

## 先進ヘリカル磁場閉じ込め装置 Heliotron J における 核融合プラズマ実験

エネルギー理工学研究所  
プラズマエネルギー研究分野  
長崎 百伸・小林 進二

### 1. はじめに

磁場閉じ込めに基づく核融合研究は、国際熱核融合実験炉 ITER が 2025 年にファーストプラズマ生成、2035 年に重水素・3 重水素を用いた燃焼プラズマ実験を開始する予定であり、新たなフェーズへと移行しつつある。ITER はトカマクと呼ばれる磁場閉じ込め方式を採用しており、外部コイルとプラズマ内部に流れる電流（プラズマ電流）でプラズマを閉じ込めるための磁場配位を形成する。磁場閉じ込め核融合の方式には、トカマク以外にヘリカル系と呼ばれる閉じ込め方式がある。ヘリカル系は磁場配位を外部コイルによって形成しており、トカマクのようにプラズマ電流を必要としないため定常運転が原理的に可能な方式であり、破壊不安定性（ディスラプション）と呼ばれる放電が止まる不安定性が発生しない長所を有している。ヘリカル方式には、ヘリオトロン（Heliotron）とステラレータ（Stellarator）という概念があり、ヘリオトロンはギリシャ語のヘリオス（太陽）、ステラレータは英語のステラ（星の）にちなんで名付けられた。ヘリカル系閉じ込め磁場構造は外部コイル系によってのみ磁場を形成するので、プラズマ電流を必要とするトカマクに比べて、磁場配位設計の自由度が極めて高いことが特徴である。先進ヘリカル磁場配位として提案されているものとしては、準ヘリカル対称、準ポロイダル対称、準トロイダル対称、準等磁場配位がある。ここで、すべての配位概念に「準」が付いているのは、ヘリカル系トラスでは数学的に厳密な対称性が存在しないためである。エネルギー理工学研究所では、これまでのヘリカル系システムをより発展させ、準等磁場配位という概念を追求するために、Heliotron J という装置を発案・建設し、1999 年より宇治キャンパスにて実験を行なっている。加えて、Heliotron J の磁場配位は高ベータ化に伴った粒子閉じ込めの改善が期待されており、世界の先進ヘリカル磁場配位研究のコミュニティーにおいて準等磁場配位の将来性を評価する重要な課題を担っている。

プラズマ実験開始以来、加熱機器及び計測機器の整備を進め、これまでに、良好なエネルギー閉じ込め（ISS95 則の 1.5 - 2 倍）、H-mode の観測、トカマクのようなグリーンワールド限界のない高密度プラズマの生成・維持（電子密度  $n_e \sim 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ）、電子熱輸送障壁（中心電子温度  $T_e(0) \sim 3 \text{ keV}$ ）、高エネルギー粒子の生成・閉じ込め、高エネルギー粒子励起 MHD 不安定性の抑制など、ヘリカル軸ヘリオトロン配位の持つ核融合プラズマ閉じ込め装置として性能が実証されてきた。また、ブートストラップ電流、電子サイクロトロン（EC）電流、トロイダル回転、高エネルギー粒子の閉じ込めなどの物理量の磁場配位依存性が新古典理論の予測と一致することを明らかにした。異常輸送によって支配されている巨視的エネルギー閉じ込め、長距離相関、周辺プラズマなども磁場配位に依存することを見出し、乱流輸送と関連する結果が得られている。本記事では、Heliotron J 装置について概説するとともに、最近のプラズマ実験の成果の幾つかについて紹介する。Heliotron J 実験プロジェクトの詳細については文献 [1] を参照いただきたい。

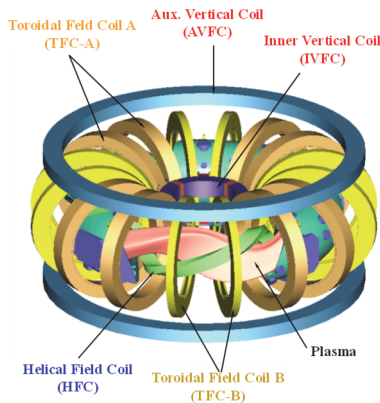


図 1 : Heliotron J 概要図

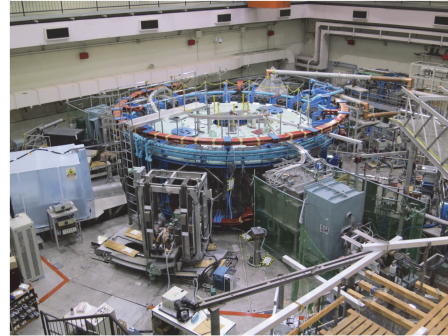


図 2 : Heliotron J 装置写真

## 2. Heliotron J 装置

Heliotron J 装置は、京都大学で創案された連続巻きヘリカルコイルを用いたユニークな磁場配位を有する中型の先進ヘリカル系プラズマ実験装置（主半径  $R = 1.2$  m, 平均小半径  $a = 0.1-0.2$  m, 中心磁場  $B < 1.5$  T）である。図 1 に Heliotron J の概要図、図 2 に Heliotron J 及び周辺機器の写真を示す。磁場コイルシステムは、 $L=1/M=4$ （ $L$  は極数、 $M$  はピッチ数）の連続巻きヘリカルコイル、2 種類のトロイダルコイル、及び、3 組のポロイダル・コイルから構成される。2 種類のトロイダルコイルを用いて四角形の四隅の磁場強度を直線部より強くすることにより、直線部に形成される局所準等磁場領域にピッチ角の大きな粒子を閉じ込めることを狙っている。それぞれのコイルに独立制御可能な電源を用意することで、広範囲な磁場配位制御が可能である。トーラス磁場配位の主フーリエ成分であるトロイディシティ（toroidicity）、ヘリシティ（helicity）に次ぐ新たな配位制御成分としてトロイダル磁場リップ成分であるバンピネス（bumpiness）を導入し、同時に、MHD 安定性の確保と高ベータ高閉じ込めの実現へ向け、従来のヘリオトロン磁場配位が高磁気シア配位であったことに対し、低磁気シアであるものの閉じ込め領域全域にわたって磁気井戸の形成を可能としている。

## 3. 最近の研究成果

### 3.1 閉じ込め・輸送の磁場配位依存性

これまでの実験において、磁場スペクトルにおけるバンピネス成分（トロイダルミラー比）の制御によって新古典輸送・MHD・高速イオン閉じ込めに対する影響が明らかになっている。最近では、分布計測の充実により、プラズマの分布構造形成への磁場制御の影響を調べる実験が進んでいる。また、従来の Low、Medium（標準配位；STD）、High bumpiness の基本 3 配位から、より高いバンピネス領域（Very high bumpiness, Ultra high bumpiness）へと磁場配位を拡張した。蓄積エネルギーとしては、これまでの知見と同様に、標準配位で最も高いことが確認された [2]。また、図 3 に示すように、磁場配位によって温度・密度分布の形状が異なることが観測された。電子密度分布

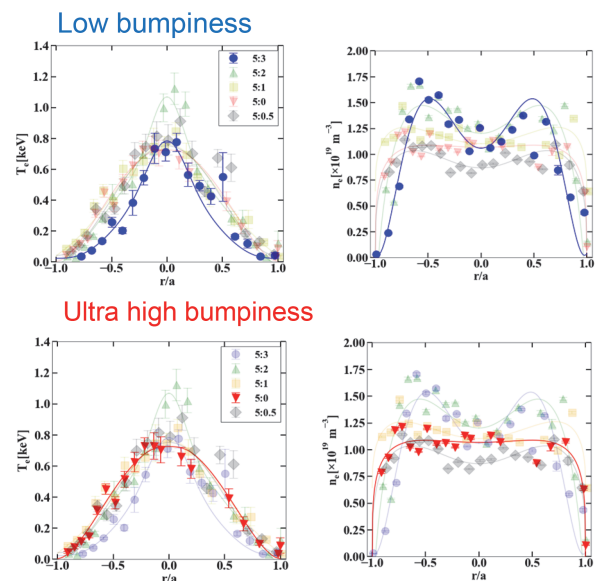


図 3 : バンピネスの異なる磁場における電子温度、電子密度分布の違い。

の凹みを表すホローネスをバンピネスに対し整理すると、バンピネスが上がると電子密度はより平坦化に、バンピネスが下がるとより凹んだ分布になる傾向を有することが観測された。電子密度分布形状のホロー構造形成の原因として、捕捉粒子の輸送の影響が指摘されているため、TRAVIS コードにより周回 / 捕捉粒子生成の割合を評価すると、この実験条件では、より高い bumpiness 配位では捕捉粒子の生成の割合がより高くなっていることが確認されている。より高いバンピネスでは捕捉粒子生成効の割合が増大しているものの、バンピネスの効果を通じて捕捉粒子輸送が低減され、その結果として分布形状がフラットとなっていることを示唆している可能性がある。今後、新古典解析や乱流シミュレーション解析などを進めてゆく予定である。

### 3.2 ECH/ECCD を用いた高速イオン励起 MHD 不安定性の抑制

核燃焼プラズマでは、自己点火プラズマ保持の観点から重水素 - 三重水素核融合反応により生成されたアルファ粒子の良好な閉じ込めが必要とされている。この 3.52MeV の初速度を有するアルファ粒子は、電子との衝突による減速過程でアルヴェン速度と同程度の速度となり、シアアルヴェン波などの電磁流体力学的 (MHD) 不安定性と共鳴的相互作用を起こす。そして、エネルギーを相互に授受することで、熱化前にアルファ粒子の異常輸送が増大したり、損失してしまうことで、自己点火プラズマ保持が困難になったり、高速イオン損失によりプラズマ対向機器が損傷してしまう恐れがある。そのため、高エネルギーイオンと MHD 不安定性との共鳴的相互作用の物理機構解明、ならびに高エネルギーイオンの異常輸送・損失の低減が求められている。

無電流での Heliotron J の磁場配位では、回転変換が径方向に殆ど変化しないため、よく知られたトロイダルアルヴェン固有モードは存在しない。しかしながら、シアアルヴェン連続スペクトルの僅か上または下の周波数を有し連続減衰を受けにくい大域的アルヴェン固有モード (Global Alfvén Eigenmode, GAE) が存在し、高エネルギーイオンによって不安定化される [3]。また、他の磁場配位と同様に、高速イオン圧力が非常に高い際には、連続減衰に打ち勝って連続スペクトルが強制的に不安定化する高速粒子不安定性 (Energetic Particle Mode, EPM) が不安定化される [4]。Heliotron J では、電子サイクロトロン加熱 / 電子サイクロトロン電流駆動 (ECH/ECCD) を用いて高速イオン励起 MHD 不安定性の安定化手法の開発を行っている。中性粒子ビーム入射 (NBI) プラズマに ECCD による EC プラズマ電流を印加した結果、EPM や GAE といった高速イオン励起 MHD 不安定性が安定化される結果が得られた [5][6]。Heliotron J では無電流において低磁気シア配位であることから、ECCD により正負、両方向の磁気シアを生成することが可能であるが、実験では磁気シアの符号に関わらず高エネルギー粒子 (EP) 励起 MHD 不安定性が安定化され傾向が得られた。シアアルヴェンスpekトルとの比較から、磁気シアに依存する連続減衰が大きくなり、高速イオン励起 MHD 不安定性が安定化できることが示された。こうした ECCD の高エネルギー粒子励起 MHD 不安定性の安定化効果は LHD, TJ-II においても追試され、その効果が観測されており、ヘリカル系に共通する効果であるといえる。

一方、ECH を NBI プラズマに印加した場合、観測されているモードの揺動強度が変化する結果が得られた

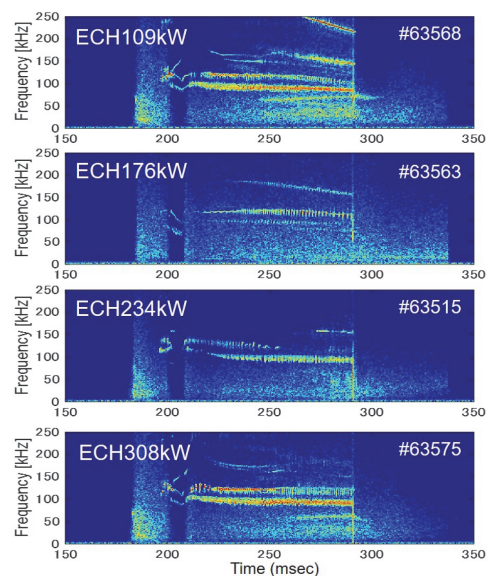


図 4 : EP 励起 MHD 不安定性の ECH に対する応答



[2]。図4はECHパワーを変化させたときのEP励起MHD不安定性の磁場スペクトルの様子を示している。観測されたGAEやEPMなどのEP励起MHD不安定性がECHパワーを大きくすることで揺動強度が減少しているのがわかる。一般的にECH加熱による電子温度上昇で高速イオン圧力は増加するため、揺動強度は増加すると思われるが、それとは逆に、安定化の傾向が見られたことは興味深く、ECHに対する応答をもとに、EP励起MHD不安定性の励起・減衰の物理機構を明らかにできるものと考えている。

### 3.3 NBI プラズマにおける閉じ込め改善 (H-mode) の観測

Heliotron Jは冒頭でも述べたとおり、ベータ値の上昇に伴い捕捉粒子閉じ込めの改善が期待される。高ベータ化のためには高密度プラズマ生成のシナリオ構築が必要である。本節では、NBI加熱を利用した高密度プラズマ生成を目指した粒子補給法(高強度ガスパフ法:HIGP)を用いた結果について述べる。

HIGP法では通常の放電で粒子補給として用いるピエゾバルブを利用し、10-20ms程度の短い時間に通常の数倍程度のガス供給量を行い、その後ガス供給を遮断する[7]。この利点として、ピエゾバルブはトラス4カ所に設置されており、トラス方向に均等なガス供給が期待されること、ガス供給後の水素リサイクリング低減により放射損失や荷電交換損失を低減できる事が挙げられる。適切なHIGPによるガス供給を行うと、HIGP後に蓄積エネルギーの増加が観測された(図5)。この時、粒子補給を停止しているにもかかわらず、プラズマ密度の増加が見られた。同時にH<sub>α</sub>線強度の急峻な低下が観測されており、閉じ込め改善を示唆するH-mode遷移と考えられる。

HIGP導入前とH-mode遷移後を比較すると、周辺部に急峻な密度勾配が観測され、周辺部での電子温度の回復も観測された。その結果、r/a = 0.8での電子圧力はHIGP前後で5倍増加した。このような高密度放電では、周辺部において急峻な径電場シアが形成されており(図6参照)、これが輸送の改善・H-mode遷移につながったと想定される[8]。

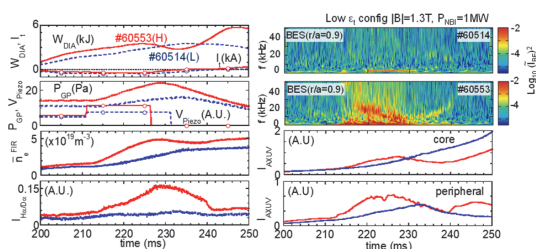


図5:HIGPを用いた高密度プラズマ放電波形。適切なガス供給を行った放電(#60553)ではH-mode遷移が観測された。

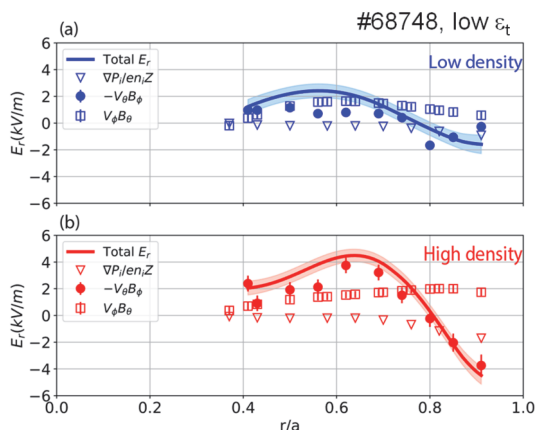


図6:HIGP放電における径電場の空間分布。高密度時に周辺部で径電場のシアが形成されている。

### 3.4 非共鳴マイクロ波による予備電離手法の開発と運転領域の拡大

ベータ値は磁気圧力に対するプラズマ圧力の比であるため、磁気圧力を下げる、すなわち低い磁場強度での運転が可能であれば高ベータ化に有利である。一方で、Heliotron Jの実験では、これまで70GHz第2高調波ECH加熱で磁場強度が1.25Tに制限されていたため、磁場強度に依らない新しい着火手法が求められていた。本節では2.45GHzの非共鳴マイクロ波を利用した予備電離を活用し、NBIプラズマ放電につなげる運転シナリオについて述べる[9][10][11]。

図7に非共鳴マイクロ波を用いた予備電離生成と、続くNBI放電波形を示す。マイクロ波の入射とともに70GHz帯のラジオメータ信号と電子密度が10<sup>18</sup>m<sup>-3</sup>オーダーの種プラズマが観測された。ラジオ



メータ信号は光学的厚さからシンクロトロン放射と想定され、そのスペクトルから 2MeV を超える高速電子生成が予想される。一方で、炭素イオン・酸素イオンの発光強度信号からバルクの電子の温度は 10eV 程度であると推測され、温度が 2 成分になっている。高速電子の生成メカニズムとしてマイクロ波電界による統計的な加速が予想され、これは磁気圏・宇宙プラズマでも観測されるユニバーサルな現象である。NBI 入射とともに密度の増加・電子加熱が促進し、軽元素不純物の輻射障壁を超えたプラズマ生成が確認された。その後、強いガス供給を与えると、 $10^{19}\text{m}^{-3}$  オーダーの高密度プラズマ生成に成功している。この手法を利用することで 0.6T から 1.4T までの放電が可能となっており、高ベータ化および磁場強度に対する輸送の依存性研究への発展が期待される。

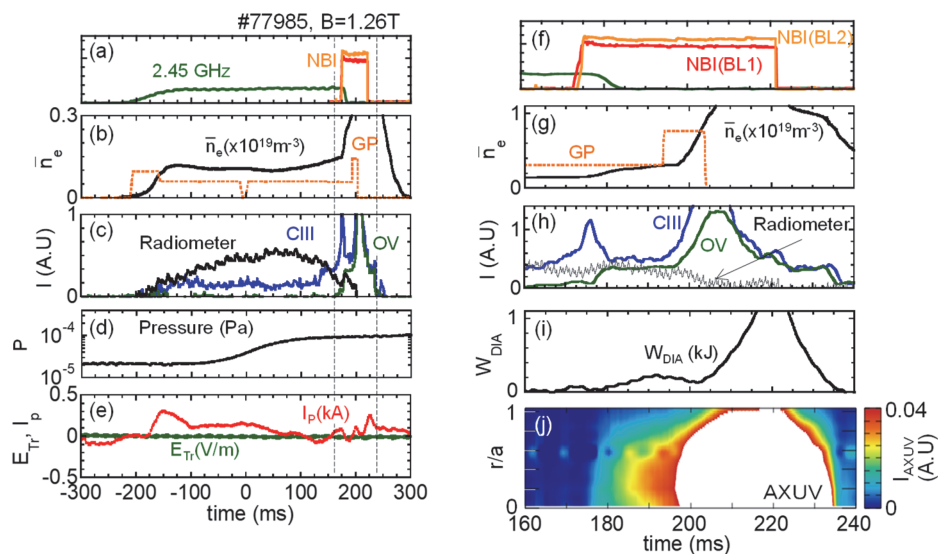


図 7：非共鳴マイクロ波を用いた予備電離と NBI プラズマ着火の放電波形。

#### 4. まとめ

本記事では、核融合実験装置 Heliotron J の概要、及び、最近の幾つかの成果について報告した。Heliotron J 装置は準等磁場配位概念を取り入れた先進磁場配位であるヘリカル軸ヘリオトロン配位を有しており、磁場配位最適化のために各磁場コイルに独立した電源を持たせ、磁場分布制御の大きな自由度を拡大することで、ヘリカル磁場最適化における新しい領域の拡大とフレキシブルな実験を可能とした。こうした設計思想がプラズマ実験において多くの成果を生み出すことにつながっている。

本研究を実行するにあたっては、核融合科学研究所との双方向型共同研究といった国内共同研究だけでなく、米国、ドイツ、スペインなどの大学・研究機関との国際共同研究も大きな役割を果たしている。また、一昨年度より JSPS の研究拠点形成事業 [12] を展開しており、国際共同研究の拠点化を目指している。実験・理論解析を通じて、さらなる磁場最適化、そして、トロイダルプラズマ物理のより総合的な理解を深め、優れた核融合炉への展望を開きたいと考えている。特に、局所プラズマ計測のさらなる高度化、プラズマ分布制御技術の高度化を図り、磁場分布制御性を活用したプラズマ輸送改善とプラズマ構造形成制御の研究を推進してゆく予定である。

#### 謝辞

本稿をまとめるにあたり、Heliotron J グループ、多くの国内外の共同研究者の方々のご協力に深く感謝いたします。Heliotron J 実験を遂行するにあたり、京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合

機構研究センター共同研究、核融合科学研究所双方向型共同研究（特にNIFS10KUHL030）、JSPS「研究拠点形成事業（A.先端拠点形成型）」"PLADyS"、「自然科学研究における機関間連携ネットワークによる拠点形成事業」、科学研究費補助金、Coordinated Working Group Meeting（CWGM）、他の支援を受けました。ここに感謝の意を表します。

- [1]. 長崎百伸, 他、プロジェクトレビュー「Heliotron J 実験」、J. Plasma Fusion Res. 96 (2020) 475
- [2]. K. Nagasaki, et al., 28th IAEA Fusion Energy Conference, 10–15 May 2021, Virtual Event, EX/P6-34
- [3]. P. Adulsiriswad, et al., Nucl. Fusion **60** (2020) 096005
- [4]. P. Adulsiriswad, et al., Nucl. Fusion **61** (2021) 116065
- [5]. S. Yamamoto, et al., Nucl. Fusion **57** (2017) 126065
- [6]. S. Yamamoto, et al., Nucl. Fusion **60** (2020) 066018
- [7]. S. Kobayashi, et al., 26th IAEA Fusion Energy Conference, 17–22 October 2016, Kyoto Japan EX/P8-17
- [8]. X. Lu, et al., Plasma Fus. Res, **13** (2018) 1202077
- [9]. S. Kobayashi, et al., Nucl. Fusion, **51** (2011) 62002
- [10]. S. Kobayashi, et al., Plasma Phys. Control. Fusion, **62** (2020) 065009
- [11]. S. Kobayashi, et al., Nucl. Fusion, **61** (2021) 116009
- [12]. PLADyS Homepage, <http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/pladys/>