

球状トカマク核融合炉に向けた合体立ち上げ研究 Merging/Reconnection Start-up Study for Spherical Tokamak Reactor Design

¹魏 啓為, ¹田辺 博士, ²伊井 亨, ¹渡辺 岳典, ¹井 通暁, ¹小野 靖
¹Keii Gi, ¹Hiroshi Tanabe, ²Toru Ii, ¹Takenori Watanabe, ¹Michiaki Inomoto, and ¹Yasushi Ono

¹東大新領域, ²東大工

¹Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

²School of Engineering, The University of Tokyo

球状トカマク (ST) は、高楕円度、高ベータ、高ブートストラップ電流割合などの特徴をもつ魅力的な磁場配位である。しかし装置中央部にセンターソレノイドコイル (CS コイル) を設置するスペースが小さいことから、ST 核融合炉では、CS コイルを用いないプラズマ立ち上げが鍵となる。プラズマ合体法[1]は、磁気リコネクションを通した2つのトラスプラズマの合体を用いる、有望な CS-less プラズマ立ち上げ手法の一つである。TS-4 装置における最初の高ベータ ($\beta_t \sim 30\%$) 合体 ST への中性粒子ビーム (NBI) 入射実験では、プラズマの減衰時間と磁束が向上した[2]が、低閉じ込めにより電流維持とランプアップは実証されていない。最大の合体装置である MAST では、一定のソレノイドコイル電流の下で、プラズマ合体と NBI と垂直磁場コイルのポロイダル磁束注入により、0.7 MA のプラズマ電流が維持されている[3]。

我々は MAST の M9 キャンペーンにおいて、合体法による CS-less プラズマ立ち上げ実験を行った。本実験では、プラズマ合体のみでプラズマ電流 $I_p = 0.2$ MA 以上を 10 ms 維持した。合体後の緩和過程では、高速度カメラから数回のプラズマ排出が観測された。この現象はダイバータ板での D_α スパイクと線積分密度の低下に一致しており、粒子排出を伴う。高速度カメラの時間発展を見ると、合体後のプラズマが垂直磁場によってセンタースタックに押しつけられ、z 方向上下が光る様子が観測された。MAST で過去に行われた 81 ショットの CS-less 合体実験を検証すると、この IRE のような現象は、合体の押しつけ力が強くプラズマ電流が大きい場合に複数回観測され、最初の現象の発生タイミングが早くなることが分かった。一方で、ダイバータコイルに正の電流を印加して2つの初期プラズマを引き伸ばしつつ合体を行った場合や、NBI を緩和直後の速いタイミング ($t \sim 12.5$

ms) で入射した場合では発生していない。本イベントは、磁気リコネクションによって加熱されたエネルギーを放出してしまうため、発生要因の特定と発生回避が次なる課題である。

MAST において合体した ST の解析を行うために、計測した熱圧力を用いた EFIT++ による平衡再構成を初めて行った。熱圧力分布は、mid-plane におけるトムソン散乱計測による電子密度分布と電子温度分布、および今キャンペーンで新たに導入されたドップラー分光計測[4]によるイオン温度分布から計算した。再構成の結果、プラズマ排出直前 ($t = 16.3$ ms) では ST は hollow な圧力分布と hollow なトロイダル電流密度分布を持ち、弱正磁気シアであることが分かった。一方、プラズマ排出後 ($t = 21.7$ ms) では、peak な圧力分布と peak なトロイダル電流密度分布を持ち、正磁気シアであった。今回のキャンペーンでは、2つの初期プラズマ生成に用いる P3 コイルの充電電圧が限定され (最大: 300 kAturn \rightarrow 今回: 200 kAturn)、外部トロイダル磁場が非常に大きい ($B_{T0} \sim 0.7$ T) ため、合体で得られた ST のベータ値は非常に小さい ($\beta_t \sim 0.3\%$)。

合体立ち上げを有効に用いるためには、mid-plane の両方向のアウトフローを共通磁束のよって閉じ込めることが重要であるが、一方で垂直磁場が強すぎると径方向にプラズマが圧縮されて、センタースタックに押しつけられてしまう。そのため、プラズマ位置制御としての CS コイルの導入は合体立ち上げの球状トカマク核融合炉には必要であると考えられる。

[1] Y. Ono et al., 19th IAEA Fusion Energy Conference, EX/P3-15 (2002).

[2] K. Gi et al., J. Plasma Fusion Res. 8, 1402023 (2013).

[3] M. Gryaznevich et al., Phys. Plasmas 10, 1803 (2003).

[4] H. Tanabe et al., Nucl. Fusion 53, 093027 (2013).