



# 構造形成・持続性ユニットの設立報告

構造形成・持続性ユニット  
所内メンバー一同  
(報告者：山口裕之)



# 報告内容

- ユニットの背景と目標
- 個別の研究課題の紹介（抜粋）
- 研究プラットフォーム
- 最近の進展（新しい実験計画へ向けた新装置の検討）
- 学際的展開の見通しと進捗，ユニットメンバー

ユニット設立報告会  
管理福利棟第1会議室，核融合研



# ユニットの背景と目標

# ユニット設立までの経緯

ユニット設立報告会  
管理福利棟第1会議室, 核融合研



2021年6月～  
個別テーマ提案

- 高エネルギー粒子閉じ込め・放射線科学
- フローと構造形成の非線形ダイナミクス
- 構造的代謝：自己置換する開放系の学理

2021年12月～  
2022年1月  
クラスタ化・統合

「システム」軸上でクラスタ化  
「3次元構造形成制御」(公聴会時)

2022年4月～  
ユニットテーマ承認

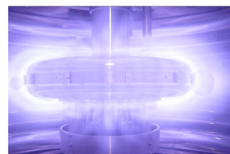
構造形成・持続性  
Structure formation and sustainability



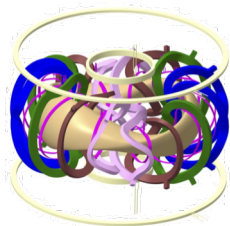
# 核融合としての課題：閉じ込め改善と定常維持

ユニット設立報告会  
管理福利棟第1会議室, 核融合研

- プラズマの閉じ込め改善と定常維持：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？
  - アルファ粒子の輸送や損失 : 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？
  - 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？  
→ プラズマの閉じ込め状態を説明する普遍的な物理機構は明らかでない。
- 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，大局的な観点から物理の解明と配位設計の両方を推進
  - 普遍的な物理の解明と，核融合プラズマの閉じ込め改善へ向けたシナリオ構築



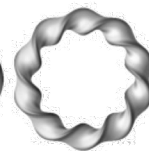
[Yoshida et al., PFR 2006]



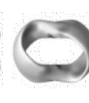
QAS



HSX



LHD



QPS



NCSX

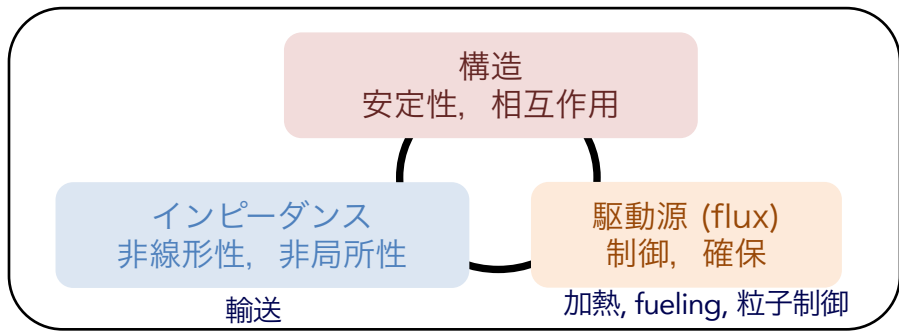


W7-X

# 核融合としての課題：閉じ込め改善と定常維持

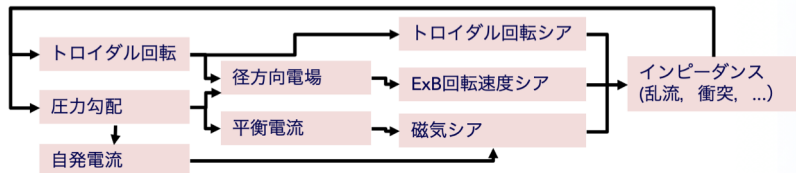
## 「磁場によるプラズマの閉じ込め」の物理と最適化を難しくしているものは何か？

- 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 (対称性・トポロジー, ...)

- 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性の探究



## 核融合としての課題

**閉じ込め改善と定常維持** ( $\alpha$ 粒子閉じ込め, MHD平衡, 分布形成...)

装置方式固有の物理的知見の積み重ね, およびその統合による予測精度向上



## 学術的な意味付け

**物質・エネルギー・運動量等の流れの中における  
構造の形成と持続性の物理**

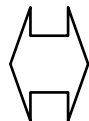
流れの中に構造=不均一状態が自発的に作られ, 持続する原理  
なぜその構造なのか? (構造の再現性, 遷移・分岐)

・システムの対称性, ・マクロな保存量, ・エントロピー生成率  
などの観点から, 閉じ込め状態を決定する普遍的な原理を探求する.

# Perspective ii

## Fusion perspective:

Burning plasma physics issues:  
"Collection of specific phenomena"  
"Synthesis of specialized knowledges"



## Academic perspective:

"Formation and sustainability of  
structure in the middle of flows of  
energy, momentum, and matter"

Optimization  
Integrated modelling

- Alpha-particle heating  
Particle orbit, TAE,  $\alpha$ -channeling...
- Confinement improvement  
L-H transition, symmetry, heating...
- Impurity exhaust  
Global effect, 3-D effect, profiles...
- MHD stability  
Force balance, flows, two-fluid...

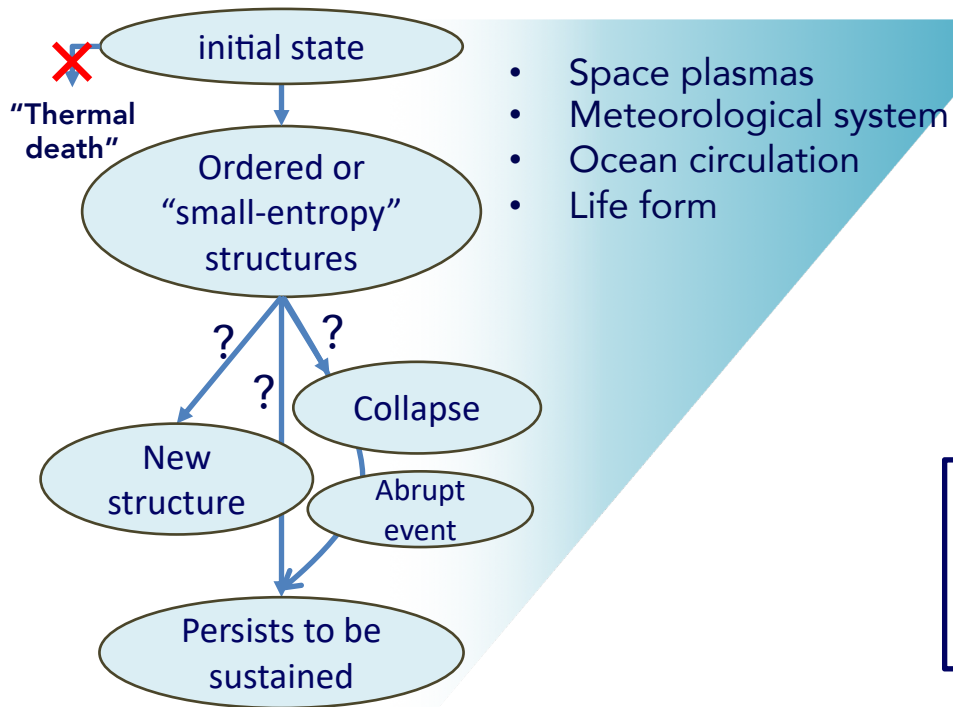
Macroscopic open system characterized by...

- Conserved quantities (constraints)
- Long-range collective interactions
- Entropy production & exhaust

Self-organized state

# Perspective iii

Open macroscopic & "multi-element" systems



## Academic perspective:

"Formation and sustainability of structure in the middle of flows of energy, momentum, and matter"

Macroscopic open system characterized by...

- Conserved quantities (constraints)
- Long-range collective interactions
- Entropy production & exhaust

Role? interplay?

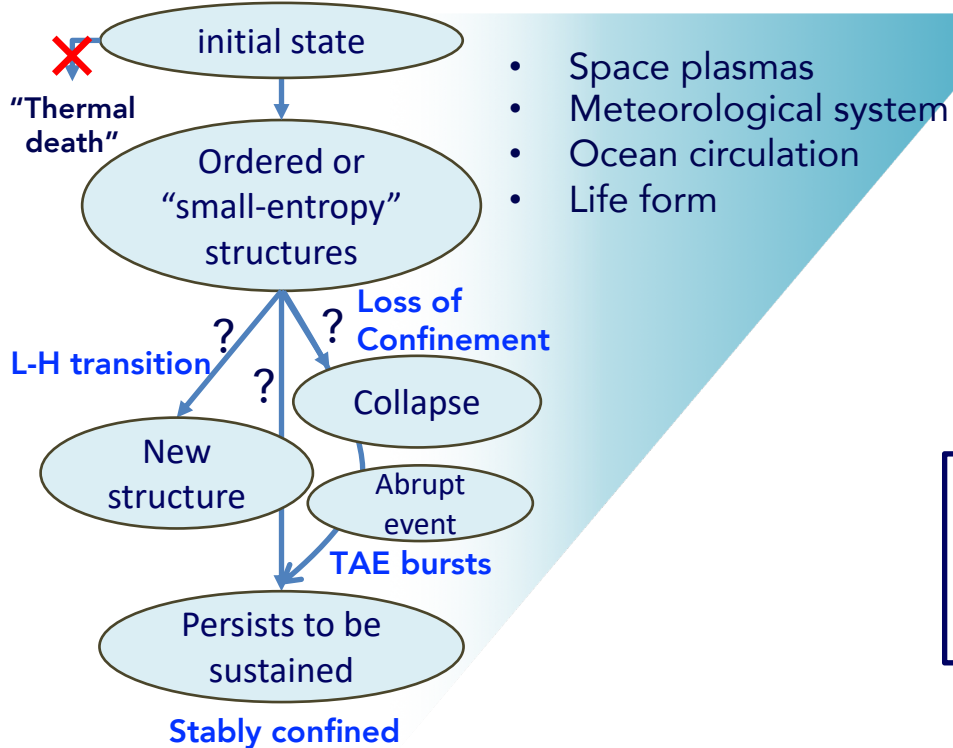
Governing principle?

Self-organized state

Max. entropy production?

# Perspective iv

Open macroscopic & "multi-element" systems



## Academic perspective:

"Formation and sustainability of structure in the middle of flows of energy, momentum, and matter"

Macroscopic open system characterized by...

- Conserved quantities (constraints)
- Long-range collective interactions
- Entropy production & exhaust

Role? interplay?

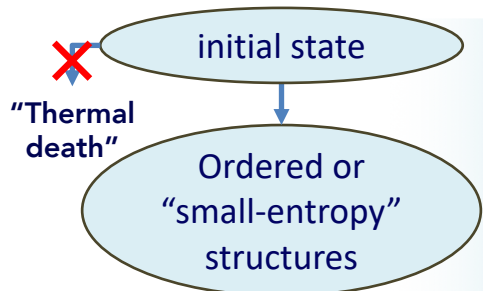
Governing principle?

Self-organized state

Max. entropy production?

# Perspective v

Open macroscopic & "multi-element" systems



- Space plasmas
- Meteorological system
- Ocean circulation
- Life form

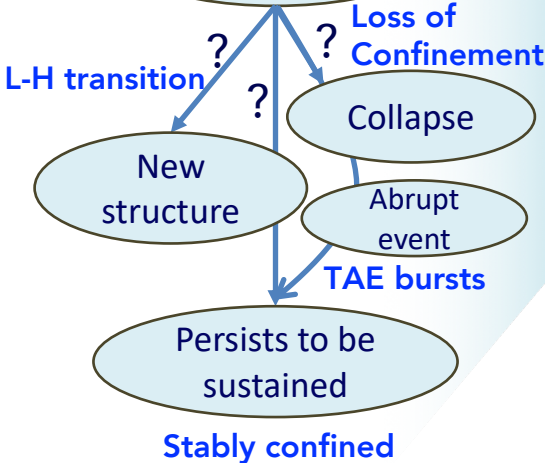
## Advantages of fusion science

3-D magnetic field  
• Symmetry, J, ...

Measurements  
• Real+velocity space  
• Fluctuations

Theory & simulation techniques

**Academic perspective:**  
"Formation and sustainability of structure in the middle of flows of energy, momentum, and matter"



Macroscopic open system characterized by...

- Conserved quantities (constraints)
- Long-range collective interactions
- Entropy production & exhaust

Role? interplay?  
Governing principle? → **Self-organized state**  
**Max. entropy production?**

# Team (NIFS members)

JTC31の発表資料より

管理福利棟第1会議室, 核融合研

Hiroyuki YAMAGUCHI

Hiromi TAKAHASHI

Kunihiro OGAWA

Akihiro SHIMIZU

Masaki OSAKABE

Mitsutaka ISOBE

Hideo NUGA

Yasuko KAWAMOTO

Shinsuke SATAKE

Shin NISHIMURA

Katsuji ICHIGUCHI

Atsushi ITO

Takuya GOTO

6 from experiment, 6 from theory & simulation, 1 from engineering

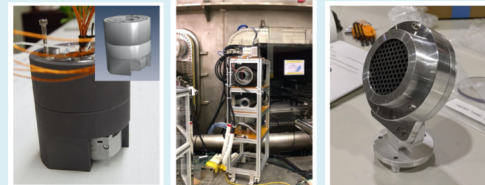
## Experiences & interests

Fast-ion (EP) physics & measurements  
Heating & current drive  
Potential profile measurement

High-performance scenario  
Multi-ion-species transport  
MHD equilibrium & dynamics

Quasi-axisymmetry physics  
Configuration optimization

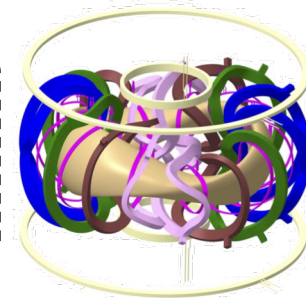
Integrated simulation  
Reactor system design



Advanced diagnostics for wave-particle collective interactions

EP MHD  
Profile formation

Covering SF from driving source to global profiles



**CFQS**

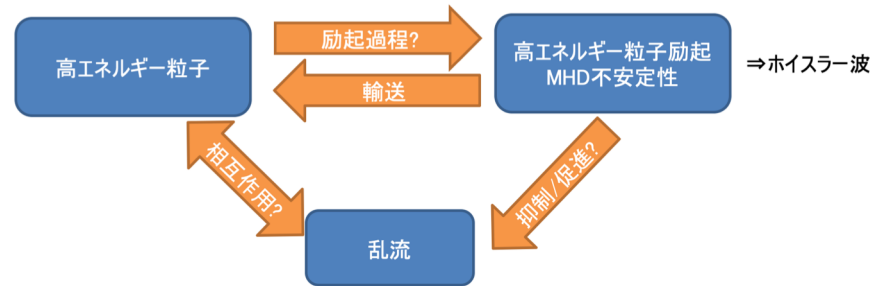
Connecting symmetric & asymmetric systems



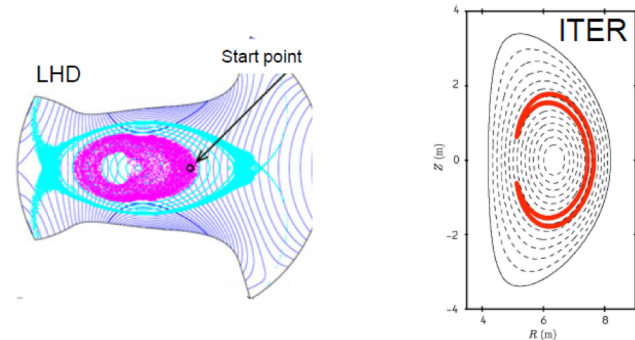
## 個別の研究課題の紹介（抜粋）

# 高エネルギー粒子物理の研究

- 構造形成および非平衡状態の上流に位置する高エネルギー粒子の物理（非熱的粒子の分布の緩和）
- 実・速度空間計測器・シミュレータの開発  
<-> これまでに構築してきた国内外の共同研究ネットワーク（米国，欧州，タイ王国，etc.）
- 高エネルギー粒子-MHD-乱流のカップリングの研究.  
<-> 国際共同研究やユニット間連携も駆使.
- 非軸対称～軸対称径の接続  
-> 保存量と軌道の対応が大きく異なる系における高エネルギー粒子閉じ込め物理の普遍化



Strong ← **Asymmetry** → Weak

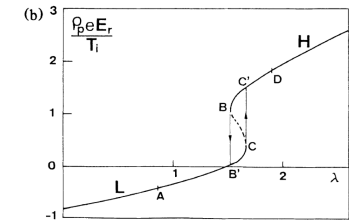
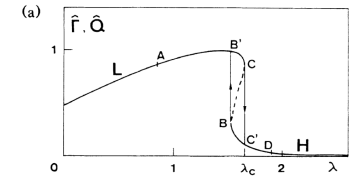


# 閉じ込め遷移の起源と制御の研究

S.-I. Itoh, K. Itoh, PRL. 60, 2276 (1988).

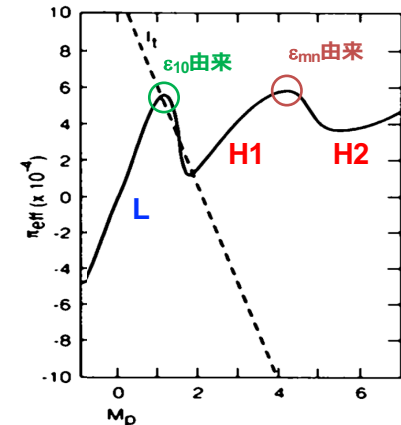
## 閉じ込めブランチとプラズマ構造形成の関係

- 非軸対称系では複数の閉じ込めブランチおよび遷移の存在が予測されているが、実験的な検証は行われていない。
- 磁場の対称性に起因する閉じ込め状態の分岐現象を実証する。
  - > 非軸対称磁場リップルの広範な制御と、正確なフロー制御。
  - > 準軸対称配位における能動的フラックス制御。
- 装置間比較に基づく普遍化。



## 輸送障壁における輸送のカップリング/デカップリング

- 輸送障壁の形成時において、バルク粒子、不純物、フロー分布のカップリング/デカップリングには多様性が存在。
- 輸送障壁形成の条件や、その位置の違い、起源を探究し、カップリング/デカップリングの制御手法確立を目指す。
  - > 核融合プラズマにおける出力制御, ELM制御, 不純物排出

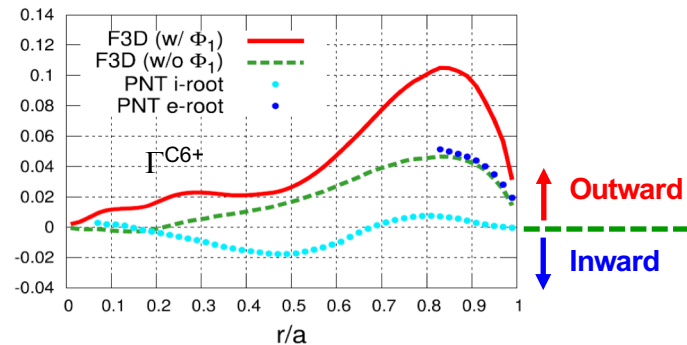


K.C. Shaing, PRL 1996

# 複数イオン種分布の決定機構と制御

## 両極性径電場の分岐におけるグローバル効果

- 非軸対称磁場配位において、新古典両極性条件を満たす径電場 $E_r$ は局所理論において正負両方の根を持ちうる。
- グローバルに決まる実際の分布では、これらの根を空間的に連続的に繋ぐような径電場が選択されている。
- 径電場の決定機構をエントロピー生成率等のマクロな視点から再考し、グローバル効果を含む新しい解析手法を開発する。



K. Fujita, NF, 2021

## 複数粒子種輸送の制御

- 核融合プラズマにおける選択的な不純物排出を実現するための研究を行う。  
=>コア領域の粒子源，磁場の3次元性，径電場の形成機構に着目

# レジリエントな動的平衡状態として考えるMHD平衡

## これまでのMHD平衡の理論

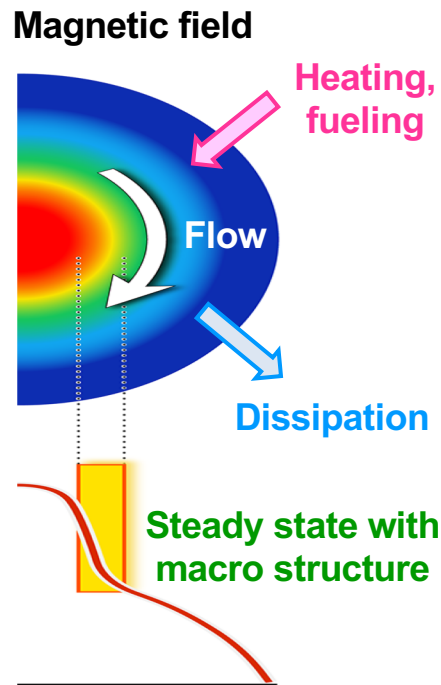
- 摂動に対する静的平衡の応答を調べる.
  - > 必ずしも現実のプラズマを反映していない (揺らぎ, 加熱, 粒子供給, 散逸の存在).
  - > 上記の擾乱は必ずしも崩壊現象の直接の原因ではない.

## 揺らぎを内包する動的平衡

- 巨視的フロー、外部加熱、粒子補給等の入力と散逸による出力を同時に含む定常状態.
- 静的平衡に微小揺らぎを印加した後での非線形飽和状態として初期状態を構築→擾乱に対するレジリエンスとしての安定性

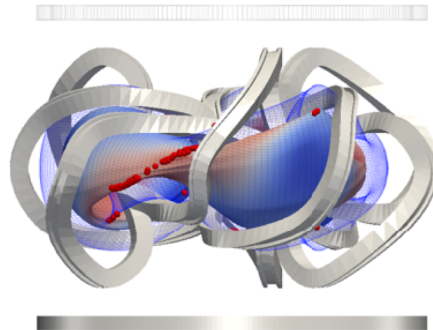
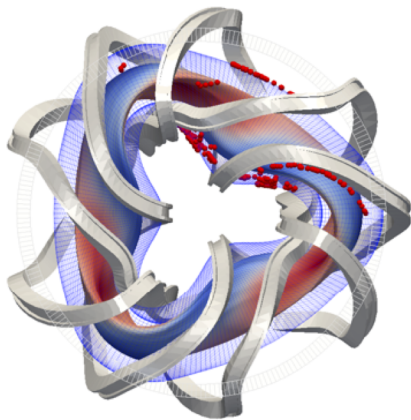
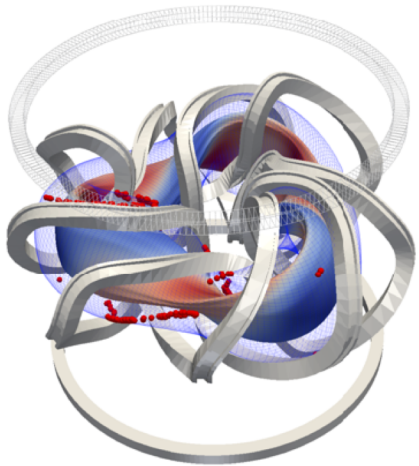
## レジリエンス

- 非線形応答としての構造の変化 → 太陽プラズマ等の他分野へ展開
1. 復原力による構造の維持
  2. 自己組織化による新たな動的平衡状態への遷移
  3. 大域的な崩壊現象
- } いずれか.



# 閉じ込め配位設計・最適化研究

- 閉じ込めの改善, MHD的安定性, 高エネルギー粒子閉じ込めに加えて, ロバストなダイバータ配位を有する配位の構築
  - ヘリオトロン装置や先進的ステラレータを包含する「定常核融合炉の解空間」を探索することのできる新しい配位設計・最適化スキームの開発
- “**OPTHECS**”, 自由曲線コイルの形状・電流値を変量とすることが可能な配位設計コード
- > モジュラー・ヘリカルといったコイル形式を問わない包括的な最適化
  - > 自由境界平衡や開いた磁力線領域を考慮した最適化
- 機械学習や多目的最適化の手法も取り入れ, 実験・理論研究の成果を具体的な炉設計へ反映

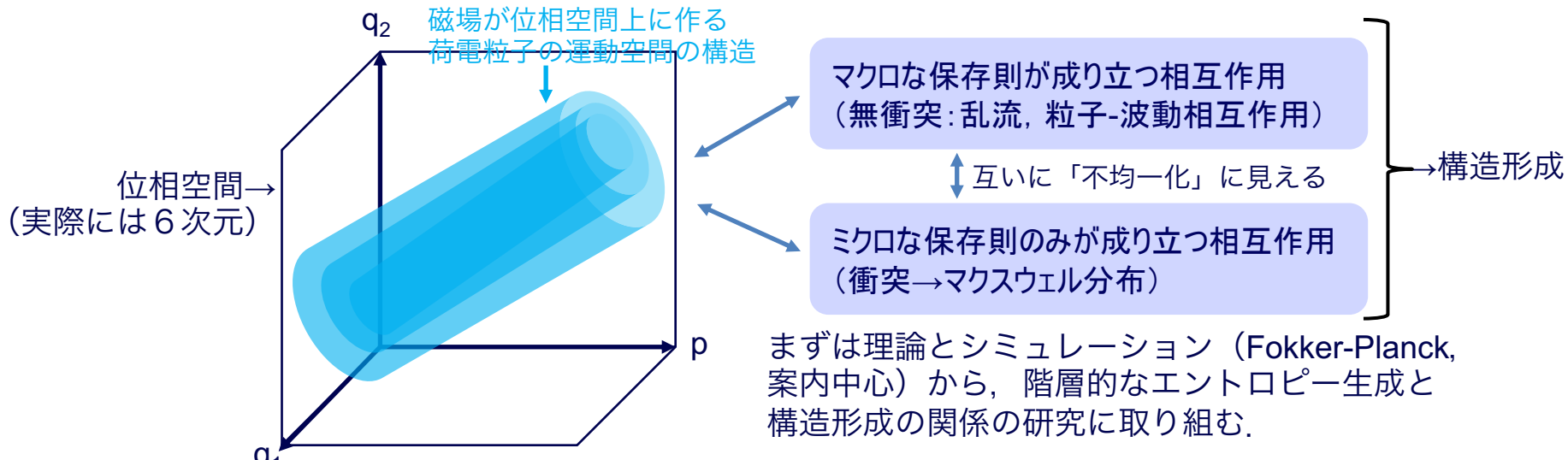


# 階層性を持つシステムのエントロピー生成と構造形成

- 核融合プラズマは無衝突相互作用によるエネルギー・運動量の再分配が支配→時空の階層化  
ある階層のダイナミクスによって系が向かう緩和状態は、別の階層から見ると緩和から程遠い不均一構造に見える→エントロピー生成の階層性とシステムの構造形成の関係について、高温プラズマ位相空間分布の均一化過程を題材に研究し、一般化する。

## マクロ階層の存在によるエントロピー生成率増大の描像

マクロな階層のエントロピー増大 → ミクロな階層のエントロピーは減少 (不均一化)  
→ ミクロな階層のエントロピー生成の余地が増大  
(例：マクロ=乱流ピンチ ↔ ミクロ=新古典拡散)



# 研究プラットフォーム

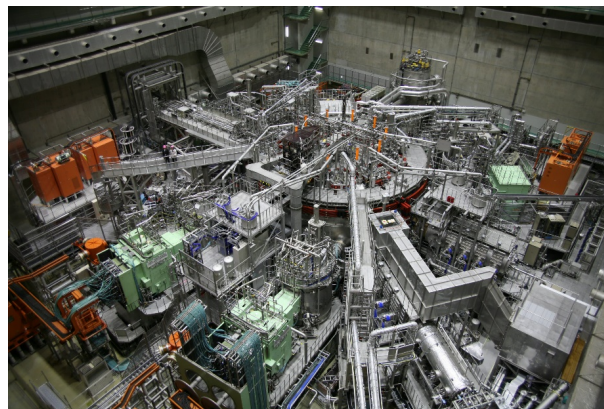


# 研究プラットフォーム（既存）

ユニット設立報告会  
管理福利棟第1会議室, 核融合研

## LHD (NIFS, 1998~)

- 世界最大級のヘリカル装置
- 世界最高の計測・加熱システム
- 磁場配位の柔軟性
- 安定した運転・プラズマの再現性
  - ✓ 実・速度空間分布の計測
  - ✓ 最適化コードを応用した配位依存性研究



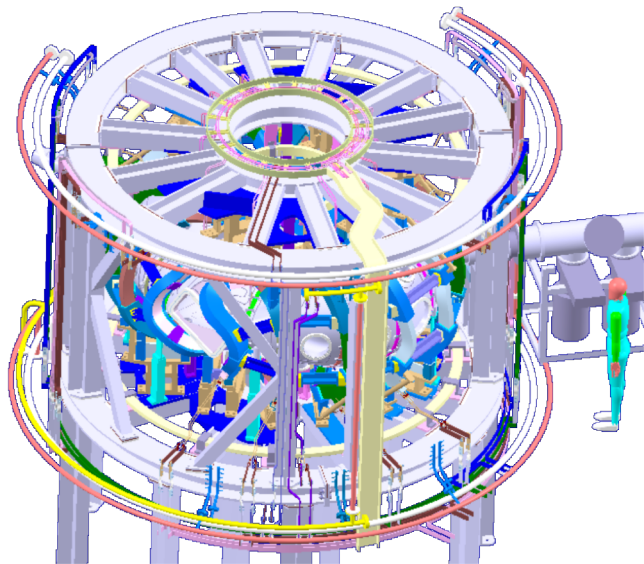
## プラズマシミュレータ「雷神」(NIFS, 2020~2025)

- ベクトル型スーパーコンピュータ（PP ~10.5 PF, メモリ ~200 TB） .
  - ✓ 高エネルギー粒子, 輸送, 平衡のシミュレーション
  - ✓ MPMDによる配位最適化計算

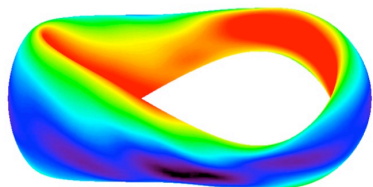


# 研究プラットフォーム：CFQS

ユニット設立報告会  
管理福利棟第1会議室, 核融合研



↑ CFQSの3D CAD図



↑ CFQSのプラズマ形状  
(色は磁場強度に対応)

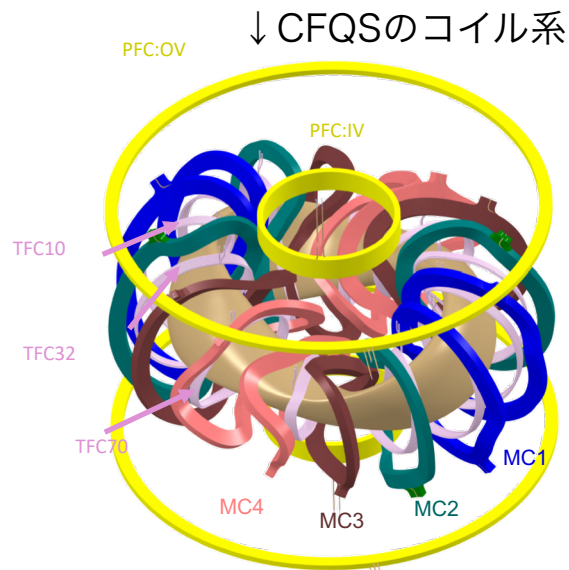
## 主要な装置パラメータ

・ プラズマ大半径	1 m
・ 平均プラズマ小半径	0.25m
・ アスペクト比	4
・ 磁場強度	1 T
・ トロイダル周期数	2
・ プラズマ放電時間	~200 ms

- ・ 核融合科学研究所と中国西南交通大学間の国際学術交流協定に基いたジョイントプロジェクトとして、装置を製作中。
- ・ **準軸対称磁場配位**によるプラズマ閉じ込め改善の原理実証, プラズマ構造形成と磁場構造の関係の研究等を実施する。

# CFQSのコイル製作状況

ユニット設立報告会  
管理福利棟第1会議室, 核融合研



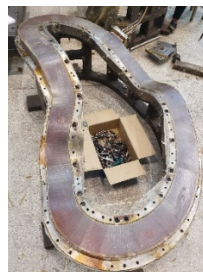
主磁場コイル (常伝導)

・モジュラーコイル 16個

磁場制御用コイル (常伝導)

・ポロイダル磁場コイル 2対

・トロイダル磁場コイル 12個



MC1-1



MC1-2



MC1-3



MC1-4



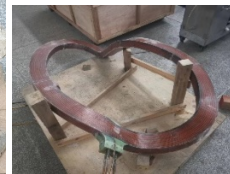
MC2-1



MC2-2



MC2-3



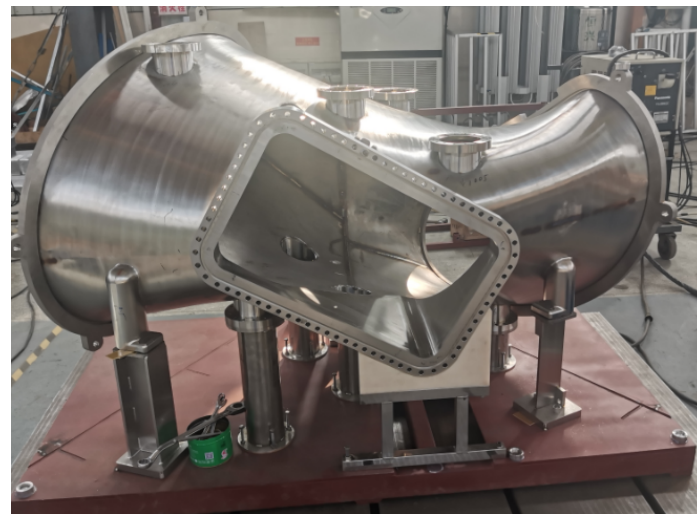
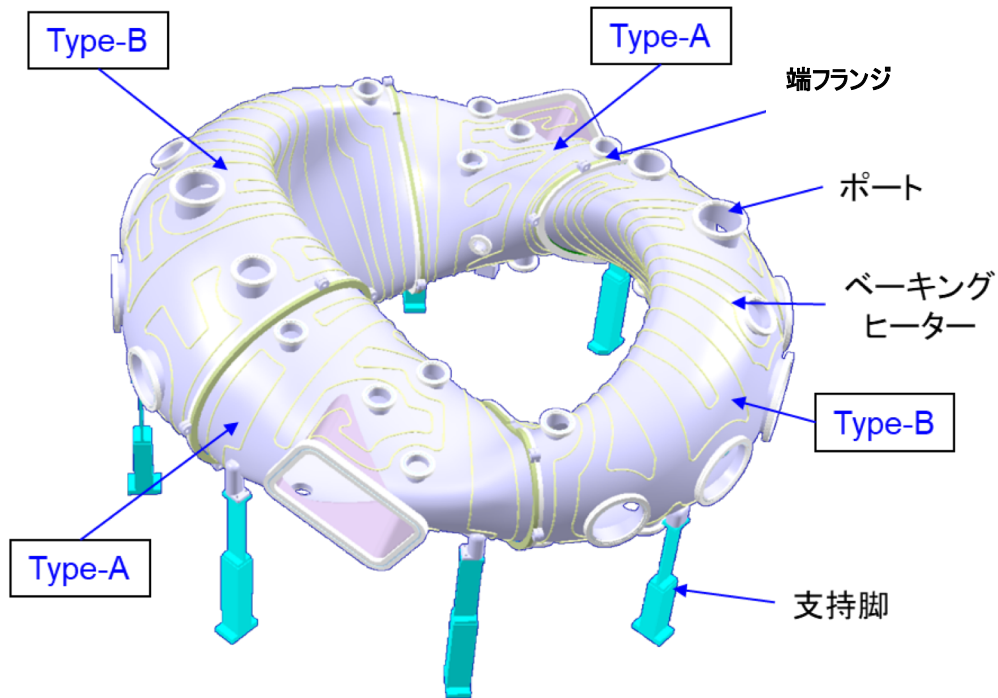
MC2-4

↑ 完成した8個のモジュラーコイル  
全てのモジュラーコイルについて巻き線が既に完了。  
現在、対地絶縁処理中 (10個について処理を完了)

# CFQSの真空容器製作状況

ユニット設立報告会  
管理福利棟第1会議室, 核融合研

↓ CFQS真空容器の設計図



↑ Type-A部. 現在2つとも完成し,  
ベーキングテストを実施中.

## 最近の進展（新しい実験計画へ向けた新装置の検討）



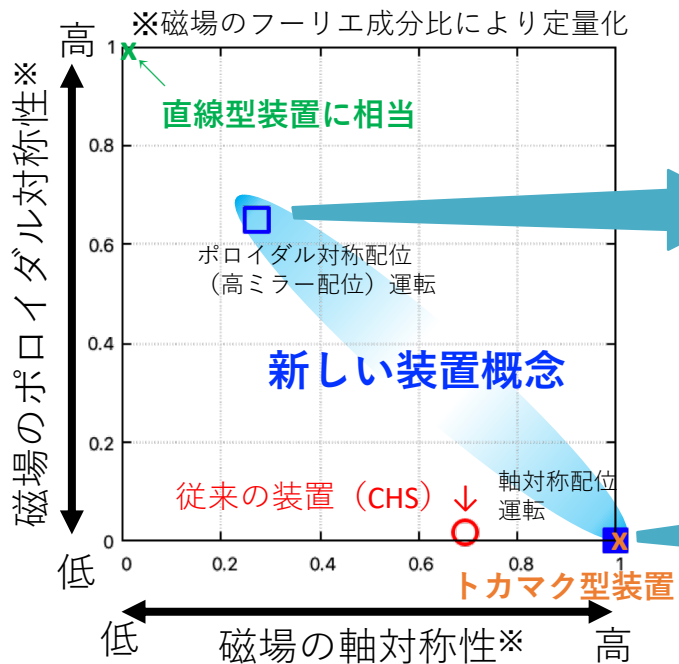
# 新しい実験計画へ向けた新装置の検討

ユニット設立報告会  
管理福利棟第1会議室, 核融合研

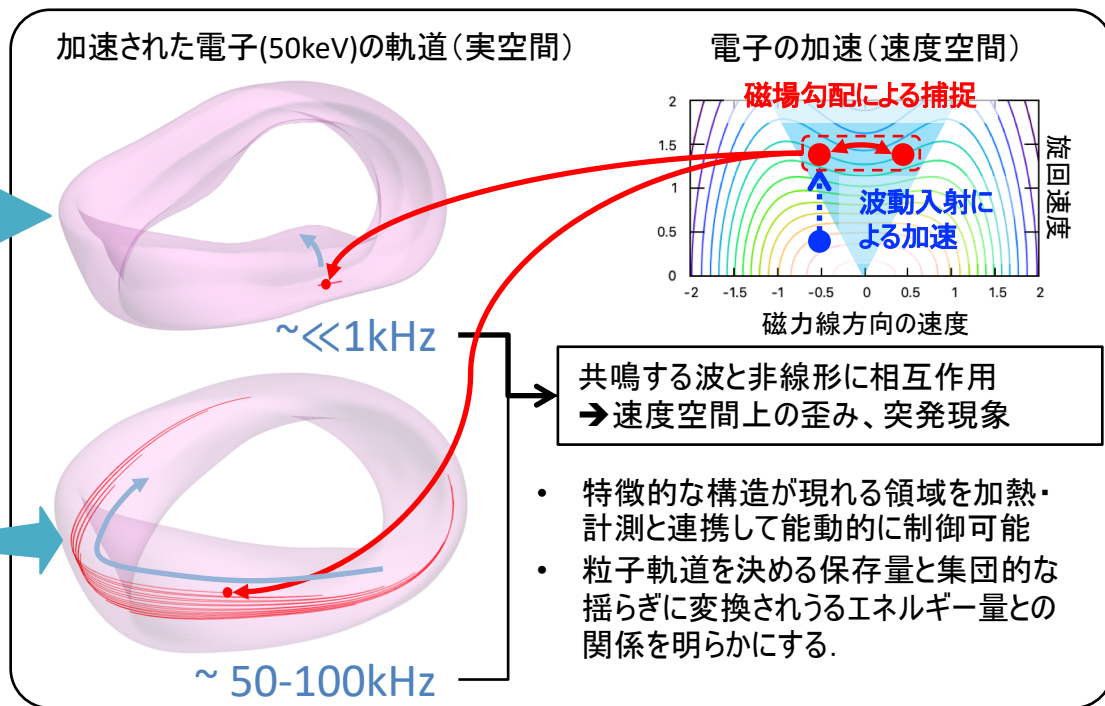
3次元磁場の自由度を拡張し、他では不可能な、粒子運動のトポロジーと周波数の能動的制御を実現→「装置研究/原理実証」からの脱却  
波動, ビーム入射(自由エネルギー源)と連携することで速度空間に起こる現象そのものを操作、観測することを目的とする。

具体的な提案へ向けて、物理設計および工学検討を進めている。

## 目指す磁場対称性のダイナミックレンジ



## 新たに可能となると考えられる位相空間ダイナミクス観測実験の例

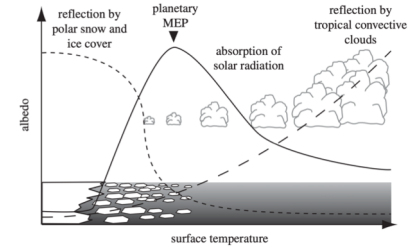


# 学際的展開の見通し・進捗と ユニットメンバー

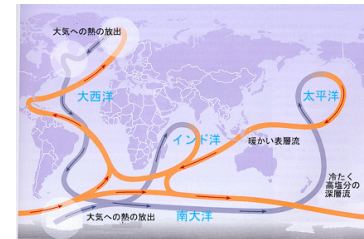
# 学際的な展開の見通し

- エントロピー生成率最大原理など、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。

ユニット設立報告会  
管理福利棟第1会議室, 核融合研



[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。



## 諸現象における相転移・エントロピー生成に関するワークショップ

- 構造形成・持続性ユニットでは磁場閉じ込めプラズマで観測される様々な自発的構造形成や、構造間の遷移現象について、実験的および理論的アプローチからそのメカニズム解明を研究目標の一つとして掲げており、エントロピー生成率と構造形成や相転移現象の関係性をターゲットの一つとしている。磁場閉じ込め以外の諸現象においても観測される構造形成や相転移現象に対し適用されている数理モデルや実験・解析手法を、核融合プラズマの研究に応用するために、幅広い分野の研究者を巻き込んだワークショップを開催する。

NIFS, 京大, 九大, 日大のプラズマ物理専門家に加え, プラズマ分野以外から阪大(基礎工学研究科), 広島大学(統合生命科学研究科)等から参画。

(土岐コンファレンスのオーガナイズドセッションから生まれた繋がりに基づく)

# ユニット研究戦略会議メンバー

ユニット設立報告会  
管理福利棟第1会議室, 核融合研



## 所内メンバー

山口裕之  
磯部光孝  
市口勝治  
長壁正樹  
小川国大  
佐竹真介  
高橋裕己  
伊藤淳  
川本靖子  
後藤拓也  
清水昭博  
西村伸  
奴賀秀男

## 所外メンバー (50音順)

井戸毅 教授 (九州大学)  
稲垣滋 教授 (京都大学)  
篠原孝司 教授 (東京大学)  
長崎百伸 教授 (京都大学)  
比村治彦 教授 (京都工芸繊維大学)  
村上定義 教授 (京都大学)  
森下侑哉 助教 (京都大学)

+ 交渉中数名 → 計 10 名程度を想定