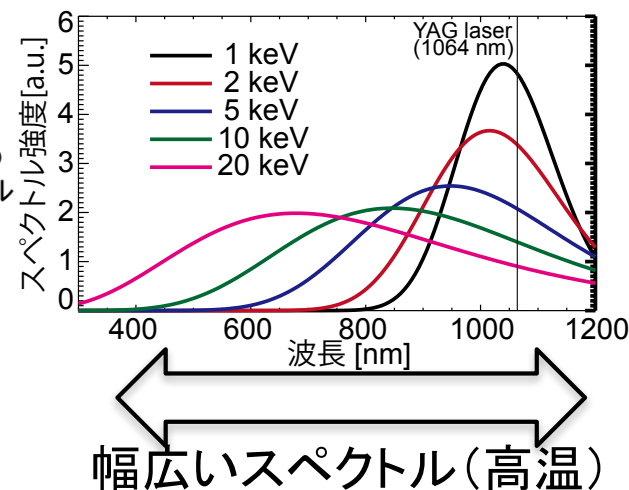
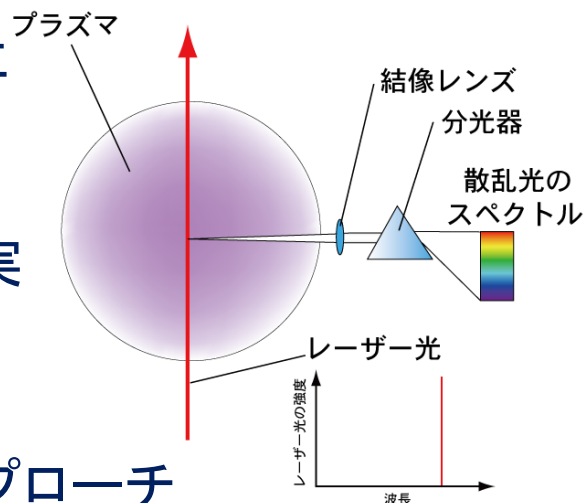


# JT-60SAトムソン散乱計測の設計

東條寛  
量研機構

第20回 若手科学者によるプラズマ研究会, 那珂, 平成29年3月6日

- トムソン散乱計測はレーザーによる散乱スペクトル分布を計測し、高空間分解能で電子密度・温度を求める核融合プラズマ実験の基幹計測



- 計測装置としての課題へのアプローチ

## 従来からの課題

微弱な信号強度  
ディストラクションによる電磁力

1. 集光効率がよく、高電子温度を計測できる  
集光光学系の設計

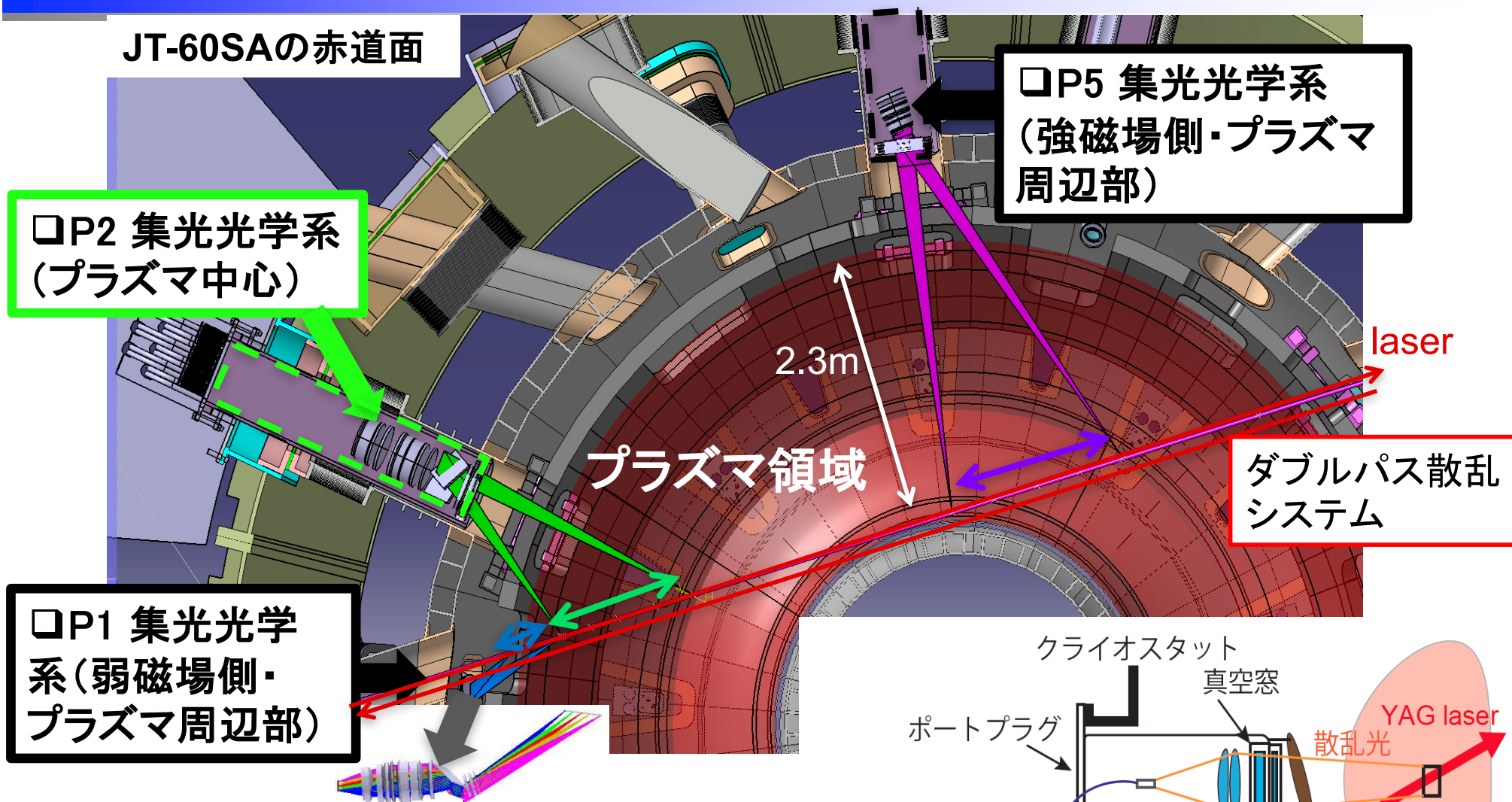
## プラズマの高性能化に伴い生じる課題

高電子温度計測(幅広いスペクトル)  
厳しい放射線環境(中性子、 $\gamma$ 線)  
輻射熱の環境

2. 電磁力や輻射熱に耐えるシャッターの設計

3. 放射線環境に強い新しい電子温度計測法  
と光学部品劣化を補正できるその場較正法  
の開発

## JT-60SAの赤道面

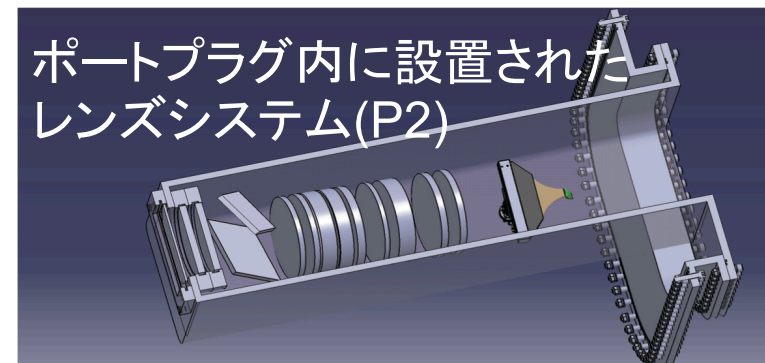
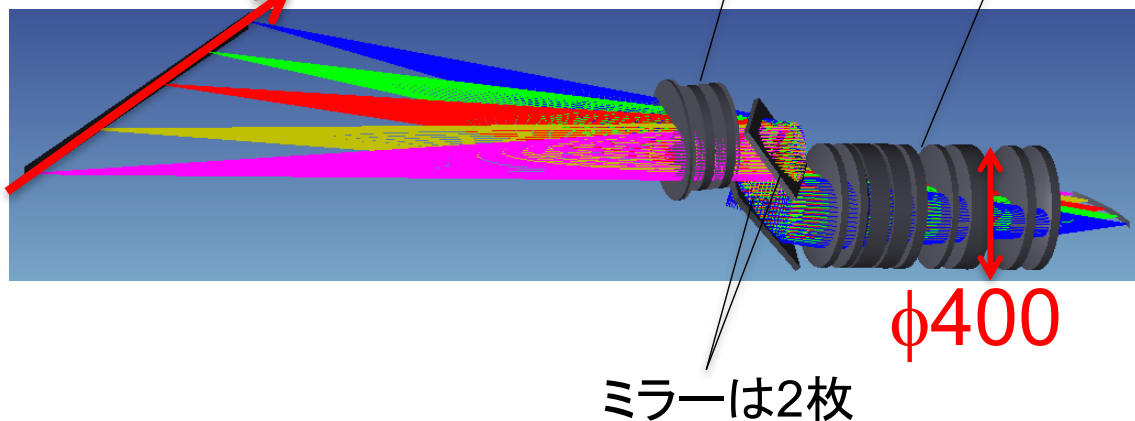


目標仕様	中心計測	周辺計測
径方向空間分解能	20 – 30 mm	~ 10 mm
計測温度領域	0.1 – 30 keV	0.01 – 5 keV

# 1. 集光効率がよく、高電子温度を計測できる 集光光学系の設計

## <初期設計>

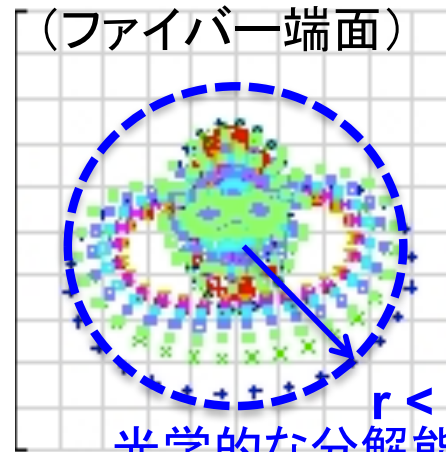
中心計測用(P2)  
YAGレーザー



- レンズ材質は石英, 蛍石, F2, BK7
- 色収差を抑制するために多数のレンズを用いた(500nm - 1100 nmで50%以上の透過率がある)  
→0.3 mm程度の高分解能
- ポートプラグ内の設計領域を守る必要がある

### • 分解能の条件

スポットダイアグラム  
(ファイバー端面)

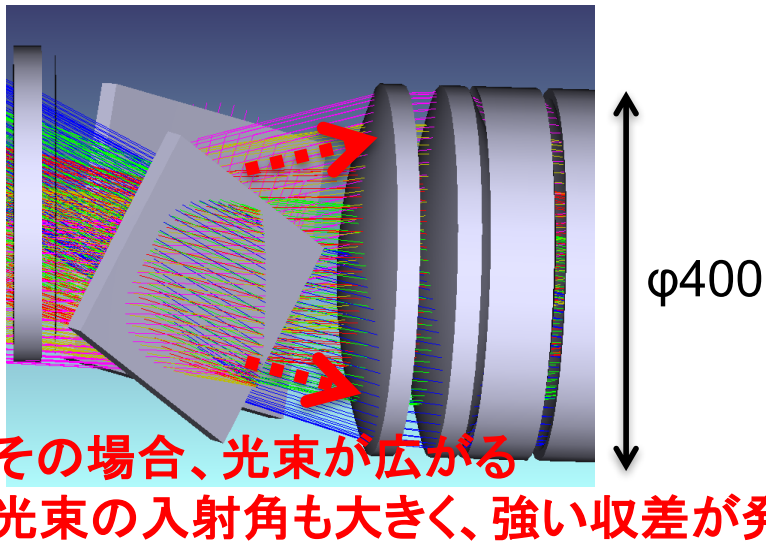
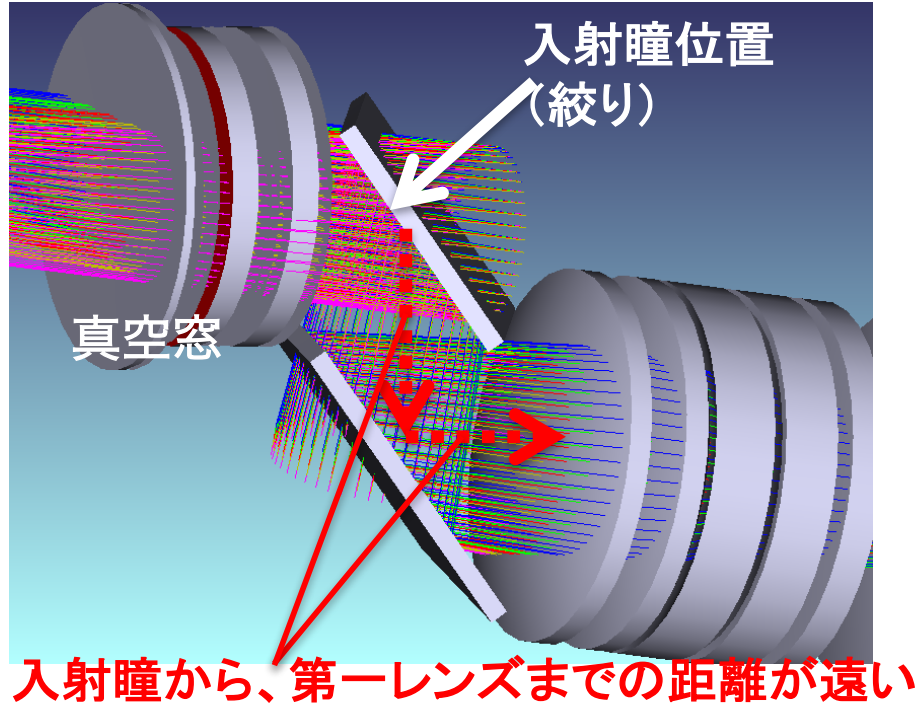


プラズマ側空間1点  
からの光束が集光時  
に半径0.6 mm以下  
に収まるようにする

**問題点: レンズが大型(φ400mm)で製作が困難**

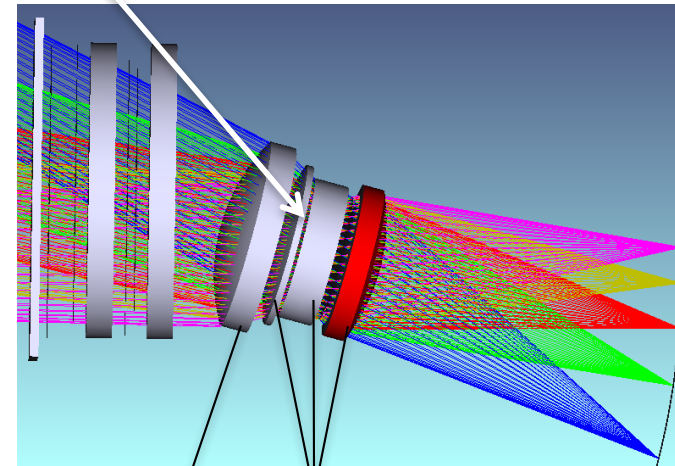


<初期設計>



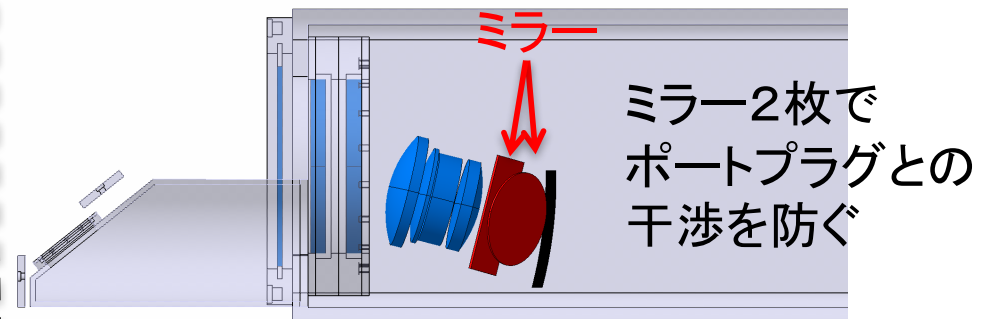
<新しい設計>

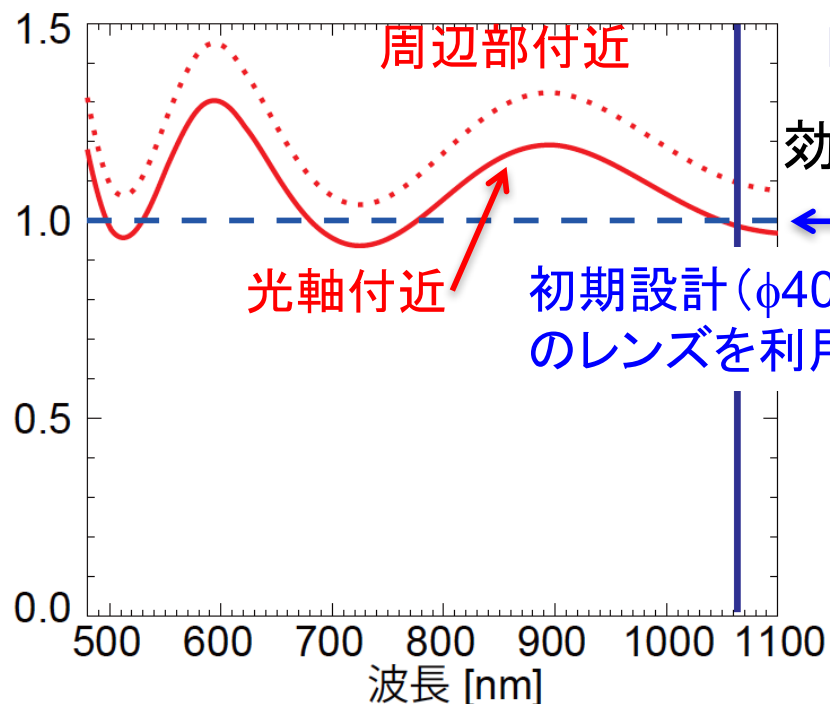
入射瞳位置：レンズ群内で収差が発生しにくい



φ200以下のレンズ  
φ220(製作が容易なBK7)

入射瞳サイズは従来の検討結果に比べ  
ほぼ同等





### □ 総合効率(初期設計を基準とする)

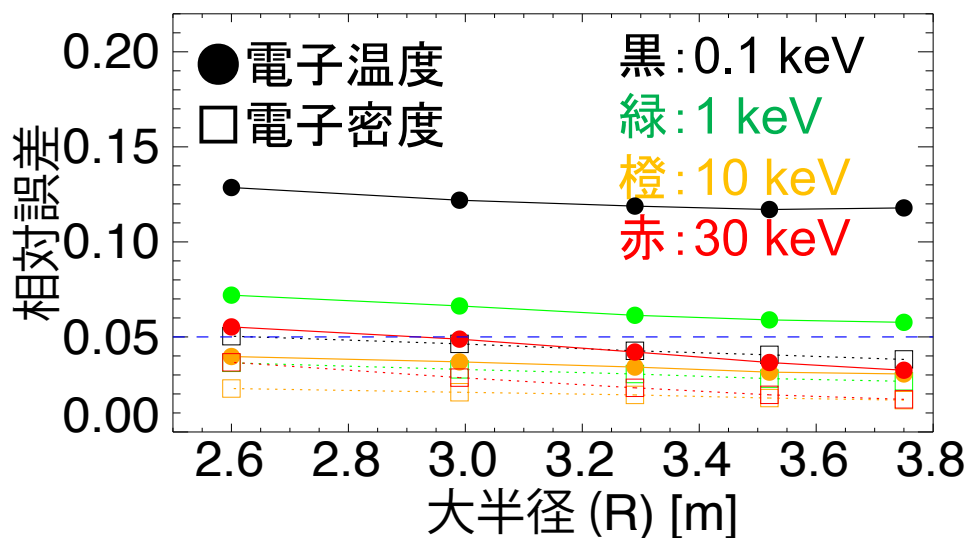
効率 = 透過率 × 集光立体角 (ケラレ係数を含む)

← 初期設計の効率(基準)

- 初期設計の光学系に比べ、より高効率な光学系となった

### □ 電子温度と密度の相対誤差 (シミュレーション)

- 低電子温度領域を除き、精度は安定している(~5%)



製作可能かつ目標仕様を満たした光学系を設計し、高電子温度まで計測できる見込みを得た

## 2. 電磁力や輻射熱に耐えるシャッターの設計

### □ シャッターの目的

- 窓の付着物(炭化水素化合物等)による計測精度劣化を最小限にする。

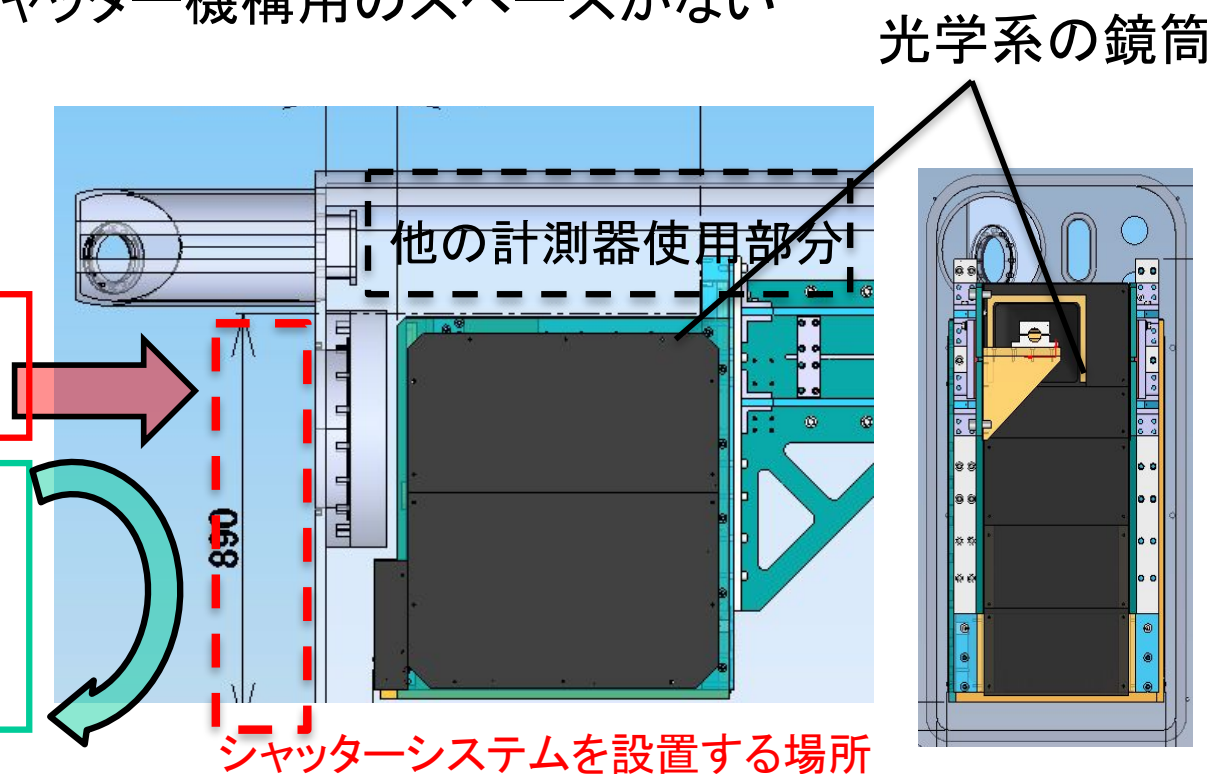
### □ 設計課題

- ポートプラグ内にはシャッター機構用のスペースがない

### □ 制約条件

プラズマからの輻射熱への耐性(40 kW/m<sup>2</sup>, 100sの熱束)

早い磁場の変化への耐性  
(ディスラプションは4 msで  
[B<sub>R</sub>, B<sub>Z</sub>]=[0.1 T, 0.6 T]の消失を想定)

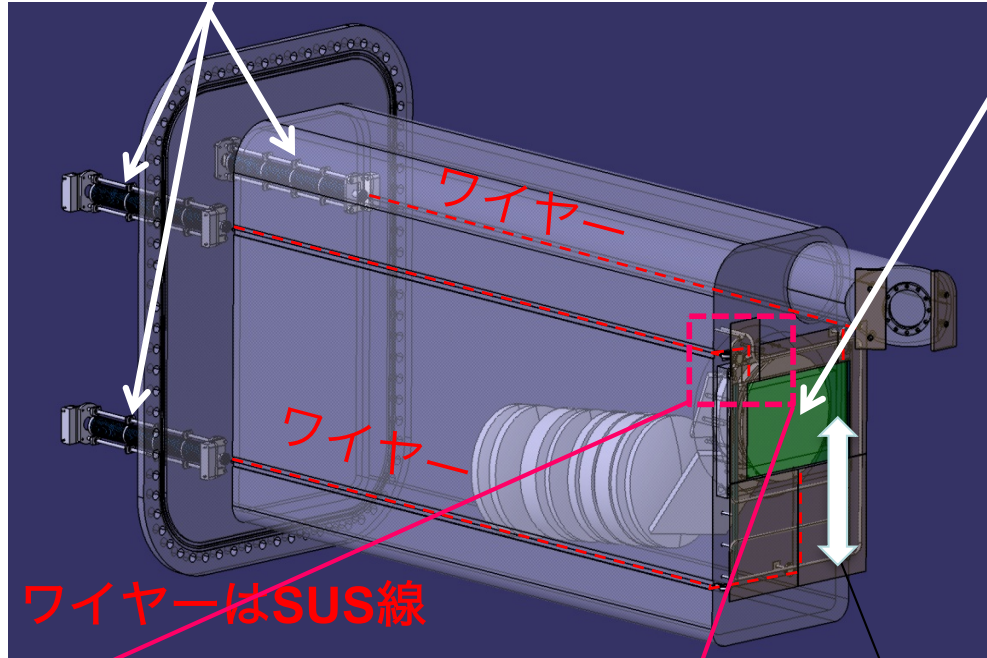


### □ 着眼点

- ワイヤーを用いた遠隔からの駆動
- ヒートシンクによる駆動機構(ワイヤー)への熱束の回避

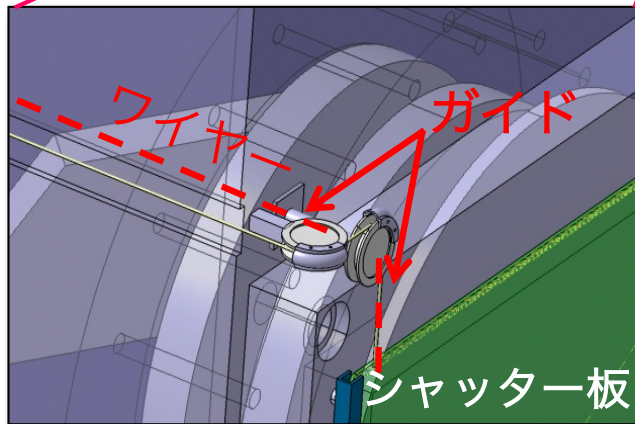
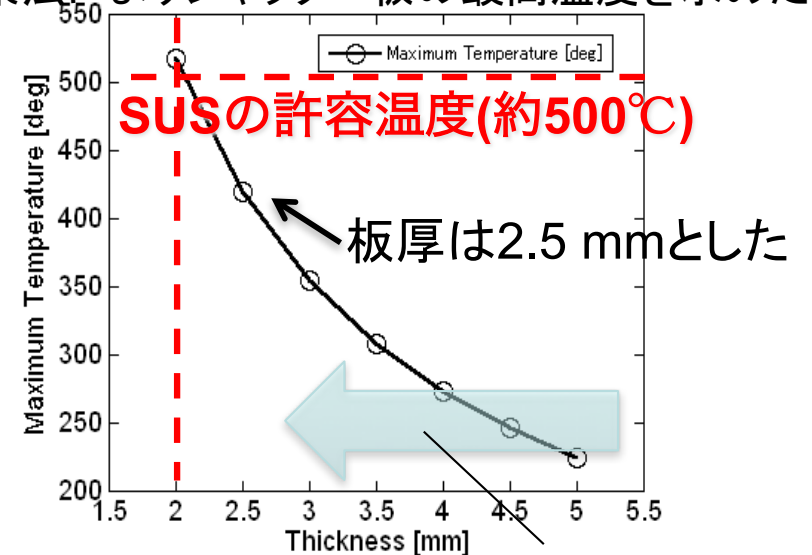
# シャッター板の動作にワイヤーを採用することで集光光学系とは干渉しないシャッター機構を考案した

長ストロークベローズ (ストローク長35cm, 1万回寿命)



シャッター板(SUS)は上下にスライドさせ、大型でも駆動しやすくした

有限要素法によりシャッター板の最高温度を求めた

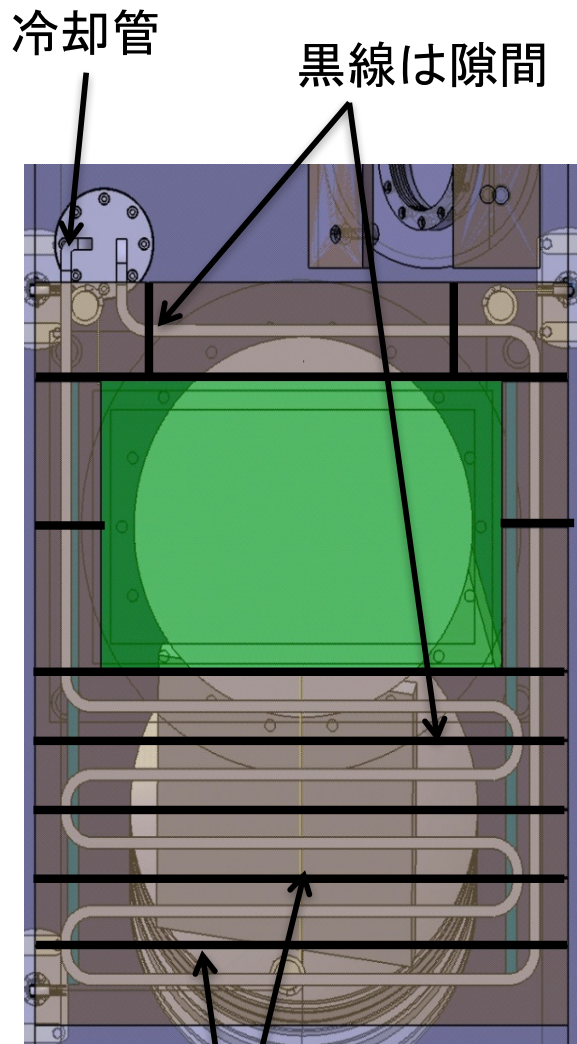


ヒートシンク(銅板)  
ワイヤーやガイド、シャッター板を保護。

表裏の温度差による変形が少ない

電磁力計算を行い、シャッター板にかかる電磁力は最大で27N程度で、ワイヤーの耐力範囲内である

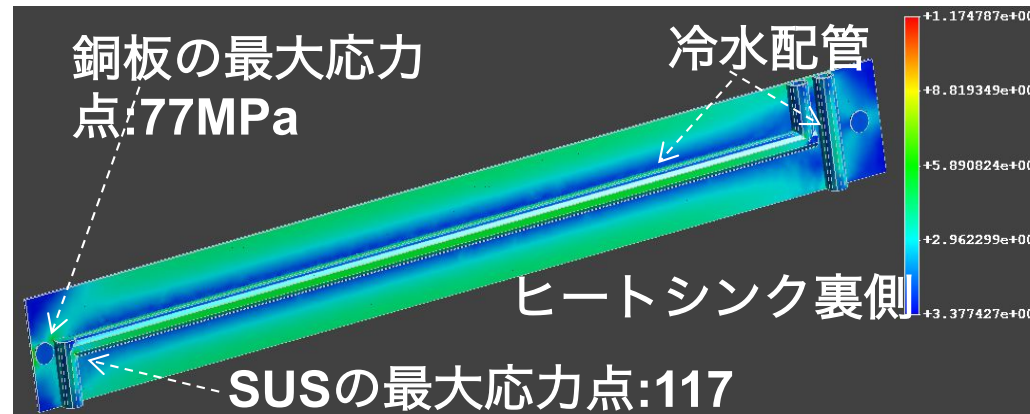




冷却管のないエリアは温度が上昇しやすく、冷却管付近との間に高い応力が発生しやすい

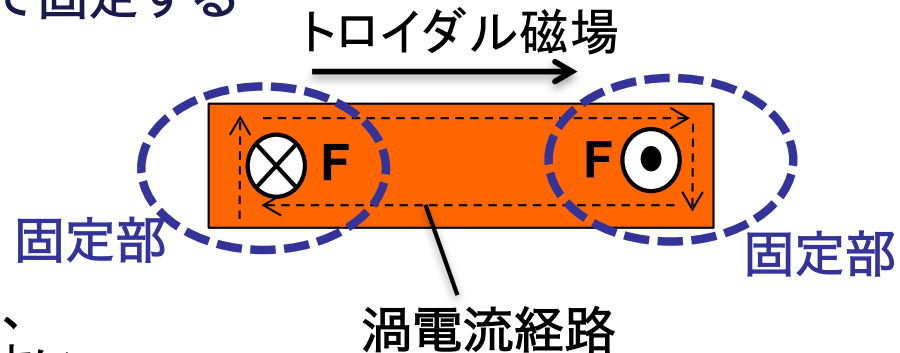
□ ヒートシンクの構造決定のための工夫

- 複数に分割した  
→ 隙間を設け、故意に熱延びさせ、熱応力を軽減  
ヒートシンク基本パーツの熱応力は設計範囲内に収まる



設計応力:  
**177 MPa**  
(SUS316L)  
**100 MPa**  
(銅板)

- 横長をパーツ多くした  
→ 電磁力(0.2kN)がかかる場所を両端に集中させ、その周辺部で固定する



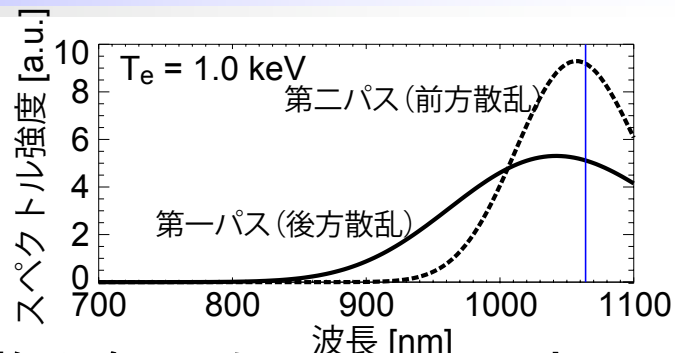
### 3. 放射線環境に強い新しい電子温度計測法と光学部品劣化を補正できるその場較正法の開発

#### □ 開発の動機

中性子、 $\gamma$ 線による光学部品(レンズ、光ファイバー)の透過率が低下する

#### □ 着想した点と原理

ダブルパス散乱計測の第一パス、第二パスでの散乱角の違いにより、1度に2つのスペクトルが計測可能



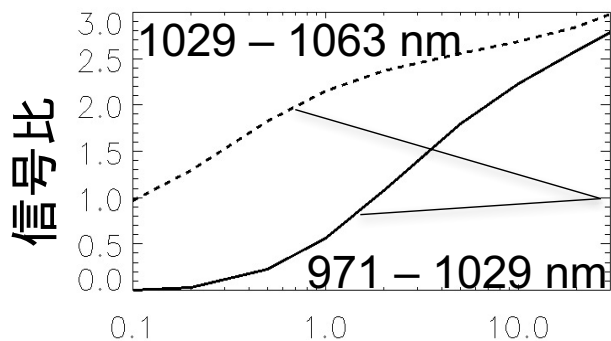
信号比(分光チャンネル  $j$ )  $\Rightarrow R_{th,j} = \frac{\text{分子: 第二パス}}{\text{分母: 第一パス}} = \frac{n_e \eta_{c,j} L_{s,2} E_2}{n_e \eta_{c,j} L_{s,1} E_1} \frac{G(\theta_2, T_e, \lambda_i)}{G(\theta_1, T_e, \lambda_i)}$

電子密度と透過率(効率)  $\rightarrow$  キャンセル

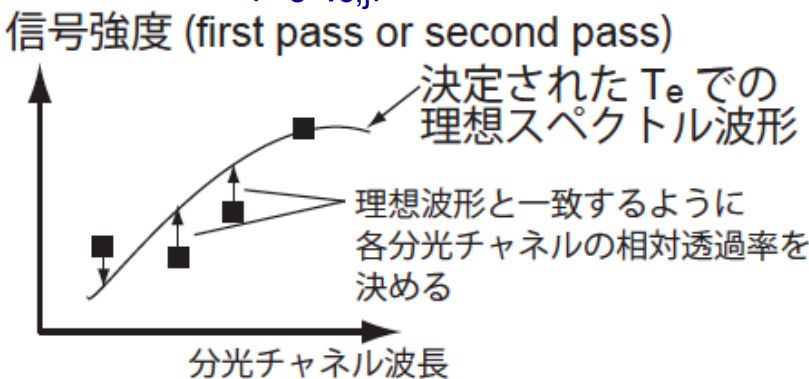
レーザーエネルギーと散乱長の変化  $\rightarrow$  既知

スペクトル波形からの寄与

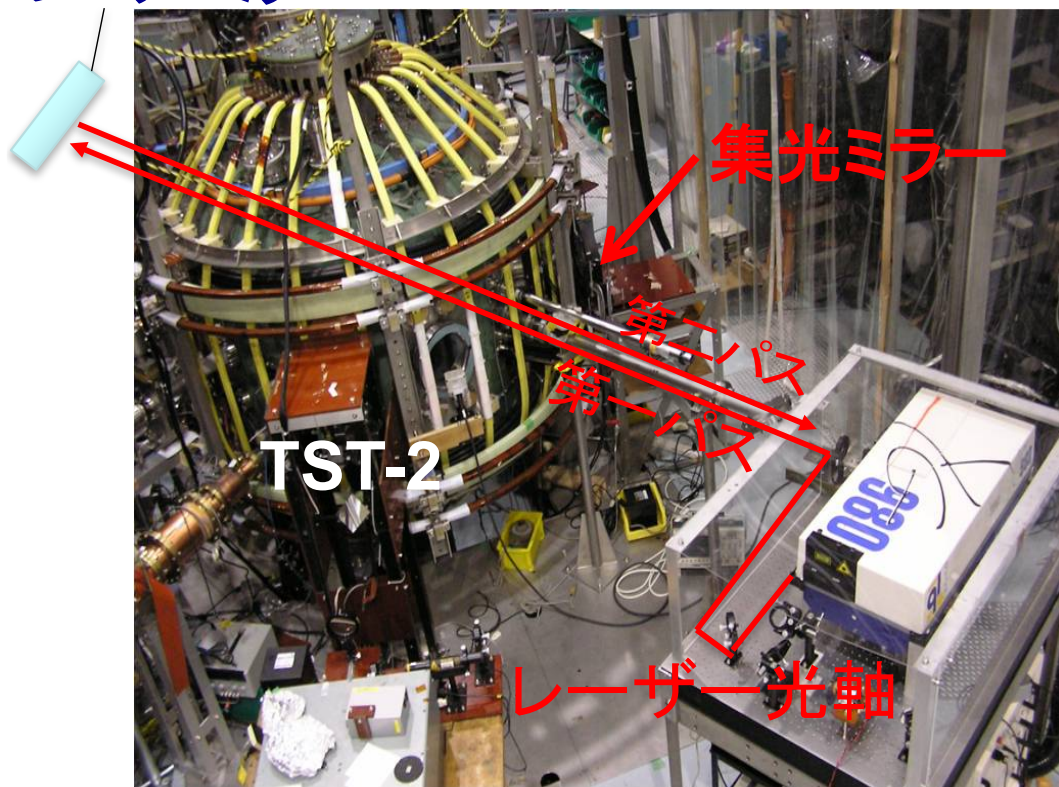
電子温度決定後、相対透過率( $n_e \eta_{c,j}$ )を求めることが可能(その場較正法)



2つの分光チャンネルでの信号比と電子温度の関係

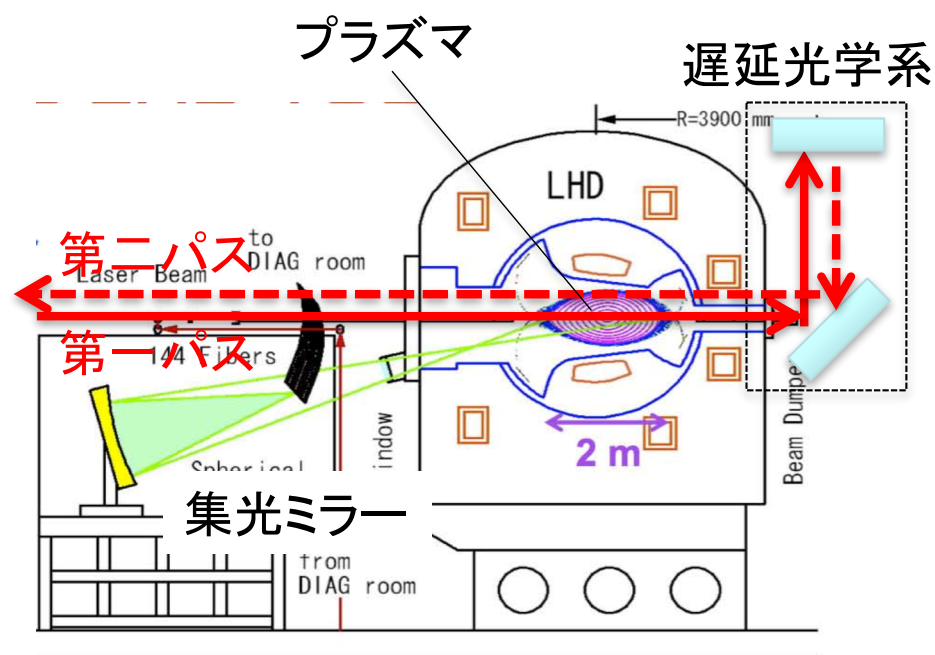


レーザーミラー <TST-2>



分光器: 6chのポリクロメータを使用  
散乱角: 120°  
電子温度範囲: 0.01 – 0.4 keV

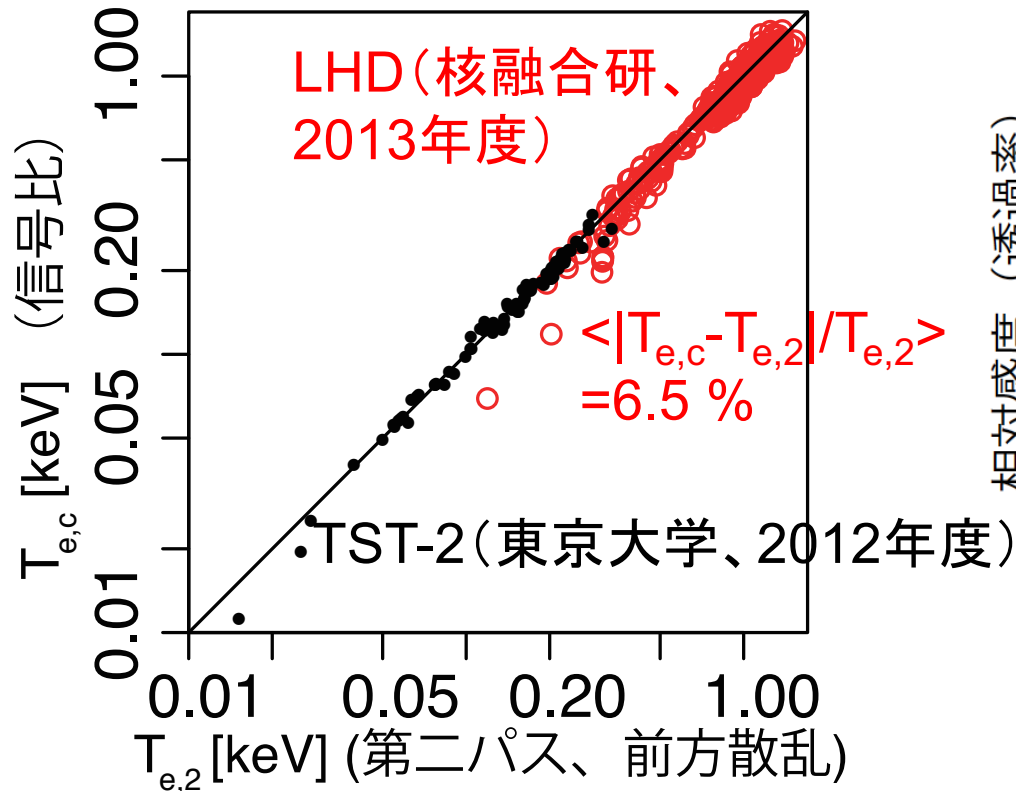
<LHD>



分光器: 6chのポリクロメータを使用  
散乱角: 167°  
電子温度範囲: < 2 keV

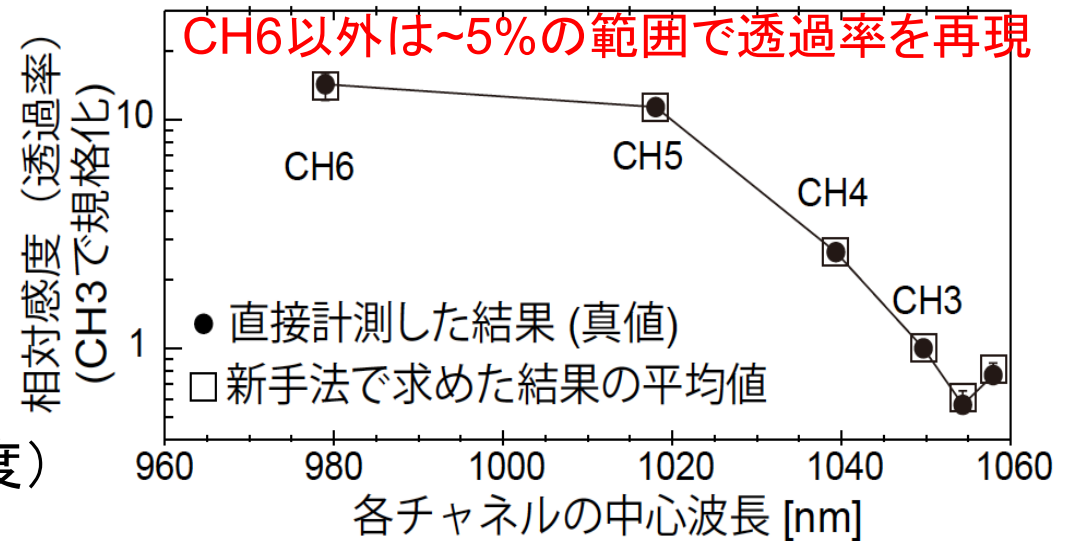


□ 新手法で求めたと従来の手法で求めた場合の比較



H. Tojo et al., RSI, **83** 023507 (2012).

□ 新手法で求めた相対透過率と直接計測した相対透過率の比較



- 燃焼プラズマを含んだ様々なプラズマ実験で応用可能で、透過率変化にとらわれない電子温度計測法の基本概念を確立。
- 放射線等の原因による未知の透過率変化を補正し、高精度の計測を可能にする



JT-60SAトムソン散乱計測は幅広い電子温度領域に対応し、径方向の電子温度・密度の分布計測を行う。

## □ 集光効率がよく、高電子温度を計測できる集光光学系の設計

- 入射瞳をレンズシステム内に置くことで、レンズサイズの大幅な小型化に成功した。製作可能かつ要求性能を満たした光学系を設計し、高電子温度まで計測できる見込みを得た。
- 初期設計結果よりも高効率で、5%程度の良好な精度で電子温度、密度が計測可能。

## □ 電磁力や輻射熱に耐えうるシャッターの設計

- シャッター板の動作にワイヤーを採用することで集光光学系とは干渉しないシャッター機構を考案した。

## □ 放射線環境に強い新しい電子温度計測法の実証実験/光学部品劣化を補正するその場較正法の開発

- ダブルパス散乱計測に着目し、2つの散乱スペクトルについての信号比から、電子温度を導出する手法を新たに考案した。
- TST-2装置、LHD装置において、0.01 – 2 keVの広い電子温度領域で同手法を実証した。