

# JT-60Uにおける抵抗性壁モード研究

松永 剛、武智 学、相羽信行、栗田源一、坂本宜照、  
小出芳彦、鈴木隆博、藤田隆明、小関隆久、JT-60チーム

原子力機構、那珂



第10回若手科学者によるプラズマ研究会 JAEA

# 定常高 $\beta$ プラズマ維持に向けて

将来の核融合炉において、定常高 $\beta_N$ プラズマの維持は重要

$$\beta_N = \frac{\beta_t}{I_p/aB_t} \propto \frac{\langle p \rangle}{I_p B_t} \quad P_{\text{out}}^{\text{Fusion}} \propto \beta_N^2$$

↑  $\beta_N$ は経済性とMHD安定性を表す指標

できるだけ $\beta_N$ を上げたいがMHD不安定性で制限

そこで有限抵抗の導体壁をプラズマに近づける  
アルヴェン時間(数 $\mu\text{s}$ )程度で成長するMHD不安定性

$$\downarrow \tau_w/\tau_A \sim 10^3 \quad \left( \tau_w = \frac{L}{R} = \frac{\mu_0 \delta d}{\eta_w} \right)$$

壁時定数程度(数ms)で成長する抵抗性壁モード  
[Resistive Wall Mode(RWM)]

→ 数ms(数kHz)の時間スケールであれば、既存の技術で制御可能

到達可能な $\beta$ 領域

$$\beta_N^{\text{free}} \leq \beta_N \leq \beta_N^{\text{ideal}} \quad \begin{cases} \beta_N^{\text{free}} & : \beta \text{ limit without wall} \\ \beta_N^{\text{ideal}} & : \beta \text{ limit with ideal wall} \end{cases}$$

# RWMの安定性

$$\underbrace{\gamma^2 K + \delta W_p + \delta W_v}_{\text{理想MHD安定性}} + \underbrace{\gamma D_p}_{\text{プラズマ散逸}} + \underbrace{D_w}_{\text{壁散逸}} + \underbrace{\delta E_c}_{\text{外部印加電磁場}} = 0$$

理想壁ありの真空ポテンシャル

プラズマ回転を考慮すると、

$$\underbrace{(\gamma + in\Omega_p)^2 K + \delta W_p}_{\text{プラズマ回転}} + \underbrace{\frac{\delta W_v^b \gamma \tau_w + \delta W_v^\infty}{\gamma \tau_w + 1}}_{\text{抵抗壁ありの真空ポテンシャル}} + \underbrace{(\gamma + in\Omega_p) D_p}_{\text{プラズマ散逸とプラズマ回転の結合}} = 0$$

壁の時定数      壁なしの真空ポテンシャル

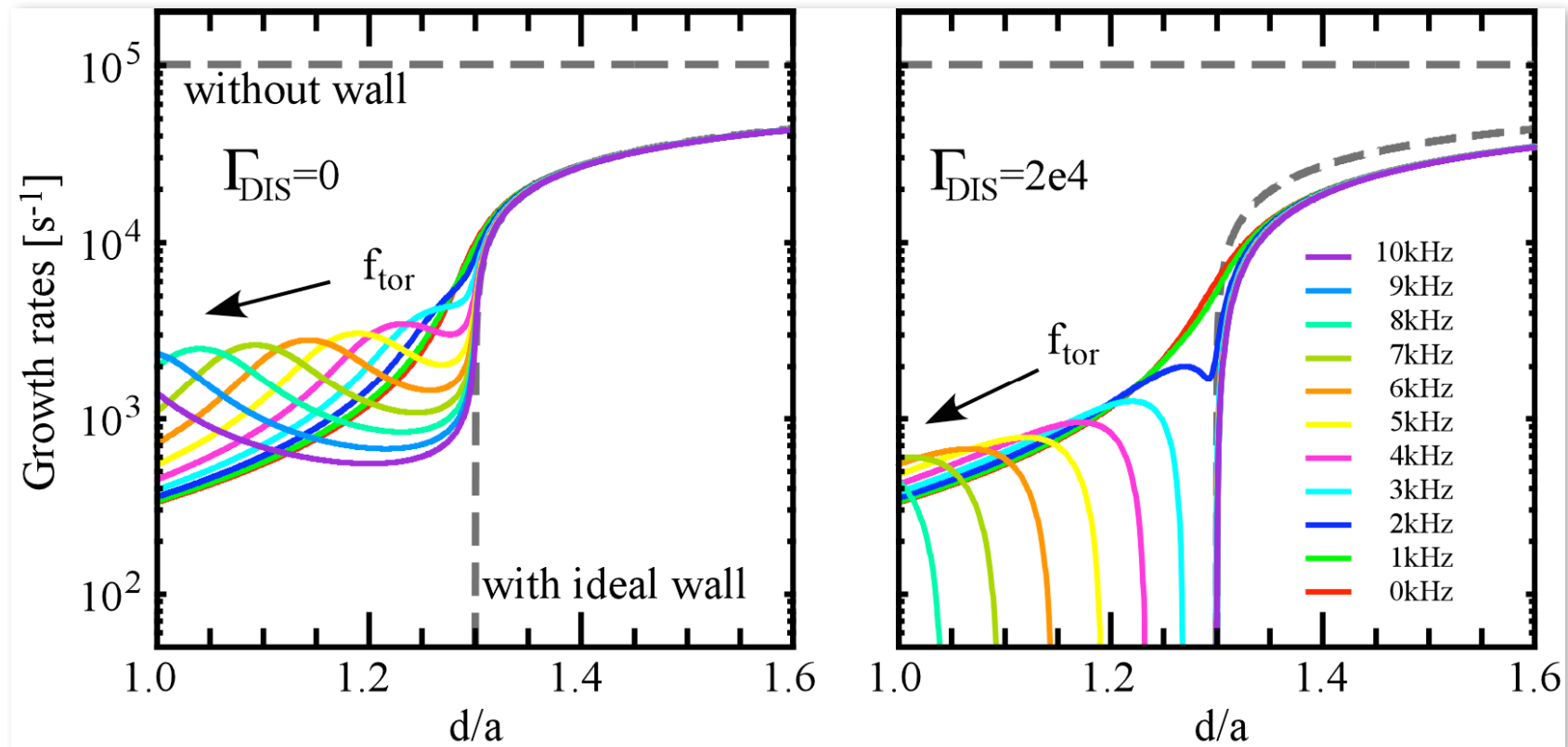
M. S. Chu et al., Phys. Plasma, Vol. 11, p.2497(2004)  
M. S. Chu et al., Phys. Plasma, Vol. 2, p.2236(1995)

$$(\gamma + in\Omega_p)^2 - \Gamma_\infty^2 \left( 1 - \frac{d_c}{d} \frac{\gamma \tau_w}{\gamma \tau_w + 1} \right) + \underbrace{(\gamma + in\Omega_p) \Gamma_{Dis}}_{\text{プラズマ回転安定化}} = 0$$

壁安定化

# RWM分散式

$$(\gamma + in\Omega_p)^2 - \Gamma_\infty^2 \left( 1 - \frac{d_c}{d} \frac{\gamma \tau_w}{\gamma \tau_w + 1} \right) + (\gamma + in\Omega_p) \Gamma_{\text{Dis}} = 0$$





# RWM研究

RWM安定化機構の解明

プラズマと壁間距離の効果

プラズマ回転の効果

誤差磁場の影響(RFA)

RWM安定化制御

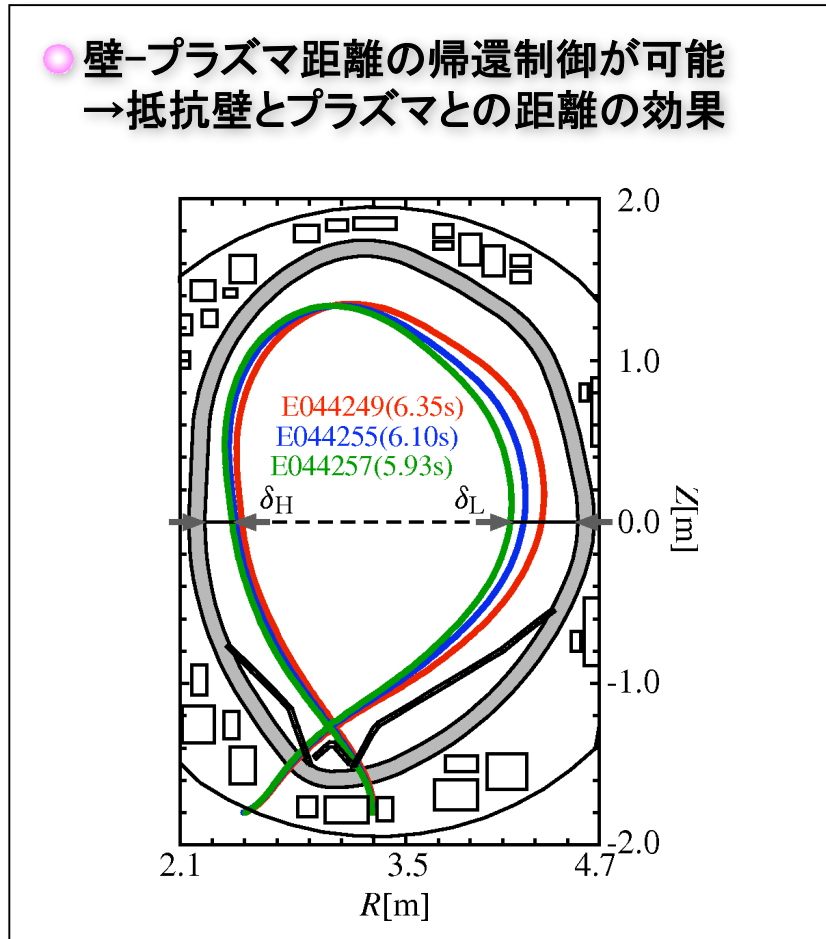
外部コイルによる帰還制御

外部コイルに能動的RWMセンシング

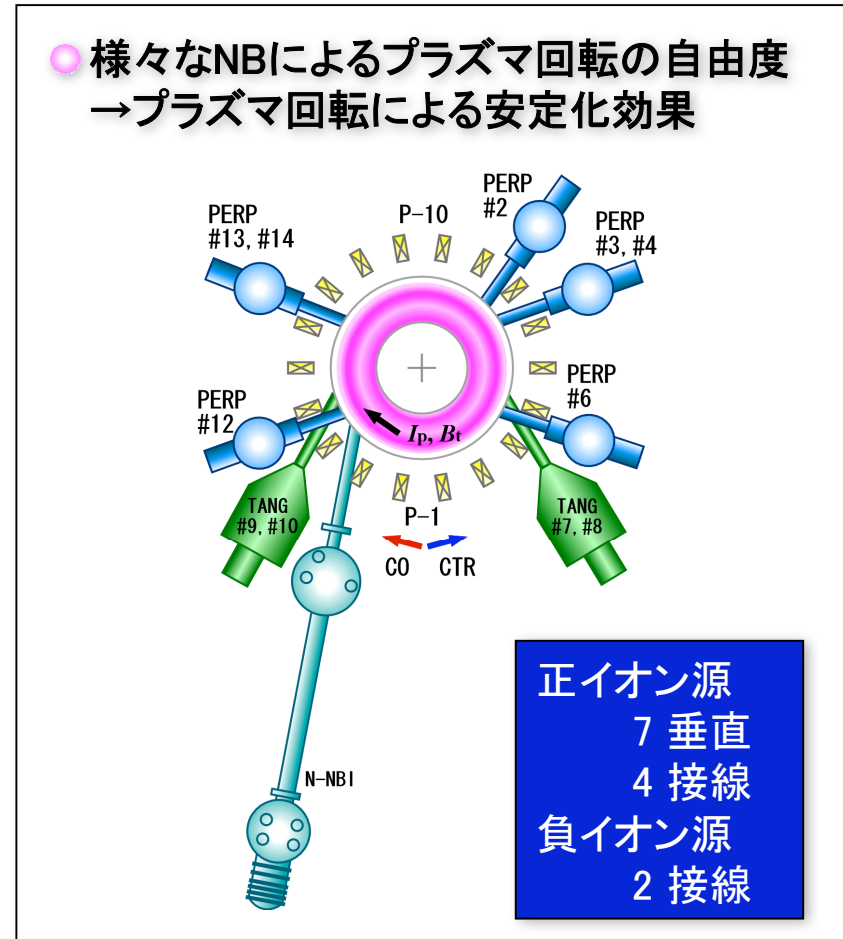
# JT-60UにおけるRWM研究のメリット

JT-60Uでは、

- 壁-プラズマ距離の帰還制御が可能  
→抵抗壁とプラズマとの距離の効果



- 様々なNBによるプラズマ回転の自由度  
→プラズマ回転による安定化効果



# RWMに対する壁位置の安定化効果を実験的に確認

■ プラズマと壁との距離を系統的に変化させ、OHプラズマで不安定性の成長率を計測。

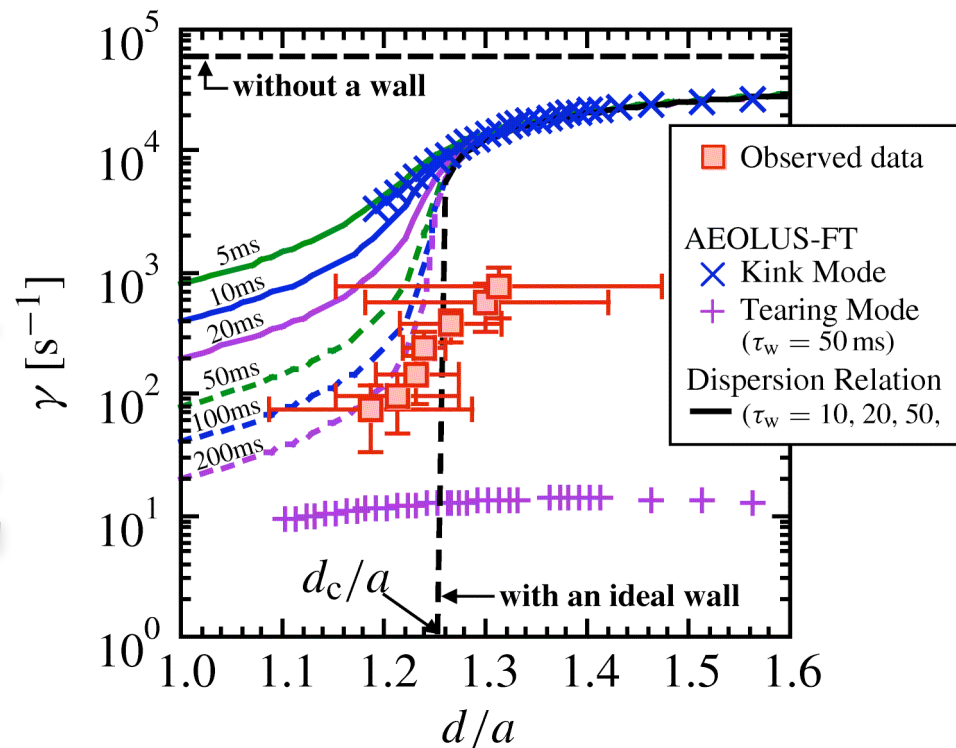
→ プラズマを壁から離すと成長率が増大。

■ 壁の抵抗率を考慮したAEOLUS-FTの計算では  $m/n=3/1$  キンクモード、 $2/1$  ティアリングモードが不安定

■ プラズマ回転および散逸を無視したRWMの分散関係及びAEOLUS-FTの計算結果と定性的に一致。

■ これらのモードは理想壁ありで安定な領域で観測。

→ 電流駆動型RWMと同定



$$\gamma^2 - \Gamma_\infty^2 \left( 1 - \frac{d_c}{d} \frac{\gamma \tau_w}{\gamma \tau_w + 1} \right) = 0$$

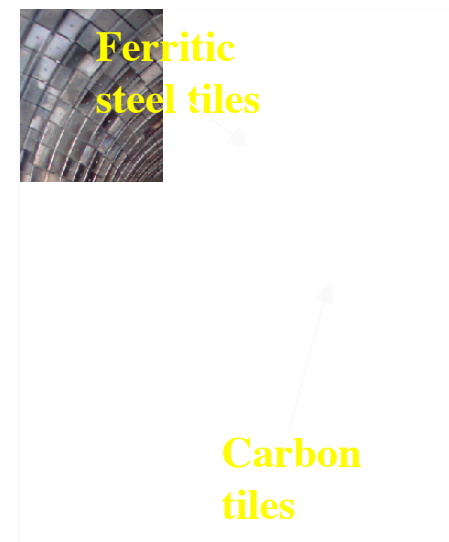
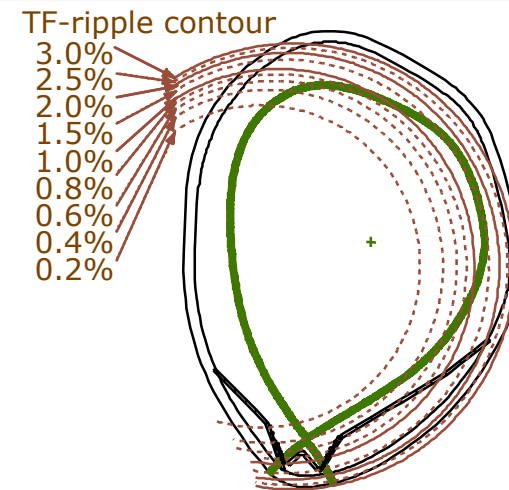
G. Matsunaga et al., PPCF, Vol. 49, pp.95-103 (2007)

# フェライト鋼タイル設置によって、 大体積プラズマへの実効入射パワーが増大

フェライト鋼タイルにより、  
トロイダル磁場リップルを低減

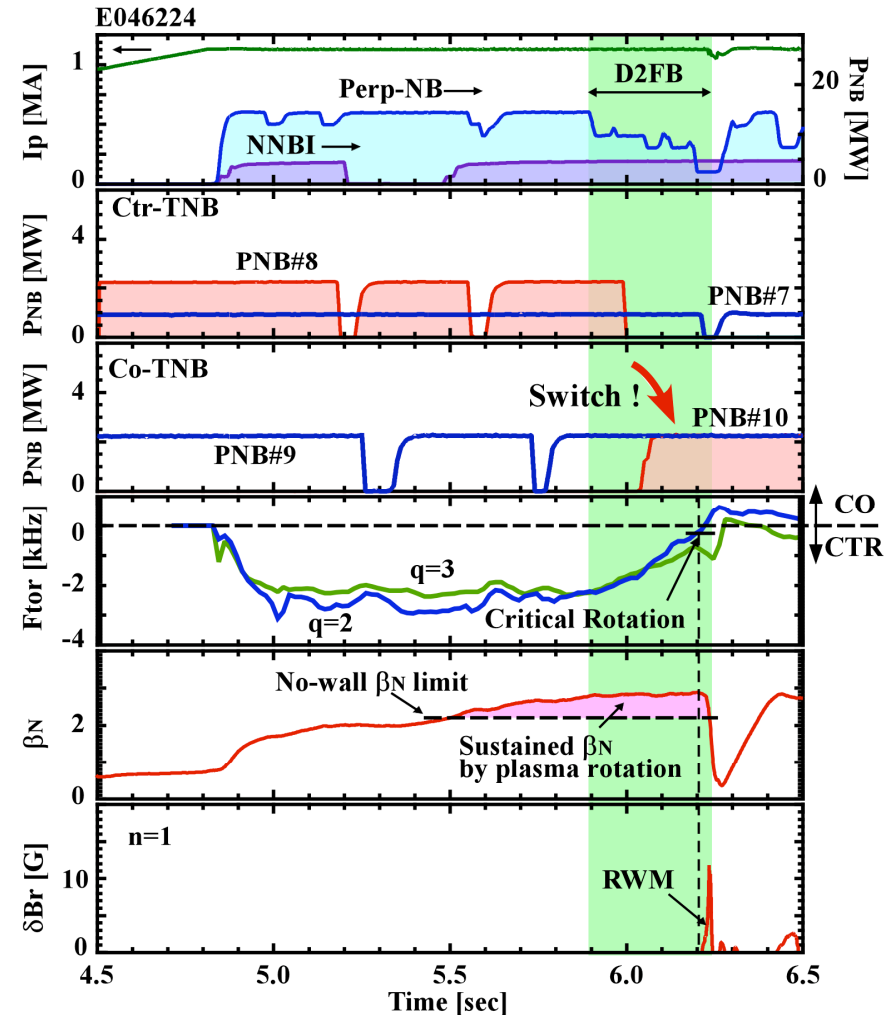
↓  
高速イオンのリップル損失が減少

- 特にリップルの大きかった外寄せ配位でのNB加熱パワーの増大(数MW)  
→高ベータRWM研究が可能
- 高速イオンリップル損失に伴う周辺でのカウンター回転の減少  
→回転の自由度の拡大



# $\beta_N \sim 3$ におけるctr-NBからco-NB入射切替による プラズマ回転制御実験

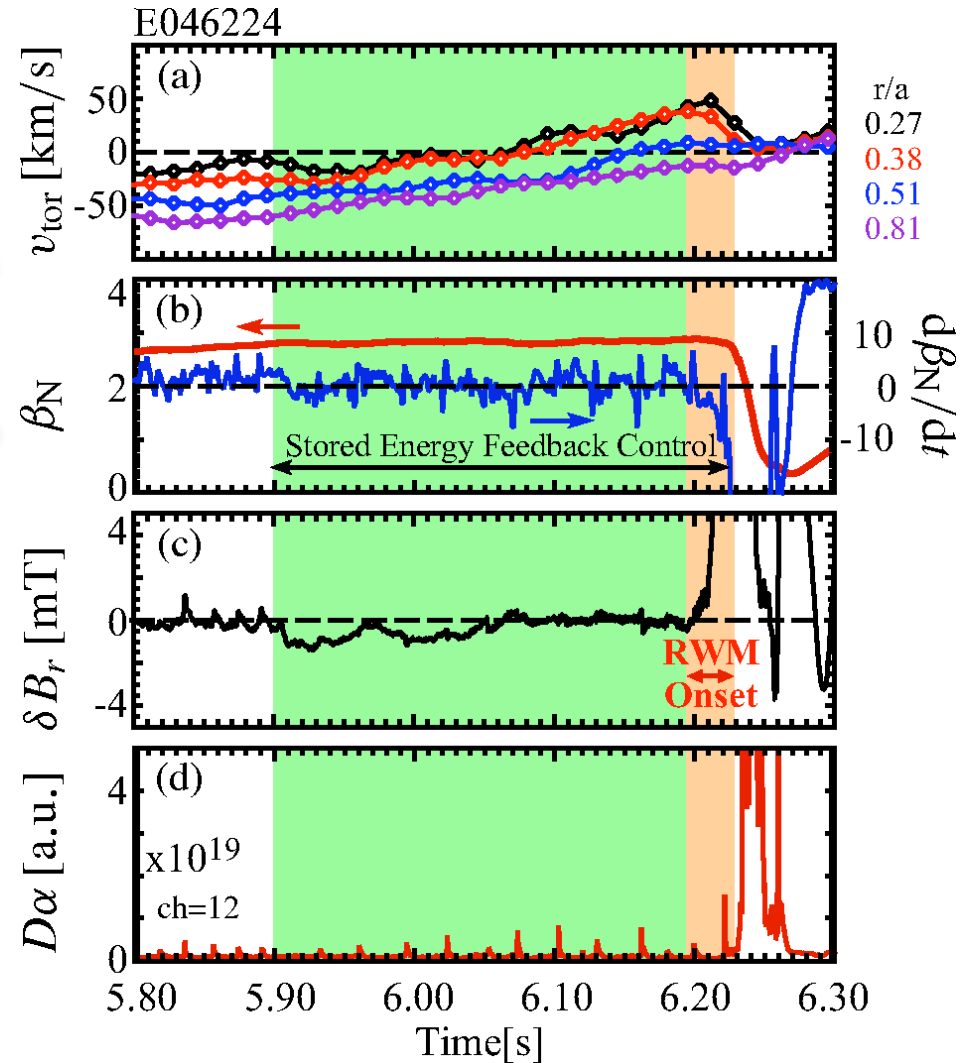
- プラズマ回転によるRWM安定化効果を調べるために、 $\beta$  値を固定して、接線NBの方向を切替、プラズマ回転のみを減少させた。
- 6.0sにおいてNB入射方向を切替えると、プラズマ回転がゆっくり減少。
- 6.2sにおいて、 $n=1$ の不安定性によるコラプスが発生。



# n=1のRWMを観測

- コラプス発生の直前、10msで成長するn=1の径方向磁場変位を観測。
- ポロイダル方向の磁場変位の構造は低磁場側のみのバルーニングタイプ。
- 理想MHD安定性コード(MARG2D)によると、壁なし $\beta$ 限界値は $\beta_N \sim 2.3$ であり、壁なし $\beta$ 限界値より高 $\beta$ の領域で発生。

↓  
RWMと同定

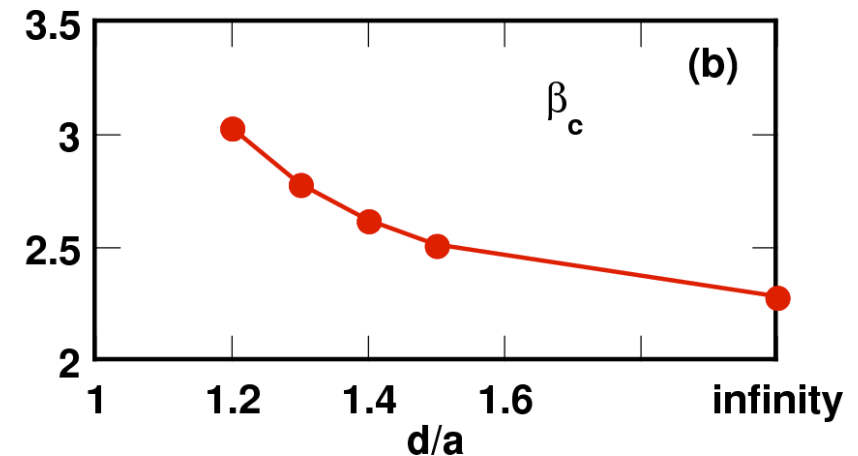
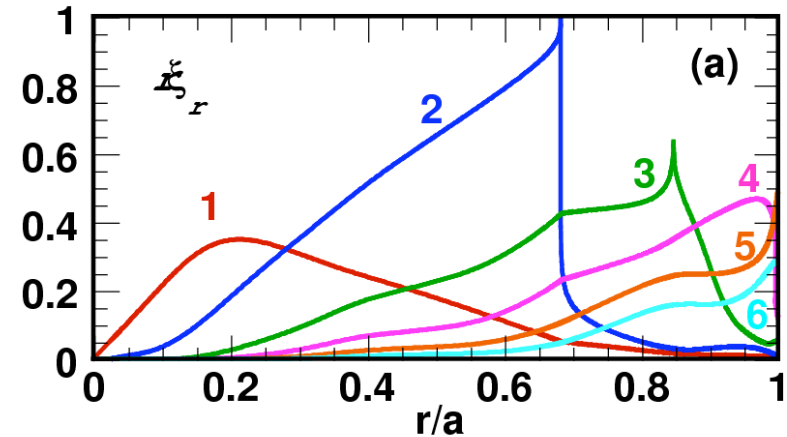


# RWMの固有関数(MARG2Dコード)

MARG2Dコードの計算によるとm=2成分が支配的であり、モードの駆動源は主にq=2での圧力勾配と考えられる。

↓  
q=2でのプラズマ回転に注目

この実験では $\beta_N$ は固定しているので、プラズマ回転の減速によってモードが不安定になったと考えられる。





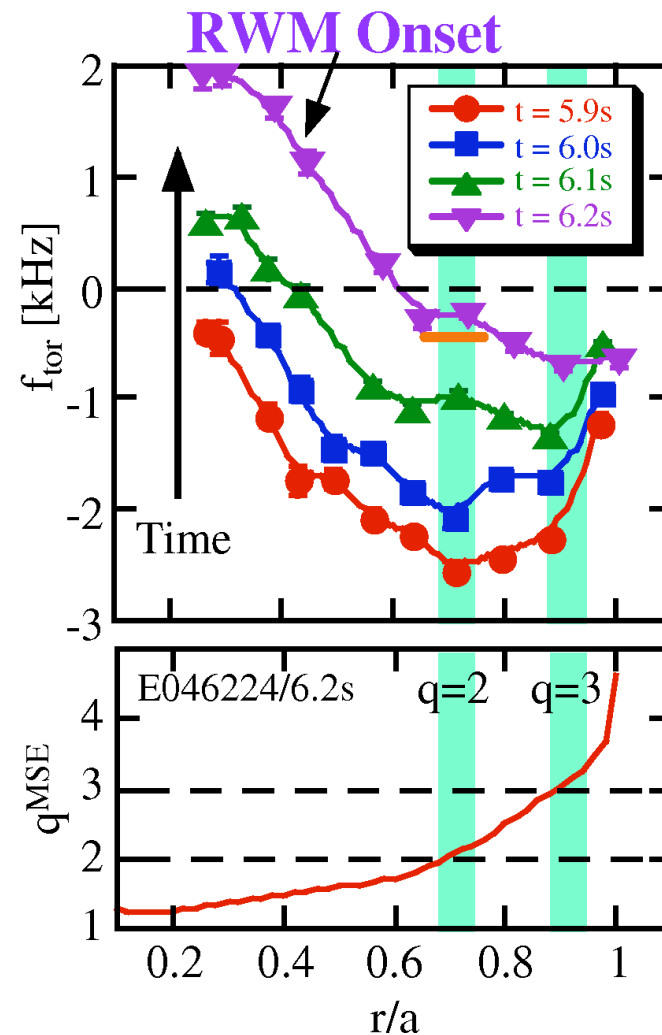
# RWM安定化に必要なプラズマ回転

●  $q=2$ での安定化に必要な回転は約0.5kHz。

● これは、  
 ● アルヴェン速度 0.3%  
 ● イオン音波速度 3.0%

低回転と言われているITERや核融合炉において実現できる回転速度

G. Matsunaga et al., 33rd EPS Conference on Plasma Physics, Roma, Italy, O2.003





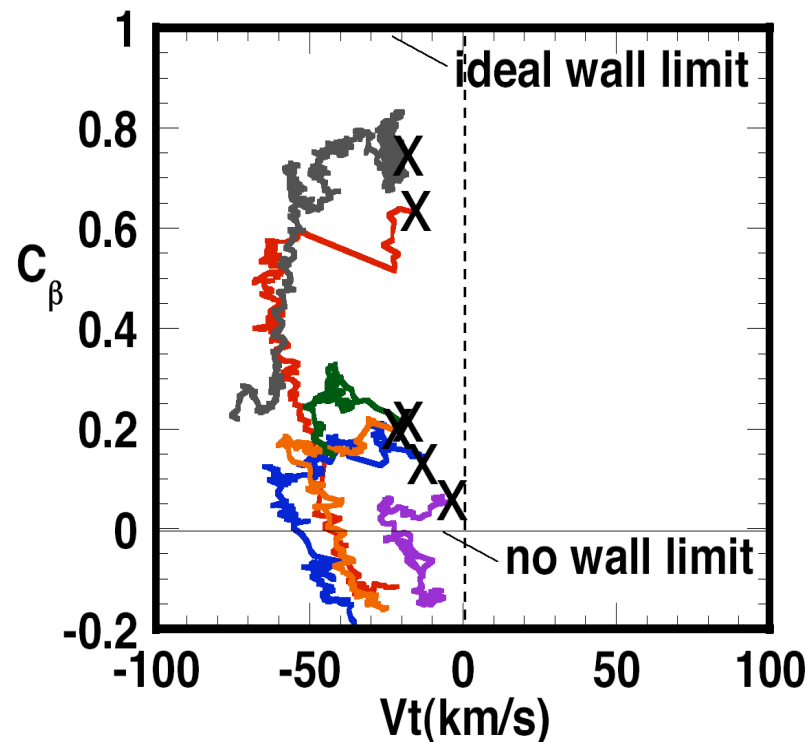
# プラズマ回転安定化速度の $C_\beta$ 依存性

どの程度 $\beta$ 限界値を超えているかの指標

$$C_\beta = \frac{\beta_N - \beta_N^{\text{free}}}{\beta_N^{\text{ideal}} - \beta_N^{\text{free}}}$$

- 安定化に必要なプラズマ回転の $\beta$ 依存性( $C_\beta$ 依存性)は弱い。

↓  
理想壁ありのMHD限界まで、  
低プラズマ回転で $\beta$ 値をあげれる!

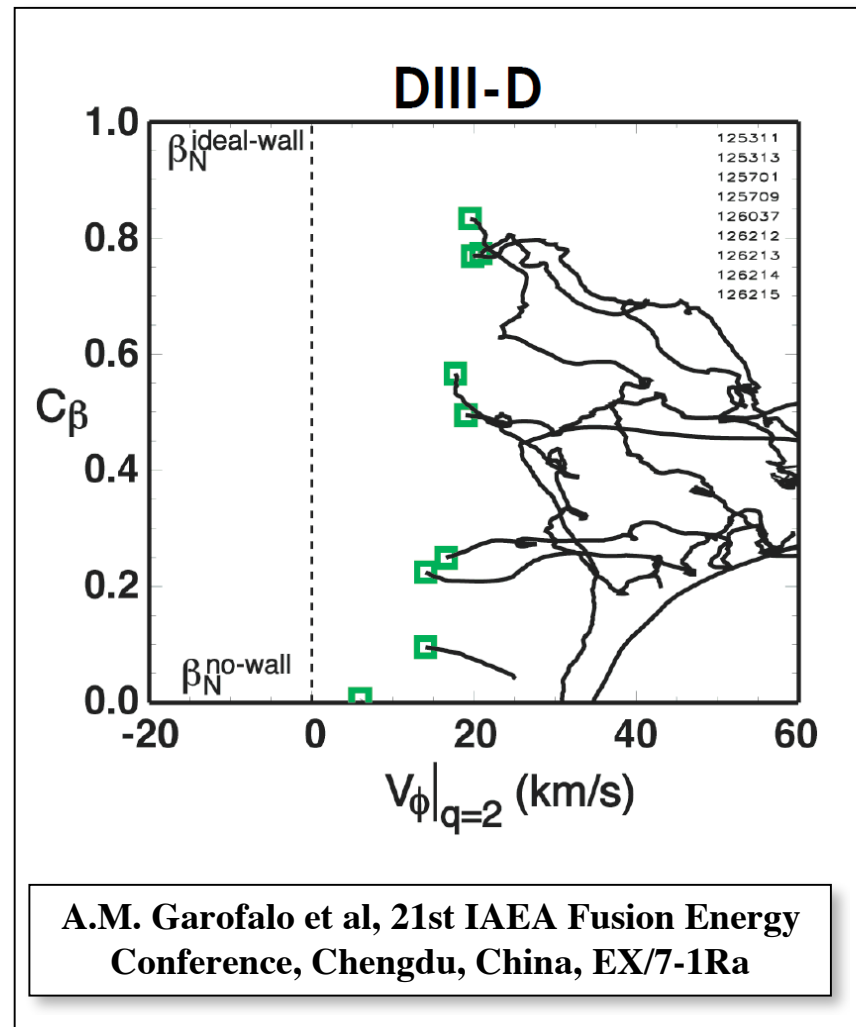
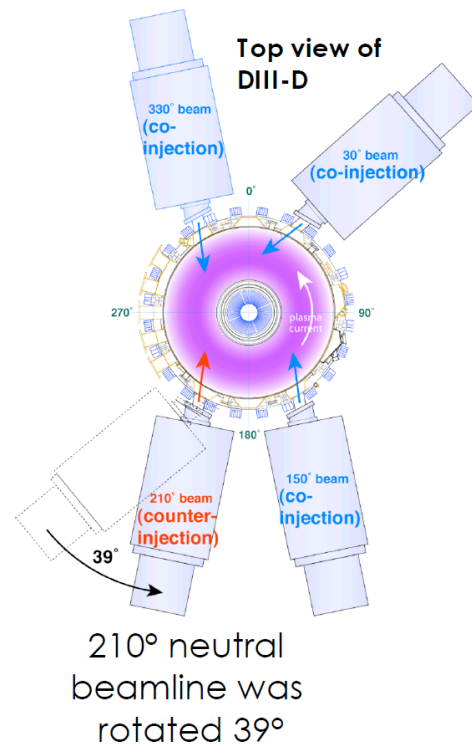


M. Takechi et al., 21st IAEA Fusion Energy Conference, Chengdu, China, EX/7-1Rb

M. Takechi et al, PRL Vol. 98, p.055002 (2007)

## DIII-Dで実験結果

2006年にco-NBの入射方向を変え、バランス入射可能に改造。低回転でのRWM安定化実験でJT-60Uと同様結果を得る。



# プラズマ回転安定化のモデル

RWMの安定化モデルとして

- ion sound dampingモデル
  - kinetic dampingモデル
- が提唱されているが、

実験で得られた $C\beta$ 依存性から、  
kinetic dampingモデルが合う

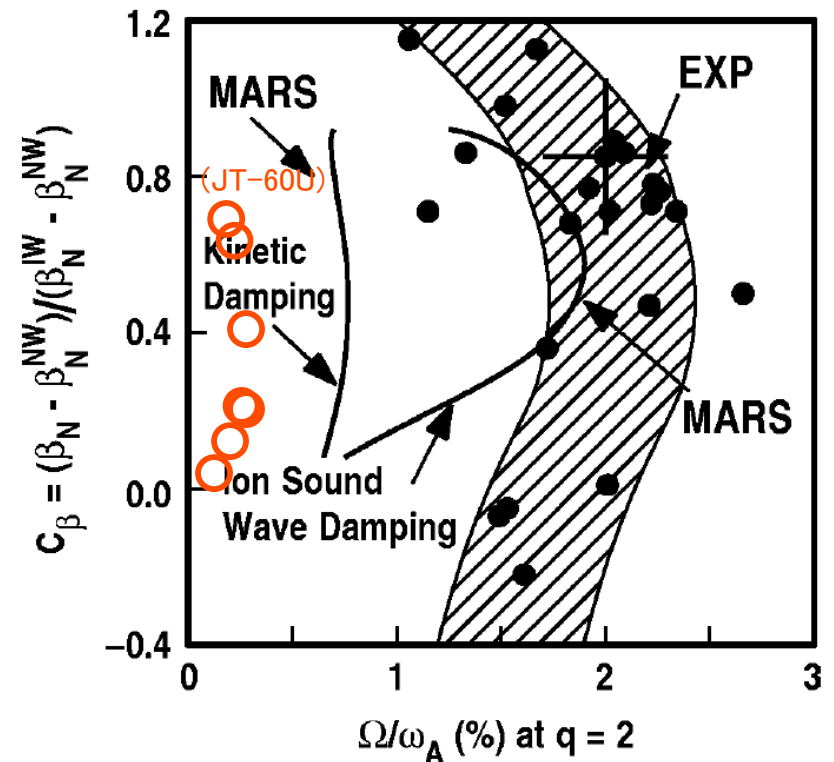
→しかし、モデルとの整合性の検証は  
今後必要。

- ion sound dampingモデル(流体的)

$$\nabla \cdot \Pi = \kappa_{\parallel} \sqrt{\pi} |k_{\parallel} v_{\text{thi}}| \rho v_1 \cdot \hat{b} \hat{b}$$

- kinetic dampingモデル(運動論的)

$$\Delta W_{\text{MHD}}(\xi) = \Delta W_p(\xi) + \Delta W_k(\xi)$$



M. S. Chu et al., Phys. Plasma, Vol. 11, p.2497(2004)

## まとめと今後の予定

- JT-60Uにおいて、高 $\beta$ プラズマ( $\beta_N \sim 3$ )におけるプラズマ回転によるRWM安定化実験を行った。
- $\beta_N$ を固定したまま、接線NBの入射方向を切替えることで、プラズマ回転による安定化効果を確認した。
- RWM安定化に必要なプラズマ回転はアルヴェン速度の0.3%程度であり、将来の核融合炉において、実現可能なプラズマ回転である。

- さまざま平衡での回転閾値や回転分布(回転シア)
- プラズマ回転制御による高 $\beta$ プラズマの維持
- RWMセンシングコイルによる安定限界計測

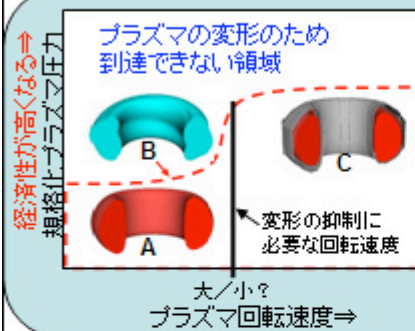
# 原子力機構 プレス発表



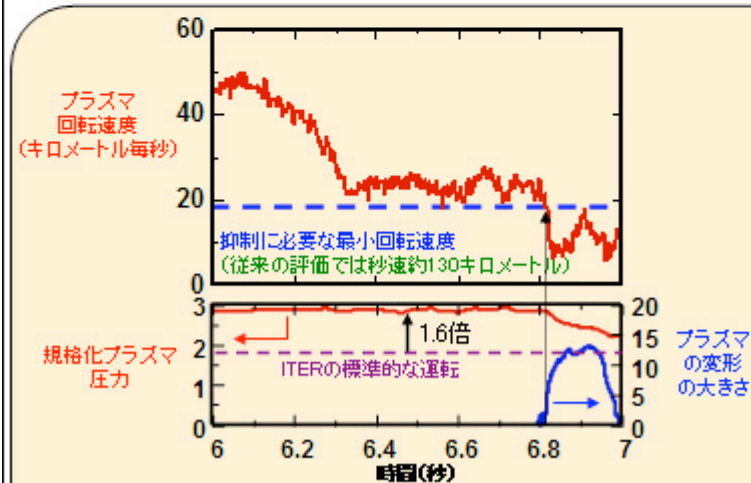
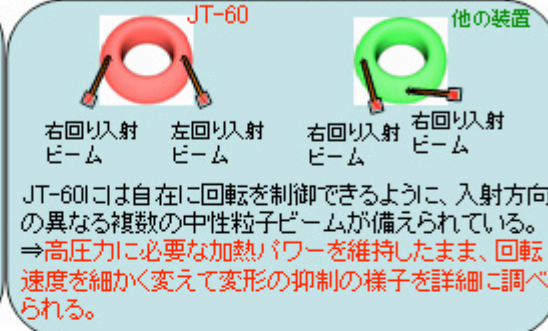
JT-60の成果、ITERのより高性能な運転に見通し  
 - 従来予測の15%の回転速度でプラズマの圧力が1.6倍に -



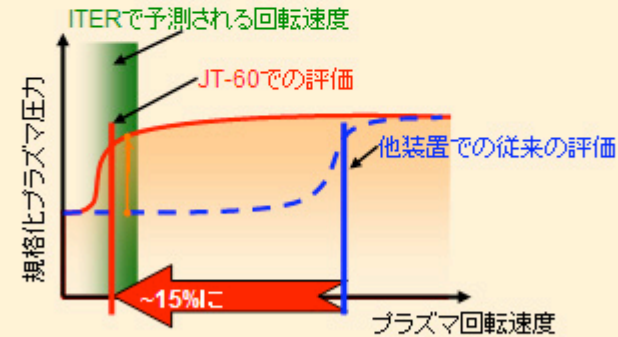
松永博士研究員、武智研究員、相羽博士研究員



- ITERの標準的な運転では、回転速度によらず必要な圧力は維持できる(A)。
  - 経済的な核融合炉で必要な高圧力領域では、プラズマの変形が高圧力状態の維持を妨げる(B)。
  - 導体の中でプラズマを回転させることで変形を抑制し圧力上昇が可能(C)。
- ⇒どの位小さい回転速度で抑制可能か?  
 (小さい回転速度で制御可能なら、ITERの運転領域を高い圧力領域へ拡張可能)



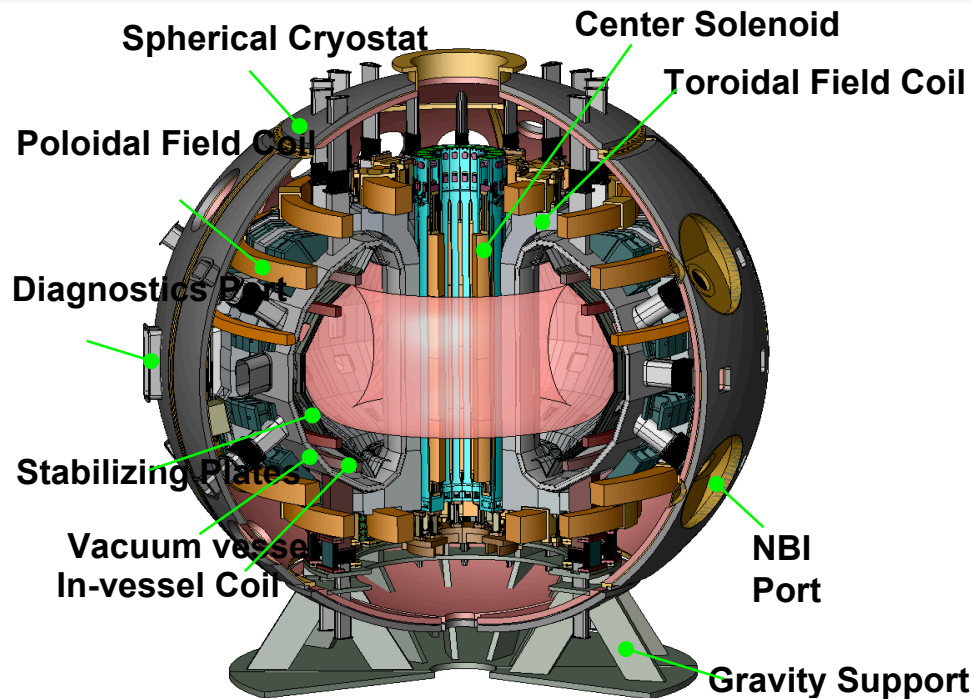
回転速度を制御しある速度以上に保つと、プラズマの変形は発生せず、高い規格化プラズマ圧力を維持した。



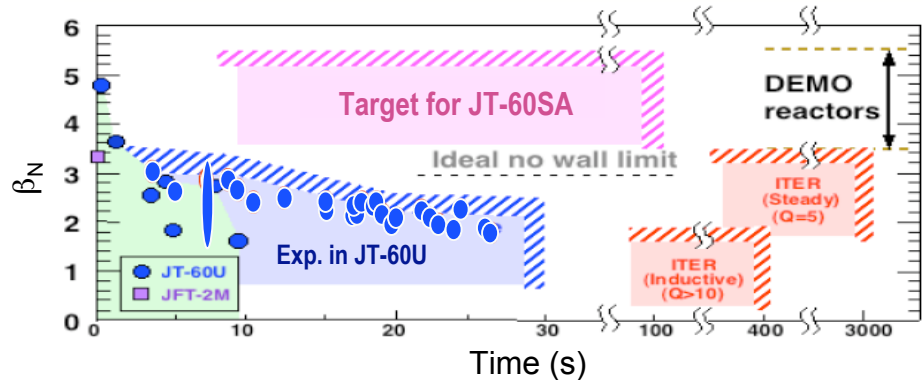
従来他装置で評価されていたよりも十分小さい(約15%)回転速度で、プラズマの変形を抑制できることを発見。  
 ⇒ITERで予測される回転速度で、変形の抑制が可能。  
 ⇒ITERの運転領域を、経済的な核融合炉の開発に可及して拡げる見通しを与える。



# Basic Machine Parameter of JT-60SA



Plasma Current $I_p$	5.5MA
Toroidal Field $B_t$	2.68T
Major Radius $R_p$	3.06m
Minor Radius $a_p$	1.15m
Elongation $\kappa_{95}$	1.76
Triangularity $\delta_{95}$	0.45
Safety Factor $q_{95}$	3.11
Volume $V_p$	127m <sup>3</sup>
Flattop Duration	100 s (8Hr)
Heating & CD power	41MWx100 s
Perpendicular NBI	16 MW
Tangential Co NBI	4 MW
Tangential CTR NBI	4 MW
N-NBI	10 MW
ECRH	7 MW
PFC wall load	15 MW/m <sup>2</sup>
Annual Neutron	4 x 10 <sup>21</sup>



# Sector Coil and Stabilizing Plate of JT-60SA

- 3 poloidal x 6 toroidal =18 coils
- 2.5kA/turn x 8 turn=20kAT
- 0.9m x 0.9m x 0.1m
- Hollow conductor with water cooling
- The amplitude of  $m=3\sim 6$  components of  $n=1$  magnetic field induced by sector coils are sufficiently larger than those of RWM magnetic perturbation.

