

ヘリオトロン配位におけるプラズマ電流の位置付け

Role of Plasma Current in Heliotron

核融合研 渡邊 清政

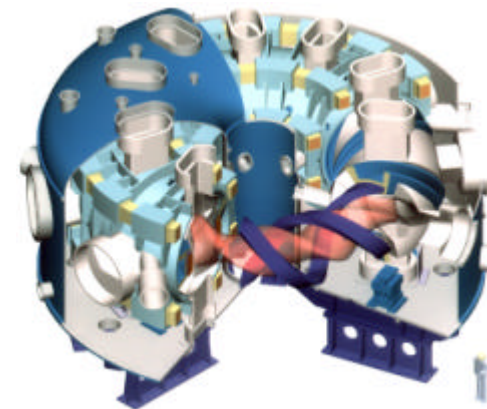
NIFS WATANABE K. Y.

概要

- ・ヘリオトロン配位におけるプラズマ電流の位置付けを概説。
- ・ヘリオトロンプラズマ性能向上の制御手段として位置付けた場合の実験結果等の事例。
- ・トラス磁場プラズマ理解のための制御パラメータ(自由度)として位置付けた場合の研究提案例。(ヘリオトロン配位を使ってトラス磁場プラズマ特性の理解を進める)

本報告をまとめるにあたり各位の協力に感謝します。

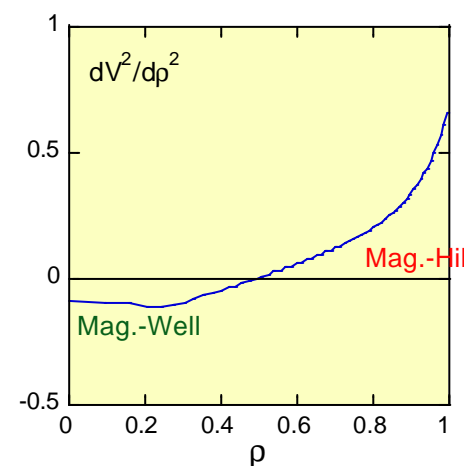
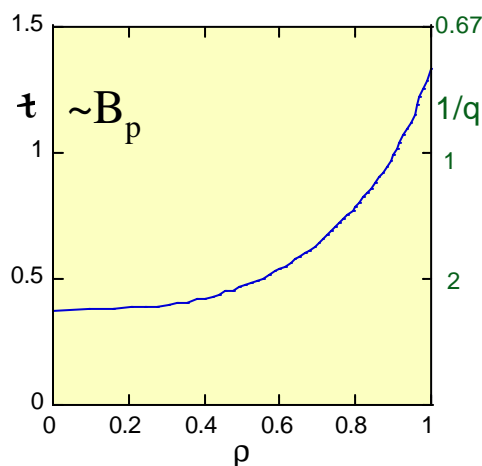
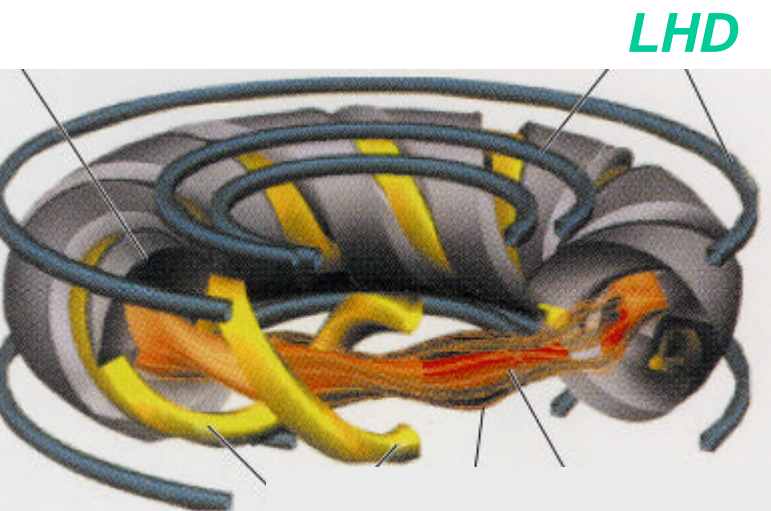
菅野龍太郎, 榊原 悟, 東井和夫, 中島 徳嘉, 成嶋 吉朗,
LHD実験グループ



ヘリオトロン配位におけるプラズマ電流の位置付け

- ヘリオトロン配位では、外部コイルによりポロイダル磁場を生成できるので、本質的にトロイダル電流は不要。
- ブートストラップ(BS)電流は流れるが、磁気シアと回転変換が大きな領域があるので、閉じ込め(平衡)磁場が壊れることはない。さらに、BS電流は磁場配位により大きく変化するので、適当な磁場配位を選べば、MHD平衡への影響も小さくできる。電流駆動型不安定性が現れるほど、BS電流は流れない。課題は、BS電流の定量評価精度の向上とBS電流を考慮した上でのMHD安定特性と閉じ込め特性の両立(未着手)。
- トロイダル電流は回転変換の変更を通じて磁気井戸の形成や磁気シアを変化させる。磁気軸や磁気面形状制御と並ぶ制御手段(ノブ)となり得る。

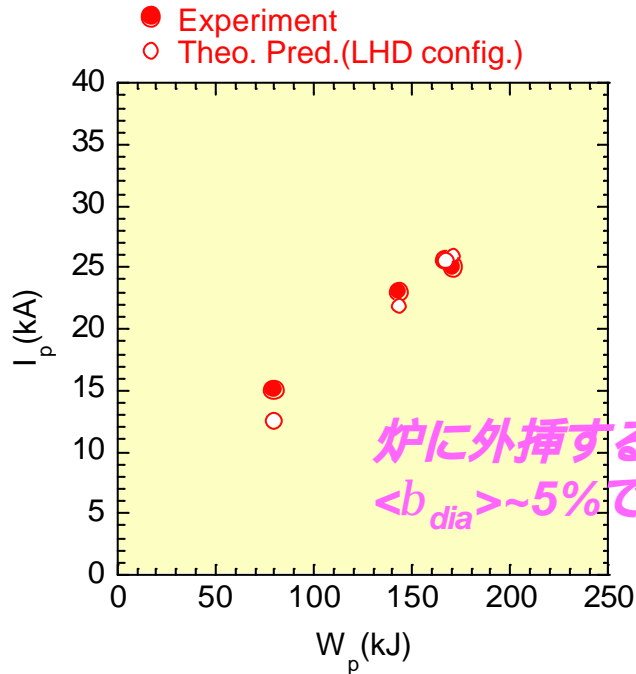
プラズマ性能向上のための
制御ノブ



LHD, $R_{ax}=3.6m$, $b\sim 1\%$, currentless

Bootstrap Current in LHD Experiments

Dependence on plasma stored Energy

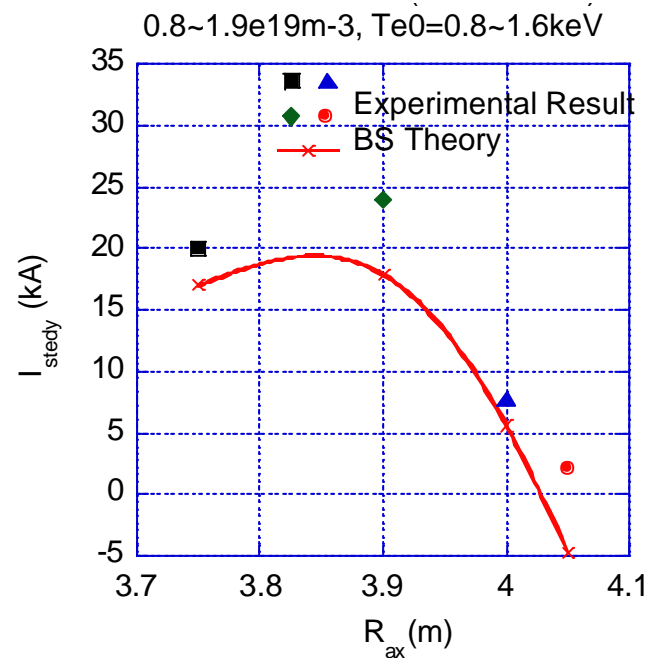


炉に外挿すると
b_{dia} ~5%で、~70kA/T.

$R_{ax}^V = 3.75\text{m}$, 1.5T, Hydrogen

NBI balanced Inj. Total NBI power = 3.5~3.7MW

Dependence on mag. axis position

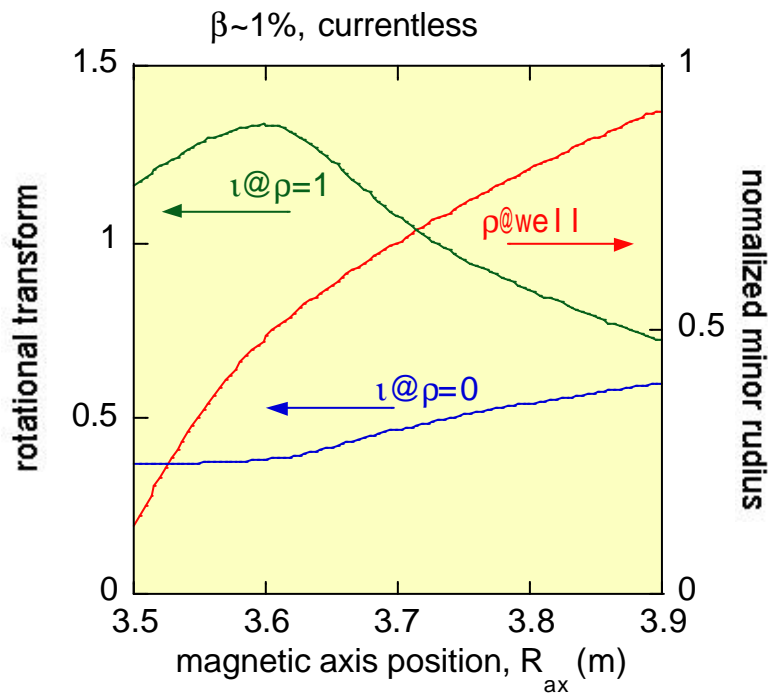


BS current significantly reduces with increase of R_{ax}

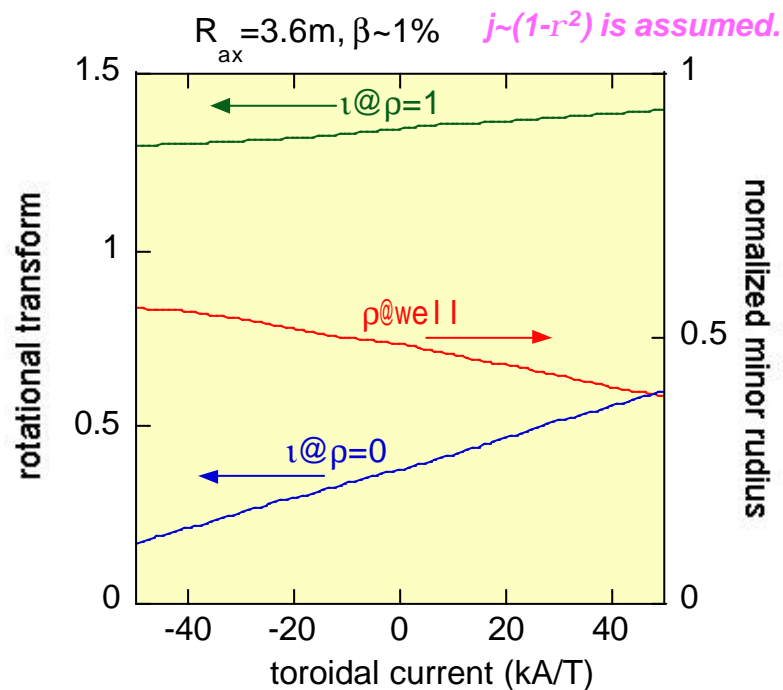
観測されたトロイダル電流のプラズマ蓄積エネルギー、磁気軸配位による依存性は理論予測と良い一致を示している。

Toroidal Current as Control Method of MHD Equilibrium

Change due to Magnetic Axis



Change due to Toroidal Current



Control of rotational transform and mag.-well due to toroidal current in CORE region is effective.

プラズマ性能向上のための制御ノブとしての位置付け

例

1. トロイダル電流の交換型不安定特性への影響

理論背景: 回轉變換を減らす方向に流れる電流は磁気シアの増加と磁気井戸の形成を助長し、交換型の不安定モードに対してMHD安定特性が改善する。

- ヘリオトロンDRのトロイダル電流印加実験において、順方向電流が増大するにつれて到達ベータ値が減少する
- LHDでは、逆方向電流運転時にコア領域の有理面近傍で観測された最大の圧力勾配が、無電流運転時のそれに比べて大きい

2. トロイダル電流の閉じ込め特性への影響

理論背景: 回轉變換の変化が周辺の閉じ込め特性を変化させる????

- 順電流運転時のCHSでのHモード観測
- LHDの低磁場、高順方向電流で観測された閉じ込め性能の向上

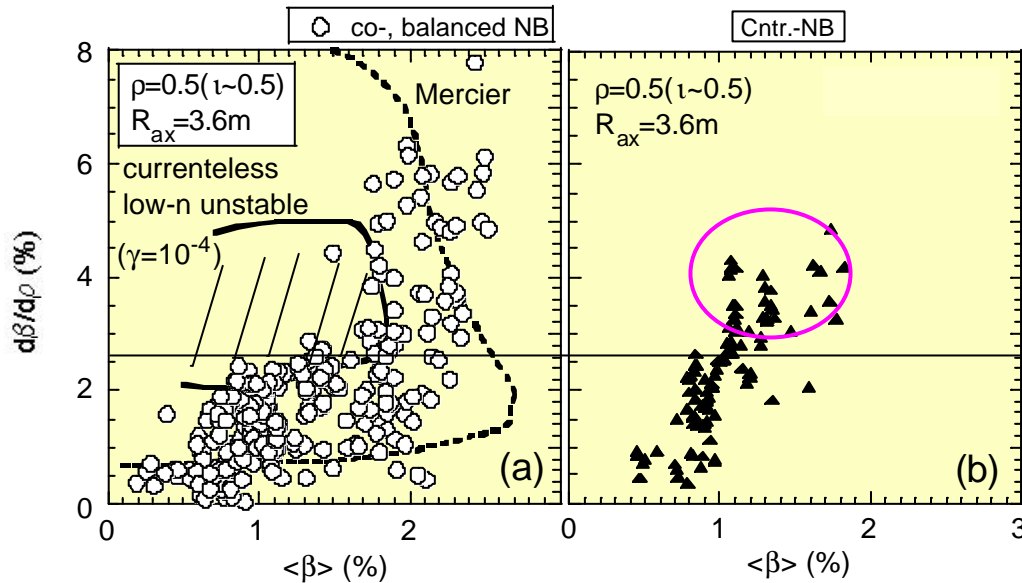
3. 回轉變換(ポロイダル磁場)ゼロ付近での閉じ込め特性

理論背景: 回轉變換が小さくなるとシャフラノフシフトによる磁気井戸が大きくなる成長。回轉變換が反転することによる磁気シアの増大。>閉じ込めの改善の期待。

- 構想中(良好な実験結果は未だ無い)。

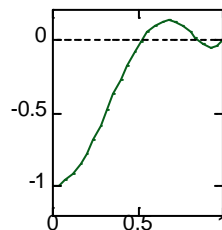
Effect of Toroidal Current on Achieved Pressure Gradient

LHD core pressure gradients



Under Cntr.-NBI discharge,
Achieved pressure gradients are superior to those under co-, balanced NB.

Assumption of current profile under Cntr.-NB.



Under BSC+Cntr.NBCD,
Theory predicts ideal interchange mode stable.

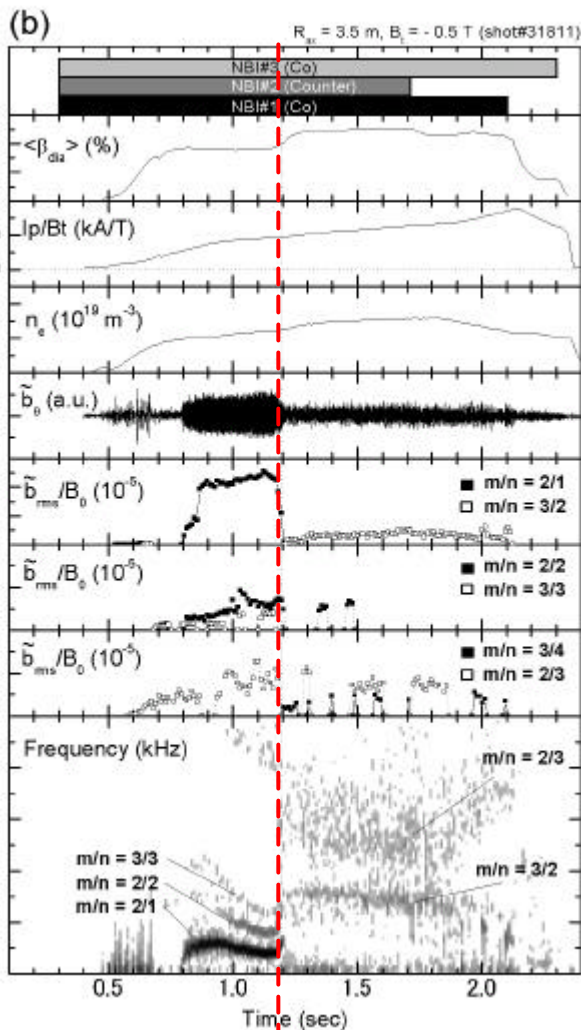
*In core, subtractive current enhances Shafranov shift.
In edge, additive current suppresses Shafranov shift.
=> enhances magnetic well formation and magnetic shear in finite beta.*

Confinement Improvement due to Toroidal Current

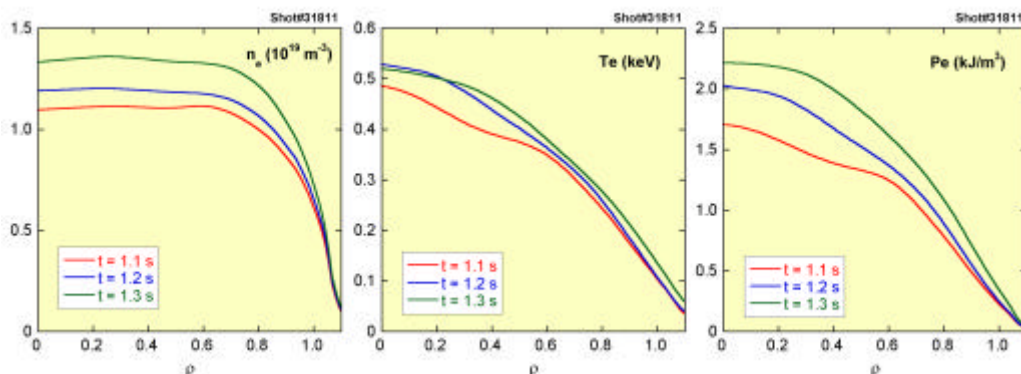
LHD, High-additive current

$R_{ax}=3.5\text{m}$, $B_t=0.5\text{T}$

$|I_p/B_t| > 30 \text{ kA/T}$
Co-Ohakawa/Co-Bootstrap



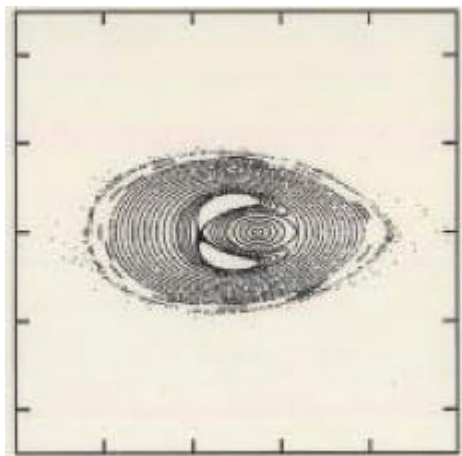
- $m/n=2/1$ mode abruptly disappears at $t \sim 1.2\text{s}$ (due to disappearance of the resonant surface)
 - $m/n=2/2$ mode disappears with $2/1$ mode
 - Increase of Core T_e (Fast) and Whole n_e (Slowly)
- $\Rightarrow \langle b_{dia} \rangle$ increases by $\sim 40\%$
 $\tau_E/\tau_{ISS95} : 1.1 \quad 1.3$



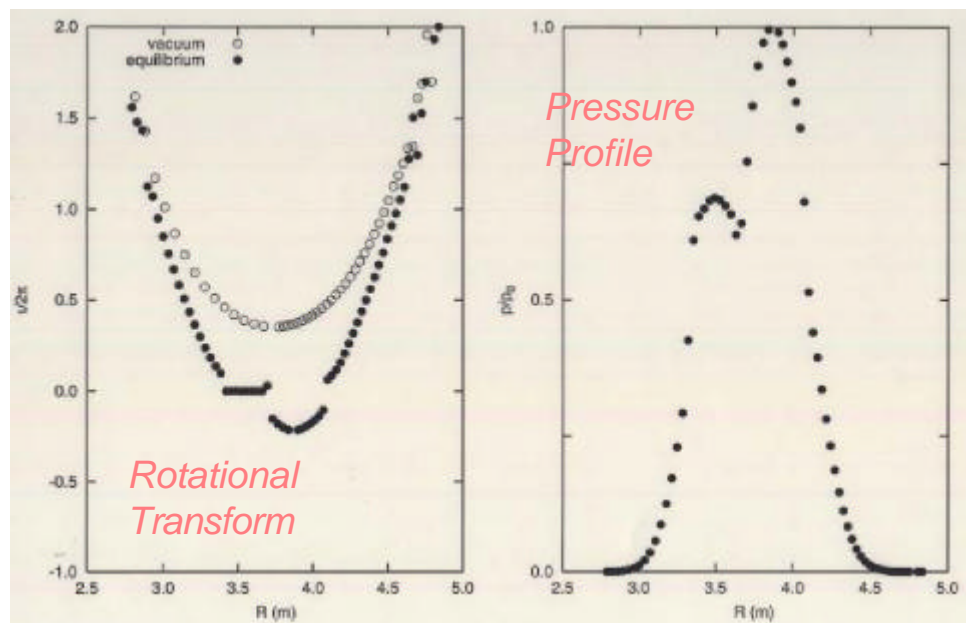
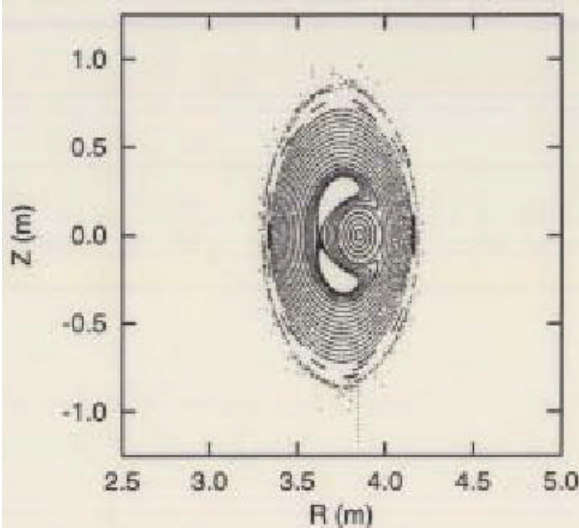
Mechanism is NOT clear.

B_p 反転磁場配位のMHD平衡(暫定版)

HINT's Result LHD, $R_{ax}=3.75m$, $b=0.3\%$, $I_p/B \sim -80kA/T$



11 SEP. 2002 BY R.KANNO (NIFS)



回転変換がゼロに近づくと磁気軸付近の磁気面が壊れ、磁気軸の分離が起こる。この時、 $m/n=1/0$ のストキャスティック領域又は磁気島が現れる。

回転変換がゼロを切り 大きな磁気軸シフトを持つ平衡の存在の確認(理論面から)

物理機構解明のための制御パラメータ(自由度)としての位置付け

ヘリオトロン配位を使ってトラス磁場プラズマ特性の理解を進める

研究提案例(構想段階)

1. 電流駆動不安定性のヘリオトロン配位への影響

トカマクの実験結果との比較により、プラズマ電流により作られる閉じ込め磁場と真空磁場の比率の違いによる不安定性発生後のプラズマの応答の違いの研究も興味深い。(電流分布(平衡)の変化に起因した応答に着目)

2. 圧力駆動型不安定性と電流駆動型不安定性の飽和状態の違いの解明

- ・ 圧力駆動型モード; トロイダルモード数/大 \Rightarrow 成長率/大、モード幅/小
 - ・ 電流駆動モード; トロイダルモード数/小 \Rightarrow 成長率/大、モード幅/大
- 理想モード**
- > 無トロイダル電流運転時の圧力駆動モードが支配的な場合と大トロイダル電流運転時の電流駆動モードが支配的な場合のプラズマの振舞いの相違の研究を行うことにより、不安定駆動源による非線形飽和状態の違いを実験的の面から調べることができる可能性あり。

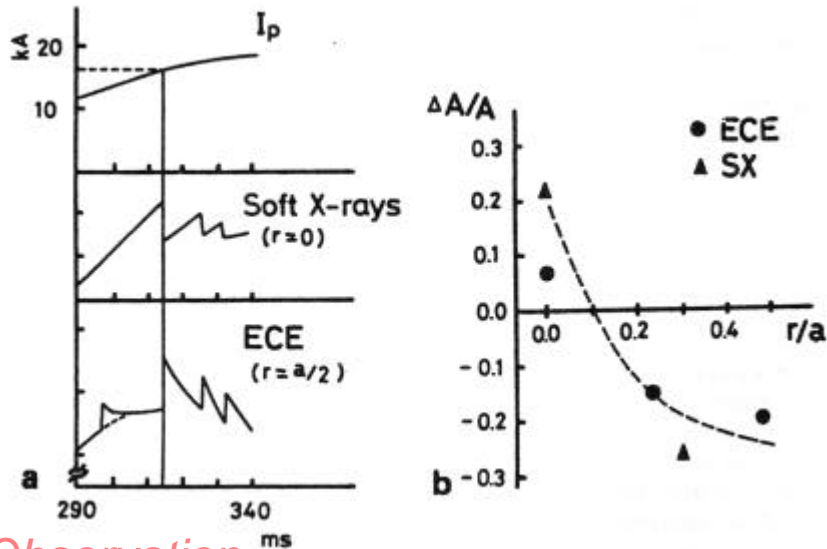
3'. 回転変換(ポロイダル磁場)ゼロ付近での閉じ込め特性の研究

- ・ ゼロ回転変換の平衡の形成機構の研究(トロイダル電流の時間発展と真空ポロイダル磁場の役割)
- ・ JT-60で観測された電流ホール(ポロイダル磁場ゼロ)の結果との比較。

Observation of Current Driven Instability

Heliotron-E, additive current

M. Wakatani et al, Nucl.Fusion, 23(1983)1669.



Prospect

Peak current profile

=>

Double resonant surface with $\iota=1$

=>

Internal kink unstable

Observation

Saw-teeth Oscillation

No disruption

Limitation of toroidal current ($<50\text{kA/T}$)

Degradation of confinement ($>10\text{kA/T}$)

Poloidal Field in Vacuum
and/or

Large Magnetic Shear

/Rotational Transform

LHD has much larger Magnetic Reynolds Number than Heliotron.

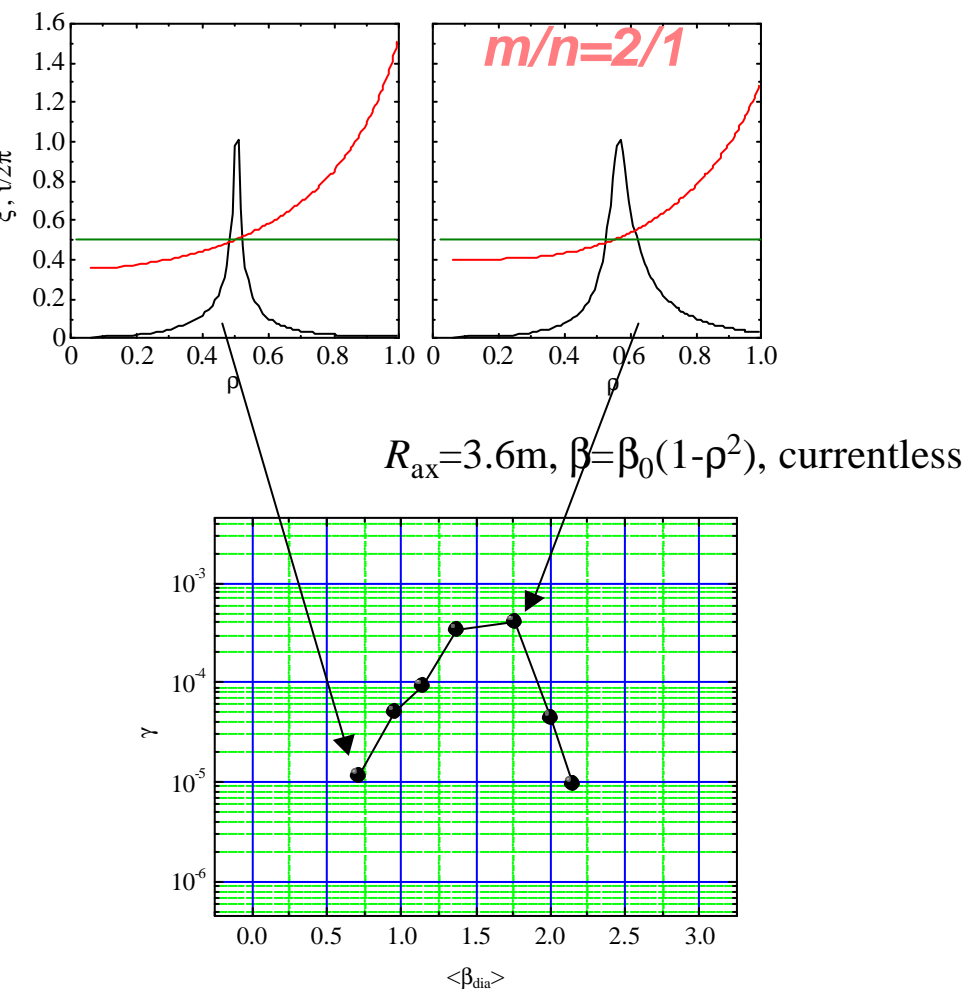
LHD has confinement field without toroidal current

(from view point of comparing with Tokamak)

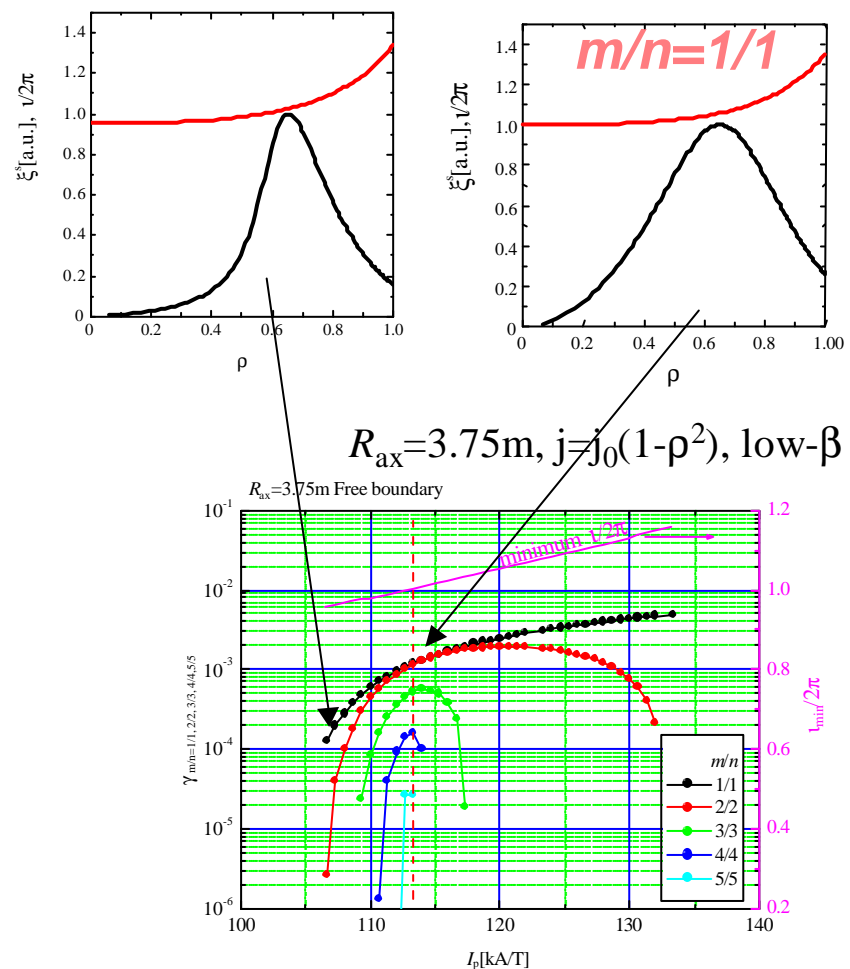
=> What happens?

Difference between pressure- and current-driven modes' structure

pressure driven mode



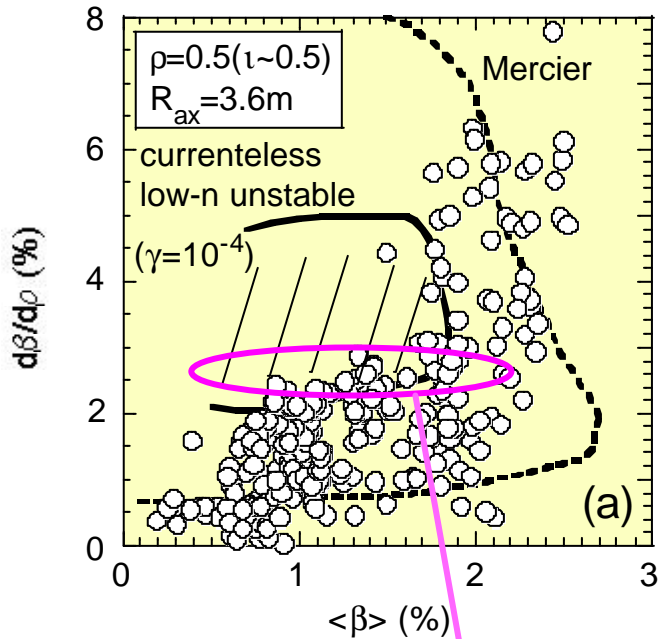
current driven mode (External)



Ideal linear MHD stability analysis (Terpsichore code)

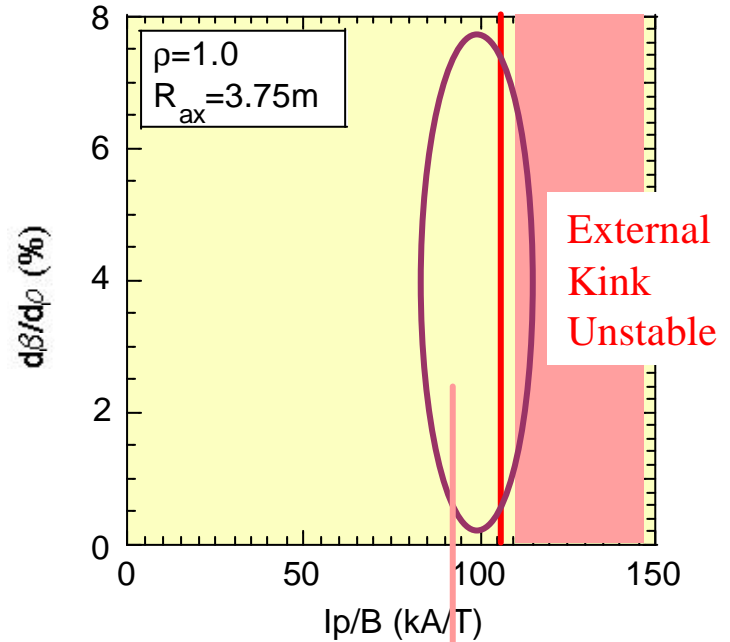
How different saturated states are realized due to different instabilities?

pressure driven mode



pressure gradients saturate

current driven mode



What happens???

まとめとLHDでの実験計画

- 一般的に、ヘリオトロンではBS電流(自発電流の代表)は平衡磁場を壊したり、電流駆動不安定性が発生するほど流れない。しかし、シャフラノフシフトの助長や抑制を通じ、MHD安定性や粒子軌道特性に影響を与えるので、プラズマ電流をプラズマ性能向上のための制御ノブと見る観点からの研究例を紹介した。
- 次に、ヘリオトロン配位を使ってトロイダル磁場プラズマ特性の理解を進める観点からプラズマ電流を制御パラメータ(自由度)として位置付けた場合の研究の可能性を紹介した。

LHDでの電流駆動のこれまでの実績

LHDは放電時間がこれまでの中型ヘリオトロン装置に比べて格段に長く、強力なNBIを備えているので、1keVを超えるプラズマで大トロイダル電流運転が可能。ビーム駆動型の大トロイダル電流が観測されており、電流による回転変換角の磁気軸での変化分は最大、 $D_i \sim 0.5 @ 1.5T (70kA/T)$ に達している(但し、電流分布が $(1-\rho^2)^2$ を仮定した場合)。

トロイダル電流に関連したLHD実験の予定

電流による回転変換角の変化分が磁気軸で $|D_i| > 0.75 @ 1 \sim 1.5T (100kA/T)$ の実験が提案されている。期待する高電流が達成できれば、

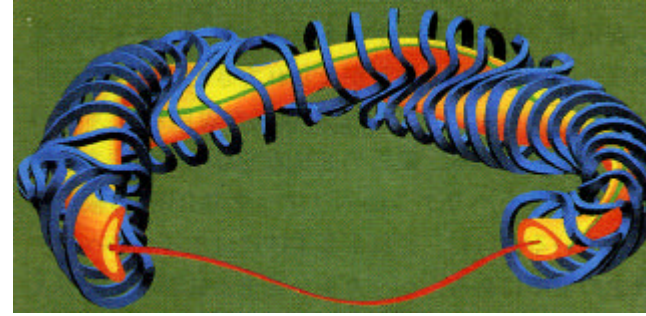
- (1) 順方向電流駆動時には電流駆動MHDモードの実験/電流駆動モードと圧力駆動モードの比較の実験
- (2) 逆方向電流駆動時にはポロイダル磁場反転実験等が行える。

他のヘリカル装置におけるプラズマ電流の位置付け

ヘリアス(Helical Advanced Stellarator);

代表 W7X(ドイツ、建設中)

- 低磁気シア、磁気井戸、準等磁場配位
 - 真空での良好な閉じ込め特性をできるだけ保持が設計理念
 - 低磁気シアなので、トロイダル電流による回転変換の変化がプラズマ閉じ込め特性を大きく劣化させる可能性有り
 - ビルトイン磁気島ダーバータのため、電流によりダイバータ特性が大きく変化する可能性有り
- => PS電流、BS電流を最小化する最適化の適用
- => トロイダル電流は存在してはならないもの



準軸対称配位; 代表 NCSX(米国、設計中)、CHS-qa(日本、設計中)

- トロイダルリップルが支配的、真空回転変換あり
- トロイダル電流が流れた方がベター。

無くても可。

- BS電流が流れることが想定される。電流制御が運転の自由度を高くする可能性はあるが、本質的に**制御する必要は無い**。

