

JT-60Uにおける原子分子素過程に関わる研究

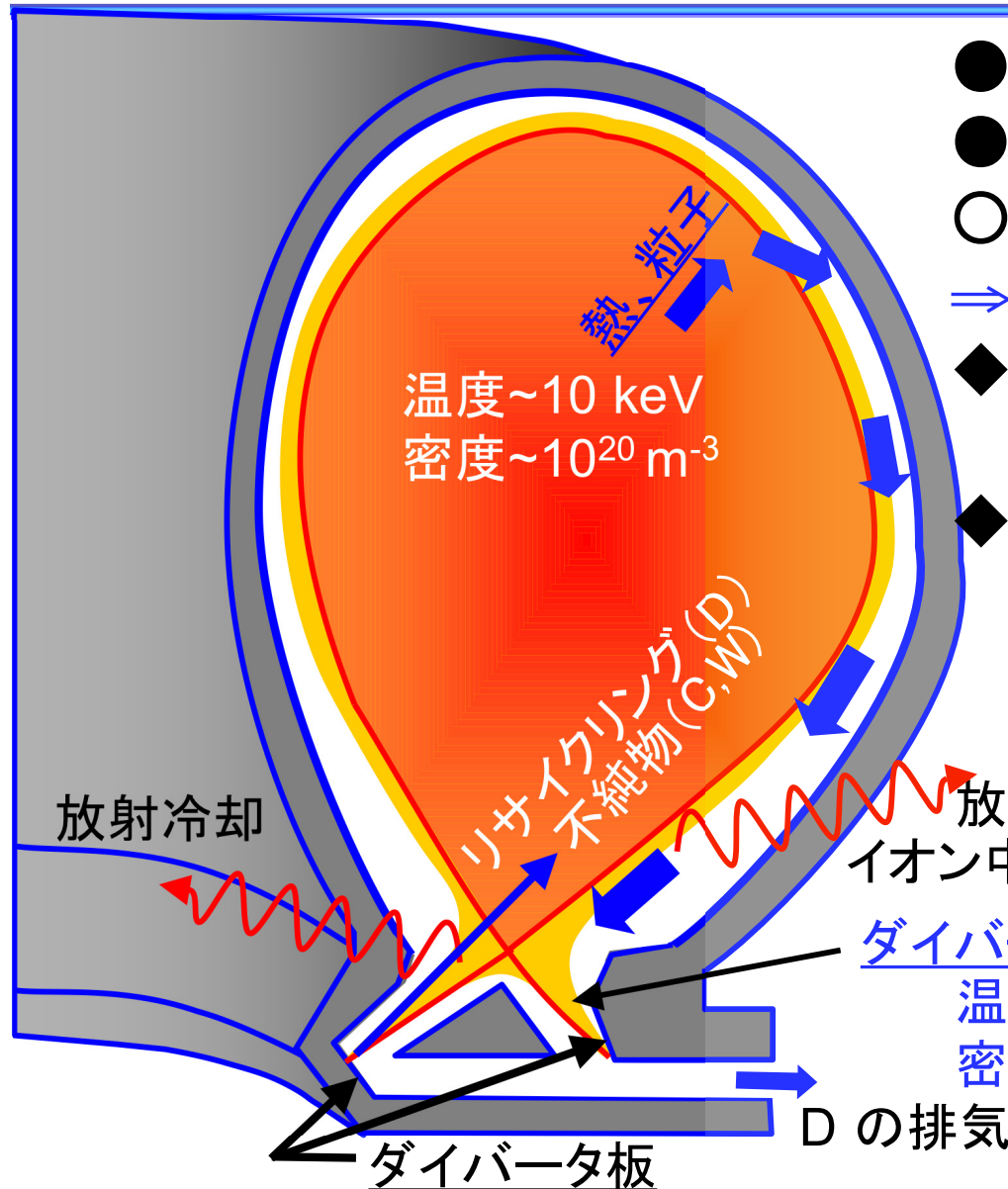
- 非接触ダイバータプラズマにおける炭素イオンの放射過程、
電離・再結合バランス
- タングステンイオンの発生、蓄積について

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ダイバータの役割

JT-60U-



- 熱制御 (放射冷却)
- 粒子制御 (密度、不純物)
- ダイバータ板への熱負荷軽減
⇒ 非接触プラズマ
- ◆ これまでに、
C³⁺ が放射源 (炭素壁装置^{*,**})
- ◆ 本研究では、JT-60U の
非接触プラズマにおいて
C³⁺ の源 (電離・再結合、輸送)
C³⁺ の発光過程

放射冷却
イオン中性化

ダイバータプラズマ

温度 ~ 0.5- 100eV

密度 ~ (0.1- 50) × 10¹⁹ m⁻³

D の排気

ダイバータ板

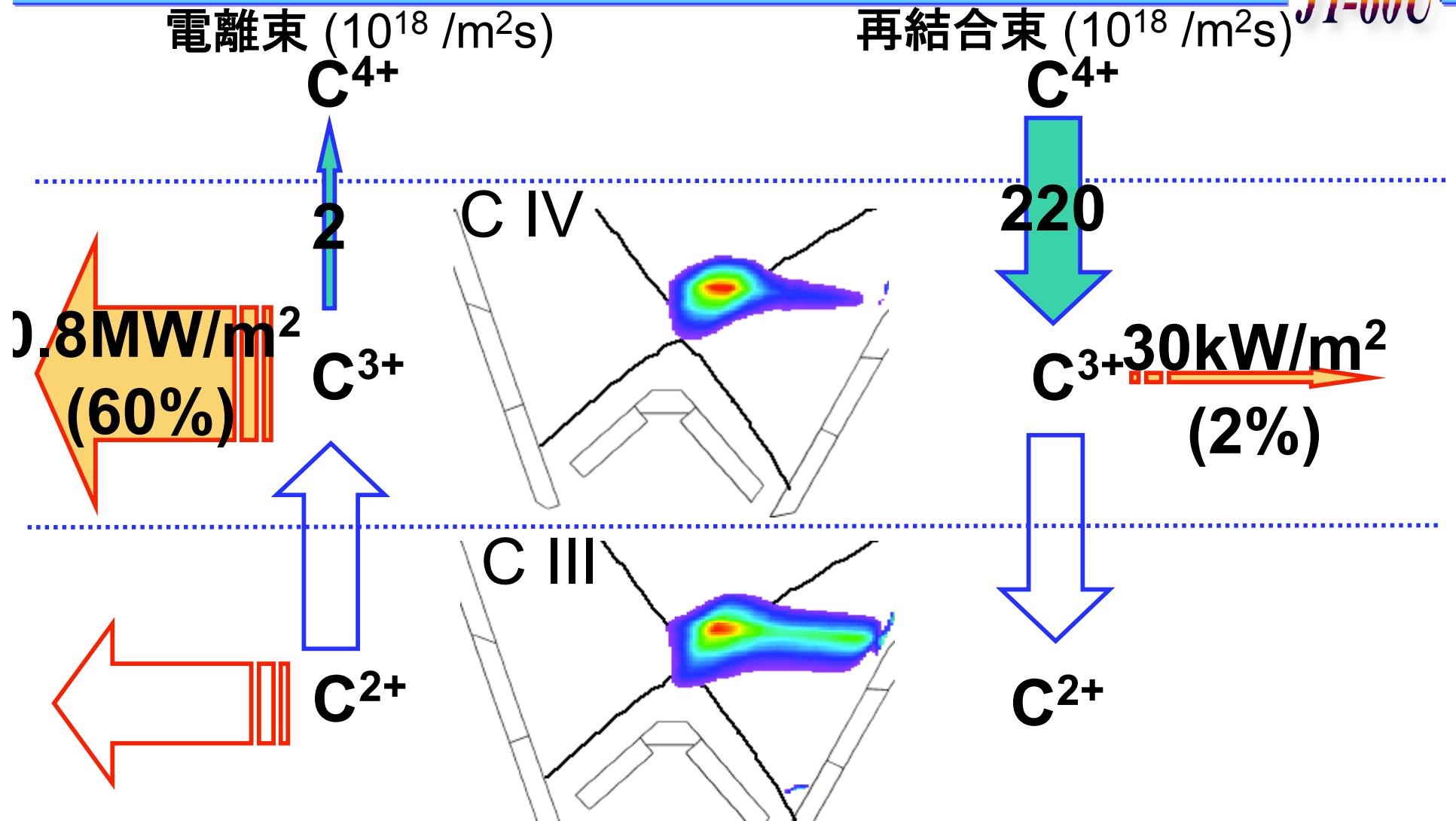
熱・粒子負荷 ⇒ 損耗、不純物の発生 (W)

* Kubo H. et al 1995 Plasma Phys. Control. Fusion 37 1133

** Fenstermacher M.E. et al 1997 Phys. Plasmas 4 1761

これまでの成果*、この研究の目的

JT-60U-

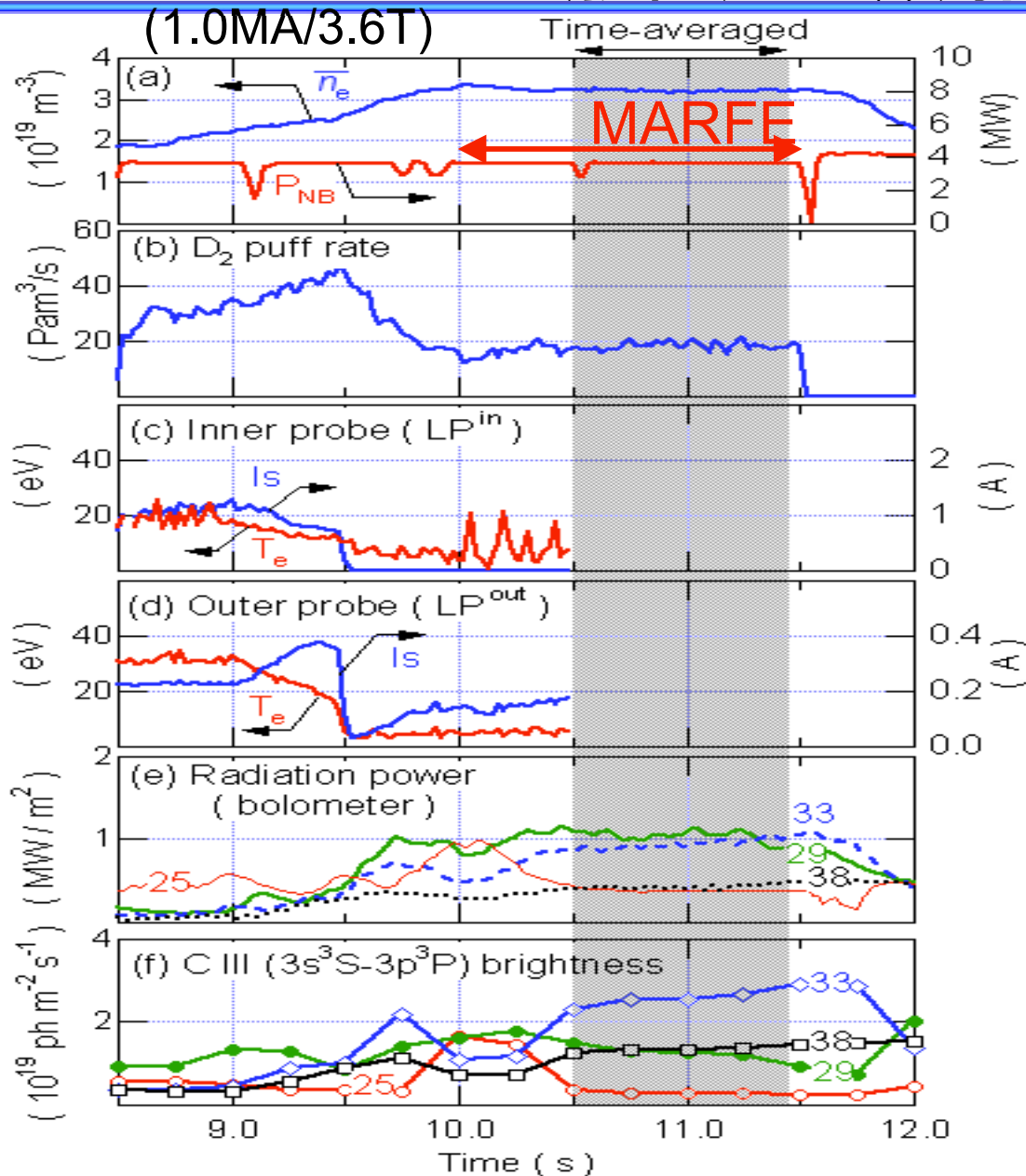


- 残り(40%)の放射源は？
- C^{3+} の源は？

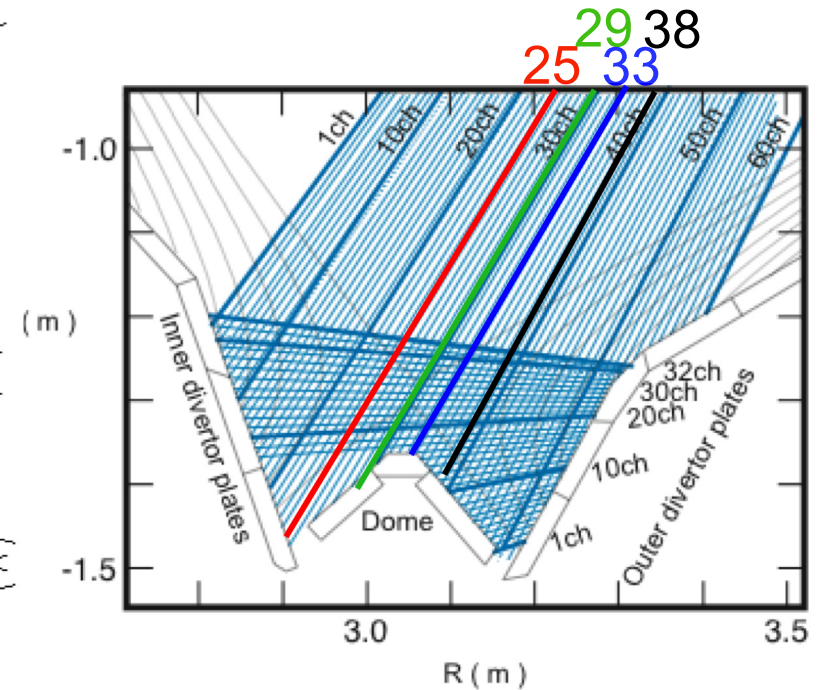
* Nakano T. et al 2007 Nucl. Fusion 47 1458

非接触プラズマ(MARFE)では、 X点付近に放射が集中

JT-60U-



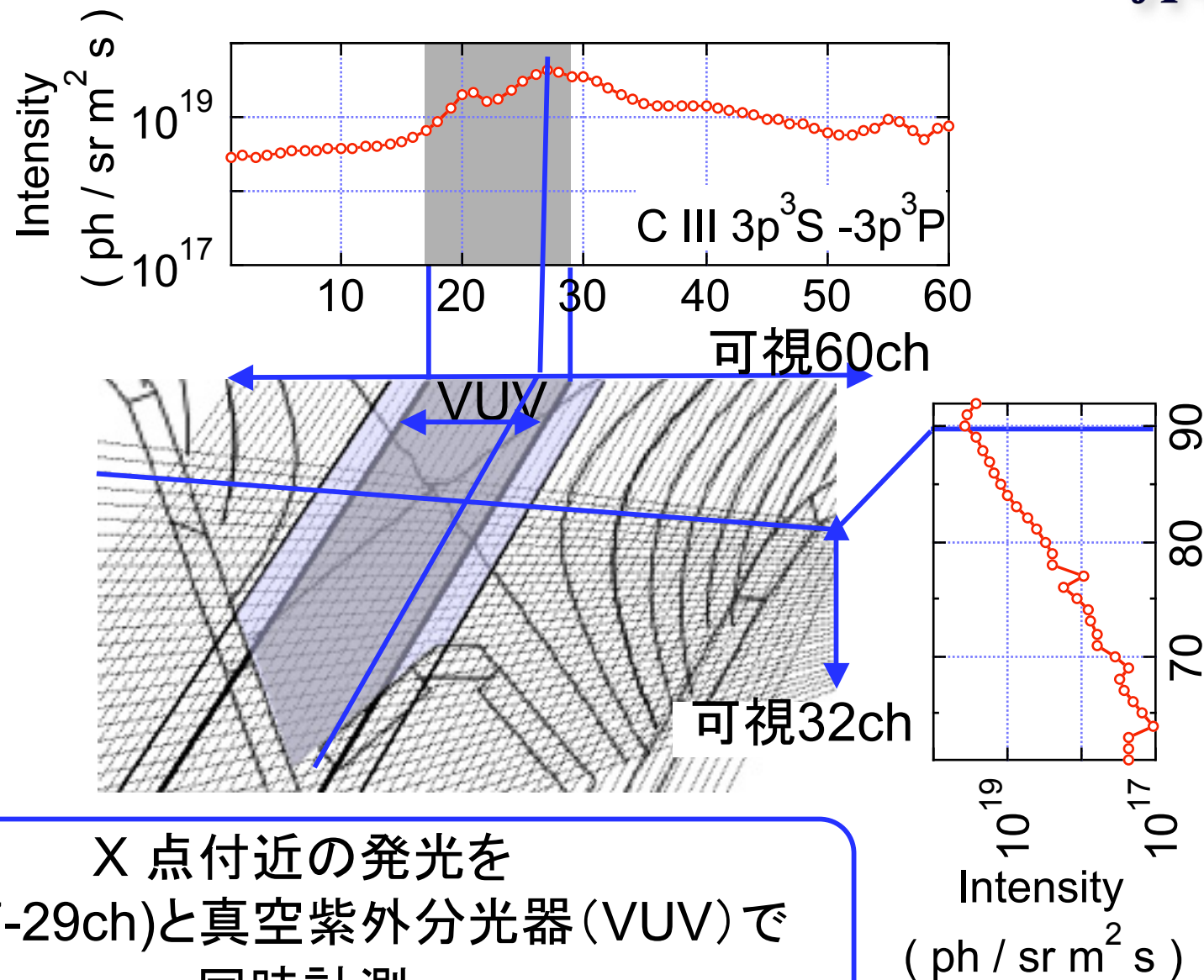
可視分光とボロメータの視野



放射パワーの波形
(ボロメータ)
～ C III 発光強度の波形

C III の発光は X 点付近に集中

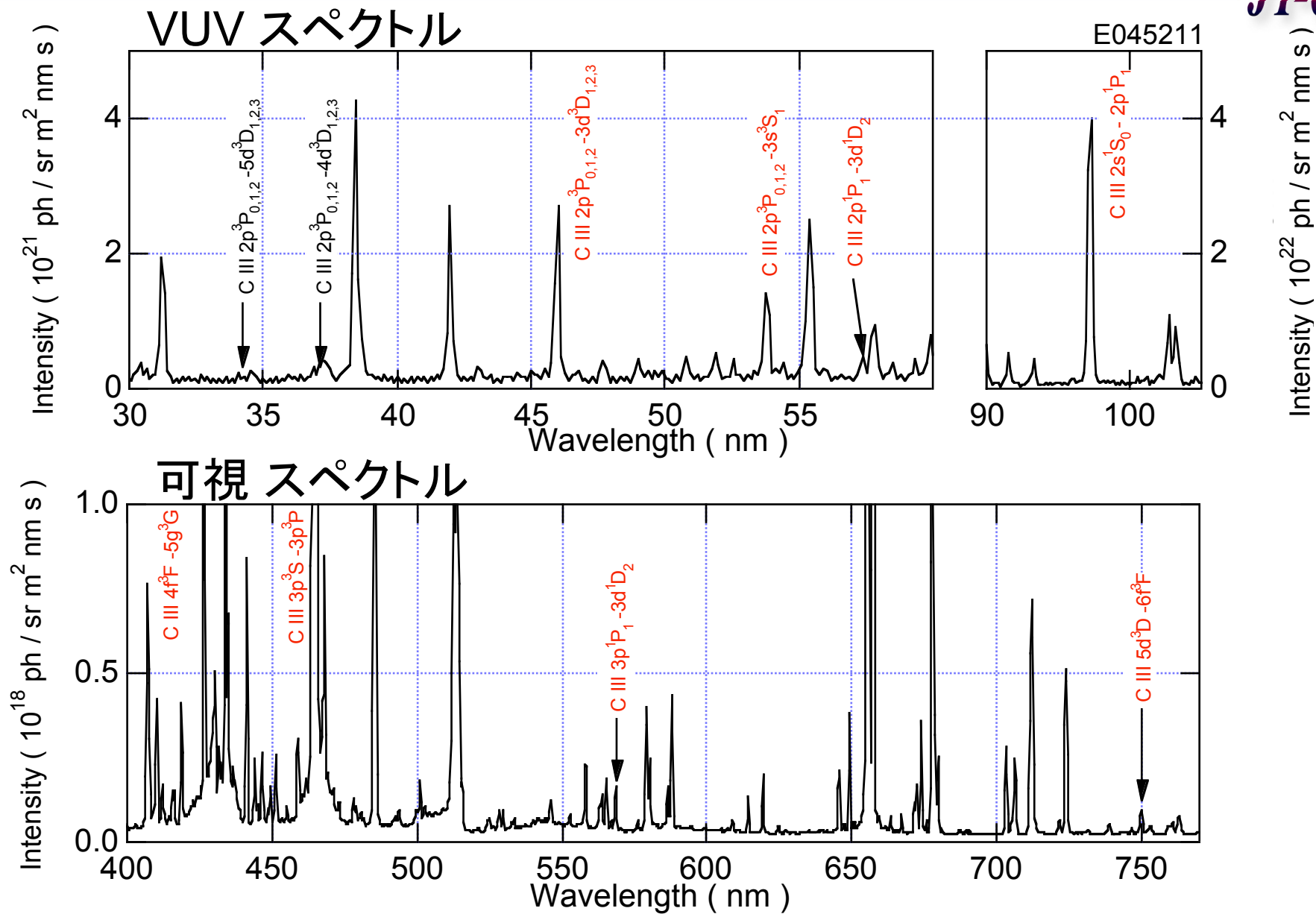
JT-60U



X 点付近の発光を
可視(17-29ch)と真空紫外分光器 (VUV) で
同時計測

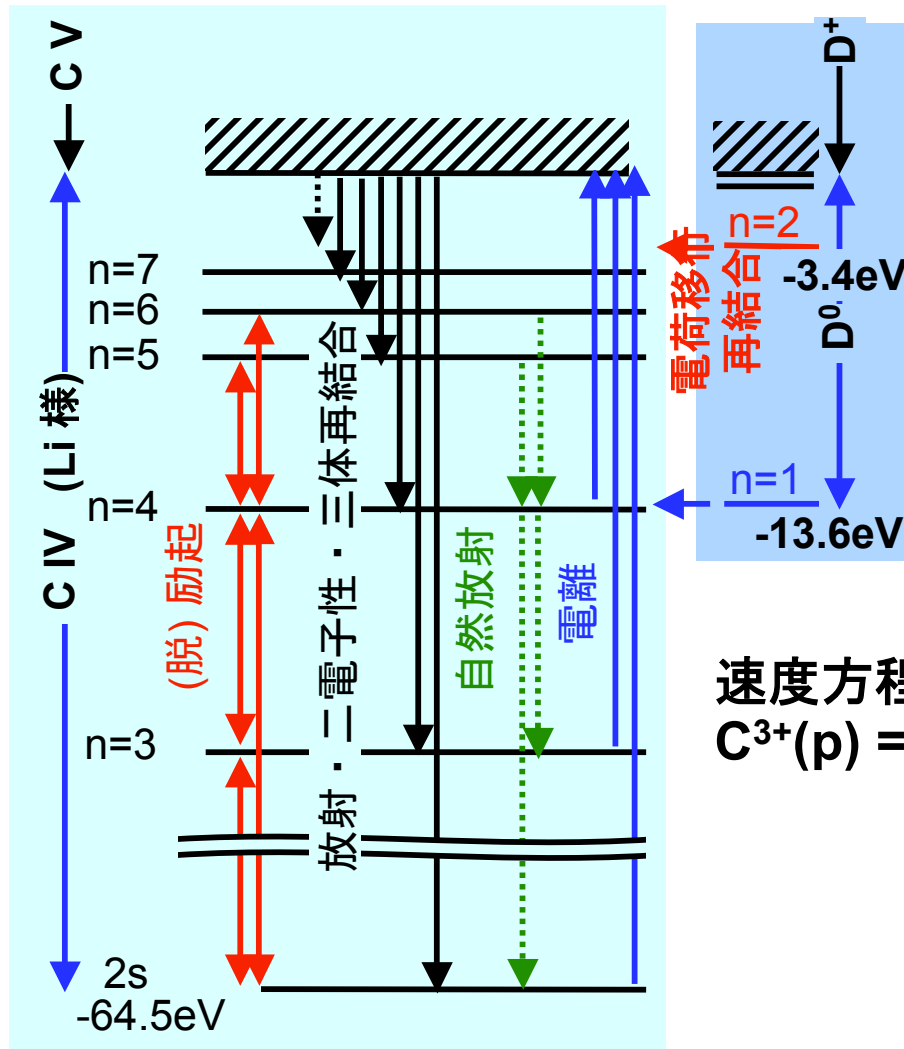
8本の C III スペクトル線を同時解析

JT-60U-



衝突放射モデル

JT-60U-



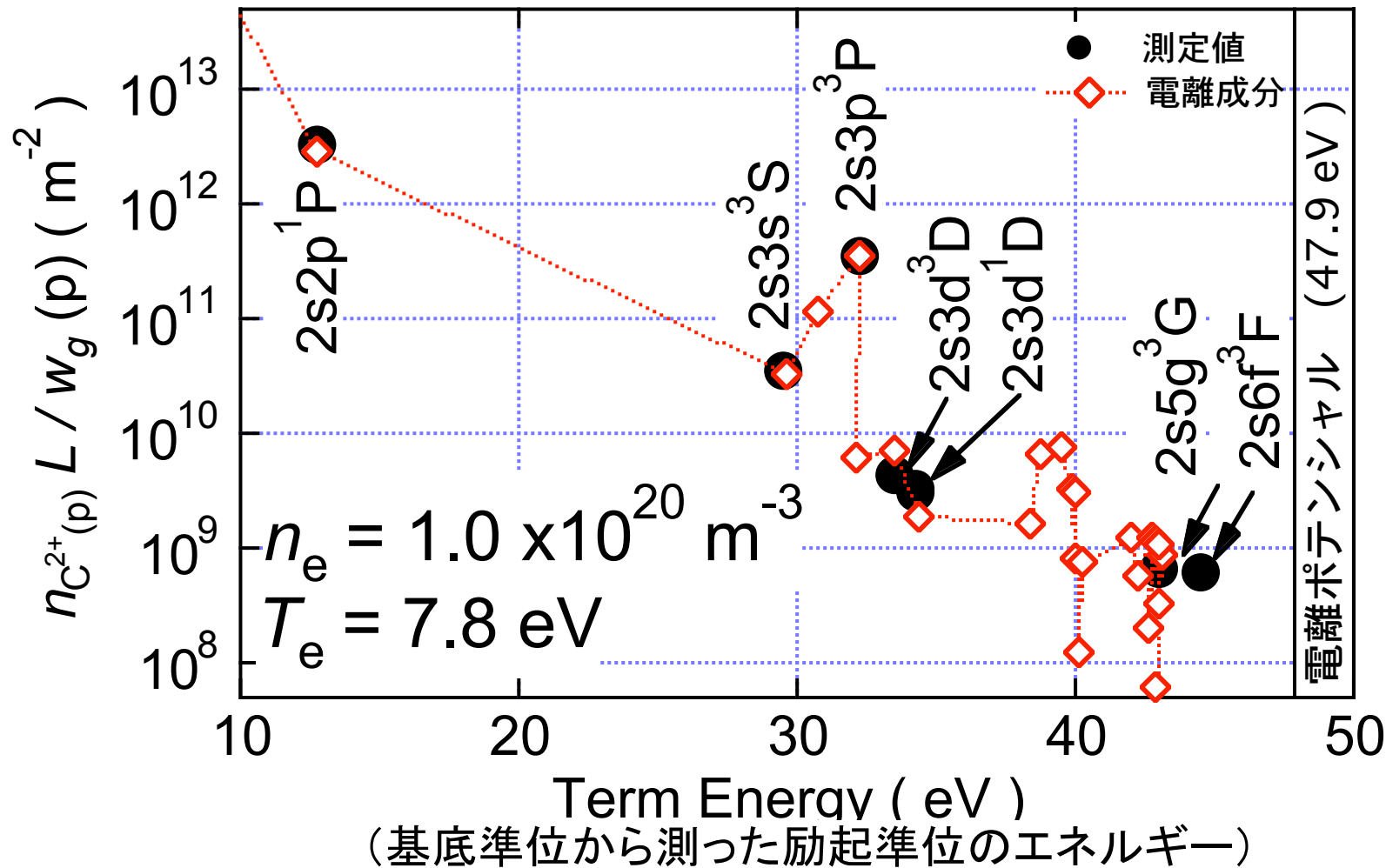
速度方程式の解（励起状態密度）；

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

(再結合成分) (電離成分)

C III (基底準位: $1s^2 2s^2$) の励起過程

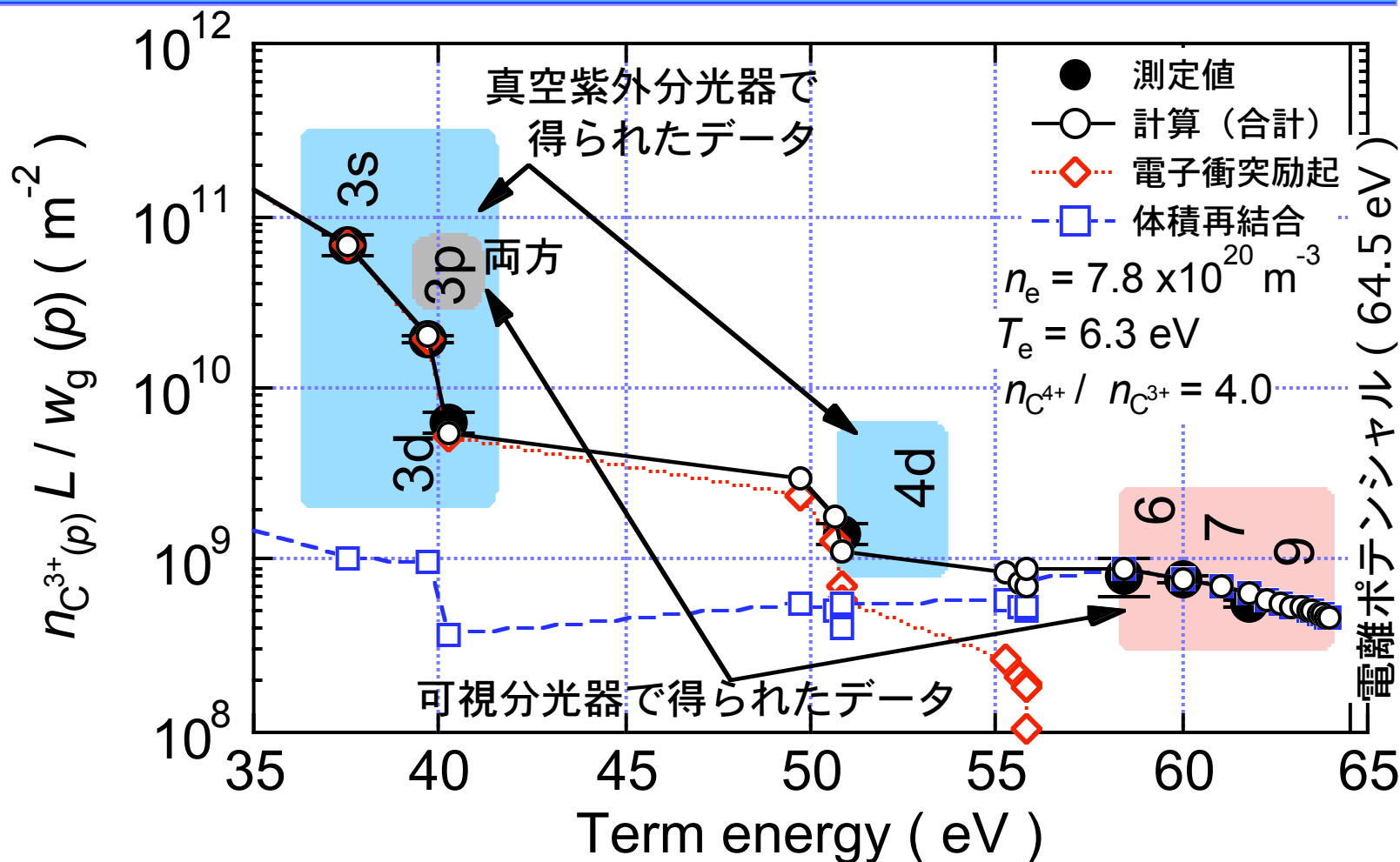
JT-60U-



電離成分が主要、再結合は検出されなかった

C IV (基底準位: $1s^2 2s$) の励起過程

JT-60U-

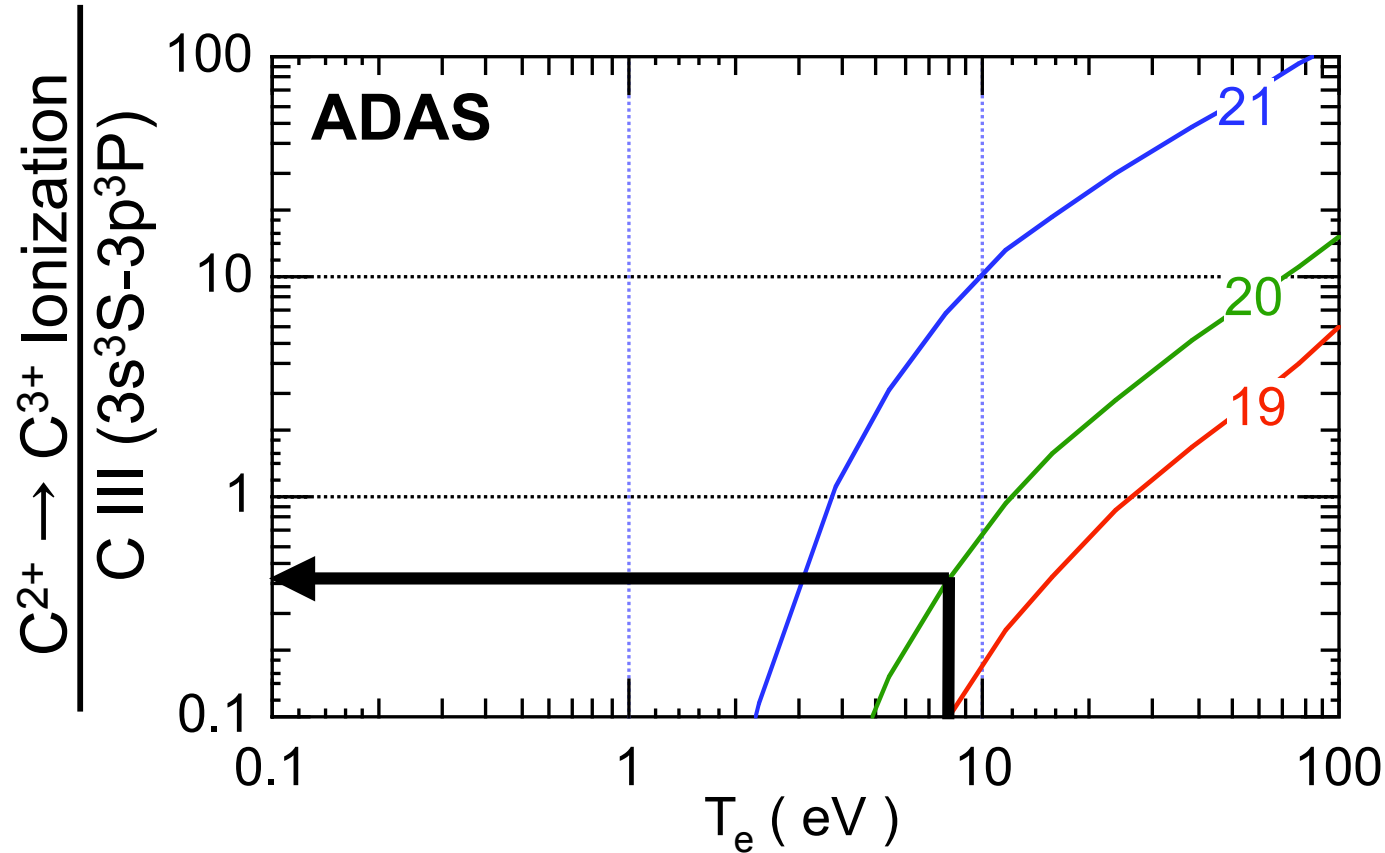


(基底準位から測った励起準位のエネルギー)

- $n \leq 4$ (励起準位エネルギー < ~50eV) 電離成分
- $n \geq 5$ 再結合成分

C²⁺ と C³⁺ の電離・再結合バランス

JT-60U-



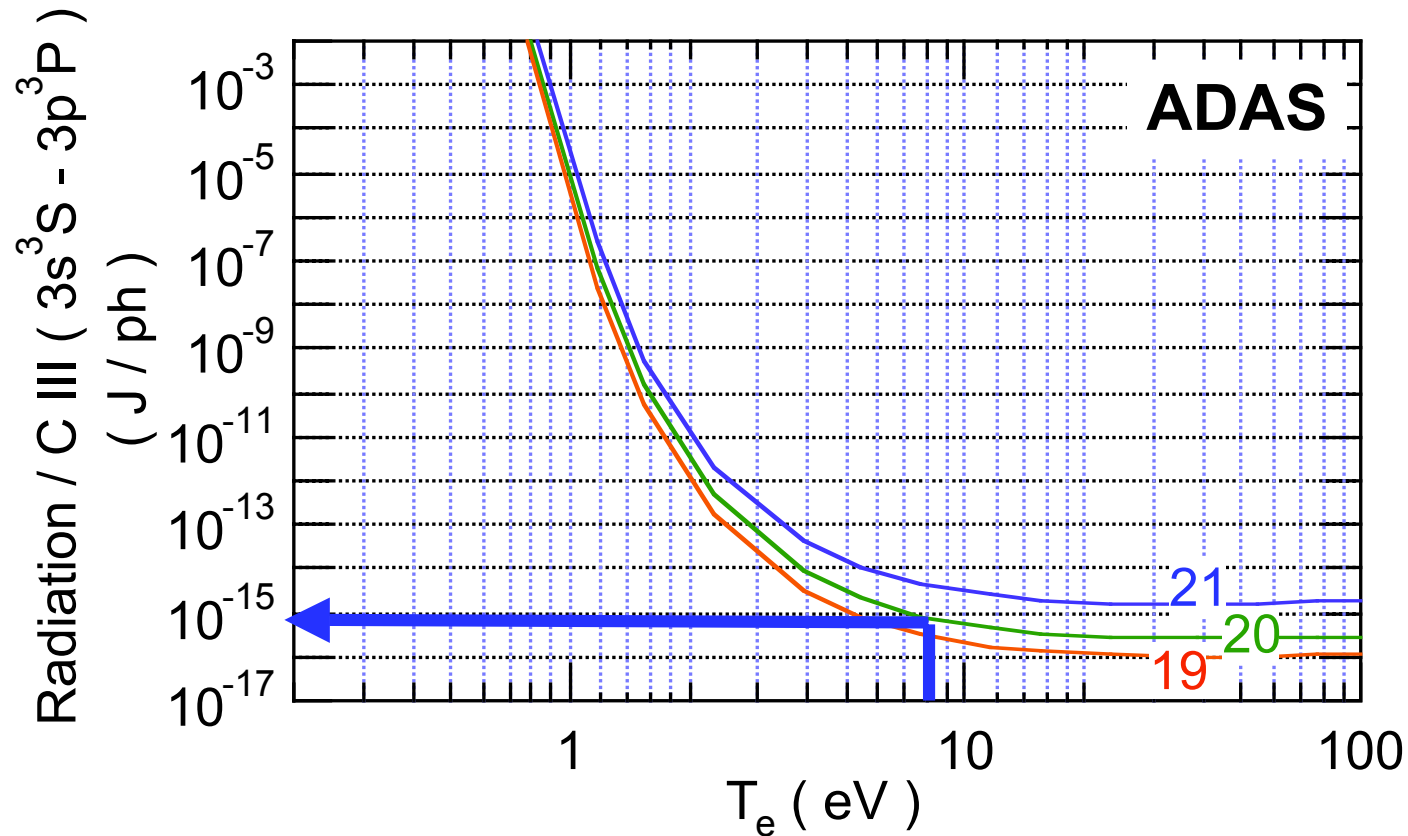
C²⁺ の電離束 = $0.4 \times 4 \times 10^{20} = 1.6 \times 10^{20} / \text{m}^2\text{s}$

C³⁺ の再結合束 = 0



C III (C²⁺) の電離成分による放射パワー

JT-60U



$$\text{Rad} / \text{C III (3s-3p)} = 1 \times 10^{-15} \text{ J/ph}$$

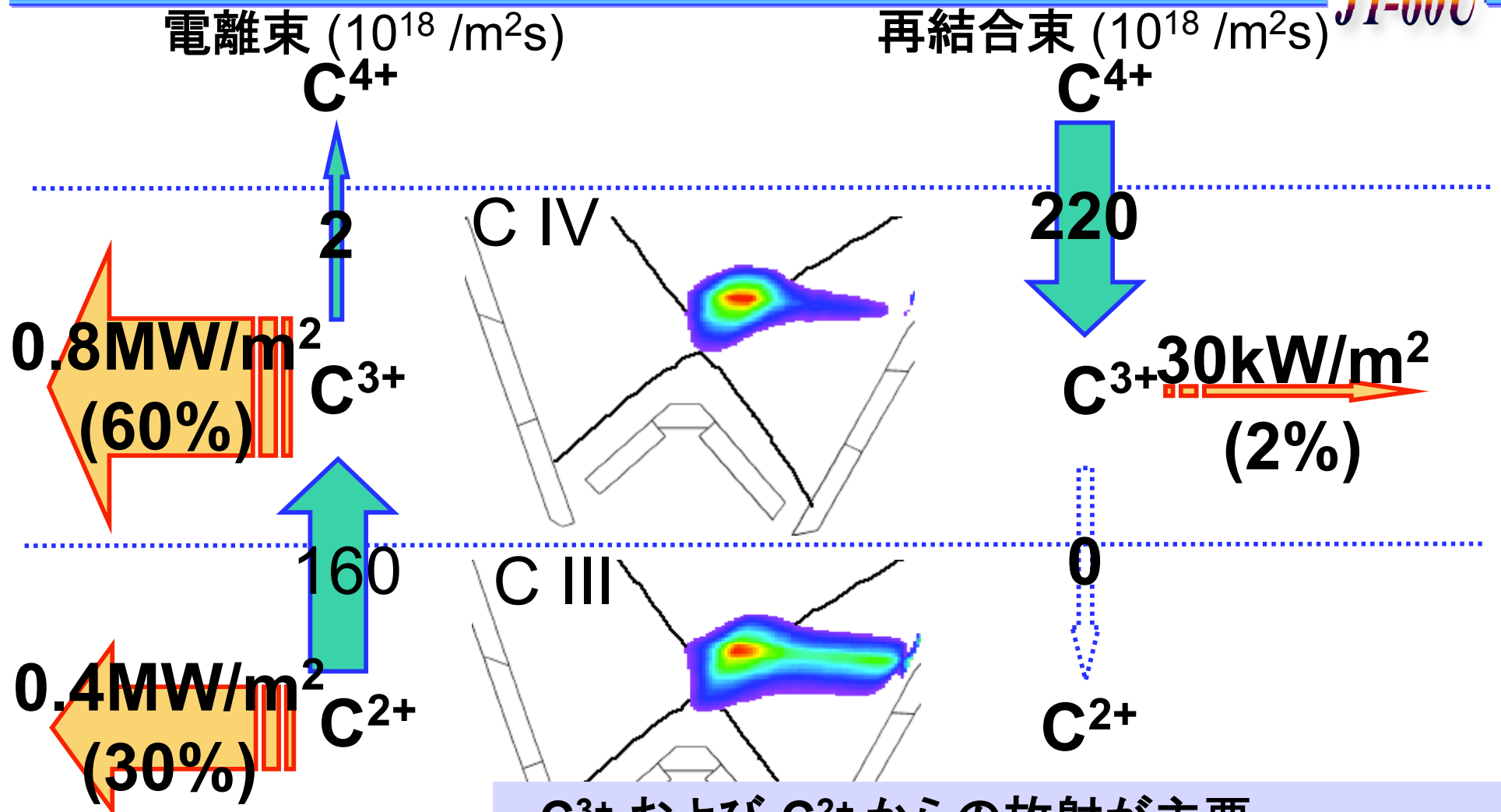
$$\text{C III (3s-3p)} = 4 \times 10^{20} \text{ ph/m}^2\text{s}$$

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

~ 全放射パワー(ボロメータ)の~30%

まとめ

JT-60U



- C^{3+} および C^{2+} からの放射が主要
- C^{3+} は C^{2+} の電離と C^{4+} の再結合により生成
- C^{3+} の輸送損失が示唆

プラズマ対向壁としてのタングステン

JT-60U-

- 利点：融点が高い
：水素吸蔵量が少ない
⇒トリチウム総量が制限される装置（ITERなど）でメリット大
：スパッタリング率が低い⇒発生量が少ない
：ラーマー半径が大きい⇒発生しても直ぐにプラズマ対向壁に戻る
- 欠点：高Z原子
⇒少量であっても放射損失が大きくなりプラズマを冷却
<⇒許容されるプラズマへの混入量はきわめて低い
⇒蓄積しやすい傾向

TYPE-I ELM など瞬時に大きな粒子・熱負荷がかかるときに多量にタングステ
ンが発生 ⇒大きなELMが発生する高温、高密度、高閉じ込めプラズマ
が必要

プラズマが高温になるほど高い電離度までタングステンがイオン化し放射損失
が大きくなる ⇒高温プラズマでの実験が必要

JT-60Uなどの大型装置でタングステンの発生量と主プラズマへの蓄積量の関
係を調べることはITERでタングステンプラズマ対向壁を利用できるかどうかを

判断する上で重要な材料

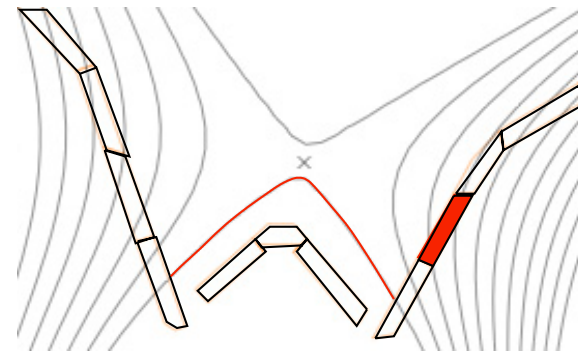
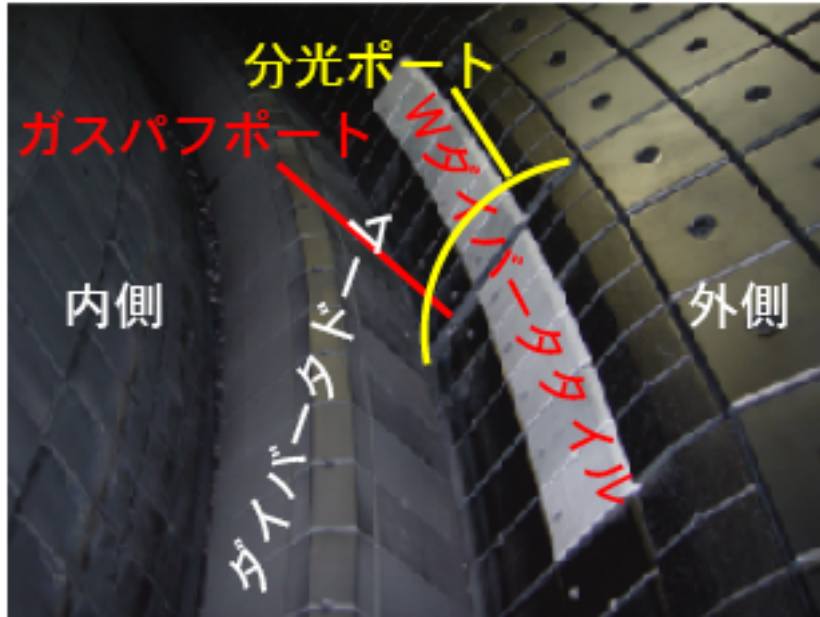
2003年よりダイバータ板の一部をWに変更

JT-60U-

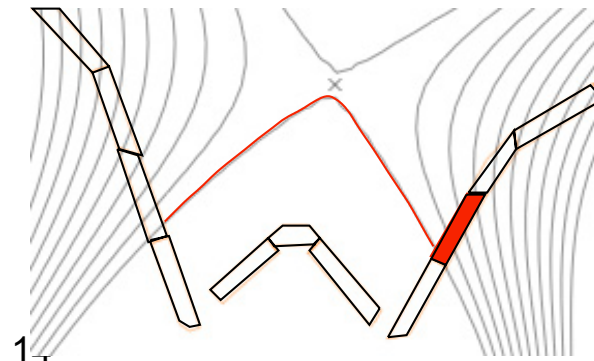
Wタイル : CFC上に厚さ 50 μ mのW(Re層マルチレイヤー有)を蒸着
設置場所と枚数: 全部で12枚

トロイダル位置P-8セクション, 外側ダイバータに11枚; 分光計測
P-17セクション, 外側ダイバータに1枚; IRTV
標準配位よりもやや上; 必要な時のみダイバータレッグをW上に設置

●P-8セクションの写真(全体)



標準的
配位



W実験
用配位

ダイバータからの中性タングステンスペクトル線 =>発生量の目安

JT-60U-

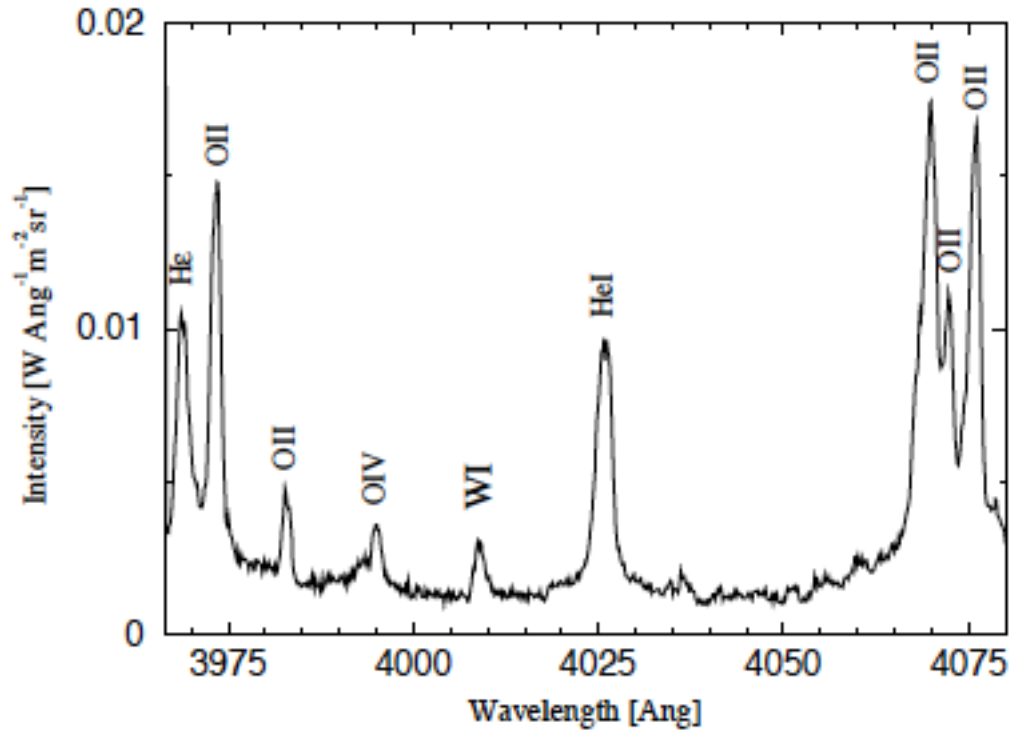


Figure 2. Typical spectrum near the WI emission line. This spectrum was recorded at the strike point with 9 ms exposure time in a 1 MA ohmic discharge with a line-averaged electron density of $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ in the main plasma. The spectrometer allows the simultaneous observation of several emission lines of oxygen, helium and hydrogen that are close to the prominent WI emission at 400.9 nm.

A. Thoma et al., Plasma Phys. Control. Fusion **39** (1997) 1487–1499

ダイバータからの中性タングステンスペクトル線 =>発生量の目安

JT-60U-

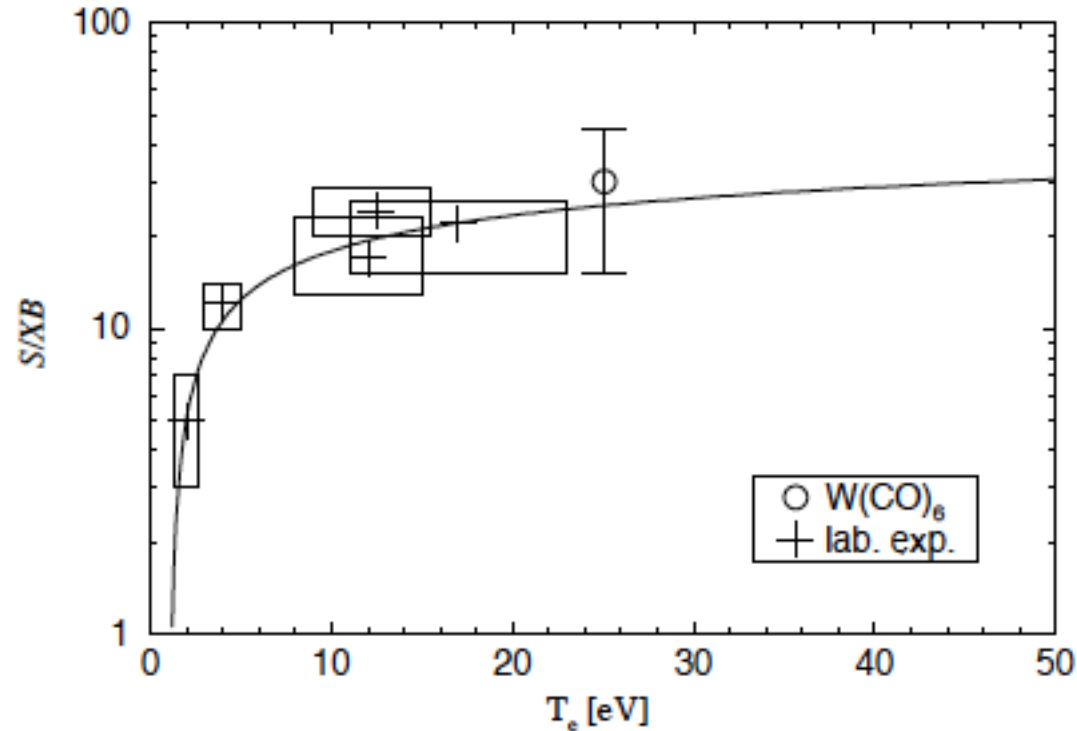
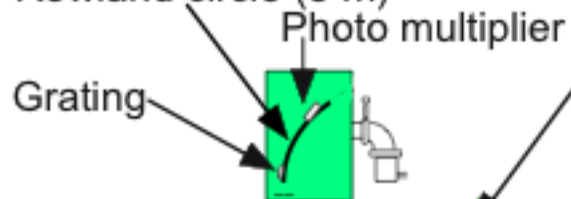


Figure 3. Temperature dependence of S/XB for the WI emission line at 400.9 nm. The values below 20 eV are deduced from a laboratory experiment [12]. The boxes indicate the error bars for the marked S/XB values (+). For higher electron temperatures $W(CO)_6$ was sublimed from an oven mounted in the ASDEX Upgrade divertor. The intensity ratio of the WI to the OII emission is used to derive S/XB (o) [15].

Grazing incidence monochromator

- Rowland diameter: 3 m
- Wavelength range: 1.5 nm - 130 nm
- Wavelength resolution: ~ 0.02 nm
- Time resolution: 0.05 ms

Rowland circle (3 m)



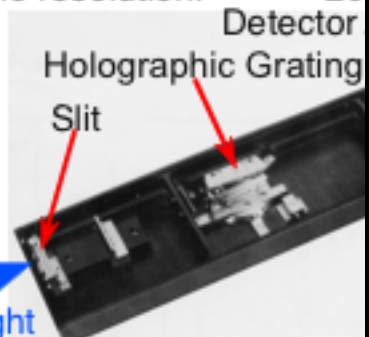
Normal incidence spectrometer

- Wavelength range: 97 nm - 130 nm
- Wavelength resolution: $\lambda/\Delta\lambda$
- Time resolution: 20 ms

Flat-field grazing incidence spectrometer

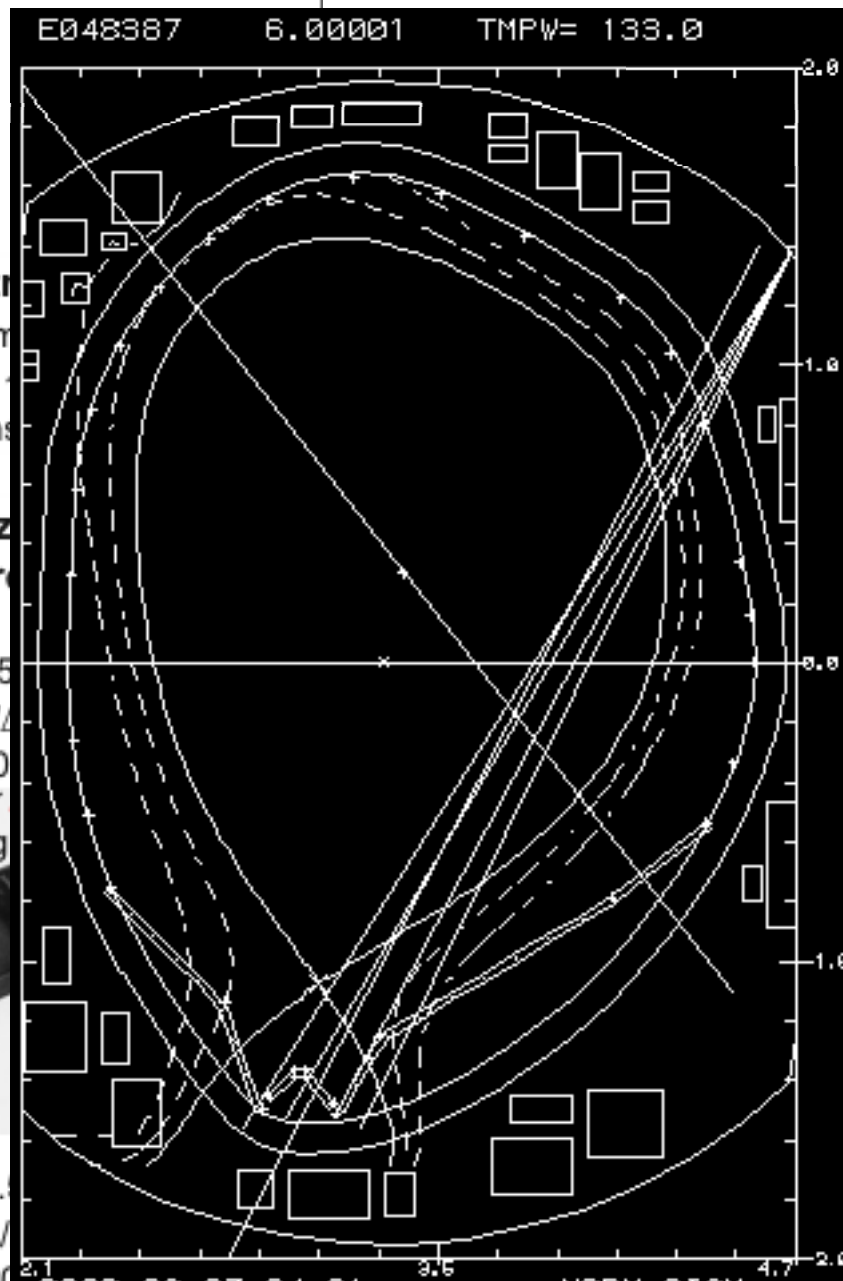
For divertor^[1]

- Wavelength range: 2.5 nm - 130 nm
- Wavelength resolution: $\lambda/\Delta\lambda$
- Time resolution: 20 ms



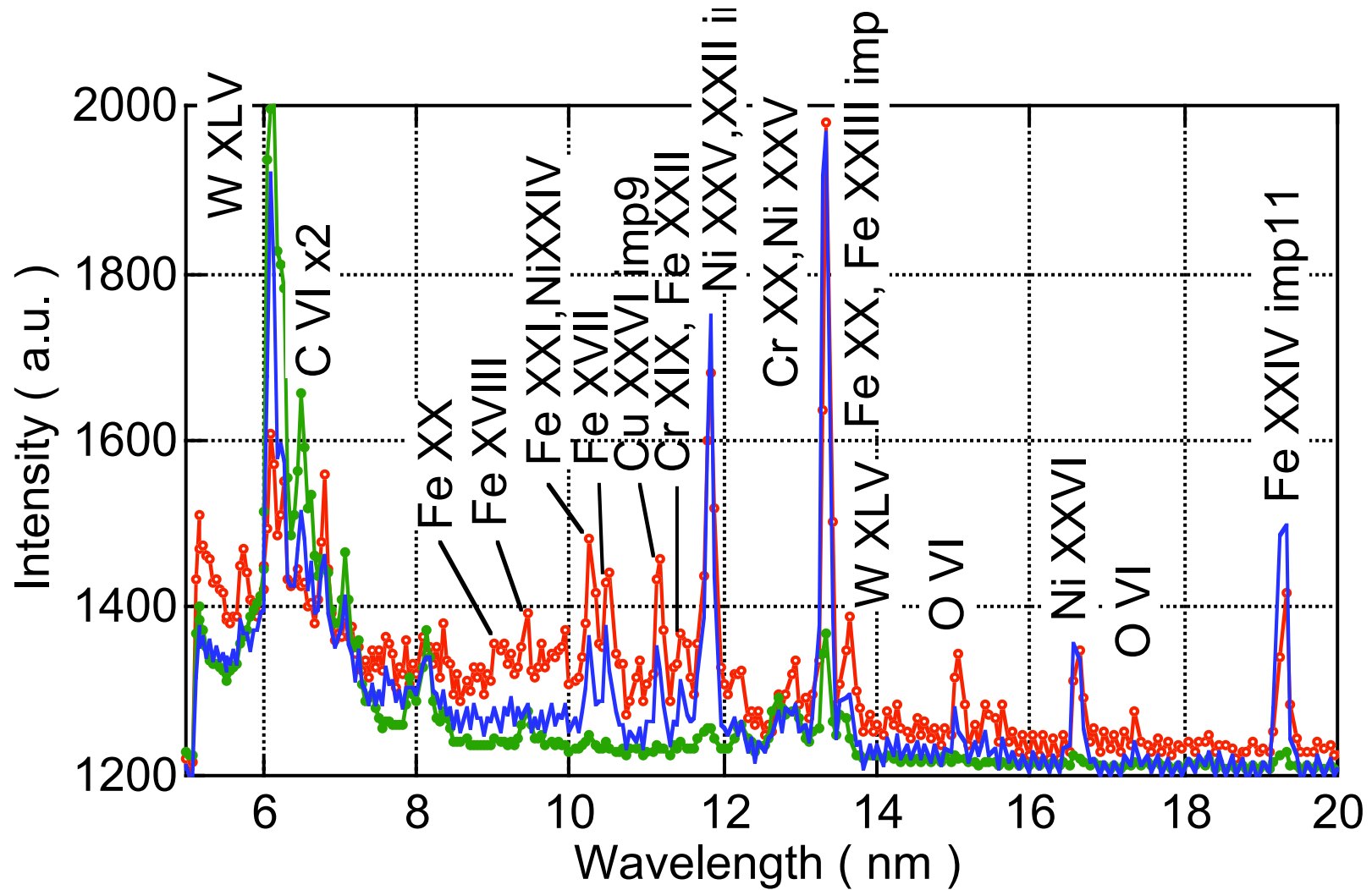
For main plasma^[2]

- Wavelength range: 0.1 nm - 130 nm
- Wavelength resolution: $\lambda/\Delta\lambda$
- Time resolution: 20 ms



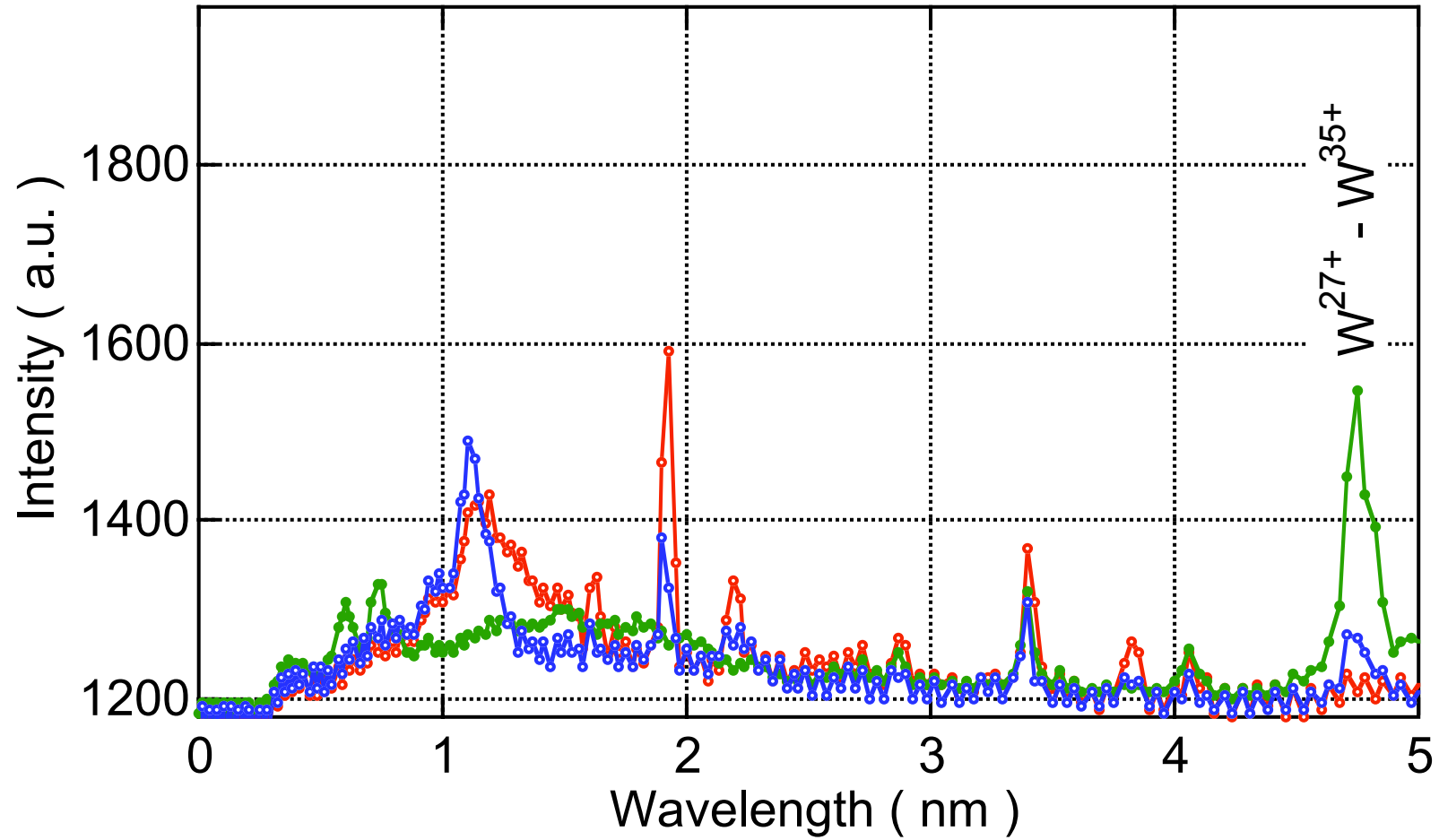
VUV スペクトル

JT-60U-



VUV スペクトル

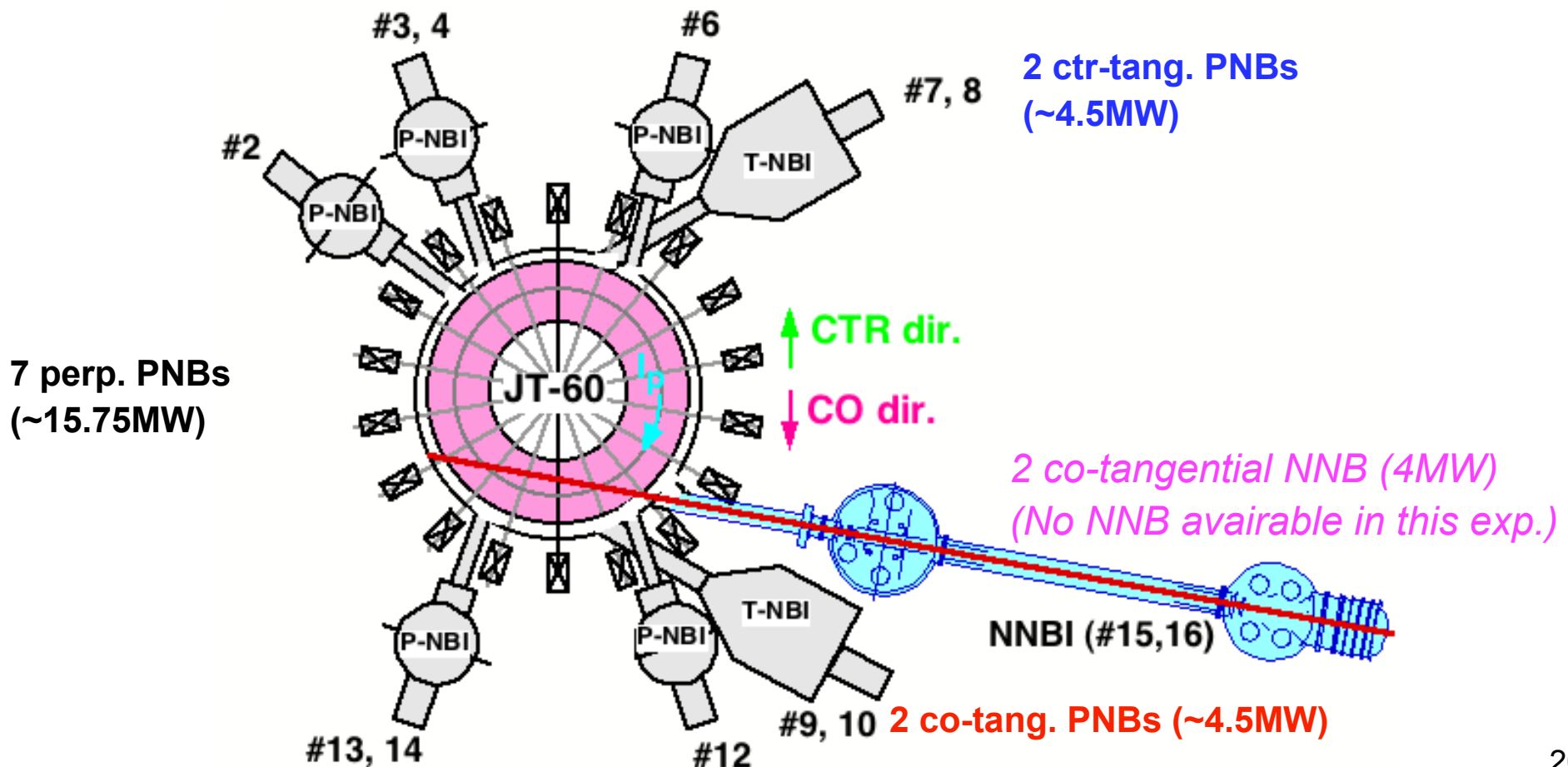
JT-60U-



Neutral Beam Injection (NBI) system

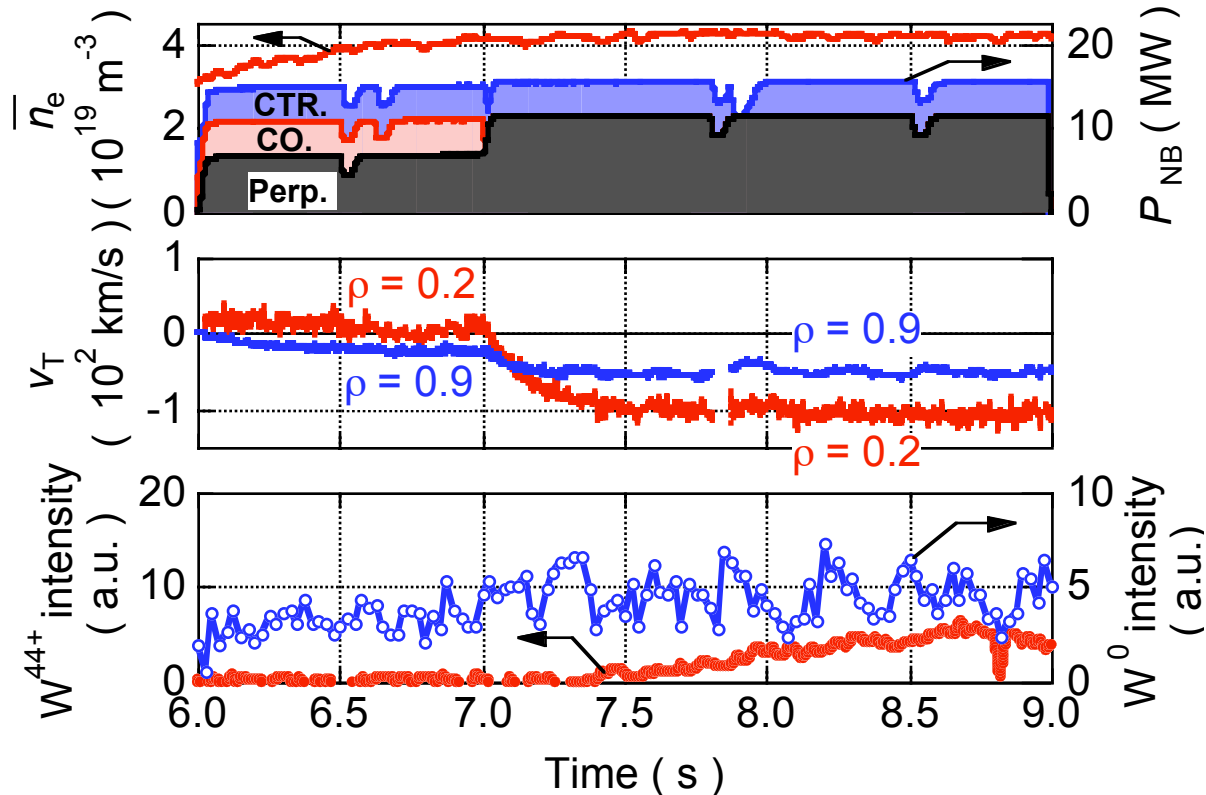
JT-60U

- JT-60U has 11 positive-ion-based NBs (PNBs~85keV) and 2 negative-ion-based NBs (NNBs~350-420keV)
- Widely variations in combination of tangential (co/bal/ctr) and perpendicular injection



プラズマ回転がプラズマ電流と逆方向に向くほど タンゲステンが蓄積

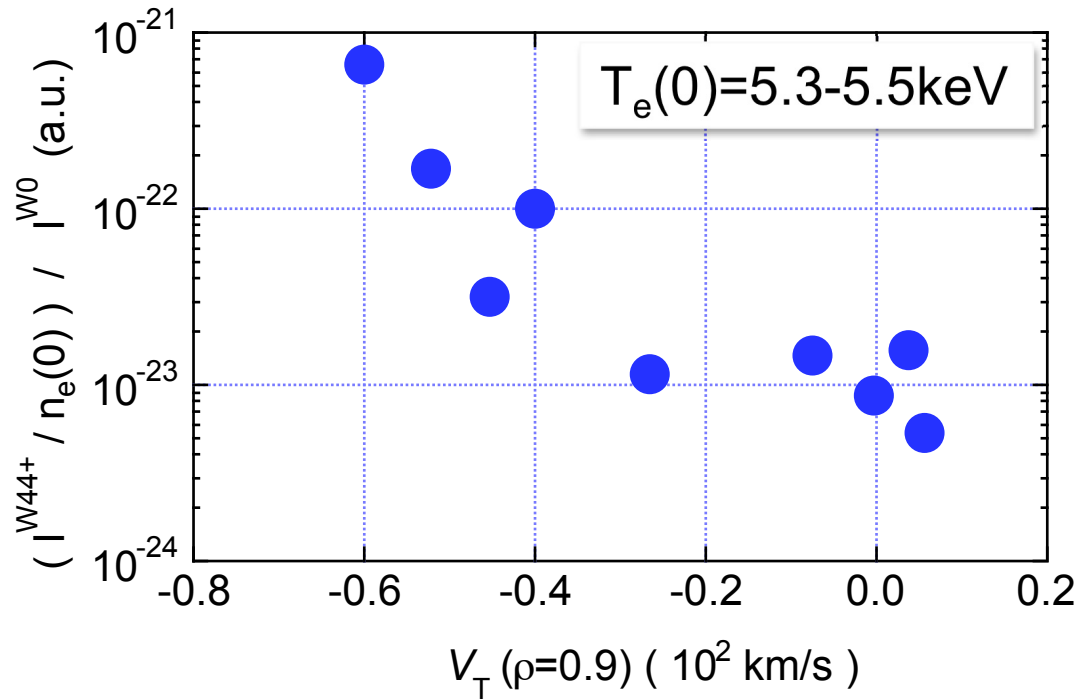
JT-60U



- 6.0-7.0s: NBの入射方向は合計としてゼロに近い運動量入射
=> プラズマの回転も全体にわたってほぼゼロ
- 7.0s- 9.0s: Co. 方向の入射を停止、逆方向への運動量入射
=> プラズマ電流と逆方向に回転が強くなる
- 7.0s 以降でタンゲステンの発生量 (W^0) はわずかに増えるのみだが、主プラズマでの蓄積量 (W^{44+}) は急激に増加

プラズマ回転がプラズマ電流と逆方向に向くほど タングステンが蓄積

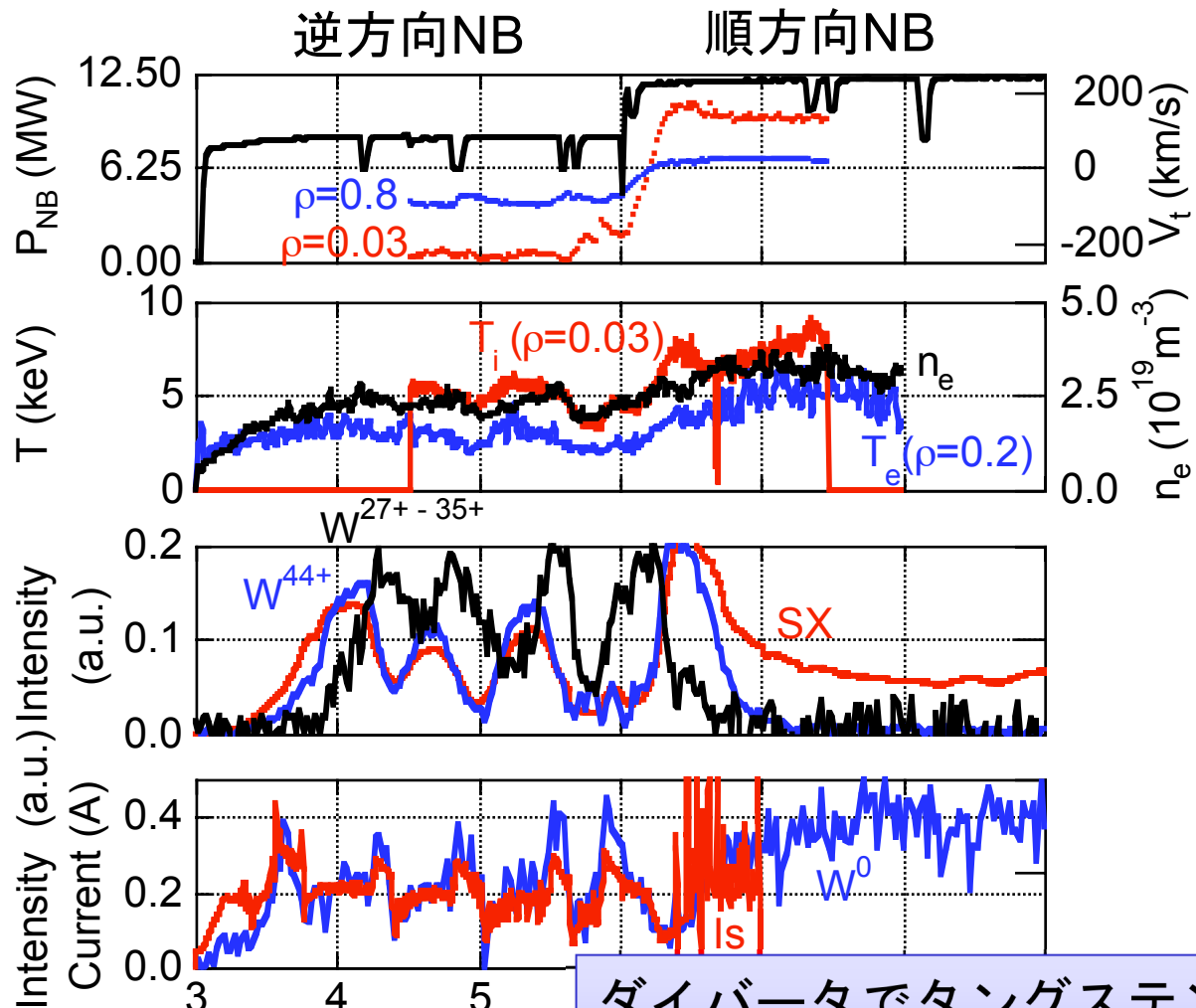
JT-60U



プラズマ回転速度がプラズマ電流と逆方向に高くなる（横軸）につれ、タングステン発生量に対する蓄積量（縦軸）が大きくなる傾向

周期的なタングステンの発生、混入、吐き出し

JT-60U



プラズマ回転：
逆方向から順方向へ

温度・密度：
増減の繰り返しから
高温・高密度へ

主プラズマ：
 W^{44+} とSXは同期
 $W^{27+}-W^{35+}$ は逆位相

ダイバータ：
 W^0 はイオン束に依存

ダイバータでタングステンが発生
 \Rightarrow Hモード（改善閉じ込めモード）でプラズマへ蓄積
 \Rightarrow Lモードに逆遷移、はき出し
 \Rightarrow 発生量の増加

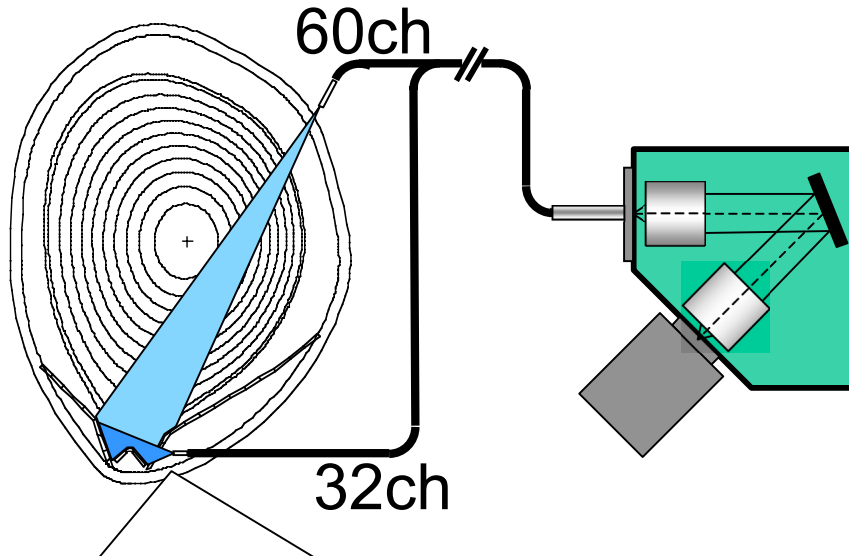
まとめ

JT-60U-

- 高電離タングステンイオンのVUVスペクトルを解析中（FACコード）
- プラズマ回転速度がプラズマ電流の逆方向に高いほどタングステンの蓄積が顕著
- 蓄積はHモードで、発生はLモードで起こりやすい例が観測された
- 低電離タングステンイオンは混入量の目安か、吐き出し量の目安か？

2次元広帯域可視分光器

JT-60U-

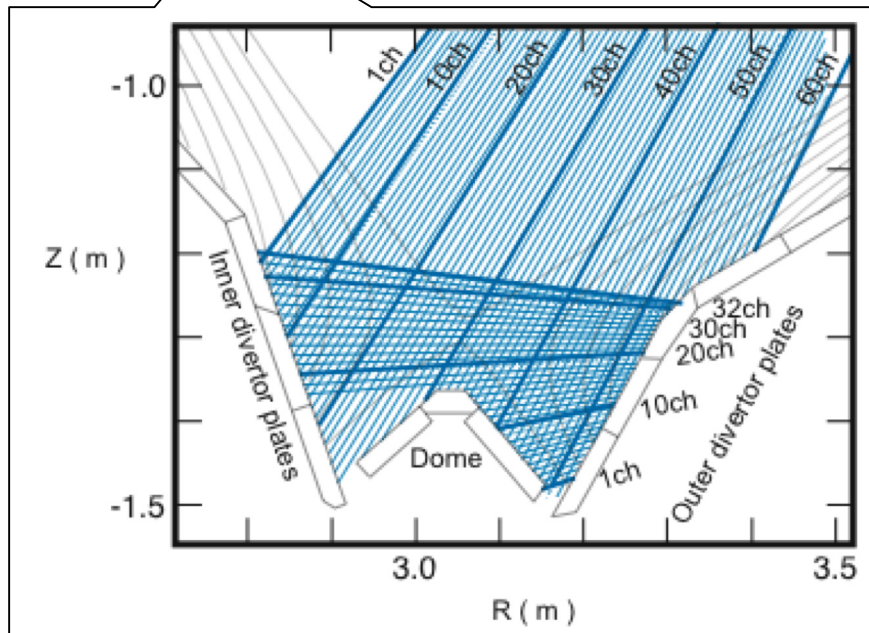


分光器

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

CCD

- 背面照射型
- ピクセル : 20 x 20 μm
- フォーマット : 1340 x 1300

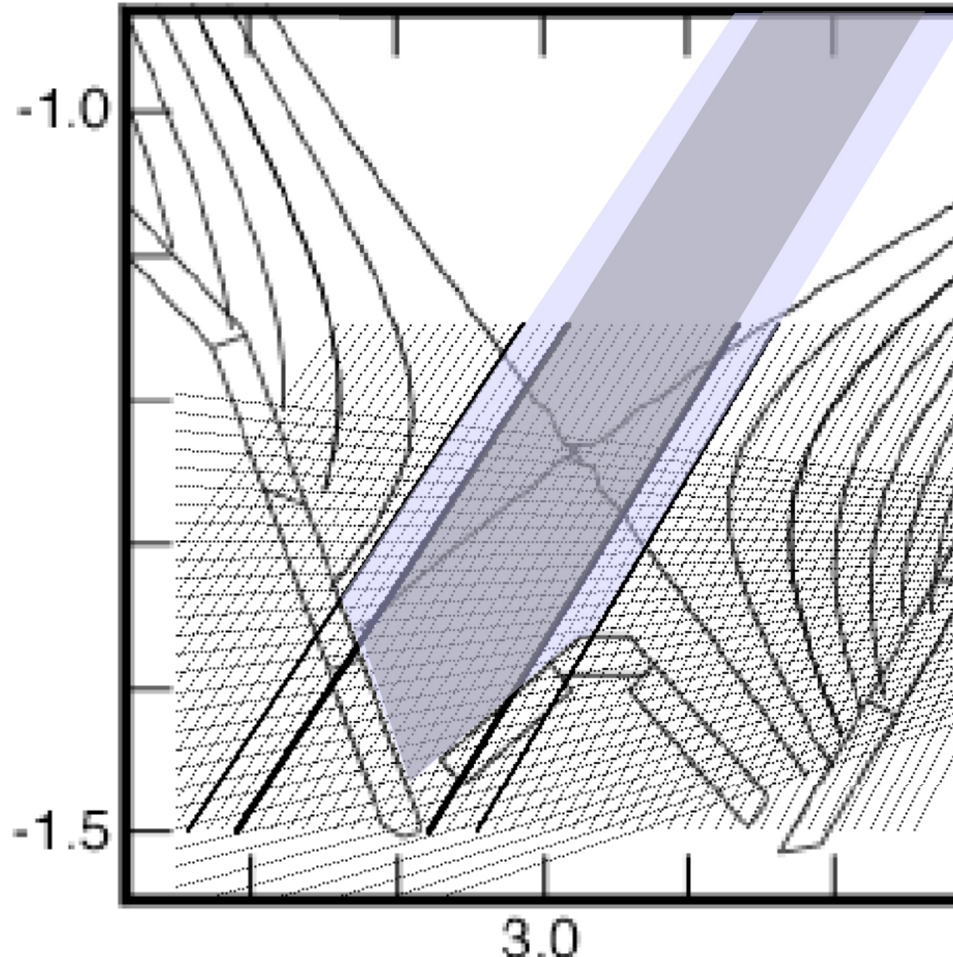


スペック

- 装置幅 (半値全幅):
~ 0.74 nm (2.3 pixels)
- 同時測定波長幅:
~ 430 nm (350 - 780 nm)
- 空間分解 (92ch):
~ 1 cm

真空紫外斜入射分光器 (VUV)

JT-60U-



回折格子:

ホログラフィック (300g / mm)

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:

シンクロトロン放射

分岐線対法

- 可視分光と視野のマッチング
- 分岐線対法による可視分光器との相対感度校正 => 絶対感度
=> 可視と真空紫外のスペクトルを同時に解析

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 $4 \times 10^{19} / \text{m}^2\text{s}$

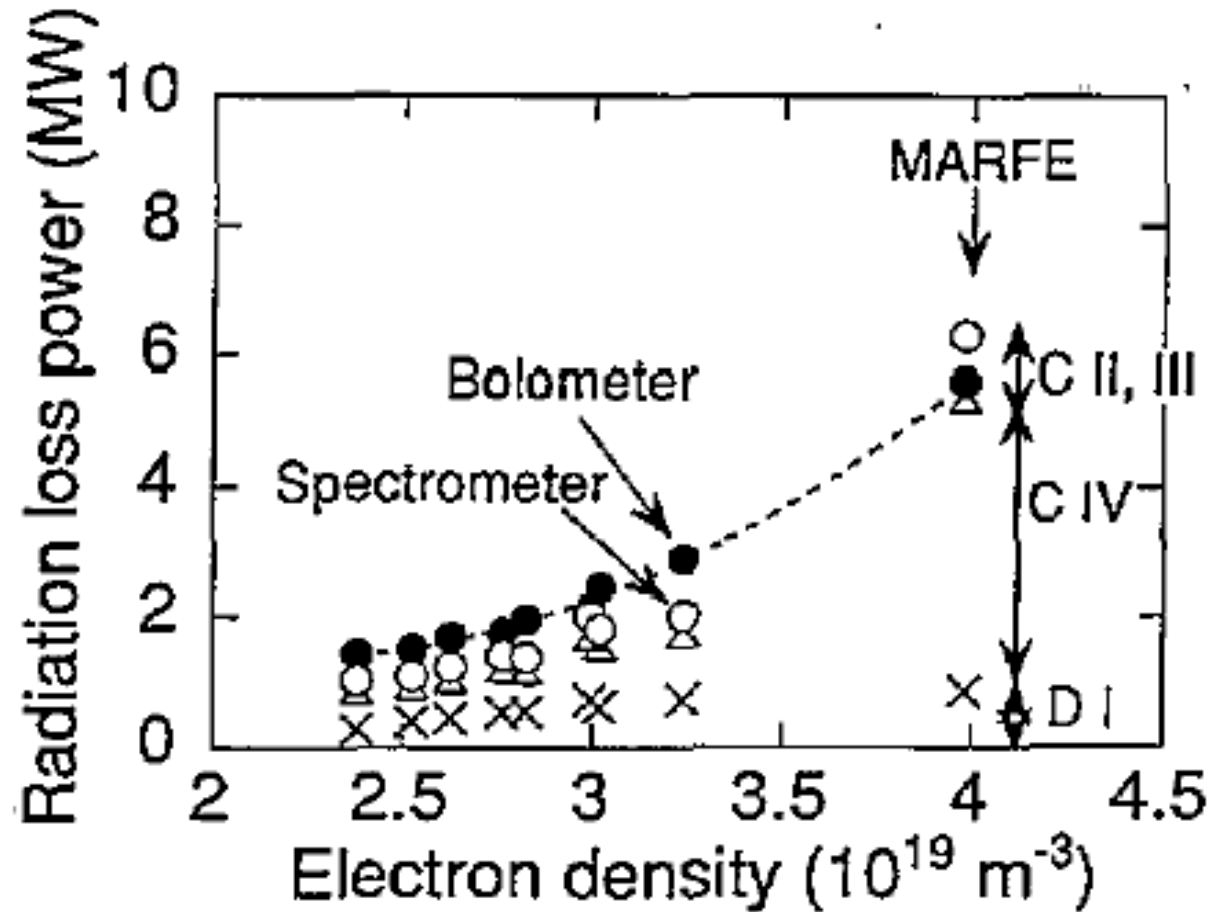
高励起準位, $n \geq 6$

- : 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

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
($T_e = 20 \text{ eV}$)

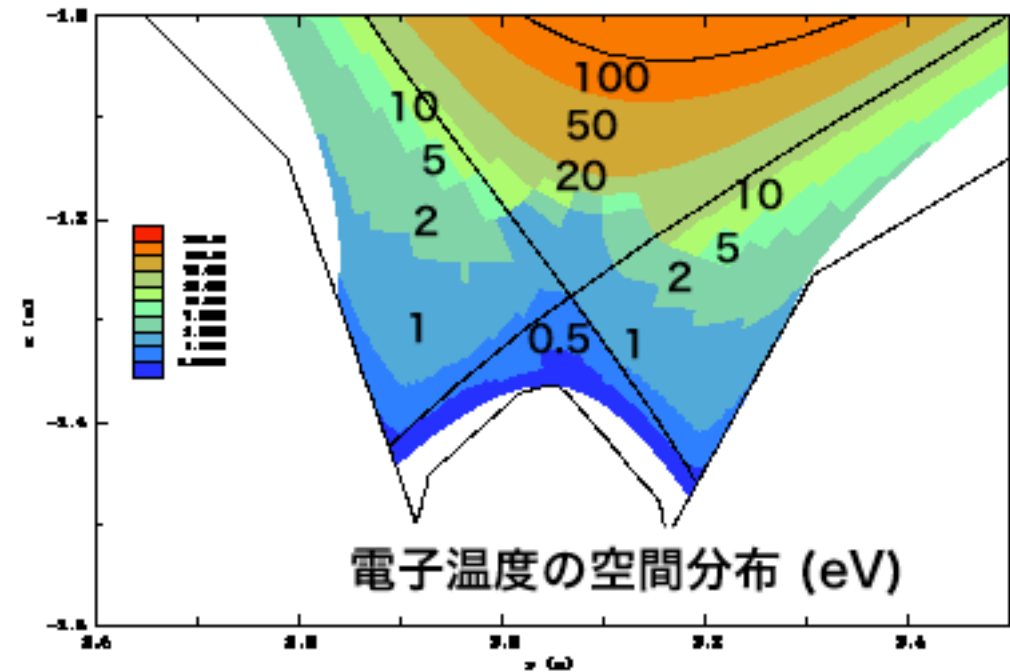
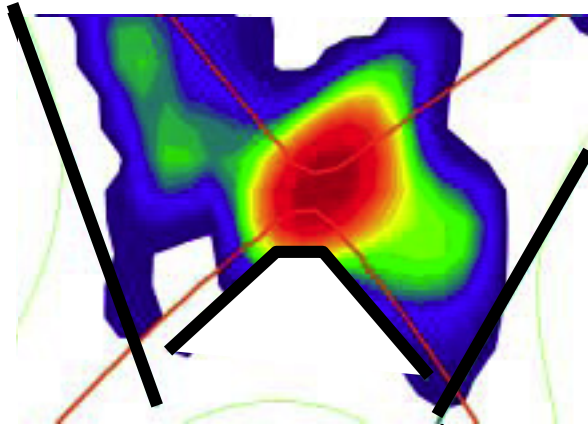
<=> 非接触プラズマでは $T_e < 1 \text{ eV}$

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

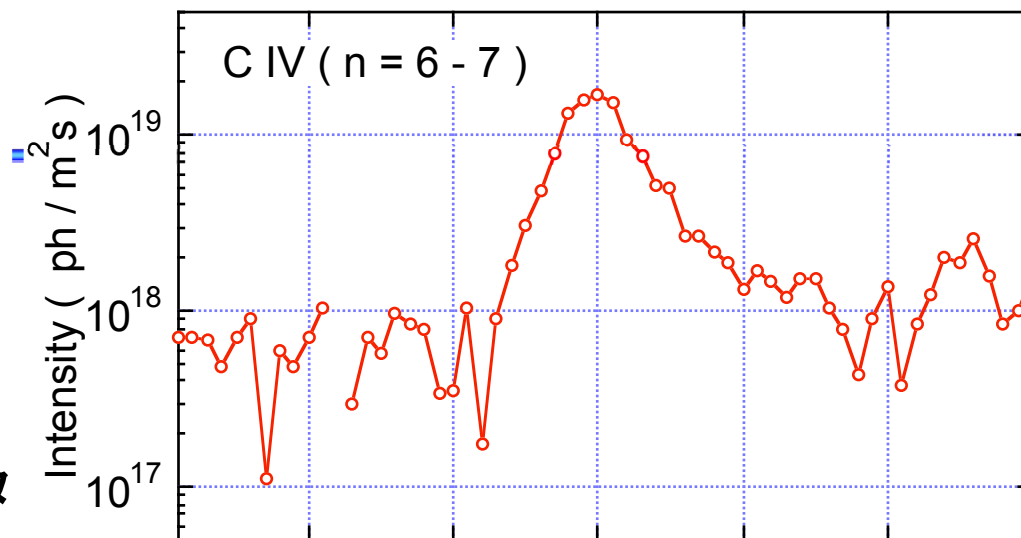
Detached plasma (MARFE)



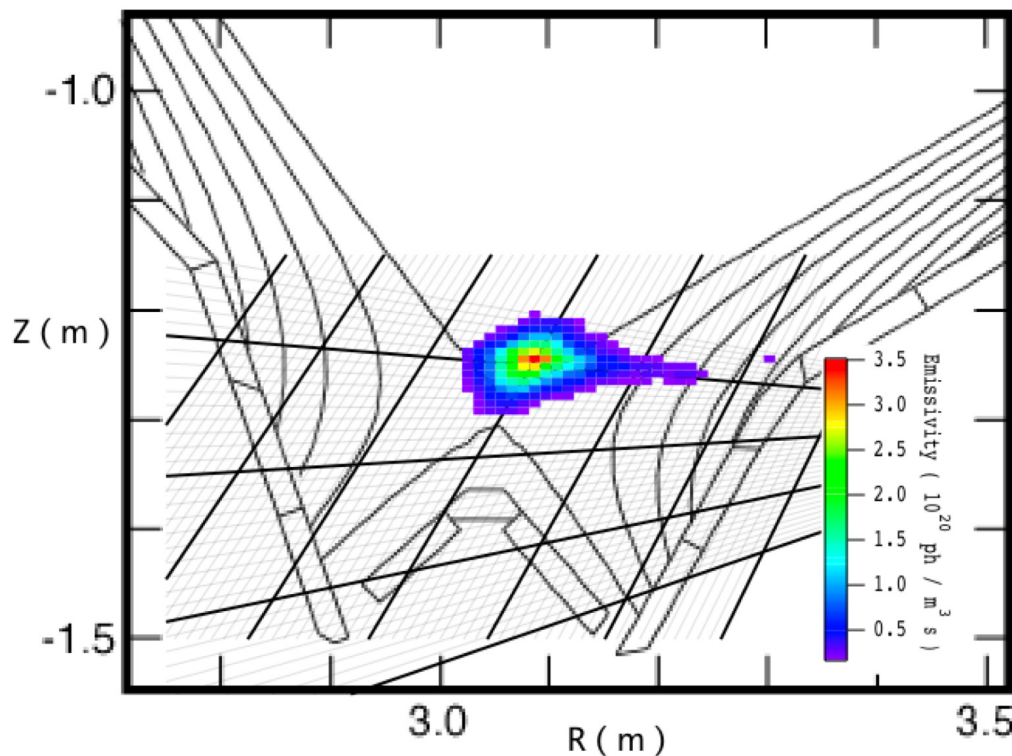
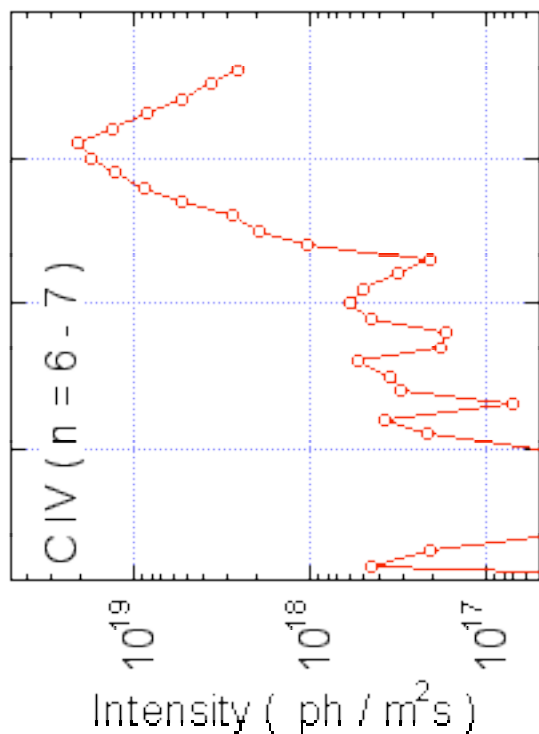
X 点付近に高放射、低温かつ高密度領域が存在

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)

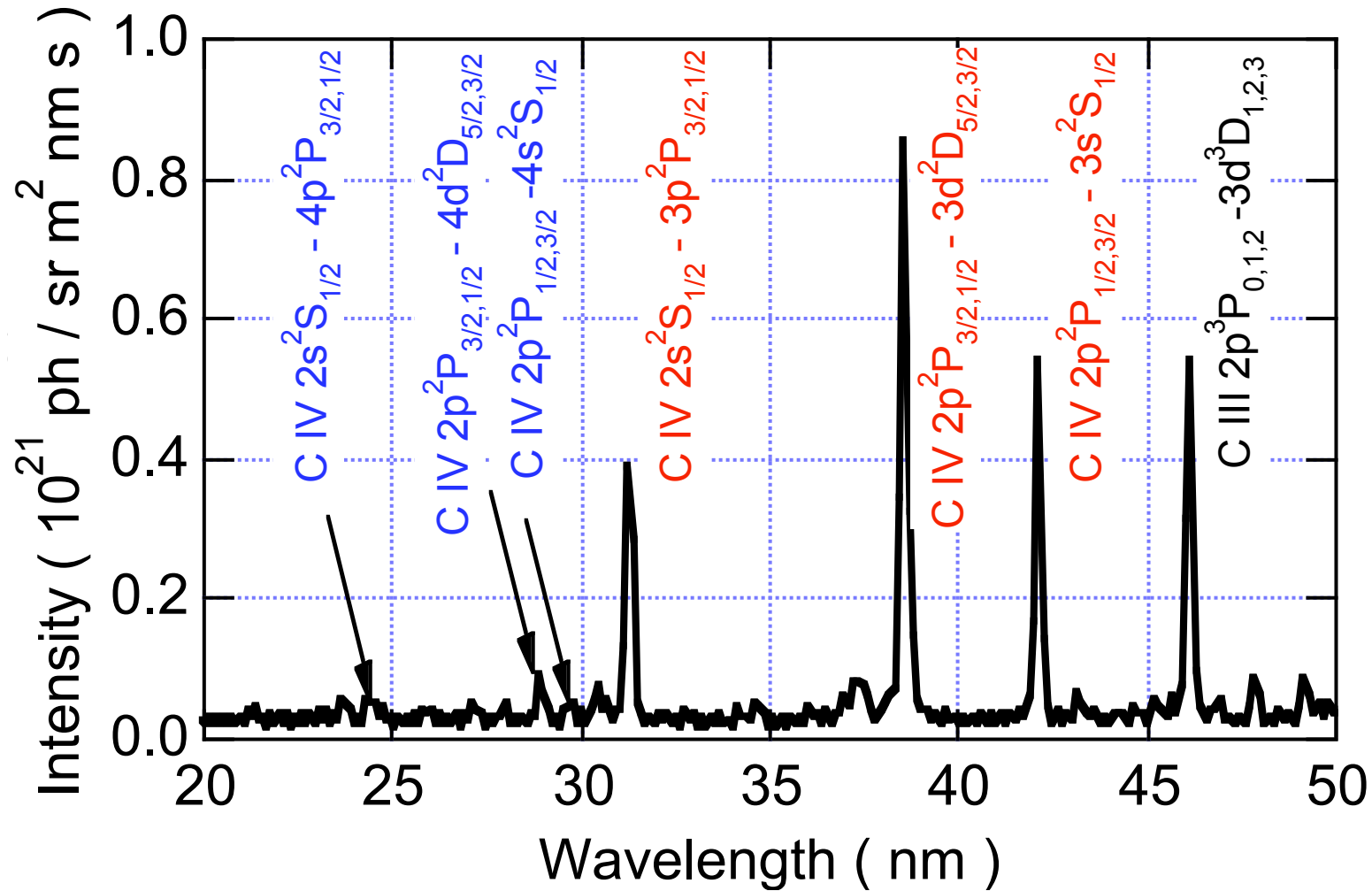


60U-



C IV スペクトル (VUV)

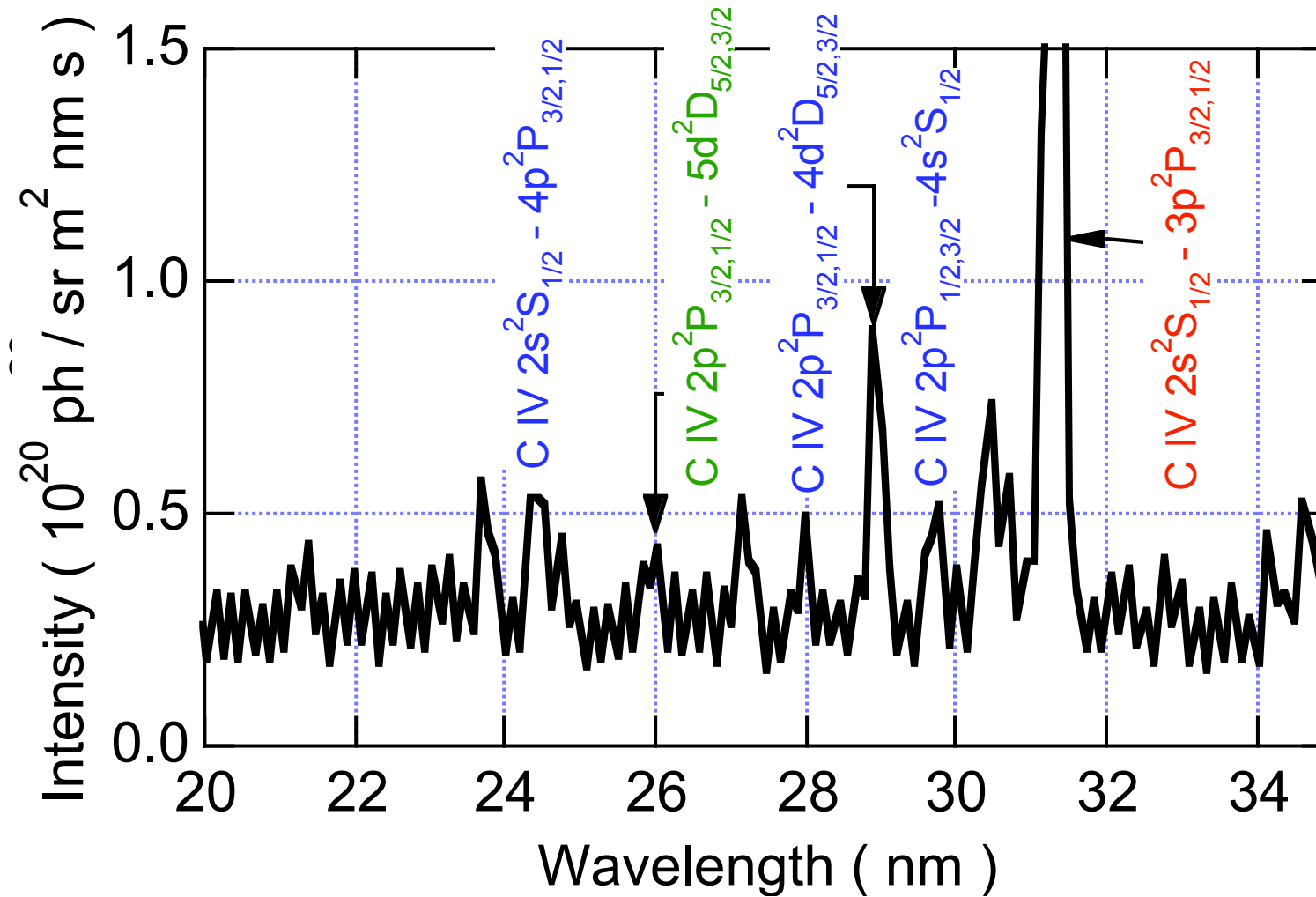
JT-60U



C IV (2 - 3, 4) が観測された

C IV スペクトル (VUV)

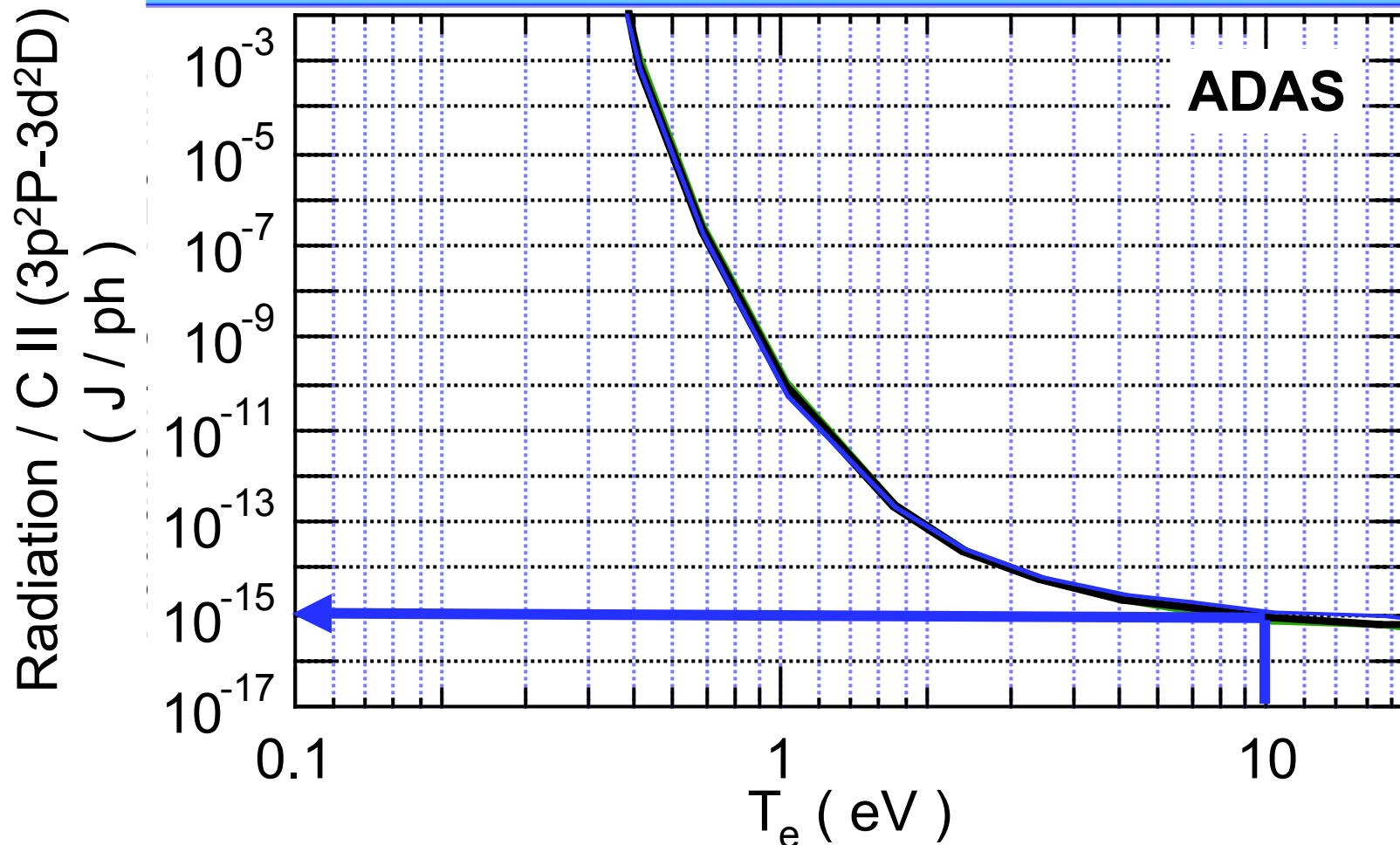
JT-60U



C IV (2 - 5) は弱く、解析は困難

Radiation power (ionizing C⁺)

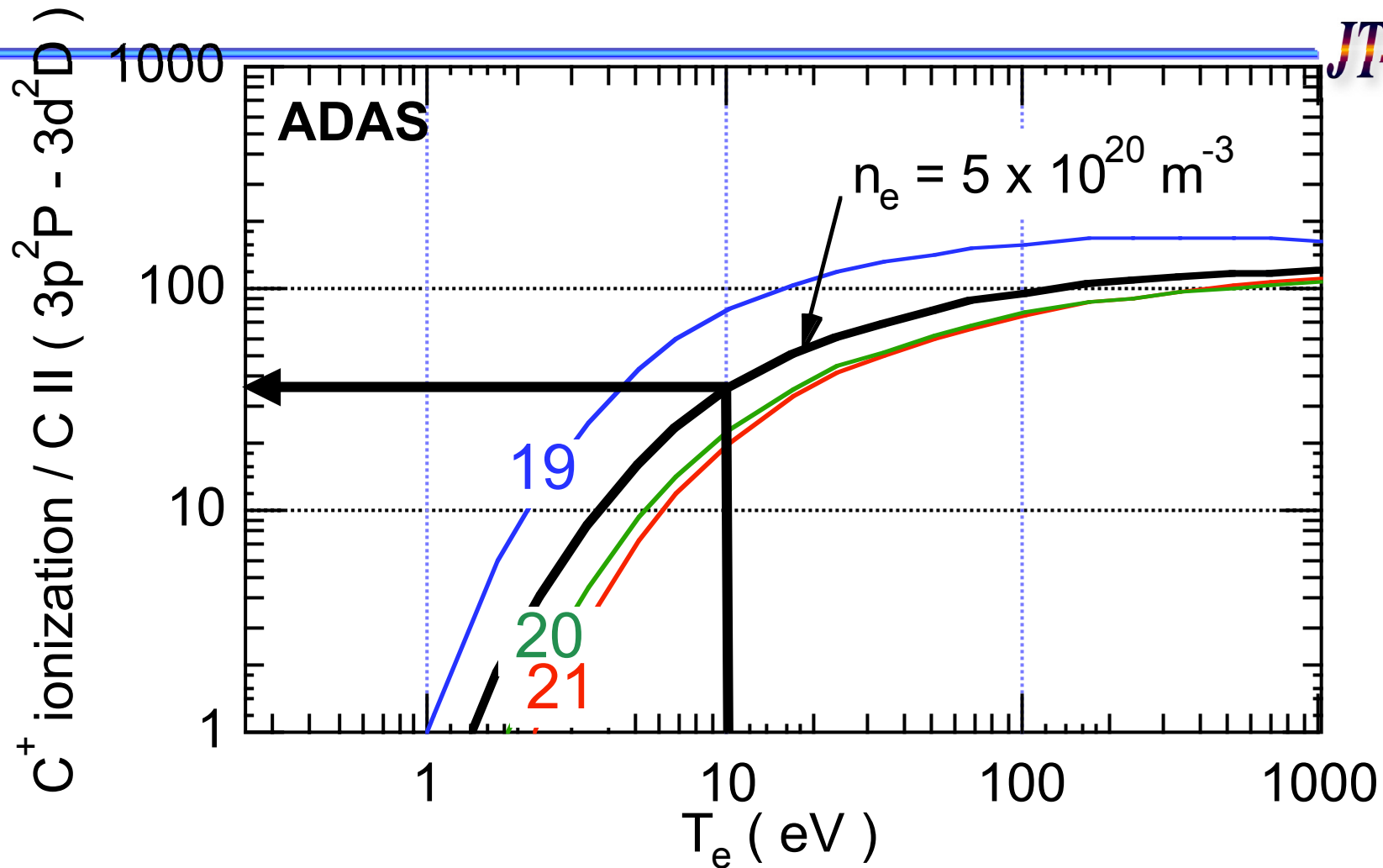
JT-60U-



$$\begin{aligned} \text{Rad} / \text{C II (3p}^2\text{P-3d}^2\text{D)} &= 1 \times 10^{-15} \text{ J/ph} \\ \text{C II (3p}^2\text{P-3d}^2\text{D)} &= 6 \times 10^{17} \text{ ph/m}^2\text{s} \\ \Rightarrow \text{Rad.} &= \mathbf{0.6 \text{ kW} / \text{m}^2} \\ &\ll \text{ total radiation (1 MW/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

Source of C²⁺

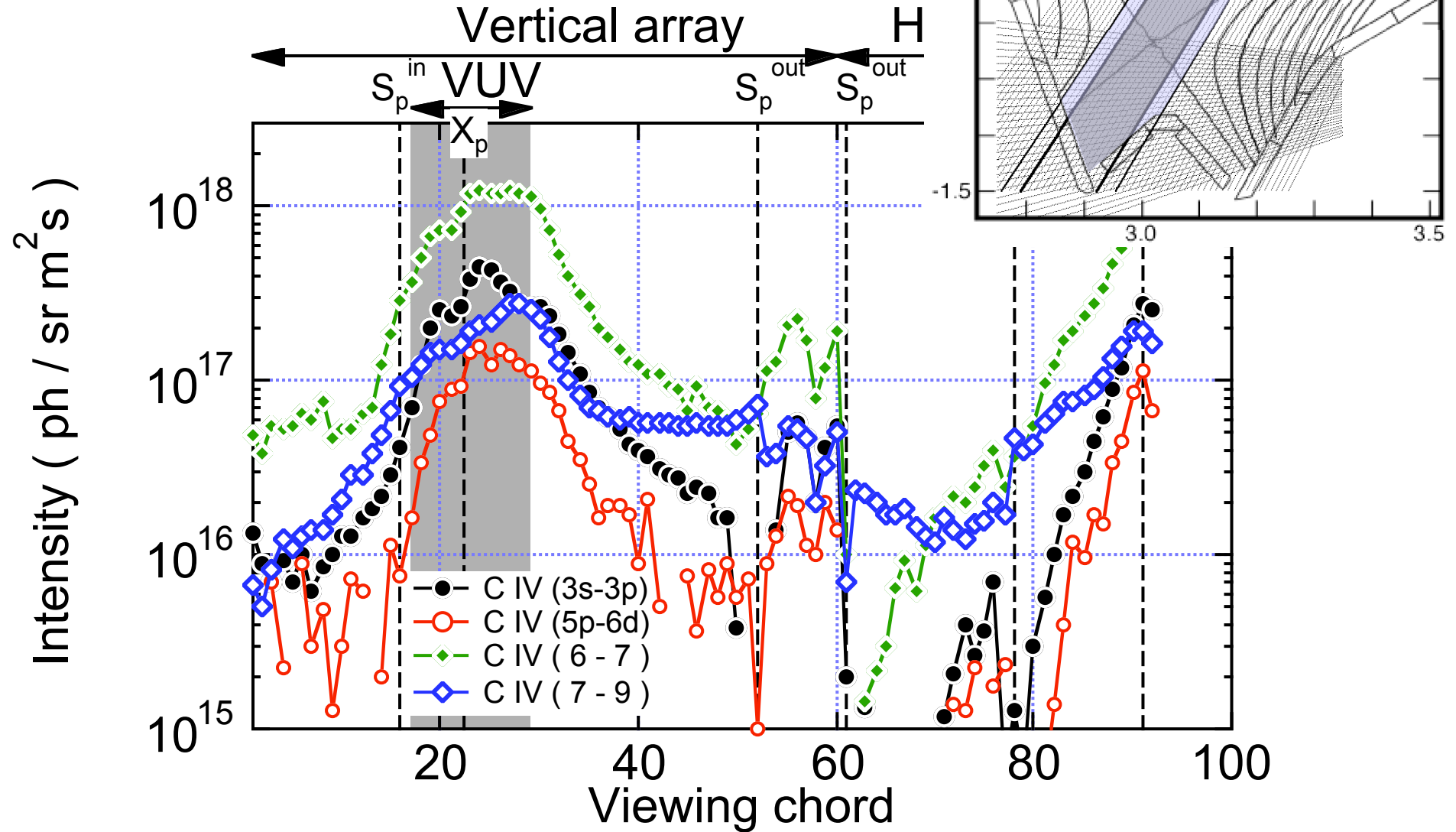
JT-60U



Ionization flux of C²⁺ = $35 \times 6 \times 10^{17} = 2 \times 10^{19} / \text{m}^2\text{s}$
 \Rightarrow **source of C³⁺ : Ionization of C⁺ \ll Ionization of C²⁺**
 ($8 \times 10^{20} / \text{m}^2\text{s}$)

C IV 発光強度分布

X点付近に集中



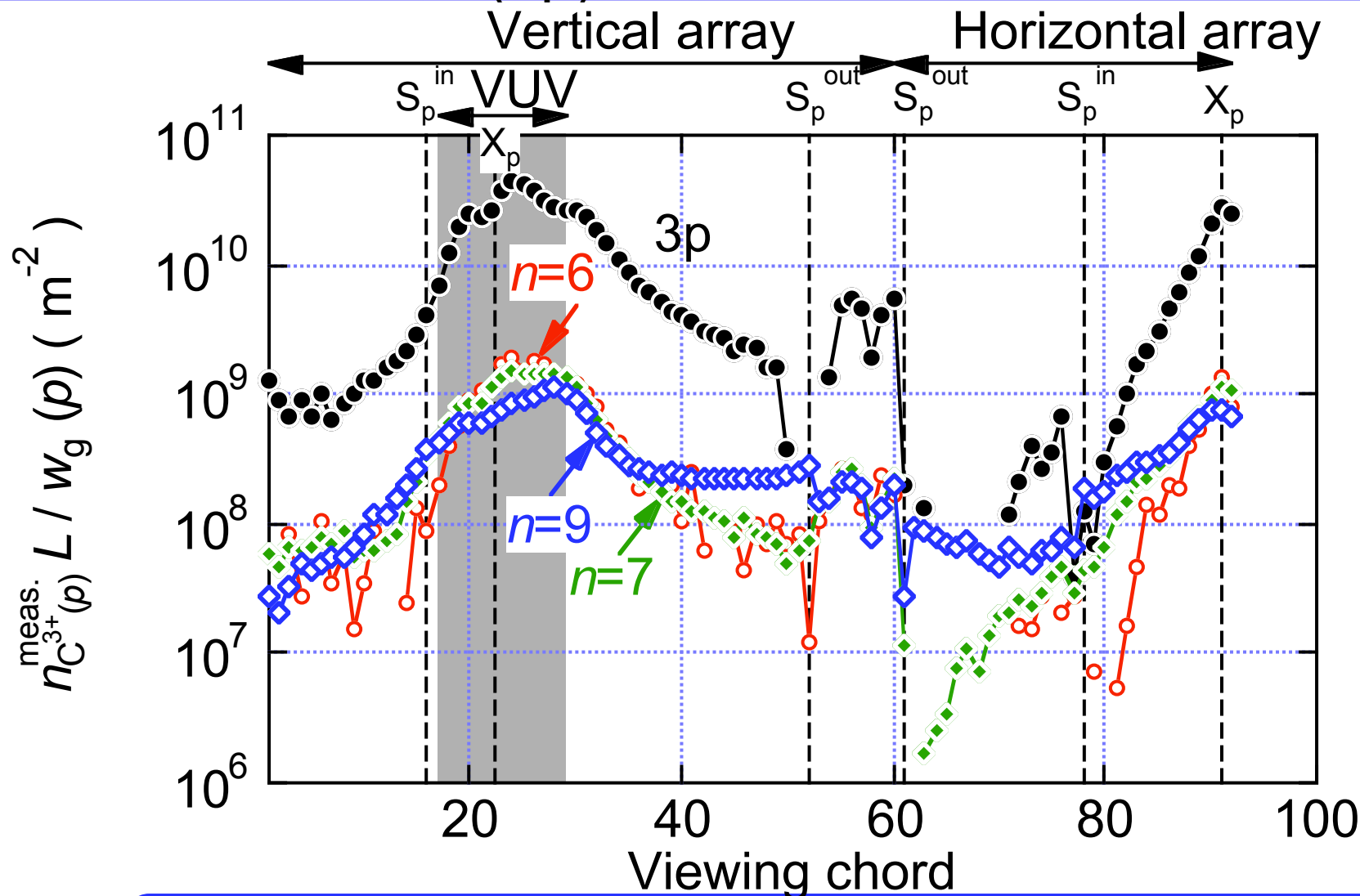
●発光強度と励起準位密度（ポピュレーション）の関係：

$$I(q \leftarrow p) = A(q \leftarrow p) \cdot n(p)$$

C IV ポピュレーション分布

低励起準位 (3p) 密度が高い

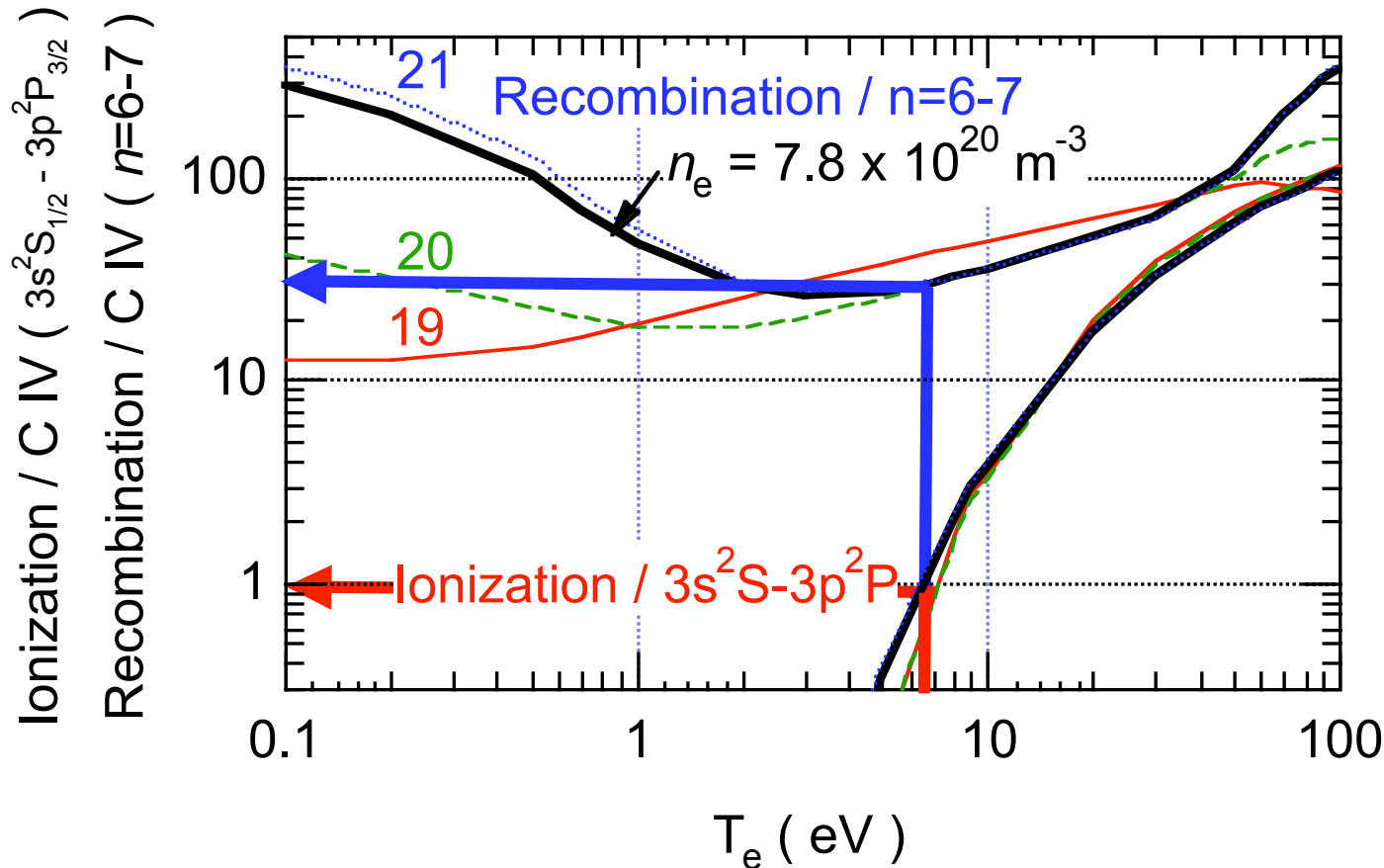
JT-60U



可視分光：低励起準位のデータが不足
=> 真空紫外分光のデータを併せて解析

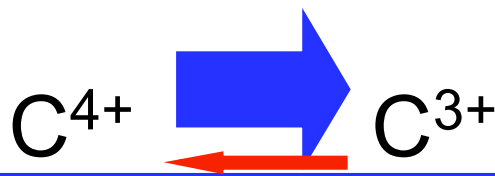
C³⁺ と C⁴⁺ の電離・再結合バランス

JT-60U-



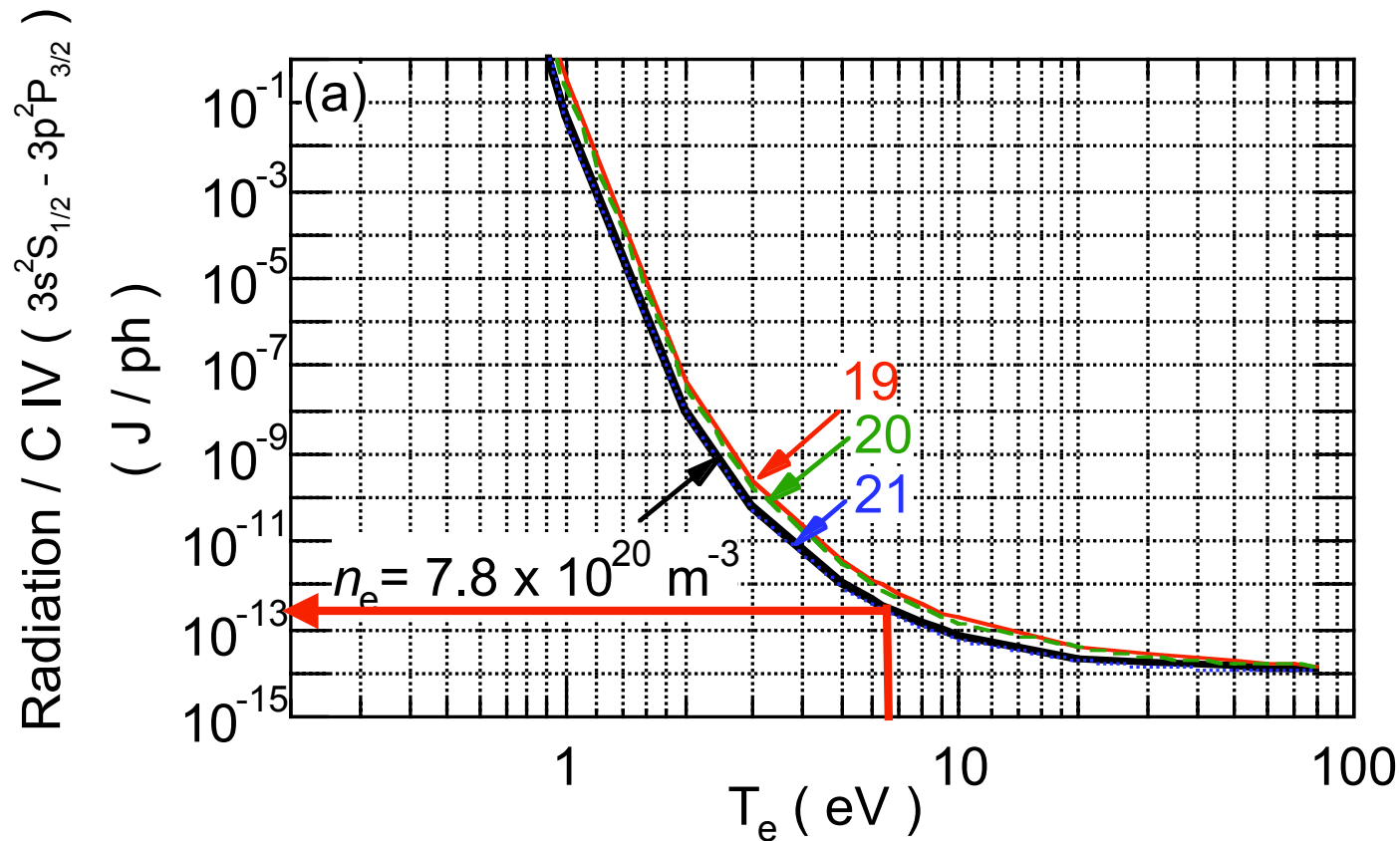
C⁴⁺ の再結合束 = $29 \times 7.5 \times 10^{18} = 2.2 \times 10^{20} / \text{m}^2\text{s}$

C³⁺ の電離束 = $1 \times 2.4 \times 10^{18} = 2.4 \times 10^{18} / \text{m}^2\text{s}$



C IV (C³⁺) の電離成分による放射パワー

JT-60U-



$$\text{Rad.} / \text{C IV (3s-3p)} = 3.3 \times 10^{-13} \text{ J/ph (6.3eV, } 7.8 \times 10^{20} \text{m}^{-3} \text{)}$$

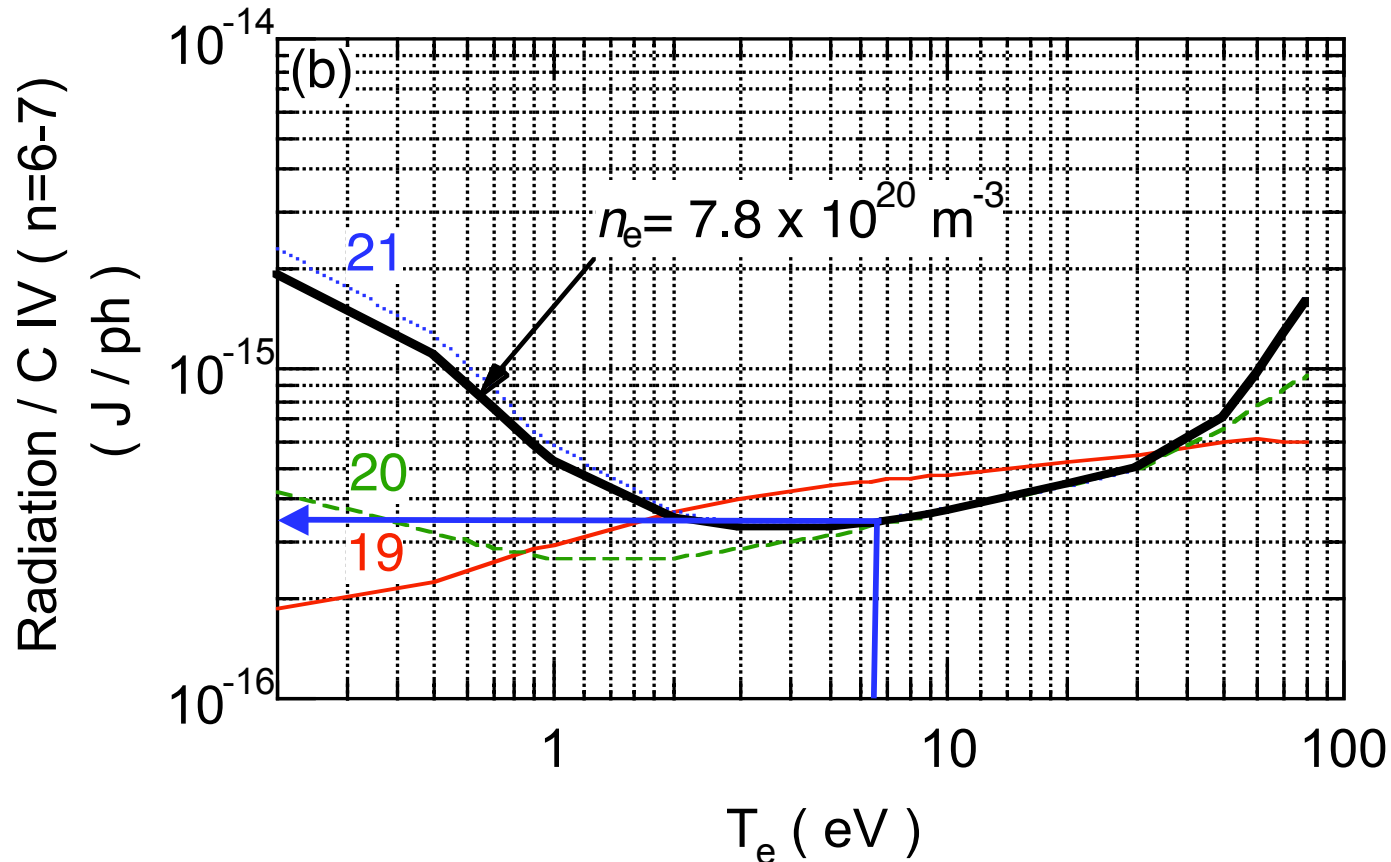
$$\text{C IV (3s-3p)} = 2.4 \times 10^{18} \text{ ph/m}^2\text{s}$$

$$\Rightarrow \text{放射パワー} = 0.8 \text{ MW / m}^2$$

~ 全放射パワー(ボロメータ 1.4 MW / m²)の 60 %

C IV (C⁴⁺) の再結合成分による放射パワー

JT-60U



$$\begin{aligned} \text{Rad / C IV (n=6-7)} &= 3.4 \times 10^{-16} \text{ J/ph} \\ \text{C IV (n=6-7)} &= 7.5 \times 10^{18} \text{ ph/m}^2\text{s} \\ \Rightarrow \text{放射パワー} &= 3 \text{ kW / m}^2 \\ &\sim \text{全放射パワー(ボロメータ)の} \sim 2\% \end{aligned}$$

Proposal: Measurement of W density from optically forbidden line

($W^{52+} 3d^4_{J=2} \leftarrow_{J=3}$ (M1): 354.6 nm)

(Nakano, JT-60U)

Background:

W is used for first wall or divertor tiles in present devices
for the test for ITER.

- AUG : first wall,
- JT-60U : divertor tiles (1/18 outer divertor tiles)
- TEXTOR : test limiter
- JET : divertor tiles (planned)

Difficulty for determining the core W density
by X-ray, VUV spectrometer:

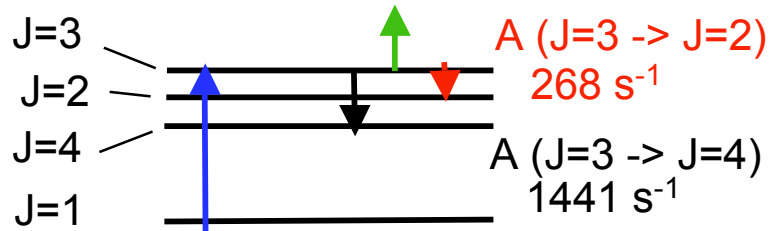
- Many lines blended -> difficult line identification, even charge state
- Calibration of sensitivity -> uncertainty of the W density

Visible spectroscopy overcomes these difficulties.

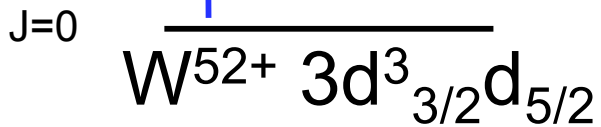
Model:

JT-60U

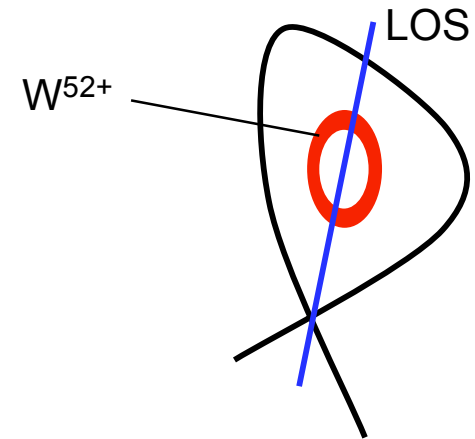
Ionization by e impact (2 keV)
 $S_4: 1.2 \times 10^{-18} \text{ m}^3/\text{s}$



Excitation by D impact (4 keV)
 (= e impact (1 eV))
 $C(J=0 \rightarrow 3) : 8.3 \times 10^{-19} \text{ m}^3/\text{s}$



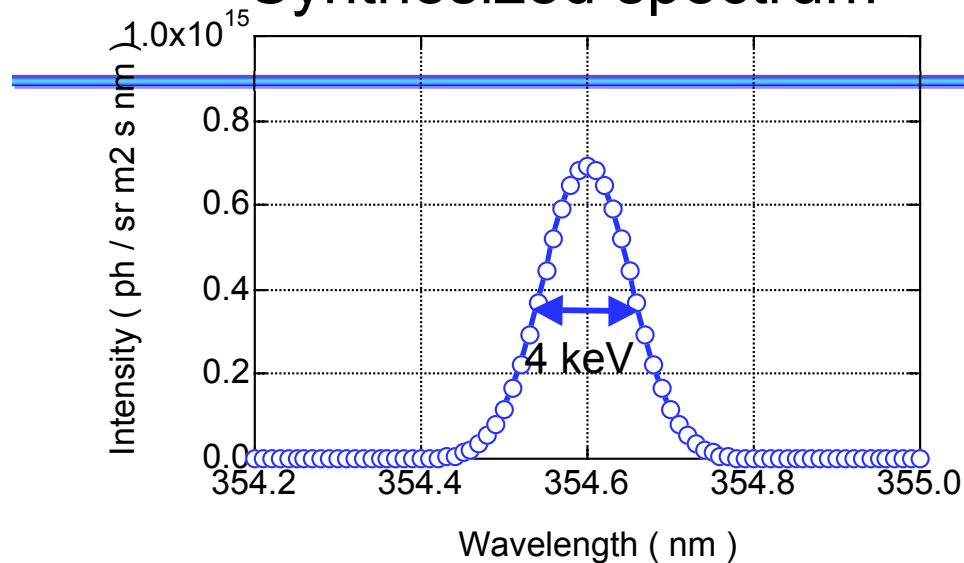
Assumption :
 $T_e = 2 \text{ keV}$
 $n_e = 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
 $T_D = 4 \text{ keV}$
 $n_D = 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
 $n_{W^{52+}}/n_e = 0.01\%$
 $L = 0.1 \text{ m}$



$$I_{32}L = \frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31} + n_e S_4} n_e C_{03} n_{W^{52+}}$$

$$= 9.2 \times 10^{13} \text{ ph / m}^2 \text{ sr s}$$

Synthesized spectrum



Around detection limit =>
Long exposure ~ sec
Back-illuminated EM-CCD
Fiber ~ mm(ϕ)

Target in JT-60U:

W-contaminated plasma ($P_{NB} > 15$ MW, S_p^{out} on W tile)

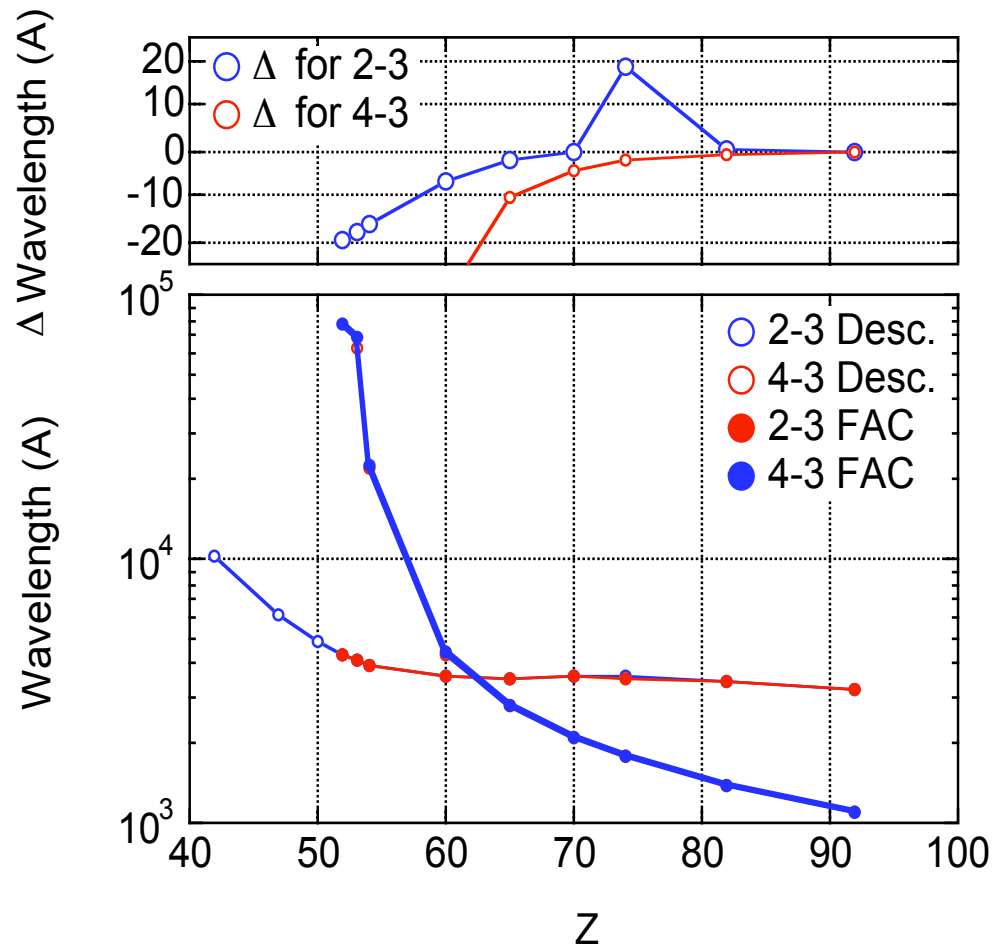
Reversed Shear plasma (accumulation & sheilding of W)

Probable collaboration:

- LHD : W ball (~mm) injection
- AUG : first wall (comparison of VUV and Visible)
- JET : divertor (2007?)
- TEXTOR : W-test limiter
- DIII-D : W on Dimes
- C-mod : W-bar?

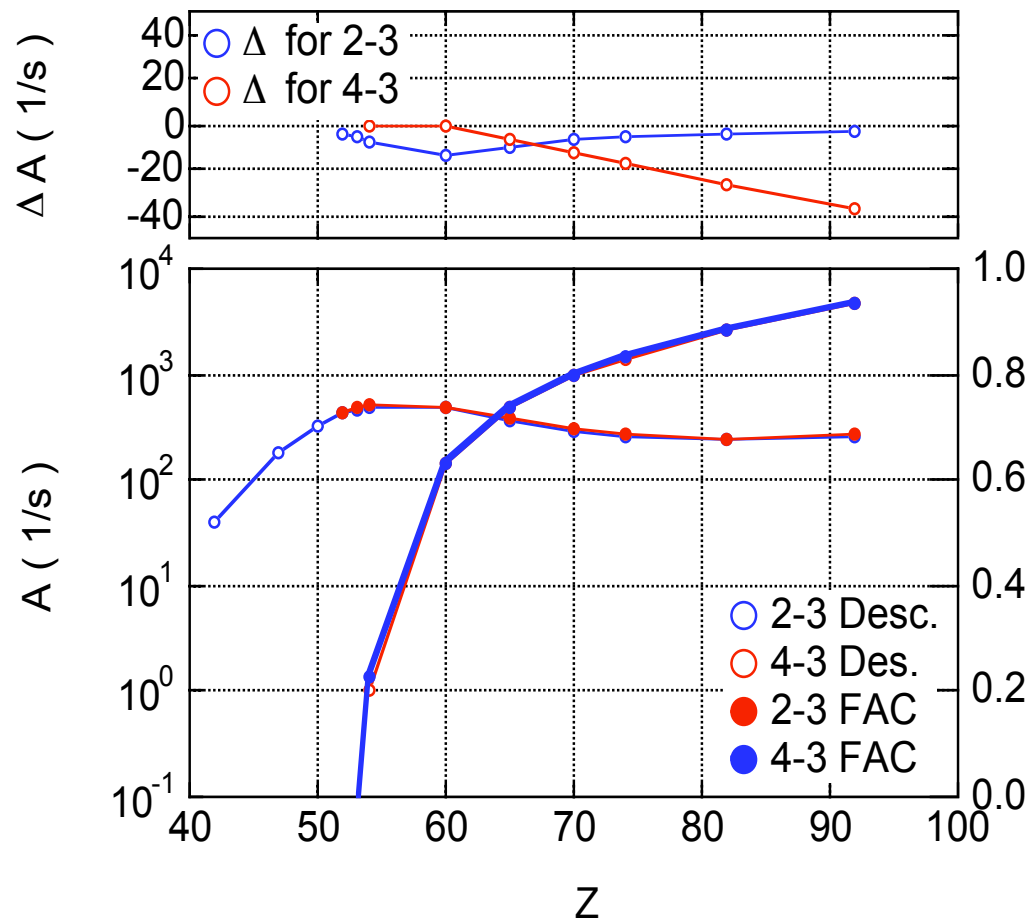
Comparison of Desc. and FAC (wavelength):

JT-60U



Comparison of Desc. and FAC (A coefficient):

JT-60U



W⁵²⁺ 3d⁴ J=2 ← J=3 : 3626.7 Å を用いた

タングステン密度計測の検討 JT-60U

電離 (2 keV 電子衝突)

$$S_4 : 1.2 \times 10^{-18} \text{ m}^3/\text{s}$$

仮定 :

$$T_e = 2 \text{ keV}$$

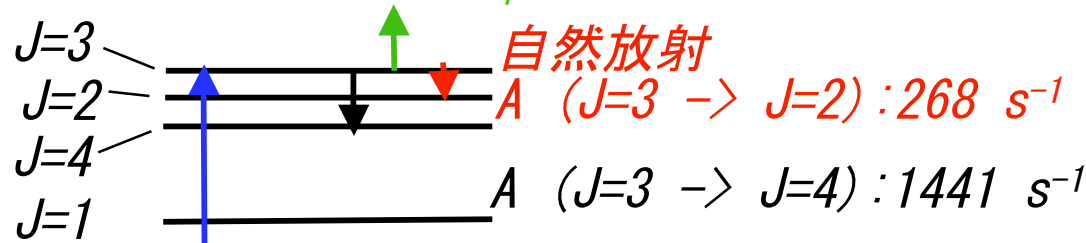
$$n_e = 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$$

$$T_D = 4 \text{ keV}$$

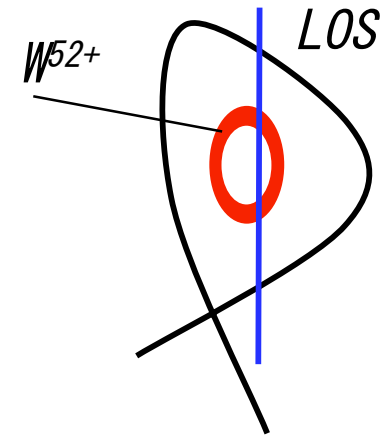
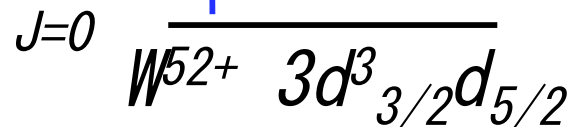
$$n_D = 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$$

$$n_{W^{52+}}/n_e = 0.01\%$$

$$L = 0.1 \text{ m}$$



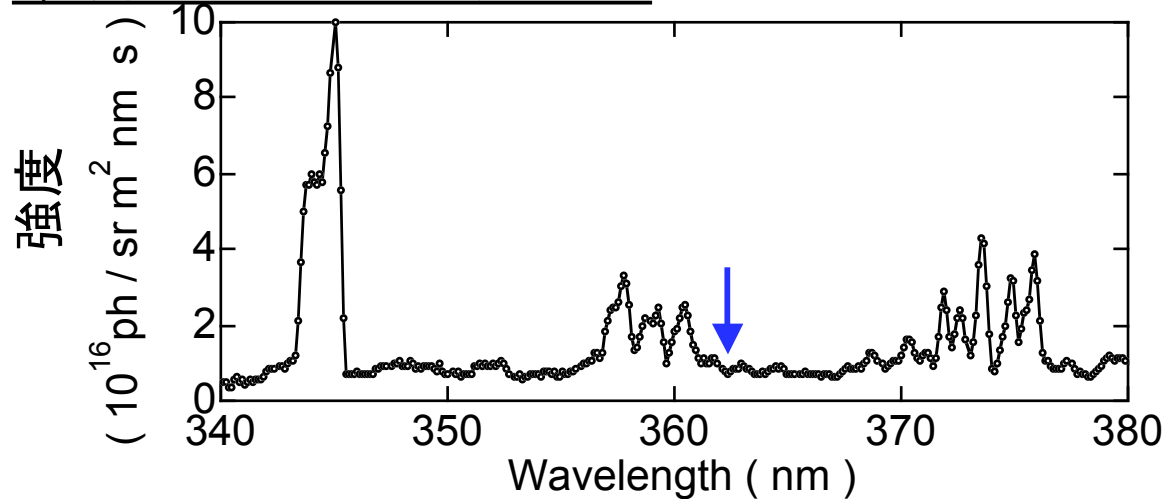
励起 (4 keV 重水素衝突)
 $C(J=0 \rightarrow 3) : 8.3 \times 10^{-19} \text{ m}^3/\text{s}$



$$\begin{aligned} \epsilon_{32} &= \frac{A_{32}}{A_{32} + A_{34} + n_e S_4} n_e C_{03} n_{W^{52+}} \\ &= 9.2 \times 10^{13} \text{ (ph / m}^2 \text{ sr s)} \end{aligned}$$

低 W^{52+} 密度のため $W^{52+} 3d^4_{J=2} \leftarrow_{J=3}$ は観測されず JT-60U

観測されたスペクトル



$T_e(0) \sim 3$ keV
 $n_e(0) \sim 4 \times 10^{19} m^{-3}$
 $Z_{eff} \sim 4.5$
 $\Rightarrow n_{W^{52+}}/n_e = 0.17\%$,
 (すべてが W^{52+} と仮定)

計算された W イオン密度分布

