

Advanced Plasma Energy Research Section

K. Nagasaki, Professor
 S. Kobayashi, Associate Professor
 Shinichiro Inagaki, Assistant Professor

1. Introduction

The advanced plasma energy research section aims to study the properties of high-temperature plasmas to control and improve plasma energy confinement from the physical standpoint of nuclear fusion research. The experimental and theoretical investigations for optimizing the helical-axis heliotron configuration are in progress under collaboration with other groups of international/national institutes and groups of other to optimize the helical-axis heliotron configuration are in progress in collaboration with other groups at international/national institutes and universities under the auspices of the Collaborative Research Program of NIFS (National Institute for Fusion Science) and IEA Stellarator-Heliotron agreement.

In this report, remarkable results obtained in the Heliotron J experimental study in FY2025 are reported, focusing on development in the plasma diagnostic systems with special regard to (1) dual Doppler reflectometry for radial electric field measurements and (2) 320GHz interferometer for high electron density measurement.

2. Dual Doppler reflectometry for radial electric field measurements

To confine plasma for extended periods, suppressing vortices that inhibit confinement is crucial. Vortices are suppressed by shear flow induced by $E_r \times B$ drift arising from the shear of radial electric field E_r . In previous research, the E_r shear was measured using a microwave Doppler reflectometer at Heliotron J, clarifying its existence and dependence on magnetic islands¹. However, no simultaneous measurement with electron density fluctuations was achieved. In this study, we have measured shear and electron density fluctuations in plasmas using the Doppler reflectometer. We have verified the suppression effect of vortices by the E_r shear by comparing cases with and without confinement improvement.

Figure 1 (a) shows a schematic diagram of the Doppler reflectometer system used in this study. The system employed in this reflectometer uses three reflectometers, enabling measurement of poloidal flow at three distinct locations within the same poloidal cross-section. The dual reflectometers positioned at the top and bottom of the plasma operate in the Ka-band (26.5-40 GHz) with O-mode incidence, while the Doppler reflectometer positioned laterally

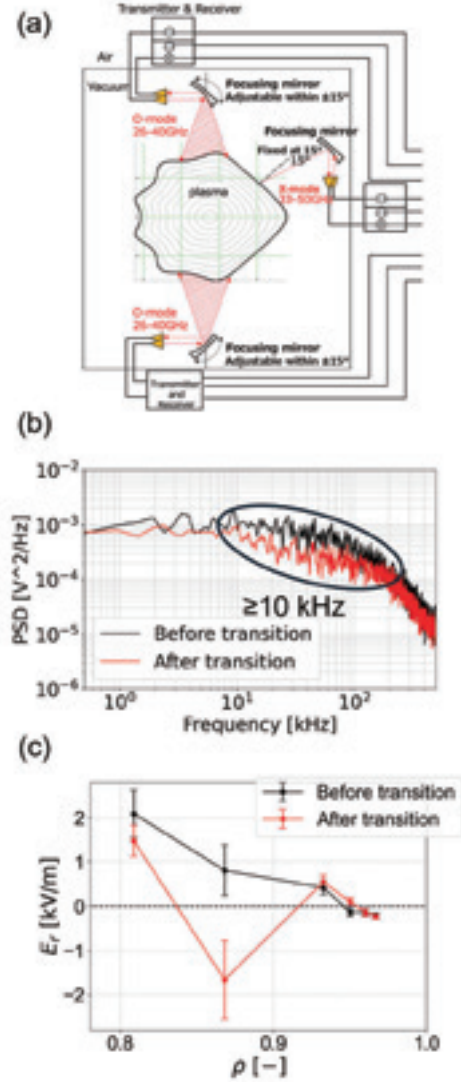


Fig. 1. (a) the schematic of the Doppler reflectometer system, (b) the spectra of the scattered wave intensity signal (proportional to electron density fluctuations) measured by the upper port reflectometer, and (c) E_r profile before and after the transition.

operates in the Q-band (33-50 GHz) with X-mode incidence.

In plasma experiments, we have measured the E_r distribution and electron density fluctuations in magnetic field configurations in which the spontaneous transition occurs, comparing the states before and after transition. Figure 1 (b) shows the spectra of the scattered wave intensity signal

(proportional to electron density fluctuations) measured with the upper port reflectometer before and after the transition. After the transition, a slight decrease in the high-frequency fluctuation component (above 10 kHz) is observed. Figure 1 (c) shows the E_r profile before and after the transition as a function of the normalized minor radius ρ . We clearly observed an enhancement of E_r shear after the transition. The simultaneous occurrence of enhanced E_r shear and reduced density fluctuation at the same point provides results consistent with the vortex suppression model driven by the E_r shear.

3. 320GHz interferometer for high electron density measurement

Precise electron density measurement is essential for high-density plasma experiments. A single-channel 320 GHz heterodyne interferometer has been developed to extend the measurable density range beyond that of the conventional 130 GHz system². However, stable measurement was difficult with the original optical system because the probe beam suffered from excessive beam expansion and truncation loss during propagation, resulting in a low signal-to-noise ratio and strong sensitivity to optical misalignment.

Gaussian beam analysis showed that, in the original system, the beam diameter became nearly equal to the aperture of the concave mirror on Optical Bench B and expanded to about 80 mm at the vacuum vessel port window, although the available aperture of the window was only 50 mm. To overcome these problems, the probe-beam optical system was redesigned by optimizing the optical layout, reducing the number of flat mirrors, changing the focal lengths of key concave mirrors, and enlarging the mirror aperture on Optical Bench B. As a result, the beam expansion was effectively suppressed, and the transmission efficiency was improved. The upgraded system was evaluated using Gaussian-beam simulations and imaging-camera measurements, which showed good agreement across most observation points. Using the improved system, electron density measurements were successfully carried out in high-density and pellet-injection discharges. In the high-density regime, the 320 GHz interferometer measured the density evolution without phase collapse, whereas the conventional 130 GHz interferometer exhibited fringe jumps. These results demonstrate that the improved 320 GHz interferometer provides more reliable electron density measurements in high-density plasmas on Heliotron J.

Figures 2(a) and (b) are Gaussian beam propagation before and after the optical redesign of the 320 GHz interferometer. In the original system, excessive beam expansion caused severe truncation near Optical Bench B and at the vacuum vessel port window,

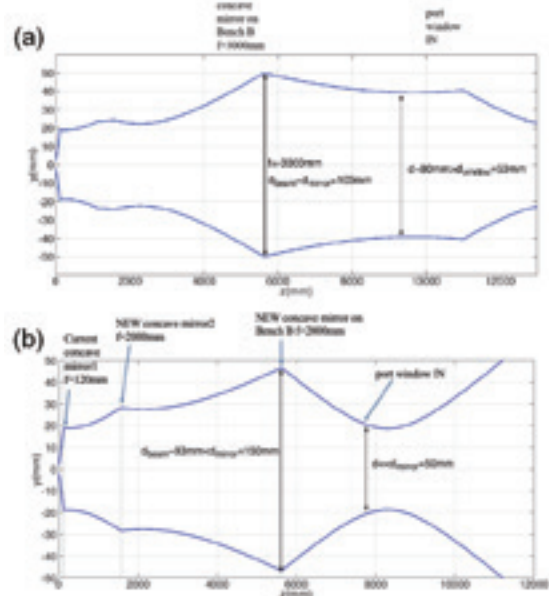


Fig. 2. Gaussian beam propagation simulations; (a) Before improvement and (b) after improvement.

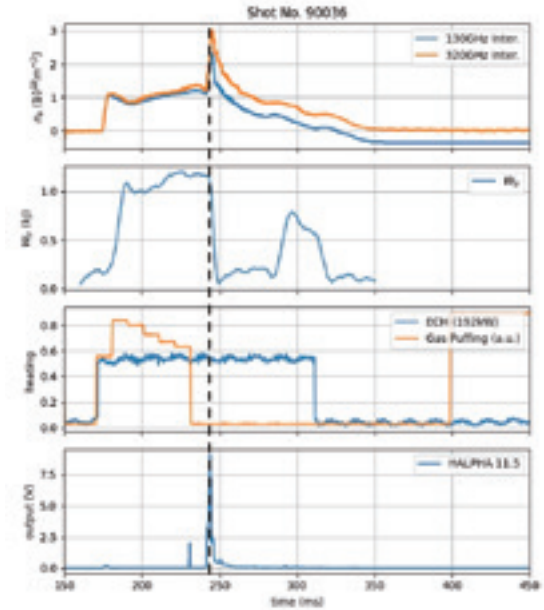


Fig. 3. Time evolution of electron densities measured in a pellet injection experiment.

whereas the improved design suppressed the beam expansion and improved the transmission efficiency.

Figure 3 shows the time evolution of electron density measured with the improved 320 GHz interferometer and the conventional 130 GHz interferometer in a pellet injection experiment. The 320 GHz system measured the density evolution without phase collapse, whereas the 130 GHz system exhibited fringe jumps in the high-density phase.

[1] Y Kondo, et al., Plasma Phys. Control. Fusion **67** 075027 (2025).

[2] P. Zhang, et al., Rev. Sci. Instr., **94**, 093501, (2023).

Collaboration Works

長崎百伸, 小林進二, 稲垣泰一郎, 稲垣滋, 門信一郎, 金史良, Univ. Wisconsin (アメリカ), Oak Ridge National Laboratory (アメリカ), Max Plank Institute (ドイツ), Stuttgart Univ (ドイツ), CIEMAT (スペイン), Australian National Univ. (オーストラリア), Kharkov Institute (ウクライナ), Southwest Institute of Physics (中華人民共和国), 先進ヘリカルシステムにおける周辺プラズマ・ダイバータ研究

長崎百伸, 西南物理研究所 (中華人民共和国), IPP, Greifswald (ドイツ), University of Wisconsin (アメリカ), 先進ヘリカルシステムにおける反射計を用いた電子密度・揺動解析

長崎百伸, IPP, Greifswald (ドイツ), 先進ヘリカルシステムにおける電子サイクロトロン電流駆動

長崎百伸, 小林進二, 稲垣泰一郎, 稲垣滋, 門信一郎, 金史良, Wisconsin University (アメリカ), CIEMAT (スペイン), Max-Planck Institute (ドイツ), 先進ヘリカルシステムにおける周辺揺動解析

長崎百伸, 小林進二, 稲垣泰一郎, 稲垣滋, 門信一郎, 金史良, Stuttgart Univ. (ドイツ), CIEMAT (スペイン), 先進ヘリカル磁場配位の最適化に向けたネットワーク拠点形成

小林進二, 長崎百伸, 稲垣滋, 門信一郎, 金史良, 稲垣泰一郎, CIEMAT (スペイン), Kurchatov Institute (ロシア), ORNL (アメリカ), 先進ヘリカル磁場配位の最適化に向けたネットワーク拠点形成

小林進二, IPP, Greifswald (ドイツ), Kharkov Institute (ウクライナ), 非共鳴マイクロ波による確率的電子加速とプラズマ着火への応用研究

小林進二, 核融合科学研究所 一般共同研究, ヘリオトロン型磁場配位を利用した統計加速の実験室シミュレーションの検討

小林進二, 核融合科学研究所 課題提案型共同研究, 実験室プラズマにおける波動粒子相互作用と天体・宇宙プラズマ連携

Financial Support

1. Grant-in-Aid for Scientific Research

長崎百伸, 基盤研究(A), 外部アクチュエータを用いた高エネルギー粒子励起 MHD 不安定性の制御

小林進二, 基盤研究(A), 外部アクチュエータを用いた高エネルギー粒子励起 MHD 不安定性の制御 (分担金)

稲垣泰一郎, 特別研究員奨励費, 三次元計測法を用いたトーラスプラズマの空間構造の自発的形成過程の解明

稲垣泰一郎, 基盤研究(C), マルチピンホールイメージングとデータ同化によるプラズマの三次元分布推定手法の開発 (分担金)

稲垣泰一郎, 国際共同研究加速基金 (海外連携研究), 複合プローブを用いたトカマク及び RFP プラズマ内の自己組織化 2 流体平衡の国際共同実験 (分担金)

2. Others

長崎百伸, 大学共同利用機関法人自然科学研究機構, 令和 7 年度基盤施設型共同研究

長崎百伸, 三菱電機株式会社, 大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所, 非開示

Publications

K. Ogihara, Shigeru Inagaki, S. Kado, R. Matsutani, G. Motojima, S. Kobayashi, F. Kin, S. Ohshima, T. Minami, S. Konoshima, T. Mizuuchi, H. Okada, K. Nagasaki, Dynamics of plasma reconfiguration after pellet injection in Heliotron J, Scientific Reports, 15, 16503, 2025

Y. Kondo, K. Nagasaki, S. Ohshima, K. Inoshita, D. Kuwahara, R. Matsutani, Y. Yamanaka, S. Kobayashi, S. Kado, Shigeru Inagaki, F. Kin, H. Okada, T. Mizuuchi, S. Konoshima, T. Minami, Effect of Edge Magnetic Islands on Poloidal Flow in Electron Cyclotron Heated Heliotron J Plasmas, Plasma Physics and Controlled Fusion, 67, 7, 075027, 2025

F. Kin, Y. Kondo, M. Sasaki, A. Miyashita, R. Matsutani, K. Ozawa, T. Kodahara, S. Kobayashi, T. Minami, S. Kado, S. Ohshima, A. Matsuyama, T. Mizuuchi, S. Konoshima, S. Inagaki, K. Nagasaki, Investigation of low-frequency fluctuation modulating turbulence during L-H transition in Heliotron J, Physics of Plasmas, 32, 072510, 2025

J. Varela, K. Nagaoka, S. Ohdachi, K.Y. Watanabe, Y. Takemura, Y. Narushima, T. Tokuzawa, K. Tanaka, K. Ida, Y. Todo, M. Yoshinuma, R. Seki, K. Nagasaki, S. Kobayashi, P. Adulsiriswad, S. Yamamoto, D.A. Spong, L. Garcia, A. Cappa, Y. Ghai, J. Ortiz, W.A. Cooper, X. Du, S. Sharapov, F.L. Waelbroeck, B. Breizman, D. Zarzoso, C. Hidalgo, A. Azegami, Analysis of Energetic Particle Driven Modes and Interchange Modes in LHD Plasma Using the Gyro-Fluid Code FAR3d, Journal of Fusion Energy, 44, 57, 2025

Y. Zhong, K. Nagasaki, J. Chen, J., Energetic-particle-driven MHD instability in Heliotron J adjusted via key plasma parameter, Acta Physica Sinica, 75, 1, 010501, 2026

S.P. Reinhoudt, K. Nagasaki, J.H.E. Proll, F. Kin, Shigeru Inagaki, S. Kobayashi, S. Kado, Coherent MHD Behaviour in a Shallow Magnetic Well Configuration in Heliotron J, Plasma and Fusion Research, 21, 1202007, 2026

T. Matsuoka, S. Kobayashi, K. Morishita, H. Yoshikawa, Availability Analysis of Heliotron J by the GO-FLOW methodology with AI Technologies, IEEE ICIEA 2025, 2025

Presentations

K. Nagasaki, Machine Report from Heliotron J, 25th CWGM, オンライン, 2025.6.3-5

小林進二, 磁場閉じ込め核融合装置における統計加速の統計数理解析, NINS OML 事業「統計数理解核融合学の創成と展開」キックオフ会合, 統計数理解研究所, 2025.6.17-18

Shinichiro Inagaki, S. Kobayashi, K. Nagasaki, S. Ohshima, Dynamics of Energetic-Particle-Driven Density Fluctuations in Heliotron J via Two-Dimensional Beam Emission Spectroscopy Measurement, 29th MHD Workshop, Princeton Univ., 2025.7.23-25

小林進二, 磁場閉じ込め核融合装置における統計加速現象の統計数理解析, 統計数理解研究所 共同研究集会「諸科学における統計思考」, 統計数理解研究所, 2025.7.29-30

小林進二, 宇宙統計加速の実験室模擬システムの開発と統計解析によるベキ則形成過程の解明, 2025 年度統計関連学会連合大会, 関西大学, 2025.9.7-11

小林進二, 本武陽一, 奥野彰文, 田中賢, 山戸瞭雅, 長崎百伸, 稲垣滋, 松山顕之, 畑知秀, 門信一郎, 金史良, 稲垣泰一郎, 中村祐司, 木島滋, 水内亨, ヘリオトロン J 統計加速実験で観測されるベキ関数型電子エネルギースペクトルの動力学, 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学, 2025.9.16-19

小林進二, 本武陽一, 奥野彰文, 田中賢, 山戸瞭雅, 長崎百伸, 稲垣滋, 松山顕之, 畑知秀, 門信一郎, 金史良, 稲垣泰一郎, 中村祐司, 木島滋, 水内亨, ヘリオトロン型磁場配位を用いた統計加速で観測されるベキ分布の動力学, 第 42 回プラズマ・核融合学会年会, 京都工芸繊維大学, 2025.12.1-4

内山拓音, 中塚大介, 長崎百伸, 桑原大介, 小林進

二, 稲垣泰一郎, 木島滋, 水内亨, 近藤恭斗, Heliotron J におけるマイクロ波ドップラー反射計を用いた径電場と電子密度揺動の計測, 第 42 回プラズマ・核融合学会年会, 京都工芸繊維大学, 2025.12.1-4

C. Wang, FDTD 法を用いた磁化プラズマ中におけるミリ波渦のトポロジカルチャージ依存性の検討, 第 42 回プラズマ・核融合学会年会, 京都工芸繊維大学, 2025.12.1-4

山戸瞭雅, 小林進二, 本武陽一, 田中賢, 奥野彰文, 長崎百伸, 稲垣滋, 畑知秀, 門信一郎, 金史良, 松山顕之, 木島滋, 水内亨, 稲垣泰一郎, 永岡賢一, 川手朋子, ヘリオトロン型閉じ込め配位における統計加速の電子シミュレーション, 第 42 回プラズマ・核融合学会年会, 京都工芸繊維大学, 2025.12.1-4

S. Kobayashi, Shinichiro Inagaki, K. Nagasaki, S. Kado, F. Kim, S-I. Inagaki, Y. Nakamura, A. Matsuyama, S. Ohshima, T. Minami, C. Wang, K. Ogihara, A. Miyashita, R. Matsutani, C. Feng, R. Yamato, P. Adulsiriswad, M. Yoshikawa, N. Kenmochi, Y. Shirasawa, T. Tatsuno, S. Konoshima, T. Mizuuchi, Confinement and Transport Study in Three-dimensional Magnetic Configuration of Heliotron J, 14th Asia Plasma and Fusion Association Conference, 名古屋, 2025.12.15-17

小林進二, 磁場閉じ込めプラズマにおける統計加速〜ベキ分布のダイナミクス〜, 第 24 回 ERG サイエンス会議および名大 ISEE 研究集会, 名古屋大学, 2026.3.5-6

小林進二, 磁場閉じ込めプラズマにおける統計加速, 統計数理解研究所 共同研究集会「諸科学における統計思考」, 統計数理解研究所, 2026.3.19-20

小林進二, 本武陽一, 田中賢, 奥野彰文, 山戸瞭雅, 畑知秀, 久保田燿丞, 長崎百伸, 稲垣滋, 松山顕之, 中村祐司, 門信一郎, 金史良, 稲垣泰一郎, 木島滋, 水内亨, 統計加速の実験室模擬で観測されるベキ分布形成のダイナミクス, 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン, 2026.3.23-26

馮超, 門信一郎, 蔡福瑞, 大石鉄太郎, 稲垣滋, 金史良, 松谷遼, 小林進二, 稲垣泰一郎, 松山顕之, 石澤明宏, 木島滋, 水内亨, 長崎百伸, EMC3-EIRENE シミュレーションと組み合わせたヘリオトロン J における EUV 分光診断線積分計測からの空間分布再構成, 日本物理学会 2026 年春季大会, オンライン, 2026.3.23-26

羅茂原, 長崎百伸, 金史良, 小林進二, 門信一郎, 木島滋, 岡田浩之, 水内亨, Analysis of a Coherent Te Fluctuation with ECE Diagnostics in Heliotron J, 日本

物理学会 2026 年春季大会, オンライン, 2026.3.23-26

門信一郎, 川向泰生, 本島巖, 荻原築, 稲垣滋, 四
竈泰一, 馮超, 蔡福瑞, 松谷遼, 金史良, 小林進二,
稲垣泰一郎, 松山顕之, 石澤明宏, 水内亨, 木島滋,
長崎百伸, ヘリオトロソ J における水素ペレット入
射後のリヒート現象を引き起こす溶発雲挙動の 2
次元可視高速分光診断を用いた観測, 日本物理学
会 2026 年春季大会, オンライン, 2026.3.23-26

長崎百伸, Y. Zhong, J. VarelaB, 小林進二, 稲垣滋,
門信一郎, 金文良, 稲垣泰一郎, 木島滋, 水内亨,
松山顕之, P. Adulsiriswad, C. Wang, Z. Wang, J. Chen,
Heliotron J における高エネルギー粒子励起 MHD 不
安定性の ECH 及び磁場配位に対する応答性, 日本
物理学会 2026 年春季大会, オンライン, 2026.3.23-
26

金史良, 宮下顕, 大島慎介, 稲垣滋, 小林進二, 門
信一郎, 松山顕之, 稲垣泰一郎, 木島滋, 水内亨,
長崎百伸, ヘリオトロソ J の SOL 領域における乱流
と輸送のダイナミクス, 日本物理学会 2026 年春季
大会, オンライン, 2026.3.23-26