



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



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 2013.Aug.29-30
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. GAMMA10 におけるSMBI実験
 1. 実験・計測装置
 2. 実験結果
 3. シミュレーションとの比較・考察
3. まとめ

共同研究者

筑波大学: 中嶋洋輔、坂本瑞樹、吉川正志、小波蔵純子、
細井克洋、武田寿人、市村和也、木暮諭、高橋樹仁、岩元美樹、細田甚成
京都大学: 水内 亨、岡田浩之、原田伴誉、大谷芳明、笠嶋慶純、桐本 充晃、丸山 正人、
広島大学: 西野信博
NIFS: 森崎友宏、宮澤順一、庄司 主、村上昭義

研究の背景

IAE Kyoto Univ.

PRC Univ. Tsukuba

定常環状プラズマ型核融合炉研究を指向して、**センター間連携研究**を双方向型共同研究で推進
GAMMA10, ヘリオトロンJ(京都大学)共通の課題:
「磁場閉じ込めプラズマにおける粒子補給最適化」をH24年度より立ち上げる。

Heliotron J

- ・電子密度: 10^{19}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}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における複数の $H\alpha$ / $D\alpha$ 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)

研究の背景（つづき）

IAE Kyoto Univ.

PRC Univ. Tsukuba

- GAMMA10では高密度プラズマ生成が求められており、
 1. 高イオン温度のICRF放電では低い荷電交換損失と効率的な粒子補給との両立
 2. ダイバータ模擬実験では低温・高密度プラズマの生成のための、粒子補給最適化が課題
- 粒子補給の最適化に向けて、GAMMA10, Heliotron Jでは
 - 超音速分子性ビーム入射(SMBI)法 : GAMMA10, Heliotron J
 - High Intense Gas Puff (HIGP)法 : Heliotron J が試されている。
- SMBIは高圧・短パルス(~2MPa, ~ms)で駆動する電磁弁・ピエゾ素子を用いた粒子補給で、トラス系装置では、中心部粒子補給・ELM pacingとして用いられている。

昨年度より、高速カメラと数値シミュレーションを用いて、SMBIによるガス入射特性を調べている。

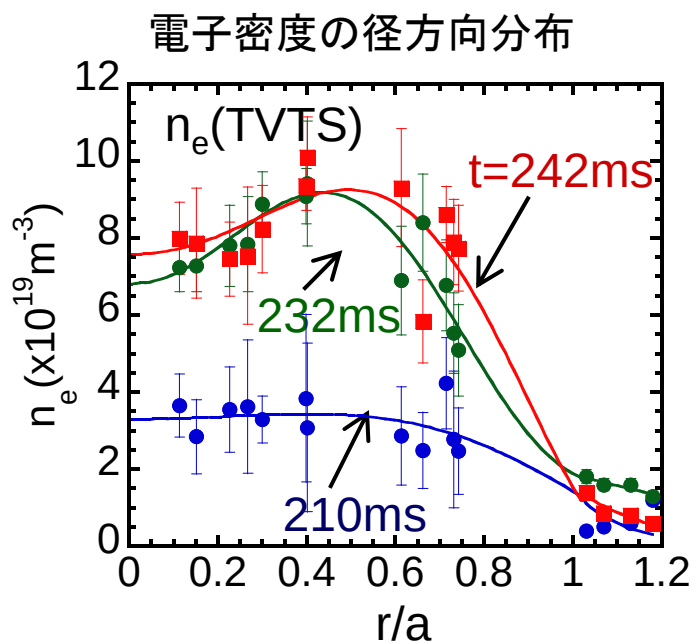
- ✓ 高速カメラでSMBI入射部を観測し、入射ガスの挙動を実験的に評価
- ✓ 中性粒子輸送シミュレーションの改良を進め、SMBI模擬の高精度化
➔ SMBIの指向性と、侵入長の検討を進めた。

High Intense GP法を用いたヘリオトロンJ高密度プラズマの観測*

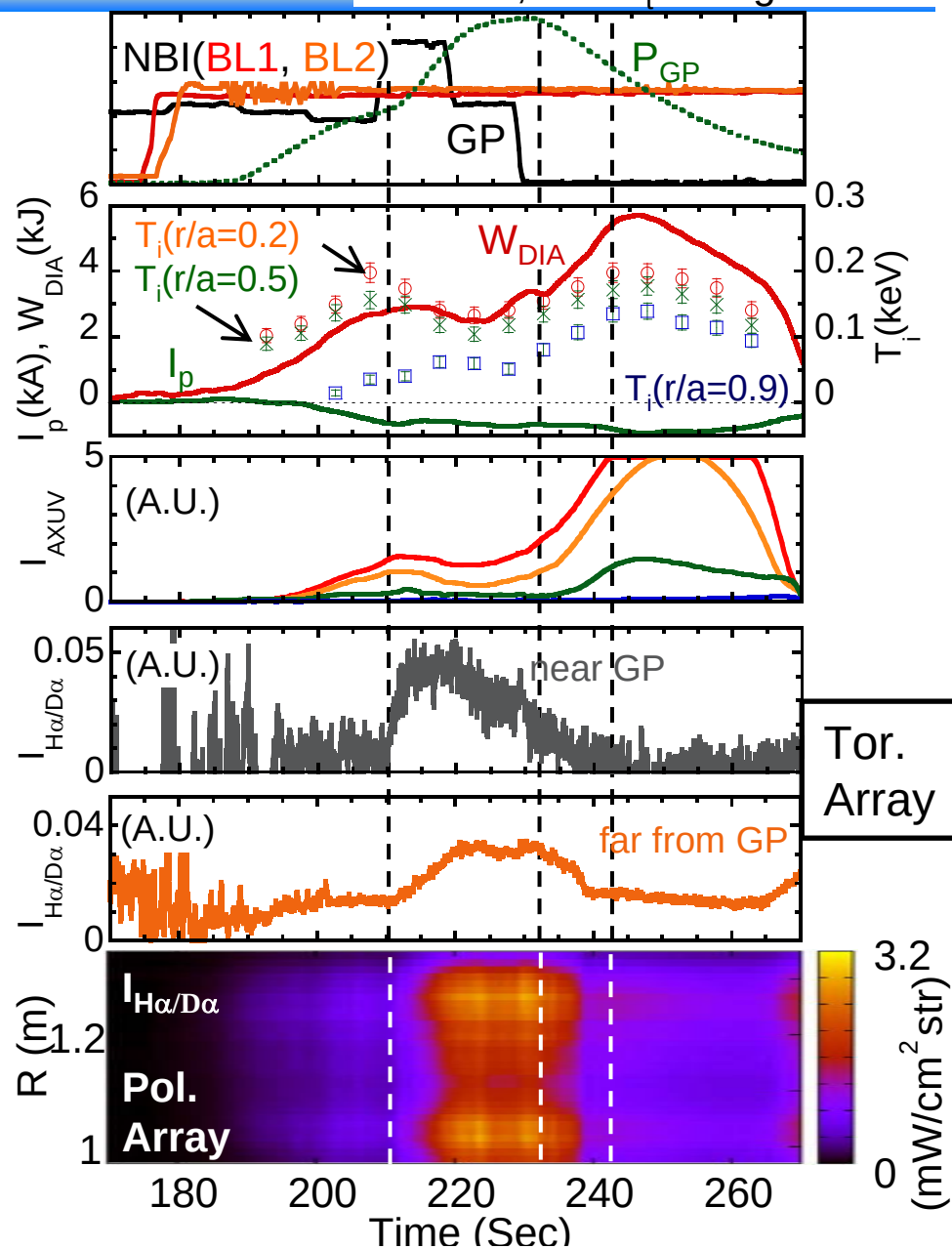
PRC Univ. Tsukuba

#50131, Low ϵ_t config. B=1.3T

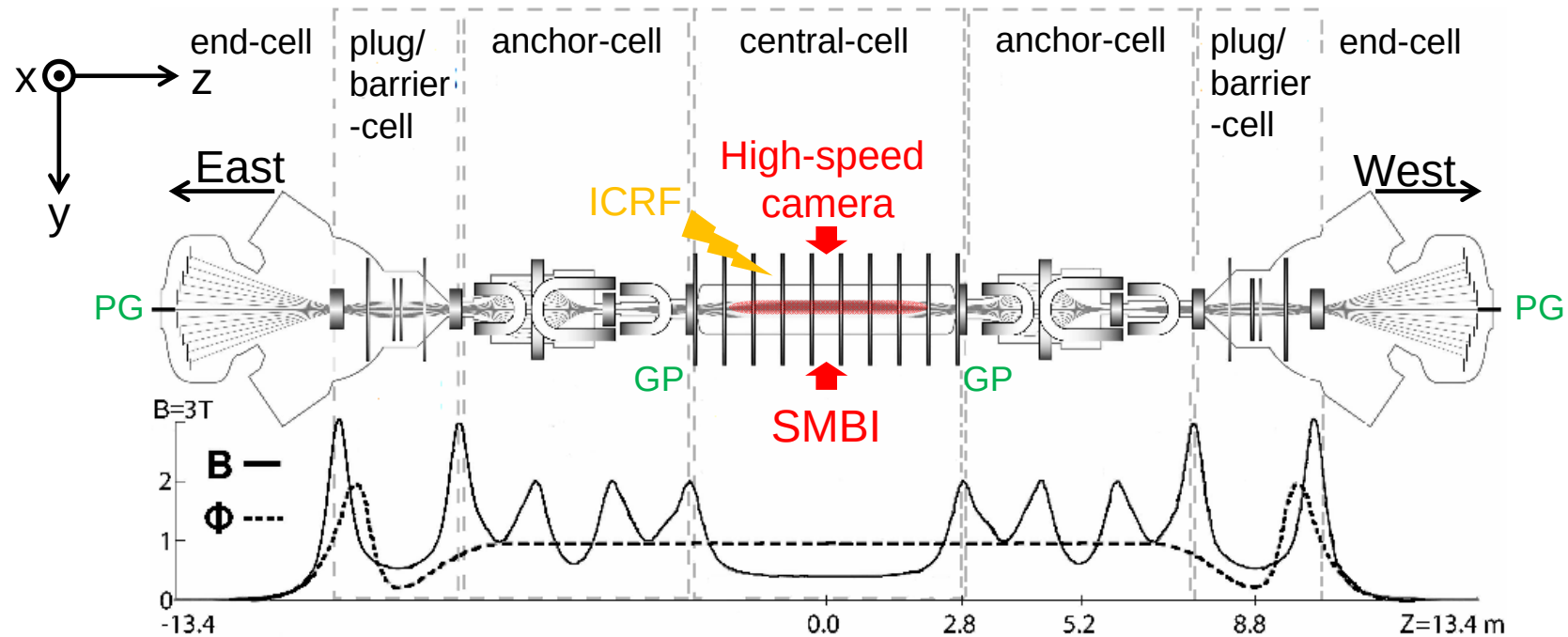
- ✓ 通常の数～十倍で短パルス(10~20ms)のGP
- ✓ GP切断後に高密度($\sim 10^{20}\text{m}^{-3}$)を観測
 1. 周辺部で電子・イオン温度の増加、および回転速度のシアが変化
 2. $H\alpha$ の急峻な減少に伴う密度揺動の低下
- 定常維持に向けた追加の粒子補給法の探索
- リサイクリング制御



*S. Kobayashi et al., 2013 EPS conference P1.148

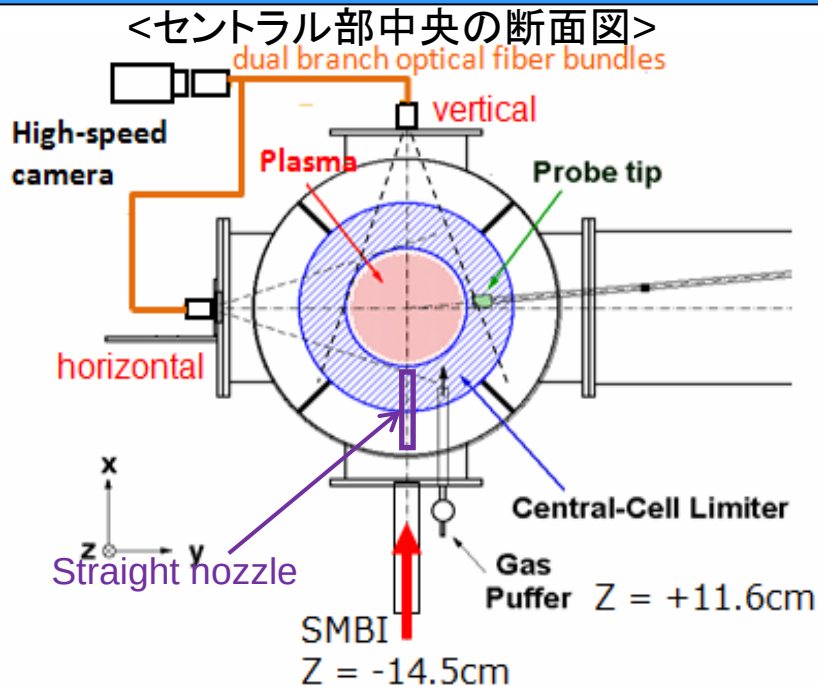


GAMMA10におけるSMBIの設置

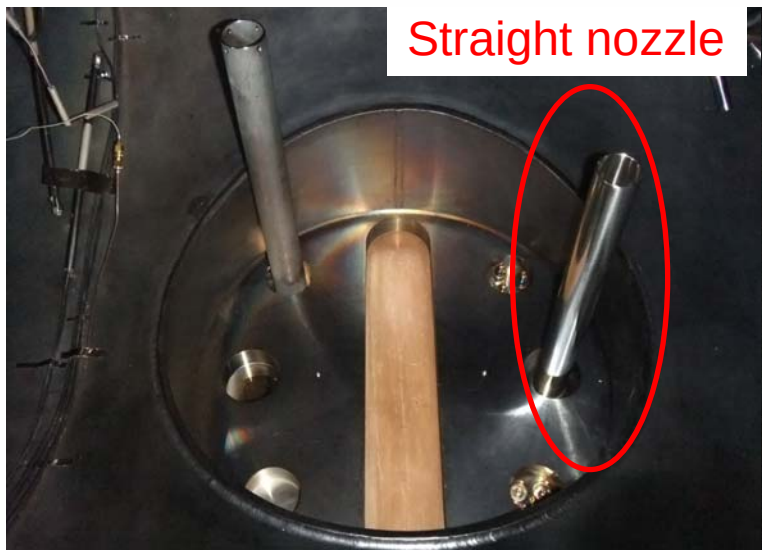


- GAMMA10はセントラル、アンカー、プラグ/バリア、エンド部で構成。(主閉じ込め領域はセントラル部)
- プラズマ生成・加熱方法
 1. 両エンド部に設置されているプラズマガン(PG)を用いて種プラズマを生成
 2. イオンサイクロトロン共鳴加熱(ICRH)を用いてプラズマ生成、加熱
- 粒子供給は通常、セントラル部両端のガスパフから供給。
- **SMBI**と**高速カメラ**はセントラル部のほぼ中央の位置に設置。

SMBI システムについて

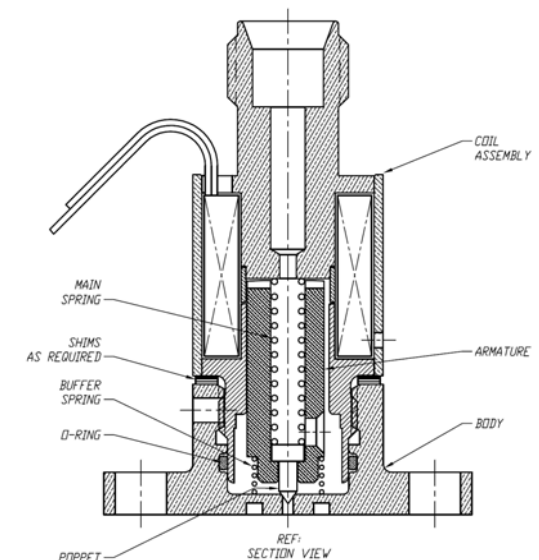


- SMBIはセントラル部中央付近の下部に設置
- SMBIシステムは高速電磁弁と磁気シールドによって構成されている。
- 電磁弁からプラズマ端までの距離は45cm
- ノズルを設置することで指向性を改善
 - ✓ ストレートノズル: 円筒型のSUS316製
 - ➔ ノズルの有無でその効果を調べる
 - ✓ ラバールノズルを用いた実験も進行中



<セントラル部中央下部の画像>

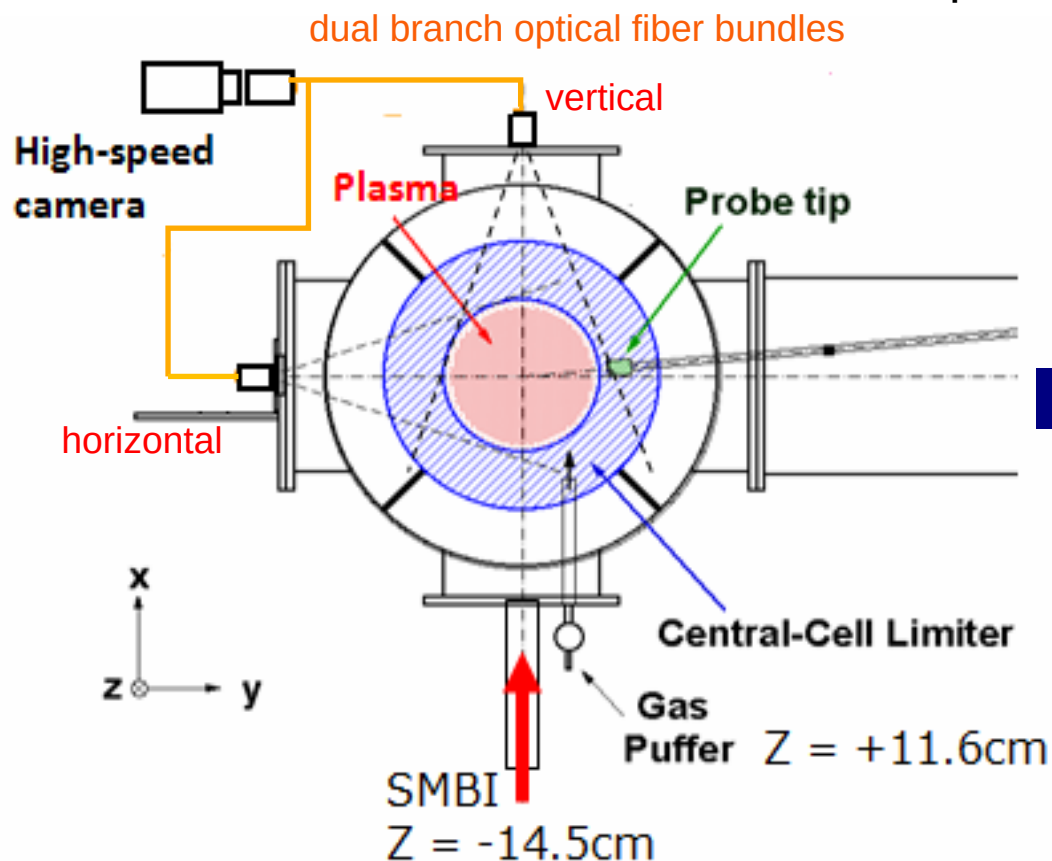
動作圧力・パルス幅
プレナム圧
:0.3~2.0Mpa
パルス幅:0.5ms



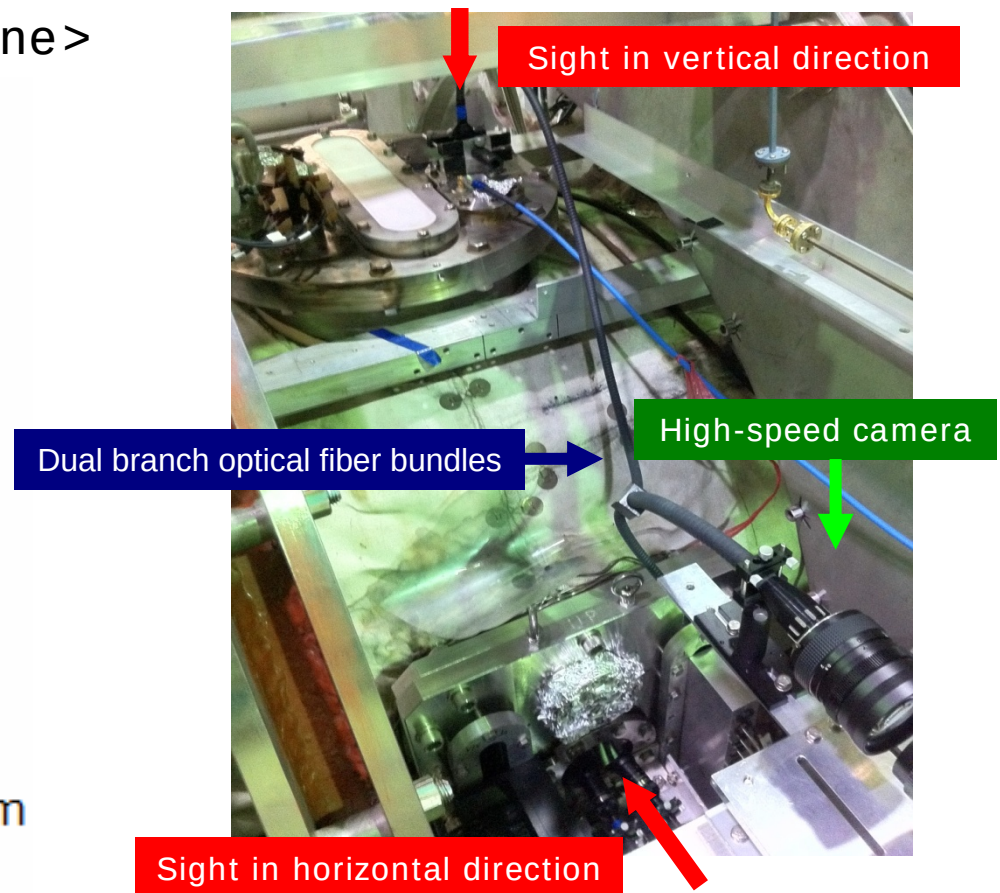
分岐ファイバーを用いた高速カメラ2方向同時計測

- ✓ プラズマの挙動観測のため、セントラル中央部に高速カメラを設置
 - ✓ 2分岐ファイバーを用いて、水平・垂直の2方向から同時測定
- ➔ 指向性の同定を目指す

<cross-section of the central-cell midplane>



<Two-point Simultaneous Measurement System>



SMBI入射実験

ICRF放電プラズマにSMBIを導入

- SMBI入射による密度の増加を観測 ⇔ 反磁性量の低下を引き起こす

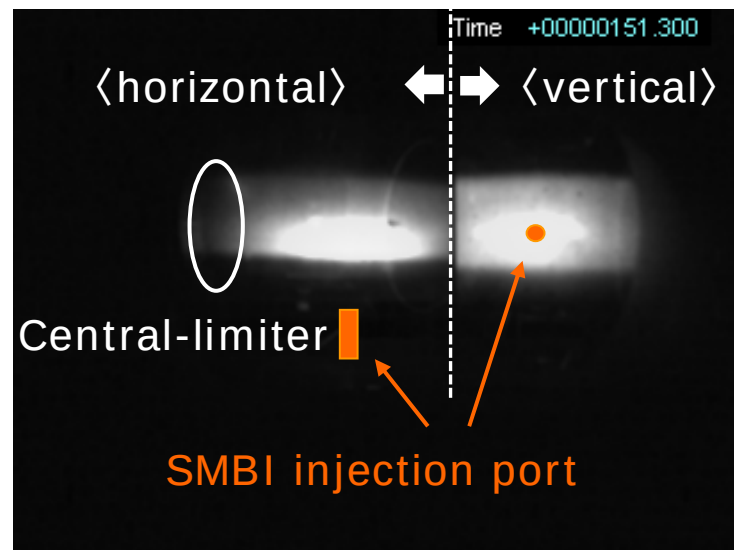
イオン温度の高いセントラル部中心付近で入射

→ 高性能化にはCX lossの低減が必要

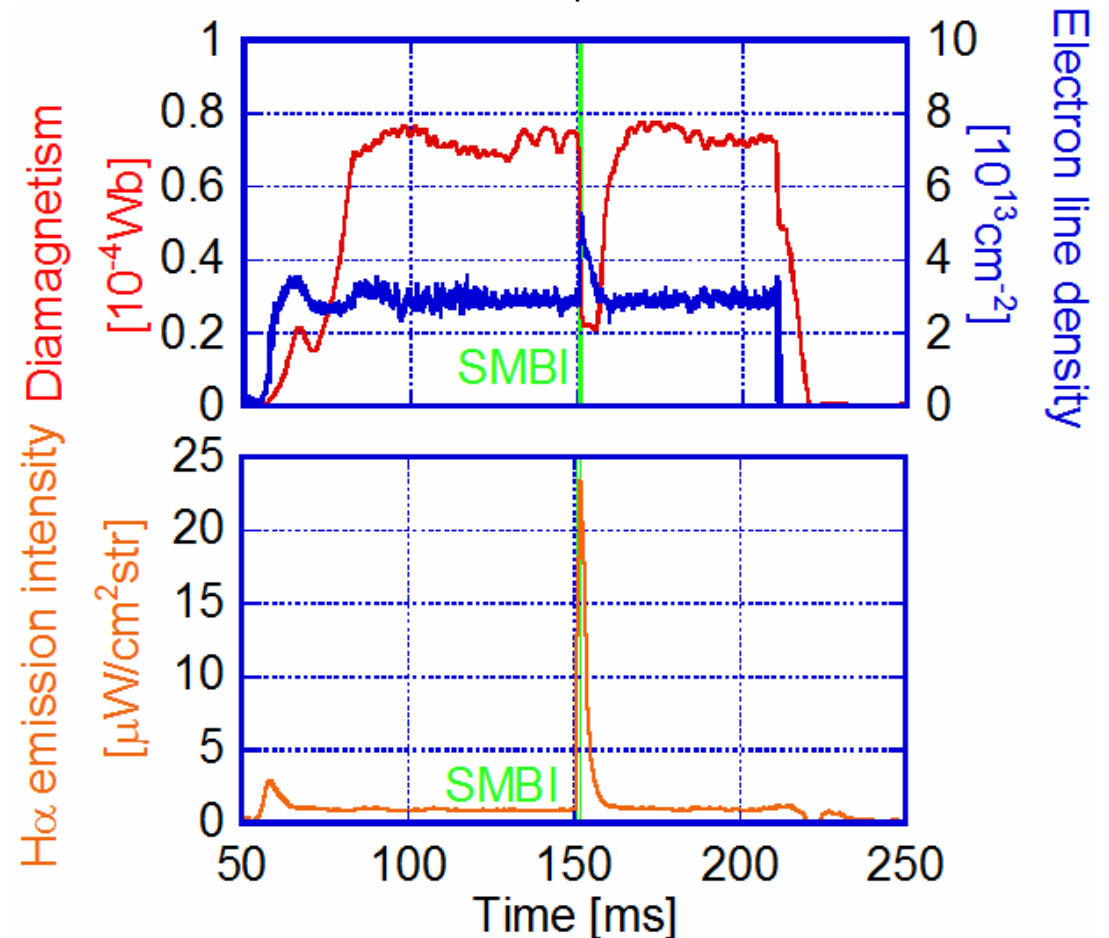
→ 入射位置最適化が今後の課題

- プラズマからの発光を高速カメラで観測

< 2-D image obtained by high-speed camera >



< The temporal behavior of plasma parameter in SMBI experiment >

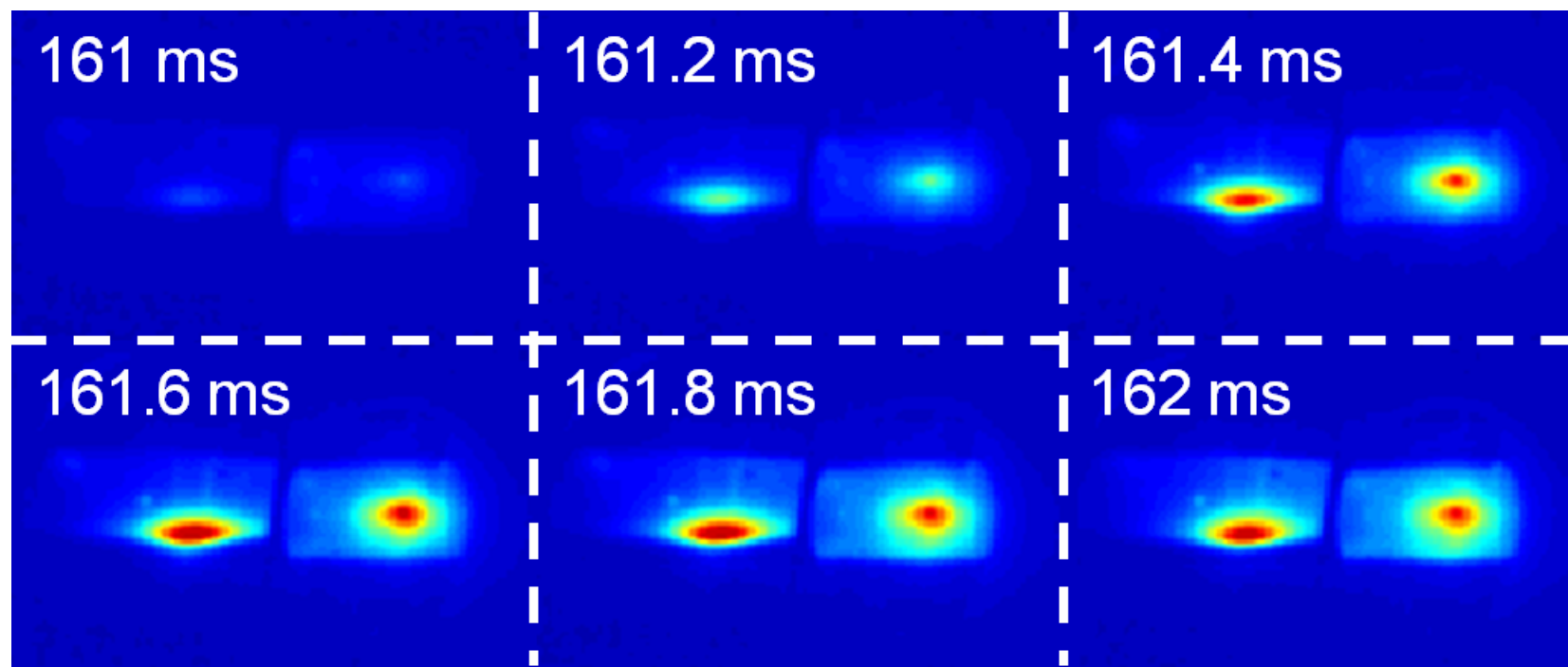


2次元カメライメージ

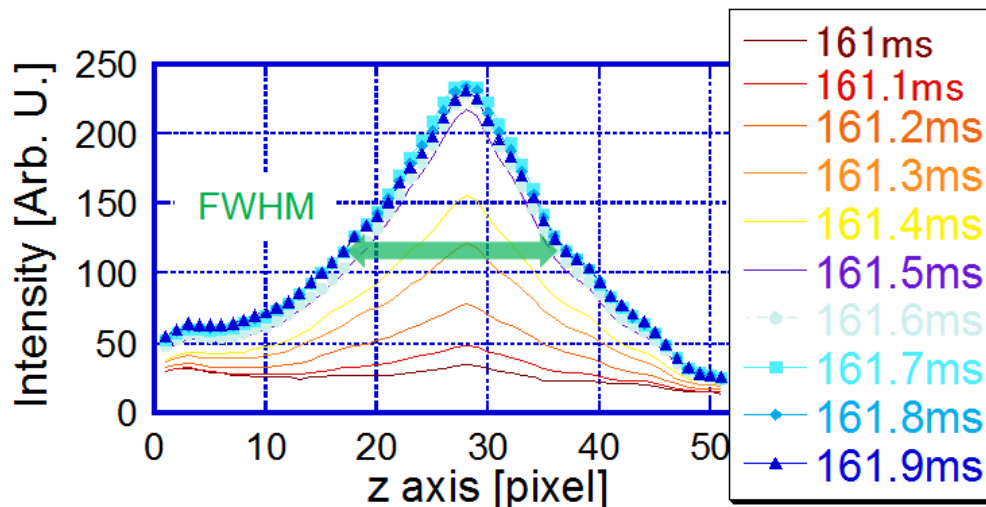
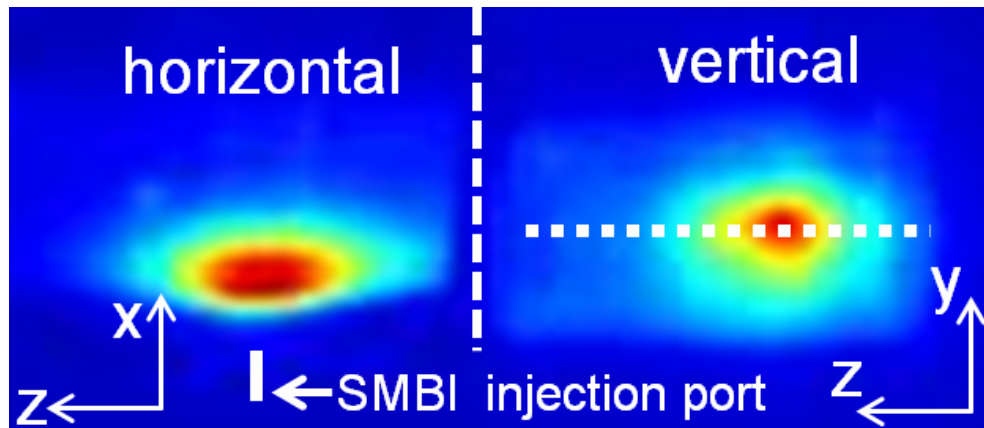
高速カメラにより観測した2次元イメージの時間変化を示したのが以下の図である。
高速カメラの設定は、10,000fps、ピクセルサイズは320x240 pixelsである。
SMBIからの中性粒子の拡散は2次元イメージで得られた発光強度の分布を基に評価した。

SMBI の設定条件は、トリガータイミングが160 [ms]、パルス幅は 0.5 [ms]である。

この条件では、入射1ms後より徐々に発光が強くなり、162msでピークを迎えた。



分子性ビームの指向性の指標

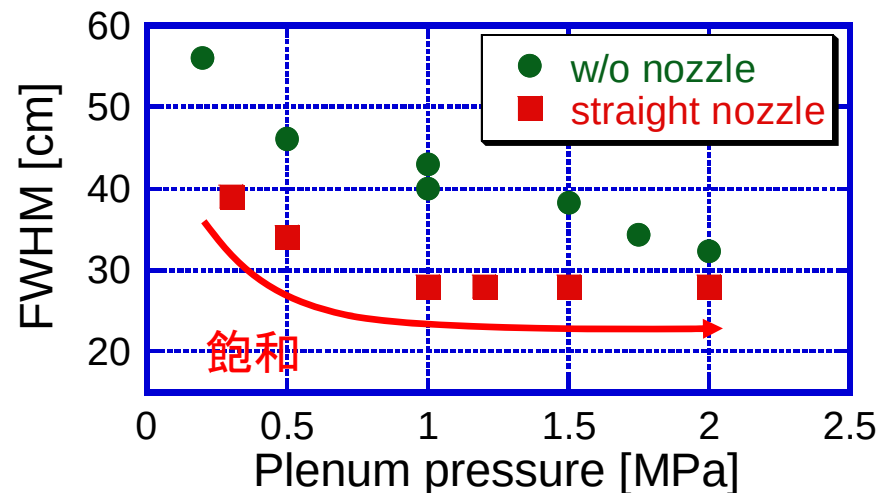


- SMBIからの分子ビームの指向性を調べるために、プラズマの径や形に影響を受けにくい、z軸方向に限定して調べた。
- 左図の垂直方向の2次元イメージのSMBIの入射口の直上の発光強度分布（破線上）を調べることにより、分子ビームの指向性を評価した。

Z軸上の発光強度分布の半値全幅(FWHM)をz軸方向の中性粒子輸送の指標とした。

プレナム圧依存性(ノズル有り・無し)

Z軸方向の中性粒子輸送の指標としたFWHMを各プレナム圧に対して調べた結果が以下の図である。また、ストレートノズルの効果についても併せて調べた。

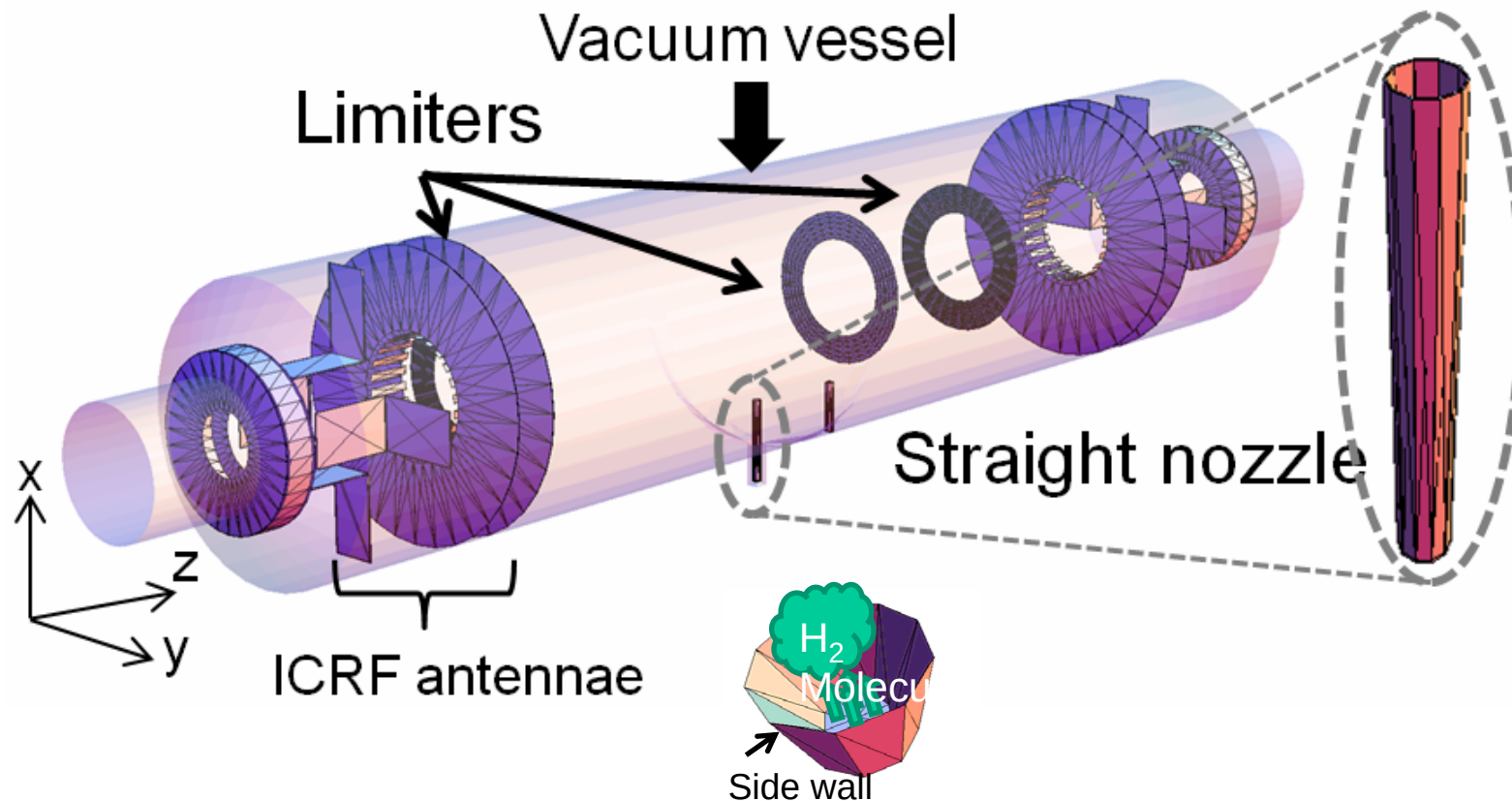


- FWHMはストレートノズルがある方が全プレナム圧に対して低い結果となった。
- ストレートノズル有無に関わらず、低いプレナム圧の場合は、プレナム圧増加に対して、FWHMは減少している。
- しかし、ストレートノズルを用いた場合、プレナム圧を高くした場合、FWHMは飽和してしまった。

- SMBIから導入されるガスの指向性の高さは、プレナム圧に対して依存
- ストレートノズルを用いた場合の飽和現象は、ノズル内での中性粒子～中性粒子衝突の効果か？
 - ➔ ラバールノズル等によるノズル形状の最適化。

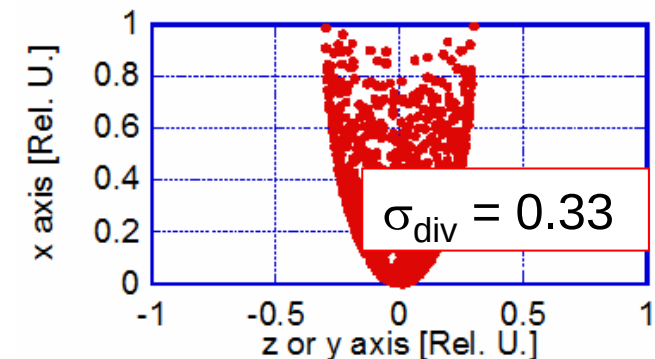
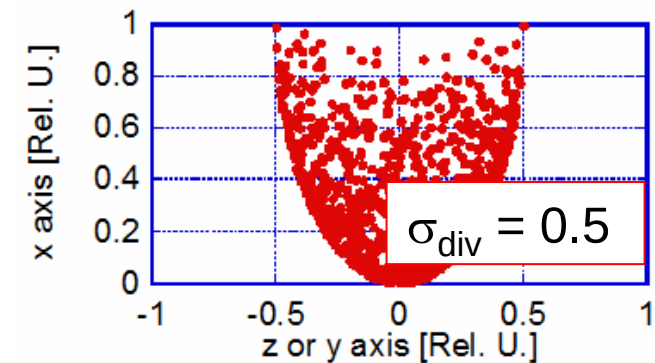
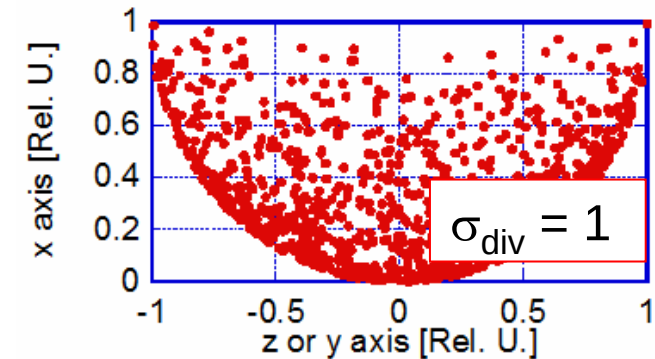
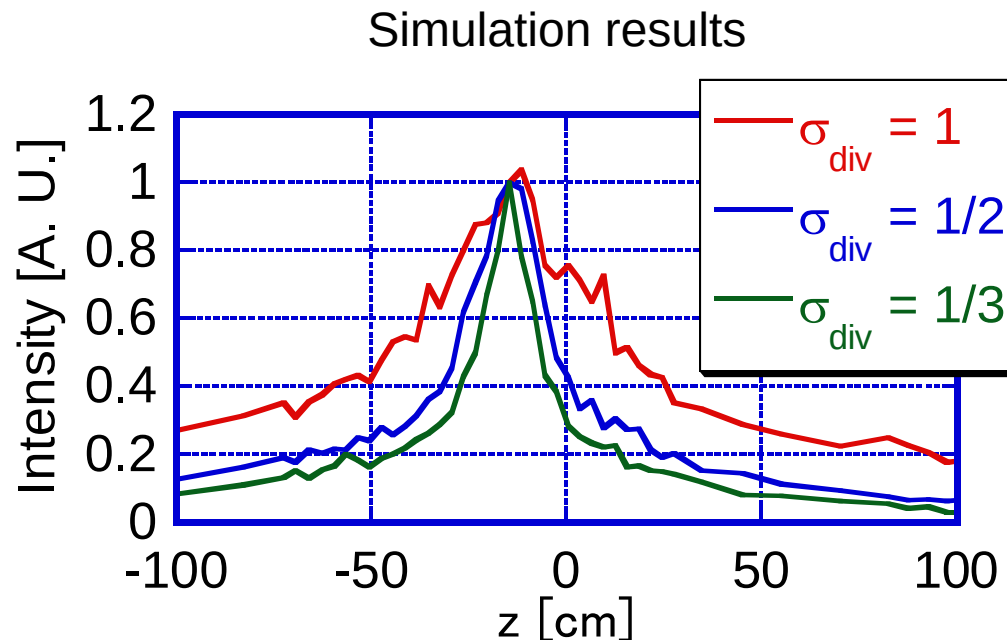
中性粒子輸送シミュレーション

- ✓ SMBIのシミュレーションを目指して、中性粒子輸送解析コード(DEGAS)を用いた数値計算を行った。
- ✓ メッシュモデルを以下のように改良。
 1. SMBI用のストレートノズル・バルブ真空容器(下図)を追加。
 2. バルブ近傍のメッシュ間隔を狭め、解像度を高める。



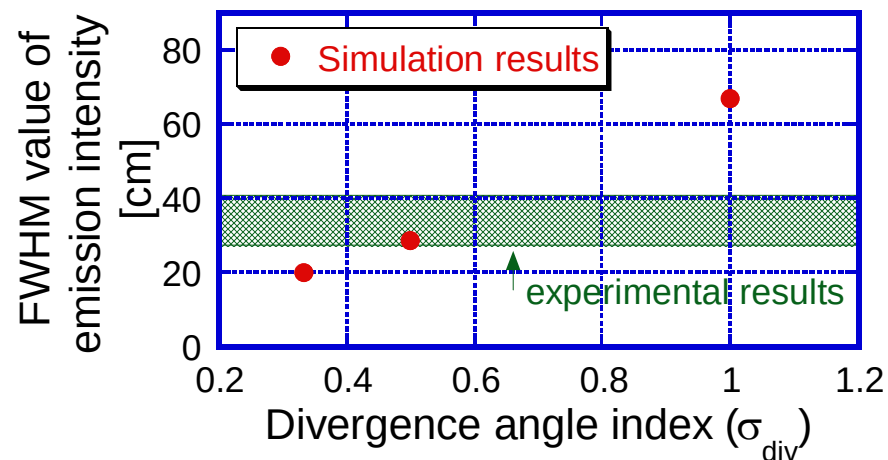
分子性ビームの指向性は初速ベクトルを変えて模擬

プレナム圧に対する、発光強度の拡散度合いの違いを、中性粒子の発散角の違いに依るものであると考え、粒子の初期条件を変えてシミュレーションを行った。



実験結果とシミュレーション結果との比較

実験結果における半値全幅の取りうる範囲をグラフ上に緑の帯として示し、そこに各発散角に対してのシミュレーションの結果における半値全幅をプロットした。

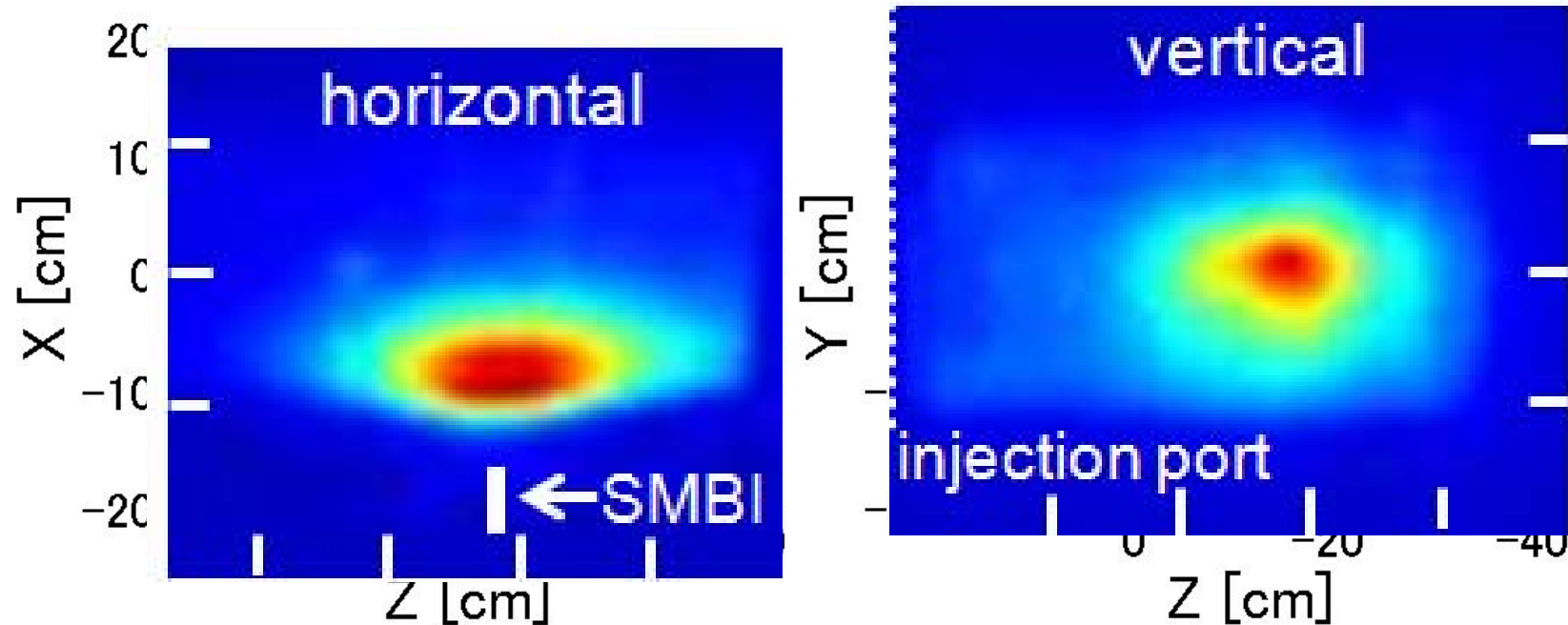


発散角を小さくした場合に、実験結果に近い結果を示した。また、 $\sigma_{div} = 1/2$ の場合にもっとも実験結果と近い値を取った。このことから、SMBIからの中性粒子の発散角をコサイン分布に対して半分くらいになっていると考えられる。しかし、実験結果における半値全幅の飽和状態は見られなかった。

実験結果とシミュレーション結果の飽和に関する違いは、中性粒子同士の衝突を考慮していないからではないかと考える。

実験結果とシミュレーション結果との比較(カメラ画像との比較)

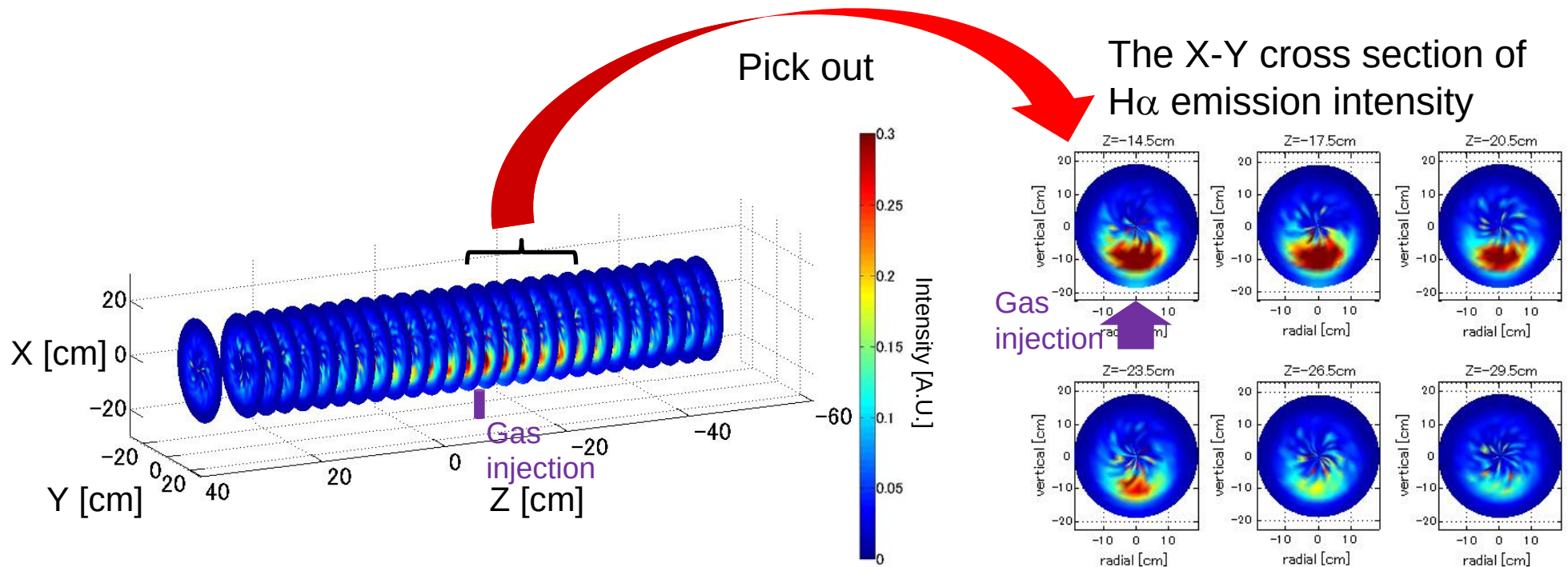
半値全幅が一番近かった条件 ($\sigma_{\text{div}} = 1/2$) を用いて、高速カメラで取得した画像と比較を行った。



DEGASコードを用いて算出した $H\alpha$ 発光を2次元イメージにしたものは高速カメラの画像を十分に再現できた。

空間構造と侵入長について

完全3次元のシミュレーションの利点を生かして、高速カメラでは評価が複雑な内部構造について解析を行った。

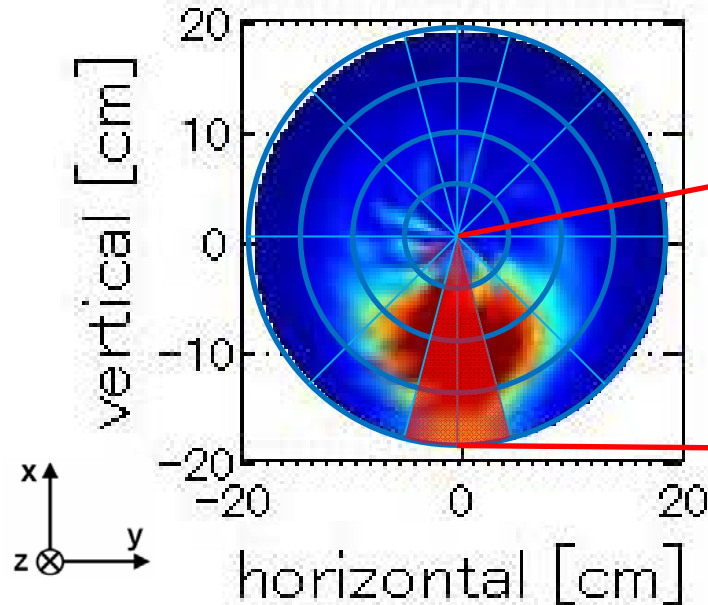


侵入長の評価法

径方向の $H\alpha$ 放射輝度の分布のピーク位置を侵入長(λ_{pnt})として定義

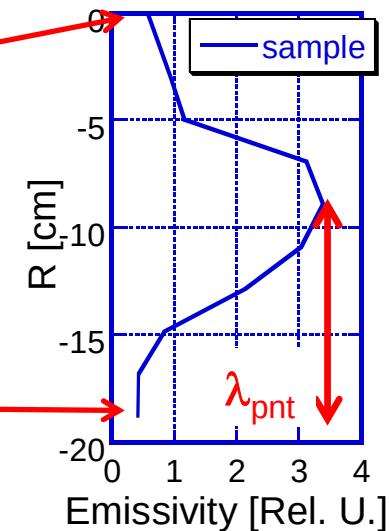
The X-Y cross section of $H\alpha$ emission

$Z = -14.5 \text{ cm}$



Gas injection

Radial profile of
 $H\alpha$ emission intensity



侵入長の評価(発散角)

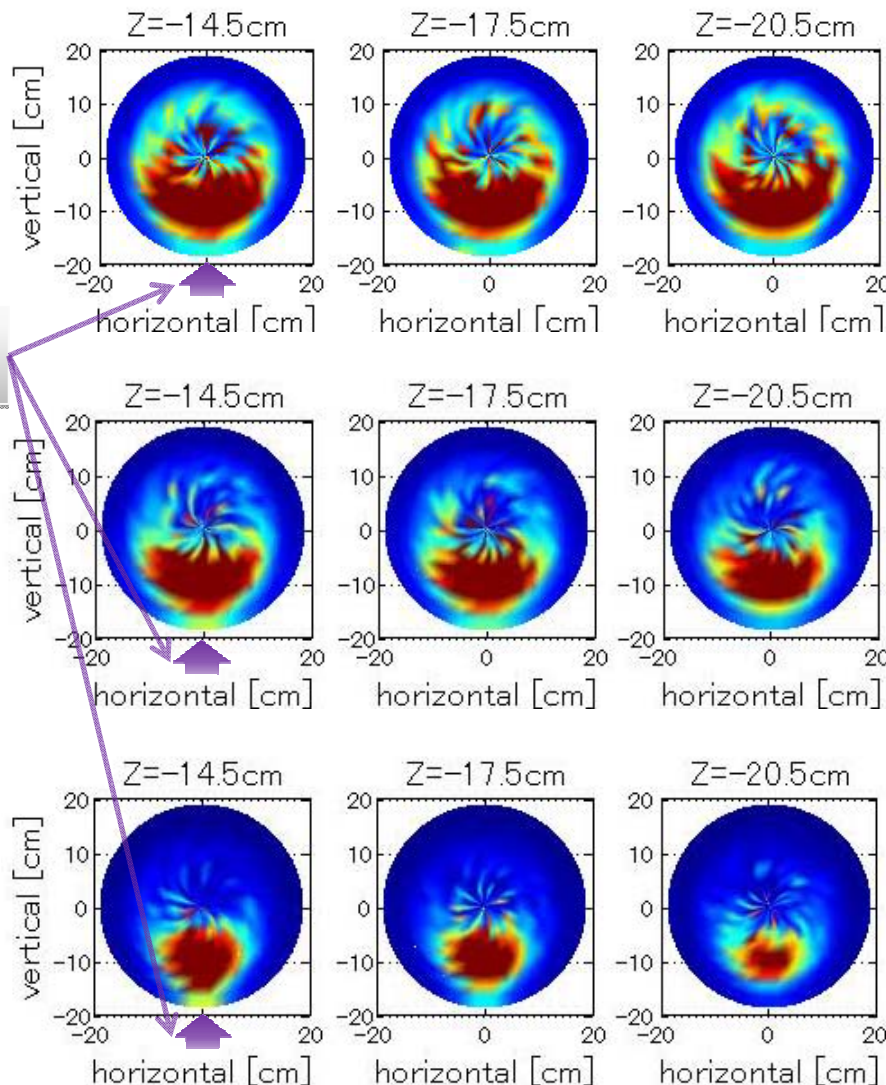
以下、3つの条件(1.ストレートノズルなし、2.ストレートノズル有り、3.ラバールノズル)で λ_{pnt} を評価

Case 1
w/o straight
nozzle

Gas
injection

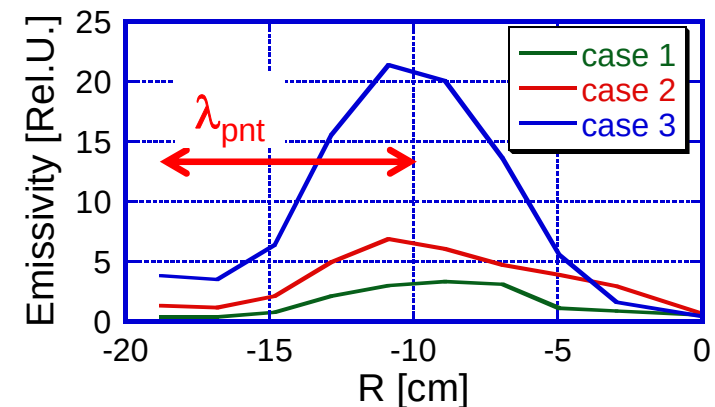
Case 2
w.straight
nozzle

Case 3
w.Laval
nozzle



H α 放射輝度の水平・磁力線方向の広がりには違いが見られた。

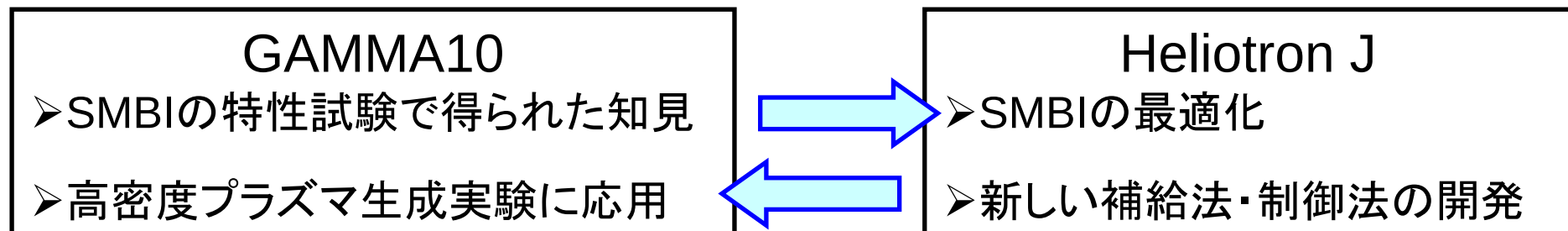
しかし、それぞれの条件において λ_{pnt} の差はほとんど見られなかった。



背景プラズマのパラメータ・過渡的な変化やSMBIの模擬方法をより高精度化

まとめと今後のセンター間連携研究に向けて

- GAMMA10にSMBIを設置し、その入射特性を実験的に調べた。
 - ✓ セントラル部中央付近から入射を行い、密度の増加を観測した。
⇔ 一方で蓄積エネルギーが低下しており、高性能化のためには設置位置の最適化が課題。
 - ✓ 新たにストレートノズルをバルブ前面に設置し、より指向性の高い粒子補給が可能であることがわかった。高いプレナム圧では指向性が飽和するため、今後、ラバールノズル等の設置を検討する。
- 中性粒子輸送シミュレーションによりSMBIの模擬を試みた。
 - ✓ 初期の速度ベクトルを変えることで指向性のあるSMBI入射ガスの再現を試み、実測との良い一致を得た。
 - ✓ 現在、侵入長をはじめとして、空間構造に対する議論を開始した。



連携研究活動を推進