

ヘリオトロンJにおける周辺プラズマ研究

- 双方向型共同研究における
筑波大学とのセンター間連携研究計画
- 周辺プラズマ中の乱流構造ならびに乱流輸送
- 給(排)気の最適化制御
- 周辺ノダイバータプラズマに対する
プラズマ電流ならびにプラズマ回転の影響

京都大学
エネルギー工学研究所
水内 亨

センター間連携研究計画

Heliotron J

IAE, Kyoto University



1a

EBW加熱物理

	定常ヘリカル型 原型炉 (FFR2m2)	Heliotron J	UHD
EBW加熱物理	-SDCプラズマ における電子加熱 (&電流駆動)	-O-X-Bモード変換 物理機構の解明 -周波数分布と 加熱特性の解明	-O-X-Bモード変換 物理機構の解明
工学・技術	最適入射システムの 工学実証	既存のシステム による原理検証	入射システムの最適化と 性能向上
密度制御	ペレット・ガスバフ	ガスバフ・ SMBI (ペレット)	ペレット・ガスバフ
周波数	170GHz	35GHz	77GHz
O-mode カットオフ密度	$3.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$	$1.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$	$7.6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
加熱パワー密度 (プラズマ全体平均)	0.05 MW/m ² (100MW/1800m ²)	1 MW/m ² (0.8MW/0.8m ²)	0.1 MW/m ² (3MW/30m ²)
入射パワー	100 MW	0.8MW	3MW
スピノフ	EBEによる 電子温度計測	EBEによる 電子温度計測	EBEによる 電子温度計測

図1: SMBI入射時の密度分布
変化

マイクロ波反射計による周辺
密度分布・密度揺動計測

高速カメラ計測
による周辺フィラメント揺動の
回転解析

方向性プローブ
によるプラズマ
回転・高速イオン
輸送の計測

BESによる
揺動計測

SX/AXUV

新規YAGトランプ

2c

ECH/EBW連携研究
(NIFS)

2a

境界プラズマ動的特性
の可視化 (I)

境界プラズマ動的特性の可視化システム
- 高感度高速カメラシステム → 三方向からの同時撮影

- ・スペクトル分解
- ・立体視手法等

上からの視線 横からの視線

プロブ先端の
発光を撮影した例

接線方向からの
視線

SMBI Hybrid probe #3.5

#11.5 SMBI

#10.5

Horizontal and upper
fast cameras

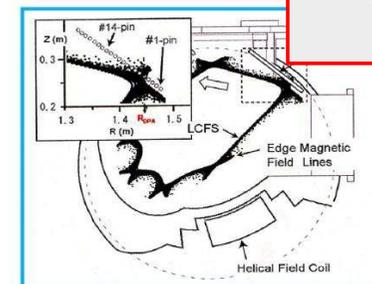
Tangential fast camera

境界プラズマ・
ダイバータ
プラズマ制御 (I)

熱・粒子制御連携研究
(筑波/広大/東大/東北大
/府立大/NIFS)

第一壁熱・粒子負荷評価 (I)

2b



Heliotron J ダイバータプローブ計測

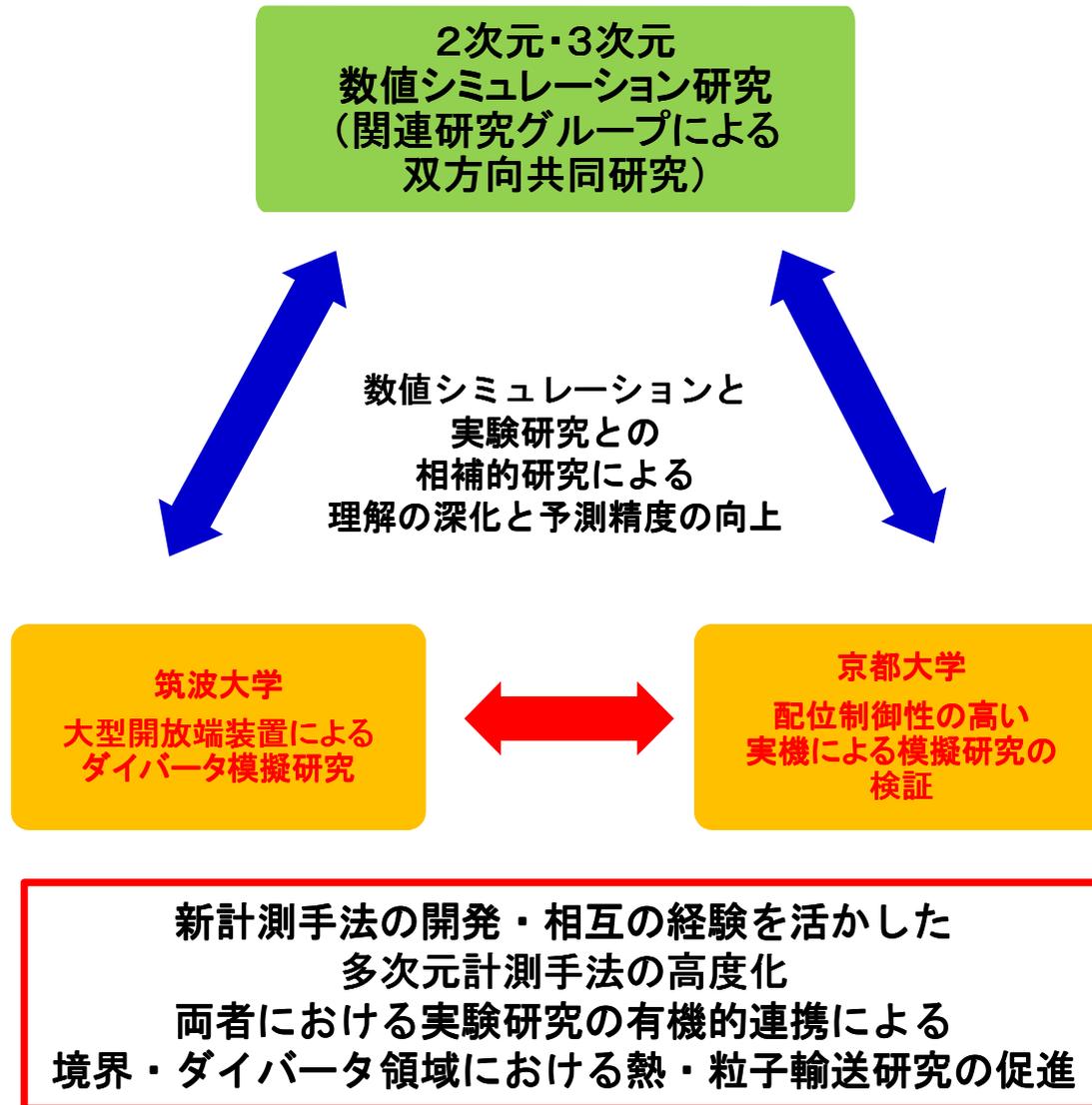
双方向型共同研究共通課題：ヘリカル型原型炉に向けた境界プラズマ制御

筑波大学・京都大学連携プロジェクト

境界プラズマ・ダイバータプラズマ制御研究と先進ダイバータ概念開発

Heliotron J

IAE, Kyoto University



■ 目標:

- 定常環状プラズマ型核融合炉、とくにヘリカル型原型炉へ向けた境界プラズマ・ダイバータプラズマの総合的理解。

■ 手法:

- 新計測手法開発を目指す相互の経験を活かした多次元計測手法の高度化。
- 大型開放端磁場を活かしたダイバータ模擬研究と配位制御性の高い中型環状磁場装置における境界プラズマ・ダイバータプラズマ研究の連携。

■ 期待される成果:

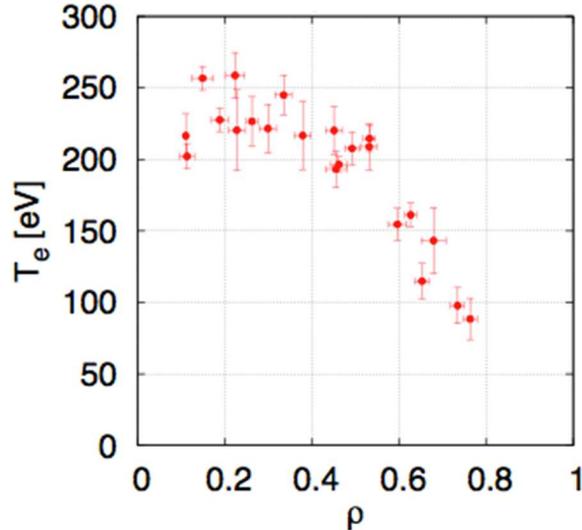
- **ヘリカル系特有の境界プラズマ輸送の理解。**
- **ヘリカル原型炉における境界プラズマ・ダイバータプラズマの予測精度の向上。**
- 先進ダイバータプラズマ制御法の提案。
- ITERやJT-60SA等における境界プラズマ・ダイバータ制御研究への貢献。

ヘリオトロンJにおける 新・局所プラズマ計測器の整備状況

Heliotron J

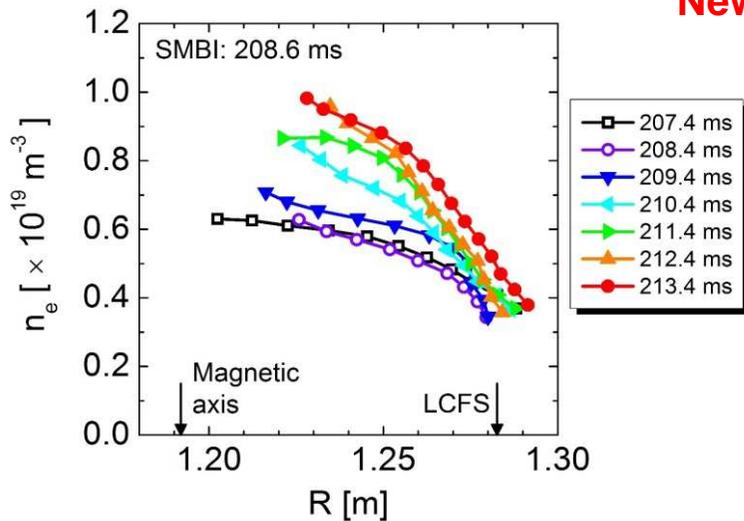
IAE, Kyoto University

電子温度分布 (TV-Thomson)



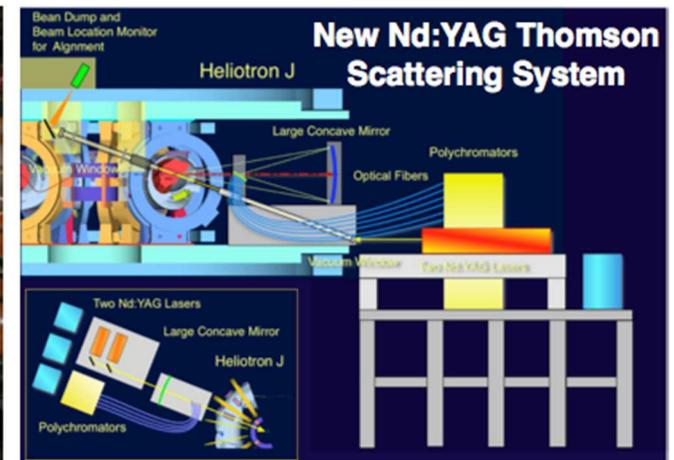
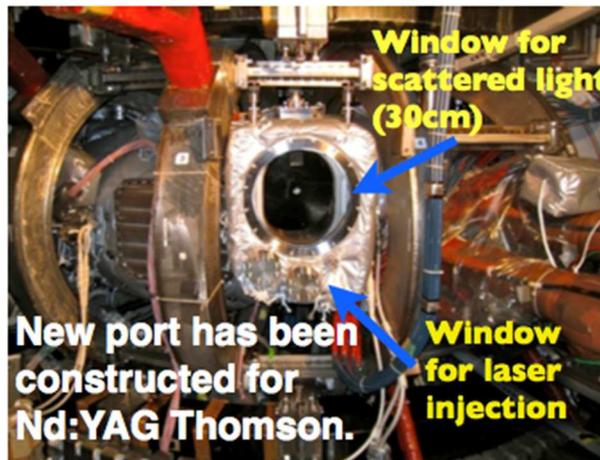
密度分布 (AM reflectometer)

SMBI後の密度分布の時間発展
(1ms時間分解能)



- **Nd:YAG トムソン 散乱計測システム (建設中)**
- **AM マイクロ波反射計**
- **T_i 分布、V_T 分布測定のための CXRS**
- **多チャンネル HCN 干渉計 (準備中)**
- **接線方向 PHA (準備中)**
- **磁気島計測システム (開発中)**
- **高速ビデオカメラ多方向同時観測システム**
- **周辺乱流輸送測定用多チャンネル・多機能プローブシステム**
- **密度揺動計測用 マイクロ波反射計**
- **密度揺動計測用 Beam emission spectroscopy**
- **新規 SX tomography システム (開発中)**

New Nd:YAG Thomson scattering system



連携研究課題 – First Phase – (1)

境界プラズマ・ダイバータプラズマを対象とした 多次元計測手法の開発と高度化

Heliotron J

IAE, Kyoto University

- **境界プラズマ動的特性の可視化**

- 高感度高速カメラを用いた計測手法の最適化

- 高感度カメラと複合プローブによる

Heliotron J周辺プラズマの研究 (京大・広大)

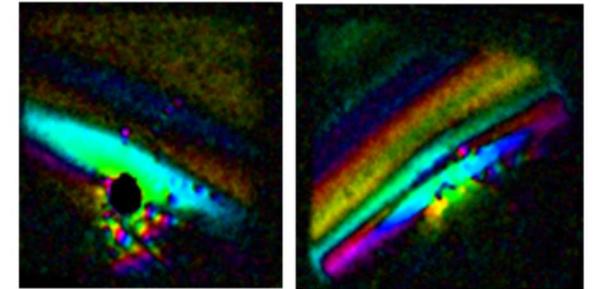
- 開放端磁場配位プラズマにおける

2次元イメージ計測に基づく周辺プラズマ揺動解析 (筑波・広大)

- 放射損失の空間構造の動的計測手法の開発

- ヘリオトロンJプラズマにおける

放射損失の空間構造とその動態に関する研究 (京大・NIFS)



- **第一壁熱・粒子負荷評価**

- バルクプラズマ分布、揺動計測

- 高時間分解静電・磁気複合ポロイダルプローブ (京大)

- 方向性プローブや損失イオンプローブによる粒子異常輸送の研究 (京大・NIFS)

- 高時間分解熱流束計測

- ヘリオトロンJにおける閉じ込め遷移に伴う

熱流束変化の計測 (京大・大阪府大)

- 境界プラズマ・ダイバータプラズマのイオン・電子エネルギー分布計測

- イオンセンシティブプローブによる境界プラズマのイオン温度計測 (京大)

- ダイバータ用マルチグリッド型静電プローブアレイの開発 (準備)

連携研究課題 – First Phase – (2)

境界プラズマ・ダイバータプラズマの 能動的制御へ向けた基礎研究

Heliotron J

IAE, Kyoto University

• 境界プラズマ・ダイバータプラズマ制御

– 粒子補給手法の最適化

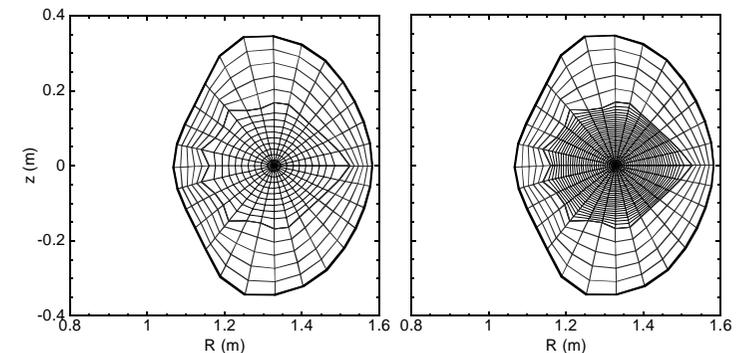
- 開放端磁場プラズマにおけるリサイクリング挙動と粒子供給の最適化に関する研究（筑波・京大）
- ヘリオトロンJにおけるマルチチャンネルH α /D α 線放射分布計測を用いた粒子補給の最適化（京大・筑波）

– 境界領域における電場制御

- Heliotron J装置における電極バイアスによる径方向電場制御（京大・東北大・NIFS）

– エルゴディック層を含む領域でのプラズマ輸送予測の高精度化

- 三次元シミュレーション・コードによる予測・モデル開発（京大・筑波・NIFS）
- プラズマ回転とヘリカル磁場高調波成分
- 詳細な境界プラズマ計測データの蓄積（京大・筑波）



先進ダイバータ概念開発へ向けたヘリカル特有の
境界・ダイバータ領域における熱・粒子輸送の理解と制御手法の開発

1. 境界・ダイバータ領域における熱・粒子輸送

- 揺動・乱流特性と輸送制御
 - » ETB制御と電位制御
 - » ELMs／Blobs特性と制御
- 不純物輸送制御
- 中性粒子制御
- 非接触プラズマ制御
- 磁力線構造ならびに粒子軌道における統計的挙動の
プラズマ粒子・熱輸送およびその制御に対する効果

2. 先進ダイバータ概念開発

- 先進磁場配位におけるダイバータ構造
- 先進概念ダイバータ

ヘリオトロンJにおける周辺プラズマ研究

- ✓ 双方向型共同研究における筑波大学との
センター間連携研究計画
- 周辺プラズマ中の乱流構造ならびに乱流輸送
- 給(排)気最適化制御
- 周辺/ダイバータプラズマに対する
プラズマ電流ならびにプラズマ回転の影響

周辺部乱流輸送の

- コアプラズマ閉じ込めへの影響
- ダイバータ機能への影響

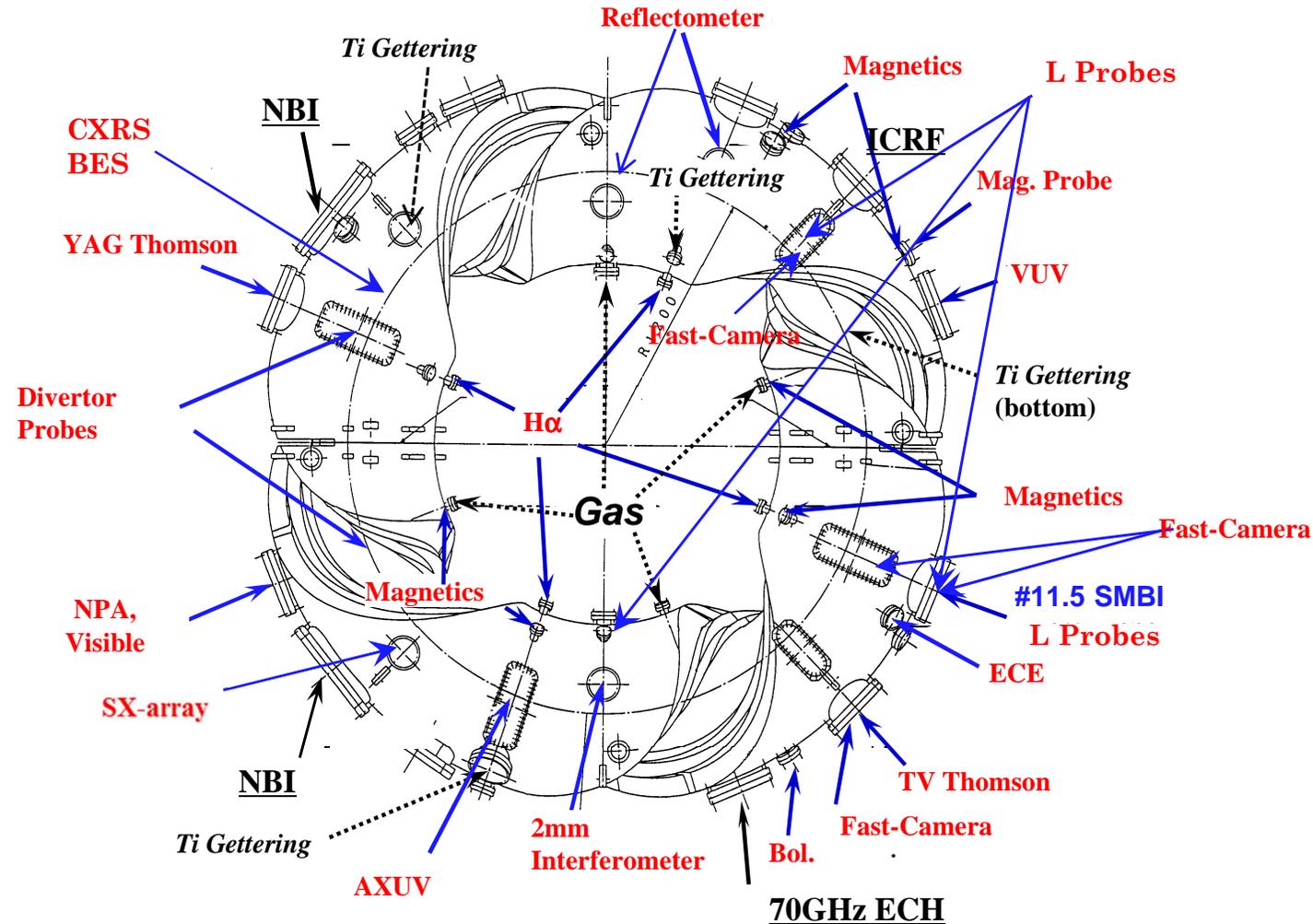


ヘリオトロンJ

主な計測／加熱装置配置

Heliotron J

IAE, Kyoto University

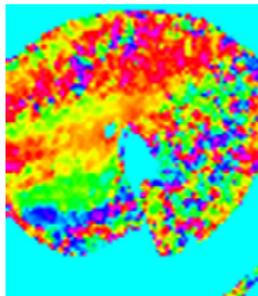


- Heliotron J: a helical-axis heliotron device
 $(\langle R_0 \rangle / \langle a_p \rangle = 1.2 / 0.17 \text{ m}, \langle B_0 \rangle \leq 1.5 \text{ T})$.

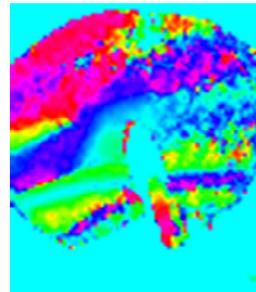
周辺プラズマ中の乱流構造ならびに乱流輸送

- 高速ビデオカメラで観測される
フィラメント(ストライプ?)状周辺プラズマ揺動構造
(径方向からの観測) (N.Nishino)

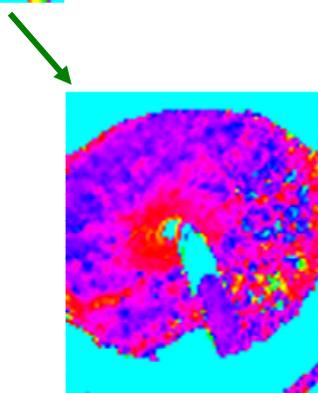
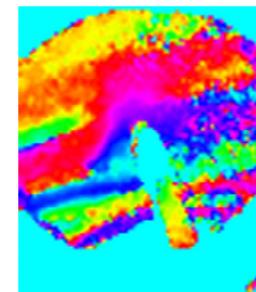
L-mode



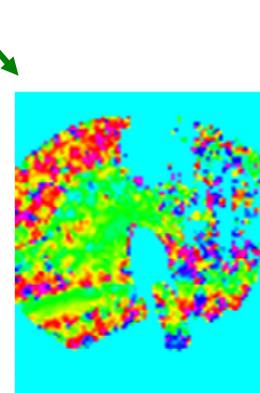
Just after transition



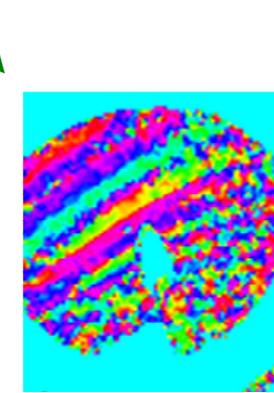
before H-L transition



L-H transition



H-mode



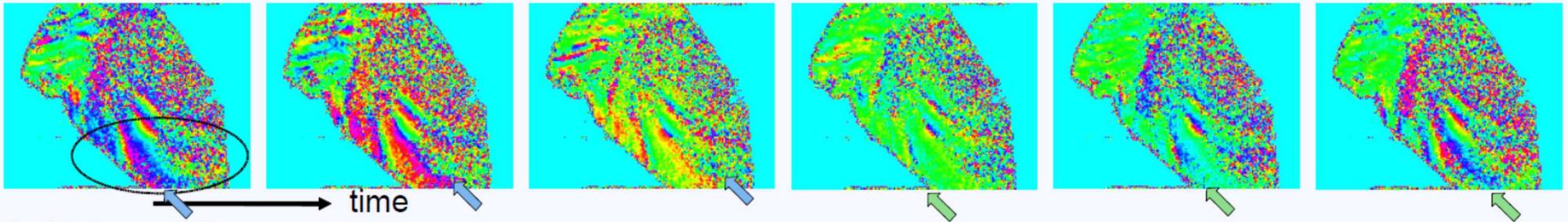
GPI (L-mode)

高速ビデオカメラで観測される フィラメント(ストライプ?)状周辺プラズマ揺動構造 (接線方向からの観測) (N.Nishino)

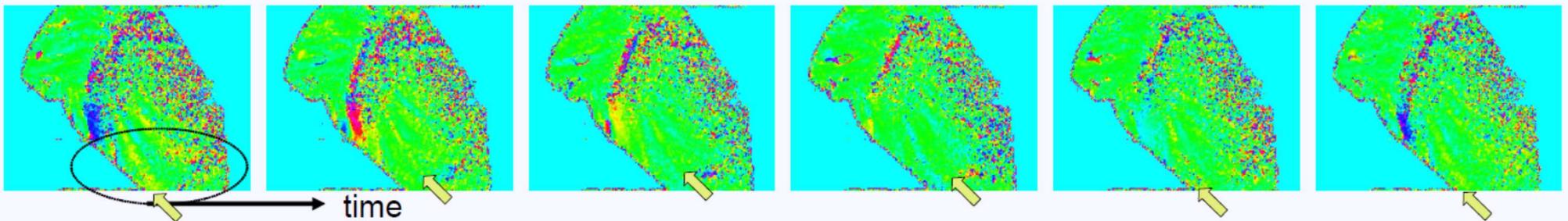
Heliotron J

IAE, Kyoto University

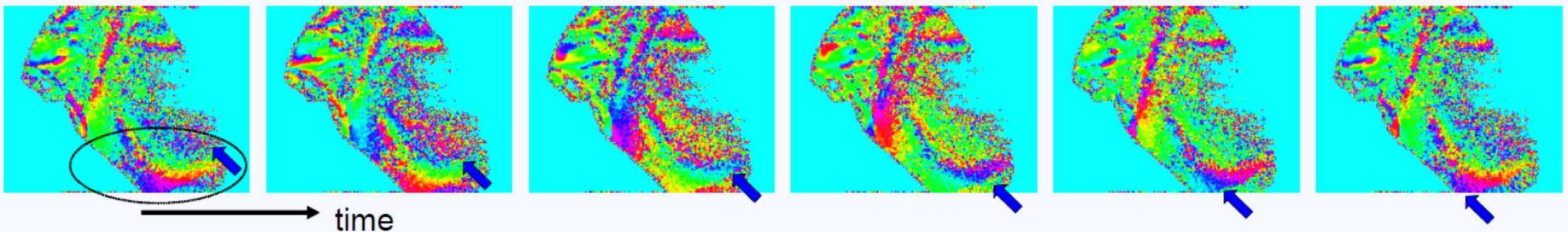
L-mode



L-H transition



H-mode



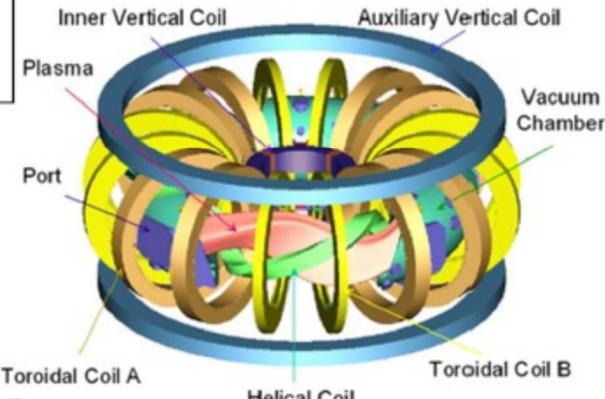
静電プローブシステム

S. Ohshima, M. Takeuchi

Heliotron J

IAE, Kyoto University

Heliotron J
Device

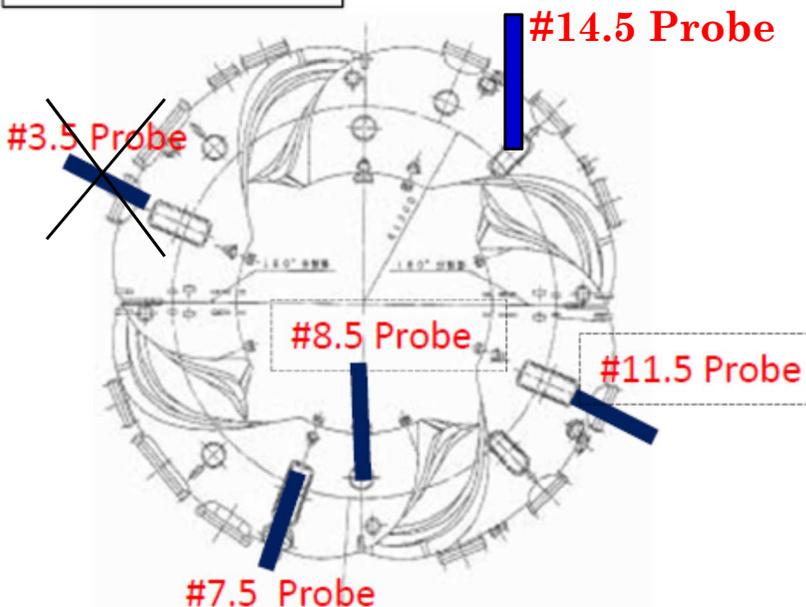


Helical axis heliotron

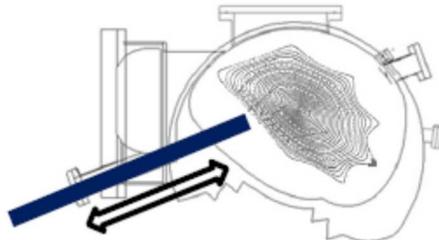
- R=1.2m, a = 0.17m - L=1, M=4
- |B| < 1.5T - Low magnetic shear, ($\Delta\iota/\iota < 0.04$)
- 5 set coils (Helical, Toroidal A (TA), Toroidal B (TB) and Two vertical coils (AV, IV))

NBI (30kV, 0.7MWx2), ECH(70GHz, 0.4MW), ICRF(16-24MHz, 0.4MWx2)

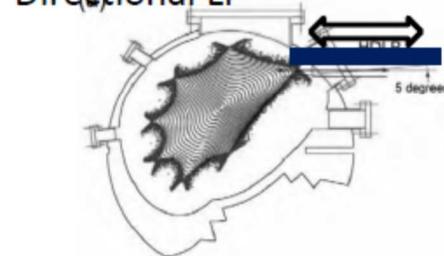
Probe Systems
in Heliotron J



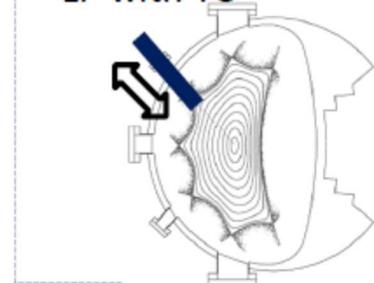
#3.5 O-point
LP with MP



#7.5 X-point
Directional LP



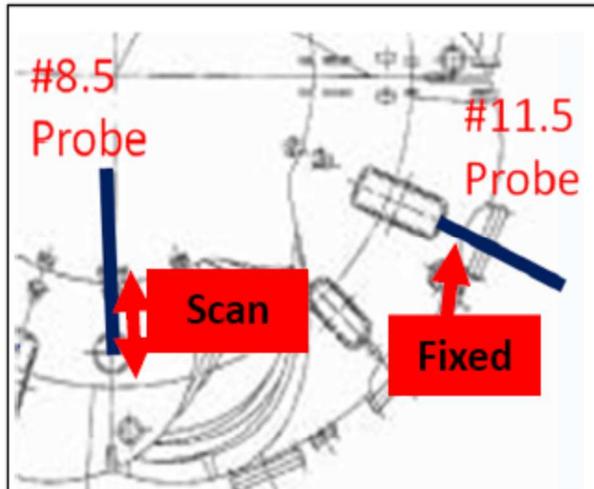
#8.5 X-point
LP with TC



#11.5 O-point
Multi-channel Probe

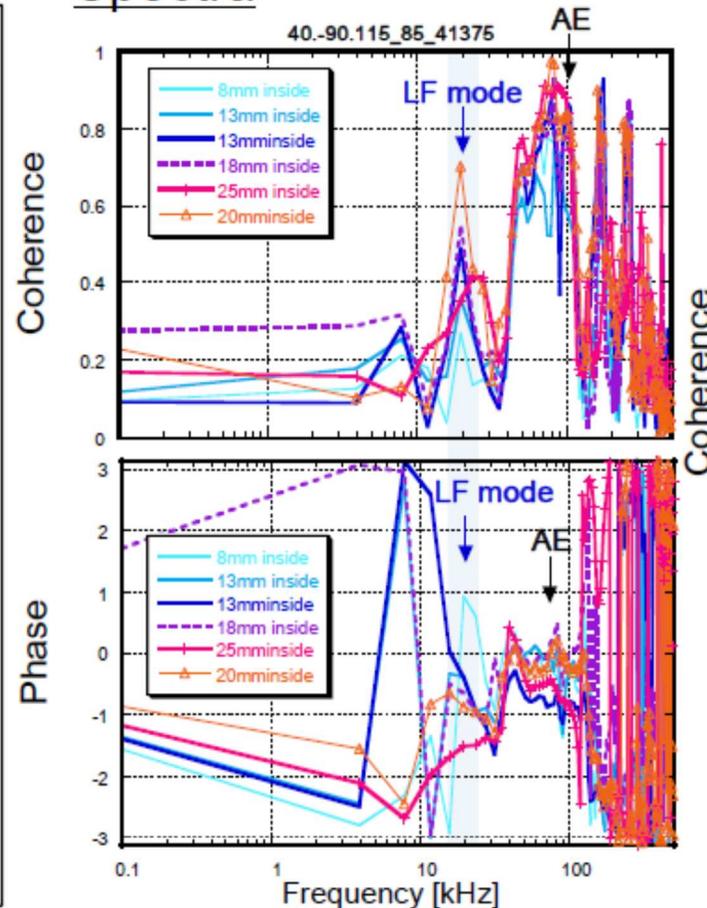


Radial structure of the LF mode

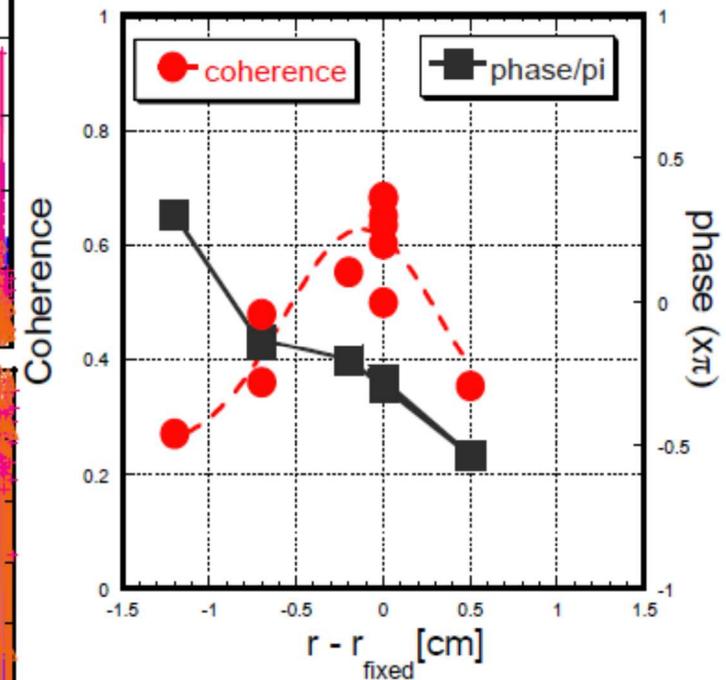


In order to investigate radial structure of these fluctuations, one probe at #11.5 was fixed, and other probe at #8.5 was scanned radially

Spectra



Radial structure



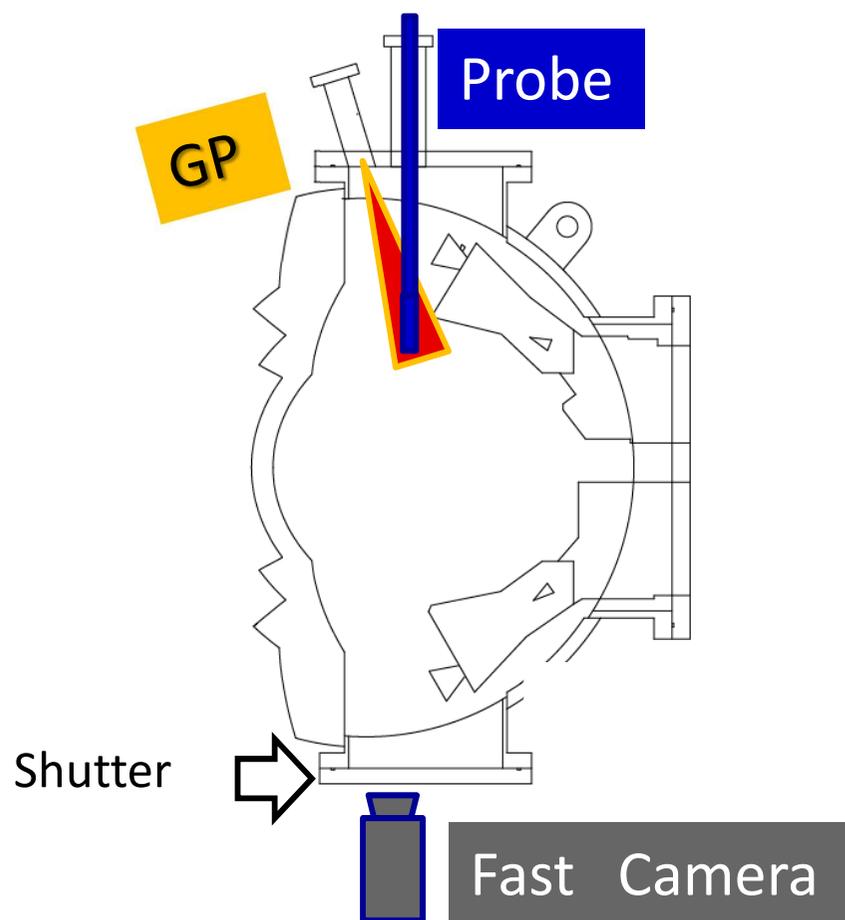
- ✓ For HF modes, coherence and phase are constant in radial direction.
- ✓ Although the LF mode has long range correlation, it has small scale structure in radial direction. ---> meso-scale structure.

Objectives of new configuration at #14.5 port

S. Oshima, J. Kasajima, L. Zang, N. Nishino

Heliotron J

IAE, Kyoto University



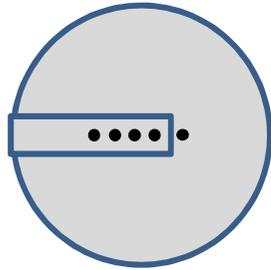
高速カメラによる二次元計測

プローブによる定量的計測を組み合わせることができる。

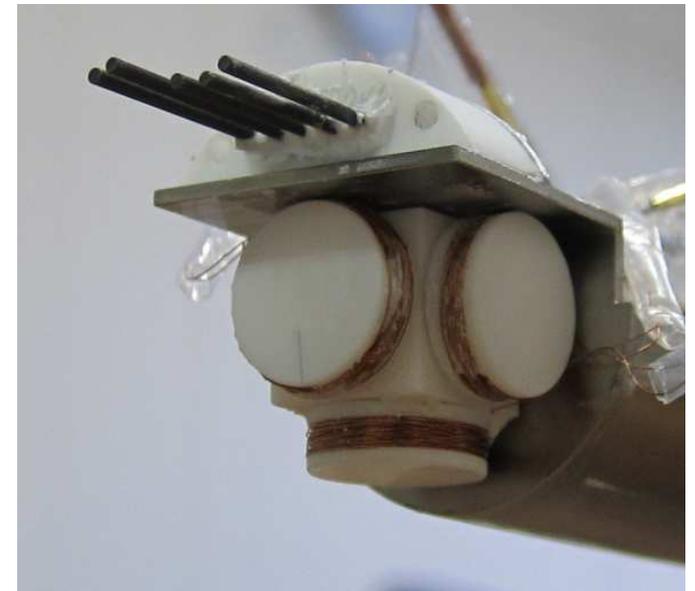
- ✓ フィラメント構造の構造・その特性を観測
- ✓ プローブ内蔵の磁気プローブによる揺動の静電 \leftrightarrow 磁場な特性の切り分け。
⇒ 複合プローブによるLCFS近辺の実測。
- ✓ 高速カメラとの相関、他プローブとの相関の検証。
⇒ フィラメント揺動が、
局所/非局所的な揺動であるのか？
- ✓ フィラメント構造と輸送との関連は？

#14.5新設複合プローブ

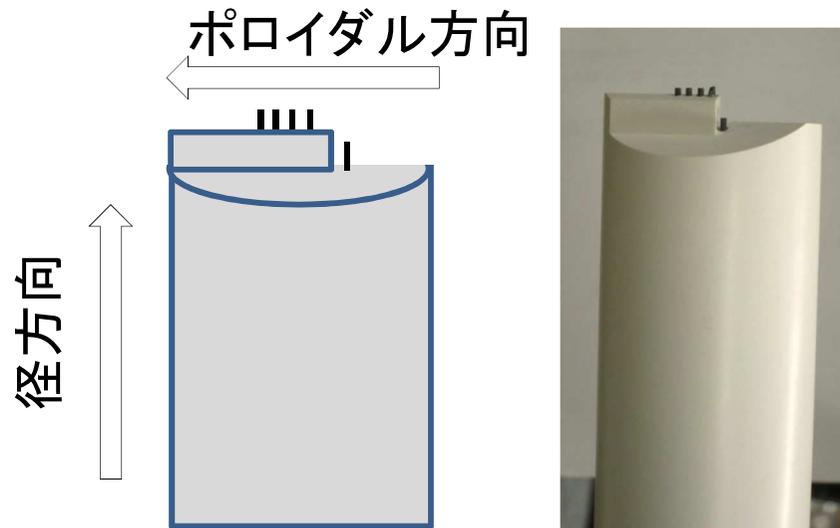
プローブ構造



内蔵磁気プローブ



B_r, B_θ, B_ϕ 計測可能



Triple probeとして使用可。

E_r, E_θ 評価可能 → $\Gamma, R.S.$ の評価可能

ヘリオトロンJにおける高速カメラを用いた周辺プラズマ揺動の可視化

J. Kasajima, N. Nishino

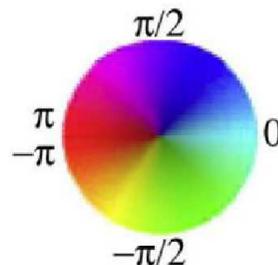
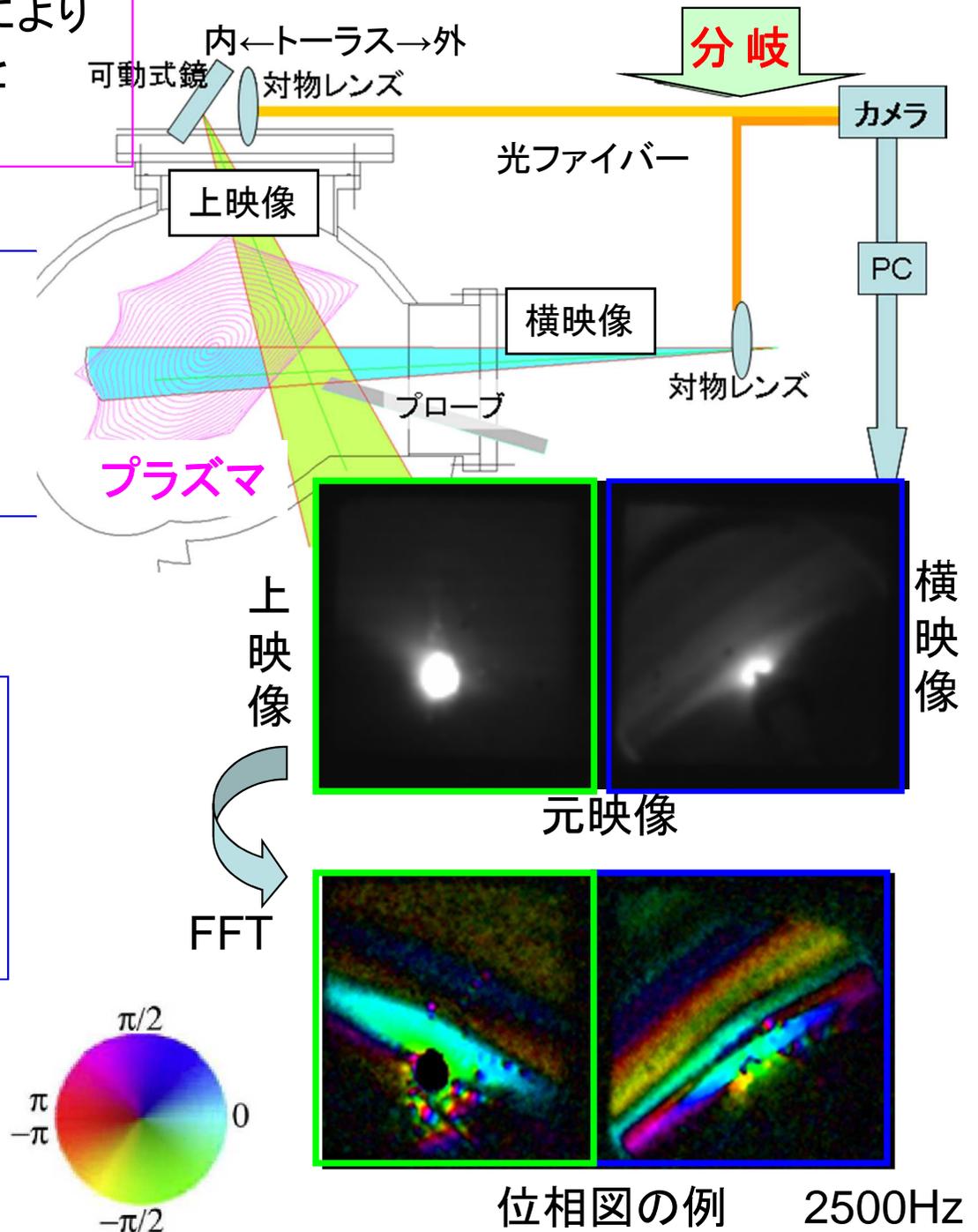
目的 高速カメラ1台による**2方向同時計測**により
高い精度で周辺プラズマ揺動の構造と
その動きの可視化を目指す

装置 分岐光ファイバーにより2方向画像を
同期して撮影
(nac製fx-K5 /
20kfps, 288pixel × 240pixel)

解析方法

各ピクセルの発光強度をFFT解析し、
位相を色で表現→位相図

$$I(\omega) = |I(\omega)| \exp(j(\omega t + \phi(\omega)))$$



ヘリオトロンJにおける周辺プラズマ研究

- ✓ 双方向型共同研究における筑波大学とのセンター間連携研究計画
- ✓ 周辺プラズマ中の乱流構造ならびに乱流輸送
- 給(排)気の最適化制御
- 周辺/ダイバータプラズマに対するプラズマ電流ならびにプラズマ回転の影響

給排気制御による
プラズマ分布制御並びに周辺プラズマ最適化



ヘリオトロンJにおける給(排)気制御

■ 給気法の最適化

– プラズマ分布制御

» コアプラズマ閉じ込め・

周辺プラズマ・ダイバータ機能の最適化

» 加熱分布制御

– 超音速分子ビーム入射(SMBI)法

» 最適化 ⇔ 短パルス高強度GP法との違い

– ペレット入射法

■ 排気(リサイクリング)制御

– 短パルス実験 → 壁排気の活用

» Ti-getter (現状)

• 実効的リサイクリング率は?

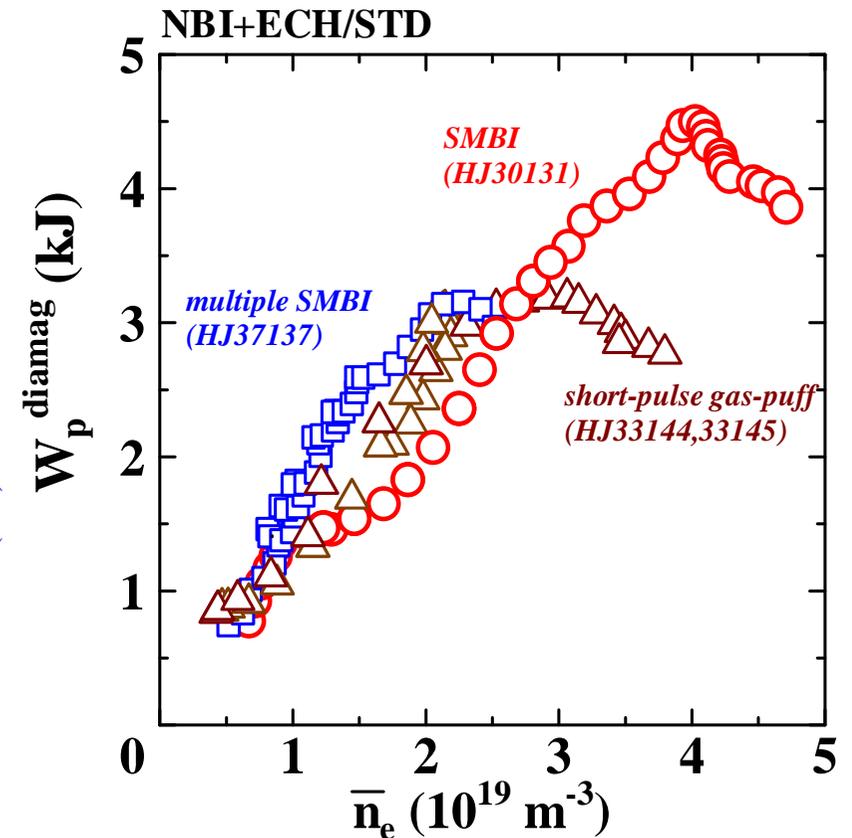
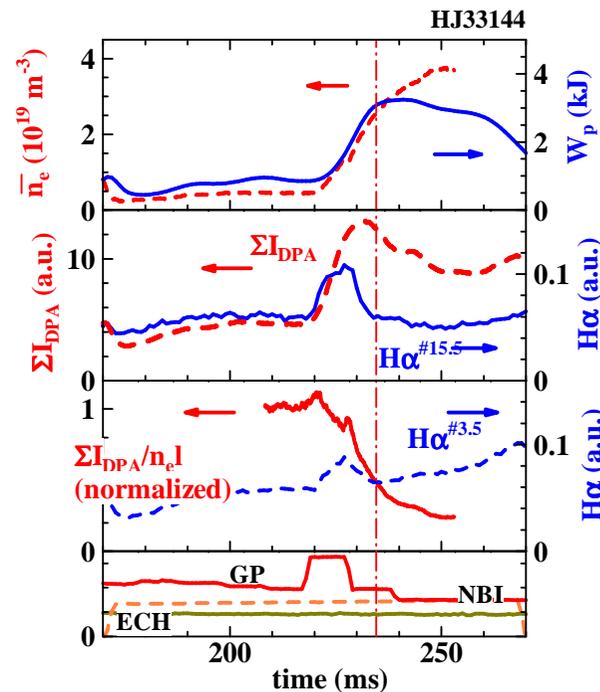
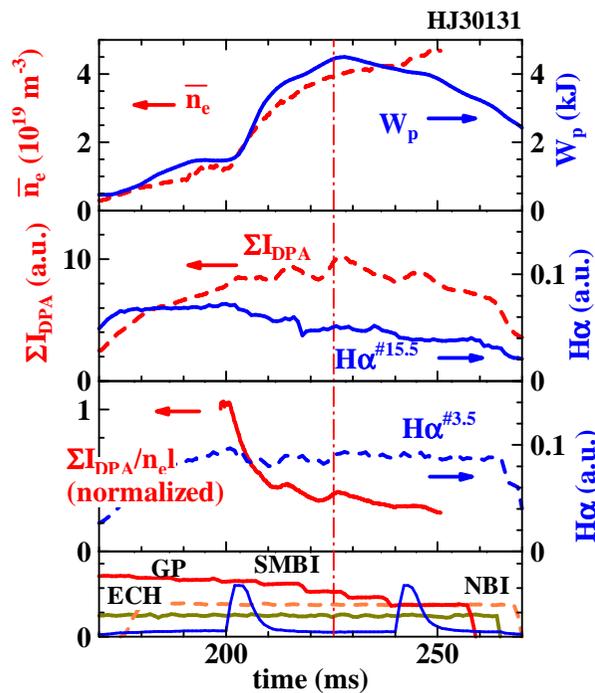
» B or Li コーティングの検討

SMBI can expand the operation region of Heliotron J

(ECH(~ 0.35 MW) +NBI($P_{\text{port}} \sim 0.6$ MW) plasma)

Heliotron J

IAE, Kyoto University

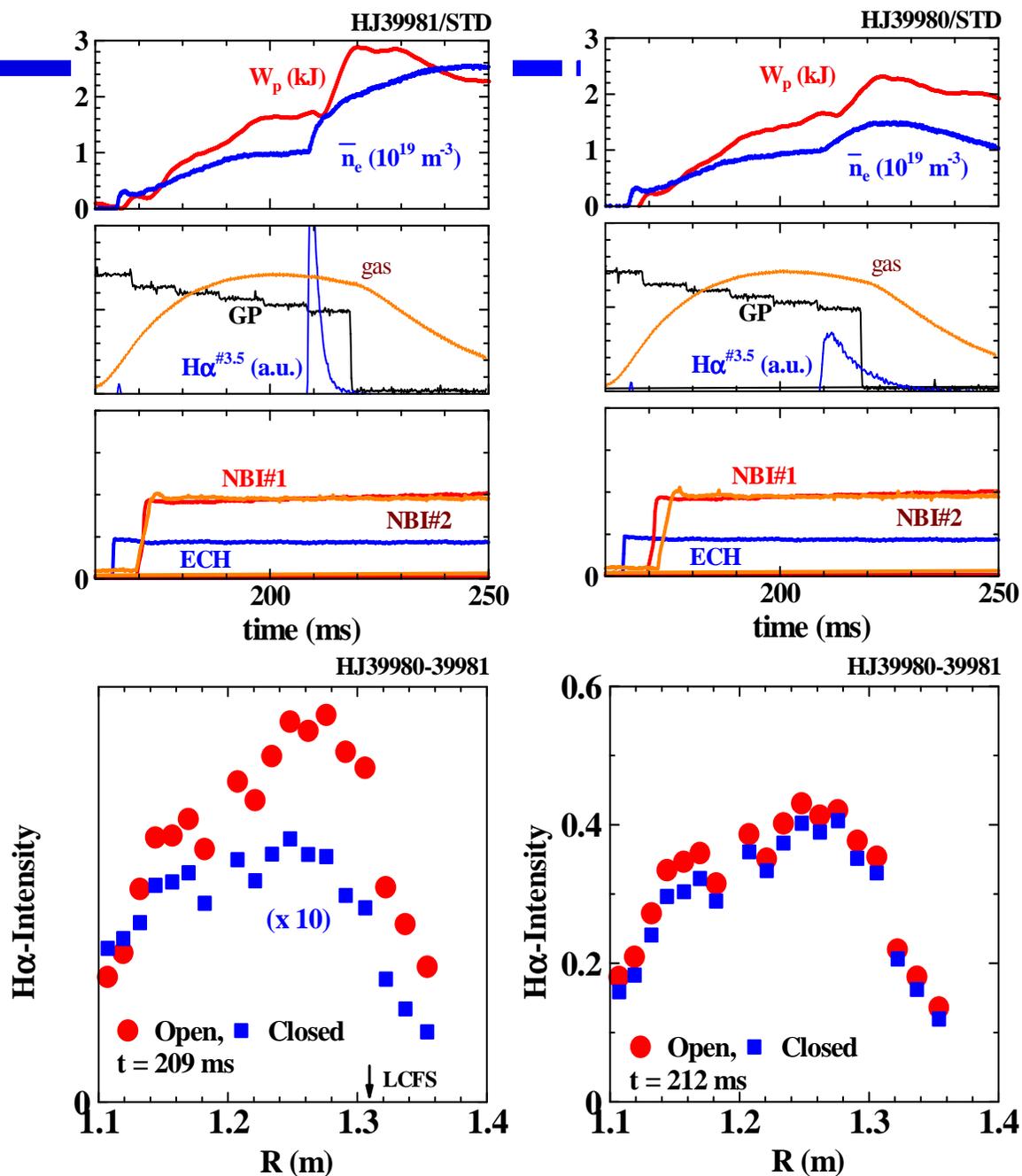


- The stored energy reached ~ 4.5 kJ, about 50 % higher than the max. one achieved so far under the normal gas-puff fueling condition in Heliotron J.
- The short & intense GP cannot increase the stored energy beyond the GP max.
- It is interesting to note that the response of ΣI_{DPA} to density increase is quite different between these two discharges.

Comparison between direct and non-direct SMBI

Heliotron J

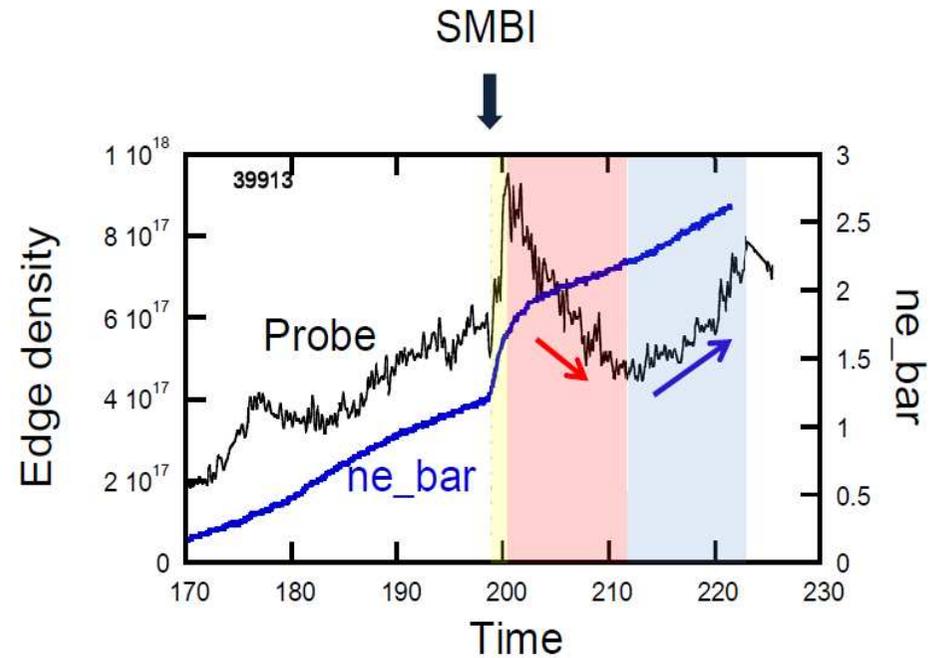
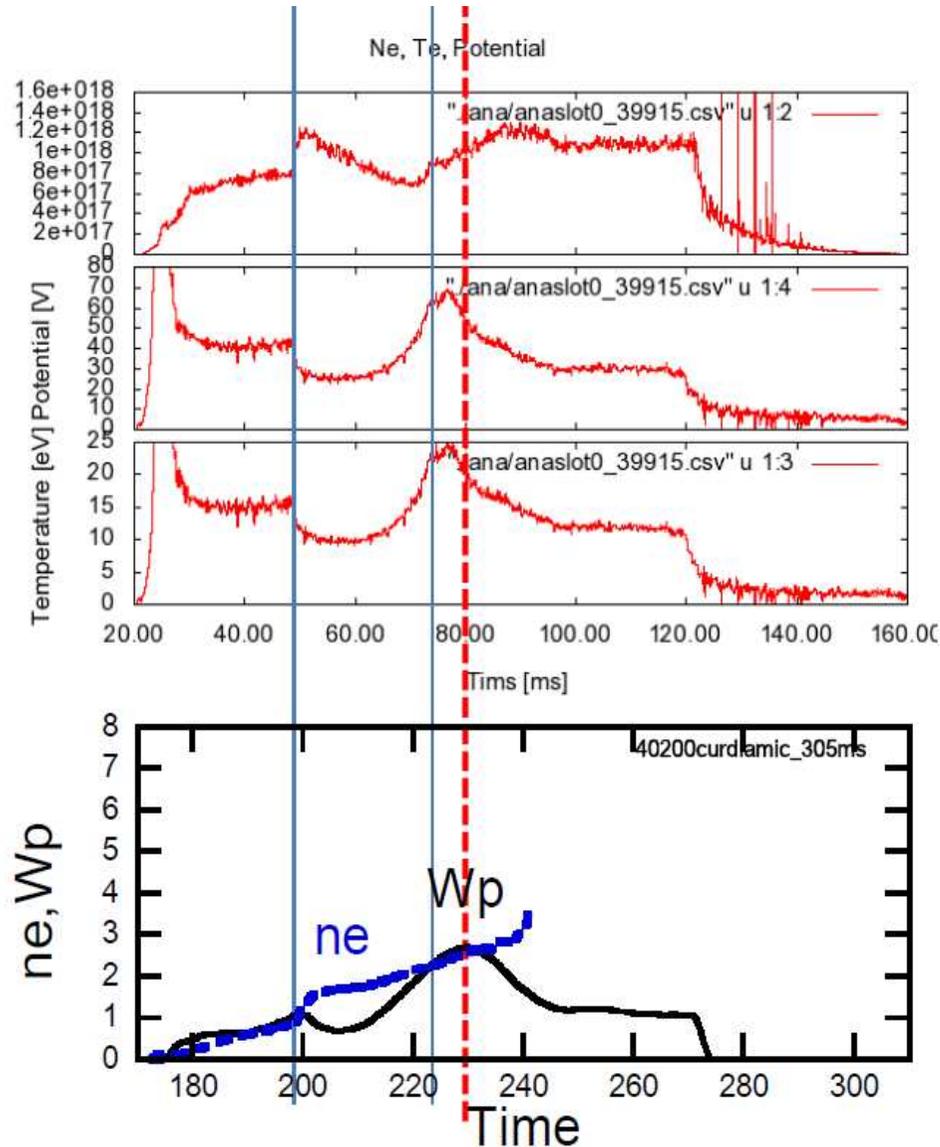
- Advantage of SMBI fueling is confirmed by comparing the plasma performance between OPEN and CLOSED shutter cases.
- Top: Time traces of line-averaged density, stored energy for ECH+NBI plasmas between two cases of open (a) and closed (b) conditions of the shutter in front of SMBI. Bottom: Chord profiles of $H\alpha$ at the SMBI section (#3.5) for the open shutter case (●) and the closed case (■) at two different timings, 209 and 212 ms.



Edge Plasma Response to SMBI

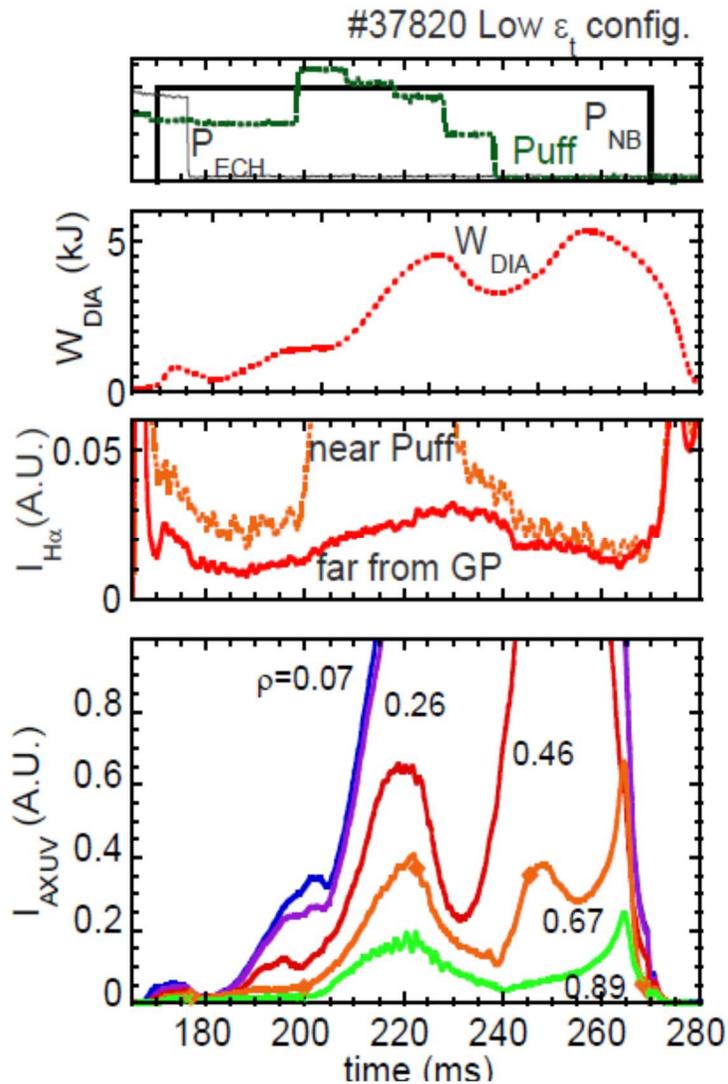
Heliotron J

IAE, Kyoto University



(S. Ohshima)

Large increment of plasma stored energy after a short pulse intense GP is also observed.



Example of Intense GP Discharge. ($P_{NBI} \sim 1$ MW)

- Large increment of plasma stored energy after a short-pulse intense GP has been observed in NBI (or NBI+ECH) plasma.
- The increment in W_p is observed after a short-pulse intense GP ($t \sim 200$ ms), but W_p starts to decrease during the heating pulse.
 - *This decrease of W_p is probably due to the cooling in the outer region of plasma caused by excess fueling.*
- However, W_p started to increase again ($t \sim 235$ ms) and finally reached to over 5 kJ, which is higher than the first peak of W_p .
 - *Rapid increase in the edge AXUV intensity in the same timing might suggest the recovery of the energy balance in the edge region.*

ヘリオトロンJにおける周辺プラズマ研究

- ✓ 双方向型共同研究における筑波大学とのセンター間連携研究計画
- ✓ 周辺プラズマ中の乱流構造ならびに乱流輸送
- ✓ 給(排)気最適化制御
- 周辺/ダイバータプラズマに対するプラズマ電流ならびにプラズマ回転の影響

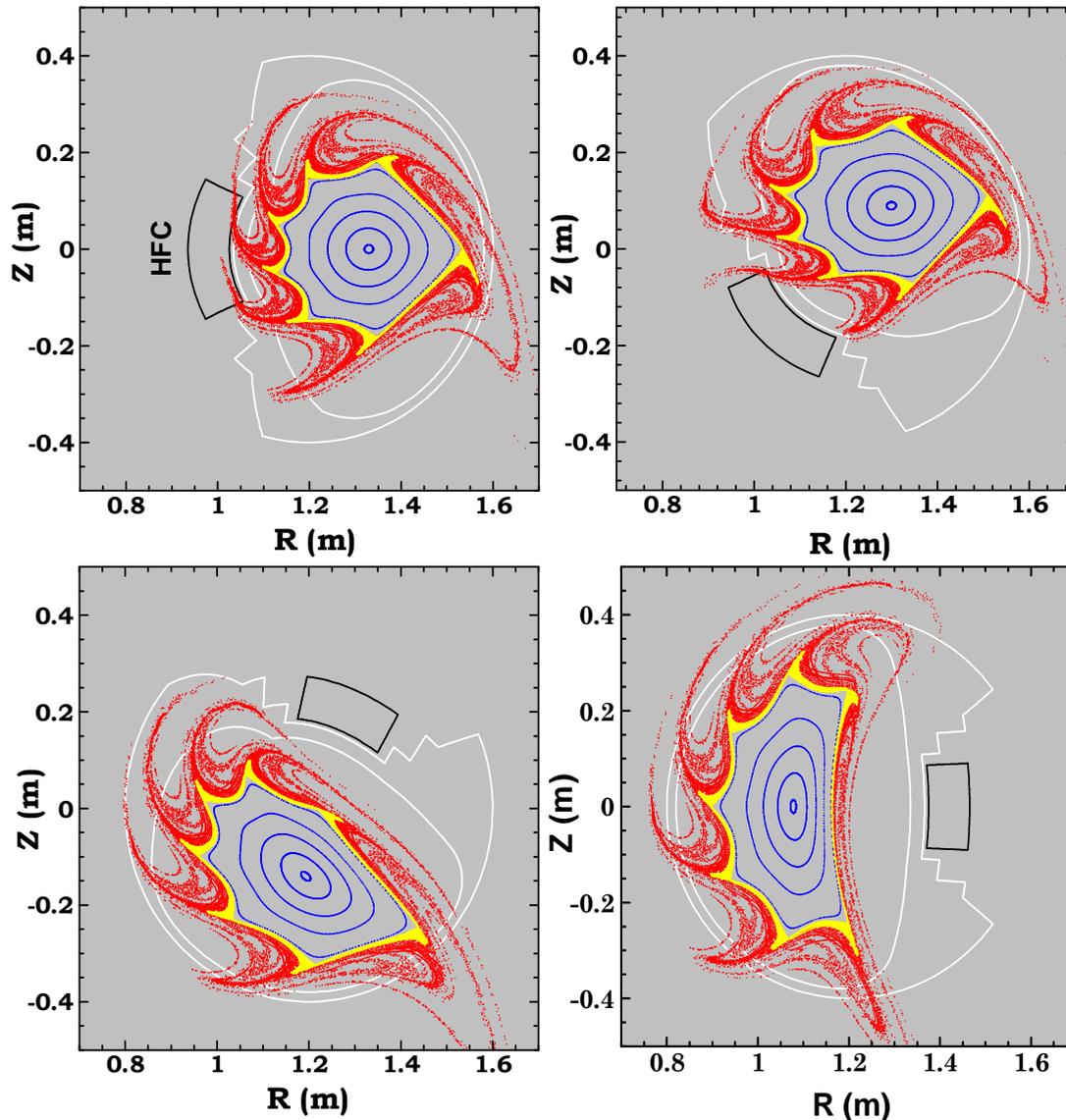
**Divertor Footprintsは
静止しているか？**



Edge Magnetic Field Structure for STD Configuration

Heliotron J

IAE, Kyoto University



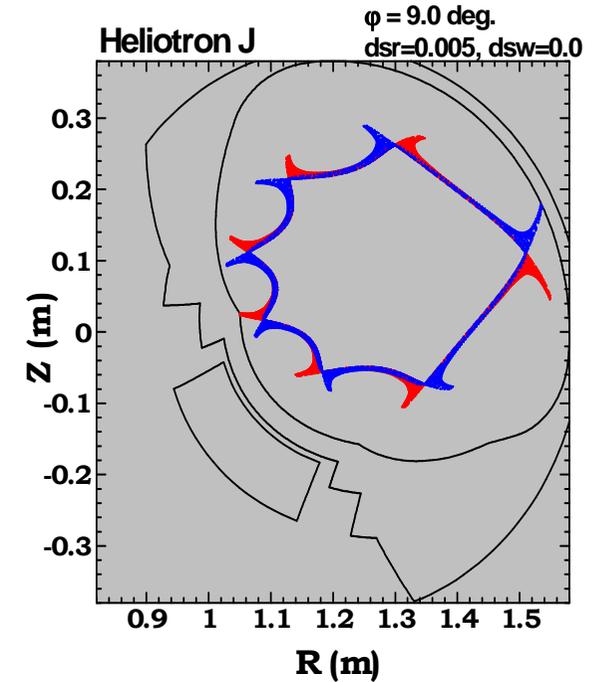
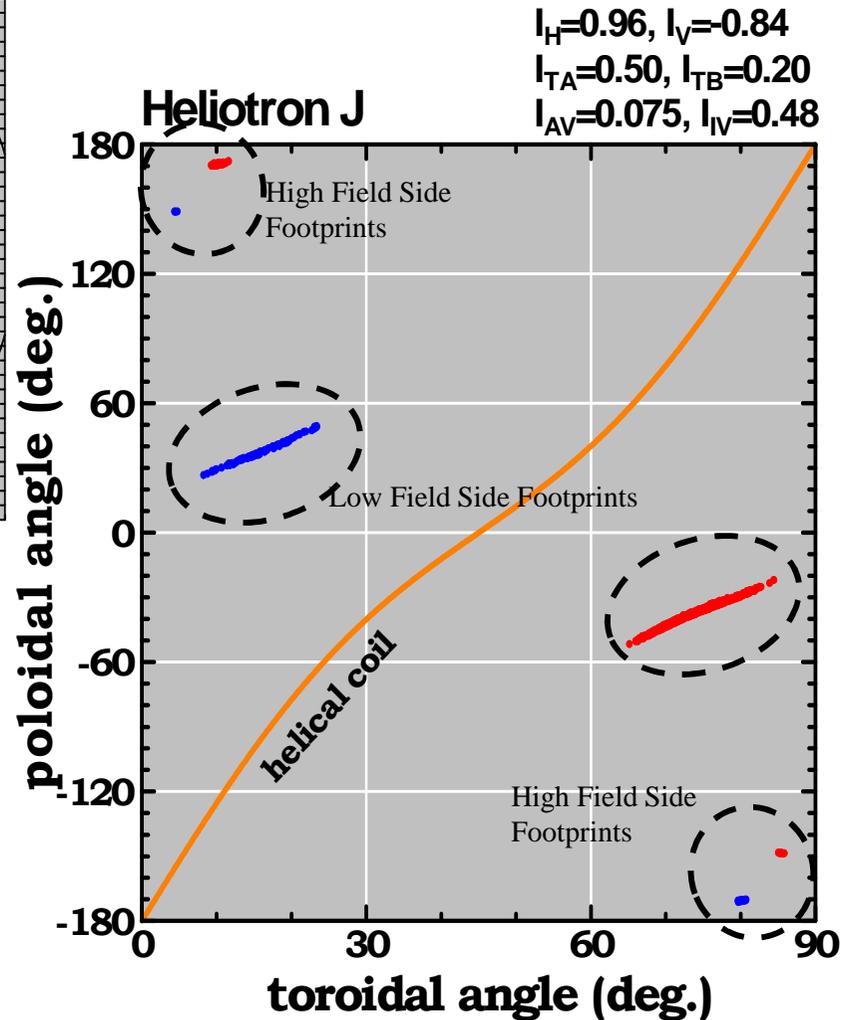
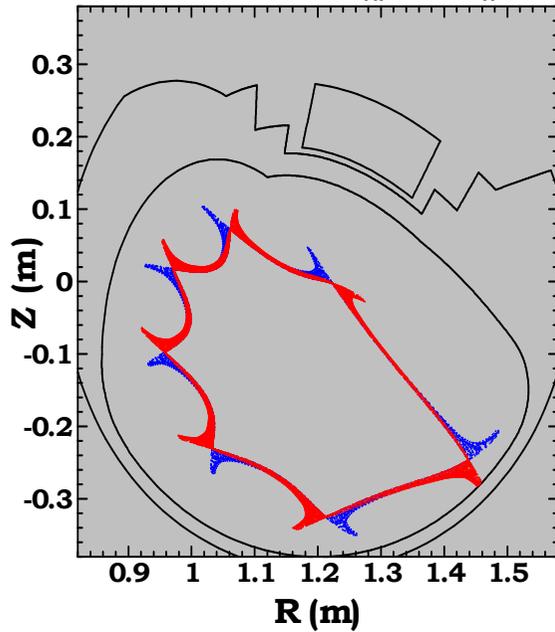
- “Ergodic” state of edge field lines (red) are similar to the conventional heliotron configuration.
- The edge field structure becomes rather simple (yellow) when the vessel wall is taken into account.
- The connection length of the divertor field lines is much shorter than the island divertor case.

The divertor footprints are localized in toroidal direction.

Heliotron J

IAE, Kyoto University

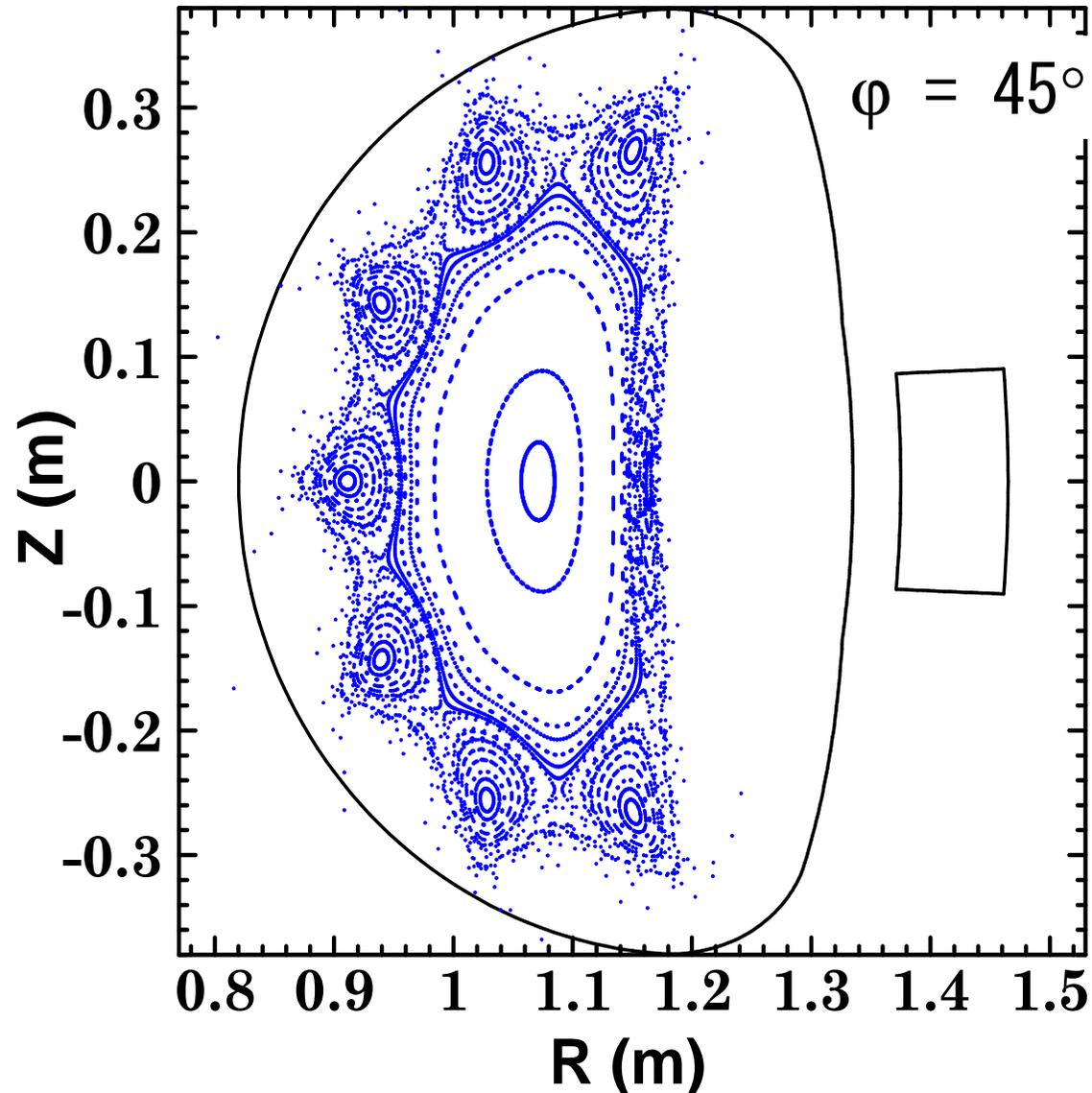
$I_H=0.96, I_V=-0.84$
 $I_{TA}=0.50, I_{TB}=-0.20$
 $I_{AV}=0.075, I_{IV}=0.48$



One Candidate for Island Divertor

Heliotron J

IAE, Kyoto University



- Another $m=8/n=4$ islands around $\iota/2\pi \approx 0.5$ surface.
- Large confinement area and middle island size.
 - Almost no clearance on the HFC side ($\phi \approx 10^\circ$).
➔ Need a Target Plate on the Opposite Side to the HFC.

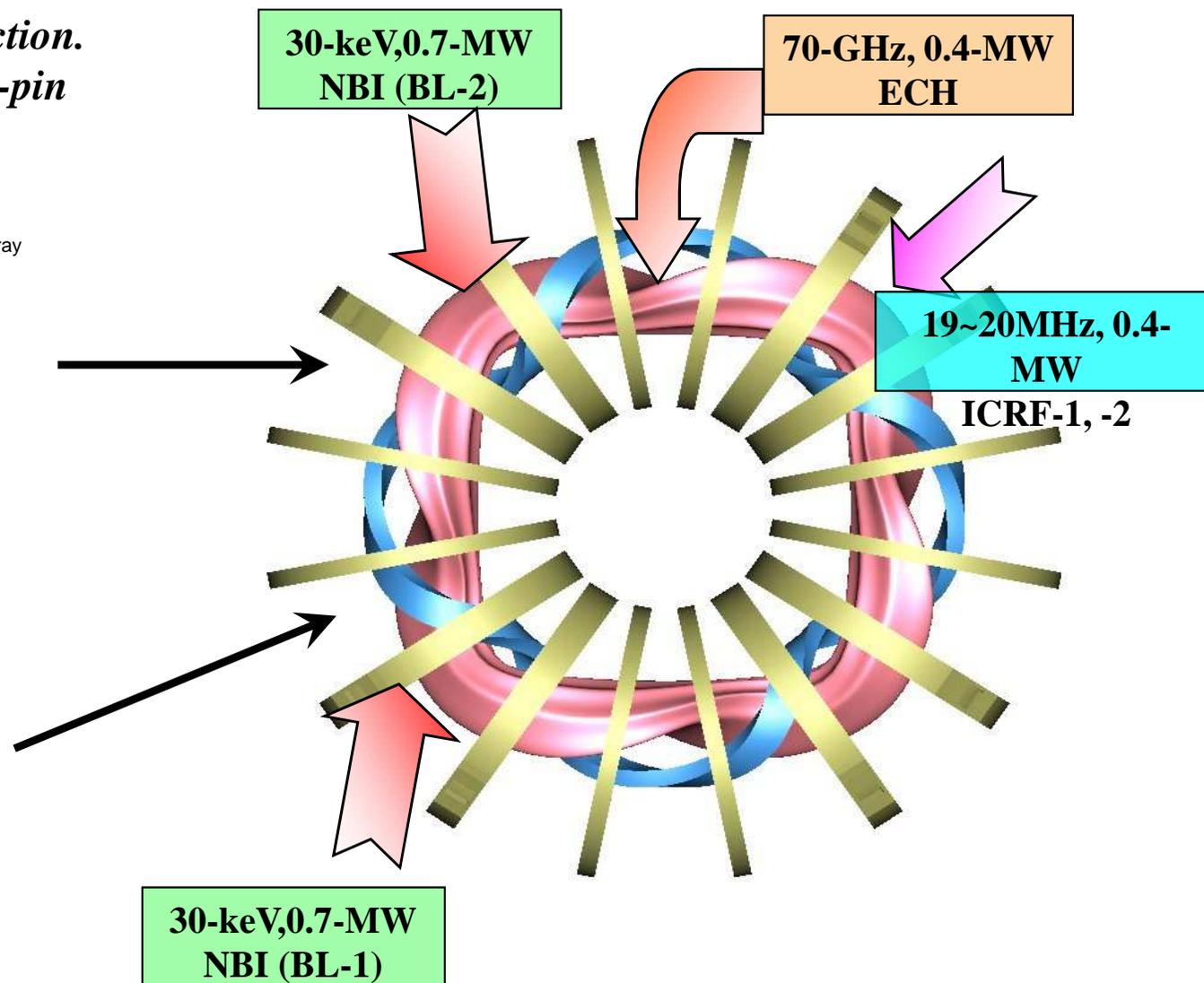
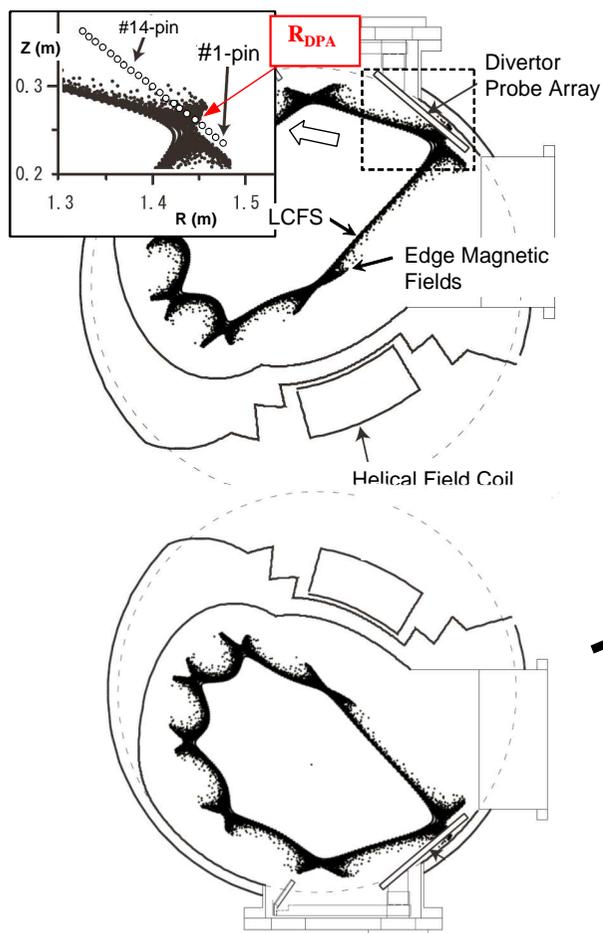
周辺／ダイバータプラズマに対する プラズマ電流ならびにプラズマ回転の影響

Divertor Footprintsは静止しているか？

Heliotron J

IAE, Kyoto University

*Poincaré plot of the edge field lines at
the divertor probe array section.
The inset shows the probe-pin
positions.*



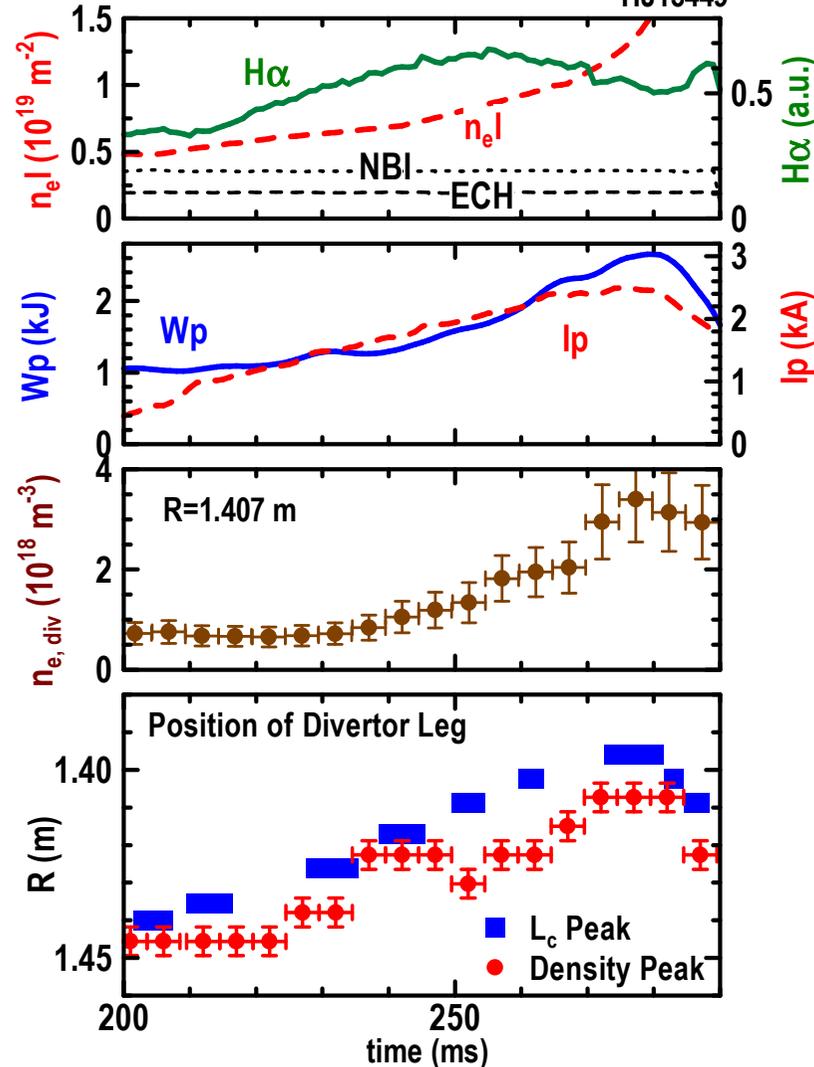
Experiment

ECH (≈ 0.3 MW) + NBI (≈ 0.7 MW, co-injection) @ STD

Heliotron J

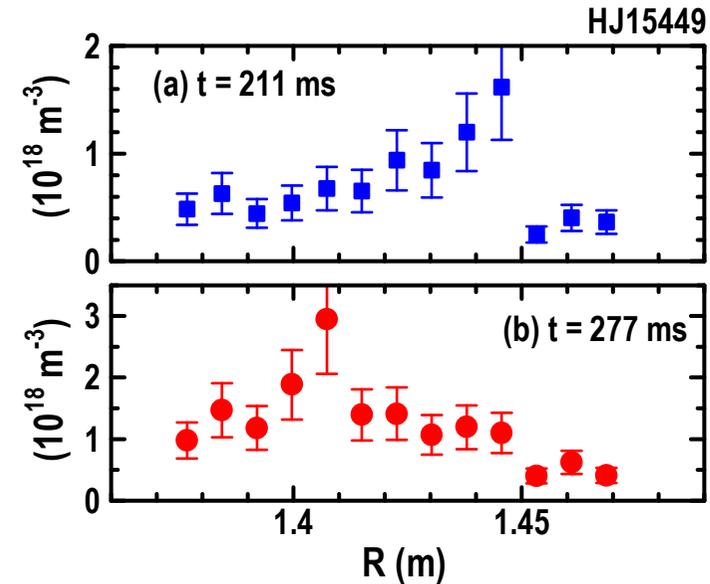
HJ15449

IAE, Kyoto University



■ The observed non-inductive toroidal plasma current is gradually increases as increase of the stored energy.

– In the density range shown in the figure, the observed plasma current is considered to mainly consist of the bootstrap current and the NB induced current.



■ The profiles of the diverted plasma density at $t = 211$ and 277 ms.

– At 211 ms, the density distribution is consistent with that expected from the vacuum field topology.
 – At 277 ms, the density peak position shifts inward about 4 cm compared to the position at 211 ms.

■ The overall trend of the density-peak-position shift seems to be well synchronized with the change of W_p or I_p .

電極バイアスシステム

S.Kitajima, et al.

Heliotron J

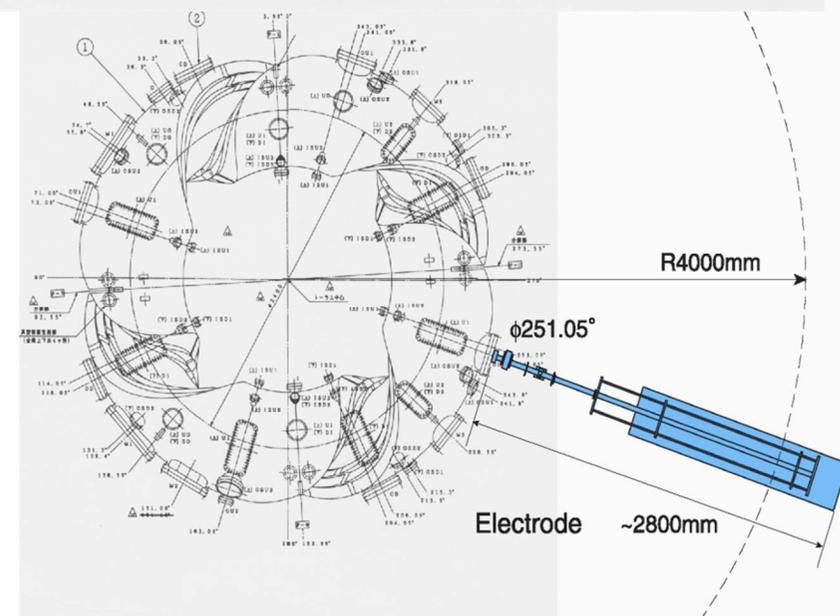
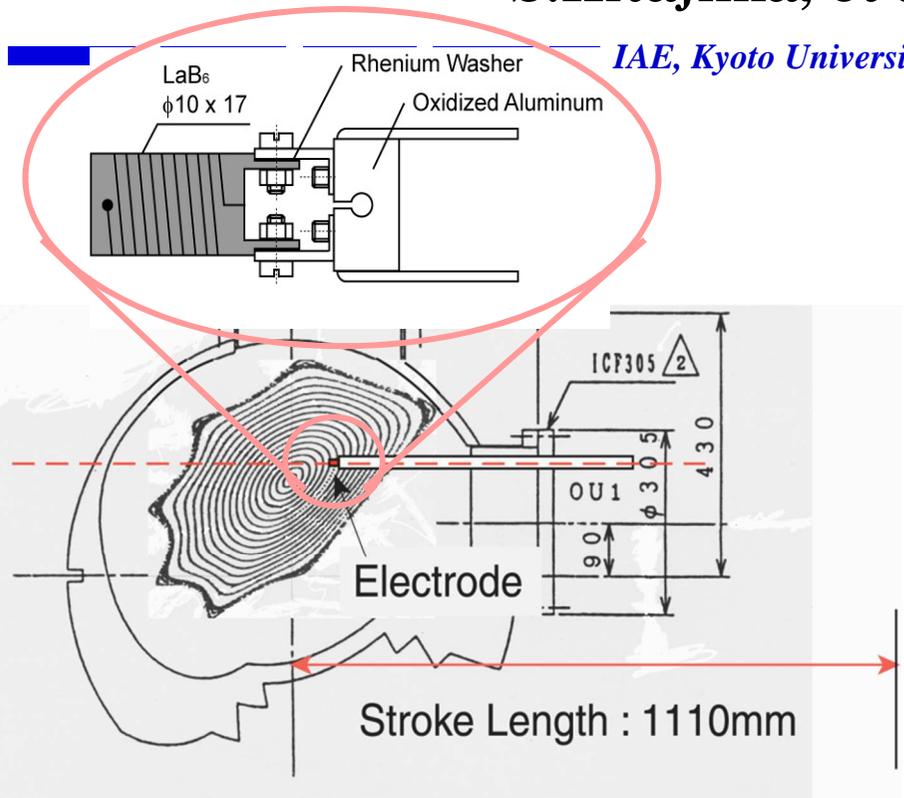
IAE, Kyoto University

■ バイアス用電極 (LaB₆製熱陰極)

- ・電極ヘッド: フィラメント材LaB₆
($\phi = 10\text{mm}$ 、 $l = 17\text{mm}$)
- ・CHS(NIFS)における電極バイアス実験において使用
- ・トロイダル角 $\phi = 251.05^\circ$ 水平ポートより挿入

■ バイアス用電源

- ・運転モード・・・定電圧モード
- ・出力電圧 / 電流・・・ $\sim 400\text{ V} / \sim 100\text{ A}$
(但し、同時達成ではない)
- ・最大出力パルス幅・・・ $\sim 50\text{ ms}$ (矩形波)
- ・真空容器に対して負にバイアス



バイアス実験 (2009年3月実験)

Heliotron J

■ 主な実験条件

磁場配位(磁場条件): $B \sim 1\text{kG}$

加熱条件(プラズマ生成): 2.45GHz

ECH

粒子供給: ガスフロー

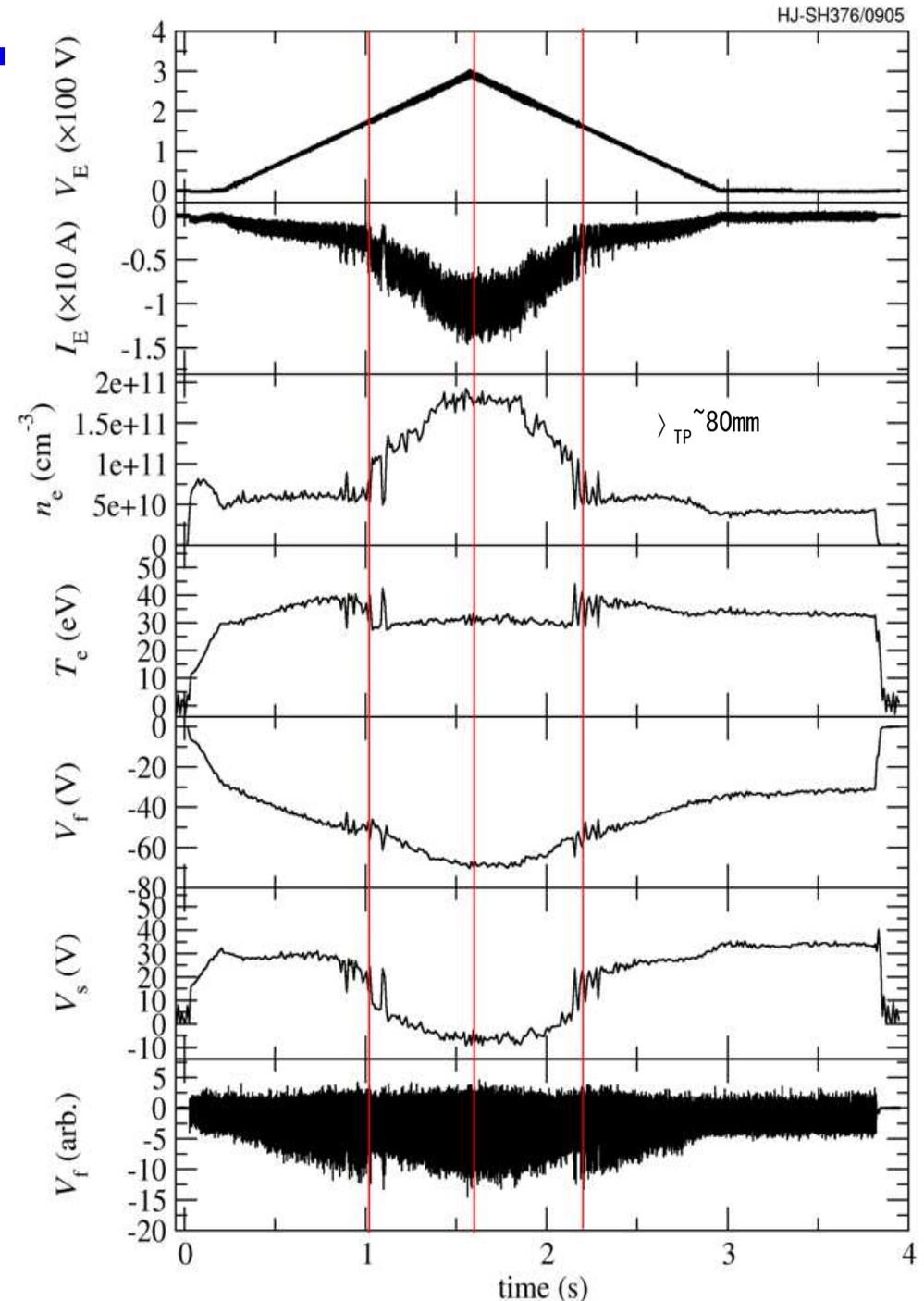
放電ガス種: H_2 、 D_2

電極用電源の増力 (CW 650V 23A)

■ 計測装置

- ・トリプルプローブ
- ・マッハプローブ
- ・ $\text{H}\alpha$ アレイ
- ・ダイバータプローブ

S.Kitajima, et al.

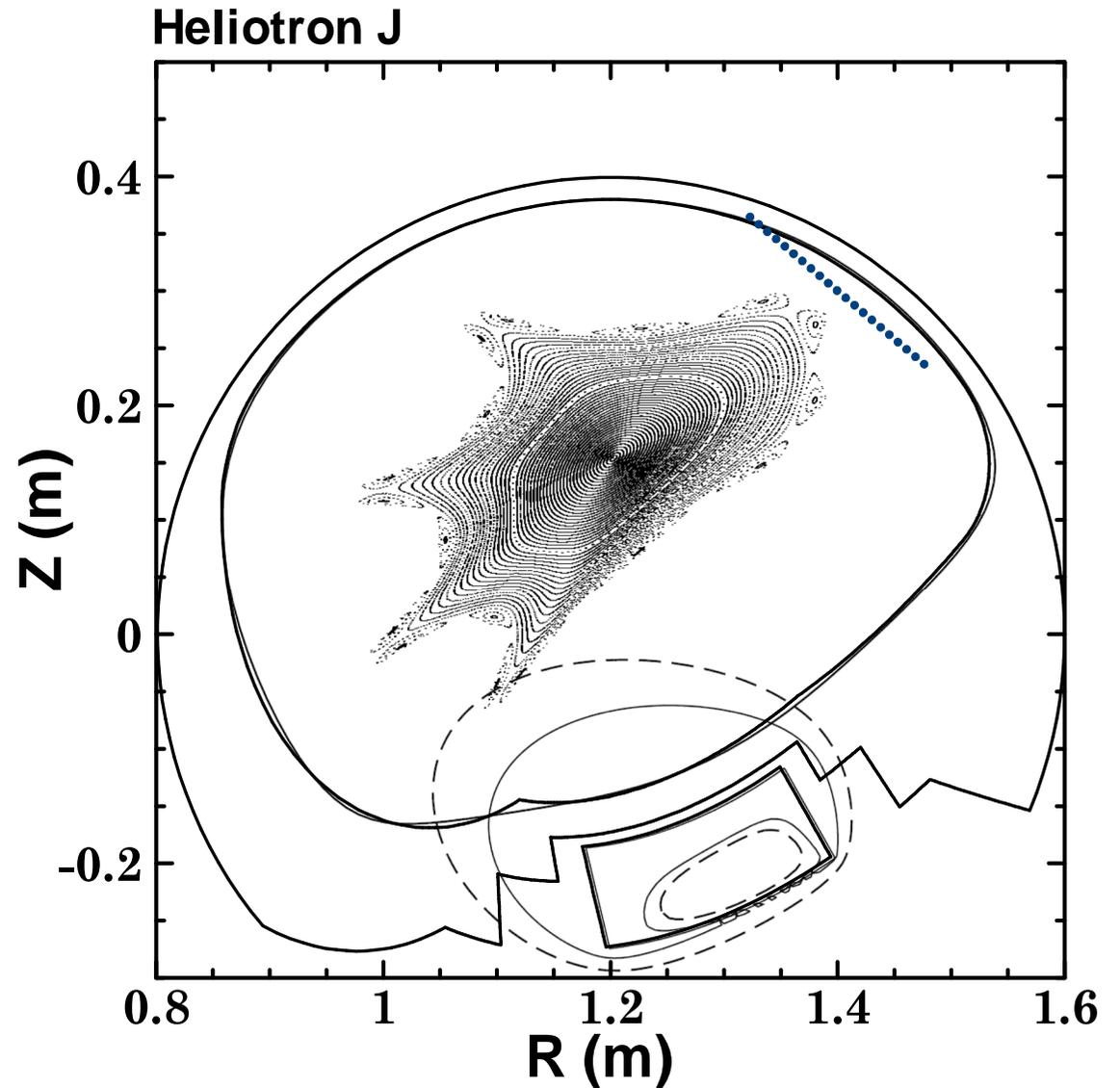
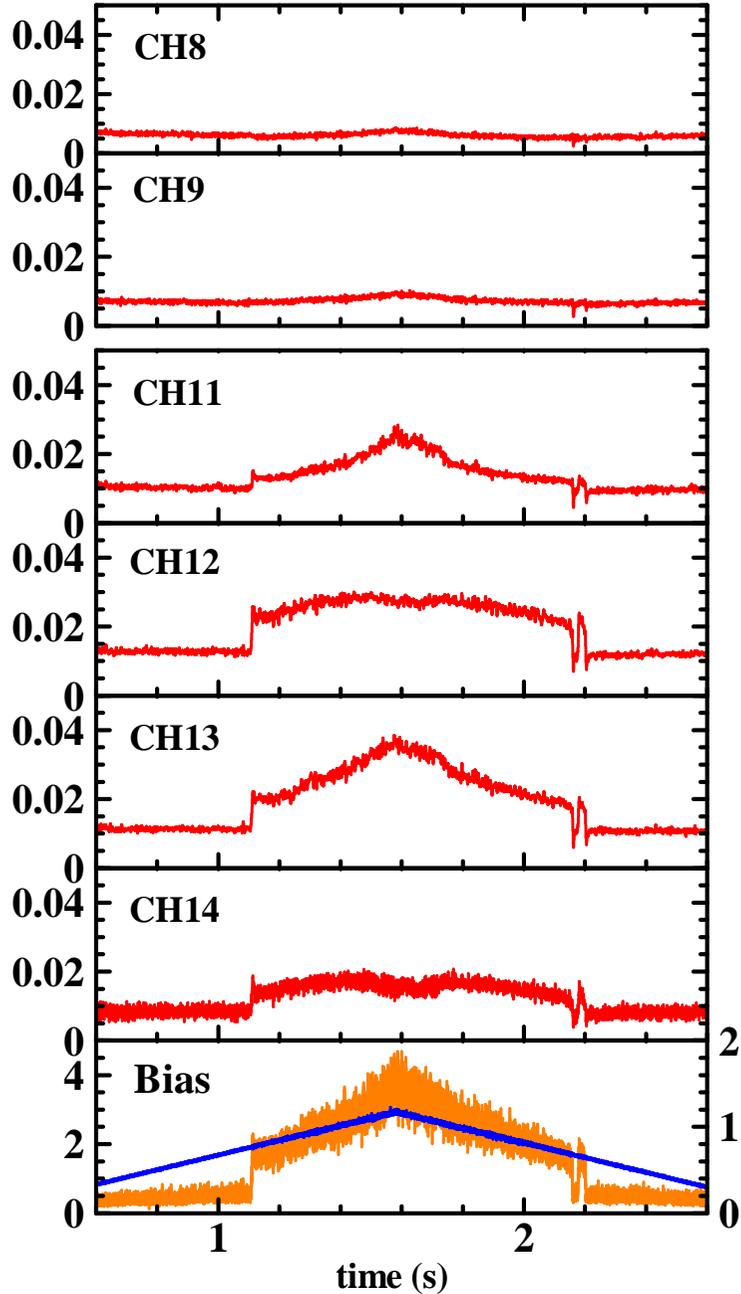


バイアス時のダイバータプラズマ位置変動

Heliotron J

IAE, Kyoto University

Divertor Probe Array HJ-SH365/090305



ヘリオトロンJにおける周辺プラズマ研究

- ✓ 双方向型共同研究における
筑波大学とのセンター間連携研究計画
- ✓ 周辺プラズマ中の乱流構造ならびに乱流輸送
- ✓ 給(排)気最適化制御
- ✓ 周辺/ダイバータプラズマに対する
プラズマ電流ならびにプラズマ回転の影響

共同利用・共同研究の提案大歓迎！

- 双方向型共同研究
- エネルギー理工学研究所
ゼロエミッションエネルギー研究拠点

