

# 合体生成球状トカマクプラズマに対する 中性粒子ビーム入射効率の検討 (平成 27 年度修士論文要旨)

菅原 拓路 (学生証番号: 47-146111)

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻, 2016 年 3 月修士課程修了

指導教員: 井通暁 准教授

キーワード: 核融合, プラズマ物理, Thomson 散乱計測, 中性粒子ビーム入射

## 序 論

### 研究背景

軽い原子核同士が融合し, 重い原子核になる核反応を核融合と呼ぶ。反応に際して欠損した質量分のエネルギー ( $E = mc^2$ ) が解放されるが, このエネルギーを発電に利用しようと考えられているのが核融合発電である。必要な資源 (重水素・リチウム) が地球上に豊富に存在することから, エネルギー問題を解決し得る発電法の 1 つとして注目されている。

核融合反応は約 10 keV (約  $10^8$  °C) という極めて高い温度条件下で発生し, そのような温度では物質はプラズマと呼ばれる, 陽イオンと電子に電離して飛び回る状態になる。プラズマの電磁気的な性質を利用し, 磁力で超高温のプラズマを閉じ込める手法を採用している核融合炉のうち最も有力なものとしてトカマク型装置が存在するが, 通常のとカマク装置で核融合発電を実現しようとする現行の他の発電手法 (火力, 原子力等) に比べて 2~3 倍程度の発電コストを要する<sup>1,2)</sup> という問題がある。プラズマ閉じ込め効率を向上し, 発電コスト低減が見込まれる改善策として球状トカマク (spherical tokamak, ST) の実現が挙げられるが, ST の特性上トラス中心の空間が非常に狭く, 通常のとカマク装置においてプラズマ電流駆動と加熱の役割を担う中央ソレノイド (CS) コイルを配置することができないため, CS コイルを用いずにプラズマを立ち上げる手法<sup>3)</sup> の確立が不可欠である。

### 研究目的

当研究室では ST 実現の手段として UTST 装置を用いたプラズマ合体による ST 立ち上げ法の研究<sup>4)</sup> を行っている。これは外部コイルの誘導で立ち上げられた ST プラズマ同士を合体させてプラズマを取り囲む磁力線のつなぎ変わり (磁気リコネクション) を引き起こし, その際にプラズマ合体時の磁気面の接点である X 点近傍において磁場のエネルギーがプラズマ粒子の運動・熱エネルギーに変換されることを利用してプラズマを加熱することにより, CS コイルを用いた初期加熱法に代替しようとするものである。

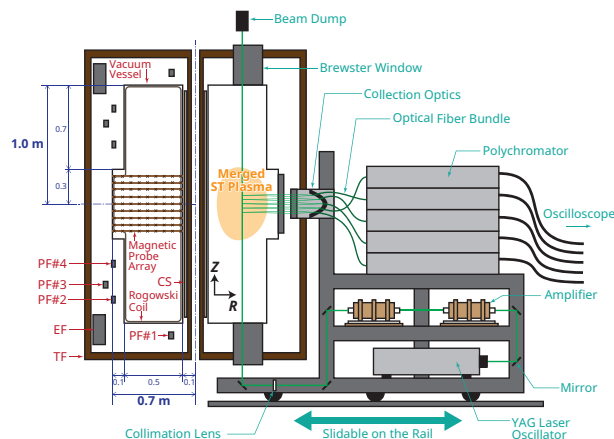


Fig. 1 UTST 装置の断面図と Thomson 散乱計測系

合体生成された ST プラズマに対する中性粒子ビーム入射 (neutral beam injection, NBI) による追加加熱を最適化するためには, NBI 加熱効果を大きく左右するパラメータである合体後の ST プラズマの電子密度  $n_e$  と電子温度  $T_e$  の分布の挙動, より具体的には合体後のプラズマが減衰する前に十分に高  $n_e$  となる位置と時間帯を知ることが必要となる。このため, 本研究ではプラズマ合体実験を行い, プラズマ合体中~合体後の時間帯にかけて  $n_e$  と  $T_e$  の両分布の時間発展計測を行った。

## Thomson 散乱計測法

### 計測原理・適用

電子密度  $n_e$ ・温度  $T_e$  の計測法として, 荷電粒子による電磁波の弾性散乱を利用した Thomson 散乱計測法がある。プラズマ中に波長  $\lambda_0$  のレーザを入射するとプラズマ粒子 (ここでは特に電子) によって散乱されるが, 散乱波長  $\lambda$  は粒子速度に起因する Doppler 効果によって変動する。レーザ入射時間内においてプラズマの平衡状態が仮定できるとき, 電子群による散乱角  $\theta$  方向へのレーザ散乱光の光強度の波長分布  $P(\lambda)$  は入射波長  $\lambda$  を中心とした Gauss 分布:

$$P(\lambda) \propto n_e \sqrt{\frac{m_e}{T_e}} \exp \left[ -\frac{m_e}{2T_e} \frac{1}{4 \sin^2(\theta/2)} \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \right)^2 \right]$$

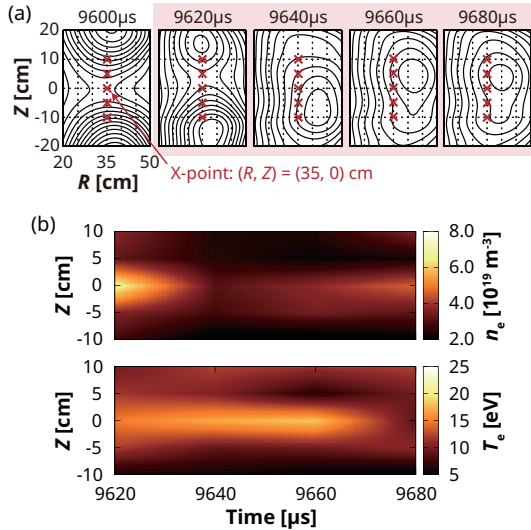


Fig. 2 (a) ポロイダル磁気面の時間発展と Thomson 散乱計測地点の対応 (b)  $n_e$ ,  $T_e$  軸方向分布の時間発展

となる ( $m_e$ : 電子質量)。 $\theta$  を固定すると Gauss 分布の幅が  $T_e$  の、高さが  $n_e$  と  $T_e$  の関数となっているので、特定の散乱方向に対する散乱光強度の波長分布を計測することにより  $n_e$  と  $T_e$  を逆算することができる。

当研究室の UTST 装置では、レーザ経路に沿った軸方向の同時計測と径方向のスキャン計測を組み合わせたスライド型の 2 次元 Thomson 散乱計測系 (Fig. 1) が採用されており、本研究では同時計測可能な軸方向 5 点の電子密度・温度分布の時間発展計測を行った。

### 計測系改良作業等

**フラッシュランプ (FL) 交換作業** 入射レーザ光強度増幅のため、FL を励起源、ガラスレーザロッドを媒質とした増幅器を使用している。FL はしばしば交換を要する部品であるが、FL 動作チェック方法を新たに導入し、交換作業を効率化した。

**ハイパスフィルタ (HPF) 導入** PF コイル放電等に伴って光散乱信号よりも低周波かつ強い信号が検出されていたため、これを除くための HPF を導入した。

**迷光対策** UTST 外部での散乱光の分光器内への侵入 (迷光) を防ぐため、暗幕の使用法を再検討した。

**集光系アラインメント** 集光光学系のアラインメント手順を効率化した。

**入射光学系点検** レーザパワーメータを利用し、入射光学系の各所におけるレーザ光強度を測定・比較することで、光学系部品の損傷を発見した。

### 実験結果・考察

本研究では動作ガスをヘリウム、計測地点を X 点 ( $R, Z$ ) = (35, 0) cm を中心とした軸方向 5 地点 ( $|Z| = 0, 5, 10$  cm)、計測時刻をプラズマ合体中から合体後の時間帯にかけ

て 20  $\mu$ s 毎に 4 時刻 (9620, 9640, 9660, 9680  $\mu$ s) として Thomson 散乱計測を行った (Fig. 2 (a))。

電子密度  $n_e$ ・温度  $T_e$  の軸方向分布の時間発展を Fig. 2 (b) に示す。いずれも合体中 (9620  $\mu$ s) には X 点でピークを持つ分布となっているが、合体直後には中心密度が低下し、平坦な分布になった後に再度ピークが成長することが分かった。一方、 $T_e$  に関しては中心にピークを持つ分布が 50  $\mu$ s 程度維持されている。

分布変化のメカニズム、ならびに NBI 適用効果に関しては以下のように考察される。合体初期から中盤にかけては電子密度は中心でピークを持つのにに対し、合体後期には下流域である径方向内側と外側の密度が増大する傾向が過去の研究により観測されている<sup>5,6)</sup>。形成された下流の高密度領域は合体完了後には速やかに磁力線に沿って平坦化されると考えられるので、合体完了後にはホローな密度分布が形成される。これに対して電子温度は中心にピークを持つため、合体完了後には  $n_e$  と  $T_e$  の積に比例する圧力分布は広がった分布となる。その後、外向きの熱拡散により温度分布は平坦化し、内向きと外向き同時に粒子拡散が起こることで中心部の密度分布が徐々に増大したものと予想される。このとき、密度・温度の両分布変化のトレードオフ関係から全体の圧力分布は概ね維持され平衡状態にあると考えられる。また、中心密度はプラズマ減衰に比べて素早く増加して  $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  に達し (9680  $\mu$ s)、これは 25 keV の水素 NBI に対して 70 % 程度の高い荷電交換効率をもたらす得る。したがって合体法によって立ち上げられた ST プラズマが NBI のターゲットプラズマと成り得ると結論付けられる。

### 結論・今後の予定

プラズマ合体実験において、合体中は X 点でピークを有した電子密度の軸方向分布が合体直後には一度平坦化し、その後中心密度の増加が観測された。増加後の密度条件から、この時間帯におけるプラズマのポロイダル断面中心付近への NBI 加熱の有意性が示唆された。

今後の研究としては計測時間の延長と計測領域の 2 次元化による NBI 適用位置・時間帯の更なる最適化、NBI 適用後の具体的な加熱効果の理論予測及び実測等を行っていくこと等が挙げられる。

### 参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁『平成 26 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2015)』(2015)
- 2) 吉田智朗 ほか『電力中央研究所報告』T95069 (1996)
- 3) R. Raman *et al*, *Plasma Phys. & Controlled Fusion* **56**, 103001 (2014)
- 4) M. Inomoto *et al*, *Nucl. Fusion* **55**, 033013 (2015)
- 5) Y. Ono *et al*, *Plasma Phys. & Controlled Fusion* **54**, 124039 (2012)
- 6) 郭学瀚 ほか, 電気学会論文誌 A **134**, No. 9, pp. 515-516 (2014)