

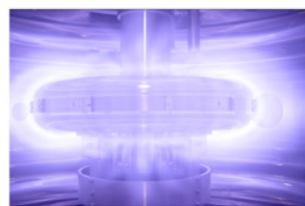
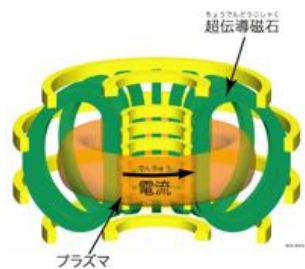
**「システム」軸上のユニットテーマ提案
(small-entropy system, sustainability, self-organization)**

「3次元構造形成制御」

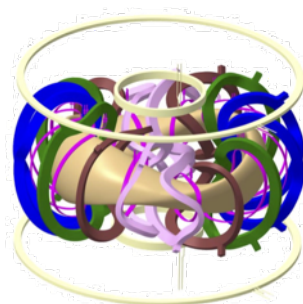
クラスタリングされたユニットテーマ：UT-5, UT-7, UT-23

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、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



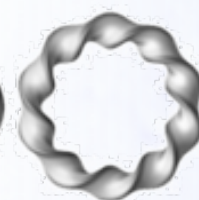
[Yoshida et al., PFR 2006]



QAS



HSX



LHD



QPS



NCSX

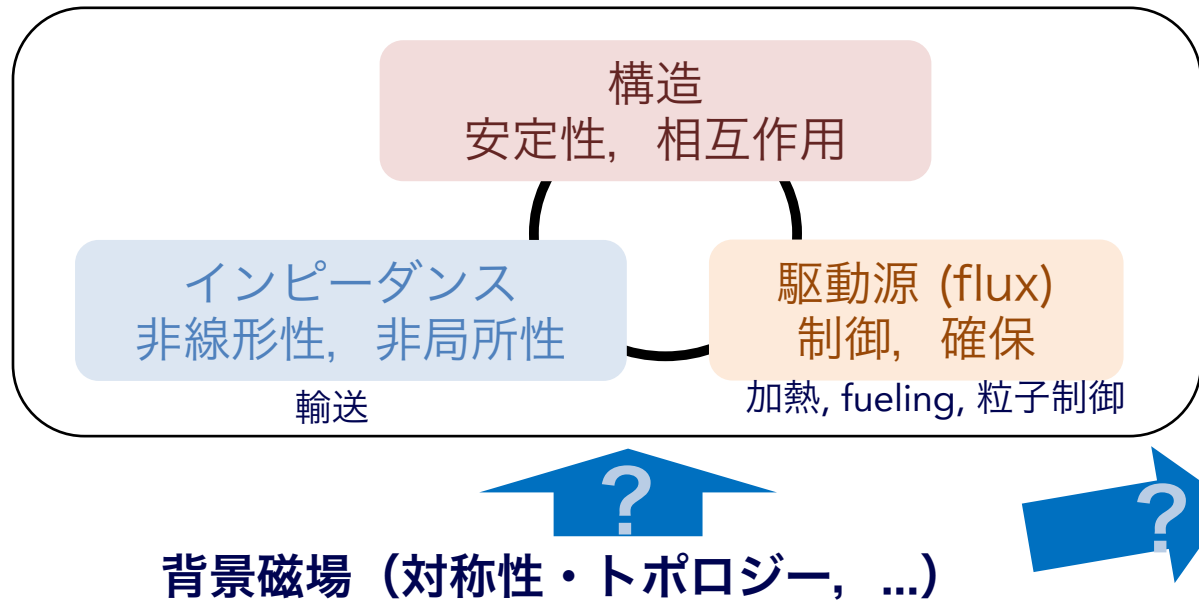


W7-X

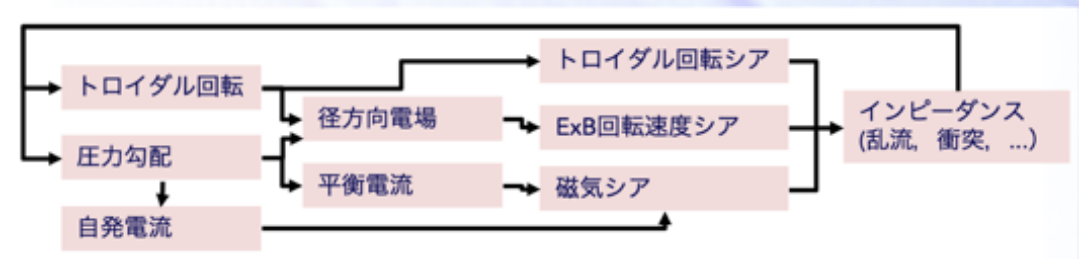
[A. S. Ware et al., Fusion Science and Technology, 50:2 (2006) 236-244]

核融合としての課題：閉じ込め改善と定常維持

- 「磁場によるプラズマの閉じ込め」の物理と最適化を難しくしているものは何か？
 - 磁場は荷電粒子のエネルギーに現れない → 背景場中のボルツマン分布すら自明でない
 - 磁場に垂直な方向の「インピーダンス」が物質・エネルギー流れ (flux) の中に勾配を形成
 - 磁場が作る束縛下での散逸過程（エントロピー生成）の多様さ
 - 様々なスケール（階層）における自己組織化・構造形成，階層間の相互作用
 - 非線形性，非局所性，自律性，分岐現象

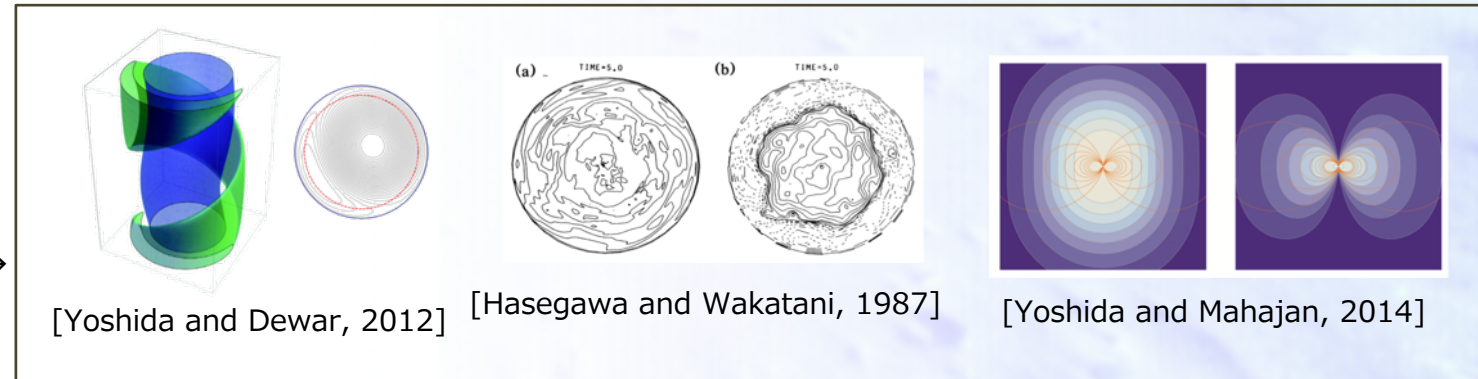
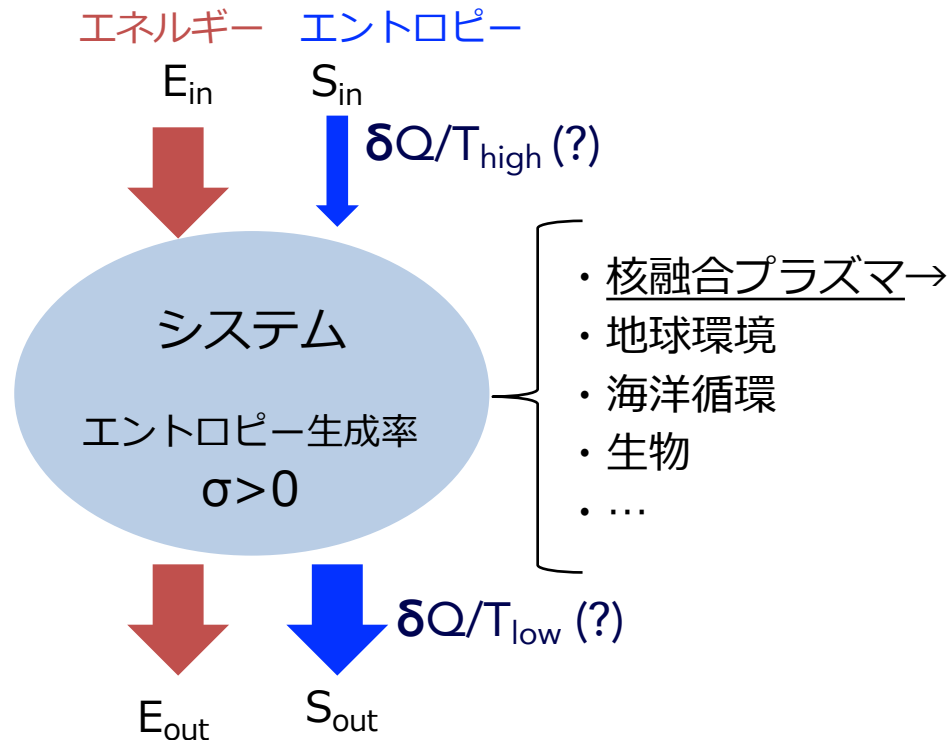


- 背景磁場の構造は，各階層の構造形成，階層間の相互作用，大域的な勾配にどのように，またどの程度影響するのか？
- エネルギー源として利用しやすい安定点の探究



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 (制御ノブ) としての背景磁場の幾何的構造



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。

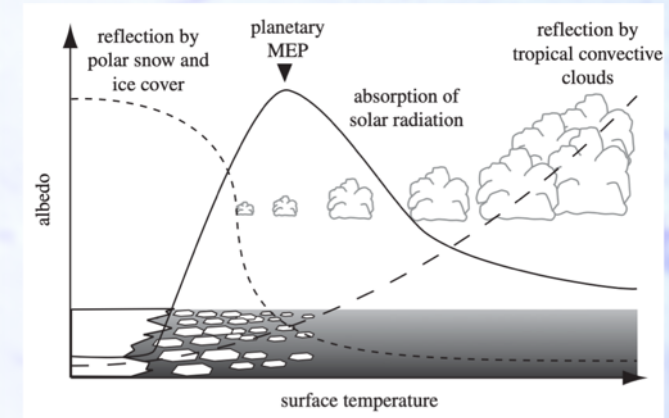
- 多階層複雑系におけるエントロピーをどう評価するべきか？
- 対称性やトポロジーの束縛とシステムの状態の自由度

定式化・アプローチ

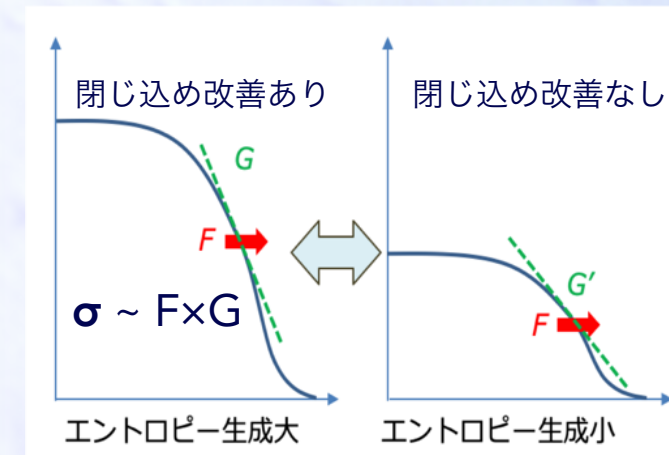
- 非平衡開放系の定常状態における構造の安定性と選択律の研究
- 構造形成やインピーダンスの非線形性・非局所性に対して磁場の幾何的構造が与える影響の研究
- 構造形成と安定性に関する理論・シミュレーション研究
- 自己組織化を活用した閉じ込め配位的设计・最適化

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

- インピーダンスの非線形性・非局所性がもたらす分岐解の安定性・選択律の問題として、他の非平衡系と共通の枠組みで定式化を行う。
 - 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。
 - 実験プラズマ : heating 駆動
 - 核燃焼プラズマ : fueling 駆動
- 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、物質・エネルギー流れの上下流の自律的な変化まで考慮に入れた普遍的な原理として確立することを目指す。



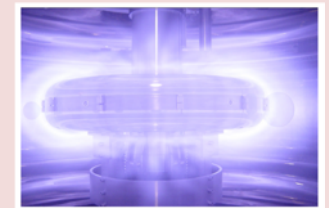
[Kleidon Phil. Trans. R. Soc. A (2010) 368, 181]



構造形成やインピーダンスの非線形性・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

- 軌道ラグランジアンの特称性
 - 軌道閉じ込め (対称なら良好)
 - 衝突拡散の両極性 (対称→高次のオーダーまたは別の物理が支配)
 - プラズマ回転 (対称性の高い=粘性の小さい方向にプラズマは流れようとする)
- 断熱不変量の位相空間分布
 - 軌道閉じ込め, 共鳴粒子
- 磁気シア, 磁気井戸, 磁力線の曲率
 - 安定性, 带状流, 共鳴粒子, ...
- 磁気島
 - 輸送障壁との関係
- ...

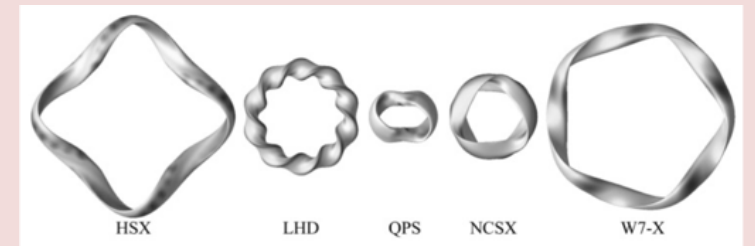
軸対称 (2次元)
顕著な自己組織化現象
(輸送障壁や内向き拡散)



[Yoshida et al., PFR 2006]

非軸対称 (3次元)
真空磁気面の構造が
プラズマの自律性を制限

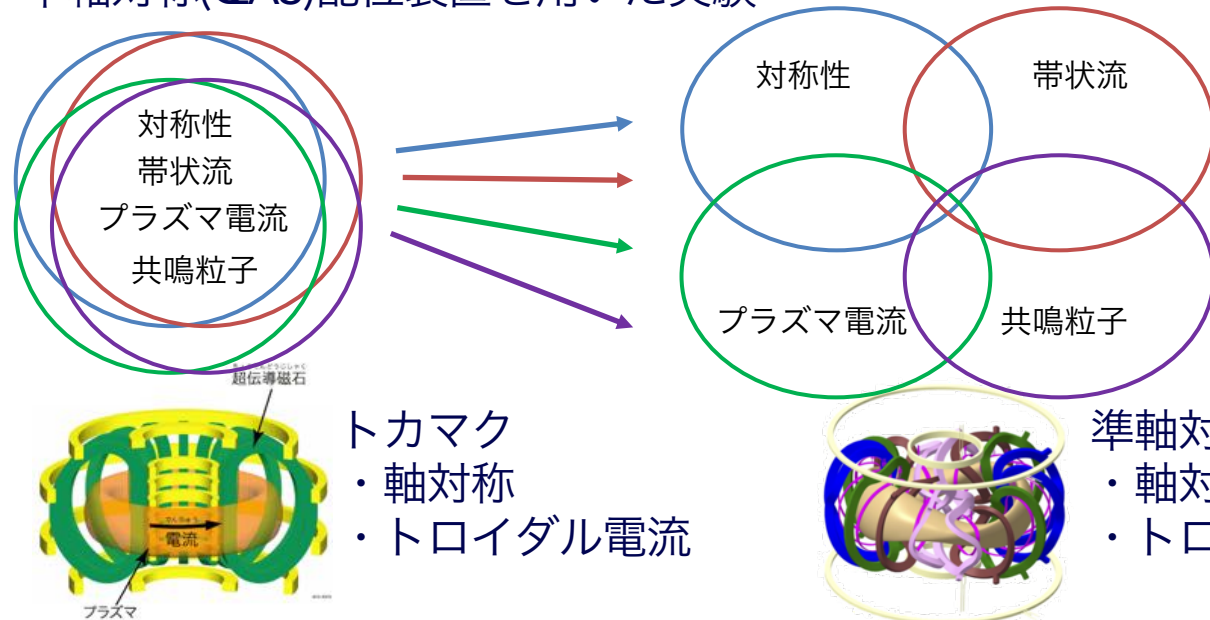
- ラグランジアンの特称化
- 断熱不変量分布の制御



構造形成やインピーダンスの非線形性・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への影響を研究する。温度・密度計測に加えて，HIBP計測と先進的な高速イオン速度分布計測を用いて密度揺動，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，それらの相互作用や，粒子閉じ込めを支配する実効的な保存量の研究等を行う

例) 準軸対称(QAS)配位装置を用いた実験

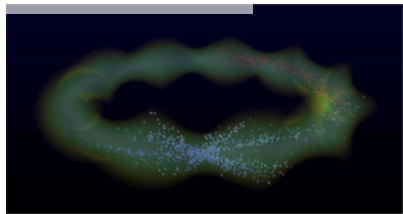


※特定の閉じ込め方式やトーラス性にとらわれず，磁場の対称性やトポロジー，断熱不変量分布等と自己組織化現象の関係性を研究する。

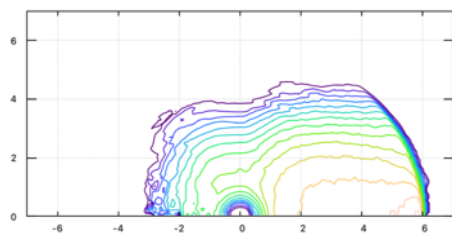
構造形成と安定性に関する理論・シミュレーション研究

- 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.
- 運動論的効果, プラズマ回転, 運動量・粒子バランスを記述可能な環状プラズマ統合コードを開発する. 磁場の非対称性に起因する粘性やトルクの効果を含めたシミュレーションにより, 複数の物理現象を跨ぐ複雑なフィードバック機構を反映して異常粘性や非局所輸送等のモデル化・検証を行う. 輸送時間スケールの構造形成と, エントロピー生成率の関係を明らかにする.

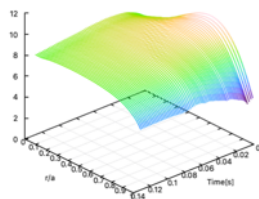
高速イオン軌道



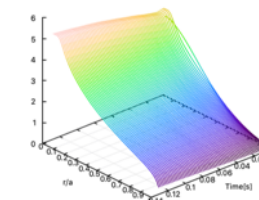
高速イオン速度分布



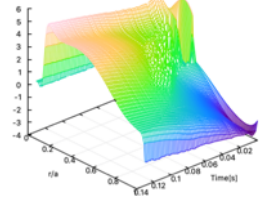
電子密度



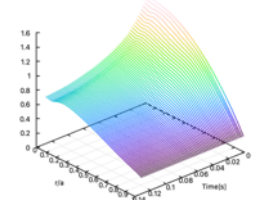
電子温度



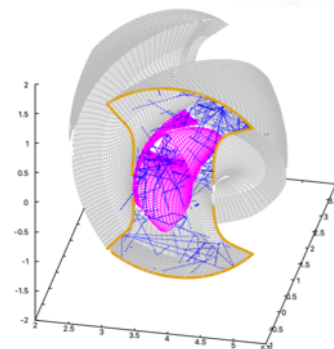
径電場



イオン温度



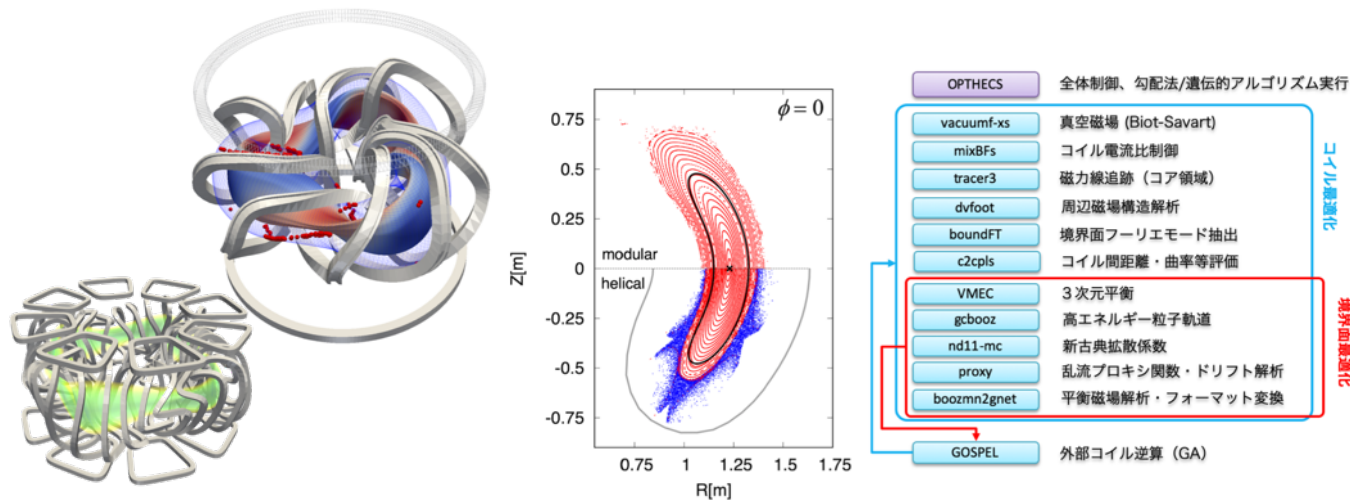
中性粒子



運動論的高速イオン (GNET-TD) と熱的粒子の輸送 (TASK3D), 中性粒子輸送を結合した統合シミュレーション

自己組織化を活用した閉じ込め配位の設計・最適化

- 主に背景磁場によって輸送の最適化を行った Wendelstein 7-X とは異なる方向性として、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。
- 例えば、局所的な対称化や真空反転磁気シア等、プラズマの自己組織化を促進するアイデアの有効性について物理検討を行い、外部資金獲得による原理実証装置の製作・実験検証を目指す。
- 検討・検証結果を反映した高閉じ込めステラレータの設計活動を行う。

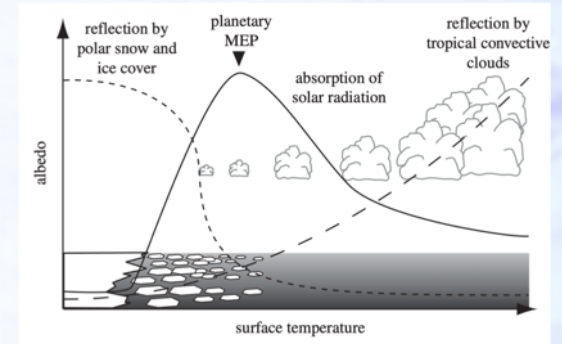


NIFS独自の配位設計フレームワーク構築が進展中

- 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

学際的な展開

- 特定の系によらない具体的な原理を探究しその検証を行うことで、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]

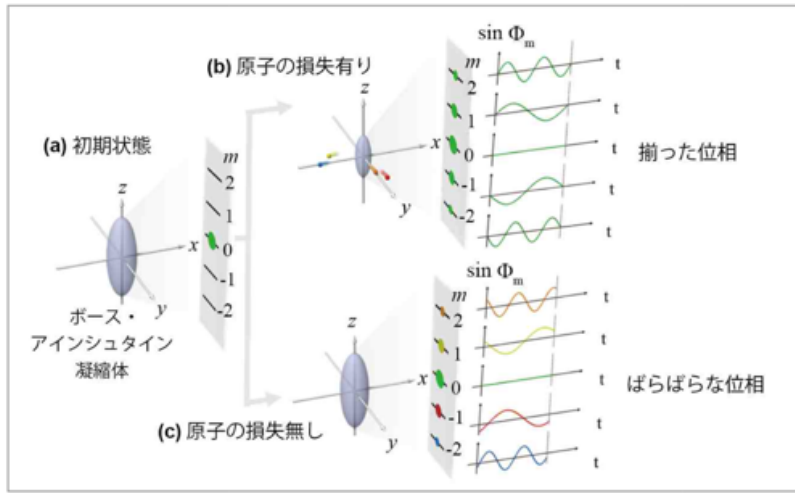
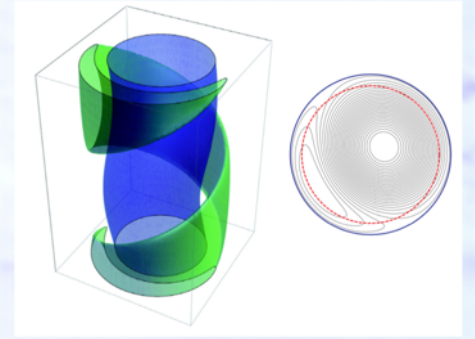


[気象庁
https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/mar_env/knowledge/deep/deep.html]

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。

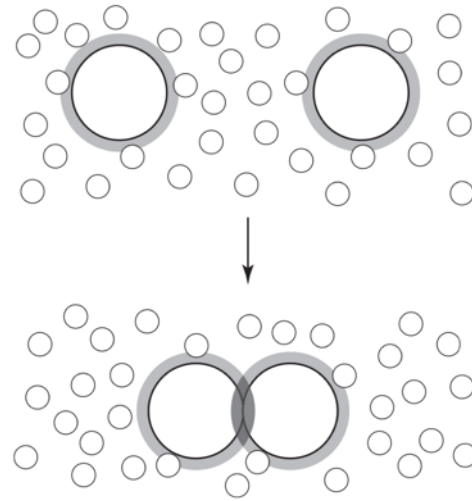
学際的な展開

秩序の発生と維持における「何が、どこでエントロピーを担うのか？」の問題
 磁場閉じ込めプラズマの知見から新たなアプローチできる可能性がある。



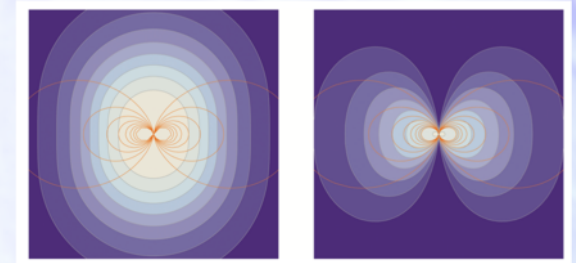
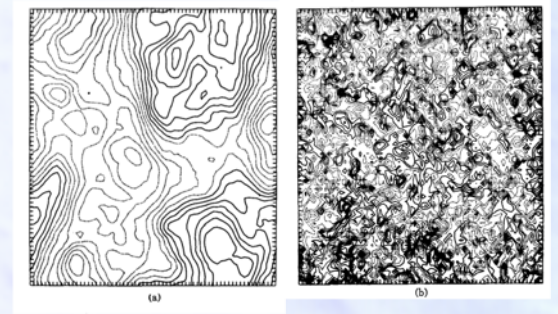
[https://www.univ.gakushuin.ac.jp/about/pr/pres/s/20190624_release.pdf]より

強磁性状態の原子が選択的に衝突，散逸することで作り出される揃った位相

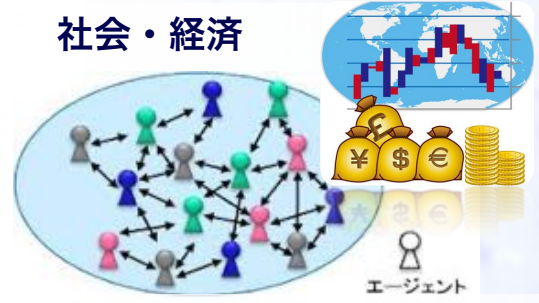
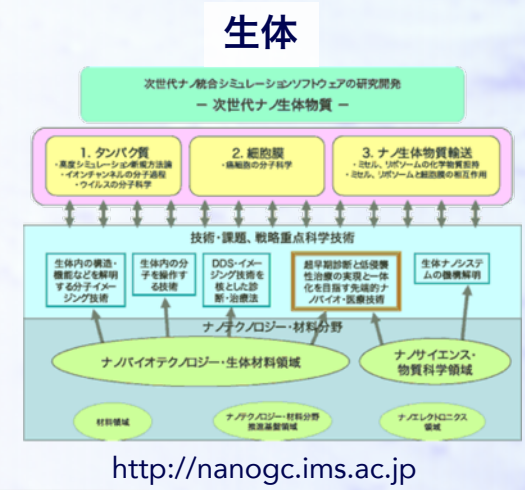
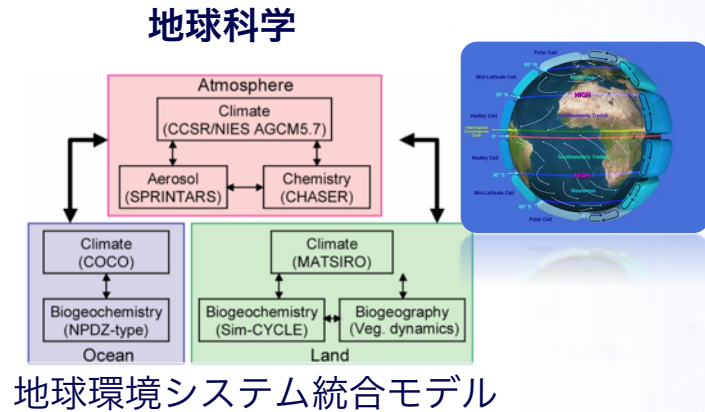
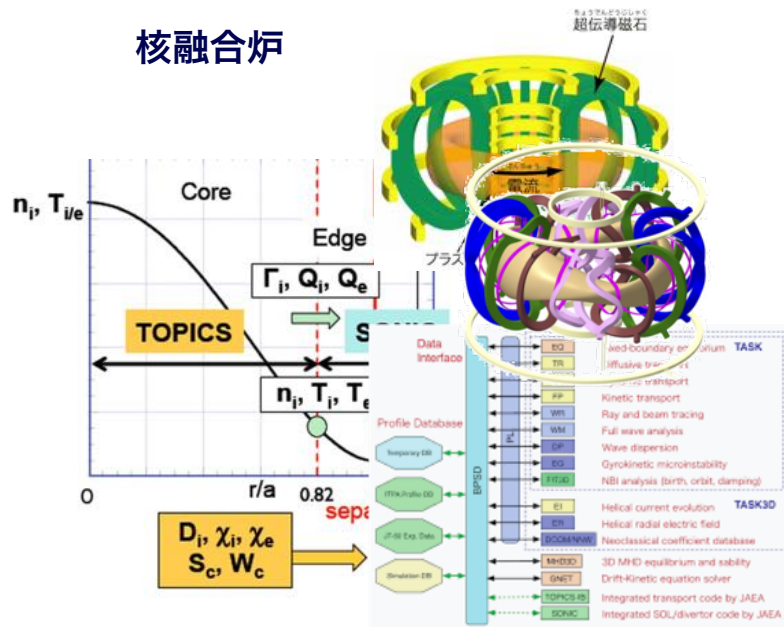


[木下, 原野, 生物物理 46(4), 214-219(2006)]より

自己集合におけるエントロピー的排除容積効果と混合エントロピー効果の競合



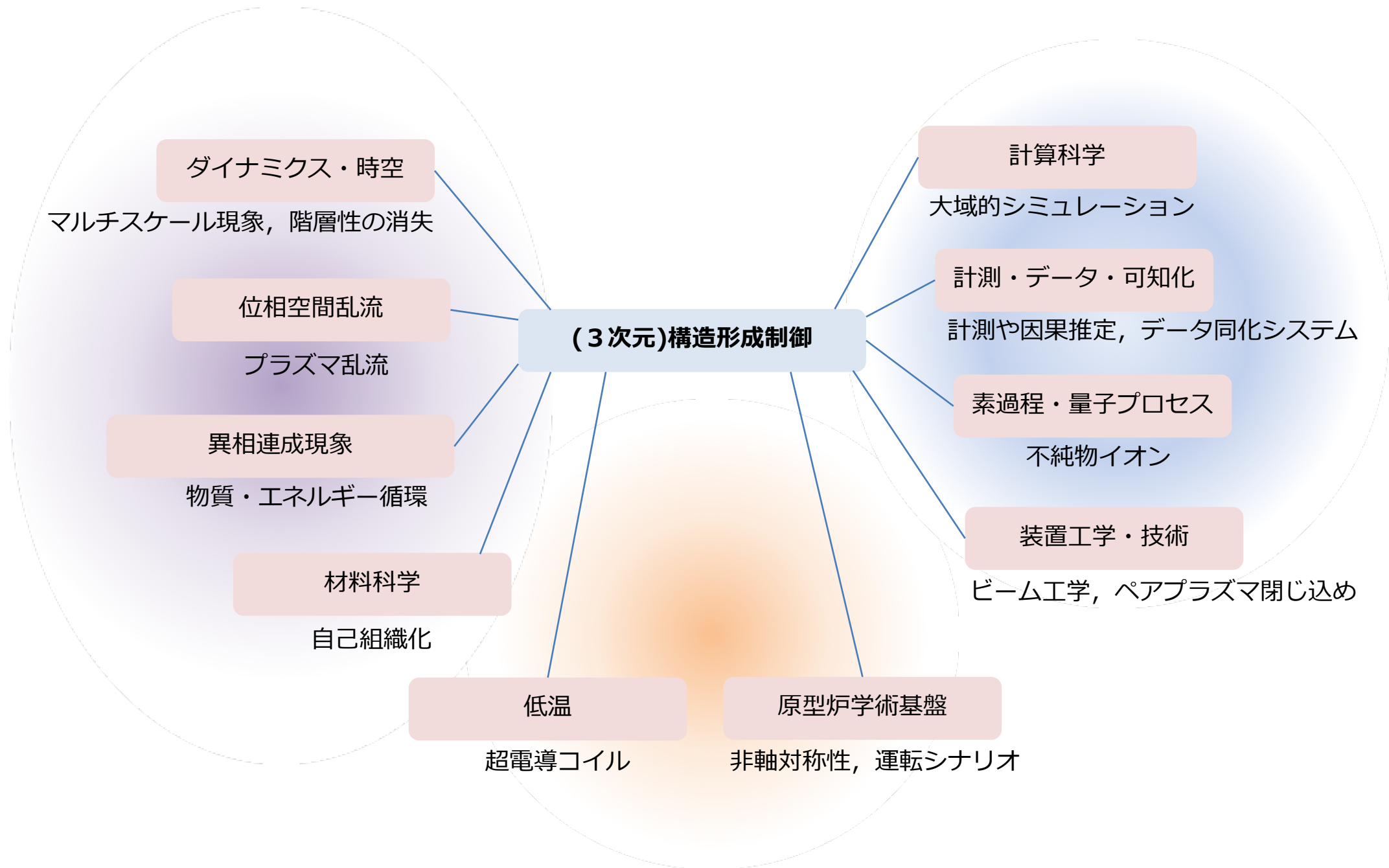
学際的な展開



固有の物理・化学プロセスの解明, モデリング
→ 普遍的な原理の探究, ミクロ-マクロを包括するエントロピーバランスの原理

独自性・優位性

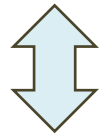
- 磁場閉じ込めプラズマは異なる条件 (磁場構造, 熱・粒子供給, 壁条件 etc.) で繰り返し実験が可能という点で, 地球や生物といった他の多階層複雑系と比べて, より詳細な実験検証が可能である.
- 準軸対称配位の原理実証は世界初のものであり, これを主導し成果発信することはトカマク系含めコミュニティ全体にインパクトを持つ.
- 磁場によるエントロピー生成の束縛と多様化という観点からプラズマにおける構造形成を理解し, 自己組織化を活用した定常閉じ込めを追求するという点で, 独自のアプローチと言える.
- NIFSは非軸対称磁場を取り扱うシミュレーションコード群とノウハウを有しているだけで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



ユニットテーマ名について

3次元 構造形成 制御

3-D structure-formation control



(ex. Active Stability Control)

→ 単に「構造形成制御」が適當？