



第20回若手研究者によるプラズマ研究会

2017年3月6日—8日

## ITER周辺トムソン散乱計測装置の開発

谷塚英一、波多江仰紀、山田一博<sup>1</sup>、  
安原亮<sup>1</sup>、舟場久芳<sup>1</sup>、伊丹潔

量研機構、<sup>1</sup>核融合研

# ITER周辺トムソン散乱計測装置の開発研究

## 目的

トムソン散乱計測による  
高空間分解能圧力分布計測

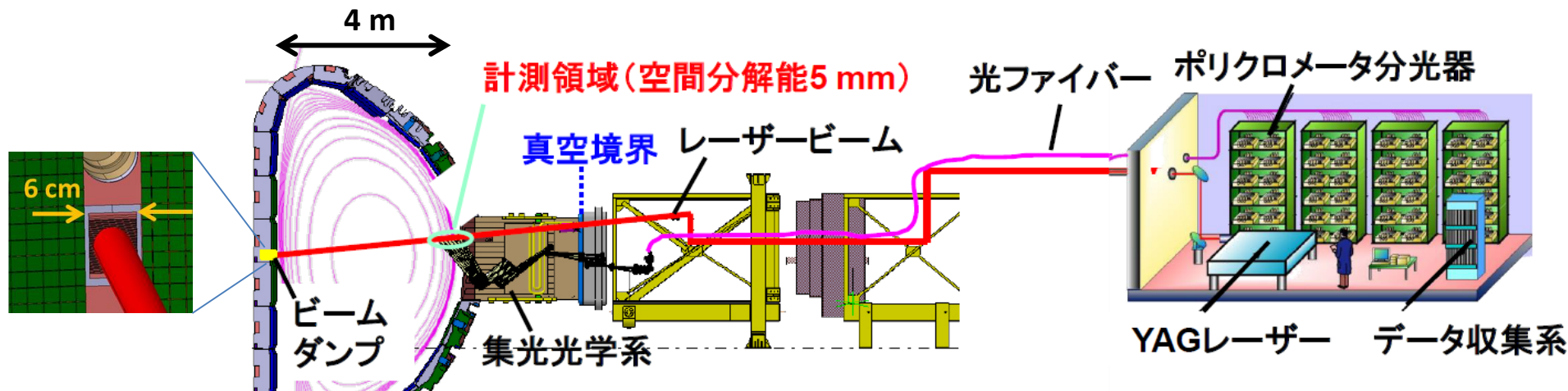


ITERのHモード(高閉じ込め)放電時の

- 周辺ペDESTアル形成
- ELM(周辺局在モード)

の物理理解及び制御へ貢献

ITERでの使用条件、設置環境、負荷のもとで高空間分解能、高精度、高信頼性計測



- JETと比較して10倍の中性子フラックス、10,000倍の中性子フルーエンス
  - 過酷な放射線環境に適合したプラズマ計測技術
  - 限られた設置空間で長期間安定して使用できる機器

## ITER周辺トムソン散乱計測装置の主要開発項目

- プラズマ中に多数の光子を入射するための高出力レーザー
- 長寿命でレーザー耐力の高いビームダンプ
- トムソン散乱光は高効率で通し、放射線は遮蔽する集光光学系
- 高効率のポリクロメータ分光器
- 放射線等により時々刻々変化してしまう光学系の分光透過率をその場較正する手法
- 放射線環境に人が立ち入ることなくレーザー入射系および集光光学系をアライメントする手法
- 限られた設計自由度のもとでの高性能化に有効な方策の明確化

# 目次

---

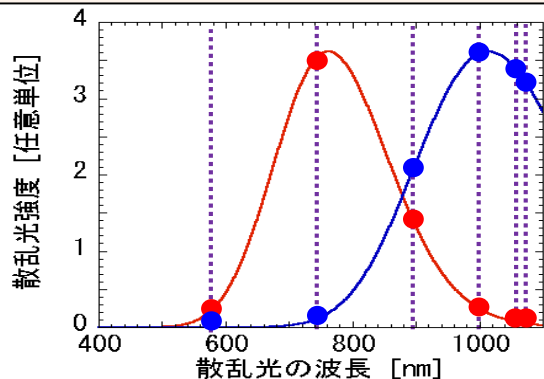
1. 2種類のレーザーを用いた分光透過率その場較正手法
2. 集光光学系の設計
3. アライメント手法の開発
4. まとめ

# 2種類のレーザーを用いた分光透過率その場較正法

## 課題

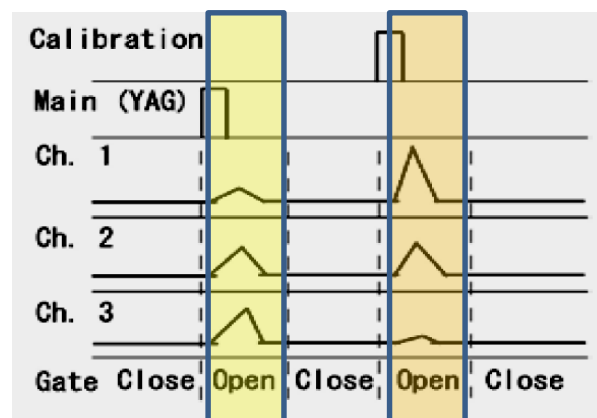
- 光学機器の分光透過率の経時変化
- 波長依存の透過率変化による、**電子温度測定値の系統的誤差**

## 2種類のレーザーを用いた手法較正手法\*



スペクトル強度比  
⇒ 電子温度

トムソン散乱光  
⇒ 相対分光透過率

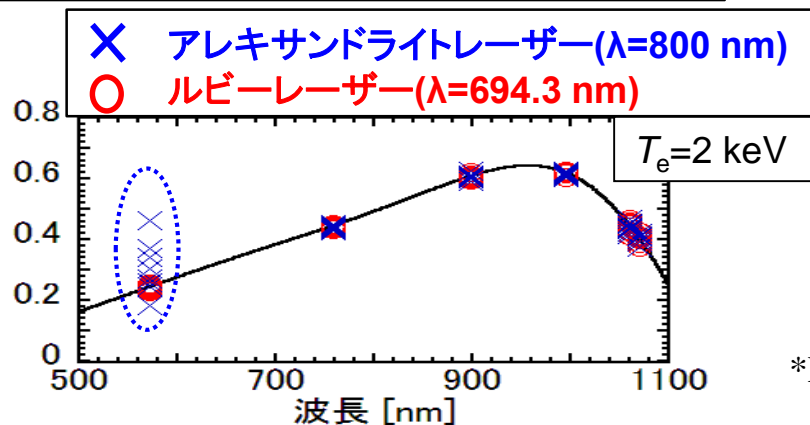


YAGレーザーによる散乱光のスペクトル測定  
ルビーレーザーによる散乱光のスペクトル測定

2つのスペクトルの重なり合いが較正実施の鍵

## 波長帯ごとの分光透過率の較正精度評価

光学系の分光透過率 [任意単位]

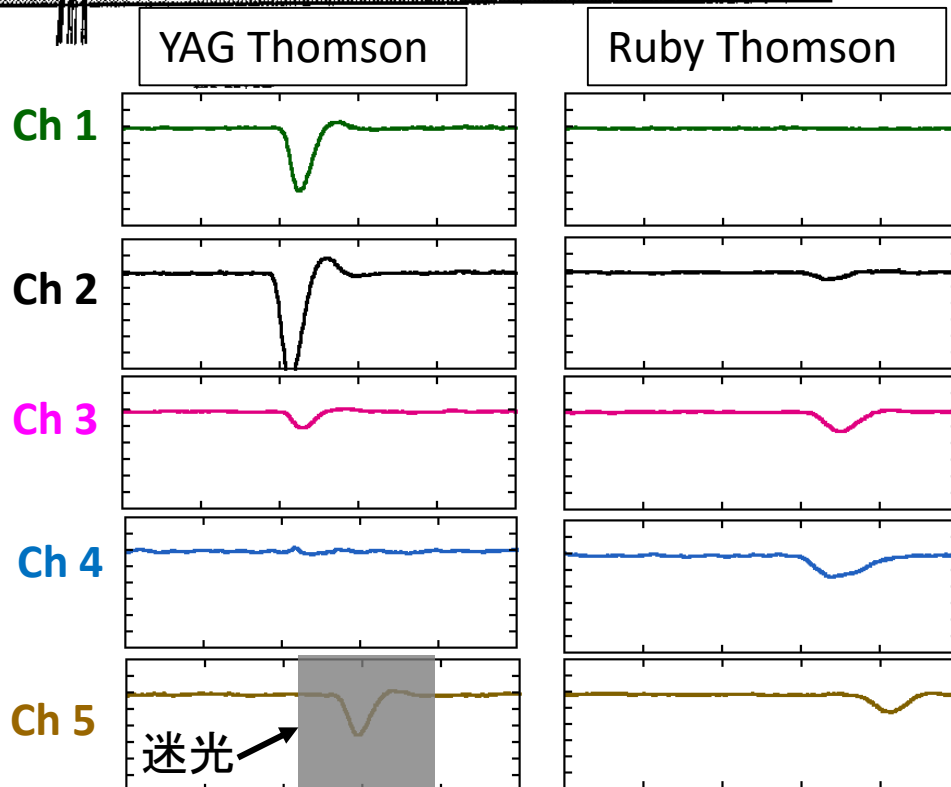
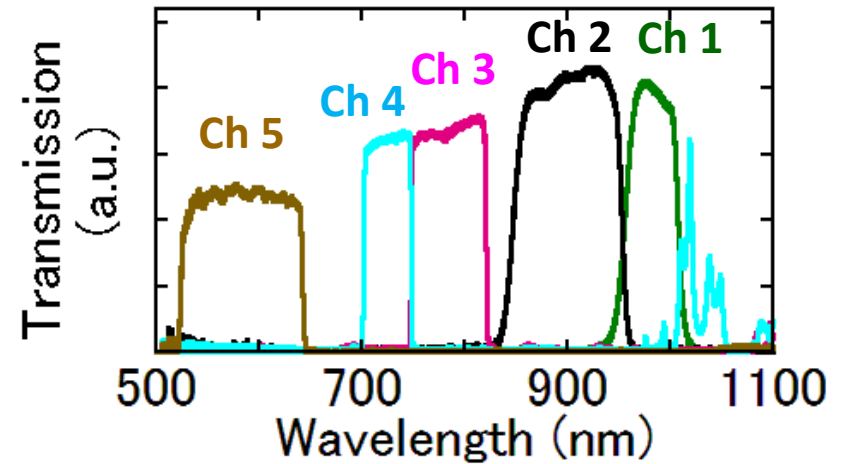
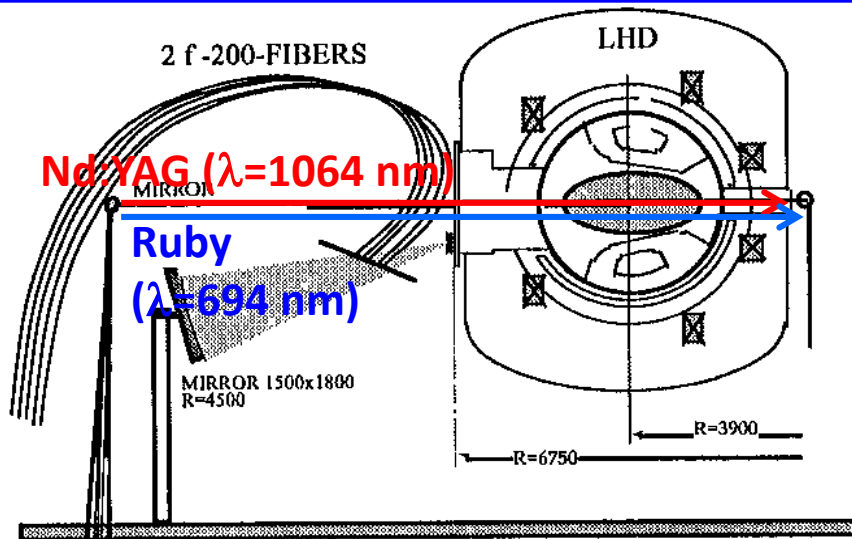


- ✓ 測定に使用する全波長帯の相対感度を1回で較正するには、ルビーレーザーが有望

ITERでプラズマ生成中にその場較正できる見通し

\*E. Yatsuka *et al.*, J. Plasma Fus. Res. SERIES, 9, 12 (2010).

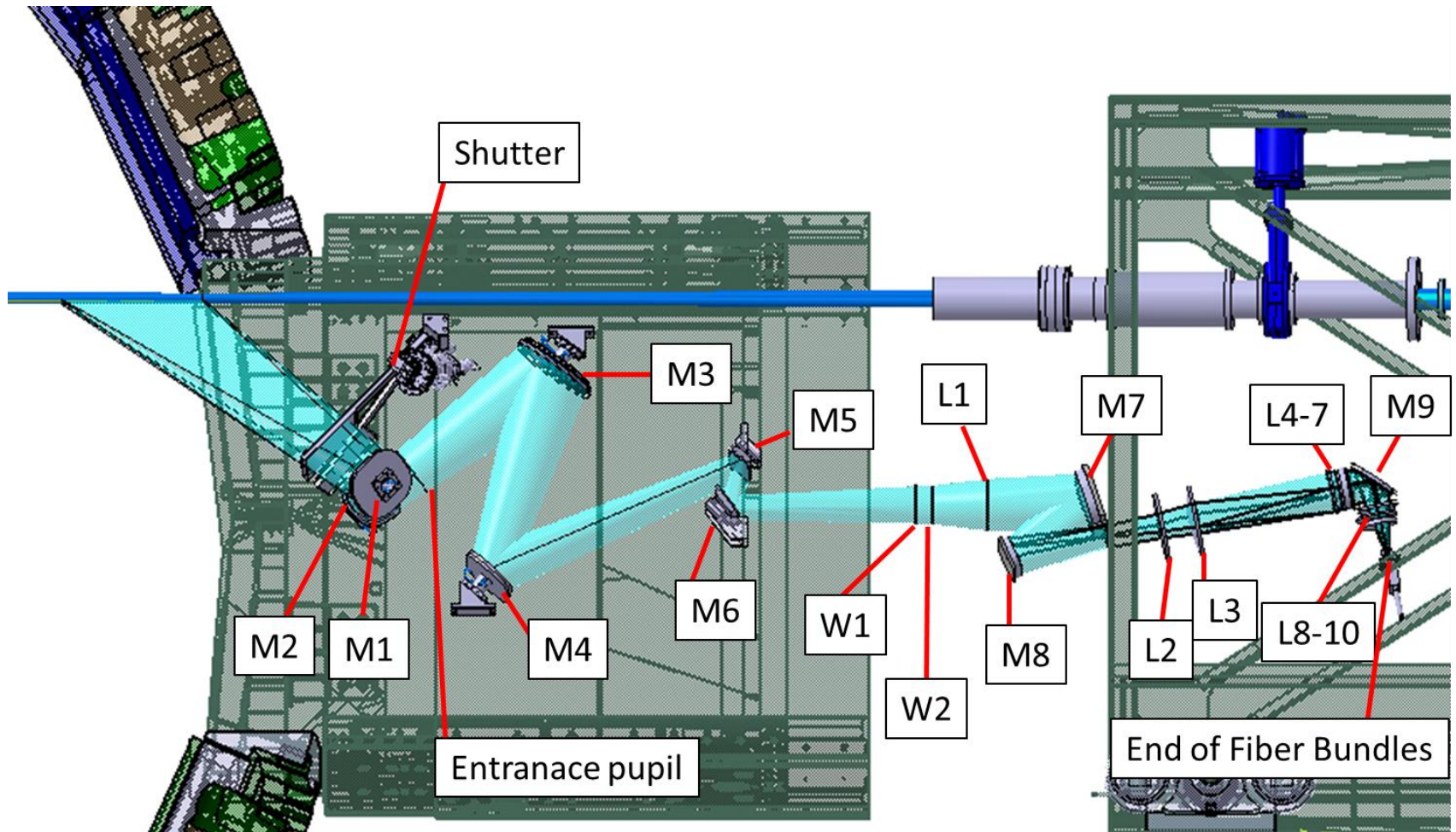
# LHDでその場校正手法の実証試験を行い、初期結果を取得



- LHDの不純物入射実験(#132520)で、不純物を入射する前のプラズマにYAGレーザー( $t=4.5 \text{ s}$ )とルビーレーザー( $t=4.5001 \text{ s}$ )を入射
  - 複数の波長チャンネルでYAGとルビーレーザーからの散乱光を検出
  - プラズマ生成前( $t=0.5 \text{ s}$ ,  $0.5001 \text{ s}$ )の信号と比較することにより、トムソン散乱光と迷光を区別
- 今後、データを蓄積することにより、校正手法の妥当性と精度を評価する

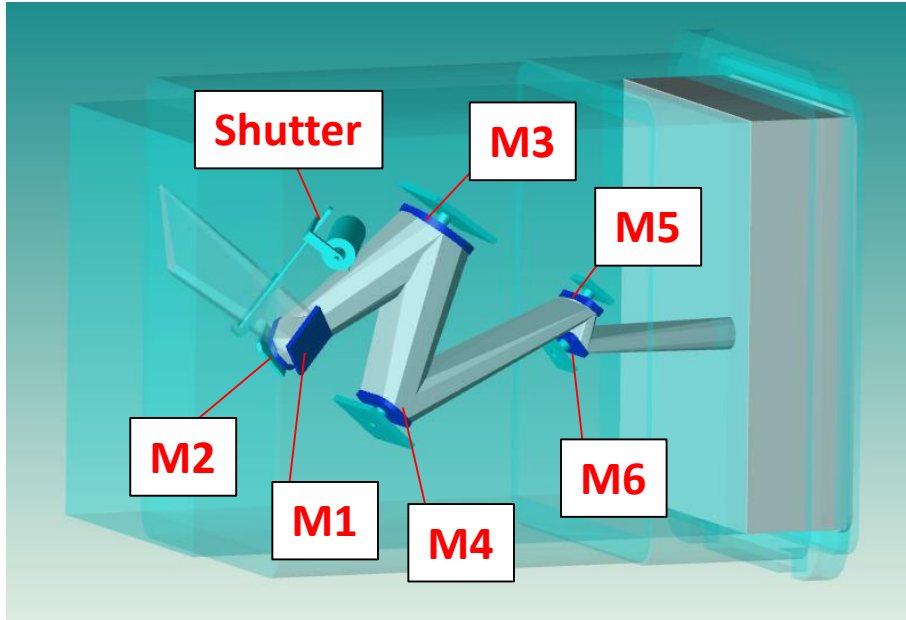


# 光は高効率に通し、放射線は遮蔽する集光光学系を設計

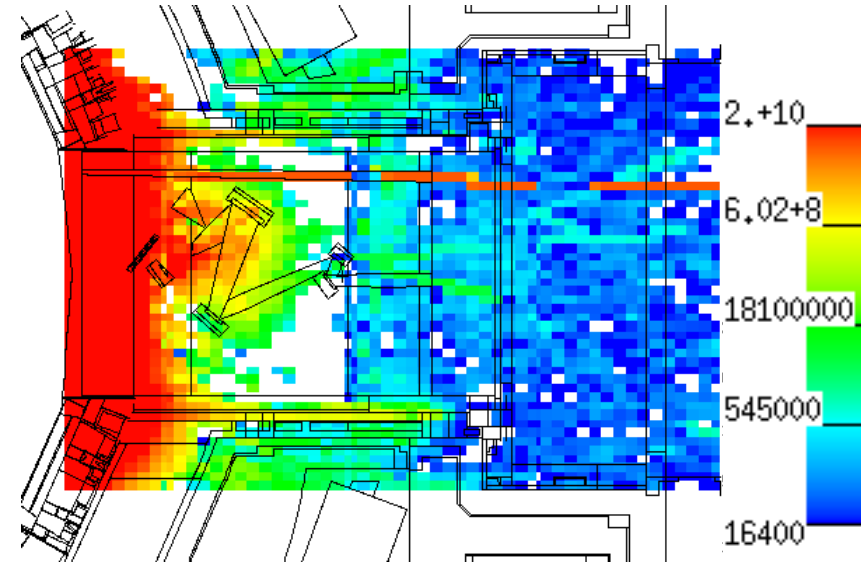


- 迷路状の光路を持ち、光路以外の空間は遮蔽体によって埋められる
- 曲率を持つミラーに対する入射角を15度以下程度になるようにして、非点収差を抑制

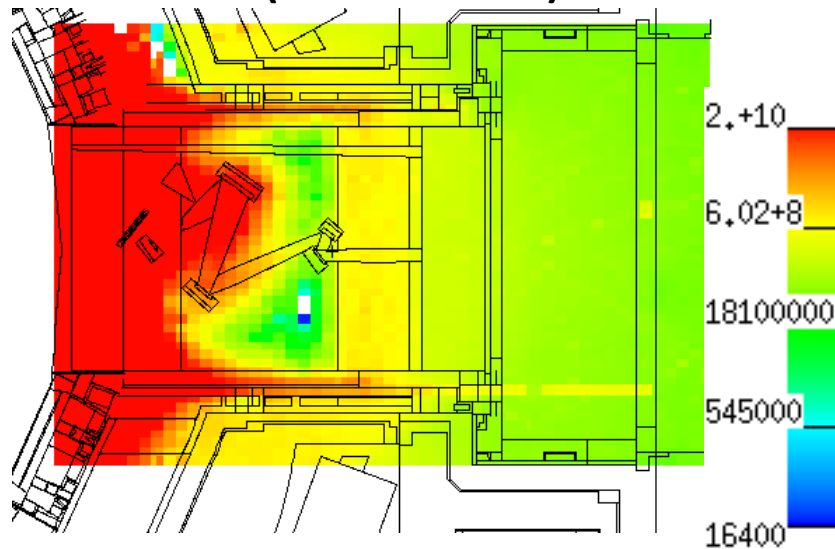
# 集光光学系における迷路状光路の効果



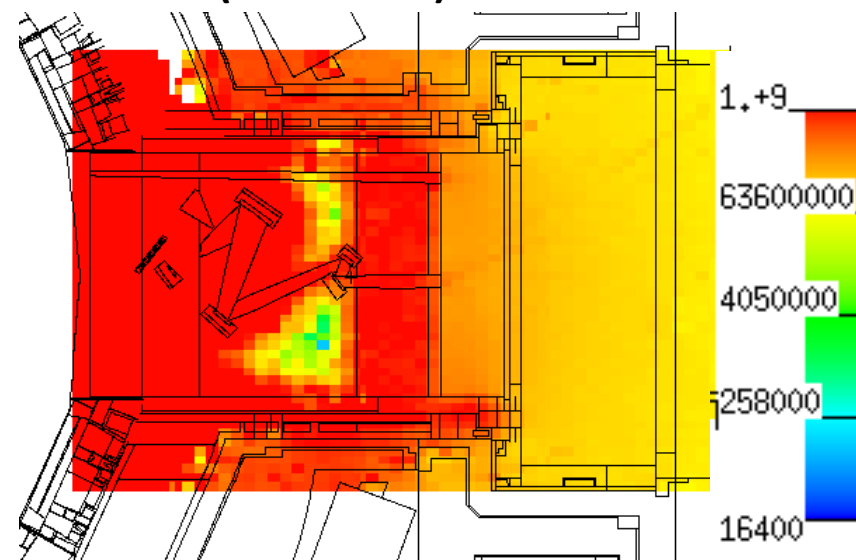
Neutron flux (> 12.6 MeV)



Neutron flux (0.1-12.6 MeV)



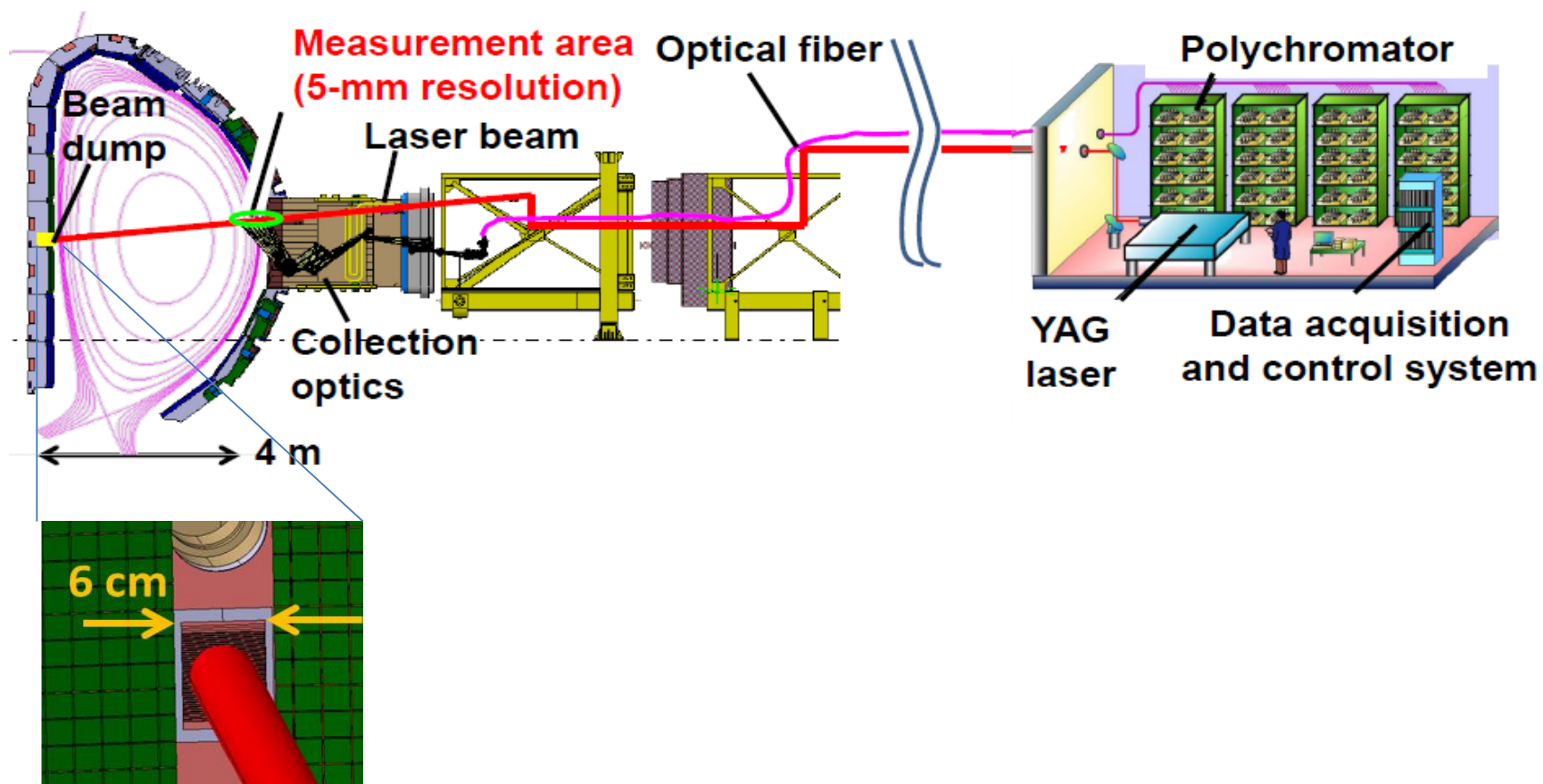
Neutron flux (< 0.1 MeV)





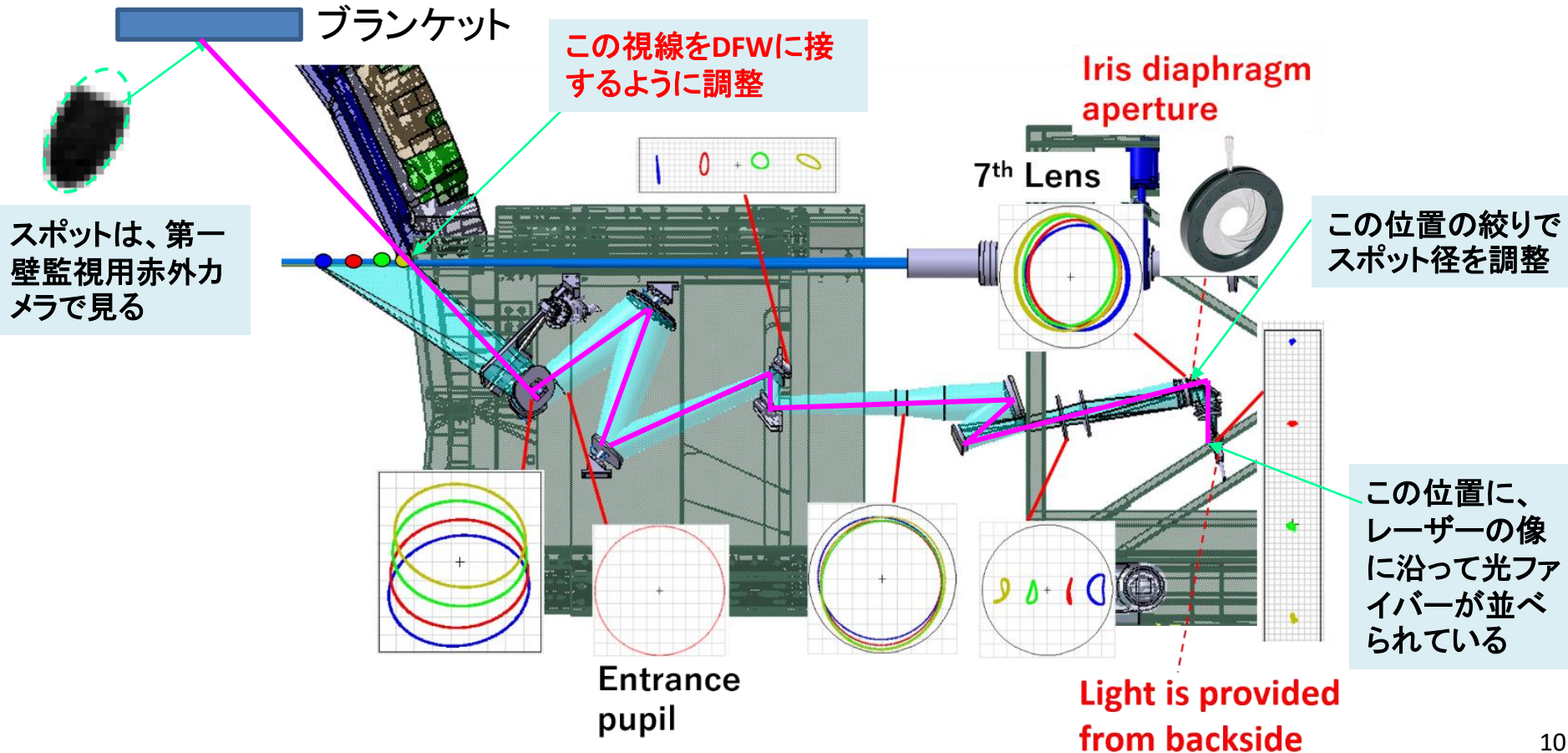
# ITER周辺トムソン散乱計測に必要なアライメント

1. レーザービームをビームダンプ中心に入射
2. 集光光学系の視野をレーザービーム上に合わせる
3. 集光光学系の視線と測定位置の対応付け



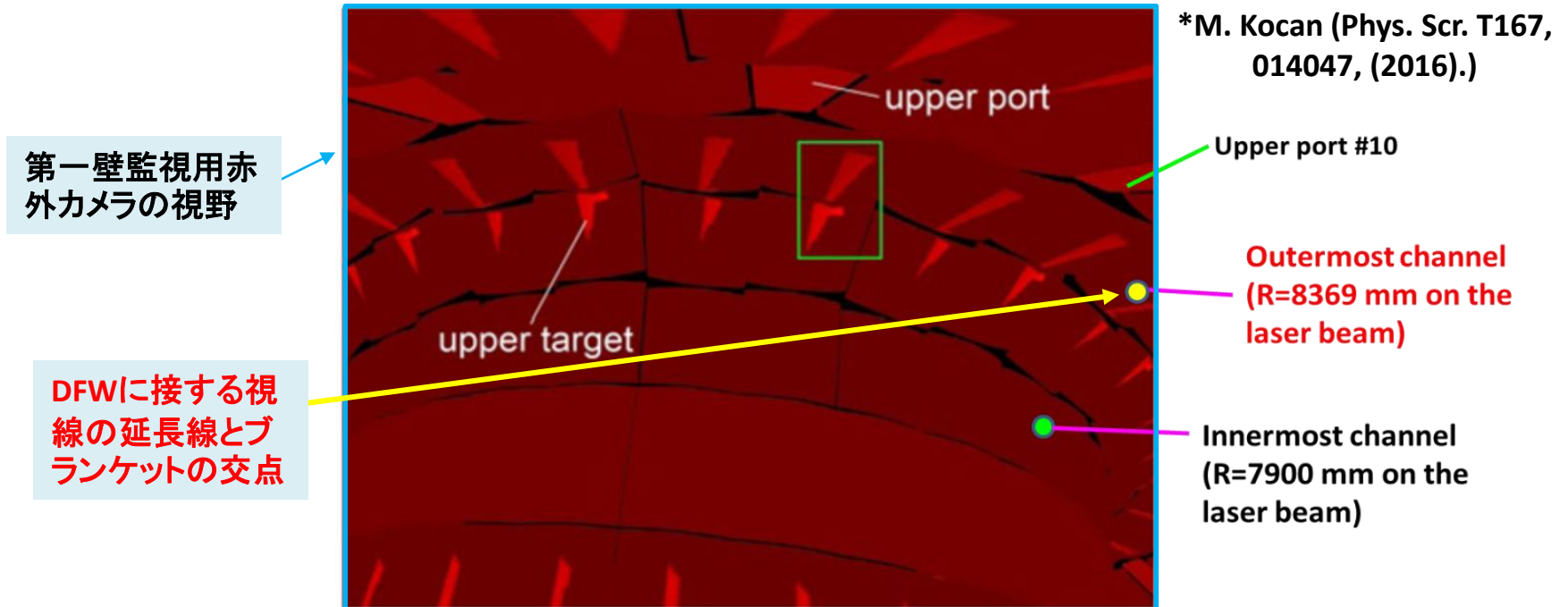
# 視線の位置調整方法概要

- 集光光学系の結像位置に設置された光ファイバーバンドルの位置からブランケットと呼ばれる真空容器中のプラズマ対向壁に向けて光を入射する。
- この際、計測第1壁(DFW)とよばれる、計測ポートの壁に光が接するように、光ファイバーバンドルの位置を調整。
- ブランケットを監視する可視・赤外カメラを用いて、投影されたスポットの形状を測定。入射用ファイバーを動かし、スポットの口径食が起こり始める位置を探す。
- 真空容器や光学機器の相対位置が変化した場合でも、口径食が起こる位置とレーザービーム上の通過点の関係はほぼ不変のため、その位置を基準にしてすべての観測視線の位置合わせが可能。



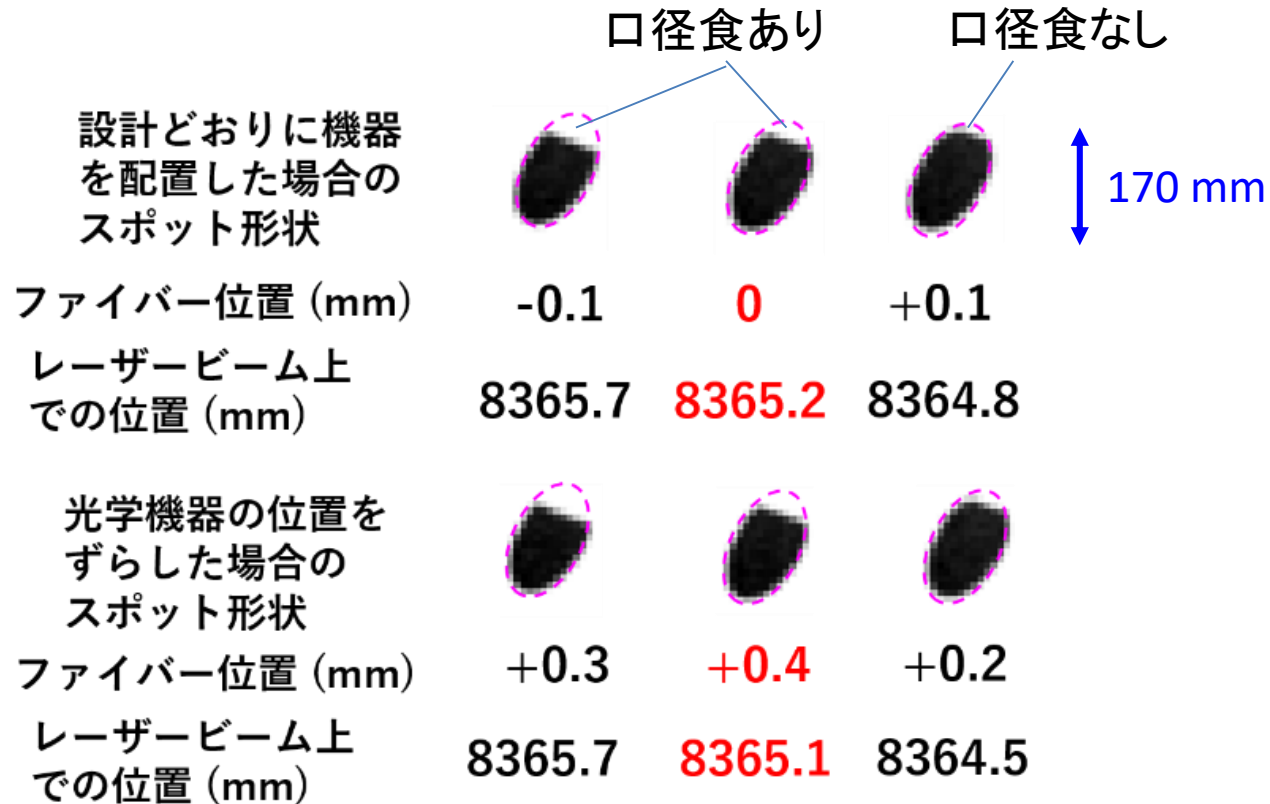
# 赤外カメラの視野及び感度を考慮し、スポットを検出できることを確認

## Capability of VIS/IR system (55G1) for measuring the spot position



- **ブランケットに投影されたスポットは、赤外カメラの視野内に入っている。**
- 赤外カメラの概算感度  $10 \text{ W} / 800 \text{ m}^2 \Rightarrow 13 \text{ mW/m}^2$ .
- 下記のパラメータを仮定すると、**スポットの光強度は  $900 \text{ mW/m}^2$  程度**:
  - 絞りを入れない場合のスポット径: 650 mm;
  - 集光光学系の透過率: 10%;
  - 光源の強度: 3 W (Spectra Physics J20E-V-106C-3000).

# 調整手法のロバストさを光線追跡で評価



- 上図のスポット形状は、1ピクセルが赤外カメラの分解能(10 mm)になるように画素を粗く作図
- ファイバー位置を0.1 mm程度ずつずらしていくと、スポット形状の変化が見える。レーザービーム上で**0.5 mm程度の調整分解能**に相当
- 光学機器の位置がずれると、口径食が起こり始めるときのファイバー位置もずれるが、その時の測定位置はほぼ不変
- **スポットの形状を見ることにより、特定のファイバーに対応する視線が、常に第一壁に接するように調整できる**
- **すべてのファイバーを共通のホルダーと一緒に動かすことにより、すべての視線が一定位置を通る**

# まとめ

- ITER周辺トムソン散乱計測装置では、放射線環境下でも信頼性の高い計測を行うことが重要
- トムソン散乱計測の成立性を検証するため、分光透過率の較正手法を開発
  - 2種類のレーザーを用いた較正手法の検証実験
- 放射線環境下でも性能を発揮する集光光学系を設計
  - 迷路状光路を持つ集光光学系
  - 曲率を持ったミラーへの入射角を制限することによる収差の抑制
- 放射線環境に立ち入ることなく、集光光学系の視線と測定位置を対応付けする手法を設計
  - 熱膨張、ディスラプションによる振動などによって光学機器の相対位置が変化してしまった場合でも、視線の位置を1 mm以下の精度で再現できる見込み