

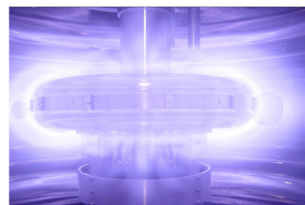
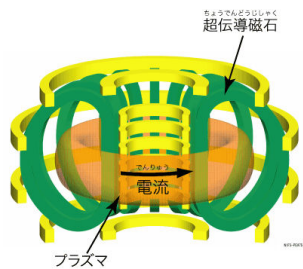
「システム」軸上のユニットテーマ

## 3次元構造形成制御（仮称）

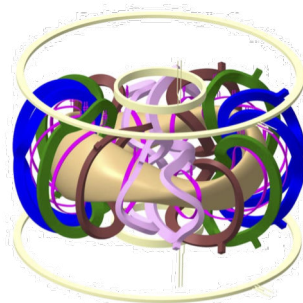
クラスタリングされたユニットテーマ：UT-5, UT-7, UT-23

## 核融合としての課題：閉じ込め改善と定常維持

- プラズマの閉じ込め改善と定常維持は、物理・数値目標の両面で磁場閉じ込め方式の未解決課題
  - 輸送障壁の形成 (L-H遷移, ITB形成) : 「装置依存性」をもたらす本質的な物理機構は？
  - 非熱的粒子の輸送や損失 : 自己点火かpower amplifierか？
  - MHD的な安定性, 崩壊現象 : 安定性を決めるものは？ 崩壊における因果は？
  - コア領域~壁の物質・エネルギーの流れ : 定常バランスの成立性は？
  - 高効率定常閉じ込めを実現する「最適な」閉じ込め配位や運転シナリオとは？
- 非軸対称（3次元）系含む磁場配位の自由度を活かし、またこれまでのNIFSの経験と実績を活かし、実験・理論シミュレーションの共同により、物理の解明と配位設計の両方を推進



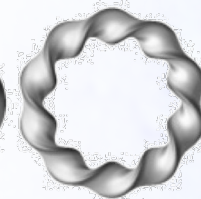
[Yoshida et al., PFR 2006]



QAS



HSX



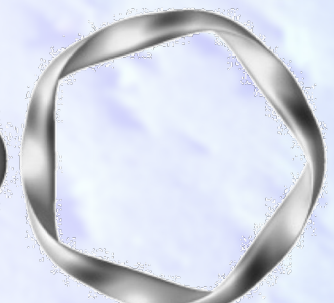
LHD



QPS



NCSX

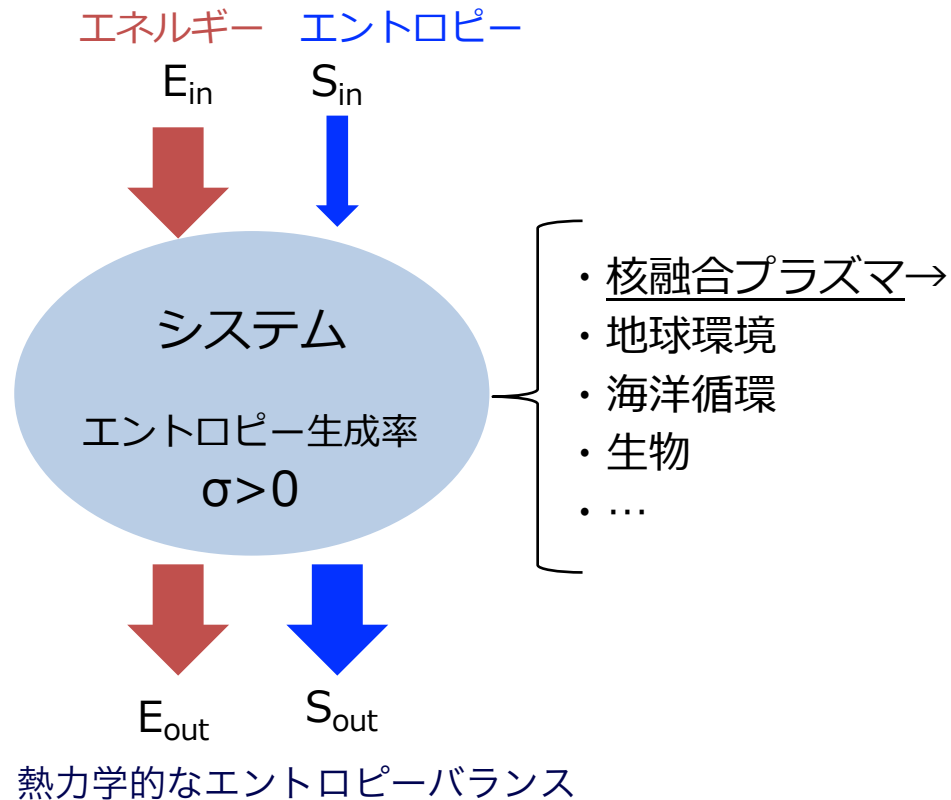


W7-X

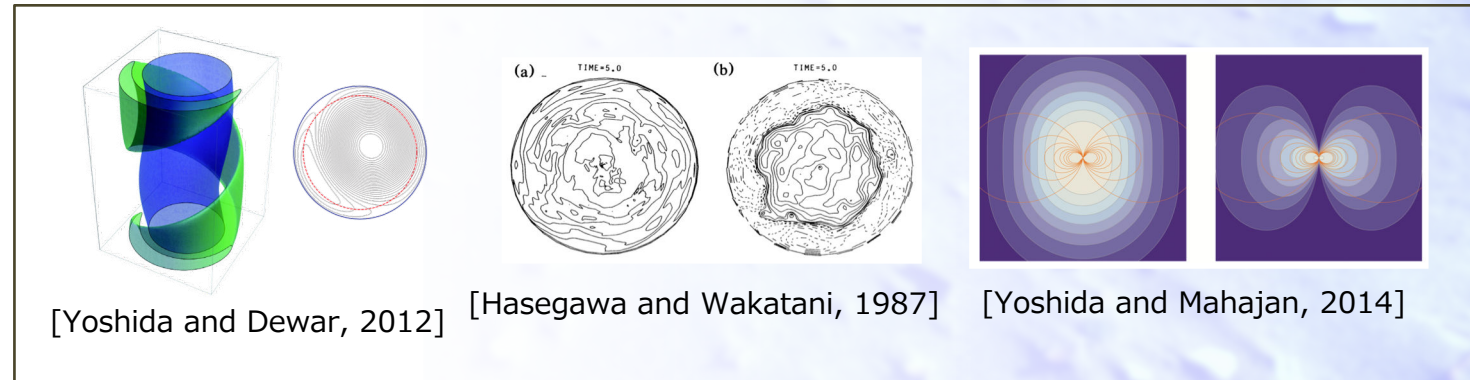
[A. S. Ware et al., Fusion Science and Technology, 50:2 (2006) 236-244]

# 学術的な特徴付け（何の研究だと言えるか）

- 物質・エネルギーの流れの中に置かれた非平衡開放系のエントロピー生成と構造形成の物理
- 系外とのエントロピー交換まで含めてバランスした定常状態における構造の安定性と選択律
- システムの自由度に対する固有の束縛としての背景磁場の幾何的構造の構造形成への影響



## 統計力学的なエントロピーと構造形成

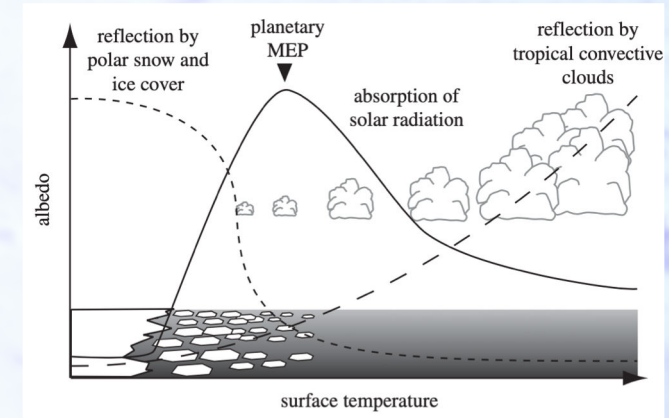


磁場に関連したマクロな保存量がプラズマのダイナミクスを束縛  
→エントロピーを担う物理的実体や、エントロピー生成が起こる空間の構造が多様化、秩序立った構造へ自己組織化する。

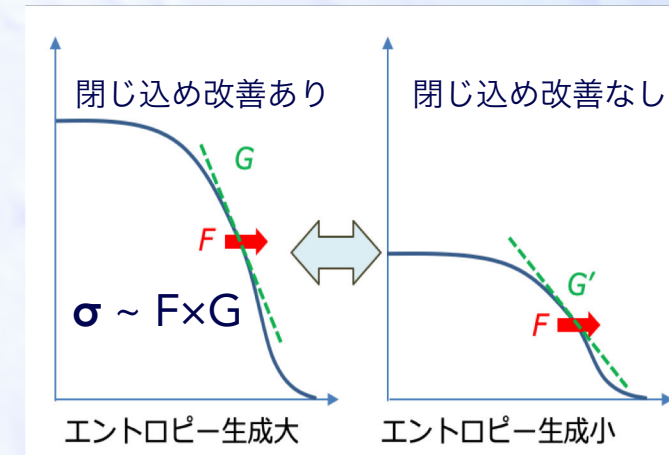
- 多階層複雑系におけるエントロピーをどう評価すべきか？
- 対称性やトポロジー等の束縛とシステムの状態の自由度

# 非平衡開放系の定常状態における構造の安定性と選択律の研究

- 他の非平衡系と共通の枠組みでプラズマの構造形成の定式化を行う。
  - エントロピー生成最小原理 Min.EPP (Prigogine 1955, 線形領域)
  - エントロピー生成最大原理 Max.EPP (Sawada 1981, 非線形領域)
- 磁場閉じ込めプラズマにおける大域的な分布や物質・エネルギーバランスが, Min/Max.EPP に従って決定されるのかどうか, 実験・シミュレーションの両面から検証する。
- 非線形領域でシステムの駆動源 (fluxか, gradientか) によって入れ替わることが指摘されているMin. EPP, Max. EPPの両原理を包括する, 拡張された原理を構築し, 普遍的な原理として確立することを目指す。



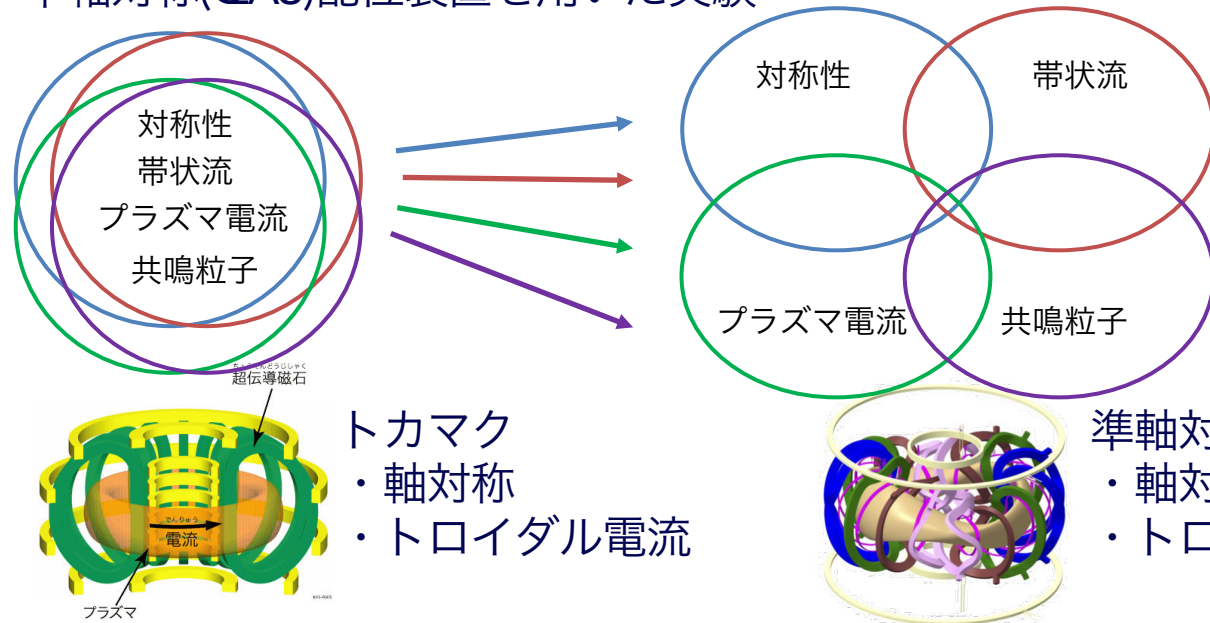
[Kleidon Phil. Trans. R. Soc. A (2010) 368, 181]



# 構造形成の非線形性・非局所性に対して磁場の幾何的構造が与える影響の研究

- 磁場の対称性や共鳴粒子分布，平均的な流れ場の存在等によるプラズマの構造形成やその分岐性への影響を研究する。HIBP計測と荷電分光・中性子計測等を用いて，密度揺動，径電場，高速イオン分布の時間変化を同時計測し，自律的な閉じ込め改善現象の背後にある複数の物理機構 (例. プラズマ回転/帯状流/共鳴粒子 etc.) の役割の切り分けや，それらの相互作用，粒子閉じ込めを支配する実効的な保存量の研究，複数イオン種輸送の研究等を行う。

例) 準軸対称(QAS)配位装置を用いた実験



トカマク  
・軸対称  
・トロイダル電流

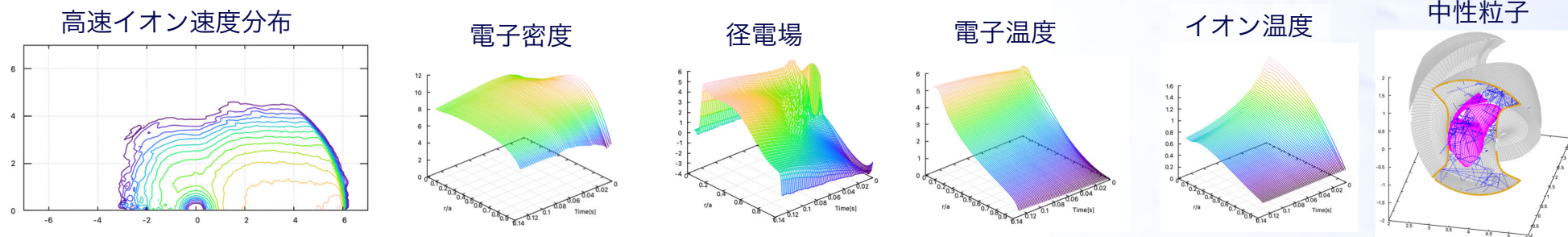
準軸対称配位  
・軸対称～対称性の崩れた配位までスキャン  
・トロイダル電流不要

※特定の閉じ込め方式やトーラス性，「閉じ込め性能の追求」にとらわれず，磁場の対称性やトポロジー，断熱不変量分布，内部電流の有無等と，自己組織化現象の関係性を研究する。

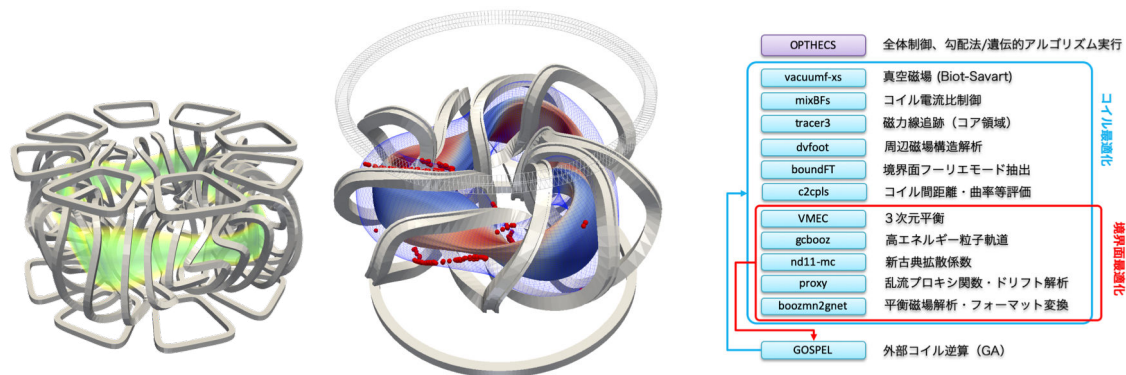
# 構造形成と安定性に関する理論・シミュレーション研究

- トーラスに限らない多様な配位におけるMHD, 運動論, 波動等のシミュレーション, また, それらの連成により, 磁化プラズマの構造形成や複数イオン種が混合した散逸現象の研究を行う.

例) 運動論的高速と熱的粒子の輸送, 中性粒子輸送を結合した非軸対称プラズマ統合シミュレーション



- プラズマ自身が内部に有する構造形成の非線形ループによる「自己閉じ込め」的な構造形成と安定点を探究し, 3次元的な背景磁場によりその点への到達を促進する, 高効率定常閉じ込め配位を探求する



NIFS独自の配位設計フレームワーク構築が進展中

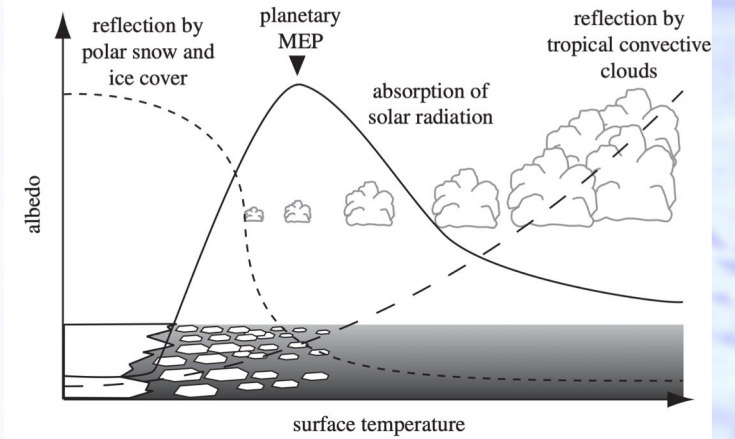
- 外部コイルを直接の変量とする最適化スキーム
- 機械学習による最適化
- 高次のドリフト効果を取り入れた高精度の輸送評価
- 不純物イオン輸送の最適化
- 先進的配位とダイバータ配位の両立

# 独自性・優位性

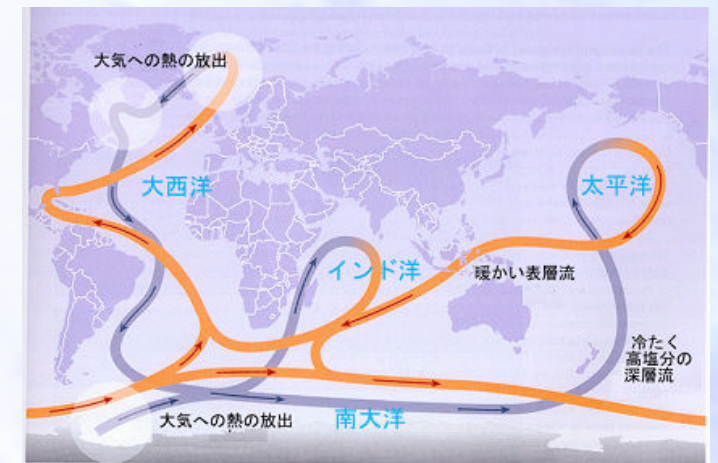
- 磁場閉じ込めプラズマは異なる条件 (磁場構造, 熱・粒子供給, 壁条件 etc.) で繰り返し実験が可能という点で, 地球や生物といった他の多階層複雑系と比べて, より詳細な実験検証が可能である.
- 準軸対称配位の原理実証は世界初のものであり, これを主導し成果発信することはトカマク系含めコミュニティ全体にインパクトを持つ.
- 磁場によるエントロピー生成の束縛と多様化という観点からプラズマにおける構造形成を理解し, 自己組織化を活用した定常閉じ込めを追求するという点で, 独自のアプローチと言える.
- NIFSは非軸対称磁場を取り扱うシミュレーションコード群とノウハウを有しているだけでなく, 磁場配位および装置設計のための独自ツールの整備も大いに進展しており, 装置の具体形を設計・提案することが可能であり, 優位性を持つ.

# 学際的な広がり

- 特定の系によらない具体的な原理の探究と検証を行うことで、生命科学や地球環境等の他分野との議論が可能となり、また、非平衡開放系一般の構造形成、維持・遷移・崩壊に関する分野を問わない理解を得ることが期待できる。
- 海洋循環や生態系、経済ネットワーク等においても検証・適用が行われてきているエントロピー生成最大原理など、共通の枠組みでの議論の土壌がある程度できている。
- 地球温暖化においては、エントロピーバランスの変化が気候状態の急激な遷移を引き起こすことも懸念され、物質・エネルギー循環の大域的な構造が決定される機構の理解は喫緊の課題であり、相当の波及効果が予想される。
- 代謝する生物とその進化の方向、地球の物質・エネルギー循環、社会といった複雑な秩序構造の持続あるいは遷移・崩壊の統一的な理解に寄与できる可能性がある。



[A. Kleidon, Phil. Trans. R. Soc. A (2010) 368, 181-196]



[気象庁  
[https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/mar\\_env/knowledge/deep/deep.html](https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/mar_env/knowledge/deep/deep.html)]

Max. EPPによる理解が試みられている様々な分野への波及を目指す。



# テーマ名について

- 3-D structure-formation control      3次元構造形成制御
- Structure-formation control      構造形成制御
- Macro-structure sustainability      マクロ構造サステナビリティ
- Structure formation and sustainability      構造の形成とサステナビリティ
- ...