

# カスケードアークプラズマにおけるH $\beta$ 線 シュタルク拡がりによる電子密度計測

○難波慎一, 上田 恵, 岩本勇樹, 松岡雷士,  
広島大学 大学院工学院

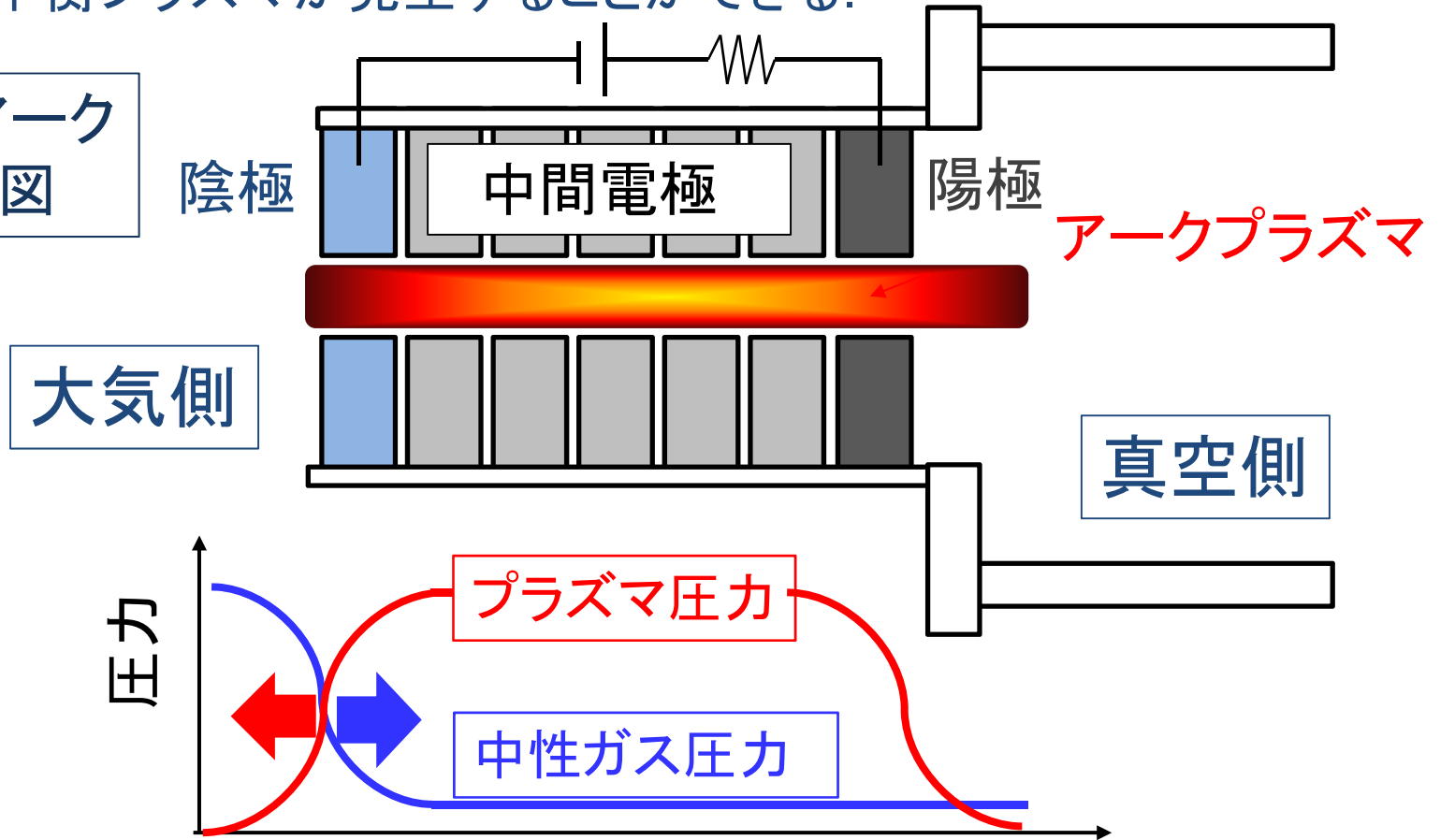
鈴木千尋, 田村直樹  
核融合科学研究所

# カスケードアーク放電 -プラズマウィンドウの開発-

2/14

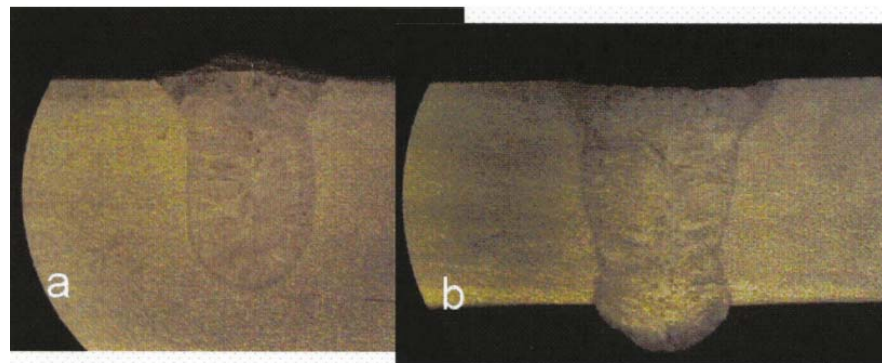
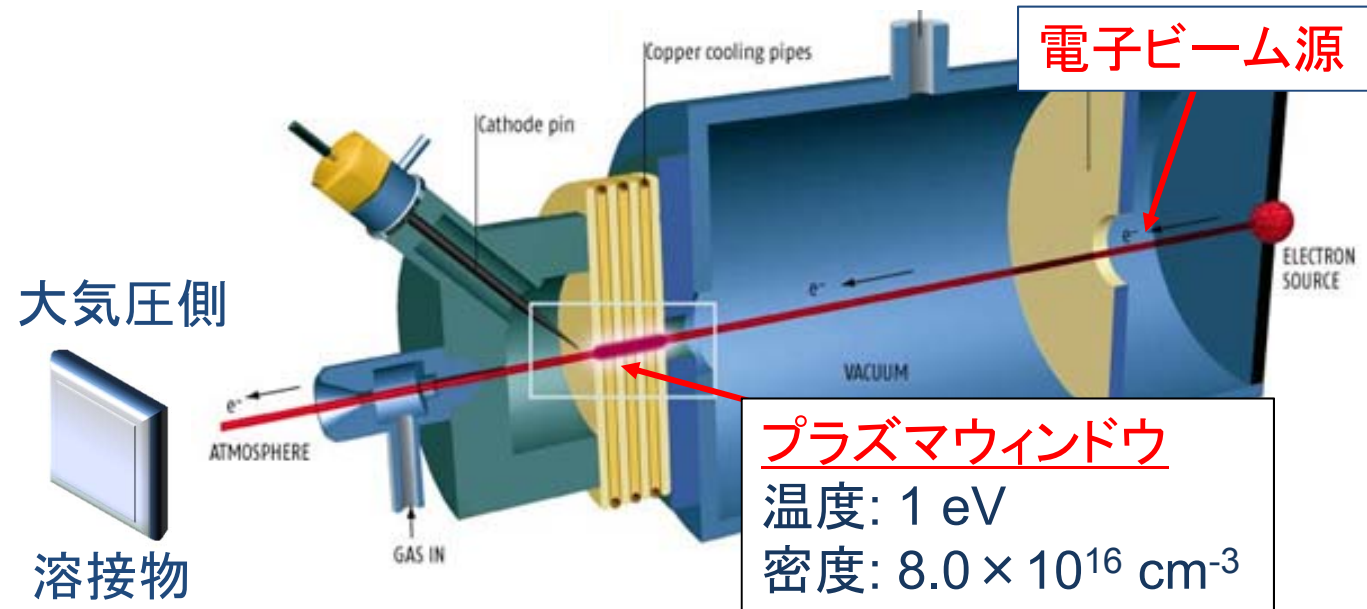
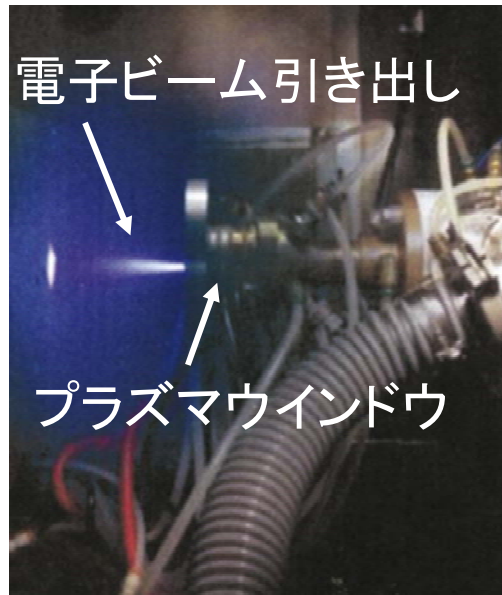
陰極と陽極との間に浮遊電極を設置するカスケードアーク放電では、安定して大気圧熱平衡プラズマが発生することができる。

カスケードアーク放電の概念図



ガスの高温化による圧力上昇と粘性効果により、ガス流量を大幅に抑制！  
→大気と真空を隔離する真空インターフェース(プラズマウィンドウ)として利用できる

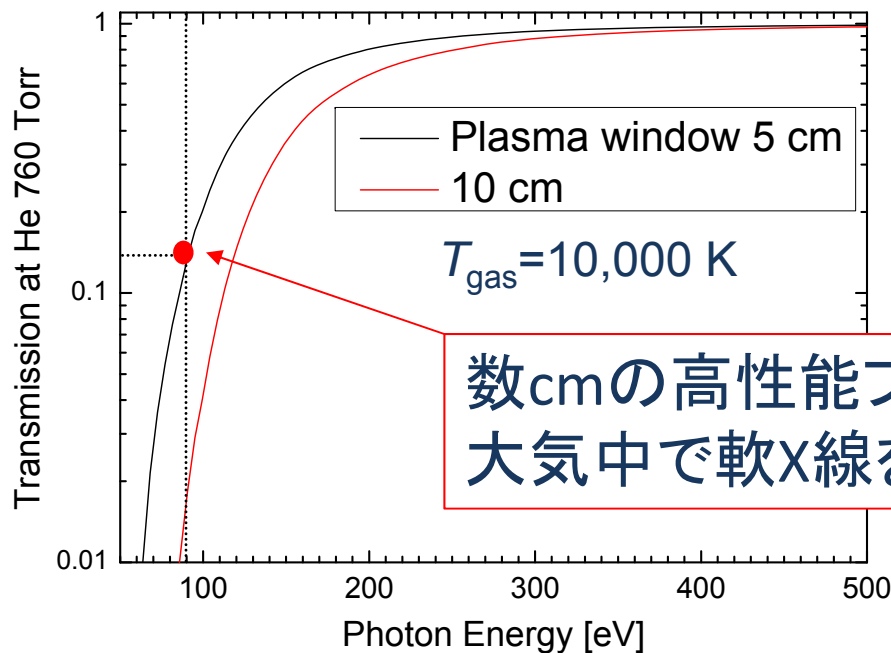
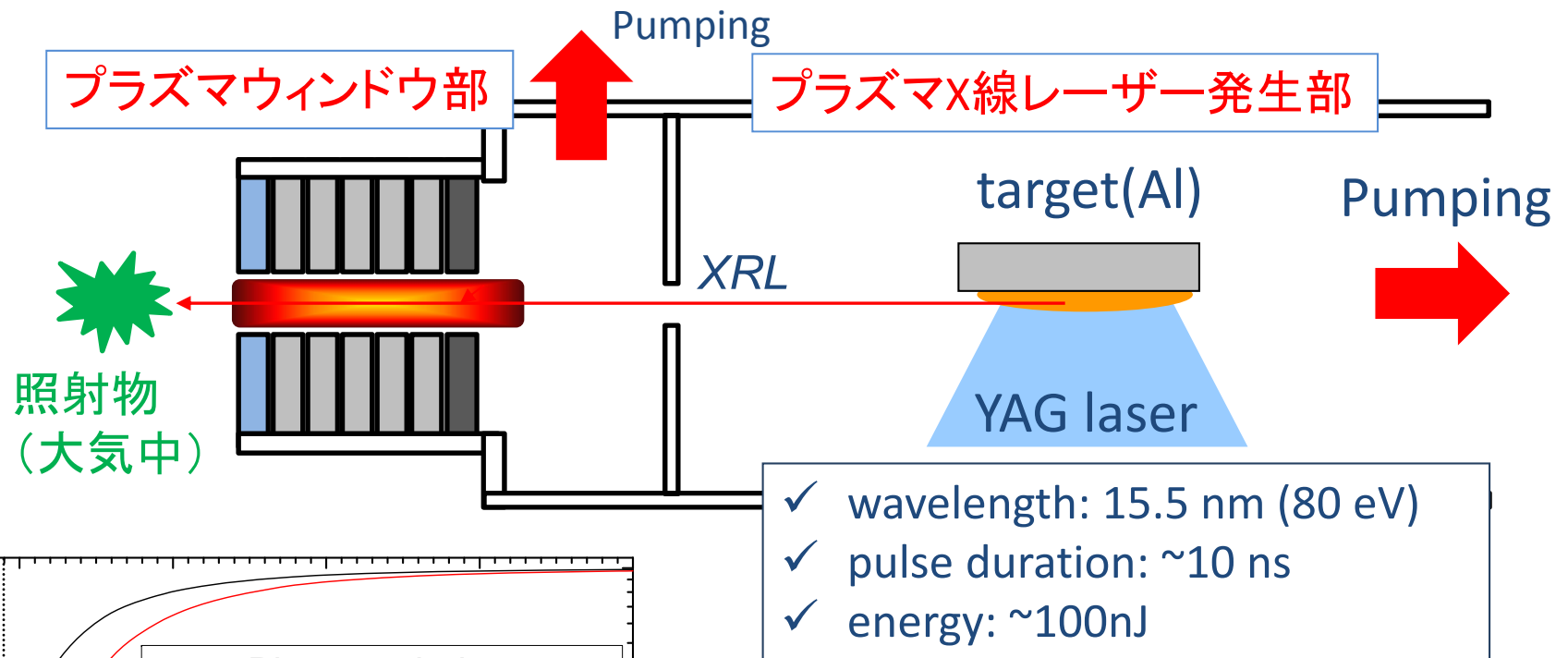
米国ブルックヘブン国立研究所のHershcovitchは**プラズマウィンドウ**を採用して、大気中での電子ビーム溶接に成功(PoP, 12, 057102, 2005).



電子ビームで行われた溶接の写真

従来真空中で行われた加工・プロセス・観測が大気中で可能になる！

- ✓ **電子ビーム** → 微細加工・溶接
- ✓ **イオン注入・ドライエッチング**  
→ 新材料開発・微細加工
- ✓ **軟X線透過のための代替窓材**  
→ 材料物性研究・生体細胞観測



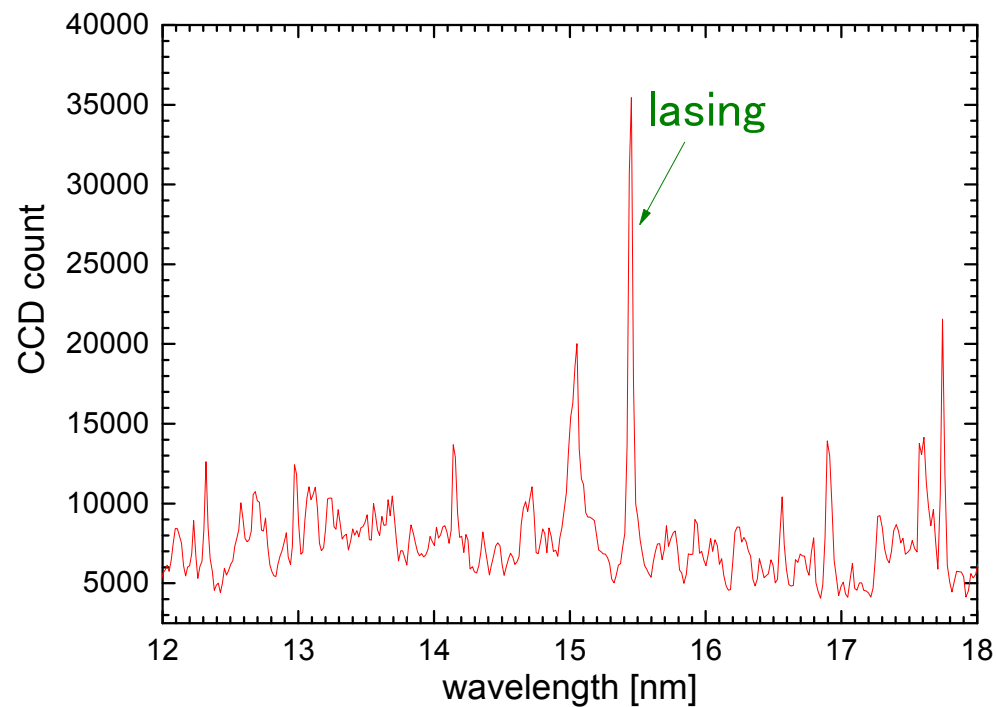
数cmの高性能プラズマウィンドウを実現すれば、大気中で軟X線を物質に照射可能 (>10%@80eV)

[http://henke.lbl.gov/optical\\_constants/](http://henke.lbl.gov/optical_constants/)

Li様Alイオン3d-4f線 (15.47nm)

励起用YAGレーザー  
100 ps, 16pulse train  
Total energy 3.0 J

lasing

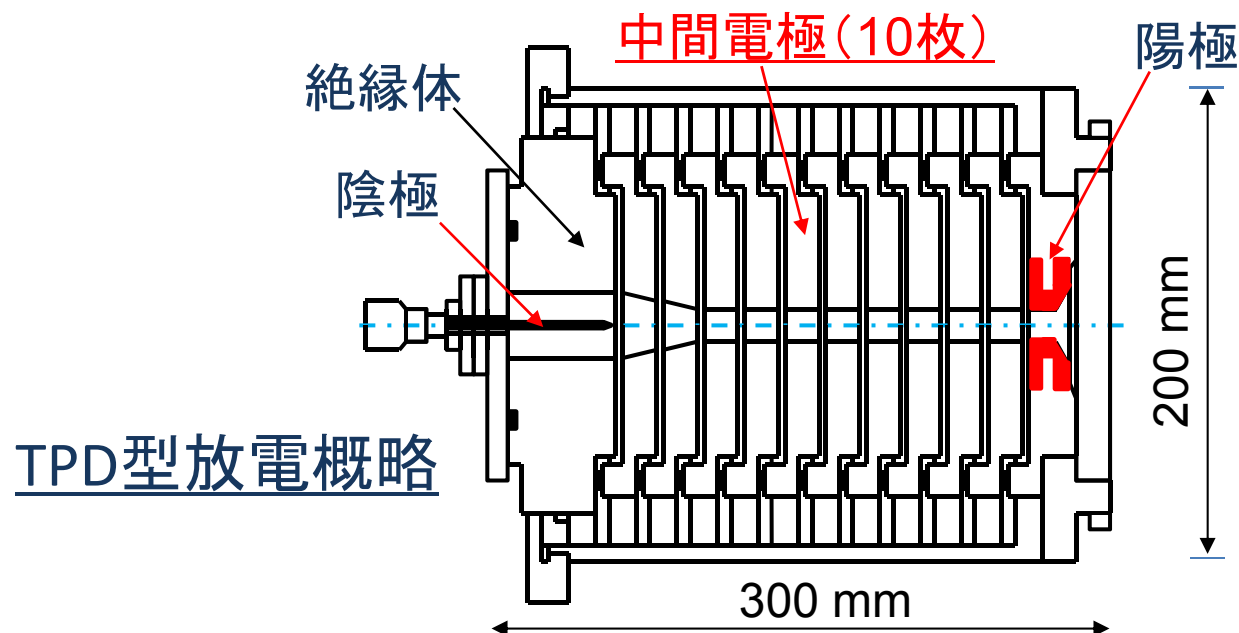


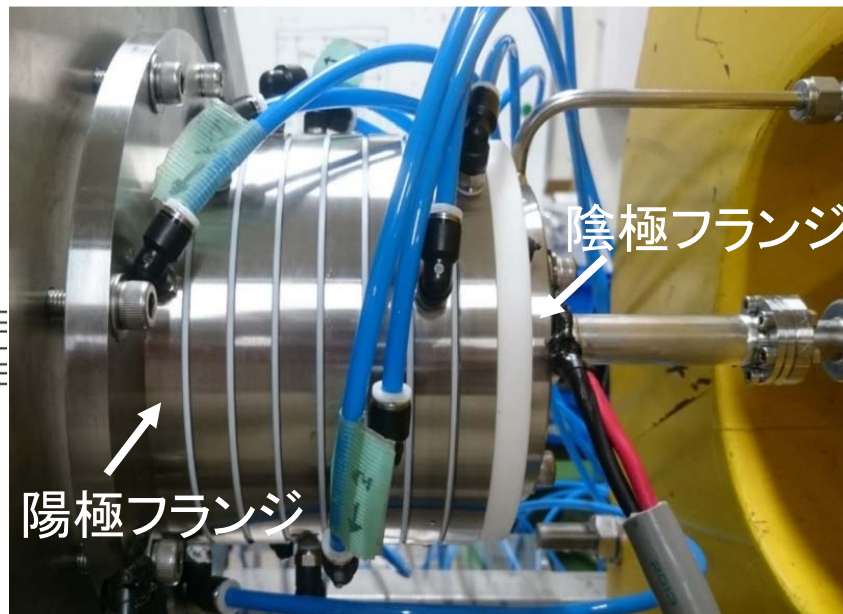
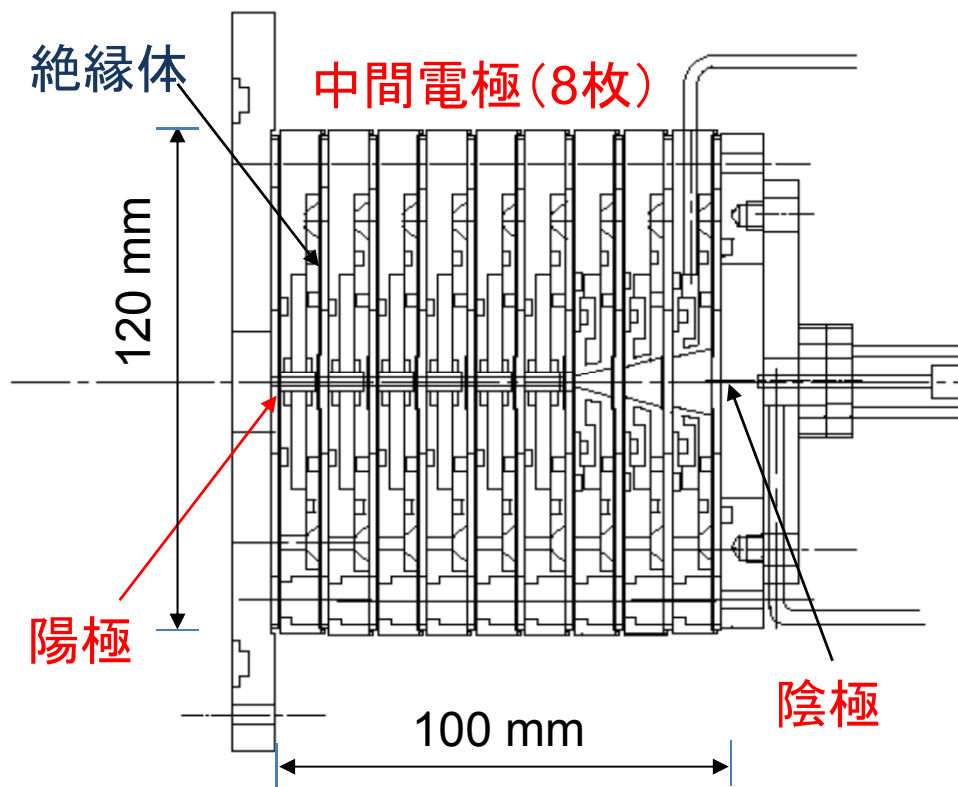
Li-like Alイオンでのレーザー発振に成功！

プラズマウィンドウを実用化するにはさらに高密度の熱プラズマを低コストで発生させ、且つ、長時間運転できることが不可欠！

## 研究目的

- ✓ TPD型放電(Test Plasma by Direct current discharge)を利用した小型カスケードアーク源を開発
- ✓ 定常高温・高密度熱プラズマを長時間発生させる  
目標値：電子温度 2 eV, 電子密度  $> 10^{17} \text{ cm}^{-3}$





陰極 : CeWロッド (3.2 mmφ)  
陽極 : Mo (3 mmφ)  
中間電極 : SUS or Mo (3 mmφ)  
使用ガス : Ar  $\leq$  3.3 L/min  
放電電流 :  $\leq$  100 A





# 装置全体と可視分光光学系

可視分光計測はエンドポートから2台の分光器で行った(焦点位置はアノード)。

分光器1 (温度計測)  
f=190mm  
150grooves/mm  
CCD camera

分光器1

M1

膨張室

放電部

M3

BS

M2

lens

分光器2

分光器2 (スペクトル形状計測)  
f=1m  
2400grooves/mm  
CCD camera

H beta spectra

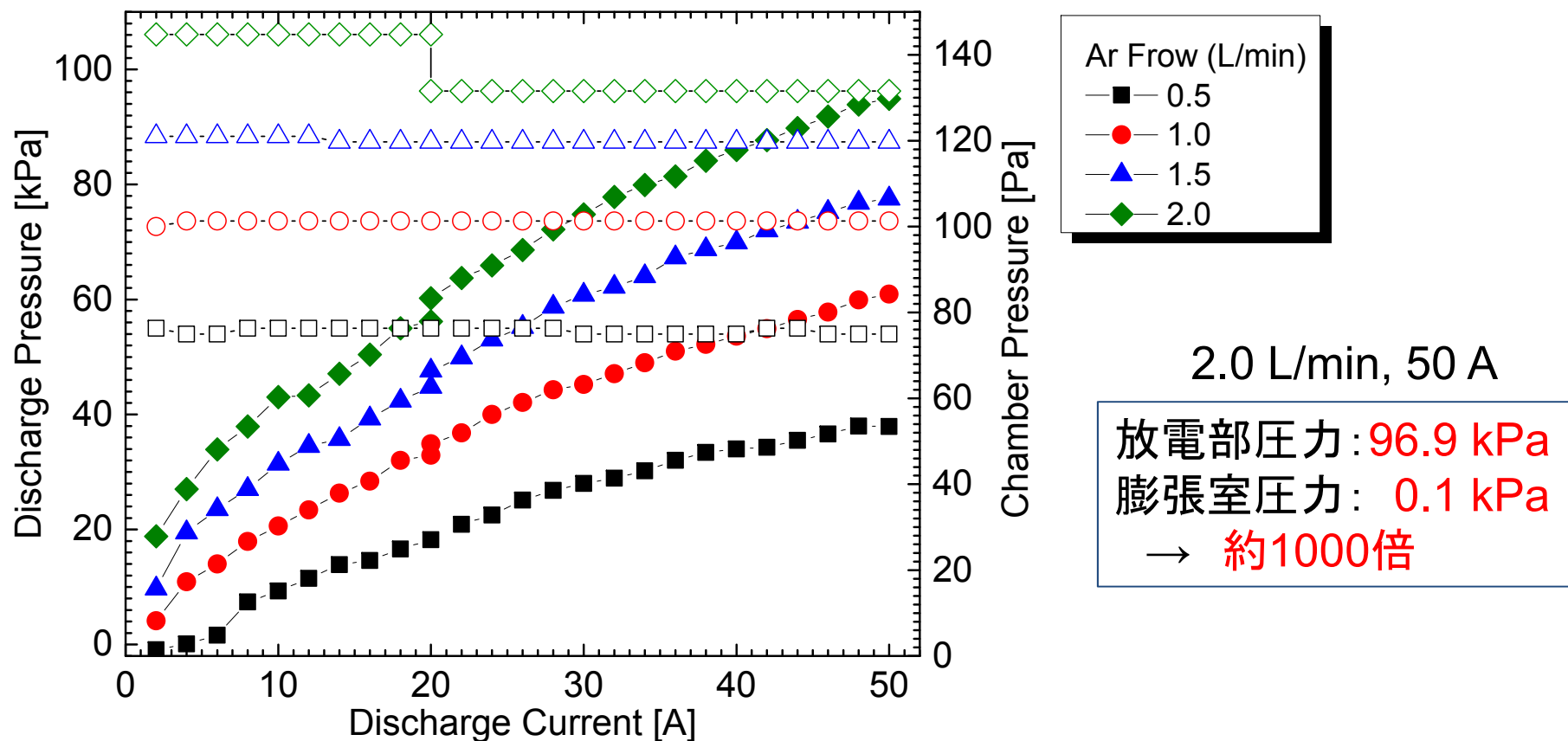
Intensity (normalized)

$\Delta\lambda$  (nm)

—○— H lamp (486nm)  
—○— 0.5 L/min, 10 A

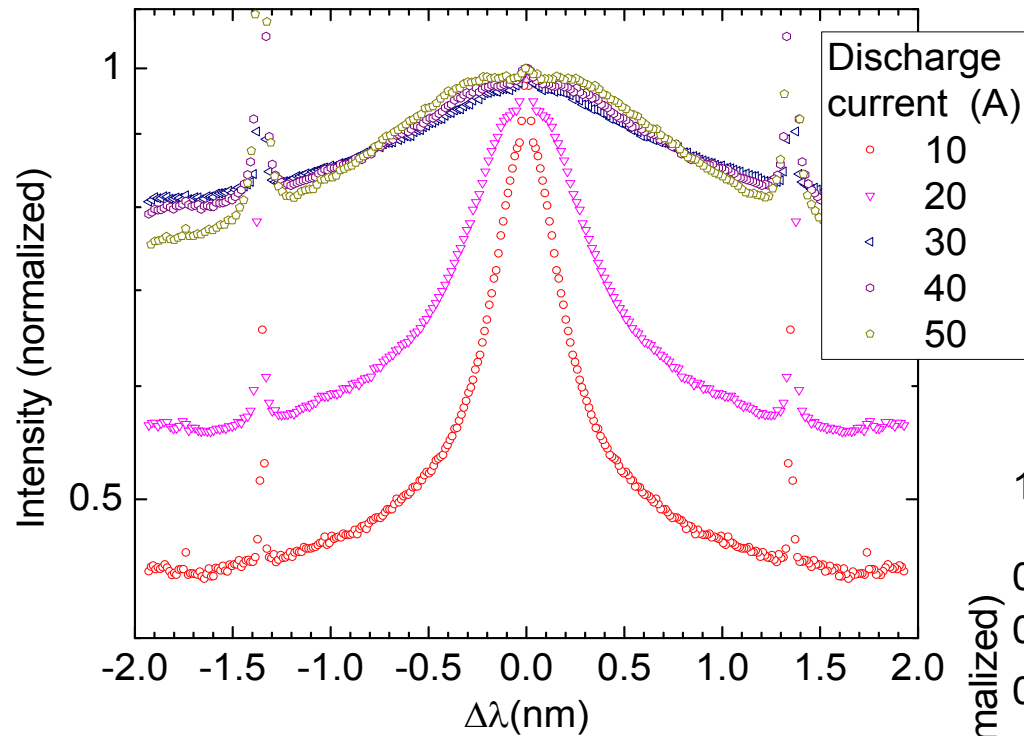


# 放電部ガス圧力の放電電流依存性

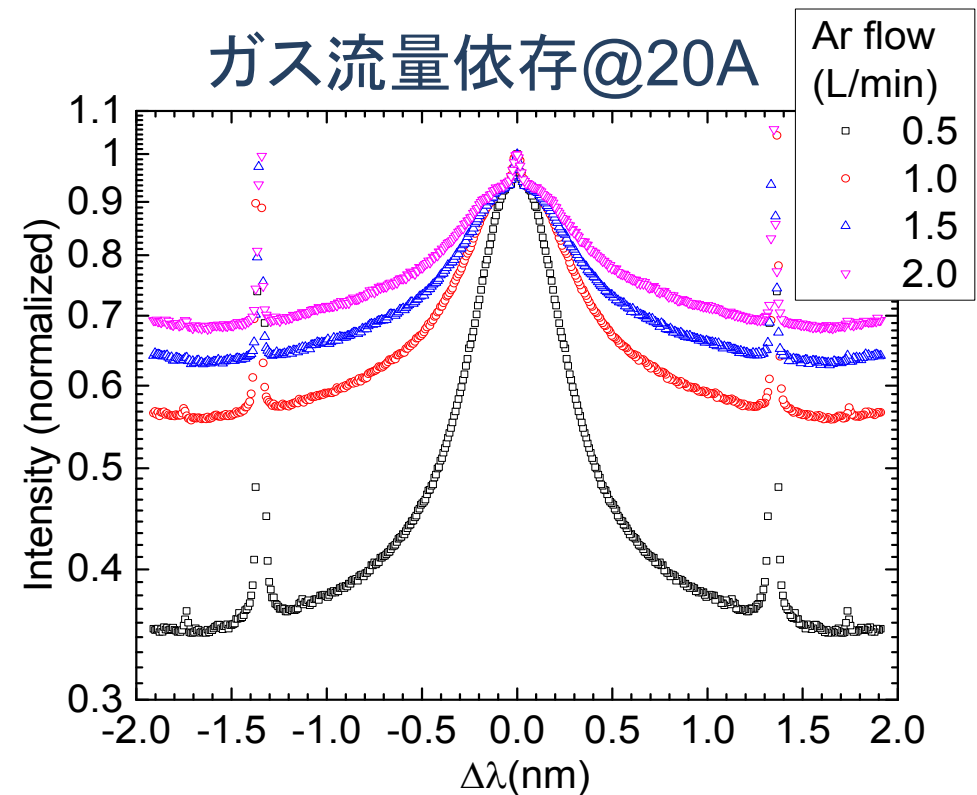


- ✓ プラズマ発生により, 放電部のガス圧が最大で約5倍上昇 (@2L/min. 50A)  
→ 低温ガス(300K)がカソード付近で加熱され, 平均ガス温度が1500 Kに上昇
- ✓ 放電部と膨張室の圧力比 約3桁の圧力隔壁を実現

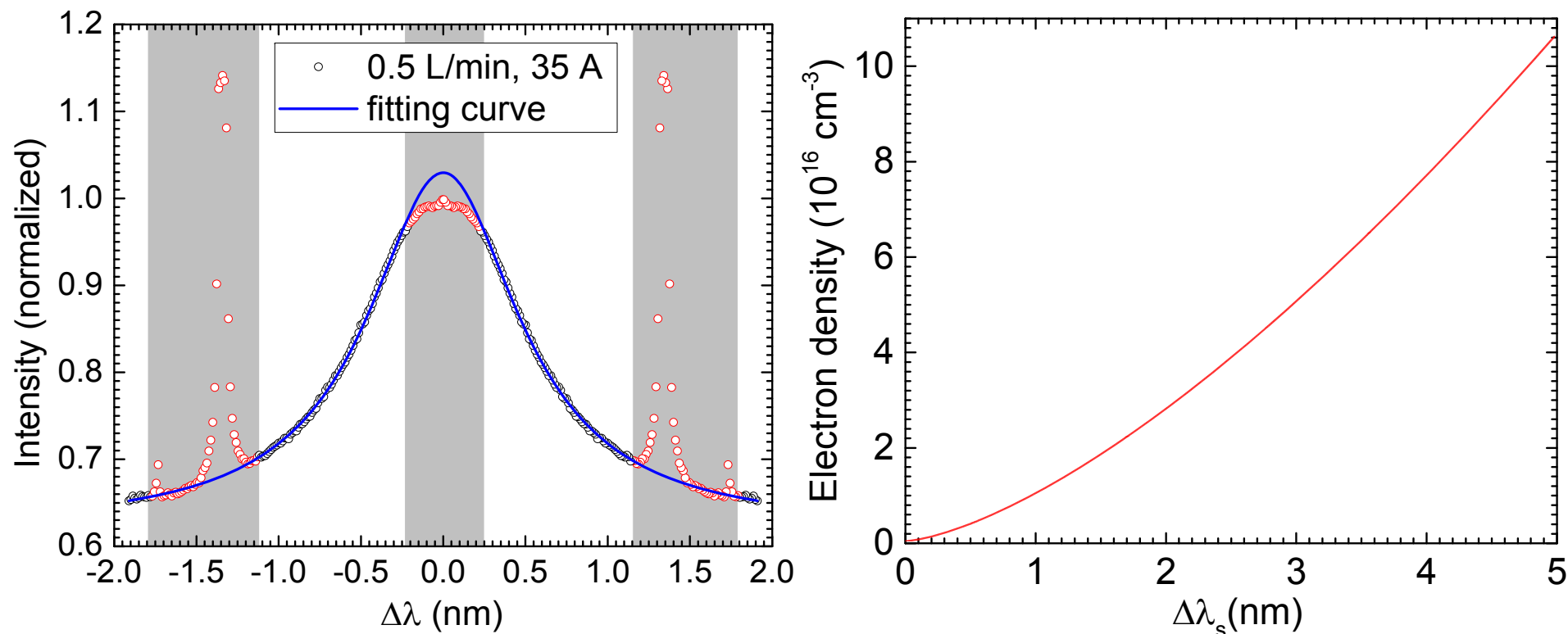
## 放電電流依存@1.0 L/min.



## ガス流量依存@20A



→ 中心部と他のスペクトルはマスクし、ローレンツ関数でフィット  
 (電子温度はAr Iスペクトルのボルツマンプロットより $T_e \sim 1\text{eV}$ )

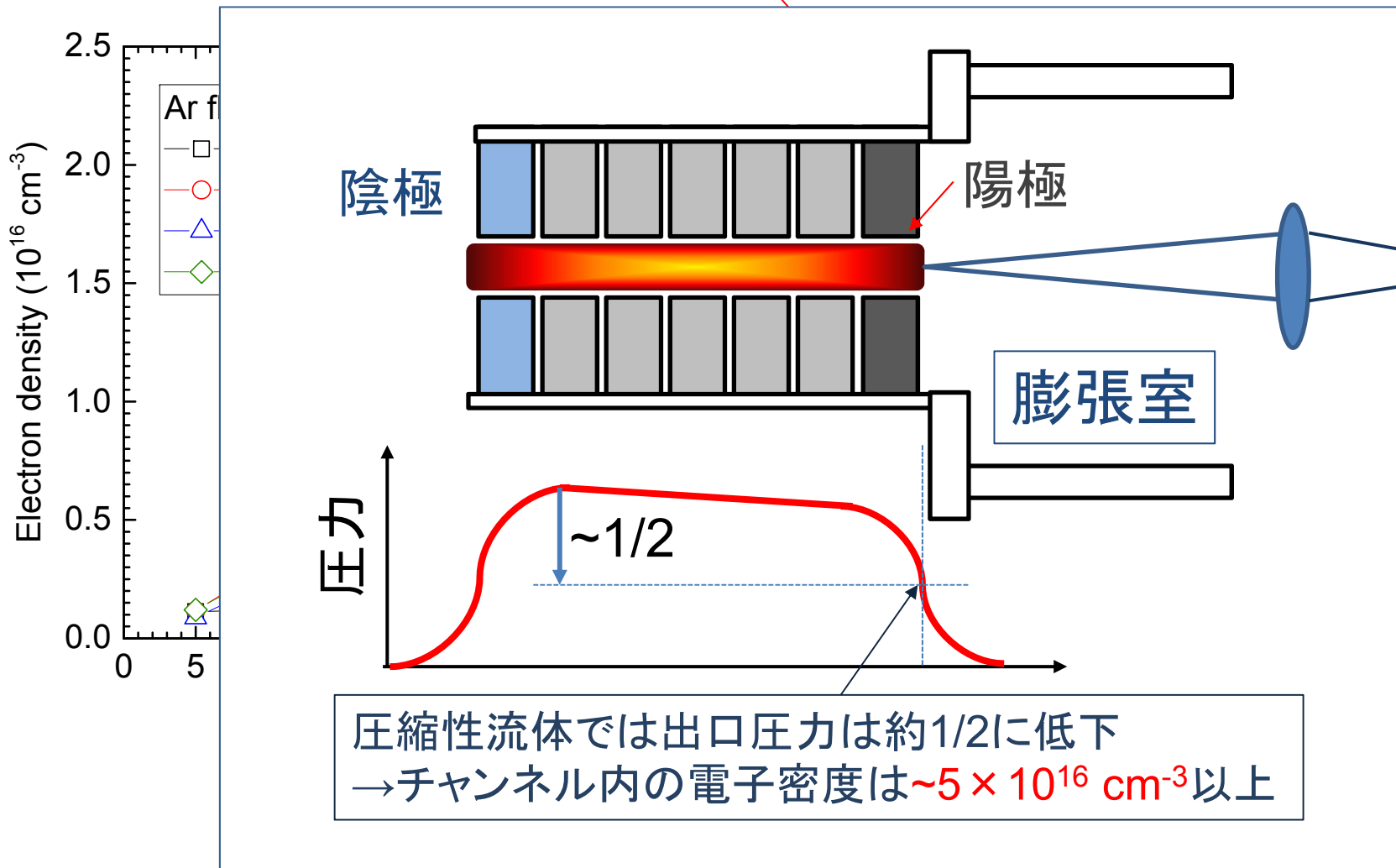


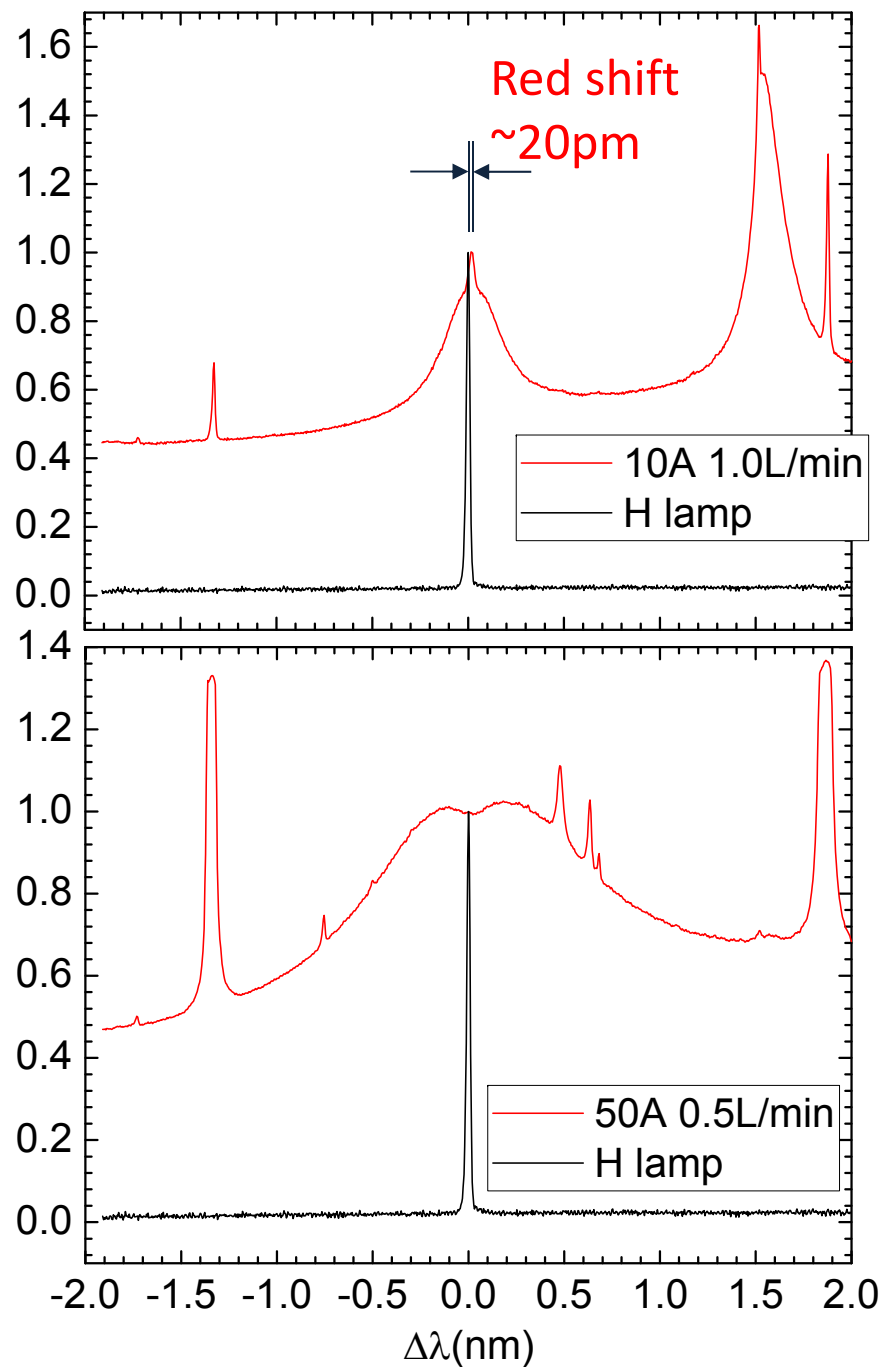
電子密度 $n_e$ はH $\beta$ 線シュタルク拡がり幅(FWHM)  $\Delta\lambda_s$  から評価.

$$\Delta\lambda_s(\text{nm}) = 4.8 \times \left( \frac{n_e}{10^{23}(\text{m}^{-3})} \right)^{0.68116}$$

Gigosos, Spectrochimica Acta Part B **58** pp.1489 (2003).

1.0 L/min, 50 A  
電子密度:  $2.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$





水素ランプと比較してプラズマは red shiftしている?

非対称・中心にくぼみがある分布  
→アルゴンプラズマなので、水素の自己吸収は無視できるはず

ローレンツ分布、軸対称均一プラズマに対しては $\Lambda_{ik}$ は、以下の式で与えられる。

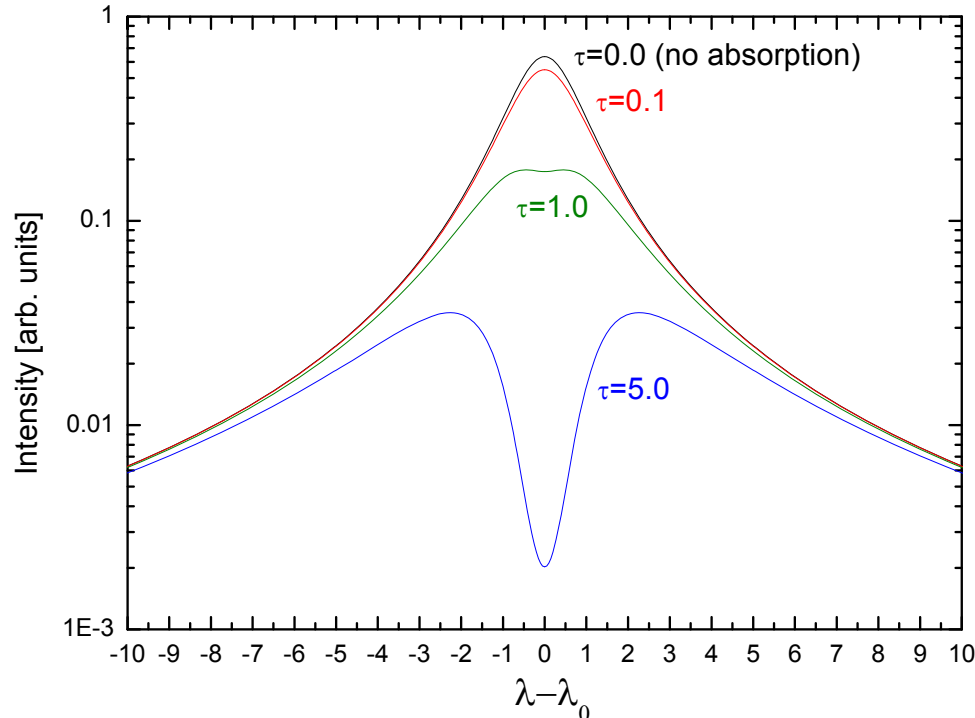
$$\Lambda_{ik} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} dx \int_0^1 dt \frac{1}{1+x^2} \exp\left[-\frac{\tau}{\sqrt{1-t^2}} \frac{1}{1+x^2}\right]$$

ここで $\tau$ はスペクトル中心での光学的深さであり、次のように定義される。

$$\tau = \frac{e^2}{mc^2} f_{ik} \left(1 - \frac{n_k(x_0)}{n_i(x_0)} \frac{g_i}{g_k}\right) \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \int_0^L n_i(x) dx$$

$\left\{ \begin{array}{l} f_{ik}: \text{振動子強度} \\ L: \text{プラズマ長} \\ n_i(x_0): x_0 \text{での下準位密度} \\ n_k(x_0): x_0 \text{での上準位密度} \end{array} \right.$

### スペクトル形状の $\tau$ 依存性





- プラズマ軟X線レーザー透過窓への応用を目指し、低コストで長時間運転可能なカスケードアーク放電源の開発を行っている
- 目標は温度2 eV, 密度 $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上の大気圧熱プラズマの発生

## カスケードアークの放電特性

- ✓ 電極径3 mm $\phi$ カスケードアーク源を製作し、大気圧プラズマ発生に成功
- ✓ 10cmのプラズマで圧力比約1000の圧力隔壁を実現

## 可視分光スペクトル計測の結果

- ✓ 電子密度 $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以上の定常アルゴンプラズマを発生

### 今後の課題

- ✓ より高効率で電極冷却を行うための電極構造・電極材の見直し(対策済み)
- ✓ 強制冷却のためのクーリングタワー設置, 大放電電流化(100A)でさらに高温高密度プラズマを発生

→放電室・真空側の圧力比 $10^5$ 以上のプラズマウィンドウを実現