



第11回若手科学者によるプラズマ研究会  
日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所  
2008年3月17-19日

# LHDにおける重イオンビームプローブによる 静電ポテンシャル計測

核融合科学研究所

井戸 毅、清水昭博、西浦正樹、中野治久、大島慎介  
加藤真治、LHD実験グループ

# 内容

---

- LHD用重イオンビームプローブ(HIBP)の紹介

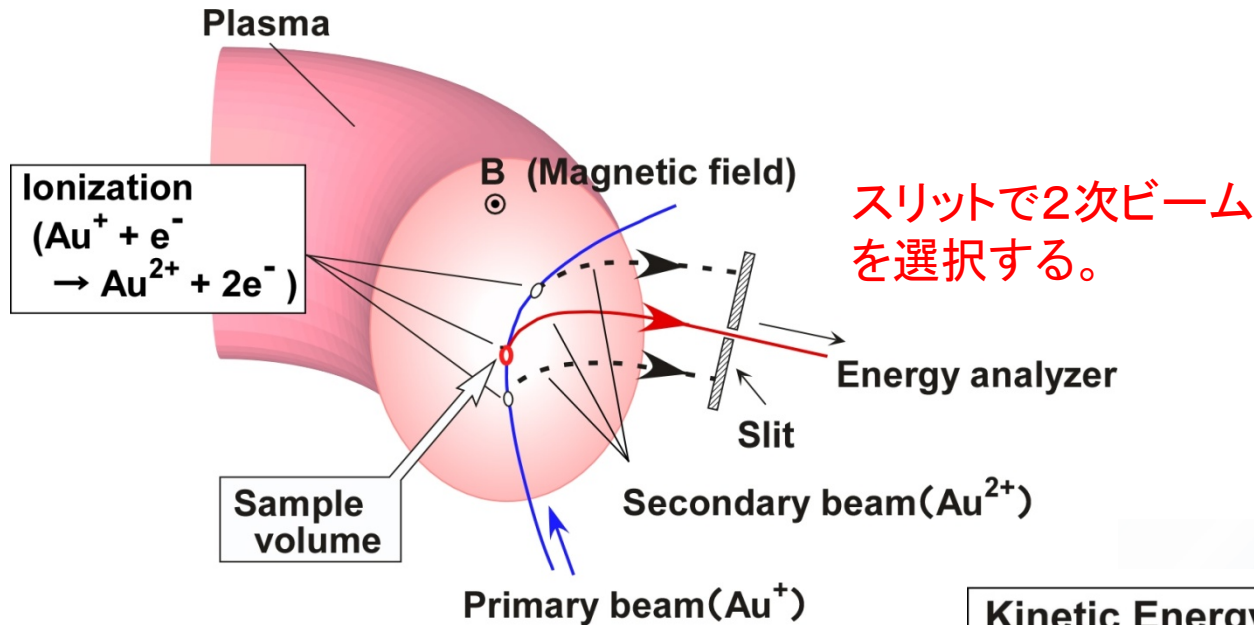
- ポテンシャル分布計測 [ポスターにて]

- HIBPによるポテンシャル分布。
- 荷電交換分光(CXS)によって得られた電場分布との比較。
- 新古典論に基づいて計算された電場分布との比較。

- 揺動計測

- ポテンシャル揺動、密度揺動の周波数スペクトル
  - Geodesic Acoustic Mode (GAM)周波数帯
  - 高速イオン駆動モード
  - 回転変換分布に対する依存性。

# 重イオンビームプローブ (HIBP : Heavy Ion Beam Probe)



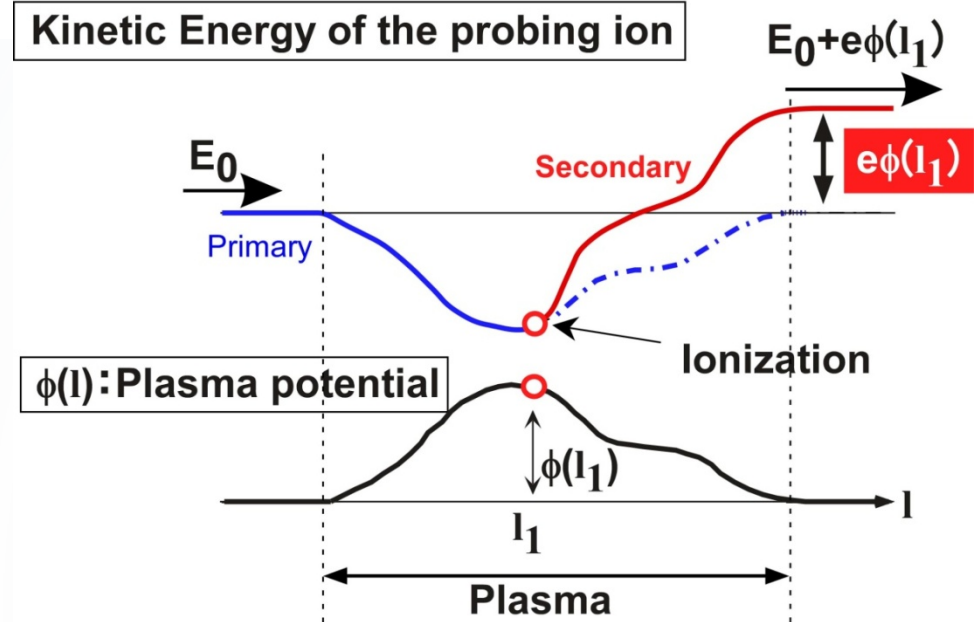
目的:

- ・静電ポテンシャルおよびその揺動
- ・密度揺動 (・磁場揺動)

スリットで2次ビームを選択する。

高エネルギー重イオンを入射する。  
(1次ビーム)

入射時の運動エネルギーと検出時の運動エネルギーはイオン化点のポテンシャルエネルギー分変化する。  
この変化分を測ることにより、**イオン化点での静電ポテンシャル**を計測することができる。



# LHD用重イオンビームプローブ (HIBP: Heavy Ion Beam Probe)

- ・ 3MV タンデム加速器

ビームエネルギー  $\leq 6 \text{ MeV}$

\*安定性 :  $5 V_{\text{RMS}}$

( $0.75\text{MV}$  for  $1.5\text{T}$ )

$230V_{\text{RMS}}$

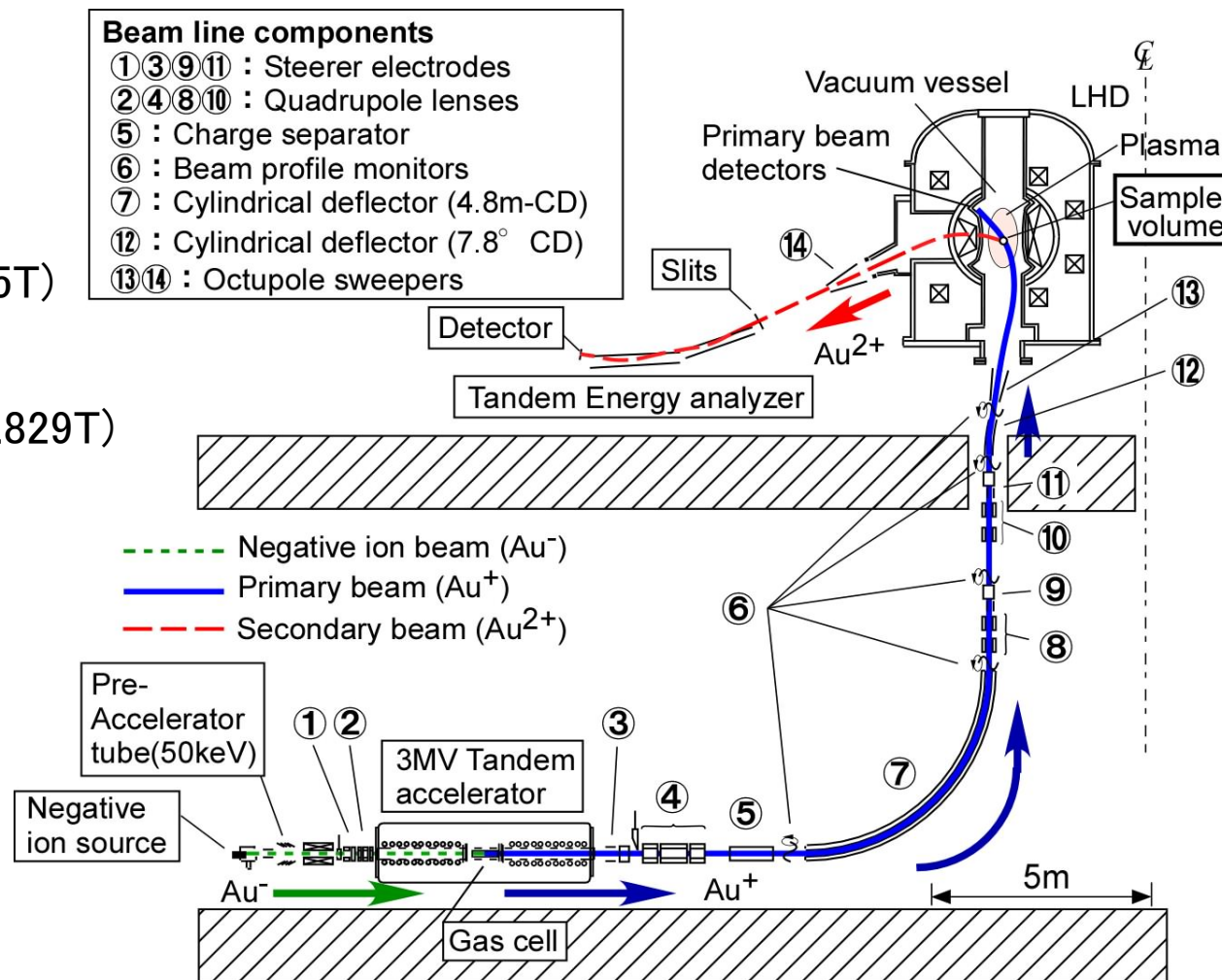
( $2.653\text{MV}$  for  $2.829\text{T}$ )

- ・ 負イオン源

イオン種 :  $\text{Au}^-$  (or  $\text{Cu}^-$ )

- ・ タンデム平行平板

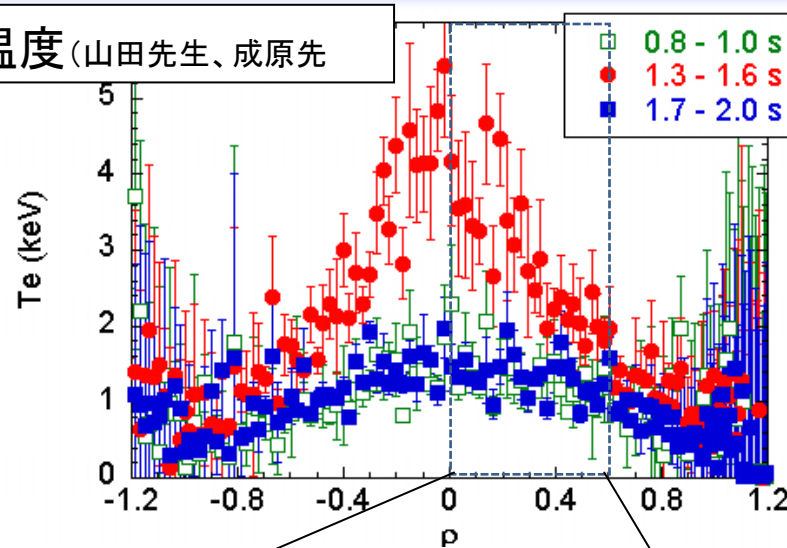
静電エネルギー分析器



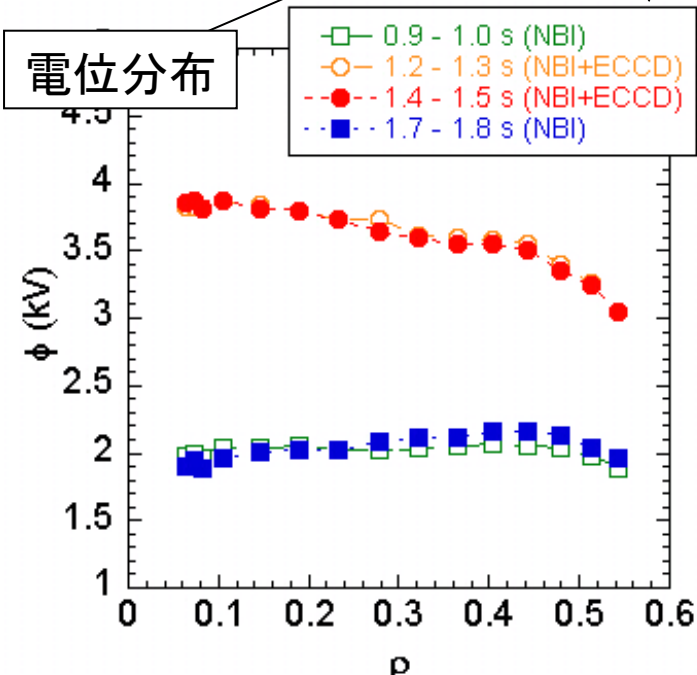
# 揺動計測 : 実験条件

$B = 1.5 \text{ T}$ ,  $R_{ax} = 3.75 \text{ m}$   
 加熱: Balanced NBI, Co-ECCD  
 ガス: H  
 HIBPビームエネルギー:  $E_{b,HIBP} = 1.376 \text{ MeV}$

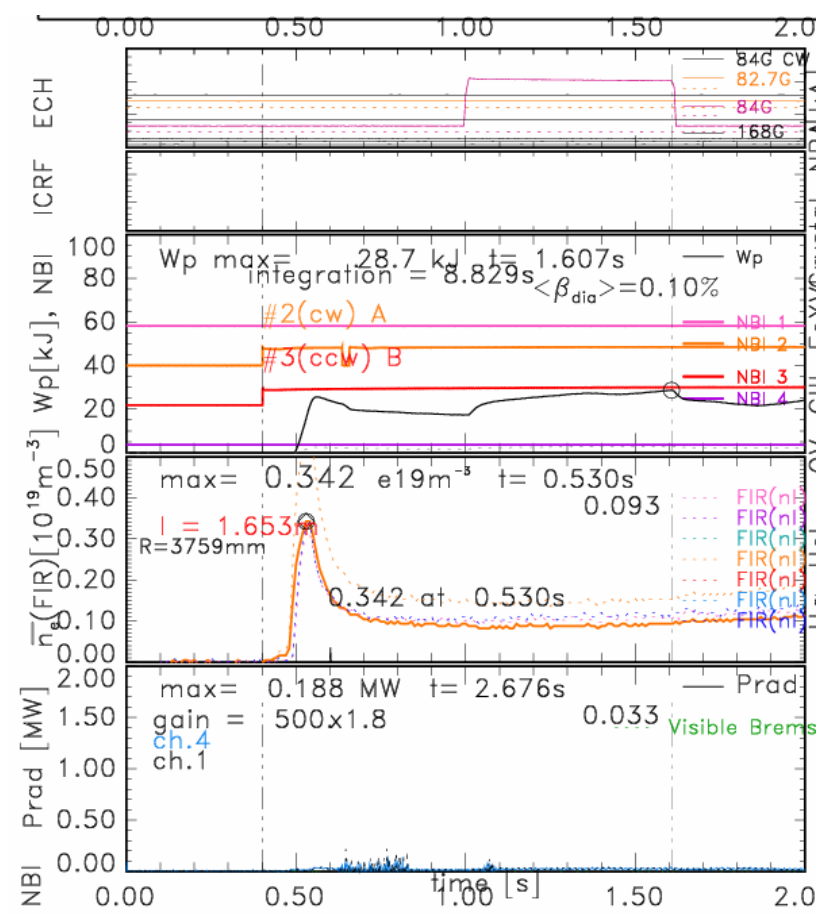
電子温度 (山田先生、成原先生)



電位分布



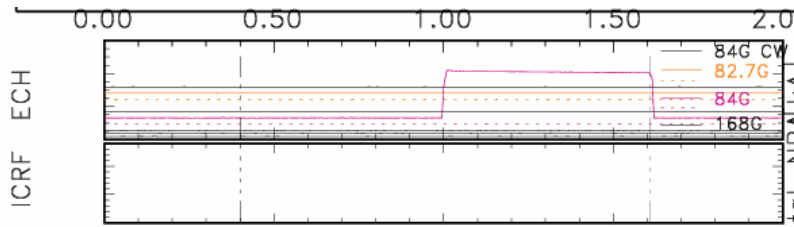
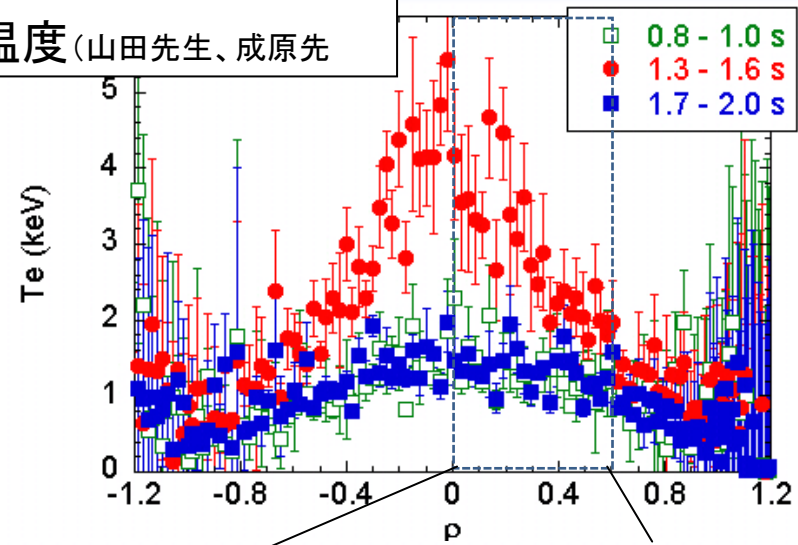
( $\rho$ の絶対値の見積もり精度は-0.2 ~ +0.1)



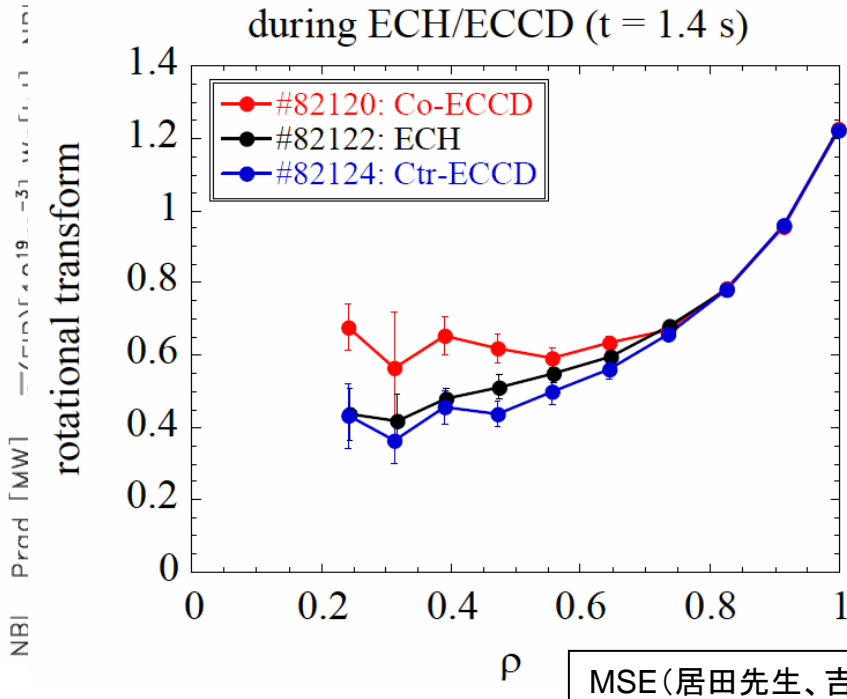
# 揺動計測 : 実験条件

$B = 1.5 \text{ T}$ ,  $R_{ax} = 3.75 \text{ m}$   
 加熱: Balanced NBI, Co-ECCD  
 ガス: H  
 HIBPビームエネルギー:  $E_{b,HIBP} = 1.376 \text{ MeV}$

電子温度 (山田先生、成原先生)

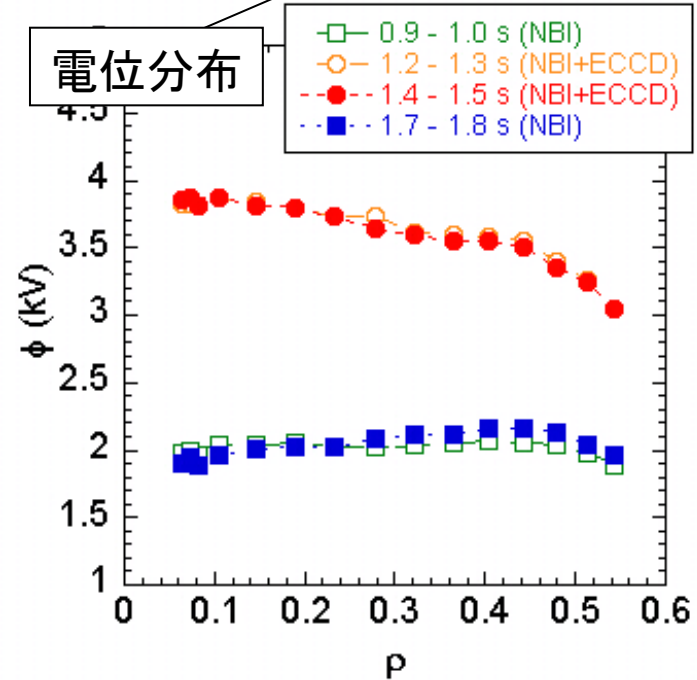


during ECH/ECCD ( $t = 1.4 \text{ s}$ )



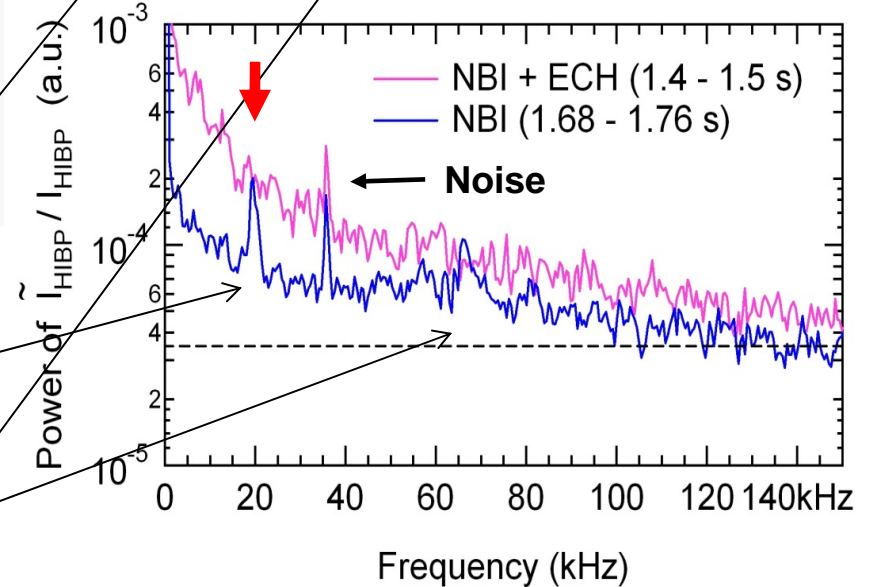
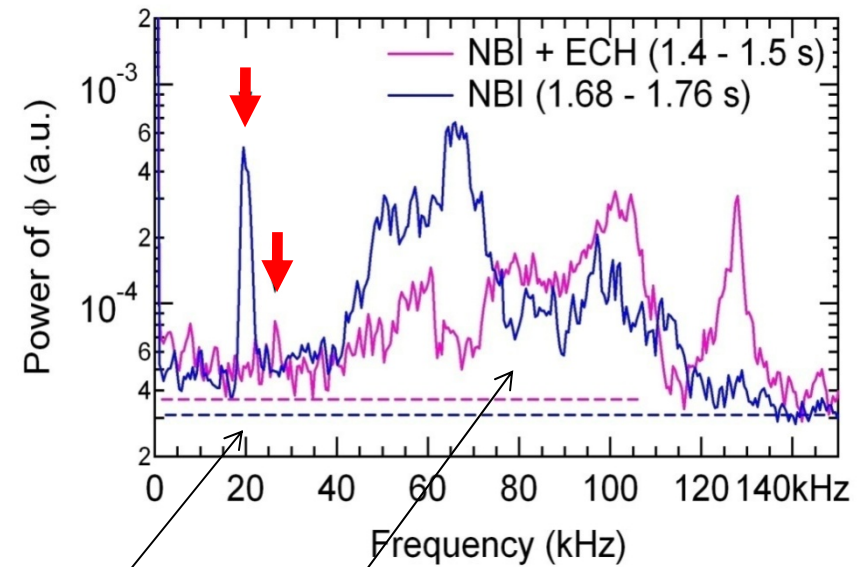
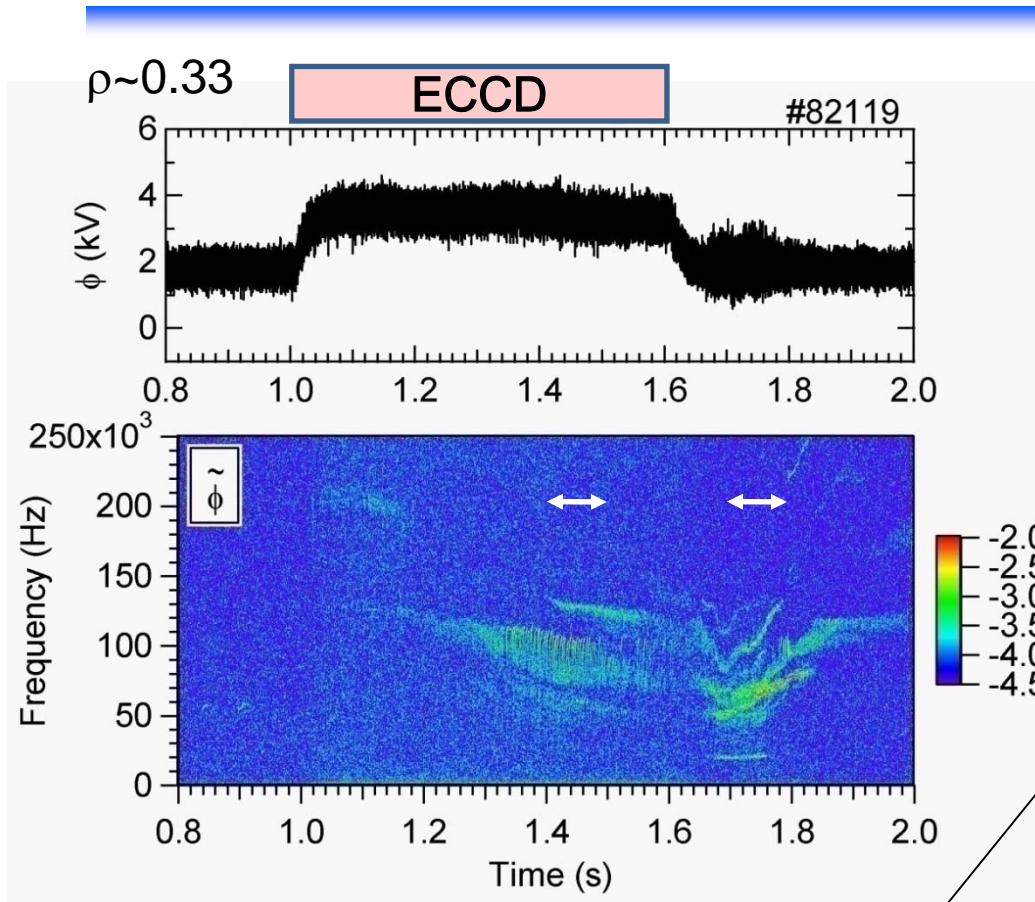
MSE (居田先生、吉沼先生)

電位分布



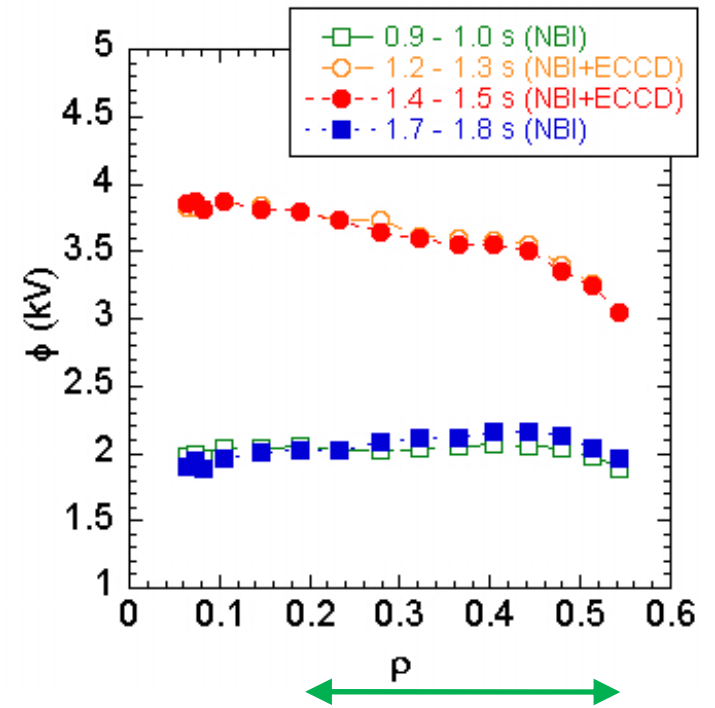
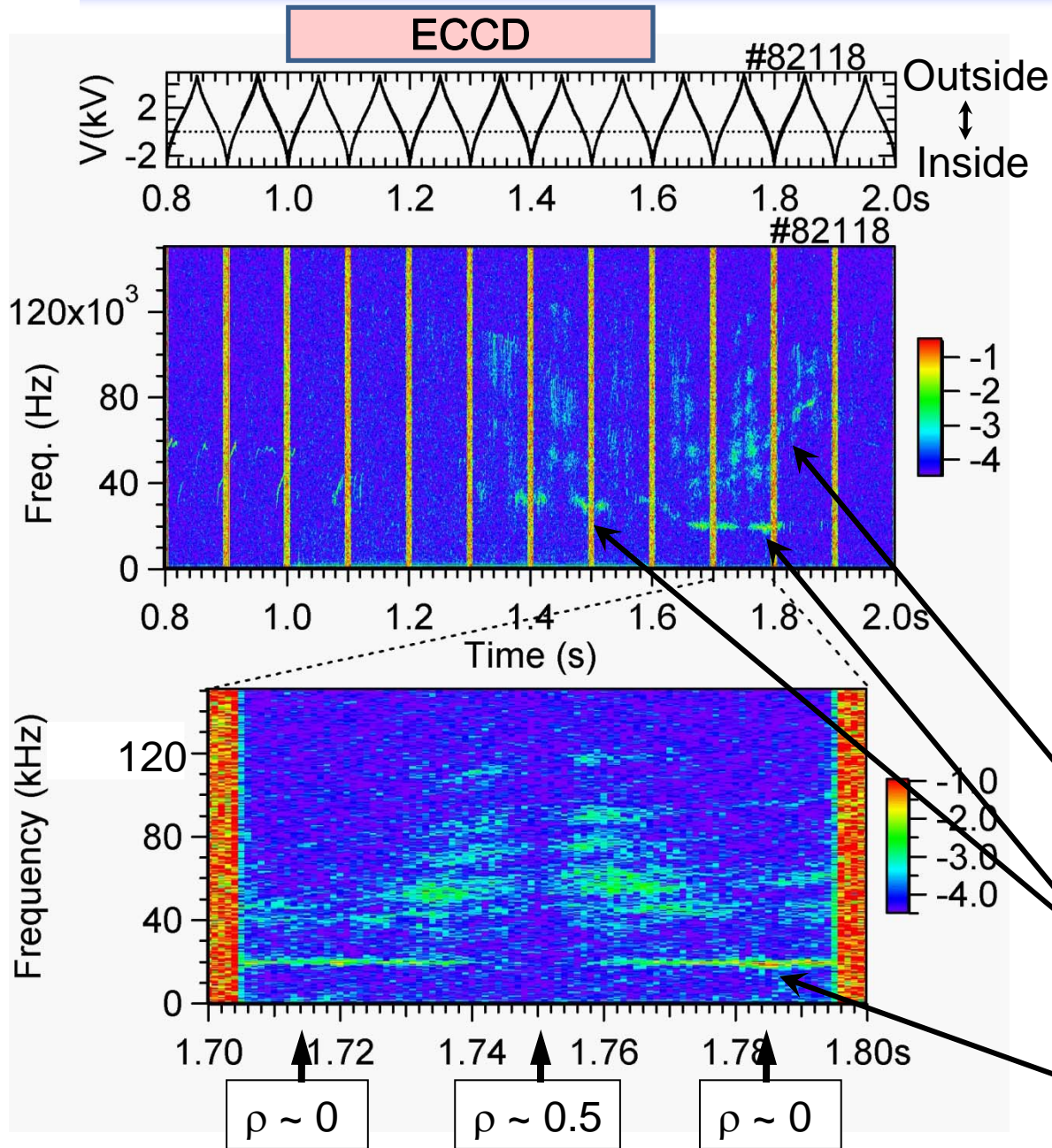
( $\rho$ の絶対値の見積もり精度は-0.2 ~ +0.1)

# 周波数スペクトル



- GAM周波数(19kHz)を持つ揺動  
 $|\phi(f_{\text{GAM}})| \sim 150 \text{ V}$
- 高速イオン励起と考えられる揺動 ( $> 40\text{kHz}$ )

# 揺動の空間分布



Coherent mode with GAM  
frequency is observed

周波数の変動が見られる。

[GAM]周波数が一定。  
温度に依存。

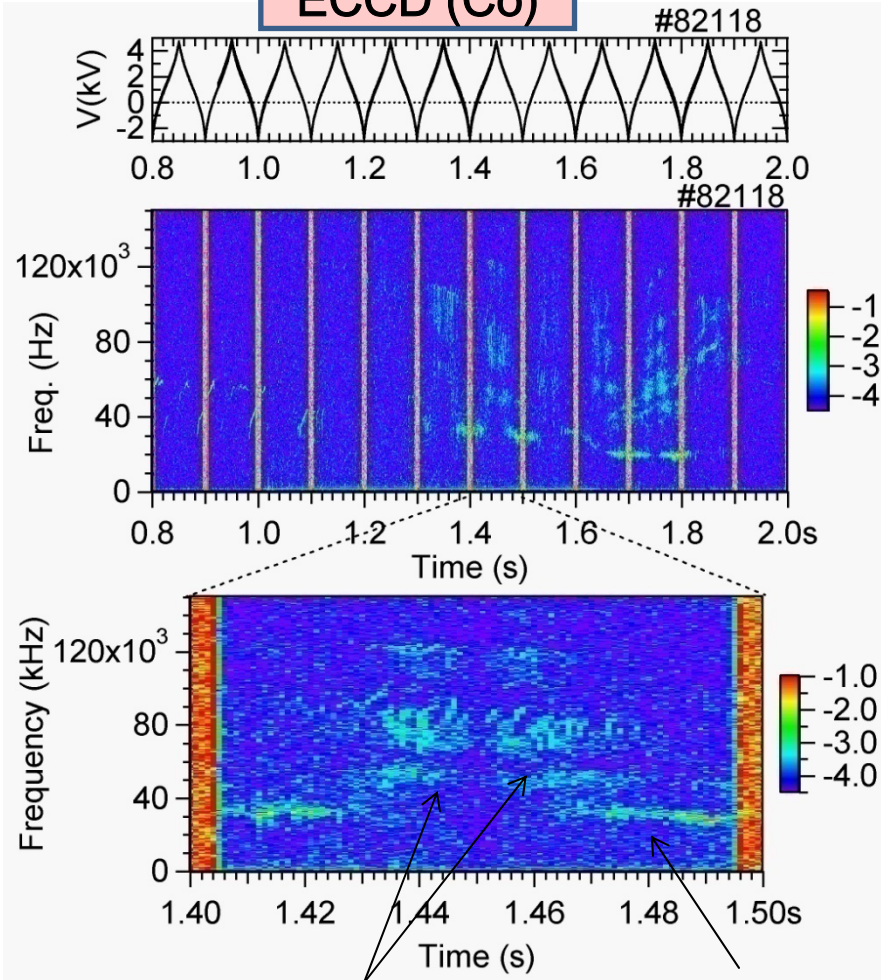
[GAM]プラズマ中心近傍に局在



# ECCDによるプラズマ電流の駆動方向による違い

プラズマ中心で回転変換増  
⇒ 磁気シアが弱くなる(逆転する)。

ECCD (Co)



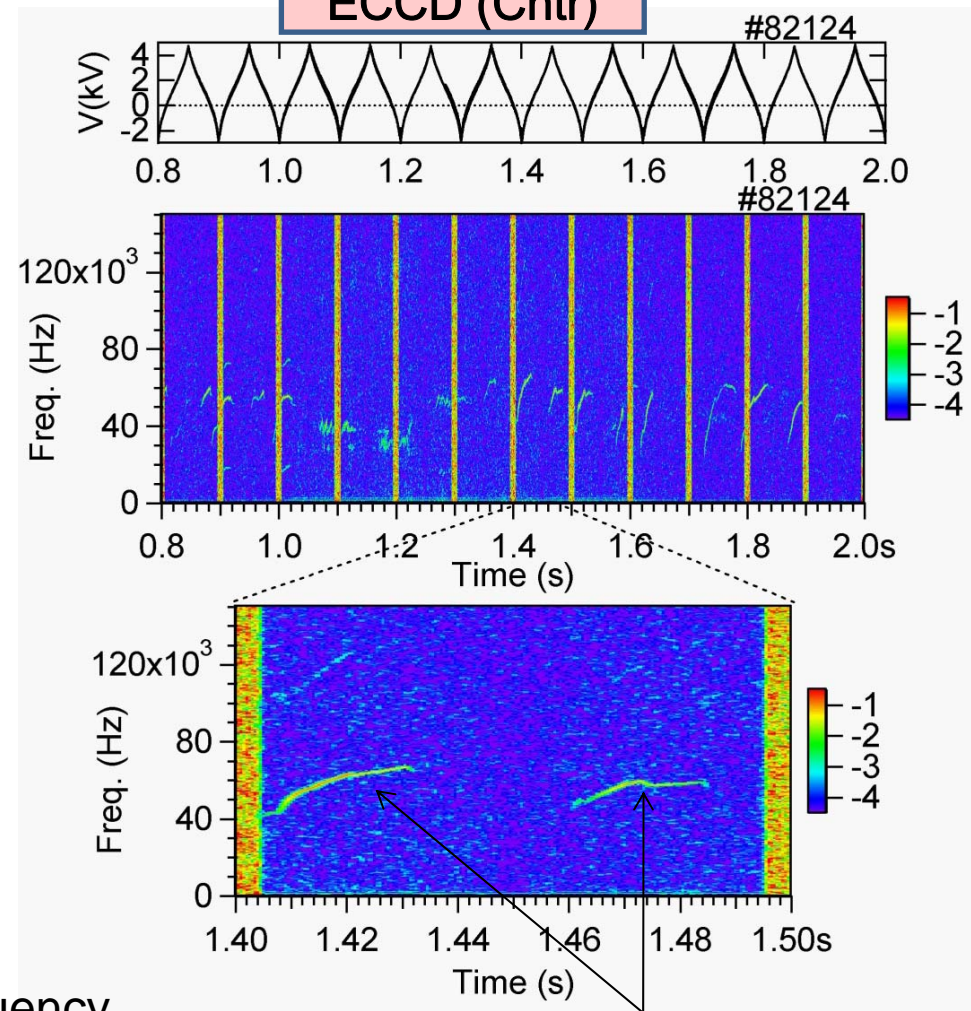
Reversed Shear

Alfven Eigenmode : RSAE(?)

GAM frequency

プラズマ中心で回転変換減  
⇒ 磁気シアが強くなる。

ECCD (Cntr)



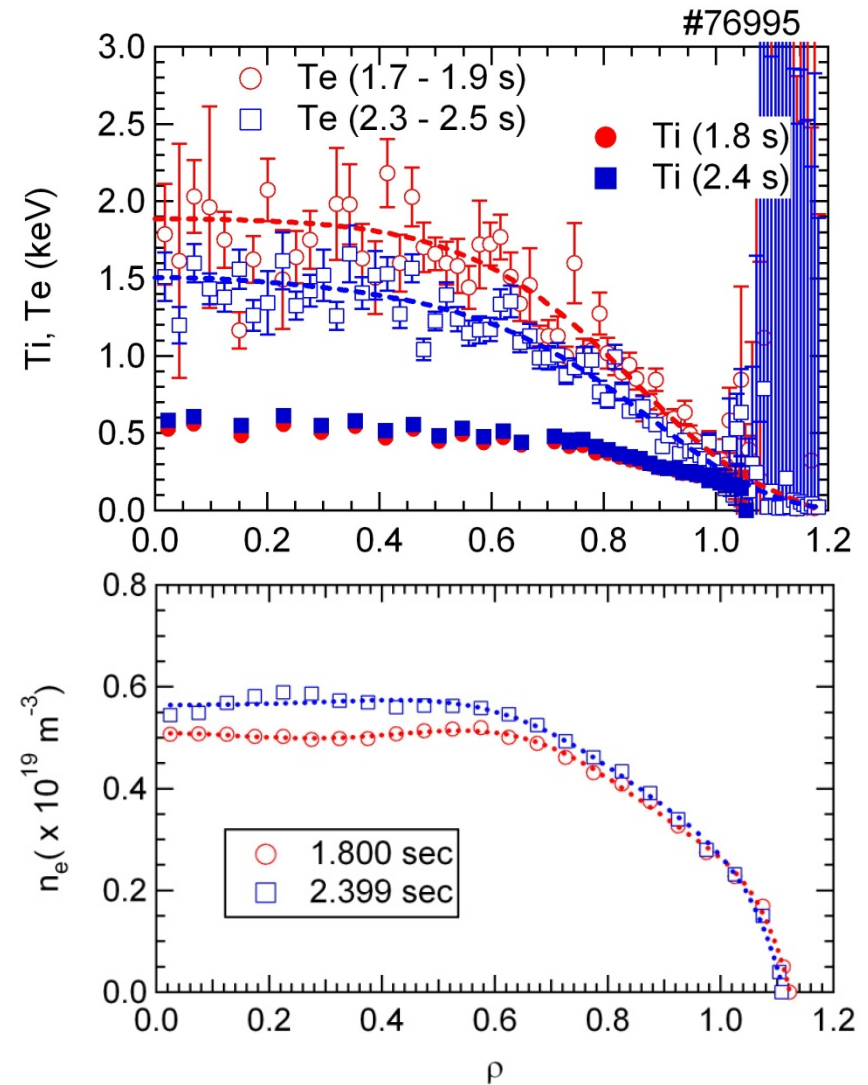
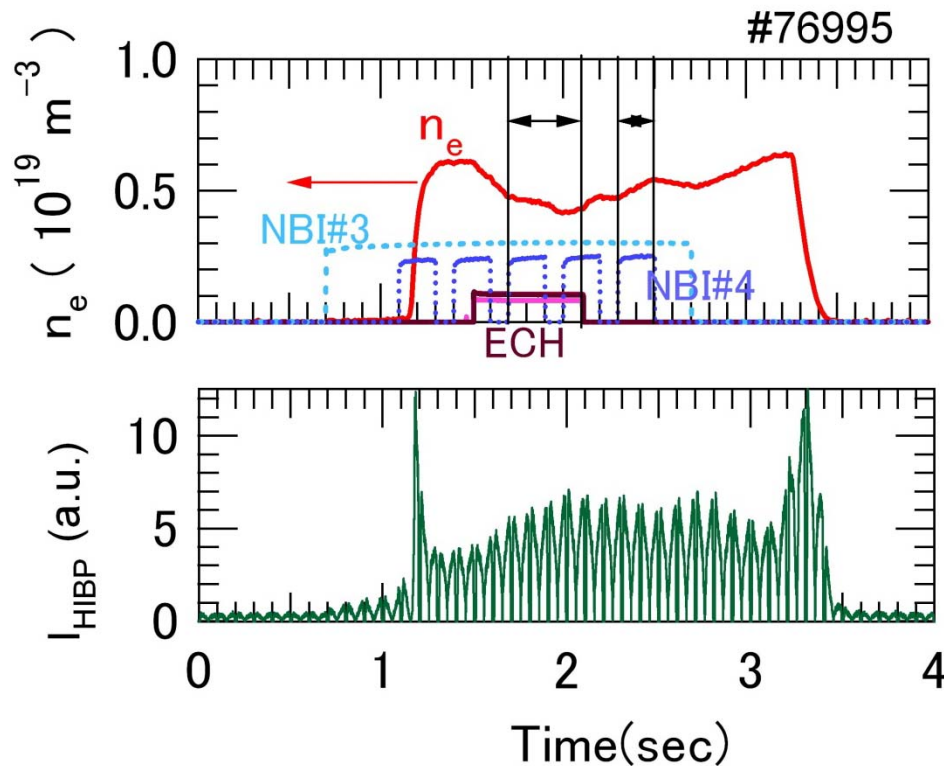
Energetic Particle Mode : EPM (?)

# まとめ

- LHD用にHIBPを開発し、ポテンシャル計測を行った。
  - (ポスターにて報告)計測されたポテンシャル分布は、CXSによる計測結果と一致している。
  - (ポスターにて報告)プラズマ中心近傍における新古典論に基づく電場予測値はHIBPによって計測された値とよく一致している。
- 
- 低密度プラズマにおいてはポテンシャル揺動計測も可能となった。
  - NBI + Co-ECCD時に、高速イオン駆動と考えられる揺動とともにGAM周波数帯に低周波揺動が観測された。
- 
- 低周波揺動の周波数は、絶対値、温度依存性ともにGAM周波数に一致する。
  - GAM周波数を持つ揺動はプラズマ中心近傍に局在している。
- 
- 高速イオン駆動モードの振る舞いはECCDによる駆動電流の方向に依存する。
    - \* Co-ECCD : RSAEと考えられる揺動。GAM周波数を持つ揺動が付随して発生する。
    - \* Counter-ECCD時 : EPMと考えられる、突発的に発生して周波数が短時間に変わるモード。

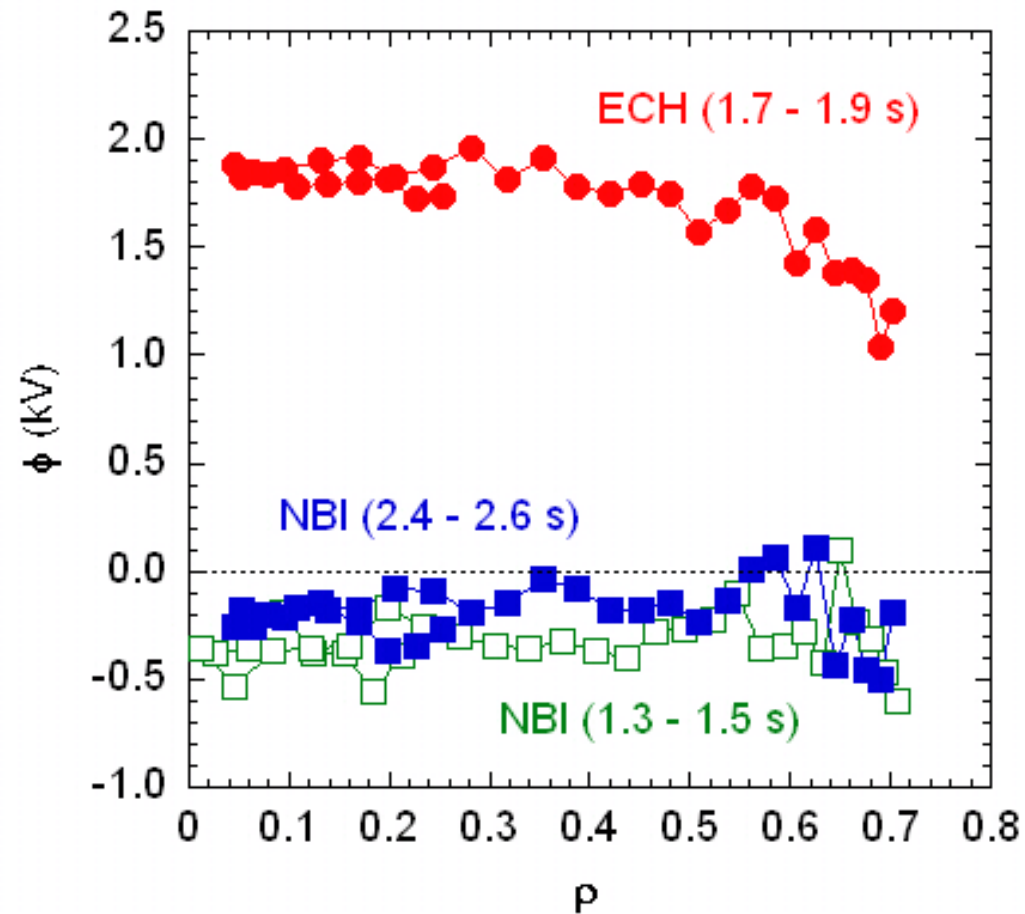
# 電位分布計測 : 実験条件

- $B_t = 1.5\text{T}$
- $R_{ax} = 3.6\text{ m}$
- The plasma is produced and sustained by counter-NBI.
- Modulated perpendicular NBI is injected to measure  $v_\theta$  by CXS.
- ECH starts at 1.4 s to form the ITB.
- Line averaged  $n_e \sim 0.5 \times 10^{19} \text{ (m}^{-3}\text{)}$ .

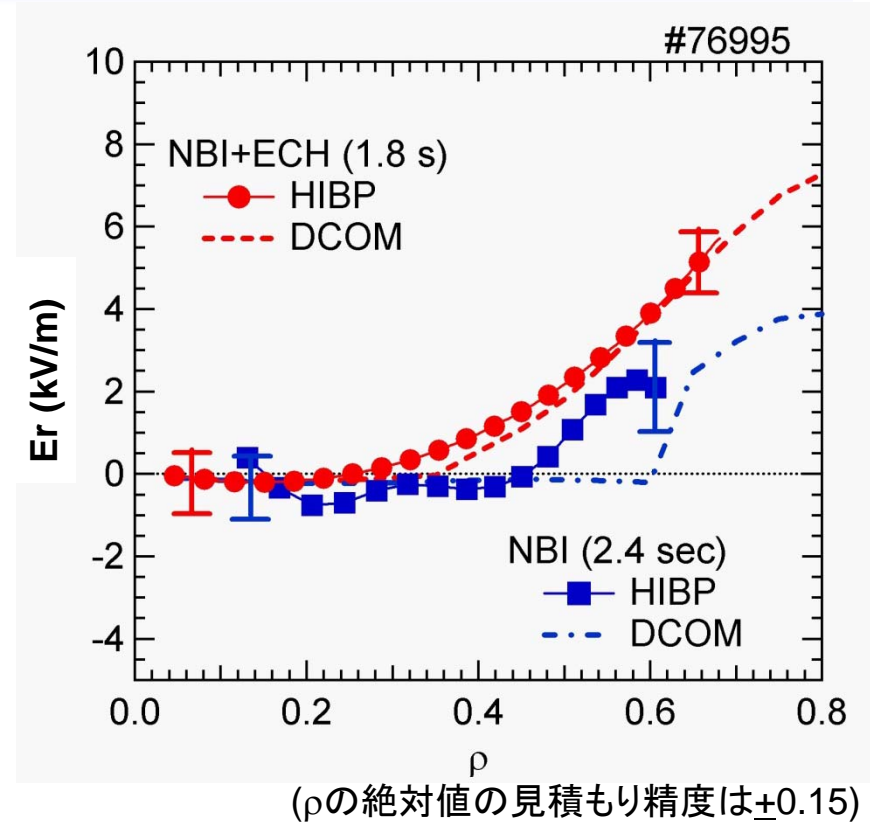
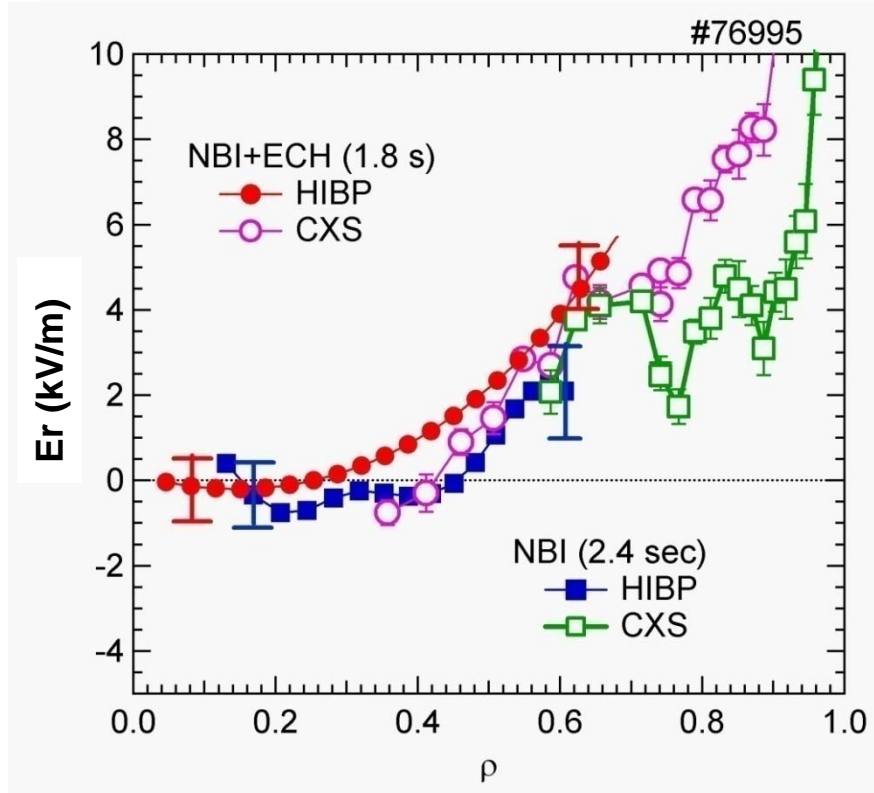


# HIBPによって測定されたポテンシャル分布

## Potential Profiles



# CXSによる観測結果、新古典論による予測値との比較

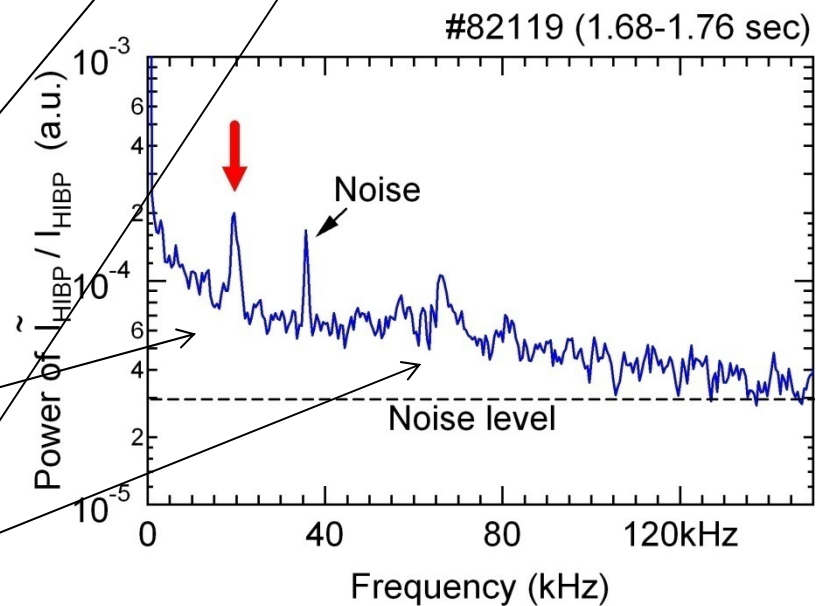
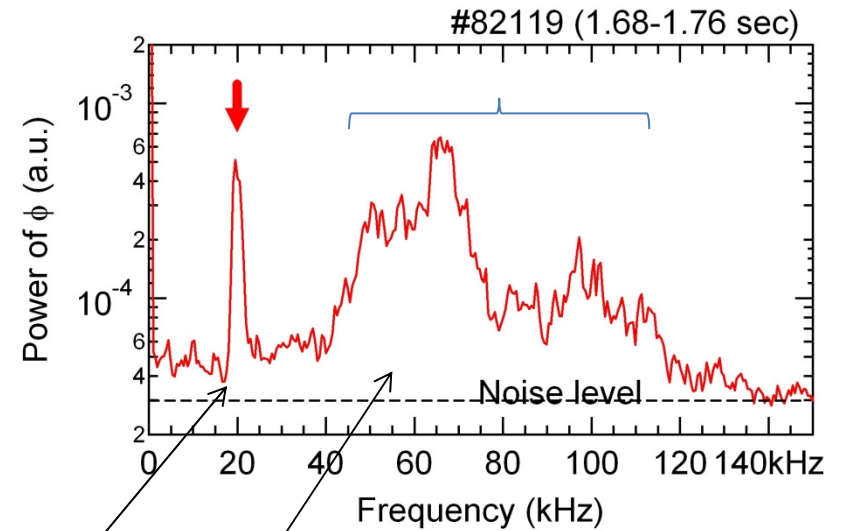
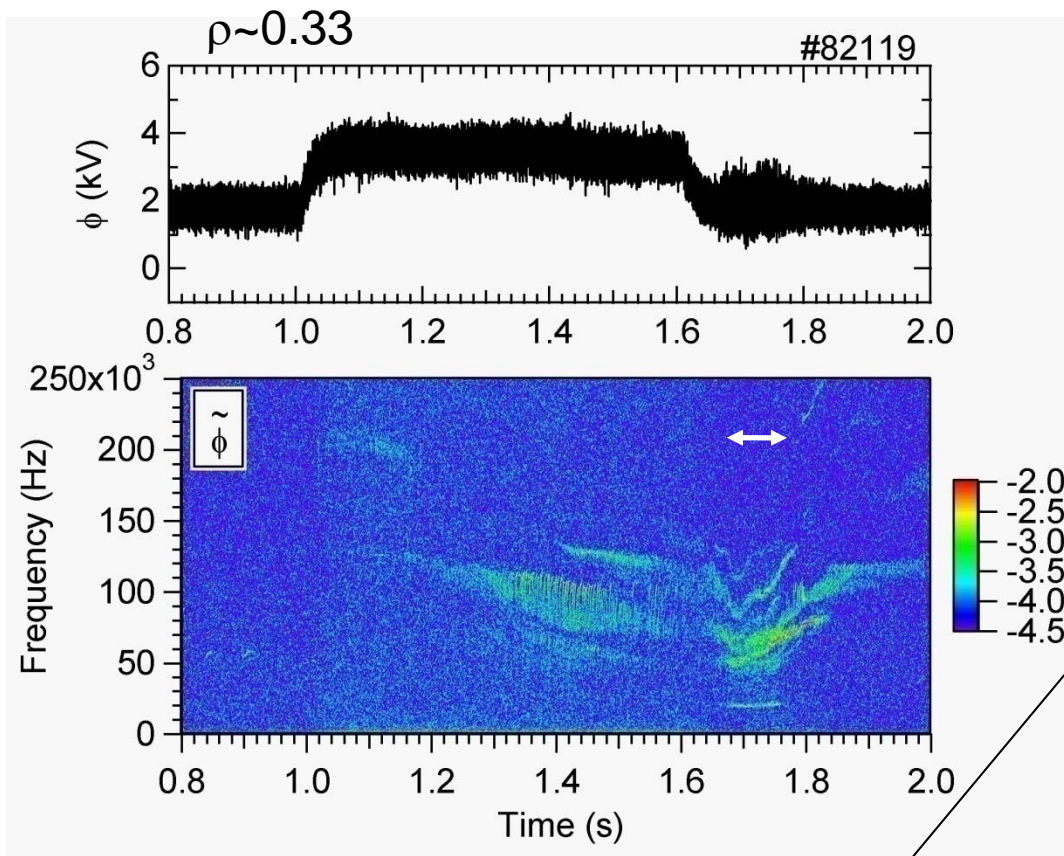


- HIBPによって測定された $E_r$ とCXSによる測定結果はエラーバーの範囲内で一致している。
- 新古典論に基づくDCOMコードによる予測値はHIBPによって測定された結果とよく一致している。
- NBI単独加熱時にイオンルートから電子ルートへの遷移がHIBP、DCOMコードともに見られている。(ただし、空間位置の同定が不十分であり、今後詳細な検討が必要。)



- 今後、プラズマ中心で計測可能なHIBPと周辺部で測定可能なCXSを相補的に利用することで電場生成機構に関する研究が進むと考えられる。

# 周波数スペクトル

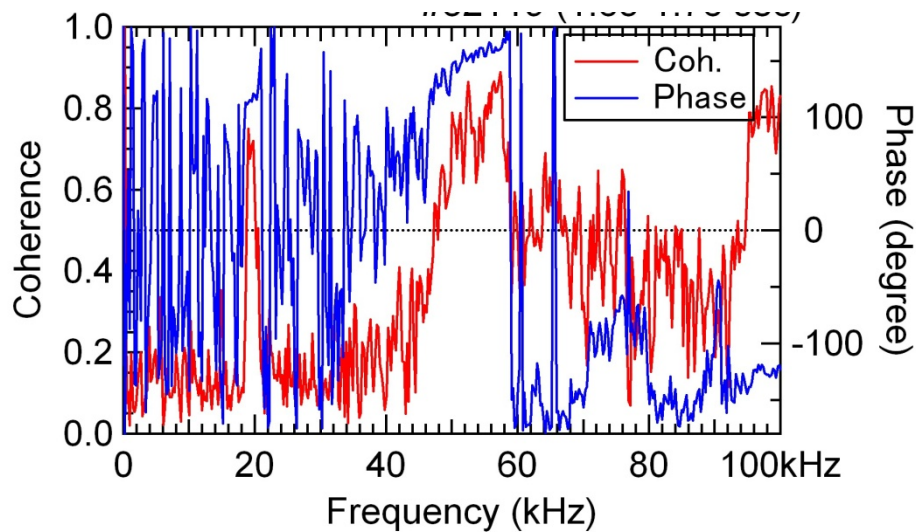
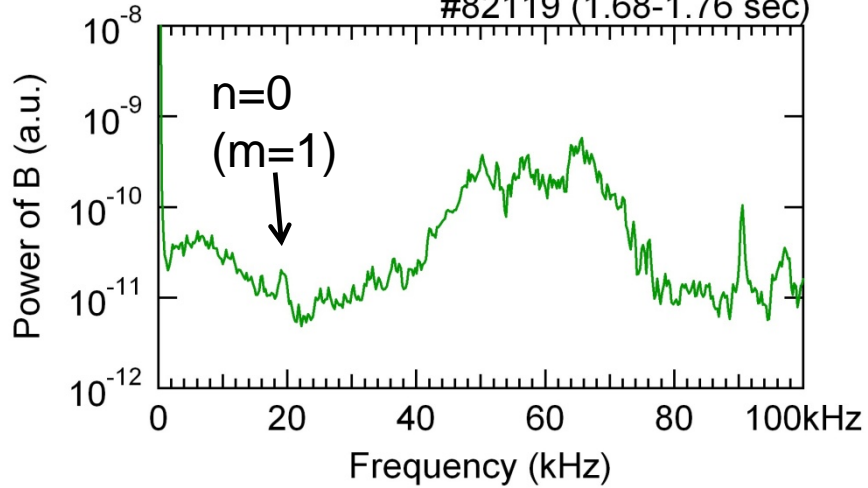


- GAM周波数(19kHz)を持つ揺動  
 $|\phi(f_{GAM})| \sim$  数100V
- 高速イオン励起と考えられる揺動 (> 40kHz)

# Magnetic field fluctuation

## Magnetic field fluctuation

#82119 (1.68-1.76 sec)

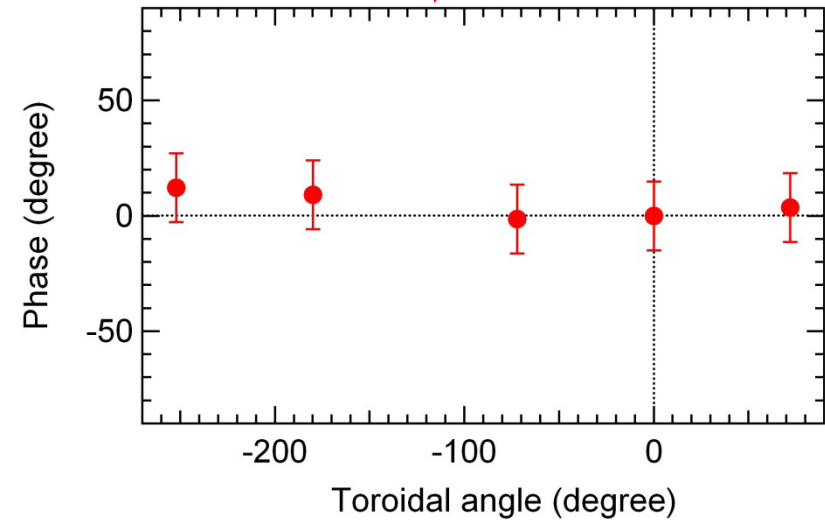


Coherence between  $\phi$  and magnetic fluctuation

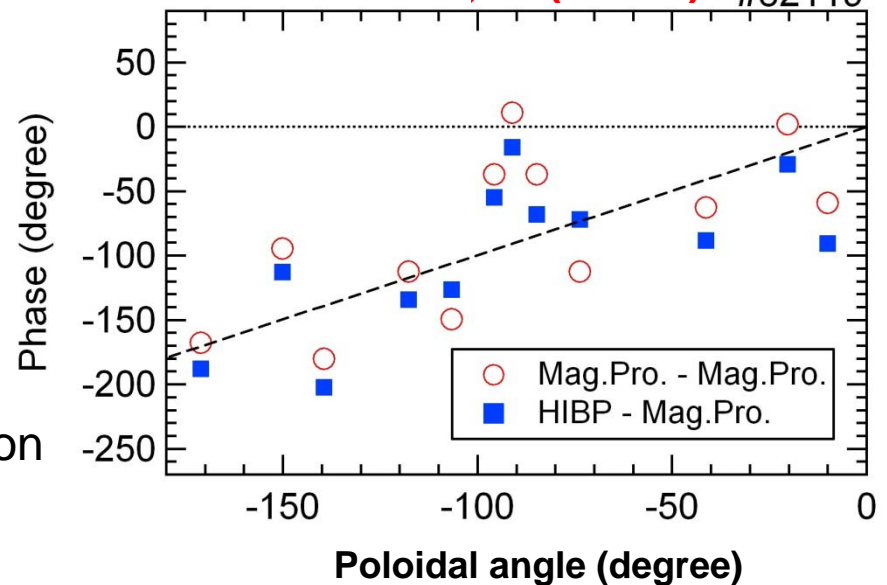
Red : coherence

Blue : phase

## Toroidal mode $\Rightarrow n=0$ #82119

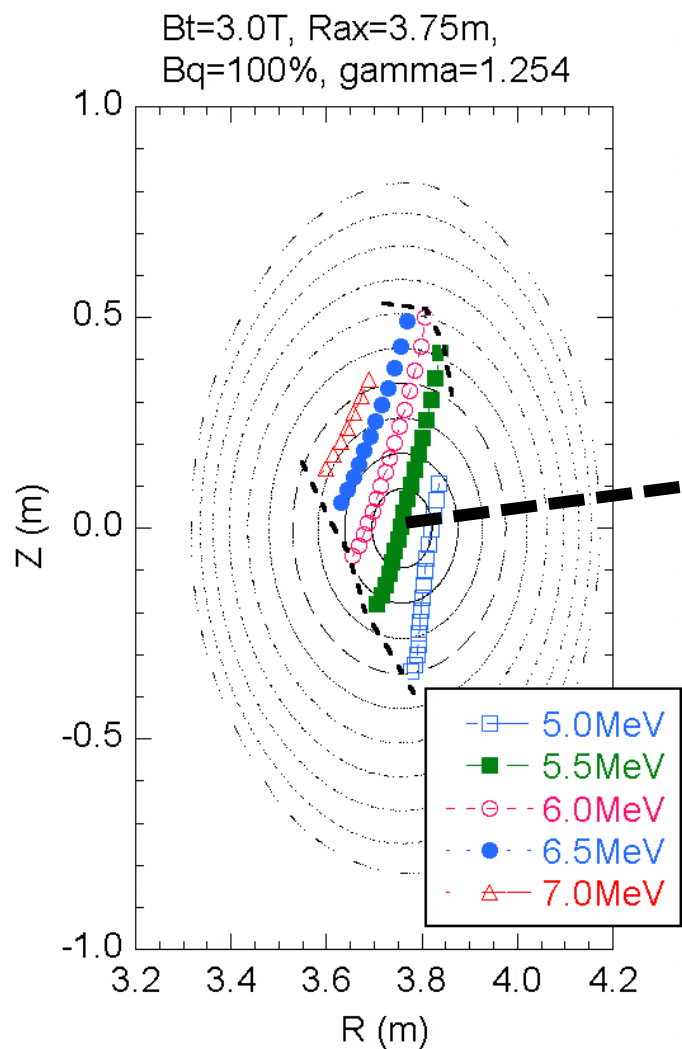


## Poloidal mode $\Rightarrow (m=1?)$ #82119

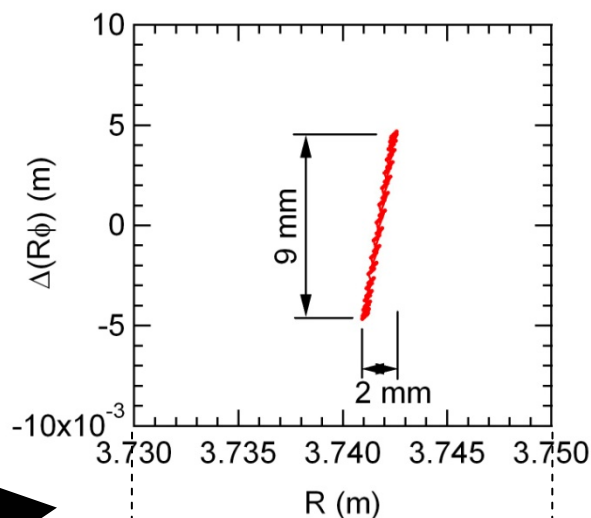


# Shape of sample volume ~ Spatial resolution~

## Observable region

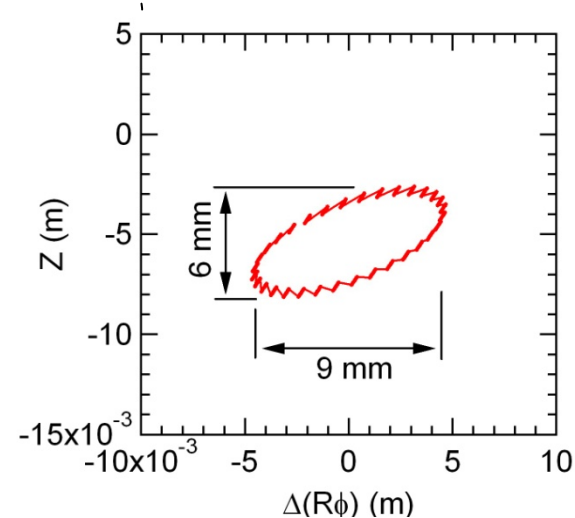
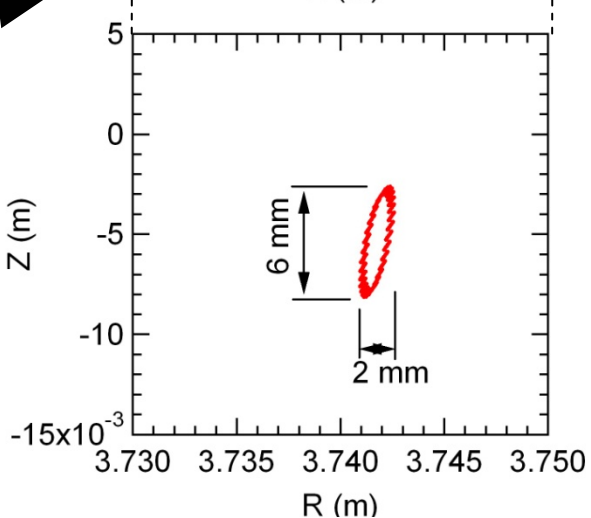


## Shape of a sample volume (orthographic drawing)



- $B_t=3.0T$ ,  $R_{ax}=3.75m$
- $E_b=5.5MeV$
- The diameter of the beam is 10mm.

- The energy spread of the probing beam is not taken into account. It can expand the sample volume by 10 mm or less.



- Spatial resolution in the minor radius direction is less than 1 cm.



# 測定可能領域

プラズマ中心近傍において測定できる。

