

# GAMMA10/PDXにおける高温ターゲット実験 -QUEST実験への期待-

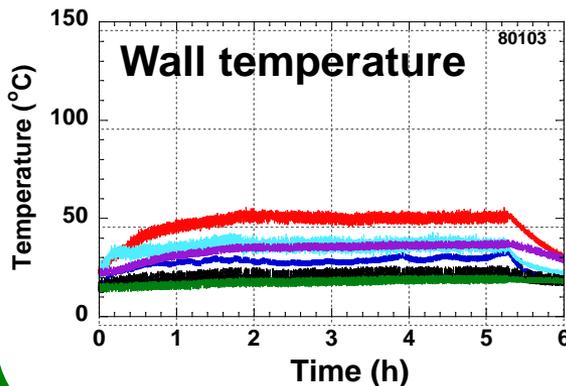
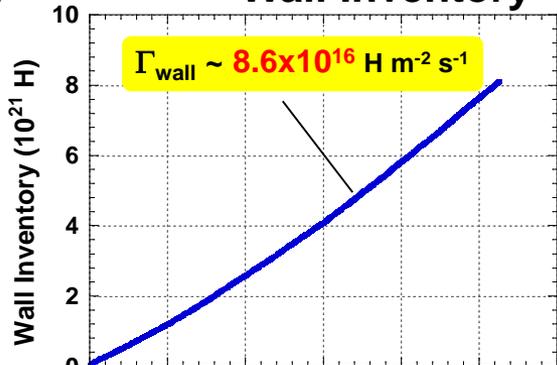
坂本瑞樹、GAMMA10/PDXグループ  
筑波大学プラズマ研究センター

# 粒子制御におけるプラズマ対向壁温度の重要性

$$T_{\text{wall}}^{\text{max}} \sim 55^{\circ}\text{C}$$

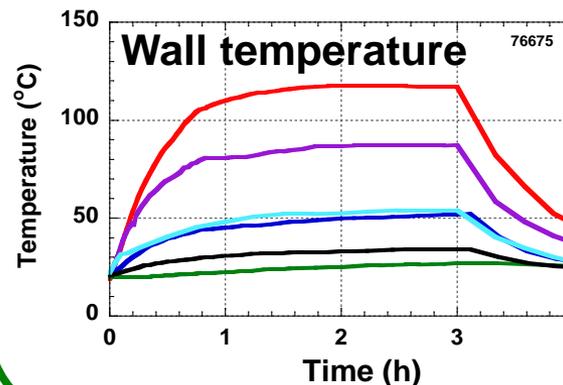
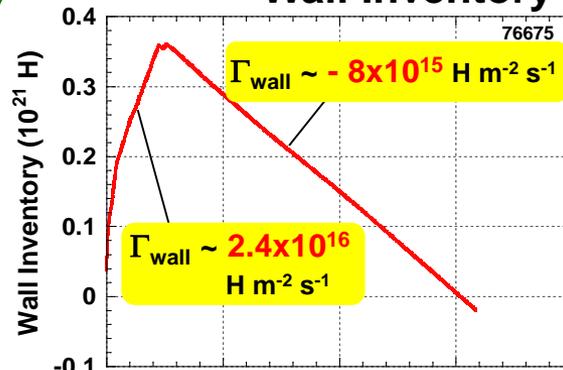
$$T_{\text{wall}}^{\text{max}} \sim 120^{\circ}\text{C}$$

Wall Inventory



$$\tau_D \sim 5 \text{ h } 16 \text{ min}$$

Wall Inventory



$$\tau_D \sim 3 \text{ h } 10 \text{ min}$$

真空容器温度が壁の役割  
(Sink, Source)

低温壁 ( $T_{\text{wall}}^{\text{max}} \sim 55^{\circ}\text{C}$ )

Sink

高温壁 ( $T_{\text{wall}}^{\text{max}} \sim 120^{\circ}\text{C}$ )

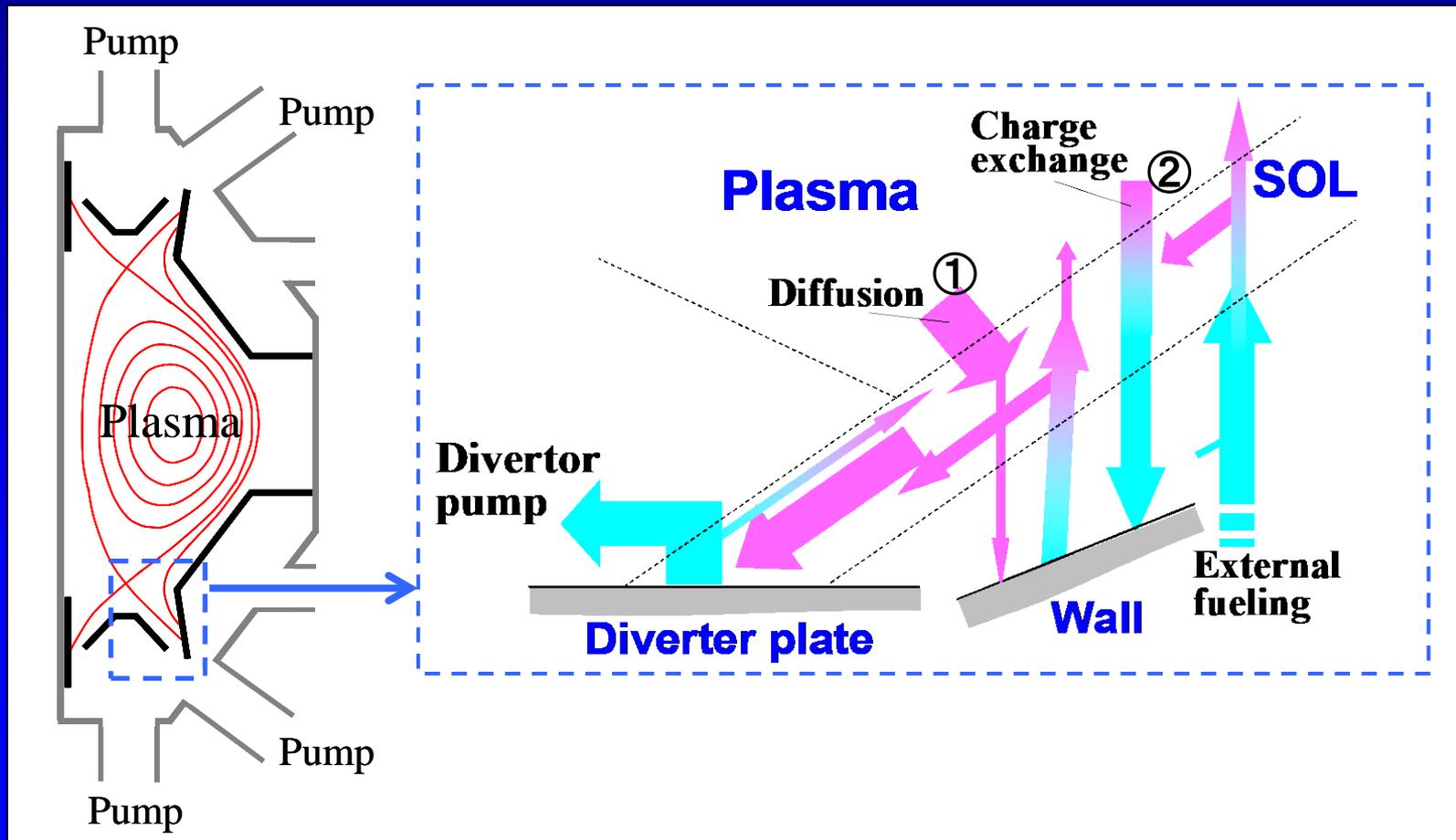
Source

これまで吸蔵した水素を  
放出する。

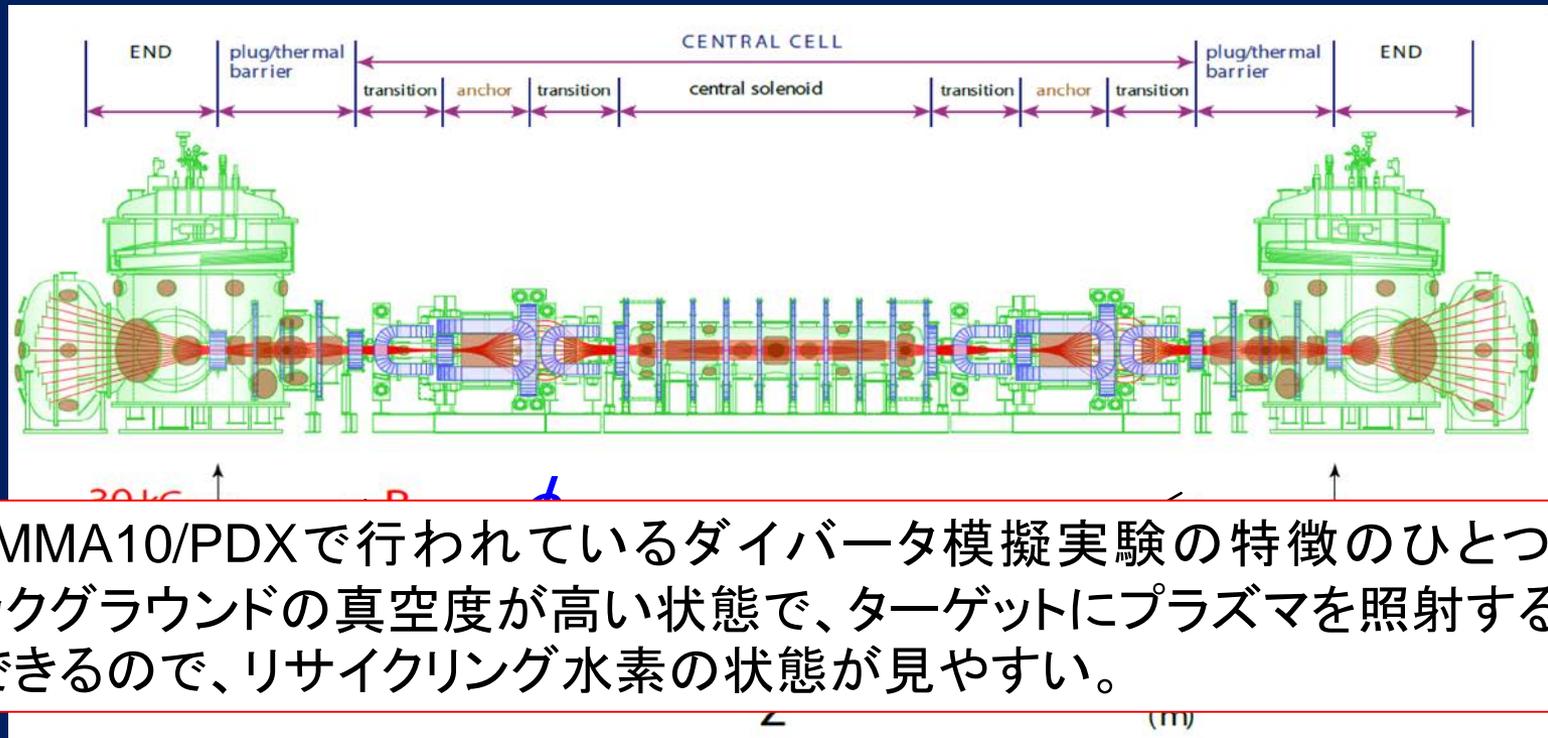
Sink-Source transition

# 高温壁実験

第一壁全体の温度を高温(300°Cから500°C)で維持し、静的リテンション量、共堆積および動的反リテンションを大きく低減した状態で、ダイバータ排気を活用し定常運転の可能性を実証する。



# Features of GAMMA 10/PDX for PSI & Boundary Plasma Research

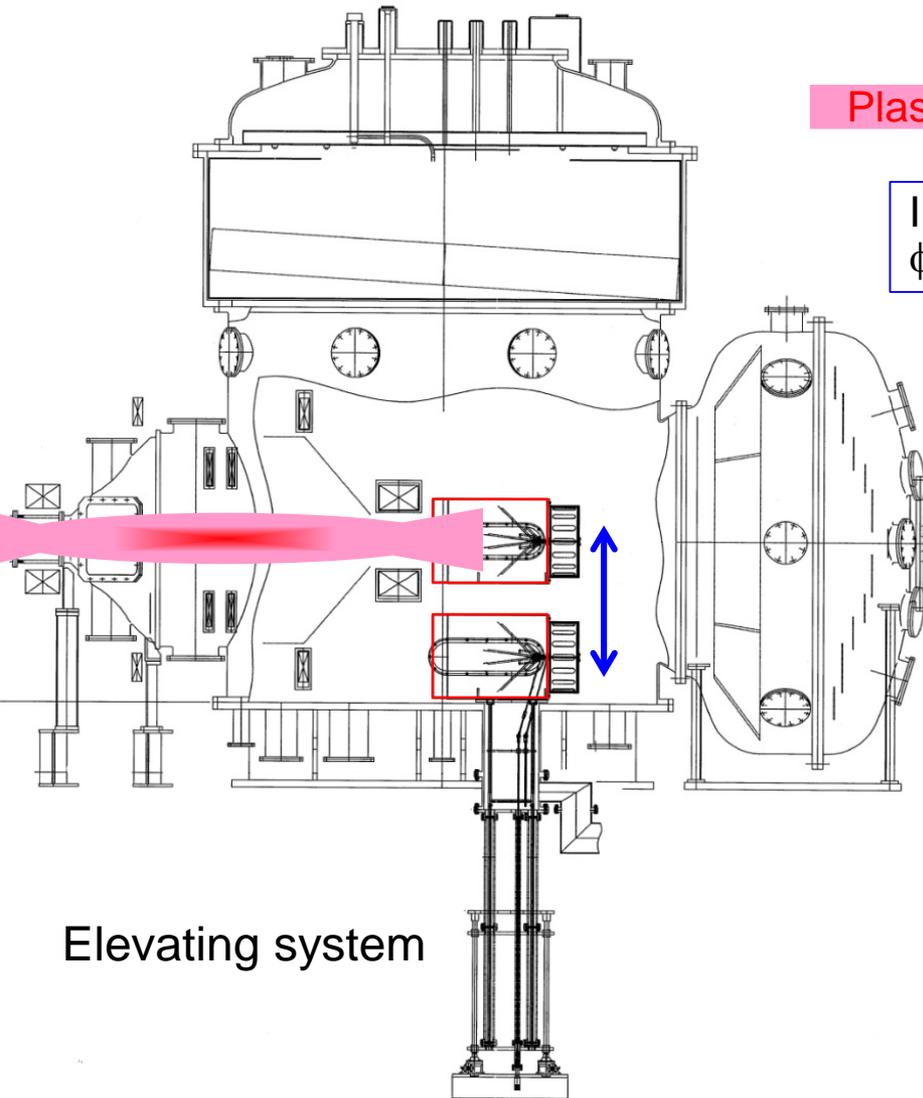


GAMMA10/PDXで行われているダイバータ模擬実験の特徴のひとつは、バックグラウンドの真空度が高い状態で、ターゲットにプラズマを照射することができるので、リサイクリング水素の状態が見やすい。

- There exists the plasma confinement region. (core-edge coupling)
- High Ion and electron temperatures ( $T_e$ :  $\sim 50\text{eV}$ ,  $T_i$ :  $50\sim 400\text{eV}$ )
- Low neutral pressure ( $\sim 1 \times 10^{-7}$  Torr)
- High magnetic field ( $0.15 \sim 1.5$  T)
- Large plasma size ( $0.1 \sim 0.3$  m)
- ELM simulation can be done by control of the thermal barrier.

# Divertor Simulation Experimental Module (D-module)

Side view of GAMMA 10 end-mirror vacuum vessel



**D-module**

rectangular parallelepiped box

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

Plasma

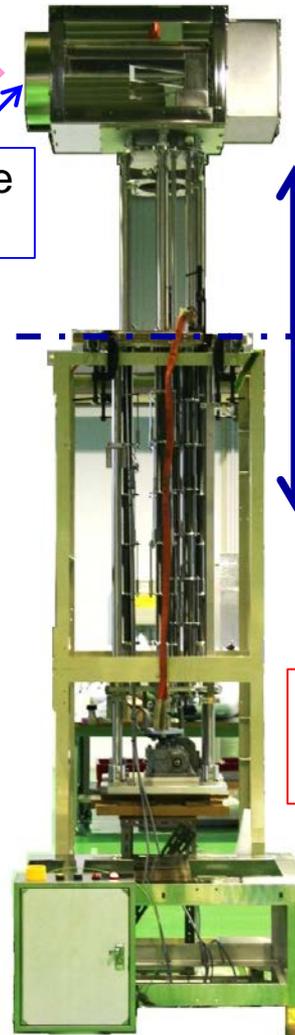
Inlet hole  
 $\phi$  0.2 m

Inside the vacuum vessel

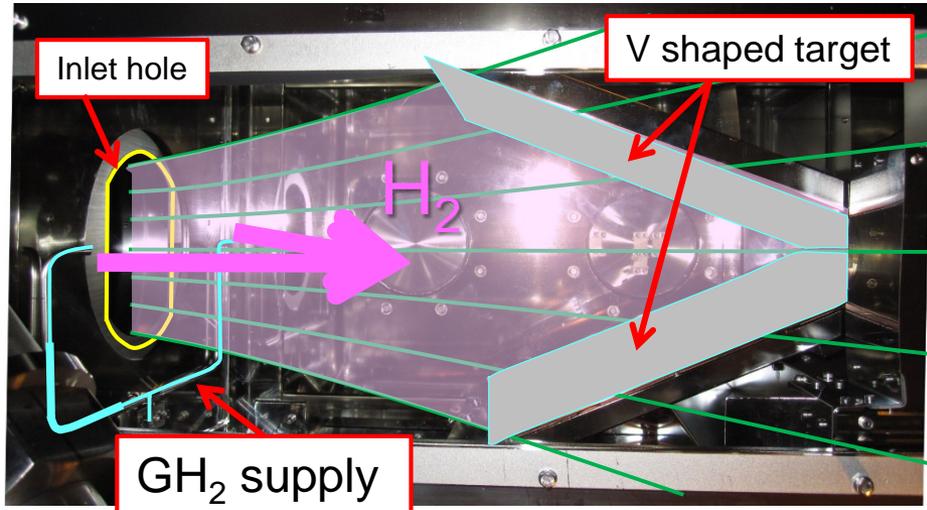
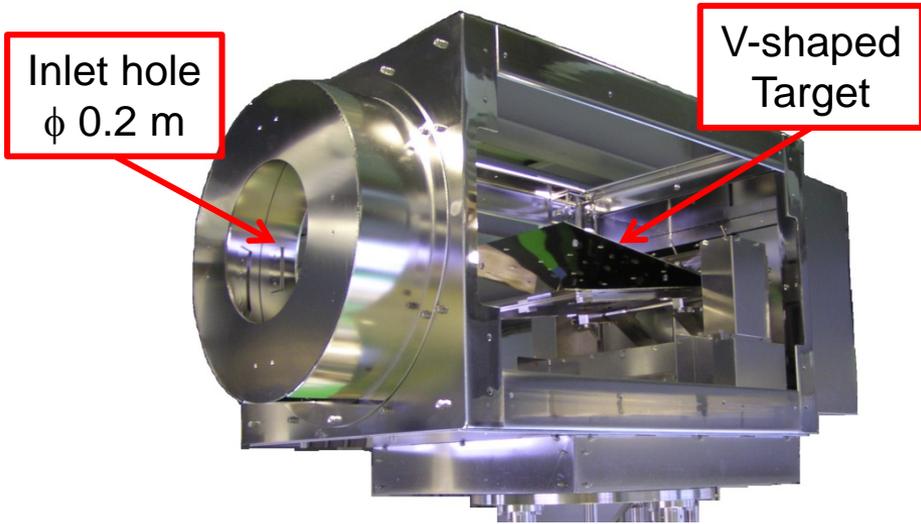
Outside the vacuum vessel

**D-module drive unit**

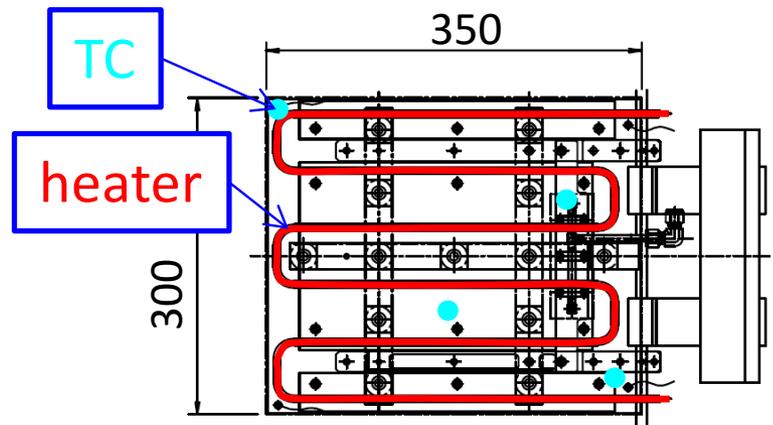
Stroke: 0.85 m  
Driving speed: 4 mm/s



# Divertor Simulation Experimental Module (D-module)

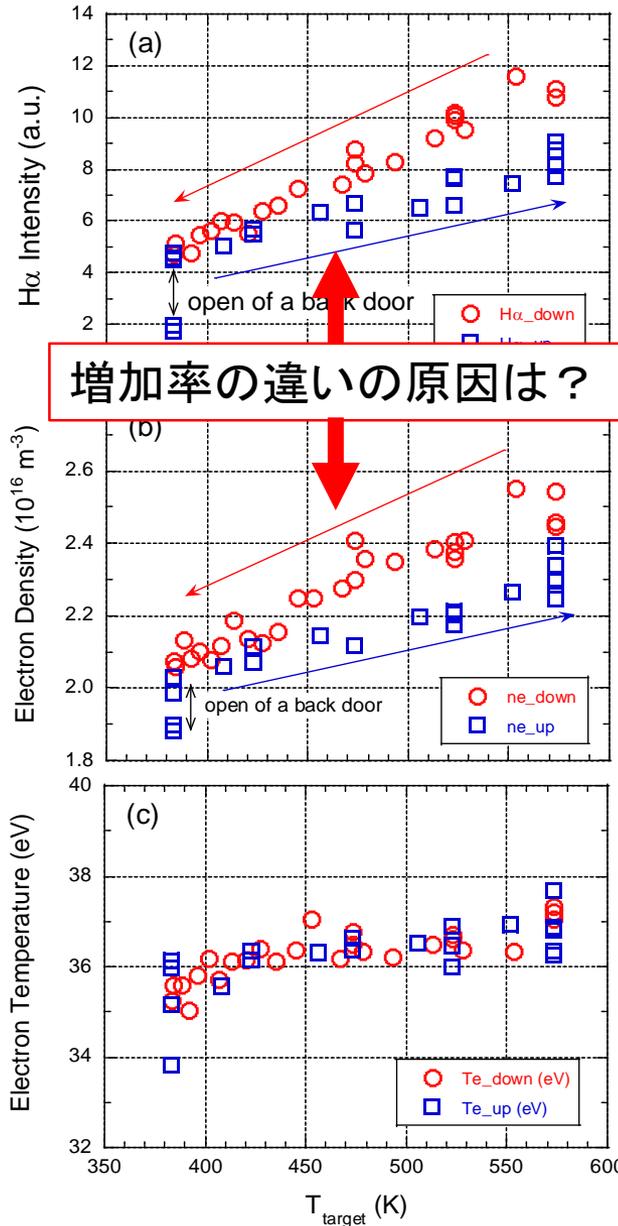
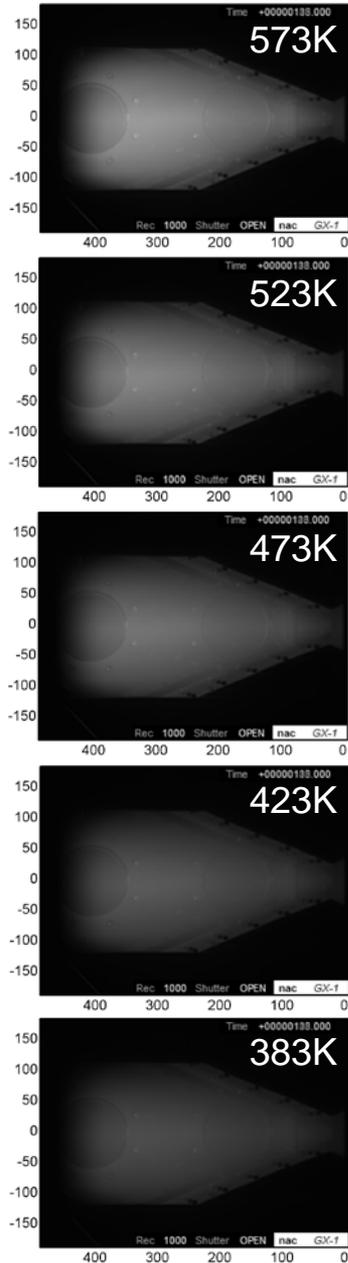


- ▶ タングステン製V字型ターゲット板 (0.3 m x 0.35 m x 0.2 mm).
- ▶ V字ターゲットの開き角は遠隔操作で **15° から 80°**まで変更可能
- ▶ プラズマ流入口からV字ターゲットに向けて水素ガス供給することが可能
- ▶ ターゲット板は**573 K**まで昇温することが可能

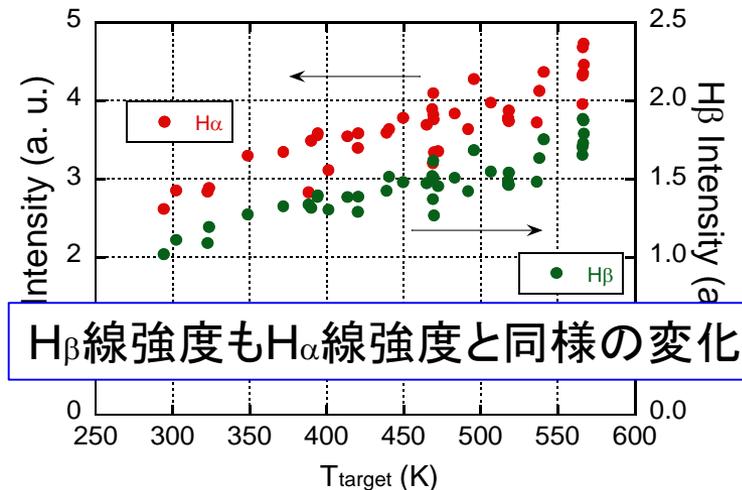


A heater is attached on the backside of the target.

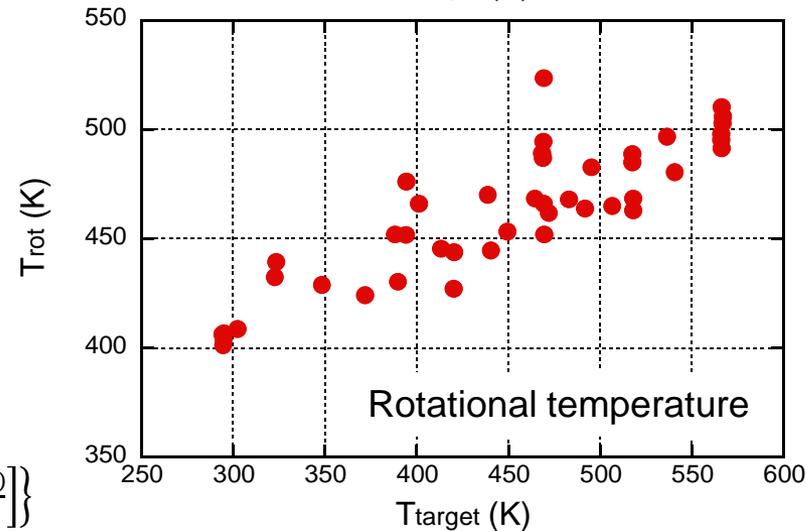
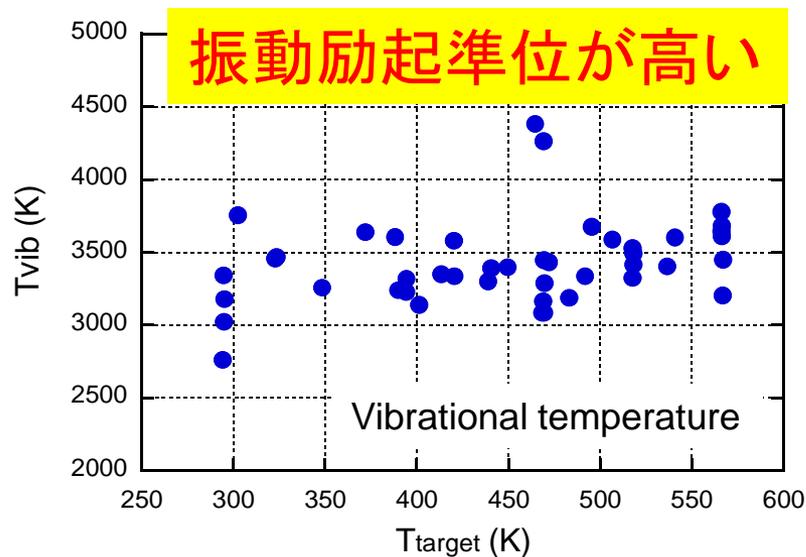
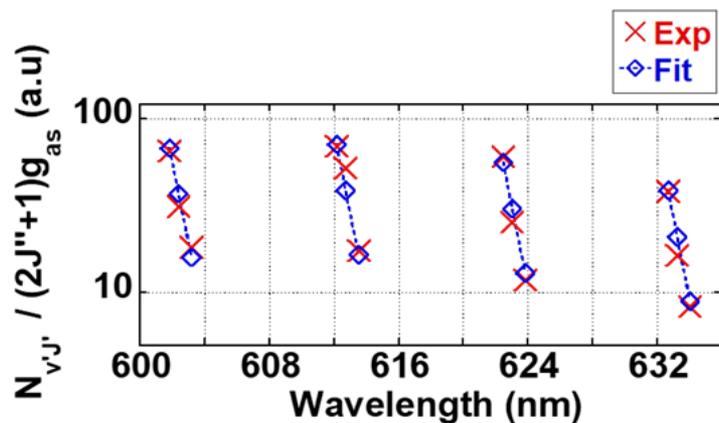
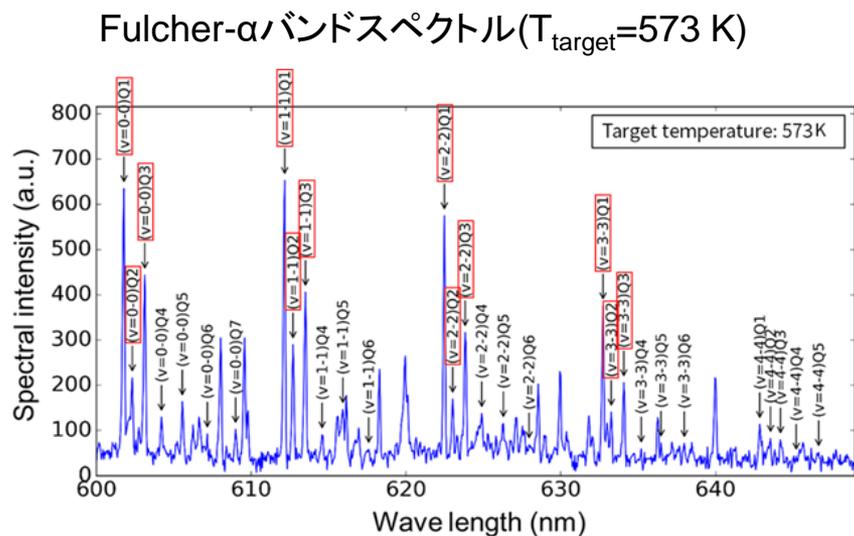
# 水素リサイクリングのターゲット温度依存性



- 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。



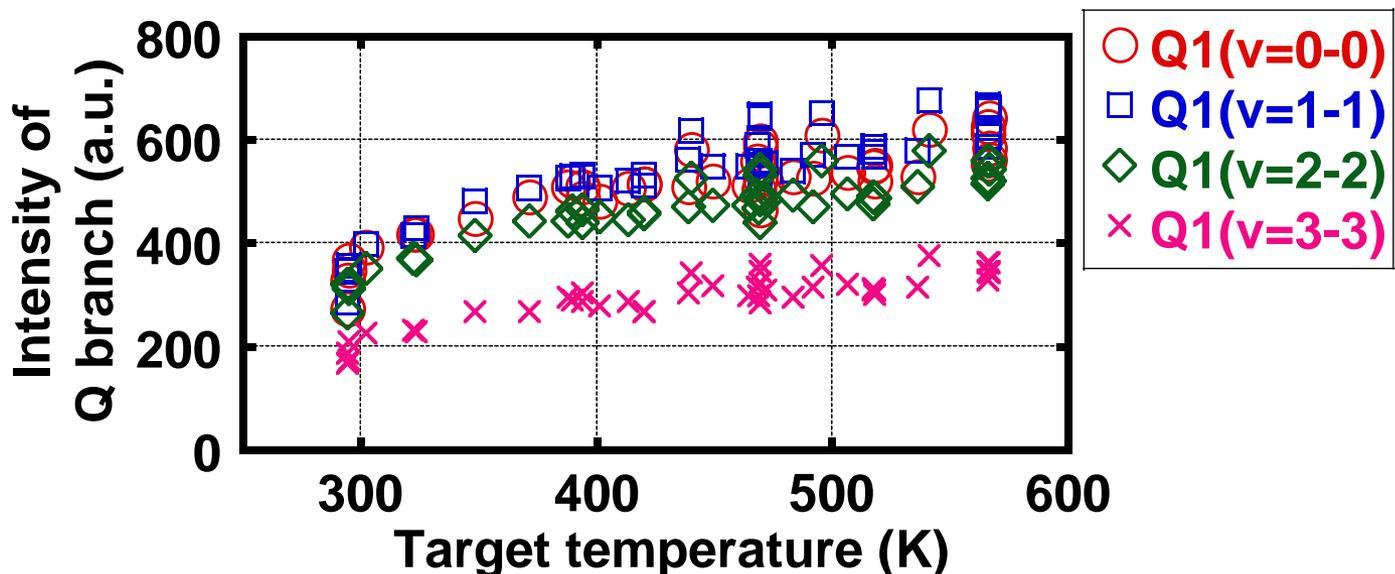
# 振動温度はターゲット温度に依存せず高温 (~3400K) 回転温度はターゲット温度とともに上昇



$$I_{av'j''}^{dv'j'} = \frac{hc}{\lambda_{av'j''}^{dv'j'}} \times n_e \sum_{v,j} \left\{ R_{Xvj}^{dv'j'} C_v (2j+1) g_{as}^j \exp \left[ -\frac{F_x(j,v)}{kT_{rot}^x} - \frac{G_x(v) - G_x(0)}{kT_{vib}^x} \right] \right\}$$

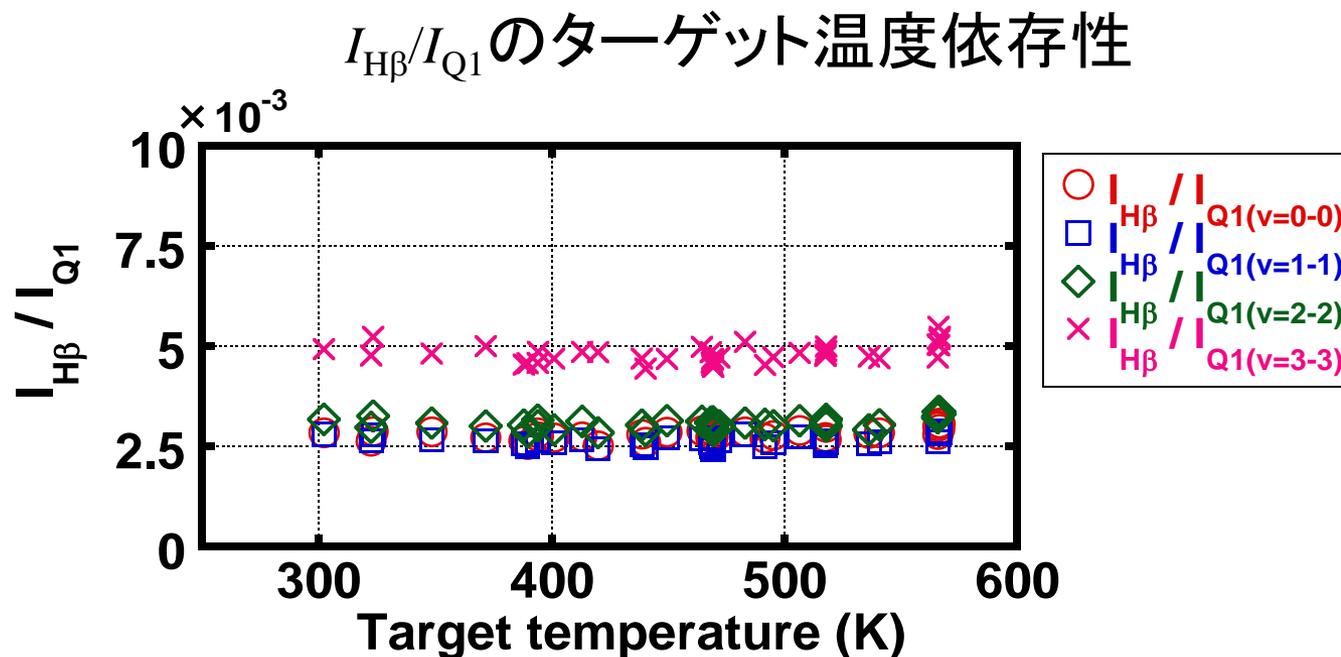
# 水素分子密度はターゲット温度とともに増加

Qbranch発光強度( $I_{Q1}$ ) のターゲット温度依存性



- ターゲット温度を室温から573 Kまで上昇させると、Fulcher- $\alpha$  band Q1-branch の発光強度( $I_{Q1}$ )は2倍程度上昇
- $I_{Q1}$ は電子温度と水素分子振動温度が一定のときは水素分子密度に比例

# 分子の解離度はターゲット温度が変化しても一定



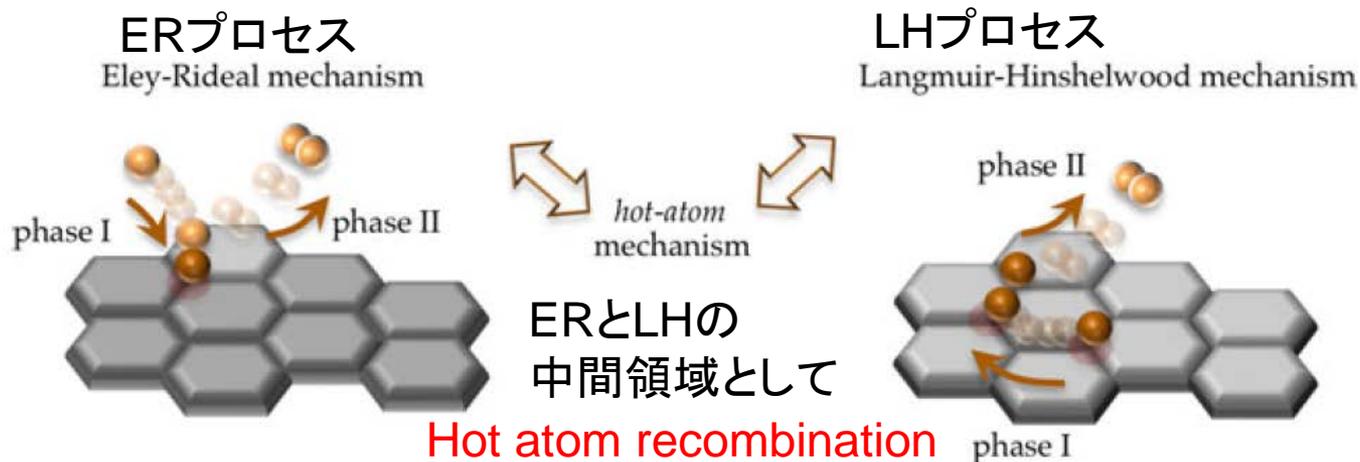
- ターゲット温度の変化に対して、 $I_{Q1}/I_{H\beta}$  はほぼ一定
- $I_{Q1}/I_{H\beta}$  は電子温度、振動温度が一定で、分子の解離度相対変化の 良い指標となる。 S. Kado et al., Journal of Nuclear Materials 337–339 166–170 (2005).

# 観測結果のまとめと考察

## ターゲット温度の増加とともに

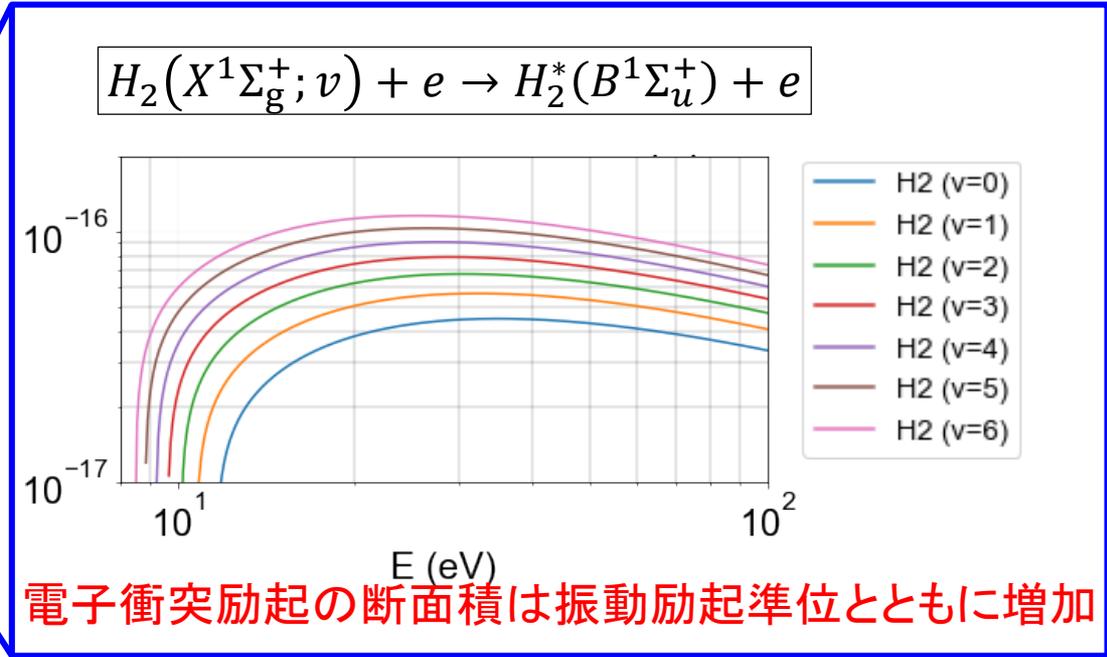
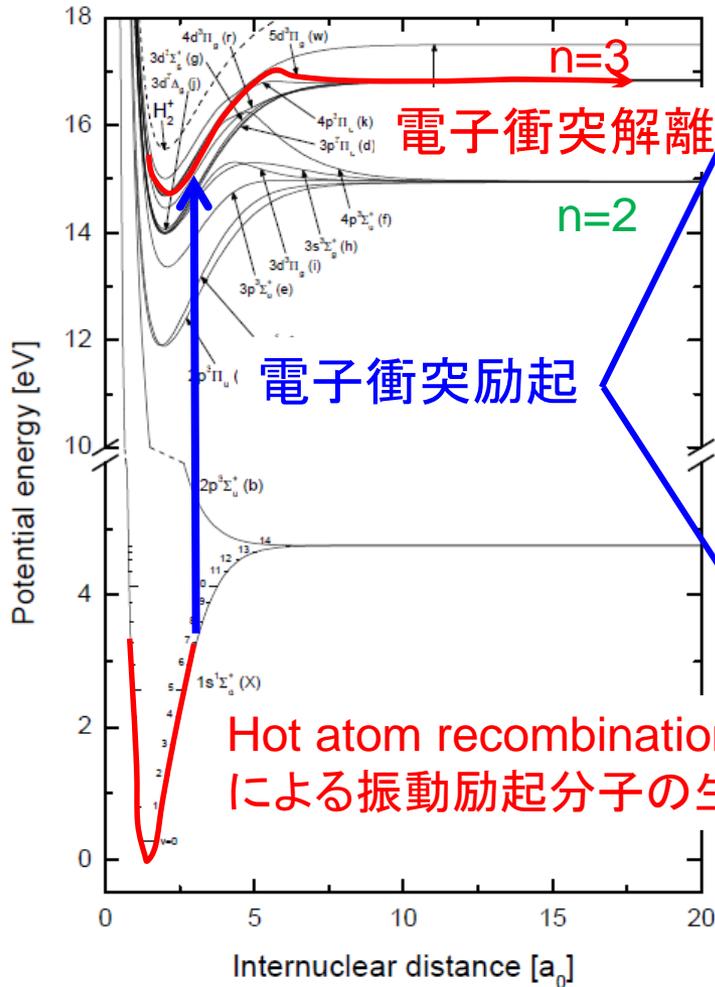
- $H\alpha$  線強度は2倍に増加したが、電子密度の増加は約20%（電子温度は一定）
- ターゲットから放出された分子の振動励起準位はほとんど変化せず、その準位は高い
- 水素分子密度がターゲット温度とともに増加。分子の解離度は変化せず

## 材料表面で何が起きているのか？



Hot atom recombination により生成された水素分子は高い振動準位を有する

# 励起原子 (n=3, H $\alpha$ 線強度) のルーツ



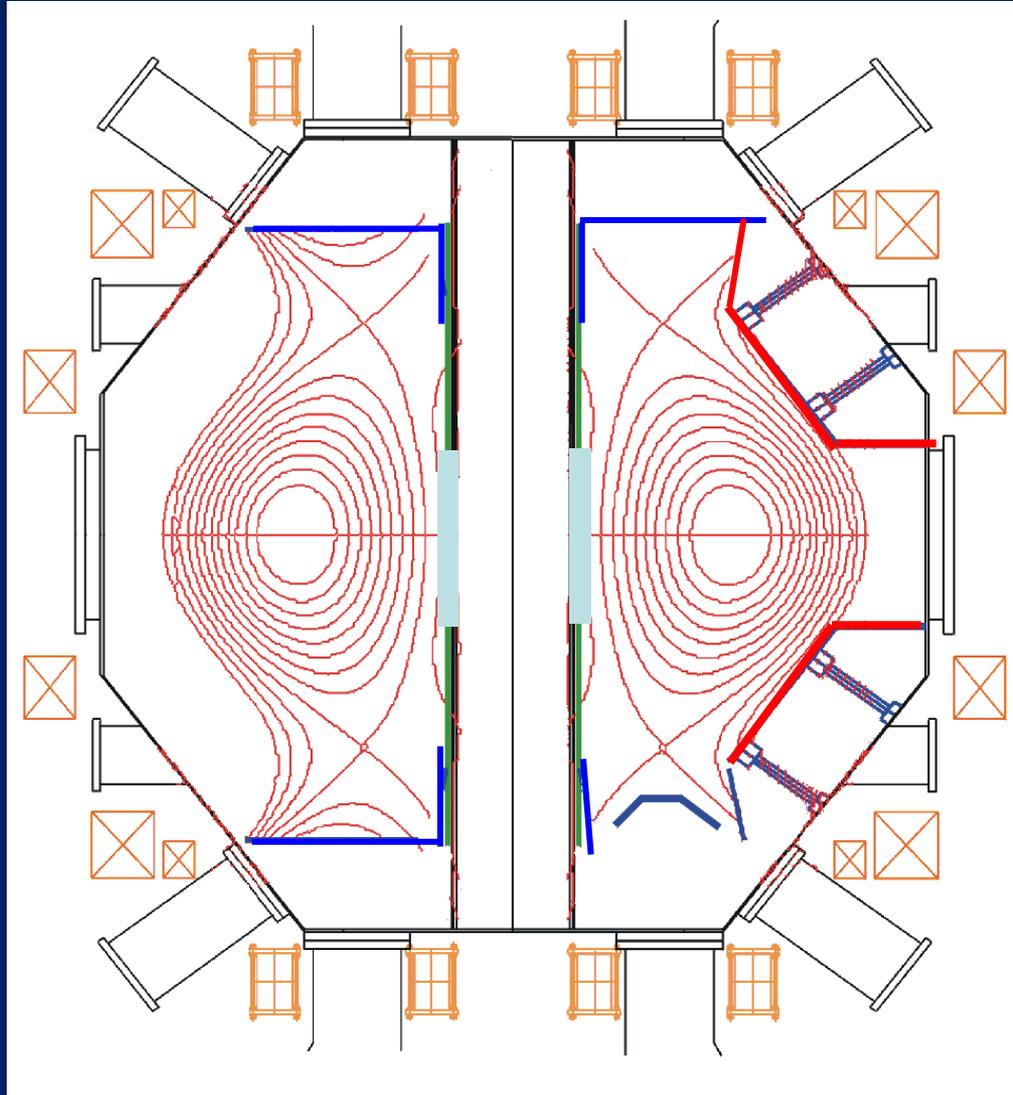
壁温度の増加

⇒ 励起原子の生成

⇒ イオン化の促進

⇒ 燃料補給効率の増大

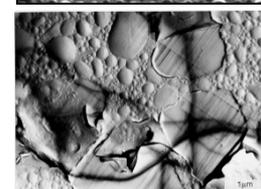
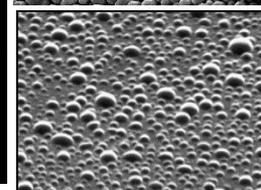
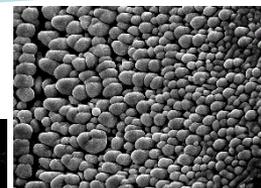
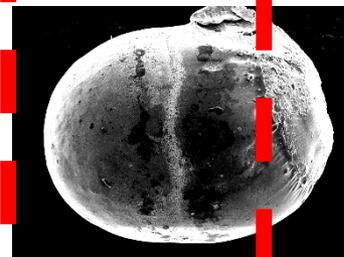
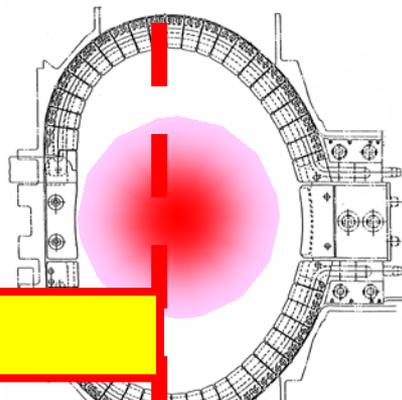
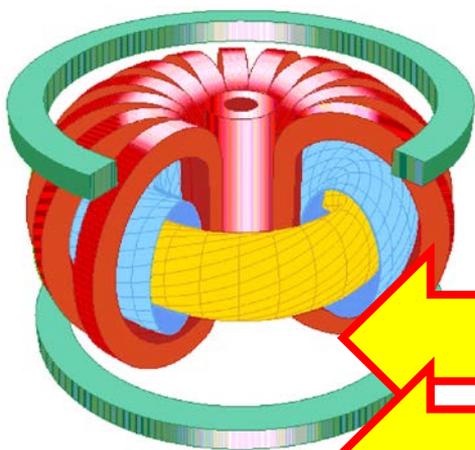
# QUEST実験への期待



# 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

10m 1m 10cm 1cm 1 $\mu$ m 1nm  
スケール



粒子バランス  
中性粒子輸送

局所リサイクリング  
局所熱負荷

ダスト

再堆積  
微細構造  
パタリング  
照射損傷

壁直近での原子分子過程、  
材料表面でのナノ、ミクロスケールの現象、  
をマクロスケールでの理解に繋げる