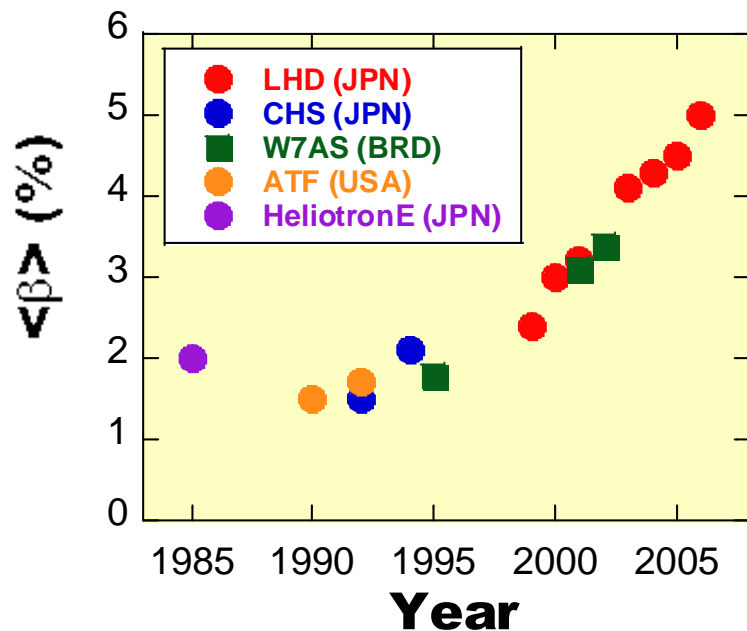


# 大型ヘリカル装置における 高ベータ放電と関連する物理課題

大学共同利用機関  
自然科学研究機構 核融合科学研究所

渡邊 清政  
エネルギー理工学研究所 非常勤講師

# 高ベータ運転研究の背景



*Progress of achievement of  
max. beta in helical devices*

# 経済的な核融合炉の実現のために、体積平均ベータ $\langle\beta\rangle\sim 5\%$ の定常的な放電が必須(ある核融合炉設計研究によると)。  
=> LHD計画の目標値のひとつ

# 最近のLHD実験の成果として、 $\langle\beta\rangle\sim 5\%$ の放電が達成されている。

# 達成された $\langle\beta\rangle\sim 5\%$ の放電やその運転手法は核融合炉に外挿可能なものなのか?

# 達成された $\langle\beta\rangle\sim 5\%$ の放電は事前に予測された結果なのか?

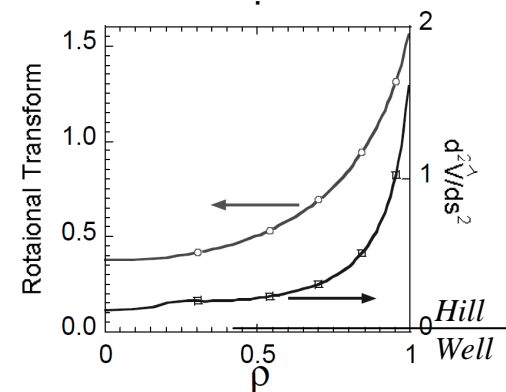
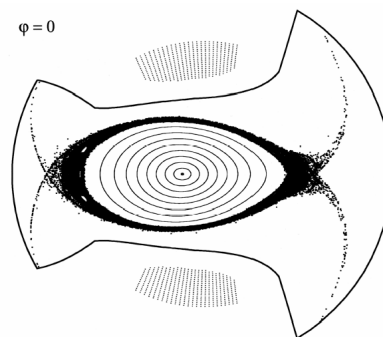
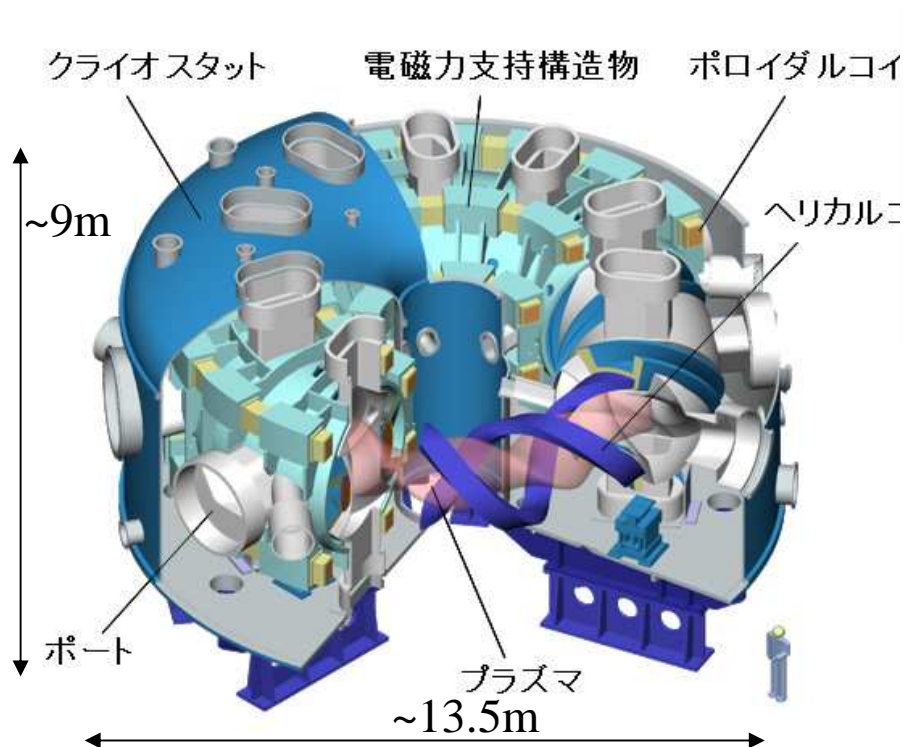


# 発表内容

---

1. LHD磁場配位の特徴
2. 高ベータ化への歩み
3. 高ベータ放電の特徴
4. 何がLHD実験での到達ベータ値を決めているのか?
  - # 低次のMHD不安定性の閉じ込めへの影響
  - # 高ベータでの輸送特性
5. 核融合炉へ外挿する際の課題

# 大型ヘリカル装置(LHD)の装置の特徴



- # 磁気面形状は、楕円。これがトロイダル方向に進むにつれて回転。
- # 磁気シアは中心で小さく、周辺で強い。
- # 典型的な真空配位では全領域磁気丘。

磁気丘の大きさ  $\propto d\Omega/dr$

$$\Omega \approx \left\langle \int d\phi \left( \left( \frac{R}{R_0} - 1 \right)^2 + \left( \frac{B}{B_0} - 1 \right)^2 \right) \right\rangle$$

$\sim \sqrt{2} \pi$

# 連続コイルによるヘリカル型装置(L=2/M=10)

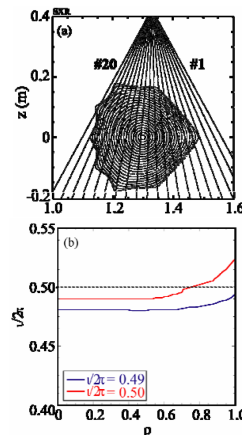
プラズマ主半径: 3.42-4.1m

プラズマ小半径: 0.6m

プラズマ体積: 30m<sup>3</sup>

磁場強度: 3テスラ(最大)

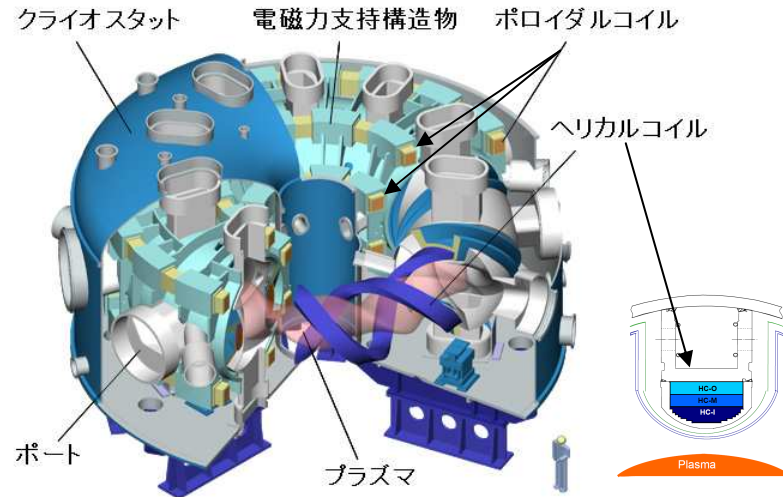
# 1998年3月実験開始



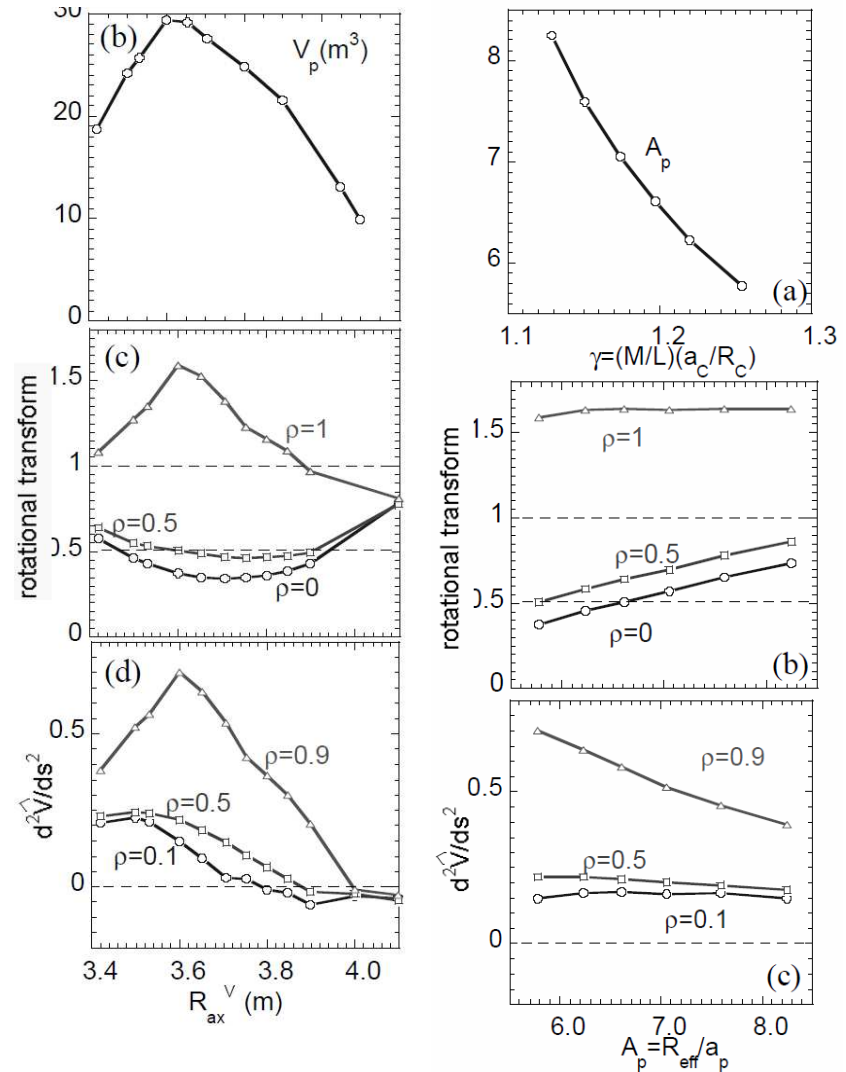
**Heliotron-J**

大半径 1.2m  
 小半径 ~0.2m  
 磁場強度 1.5T  
 L=1/M=4

# 大型ヘリカル装置(LHD)の装置の特徴 II



**主な配位制御パラメータ**  
 # 垂直磁場(磁気軸トラス大半径)  
 => 最外殻と磁気軸の相対位置、  
 ヘリカルコイルとプラズマの距離  
 => 磁気丘(井戸)、体積、磁気シア  
 # 4重極磁場 => 楕円度  
 # コイルピッチ ( $\gamma \propto a_c/R_c$ )  
 =>  $A_p$ ,  $1/2\pi$  (磁気シア)、磁気丘(井戸)

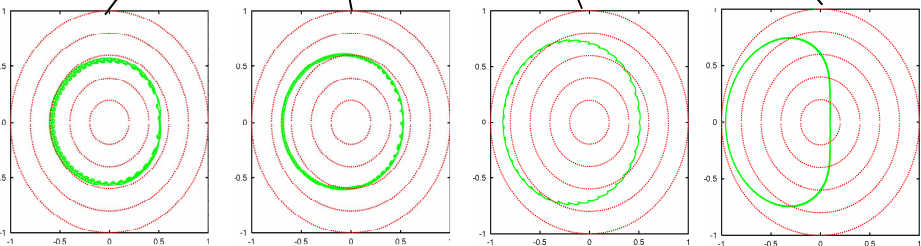
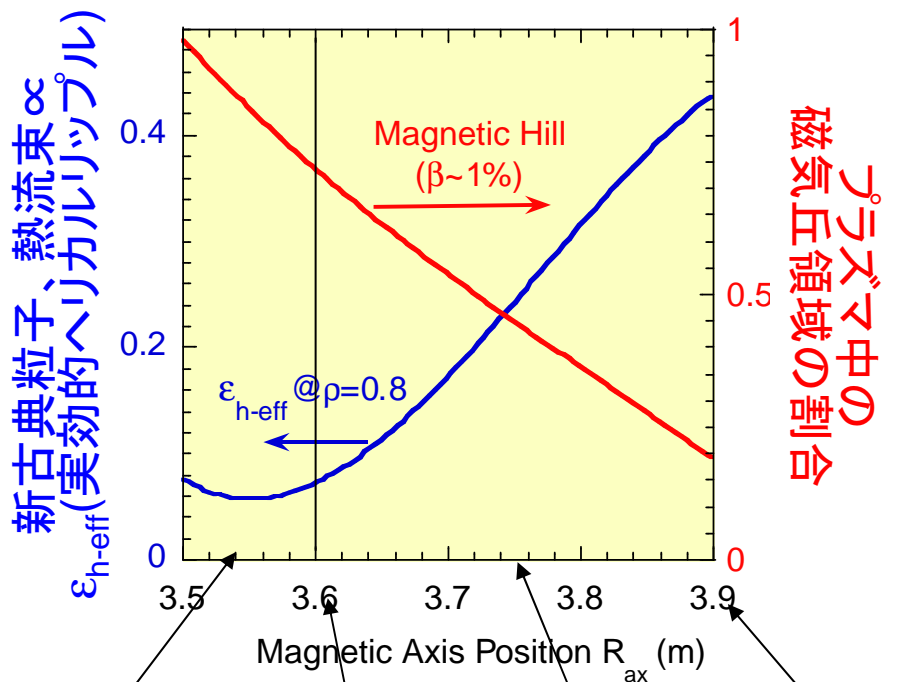


楕円度、 $1/2\pi$  (磁気シア) => 有限ベータ時の磁気軸シフト => 有限ベータ時の磁気井戸形成

# ヘリオトロン配位における高ベータ運転最適配位の模索

## 閉じ込め性能、MHD安定特性の磁気軸依存性

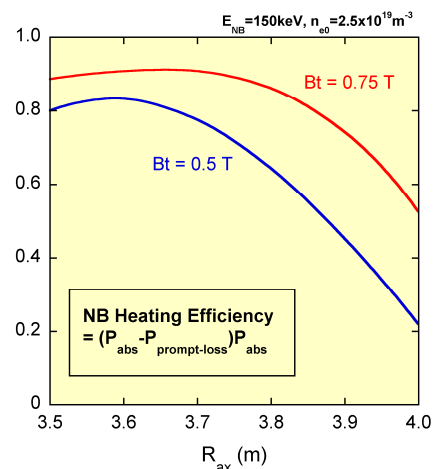
← Better
Better →  
新古典輸送, 高速粒子閉じ込め
MHD安定性(交換型モード)



高速粒子の軌道

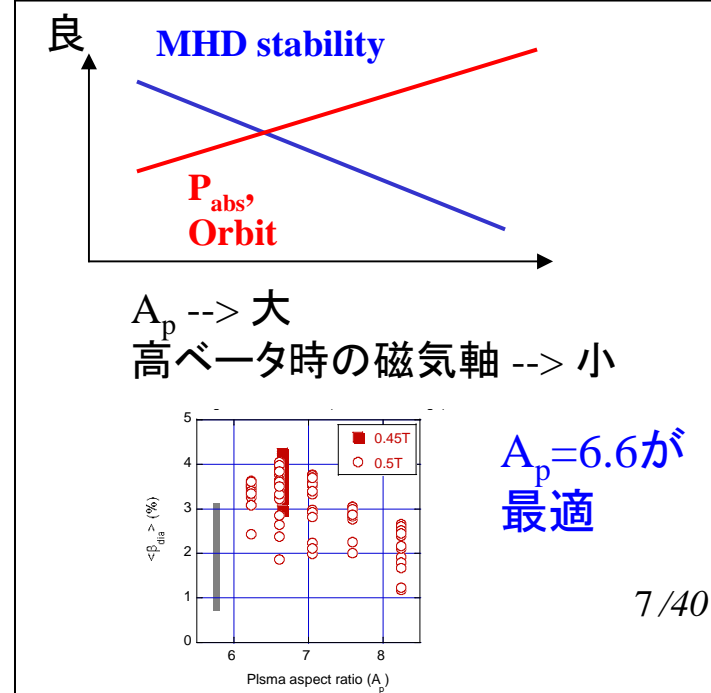
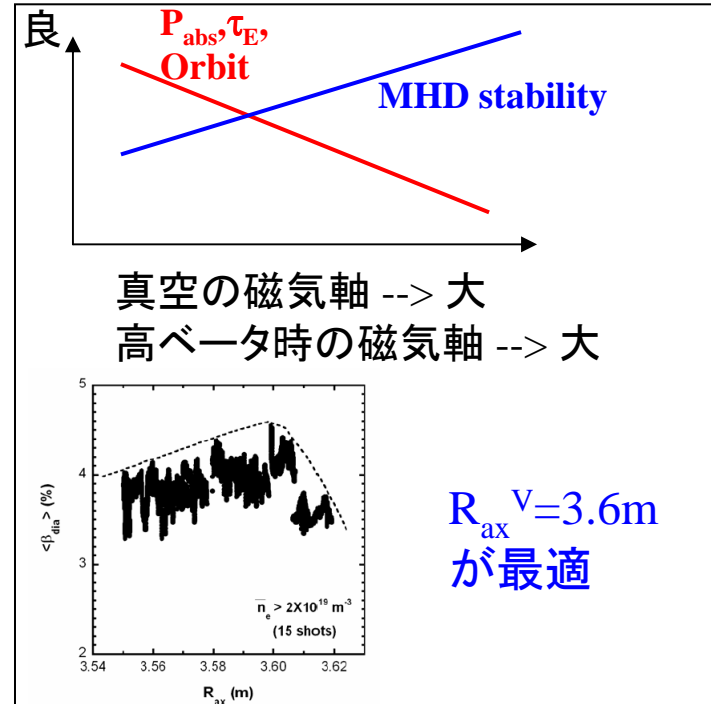
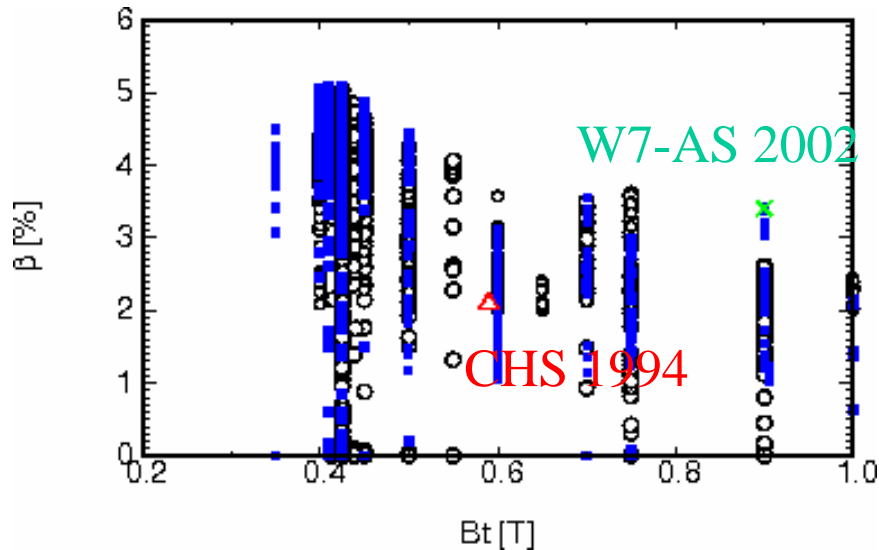
ヘリオトロンプラズマでは閉じ込め性能、MHD安定特性とも磁気軸位置に強く依存し、それぞれは良好な配位は矛盾している。特に、低磁場では、NBIの加熱効率が磁気軸位置に強く依存。

=> すべての性能が優れた最適配位の模索



# 高ベータ領域拡大の歩み I

- $\langle \beta \rangle_{\max} (A_p, B_0)$
- FY2002** ( $R_{ax}$  の最適化 : 3.2 % (5.8, 0.5 T)  
 $B_0$  の減少)
  - FY2003** ( $A_p$  の減少) : 4.1 % (6.2, 0.5 T)
  - FY2004** ( $A_p$  の最適化) : 4.3 % (6.6, 0.45T)
  - FY2005** ( $B_0$  の最適化) : 4.5 % (6.6, 0.425 T)



# 高ベータ領域拡大の歩み II

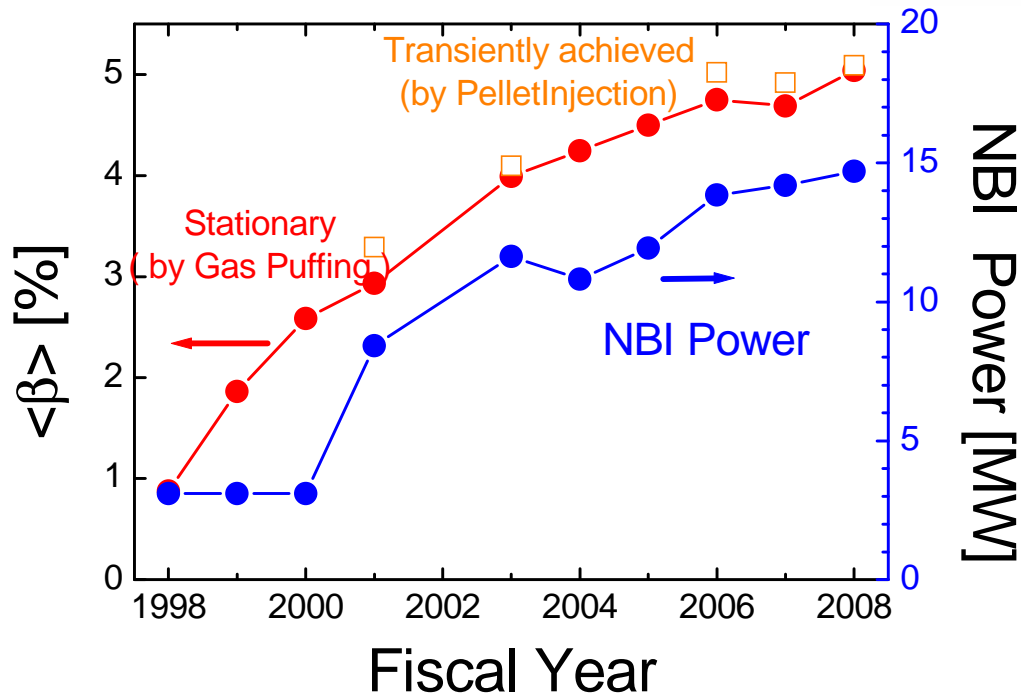
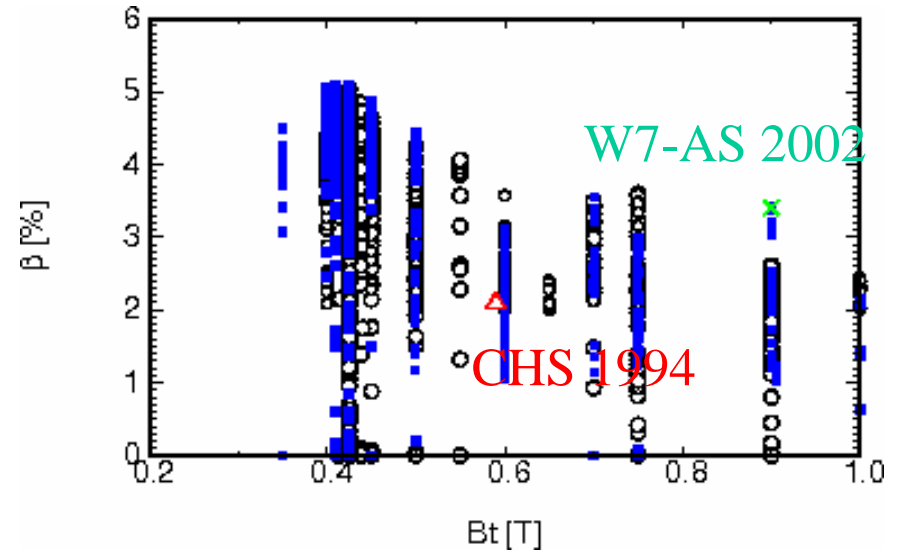
$\langle \beta \rangle_{\max} (A_p, B_0)$

**FY2002** ( $R_{ax}$  の最適化 : 3.2 % (5.8, 0.5 T)  
 $B_0$  の減少)

**FY2003** ( $A_p$  の減少) : 4.1 % (6.2, 0.5 T)

**FY2004** ( $A_p$  の最適化) : 4.3 % (6.6, 0.45T)

**FY2005** ( $B_0$  の最適化) : 4.5 % (6.6, 0.425 T)

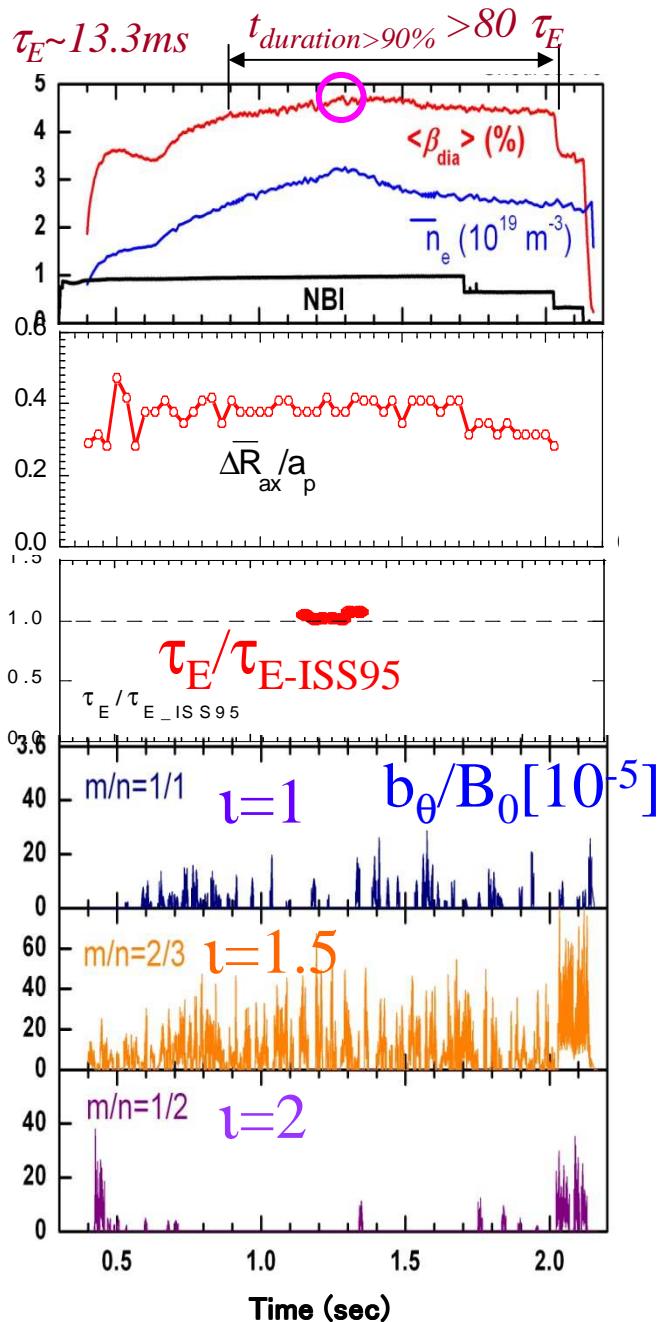


**Optimized  
 Config.**

**pre-set  $R_{ax}=3.6m$ ,  
 $A_p=6.6$ ,  
 $B_0=0.425 T$**

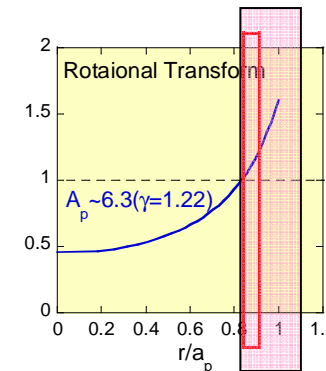
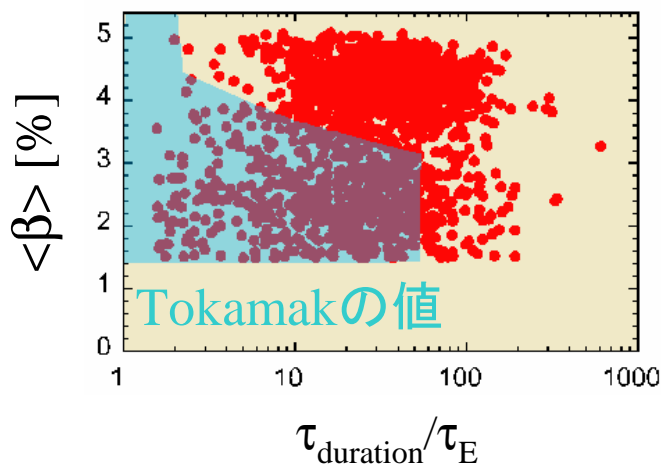


# LHDにおける高ベータ放電の特徴



- # IS95と同程度の巨視的閉じ込め性能を持つ
- # 低次モード数の MHD 活動

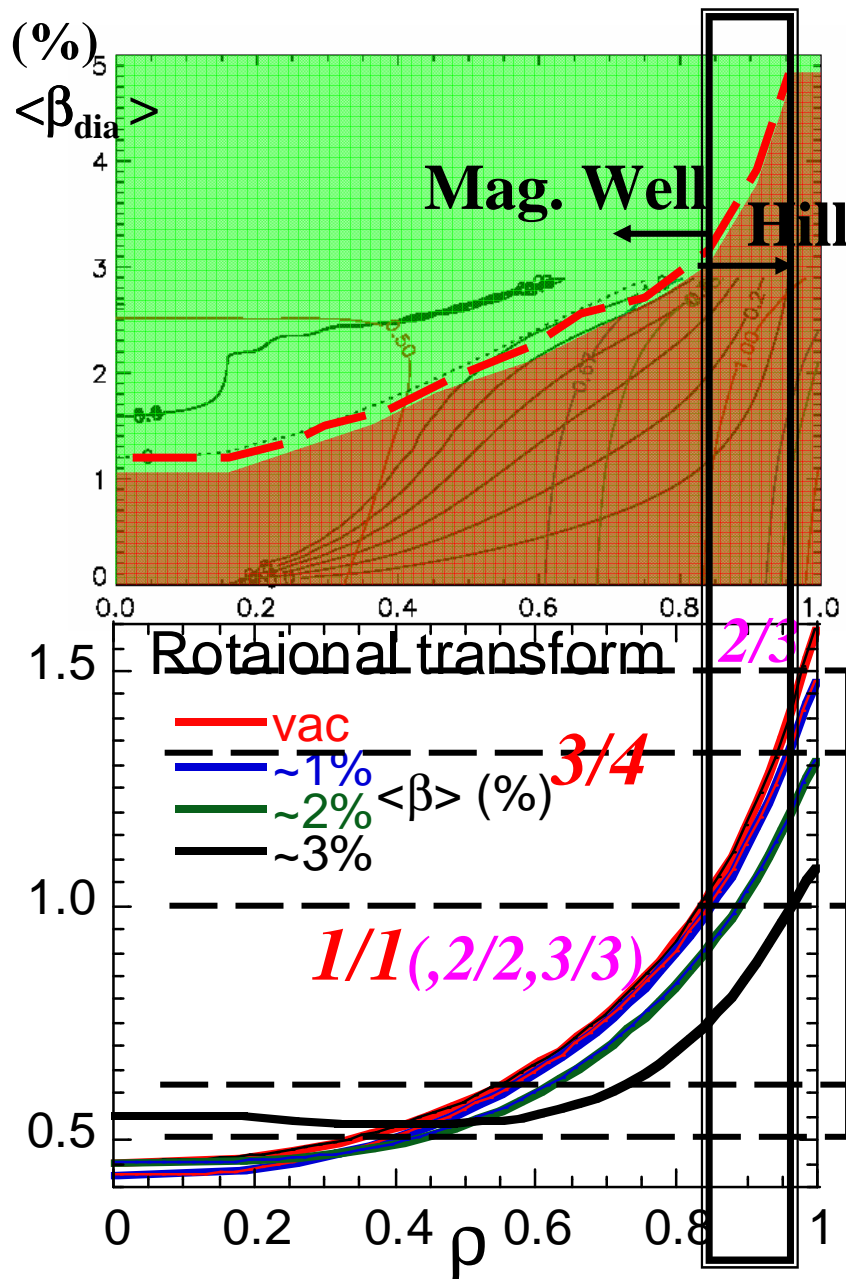
- 周辺有理面に共鳴する揺動( $m/n=2/3$ 、 $1/2$  and  $1/1$ )のみ発現する
- コア有理面に共鳴する揺動は観測されない



4.5%以上の体積平均  $\beta$  プラズマをエネルギー閉じ込め時間の100倍程度保持が実現。

≦トカマクと違って、プラズマ電流の浸み込みなどの効果を考える必要がないから。

# 高ベータ放電を達成した磁場配位の配位特性



$$A_p = 6.2, p \sim (1 - \rho^2)(1 - \rho^8)$$

高ベータでは中心付近に磁気井戸が形成されるが、周辺部は磁気丘構造が残る

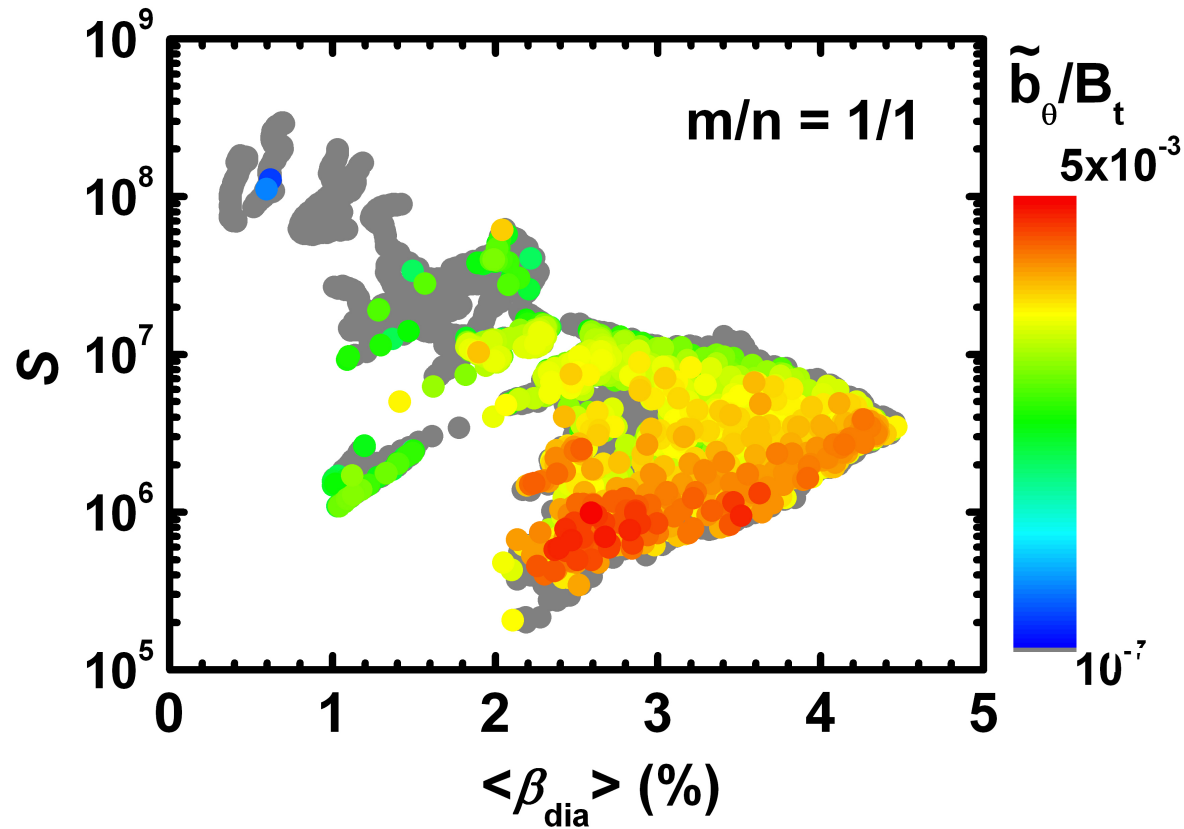
=>

高ベータ領域では、周辺の有理面に共鳴する圧力駆動MHD不安定性が重要と考えられる

Low order rational surface  $m \leq 3$

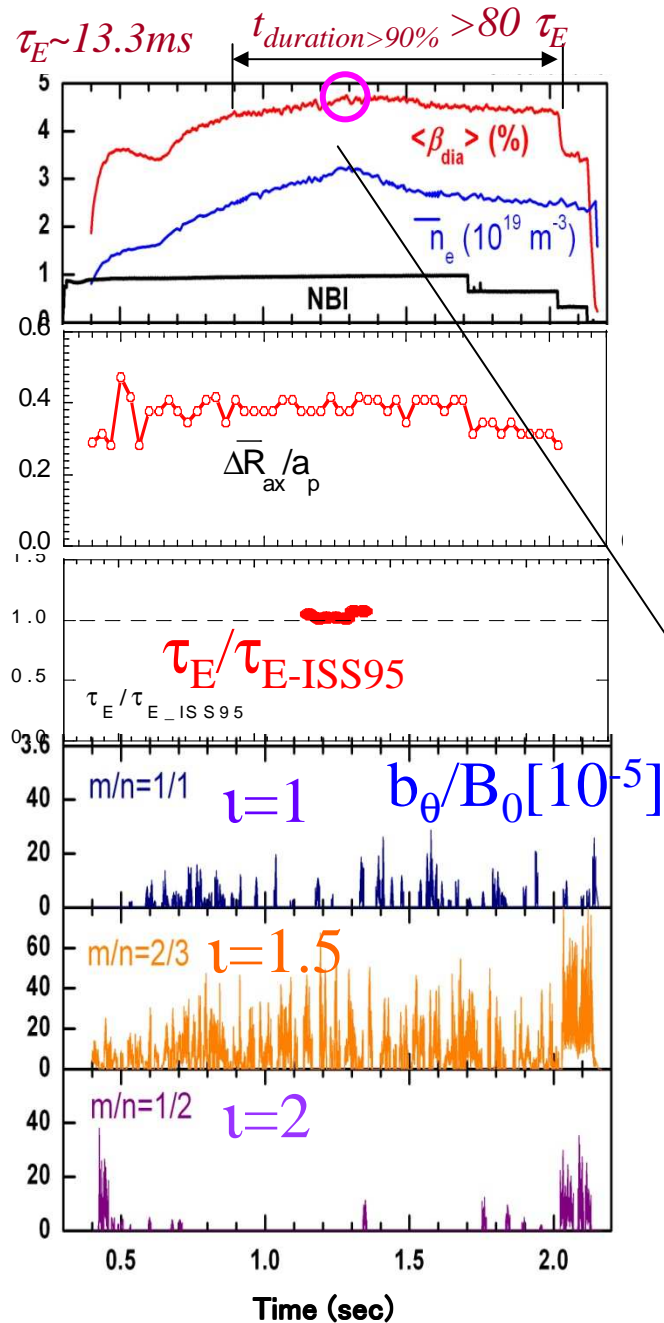
$m/n = 2/1, 3/2, 1/1(2/2, 3/3), 3/4, 2/3$

# 低次の磁場揺動強度のベータ値、磁気レイノルズ数依存性

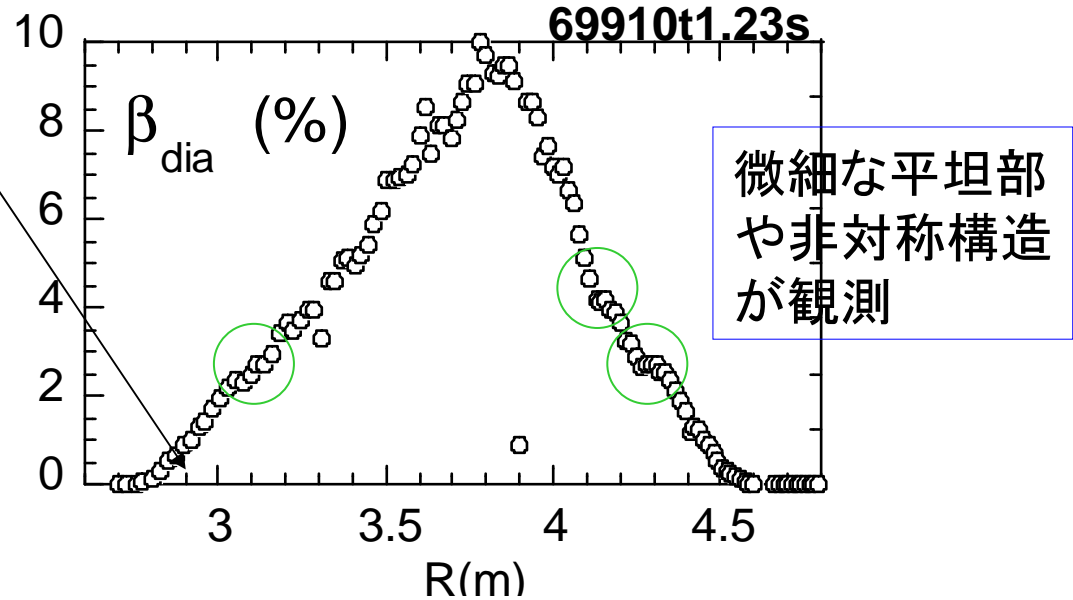


ベータ値が大きいほど、磁気レイノルズ数が小さいほど、磁場揺動強度は大きくなる

# 低次MHDモードの 閉じ込めへの影響 $\langle \beta \rangle \sim 5\%$



# 低次モード数の MHD 活動  
- 周辺有理面に共鳴する揺動  
( $m/n=2/3$ 、 $1/2$  and  $1/1$ )のみ発現する



平坦部や非対称な微細構造の巨視閉じ込め性能への影響は大きくないように見える

=>揺動の内部モード構造の解析が重要<sup>12</sup>



# LHDにおける周辺MHDモードの計測装置

## Magnetic Probe (MP)

Toroidal : 6 sets

Poloidal (Helical) : 15 sets

→  $\delta b_\theta$ , m,n-number

## Soft X-ray array (SX)

Vertically elongated section :

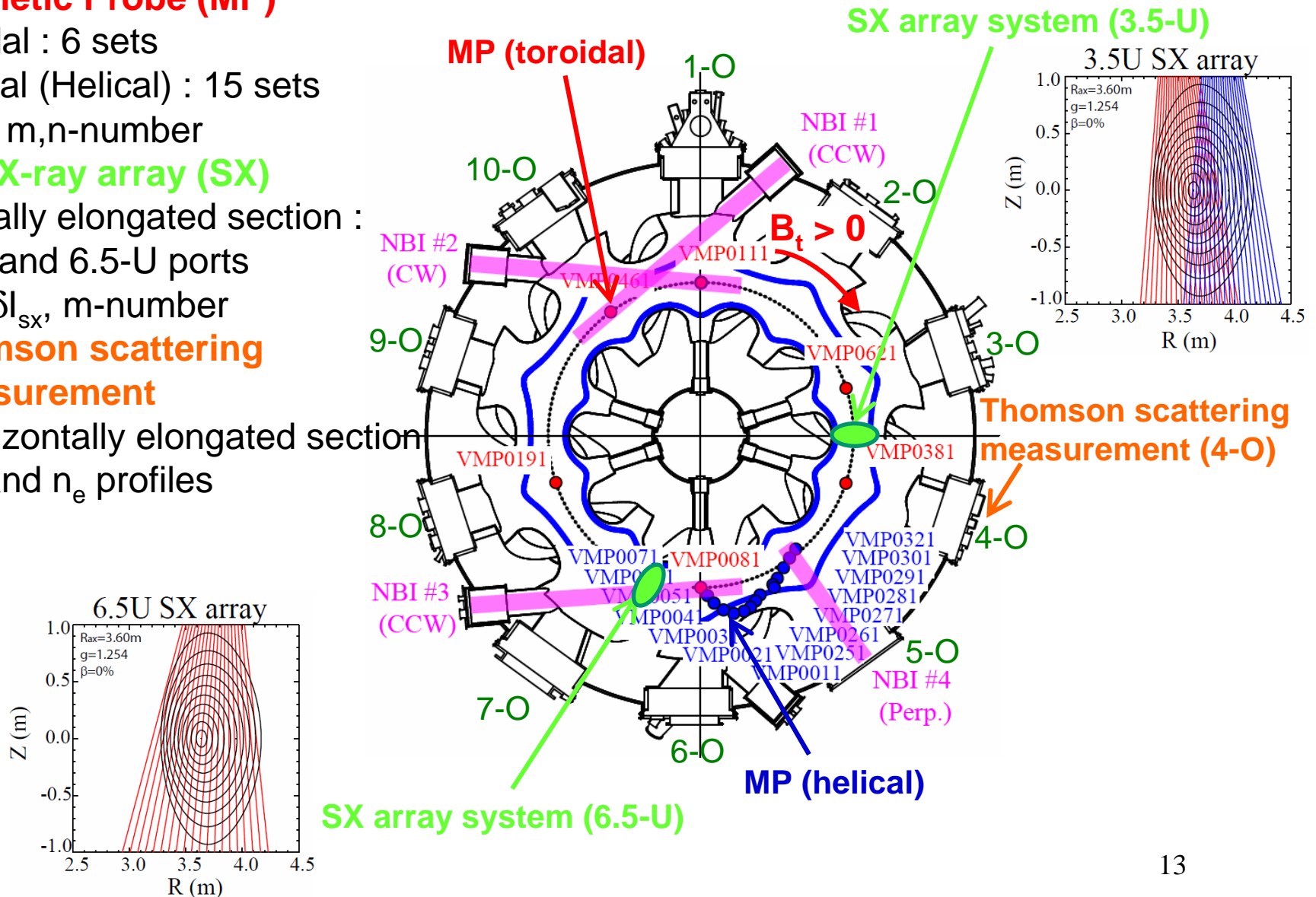
3.5-U and 6.5-U ports

→  $I_{SX}$ ,  $\delta I_{SX}$ , m-number

## Thomson scattering measurement

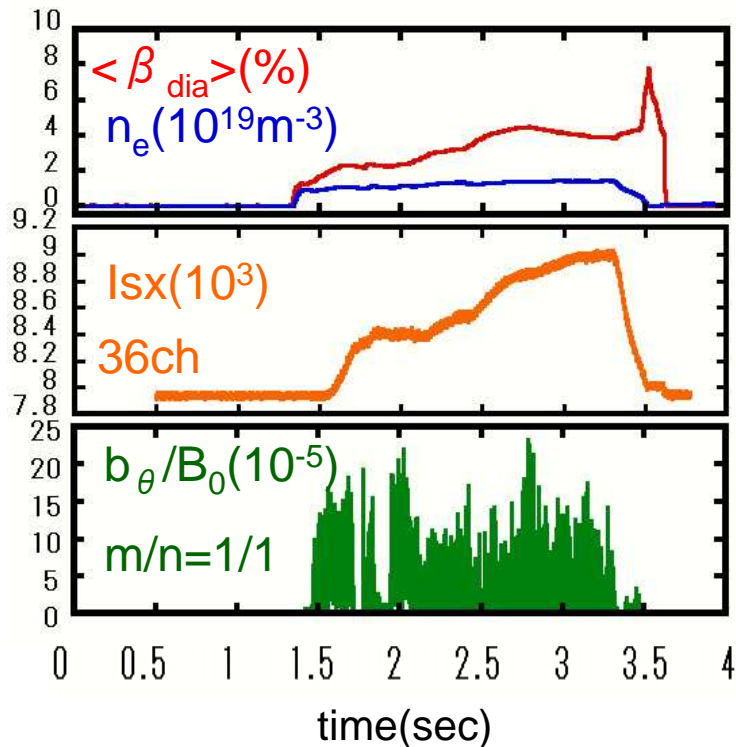
→ Horizontally elongated section

→  $T_e$  and  $n_e$  profiles



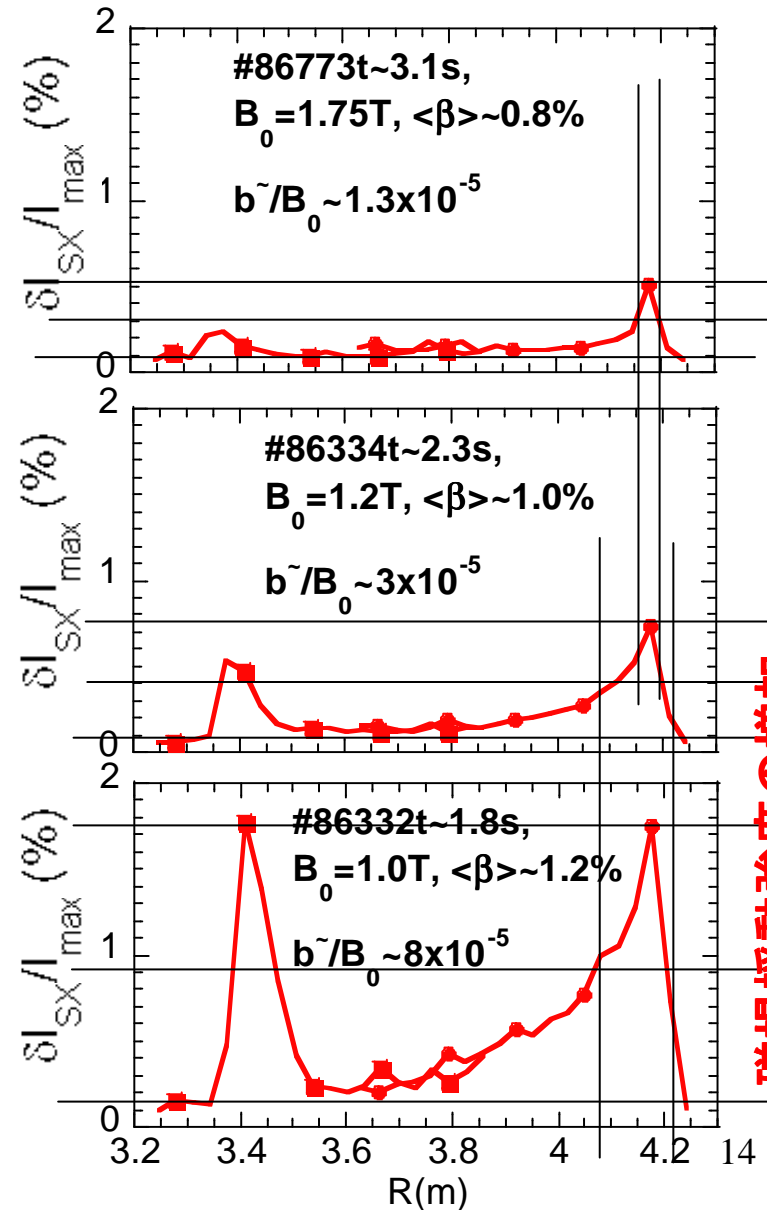
# 軟X線(SX)測定によるモード構造の評価手法および評価結果 (I)

# 86332  
1.0000[T], 3.7500[m], 1.2538, 100.0[%]



低次MHD モード(m/n=1/1)磁場揺動の観測された典型的な放電の放電波形

## 異なる磁場揺動強度に対するSX揺動振幅の変化



磁場揺動強度の増加  
SXによる揺動振幅(線積分値)絶対値、小半径方向の  
広がりが増加

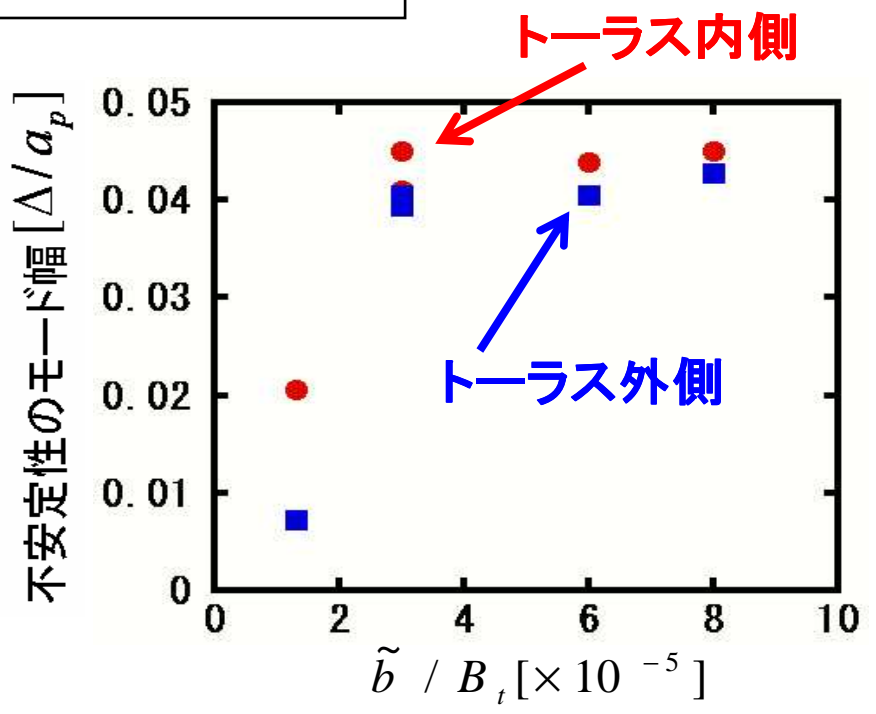
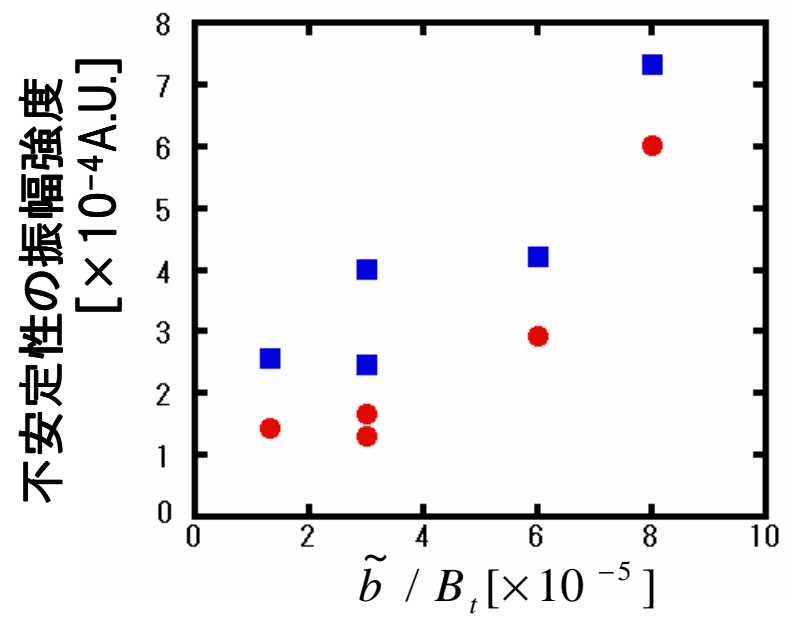
# 軟X線(SX)測定によるモード構造の評価手法および評価結果(II)

モード振幅、モード幅は磁場揺動振幅の増大とともに増大

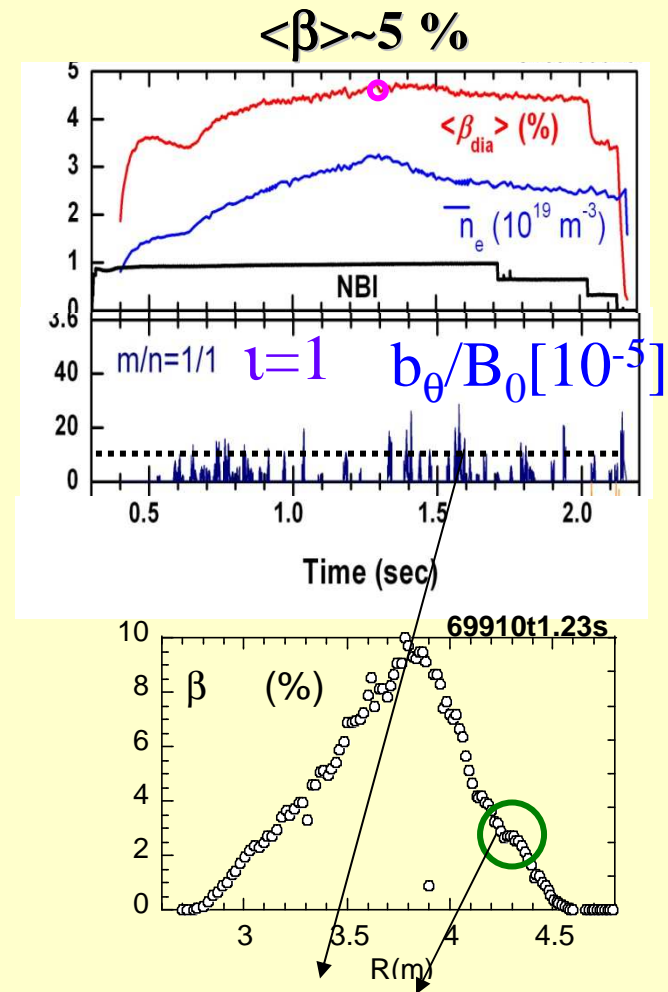
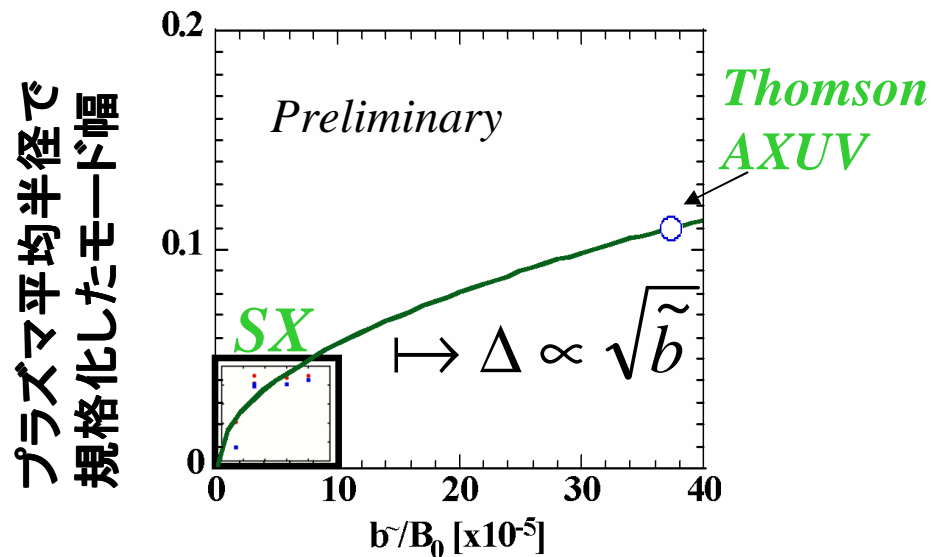
$$\tilde{i}_{SX} = \frac{\partial \bar{i}}{\partial \rho} A_0 \exp\left\{-\left(\frac{\rho - \rho_{\text{peak}}}{\Delta}\right)^2\right\} \cos(m\theta_B + 2\pi f t)$$

$$\tilde{I}_{SX} = \int_{L_1} dl \tilde{i}_{SX}$$

最小自乗法によりモード振幅  $A_0$  とモード幅  $\Delta$  を決定



# 低次MHDモードのモード幅と共鳴 磁場揺動レベルの関係

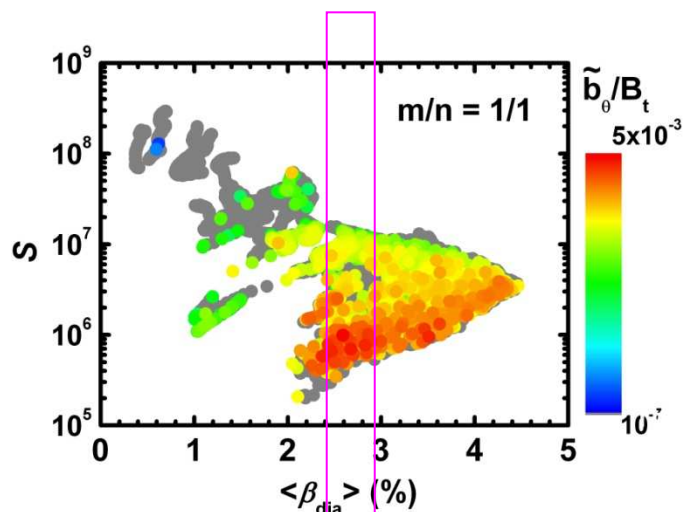


$\Delta/a_p \sim 0.05$  at  $b \sim /B_0 \sim 10^{-4}$ ,  $\iota=1$

$m=1/n=1$  共鳴磁場揺動レベルおよび  $\beta$  分布に観測される局所的な平坦化幅とは矛盾しない



# β値とS (磁気レイノルズ数)に対するMHDモードの依存性



磁気レイノルズ数Sの低下

=> 周辺共鳴磁場揺動レベルは増大

$$b \sim \propto S^{-0.7}$$

実験で得られた、磁場揺動強度計測とSXによるモード幅  $\Delta$  の関係  $\Delta \sim \sqrt{\tilde{b}_\theta/B_t}$  を使うと

$$\Delta \propto S^{-0.35}$$



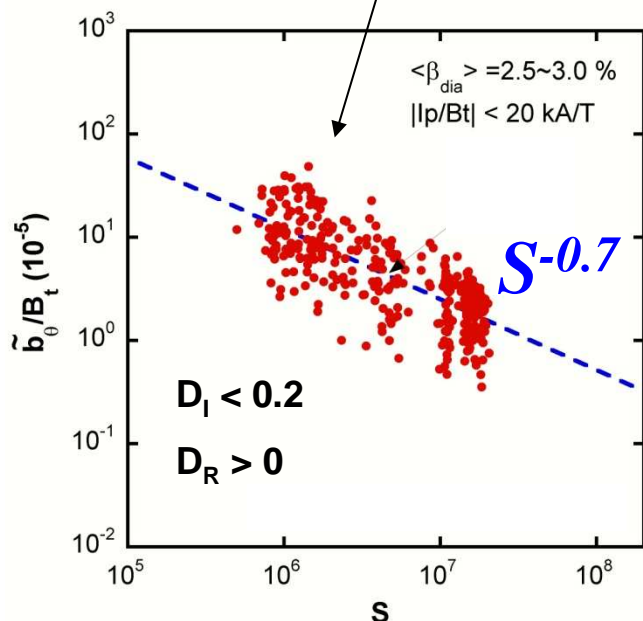
抵抗性交換型モードの線形理論の予測:

$$\text{モード幅 } \Delta_{LRGM} \propto \beta^{1/6} S^{-1/3}$$

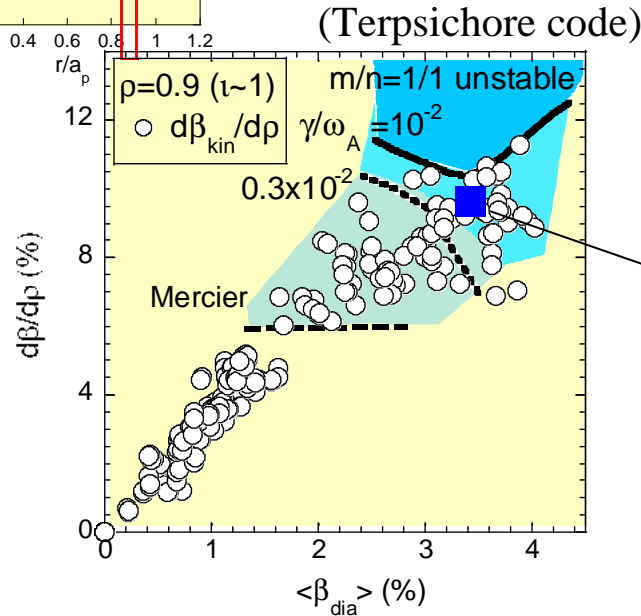
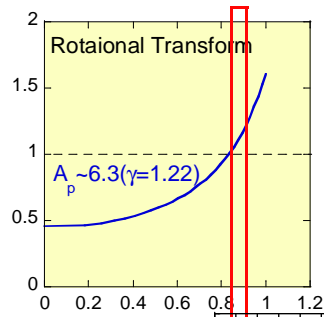
観測された揺動は非線形飽和状態;  
非線形飽和状態モード幅が、線形モード幅と強い相関を持つと仮定すると

LHDの高ベータ運転領域で観測される不安定性は

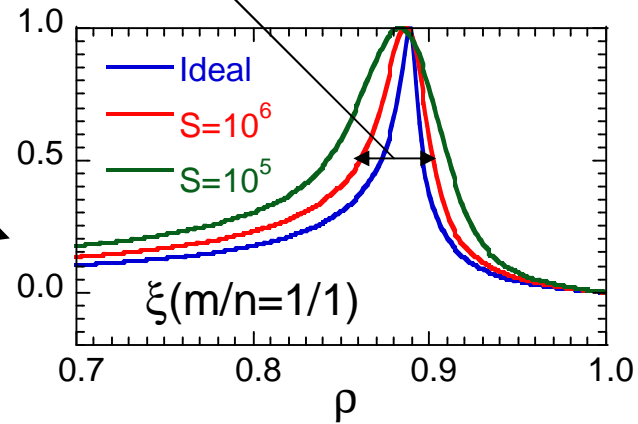
**抵抗性交換型不安定性**



# 観測された圧力勾配と 線形MHD安定性解析結果の比較



$\delta/a_p \sim 3\%$  (Ideal)  
 $\sim 5\%$  ( $S=10^6$ ) consistent with exp.



Calc. by  
FAR3D

観測された圧力勾配と低n線形理想不安定性の成長率の等高線(周辺)

平均ベータ4%まで、強い圧力勾配の劣化は観測されない

注) 圧力勾配は $\Delta\rho=0.1$ で平均取っている。

低n線形理想/抵抗性MHD不安定性の小半径方向のモード構造

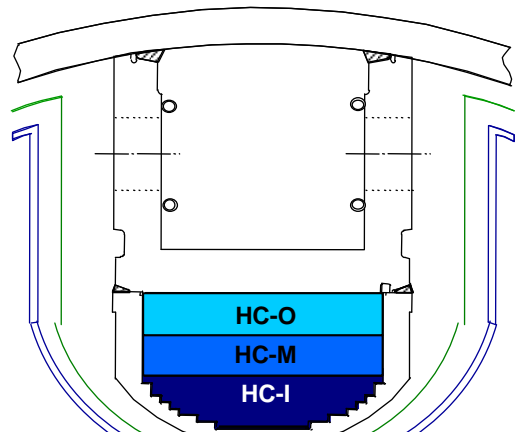
$\langle\beta_{dia}\rangle \sim 4\%$ で、低nモードは不安定と予測されるが、予測される小半径方向のモード幅はかなり小さい ( $\sim 5\%$  of  $a_p$  / growth rate  $\gamma/\omega_A \sim 10^{-2}$ )

=> 揺動の内部構造計測と矛盾なし

仮説) 線形成長率が有意に大きい場合でも、線形解析で予測されるモード幅が十分狭いと閉じ込めへの影響は小さい

# 閉じ込めに影響を与える低nのMHD不安定性はあるのか？

3層のヘリカルコイルの電流比を変えることにより、プラズマアスペクト比、磁気シア、磁気丘強度の異なる配位を実現

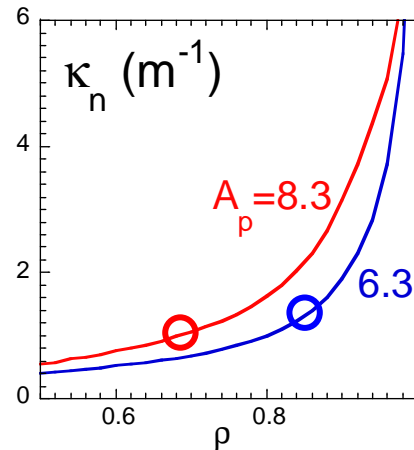


Plasma

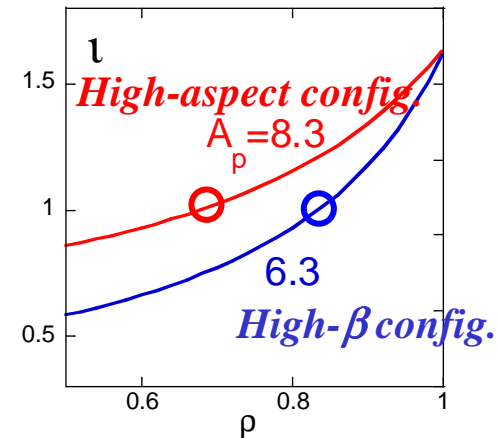
高アスペクト配位では、低磁気シア、高磁気丘配位となる

=> 圧力駆動型不安定性の強い不安定化が予測

磁気曲率分布

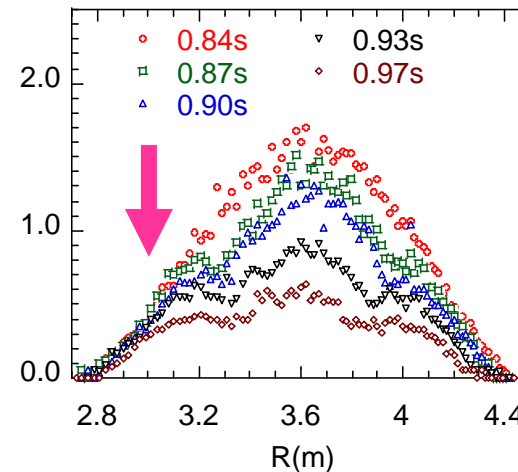
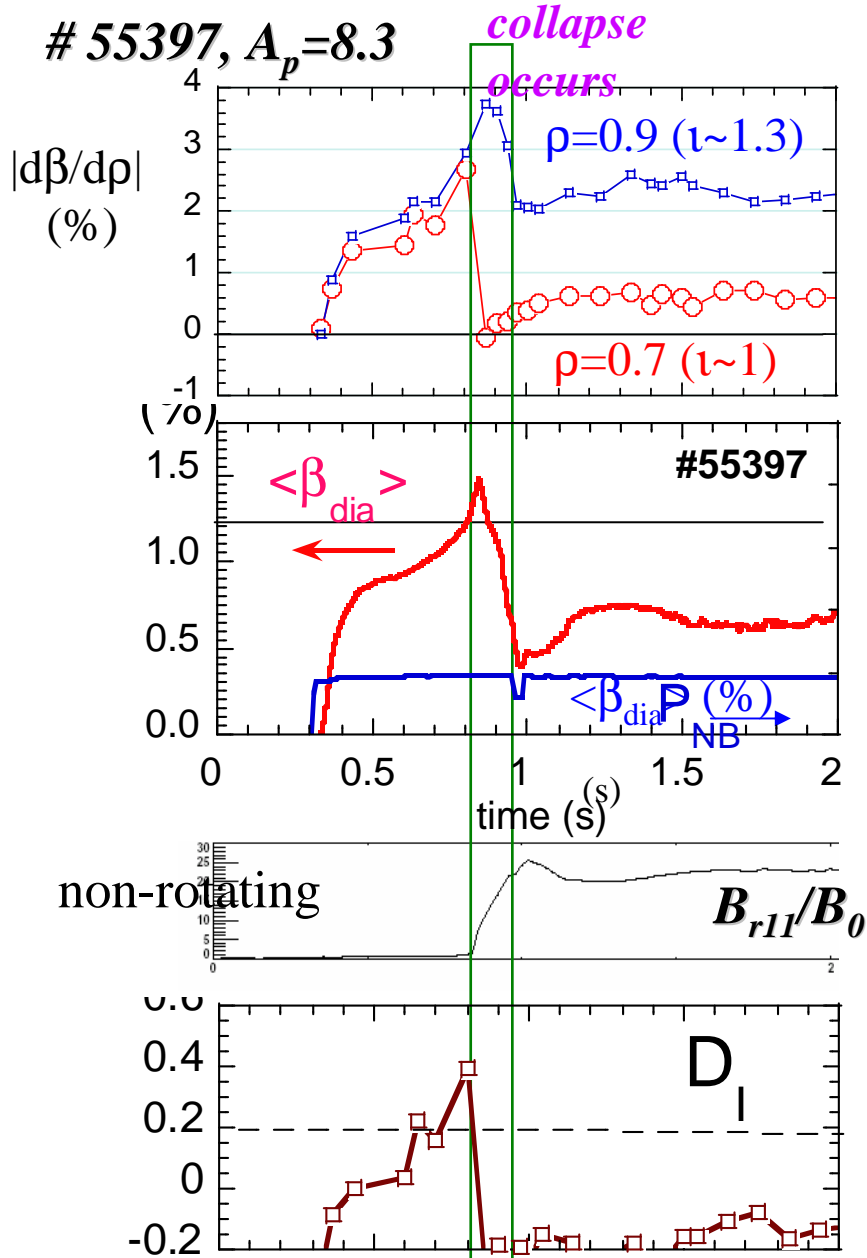


回転変換分布



m/n=1/1有理面では、磁気曲率 $\kappa_n$ はほぼ同じだが、磁気シアが非常に小さくなる  
=> 理想モードの不安定度が増大

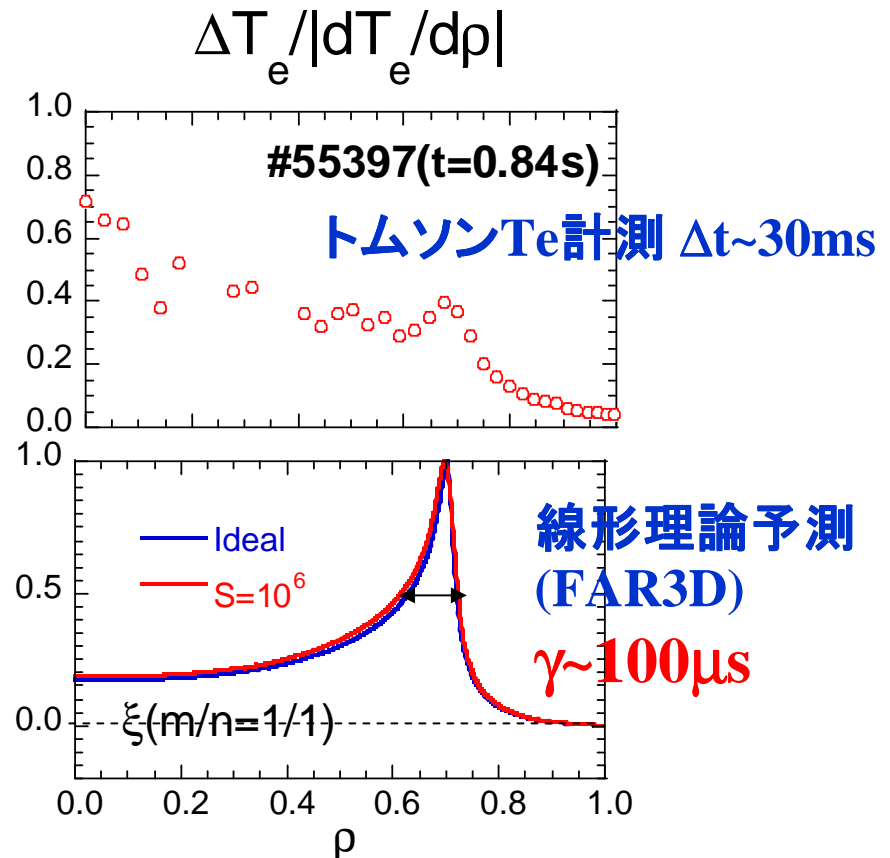
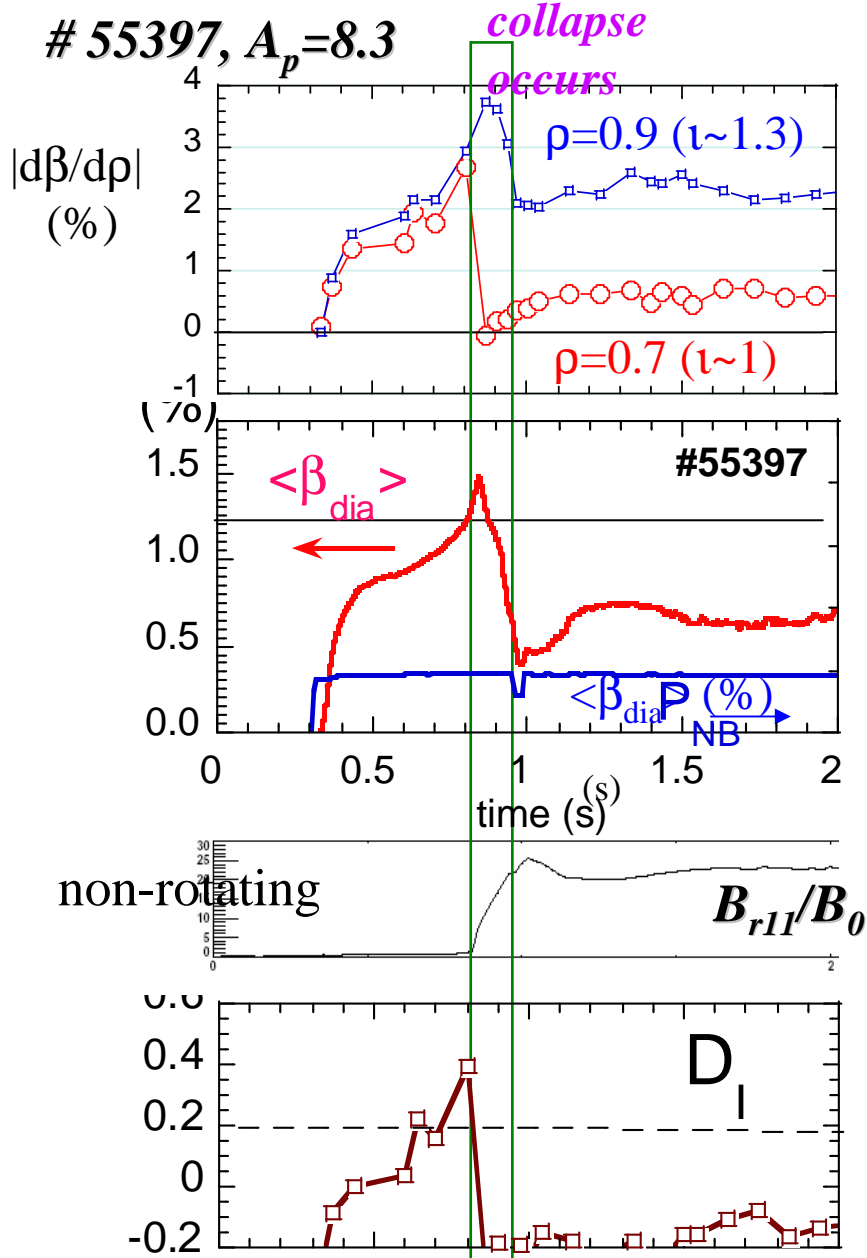
# 高磁気丘配位における崩壊現象の特徴 I



- # 高磁気丘配位ではベータ値が半減するような崩壊現象を観測。コア領域の電子温度が減少。
- # 崩壊の直前のメルシエパラメータ; 巨視的モードの不安定基準を大きく超えている( $D_1 > 0.2$ )
- # 明確な前駆磁気揺動は未観測、回転しない誤差磁場の増大 ( $m/n=1/1$ ) を観測



# 高磁気丘配位における崩壊現象の特徴 II



- # モード構造は概略、線形理論予測(理想交換型モード)に近い。
- # 理論予測のモード幅は小半径の10%を超えている。また、プラズマ中心でも大きな変位が予測されている。

## 低次MHD不安定モードの閉じ込めへの影響(まとめ)

# 不安定モード幅が、5%以下

=> 局所的な圧力分布に影響(微細な平坦化や勾配の劣化等)

=> 加熱パワーを追加すれば、平均ベータ値は更に増加。

# 不安定モード幅が、10%以上(+中心まで有意な変位有??)

=> プラズマエネルギーが急激に50%程度まで減少(コラプスの観測)

# LHDの高ベータ放電では、低次のMHD不安定モードは、閉じ込め性能に大きな影響を与えない

=> 到達ベータ値の上限を決めているものは何か?

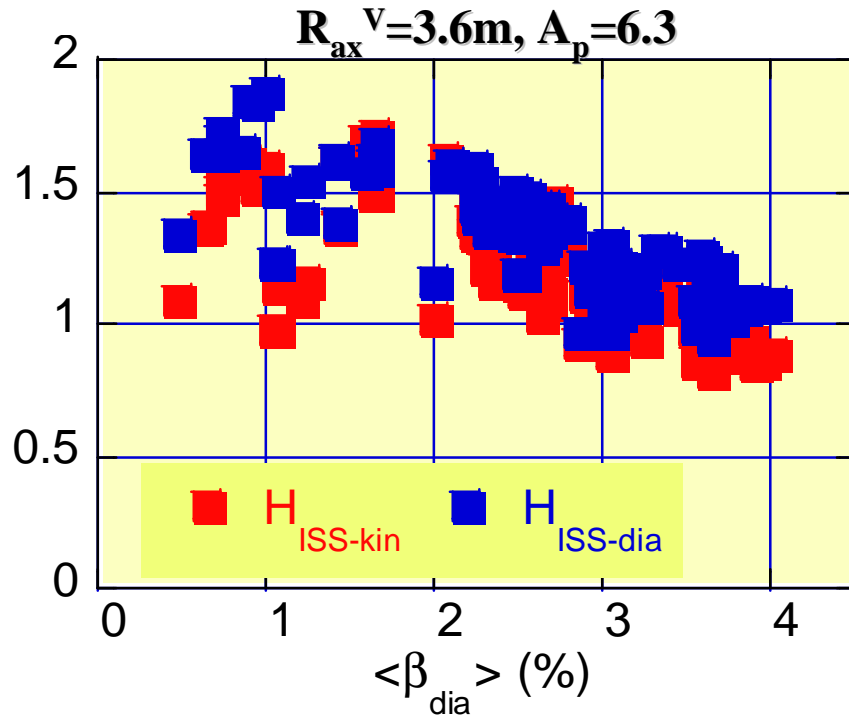
=> **高ベータ放電での輸送特性の研究**

# 閉じ込め性能に影響を与える閾値の定量的な評価

=> **核融合炉の設計基準の明確化**

# 巨視的エネルギー閉じ込め時間 $\tau_E$ のベータ依存性

## ISS95則を基準にした閉じ込め性能

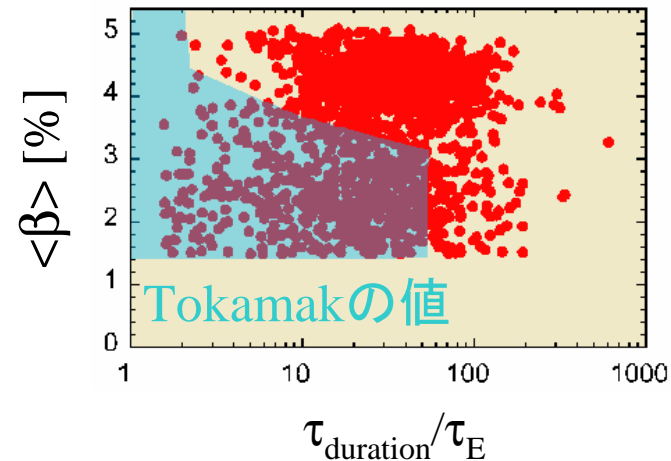


$$\tau_{ISS95} \propto a^{2.21} R^{0.65} P^{-0.59} n_e^{0.51} B^{0.83} l_{2/3}^{0.4}$$

ISS95 scaling  
(International Stellarator Scaling 1995)

$H_{ISS-dia}$  is based on the diamagnetic plasma energy.

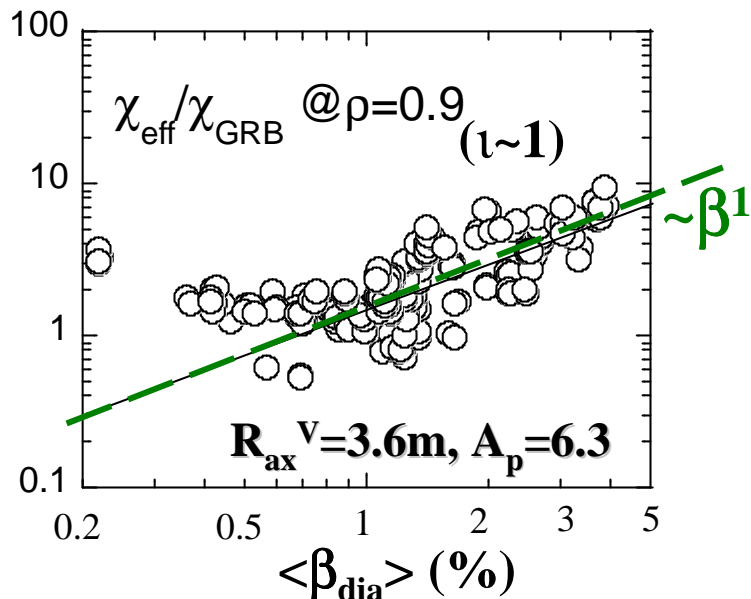
$H_{ISS-kin}$  are based on  $T_e$  and  $n_e$  profile measurements under the assumption of  $Z_{eff}=1$  and  $T_i=T_e$ .



高ベータ領域で、破壊的(disruptive)な閉じ込め劣化は観測されていないが、緩やかな閉じ込め性能の劣化が、観測されている。

# 周辺局所輸送特性のベータ値依存性

$$\chi_{GRB} \propto \beta^0 v_{p*}^0 \rho_*^1 \chi_B$$



Gyro-Bohmモデルで規格化した熱輸送係数(Gyro-BohmモデルはISS95則に似た依存性を持つ)

周辺の $\chi/\chi^{GRB}$  inは平均ベータ値が1%を超えると増加する

# MHD(抵抗性交換型モード)駆動乱流モデルと似たようなベータ依存性を持っている。

$$\chi_{GMTe} \propto \beta^1 v_{p*}^{0.67} \rho_*^{0.33} \chi_B$$

proposed by Carreras et al. (PoF B1 (1989))

# 抵抗性交換型(g)モードはLHDの高ベータ放電で常に不安定である。  
=> 高次のMHDモードが輸送特性を支配している可能性あり。

他の可能性は:

# ストキャスティック磁場構造領域の侵食

# ISS04則で提案された配位の影響

Not important!!

# 高ベータ放電の輸送モデル

refs. B.A.Carrers et al. Phys.Fluids 30, 1388 (1987)  
B.A.Carrers et al. Phys.Fluids B1, 1011 (1989)

抵抗性圧力駆動乱流輸送(GMT)モデル式

$$D_{xx} = \gamma_{(m)}^{(0)} (W_{(m)}^{(0)})^2 \Lambda^2, \quad (1)$$

イオンの熱輸送係数、粒子の  
拡散係数  $D, \chi_{GMTi} \propto \beta^0 v_{p*}^{-1} \rho_*^{-1} \chi_B$

$$\chi_e = \sqrt{\frac{\pi}{4}} \frac{\hat{S}}{R_0 q} V_T \frac{\mu_0}{\eta} \gamma_{(m)}^{(0)} (W_{(m)}^{(0)})^4 \Lambda^{4/3}. \quad (38)$$

電子の熱輸送係数(揺動による磁場の拡散効果に起因、イオンは小さい)

$$\Lambda = \frac{2}{3\pi} \ln \left[ \frac{256 S^2 L_p}{\beta R_0^2 \kappa_n} \left( \frac{\hat{S}}{r k_\theta q} \right)^4 \right] - \frac{2}{\pi} \ln \Lambda. \quad (4)$$

繰り込み係数(>~3、非線形飽和係数)

$$\tau_{hp} = R_0 \sqrt{\mu_0 \rho_m(r) / B_0} \quad \tau_R = r^2 \mu_0 / \eta(r) \quad S(r) = \tau_R / \tau_{hp}$$

$$\gamma_{(m)}^{(0)} = \frac{1}{S^{1/3}} \left( \frac{\beta}{2} \frac{r}{L_p} R_0^2 \kappa_n k_\theta \frac{q}{\hat{S}} \right)^{2/3} \tau_{hp}^{-1}. \quad (2)$$

抵抗性圧力駆動不安定性の線形成長率

$$W_m^{(0)} = \left( \frac{q^2}{\hat{S} \hat{S}^2 k_\theta r} \right)^{1/3} \left( \frac{\beta}{2} \frac{R_0^2 \kappa_n}{L_p} \right)^{1/6} r.$$

(3) 抵抗性圧力駆動不安定性の線形モード幅

$$\chi_{GMTe} \propto \left( \frac{q}{\hat{S}} \right)^{7/3} (\kappa_n R_0)^4 a_{eff}^2 \left( \frac{\beta R_0}{L_p} \right)^{4/3} S^{-2/3} \frac{v_{Te}}{R_0} \propto G_{GMTe} \beta^1 v_{p*}^{0.67} \rho_*^{0.33} \chi_B$$

磁場配位に依存するパラメータ

プラズマ特性に依存するパラメータ

$$S \propto \frac{T_e^{3/2}}{n_e^{1/2}} B_0 \frac{a_{eff}^2}{R_0} \rho^2$$



# 抵抗性交換型モードの局所輸送係数に対する影響

gモード乱流駆動モデルの熱輸送係数(電子); 磁場の拡散を通して駆動する

$$\chi_e = \sqrt{\frac{\pi}{4}} \frac{\hat{S}}{R_0 q} V_T \frac{\mu_0}{\eta} \gamma_{(m)}^{(0)} (W_{(m)}^{(0)})^4 \Lambda^{4/3}.$$

*Today's Model*

$\Lambda$ ; Renormalization factor

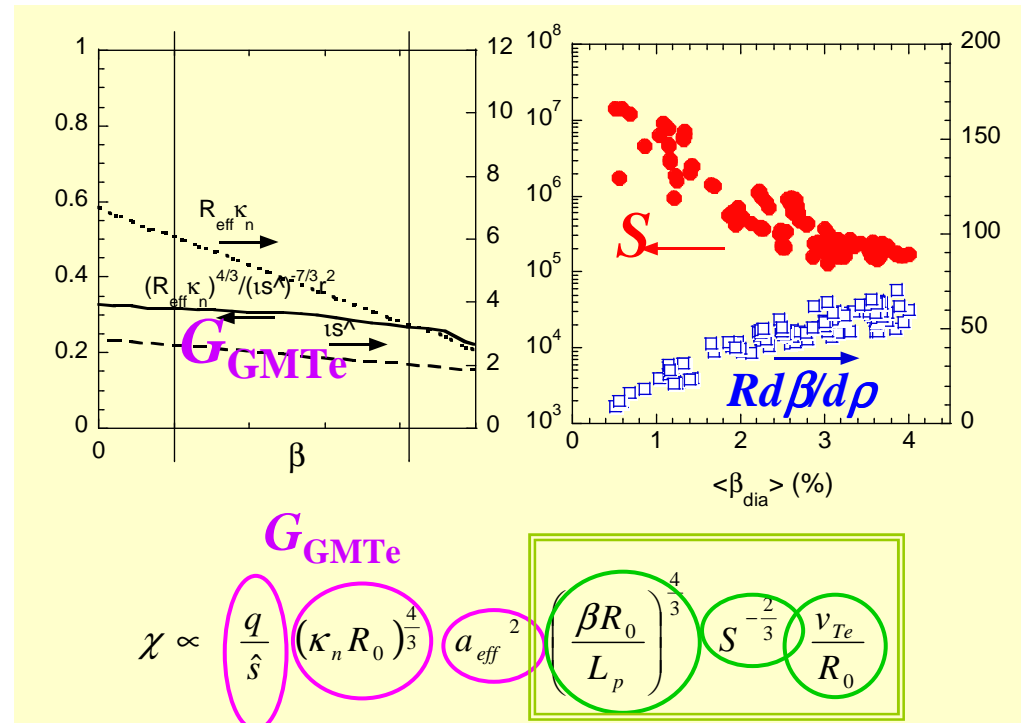
$\gamma$ ; Linear growth rate

$W$ ; mode width of g-mode

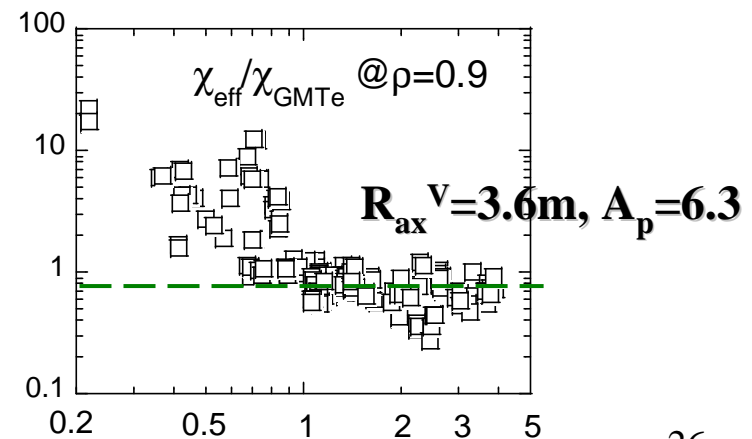
refs. B.A.Carrears et al. Phys.Fluids 30, 1388 (1987)

B.A.Carreras et al. Phys.Fluids B1, 1011 (1989)

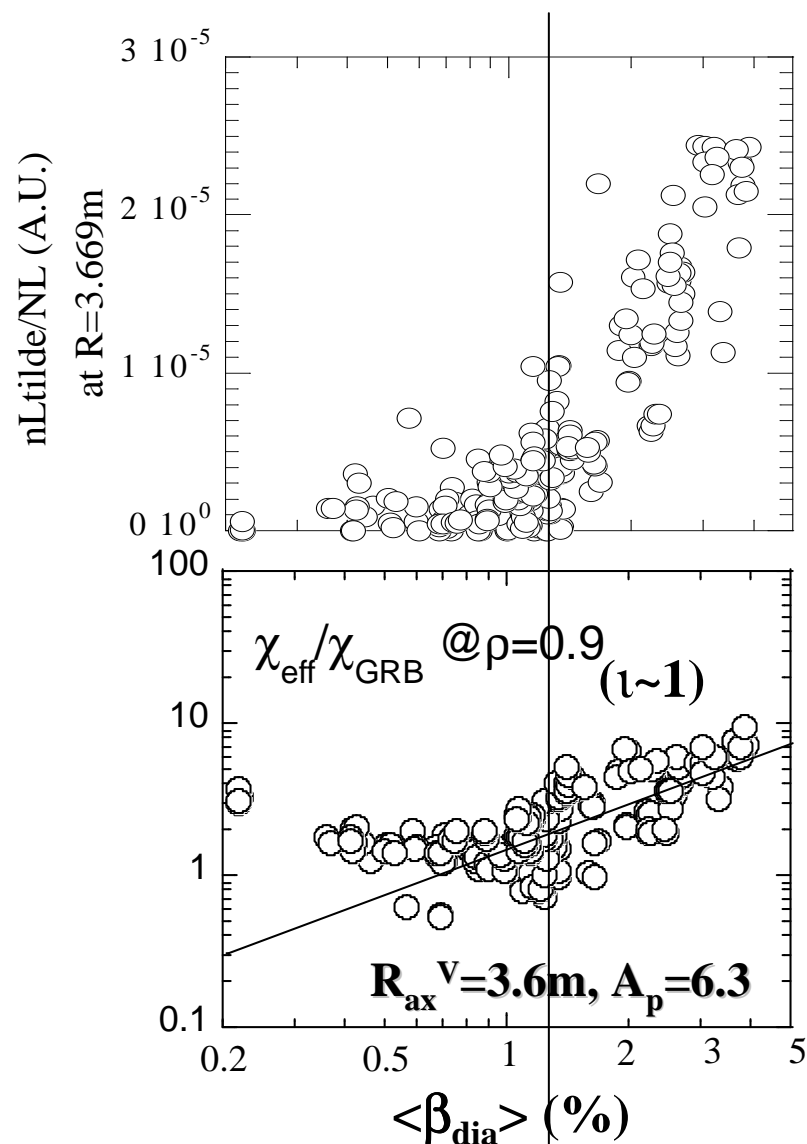
gモード乱流モデルで規格化した熱輸送係数は、ベータが1%より大きな領域では、ベータ値に対してほぼ一定となる。



$$\chi \propto \left( \frac{q}{\hat{S}} \right) \left( \kappa_n R_0 \right)^{\frac{4}{3}} a_{eff}^2 \left( \frac{\beta R_0}{L_p} \right)^{\frac{4}{3}} S^{-\frac{2}{3}} \frac{v_{Te}}{R_0}$$



比較的長波長の密度揺動強度がベータ値とともに増加する

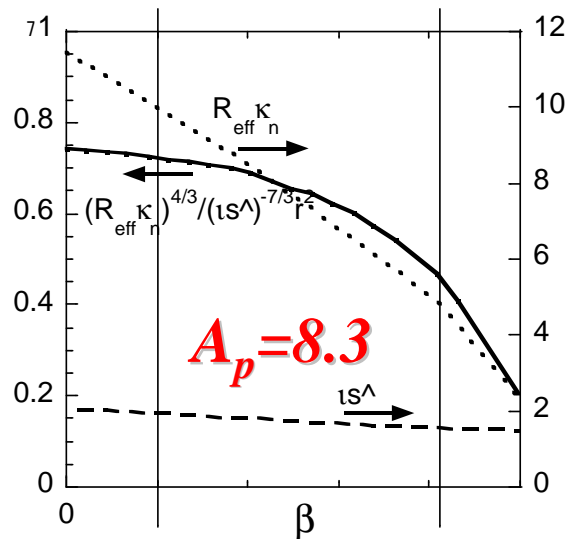
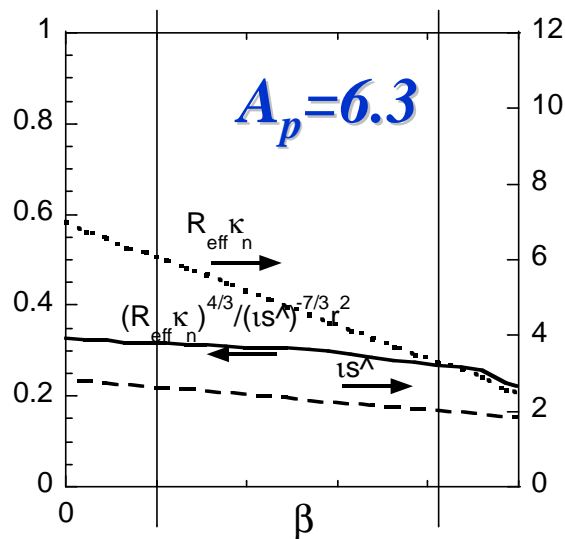
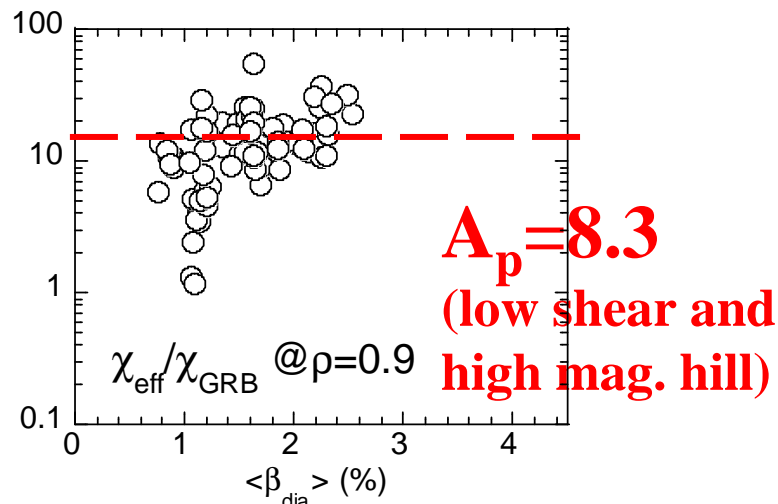
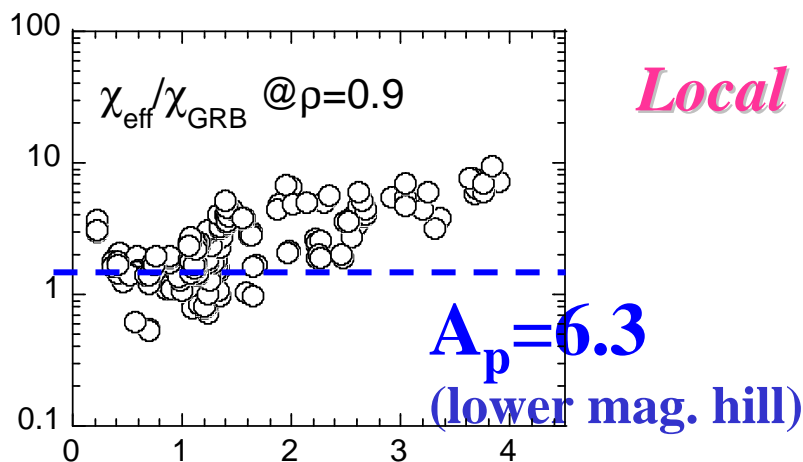


比較的長波長、  
 $\lambda > \sim 30\text{mm}$  ( $m < 100$ )、の密度  
 揺動のベータ依存性

# 観測視線は周辺領域を通過している。

# 規格化 $\chi$ の変曲点は、密度  
 揺動の強度が上昇し始める  
 ベータ領域とよく一致してい  
 る。

# 抵抗性gモード乱流輸送モデルの磁場配位依存性

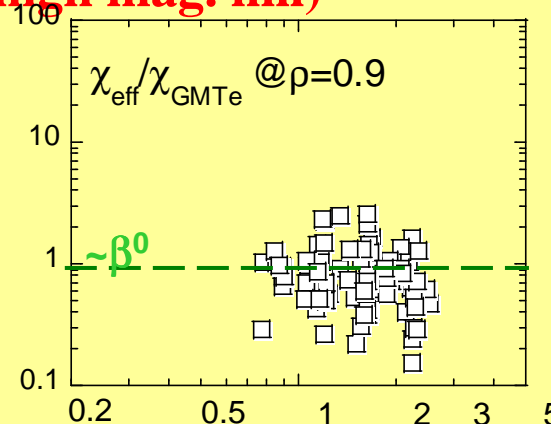
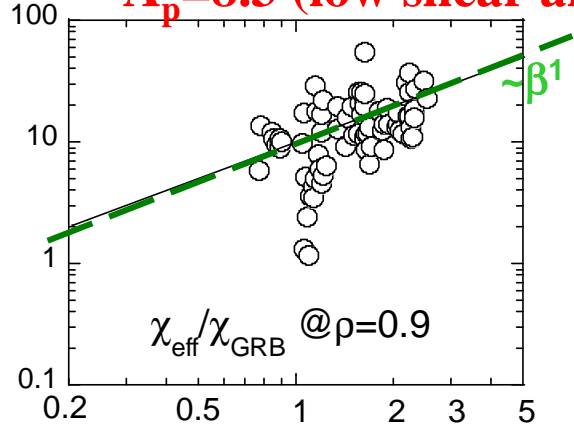


$G_{GMTe}$

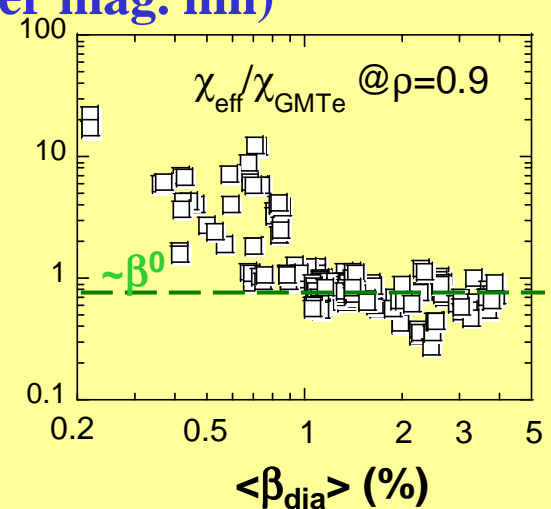
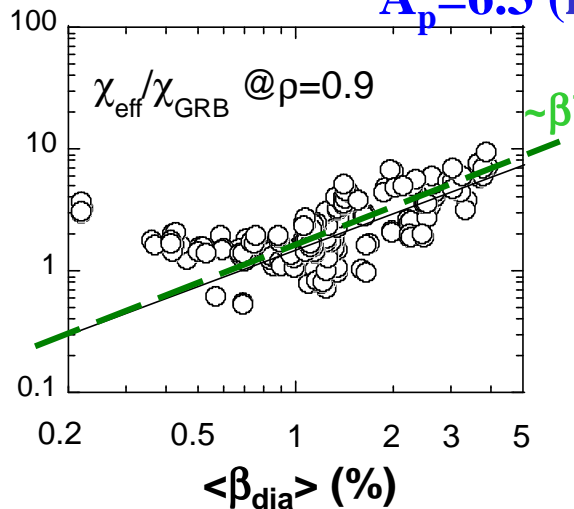
$$\chi \propto \left(\frac{q}{s}\right) \left(\kappa_n R_0\right)^{4/3} a_{eff}^2 \left(\frac{\beta R_0}{L_p}\right)^3 S^{2/3} \frac{v_{Te}}{R_0}$$

形状因子は低ベータで2.5倍、高ベータで2倍、高アスペクト配位の方が大きい<sup>28</sup>

$A_p=8.3$  (low shear and high mag. hill)



$A_p=6.3$  (lower mag. hill)



$$\chi_{GRB} \propto \beta^0 v_{p*}^0 \rho_*^1 \chi_B,$$

$$\chi_{ISS95} \propto \beta^{0.16} v_{p*}^{0.04} \rho_*^{0.71} \chi_B,$$

$$\chi_{GMTe} \propto \beta^1 v_{p*}^{0.67} \rho_*^{0.33} \chi_B$$

**GMT (g-mode turbulence) model is more consistent with experimental thermal conductivity in a high beta range than GB (Gyro-reduced Bohm) model.**

(The scatterings of data in a high aspect config. are fairly large.)

## MHD不安定の輸送への影響(まとめ)

- # 高ベータ領域で、周辺付近の局所輸送特性の緩やかな劣化が観測(Gyro-Bohmモデルに対して)
- # 上記のプラズマの熱輸送係数のベータ、規格化された衝突周波数、規格化したイオンのラーマ半径依存性はgモード駆動乱流モデルのそれによく似ている。

### 傍証1

gモード駆動乱流が支配的となると予測されるベータ領域において、比較的長波長の密度揺動の振幅強度が増加する(gモード乱流の理論予測と一致する)。

### 傍証2

異なるアスペクト比の放電群に対しても、gモード駆動乱流モデルの有効性を検証。



# LHDで進んだ高ベータ放電研究の成果

- 1) モード幅が低 $n$ のMHD不安定性の閉じ込め性能に影響を与える指標となる。
- 2) 5%までの高ベータ運転の到達ベータ値の上限は、低次のMHD安定特性ではなく、輸送特性により決まっている。(輸送特性を支配しているのは、周辺部の $g$ モード乱流輸送である可能性が高い)

LHDで研究が進展した主な理由は(私見)?

- 1) 高解像度の電子温度分布、電子密度分布計測の実現。
  - 2) LHDの磁場配位がヘリカルにしては単純なため、コード適用が比較的容易かった。
  - 3) MHD特性が不利と予測される配位で十分に入力エネルギー供給の実現できる設計を行ったこと(磁気軸トーラス内寄せ、高アスペクト比運転)。
- <= 結果的に、MHD不安定性により運転領域が強く制限されなかった。

# 設計、予測、解析に使った計算コード、モデル(LHD高ベータ関連)

	平衡	安定性	輸送、閉じ込め
設計時(~1992)	BETA_EQ, STEP_EQ <sup>1)</sup> , H-APOLLO <sup>1)</sup> , VMEC(fix), HINT (fix, filament)	BETA_ST, STEP_ST <sup>1)</sup> , RESOLM <sup>1)2)</sup> , H-ERATO <sup>1)</sup> ,	LHDscaling <sup>4)</sup> , Gyro-Bohm, Bohm, g-mode turbulence
実験前(~1998)	VMEC(free), HINT (fix, filament)	STEP_ST <sup>1)</sup> , RESOLM <sup>1)2)</sup> , Hn_bal 高nバルーン	ISS95scaling <sup>4)</sup> , Gyro-Bohm, FIT NBI加熱分布
現在(~2009)	VMEC2000(free), HINT2(free)  1) 2次元	NORM <sup>1)2)3)</sup> , CAS3D, Terpsichore, FAR3D <sup>2)</sup> Hn_bal	ISS04scaling <sup>4)</sup> , Gyro-Bohm, g-mode turbulence, FIT  4) 巨視的閉じ込め則

2) 抵抗性、3) 非線形

## LHD高ベータ放電の核融合炉への外挿性は？

---

# 平均ベータ値; OK?

反磁性計測で~5%

抵抗交換型モードは、Sにも依存.

# 圧力分布; OK?

電子圧力分布は、 $\sim(1-\rho^2)$  or 更にピーク

# 閉じ込め性能; NG?

$\langle\beta\rangle\sim 5\%$  で、 $H_{ISS}\sim 1$ .

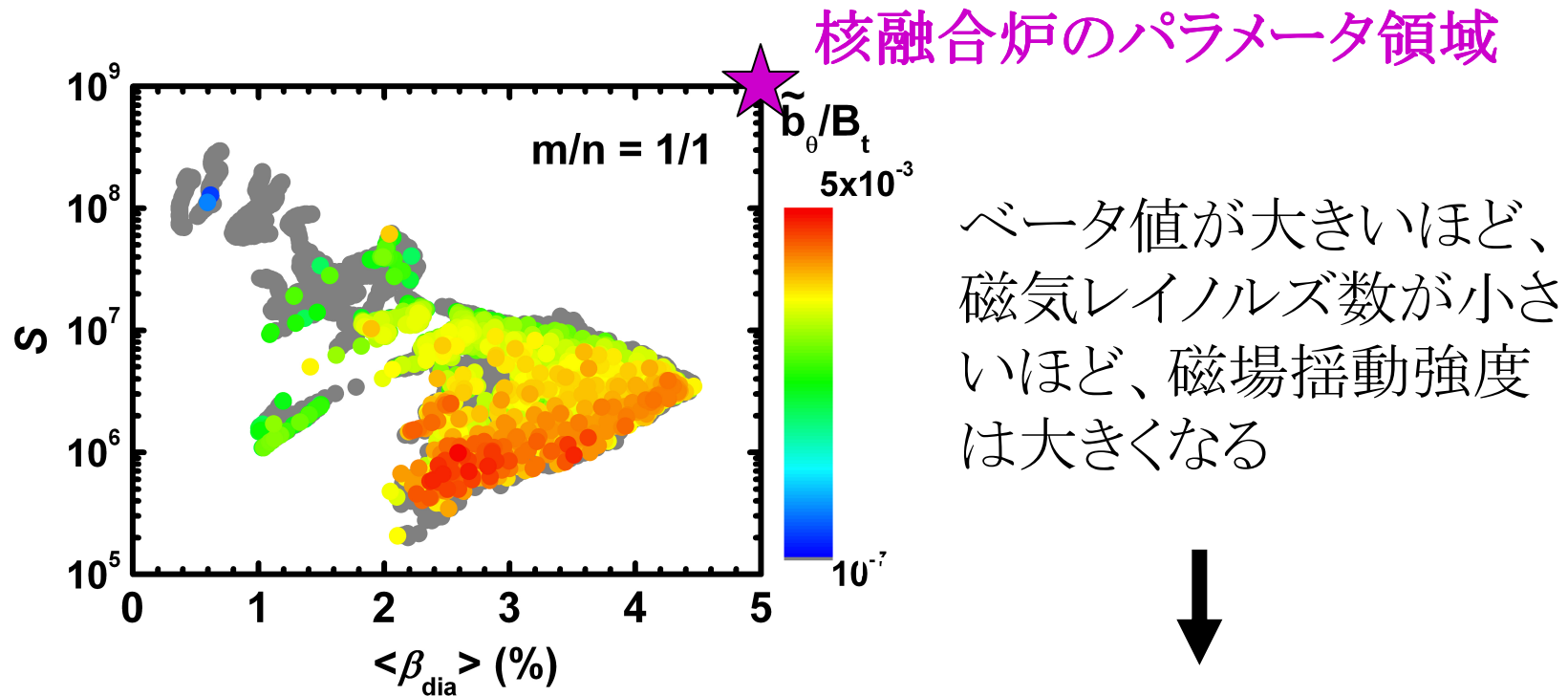
ベータ値の上昇につれてさらに劣化.

# アルファ粒子の閉じ込め; NG?

現在の実験では未検証.

NBIの加熱効率から推測するとNG?

# 低次の磁場揺動強度のベータ値、磁気レイノルズ数依存性

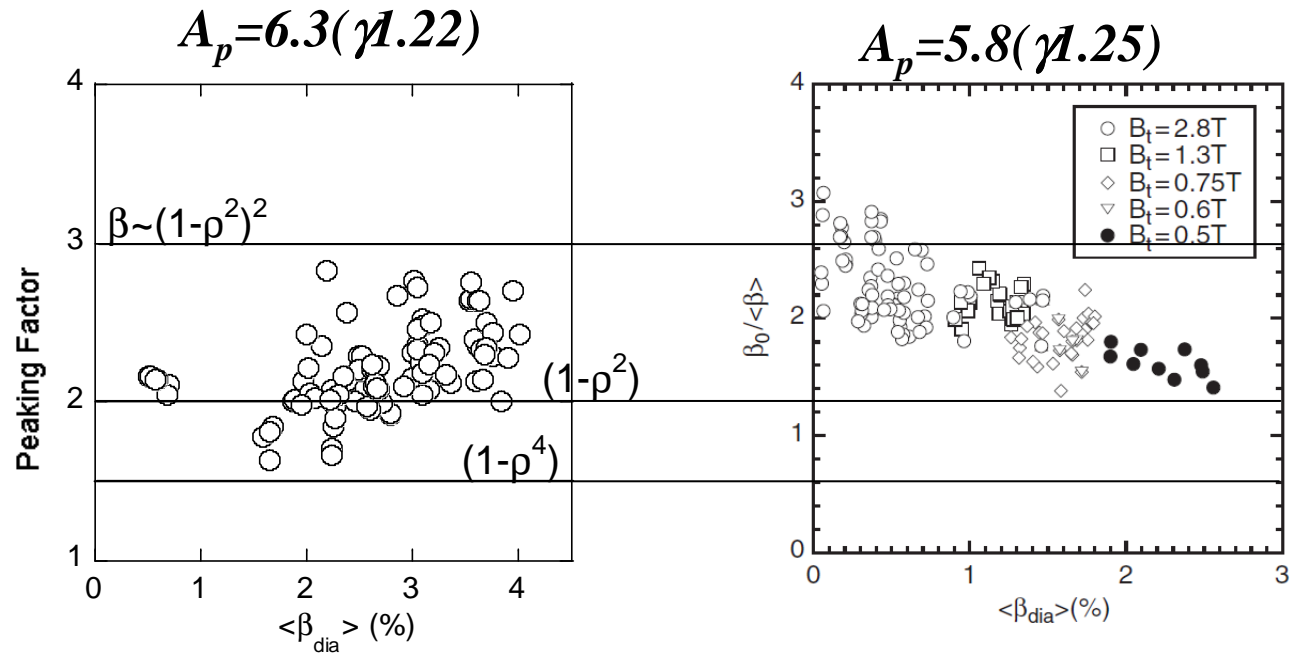


ベータ値が大きいほど、  
磁気レイノルズ数が小さいほど、  
磁場揺動強度は大きくなる



MHD安定特性としては、  
楽な方向にある。

# ベータ値による圧力分布の変化



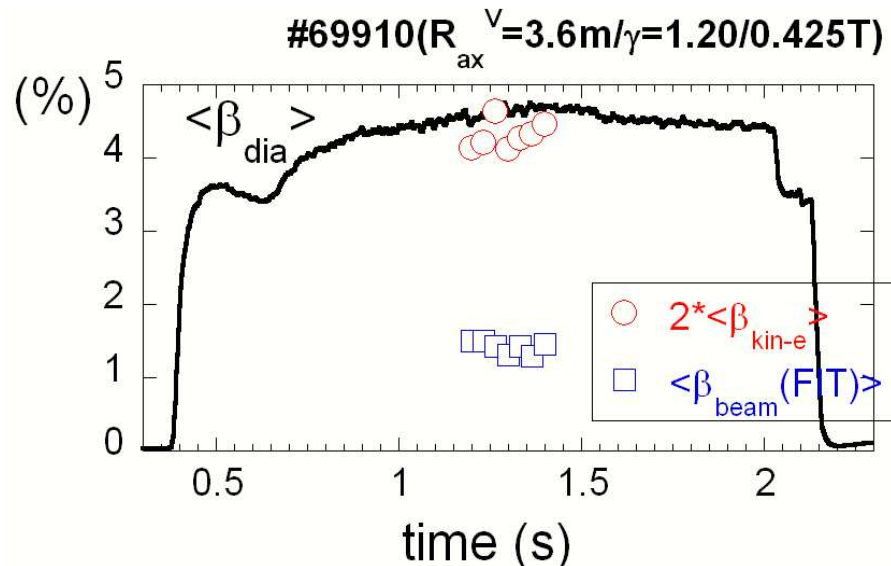
ベータ値が低い領域で一旦平坦化するが、  
更にベータ値が上昇すると尖塔化する

交換型不安定性は、中心/周辺とも好ましい方向  
平衡/バルーニングが課題？



# 高ベータ放電で予測される高いビーム圧力

$\langle \beta_{kin} \rangle$  ; 3.6% ( $Z_{eff}=2.5$ ),  $\langle \beta_{beam} \rangle$ ; 1.5% (Cal.)



Port-through power //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)

解決すべき課題

ビーム圧力、非等方性の同定手法の確立  
MHD平衡/安定特性にビーム圧力が与える効果

Relatively low  $n_e$  and low  $B_0$  leads to large ratio of  $p_{beam}$ .

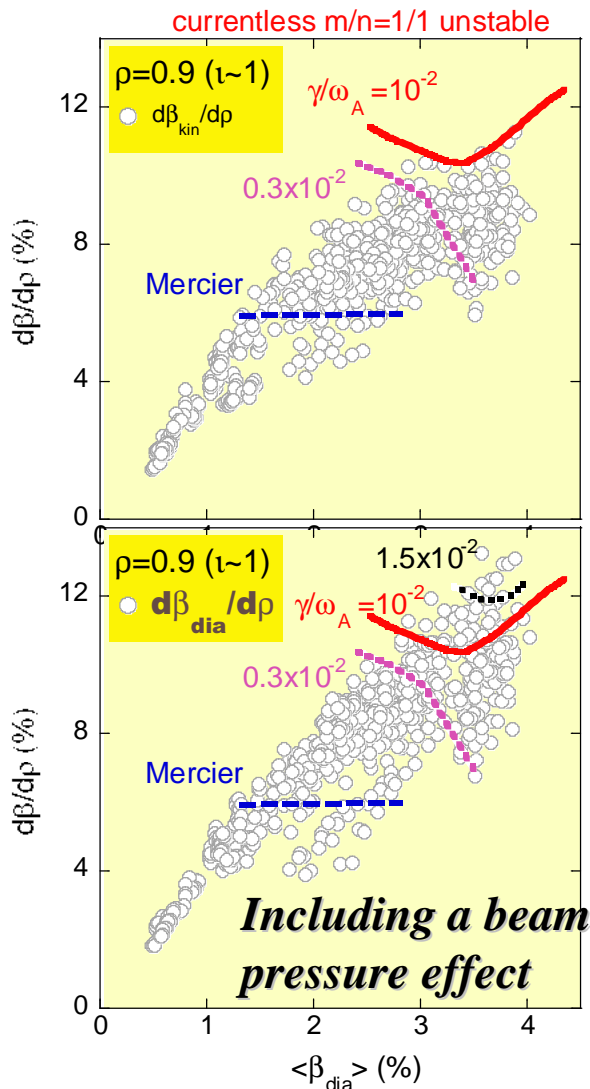
$\langle \beta_{dia} \rangle$  ; based on the diamagnetic measurement.

$\langle 2 \times \beta_{kin-e} \rangle$ ; based on the  $T_e$  and  $n_e$  profile measurements  $Z_{eff}=1$  and  $T_i=T_e$  are assumed.

(When  $Z_{eff}=2.5$ ,  $\langle \beta_{kin} \rangle \sim 3.6\%$  ( $\beta_{perp} \sim 2.45$ ),  $\langle \beta_{beam} \rangle_{perp} \sim 0.75\%$ ,  $\langle \beta_{beam} \rangle_{ara} \sim 0.75\%$ )

$\langle \beta_{beam} \rangle$  ; based on the calculation with Monte Carlo technique.

# 圧力駆動MHD不安定性に対する ビーム圧力の影響は?



Typical LHD high beta operations are done in low magnetic field and with high NBI power, where the beam pressure is fairly large.

We need the beam pressure effect on the ideal interchange mode.

Assumption when as the first step;

$d\beta_{beam}/d\rho$  is proportional to  $d\beta_{kin}/d\rho$ .

$$\langle \beta_{dia} \rangle + \langle \beta_{kin} \rangle \Rightarrow \langle \beta_{beam} \rangle$$

**Predicted maximum of growth rate exceeds**

$$\gamma_{low-n}/\omega_A = 1.5 \times 10^{-2} .$$

**Not consistent with the result from the Core!?**

To make clear the effects of the beam pressure on the ideal MHD mode, we need more detail information of the beam pressure. Moreover, we need larger heating power and/or the same kind of experimental study in other configurations in LHD.

# ビーム圧力、非等方圧力による安定化(理論予測)

Cooper et al., *FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY* 50 (2006) 245.  
"STABILITY PROPERTIES OF ANISOTROPIC PRESSURE STELLARATOR  
PLASMAS WITH FLUID AND NONINTERACTIVE ENERGETIC PARTICLES",

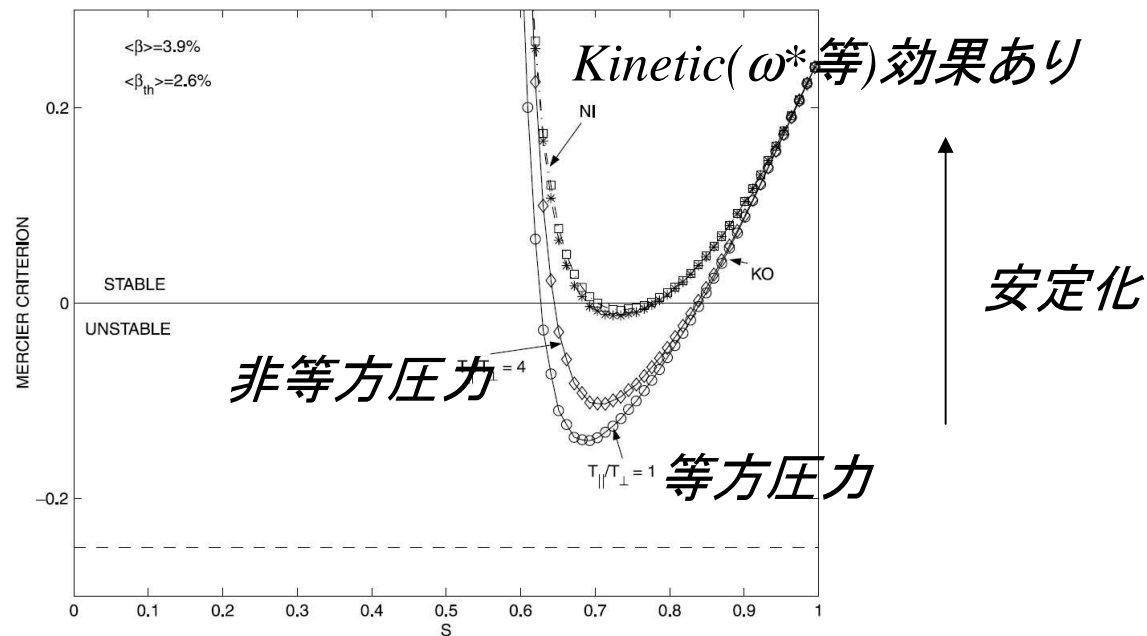
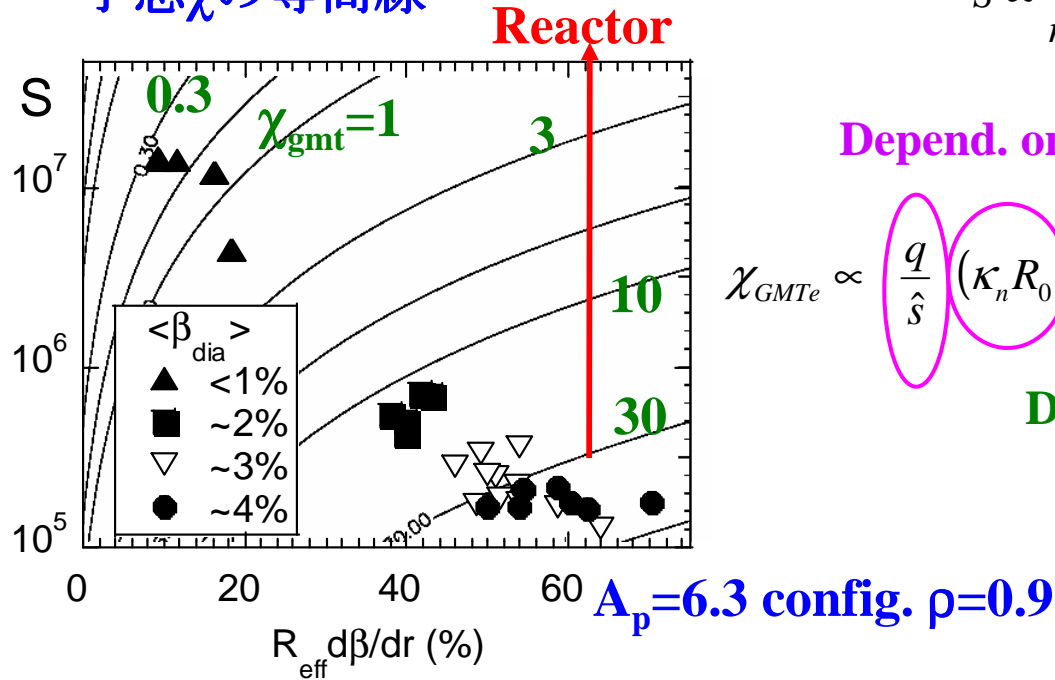


Fig. 5. The profiles of the Mercier according to the fluid KO and rigid NI hot particle models at fixed total  $\langle \beta \rangle = 3.9\%$  and thermal  $\langle \beta_{th} \rangle = 2.6\%$  for  $T_{\parallel}/T_{\perp} = 1$  and 4. The NI curves are almost indistinguishable from each other, reflecting their near marginality.

# 核融合炉におけるgモード乱流輸送の影響

gモード乱流輸送モデルの  
予想 $\chi$ の等高線



$$S \propto \frac{T_e^{3/2}}{n_e^{1/2}} B_0 \frac{a_{eff}^2}{R_0} \rho^2 = \frac{\beta^{3/2}}{n_e^2} B_0^4 \frac{a_{eff}^2}{R_0} \rho^2$$

Depend. on geometric param.

$$\chi_{GMTe} \propto \left( \frac{q}{\hat{s}} \right) \left( \kappa_n R_0 \right)^{4/3} \left( \frac{a_{eff}}{R_0} \right) \left( \frac{\beta R_0}{L_p} \right)^{4/3} S^{-2/3} v_{Te} a_{eff}$$

Depend. on plasma param.

Increases

Decreases

LHDの高ベータ放電は、低磁場で運転

=> ベータが高くなるほど、磁気レイノルズ数(S)が増加.

=> 高ベータにおいて大きな $\chi$ を予測.

核融合炉では、磁場、密度が10倍、小半径が3~4倍大きくなる

=> S が300-400倍増加( $v_{Te} a_{eff}$ は15~20倍).

=>  $\chi \sim 1 \text{ m}^2/\text{s}$  (予測値は無視できないが、大きくはない)

要  
実験での検証

# LHD高ベータ放電の核融合炉への外挿性は？

---

# 平均ベータ値; OK? *まずは正確な平衡の把握が重要*

*ビーム圧力、非等方圧力の効果の検証が重要.*

# 圧力分布; OK?

*バルーニング、平衡限界の検証要*

# 閉じ込め性能; NG?

*$\langle\beta\rangle\sim 5\%$ で、 $H_{ISS}\sim 1$ .*

*磁気レイノルズ数を上げた実験での検証要*

# アルファ粒子の閉じ込め; NG?

*現在の実験では未検証.*

*NBIの加熱効率から推測するとNG?*

*高ベータ放電での高速イオンの  
閉じ込め特性の研究が重要*