

過渡的高熱流重水素プラズマと タングステン材料との相互作用

高村秀一¹⁾、上杉喜彦²⁾

1) 愛知工業大学・工学部

2) 金沢大学・理工学域

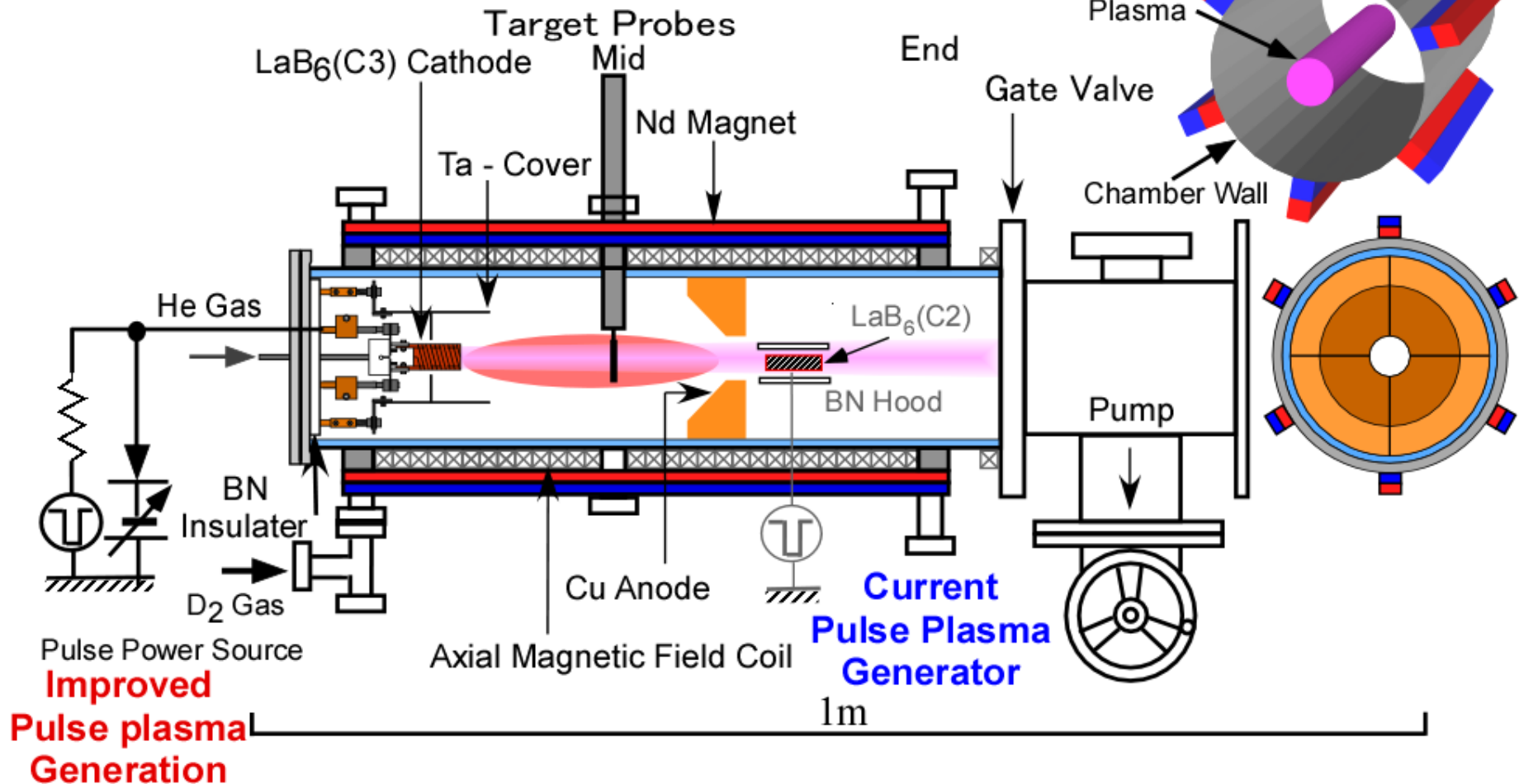
- (1) W材料の融点に迫る異常昇温過程
- (2) 蒸発W原子の重水素プラズマ中への異常浸透過程
- (3) プラズマ圧力・W原子蒸発によるターゲット板への運動量注入過程
- (4) 表面形態の異なる(fuzz)Wのプラズマ熱負荷による表面形態変化

核融合エネルギーフォーラム研究会@筑波大学
平成26年7月31日～8月1日

実験装置 1

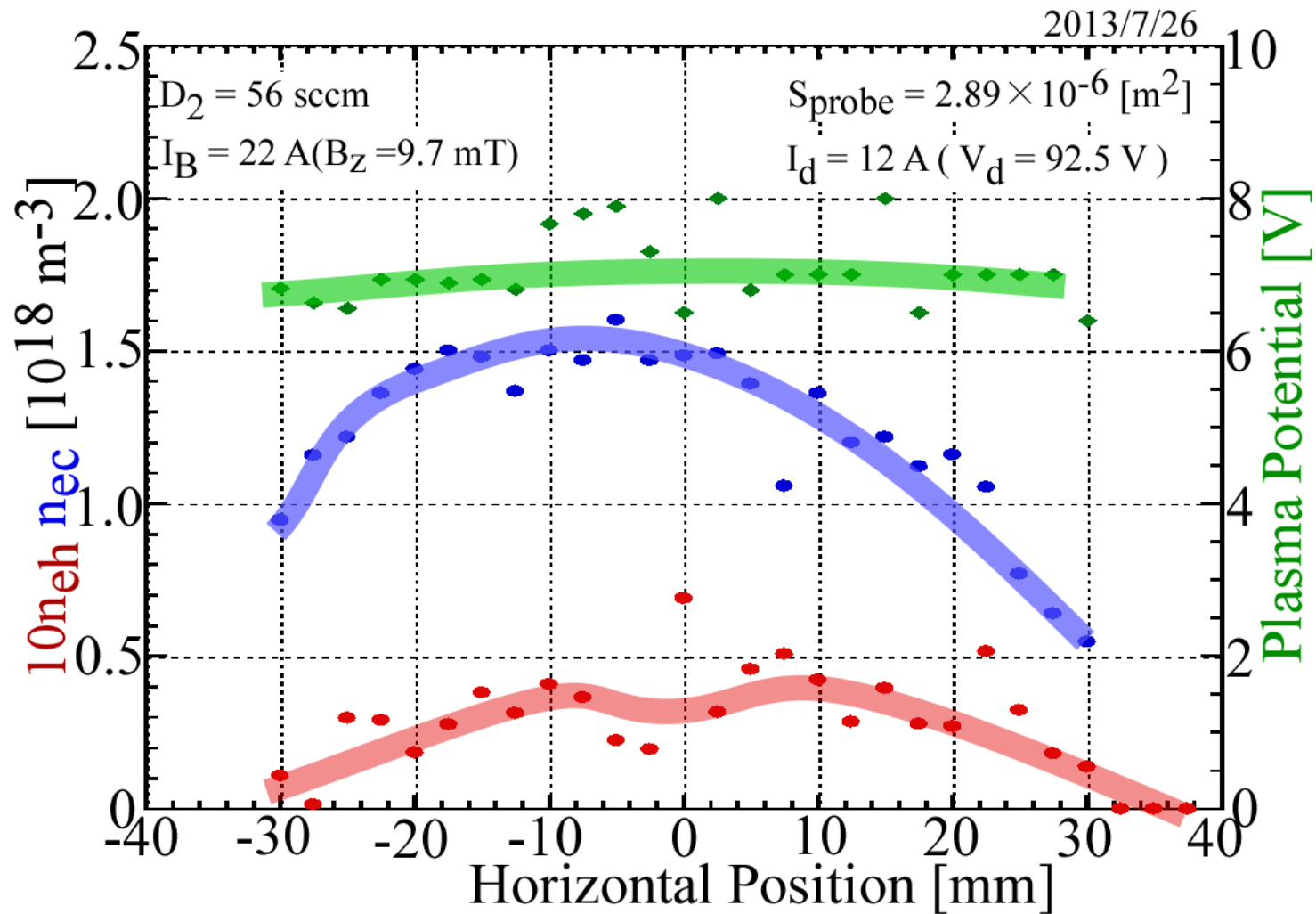
愛工大 → 金沢大学上杉研究室

Pulse Plasma Operation in AIT-PID



実験装置 2

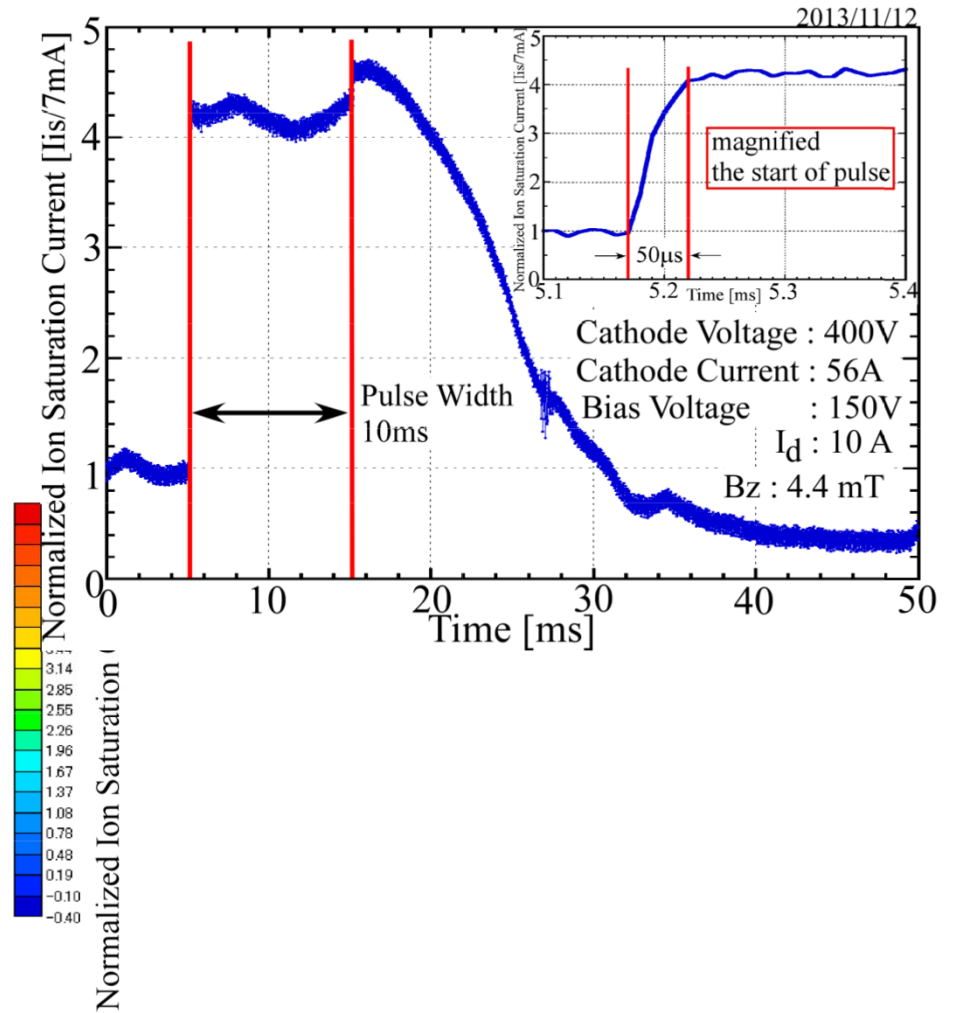
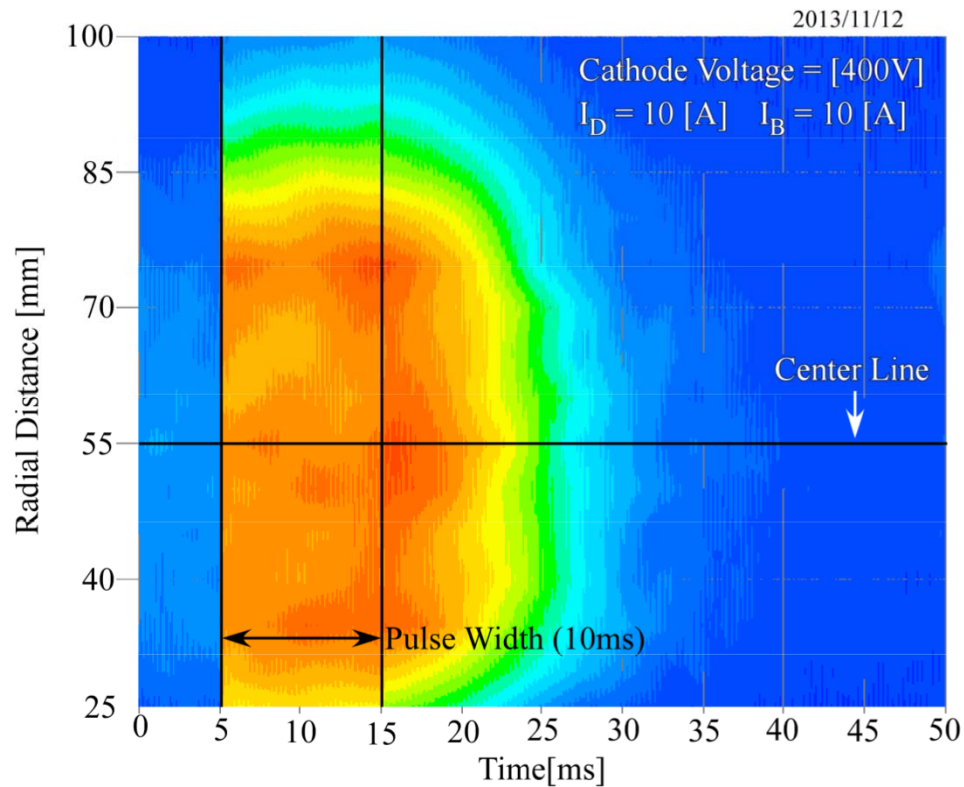
熱パルス印加前のプラズマ特性



実験装置 4

パルス・プラズマ

イオン飽和電流の時空変化

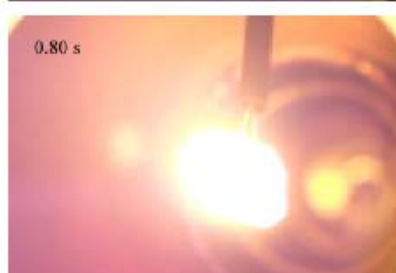


パルス入射実験 1

2013_8_20



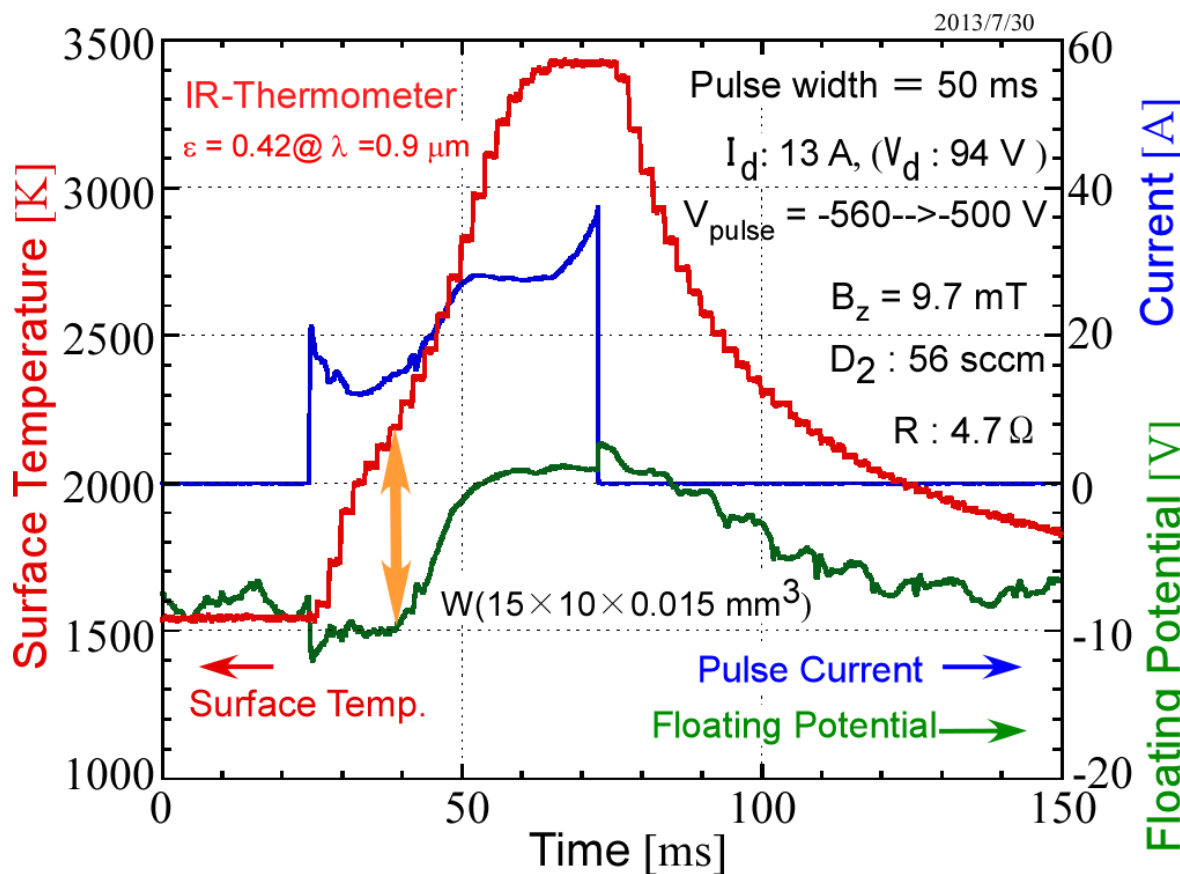
パルス実験 2



W材料の融点に迫る異常昇温過程 1

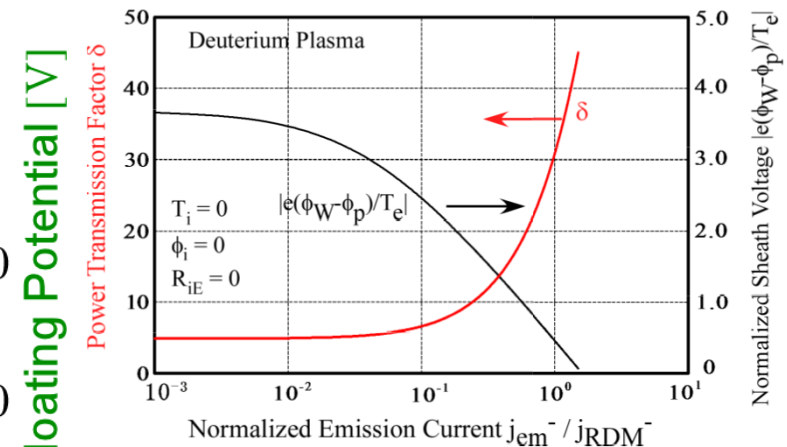
At around 2200 K the inclination of temperature increase enhances dramatically because of enormous increase in **electron heat flux**.

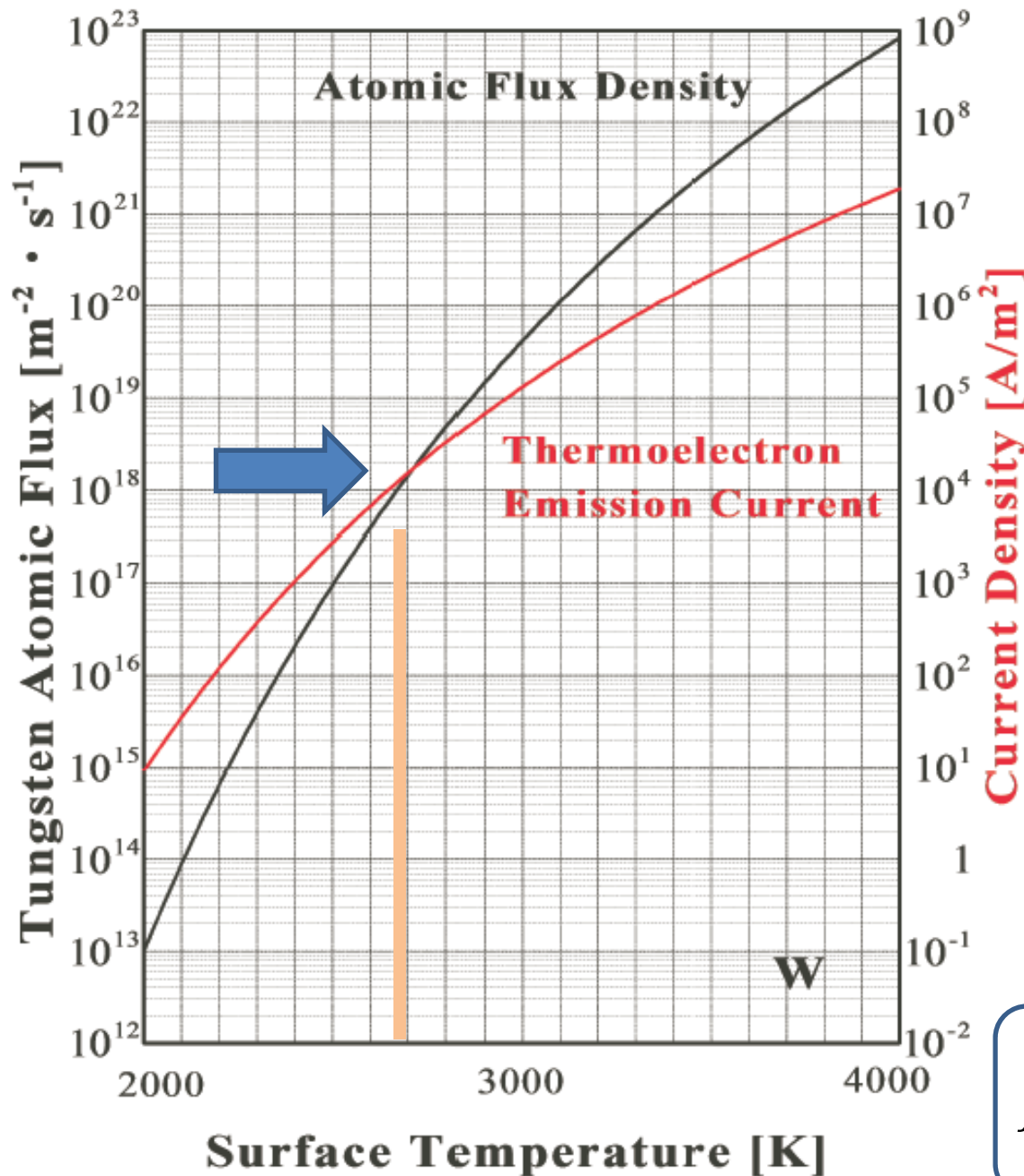
Electron emission makes the sheath voltage shallow !
$$e\phi_f = T_e \ln \left\{ M \sqrt{\frac{2\pi m_e}{m_i}} + \frac{j_{em}^-}{(en_{se}/4)\sqrt{8T_e/\pi m_e}} \right\},$$



Richardson-Dushman's eq.

$$j_{em} = AT^2 e^{-e\phi_W/\kappa T}$$





Thermoelectron Emission Current Density

$$j_{se} = \frac{1}{4} e n_{se} \sqrt{\frac{8\kappa T_e}{\pi m_e}}$$

$$n_e = 1 \times 10^{19} m^{-3}$$

$$T_e = 5 \text{ eV}$$

$$j_{se} \sim 6 \times 10^5 \text{ A/m}^2$$

Corresponding to 3200 K

$$j_{se} \times \sqrt{\frac{2m_e}{m_i}} \approx 1.4 \times 10^4 \text{ A/m}^2$$

Effect of B Field Inclination on Electron Emission

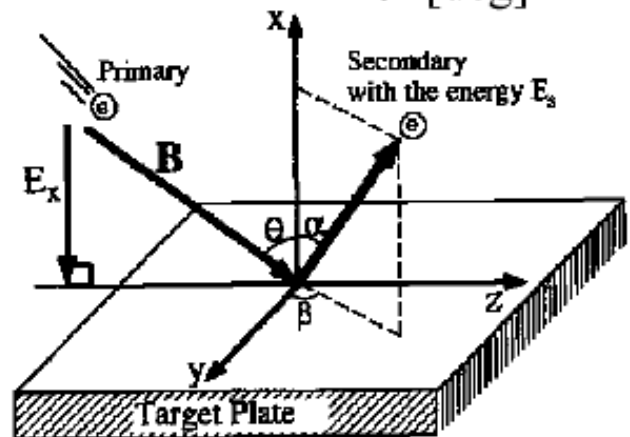
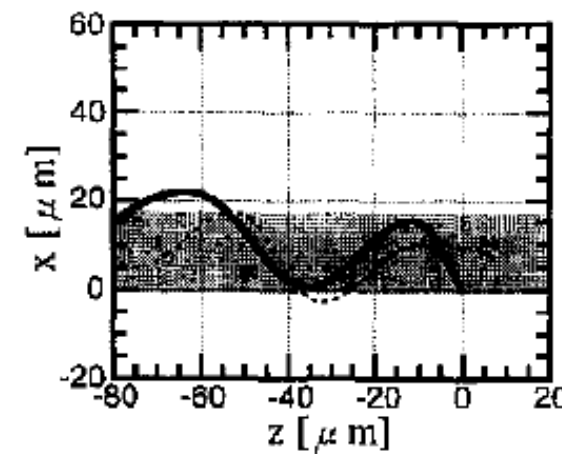
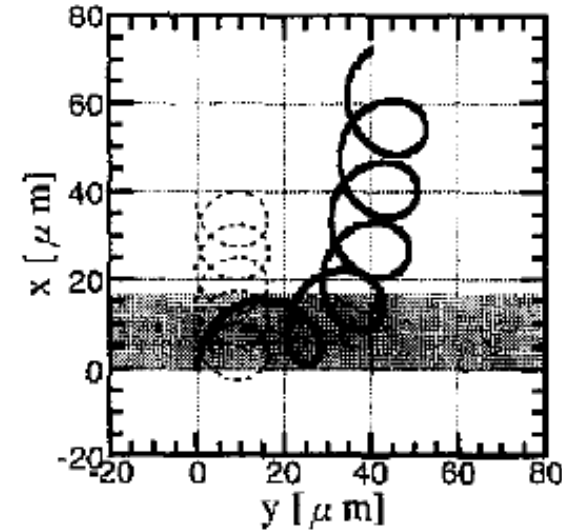
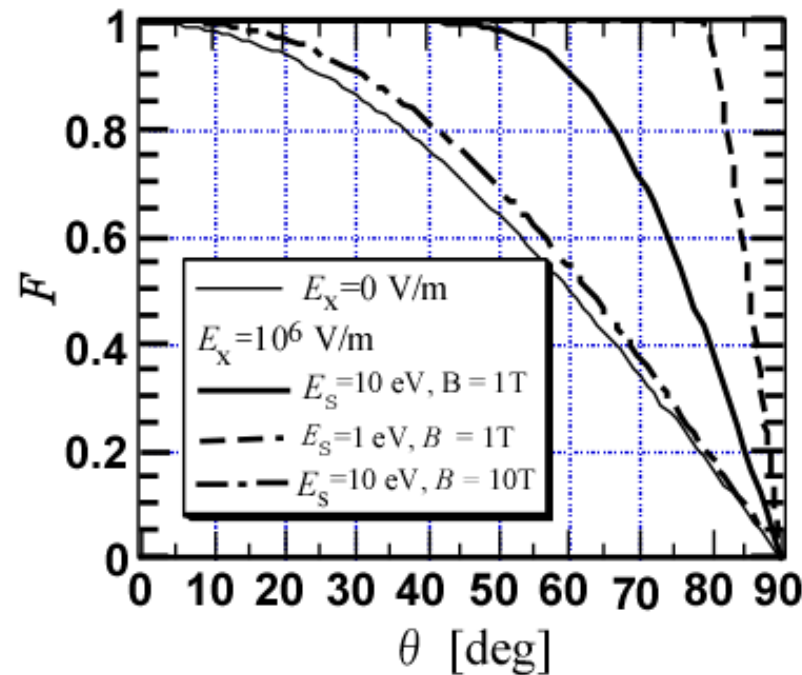


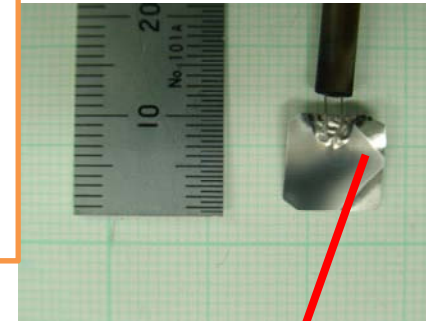
Fig. 4. Examples of electron orbit with (thick solid line) and without (thin solid line) sheath electric field. $B = 1$ T, $n_e = 5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $E_s = 10$ eV, $T_e = 10$ eV, $\theta = 80^\circ$, $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 270^\circ$.

蒸発W原子の重水素プラズマ中への異常浸透過程 1

High Speed Camera

再生速度 5 fps

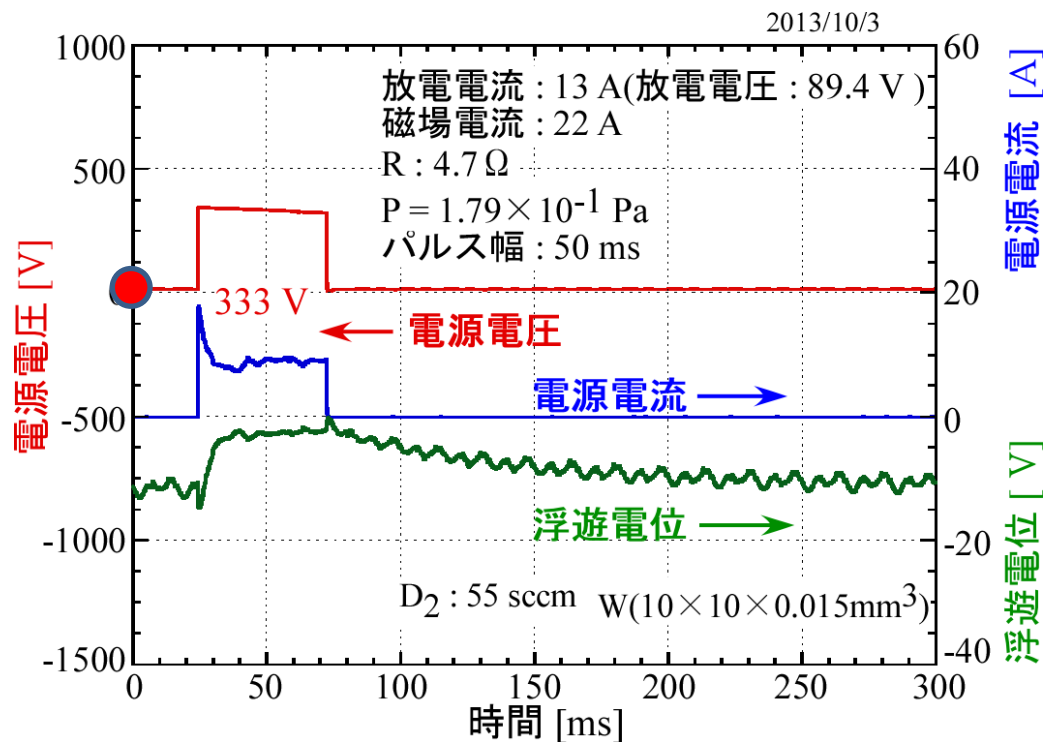
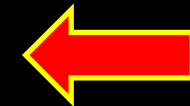
- Shuttering: 1/frame
- Camera speed: 1000 fps
- Interference filter:
WI (498.3 nm)



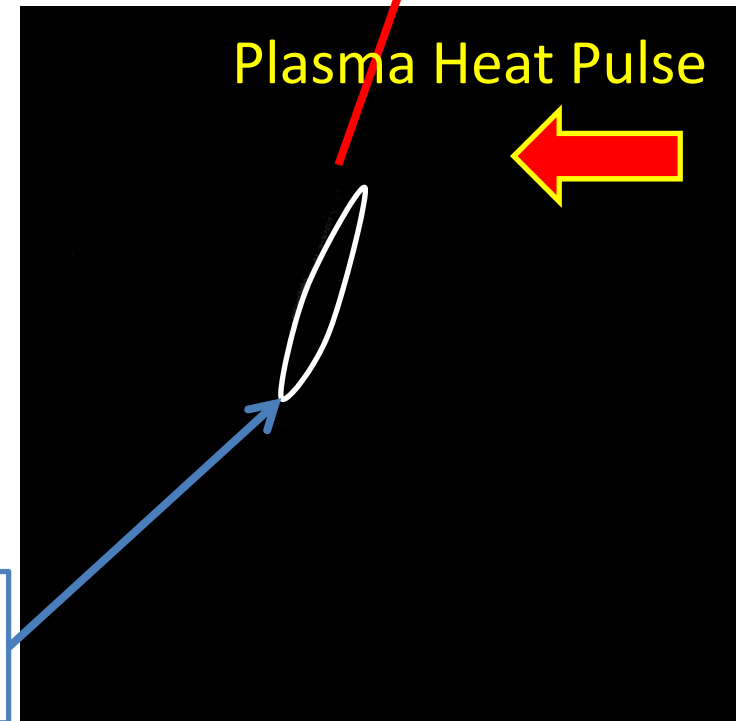
W Target

γ correction = 0.4

Plasma Heat Pulse



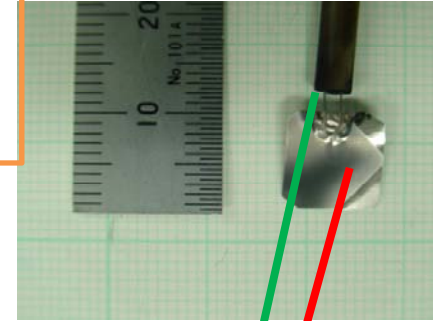
Layered W atomic line emission



蒸発W原子の重水素プラズマ中への異常浸透過程 2

High-Speed Camera

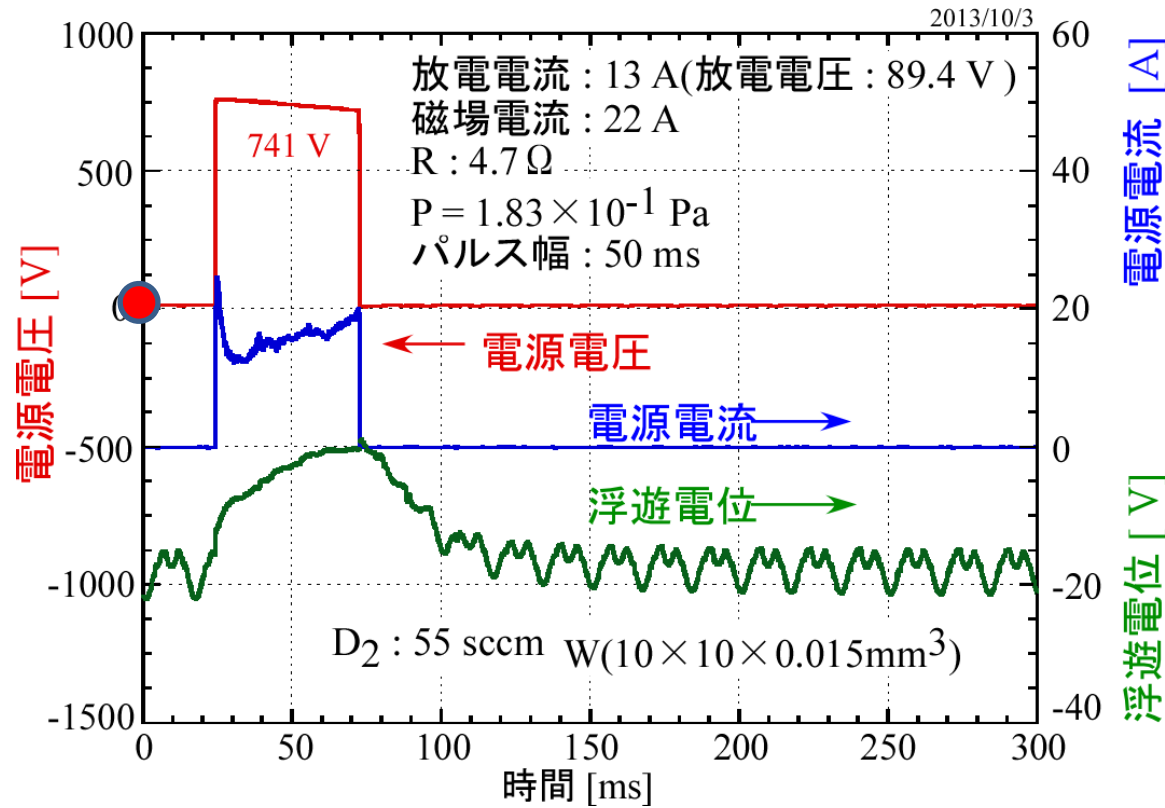
- Shuttering: 1/frame
- Frame Speed: 1000fps



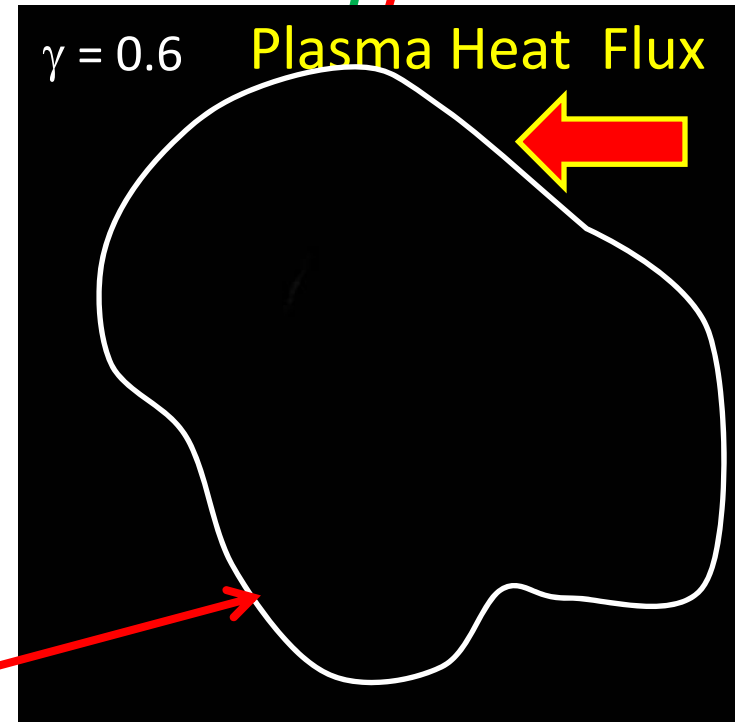
Ceramic Support

W Target

再生速度 5 fps



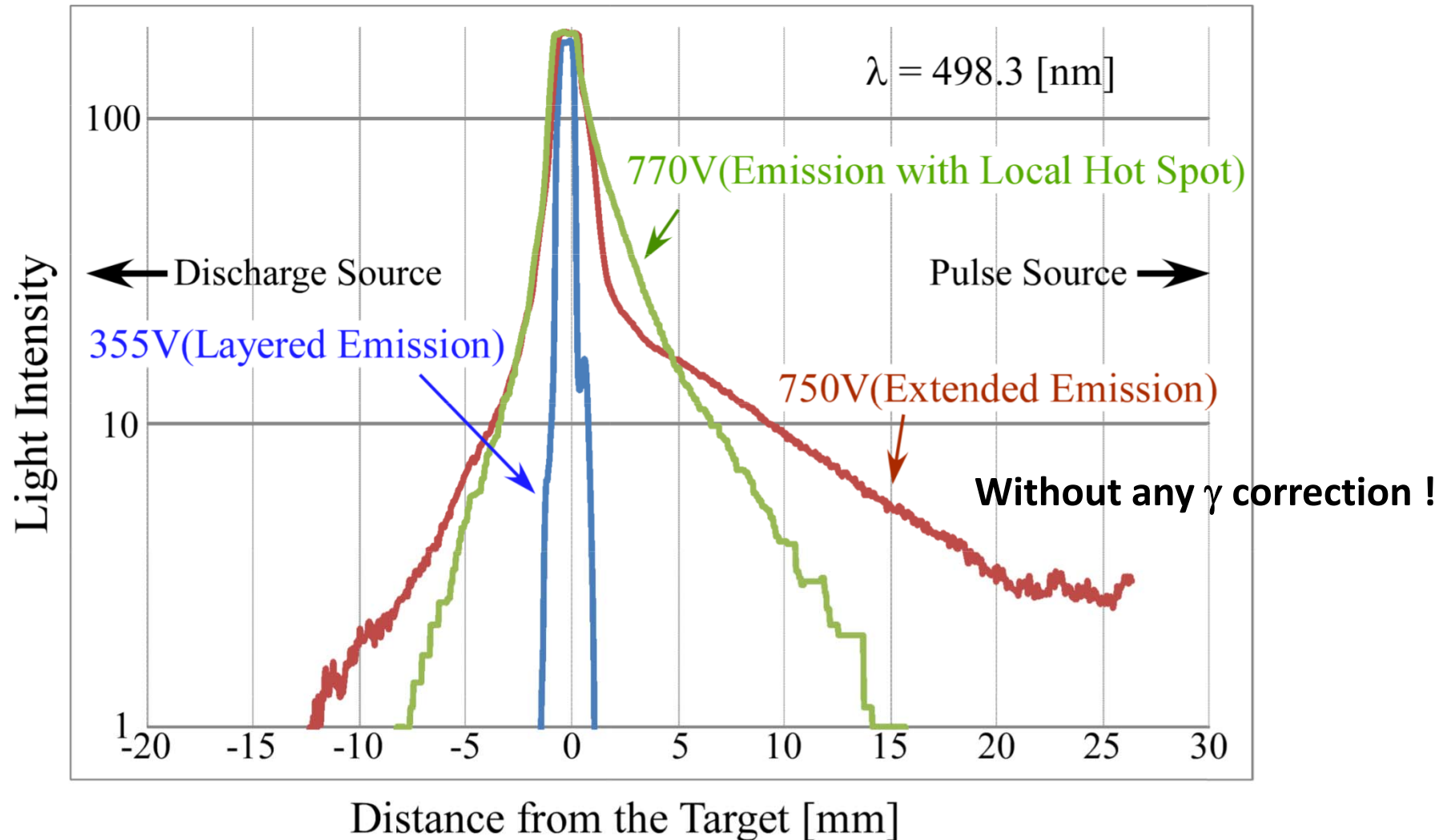
Broad Penetration of W Atoms



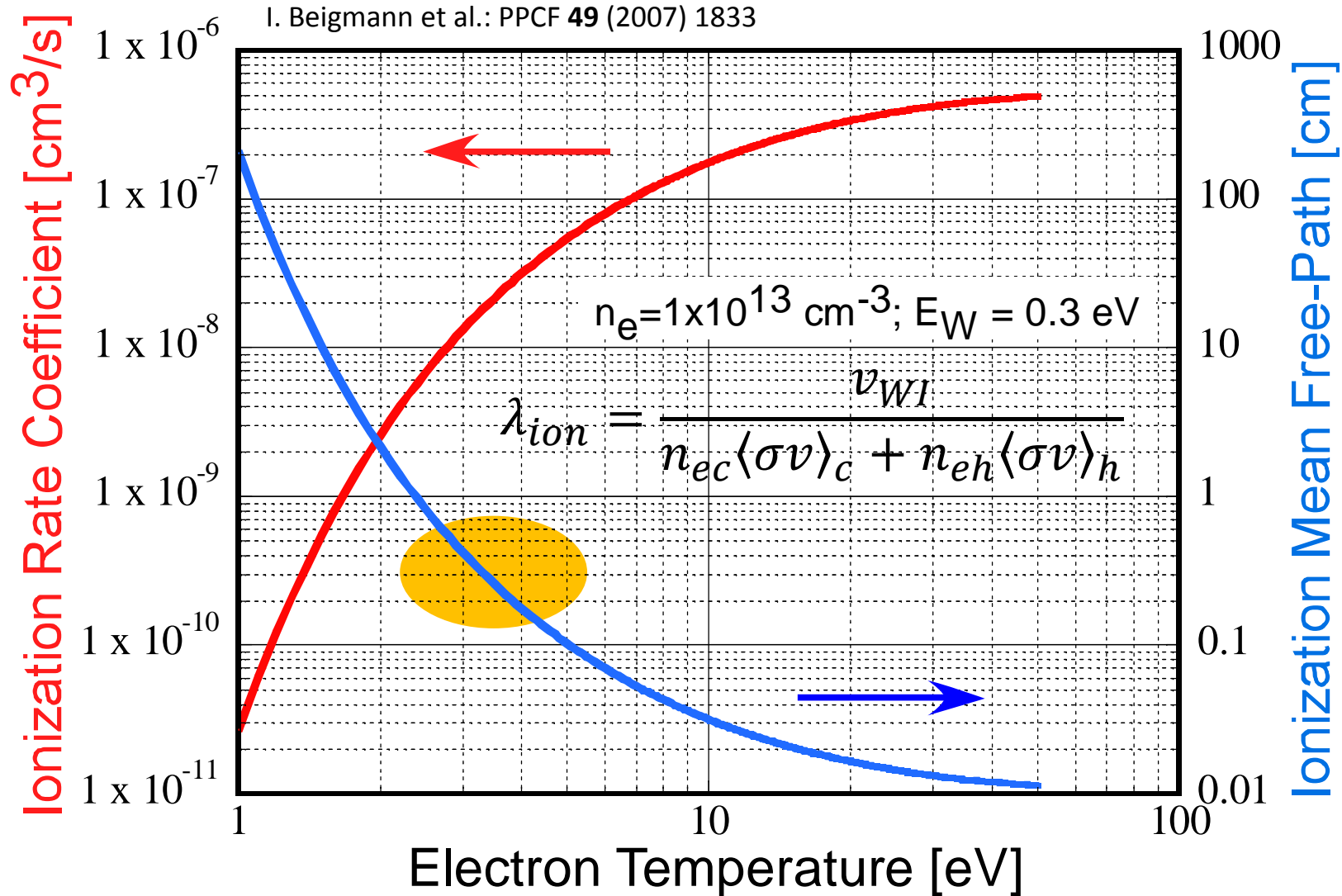
蒸発W原子の重水素プラズマ中への 異常浸透過程 3

WI Emission Profile

2013/10/3



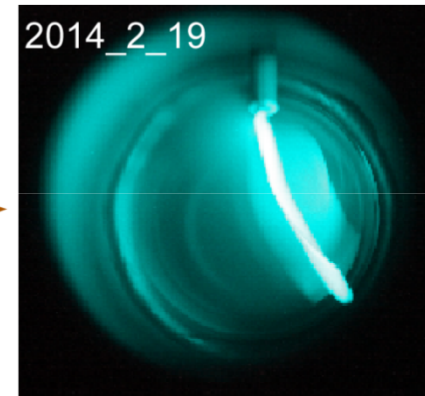
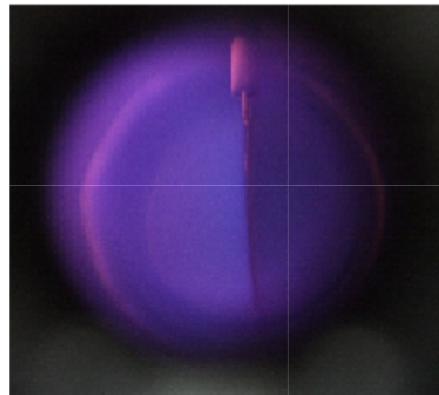
蒸発W原子の重水素プラズマ中への 異常浸透過程 4



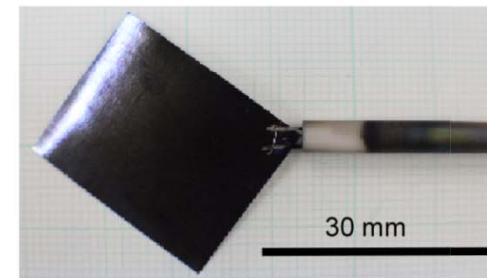
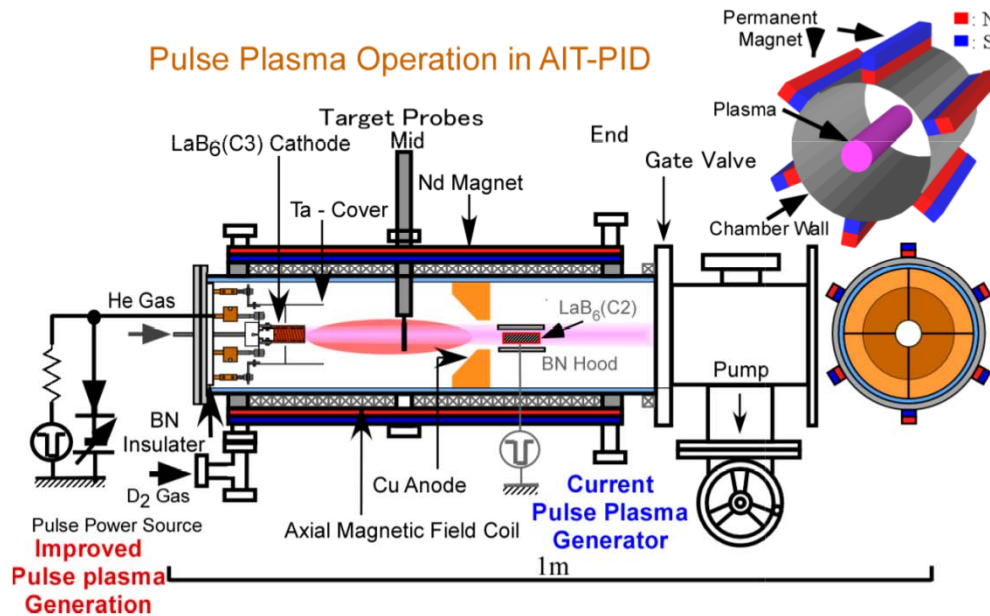
プラズマ圧力・W原子蒸発による ターゲット板への運動量注入過程 1

At the Improved
Pulse Plasma Generation

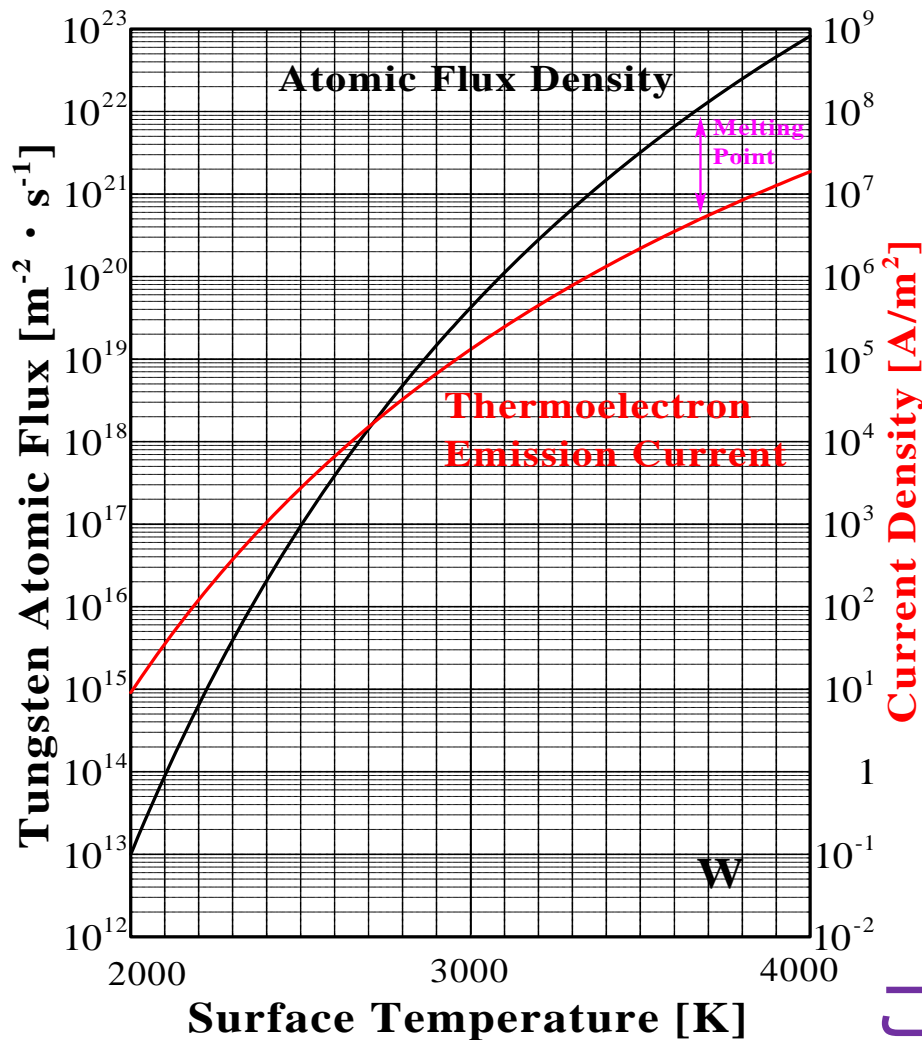
Pulse Plasma
Injection



Pulse Plasma Operation in AIT-PID



プラズマ圧力・W原子蒸発による ターゲット板への運動量注入過程 2



プラズマ圧力:

$$p = n\kappa T = 4.8 \text{ Pa}$$

$$@ n = 1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}, T_e = 3 \text{ eV}$$

プラズマの流れの効果は?

蒸発タングステン原子の反作用:

$$n_W \cdot v_W \cdot \Gamma_W = n_W \cdot \sqrt{\frac{2E}{m_W}} \cdot \Gamma_W = 1.7 \text{ Pa}$$

$$m_W = 3.05 \times 10^{-25} \text{ kg}$$

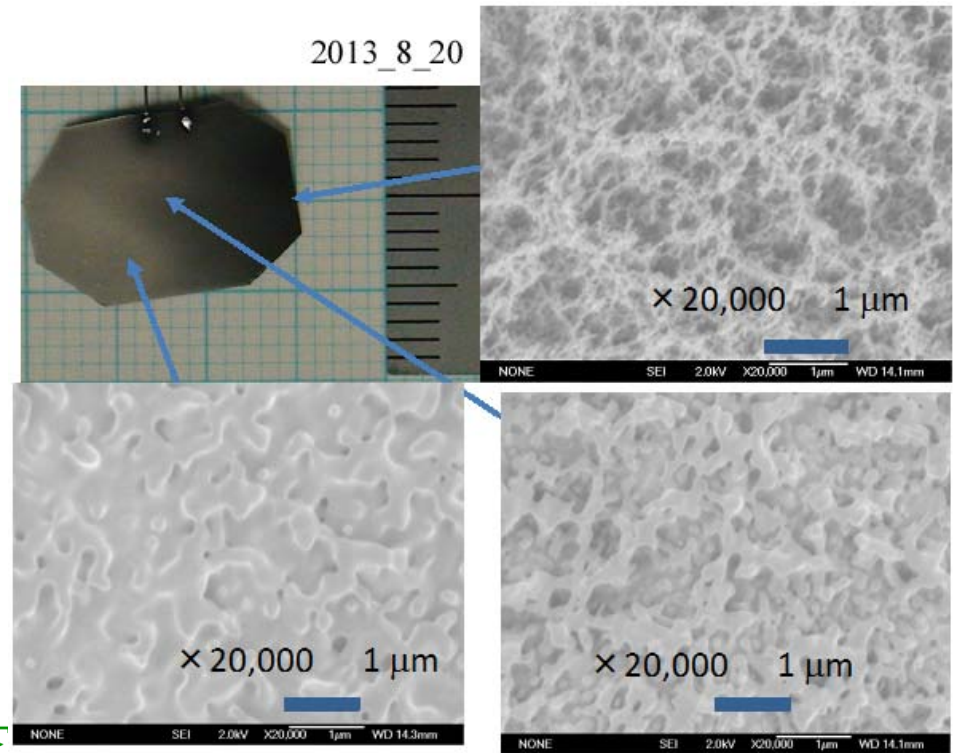
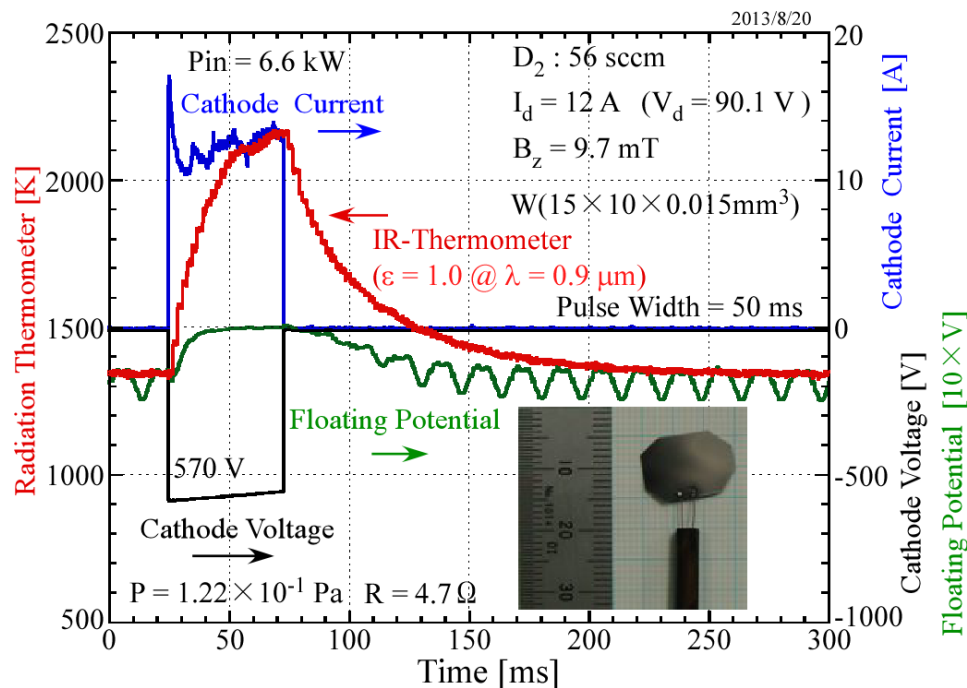
$$\Gamma_W = 1.0 \times 10^{22} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$E_W = 0.3 \text{ eV}$$

これらの溶融層への影響は?

表面形態の異なる (fuzz) W の プラズマ熱負荷による表面形態変化 1

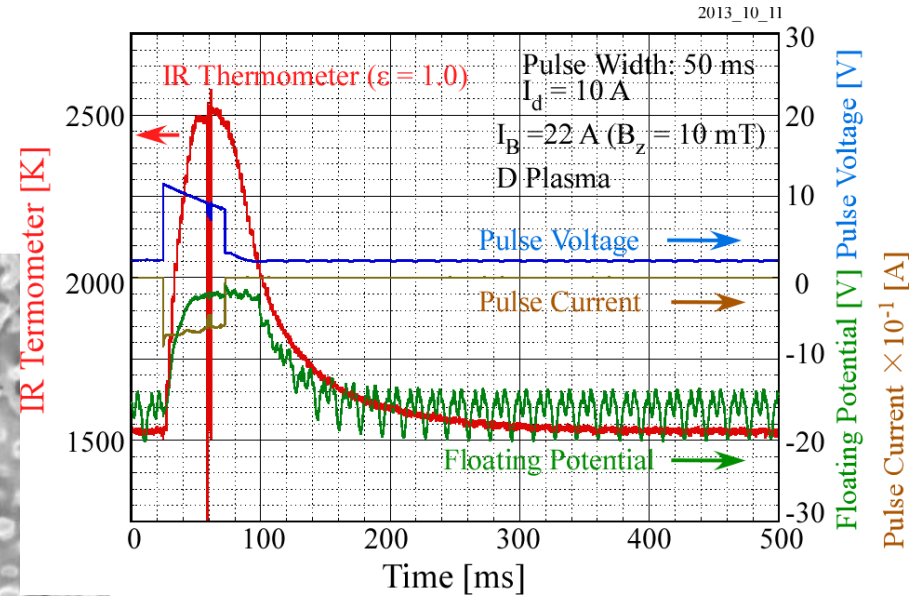
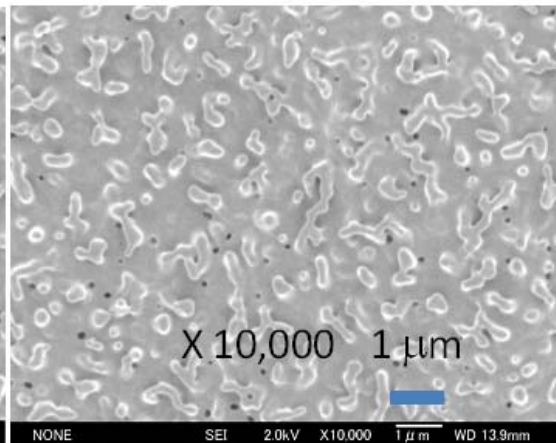
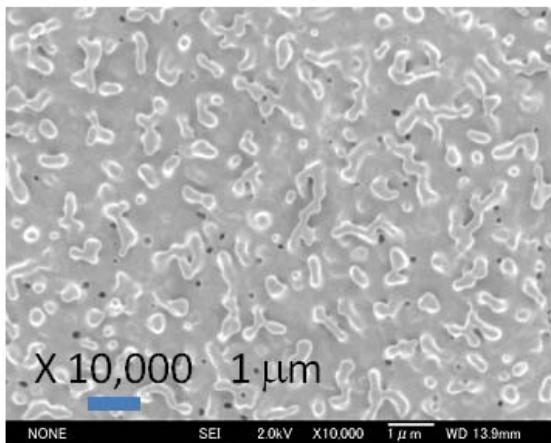
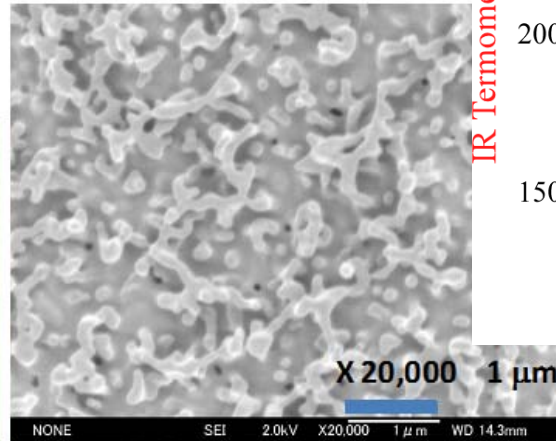
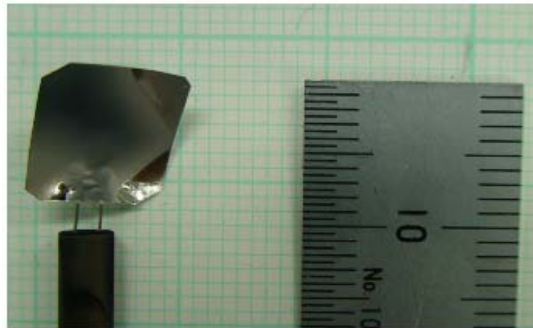
Fuzz の溶融！



注) 放射温度計の指示は参考

表面形態の異なる (fuzz) W の プラズマ熱負荷による表面形態変化 2

Plasma Annealing of Nano-fibers 2013_10_11



放射温度計の指示は参考

まとめ

- (1) W材料の融点に迫る異常昇温過程
 - 表面からの電子放出によるシース電圧低下が電子熱流束を増大させ、昇温を加速。
- (2) 蒸発W原子の重水素プラズマ中への異常浸透過程
 - 蒸発W原子粒子束が閾値を超えると電離の平均自由行程では説明できない距離まで、原子は深く浸透する。背景プラズマの電子温度の低下ではないか。
- (3) プラズマ圧力・W原子蒸発によるターゲット板への運動量注入過程
 - パルスプラズマに押される方向にターゲットは運動量を受ける。プラズマ圧力と蒸発タングステン原子のロケット効果と考えられる。
- (4) 表面形態の異なる(fuzz)Wのプラズマ熱負荷による表面形態変化
 - タングステン繊維が溶融する場合とアニールされる場合の異なった二つのケースがある。これを分ける物理要因は今のところ不明。

今後の課題

- 放射温度計の高速化
 - 3 ms (90%) → 1ms (90%)
- Fuzz への熱パルス効果の精査
 - 溶融とアニーリングを分ける要因の同定
- フルパワー(0.2 MW)の投入実験