

## 新手法による高ベータ球状トカマクプラズマの生成及び維持

Production and maintenance of high beta spherical tokamak plasmas using a new method

高瀬 雄一 (TAKASE YUICHI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授



### 研究の概要

真空容器外コイルで生成したプラズマの合体により高ベータプラズマを生成、維持するための、先進的高周波波動を使った新手法を開発する。磁気リコネクション、球状トカマクプラズマの自発的生成、高周波加熱のみによるプラズマ電流維持、詳細計測に基づく非線形波動現象の理解等において大きな進展があった。

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 総合工学・核融合学

キーワード： 核融合・プラズマ・高ベータ・球状トカマク・電流駆動

### 1. 研究開始当初の背景

球状トカマク (ST) の高ベータ・高閉じ込め特性を活用すれば、小型装置で体積中性子源や発電実証を実現し、核融合開発の加速に貢献できる。但し ST 核融合炉では中心ソレノイド (CS) を使えないので、先進的 RF 手法でなければならない。

### 2. 研究の目的

「超高ベータ球状トカマク (ST) プラズマ」を生成・維持するための新手法を開発する。真空容器外コイルで生成したプラズマの合体に伴う磁気リコネクションによる磁場から粒子へのエネルギー変換を利用した超高ベータ ST プラズマ新生成法の開発、および先進的 RF 手法を用いた高ベータ ST プラズマの維持を目指す。

### 3. 研究の方法

外部コイルのみによるダブルヌル合体立ち上げ装置 UTST を製作し、高ベータ ST プラズマ生成実験を開始した。TS-3 および TS-4 ではリコネクションの詳細計測、TST-2 では ECW による ST プラズマ自己生成の実験、RF による ST プラズマ維持実験、高次高調速波 (HHFW) による電子加熱および非線形波動現象の複数計測器による詳細測定を行った。また、高ベータ ST プラズマ維持に用いる LH および NB 装置の準備を行った。

### 4. 研究の主な成果

TST-2では、イオンサイクロトロン周波数の10倍程度のHHFWを用いて、電子サイクロトロン周波数帯のマイクロ波で立ち上げたプラズマを維持できることを初めて示した。これにより立ち上げシナリオの選択肢が格段に広がった。立ち上げ過程で、プラズマは開いた磁気面配位から閉じた磁気面を持つ球状トカマク配位に自発的に遷移する。この時、磁気リコネクションを通じて磁力線群はトポロジーを変化させる。磁気計測を用いた平衡解析の結果、電流分布がほとんど変化しない準静的なトポロジーの変化が起きていること、閉じた磁気面形成後に電流上昇率が減少することが分かった。

RF波動の吸収が悪いと、プラズマ内に定在波が立ち、振幅が増大するので、パラメトリック崩壊不安定性 (PDI) が起き易い。TST-2では、運転領域の選択により、電子を加熱したりPDIを起こしたりできる。多チャンネル磁気計測による分布・偏波測定、反射計による局所電場の評価、プローブによる波数測定、高速光測定等の種々の波動測定を行った。スペクトルからこれまで報告されていない崩壊モードを見出し、磁場依存性から分子、不純物のイオンサイクロトロン準モードに関係していると推測されている。反射計では、位相振動から密度揺動を求め、密度振動から励起波動の電場を評価したところ、計算結果と整合する値が得られた。PDIでは励起波と崩壊波の間に非線

#### [ 4. 研究の主な成果 (続き) ]

形関係があることが確かめられた。一方、励起波動の周波数拡がりにはパワーに依存せず、密度揺動による多重散乱が原因であると考えられる。磁気揺動と密度揺動間のクロスバイコヒーレンスを算出した結果、有意な三波結合が観測され、PDIのカップリングが同定された。これは世界初の成果である。

新装置UTST (図1) は、超高ベータSTの可能性を探る実験研究を目指して建設された。センターソレノイドを使わず、真空容器外に配置された上下2対のコイルが作る磁気中性点付近に2個の球状トカマクを生成し、軸対称合体させて高ベータSTプラズマを生成する。これまで既に100 kA以上のプラズマ電流が得られている。これと並行して、TS-3およびTS-4装置では合体によるイオンおよび電子加熱の物理機構解明、および非定常リコネクションに関して大きな進展があった。イオン温度分布は、磁気中性点から放出されるリコネクションアウトフローが再結合後の磁力線に衝突する部分が選択的に加熱され、高温領域が2ヶ所現れることがわかり、ファーストショックやイオン粘性により、加速されたイオンの運動エネルギーが熱化されるプロセスが明らかになった。一方、電子温度分布のピークは電流シート内の磁気中性点付近にあり、電子加熱は電流シートの異常抵抗損失により起こることが明らかとなった。また、リコネクションによるプラズマ加熱エネルギーがポロイダル磁場の2乗に比例することを実験・理論の両面から明らかにした。これらの結果は、衛星観測・理論・室内実験の間で共有し、一体化した検討が進んでいる。



図1 UTST と NBI 装置

#### 5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

新装置 UTST の実験開始、リコネクションに伴うイオン・電子加熱、非定常リコネクション、ST プラズマの自発的形成、イオンサイクロトロン高調波帯 RF による ST プラズマ維持、波動電場分布および非線形波動現象の測定等、いずれも世界的インパクトが高い成果である。

#### 6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者は二重下線、連携研究者は一重下線)

[1] S. Shiraiwa, K. Hanada, M. Hasegawa, H. Idei, H. Kasahara, O. Mitarai, K. Nakamura, N. Nishino, H. Nozato, M. Sakamoto, K. Sasaki, K. Sato, **Y. Takase**, T. Yamada, H. Zushi, and TST-2@K Group, "Heating by an Electron Bernstein Wave in a Spherical Tokamak Plasma via Mode Conversion," Phys. Rev. Lett. 96 (18), 185003 (2006).

[2] A. Ejiri, **Y. Takase**, H. Kasahara, T. Yamada, K. Hanada, K. N. Sato, H. Zushi, K. Nakamura, M. Sakamoto, H. Idei, M. Hasegawa, A. Iyomasa, N. Imamura, K. Esaki, M. Kitaguchi, K. Sasaki, H. Hoshika, O. Mitarai, and N. Nishino, "RF start-up and sustainment experiments on the TST-2@K spherical tokamak," Nucl. Fusion 46 (7), 709-713 (2006).

[3] T. Yamada, A. Ejiri, Y. Shimada, T. Oosako, J. Tsujimura, **Y. Takase**, H. Kasahara, "Direct measurement of density oscillation induced by a radio-frequency wave," Rev. Sci. Instrum. 78, 083502 (2007) (5 pages).

[4] O. Watanabe, A. Ejiri, T. Yamaguchi, J. Sugiyama, T. Oosako, Y. Adachi, K. Yamada, H. Tojo, S. Kainaga, **Y. Takase**, Y. Nagashima, M. Sasaki, T. Masuda, "Plasma Current Sustainment by RF Power in ECH Start-up Plasma in the TST-2 Spherical Tokamak," Plasma Fusion Res. 3, 049 (2008) (3 pages).

[5] Y. Ono, R. Imazawa, H. Imanaka, Y. Hayashi, S. Ito, M. Nakagawa, T. Yamada, M. Inomoto, A. Ejiri, **Y. Takase**, T. Asai, T. Takahashi, H. Sakakita, S. Kiyama, Y. Hirano, H. Koguchi, C. Z. Cheng, "Ion and Electron Heating Characteristics of Magnetic Reconnection in TS-3 and UTST Merging Startup Experiments," Fusion Energy 2008, EX/P9-4 (2008).

ホームページ等

<http://fusion.k.u-tokyo.ac.jp/research/kakenhi.html>