

JT-60Uにおける原子分子過程に関わる研究

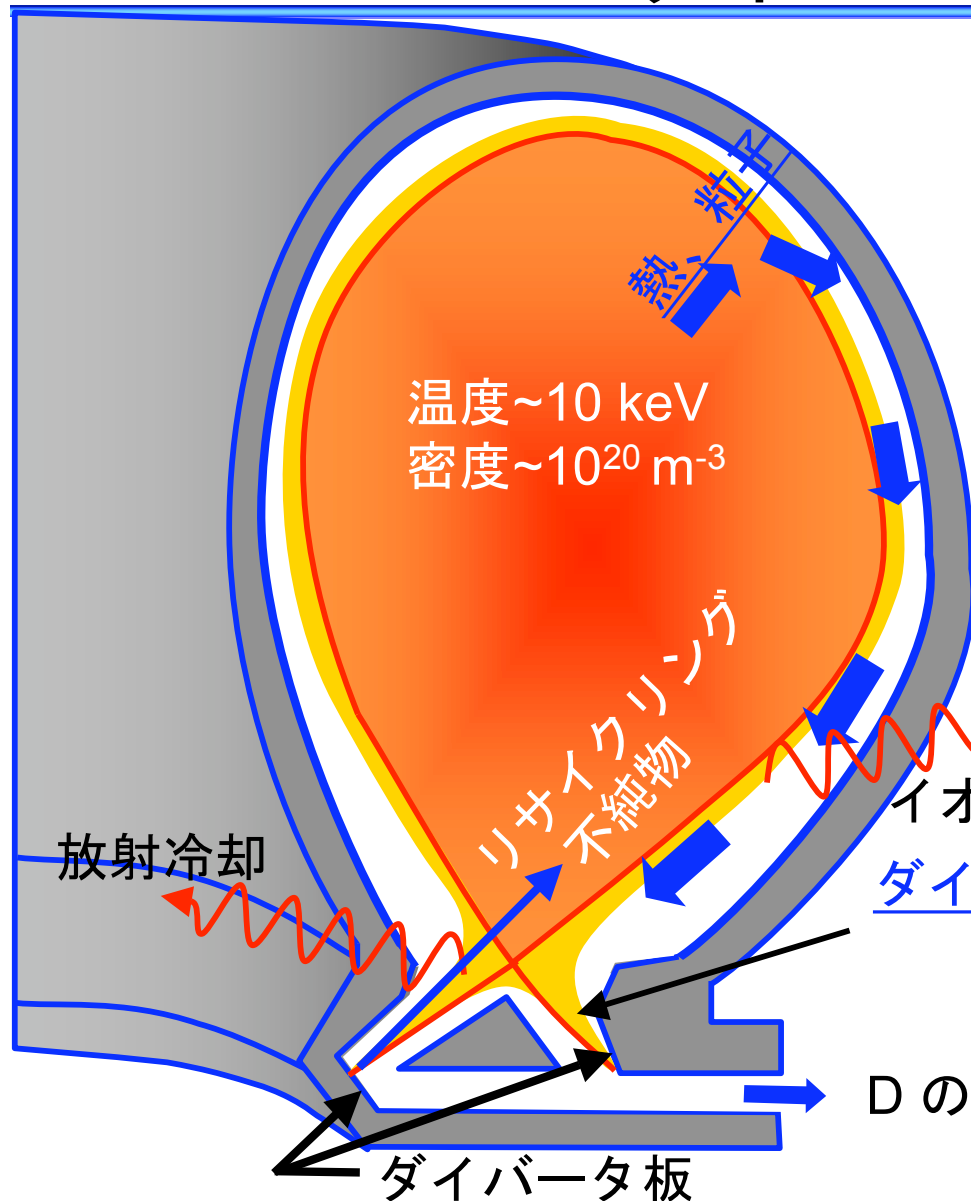
1. トカマク装置での熱・粒子とダイバータの役割
2. 分子線発光率データ生産とそれを用いた炭化水素発生量計測
3. 非接触プラズマにおける炭素イオンの放射過程
4. He I 強度線比を用いた電子温度と電子密度の高速測定

日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所

仲野 友英

トカマク装置における熱・粒子とダイバータの役割

JT-60U-



課題

- 燃料粒子制御
- 炉心プラズマの不純物量低減
化学スパッタリング率測定
- ダイバータ板への熱負荷軽減
非接触プラズマにおける放射過程

ELMによるダイバータ
プラズマの変化

放射冷却
イオン中性化

ダイバータプラズマ

温度 $\sim 0.5 - 100 \text{ eV}$

密度 $\sim (0.1 - 50) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

Dの排気

ダイバータ板

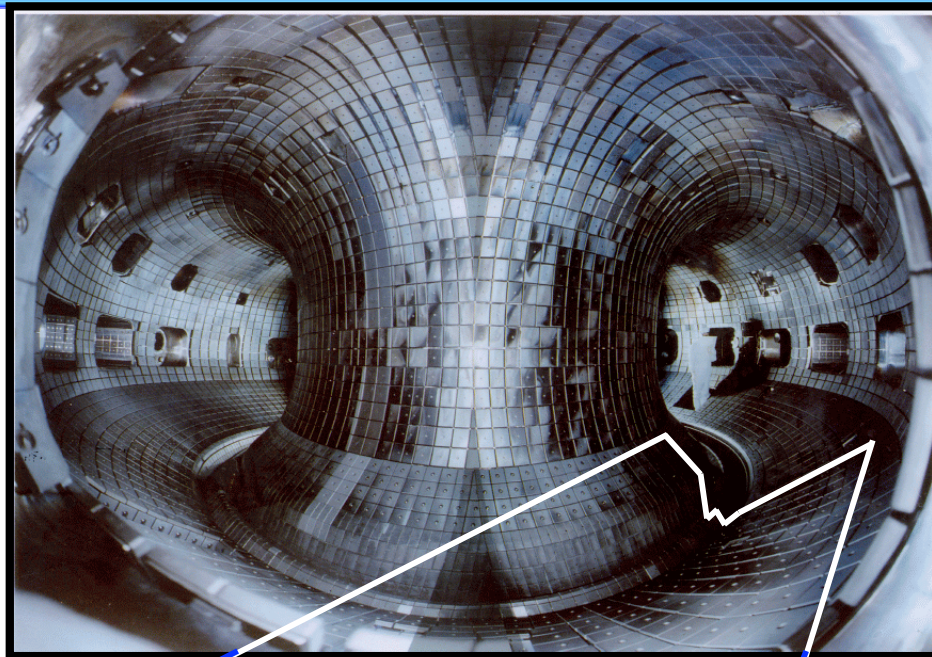
熱・粒子負荷 \Rightarrow 損耗、不純物の発生

JT-60Uにおける原子分子過程に関わる研究

1. トカマク装置での熱と粒子
2. 分子線発光率データ生産とそれを用いた炭化水素発生量計測
3. 非接触プラズマにおける炭素イオンの放射過程
4. He I 強度線比を用いた電子温度と電子密度の高時間分解測定

化学スパッタリング率測定の意味

JT-60U-

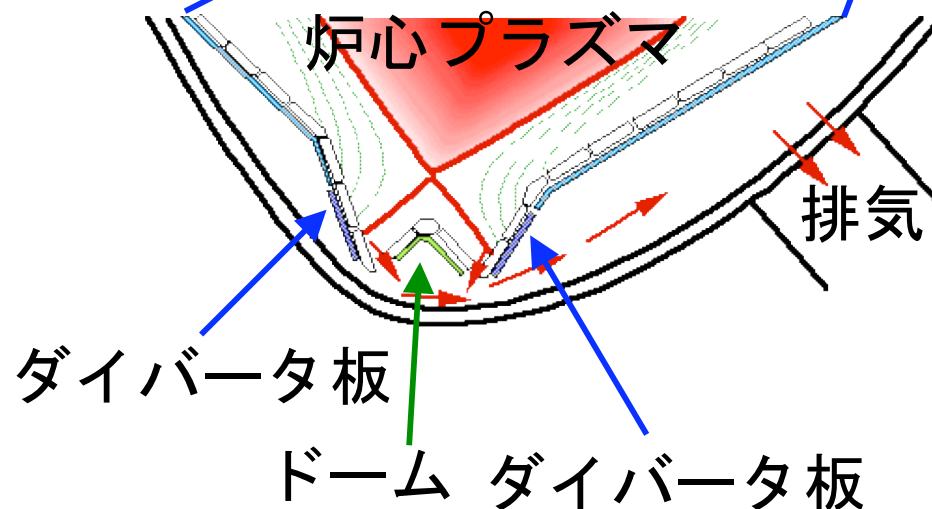


炭素材 (CFC)

- 高い熱衝撃・伝導性能
 - 低原子番号
- ⇒ ダイバータ板、リミター、
第一壁
- 高い化学反応率 $Y_{\text{chem}} > Y_{\text{phys}}$
(低衝突エネルギー)

核融合炉のタイル寿命を
決める一要素

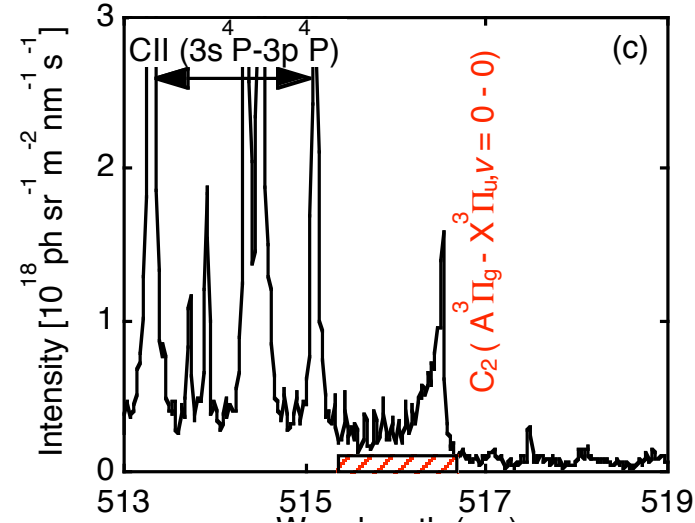
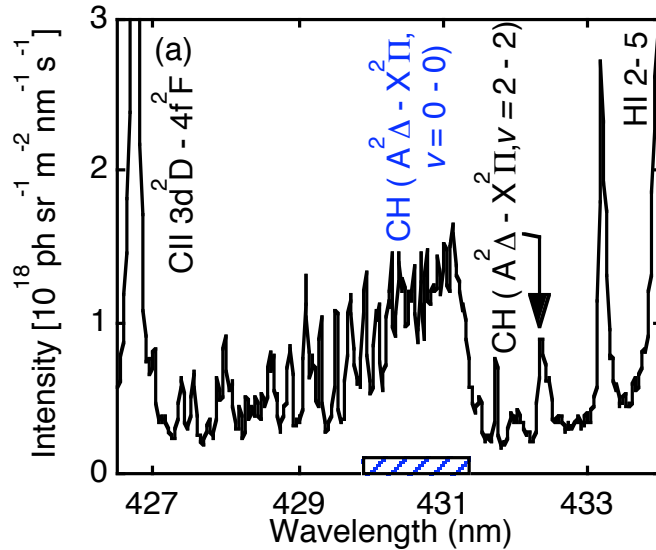
- 不純物源
 - 水素との共堆積
- ⇒ Tインヴェントリーの増加
⇒ 壁排気
- 分子活性化再結合



分光計測による炭化水素発生量計測

JT-60U-

CH と C₂ スペクトルバンドを分光測定



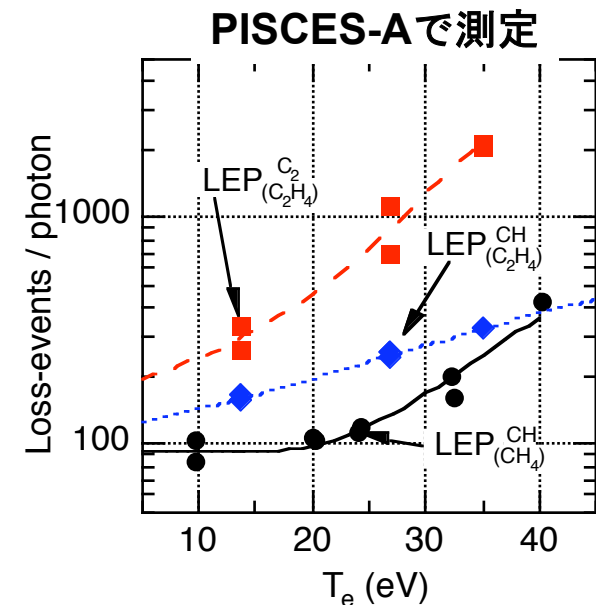
Loss-Events / Photon を乗じる

(炭化水素分子が損失するまでに放射する光子数の逆数)

$$\Gamma_{C_2H_y} = I_{C_2H_y}^{C_2} \cdot LEP_{C_2H_y}^{C_2}$$

$$\Gamma_{CH_4} = \left(I_{CH_4}^{CH} - I_{C_2H_y}^{CH} \right) \cdot LEP_{CH_4}^{CH}$$

問題点：LEP データの不足、信頼性、装置
=> LEP データ生産 => スパッタリング率(

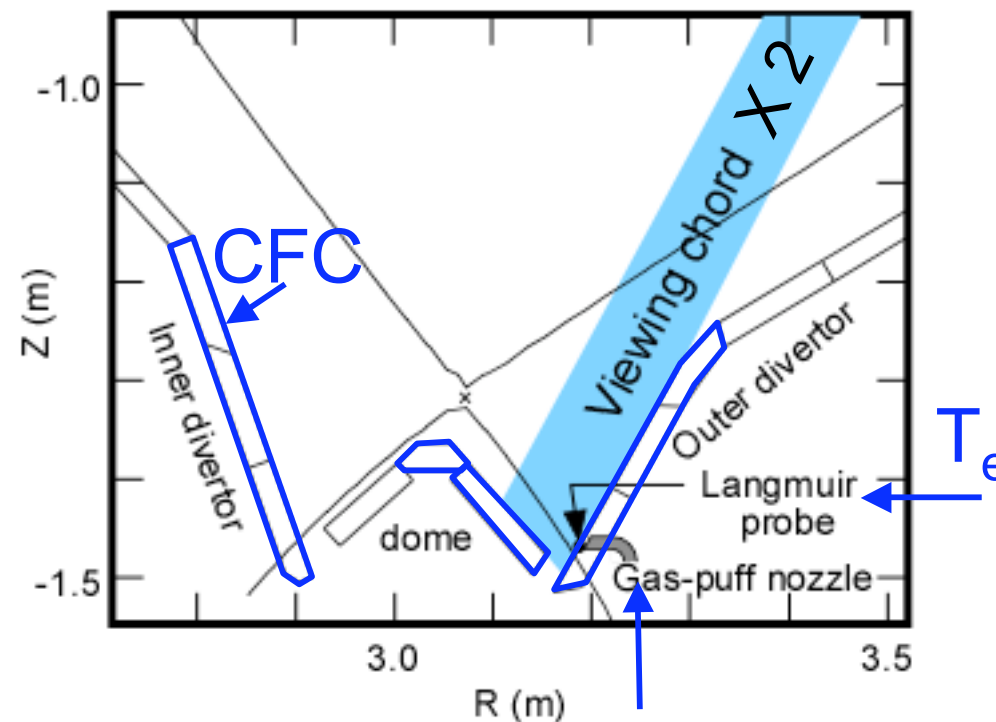


局所ガス入射による発光率測定

JT-60U-

分光計測 : CH, CD, C₂ スペクトルバンド

ガス入射口を見込む視野 (V_g) + 背景光用視野 (V_b)
(トロイダル方向に 10 cm ずらした視野)



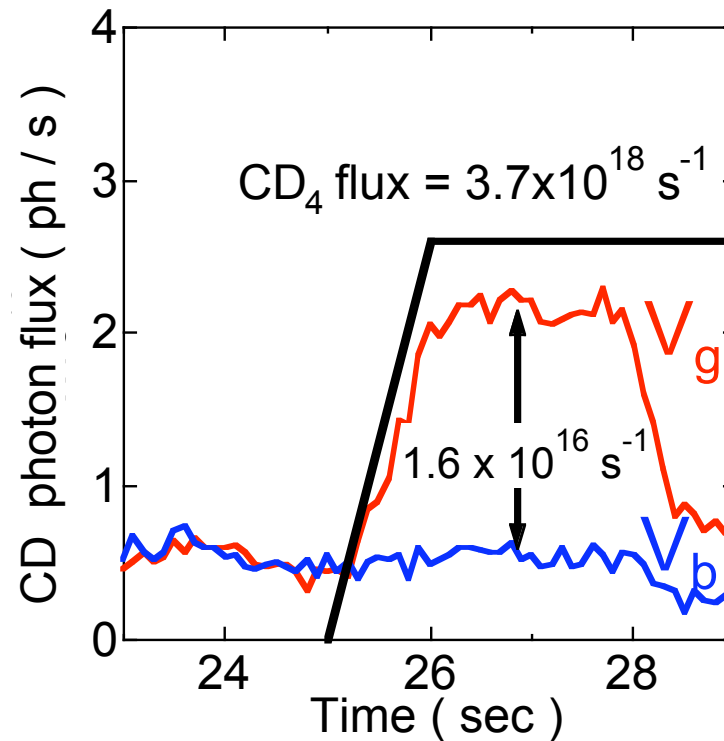
入射ガス : CH₄, CD₄, C₂H₄, C₂H₆

at $3 \times 10^{18} - 2 \times 10^{19} / \text{s}$

局所ガス入射による発光率測定

JT-60U-

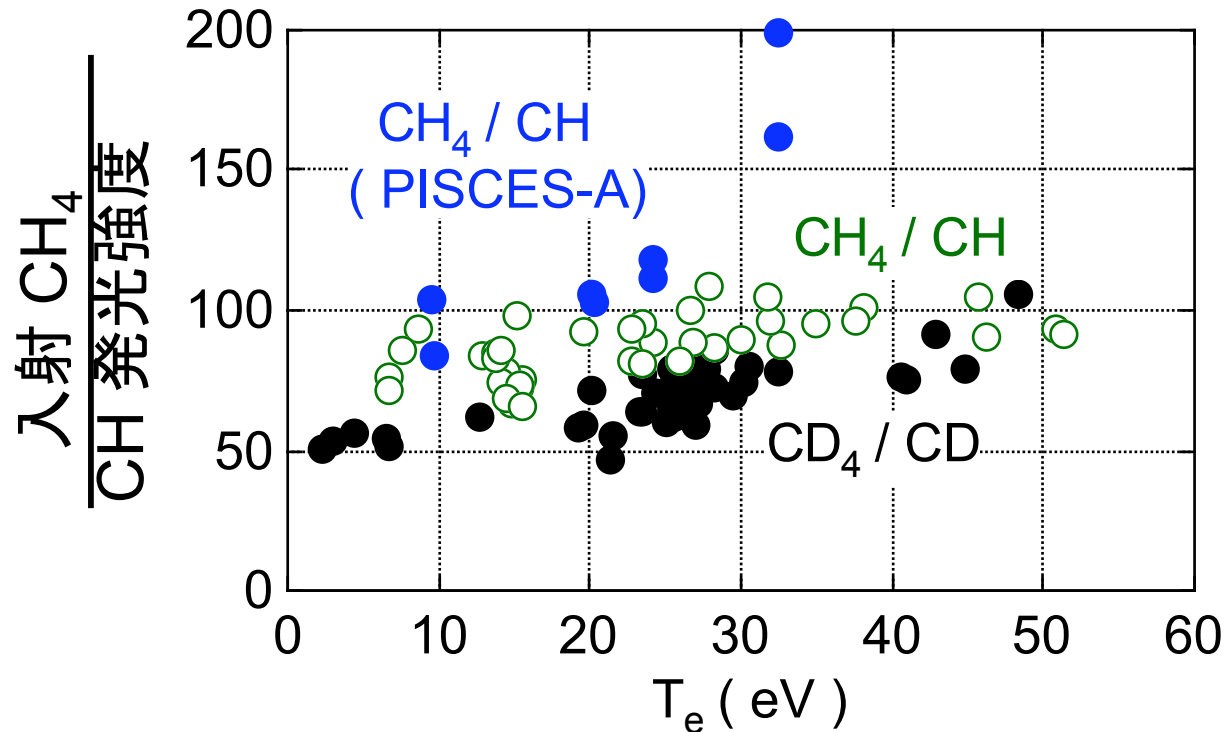
$T_e = 70 \text{ eV}$



$$LEP_{CD_4}^{CD} = \frac{3.7 \times 10^{18}}{1.6 \times 10^{16}} = 230$$

CH₄・CD₄入射による CH 発光率

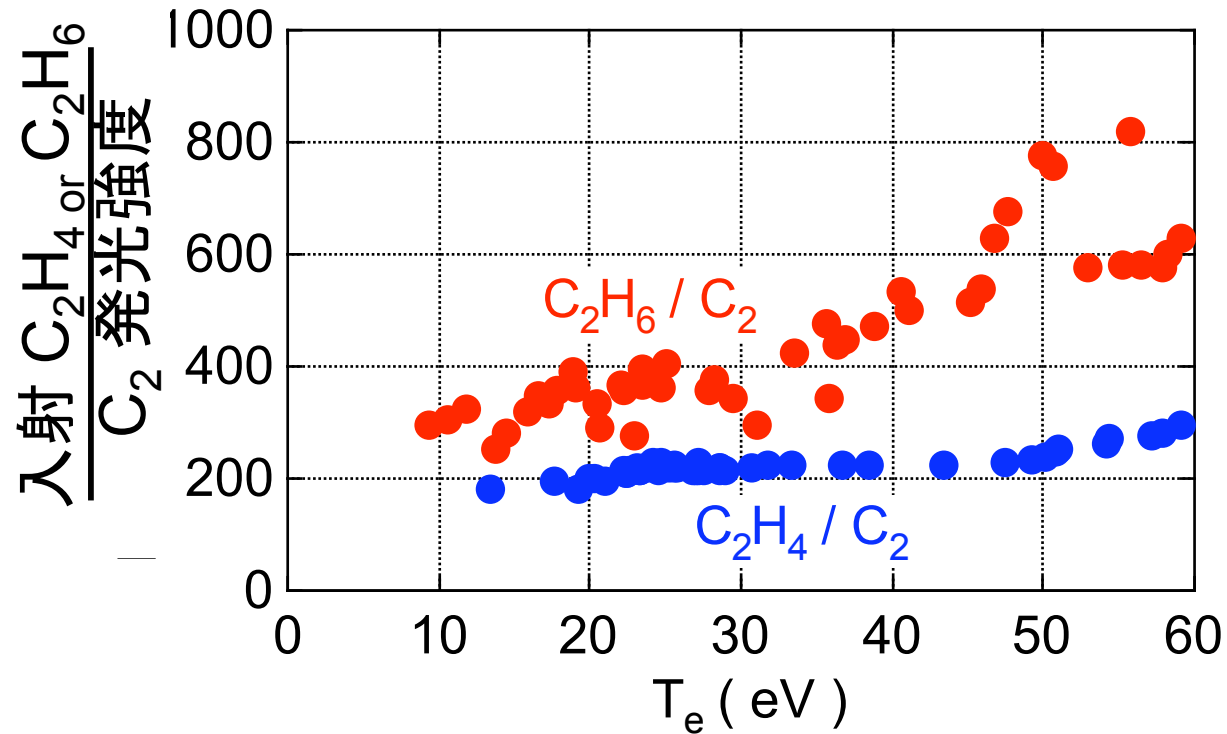
JT-60U-



- T_e ~ 10 eV では PISCES-A の結果と一致
- PISCES-A の結果より弱い電子温度依存性
- PISCES-A の結果より定めた化学スパッタリング率は収率および衝突エネルギー依存性が過大評価

C_2H_4 ・ C_2H_6 入射によるCH・ C_2 発光率

JT-60U-



- $C_2H_4 / CH > C_2H_6 / CH$
 - $C_2H_4 / C_2 < C_2H_6 / C_2$
- ⇒ CH・ C_2 分子の相対的な生成確率と定性的に一致

化学スパッタリング率の導出

JT-60U-

化学スパッタリングによって発生する炭化水素に由来する、
C₂ スペクトラルバンド強度

$$\begin{aligned} I_{C_2}^{measured} &= \Gamma_{C_2H_4} / LEP_{C_2}^{C_2H_4} + \Gamma_{C_2H_6} / LEP_{C_2}^{C_2H_6} \\ &= \Gamma_{C_2H_y} \cdot \left(\alpha / LEP_{C_2}^{C_2H_4} + (1-\alpha) / LEP_{C_2}^{C_2H_6} \right) \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \end{aligned}$$

CH スペクトラルバンド強度

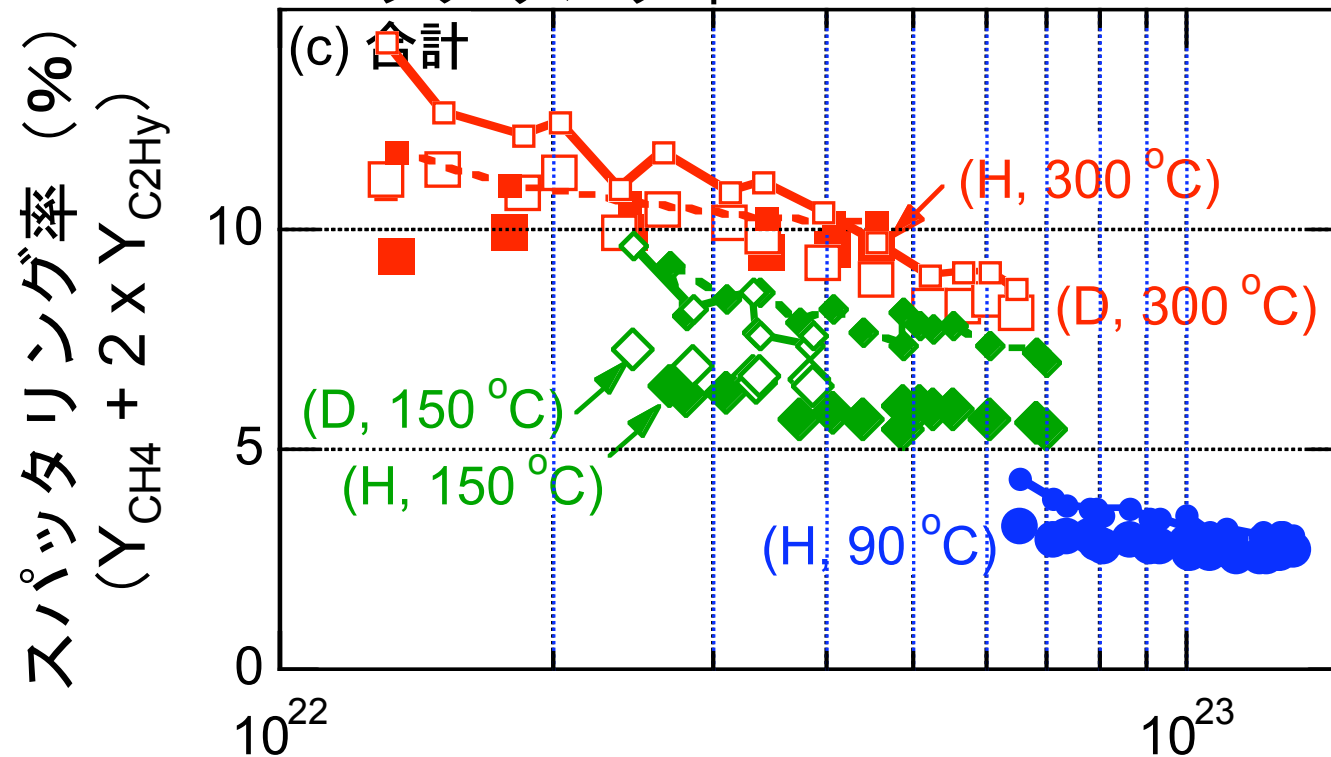
$$\begin{aligned} I_{CH}^{measured} &= \Gamma_{CH_4} / LEP_{CH}^{CH_4} + \Gamma_{C_2H_4} / LEP_{CH}^{C_2H_4} + \Gamma_{C_2H_6} / LEP_{CH}^{C_2H_6} \\ &= \Gamma_{CH_4} / LEP_{CH}^{CH_4} + \Gamma_{C_2H_y} \cdot \left(\alpha / LEP_{CH}^{C_2H_4} + (1-\alpha) / LEP_{CH}^{C_2H_6} \right) \end{aligned}$$

仮定：C₂H₂, C_mH_n (m≥3) を無視
(これらの発生量は CH₄, C₂H₄, C₂H₆ よりも少ないことが報告されている)

合計スパッタリング率

PISCES-Aのデータを用いて求めた
スパッタリング率

JT-60U-



$$\Gamma_{C_2H_4} = \alpha$$

$$\Gamma_{C_2H_6} = (1 - \alpha)$$

$$\alpha = 0$$

$$0.5$$

$$1$$

ストライク点でのイオン束密度 ($m^{-2}s^{-1}$)

- α の取り得る範囲から生じる合計スパッタリング率 ($Y_{CH_4} + 2 \times Y_{C_2H_y}$) の不確かさは統計誤差より小さい
- 発生率およびイオン束依存性の過大評価が修正された

まとめ

JT-60U-

1. CH_4 , CD_4 , C_2H_4 , C_2H_6 を入射して、 CH , CD および C_2 スペクトラルバンドの発光率を測定した

電子温度依存性は弱い (PISCES-Aとの比較)

⇒ 低温 ($T_e \sim 10 \text{ eV}$) ではよく一致するが、高温 ($T_e < 30 \text{ eV}$) では差が大きくなる傾向

2. 測定した発光率データを用いて炭化水素の発生率を測定した
炭化水素の発生率は、炭素材温度 300 度で 10 %

150 度で 6 %

90 度で 3 %

(C_2H_4 と C_2H_6 の比によらない : 仮定 C_2H_2 , $\text{C}_n\text{H}_m (n \geq 3)$ を無視)
発生率およびイオン束依存性の過大評価が修正された

モデリングのためのデータ

低温 ($T_e < 5 \text{ eV}$) では発光率データの計算は実験値を再現しない

C_2H_y のモデリングは今後の課題 (ほとんど報告はない)

JT-60Uにおける原子分子過程に関わる研究

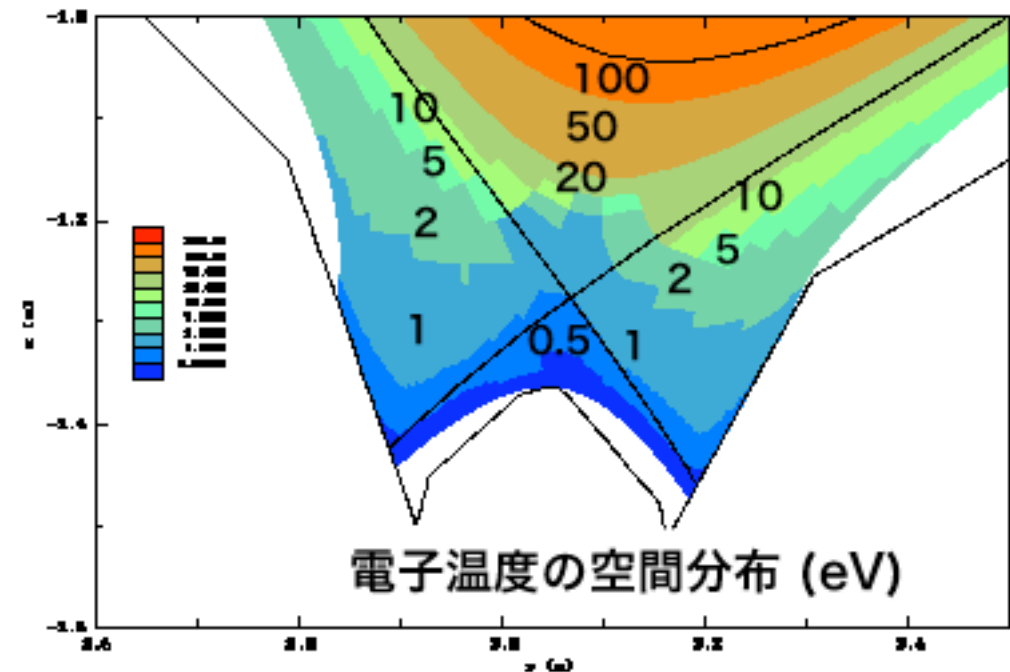
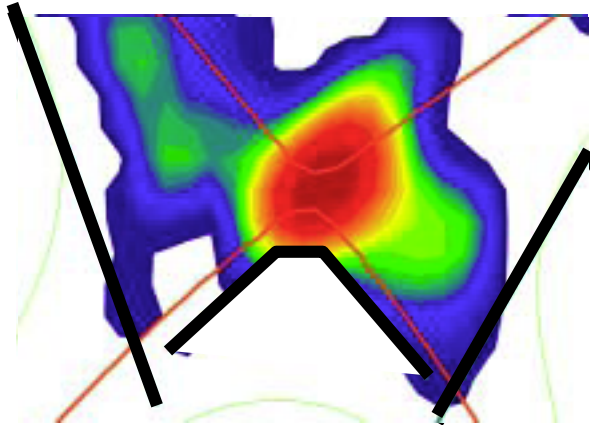
1. トカマク装置での熱と粒子
2. 分子線発光率データ生産とそれを用いた炭化水素発生量計測
3. 非接触プラズマにおける炭素イオンの放射過程
4. He I 強度線比を用いた電子温度と電子密度の高時間分解測定

非接触プラズマ

JT-60U-

- 2次元放射パワー分布
- プラズマ輸送コードで計算された電子温度と密度の分布

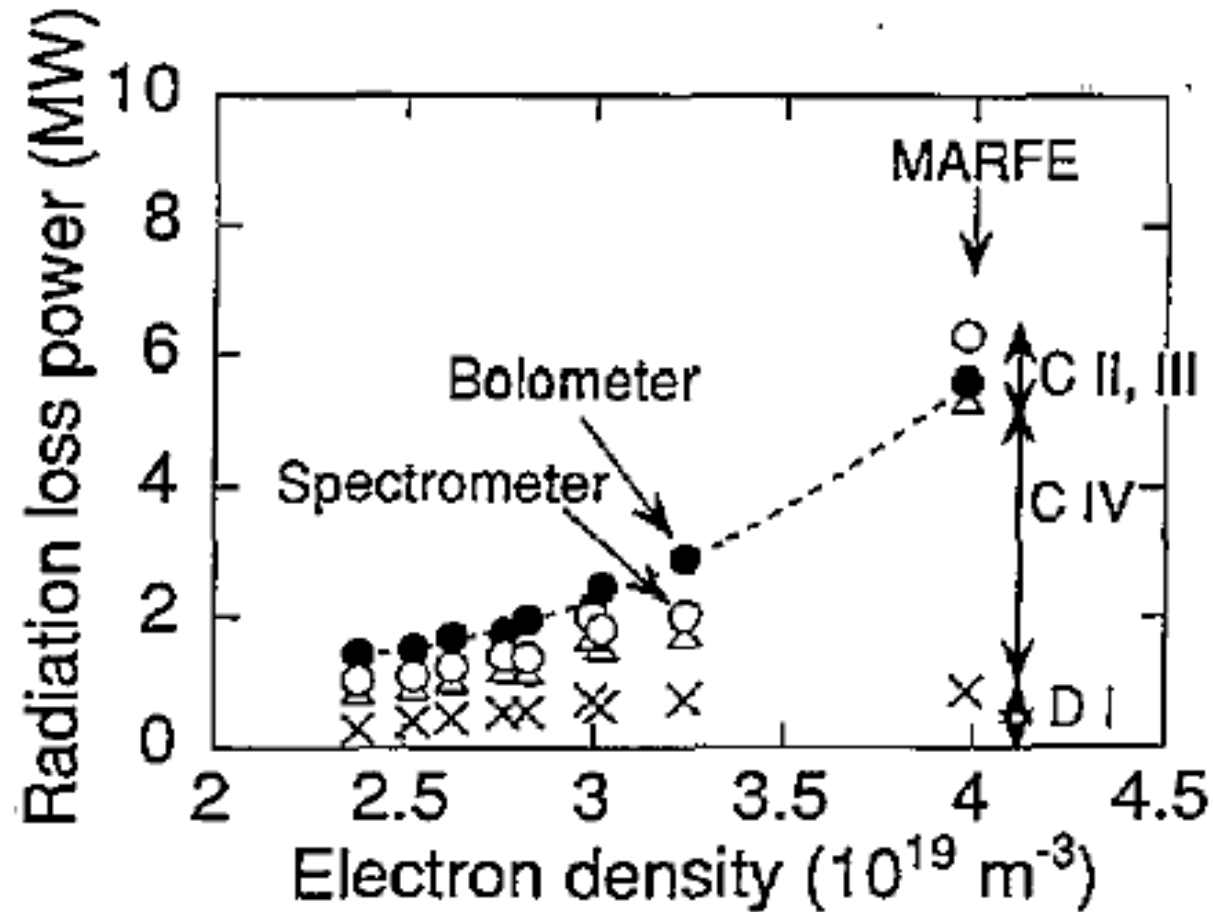
Detached plasma (MARFE)



X 点付近に高放射、低温かつ高密度領域が存在

低温プラズマの放射源

JT-60U-

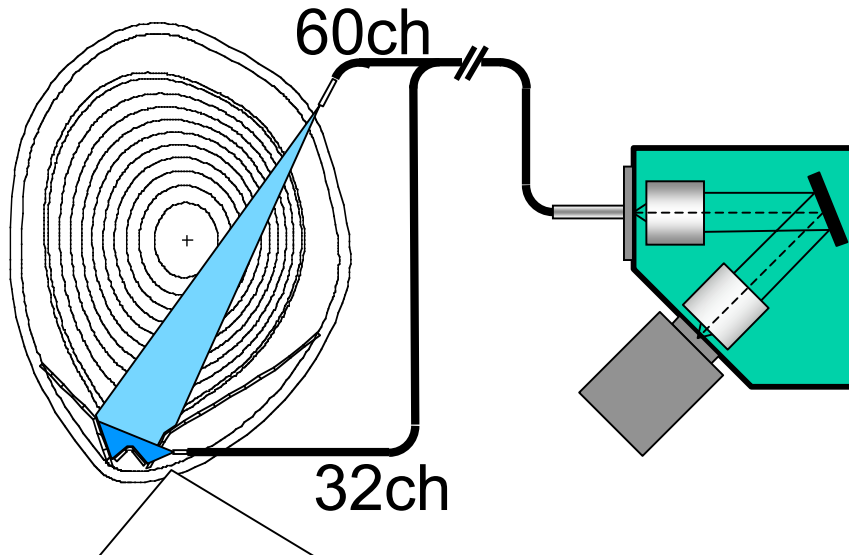


仮定：C³⁺ 基底状態からの励起によるC IV の線放射
($T_e = 20 \text{ eV}$)

<=> 非接触プラズマでは $T_e < 1 \text{ eV}$

2次元広帯域可視分光器

JT-60U-

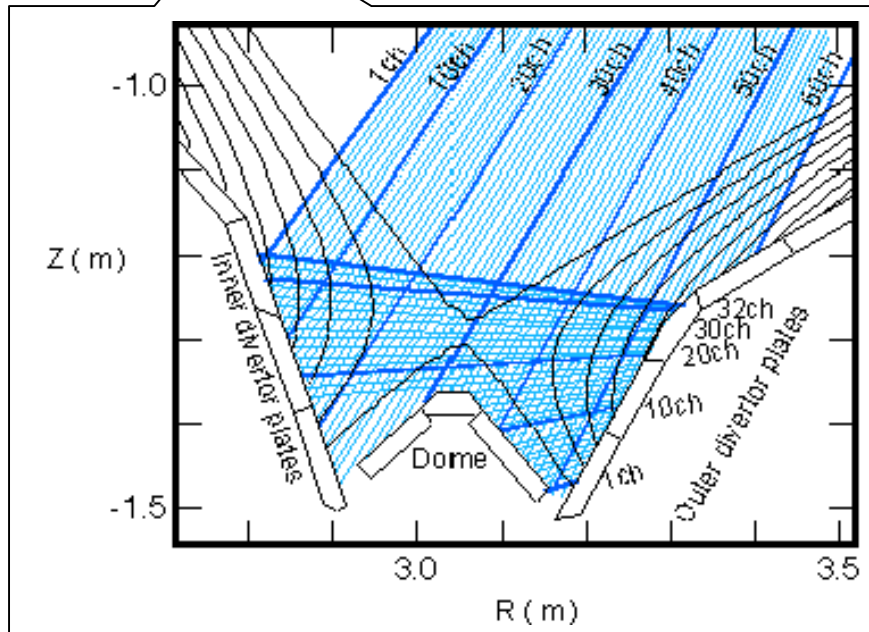


分光器

- 回折格子 : 300 g/mm
- F ナンバー : 2
- 焦点距離 : 0.2 m

CCD

- ピクセル : 20 x 20 μm
- フォーマット : 1340 x 1300



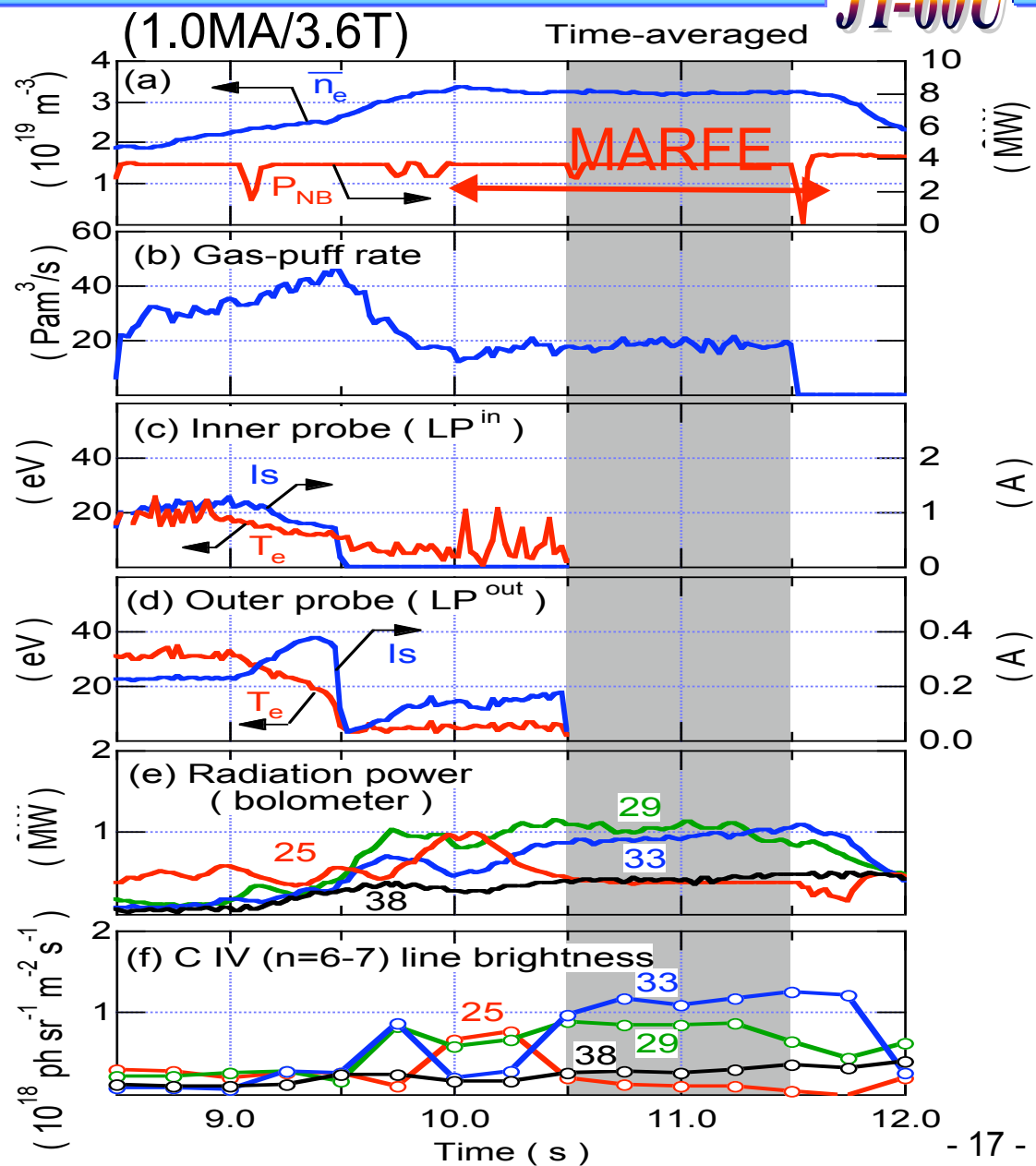
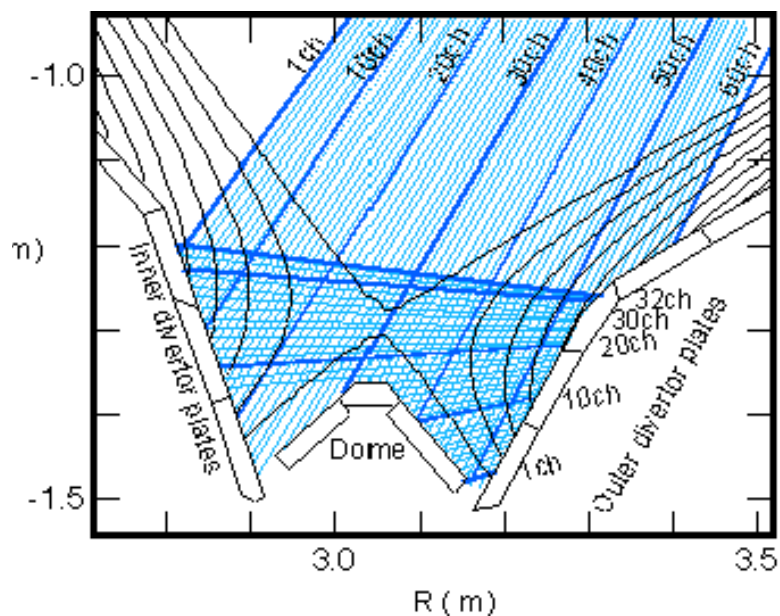
スペック

- 同時測定波長幅:
~ 430 nm (350 - 780 nm)
- 空間分解:
~ 1 cm
- 装置幅 (半値全幅):
~ 0.74 nm (2.3 pixels)

放電波形

JT-60U-

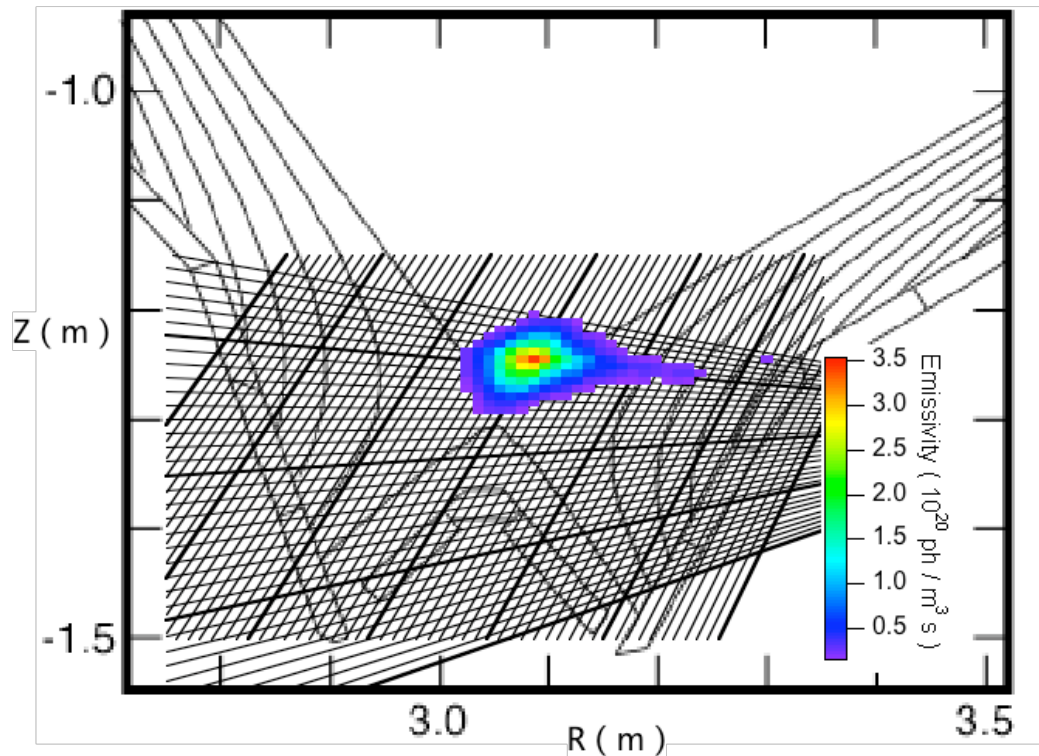
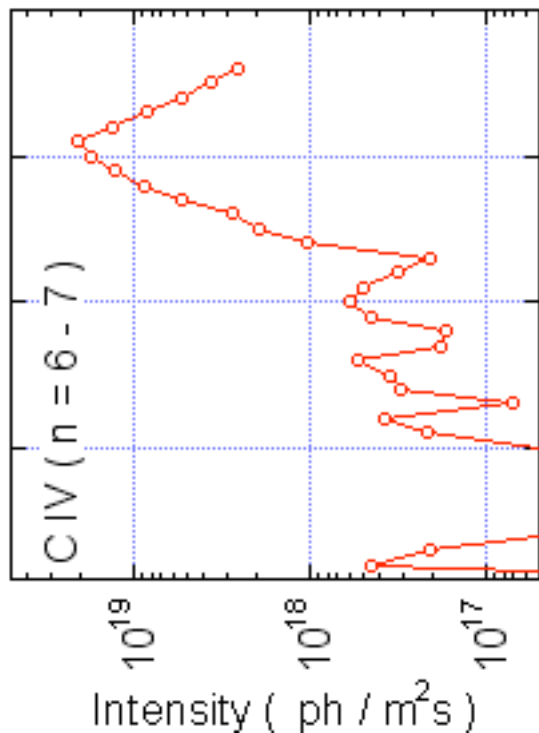
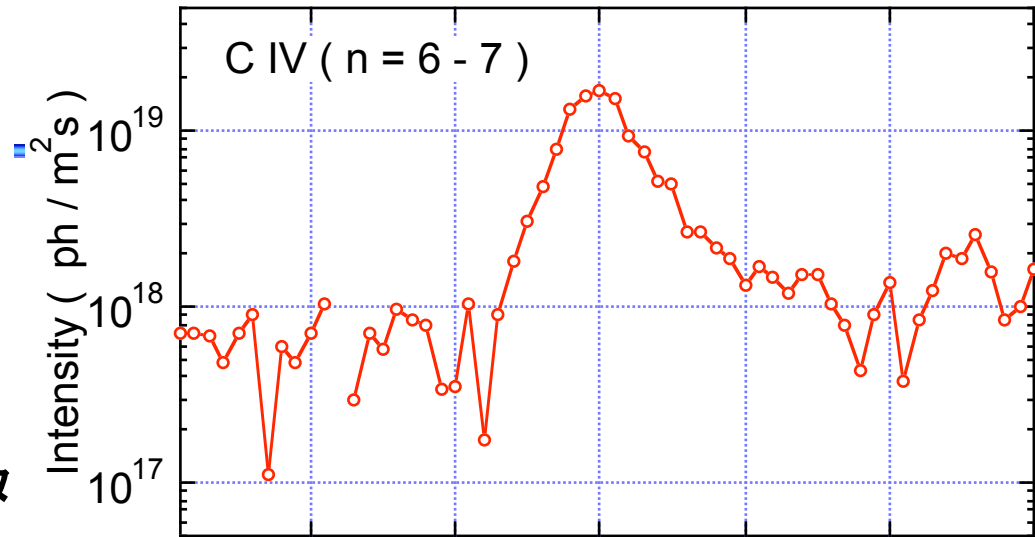
1秒間、時間平均した
スペクトル強度を解析



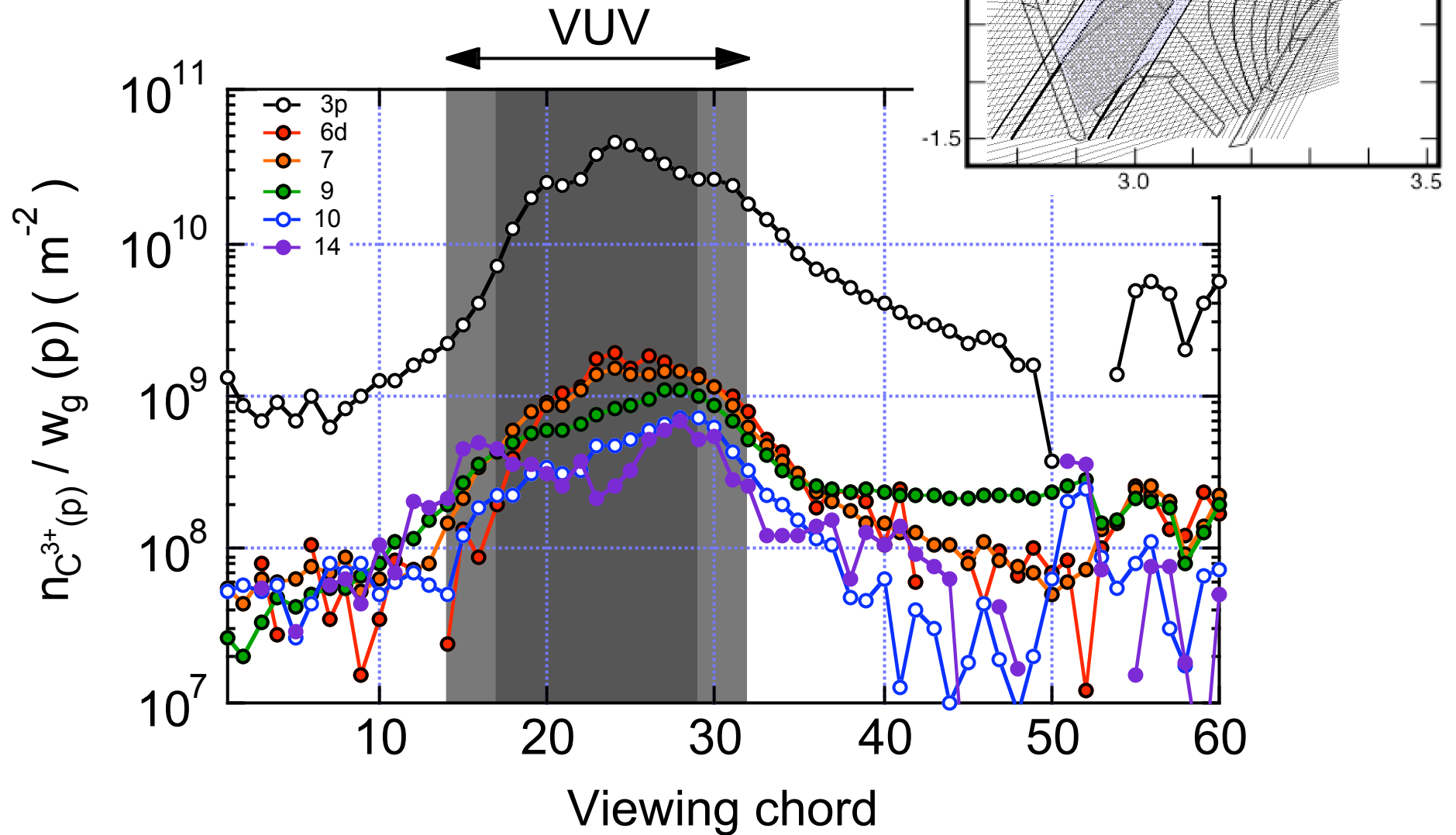
C IV発光の 2次元分布

類似した空間分布
⇒ プラズマパラメータ
も同じ (n_e, t_e, n_D, \dots)

60U-

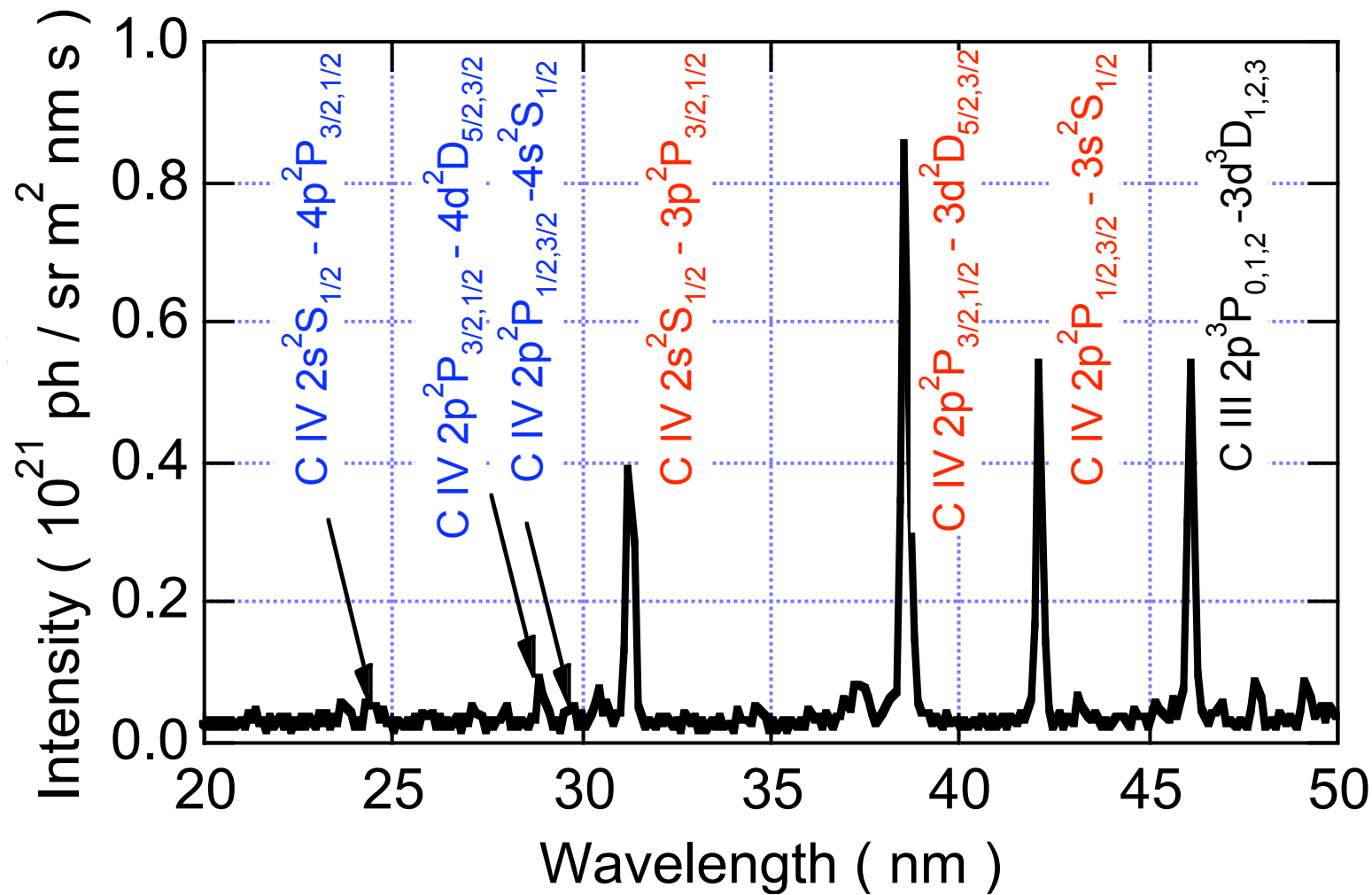


C IV ポピュレーション分布



C IV スペクトル (VUV)

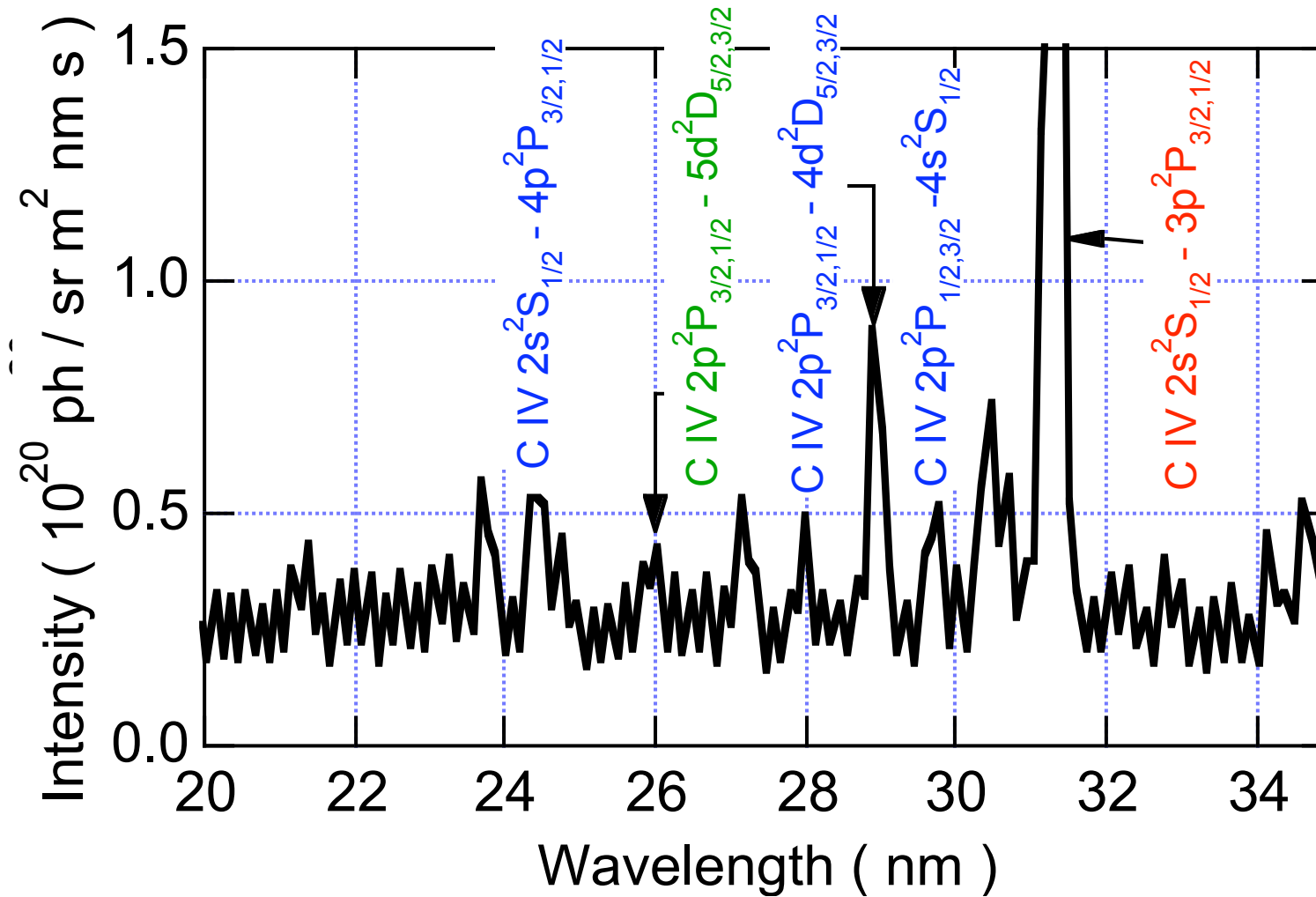
JT-60U-



C IV (2 - 3, 4) が観測された

C IV スペクトル (VUV)

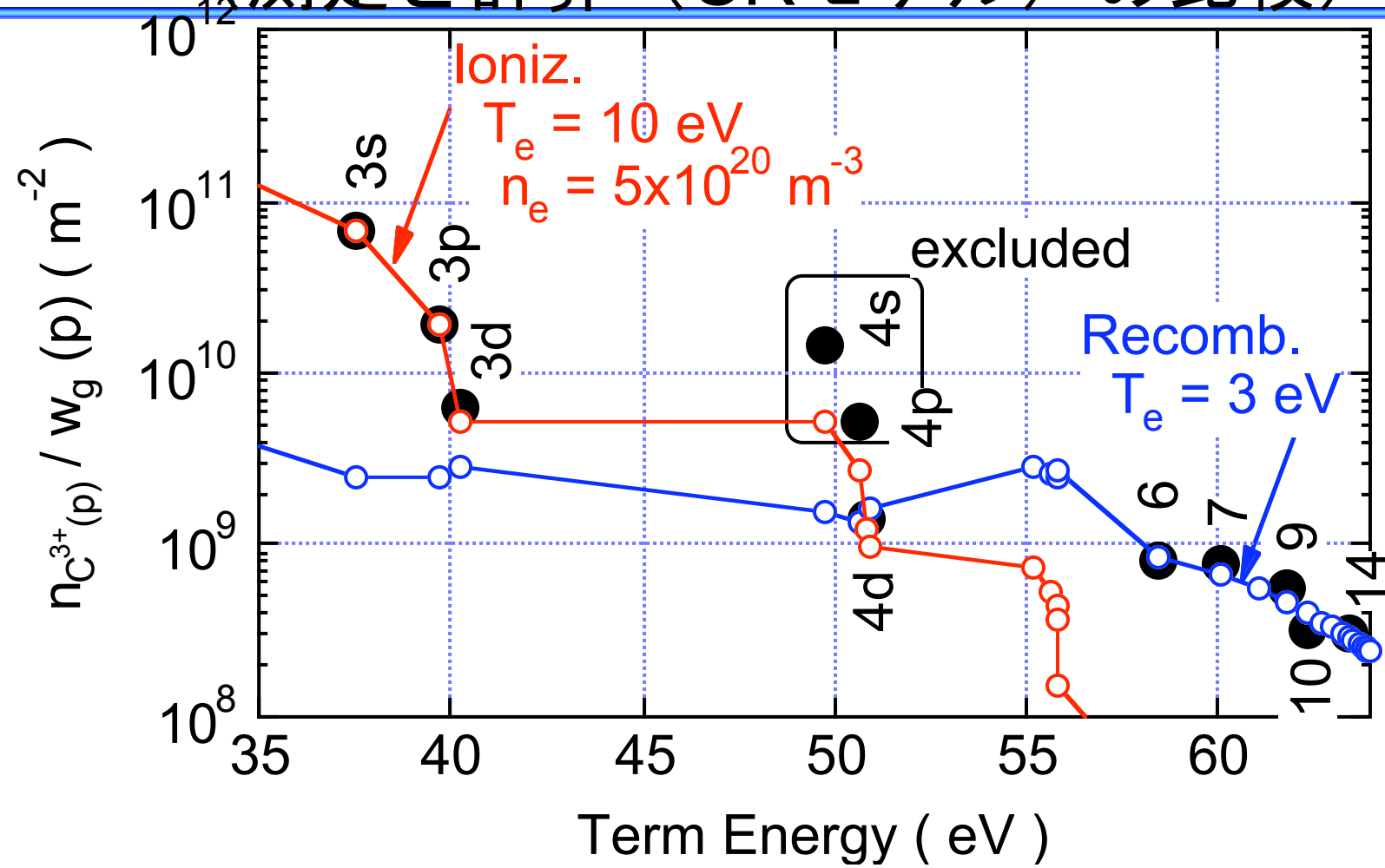
JT-60U-



C IV (2 - 5) は弱く、解析は困難

ボルツマンプロット (測定と計算 (CRモデル) の比較)

JT-60U-



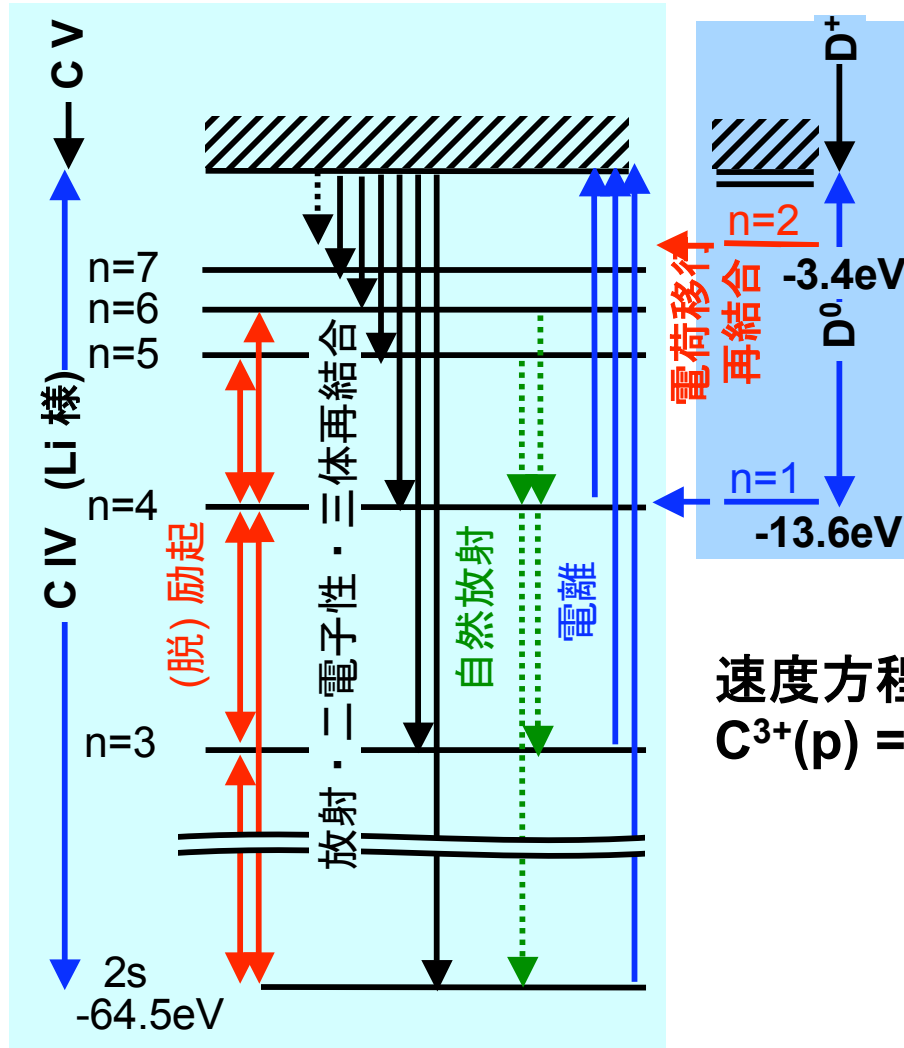
低励起準位：電離成分

高励起準位：再結合成分

(電子温度が異なる理由は不明)

衝突放射モデル

JT-60U-



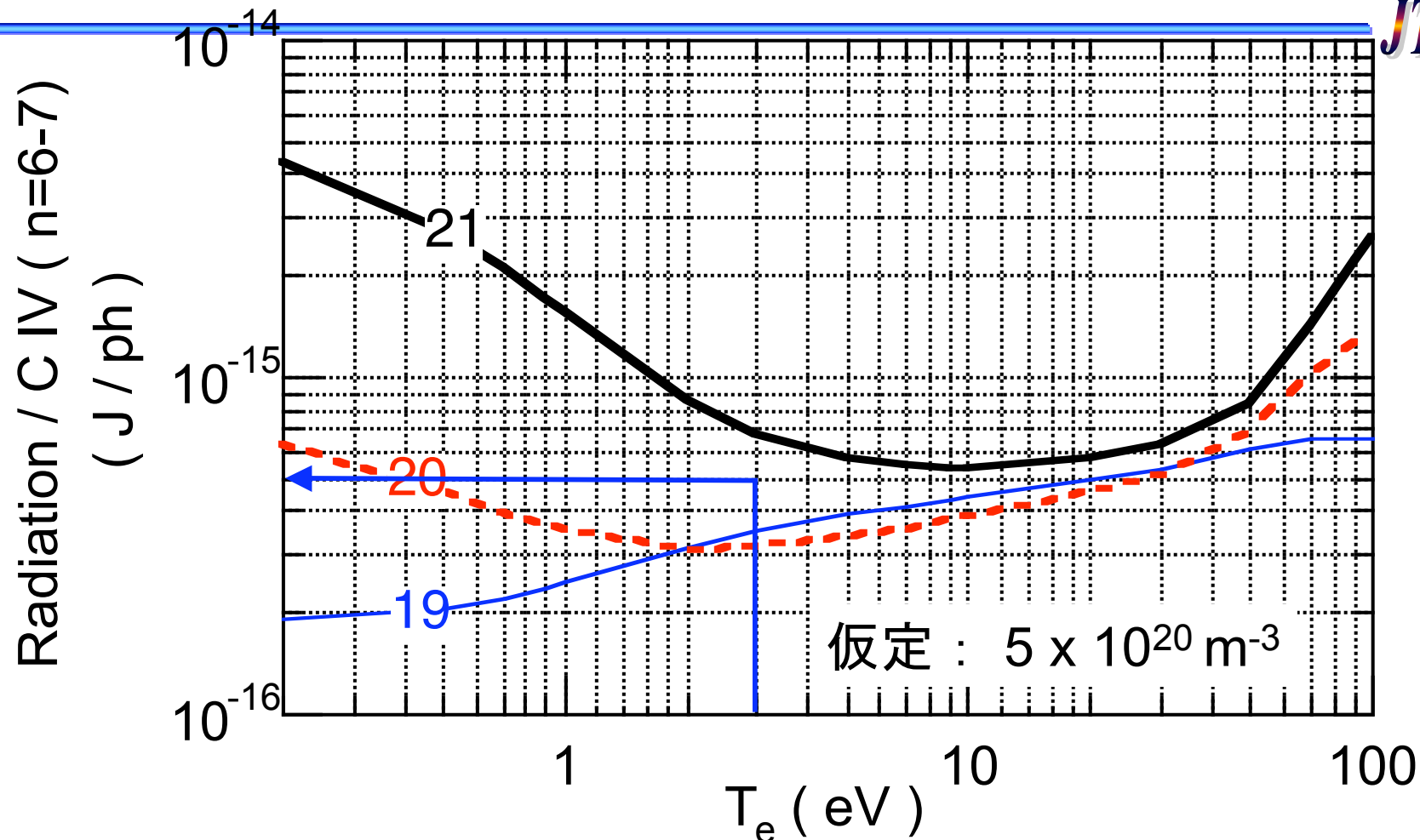
速度方程式の解（励起状態密度）；

$$C^{3+}(p) = R_0 n_e n_{CV} + R_0' n_D n_{CV} + R_1 n_e n_{CIV}$$

(再結合成分) (電離成分)

C⁴⁺ の再結合による放射パワー

JT-60U-



$$\text{Rad} / \text{C IV} (n=6-7) = 5 \times 10^{-16} \text{ J/ph}$$

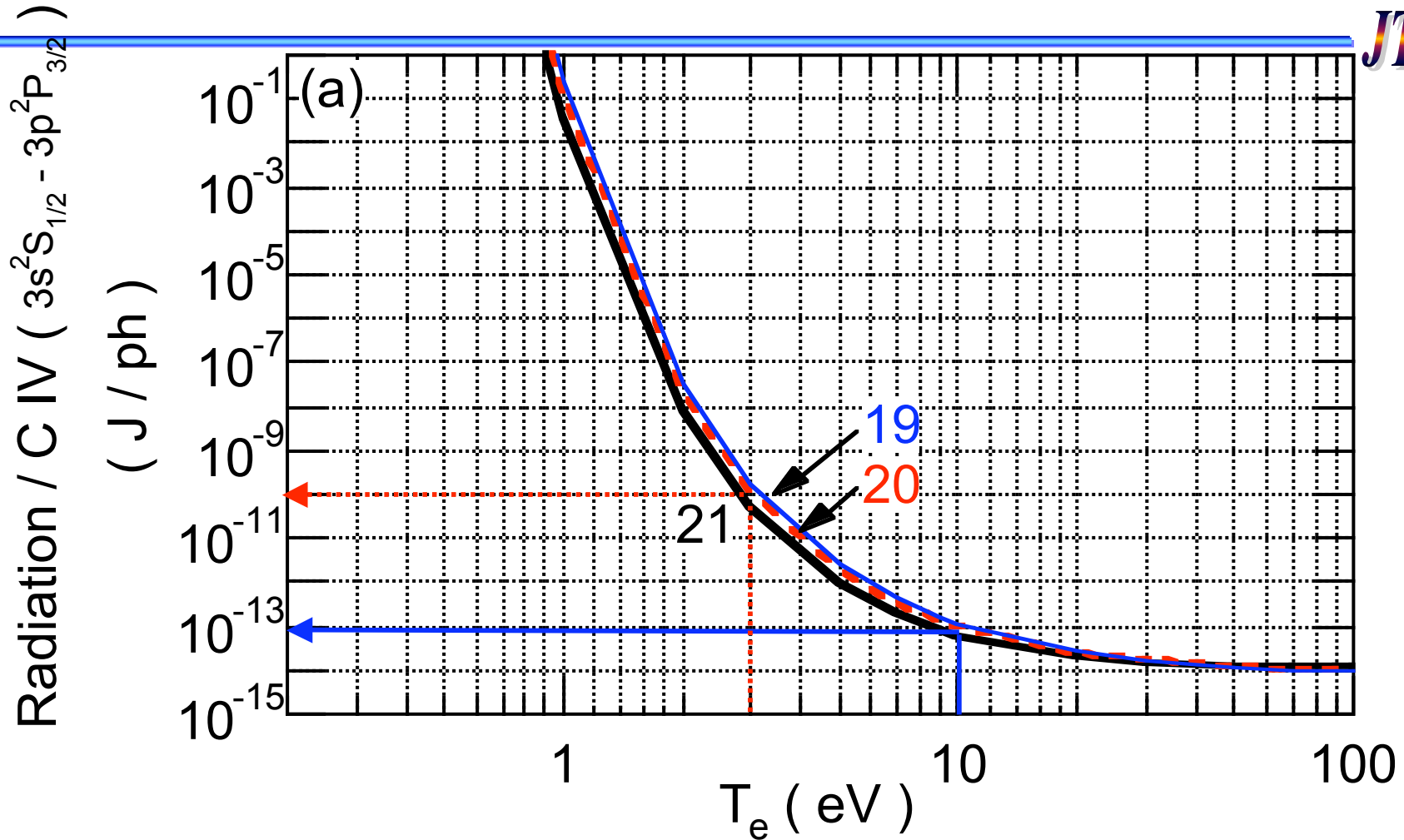
$$\text{C IV} (n=6-7) = 1.2 \times 10^{19} \text{ ph/m}^2\text{s}$$

$$\Rightarrow \text{放射パワー} = 6 \text{ kW / m}^2$$

全放射パワー(ボロメータ)の~0.5%

C³⁺ の電離による放射パワー

JT-60U-



$$\text{Rad} / \text{C IV} (3s-3p) = 1 \times 10^{-13} \text{ J/ph}$$

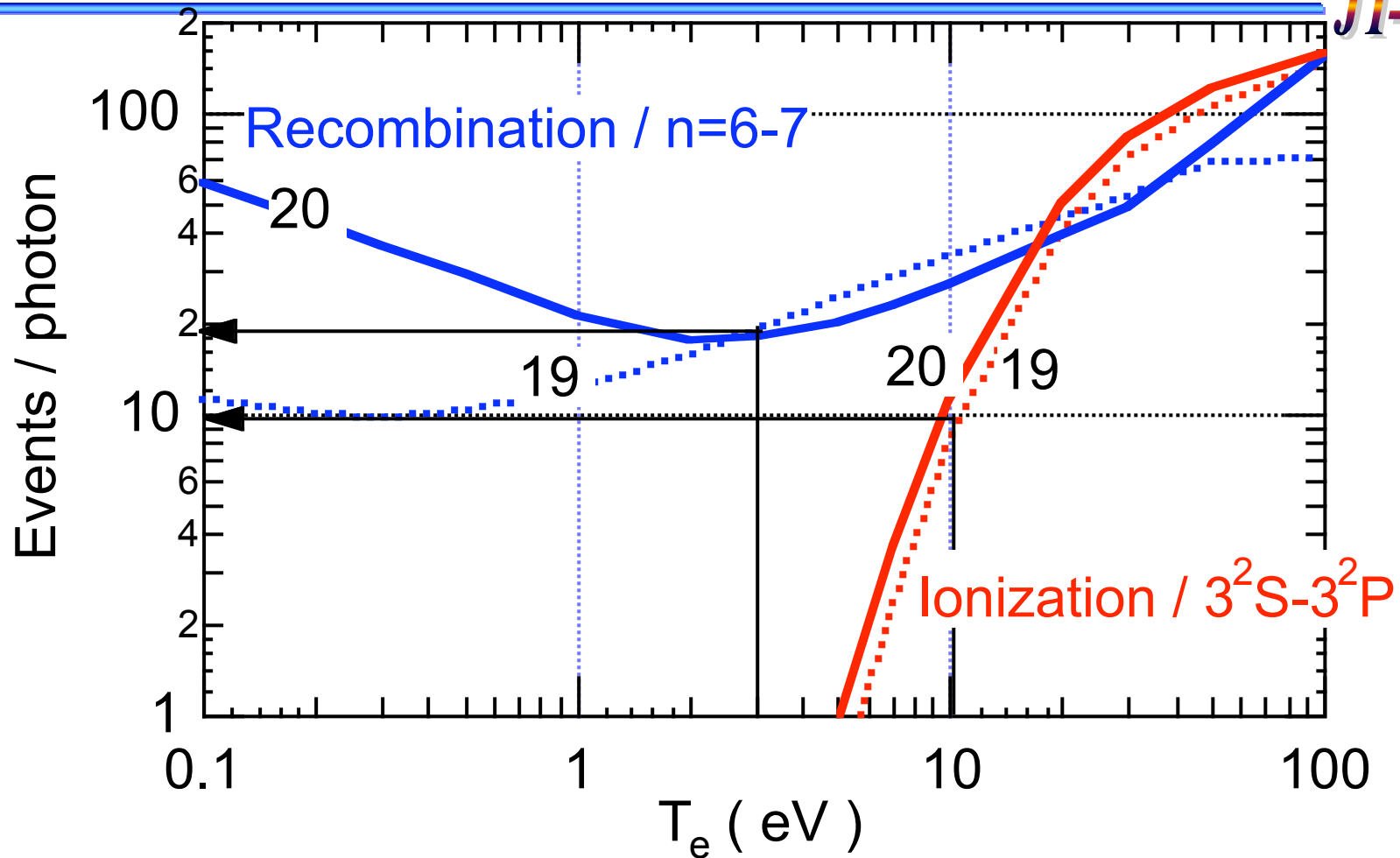
$$\text{C IV} (3s-3p) = 4 \times 10^{18} \text{ ph/m}^2\text{s}$$

$$\Rightarrow \text{放射パワー} = 0.4 \text{ MW / m}^2$$

~ 全放射パワー(ボロメータ)の 40 %

C³⁺ の源

JT-60U-



$$C^{4+} \text{ の再結合束} = 20 \times 1 \times 10^{19} = 2 \times 10^{20} / m^2s$$

$$C^{3+} \text{ の電離束} = 10 \times 4 \times 10^{18} = 4 \times 10^{19} / m^2s$$

⇒ C⁴⁺ の再結合が C³⁺ の源

まとめ

JT-60U-

MARFE をともなう非接触ダイバータプラズマで、X点の直上に C IV の放射領域を観測

低励起準位, $n \leq 4$

- : C³⁺ からの励起
- : $n_e = 5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, $T_e = 10 \text{ eV}$
- : 全放射パワーの 40 % を放射
- : C³⁺ の電離束 $4 \times 10^{19} / \text{m}^2\text{s}$

高励起準位, $n \geq 6$

- : C⁴⁺ の再結合
- : $T_e = 3 \text{ eV}$
- : 全放射パワーの 0.5 % を放射
- : C⁴⁺ の再結合束 $2 \times 10^{20} / \text{m}^2\text{s}$

→ 再結合で生成した C³⁺ は C³⁺ の源であり、それは主要な放射損失源

JT-60Uにおける原子分子過程に関わる研究

1. トカマク装置での熱と粒子
2. 分子線発光率データ生産とそれを用いた炭化水素発生量計測
3. 非接触プラズマにおける炭素イオンの放射過程
4. He I 強度線比を用いた電子温度と電子密度の高時間分解測定

ELM (Edge Localized Mode)

JT-60U-

ELM (周辺局在モード) :

間欠的で周期的な熱と粒子の吐き出し現象

Hモードプラズマの主プラズマ周辺部で発生

エネルギーロス : プラズマ蓄積エネルギーの 2-6%

ダイバータへの熱負荷 : そのうちの 60-70%

ダイバータ板の照射時間 : $\sim 300 \mu\text{s}$

ITERでは (蓄積エネルギー350 MJ, ダイバータ面積 10m^2) :

$$350 \text{ MJ} \times 2\% \times 65\% / 300 \mu\text{s} / 10 \text{ m}^2 \sim 1 \text{ GW/m}^2$$

(JT-60U では $\sim 100 \text{ MW/m}^2$)

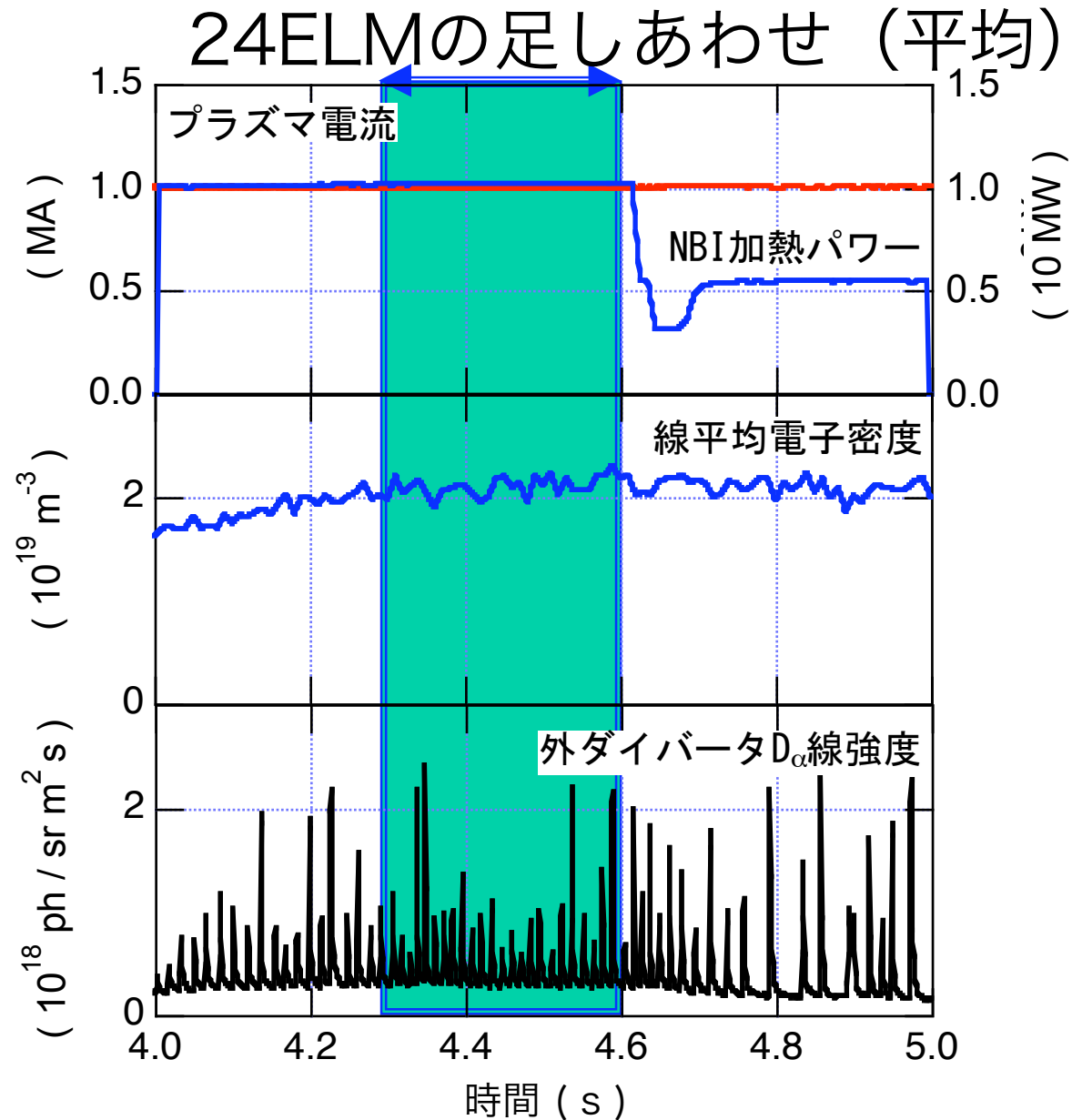
プラズマ対向壁の損耗 (昇華) \Rightarrow 不純物発生 \Rightarrow 主プラズマへ侵入 \Rightarrow 主プラズマを希釈・放射による温度低下

ELM によるダイバータプラズマの変化や不純物発生量 (損耗量) などの定量的な理解

\Leftarrow 高時間分解計測 (μs) によるパラメータ計測が必要

ELMによるダイバータプラズマの変化

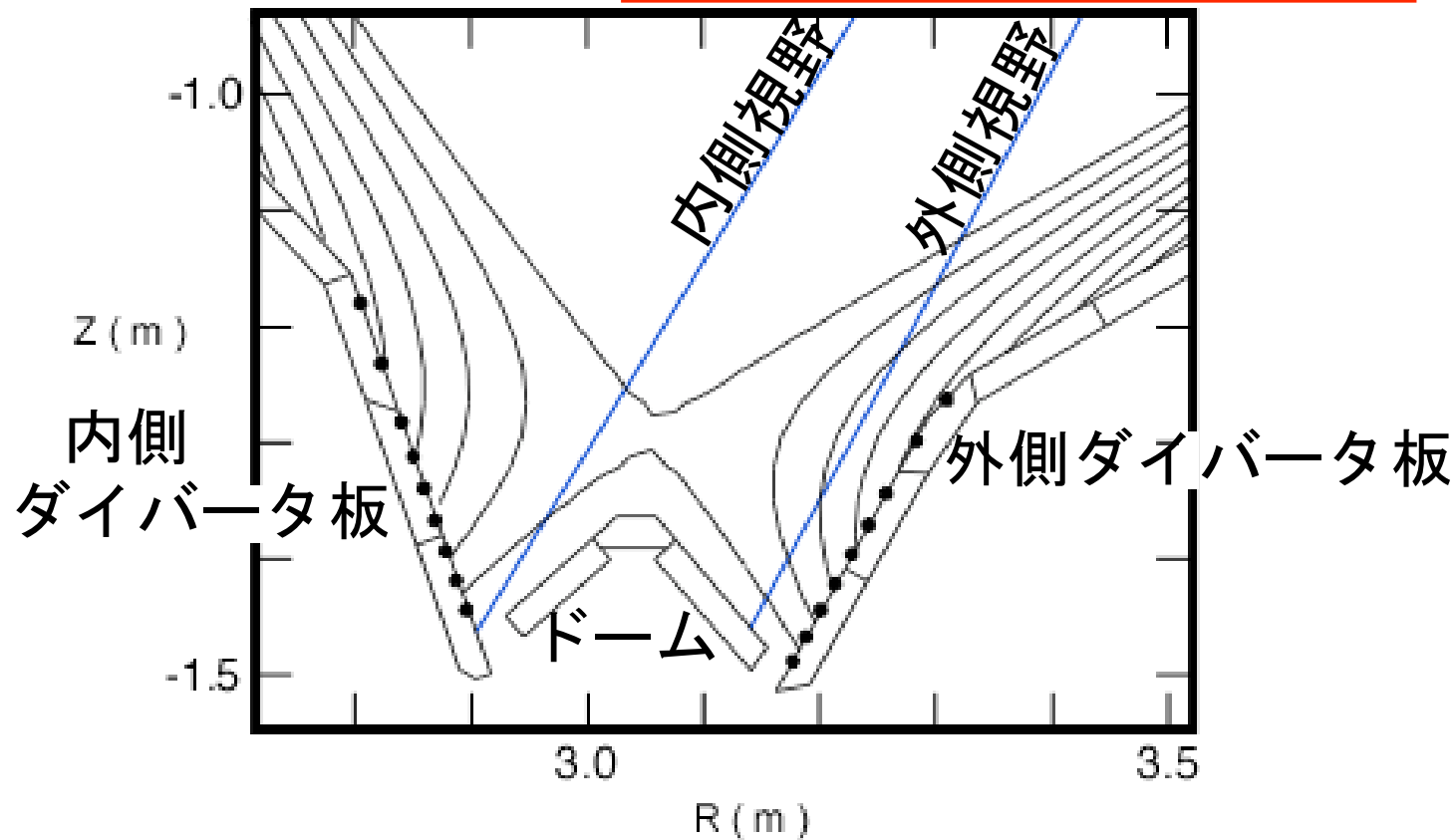
JT-60U-



計測器の配置

JT-60U-

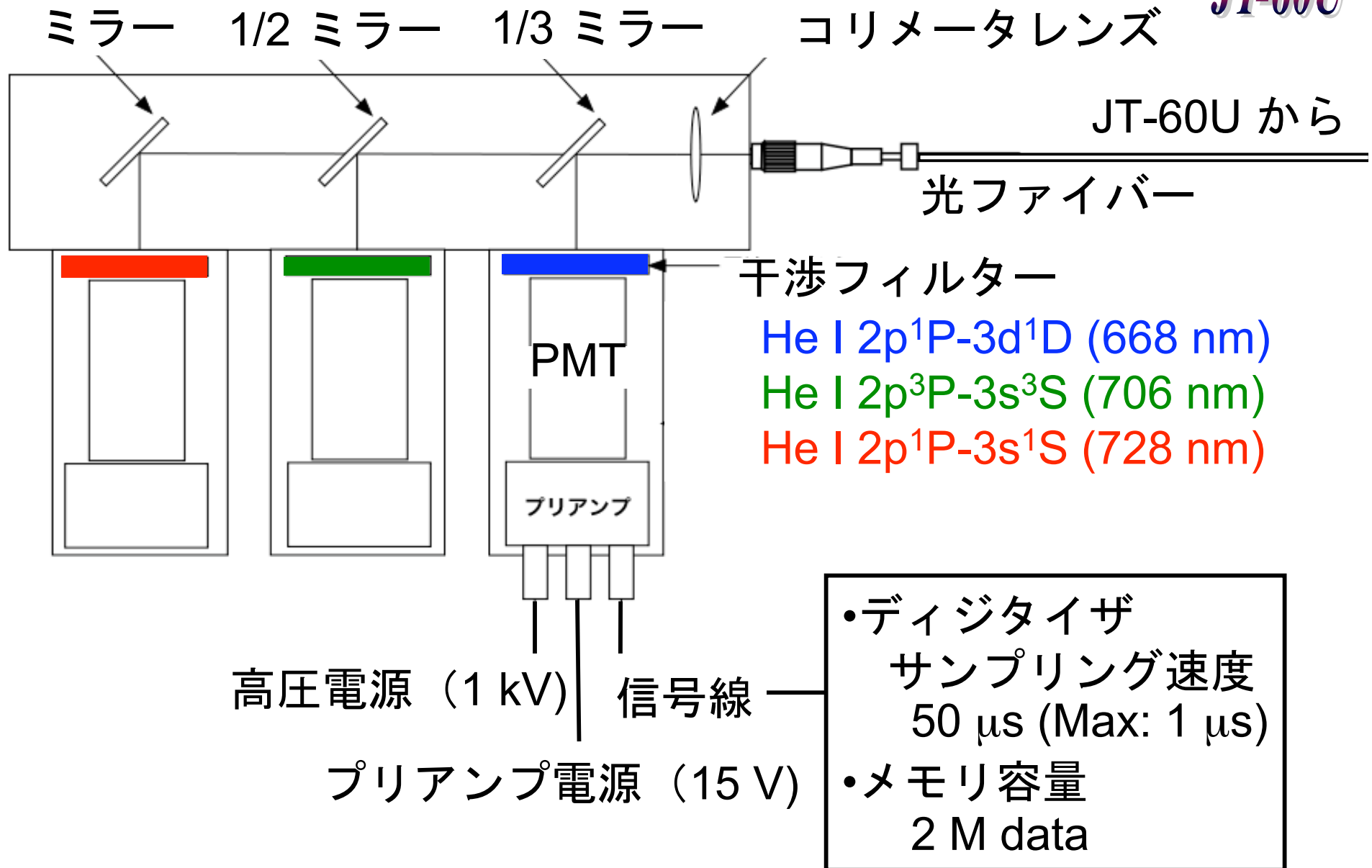
分光器 (時間分解能 $50 \mu\text{s}$)



He は放電洗浄の動作ガスとして用いられ、容器内に残留する
⇒ He I 発光線強度比を用いた電子温度と密度の高時間分解計測

三分岐分光器

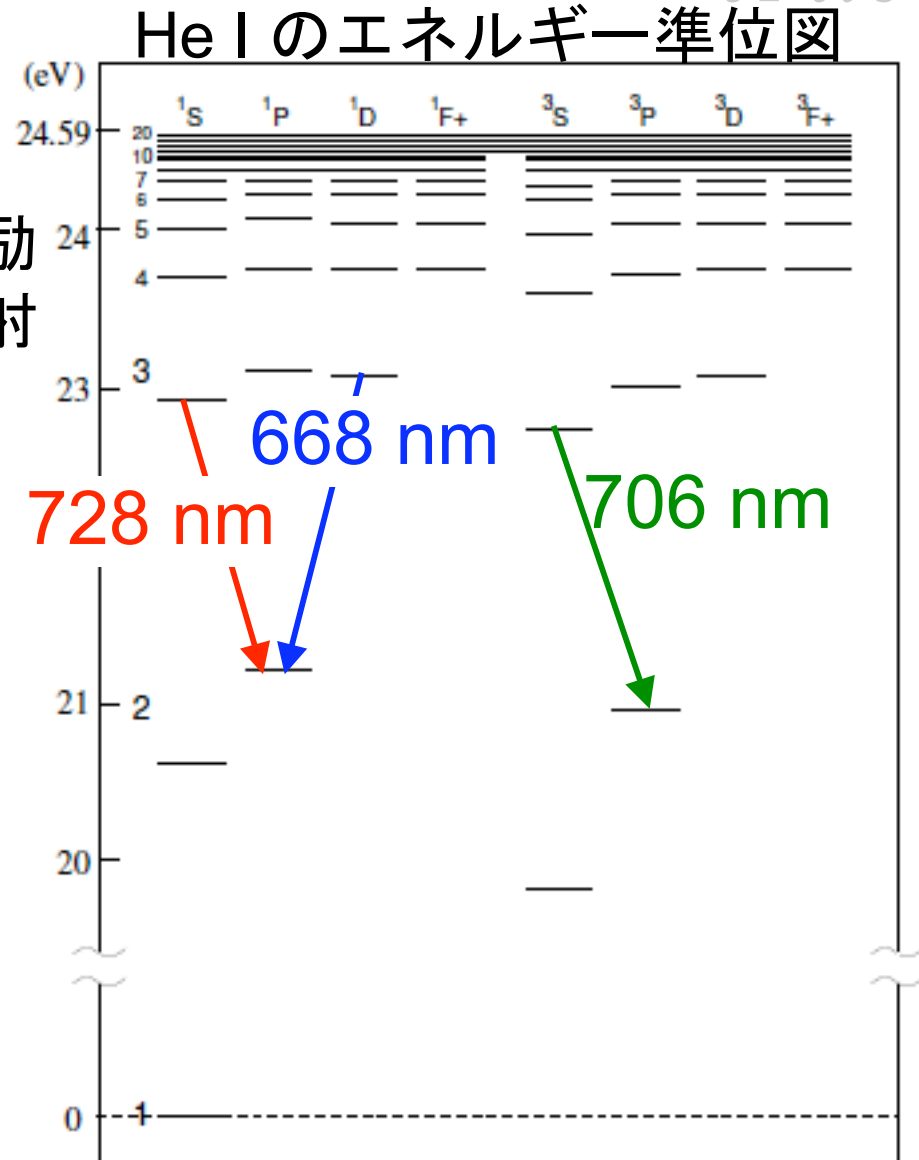
JT-60U-



衝突放射モデル*

JT-60U-

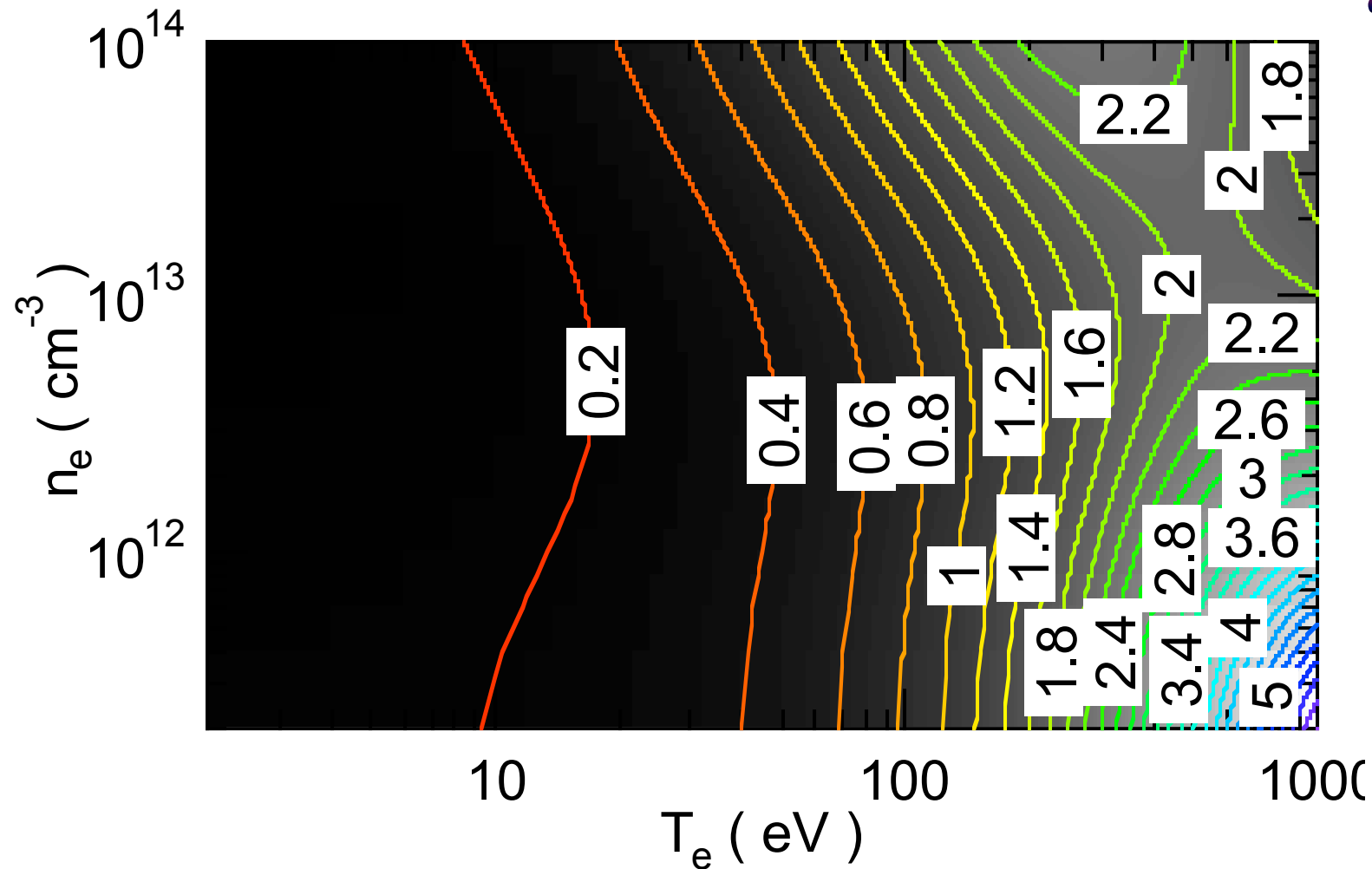
- 励起状態間の速度方程式
 (自然放射、電子衝突電離、励起、脱励起、三体再結合、放射再結合、二電子性再結合)
- 定常解を解く
 (<100 nsで定常に達する)



* M. Goto, J.Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. **76** (2003) 331.

He I 728 nm / He I 706 nm の強度比

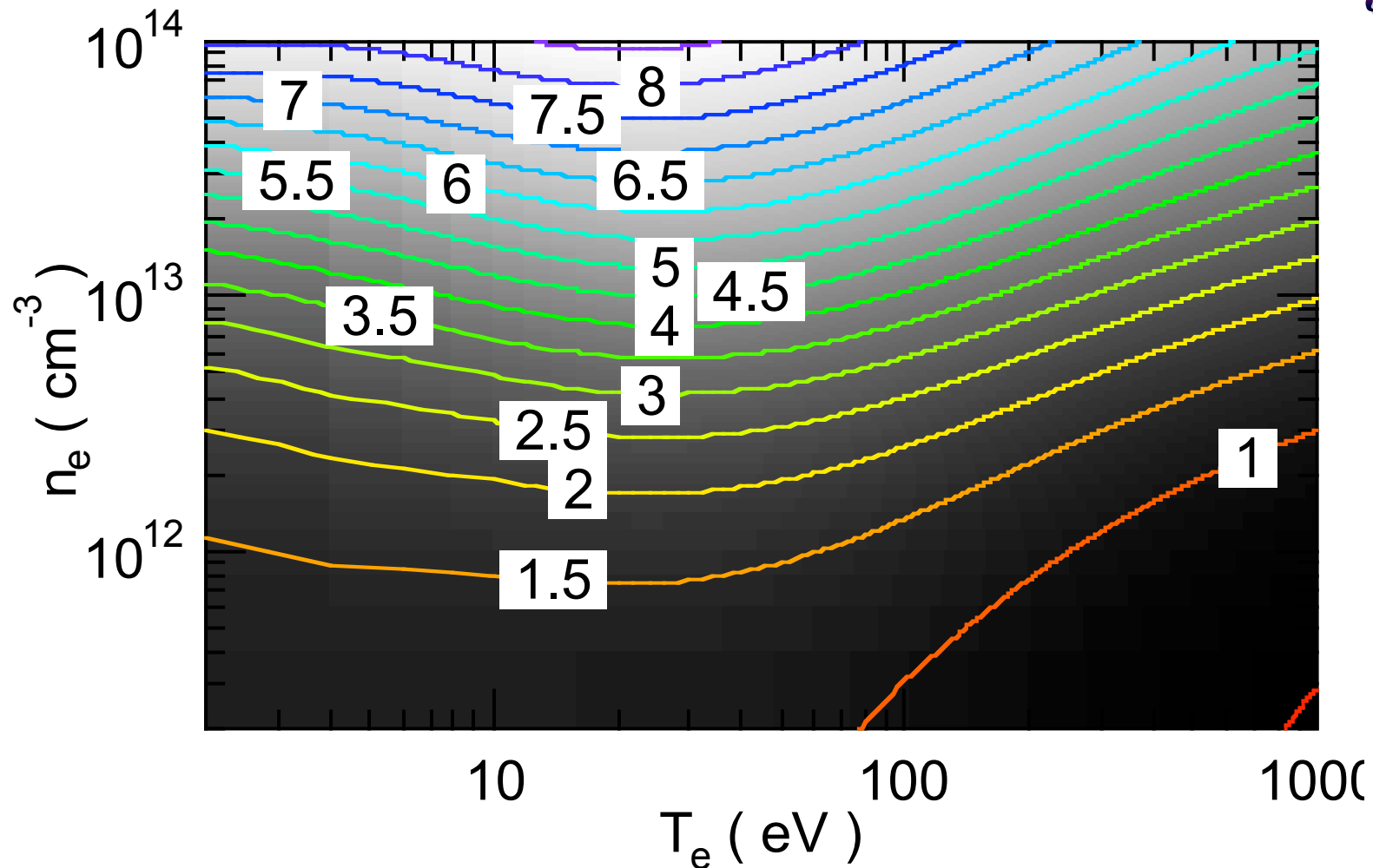
JT-60U-



電子密度に弱い依存性、電子温度に強い依存性
⇒ 電子温度計測に適する

He I 668 nm / He I 728 nm の強度比

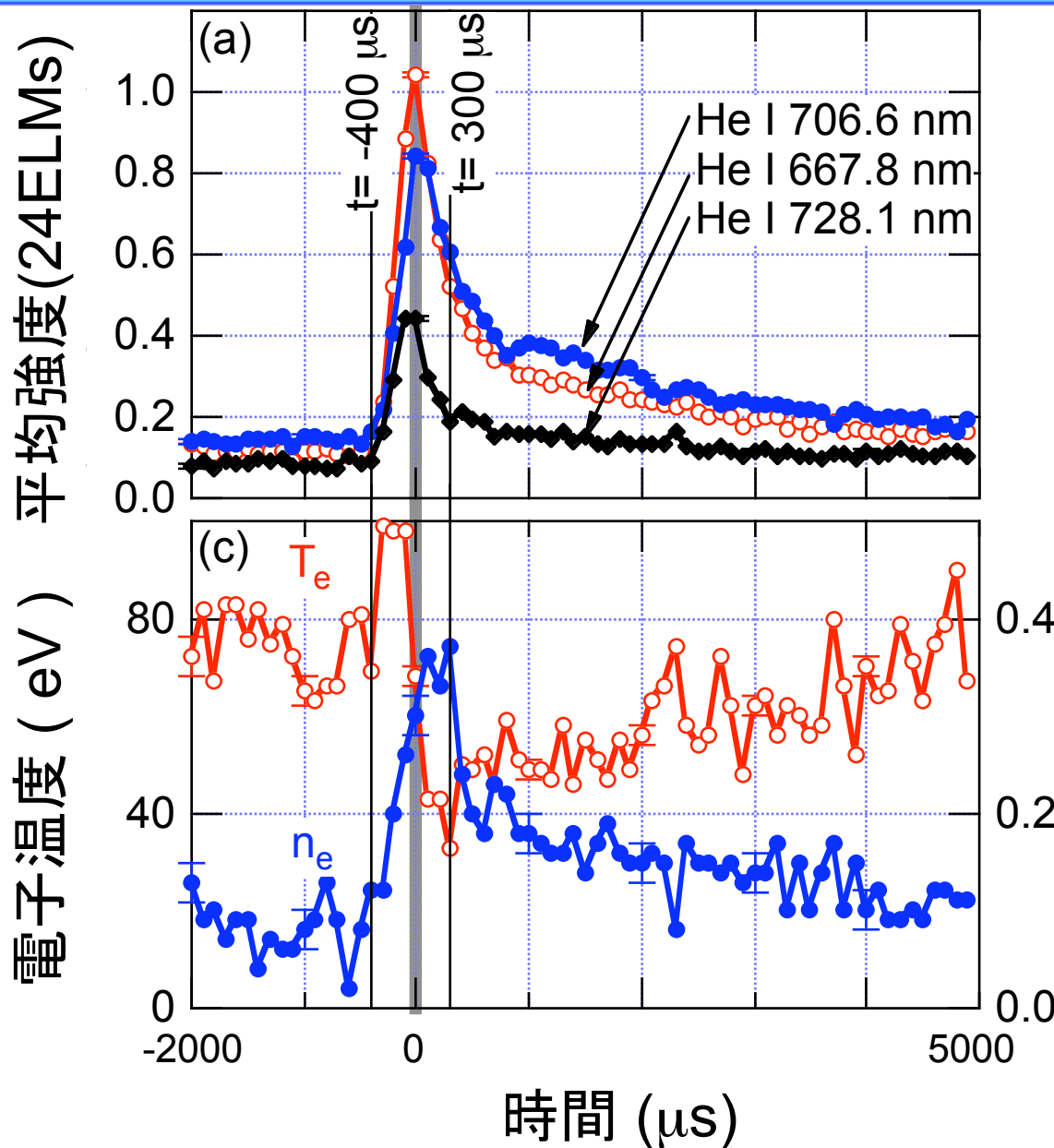
JT-60U



電子密度に強い依存性、電子温度に弱い依存性
⇒ 電子密度計測に適する

ELMによるダイバータプラズマの変化

JT-60U



- ⇒ ELMによる粒子加熱
- ⇒ 粒子リサイクリング束の増加
- ⇒ 電離束の増加
- ⇒ 密度上昇
- ⇒ エネルギーの消費
- ⇒ 温度低下

まとめ

JT-60U-

1. 3本の He I 発光線強度を高い時間分解能（最高 $1 \mu\text{s}$ ）で測定する分光器を整備

⇒ 強度比から電子温度・密度を導出

2. 求められた電子温度・密度はラングミュアプローブで測定された電子温度・密度にも近い

3. ELM によってもたらされる外側ダイバータプラズマの変化は ELM プラズマによる加熱と到達した粒子のリサイクリングによると解釈

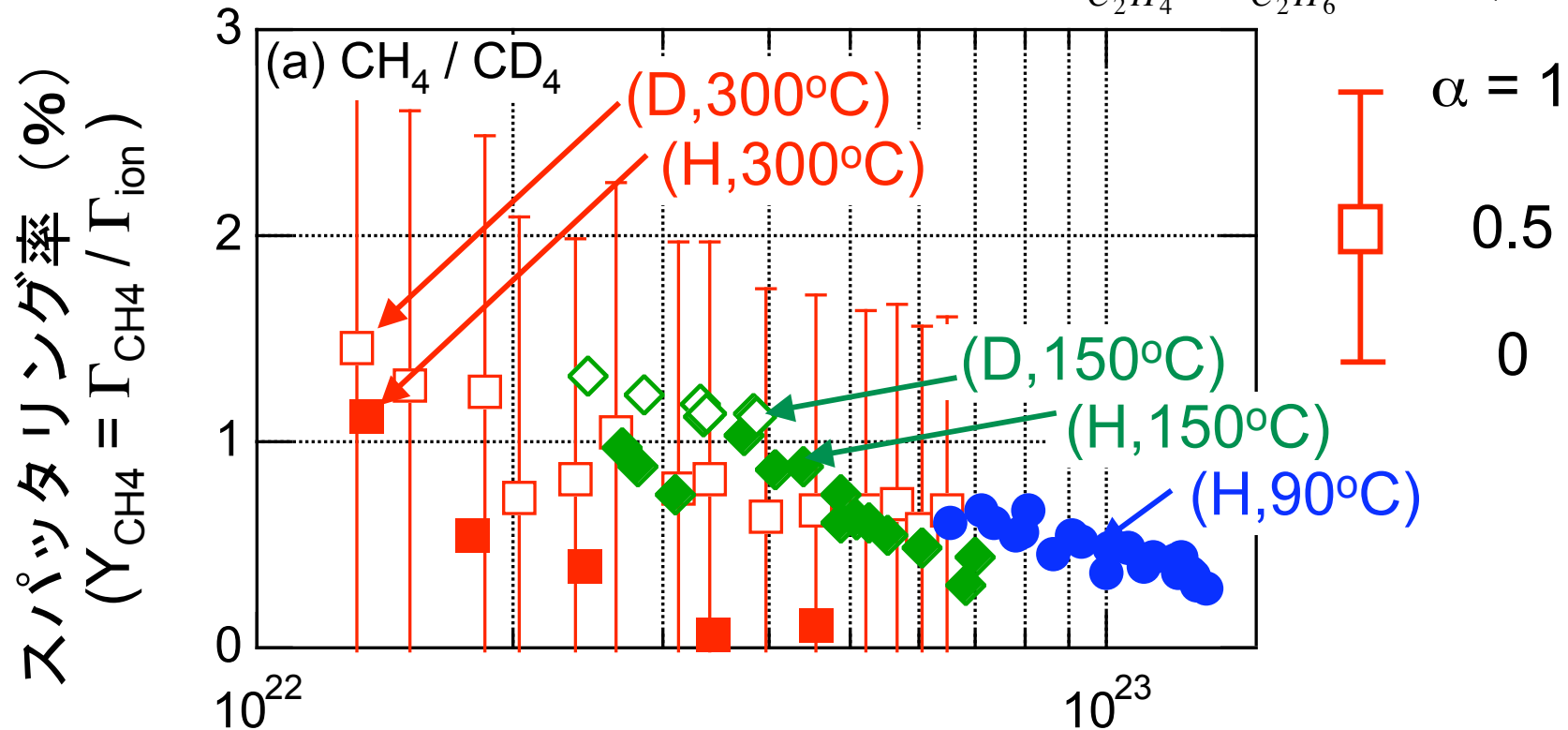
今後、求めた電子温度・密度と C II 発光強度を用いて不純物発生量（損耗率）を測定するなど、さまざまな速い現象を解明

おわり
以降は、予備

CH₄・CD₄スパッタリング率

JT-60U-

$$\Gamma_{C_2H_4} : \Gamma_{C_2H_6} = \alpha : (1 - \alpha)$$



ストライク点でのイオン束密度 ($m^{-2}s^{-1}$)

$\alpha \sim 0.25$ で $Y_{CH_4} \sim 0$

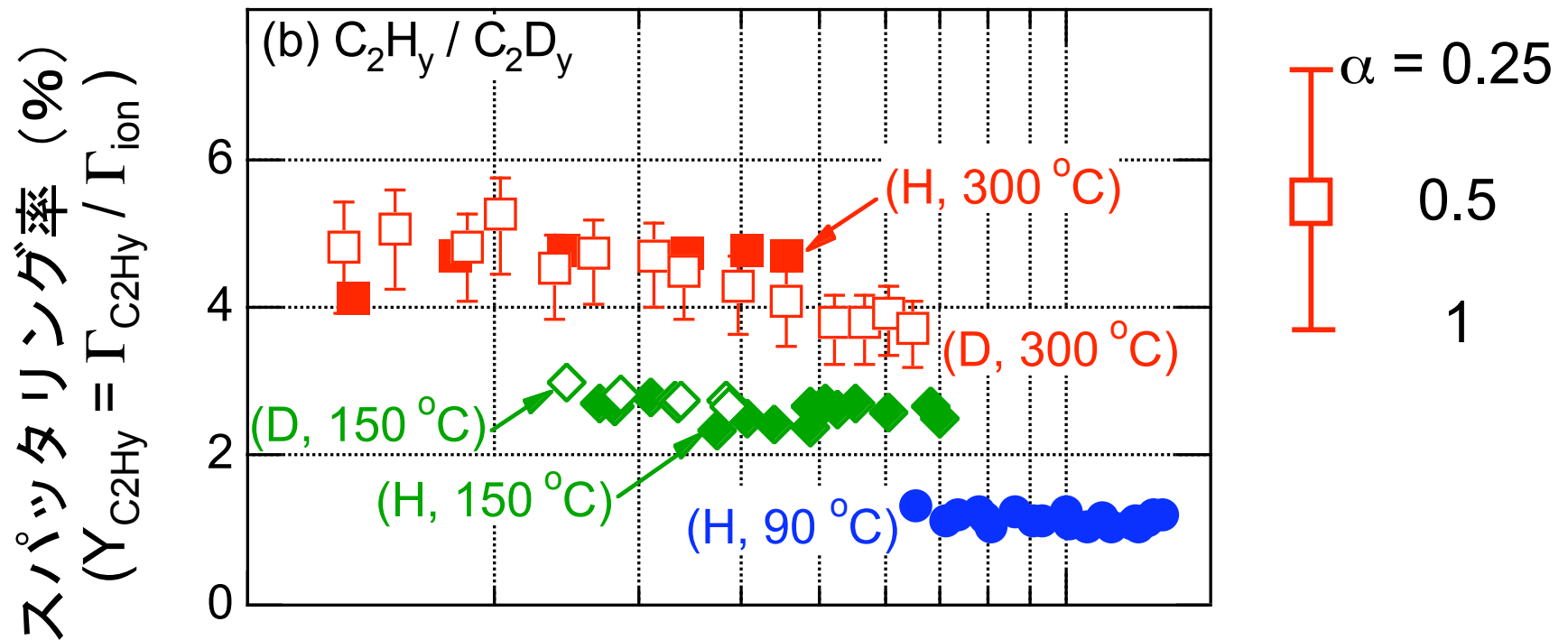
CH₄ に由来する CH スペクトルバンド放射はゼロ

⇒ α の下限を与える (C₂H₄ と C₂H₆ 比の範囲が限定される) ₃₉

C₂H_y スパッタリング率

JT-60U-

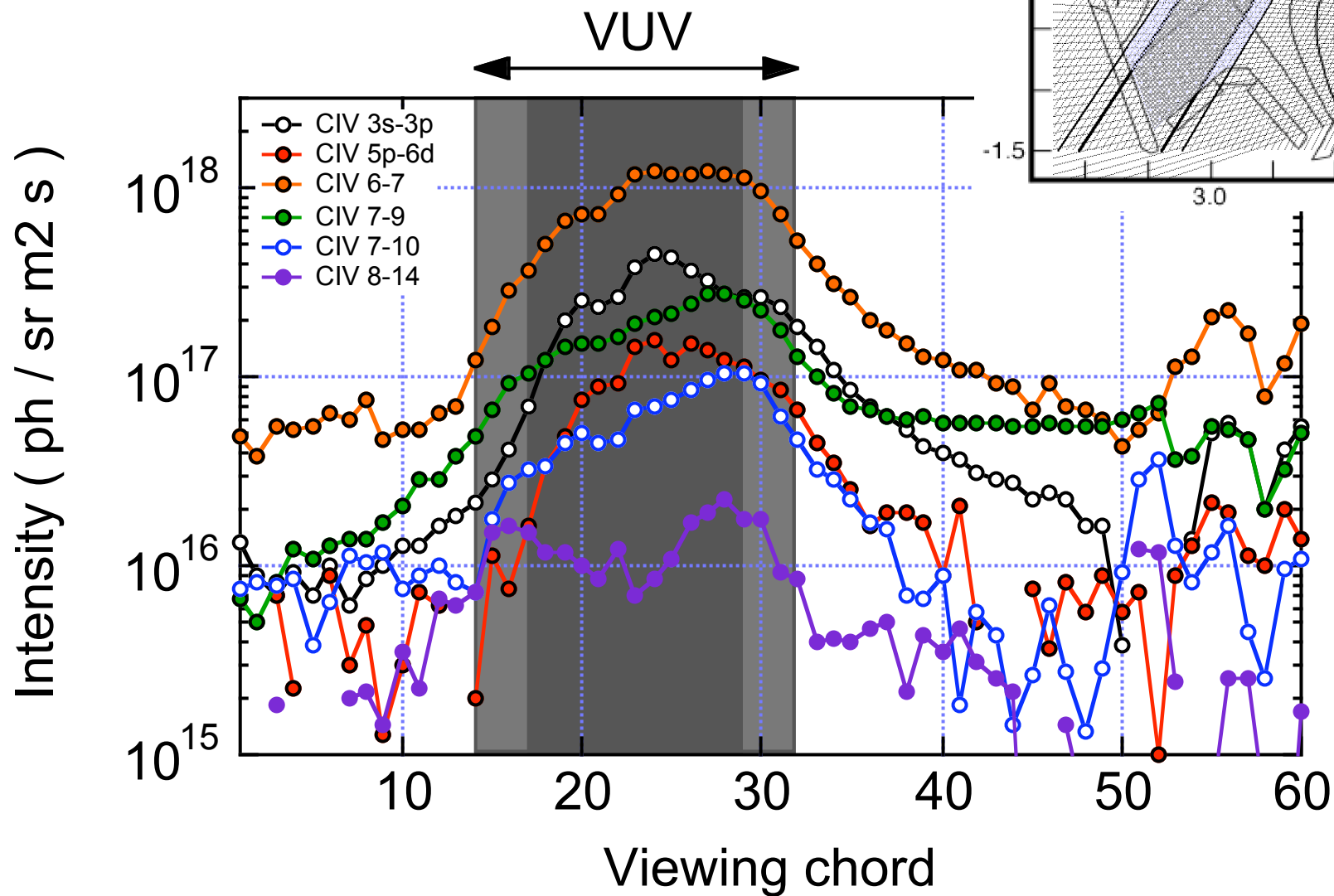
$$\Gamma_{C_2H_4} : \Gamma_{C_2H_6} = \alpha : (1 - \alpha)$$



ストライク点でのイオン束密度 ($m^{-2}s^{-1}$)

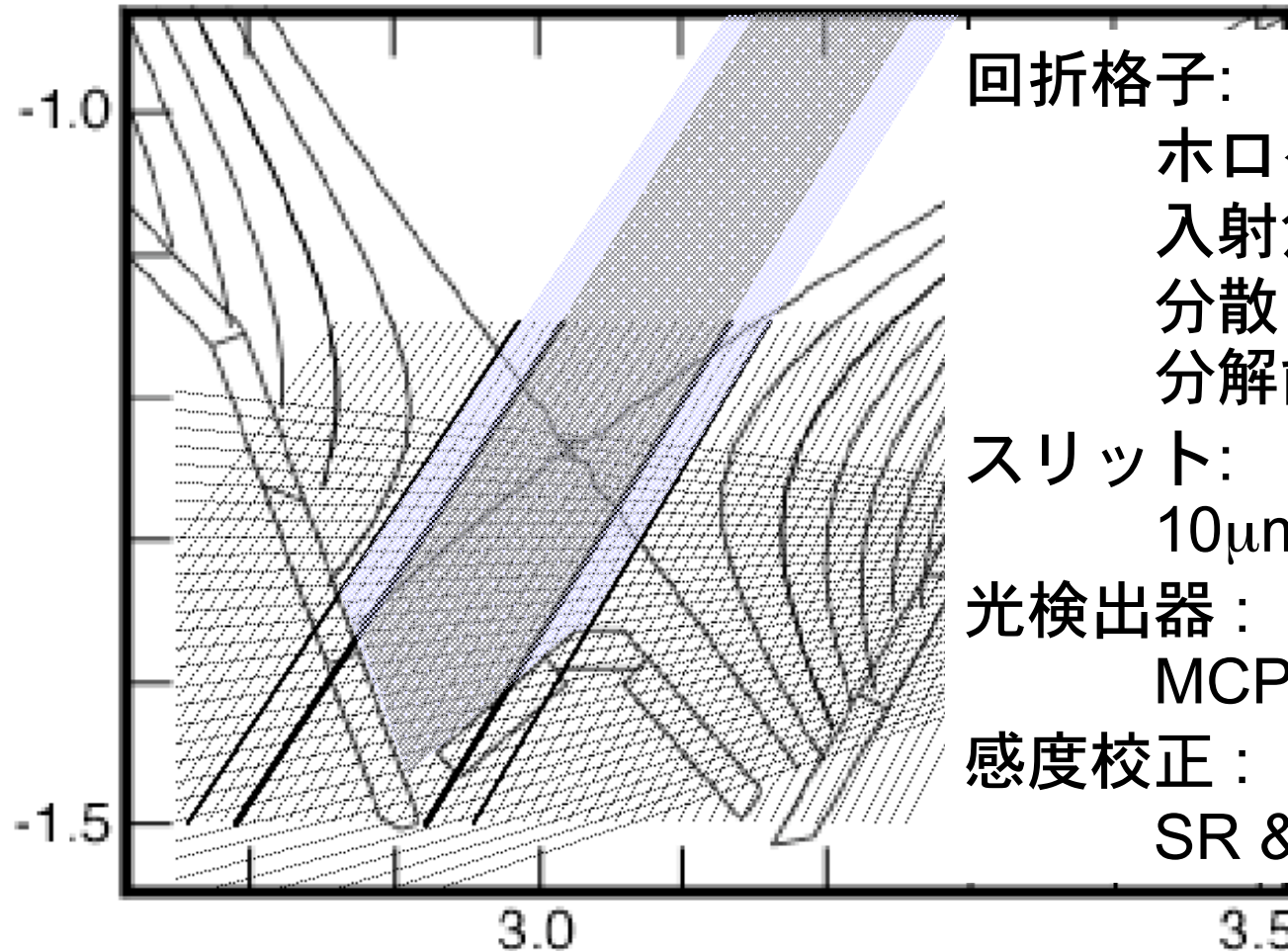
α の取り得る範囲から生じる $Y_{C_2H_y}$ の不確かさは
統計誤差と同程度

C IV 発光強度分布



真空紫外斜入射分光器

JT-60U-



回折格子:

ホログラフィック (300g /

入射角 85°

分散 2 nm / mm

分解能 ($\lambda / \Delta\lambda$) ~ 150

スリット:

10 μ m x 5mm

光検出器:

MCP 50 μ m x 1024ch

感度校正:

SR & Branching Ratio