

構造形成・持続性ユニット 2025年度成果全体報告

発表者：高橋裕己（2025年度ユニット長）



所内メンバー（16名）

磯部光孝、市口勝治、長壁正樹、小川国大、佐竹真介、高橋裕己、山口裕之、伊藤淳、
川本靖子、清水昭博、西村伸、奴賀秀男、藤田慶二、井戸毅（CA）、古賀麻由子（CA）、
Sangaroon Siriyaporn（CA）

所外メンバー（10名）

井戸毅（九州大学）、稲垣滋（京都大学）、篠原孝司（東京大学）、長崎百伸（京都大学）、
比村治彦（筑波大学）、藤田隆明（名古屋大学）、村上定義（京都大学）、
古賀麻由子（兵庫県立大学）、森下侑哉（京都大学）、
Sangaroon Siriyaporn（マハーサーラカーム大学）

ユニットの研究目的

- 核融合プラズマの閉じ込め改善と定常化の鍵となる、プラズマが自発的に内部構造を形成し、維持しようとするメカニズムの理解。
 - > 自然界の様々な散逸系でみられる普遍的な現象である、自発的な構造形成の背後にある共通原理をプラズマの構造形成の研究を通じて探求。
- 対称性やエントロピーといった物理学の根本的な概念を再検討することで、構造形成の原理を解明し、高性能の閉じ込め配位を探求。

プラズマの内部構造形成・維持の理解

高エネルギー粒子の発生、吸収、緩和



✓ 駆動源となる高エネルギー粒子

粒子・エネルギーバランス、
マクロな分布形成/遷移現象



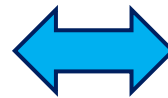
✓ プラズマ内部の遷移・分岐現象

平衡、流れによる安定化



✓ 巨視的平衡とダイナミクス

準定常状態への到達・維持



高性能の閉じ込め配位の探求

- シミュレーションによる位相空間分布の時間発展の様相を解明

✓ 統合シミュレーションの高度化

- 先進的な設計手法を開発し、具体的な新配位を提案

✓ 閉じ込め配位の最適化



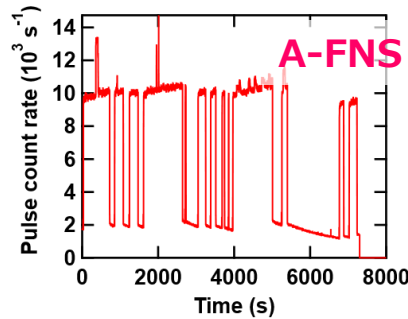
✓ CHD-Uの物理・工学検討

✓ CFQSプロジェクトの進展

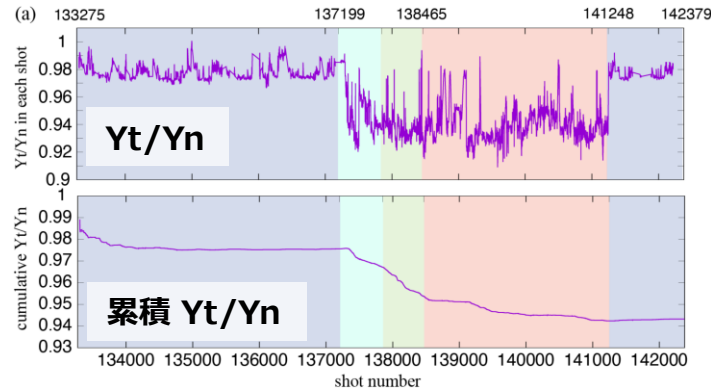
2025年度の研究の進展

高エネルギー粒子挙動・MHD平衡

・EP, 放射線計測にかかる国内外の共同研究の発展

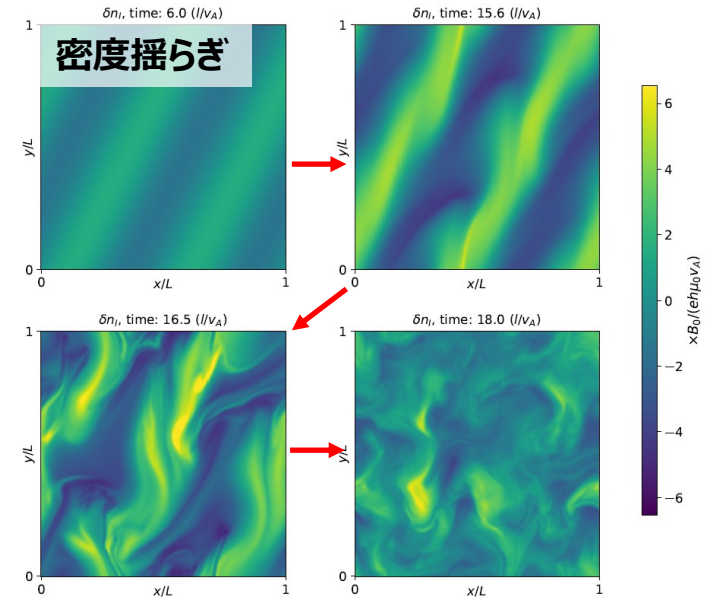


・LHD重水素実験でのT発生量の現実的評価



H. Nuga+, Nucl. Fusion, 65, 106002 (2025)

・GKVによる磁気圏-電離層結合系のシミュレーション



Watanabe, T.-H., Fujita, K. and S. Maeyama., Geophysical Research Letters (2026)

・流れをもつ軸対称MHD平衡の簡約化モデルの高次項の解析

$$I = B_0 R_0 + I_1 + I_2 + I_3, \quad p = p_1 + p_2 + p_3$$

$$n = n_0 + n_1 + n_2, \quad v_{\perp} = v_{\perp 1} + v_{\perp 2}$$

$$I_3 - \mu_0 m_i \frac{n_0}{B_0^2} \left(v_{\perp 1}^2 B_0 R_0 - I_0^2 \frac{\Phi_{1\perp}'}{B_0} v_{\perp 2} \right)$$

$$+ \mu_0 m_i \frac{\Phi_{1\perp}'}{B_0} \left(R_0^2 n_1 + 3 n_0 R_0 x \right) v_{\perp 1} + \mu_0 m_i \frac{|\nabla \psi|^2}{B_0^2} n_0 I_0 \frac{\Phi_{1\perp}^2}{B_0^2} = I_{M3}(\psi)$$

$$\frac{m_i}{2} \left[v_{\perp 1}^2 - 2 R_0 \Phi_{1\perp}' \left(\frac{x}{R_0} + \frac{\Phi_{1\perp}'}{\Phi_{1\perp}'} \right) v_{\perp 1} - 2 R_0 \Phi_{1\perp}' v_{\perp 2} - \frac{\Phi_{1\perp}^2}{B_0^2} |\nabla \psi|^2 \right]$$

$$+ \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{1}{n_0} \left[\left(\frac{n_1}{n_0} \right)^2 p_1 - \frac{n_2}{n_0} p_1 - \frac{n_1}{n_0} p_2 + p_3 \right] = H_3(\psi)$$

$$p_3 = \tilde{p}_3(R, Z) + p_{3*}(\psi)$$

$$v_{\perp 2} = \tilde{v}_{\perp 2}(R, Z) + v_{\perp 2*}(\psi)$$

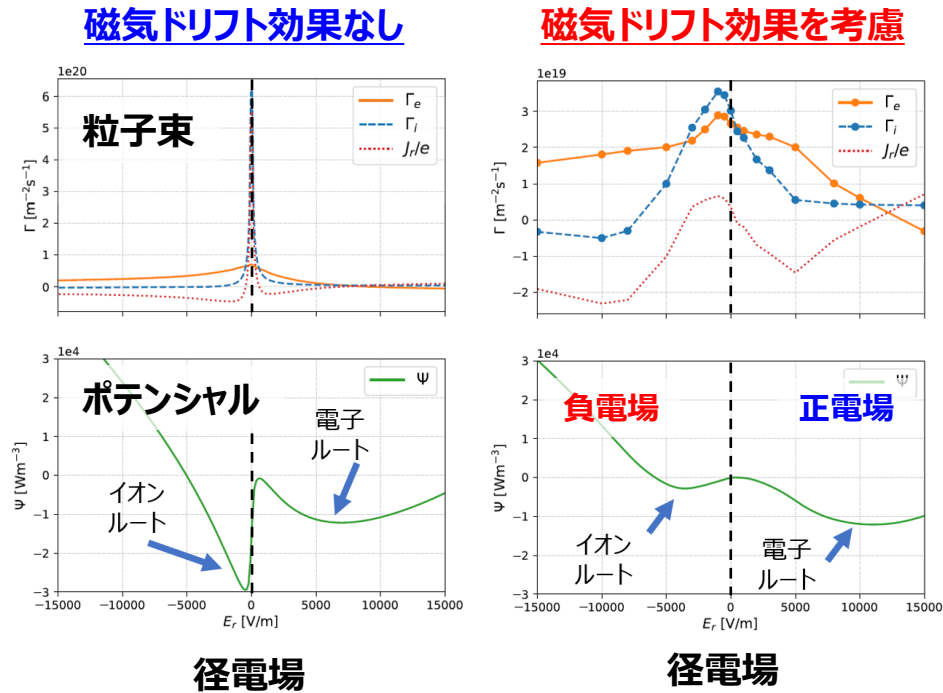
$$H(\psi) = H_1(\psi) + H_2(\psi) + H_3(\psi)$$

$$I_M(\psi) = I_{M1}(\psi) + I_{M2}(\psi) + I_{M3}(\psi)$$

伊藤 淳,
JSPF年会
(2025)

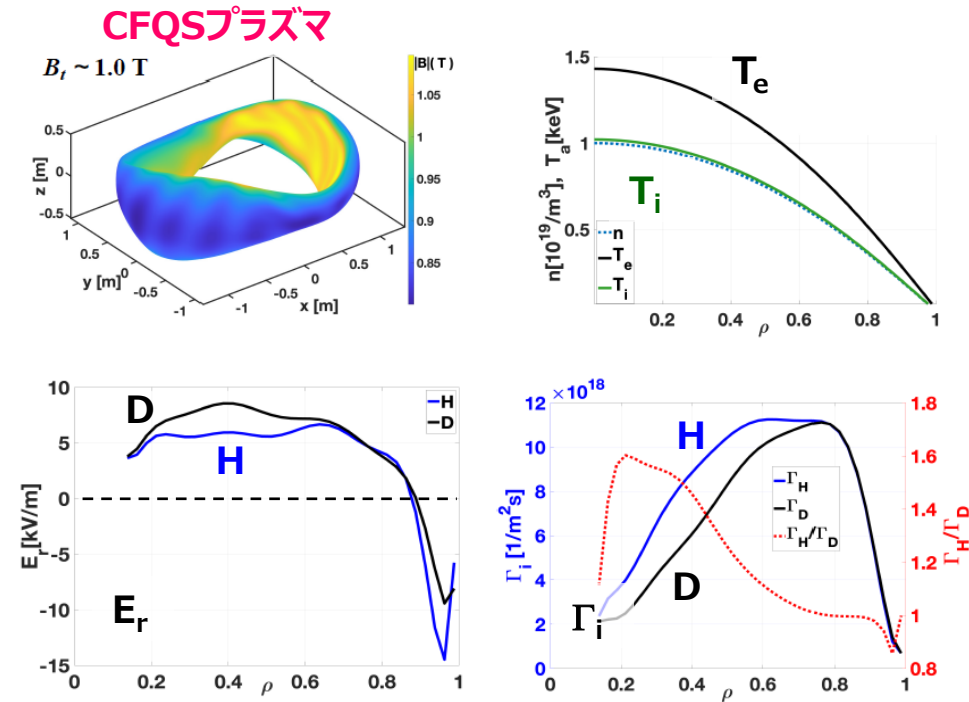
遷移・分岐現象

・両極性径電場の安定性と遷移に関する研究



Fujita, K., & Satake, S.,
arXiv:2603.03656 (2026)

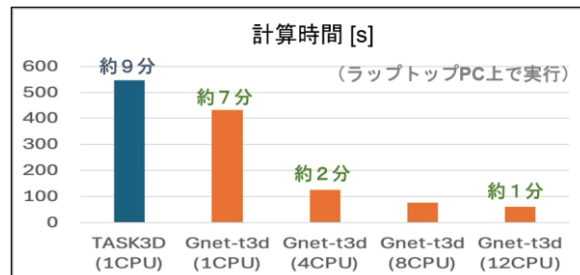
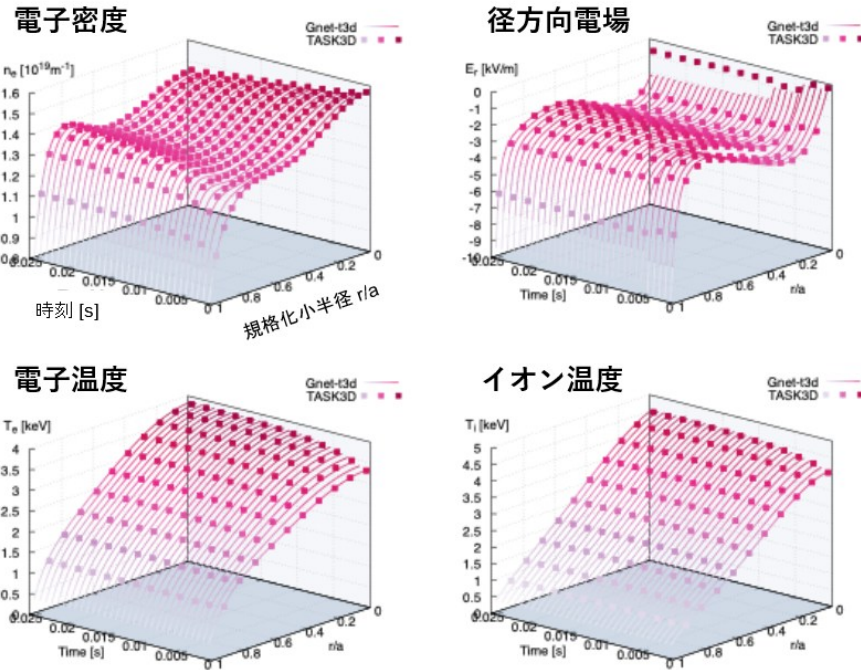
・両極性電場の新古典輸送への影響に対する同位体効果の研究



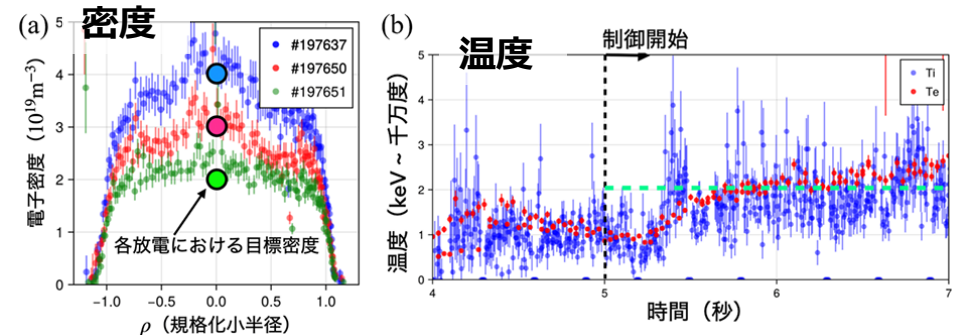
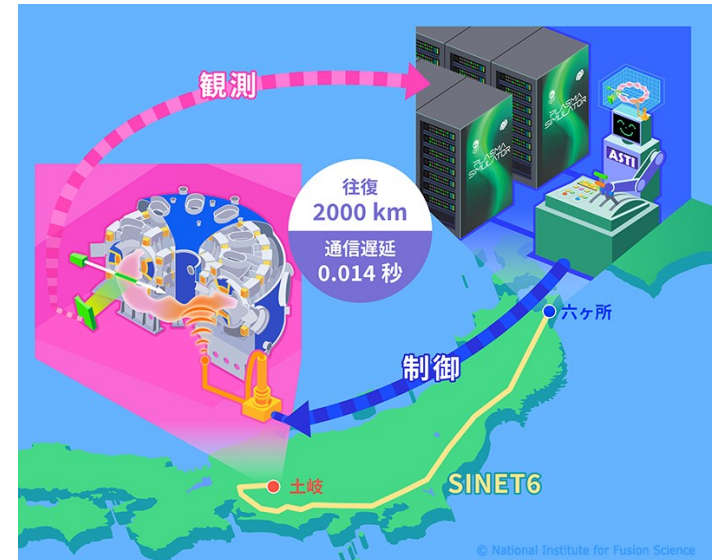
H. F. Liu, S. Satake,
H. Takahashi+, APPC (2025)

環状プラズマ統合シミュレーション

・磁場配位汎用型統合コードの開発と検証



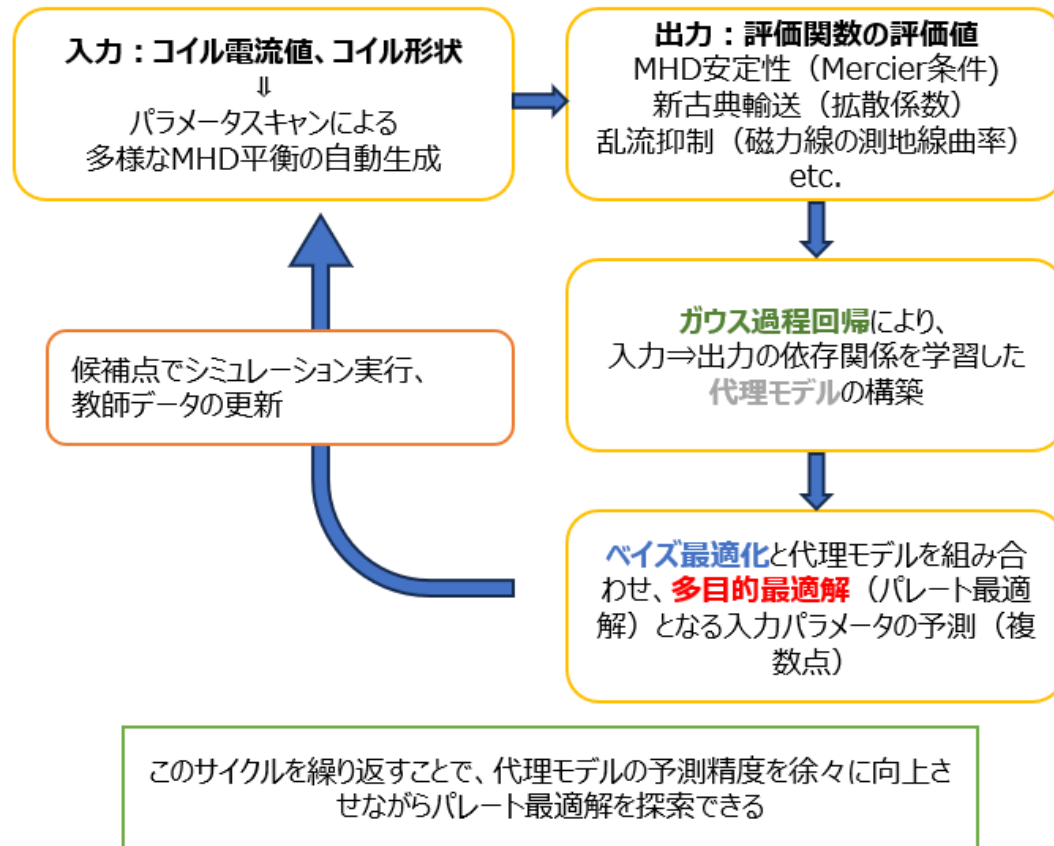
・核融合プラズマの遠隔リアルタイム予測制御の実証



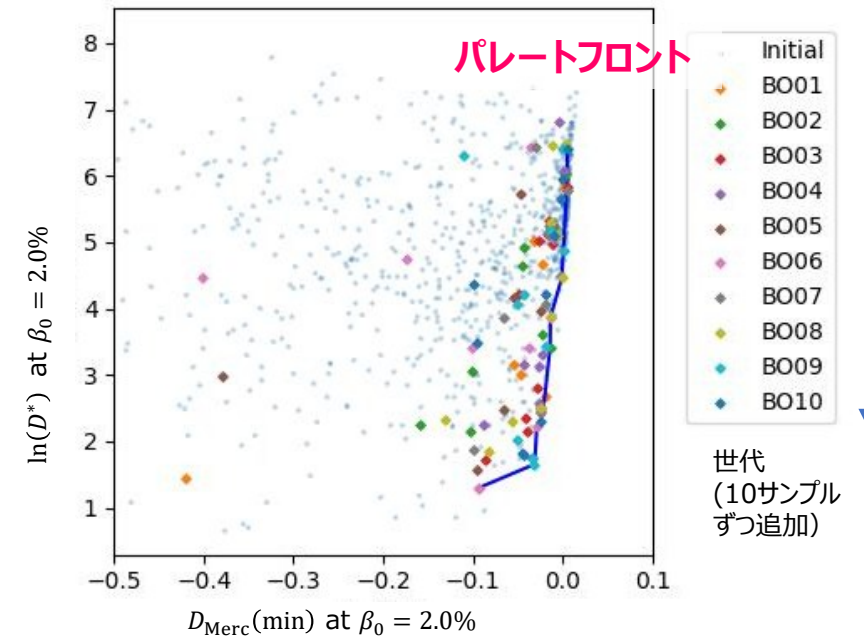
森下、村上、長壁+,
プレスリリース (2025.12.19)

閉じ込め配位の最適化

・機械学習による多目的最適化配位探索法の構築



LHD磁場配位探索への応用例



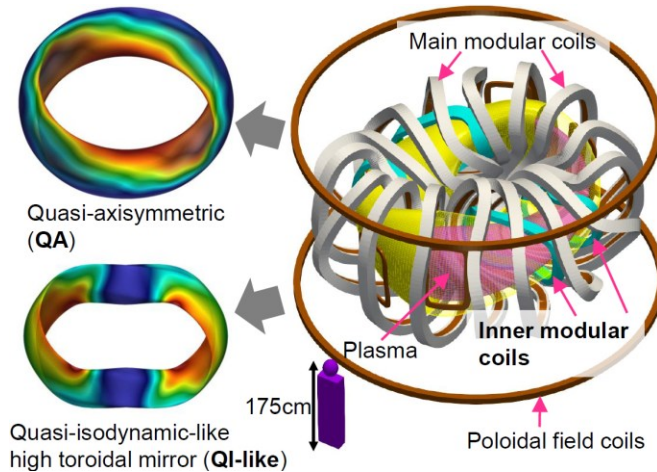
S. Satake, S. Yabumoto, and
H. Yamaguchi, APFA2025

CHD-Uの物理・工学設計の進展

・CHD-Uの物理設計検討

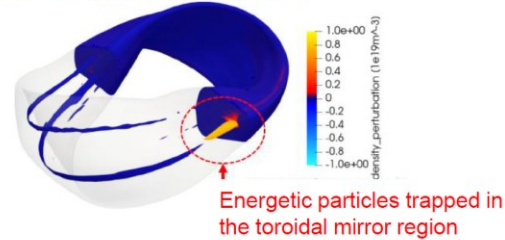
H. Yamaguchi, APFA2025、ISHW2026

VAST (Variable symmetry torus)



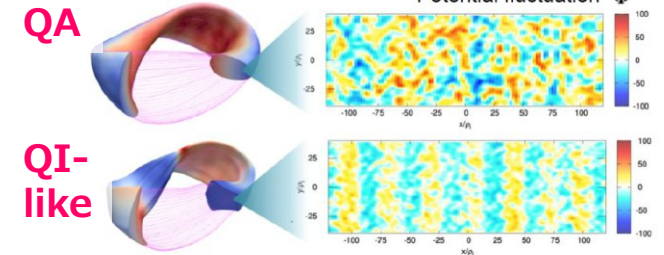
Excitation and observation of phase-space dynamics

Electron-density perturbation by ECH



Experimental evidence of phase-space dynamics of plasma

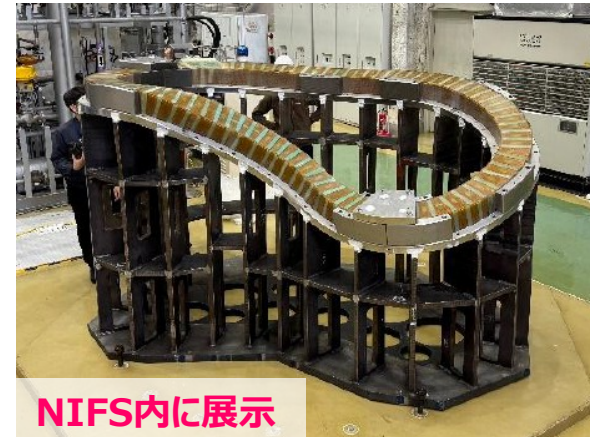
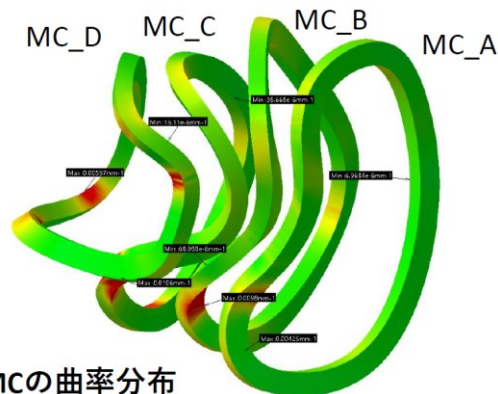
Study of fluctuations, flows, and transport by utilizing magnetic flexibility



Scientific basis

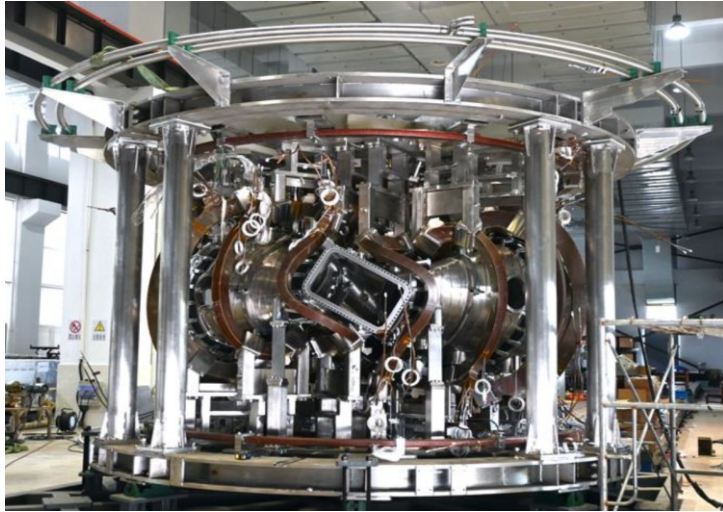
Design principle for high-performance reactor based on phase-space physics.

・MCプロトタイプ製作



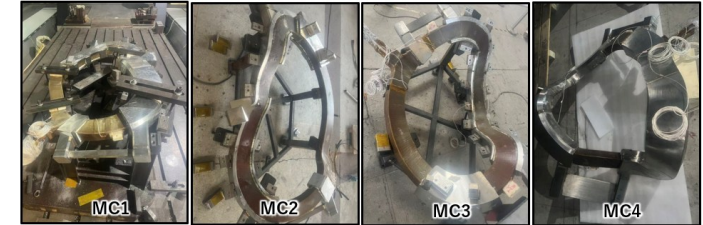
CFQSの1 T運転に向けた取り組み

CFQS-T (0.1 T, July 2024 ~ May 2025)



CFQS (1 T)

Reinforcing MC support structure was completed recently.

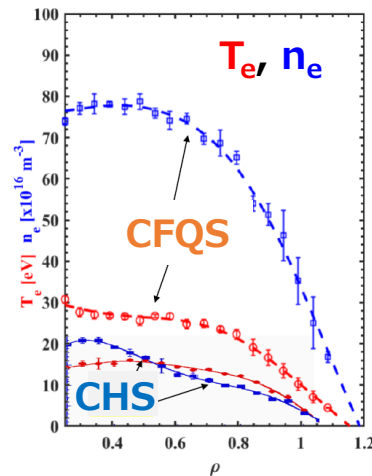
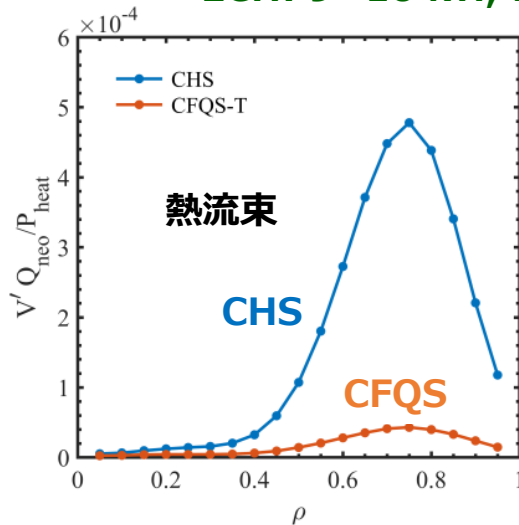


Assembly of the CFQS main body is ongoing.

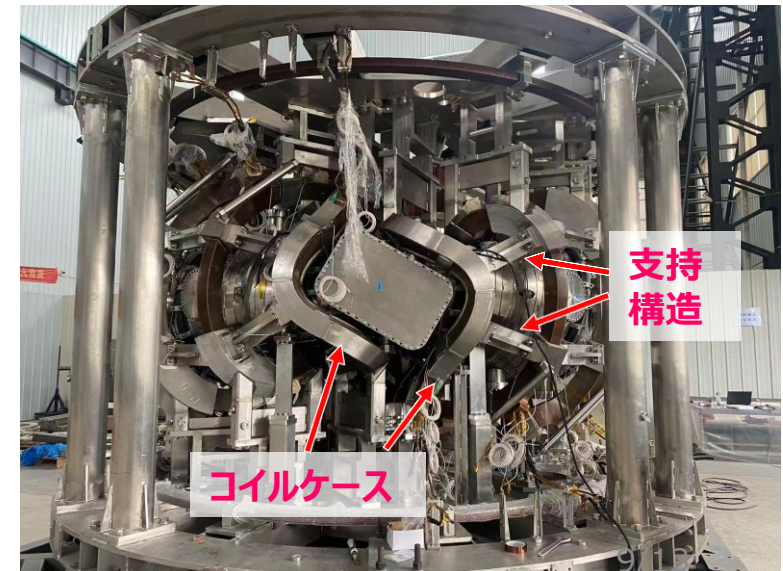


H. Tanoue+, ISHW2026

ECH: 9~10 kW, Bt: 0.06~0.07 T



Y. Xu+, ISHW2026



論文リスト

論文

1. S. Yabumoto, S. Satake, H. Yamaguchi, "Prediction of Plasma Confinement Indices by Gaussian Process Regression", Plasma Fusion Res. **20** (2025) 1403026.
2. Y. Morishita, S. Murakami, N. Kenmochi et al., "Development of Data Assimilation System for Temperature and Density Control in Helical Plasmas", Plasma Fusion Res. **20**, (2025) 1403034.
3. K. Ogawa, M. Osakabe, H. Nuga, M. Isobe, "Aneutronic Fusion Study in Large Helical Device", J. Fusion Energy **44** (2025) 52.
4. H. Nuga, R. Seki, K. Ogawa et al., "Kinetic estimation of tritium and neutron yields in all LHD deuterium experiment campaigns", Nucl. Fusion **65** (2025) 106002.
5. Y. Lang, M. Isobe, A. Shimizu et al., "Effect of finite beta on neoclassical transport characteristics in CFQS quasi-axisymmetric stellarator", J. Phys. Commun. **9** (2025) 075004.
6. K. Ogawa, L. Liao, T. Kobuchi et al., "Progress in the development of radiation detectors for fusion neutron source A-FNS", Fusion Eng. Des. **218** (2025) 115214.
7. S. Sangaroon, H.J. Kim, N.D. Quang et al., "Pulse height analysis and pulse shape discrimination of pure LaCl₃ scintillation crystal across a broad neutron energy range", Radiat. Phys. Chem. **239** (2026) 113290.
8. K. Ogawa, S. Sangaroon, T. Kobuchi, M. Isobe, "Neutron Camera in Large Helical Device", J. Fusion Energy **45** (2026) 7.
9. K. Ogawa, S. Sangaroon, H. Matsuura et al., "Gamma Ray Diagnostics in Large Helical Device", J. Fusion Energy **45** (2026) 14.
10. K. Fujita and S. Satake, "Effect of magnetic drift on the stability structure of the ambipolar condition", arXiv:2603.03656 (2026).
11. H. Takahashi, K. Nagaoka, M. Osakabe et al., "Progress in Extending the High-Temperature Plasma Regime in the LHD", J. Fusion Energy **45** (2026) 29.

招待講演リスト

招待講演

1. **Y. Morishita**, **S. Murakami**, N. Kenmochi et al., “Digital twin control of fusion plasma based on data assimilation”, 19th Japan-Korea Joint Workshop on Theory and Modeling of Plasmas, Aug. 26-27, 2025 (Plenary).
2. **Y. Morishita**, **S. Murakami**, N. Kenmochi et al., “Adaptive model predictive control of fusion plasma based on data assimilation system ASTI”, 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Sep. 21-26, 2025 (Invited).
3. **K. Ogawa**, R. M. Magee, T. Tajima et al., “Demonstration of aneutronic p-11B reaction in a magnetic confinement device”, 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Sep. 21-26, 2025 (Invited).
4. **K. Fujita** and T.H. Watanabe, "Extension and application of the gyrokinetic code GKV to space plasmas", 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Sep. 21-26, 2025 (Invited).
5. **Y. Morishita**, **S. Murakami**, N. Kenmochi et al., “Development of data assimilation system ASTI toward digital twin control of fusion plasma”, 30th IAEA Fusion Energy Conference, Oct. 13-18, 2025. (Oral).
6. **小川国大**、Richard Magee、田島俊樹 他、「磁場閉じ込めプラズマにおける p-11B 先進燃料核融合反応の実証」、第42回プラズマ・核融合学会年会、2025年12月1日-12月4日 (招待).
7. **山口裕之**、磯部光孝、小川国大 他、「核融合科学研究所における新装置 CHD-U の検討」、第42回プラズマ・核融合学会年会、2025年12月1日-12月4日 (招待).
8. **森下侑哉**、「データ同化を活用した核融合プラズマの予測制御」、第28回若手科学者によるプラズマ研究会、2026年3月11日-3月13日 (招待).

受賞・プレスリリースリスト

受賞

1. 小川 国大、隅田脩平 (QST)、磯部光孝、篠原孝司 (東京大学)、石川正男 (QST)、高田英治 (富山高専)、令和6年度JT-60共同研究優秀賞、「JT-60SAにおける中性子計測機器の較正方法の検討」(2025年10月28日)
2. LIAO Longyong、2024年度中国国家優秀私費留学生賞、「環状プラズマにおける放射線計測機器を用いた高エネルギー粒子閉じ込め研究に関する研究」(2025年11月21日)

プレスリリース

1. 森下侑哉、村上定義、鈕持尚輝、舟場久芳、横山雅之、長壁正樹、石井康友 (QST)、宮戸直亮 (QST)、徳永晋介 (QST)、上野玄太 (統数研)「核融合プラズマの遠隔リアルタイム予測制御を実証-1,000 km離れたスーパーコンピュータにデジタルツインを実現 -」、2025年12月19日

まとめ

- JT-60SAの中性子分布計測、NIFSで開発した検出器のGAへの設置、MPIとの損失高エネルギーイオンプローブに掛かる共同研究、A-FNS用放射線検出器の研究開発を展開。
- LHD重水素実験の全放電に対してTASK3D-aによりNB高速イオン由来の現実的なYt/Yn比を評価。
- GKVを拡張しオーロラ現象の非線形シミュレーションに適用。オーロラ構造に対応する電離層密度の自発的成長と、波動粒子相互作用によるオーロラ電子の加速を同時に再現。
- 流れをもつMHD平衡に対する簡約化モデルにおける任意関数と物理量との関係を明らかにするため、簡約化モデルの高次の項を導出。
- 新古典輸送の軌道モデルに磁気ドリフトの効果を導入。最も安定な解が入れ替わるとともに、安定解の間のポテンシャル障壁が著しく低下することがわかった。
- FORTEC-3DをCFQSに適用し、電場形成の同位体効果を評価。
- 多様な3次元磁場配位に対応可能な統合コードGnet-t3dを新規に開発。既存の統合輸送コードTASK3Dに比べて9倍程度の高速化を達成。
- プラズマシミュレータをSINET6で接続しASTIによるLHDプラズマの制御を実施。2万コアの占有計算と処理遅延の最小化により、遠隔地スパコンを介したリアルタイム予測制御に成功。
- 機械学習による多目的最適化配位探索法の構築を行い、LHDへの応用でコイル電流の広範なスキャンにより、MHD安定性と新古典拡散を同時最適化が可能であることを示した。
- CHD-Uの候補VASTにおいてQA/QI配位の物理特性の理解が進展した。同時に工学設計検討も進展し、モジュラーコイルのプロトタイプを制作。
- CFQSのコミッショニングが完了。1 T運転に向けた改修が完了し本格運転フェーズに移行。
- 11編の主著論文、8件の招待講演、2件の受賞、1件のプレスリリースを発信。