

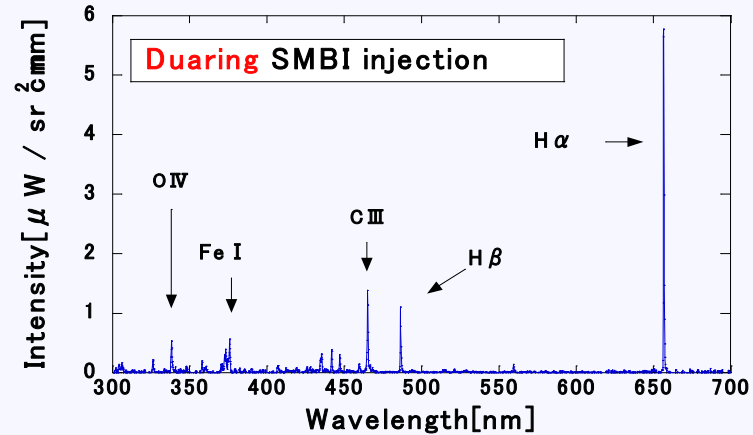
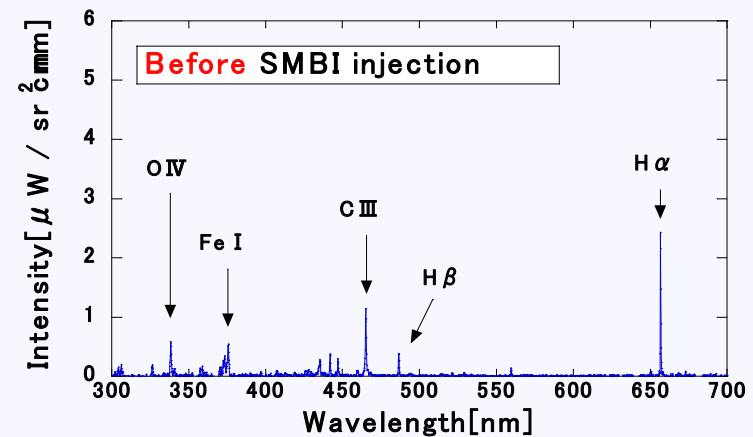
# GAMMA10セントラル部 SMBI入射実験における分光計測

筑波大学プラズマ研究センター  
北出 崇二

研究背景・目的  
実験装置  
実験原理  
実験結果  
考察・まとめ

# 研究背景

- 2010年度から京都大学との双方向型共同研究でGAMMA10に超音速分子ビーム入射(Supersonic Molecular Beam Injection: SMBI)装置が設置された。
- SMBIはプラズマ中心部への燃料粒子補給を目的としており、SMBIのプラズマへの効果を詳細計測する必要がある。
- SMBI入射時の分光測定結果が右図である。水素のバルマー系列線の増加が確認できた。それに加えて、炭素イオンからの放射も少し増加していることが観測された。

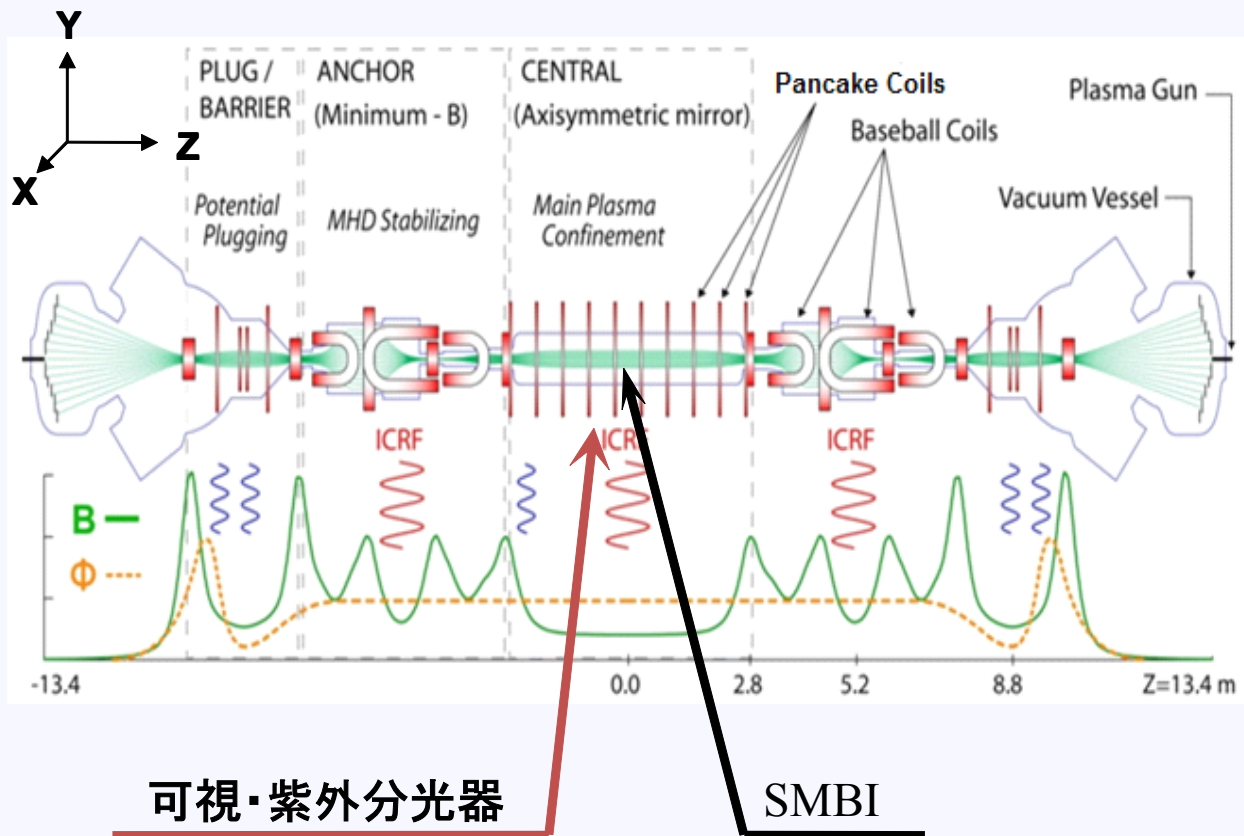


多波長同時計測分光器による  
放射スペクトル

# 研究目的

- ***SMBI*による燃料粒子補給の効果を計測する。**
  - 紫外・可視分光器を使用し、SMBI実験時の水素バルマー系列線を計測する。衝突・輻射モデル(CR-model)を用いて、中性粒子密度の挙動を追う。また、プラズマパラメータの変化も計算する。
- ***SMBI*による炭素イオンの発光増加の原因を追う。**
  - SMBI入射時の1価の炭素イオン(CII)スペクトル(283.76nm)を計測する。CR-modelを用いてCIIの径方向密度分布を調べる。

# GAMMA10



## • *GAMMA10*

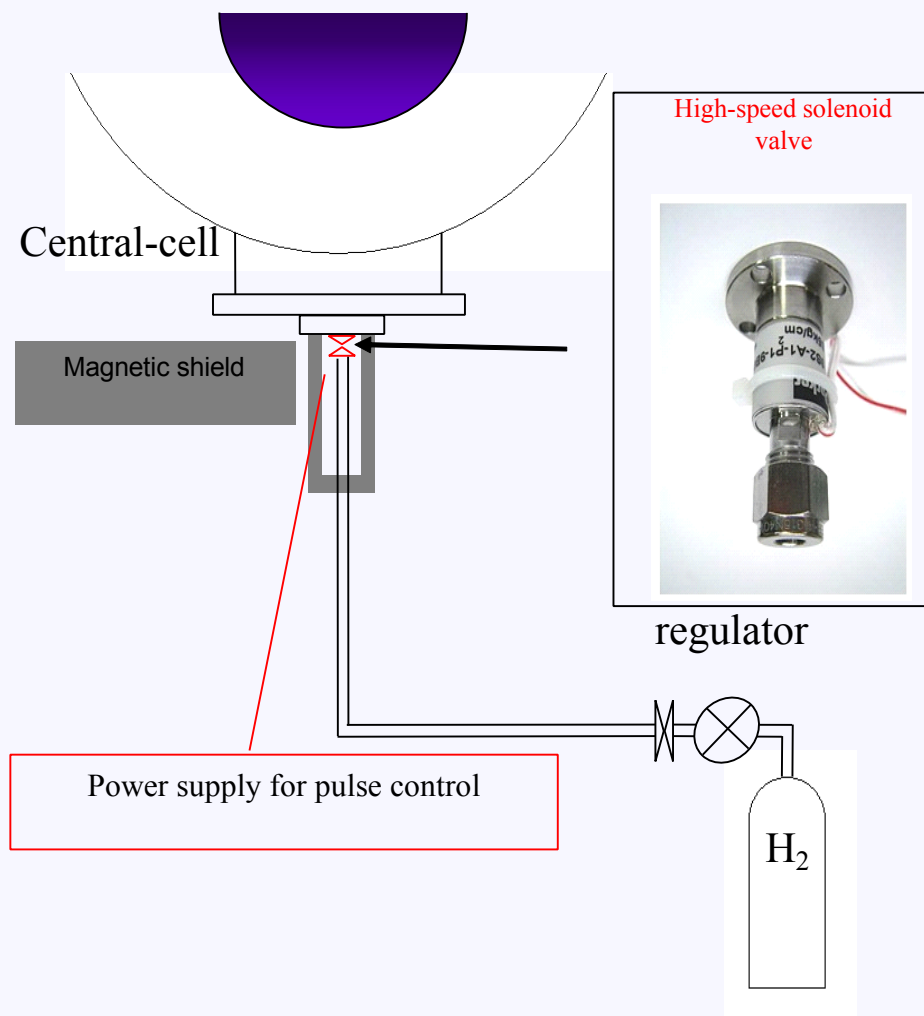
全長27mの直線型装置。プラズマは、プラズマガン(PG)によって生成され、イオンサイクロトロン周波数帯発信機(ICRF)によって加熱される。水素プラズマを生成している。セントラル部は主プラズマ閉じ込め領域である。

## • 基本パラメータ

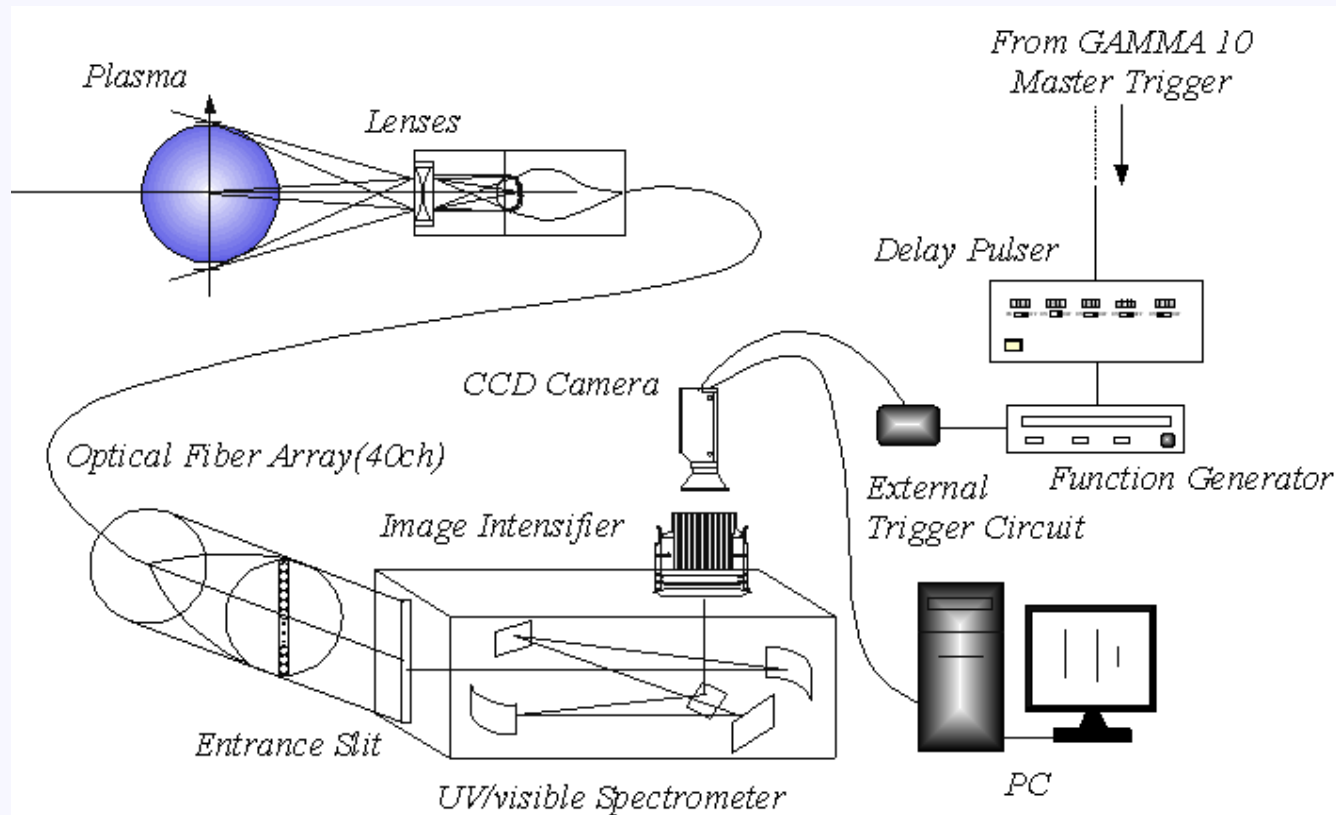
$$n_e = n_i \sim 2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$$
$$T_e \sim 40 \sim 80 \text{ eV}$$
$$T_i \sim 5 \text{ keV}$$

# 超音速分子ビーム入射装置 (Supersonic Molecular Beam Injection : SMBI)

- 超音速
  - パルスバルブを用いて高圧力で水素分子ガスをプラズマ中に高速で入射する。
- 圧力・タイミング・パルスが調節可能
  - プレナム圧・入射タイミング・パルス幅を調節し、プラズマへの入射粒子制御を行うことができる。
- 使用圧力は0.5-1.5MPa
  - 普段使用している燃料粒子補給装置であるガスパフの50-150倍の圧力



# 紫外・可視分光計測器



分光器  
ツェルニター型紫外・可視  
分光器(日本分光 CT100)

CCDカメラ  
QImaging Retiga 1300R cool

CCD素子  
1300 × 1030pixel 2/3inch

計測波長領域: 200 – 700nm

波長分解能: 0.03 nm

波長分散: 0.006 nm/pixel

空間分解能: 約1cm

露光時間: 10 ms

- 径方向に広がった40本の光ファイバーで計測している。
- 分光器を経て、イメージンテンシファイアで増幅した信号をCCDカメラで撮影。

# 原理と衝突・輻射モデル(CR-model)

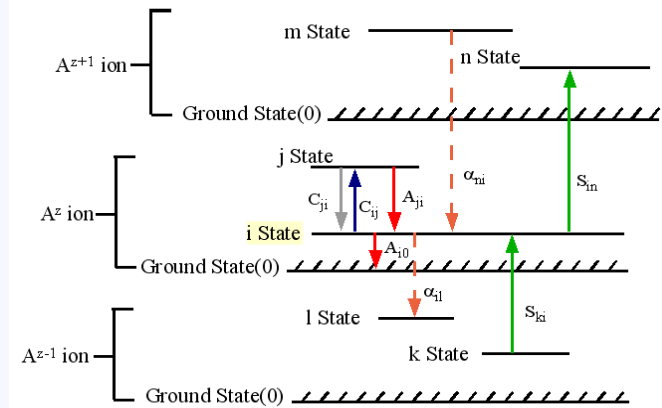
## • 発光の原理

- プラズマ中の線スペクトル放射は、主に電子との衝突によって中性粒子が励起し、安定な状態に脱励起した時にエネルギーが空間に放出される現象。分光計測によって得られる放射スペクトル強度  $I(i, j)$  は、励起状態の占有密度  $n(i)$ 、放射遷移確立  $A(i, j)$  を用いて以下のように示すことができる。

$$I(i, j) = n(i) A(i, j)$$

## • CR-model

- 電離進行プラズマ ( $n_e = 10^{11} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) において最も適した分光モデル。CR-modelでは、励起・電離・再結合等のすべての素過程を考慮している。電子・イオンの占有密度は以下の速度方程式で示すことができる。



$$\begin{aligned} \frac{dn_z(i)}{dt} = & \left\{ \sum_{j \neq i} C_z(j, i) n_e n_z(j) + \sum_{j > i} A_z(j, i) n_z(j) \right\} - \left\{ \sum_{j \neq i} C_z(i, j) n_e n_z(i) + \sum_{j < i} A_z(i, j) n_z(i) \right\} \\ & + \left\{ \sum_l S_{z-1}(l, i) n_e n_{z-1}(l) \right\} - \left\{ \sum_k S_z(i, k) n_e n_z(i) \right\} \\ & + \left\{ \sum_k \alpha_{z+1}(k, i) n_e n_{z+1}(k) \right\} - \left\{ \sum_l \alpha_z(i, l) n_e n_z(i) \right\} \end{aligned}$$

# 中性粒子・電子密度の算出

- 中性粒子密度

- CR-modelにおいて、水素の場合、速度方程式を解くことができる。励起準位  $i$  における原子の数  $n(i)$  は、水素の中性粒子密  $n_H$  とポピュレーション係数  $R_1(i)$  を用いて以下で表せる。

$$n(i) = R_1(i) n_e n_H$$

- 放射スペクトル強度は以下で表せる。

$$I(i, j) = n(i) A(i, j) = R_1(i) n_e n_H A(i, j)$$

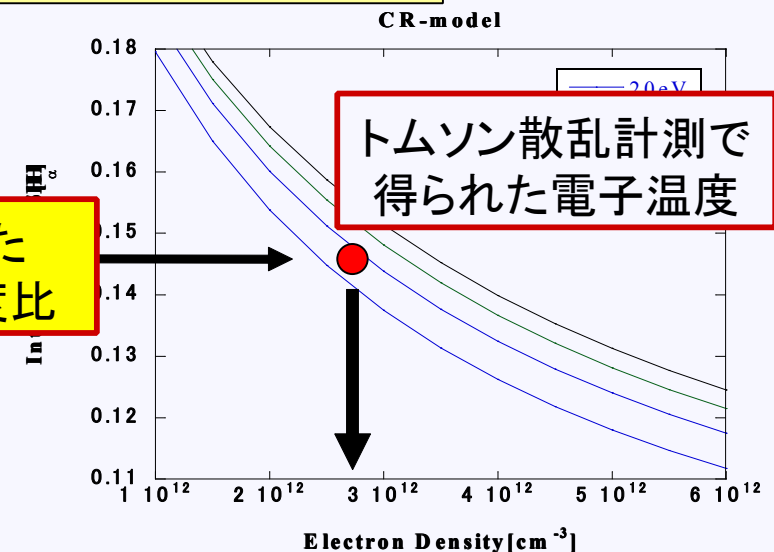
- 電子密度

- 放射スペクトル強度の比は以下の式で表すことができる。

$$\frac{I(i, j)}{I(j, k)} = \frac{R_1(i) A(i, j)}{R_1(j) A(j, k)}$$

得られた  
発光強度比

- ポピュレーション係数は電子温度・電子密度に依存する関数である。したがって、発光強度比・電子密度を実験から求めることができれば電子密度を算出することができる。



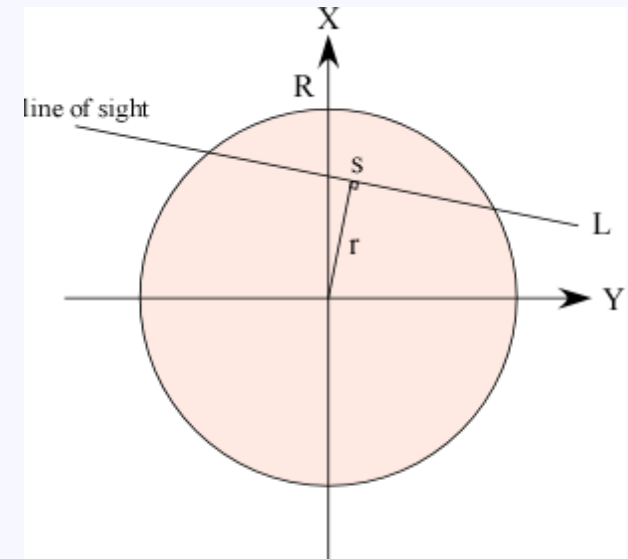


# 炭素イオン密度分布の算出

- 体積輻射率

- 可視・紫外分光器で得られる放射輝度は視線席分量  $I(s)$  である。単位堆積あたりの放射輝度である体積輻射率  $E(r)$  に変換するためアーベル変換を使用する。アーベル変換を以下の式に表す。

$$E(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{dI(s)}{dx} \frac{dx}{\sqrt{x^2 - r^2}}$$



- イオン密度分布

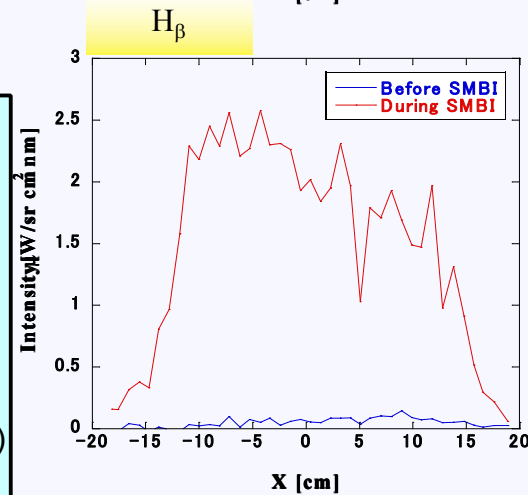
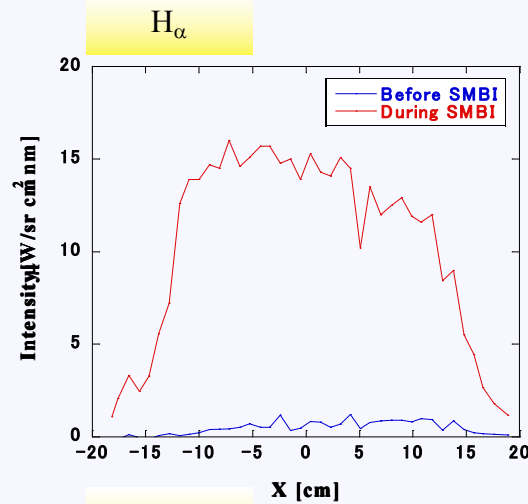
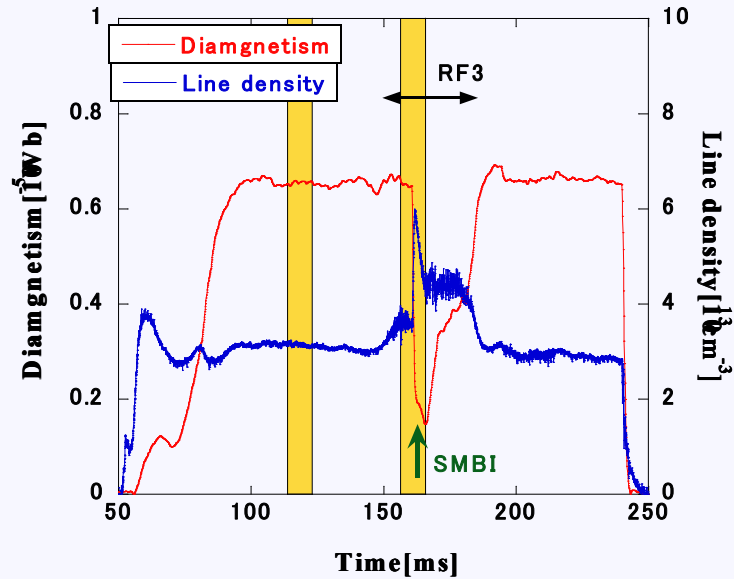
- $z$ 価イオンの  $i$ 準位の占有密度は、体積輻射率  $E(r)$  と放射遷移確立  $A(i,j)$  を用いて以下の式で表せる。

$$n_z(i) = \frac{E_i}{A_z(i)}$$

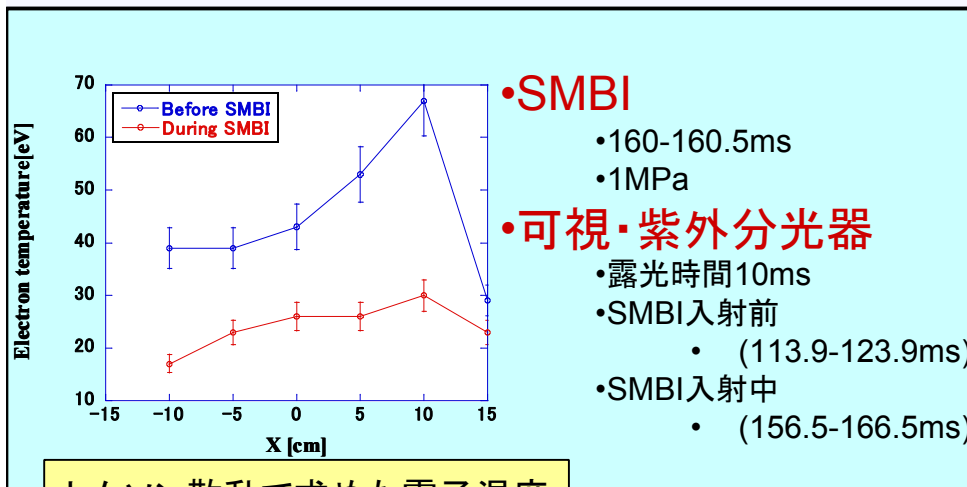
- CR-modelから  $i$ 準位の占有密度と  $z$ 価イオン全体の密度の比  $n_z'(i)$  を計算する。 $z$ 価イオン全体の密度は以下の式で表すことができる。

$$n_z = \frac{n_z(i)}{n_z'(i)} = \frac{E_i}{n_z'(i) A_z(i)}$$

# 実験結果 SMBIの効果



•  $H_\alpha$ 、 $H_\beta$ のどちらも発光強度が増えている。  
 • SMBI入射によって、X軸方向の負の方に発光が多くみられた。  
 • 得られた発光強度の比をとり、電子密度を算出した。

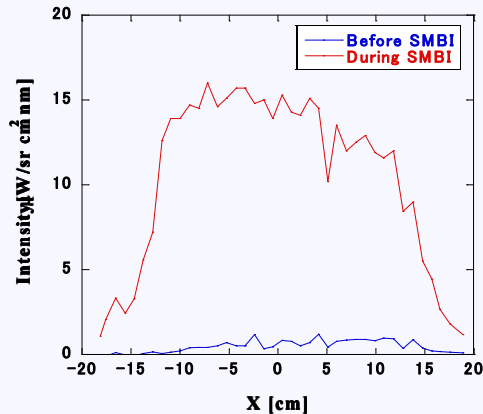


- **SMBI**
  - 160-160.5ms
  - 1MPa
- **可視・紫外分光器**
  - 露光時間10ms
  - SMBI入射前
    - (113.9-123.9ms)
  - SMBI入射中
    - (156.5-166.5ms)

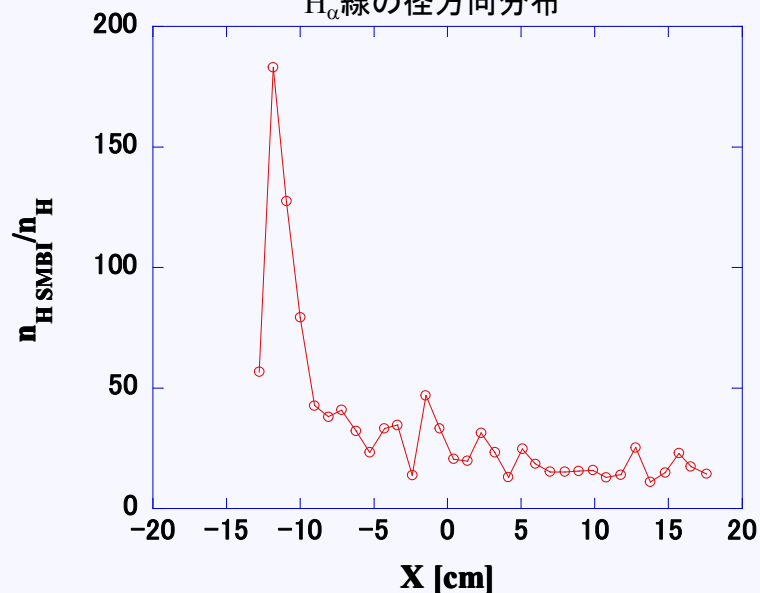
トムソン散乱で求めた電子温度

可視・紫外分光器で得られたスペクトルの径方向分布

# 中性粒子密度の変化



H<sub>α</sub>線の径方向分布



中性粒子密度の径方向分布の変化

- 中性粒子密度

- 中性粒子密度が大きく上昇していることが確認できる。

- SMBIの効果

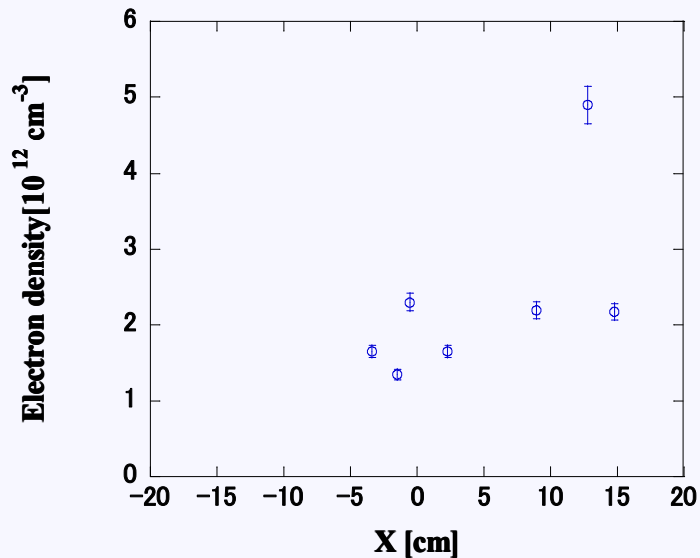
- プラズマの中心部まで中性粒子密度が30-50倍に上昇している。プラズマの中心部まで粒子補給できていることが確認できた。

- 誤差

- X=-12,13cmのところで100倍以上になっている。これはSMBI入射前の信号が弱いことによる誤差と考えられる

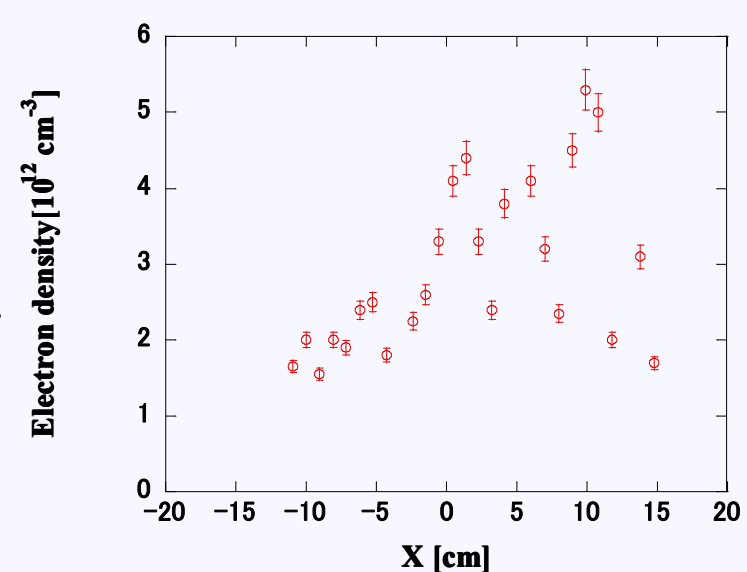
# CR-modelで求めた電子密度

SMBI入射前[113.9-123.9ms]



SMBI

SMBI入射中[156.5-166.5ms]



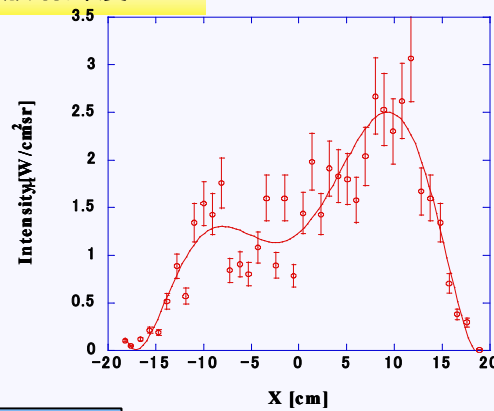
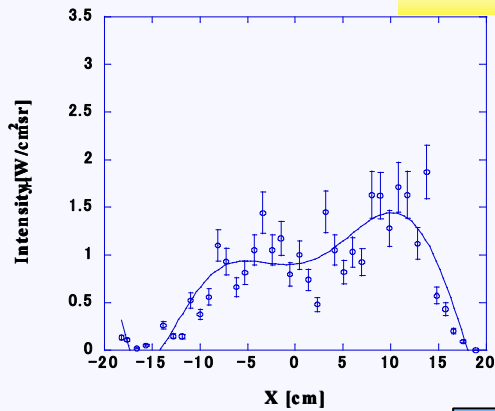
- エラーバーは、トムソン散乱で求めた電子温度の誤差。
- 多くの $n_e=2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ に近い密度になっている。
- マイクロ波で求めた密度は $n_e=2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 程度。

- プラズマの中心部の密度は $n_e=3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 程に見える。
- $X > 0$ の部分はエラーが大きい可能性がある。
- マイクロ波で計測した結果は $n_e=2.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 程度。
- マイクロは干渉計は計測している視線方向が異なる。
- $H_\alpha$ と $H_\beta$ は異なるショットで計測している。

# 炭素イオン密度分布

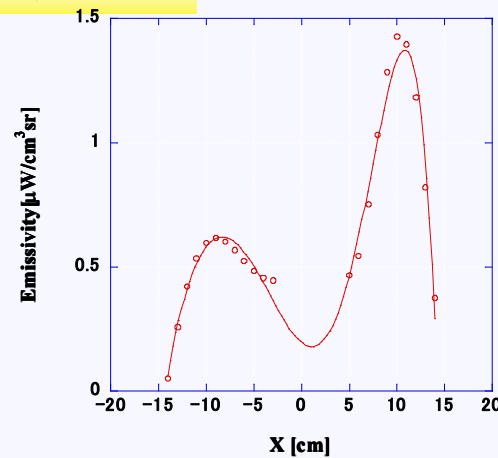
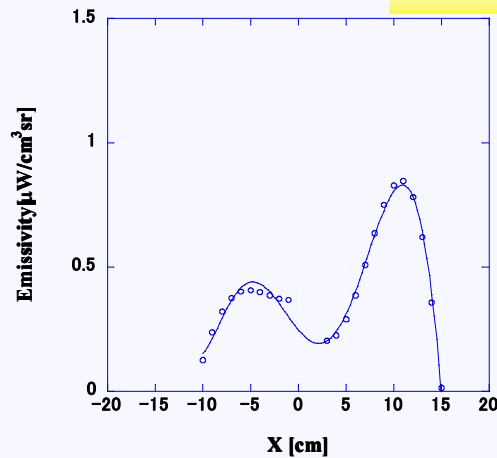
•1価の炭素イオン(CII:283.76nm:2S<sup>1</sup>2P<sup>2</sup>-2S<sup>2</sup>3P<sup>1</sup>)を計測した。

CII 放射輝度

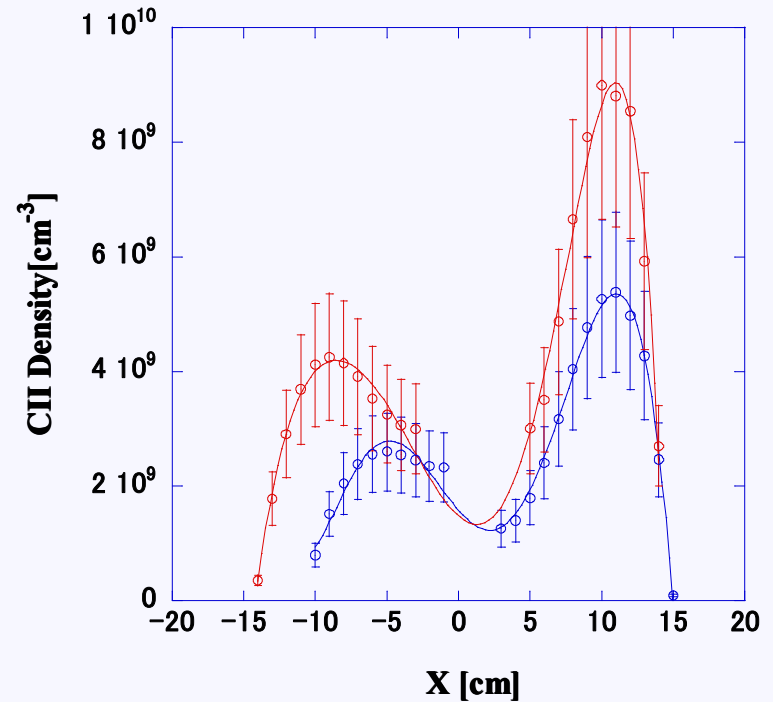


Abel

CII 体積放射



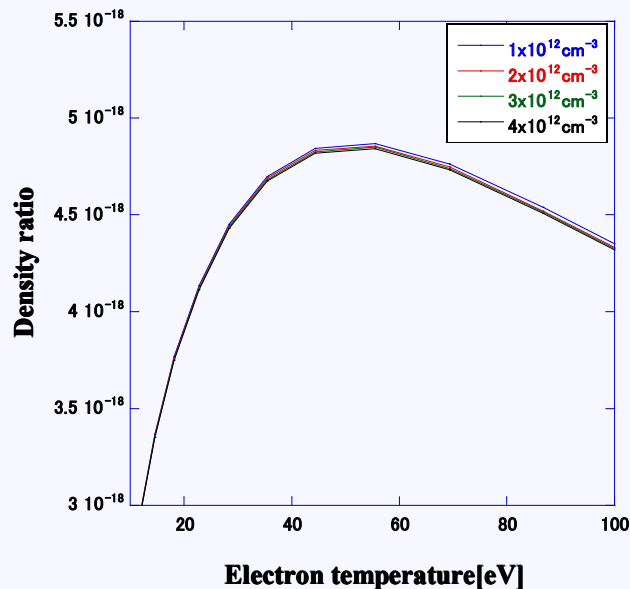
CII 密度



•SMBI入射時に1価の炭素イオン(CII)の密度が上昇している結果となった。

# 考察：炭素イオン密度の増加

SMBI装置は水素ガスを噴射している。  
今回の実験で、SMBI入射時にCII密度が増加していることが確認できた。  
その原因を次のように考察した。



CR-modelを用いたCIIの密度と励起状態の占有密度との密度比

## • スパッタリング

- SMBI入射により、プラズマの径が大きくなったことで、リミターからの炭素が頻繁に叩き出された。

## • 多価イオンからの再結合

- 電子温度の減少によって多価イオン(CIII, CIV)からの再結合が増加した。

## • アーベル逆変換

- 今回の解析では、軸対象プラズマを仮定としたアーベル逆変換を行っている。これによる誤差

# まとめ

- 本研究では可視・紫外分光器を使用して、スペクトルの径方向分布を計測した
- 得られた結果をCR-modelに適用することで、径方向の電子密度分布、1価の炭素イオン(CII)の密度分布を計算した。

## •中性粒子密度分布・電子密度分布

- SMBI装置によって、プラズマ中心部への燃料粒子補給ができていることが確認できた。
- SMBI入射によって電子密度が増加していることが確認できた。
- 衝突・輻射モデルから算出した電子密度はマイクロ波干渉計でもとめた電子密度より大きかった。

## •炭素イオン密度分布

- SMBI入射時のCIIの放射輝度が強くなることが確認できた。
- CIIの密度分布は増加している結果となった。

## 今後の課題

- 非軸対象であるプラズマのアーベル逆変換について検討する。
- 他の不純物を計測する。
- 粒子補給の効果についてより、詳細に調べる。