

JT-60におけるMHD研究の現状と

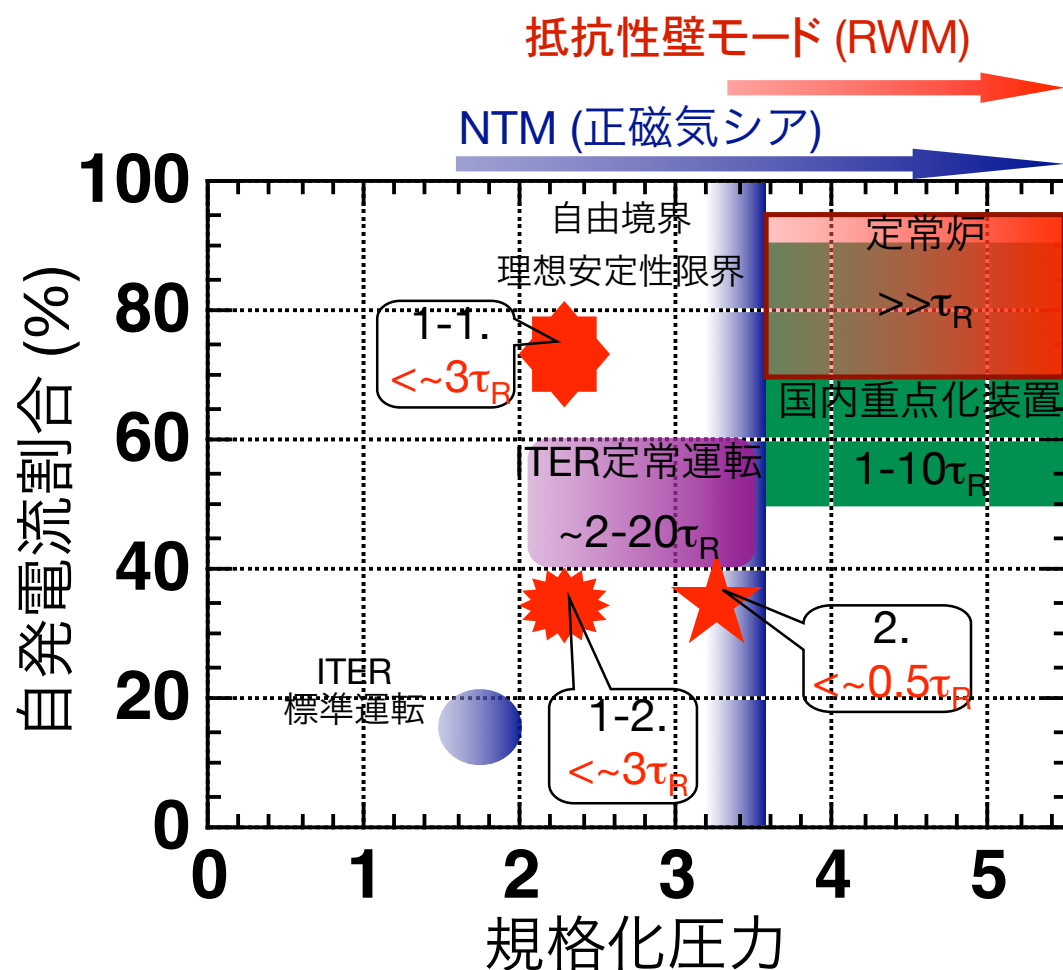
その課題

武智 学

内容

- ・ 目標とMHDの問題
- ・ JT-60の最近の研究成果
- ・ 将来の課題

JT-60の目標とMHDの問題と戦う人たち



★ 圧力及び電流駆動型MHD

- 自由境界理想安定性限界以下 (正磁気シア)
 - NTM (長崎先生、諫山さん、及川さん、林さん)
- 自由境界理想安定性限界以下 (負磁気シア)
 - NTM?, RIM? (武智)
- 自由境界理想安定性限界以上
 - RWM (松永さん)

★ 高速イオン駆動型MHD

- TAE (石川さん、篠原さん)

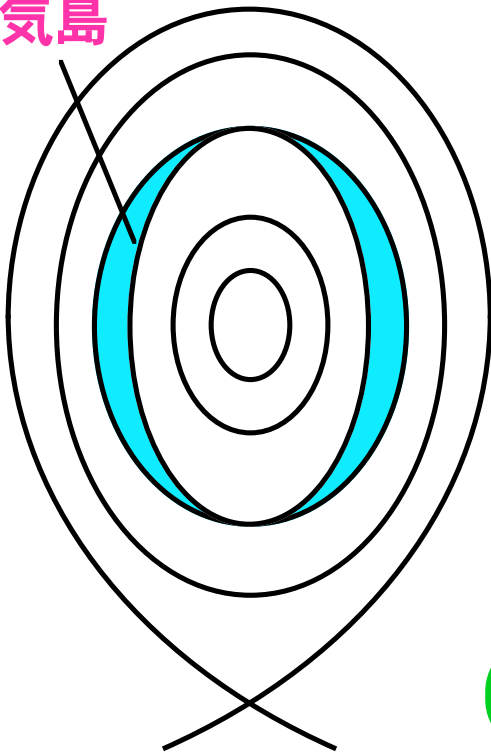
NTM

長崎先生、諫山さん

及川さん、林さん

新古典テアリングモード

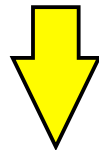
磁気島



磁気島発生



磁気島内の
圧力平坦化

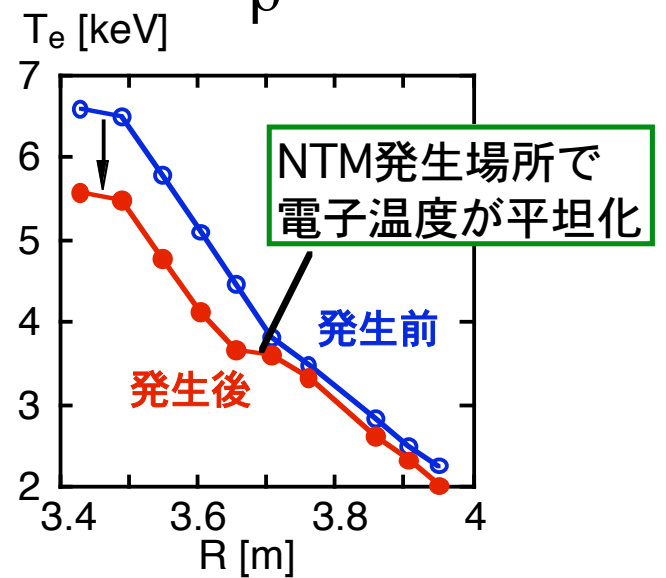
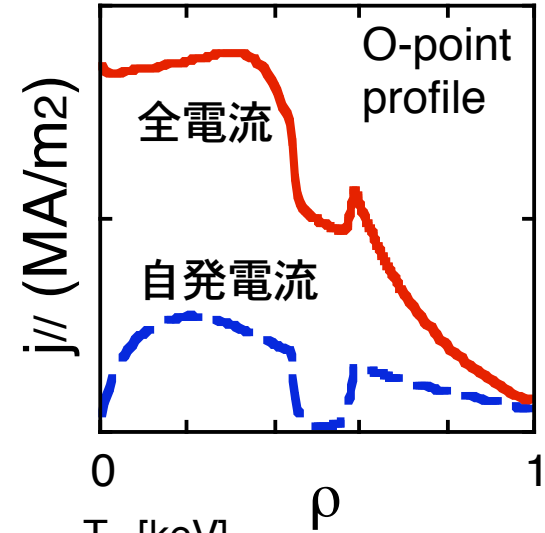


成長

自発電流減少

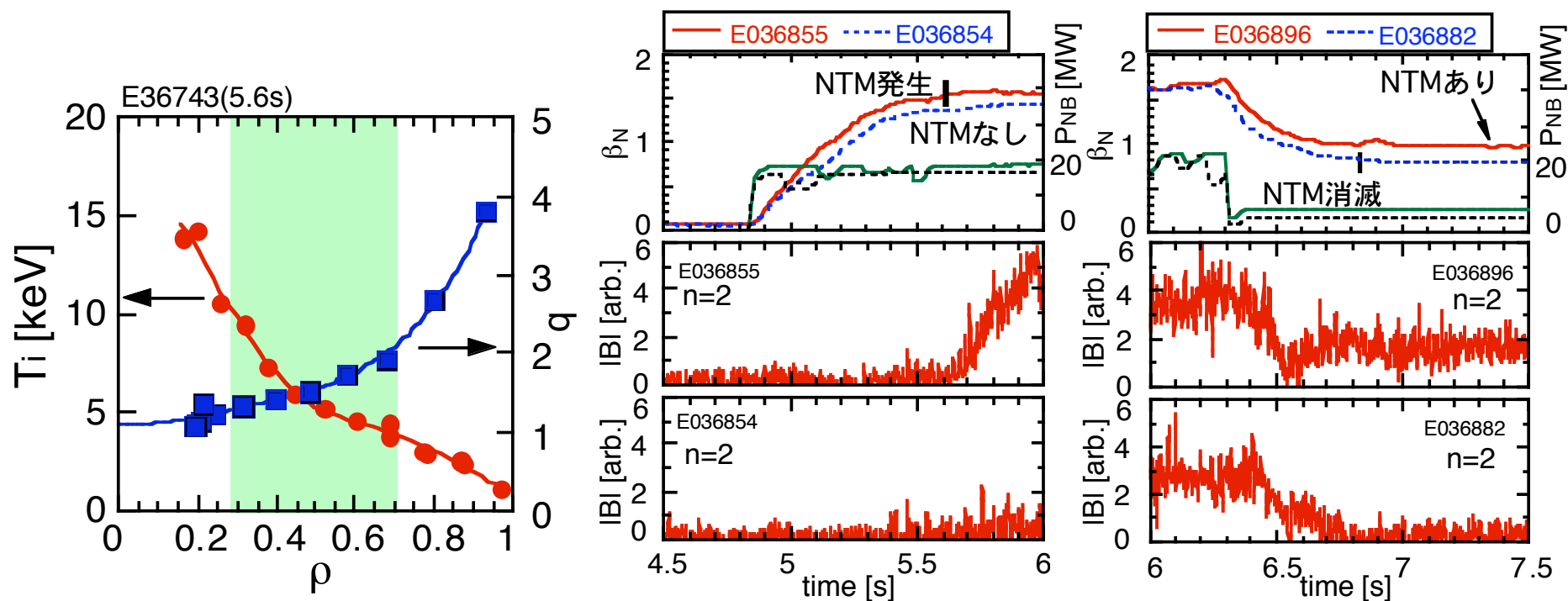
$q' > 0$ の
場合

到達ベータを制限



NTMの性質

- 高ベータ領域でのみ発生
- 圧力勾配の高い領域の有理面に対応するモードが成長
 $m/n=3/2, 5/3, 4/3, (2/1), \dots$ ($\rho=0.3-0.7$)
- 発生/消滅時のベータ値にヒステリシスがある
 $\beta_N^{\text{消滅}}/\beta_N^{\text{発生}} < 0.4$ (JT-60U) “一度発生したらなかなか消えない”



修正Rutherford方程式：磁気島の成長を記述

$$\frac{\mu_0}{\eta} \frac{dW}{dt} = \underbrace{k_c \Delta'(W) \langle |\nabla \rho|^2 \rangle}_{\text{Classical}} - \underbrace{k_{GGJ} \varepsilon_s^2 \beta_p \frac{L_q^2}{\rho_s L_p} \left(1 - \frac{1}{q^2}\right) \langle |\nabla \rho|^2 \rangle \frac{1}{W}}_{\text{GGJ}}$$

$$+ \underbrace{k_{BS} \mu_0 L_q j_{BS} \left\langle \frac{|\nabla \rho|}{B_p} \right\rangle \frac{W}{W^2 + W_d^2}}_{\text{自発電流項}} - \underbrace{k_{pol} \varepsilon_s^{1.5} \beta_p \left(\frac{\rho_{pi} L_q}{L_p} \right)^2 \langle |\nabla \rho|^2 \rangle \frac{1}{W^3}}_{\text{分極電流項}}$$

$$- \underbrace{k_{EC} \mu_0 \frac{L_q}{\rho_s} \left\langle \frac{|\nabla \rho|}{B_p} \right\rangle \eta^{EC} \frac{I_{EC}}{a^2} \frac{1}{W^2}}_{\text{ECCD}}$$

W : 磁気島幅

$k_c=1.2$, $\Delta'(W)$: テアリングパラメータ

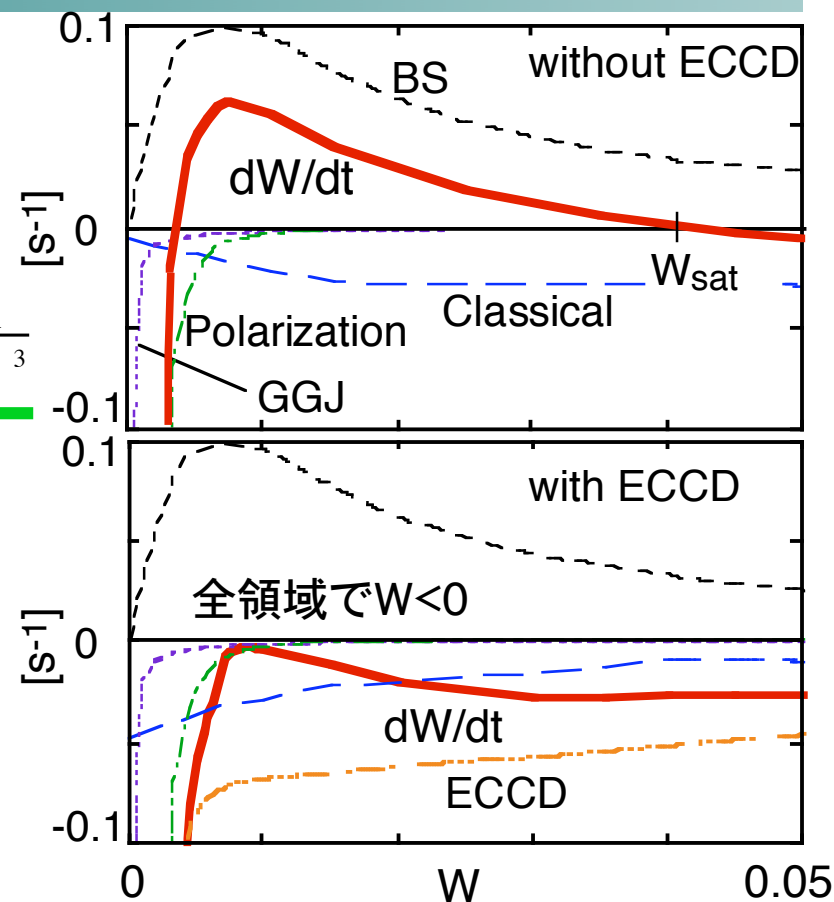
$L_q = q / (dq/d\rho)$, ρ_s : 有理面位置

W_d : 有限 $\chi_{\perp} / \chi_{\parallel}$ 効果 (R.Fitzpatrick, 1995)

η_{EC} : EC電流駆動効率

I_{EC} : 全EC駆動電流

$k_{GGJ}, k_{BS}, k_{pol}, k_{EC}$: 係数



NTMに関する物理課題とITERへの外挿

1.発生に関すること

- 発生条件, スケーリング則, 発生機構

2.磁気島構造の解明

- 電流分布や温度分布の構造の変化

3.修正Rutherford方程式(MRE)との対応

- シミュレーション, 係数の範囲の同定

4.電子サイクロトロン電流駆動(ECCD)による安定化

- 安定化効果への影響:
- 入射タイミング, JECCD/JBS, JECCD分布

5.高ベータ実験への応用

- NTM抑制: 発生の回避とECCDによる安定化
- 運転シナリオの確立

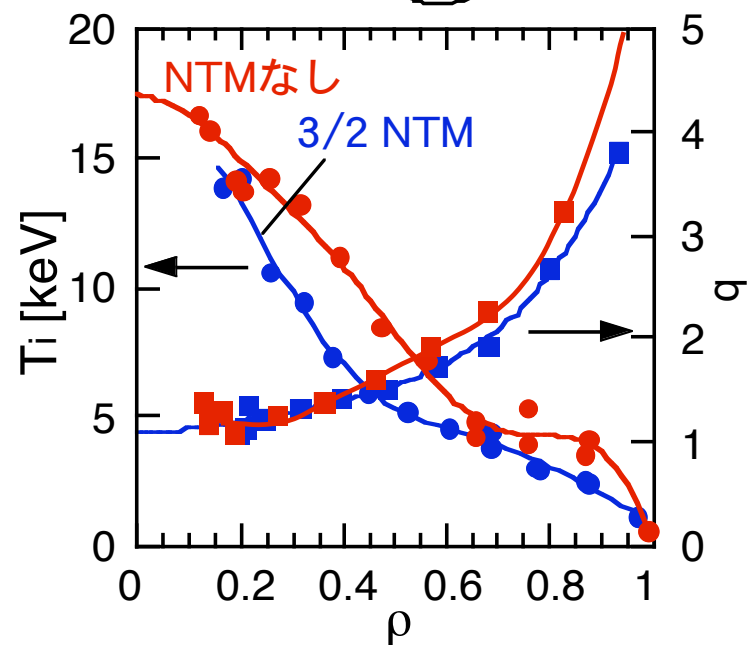
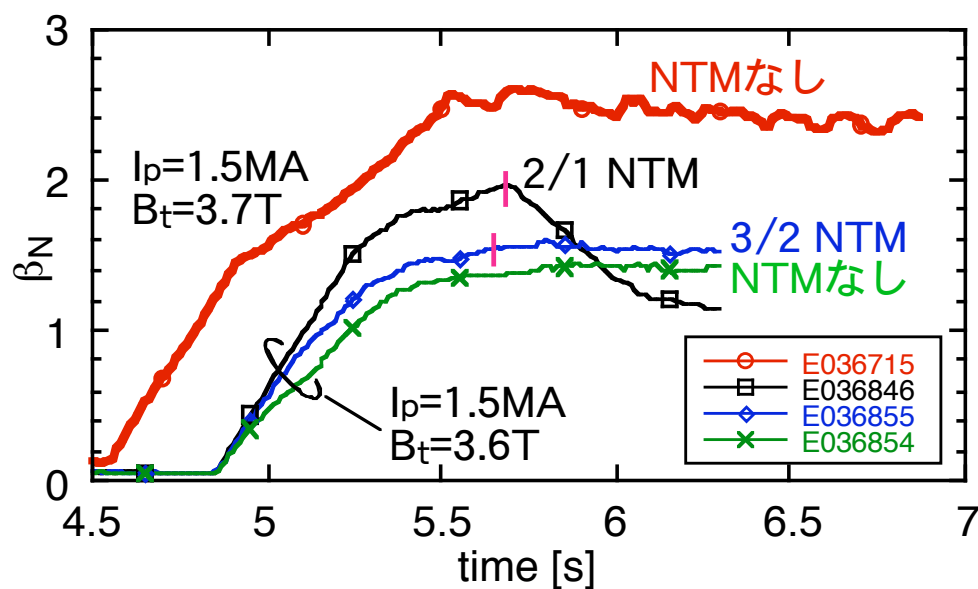
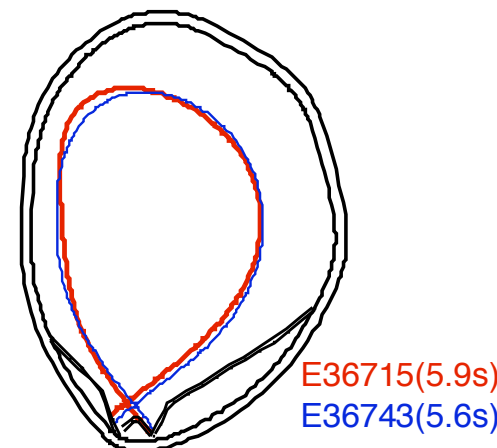
6.ITERへの外挿 (1, 3, 4)

NTM発生回避 (分布の最適化)

- よい閉じ込め性能のためには尖頭化必要
- 有理面の圧力勾配が大きすぎるとNTM発生

圧力・電流分布の最適化(時間発展を含む)

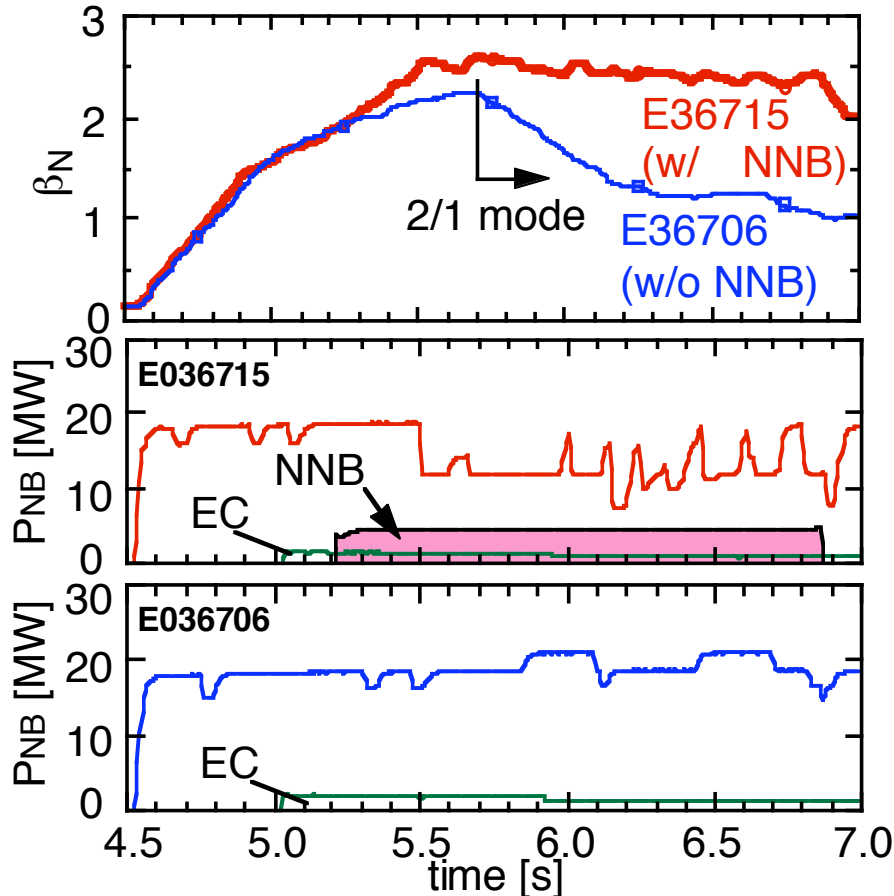
- 「ハイブリッドシナリオ」の開発はITPAの研究課題
- 「最適化」の定量化が必要



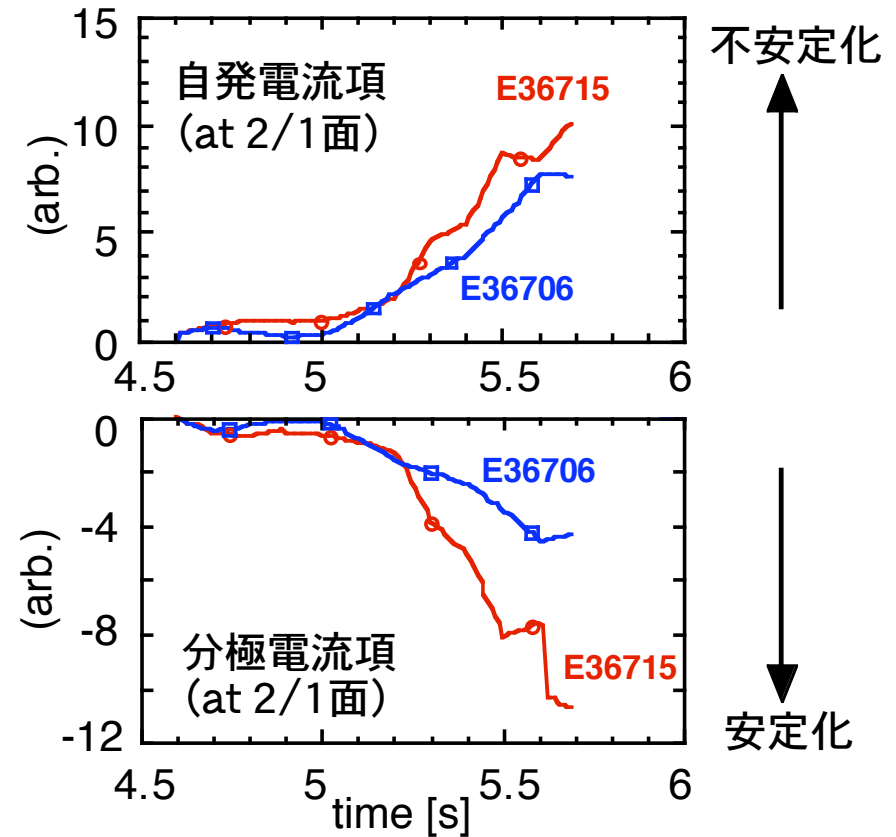
JT-60の多彩なアクチュエータで最適化

「分布の最適化」：MREの各項の寄与（諫山）

時間依存輸送コード(TOPICS)にMREを統合→NTMのシミュレーション



加熱パターンの最適化NTMの回避
 I_p , B_t , プラズマ形状等はほぼ同じ



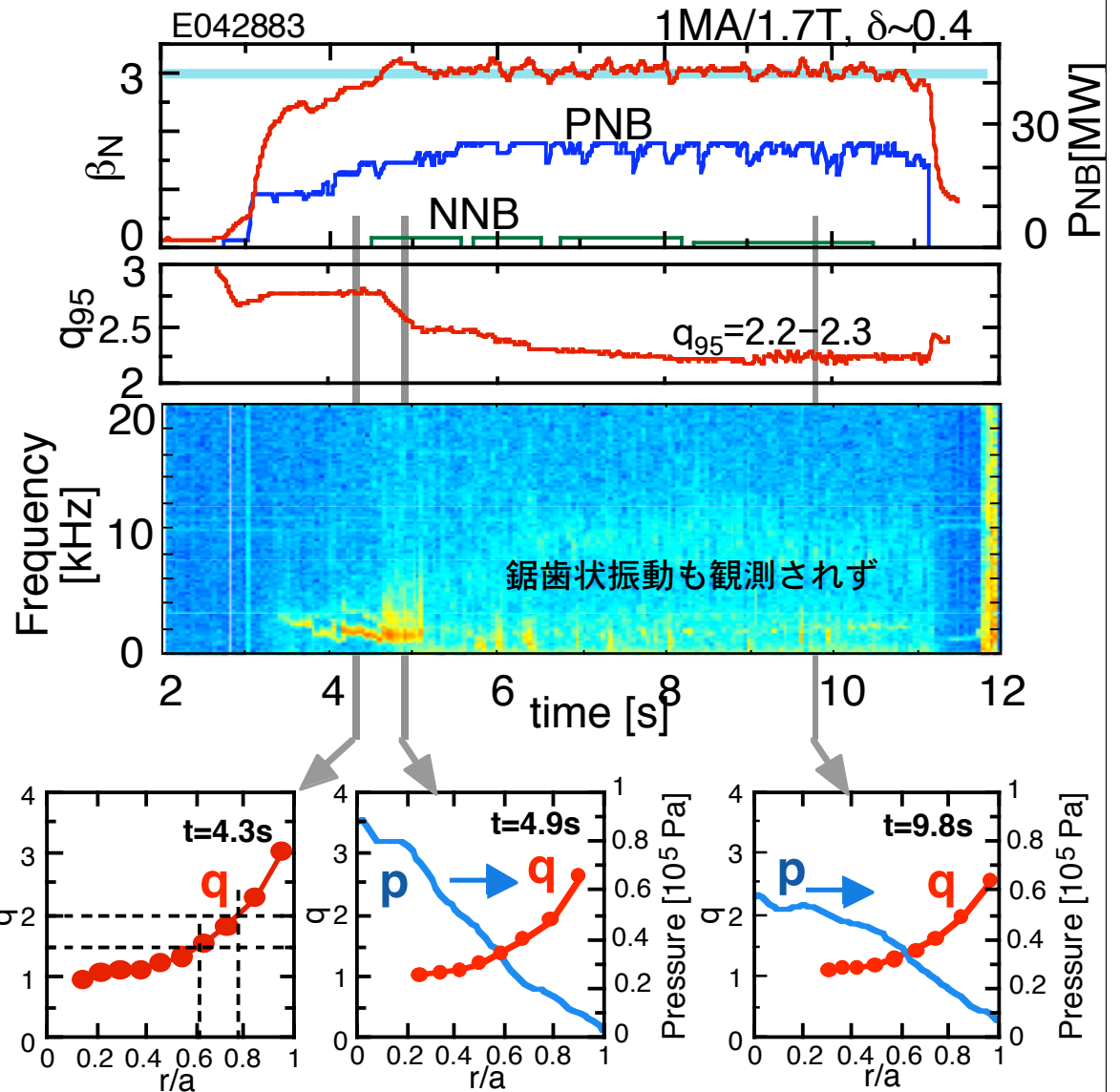
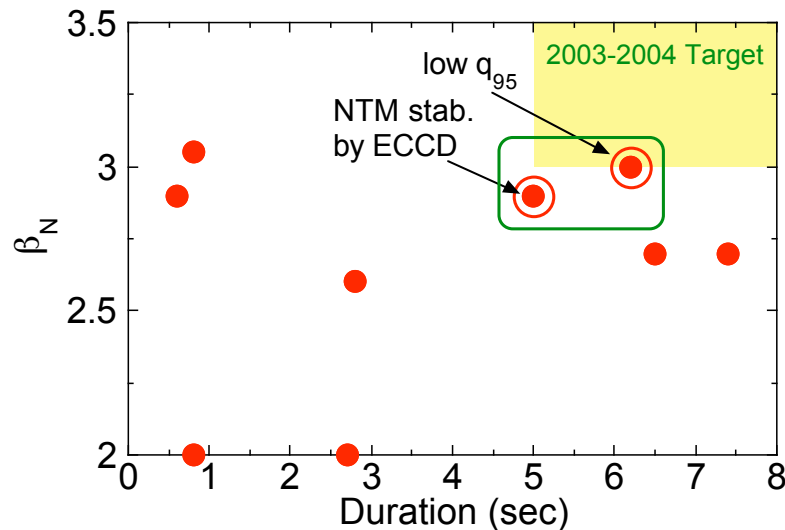
・ NNB入射後($t=5.2s$), 差が生じる

分極電流項の安定化効果
 > 自発電流項の不安定効果

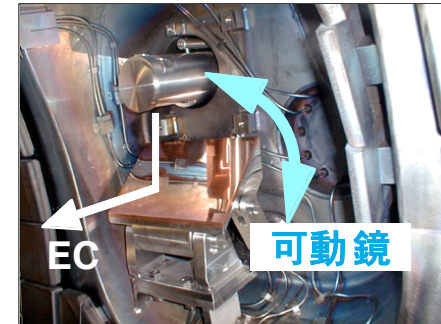
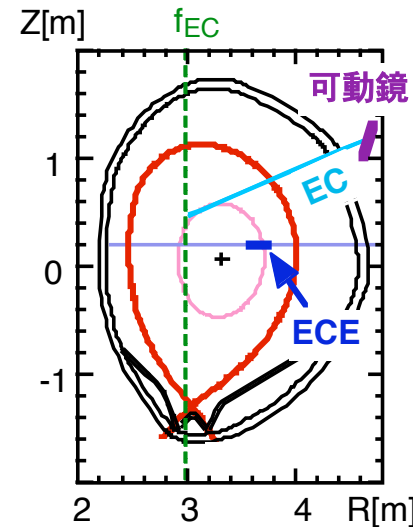
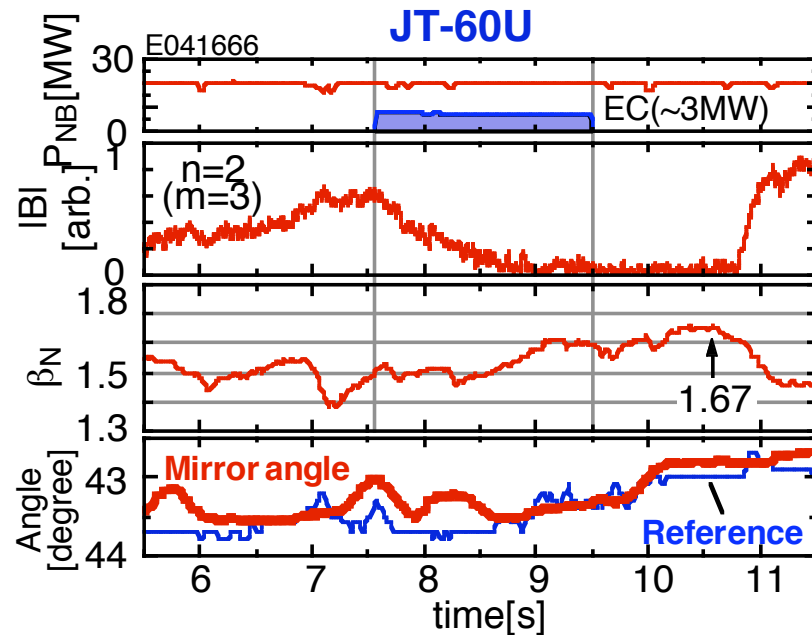
NTM回避による高ベータプラズマの準定常維持

- NTMの発生を抑制し $\beta_N \sim 3$ を6秒間維持
- NTM抑制の要因
 - (a) 低 q 化(~ 2.3)により $q=1.5, 2$ の有理面を周辺部に移動
 - (b) 周辺加熱による圧力分布の平坦化

分布制御が重要



EC入射によるNTMの安定化（長崎、諫山）



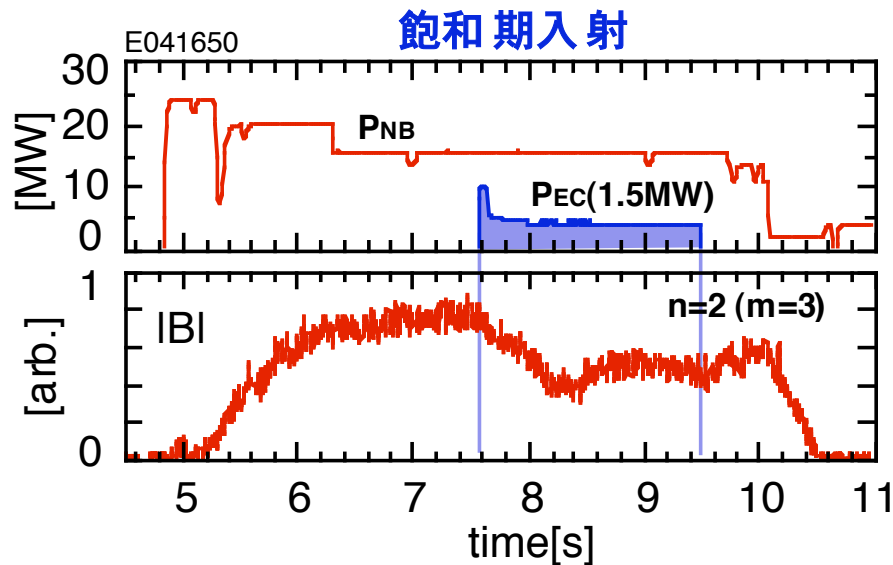
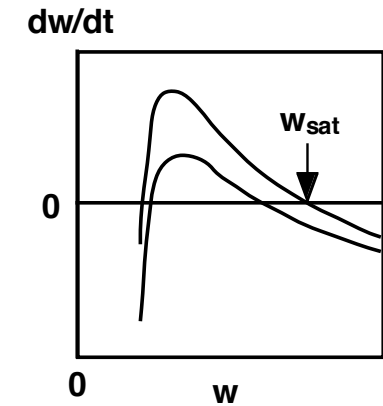
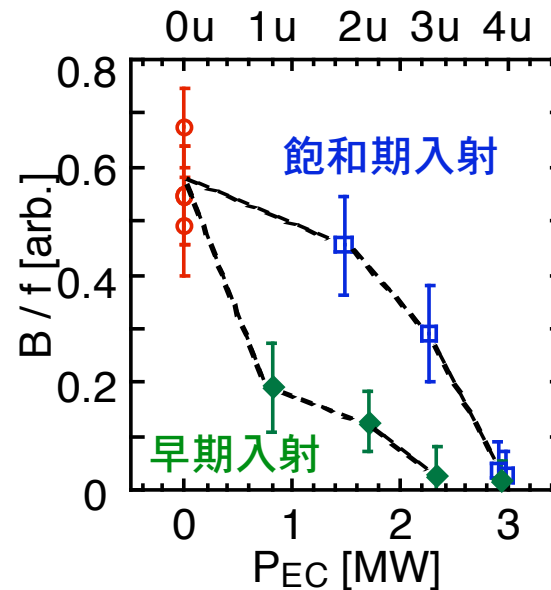
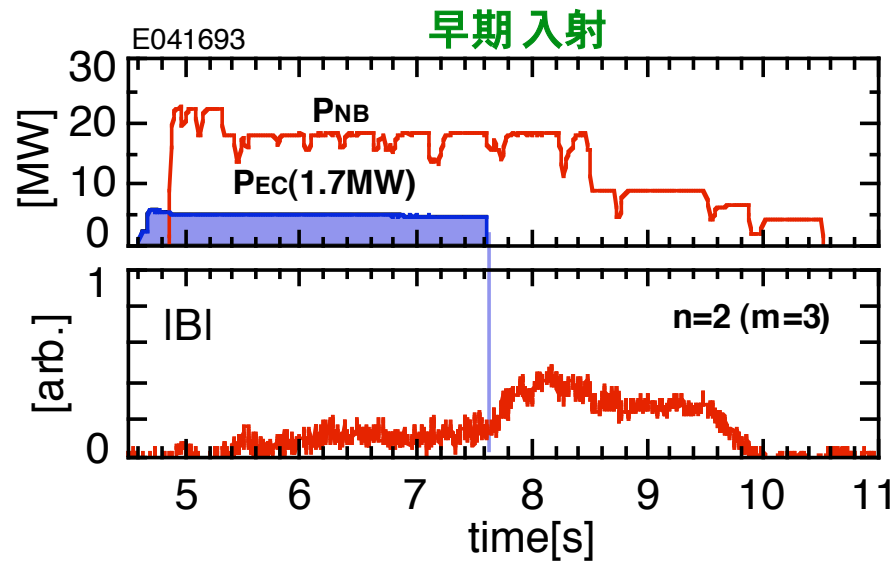
磁気島中心にEC波が吸収されるようにEC波入射角を最適化

	JT-60U	DIII-D	AUG
モード数	3/2	3/2, 2/1	3/2, 2/1
実時間制御	EC入射角	R, B _t	未実施

自発電流の補償
による安定化

- 3/2モードでは $J_{EC} \sim J_{BS}$ で安定化 (JT-60U, DIII-D, AUG)
- 2/1モードでは $J_{EC} > J_{BS}$ で安定化 (DIII-D, AUG) " Δ ' is less negative"

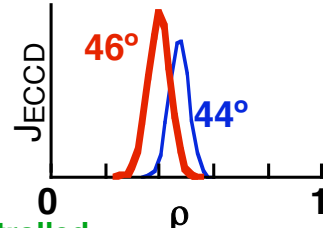
早期EC入射によるNTM安定化（長崎）



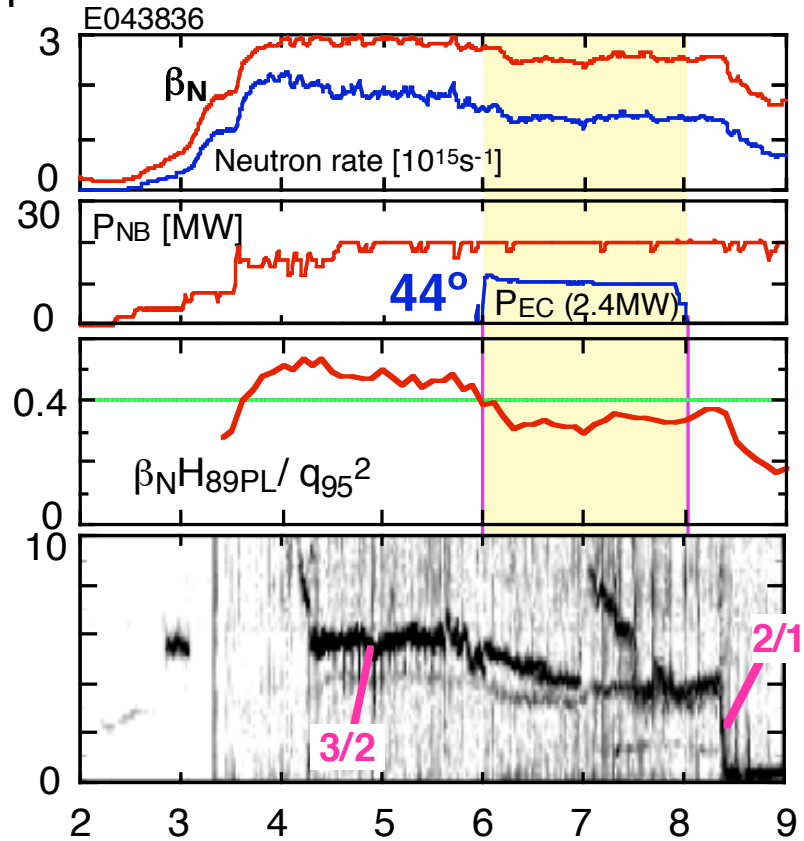
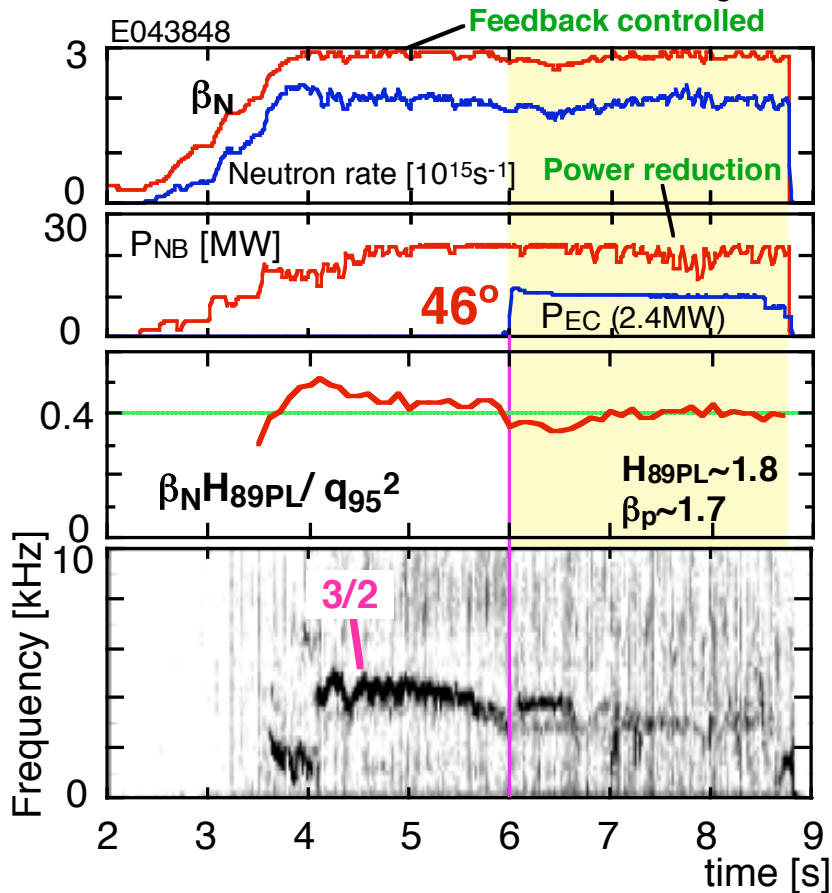
- 早期入射の方が揺動の減少が大きい
- 完全安定化に要するパワーも小さい
- EC入射中の磁場揺動強度が異なる (この間パワーは同程度)
→ ECCD項以外の項の寄与を示唆
- 2つの平衡状態の存在

$\beta_N \sim 3$ においてNTMの抑制に成功（飽和期入射）

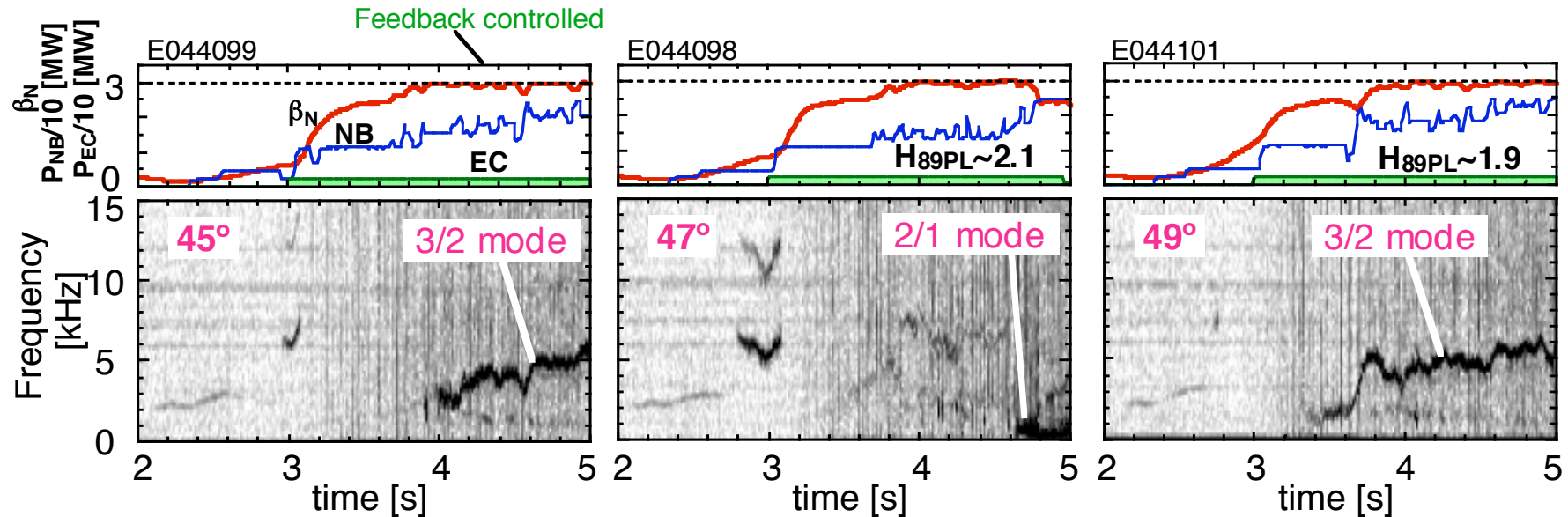
3/2NTM安定化後 β とH
ファクタが回復



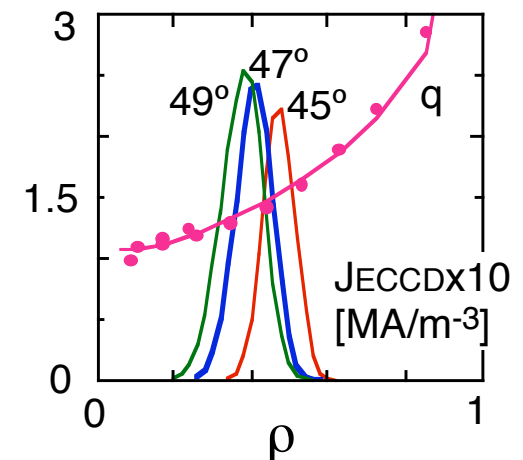
EC入射位置がずれると
安定化不可



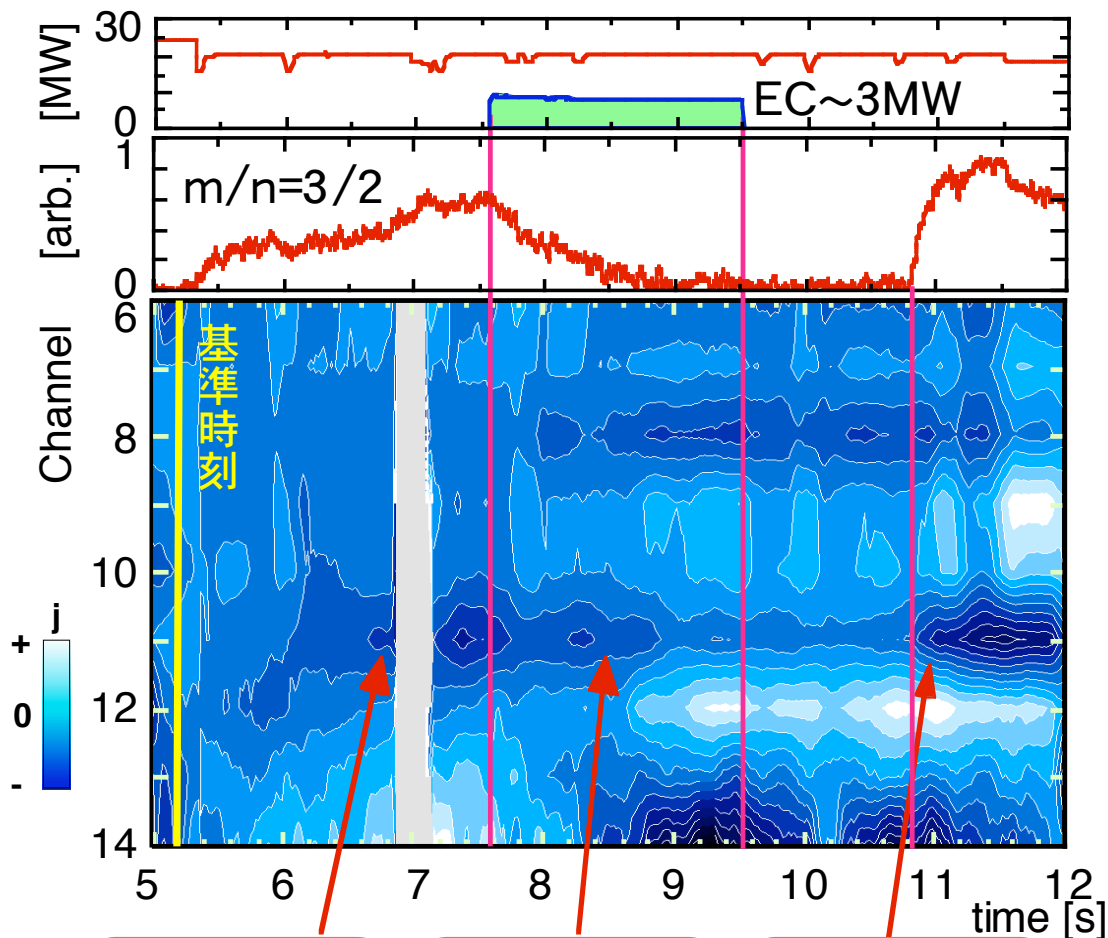
$\beta_N \sim 3$ において早期入射により低パワーで安定化



- 低パワー (3unit) で安定化
 - 飽和期入射4unit
- NTM安定化により閉じ込めを改善
- NTM完全安定化に必要な条件
 - JECCD~JBS at $q=3/2$
 - High accuracy of ECCD location



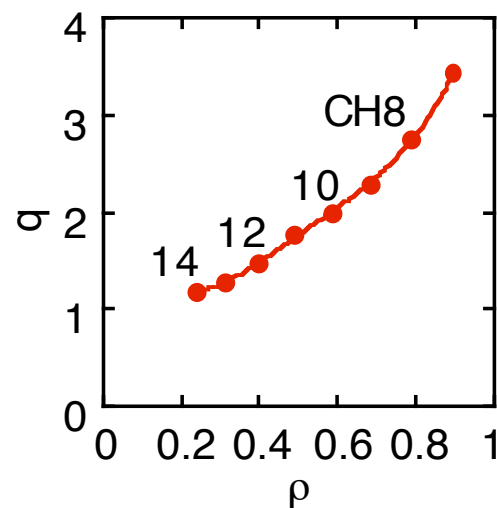
NTMによる電流密度の局所的な変化（鈴木）



NTMの成長によるjの減少

NTM安定化によるjの増加

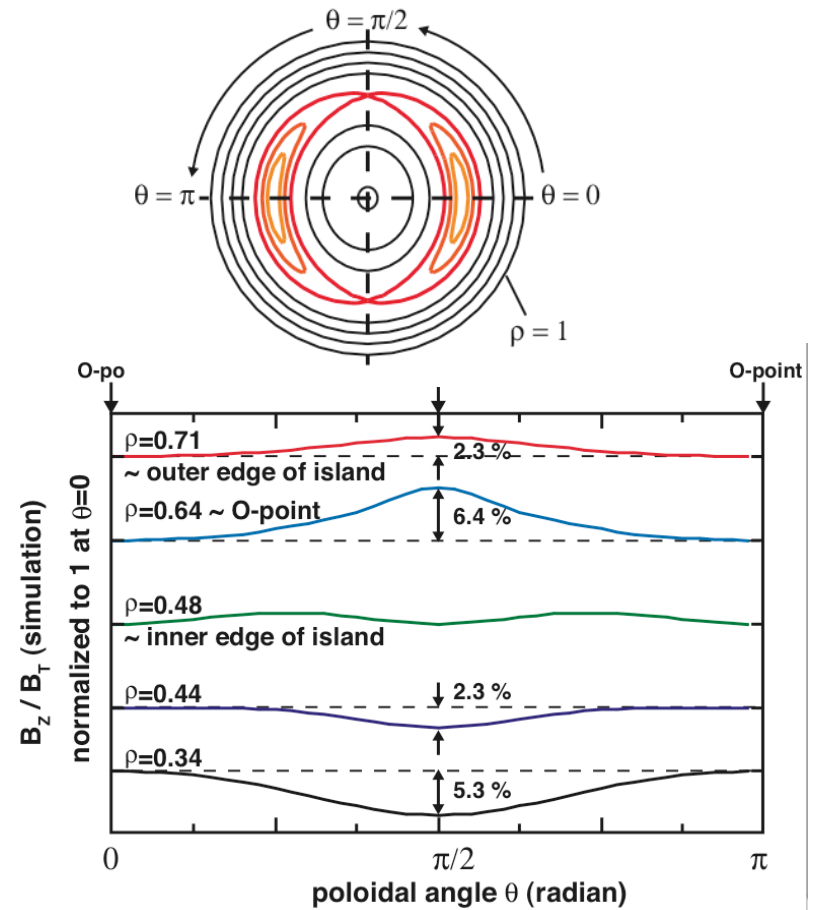
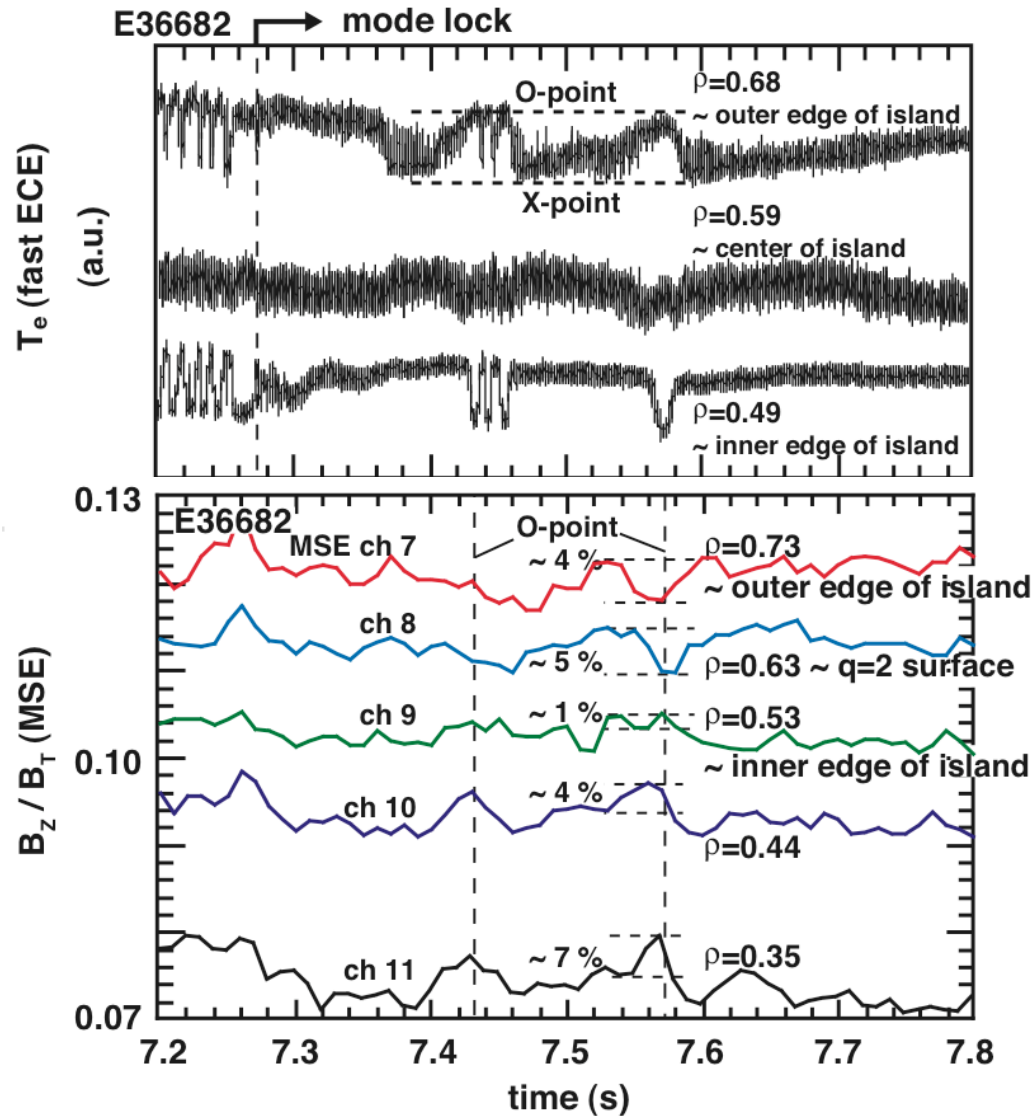
NTM再発生によるjの減少



- ・ モーショナルシュタルク効果偏光計で局所的な電流密度を測定
- ・ 電流密度の変化分の解析手法を開発→微小な変化量の測定
- ・ **NTMの成長/消滅に対応して電流密度が減少/増加**

磁気島での自発電流の減少を示唆

電流密度のポロイダル構造 (及川)

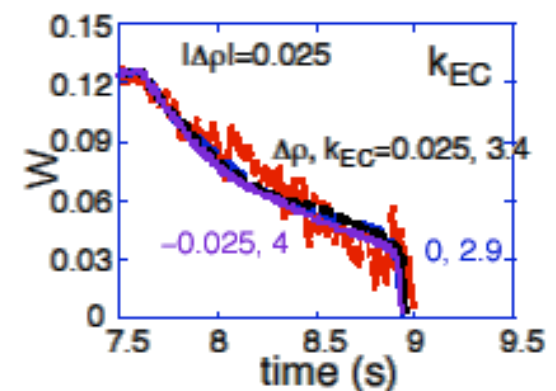
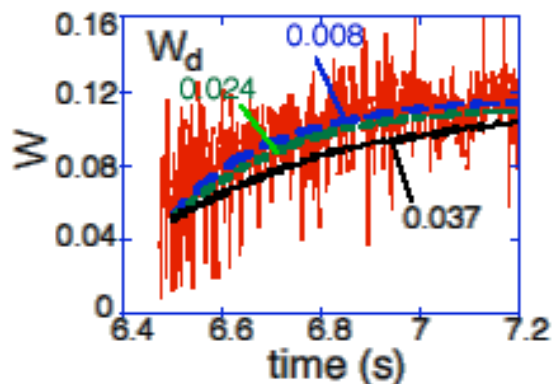
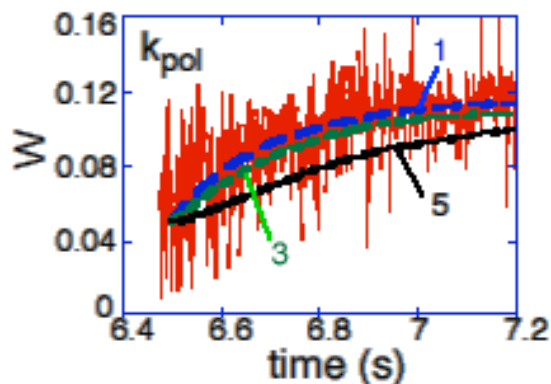
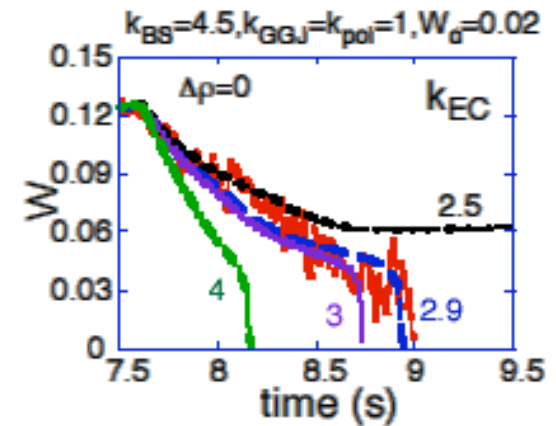
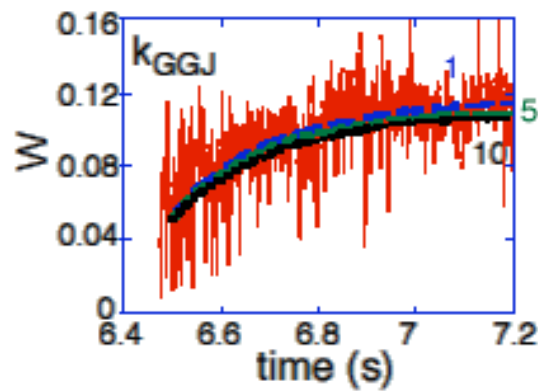
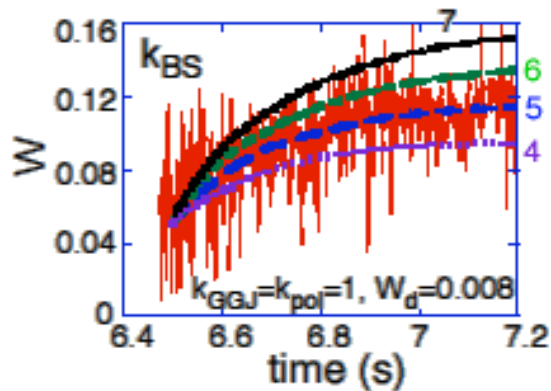


- MSE信号に電子温度揺動と同期した振動
- 電流分布のポロイダル構造

MREの各項をJT-60のNTM実験より評価してITERで必要なECパワーを外挿 (林)

ITERにて3/2モード、2/1モードのNTMいずれもおよそ30MW必要
入射角度と入射幅を最適化すれば12MW程度

$k_{BS} \sim 5, k_{GGJ} < 10$ (not important), $k_{pol} < 3, W_d < 0.02$ (~ flux-limit model)



TAE

石川さん、篠原さん

アルヴェン固有モード(AE)研究

◆ITER等の燃焼プラズマではアルヴェン固有モード(AE)の励起が大きな課題である

- ➡ α 粒子の輸送を引き起こす
 - プラズマ性能の劣化
 - 損失 α 粒子が第一壁に損傷を与える

AEの励起機構、およびAEによる α 粒子の輸送を調べることはITER等の高性能プラズマの維持において重要。

↙ 世界各国の装置で精力的にAE励起実験が行われている

【JT-60UでのAE励起実験の意義】

- 負イオン源中性粒子ビーム (NNB)を利用したAE励起実験

ITERの α 粒子のパラメータ領域に近い高エネルギーイオンのパラメータ領域で実験を行なうことが可能

➡ ITERにおいて発生するAEを模擬できる

JT-60Uにおけるアルヴェン固有モード研究

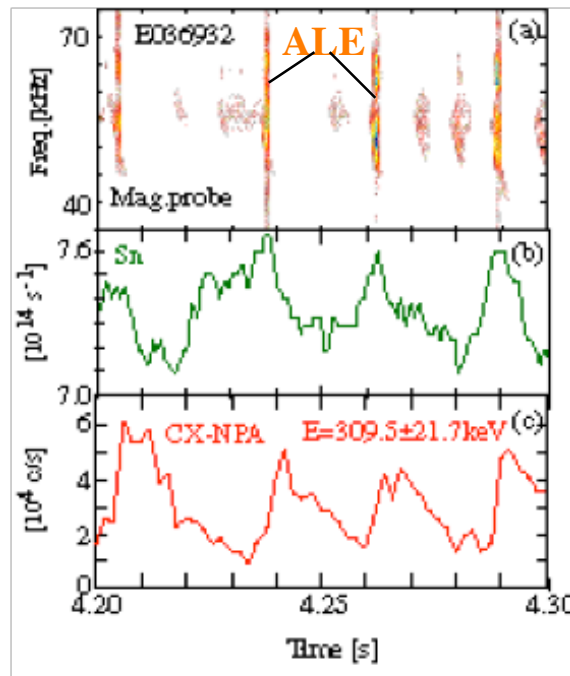
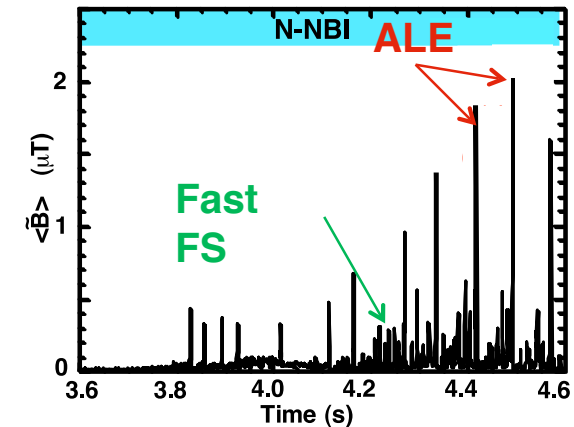
NNBIによるAE励起実験により

Fast Frequency Sweeping (FS) mode

Abrupt Large-amplitude Event (ALE)

Reversed-Shear induced Alfvén Eigenmode (RSAE)

等のAEを観測



特にALE発生時に、顕著な全中性子発生量の低下、および、中性粒子束(エネルギースペクトルは離散的)の増加を観測

↳ 高エネルギー粒子の輸送を示唆

◎しかし、高エネルギーイオンが
どのように輸送されるかは不明

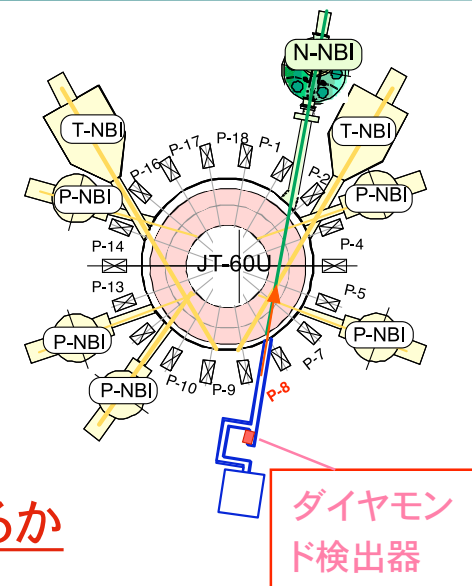
AEによる高エネルギー粒子輸送研究のための 新計測器（石川）

◎荷電交換中性粒子計測

ダイヤモンド検出器を用いた中性粒子計測による連続エネルギー
ギースペクトル測定

- 検出器のエネルギー較正、バックグラウンドノイズを除去するための放射線シールドの設計・設置を行い、計測を確立した
→ [15th. HTPD conference, RSI Vol.75\(2004\) p3643](#)

➡ どのような高エネルギー粒子が輸送されるか

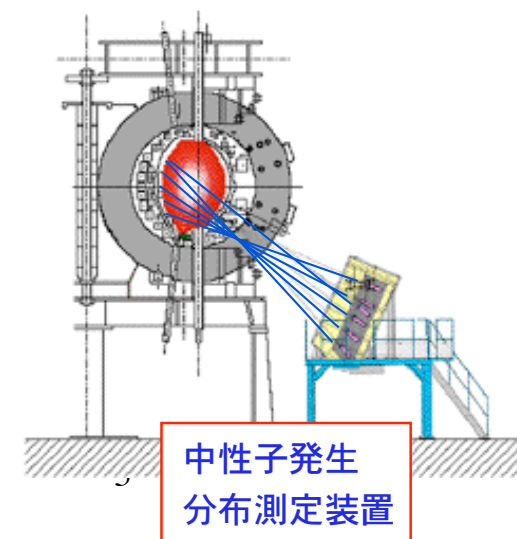


◎中性子発生分布計測

大型コリメータアレイを利用した6チャンネルの中性子発生分布計測

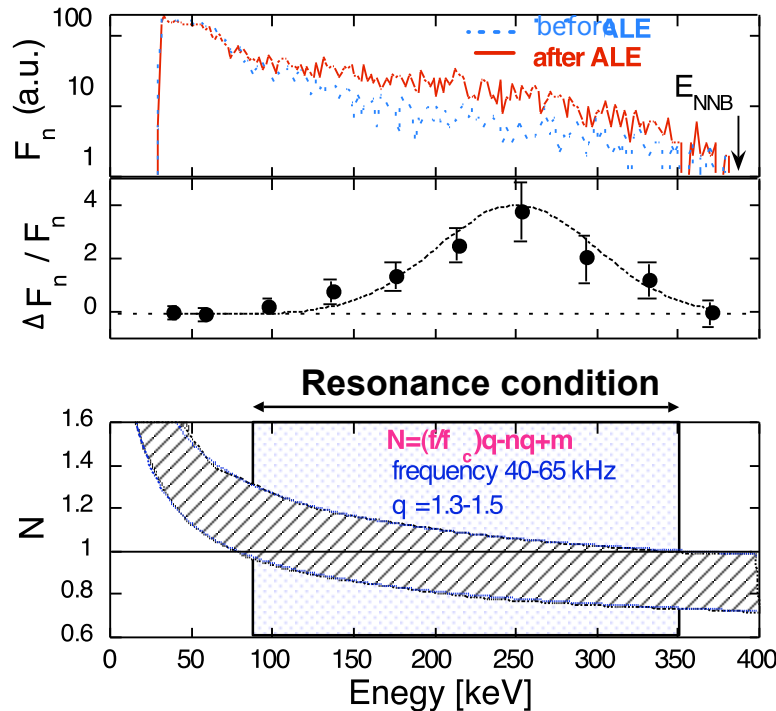
- スチルベン検出器を導入、コリメータ性能評価、MCNPコードによる散乱・減衰効果の評価を実施し、計測を確立した

➡ どのように輸送されるか



輸送される高エネルギーイオンのエネルギー範囲はAEモードとの共鳴相互作用から予想される範囲と一致

● ALE発生前後の中性粒子のエネルギー分布を比較



- 特定のエネルギー領域 (100 ~ 370 keV) の中性粒子束が増加

[AEモードと粒子の共鳴条件]

(R. B. White *et.al.* Phys. Fluids 26 (1983) 2958)

$$N = (f / f_c) q - nq + m = 1$$

f = mode frequency (40 - 65 kHz)

q = safety factor (1.3 - 1.5)

n, m = toroidal, poloidal mode number (1, 2)

F_c = toroidal transition frequency

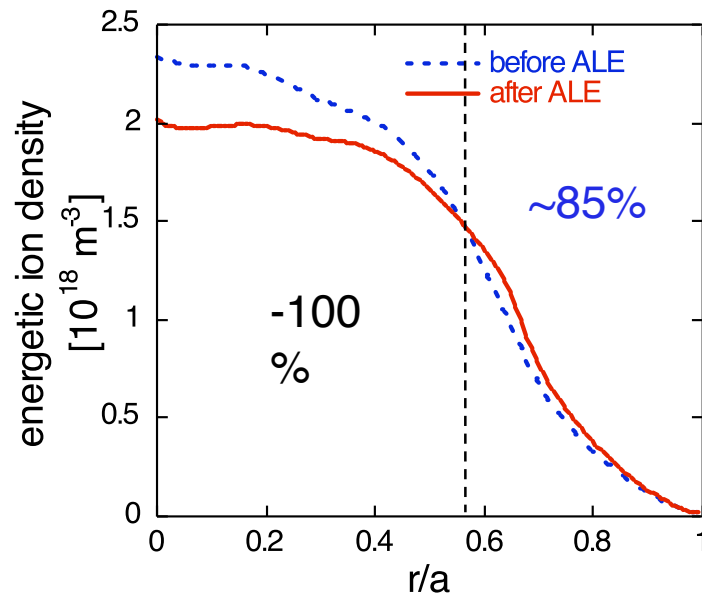
of energetic ions

- 共鳴エネルギー領域 => 80 ~ 350 keV

高エネルギーイオンはAEモードとの共鳴相互作用により周辺領域へ輸送される

ALEは高エネルギーイオンを再分配する

ALE発生前後の高エネルギーイオン密度分布を比較すると、



中心領域 ($r/a < \sim 0.6$)で高エネルギーイオン密度が減少. 一方で周辺領域で増加している.

- 体積要素を考慮に入れて比較すると、 $r/a < \sim 0.6$ で減少したうち、~85%がプラズマ周辺部へ再分配されている。



**ALEは中心領域の高エネルギーイオンを再分配する。
(一部損失)**

⇒ ※ 今後定量的な評価が必要

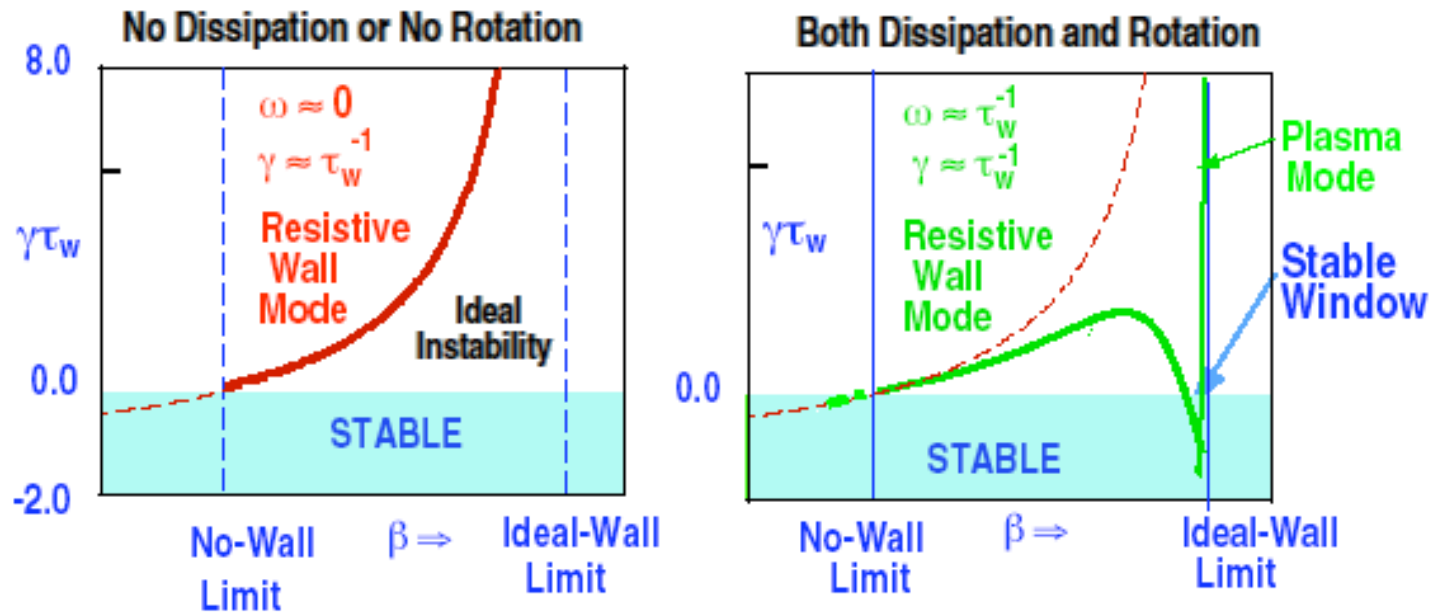
RWMM

松永さん

RWM

- Possibility of "Stable window" revitalized the efforts of external kink control

$$\underbrace{(\gamma + i n \Omega)^2 - \delta W_p}_{\text{Ideal Stability}} + \underbrace{\frac{\delta W_{pw} \gamma \tau_w}{\gamma \tau_w + 1}}_{\text{Resistive Wall}} + \underbrace{(\gamma + i n \Omega) D}_{\text{Plasma Dissipation}} = 0 \quad (\text{Bondeson \& Ward})$$



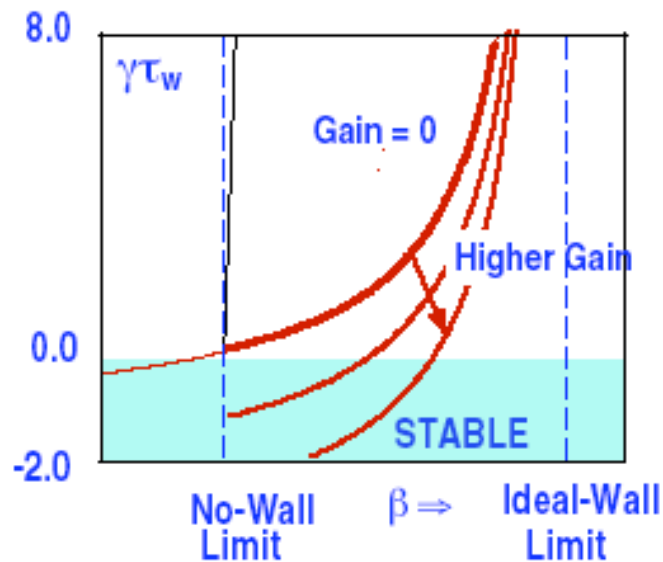
- Dissipation through parallel viscosity inside the plasma

RWMの2つの安定化手法（プラズマ回転と帰還制御）

Magnetic Feedback

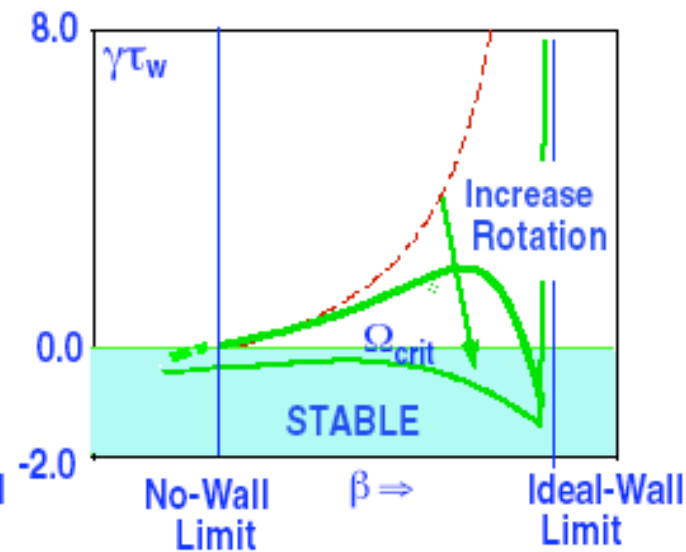
by compensating flux lost on the resistive wall

- Required: Practical power level
- System stability limits gain

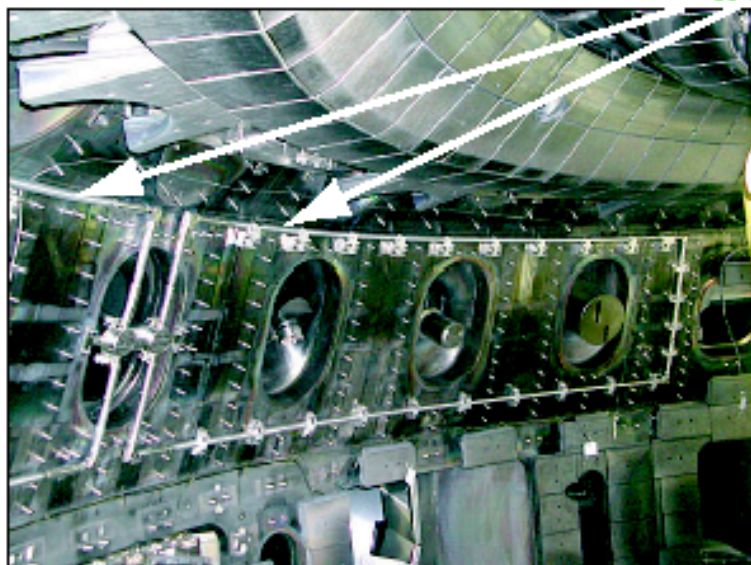


Plasma Rotation

- Required: A few % of Alfvén Velocity



DIII-DにおけるRWM制御用コイル

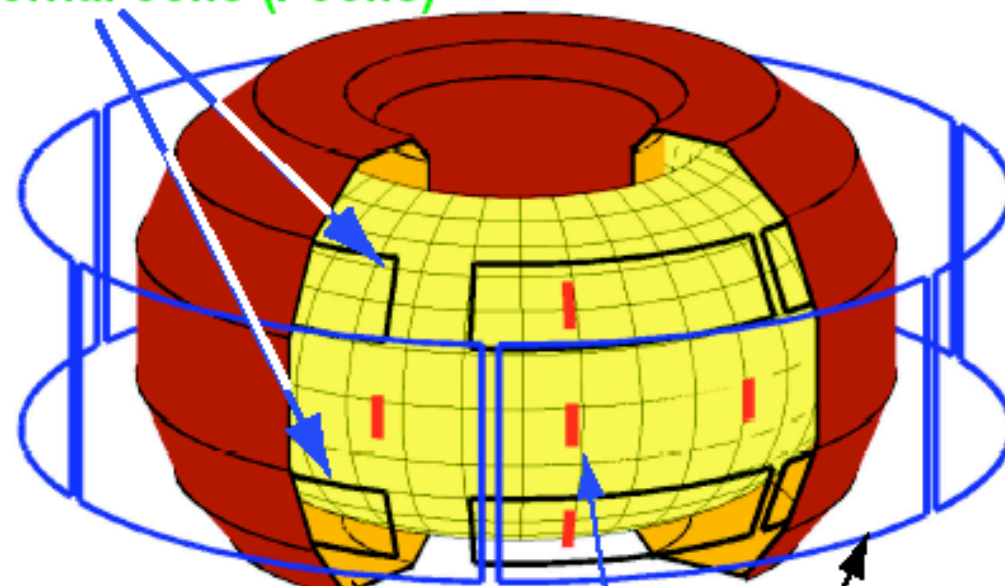


- 12 "picture-frame" coils
- protected by graphite tiles

- More than 50 Bp, Br diagnostic sensors



Internal coils (I-coils)

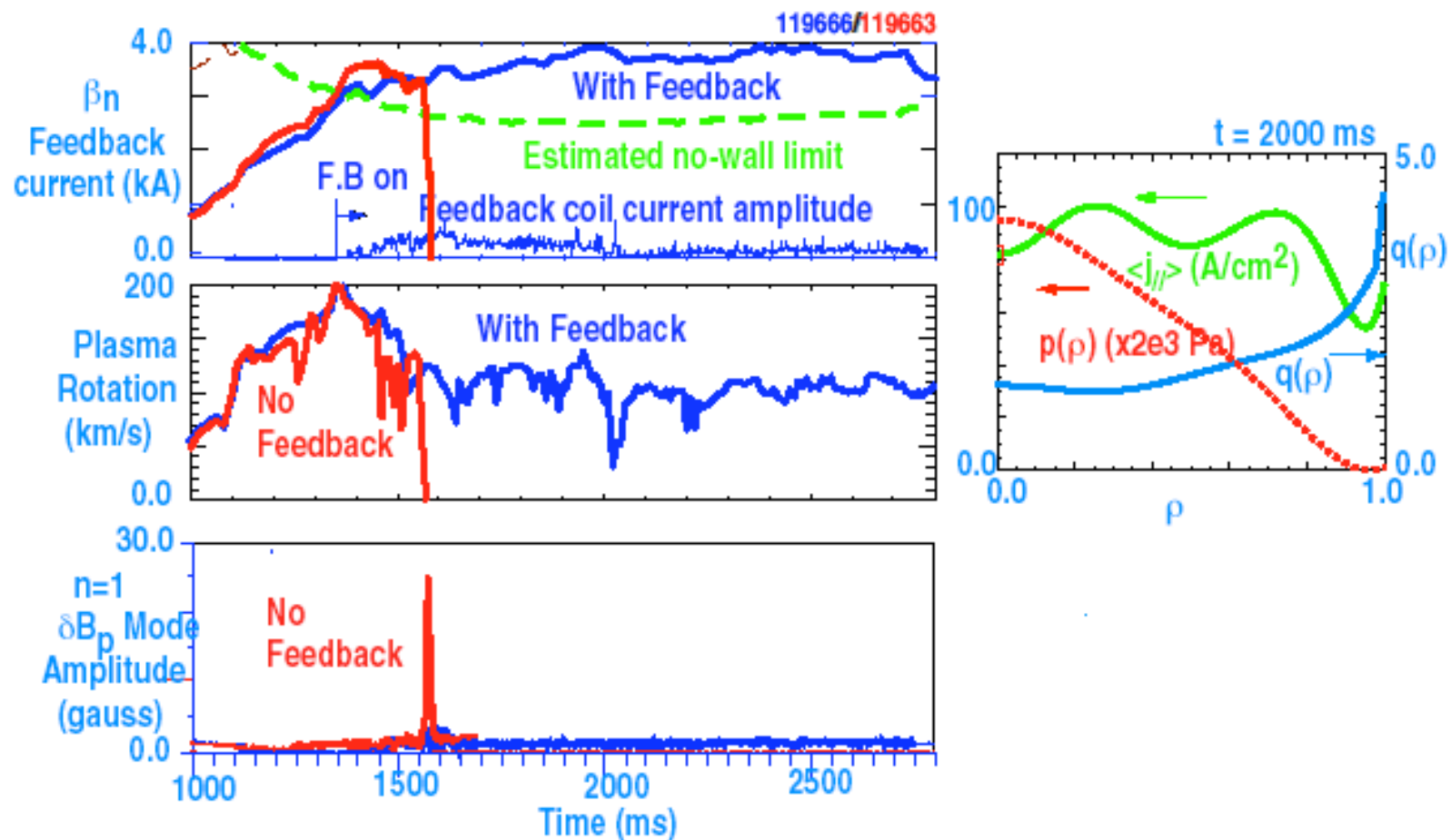


Vacuum Vessel
(Cutaway View)

External Coils
(C-coils)
6 coils

Bp magnetic
feedback sensors

DIII-Dでは帰還制御により $\beta_N \sim 4$ を1秒以上維持

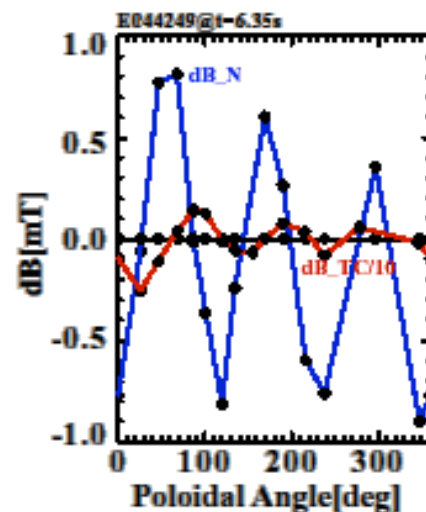
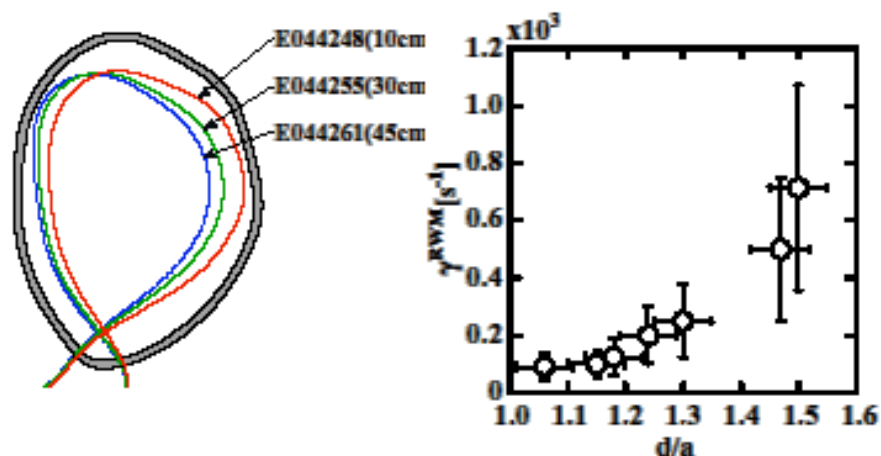
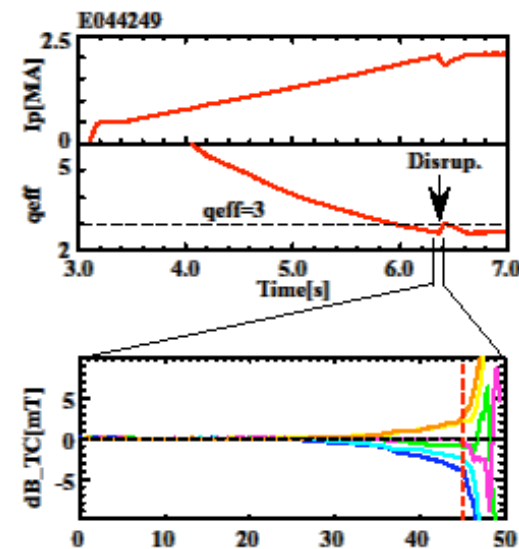


- The rotation is similar for both cases

JT-60におけるRWM実験（電流駆動型RWM）

プラズマ電流ランプアップ($dlp/dt=0.5\text{MA/s}$)により外部キ
ンクモードを発生させ、壁によって安定化

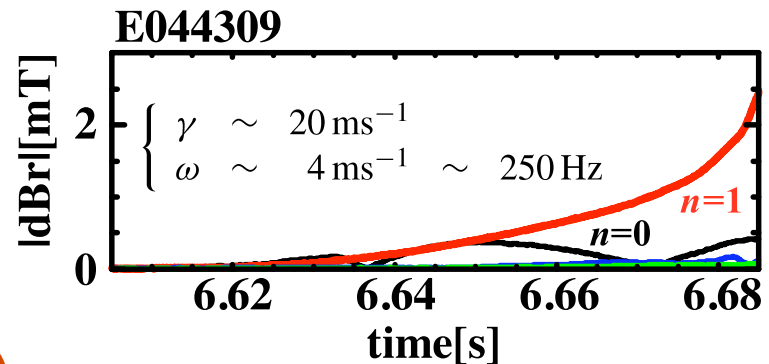
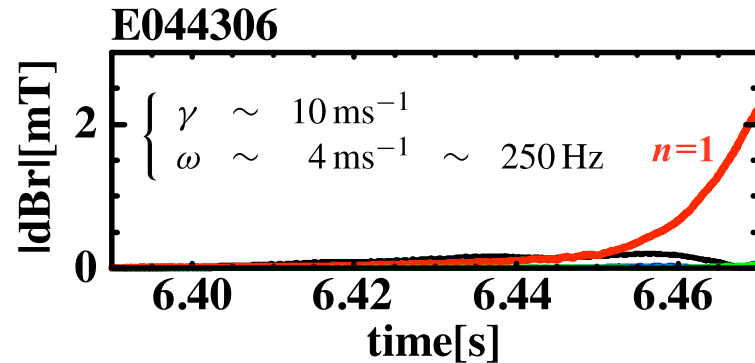
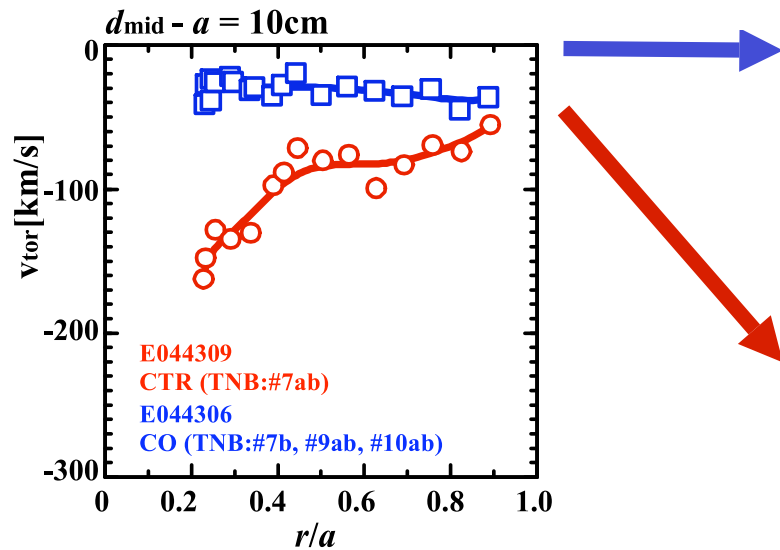
- ディスラプション前に RWMを観測 ($q_{\text{eff}} < 3$)
RWMの時定数は $\sim 10\text{ms}$ で壁の時定数程度
- モード数を確認
◦ $m/n=3/1$
- 壁の安定化効果の系統的データを収集
プラズマを壁から離すとRWMの成長率が大きくなる



プラズマ回転の効果

プラズマ回転効果を調べるために
接線NBの組合せを変える

$$\delta_w = d_{\text{mid}} - a = 10 \text{ cm}$$



早い回転では

- 成長率が減少
- モードの回転速度は変わらない

JT-60におけるRWM実験 (圧力駆動型RWM)

大体積プラズマではリップロス大のため実質的入力パワーが小さいため負磁気シアプラズマ(低li)を用いて壁なし安定化限界を下げて実験

$\beta_N \sim 2.4$ でディスラプション前にRWMを観測(限界 $\beta_N \sim 2.2$)

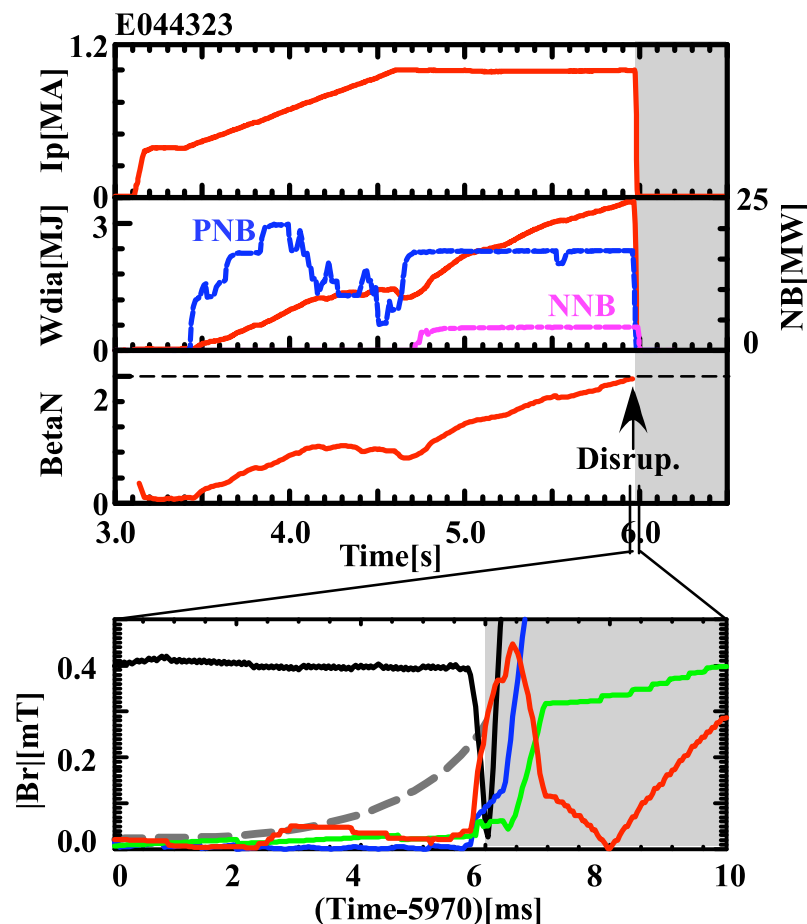
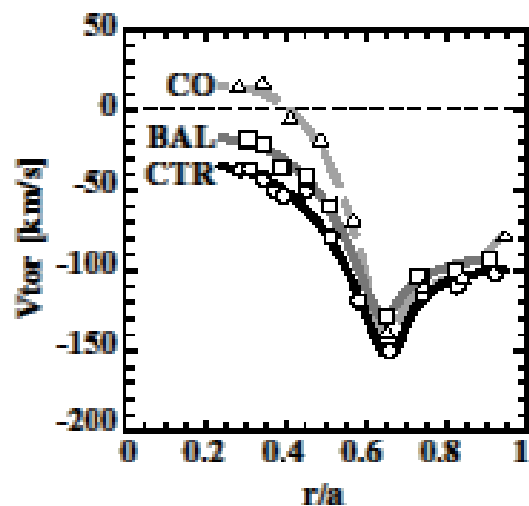
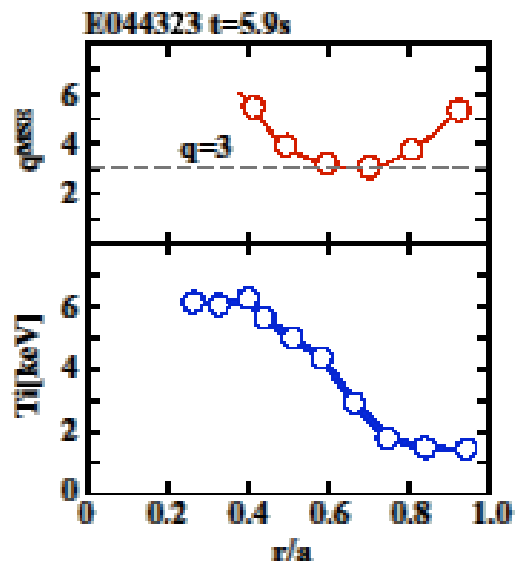
◦ $q_{min} \sim 3.0$

プラズマ回転によるRWMの安定化効果

接線NBによるトロイダル回転スキャン

パワー不足によりスキャン幅小

リップロス大のためctr方向に大きく回転



今後の課題

☆ NTM

- 2/1モードの安定化
- NTM発生時/消滅時のベータ値のスケーリング(ITPA関連)

☆ AE

- 負磁気シアのAEの系統的理解
- 解析コードのベンチマークと実験結果との比較 (TASK/
WM, NOVA, HINST等)

☆ RWM

- RWMの特性の理解
 - ・RWMの同定とモード構造の計測
 - ・発生機構、発生スケーリング
 - RWMが急激に成長する回転のしきい値
 - ・DCWを用いた不整磁場に対するRWMの影響
- RWMの安定化
 - ・プラズマ回転
 - 多様なNBIを用いたスキャン

最後に

**JT-60における
MHD研究の
問題点**

計測器の老朽化

人材不足