

# GAMMA 10 SMBI実験における中性粒子輸送解析

筑波大学プラズマ研究センター  
細井克洋、中嶋洋輔、他 GAMM 10 Gr.

京都大学エネルギー理工学研究所  
小林進二

広島大学大学院工学研究科  
西野信博

## Contents

1. 実験背景と目的
2. 実験装置
3. 実験結果
4. シミュレーション結果
5. 結論

# 実験背景と目的

## 実験背景

プラズマの高性能化には粒子供給のコントロールは非常に重要である。  
周辺部のガスを減らしつつ、中心部へ燃料粒子の供給を行うことが重要である。



新しい粒子供給法として、超音速分子ビーム入射 (SMBI) が注目されている。

GAMMA 10 セントラル部はパンケーキコイルによる単純ソレノイド磁場配位で、観測ポートを多く持つため、SMBIによる中性粒子輸送の観測に適している。

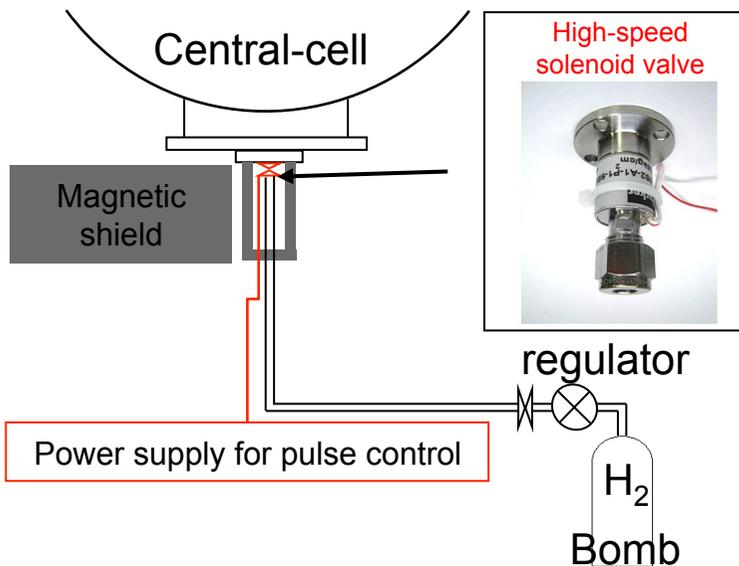
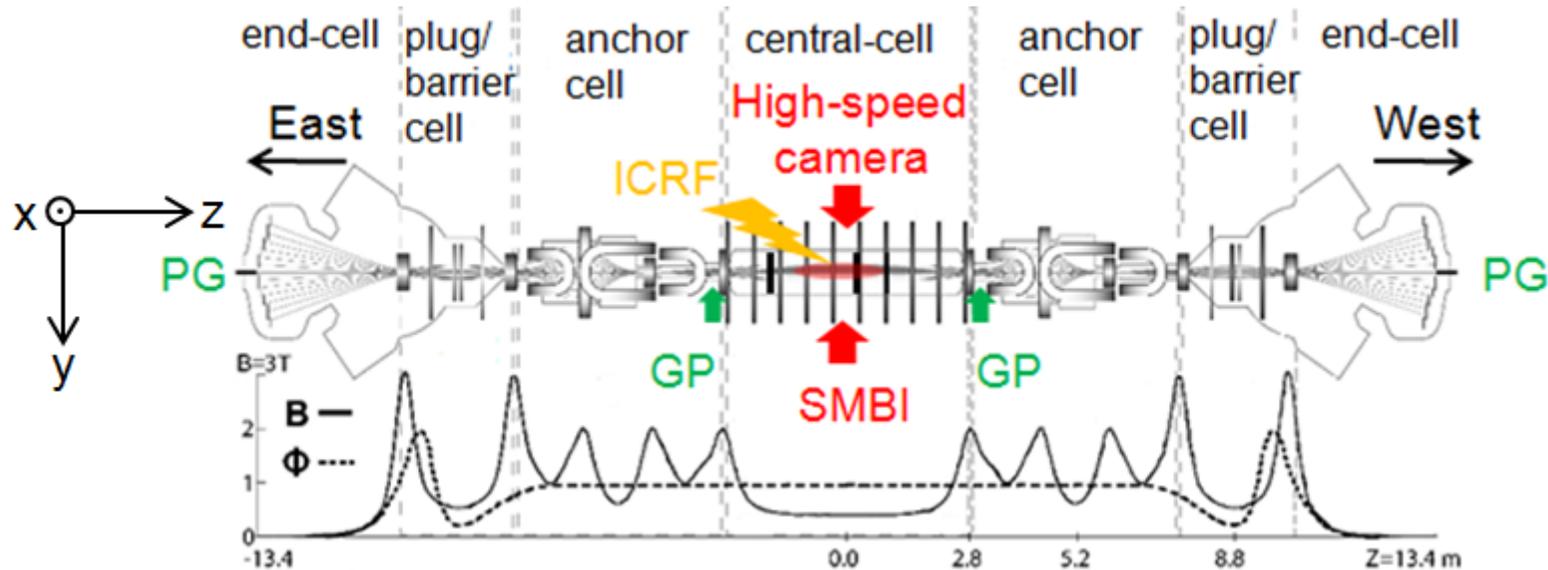
## 実験目的

SMBIにおける中性粒子輸送を高速カメラと中性粒子輸送シミュレーションコードを用いて、詳細に調べる。

SMBI入射時の高速カメラ計測により得られた2次元イメージから中性粒子輸送を評価する。

得られた実験結果を基に、中性粒子輸送シミュレーションコードを用いて、算出したH $\alpha$ 線発光強度の分布から中性粒子輸送を評価する。また、従来のガスパフとの違いも併せて調査する。

# 実験装置について



- GAMMA 10 におけるプラズマ生成について

プラズマガンを用いて初期プラズマを入射し、ガスパフにより燃料粒子を補給し、ICRFによりプラズマを加熱維持する。以上のように生成されたプラズマにNBI, ECH等の追加熱を行っている。

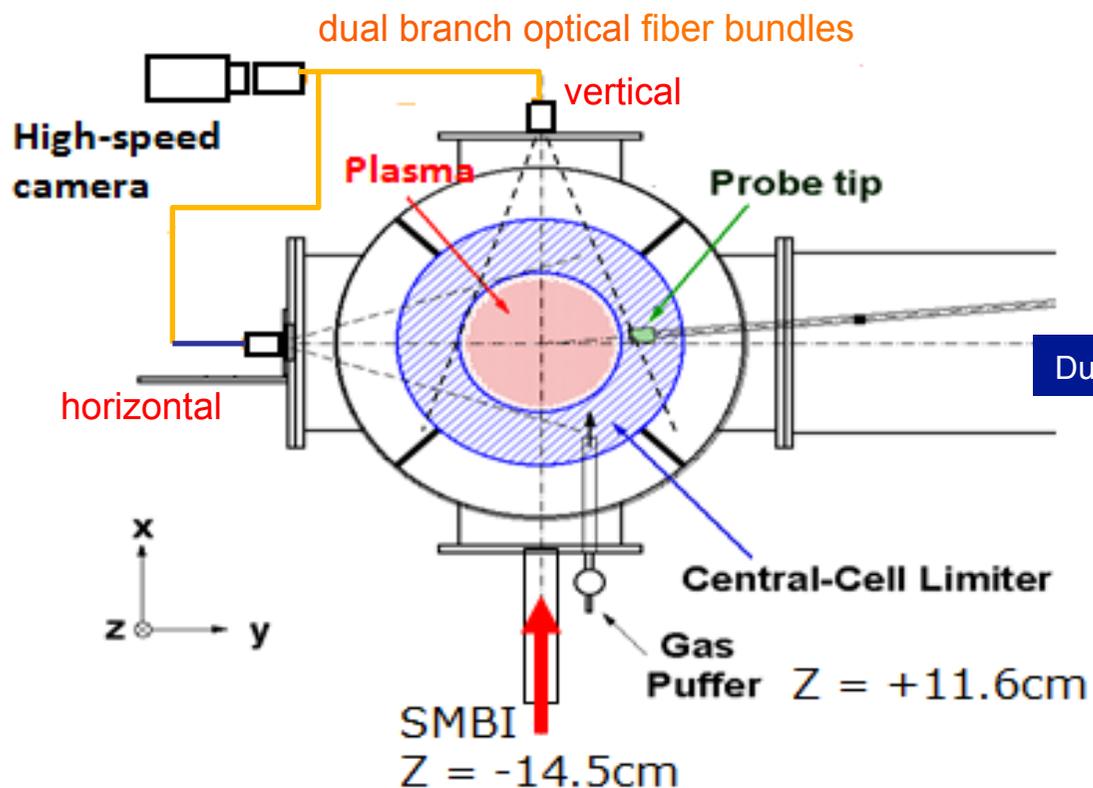
- SMBIについて

GAMMA 10 におけるSMBIシステムは高速ソレノイドバルブと磁気シールドによって構成される。通常プレナム圧は1MPa、パルス幅は0.5-1.0 ms である。

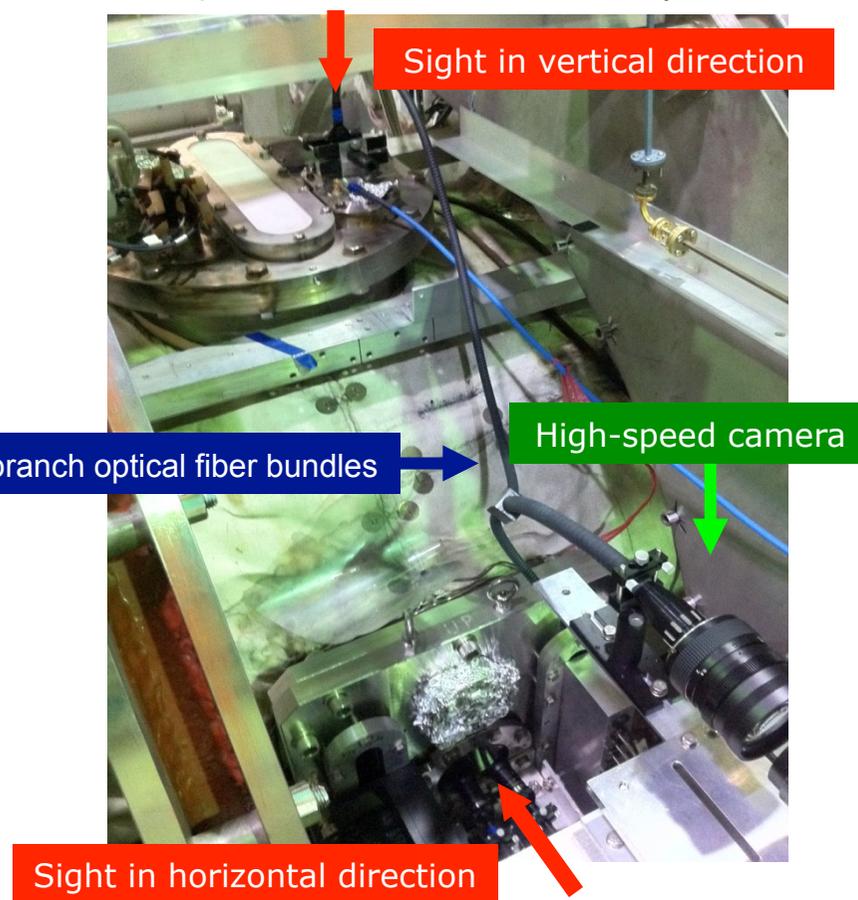
# 高速カメラについて

プラズマの挙動を観測するために、高速カメラがセントラル部に設置されている。この高速カメラは2分岐ファイバーを用いることにより、水平垂直の2方向から同時測定が可能となっている。

<cross-section of the central-cell midplane>



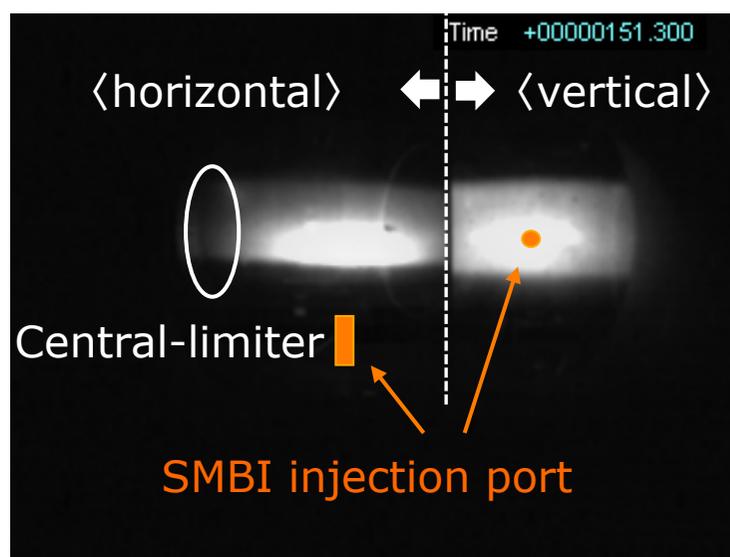
<Two-point Simultaneous Measurement System>



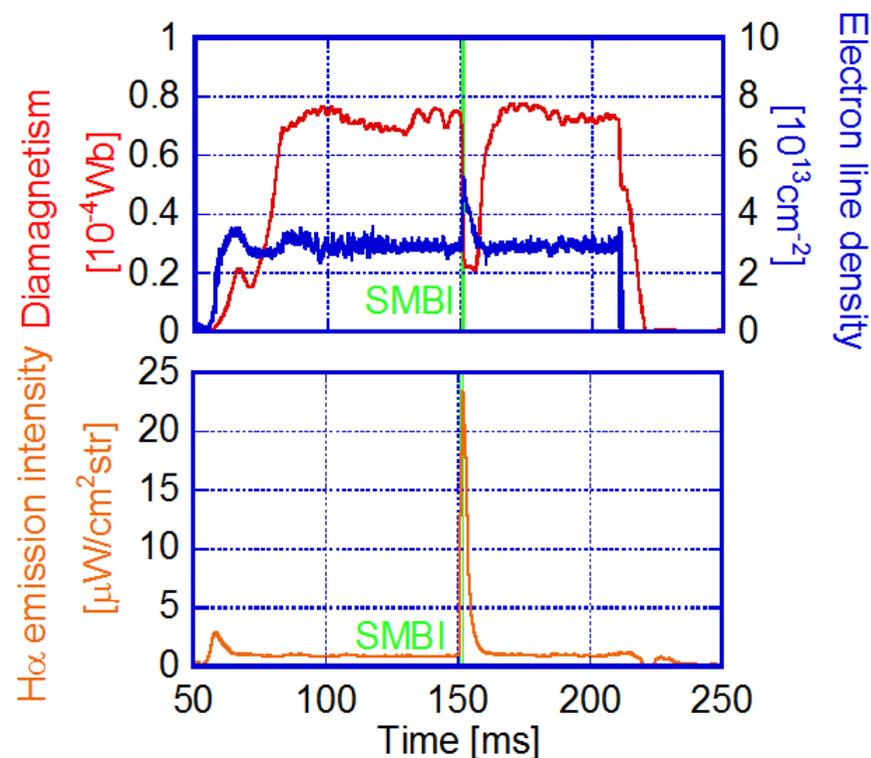
# 典型的なSMBI実験結果

プラズマガンによる種プラズマをイオンサイクロロン加熱(ICH)を用いて加熱維持したプラズマに対し、SMBI実験を行った。  
左図が2分岐ファイバーを用いた2点同時計測システムを備えた高速カメラにより得られた2次元画像である。右図はSMBI入射時の反磁性量、電子線密度、SMBI入射ポート近傍の発光強度のそれぞれの時間変化を示したものである。

< 高速カメラによる2次元イメージ >



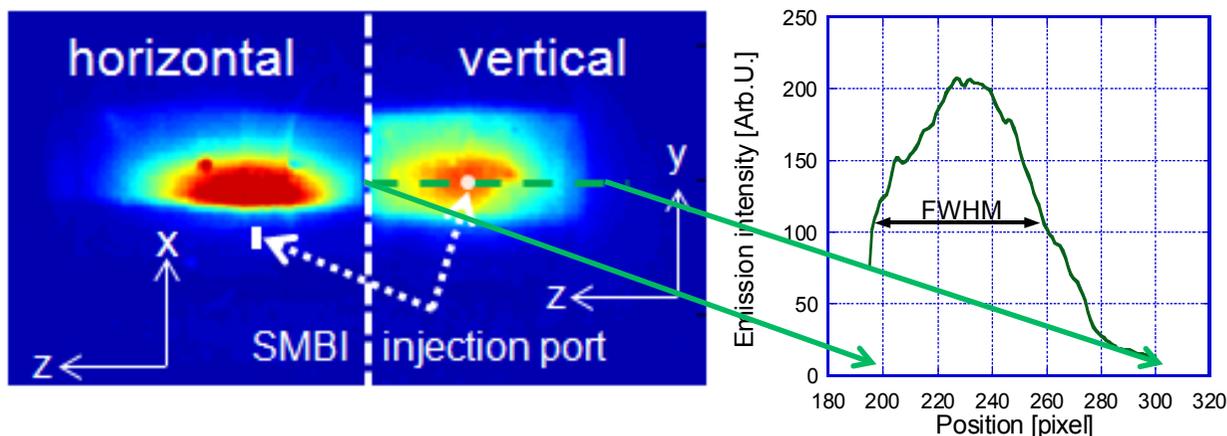
< SMBI入射実験時のプラズマパラメータ >



SMBI入射に伴い電子線密度の大幅な上昇が得られた。

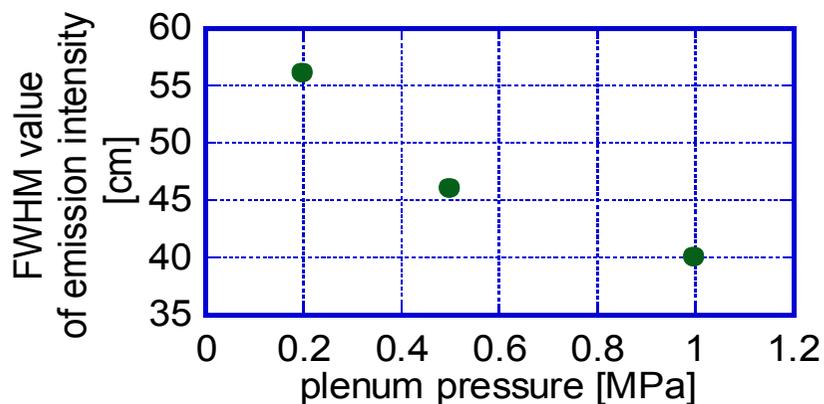
# 中性粒子輸送解析（高速カメラ計測）

高速カメラにより得られた画像からz軸方向の中性粒子輸送を調べた。



垂直方向からの視線で得られた画像からz軸方向の発光輝度の半値幅をz軸方向の中性粒子輸送の指標とした。

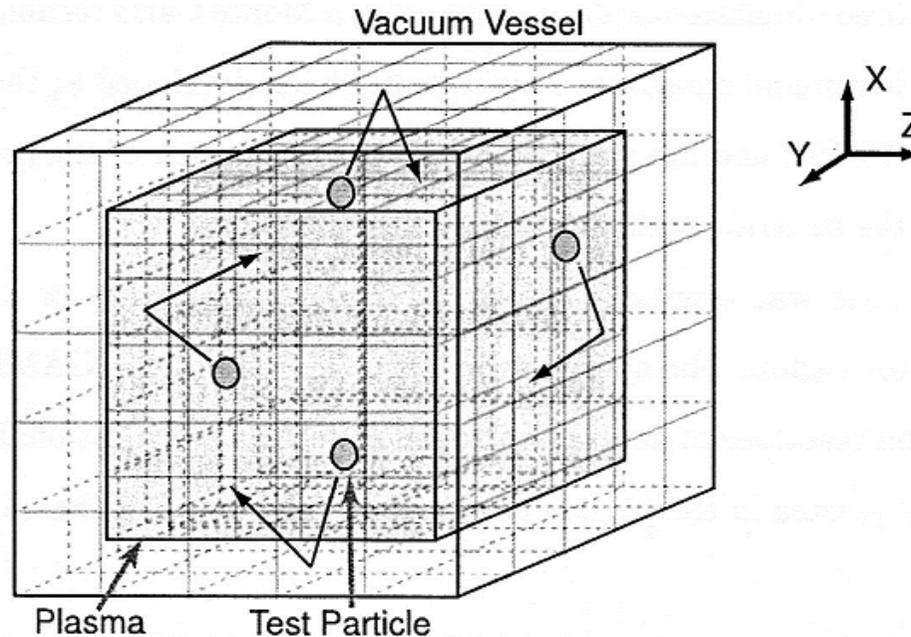
各プレナム圧に対するz軸方向の中性粒子輸送を調べた。



プレナム圧が0.2~1.0 MPaの範囲では発光輝度の半値幅は40~56cmであることが分かった。これを実験結果から得られたSMBIにおけるz軸方向の中性粒子輸送の指標とした。

# 中性粒子輸送シミュレーションコード (DEGAS)

DEGAS code  
Schematic View

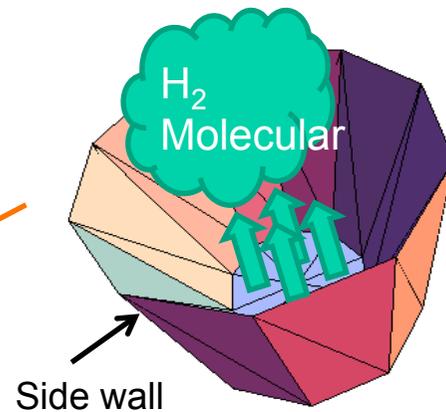
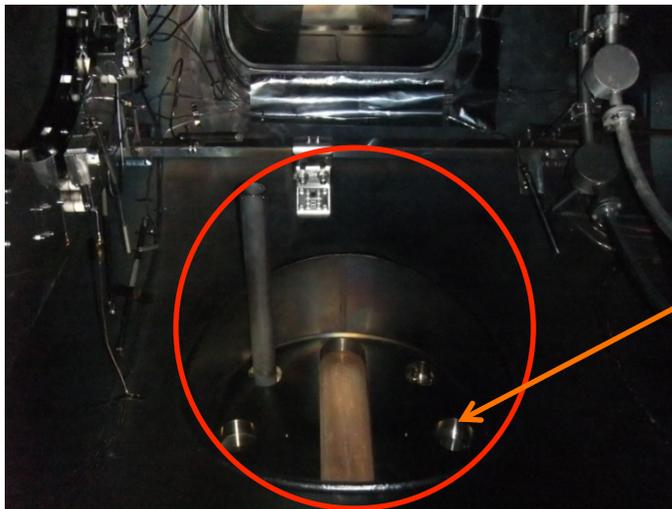
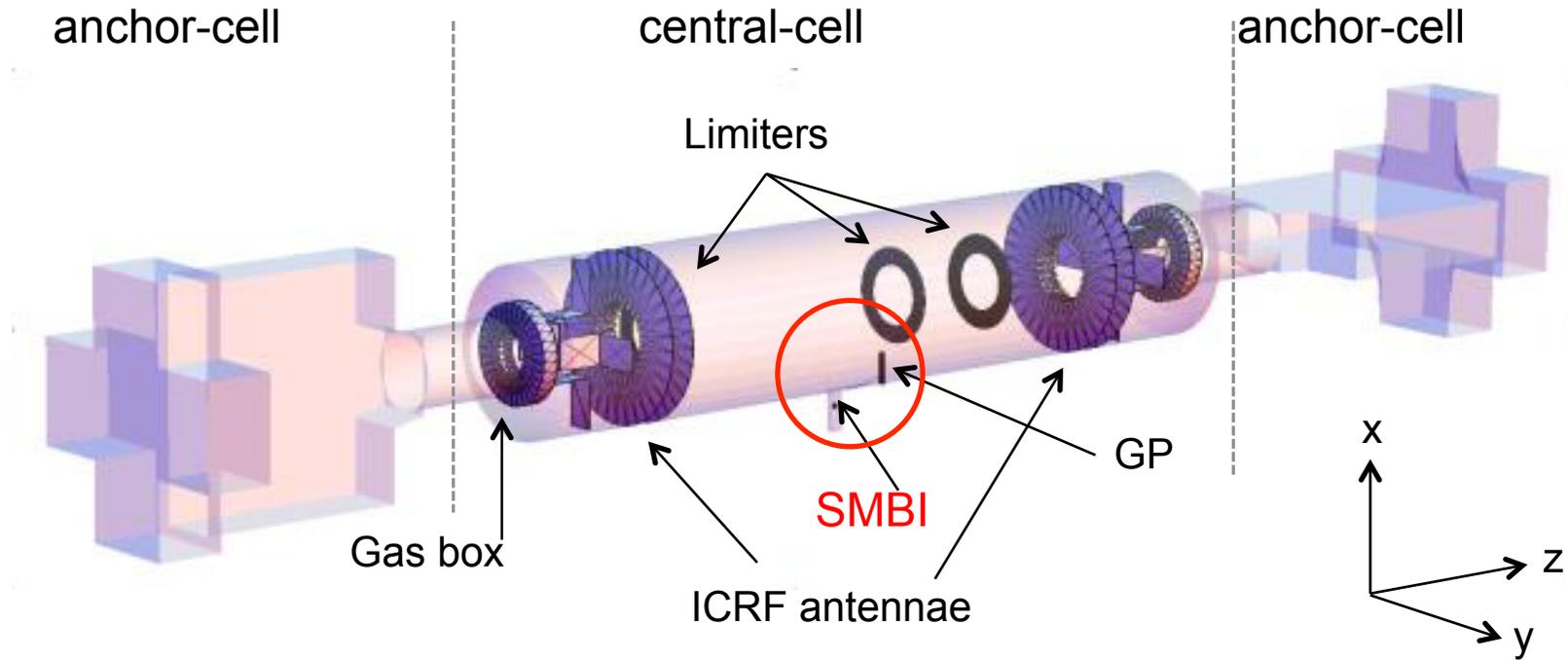


DEGASコード(中性粒子輸送シミュレーションコード)は、プラズマ中の中性粒子密度・温度をモンテカルロ法を用いて求める

- ・シミュレートする領域→メッシュ状に区分
  - ・各ボリューム(cell)にプラズマの密度、温度等を入力
- 中性粒子の原子・分子過程を考慮し、その軌道を追う

D. Heifetz, D. Post, M. Petravac et al., J. Comput. Phys. **46**, 309 (1982).

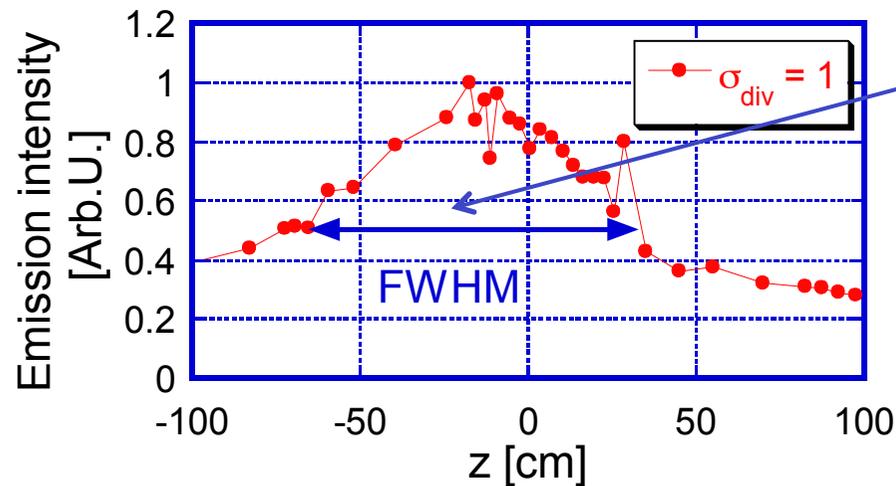
# 3-D simulation mesh model



新たにSMBIポートを追加し、バルブ上部も再現したメッシュを作成した。バルブ上部に粒子源を設定し、シミュレーションを行った

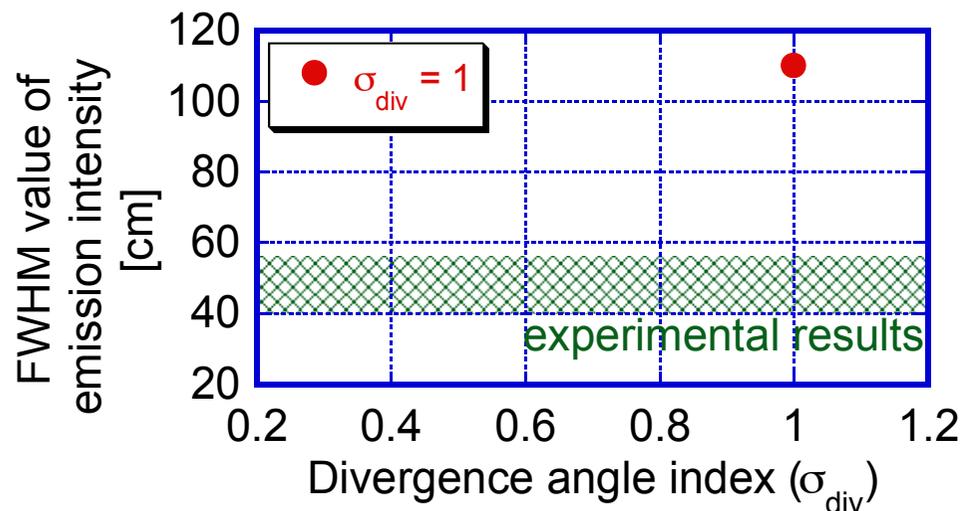
# シミュレーション結果（ガスパフとの比較）

< H $\alpha$ 発光強度のz軸分布 >



シミュレーションでは算出したH $\alpha$ 線発光強度のz軸分布の半値幅をz軸方向の中性粒子輸送の指標とした。

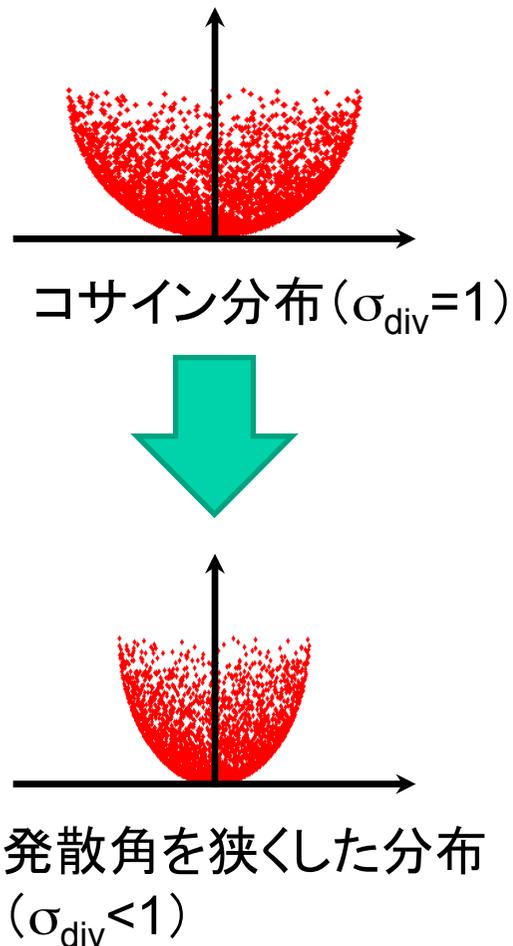
< z軸方向の中性粒子輸送の比較 >



従来のガスパフのガス拡散における発散角はコサイン分布で与えられる。コサイン分布の発散角の指標をここでは $\sigma_{div} = 1$ とした。この発散角を初期条件としてSMBIのバルブに粒子源を設定してシミュレーションを行った。

実験結果に対して拡散しすぎであることがわかる。これはSMBI入射実験の結果とは異なることがわかった。

# テスト粒子の初期条件について

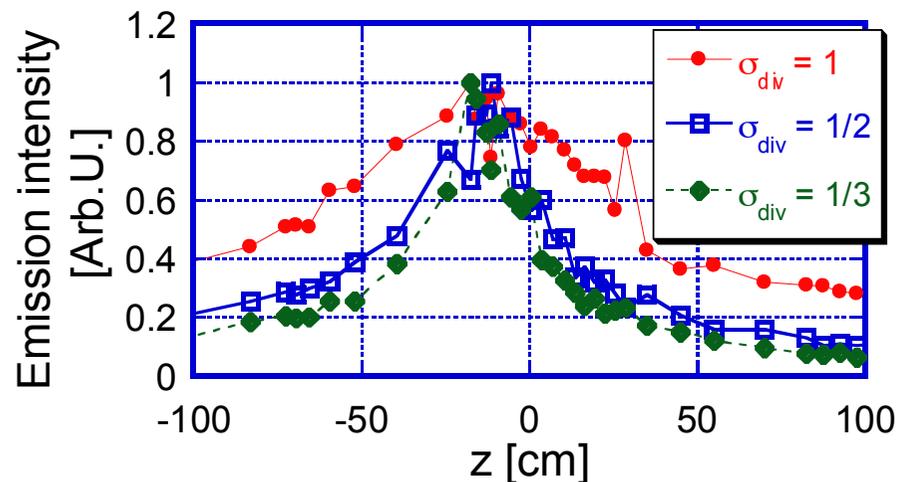


中性粒子輸送シミュレーションにおいて従来のガスパフを再現するには、粒子の初期条件にコサイン分布を用いたもので再現できた。しかし、先程の結果より、SMBIの実験結果とは異なる結果となった。これは従来のガスパフとSMBIでは粒子の発散角が異なることが考えられる。

そこで、実験結果との比較の結果、粒子の初期条件の発散角をより狭くしたモデルでシミュレーションを行った。

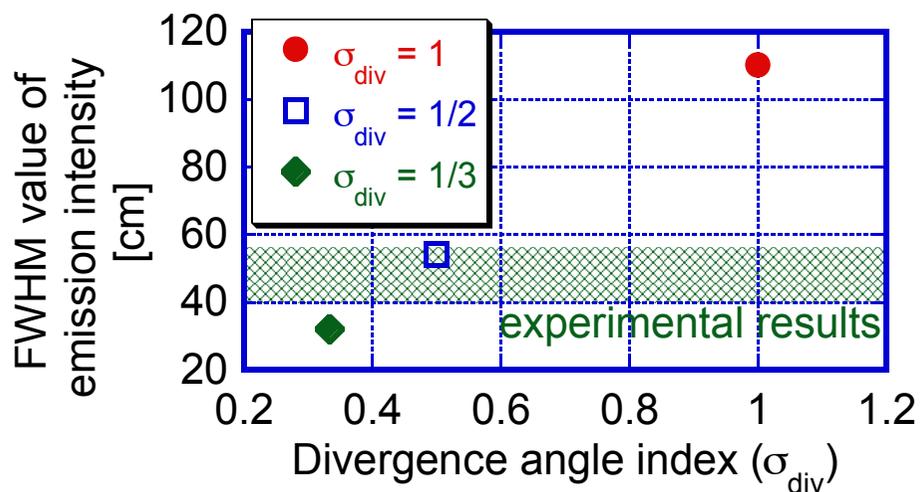
# シミュレーション結果（発散角依存性）

< 各発散角に対するH $\alpha$ 発光強度のz軸分布 >



粒子の初期条件である発散角を通常のコサイン分布より狭くした条件でシミュレーションを行ったものが、上図である。発散角を狭くしていくとz軸方向の中性粒子の拡散が狭くなる。

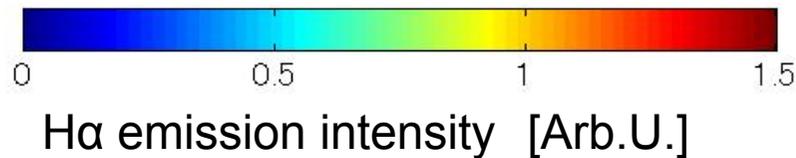
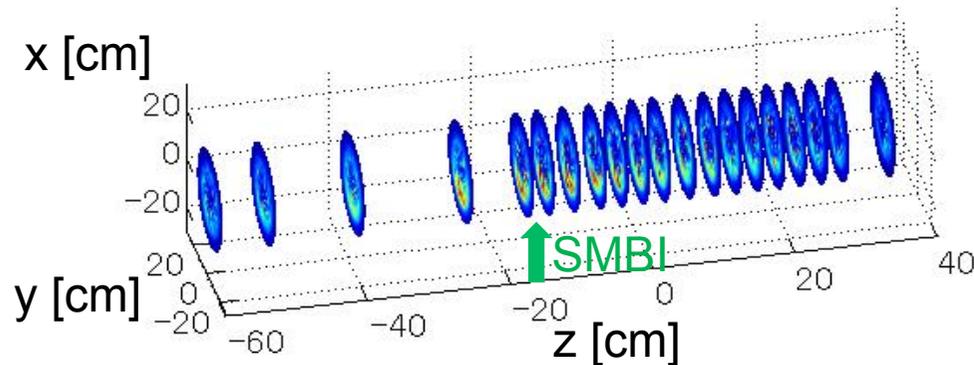
< z軸方向の中性粒子輸送の比較 >



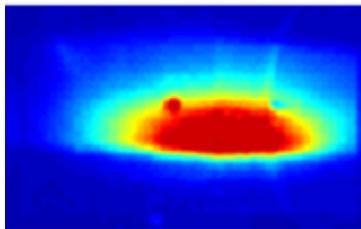
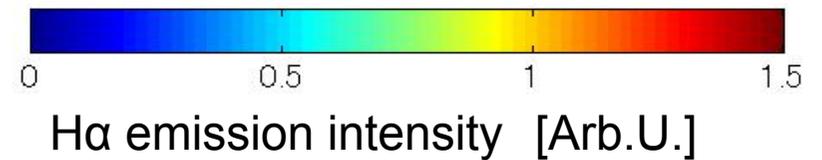
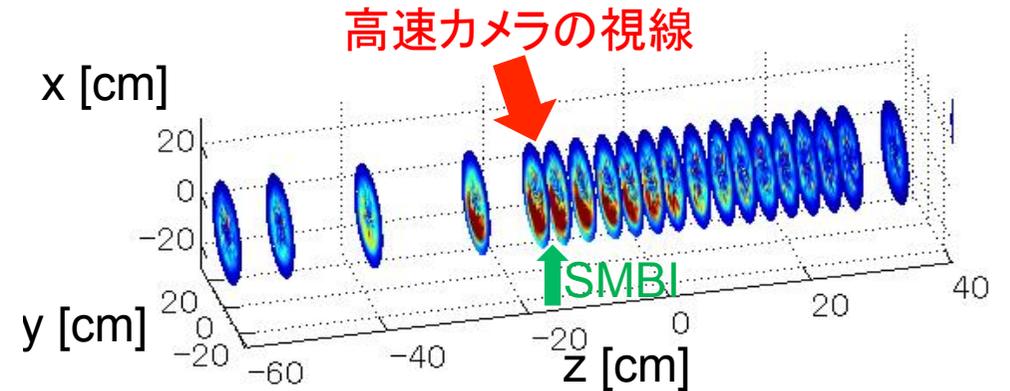
これらの結果から、SMBIによる中性粒子を模擬するには発散角を0.4~0.5にする必要があることがわかった。このことから従来のガスパフとSMBIでは中性粒子の発散角が異なることが考えられる。

# シミュレーション結果 (3次元)

コサイン分布 ( $\sigma_{\text{div}}=1$ )



発散角を狭くした分布 ( $\sigma_{\text{div}}=1/2$ )



SMBI入射時の高速カメラ画像(水平方向)

高速カメラで観測した画像と比較した場合でも実験結果をある程度再現できた。

## 結論

SMBIによる中性粒子の挙動を高速カメラを用いて計測し、その結果とDEGASコードを用いて解析した結果との比較を行った。その結果以下のことがわかった。

- 粒子の初期条件を従来のガスパフと同じ条件にしたシミュレーション結果では実験結果を再現することができなかった。
- 高速カメラによる観測結果によるとSMBIの中性粒子の発散角は従来のガスパフより狭いことがわかった。
- ガスパフとSMBIの粒子の初期条件に違いがあることがわかった。

以上より、SMBI実験を再現するための粒子の初期条件の有益な知見を得た。今後は今回議論出来なかったSMBIによる中性粒子の侵入長も併せて調べていく予定である。

また、SMBI用ラバーノズルの設計も行っており、よりプラズマに近い場所での粒子供給の効果を調べていく予定である。