

JT-60U負磁気シアプラズマにおける ディスラプションにいたるMHD不安定性

武智学、石井康友、小関隆久、鈴木隆博、諫山明彦、
大山直幸、藤田 隆明、JT-60チーム
原研那珂

背景

JT-60U

負磁気シア (RS) プラズマ

ITBを伴う高閉じ込め+高自発電流割合 → ITERの先進運転モードとして有望

JT-60Uでは非常に高い閉込めを達成 (QDT>1)

が、 β_N が低い (< 低I)

しかし、電流ホールありでは高 β_N (~5)化が可能 (T.Ozeki, et al. eps (2003))

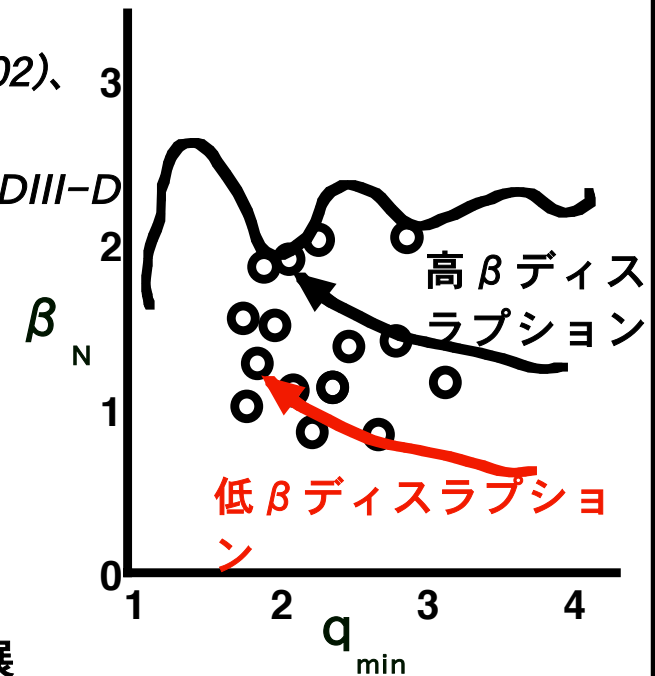
強いITBを伴うRS配位放電はディスラプションに至ることが非常に多い。

$q_{min} \sim 2$ 、 $\beta_n \sim 2$ → 確定。n=1理想キंकモードの安定性限界

$q_{min} > 2$ 、 $\beta_n \ll 2$ → 確定していない

1. ダブルテアリングモード : Y. Ishii et al. PRL(2002)、
S. Takeji et al. (2000)、TFTR
2. 抵抗性交換モード : S. Takeji et al. NF(2002)、DIII-D

q_{min} やITB付近のMHD不安定性が重要
どの不安定性がトリガーとなるのか?



計測の進展

1. 磁気プローブ

高ポロイダルモード数、高周波数

2. MSEによる安全係数分布計測

多チャンネル化による分解能の改善、再構成手法の進展

目的

JT-60U

ITBの強い高性能RS放電（高核融合出力化（高 Q ）実験）でのディスラプション時のプラズマの特性を調べ分類し、特に低 β 時のディスラプション^{DT}の原因となる不安定性を同定する。さらに回避方法を探索し、高 β のパスを示す。

――>ITERの先進運転の放電シナリオの構築

CSなし立ち上げ（高ブートストラップ電流割合）等

――>JT-60UでのRS実験の歩留まりを良くする

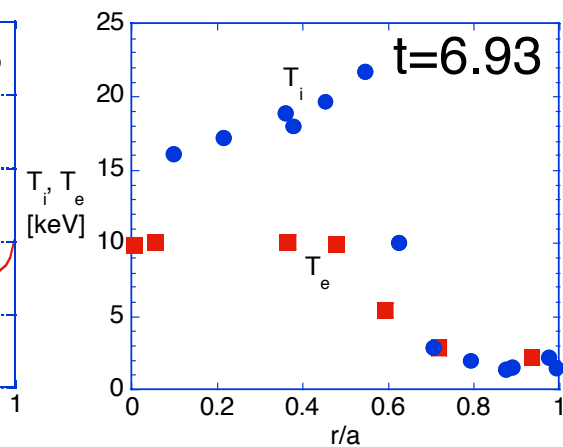
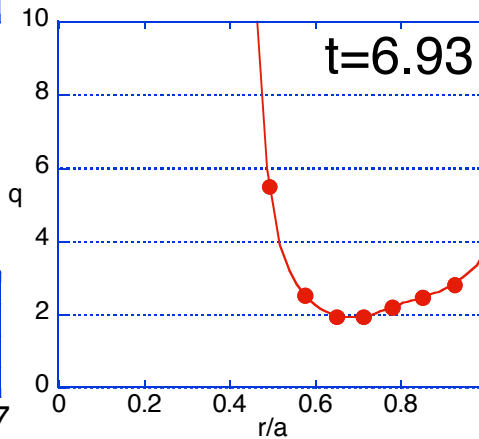
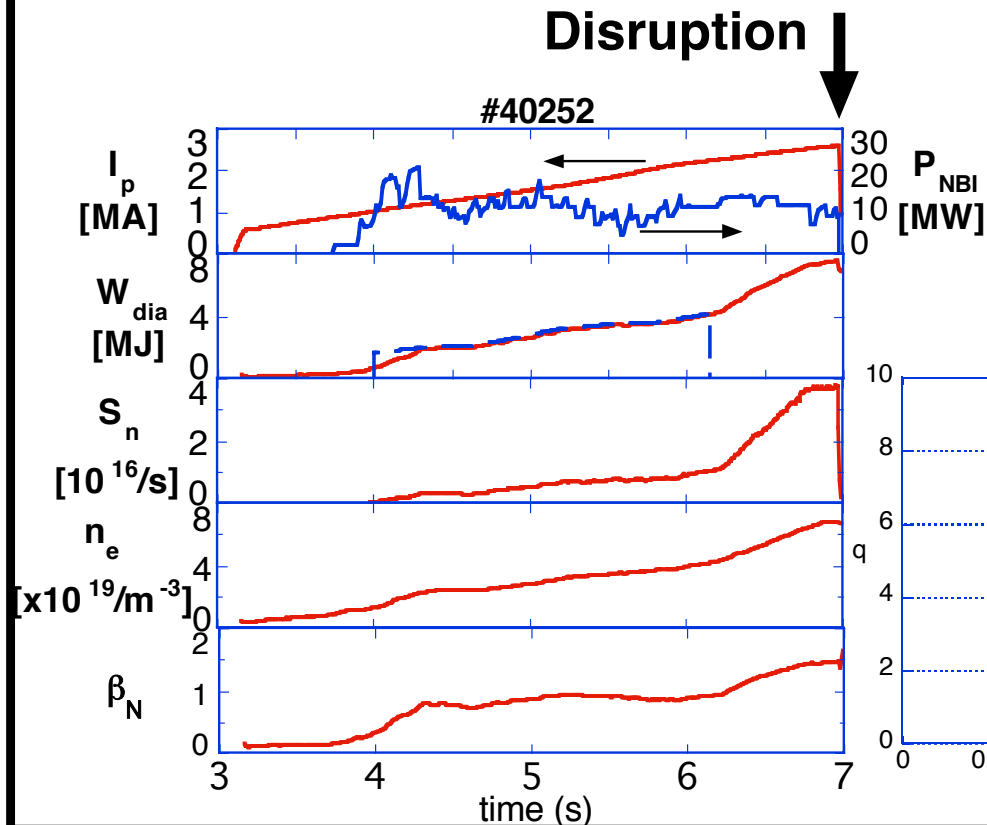
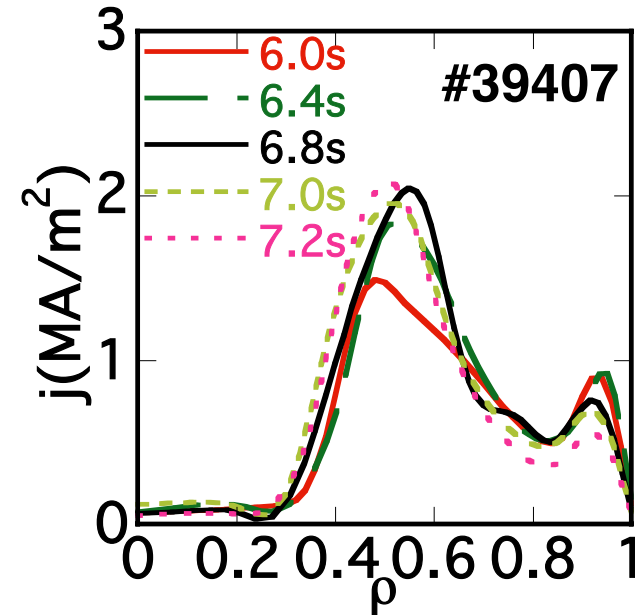
強いITBを伴うRS配位放電を用いて高性能プラズマを得るために現在、以下のような工夫をしている

1. $q_{\min} = 2$ でおこると考えられているディスラプション前で勝負
2. ITBの圧力勾配を小さくしてディスラプションを回避
加熱パワー制御、回転制御、周辺加熱、Hモード化等
3. プラズマ電流を大きくして閉じ込めを良くする

負磁気シア配位放電の典型的なプラズマパラメータ

JT-60U

#40252, $I_p = 2.6\text{MA}$ (1.5-2.6), $B_t = 4.05\text{T}$
 (3.73-4.05), $Q_{DT} \sim 1$ ($< \sim 1.25$),
 $T_i(0) \sim 20\text{keV}$, $\beta_n \sim 1.5$, $H \sim 2.9$



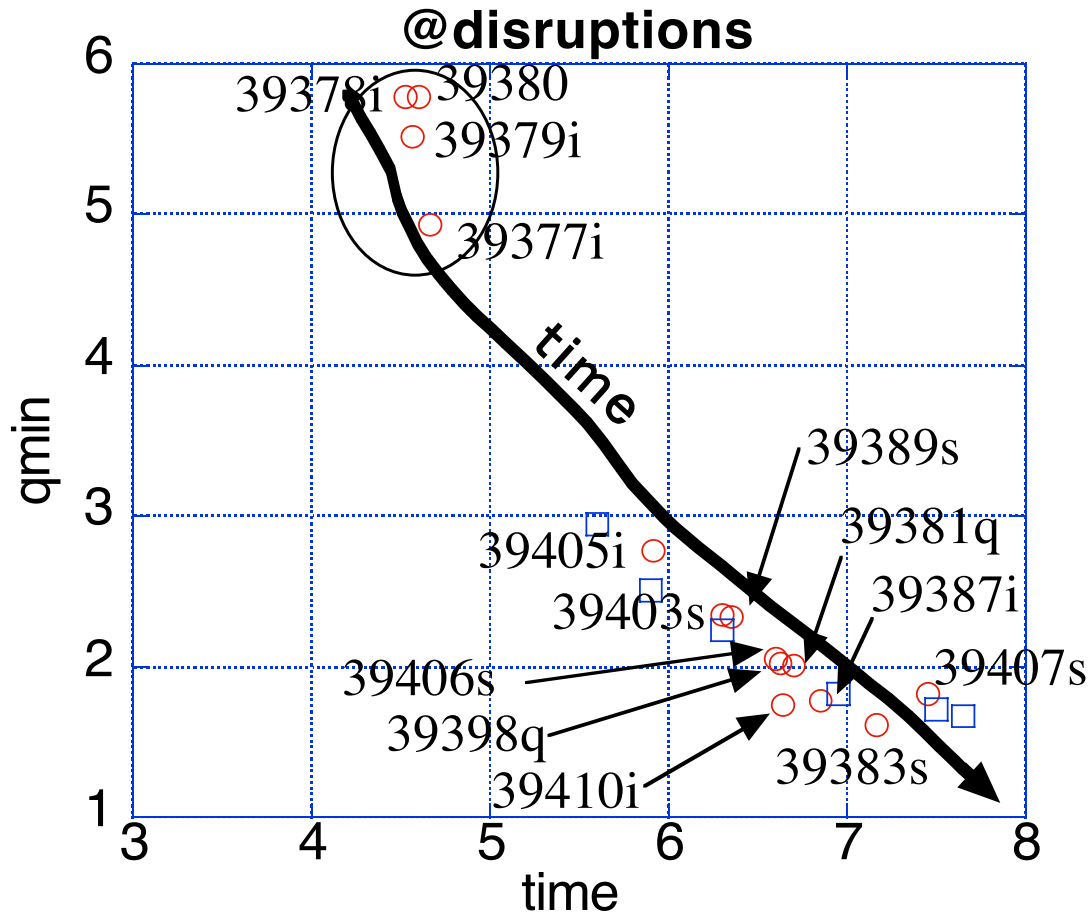
高閉じ込めRS放電ディスラプションの特徴

JT-60U

1. 様々な前兆の観測
高周波モード、低周波モードの成長、成長なし
2. 磁気プローブで $m < 4$ の飽和したモードが全く観測されない
3. 到達しうるプラズマ電流の最大値が存在する
4. 一定の時刻（例 $t \sim 6s$ ）で多くおこる。
5. 蓄積エネルギーが低い場合や一定もしくは低下中にもおきる。

ディスラプション時の様々な揺動の観測

JT-60U



同様な放電において様々な時間帯および安全係数でディスラプションにいたる。
ディスラプションの前の様々な揺動の観測。
->様々な要因？

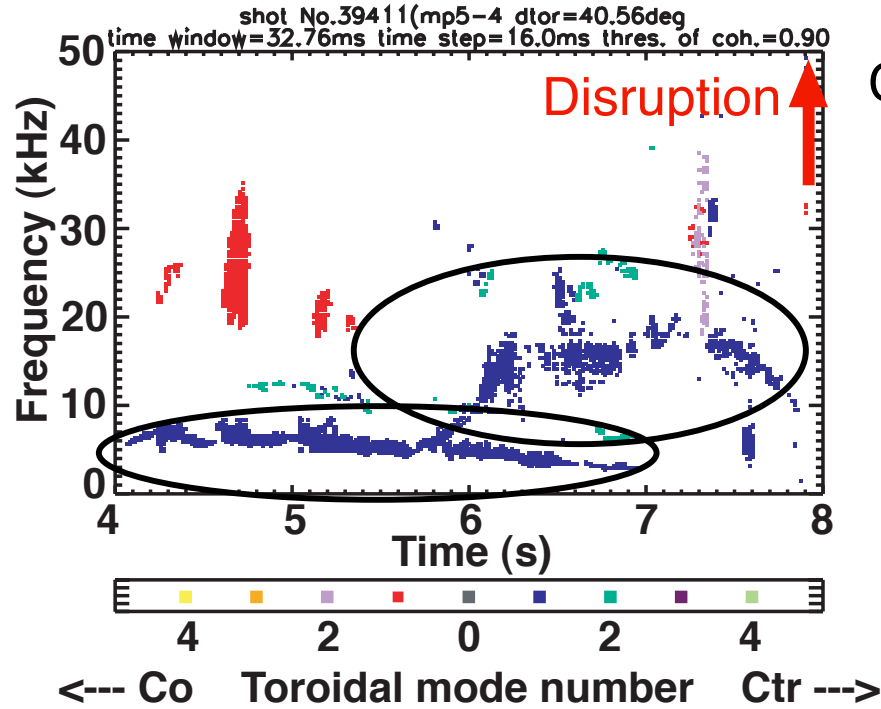
s : 低い周波数($f \sim 5\text{kHz}$)の揺動の成長を観測

i : 高い周波数($f \sim 20\text{kHz}$)の揺動の成長を観測

q : 揺動の成長は未観測

負磁気シア配位で観測されるMHD不安定性の典型例 (低周波モードと高周波モード)

JT-60U



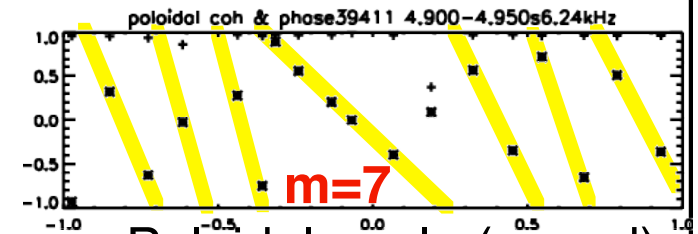
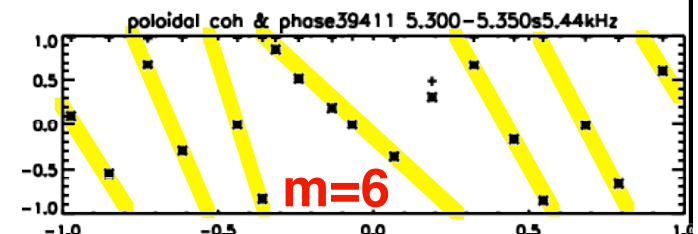
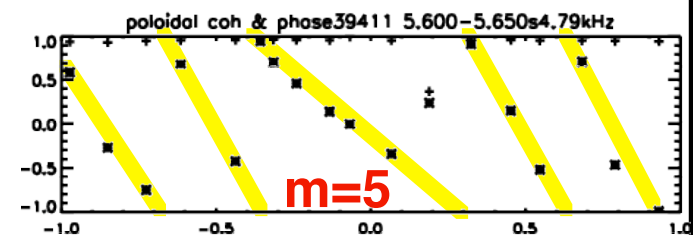
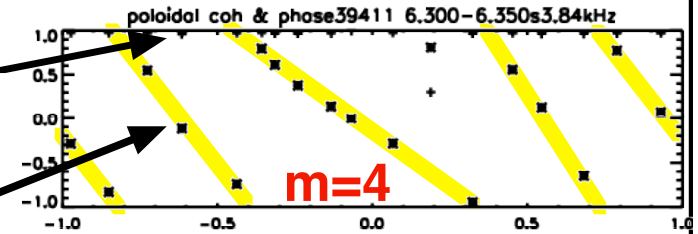
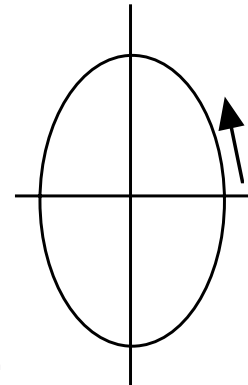
n=1 (counter)モードをおもに観測。

低周波数 (~5kHz) 低周波モード
高周波数 (10~40kHz) 高周波モード

明確にポロイダルモード数を決定 ($m \leq 7$)
 $m=2, 3$ は非観測

Coherence

Phase



Poloidal angle ($x\pi$ rad)

HFS

LFS

HFS

低周波モードのモード数

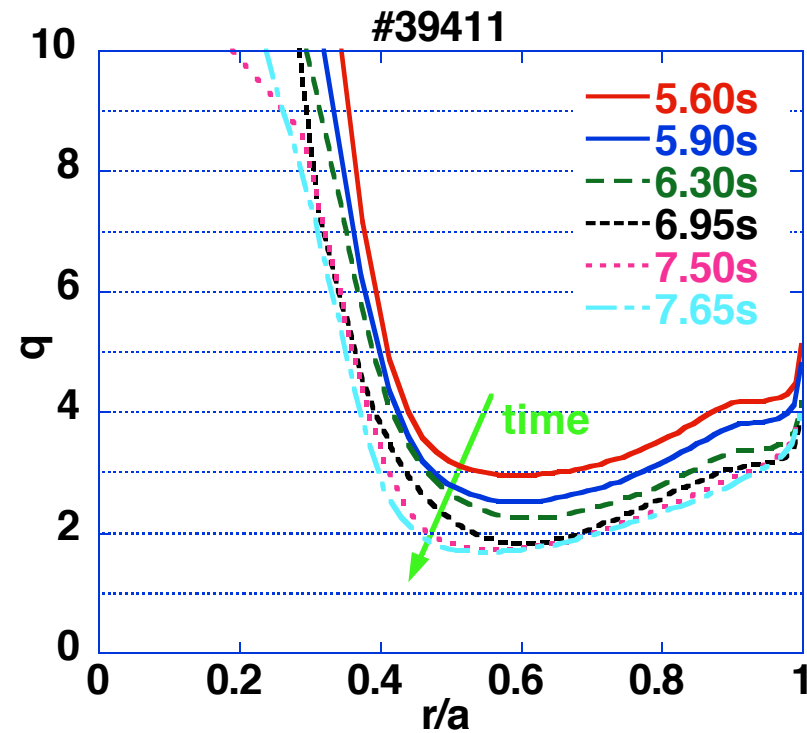
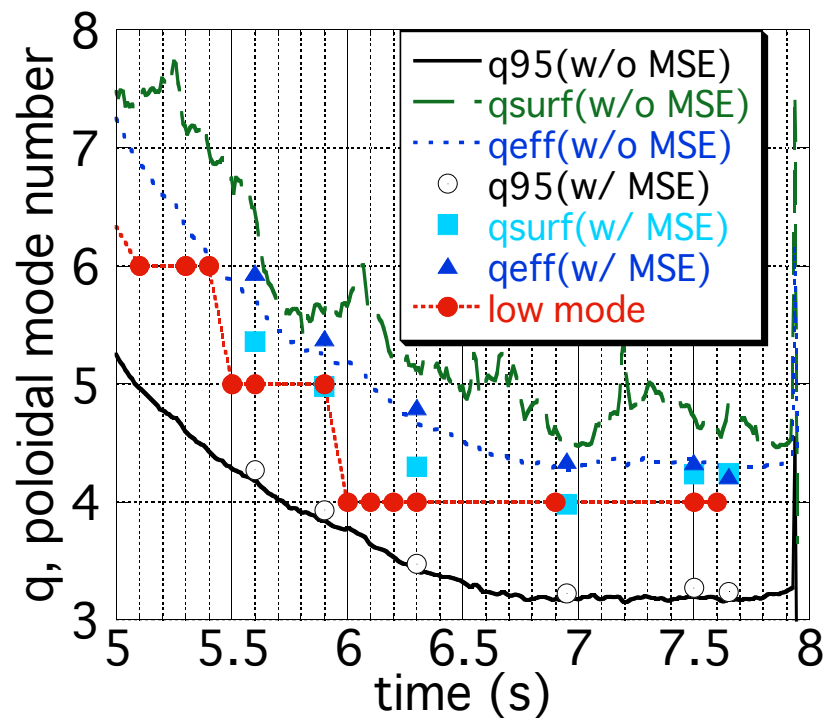
JT-60U

トロイダルモード数 $n=1$

ポロイダルモード数 プラズマ表面の安全係数に対応して変化する
(MSEを用いたqsurfと最も近い)

外部キंकモード? *T-3* (L. A. Artimovich, *Nucl. Fusion*, 1972!)

抵抗性テアリングモード?

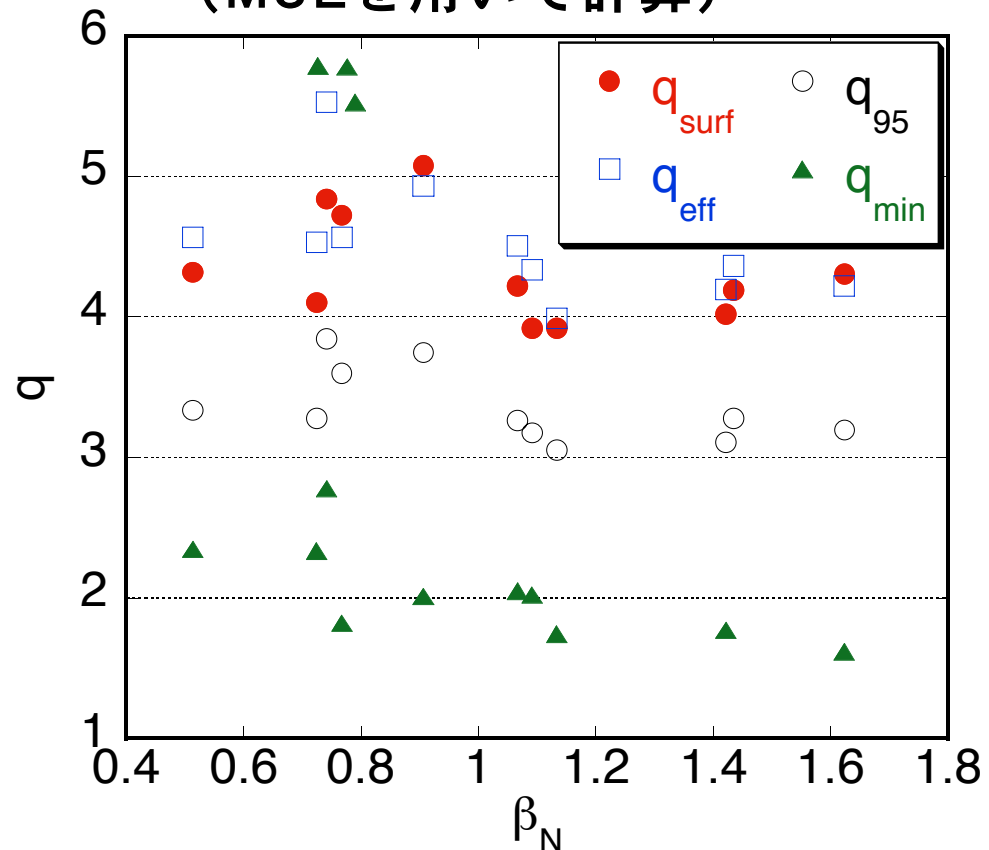


到達しうるプラズマ電流の最大値が存在 (続) ディスラプション時の β と安全係数

JT-60U

q_{min} は有意に2より小さい。
 q_{surf} が有意には4を切れず
 ほぼ4でディスラプション
 を起こす。小さい β でも回
 避できない。また、
 $m/n=3/1$ の飽和した低周波
 モードは全く観測されな
 い。さらに q_{surf} は低周波
 モードのモード数に関連す
 る。
 → $m/n=4/1 \rightarrow m/n=3/1$
 モードに変化時にディスラ
 プションがおきる？

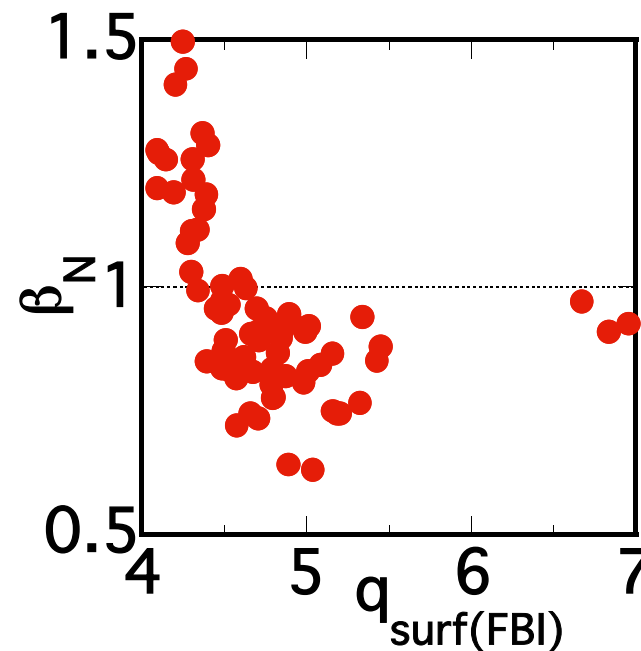
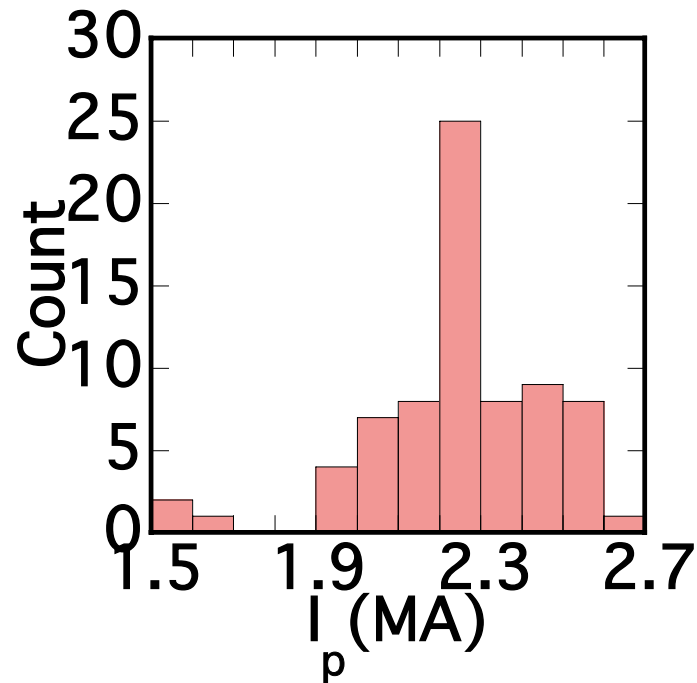
ディスラプション時の β_N と q
 (MSEを用いて計算)



同様な電流（例 $I_p=2.2\text{MA}@B_t=4.05\text{T}$ ）で ディスラプションが多く発生する

JT-60U

$m=5 \rightarrow 4$ に変化するところでディスラプションにいたる場合が多い。
むしろ β が低い場合や低下中の場合が多い。
ディスラプションしない場合もある。



RSプラズマのDisruptionを説明する新たなモデルの提唱

JT-60U

「プラズマ表面の安全係数によって決まる表面のモードに対応する負磁気シア領域の有理面の位置の圧力勾配が閾値を超えた場合不安定性が増大しディスラプションに至る。」

このモデルを用いるとディスラプションに至るプロセスは対応する負磁気シア領域の有理面とITBの位置関係がディスクリートに変わる場合と有理面の圧力勾配が連続的にかわる場合に分けられる。

(1) 負磁気シア領域の安全係数とITBの位置が ディスクリートになる場合

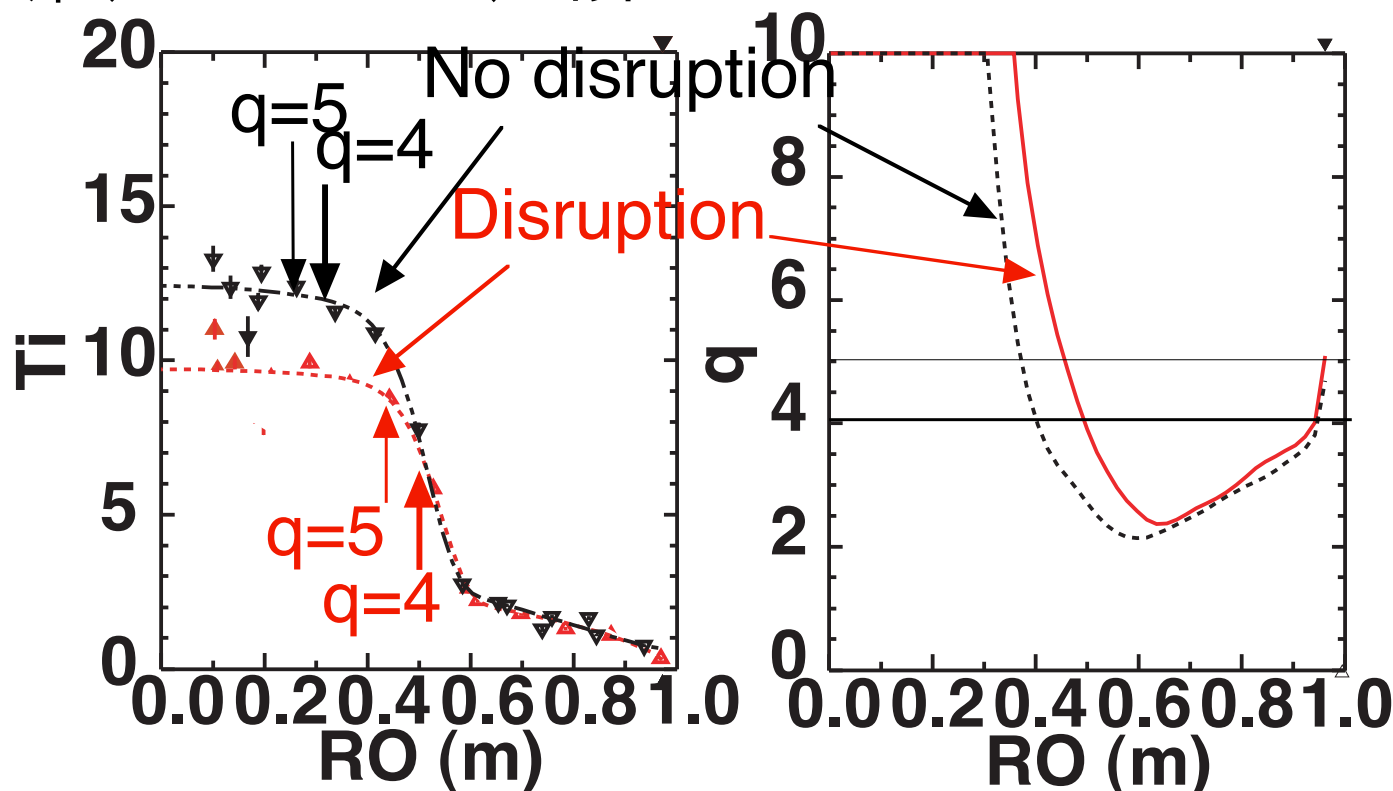
JT-60U

表面のモードは表面の安全係数の変化によりディスクリートに変化

→ 対応する正磁気シア領域の有理面の位置もディスクリートに変化

m=4からm=3に変わる場合はもはやITB面をさけることができないため
すべての場合においてディスラプションに至る。

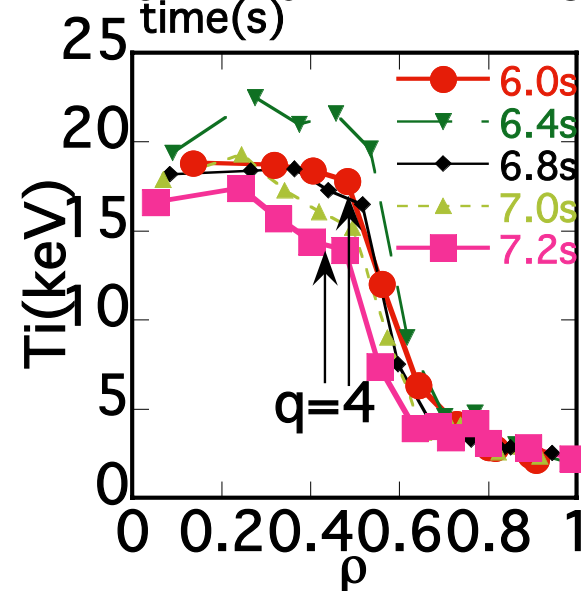
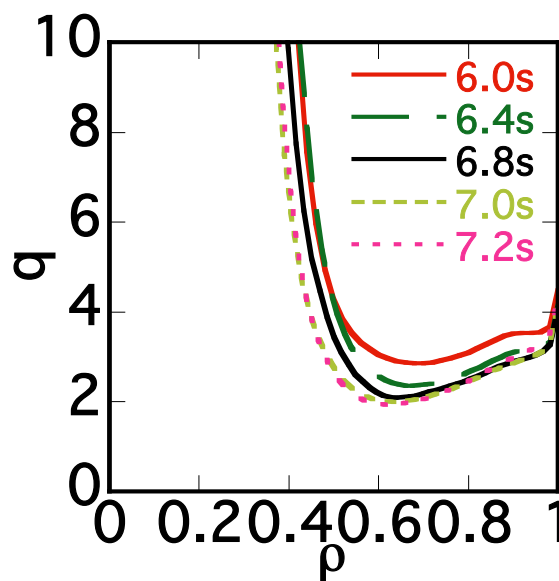
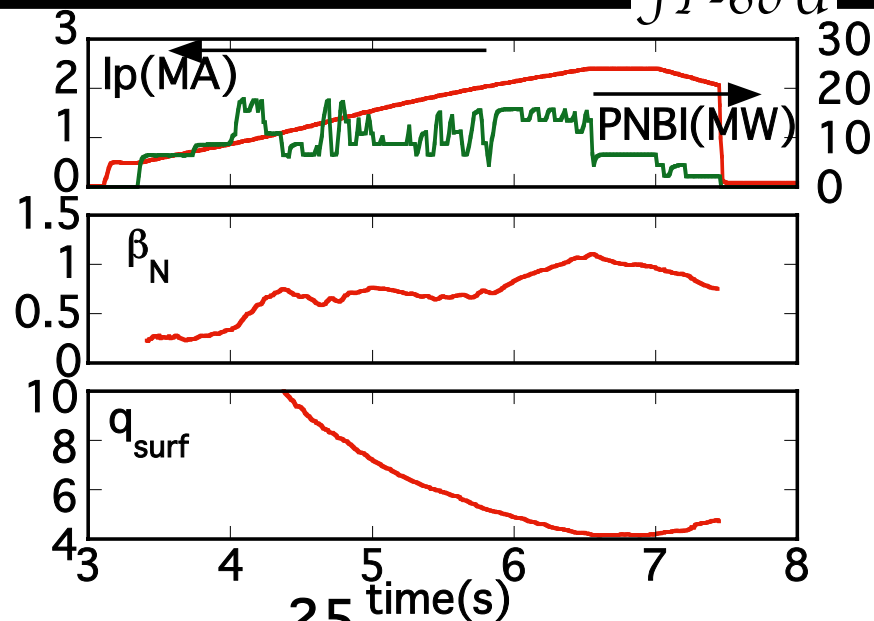
→ 最大 I_p (~2.6MA@4.05T)が存在



(2) 有理面の圧力勾配が連続的にかわる場合

表面モードが $m=5$ から $m=4$ に変化する
 時間では $q=4$ 面は平坦($t=6.0s$)
 加熱をやめることにより勾配を持ち
 ディスラプションに至る($t=7.2s$)
 対応する有理面の圧力勾配が大きくな
 る場合やITBと有理面の位置関係が動
 くことにより表面のモードがディス
 リートに変わるとき以外
 にもディスラプションに至る

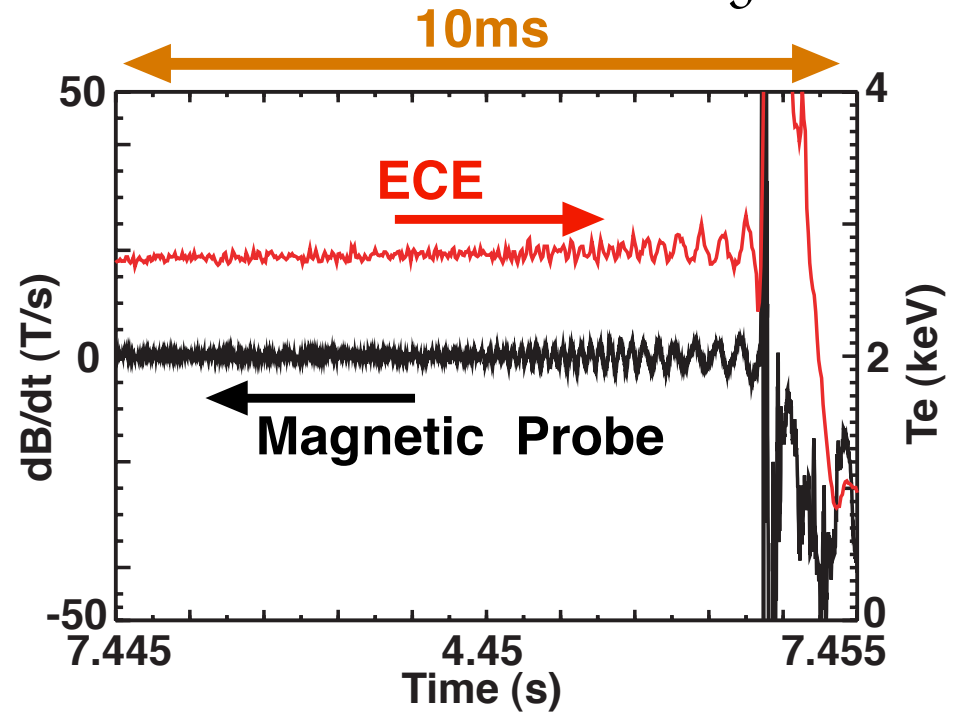
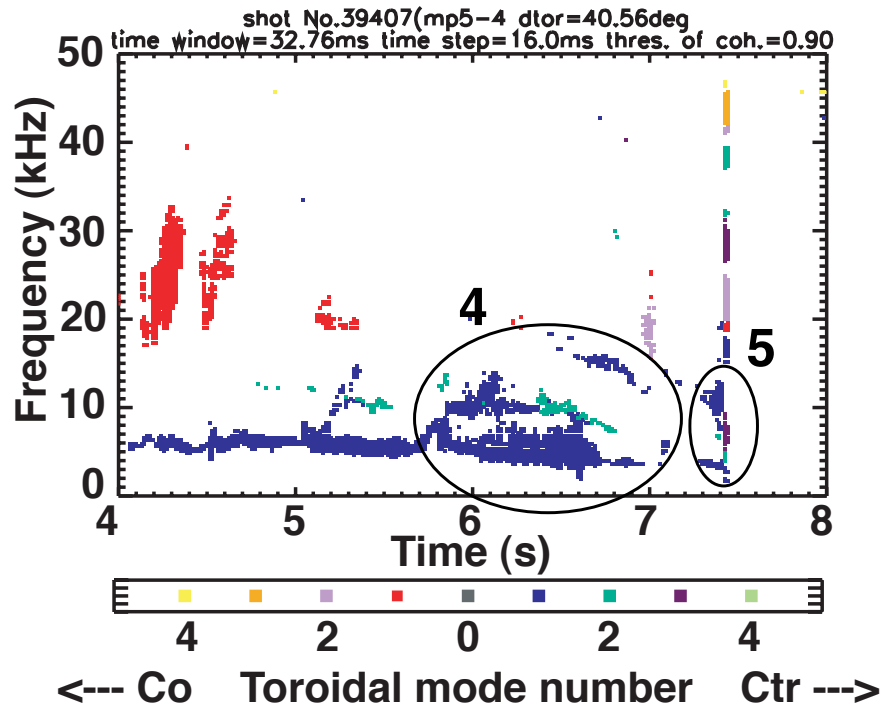
JT-60U



ディスラプションの前兆振動 低周波モードの成長の観測

JT-60U

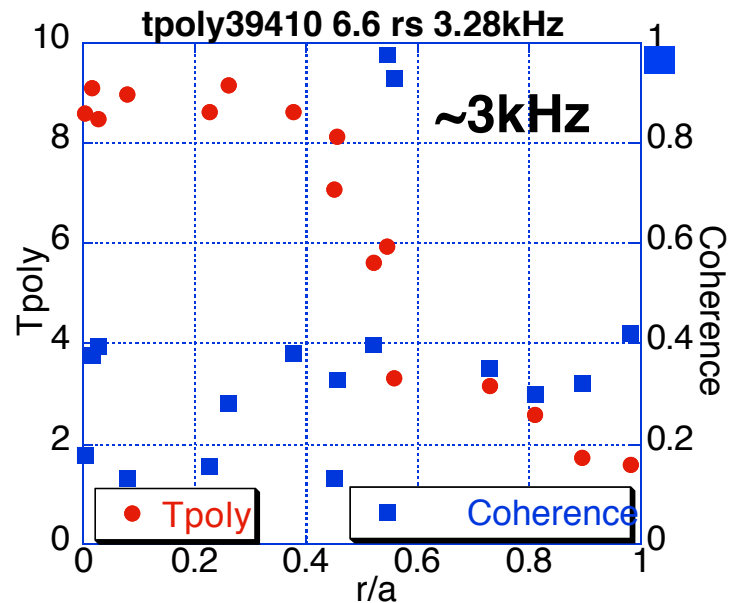
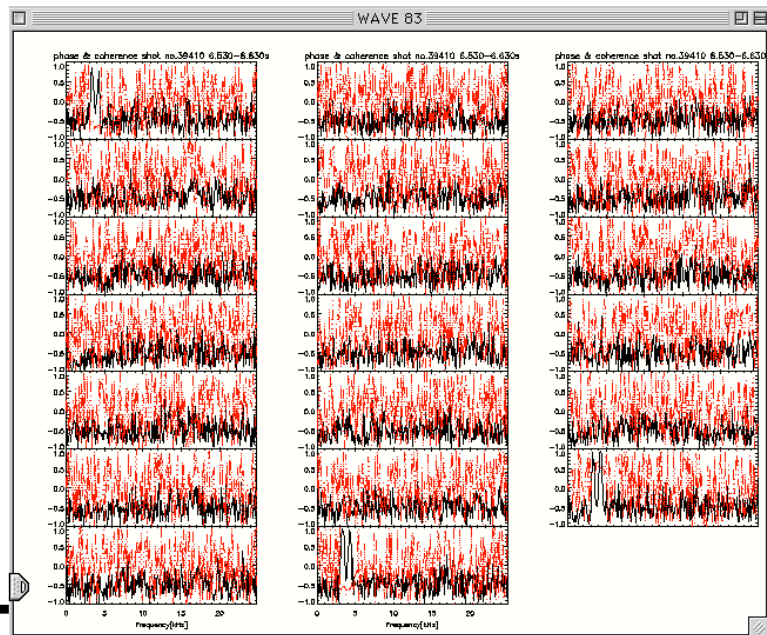
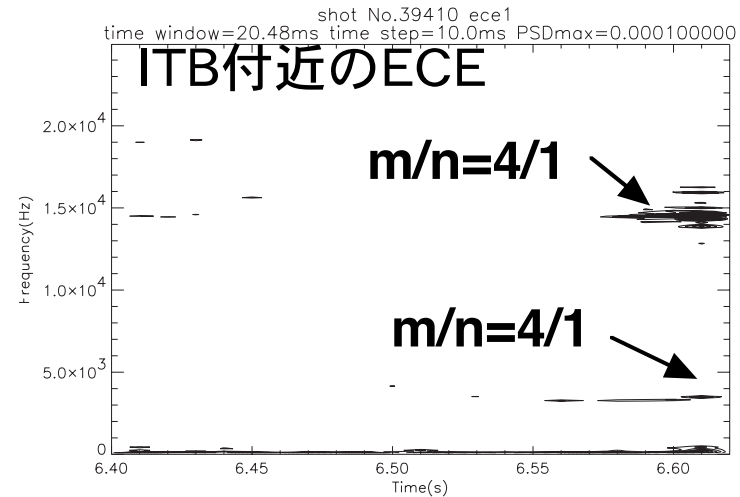
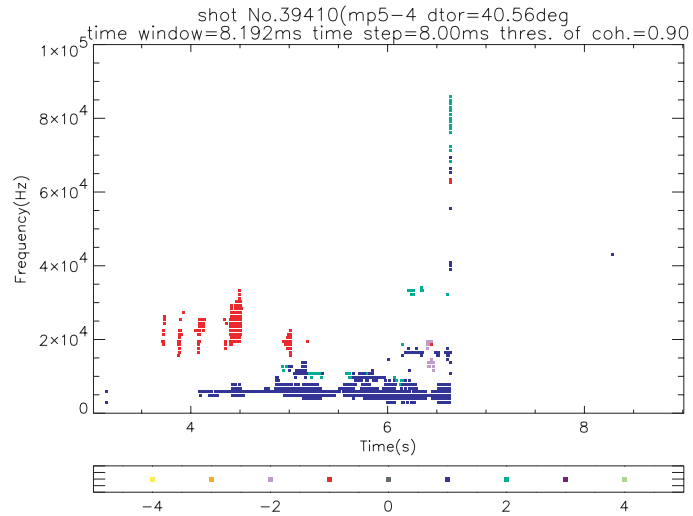
ディスラプション前に低周波モード
($m/n=5/1$) が成長 ($1/\gamma \sim$ 数ms)



低周波モードのECE計測

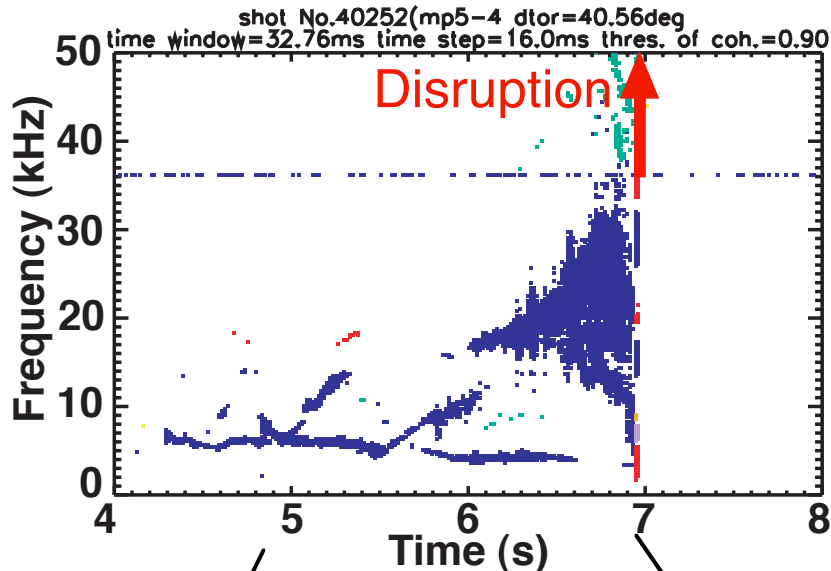
ITB付近及び／もしくはプラズマ周辺部付近に存在？

JT-60U

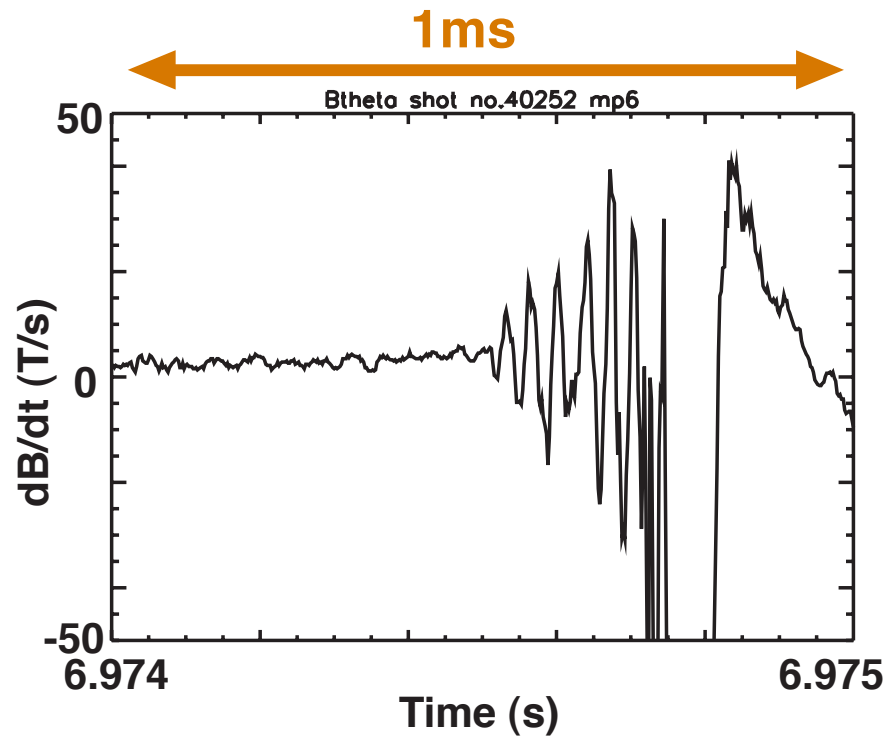
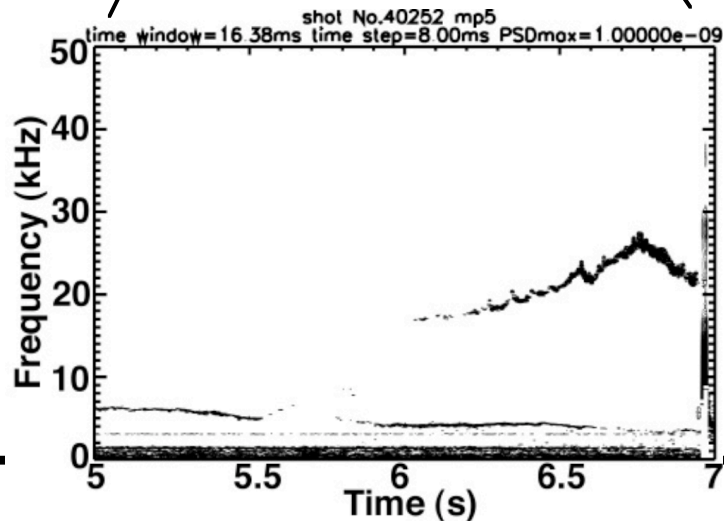
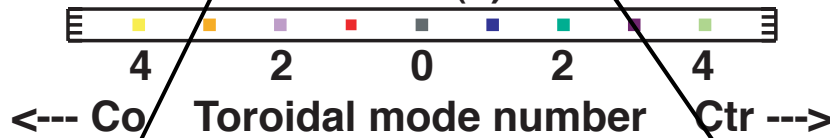


ディスラプションの前兆振動 高周波モードの成長の観測

JT-60U



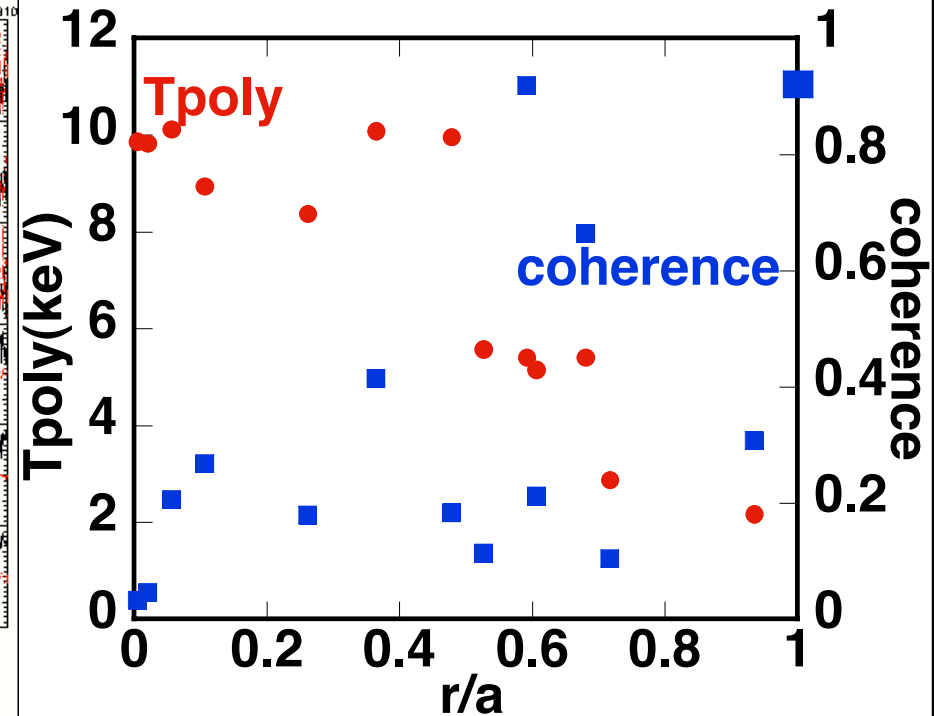
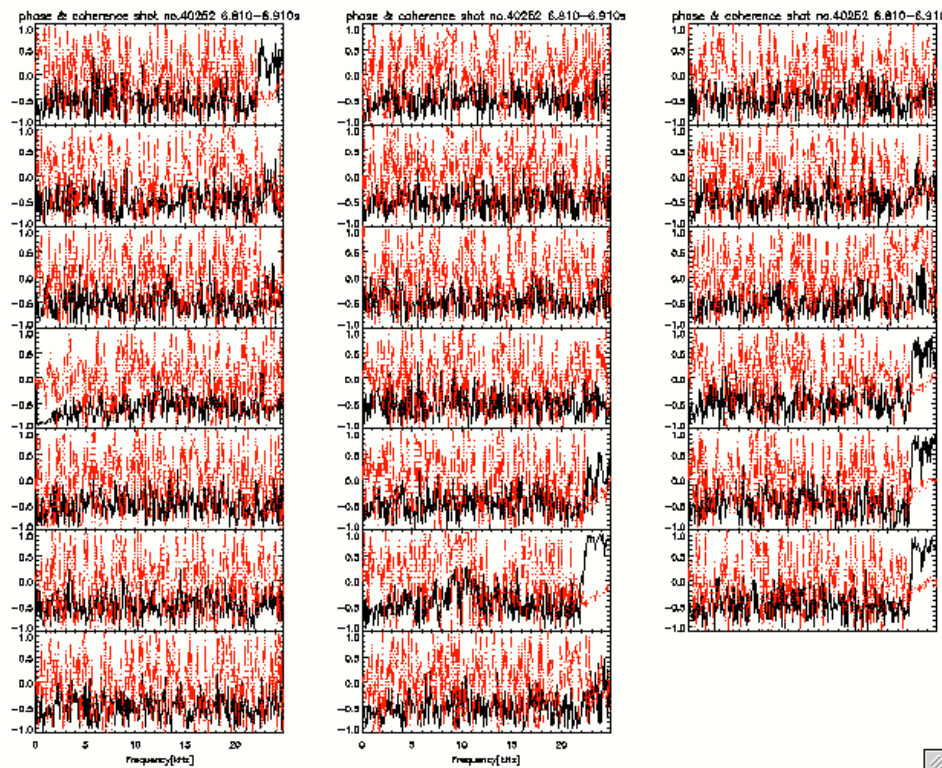
ディスラプション前に高周波モード
($m/n=4/1$) が成長 ($1/\gamma \sim 100\mu s$)



高周波モードのECE計測 ITB付近及び／もしくはプラズマ周辺部付近に存在？

JT-60U

ITBとITB以外で温度の勾配が大きく異なるためECEによる場所の同定は今のところ困難。高SNが必須。



まとめと今後の課題

JT-60U

高い閉じ込め性能を持つ（強いITBを持つ）負磁気シア放電においてディスラプションにいたるプラズマの条件と原因となる不安定性を調べた。

強いITBを持つRS放電のディスラプションは次のような特徴を持つことが明らかとなった。
様々な前兆の観測（高周波モード、低周波モードの成長、成長なし）

様々な要因が混在する

磁気プローブで $m < 4$ の飽和したモードが全く観測されない
表面モードの変化する時間（例 $m=5 \rightarrow 4$ ）で多くおこる。

**プラズマ表面付近のMHD不安定性がきっかけになり
ディスラプションにいたる**

ITBの圧力勾配の小さい放電でもディスラプションにいたり、電流のしみ込みが大きい方が安定

**ITBの圧力勾配の制御ではディスラプションは回避できない。
むしろITB位置とq分布の位置関係が重要**

（低周波モードのモード数に対応する内側有理面が重要？）

今後の課題

SNの良いECEを用いて固有関数を調べ、モードの同定を行う。