

# 数値実験炉研究プロジェクト

## (Numerical Simulation Reactor Research Project)

数値実験炉研究プロジェクト 研究総主幹 洲鎌英雄

### 第3期中期計画

プラズマシミュレータを有効活用して、**数値実験炉の構築に向けたコアプラズマから周辺プラズマ・プラズマ対向壁までを含むシミュレーションコードの整備・拡張・高精度化及び統合化のための研究**として、

- 平成31年度中において、プラズマシミュレータの性能を現行機種と比べて4倍以上に向上させ、それに対応した各種3次元コードの最適化を行う。
- 平成31年度までに、コアプラズマにおける乱流輸送のモデル化と統合輸送コードへの組み込み、
- 第3期中期目標期間終了時まで、各種輸送コードに複数イオン種効果を取り込む。
- 第3期中期目標期間終了時まで、タングステンを中心とするプラズマ対向材の物性値評価に必要であるプログラミングの改善や新たなモデルの構築により分子動力学的シミュレーション技法を開発する。
- 上記目標を達成するための支援研究として、LHDプラズマを始めとする磁場閉じ込めプラズマの3次元平衡、輸送、不安定性、非線形発展についての実験結果との照合によりコードの完成度を高めるとともに、関連する基礎物理等に関するシミュレーション研究を行う。

### 2021年度 年度計画

数値実験炉の構築に向けて、(1)コアプラズマから周辺プラズマ・プラズマ対向壁までを含むシミュレーションコード群や使用する物理モデル群の整備・拡張、(2)高エネルギー粒子・MHD連結シミュレーションによるICRF波動の効果の解析、(3)複数輸送コードの結合によるプラズマ壁相互作用・周辺プラズマ輸送の解析、(4)重水素実験との連携による水素同位体及び複数イオン種等の効果の解析、(5)コアプラズマにおける乱流輸送のモデルの拡張と統合輸送コードへの組み込み、を進める。さらに、上記計画の支援研究として、LHDプラズマをはじめとする磁場閉じ込めプラズマの3次元平衡、輸送、不安定性、非線形発展シミュレーション及び関連する基礎物理、データ可視化等に関する研究を行う。

# プラズマ流体平衡・安定性解析

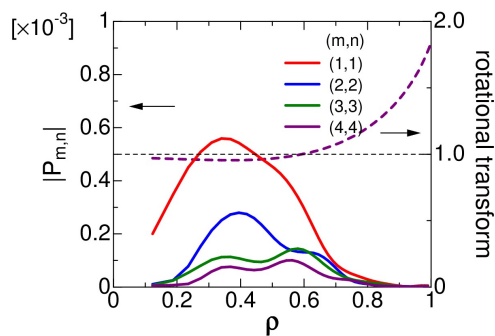
## 2021年度成果

### (1) 数値実験炉構築に向けた数値手法・計算コードの開発、整備、統合化

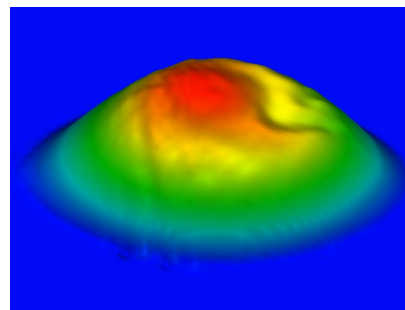
LHDプラズマにおいて正味トロイダル電流を流した平衡における摂動の挙動を非線形MHDシミュレーションコードMIPSを用いて解析した。

- ・回転変換が1の有理面に極めて近い場合には、交換型モードから非共鳴モードへの非線形遷移が生じ得ることを示した。

- ・この遷移では逆カスケード的に支配的な成分が最小モード数の $(m,n)=(1,1)$ 成分へ移行していく。このモード数がLHDの崩壊現象で観測されているものに対応している。



非線形発展後の摂動圧力の  
支配的なFourier成分



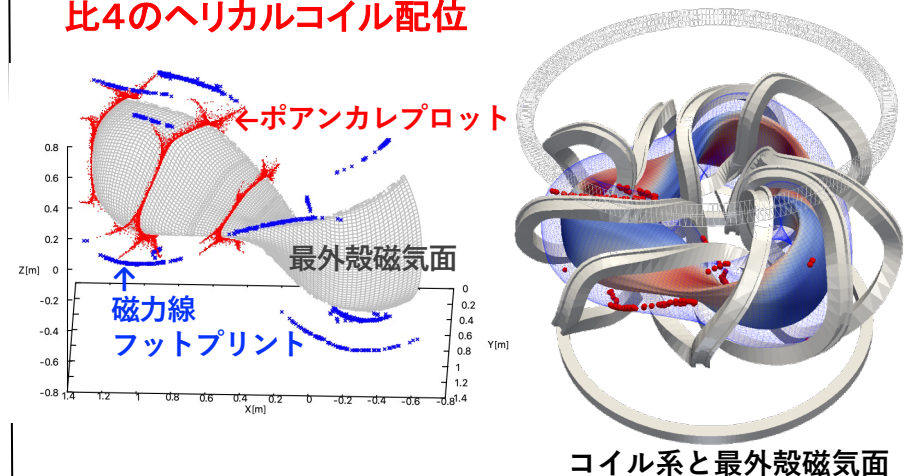
非線形発展後の圧力分布の  
鳥観図

### (2) 磁場閉じ込めプラズマの平衡、輸送、不安定性、非線形発展及び関連する基礎物理に関するシミュレーション研究

配位最適化コードOPTHECSコードを発展させ、連続巻ヘリカルコイルに基づく磁場配位の最適化研究を推進した。

- ・準ヘリカル対称配位をベースとして、低アスペクト比配位の検討を進めた。

### ダイバータレグ構造を有する、周期数3、アスペクト比4のヘリカルコイル配位



## 2022年度計画

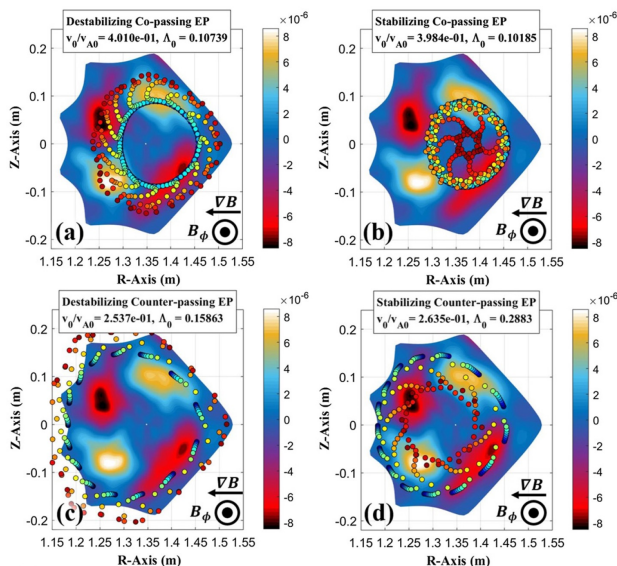
ヘリオトロンプラズマの崩壊メカニズム及び安定限界を解明するために、運動炉運的熱イオン効果、フローと磁気島との相互作用等について流体解析及び統計データ解析を行い、自由度を拡張した磁場配位最適化解析への適用を進める。

# 高エネルギー粒子

## 2021年度成果

### (1) 数値実験炉構築に向けた数値手法・計算コードの開発、整備、統合化

1. 京都大学との共同研究によりHeliotron Jにおけるアルフベン固有モード (AE) のシミュレーションに自由境界条件を導入し、AEによる高エネルギー粒子輸送過程を明らかにした (下図)。
2. MEGAコードにICRFの効果を導入して、ICRF高エネルギー粒子分布について他コードとの相互検証を実施するとともに、ICRF高エネルギー粒子とAEの相互作用を研究した。

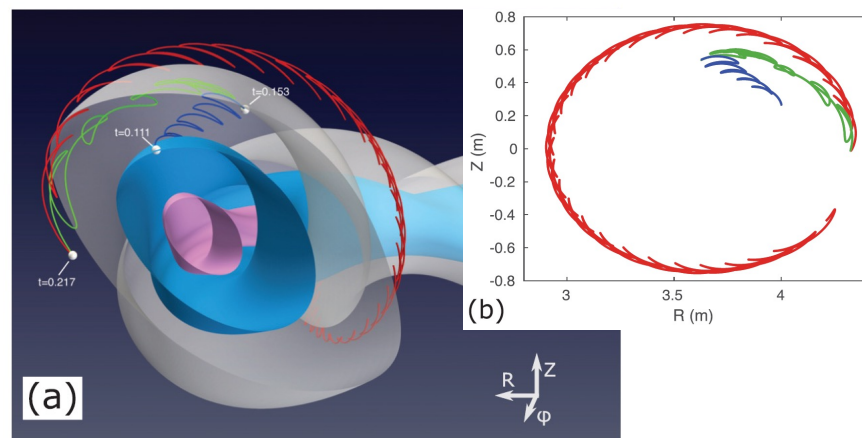


[P. Adulsiriswad+,  
NF (2021)]

Heliotron JにおけるAEによる高エネルギー粒子輸送過程

### (2) 磁場閉じ込めプラズマの平衡、輸送、不安定性、非線形発展及び関連する基礎物理に関するシミュレーション研究

1. LHDにおける不安定性によって、捕捉高エネルギー粒子が歳差ドリフト方向を反転しながら輸送される過程を解明した (下図)。
2. トカマクプラズマにおける軸外れフィッシュボーンモード (OFM) のシミュレーションを実行し、高エネルギー粒子との共鳴条件や分布関数の平坦化を解明した。



### LHDにおける捕捉高エネルギー粒子輸送過程

## 2022年度計画

[M. Idouakass+, PoP (2021)]

核燃焼プラズマの運動論的MHDハイブリッドシミュレーションを実行して、高エネルギー粒子駆動不安定性に対する熱イオンの運動論的效果を調査する。



# 新古典・乱流輸送シミュレーション

## 2021年度成果

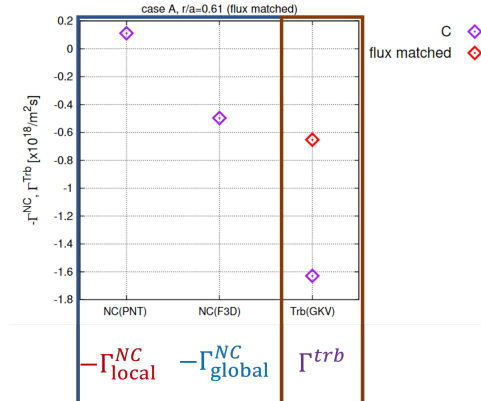
### (1) 数値実験炉構築に向けた数値手法・計算コードの開発、整備、統合化

1. 拡張された大域的新古典輸送シミュレーションにより、LHD実験で観測された不純物ホールプラズマにおいて、温度勾配に駆動される外向きの不純物新古典フラックスと微視的乱流による内向きフラックスの釣り合いが成り立っていることを発見。(→右図)
2. 大域的full-fジャイロ運動論シミュレーションコードGT5Dについて、衝突項の改良により高衝突領域における新古典輸送評価を改善。また、新たな磁気面構築手法により、低次有理面近傍における磁気面に係る幾何学的量の不連続性を解消。さらに、ポアソンソルバに行列分解法に基づくアルゴリズムを適用し、大幅な高速化及びメモリ使用量削減を達成。
3. ジャイロ運動論簡約化モデルを用いた時間発展シミュレーションにより、温度分布を予測。
4. 連成計算による大域的輸送解析のための、広パラメータ領域で有効な縮約乱流輸送モデルの構築が進展。
5. 時系列データ変動を含め、乱流輸送の精密な関数形を導出。これまでの輸送モデルと比較し、非線形計算結果の再現性が大幅に向上。
6. ジャイロ運動論シミュレーションの5次元位相空間分布関数を画像化し、データクラスタリング手法により、分布関数の特徴的構造を効果的に抽出する方法を開発。

### (2) 磁場閉じ込めプラズマの平衡、輸送、不安定性、非線形発展及び関連する基礎物理に関するシミュレーション研究

1. 乱流場の空間構造を高速に推定するマルチスケール深層学習モデルの構築が進展(国立天文台との共同研究; 2/25 共同プレスリリース(web掲載))。
2. 磁気面が壊れているエッジにおける新古典輸送モデルの構築を進め、ポアソン方程式を解くためのモンテカルロ手法を開発・改良。

### 複数イオン種プラズマ に対する新古典輸送シミュレーションと乱流 輸送シミュレーション による不純物輸送解析



$\Gamma_{\text{trb}}$  は (Nunami et al. Phys. Plasmas, 2020) における GKV による計算結果 + flux matching

## 2022年度計画

大域的ドリフト運動論シミュレーションにより、不純物新古典輸送について調べる。また、局所のおよび大域的ジャイロ運動論シミュレーションにより、プラズマ乱流輸送の多成分効果や大域的効果、ゾーナルフローの活性化機構について、研究を進める。実験結果との定量的比較や、データサイエンスを利用した輸送予測手法の開発、最適化配位の探索などを進める。

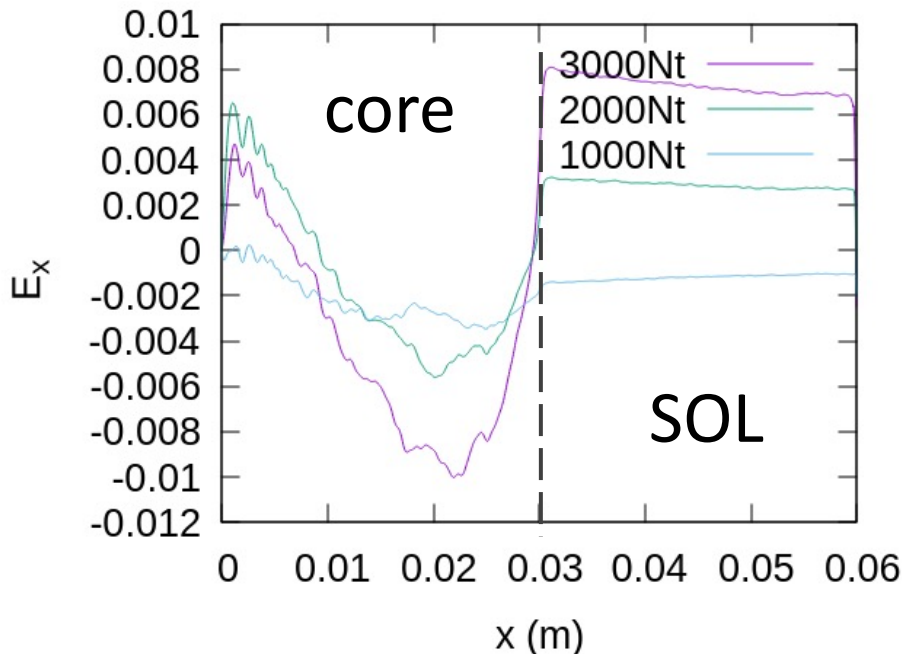


# 周辺プラズマ輸送グループ

## 2021年度成果

### (1) 数値実験炉構築に向けた数値手法・計算コードの開発、整備、統合化

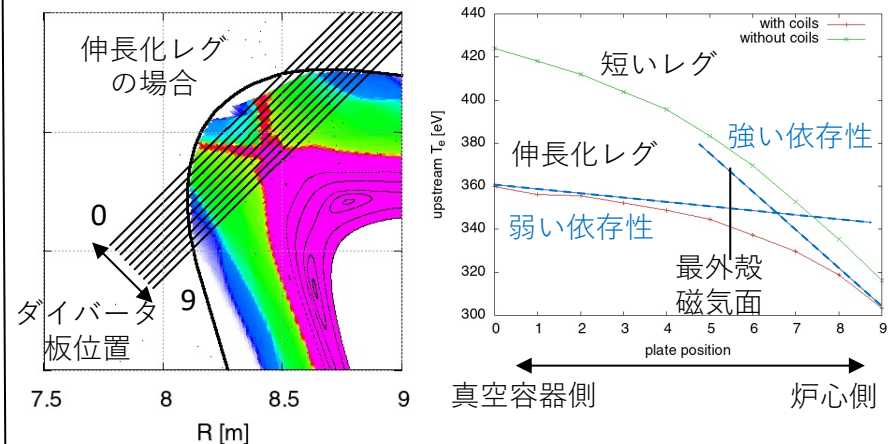
1. PICコードでコア-SOL結合部でのプラズマ輸送を考察。イオンと電子の軌道の違いから生まれる径電場構造を自己無撞着に再現した。



スラブ配位で周辺プラズマ輸送を考察。X=0.03mの点線はLCFSを示す。線の色は時間発展を示す。LCFS付近でのイオンと電子の輸送の差から径電場が自己無撞着に形成される。今後は、ストカスティック磁場中での輸送の考察を行う。

### (2) 磁場閉じ込めプラズマの平衡、輸送、不安定性、非線形発展及び関連する基礎物理に関するシミュレーション研究

1. 準対称ステラレータ磁場配位に対するダイバータレグ形状制御手法の検討 ⇒ 付加コイルによるレグの伸長化と炉心への壁の影響低減効果を数値輸送コードで明らかにした



左：外部コイルで伸長させたレグとダイバータ板位置(0-9)の関係。右：ダイバータ板位置ごとの炉心電子温度。レグの伸長によって、炉心温度への壁の影響が軽減されることを示した。

## 2022年度計画

PICコード、2流体コードの開発を進め、周辺プラズマの基礎物理過程の理解を進める。とりわけ、体積再結合の原子分子過程を取り入れた非接触プラズマの輸送モデリングを他大学と協力して進める。

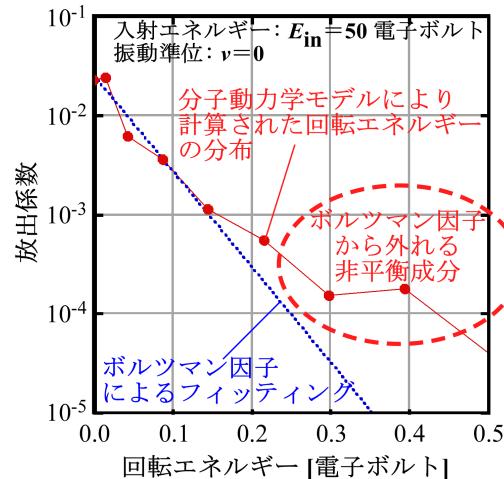
# PWIシミュレーション

## 2021年度成果

(1) コアプラズマから周辺プラズマ・プラズマ対向壁までを含むシミュレーションコード群や使用する物理モデル群の整備・拡張・高精度化及び統合化のための研究

1. LHD中の水素原子・分子の密度分布を求めるための炉材料から発生する各振動回転準位が必要。そこで、MDを使って炭素から発生する水素同位体原子分子の回転温度の評価に成功した。
2. 光渦によるナノらせん構造形成のMDシミュレーションを行った。
3. トリチウムの $\beta$ 崩壊によるDNAの損傷実験のDeep Learningを使った画像処理手法の開発。

## 分子動力学を用いた炭素から発生する水素同位体分子の回転温度の評価



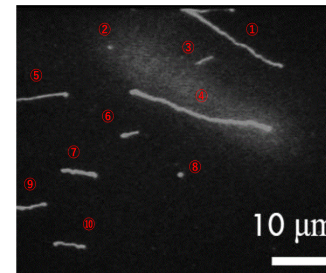
タングステンに水素を照射した際の水素同位体温度をMDで求めた。[中村・斎藤他、JJAP 61, SA1005 (2022)]  
[斎藤・中村他、プラ核学会誌, vol.98, 5 (2022)]  
[斎藤・中村、NIFS News, No.262, 4 (2021)]

## 分子動力学法による光渦光を使った螺旋ナノ構造針形成再現

## 論文執筆中のため 図は非公開

新プラズマシミュレーター(ベクトル機)向けの最適化を行い、スカラー機同等以上の計算速度を達成した。  
[土生・中村、JSST 2021 Outstanding Presentation Awardを受賞]

## トリチウムの $\beta$ 崩壊によるDNAの損傷実験のDeep Learningを使った画像処理手法の開発



No.	手動: Length(μm)	自動: Length(μm)	差 (手動-自動)
1	19.87	23.70	-3.82
2	0.00	0.42	-0.42
3	3.32	2.96	0.35
4	25.63	26.32	-0.69
5	8.76	9.40	-0.64
6	2.75	2.79	-0.04
7	5.72	5.96	-0.24

DNA測定実験画像から長さ測定をDeep Learningを使って自動化するツールを開発。[斎藤・中村・剣持他、JASSE vol.8,173(2021) <https://doi.org/10.15748/jasse.8.173>]

## 2022年度計画

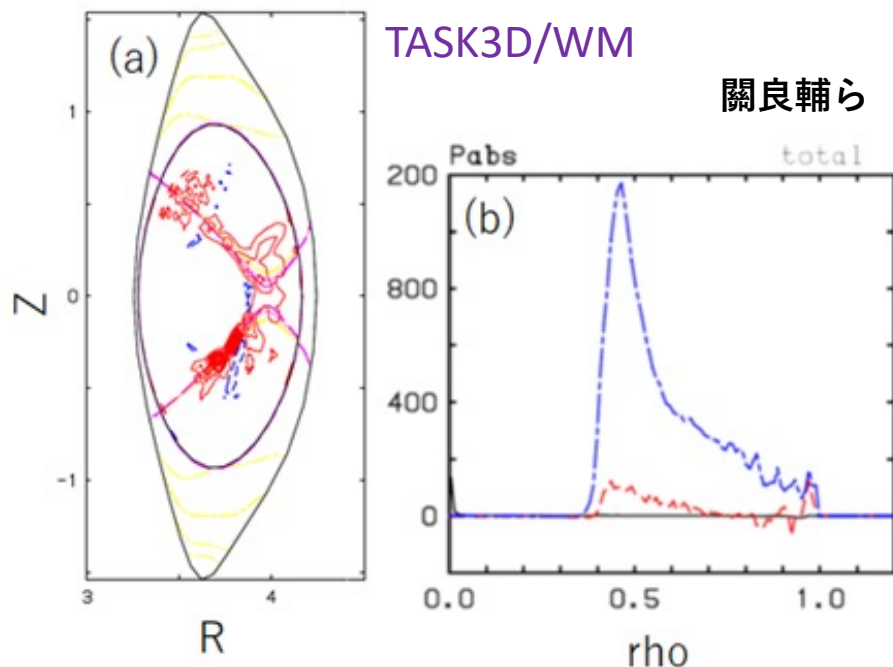
壁・中性粒子輸送・プラズマの各々のシミュレーションコードを組み合わせをさらにすすめ、弱電離プラズマ挙動解析シミュレーション技法改良を進める。

# 統合輸送シミュレーション

## 2021年度成果

### (1) LHD重水素実験対応統合輸送解析スイート **TASK3D-a (ver 5)**の機能拡張・運用拡大

- 高エネルギー粒子挙動に関するモジュールの高精度化（中性子発生率評価含む）
- 同位体効果に関する解析データベース構築
- ICRHモジュール整備



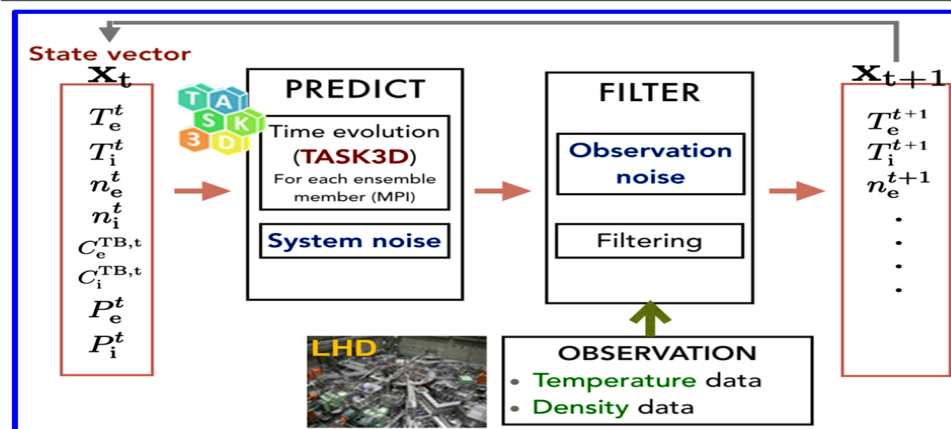
(a) Hイオンへの吸収ポロイダル分布,  
(b) 径方向吸収分布(青:Hへ, 赤:Dへ)

## (2) 予測・制御用データ同化システム **ASTI** *Assimilation System for Toroidal plasma Integrated simulation*

データ同化活用による熱輸送モデル最適化  
(多数放電の時系列変化再現)  
プラズマ制御システムとしての整備  
(京大、統計数理研究所、核融合研共同研究)



森下侑哉（京大D2）  
コミュニティの拡大、学生実践教育にも大きく貢献  
データ同化ワークショップでの注目



## 2022年度計画

- TASK3D-a**によるLHD重水素実験の解析（水素同位体効果、高エネルギー粒子挙動などを主眼）をさらに進める
- データ駆動手法による熱輸送モデリングや、**データ同化**手法を導入した予測・制御型スイート**ASTI**により、放電全体にわたる分布予測の確度向上、長時間LHD放電を舞台とした制御実証に取り組む



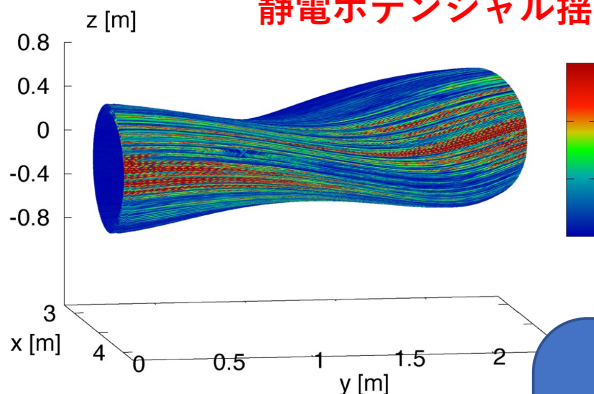
# 多階層複合物理

## 2021年度成果

### (1) 数値実験炉構築に向けたジャイロ運動論コード開発と大型ヘリカル装置への適用

1. **大型ヘリカル装置における同位体効果:** ジャイロ運動論PICコード(XGC-S)を用いたイオン温度勾配不安定性の準線形解析を行い、大域的な径電場の効果により、熱フラックスの質量数依存性がGyro-Bohm則よりも良好になることを見出した。(IAEA-FEC2020、ITC30 (招待講演))

イオン温度勾配不安定性による  
静電ポテンシャル揺動



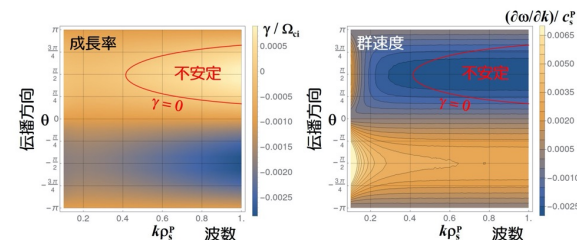
熱フラックスの  
質量数依存性と  
径電場( $E_r$ )の効果

未出版図

### (2) 磁場閉じ込めプラズマの平衡、輸送、不安定性、非線形発展及び関連する基礎物理に関するシミュレーション研究

1. **非接触ダイバータプラズマにおける径方向輸送:** 非接触ダイバータプラズマのフィードバック不安定モードが、典型的な環状プラズマにおいても存在しうることを示すとともに、同モードの再結合頻度依存性、密度勾配依存性を評価した。(IAEA-FEC2020, Nucl. Fusion)
2. **球状トカマク合体における加熱過程:** 粒子シミュレーションによって、球状トカマク合体におけるイオン加熱がグローバルな過程であることを示し、その運動論的機構、トロイダル磁場依存性を解明した。(IAEA-FEC2020, JSST2021)

環状装置の非  
接触プラズマに  
おける不安定  
モードの線形成  
長率と群速度



## 2022年度計画

全系運動論モデル、運動論効果を現象論的に取り込む拡張MHDモデルといった、実用段階に入りつつある2種の多階層モデルの開発・拡張を進める。一方で、多階層モデルの基礎を支える粒子コード群の高速化・最適化を行い、素過程研究を並行して進める。

# シミュレーション科学基盤

## 2021年度成果

### (1) VR装置の利活用

1MeVトリトンの即発損失点の計算結果をLHD真空容器内部CADデータとともにVR可視化した。定量的に検討できるように、衝突点の数密度を表示できるように可視化プログラムを開発した。

未出版図

1MeVトリトンの即発損失点のVR可視化。数値密度を表示している。

### (2) VLHDのUnityへの移植

VLHDデータセットをHMDで可視化する試みとしてUnity用可視化フレームワークVisAssetsに読み込むためのモジュールを開発した。圧力場データをVisAssetsのスカラー場用可視化モジュールで表示できることを確認できた。

JAMSTECとの共同研究

未出版図

Unity上での圧力等値面表示

### (3) 磁力線追跡データからのプラズマ領域の可視化

磁力線追跡データによるポアンカレプロットに対して、ディープニューラルネットワークを使って磁力線の存在確率を計算して、プラズマ領域を可視化。

京都大学との共同研究

未出版図

CADデータとともにプラズマ領域の可視化

### (4) In-situ可視化ライブラリVISMOの開発

VISMOのソースコードとカラーマップ・視点設定の補助ツールを公開した。2次元的なデータ可視化のため、In-situ的にPythonのMatplotlibのスクリプトを実行して画像出力するプログラムTiny VISMOを開発した。

兵庫県立大学との共同研究

### (5) 高温超伝導薄膜のシミュレーション

辺要素有限要素法によるコードを開発して、高温超伝導(HTS)薄膜における臨界電流密度を測定する永久磁石法の有効性をシミュレーションによって明らかにした。

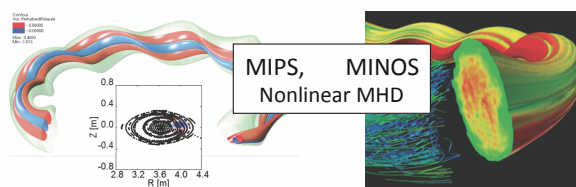
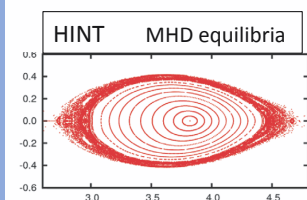
未出版図

永久磁石法の模式図

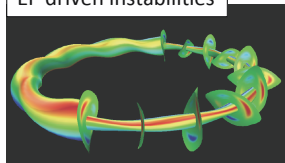
## 2022年度計画

先進的可視化デバイスや開発環境を活用するための研究開発や、超並列化に対応するアルゴリズムやモデルの研究開発を進める。

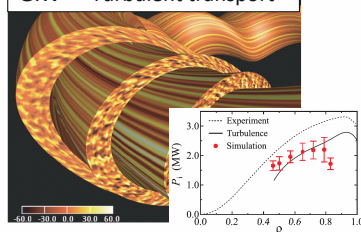
2022年度は、プロジェクト体制から研究テーマごとのユニットからなる新たな体制への移行期間となる。今後も、核融合科学の発展や成果創出に貢献するため、プラズマシミュレータ等のシミュレーション科学研究環境の充実に努め、数値実験炉研究プロジェクトで培われた研究人材や理論モデルやシミュレーコード群が、新たなユニット体制に効果的に引き継がれ十分に活用されるように、プロジェクト成果の向上と整備をさらに進めていく。



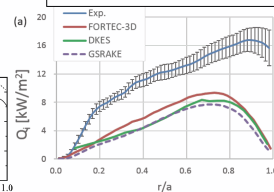
MEGA  
EP driven instabilities



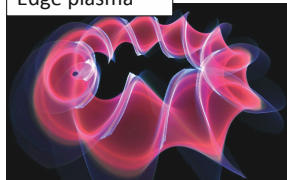
GKV Turbulent transport



FORTEC-3D, KEATS  
Neoclassical transport



EMC3-EIRENE  
Edge plasma



TASK3D  
Integrated transport code

