

LHD成果報告

X線から可視光までの広波長域分光計測による LHDのタングステン不純物多価イオン研究

東北大学 大石鉄太郎

研究協力者

東北大学 西村涼汰, 高橋宏幸

核融合研 後藤基志, 川本靖子, 石川遼太郎、村上泉, 加藤太治, 鈴木千尋, 坂上裕之, 森田繁

量研機構 川手朋子

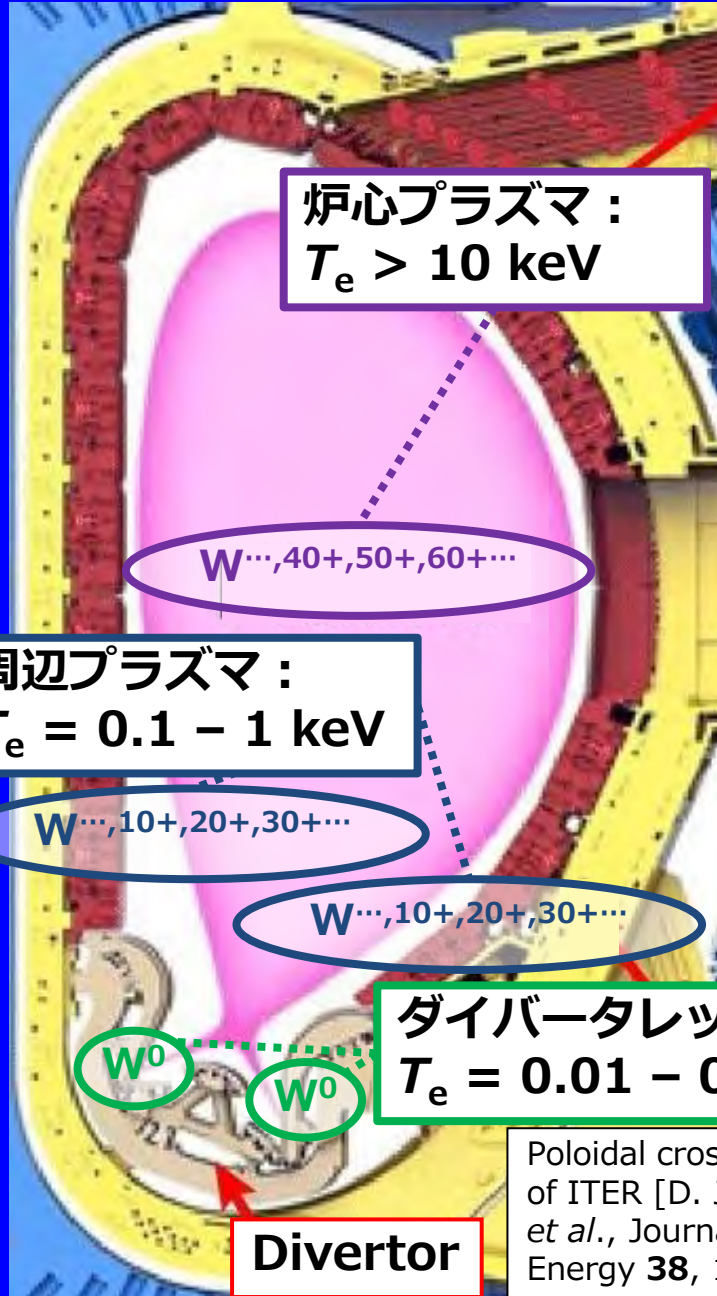
IPP 田村直樹

Contents

- 核融合プラズマにおけるタングステン不純物多価イオン研究
- LHDで観測されたタングステン発光スペクトル：X線から可視光まで
- 2025年度の成果
 - 3.7–4.0 ÅのX線波長域で観測された W^{43+} – W^{47+} の発光線スペクトル
 - EUV波長域で観測された20価前後のUTAスペクトルを用いた不純物診断
- まとめ

核融合プラズマの広範な電子温度分布＝不純物イオンの広範な価数分布

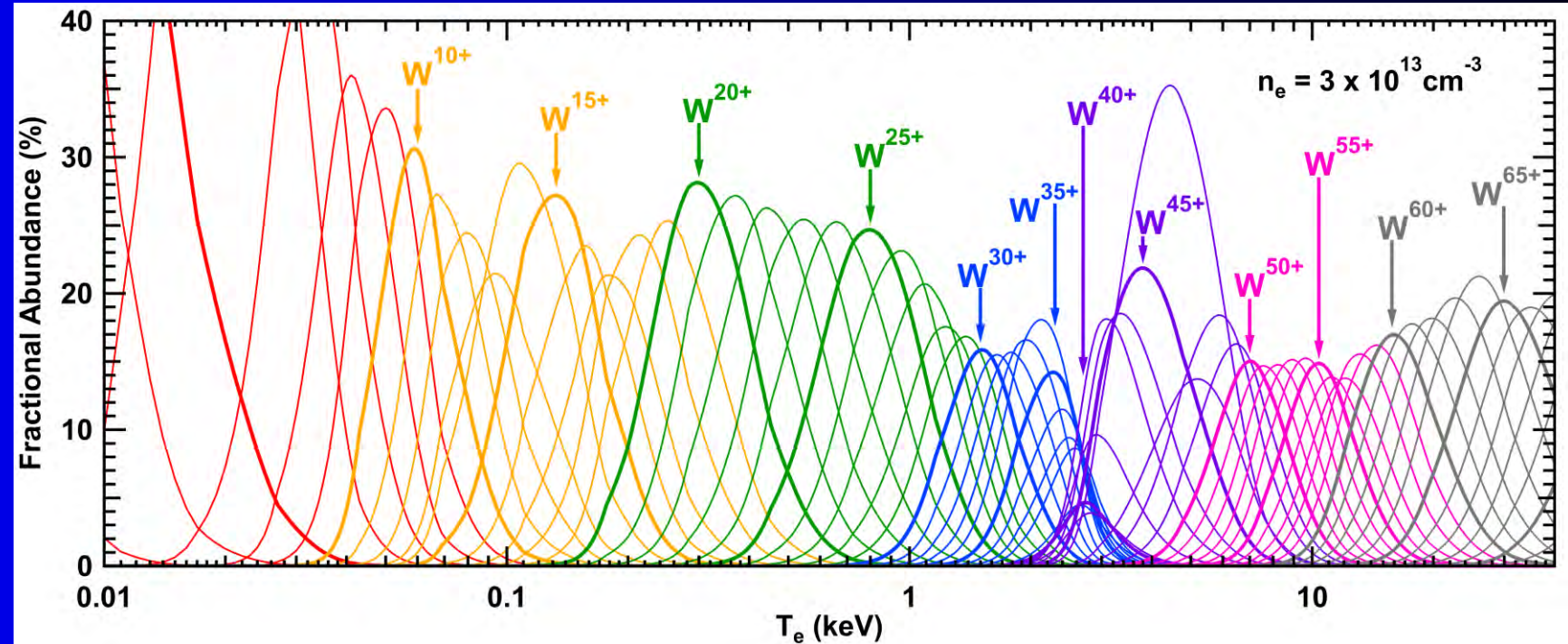
03/21



タングステン ($Z = 74$) はプラズマ対向材料の有力候補

✓ 高融点・低スパッタリングレート

✗ 不純物イオンとして放射/電離による大きなエネルギー損失



q 価イオンの価数存在比 f_q (fractional abundance)

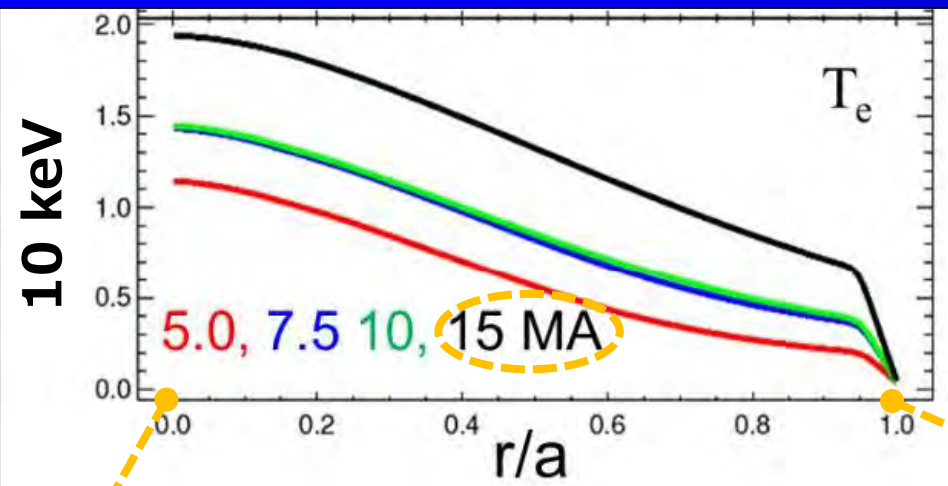
$$f_q = n_q / \sum_q n_q, \sum_q f_q = 1, S_q f_q = \alpha_{q+1} f_{q+1}$$

Rate coefficients in OPEN-ADAS

Ionization (S): *scd50_w.dat*, Recombination (α): *acd50_w.dat*

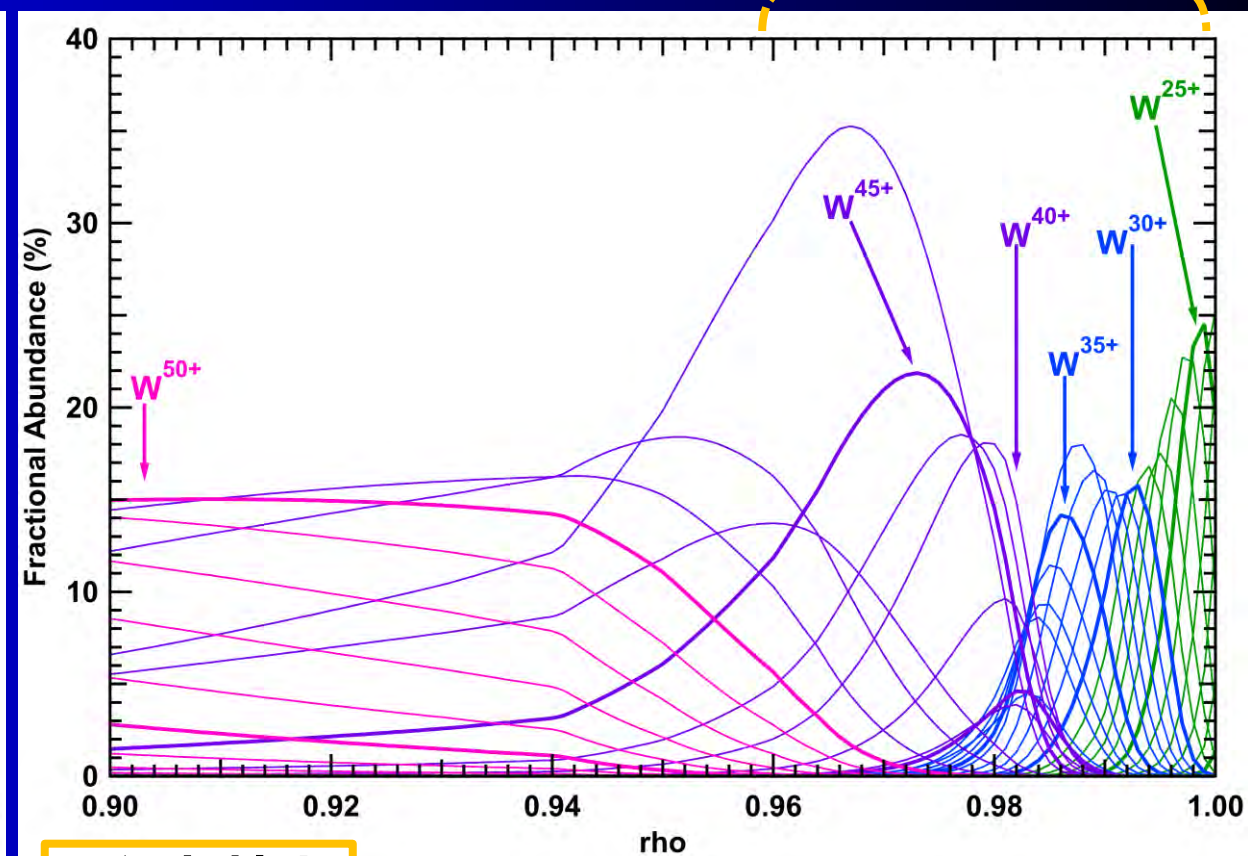
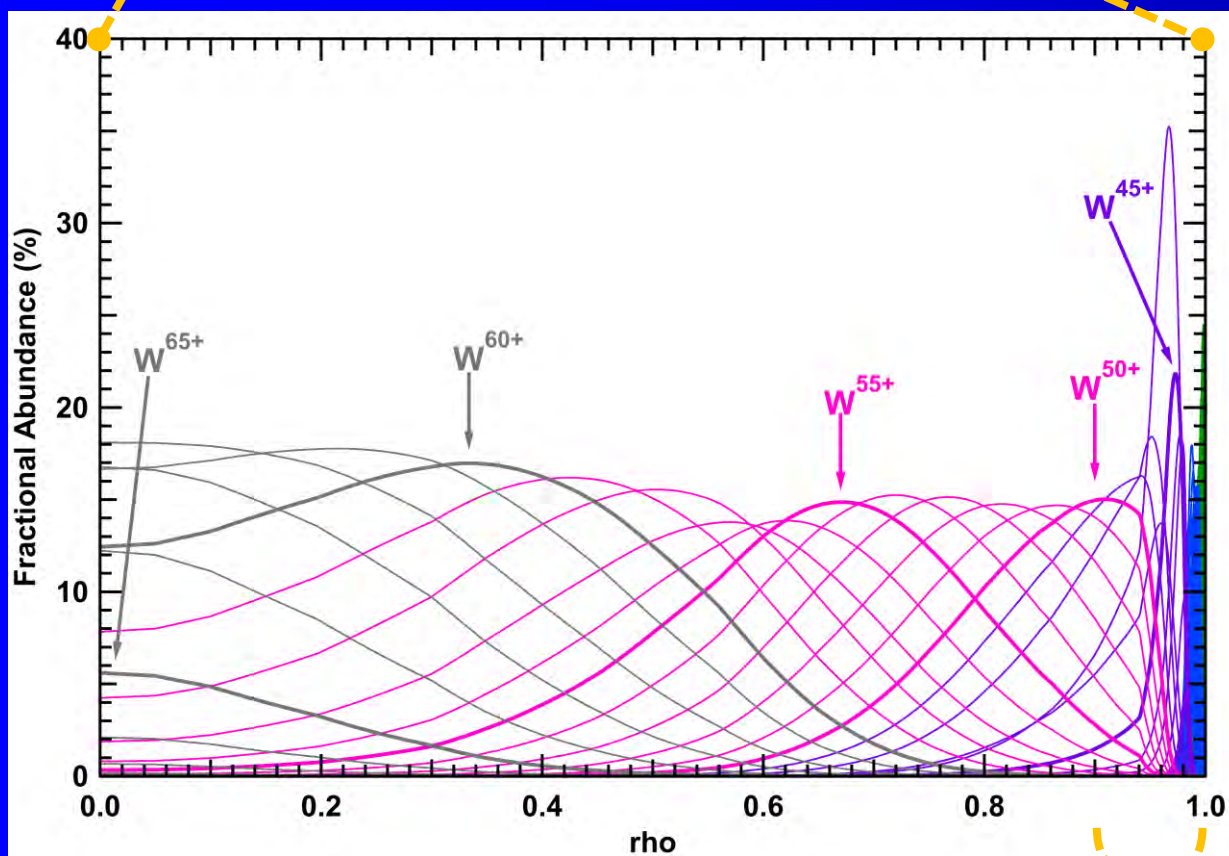
中性粒子から65価程度まで、広範な価数領域の計測が必要

LHDで計測が期待できるタングステンイオン価数



ITERの電子温度分布の予測例
[D.J. Campbell *et al.*, ITER Research Plan within the Staged Approach (Level III – Final Version) (2024)]

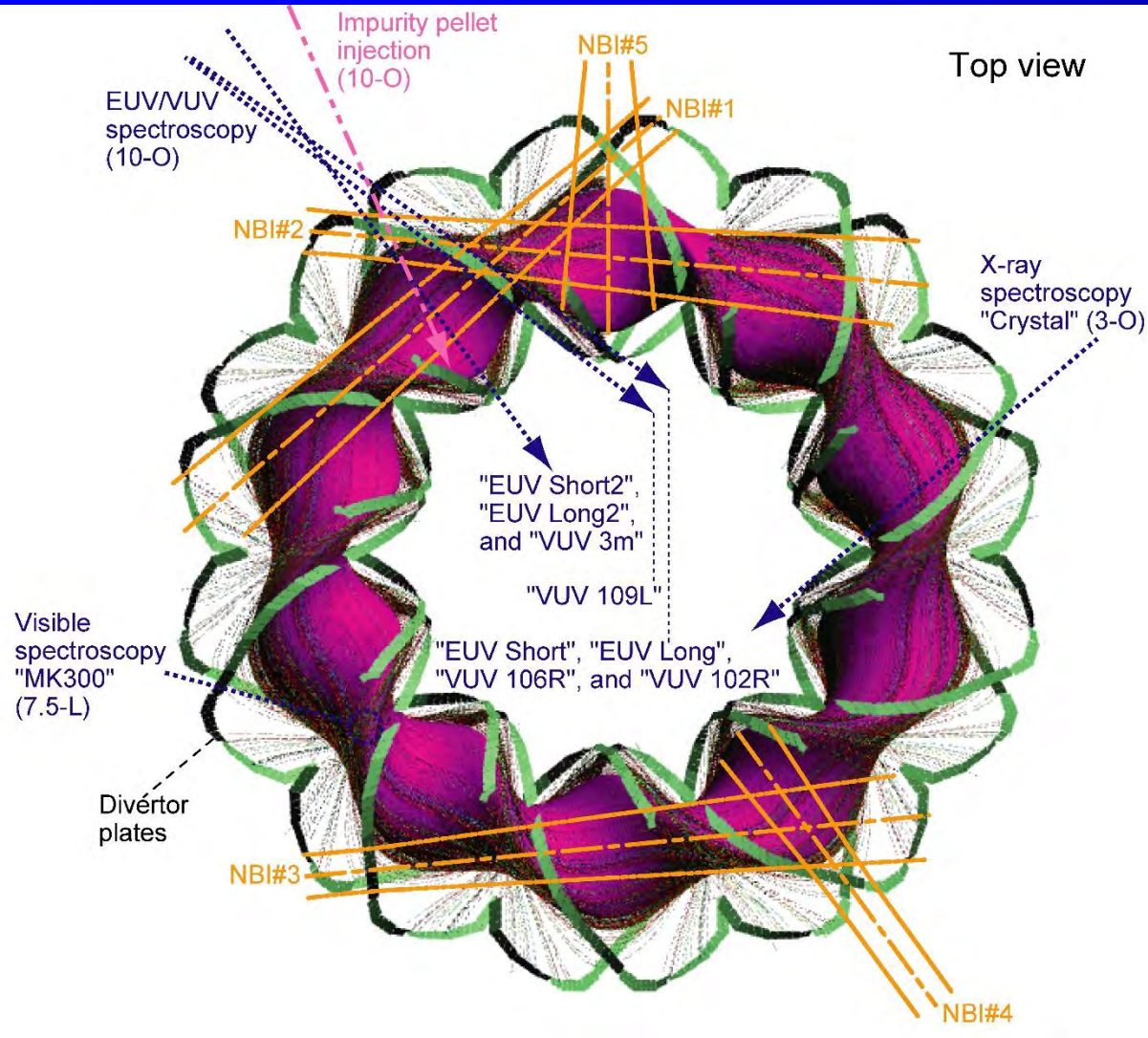
高温プラズマ実験で観測できるのは主に W^{46+} 以下
⇒ITER周辺プラズマ診断への貢献



周辺部拡大

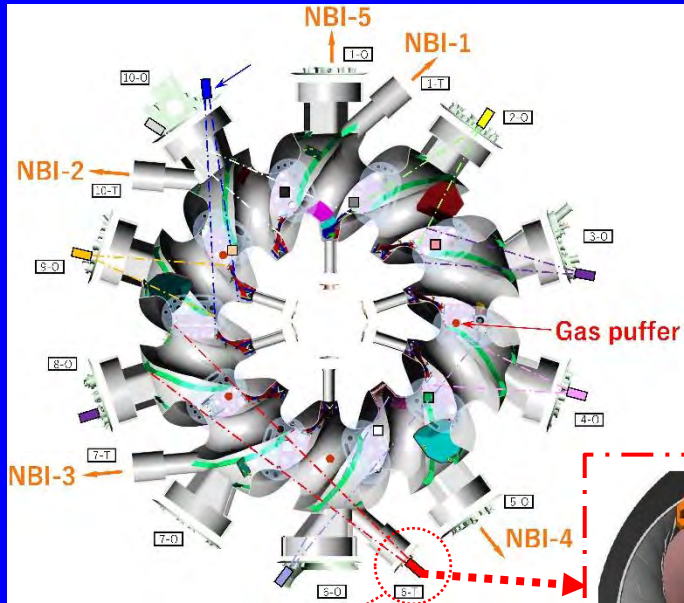
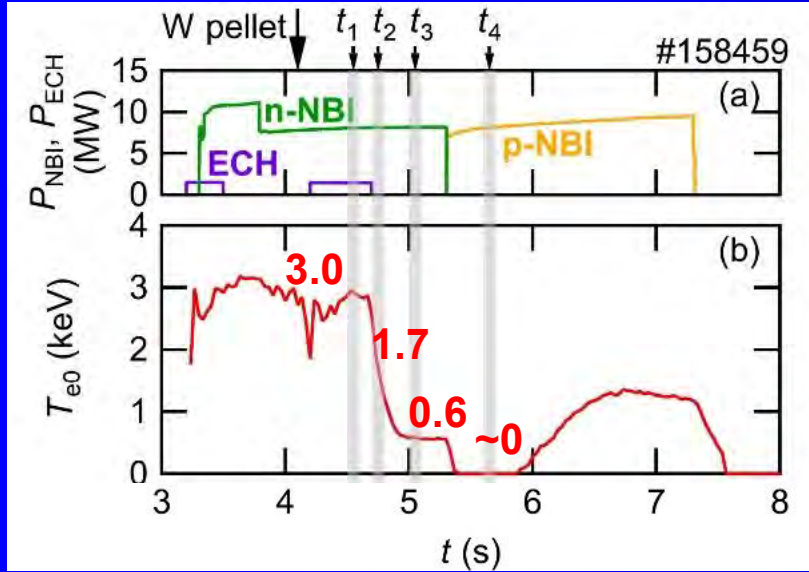
タングステン輝線観測のための不純物入射と分光計測

- 不純物ペレット or TESPELでW入射
- 可視光, VUV, EUV, X線の波長領域でタングステンの輝線を観測

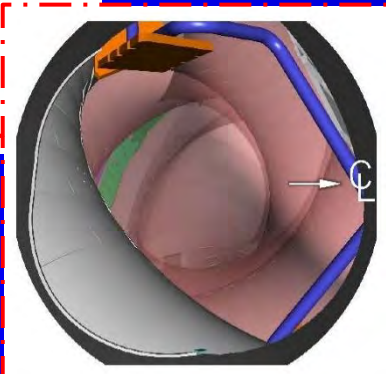


Name	Type	Crystal or Grating (g/mm)	λ range (Å)	$d\lambda/dx$ (Å/mm)
X-ray Crystal	Johann	Quartz (2020)	3.7 – 4.0	$1.6 \times 10^{-3} - 1.1 \times 10^{-3}$
EUV Short	Grazing incidence	2400	10 – 130	1.2 – 4.3
EUV Long		1200	50 – 500	4.0 – 11.0
3 m VUV	Normal incidence	1200	300 – 3200	2.8
20 cm VUV 109L	Normal incidence	1200	300 – 1050	32.7
20 cm VUV 106R			970 – 1870	33.8
20 cm VUV 102R			1510 – 2400	33.8
Visible MK300	Czerny–Turner	1200	2000 – 9000	25.8

広範な波長領域の同時計測が可能



プラズマ監視カメラ



真空容器内での視野



- Wペレット入射: 4.15 s
- ECH: 3.2-3.5 s, 4.2-4.7s
- N-NBI: 3.3-5.3 s, p-NBI: 5.3-7.3 s
- “Temperature hole: 5.3 s

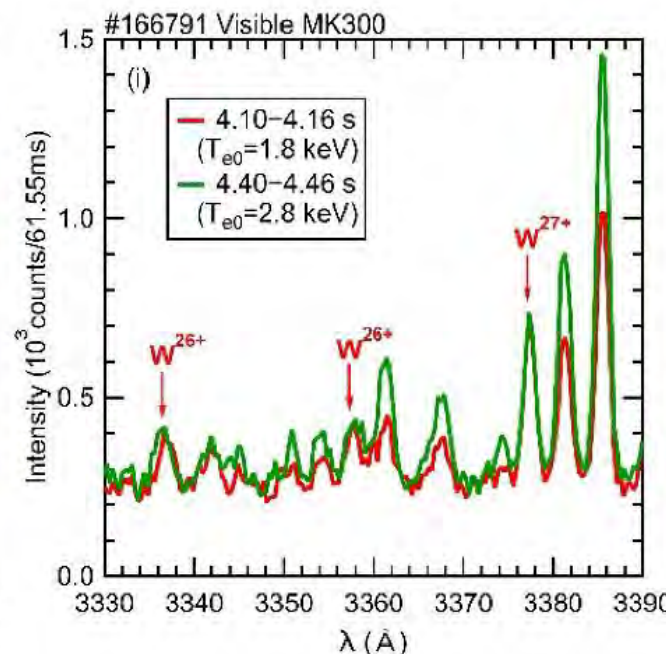
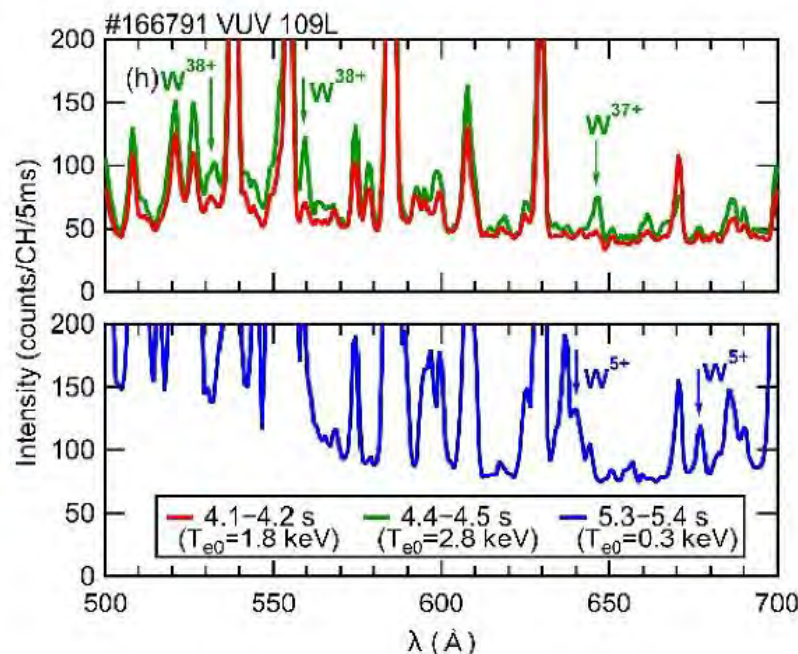
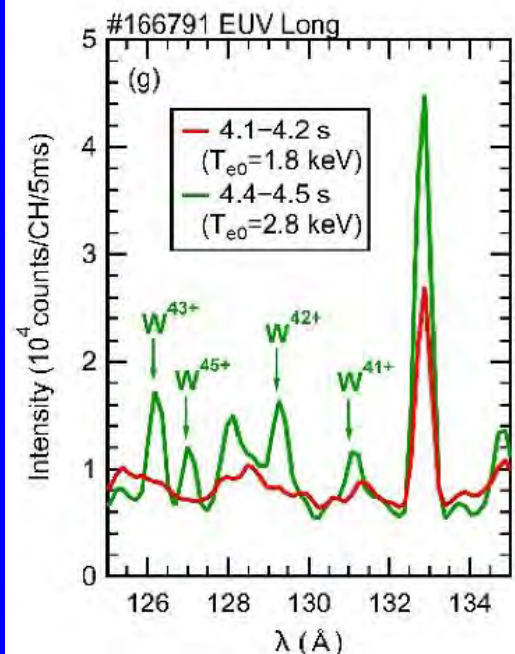
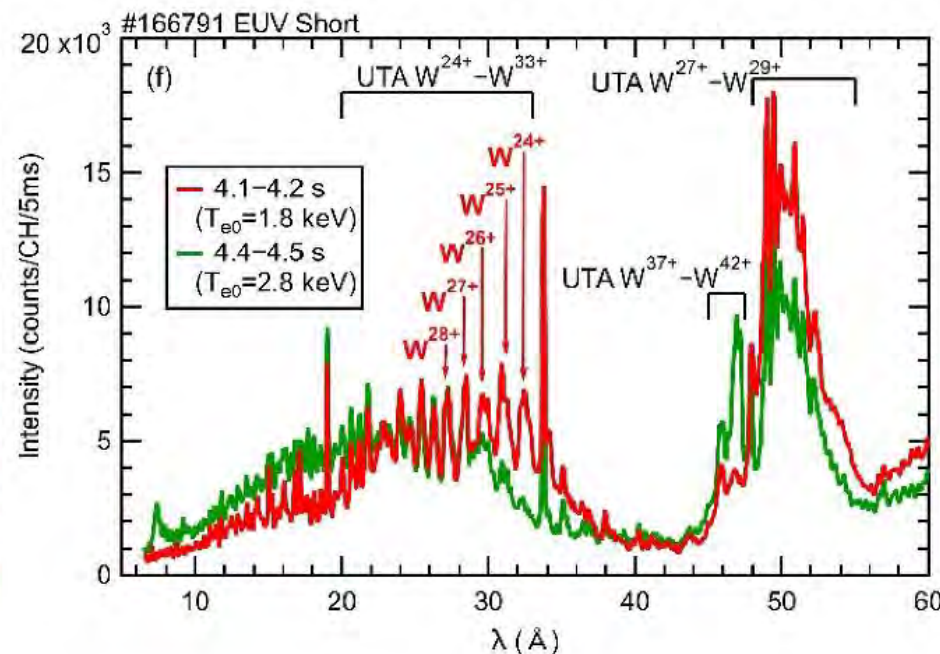
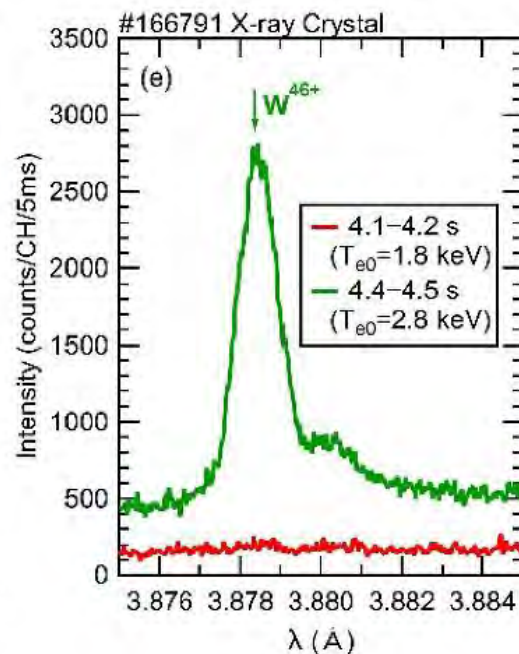
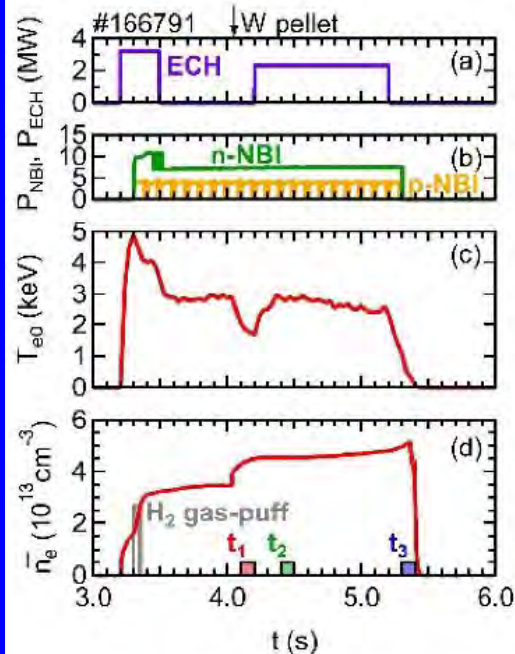
X線－可視光 同時分光計測

— $T_{e0} = 2.8$ keV
X線+EUV域に40個
台高価数
VUV域に30個台M1
禁制線

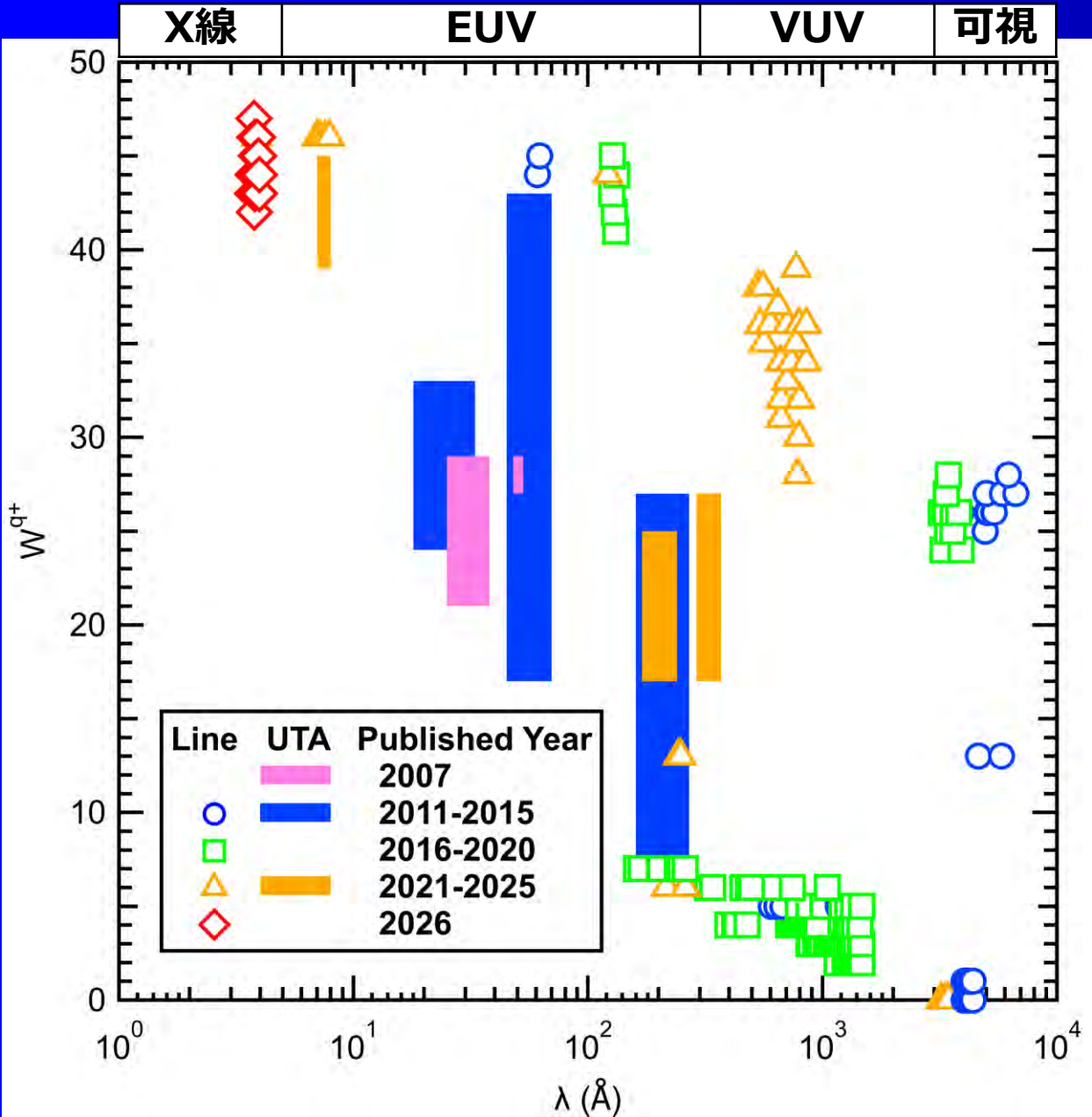
— $T_{e0} = 1.8$ keV
EUV域に20個台UTA
(unresolved
transition array)
可視域に20個台M1
禁制線

— $T_{e0} = 0.3$ keV
VUV域に低価数

広範な価数領域の 同時計測が可能



LHDにおけるW多価数同時計測の進展



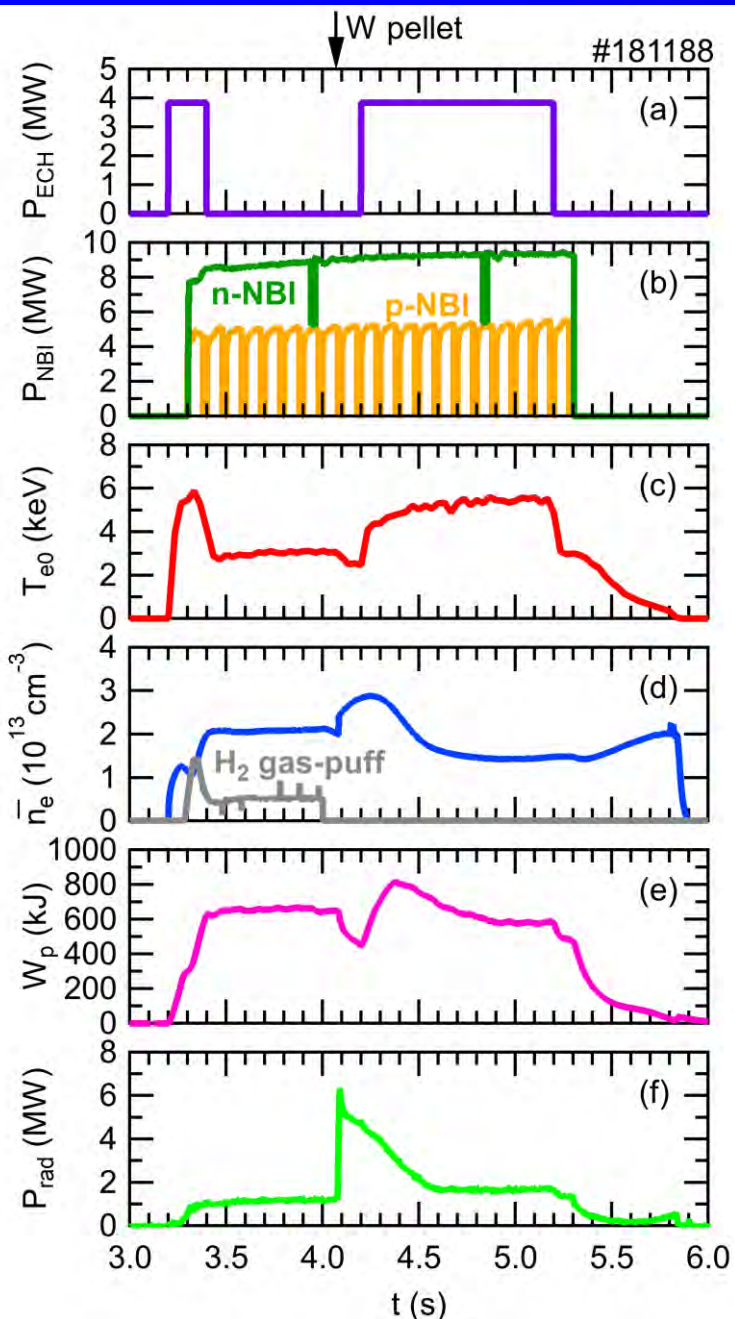
LHDで観測されてきたW発光線の価数（ $\sim W^{47+}$ ）と波長

研究内容	波長・価数	論文	08/21
Wスペクトル計測開始	EUV・21-29価	M. B. Chowdhuri <i>et al.</i> , PFR 2 , S1060 (2007)	
UTA価数同定	EUV・7-43価	C. Suzuki <i>et al.</i> , JPB 44 , 175004 (2011) S. Morita <i>et al.</i> , AIP Conf. Proc. 1545 , 143-152 (2013) Y. Liu <i>et al.</i> , JAP 122 , 233301 (2017)	
CR計算によるUTA構造再現	EUV・17-27価	I. Murakami <i>et al.</i> , NME 26 , 100923 (2021) R. Nishimura <i>et al.</i> , NME 41 , 101740 (2024)	
UTAを用いたW密度評価	EUV・17-27価	Y. Liu <i>et al.</i> , JJAP 57 , 106101 (2018) R. Nishimura <i>et al.</i> , submitted to NF	
M1禁制線探索	可視・23-28価 VUV・28-39価	D. Kato <i>et al.</i> , Phys. Scr. T156 , 014081 (2013) K. Fujii <i>et al.</i> , JPB 50 , 055004 (2017) T. Oishi <i>et al.</i> , NME 26 , 100932 (2021)	
M1禁制線を用いたW密度評価	可視・26-27価	D. Kato <i>et al.</i> , NF 61 , 116008 (2021)	
発光線探索	VUV・2-7価 X線・42-47価	T. Oishi <i>et al.</i> , Phys. Scr. 91 , 025602 (2016) T. Oishi <i>et al.</i> , NF 66 , 076010 (2026)	

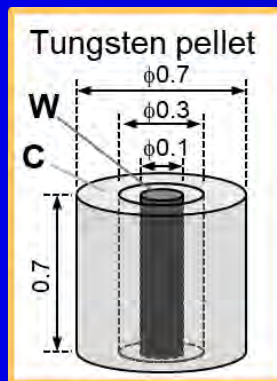
Contents

- 核融合プラズマにおけるタングステン不純物多価イオン研究
- LHDで観測されたタングステン発光スペクトル：X線から可視光まで
- 2025年度の成果
 - 3.7–4.0 ÅのX線波長域で観測された W^{43+} – W^{47+} の発光線スペクトル
T. Oishi, R. Nishimura, S. Morita *et al.*, Nucl. Fusion **66** (2026) 076010
 - EUV波長域で観測された20価前後のUTAスペクトルを用いた不純物診断
- まとめ

LHDにおけるタングステン発光線のX線分光計測



- $R_{ax} = 3.60 \text{ m}$,
 $B_t = 2.75 \text{ T (CCW)}$
- 4.07 sにWペレット入射
- 4.2–5.2s にECH
→ T_{e0} は4~5 keVまで回復



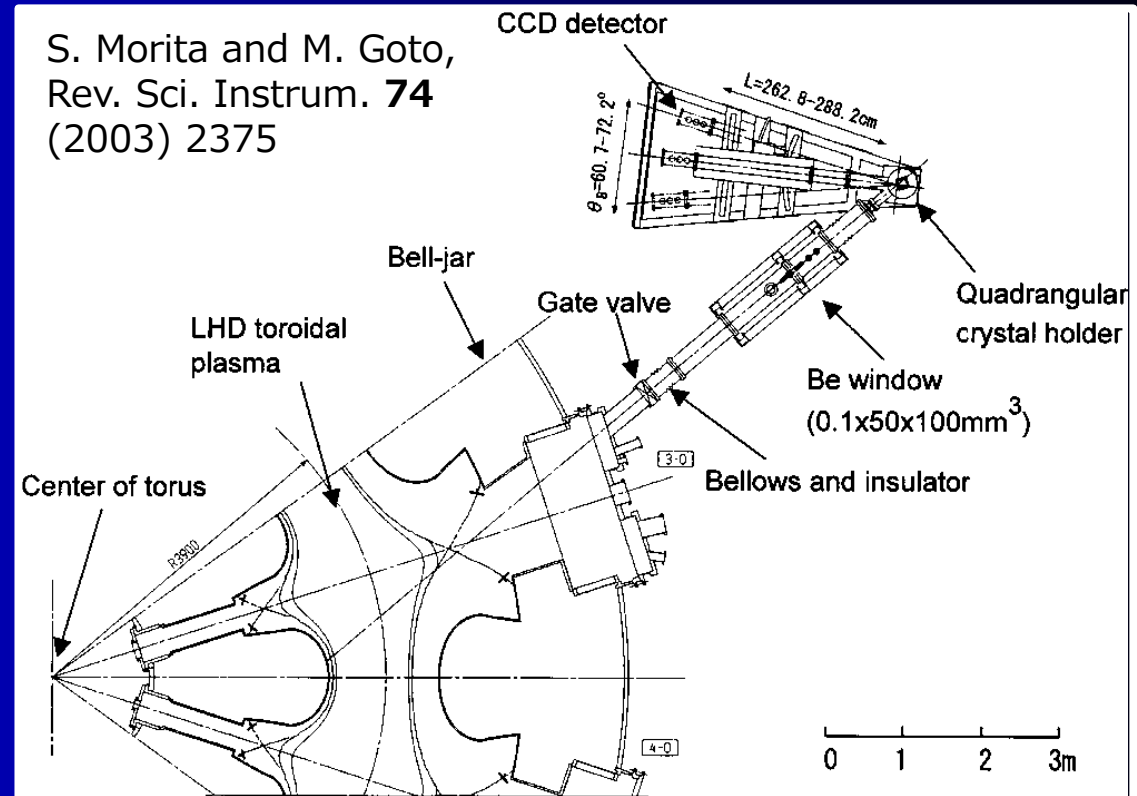
W金属線
/ 0.7 mm

$\times \phi 0.1 \text{ mm}$

$\sim 3.5 \times 10^{17} \text{ W atoms}$

- スペクトルの中心波長は
3.7–4.0 Åの範囲で可変
- 1放電で観測できる波長の
幅は0.03 Å程度
→ 波長スキャン10放電

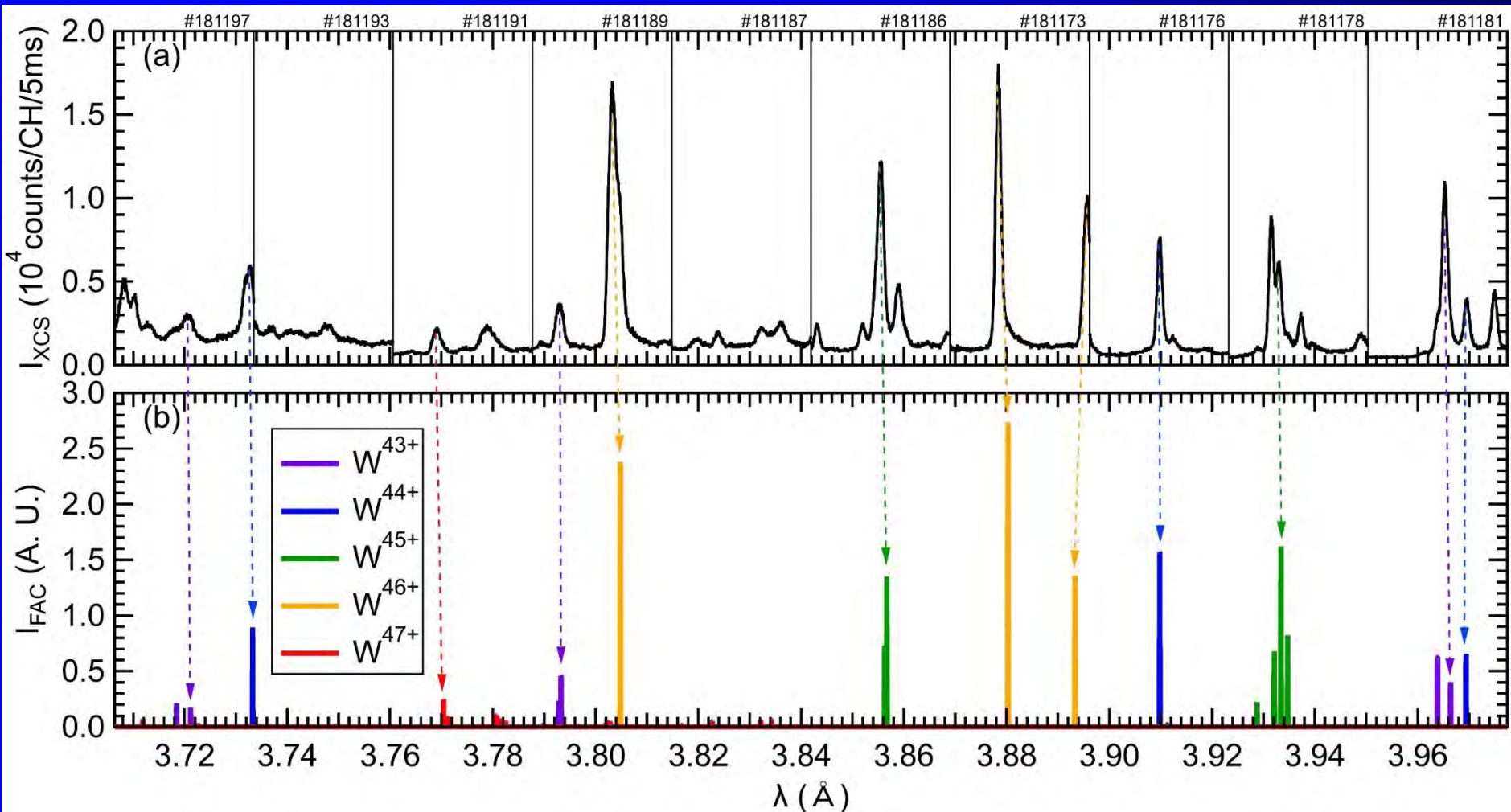
S. Morita and M. Goto,
Rev. Sci. Instrum. **74**
(2003) 2375



Ar XVII (3.9492 Å)計測用結晶

Quartz	(2020)
格子間隔 $2d$ (Å)	4.2554
曲率半径 $2R$ (mm)	1500
Bragg角 q_B (deg.)	68.13
逆線分散 (Å/mm)	1.136×10^{-3}

$\lambda = 3.7 - 4.0 \text{ \AA}$ のタングステンX線スペクトル

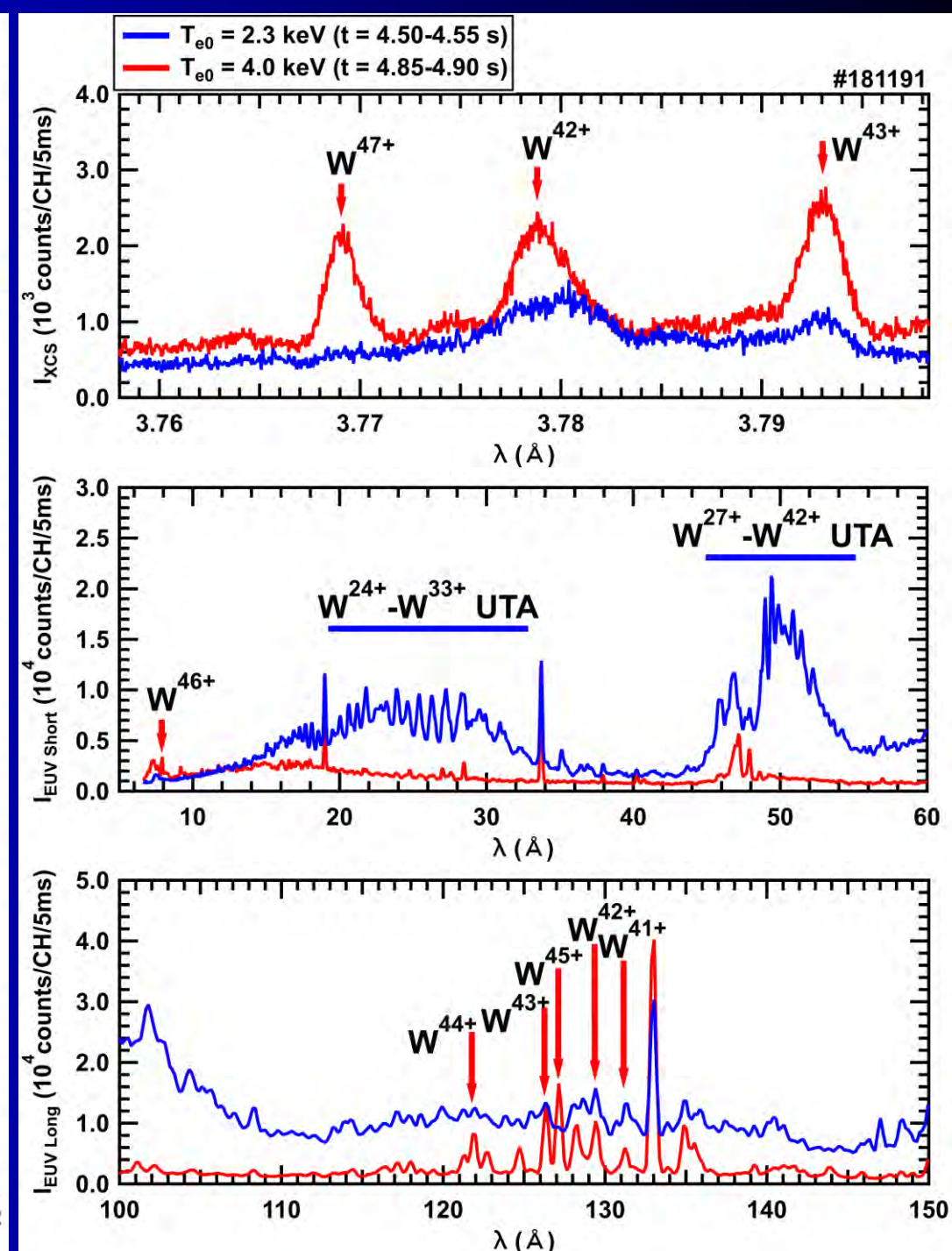
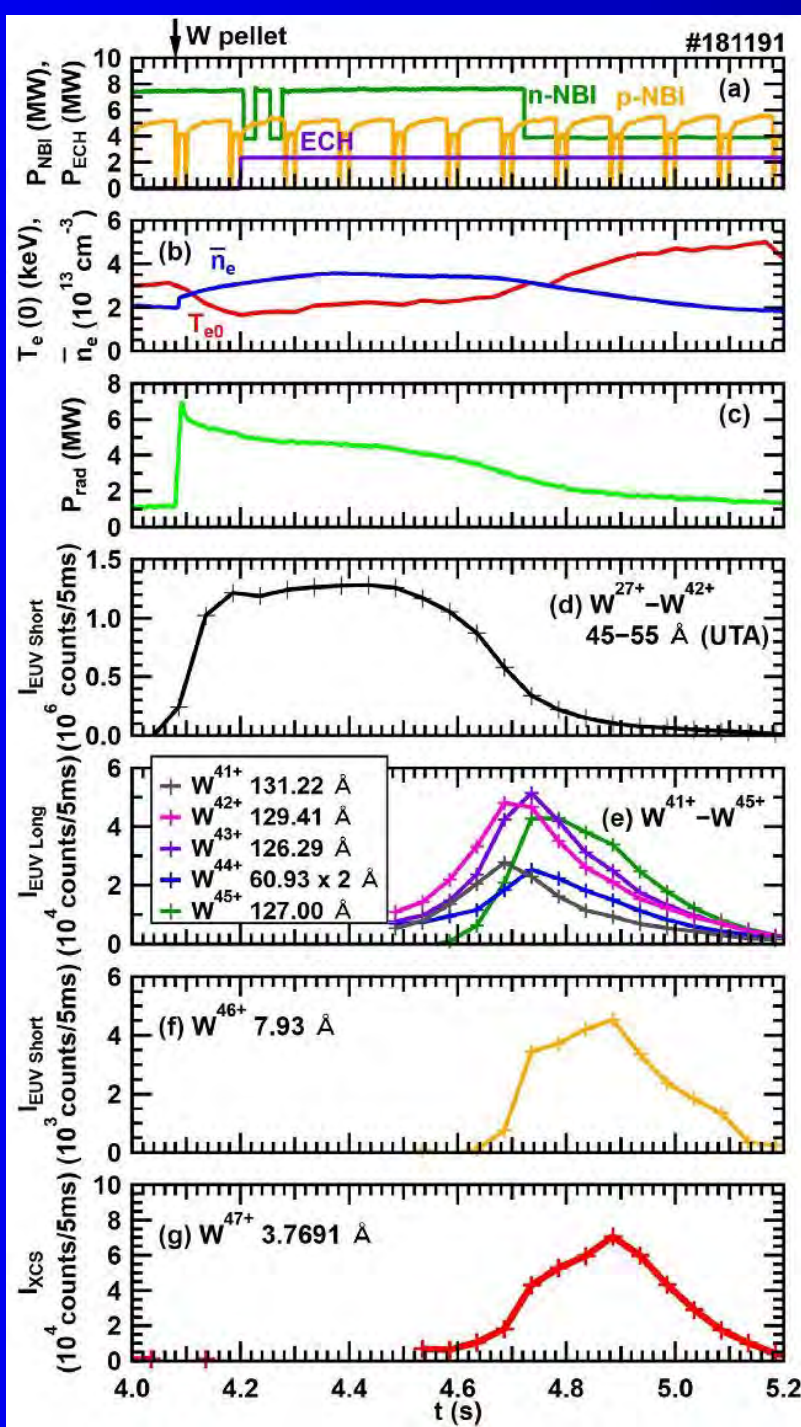


$\lambda_{\text{XCS}} (\text{\AA})$	$\lambda_{\text{FAC}} (\text{\AA})$	Ion
3.7204	3.7212	W^{43+}
3.7323	3.7332	W^{44+}
3.7691	3.7704	W^{47+}
3.7930	3.7933	W^{43+}
3.8033	3.8048	W^{46+}
3.8555	3.8567	W^{45+}
3.8784	3.8803	W^{46+}
3.8956	3.8933	W^{46+}
3.9098	3.9098	W^{44+}
3.9330	3.9334	W^{45+}
3.9655	3.9664	W^{43+}
3.9694	3.9694	W^{44+}

- Flexible Atomic Code (FAC) [M.F. Gu, *Astrophys. J.*, 582 (2003) 1241]による計算との比較で価数同定
 - エネルギー準位, 自然放出係数, 衝突断面積の計算
 - n_e , T_e を与えてCRモデルを解き, 発光スペクトルを出力
- 多数の輝線を $\text{W}^{43+} - \text{W}^{47+}$ と価数同定, $\text{W}^{47+} 3.7691 \text{ \AA} (3p^6 3d^9 - 3p^6 3d^8 6f)$ は新たな価数領域

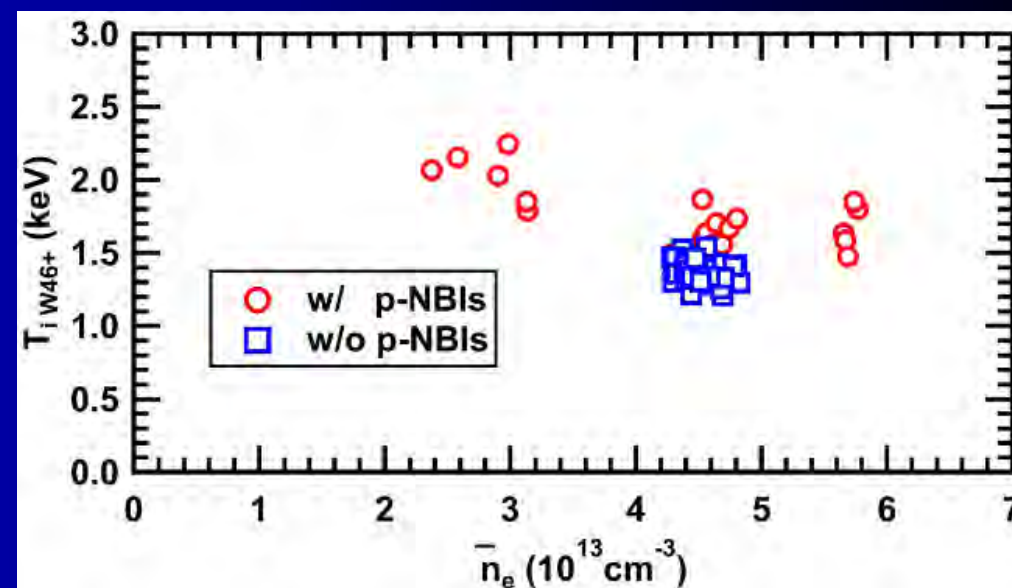
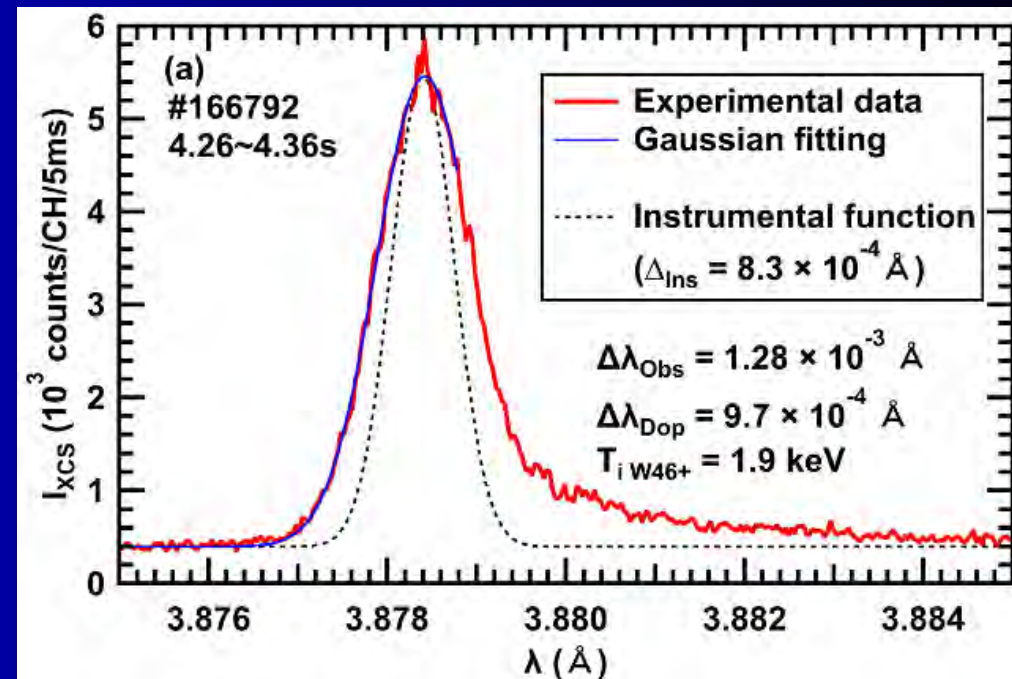
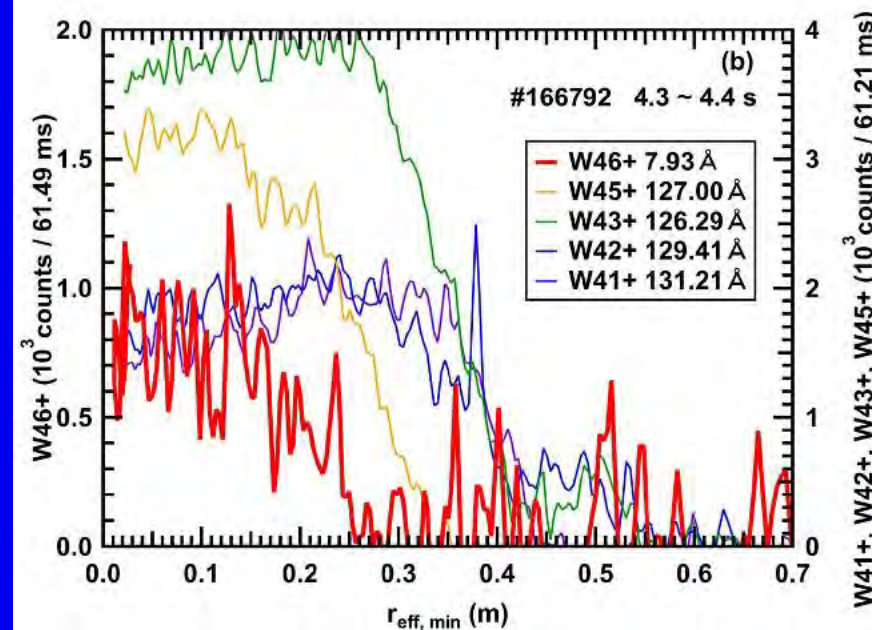
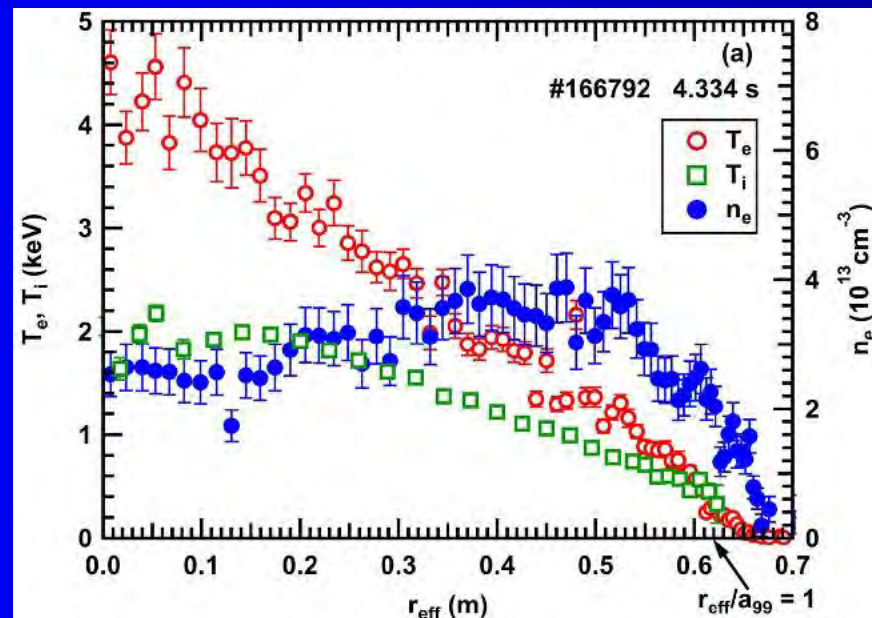
$W^{41+} - W^{47+}$ 発光線 強度の経時変化

- T_{e0} は 1.7 keV から 5.0 keV まで上昇
- $T_{e0} < 3$ keV では、 $W^{27+} - W^{42+}$ の UTA (unresolved transition array) @45-55 Å がタングステン不純物の指標
- $t = 4.5$ s 以降 UTA の強度減少、 $W^{41+} - W^{47+}$ 発光線が順次現れる
- W^{47+} は $T_{e0} = 4.3$ keV となる $t = 4.9$ s で最大
 $\Rightarrow$ 4 keV 程度の電子温度領域におけるタングステン不純物の指標として有用



W⁴⁶⁺線ドップラー 拡がりを用いた イオン温度計測

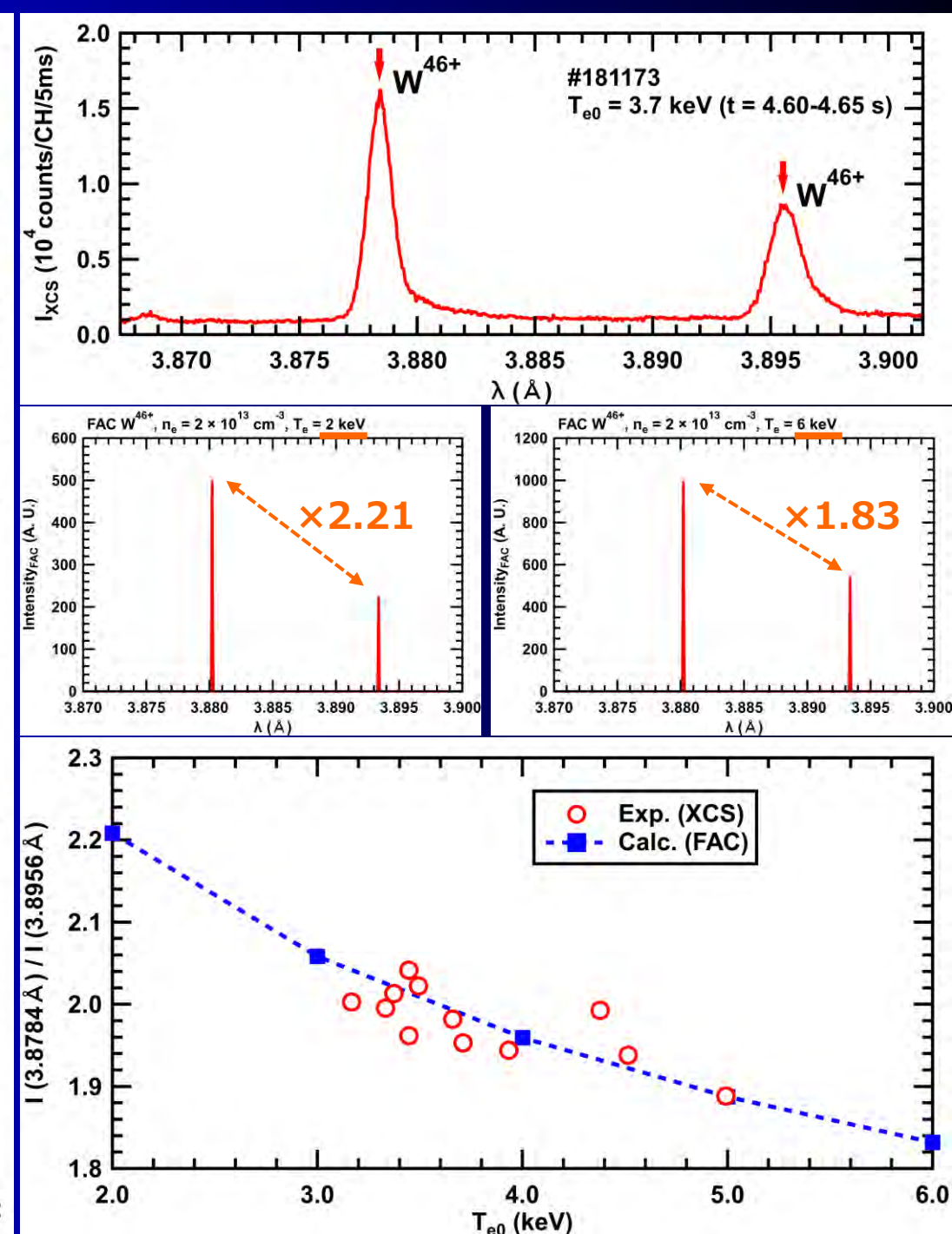
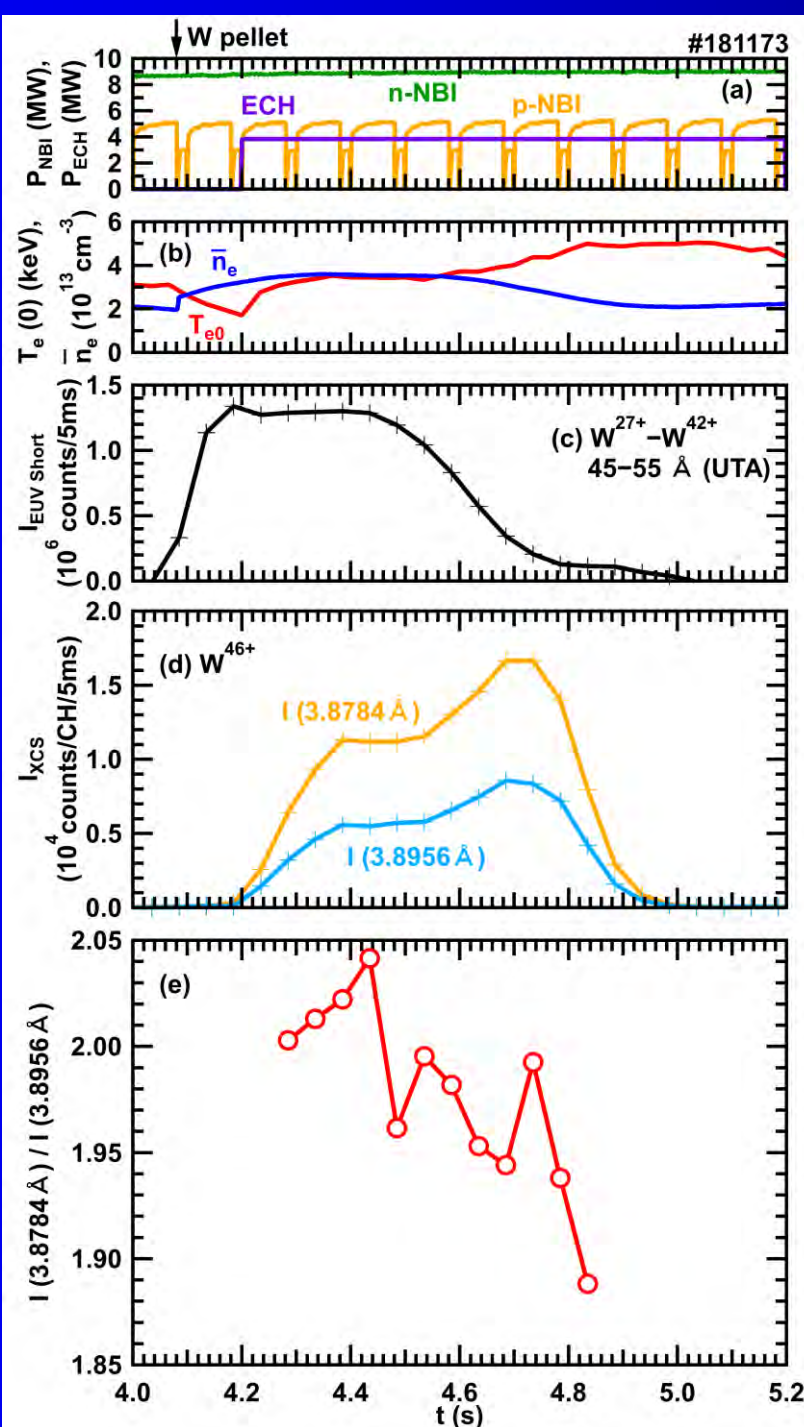
- W⁴⁶⁺ 3.8784 Å (3p⁶3d¹⁰ – 3p⁶3d⁹6f) は強度が大きく孤立、スペクトル幅の評価に適する
- W⁴⁶⁺はプラズマ中心に局在。CXSで計測した中心イオン温度と合うように装置関数を決定
- いったん装置関数を決定したらW⁴⁶⁺線計測単独でイオン温度計測が可能



W^{46+} 線強度比の 電子温度依存性

- T_{e0} の上昇に伴って,
 W^{46+} 3.8784 Å
(3p⁶3d¹⁰ – 3p⁶3d⁹6f)
と W^{46+} 3.8956 Å
(3p⁶3d¹⁰ – 3p⁵3d¹⁰5d)
の線強度比が減少
- FACによる計算は観測され
た線強度比の T_e 依存性
を再現
- $10^9 - 10^{15}$ cm⁻³の電子
密度領域では, 線強度比
の密度依存性無し (FAC
計算で確認済)
⇒ 電子温度計測として有用

X線分光によって発光強
度, イオン温度, 電子
温度の同時計測が可能



Contents

- 核融合プラズマにおけるタングステン不純物多価イオン研究
- LHDで観測されたタングステン発光スペクトル：X線から可視光まで
- 2025年度の成果
 - 3.7–4.0 ÅのX線波長域で観測された $W^{43+} - W^{47+}$ の発光線スペクトル
 - EUV波長域で観測された20価前後のUTAスペクトルを用いた不純物診断
R. Nishimura, T. Oishi, I. Murakami *et al.*, *submitted to Nucl. Fusion*
R. Nishimura, T. Oishi, I. Murakami *et al.*, *Nucl. Mater. Energy* **41** (2024) 101740
- まとめ

Collisional-Radiative modeling of W-UTAs

R. Nishimura *et al.*, submitted to Nucl. Fusion

- Collisional-radiative modeling was conducted for W^{17+} - W^{27+} to reproduce the observed spectra. In this study, Flexible Atomic Code (FAC) developed by M.F. Gu was used.

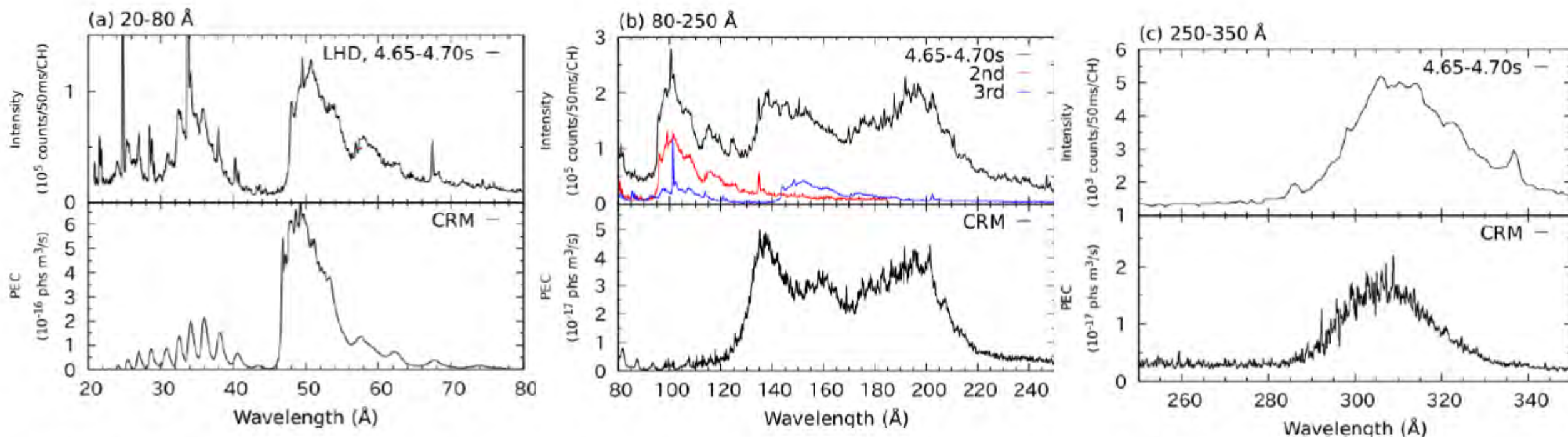
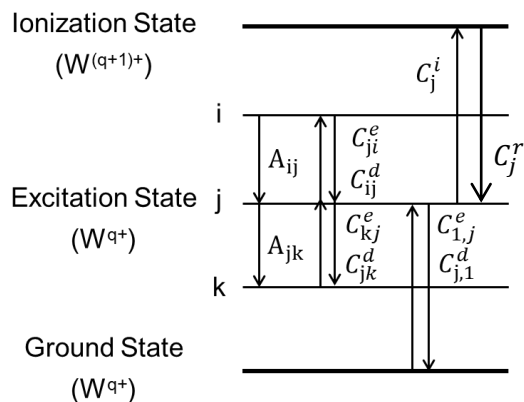


Figure 5. Comparison of the observed spectrum with the spectrum synthesized using the CR model. Panels (a) – (c) show the wavelength ranges in 20–80 Å, 80–250 Å, and 250–350 Å, respectively. Plasma condition with electron temperature of 0.5 keV and electron density of 10^{19} m^{-3} was assumed for the CR model.

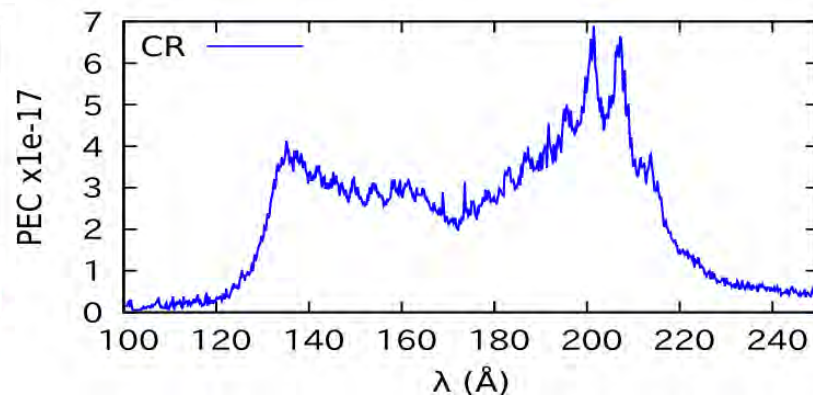
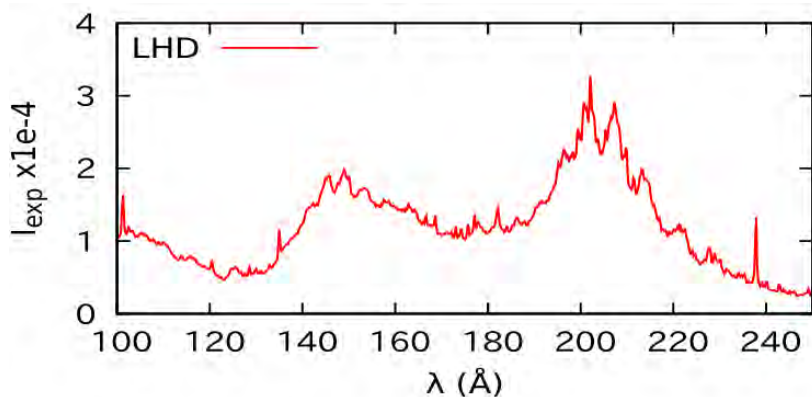
- Despite the very complex structure of UTAs, the spectra reproduced by the CR model show good agreement with the observed spectra in each wavelength region.

衝突・輻射モデル (Collisional-Radiative Model)

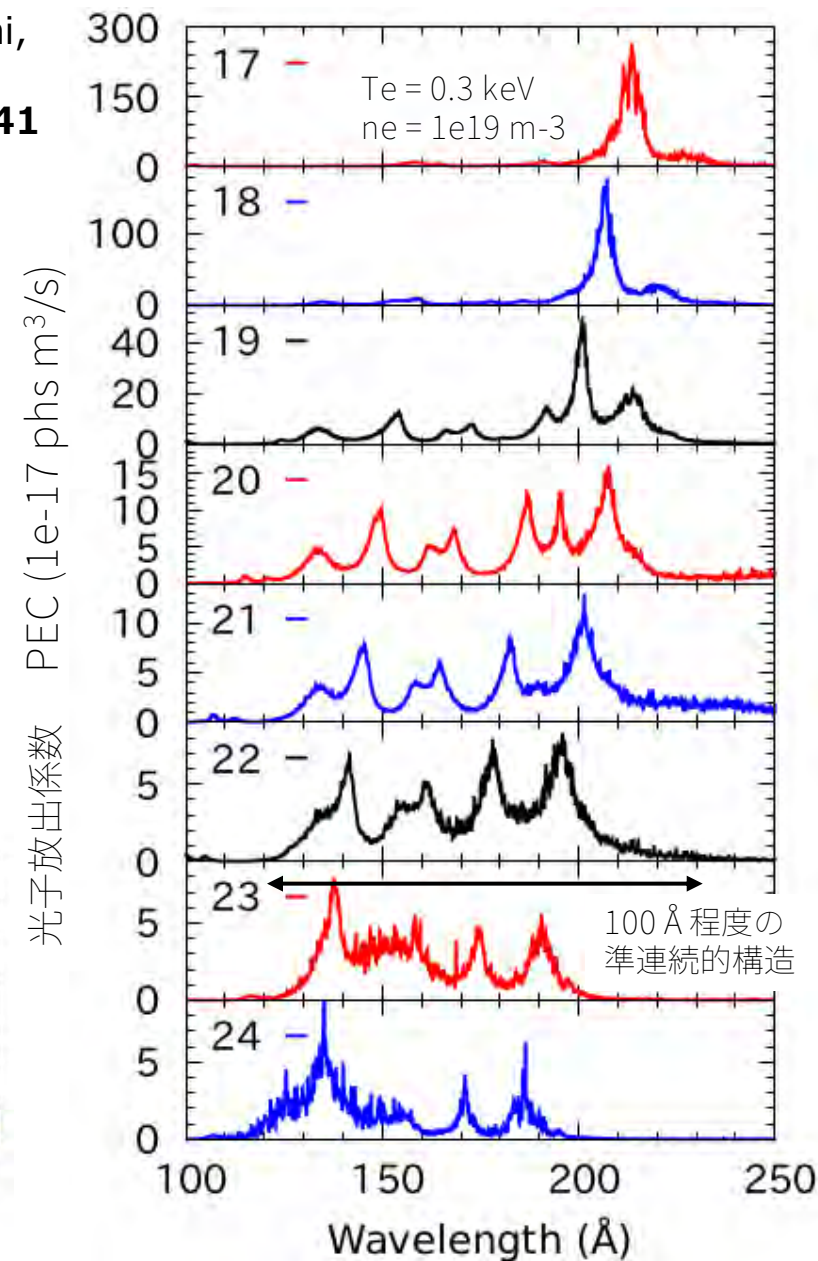


- C^i : ionization rate coef.
- C^e : electron impact excitation
- C^d : electron impact de-excitation
- C^r : radiative recombination
- A_{ij} : radiative transition rate from level i to level j
- $n(j)$: population density of level j

$$\frac{dn_j}{dt} = \sum (C_{kj}^e n_k + C_{ij}^d n_i) n_e - \sum (C_{ji}^e + C_{jk}^d) n_e n_j + \sum (A_{ij} - A_{jk}) n_j - (C^i + C^r) n_e n_j$$

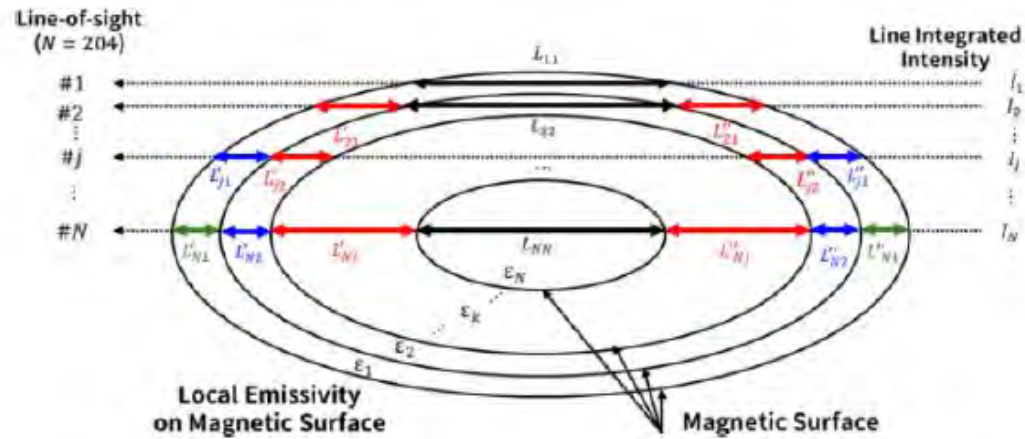


R. Nishimura, T. Oishi,
I. Murakami *et al.*,
Nucl. Mater. Energy **41**
(2024) 101740



“Slice & Stack” for estimation of local emissivity

- In Slice & Stack method, local emissivity of emission lines is estimated from line-integrated intensity.



R. Nishimura *et al.*, Atoms **13**, 21(2025).

$$I = \int_{LOS} \varepsilon dL \quad \text{LOS : Line Of Sight}$$

$$I = L\varepsilon \rightarrow \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ L_{21} & L_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{N1} & L_{N2} & L_{N3} & \cdots & L_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix}$$

R. Nishimura *et al.*, submitted to Nucl. Fusion

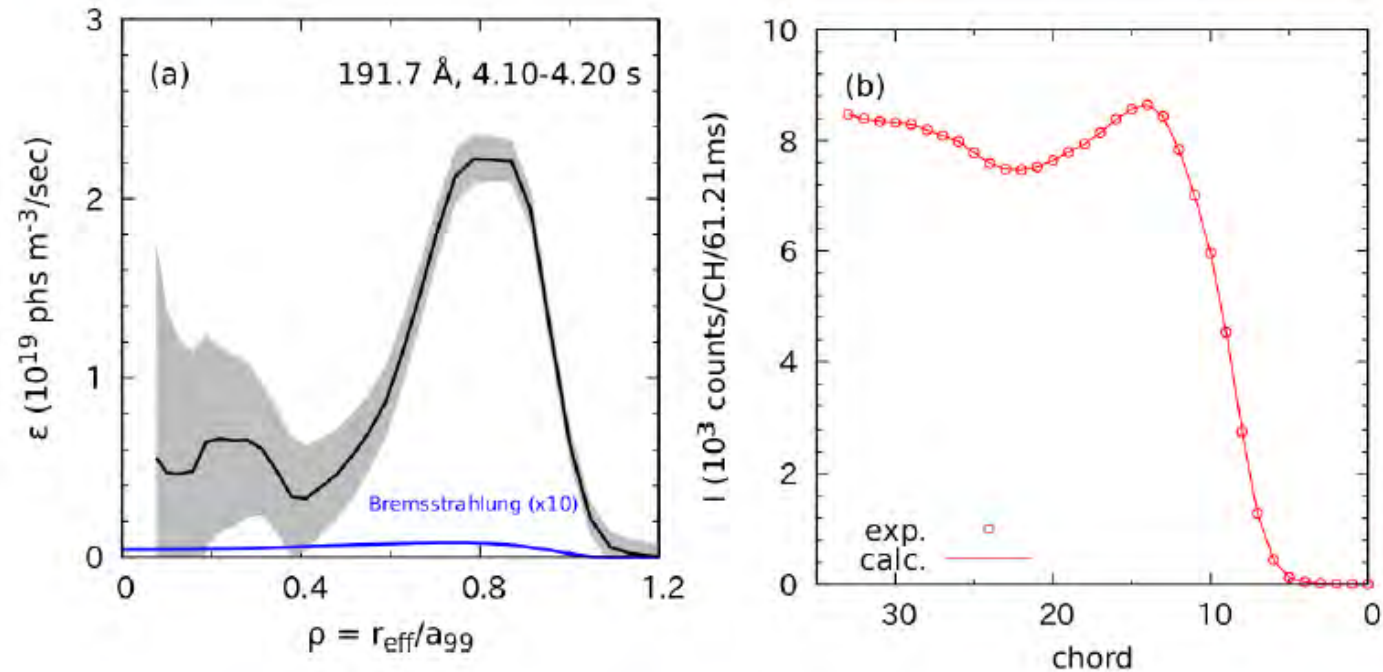


Figure 7. (a) Spatial profile of emissivity of 191.7 ± 0.2 Å and bremsstrahlung, measured at $t = 4.10-4.20$ s. (b) Comparison of the observed line-integrated intensity I and that reproduced by the calculation ($I = L\varepsilon$).

- Estimated emissivity profile reproduced the observed line-integrated intensity.

Tungsten density evaluation

R. Nishimura *et al.*, submitted to Nucl. Fusion

- Wq+ density can be evaluated

$$\varepsilon_q = \text{PEC } n_e n_q$$

- For a line includes multiple charge states:

$$\varepsilon = \sum_q \varepsilon_q = n_e \sum_q \text{PEC}_q n_q$$

- Assuming ionization equilibrium ($n_q = n_W f_q$):

$$\varepsilon = n_e n_W \sum_q \text{PEC}_q f_q$$

- f_q is ion abundance, depends on (T_e, n_e)
- Data on OPEN-ADAS was used.

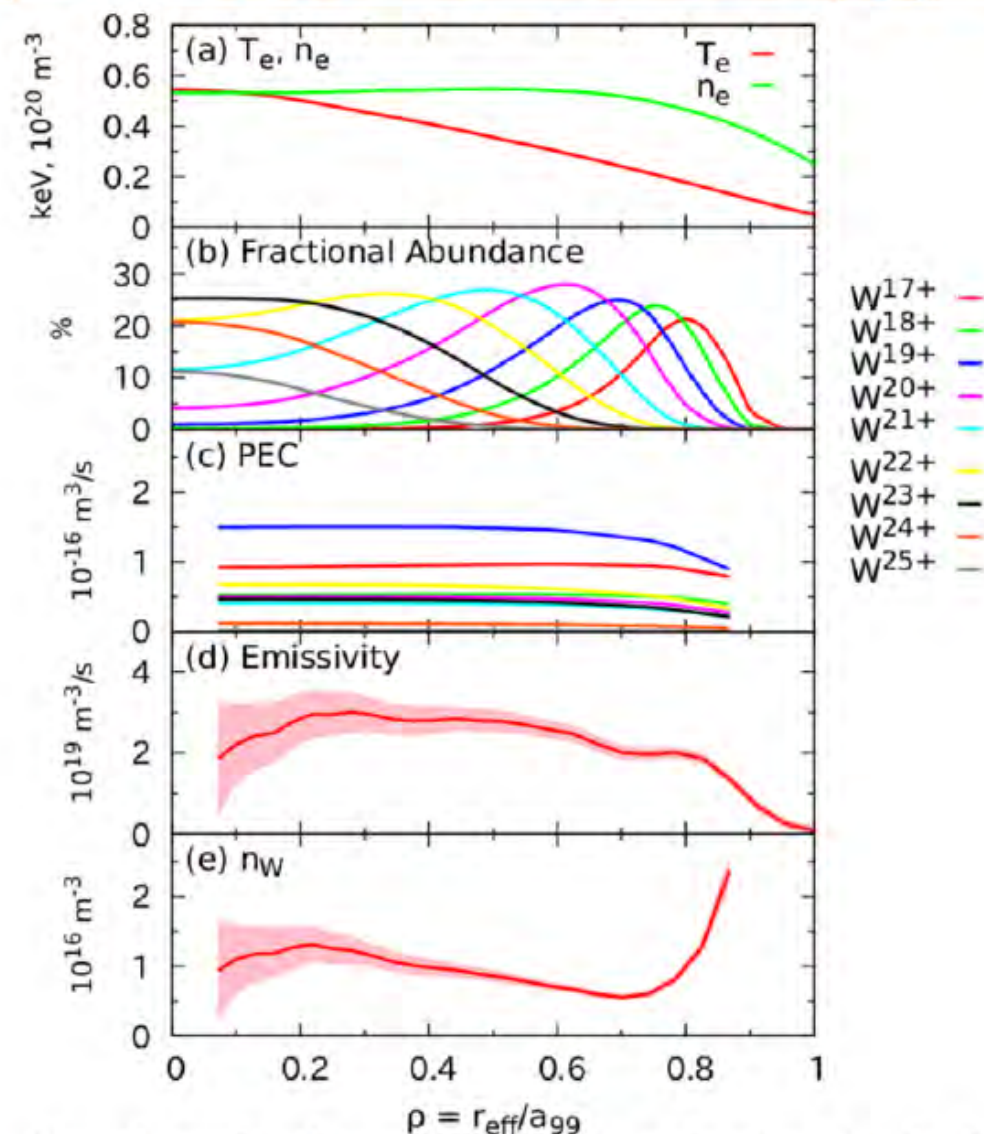


Figure 9. Typical result of tungsten density evaluation. Panels (a)-(e) represent the spatial profiles of T_e and n_e , ion fractional abundances, PECs, Emissivity of $191.7 \pm 0.2 \text{ \AA}$, and tungsten density at $t = 4.50\text{-}4.60 \text{ s}$.

Tungsten density profiles

R. Nishimura *et al.*, submitted to Nucl. Fusion

- Similar to the emissivity profile, injected pellet was first ablated in the edge plasma and accumulated in the core plasma.
- Impurity concentration reached 10^{-3} at $t = 5.1$ s.

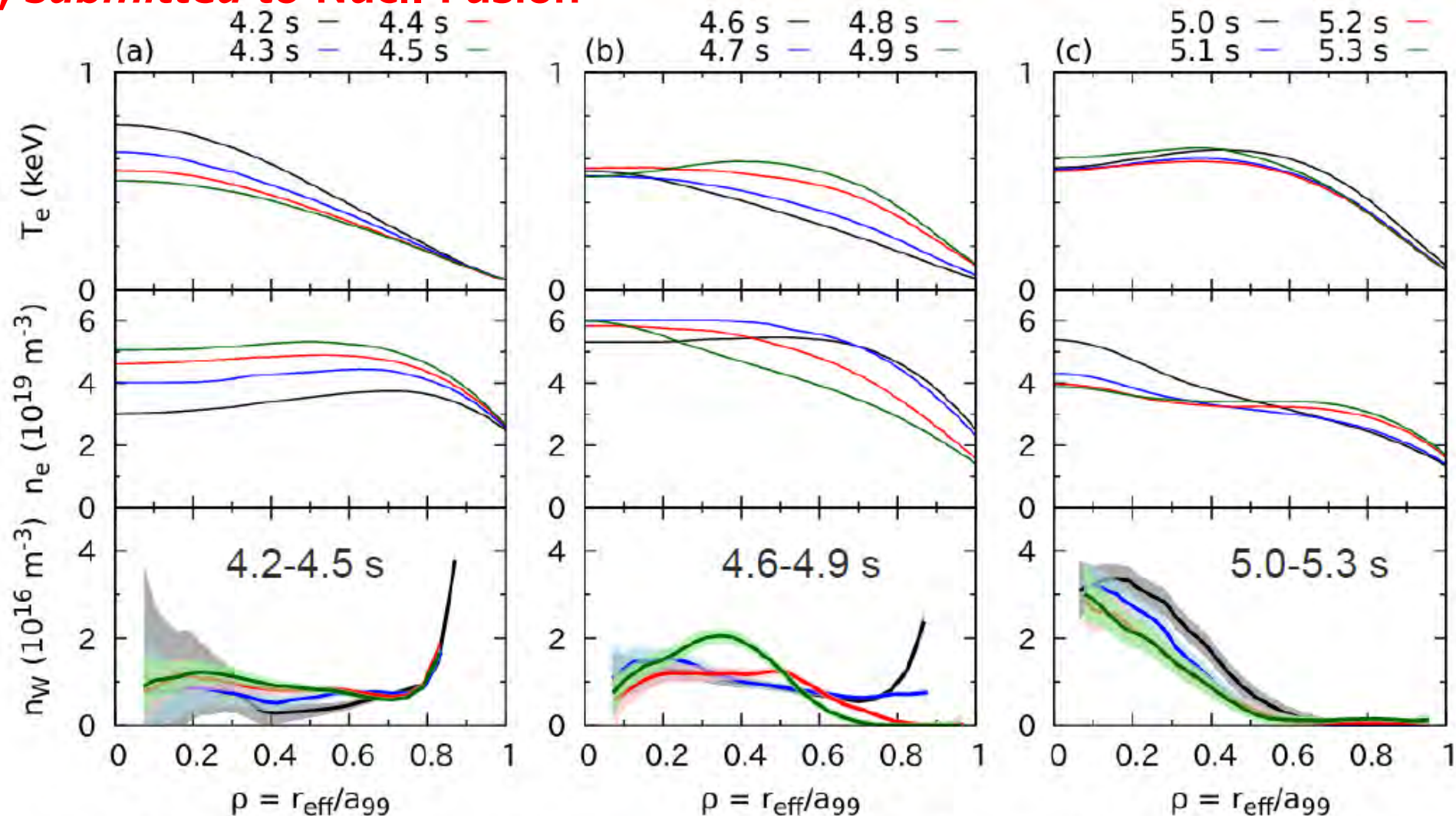


Figure 10. Spatiotemporal evolution of electron temperature, electron density, and tungsten density. Panels (a)-(c) show the time windows 4.20-4.50 s, 4.60-4.90 s, and 5.00-5.30 s, respectively.

**UTAスペクトルから
タングステンイオン
密度の時空間構造を
求めることに成功**

Summary

LHDのNBI加熱プラズマに微小なタングステン金属線をペレットとして入射し、発光線スペクトルを分光計測することでタングステン不純物の挙動を研究してきた。

- X線から可視光までの波長領域を同時に分光計測することで、タングステン中性原子から47価イオンまでの発光スペクトルを観測してきた。スペクトル形状は線スペクトルとUTAスペクトルに大別できる。
- 2025年度の成果
 - 電子温度が3–5 keV程度の時、3.7–4.0 ÅのX線波長域で、43–47価の発光線が多数観測された。観測された発光線を用いて、発光強度、イオン温度、電子温度の同時計測ができる可能性を示した。
 - 電子温度が0.5 keV程度の時、200 Å前後のEUV波長域で、17–25価から構成されるUTAスペクトルが観測された。FACコードを用いたCRモデル計算で構造を再現し、発光強度の径方向分布からタングステンイオン密度の径方向分布を求めることに成功した。
- 未解析のデータ多数。発光線探索、不純物輸送、解析法提案など、今後もLHDの分光データ活用を加速したい。