

# ヘリオトロンJおよびGAMMA10における 粒子補給の最適化実験



IAE Kyoto Univ.



PRC Univ. Tsukuba

筑波大学プラズマ研究センター シンポジウム 2011.Jul.20-22  
京都大学エネルギー理工学研究所 小林進二

## Contents

1. 研究の背景
2. Heliotron J における粒子供給最適化に向けた実験
  - ✓ 超音速分子性ビーム入射(SMBI)実験
  - ✓ 粒子輸送解析のための密度変調実験
3. GAMMA10 におけるSMBI初期実験
4. まとめ

共同研究者:

中嶋洋輔、坂本瑞樹、吉川正志、細井克洋、米永理央、小澤博樹、武田寿人、石井貴、  
小波蔵純子、市村和也(筑波大学)

庄司主(核融合研)

小林進二、水内亨、岡田浩之、李炫庸、南貴之、香川輔(京都大学)

# 研究の背景

双方向型共同研究で、定常環状プラズマ型核融合炉を指向した境界プラズマの総合的理解

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

- ・電子密度:  $10^{19}\text{m}^{-3}$ オーダー
- ・イオン温度: 数百eV
- ・プラズマベータに伴う磁場配位最適化  
→リップロス低減の実験的実証

### GAMMA10

- ・電子密度:  $10^{18}\text{m}^{-3}$ オーダー
- ・イオン温度: 数keV~10keV
- 電位による磁力線方向の閉じ込め  
実証

→プラズマ高性能化に向けて、高密度化が鍵

磁場配位・  
磁力線構造最適化

双方向型共同研究課題(京都大学)

ヘリオトロンJにおけるマルチチャンネルH $\alpha$ /D $\alpha$ 線放射分布計測を用いた粒子補給の最適化

代表者: 中嶋(筑波大)

双方向型共同研究課題(筑波大学)

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

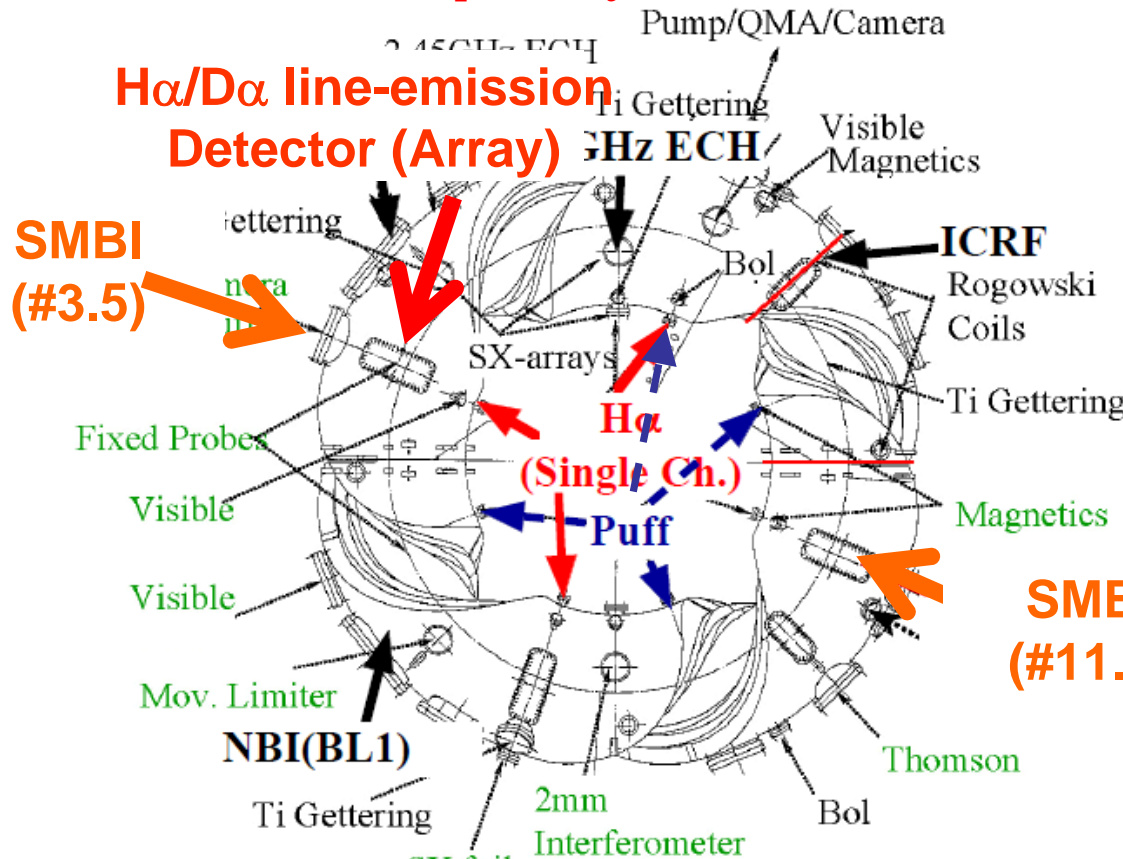
代表者: 小林(京大)

# Heliotron J device and Experimental setup

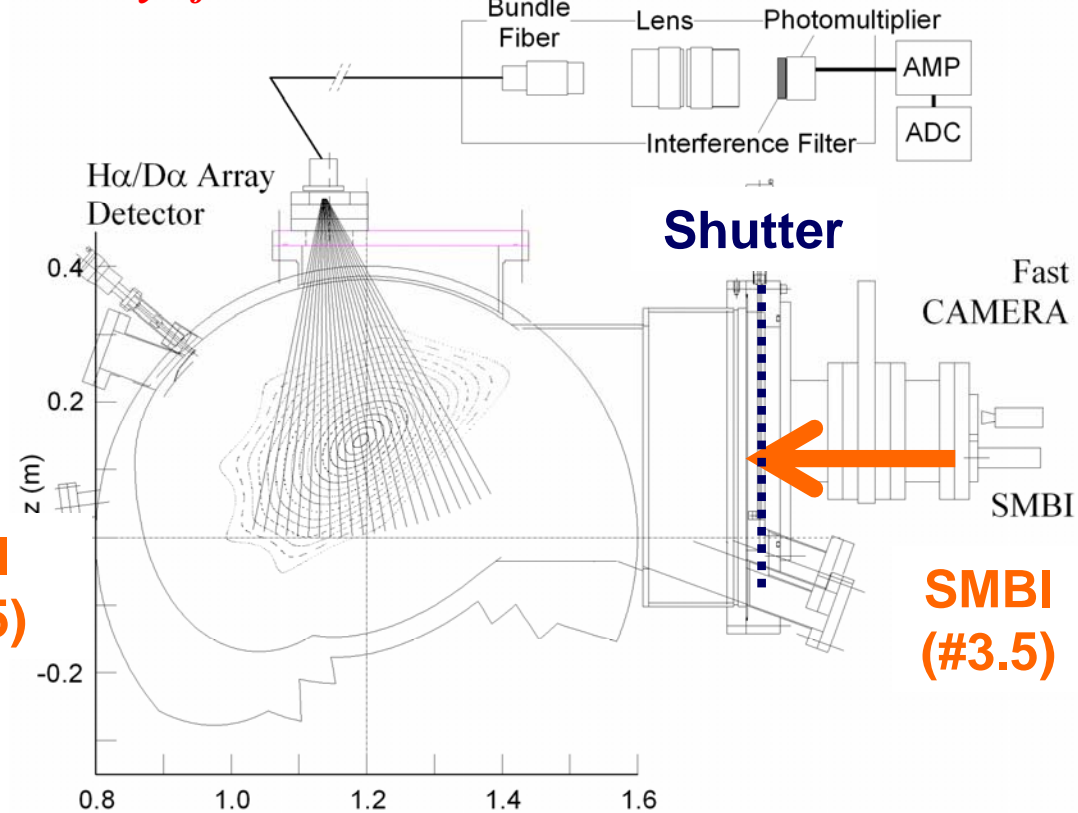
IAE Kyoto Univ.

PRC Univ. Tsukuba

*Top view of Heliotron J*



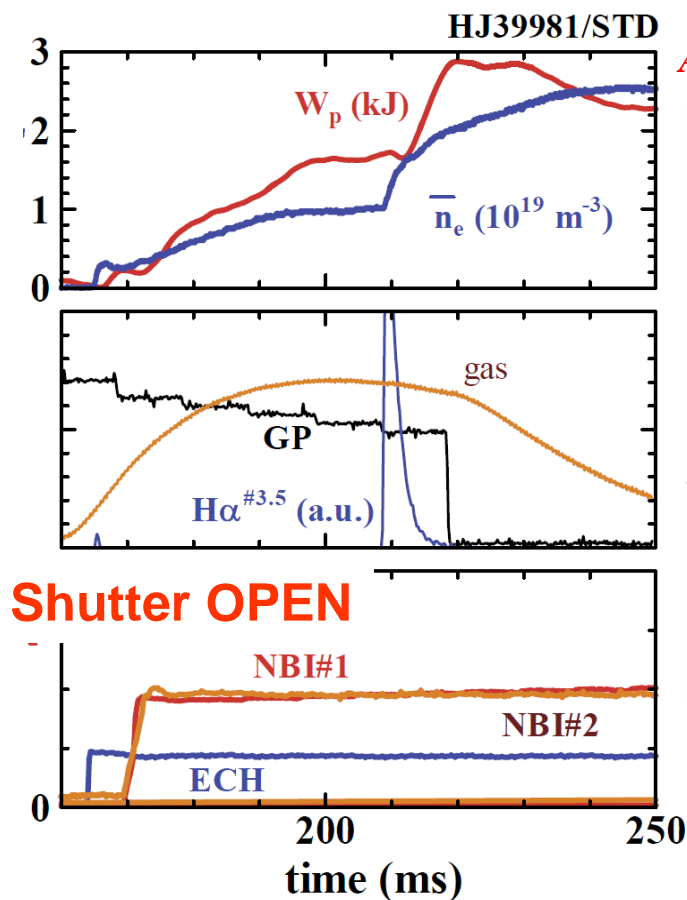
*Experimental setup for Array of H $\alpha$ /D $\alpha$ -line Detector and SMBI*



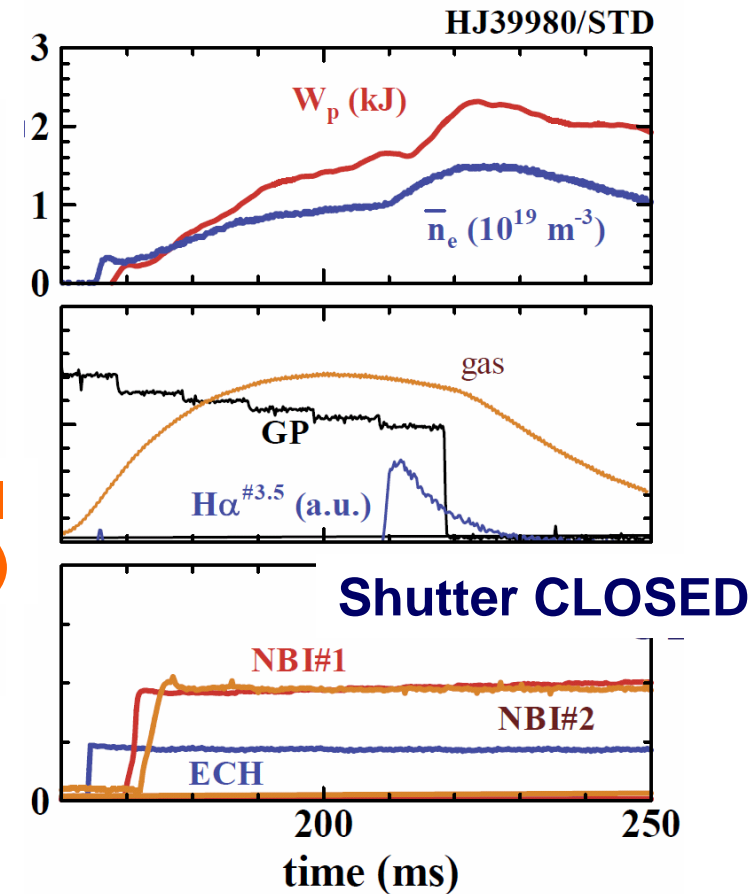
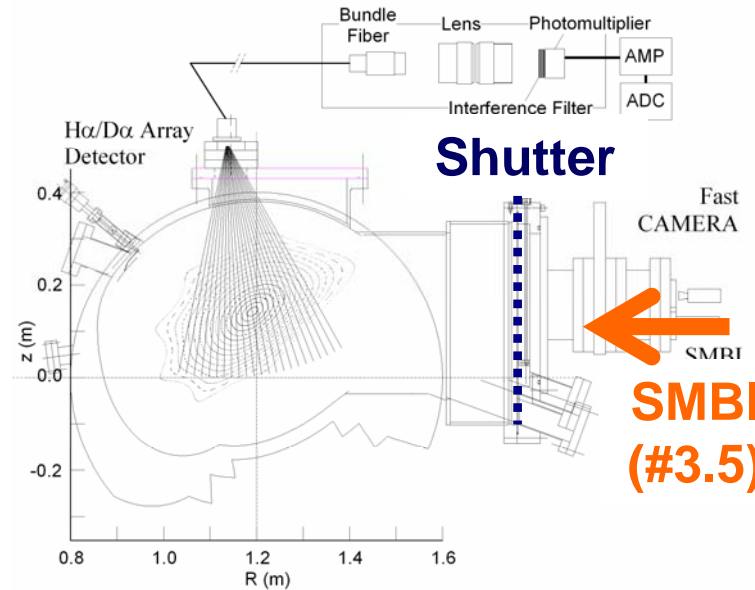
## Gas fueling:

1. Normal Gas puff; Piezo-electric valve (PV-10) installed at each toroidal section, D<sub>2</sub> at 0.05MPa → uniformly injection
2. Supersonic Molecular Beam Injection (SMBI); Electric or Piezo-electric valve, H<sub>2</sub> at 0.25~1.5MPa, preferable modification of nozzle shape for local fueling (ex. Laval nozzle, sheet-type nozzle)

# Comparison between direct and non-direct SMBI



Experimental setup for Array of  $H\alpha/D\alpha$ -line Detector and SMBI

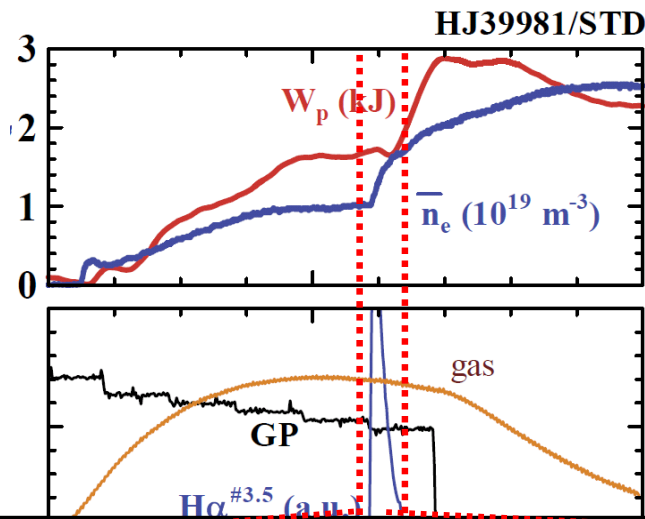


- ✓ Advantage of SMBI fueling is confirmed by comparing the plasma performance between **OPEN (left)** and **CLOSED (right)** shutter cases.
  - When the shutter is closed, the  $H_2$ -beam is stopped at the shutter and diffuses to plasma.
- ✓ Higher density and stored energy are obtained for **the OPEN case**, where the heating and fueling conditions are exactly the same except for the shutter condition.
  - ➔ Good fueling efficiency

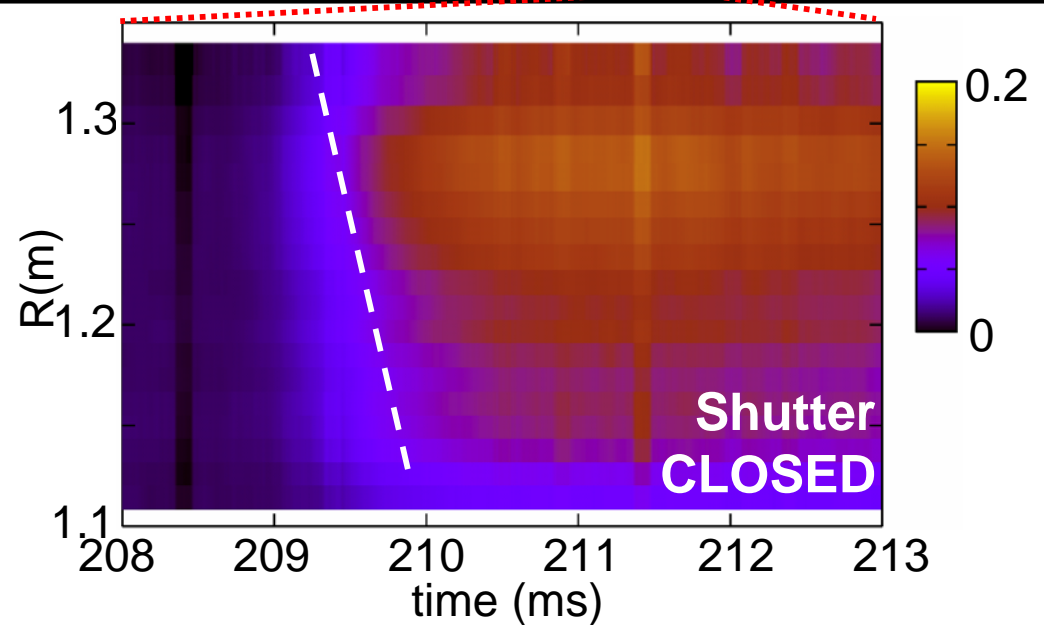
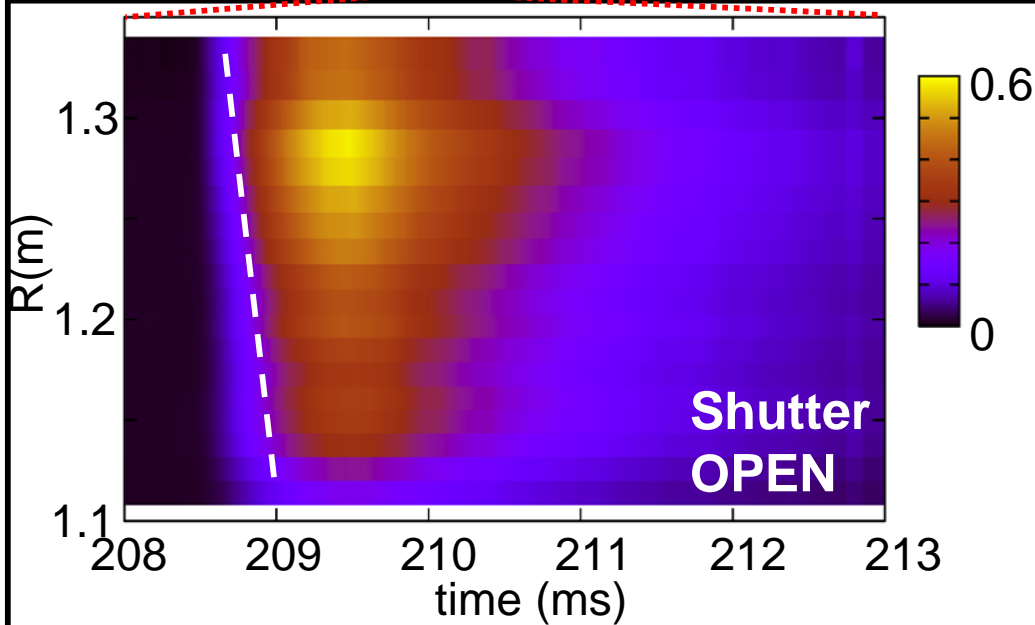
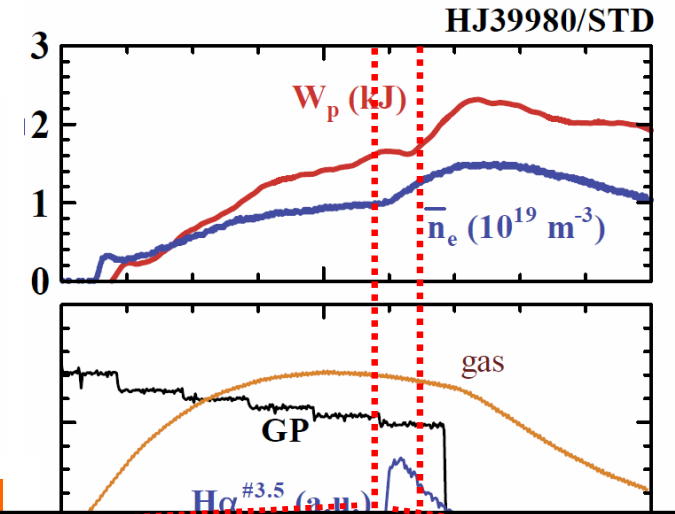
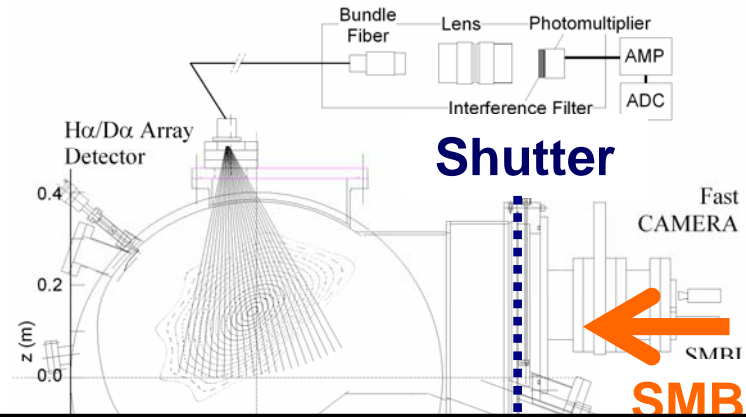
# Comparison between direct and non-direct SMBI

IAE Kyoto Univ.

PRC Univ. Tsukuba



Experimental setup for  
Array of  $H\alpha/D\alpha$ -line Detector and SMBI

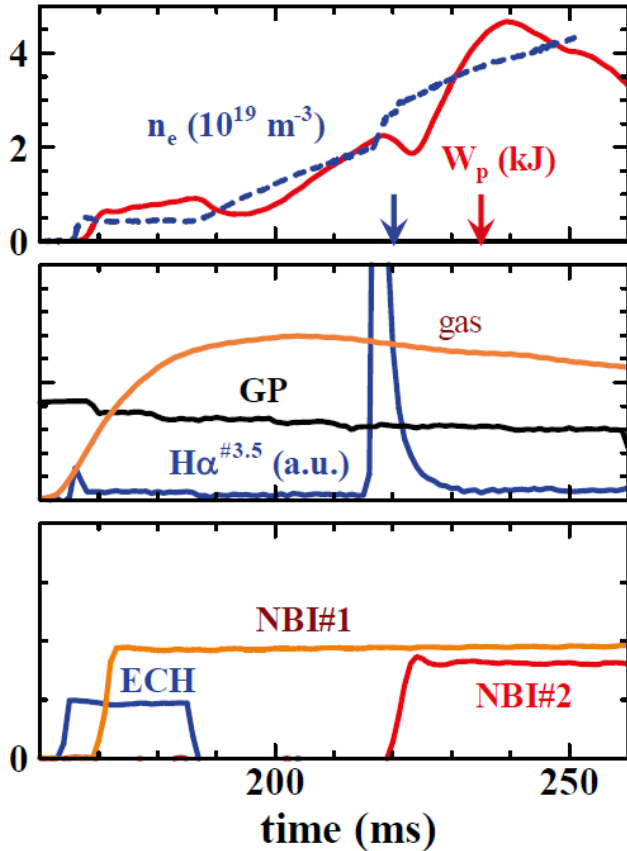


- ✓ Faster and intense response in open shutter case
- ➔ Indicating injected beam well penetrate to core plasma region

# Fueling control effects for NBI heating plasmas

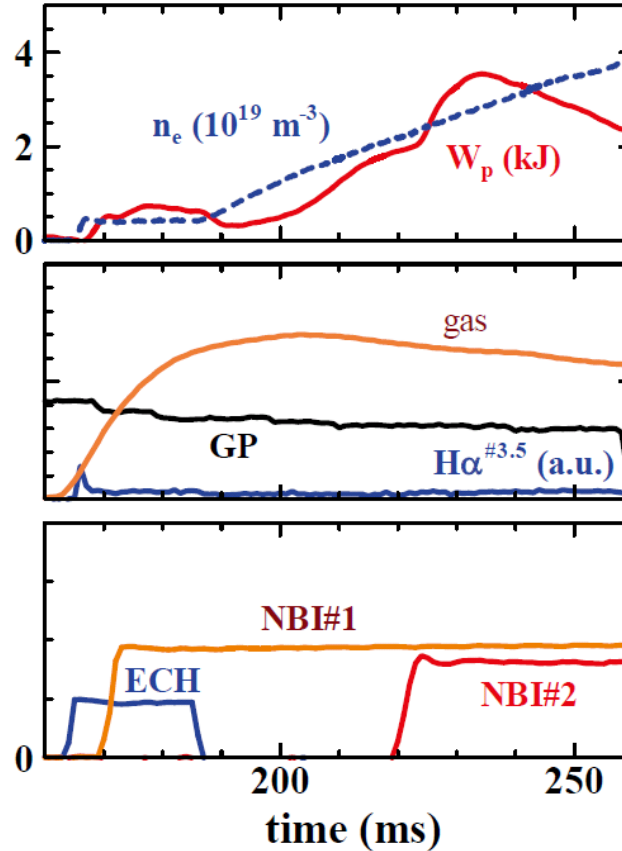
## SMBI

HJ40180-40190/STD



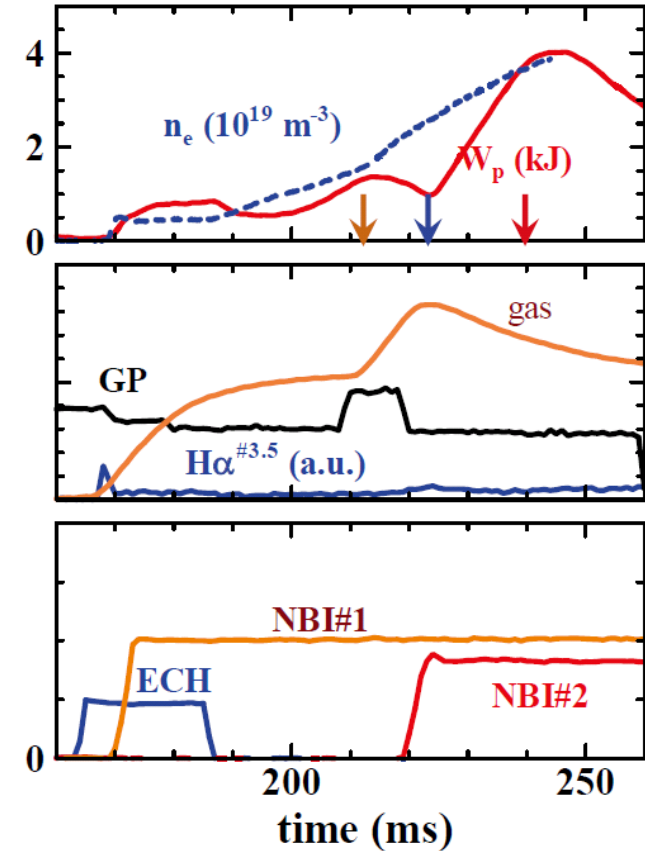
## Continuous GP

HJ40175/STD



## Short-pulsed Intense GP

HJ40230-40259/STD



✓ Comparison among three fueling methods, SMBI, continuous gas puffing, short-pulsed intense gas puffing, in the two-staged NBI heating scenario.

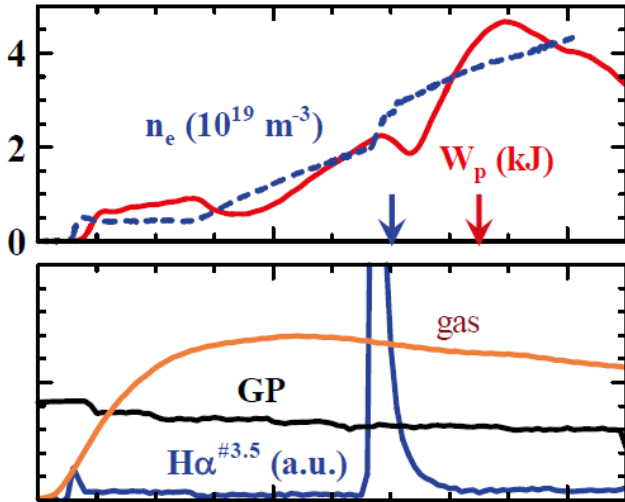
→ to produce and investigate preferable target plasma for NBI heating.

✓ Higher density and stored energy was obtained for SMBI case.

# Fueling control effects for NBI heating plasmas

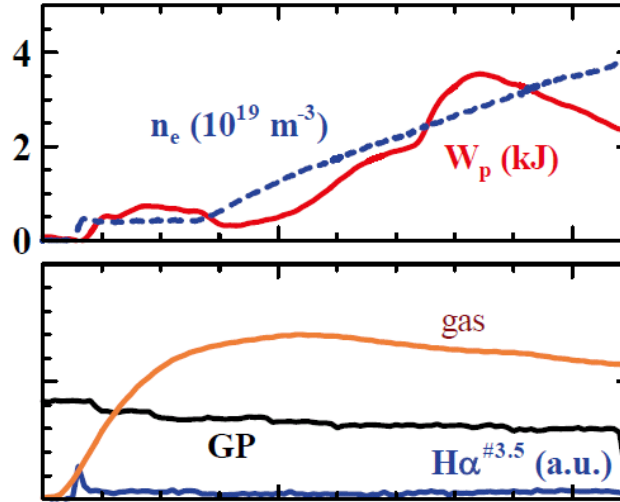
## SMBI

HJ40180-40190/STD



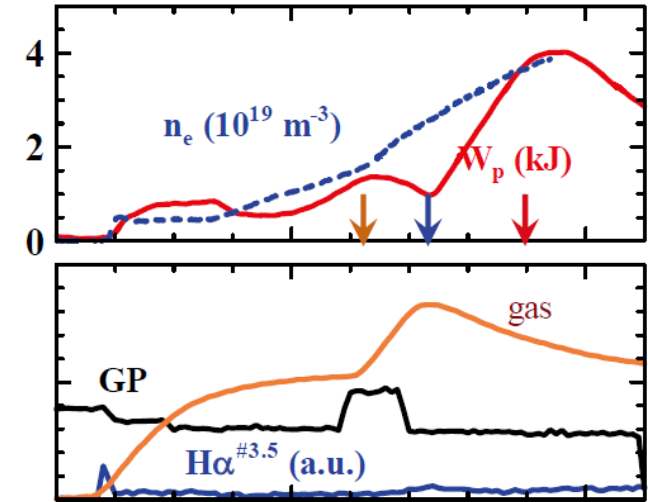
## Continuous GP

HJ40175/STD

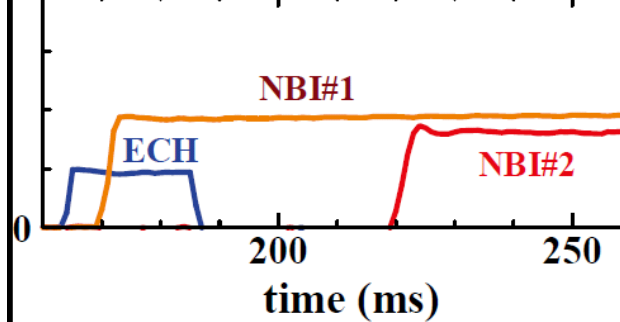
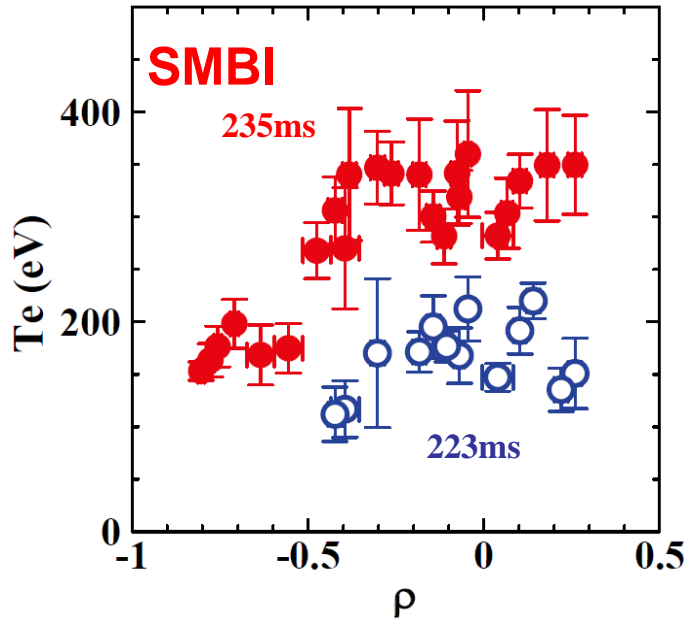


## Short-pulsed Intense GP

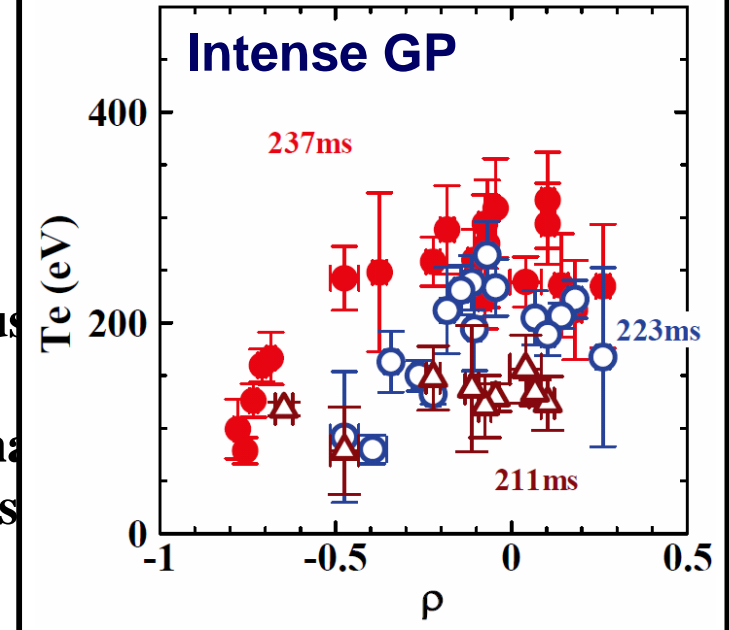
HJ40230-40259/STD



HJ40176-40196/H2



HJ40231-40259/H2



...ing methods, SMBI, continuous  
 staged NBI heating scenario.  
 ...estigate preferable target plasma  
 energy was obtained for SMBI cas

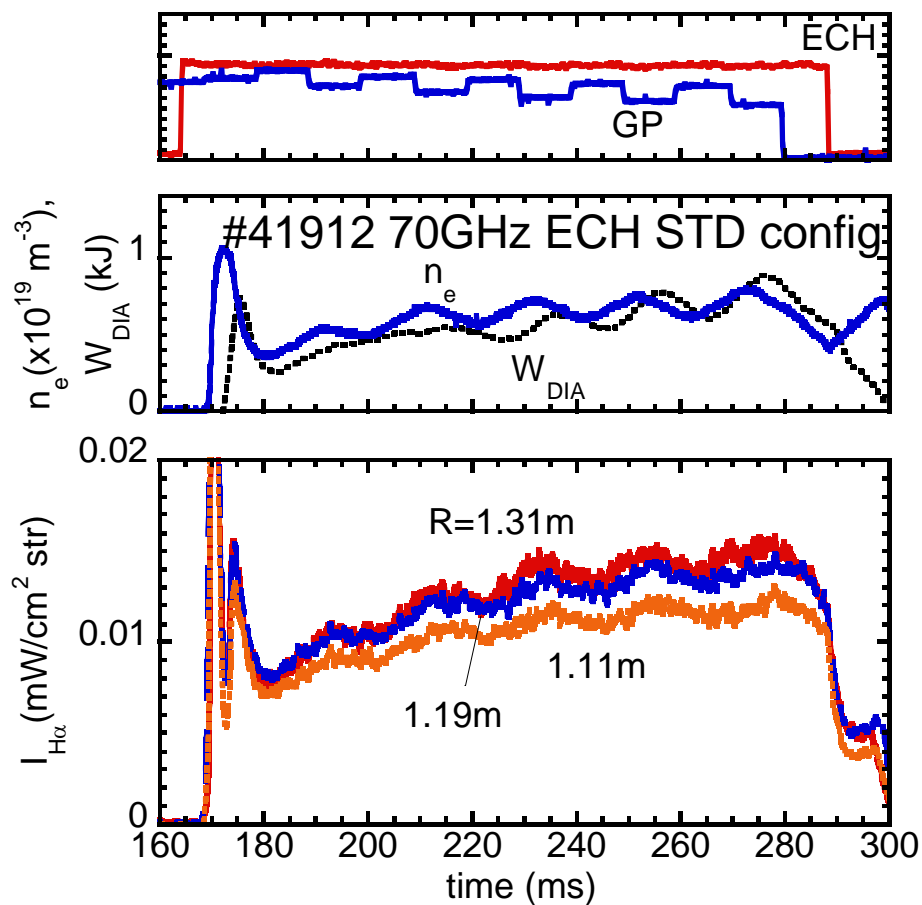
**Higher core  $T_e$  for SMBI case**

# 粒子輸送解析のための密度変調実験

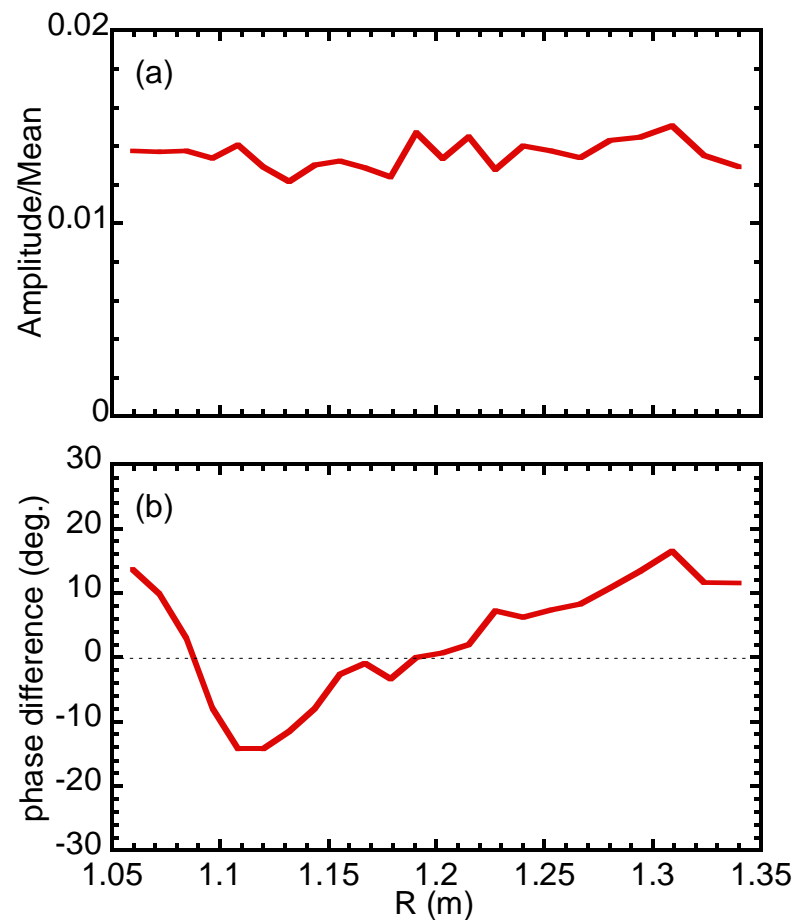
- 双方向型共同研究課題「ヘリオトロン」における密度分布の動的挙動と能動的制御に関する研究」代表者：福田先生(大阪大学)と協力した研究
- ガスパフ変調法(50Hz)による密度変調実験
- 線平均電子密度  $n_e = 0.7 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  に対して約  $\Delta n_e = \pm 0.1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  の密度変調

- H $\alpha$ 線放射輝度にも密度変調と同様な変調  
→ 粒子生成量の変化を示唆  
→ 位相差に空間分布が見られた。一方、規格化した振幅強度はフラットな分布
- 密度分布の変化と、ガスパフ・水素リサイクリングによる中性粒子密度の変化の結果

密度変調実験の放電波形



H $\alpha$ 発光強度の位相差空間分布

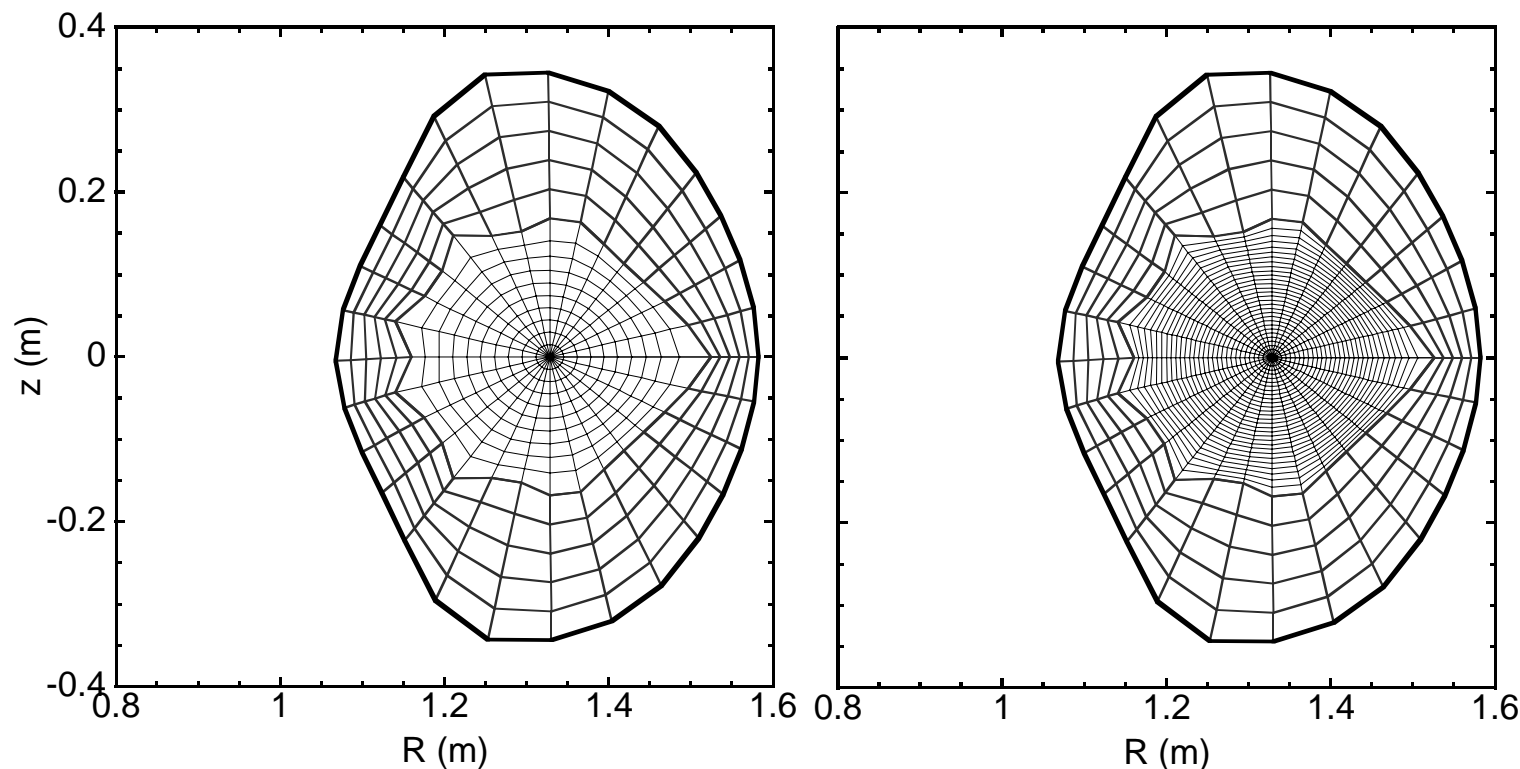




# 粒子生成量の評価に向けた中性粒子輸送解析

- ・密度分布の空間・時間発展を反射計で計測  
→ 計測範囲(密度・空間位置)に制限、現在、FIR干渉計の設置を計画
- ・現在、粒子生成量の時間・空間分布を評価するための中性粒子輸送解析を進めている
  - ✓ 3次元中性粒子輸送シミュレーション(DEGAS)のプラズマメッシュモデルを改良
  - ✓ 径方向のメッシュ数を増やし、より高精度化を目指す(下図参照)
  - ✓ 現在、メッシュモデルの健全性の確認、実際のシミュレーションを進め、粒子生成量の時間・空間分布を評価し、輸送解析のデータベース構築を目指す。

モンテカルロシミュレーションのプラズマメッシュモデル(左:従来、右:径方向のメッシュ数を3倍に増やしている)。コーナー部の断面のみ表示



# ヘリオトロンJおよびGAMMA10における 粒子補給の最適化実験



IAE Kyoto Univ.



PRC Univ. Tsukuba

筑波大学プラズマ研究センター シンポジウム 2011.Jul.20-22  
京都大学エネルギー理工学研究所 小林進二

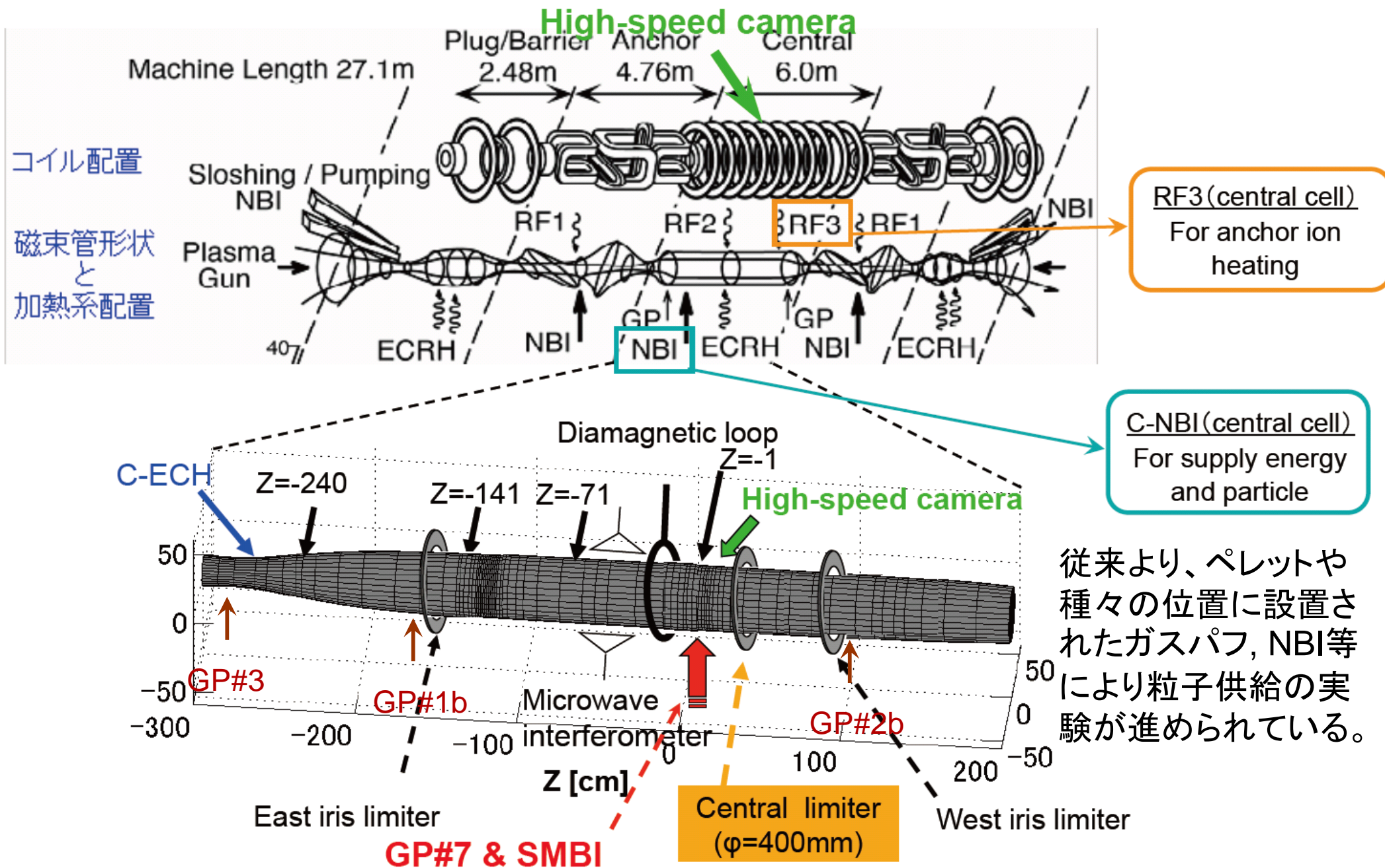
## Contents

1. 研究の背景
2. Heliotron J における粒子供給最適化に向けた実験  
The helical-axis heliotron device  
✓ 超音速分子性ビーム入射(SMBI)実験  
✓ 粒子輸送解析のための密度変調実験  
Largest Helical-Axis Heliotron in the World
3. GAMMA10 におけるSMBI初期実験  
Largest Helical-Axis Heliotron in the World
4. まとめ

Heliotron J

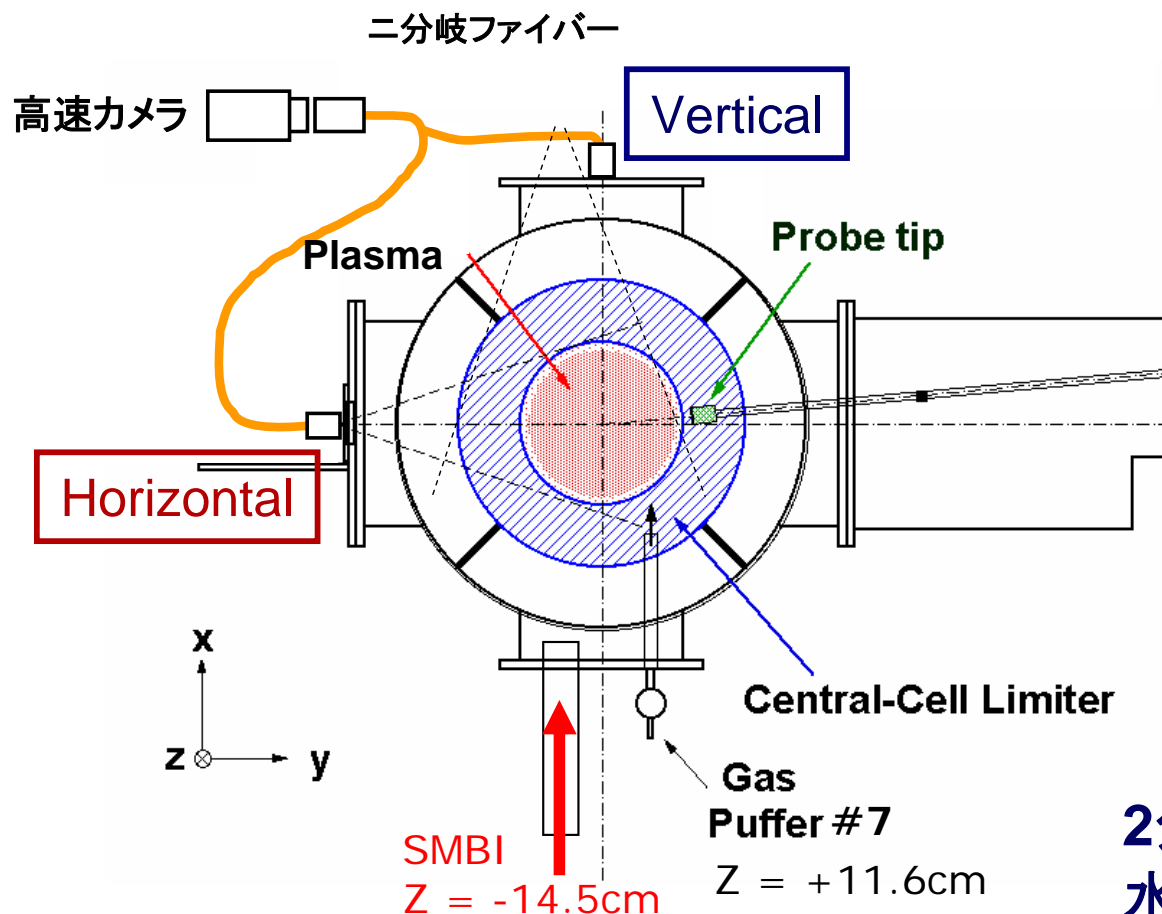
GAMMA10

# GAMMA10概略図

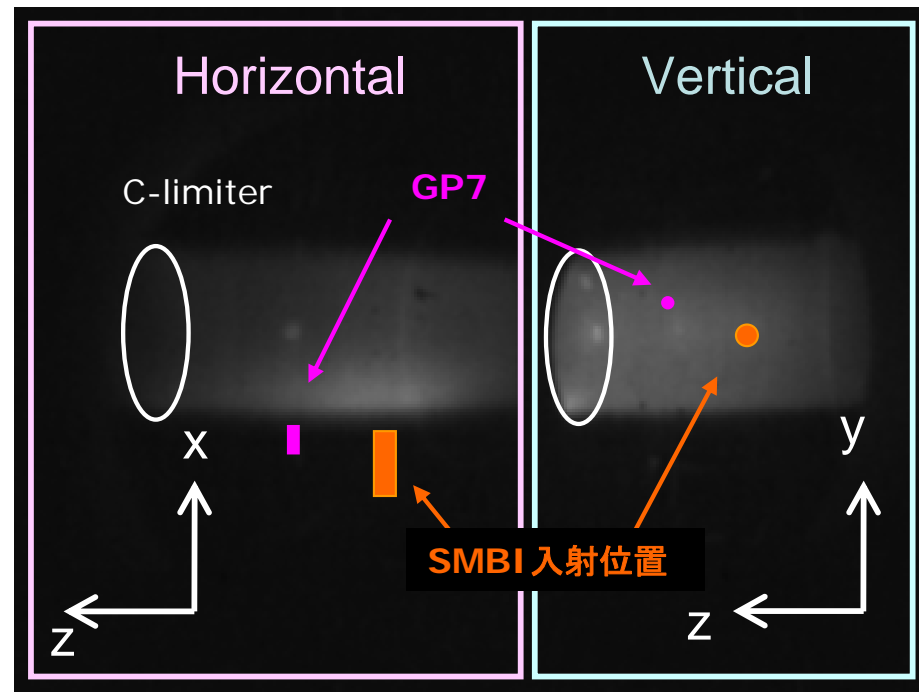


# 高速カメラによる二点同時計測

## プラズマ発光の2次元イメージ計測システム



## 二視線の同時計測(高速カメラ画像)

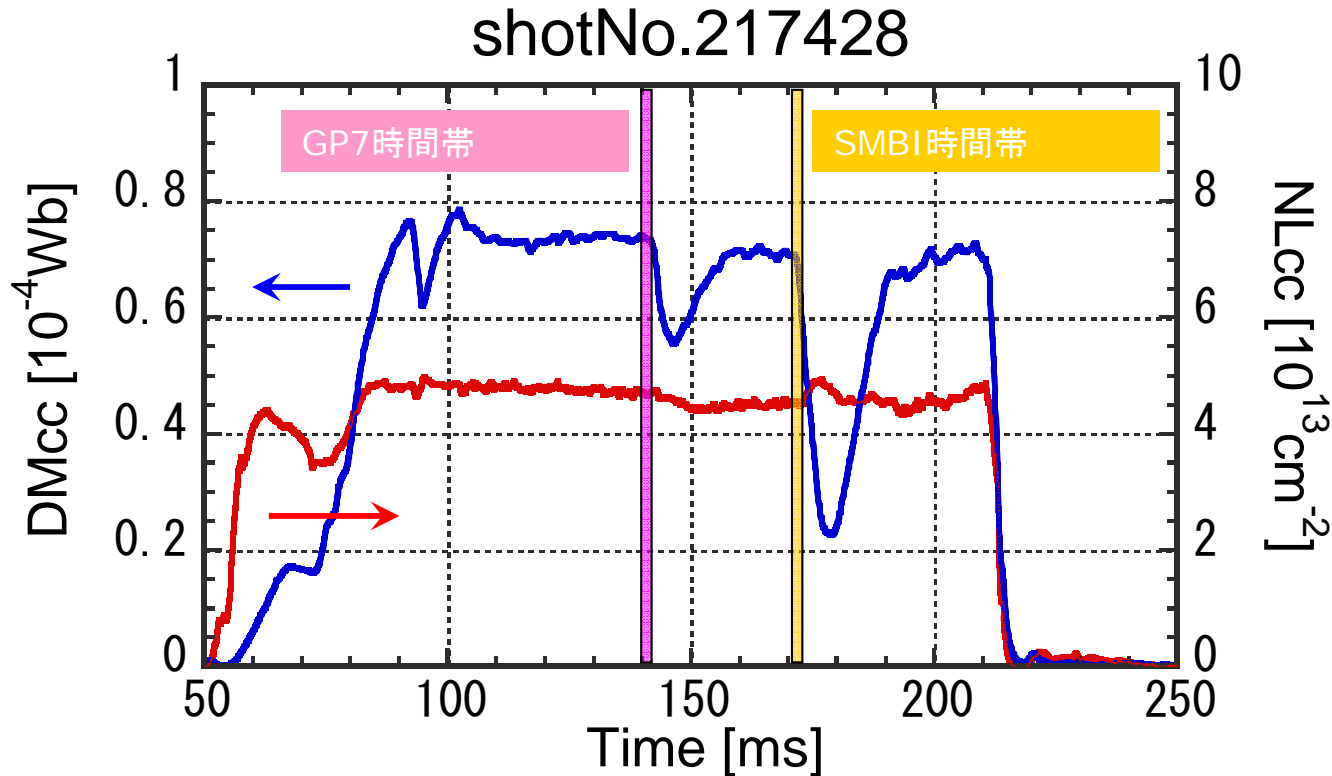


2分岐型イメージファイバにより、上下、水平方向から同時に観測可能

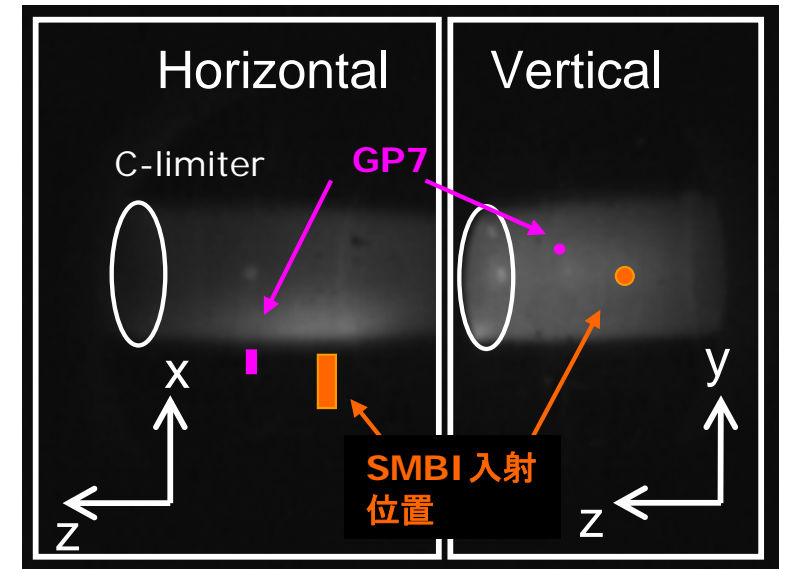
今回の粒子補給実験に用いられたガスパフ#7及びSMBIは、共にセントラル部中央部付近において、真空容器下部に設置

# SMBI初期実験結果

セントラル部中央ガスパフ(GP#7)とSMBIの同一ショット内で入射を行い, 高速カメラにより水平・垂直方向から放射輝度の同時測定を行った。



二視線の同時計測(高速カメラ画像)



イオン温度の高いセントラル部中央での入射→CX損失の増大→イオン温度低下  
→入射位置の最適化が課題。今後、ミラースロート部への設置を検討。

今回はプラズマへの応答、2方向からのイメージ観測を主目的

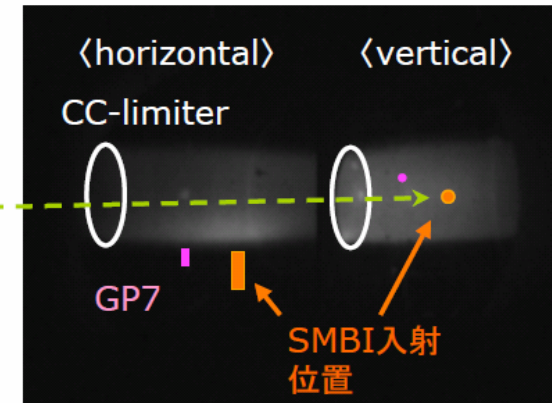
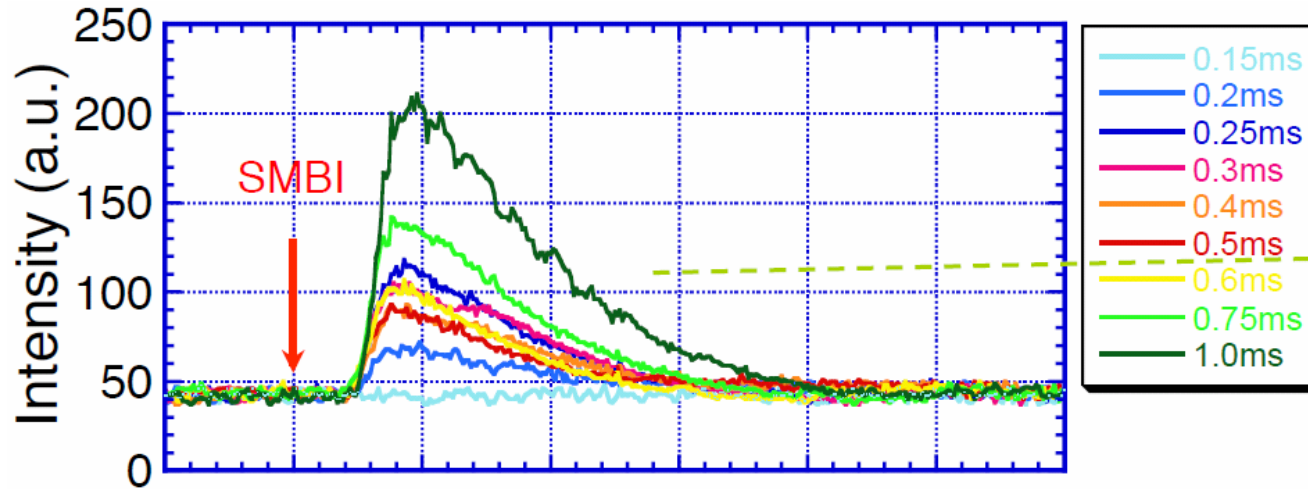
# SMBIガス導入量依存性(プレナム圧1.0MPa パルス幅可変)

PRC Univ. Tsukuba

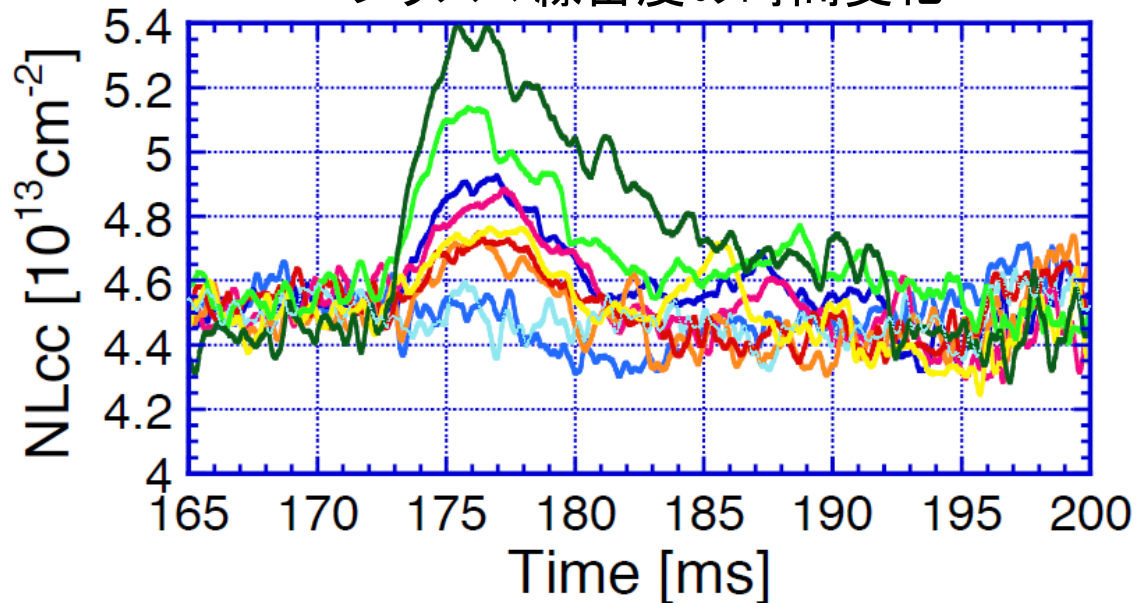
IAE Kyoto Univ.

SMBIのガス導入量を変化させ、変化を調べた。(プレナム圧1.0MPa、パルス幅0.15ms~1.0ms)

発光輝度(SMBIを見込む視線)の時間変化



プラズマ線密度の時間変化



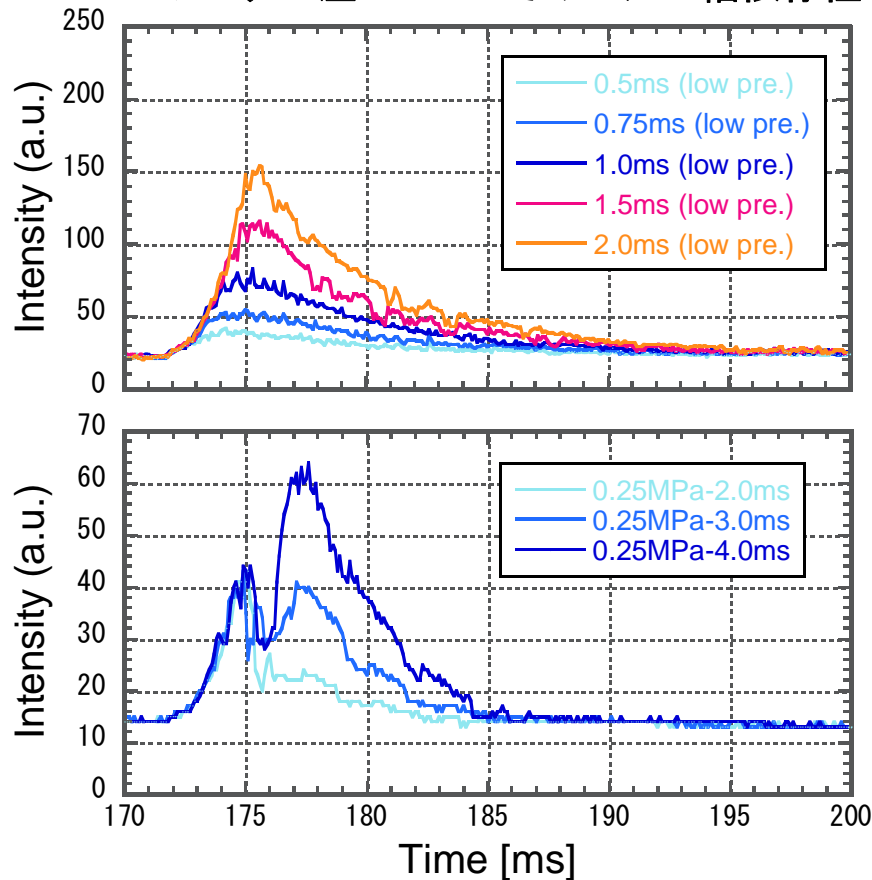
- 発光輝度は、SMBI後、2~3ms後に立ち上がり、そのピーク値はパルス幅の増加と共に上昇する。
- プラズマの電子線密度は発光輝度とほぼ同時に立ち上がり、輝度のピーク時から1~2ms程維持した後、減少に転じる。

# SMBIガス導入量依存性(プレナム圧0.25MPa パルス幅可変)

PRC Univ. Tsukuba

IAE Kyoto Univ.

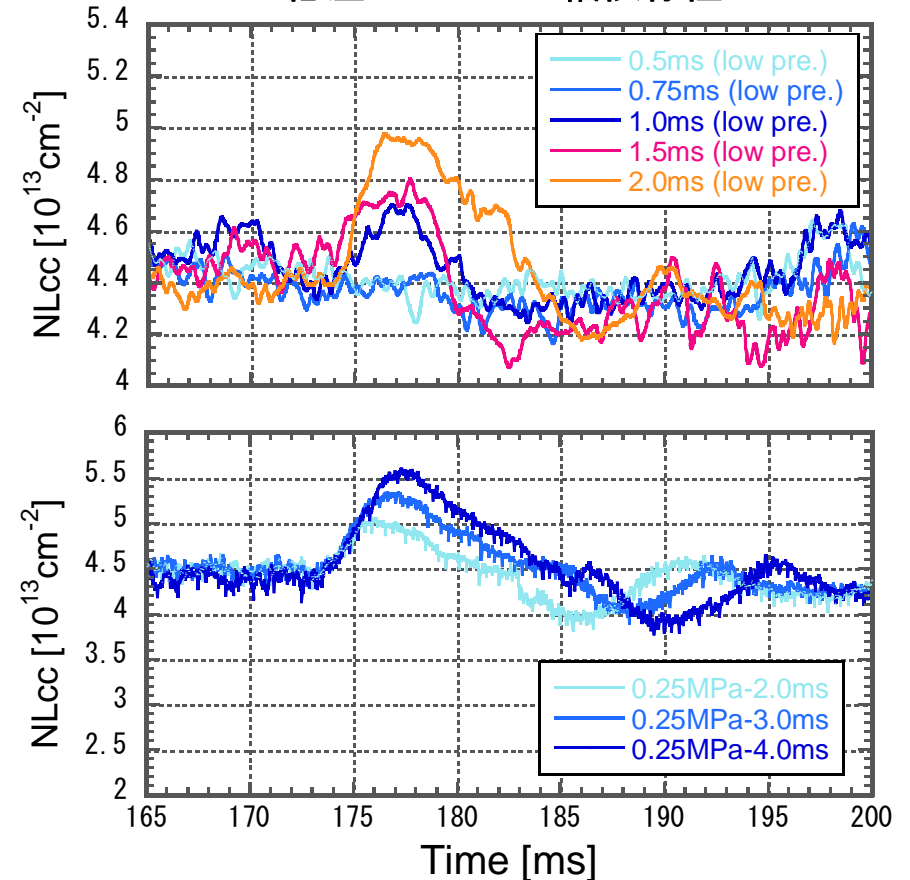
### プレナム圧0.25MPaでのパルス幅依存性



パルス幅  
0.5-2.0ms

パルス幅  
2.0-4.0ms

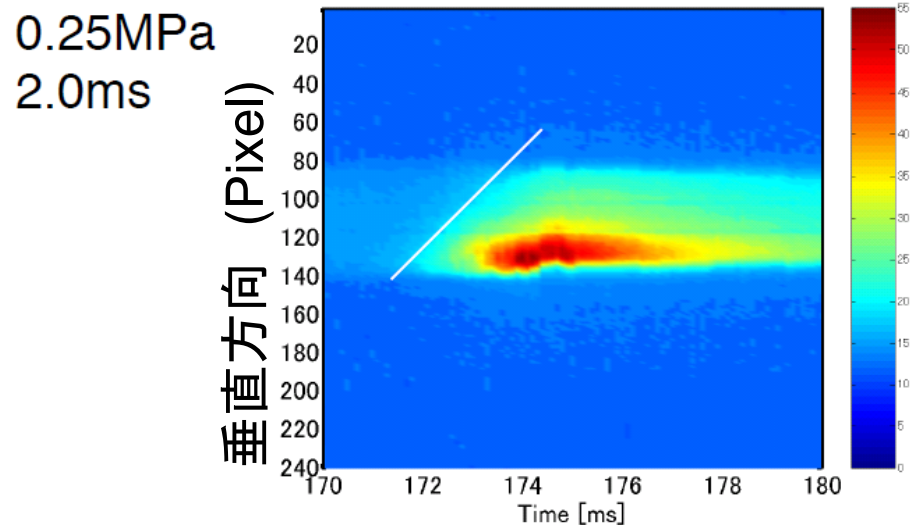
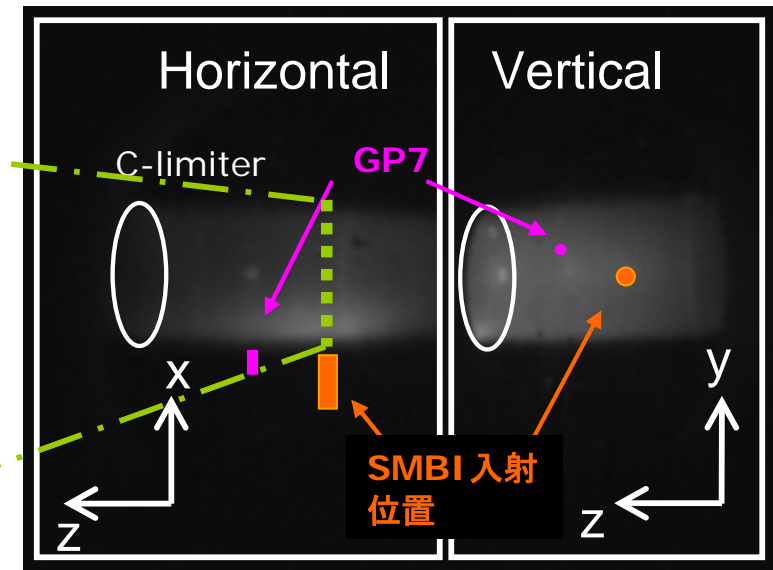
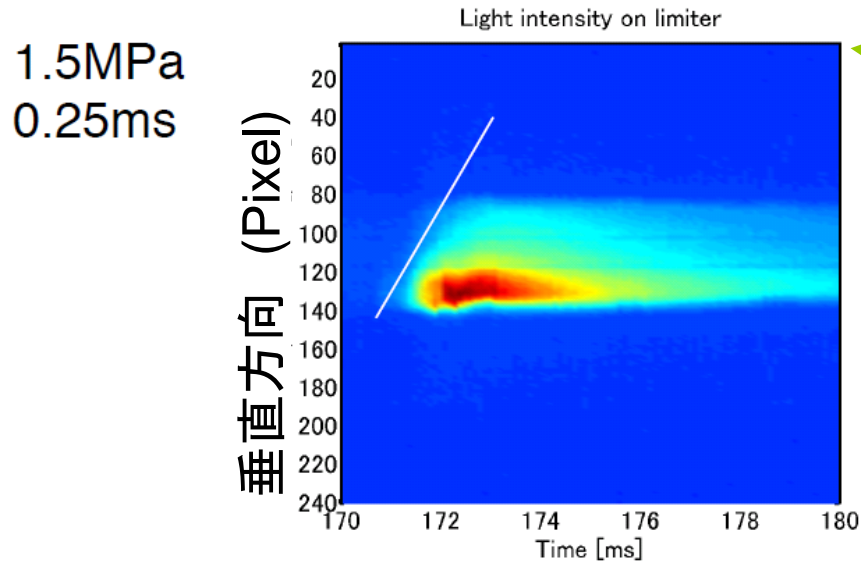
### 低圧でのパルス幅依存性



- ・低プレナム圧でパルス幅を伸ばすとピークが2つに分裂する現象が見られた
- ・後半のピークの輝度が支配的で密度増加の寄与が大きい

# SMBIガス導入量(プレナム圧)依存性

SMBI入射方向の断面を時系列でプロット



- プレナム圧の高い方(1.5MPa)が、傾斜が強いことが分かる。
  - 速度が速いことを示唆
  - ただし、評価された速度は0.2km/sと遅い。
  - SMBIの電磁弁の設置位置に依存?
  - 高速成分(0.6km/s)も見えており、詳細に解析する必要。
- 輝度ピーク(赤い領域)の垂直方向位置は、プレナム圧に対してほとんど変化しない。
  - 吸収位置は変わらないことを示唆



# まとめ

---

## Heliotron J

- ・ SMBIの効果的な粒子供給が実験的に明らかになる
  - ガスパフによる粒子供給を超えた高密度プラズマの生成
  - $H\alpha/D\alpha$ 線放射分布計測から、より高速&中心部への粒子供給
  - 加熱(NBI, ECH等)に最適な密度(分布)制御
  - 高密度での分布計測についてはYAG ThomsonやFIRの設置が課題
- ・ 粒子輸送解析にむけた密度変調実験を試みる
  - 粒子生成量の変化を示唆するデータを取得、今後詳細に解析を進める計画

## GAMMA10

- ・ SMBIの初期実験を行い、プラズマへの応答、2次元イメージ計測を行った
  - 低プレナム圧におけるパルス幅依存性実験
    - ・ パルス幅に応じて密度増加、パルス幅が3ms以上で発光ピークが2つに分裂。  
ただし後半の発光が密度増加に寄与
  - 高プレナム圧におけるパルス幅依存性実験
    - ・ 同様にパルス幅に応じて密度増加を観測。密度の立ち上がりが早い  
ただしSMBIの進入速度については要検討(コンダクタンスの問題?)
  - 入射システム、位置の改良、改善