

2010/03/11

「第13回 若手科学者によるプラズマ研究会」

# プラズマイメージング分光計測への 液晶リオフィルタの適用

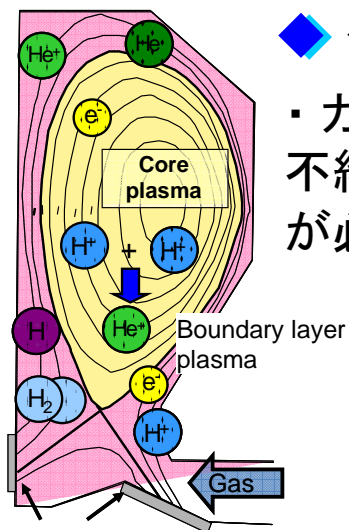
---

村木 厚哉(M1), 小松 怜史<sup>A</sup>, 門 信一郎,  
鈴木 健二, 飯田 洋平, 田中 知

東京大学大学院工学系研究科  
東京大学工学部<sup>A</sup>

---

# 1.1 イメージング分光計測の必要性



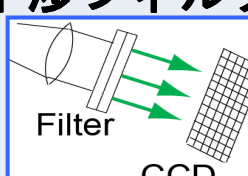

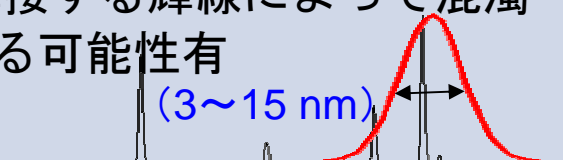
## ◆ ダイバータ板への熱負荷低減

・ ガスパフ等により放射損失を促進し電子温度を低下. 放射損失の機構の解明, 不純物, 熱流を制御 ⇒ダイバータ・境界層プラズマのパラメータ( $T_e$ ,  $n_e$ )計測が必要. He 衝突輻射モデルに基づく線強度比法が確立されている.

プラズマパラメータは空間的に分布を持ちうる

⇒ イメージング分光計測が有効な手法である

線強度比法をイメージング計測に適用して空間分布計測を行う

分光手法	○	×
<b>干渉フィルタ</b> 	<b>パスバンド幅が狭い</b> 特定の輝線のイメージを得る場合に適する ( $\sim 1 \text{ nm}$ ) 	<b>透過波長が単一</b> →輝線数分のフィルタが必要. フィルタを機械的に交換する必要がある.
<b>波長可変液晶リオフィルタ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>電氣的な制御により<b>透過波長を選択可能</b></li> <li>高速な波長移動が可能 (<math>\sim 50 \text{ msec}</math>)</li> </ul>	<b>パスバンド幅が比較的広い</b> →隣接する輝線によって混濁される可能性有 ( $3 \sim 15 \text{ nm}$ ) 

液晶リオフィルタをプラズマのイメージング分光に適用したい

# 1.2 液晶リオフィルタの構造・原理

◆ 液晶リオフィルタ 偏光干渉を利用した複屈折フィルタの一種

- 位相遅延  $\phi$  と波長  $\lambda$ , 屈折率の差  $\Delta N_{LC}$  の関係

$$\phi = \frac{2\pi(\Delta N_F d_F + \Delta N_{LC} d_{LC})}{\lambda}$$

$\phi$ : 位相遅延

$\Delta N$ : 液晶波長板中の屈折率の差

波長板中での複屈折  $\Delta N$  により位相遅延  $\phi$  が生じる.

⇒  $\Delta N$  を電氣的に制御. 特定の波長が減衰せずに透過.

⇒ 次段の直線偏光子により  $\phi$  に応じて透過率  $T$  が変化.

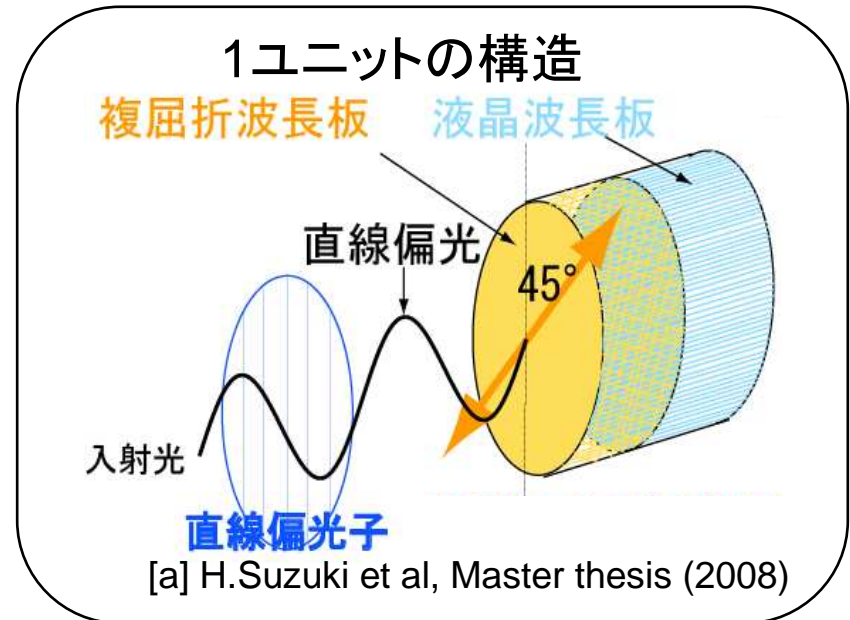
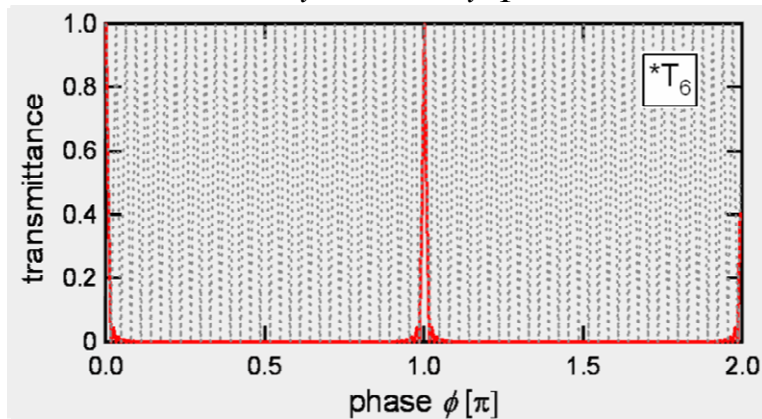


リオフィルタ

6段のユニットの積層構造

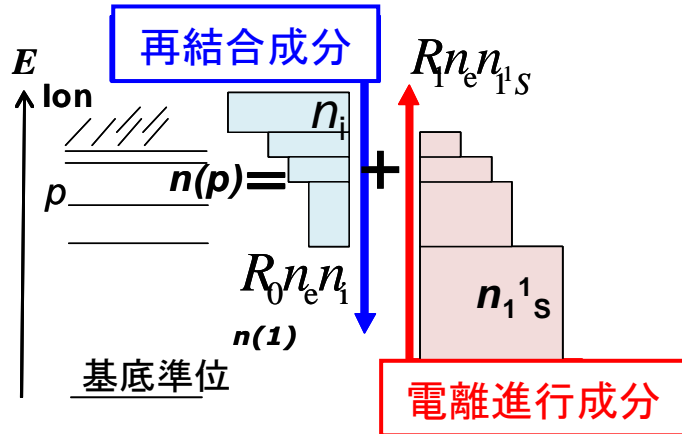
- 透過率 -

$$T = \prod_i T_i = \prod_{i=1}^6 \cos^2(\phi_i / 2)$$



# 1.3 線強度比法の適用

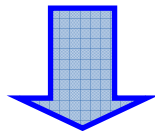
## ◆ 衝突輻射 (CR) モデル<sup>[1]</sup>



$p$  準位における占有密度  $n(p)$  は電子衝突や輻射過程による流入と流出のバランスで決定される

$$\frac{d}{dt} n(p) = \Gamma_{in} - \Gamma_{out}$$

準定常近似



$$n(p) = R_0(p, T_e, n_e) n_e n_i + R_1(p, T_e, n_e) n_e n_{1S}$$

## ◆ 線強度比法

CRモデルにおける占有密度比を実験値に合わせる

### 実験

$$\frac{n_{\text{exp}}(p)}{n_{\text{exp}}(p')} = \frac{(I_{q \leftarrow p} \lambda_{q \leftarrow p} / hc A_{q \leftarrow p})}{(I_{q' \leftarrow p'} \lambda_{q' \leftarrow p'} / hc A_{q' \leftarrow p'})} = \frac{\text{既知 } \lambda_{q \leftarrow p} A_{q \leftarrow p}}{\text{計測 } \lambda_{q' \leftarrow p'} A_{q' \leftarrow p'}} \frac{I_{q \leftarrow p}}{I_{q' \leftarrow p'}}$$

### CR モデル

$$\frac{n_{CR}(p)}{n_{CR}(p')} = \frac{R_1(p) n_{1S} + R_0(p) n_i}{R_1(p') n_{1S} + R_0(p') n_i}$$

$h$ : プランク定数  
 $A$ : 自然放出係数

評価関数  $f$  を最小にする  $T_e, n_e$  を決定.

$$f = \sum_i \frac{(n_{\text{exp}}(i) / n_{\text{exp}}(p) - n_{CR}(i; T_e, n_e) / n_{CR}(p))^2}{n_{\text{exp}}(i) / n_{\text{exp}}(p)}$$

## ◆ 輻射捕獲の考慮

場合, 共鳴線による光子の吸収過程を考慮

$$\underbrace{A_{pq}}_{\text{自然放出}} \rightarrow \underbrace{A_{pq} - B_{pq} \frac{n(p)}{n(q)} I_{pq}^-}_{\text{共鳴吸収}} = \Lambda_{pq}(L) A_{pq}$$

$\Lambda$ : エスケイプファクタ ( $\leq 1$ )

[1] T. Fujimoto, J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer **21**, 439 (1979).

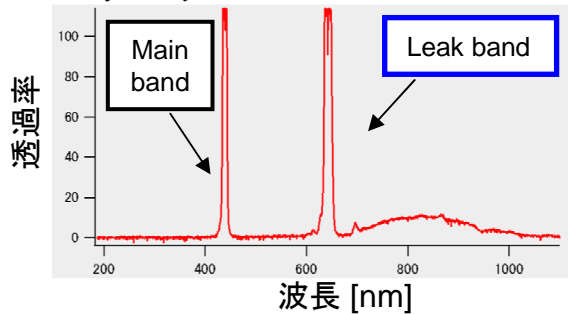
# 1.4 輝線の選定

667/728 →  $n_e$  計測  
 728/706 →  $T_e$  計測 } 液晶リオフィルタは728 nmが計測できないため、輝線の選択が重要である

## ◆ 選定項目 [a]

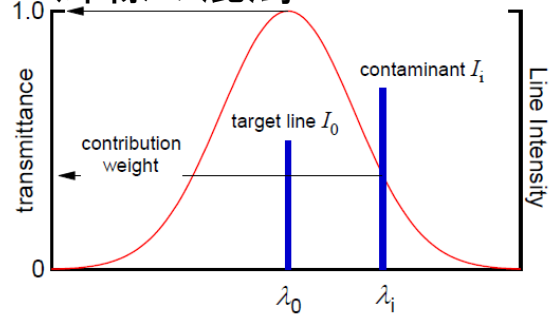
1. リオフィルタの可変波長範囲 : 400-720 nm

2. リークバンド



下記波長領域外:  
**400-455 nm**

3. 輝線の混濁



$$f_{tr}(\lambda_0, \lambda) = \exp\left(-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta w_{\text{filter}}}\right)^2\right)$$

$$\xi = \frac{\sum I_i f_{tr}(\lambda_0, \lambda)}{I_0} < 0.1$$

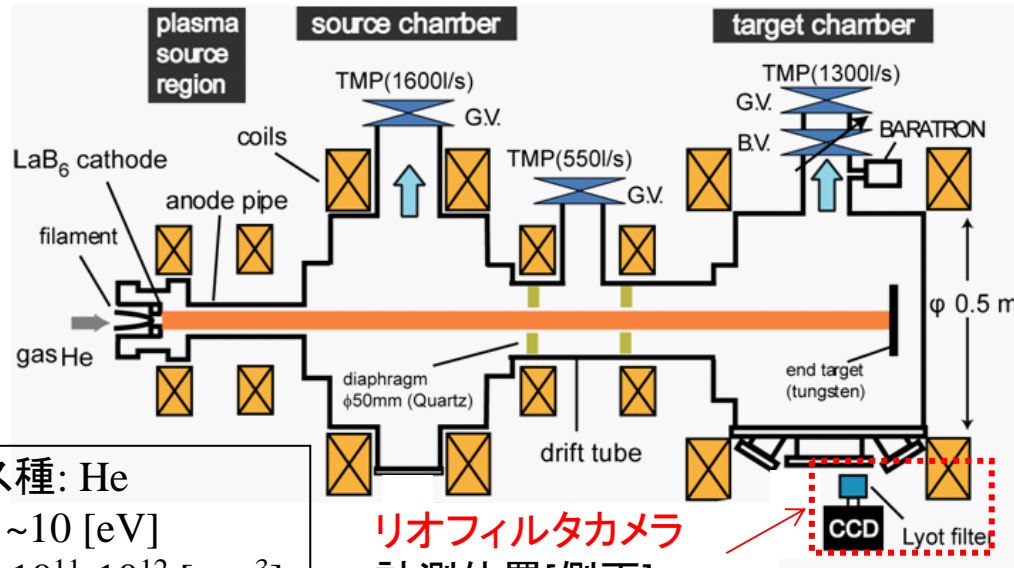
4. 収束特性の変化 ➡ 492 nmを除いても変化しない

- He のスペクトル -

項	波長 [nm]
7 <sup>1</sup> D	400.927
5 <sup>3</sup> D	402.619
5 <sup>3</sup> S	412.082
6 <sup>1</sup> D	414.376
5 <sup>1</sup> D	438.793
5 <sup>1</sup> S	443.755
4 <sup>3</sup> D	447.148
4 <sup>3</sup> S	471.315
4 <sup>1</sup> D	492.193
3 <sup>1</sup> P	501.568
4 <sup>1</sup> S	504.774
3 <sup>3</sup> D	587.562
3 <sup>1</sup> D	667.815
3 <sup>3</sup> S	706.519

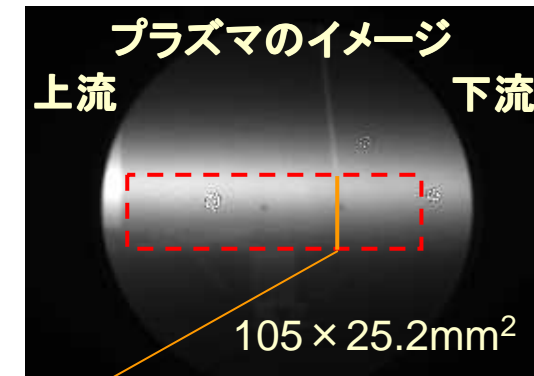
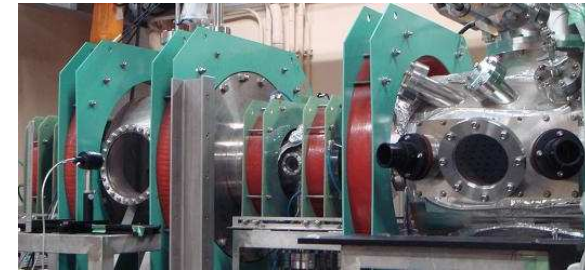
# 2.1 実験装置

## ◆ MAP (Material And Plasma) - II



ガス種: He  
 $T_e: \sim 10$  [eV]  
 $n_e: 10^{11} - 10^{12}$  [cm<sup>-3</sup>]  
 (2nd chamber)

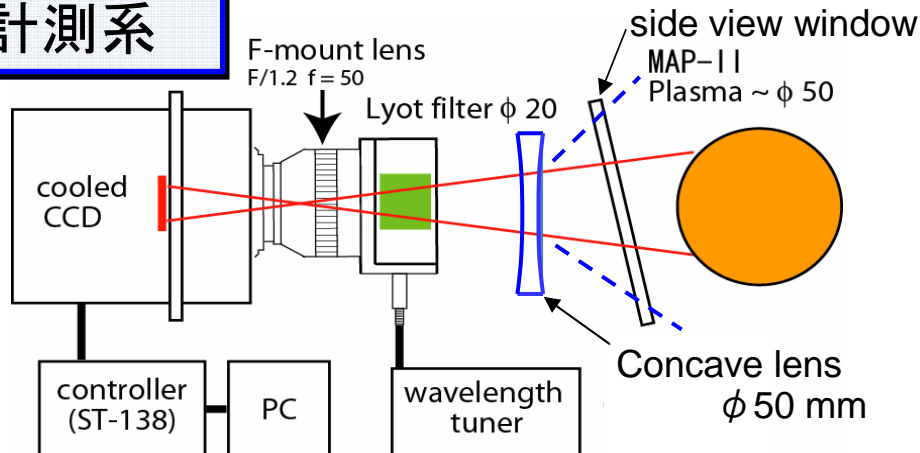
リオフィルタカメラ  
 計測位置[側面]



強度

Lを実測(軸方向は一定値と仮定)

### 計測系



### ・リオフィルタカメラ(イメージング計測)

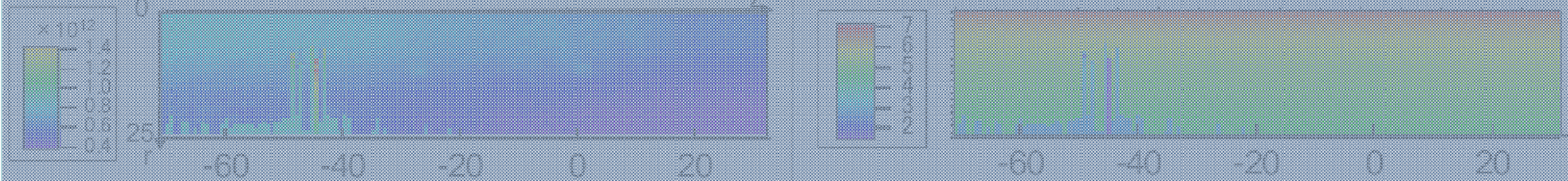
- [ 波長領域: 400-720 nm
- [ 光学倍率(M) : 0.0443
- [ 有効観測領域 : 183 x 183 mm<sup>2</sup>
- ・低分散分光器 (  $n(3^1P)/n(4^1P)$  計測 )
- [ StellarNet Inc., 2048チャンネルリニアCCD, 分解能 $\sim 0.5$  nm, 計測波長範囲185- 850 nm
- ・静電プローブ (原理検証用)
- [ タングステン製, 直径 1.0 mm, 長さ 2.0 mm

## 2.2 実験結果(初期結果)

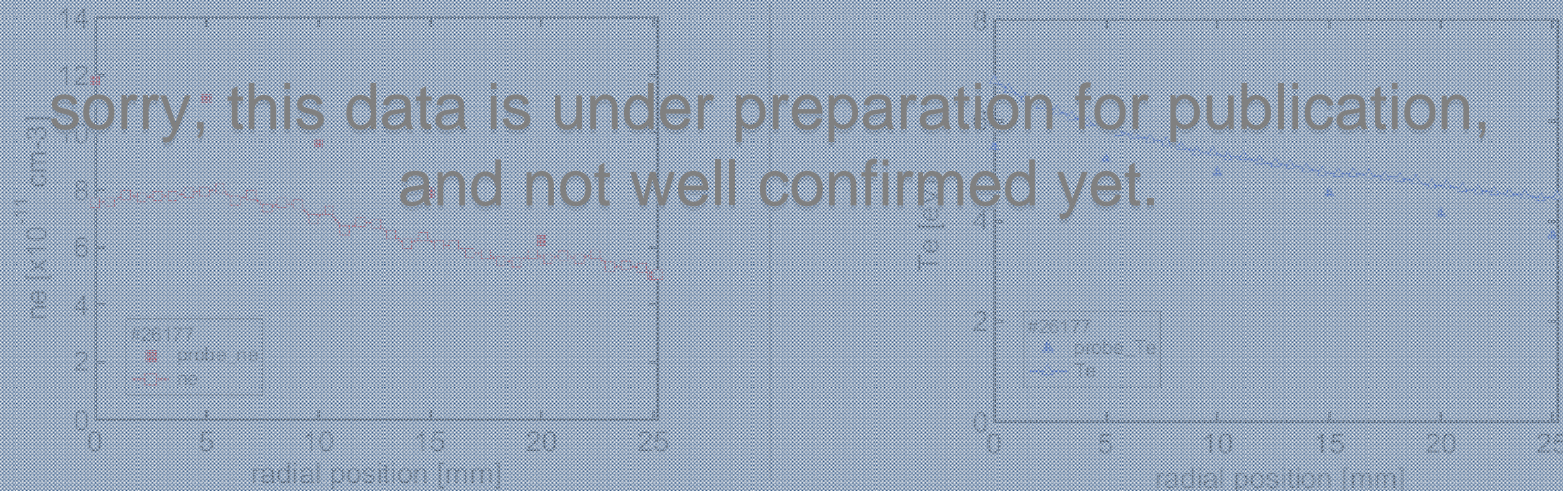
◆  $n_e$  (左),  $T_e$  (右) の2次元分布 (発光の線積分値を使用)

#26177 He 4.0 mTorr  
79V, 29.96A

使用輝線 (471, 501, 587, 667, 706 nm)



◆ プローブ計測との比較(径方向パラメータ分布: z=0 mm)



・中心部で最大1.5倍の差

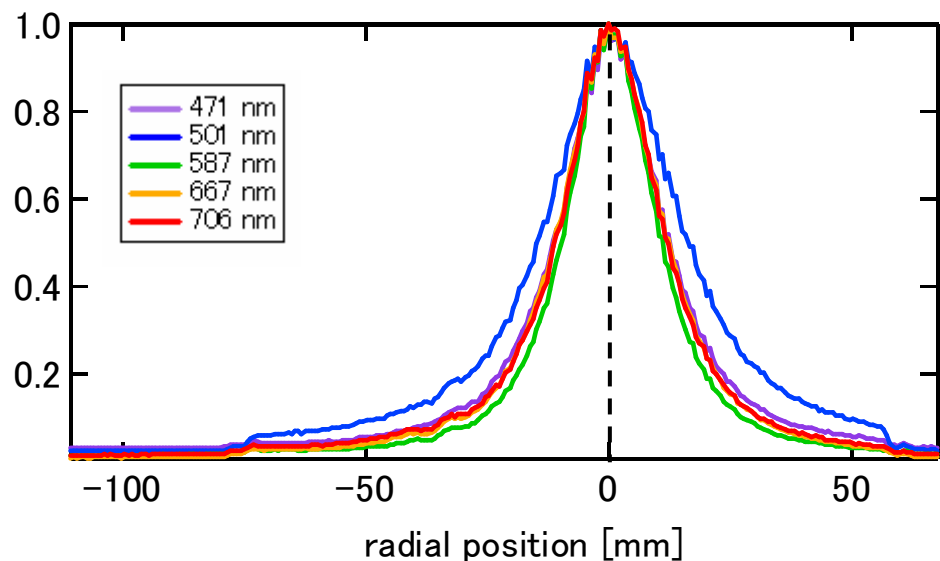
・中心部で最大1.2 eVの差

発光強度を局所値に変換する手法の適用を行う。  
選択した輝線が線強度比法に適用できるかを検証する。

## 2.3 Abel逆変換による局所値への変換

軸対象円筒形プラズマ → Abel逆変換が適用可能

◆ 径方向密度分布形状の比較



(軸中心の値で規格化)

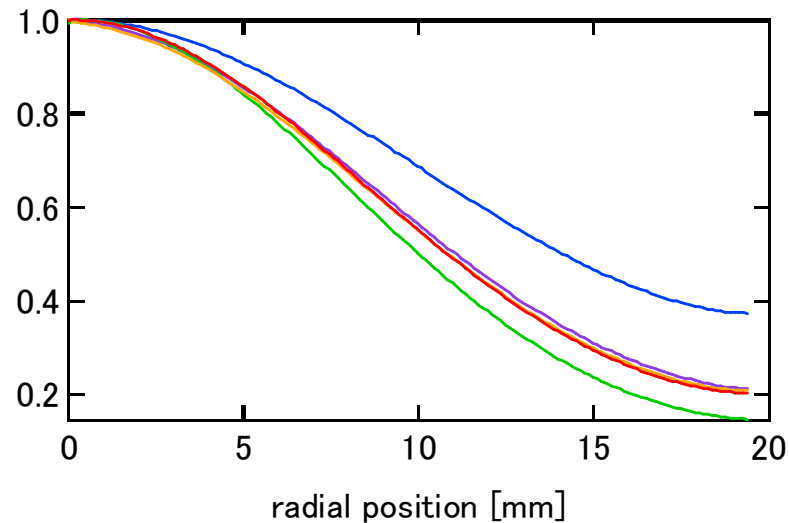
- ・ 501 nmが有意に広い分布形状
- ・ 587 nmが比較的狭い分布形状



これらの輝線を使用する場合、局所値に直す必要がある(関数系が異なると影響が大きい)

◆ Abel逆変換後の占有密度分布

(関数系を外挿して使用)



リオフィルタカメラでは詳細な分布が得られる(空間分解能 0.7 mm)ため、pixel単位で数値的にAbel逆変換し、詳細なプロフィールを得ることができる。



## 2.4 適用可能な輝線の選定

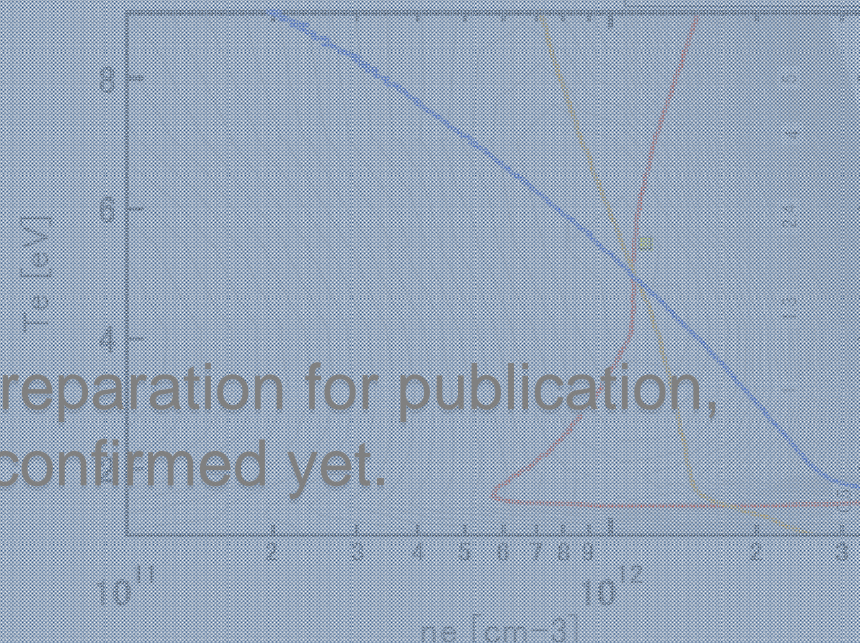
◆ 占有密度比と  $f$  の収束特性の  $n_e$ - $T_e$  等高線

<5 本使用した場合>



・587/471の比がプローブ値から大きく離れている

<w/o 587>



・占有密度比の交点と  $f$  の収束特性が一致

・587 nmの比を外すことにより  $f$  の収束値と占有密度比の交点  
が一致する結果となり、プローブ値と良く一致するようになった。  
(圧力条件により傾向が異なるため現在検証中)

占有密度比  
 — 501/471  
 — 587/471  
 — 667/471  
 — 706/471

sorry, this data is under preparation for publication,  
and not well confirmed yet.

# まとめと今後の方針

---

## ◆ まとめ

液晶リオフィルタをプラズマのイメージング分光に適用し、原理検証を試みた。

- ・ 線強度比法をイメージング計測に拡張することで、MAP-II 円筒系プラズマにおいてパラメータ( $n_e, T_e$ )の2次元分布を導出した。
- ・ 占有密度分布形状の違いを考慮するため、Abel逆変換等を用いて局所値に直す必要があることが示された。
- ・ 今回の条件においては587/471の占有密度比がプローブ結果と大きく離れており、パラメータ計算に適用できない可能性があることが示唆された。

## ◆ 今後の方針

- ・ より詳細な圧力条件において占有密度比の変化について検証し、線強度比法に適用する輝線の最適化を行う。
- ・ 発光の局所値を用いたパラメータの2次元分布を導出する。
- ・ 液晶リオフィルタの可変波長を活かして、輝線の混濁の分離(デコンボリューション)を試みる。