

複合大域シミュレーション ユニット

- (1) 全体報告：三浦英昭 (15分程度)
 - (2) 研究成果報告：WANG Hao (15分程度)
 - (3) 研究成果報告：WANG Jialei (15分程度)
 - (4) 質疑応答・討論 (15分程度)
-

2026年度ユニット成果報告会 2026年6月16日



メンバーリスト

ユニット研究戦略会議(2026年4月)

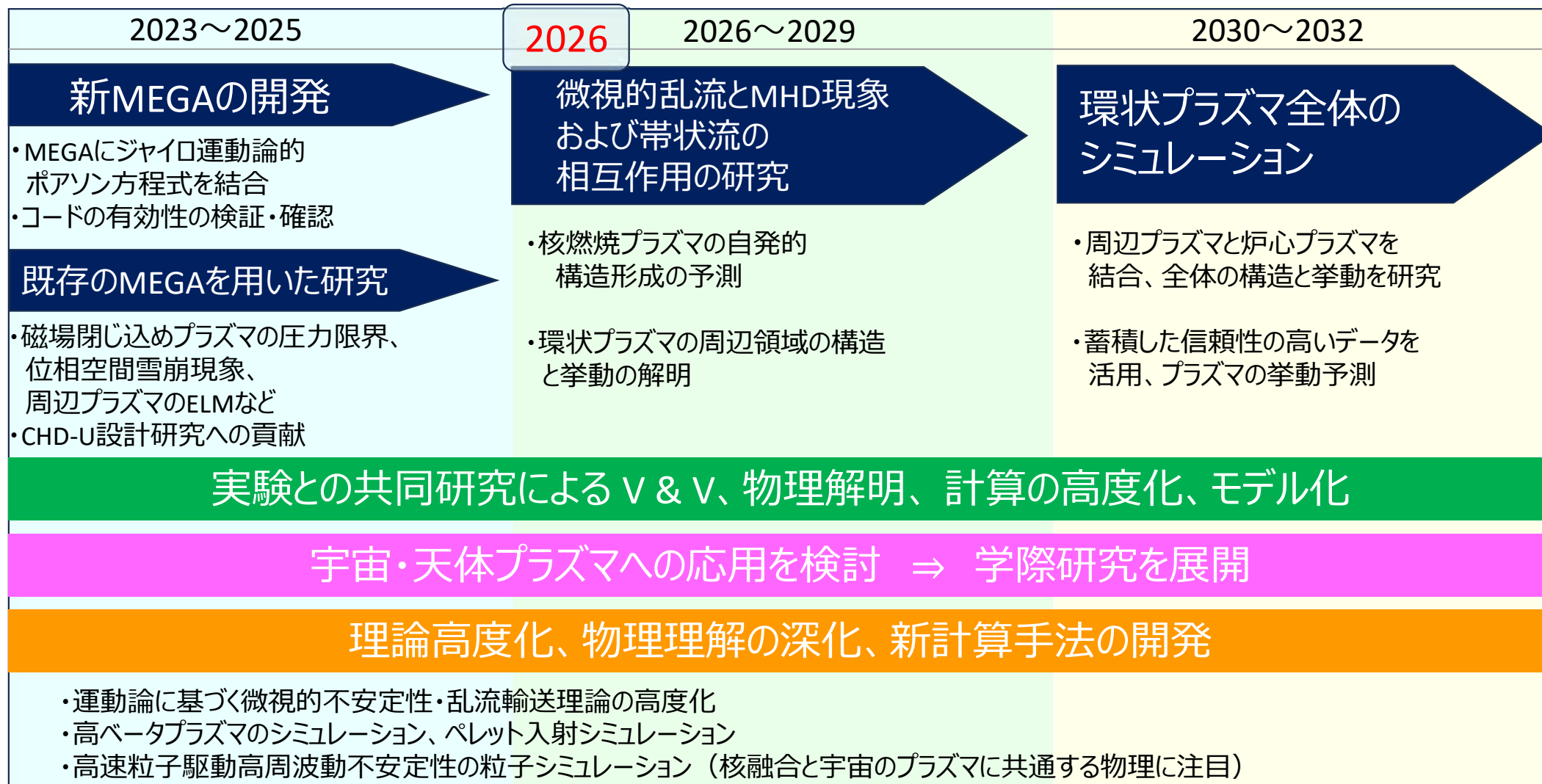
所内メンバー

樋田美栄子（戦略会議議長）、藤堂泰（副所長）、
三浦英昭（ユニット長）、堀久美子、山本孝志、佐藤雅彦、
石崎龍一、關良輔、WANG Hao、WANG Jialei、
榊原由貴 (new, クロスアポイントメント)

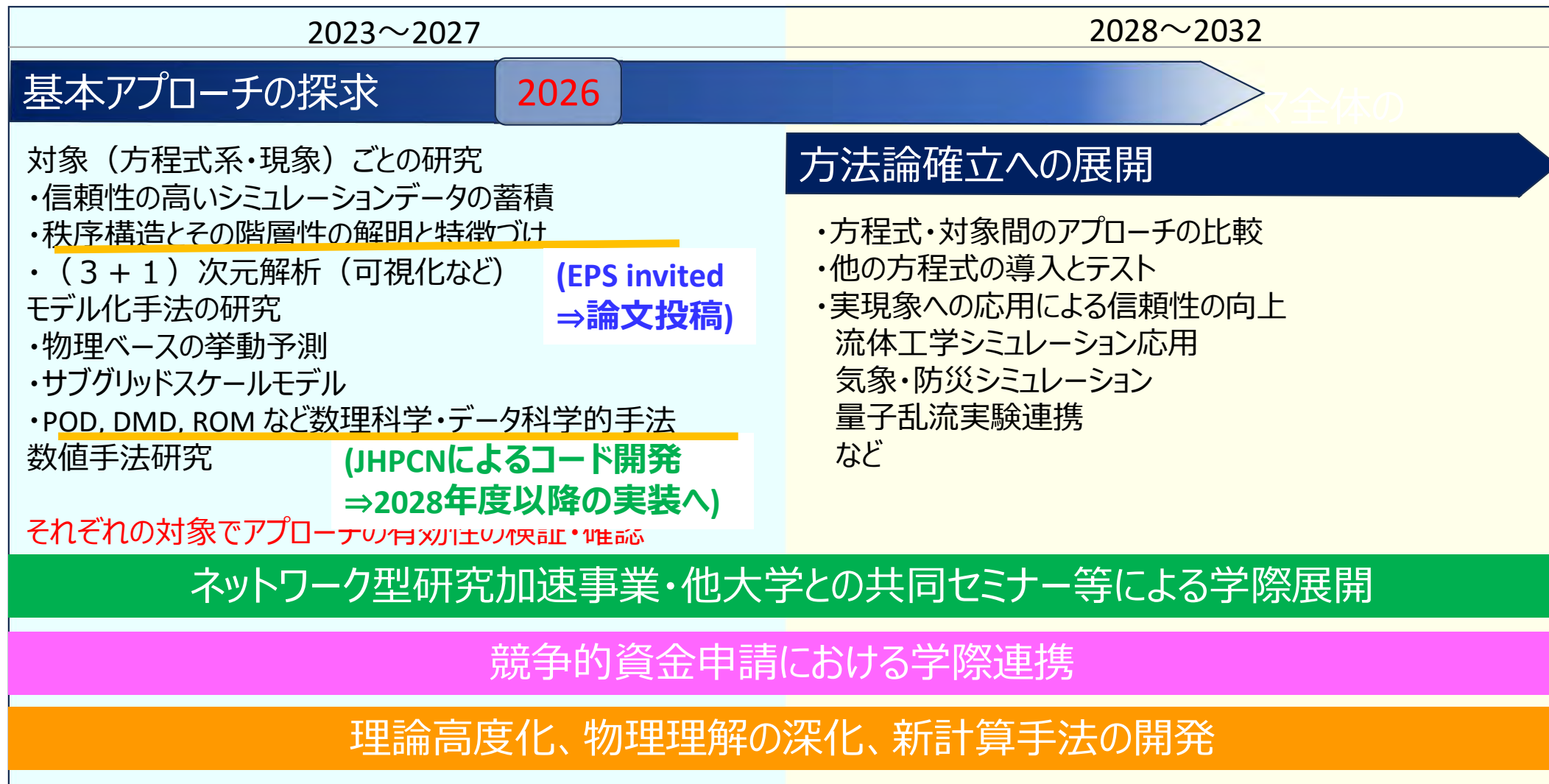
所外メンバー

石澤明宏（京大）、陰山聡（神戸大）、後藤晋（阪大）、
洲鎌英雄(new, 名誉教授)、高橋俊樹（群馬大）、田口聡（京大）、
辻義之（名大）、町田真美（国立天文台）、芳松克則（名大）、
渡邊威（名工大）

(1)MEGAを用いた研究とその関連研究：戦術（研究計画）



(2)乱流の微視的・散逸スケール構造の解明・モデル化研究の戦術（研究計画）

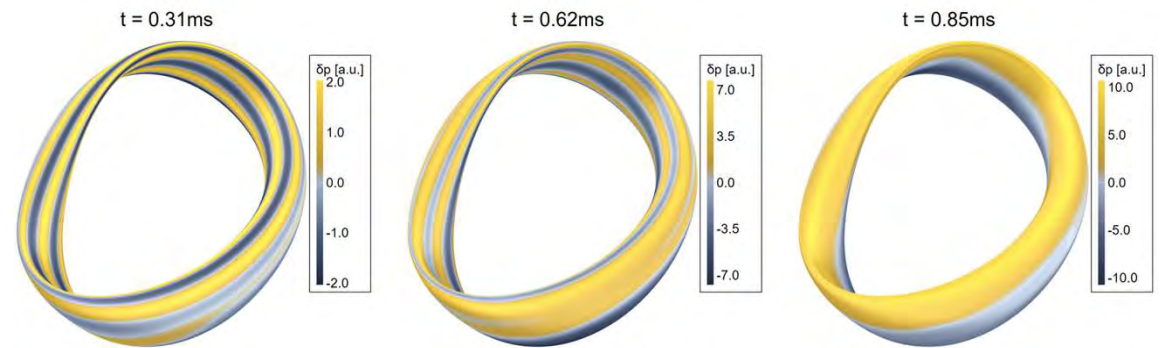
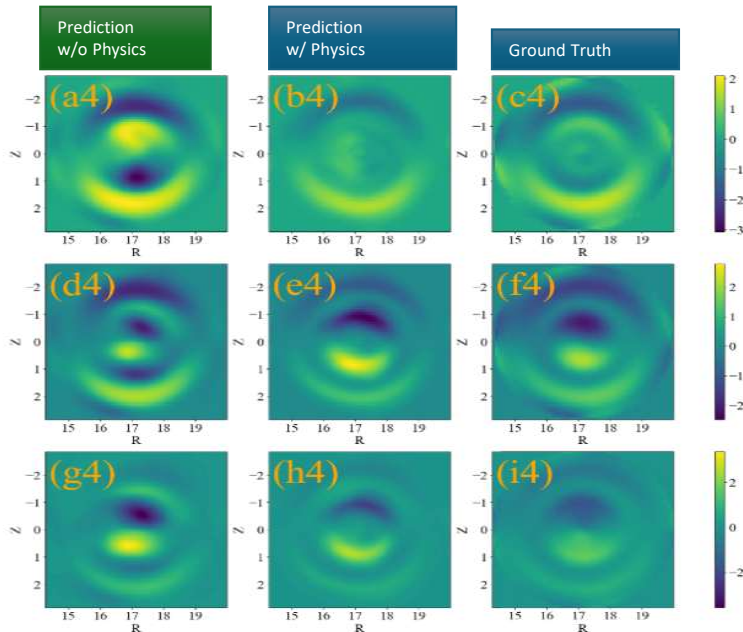


特筆される成果

(1) MEGAを用いた研究とその関連研究の成果

MEGAを用いて、高速粒子不安定性・輸送・加熱効果の理解と予測技術を大きく進展させた。

- **1. Physics-embedded Neural ODE** Plasma Physics and Controlled Fusion 67 (2025) 085038
物理法則を埋め込んだNeural ODEにより、EGAMモード構造を高精度・高速に予測。
- **2. EGAM excitation in CFQS** Nuclear Fusion (2026) 66, 014003
共鳴領域の重なりにより、EPMからEGAMが非線形励起される機構を解明。
- **3. EP instabilities in VAST** The 44th International Conference on Simulation Technology
VASTでの高速粒子駆動BAEを解析し、QI配位の高い安定性を示した。



Left: $t = 0.31$ ms, EPM is dominant; Middle: $t = 0.62$ ms, EPM and EGAM coexist; Right: $t = 0.85$ ms, EGAM is dominant. (Cover image of NF)

“Prediction of mode structure using a novel physics-embedded neural ODE method”, Plasma Physics and Controlled Fusion 67 (2025) 085038.

特筆される成果

(1) MEGAを用いた研究とその関連研究の成果 1-2

MEGAを用いて、高速粒子不安定性・輸送・加熱効果の理解と予測技術を大きく進展させた。

●4. AE and EP transport in ITER Nuclear Fusion 65 (2025) 102003

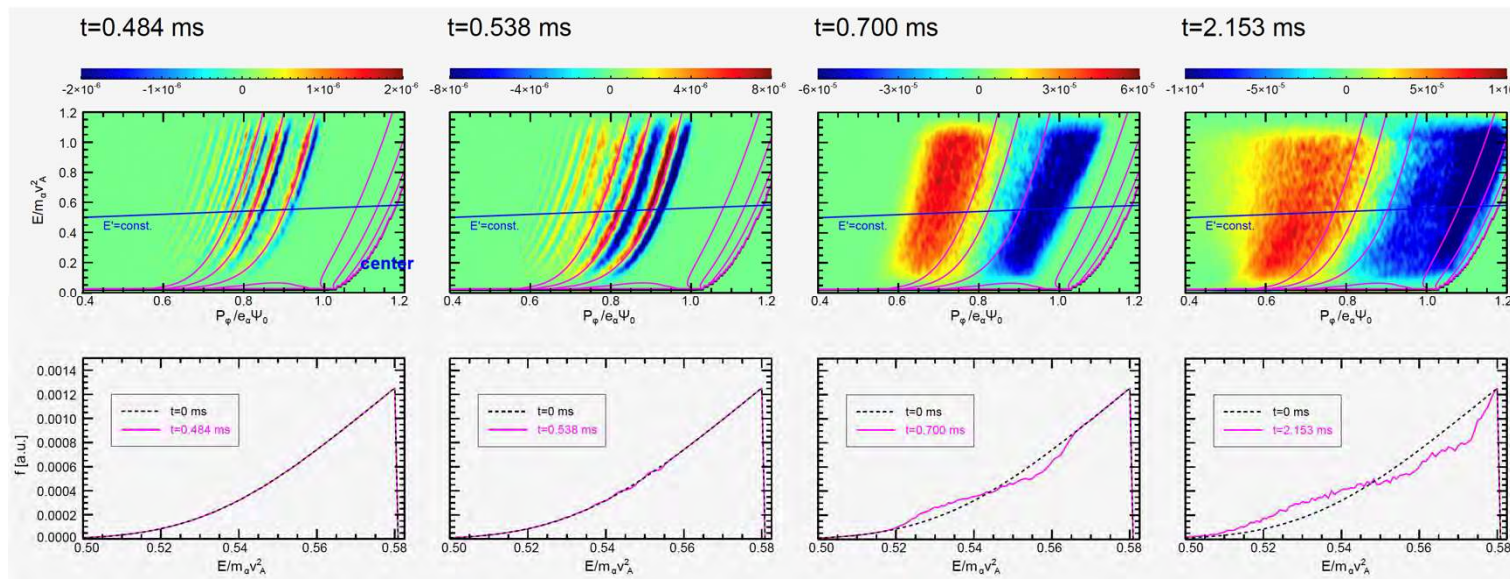
AE成長による共鳴重なりが高速粒子輸送を拡大し、大域輸送を引き起こす。

●5. Multiple fast-ion species in LHD 30th Fusion Energy Conference (FEC 2025).

複数高速イオン種の相乗効果によりAE駆動輸送と粒子損失が増大する。

●6. ICRF-generated energetic ions Journal of Fusion Energy 45, 20(2026).

ICRF加熱による高速イオン生成と中性子発生率増加の関係を定量評価。



Nuclear Fusion 65 (2025)
102003

(上段) アルファ粒子位相空間分布揺動。

(下段) E' = 一定の直線に沿った
アルファ粒子分布関数 (マゼンタ)。
黒破線は初期分布。

特筆される成果

(1) MEGAを用いた研究とその関連研究の成果I-3

MEGAを用いて、高速粒子不安定性・輸送・加熱効果の理解と予測技術を大きく進展させた。

• **7. Bursting / Non-bursting Alfvén waves** 30th IAEA Fusion Energy Conference

RF拡散効果がバーストを抑制し、高速粒子圧力の増大を可能にする。

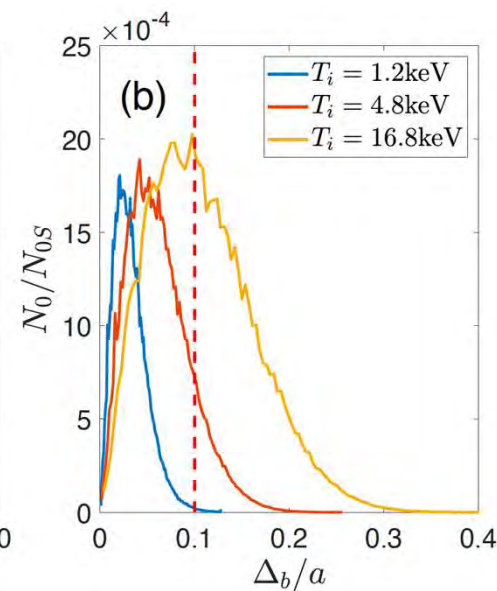
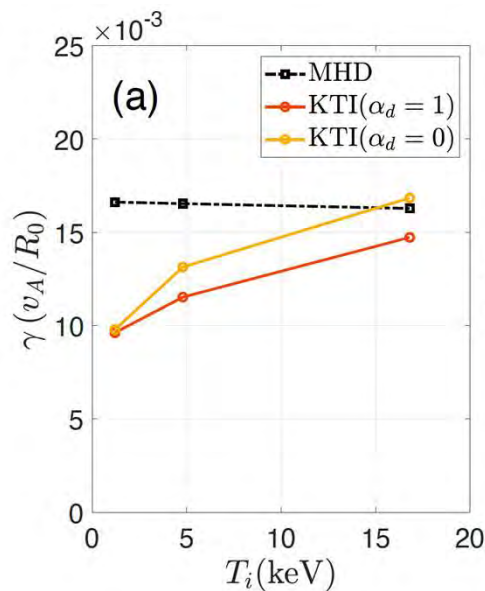
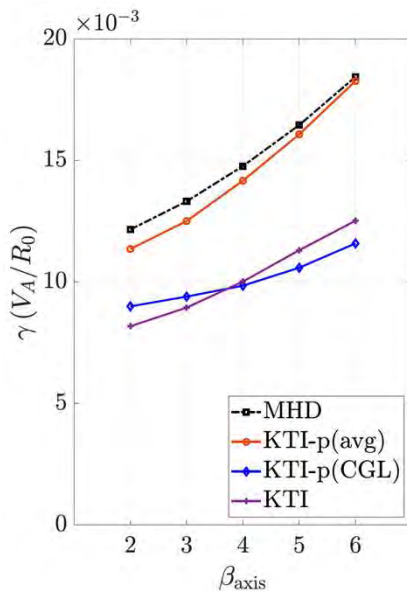
• **8. Kinetic effects on internal kink mode** Nuclear Fusion 65 (2025) 086044

熱イオンの運動論効果が内部キンク不安定性を安定化することを実証。

- 熱イオンに粒子法を適用した運動論的電磁流体力学(MHD)シミュレーション(KTIシミュレーション)を用いて、トカマクプラズマにおける内部キンク不安定性を計算し、MHDシミュレーションと比較した。

Nuclear Fusion 65
(2025) 086044

異なる熱イオン
圧力モデル間での
線形成長率の比較



(a) 熱イオン温度が異なる場合の線形成長率に関する、KTI計算（有限軌道幅効果あり/なし）とMHD計算の比較。

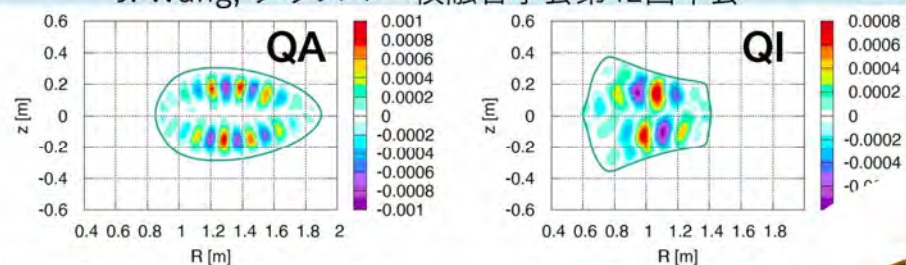
(b) 温度が異なる場合の熱イオン分布の比較。破線はモード分布幅。

VAST(CHD-U候補配位)のシミュレーション解析

高エネルギー粒子駆動型MHD不安定性

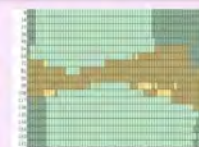
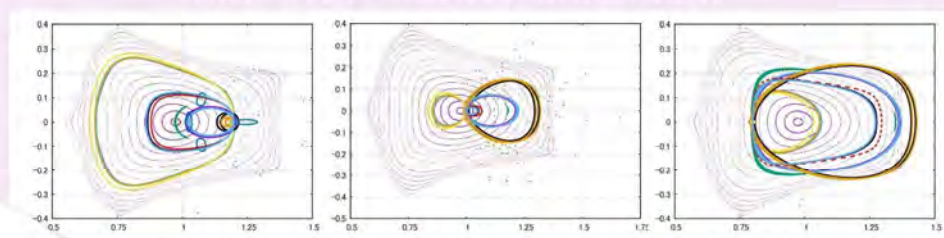
H. Wang, プラズマ・核融合学会第42回年会

J. Wang, プラズマ・核融合学会第42回年会



高エネルギー粒子軌道特性

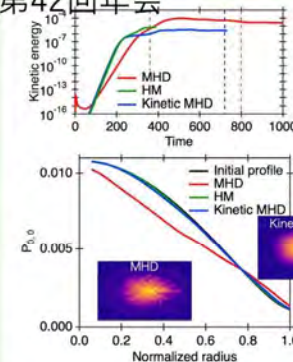
關, プラズマ・核融合学会第42回年会



■: 通過粒子
■: 捕捉粒子
斜線: 損失

圧力駆動型MHD不安定性

佐藤, プラズマ・核融合学会第42回年会



特筆される成果

(2) MEGAを用いた研究とその関連研究の成果 II

運動論・乱流・波動物理の理論と数値解析により核融合プラズマ理解を深化。

1. ITG-TEM乱流による電子・イオン間エネルギー交換 Phys. Plasmas Vol. 32, 122303 (2025) (featured article)
ITG/TEM乱流による電子・イオン間エネルギー交換を定量化し予測モデルを提案。
2. Landau Damping and Information Entropy, 4th International Fusion and Plasma Conference (iFPC 2025)
ランダウ減衰過程の情報エントロピーと相互情報量の時間発展を解明。
3. Landau Damping, Schrödinger Equation, and Fluctuation Theorem
ランダウ減衰をシュレディンガー方程式で定式化し揺らぎ定理を導出。Phys. Plasmas Vol.32, 080701 (2025)
4. p-¹¹B小型核融合・FRC波動伝播 PFR (2025), PFR(2026)
p-¹¹B核融合用陽子加速とFRC波動伝播特性をシミュレーションで解明。
5. Lower hybrid / ion Bernstein wave instability, Physics of Plasmas 33 012115 (2026)
高速粒子駆動波動不安定性の閾値密度を解析し理論式を導出。
6. MHD simulation on pellet injection in the LHD plasma with an m/n = 1/1 magnetic island JSST Proceedings
磁気島のあるLHD配位におけるペレット入射による密度上昇の定量的評価。

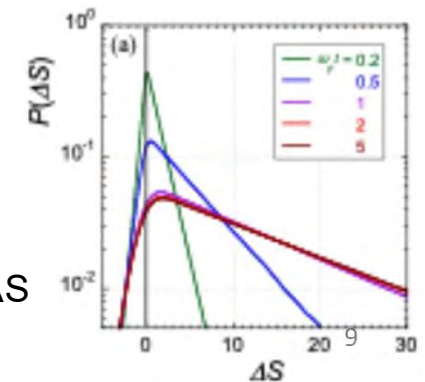
$$\frac{n_{h,pre}}{n_b} = \frac{(1 + \Omega_i^2/\omega_{pi}^2)(\omega_{l_{res}}^2 - \omega_{l_{res}+1}^2)^2}{8\omega_{LH}^2(\omega_{l_{res}}^2 + \omega_{l_{res}+1}^2 - 2\Omega_i^2)(l_{res}+1)^2} \left| \frac{J_{l_{res}}(\xi_0)J'_{l_{res}}(\xi_0)}{\xi_0} \right|$$
$$\xi_0 = \frac{ku}{\Omega_i} \quad \omega_{l_{res}}, \quad \omega_{l_{res}+1} \quad \text{IB波} \quad l_{res} + \frac{1}{2} \ll \frac{\omega_{LH}}{\Omega_i} < l_{res} + 1$$

Physics of Plasmas 33, 012115 (2026)

ゆらぎの定理:

$$\frac{P(\Delta S)}{P(-\Delta S)} = \exp(\Delta S)$$

確率的相対エントロピー ΔS
の確率密度関数 $P(\Delta S)$



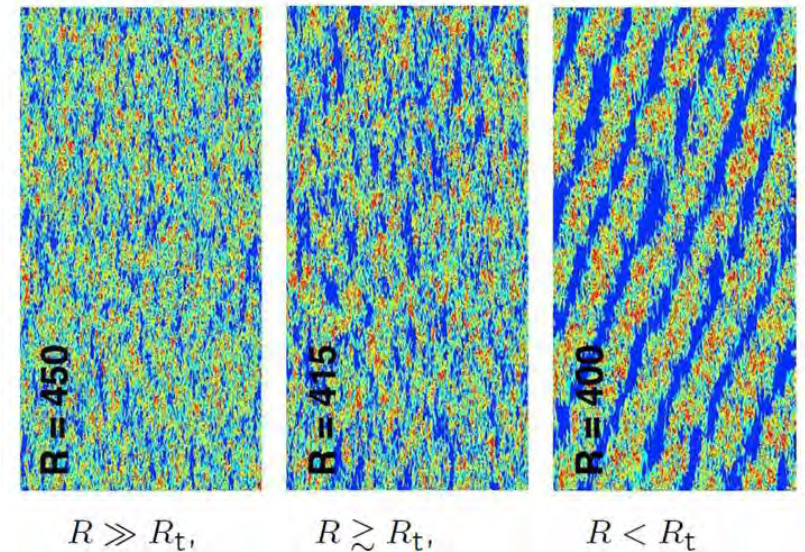
特筆される成果

(3) 散逸系偏微分方程式のモデル化研究

Hall MHD乱流の理解深化と次世代乱流モデリング手法の開発を推進。

1. Uncovering the varieties of three-dimensional Hall MHD turbulence Phys. of Fluids 37, 085327 (2025). ;
Hall MHD乱流のPrm依存性と波動・間欠性がスペクトルに与える影響を解明。 (EPS2026 招待講演)
2. Verification of SGS model for LES of Hall MHD JSST2025 Proceedings(査読付き)
新SGSモデルとGPU実装によりHall MHD乱流LESの有効性を実証。
3. Critical properties of laminar-turbulent pattern emergence, Manneville & Shimizu, *EPL*, 2025
平面クエット流の乱流パターン出現に伴う臨界現象と臨界指数を解明。
4. 状態空間を用いた局所乱流モデリング 特許出願済
状態空間表現に基づく低コスト・高精度な新しい乱流モデルを提案。

Manneville & Shimizu(2025): 平面クエット流における乱流パターンの様子。色は壁面方向に積分された攪乱エネルギー。上下方向に壁面運動の方向。



学際研究ネットワークの形成

自然科学研究機構ネットワーク型研究加速事業(2023～2027年度)
「**多階層現象の複合大域シミュレーション研究拠点の構築**」

代表者：三浦英昭

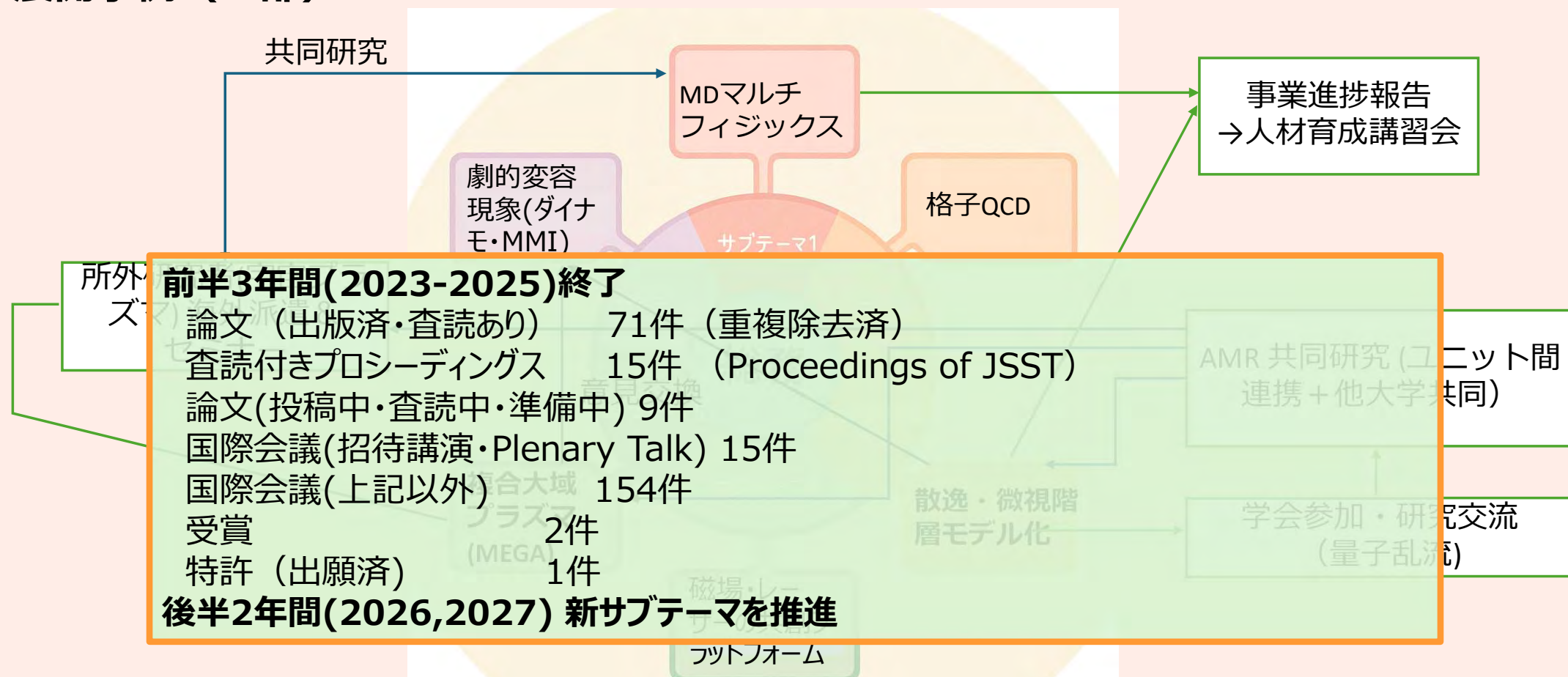
サブテーマを公募（3年間+2年間）、6サブテーマ(2023～2025年度)

- 1：分子動力学法を中心としたマルチフィジックスシミュレーションへの挑戦
- 2：格子 QCDによる強磁場下における核融合反応のエネルギー生成計算
- 3：乱流現象の散逸階層・微視的階層のモデル化研究 →(2)**
- 4：磁場・レーザーの共創プラットフォームを用いたマルチスケール実験室宇宙物理学への挑戦
- 5：エネルギー循環における劇的変容現象のシミュレーション研究
- 6：複合大域プラズマ→(1)**

セミナー・講習会の開催（人材育成）、客員招聘（国内・国外）
ユニット間協力（複合大域シミュレーション、プラズマ量子プロセス、
プラズマ・複相間輸送、可知化センシング、メタ階層ダイナミクス）
他分野・他研究機関・他大学・海外機関と連携

多階層現象の複合大域シミュレーション研究拠点の構築

展開事例（一部）



この他、各サブテーマごとにNIFS-大学-海外機関共同研究・セミナーを展開（図省略）
→複数サブテーマ・複数の所外機関にまたがる研究も

2025年度論文リスト 19件

1. Jiangyue Han, Yasushi Todo, Hao Wang, Masahiko Sato, and Jialei Wang, "Kinetic effects of thermal ions on internal kink modes in tokamak plasmas", Nuclear Fusion 65 (2025) 086044 (11pp)
2. Shun INOUE, Toru TAKAHASHI, ZHANG Siyu, Toshiki TAKAHASHI, Naoki MIZUGUCHI, "Numerical analysis of electrode geometry effects on proton generation and acceleration in pyroelectric crystal electrostatic fields", Plasma and Fusion Research (Rapid Communications), Vol.20, 1205040, DOI: 10.1585/pfr.20.1205040
3. Takuya TAKAHASHI, Toru TAKAHASHI, Toshiki TAKAHASHI, Siyu ZHANG, Shun INOUE, Tomohiko ASAI, Naoki MIZUGUCHI, "Spatial Structure of Low-Frequency Hall-MHD Wave Propagation in a Field-Reversed Configuration Plasma", Plasma and Fusion Research (Rapid Communications), Vol.20, 1203042, DOI: 10.1585/pfr.20.1203042
4. Pratik Patel, Sharad Yadav, Hideaki Miura, and Rahul Pandit, "Uncovering the Varieties of Three-dimensional Hall magnetohydrodynamics Turbulence.", Phys. Fluids .37, 085237 (2025).
5. Y. Todo, M. Idoakass, Hao Wang, R. Seki, Jialei Wang, Shizhao Wei, Hanzheng Li, M. Sato, "Energetic particle driven Alfvén eigenmodes and associated energetic particle redistribution in a tokamak burning plasma", Nuclear Fusion 65 (2025) 102003 (17pp).
6. Bowen Zhu, Hao Wang, Jian Wu, and Haijun Ren, "Prediction of Mode Structure Using A Novel Physics-Embedded Neural ODE Method", Plasma Physics and Controlled Fusion 67 (2025) 085038 (16pp).
7. H. Sugama, "Linear Landau damping, Schrödinger equation, and fluctuation theorem," Phys. Plasmas 32, 080701 (2025).
8. A.J. Brizard and H. Sugama, "Metriplectic bracket for guiding-center Vlasov-Maxwell-Landau theory," Phys. Plasmas 32, 102310 (2025).
9. N. Sato, K. Hori, Axisymmetric dynamos sustained by a modified Ohm's law in a toroidal volume. J. Plasma Phys. 91, E91 (2025).
10. T. Kato, H. Sugama, and T.-H. Watanabe, "Energy exchange between electrons and ions driven by ITG-TEM turbulence," Phys. Plasmas 32, 122303 (2025).[published as a Featured Article]
11. Toseo Moritaka, Robert Hager, Hideo Sugama, Shinsuke Satake, Seikichi Matsuoka, Seung-Hoe Ku, C-S. Chang, Seiji Ishiguro, "Global Gyrokinetic Simulations of Isotope Effects under Ambipolar Electric Fields and Advances Toward Whole-Volume Modeling," Journal of Fusion Energy 44:63 (2025).
12. Z. Chen, H. Wang, H. Ren, Y. Todo, J. Han, J. Wang, "Nonlinear excitation of energetic particle-induced geodesic acoustic mode via resonance overlap in CFQS", Nucl. Fusion 66 (2026) 014003 (7pp). [published as a Cover Article]
13. P. Su, J. Wang, Y. Hu, W. Zhang, W. Shen, J. Huang, Y. Huang, J. Han, C. Pen, N. Chu, T. Shi, Z. Qiu, "Magnetohydrodynamic-kinetic hybrid simulation of Alfvén instabilities in ICRH experiments on EAST", Nucl. Fusion 66 (2026) 022002 (12pp).
14. T. Kotani, M. Toida, T. Moritaka, S. Taguchi, "Threshold analysis of lower hybrid and ion Bernstein wave instability driven by energetic ions", Physics of Plasmas 33, 012115 (2026).
15. Shun INOUE, Toru TAKAHASHI, Zhang Siyu, Toshiki TAKAHASHI, Masahiko SATO, "Numerical Study of Proton Impact Rates on a Solid Target in Pyroelectric Fusion: Effects of Electrode Geometry and Crystal Heating Temperature", Plasma and Fusion Research (2026).
16. R. Seki et al., "Study of high energy ions generated by ion cyclotron range of frequency heating in deuterium plasma", Journal of Fusion Energy 45, 20(2026).
17. Y.H. Shou, X.Q. Wang, Y. Xu, J. Cheng, H.F. Liu, J. Huang, X. Zhang, H. Liu, H. Wang, Y. Todo, M. Isobe, A. Shimizu, S. Okamura, K. Ogawa, and C.J. Tang, "Suppression of resistive ballooning mode by energetic ions in quasi-axisymmetric stellarator plasmas", Plasma Physics and Controlled Fusion 67, 095024 (2025).
18. 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).
19. T. Kato, H. Sugama, and M. Honda, "Effects of Turbulent Energy Exchange between Electrons and Ions on Global Temperature Profile", Plasma Fus. Re. 21 (2026) 1303027.

国内外の主要な研究集会における研究発表

国際会議発表：24件、 国内学会・研究集会発表：18件

基調講演 & 招待講演

1. H. Sugama, "Landau Damping and Information Entropy," 4th International Fusion and Plasma Conference (iFPC 2025) (9-13 June 2025, Daejeon, Korea), PL-9 (Plenary talk)
2. Hao WANG et al, "Preliminary simulation results of energetic particle driven instabilities in VAST stellarator", The 44th International Conference on Simulation Technology, Sep. 1-4, 2025, Aomori, Japan.
3. M. Sato, H. Wang, R. Seki, J. Wang and Y. Todo, "Recent progress and future prospects of kinetic-magnetohydrodynamic hybrid simulations using the MEGA code", AAPPS-DPP2025, Sep. 21-26 2025.
4. H. Miura, S. K. Yadav, K. Araki, R. Pandit, and T. Gotoh, "Characterization of Hall MHD turbulence as wave turbulence", AAPPS-DPP 2025 (Sep.21-26 2025, Fukuoka, Japan, invited talk)
5. T. Kotani, "Harmonic structure of lower hybrid and upper hybrid waves driven by energetic particles", 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2025), Hakata, September 2025 (invited).
6. J.Wang, "Comprehensive simulations of bursting shear Alfvén waves in tokamaks and their control via phase space engineering with ICRF waves", Theory of Fusion Plasmas Joint Varenna-Lausanne International Workshop (Varenna, Italy; September 21-25, 2026).

セミナー実施

1. Sharad Kumar Yadav博士(NIFS客員研究員)セミナー 2025年7月9日 “Magnetic Prandtl number dependent fluctuation spectra and intermittency in 3D Hall-magnetohydrodynamics (HMHD) plasma turbulence”
2. Laura K. Currie 博士(NIFS客員研究員)・Yohei Masada博士 セミナー 2025年7月24日 (メタ階層ユニットと共催) L.Currie: “Towards a diffusion-free regime in models of stellar and planetary convection: theory and simulations”
Y.Masada: “Numerical modeling of solar convection - Impact of non-local effects”
3. 石澤明宏 (京都大学) 「高エネルギー粒子駆動アルフェンモードと乱流の相互作用を特徴づけるパラメータ」 2025 年 11 月 14 日 (金)
4. 洲鎌英雄 (核融合科学研究所) 「ランダウ減衰・シュレディンガー方程式・ゆらぎの定理に関する論文について」 2026年2月9日 (月) 13:00-15:00
5. ネットワーク型研究加速事業「分野融合ネットワーク型共同研究加速」令和7年度進捗報告会 (2月19日)
6. 陰山聡 (神戸大学) (客員教授) 「正四面体ダイナモモデル」 2026 年 2 月 26 日(木) 10:00-12:00
7. 名工大・核融合研共同セミナー (ネットワーク型研究加速事業) (オンライン) 下川辺隆史 (東京大学准教授) 「GPUによるAMRと深層学習による流体シミュレーション結果予測研究の最近の進展について」
2026年3月2日 (月) (初学者向け講習会)、2026年3月9日 (月)
8. 日本シミュレーション学会初学者向け機械学習講習会 (ネットワーク型研究加速事業による支援)