



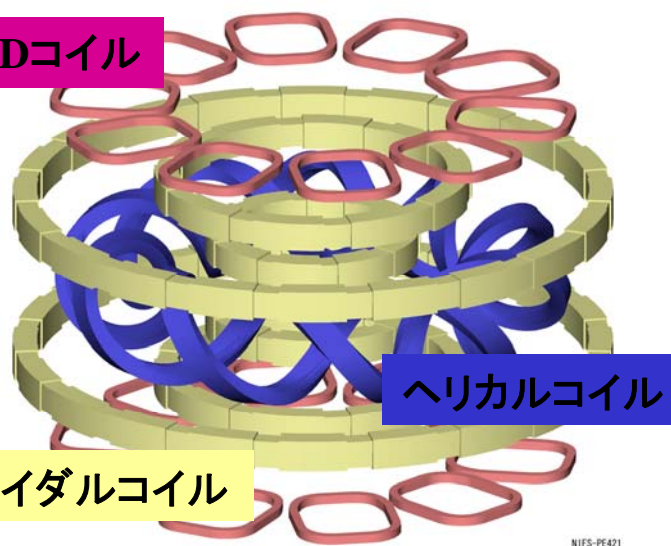
# LHDにおけるプラズマ制御を目指した ECH/ECCD実験の現状

伊神弘恵、野竹孝志、久保伸、下妻隆、吉村泰夫  
多喜田泰幸、小林策治、伊藤哲、水野嘉識

## 内容

- LHDとECRHシステムについて
- LHDにおいてECRH/ECCDを用いた圧力・電流分布制御が重要になると考えられる事象
- ECCD実験
- ECRHによる定常プラズマ実時間制御の試み
- 電子バーンシュタイン波による加熱実験

LIDコイル

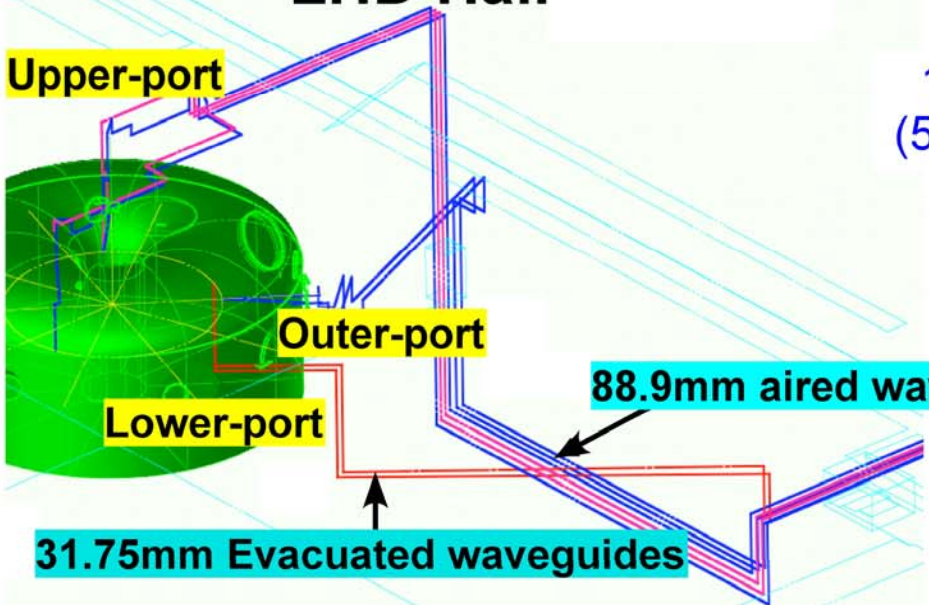


ヘリカルコイル

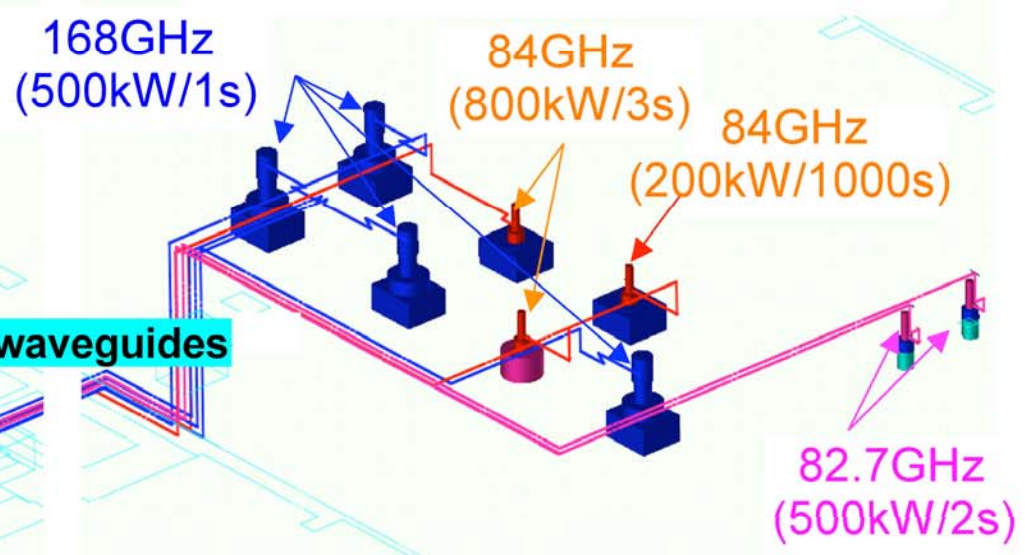
ポロイダルコイル

- 極数2、トロイダルモード数10のヘリオトロン型装置
- 主半径3.9m、平均小半径0.6m
- アスペクト比6~8
- プラズマ体積20~30m<sup>3</sup>
- NBI~15MW、ICRF~3MW
- **ECRH~2MW(168GHz×4, 84GHz帯×5)**
- 1対ヘリカル、3対ポロイダルコイル(磁気軸、楕円度制御)
- 10対LIDコイル(磁気島制御)

## LHD Hall



## Heating Equipment room





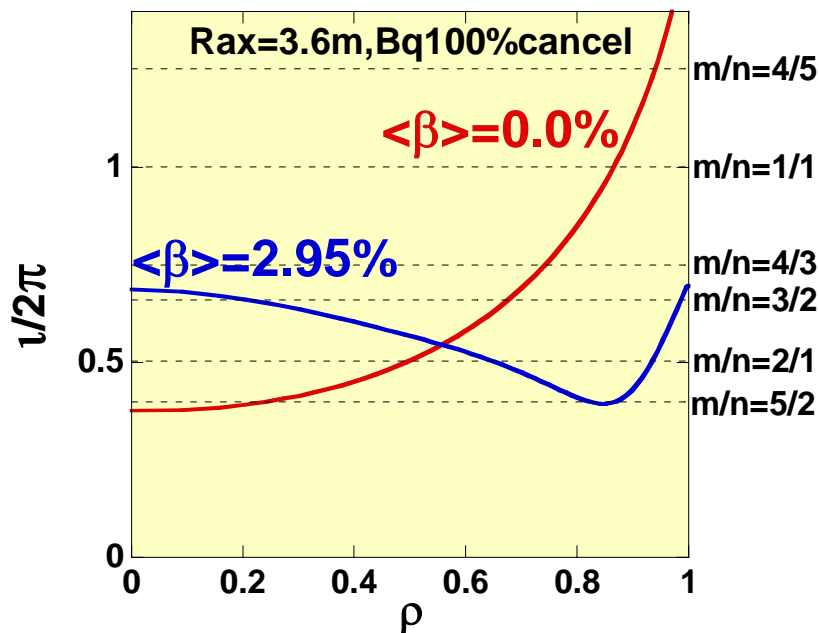
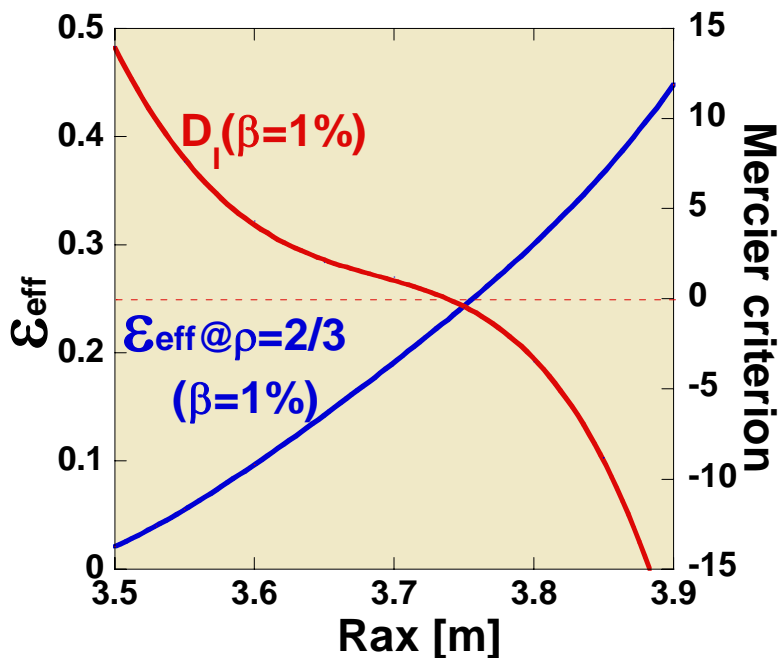
# LHDにおいて圧力・電流分布制御が重要になると考えられる事象

## 高閉じ込め配位におけるMHDモード安定化

- ・LHDは磁気軸内寄せで新古典輸送良好、外寄せでMHD特性良好となる。
- ・Te=10keVは磁気軸3.5m、最高 $\beta$ 、最高核融合積は磁気軸3.6m、最高WpIは磁気軸3.65mで達成
- 粒子軌道を損なわない範囲で圧力・電流分布を制御し、より良い閉じ込め状態の実現を狙う

## 高 $\beta$ 、ブートストラップ電流による磁気シア、回転変換分布変化の制御

- ・高 $\beta$ になるとBS電流を考慮しなくても、回転変換分布や磁気シアが大きく変化する。
- ・W7AS、X、TJ-II、Heliotron-J等の低磁気シア装置はBS電流の影響大。
- ・LHDでも高 $\beta$ 時には閉じ込めに影響を及ぼす程のBS電流が予想されている。
- 特にCo方向に流れる場合はシャフラノフシフトが抑制され、磁気井戸形成を妨げる。
- ECCDによるブートストラップ電流の打ち消し、磁場構造制御

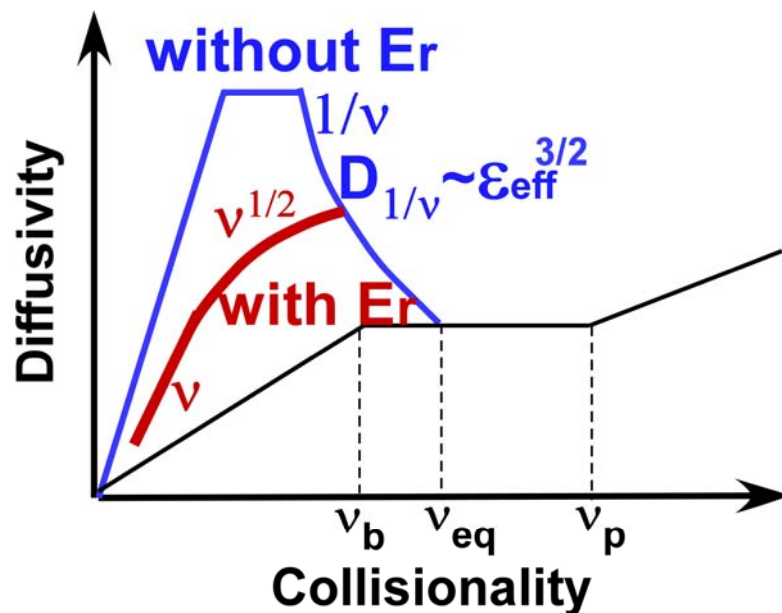
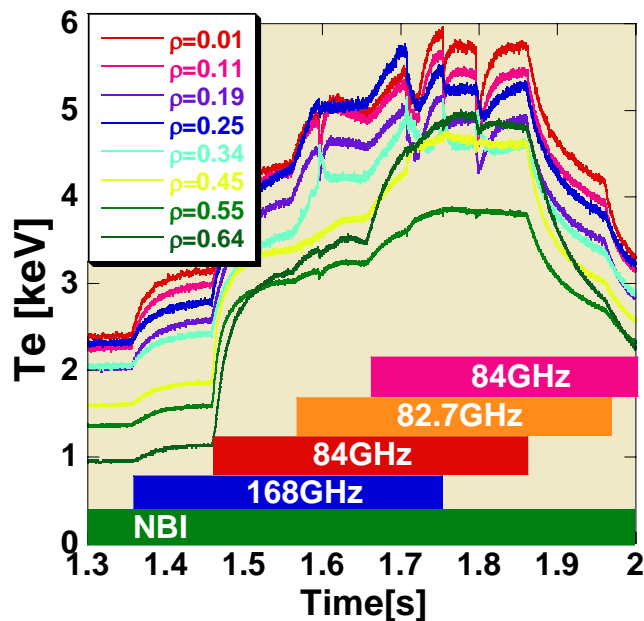


## ECRH大電力入射時にみられるMHD不安定性の抑制

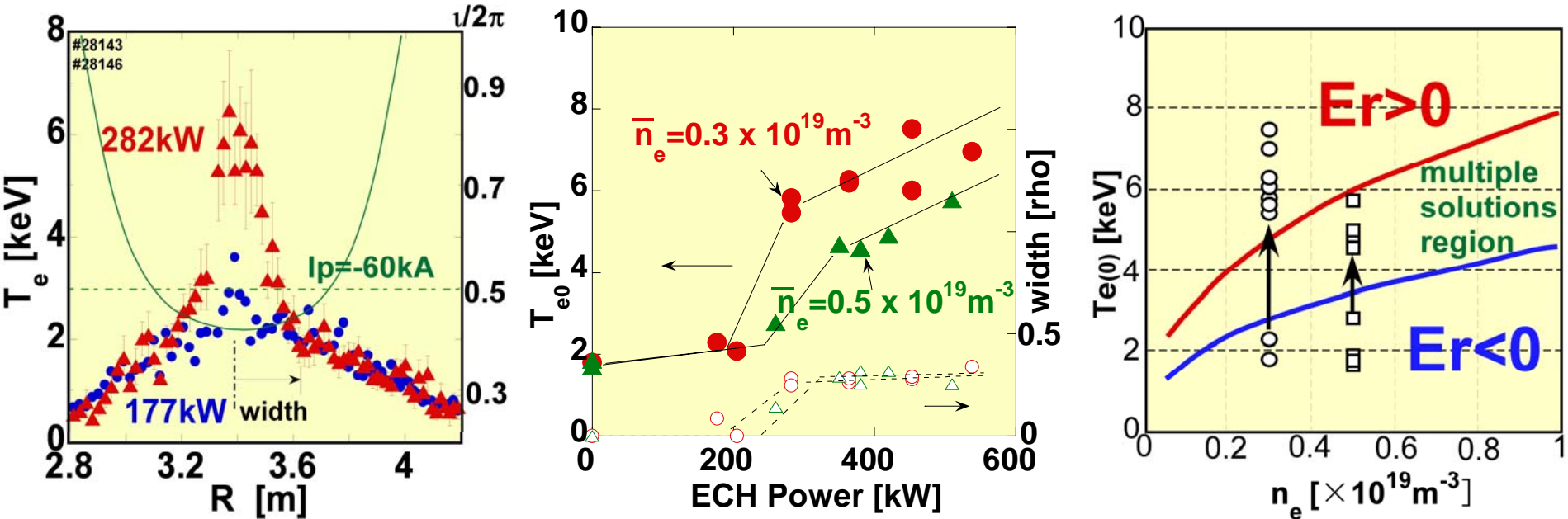
- ・ECRH大電力入射による急峻な圧力勾配形成により？、MHD的なクラッシュが発生し温度上昇を妨げる場合がある。
- Co-ECCDを用いた有理面排除によるMHD不安定性の回避
- CTR-ECCDを用いた磁気井戸形成、局所的磁気シアの増大による安定化
- off-axis ECRHを用いた圧力分布の局所的平坦化による安定化

## 電子系内部輸送障壁形成とその空間領域の拡大

- ECRHを用いたポテンシャル制御(電子ルート遷移)による低衝突領域での閉じ込め改善
- ECCDを用いた回転変換分布制御によるeITB空間領域の拡大？
- 磁気島制御によるeITB形成閾値電力の軽減？



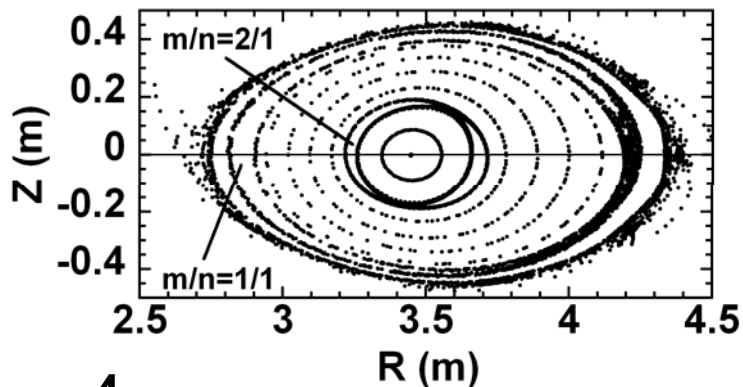
# ECRHによる電子系内部輸送障壁の形成



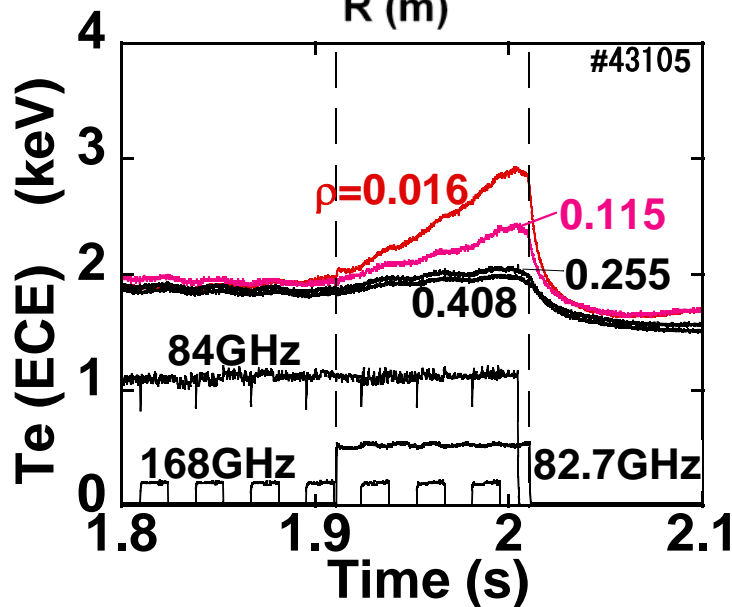
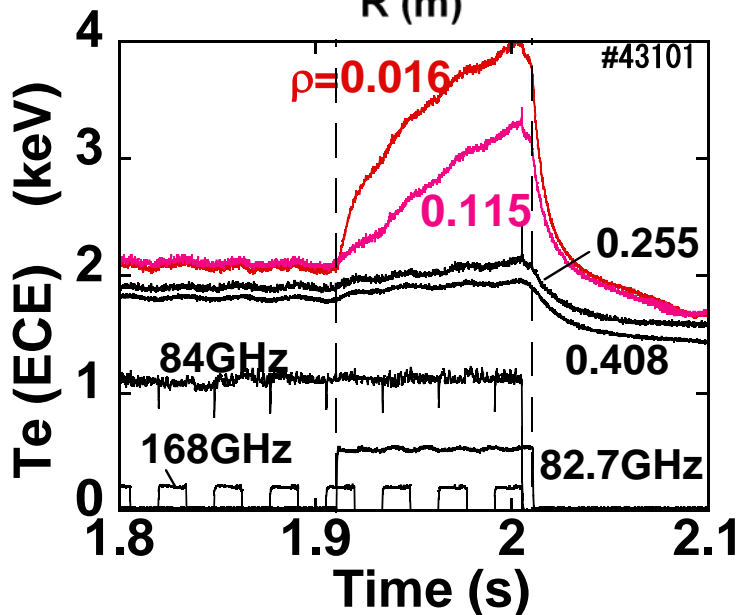
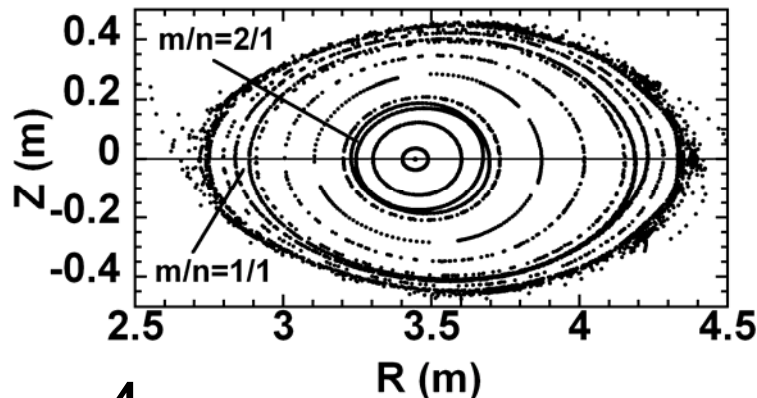
- CTR-NBIにより保持されたプラズマに中心集光したECRHを行うことで、急峻な温度勾配を伴う高電子温度プラズマへの遷移が観測される。(電子系内部輸送障壁eITBの形成)
- CO-NBIターゲットプラズマではeITBは形成されていない。
- $m/n=2/1$ の有理面、磁気島がeITBの形成に関与していると考えられる。
- eITBの形成にはECRHの閾値電力が存在し、電子密度とともに増大する。
- eITB遷移の中心電子温度に対する電子密度依存性は新古典理論からの予想と定性的に一致している。 $T_{e(0)B} \propto n_e^{0.4}$
- eITB遷移後、輸送障壁より内側では熱輸送係数が一桁近く減少している。

# eITB遷移へのm/n=2/1 磁気島効果

消去磁場無し(natural island)



消去磁場有り(shrunk island)

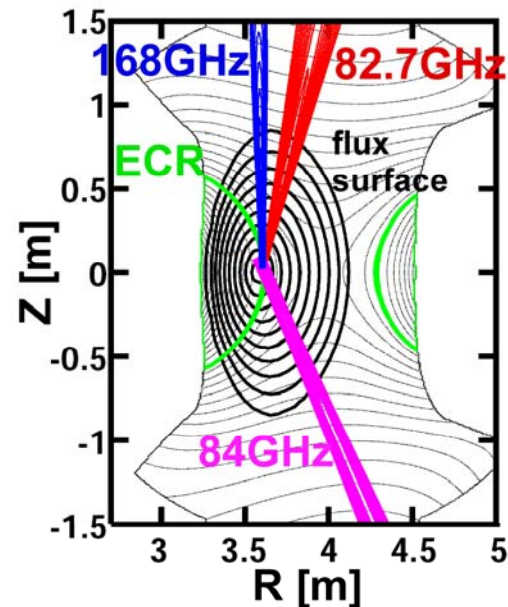


- ある程度の磁気島の存在によって高Te遷移が促進される。高Te遷移閾値電力軽減の可能性。
- 磁気島領域における径電場シアの形成が輸送障壁の形成に関与？
- 磁気島を更に拡大した場合、MHD的なクラッシュにより電子温度上昇は妨げられる。

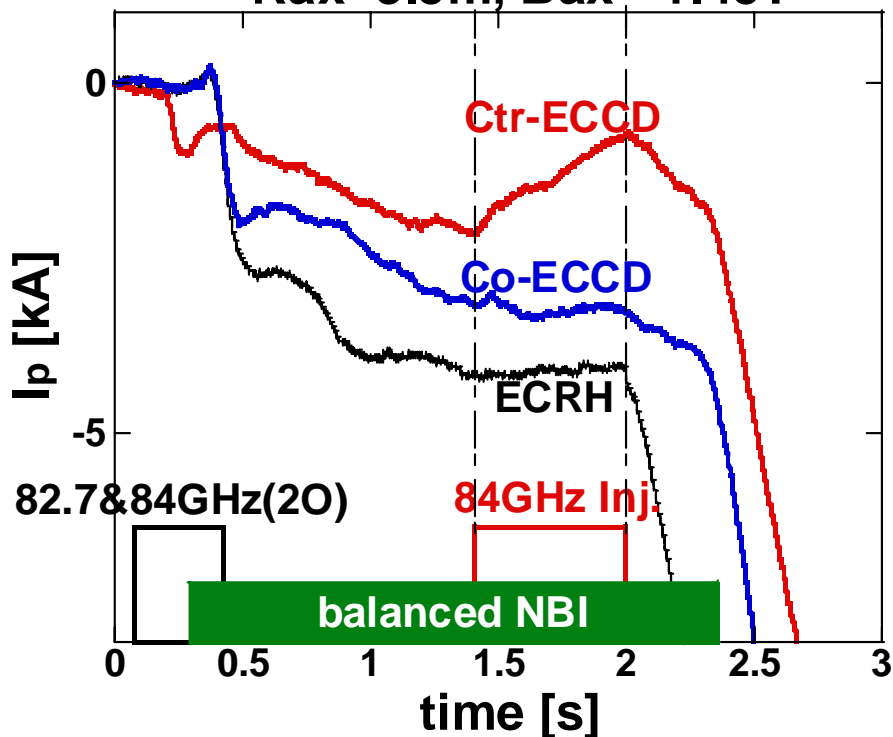
# 電子サイクロトロン電流駆動の試み

## ECCD (ECRH) の特徴

- アンテナをプラズマから離すことができる
- 大型装置でも中心部に電流が駆動できる
- 電流(電力)密度が大きい
- 高電子温度になる程、電流駆動効率が上昇
- 高密度では伝播できない e.g.  $170\text{GHz} \sim n_{ec} = 3.5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$   
→ 電子バーンシュタイン波加熱・電流駆動が有効



$R_{ax} = 3.5\text{m}$ ,  $B_{ax} = -1.45\text{T}$

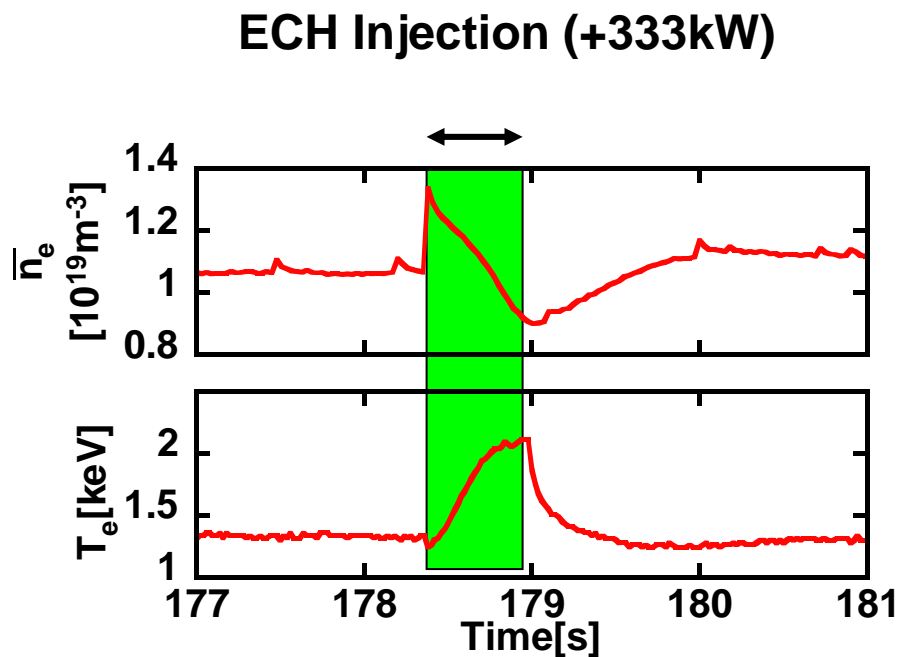
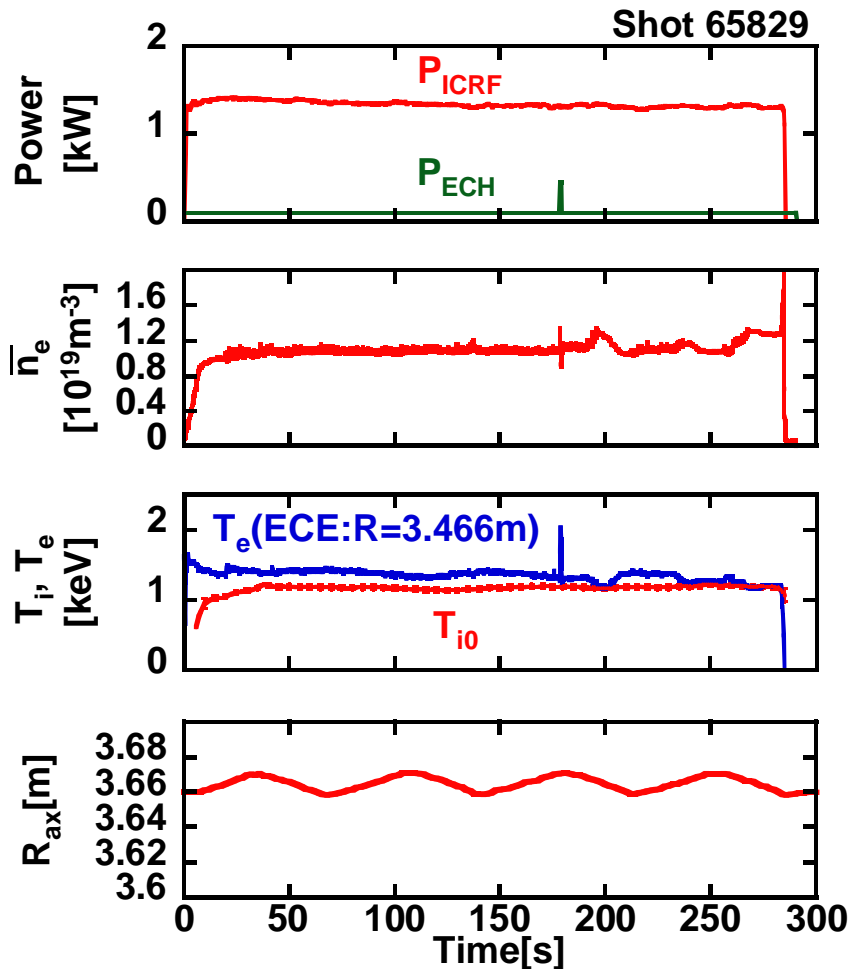


- Ctr-ECCDの場合に、有意な駆動電流を観測
- Co-ECCDの場合は有意な変化は見られない。  
→ 捕捉電子効果による電流駆動効率の低下?

## 今後の課題

- 入射角、偏波、磁場配位の最適化
- 電流駆動効率、駆動電流局在化に関して実験結果と比較するための運動論的モデリング。特に3次元磁場配位における捕捉電子効果や高エネルギー電子の振る舞い(衝突緩和、リップル輸送等)を考慮した計算コードが必要。
- MSE計測による電流分布制御の実証

電子密度の突然の増加をトリガーとしてECRHを行い、放射崩壊を防ぐ。



ECRH入射による密度上昇の抑制





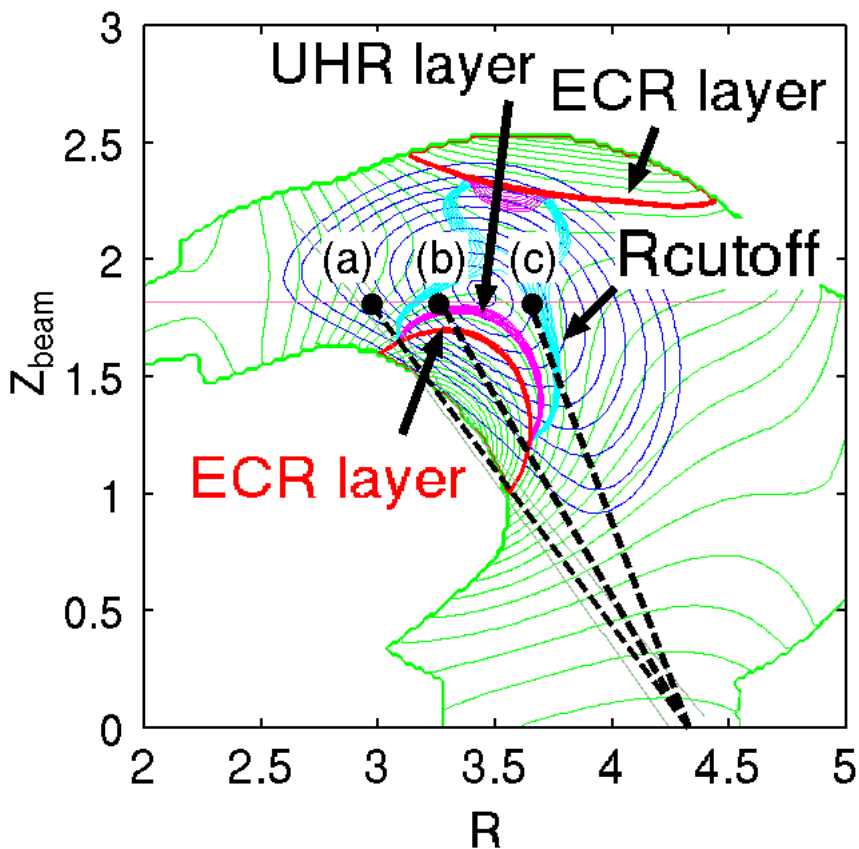
# 電子バーンシュタイン波(EBW)-ECH実験(2004年度~)

## 目的

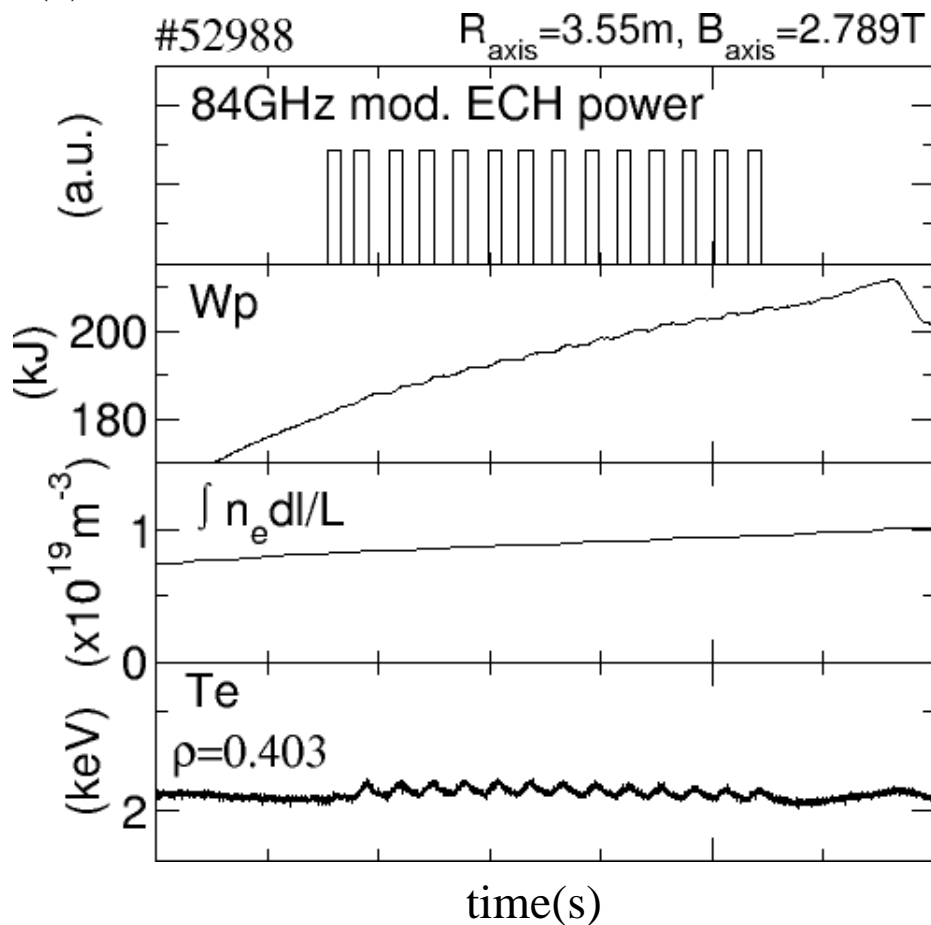
- 遮断密度を越える高密度プラズマのECH/ECCD
- 周辺(低温度)領域のECH/ECCD

→ 強磁場側からのXmode入射によるEBW-ECHの試み(2004年度~)

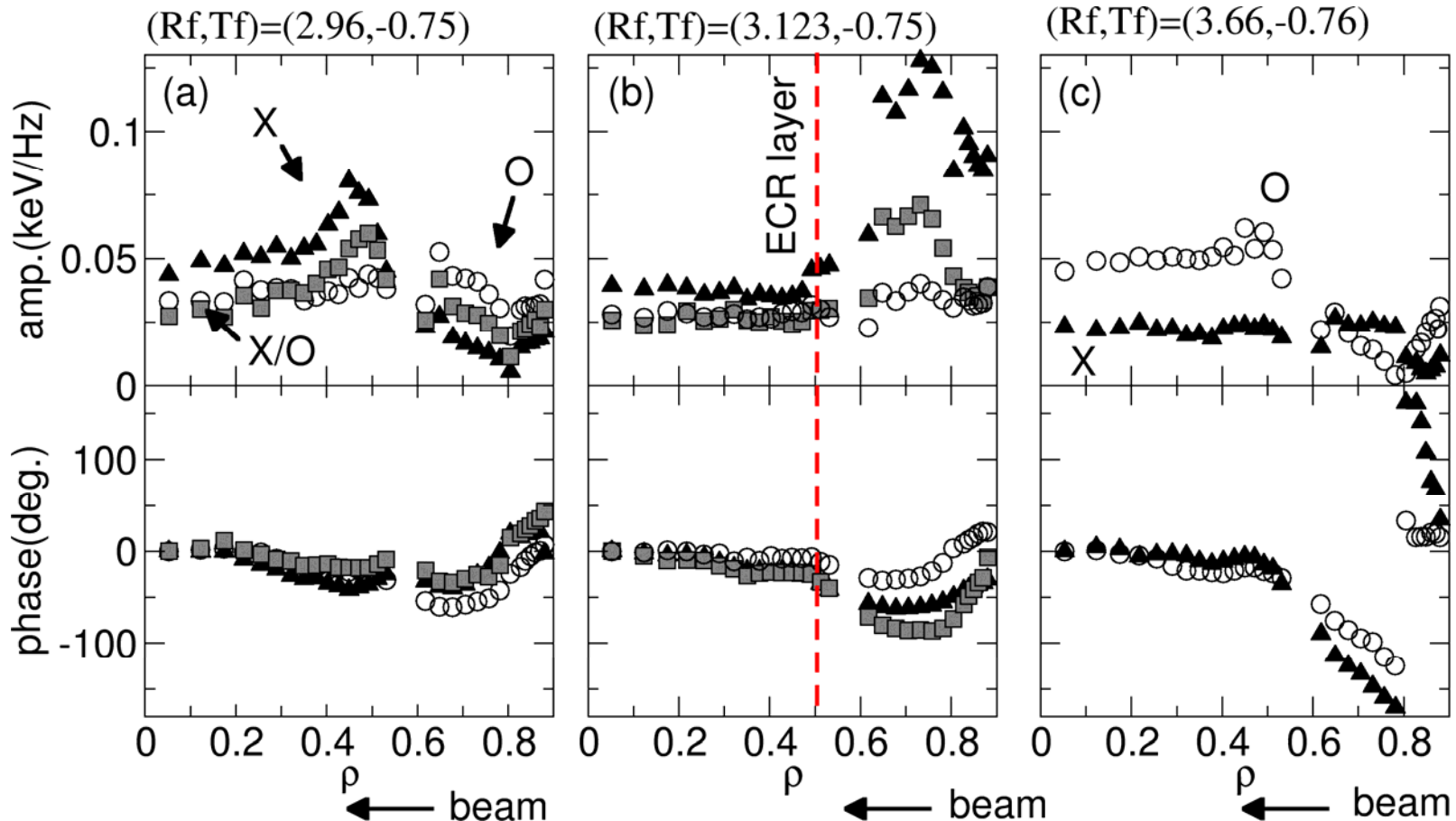
入射角度の径方向スキャン



(a)の角度でX-mode入射した場合の放電波形

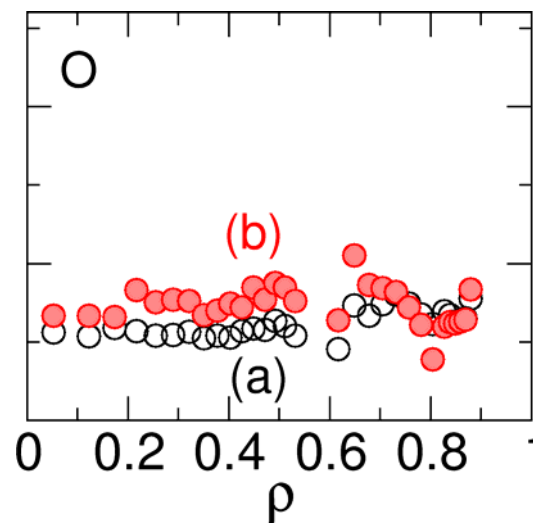
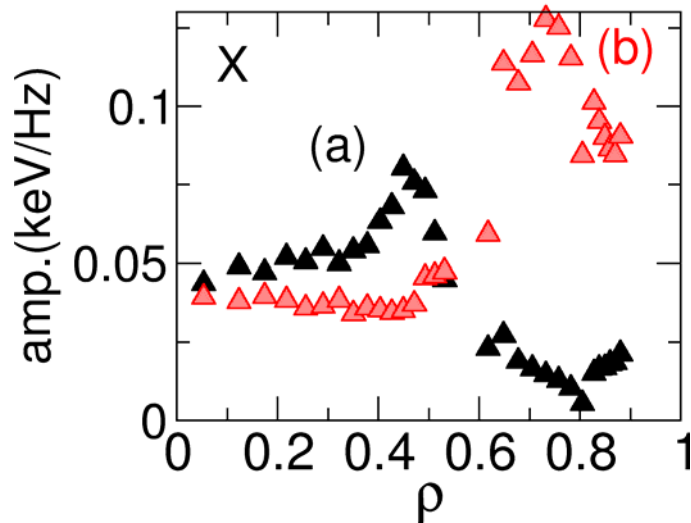
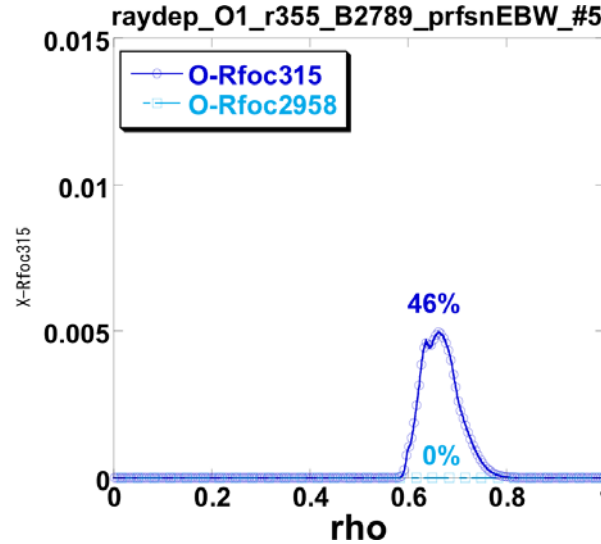
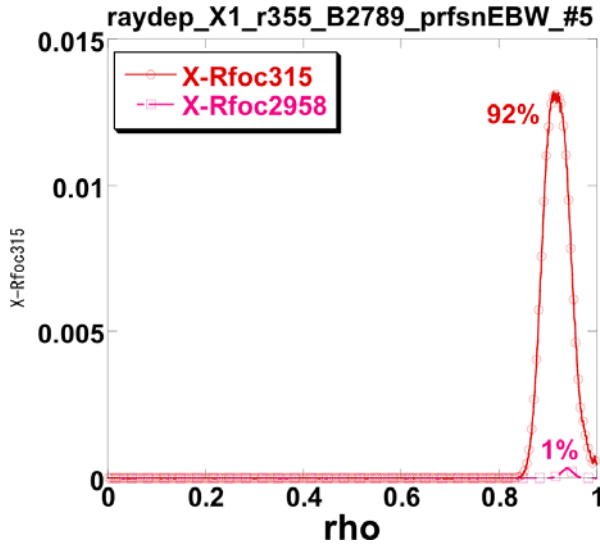


- a) X-modeがUHR層でEBWにモード変換された後共鳴吸収された？
- b) X-mode O-modeともに強磁場側にドップラーシフトしたECR層で電磁波モードとして共鳴吸収された。
- c) 右手サイクロトロン遮断があるのでX-modeは反射された。



# 光線追跡計算結果との比較

- 強磁場側からECR層にビームが近接する場合、電磁波モードのX-modeとして共鳴吸収される場合はO-modeより強磁場側で吸収される。



(a) Rf=2.96m

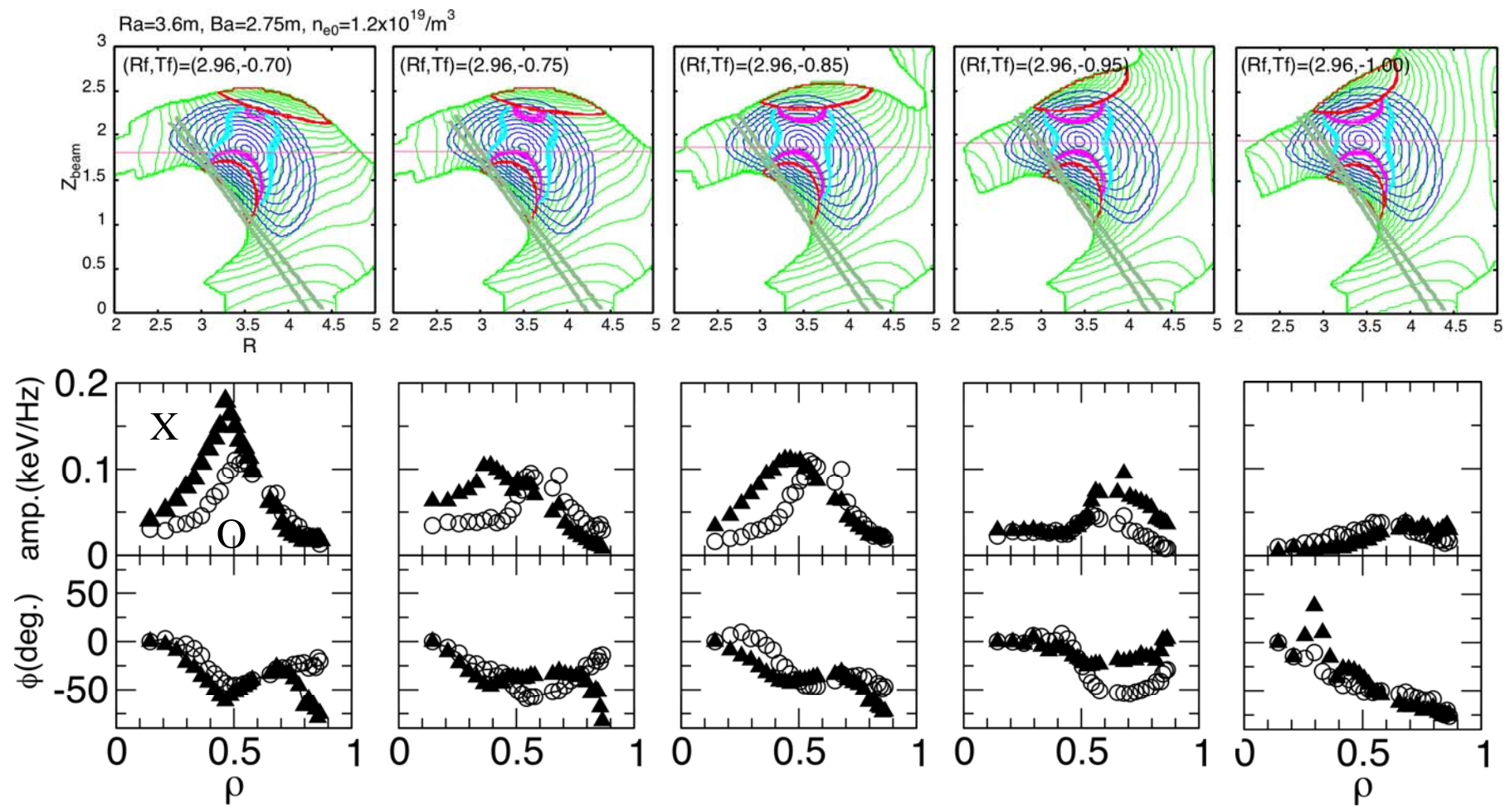
(b) Rf=3.12m

## LHDでのプラズマ制御を目指したECH/ECCD実験

- eITB  
 Cntr. NBIIにECHを中心集光して重畳するとe-ITBが形成される。 $m/n=2/1$ の有理面、磁気島がeITBの形成に関与していると考えられる。
- ECCD  
 Ctr-ECCDの場合に、有意な駆動電流を観測  
 Co-ECCDの場合は有意な変化は見られない。→捕捉電子効果による電流駆動効率の低下？
- 定常実時間制御  
 電子密度の突然の増加をトリガーとしてECRHを行い、放射崩壊を防ぐ。  
 放射崩壊寸前のプラズマへのECHカンフル入射が放電継続に有効
- EBWH  
 XB法によるEBWHが2004年度から試みられている。電磁波モードとしての吸収とEBWとしての吸収の切り分けが課題。  
 OXB法によるEBWHは2005年度から試みられている。

# トロイダル方向の入射角度スキャン

- ビーム焦点位置をトロイダル方向にスキャンしパワー吸収領域に違いが出るかを調べた。
- ビームが壁に当たるとマルチリフレクションの吸収パターンが見られる。
- シングルパス吸収の場合のX-mode吸収領域には大きな違いは見られない。



# 密度スキャン実験

- 密度を変えることでUHR層の位置を変えた。モード変換後のEBWの軌道が変わって吸収領域に違いが出るかを調べた。
- X波入射の場合のパワー吸収領域は殆ど動かないように見える。
- 密度が大きくなると、ECEの変調波形の振幅が小さくなるため、パワー吸収プロファイルをFFT解析から見るのが困難になる。

