

ヘリオトロンJにおける高速カメラ計測と 中性粒子輸送解析

第11回若手科学者によるプラズマ研究会 2008年3月17-19日 日本原子力研究所那珂研究所

京都大学エネルギー理工学研究所

小林進二

Email : kobayashi@iae.kyoto-u.ac.jp

共同研究者：中嶋洋輔¹，東園雄太¹，西野信博²，庄司主³
水内 亨，長崎百伸，岡田浩之，近藤克巳⁴，山本 聡⁵，
鈴木康浩³，中村祐司⁴，村井謙介⁴，花谷 清，保坂勝幸⁴，
佐野史道，

京大エネ理工研，筑波大プラズマ¹，広島大²，核融合研³，
京大エネ科⁴，京大次世代⁵

研究目的・内容

高速カメラを用いたプラズマ診断→周辺プラズマのダイナミクス

- ・ 2次元イメージとして取得され，豊富な情報量
- ・ 物理的解釈，発光領域の同定（SOL～ペデスタル）に工夫が必要
 - 数値計算との組み合わせ
 - 多視線カメラ計測＋画像解析

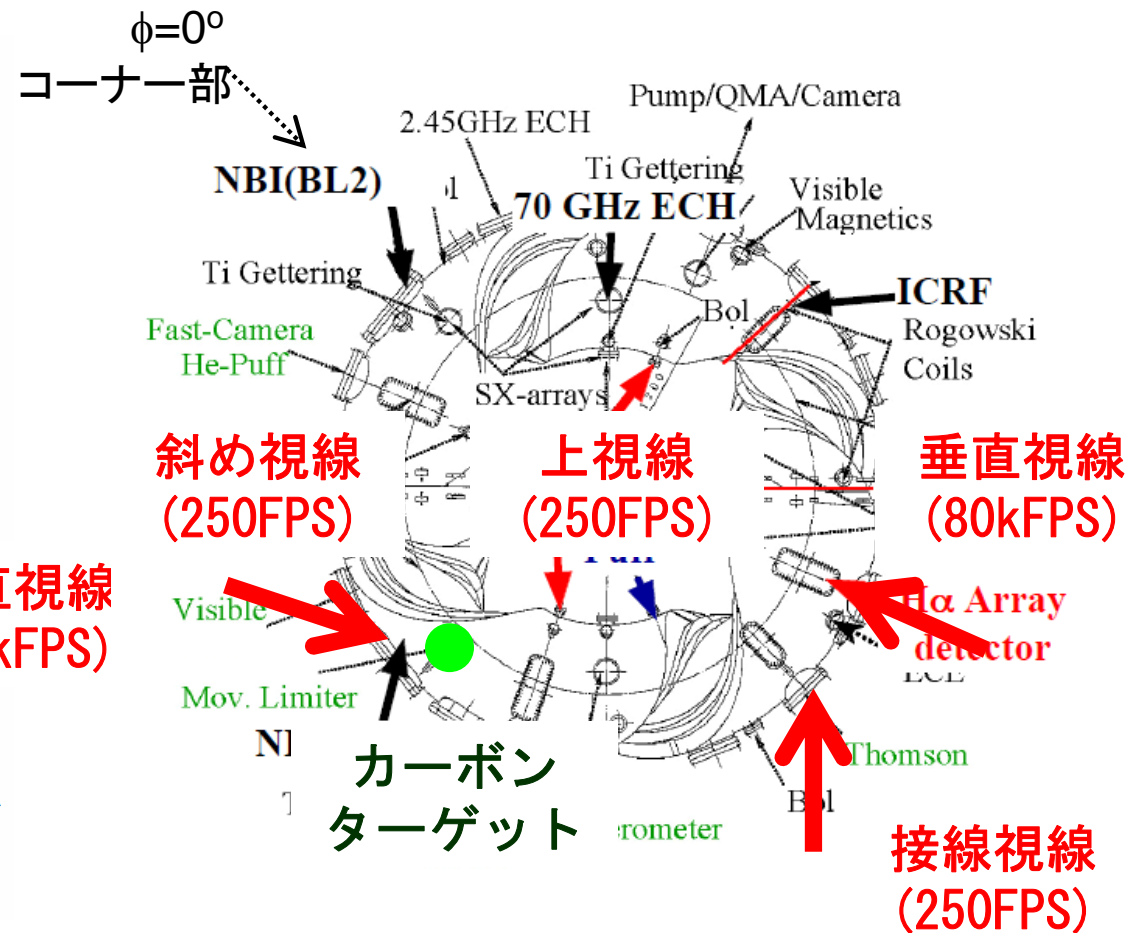
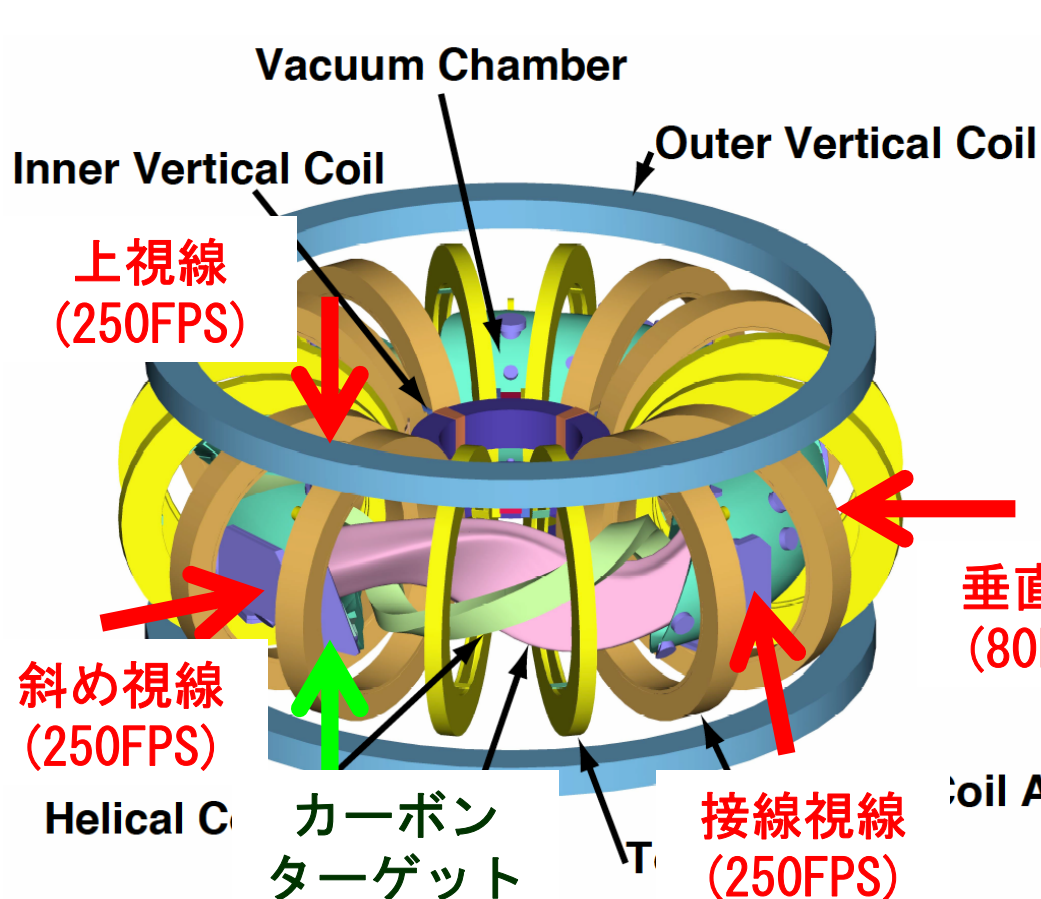
中型のヘリカル装置であるヘリオトロンJには複数の中速・高速カメラが設置

- プラズマモニター，
周辺プラズマにおける発光分布計測，プラズマの挙動解析

内容

1. ヘリオトロンJにおける高速カメラ計測の紹介
 - ・ 磁力線追跡計算との比較（LCFS，ECH点火時）
 - ・ ECHプラズマにおけるH-mode遷移時の周辺部揺動
2. カーボンターゲット挿入実験
 - ・ 中性粒子輸送シミュレーションとの比較

ヘリオトロンJ装置と中速・高速カメラ



$R/a = 1.2\text{m}/0.1\text{-}0.2\text{ m}$

$L/M = 1/4$

$Bt < 1.5\text{T}$

$v/2\pi = 0.4 \sim 0.65$

$\Delta v/v(a) = 1.4\%$ for STD config.

Magnetic well = 1.3 %

Gas : D_2 ,

ECH : 70GHz (2nd Harmonic, 400kW)

ICRF : 19~23MHz (400kW x 2 units)

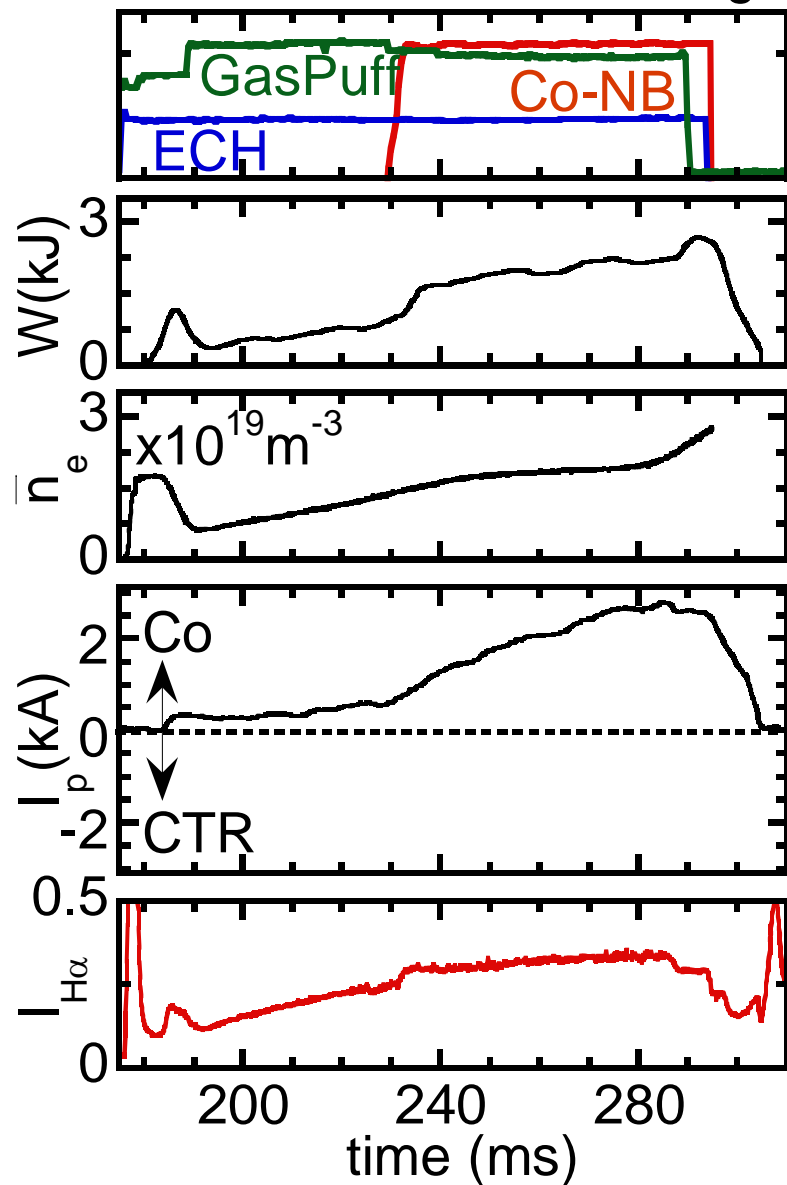
Wall conditioning

- 2.45 GHz ECR-DC (1-2 days : after air vent)

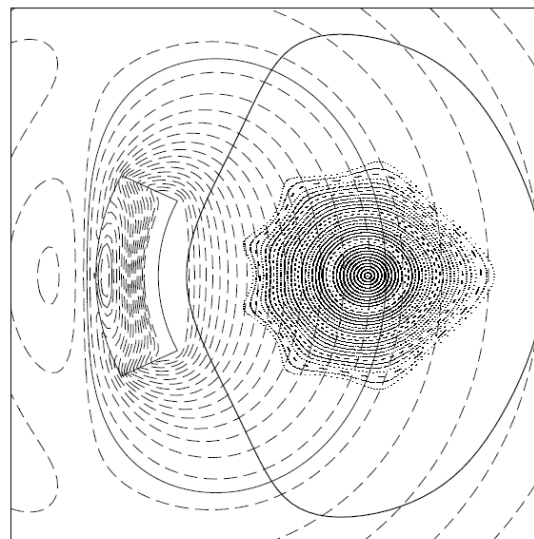
- Ti getter (0.5h x 4 units every morning)

プラズマ放電波形と磁気面形状 (標準配位)

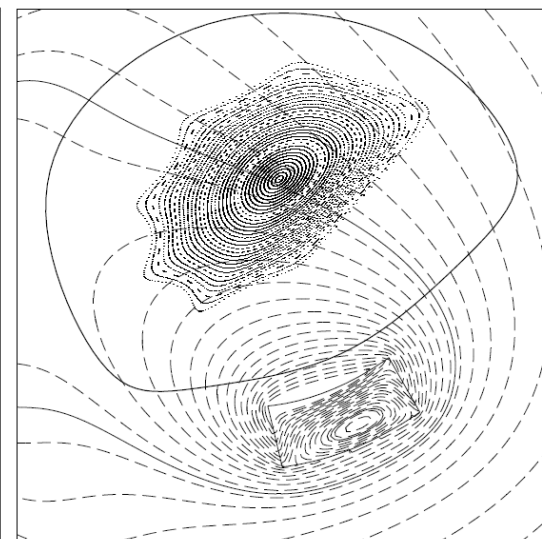
#11948 STD Config.



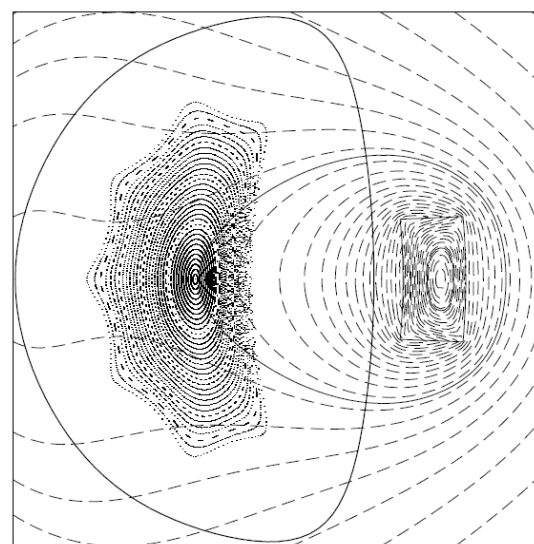
$\phi=0^\circ$ (コーナー部)



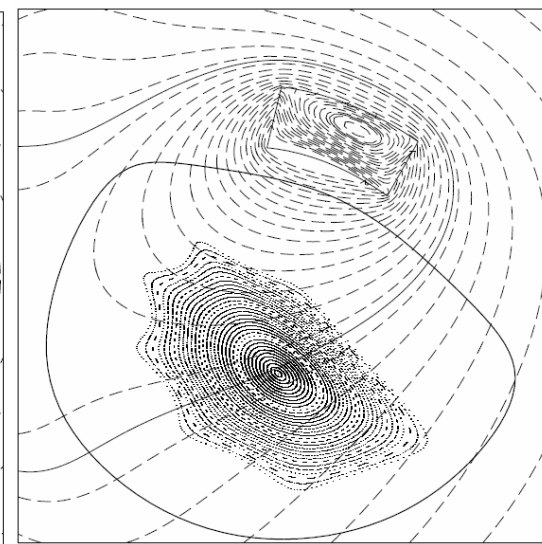
$\phi=22.5^\circ$



$\phi=45^\circ$ (直線部)

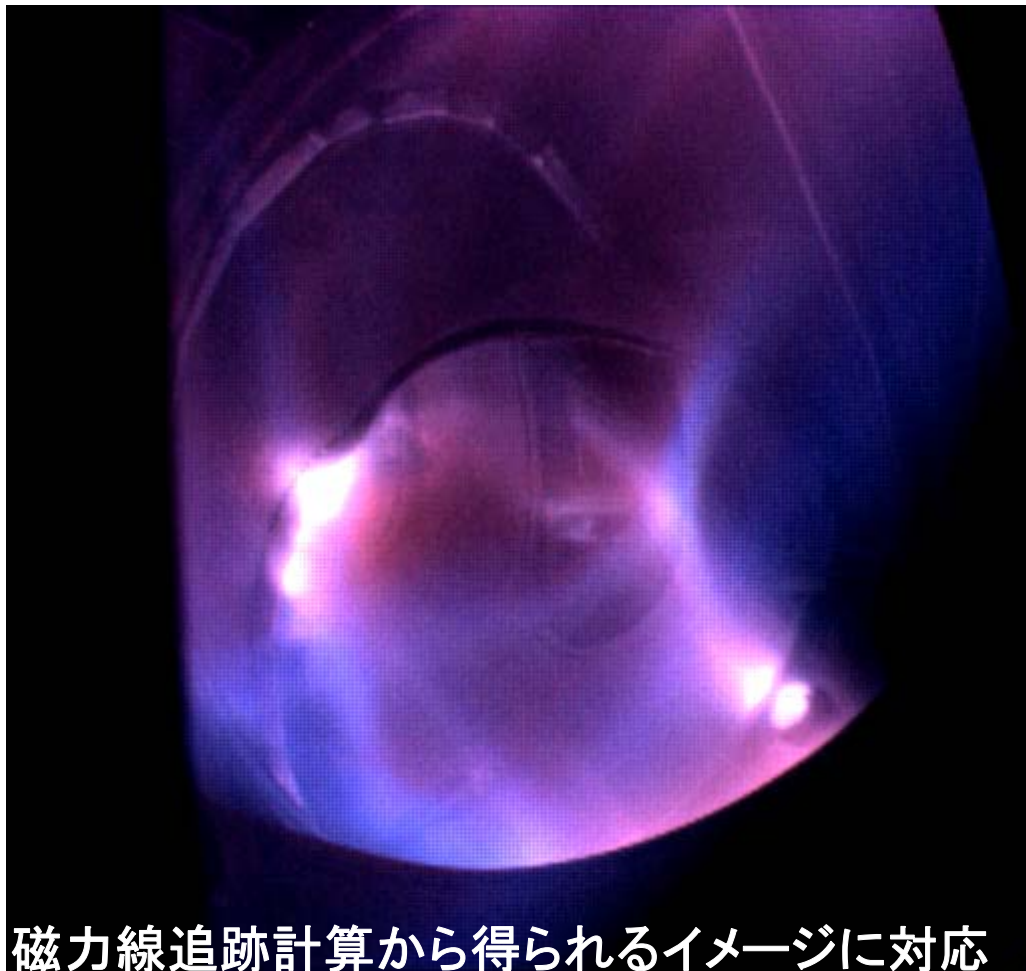


$\phi=67.5^\circ$

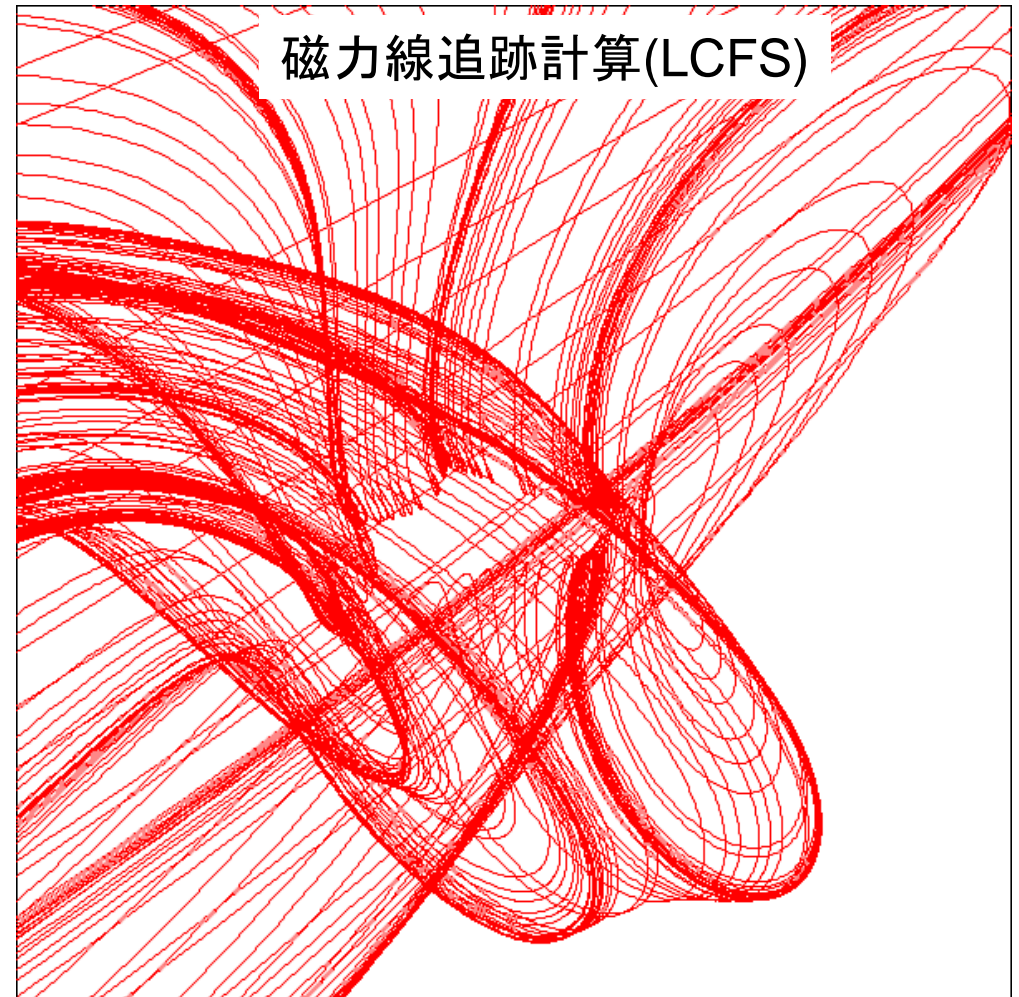


磁力線追跡計算との比較

- ・LCFSを出発点として、磁力線追跡計算をおこなう
- ・磁力線の座標をカメラの視線に投影し、画像と比較



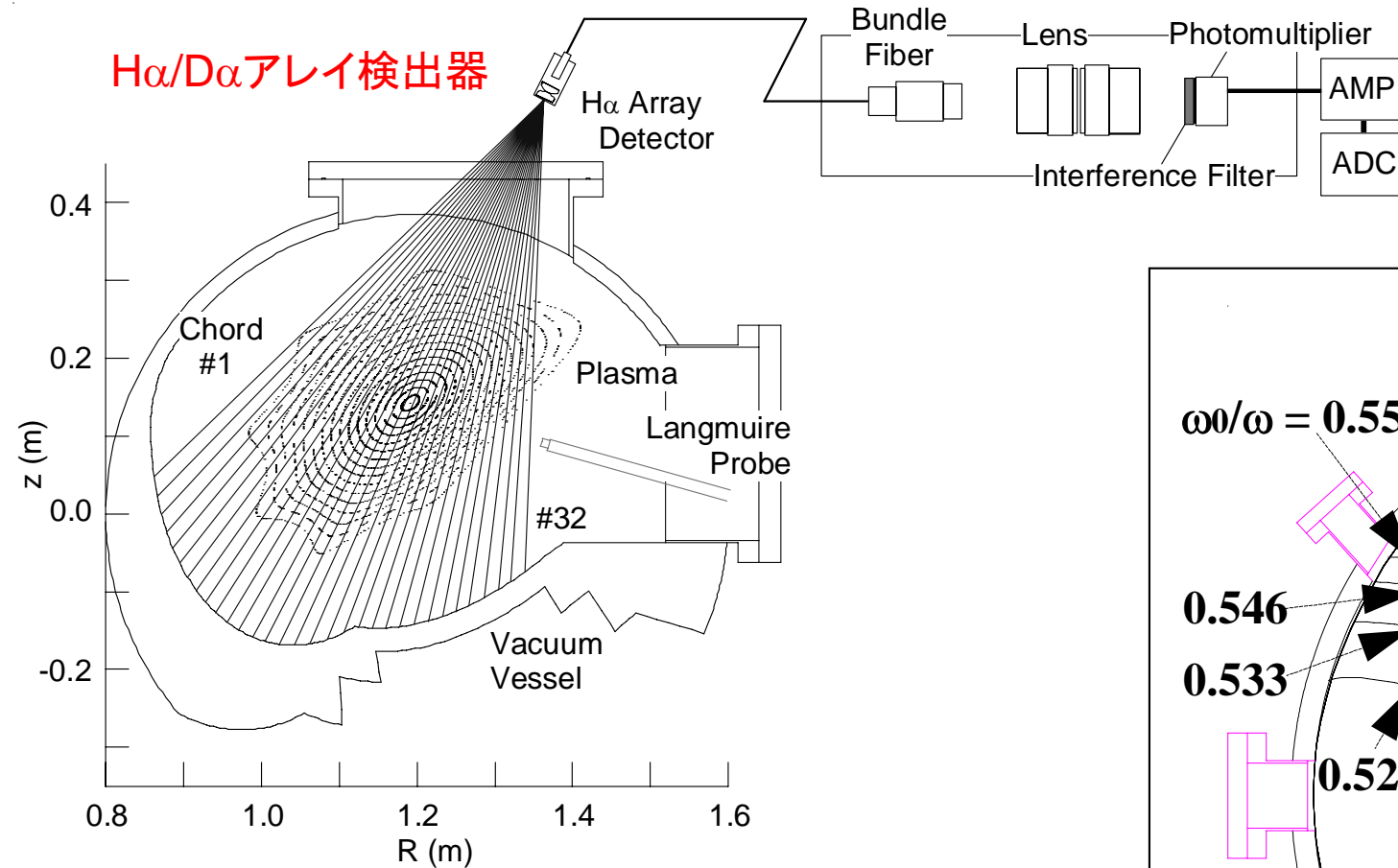
磁力線追跡計算から得られるイメージに対応
→LCFS近傍での発光を示唆



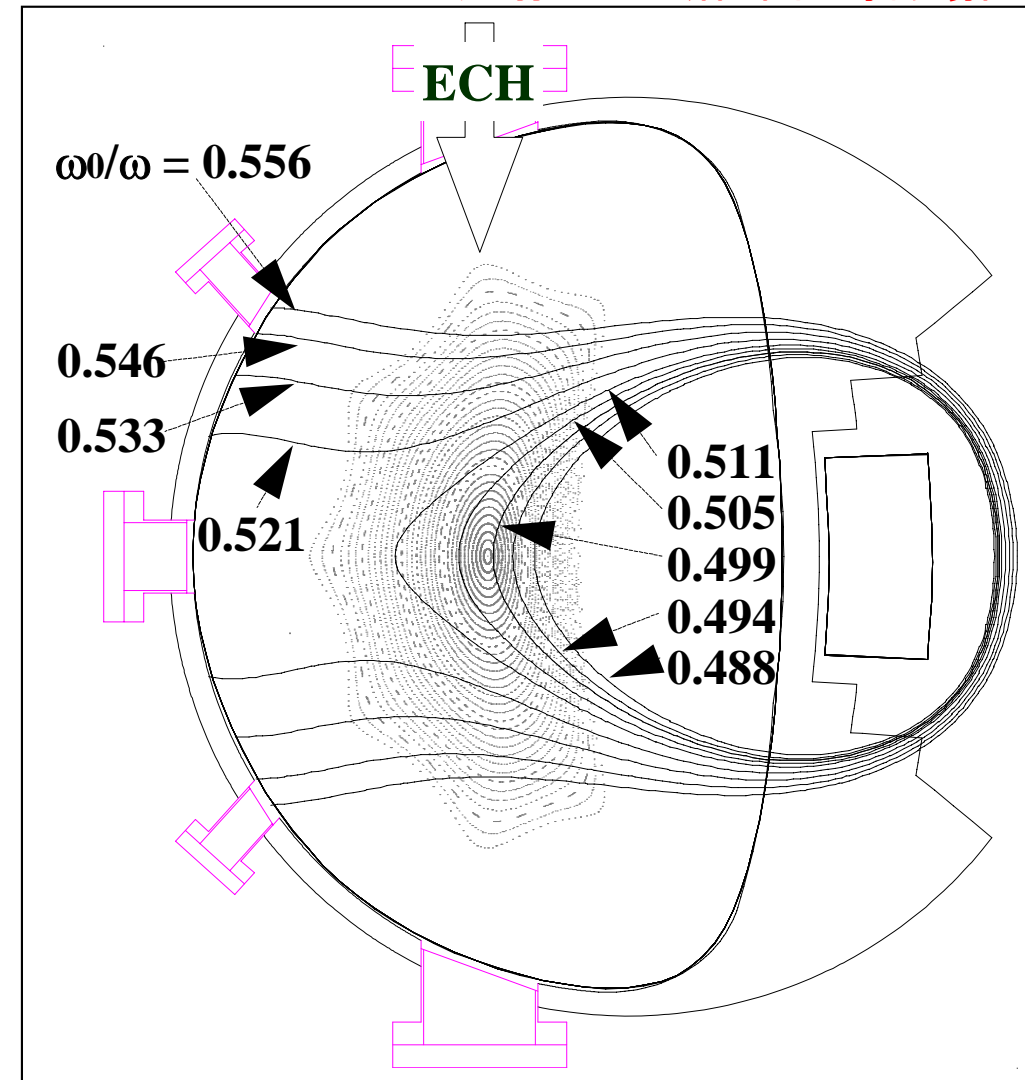
第二高調波ECH加熱によるプラズマ点火特性：磁場強度依存性

by Prof. Nagasaki and
S. Kobayashi (Kyoto Univ.)

H α /D α アレイ検出器

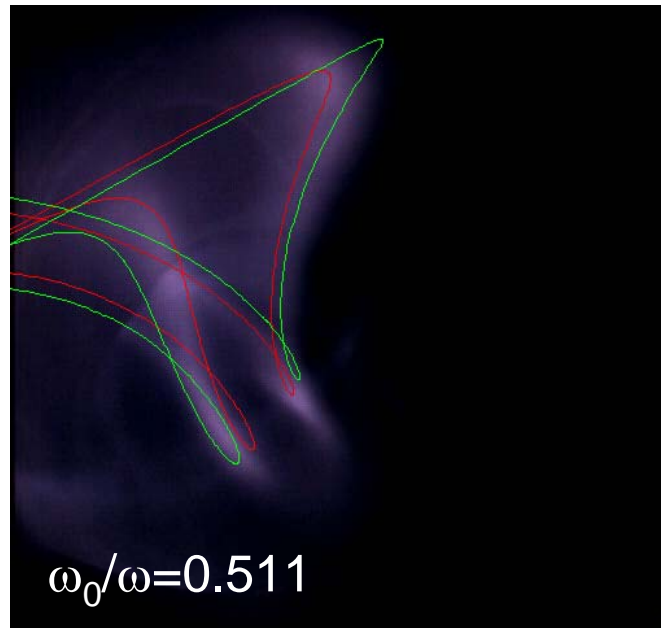
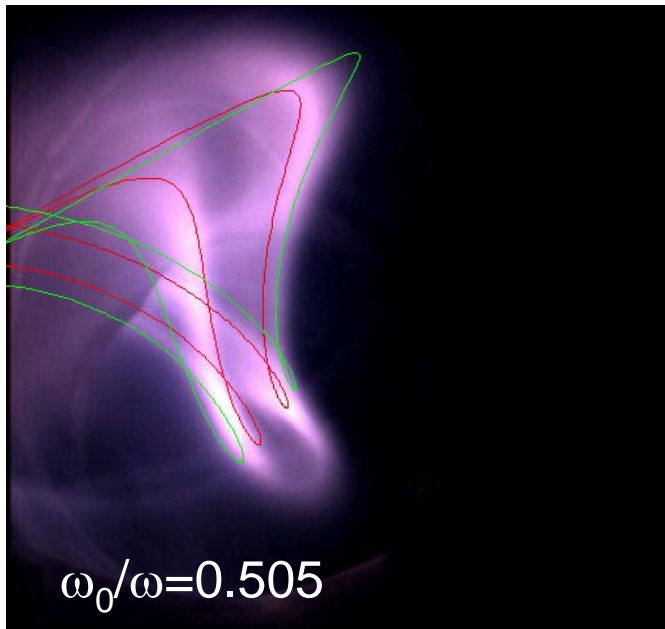
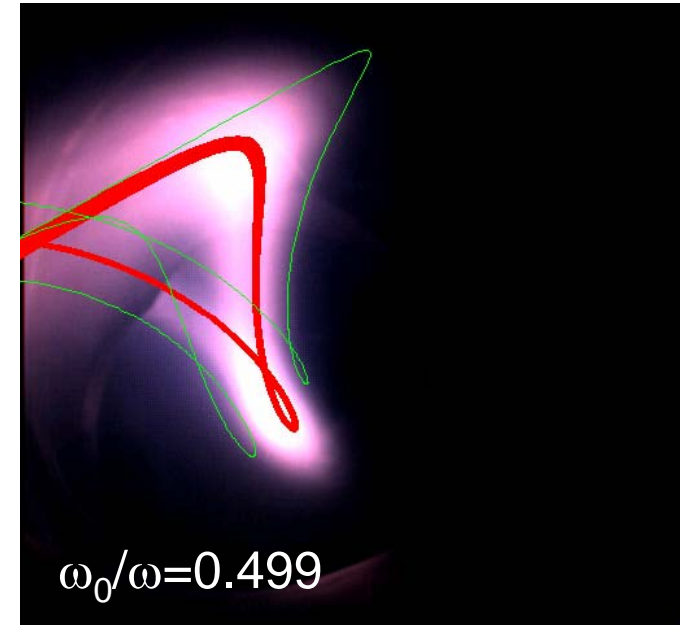
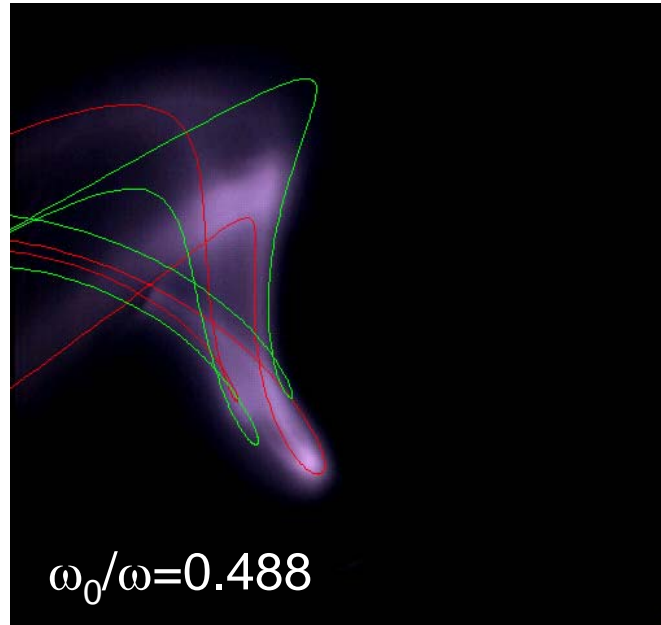
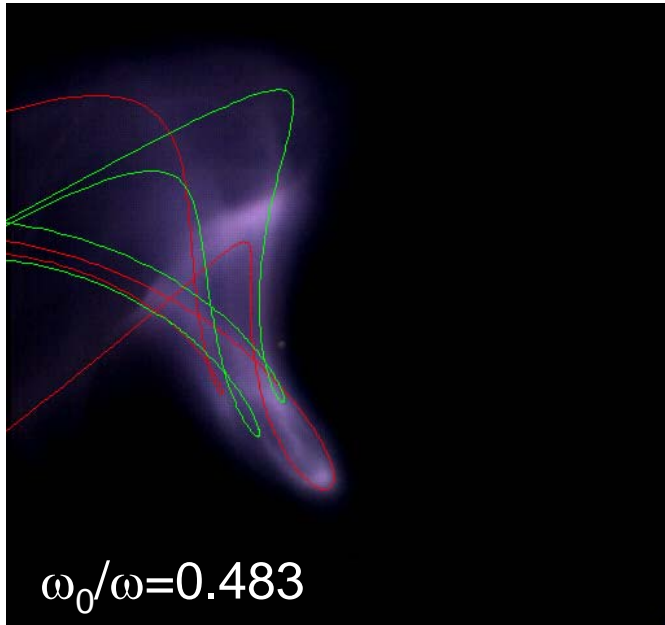


ECH入射ポート断面図と等磁場面



- ・ECHプラズマ点火時の発光強度画像を撮影
- ・磁場強度を変化させ吸収位置をスキャン
- ・マルチアノード光電子増倍管を用いたH α /D α アレイ検出器による詳細分布計測

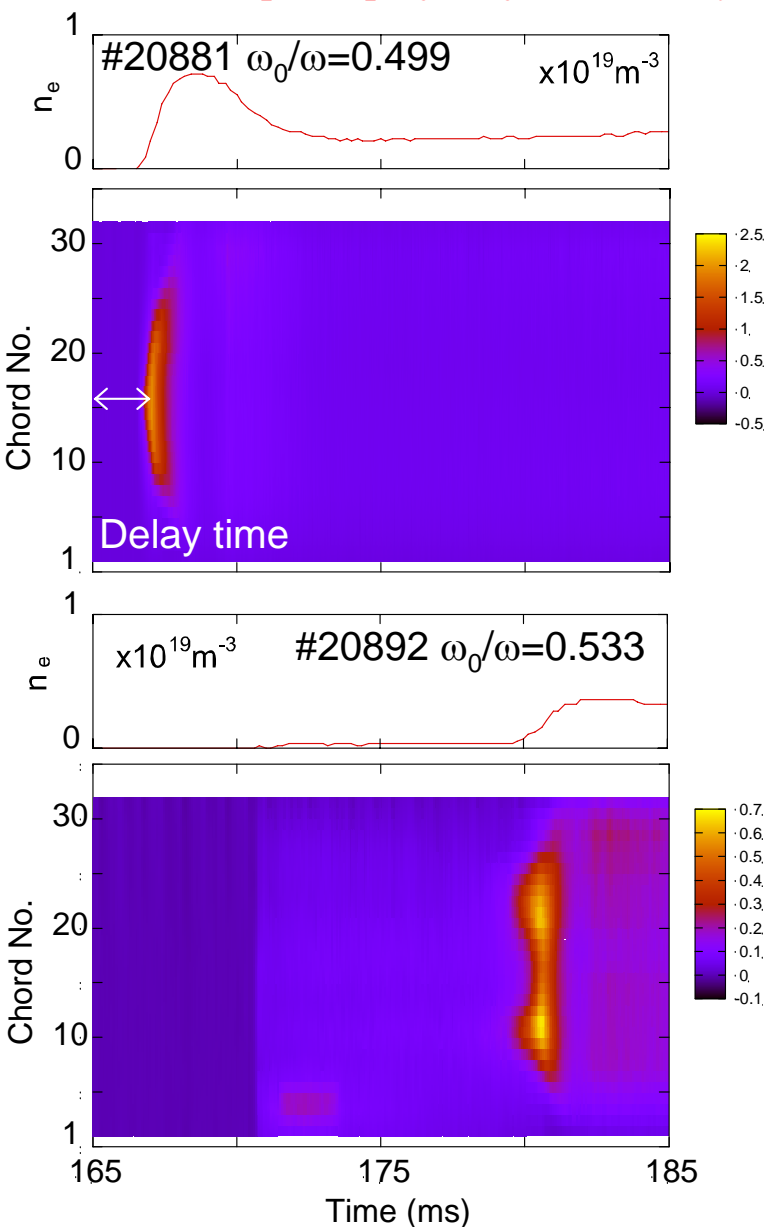
第二高調波ECH加熱によるプラズマ点火特性：磁場強度依存性



(赤線：ECHマイクロ波と共鳴層との交点から出発した磁力線)
→カメラ画像とよく一致

D α 線発光量域はECH共鳴層に対応（多チャンネル検出器）

Time and spatial profile of D α intensity



In case of $\omega_0/\omega < 0.53...$

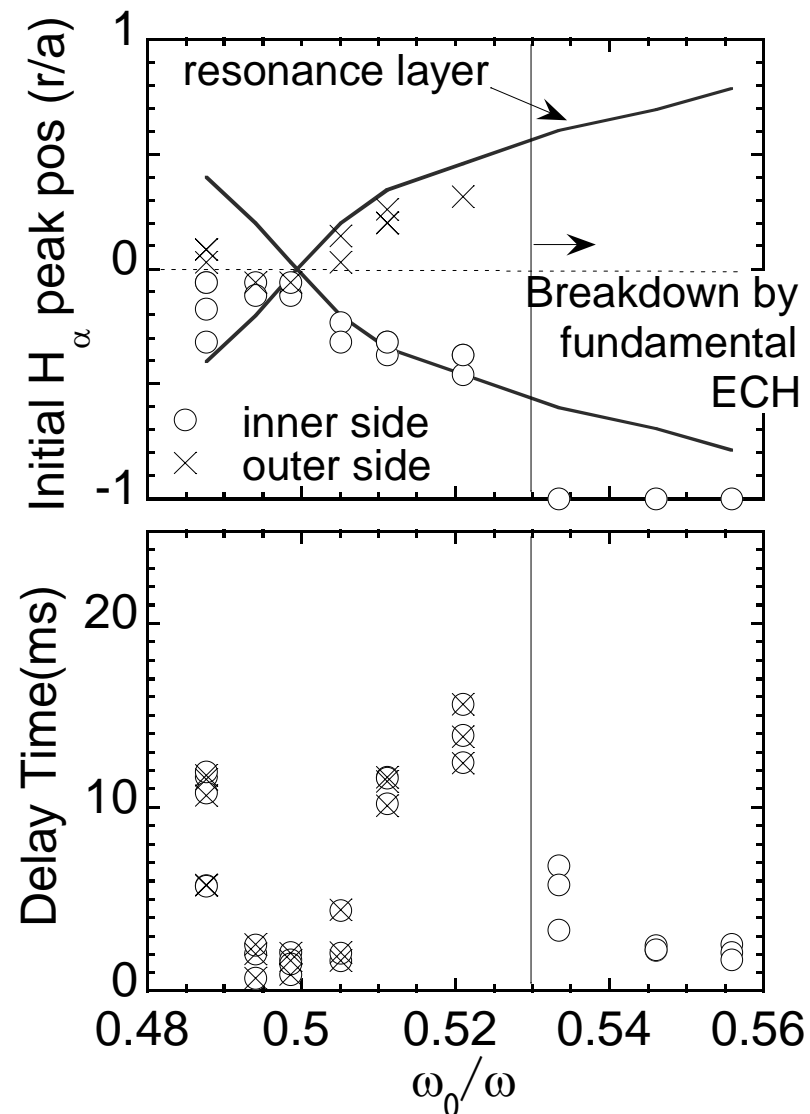
- D α peak positions agree with the resonance layer
- Shortest delay time at the on-axis heating
- Delay times became longer as the resonance position moves to off-axis.

In case of $\omega_0/\omega > 0.53...$

- Initial D α peak is observed only in the inner torus side. => Due to the existence of the fundamental resonance at SOL region

Some electrons are accelerated at the fundamental resonance by the multi-reflection of injected ECH microwaves.

Peak position and delay time in plasma breakdown by 2nd harmonic ECH



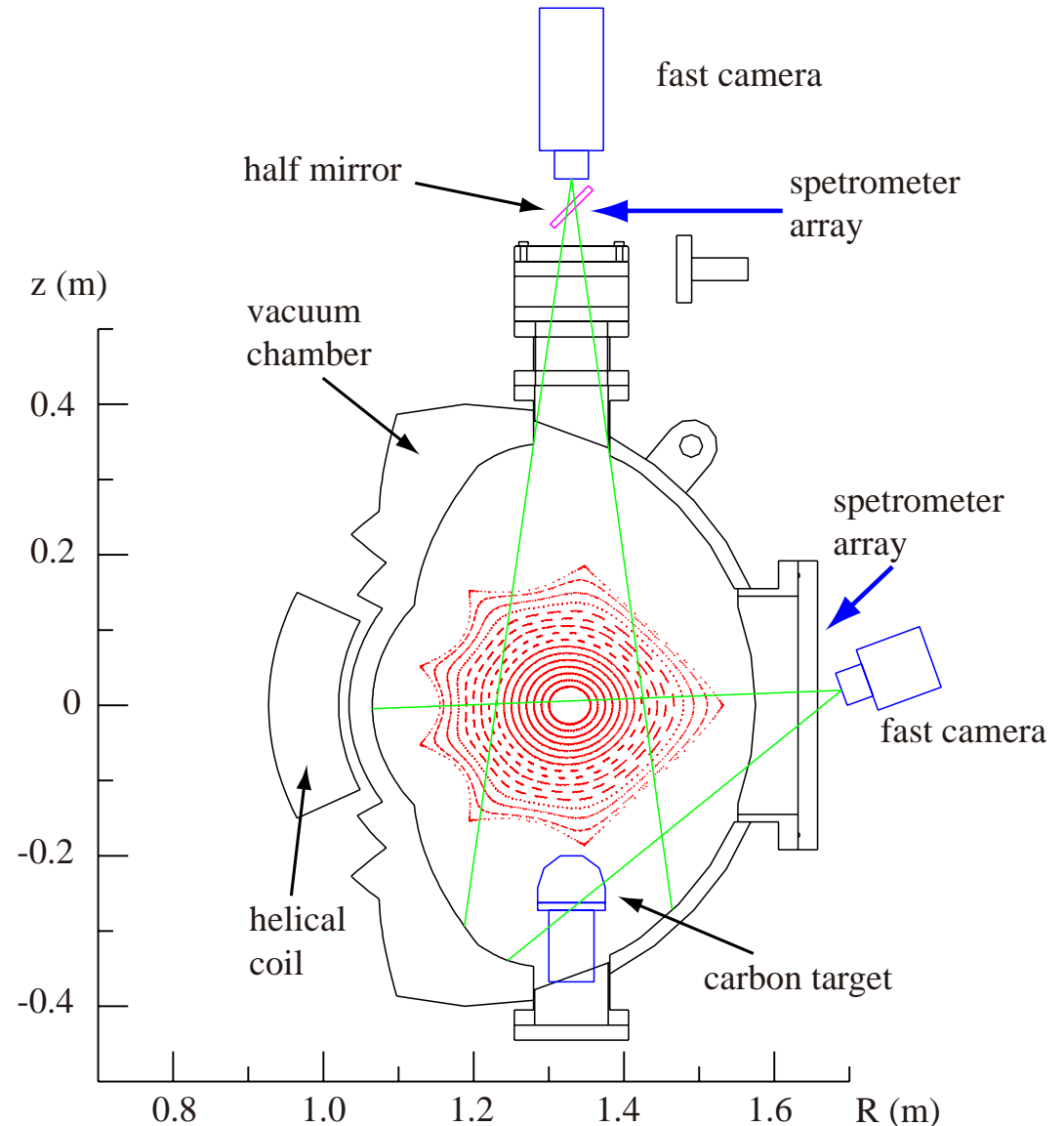
カーボンターゲット挿入実験

- ・周辺プラズマ挙動や水素リサイクリング特性を調べる目的
- ・上・横方向から高速カメラ(250FPS)による $H\alpha/D\alpha$ 線発光分布計測(干渉フィルターおよび分光器)
- ・材質:CFC, 挿入長は可変
 - 周辺プラズマとの近接性の制御(ダイバータ~リミター配位)
- ・モンテカルロシミュレーションを用いて再現を試みる



by Prof. Nakashima, Dr. Higashizono (Tsukuba Univ.)

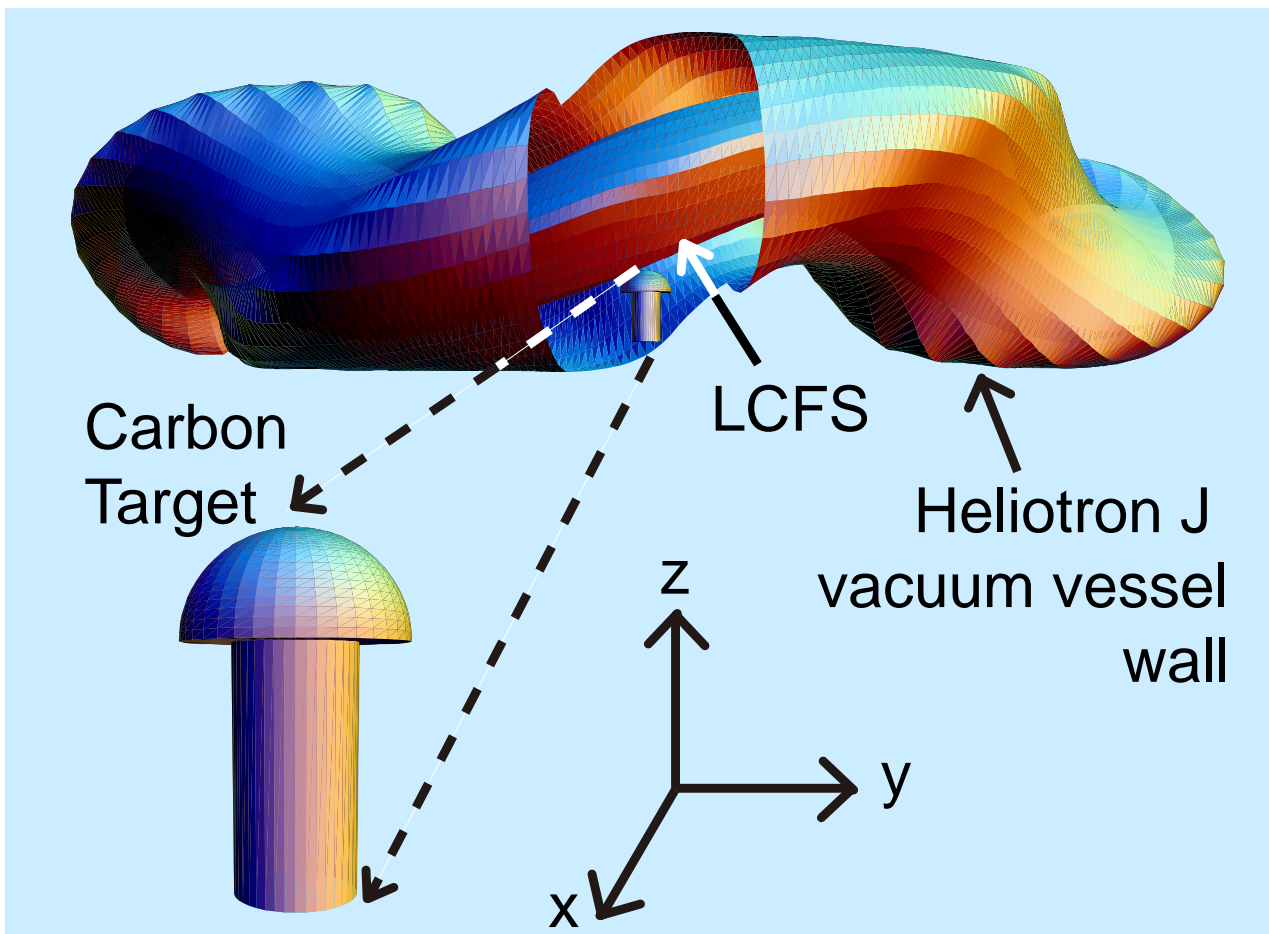
カーボンターゲットおよび計測系模式図



中性粒子輸送モンテカルロシミュレーション

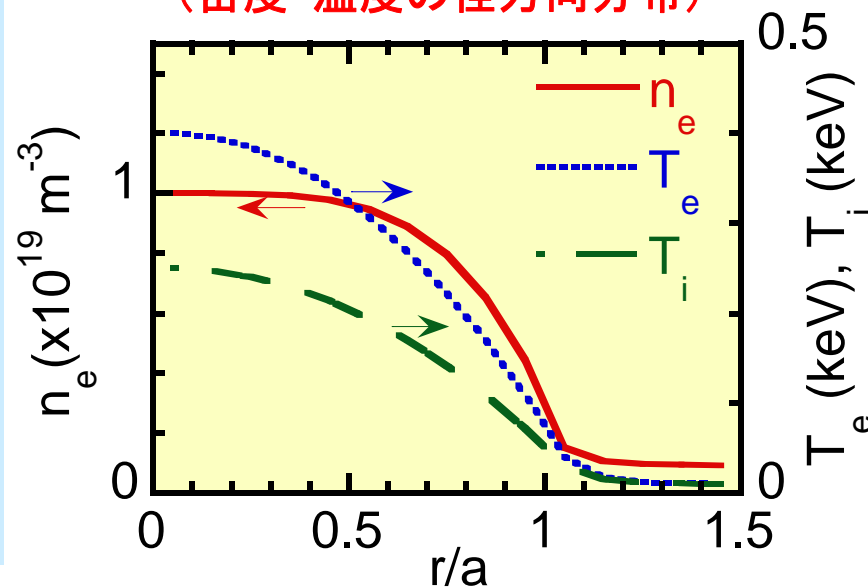
- ・任意の形状を持つプラズマ・周辺領域の中性粒子の密度・温度をモンテカルロ法により評価(DEGASコード)
- ・ヘリオトロンJプラズマ・真空容器, およびカーボンターゲットを完全3次元化

DEGASコードで用いたプラズマメッシュモデル



メッシュモデル分割数
径方向: 15
ポロイダル方向: 28
トロイダル方向: 512

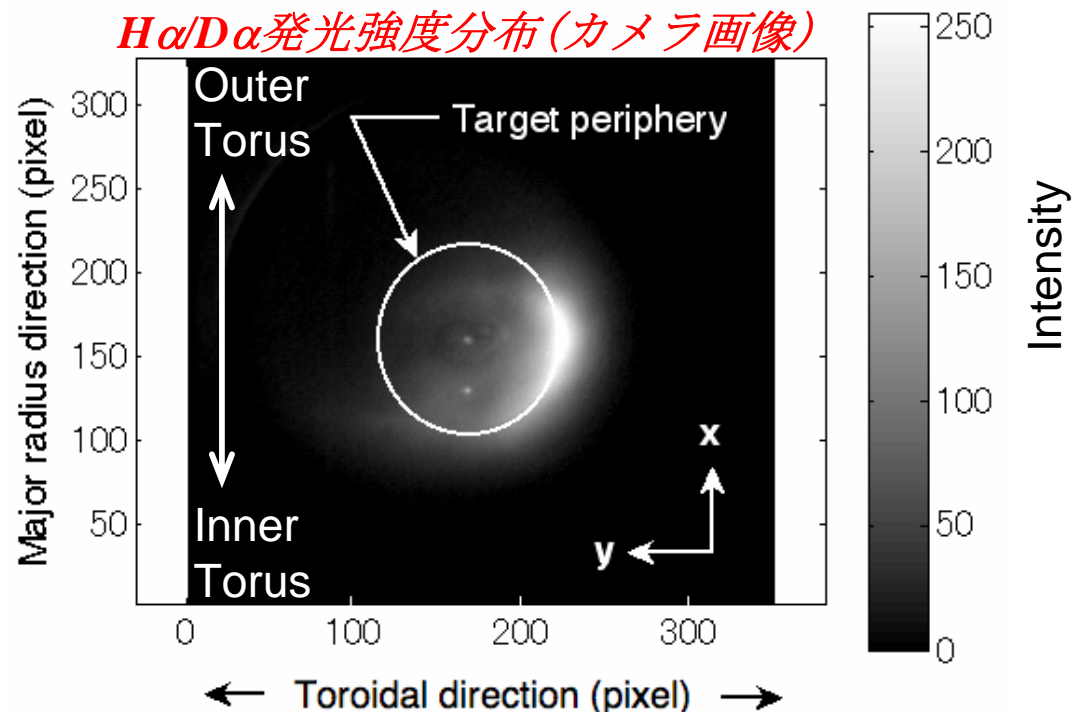
プラズマ入力パラメータの一例
(密度・温度の径方向分布)



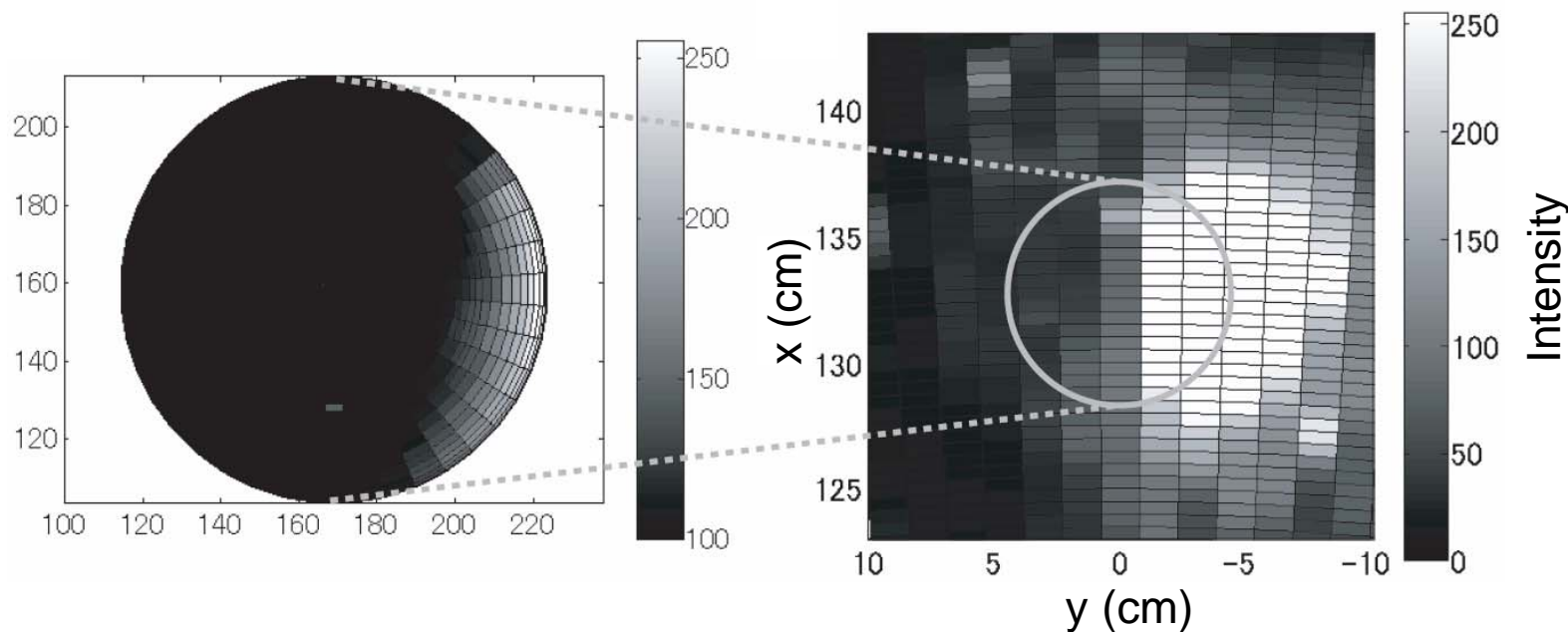
カーボンターゲットからの $H\alpha/D\alpha$ 発光強度分布（上ポート）

- ・リミターヘッド頭頂部を最外殻磁気面より内側10mmまで挿入
- ・リミター上部からカメラ計測
- ・局所的な強い発光
 - プラズマが近接している箇所に対応
- ・計測された発光分布より、より局所化したテスト粒子分布を与えて計算
 - トロイダル方向の分割数が不足しているため解像度が悪いが、計測結果との良い相関が得られる
 - 局在した粒子源の存在を示唆

$H\alpha/D\alpha$ 発光強度分布(カメラ画像)



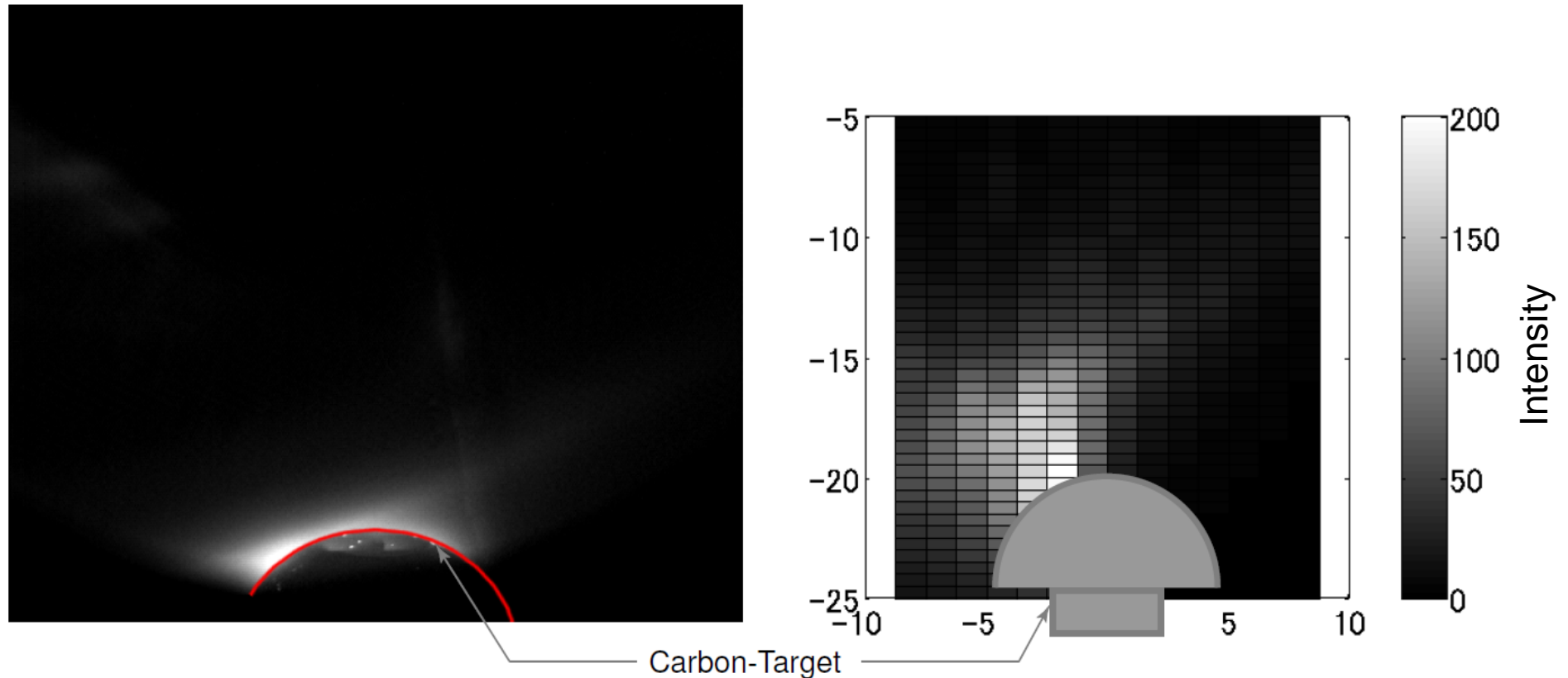
シミュレーション
で与えたターゲット
上のテスト粒子
分布(左), 及び $D\alpha$
線発光強度分布の
計算結果(右)



カーボンターゲットからの $H\alpha/D\alpha$ 発光強度分布（横ポート）

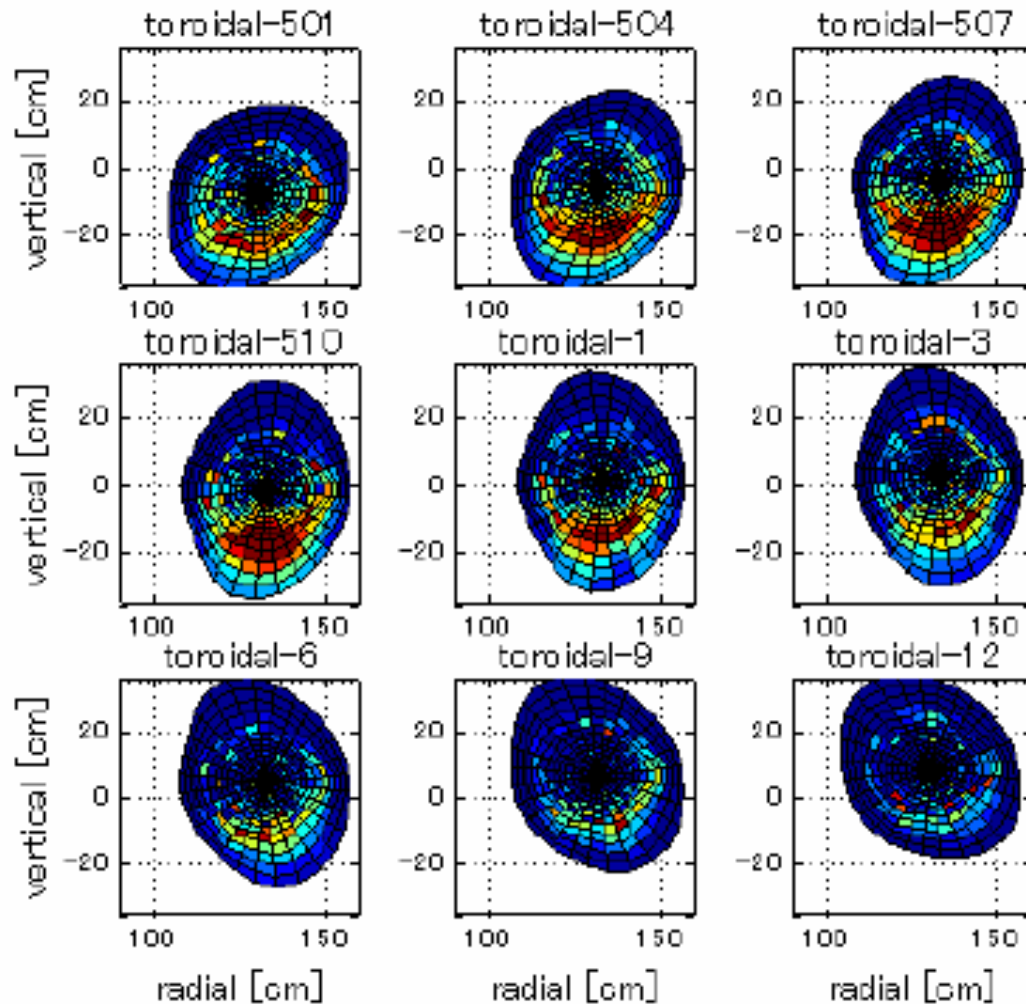
- ・横ポートからのカメラ画像
- ・先ほどの計算結果を用いて横方向から $H\alpha$ 線強度を評価
 - カメラ画像とよく一致
 - 本手法の有効性を確認

横方向からのカメラ画像(左), およびシミュレーション結果(右)

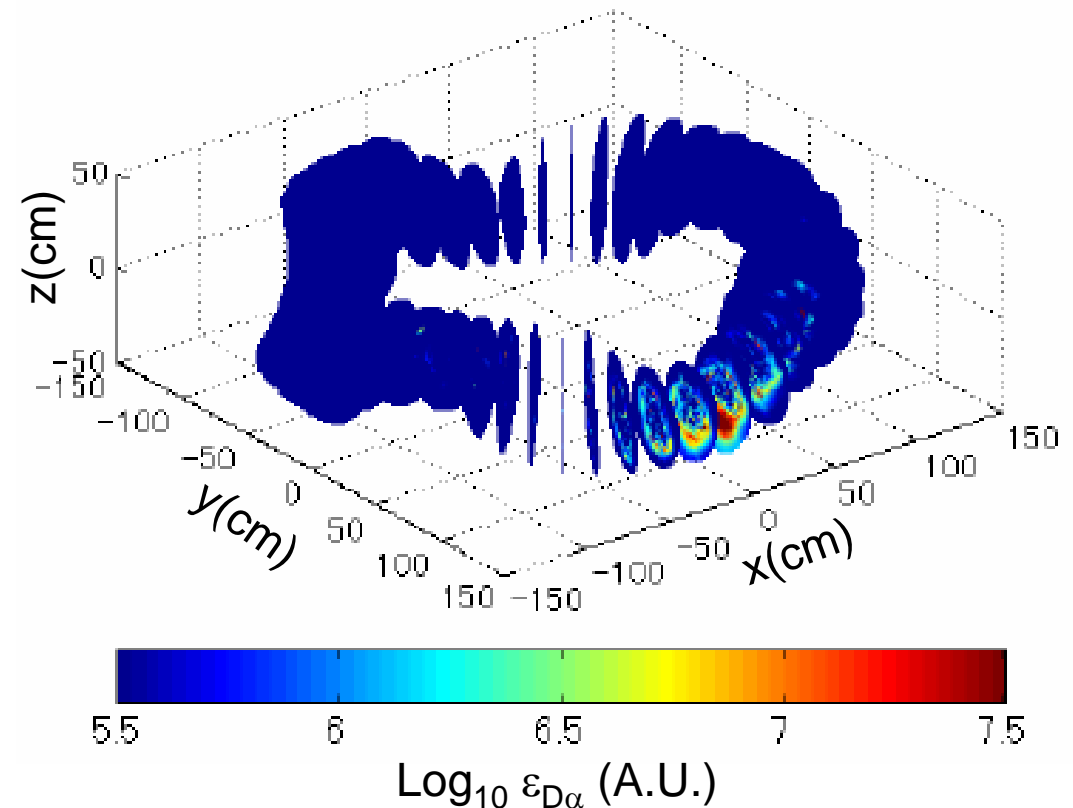


D α 線放射強度分布：挿入長10mm（LCFS内側）の場合

ポロイダル断面上のD α 線強度分布



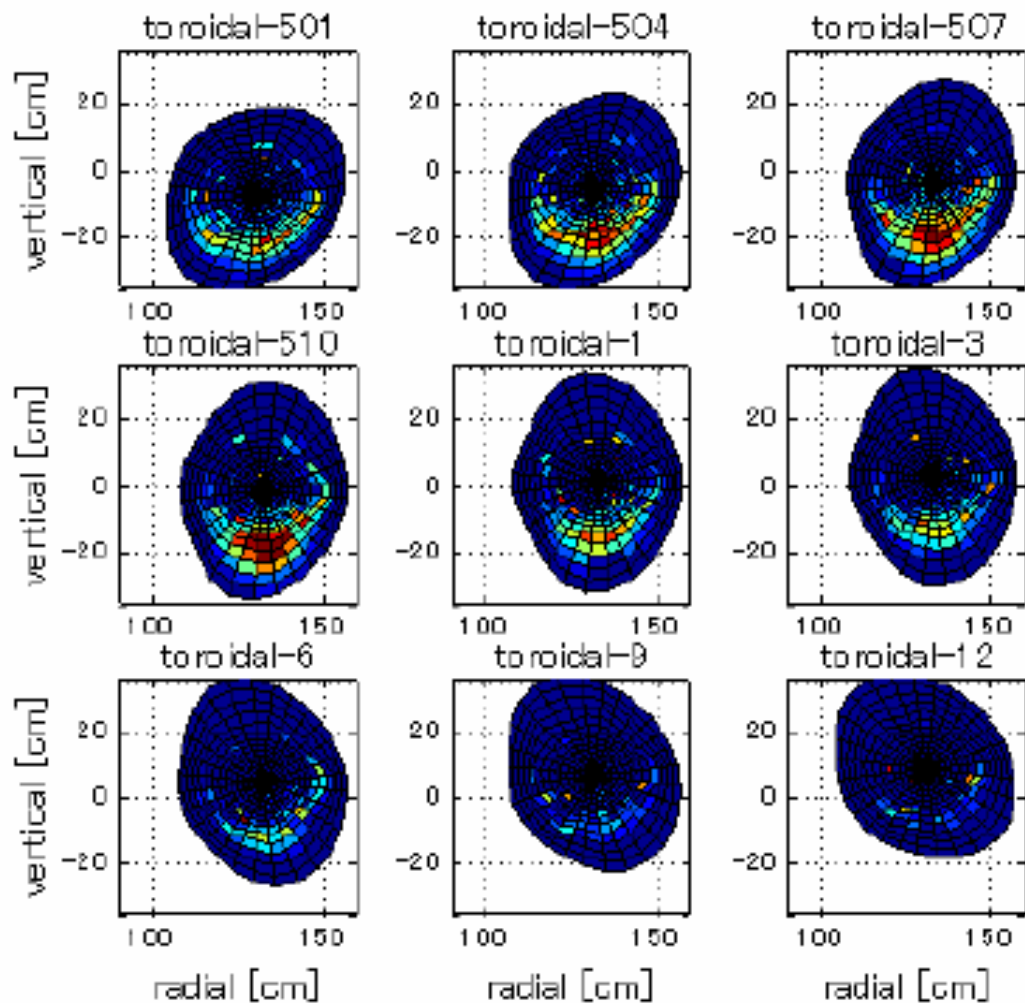
3次元D α 線強度分布



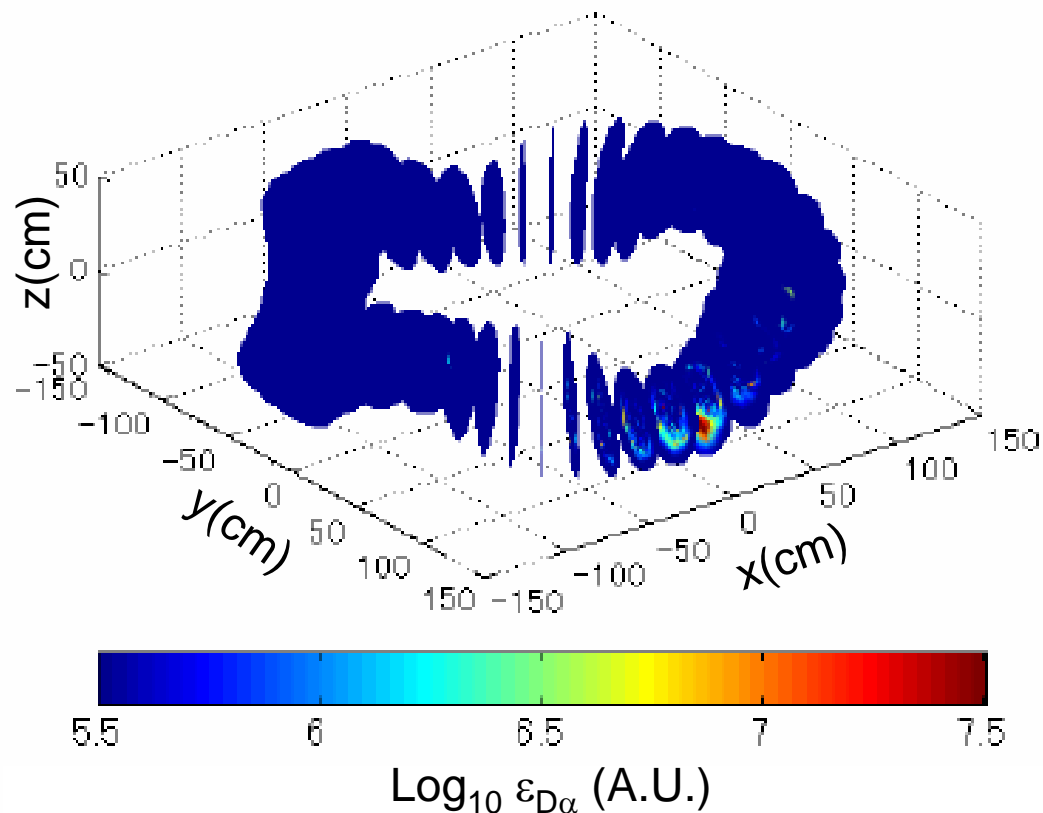
- ・カーボンターゲット近傍で、強い発光量域がポロイダル方向に広がっている
- ・トロイダル方向への発光量域の減衰長は非対称(時計<->反時計方向)
=> 局所化した粒子源の方向と一致

D α 線放射強度分布：挿入長-15mm（LCFS外側）の場合

ポロイダル断面上のD α 線強度分布



3次元D α 線強度分布



- ・カーボンターゲットを下方に引き抜くと、D α 線発光強度の強い領域も下がる

まとめ

ヘリオトロンJにおける中速・高速カメラ計測により,

- ・磁力線追跡計算と組み合わせることで, プラズマ発光, およびECHによるプラズマ点火特性の理解
- ・周辺部揺動計測の試み

カーボンターゲット挿入実験におけるリサイクリング特性の評価

- ・多点カメラ計測と中性粒子輸送シミュレーションの組み合わせの有効性
- ・局所的な粒子源の存在を示唆