

# 磁気計測によるヘリカル装置の MHD 平衡量同定の高度化

総合研究大学院大学 物理科学研究科 核融合科学専攻  
D3 山口太樹

# 同定するMHD平衡量の「高度化」と「高精度化」

磁気計測によるMHD平衡量

同定研究 (従来)

課題

無電流 → 有限のトロイダル電流分布が磁気計測器に及ぼす影響を考慮した手法により精度向上はできないか？

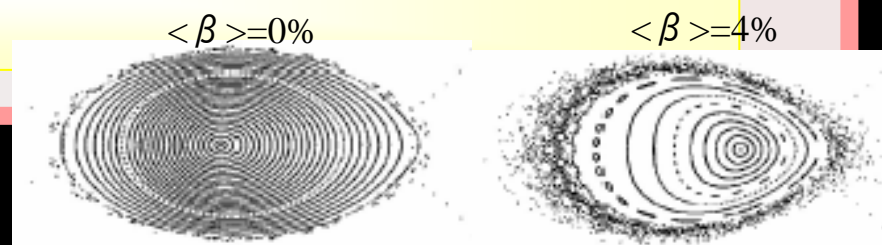
① トロイダル電流駆動実験におけるMHD平衡量の同定精度向上

等方圧力 → 圧力非等方度の同定は出来ないか？

② 圧力非等方度の同定 (高度化)

きれいに閉じた磁気面 → ヘリカル装置では高ベータで磁気面が乱れる。これを考慮した手法により精度向上は出来ないか？

③ 乱れた磁気面を考慮したMHD平衡コードを用いた平衡量同定精度向上



# 圧力非等方度の同定

## 【背景】

平衡, 安定性, 輸送の実験解析では一般に等方圧力( $p_{\parallel}=p_{\perp}$ )を仮定

→ NBI等の追加熱による圧力の非等方性が示唆されている

→ 圧力非等方度の定量化により非等方圧力が平衡, 安定性, 輸送に及ぼす影響という観点から研究が進展する可能性がある

## 【従来の $\langle \beta \rangle$ , $W_p$ の同定手法】

・平衡コード + 磁気計測器信号解析コードを用いた同定手法

→ 等方圧力を仮定

・円断面, 大アスペクト比近似を用いた圧力非等方度の同定に関する報告

E.D. Andryukihina et. al, in EPS (1985)

S. Morimoto et. al, Nucl. Fusion (1988)

→ プラズマ, 磁束ループの幾何学形状に仮定

→ 有限 $\beta$ 効果による平衡の変化なしと仮定

→ 圧力分布を仮定

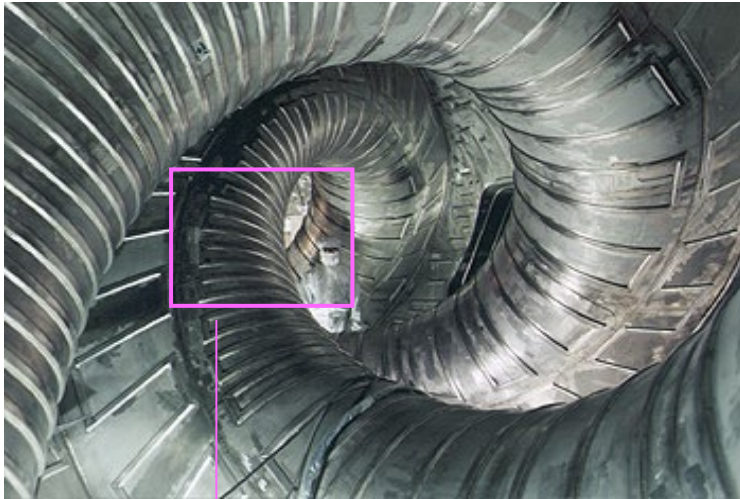
## 【本研究】



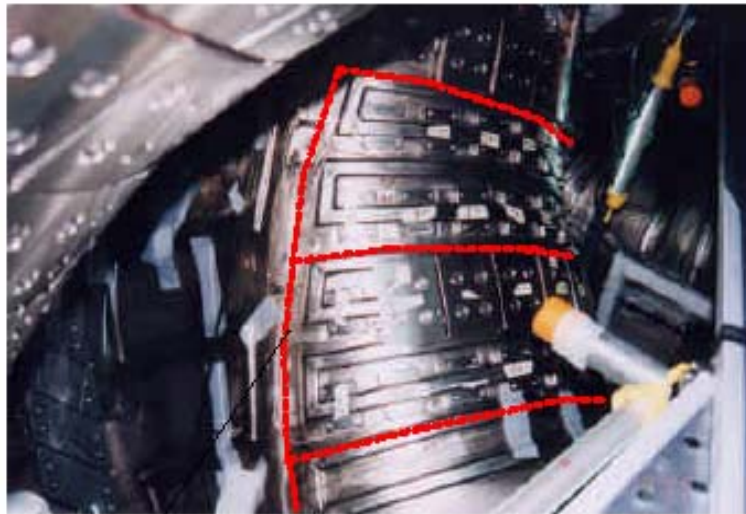
平衡コード + 磁気計測器信号解析コードを用いた  
精度が良く, 信頼性の高い圧力非等方度の定量化



# LHDのサドルループ

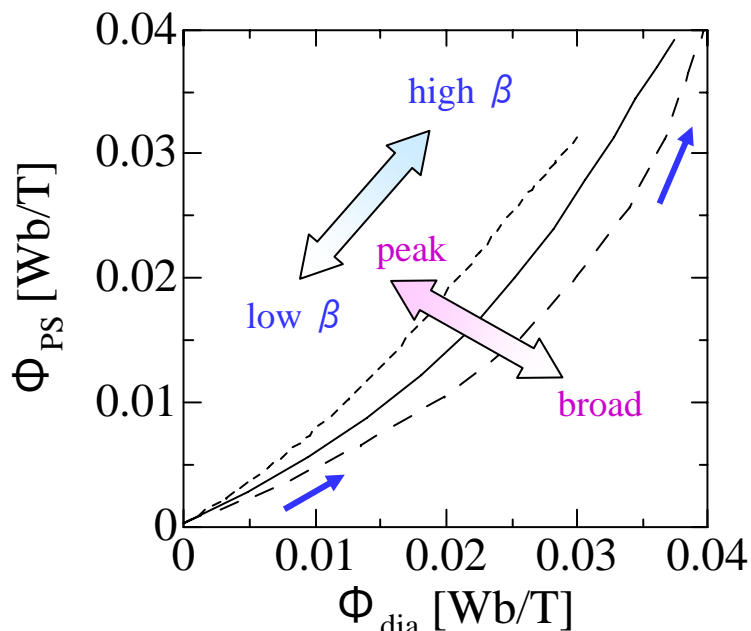


LHD内部



# 磁気計測器信号からの“圧力非等方度指標”の抽出

$\Phi_{PS}/\Phi_{dia}$  から圧力非等方度を精度良く評価するためには、 $\Phi_{PS}/\Phi_{dia}$  に含まれる“圧力非等方度に関係ない情報”を差し引く必要がある



等方圧力を仮定した平衡計算の結果

圧力非等方度が変わらない(等方)の場合でも

- ・正味の熱化圧力によって  $\Phi_{PS}/\Phi_{dia}$  が変化
- ・圧力分布によって  $\Phi_{PS}/\Phi_{dia}$  が変化



圧力非等方度以外の要因(正味熱化圧力, 圧力分布)によって変化しない“圧力非等方度指標”を抽出する必要がある

## <圧力非等方度指標の抽出方法>

- $\Phi_{PSexp}$ : サドルループの実験データ
- $\Phi_{PSiso}$ : 等方圧力を仮定した平衡計算によるサドルループの計算値
  - 正味圧力は計測された  $\Phi_{dia}$  と一致するように入力
  - $T_e, n_e$  計測による圧力分布を入力



$\Phi_{PSexp}/\Phi_{PSiso}$ : 圧力非等方度指標

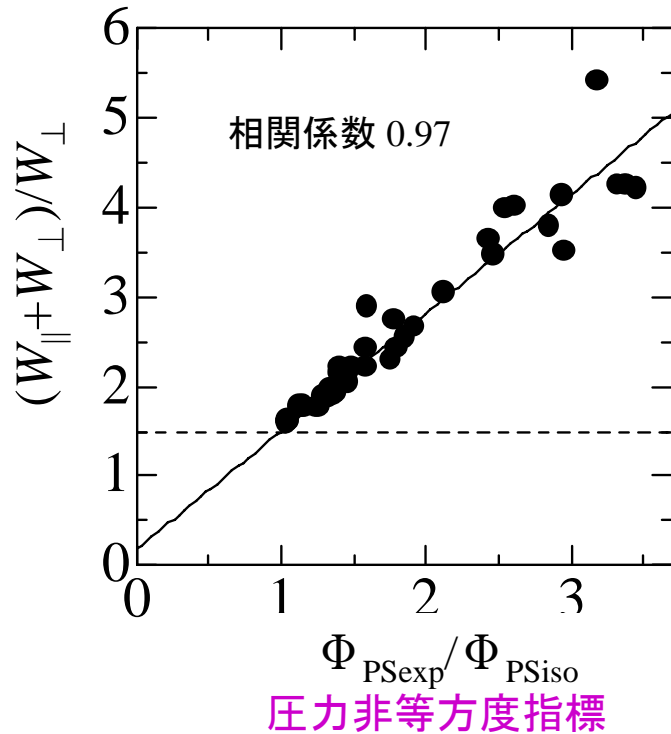
- ・  $\Phi_{PS}/\Phi_{dia}$  の情報を含んでいる  
分子  $\sim p_{||}+p_{\perp}$ , 分母  $\sim p_{\perp}$
- ・ 正味の熱化圧力によって変化しない
- ・ 圧力分布によって変化しない







# 磁気計測による圧力非等方度の定量評価



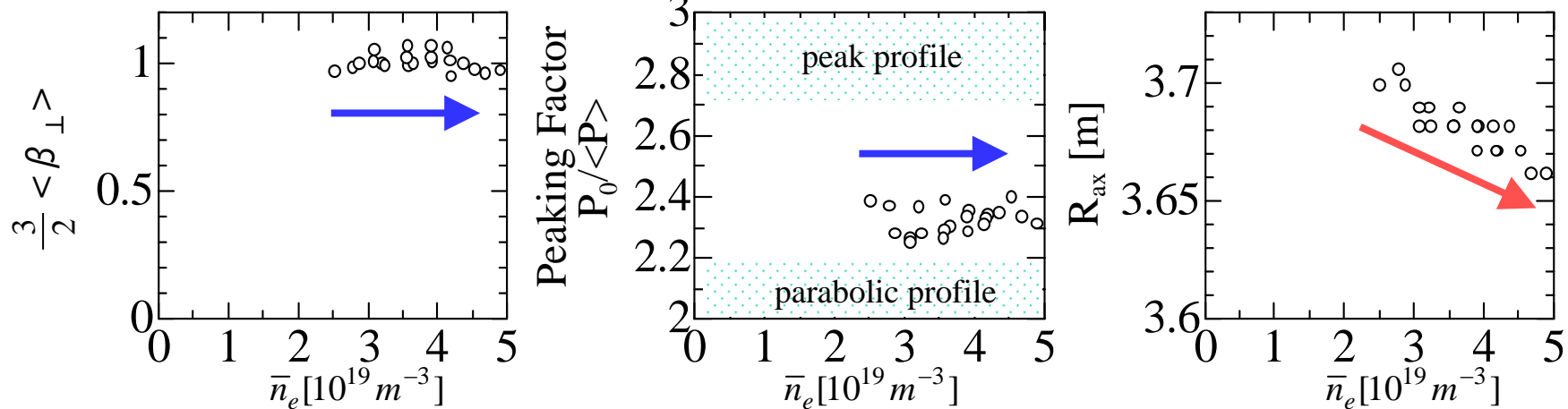
“圧力非等方度指標”をビームエネルギー計算の結果を用いて $(W_{\parallel} + W_{\perp}) / W_{\perp}$ に較正するための関係式の導出

$$\Rightarrow (W_{\parallel} + W_{\perp}) / W_{\perp} = 0.2 + 1.3(\Phi_{PSexp} / \Phi_{PSiso})$$

Rax=3.6m,  $\gamma=1.254$ , Bt=0.5, 0.75 and 1.5T,  $\langle \beta_{dia} \rangle = 1 \sim 2\%$ .

磁気計測データから抽出した“圧力非等方度指標”より  
圧力非等方度の定量評価を実現

# LHDの平衡の変化に対する圧力非等方度同定手法の適用

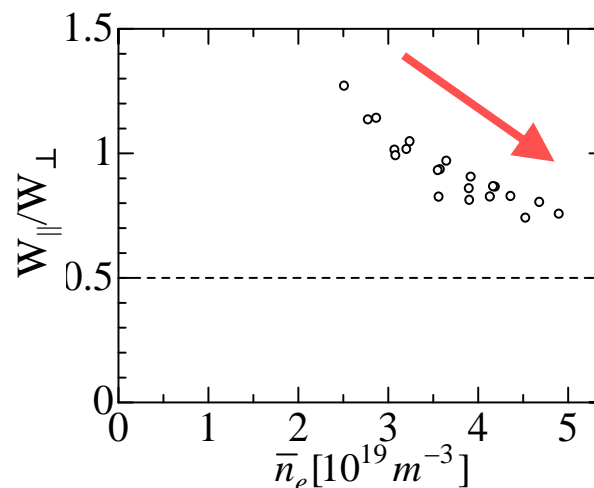


真空配位:LHD標準配位, 較正式の導出に用いたデータ群とは異なるデータ群

等方圧力を仮定した場合、磁気軸シフト量減少に結びつく圧力の変化は見られない

圧力非等方度を考慮して考察

磁気計測器による圧力非等方度の定量評価



# シャフラノフシフトの圧力非等方度依存性

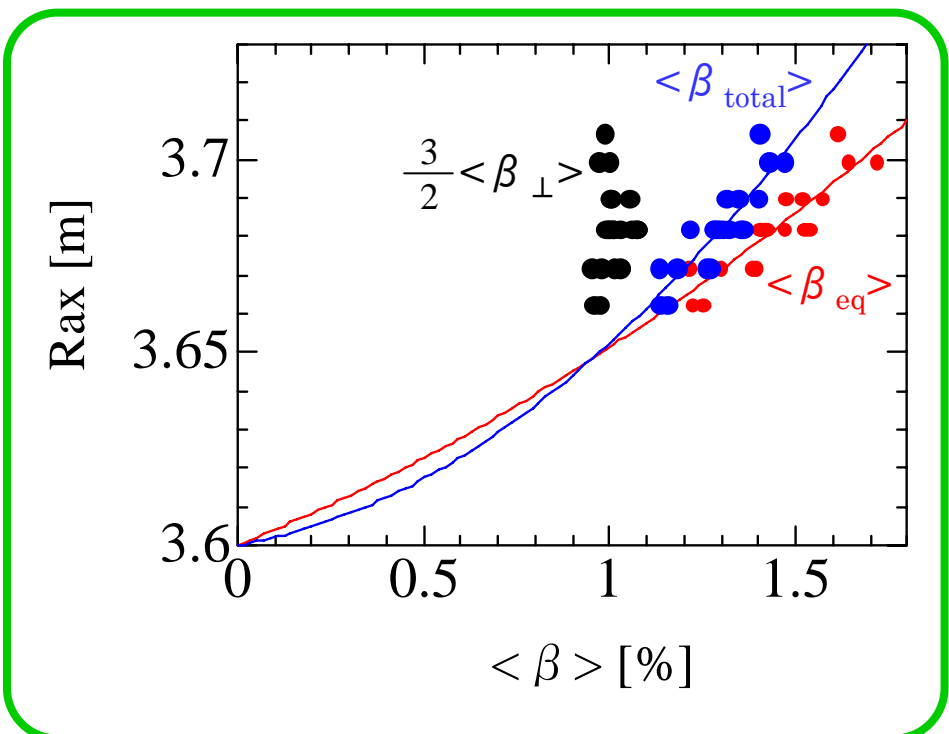
非等方圧力条件下でのシャフラノフシフトの正味圧力依存性について実験の観点から検討

$$\langle \beta_{eq} \rangle = \frac{\langle \beta_{\parallel} \rangle + \langle \beta_{\perp} \rangle}{2} = \frac{3}{2} \langle \beta_{\perp} \rangle \left( -0.5 + \frac{W_{\parallel} + W_{\perp}}{W_{\perp}} \right)$$

磁気計測器により評価した  
圧力非等方度

理論予測: シャフラノフシフトは  $\langle \beta_{eq} \rangle$  に依存, W.N.G Hitchon, Nucl. Fusion (1983)

$$\langle \beta_{total} \rangle = \frac{\langle \beta_{\parallel} \rangle + 2 \langle \beta_{\perp} \rangle}{3} = \langle \beta_{\perp} \rangle \left( \frac{W_{\parallel} + W_{\perp}}{W_{\perp}} \right)$$



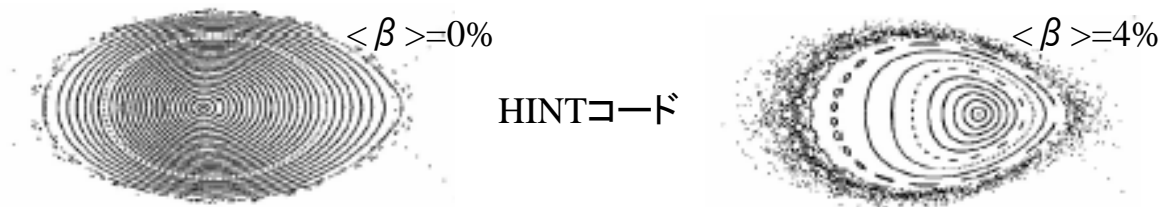
磁気軸シフト量との相関係数  
 3/2<math>\langle \beta\_{\perp} \rangle</math>: 0.14  
 <math>\langle \beta\_{eq} \rangle</math>: 0.89  
 <math>\langle \beta\_{total} \rangle</math>: 0.88

<math>\langle \beta\_{eq} \rangle</math>, <math>\langle \beta\_{total} \rangle</math>との相関はほぼ同じ  
 今後 → 非等方圧力を考慮した平衡コード  
 → 更に多くの実験データによる解析

- “圧力非等方度指標”と $(W_{\parallel}+W_{\perp})/W_{\perp}$ の関係式を求め、磁気計測器による圧力非等方度の定量評価に必要な較正式の導出を行った
  - ⇒ 精度が高く、信頼性のある圧力非等方度の計測手法の確立
- 磁気計測により同定した圧力非等方度を基に、実験で観測された磁気軸シフトと $(3/2)\langle\beta_{\perp}\rangle$ ,  $\langle\beta_{\text{eq}}\rangle$ ,  $\langle\beta_{\text{total}}\rangle$ の関係が得られた

# ヘリカル装置におけるMHD平衡同定の難しさ

- ・**プラズマ形状が複雑**（非軸対称, トロイダル角毎に断面が大きく変形）  
ex. 2次元, 3次元計測の必要性(多数の計測位置, 検出器設置場所)
- ・**プラズマ境界の同定が困難**
  - プラズマ周辺部で**磁気面の乱れ**や**磁気島形成**が予測(入れ子状の磁気面の喪失)
  - ex. 境界形状のあいまいさは**プラズマ内部の平衡配位に大きく影響**( $R_{ax}$ 位置等)
  - ex. プラズマ電流経路のモデル化等の簡便な手法で境界形状を評価出来ない

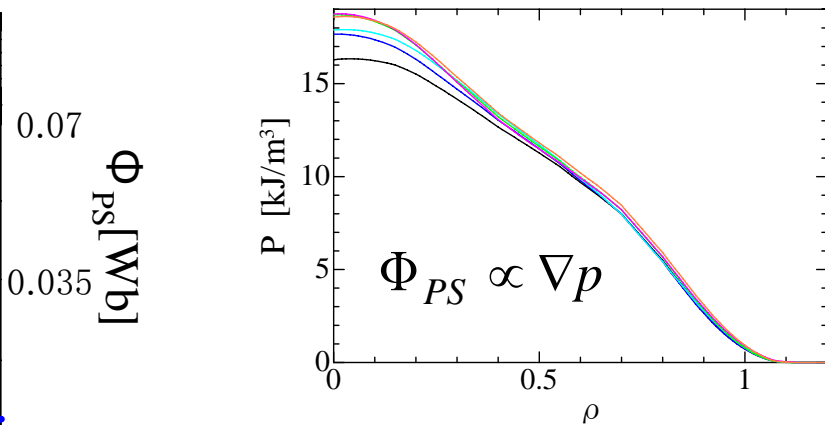
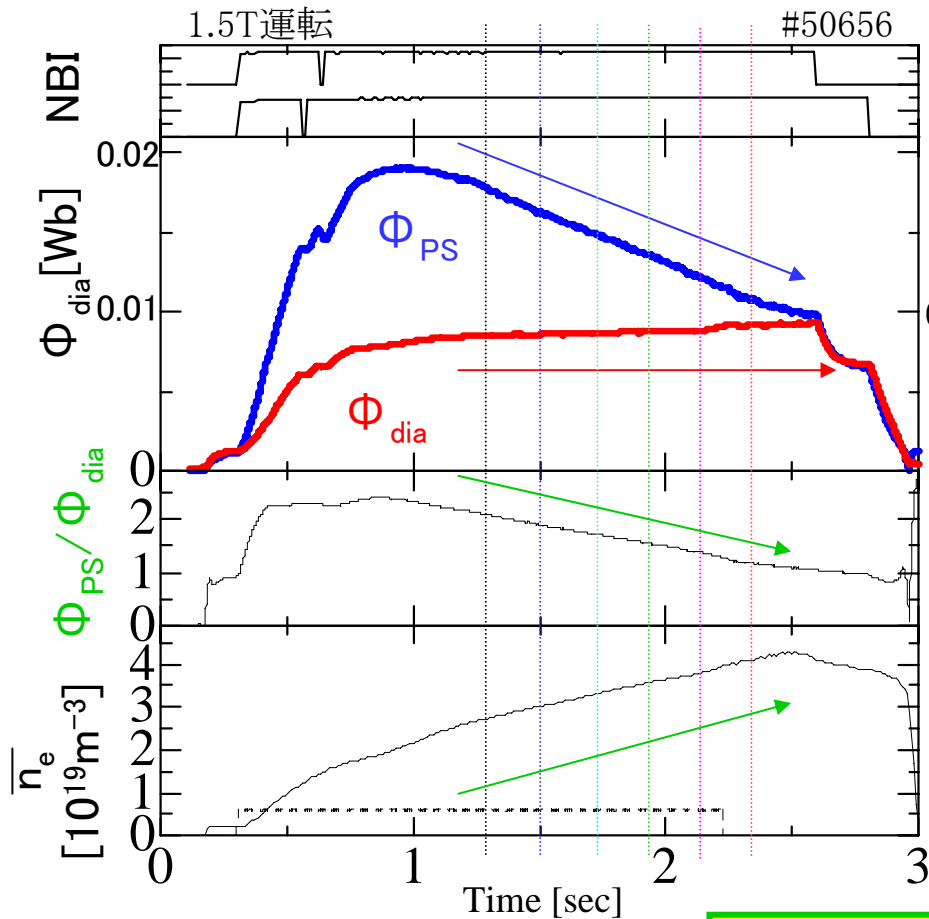


- ・**MHD平衡決定に与える圧力の影響大**(正味トロイダル電流と同程度かそれ以上)
  - 精度良く全圧力(MHD平衡圧力)を評価する必要がある
  - ex. **反磁性ループ**による $\langle \beta \rangle$ ,  $W_p$ の計測精度が、正味トロイダル電流の存在時に劣化
  - ex. 高エネルギー粒子による**非熱化圧力, 非等方圧力がMHD平衡配位へ大きく影響**
- ・**正味トロイダル電流の影響**
  - 有意な正味トロイダル電流が観測されている
  - 難しいトロイダル電流分布計測
  - ex. 極性の反転を含むトロイダル電流分布の多様性
  - ex. 真空ポロイダル磁場と比較して小さな正味トロイダル電流



# 接線方向NBI実験

反磁性ループ磁束( $\Phi_{dia}$ ) sensitive to  $p_{\perp}$   
 サドルループ磁束( $\Phi_{PS}$ ) sensitive to  $p_{\parallel} + p_{\perp}$



- ・  $\Phi_{PS}$  と  $\Phi_{dia}$  の時間変化の傾向が異なる
- ・ 圧力分布の変化etcでは説明がつかない

$\Phi_{PS}/\Phi_{dia}$  は密度に依存



低密度  $\Rightarrow$  衝突が少なく、**ビーム圧力大**  
 $\Rightarrow$  NBIは接線方向入射の為、**ビーム圧力は**  
 $p_{\parallel} > p_{\perp}$   
 $\Rightarrow \Phi_{PS}/\Phi_{dia}$   $\uparrow$

$\Phi_{PS}/\Phi_{dia}$  が圧力非等方  
 度を検出したと考えると  
 定性理解と矛盾しない

# 吸収パワー依存性

