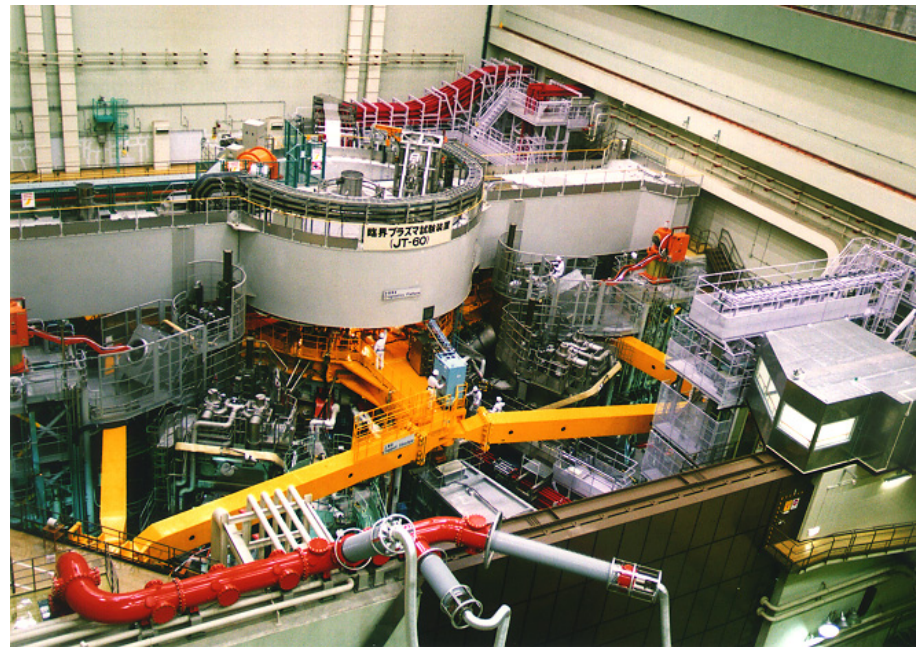




若手科学者によるプラズマ研究会 2004.03.17-19 那珂  
2004.03.17/15:30-16:00 (30min.)

燃焼プラズマに向けた研究の現状と展望

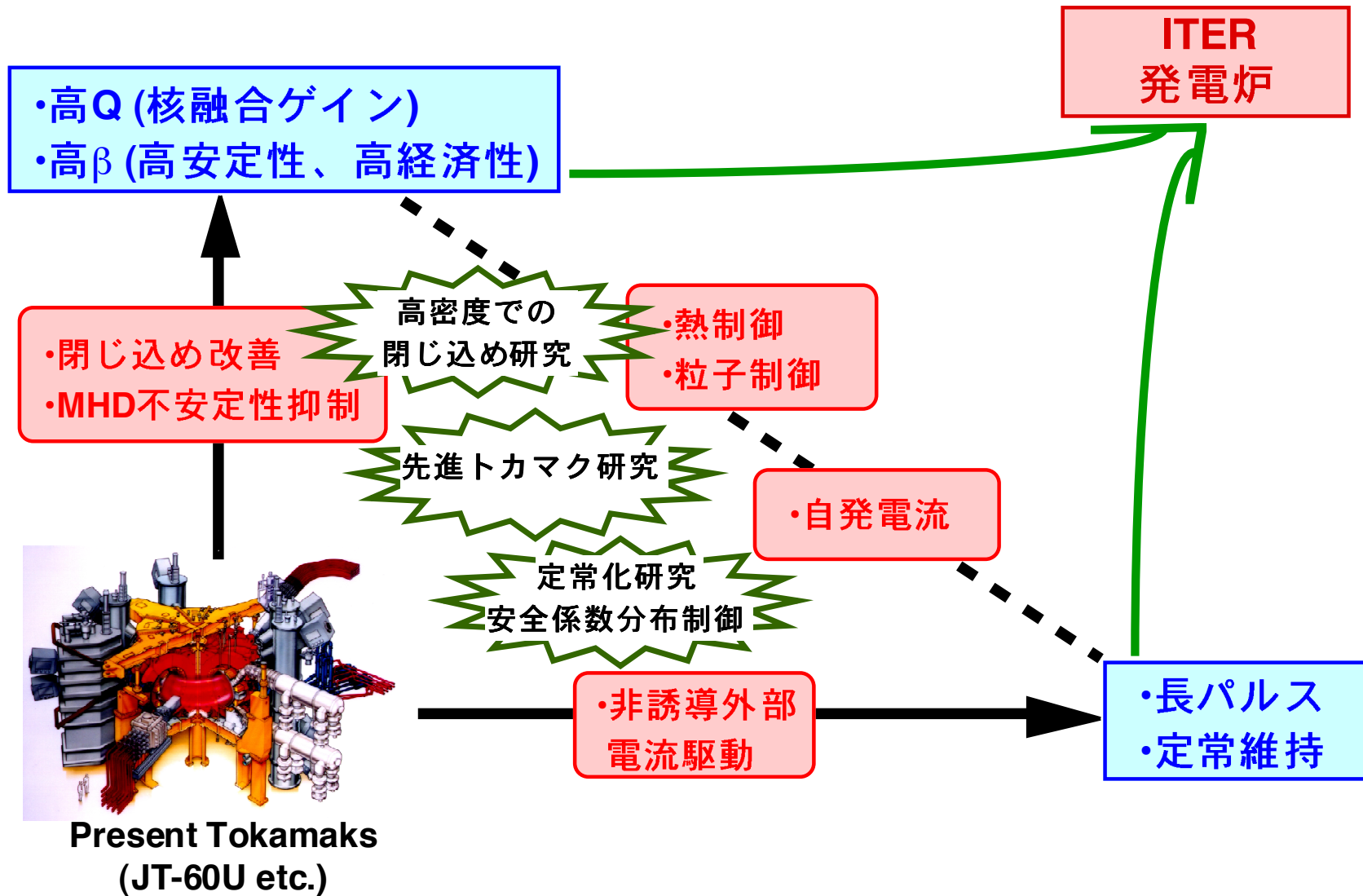
# 燃焼プラズマに向けた JT-60U実験の最近の研究成果



鈴木隆博、JT-60チーム  
原研那珂

# 燃焼プラズマに向けて

JT-60U



# 内容

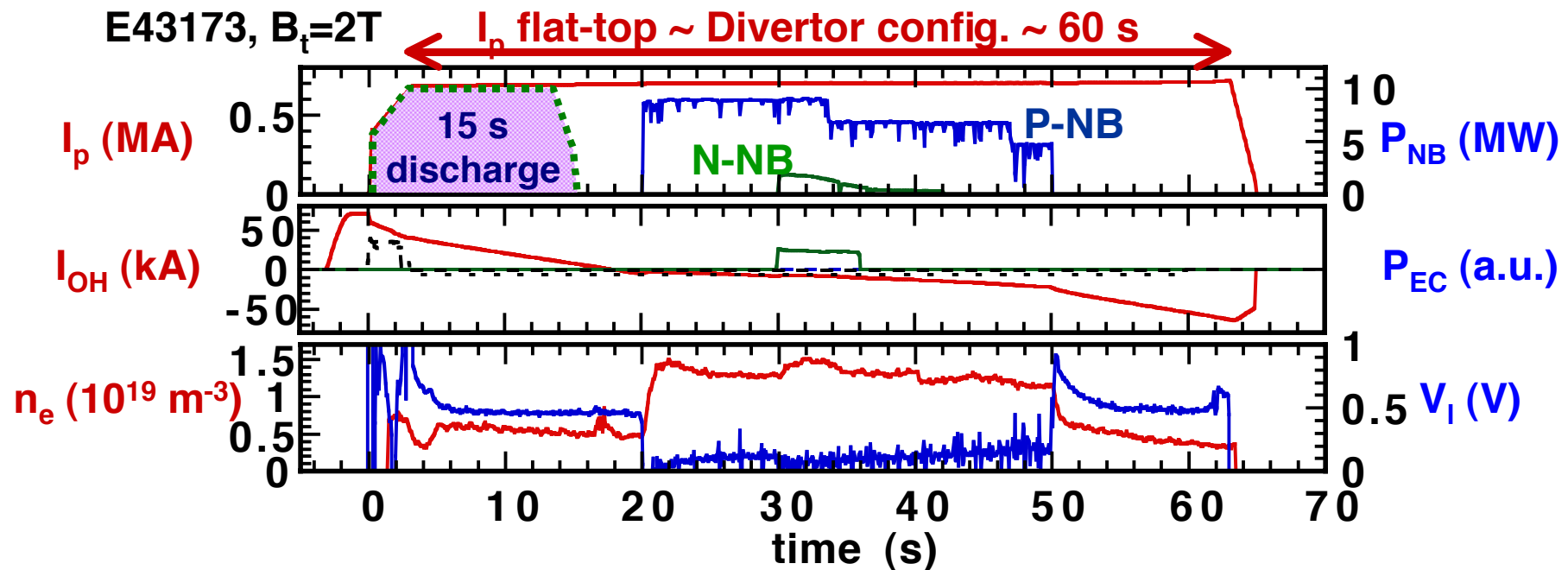
JT-60U

- **長時間化改造による定常化研究**
- **先進トカマク研究**
- **高密度での閉じ込め研究**
- **安全係数分布の実時間制御**

# 長時間化改造により65s放電(従来は15sまで) $I_p=0.7\text{MA}$ 一定でダイバータ配位を60s間維持

長時間化改造

JT-60U



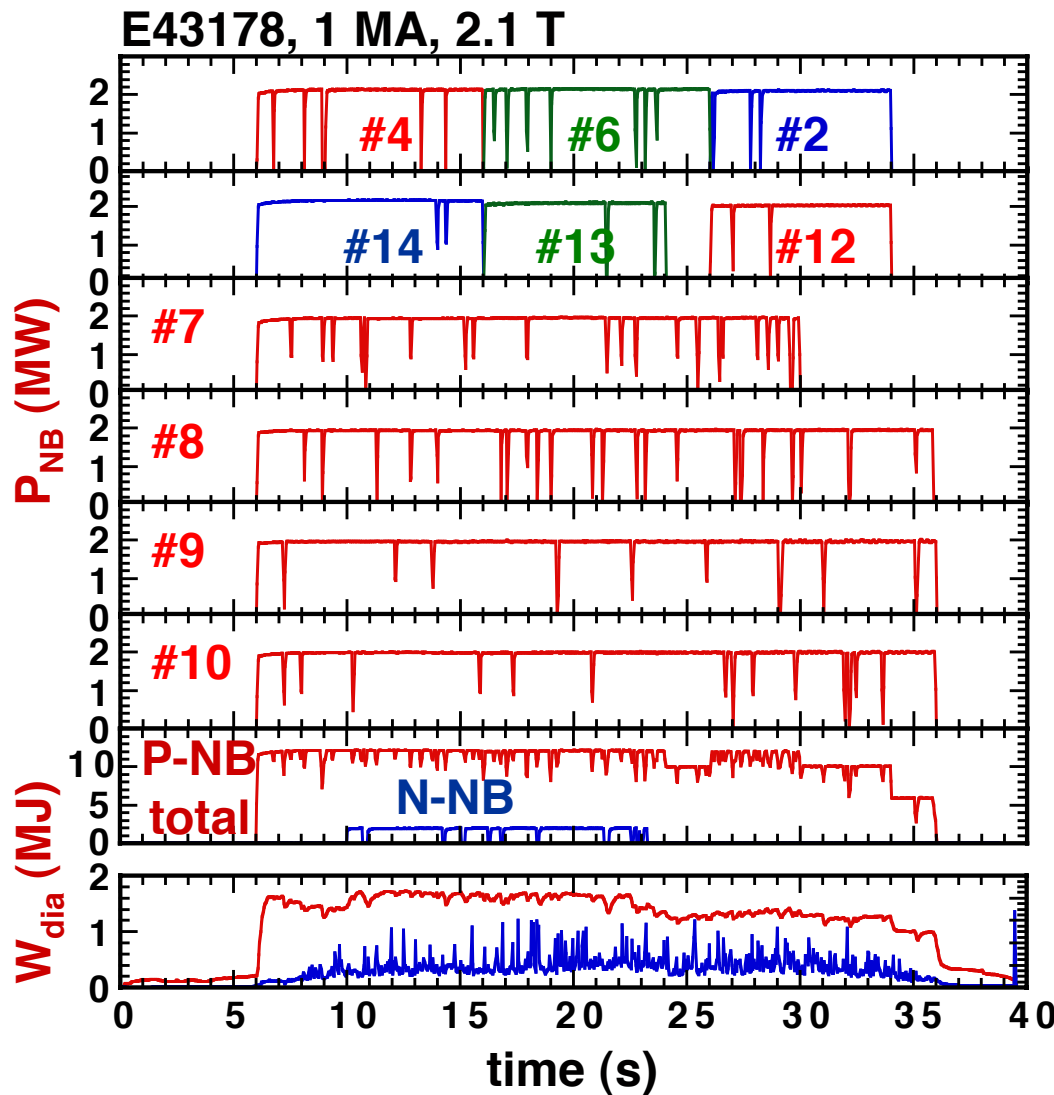
## 制限

- ◆ OH コイル電流  $|I_{OH}| \leq 100\text{kA}$ 
  - ✦ 加熱・電流駆動により周回電圧を下げ、節約
- ◆ コイルの温度上昇(コイル電流<sup>2</sup>x通電時間)
  - ✦ プラズマの磁場・位置・形状を工夫することで節約
- ◆ 電源(MG)から引きだせるエネルギー

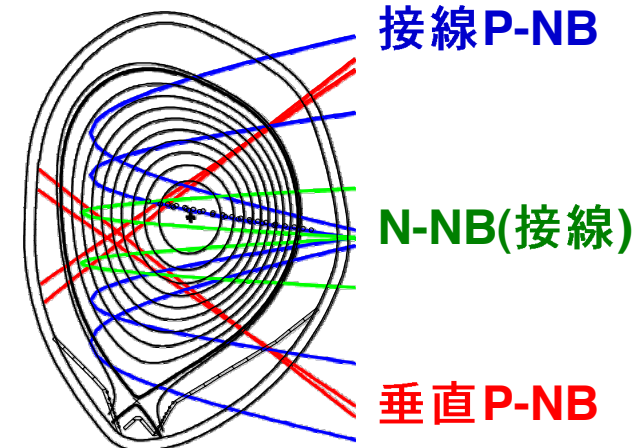
# 制御系の改造により30秒間のNB加熱

長時間化改造

JT-60U



- 正イオン源NB(P-NB)入射:30s
  - ◆ 4接線ユニット(#7-10):30s
  - ◆ 7垂直ユニット: 30秒間のうち任意の10秒間
- 負イオン源NB(N-NB) 入射:30s
  - ◆  $E_{beam}=366\text{keV}$ , 1.7MWで17sまで達成
- 全入射エネルギー358MJ  
(改造前203MJ)

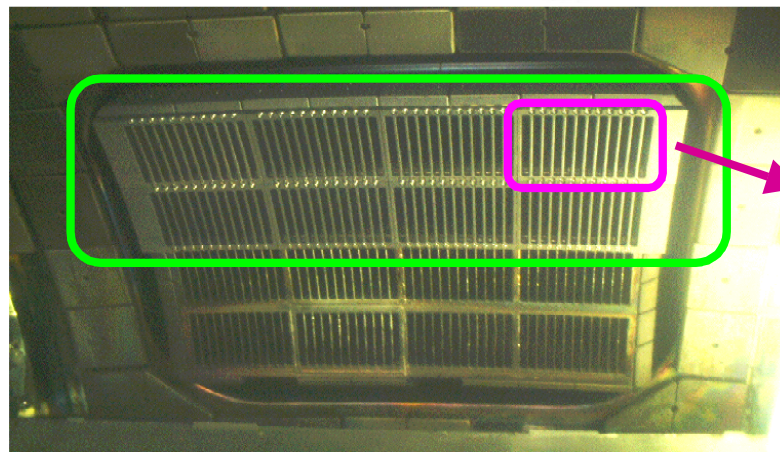




# LHアンテナ耐熱化改造 LHCDは後述の安全係数分布制御でも使用

長時間化改造

JT-60U

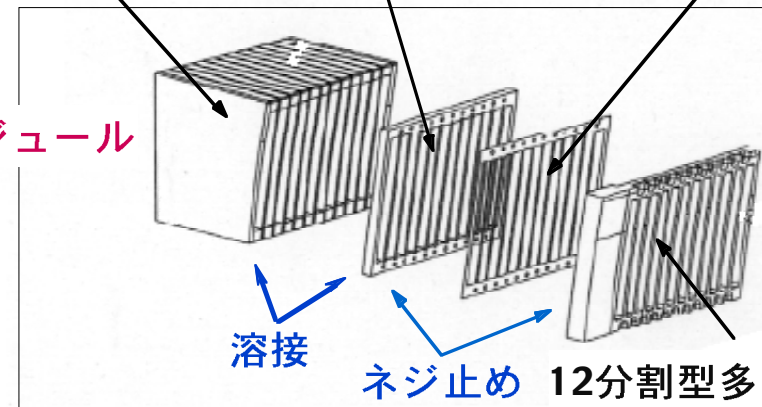


12分割型多分岐アンテナ  
(ステンレス製)

高周波接触子  
(銅製, 約0.2mm厚)

12分割型多分岐ベース  
(ステンレス製, 約10mm厚)

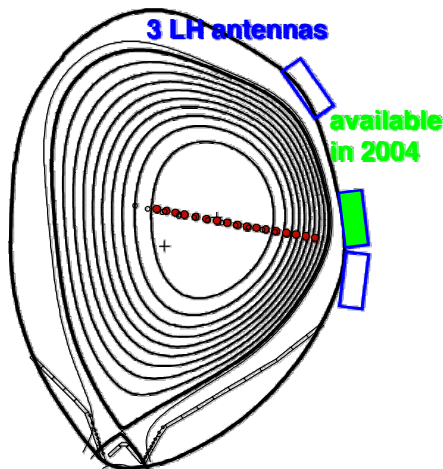
1 モジュール



溶接

ネジ止め

12分割型多分岐先端部  
(炭素繊維材/グラファイト製,  
約15mm厚)

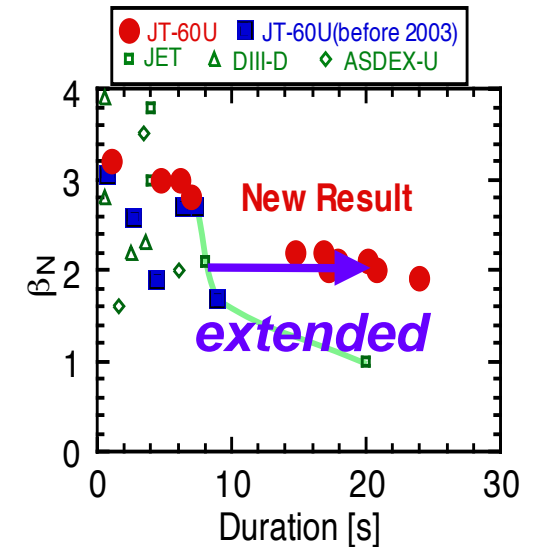
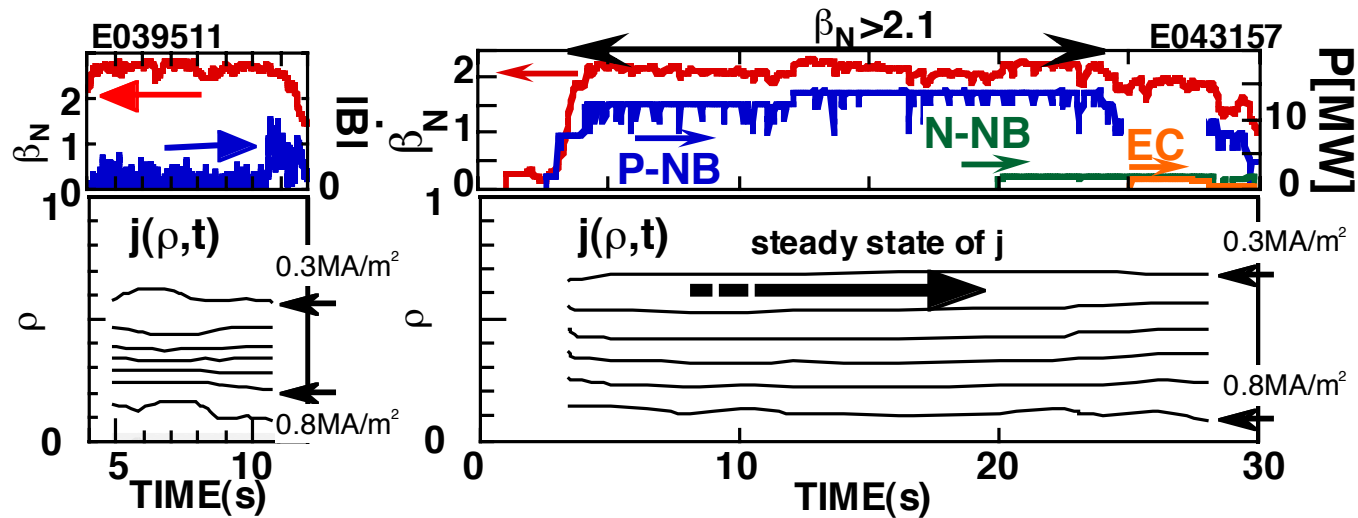


- LH波のプラズマへの結合のためにアンテナはプラズマに近接し(<10cm)、熱負荷大
- 先端部を炭素繊維材/グラファイト化
  - ◆ ダイバータ、第一壁と同じ低Z材
  - ◆ 従来はステンレス製

# $\beta_N=2.1$ を20秒間維持し、電流分布は定常

## 定常化研究

JT-60U



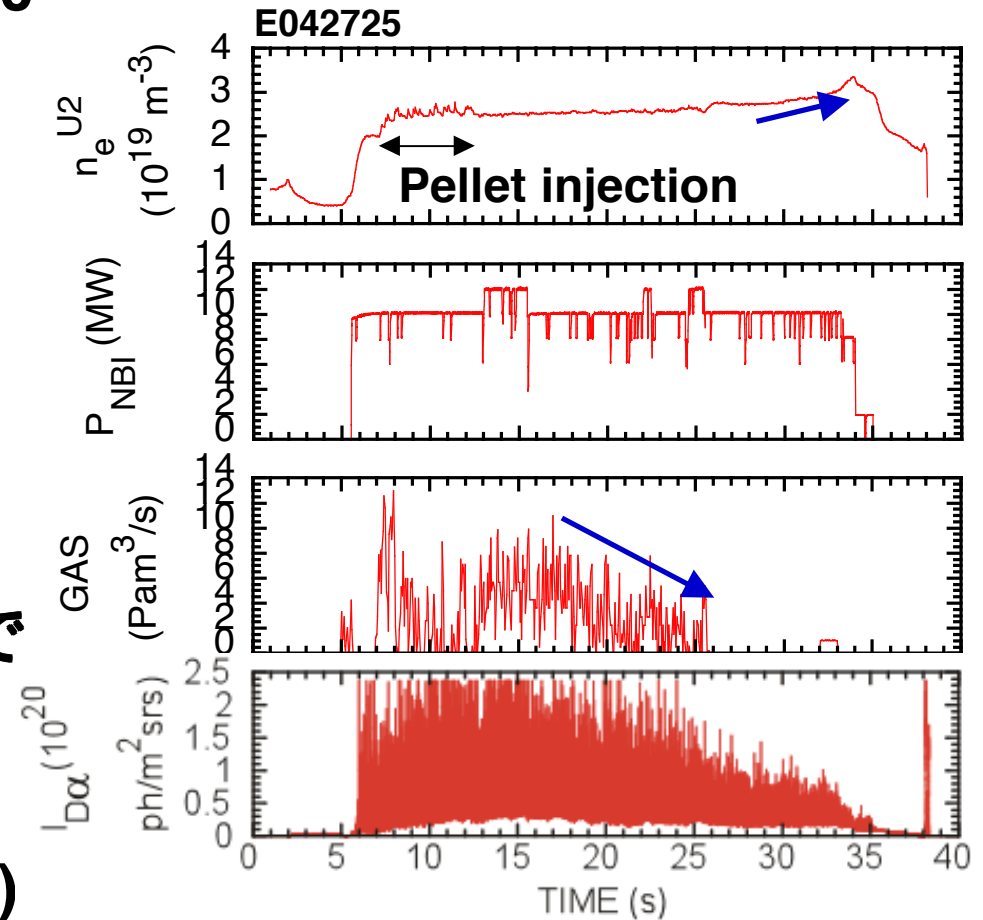
- 電流分布の変化に伴いNTMが発生し得る(E39511)
- $\beta_N=2.1$ の維持開始10秒程度以降、電流分布は定常(E43157)
- ITERの標準運転で想定される $\beta_N=1.9$ より大きな $\beta_N=2.1$ でNTMの発生無く、電流分布と圧力分布の定常状態を得た。
- ただし、 $D_\alpha$ 光強度と電子密度は時間とともに徐々に上昇し、閉じ込めは劣化している。

# ELMy Hモードの30秒間維持 壁状態とリサイクリングが変化

定常化研究

JT-60U

- ELMy Hモードプラズマを30秒間維持
  - ◆  $I_p=1\text{MA}$ ,  $B_T=2.1\text{T}$ ,  
 $P_{\text{NB}}=10\text{-}12\text{MW}$
  - ◆  $n_e=2.5\text{-}3.2\times 10^{19}\text{m}^{-3}$   
 $n_e/n_{\text{GW}}=60\text{-}77\%$
- $n_e$ 一定に保つために必要なガス供給は時間と共に減少
- $t=25\text{s}$ 以降はガス供給なしでも  $n_e$ 上昇
- $n_e$ の上昇と共に  $H_{89\text{P}}=1.4\rightarrow 1.2$  ( $t=9.8\rightarrow 31.4\text{s}$ )



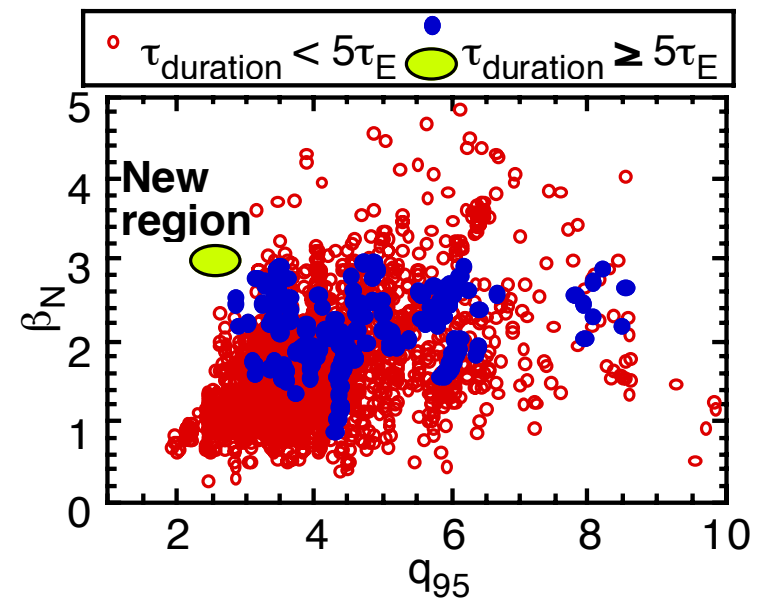
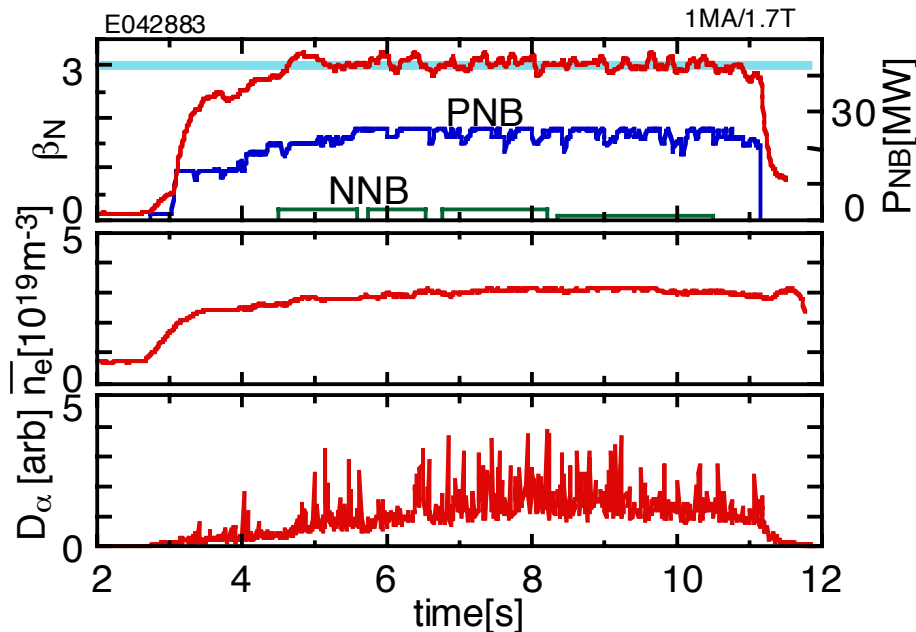
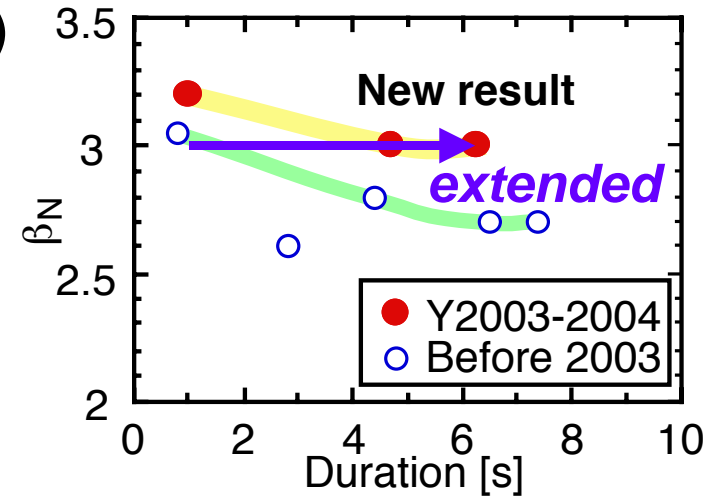


# 高 $\beta_N=3$ の準定常維持(6.2秒間)

先進トカマク研究

JT-60U

- $\beta_N \sim 3$ を準定常維持 6.2秒間( $\sim 2\tau_R$ ,  $\sim 60\tau_E$ )
- 大きな NTM は観測されない
- 低 $q$ 高 $\beta_N$ の新しい運転領域  
 $B_T=1.7T$ ,  $I_p=1.0MA$ ,  $\delta \sim 0.42$ ,  $q_{95}=2.8-2.2$ ,  
 $HH_{98y2}=0.7$ ,  $n_e/n_{GW} \sim 0.6$ ,  $\beta_N H_{89}/q_{95}^2 \sim 0.75$

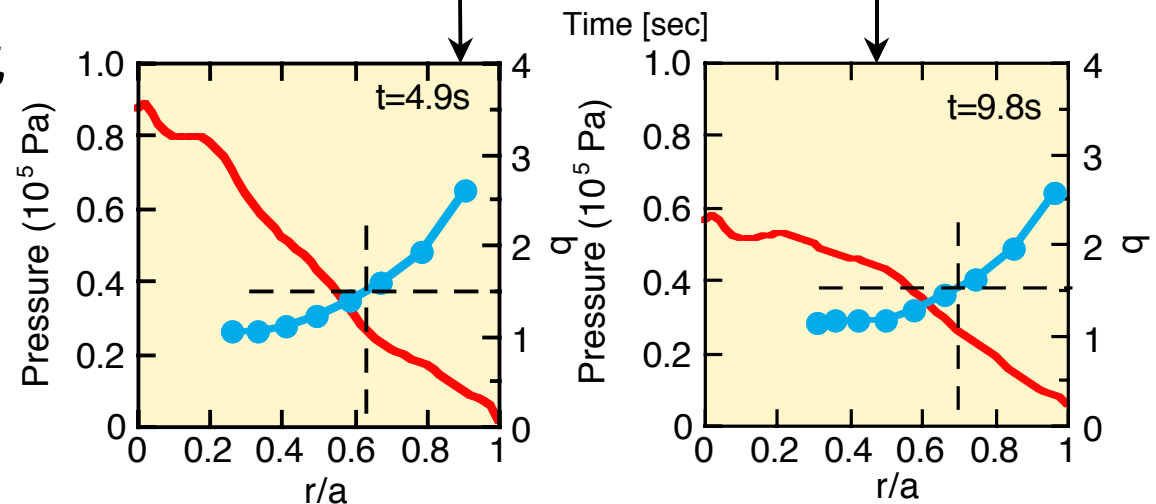
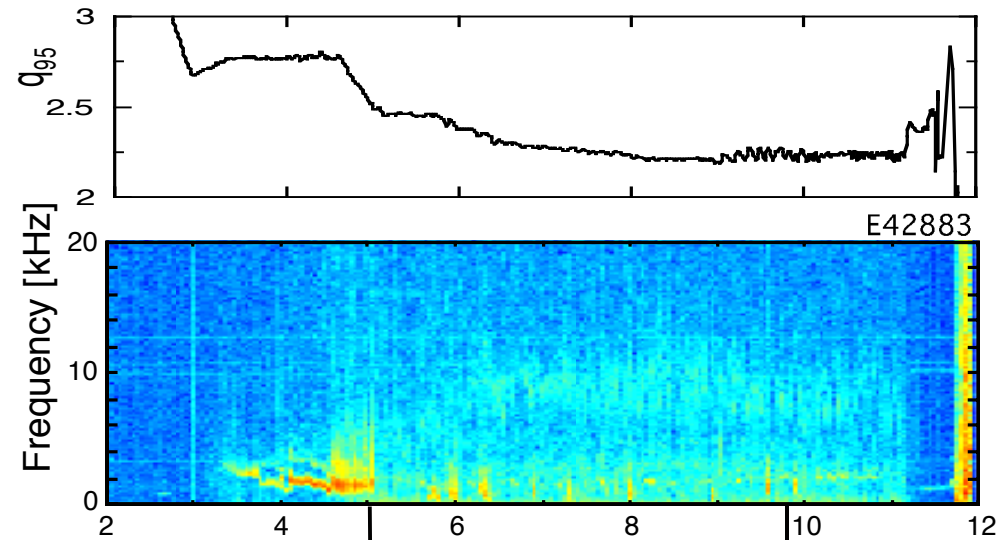
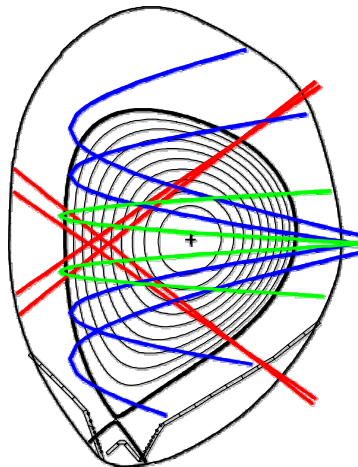


# 低安全係数と加熱分布を広くすることで $\beta_N=3$ を準定常維持

先進トカマク研究

JT-60U

- $q_{95}$ の低下に伴い $m/n=3/2$ ,  $2/1$ の有理面は圧力勾配の小さな小半径外側に移動
- $q_{95}$ の低下は垂直位置 $Z_{ax}$ の低下による
- $Z_{ax}$ の低下によりNBがoff-axis $\rightarrow$ broadな加熱分布と圧力分布
- $t=5s$ 以降NTMは安定化



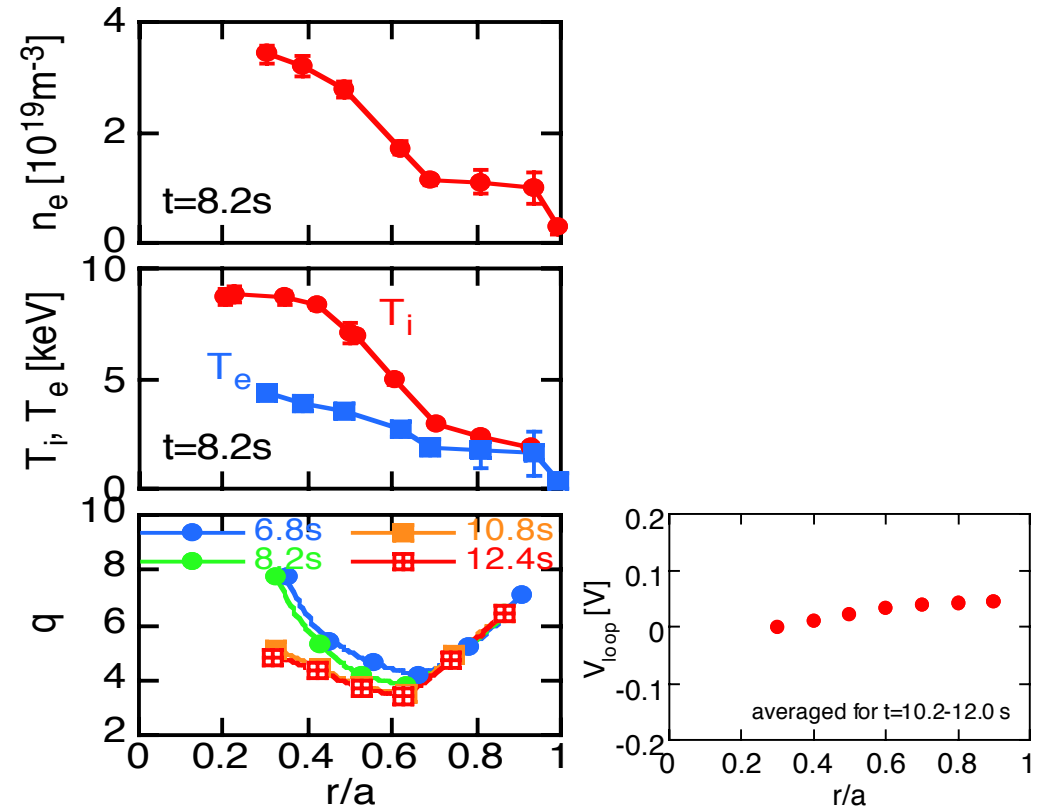
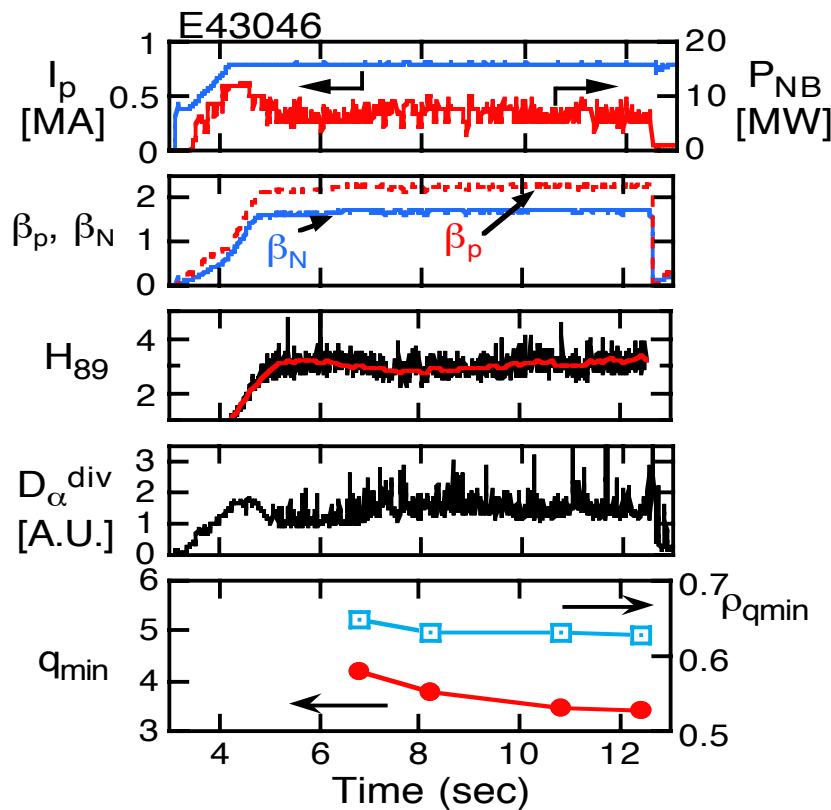
# 自発電流率75%のELMy Hモードプラズマを7.4秒間準定常維持 (非誘導電流率95%)

先進トカマク研究

JT-60U

q分布は負磁気シアでほぼ定常に達する ( $7.4\text{s} \sim 2\tau_R, \sim 13\tau_E$ )

$f_{BS} \sim 75\%$ ,  $f_{BD} \sim 20\%$ ,  $f_{CD} \sim 95\%$ ,  $B_T = 3.4\text{T}$ ,  $I_p = 0.8\text{MA}$ ,  $\delta \sim 0.42$ ,  $q_{95} = 8.6$ ,  
 $\beta_N \sim 1.7$ ,  $\beta_p \sim 2.25$ ,  $n_e/n_{GW} \sim 0.55$ ,  $H_{89p} \sim 3.0$ ,  $HH_{98y2} \sim 1.7$ .

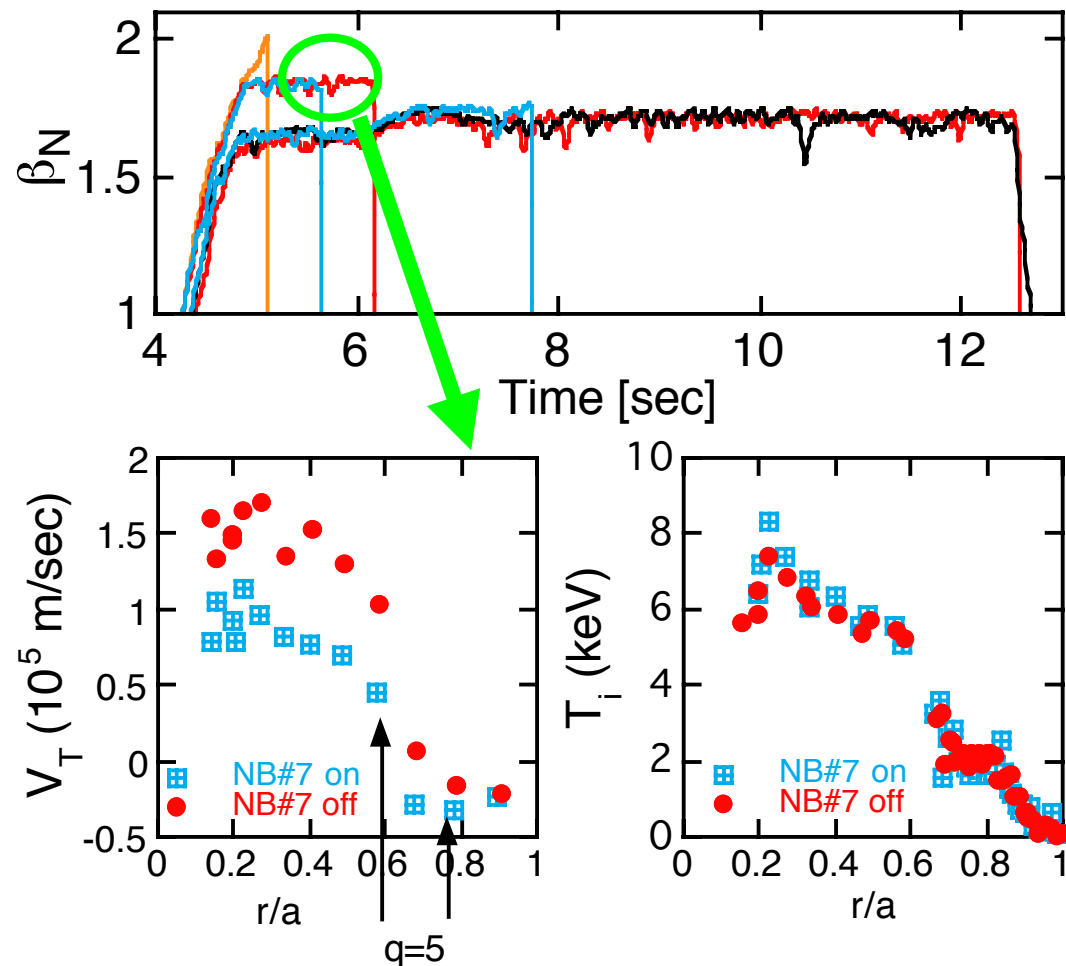


# 蓄積エネルギーの帰還制御とトロイダル回転の調整により自発電流率75%の準定常維持

先進トカマク研究

JT-60U

- 蓄積エネルギーの帰還制御によりディスラプションを回避して高 $\beta$ を維持
  - イオン温度分布は同じだが、トロイダル回転を調整することでディスラプションを回避することができた。
- ctr-NBを停止してITB近傍のトロイダル回転を調整



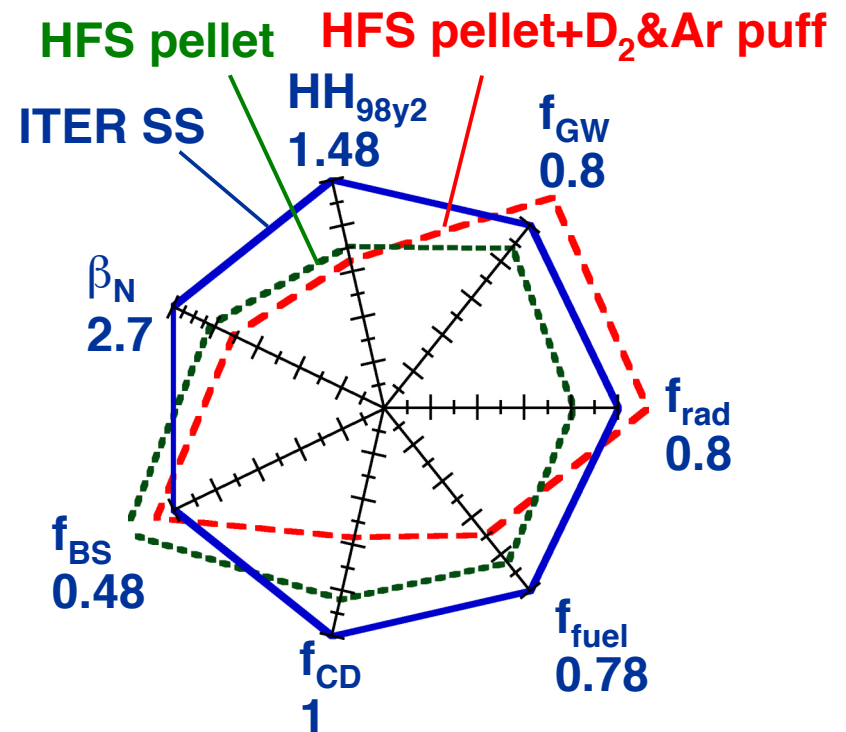
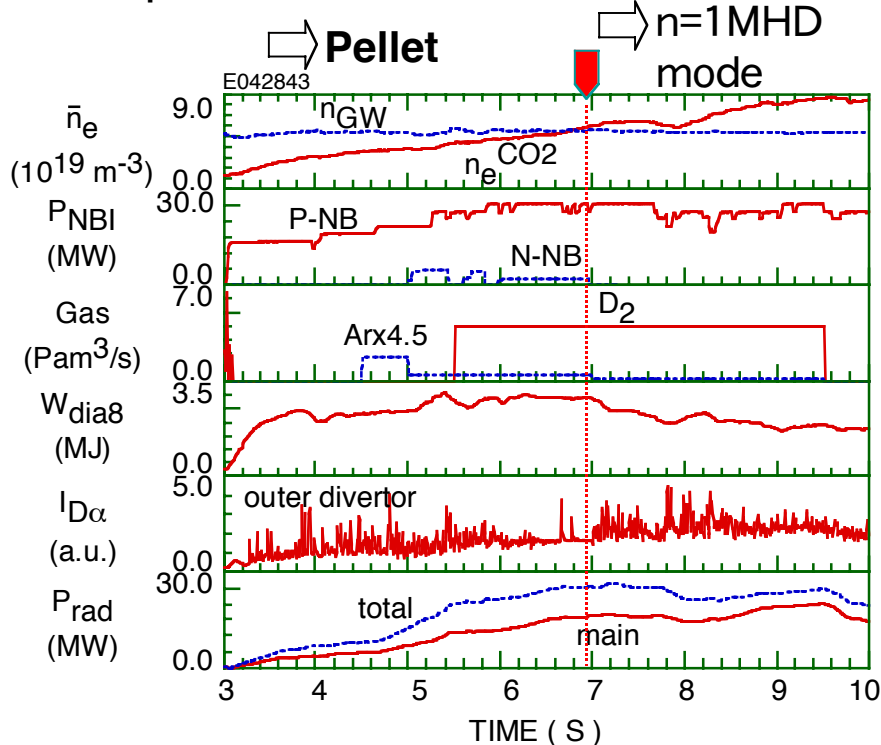
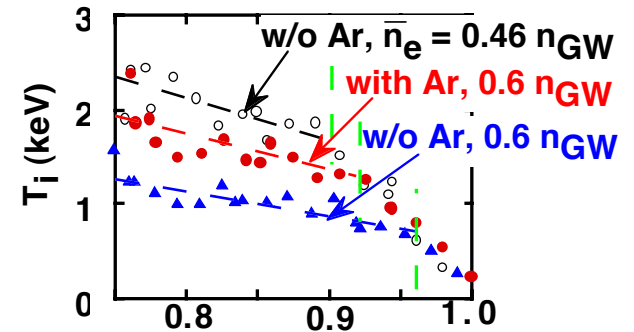
# 高閉じ込め ( $HH_{98y2}=0.96$ )、高放射損失率 ( $f_{rad}\sim 0.9$ )、高密度 ( $f_{GW}=0.92$ )を同時に達成

## 高密度化研究

JT-60U

- 高 $\beta_p$  ELMy Hモード
- 強磁場側ペレットとAr&D<sub>2</sub>ガスパフ
- t=6-7sでは小振幅ELM
- N-NB停止後のt=7.1sにおける小コラプス以降に発生したn=1モードによって閉じ込めは劣化

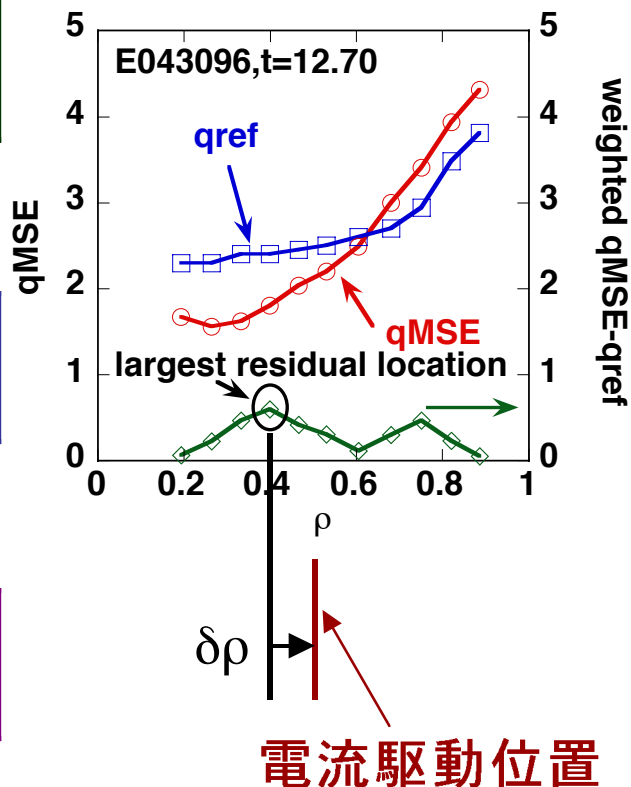
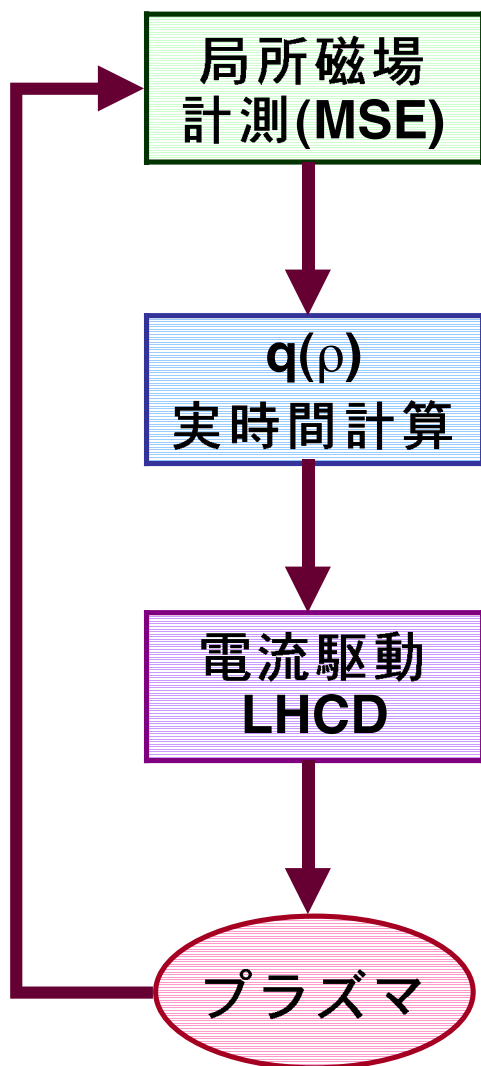
$I_p=1.0$  MA,  $B_T=3.6$  T,  $\delta=0.37$ ,  $q_{95}=6.1$



# MSE計測とLH電流駆動により安全係数分布 を実時間制御

q分布実時間制御

JT-60U



If  $q_{MSE} - q_{ref} < 0$ , then  $\delta\rho > 0$ .  
 If  $q_{MSE} - q_{ref} > 0$ , then  $\delta\rho < 0$ .

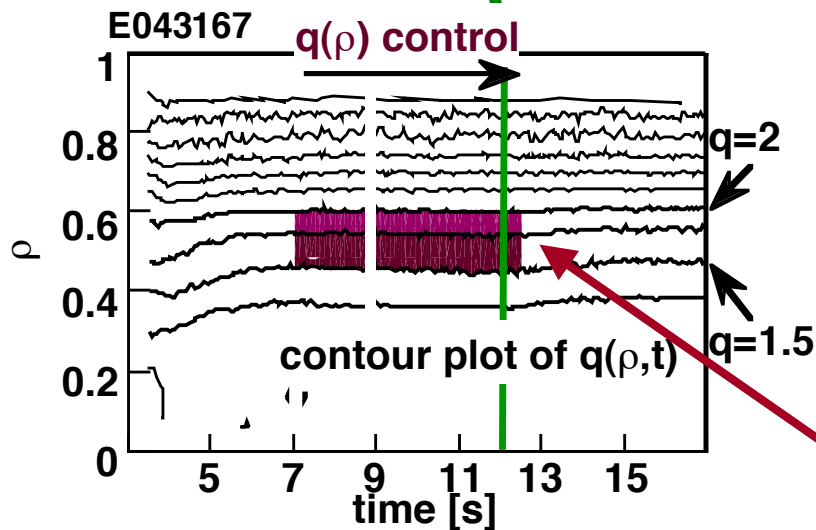
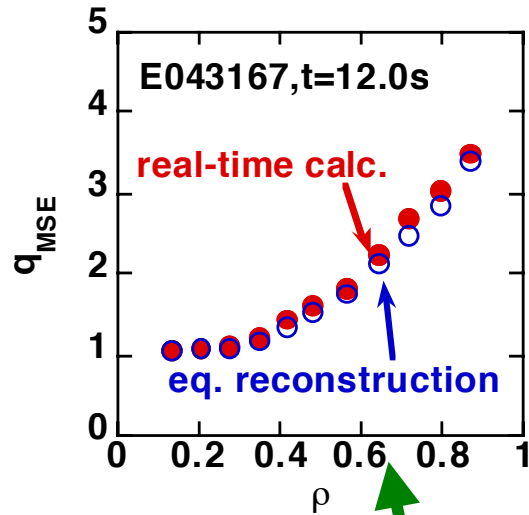
- 実時間で重み付き残差  $(q_{MSE}(\rho) - q_{ref}(\rho))w(\rho)$  を計算
  - $q_{MSE}(\rho)$ : 実時間評価q分布
  - $q_{ref}(\rho)$ : 目標q分布
  - $w(\rho)$ : 重み
- 残差  $|q_{MSE} - q_{ref}|w$  の最大位置を常に制御する
- 例えば  $q_{MSE} < q_{ref}$  なら  $q_{MSE}$  を大きくするために  $\delta\rho$  だけ外側を電流駆動するような  $N_{//}$  を LHシステムに指令
  - $\delta\rho \sim 0.1$ : 入力パラメータ
- LH波の  $N_{//}$  と LHCD位置の関係は実験によるデータベースから決定



# 実時間制御により安全係数分布が変化

JT-60U

## q分布実時間制御



- 実時間計算した $q(\rho)$ はMSEを考慮した平衡計算と良く一致
- $q(\rho)$ 制御前は電流が浸込む
- $q(\rho)$ 制御開始後、電流の浸込みが止まり、 $\rho < 0.5$ の $q$ 上昇
  - ◆ LHアンテナのコンディショニング最中の実験のため入射パワー0.6MW
- $q(\rho)$ 制御停止後、電流は再び浸込み始める

# まとめ

JT-60U

- **長時間化改造により達成**
  - ◆ 60秒間のダイバータ放電(65秒放電)
  - ◆ 30秒間のHモード放電
  - ◆  $\beta_N \sim 2.1$ のHモードプラズマを20秒間維持
- **高 $\beta_N$ ,  $f_{BS}$ の準定常維持**
  - ◆  $\beta_N \sim 3$ を6.2秒間 ( $\sim 2\tau_R$ ,  $\sim 60\tau_E$ )
  - ◆ 自発電流率 $f_{BS} \sim 75\%$ (非誘導電流駆動率95%)を7.4秒間(負磁気シアELMy Hモード)
- **高密度での閉じ込め改善**
  - ◆  $HH_{98y2} = 0.96$ ,  $f_{rad} \sim 0.9$ ,  $f_{GW} = 0.92$  (高 $\beta_p$  ELMy Hモード)
- **実時間安全係数分布制御**
  - ◆ 安全係数分布の実時間評価とLHCDによる局所電流駆動によりq分布変化