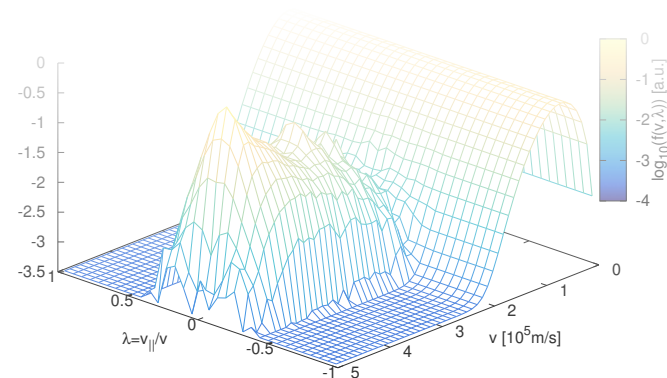


令和6年度 構造形成・持続性ユニット成果報告

CHD-U検討の進展

山口裕之（核融合研）

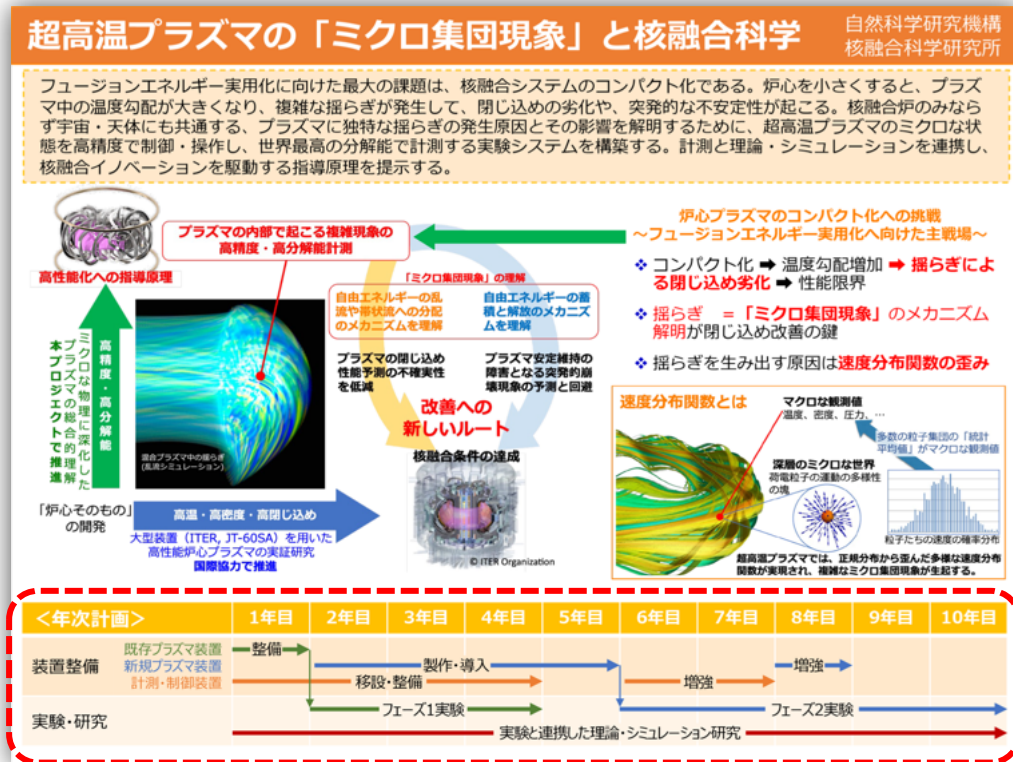
核融合科学研究所 令和6年度ユニット成果報告会
2025年5月28日 核融合科学研究所 管理・福利棟4階第1会議室



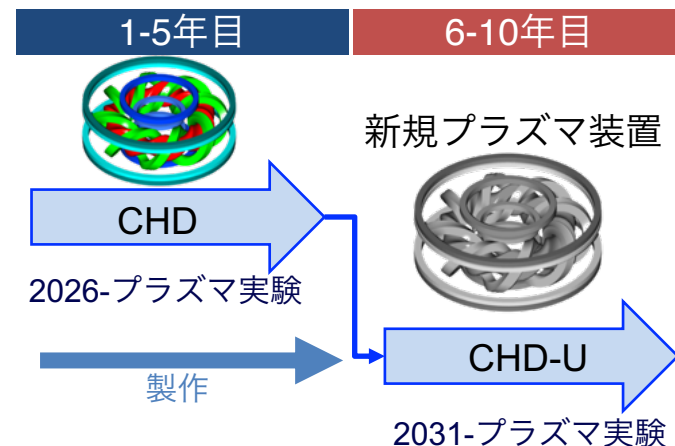
ロードマップ計画における装置計画

R6ユニット成果報告会

2025/5/28



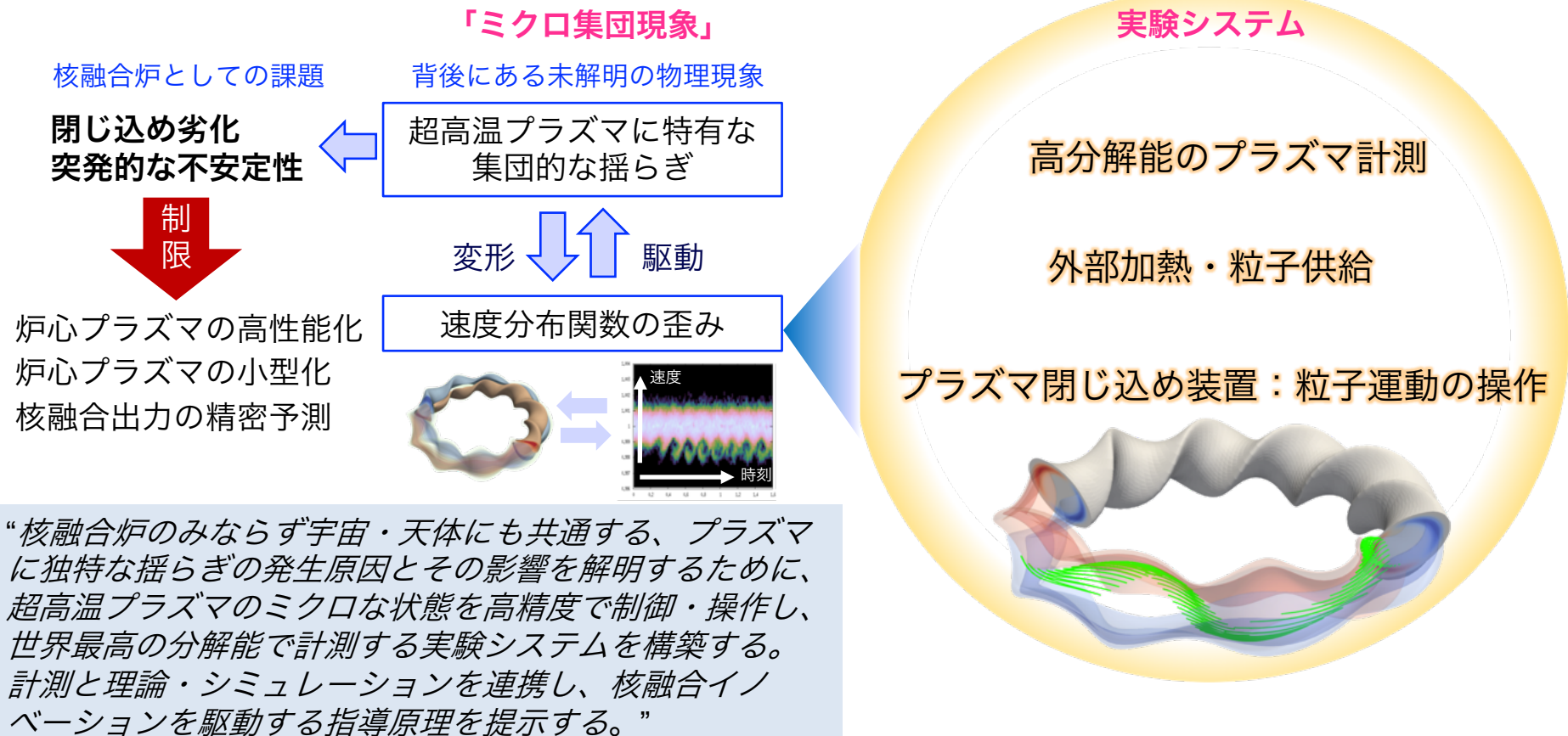
- 文部科学省「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想-ロードマップ2023-*」に、核融合科学研究所が中核機関となる「超高温プラズマの『マイクロ集団現象』と核融合科学」計画が掲載。
- 本計画における新規プラズマ装置CHD-Uの具体化を推進するため、物理検討および設計活動を行ってきている。



ロードマップ計画の研究目標と実験システムの役割

R6ユニット成果報告会

2025/5/28



3次元磁場配位による粒子運動操作の可能性

R6ユニット成果報告会

2025/5/28

多様な閉じ込め磁場配位

トカマク系 ヘリカル系 直線系

「隠れた対称性」を持つ3次元磁場配位



対称性を通じて操作できる量・性質の例

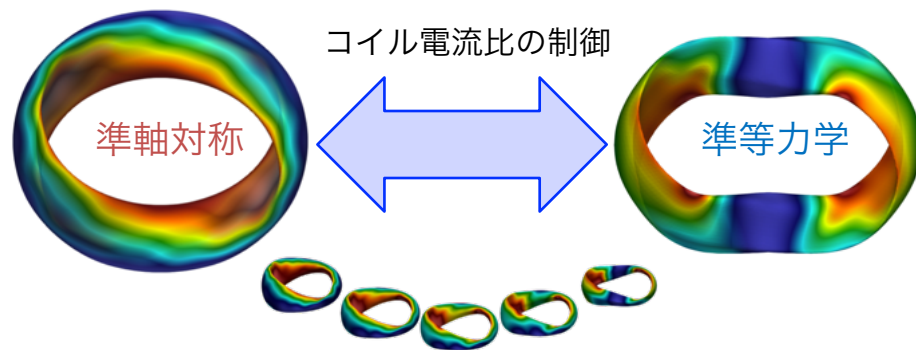
- 捕捉粒子の軌道トポロジー・割合
- 粒子軌道の空間的広がり
- 軌道の周波数（共鳴条件）
- 断熱不変量（有効エネルギー）

CHD-U候補配位「可変対称性トーラス」

R6ユニット成果報告会

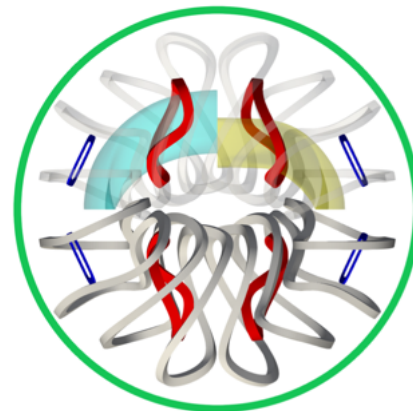
2025/5/28

閉じ込め磁場の隠れた対称性を操作することのできる革新的な装置概念「**可変対称性トーラス**」を考案。



- 物理特性のコントラスト*が高い**準軸対称配位**と**準等力学配位**の組合せを選択。
- トカマクとの比較研究を視野に入れ、高い軸対称性を実現可能なトロイダル周期数2を選択。

*ブートストラップ電流、トロイダル粘性、軌道トポロジー等。



ユニットが独自に開発した最適化コードにより、対称性の異なる2つの磁場配位を高精度に実現できるコイルを設計（世界初）。

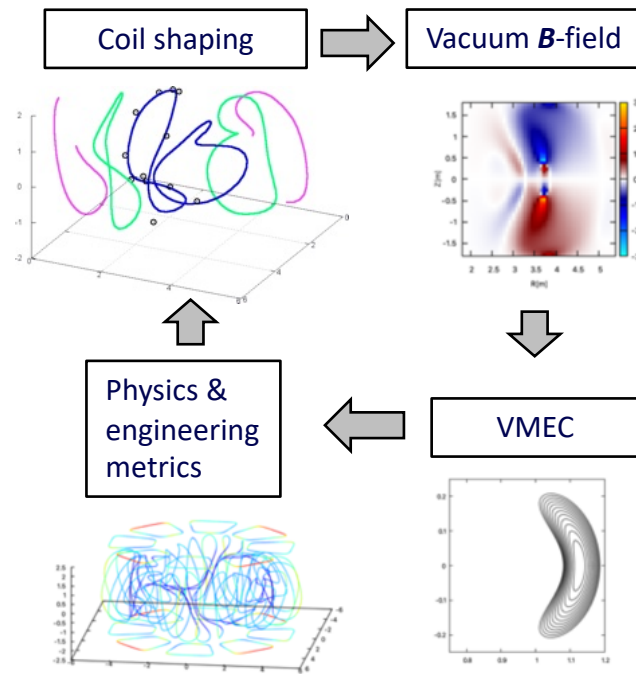
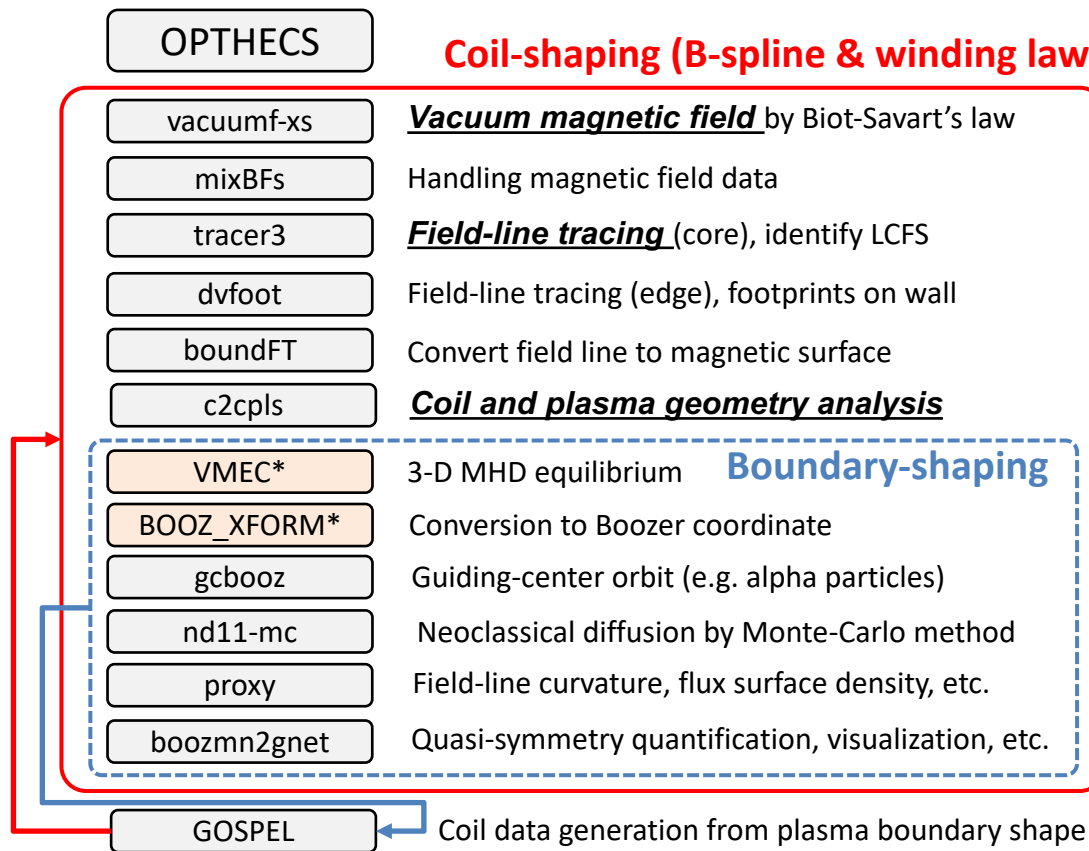
➔ CHD-U候補配位の一つとして具体化。

- H. Yamaguchi et al., 29th IAEA-FEC2023
- 山口裕之 他 第40回プラズマ・核融合学会年会
- H. Yamaguchi et al., ISHW2024

OPTHECS : coil-shaping-based optimization code

R6ユニット成果報告会

2025/5/28



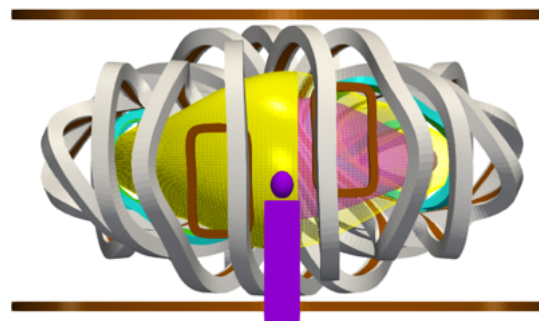
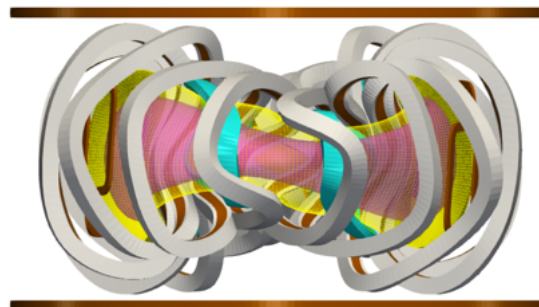
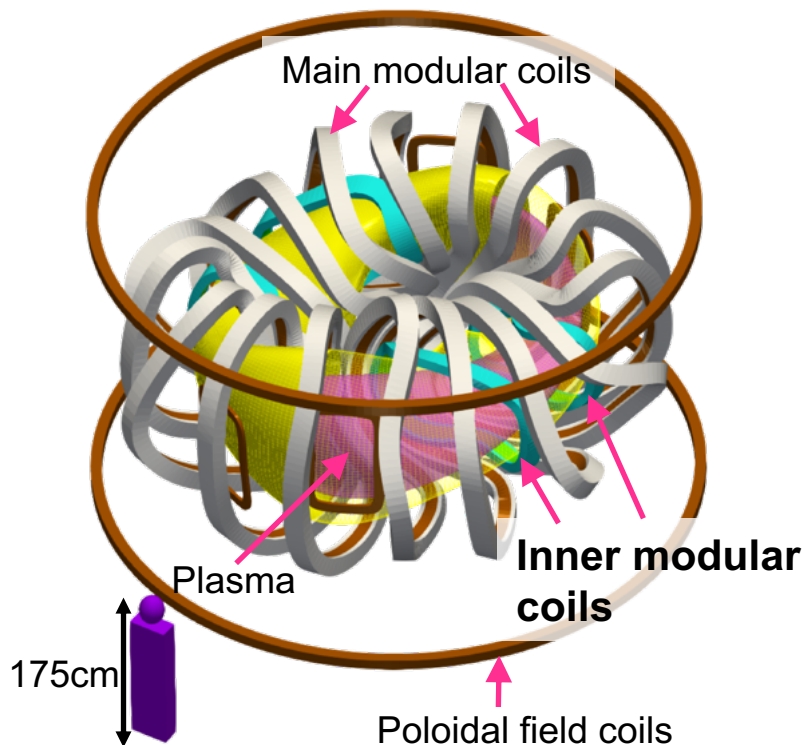
H. Yamaguchi, 23th ISHW, (Warsaw, 2022)
H. Yamaguchi et al., 29th IAEA FEC (London, 2023)

[*] [<https://github.com/PrincetonUniversity/STELLOPT>]

可変対称性トーラスのコイル系

R6ユニット成果報告会

2025/5/28



Magnetic coils

- 16 main modular coils
- 4 inner modular coils
- 4 saddle loop coils
- 2 poloidal field coils
- 2-fold symmetry

Major radius	1.5 m
Minor radius	0.4 m
Aspect ratio	4
Field strength	~1.5 T

CHD-U候補配位に関する物理解析の状況

R6ユニット成果報告会

2025/5/28

- **MHD安定性** 佐藤 他 第41回プラズマ・核融合学会年会
 - 反磁性ドリフト効果および熱イオンの運動論的效果を考慮すると、QA配位、QI配位ともに、非線形飽和した圧力分布に初期分布からの大きな変化は生じないことが確認された（中心 β 値=2%）。
 - MIPS、MEGA、FAR3Dなど複数コード間でベンチマークしながら進めていく。
- **高速イオン粒子軌道** 關 他 第41回プラズマ・核融合学会年会
 - QI配位では通過粒子・捕捉粒子が良好に閉じ込められ、中間的なピッチ角領域に損失軌道が存在する。QA配位では通過粒子は良好に閉じ込められるが、捕捉粒子は5keV程度のエネルギーでも多くが損失する。
- **微視的不安定性・乱流（ITGモード）** 堺井 他、日本物理学会2025年春季大会
 - 線形成長率の大きさやモード構造は、QAとQIで異なる磁力線ラベル依存性を示す。
 - QI配位では、QA配位の場合よりも帯状流が大きく、乱流輸送が小さい。
- **高エネルギー粒子駆動型不安定性**
 - モデル的な高速イオン分布→BEA~TAE付近のモードが励起された。
 - より現実的なNBI入射を仮定した計算を実施中。
- **ECH, NBI加熱の検討** NIFS + 京都大学

基本的な閉じ込め特性の確認

CGS・S&Iユニットとの協働

プラズマ操作能力の検討

Meta-HDユニットとの協働

イオン温度勾配が駆動する微視的乱流

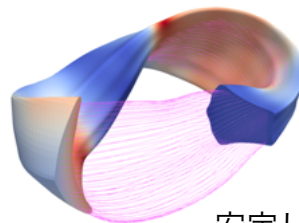
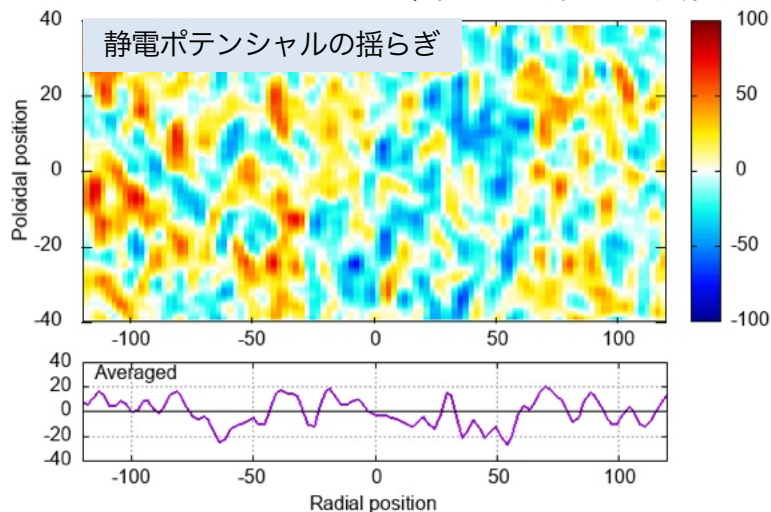
R6ユニット成果報告会

2025/5/28

GKVコードによる局所フラックス
チューブシミュレーション

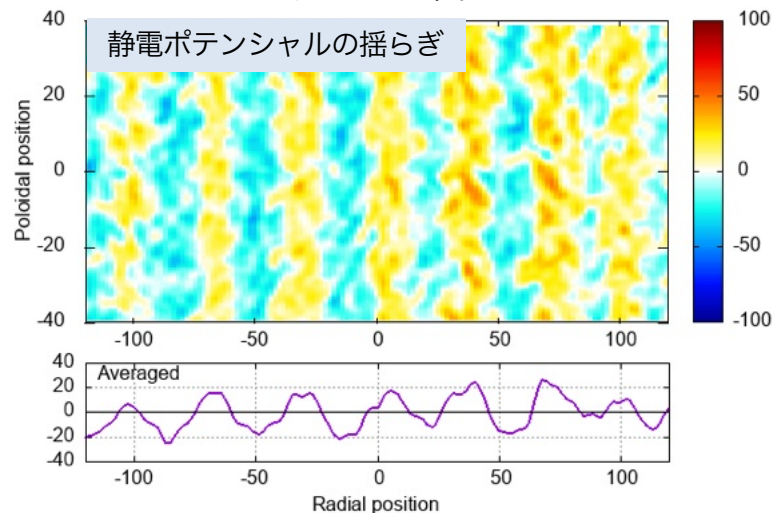
準軸対称配位

帯状流は時間的に変化。



準等力学配位

安定した帯状流が形成される。



→ 微視的乱流の様相が（シミュレーションでは）大きく変化：
実際は？ 分布形成との相互作用は？

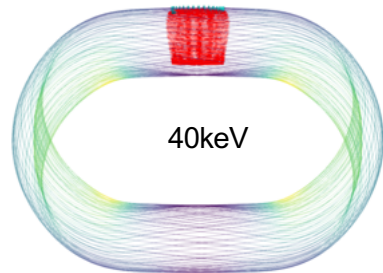
高速イオン閉じ込めと速度分布の操作

R6ユニット成果報告会

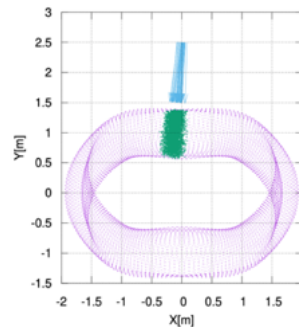
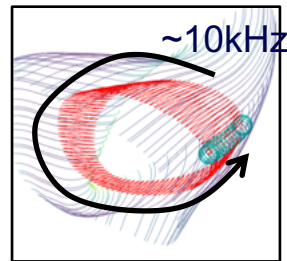
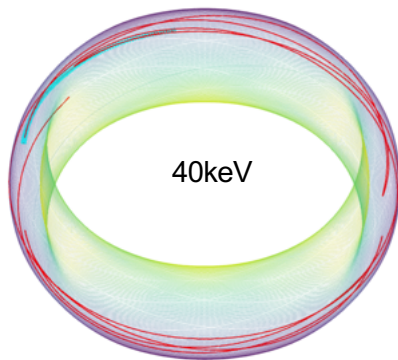
2025/5/28

実空間における水素イオンの軌道と磁力線

準等力学

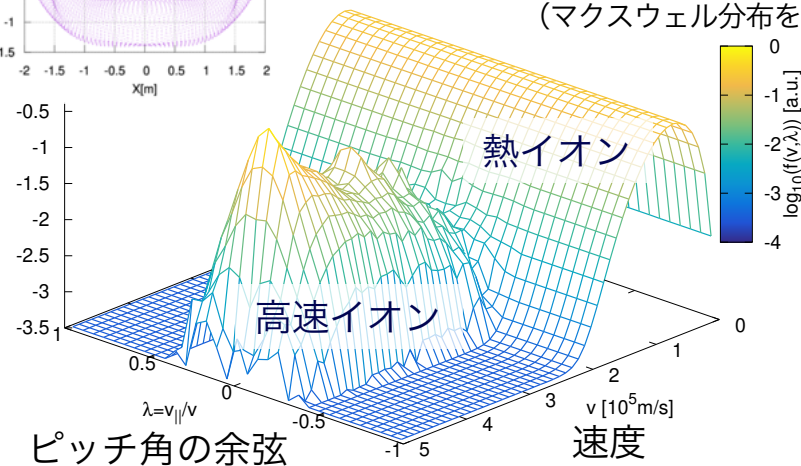


準軸対称



垂直入射NBI(40keV, 500kW)が作る
イオン速度分布関数の歪み

イオン速度分布関数
(マクスウェル分布を重畳)



局所的な高速イオン圧力勾配を生成可能 ($\beta_{EP} > \sim 10\%$) :
どのように緩和されるか？

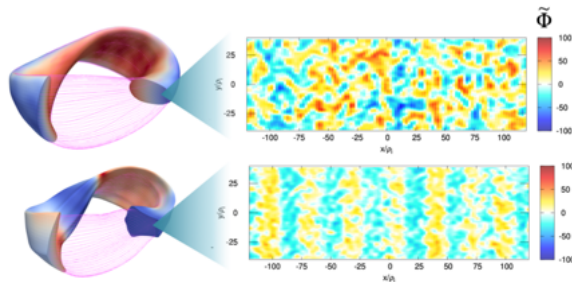
→CGSユニットと連携し、シミュレーション中。

リサーチプランの展望

R6ユニット成果報告会

2025/5/28

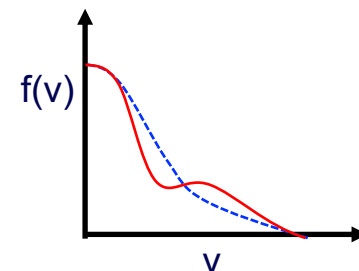
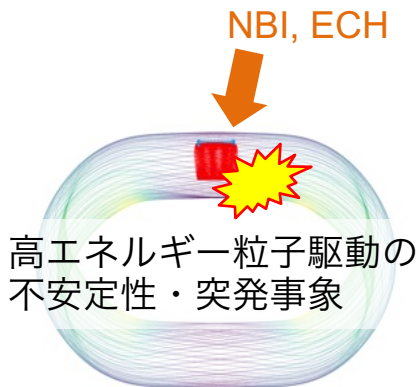
ミクロ～マクロのプラズマ構造形成



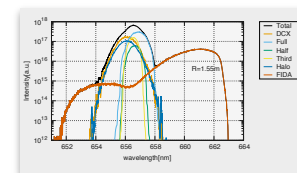
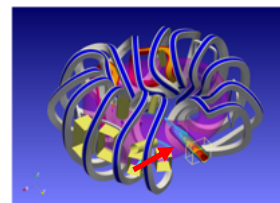
異なる磁場配位でプラズマを生成

- 揺らぎの実・波数空間構造
- 温度・密度分布・フロー分布の形成
- 新古典輸送レベルを揃えた乱流制御実験

位相空間のダイナミクス



分布関数歪みとの連関

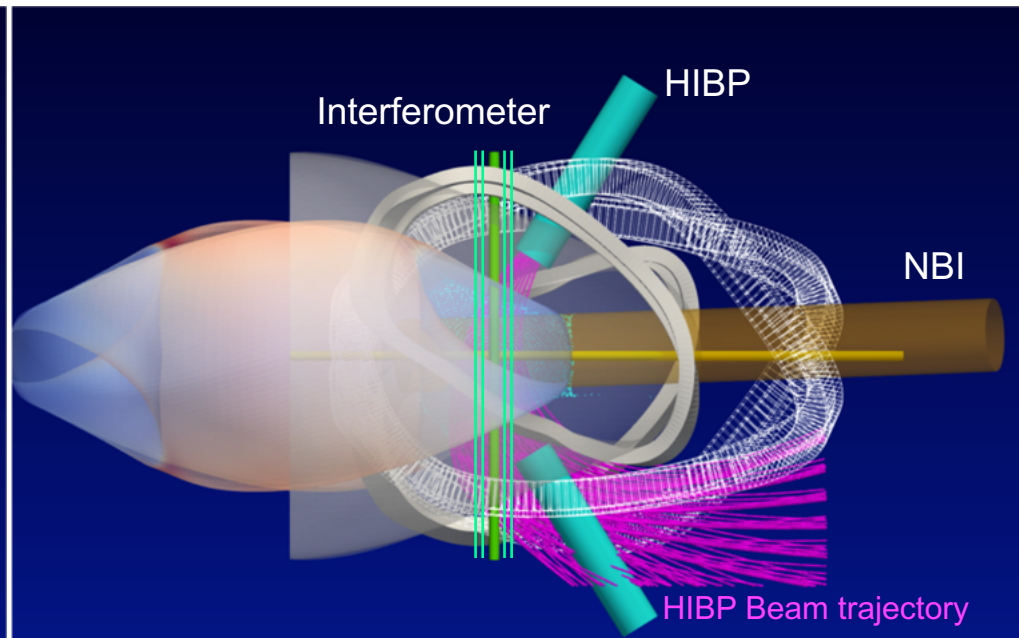
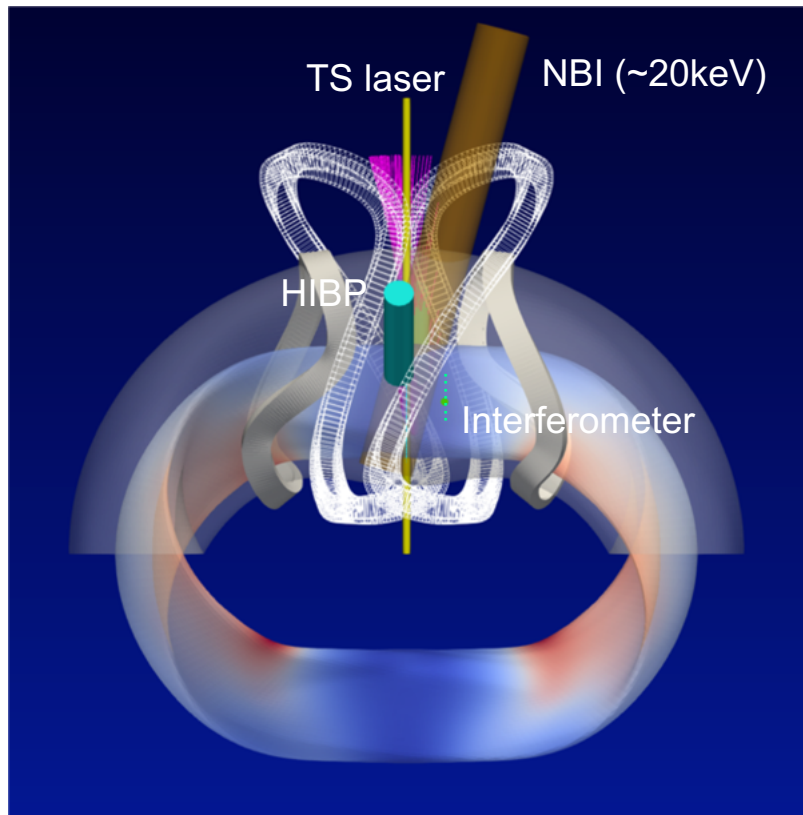


... and more.

計測ポート配置の初期検討

R6ユニット成果報告会

2025/5/28



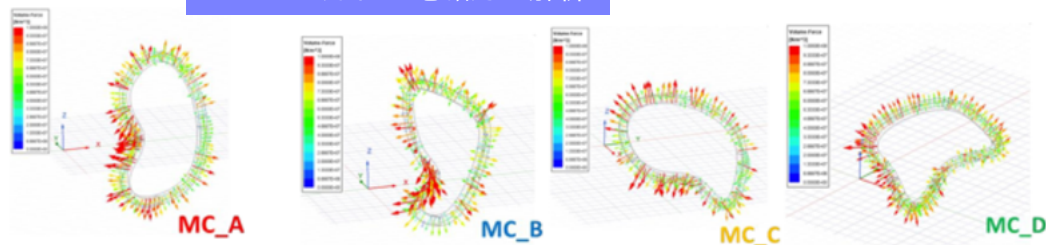
- 物理解析チームで素案を作成し、計測器の専門家によるフィードバックを受けて調整を進めていく。
- プラズマ計測の見通しを伴った装置設計を進める。

可変対称性トーラスの工学設計

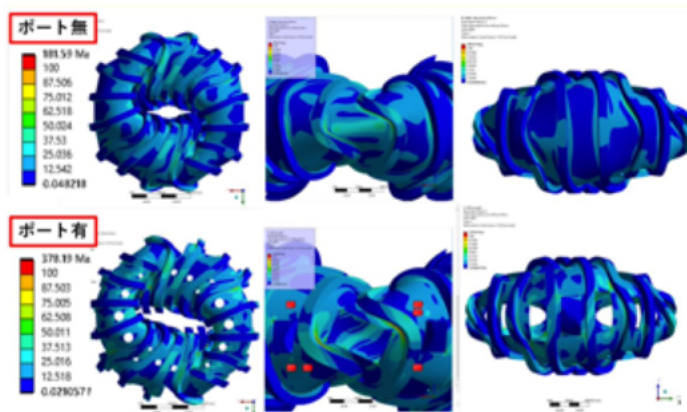
R6ユニット成果報告会

2025/5/28

コイルに加わる電磁力の解析



電磁力支持構造の応力解析



- NIFS技術部と連携し、可変対称性トーラスの工学検討を推進した。
- 具体的な設計案の検討、体系的な解析を実施。
- ポート位置と電磁力支持構造の整合性についても、初期的な検討を行った。

中川翔 他「CHD-Uの工学設計に関する現状」第41回プラズマ・核融合学会年会、20P54

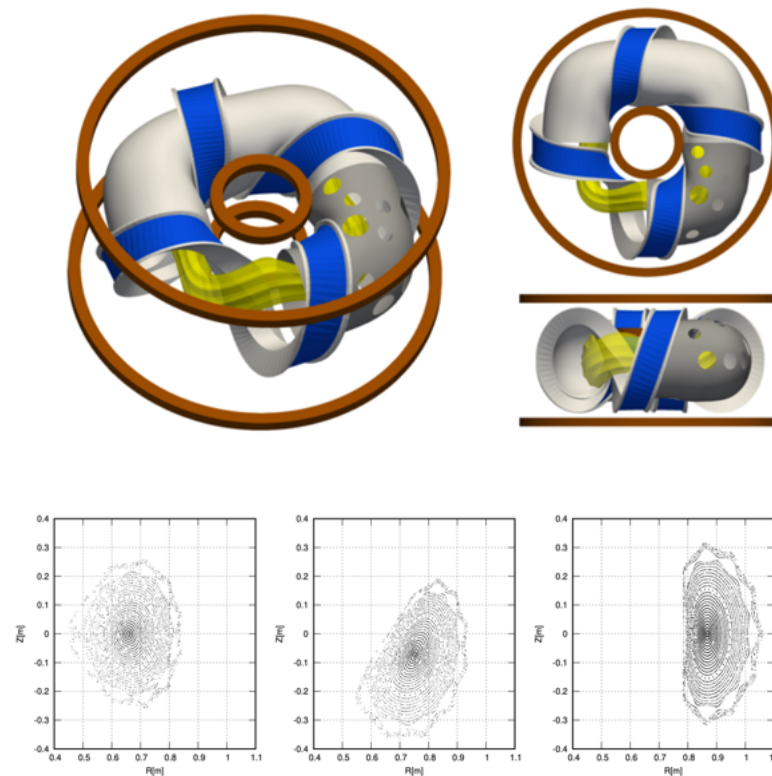
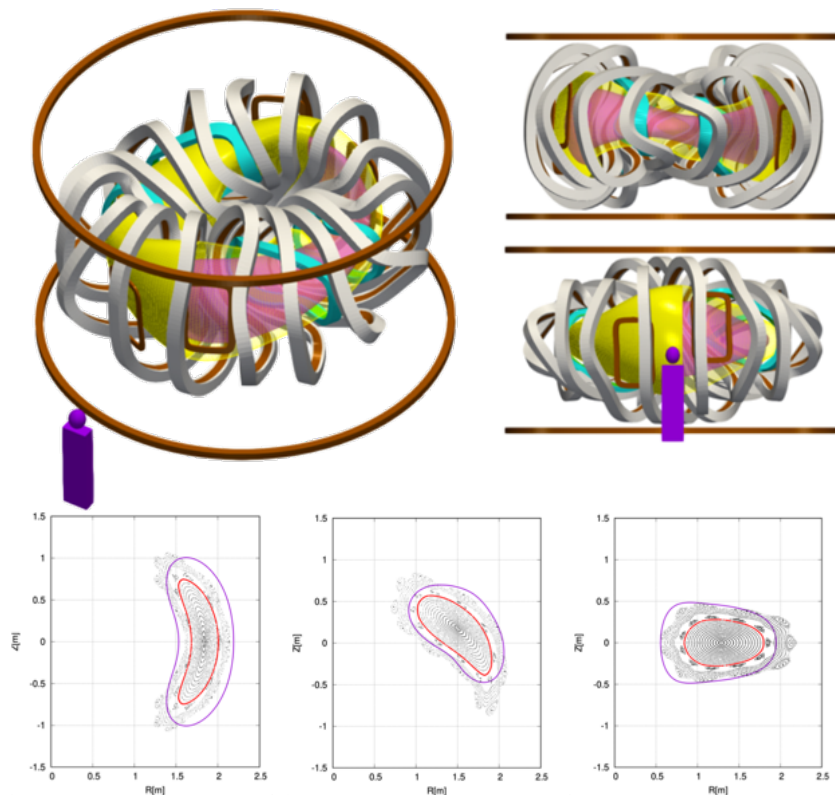
ミクロ集団現象研究にとってベストな選択とは？

R6ユニット成果報告会

2025/5/28

磁場配位の操作に特化（可変対称性トーラス）

計測・加熱ポート領域に特化



これまでの主な成果発表

R6ユニット成果報告会

2025/5/28

2024年度は、複数のユニットおよびNIFS技術部からCHD-U検討に関連する成果発表がありました。この場をお借りして、参画いただいた方々に改めて御礼申し上げます。

- H. Yamaguchi et al., 29th IAEA Fusion Energy Conference, TH/P2-14 (2023)
- 山口裕之 他「磁場の準対称性を幅広く制御可能なハイブリッドステラレータの検討」第40回プラズマ・核融合学会年会、28P07
- H. Yamaguchi et al., “Design study of a flexible experimental stellarator that can generate quasi-axisymmetric and quasi-isodynamic-type magnetic configurations”, 24th International Stellarator-Heliotron Workshop
- 山口裕之 他「CHD-U候補の検討状況」第41回プラズマ・核融合学会年会、20P53
- 中川翔 他「CHD-Uの工学設計に関する現状」第41回プラズマ・核融合学会年会、20P54
- 佐藤雅彦、武村勇輝、關良輔、市口勝治、山口裕之「MHD安定性の観点からの可変対称性トーラスの検討」第41回プラズマ・核融合学会年会、17Ap41
- 關良輔、山口裕之「CHD-U候補・可変対称性トーラスにおける高速イオンの軌道特性」第41回プラズマ・核融合学会年会、17P58
- Taiyo SAKAI, Masanori NUNAMI, Shiniricho TODA, Hiroyuki YAMAGUCHI, “Gyrokinetic simulations for microinstabilities in advanced three-dimensional magnetic field configurations” International ITER School 2024 (networking session at NIFS)
- 堺井太陽, 沼波政倫, 登田慎一郎, 山口裕之、「CHD-U配位における磁場形状が微視的不安定性に与える影響」、日本物理学会2025年春季大会、3月18日 @ONLINE、メタ階層科学セッション、18aB1-10
- H. Yamaguchi “A Stellarator with Variable Symmetry for Enhanced Experimental Capability” (submitted to *Nuclear Fusion*)

まとめ

R6ユニット成果報告会

2025/5/28

- 超高温プラズマに特有の「ミクロ集団現象」を解明するための新規プラズマ実験装置CHD-Uの検討が進展した。
- 磁場の準対称性を通じて粒子軌道のトポロジーを操作する「可変対称性トーラス」の検討を推進した。
- 2024年度は複数ユニットおよび大学にまたがる検討体制により、プラズマの基本的な閉じ込め性能に加え、磁場配位によるプラズマの操作についても解析が進展した。
- 技術部との連携により工学検討・設計が進展した。
- 微視的乱流の磁場配位依存性、高エネルギー粒子の局所閉じ込めを活用し、ミクロ集団現象研究のリサーチプラン策定を進め、CHD-Uの具体案として提示する。