

## 大型球状トカマク合体実験 MAST におけるリコネクション加熱研究の進展 Recent progress of high power reconnection heating experiment in MAST

田辺 博士<sup>1)</sup>, 山田 琢磨<sup>2)</sup>, 渡辺 岳典<sup>1)</sup>, 魏 啓為<sup>1)</sup>, 門脇 和丈<sup>1)</sup>, 今澤 良太<sup>3)</sup>, Clive Michael<sup>4)</sup>, Brendan Crowley<sup>4)</sup>, Neil Conway<sup>4)</sup>, Rory Scannell<sup>4)</sup>, Mikhail Gryaznevich<sup>4)</sup>, 井 通暁<sup>1)</sup>, 小野 靖<sup>1)</sup> Hiroshi Tanabe<sup>1)</sup>, Takuma Yamada<sup>2)</sup>, Ryota Imazawa<sup>3)</sup>, Mikhail Gryaznevich<sup>4)</sup>, Yasushi Ono<sup>1)</sup> *et.al.*

1) 東大新領域, 2) 九大基幹教育院, 3) 原子力開発機構, 4) カラム研究所  
1) Univ.Tokyo, 2) Kyusyu Univ., 3) JAEA, 4) CCFE

本講演では、START・TS-3 装置で開発された合体法による高ベータ球状トカマク生成法を大型実験に応用した英国カラム研究所 MAST における磁気リコネクションを介した急速加熱実験について、2013 年から実施された M9 キャンペーンの結果を中心とした最近の進展を報告する。合体法を用いた球状トカマクの CS-less 立ち上げは START・TS-3 におけるベータ 40% を超えるレコード達成をはじめとして、衛星観測やシミュレーションとの連携によるエネルギー変換過程の検証、TS-3/TS-4 における再結合磁場スケールリングによる  $B_{rec} < 0.1T$  の範囲における 10-200eV 程度の合体加熱アップグレードシナリオの開発、UTST 装置における外部コイル駆動合体生成シナリオの開発が行われ、これらの成果を集約した MAST 実験では最大 0.5MA のプラズマ電流駆動、イオン・電子ともに 1keV を超える加熱の達成と準定常運転との連結などが達成されてきた[1][2][3][4][5][6]。

過去 15 年の東大-MAST 共同研究では、空間 300CH の Ruby トムソンに加え、YAG トムソン散乱計測の空間分解能が 36 点から 130 点にアップグレードされたことで電子加熱に関する研究は順調に進展してきた。しかしながら、イオン加熱に関しては従来 MAST 既設の荷電交換分光計測がリコネクション領域に視野を持たないことにより 1CH の視線積分 NPA 計測依存で空間分布計測に課題を有し、その詳細は不明なところが多かったが、2013 年度に 32 視線のイオンドップラートモグラフィ計測[7]がミッドプレーンに導入されたことで、イオン温度の空間分布計測が初めて実現し、MAST の合体加熱研究に大幅な進展がみられた。本講演では、2013 年の M9 キャンペーンの結果を中心に、MAST における合体リコネクション研究の最新の進展を報告する[8][9]。

MAST 装置における合体リコネクション実験の装置構成および典型的な放電波形を図1に示す。MAST 装置は TF, OH コイル (P1) に加え、真空容器内部に 5 つの PF コイル (P2, P3, P4, P5, P6) を有し、プラズマ合体は主として P3 コイルによって駆動

される(他のコイルは、合体生成後のダイバータ配位形成(P2)、径方向平衡制御(P4、P5)、垂直位置制御(P6)に使用される)。プラズマ合体は、高速度カメラ画像が示すように P3 コイル電流の立ち下げ過程において進行し、P3 コイルの誘導によって装置上下に生成された 2 つのプラズマリングが両者の同軸電流によって互いに引き付けあうことで駆動される。図1は MAST における標準運転の一つである合体 + Ohmic のハイブリッド standard shot の一例(no NBI)であるが、時刻  $t = 0-30ms$  までの短時間の間に  $\sim 0.3MA$  の初期プラズマ電流立ち上げ、300eV を越える電子加熱が発生し、その後 Ohmic 放電のアシストを受けて  $\sim 1MA$  クラスの準定常放電を達成していることが確認できる。

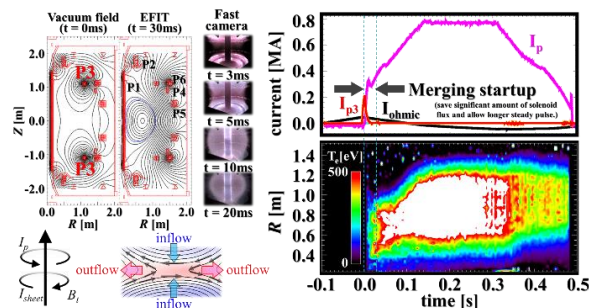


図1 合体法を応用したMAST standard shot概観

図1が示すように磁気リコネクションによるプラズマ加熱の時間スケールは、Ohmicによるランプアップと比べてきわめて速い時間スケールで進行する。図2は磁気リコネクションに伴って再結合磁場が合体下流に蓄積することにより、内側装置境界に設置されたピックアップコイルが検出する  $dB_z/dt$  のスパイク信号を、イベントの時間スケールのリファレンスとして、特にその信号のスパイクの時間帯に YAG レーザ 8 基によるトムソン散乱計測を集中的に運用した際の、電子密度・温度分布である。磁気リコネクションに伴うインフローにより、まず X 点で電子密度の上昇が見られるが、リコネクションの進行に伴いアウトフロー方向への加速が進行し、ピーク位置が合体下流へ

と移動していく様子および、急峻な密度勾配を有するホローな電子密度分布を形成する過程が確認できる。一方電子温度はピックアップコイルの信号がピークに到達する $t \sim 5.4\text{ms}$ から進行し、電流シート内部と思われる領域においてX点にピークした電子温度分布を形成する。

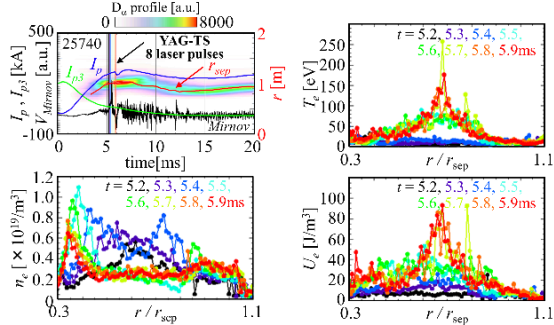


図2 MASTの高速リコネクションの加速・加熱

図3に電子温度・密度の二次元分布( $r$ - $z$ )を示す。合体下流に向かったアウトフローによる高密度領域は、再結合磁場が形成する閉じた磁気面上に沿って広がり、一方電子温度はX点においてインフロー方向にもアウトフロー方向にもピークした構造を形成する。また、電子-イオンのエネルギー緩和時間 $\tau_{ei} \sim 4\text{-}11\text{ms}$ に対応して、合体下流でも電子温度の上昇が見られる。

一方イオン温度は図4が示すように、 $c/\omega_{pi} \sim 0.1\text{m}$ 程度の電流シート幅内のアウトフロー加速のチャンネル内および合体下流のよどみ点を示唆する領域で最大化し、P. Browningらのトロイダル効果を組み込んだMASTをモデリングした二流体シミュレーションで予測されたように[10]、再結合磁場が形成する磁気面上で広範囲に加熱される。

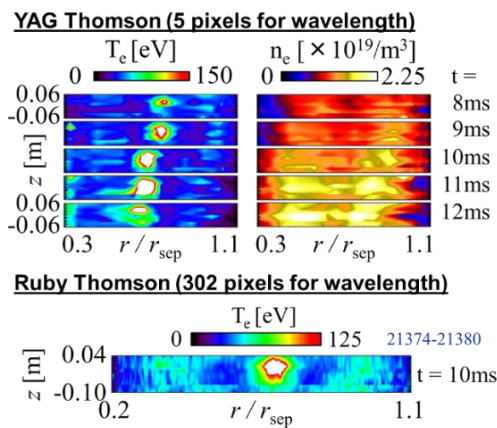


図3 X点近傍における2D電子温度, 密度分布

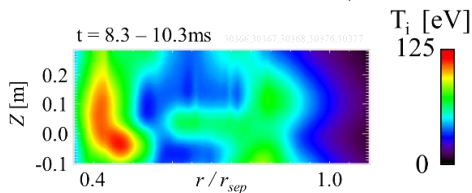


図4 X点近傍の2Dイオン温度分布

図5はX点近傍の電子加熱が最大化するZ位置において、電子温度・イオン温度の径方向分布を同時に計測したものである。図3,4で確認されたX点および合体下流の特徴的なピーク構造は電子・イオンで相互に緩和しあい、最終的にトリプルピーク構造を形成した。リコネクション平面に垂直なトロイダル磁場は、図6が示すように特にX点のピーク構造に影響を与え、一方合体下流領域におけるバルクプラズマの加熱へは影響しなかった。図7に示すようにパラメータ向上には散逸エネルギーを決める再結合磁場( $B_{rec} \sim B_p$ )が貢献し、高トロイダル磁場下でもリコネクション加熱性能が低下することなく再結合磁場の2乗に比例するスケールリングが得られ、合体生成後の高閉じ込め運転との良好な連結シナリオの開拓に成功した[9]。

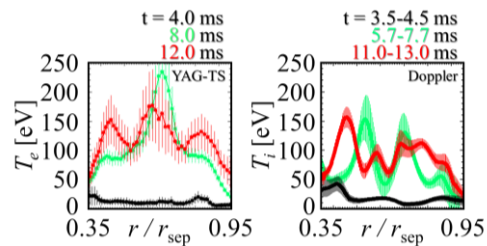


図5 電子温度, イオン温度分布の時間発展

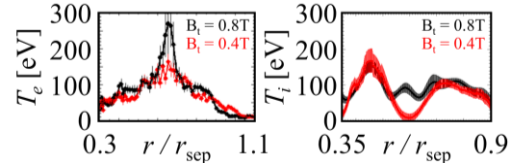


図6 トロイダル磁場の加熱分布への影響

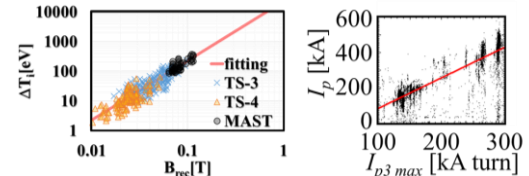


図7 合体による加熱・電流立ち上げスケールリング

## Acknowledgement

本研究はJSPS科研費15H05750、15K14279、15K20921の助成を受けたものです。

## References

- [1] M. Gryaznevich *et. al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 3972 (1998)
- [2] Y. Ono *et. al.*, *Nucl. Fusion*, **43**, 789(2001)
- [3] Y. Ono *et. al.*, *Plasma Phys. Controlled Fusion*, **54**, 124039 (2012)
- [4] S. Inoue *et. al.*, *Nucl. Fusion*, **55**, 083014 (2015)
- [5] M. Yamada *et. al.*, *Nat. Commun.*, **5**, 4774 (2014)
- [6] M. Inomoto *et. al.*, *Nucl. Fusion*, **55**, 033013 (2015)
- [7] H. Tanabe *et. al.*, *Nucl. Fusion*, **53**, 093027 (2013)
- [8] Y. Ono *et. al.*, *Phys. Plasmas*, **22**, 055708 (2015)
- [9] H. Tanabe *et. al.*, *Phys. Rev. Lett.*, accepted
- [10] P. Browning *et. al.*, *Plasma Phys. Controlled Fusion*, accepted