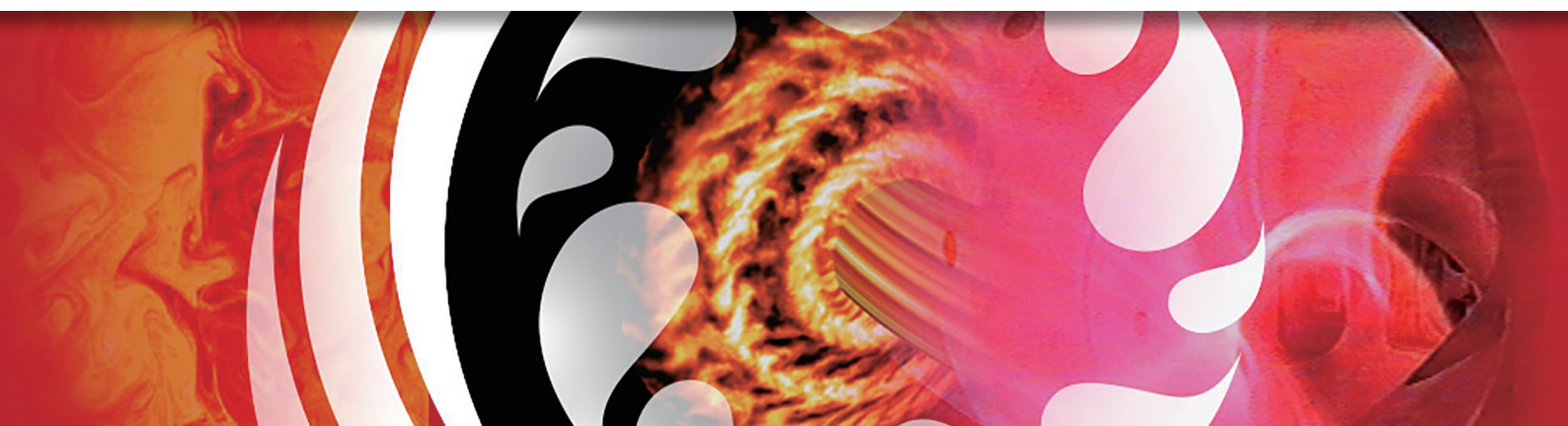


磁場の多様性が拓く 超高温プラズマダイナミクスと 構造形成の国際研究拠点形成

Advanced Core-to-Core Network for High-Temperature Plasma Dynamics
and Structure Formation Based on Magnetic Field Diversity (PLADyS)



CONTENTS

■ はじめに	1
■ 研究活動の紹介	2
■ 協力研究機関紹介	3
■ Activity — 研究交流活動 —	4
■ 交流手記（派遣・受入）	9
■ Achievements — 研究成果 —	19
■ Activity — 派遣・招聘等 —	23
■ メンバーリスト	24

はじめに

PLADyS 統括責任者

長 崎 百 伸



研究交流課題「磁場の多様性が拓く超高温プラズマダイナミクスと構造形成の国際研究拠点形成（Advanced Core-to-Core Network for High-Temperature Plasma Dynamics and Structure Formation Based on Magnetic Field Diversity、略称“PLADyS”）は、平成31年度に日本学術振興会研究拠点形成事業 A. 先端拠点形成型として採択され、5年間の予定で事業を進めています。この事業は、世界各国で行われている超高温プラズマ閉じ込め研究の成果を結集し、多様な閉じ込め磁場中の超高温プラズマで見られる乱流状態からの構造形成や高エネルギー粒子ダイナミクスの役割を精密実験と理論・シミュレーション解析によって比較・考察することで、自然界に存在する構造形成を理解する鍵となる新たな学理を創出する国際研究拠点の形成を目指すものです。

平成31年度（令和1年度）には、本研究課題に関連して多くの若手研究者・大学院生の派遣・受け入れを行いました。また、令和元年8月には彦根においてPLADyS国際サマースクールを開催しました。京都大学、九州大学、京都工繊大、名古屋大学、西南交通大学の学生、また、京都大学、核融合研、中部大学、Max-Planck Institute、Eindhoven University of Technology、University of Wisconsin-Madison、西南交通大学の教員が参加し、英語による講義やディスカッションを行いました。講師として、本島修・ITER名誉機構長をはじめ、国内外の著名な先生方をお招きし、超高温プラズマを取り巻く研究最前線に関してご講演いただきました。令和2年度はコロナ禍のため、残念ながら派遣・受け入れを行うことが困難な状況となりましたが、そういった状況下でも、Zoom等のオンラインを利用することで、遠隔実験による国際共同研究、国際サマースクール、国内セミナーを行っています。令和3年度には、5月と6月に国際PLADySセミナーを毎週開催し、90名を超える方に参加いただきました。また、8月には3回目となる国際サマースクールも開催しました。現在、オンラインによる国際共同研究等の準備を進めているところです。

これまで活動状況についてはウェブサイト <http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/pladys/index.html>（“PLADyS”で検索）で随時公開していますので、どうぞご参照ください。今後も、磁場の多様性が拓く超高温プラズマダイナミクスと構造形成の国際拠点形成に向けた活動を進めてまいりますので、ご協力の程よろしくお願い申し上げます。

磁場閉じ込め核融合プラズマをはじめとする超高温プラズマ中では、自然界においても普遍的に見られる様々な「構造形成」が起き、その構造形成が超高温プラズマを新たな閉じ込め状態へと遷移させることがあります。この構造形成の発現メカニズム理解の鍵となるのが、プラズマ中の乱流と高エネルギー粒子のダイナミクスです。磁場により閉じ込められた超高温プラズマでは流体的な振る舞いと粒子的な振る舞いが共存し、(1) 閉じ込め磁場とプラズマが電磁力を介した強い非線形結合を起こすこと、(2) 核融合反応により生成されるアルファ粒子のように熱平衡状態から遠く離れた高エネルギー粒子との波—粒子共鳴相互作用、といった中性流体とは著しく異なる特性が現れます。これらの現象が複雑に絡み合うことにより、微視的な渦を伴う乱流状態から巨視的な自発流が形成され、超高温プラズマ中にある種の「構造」が作り出されます。一方、近年の実験結果から、これらの構造形成現象が、超高温プラズマを閉じ込める磁場の三次元構造により制御できる可能性が明らかになりつつあります。

これまで、超高温プラズマに関する多様な物理研究に関して国際共同研究体制を構築してきました。その中から、京都大学を研究統括拠点機関として、マックスプランク・プラズマ物理研究所（ドイツ）、ウィスコンシン大学マディソン校（米国）、西南交通大学（中国）をそれぞれの国における拠点研究機関とした「超高温プラズマダイナミクスと構造形成に関する国際研究拠点コンソーシアム」の構築を目指しています。本コンソーシアムを構成する拠点機関は、超高温プラズマ中の乱流現象および高エネルギー粒子ダイナミクスの研究で世界をリードする研究機関である。さらに、それぞれの拠点機関は各極内の研究協力機関を置き、拠点機関と連携しながら研究を深化させ、またそれぞれの成果を統合することにより、構造形成という難問に挑んでいます。

日本側コーディネーター Japanese Coordinator

- ・長崎百伸 京都大学エネルギー理工学研究所・教授

Prof. Kazunobu NAGASAKI, Institute of Advanced Energy, Kyoto University

相手国コーディネーター Counterpart Coordinators

- ・David ANDERSON 教授, ウィスコンシン大学マディソン校（米国）

Prof. David ANDERSON, University of Wisconsin-Madison, U.S.A.

- ・Thomas KLINGER 教授, マックス・プランク・プラズマ物理研究所（ドイツ）

Prof. Thomas KLINGER, Max-Planck Institute for Plasma Physics, Germany

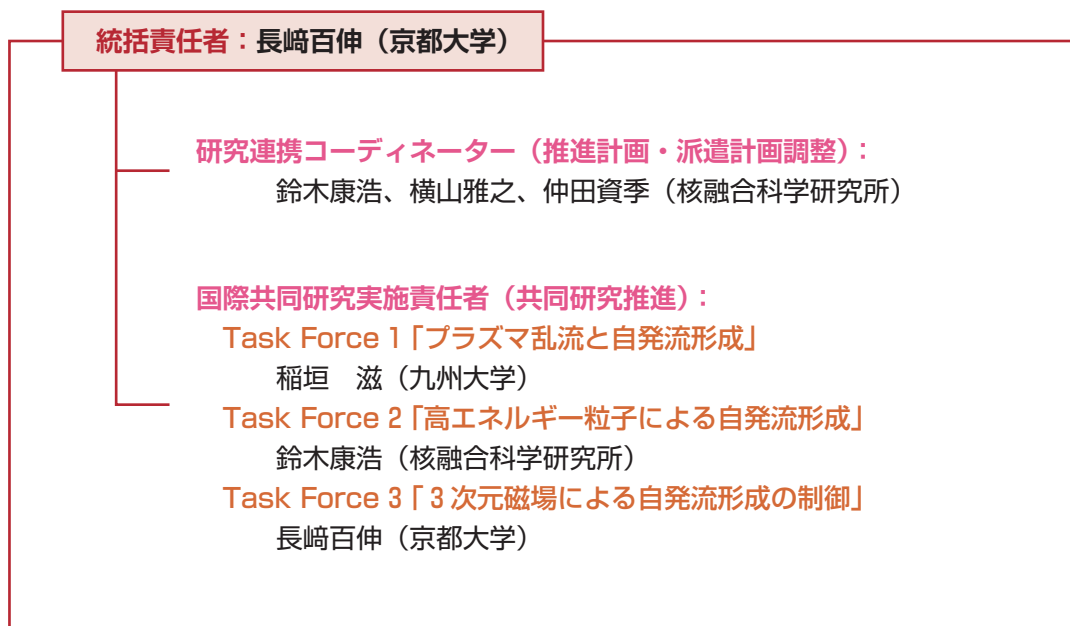
- ・Yuhong XU 教授, 西南交通大学（中国）

Prof. Yuhong XU, Southwest Jaotong University, China

研究拠点実施体制



国内推進体制



国際セミナー

2020 年度

- 4.22 “Recent progresses of understanding 3D equilibrium and high-beta plasma” (113名が参加)
- 5.13 “Fueling Pellets and Impurity injection” (85名が参加)
- 6. 3 “Divertor Physics” Marcin Jakubowski (IPP, Greifswald, Germany) が講演 (132名が参加)
- 6.10 “Impurity transport” Novimir Pablant (Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton, USA) が講演 (102名が参加)
- 6.17 “3D turbulence” Motoki Nakata (NIFS・PLADyS 研究連携コーディネーター) が講演 (98名が参加)
- 6.24 “Fast ion” Samuel Lazerson (IPP, Greifswald, Germany) が講演 (89名が参加)
- 7. 1 “Scaling and operation limits” G. Fuchert (IPP, Greifswald), “Tokamak cooperation” Y. Suzuki (NIFS・PLADyS 研究連携コーディネーター) で講演 (101名が参加)
- 7. 8 Novimir Pablant (PPPL, USA), Andreas Dinklage (IPP, Germany), Naoki Tamura (NIFS, Japan), Jose Marcia Regana (CIEMAT, Spain) が各タスクグループのサマリを行い、今後の国際共同研究の進め方について議論しました。(71名が参加)

2021 年度

- 5.19 “Isotope effect on electron internal transport barrier and role of radial electric field” T. Kobayashi (NIFS, Japan), “Observation of spatiotemporal dynamics of multiple instabilities in linear magnetized plasma using conditional sampling techniques” Y. Kawachi (Kyushu Univ., Japan) が講演 (64名が参加)
- 5.26 “Improving Energetic Particle Confinement in Stellarators” A. Bader, Univ. (Wisconsin-Madison, U.S.A.), “TEM turbulence in simulation and experiment with and without quasi-symmetry in the HSX stellarator” J. Smoniewski (Univ. Wisconsin-Madison, U.S.A.) が講演 (75名が参加)
- 6. 9 “Suppression of Pseudo Symmetric Field Induced α -particle Loss Channels in a Quasi-axisymmetric Stellarator” H. Liu (SWJTU, China), “Three-dimensional equilibrium with magnetic islands and MHD instabilities in the CFQS quasi-axisymmetric stellarator” X. Wang (SWJTU, China) が講演 (42名が参加)
- 6.16 “Heat transport in stellarators: A zero sum game?” F. Warmer (IPP, Greifswald, Germany), “Turbulent Transport and Plasma Profiles in the Island Divertor SOL of W7-X” Y. Narbutt (IPP, Greifswald, Germany) が講演 (95名が参加)

国際サマースクール

2019 年度

2019年8月9-10日にかんぽの宿（滋賀県彦根市）で開催しました。

学生17名（京都大学、九州大学、京都工繊大、名古屋大学、西南交通大学）、教員11名（京都大学、核融合研、中部大学、Max-Planck Institute、Eindhoven University of Technology、University of Wisconsin-Madison、西南交通大学）が参加しました。



講演内容

A. Dinklage (IPP Greifswald)

“Results from the first experimental campaigns of Wendelstein 7-X”

O. Motojima (President of Future Energy Research Association, Board of Trustees member, Chubu Univ.)

“High-Temperature Superconducting DC Transmission Technology brings a Paradigms Shift in Energy System and Society”

J. Proll (Eindhoven Univ. Technol.)

“Turbulence in Fusion Plasmas”

D J Den Hartog (Univ. Wisconsin-Madison)

“Overview of Plasma Diagnostic Techniques”

Presentation by PhD Students

K. Kawachi (Kyushu Univ.)

“Observation of spatiotemporal structures of temperature and density fluctuations in cylindrical magnetized plasma”

G. Xiong (SWJTU)

“Structural Analysis of CFQS Supporting Structure”

R. Matoike (Kyoto Univ.)

“EMC3-EIRENE modeling of the peripheral plasmas with various magnetic configurations in Heliotron J”

2020 年度

2020年8月8日にZoomで未来エネルギー研究協会と共催でサマースクールを開催しました。参加学生は、東北大学、東海大学、東京大学、京都工芸繊維大学、名古屋大学、総合研究大学院大学、京都大学、大阪大学、九州大学から、修士課程・修士課程の大学院生、合わせて51名の学生の方々に参加いただきました。

Zoom参加形式をとることで昨年よりも格段に多くの学生の方々に参加いただきました。



講演内容

田中照也博士・核融合科学研究所准教授

「核融合炉発電ブランケットシステムの開発研究」

Dr. Bernard Bigot, Director General/Chief Executive Officer of the ITER Organization

“Hydrogen fusion, an option for the world energy supply during 21th century”

Dr. Michael Tendler, Professor Emeritus, KTH Royal Institute of Technology, Sweden

“Fusion Energy Past, Present and Future”

学生プレゼンテーション

2021 年度

2021年8月6日、7日にZoomで未来エネルギー研究協会と共催でサマースクールを開催しました。東京大学、京都工芸繊維大学、名古屋大学、総合研究大学院大学、京都大学、九州大学から、学部学生、修士課程・博士課程の大学院生合わせて68名の方々に参加いただきました。



■ 講演内容

August 6th (Fri), 2021

Dr. Hideshi Hanamura (KEPCO)

“A thermal power station based on hydrogen (tentative)”

Dr. Kazuaki Kitoh (Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.)

“Development of Small light water reactor (tentative)”

Dr. Matthias Hirsch (Max Planck Institute for Plasma Physics • BRD)

“Concept and status of the Wendelstein 7-X project”

Prof. Guido Van Oost (Ghent University • BEL)

“A new IAEA textbook about Fundamentals of Magnetic Fusion Technology”

August 7th (Sat)

Dr. Oliver Schmitz (University of Wisconsin-Madison • USA)

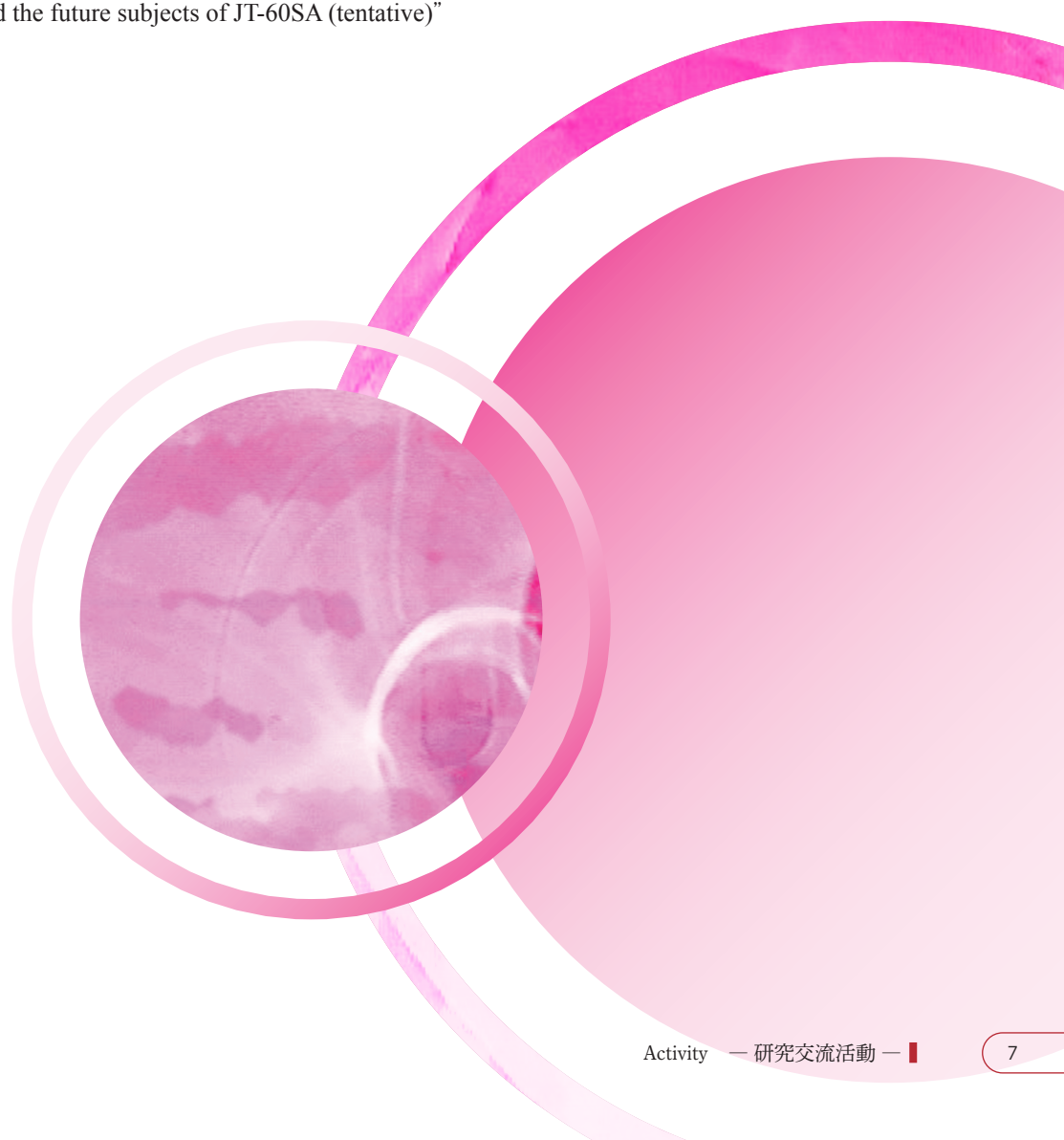
“Plasma edge physics in toroidally symmetric and 3D plasma edge layers”

Information of poster session

Poster session by students

Dr. Maiko Yoshida (QST, Naka-institute)

“The present status and the future subjects of JT-60SA (tentative)”



国内セミナー

2020 年度

3. 3 京都大学から長崎百伸、小林進二、大島慎介、NIFSから岡村昇一、永岡賢一、小林達哉、林祐貴、鈴木康浩が発表を行い、磁場最適化に関する議論を行いました。

PLADySセミナー JSPS研究拠点形成事業「磁場の多様性が拓く超高温プラズマダイナミクスと構造形成の国際研究拠点形成」

NIFS研究会「次世代先進ヘリカル配位開発に向けたヘリカル研究の現状と展望」
(共催)

日時：2021年3月3日（水）13:00-17:20

場所：Zoom

13:00-13:10 はじめに

長崎百伸（京大）

13:10-13:40 「ヘリオトロンJ磁場配位制御実験の拡張」

大島慎介（京大）

13:40-14:10 「ヘリオトロンJ配位のベータ効果：実験的にどのように検証するか？」

小林進二（京大）

14:10-14:40 「NIFS国際共同プロジェクトNSJPの現状とCFQS装置の磁場配位設計」

岡村昇一（NIFS）

14:40-15:00 Coffee break

15:00-15:30 「帯状流の測地曲率依存性に着目した実験研究」

永岡賢一（NIFS）

15:30-16:00 「乱流抑制磁場配位ステラレータにおける統合乱流計測システムの導入検討」

小林達哉（NIFS）

16:00-16:30 「準対称ステラレータにおけるダイバータ配位制御」

林 祐貴（NIFS）

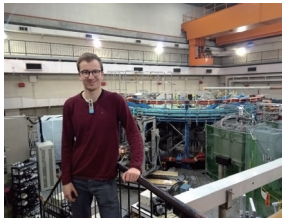
16:30-17:00 「最適化ステラレータにおける先進ダイバータ配位の検討」

鈴木康浩（NIFS）

17:00-17:20 磁場最適化に関する議論

研究会世話人および司会進行：仲田資季（NIFS）

Measurement of Radial Correlation Lengths of Electron Density Fluctuations in Heliotron J Using O-Mode Reflectometry



Eindhoven University of Technology · Msc. Student

Niels Smith

招へい期間：令和元年11月17日－令和2年2月28日

My internship at Heliotron J, a helical-axis heliotron, located at the Institute of Advanced Energy, Kyoto University, has been a very enriching experience. I have learned a lot about what it means to do experiments on a nuclear fusion reactor, raw data/signal processing and finally, reporting for a specific audience.

The project goal was to find the (radial) correlation length of broadband turbulence in the plasma edge using a two channel reflectometer system. This reflectometer system is able to send two (micro)waves into the plasma, which are then reflected when the cut-off densities for the frequencies of those specific waves is reached. This allowed us to measure electron density fluctuations at two different locations in the plasma, and then check for what separation distances these fluctuations would still correlate with each other.

The measurements were performed in Heliotron J, a helical-axis heliotron that can be used in multiple magnetic configurations, rather than only one optimized magnetic configuration. This means that many experimental conditions can be made, compared and contrasted. And, since Heliotron J is a stellarator type device, creating a helical shaped plasma, you may well realize that this is the most complex machine you have ever worked on in your whole life up to that point.

My professor at Heliotron J showed me how to troubleshoot the experimental set-up, e.g. when the magnetic coils of the reactor caused interference in the signals. The search for the component that failed, learned me a lot about the experimental set-up itself and it taught me that persistence is a necessary trait when you do experimental work. There is always a chance that components fail, especially when you are working with such an extreme device like a nuclear fusion reactor. But even if your setup is working and generating data, there is more to take care of: keeping overview of the data, judging the quality of the data and finally going into the data with a thorough analysis; it's all part of the deal! My professor made a remark about this notion that I found very true. He said that at any point, you will feel that you need more results. That your results are not 'complete', and it is the pursuit of exactly this completeness that drives you towards picking up the next research question and making that into a new project.

Working in a Japanese culture has helped me to understand that there are many ways, and not just my own, to achieve a certain goal. I will definitely take home these things I learned from the Japanese culture to use in my future! I therefore wish to thank my supervisors on both locations (Eindhoven and Kyoto) for everything they taught me and their guidance.

CFQS equilibrium calculated by HINT code with the bootstrap current



X. Q. Wang¹⁾, Y. Xu¹⁾, A. Shimizu²⁾, M. Isobe^{2), 3)}, S. Okamura²⁾,
Y. Todo²⁾, H. Wang²⁾

1) Institute of Fusion Science, School of Physical Science and Technology Southwest Jiaotong University,
Chengdu 610031, China

2) National Institute for Fusion Science, National Institutes of Natural Sciences, Toki, Gifu 509-5292, Japan

3) SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), Toki, Gifu 509-5292, Japan

招へい期間：令和元年 7 月 1 日 - 8 月 31 日

The equilibrium of Chinese First Quasi-axisymmetric Stellarator (CFQS) has been investigated by the HINT code. The result is in good agreement with the result of VMEC code. With increasing of plasma beta, the island structure is larger and larger near boundary regions. Particularly, when the volume averaged beta value $\langle\beta\rangle$ is large than 1 %, the boundary magnetic surface structure becomes very sharp due to the pushing of boundary islands. The large bootstrap current is found to play a crucial role in the CFQS in which the considerable islands are produced not only at the boundary but also at rational surfaces.

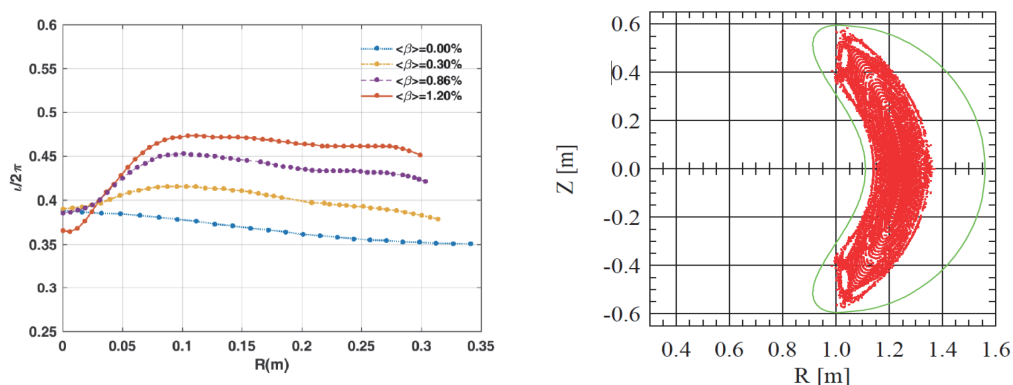


Figure 1. (Left) The rotational transform profile for different $\langle\beta\rangle$; (Right) magnetic flux for $\langle\beta\rangle \sim 1.2\%$.

However, when we increase the flatness of pressure profile, the island size can be reduced significantly. As shown in Fig. 1, for $\langle\beta\rangle \sim 1.2\%$, the magnetic surfaces are also well maintained. The rotational transform profiles are also given in this figure with different $\langle\beta\rangle$. The MHD instability is estimated by the MEGA code. The result shows that the mode is stable without energetic particles in this case.

The actual visit time is 2019.07.01-2019.08.31 for a total of 2 months. The main learning contents during the stay include the theoretical and numerical simulation of CFQS physics by the HINT code developed by Prof. Suzuki of NIFS. This visit has established good cooperative relations between NIFS and SWJTU and promoted the engineering design of CFQS experimental devices.



Structural Analysis of CFQS Supporting Structure



Guozhen Xiong¹⁾, Yuhong Xu¹⁾, Akihiro Shimizu²⁾,
Shigeyoshi Kinoshita²⁾, Haifeng Liu¹⁾, Mitsutaka Isobe^{2, 5)},
Shoichi Okamura²⁾, Dapeng Yin³⁾, Yi Wan³⁾,
Changjian Tang^{1, 4)}, and CFQS team^{1, 2, 3)}

1) Institute of Fusion Science, School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

2) National Institute for Fusion Science, National Institutes of Natural Sciences, Toki 509-5292, Japan

3) Hefei Keye Electro Physical Equipment Manufacturing Co., Ltd, Hefei 230000, China

4) College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610041, China

5) SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), Toki 509-5292, Japan

招へい期間：令和元年 7 月 4 日 - 8 月 31 日

In this report, the design of the supporting structure of the Chinese First Quasi-axisymmetric Stellarator (CFQS) is introduced. The electromagnetic (EM) forces on the modular coils (MC) are evaluated by finite element analysis. Based on the distribution of EM forces, a cage-like supporting structure has been designed for satisfying flexibility and reliability. A finite element analysis has been carried out to verify the reliability of the cage-like supporting structure.

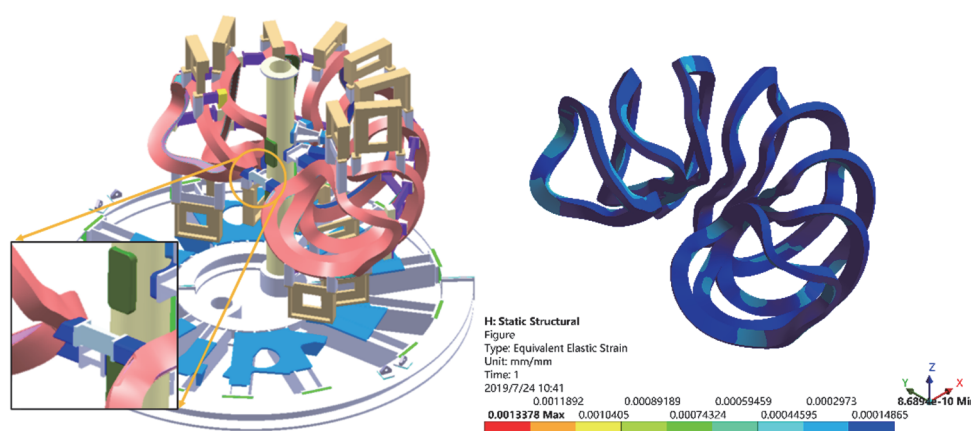


Figure 1. (Left) CFQS supporting structure, (Right) Elastic strain on modular coils.

The maximum elastic strain on modular coils is about 0.045 %, less than the allowable maximum elastic strain in our design proposal. That means the coils are well protected, the EM force will not hurt the insulation layer.

During my visit to Japan, I worked with Japanese colleagues in NIFS on engineering design. It is a great experience because our collaboration not only carried out good results but also improved our relationship.



DIII-DにおけるL-H遷移時の大域的閉じ込め改善現象の同位体効果



自然科学研究機構 核融合科学研究所・助教

小林 達哉

派遣期間：令和元年4月23日－10月5日

磁場閉じ込め核融合実験の最大の懸念事項の一つに、乱流輸送の問題がある。炉心プラズマで核燃焼反応を起こすためにプラズマを加熱すると、温度や密度に磁力線垂直方向の勾配ができ、その自由エネルギーが微小スケールの乱流揺動を励起する。励起された乱流揺動は密度や熱の輸送チャンネルを作り、プラズマパラメータの悪化を引き起こす。一方、プラズマをある閾値以上のパワーで加熱すると、プラズマが乱流を自発的に抑制し、閉じ込めのよい状態へと遷移する（LH遷移）ことが知られている。LH遷移の背景物理を理解し、自在にコントロールすることは、核融合発電を実現する上で鍵となる。

核融合プラズマ物理の別の未解決課題として、水素同位体効果が挙げられる。これは燃料水素の質量を大きくすればするほど、単純なスケーリング理論予測に反して閉じ込めが改善していく現象である。水素同位体効果はLH遷移に必要な閾値パワーに顕著に見られ、重水素プラズマでは水素プラズマに比べより小さいパワーで遷移が起こることが知られている。この現象をより詳細に理解するため、周辺で発生した閉じ込め改善がプラズマ全体にどのように広がるかを実験的に明らかにする必要がある。このため、米国ジェネラルアトミクス社のDIII-Dで得られた実験データに対し、統計解析を行なった。プラズマ半径方向に伝わる温度上昇パルスの振る舞いを、重水素プラズマと軽水素プラズマで比較した。パルスは軽水素プラズマでより中心部近くまで到達し、またより速い伝播速度を持つことがわかった。

観測された重水素・水素プラズマでの非局所閉じ込め改善の程度の違いを考察するため、局所勾配の小さいプラズマ中心部の乱流の大部分は、周辺より伝播してきたものであると仮定した。Hモード遷移は、周辺の径電場が局所的に乱流を抑制する現象であるため、中心部の乱流もこの供給源の消滅に伴い減少する。水素プラズマでは、水素同位体効果により元々の非局所輸送の程度が大きかったと考えられる。このため、Hモード遷移によって周辺の乱流ソースが消滅した際のプラズマ全体に渡る閉じ込め改善度は、重水素プラズマに比べて軽水素において大きくなると考察した。今後得られた成果をまとめ、論文として出版する予定である。

中国合肥 ASIPP への研究打ち合わせ及び EAST 視察のための出張



核融合科学研究所・助教

清水 昭 博

派遣期間：令和元年 7 月 1 日 - 7 月 4 日

中国合肥 ASIPP へ出張し、西南交通大学の研究グループと研究打ち合わせ及び EAST 装置の視察を実施した。

1) 西南交通大学の研究グループとの研究打ち合わせ

建設が進んでいる準軸対称ヘリカル装置 CFQS に関して、研究打ち合わせを実施した。予想されるブートストラップ電流について議論した。図 1 に BOOTSJ コードの計算による、ブートストラップ電流の体積平均ベータ値依存性を示す。体積平均ベータ値 1 % で 20 kA 以上の電流が予想される。その後、Maximum-J 条件について議論した。Maximum-J は、荷電粒子の第二断熱不変量が中心で最大となる特性で、もし満たされればイオン温度勾配モードが安定化されて、異常輸送の低減が期待できる。CFQS の真空磁場配位では、この条件は満たされていない。しかし、ブートストラップ電流や電場の影響によって Maximum-J 条件を満たす可能性があり、今後検討を進める。

その後、建設中のモックアップモジュラーコイルを視察した。導体の巻き線が順調に進んでいることを確認した（図 2）。

2) EAST 装置の視察

トカマク装置 EAST 本体と、制御室を視察した。更に、コイルや加熱装置の電源についても、今後の CFQS プロジェクトの参考とするために見学した。図 3 に EAST 本体と制御室の様子を示す。大半径／小半径、1.85 m/0.45 m、アスペクト比 4.25、磁場強度 3.5 T の装置規模である。磁場コイルは超伝導となっている。中性粒子ビームは 2 台、低域混成波加熱は 4.6 GHz で 1 MW である。

制御室のディスプレイは非常に大きく、実験情報が詳細に示されていて分かりやすい印象を受けた。

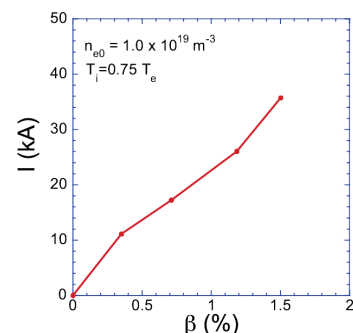


図 1 CFQS において予想されるブートストラップ電流の体積平均ベータ依存性

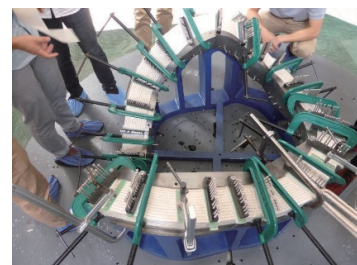


図 2 CFQS モジュラーコイルのモックアップ



図 3 EAST の実験室、制御室の様子

ステラレータ磁場配位最適化コードSTELLOPT2に関する基礎的研究



核融合科学研究所・助教

松岡 清吉

派遣期間：令和2年2月24日－3月15日

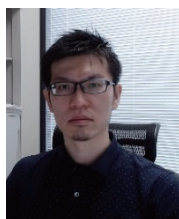
磁場閉じ込め核融合プラズマでは、燃料プラズマの温度・密度分布を制御し、良好な閉じ込め性能をもつプラズマを定常維持することが必要である。プラズマの閉じ込め性能は、主にプラズマ中の乱流に起因した乱流輸送によって決まるため、プラズマ乱流（輸送）を抑制・制御することが極めて重要な課題となっている。一方で、プラズマ乱流では、乱流の非線形相互作用により帯状流と呼ばれるメゾスケールの構造が自発的に形成され、それが乱流輸送を強く抑制する効果をもつことが明らかになっている。本研究では、3次元磁場構造の多様性を活用することで乱流によるメゾスケール構造（帯状流）形成を促進し、より乱流輸送抑制に適した3次元磁場配位の探索を行うことを目的としている。

3次元磁場を活用した乱流抑制配位探索のためには、乱流の非線形相互作用を適切にモデル化した上で磁場配位の最適化を行う必要がある。ここでは、ヘリカル・ステラレータ型3次元磁場閉じ込め装置内の磁場配位最適化に広く用いられているSTELLOP2コードをベースとした拡張を施すことで上記の探索を行うこととした。本派遣では、その準備として、STELLOPT2の現在の中心的開発者であるS. Lazerson博士（IPP・独）を訪問し、1）遠隔地間でのコード開発体制の構築、2）コードの基礎的特性理解に向けた動作検証を行い、併せて結果の物理特性評価手法について把握すること、3）乱流の非線形相互作用モデルの実装を進めること、の3点を目標として設定した。

滞在期間中は、S. Lazerson博士からSTELLOPT2コードについて最新版ソースコードの提供と基本的な使用方法について講習を受けるとともに、今後のSTELLOPT2開発・拡張に向けて、遠隔地間（日独）でのコード同期フローを含めた開発体制や拡張方針について議論を行った。続いて、コードの基礎的動作特性を把握・検証するため、アスペクト比をターゲットとした最適化計算についてパラメータサーベイを実施し、可視化による結果の妥当性評価手法やさらに高度な最適化パラメータ選択について議論した。また、滞在期間中に得られた知見に基づき、滞在終了後、STELLOPT2に簡易な乱流非線形相互作用モデルを新たに実装し、乱流抑制配位の実現可能性について初期的検討を行った。

今回の派遣事業によりSTELLOPT2をベースとした乱流最適化配位探索のための準備を整える事ができた。今後は、STELLOPT2をより詳細な乱流非線形相互作用を取り入れた先進的な乱流最適化コードへと拡張し、乱流と非線形相互作用を通じた構造形成を促進する3次元磁場構造探索について、さらに検討を進めていくことを予定している。

準ヘリカル対称装置 HSX ステラレータにおける乱流実験



京都大学エネルギー理工学研究所・助教

大 島 慎 介

派遣期間：令和元年9月21日－10月9日

自然界において普遍的に観察される「構造形成」の例として、磁場閉じ込めプラズマ中のプラズマ乱流による自発流形成が知られている。乱流によって生成された流れ場は帯状構造を有するために“帯状流”と呼ばれ、それを生み出した乱流を抑制し、それらは均衡しながら共存する。この自発流は、磁場の三次元構造に依存し、特性を変える。本研究では、京都大学が有するヘリオトロンJ装置と準ヘリカル対称を有するHSX装置という磁場概念の異なる装置間で乱流による自発流形成に関して比較を進め、その振る舞いの共通点、そして差異を実験的に見出すことに主眼を置き、実施している。

研究の第一段階として、HSXステラレータにおいて帯状流探索実験を実施し、帯状流と特徴が合致する揺動構造を実験的に観測することに成功している。異なるトロイダル位置に設置された一対のプロープ計測器を用い、相関計測をベースとして実験を実施した。ポテンシャル揺動のみにおいて、トロイダルに対称、かつ径方向に局在した帯状構造を有する揺動が観測された。興味深いことに、帯状流の特徴を有する揺動に加え、 ~ 20 kHzのコヒーレントモード、乱流が共存しており、これらは互いに相互作用していることが観測された。振幅相関法を適用によって、コヒーレントモード成長に伴う帯状流が減衰、あるいはコヒーレントモードが乱流に影響することで間接的に帯状流に影響していることが示唆される結果を得た。これらの実験は通称“Old mirror配位”と呼ばれる配位において実施され、それに続き準ヘリカル対称配位において実験を実施、比較データを得る予定であったが、装置の機器トラブル、その後のコロナ禍の影響で共同実験は現在停止している。

本研究はHSXステラレータにおける帯状流の初めての観測結果であり、今後三次元装置間の構造形成の比較研究の原動力となり得る成果となることが期待される。既に論文執筆に足る結果は揃っているが、論文のインパクトを増すため、前述した他配位における実験を計画している。再度訪問可能な体制が整った時点で早急に訪問し、共同研究を継続する予定である。

最後に、本研究に関しご支援を頂いたPLADyS事業の運営メンバー、およびウィスコンシン大学マディソン校の共同研究者に謝意を表します。

HSXにおけるECHによるトロイダル流駆動の検証



京都大学大学院工学研究科

山本 泰弘

派遣期間：令和元年8月20日－11月14日

トロイダル流はプラズマの閉じ込め改善に関して重要であり、外部トルクを与えずに発生する自発的トロイダル流は重要な研究対象となっている。Wisconsin大学では、準対称ヘリカル装置HSXを用いた先進的な実験が行われており、電子サイクロトロン加熱（ECH）に関連する自発的トロイダル流が観測されている。本派遣の目的は、ECHが発生させるトルクの影響についてHSX実験との比較をすすめ、磁場の非対称モードが励起する $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ トルクがトロイダル流駆動に関して重要な働きをしていることを定量的に検証することである。

これまでHSXではO-mode ECH加熱を中心に行ってきたが、今回の派遣期間中にX-mode ECHによる加熱実験を行い、偏光モードや密度等のパラメータ依存性を実験とシミュレーションを比較することで検証する予定であった。しかし、実験装置の不調により新たな実験を行うことが出来なかったため、シミュレーション研究と過去の実験との比較検証を進めた。今後行う実験との比較を見据え、加熱位置、ECH偏光モードなどの実験パラメータに関する依存性を調べた結果の一例が図1である。X-modeにおいては加熱位置（弱磁場側・強磁場側）によってECHトルクに必要な径方向流束に関して差が現れたのに対して、O-modeではほとんど差は現れないということが分かった。これはO-modeによって加速された電子の多くが通過粒子だが、径方向流束を作り出すのは捕捉粒子であるためである。

私は普段、理論・シミュレーション研究に従事しているために実験の準備・実行・解析について考えることがほとんどなかったが、本派遣では、海外の研究者と議論を行いながら実験のセッティングや過去の計測データの解析等を行うことが出来た。これらは、これからの私の研究生活にとって良い経験になったと感じている。

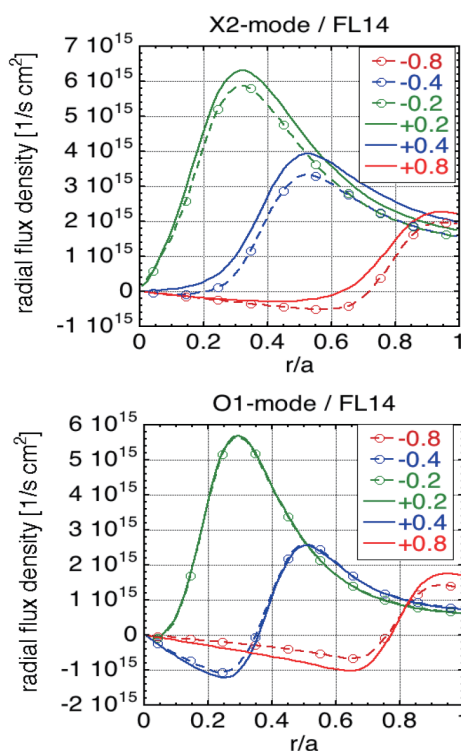


図1 Off-axis加熱時の径方向流束。
凡例は加熱位置 ($r/a = \rho$) を表し、 $\rho < 0$ は強磁場側、 $\rho > 0$ は弱磁場側に対応する。

HSX装置における条件付き抽出法を用いた電子温度揺動計測の検討



九州大学大学院総合理工学府 博士課程学生

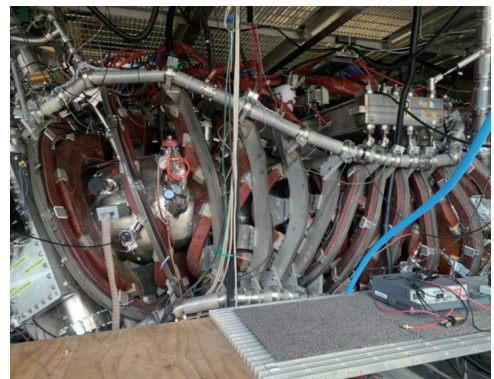
河内 裕一

派遣期間：令和2年2月17日 - 3月17日

高エネルギーのプラズマを磁場で維持する核融合プラズマにおいて、どういうメカニズム密度や温度の分布が形成されるかを明らかにするのは、重要な課題である。特に、乱流によるエネルギー輸送については直接的な観測が困難である。私の研究では、乱流が駆動するエネルギー輸送を直接観測する手法の開発を行っている。本手法は、条件付き平均法を用いて時間分解能が悪い温度計測を改善し温度揺らぎの観測を可能にするものであり、直線プラズマ装置PANTAにおいて温度揺らぎの観測に成功した。

今回のPLADySの派遣では、本手法をより複雑な磁場や乱流状態へ適用するために、HSXで共同研究を行うための議論をおこなった。HSXでは、捕捉粒子不安定性や高エネルギー電子駆動MHDなど、様々な揺動が観測されており、磁場による制御を系統的に行うことが可能である。派遣先では、これらの揺動が駆動する温度揺らぎの観測可能性について検討した。特に、マイクロ波反射計、電子サイクロトロン輻射計、および静電プローブを組み合わせれば、温度揺らぎの評価ができる可能性がことがわかり、次回の研究の時期やマシンタイムの調整までを行うことができた。その後の計画については、COVID-19の影響により共同研究を行っていないが、実験によりデータが揃えばデータ解析をすぐに適用できる段階にある。

今回の派遣は私個人の初めての海外共同研究となり、戸惑うことも多かったが大変有意義なものとなった。特に、英語での議論を毎日行う経験や、異なる装置での経験、そして今回お世話になった共同研究先の先生らとのつながりは、今後の研究生活で掛け替えのないものであった。この共同研究をきっかけに再度共同研究を行うための別の予算の獲得や新たな別の共同研究についての提案を行えたりと、研究の幅が広がる経験となった。今後は、この経験や得られたつながりを大事にして、研究を継続していきたい。



現地で撮ったHSX装置の写真

超高密度プラズマ加熱に向けた電子バーンシュタイン波モード変換の物理機構の解明



九州大学総合理工学府先端エネルギー理工学専攻出射・池添研究室 博士3年

福山 雅治

派遣期間：令和2年3月1日－3月19日

経済的に成立する核融合炉発電の実現に向けて、ITERで採用されているトカマク型方式よりも、球状トカマク（ST）型方式が経済性の高い核融合炉の候補として注目されている。トカマクではプラズマ中に高い電流を駆動させプラズマ圧力を維持する必要があるが、ST装置は装置半径に比べてプラズマ半径が大きいいため、装置中心スペースが狭く、装置中心部に設置される“トカマク原理”である誘導加熱を行うための十分なオーミック加熱用コイル設置が難しいという問題を抱えている。従って、ST方式の核融合炉実現のためにはオーミック加熱に頼らない非誘導方法を用いた加熱・電流駆動法の確立が不可欠であるが、電磁波を用いたプラズマ加熱・電流駆動には遮断密度というものが存在する。ECHCDを用いるST方式の核融合炉実現のために、遮断密度に制限されない加熱・電流駆動法の確立が不可欠である。

そこで、EC波がモード変換した静電波の一種である電子バーンシュタイン（EB）波には密度上限が存在しない事を利用し、EB波による加熱・電流駆動（EBH/CD）が核融合炉の加熱・電流駆動法として提案された〔1〕。有効なEBWH/CDのために、電子サイクロトロン波（ECW）からの電子バーンシュタイン波（EBW）へのモード変換が必要であるが、マックスプランク研究所ヘリカル装置（Wendelstein 7-x）では、プラズマ波動計算においてグラフィックスプロセッシングユニット（GPU）を用いた3次元コールドプラズマフルウェーブ計算コード（CUWA）〔2〕が開発されており、バーンシュタイン波加熱のために必要なプラズマパラメーター及びアンテナの入射角を検討されている。本事業によって、このCUWAを九州大学球状トカマク装置（QUEST）に適用し、QUESTにおける電子バーンシュタイン波加熱・輻射計測の検討が3次元的に可能となった（図1）。

〔1〕 J. Prenhaelter *et al.*, J. Plasma Phys. **10**, 1 (1973).

〔2〕 P. Aleynikov *et al.*, EPJ Web of Conferences reference. **203**, 01003 (2019).

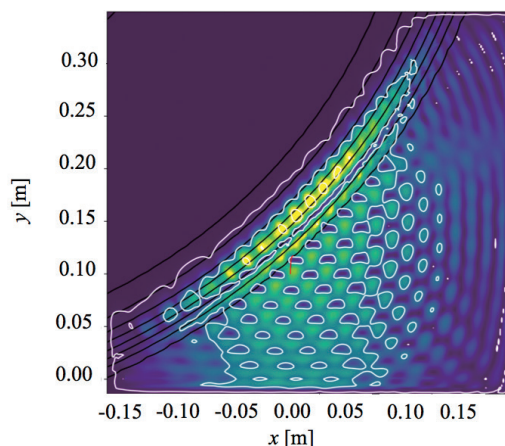


図1 QUEST条件に適用された3次元プラズマフルウェーブ計算の一例。モード変換率は31%であった。

論文掲載

2019 年度

R. Matoike, G. Kawamura, S. Ohshima, M. Kobayashi, Y. Suzuki, K. Nagasaki, S. Masuzaki, S. Kobayashi, S. Yamamoto, S. Kado, T. Minami, H. Okada, S. Konoshima, T. Mizuuchi, H. Tanaka, H. Matsuura, Y. Feng, H. Frerichs

“First Application of 3D Peripheral Plasma Transport Code EMC3-EIRENE to Heliotron J”

Plasma and Fusion Research 14 (2019) 3403127

N. Kenmochi, T. Minami, T. Mizuuchi, C. Takahashi, G.M. Weir, K. Nishioka, S. Kobayashi, Y. Nakamura, H. Okada, S. Kado, S. Yamamoto, S. Ohshima, S. Konoshima, Y. Ohtani, K. Nagasaki

“Reformation of the Electron Internal Transport Barrier with the Appearance of a Magnetic Island”

Scientific Reports 10, (2020) 5

2020 年度

Yuichi Kawachi, Shigeru Inagaki, Fumiyoshi Kin, Kotaro Yamasaki, Yusuke Kosuga, Makoto Sasaki, Yoshihiko Nagashima, Takuma Yamada, Hiroyuki Arakawa, Naohiro Kasuya, Chanho Moon, Kazunobu Hasamada and Akihide Fujisawa

“Observation of spatiotemporal structures of temperature fluctuations by using of a statistical phase detection method in a linear magnetized plasma”

Plasma Physics and Controlled Fusion 62 (2020) 055011

S. Kobayashi, K. Nagasaki, T. Stange, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, S. Kado, S. Yamamoto, S. Ohshima, K. Hada, G. Weir, S. Konoshima, Y. Nakamura, N. Kenmochi, Y. Otani, X.X. Lu, A. Panith, K. Toki, Y. Suzuki

“Study of seed plasma generation for NBI plasma start-up using non-resonant microwave launch in Heliotron J”

Plasma Physics and Controlled Fusion 62 (2020) 065009

S. Yamamoto, K. Nagasaki, K. Nagaoka, J. Varela, Á. Cappa, E. Ascasibar, F. Castejón, J.M. Fontdecaba, J.M. García-Regaña, Á. González-Jerez, K. Ida, A. Ishizawa, M. Isobe, S. Kado, S. Kobayash, M. Liniers, D. López-Bruna, N. Marushchenko, F. Medina, A. Melnikov, T. Minami, T. Mizuuchi, Y. Nakamura, M. Ochando, K. Ogawa, S. Ohshima, H. Okada, M. Osakabe, M. Sanders, J.L. Velasco, G.M. Weir, M. Yoshinuma

“Effect of ECH/ECCD on energetic-particle-driven MHD modes in helical plasmas”

Nuclear Fusion 60 (2020) 066018

Y. Suzuki, S. Purohit, S. Odachi, S. Yamamoto, K. Nagasaki

“New tomographic reconstruction technique based on Laplacian eigenfunction”

Plasma Science and Technology 22 (2020) 102002

Y. Suzuki, K. Y. Watanabe and S. Sakakibara

“Theoretical studies of equilibrium beta limit in LHD plasmas”

Physics of Plasmas 27 (2020) 102502

Yasuhiro Suzuki

“Effect of pressure profile on stochasticity of magnetic field in a conventional stellarator”

Plasma Physics and Controlled Fusion 62 (2020) 104001

M. Luo, K. Nagasaki, G. Weir, H. Okada, T. Minami, S. Kado, S. Kobayashi, S. Yamamoto, S. Ohshima, T. Mizuuchi, S. Konoshima, Y. Nakamura, A. Ishizawa

“Measurement of Electron Temperature Profile and Fluctuation with ECE Radiometer System in Heliotron J”
Plasma and Fusion Research 15 (2020) 2402038

D. Qiu, T. Minami, T. Nishide, M. Miyoshi, Y. Yamanaka, S. Kado, S. Ohshima, K. Nagasaki, H. Okada, S. Kobayashi, T. Mizuuchi, S. Konoshima, R. Yasuhara

“Design of Compact Multi-Path Thomson Scattering Diagnostic with Signal Delay System in Heliotron J”
Plasma and Fusion Research 15 (2020) 2401044

P. Adulsiriswad, Y. Todo, S. Yamamoto, S. Kado, S. Kobayashi, S. Ohshima, H. Okada, T. Minami, Y. Nakamura, A. Ishizawa, S. Konoshima, T. Mizuuchi, K. Nagasaki

“Magnetohydrodynamic hybrid simulation of Alfvén eigenmodes in Heliotron J, a low shear helical axis stellarator/heliotron”
Nuclear Fusion 60 (2020) 096005

長崎百伸

プロジェクトレビュー論文「Heliotron J実験」
プラズマ・核融合学会誌96 (2020) 475-518

Yasuto KONDO, Takeshi FUKUDA, Kazunobu NAGASAKI, Hiroyuki OKADA, Takashi MINAMI, Shinichiro KADO, Shinji KOBAYASHI, Satoshi YAMAMOTO, Shinsuke OHSHIMA, Tohru MIZUUCHI and Takeshi TOMITA

“Measurement of Radial Electric Field Using Doppler Reflectometer in High-Density Plasma of Heliotron J”
Plasma and Fusion Research 15 (2020) 2402064

Yoshiaki Ohtani, Kenji Tanaka, Hiroe Igami, Katsumi Ida, Yasuhiro Suzuki, Yuki Takemura, Hayato Tsuchiya, Mike Sanders, Mikiro Yoshinuma, Tokihiko Tokuzawa, Ichihiko Yamada, Ryo Yasuhara, Hisamichi Funaba, Mamoru Shoji, Takahiro Bando and LHD Experimental Group

“Effects of core stochastization on particle and momentum transport”
Nuclear Fusion 61 (2021) 034002

発表

2019 年度

長崎百伸（京都大学）

第46回プラズマ物理に関する欧州物理学会（EPS2019）（口頭発表）

“Energetic-particle-driven MHD Instabilities and Their Control by ECH/ECCD in Helical Plasmas”

ISHW 2019（招待講演）

“Response of Plasma Performance to Magnetic Configuration, Fuelling and Heating/Current Drive in Heliotron J”

3rd LHD Workshop（口頭発表）

“Control of Energetic-Particle-Driven MHD Modes by ECH/ECCD in LHD”

鈴木康浩（NIFS）

ISHW 2019（口頭発表）

“Impact of Pressure Anisotropy on 3D Equilibrium and its Identification of High-beta LHD Plasma”

的池遼太（京都大学）

ISHW 2019（ポスター発表）

“EMC3-EIRENE Modeling of the peripheral plasmas with various magnetic configurations in Heliotron J”

Panith Adulsiriswad（京都大学）

ISHW 2019（ポスター発表）

“Simulation Study of Energetic Particle-driven Mode in Helical Axis Heliotron with the Bump-on-tail and Slowing Down Energetic Particle Energy Distribution”

2020 年度

大島慎介（京都大学）

AAPPS-DPP2020 as e-conference（招待講演）

“Isotope Effects on Nonlinear Turbulence System in a Torus Plasma”

Panith Adulsiriswad（京都大学）

AAPPS-DPP2020 as e-conference（ポスター発表）

“Simulation Study of Energetic Particle-driven MHD Modes and Energetic”

Dechuan QIU（京都大学）

AAPPS-DPP2020 as e-conference（ポスター発表）

“Development of Double Pockels Cells Multi-path Thomson Scattering System in Heliotron J based on Gauss Beam Analysis”

的池遼太（京都大学）

PSI-24（ポスター発表）

“Peripheral Plasma Transport Characteristics arising from 3D Magnetic Field Structure in Heliotron J”

茶谷智樹（京都大学）

日本物理学会第76回年次大会（ポスター発表）

「ヘリオトロンJにおける近赤外原子輝線のゼーマン効果計測」

岡野竜成（京都大学）

日本物理学会第76回年次大会（ポスター発表）

「ヘリオトロンJにおける真空紫外分光法を用いた低価数輝線の空間分布計測」

受賞

2019 年度

仲田資季（NIFS）

第14回日本物理学会若手奨励賞

「磁場閉じ込めプラズマの乱流・輸送および同位体質量効果に関する研究」

釧持尚輝（東京大学）

Poster Prize (3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics)

“Deep learning for tomographic reconstruction of imaging diagnostics”

2020 年度

仲田資季 (NIFS)

若手科学者賞 (令和 2 年度科学技術分野文部科学大臣表彰)

「超高温プラズマにおける乱流抑制機構の解明と閉じ込め改善の研究」

Panith Adulsiriswad (京都大学)

日本物理学会2020年秋季大会領域 2 学生優秀発表賞

“Numerical Investigation of the Energetic Particle Redistribution and Interaction with Alfvén Eigenmode in Heliotron J”

AAPPS-DPP2020 as e-conference, Poster Prize

“Simulation Study of Energetic Particle-driven MHD Modes and Energetic”

令和 2 年度京都大学エネルギー理工学研究所・学生賞

「ハイブリッドシミュレーションコードを用いたヘリオトロンJプラズマにおける高エネルギー粒子励起MHD不安定に関する研究」

的池遼太 (京都大学)

日本物理学会2020年秋季大会領域 2 学生優秀発表賞

「Heliotron Jにおける三次元磁場構造を背景とした周辺プラズマ輸送特性」

釧持尚輝 (NIFS)

プラズマ・核融合学会第25回技術進歩賞

「深層敵対的生成ネットワークを用いたイメージング計測におけるトモグラフィー法の開発」

岡 佑旗 (京都大学)

COMSOL Conference 2020 優秀ポスター発表賞

「磁場閉じ込め核融合プラズマにおけるミリ波帯域電磁波モード変換シミュレーション」



派遣

2019 年

- 05.23-10.05 小林達哉（NIFS）を General Atomics（米国）へ派遣
 07.01-07.04 清水昭博（NIFS）を中国科学院・等離子体物理研究所（ASSIP）へ派遣
 08.20-11.14 山本泰弘（京都大学博士2年）をウィスコンシン大学マディソン校（米国）へ派遣
 09.21-10.09 大島慎介（京都大学）をウィスコンシン大学マディソン校（米国）へ派遣
 02.17-03.17 河内祐一（九州大学博士1年）をウィスコンシン大学マディソン校（米国）へ派遣
 02.24-03.15 松岡清吉（NIFS）をマックスプランク・プラズマ物理研究所（ドイツ）へ派遣
 03.01-03.20 福山雅治（九州大学博士1年）をマックスプランク・プラズマ物理研究所（ドイツ）へ派遣

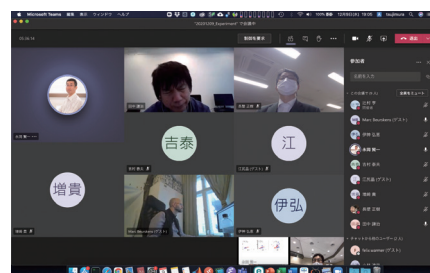
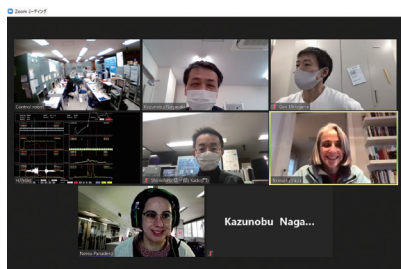
招聘

2019 年

- 07.01-08.31 Xianqu Wang（西南交通大学・中国）をNIFSに招聘
 07.04-08.31 Guozhen Xiong（西南交通大学博士学生・中国）をNIFSに招聘
 07.15-01.20 Jie Huang（西南交通大学・中国）をNIFSに招聘
 07.28-08.03 Zhongyong Chen, Nengcao Wang, Zhoujun Yang（華中科技大学・中国）を京都大学、NIFSに招聘
 〃 Jun Cheng（西南交通大学・中国）をNIFSに招聘
 09.03-09.05 Jiquan Li（西南物理研究所・中国）を京都大学に招聘
 09.12-09.13 Alvaro Cappa（CIEMAT・スペイン）を京都大学に招聘
 10.27-11.09 Nerea Panadero（CIEMAT・スペイン）を京都大学に招聘
 11.10-12.20 Santhosh Kumar（ウィスコンシン大学マディソン校・米国）を京都大学、NIFSに招聘
 11.10-12.30 Ke Wang（浙江大学学生・中国）を京都大学に招聘
 11.16-02.26 Niels Smits（Eindhoven Univ. of Technology学生・オランダ）を京都大学に招聘
 02.03-03.02 二谷辰平（Universitat Politècnica de Catalunya・スペイン）を京都大学、NIFSに招聘
 03.25-03.25 Samuel Totoica（プリンストンプラズマ物理研究所・米国）を京都大学に招聘

遠隔実験

- 2020年11月 Heliotron J装置（京都大学）において、International joint experimentsをオンラインで開始
 Heinrich Laqua、Torsten Stange（ドイツ・マックスプランク研究所）、Yurii Kovtun（ウクライナ・ハリコフ研究所）、伊神弘恵氏（核融合科学研究所）がHeliotron Jプラズマ実験に遠隔参加
 2020年12月 LHD装置（核融合科学研究所）にてInternational Joint Experimentをオンラインで開始。
 Marc Beurskens、Felix Warmer（ドイツ・マックスプランク研究所）が、LHD実験に遠隔参加。
 2021年1月 Teresa Estrada, Nerea Panadero（スペイン・CIEMAT）、Josefine Proll, Niels Smith（オランダ・アイントホーフェン工科大学）、本島巖氏（核融合科学研究所）がHeliotron Jでのペレット入射実験に遠隔参加
 Daniel Caralero（スペイン・CIEMAT）がHeliotron Jでのプローブ実験に遠隔参加
 Samuel Lazerson（ドイツ・マックスプランク研究所）がLHD実験に遠隔参加



■ 発行日：2021年9月30日

■ 〒611-0011

京都府宇治市五ヶ庄

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北4号棟

■ e-mail: pladys-coordinator@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp

■ website: <http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/pladys/index.html>