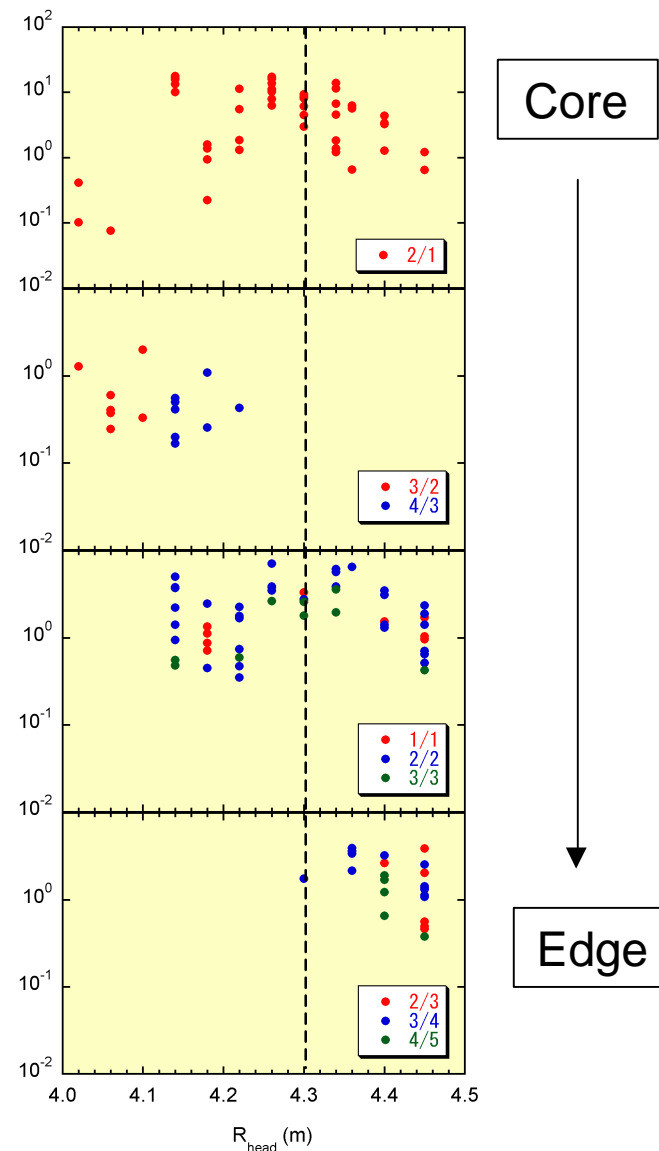
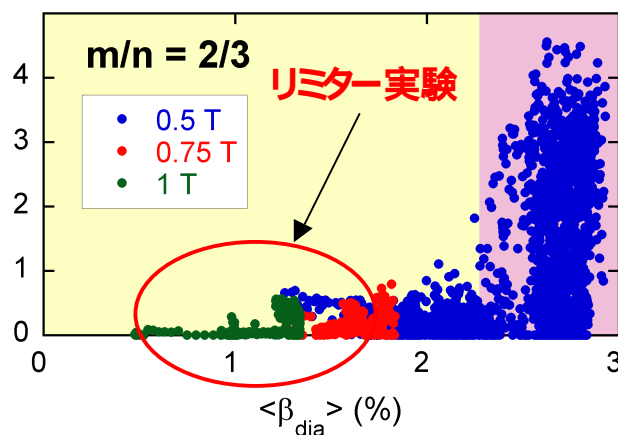
・リミター挿入により周辺部モードを制御



高 プラズマ生成の可能性 (リミター)



- $R_{\text{head}} \leq 4.3 \text{ m}$ で $m/n = 2/3, 3/4, 4/5$ が消滅
- $R_{\text{head}} \geq 4.3 \text{ m}$ では $\langle \beta \rangle$ への影響は小
- $R_{\text{head}} \sim 4.3 \text{ m}$ ならば、プラズマへの影響を最小限にとどめ、周辺モードを抑制することが可能
- 高 β 領域では周辺モードの揺動強度が急上昇
- コア領域は高 β 領域でMHD安定 (実験)
- 高 β プラズマ生成に利用できる可能性あり



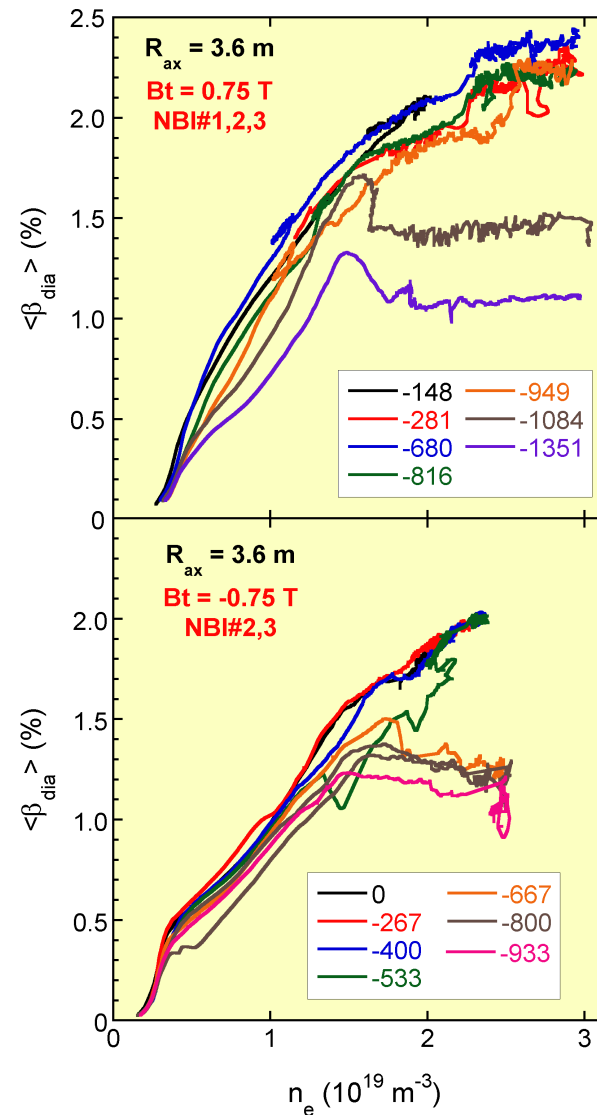
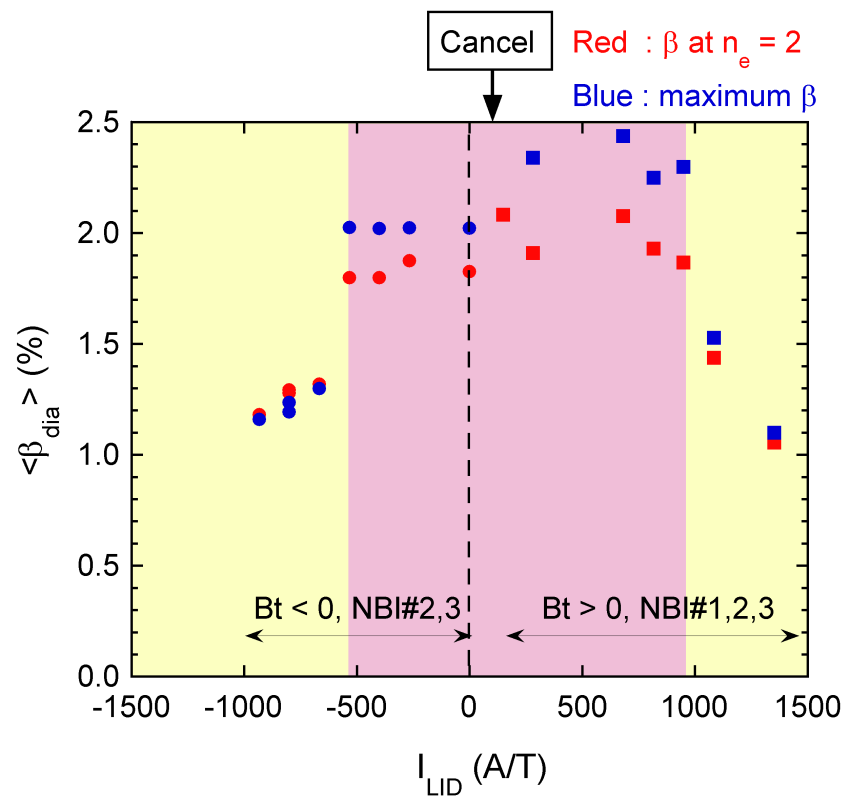
高 プラズマ生成の可能性 (磁気島)

外部揺動磁場で $m/n=1/1$ の磁気島生成

放電を劣化させない揺動磁場コイル電流領域は

$$-500 < I_{LID} \text{ (A/T)} < 1000$$

$I_{LID} \sim -680 \text{ (A/T)}$ で大きな遷移を観測



高 プラズマ生成の可能性 (磁気島)

$m/n = 1/1$ モードは高い 値に到達している

$I_{LID} > 100$ (A/T)の領域で観測されない

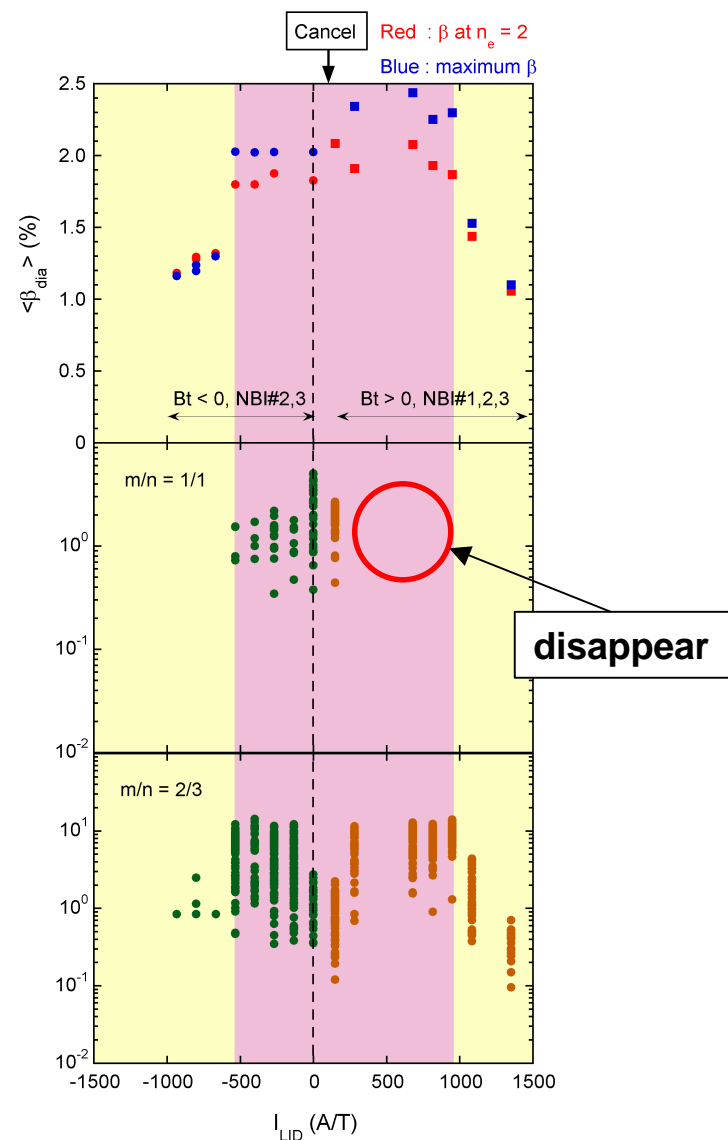
低 であっても $m/n = 1/1$ モードを抑制した

放電が可能

• $m/n = 2/3$ モードは閉じ込めが劣化しない領域で

常に観測されており、揺動量に大きな差はない

LIDリミターを使った放電が有効



まとめ

- 高 β 化は、トカマク、ヘリカル共通の課題。
- LHD、CHSはMercierに制限されていない。

LHDにおける高 β 放電

コア部

安定

- 理論予測 :低 n 不安定領域からの「脱出」TERPSICHORE
- 実験 :磁場揺動 $m/n=2/1$ の消失

周辺部

不安定

- 理論予測 :低 n 不安定領域
- 実験 : $m/n=2/3, 2/5, 1/2$ などの周辺モード発生

リミター・磁気島による安定化の可能性

周辺モードが安定化された高 β プラズマの生成を目指した実験。