

## 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での  
水素イオンの再結合二次元空間分布
- 高電離タングステンイオンのスペクトル解析

日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所  
仲野友英

# トカマク型核融合炉における粒子と熱の流れ

JT-60U-

## ●粒子の制御

### -密度制御: 核融合出力の制御

- 供給 (ガスパフ、ペレット、中性粒子ビームなど)
- 排気 (外部排気装置、壁)

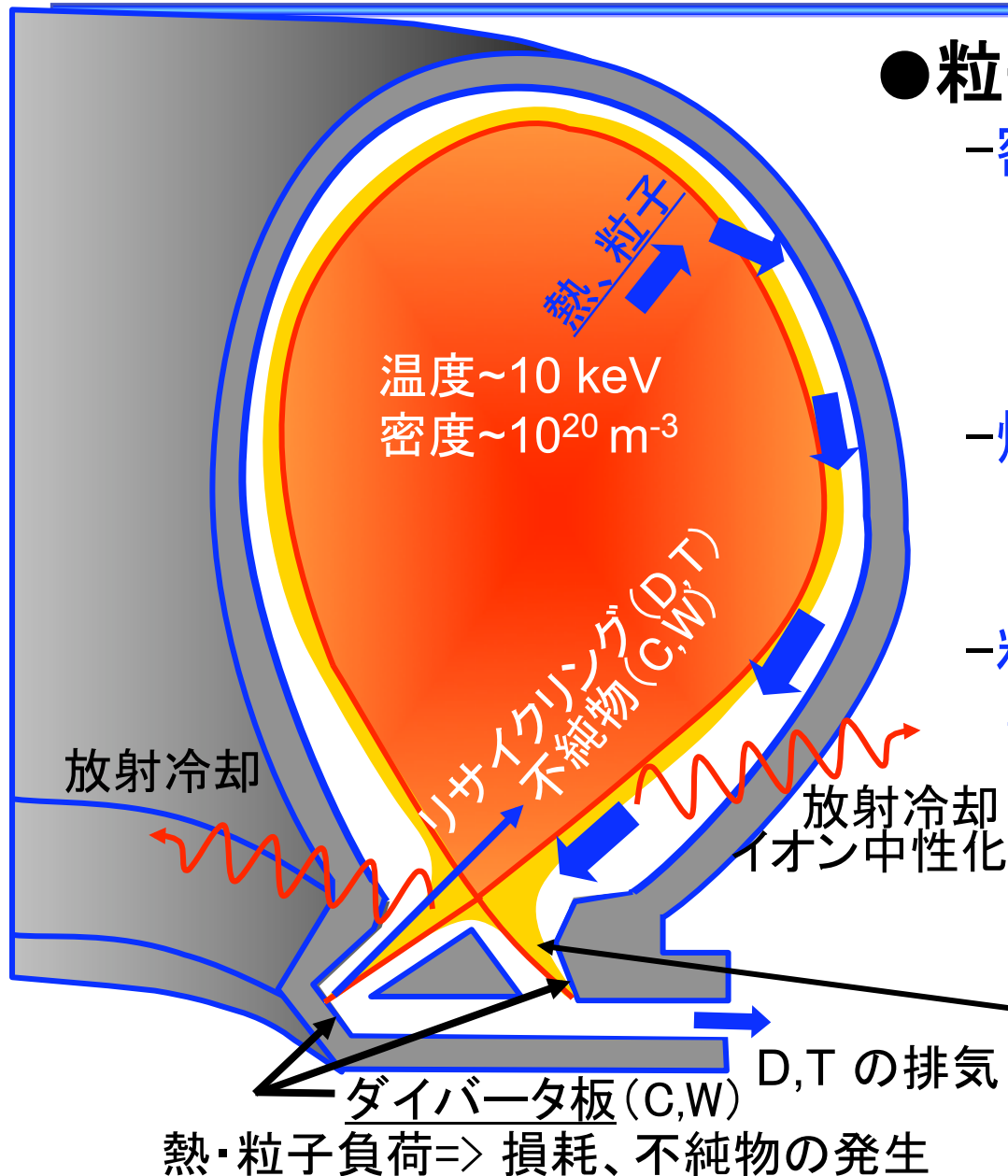
### -燃料純度: 同上

- 不純物の遮蔽、排出
- 中心燃料供給

### -粒子インヴェントリ(トリチウム):

安全上の運転制約、循環性、経済性

- 壁への吸収
- 不純物との供堆積



### ダイバータプラズマ

温度~0.5- 100eV

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

# トカマク型核融合炉における粒子と熱の流れ

JT-60U-

## ●熱の制御

-放射冷却(周辺プラズマ):

ダイバータ板の保護

- 不純物入射 (Arなど)
- 低温・高密度化

=> 非接触ダイバータ

-低放射損失(主プラズマ):

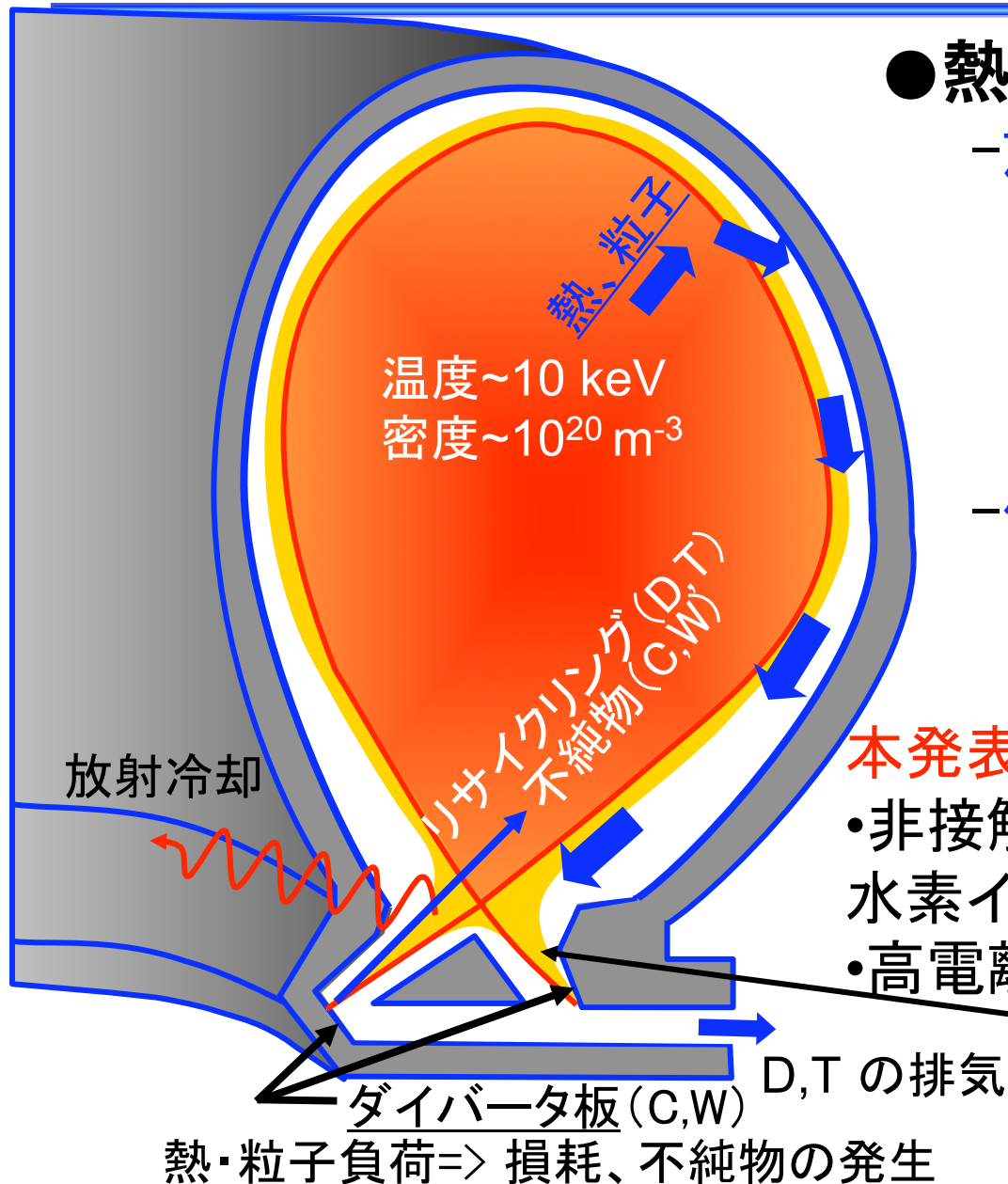
高温プラズマの維持

- 不純物の遮蔽、排出

=> 高Zほど放射率が高い

本発表:

- 非接触ダイバータプラズマでの水素イオンの体積再結合の空間分布
- 高電離タングステンイオンのスペクトル



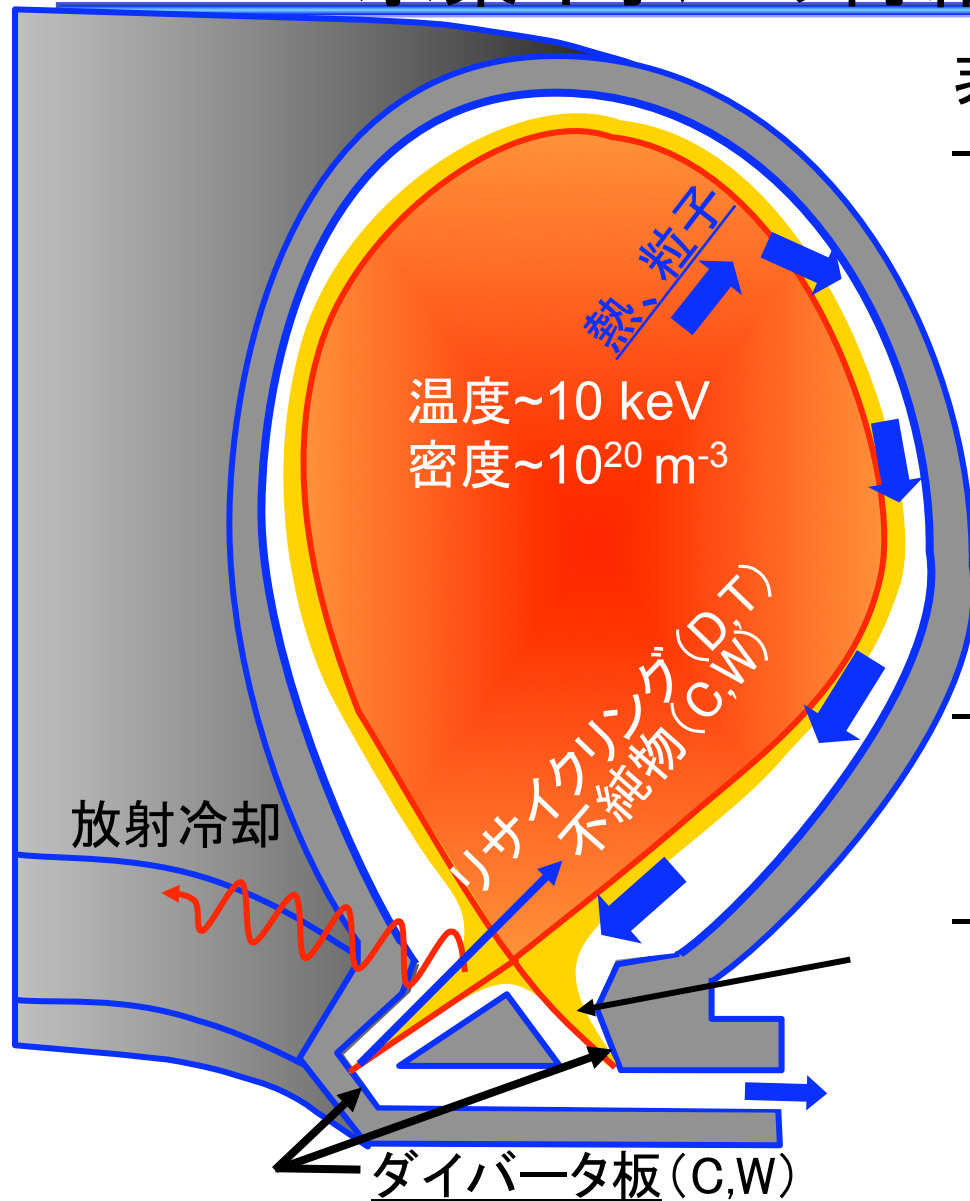
ダイバータプラズマ

温度 ~ 0.5- 100eV

密度 ~ (0.1- 50) x 10<sup>19</sup> m<sup>-3</sup>

# 非接触ダイバータプラズマでの 水素イオンの再結合二次元空間分布

JT-60U



非接触プラズマ:

-磁力線に沿ったイオン流束が急激に減少し、ダイバータ板にプラズマが接触しない状態

- シースによる衝突エネルギーの増加がない
- 表面再結合エネルギーを放射として散逸

⇒ ダイバータ板への熱負荷低減

-炭素イオンの体積再結合 (JT-60U)

温度 $\sim 6$  eV、密度 $\sim 5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$

放射の90%が $\text{C}^{2+}$ と $\text{C}^{3+}$ による

-水素イオンの体積再結合

温度 $\sim 0.5$  eV、密度 $\sim 1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$

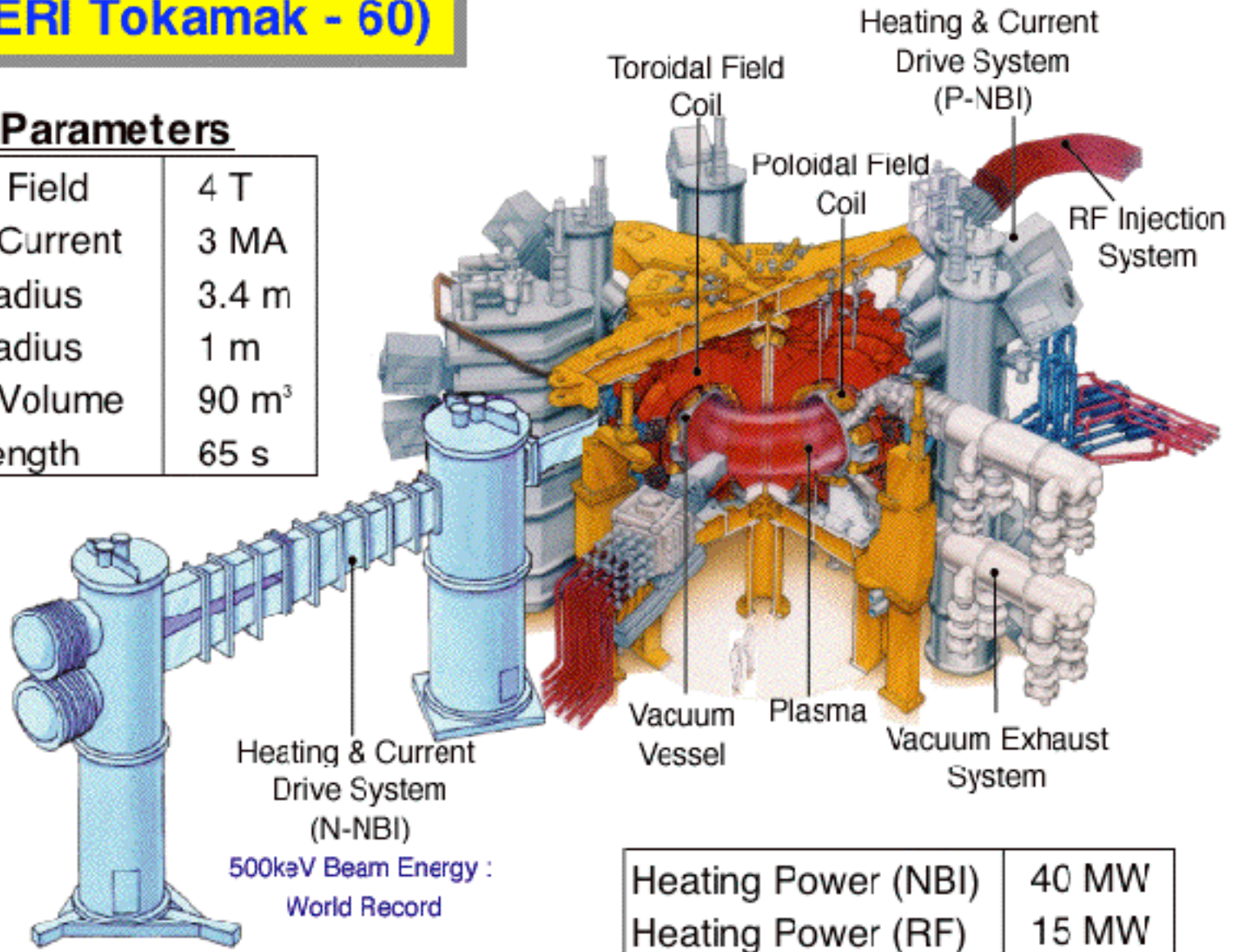
再結合束 $\sim$ ダイバータ板へのイオン束

$\text{D}_\alpha$ 発光強度が高い(再結合による発光では説明できない)

# JT-60 (JAERI Tokamak - 60)

## Main Parameters

Toroidal Field	4 T
Plasma Current	3 MA
Major Radius	3.4 m
Minor Radius	1 m
Plasma Volume	90 m <sup>3</sup>
Pulse Length	65 s

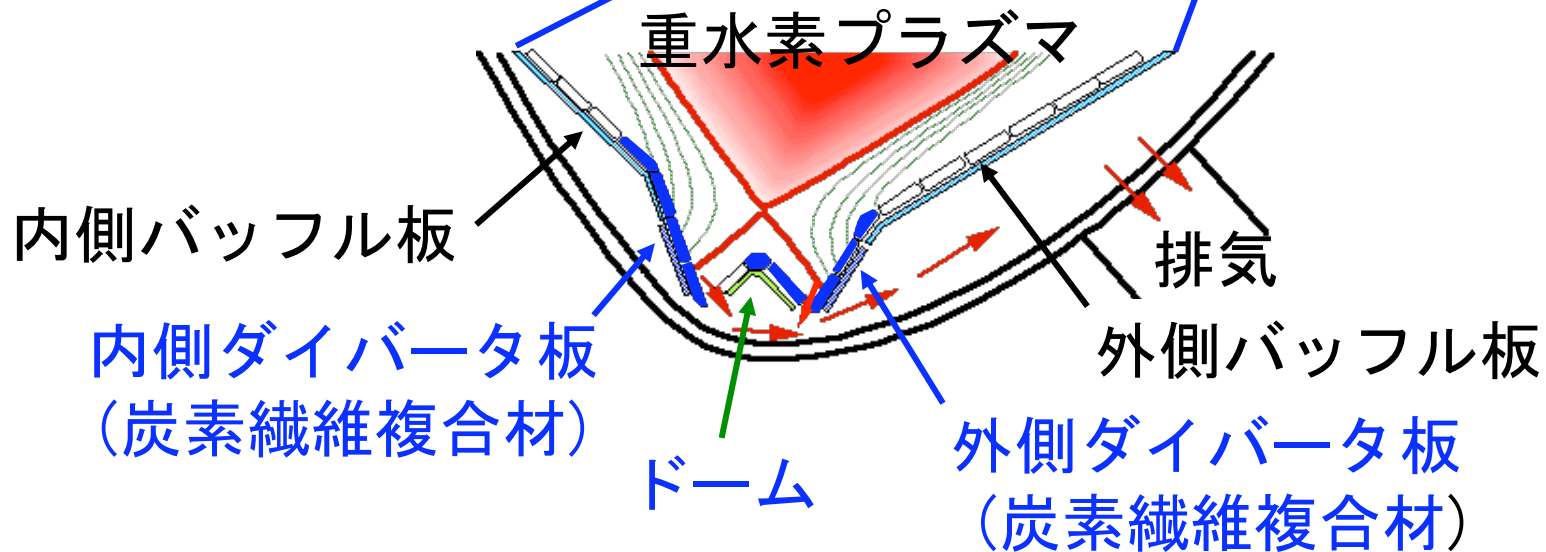
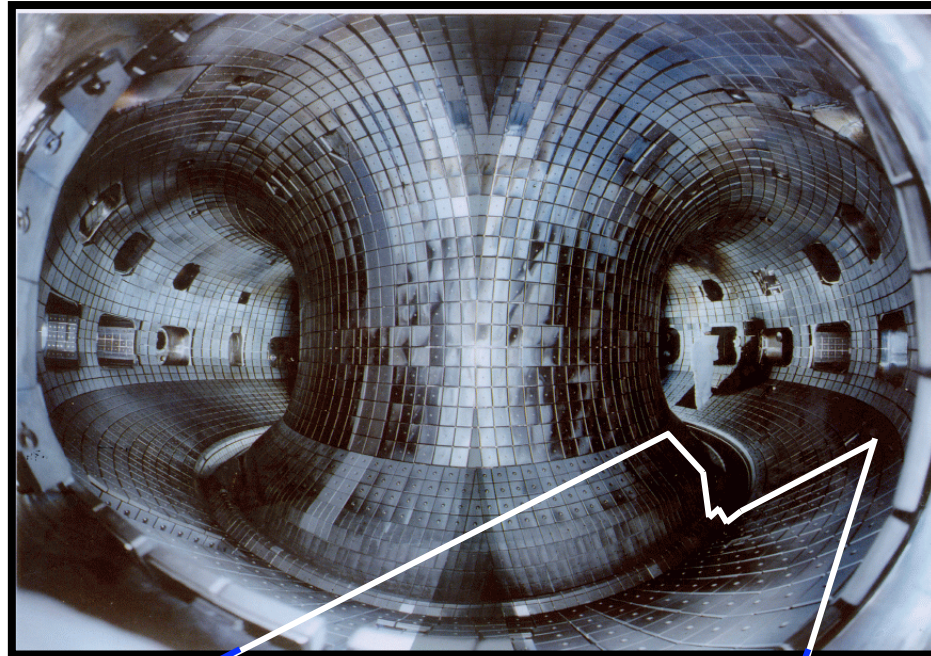


Heating & Current Drive System (N-NBI)  
500keV Beam Energy :  
World Record

Heating Power (NBI)	40 MW
Heating Power (RF)	15 MW

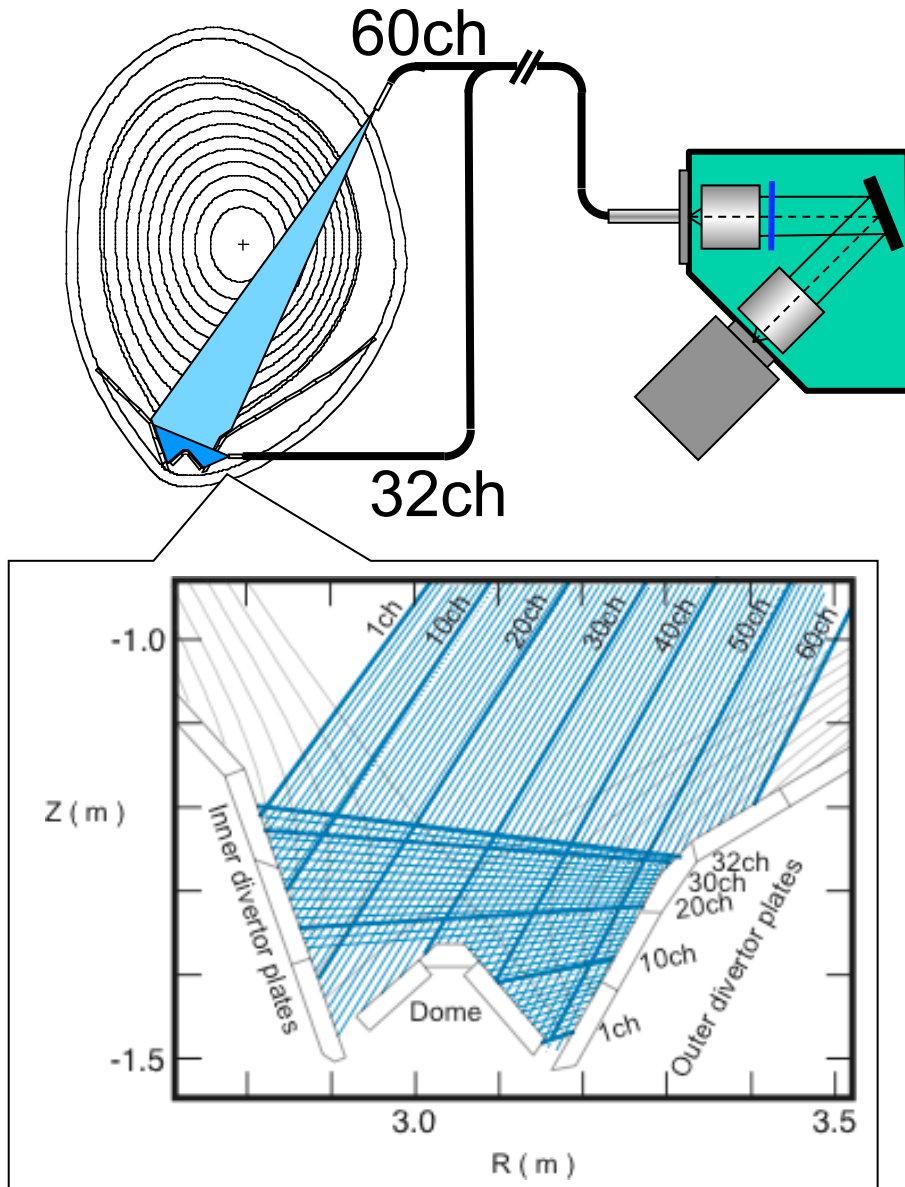
# JT-60U ダイバータ

JT-60U-



# 二次元広帯域可視分光器

JT-60U-



## 分光器

- 明るさ : 2
- 焦点距離 : 0.2 m
- 回折格子 : 300 g/mm
- フィルター : 透過率6%@656nm  
FWHM~30nm

## CCD

- 背面照射
- ピクセルサイズ: 20 x 20  $\mu\text{m}$
- ピクセル数 : 1340 x 1300
- 時間分解能 : 300 ms

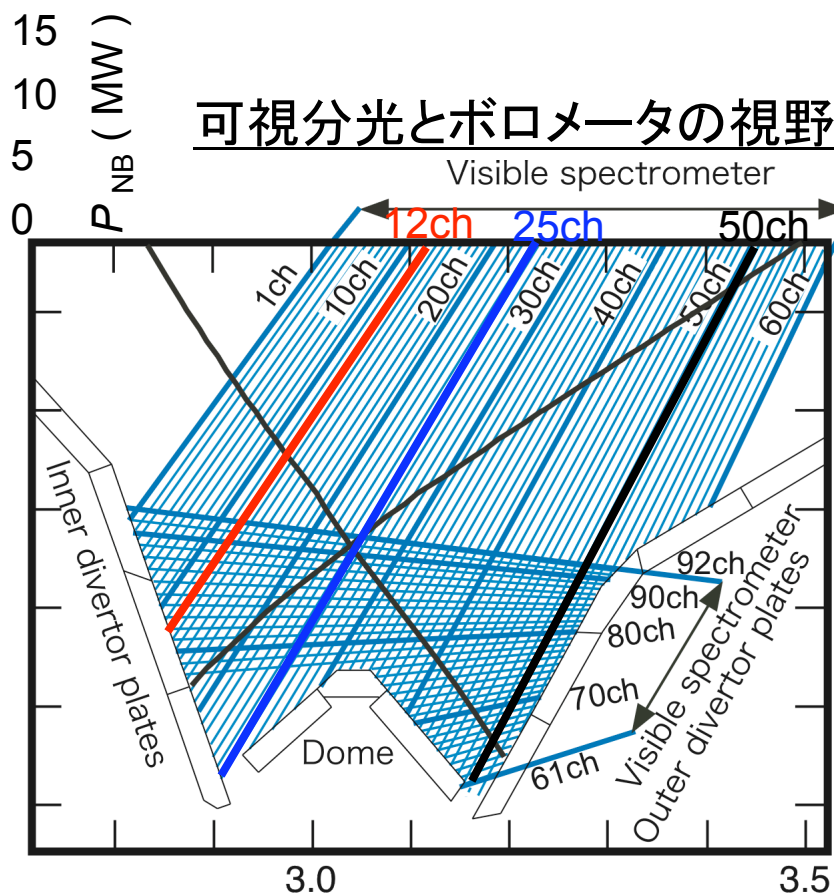
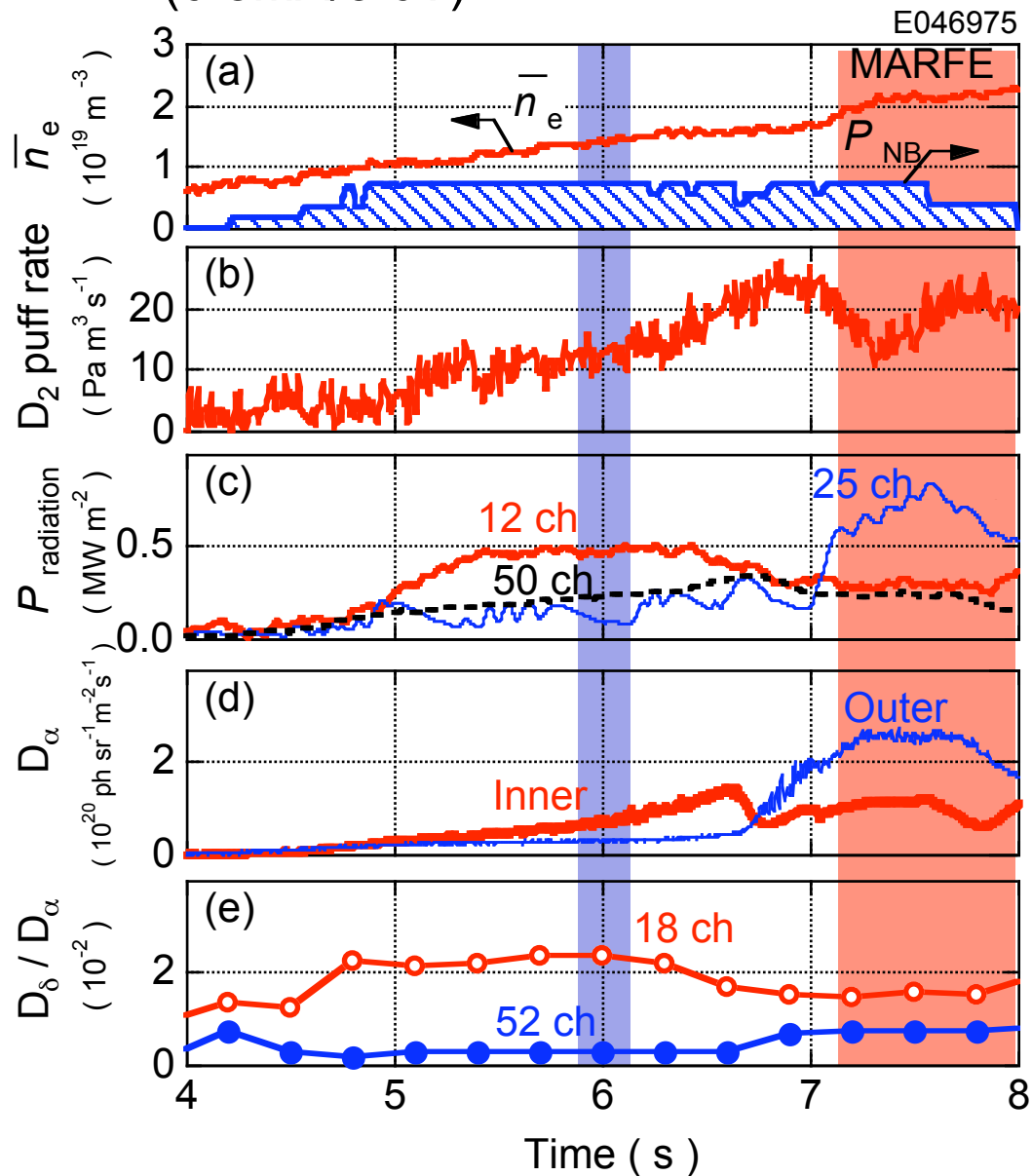
## 主要諸元

- 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)
- 空間分解能 (92ch):  
~ 1 cm

# 実験波形：Lモード、密度スキャン放電

JT-60U-

(0.8MA/3.6T)

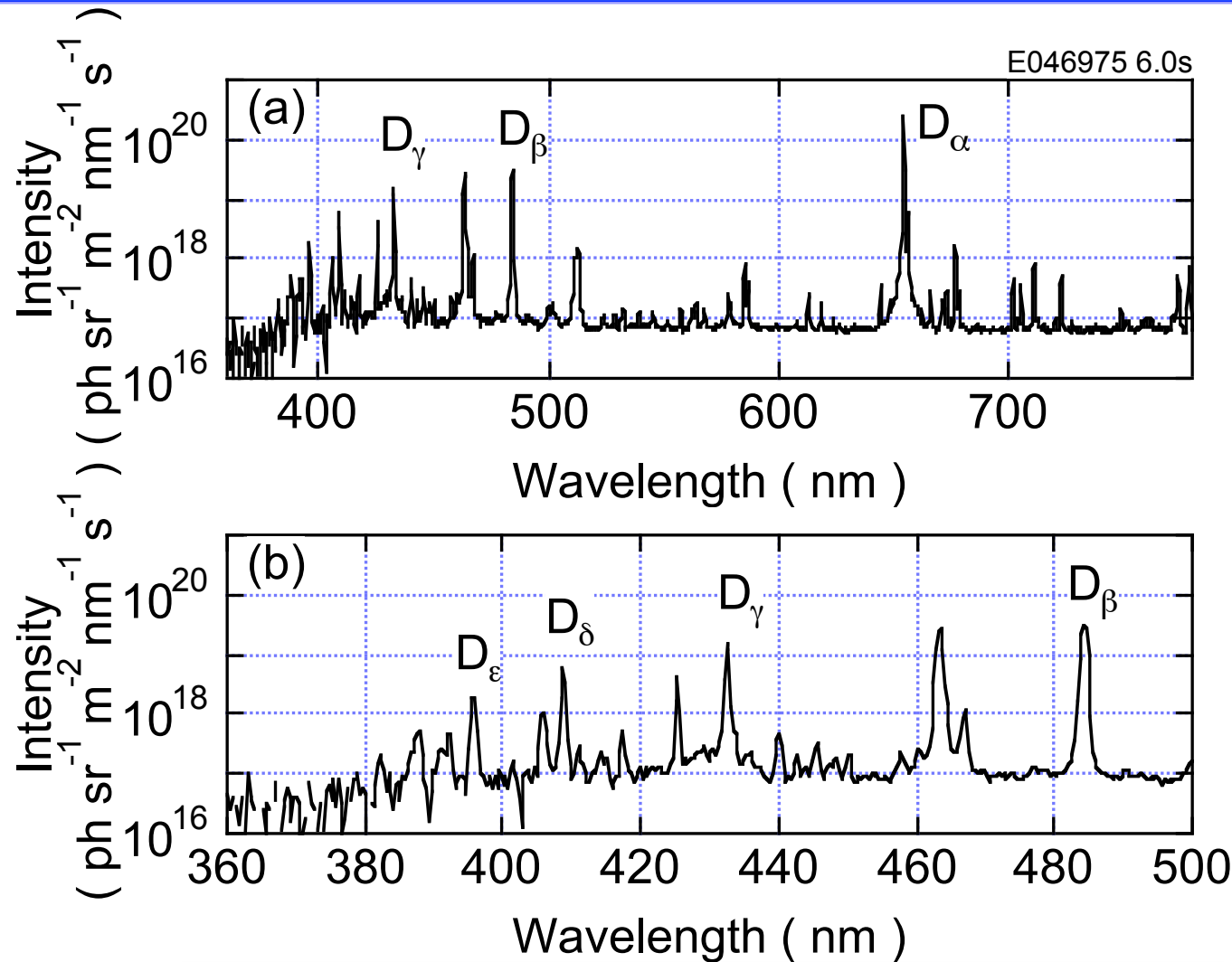


内側非接触状態  
 外側接触状態(t=6.0s)  
 を解析



# バルマー系列線を観測

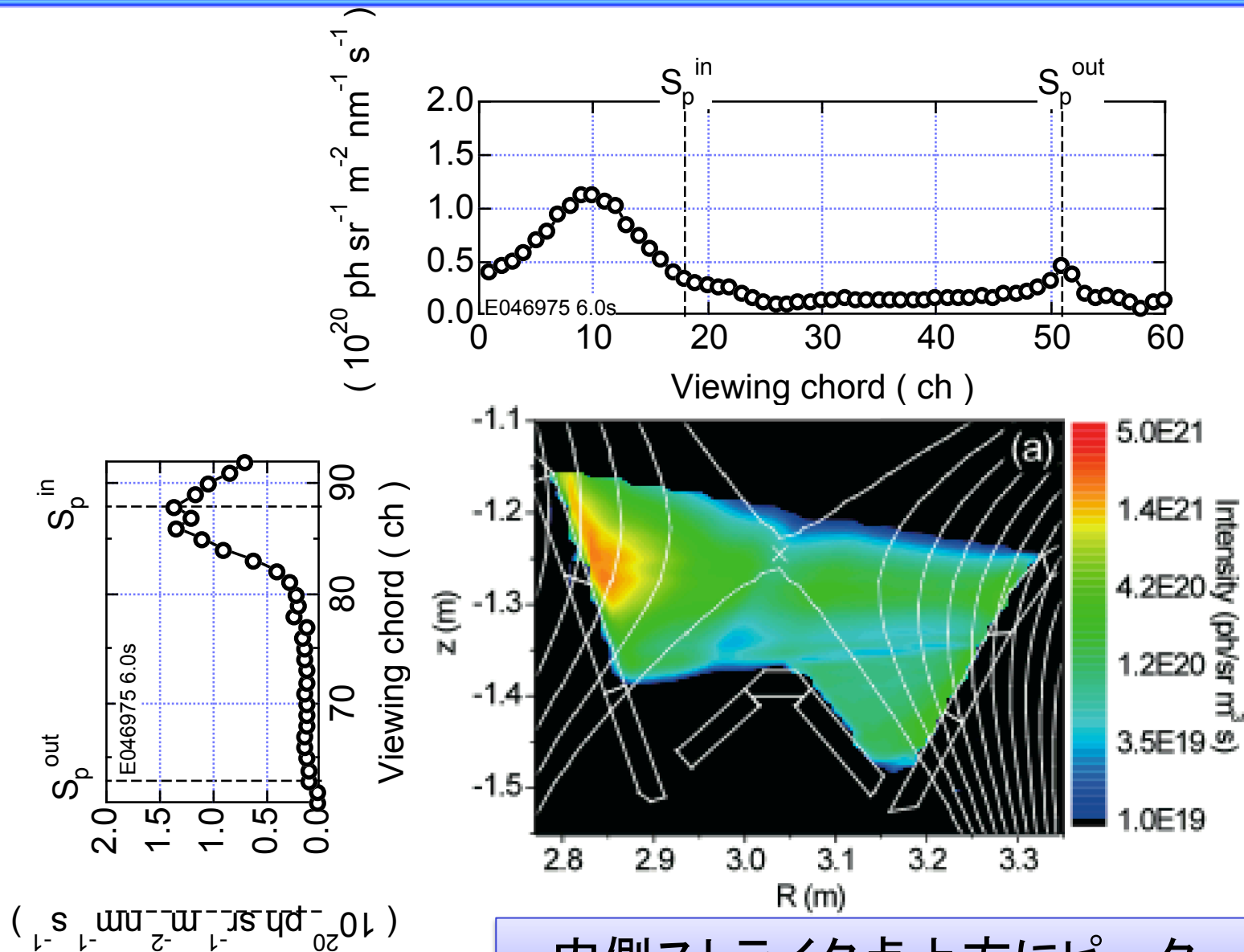
JT-60U-



二方向から同時計測(縦60ch、横32ch)  
=> トモグラフィーによる再生像 ( $D_\alpha - D_\delta$ )

# トモグラフィーによる再生像 ( $D_\alpha$ )

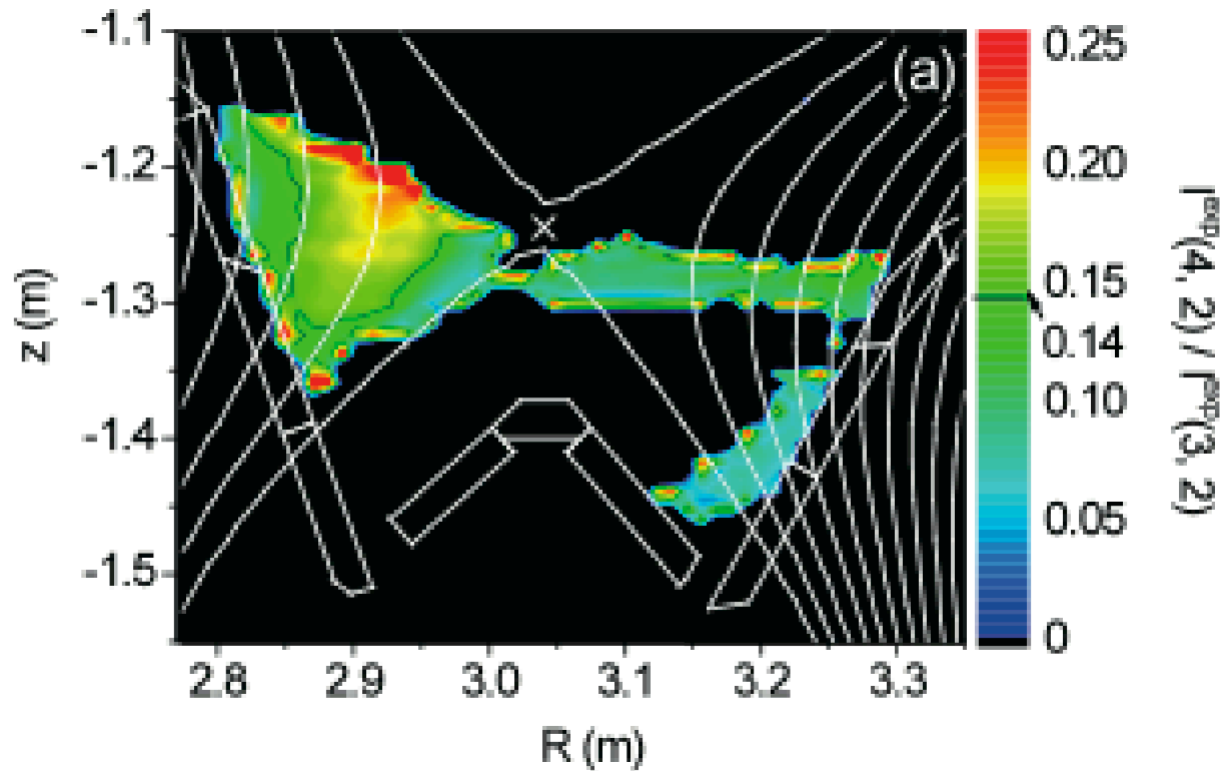
JT-60U-



内側ストライク点上方にピーク

# 発光強度比の二次元分布 ( $D_\beta / D_\alpha$ )

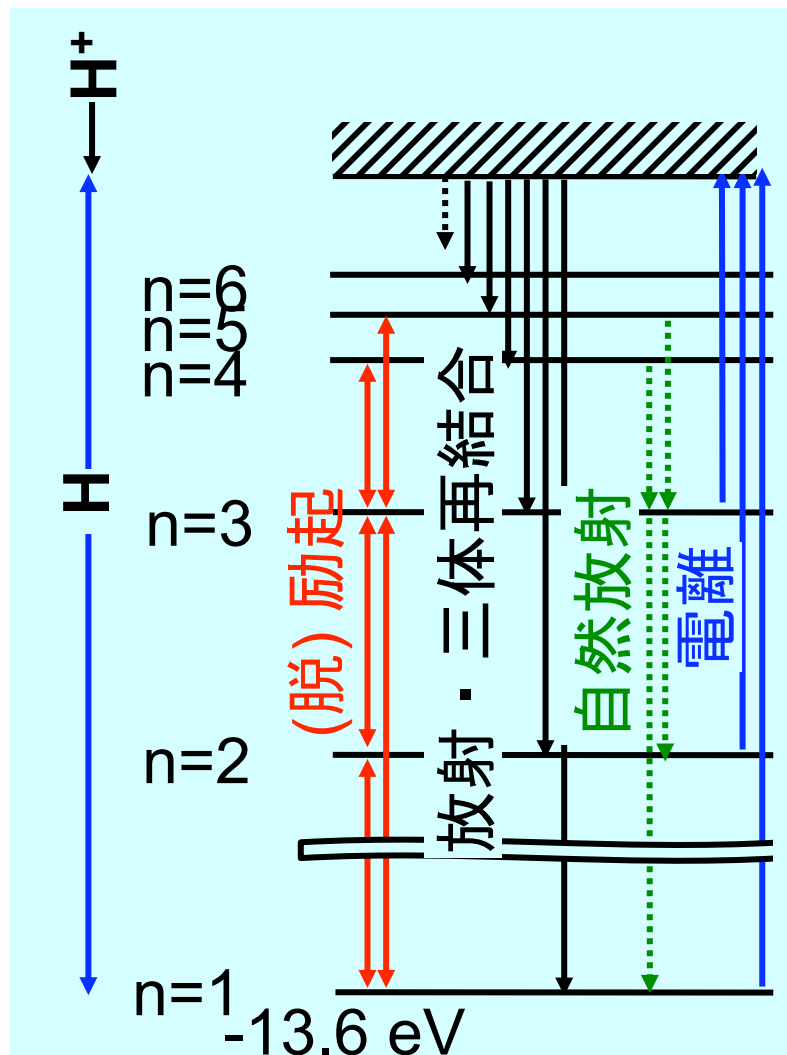
JT-60U-



$D_\alpha$  発光ピークの周りで高い  $D_\beta / D_\alpha$  ( $>0.15$ )

# 衝突放射モデル

JT-60U-



速度方程式の解（励起状態密度）；  
 $nH(p) = R_0(p)n_en_{H^+}$  (再結合成分)  
 $+ R_1(p)n_en_H$  (電離成分)

**D $\alpha$  強度（再結合成分）；**  
 $I_{D\alpha} = A(3,2)nH(3) = A(3,2)R_0(3)n_en_{H^+}$

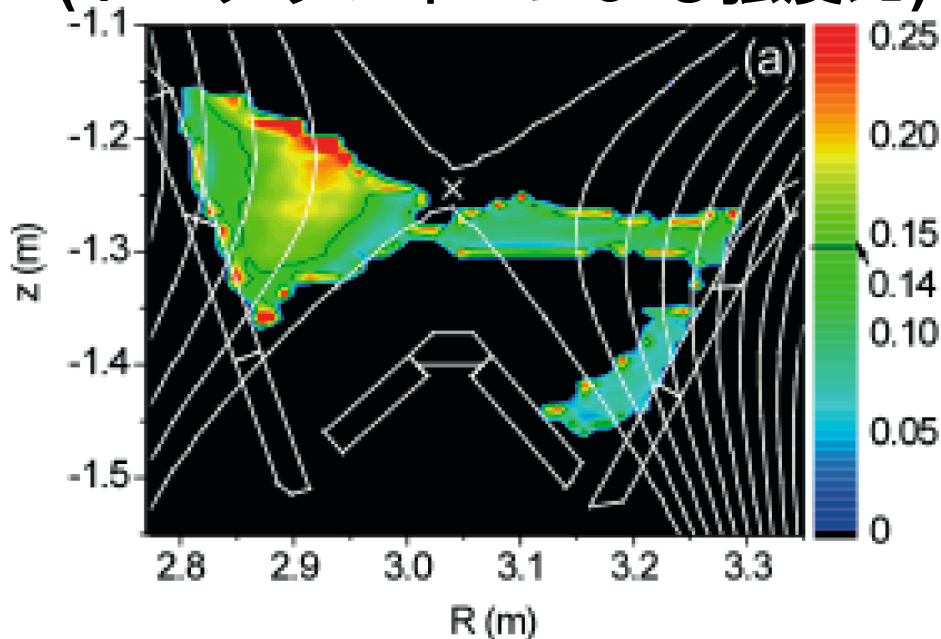
**D $\beta$  / D $\alpha$  強度比（再結合成分）；**  
 $I_{D\beta} / I_{D\alpha} = A(4,2)nH(4) / A(3,2)nH(3)$   
 $= A(4,2)R_0(4) / A(3,2)R_0(3)$

# 発光強度比の二次元分布 ( $D_\beta / D_\alpha$ )

JT-60U

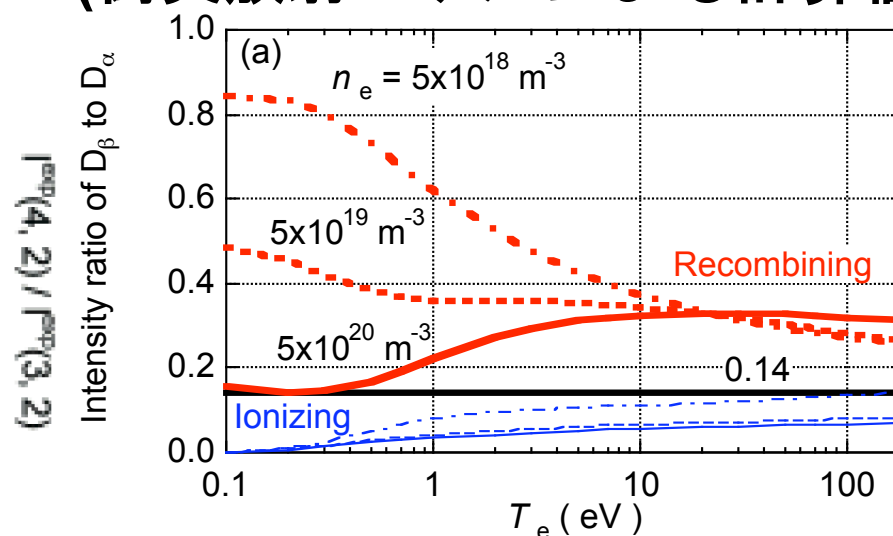
$D_\beta / D_\alpha$  強度比

(トモグラフィーによる強度比)



$D_\beta / D_\alpha$  強度比

(衝突放射モデルによる計算値)

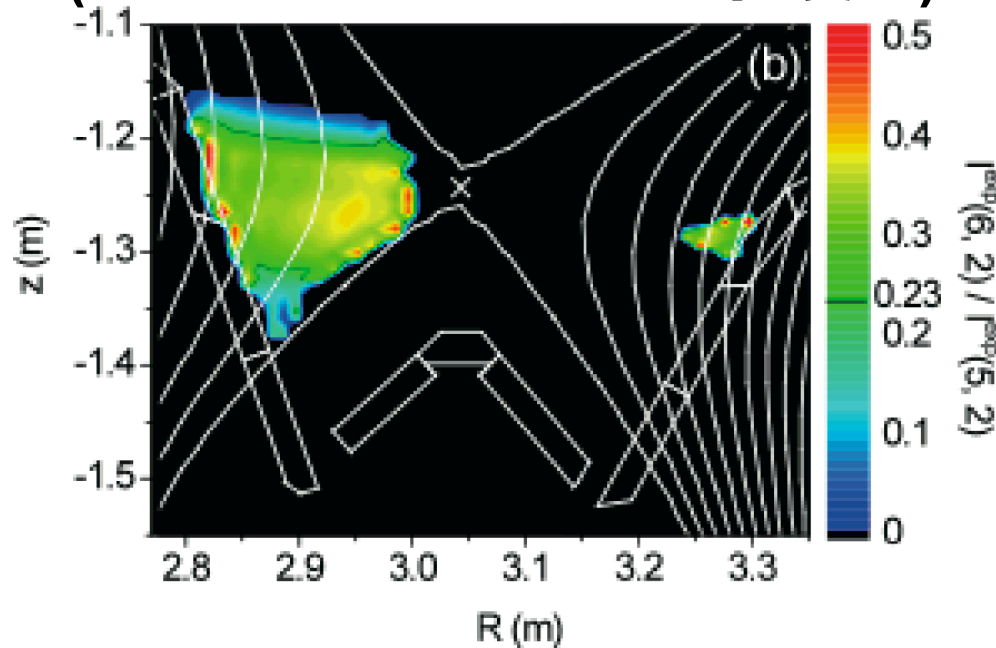


$D_\alpha$  発光ピークの周りで高い  $D_\beta / D_\alpha$  ( $>0.15$ )  
 $\Rightarrow D_\beta$  には再結合由来の発光が含まれる

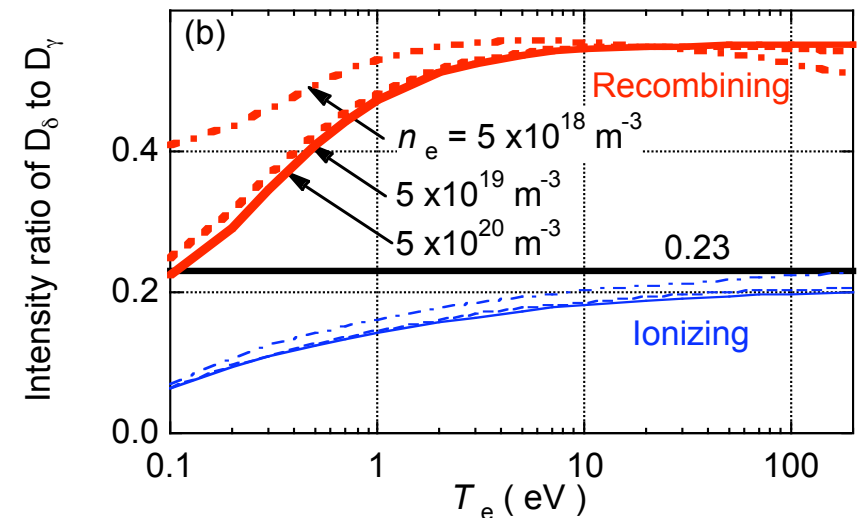
# 発光強度比の二次元分布 ( $D_\delta / D_\gamma$ )

JT-60U-

$D_\delta / D_\gamma$  強度比  
(トモグラフィーによる強度比)



$D_\delta / D_\gamma$  強度比  
(衝突放射モデルによる計算値)

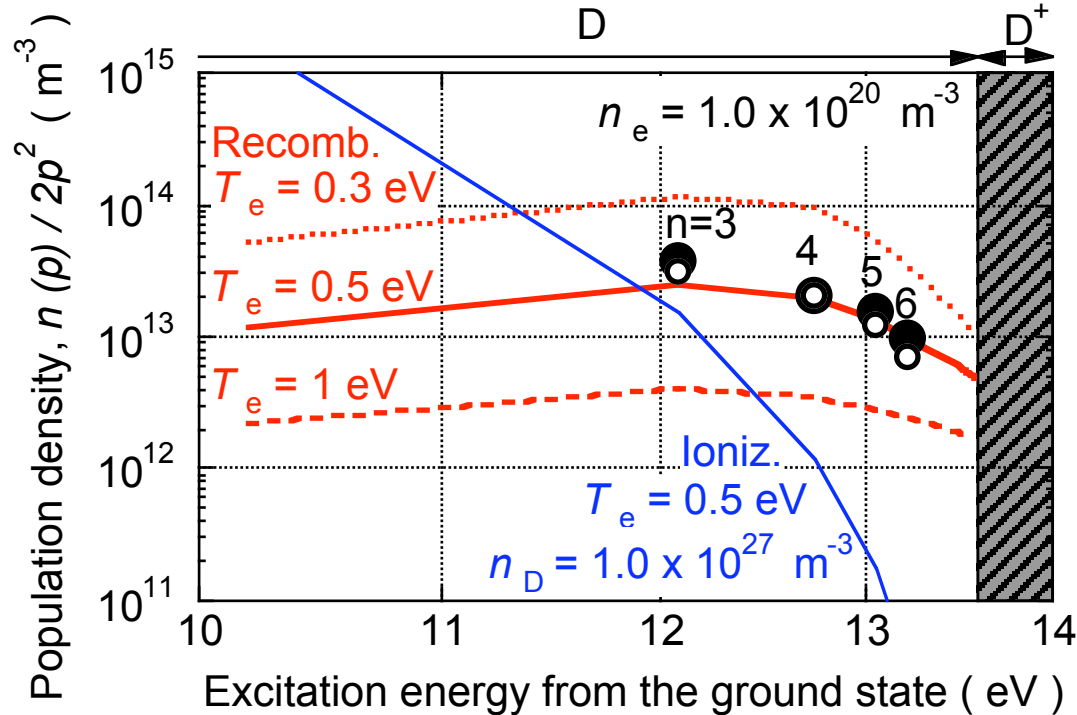


$D_\alpha$  発光ピーク上を含む内側ダイバータ領域全域で  
高い  $D_\delta / D_\gamma$  ( $>0.23$ )  
 $\Rightarrow D_\delta$  には再結合由来の発光が含まれる ( $T_e \sim 0.3-0.5 \text{ eV}$ )

# 局所ポピュレーションの解析

JT-60U-

- : 局所ポピュレーション
- : 線積分 (長さ0.07mを仮定)



局所ポピュレーションと  
線積分ポピュレーションの一致  
⇒十分なトモグラフィの精度

n=4,5,6 は衝突放射モデルと  
よく一致  
⇒再結合成分

n=3 は再結合成分でも電離成分  
でも説明できない  
⇒分子活性化再結合など考慮し  
ていない過程が効くであることを示唆

# まとめ

JT-60U-

非接触ダイバータプラズマ（内側非接触・外側接触）からのバルマー系列線を二次元計測し、トモグラフィーによる局所発光強度を導出、強度比を衝突放射モデルで解析した。

- トモグラフィーによる再生像の強度比の解析

内側ダイバータ全域で  $D_{\alpha}$  線に再結合成分が含まれる

⇒ 体積再結合は内側ダイバータ全域で生じている

( $T_e = 0.2-0.5$  eV)

- 局所ポピュレーションの解析

$n=4,5,6$  準位は再結合成分

⇒ パラメータを導出 ( $n_e = 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ,  $T_e = 0.5$  eV)

$n=3$  準位は再結合でも電離成分でも説明できない

⇒ 分子活性化再結合などほかの過程が効くことを示唆

今後

モンテカルロ輸送コード＋衝突放射モデルによる解析の継続



# 高電離タングステンイオンのスペクトル解析

JT-60U-

## ● 核融合プラズマの観点から

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

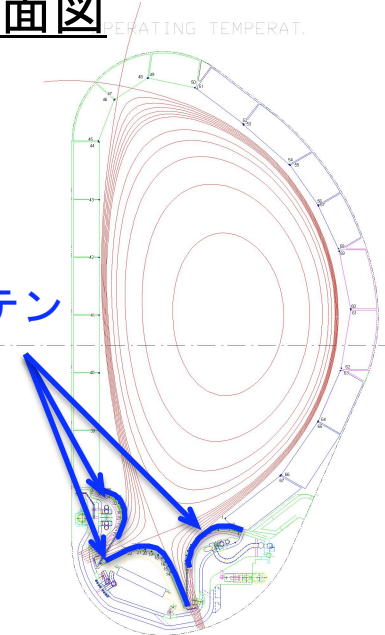
(許容されるプラズマへの混入量はきわめて低い:  $10^{-4}$ )

⇒ 蓄積しやすい傾向

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

ITER断面図

タングステン



## ● 原子物理学の観点から

原子番号が74、複雑な原子構造のため未開拓な研究分野\*

相対論的効果、電磁量子力学の効果が大きく、物理的にも興味深い

JT-60 の高温プラズマ(10keV)は高電離イオン(~60価)生成の能力を持つ

⇒ 原子物理的研究が実施可能で、その成果はプラズマ物理へ還元

# 2003年よりダイバータ板の一部をWに変更

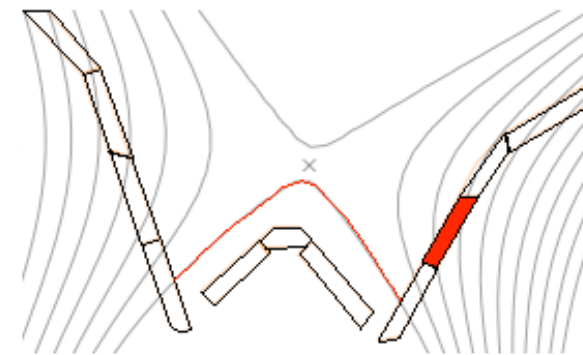
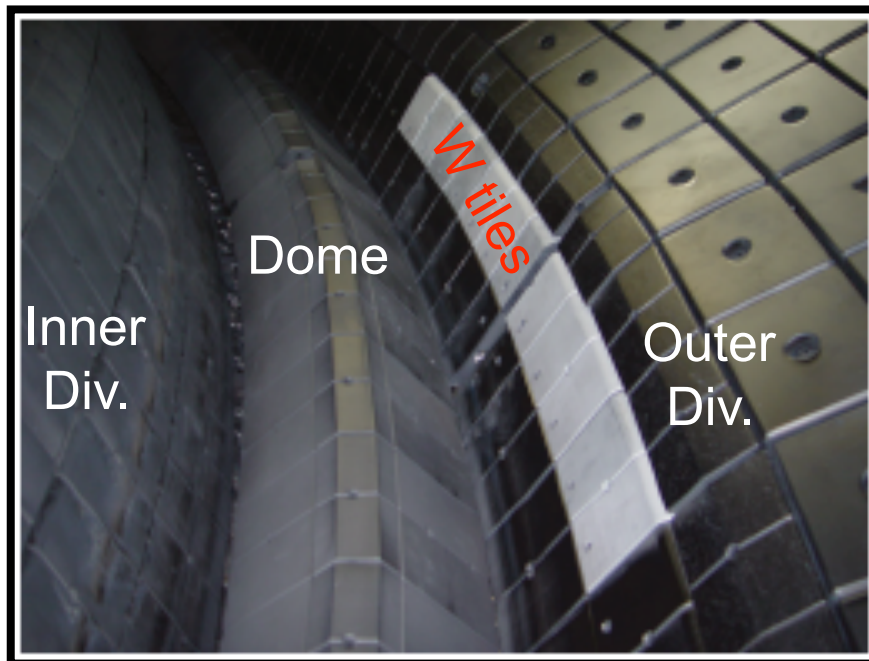
JT-60U-

Wタイル :

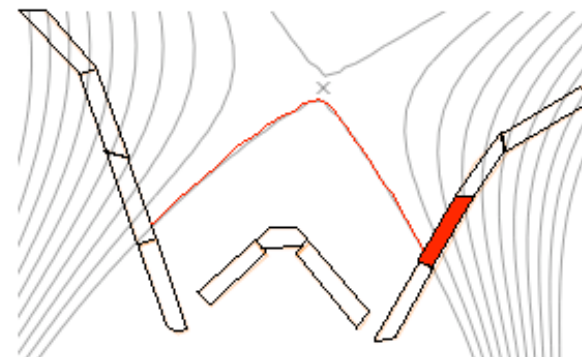
CFC上に厚さ 50 $\mu$ mのW(Re層マルチレイヤー有)を蒸着

設置場所と枚数: 全部で12枚 (トロイダル周回距離の1/21)

標準配位よりもやや上 ; 必要な時のみストライク点をW上に設置



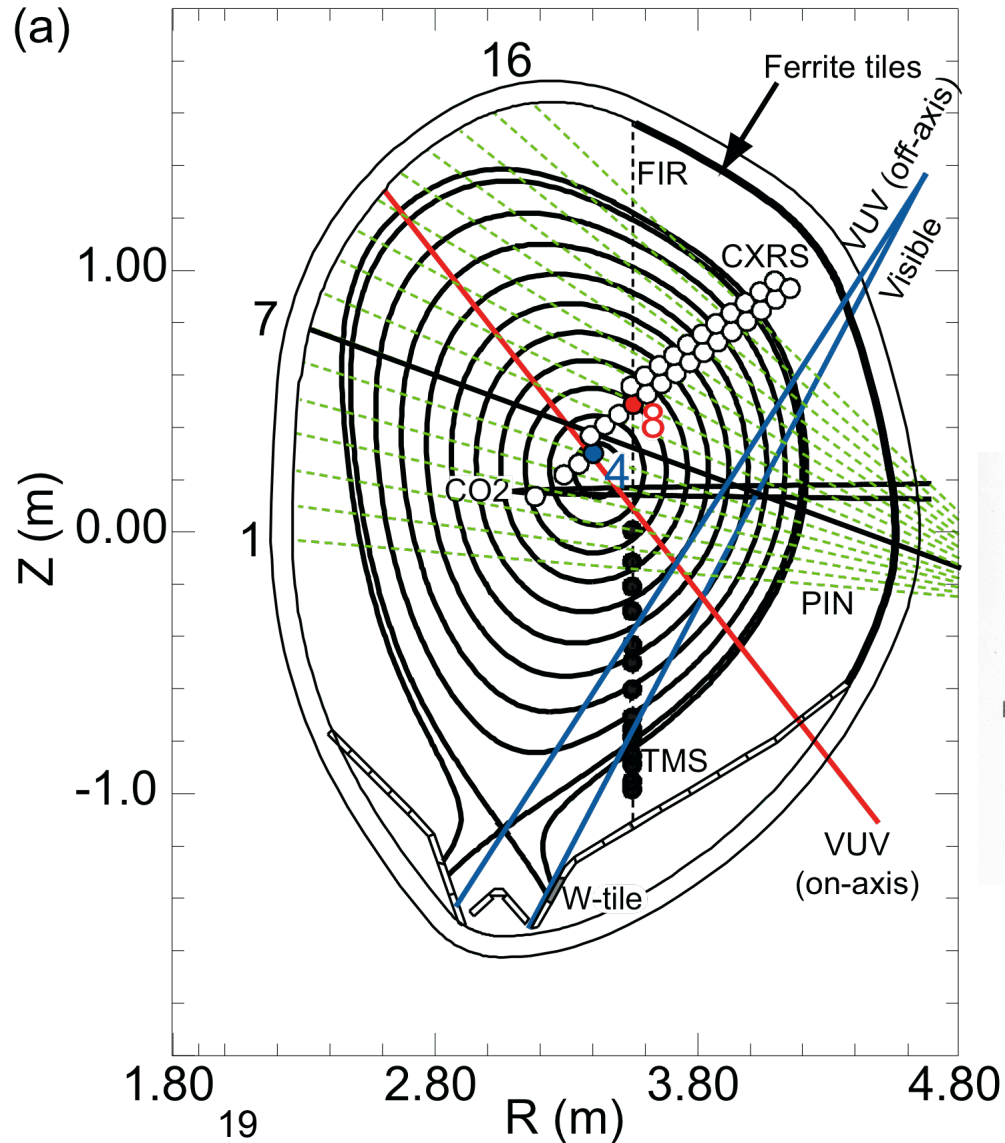
標準的  
配位



W実験  
用配位

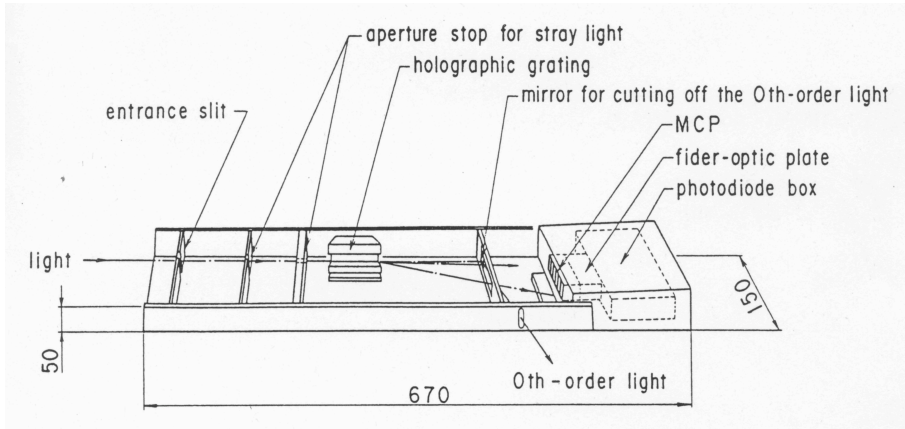
# 計測器

JT-60U-



## 平面結像型斜入射分光器 (各視線)

- 入射角 :  $89^\circ$
- 波長域 : 0.5 - 40 nm
- 波長分解能 : 0.01 nm @ 5 nm
- 時間分解能 : 20 ms
- **On-axis** : プラズマ中心を通る視線
- **Off-axis** : プラズマ周辺を通る視線

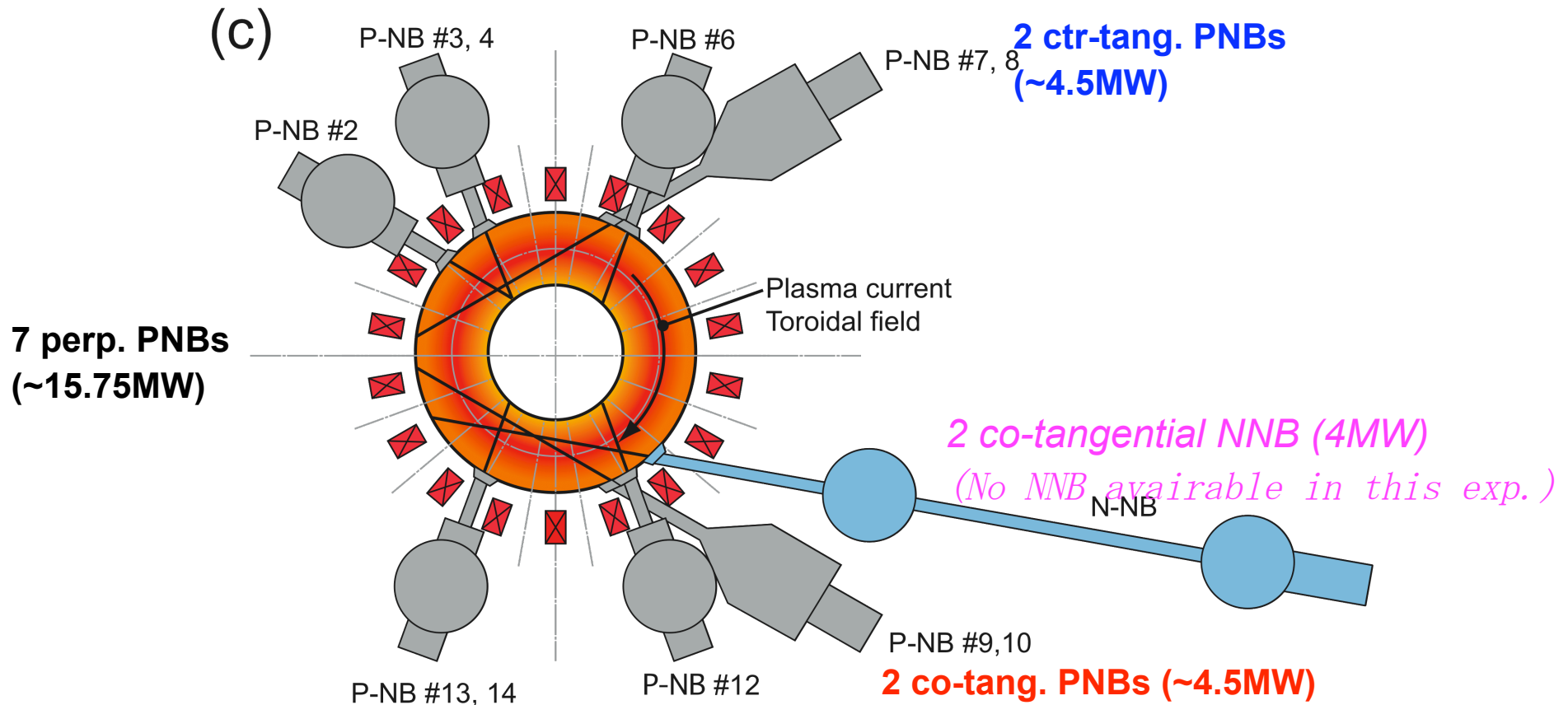


**PIN** 軟X線(>3keV)  
**CXRS** プラズマ回転

# 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



# 実験波形

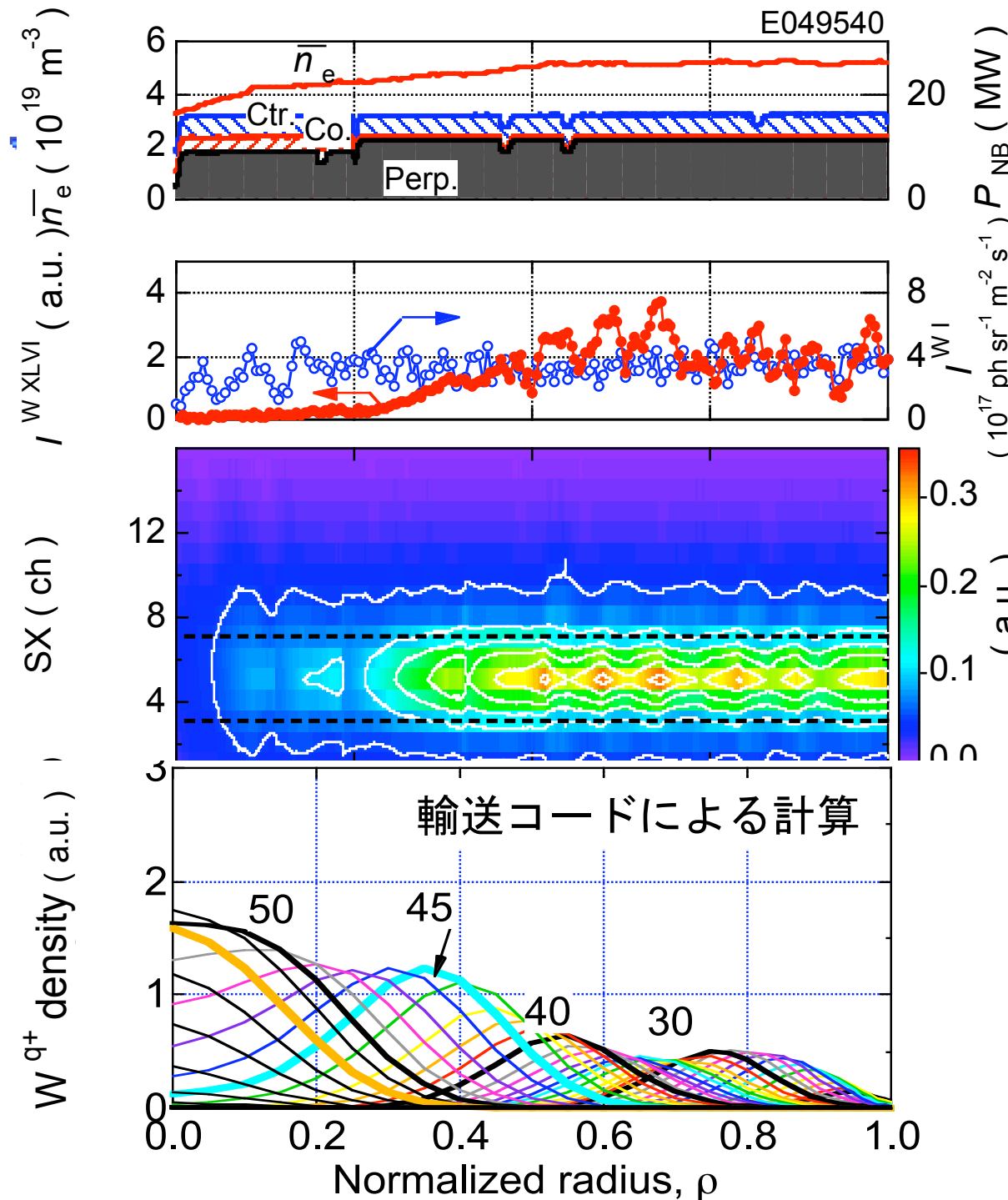
*JT-60U*

プラズマ電流と逆方向の回転とともに W XLVIが増加

W XLVI と中心部の SX の波形は対応

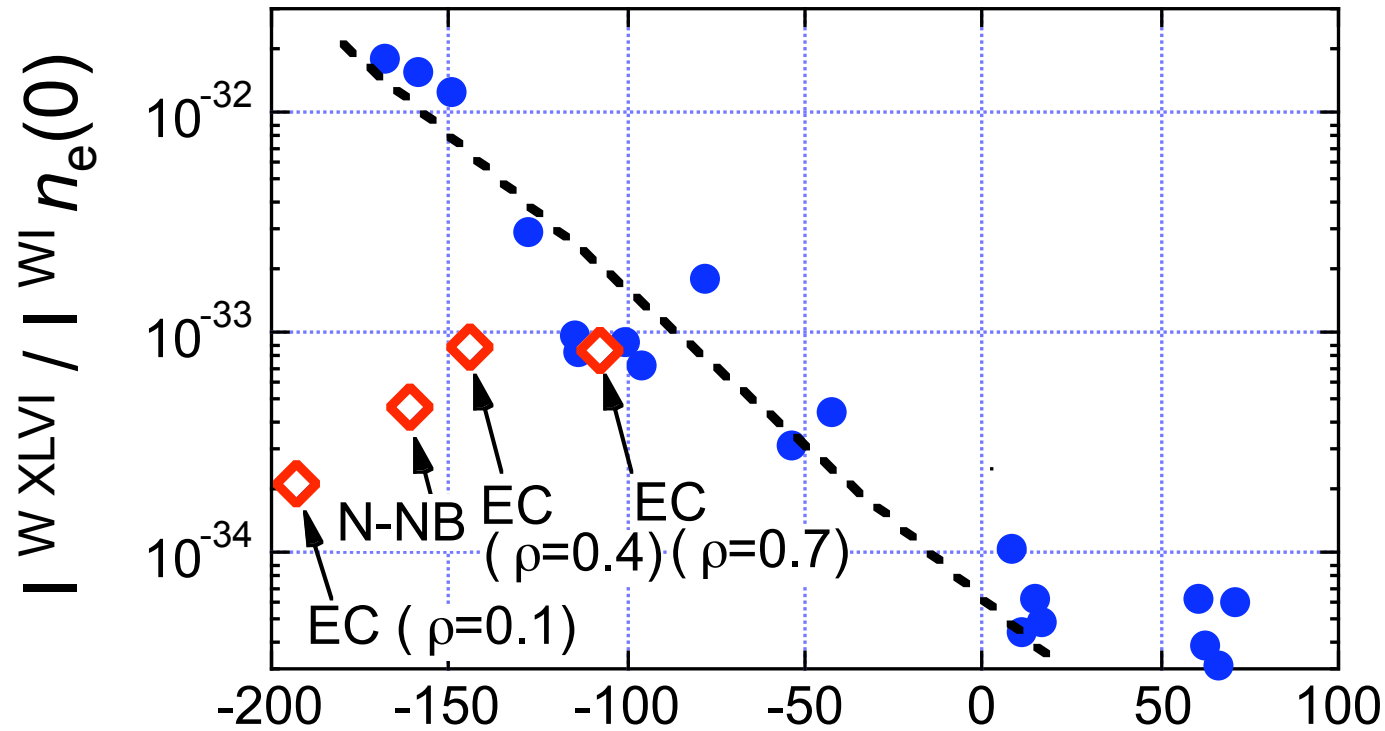
⇒W XLVI はプラズマ中心のタングステン密度の指標

輸送コードによる解析結果では、W XLVI は  $r=0.35$  付近にピーク (実験結果を再現していない)



# 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

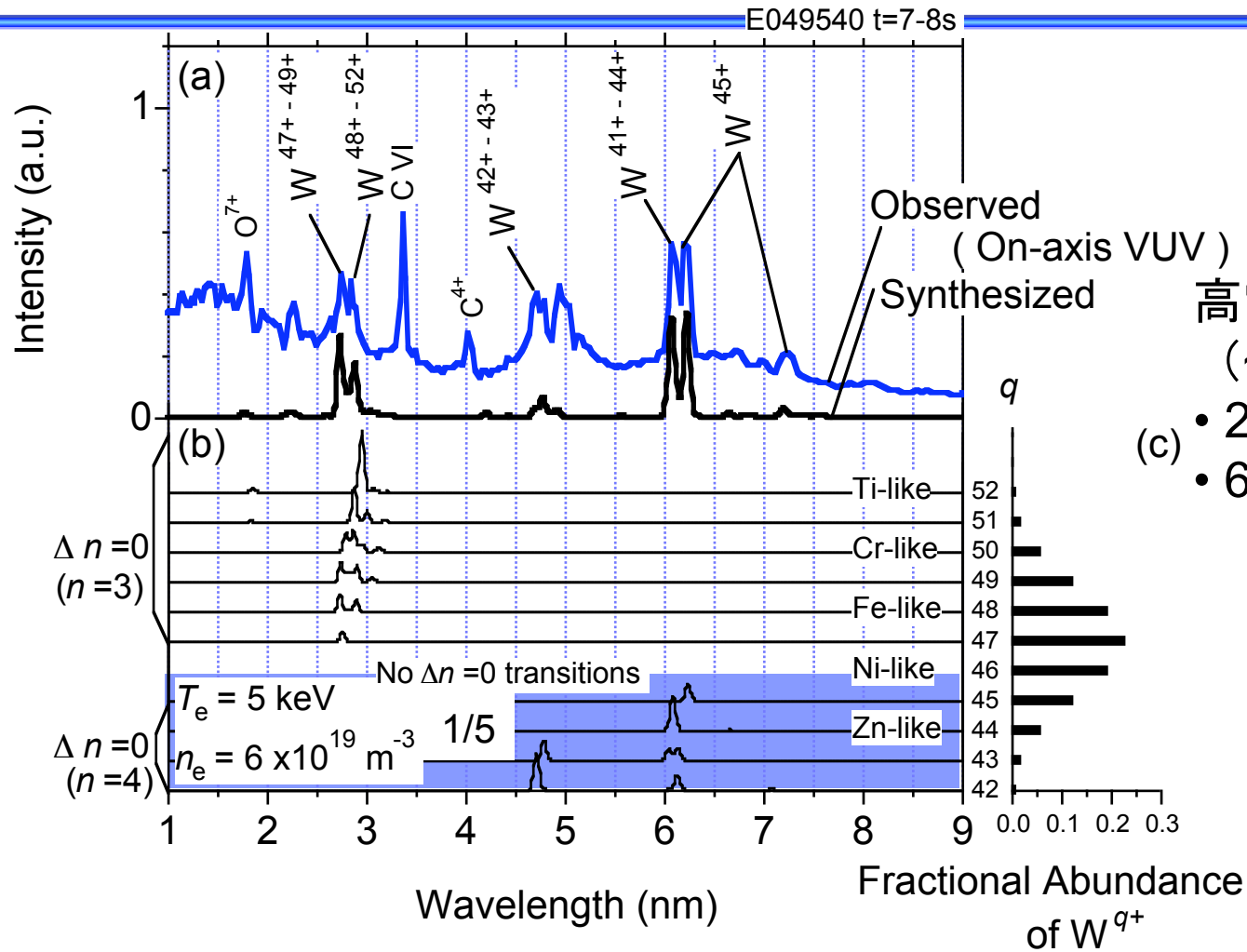


Toroidal rotation velocity at  $\rho=0.04$  ( km / s )

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

# on-axis (中心) VUV スペクトル

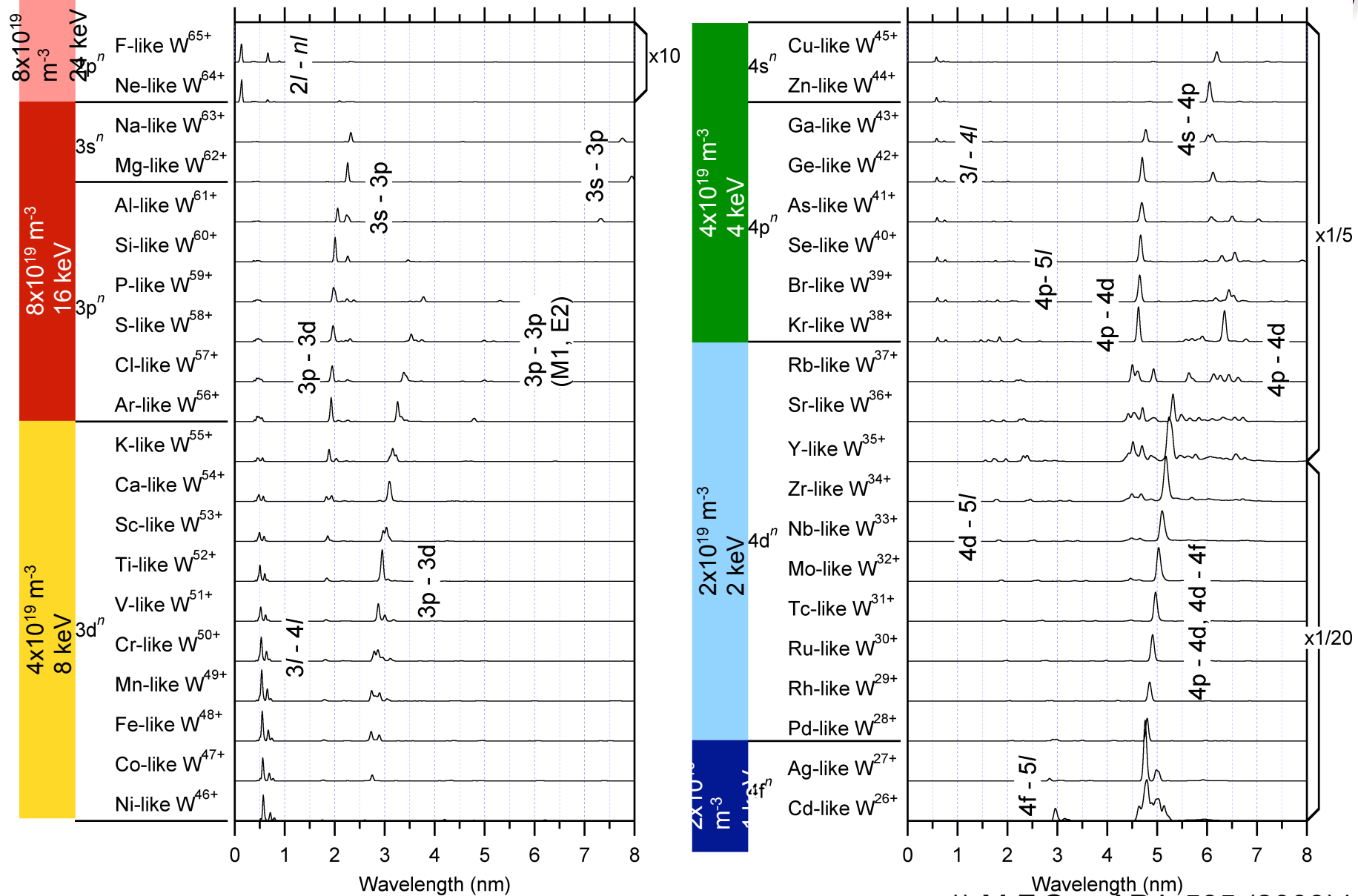
JT-60U-



高電離タングステニオン  
(~47価) が主要

- 2.8 nm ~ 50 価
- 6.2 nm ~ 44 価

# FAC\*)原子構造計算プログラムによる 高電離タングステニイオンのモデルスペクトル

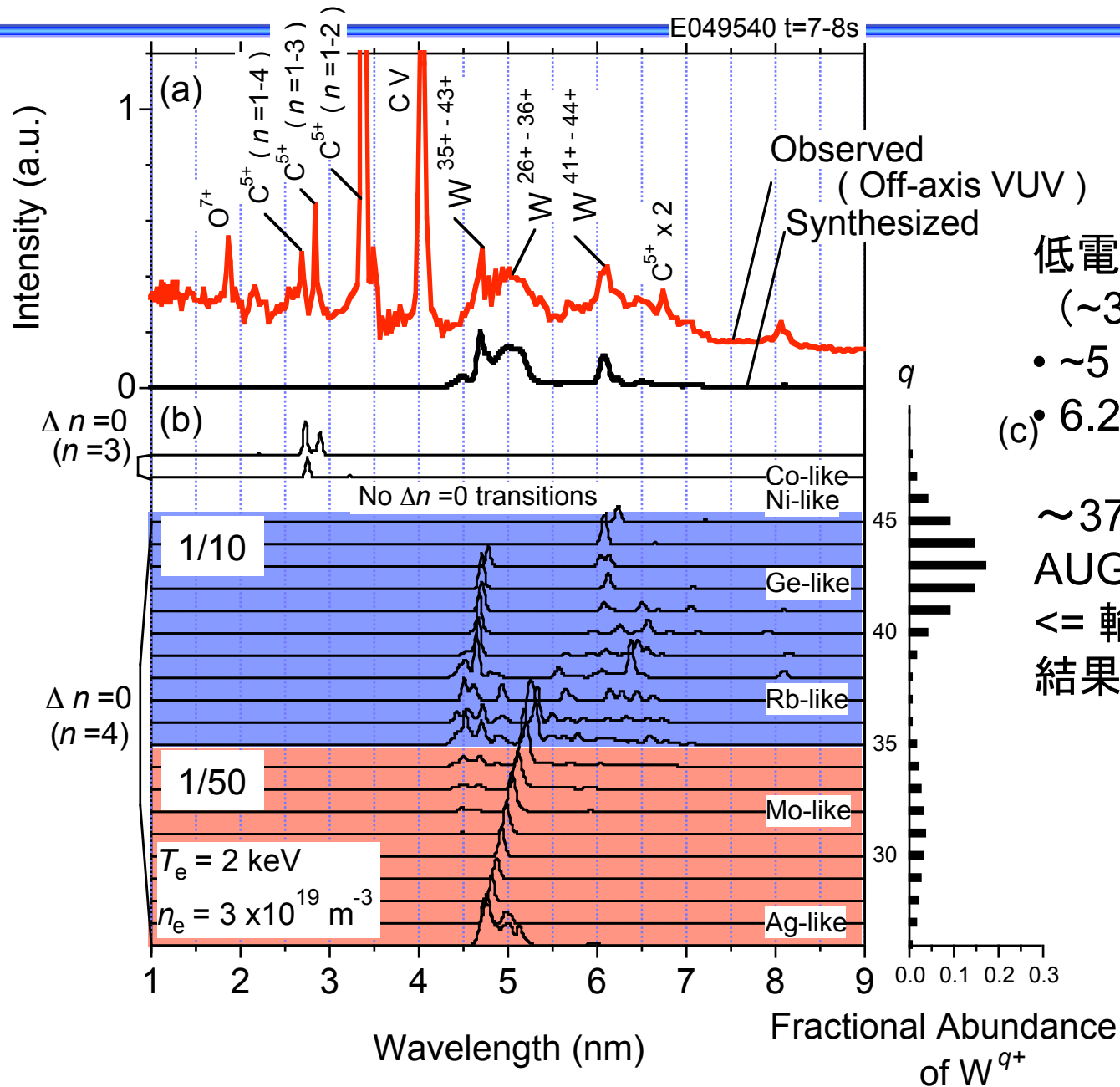


\*) M.F.Gu., APJ. 585 (2003)1241.



# off-axis (周辺) VUV スペクトル

JT-60U-



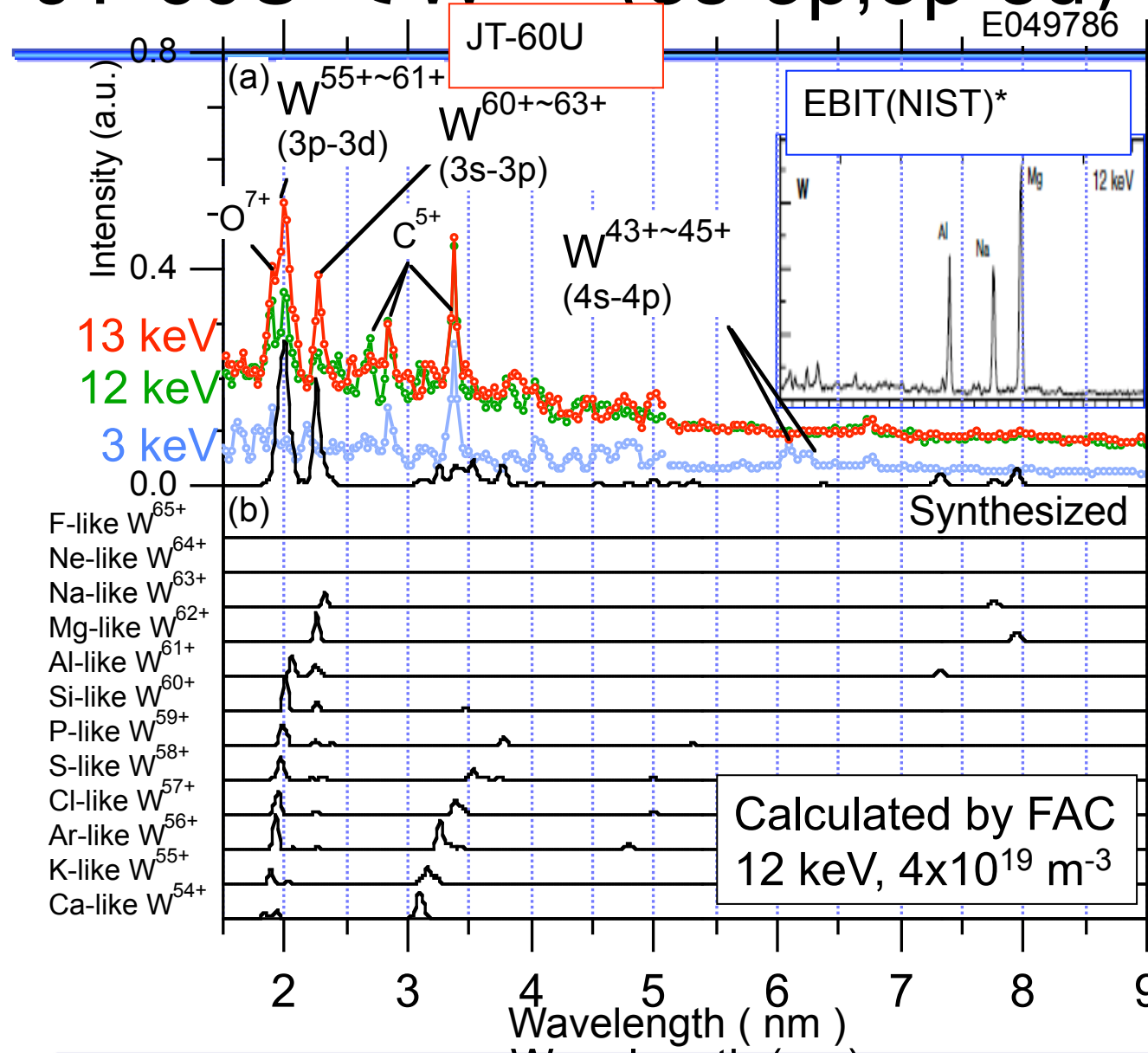
低電離タングステニオン  
 (~31価、~43価) が主要

- ~5 nm Quasi-continuum
- 6.2 nm ~44価

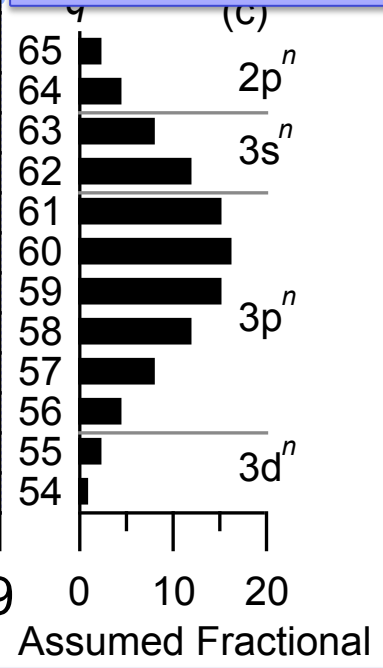
~37価の密度が低い  
 AUGでも同様の傾向  
 <= 輸送コードによる計算  
 結果には見られない

# JT-60U で $W^{60+}$ (3s-3p, 3p-3d) を初めて同定

JT-60U



EBITでの測定結果と比較し、FACの計算を確認  
 ⇒ 2-3nm 帯の  $W^{60+}$  の同定に成功  
 \*) Y. Ralchenko et al  
 J. Phys. B 41 (2008) 021003



ITERプラズマで主要な価数である  $W^{60+}$  のスペクトル線を同定

# まとめ

JT-60U

- ダイバータタイルの一部をタングステンコーティングタイルに変更し、タングステンの発生、輸送、蓄積を調べた
- 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
  - 高電離タングステンイオンのVUVスペクトルをFACコードを用いて解析、下記のスペクトルを同定
    - ◆ 2.8 nm ~ 50 価
    - ◆ 6.2 nm ~ 44 価
    - ◆ ~5 nm Quasi-continuum (~ 30 価)
    - ◆ 2 nm ~ 60 価 (NISTのデータ集\*にも未掲載)
- \*)A. Kramida and T. Shirai, ADNDT in press

## 今後

Wの蓄積のメカニズムの解明

EBITのデータなどを参考に、さらに同定を進める