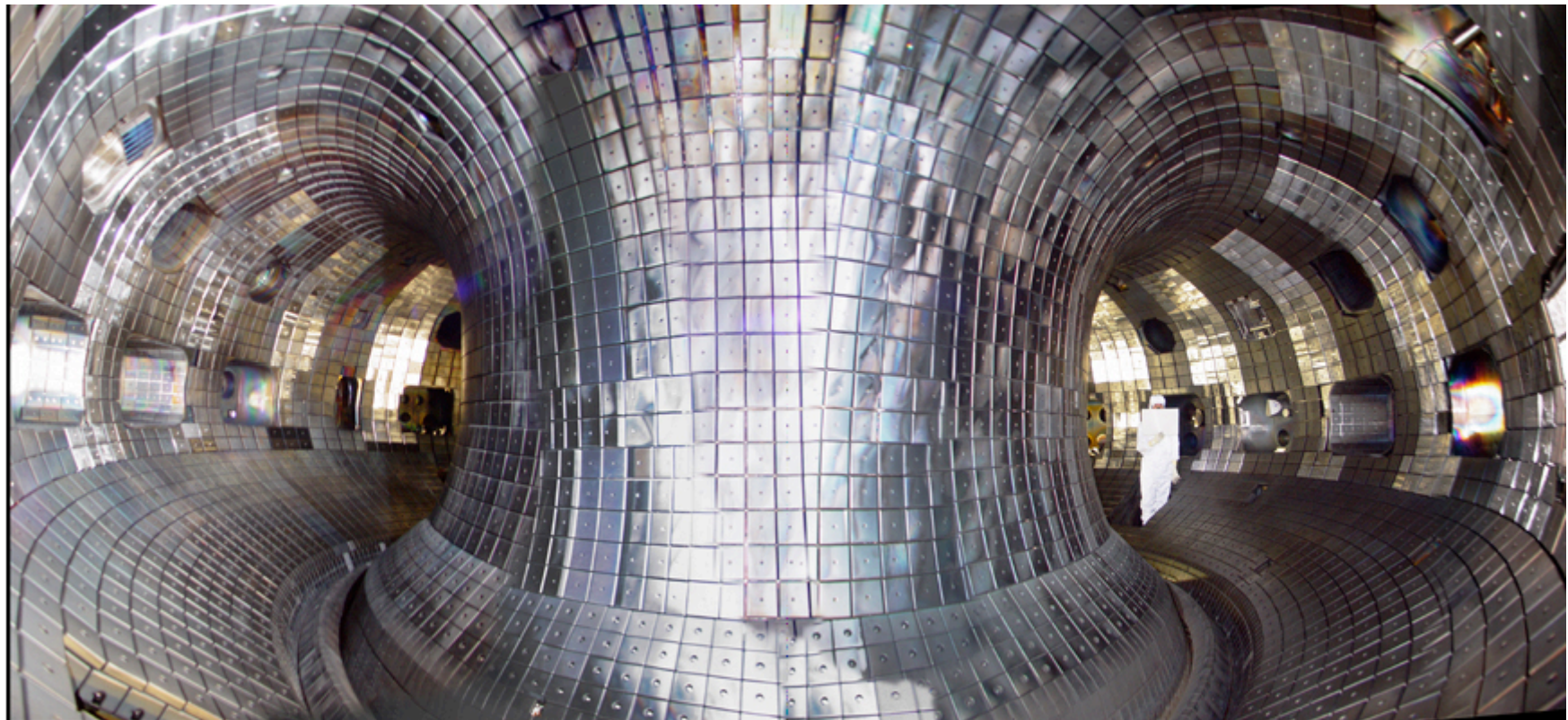




ITERに向けた JT-60Uにおける最近の実験結果について

大山直幸、JT-60チーム(原子力機構)



ITERの運転シナリオと研究課題

1. 標準(誘導)運転: $Q=10$, $H_H=1$, $\beta_N=1.8$, 400s

ELM熱負荷低減、ディスラプション対策、AEモード

2. ハイブリッド運転: $Q\sim 5-10$, $H_H>1$, $\beta_N>2$, $>1000s$, $f_{NI}>\sim 40\%$

放電シナリオ開発、NTM回避/安定化

3. 定常(非誘導)運転: $Q>5$, $H_H>1.3$, $\beta_N>2.6$, $f_{BS}>\sim 50\%$ (full-CD)

RWM制御、複合実時間制御、 α 粒子の損失(リップル/AE)

JT-60Uの特長

- 接線・垂直NBIの組み合わせによる回転・加熱分布制御
- フェライト鋼設置によるトロイダル磁場リップルの低減
=> 高速イオンの損失低減 => 回転制御性向上
- ECH/ECCD、LHCD、N-NBI(CD/加熱)

- JT-60UにおけるELM研究
 - ✓ Type I ELM特性
 - ✓ Grassy ELM特性

- 高 β プラズマの長時間維持(ハイブリッド運転開発)
 - ✓ フェライト鋼設置による利点
 - ✓ 高 β 高閉じ込め性能プラズマの維持時間伸長
 - ✓ ITB性能維持のための粒子制御の重要性

- $m/n=2/1$ NTMの安定化
 - ✓ ECCD位置の重要性
 - ✓ NTM安定化のシミュレーション

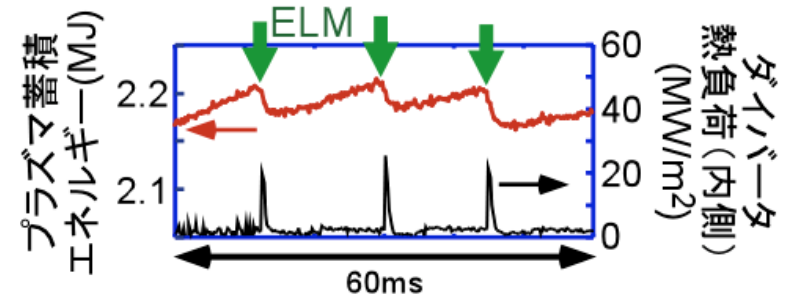
Hモード(改善閉じ込めモード)とは

- 周辺部に形成される**輸送障壁**によって**性能改善**
- **国際熱核融合実験炉(ITER)の標準運転で採用**

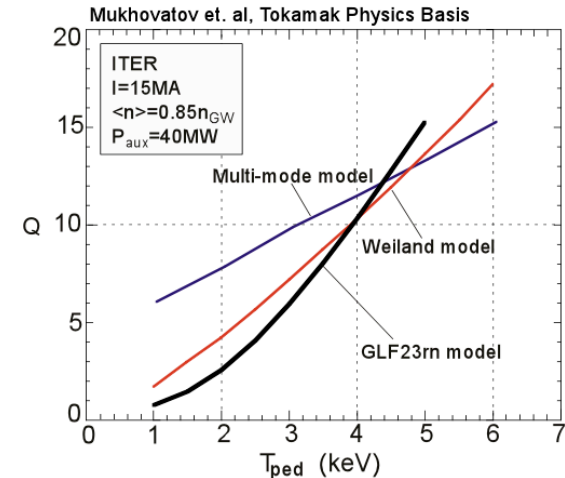
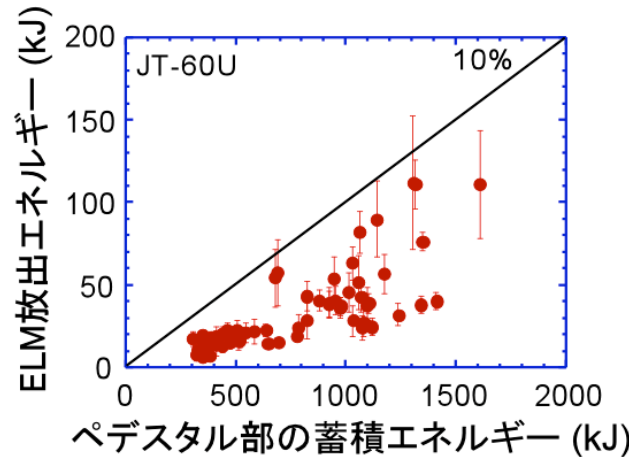
ELMとは

- Hモードプラズマ周辺部に局在する**周期的崩壊現象**
- **MHD不安定性**のひとつ
- **ペデスタル性能が高くなると熱負荷も増加**

ELMy H: 周期的なELMのおかげで、高閉じ込め性能を維持しつつ定常性を示す



**ITER: $W_{ped} > 100MJ$
=>10MJ以上のELM!!**



1. ELMによる熱負荷がダイバータ板の寿命を決定
 2. エネルギー増倍率(Q)はペデスタル性能に比例
- 高いペデスタル性能とELM熱負荷低減の両立が目標**

Type I ELM研究の背景

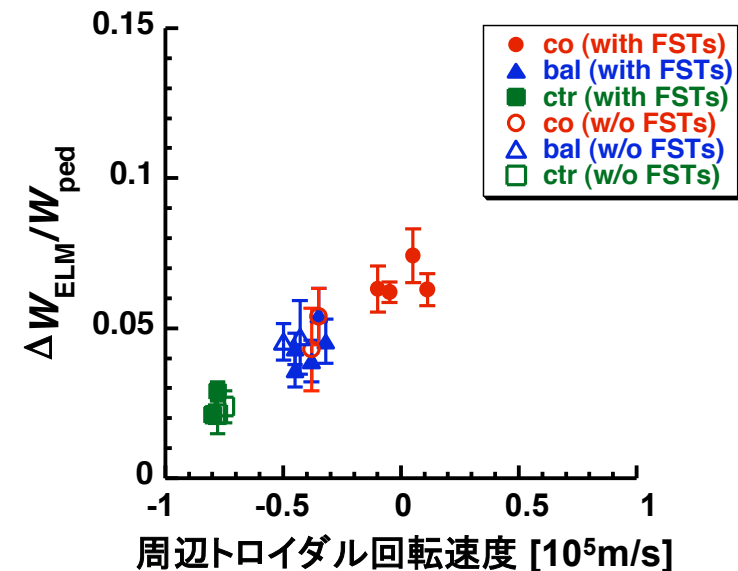
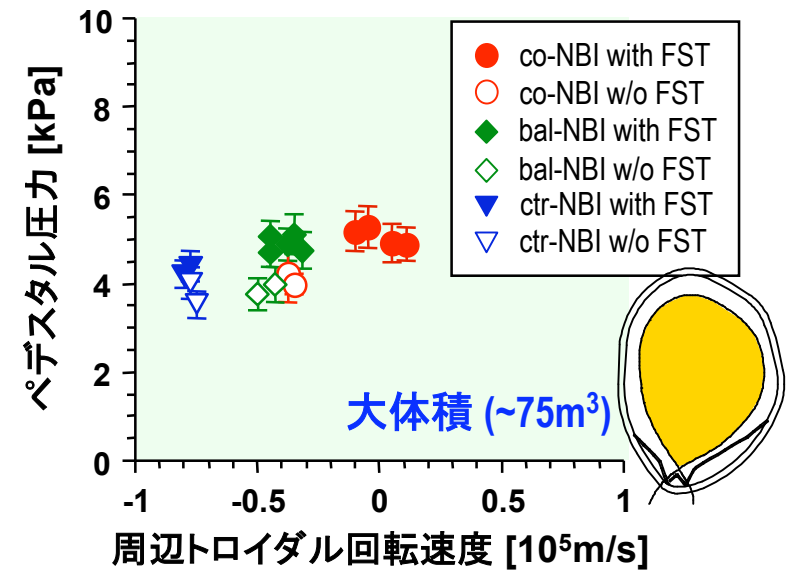
JT-60UのELMは他装置より小さい => なぜ？

断面形状、TFリップル、トロイダル回転、...

フェライト鋼設置前後を比較することにより、リップルの効果と回転の効果の切り分けが可能

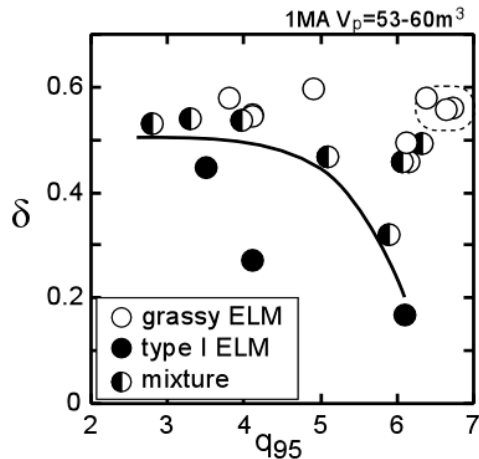
- CO方向のトロイダル回転増加により、ペデスタル圧力は緩やかに増加
- CO方向のトロイダル回転増加(CTR方向の回転減少)によって、規格化したELMの大きさ ($\Delta W_{ELM}/W_{ped}$) は上昇
 - ΔW_{ELM} も W_{ped} も変化するが、 W_{ped} の変化より ΔW_{ELM} の変化の方が大
(トロイダル回転によるELM低減が可能)
 - 同一トロイダル回転でフェライト鋼の有無を比較すると、 ΔW_{ELM} も W_{ped} も同じ割合で増加しているため、その比は一定
(TFリップルの影響は小)

ITERで2kHz程度のCTR回転が得られるか？
Type I ELM以外のELMは？



Grassy ELM研究の背景

Grassy ELM: JT-60Uで発見された小振幅ELM



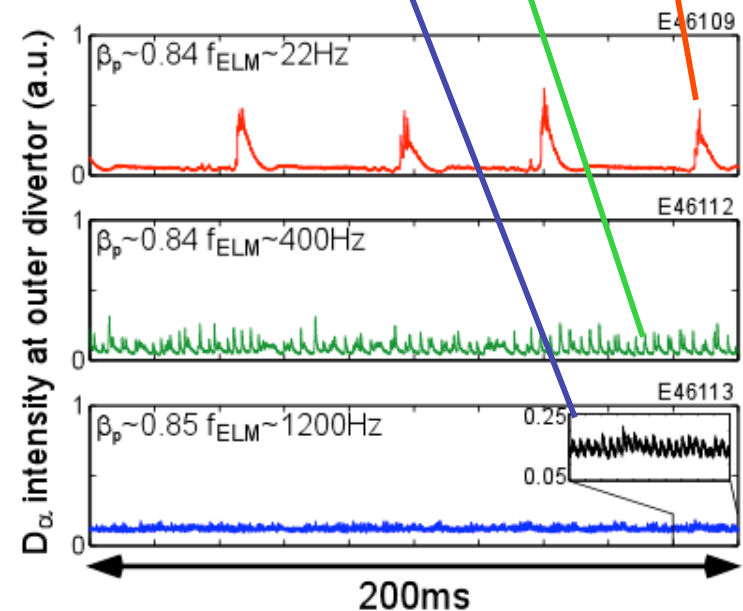
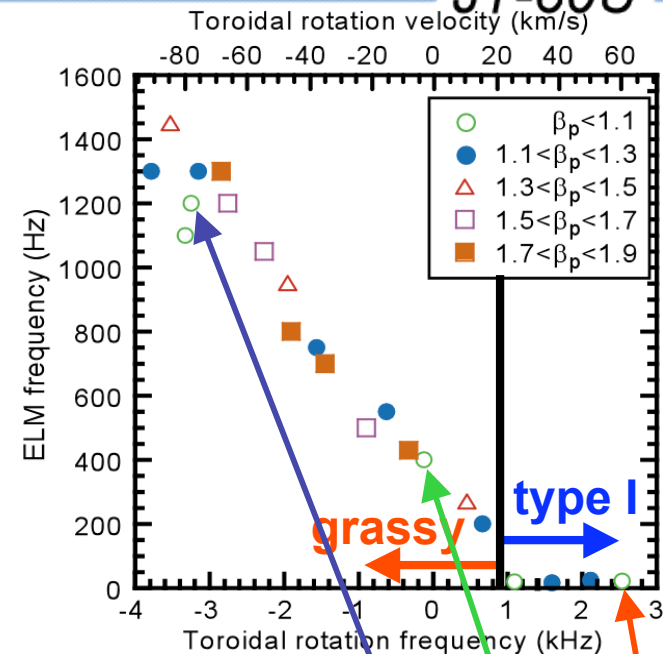
周波数の高い崩壊現象
熱負荷はType I ELMの1/10程度
低 v_e^* でも発生 (ITERで重要)
重要パラメータ (δ , β_p , q_{95} , V_T)

ITERプラズマは低トロイダル回転 (0.23kHz)

⇒ 高 q_{95} , δ 領域で V_T と β_p 依存性検証

- CTR回転の増加 ⇒ β_p に依らず f_{ELM} が上昇
- ITERで予想される低トロイダル回転のプラズマでもgrassy ELMが発生
- 200Hz程度のgrassy ELMでも $\Delta W_{ELM}/W_{ped}$ は1%以下 (ITERの許容範囲内)
- ペDESTALの性能は通常のELMと同程度

低 q 領域への運転領域拡大が今後の研究課題



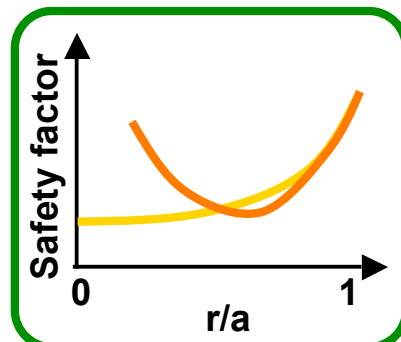
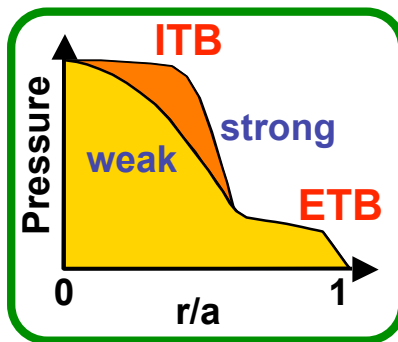
先進トカマク放電の開発

ITER/DEMOへ向け、定常トカマク炉に必要な炉心プラズマ開発

高い規格化ベータ値 (β_N): 核融合出力 $P_{fus} \propto \beta_N^2$

高いブートストラップ電流割合 (f_{BS}): 循環電力の低減、定常化に必須

JT-60Uでは、内部輸送障壁 (ITB) を伴う
正/弱磁気シアプラズマと**負磁気シアプラズマ**で
 先進トカマク放電の研究・開発を実施



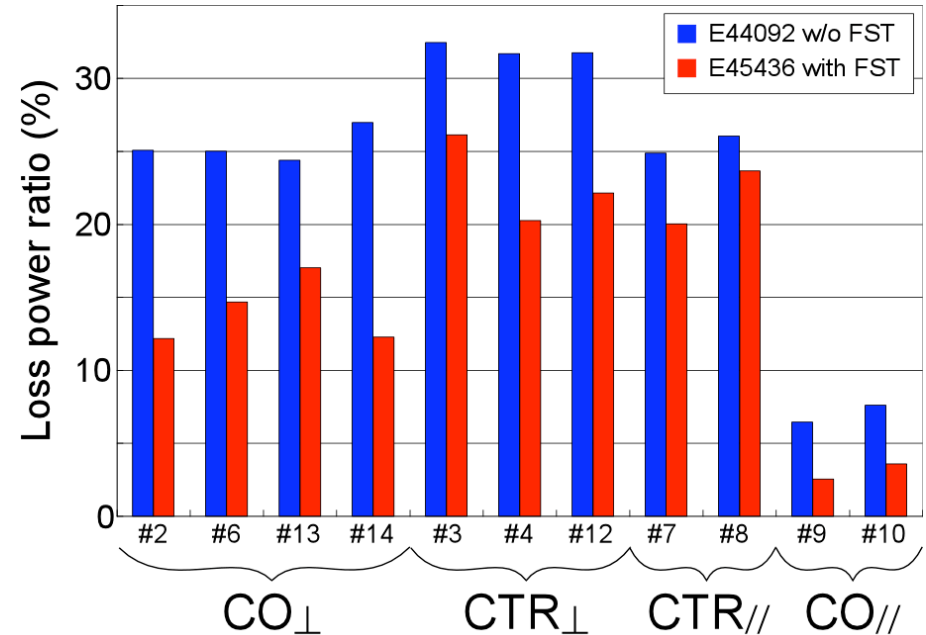
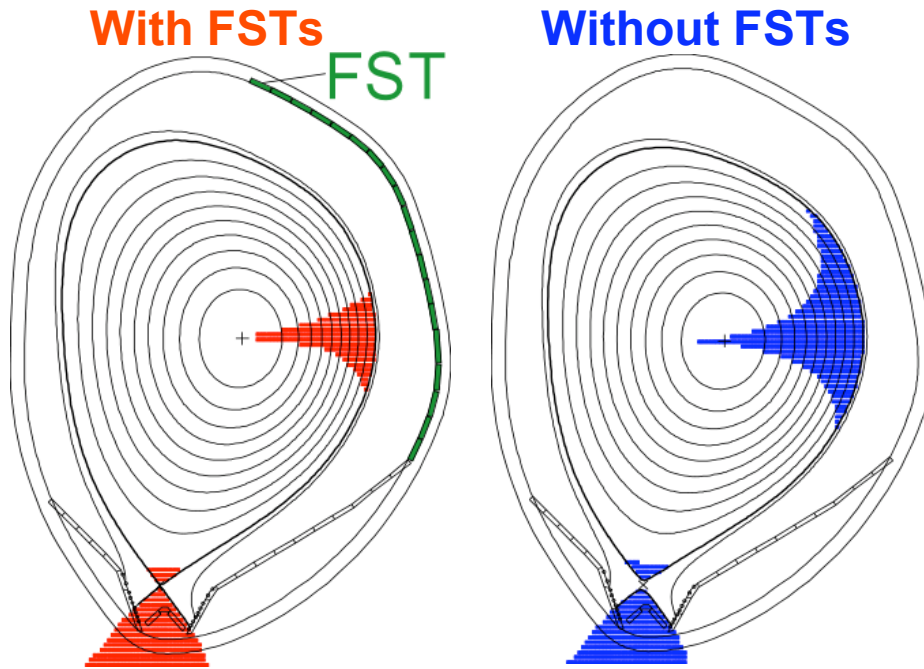
正/弱磁気シアプラズマ

- フェライト鋼設置による利点を活かし、 $\beta_N > 2.3$, $H_H \sim 1$ を23.1秒間維持

ハイブリッドシナリオ候補

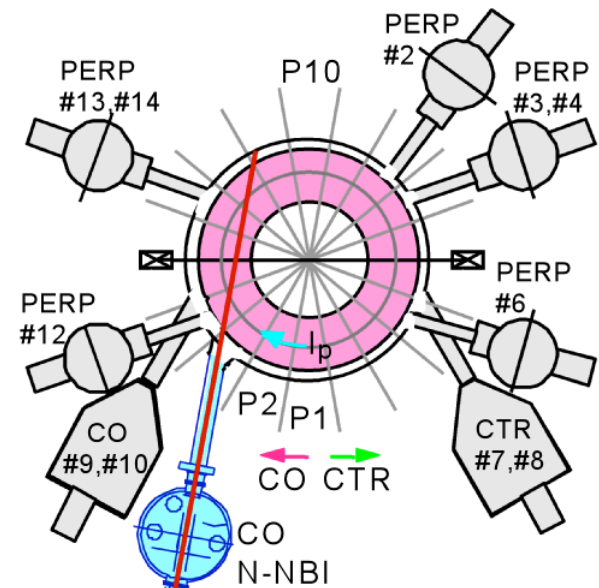
負磁気シアプラズマ

- 実時間制御で $f_{BS} > 70\%$ を8秒間維持
- CSなしで $f_{BS} \sim 100\%$ を1秒間維持



高速イオンの閉じ込め改善の利点

- 同じ入力パワーに対し吸収パワーが増大
=> 同じ β_N を維持するのに必要なNBユニット数低減
=> NBIユニットの選択肢が増える
=> トルク分布の自由度が増える
- CTR回転を誘起する内向きの径電場が減少
=> CTR回転の低減 => 回転分布の制御性拡大

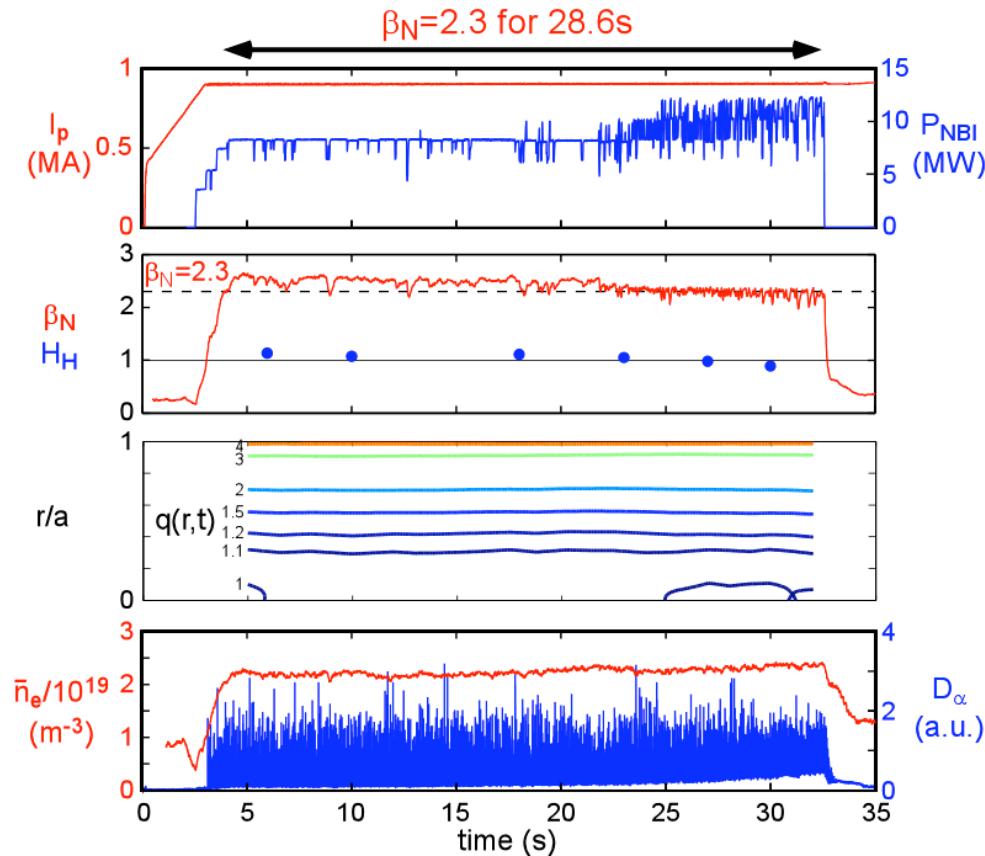


$\beta_N H_H = 2.2$ を23.1秒間($\sim 12\tau_R$)維持

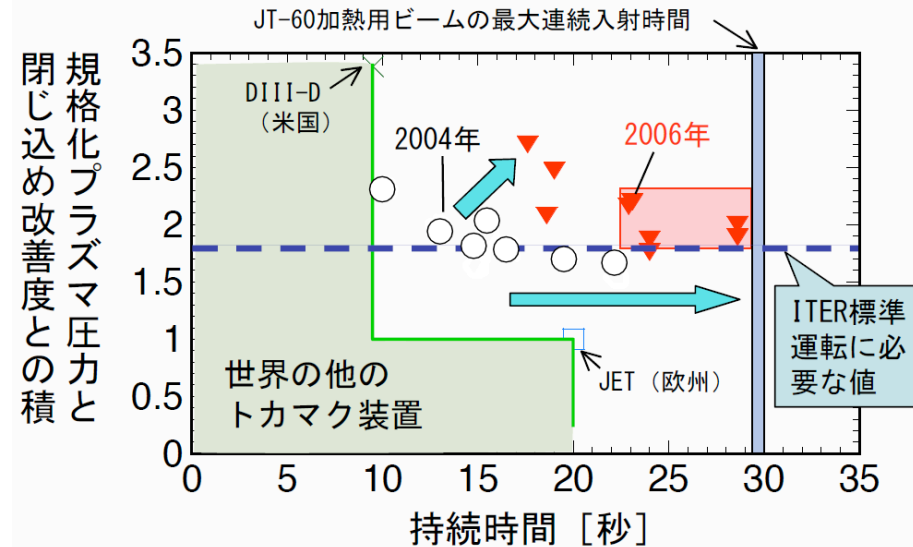
JT-60U

フェライト鋼設置 \Rightarrow 密度制御性の向上によるITBの維持
 \Rightarrow CO回転による電子系ITBの性能向上

\Rightarrow 閉じ込め性能改善
 $H_H \sim 0.82 \Rightarrow 1.1$



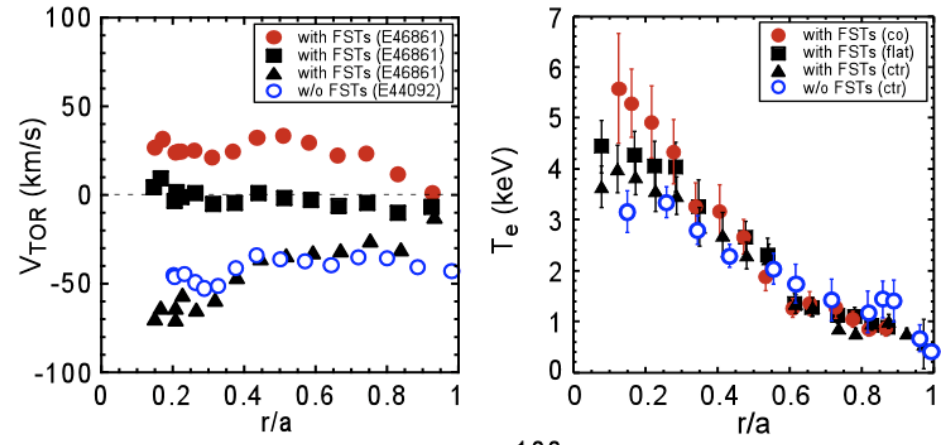
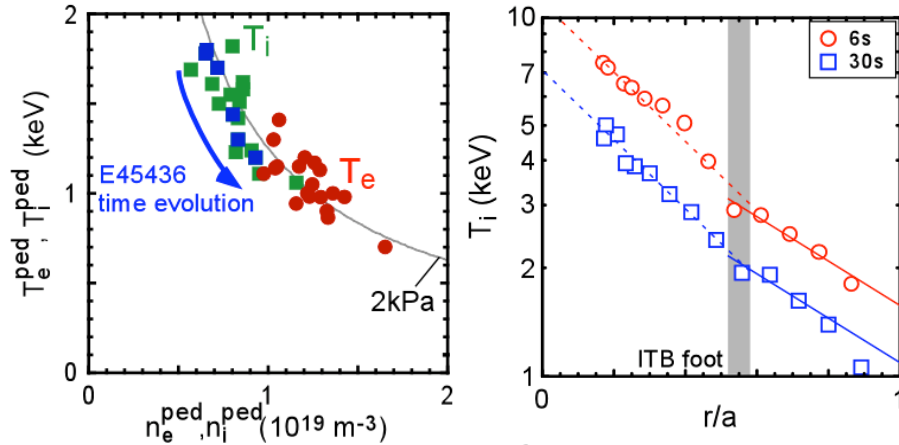
- 放電後半のリサイクリング増加に伴い、閉じ込め性能が劣化
- 蓄積エネルギーFBで β_N は維持



- 同じ β_N を維持するために必要な加熱パワーが低減 \Rightarrow ダイバータ熱負荷低減 \Rightarrow 壁排気の長時間維持
- ほぼ定常な安全係数分布(電流分布)を電流拡散時間($\tau_R \sim 2s$)の12倍程度維持
- 低安全係数($q_{95} \sim 3.3$)運転で、エネルギー増倍率の指標($\beta_N H_H / q_{95}^2 > 0.2$)やブートストラップ電流割合($\sim 40\%$)も高い

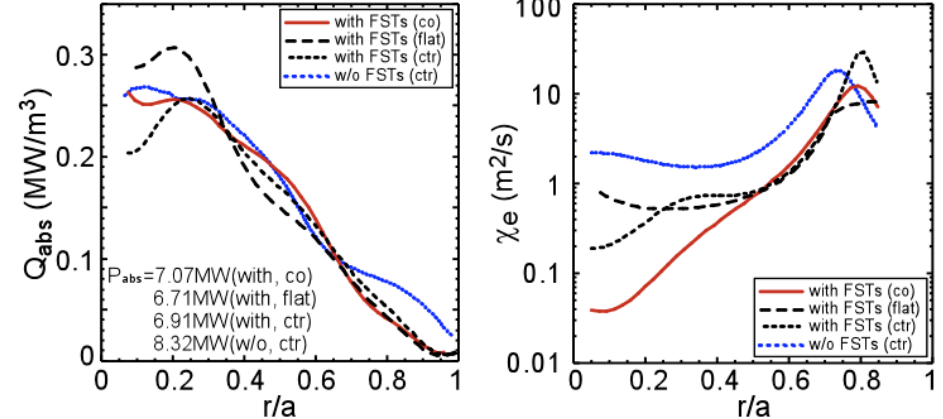
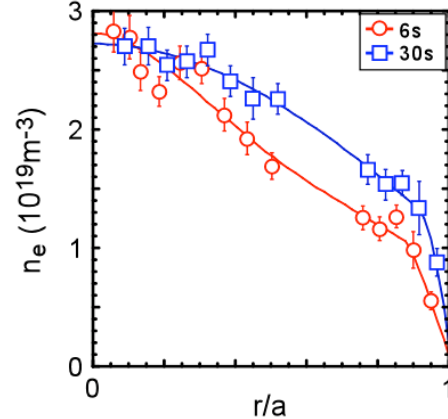
1. 粒子制御(リサイクリング制御)の重要性

2. CO回転の重要性



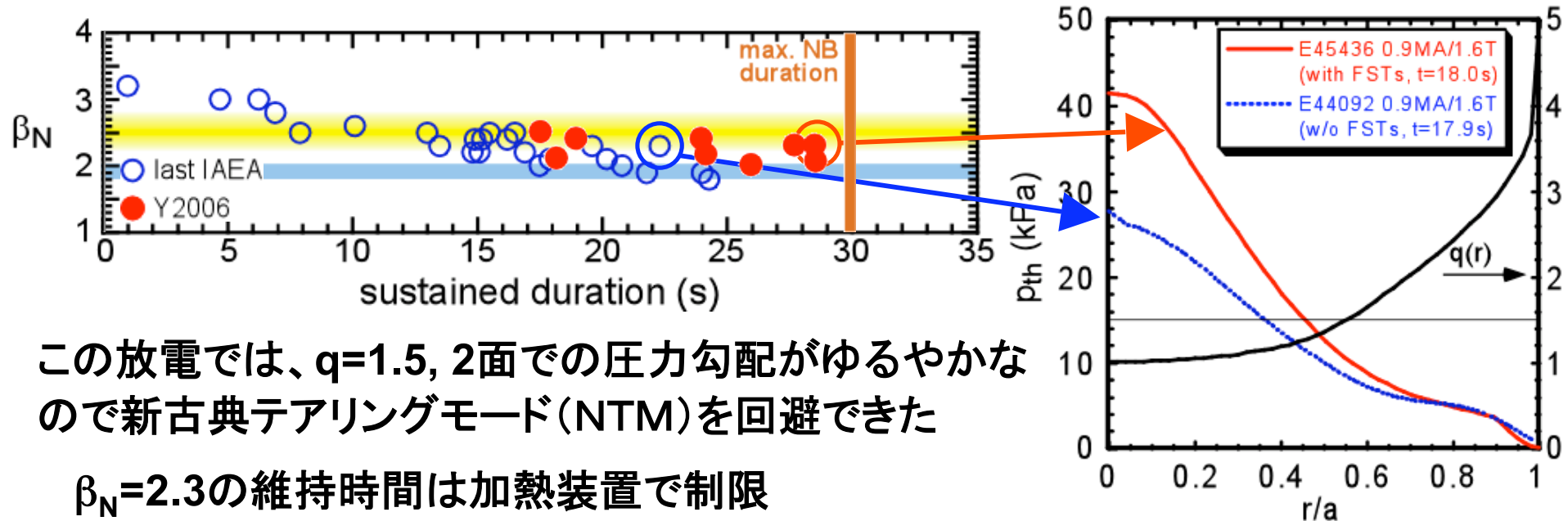
ペデスタルは
ELMが発生するため
圧力一定で変化

温度分布と密度分布
は分布の決定機構が
異なる



周辺密度が高くなると、コアプラズマ温度が減少。一方、密度分布はブロードになるため、全体の圧力分布は減少
⇒ 低リサイクリングの長時間維持が重要

フェライト鋼設置後の放電を用いて、トロイダル回転と電子温度分布の関係を調査
同様のCTR回転プラズマでは、フェライト鋼の有無に関わらず同様の温度分布に



この放電では、 $q=1.5$, 2面での圧力勾配がゆるやかなので新古典テアリングモード(NTM)を回避できた

$\beta_N=2.3$ の維持時間は加熱装置で制限

=> 今後の研究・開発では、更に高い β_N での長時間維持実証

=> **NTMの制御が重要!**

JT-60UにおけるNTM研究の状況

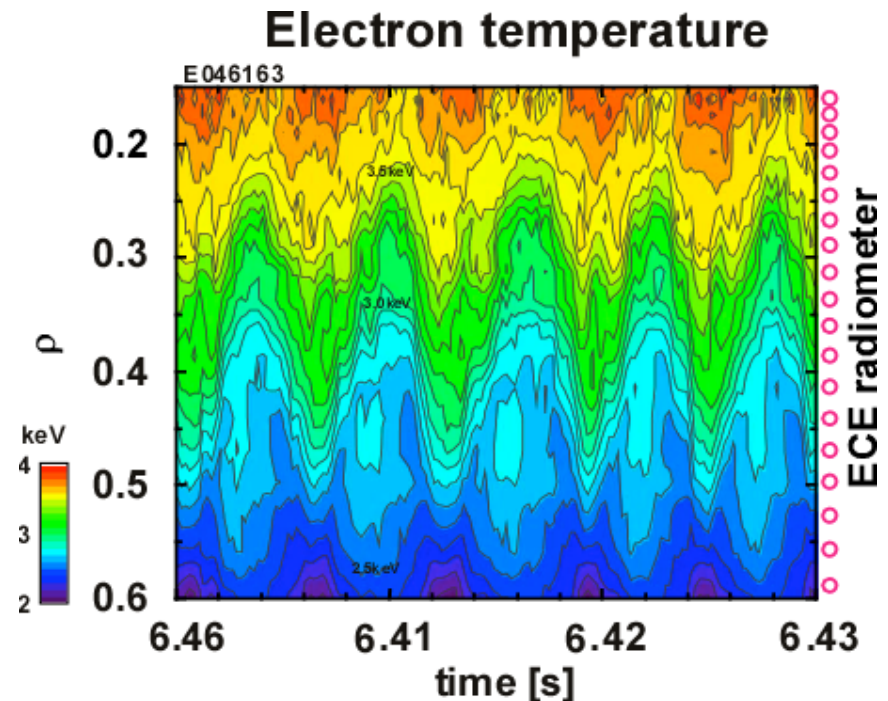
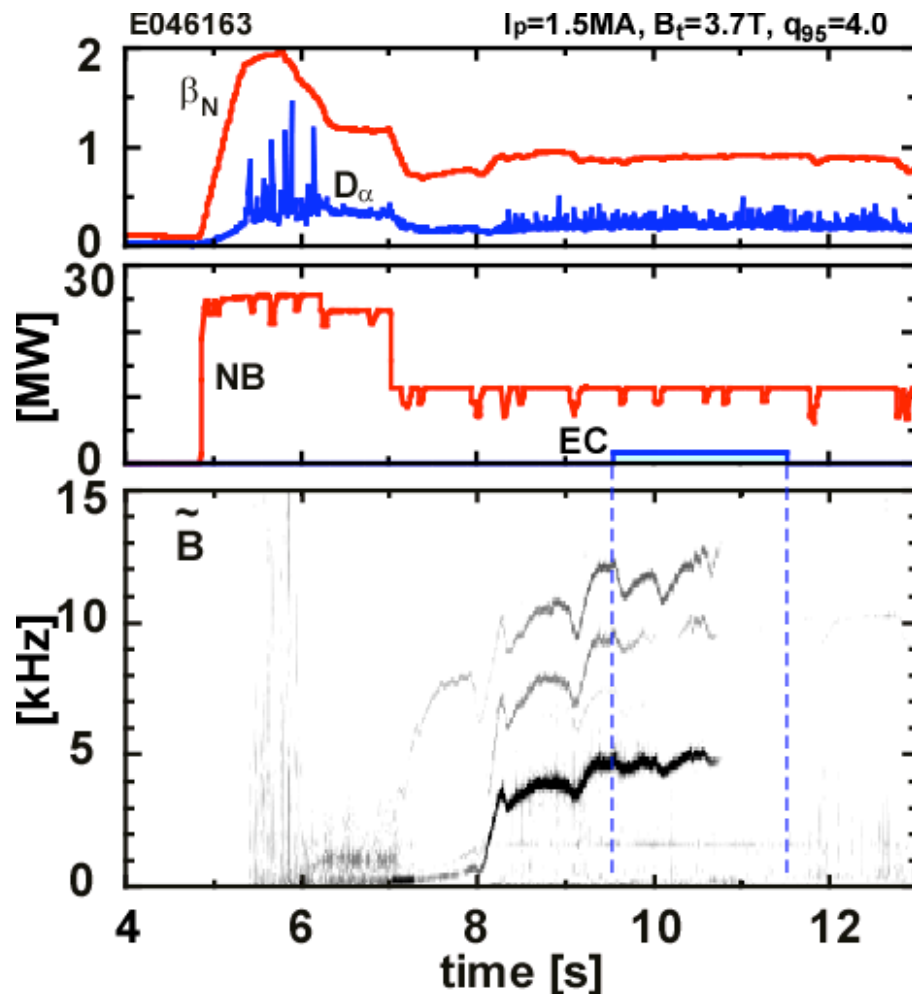
$m/n=3/2$ NTM: ECCDによる完全安定化、EC早期入射によるNTM回避

ECEによるモード位置検出+ECミラー駆動=実時間NTM制御

最近のNTM研究

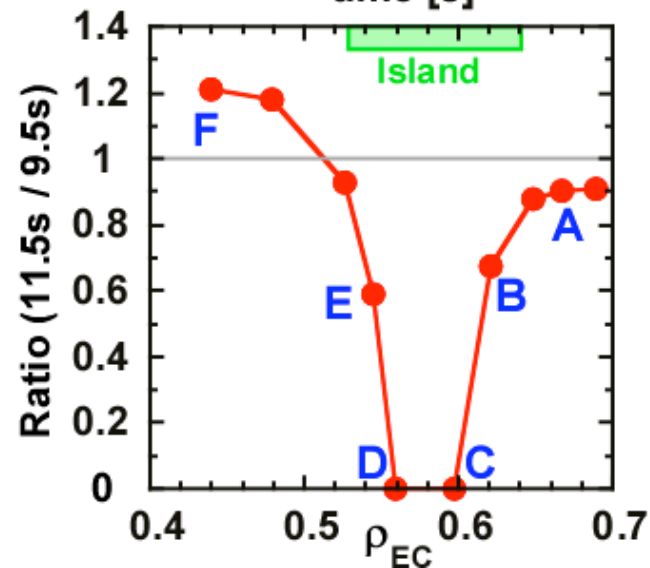
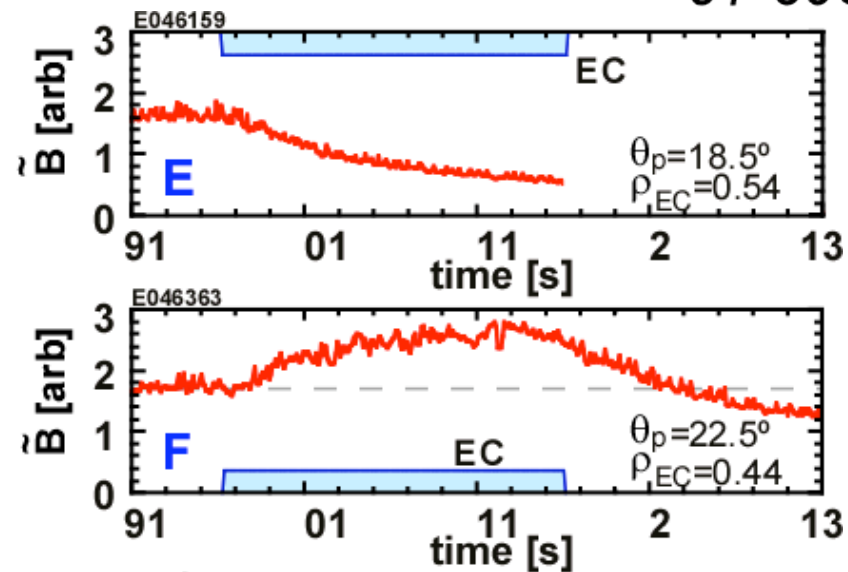
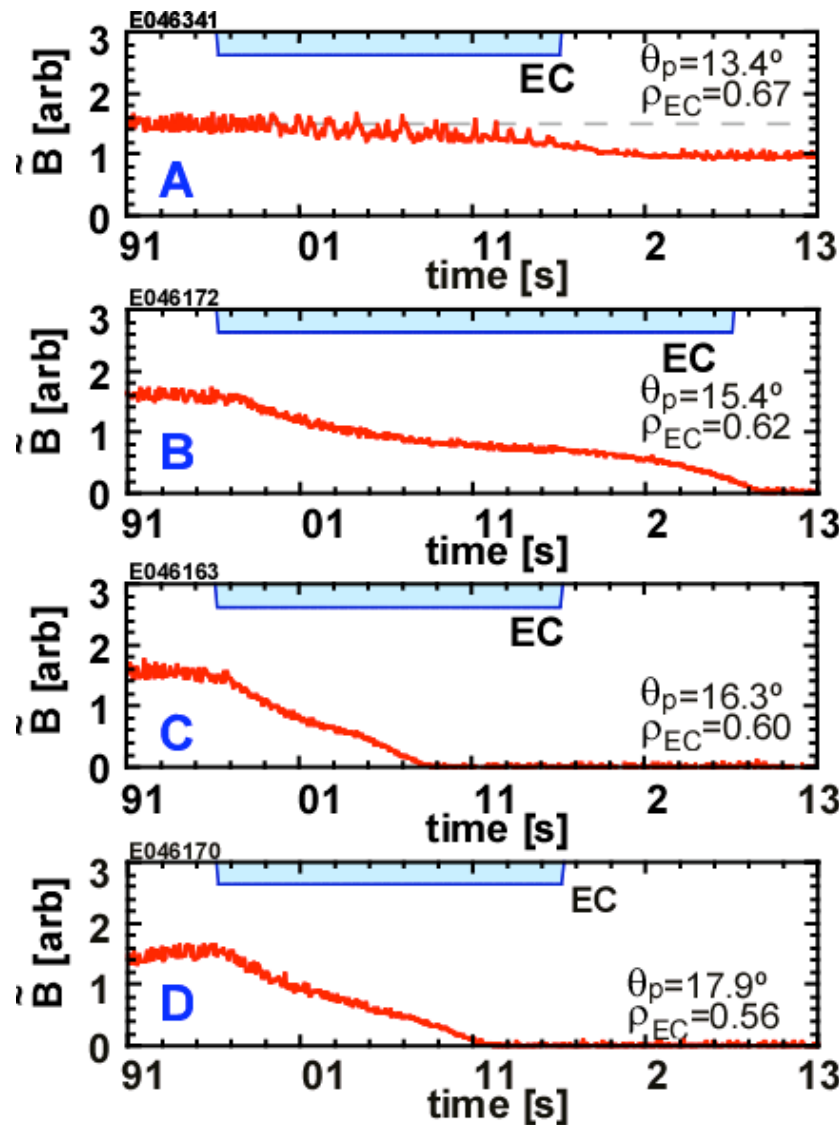
$m/n=3/2$ NTM: 中心ECCDによるNTM成長の抑制

$m/n=2/1$ NTM: **ECCDによる完全安定化の実証とシミュレーションによる予測**



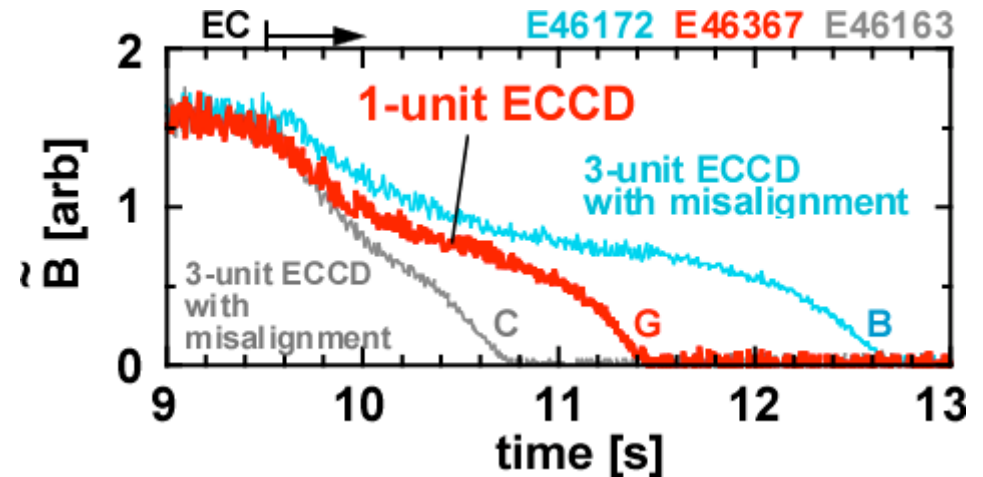
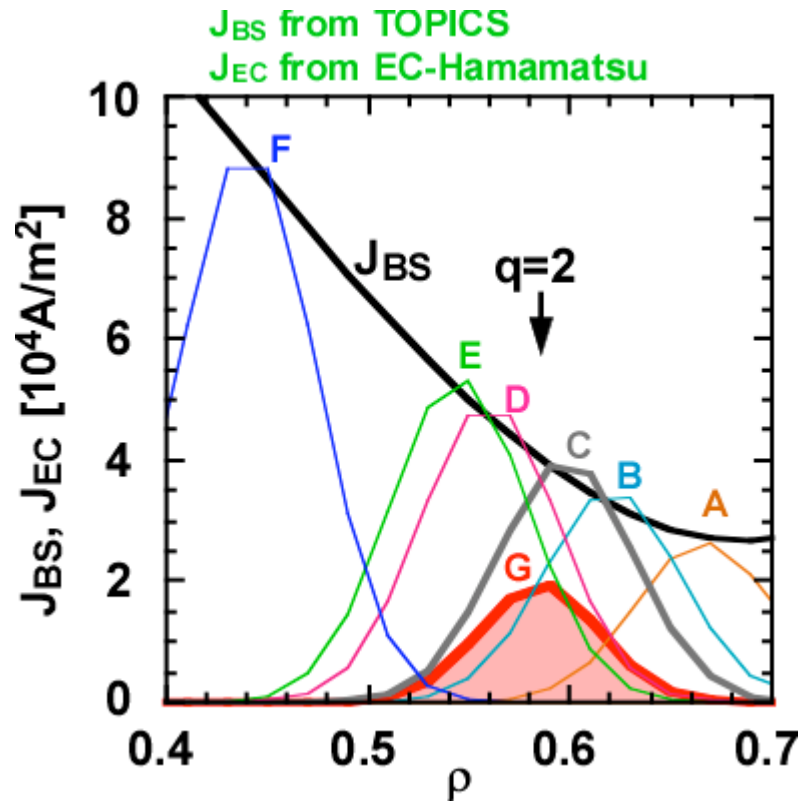
- 磁気島の幅: ρ で0.15程度
- 幅広い空間位置で温度揺動を観測
- 磁気島内部での平坦化は不完全

- m/n=2/1のNTMが $t \sim 5.8s$ に発生。 $\beta_N \sim 2$ ($\beta_p \sim 1.2$)
- $t=7s$ に P_{NBI} を減少し、CTR方向の接線NBIのみ入射 => $t \sim 8s$ からモードが回転
- $t=9.5s$ から連続ECCCDを入射 => $t=10.7s$ に完全安定化

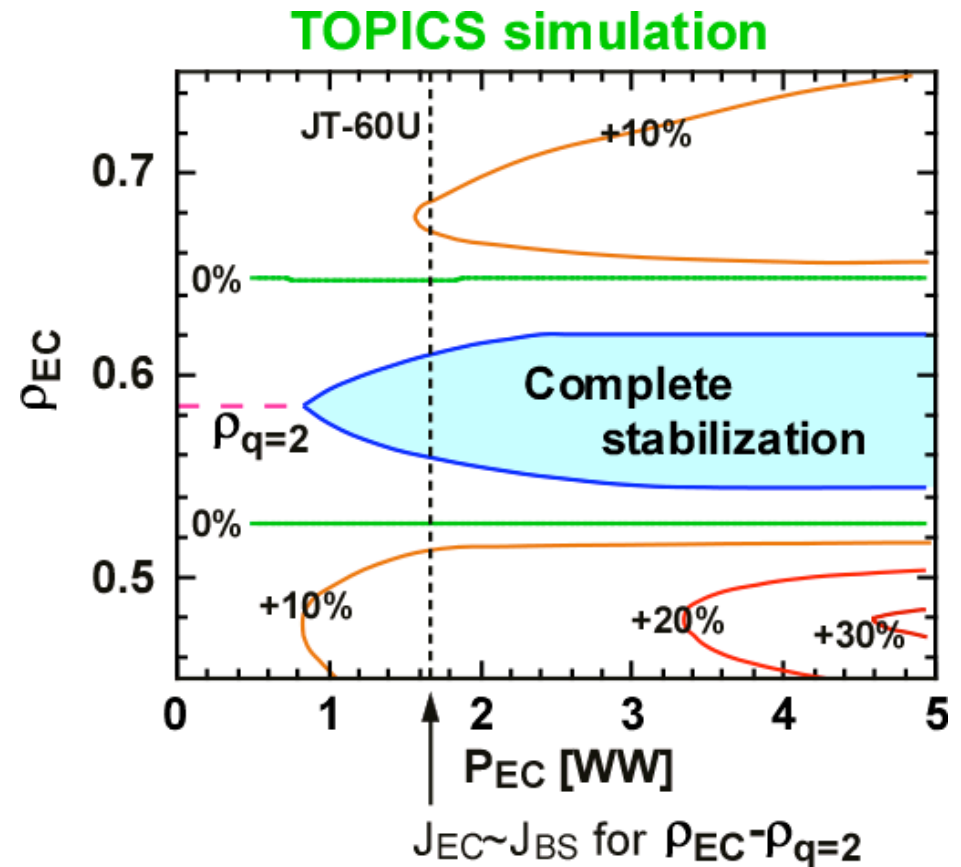
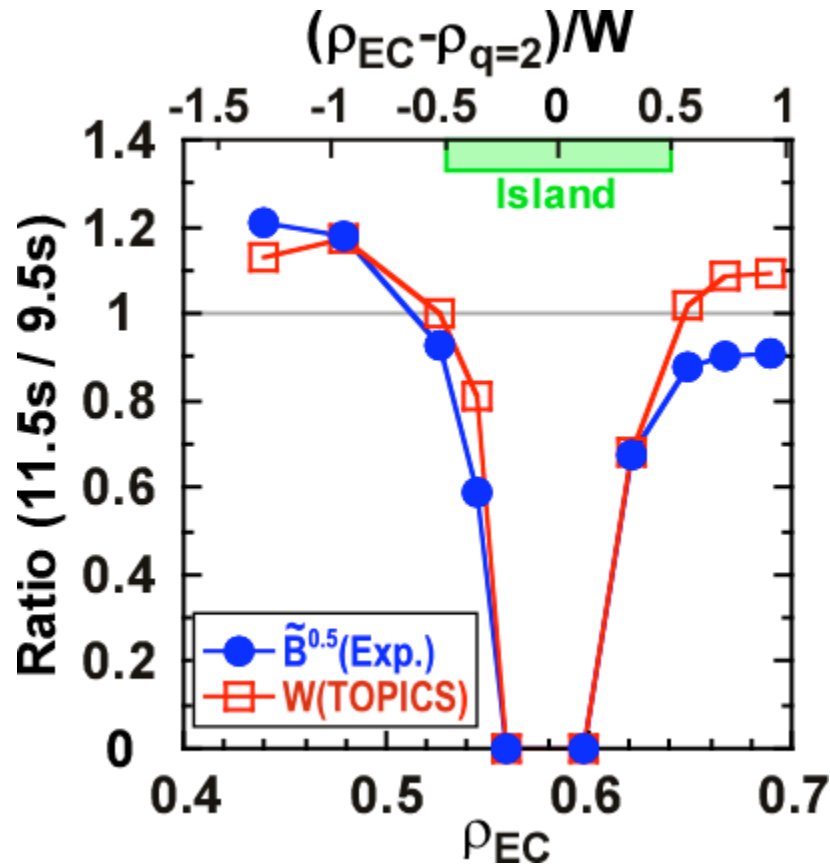


安定化条件: $|\rho_{EC} - \rho_{q=2}| < \sim W/2$

不安定化条件: $|\rho_{EC} - \rho_{q=2}| \sim W$



磁気島が完全になくなるまでに要する時間は延びるが、
 安定化に必要なEC駆動電流は有理面での自発電流の
 半分でも安定化が可能



修正ラザフォード方程式を1.5次元
輸送コードTOPICSに導入

実験結果で観測された安定化条件
と不安定化条件を再現

磁気島中心にECCDをする場合、
ECパワーは少なくて済む

必要以上のECパワーがあっても、
安定化条件は変化しない

● JT-60UにおけるELM研究

Type I ELM特性: CTRからCOになるにつれて、 $\Delta W_{ELM}/W_{ped}$ 増加

(大体積配位で) 2kHz程度のCTR回転が得られれば $\Delta W_{ELM}/W_{ped}$ は5%程度

Grassy ELM特性: CTR回転の上昇で f_{ELM} 上昇

ゼロ回転でも~400Hzのgrassy ELM発生

~200Hzのgrassy ELMでも $\Delta W_{ELM}/W_{ped}$ は1%以下

● 高 β プラズマの長時間維持(ハイブリッド運転開発)

$\beta_N=2.3$ で $H_H \sim 1$ を23.1秒間維持。 $f_{BS} \sim 40\%$ のプラズマを τ_R (~2s)の12倍程度維持。

粒子制御性能とCO回転がITB性能維持のために重要

● $m/n=2/1$ NTMの安定化

自発電流の半分のEC駆動電流で完全安定化を実証

ECCD位置が磁気島幅の半分以内であれば安定化

磁気島幅程度ECCD位置がずれると逆に不安定

修正ラザフォード方程式を組み込んだTOPICSで実験結果(安定化条件)を再現

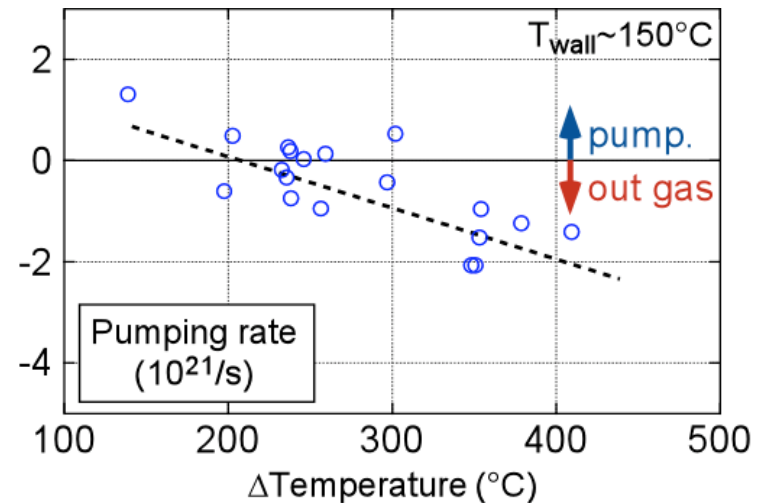
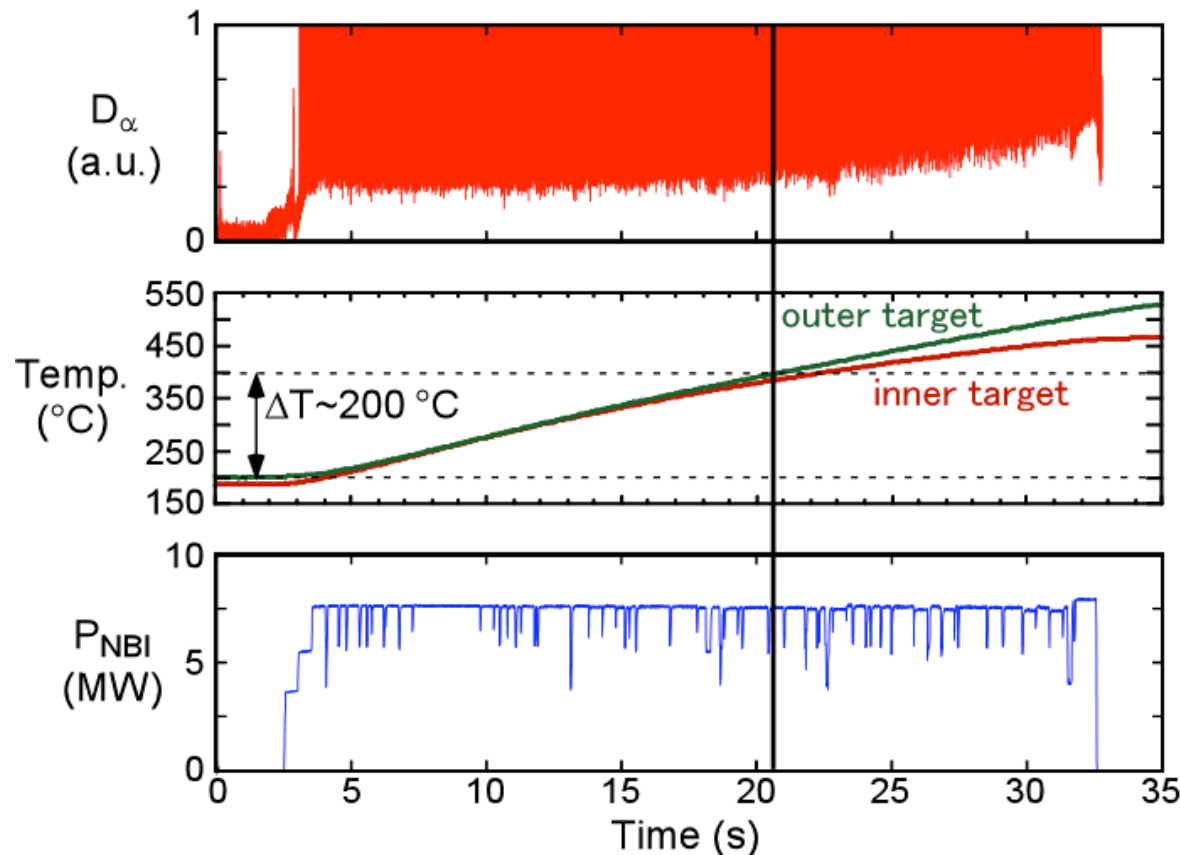
磁気島中心を狙ってECCDすることが効率の良い安定化に重要



Divertor recycling was enhanced even with the constant heating power

JT-60U

- constant heating power of $\sim 7.6\text{MW}$ was applied
- recycling started to increase, when ΔT reached $\sim 200^\circ\text{C}$
- even after dedicated wall conditioning, wall-saturation occurred in second/third long-pulse plasmas



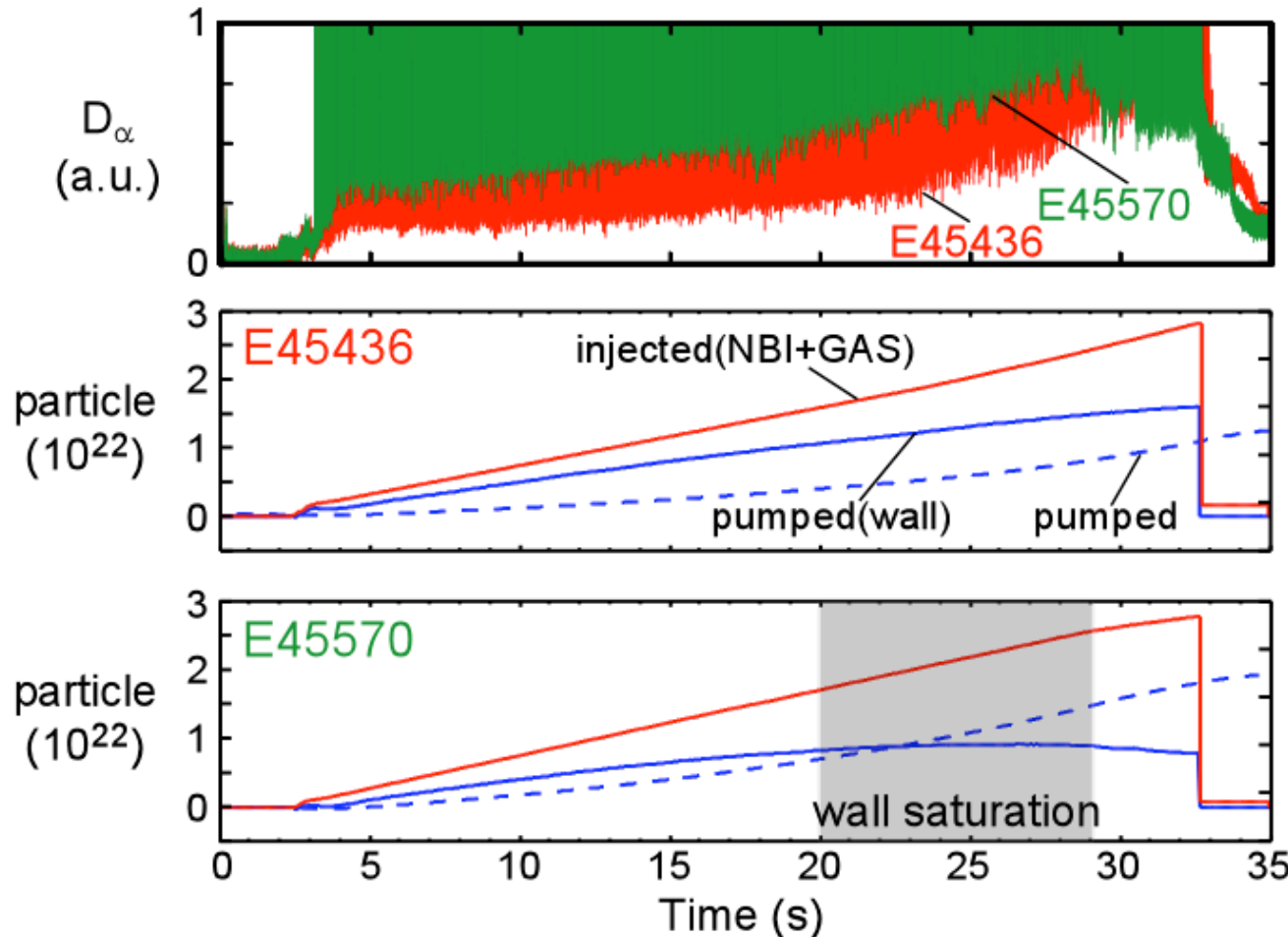
Global wall pumping rate varies with increase of divertor temperature. (especially for outer target)

T. Nakano,
PSI2006



Particle control is important to sustain strong ITB in long-pulse plasmas

JT-60U



Low recycling
(E45436)
Wall pumping
became less
effective
gradually

High recycling
(E45570)
Wall saturation
occurred
during
discharge

For future devices with no wall pumping,
it is important to demonstrate high performance
plasmas longer than τ_w with active particle control.

ITERを補完するJT-60SA

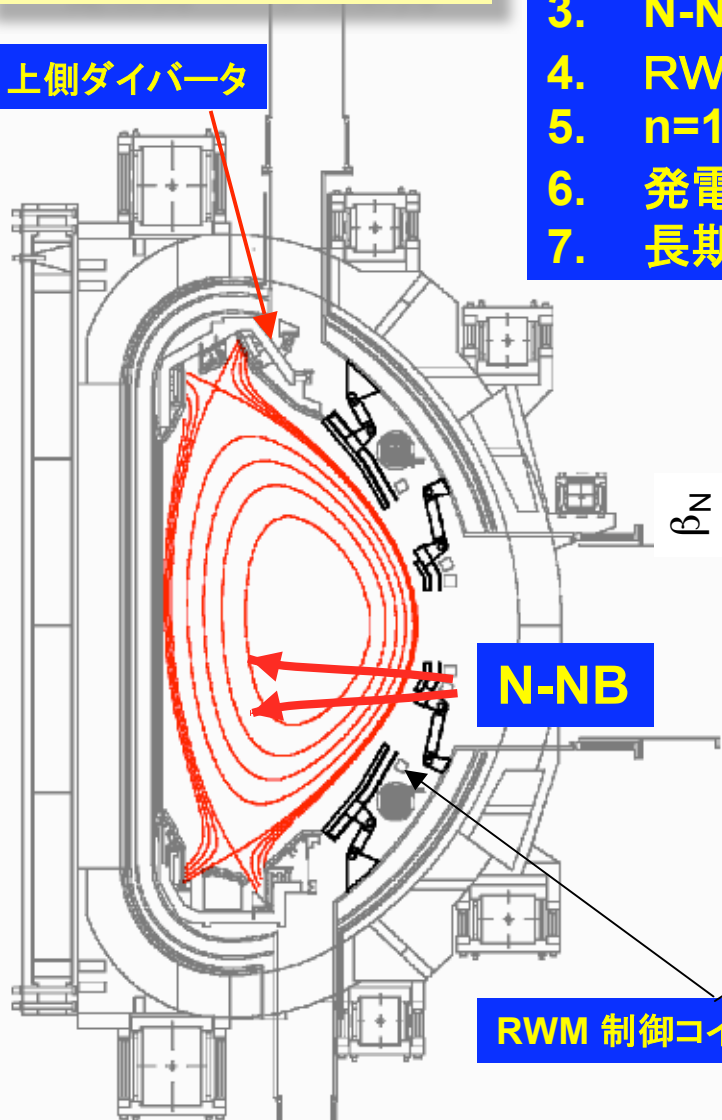
JT-60SA



発電実証プラントに向けた
定常高ベータ化研究

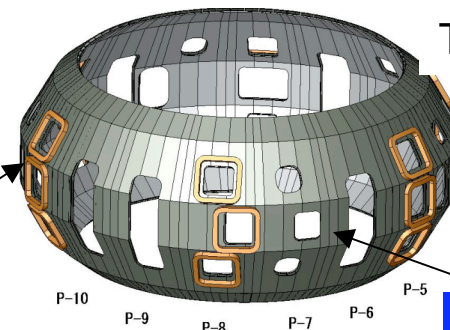
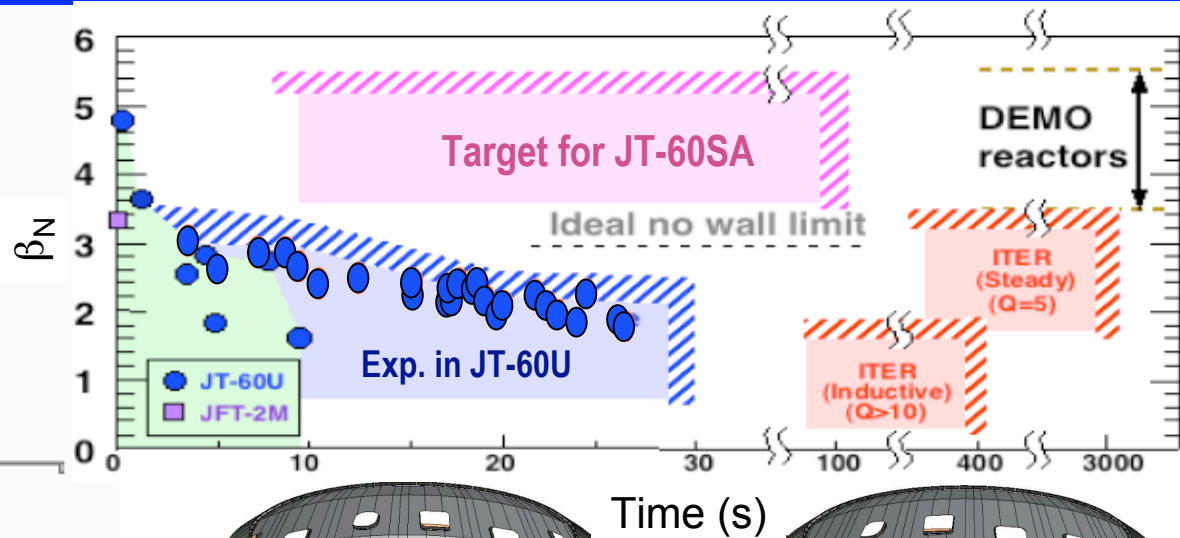
1. 幅広い形状制御性 (低アスペクト比 $A \sim 2.6$, ダブルヌル)
2. 高三角度と整合する上側ダイバータ
3. N-NBビームラインの下側移動による周辺電流駆動
4. RWM制御のための安定化板
5. $n=1,2$ RWM 制御用コイル (3個×6セット)
6. 発電実証プラントに向けた安定化板上のフェライト鋼板
7. 長期目標としての8時間運転

上側ダイバータ



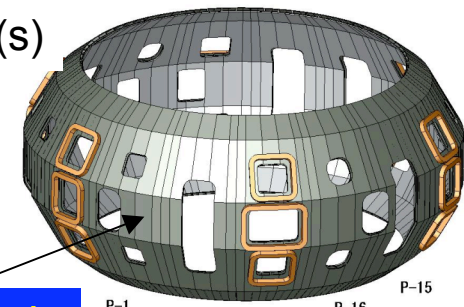
N-NB

RWM 制御コイル



Time (s)

安定化板

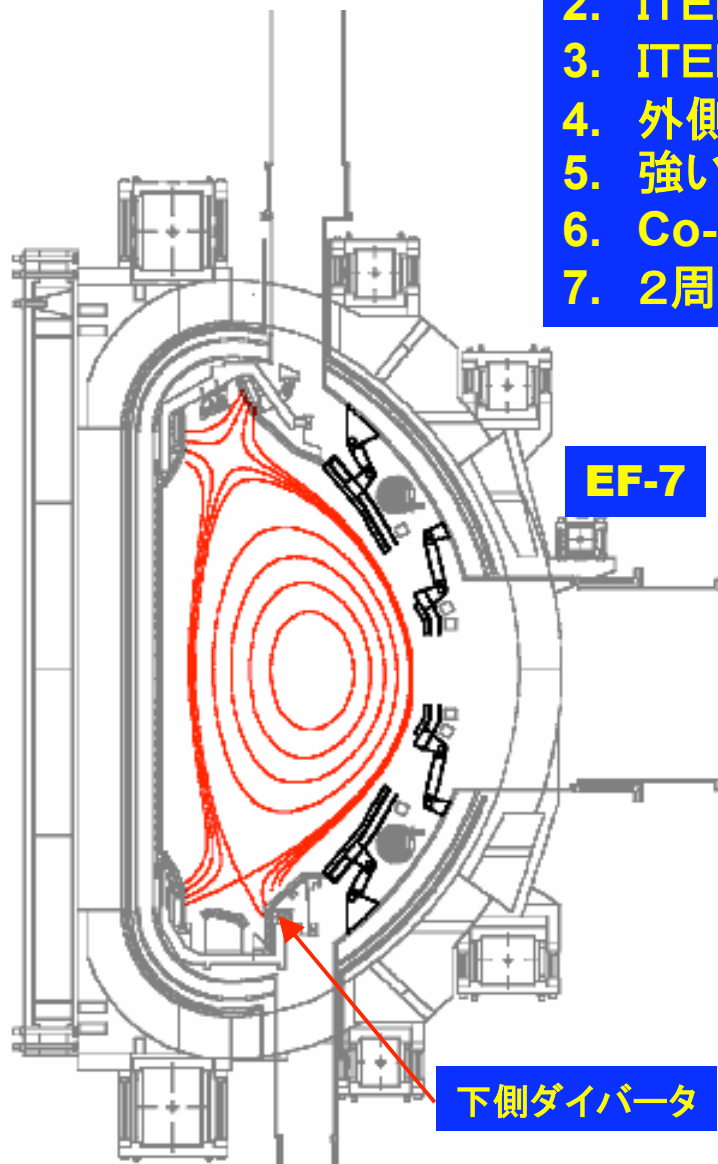


ITER支援研究

JT-60SA



1. EF-7コイルを付加することによりITER形状プラズマを生成
2. ITERとほぼ同じグリーンワルド密度
3. ITER三角度と一致する下側ダイバータ構造
4. 外側ダイバータ板はITER型モノブロックダイバータ
5. 強い電子加熱(10MW N-NB+7MW ECRF)
6. Co-CTR接線NBIによる回転制御
7. 2周波数ECRF (110&140GHz) によるNTM制御

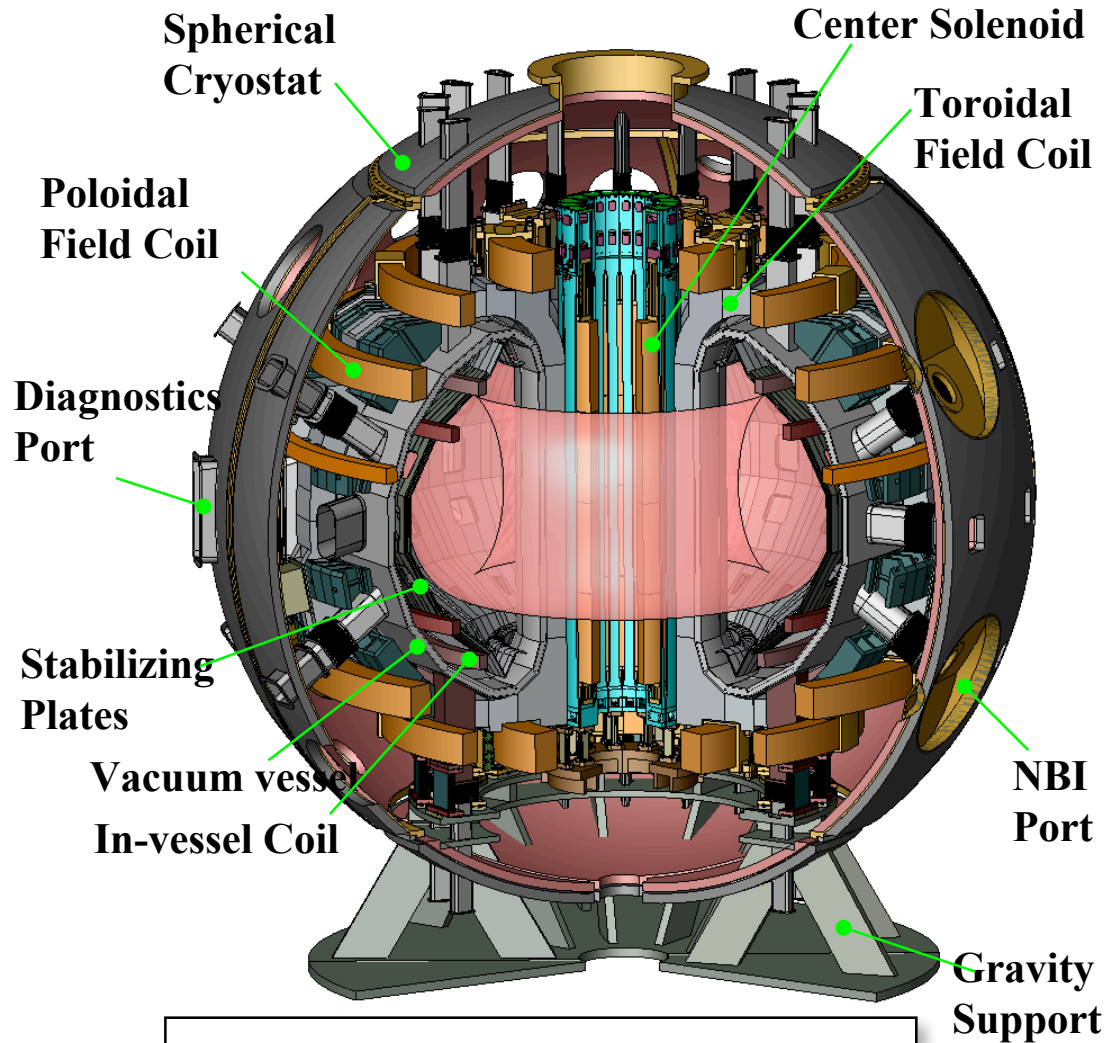


Parameter	ITER	JT-60SA
Plasma Current I_p	15 MA	3.5MA
Toroidal Field B_t	5.3T	2.59T
Major Radius R_p	6.2 m	3.16 m
Minor Radius a	2.0 m	1.02 m
Aspect Ratio A	3.1	3.1
Elongation κ_{95}	1.70	1.7
Triangularity δ_{95}	0.33	0.33
Safety Factor q_{95}	3.0	3.0
Greenwald density n_G	$1.2 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$	$1.1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$

$$P=41\text{MW} \gg P_{th}^{L-H} \sim 20\text{MW}$$

JT-60SA装置パラメータ

JT-60SA



D₂ main plasma + D₂ beam injection
Remote handling is required.

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 κ_{95}	1.76
Triangularity δ_{95}	0.45
Safety Factor q_{95}	3.11
Volume V_p	127m ³
Flatop 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 ²
Annual Neutron	4 x 10 ²¹

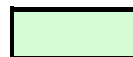
建設の年次計画

JT-60SA



JT-60Uの運転と並行してSA用機器の設計・製作を開始
ブロードアプローチ計画：建設期間7年＋運転期間3年

J-FY	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
JT-60 Exp.										
Disassembly										
Cryostat										
EF4,5,6										
V. Vessel										
InV. coil/S.F.										
TF coils										
EF1,2,3,7										
CS1-4										
Div.&FW										
Cryogenics										
Power Supply										
Diagnostics										
NBI & ECRF										
Leak test										
Cold test										
JT-60SA Operation										



: Design, Manufacturing, test, shipment



: Assembly

運動量の釣り合いの式(径方向)

$$E_r = \frac{\nabla p_i}{Z_i e n_i} - V_p B_t + V_t B_p$$

内向き(負)の径電場 => CTR回転

