

2007/3/14(水)

第10回若手科学者によるプラズマ研究会

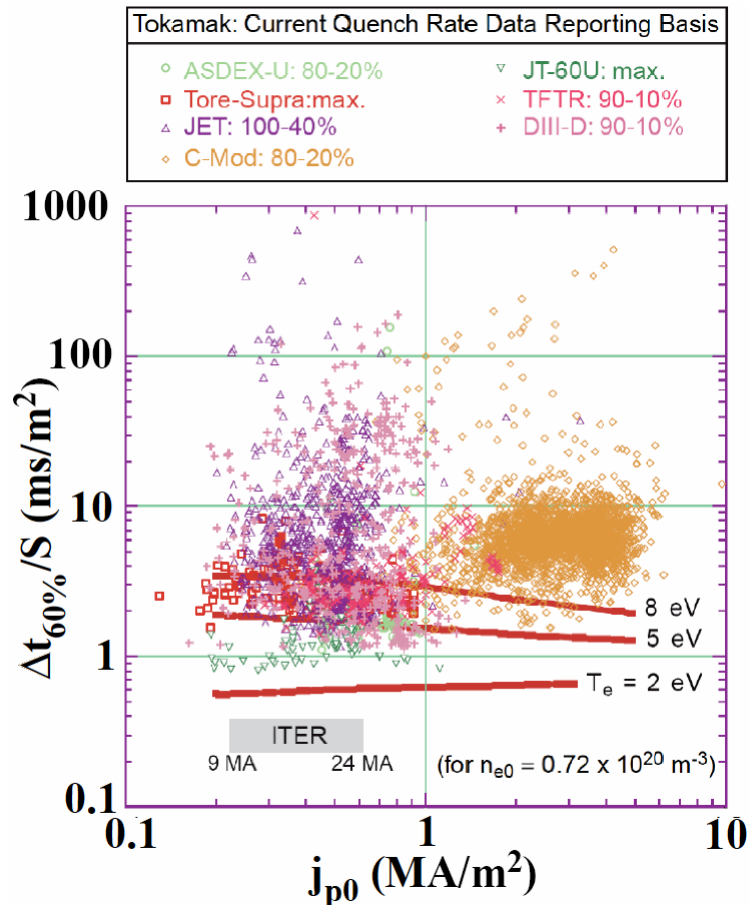
日本原子力開発機構那珂核融合研究所

制御棟2階204号室

# 小型トカマクを用いた ディスラプション時のプラズマ 内部構造ダイナミクスの観測

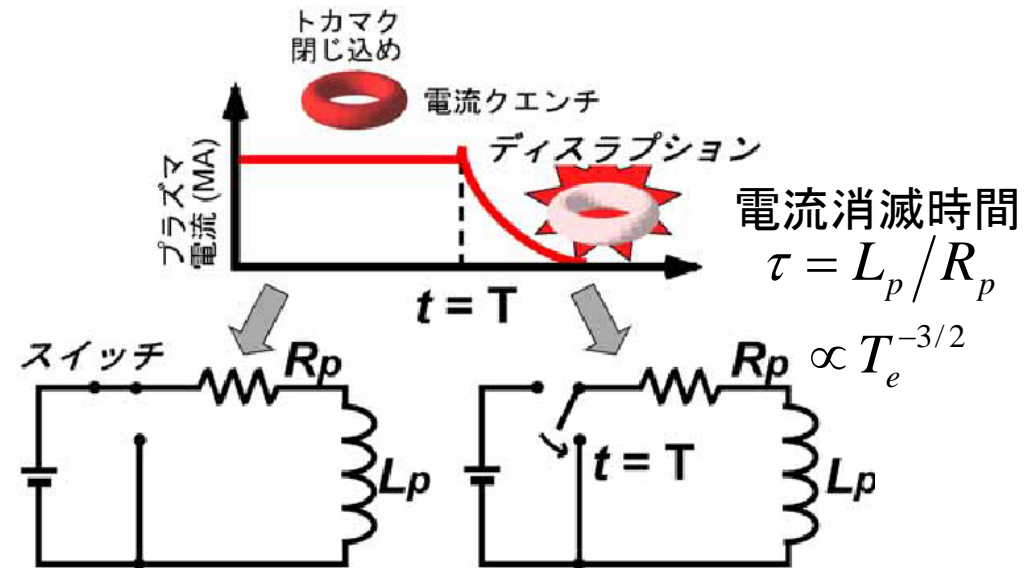
名古屋大学工学研究科高村研究室 岡本 征晃

# 研究の背景



## ディスラプション

プラズマの閉じ込めが急に破壊される現象。  
 ディスラプションの発生原因や物理機構の解明にはプラズマの内部計測が有効。



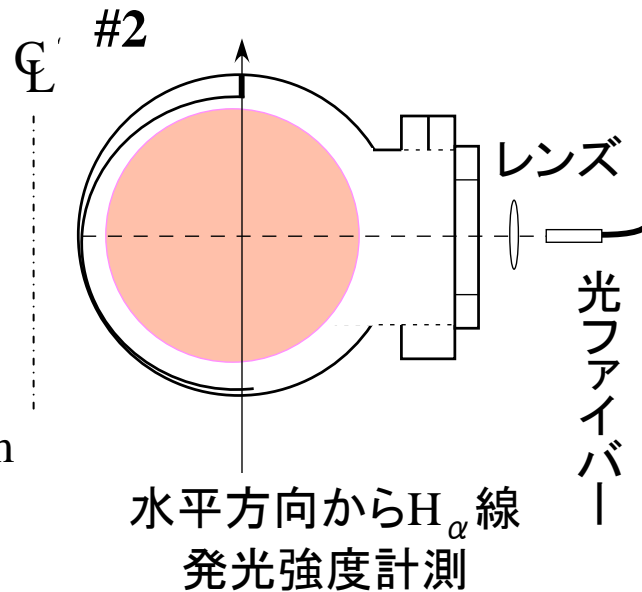
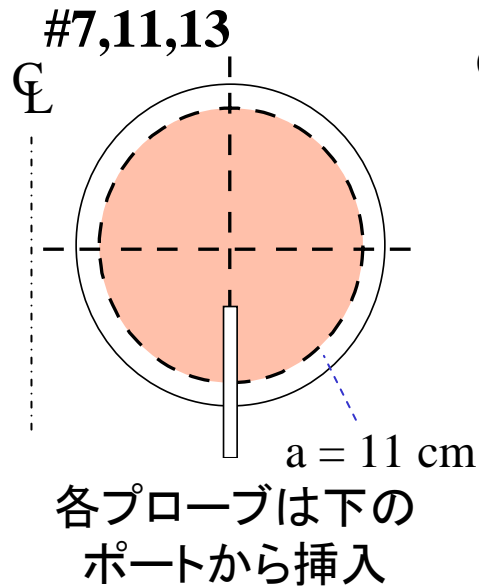
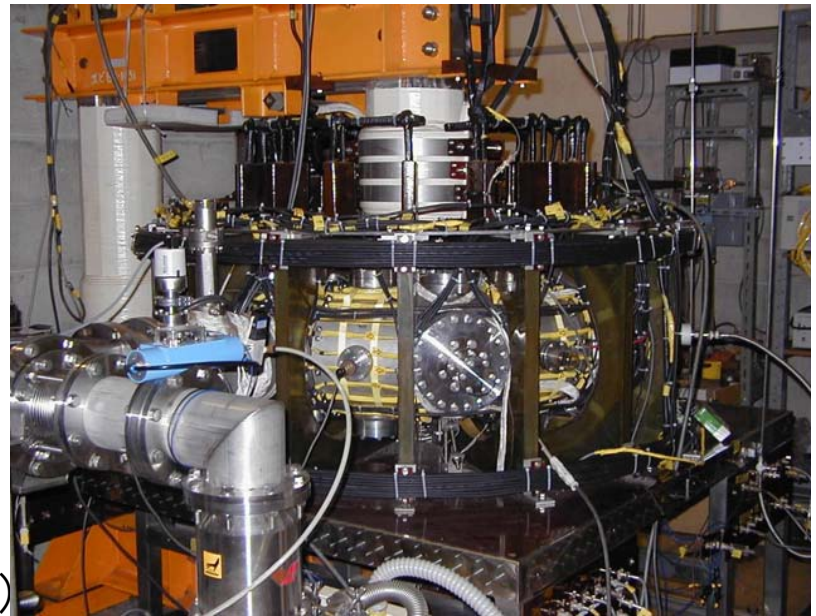
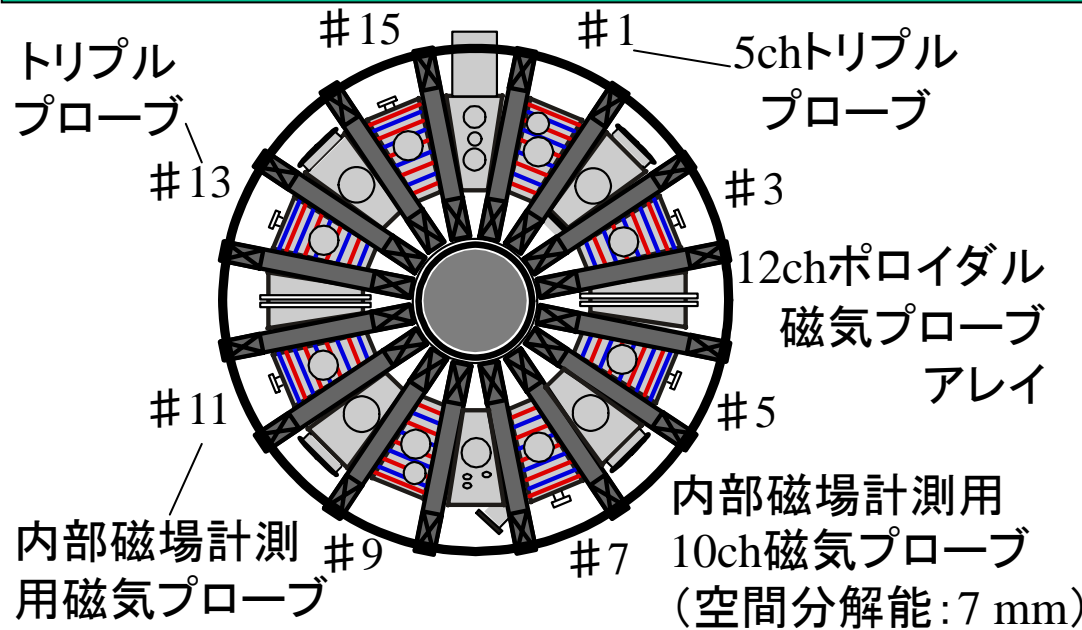
現在用いているディスラプション発生時のプラズマ電流消滅時間のモデルではプラズマ内部の電子温度が重要なパラメータ。



大型装置でのプラズマ電流消滅中の電子温度計測は困難。

小型トカマクを用いたプラズマ内部の磁気・静電プローブによる直接計測。

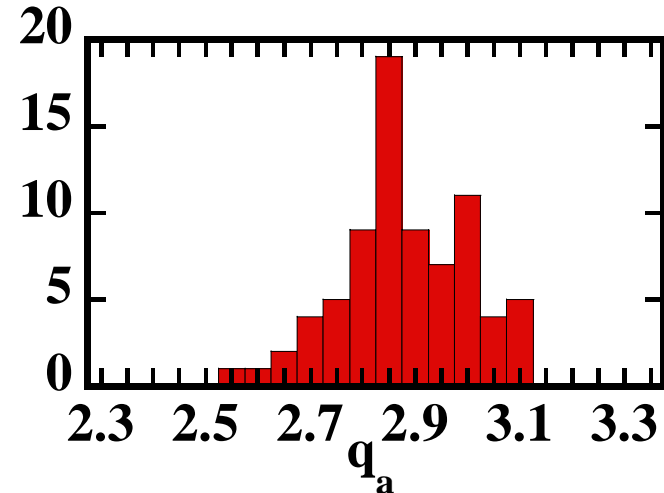
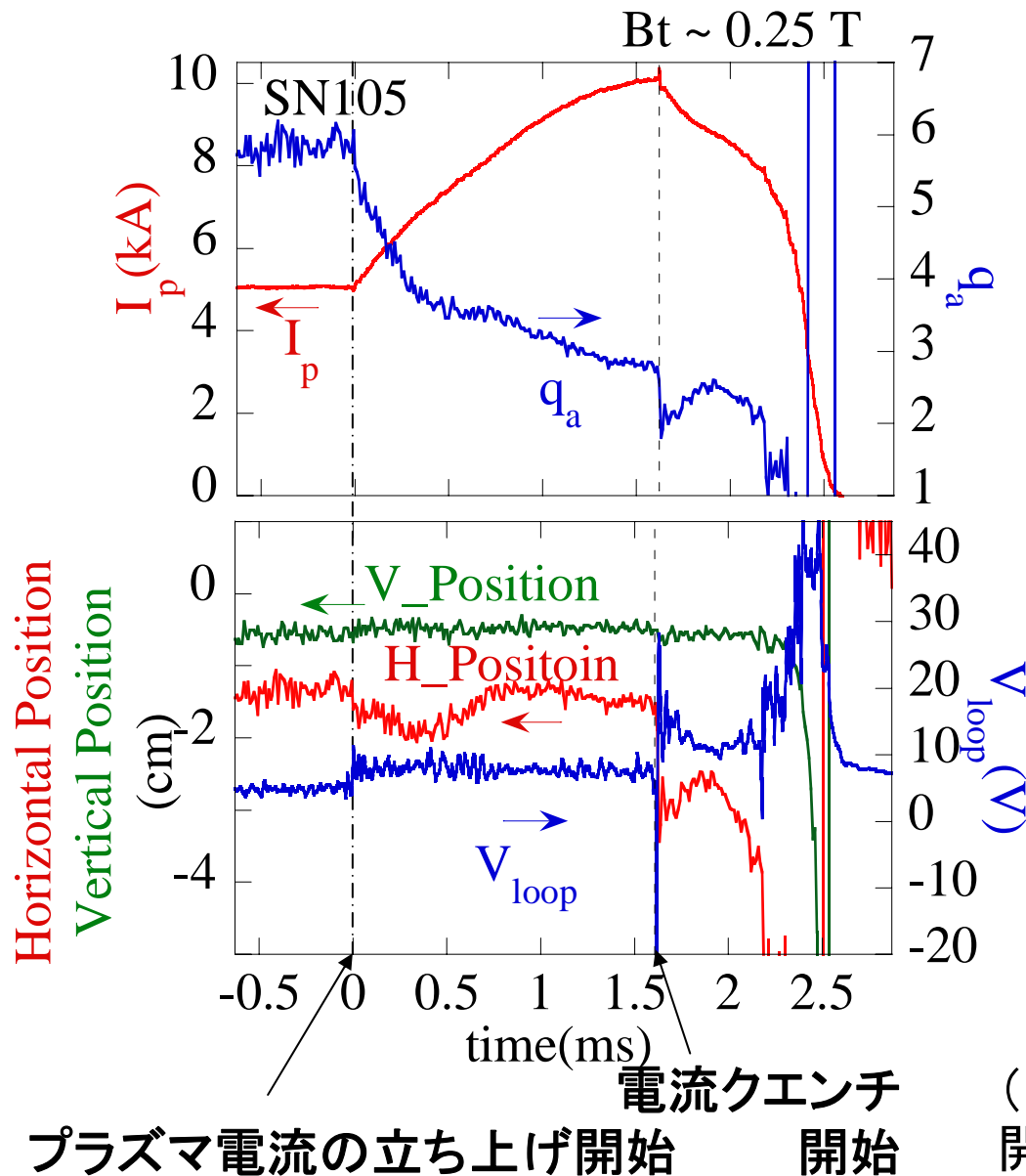
# 実験装置 (小型トカマクHYBTOK-II)



HYBTOK-II主要パラメータ

|               |         |
|---------------|---------|
| 大半径 $R_0$     | 0.40 m  |
| リミタ半径 $a$     | 0.11 m  |
| プラズマ電流 $I_p$  | ~ 15 kA |
| トロイダル磁場 $B_t$ | ~ 0.3 T |
| 放電時間          | ~ 20 ms |

# 実験方法



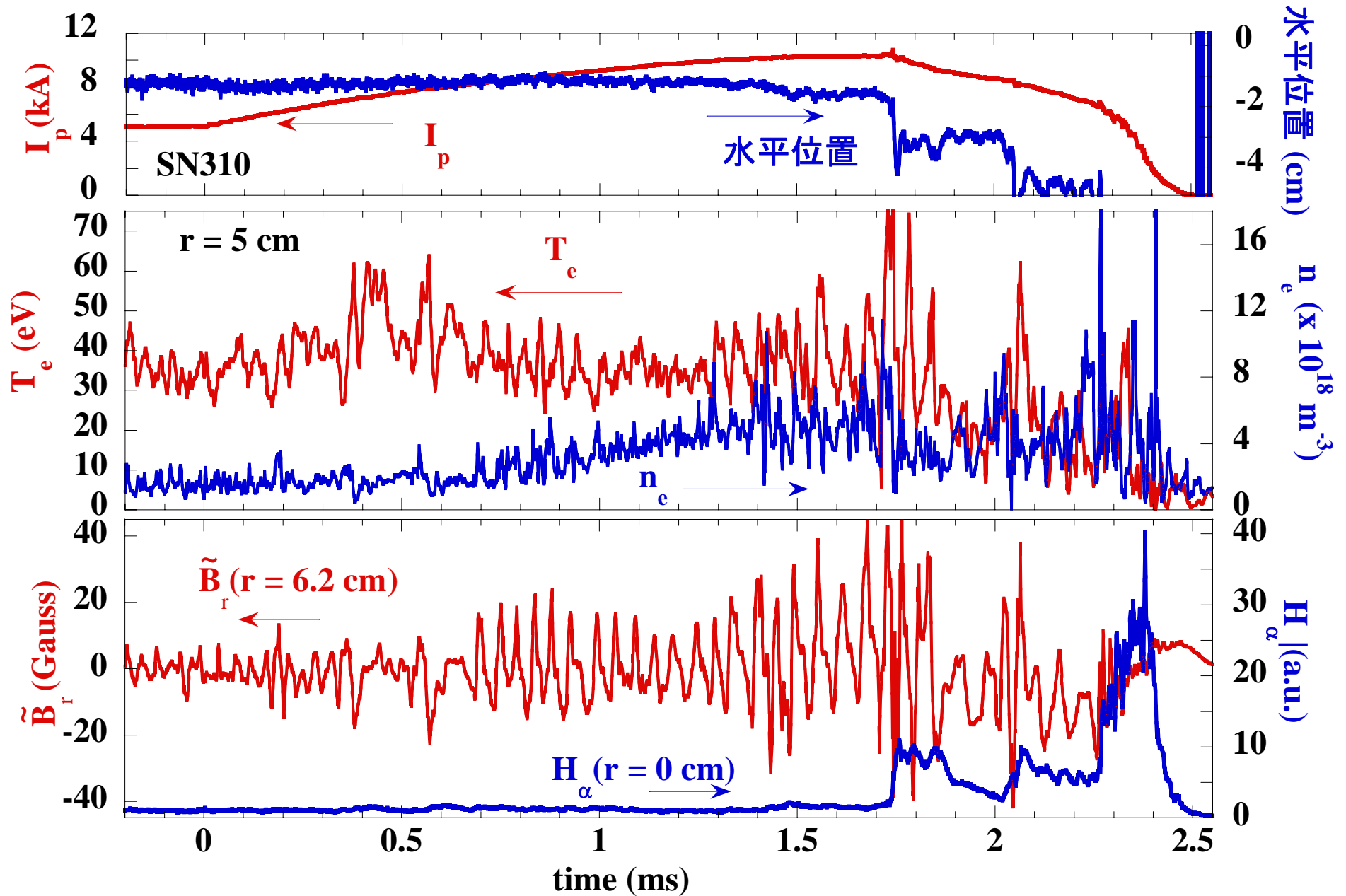
プラズマ電流  $I_p$  を増加させることで安全係数 ( $q_a = aB_t / RB_\theta$ ) を減少させてディスラプションを誘起。

安全係数  $q_a$  が 3 を下回る程度で電流クエンチを観測。

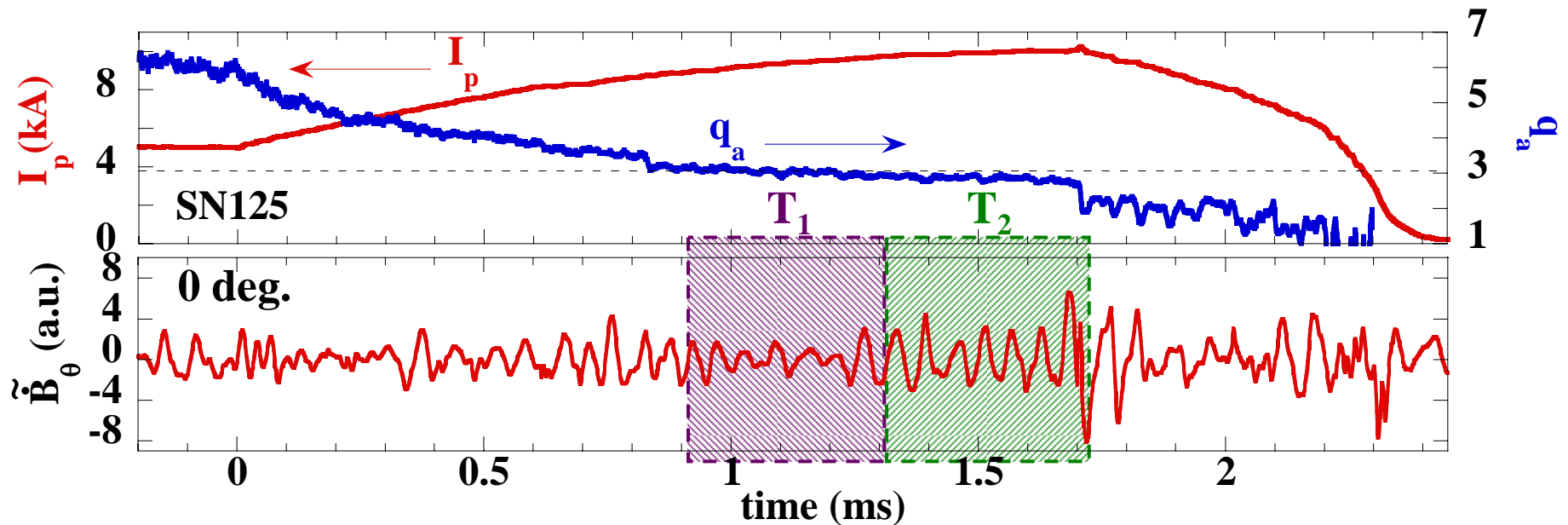
電流クエンチ時のプラズマ電流波形が 2 段階で減衰。

(時間軸はプラズマ電流を立ち上げ開始時刻を  $t = 0$  ms として表示)

# 計測結果

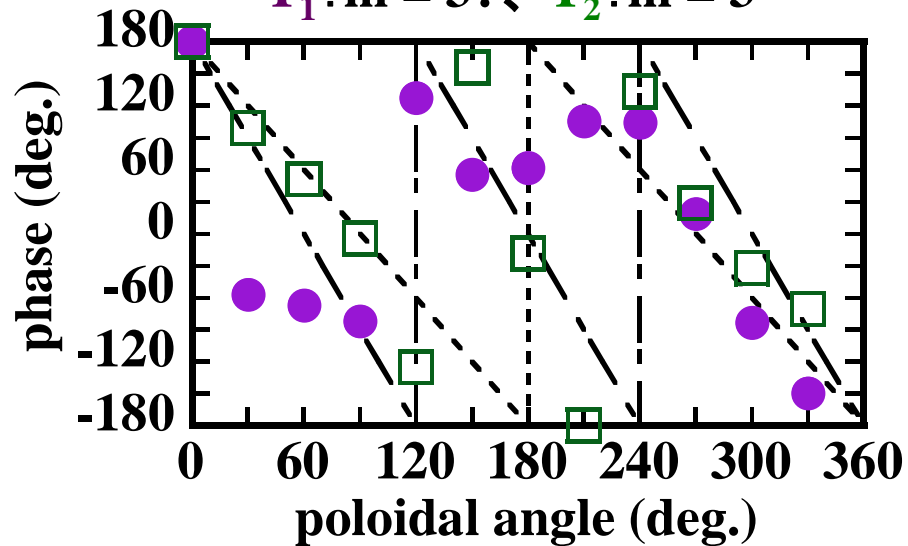


# モード解析



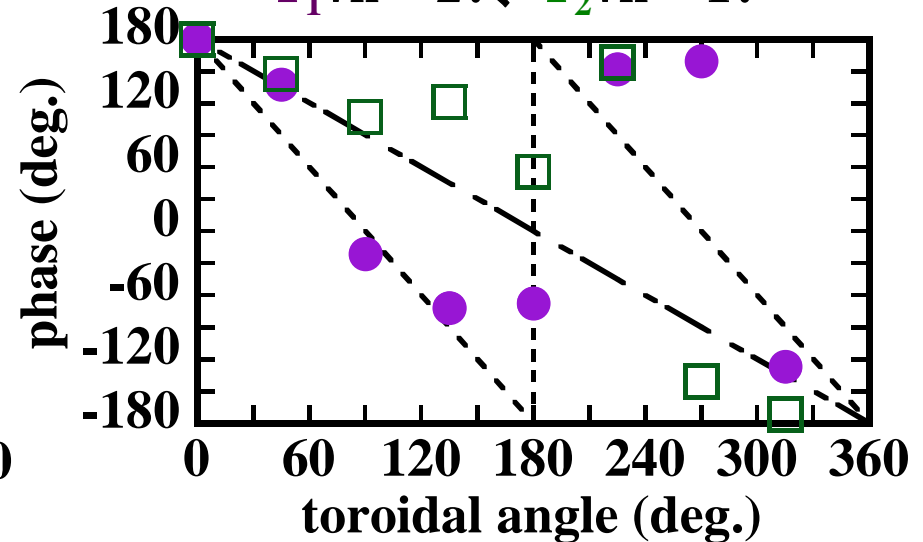
ポロイダルモード解析

$T_1$ :  $m = 3?$ 、 $T_2$ :  $m = 3$

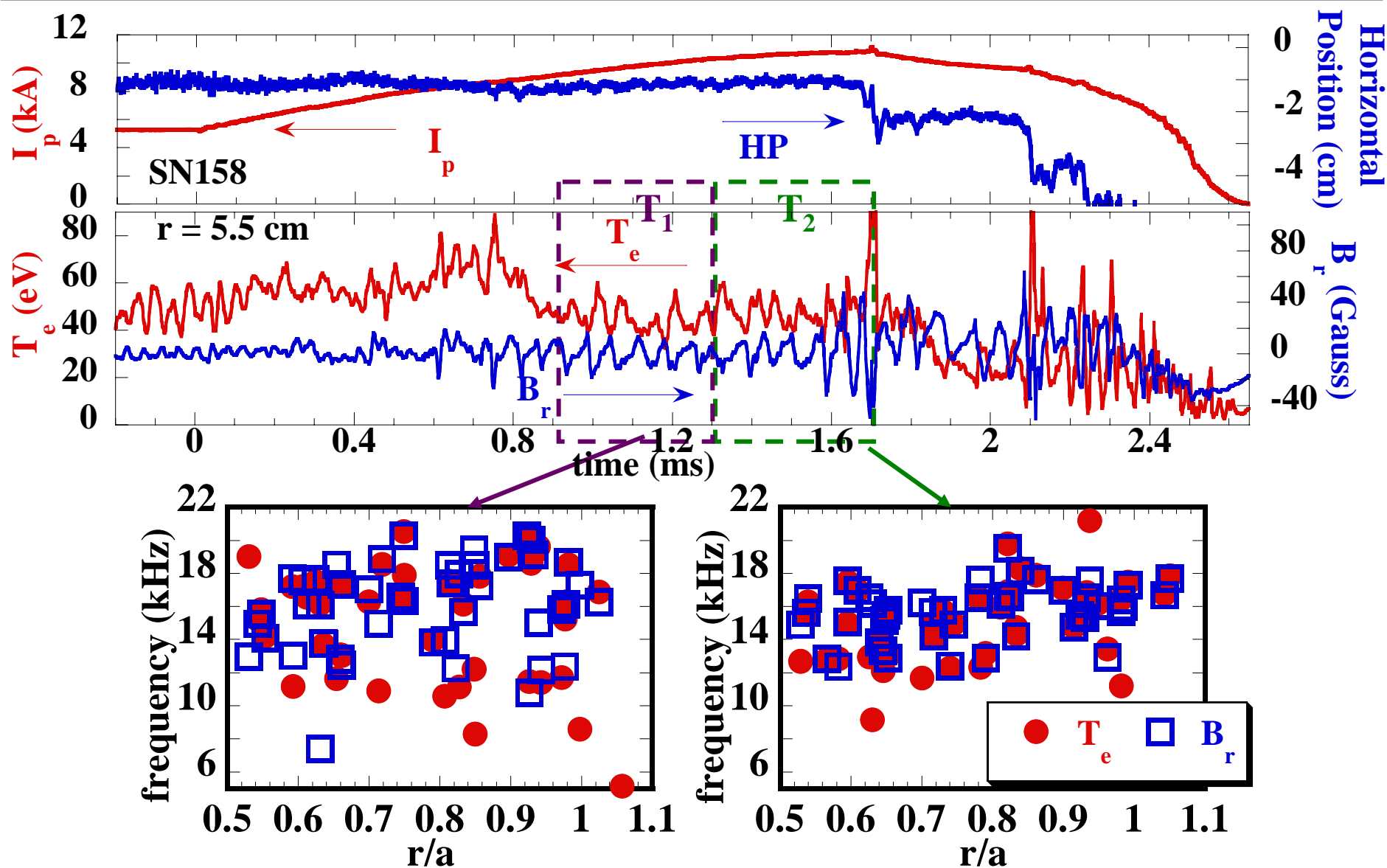


トロイダルモード解析

$T_1$ :  $n = 2?$ 、 $T_2$ :  $n = 1?$

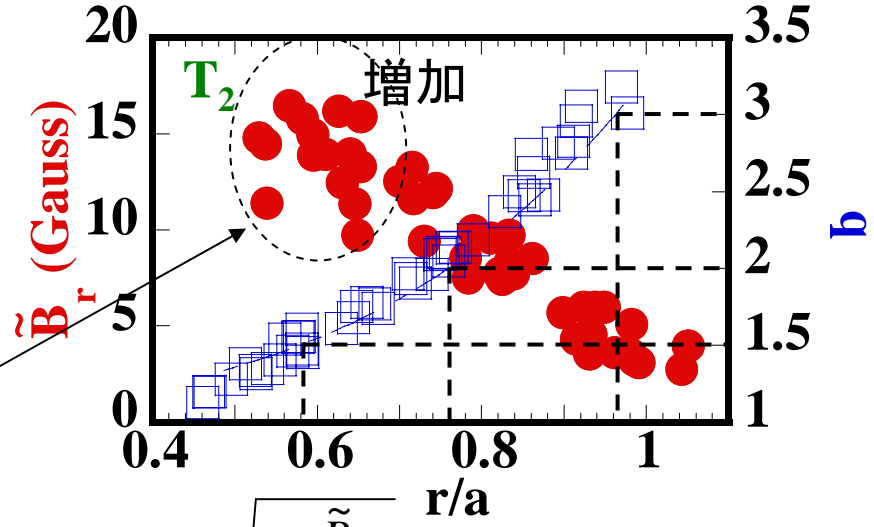
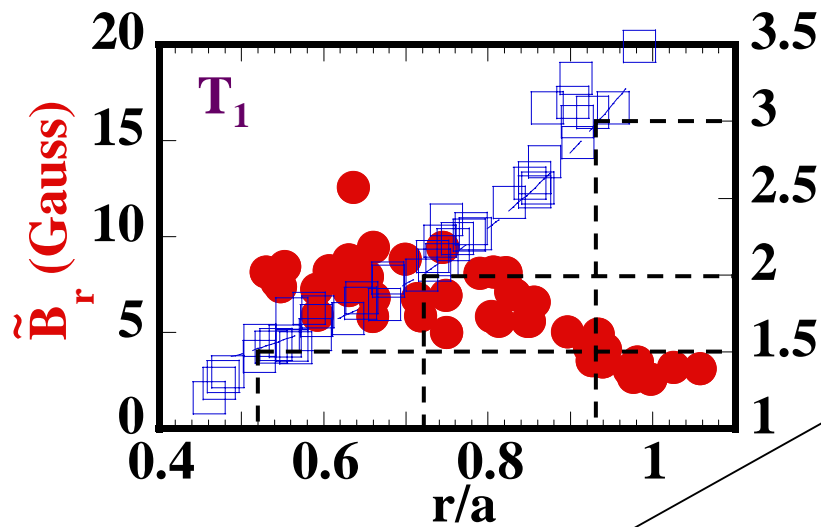


# 電子温度揺動の観測



$B_r$ と $T_e$ の相関が強い。→磁気島が回転することで温度揺動の観測。

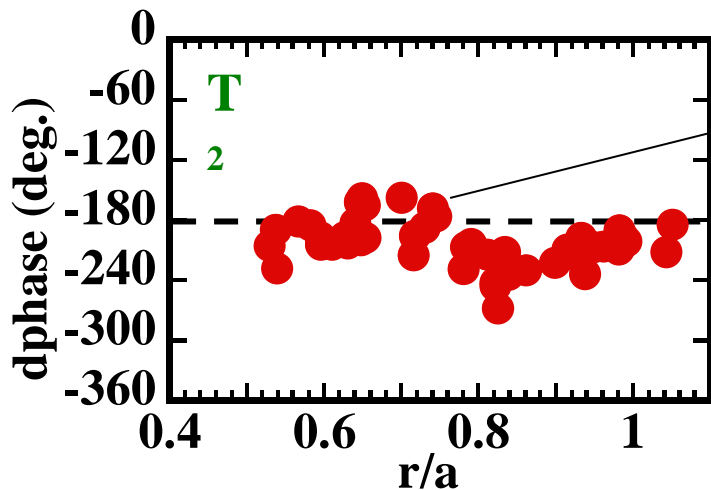
# 磁気島の回転に伴う揺動



$m/n = 3/2$ の磁気島の成長? → 磁気島の幅

$$w = 4 \sqrt{\frac{rq\tilde{B}_r}{mq'B_\theta}} \sim 3.2 \text{ cm}$$

プラズマ半径の約30%

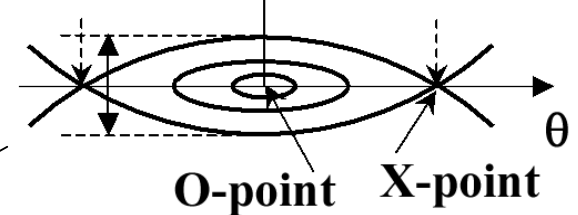


$B_r$ と $T_e$ の計測位置がトロイダル方向に $90^\circ$ 離れており、 $n=2$ だとすると同じトロイダル面上では位相差は $90^\circ$ 。

↑ ↓ 一致。

$B_r$ と $T_e$ の位相差は $90^\circ$ 。 $B_r = \tilde{B}_r(r) \sin m\theta$

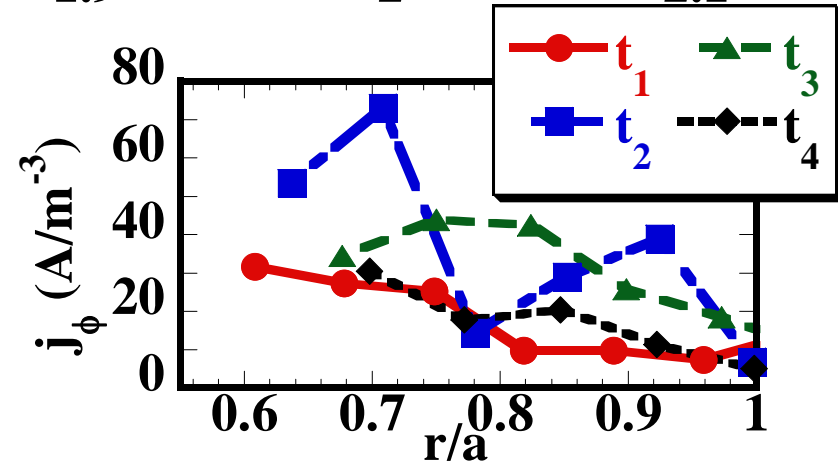
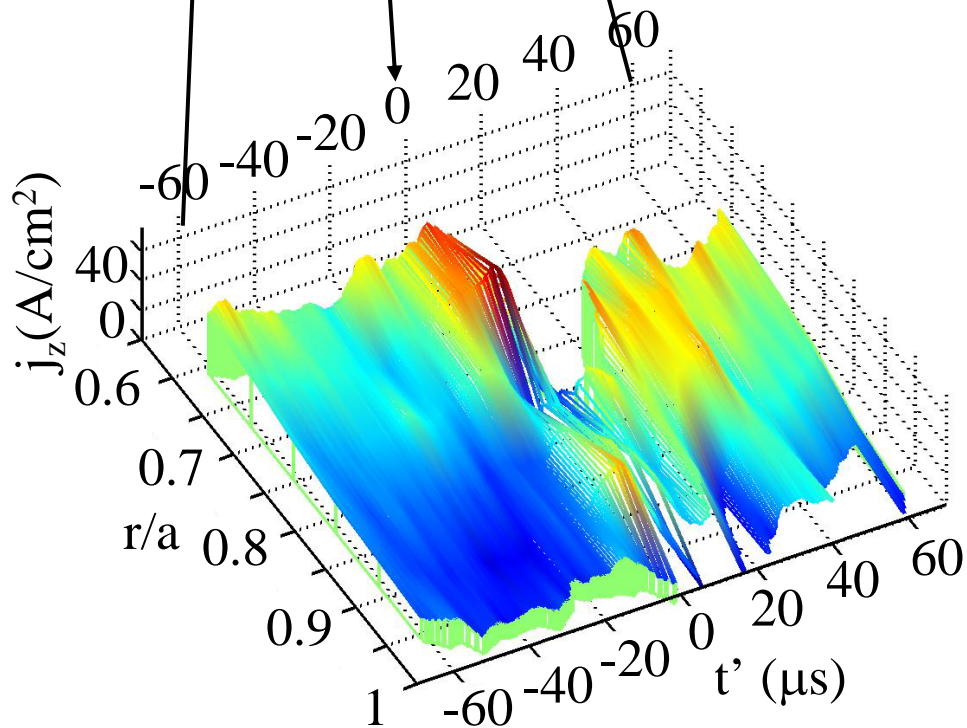
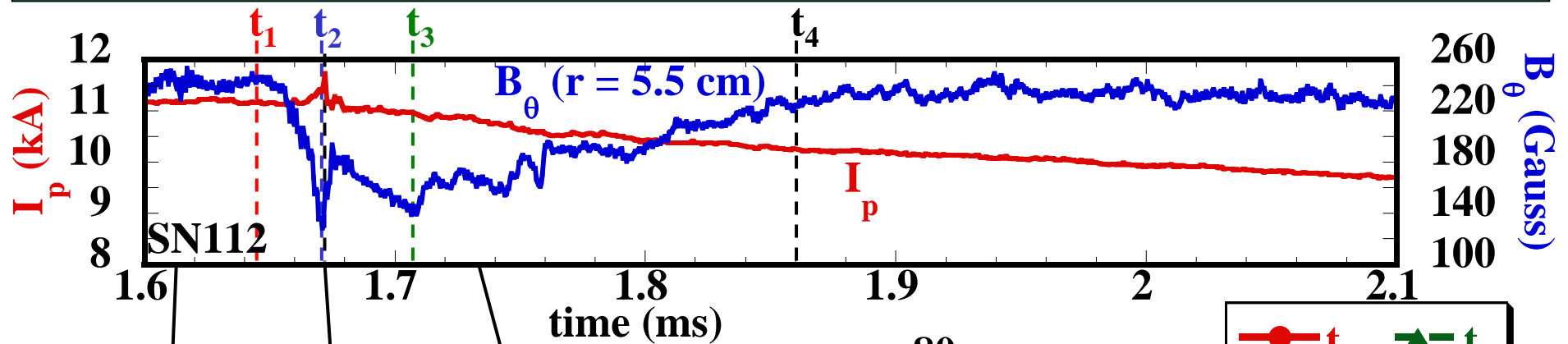
共鳴面より外側で  $T_e$ :最大  $T_e$ :最小  
 $m\theta = -\pi$   $r$   $m\theta = \pi$



$r/a = 0$ で $q$ 値が1を下回るような分布。→  $m/n = 3/2$ のテアリングモードと $m/n = 1/1$ の内部キックモードの相互作用がディスラプションの発生原因の可能性。



# 電流減衰開始時の電流密度分布の変化

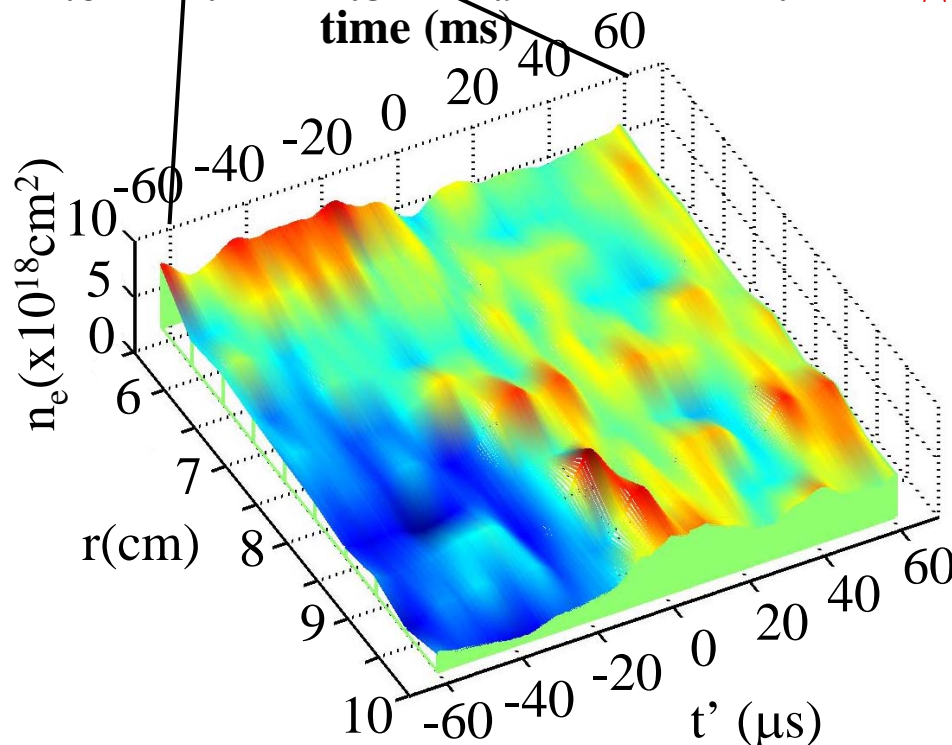
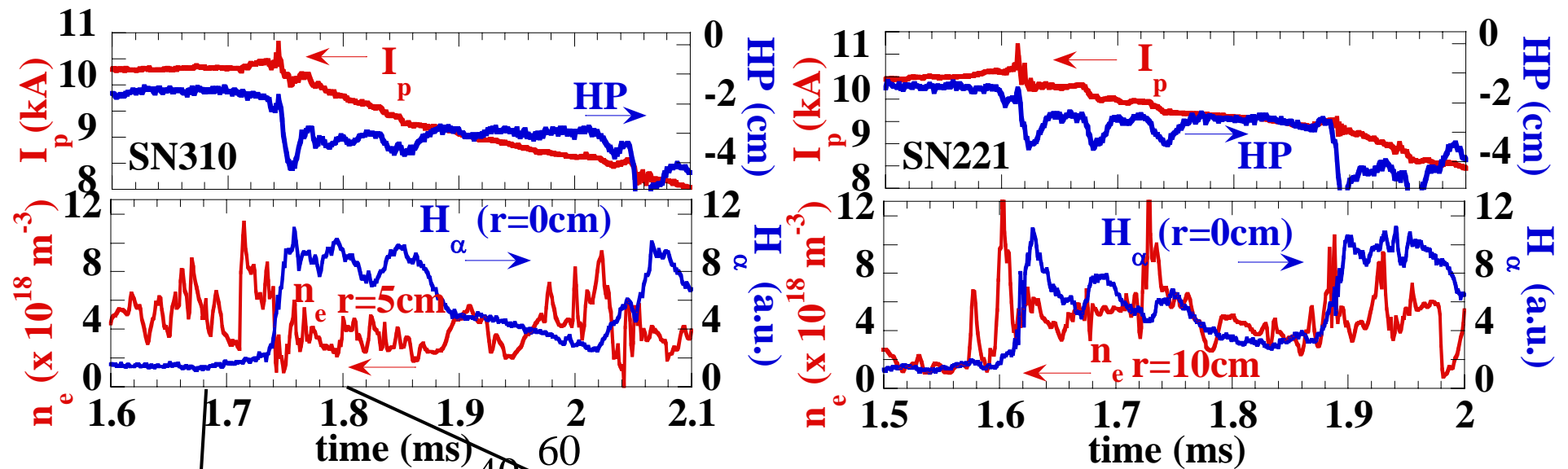


電流クエンチが開始する約20  $\mu$ s前から電流密度分布の変化(中心部のプラズマ電流の吐き出し)。

電流の吐き出し後、電流密度分布は約300  $\mu$ sで元の分布に戻る。

→閉じ込め磁場の改善。

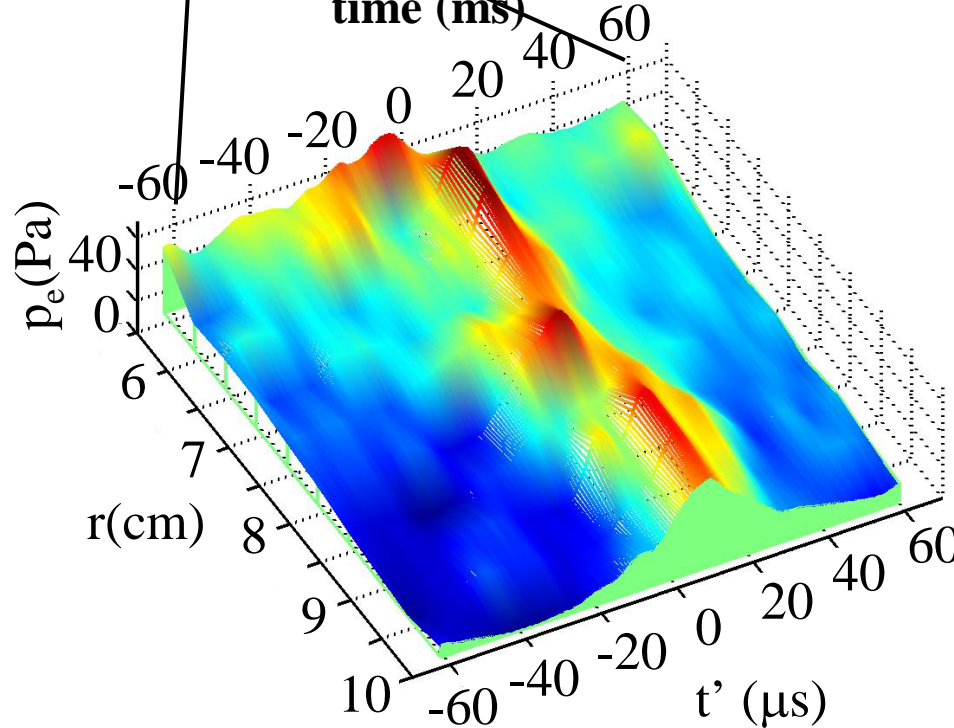
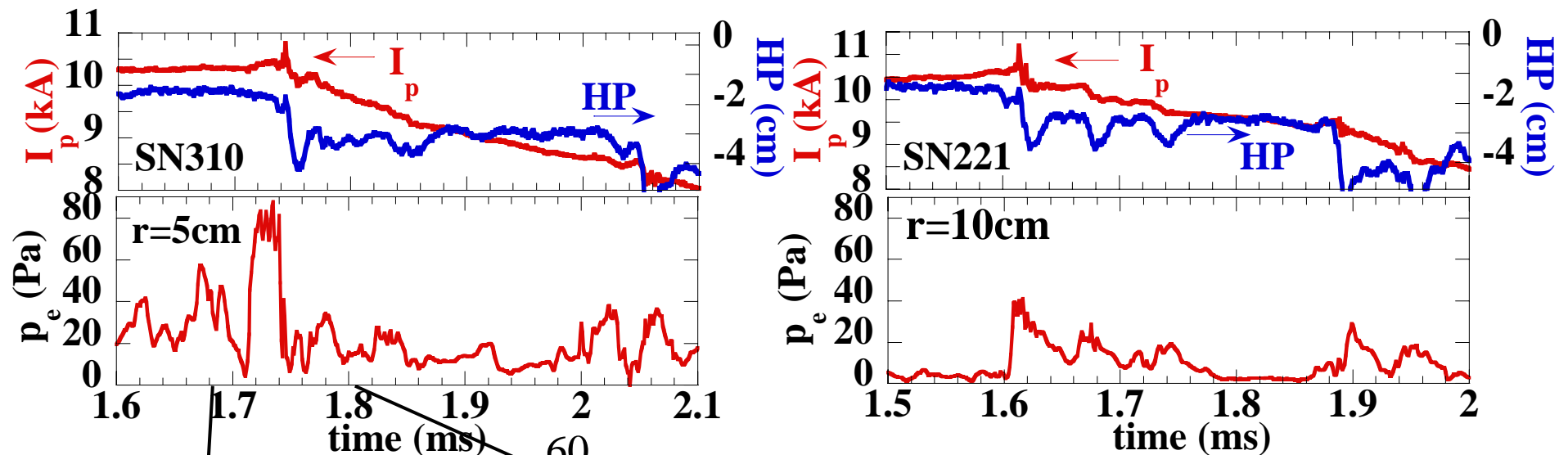
# 電流減衰開始時の電子密度分布の変化



電流密度分布の変化と同様に電流クエンチが開始する約 $20 \mu\text{s}$ 前から電流密度分布の変化(中心部のプラズマ粒子の吐き出し)。

プラズマ粒子の吐き出し後は、リサイクリングガスの流入により周辺部の密度は高い状態を維持。

# 電流減衰開始時の電子圧力分布の変化



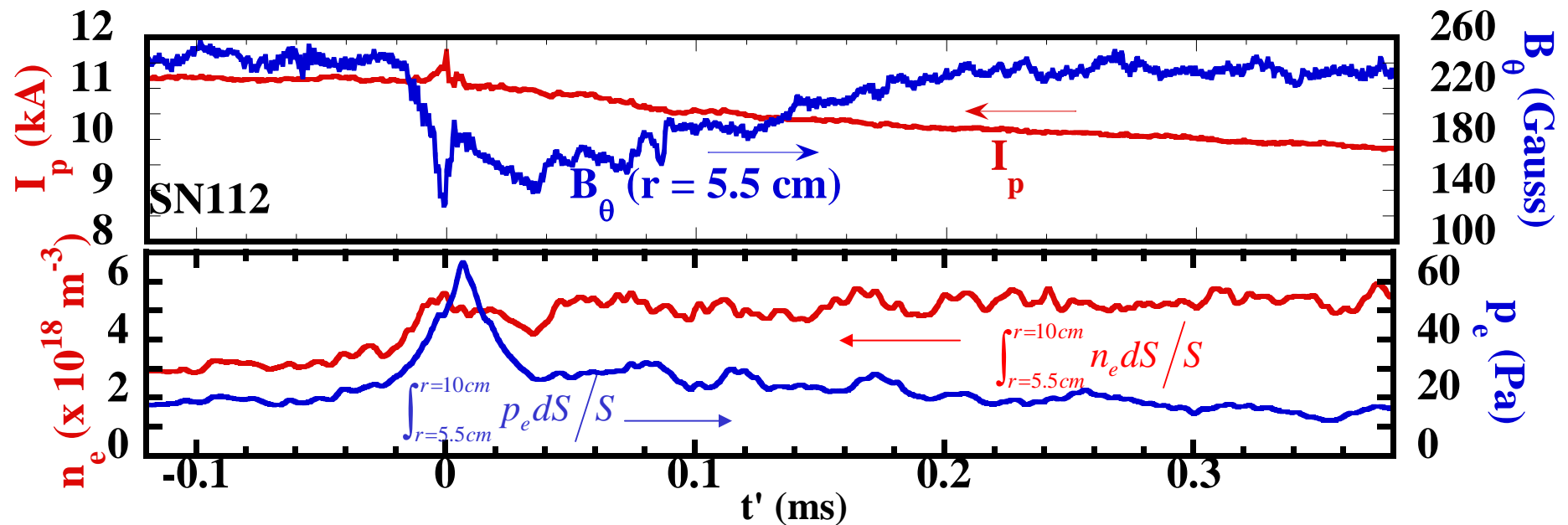
電流クエンチ開始する約 $20\mu\text{s}$ 前から周辺部でのプラズマ内部エネルギーの増加。

→ 中心部の高エネルギー粒子が周辺部に流れ込んでくるため。

電流クエンチ開始直後にピーク。

→ 加熱が起こっている可能性？

# 各現象の変化する時間



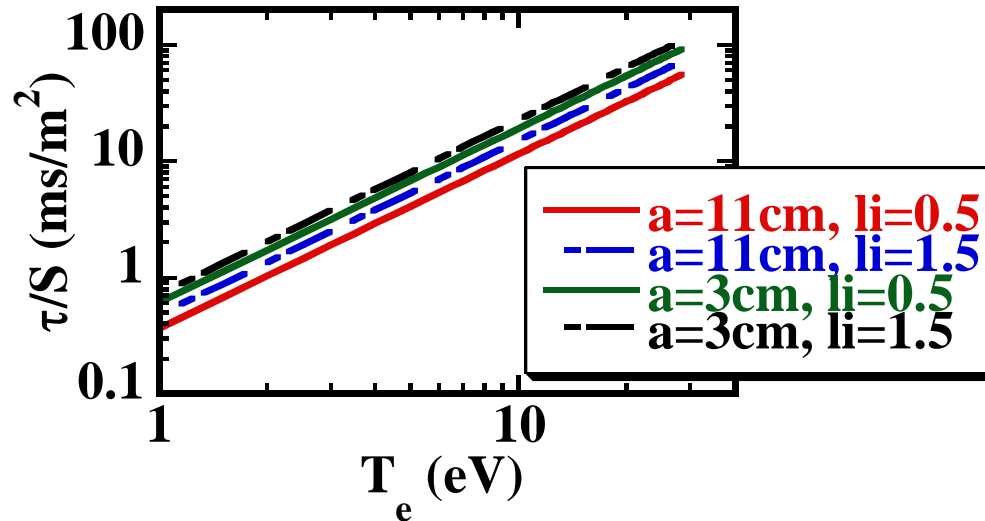
イオン音速 ( $T_e = 30\text{eV}$  のとき)  $C_s = \sqrt{T_e [J] / m_i} \sim 5.4 \text{ cm}/\mu\text{s} \rightarrow$  電流・粒子の吐き出しの時間スケール

電流拡散時間 ( $T_e = 30\text{eV}$ 、 $r = 5\text{cm}$  のとき)  $\tau_R = \mu_0 r^2 / \eta \sim 580 \mu\text{s}$

$\rightarrow$  電流吐き出し後に元に分布に戻る時間スケール。

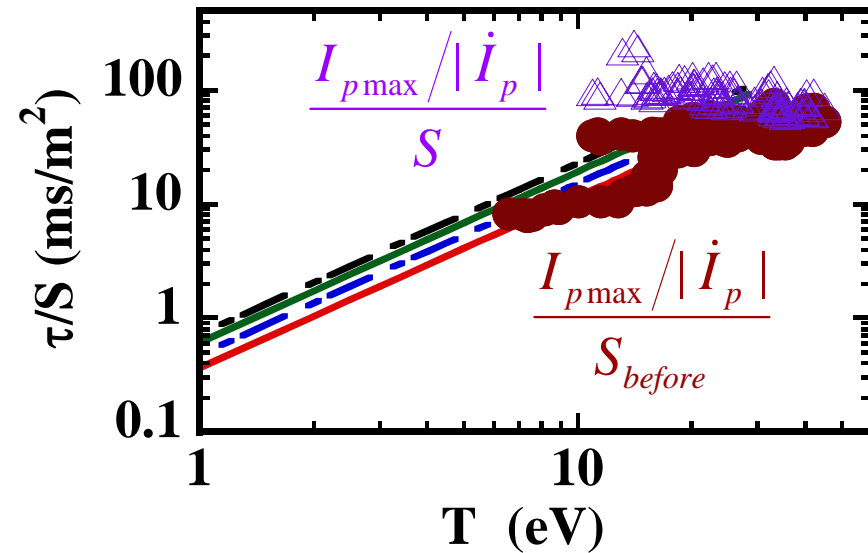
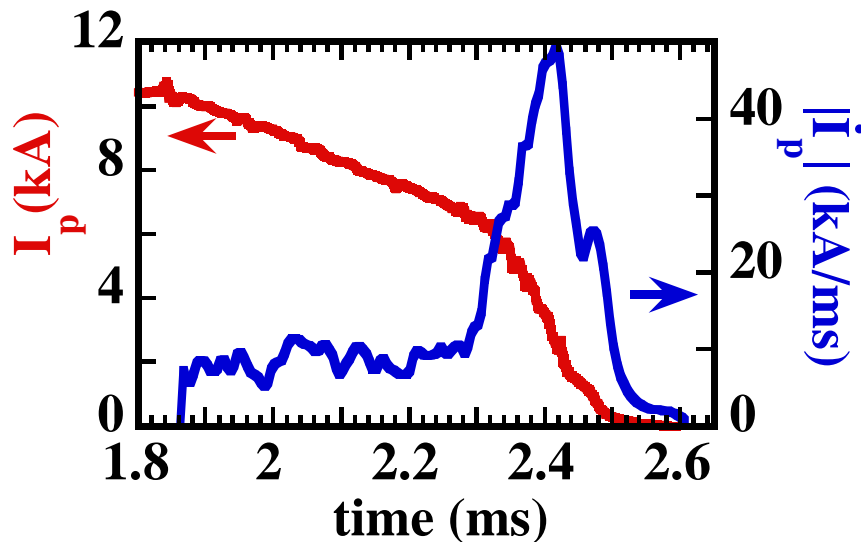
アルフベン速度 ( $B = 0.25 \text{ T}$ 、 $n_i = 3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  のとき)  $V_A = B / \sqrt{\mu_0 n_i m_i} \sim 310 \text{ cm}/\mu\text{s}$

# 電流減衰時間の評価



$$\tau = L_p / R_p \longrightarrow \frac{\tau}{S} = \frac{L_p / 2\pi R_0}{\eta_p}$$

$L_p$ : インダクタンス  $R_0$ : 大半径  
 $\eta_p$ : 抵抗率  $S = \pi a^2$  (a: 小半径)



電流減衰中のプラズマ断面積の評価  
 が妥当でない可能性。

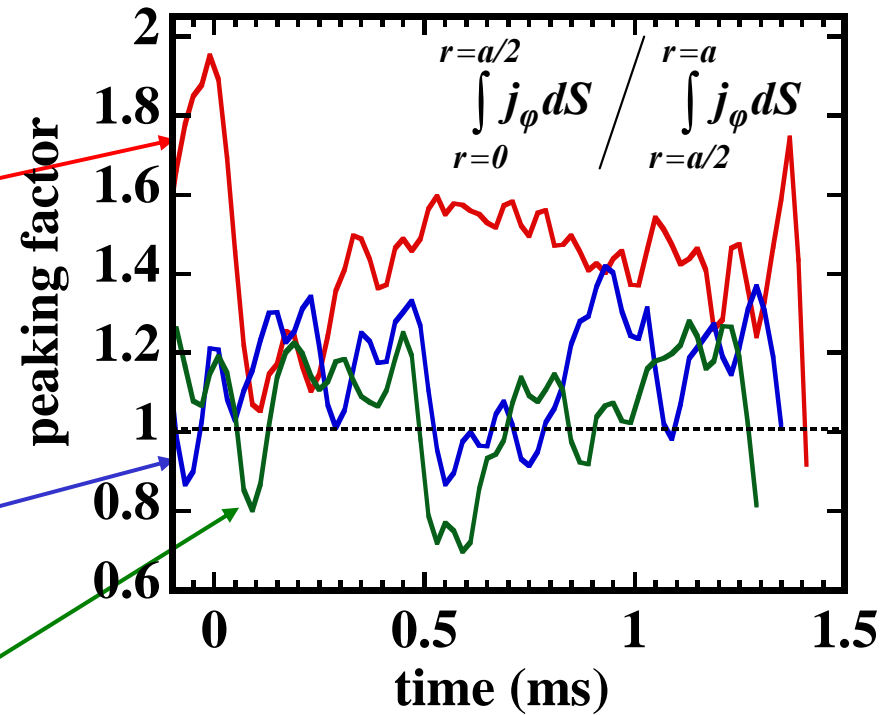
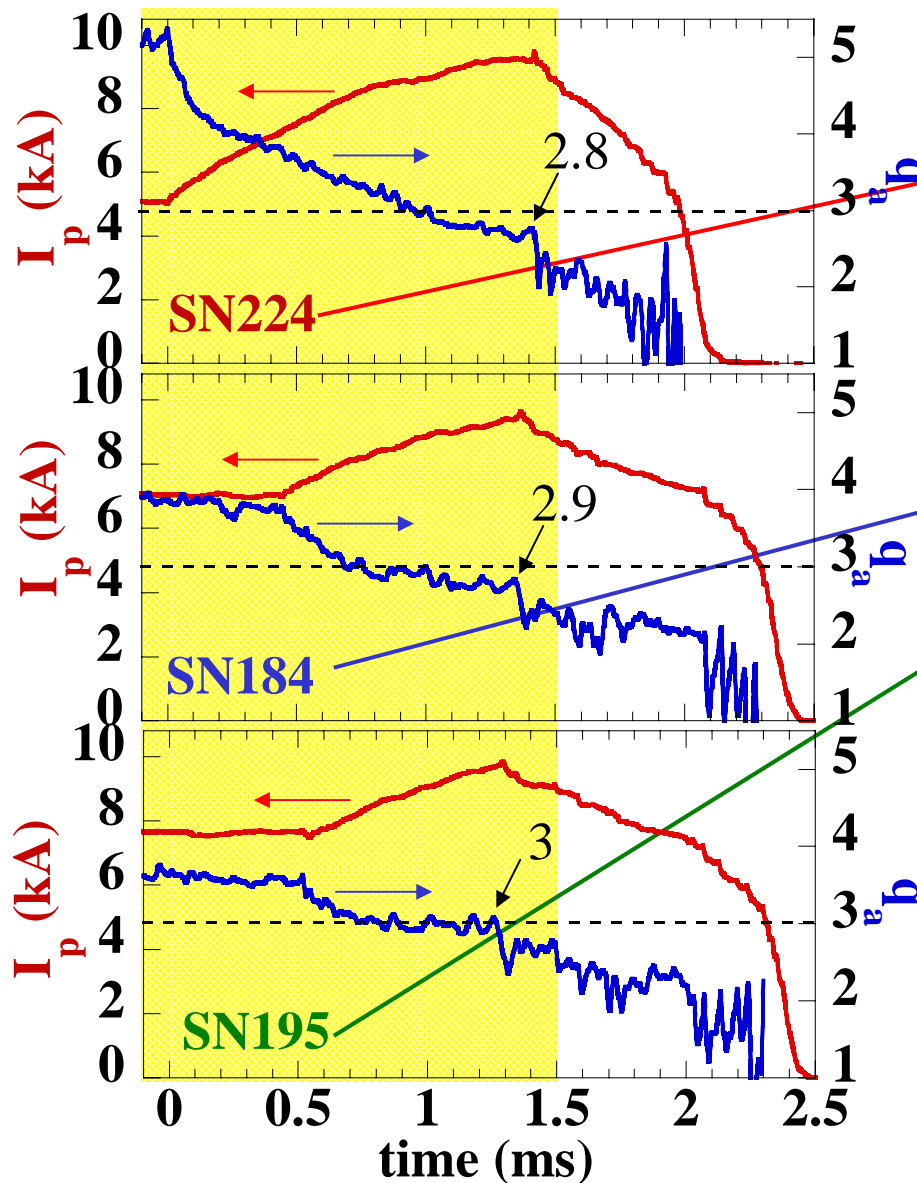
# まとめと今後の課題

---

- 電流クエンチ開始前に $m/n = 3/2$ の磁気島の回転に伴う電子温度揺動が観測された。
- 電流クエンチの発生原因として $m/n = 3/2$ のテアリングモードと $m/n = 1/1$ の内部キンクモードの相互作用による閉じ込め磁場の破壊が考えられる。
- 電流クエンチ開始時にプラズマ電流と粒子の吐き出しが観測され、電流クエンチ直後にプラズマが加熱されていることが考えられる。
- ディスラプション時の電流消滅時間と電子温度との関係を実験的に示したが、断面積の評価を改良する必要があると考えられる。

# 付録

# 電流密度分布制御実験①



電流立ち上げ時  
表皮効果で周辺部に電流が流れる。

電流拡散時間  
( $T_e = 30\text{eV}$ 、 $r = 5\text{cm}$ のとき)

$$\tau_R = \mu_0 r^2 / \eta \sim 580 \mu\text{s}$$



# 電流密度分布制御実験②

