



構造形成・持続性ユニット 2023年度成果報告

発表者：山口裕之（ユニット長）



内容

構造形成・持続性ユニット
2023年度成果報告

2024/5/9



- 事前提出資料（定型フォーム）のまとめ
- 個別の研究成果（抜粋）
- 国際的・学際的な連携の広がり
- まとめ

事前提出資料（定型フォーム）のまとめ

- 核融合炉の高効率化・小型化を目指す研究において、プラズマの閉じ込め改善と定常化が中心的な課題である。その鍵となるのが、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を理解することである。
- このような自発的な構造形成は、天体や生命活動、化学反応など、自然界の様々な散逸系においてみられる普遍的な現象である。その背後にある共通の原理をプラズマの構造形成の研究を通じて探求する。
- 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する。



無数の要素から構成されるマクロな系がエネルギーの流れの中に置かれたとき、その動態はいかにして決定され、どのような状態が維持されるのか？

- これまで培ってきた研究実績と共同研究ネットワークを活かし、これらをさらに発展させ、プラズマにおける構造形成の物理解明と制御、そして最適化に必要な不可欠となる学術基盤を固めていく。
- エントロピー生成と相転移という観点から、対象とする系を問わない学際的な研究へと展開を図る。
 - 構造形成の駆動源となる高エネルギー粒子の挙動について、多様な閉じ込め配位に対してその実・速度分布関数の精密計測を行い、現象の理解を深める。計測器開発およびシミュレーションとの連携を進めるとともに、JT60-SAおよびITER核燃焼実験に向けて必要な技術と知見を培う。
 - プラズマの巨視的平衡とダイナミクスについて、フローや圧力非等方性を伴う平衡・ダイナミクス・安定性を解明するための理論およびシミュレーションを開発する。
 - プラズマ内部の遷移現象や分岐現象について、磁場の対称性に着目したプラズマ実験、データ駆動型のアプローチ、シミュレーションを駆使して解明を目指す。
 - 環状プラズマの統合シミュレーションを高度化し、位相空間分布の時間発展が決定される様相を解明する。
 - 閉じ込め配位の最適化について、先進的な設計手法を開発し、具体的な新配位を提案する。

研究戦術（具体的な取り組み）

構造形成・持続性ユニット
2023年度成果報告

2024/5/9



- ✓ LHDが備える世界最高レベルの入射エネルギーを持つNBIを活用しつつ、国内外のさまざまな装置を対象とした高エネルギー粒子計測手法の開発、および、高エネルギー粒子が駆動する現象についての国内外の共同研究を進めている。分光計測、放射線（中性子・ γ 線）計測の高性能化により分布関数の詳細解析を進める。
- ✓ 巨視的平衡について、LHD実験と連携したフロー効果の3次元解析と、軸対称系を対象としたフローと微視的效果の理論研究の2系統で進めている。
- ✓ 国際共同プロジェクトとしての準軸対称ステラレータCFQSの建設を進め、トカマクも含む国際共同研究ネットワークの形で、磁場の軸対称性を制御する先駆的実験の準備を着実に進めている。
- ✓ 不純物イオン輸送について、LHD実験と連携したシミュレーション解析を進めつつ、径電場の決定機構についてエントロピー生成率などの新たな観点から理解を試みる。
- ✓ 閉じ込め配位最適化について、ガウス過程回帰や遺伝的アルゴリズム、自由曲線表現などを取り入れた先進的ツールの開発整備を行っている。また、新たな国際共同研究体制の構築に着手した。
- ✓ 5次元位相空間を取り扱う運動論的な統合コードの整備を進め、LHDにおける高速イオンを含む両極性電場の解析を行なっている。

ユニットメンバー（研究体制）

構造形成・持続性ユニット
2023年度成果報告

2024/5/9



2023年度所内メンバー（13名）

山口裕之、長壁正樹、磯部光孝、小川国大、
高橋裕己、佐竹真介、市口勝治、清水昭博、
西村伸、奴賀秀男、川本靖子、伊藤淳、後藤拓也

2023, 2024年度研究戦略会議所外メンバー（8名）

村上定義（京都大学）、森下侑哉（京都大学）、
長崎百伸（京都大学）、稲垣滋（京都大学）、
藤田隆明（名古屋大学）、篠原孝司（東京大学）、
比村治彦（京都工業繊維大学）、井戸毅（九州大学）

特筆される成果と見込み 1/3

構造形成・持続性ユニット
2023年度成果報告

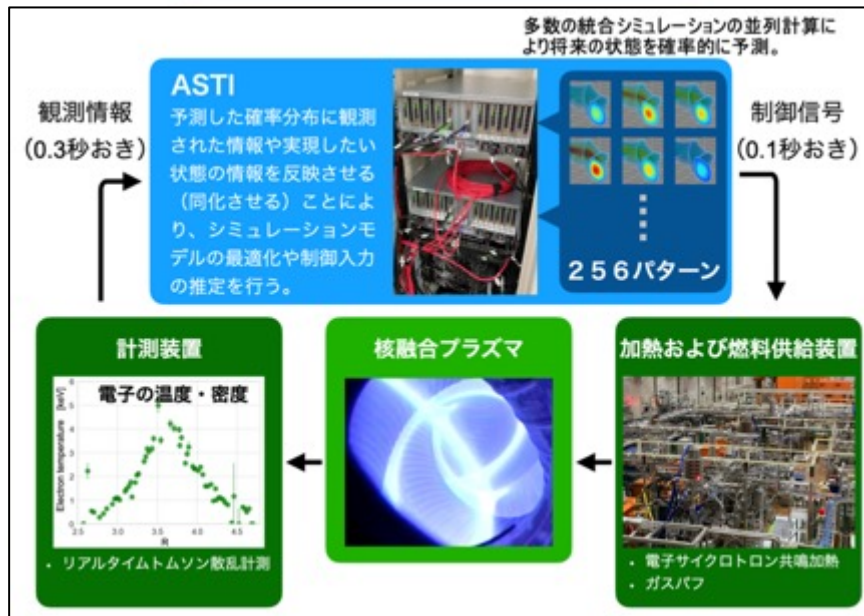
2024/5/9

先進的なプラズマ制御手法の開発と実証

- LHDにおいて、デジタルツインを用いたプラズマ制御の実証実験を実施。
- システムモデルとして統合コードTASK3Dを用いるデータ同化型の予測・制御システムASTIを開発し、LHDにおいて中心電子温度の時間発展を制御することに成功した。
- 核融合プラズマにおける困難な制御問題（多変量の同時制御、径方向分布制御、径電場分布の制御、突発的事象の回避など）に対処するための道を開く成果。
- この成果の発展として、スーパーコンピュータ（プラズマシミュレータ雷神）を用いた、より高度な制御の実証実験へむけて準備が進行中である。

（本成果は、当ユニットの研究戦略会議所外メンバーを中心とする共同研究チームによって得られたため、特筆される成果に含めた）。

データ同化：地球科学等の分野で開発・応用が進んできた技術であり、現実の観測データを取り入れることで数値モデルの予測性能を高め、より現実に近い予測を可能とする。



- [Y. Morishita+, Scientific Reports, 2024]
- プレスリリース
[\[https://www.nifs.ac.jp/news/researches/240126.html\]](https://www.nifs.ac.jp/news/researches/240126.html)

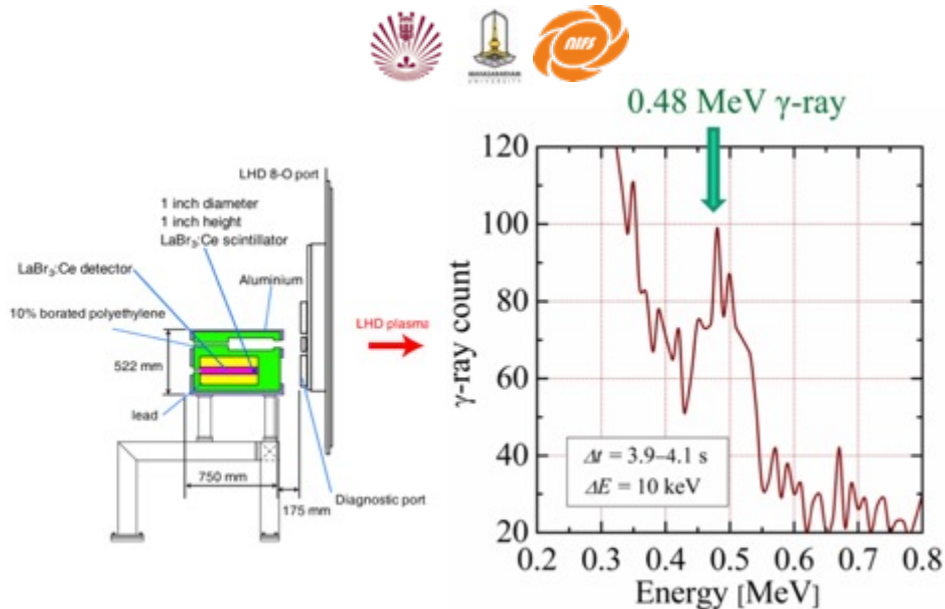
特筆される成果と見込み 2/3

構造形成・持続性ユニット
2023年度成果報告

2024/5/9

高時間分解能とエネルギー分解能を特徴とする LaBr₃:Ce γ 線シンチレータ検出器の開発

- LaBr₃:Ceシンチレータに基づき、シンチレータの小型化や放射線遮蔽の強化により高速中性子や迷走 γ 線の影響を低減した、高分解能の γ 線検出機を開発した。
- LHDにおいて、重水素プラズマに対する⁶LiFペレット入射実験を行い、開発した検出機により0.48MeV付近にピークを持つ γ 線エネルギースペクトルを検出した。このピークは高エネルギー水素ビームとの核弾性散乱で生じる高速重水素イオンが関与する⁶Li(d,p' γ)⁷Li反応に対応すると考えられる。
- γ 線計測はITERのD-T実験フェイズにおける α 粒子閉じ込めや、中性子を発生しない/発生量の少ない先進燃料核融合反応の有力な計測手段であり、本成果はその精密な理解に寄与すると期待される。



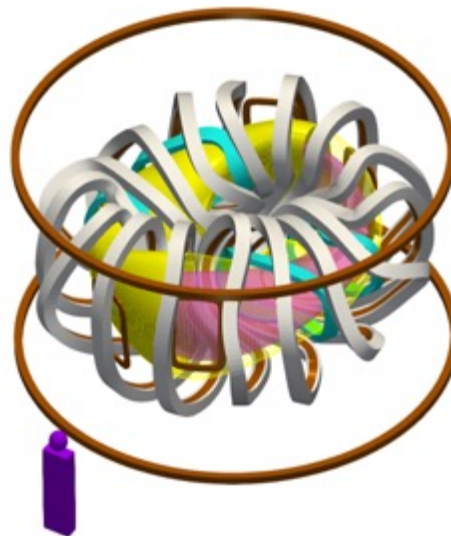
[K. Ogawa et al., JINST 18 P09024 (2023)]

ロードマップ計画へ向けた新装置の考案と設計

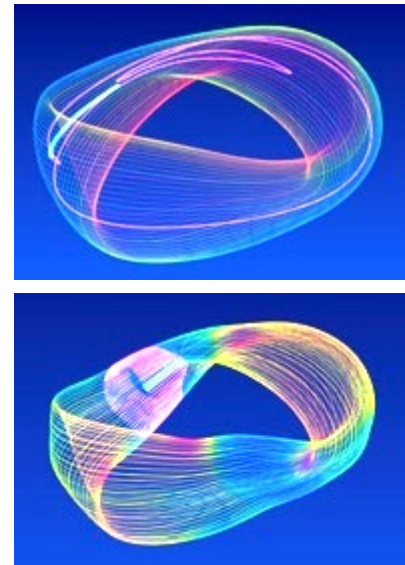
- 「ロードマップ2023」に掲載された核融合科学研究所の次期計画を念頭に、磁場配位を通じてプラズマ内部の集団現象の様相を操作可能な環状プラズマ装置の設計を行った。(ユニットで開発している最適化コードによる成果)
- 磁場の対称性や粒子軌道のトポロジー、微視的乱流、高エネルギー粒子分布関数の様相をコイル電流比の制御によって操作可能な装置設計が得られている。
- 速度分布関数の多様性が創発する集団現象(ミクロ集団現象)を世界に先駆けて解明する実験プラットフォームとすべく、詳細設計へ向けた具体的な工学検討、および、プラズマのさらに詳細な物理解析を進めている。

(本研究課題は、核融合科学研究所・技術部との協力によって推進されている)

磁場コイル系の外観



代表的な磁力線構造と粒子軌道



- H Yamaguchi et al., 29th IAEA Fusion Energy Conference (London, 2023)
- 山口裕之他、第40回プラズマ・核融合学会年会(盛岡、2023)

思うようにいかない点と解決策

これまでとは異なる分野への研究展開をより充実させたかったが、当初想定よりは限定的となっている。また、新しく取り組み始めた研究については、最初期ということもあり成果論文が低調である。

ロードマップ計画と関連する新装置設計に多大なエフォートを割いたことも要因と考えている。今後、検討体制を拡大することで改善されていくと期待している。

評価委員会への要望

研究所の重要なプロジェクトに関連してユニットが行う人事に関するアカデミックプランの提案について、配慮をいただきたい。

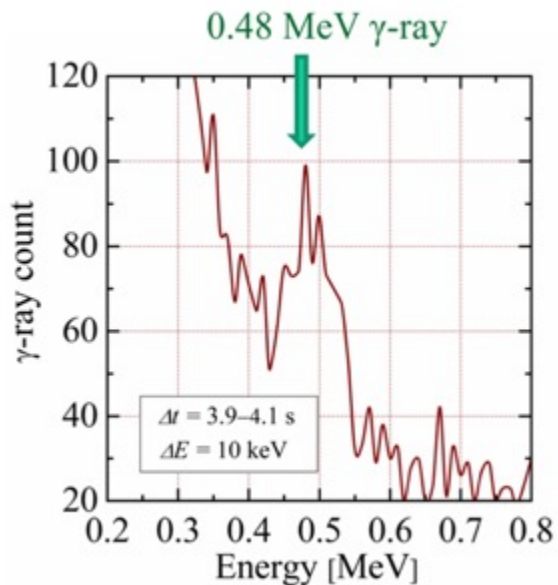
個別の研究成果（抜粋）

核燃焼プラズマ実験の時代に向けた 高エネルギー粒子の計測手法に関する進展

構造形成・持続性ユニット
2023年度成果報告

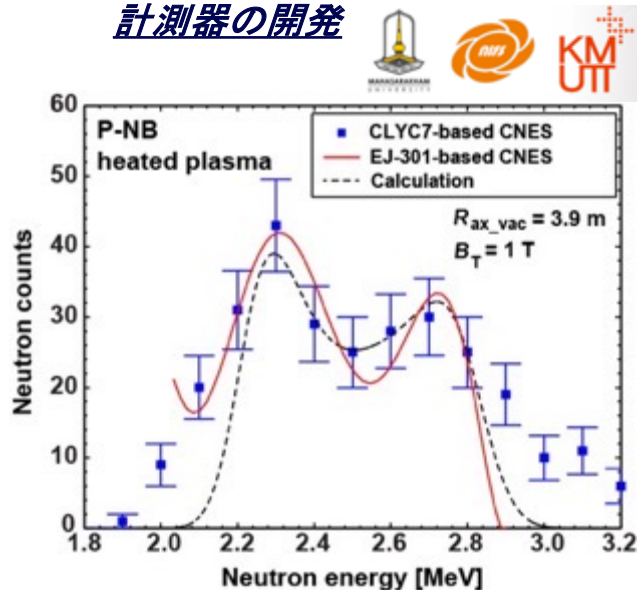
2024/5/9

γ 線シンチレータ検出機の開発



[K. Ogawa et al., JINST 18 P09024 (2023)]

中性子エネルギースペクトル 計測器の開発



[S. Sangaroon et al., 18th of Siam Physics
Congress 2023 (SPC2023)]

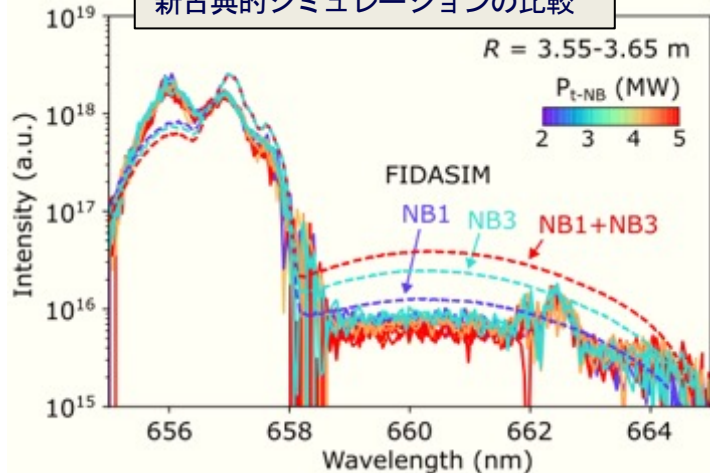
- γ 線・中性子のエネルギースペクトル計測器機を開発し、LHD重水素実験に適用し検証。
- プラズマ内部の高エネルギー粒子分布、エネルギー伝達に関わる情報を取得

→ ITERにおける α 粒子閉じ込め挙動の解明、先進燃料核融合の精密計測に向けた基盤を着実に構築。

LHD プラズマにおける高速イオン 分布硬直性の観測



荷電交換分光計測 (FIDA)と
新古典的シミュレーションの比較

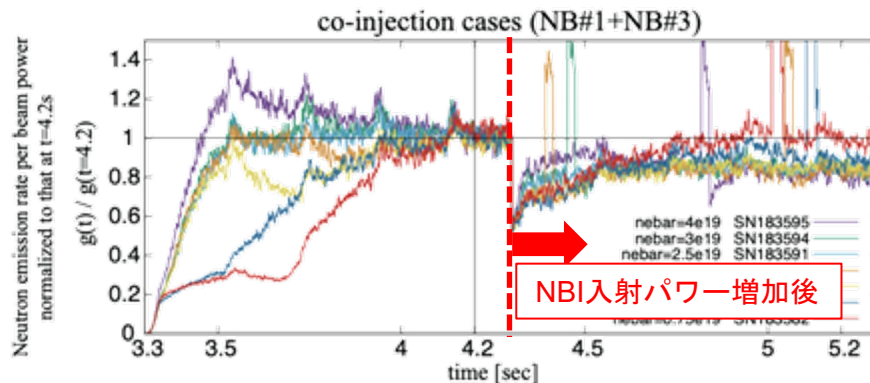


[S. Kamio et al., 7th AAPS-DPP (2023)]

→ Alfvén Eigenmodeによる高速イオン分布硬直化が環状プラズマに普遍的な現象であることを示唆

MHD的に静かなLHDプラズマにおいて、 ビーム入射パワーに依存する新たな 高速イオン損失現象を発見

NBI入射パワー当たりの中性子発生率 (規格化値)



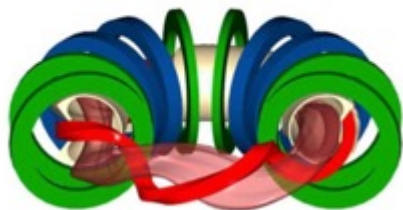
[H. Nuga et al., Nuclear Fusion (2024)]

→ 高速イオン閉じ込めを精密に評価する上で重要な知見

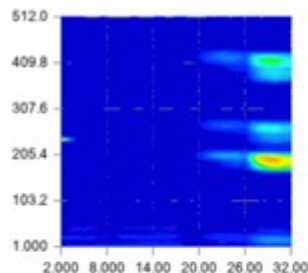
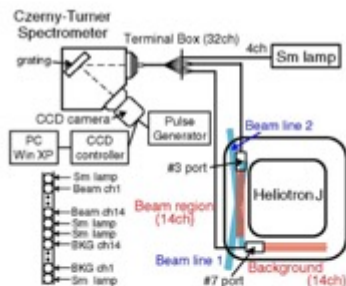
S.Nishimura, H.Yamaguchi, S.Kobayashi, S.Kado, T.Minami, S.Ohshima,
H.Okada, Y.Nakamura, and K.Nagasaki

APS-DPP2023発表より抜粋
科研費 JP18K03587
双方向共同研究NIFS17KUHL079

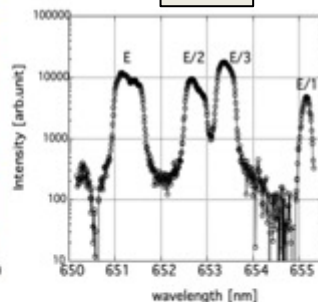
A recent example in the Heliotron-J (non-axisymmetric torus)



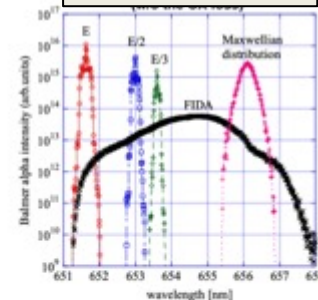
The beam energy component of E/18 is due to H₂O in the ion source.
The strong reduction in the low energy region indicates the CX loss.
Analogous results were obtained also by the NPA measurement.



実験



シミュレーション



Heliotron-JのFIDAスペクトルでは荷電交換損失無しのGNET+FIDASIM計算に比べ、低エネルギー領域が減衰しており、同様な事はNPAでも見られている。今後の同規模実験であるCFQSの高速イオン駆動諸効果の実験研究でも同様な事が予想される。このような状況下でそれら検討を如何に進めるかを、同規模立体磁気軸装置であるHeliotron-Jで考えている。

流れをもつ軸対称MHD平衡の数値解析が進展

構造形成・持続性ユニット
2023年度成果報告

2024/5/9

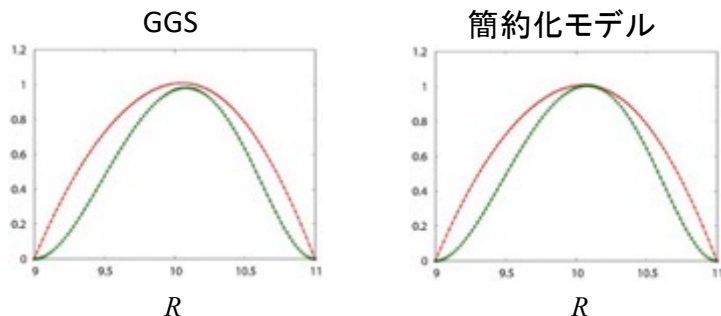


- トロイダル及びポロイダル流を含む軸対称MHD平衡に一般化されたGrad-Shafranov (GGs)方程式に対する数値計算コードを開発し、ポロイダル音速程度の流れをもつ高ベータ簡約化モデルにおける平衡解の構造と一致する解が得られた。計算コードに反磁性ドリフトの効果も実装した。

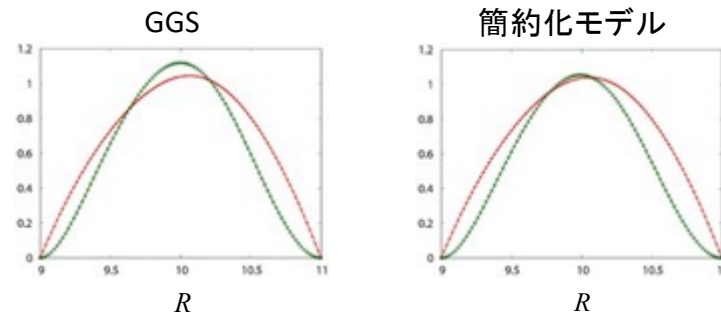
(赤: 磁束関数、緑: 密度)

流れをもつMHD平衡のポロイダル断面の径方向プロファイル

➤ 亜音速流 (ポロイダルマッハ数 $\sqrt{0.35}$)



➤ 超音速流 (ポロイダルマッハ数 $\sqrt{3.5}$)



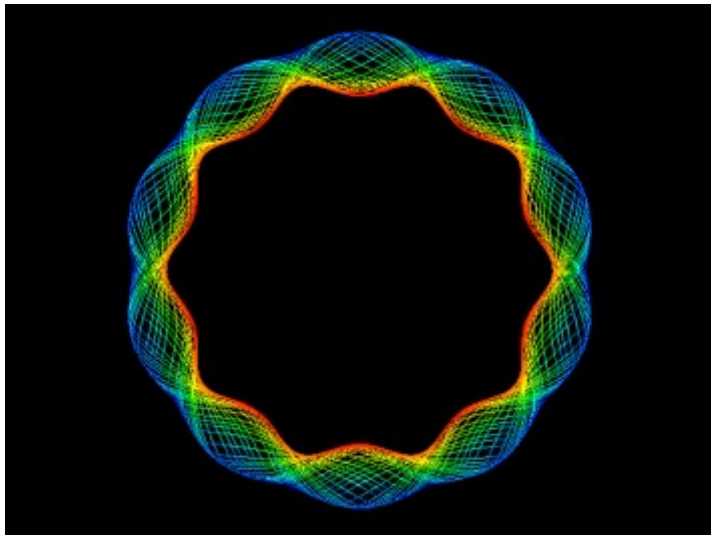
➔ 密度のピークの位置が磁気軸に対して亜音速と超音速で逆向きにずれる。

[A. Itoh et al., 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP 2023)]

[伊藤淳 他、第40回プラズマ・核融合学会年会]

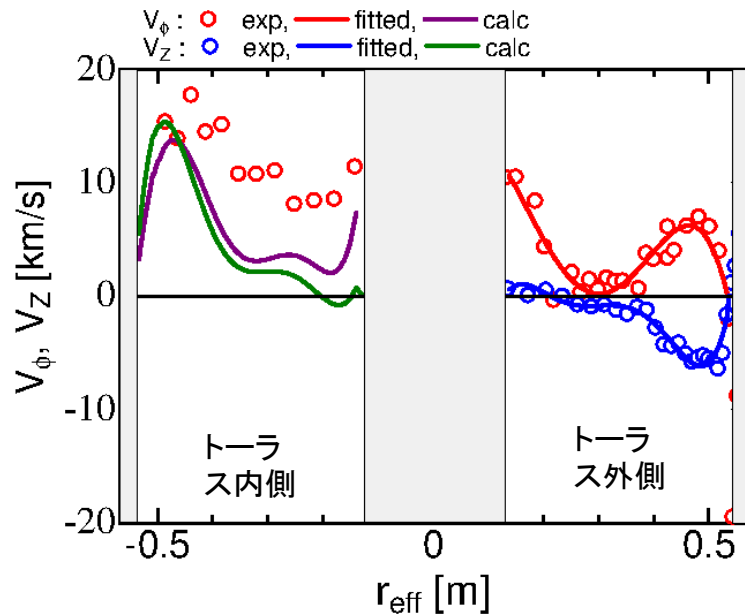
◆ 三次元巨視的背景フローの計算スキームの改良

- トーラス外側の1次元データを用いてプラズマ全域でLHDにおけるフローを計算



- $r_{\text{eff}} = 0.455$ での流線プロット

- トーラス内側で実験データと比較



- トーラス内側での分布の傾向は再現しているが、絶対値は小さい。
- 一致させるにはスキームの改良が必要。

ガウス過程回帰を用いたヘリカル型核融合炉の最適化配位探索

構造形成・持続性ユニット
2023年度成果報告

2024/5/9



総研大D・藪本宙さんによる研究成果

- 連続巻きヘリカルコイルが作るヘリオトロン配位による核融合炉の可能性を探索。
- コイル形状のパラメータに対し、MHD安定性などの設計に関する評価関数をシミュレーションで評価。
- 評価関数のコイル形状パラメータに対する依存性をガウス過程回帰（GPR）で学習
 - 教師データ数：～6万、パラメータ：9次元
- MHD安定性（Mercier条件: D_{Merc} ）、体積、シャフラノフシフト量を用いた原理実証計算を実施。

➔ 評価関数のパラメータ依存性をGPRで予測できることを確認。
ヘリカル核融合炉の多目的最適化へ向けた研究が前進

- ヘリカル型核融合炉の最適化計算を行う上で、最外殻磁気面の自動的かつ高精度の判別が必要とされる。
- 磁力線ポアンカレプロット点列の分布に対して定義された情報エントロピーを用いる判別手法を新たに開発した。

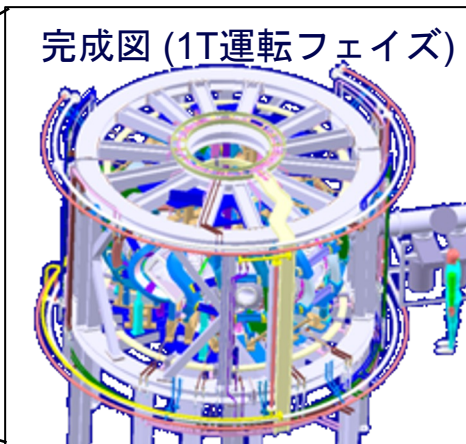
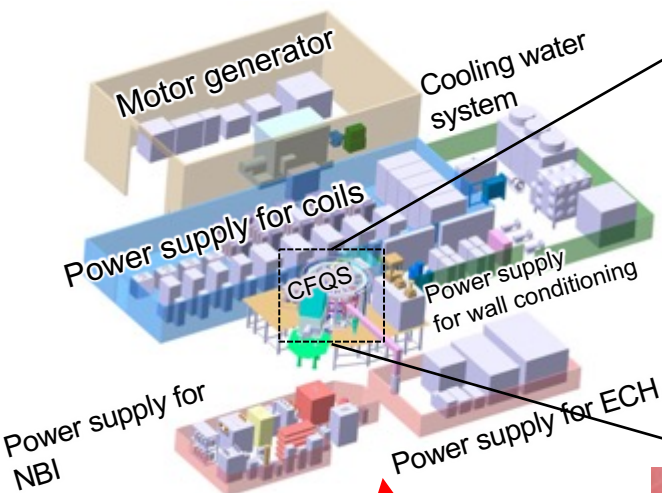
→情報エントロピーという新たな尺度で磁気面の滑らかさを定量化する手法が最外殻磁気面の自動判別に有効であることが示された。

国際的・学際的な展開の広がり

準軸対称ステラレータCFQSの進展

構造形成・持続性ユニット
2023年度成果報告

2024/5/9



- トカマクと同等の軸対称性を有する準軸対称磁場配位に基づく先進的ステラレータ（ヘリカル型装置）CFQSについて、中国・西南交通大学との学術協定のもと、共同プロジェクトとして推進。

➤ 磁場の準軸対称性が高温プラズマの閉じ込めや構造形成にもたらす効果を世界に先駆けて解明する実験プラットフォーム

- 中国・合肥の製作工場および成都に日本側の研究者および技術者らを複数回派遣し、現地視察、打ち合わせを実施。
- JSPS二国間交流事業に2023年度より採択。



New site for CFQS
at Tianfu New District



準軸対称ステラレータCFQSの進展

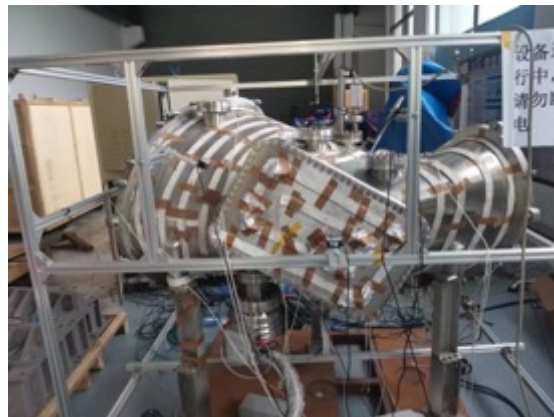
構造形成・持続性ユニット
2023年度成果報告

2024/5/9

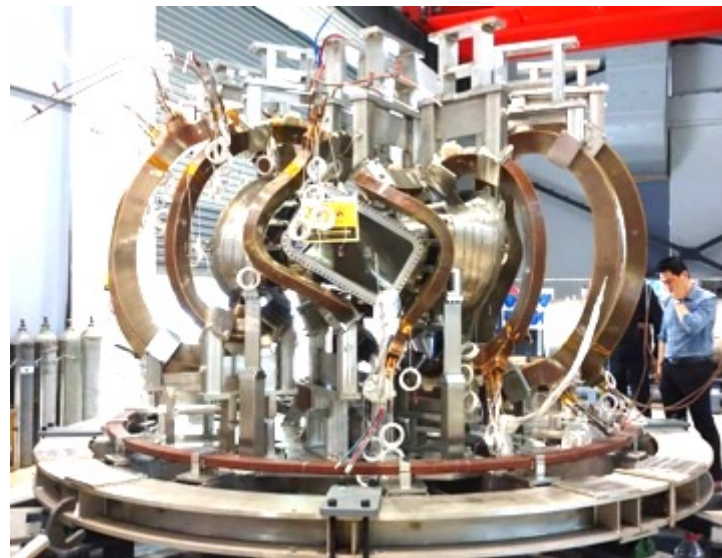
モジュラーコイル



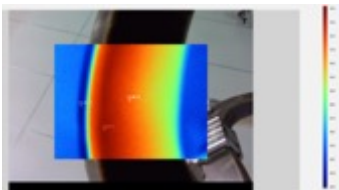
真空テスト中の真空容器 (type A)



CFQS組み立て中の様子



→ヒートラン試験の実施



- 全モジュラーコイルの巻線が完了
- コイル、真空容器、支持構造の組み立てを開始
- 2024年にファーストプラズマを予定

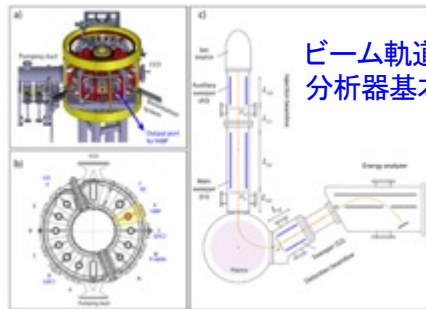
国際共同研究の新たな展開 ~タイとのプラズマ計測を中心とする研究協力

- ・タイ国家原子力技術研究所(TINT)にてThailand Tokamak-1(TT-1)が稼働を開始(2023年7月~)
- ・軸対称系TT-1を準軸対称系CFQS(NIFS-SWJTU)、CHD及びCHD-Uのカウンタパートと位置付け、NIFS-TINTの国際学术交流協定に基づき、乱流輸送、閉じ込め改善、高速粒子等に係る研究を推進する計画

Thailand Tokamak-1 (TT-1)

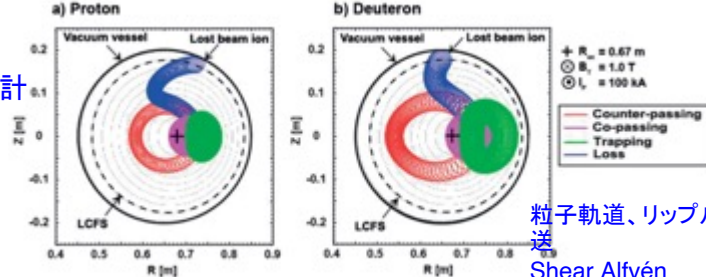


HIBP実装に向けた準備研究



A. Wisitsorasak, A. Shimizu *et al.*, *Fus. Eng. Des.* **198** (2024) 114068.

将来のNBI加熱に向けた準備研究



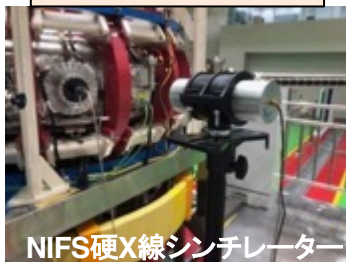
P. Wangkhahat, S. Sangaroon, A. Wisitsorasak, N. Poolyarat, M. Isobe, ASEAN J. Sci. Tech. Report. **27** (2024) 58-67.

TT-1グランドオープニングセレモニー

2023年7月25日 TINTにて



逃走電子研究



K. Rongpuita, A. Wisitsorasak, S. Sangaroon, K. Ogawa *et al.*, submitted to *Rad. Phys.*

バイアス実験に向けた準備研究



超音速ガスパフ



国際共同研究の新たな展開 SDGs社会実現に向けて～

～タイとの研究協力：NIFSの核融合技術の拡大発展

SFSユニットと技術部の協働による研究開発

背景：核融合分野における活性炭利用

クライオ吸着ポンプと
その高性能化研究

評価・分析技術の醸成

稲由来の活性炭に着目

複雑な三次元構造の
ナノレベルの孔に
シリカ (SiO₂)
が内在している

このSiO₂を除去して
できた無数の細孔は
活性炭の吸脱着性能
を高めるのでは？

**SDGsを志向した
高機能活性炭の開発に着手**

研究環境の整備

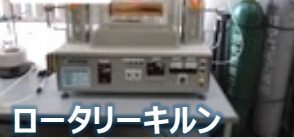
活性炭の製造から分析・評価まで、
一貫したプロセスを実施可能な環境を整備

①炭化



管状炉

②賦活



ロータリーキルン

③焼結



放電プラズマ焼結装置

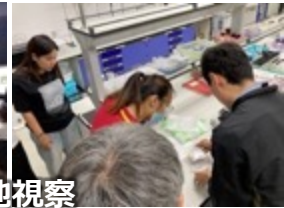
④分析



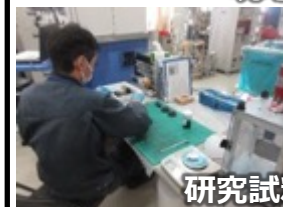
ガス吸着量測定装置

共同研究

多様なナノ材料の研究開発を進める
タイWalailak大学との共同研究に発展



現地視察

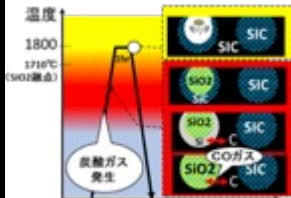


研究試料の作製

高機能ナノ材料を用いた**水素製造用電極**
や**電気二重層キャパシタ**の研究を実施中

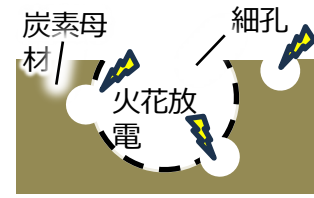
研究成果

①真空加熱による SiO₂除去法



特許7301300号

②放電プラズマによる 活性炭特性の向上



放電プラズマによる
細孔形成 (特許申請中)

社会実装に向けて

学会や展示会等 様々なチャンネルを通じ
積極的に研究シーズの情報を発信



国際会議



研究シーズ展示

学際的展開：非平衡相律研究会への参加

構造形成・持続性ユニット
2023年度成果報告

2024/5/9



- 大阪大学を中心とした研究チームが開催している「非平衡相律」研究会に、ユニットメンバーらが参加（核融合からは初）。この研究チームはエントロピー生成率に基づいて様々な系における相転移現象の理解を得ることを目標として活動されてきている。
- 現在、物理学、生物学、工学等、多分野共同での競争的資金獲得へ向けて活動を開始。

- これまで培ってきた研究実績と共同研究ネットワークを活かし、これらをさらに発展させ、プラズマにおける構造形成の物理解明と制御、そして最適化に必要な不可欠となる学術基盤を堅めていく。
- エントロピー生成と相転移という観点から、対象とする系を問わない学際的な研究へと展開を図る。
 - 構造形成の駆動源となる高エネルギー粒子の挙動について、多様な閉じ込め配位に対してその実・速度分布関数の精密計測を行い、現象の理解を深める。計測器開発およびシミュレーションとの連携を進めるとともに、JT60-SAおよびITER核燃焼実験に向けて必要な技術と知見を培う。
 - プラズマの巨視的平衡とダイナミクスについて、フローや圧力非等方性を伴う平衡・ダイナミクス・安定性を解明するための理論およびシミュレーションを開発する。
 - プラズマ内部の遷移現象や分岐現象について、磁場の対称性に着目したプラズマ実験、データ駆動型の解析、シミュレーションを駆使して解明を目指す。
 - 環状プラズマの統合シミュレーションを高度化し、位相空間分布の時間発展が決定される様相を解明する。
 - 閉じ込め配位の最適化について、先進的な設計手法を開発し、具体的な新配位を提案する。

- これまで培ってきた研究実績と共同研究ネットワークを活かし、これらをさらに発展させ、プラズマにおける構造形成の物理解明と制御、そして最適化に必要な不可欠となる学術基盤を固めていく。
 - ✓ 高エネルギー粒子に関する計測機器の開発、およびその適用による物理の解明が進展。
 - ✓ 環状プラズマの巨視的平衡とダイナミクスに対する背景フローの効果について、シミュレーションへの導入とバリデーションが進展。
 - ✓ 国際学術協定に基づく新装置CFQSの建設を着実に進め、プラズマ閉じ込めと構造形成における磁場対称性の役割を解明する先駆的実験へ向けた準備が進展。
 - ✓ 機械学習、情報エントロピー、遺伝的アルゴリズムといった手法を取り入れた最適化手法の開発が進展。
 - ✓ 核融合科学研究所の次期計画における新装置の検討を実施。
 - ✓ データ駆動型の新しい制御手法の実証、LHD実験データの分析が進展
 - ✓ 国際共同研究の新たな展開として、タイとのプラズマ計測を中心とした協力体制を構築。
 - ✓ クライオ吸着ポンプから派生した活性炭研究の国際協力体制と社会実装へ向けた展開。
- エントロピー生成と相転移という観点から、対象とする系を問わない学際的な研究へと展開を図る。
 - ✓ 多分野協働の形で競争的資金獲得へ向けて準備中。