

TST-2球状トカマク装置における線積分トムソン散乱計測システムの開発

武智雄大

東京大学大学院新領域創成科学研究科

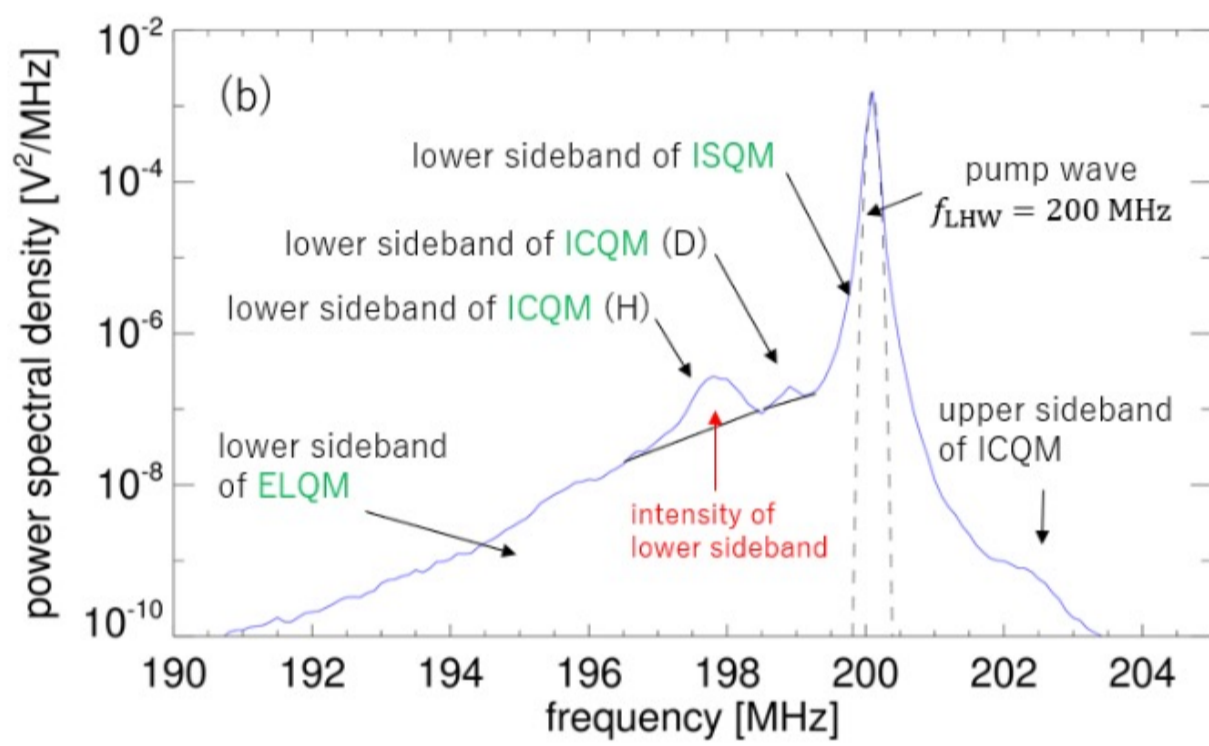
概要

- 核融合エネルギーの実現に最も近いトカマク型では、電流駆動の効率が課題である。
- TST-2球状トカマクでは低域混成波 (LHW) によるプラズマ立ち上げを研究している。
- 従来のトムソン散乱 (TS) 計測システムでは、プラズマの電子密度が低いため信号強度が微弱である。
- 信号強度を増大しSN比の良い測定手法として、線積分トムソン散乱 (LITS) 計測システムを導入した。
- 原理・性能を実証するため1視線のLITSシステムを用いてプラズマ計測を行った。

背景

- LHW立ち上げではパラメトリック崩壊不安定性 (PDI) による電流駆動効率の悪化が観測
- 崩壊パターンの一つである電子ランダウ準モード (ELQM) の同定には、電子温度の計測が必要

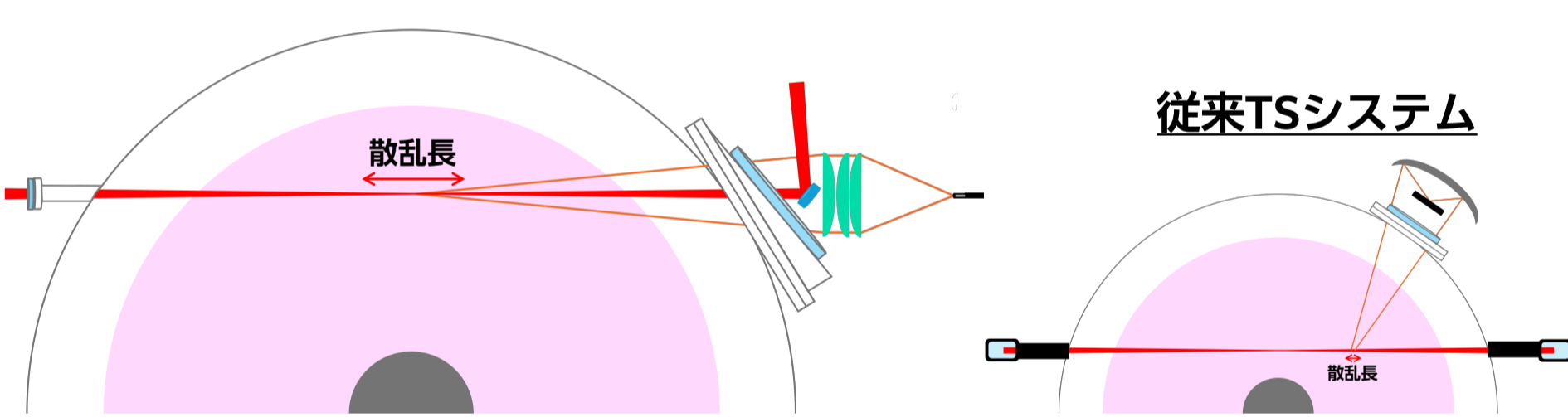
200 MHz 近傍でのパワースペクトル



PDIの崩壊パターンは3種類

- これまでイオンサウンド準モード (ISQM), イオンサイクロトロン準モード (ICQM) によるイオン加熱が観測 [1]
- ELQMによるパワー損失の推定には電子温度・密度が必要
- 従来のTSシステムでは、電子密度が低いため信号強度が微弱

線積分トムソン散乱計測システム [2]



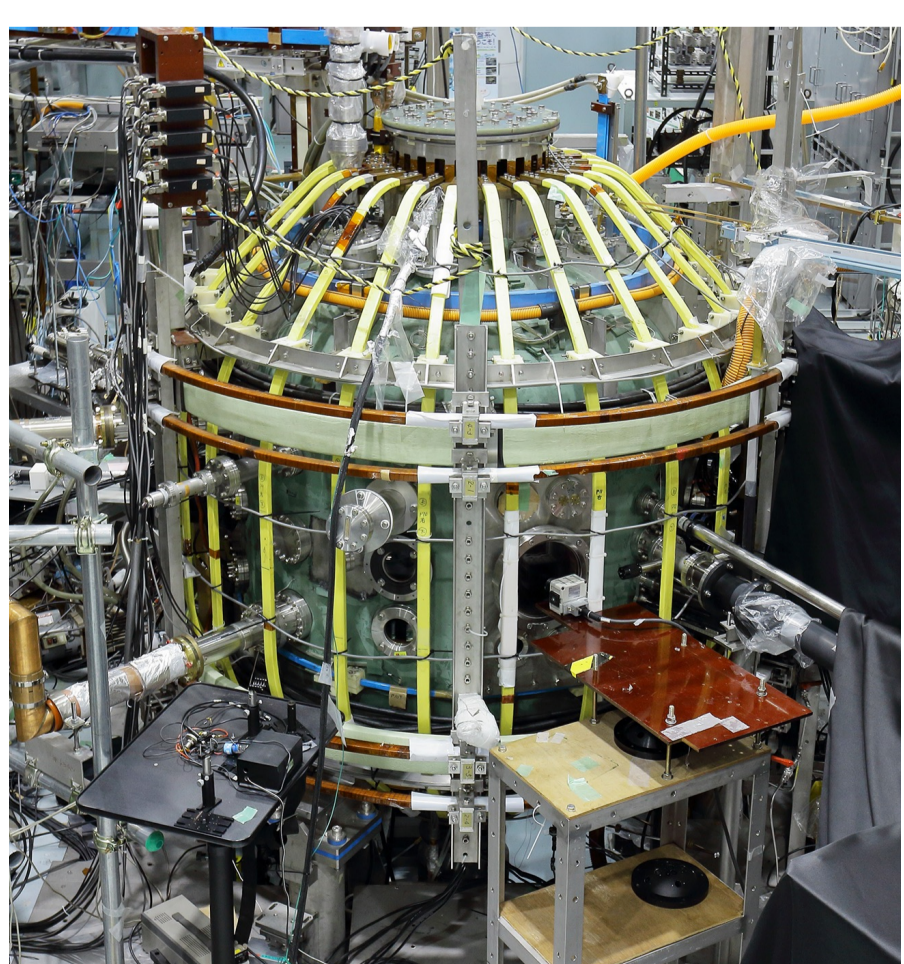
- 完全後方散乱配位を採用
- 散乱長を従来TSより大きくすることで信号強度を確保

低密度プラズマのTS計測システムとして期待

目的：線積分トムソン散乱計測システムの開発

- TST-2における1視線のLITSシステムの導入
- レーザー径の理論計算
- 相対立体角分布の計算と測定
- プラズマ測定を行いLITSシステムの原理・性能を精査

TST-2 装置



TST-2 球状トカマク

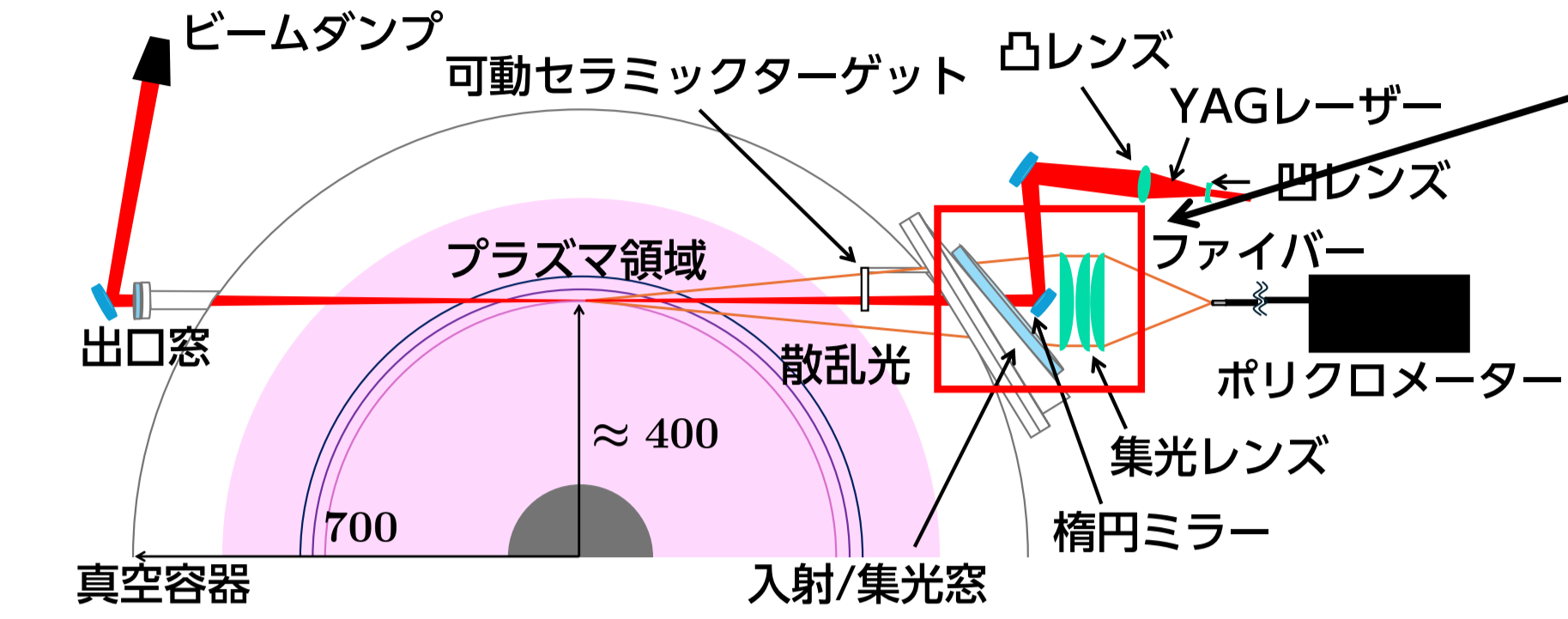
- 大半径: 0.36 m
- 小半径: 0.23 m
- アスペクト比: > 1.5

オーミック駆動/LHW駆動プラズマの運転パラメータ

トロイダル磁場	< 0.3 T
プラズマ電流	< 100 kA / < 20 kA
電子密度	< 2 × 10 ¹⁹ m ⁻³ / < 1 × 10 ¹⁸ m ⁻³
電子温度	400 eV / 10 eV
放電時間	< 30 ms / < 100 ms

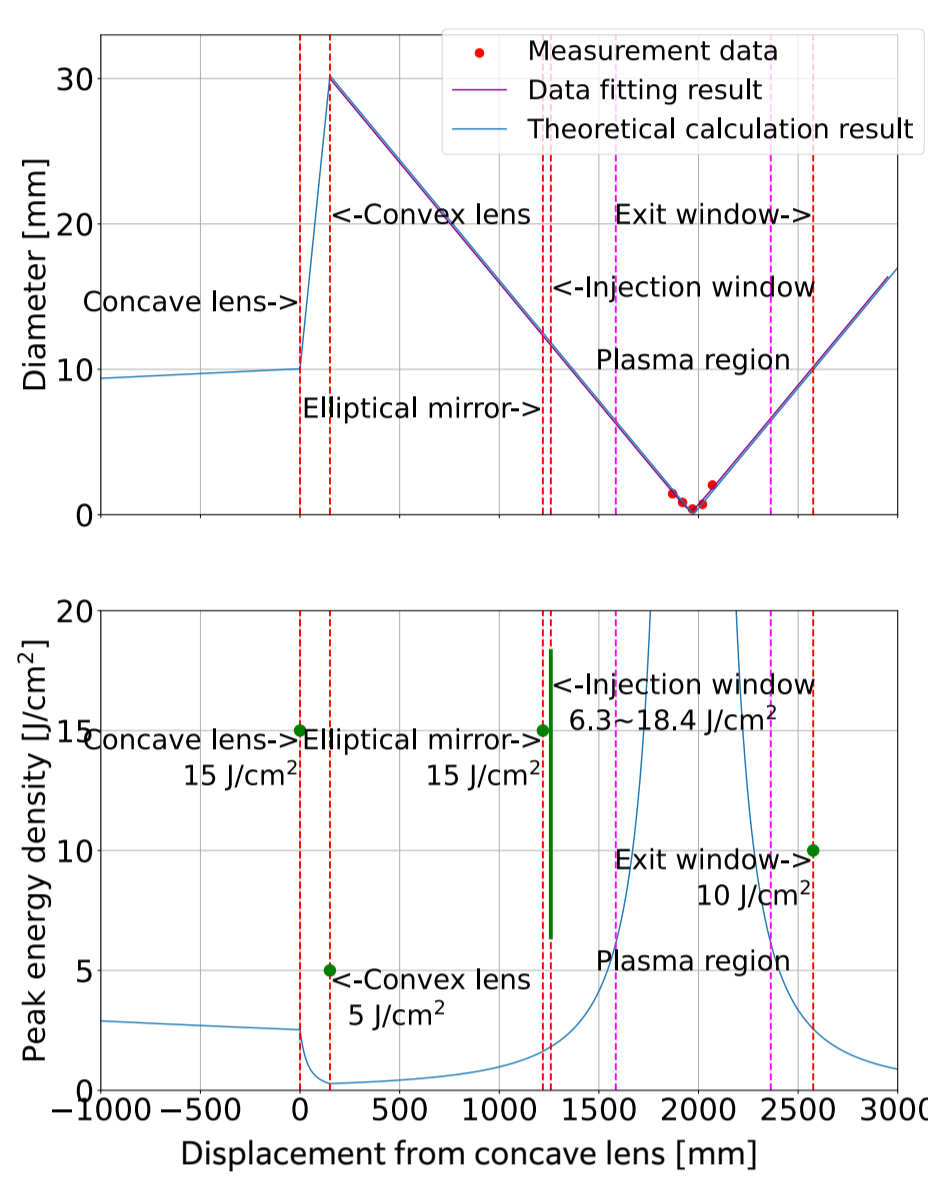
1視線の線積分トムソン散乱計測システムの開発

TST-2に導入した1視線のLITSシステム [3]



- 波長1064 nm, パルス周波数10 HzのYAGレーザーを使用
- 入射系と集光系が同軸にある完全後方散乱構成
- 凹レンズ・凸レンズを設置し、レーザーの幅を調整
 - レーザーによる光学部品の損傷を避ける配置を構成
- 集光系には3枚の凸レンズを採用 [4]
- ポリクロメーター内に迷光対策用のノッチフィルターを導入・設置
- 可動セラミックターゲットにより相対立体角分布を測定

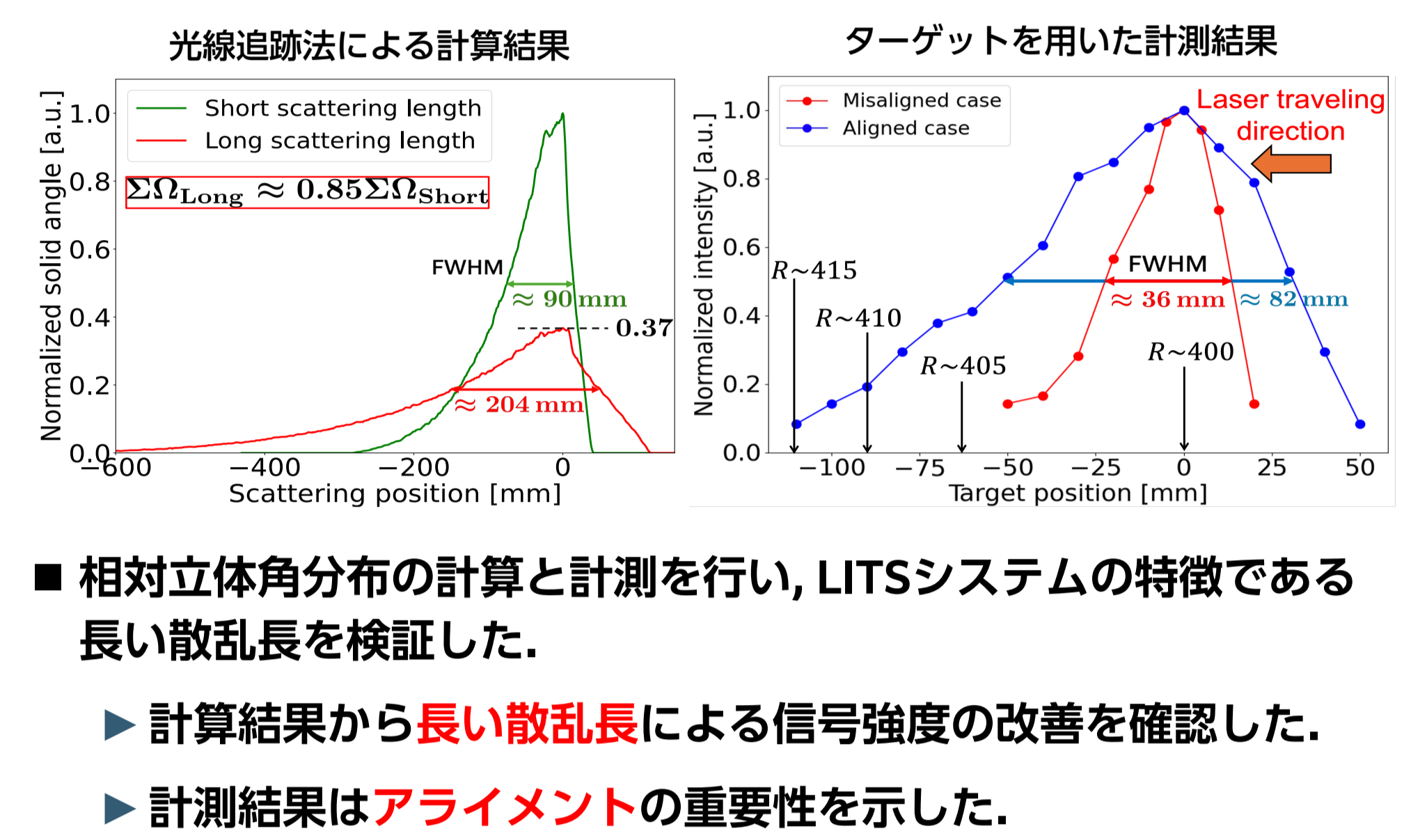
レーザー径の理論計算



設計要件

- レーザーのピークエネルギー密度が損傷閾値の2倍以下
- 各光学部品におけるレーザー透過率が99%以上
- 理論計算によりレーザー径を予測
- 上記の要件を満たすレーザー伝播が実現可能
- 計算によるレーザー径は、測定したレーザー径とおおよそ一致

相対立体角分布の計算と計測

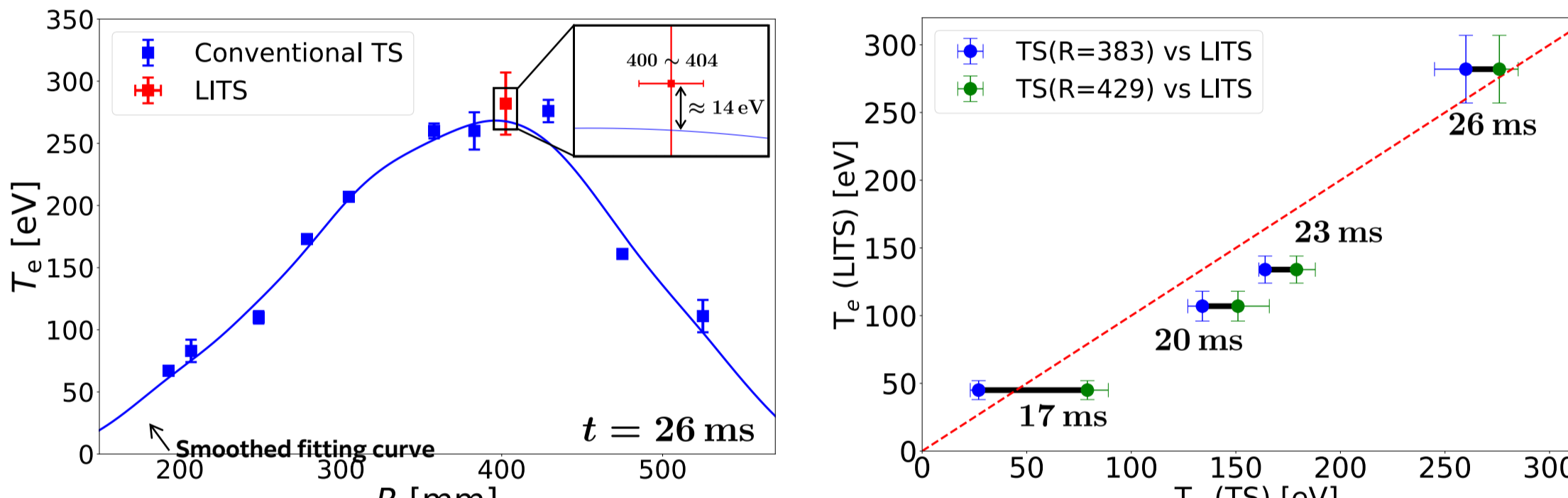


- 相対立体角分布の計算と計測を行い、LITSシステムの特徴である長い散乱長を検証した。
 - 計算結果から長い散乱長による信号強度の改善を確認した。
 - 計測結果はアライメントの重要性を示した。

線積分トムソン散乱計測システムを用いたプラズマ測定結果

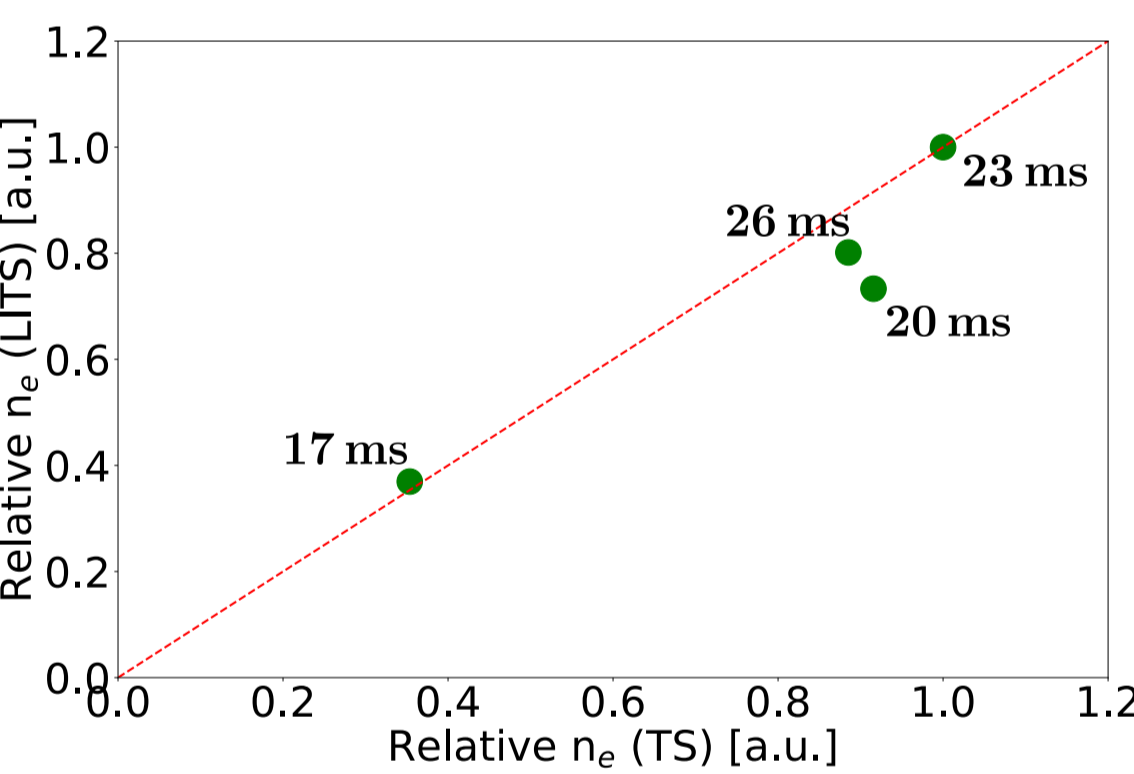
LITSシステムを用いたオーミック駆動プラズマ測定結果

LITSと従来TSで測定した電子温度の比較

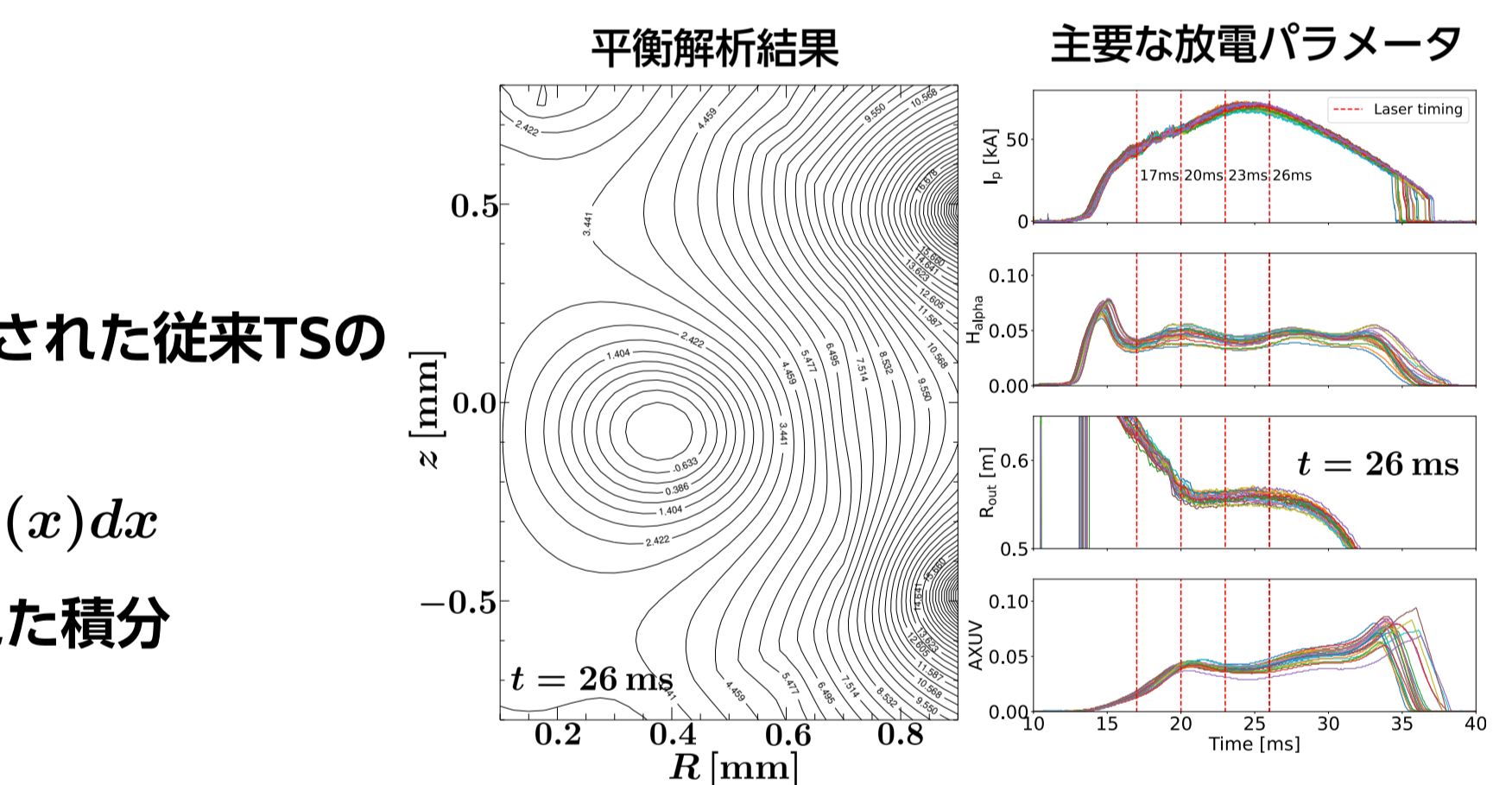


- LITSの計測領域は立体角分布の半値全幅により定義
- LITSによって計測された電子温度は誤差の範囲で一一致
- 電子温度の時間発展は、プラズマの再現性・空間的な曖昧さを考慮すると妥当

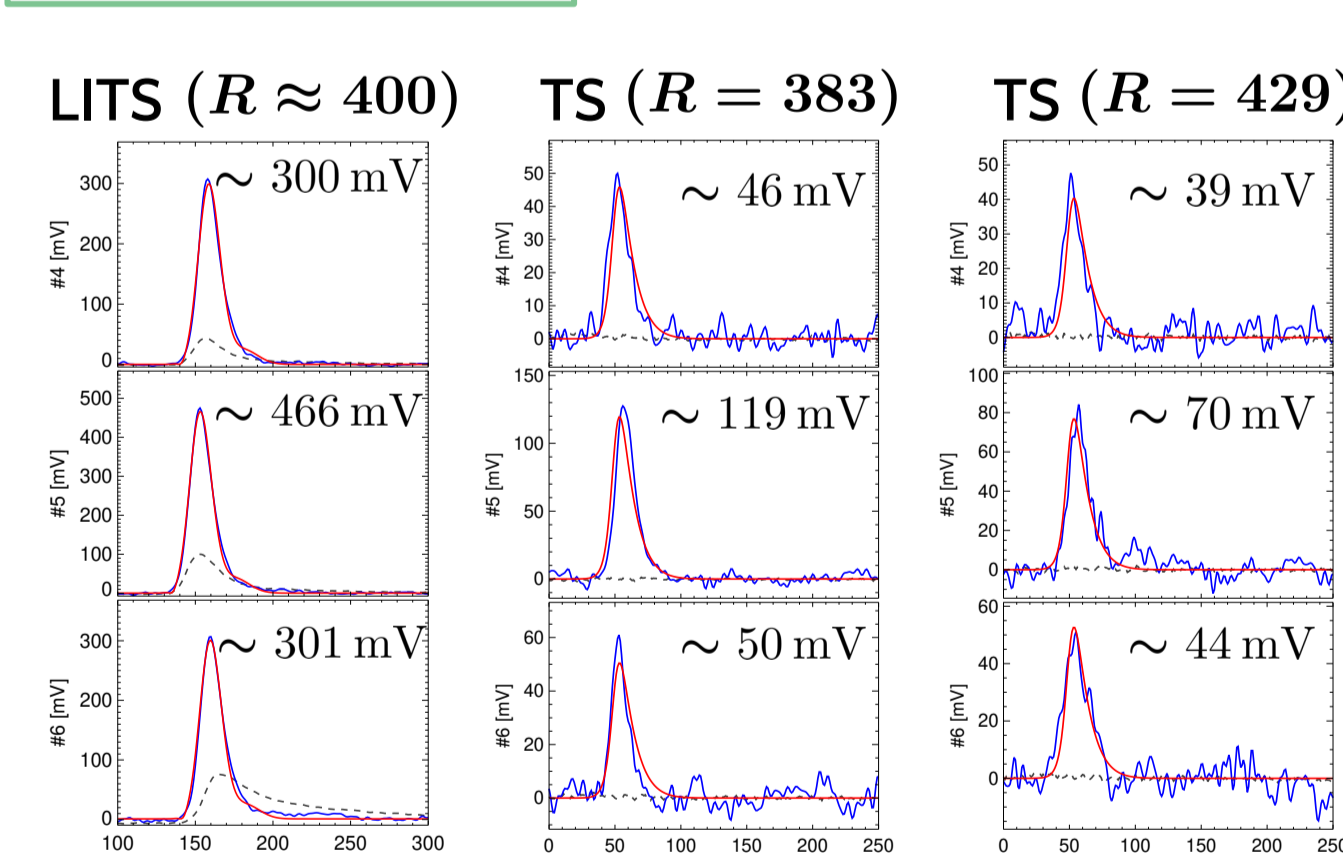
LITSと従来TSで測定した電子相対密度の比較



- 横軸はLITSの計測領域において積分された従来TSの電子相対密度
- 相対立体角によって重み付けされた積分
- 相対密度についても定性的に一一致
- 1視線のLITS計測システムの性能を十分に示した。

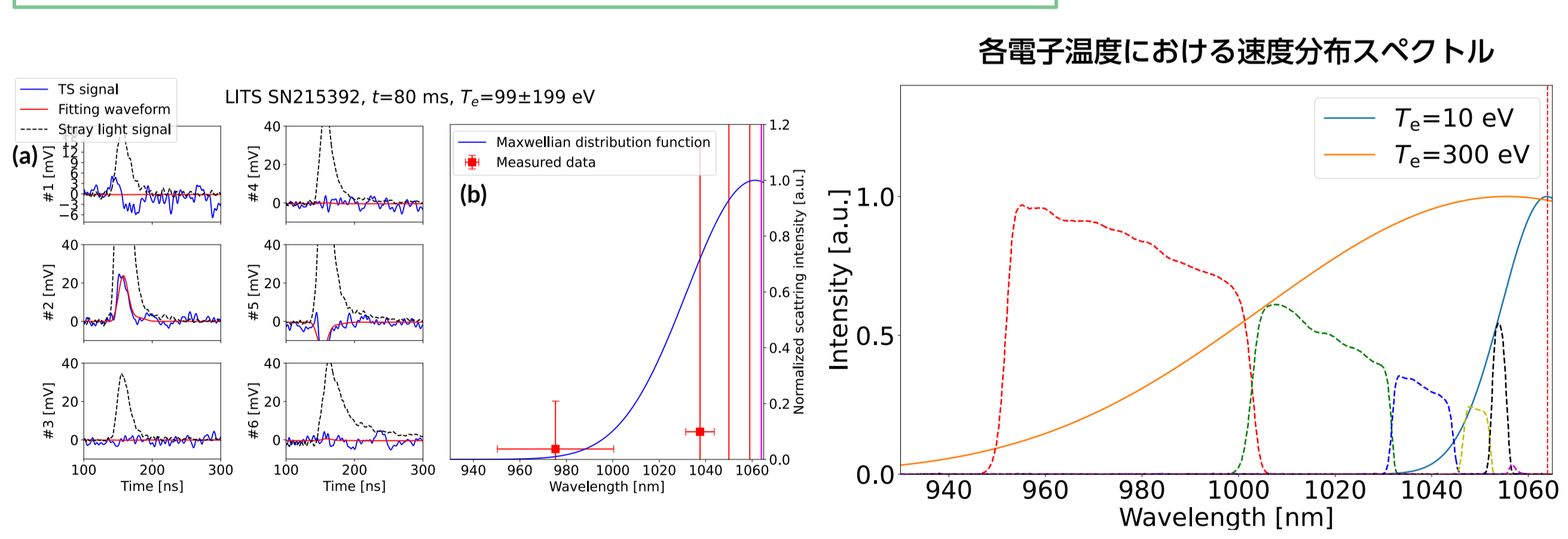


信号強度の比較



- それぞれ同じポリクロメーターを用いて測定
- 信号強度比 S_{LITS}/S_{TS}:
 - 5.4 ± 0.5 (LITS vs TS (R = 383))
 - 6.9 ± 0.2 (LITS vs TS (R = 429))
- 長い散乱長によって信号強度が増加した。

LITSシステムを用いたLHW駆動プラズマ測定結果



- 波長チャンネル#2でのみ明確な信号強度が観測された。
- 有意なマクスウェルフィッティング結果は得られなかった。
 - LHW駆動プラズマ中の電子温度が低いため、速度分布スペクトルの広がり比較的狭くなり、短波長側のチャンネルで信号強度がほとんど観測されない。
 - 波長チャンネル#1の信号はノッチフィルターにより遮断されている。

参考文献

- K. Iwasaki, Doctoral thesis, The University of Tokyo (2023).
- Y. Lin et al., Plasma Fusion Res. 17, 1405098 (2022).
- Y. Takechi et al., Plasma Fusion Res. 20, 1401046 (2025).
- A. Ejiri et al., Plasma Fusion Res. 18, 2402025 (2023).

謝辞

- National Institute for Fusion Science Collaboration Research Programs NIFS22KIPP007 and NIFS25KSP5001
- QST fusion demo collaboration program 071004

結論

- TST-2において1視線のLITSシステムを設計、制作、導入した。
- LITSシステムによって計測された電子温度・密度は妥当であった。
- 長い散乱長によって信号強度が増加することを確認した。
- 1視線のLITSシステムが効果的に機能することを実証した。
- 今後の展望
 - 複数視線のLITSシステムの導入
 - より性能の良い迷光対策フィルターの開発・導入