

# 高周波プラズマ源を用いた 高エネルギーイオン衝突存在時の 体積再結合過程調査

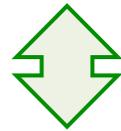
高橋宏幸<sup>1</sup>, 岡本敦<sup>2</sup>, 北島純男<sup>1</sup>

東北大院工<sup>1</sup>, 名大院工<sup>2</sup>

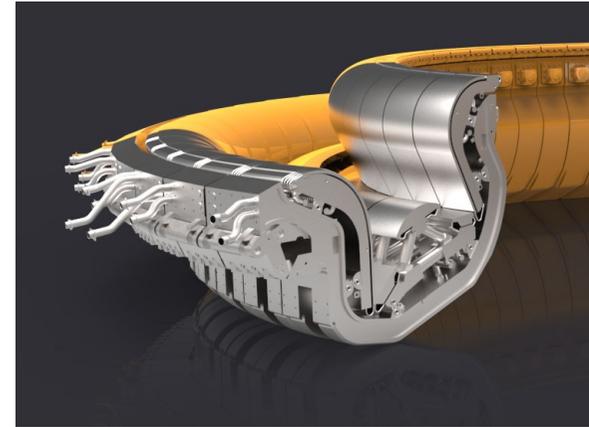
# 1 – 1. 核融合炉ダイバータ

## 核融合炉ダイバータの役割と課題

磁力線に沿って不純物をダイバータまで誘導することによる不純物制御、粒子制御



炉心からの熱負荷がダイバータ板に集中するため**熱流の制御が課題**



ダイバータの概念図 [1]

## 非接触ダイバータを利用した熱流制御

- ダイバータ板からプラズマを隔離する非接触ダイバータが有効
  - プラズマの**体積再結合**が重要な役割を担う [2]
- 体積再結合の反応率は低電子温度、高電子密度領域で増加
  - 安定した熱流分散のためには低温高密度プラズマの維持が重要

[1] <https://www.iter.org/mach/Divertor>

[2] S. I. Krasheninnikov et al., Phys. Plasmas 4, 1638 (1997).

## 1-2. ダイバータプラズマ研究の課題

---

- 核燃焼プラズマを維持するためには高い閉じ込め性能を持つ運転モードが必要
  - Hモードプラズマ
  - 閉じ込め領域からの突発的粒子放出現象が生じる ( ELM )
- ITERでは**非接触ダイバータとHモードプラズマの同時運転**が想定



### ダイバータプラズマの研究課題

- 非接触ダイバータとプラズマの閉じ込め性能維持の両立
  - 非接触時にペDESTAL部圧力低下 [3,4]
- 高エネルギープラズマ流存在下の非接触/再結合プラズマ挙動の理解
  - 非定常熱負荷の予測、制御

[3] A. W. Leonard *et al.*, Nucl. Fusion **52** (2012) 063015

[4] T. W. Petrie *et al.*, Nucl. Fusion **37** (1997) 321

# 1-3. 小型装置による模擬実験

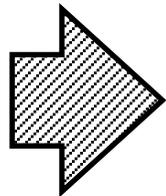
## 小型装置によるダイバータプラズマ模擬実験 [5]

- ▶ 高エネルギー電子は再結合により生じた高励起状態原子を電離
  - 高励起状態原子がエネルギーのバッファとして機能
- ▶ 非接触状態から接触状態への移行 (電子温度上昇)

[5] N. Ohno *et al.*, Phys. Plasmas **6** (1999) 2486

## 高エネルギーイオンの影響に関する実験的調査例は少ない

- ▶ 従来のダイバータプラズマ模擬装置固有の問題 (放電形態、加熱機構形態)
- ▶ 予想される現象としてはイオン衝突励起/電離、荷電交換



プラズマの体積再結合反応率に対して高エネルギーイオンが与える影響を調査するためには**新しいタイプのダイバータプラズマ模擬装置**が必要

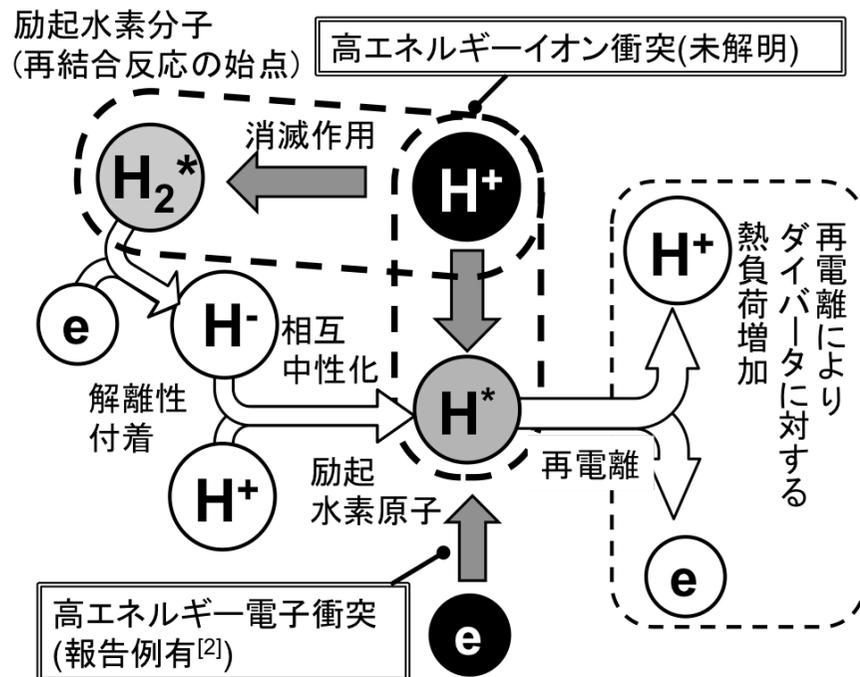
# 1-4. 高周波放電装置による模擬実験

高エネルギーイオンを用いたダイバータプラズマ模擬実験に必要な事項

- (1) 再結合/非接触プラズマの生成
- (2) ターゲットプラズマへのイオンビーム入射



- 高周波(RF)プラズマ源であれば(2)はこの要求はクリア
- (1)は容易ではない



- ダイバータで期待されるのは**分子活性化再結合**
  - 振動励起状態の水素分子H<sub>2</sub>\*が起点
  - 最終的に励起水素原子H\*が生成
- 高エネルギーイオンの影響
  - 反応の起点となるH<sub>2</sub>\*への影響(消滅)
  - 生成されたH\*への影響(再電離)

# 1- 5. DT-ALPHA装置

## 東北大学のDT-ALPHA装置

無電極高周波放電装置であるため高エネルギーイオンビームの入射が可能

- 高エネルギーイオンがプラズマ粒子の生成、消滅バランスに与える影響は原子過程( $H^*$ )、分子過程( $H_2^*$ )を反映
- 原子過程についてはヘリウム実験による現象の単純化が有効
- ITER計画の初期段階においてもヘリウム実験が想定



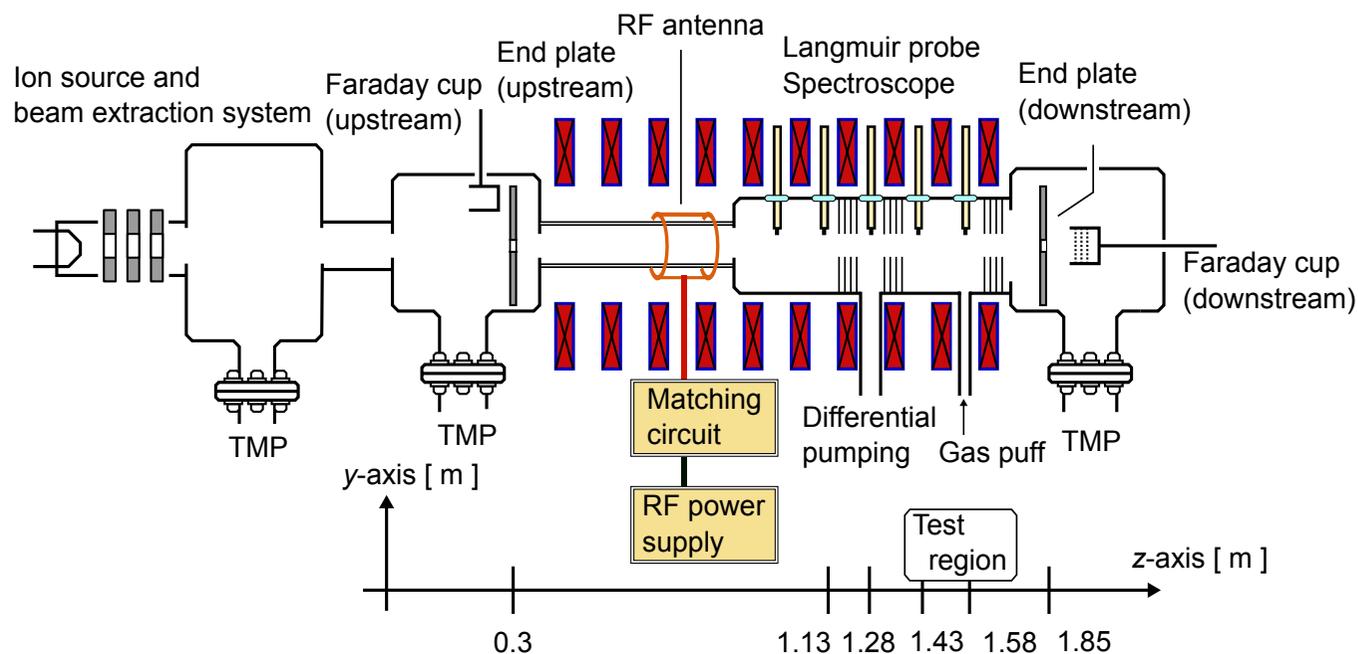
ヘリウム体積再結合プラズマに対する高エネルギーヘリウムイオンビーム重畳実験による原子過程の調査を先行して実施

## 高エネルギーイオンによる影響の例 [6]

- He電離進行プラズマに対するHeイオンビーム入射実験では荷電交換による中性粒子空間分布の再構成が示唆

[6] A. Okamoto *et al.*, Plasma Fusion Res. **6** (2011) 1201153

## 2 – 1. DT-ALPHA 装置

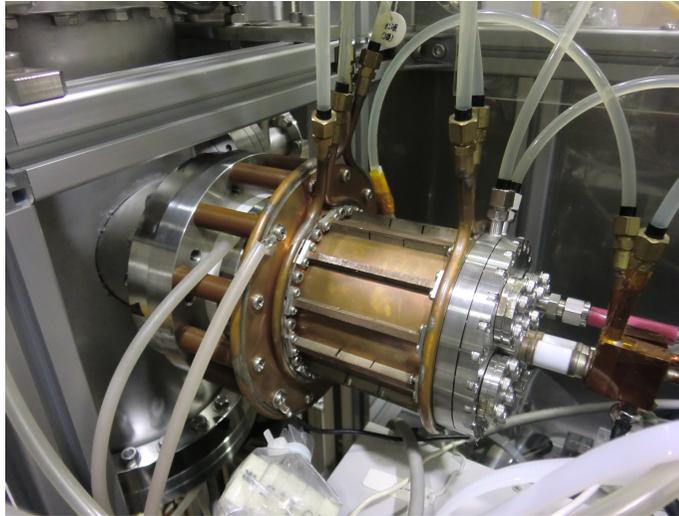


Inner diameters	63 mm (SUS chamber) 36 mm (quartz pipe) 20 mm (orifices)
Plasma production	13.56 MHz RF discharge ( $P_{RF} \sim 200$ W)
Neutral pressure	$p < 20$ Pa (at the test region)
Mag. field	$B < 0.2$ T

- テスト領域 ( $z = 1.58$  m) ではガスパフを行いヘリウム再結合プラズマを生成
- 圧力、磁場条件 ( $z = 1.43 - 1.58$  m)
  - $p \sim 6.9$  Pa,  $B \sim 0.2$  T
- ビームを入射しプラズマの応答を計測
  - プラズマ計測: 分光
  - ビーム計測: ファラデーカップ

## 2-2. イオンビーム源およびビーム引き出し

### バケット型イオン源

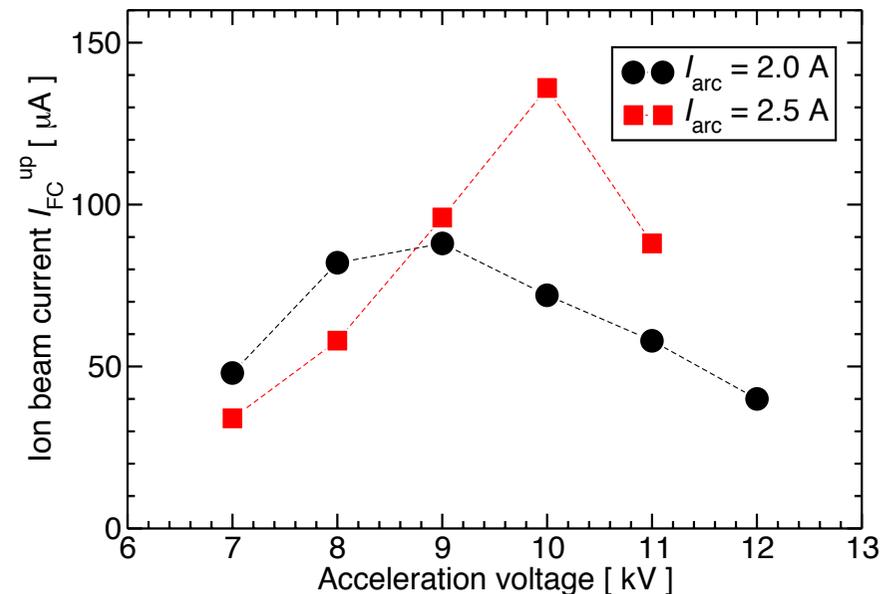


Size	80 mm (Inner diameter) 90 mm (Length)
Plasma production	DC arc discharge using hot tungsten filaments
Arc voltage	80 V
Beam extraction system	Acceleration electrode Deceleration electrode Grounded electrode

### ビーム引き出しのコントロールノブ

- イオンビーム束は加速電圧およびアーク電流で制御可能
- **イオン流束はアーク電流で制御**
  - イオン衝突断面積を一定に維持するため

上流FCで計測したビーム電流



## 3 – 1. ターゲットプラズマ計測

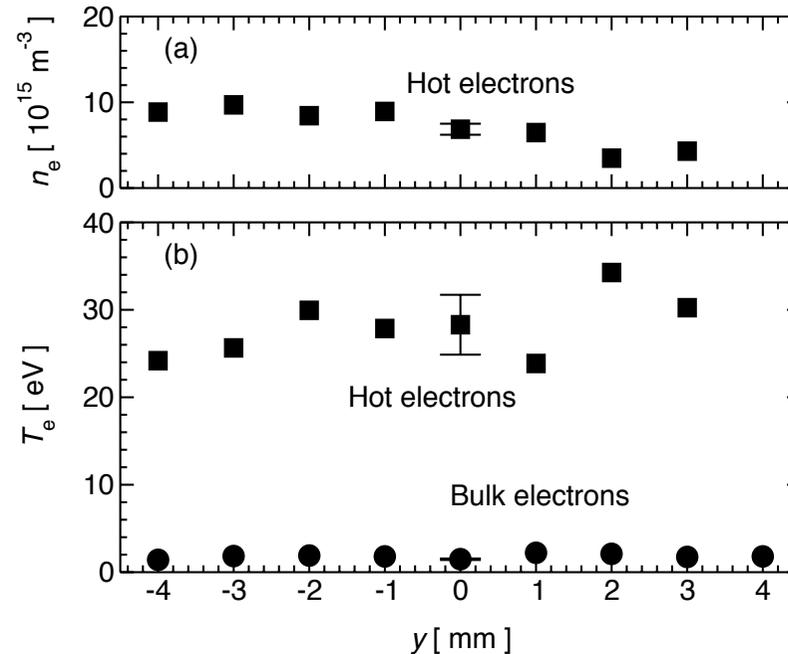
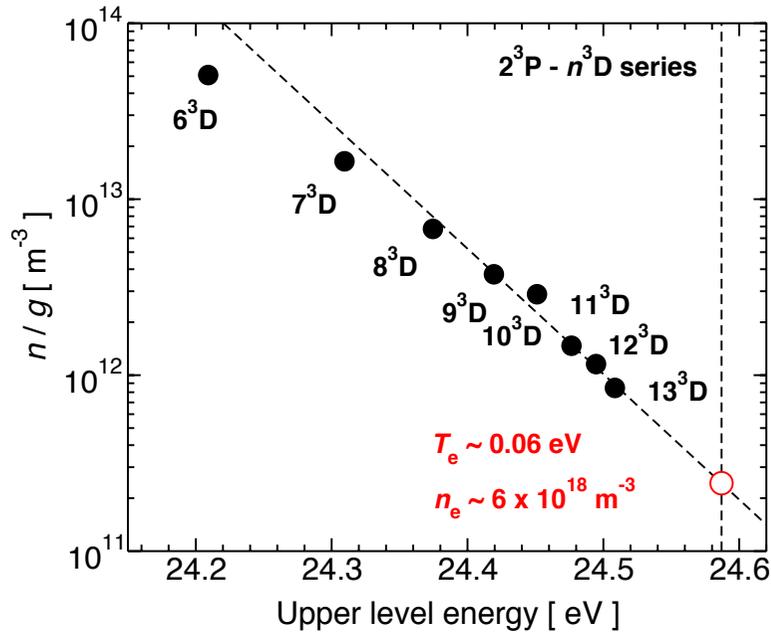
---

### ターゲットプラズマ診断手法

- 静電プローブ
- 分光
  - 線スペクトル強度を用いた診断
    - 局所熱平衡を仮定したボルツマンプロット
  - 連続スペクトル強度を用いた診断
    - 連続光のフィッティング

低電子温度プラズマでは静電プローブが電子温度を過大評価するため[7]、ターゲットプラズマの診断では分光法を利用

## 3-2. 線スペクトル強度を用いた診断 [9]



- 本実験での典型的ボルツマンプロット

–  $T_e \sim 0.06 \text{ eV}$ ,  $n_e \sim 6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  (再結合プラズマとしてはそれらしい値)

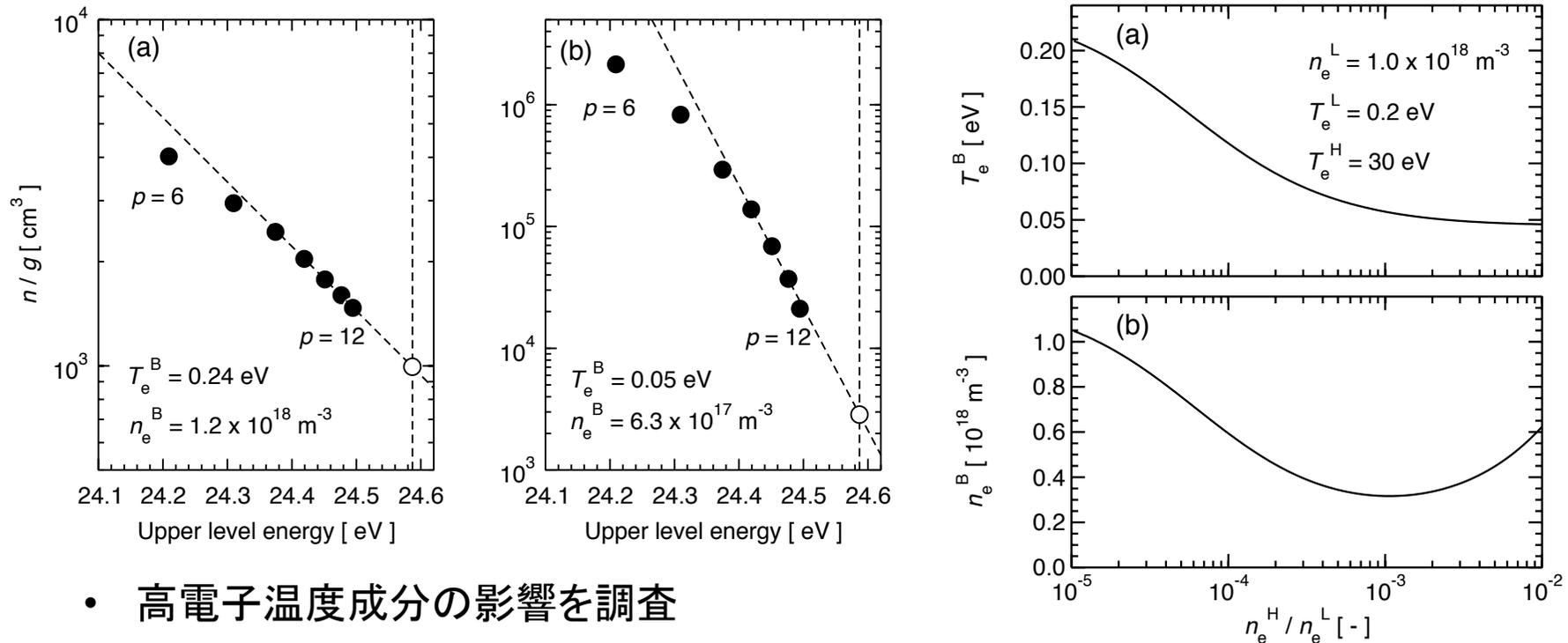
[8] N. Ohno et al., Contrib. Plasma Phys. **42** (2002) 2-4, 419  
 [9] H. Takahashi et al., Phys. Plasmas, **23** 112510 (2016)

- ボルツマンプロット法は高エネルギー電子の存在下では電子温度を著しく過小評価 [8]

– プローブ特性では二電子温度プラズマであることが示唆

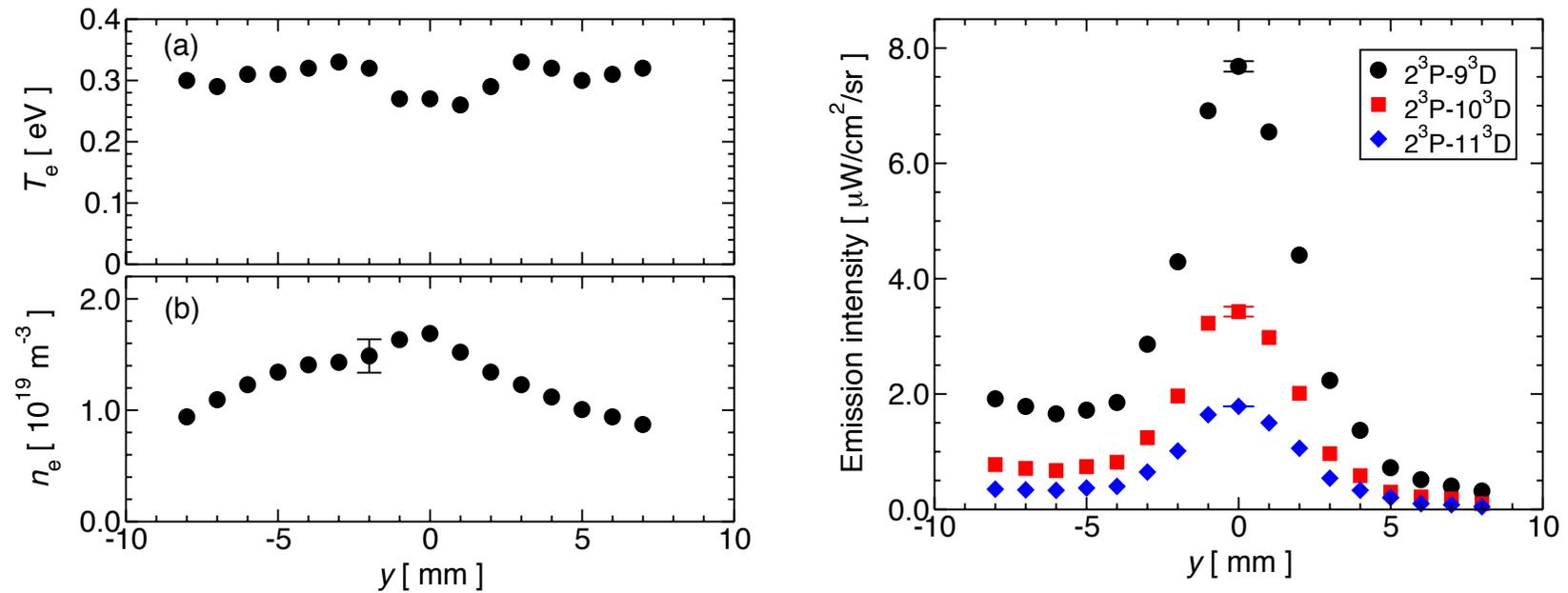
( $T_e^H \sim 30 \text{ eV}$ ,  $n_e^H / n_e^L = 0.1\%$ )

### 3-4. 高電子温度成分の影響



- 高電子温度成分の影響を調査
  - ヘリウム衝突輻射モデル[9,10]を二電子温度に拡張
  - インットパラメータは  $T_e^L = 0.2$  eV,  $n_e^L = 1.0 \times 10^{18}$  m<sup>-3</sup>,  $T_e^H = 30$  eV,  $n_e^H = 0$  or  $\neq 0$  m<sup>-3</sup>
- $n_e^H = 0$  m<sup>-3</sup> の場合は良好に一致するものの、 $n_e^H \neq 0$  m<sup>-3</sup> の場合は電子温度が過小評価
  - **< 0.1%の割合でもボルツマンプロットはバルク電子温度を反映せず**

## 3-5. $T_e$ および $n_e$ の空間分布



### 連続スペクトルから評価した電子温度・電子密度の空間分布

- $T_e$  は中心部でやや低い ( $T_e \sim 0.25 - 0.3 \text{ eV}$ )
- $n_e$  は中心部で最大値を持つ ( $\sim 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ )

### $2^3\text{P-}n^3\text{D}$ 発光強度の空間分布

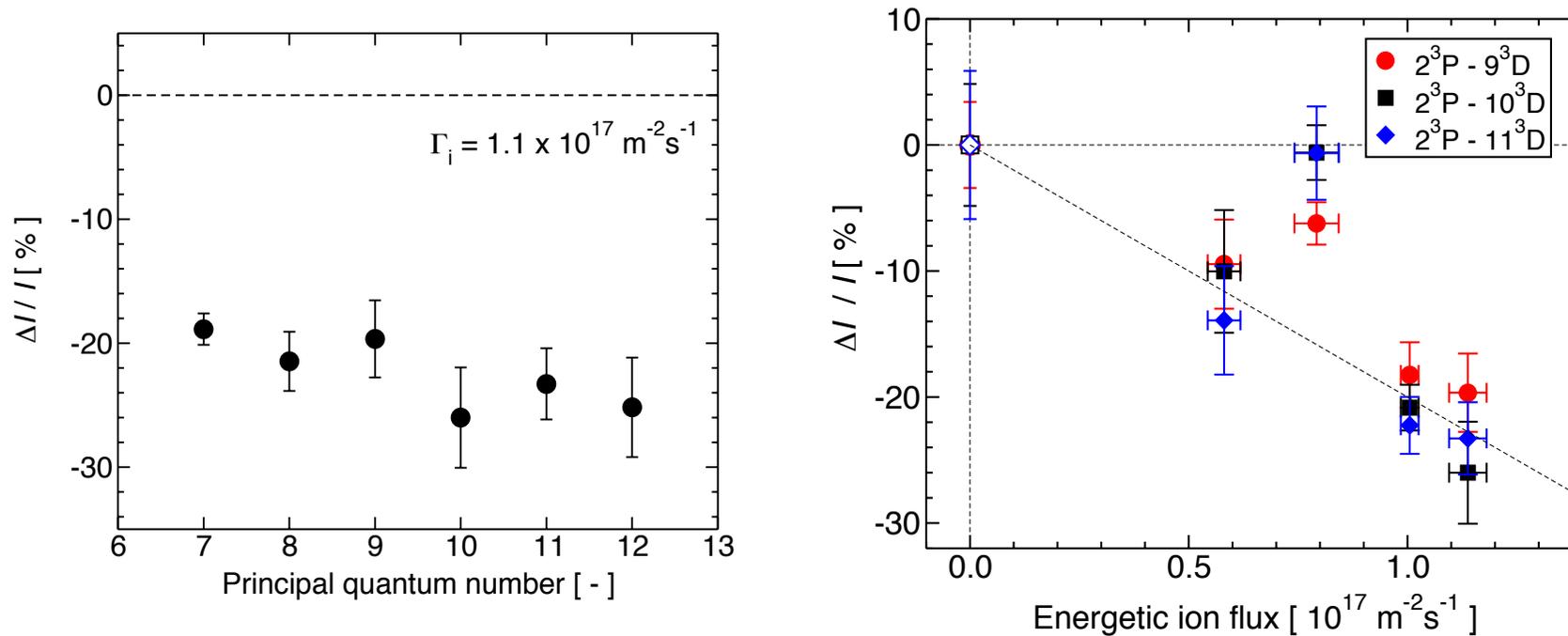
- 円柱プラズマ中心部で体積再結合が進展することを示唆
- ビーム入射に適した空間分布

## 4-1. 再結合プラズマへのビーム重畳

---

- ヘリウム再結合プラズマにヘリウムイオンビームを重畳し応答を調査
  - ビームイオンのエネルギー  $E = 13 \text{ keV}$
  - イオン衝突断面積を一定に保つためイオン流束はアーク電流で制御
  - イオンビーム束  $I_i$  はテスト領域よりも下流側に設置したファラデーカップで計測
- イオン流束計測時はプラズマ生成無し
  - 磁場、中性粒子密度の空間分布はプラズマ生成時と同様
  - イオンビームと背景プラズマとの弁別は進行中
- 再結合に伴う線スペクトルと連続スペクトルをビームの有無で比較

## 4 – 2. 再結合発光強度の応答



- 入射イオン流束を  $\Gamma_i = 0.5 - 1.1 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  の範囲で変化させプラズマの応答を調査
- 再結合に伴う発光強度は現象し、主量子数依存性が見られる
- 発光強度の減少割合はイオン流束の増加とともに大きくなる
  - 再現性よりは大きな変化量
  - 比例のような関係

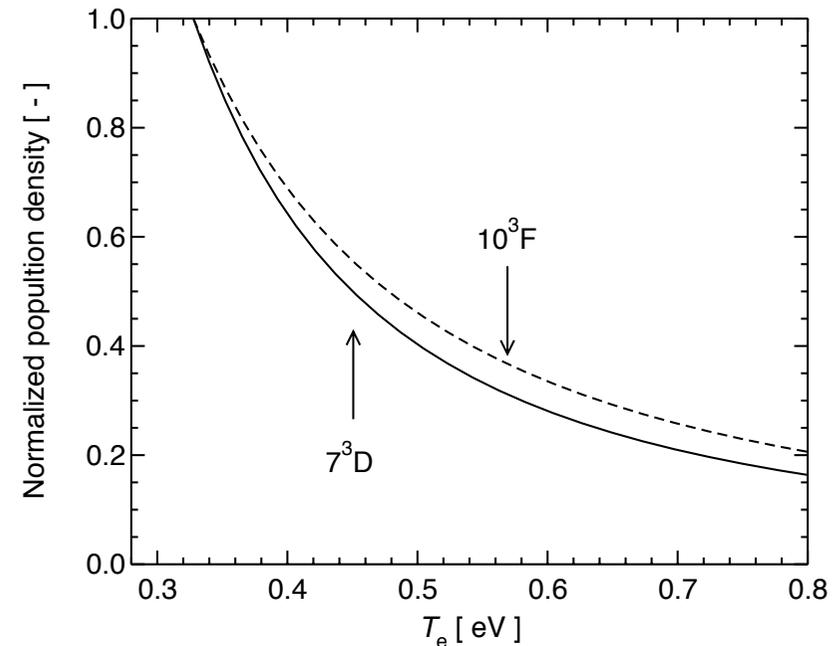
# 5-1. イオン衝突の影響

高エネルギーイオンが再結合プラズマに与える影響

- (1) バルク電子成分の加熱
- (2) 高電子温度成分の加熱
- (3) 高励起状態原子との荷電交換
- (4) イオン衝突遷移

## (1) バルク電子成分の加熱について

- ビーム入射が無い場合の診断結果 ( $T_e \sim 0.3$  eV) と衝突輻射モデルにより検討
- 発光強度 (占有密度) が10-20% 減少するためにはターゲットプラズマの電子温度は0.4 eV程度まで増加する必要
- **ビーム入射の有無で電子温度に変化は見られず**



## 5-2. イオン衝突の影響

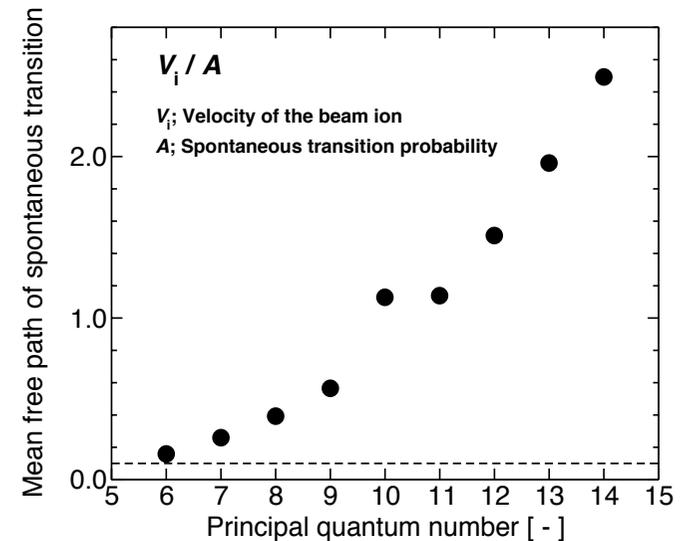
### (2) 高電子温度成分の加熱について

- 連続光に対する高電子温度成分は小さい
- ビームイオンと高電子温度成分とのエネルギー緩和時間は  $10^{-1}$  s
  - ビームイオンの滞在時間 ( $10^{-5}$  s) よりも十分大きい

### (3) ビームイオンと高励起状態原子との荷電交換について

- 断面積には主量子数依存性あり [11]
- 荷電交換により運動量を得た原子は遷移前に装置内部を数m移動可能
  - 観測領域よりも十分大きい ( $\sim 10^{-2}$  m)

[12] R. K. Janev, Atomic and Plasma-Material Interaction Data for Fusion (Supplement to the journal Nuclear Fusion) 3, (1992) 71



## 5-3. イオン衝突の影響

### イオン衝突遷移の影響

- $E = 13 \text{ keV}$ のヘリウムイオンを $T_e = 2 \text{ eV}$ の熱電子と等価と考える
  - 温度が低いため基底状態原子への影響は無視できる
  - エネルギー準位が密な高励起状態原子については影響があるものと予想される



$\Delta I / I$ を仮定し、衝突による流出項(分子)と自然放射項(分母)を計算

- 計算的には  $\Delta I / I = 10^{-2} - 10^0 \%$
- 実験的には  $\Delta I / I = 10^1 \%$

$$\frac{\Delta I}{I} \sim - \frac{n(p)n_b \langle \sigma v \rangle}{n(p)A}$$



- イオン衝突遷移が占有密度の分配に対して無視できないり流出過程となる場合がある
- 流出項のみではなく流入項も考える必要有り
- イオンビーム束を実測しビームイオン密度を正確に評価する必要有り

## 6. まとめ

---

高周波プラズマ源DT-ALPHAにおいてヘリウム再結合プラズマに対する高エネルギーヘリウムイオンビーム重畳実験を行った

### ➤ ターゲットプラズマ特性

- 連続光から電子温度・電子密度を決定 ( $n_e \sim 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ,  $T_e \sim 0.3 \text{ eV}$ )

### ➤ 高エネルギーイオンビームに対する再結合過程の応答

- ビーム存在下で線スペクトル強度が減少する一方、連続スペクトル強度はほぼ一定
  - バルクプラズマの電子温度・電子密度変化は結果を説明せず
- ビームイオンと励起状態原子の荷電交換、ビームイオンによる衝突遷移が結果を説明できる可能性がある
- ダイバータプラズマ中では高エネルギーの中性粒子流れ場が形成される可能性を示唆