

大型ヘリカル装置LHDプロジェクトが切り開いた プラズマ物理の地平 周辺プラズマ物理

小林 政弘、LHD実験グループ

核融合科学研究所

1. 研究の背景

- －核融合炉における周辺プラズマの役割：粒子排気、不純物制御、熱負荷除去
- －ヘリカル系における周辺輸送の特徴

2. LHDの周辺磁場構造

3. 粒子排気

- －カオス磁力線構造によるSOL・ダイバータプラズマへの影響
- －非軸対称磁場配位における粒子排気の達成：閉構造ダイバータ

4. 不純物輸送

- －ストキャスティック磁場による不純物遮蔽

5. 熱負荷除去

- －磁場トポロジー遷移による放射冷却プラズマの安定化
- －乱流伝播の観測と熱負荷軽減

6. 今後の展開

7. まとめ

研究の背景—核融合炉における周辺プラズマの役割

- セパトリクス磁気面により、閉じ込め領域を装置壁から分離
- SOL: 磁力線方向輸送により、熱・粒子をダイバータ領域へ輸送

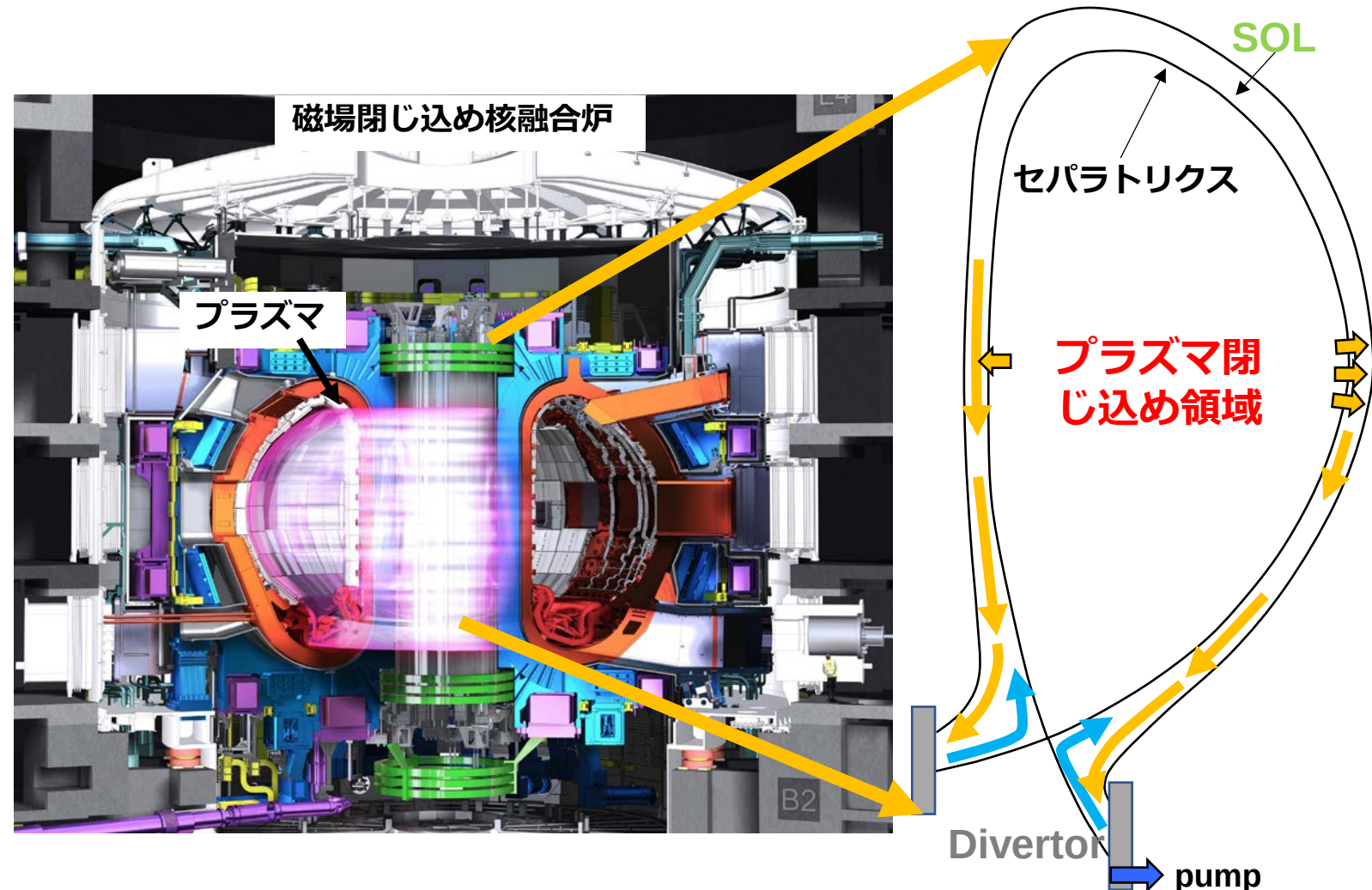
周辺プラズマの役割：

粒子排気： 閉じ込め領域の密度制御・He排気

熱負荷除去： ダイバータ板の損傷回避

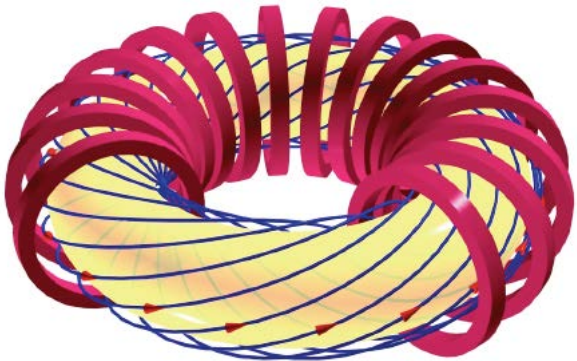
不純物制御： 高性能閉じ込めプラズマの維持

LHDの非軸対称磁場が周辺プラズマ輸送とその役割に及ぼす効果は？



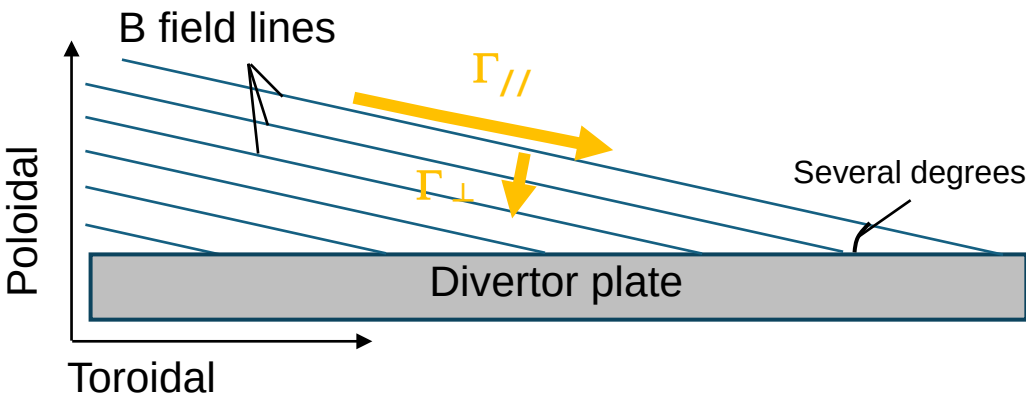
研究の背景ーヘリカル系における周辺輸送の特徴

軸対称磁場配位

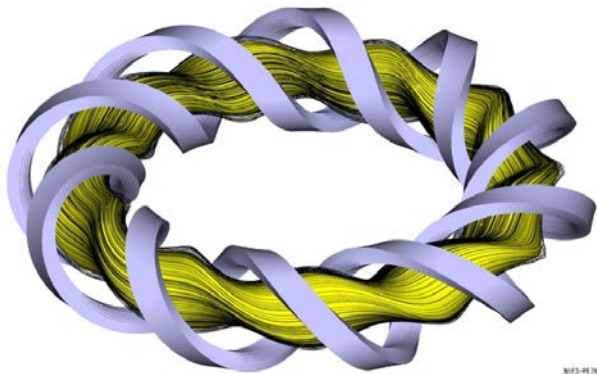


SOLでは磁力線方向輸送が支配的→**1D輸送**

$$\Gamma_{//} \left(\frac{B_{\theta}}{B_t} \right)^2 \gg \Gamma_{\perp}$$

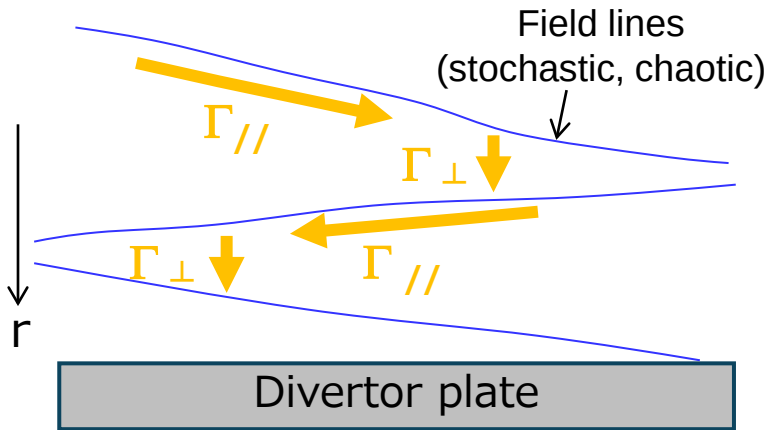


非軸対称磁場配位



磁場トポロジーの変化により磁力線方向と磁場横断輸送が競合→**2D, 3D輸送**

$$\Gamma_{//} \left(\frac{B_r}{B_t} \right)^2 \sim \Gamma_{\perp}$$



1D輸送から2D・3D輸送へ
ー 磁場トポロジーが生み出す新たな輸送自由度と複雑性 ー

本日の発表内容

1. 研究の背景

- －核融合炉における周辺プラズマの役割：粒子排気、不純物制御、熱負荷除去
- －ヘリカル系における周辺輸送の特徴

2. LHDの周辺磁場構造

3. 粒子排気

- －カオス磁力線構造によるSOL・ダイバータプラズマへの影響
- －非軸対称磁場配位における粒子排気の達成：閉構造ダイバータ

4. 不純物輸送

- －ストキャスティック磁場による不純物遮蔽

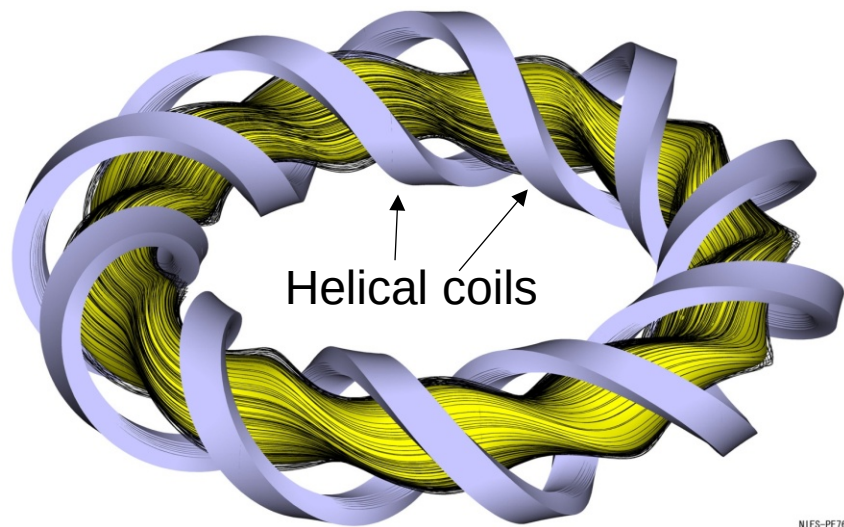
5. 熱負荷除去

- －磁場トポロジー遷移による放射冷却プラズマの安定化
- －乱流伝播の観測と熱負荷軽減

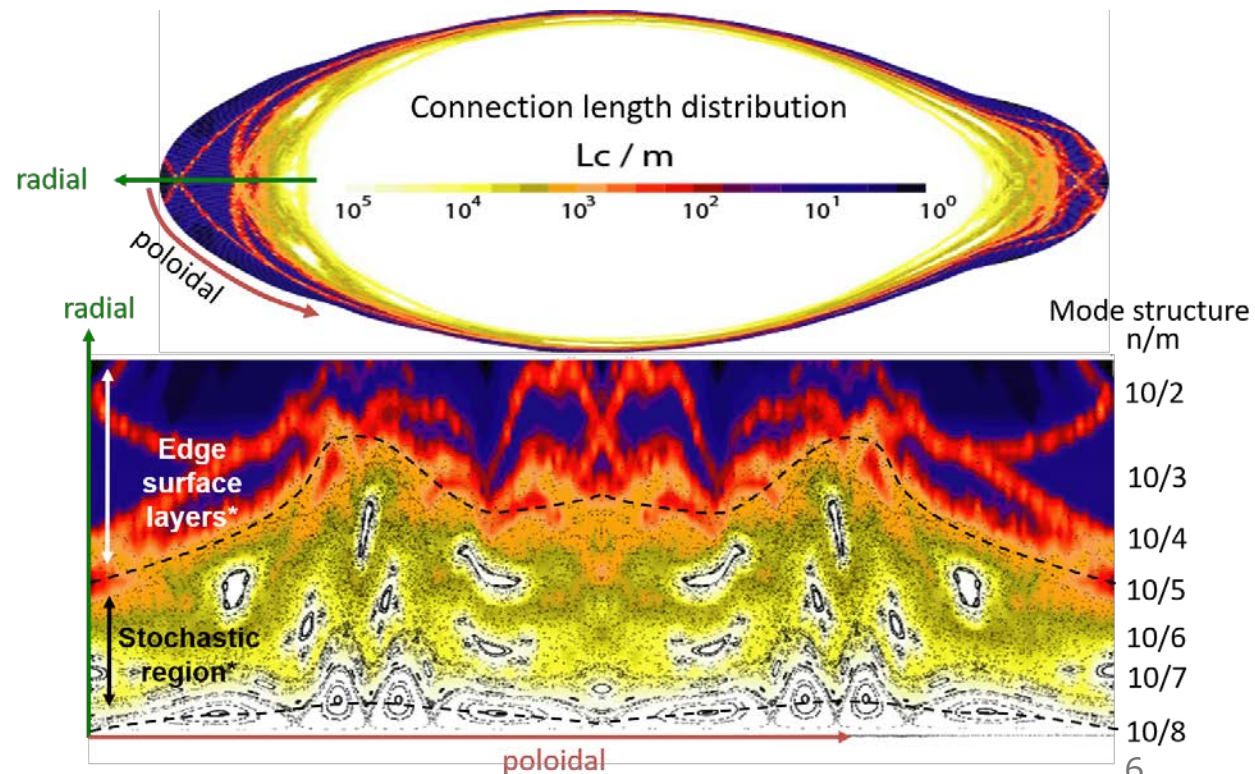
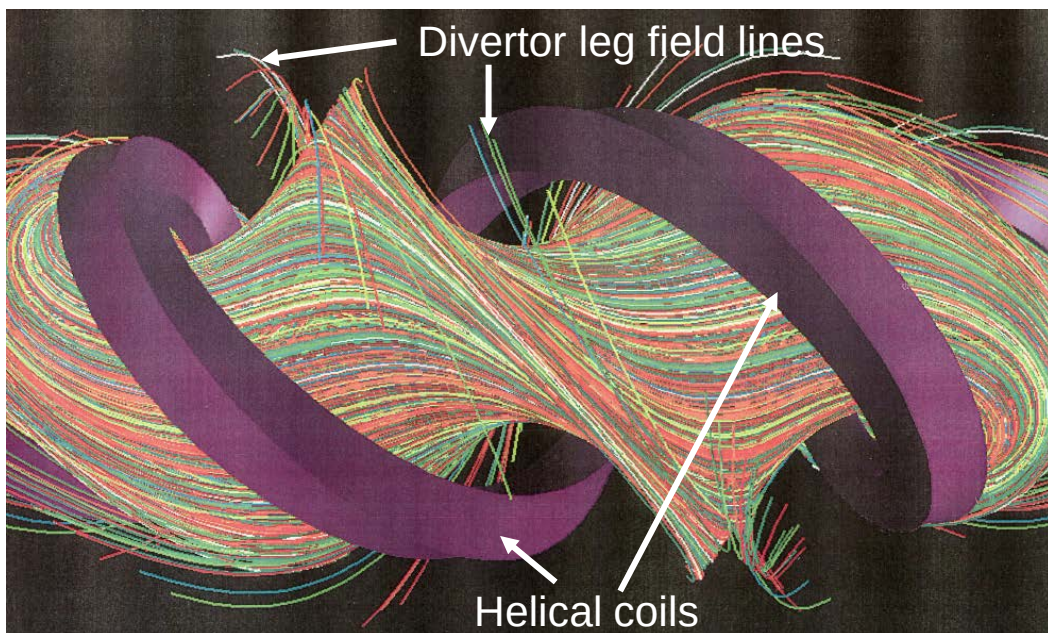
6. 今後の展開

7. まとめ

LHDの周辺磁場構造



- 非軸対称トーラス磁場配位では、複数モードの磁気島とサイドバンドの重なりにより、本質的にストキャスティック磁場構造が形成
→ カオス磁力線：長い接続長（数 km）・初期値への敏感性
- 磁力線構造の複雑化により、磁力線方向輸送と磁場横断輸送が競合
→ 輸送の2次元・3次元性が顕在化
- 従来の1次元輸送モデルでは記述困難
→ 3次元輸送効果が本質的に重要



本日の発表内容

1. 研究の背景

- －核融合炉における周辺プラズマの役割
- －ヘリカル系における周辺輸送の特徴

2. LHDの周辺磁場構造

3. 粒子排気

- －カオス磁力線構造によるSOL・ダイバータプラズマへの影響
- －非軸対称磁場配位における粒子排気の達成：閉構造ダイバータ

4. 不純物輸送

- －ストキャスティック磁場による不純物遮蔽

5. 熱負荷除去

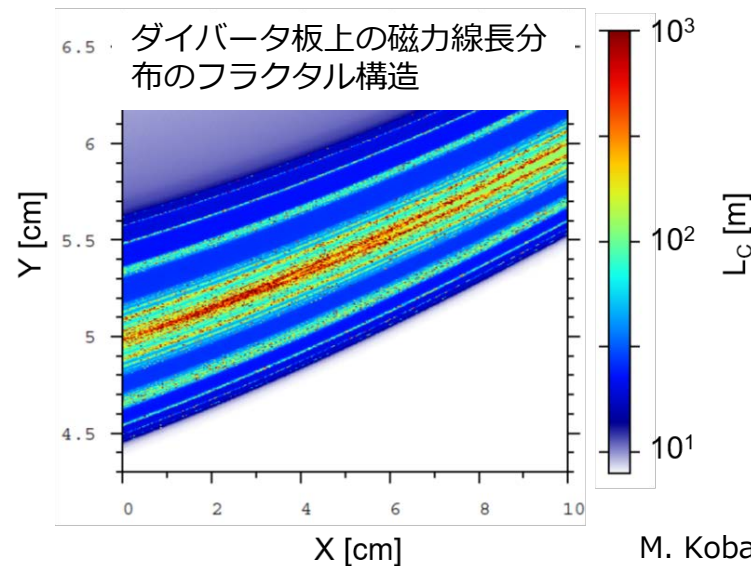
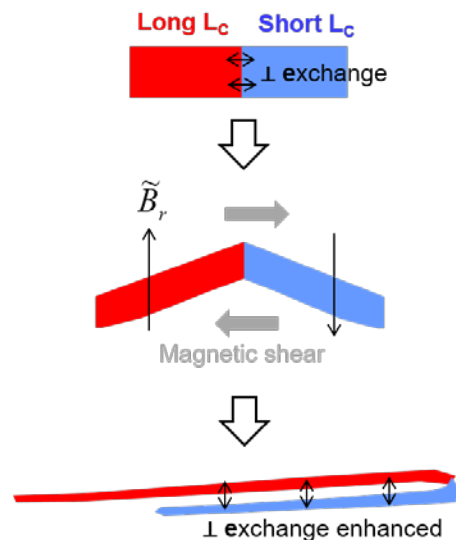
- －磁場トポロジー遷移による放射冷却プラズマの安定化
- －乱流伝播の観測と熱負荷軽減

6. 今後の展開

7. まとめ

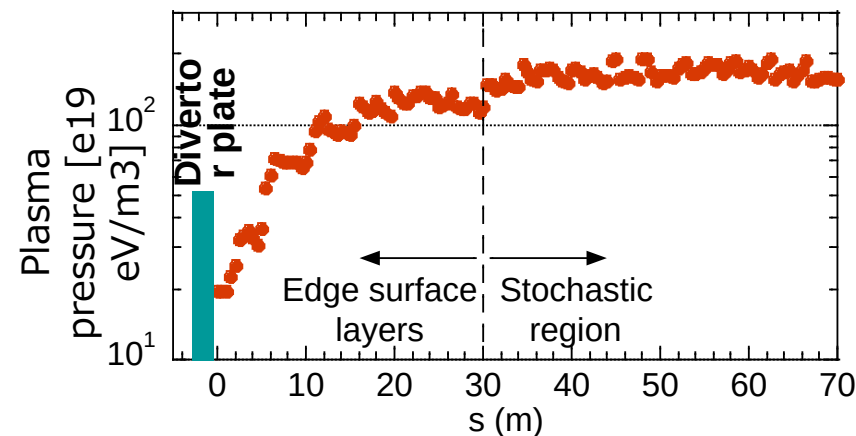
カオス磁力線構造によるSOL・ダイバータプラズマへの影響

引き延ばし・折り畳みによる磁力線構造
のフラクタル化

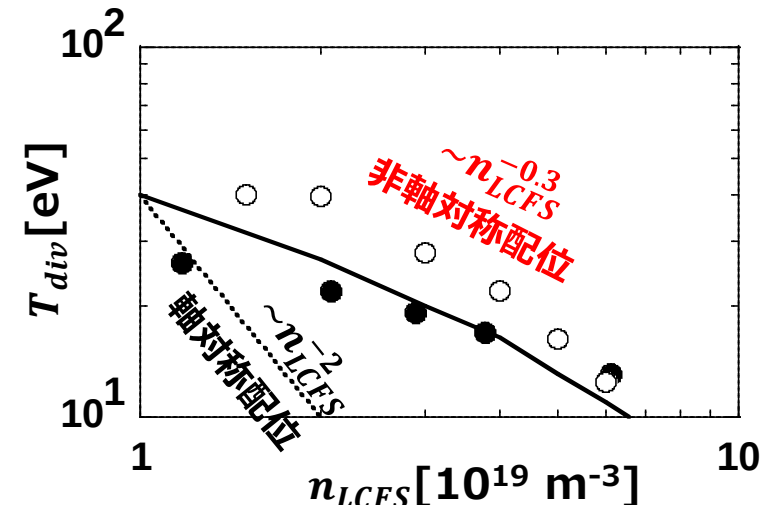
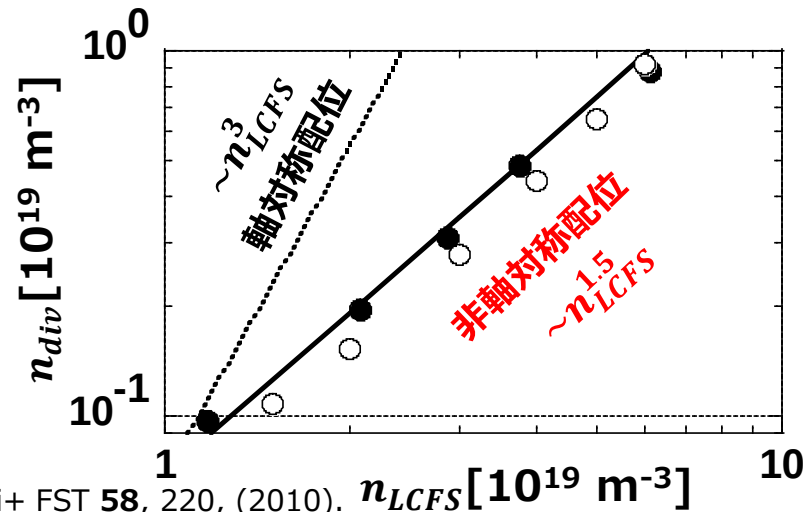


磁場構造のフラクタル化により、磁力線横断輸送が促進
→ 磁力線に沿ったプラズマ圧力保存の破れ

ダイバータ磁力線に沿ったプラズマ圧力分布



非軸対称磁場配位により、ダイバータ閉じ込め領域間の非線形結合が緩和
→ 軸対称配位と大きく異なる特徴



M. Kobayashi+ FST 58, 220, (2010). $n_{LCFS} [10^{19} \text{ m}^{-3}]$

カオス磁力線構造によるSOL・ダイバータプラズマへの影響

国際装置間比較による非軸対称配位に共通する普遍的効果の実証と定式化

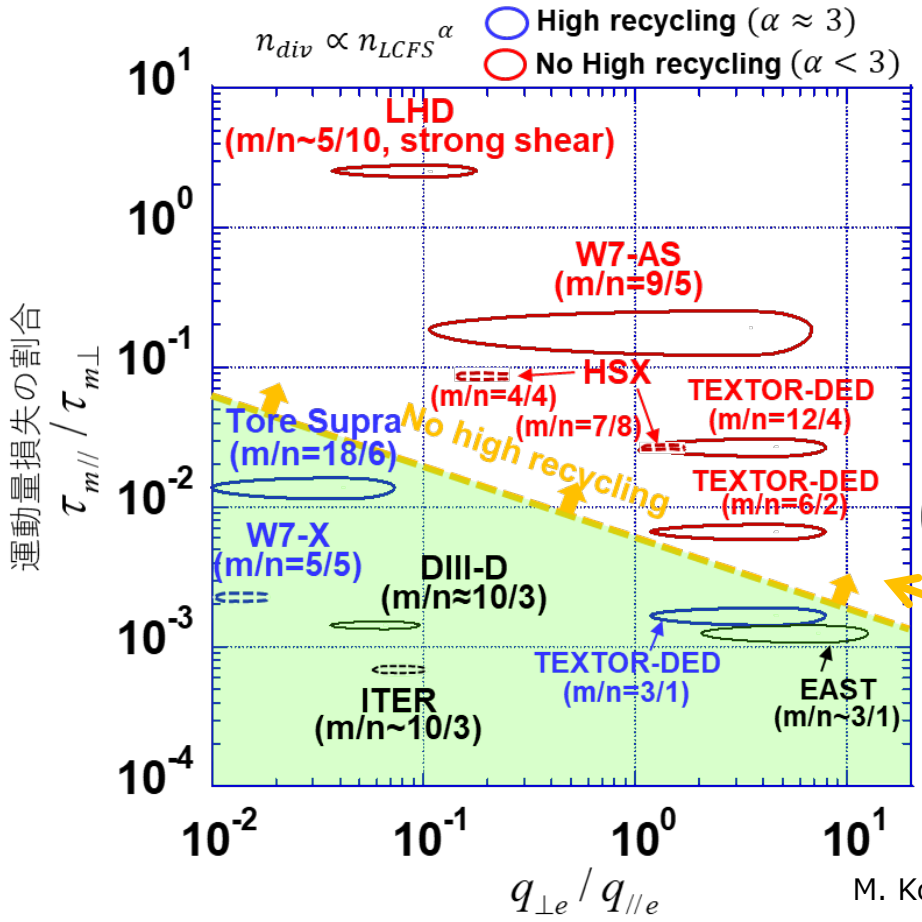
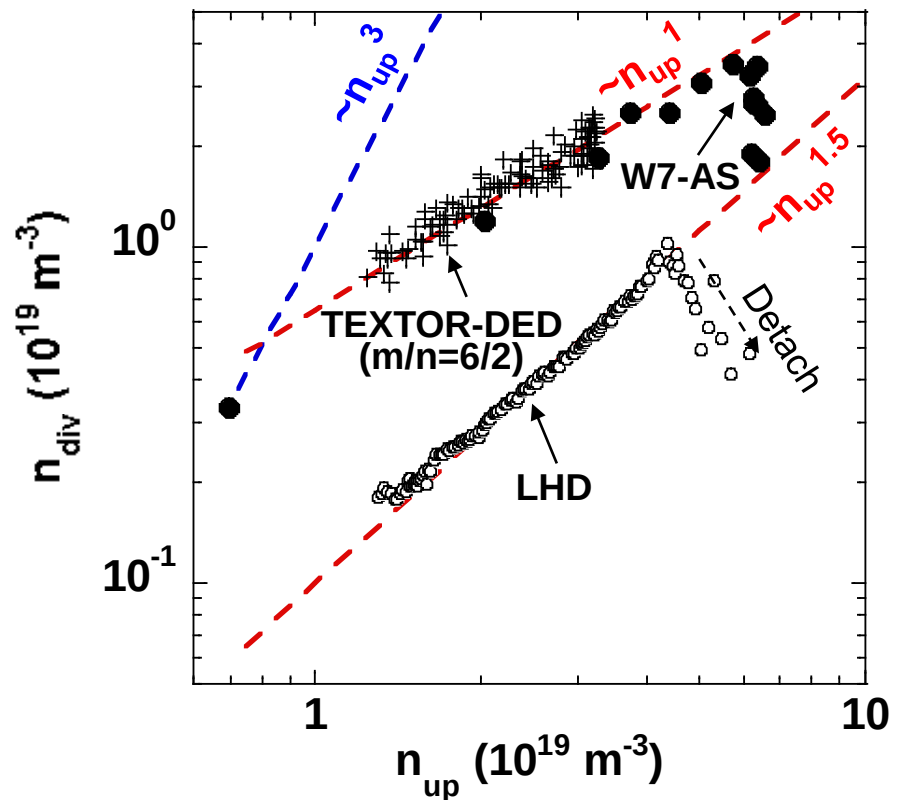
軸対称配位：強い上流密度応答

$$n_{div} \propto n_{up}^3 \quad T_{div} \propto n_{up}^{-2}$$



非軸対称配位：上流密度に対する応答が緩和

$$n_{div} \propto n_{up}^{\sim 1} \quad T_{div} \propto n_{up}^{\sim -1}$$

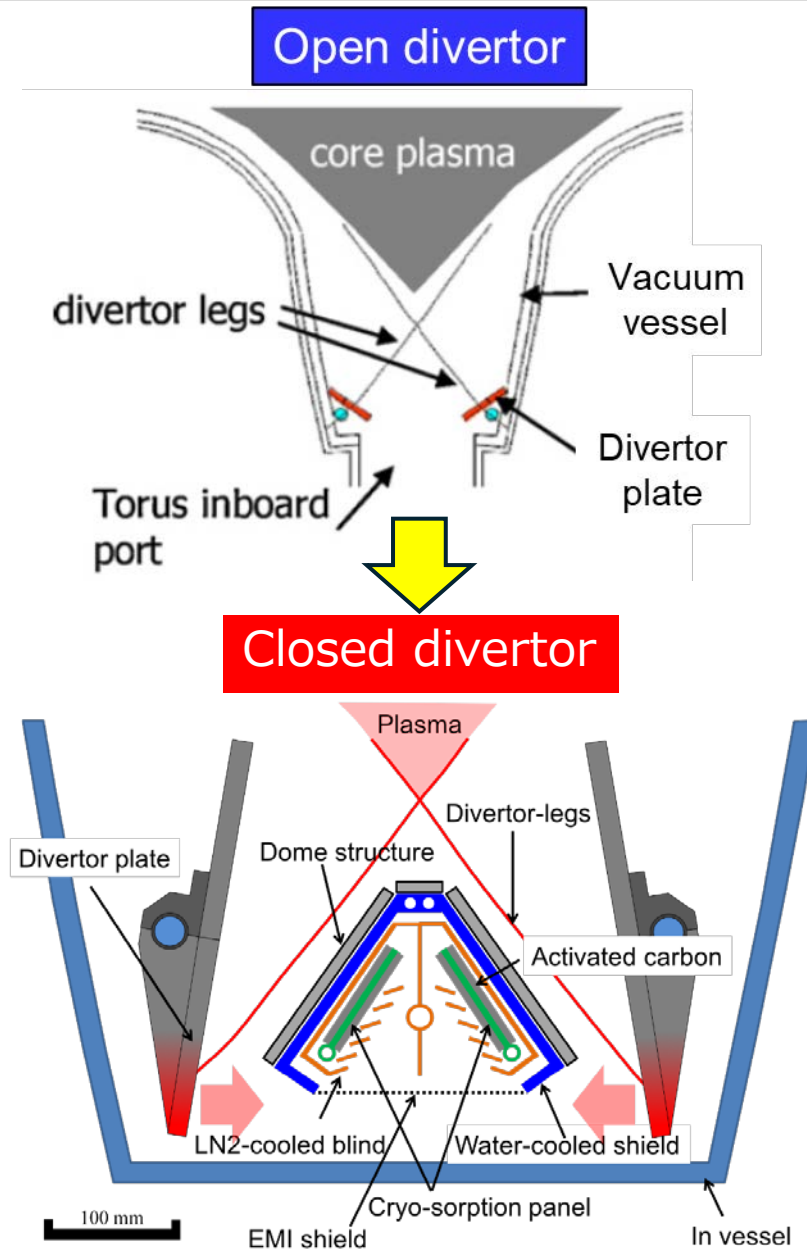


$$\left(\frac{\tau_{m\parallel}}{\tau_{m\perp}}\right)^2 \left(\frac{q_{\perp e}}{q_{\parallel e}}\right) > 3.6 \times 10^{-5}$$

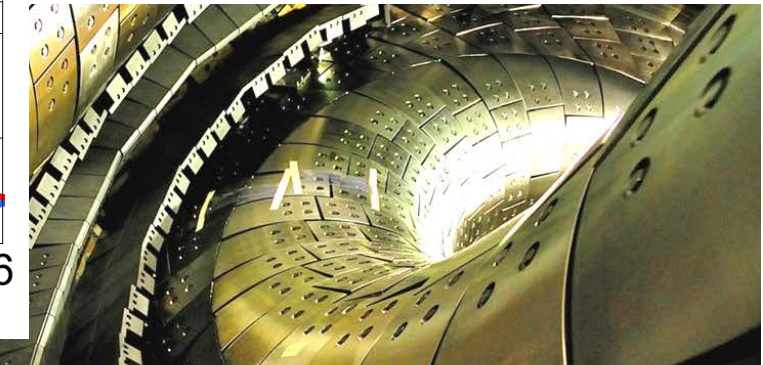
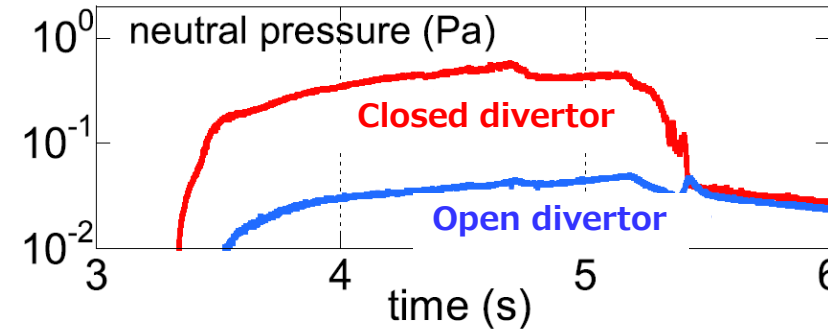
非軸対称効果が現れる
パラメータ領域

M. Kobayashi+ NF 55, 104021 (2015).
磁力線に垂直方向のエネルギー輸送の割合

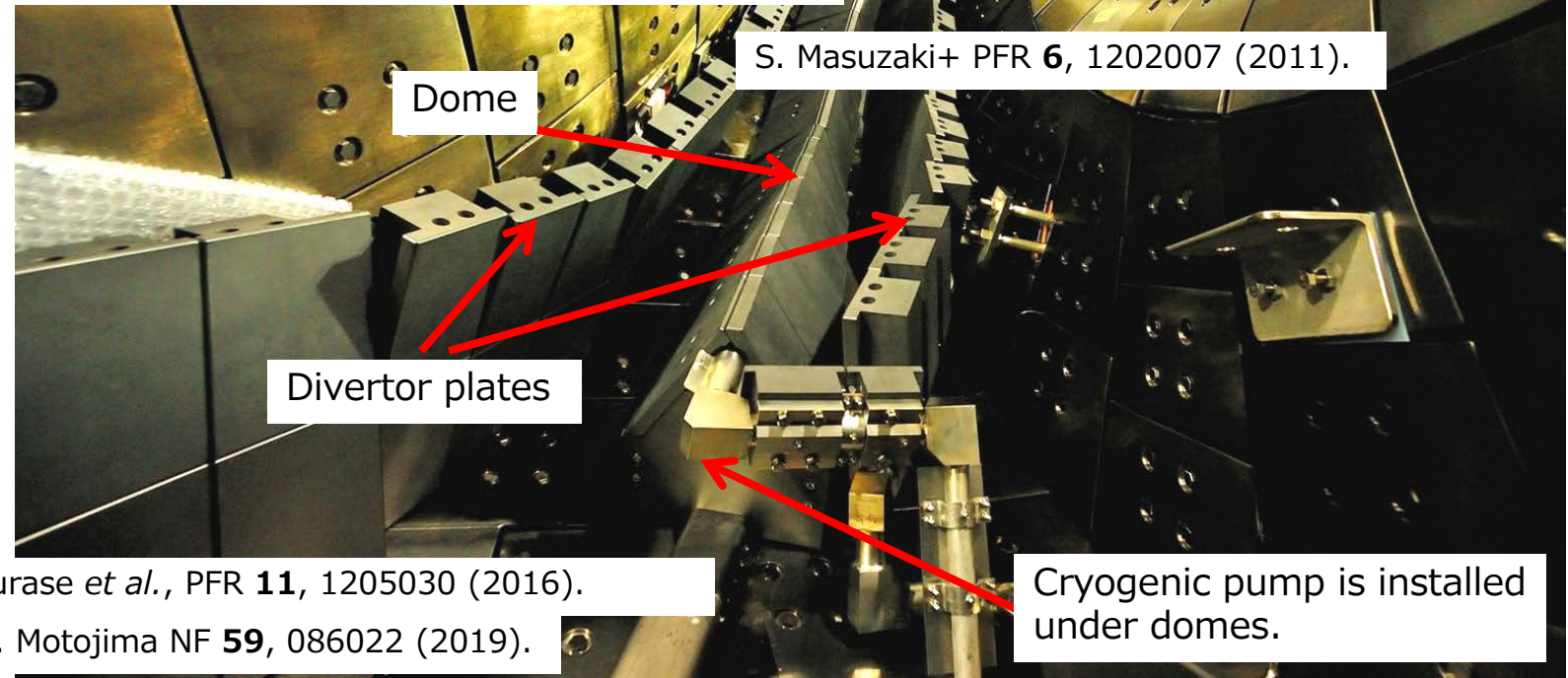
非軸対称磁場配位における粒子排気の達成：閉構造ダイバータ



- 技術的課題を克服し、複雑な3次元形状にダイバータ板・クライオポンプを最適化し設置することに成功
- ダイバータガス圧が10倍に上昇



S. Masuzaki+ PFR **6**, 1202007 (2011).



T. Murase *et al.*, PFR **11**, 1205030 (2016).

G. Motojima NF **59**, 086022 (2019).

本日の発表内容

1. 研究の背景

- －核融合炉における周辺プラズマの役割
- －ヘリカル系における周辺輸送の特徴

2. LHDの周辺磁場構造

3. 粒子排気

- －カオス磁力線構造によるSOL・ダイバータプラズマへの影響
- －非軸対称磁場配位における粒子排気の達成：閉構造ダイバータ

4. 不純物輸送

- －ストキャスティック磁場による不純物遮蔽

5. 熱負荷除去

- －磁場トポロジー遷移による放射冷却プラズマの安定化
- －乱流伝播の観測と熱負荷軽減

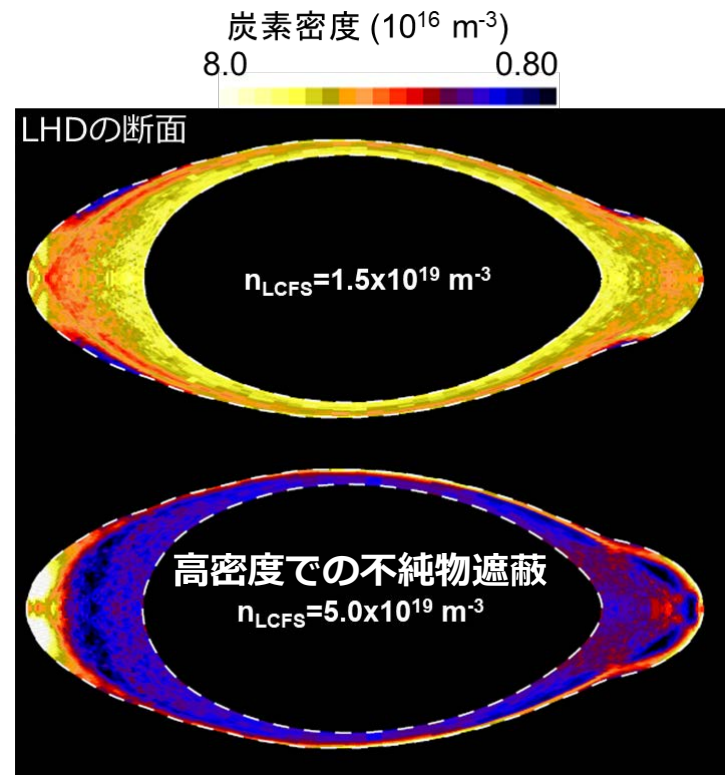
6. 今後の展開

7. まとめ

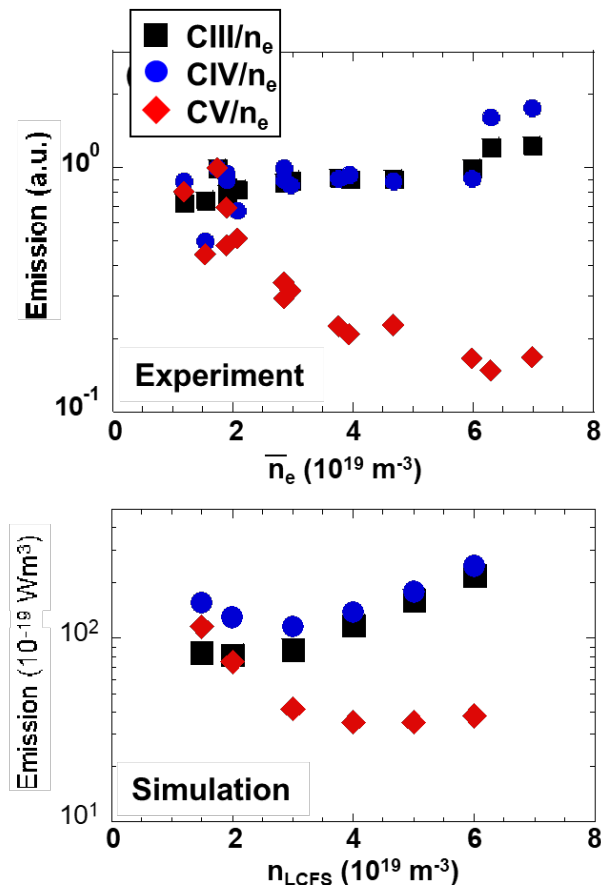
ストキャスティック磁場による不純物遮蔽

数値シミュレーションと実験計測の比較から、ストキャスティック磁場領域が高密度において不純物の遮蔽効果を有することが見出された

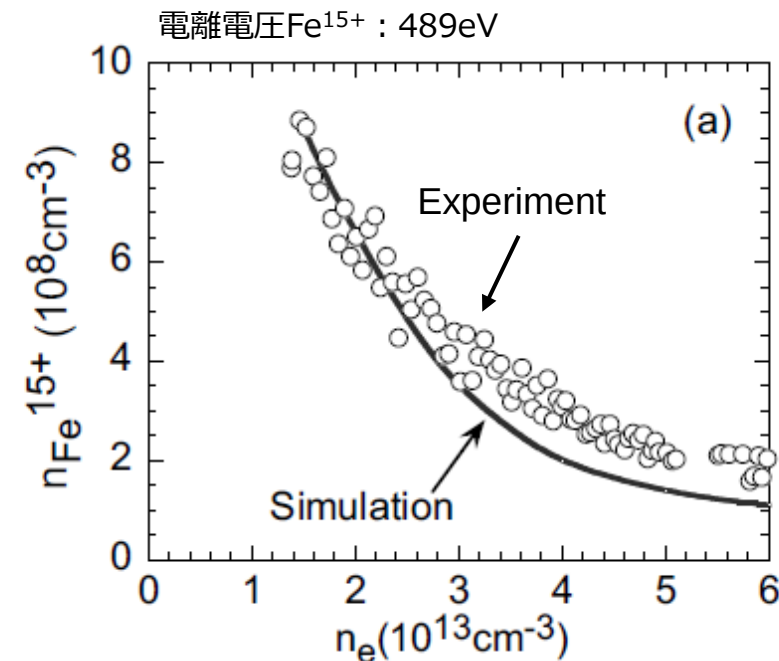
3次元プラズマ輸送シミュレーションによる
不純物遮蔽効果の予測



発光強度の実験との比較に
よる遮蔽効果の発見



高Z不純物(鉄)についても遮蔽効果を実証
→ 将来の高Z壁核融合炉の不純物制御の有効性を示唆



S. Morita+, NF **53**, 093017 (2013).

M. Kobayashi+ NF **53**, 033011 (2013).
S.Y. Dai+ NF **58**, 096024 (2018).

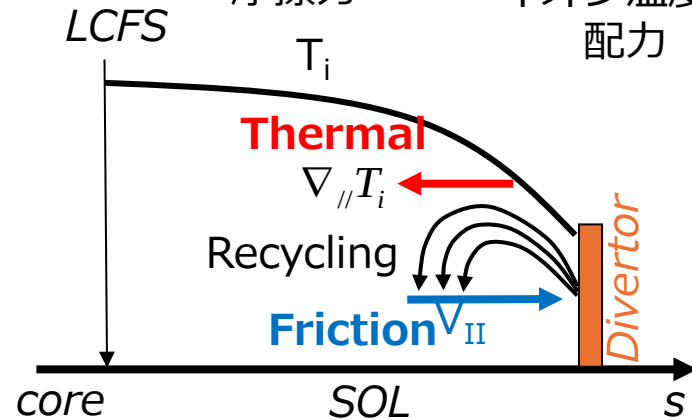
T. Oishi+ NF **58**, 016040 (2018).
M.B. Chowdhuri+ POP **16**, 062502 (2009).

ストキャスティック磁場による不純物遮蔽：メカニズム

1. 3次元磁場効果により外向きプラズマ流 $V_{//}$ が増大
 → 粒子閉じ込め時間 ↓
 → **リサイクリング ↑ → 摩擦力 ↑**

不純物運動量の磁力線方向輸送モデル

$$m_z \frac{\partial V_{z//}}{\partial t} = \underbrace{m_z \frac{V_{i//} - V_{z//}}{\tau_s}}_{\text{摩擦力}} + \underbrace{2.6Z^2 \nabla_{//} T_i}_{\text{イオン温度勾配力}} + \dots$$

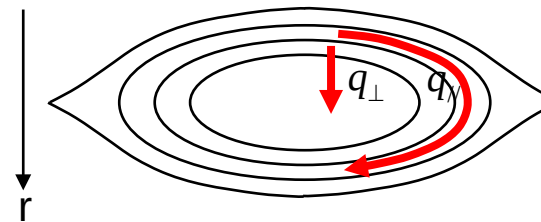


$$\frac{D_{st}}{D_{\perp}} = \frac{(B_r/B_t)^2 V_{//} L_{//}}{D_{\perp}}$$

M. Kobayashi+ NF **55**, 104021 (2015).

2. イオン熱輸送： $q_{//}$ の一部を $q_{\perp}$ が担う
 → **磁力線方向の温度勾配 ↓ → 温度勾配力 ↓**

$$q_{//i} = \kappa_{0i} T_i^{2.5} \nabla_{//} T_i \downarrow$$



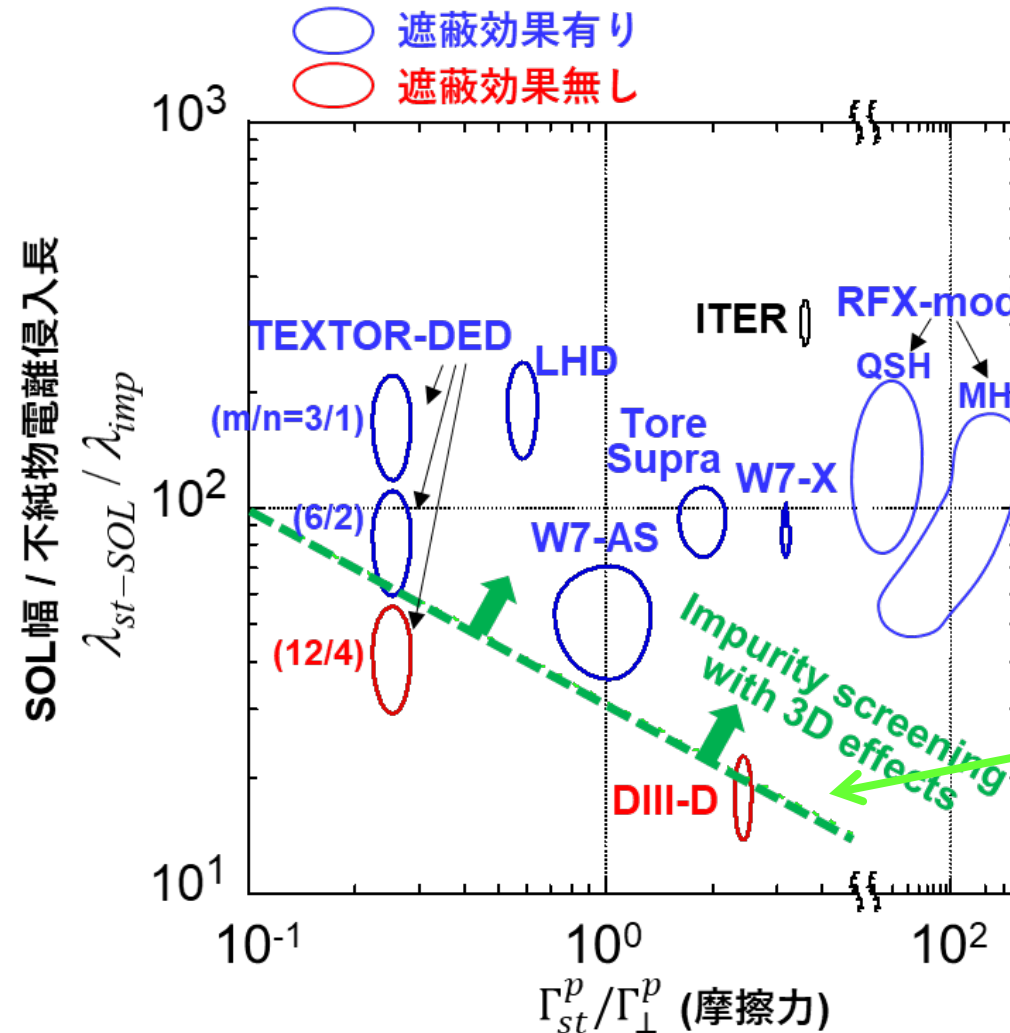
$$\frac{q_{\perp i}}{q_{//i}} = \frac{n \chi_{\perp i}}{(B_r/B_t)^2 \kappa_{0i} T_i^{2.5}}$$

Y. Feng+ NF **46**, 807 (2006).

M. Kobayashi+ CPP **48**, 255 (2009).

ストキャスティック磁場による不純物遮蔽

国際装置間比較による不純物遮蔽効果の検証と定式化



M. Kobayashi+ NF **55**, 104021 (2015).

$$\left(\frac{\lambda_{st-SOL}}{\lambda_{imp}} \right) \left(\frac{\Gamma_{st}^p}{\Gamma_{\perp}^p} \right)^{1/4} > 18$$

不純物遮蔽効果が現れる領域

今後、さらに比較対象を拡充して
スケーリングの信頼性の検証が必要

本日の発表内容

1. 研究の背景

- －核融合炉における周辺プラズマの役割
- －ヘリカル系における周辺輸送の特徴

2. LHDの周辺磁場構造

3. 粒子排気

- －カオス磁力線構造によるSOL・ダイバータプラズマへの影響
- －非軸対称磁場配位における粒子排気の達成：閉構造ダイバータ

4. 不純物輸送

- －ストキャスティック磁場による不純物遮蔽

5. 熱負荷除去

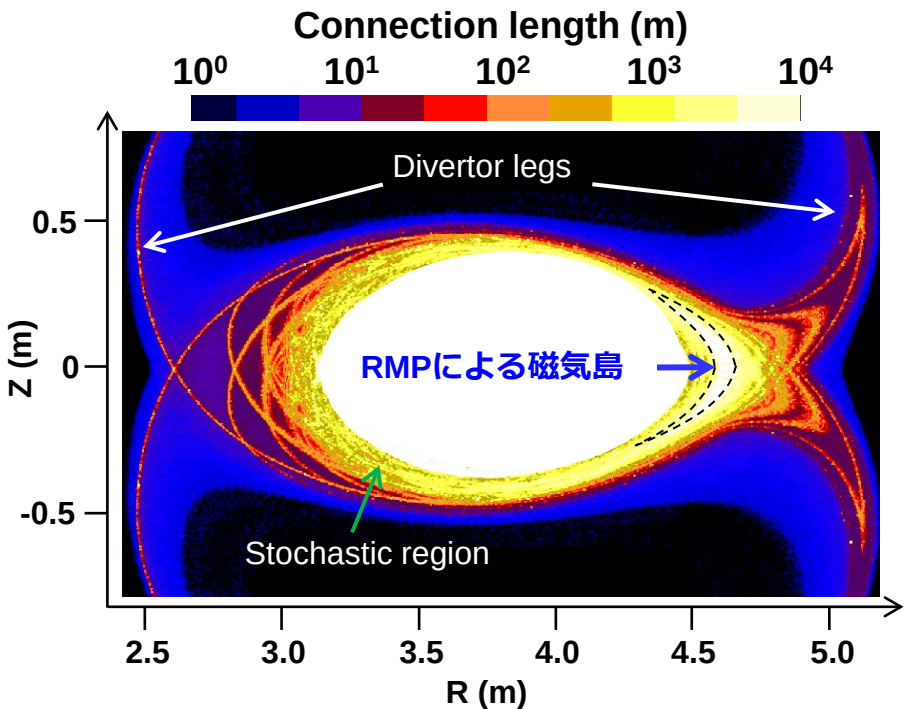
- －磁場トポロジー遷移による放射冷却プラズマの安定化
- －乱流伝播の観測と熱負荷軽減

6. 今後の展開

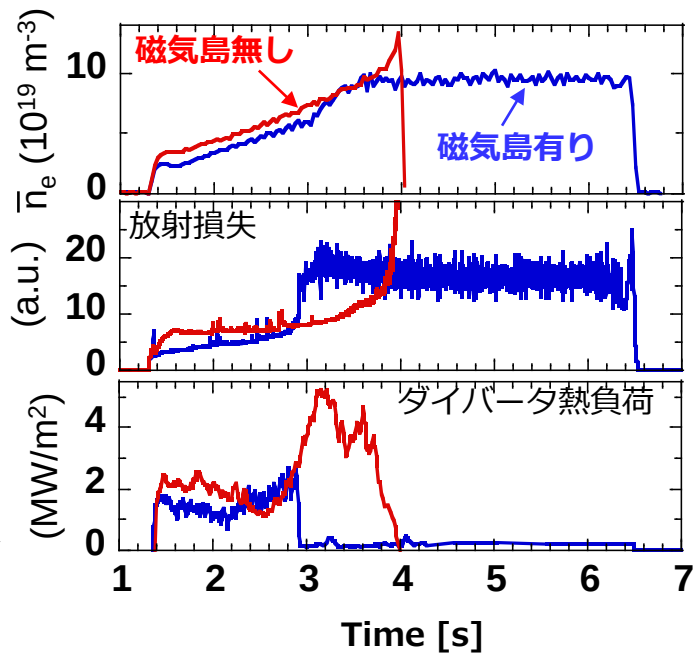
7. まとめ

磁場トポロジー遷移を用いた新概念による放射冷却プラズマの安定化の実証

$m/n=1/1$ 共鳴摂動磁場(RMP)を印加し、周辺部に磁気島形成

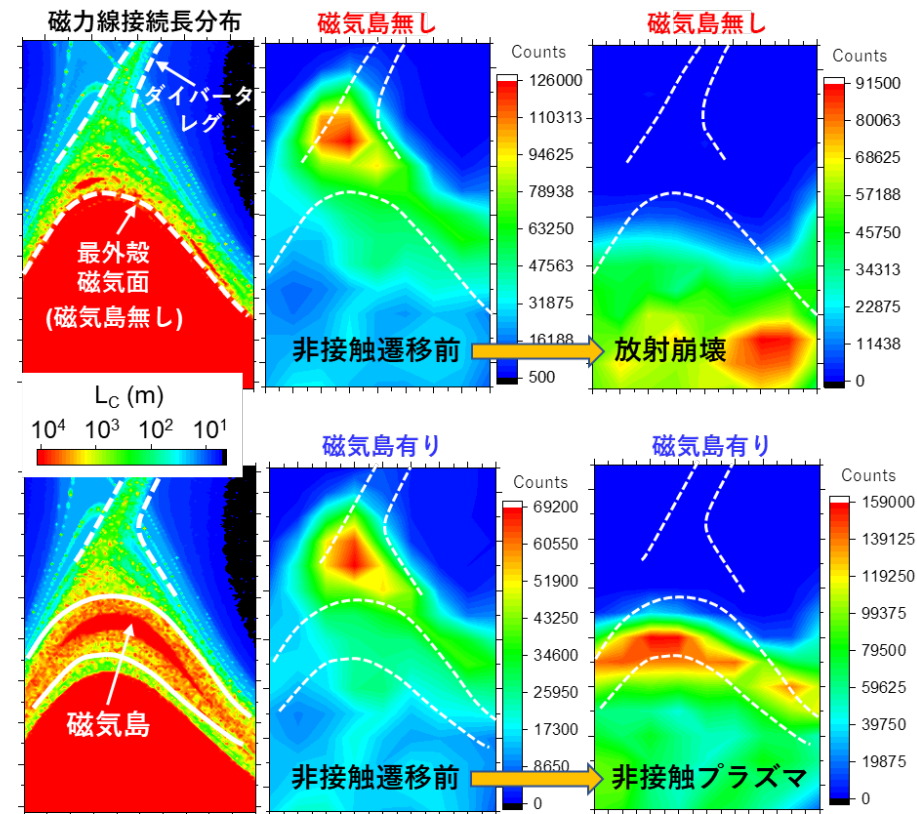


磁気島により、高放射・低ダイバータ熱負荷の状態を安定に維持



磁気島領域の発光分布

分光器視野内の磁場構造： 不純物発光(CIII, 464.7 nm)分布の時間変化



磁気島無し： 不純物発光領域が閉じ込め領域に侵入→放射崩壊
磁気島有り： 発光領域は磁気島内に保持→放射崩壊を回避

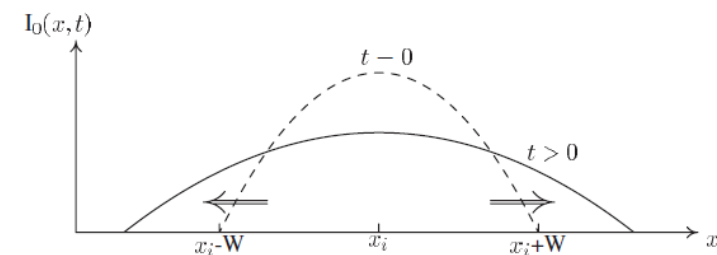
M. Kobayashi+ JFE **44**, 62 (2025).

磁気島による放射領域の“捕獲”と非接触プラズマの安定化を実証
→3次元磁場トポロジーを用いた新たな放射冷却制御へ

乱流伝播の初観測とダイバータ熱負荷の低減

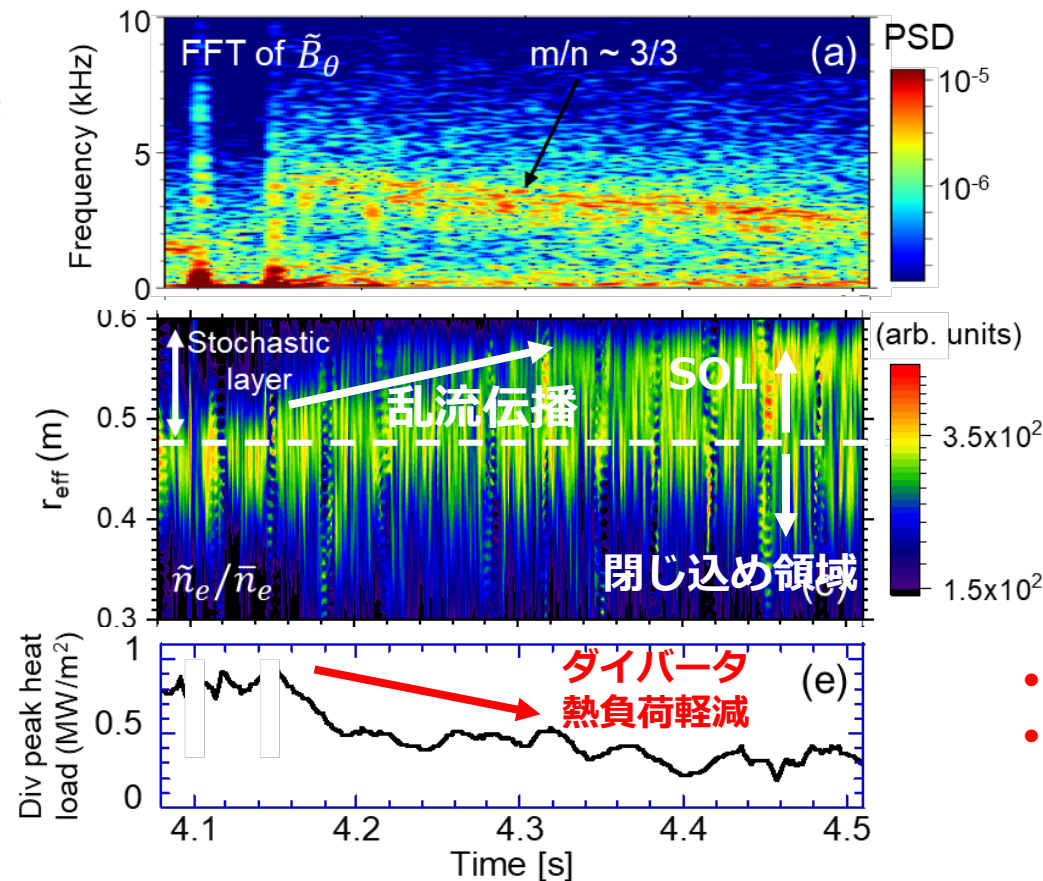
「乱流伝播」

- 乱流揺動が励起された場所から励起されない場所へ伝播する
- 乱流の非局所性
- 1990年代に提唱されたが、実験的な観測が困難であった



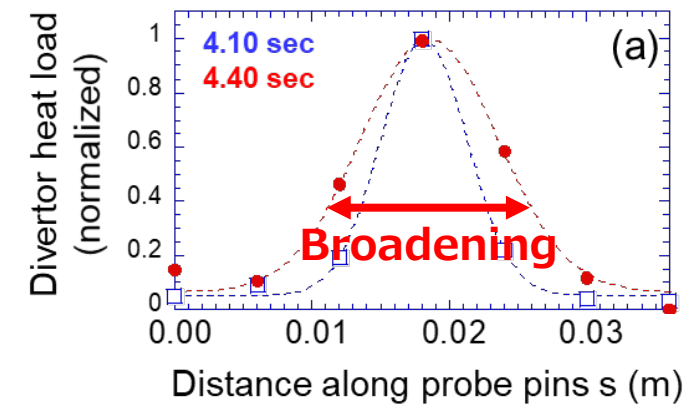
T.S. Hahm+ PPCF 2004.

LHD実験において、乱流が閉じ込め領域からSOLへ伝播する様子が**初めて観測された**：磁場揺動がトリガー



M. Kobayashi+ PRL **128**, 125001 (2022).

乱流の伝播とともに、ダイバータ熱負荷分布が広域化し、4分の1に低減



- 乱流の理解：局所→非局所
- 放射冷却によらない、乱流を用いた新たな熱負荷軽減手法の可能性が示された

本日の発表内容

1. 研究の背景

- －核融合炉における周辺プラズマの役割
- －ヘリカル系における周辺輸送の特徴

2. LHDの周辺磁場構造

3. 粒子排気

- －カオス磁力線構造によるSOL・ダイバータプラズマへの影響
- －非軸対称磁場配位における粒子排気の達成：閉構造ダイバータ

4. 不純物輸送

- －ストキャスティック磁場による不純物遮蔽

5. 熱負荷除去

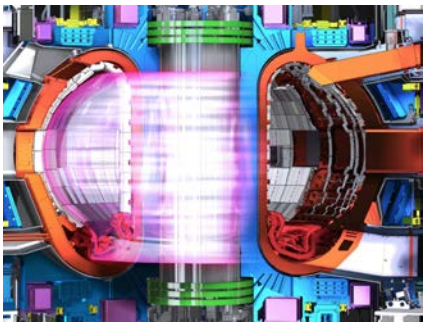
- －磁場トポロジー遷移による放射冷却プラズマの安定化
- －乱流伝播の観測と熱負荷軽減

6. 今後の展開

7. まとめ

核融合プラズマと宇宙プラズマにおける熱的不安定性の統一的理解

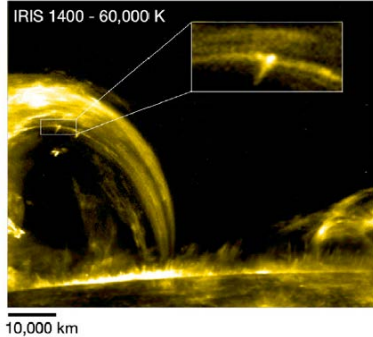
核融合：放射冷却による装置壁熱負荷軽減



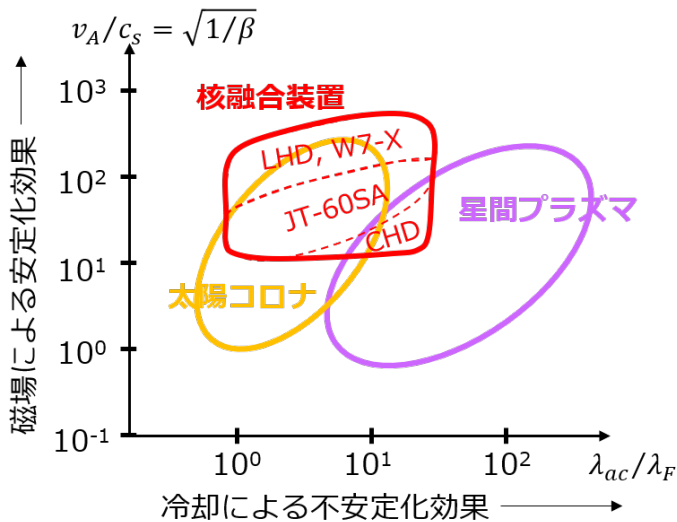
星間分子雲：放射冷却による星形成



太陽コロナ：放射冷却によるコロナレインの発生

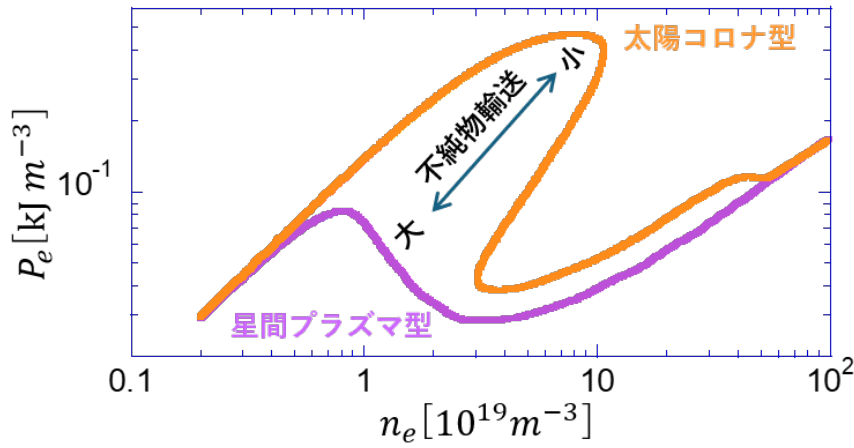


熱的不安定性を特徴づける無次元パラメータ空間で比較する核融合・太陽・星間プラズマ



核融合プラズマによる太陽コロナ・星間プラズマの平衡曲線の再現→ 実験室プラズマによる多様な熱的遷移過程を検証

核融合プラズマの加熱－冷却平衡曲線



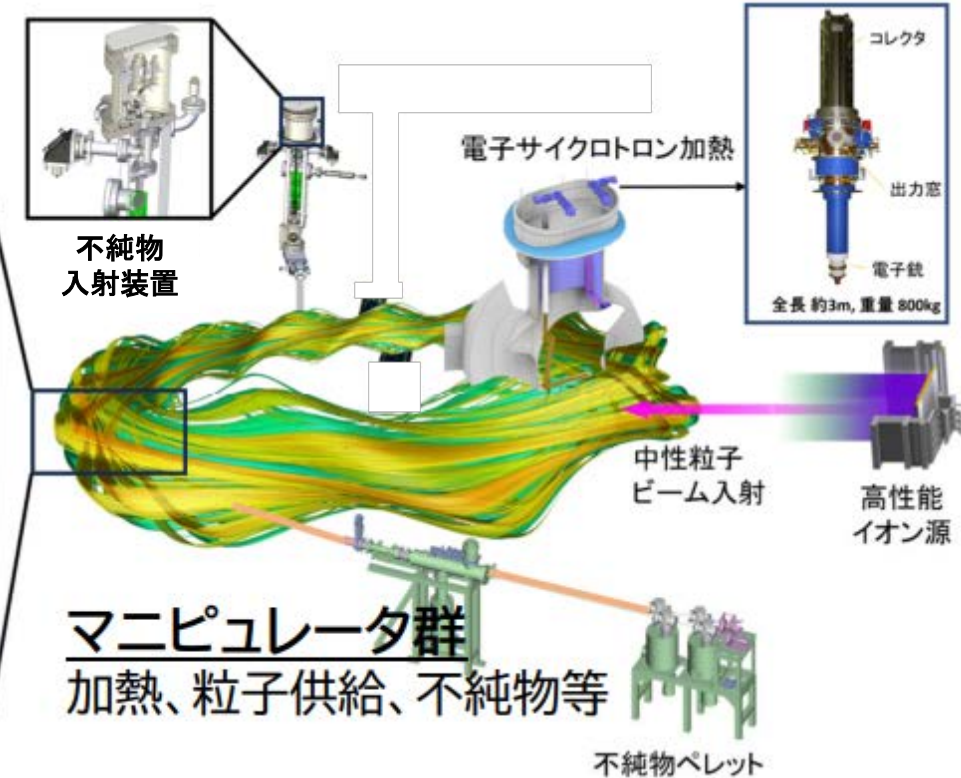
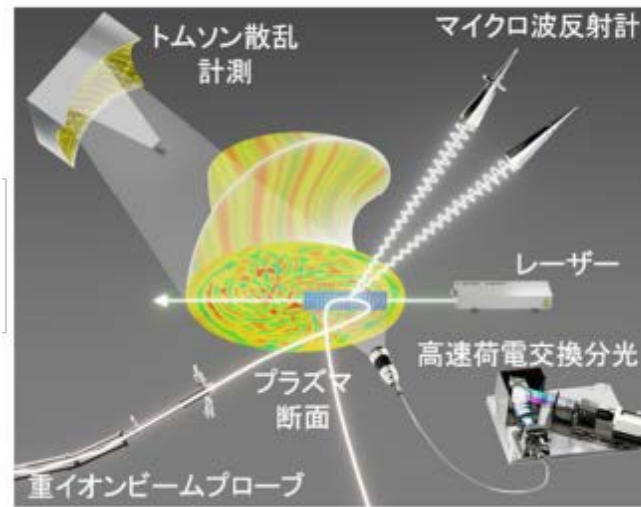
核融合科学の精密実験、太陽物理学と天体物理学の大域的観測・シミュレーション・熱的不安定性理論を融合
 →各分野の知見と手法を相互に検証・統合し、核融合・太陽・星間プラズマに共通する熱的不安定性と構造形成の統一的物理モデルの構築を目指す

LHD実験データの活用と次期CHD(CHD-U)装置での周辺プラズマ研究

- データ駆動・AI技術を用いたLHDデータの解析
- 熱的不安定性の発生条件、成長過程、飽和過程：高速トムソンによる温度・密度分布＋放射分布＋揺動計測
 - 不安定領域の3次元的な構造、磁力線に垂直方向の成長
 - 理論モデル、数値シミュレーションとの比較
- 放射冷却の主要エネルギーであるEUV域のエネルギー選択性を有する高速EUV放射分布計測器の開発
 - イメージングボロメータ、SXアレイ等と組み合わせ、ODAT-SE、EMC3-EIRENEデータを活用したトモグラフィ手法による放射分布再構成

高性能計測器群

- 揺らぎの広帯域計測
- 位相空間の分解



- 分子科学研究所UVSORとの共同研究によるEUV領域エネルギー特性評価



- **非軸対称磁場配位におけるカオス磁力線構造により磁場横断輸送が顕在化**
1D輸送像から2D・3D輸送へ
非軸対称3次元磁場がSOL・ダイバータ輸送を本質的に変える
- **ダイバータ応答の緩和と不純物遮蔽**
実験・シミュレーション・国際装置間比較で検証
3次元輸送効果によるメカニズムの解明
- **磁場トポロジー効果による放射領域の捕獲・安定化、乱流伝播の初観測**
放射崩壊を回避しつつダイバータ熱負荷を低減
磁場トポロジーは、周辺プラズマ制御の新たな自由度

1次元輸送から3次元輸送へ — 3次元輸送の理解と磁場トポロジーを活用した周辺プラズマ制御

LHDで確立した3次元周辺プラズマ物理を、将来装置と宇宙プラズマ研究へ

- 非軸対称磁場効果の普遍性・適用条件の理解
- 熱的不安定性の統一的理解