

新配位創成研究の進展

-次期計画を見据えた新たな研究-

自然科学研究機構 核融合科学研究所

仲田 資季

新配位創成研究チーム
次期計画検討チーム

アウトライン

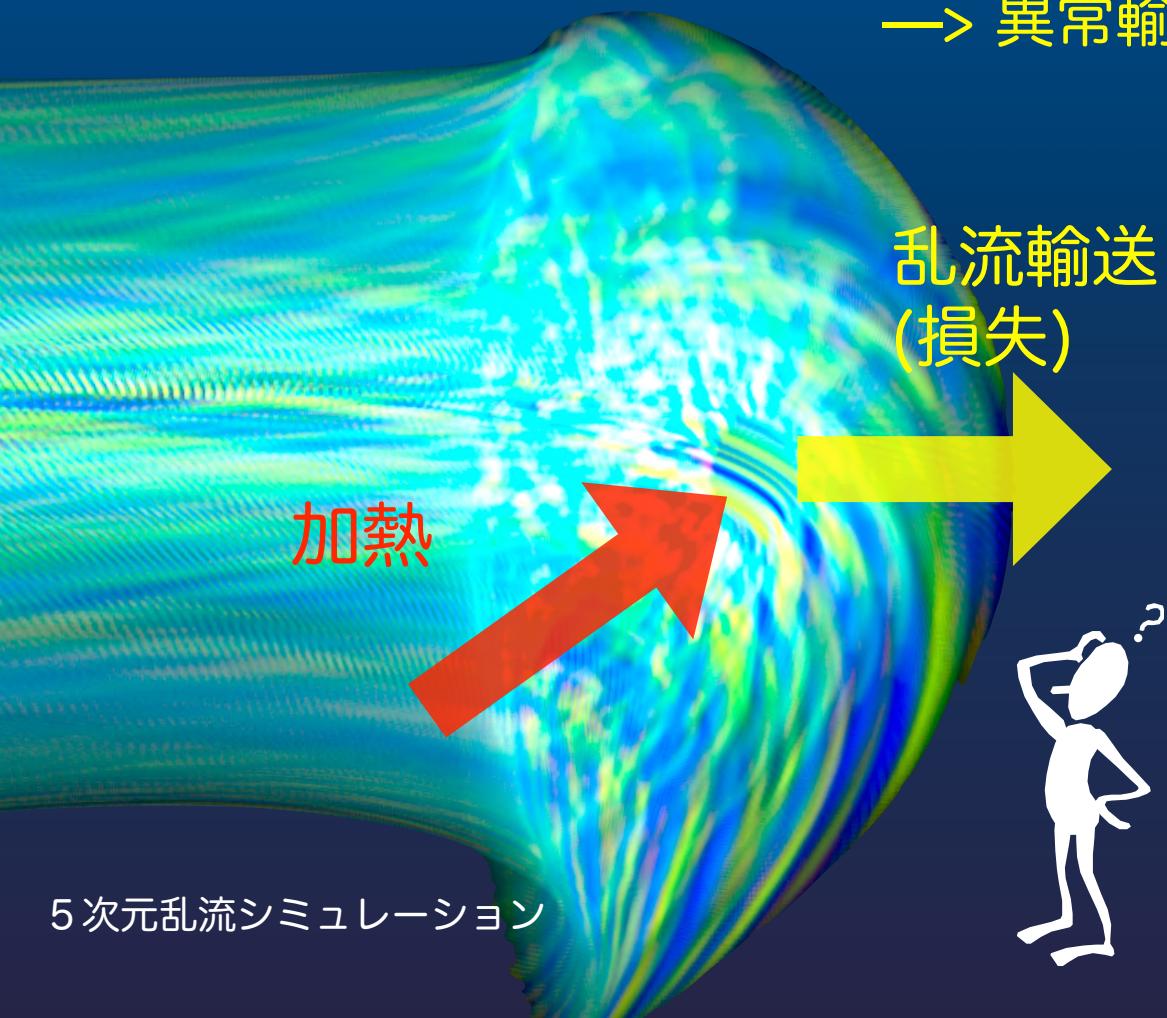
- 背景と動機：乱流が支配する核融合プラズマの輸送・閉じ込め
- この研究で目指すもの、新たな挑戦。
- 研究アクティビティの紹介
 - 乱流モデリング、ダイバータ制御、最適コイル探索
 - 工学検討、先進乱流計測の考案
- まとめ

アウトライン

- 背景と動機：乱流が支配する核融合プラズマの輸送・閉じ込め
- この研究で目指すもの、新たな挑戦。
- 研究アクティビティの紹介
 - 乱流モデリング、ダイバータ制御、最適コイル探索
 - 工学検討、先進乱流計測の考案
- まとめ

核融合プラズマ内部に発達する「乱れ」

- 閉じ込め磁場方式に依らず、プラズマ中に乱流が発生: ドリフト波乱流
温度・密度・磁場の非一様性がドリフト波を不安定化させ乱流へと発達
→ 異常輸送 → 乱流輸送 (熱・粒子・運動量)
**温度・密度勾配に関する非線形性



乱流はどのような条件で発生・発達するか？

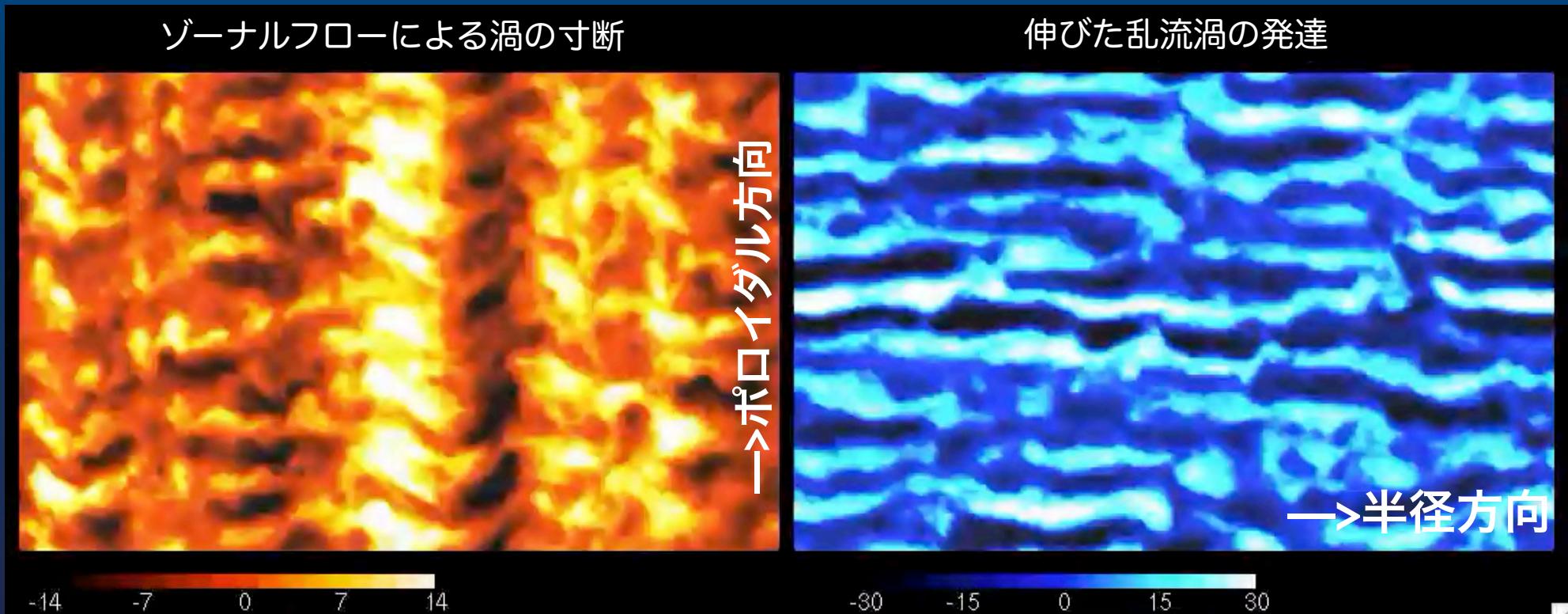
どれくらい輸送するか？

どのようにすれば抑制できるか？

→ この共通性の高い乱流現象を解明して役立てることが核融合プラズマ研究の最重要課題のひとつ

「乱れ」から「流れ」への転換

- ある条件下では、乱れの中から自発的に「流れ」の構造が形成される。
 - シア流が帯状に連なった構造(ゾーナルフロー: ZF)による乱流輸送抑制
 - 内部輸送障壁(ITB)形成やH-mode遷移などとも密接に関連

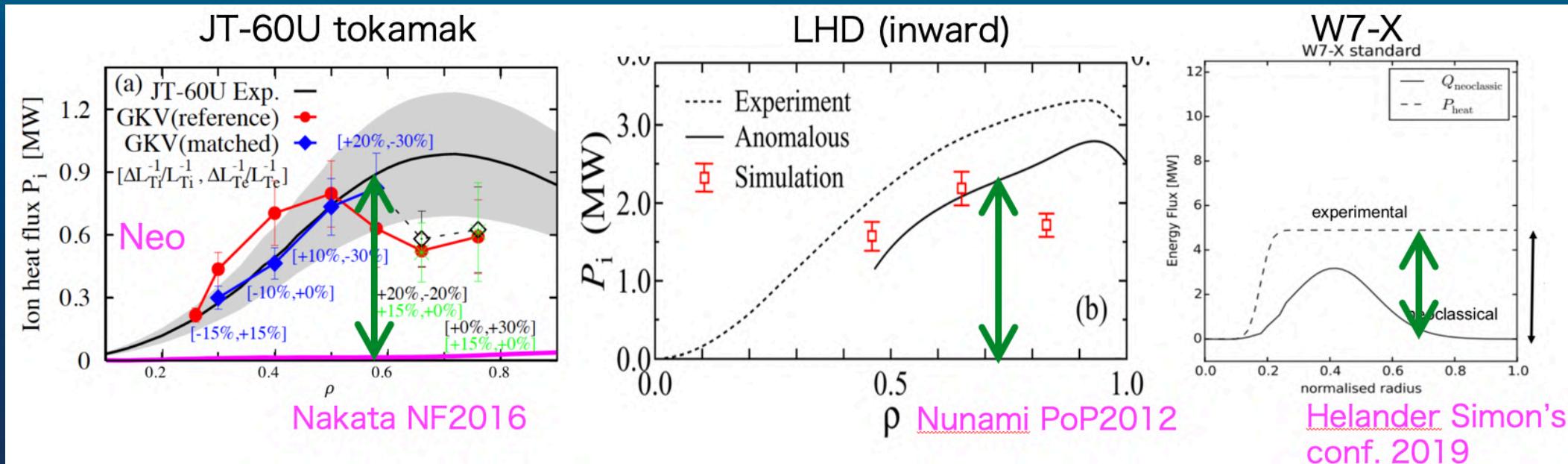


ゾーナルフローの計測は難しく、実験による定量実証はいまだ限定期

cf. Fujisawa PRL2004, Birkenmeier PRL2013, Hillesheim PRL2016, etc

乱流輸送が支配する炉心プラズマの閉じ込め

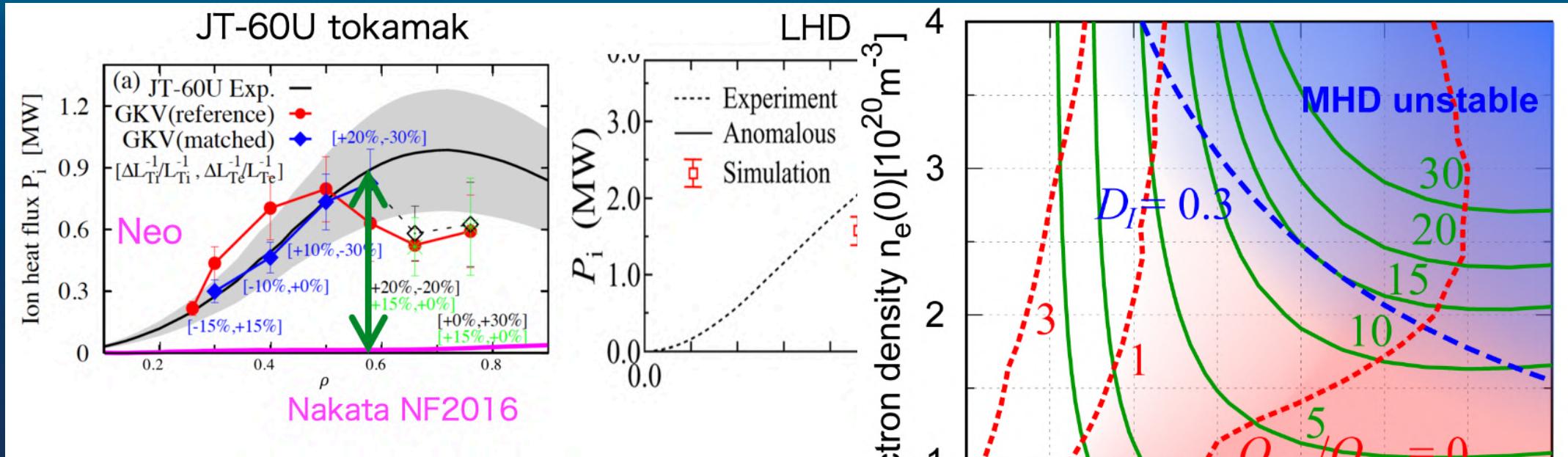
- 乱流輸送 = 全フラックス(例えば実験計測) - 衝突輸送フラックス(計算)



閉じ込め形式に依らず、炉心の輸送を決めているのは乱流輸送
乱流をいかに抑制するか？あるいはZF励起をいかに強化するか？

乱流輸送が支配する炉心プラズマの閉じ込め

- 乱流輸送 = 全フラックス(例えば実験計測) - 衝突輸送フラックス(計算)



閉じ込め形式に依らず、炉心の輸送

乱流をいかに抑制するか？あるいは

→ 炉の出力・効率を通して、核融合炉
の実現性や経済性に強く影響

ヘリカル炉の炉心条件マップ Goto, JSPF2019

アウトライン

- 背景と動機：乱流が支配する核融合プラズマの輸送・閉じ込め
- この研究で目指すもの、新たな挑戦。
- 研究アクティビティの紹介
 - 乱流モデリング、ダイバータ制御、最適コイル探索
 - 工学検討、先進乱流計測の考案
- まとめ

乱れ無き？プラズマへの新しい挑戦

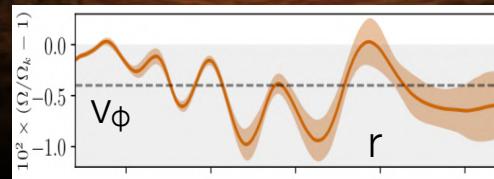
- そこかしこで重要な機能を果たす乱流とZonal Flow(ZF)

星が生まれる時も

<http://www.spitzer.caltech.edu>

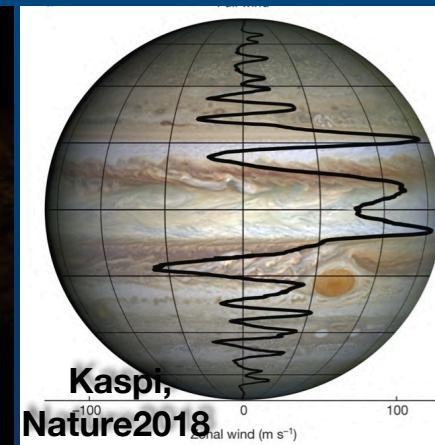
原始惑星円盤(MHD sim.)
を上から見た図

Krapp, ApJ2018



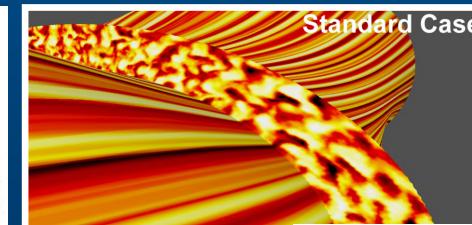
ZFシアによるダスト分布の局在(惑星の種)

星が生まれた後も



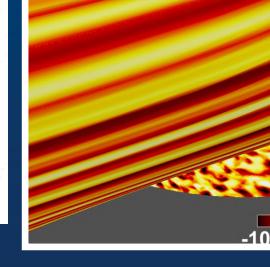
深さ3000kmにおよぶ
木星大気のZF構造

地上の究極のエネルギー源でも



Standard Case

Watanabe
PRL2008



Inward-Shifted Case

核融合プラズマにおける
磁場構造とZF形成の関係



- 核融合プラズマ研究は乱流とZFの精密科学でもある

閉じ込め改善の理解/予測を目的としたZFや乱流輸送の解明や定量検証

→ 磁場構造をつかってZFのような"流れ"を自在に励起することで、

"乱れ"を極限まで抑える「新しいプラズマ」の実現を目指した挑戦へ！

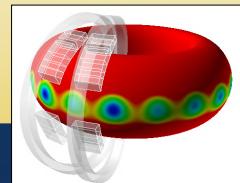
新たな挑戦で引き起こしたいイノベーション

核融合炉実現を加速する知見の創出

ITER/JT-60SA, DEMOへの波及・連携

- ・乱流抑制を中心とした革新的閉じ込め改善による高効率化や炉工学条件の緩和
 - e.g., コイル磁場、熱負荷、装置サイズ、プラズマ電流(or循環加熱)の低減
- ・自己点火へ導く新たなスケーリング則、理論モデル・予測コードの構築と検証
- ・高Q燃焼プラズマを見据えた磁場構造による非熱的な制御手法の構築
 - e.g., 外部から加熱で制御できる割合 $\sim 1/Q < 10\%$, 自己点火→熱的に自律
- ・数理計画手法を融合した配位設計の有効性と外挿性の実証

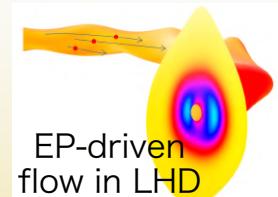
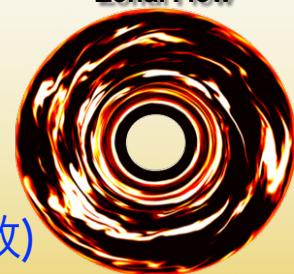
3D effects
in tokamak



プラズマ科学や他の科学領域への波及

- ・乱流(非線形性)やZonal Flow(構造形成)の精密科学 (核融合プラズマ研究の強み)
 - cf. 天文学におけるZonal Flowと乱流の重要性
- ・多様な磁場構造下におけるプラズマ-物質相互作用の理解
- ・材料・宇宙技術・天文学・データ科学等との連携/融合研究
 - cf. 太陽物理、統計数理との連携研究
 - e.g., NINS分野間連携研究プロジェクト(実績多数)

原始惑星円盤における
Zonal Flow



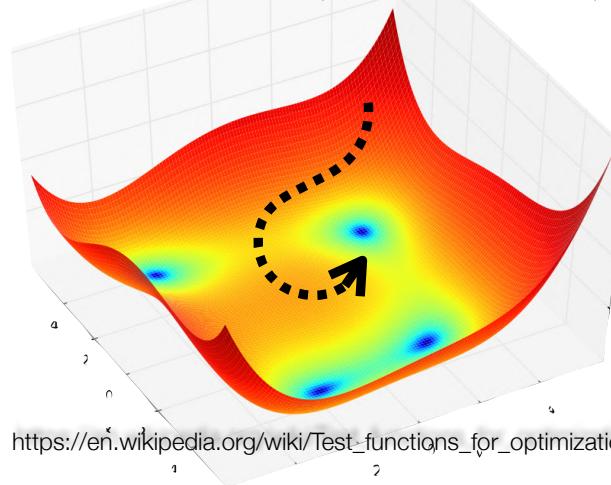
EP-driven
flow in LHD

乱れと流れを磁場構造でいかに操るか

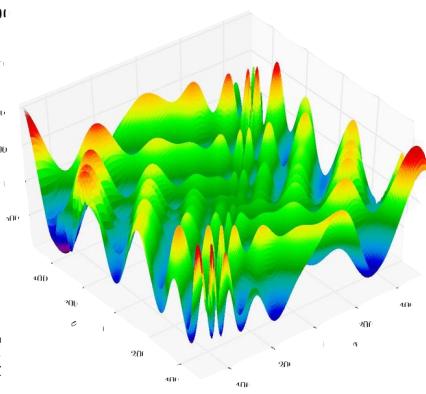
- 3次元磁場構造の多様性 + 大規模計算とモデリング + 非線形数理計画(数理最適化)の融合で、顕著な特質を持つ新しい閉じ込めプラズマを創成
- 非線形性や構造形成を新たに組み入れた概念(従来は線形に特化)
cf. LHD, W7-X, etc
- 実験による理論モデル検証と理論予測を超えた新たな現象の探究

→ 新配位創成研究

数理計画計算(AI等の基盤)

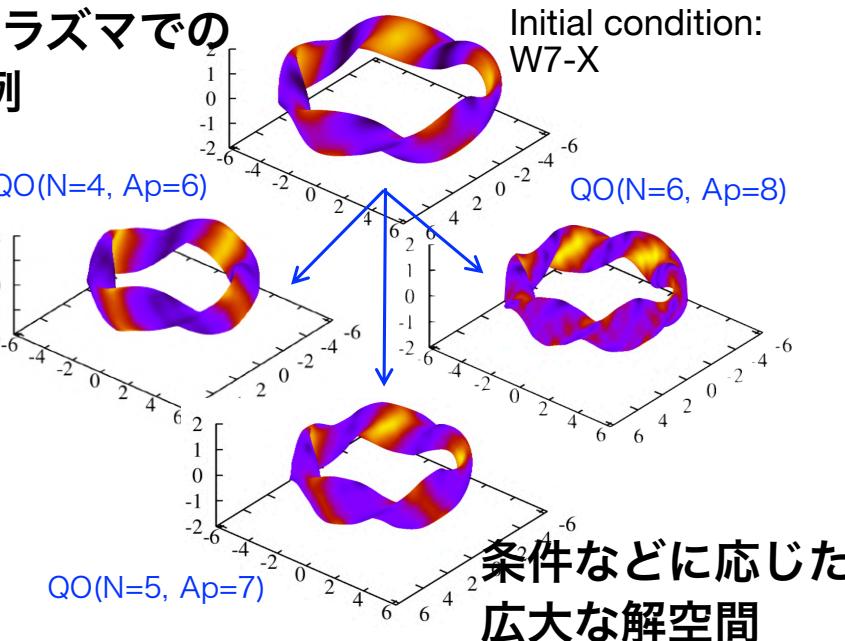


○○を変量として、
△△の条件の下で、
□□を最小化せよ。



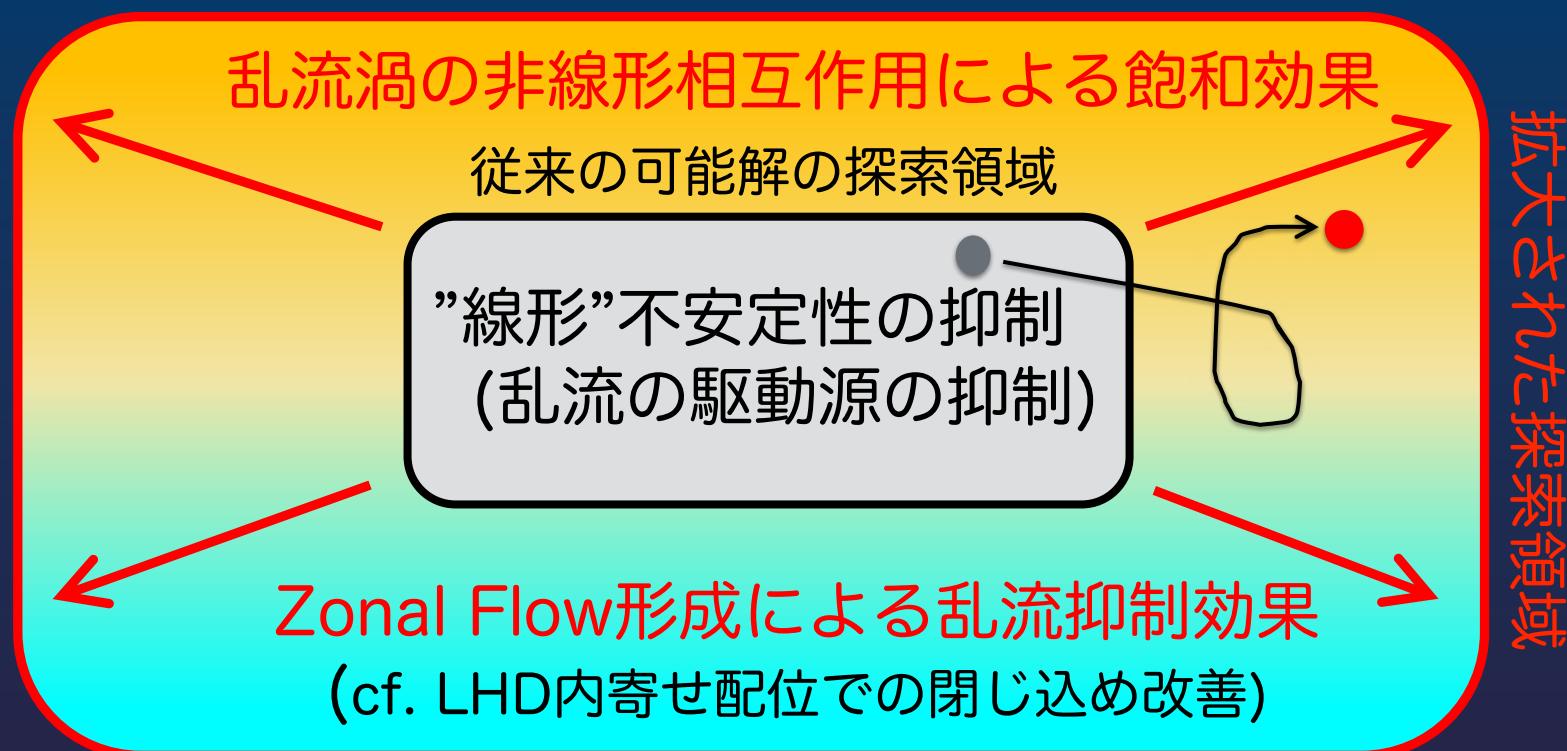
多次元の超曲面上の極値探索

3Dプラズマでの適用例



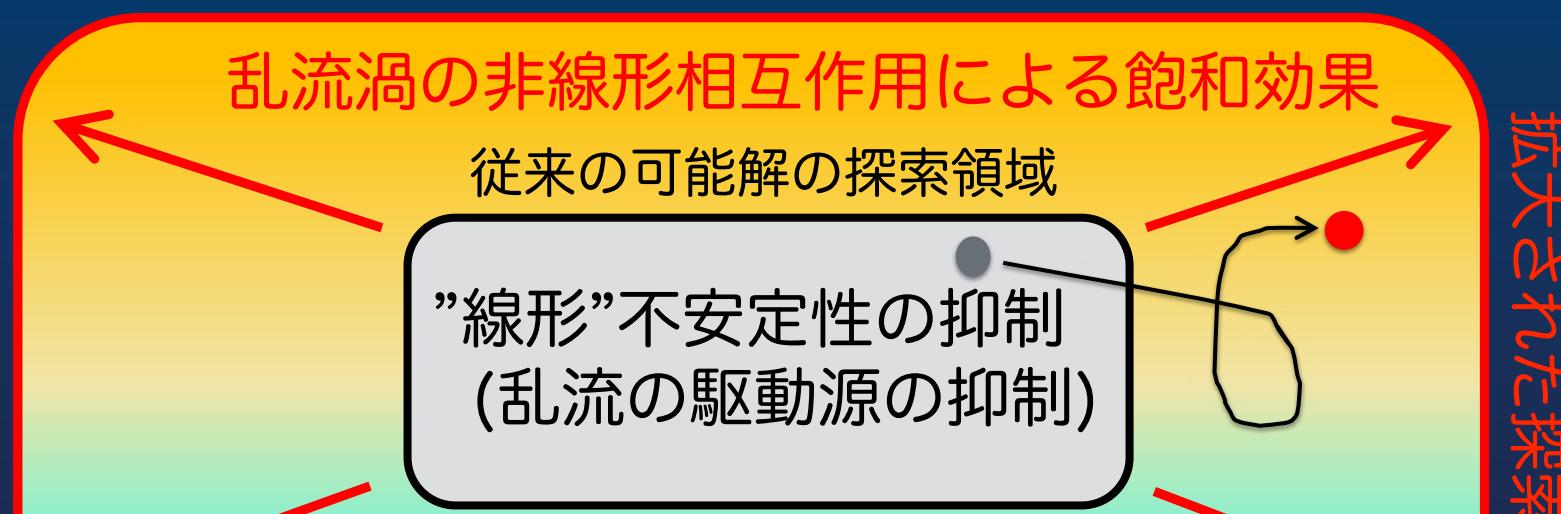
非線形性や構造形成が広げる可能性(乱流を例に)

- 従来の”乱流”抑制配位の研究 → “線形”不安定性(駆動源)の低減のみに着目
c.f. Proxy modeling: Mynick PRL2010, Xanthopoulos PRL2014, Proll PPCF2016
→ 乱流渦の非線形相互作用やZonal flowによる抑制効果を無視
- 非線形性(乱流)や構造形成(ZF)を組み入れた新たな探索モデル(目的関数)を構築し、配位探索の地平を拡大 → 新たなプラズマ閉じ込めを開拓



非線形性や構造形成が広げる可能性(乱流を例に)

- 従来の”乱流”抑制配位の研究 → “線形”不安定性(駆動源)の低減のみに着目
c.f. Proxy modeling: Mynick PRL2010, Xanthopoulos PRL2014, Proll PPCF2016
→ 乱流渦の非線形相互作用やZonal flowによる抑制効果を無視
- 非線形性(乱流)や構造形成(ZF)を組み入れた新たな探索モデル(目的関数)を構築し、配位探索の地平を拡大 → 新たなプラズマ閉じ込めを開拓



新古典輸送+MHD安定性+高エネルギー粒子閉じ込め+周辺磁場構造(ダイバータ)も含めた複合的な探索 (LHDや世界の研究知見の集約・発展)

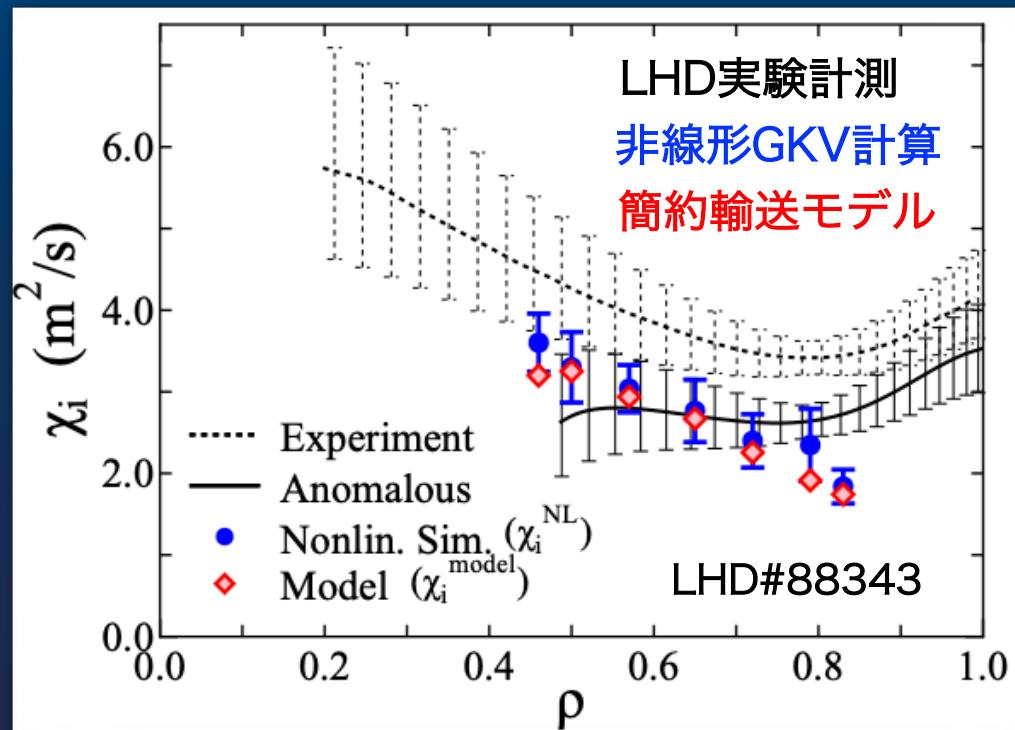
アウトライン

- 背景と動機：乱流が支配する核融合プラズマの輸送・閉じ込め
- この研究で目指すもの、新たな挑戦。
- 研究アクティビティの紹介
 - 乱流モデリング、ダイバータ制御、最適コイル探索
 - 工学検討、先進乱流計測の考案
- まとめ

乱流の非線形性・ZF効果をモデル化する

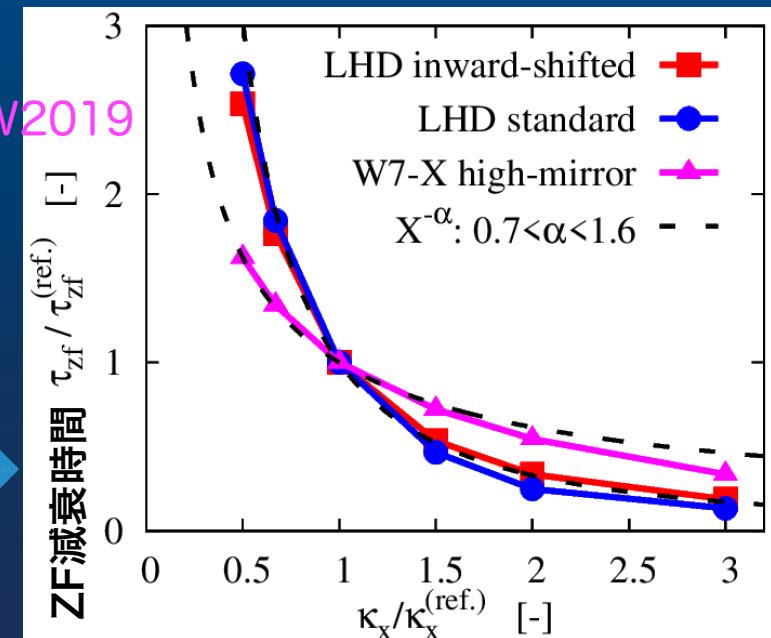
- LHD・W7-X・JT-60Uに対するジャイロ運動論的乱流シミュレーション
→ 乱流輸送(χ_i) = F [乱流振幅T, ZF振幅Z]モデル化

Nunami PoP2013, Toda PoP2018, Nakata FEC2014



Nakata ISHW2019

LHDなどの乱流
研究に基づくモデ
リング



乱流抑制配位探索のために拡張されたモデル

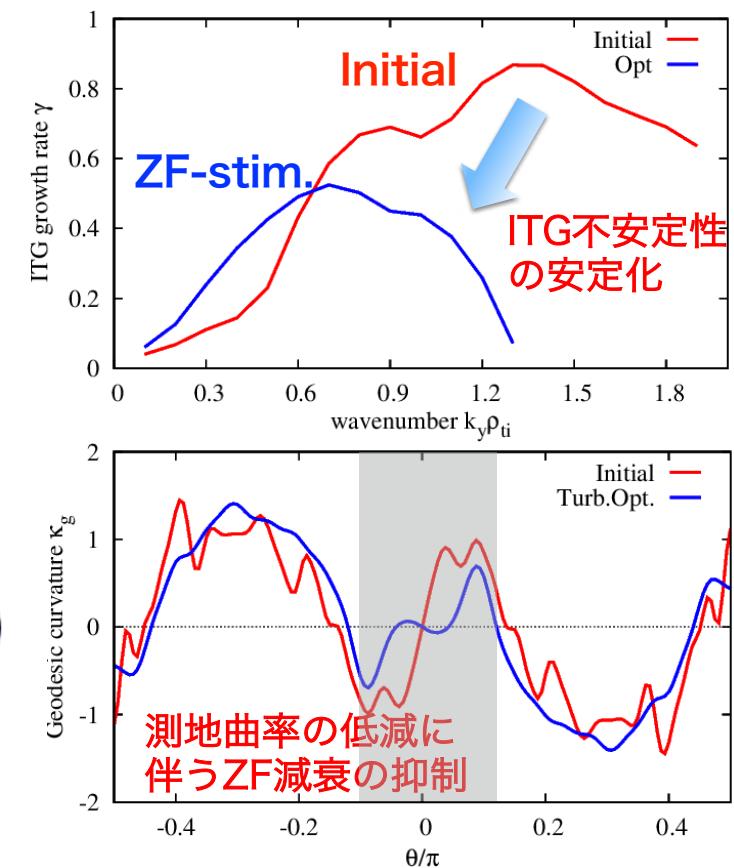
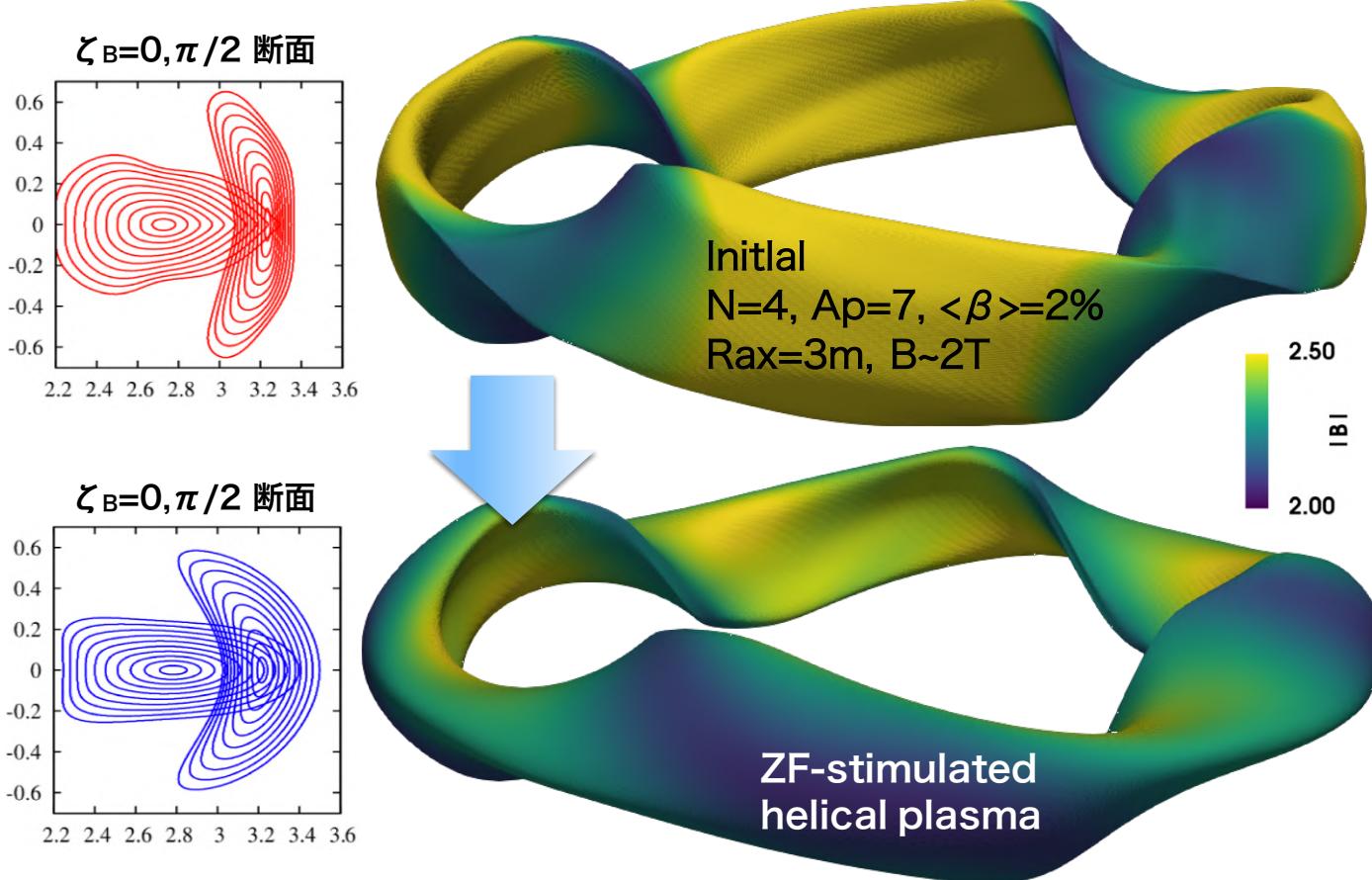
$$\chi_i^{\text{proxy}}(|B|, g^{ij}) = \frac{C \left(\sum_k \gamma_k^{\text{proxy}} / k_{\perp}^2 \right)^{\beta}}{1 + \kappa_x^{-\alpha} / \left(\sum_k \gamma_k^{\text{proxy}} / k_{\perp}^2 \right)^{\delta}} \chi_i^{\text{GB}}$$

磁場幾何学量だけで近似

新しいモデルを用いた乱流抑制配位の探求

Nakata, Matsuoka+ JPS2020

- 数理計画計算による配位探索(with STELLOPT2: LM法)
- 初期条件は新古典輸送低減配位、 $\theta \sim 0$ 近傍の測地曲率(on $\alpha=0$ fluxtube)
→ 乱流の駆動源(ITG不安定性)の減少、ZF減衰効果の抑制を確認



3次元磁場構造でZF励起が強化されるプラズマ

Nakata, Matsuoka+ JPS2020

ジャイロ運動論ITG乱流
シミュレーション

初期配位
(新古典輸送最適化)

乱流抑制配位

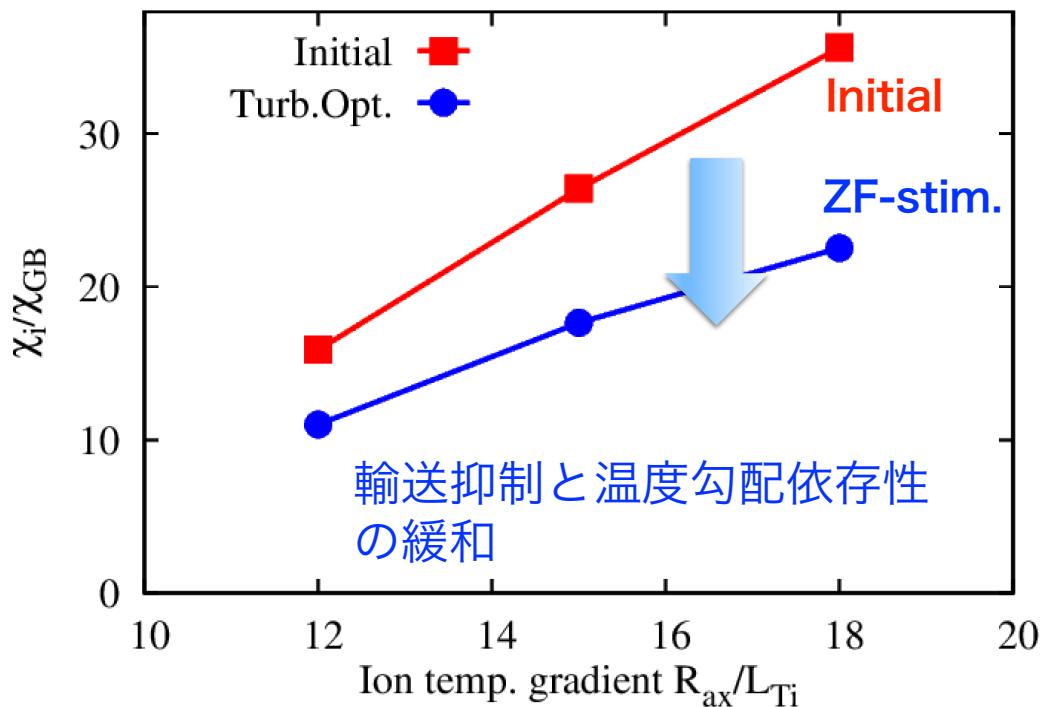
50.0
-50.0

calc. by GKV

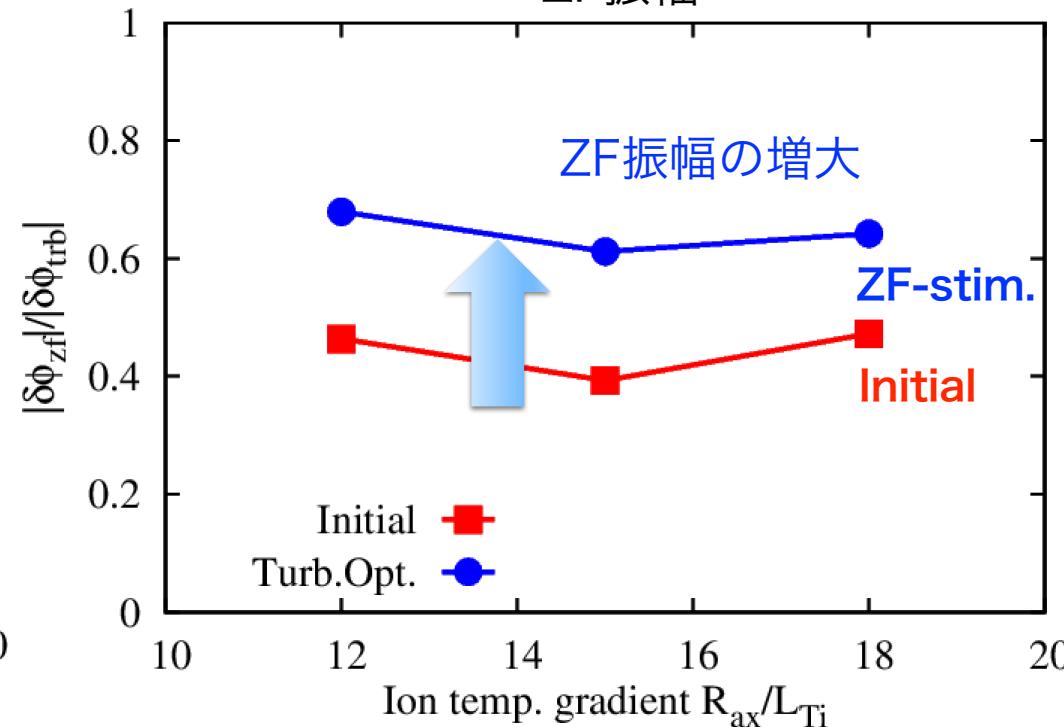
3次元磁場構造でZF励起が強化されるプラズマ

ジャイロ運動論ITG乱流
シミュレーション

乱流輸送レベル



ZF振幅



線形不安定性(駆動源) + ZF(非線形性)最適化モデルの有効性を確認

- 強いZFの励起が促進される新たな乱流抑制配位創成の可能性を例示
- 大規模並列探索を実現する数理計画計算スキームの構築を推進

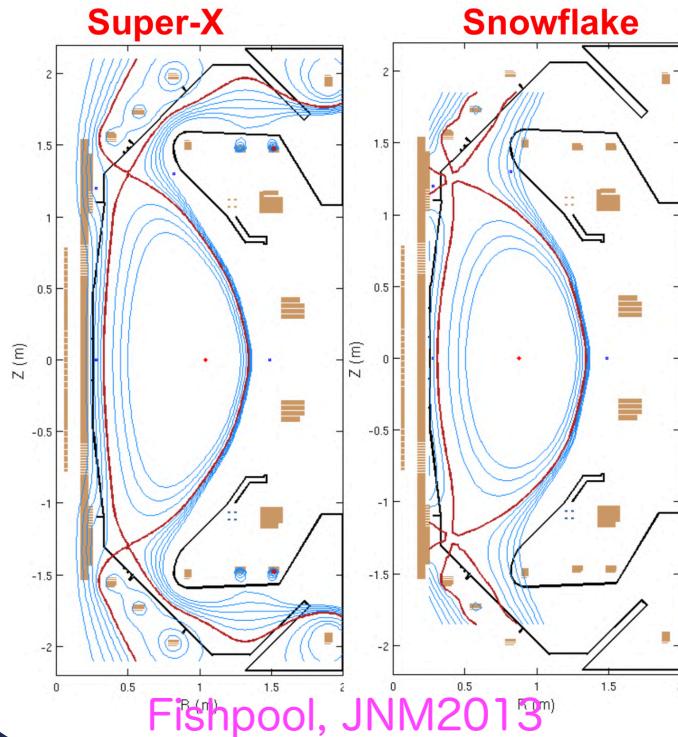
アウトライン

- 背景と動機：乱流が支配する核融合プラズマの輸送・閉じ込め
- この研究で目指すもの、新たな挑戦。
- 研究アクティビティの紹介
 - 乱流モデリング、ダイバータ制御、最適コイル探索
 - 工学検討、先進乱流計測の考案
- まとめ

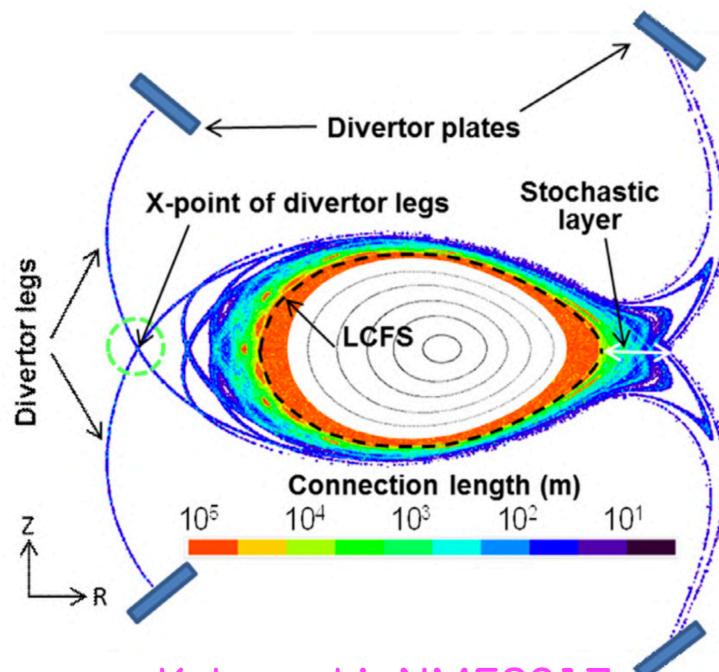
多様なダイバータ構造の実現を目指して

- 核融合炉にとって不可欠なダイバータ: 粒子排気、熱負荷、放射口ス, etc
- プラズマ内部の状態に対してロバストなダイバータ構造が要求される

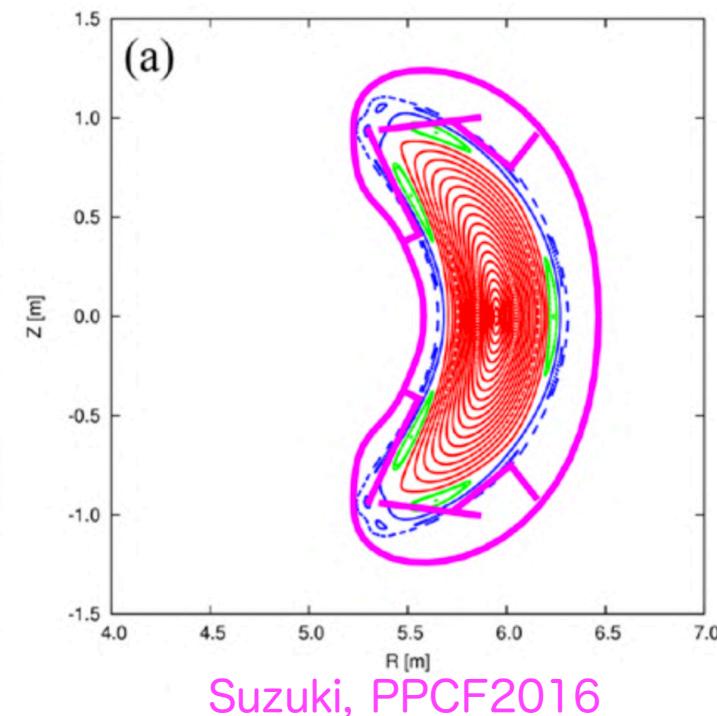
トカマク：レッグダイバータ



LHD : レッグダイバータ+ergodic層



W7-X : 磁気島ダイバータ

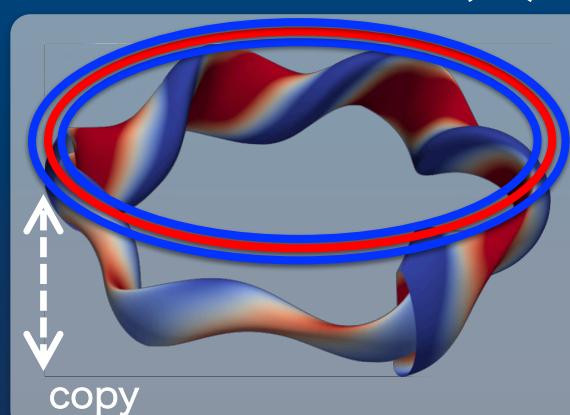


→ 各々の配位に関する粒子排気・熱輸送特性の系統的な比較研究
(炉心と周辺の結合)

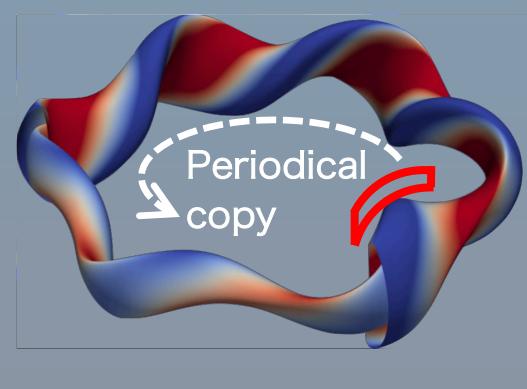
外部コイルによるダイバータ磁場構造の制御

- 3次元プラズマでレッグ/磁気島ダイバータを柔軟に構成するスキームを検討

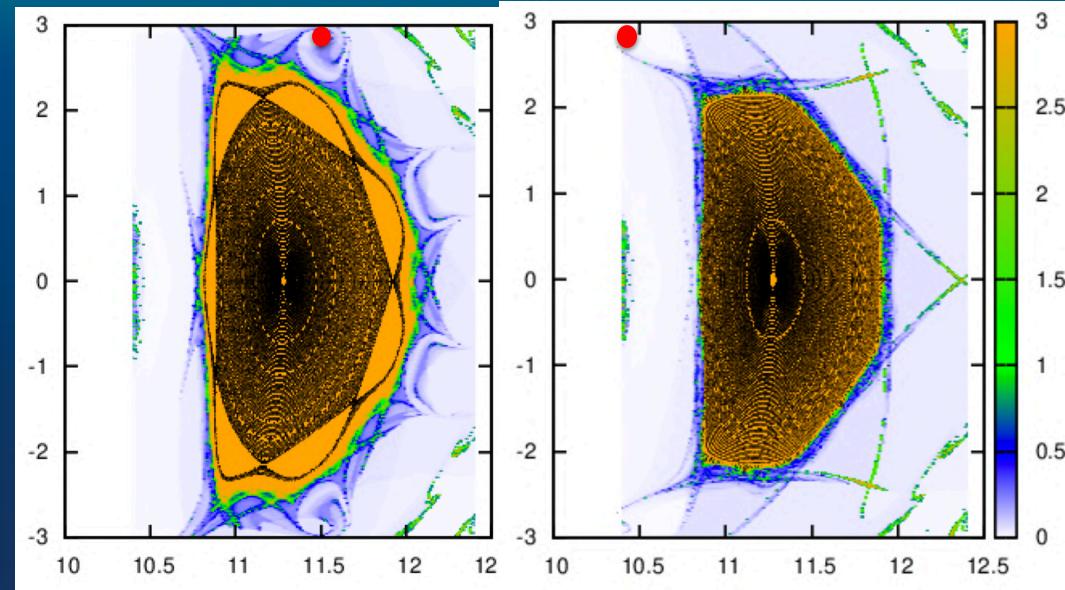
Poloidal Field Coils(PF)



Saddle Loop Coils (SDL)

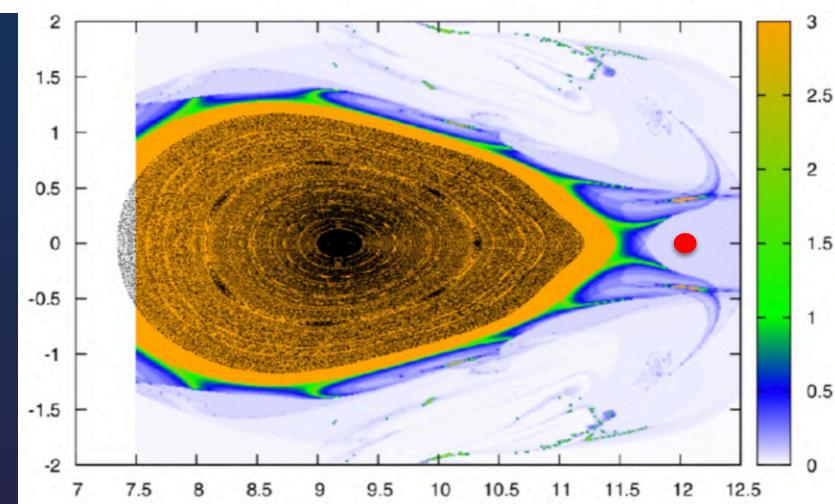


局所ループ外部コイル ($\Delta\phi \pm 5\text{~}10^\circ$)



外部コイルの最適配置などを探索し、コア部の特性劣化を抑制しつつ周辺構造を制御

ほぼ同一の炉心プラズマで複数のダイバータ構造制御 → より定量的で多様な比較研究



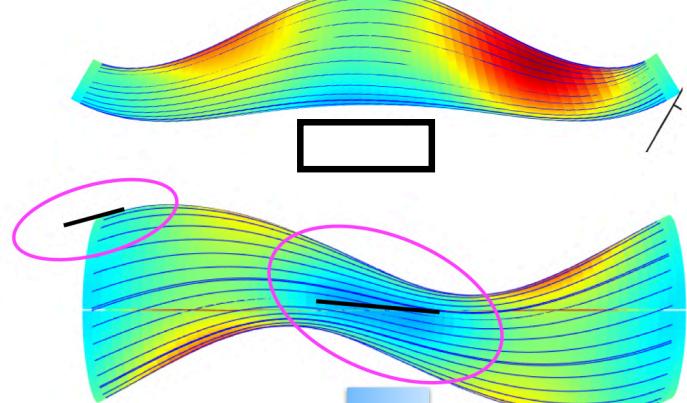
外部コイルによるダイバータ磁場構造の制御

- 3次元磁場構造に適合したコイル配置の探索

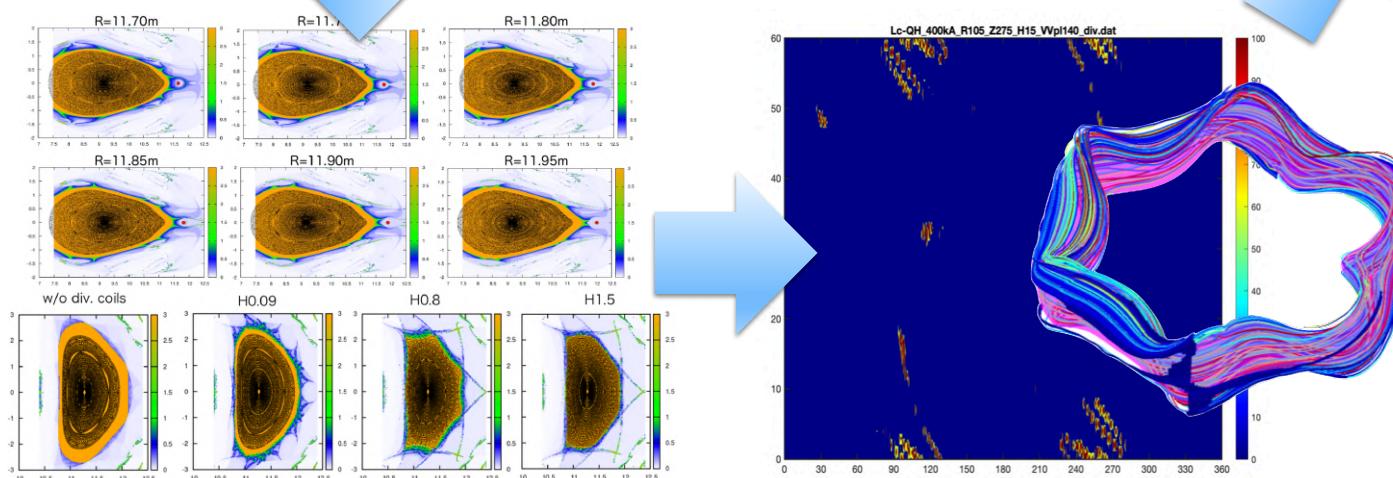
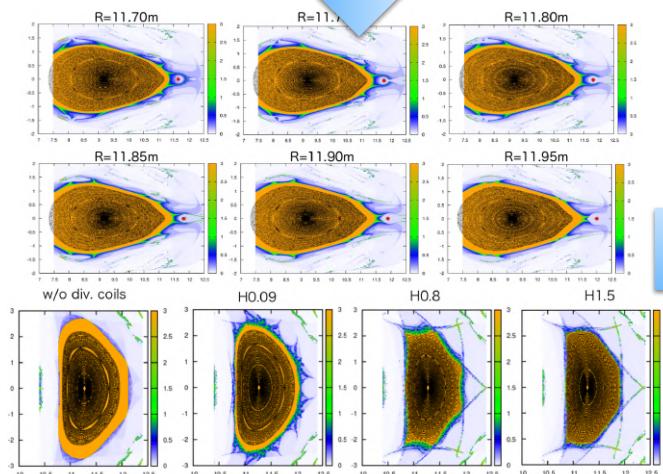
Hayashi+ 2020

Suzuki+ & Kawamura+ JSPF2019

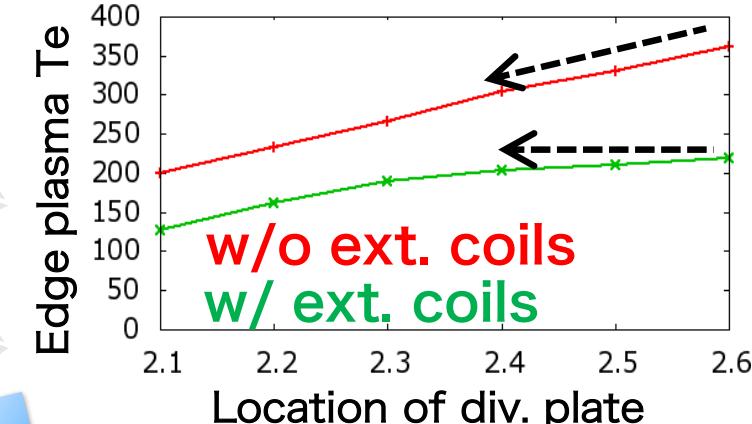
弱ポロイダル磁場&平坦領域の探索



磁力線追跡スキャン(> 80 cases)



EMC3-EIRENEによる周辺熱・粒子輸送解析



外部コイルでのダイバータ構造制御のスキーム構築が進展

→ 数理計画手法に基づく最適計算による外部コイル配置の探索へ

アウトライン

- 背景と動機：乱流が支配する核融合プラズマの輸送・閉じ込め
- この研究で目指すもの、新たな挑戦。
- 研究アクティビティの紹介
 - 乱流モデリング、ダイバータ制御、最適コイル探索
 - 工学検討、先進乱流計測の考案
- まとめ

3次元閉じ込め磁場を作る最適コイルの探索

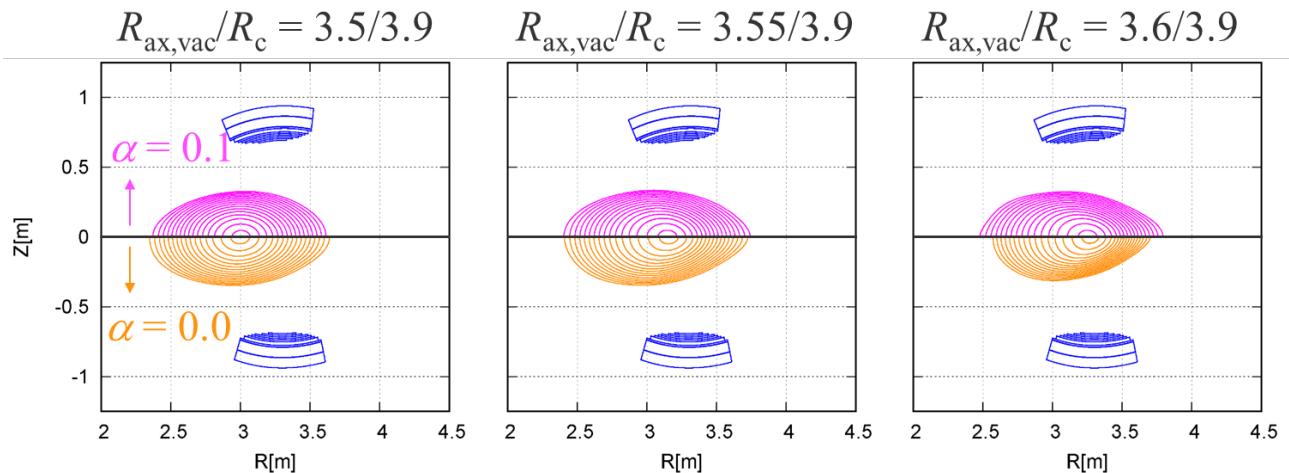
Satake+, Ichiguchi+, Goto+, Yanagi+,
yamaguchi+, JSPF2019

- 3次元プラズマの閉じ込め磁場を作り出すコイル形状には自由度がある。
→ (同じ炉心プラズマに対して)目的や特性に応じた複数の最適コイル形状
- LHDをレファレンスとした連続巻線則の変調効果の解析や、統合的な配位・コイル探索コードを構築 (コイル形式の系統的な評価・比較)

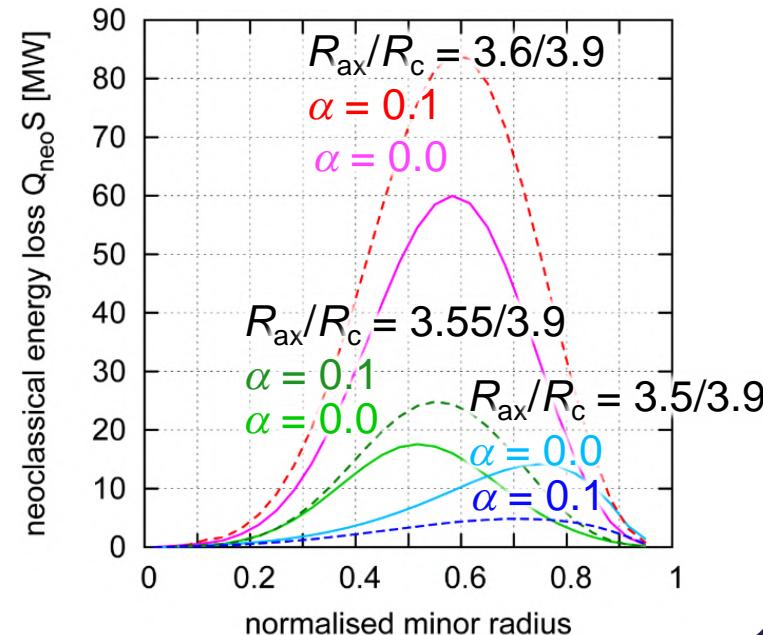
LHD-like巻線則におけるピッチパラメータ(α)最適化による高性能化

$$R = R_c + a_c \cos \theta, \quad Z = a_c \sin \theta \\ \theta = \frac{m}{\ell} \phi + \alpha \sin \left(\frac{m}{\ell} \phi \right)$$

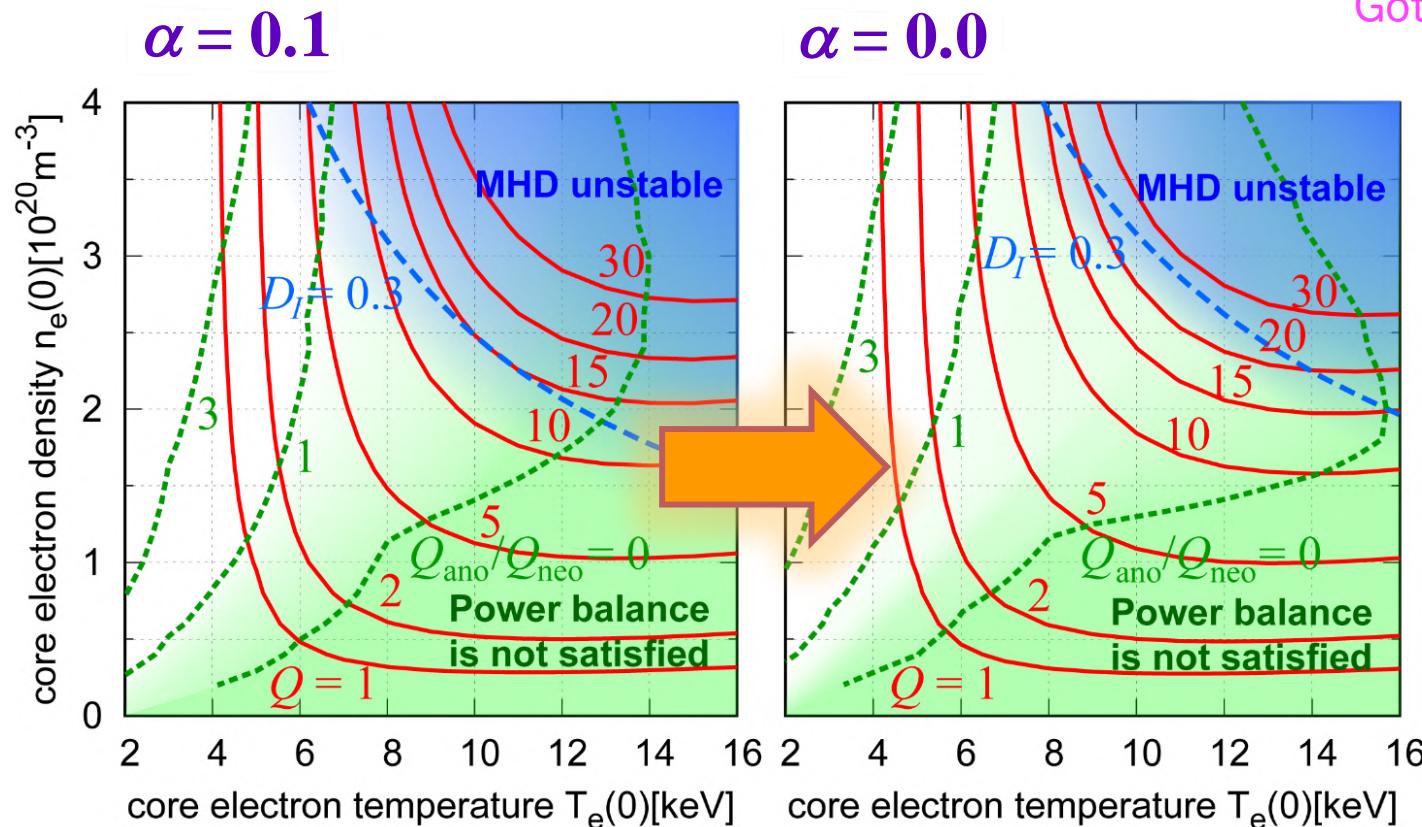
高ベータ平衡計算 ($\beta_0 = 6\%$, HINT)



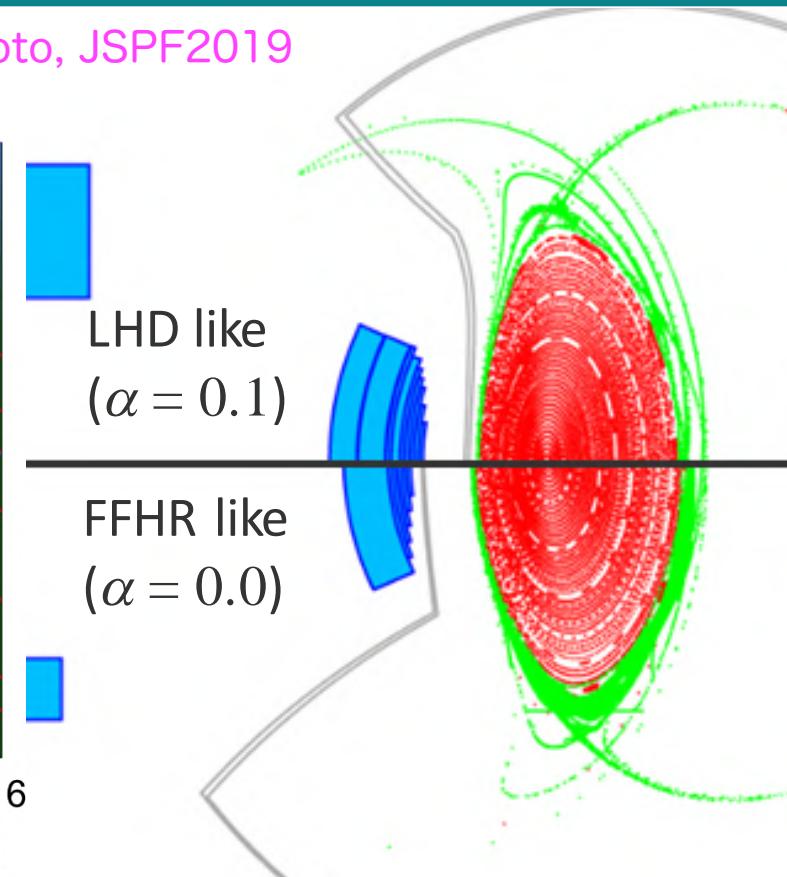
新古典輸送計算 (KNOSOS, GSRAKE)



炉設計へのフィードバック



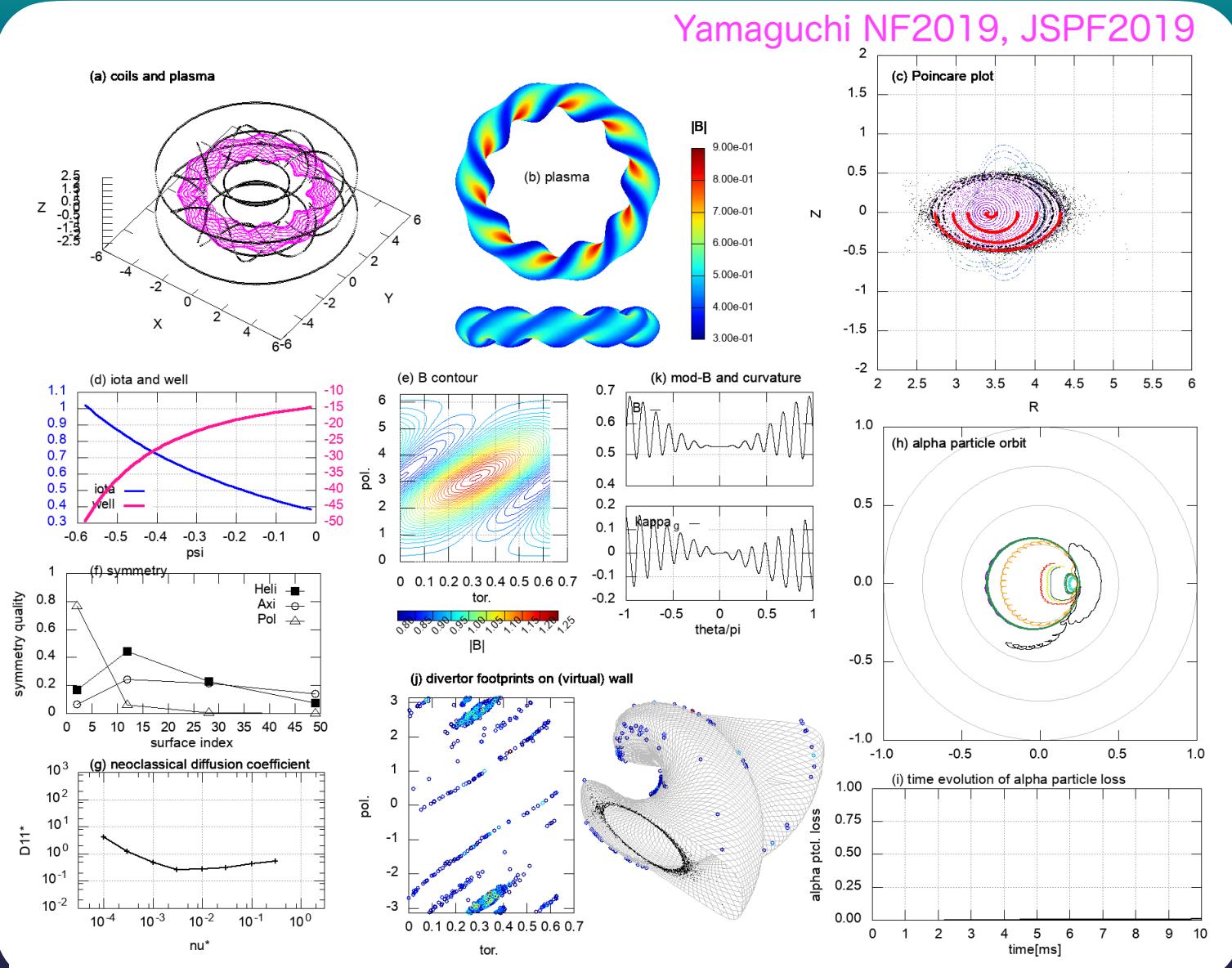
Goto, JSPF2019



- 到達可能と考えられる温度・密度領域が増大し、核融合利得の向上が見込まれる
- 附加コイルを追加した最適化や、機械学習を援用した最適化も推進

配位とコイルの統合最適化計算コードの開発

- OPTHECSコードによって、巻線則の制御パラメータを選んだ上で自動最適化が可能に。
- 配位探索に加えて、新たな実験条件を見出すことにも有効



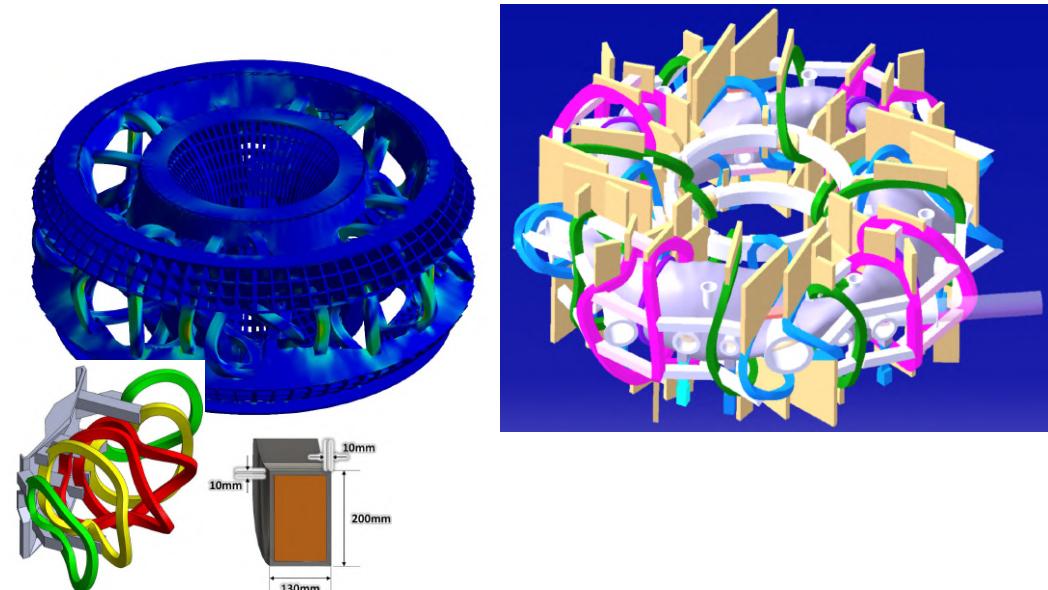
アウトライン

- 背景と動機：乱流が支配する核融合プラズマの輸送・閉じ込め
- この研究で目指すもの、新たな挑戦。
- 研究アクティビティの紹介
 - 乱流モデリング、ダイバータ制御、最適コイル探索
 - 工学検討、先進乱流計測の考案
- まとめ

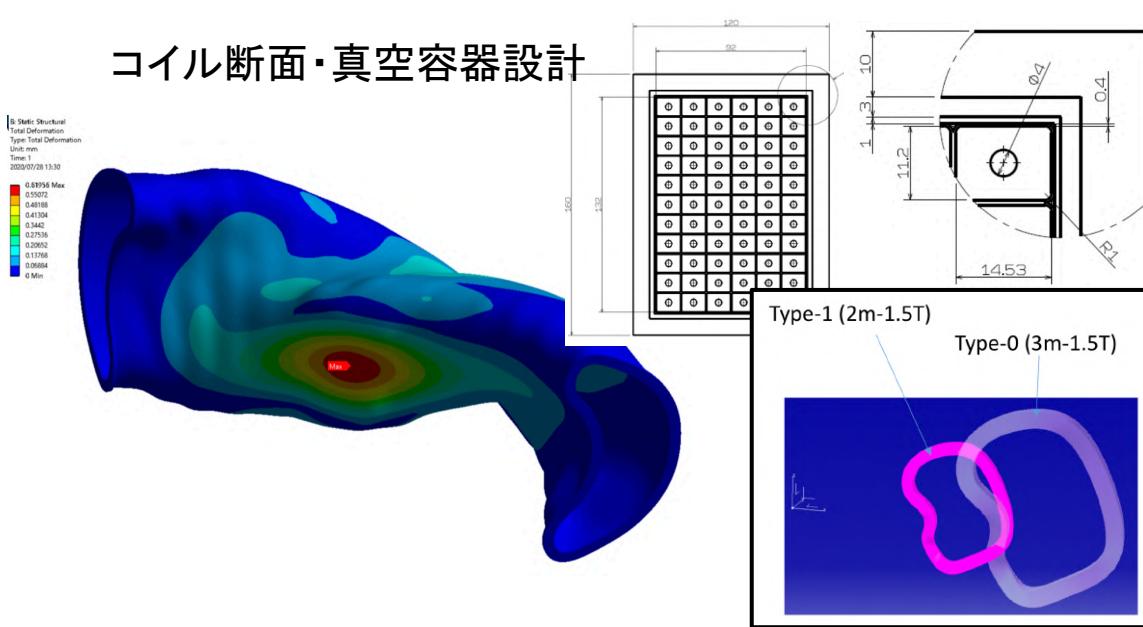
トライアル配位を用いた模擬工学設計

- 工学的制約条件の洗い出し、解析ツールなどの整備、ワークフローの構築
- 複数の形式でコイル支持構造や真空容器を設計・解析 (技術部および木下氏の協力)
→ 電磁応力分布の評価をもとに、コイル形状やコイル距離などの計算へフィードバック

複数のコイル支持形式の検討と電磁力解析



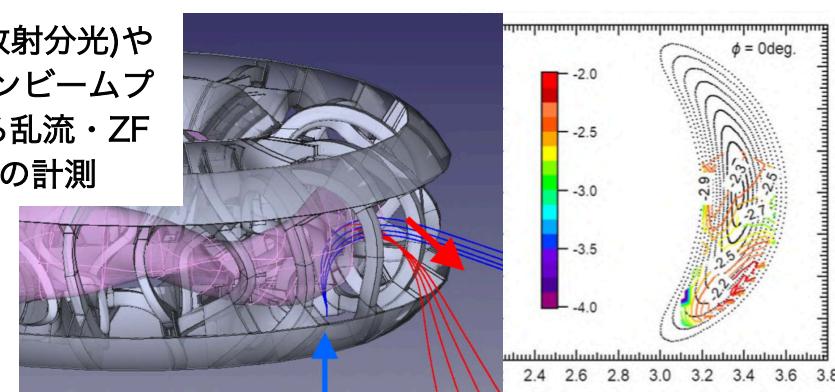
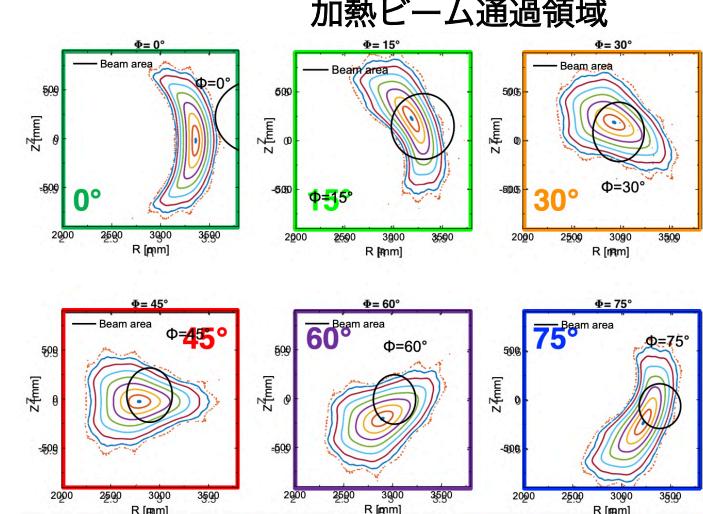
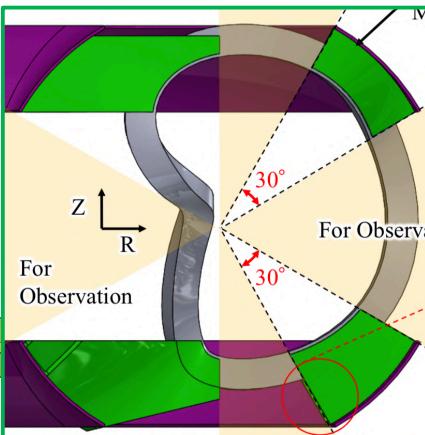
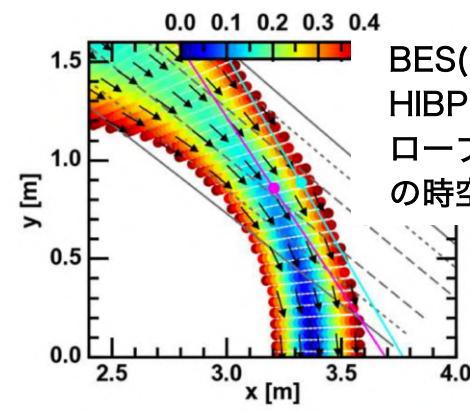
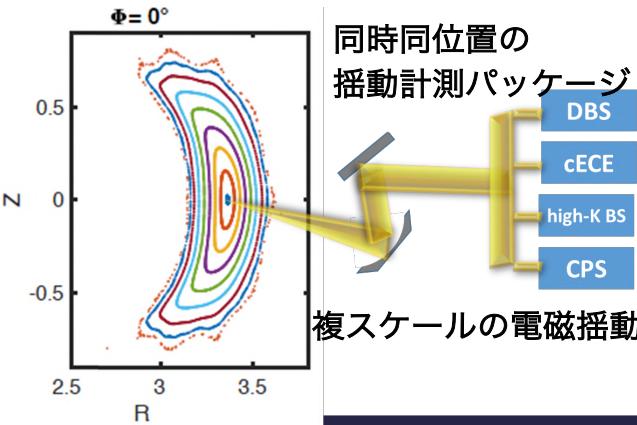
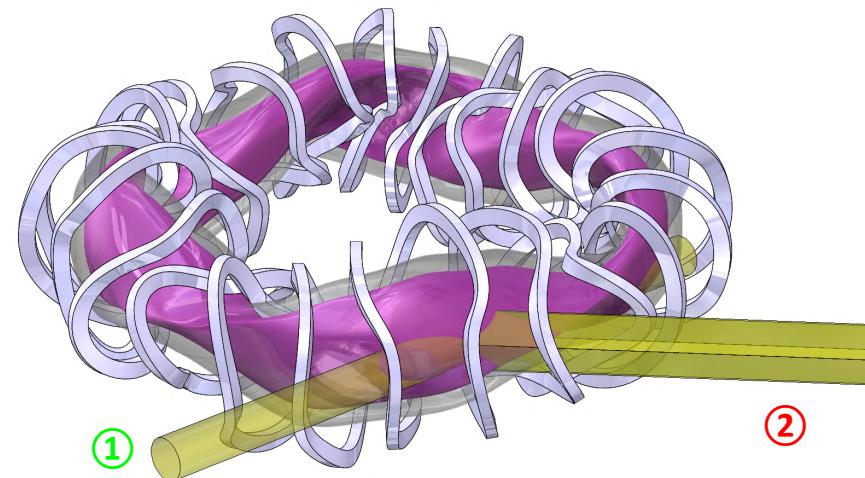
コイル断面・真空容器設計



先進的な乱流計測手法の考案や加熱系の検討

- 加熱システムや計測ポートの検討
- 乱流抑制やZF励起などのダイナミクスを実験的に検証するための計測考案
→ 各々の詳細: プラ核学会2020でのシリーズ発表

Nagaoka, Kobayashi, Tokuzawa, Ido+ JPS2020



BES(ビーム放射分光)や
HIBP(重イオンビームブ
ローブ)による乱流・ZF
の時空間構造の計測

まとめ

- 新配位創成研究が目指すもの
3次元磁場の多様性 + 大規模計算・モデリング + 数理計画手法
→ 新しい挑戦と開拓 「乱れ(非線形性)や流れ(構造形成)を磁場で操り、乱れが極限まで抑えられた新しいプラズマの創成」
 - LHDをはじめ、世界の研究知見を集約・発展させる研究
 - 核融合炉実現の加速を与える知見 + プラズマ科学や他領域への波及
 - 実験研究の重要性：プラズマの非線形性がもたらす理論と実験の進化の連鎖
- 磁場構造でゾーナルフロー励起が強化された乱流抑制配位に向けた物理研究や工学検討・先進計測手法の考案が進展
- 課題と今後の展開
乱流(非局所効果, 周辺)、新古典フロー、MHD安定性や高エネルギー粒子挙動との両立、ダイバーク概念、先進的な数理計画手法、高効率なプラズマ加熱手法、新しい計測手法, etc
→ 色々な分野とも繋がりながら新しいアイデアを生み、研究を広げていきたい。