

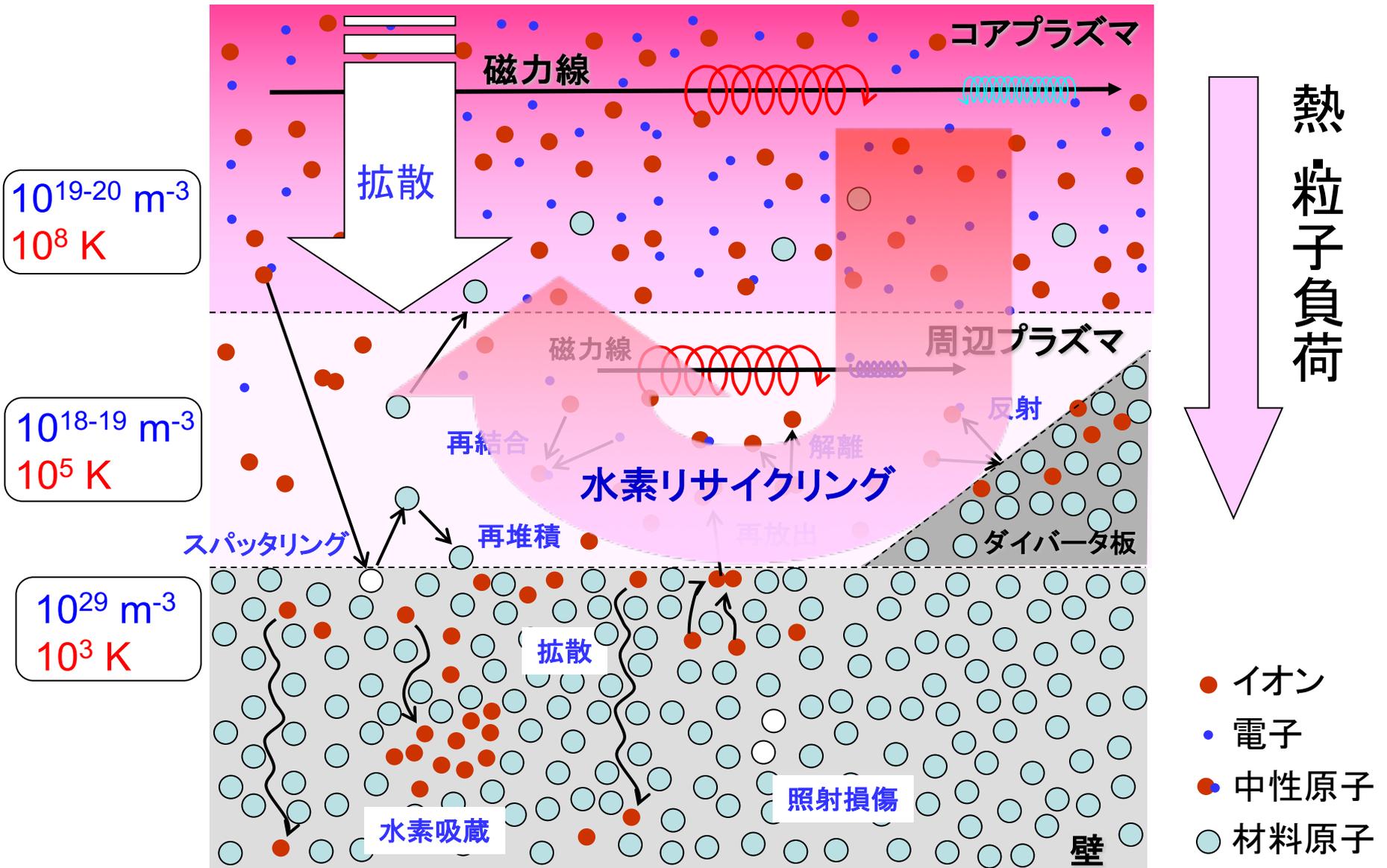
固体、気体、プラズマ中の水素循環の理解と制御

4. 周辺プラズマと壁との相互作用

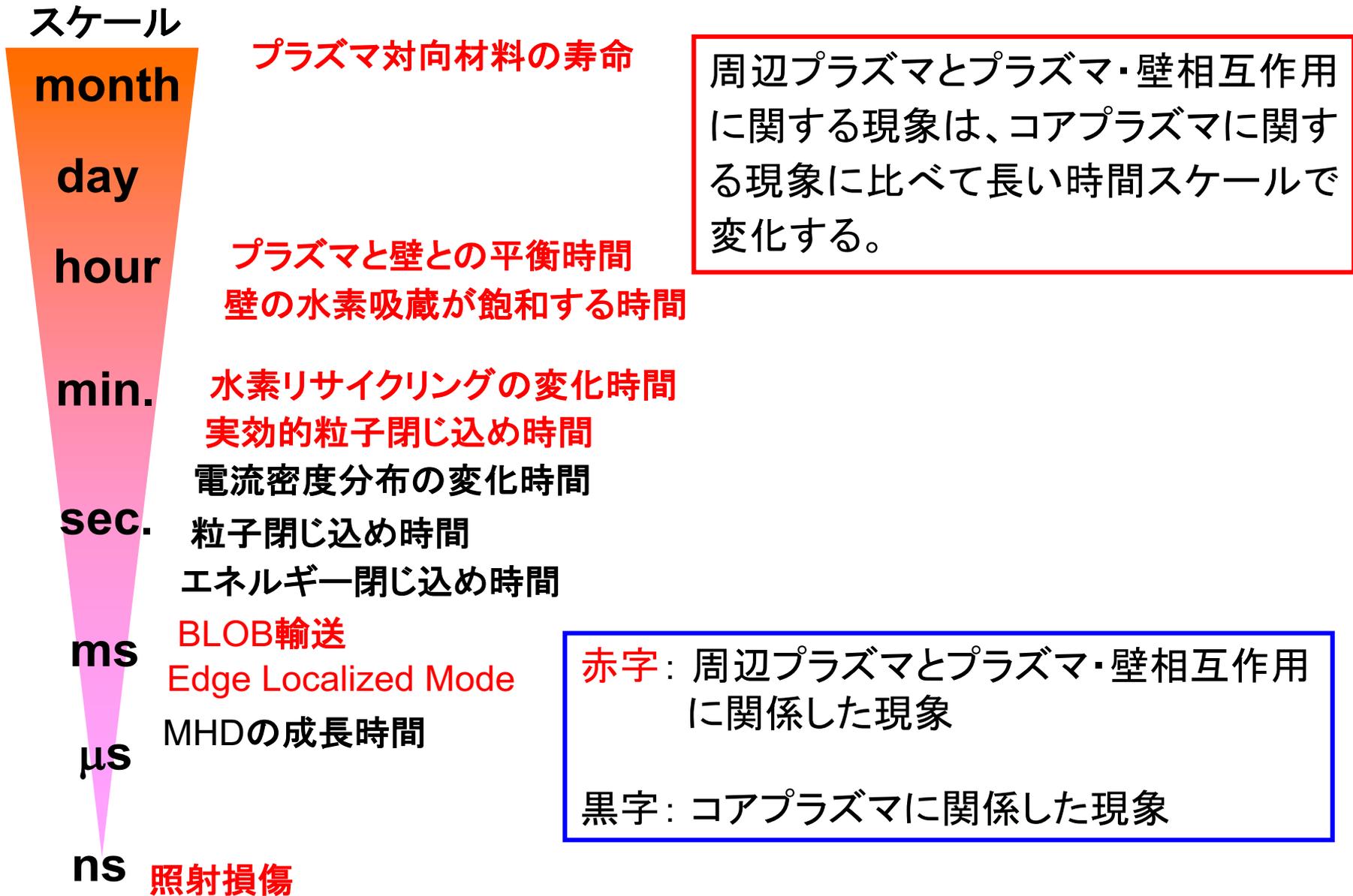
坂本瑞樹

筑波大学プラズマ研究センター

周辺プラズマ及びその壁との相互作用

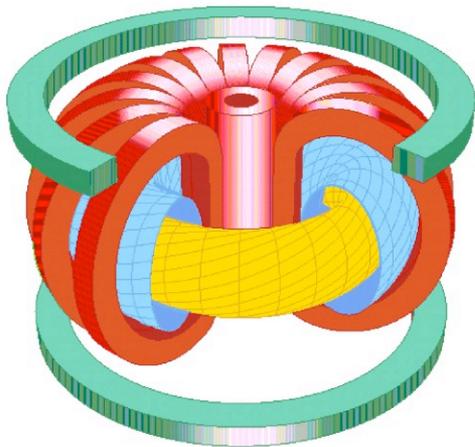
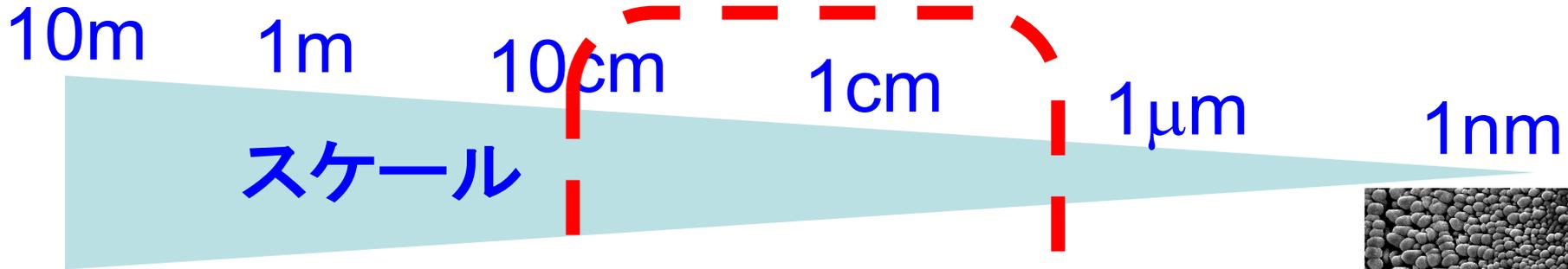


周辺プラズマ及びプラズマ・壁相互作用研究の 時間スケール

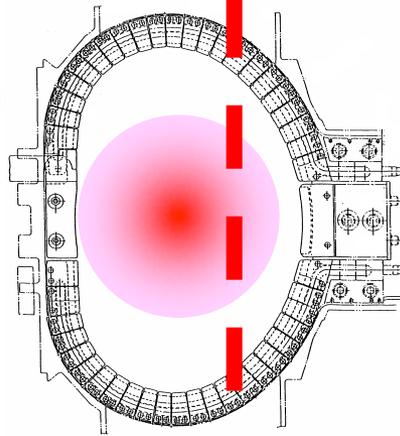


境界プラズマ及びプラズマ・壁相互作用研究の 空間スケール

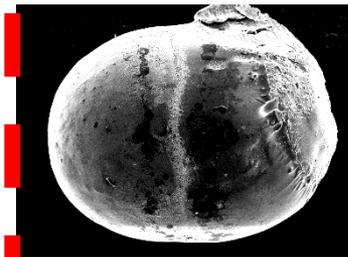
各空間スケールでの現象に関して、巨視的観点と微視的観点
の双方から総合的に理解することが重要



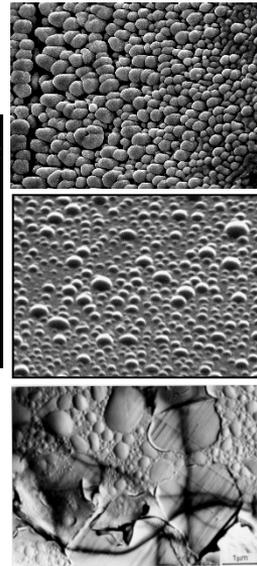
粒子バランス
中性粒子輸送
不純物輸送



局所リサイクリング
局所熱負荷



ダスト



再堆積
微細構造
スパッタリング
照射損傷

本発表の概要

材料(W)から放出または反射した水素原子、分子の状態に注目して、GAMMA10/PDXで行った2つの実験結果を基に議論する。

1. タングステンターゲットへのプラズマ照射実験

反射原子の励起状態に着目

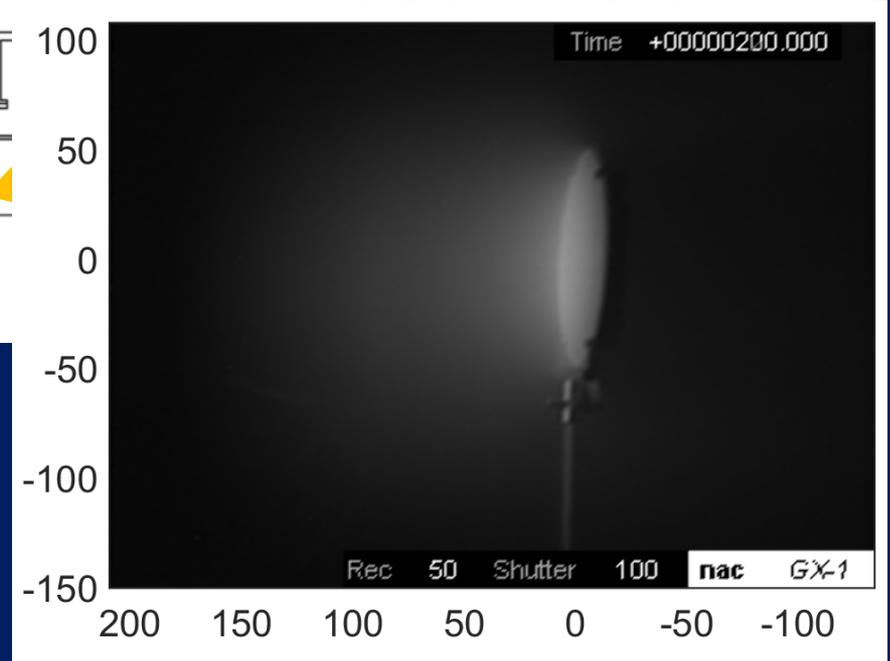
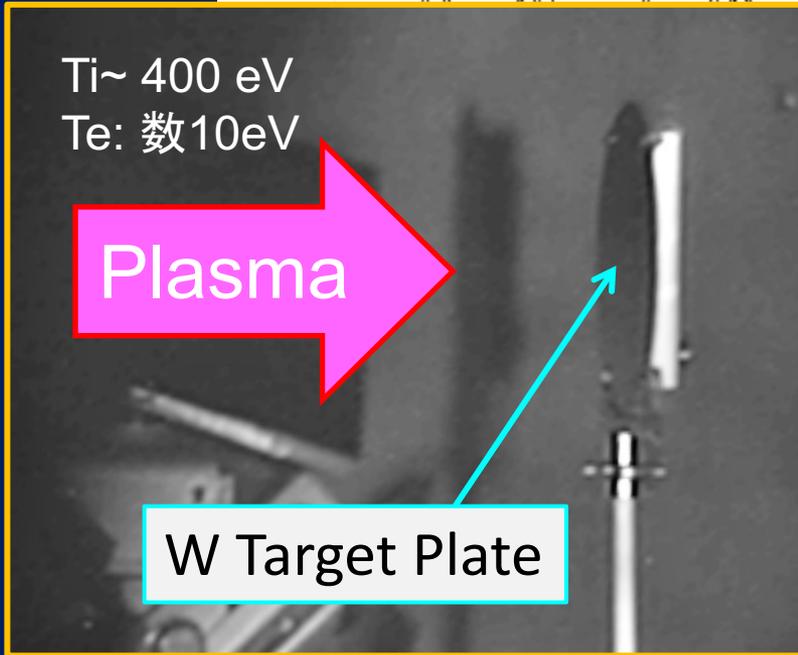
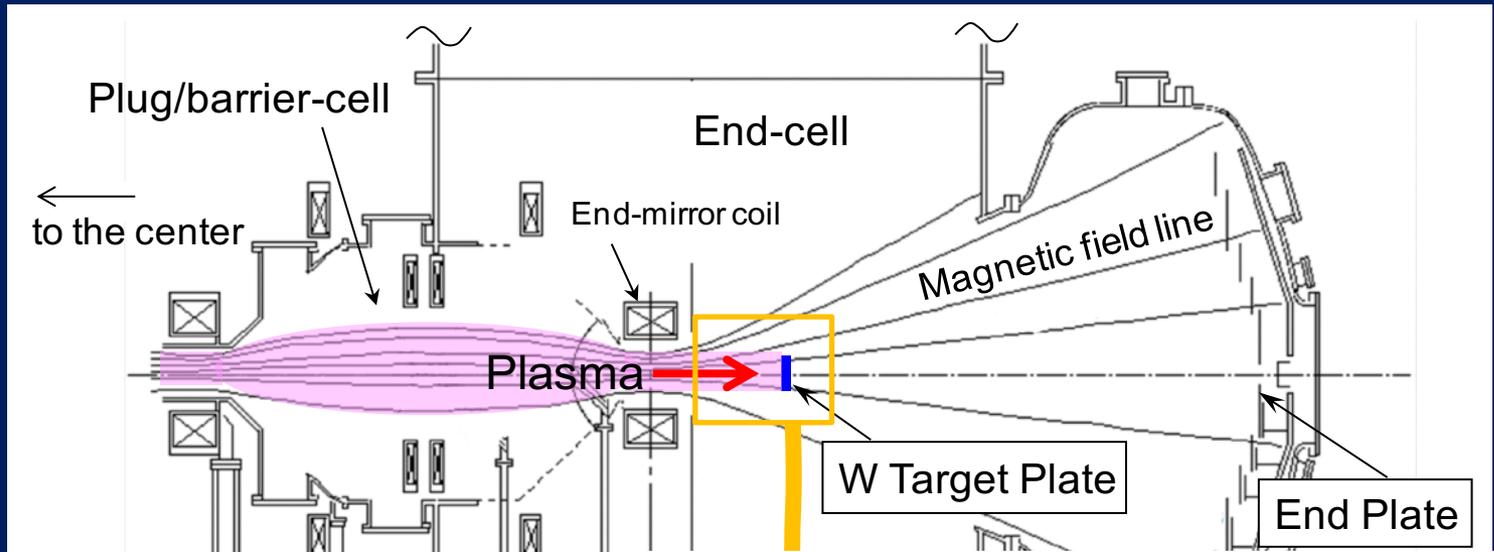
2. 高温ターゲット実験

分子の励起状態に着目

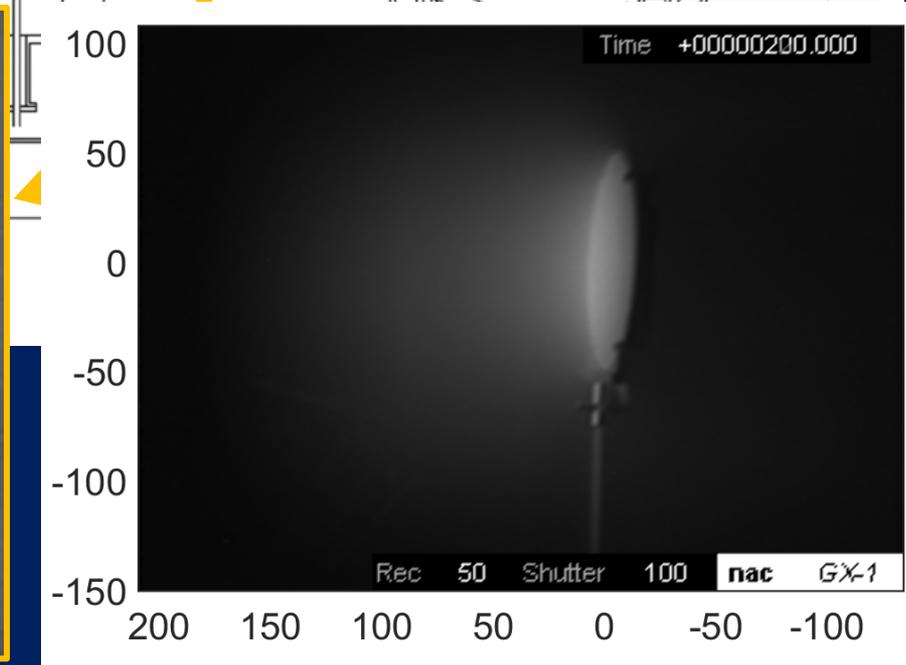
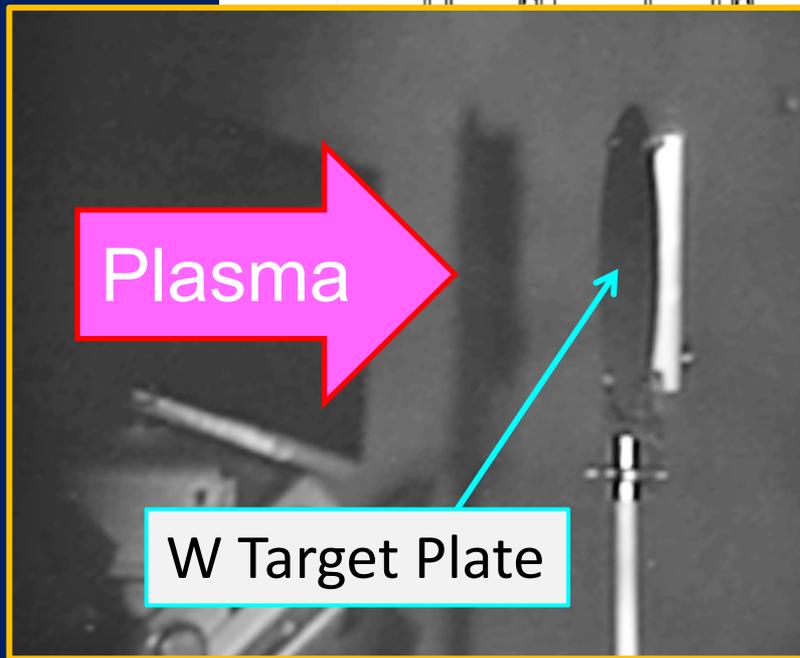
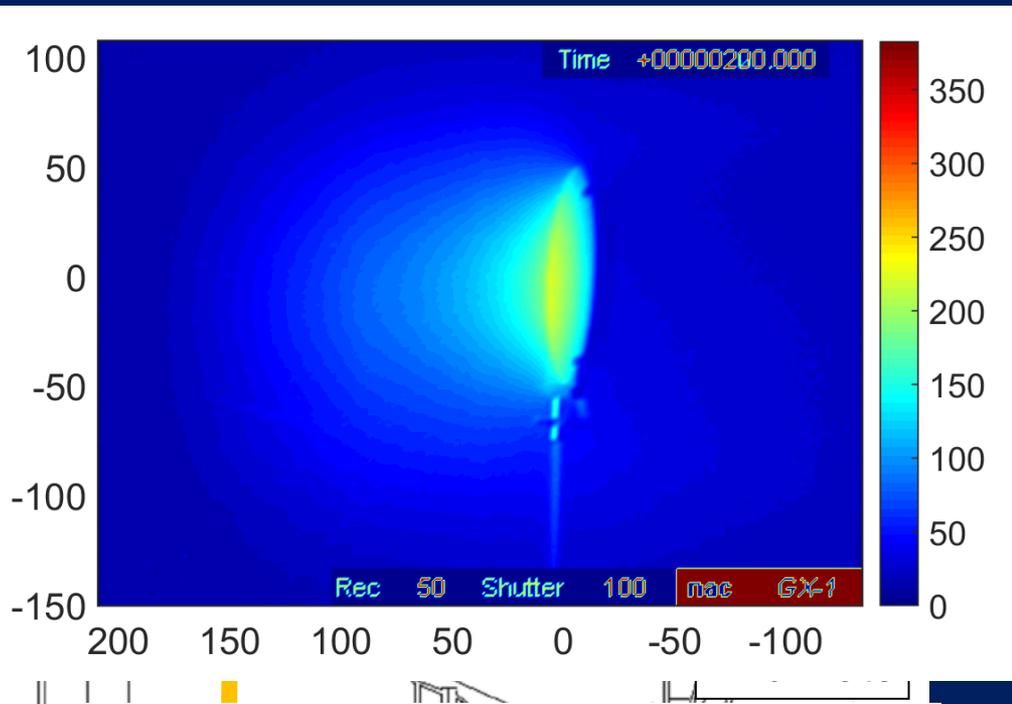
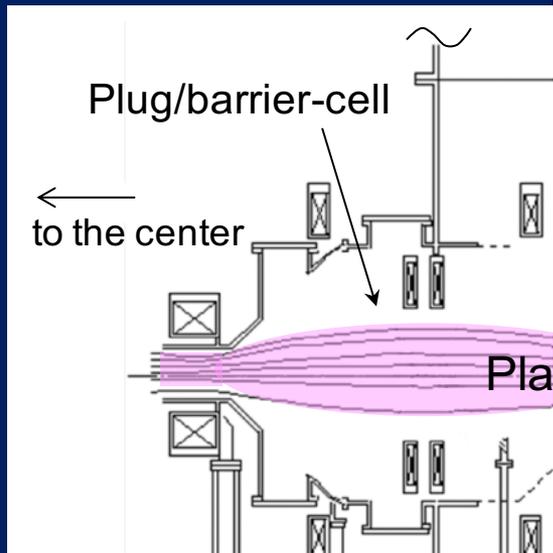
GAMMA10/PDXで行われているダイバータ模擬実験の特徴のひとつは、バックグラウンドの真空度が高い状態で、ターゲットにプラズマを照射することができるので、リサイクリング水素の状態が見やすい。

1. タングステンターゲットへの プラズマ照射実験

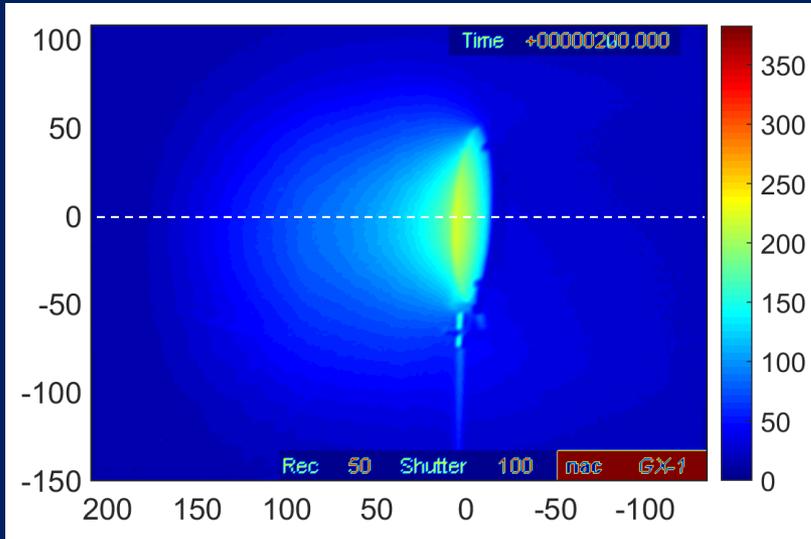
タングステン板に端損失プラズマを照射



タングステン板に並



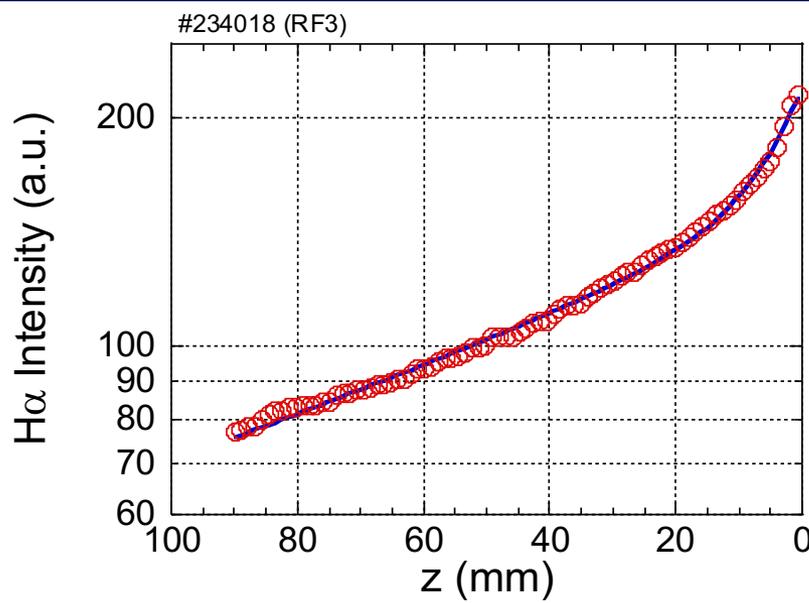
H α 線強度の空間分布: 2つの減衰長が存在



$$\tau_{\text{short}} \sim 7 \text{ mm}$$

$$\tau_{\text{long}} \sim 100 \text{ mm}$$

これらの減衰長は、イオン化の平均自由行程 (>100m) と比べて非常に短い

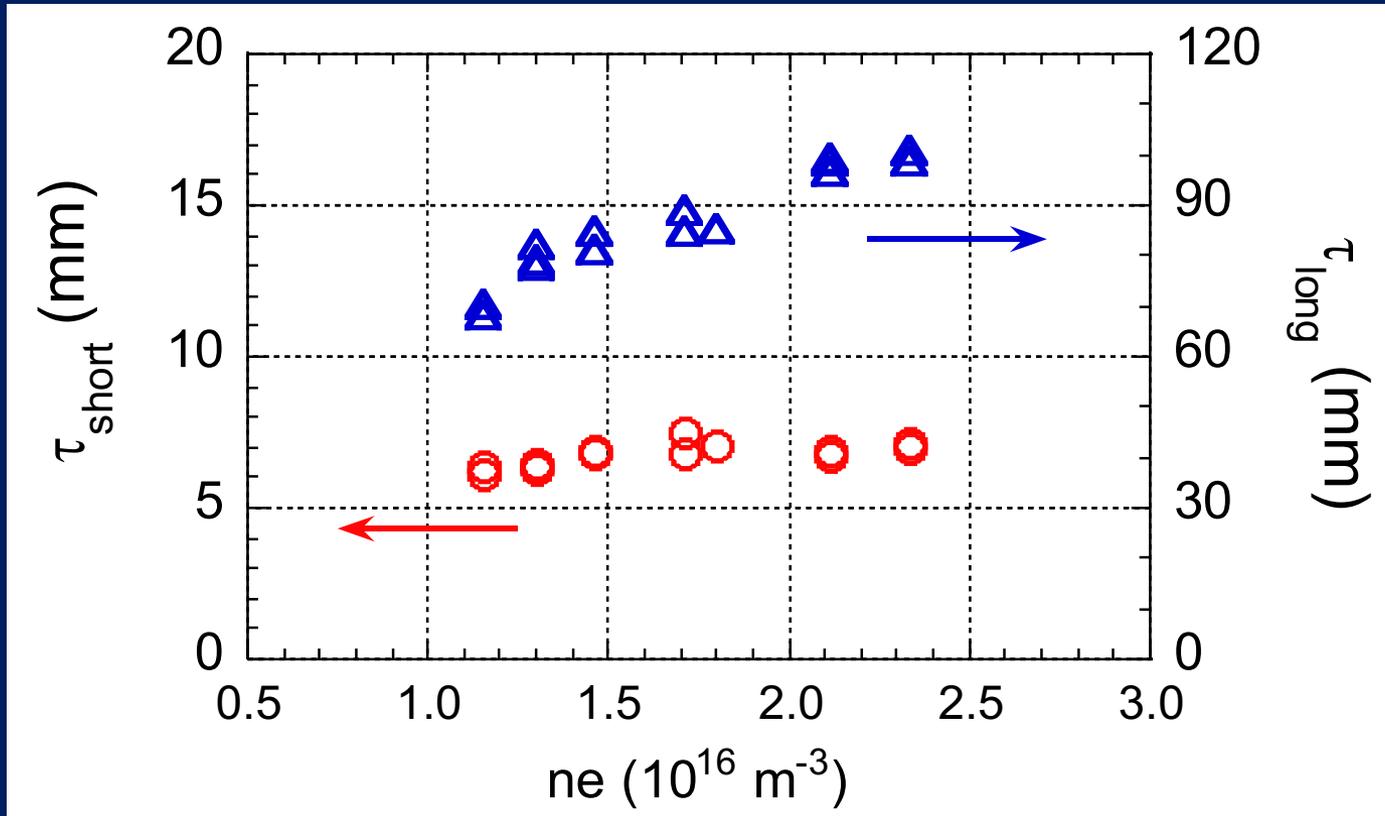


$$T_e \sim 20 \text{ eV},$$

$$T_i \sim 200 \text{ eV}$$

$$n_e \sim 2 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$$

減衰長の密度依存性



観測結果

- H α 線強度の空間分布: 2つの減衰長が存在
- 減衰長はイオン化の平均自由行程 (>100m) と比べて非常に短い
- 減衰長は電子密度に依存しない

➡ 電子衝突励起による発光ではないことを示唆している

タングステンで反射した水素原子の一部が励起している

Transition		A ⁻¹ (10 ⁻⁸ s)	τ (nm)
3	2	2.3	3.7
4	3	11	18
5	3	45	72

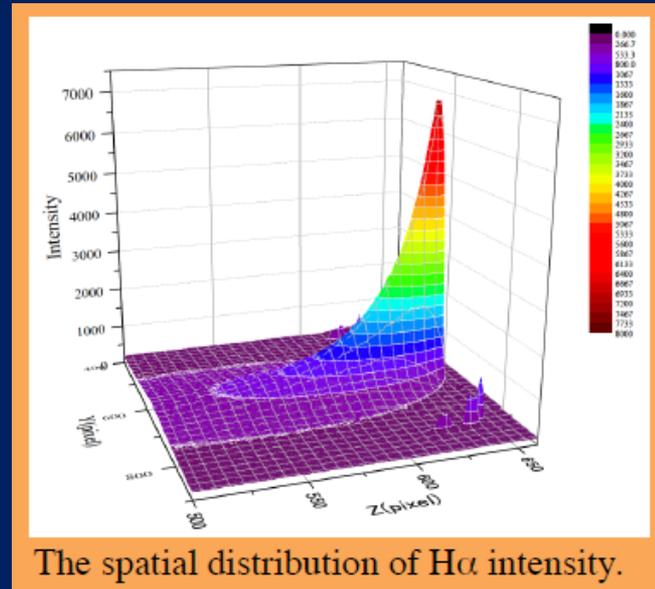
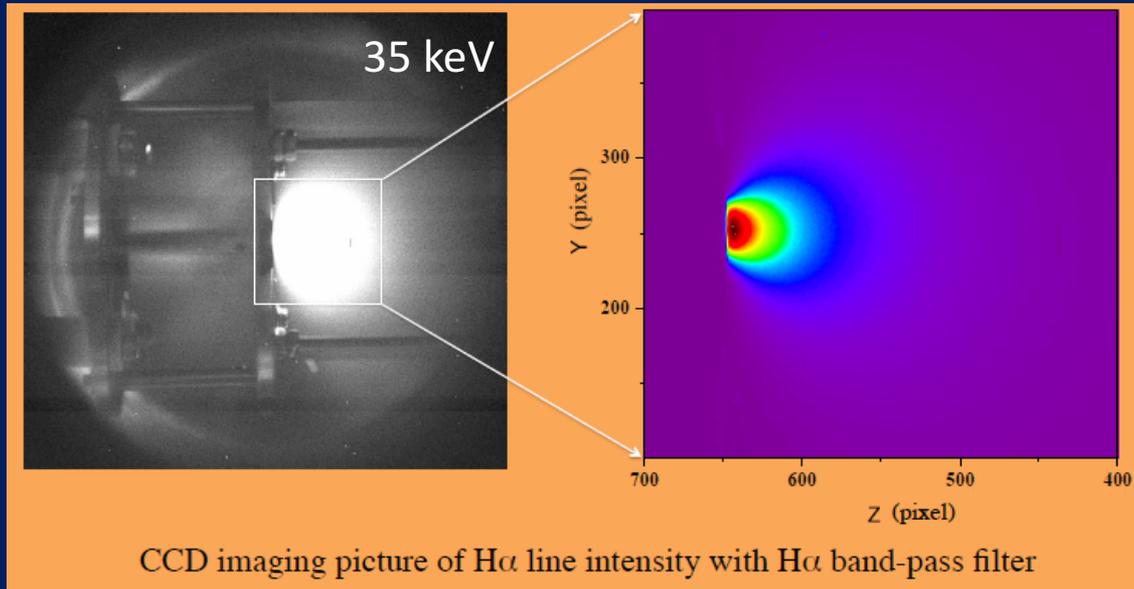
(T_i ~ 200 eV (evaluated by ELIEA), R_E = 0.5)

- 減衰長が2つある理由は、n=4 or n=5からn=3への遷移、n=3からn=2へのカスケードプロセスに起因していると考えられる。

タングステンへの高エネルギー水素イオン照射

反射原子からの発光

2つの減衰長

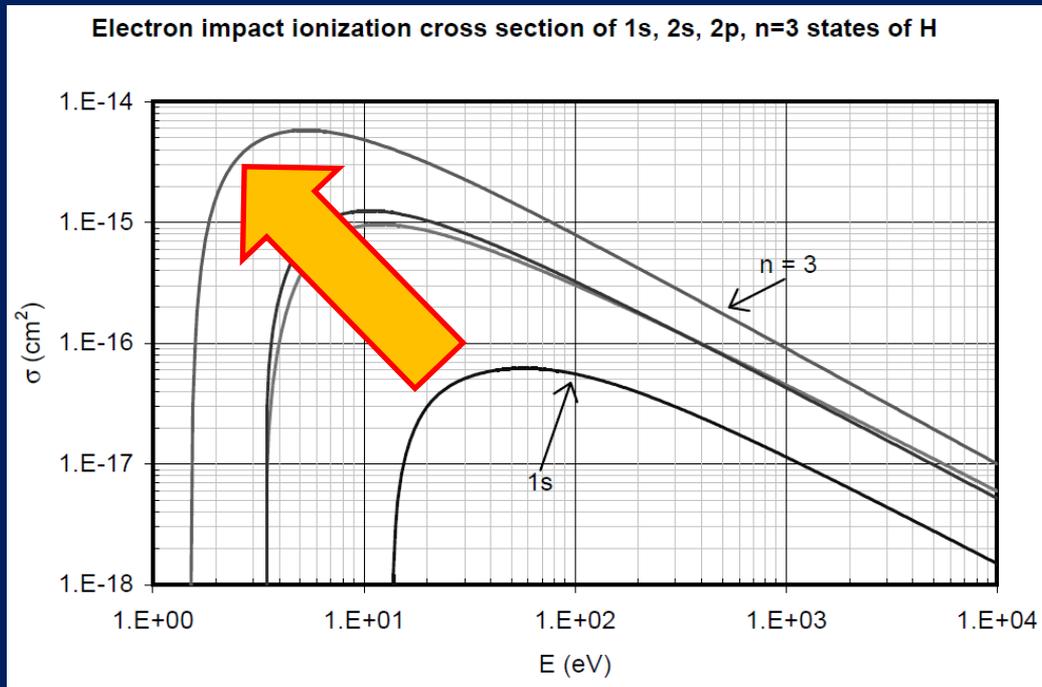


H. A. Sakaue, D. Kato et al., Plasma conference 2014, 18PB-075.

High energy H^+ irradiation to Mo

T. Tanabe et al., “Hydrogen reflection and $H\alpha$ emission”,
J. Nucl. Mater. 220-222 (1995) 841.

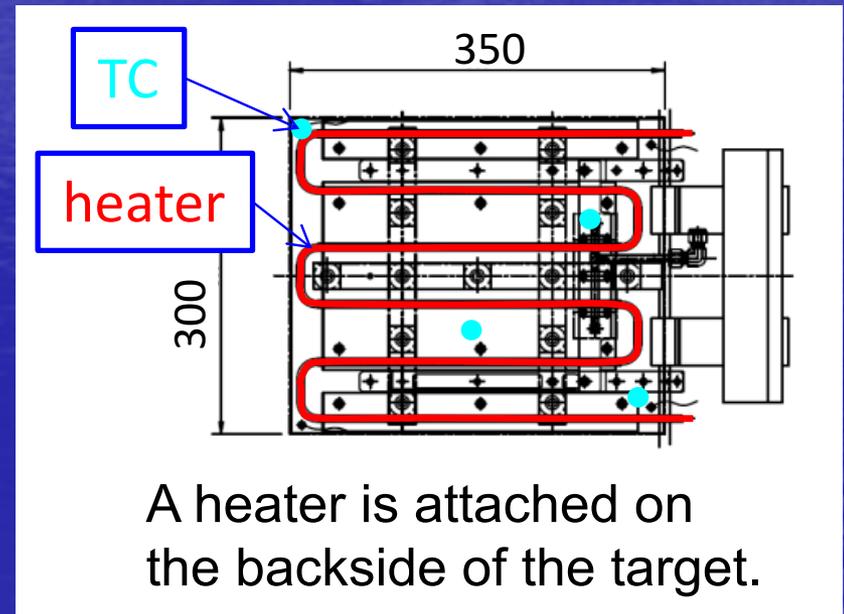
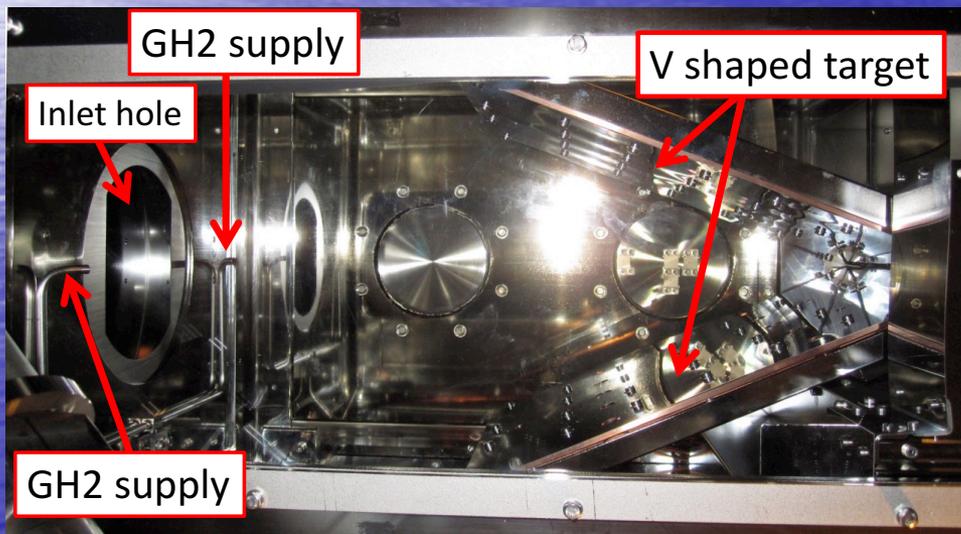
Impact of the excited state of the reflected H atoms on the ionization



周辺プラズマでのイオン化の促進

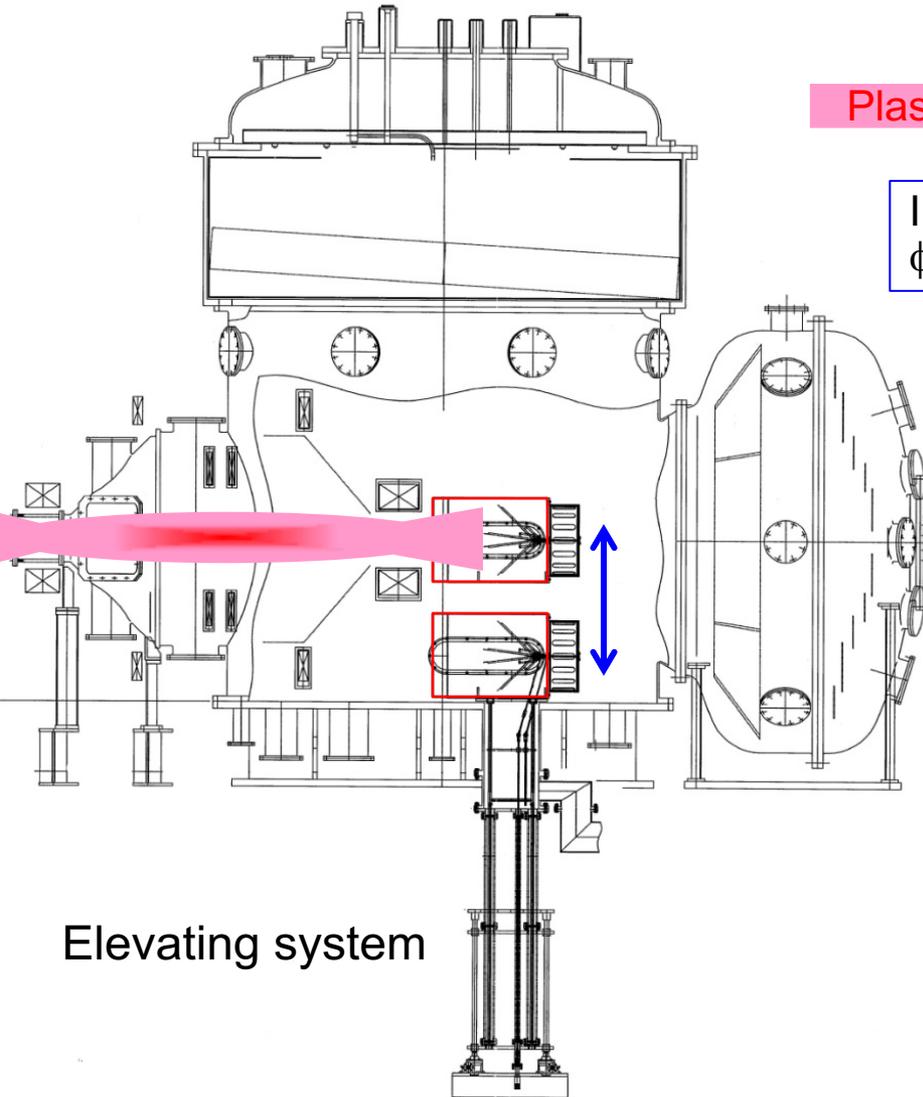
2. 高温ターゲット実験

Impact of target temperature on Hydrogen Recycling



Divertor Simulation Experimental Module (D-module)

Side view of GAMMA 10 end-mirror vacuum vessel



Elevating system

D-module

Plasma

Inlet hole
 ϕ 0.2 m

rectangular parallelepiped box

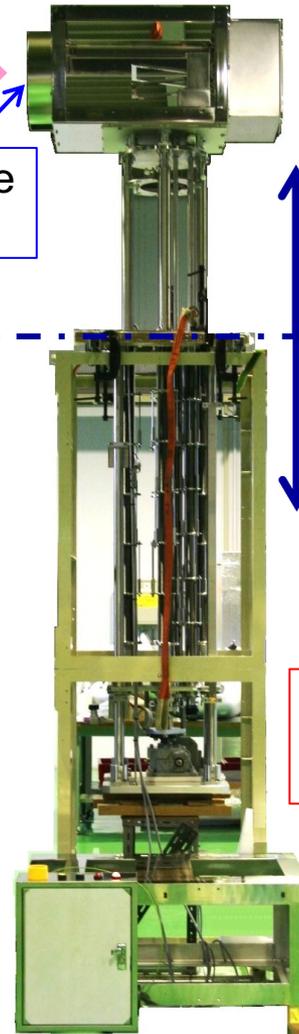
Width: 0.5 m
Height: 0.48 m
Length: 0.7 m

Inside the vacuum vessel

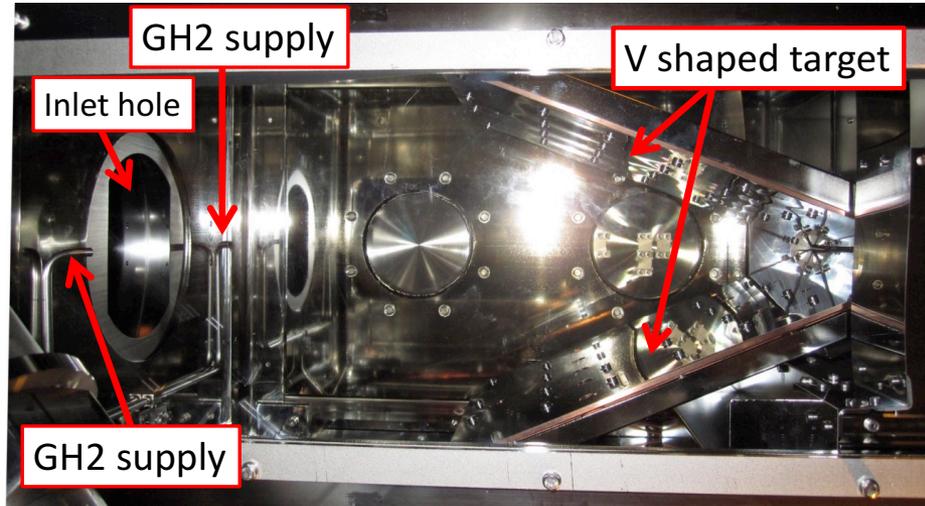
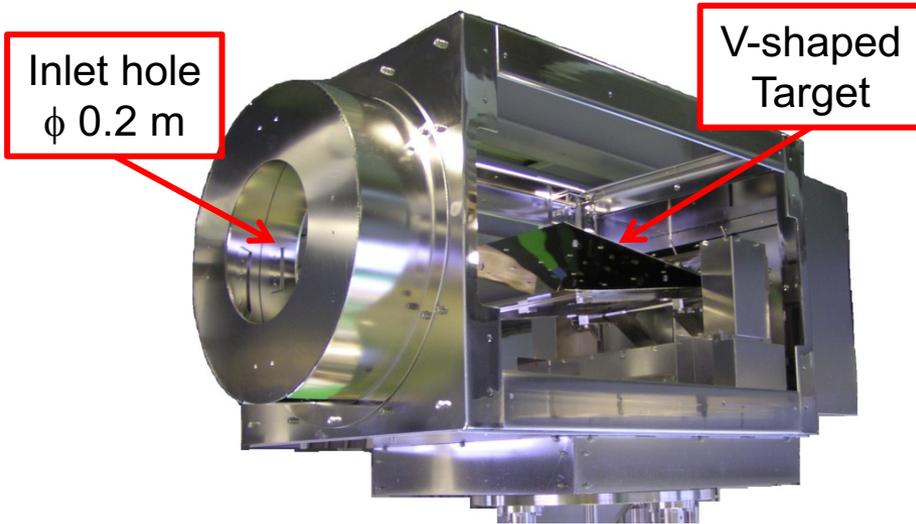
Outside the vacuum vessel

D-module drive unit

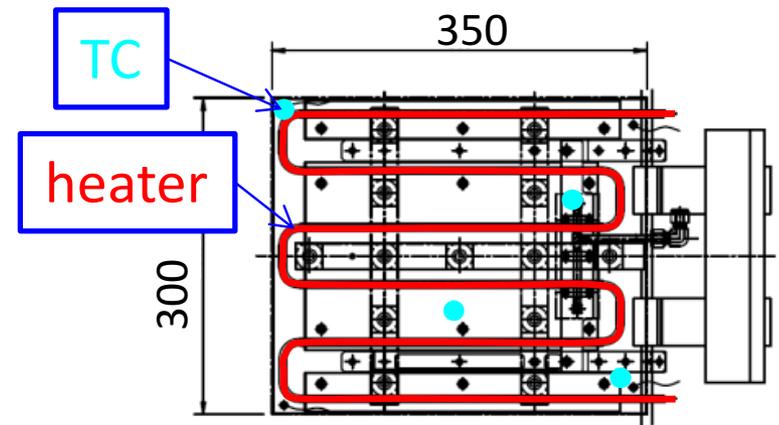
Stroke: 0.85 m
Driving speed: 4 mm/s



Divertor Simulation Experimental Module (D-module)

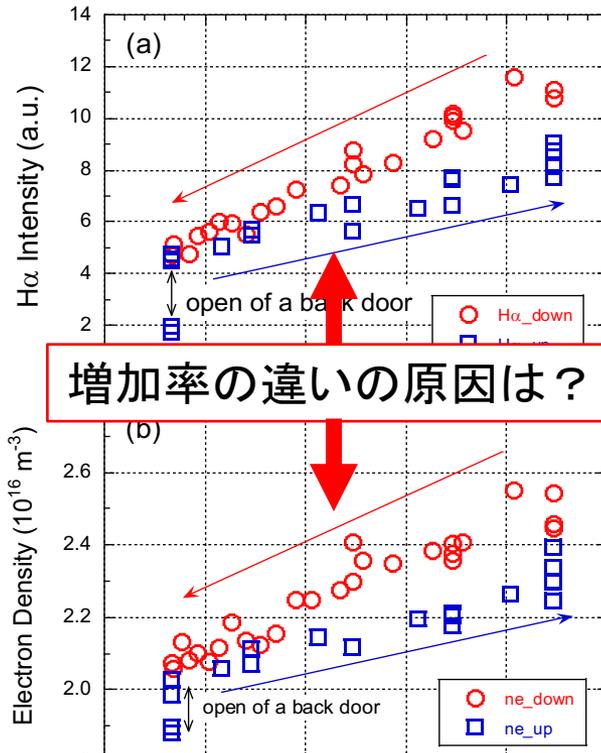
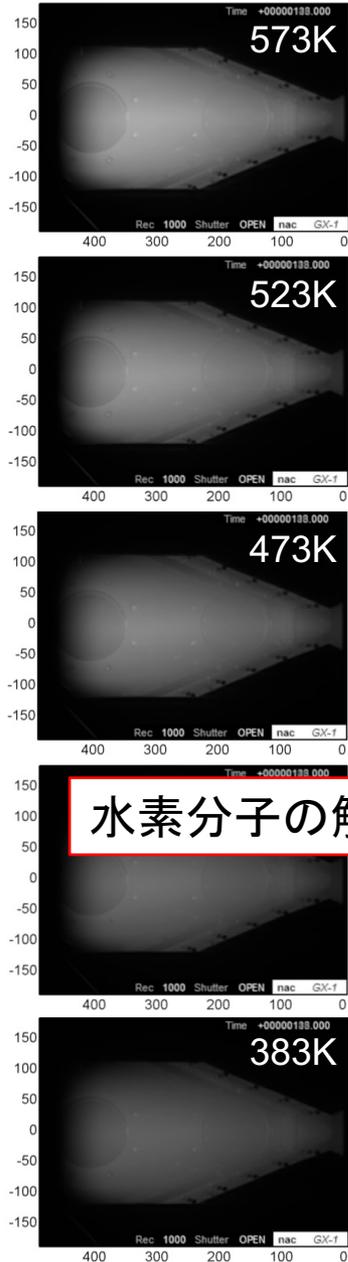


- ▶ タングステン製V字型ターゲット板 (0.3 m x 0.35 m x 0.2 mm).
- ▶ V字ターゲットの開き角は遠隔操作で **15° から 80°**まで変更可能
- ▶ プラズマ流入口からV字ターゲットに向けて水素ガス供給することが可能
- ▶ ターゲット板は**573 K**まで昇温することが可能



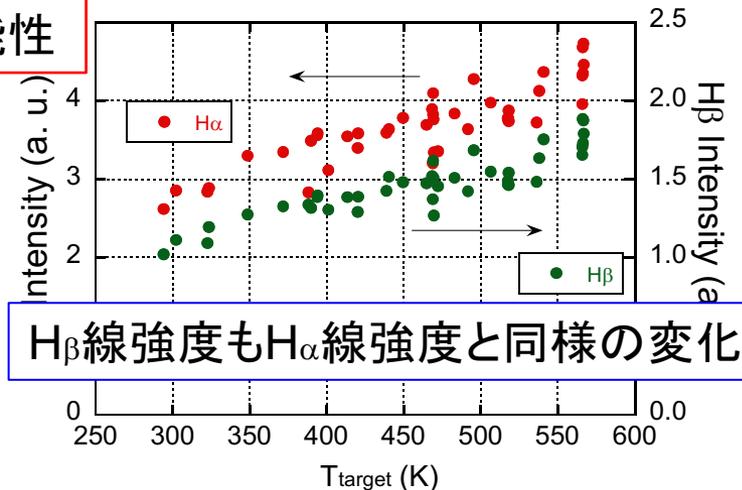
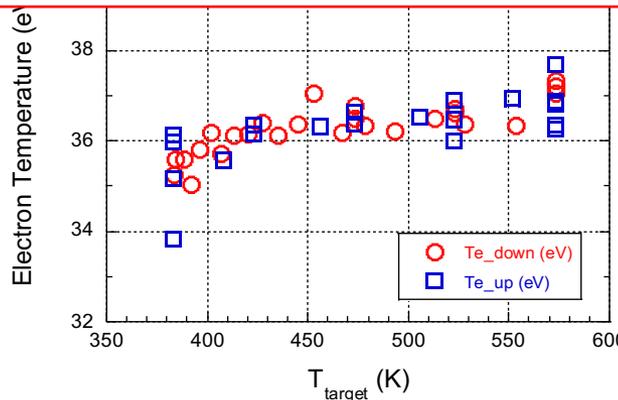
A heater is attached on the backside of the target.

水素リサイクリングのターゲット温度依存性



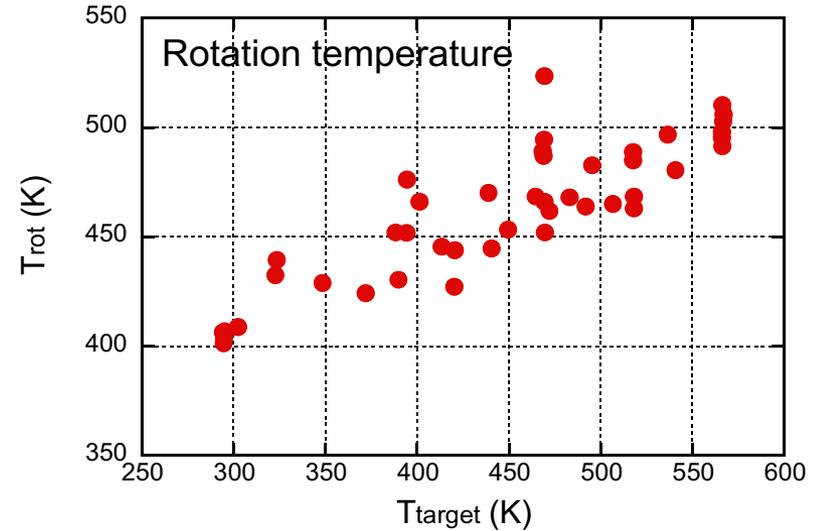
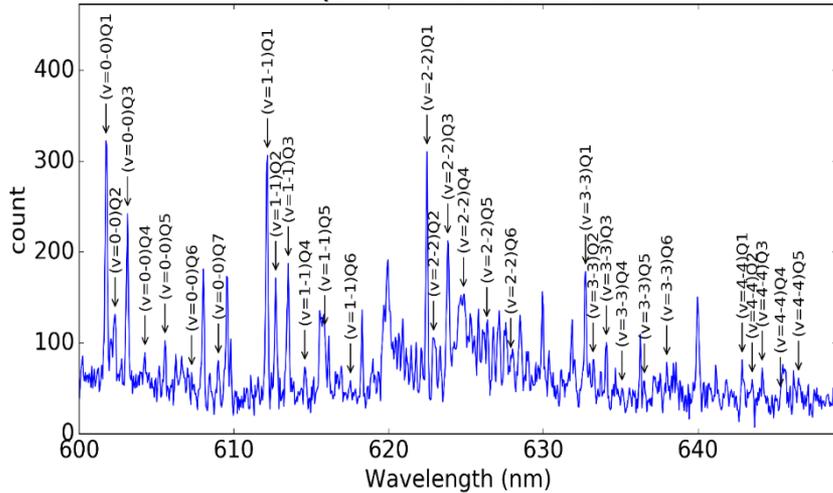
- ターゲット板温度を573K からプラズマ照射を開始。383Kまで下げた後、再び573Kまで昇温させた。
- The $H\alpha$ 線強度は、ターゲット温度の上昇とともに、**2倍**に増加。
- 一方、電子密度の増加は、**約20%**。電子温度は、ターゲット板温度に依存しない。
- これらの結果は、ターゲット温度とともに水素リサイクリングが促進したことを示唆している。

水素分子の解離により励起原子が生成された可能性

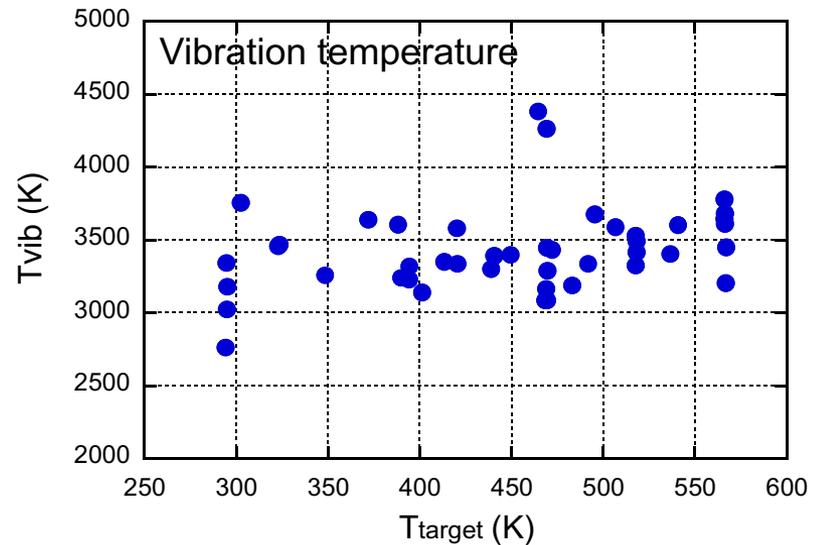
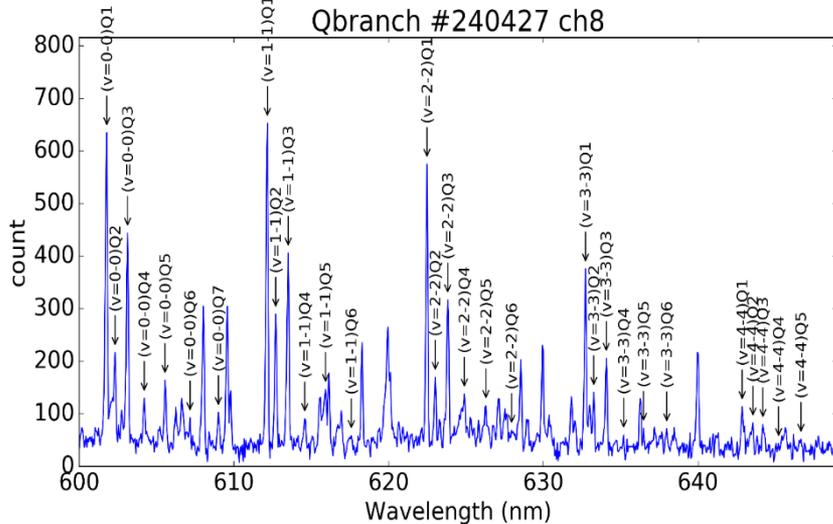


ターゲット温度とともに分子の回転温度が上昇

Qbranch #240383 ch8



Qbranch #240427 ch8



まとめ

- 周辺プラズマと壁との相互作用について、タンゲステンで反射した水素原子の励起状態、高温ターゲットから放出された分子の状態に注目して、GAMMA 10/PDXで行った実験結果を紹介した。
- 水素リサイクリング過程において、水素原子、水素分子の励起状態の重要性が改めて認識された。