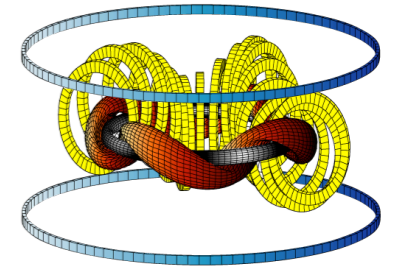


2008.3.19

第11回若手科学者によるプラズマ研究会



# 東北大学ヘリアック装置における 熱陰極バイアスプラズマ中での 密度崩壊現象

東北大大学院工学研究科

田中豊、岡本敦

# 熱陰極バイアス実験

東北大学ヘリアック装置における熱陰極バイアス実験

⇒熱陰極からオーミックプラズマに電子注入

~特徴~

(1) 線電子密度増加(約3倍)、最外殻磁気面における密度低下

(2) 径電場形成(2 ~ 4 kV/m)、 $E \times B$ フロー形成(約10 km/s)

(3) 100 kHz以下の揺動低下

(4) 不純物蓄積量低下

- 大型装置の閉じ込め改善モードと似た特徴
- 遷移のメカニズム⇒新古典理論の予想と一致



(5) プラズマ中心領域における密度崩壊、間欠性の揺動

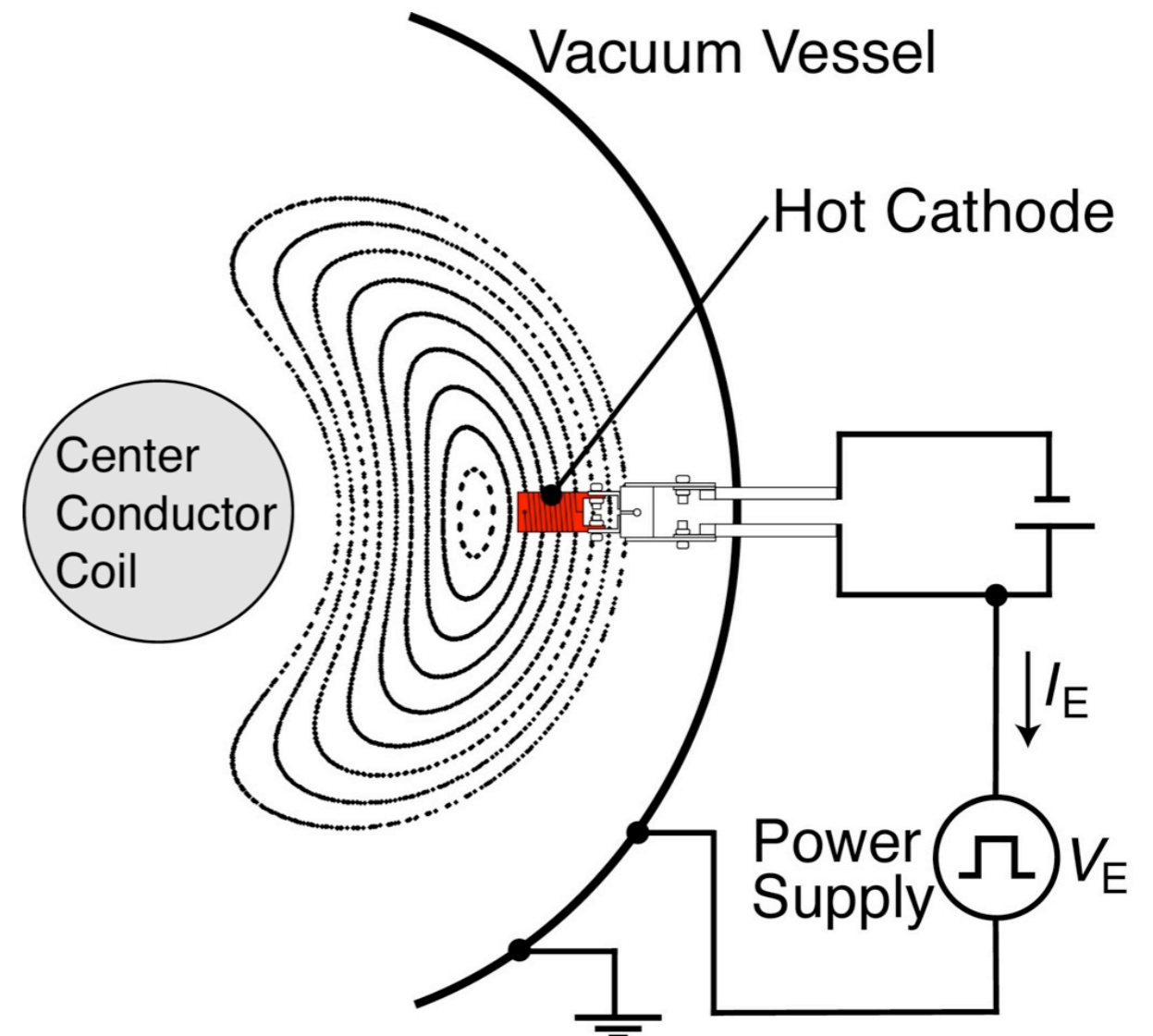
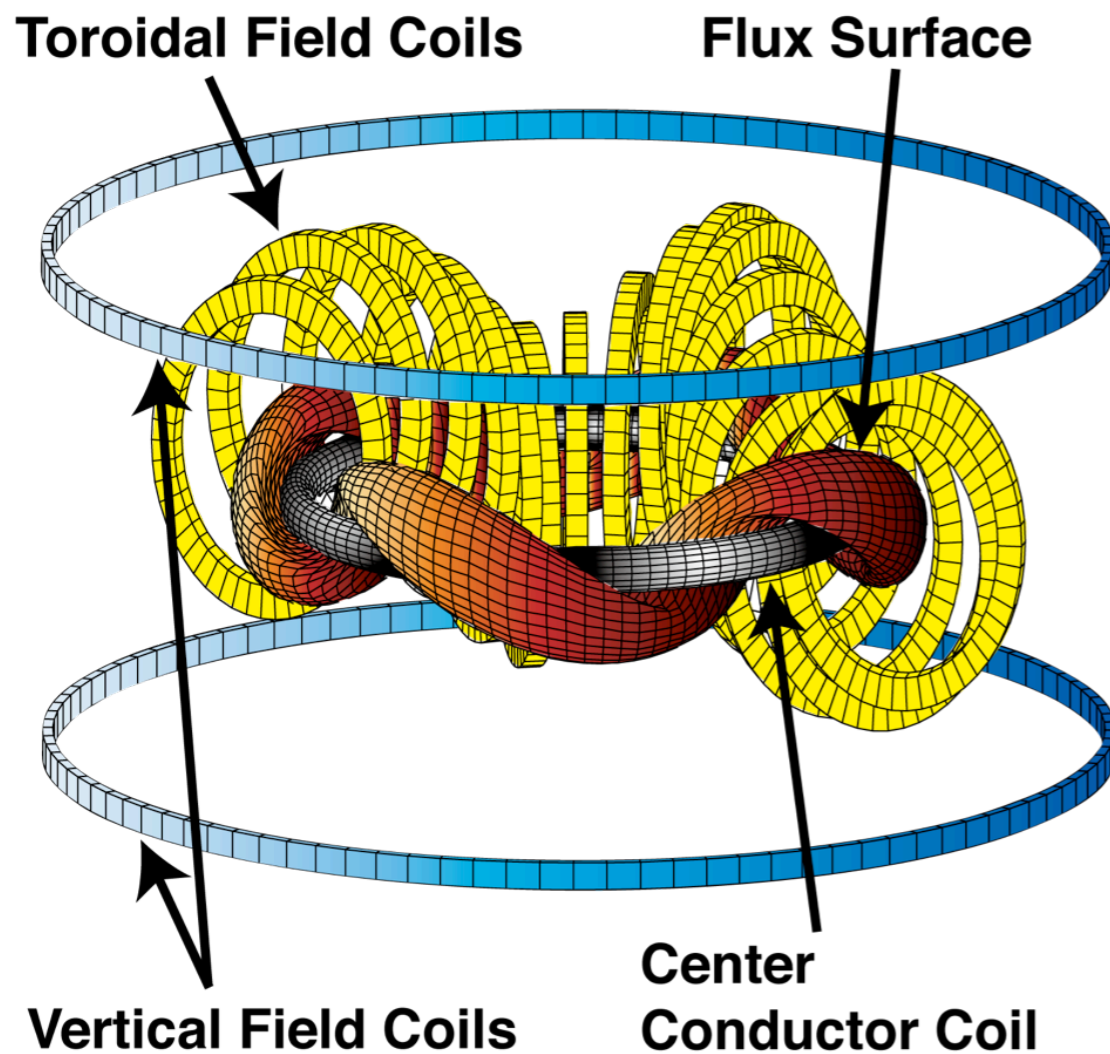
- 密度崩壊は、短時間(10 ~ 100  $\mu$ s)で粒子を輸送  
⇒揺動による異常輸送が原因か?

密度崩壊と揺動との関係を調べる事が必要

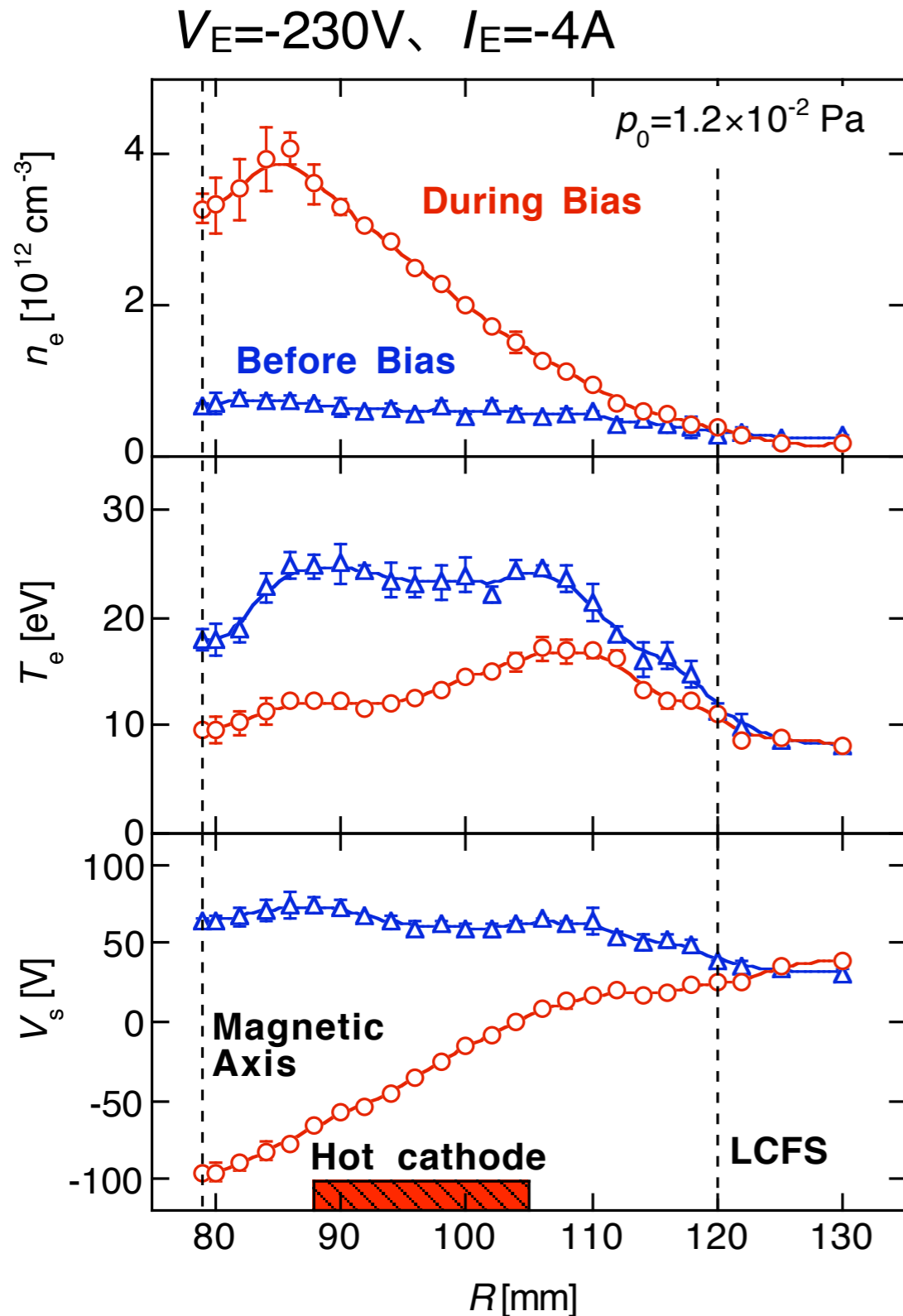
# 東北大学ヘリアック装置(TU-Heliac)

大半径 $R_0$	: 48 cm
小半径 $a$	: 6 cm
磁場 $B$	: 0.3 T
放電ガス	: He
放電時間	: 10 ms
プラズマ生成	: 交流オーム加熱 ( $f = 18.8$ kHz)

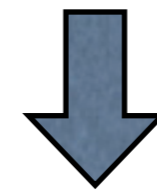
- (1) 熱陰極を真空容器に対して負バイアス
- (2) 径電場形成、 $E \times B$ 回転形成
- (3) 閉じ込め改善モードへ遷移



# 熱陰極バイアス時の典型的なパラメータ



- ✓ 電子密度3 ~ 4倍に増加
- ✓ 電子圧力  $n_e T_e$  増加
- ✓ 空間電位が負に変化
- ✓ 径電場2 ~ 4 kV/m形成



- $E \times B$  フロー速度

$$V_{EB} = E_r / B \sim 10 \text{ km/s}$$

- ポロイダルマッハ数

$$M_p = \frac{2\pi R v_{E \times B}}{l r v_t} \sim 5$$

- $E \times B$  ポロイダル回転周波数

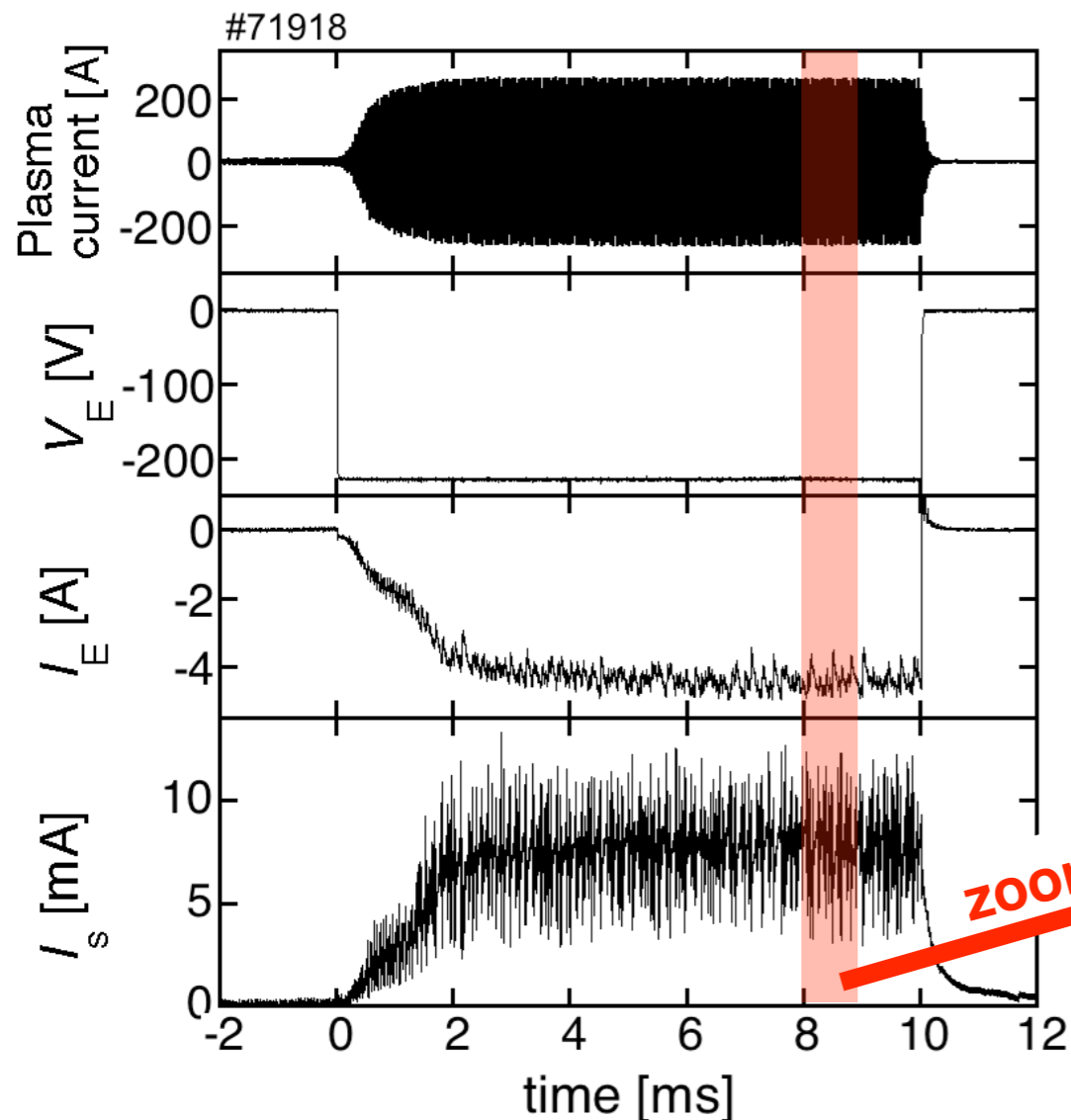
$$f_{pol} = V_{EB} / 2\pi r \sim 100 \text{ kHz}$$

# 熱陰極バイアス実験における 密度崩壊と揺動

# 熱陰極バイアス実験における 密度崩壊と揺動

熱陰極バイアス実験で、イオン飽和電流 $I_s$ と線電子密度 $n_e l$ を $\rho \sim 0.2$ で計測

- イオン飽和電流が急激に減少(矢印位置)後、徐々に増加
- 線電子密度も同様な増減 $\Rightarrow$ 密度崩壊
- イオン飽和電流には、間欠的な揺動も発生



Interferometer

$n_e l$

Triple Probe

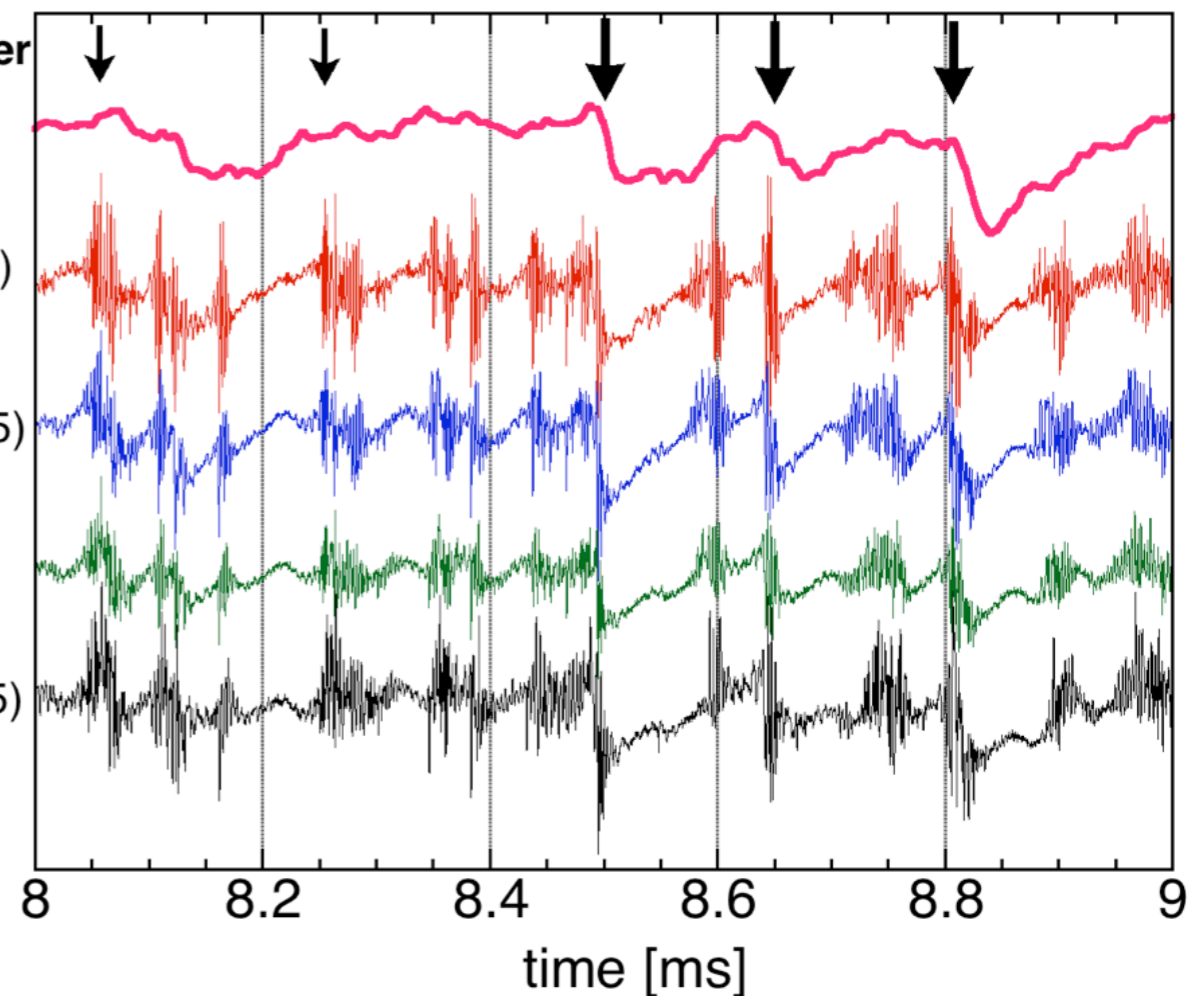
$I_s$  ( $\rho=0.2$ )

Rake Probe

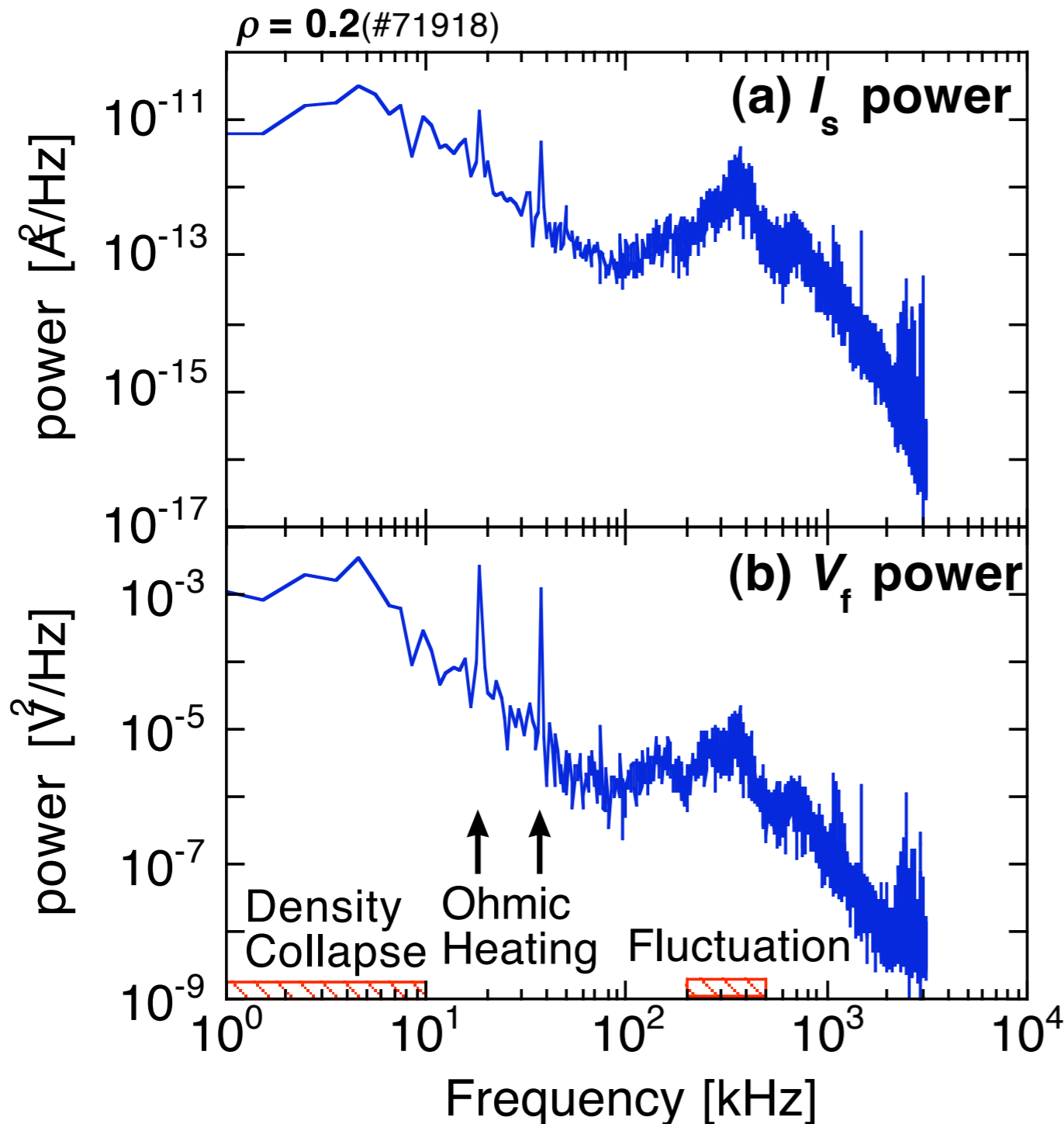
$I_s$  ( $\rho=0.15$ )

$I_s$  ( $\rho=0.2$ )

$I_s$  ( $\rho=0.25$ )



# 密度崩壊と揺動の周波数分布



トリプルプローブのイオン飽和電流と浮動電位から、パワースペクトルを計算

- 密度崩壊:  
 $f = 1 \sim 10$  kHz
- 揺動:  
 $f = 200 \sim 500$  kHz
- オーム加熱:  
 $f = 18.8, 37.6$  kHz

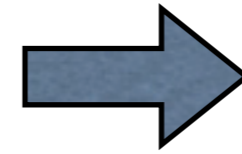
この周波数を基準にして、密度崩壊と揺動を解析する

# 密度崩壊時の径方向分布

## ~崩壊モニターを用いた計測(1)~

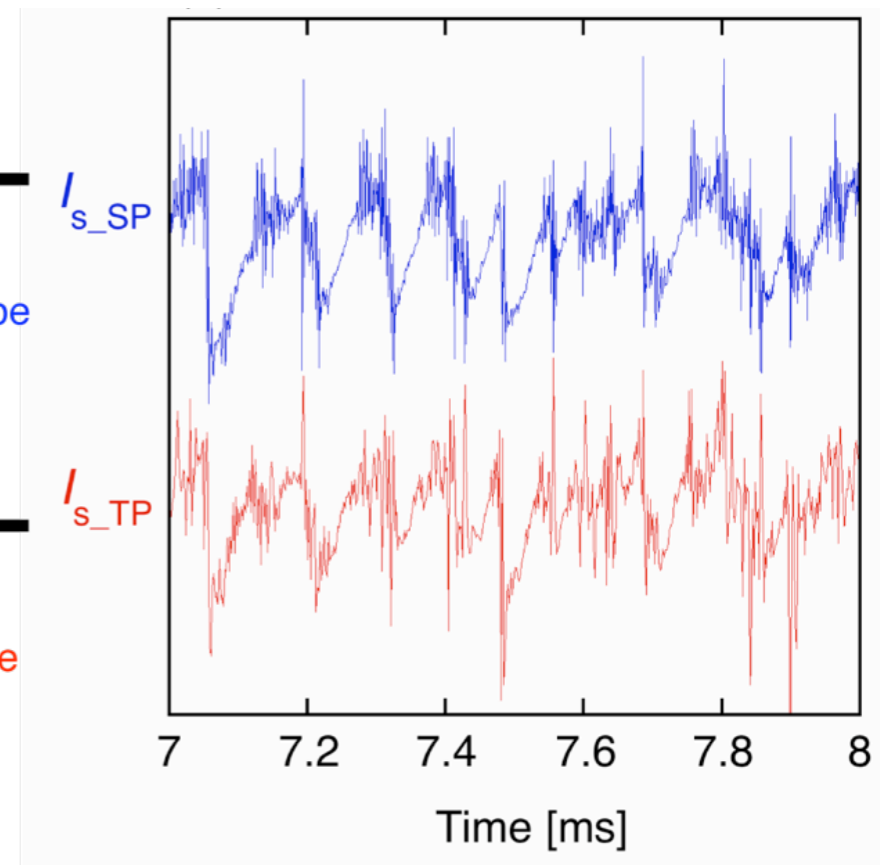
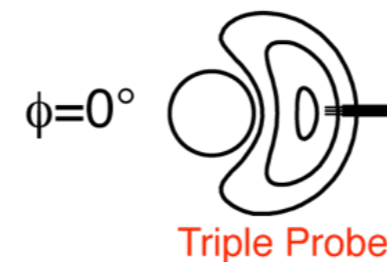
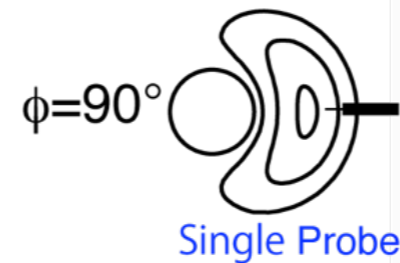
密度崩壊の特性

⇒崩壊の瞬間の密度分布に反映



密度崩壊をモニターしながら、密度分布計測

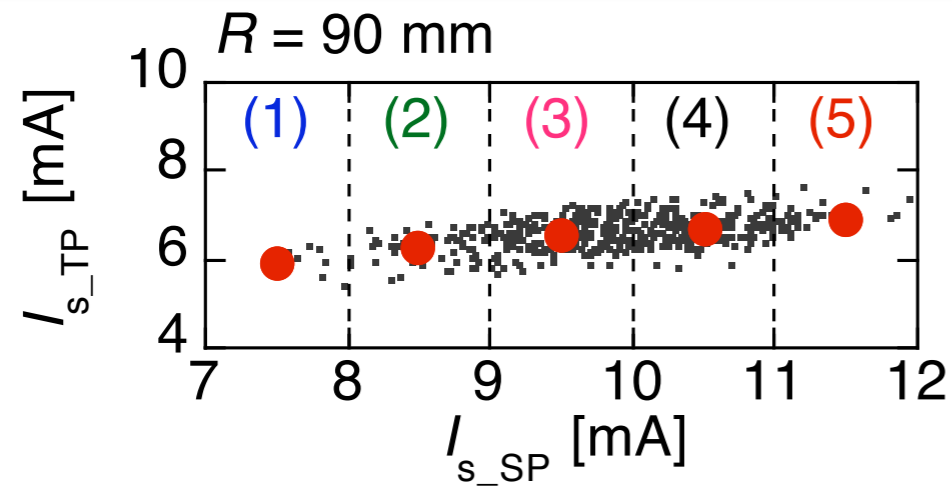
- シングルプローブ  
(密度崩壊のモニター)  
プラズマ中心部に固定し、イオン飽和電流を計測
- トリプルプローブ  
径方向に移動させ、イオン飽和電流を計測





# 密度崩壊時の径方向分布

## ~崩壊モニターを用いた計測(2)~



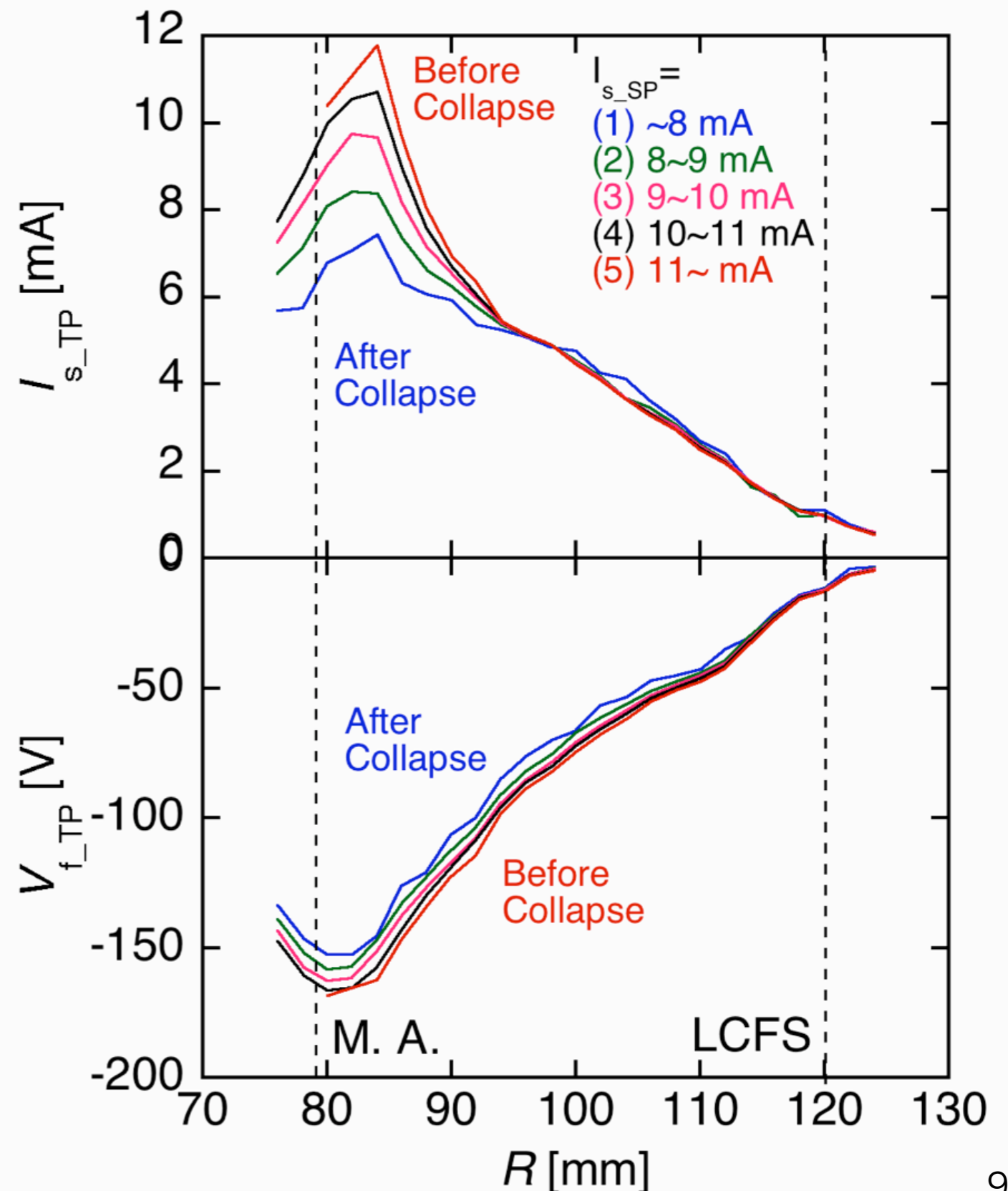
### 密度崩壊前

- ・急峻な密度勾配
- ・深い電位

### 密度崩壊後

- ・密度勾配の消滅
- ・中心部の密度減少
- ・周辺部の密度増加
- ・浅い電位

密度勾配と崩壊が関係している可能性



# 密度崩壊時の径方向分布

## ~崩壊モニターを用いた計測(3)~

### 周辺部の密度増加の原因

崩壊前と崩壊後の  
イオン飽和電流差



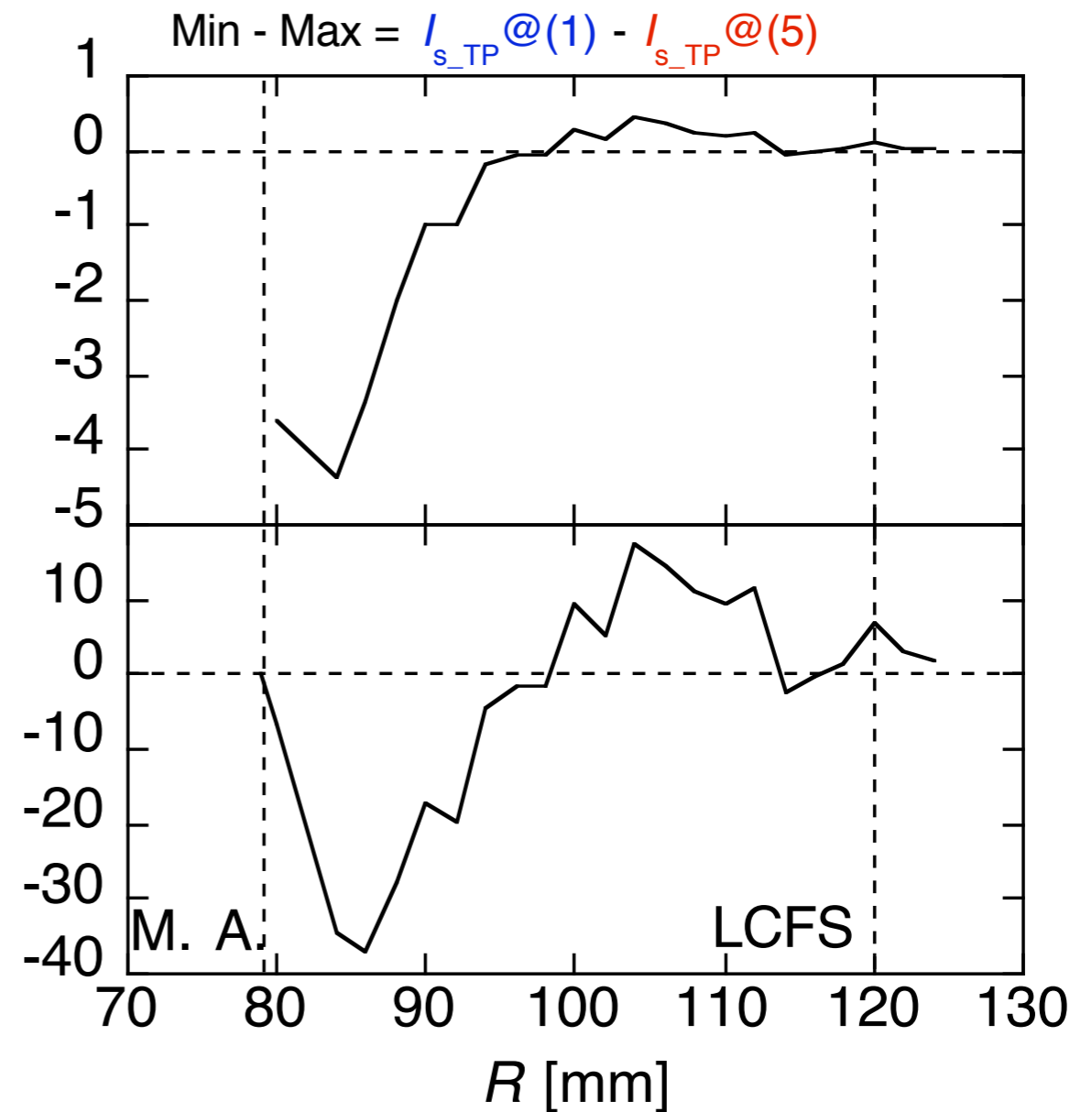
⇒ 中心部の減少に比べ周  
辺部の増加は僅か

面積補正した  
イオン飽和電流差



⇒ 中心部と周辺部の  
増減はほぼ同じ

Min-Max [mA]  
<r>(Min-Max) [mAmA]

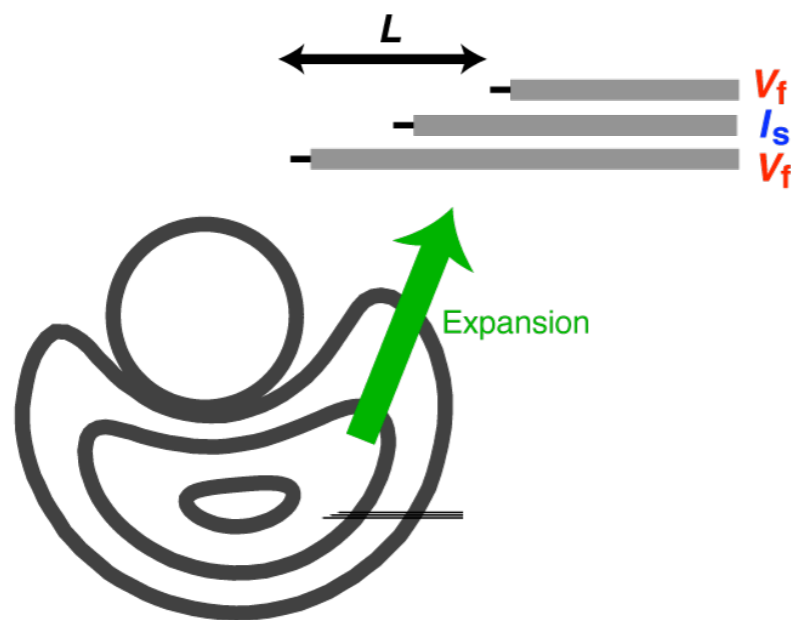


密度崩壊時  
中心部の粒子が周辺部へ流出

# 密度崩壊と高周波揺動のバースト

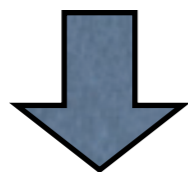
揺動、径電場、密度崩壊の比較

レイクプローブ(径方向にチップを設置)

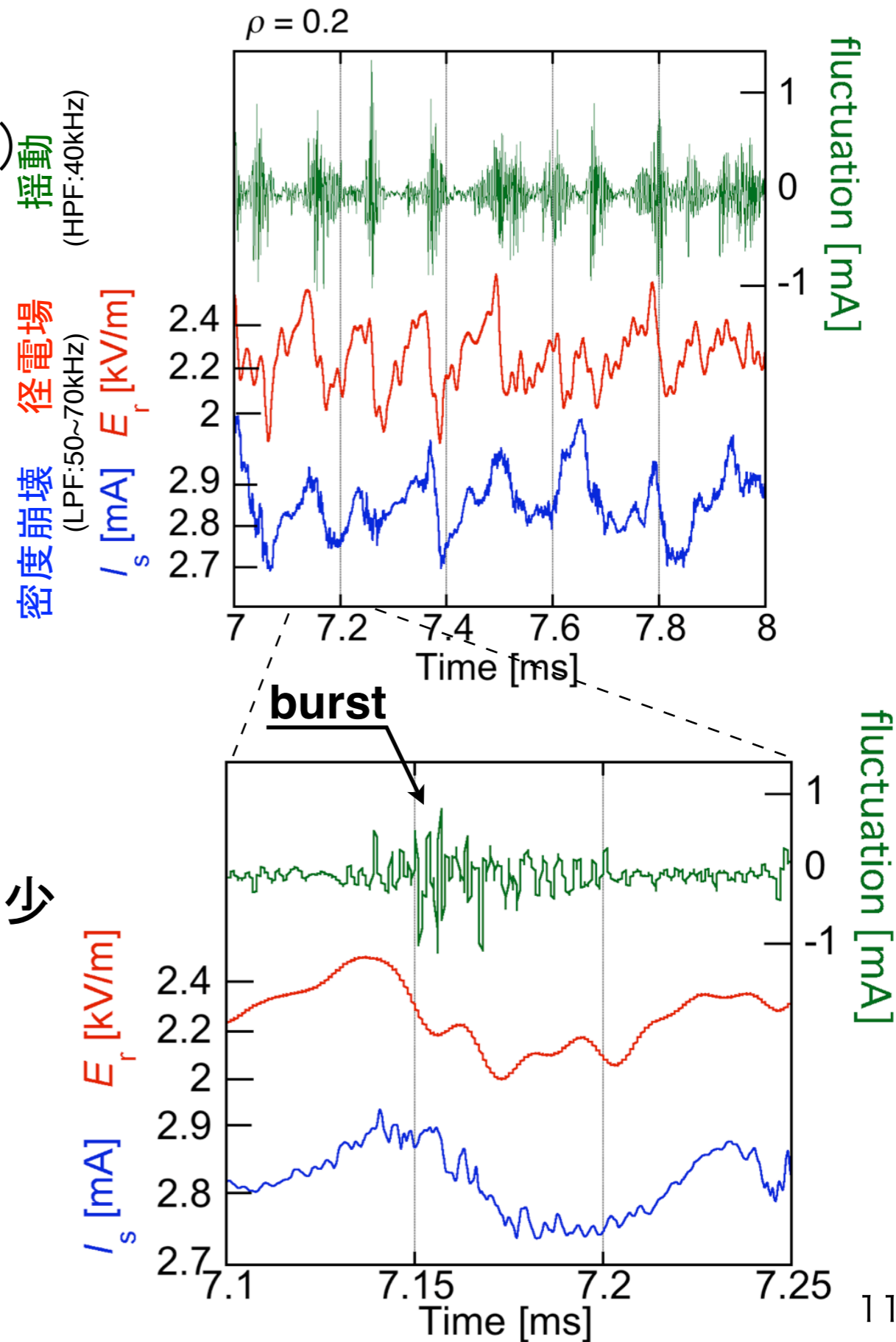


密度崩壊時、

- $E \times B$ ポロイダル回転低下(約20%)
- 揺動のバースト、径電場低下、密度減少



$E \times B$ ポロイダル回転低下による揺動の抑制不良を示唆



# 揺動の特性評価

# ポロイダル回転の制御

揺動に対するポロイダル回転の影響を調べるには異なる回転数での実験が必要

## ポロイダル回転の制御法

放電ガス → 高圧

→ プラズマと中性ガスとの荷電交換増

→ ポロイダル回転減速

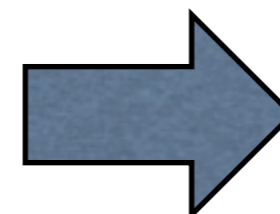
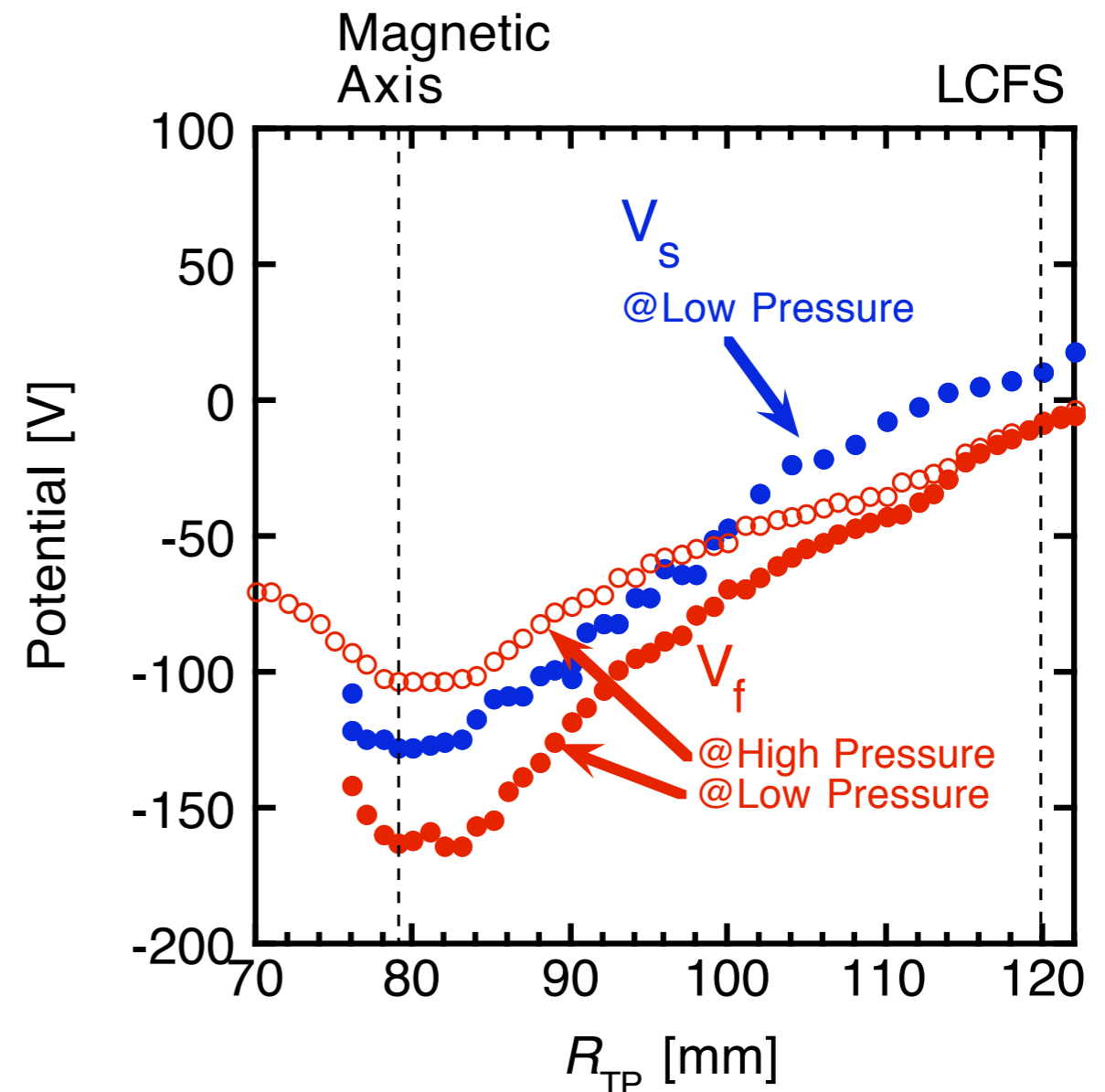
(a) 低ガス圧  $p_{\text{He}} = 1.2 \times 10^{-2}$  Pa

(b) 高ガス圧  $p_{\text{He}} = 3.2 \times 10^{-2}$  Pa

で浮動電位  $V_f$ 、空間電位  $V_s$  を計測  
(空間電位は、シングルプローブ法で計測)

✓ 低ガス圧時に、浮動電位と空間電位の分布はほぼ同じ

✓ 高ガス圧になると、浮動電位の勾配が減少 (径電場は約2倍異なる)



浮動電位  
ポロイダル回転を反映

# 揺動の径方向分布

(a) 低ガス圧

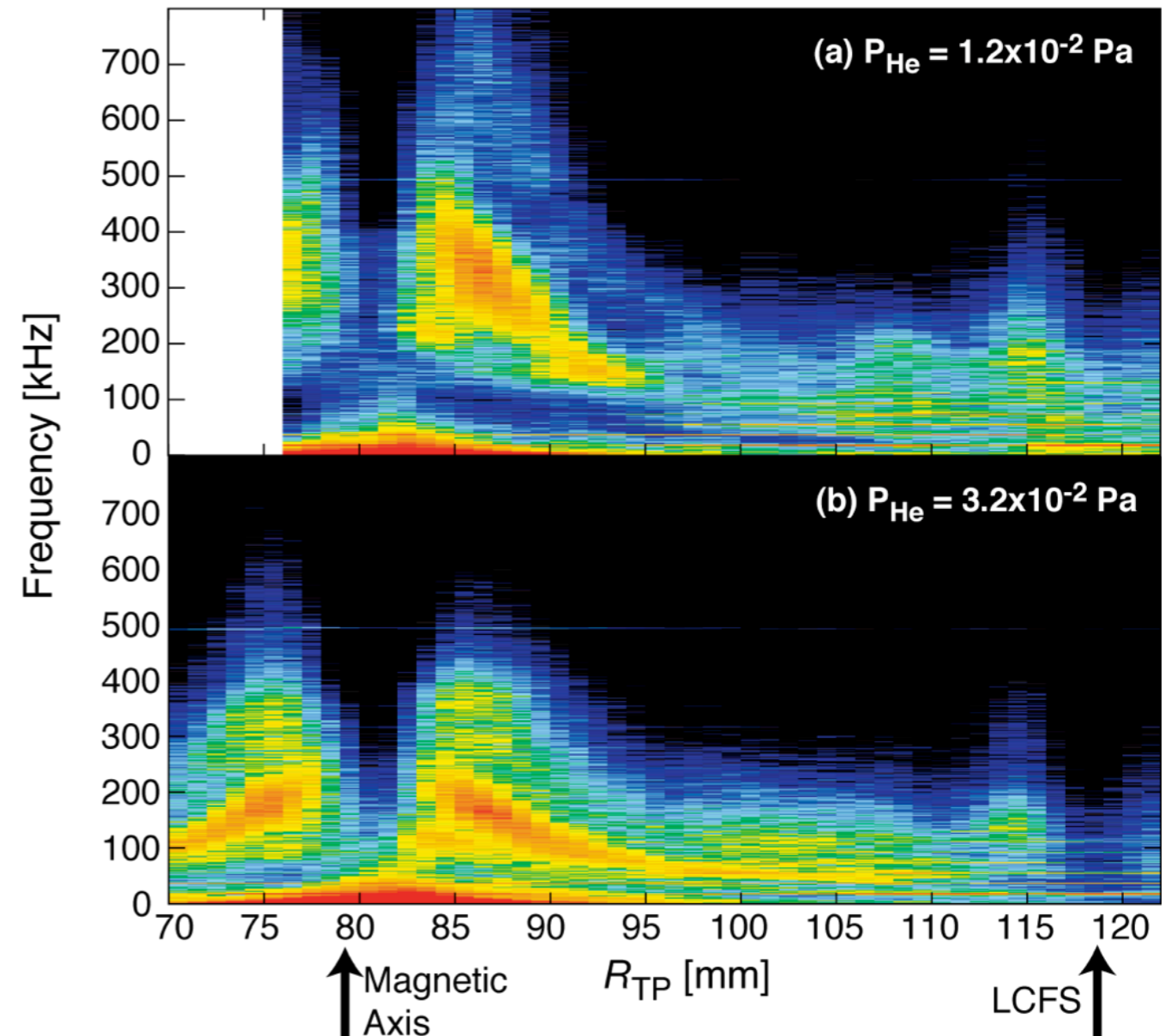
$$p_{\text{He}} = 1.2 \times 10^{-2} \text{ Pa}$$

(b) 高ガス圧

$$p_{\text{He}} = 3.2 \times 10^{-2} \text{ Pa}$$

でイオン飽和電流揺動  
の径方向分布を計測

ポロイダル回転数約1/2



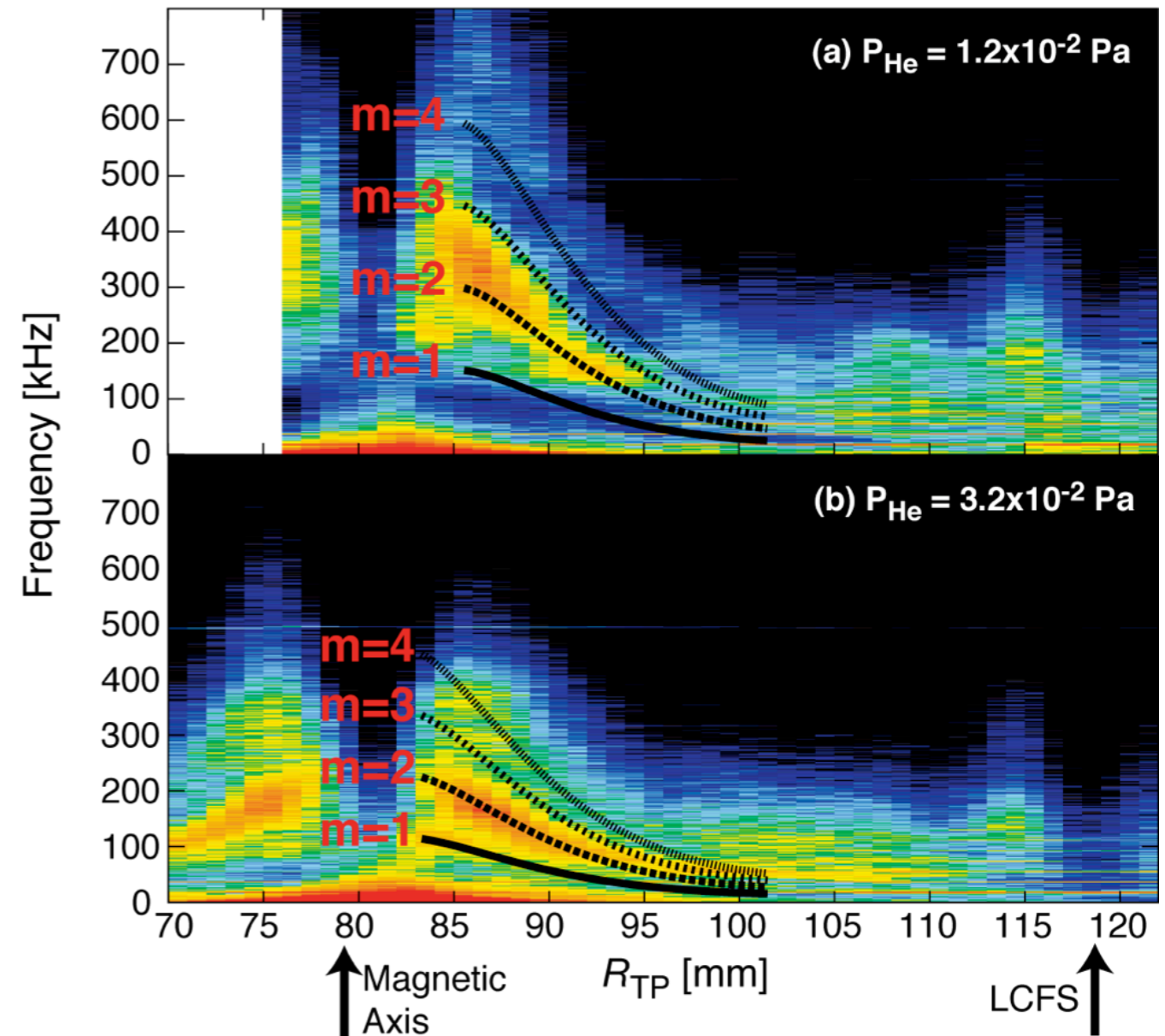
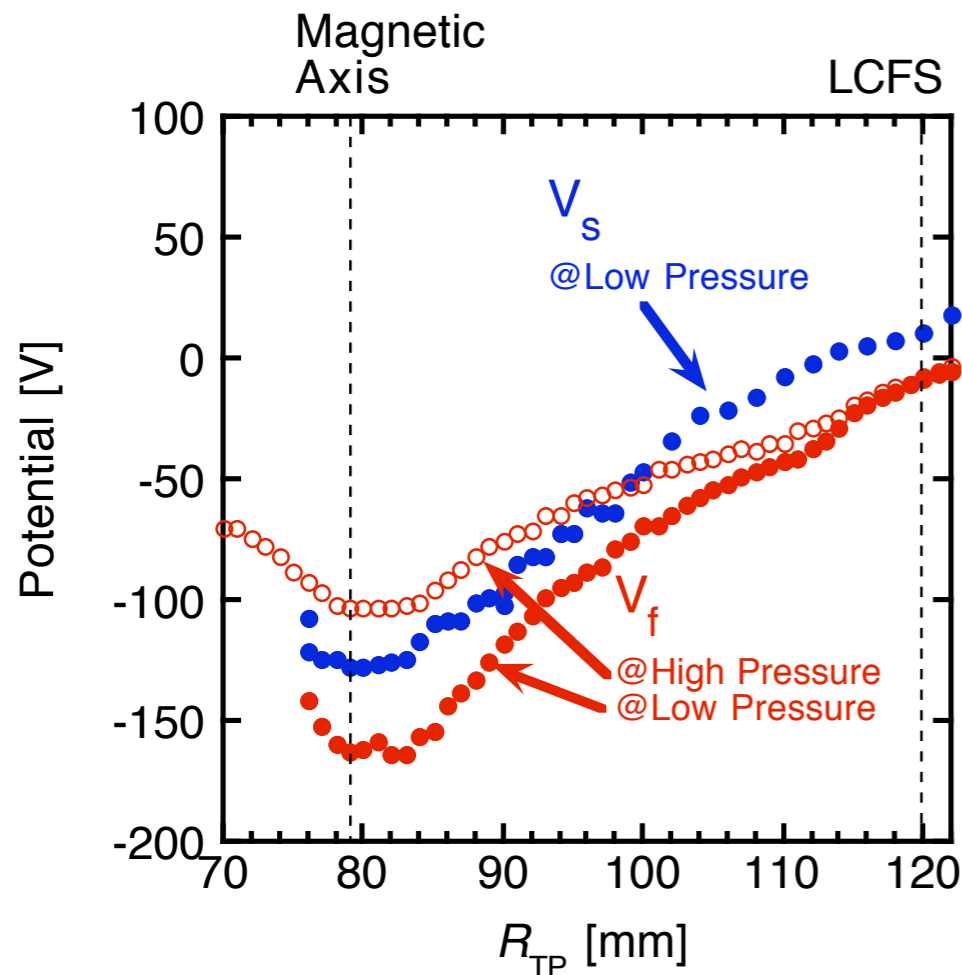
- ◆ プラズマ中心部分で揺動が発生し、中心部ほど周波数が高い
- ◆ (a)と(b)では揺動の周波数が約2倍異なる

# 揺動周波数に対するポロイダル回転の影響

$E \times B$ ポロイダル回転数  $f_{EB}$   
(浮動電位  $V_f$  から計算)

$$f_{EB} = \frac{E_r}{B_\phi} = \frac{dV_f / d\langle r \rangle}{2\pi \langle r \rangle B_\phi}$$

を計算し、 $mf_{EB}$  をプロット  
( $m$  は整数、 $B_\phi$  はトロイダル磁場)



$m = 2 \sim 3$  の線と揺動周波数が一致  
⇒ 揺動のポロイダルモード  $m = 2$  or  $3$  と推測

- ▶ 高速回転プラズマでは、揺動周波数はポロイダル回転数で決定
- ▶ クリアなモード数を持つ揺動

# まとめ

東北大学ヘリアック装置における熱陰極バイアス実験において密度崩壊と間欠性の揺動が観測されている。本発表では、それらの特性を調べた。

## (1) 密度崩壊時の変化

- プラズマ中心部の密度減少
- 周辺部の密度増加 ← 中心部の粒子が周辺部へ流出
- 急峻な密度勾配の消滅
- 揺動のバースト、径電場低下、 $E \times B$ フロー低下(約20%)



- フロー低下による揺動の抑制不良がバーストの原因か?
- 異常輸送が密度崩壊の原因か?

## (2) 揺動の特性

- 揺動周波数 ⇒ ポロイダル回転によって決定
- ポロイダルモード  $m = 2$  or  $3$

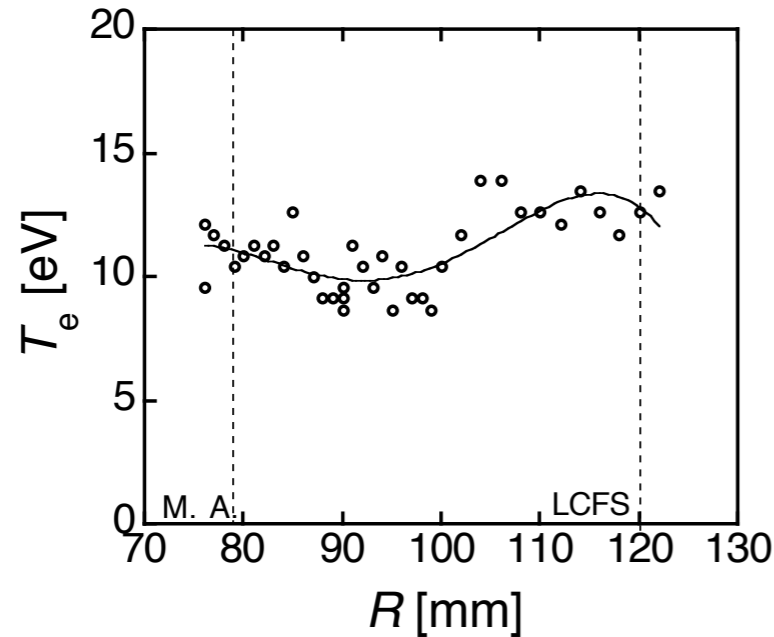


# 揺動の密度勾配依存性

~揺動のパワー~

⇒ 圧力勾配、密度勾配、温度勾配に依存する可能性

ただし、電子温度分布はほぼ平坦



⇒ 密度勾配との比較が重要

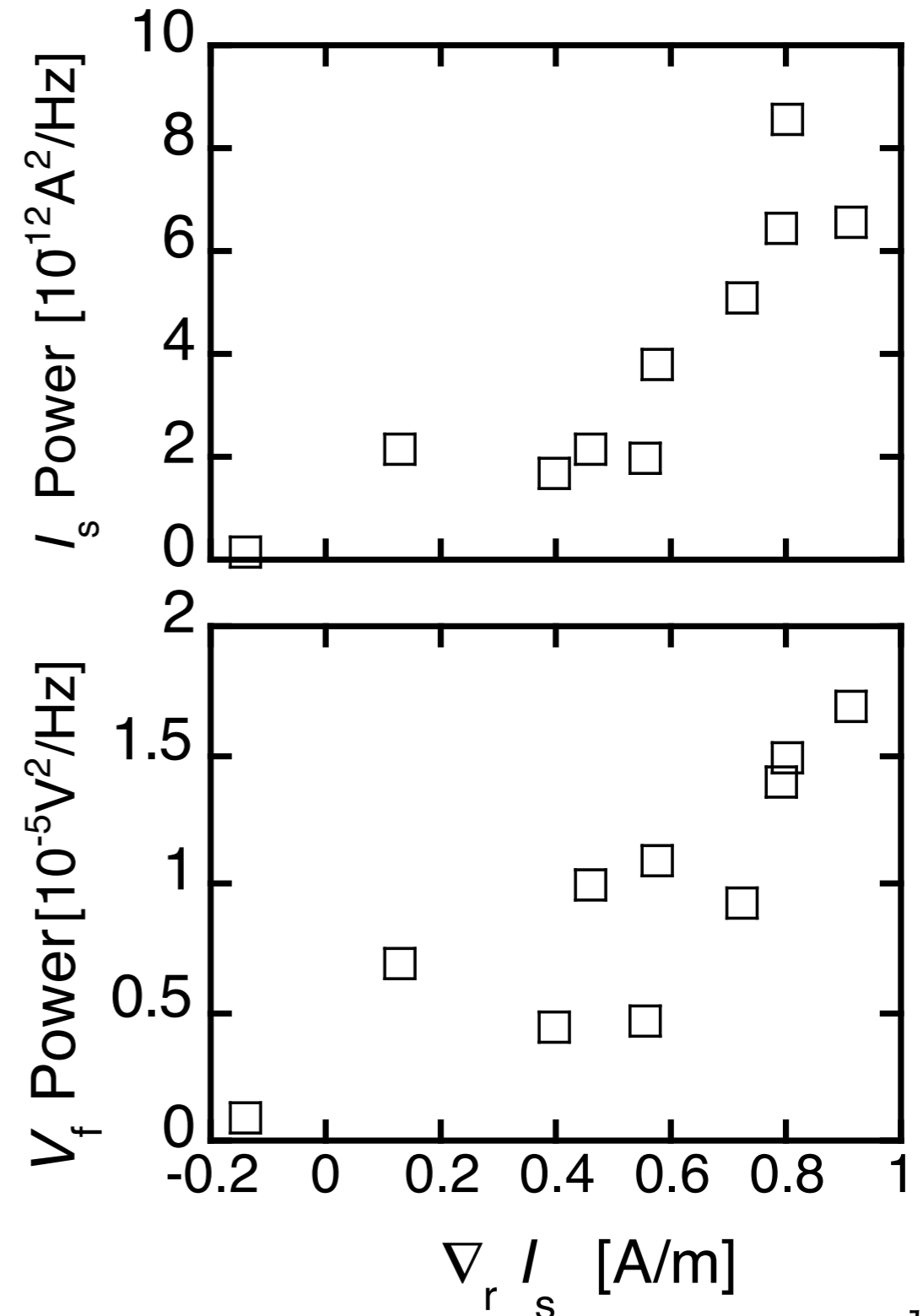
イオン飽和電流勾配  $\nabla_r I_s$  で代用

(ただし、 $\nabla_r I_s$  は時間平均した値)

揺動のパワーは、 $\nabla_r I_s$  と正の相関

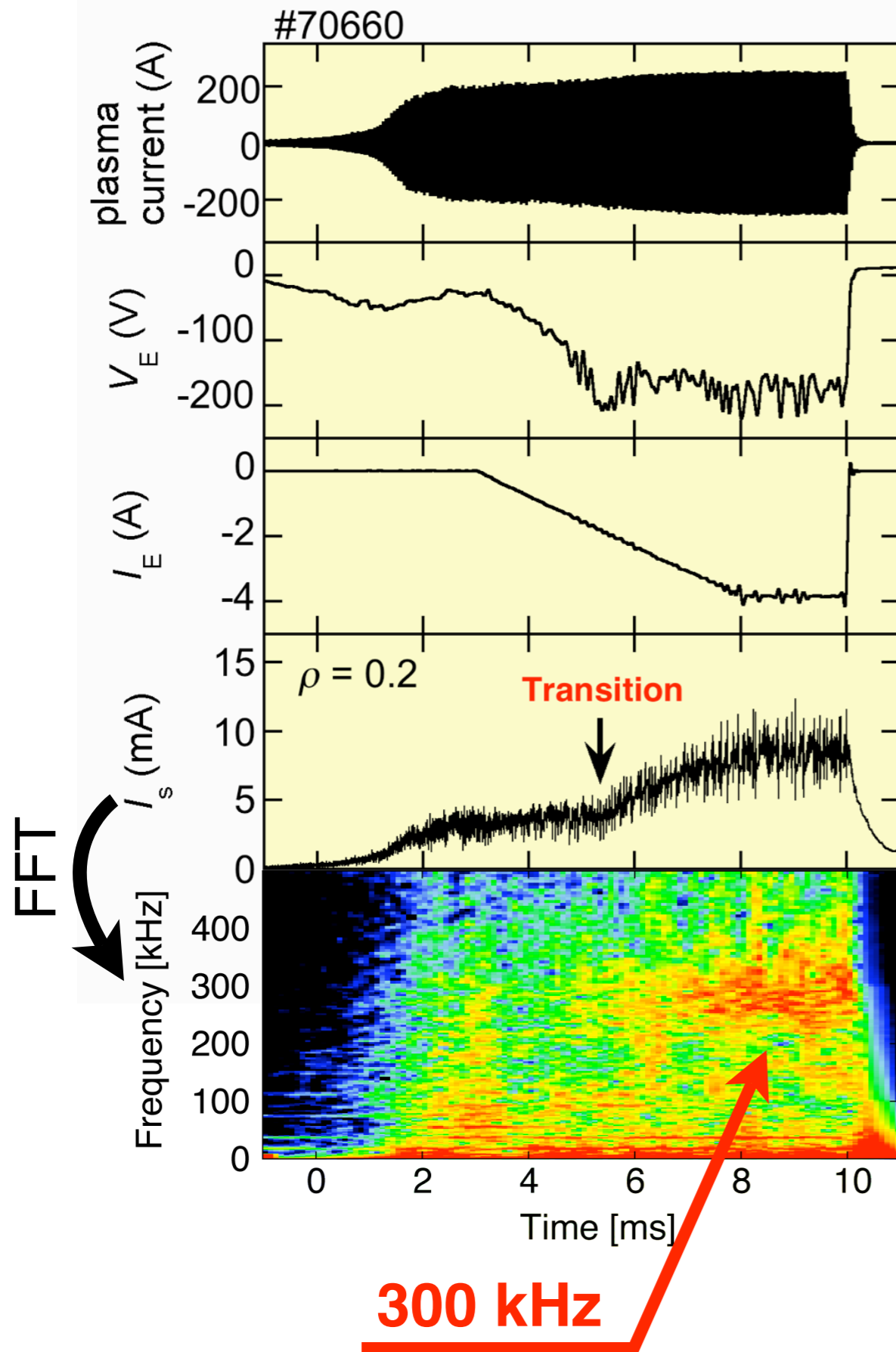
⇒ **密度勾配** との依存性が強い

密度崩壊の特徴と一致



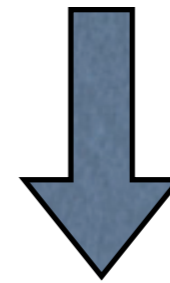
# 高速ラングミュアプローブの設計

# バイアス実験における高周波揺動



熱陰極バイアス開始後、

- ✓ 閉じ込め改善モードへ遷移 (at Time = 5 ms)
- ✓ イオン飽和電流が増加
- ✓ 高周波揺動が発生 (Frequency = 300 kHz)



帯域1 MHz程度の  
揺動計測装置が必要

# 熱陰極バイアス時の揺動周波数

- $E \times B$ ポロイダル回転周波数

$$f_{\text{pol}} = V_{\text{EB}} / 2\pi r \sim 100 \text{ kHz}$$

- 静電揺動の周波数

Ex.)

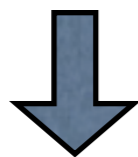
- ドリフト波不安定性
- フルート不安定性

$$f \sim 10 \text{ kHz}$$

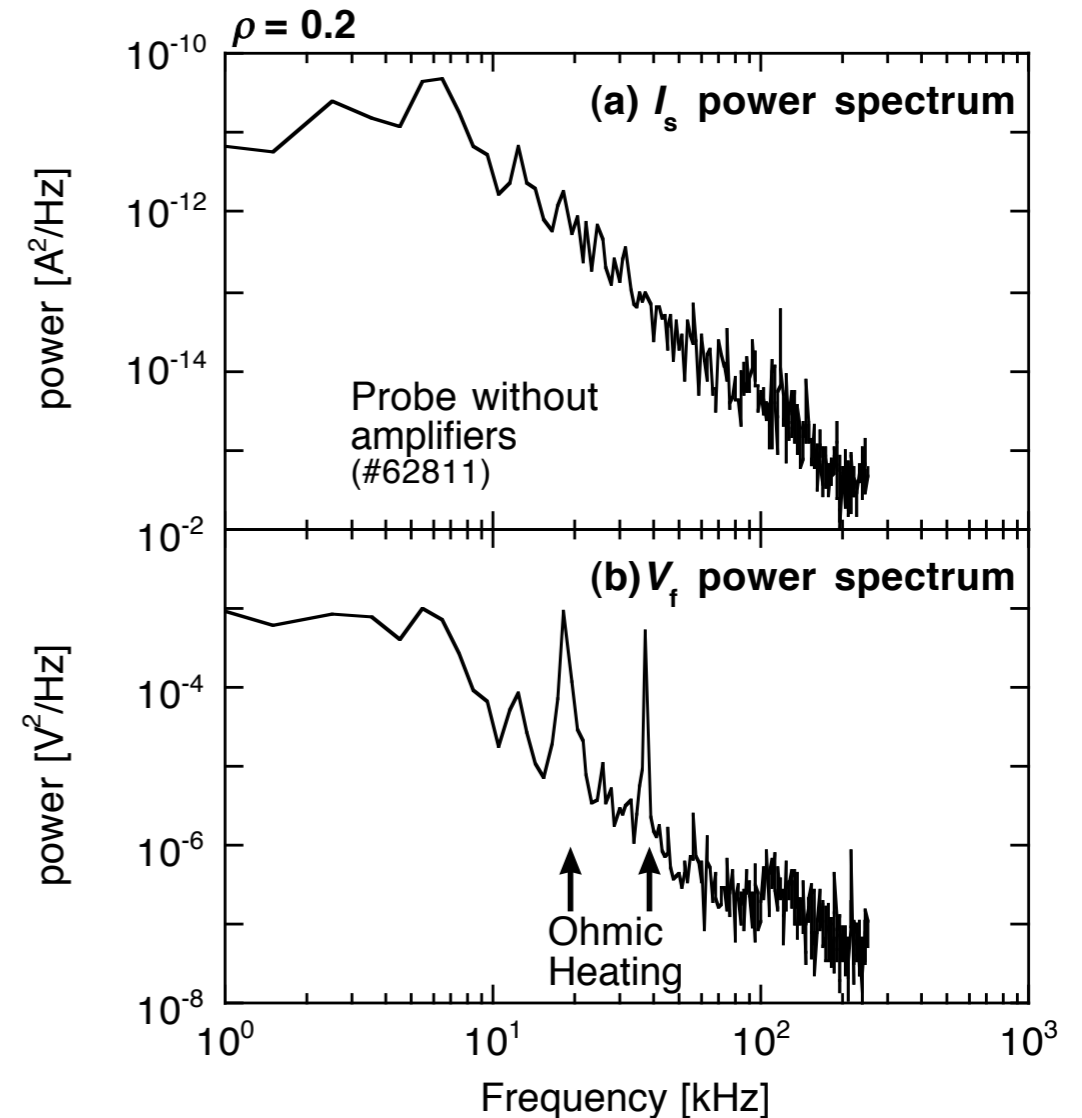


揺動周波数が100 kHz以上となる可能性

これまでのラングミュアプローブでは、100 kHz以上の計測が困難



帯域1 MHz程度の  
揺動計測装置が必要



これまでのラングミュアプローブのパワースペクトル

# 揺動計測用プローブの仕様

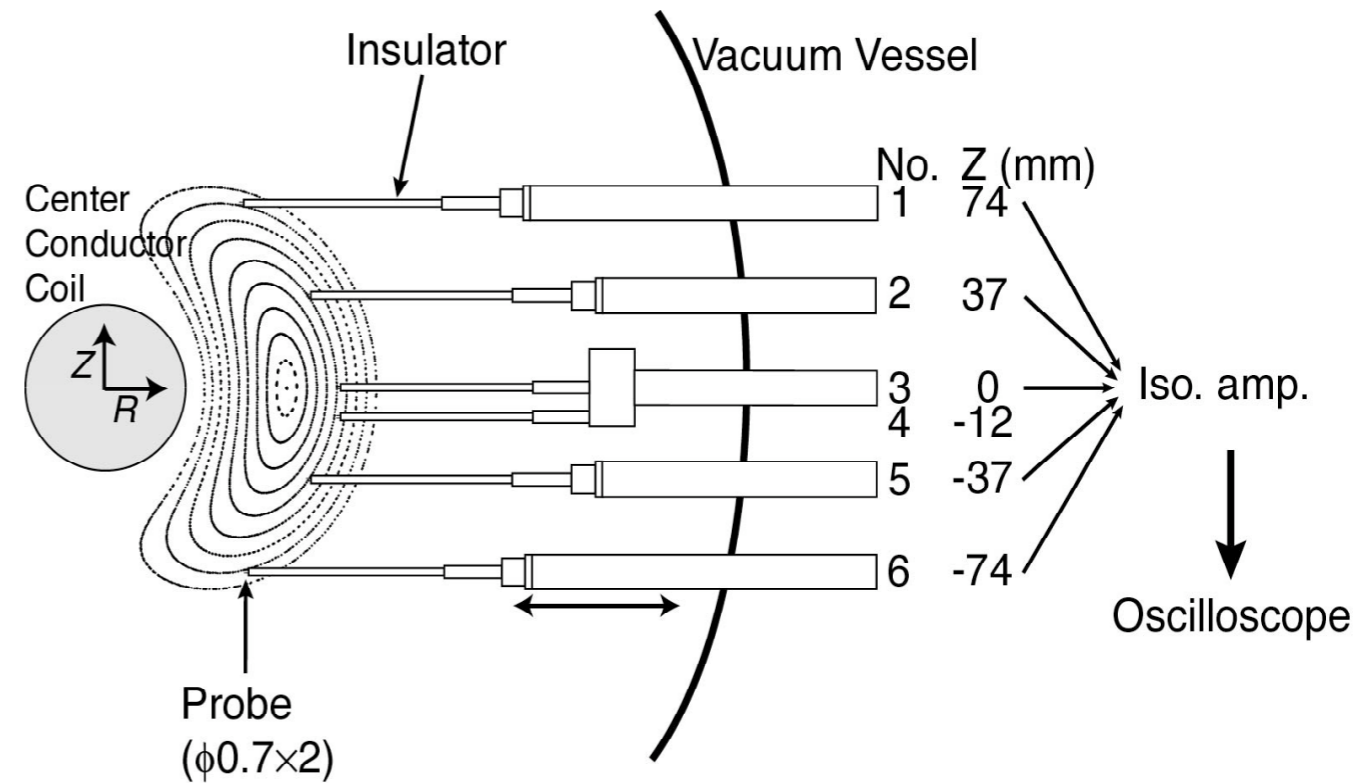
密度揺動と電位揺動が重要  
(ベータ値 $\ll 1\%$ なので磁場揺動を無視)

- ・密度揺動  
→イオン飽和電流揺動
- ・電位揺動  
→浮動電位揺動

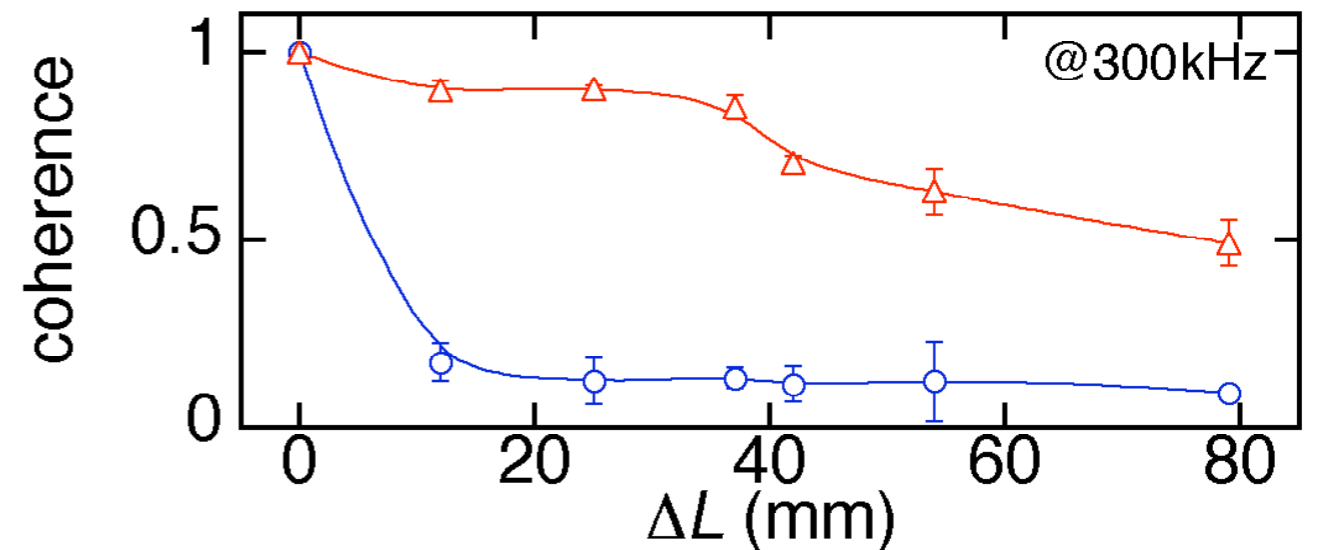
波数の見積もり  
→コヒーレントな距離での多点計測

イオン飽和電流の相関長  
○無バイアス時: 10mm以下  
○バイアス時: 10mm以上

イオン飽和電流、浮動電位の同時計測  
プローブ間距離  $< 10$  mm  
帯域  $\sim 1$  MHz



規格化小半径 $\rho \sim 0.5$ でイオン飽和電流を計測[1]



$f = 300$  kHzでコヒーレンスを計算

# 浮動電位揺動の計測方式

帯域1 MHzでの

- ・イオン飽和電流計測  
→問題なし
- ・浮動電位計測  
→浮遊容量低減が必須

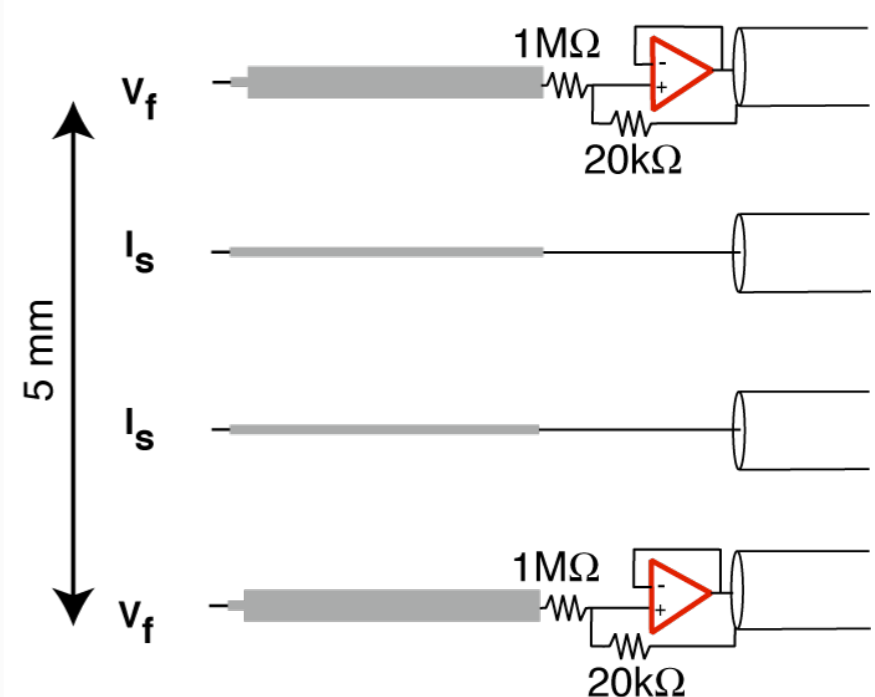
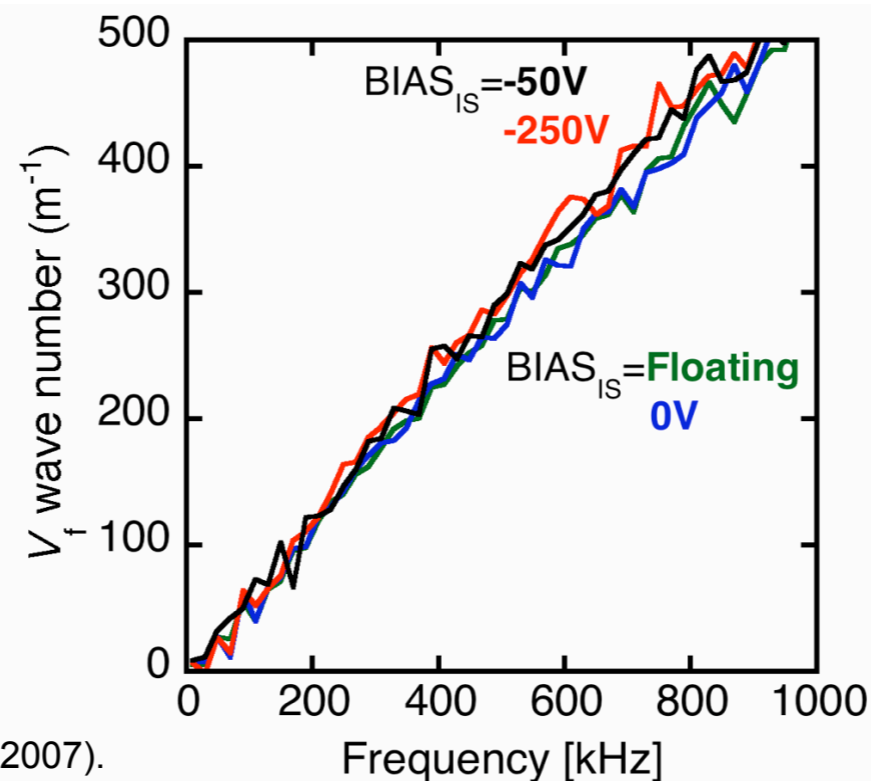
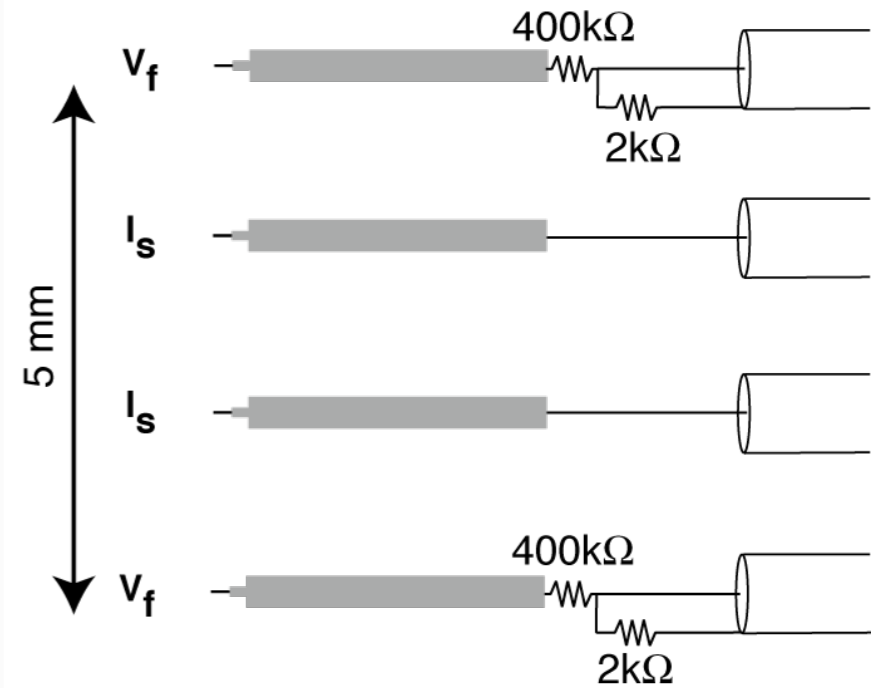
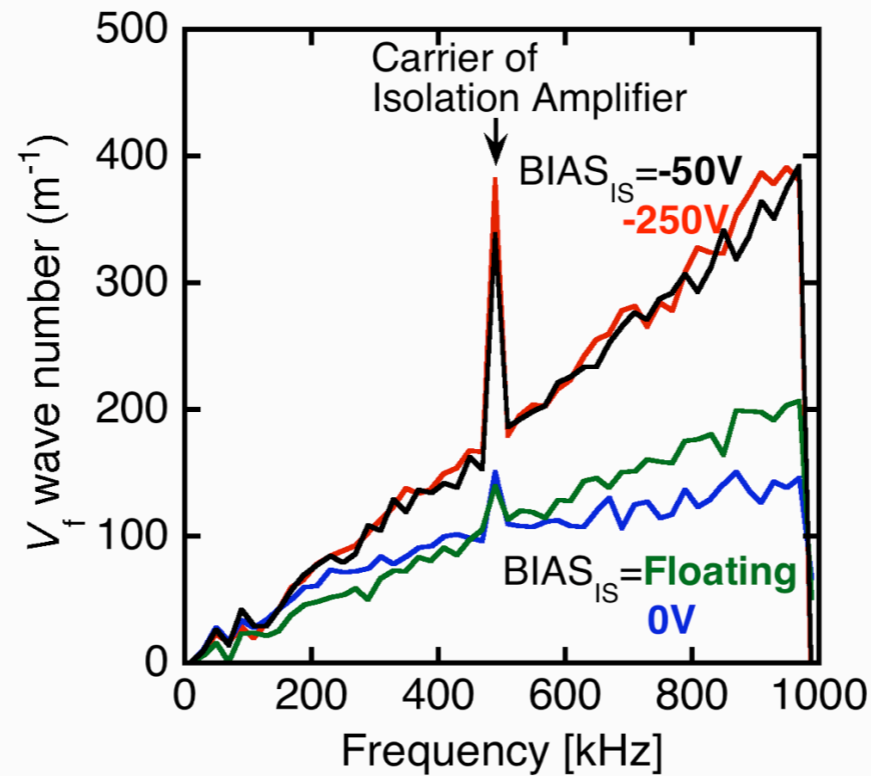
高抵抗の後側:

方法1) 低抵抗で信号伝送 [1]  
イオン飽和電流の信号とクロストークが発生し、不可

方法2) プリアンプを内蔵 [2]  
クロストークが発生せず、揺動を計測可能



プリアンプ内蔵方式を採用



[1] Y. Tanaka *et al.*, Trans. Fusion Sci. Tech., **51**, 265 (2007).

[2] Y. Tanaka *et al.*, Plasma Fusion Res., **2**, S1090 (2007).

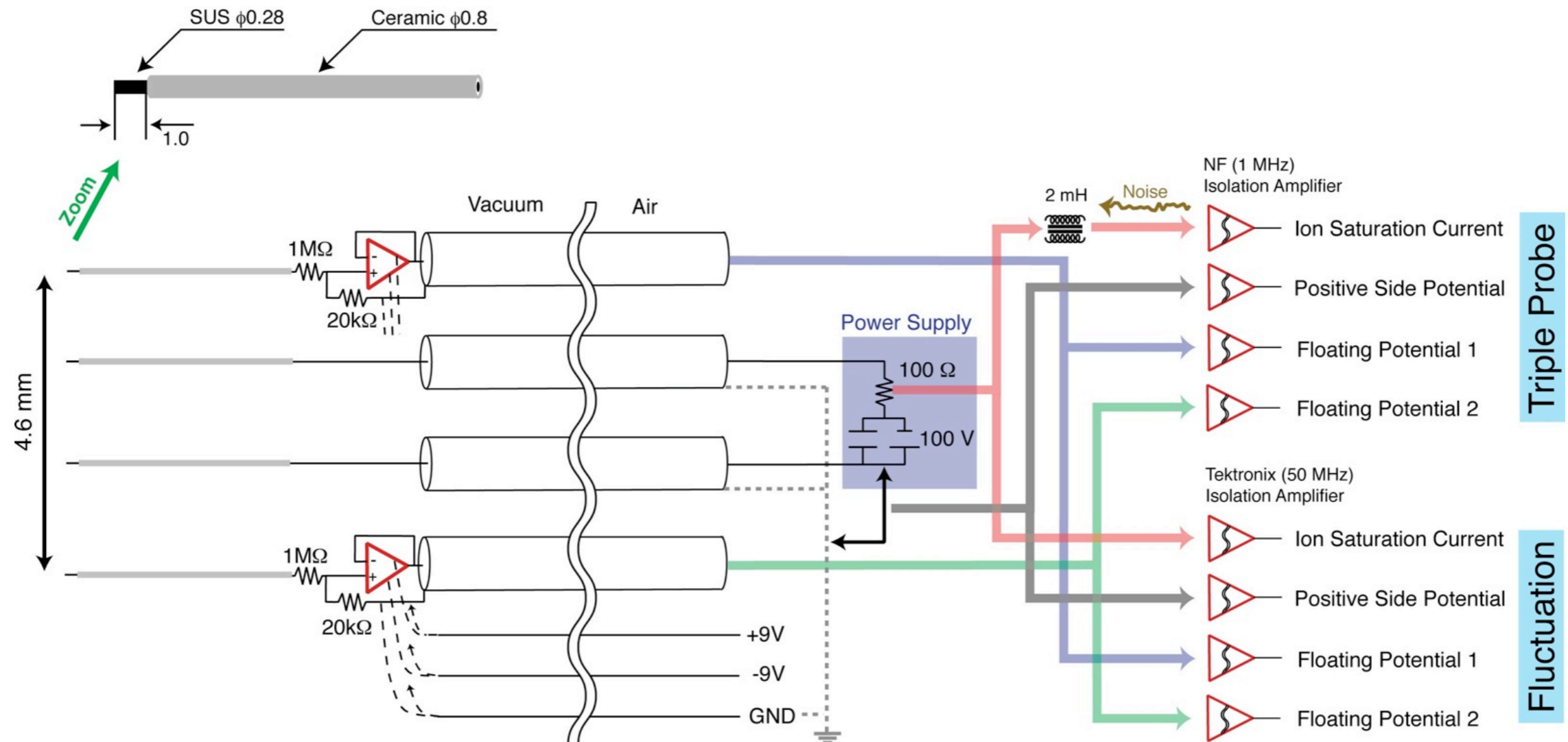
# 揺動計測用高速ラングミュアプローブ

トリプルプローブを高速化し、TU-Heliacに取り付け[1]

## 特徴

浮動電位計測には、プローブの浮遊容量低減と低インピーダンスによる信号伝送が必要

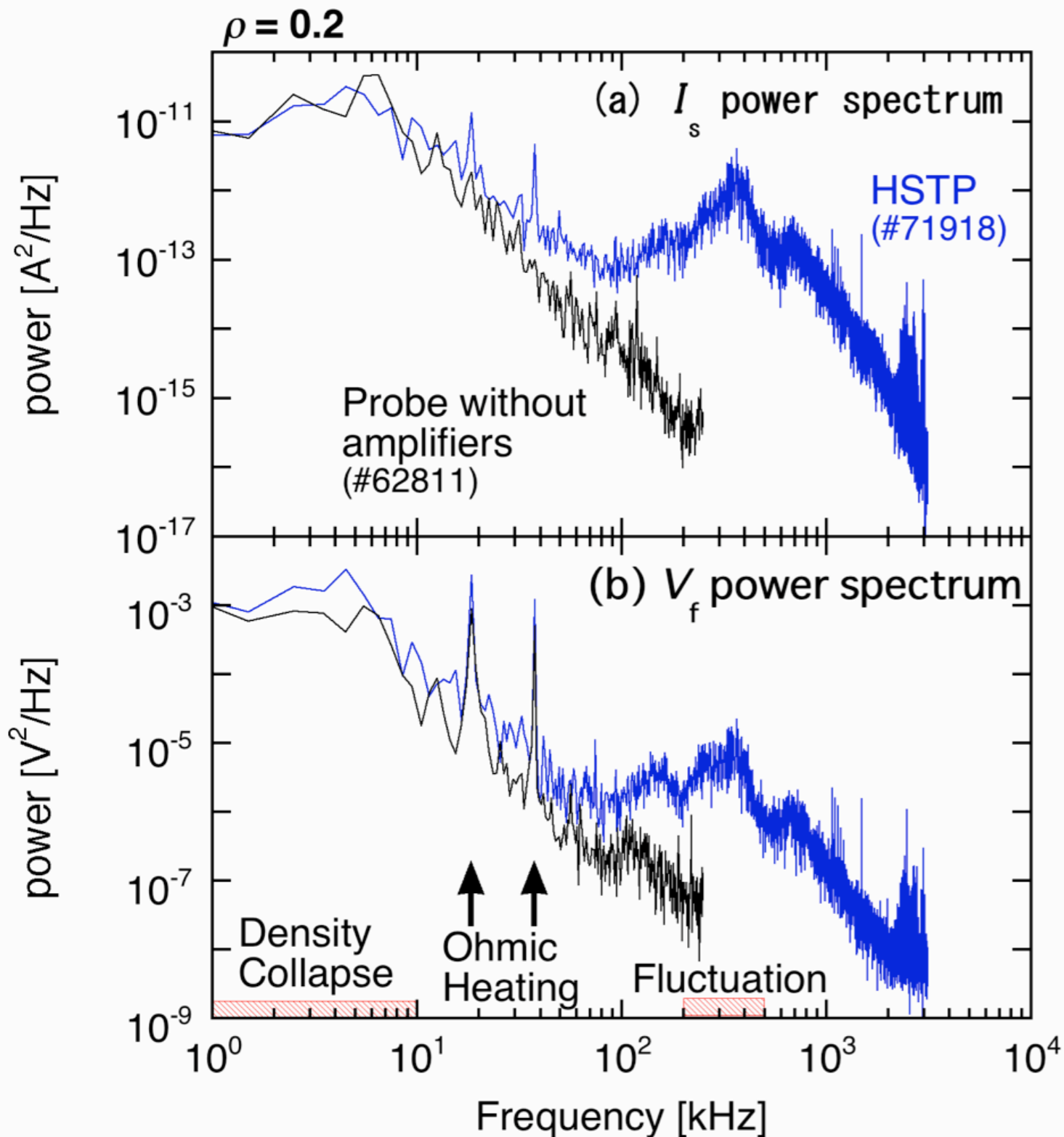
- ✓真空中にプリアンプを内蔵 [2]
- ✓イオン飽和電流揺動、浮動電位揺動を計測(計測帯域: 1 MHz)
- ✓トリプルプローブ法で電子温度、電子密度、空間電位も同時計測



[1] Y. Tanaka et al., Plasma Phys. Control. Fusion, **48**, A285 (2006).

[2] Y. Tanaka et al., Plasma Fusion Res., **2**, S1090 (2007).

# 密度崩壊と揺動の周波数分布



- ・新トリプルプローブ
  - ・過去のプローブ
- からイオン飽和電流と浮動電位の  
パワースペクトルを計算[1]



プローブの性能向上

- 密度崩壊:  
 $f = 1 \sim 10$  kHz
- 揺動:  
 $f = 200 \sim 500$  kHz
- オーム加熱:  
 $f = 18.8, 37.6$  kHz

この周波数を基準にして、  
密度崩壊と揺動を解析する

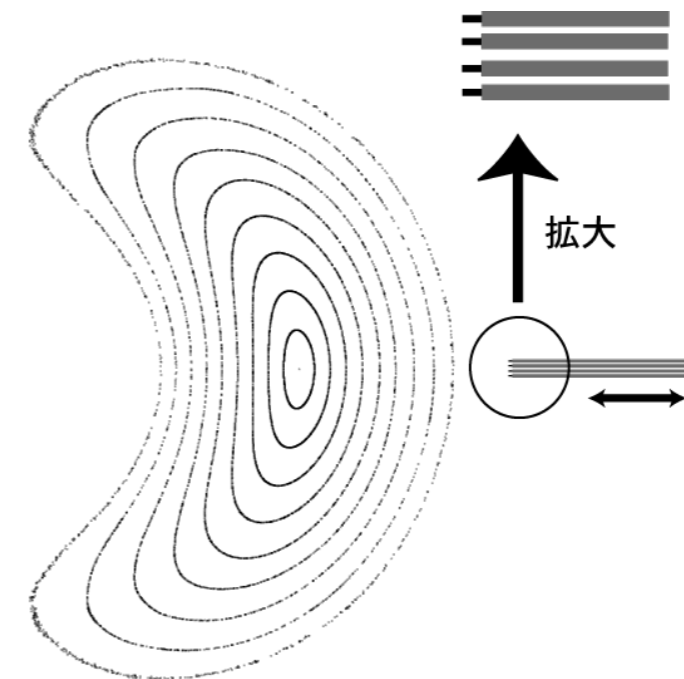
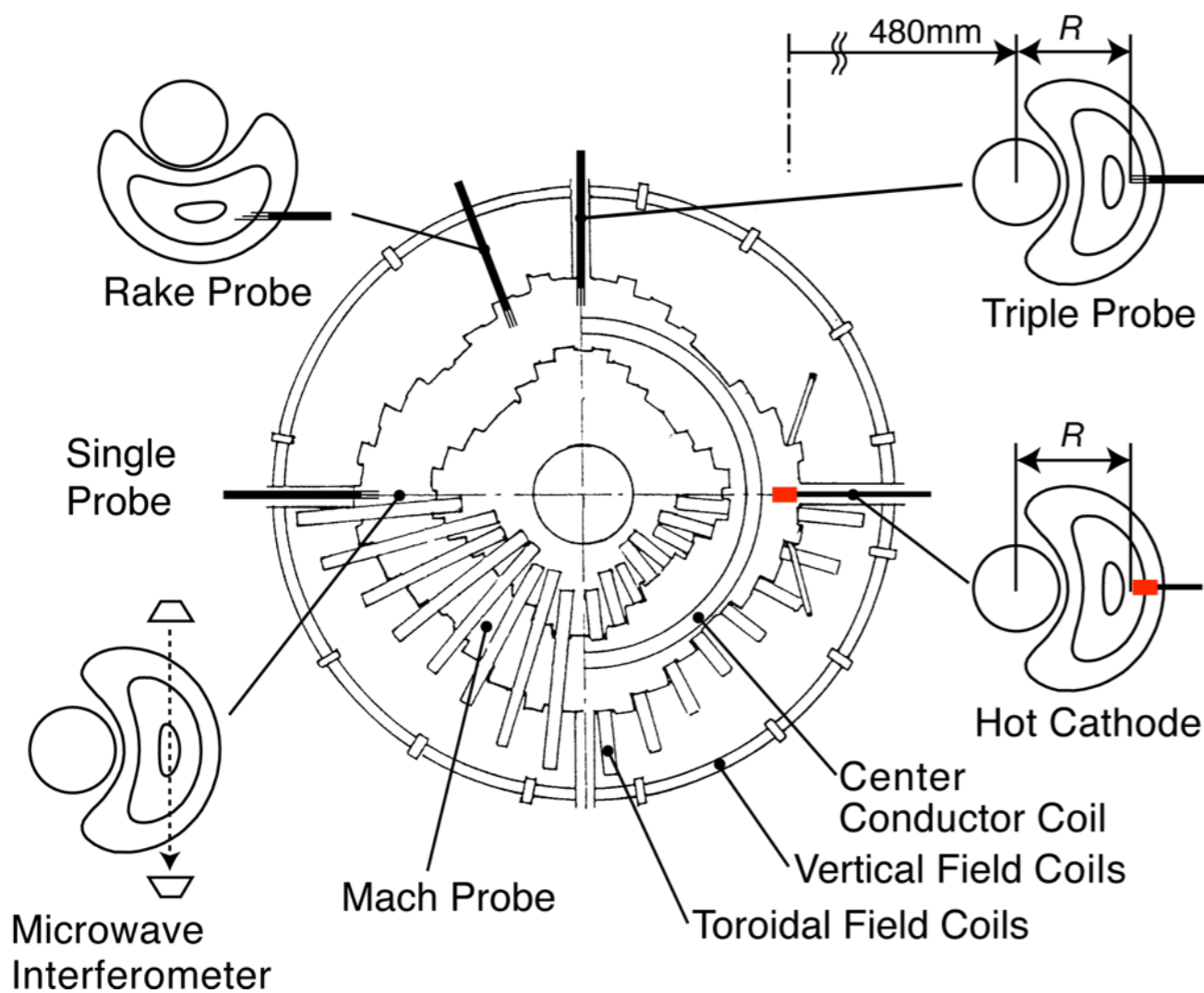


# 密度崩壊時の径電場とフローの変化

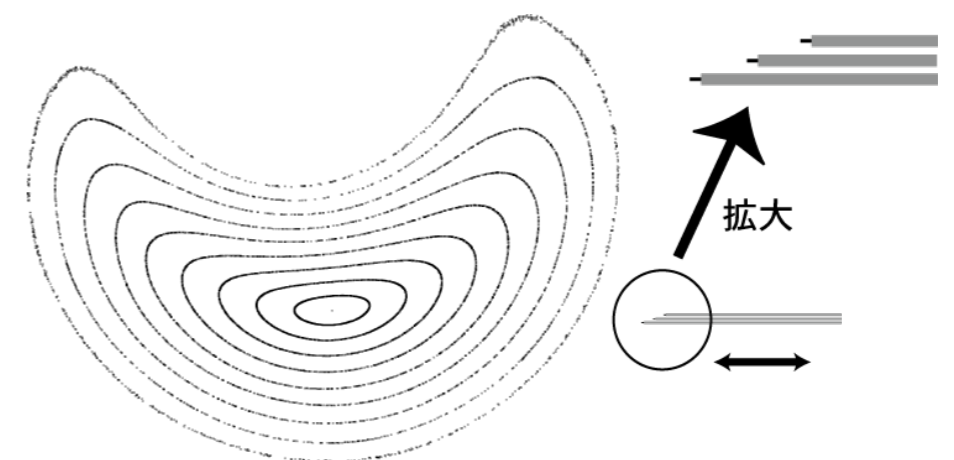
# 計測装置の配置

## 密度崩壊と揺動の計測装置

- 1) トリプルプローブ
- 2) レイクプローブ
- 3) マイクロ波干渉計
- 4) シングルプローブ



トリプルプローブ  
ポロイダル方向に先端を配置  
イオン飽和電流、浮動電位を計測



レイクプローブ  
径方向に先端を配置  
イオン飽和電流、浮動電位を計測

# 密度崩壊時の径方向分布

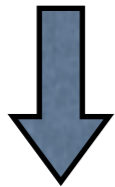
## ~イオン飽和電流計測~

密度崩壊の特性

⇒ 密度分布に反映

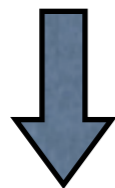
イオン飽和電流の最大値と最小値

⇒ 崩壊の前後に対応



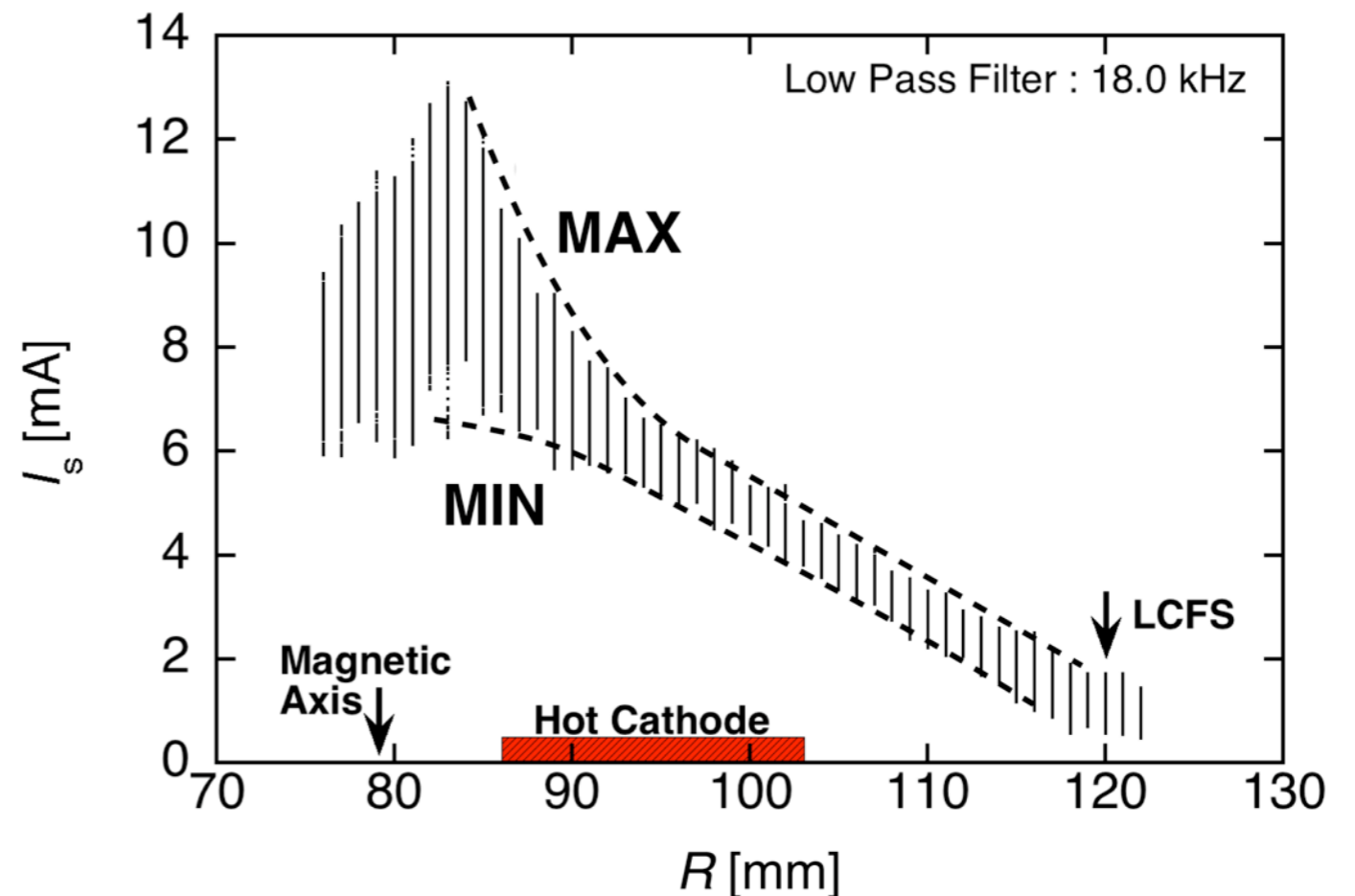
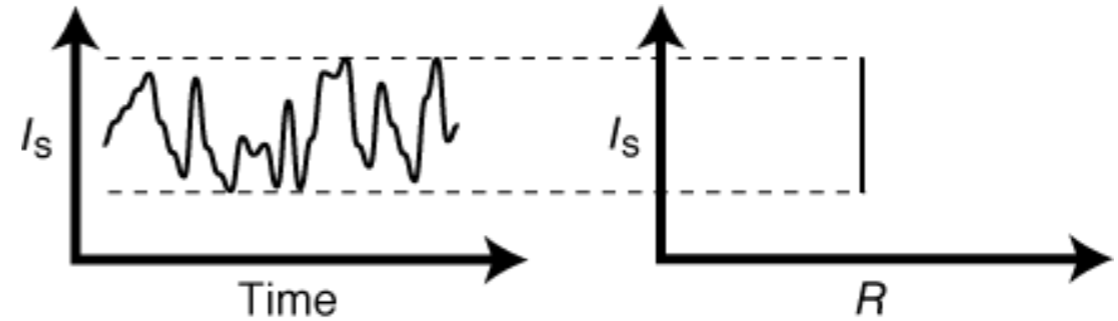
崩壊時に、

- プラズマ中心部で30~40%の密度減少
- 急峻な勾配の消滅  
密度勾配と崩壊が関係している可能性を示唆



密度崩壊の瞬間を反映させた計測が必要

ローパスフィルター(18.0 kHz)で密度崩壊の成分を抽出

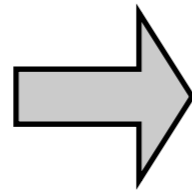


# 密度崩壊時の径方向分布

## ~崩壊モニターを用いた計測(2)~

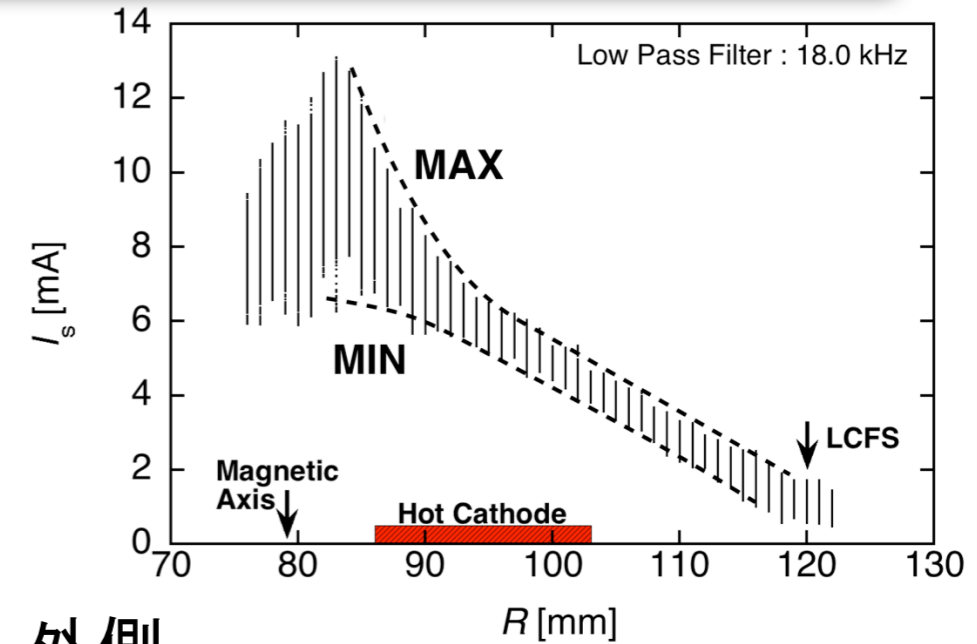
トリプルの位置

- ・内側:正の相関
- ・外側:負の相関

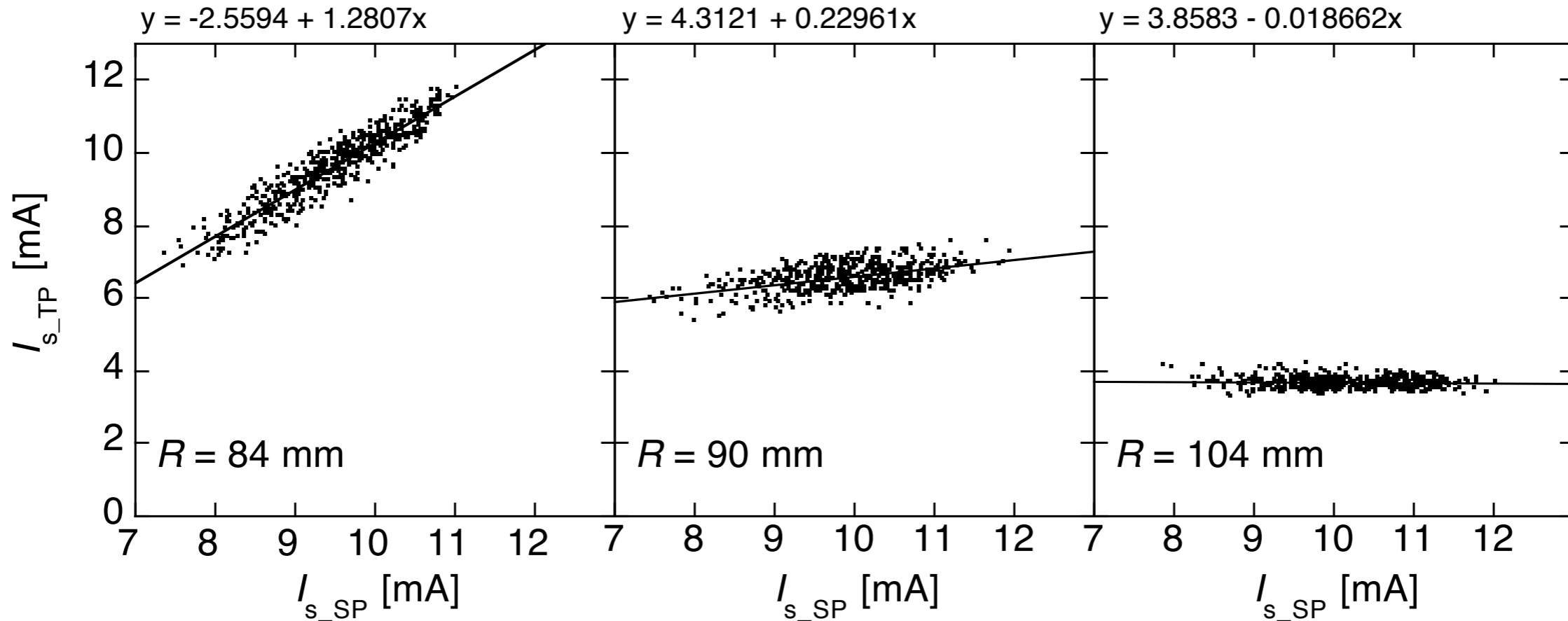


密度崩壊時

- ・内側:密度減少
- ・外側:密度増加



内側 ← トリプル → 外側



シングルプローブのイオン飽和電流

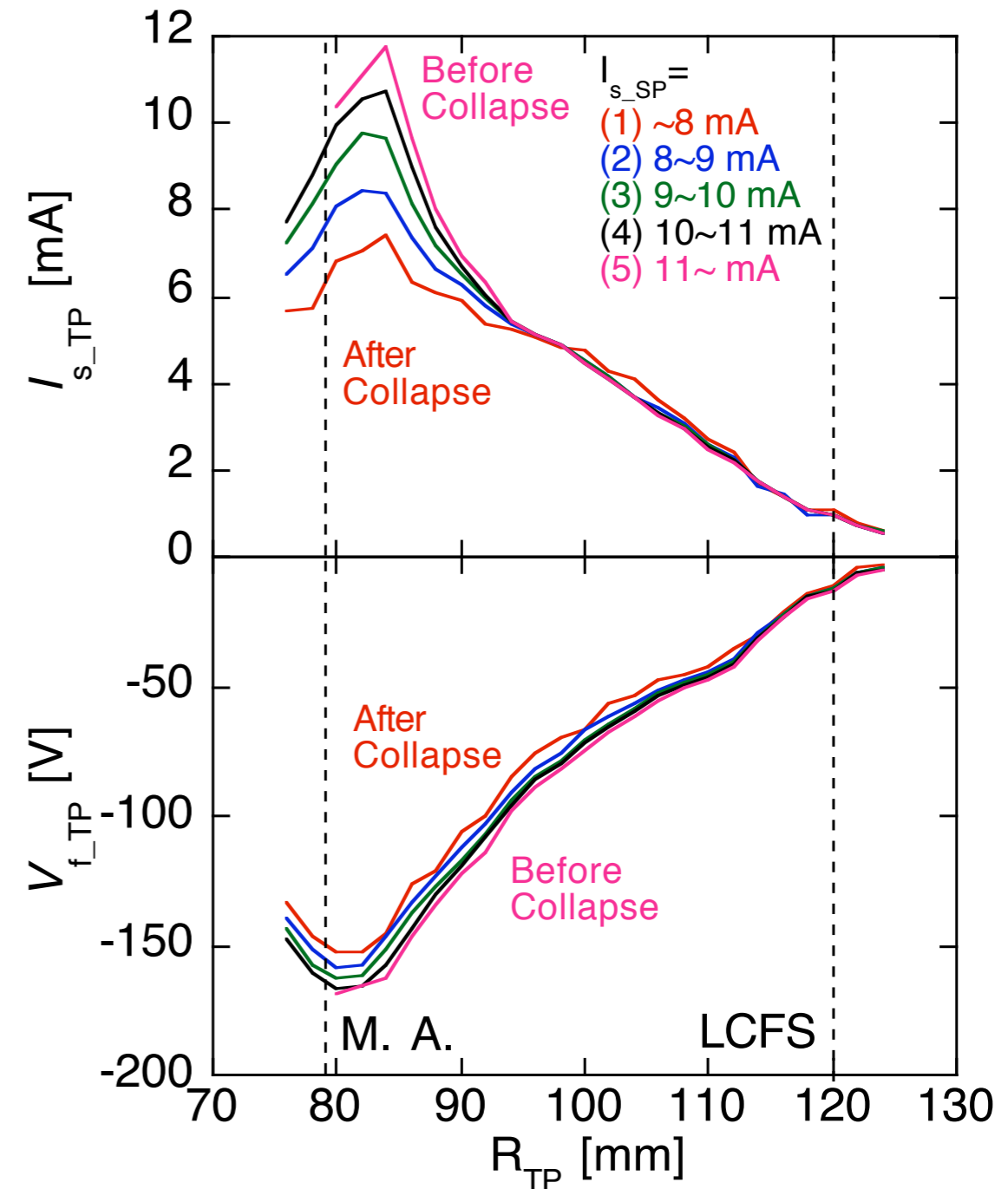
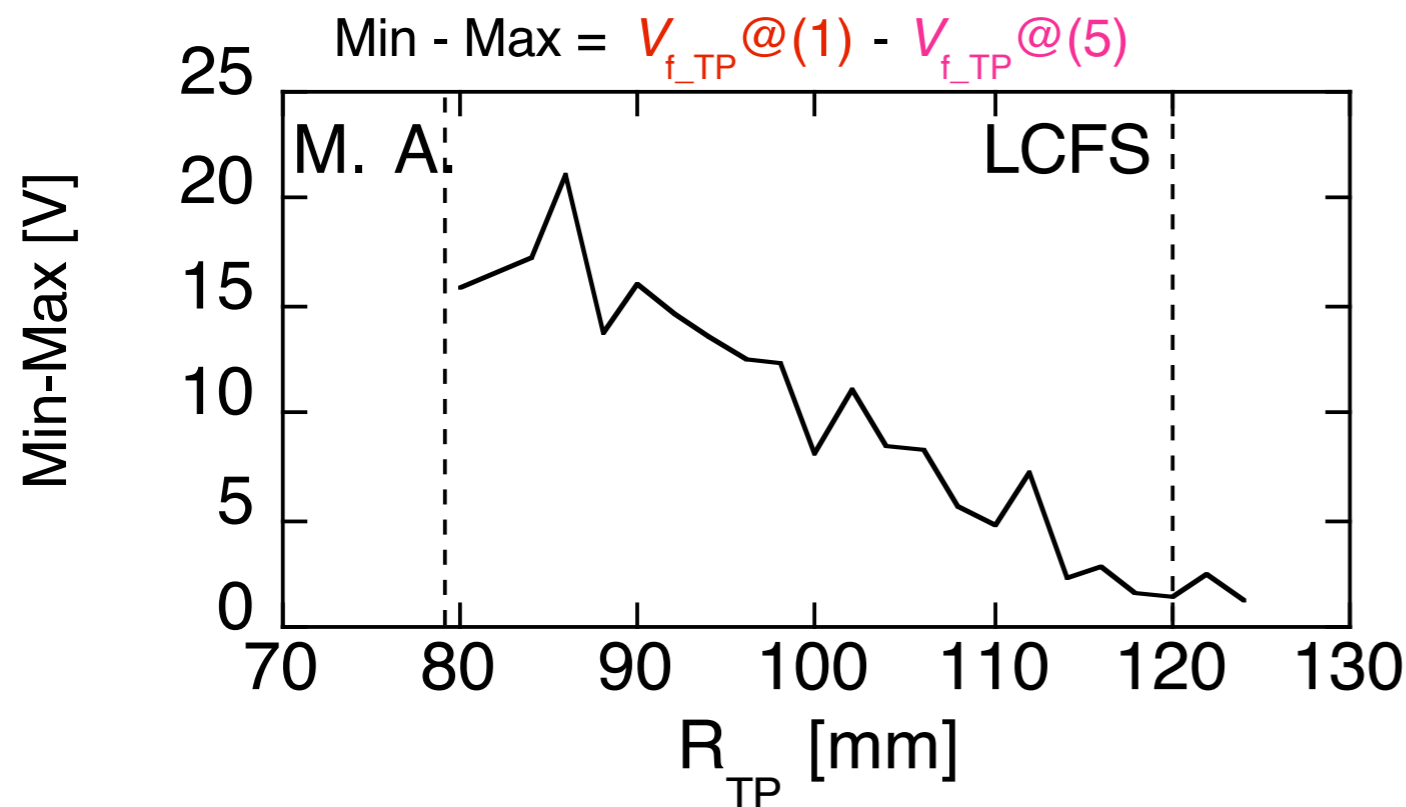
トリプルプローブのイオン飽和電流

# 密度崩壊時の浮動電位の上昇量

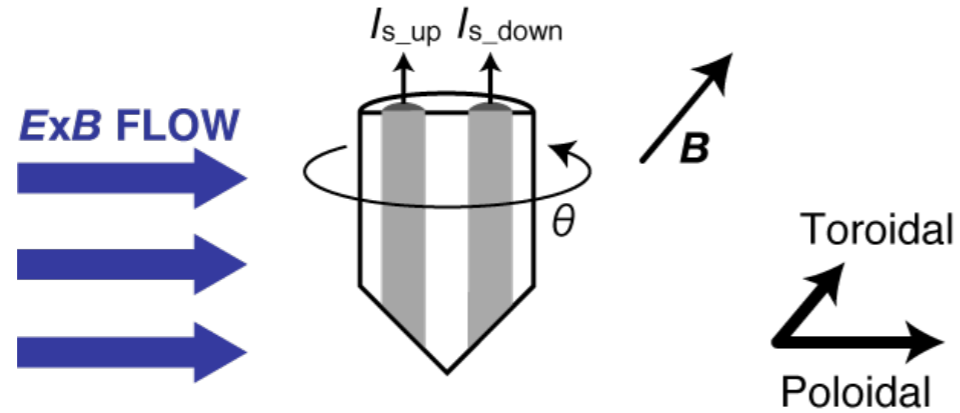
崩壊に伴う電位の上昇量を求めるために、浮動電位の崩壊前後の差を計算した。

崩壊時に、

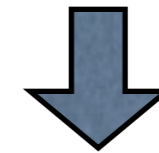
- ・ 中心部では、最大20 V上昇
- ・ 最外殻磁気面では、上昇しない
- ・ 径電場に換算すると、  
 $20 \text{ V}/40 \text{ mm} = 0.5 \text{ kV/m}$ 低下  
⇒ レイクプローブの結果と同じ値



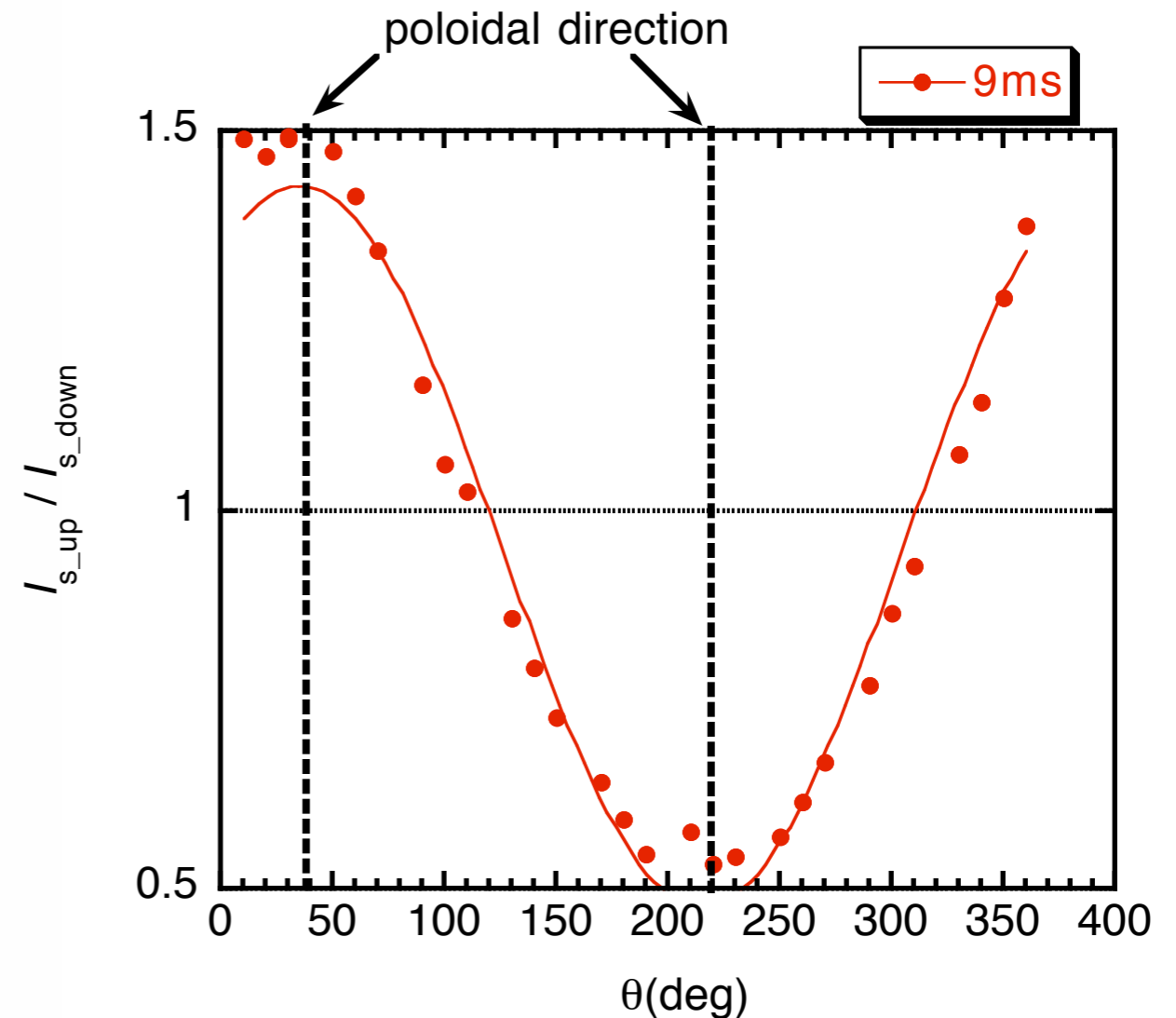
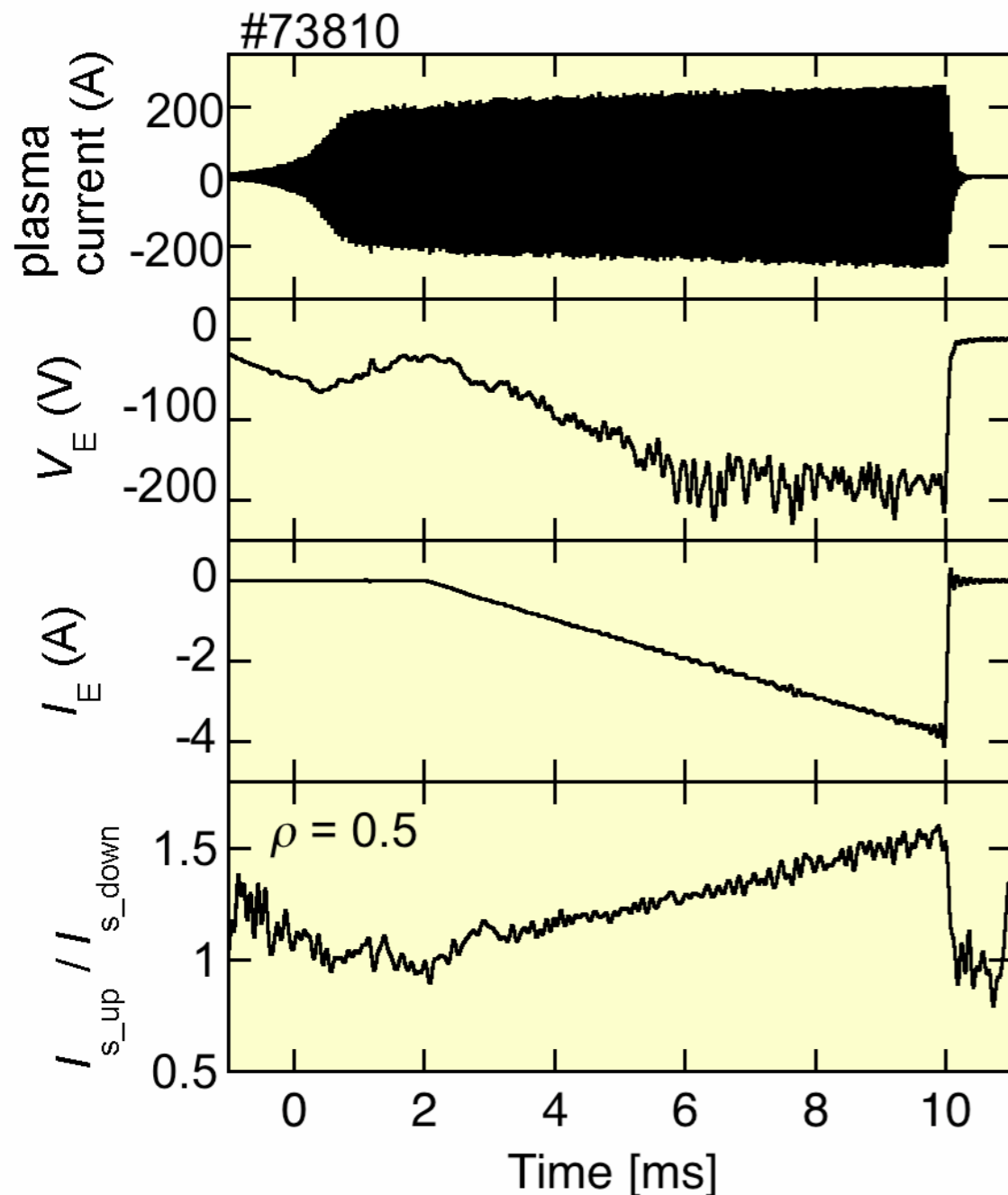
# 熱陰極バイアスによるポロイダル回転形成



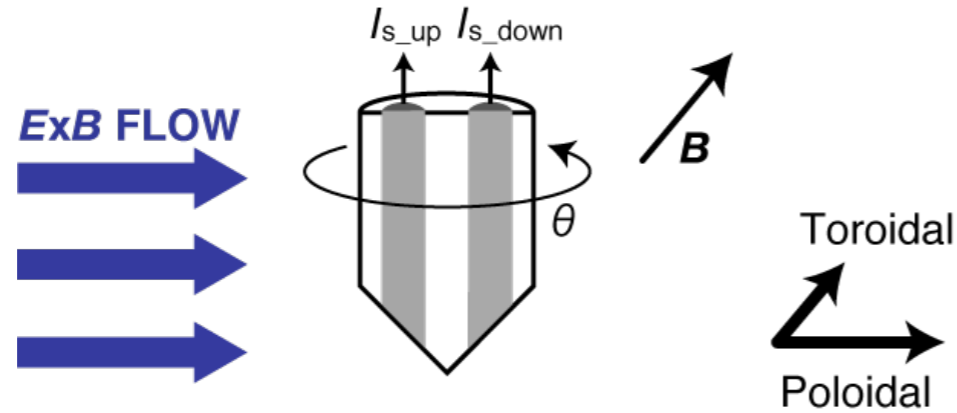
- マツハプローブでイオン飽和電流を計測
- ✓ 電流比が増加 ⇨ フロー形成
  - ✓ フローの向き ⇨ ポロイダル方向



**ExBポロイダル回転の形成を確認**



# 密度崩壊時のフロー変化

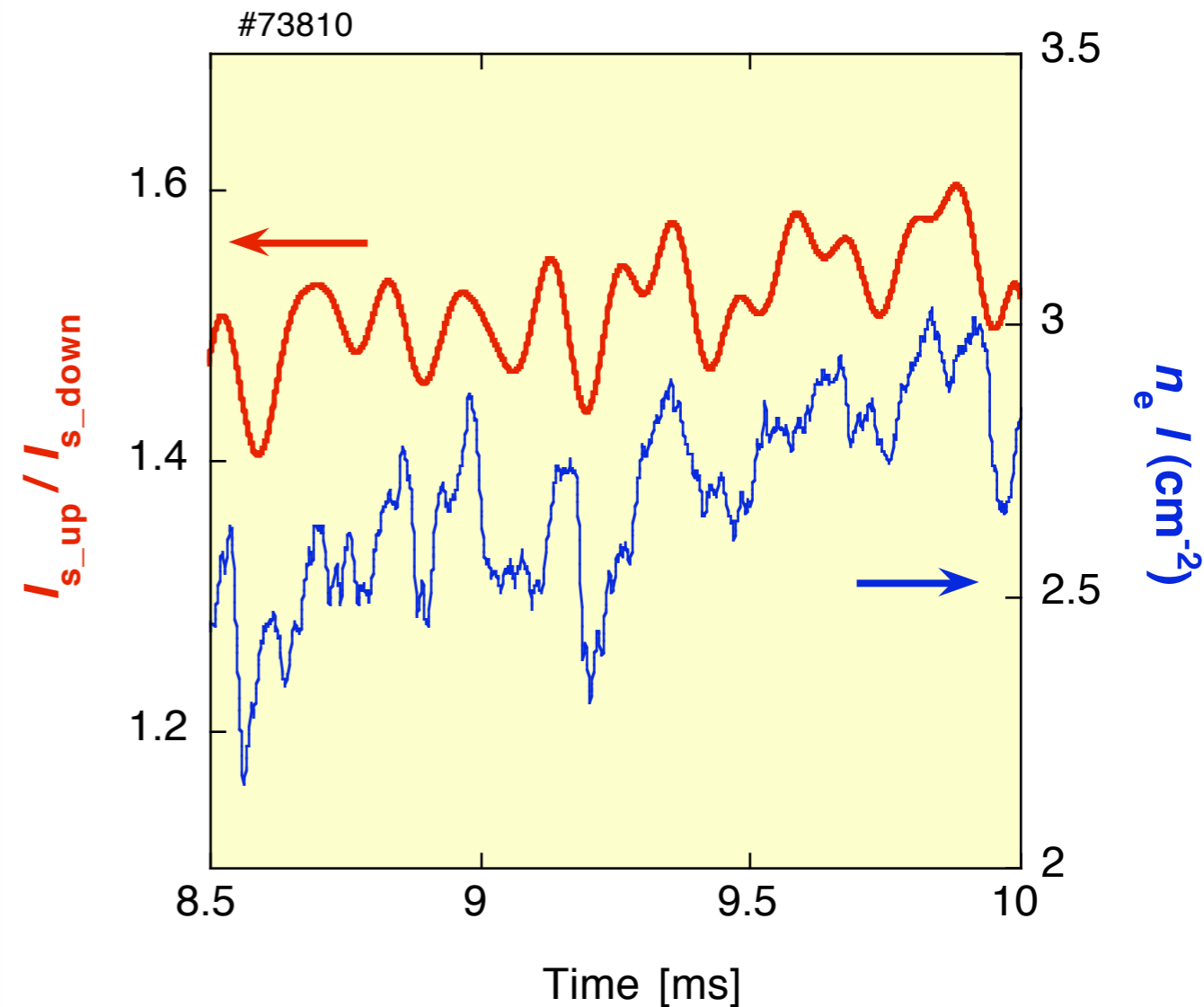
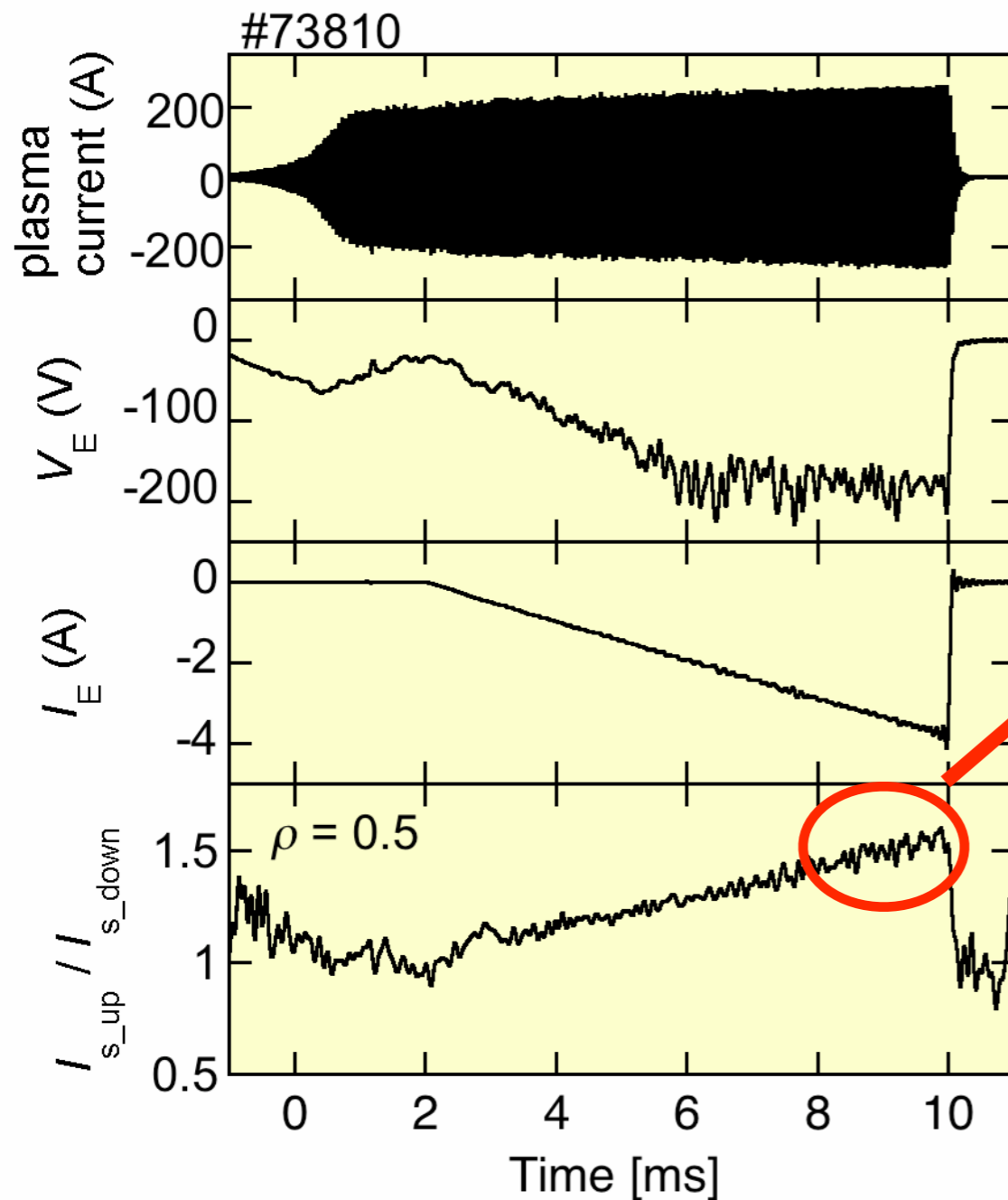


密度崩壊時

⇒ 電流比が低下

⇒ **ポロイダルフロー低下**

⇒ 浮動電位は空間電位を反映

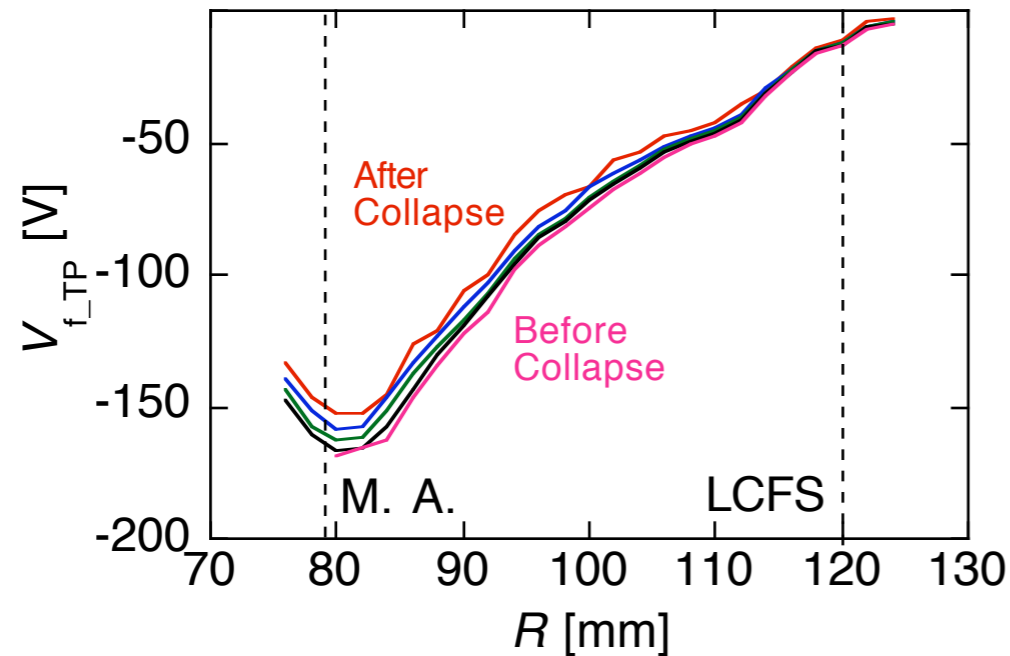


# 密度崩壊時の径電場計測

密度崩壊時に浮動電位も変化

⇒ 径電場に反映

⇒ 浮動電位の差分から径電場を見積もる



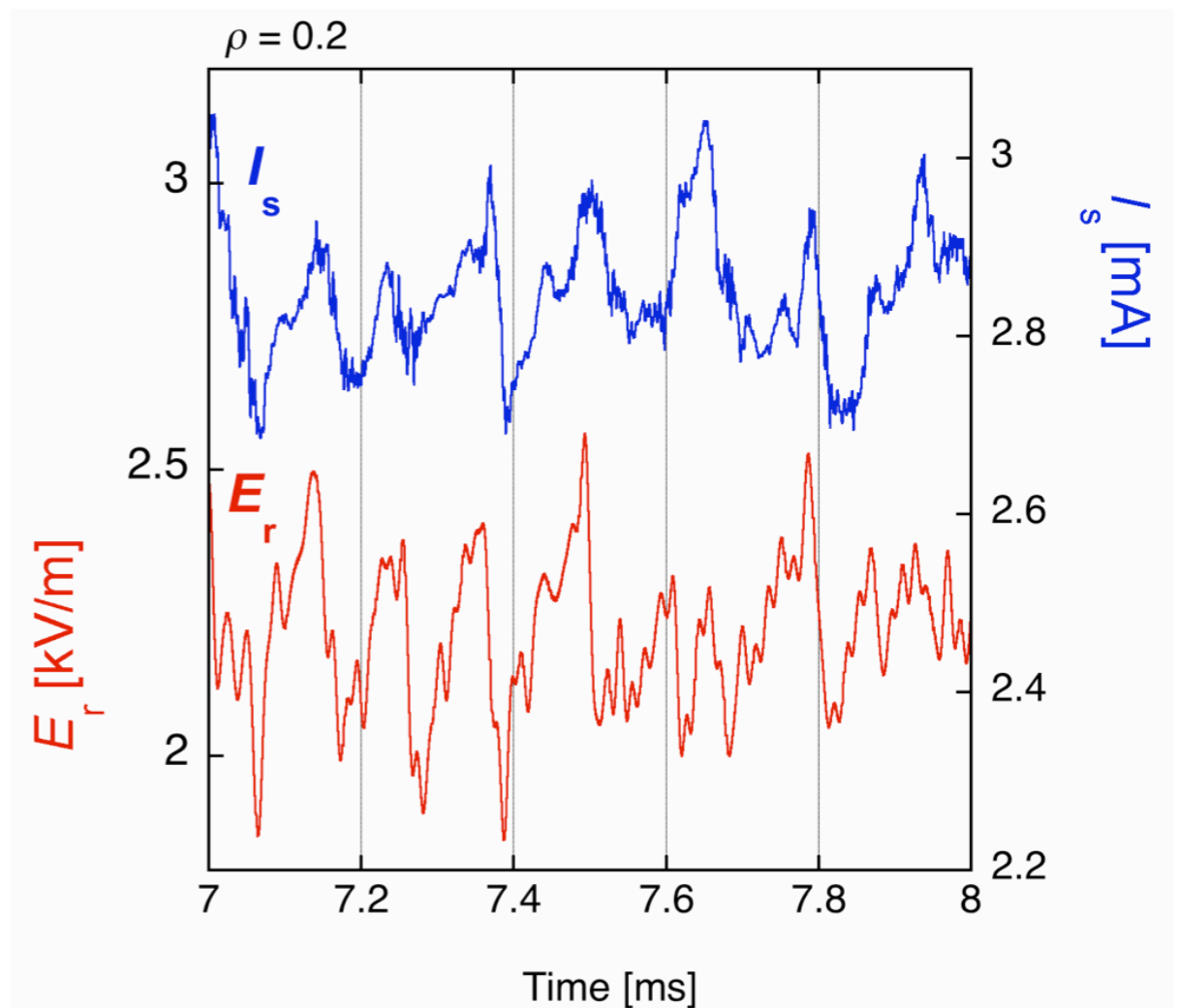
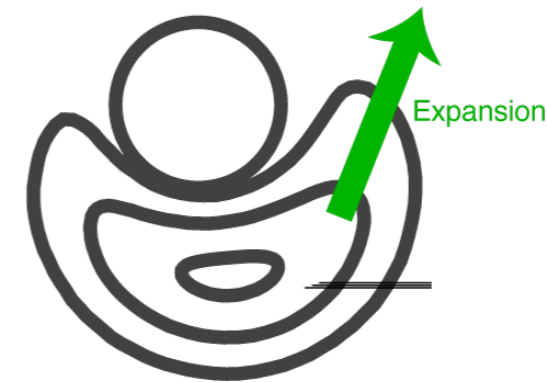
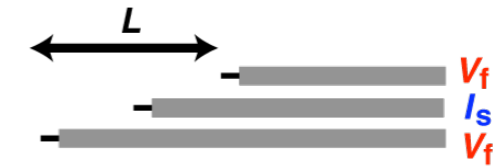
~径電場~

- 約0.5 kV/mの振幅で振動
- イオン飽和電流と同位相で振動 (山谷が揃っている)

密度崩壊時に約20%の  
 $E \times B$ ポロイダル回転低下

レイクプローブ

径方向に3本のチップを設置





# パラメータの径方向分布

シングルプローブ法で、空間電位  $V_s$ 、浮動電位  $V_f$ 、  
電子温度  $T_e$ 、電子密度  $n_e$  を計測

