

2004年3月18日(木)

第7回若手科学者によるプラズマ研究会

日本原子力研究所 那珂研究所

崩壊現象、MHD現象

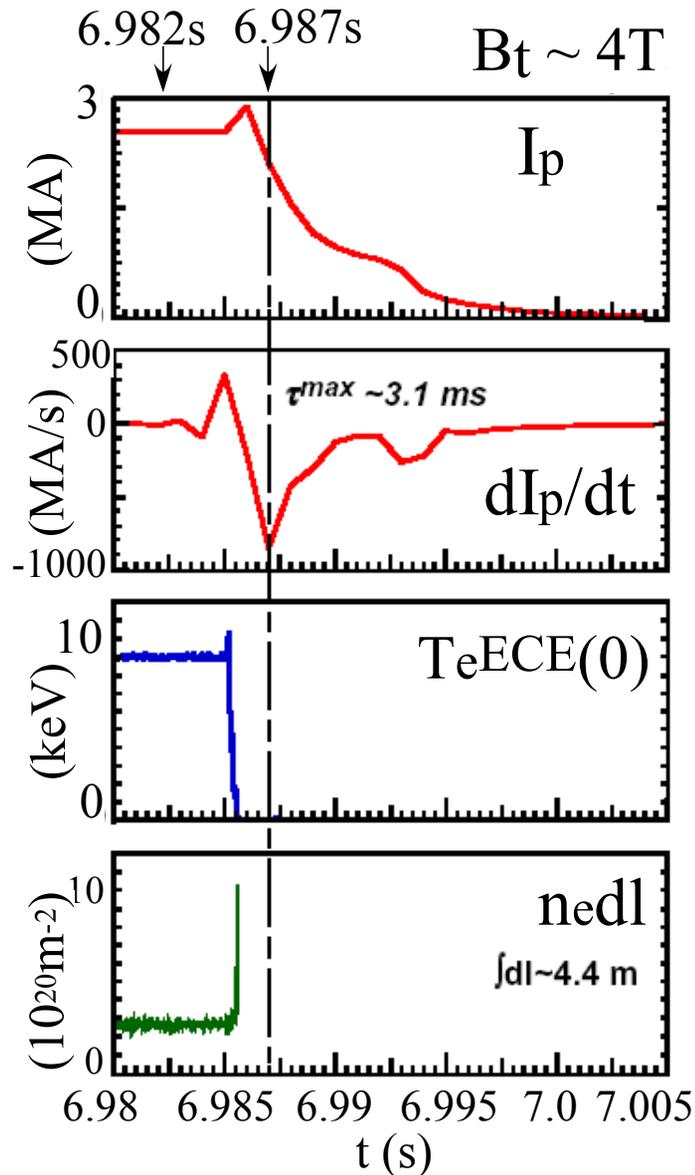
小型トカマクHYBTOK-IIにおける ディスラプション発生時の 内部磁場構造計測と電流減衰時間の評価

岡本 征晃、小久保 慎平、菊池 祐介、大野哲靖¹、上杉喜彦²、高村秀一
名大工、1.名大理工総研、2.金沢大工

目次

1. 研究の背景 (ディスラプション)
2. 研究の目的
3. 実験装置 (小型トカマクHYBTOK-II)
4. プラズマ電流減衰時間
5. HYBTOK-IIにおけるプラズマ電流の2段階減衰
6. ディスラプション時のモード解析
7. プラズマ内部計測
8. まとめ、今後の課題

1. 研究の背景



ディスラプションとは:
大型装置の場合、数MAのプラズマ
電流が数msで消滅する現象

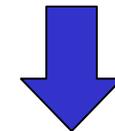
ディスラプション時の主な現象

熱クエンチ

…ダイバータ板への熱負荷

電流クエンチ

…ハロー電流、渦電流による電磁力
逃走電子の発生



対処法の一例

- ・NNによるディスラプション予知
- ・不純物ガス入射による熱負荷の軽減と逃走電子発生の抑制

Fig. Typical Disruption waveform in JT-60U.

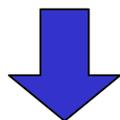
2-1. 研究の目的 (電流減衰時間)

現在のトカマク装置で、ディスラプション時の
プラズマ電流減衰時間を

$$\tau = \frac{L_p}{R_p} \quad \begin{array}{l} L_p: \text{プラズマのインダクタンス} \\ R_p: \text{プラズマの抵抗} \end{array}$$

とした時、プラズマ断面積Sで規格化した値

$$\frac{\tau}{S} = \frac{L_p^{eff}}{2\pi R_0 \eta_p} \quad \eta_p = \frac{R_p S}{2\pi R_0}$$



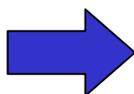
スケーリング

ITERにおける電流減衰時間の評価。

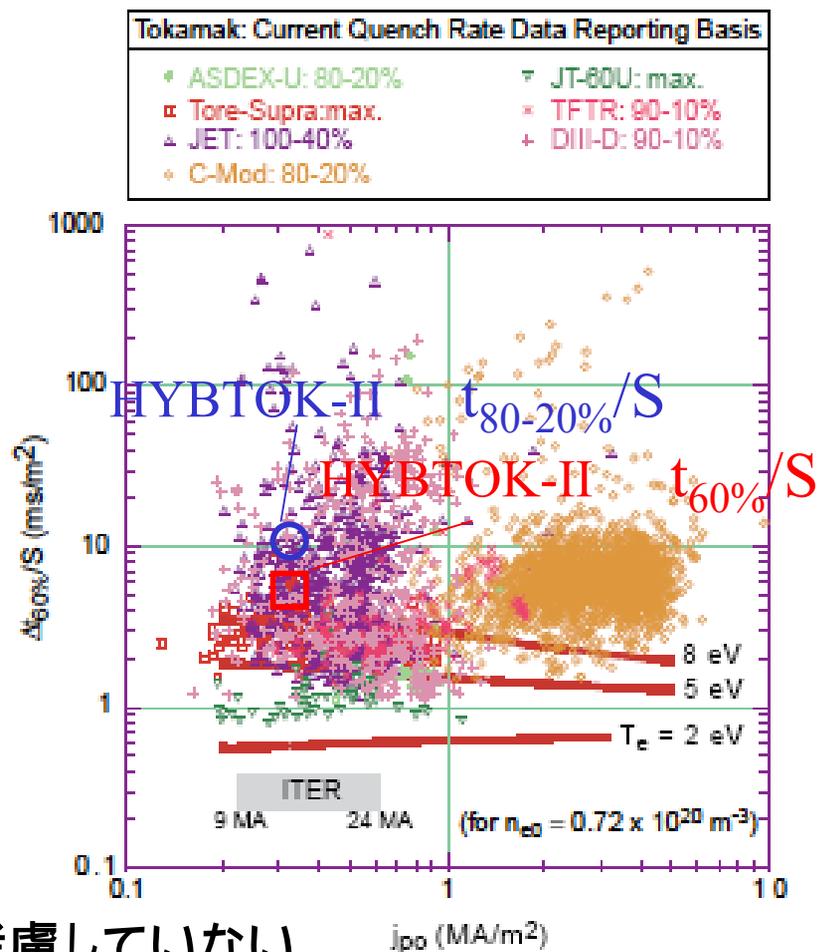
しかし、電流密度分布と電子温度の違いを考慮していない。

・現在のスケーリングの問題点

装置間の評価の違い
ショットによる のばらつき

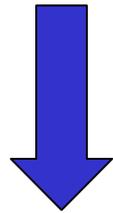


新しい の評価方法の提案



2-2.研究の目的(内部計測)

プラズマ電流減衰時間を決定するものは何か？
電流密度、電子温度の時間発展や径方向分布



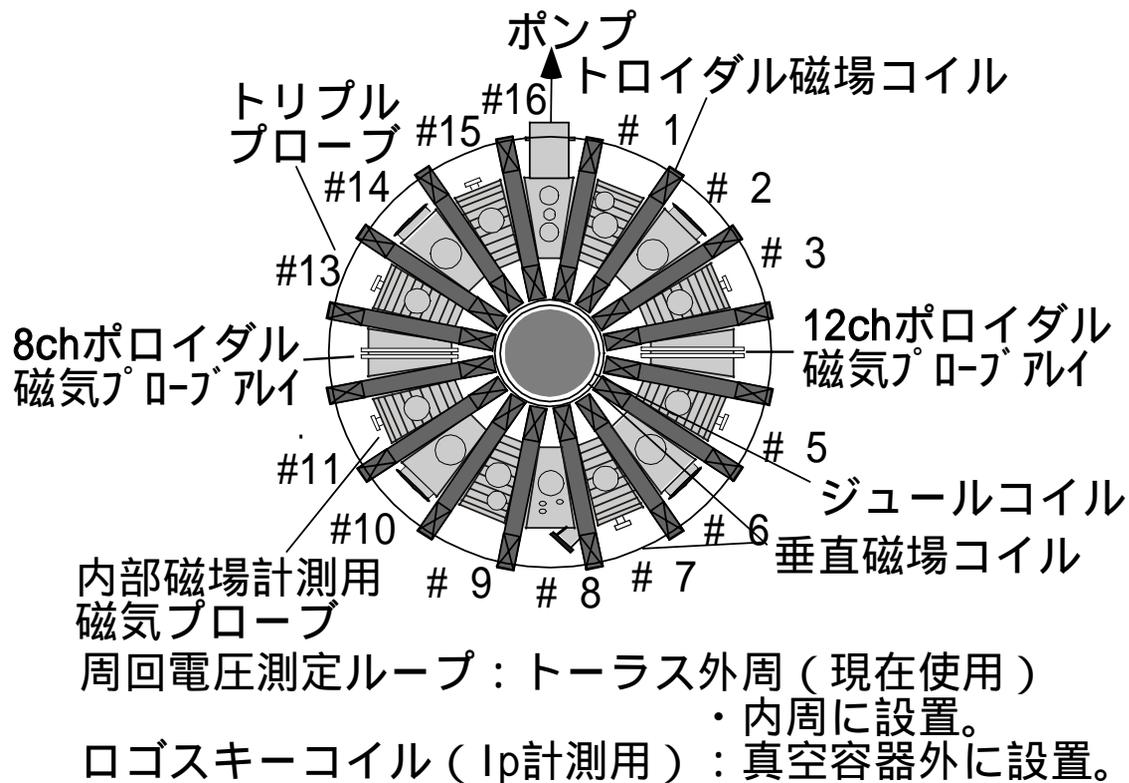
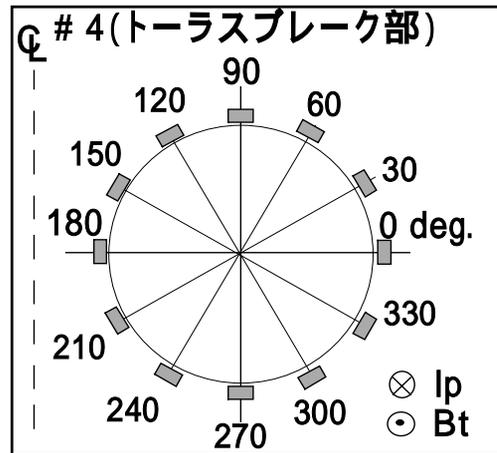
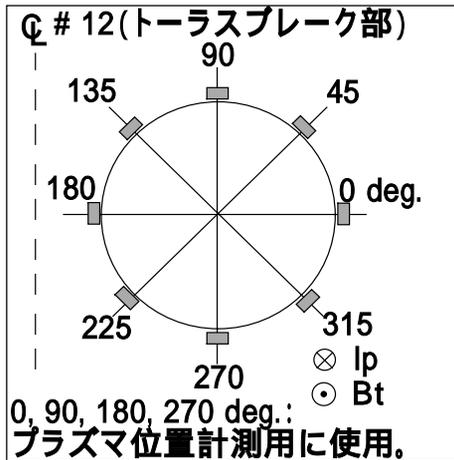
$$\tau \propto S, \frac{1}{\eta_p}, \frac{L_p^{eff}}{R_0}$$

$$L_p^{eff} = L_i + L_e = \mu_0 R_0 \left(\frac{1}{2} l_i + \ln \frac{8R_0}{a} - 2 \right)$$

$$\eta_p \propto T_e^{-3/2}$$

小型トカマク装置での磁気、静電プローブを用いた
プラズマ内部の直接計測

3. 小型トカマクHYBTOK-II

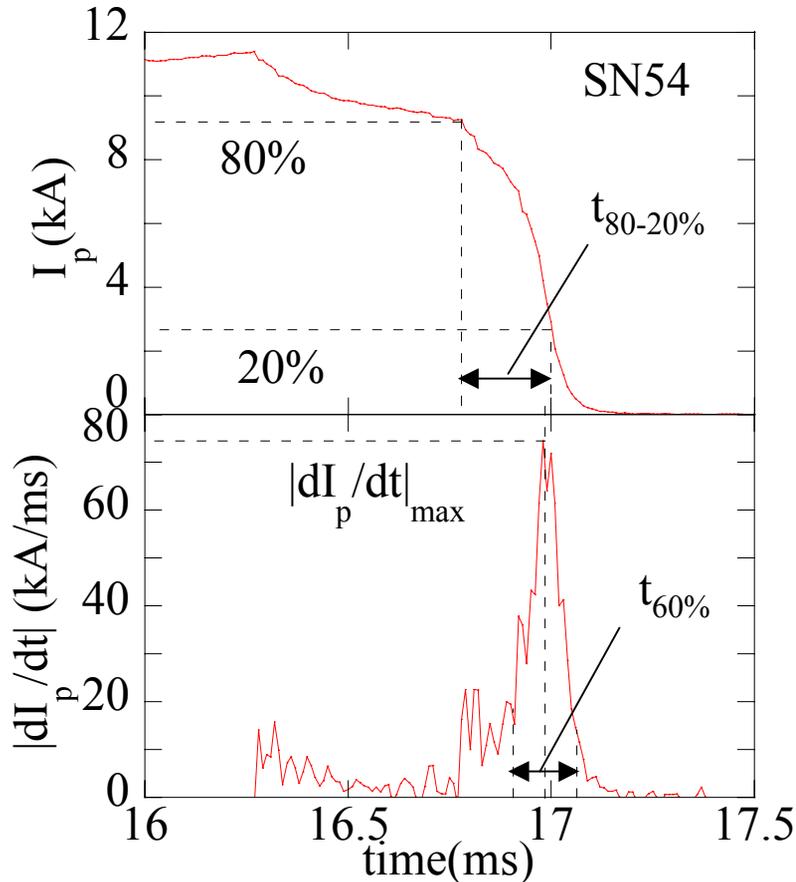


HYBTOK- 主要パラメータ

大半径 R_0	0.40m
小半径 a	0.11m
プラズマ電流 I_p	~15kA
トロイダル磁場 B_t	~0.5T
電子密度 n_e	~ $2.0 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$
放電時間	26ms
放電間隔	3min

4-1.電流減衰時間評価の提案手法

・渦電流による電磁力が最大になる所に着目した手法



ディスラプション開始時からプラズマ電流が消滅する時間を時間で微分。

dI_p/dt が最大になる時刻を中心に、左右同じ時間だけずらし、その区間の面積が全体の面積の60%になった時の時刻を電流減衰時間とする。

SN54では

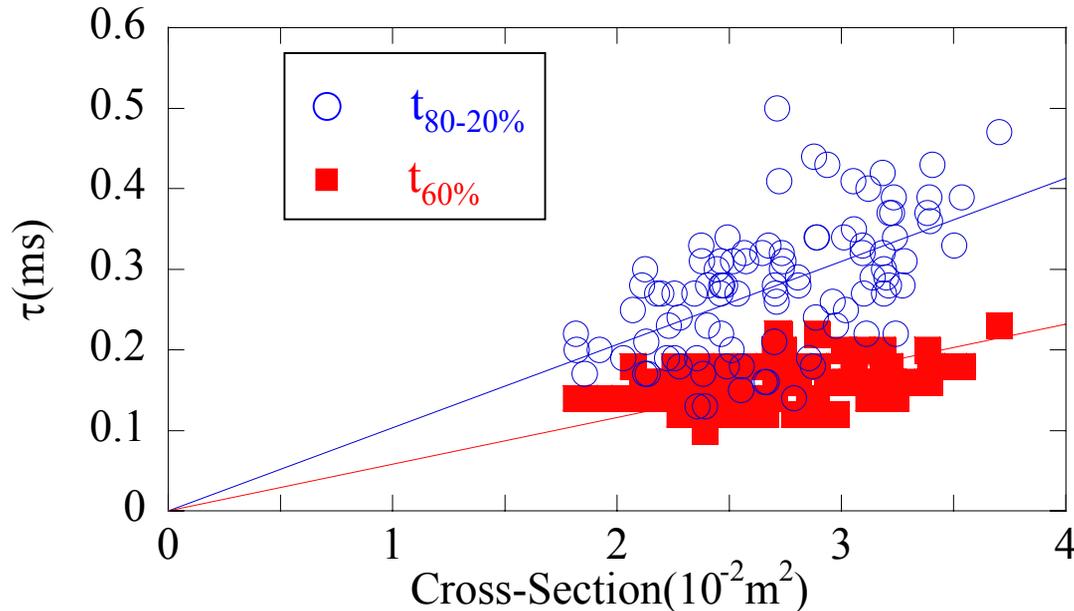
$$t_{80-20\%} = 0.22\text{ms}$$

$$t_{60\%} = 0.16\text{ms}$$

HYBTOK-IIのディスラプション波形では fast decay を重視した電流減衰時間になる。

Fig. Typical Disruption waveform in HYBTOK-II

4-2.電流減衰時間評価結果



提案手法では のばらつきを抑えられた。

$$t_{80-20\%}/S=10\text{ms}/\text{m}^2$$

$$t_{60\%}/S = 5.8\text{ms}/\text{m}^2$$

$$j_z = \frac{(\nu + 1)I_p}{\pi a^2} \left\{ 1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \right\}^\nu$$

$$=2.6, T_e=10\text{eV}$$

プラズマ半径10cmのとき

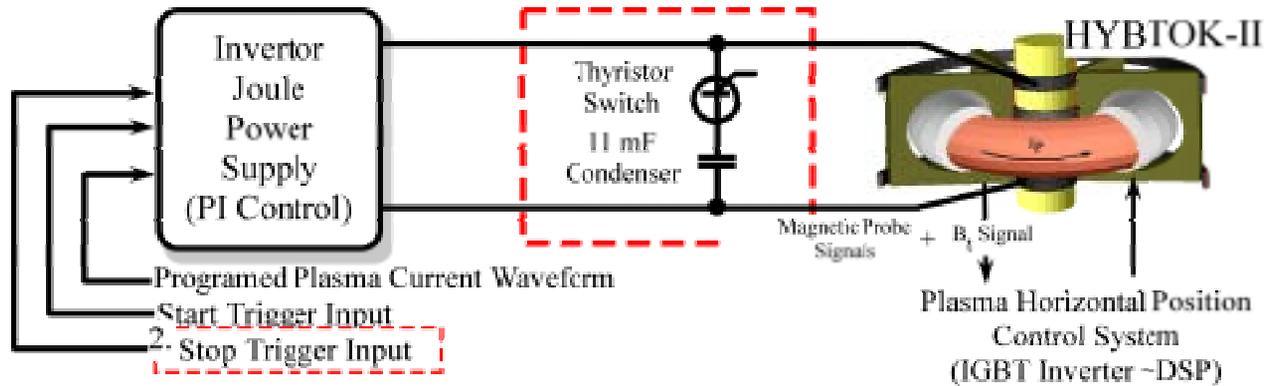
$$L_p=1.04 \times 10^{-6}\text{H}$$

$$R_p=2.24 \times 10^{-3}$$

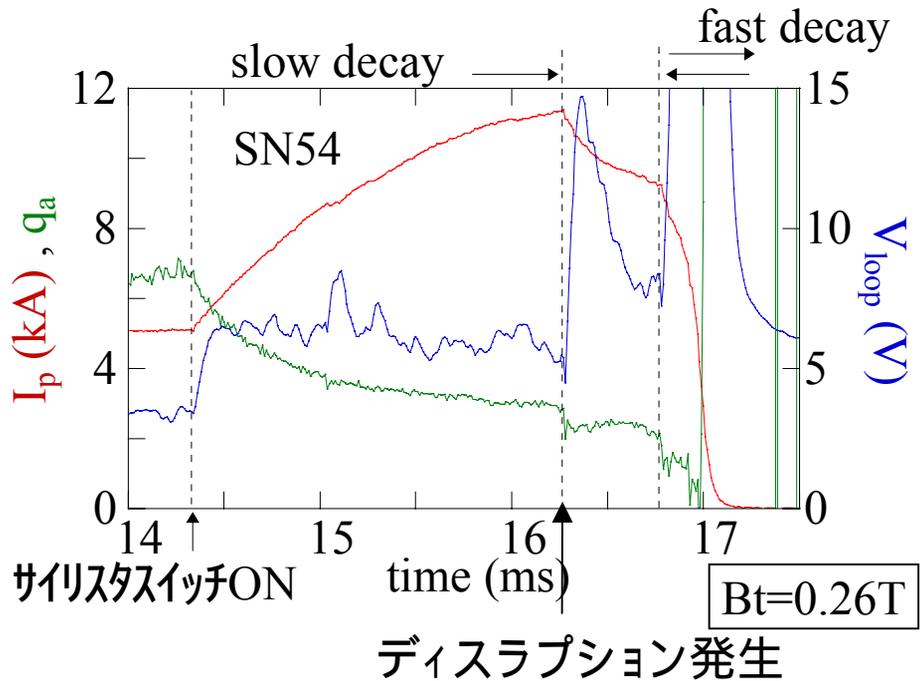
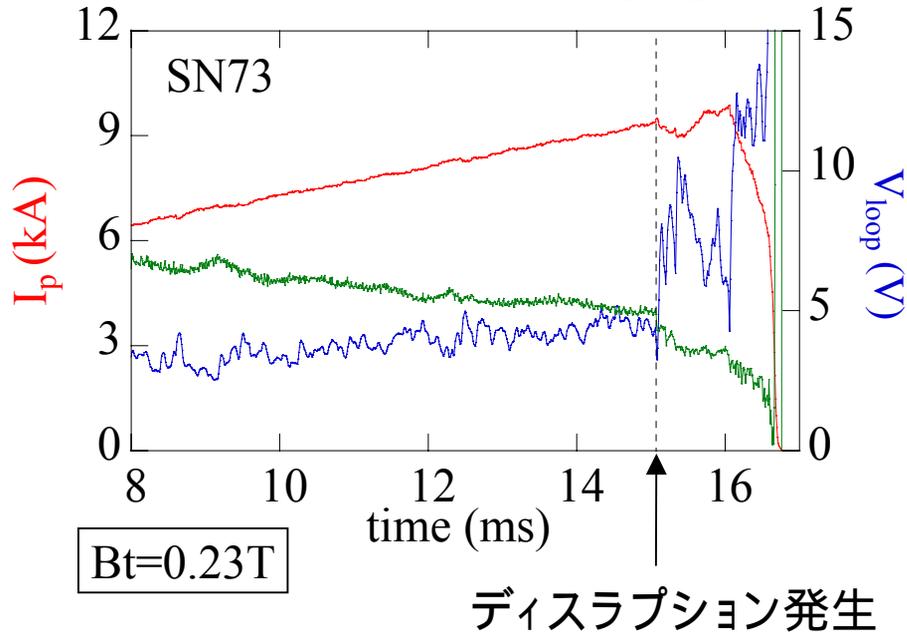
$$\tau = \frac{L_p}{R_p} = 0.46\text{ms}$$

5. プラズマ電流の2段階減衰

IGBTインバータ放電の途中でコンデンサバンク放電に切り替える運転

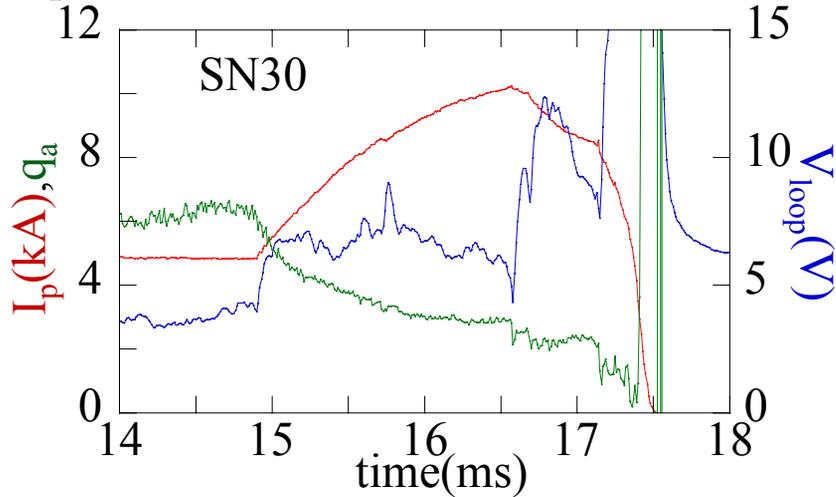


IGBTインバータ放電

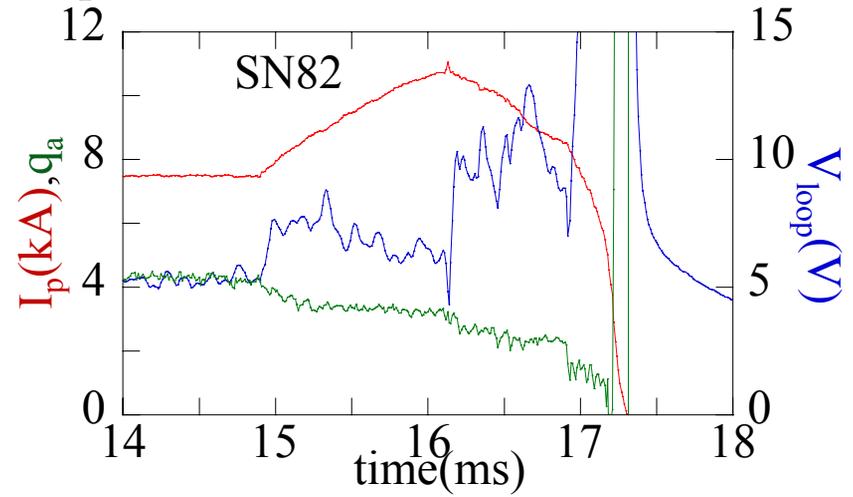


5. プラズマ電流の2段階減衰

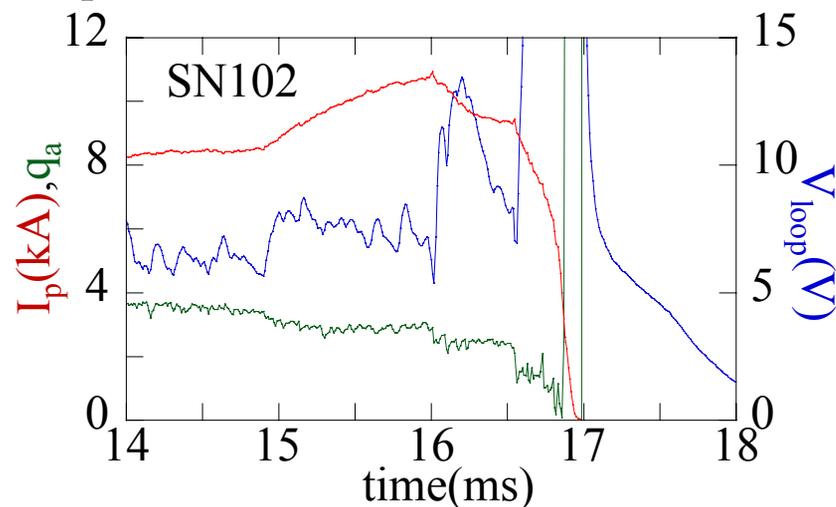
$I_p=5\text{kA}$ ベースでの切り替え。 $Bt=0.26\text{T}$ 。



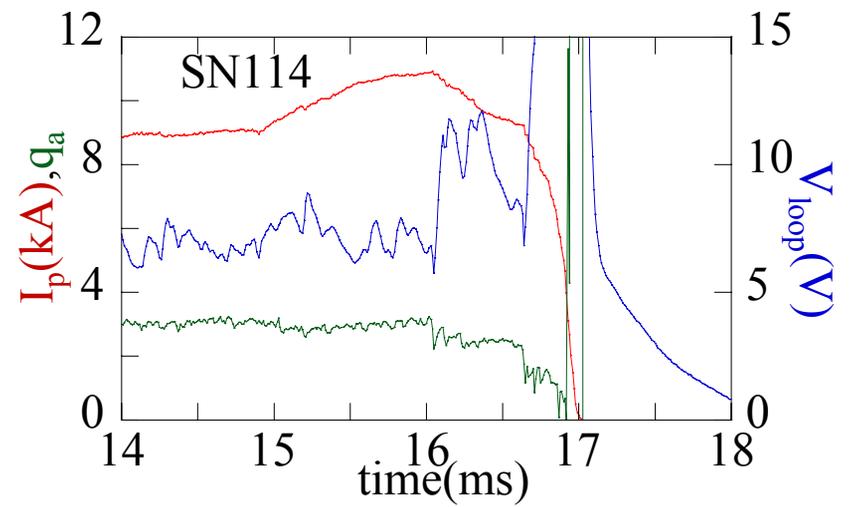
$I_p=7.5\text{kA}$ ベースでの切り替え。 $Bt=0.25\text{T}$ 。



$I_p=7.5\sim 8.3\text{kA}$ で切り替え。 $Bt=0.25\text{T}$ 。

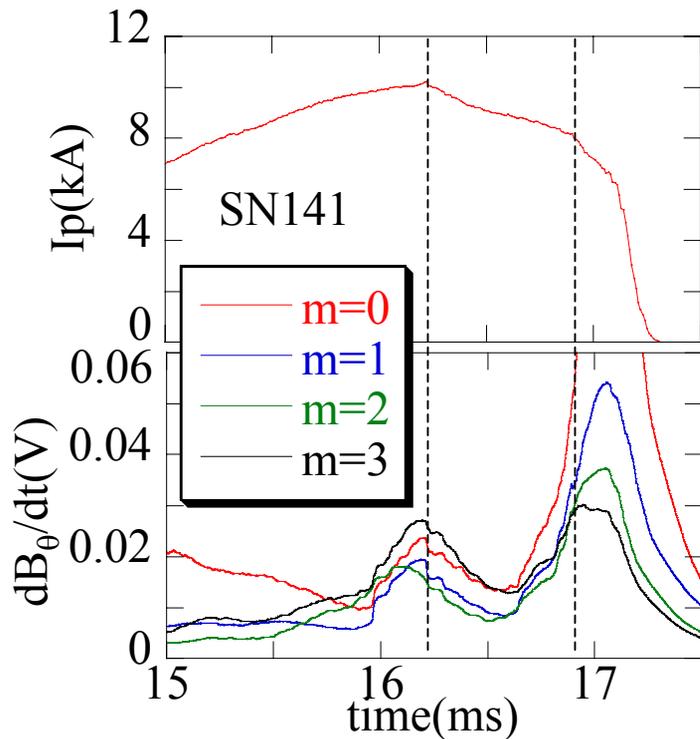


$I_p=7.5\sim 9\text{kA}$ で切り替え。 $Bt=0.25\text{T}$ 。

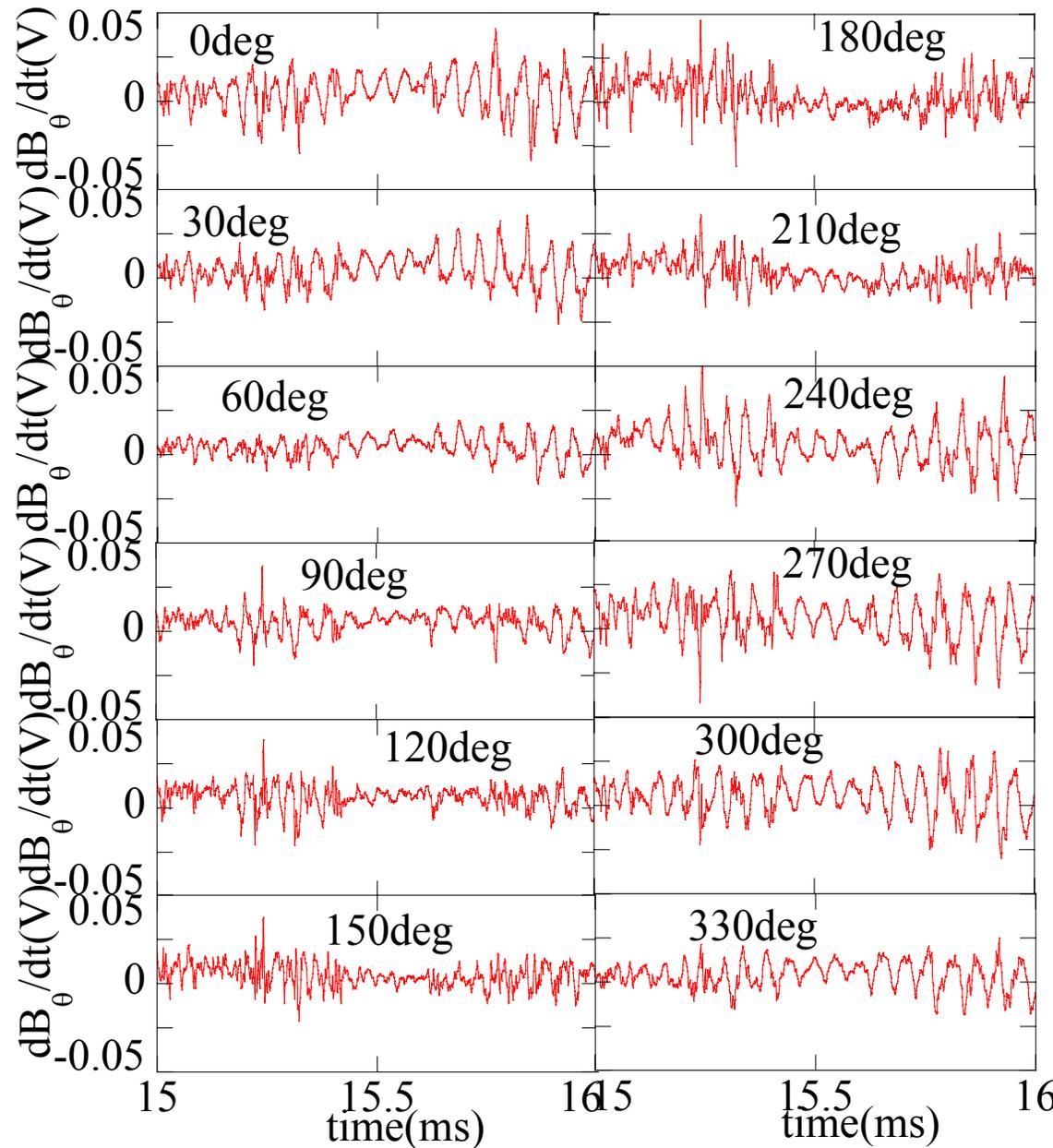


プラズマ電流の2段階減衰はプラズマ電流波形によらないことを確認

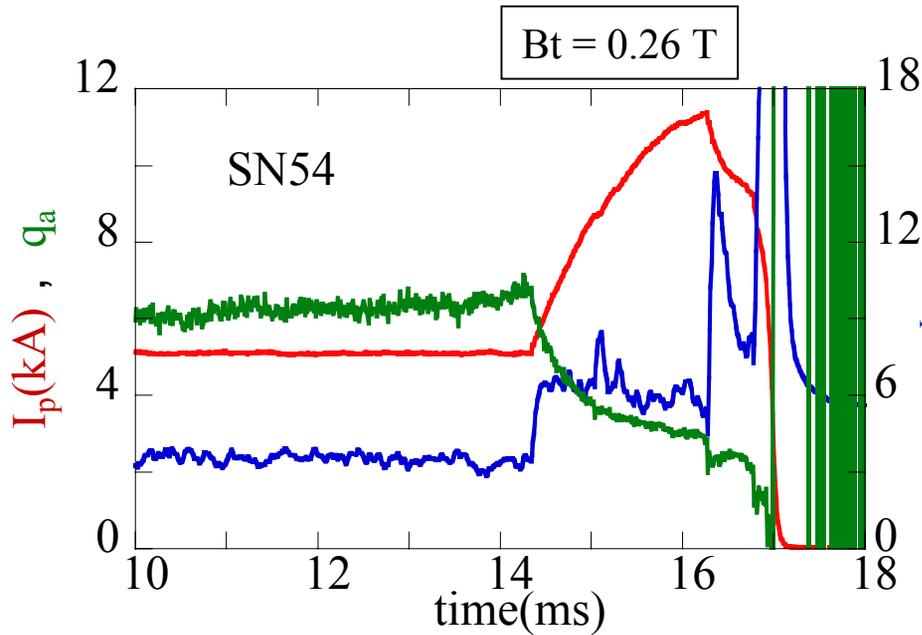
6. ディスラプション時のモード解析



slow decay 開始時
 $m=2,3$ のモードが成長
fast decay 開始時
 $m=1$ のモードが大きく成長

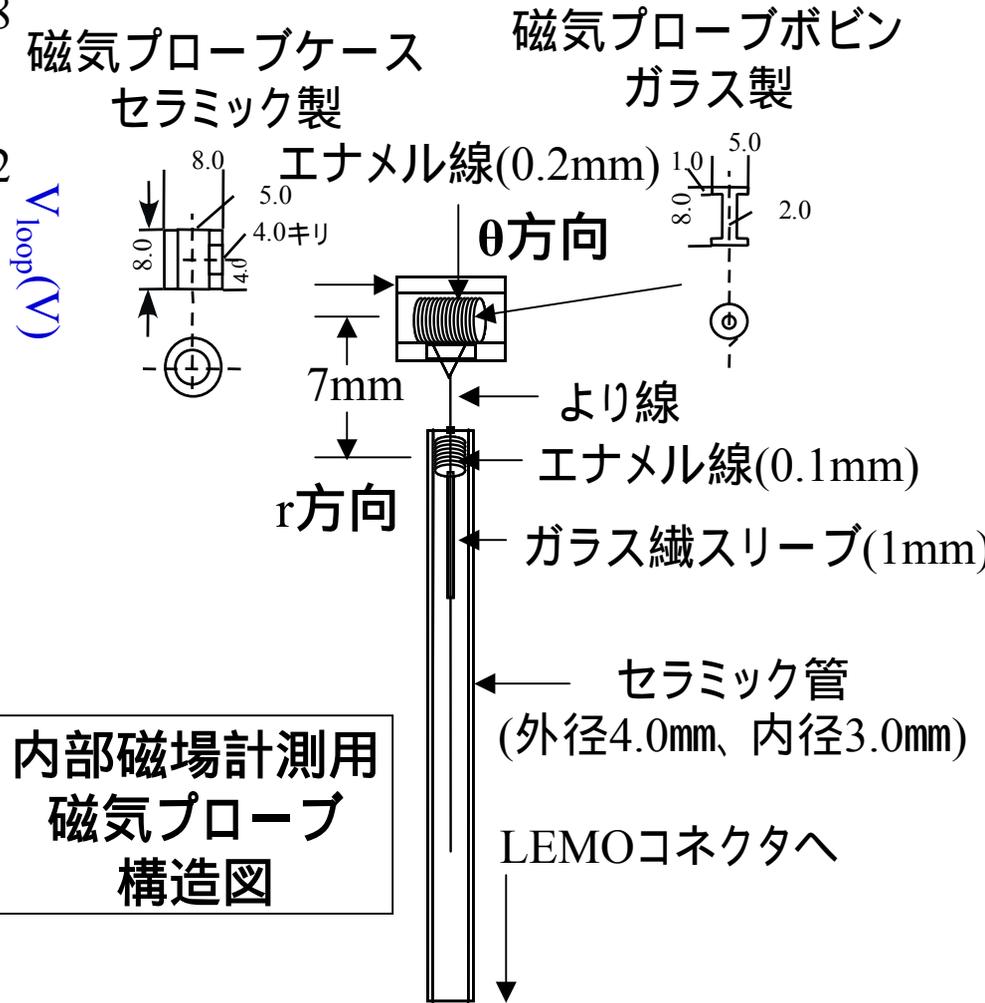


7. プラズマ内部計測

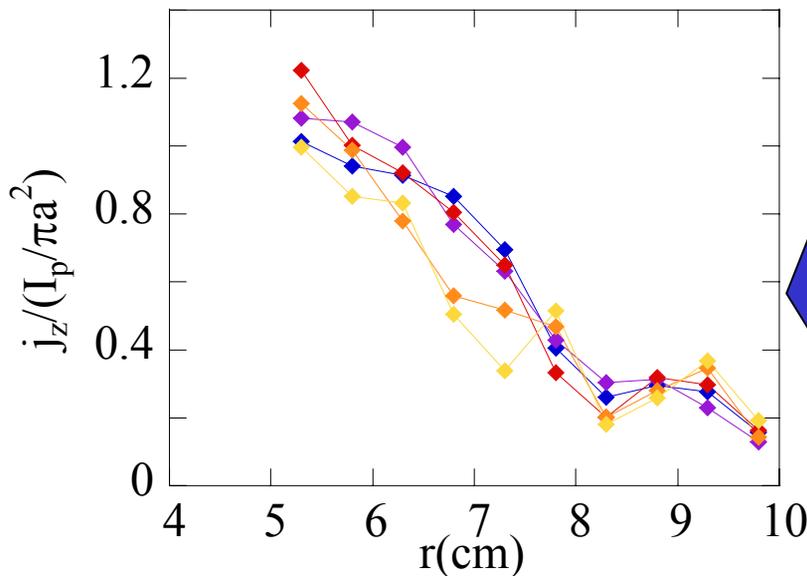
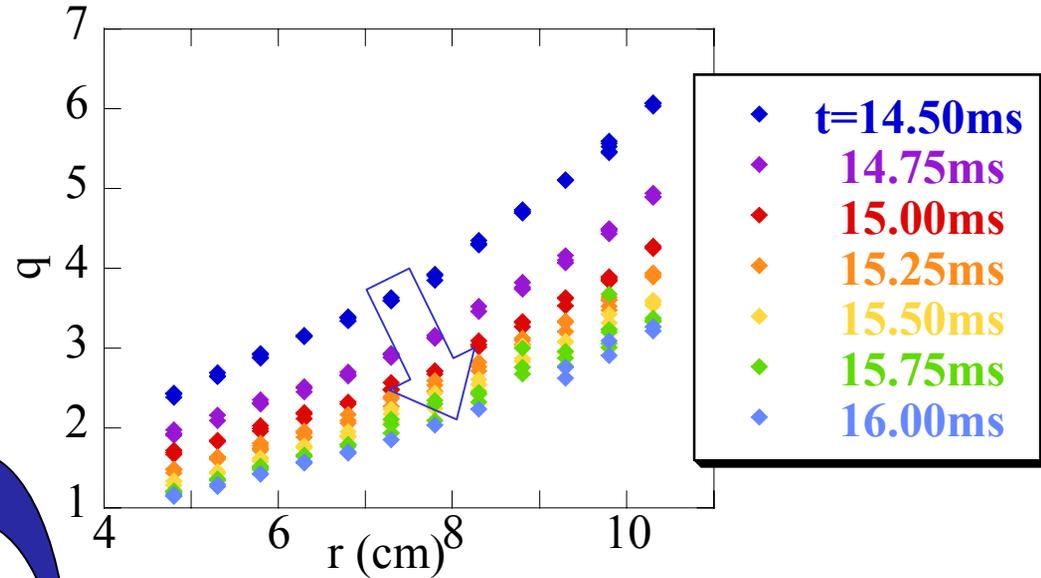
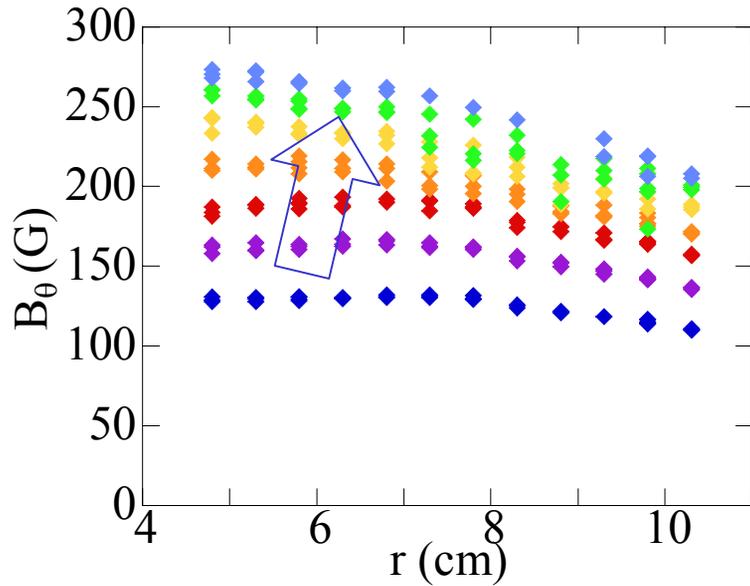


プラズマパラメータは固定

磁気プローブは B_r を基準にして
 $r=11$ cmから0.5cm間隔で $r=6$ cm
 まで内部に挿入



7-1.内部磁場の時間発展

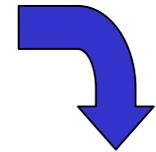
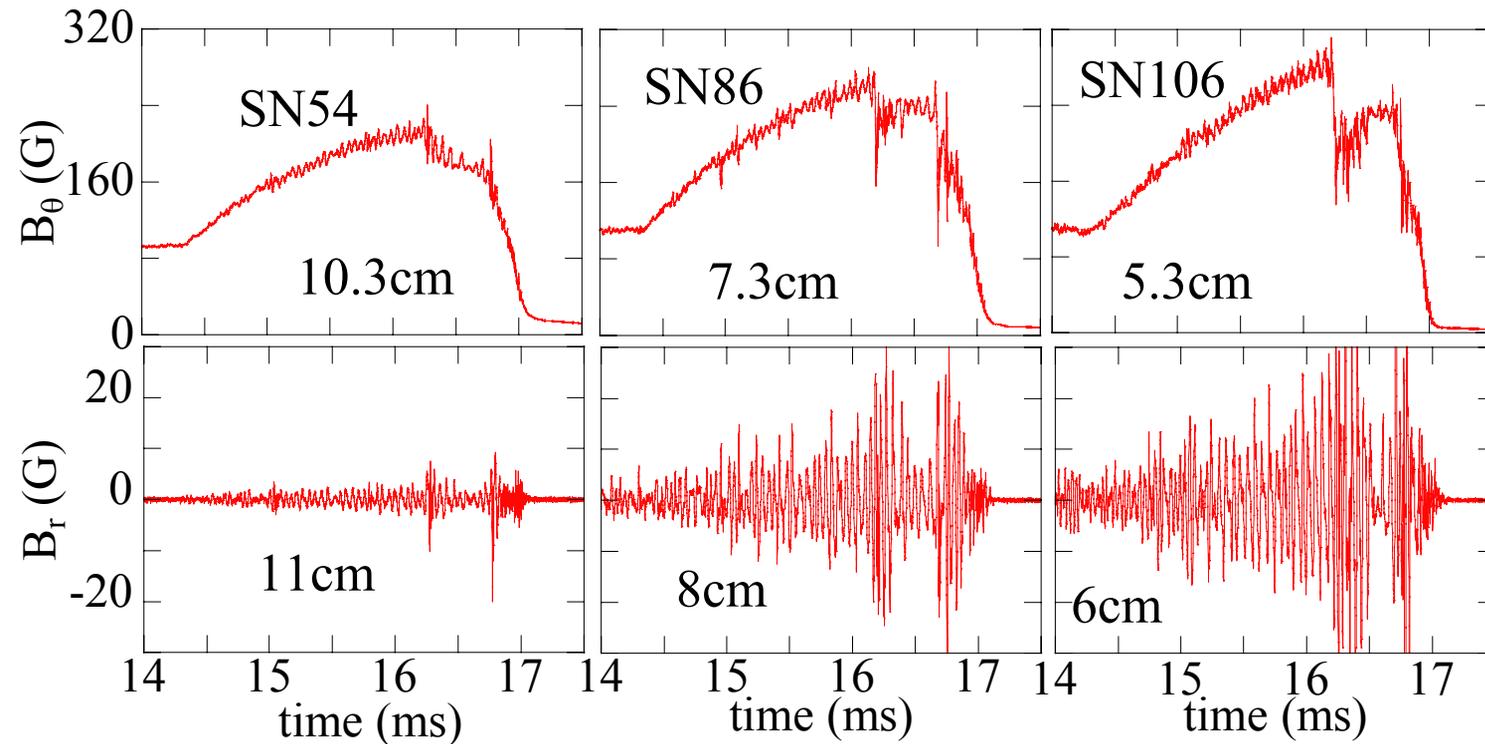


$$q = \frac{rB_t}{R_0B_\theta}$$

ディスラプション
直前でプラズマ
表面で q が3を
下回る。

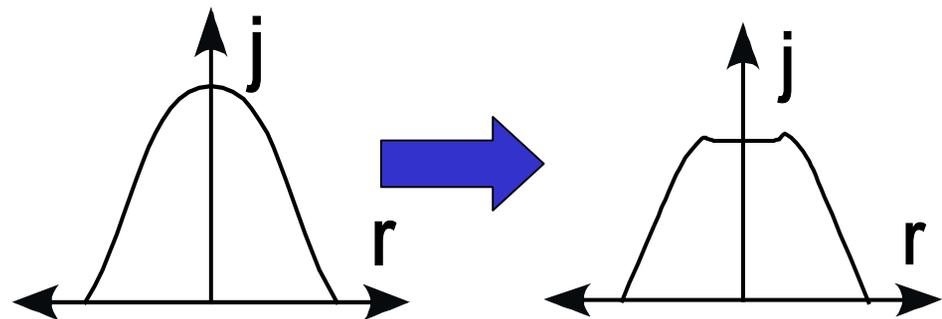
時間が経過するに
つれ、電流密度分布
が中心にピークする。

7-2.内部磁場径方向分布

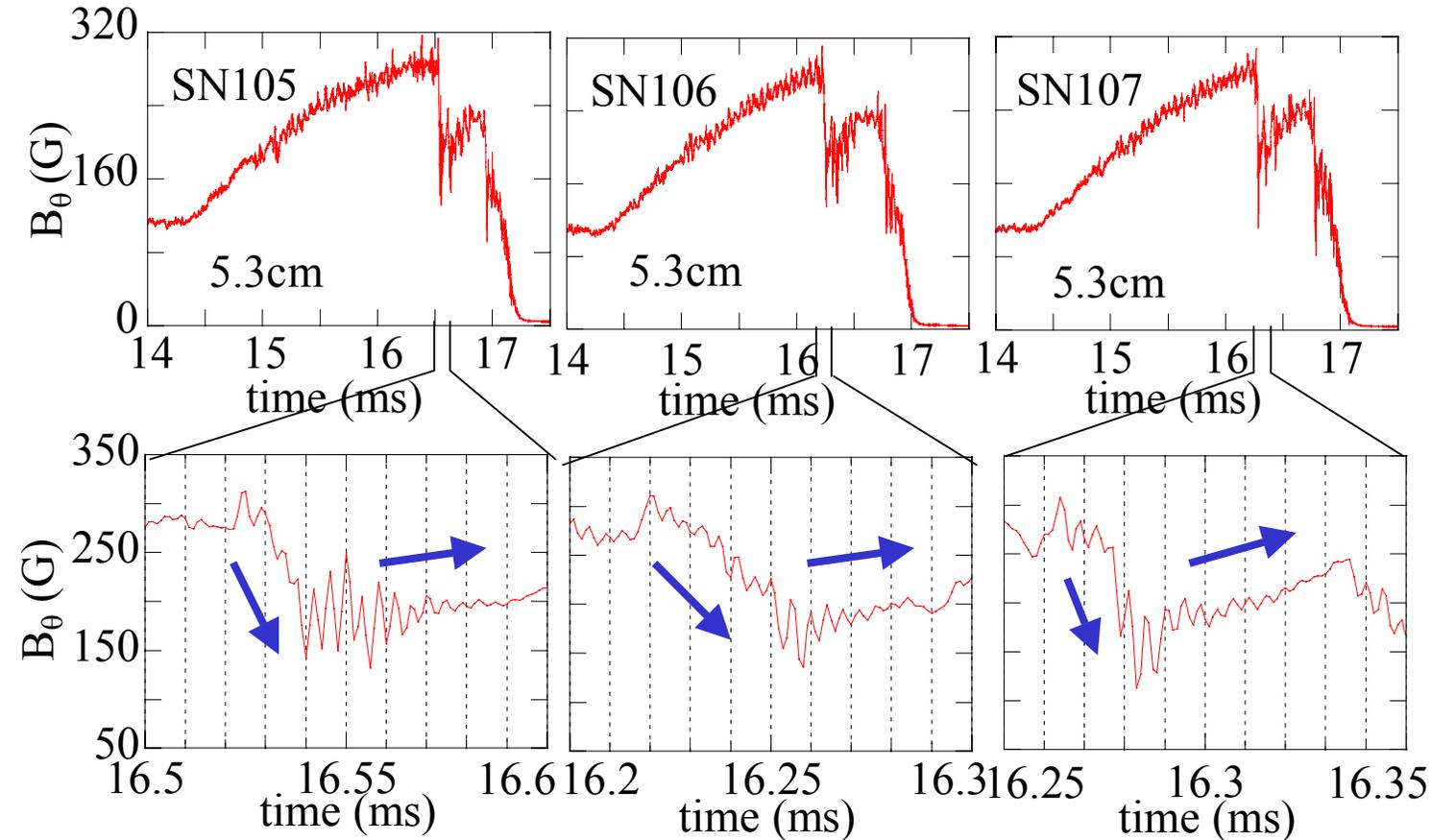


プラズマの内部ではディスラプション時にポロイダル磁場が大きく減少

ディスラプション時に内部の電流が吐き出されているのではないか？
(内部MHD不安定性?)



7-3.内部磁場の速い減衰



抵抗性拡散時間

$$\tau_R = \frac{\mu_0 a^2}{\eta}$$

$$\eta = \frac{3 \times 10^{-8}}{T_e (\text{keV})^{\frac{3}{2}}}$$

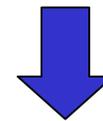
$$a = 0.11 \text{ m}$$

$$T_e = 30 \text{ eV}$$

の時

$$\tau_R = 2.6 \text{ ms}$$

ポロイダル磁場が急激に減少した後
増加に転じる様子を確認。
電流密度がディスラプション前に戻る。

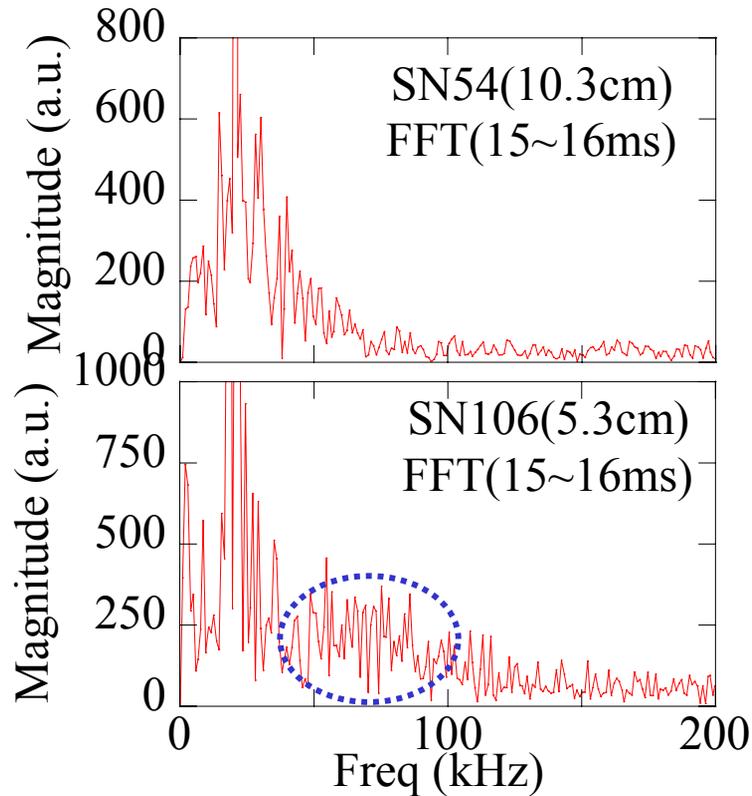


10~30 μs 程度の
減衰時間

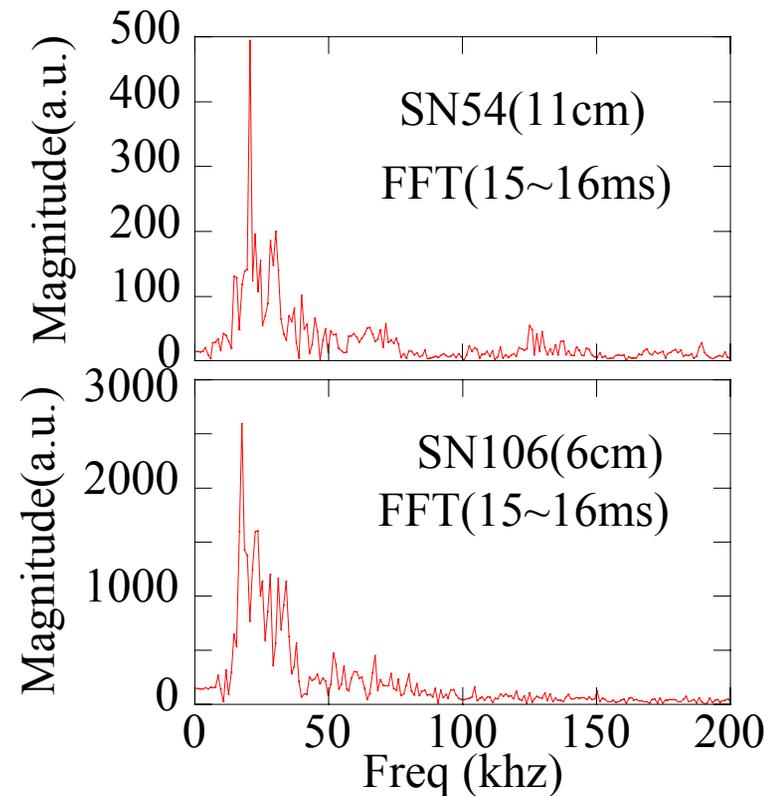
\ll 抵抗性拡散時間

7-4.内部磁場揺動

B 揺動の周波数スペクトル



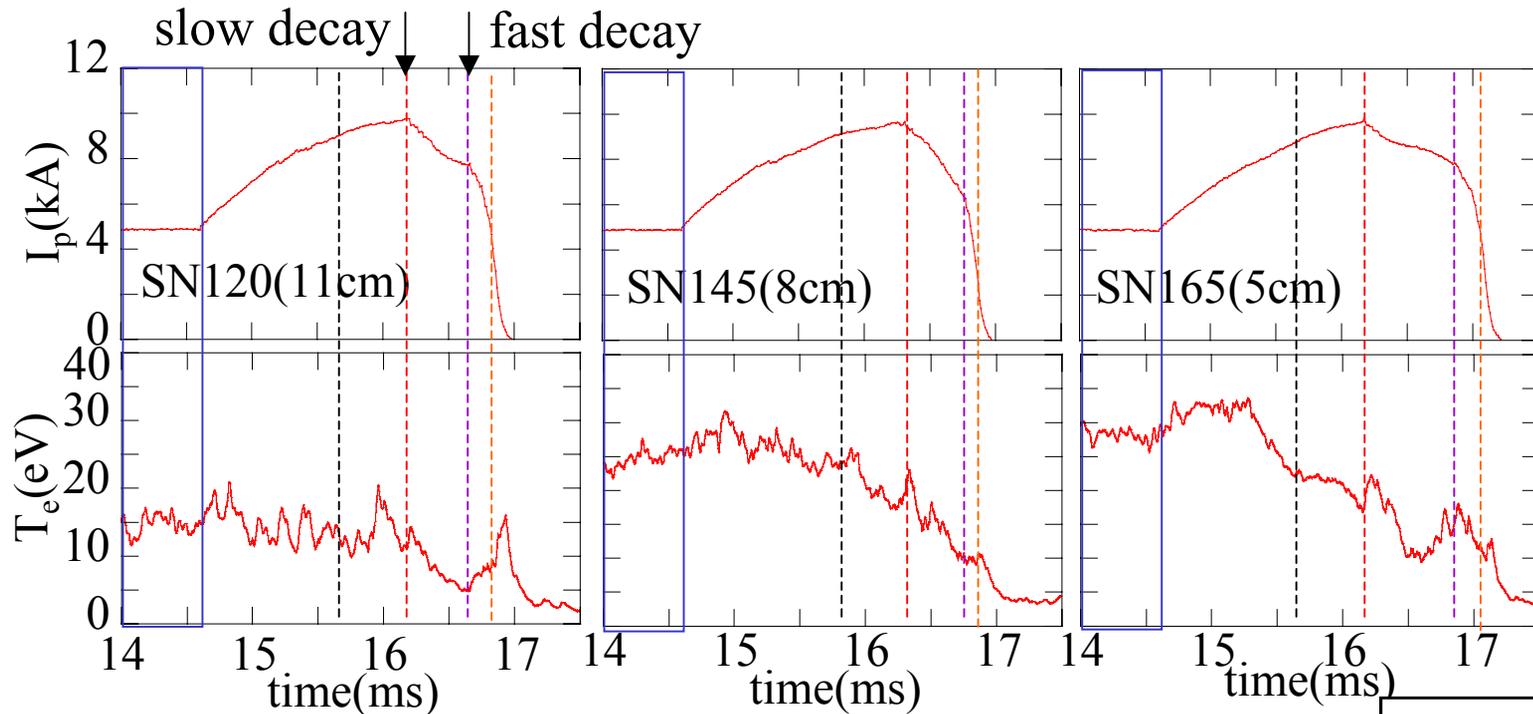
B_r揺動の周波数スペクトル



内側のポロイダル磁場には
低周波(15~20kHz)揺動の上に
高周波(50~100kHz)揺動がのっている。

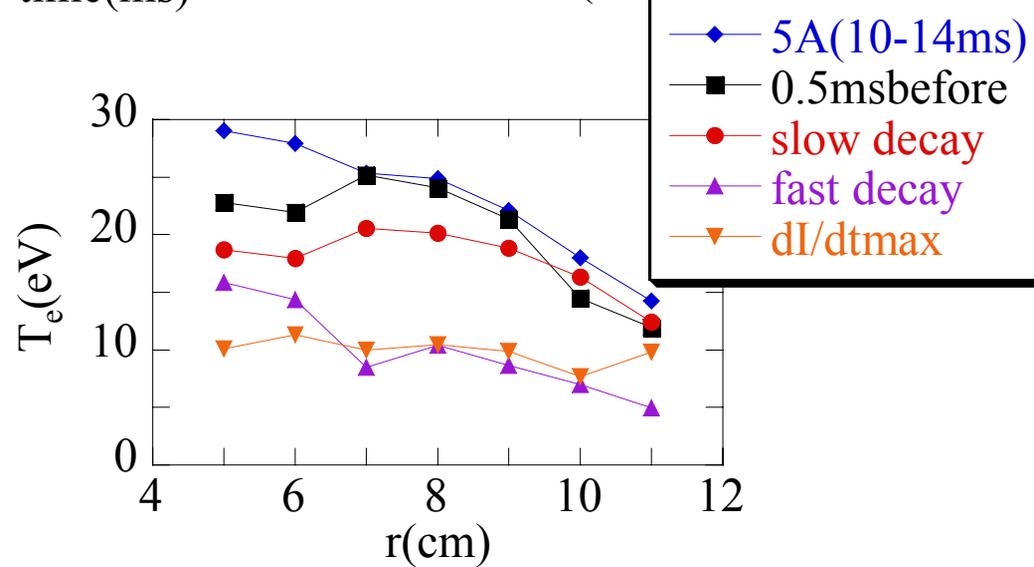
内側のポロイダル磁場に見られる
高周波(50~100kHz)揺動は径方向磁場
では見られない。

7-5.トリプルプローブによる電子温度計測



slow decay開始時では
外側より内側の電子温度が
落ち、fast decay開始時では
大幅に全体の温度が減少する。

dI/dt_{\max} 時には $r=5\sim 11\text{cm}$ の
電子温度が 10eV 程度になる。



まとめ、今後の課題

まとめ

- HYBTOK-IIでのディスラプション波形が2段階減衰になることが確認された。
- 提案する電流減衰時間の評価では、ばらつきを抑えることが出来た。
- ディスラプションが発生すると内部の電流が短い時間で吐き出される。

今後の課題

- 大型トカマク装置(JT-60U)での提案手法による電流減衰時間の評価。
- ガス種を変えた時の電流減衰時間の評価。
- 多チャンネル磁気プローブアレイによるポロイダル磁場の径方向分布の同時計測。
- ディスラプション時のMHD不安定性モードの特定。

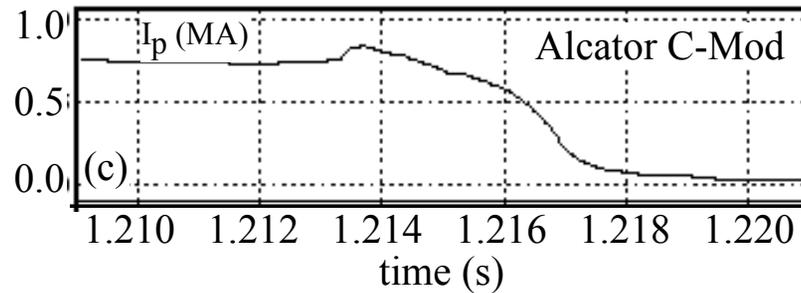
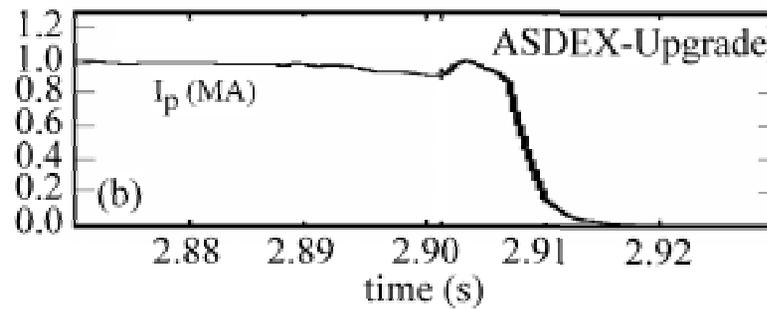
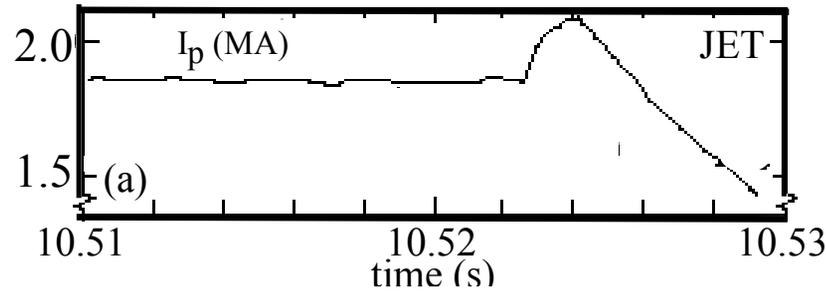
付録：装置別電流減衰時間

Table 6. Machine and plasma parameters and analysis results for current quench database

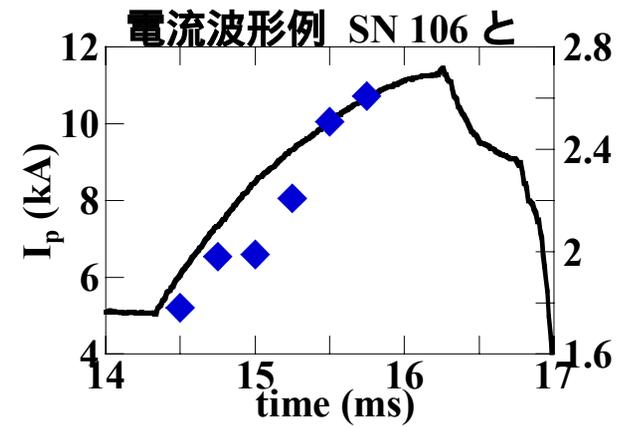
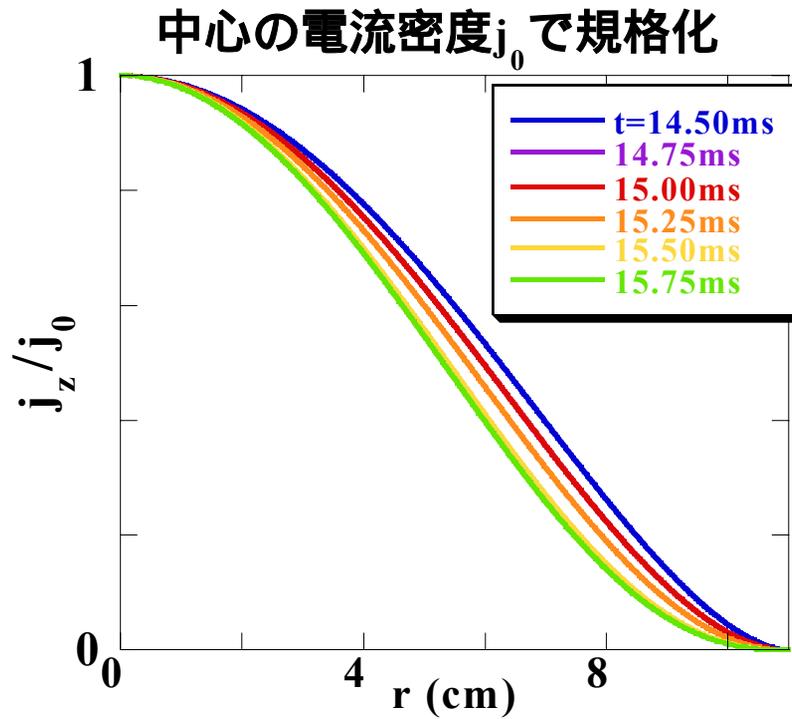
Tokamak	$R0$ (m)	A (m)		S (m ²)	$\text{min.}t_{cq}/S$ (msm ⁻²)	$\text{min.} t_{cq}$ (ms)	t_{wall} (ms)
Tore-Supra	2.3	0.75	1.0	1.77	2	3.5	7.5
JET	3.0	1.0	1.5	4.71	1.5	7.1	5
C-Mod	0.68	0.22	1.6	0.243	1.7	0.4	6
ASDEX-Upgrade	1.65	0.5	1.6	1.26	1.1	1.4	13
JT-60U	3.3	0.9	1.4	3.56	0.8	2.8	20
TFTR	2.5	0.9	1.0	2.54	1.2	3.0	10
DIII-D	1.7	0.6	1.8	2.04	1.0	2.0	10
ITER	8.14	2.8	1.6	39.4	0.8	32	1000

Extrapolation for ITER based on $S \cdot 1dI=dt = 0.8 \text{ MAm} \cdot 2 \text{ ms} \cdot 1.$

付録：装置別プラズマ電流波形



付録：電流密度分布



付録: インダクタンス

内部インダクタンス

$$L_i = \frac{1}{2} \mu_0 R_0 l_i \quad l_i = \frac{\int_0^a B_\theta^2 r dr}{a^2 B_{\theta a}^2}$$

外部インダクタンス

$$L_e = \mu_0 R_0 \left(\ln \frac{8R_0}{a} - 2 \right) \quad L_p^{eff} = L_i + L_e = \mu_0 R_0 \left(\frac{1}{2} l_i + \ln \frac{8R_0}{a} - 2 \right)$$

$$j_z = \frac{(\nu + 1) I_p}{\pi a^2} \left\{ 1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right\}^\nu$$

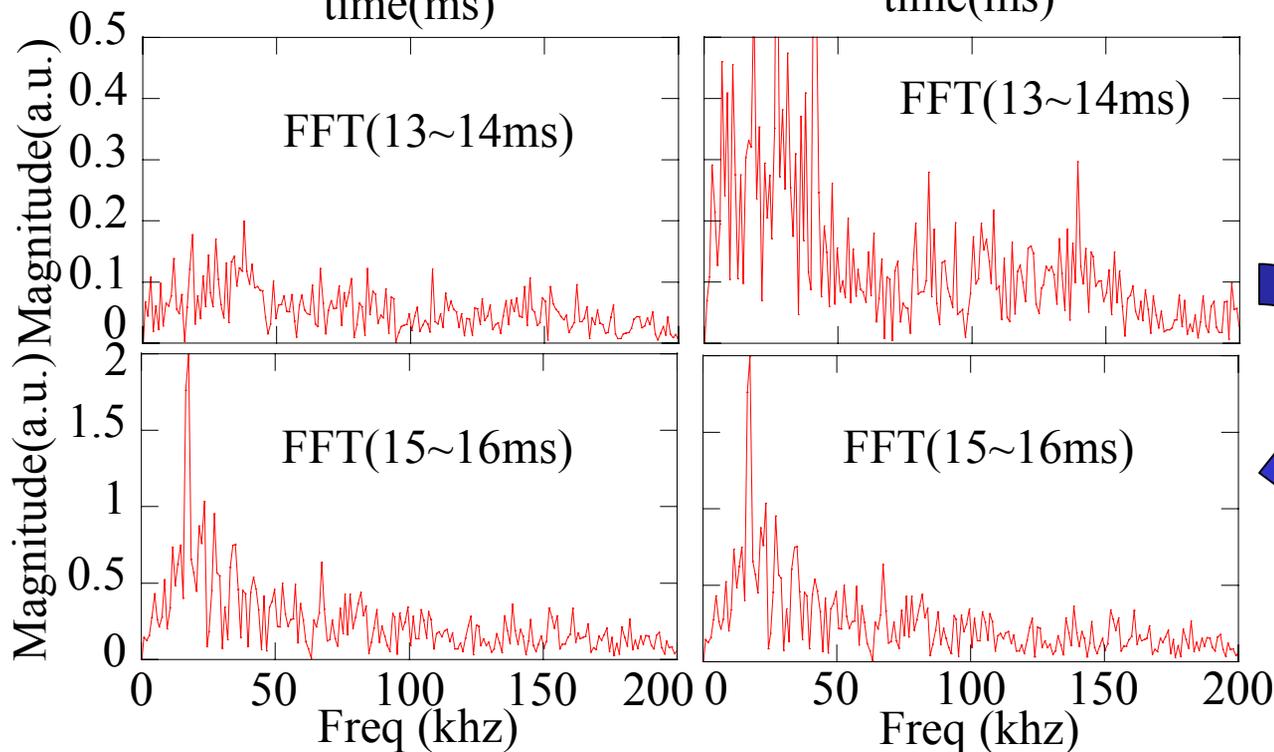
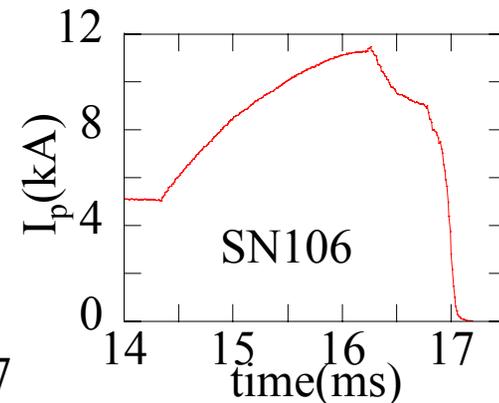
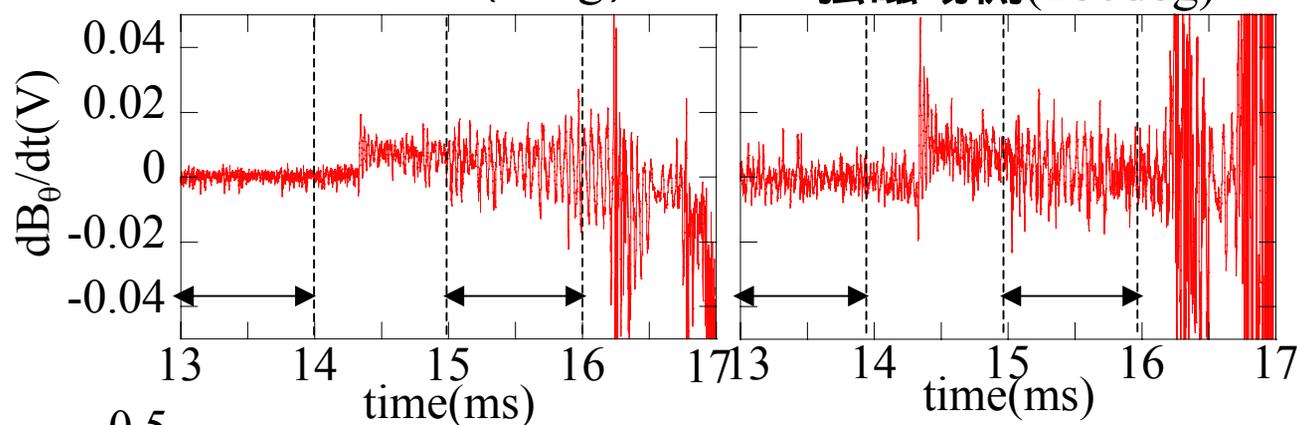
$$l_i = \ln(1.65 + 0.89\nu)$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi r} \left[1 - \left\{ 1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right\}^{(\nu+1)} \right]$$

$$\eta = 2.8 \times 10^{-8} \times T_e^{-3/2} [\Omega \cdot m]$$

付録: 外部磁場揺動

SN106での外部ポロイダル磁場
弱磁場側(0deg) 強磁場側(180deg)



プラズマ電流が
大きくなるにつれ
周波数が遅く
(15~20kHz程度)
なる。