

第8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における電極バイアス実験

高橋裕己
東北大院工

Outline

1. Introduction
2. Characteristics of plasma parameters under the electrode biasing in TU-Heliac
3. Comparison with neoclassical theory
4. Preliminary result of the electrode bias experiment in CHS
5. Summary

背景

➤核融合研究における問題点(Lモード時の閉じ込め悪化)

核融合発電炉の実現には高性能の炉心プラズマが要求される。しかしプラズマへの追加熱を行うと温度上昇に伴いプラズマの熱拡散係数が増大し、閉じ込めが悪化する(異常輸送)。

➤高性能閉じ込めモード(Hモード)の発見 (ASDEX(独), 1982)

プラズマ中への追加熱がある臨界値を越えるとプラズマの閉じ込めが突然改善。

Hモードの特徴

1. LモードからHモードに突然遷移する
2. 径電場が形成され、ポロイダル回転が誘起される
3. プラズマ中の揺動が抑制される
4. エネルギー閉じ込め時間が増加する



新古典理論からの遷移条件の予測

イオン粘性に極大値が存在。ポロイダルフロー駆動力が粘性の極大を超えると瞬間的にHモードに遷移する。

目的

➤ 本研究における目的

閉じ込め改善モードへの遷移機構を明らかにするために、ヘリカル系のプラズマ閉じ込め装置である、東北大学ヘリアック(TU-Heliac)、コンパクトヘリカルシステム(CHS)において電極バイアス実験を行い、

1. LH遷移に伴う分岐現象を時間的、空間的に詳細に調べる
 2. 径電場の形成機構、並びに径電場と新古典粘性との関係を明らかにする
- 事を目的とする。

➤ 電極バイアス実験

プラズマ中に挿入した電極を真空容器に対してバイアスする事により、プラズマ中に能動的に径電場を形成する

電極バイアス実験の利点

1. 電極電圧および電極電流を変化させる事により、外部からの径電場の制御が可能
2. 電極電流からポロイダル回転の駆動力を実験的に評価できる

閉じ込め改善に対する径電場の役割

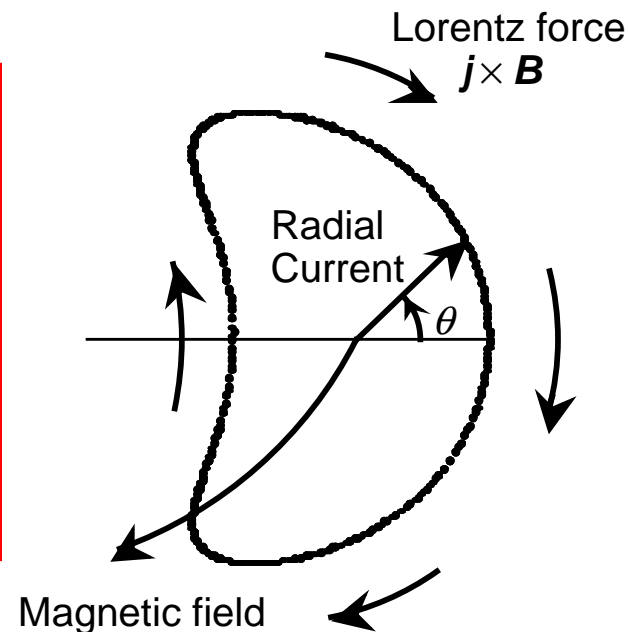
径電場形成に伴う閉じ込め改善のシナリオ

プラズマ中に径電場が形成される。

径電流と閉じ込め磁場によってローレンツ力が誘起され、ポロイダルフロー(θ 方向)が駆動される。

径電場にシアがあるとポロイダルフローは径方向で流速の異なるシアフローとなりプラズマ中の揺動が抑えられる。

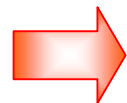
異常輸送が低減し、閉じ込めが改善される



径電場形成機構

ポアソン方程式

$$\varepsilon_0 \varepsilon_{\perp} \frac{\partial}{\partial t} E_r = e(\Gamma_e - \Gamma_i)$$



- ・イオンと電子のフラックスに差があると径電場が形成される

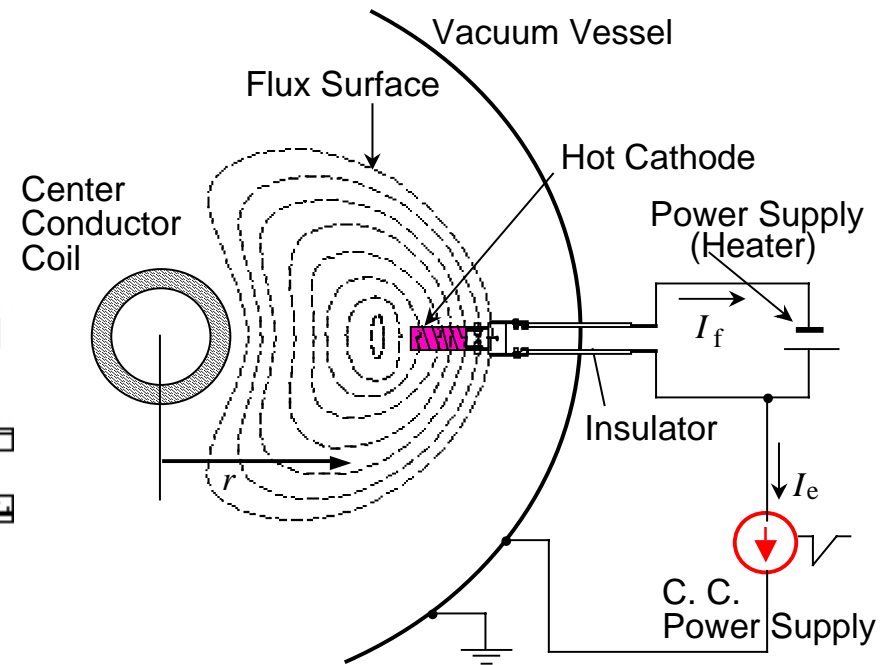
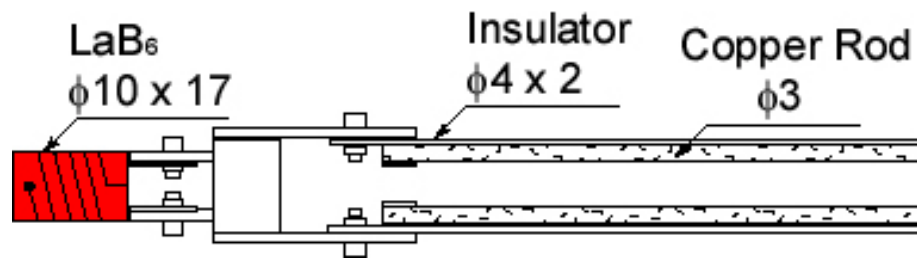
電極バイアス実験では電子注入、電子捕集により電子フラックスを変化させることが可能



能動的な電場生成

実験装置

Major radius	48 cm
Minor radius	~ 7 cm
Working gas	He (1.2×10^{-2} Pa)
Electron density on axis N_{e0}	6×10^{11} cm $^{-3}$
Electron Temperature on axis T_{e0}	~ 25eV
RF frequency f_{RF}	18.8 kHz



Property of LaB ₆	
• molecular weight	203.78
• density	4.721 g/cm ³
• melting point	2400 °C~
• emission j_e	1 A/cm ² (1400 °C)

The hot cathode is inserted horizontally from the low field side. Negative bias voltage is applied against to the vacuum vessel.

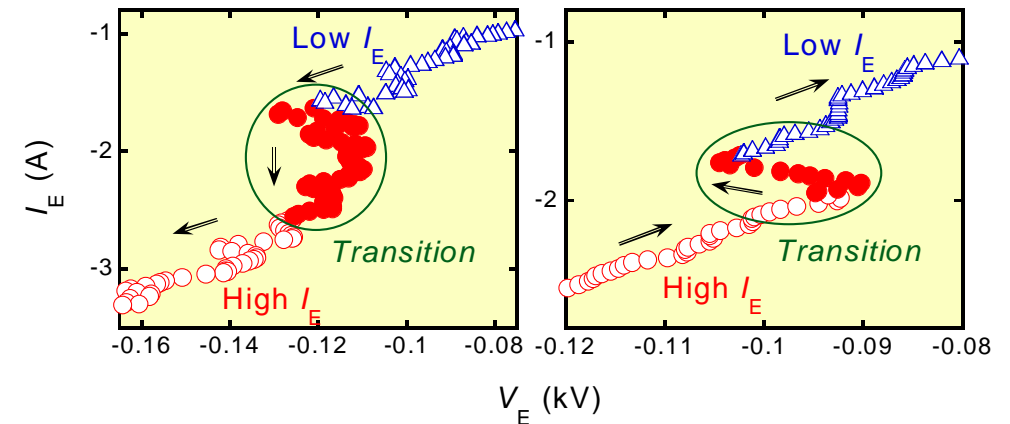
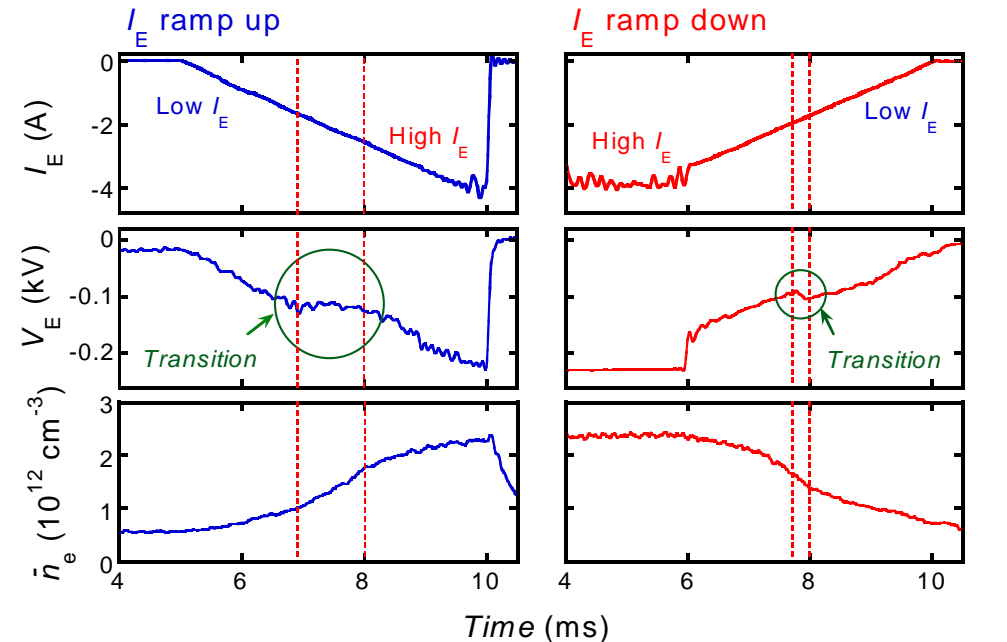
時間発展

- 電極電流は定電流電源により制御されている

Forward transition: I_E 0 A \rightarrow -4.2 A
(I_E ramped up)

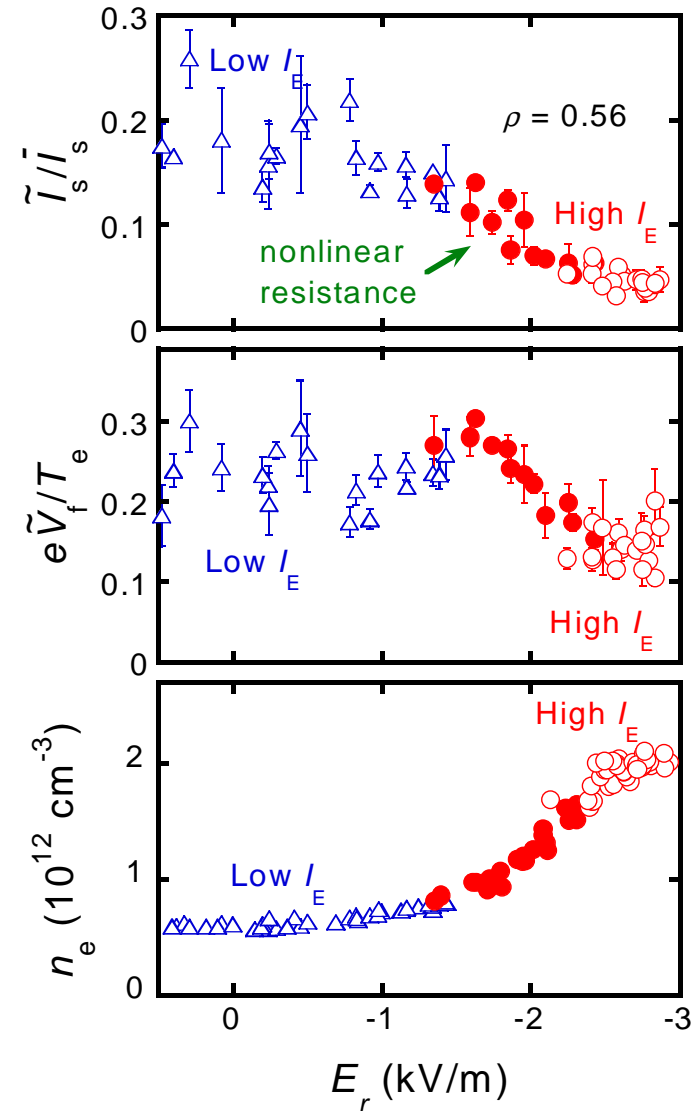
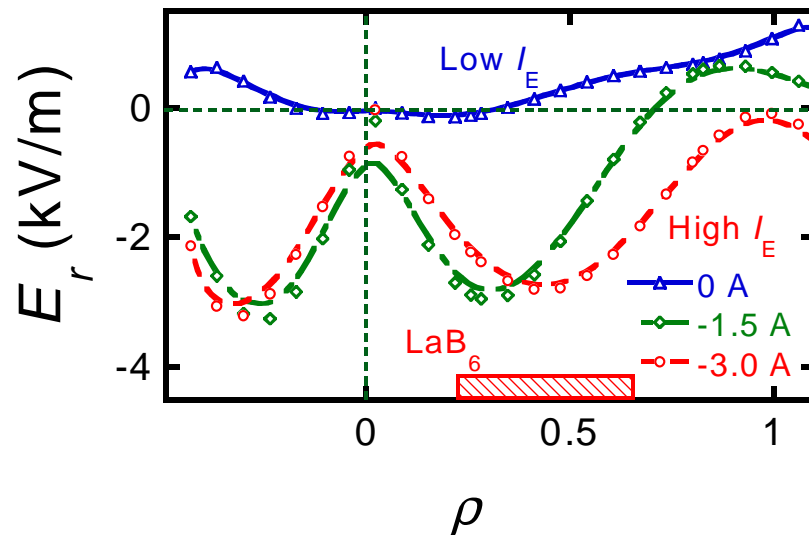
Back transition: I_E -4.2 A \rightarrow 0 A
(I_E ramped down)

- 電極電圧が非線形性を示す。特にBack transition時には負性抵抗を示している。
- 非線形抵抗を示す時刻で電子密度が大きく変化している。



径電場の効果

- バイアス時プラズマ内部に大きな負電場が形成
- 負電場の成長に伴い、
 - イオン飽和電流揺動、浮動電位揺動は1/2
 - 電子密度は4倍
- 非線形抵抗時に、より大きな変化が観測



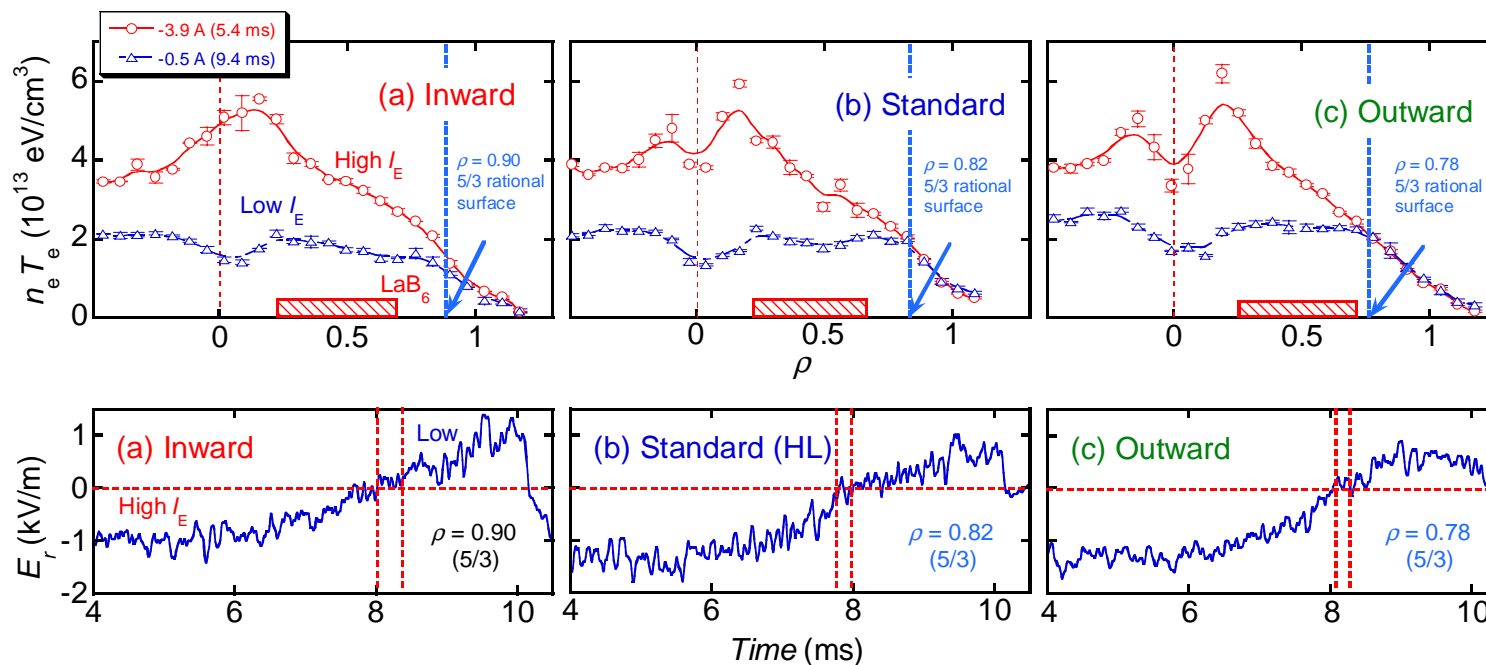
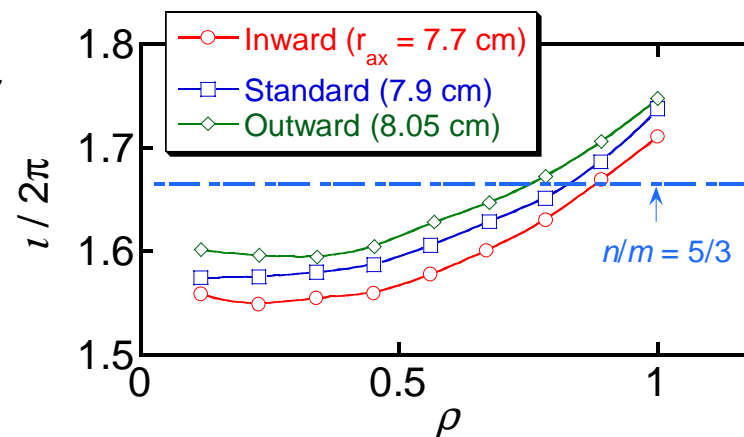
有理面の効果

閉じ込め改善に対する有理面の効果を検証

➡ 有理面位置の異なる磁場配位をターゲット

$n/m = 5/3$ 有理面において

- 圧力勾配が分岐
- 閉じ込め状態の遷移時に径電場が0になる



理論との比較

定常状態におけるポロイダル方向の運動量バランス方程式

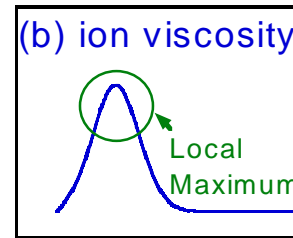
$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\langle r \rangle}{\rho_i} \langle J_\rho \rangle B_0 = -\Pi_{p,n} - \frac{4}{\sqrt{\pi}} (1 + 2q^2) \frac{v_{in}}{(v_t / \langle r \rangle)} \Theta M_p, \quad M_p \cong \frac{E_r}{B_0 \Theta v_t}$$

(a) Driving force (b) Ion (c) friction

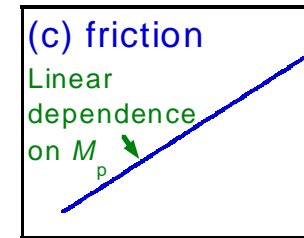
viscosity



$$\langle J_\rho \rangle \times B_0 = \frac{I_E}{S_p} B_0 = \frac{I_E}{2\pi \langle r \rangle L} B_0$$



M_p

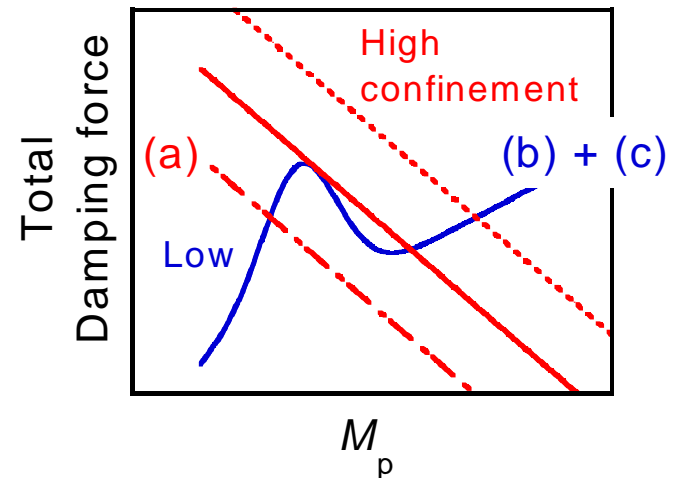


M_p

LH遷移におけるイオン粘性の役割

イオン粘性がフロー速度に対して極大値を持つ。

フロー駆動力が粘性の極大値を超えると解が分岐(フロー速度(径電場)が急激に増大)し、Hモードに遷移する。



ポロイダル回転とイオン粘性

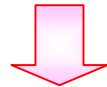
イオン粘性

- ・磁場のトーラス性 (リップル構造) に起因。磁場成分の関数。

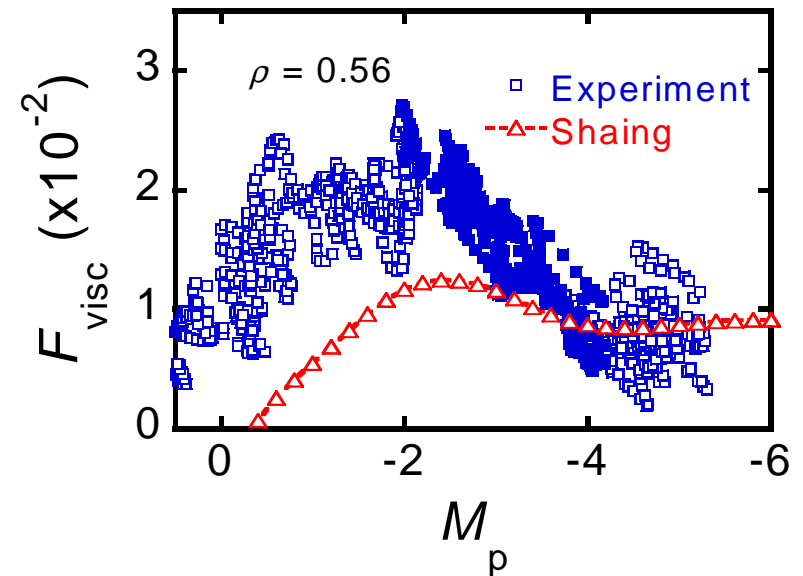


高次のフーリエ磁場成分まで考慮したShaingモデルと比較

- 実験的に得られたイオン粘性に極大値が存在
- 極大値の位置は実験値、理論値でほぼ一致
- 実験値のポロイダルフロー速度に対する依存性は理論値と定性的、定量的に良く一致
- 非線形抵抗領域のデータはイオン粘性がフロー速度に対して減少する領域に対応している。



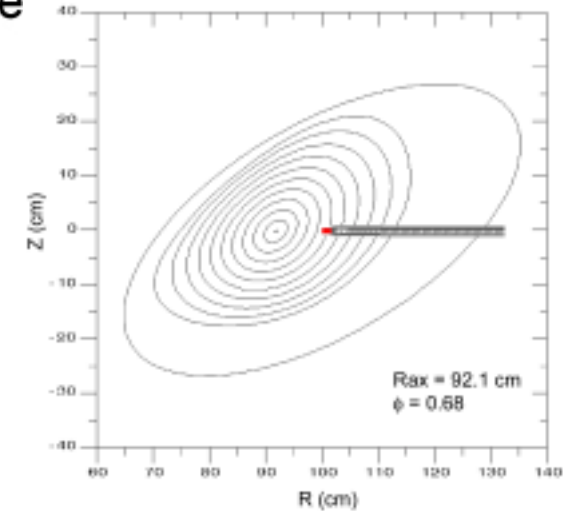
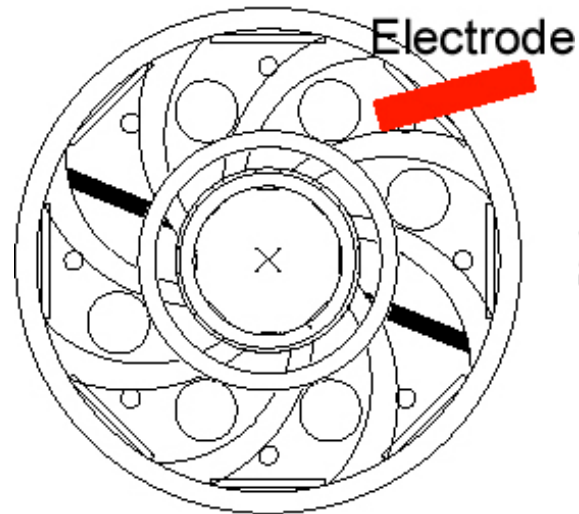
TU-Heliacにおける、径電場形成に伴う閉じ込め領域への遷移機構はイオン粘性がポロイダルフロー速度に対して極大値を持つことに起因する分岐現象である



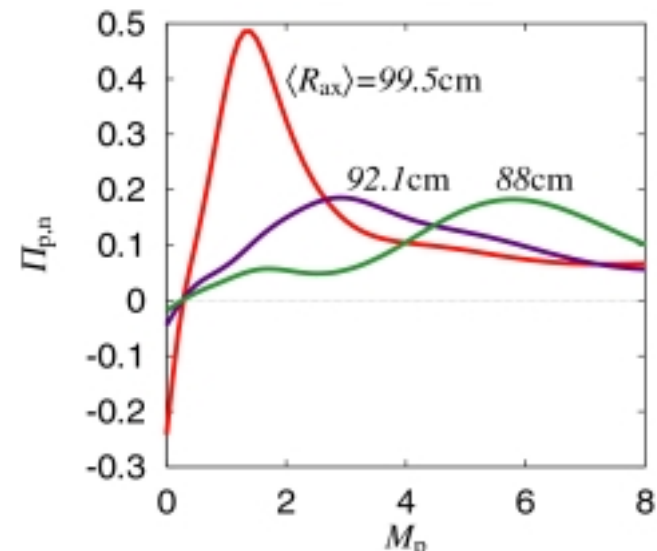
CHSにおける電極バイアス実験

CHSにおける電極バイアス実験

- 高電離度のプラズマ
 - ➡ フリクション低減
- 磁場配位を大きく振れる
 - ➡ 粘性のリプル構造依存性
- プラズマ体積が大きい
 - ➡ 電極の相対的な小型化
- 優れた計測システム



Major radius	1 m
Minor radius	~ 20 cm
Magnetic field on axis B_0	875 G
Electron density on axis N_{e0}	$1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$
Electron temperature on axis T_{e0}	~ 15eV
ECH power	30 kW
Working gas	He ($3.6 \times 10^{-2} \text{ Pa}$)



バイアス時のCHSプラズマの振る舞い

本研究では定電流電源を用いる事により電極電流を制御している。

I_E : -5.4 A ($t = 160 - 210$ ms)

Input power

ECH . . . 15 kW \times 2

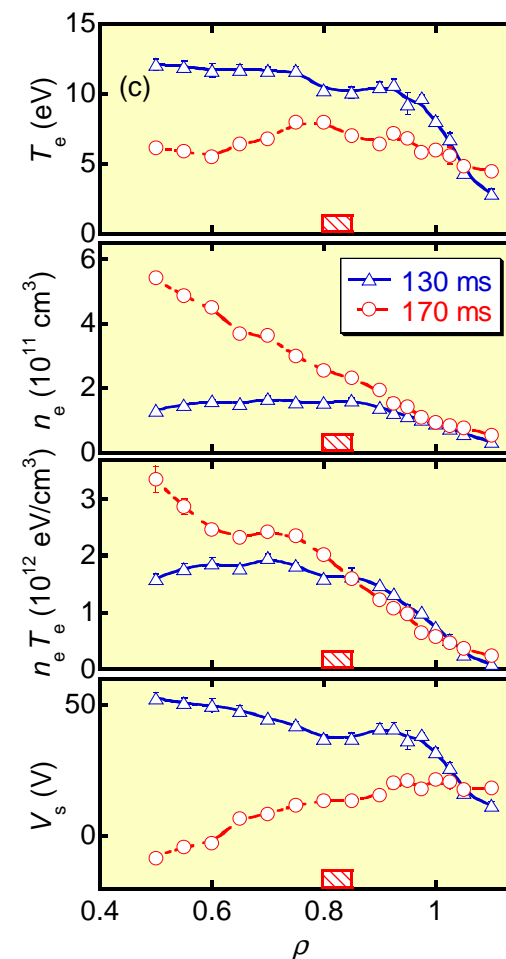
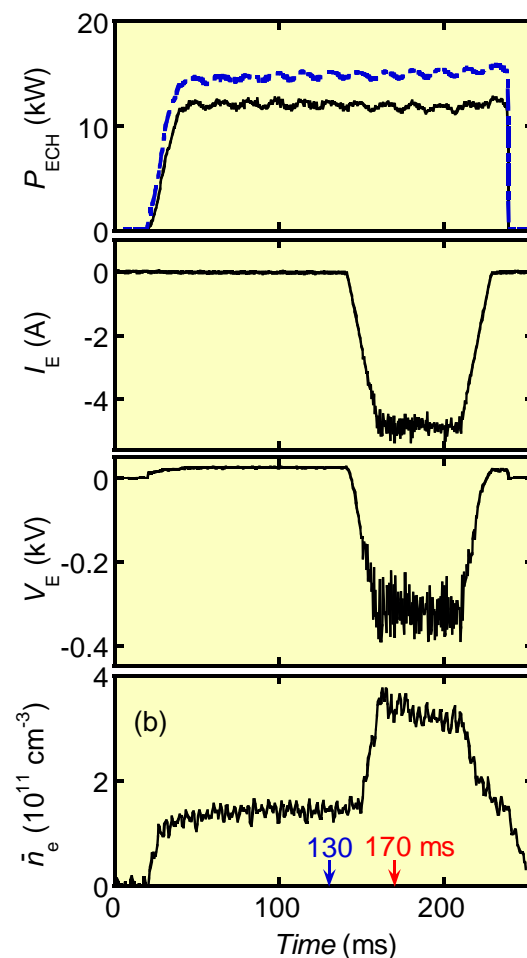
Electrode . . . \sim 1.6 kW

バイアス時の振る舞い

- 平均電子密度が約2.7倍増加
- プラズマ内部に電子密度勾配が形成
- $\rho < 0.85$ で内部エネルギーが増加し、逆に $\rho > 0.85$ で減少している
- $-\partial V_s / \partial r$ が負になっている

Working Gas: He, 3.64×10^{-5} Torr

$I_f = 28$ A, $B_0 = 875$ G



結論

本研究では LH遷移に伴う分岐現象の機構を解明し、さらに径電場と新古典粘性との関係を明らかにするために、TU-Heliac、CHSにおいて電極バイアス実験を行った。

TU-Heliac

- 閉じ込め状態の遷移時に **プラズマ抵抗の非線形性**が観測された。
- 径電場形成に伴う揺動レベルの減少、電子密度の増大が確認された。
- 5/3有理面位置において、**圧力勾配が分岐**する事、遷移時に**径電場が0になる**事が確認された。
- 実験的に得られた**イオン粘性に極大値**が観測された。さらに、**負性抵抗領域のデータはイオン粘性がポロイダルフロー流速に対して減少する領域に存在する**。

CHS

- 線平均電子密度の増大、圧力勾配の急峻化、負の径電場の形成が確認された。