

課題No. 35 : 核融合炉早期実現を指向する多要素結合循環系の 物理・モデリング・制御・設計の統合研究

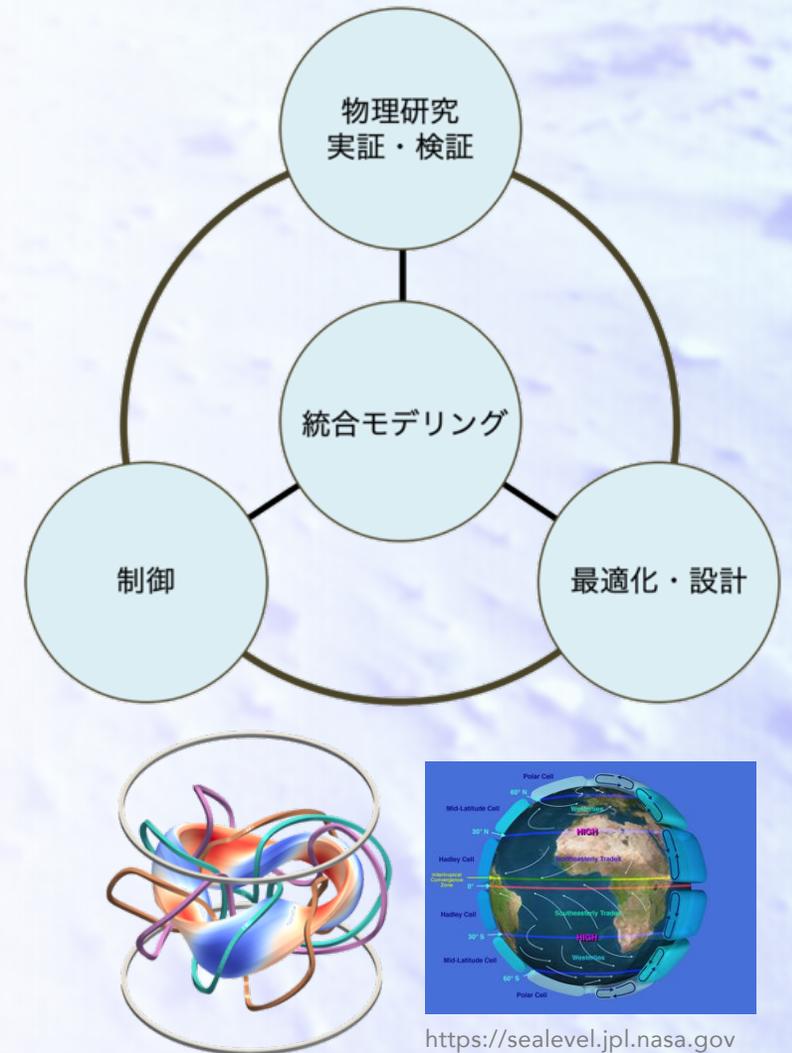
提案者：山口裕之
核融合理論シミュレーション研究系
統合シミュレーション研究部門
ver. 2021.06.08

“高自律性解放系の統合的記述と制御・機能性設計”をテーマ(案)として、炉心プラズマ-壁まで含む多粒子種の統合モデリング、制御、最適化・設計、関連する物理研究（加熱/波動/輸送/安定性/乱流/EP/周辺/壁 etc.）や実験を通じた実証・検証を行うユニットを提案します。多要素結合系としての全体像記述・予測・理解といった点で、地球環境システム（気象⇔気候、陸⇔海⇔大気⇔太陽）や社会・経済学（個人⇔集団）とも手法・需要・価値・課題を共有しつつ、核融合に閉じこもることなく展開できないかと考えています。

また、核融合炉のように複雑な物理システムの制御や最適化を、「情報から秩序(=統計的に有りうべからざる方向への変化)が生まれ出る営み」と捉えることで、生物と非生物を繋ごうとする研究[*]との関係性はないか？ 模索していきたいと思えます。

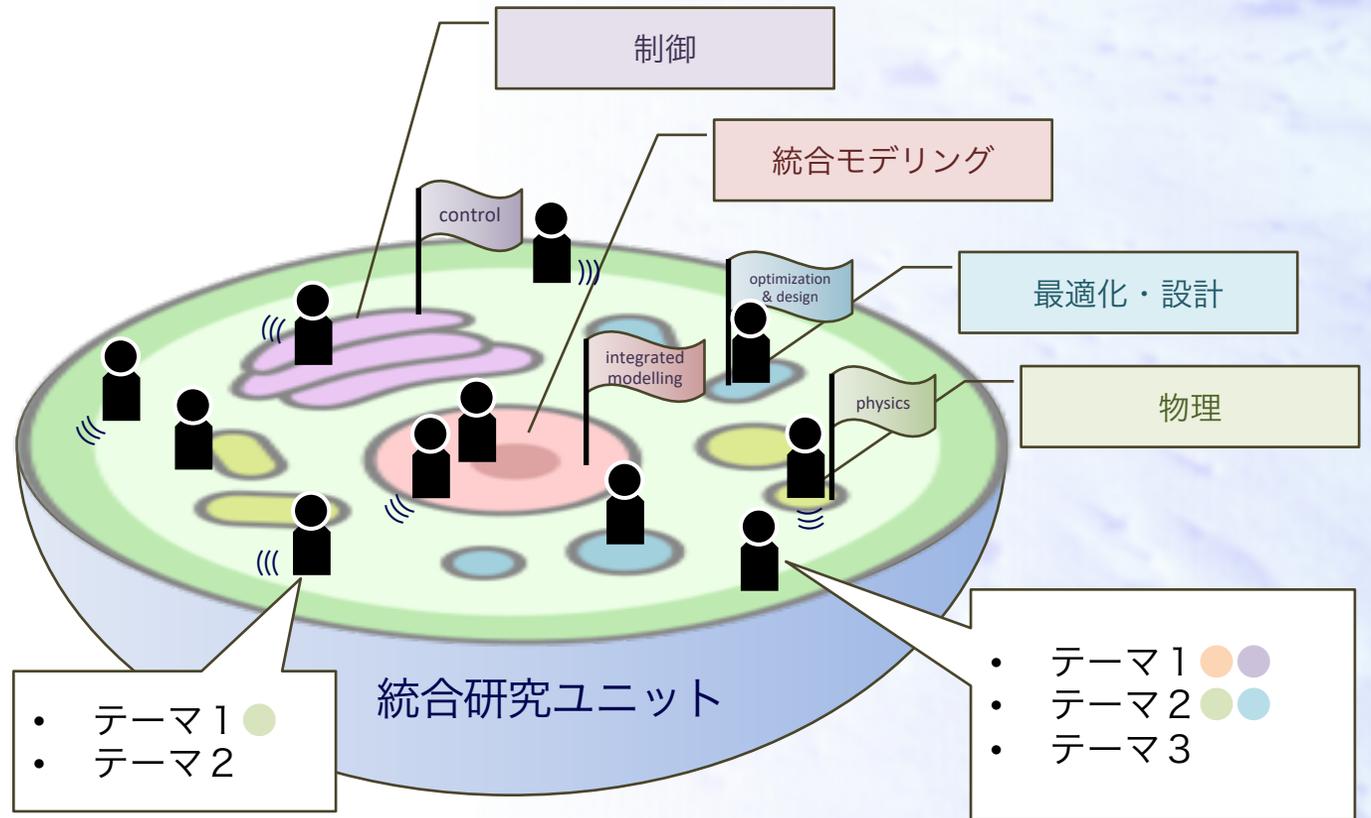
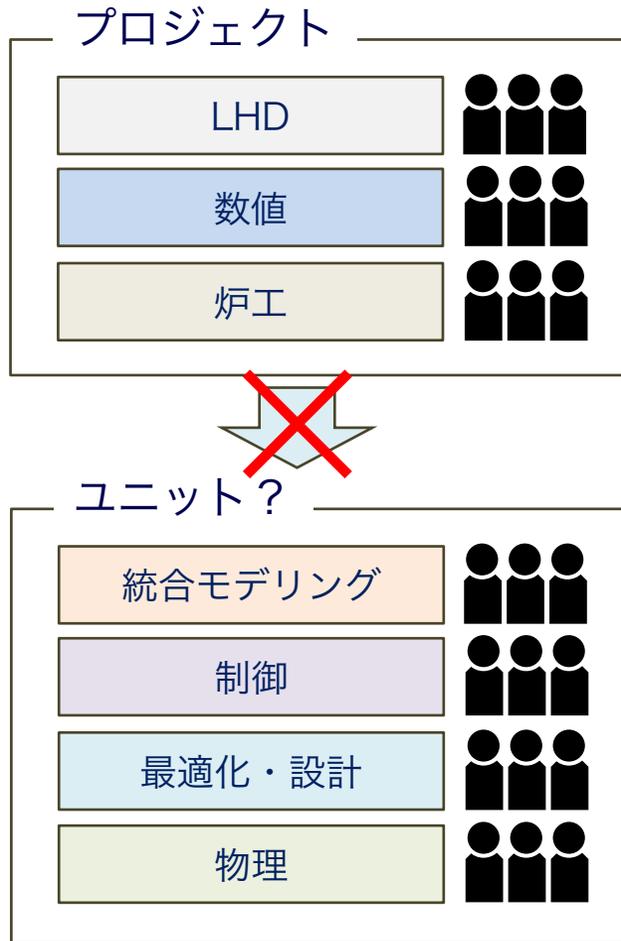
学術性のみならず、「現段階で我々に描くことのできるベストな核融合炉の具体像」を説得力を持って提示する能力を有するユニットになればと考えています。若輩者の提案ではありますが、ご議論いただけますと幸いです。

* N. Perunov, R. A. Marsland, J. L. England, *Physical Review X* **6** 012036 (2016)



<https://sealevel.jpl.nasa.gov>

有機的な体制で



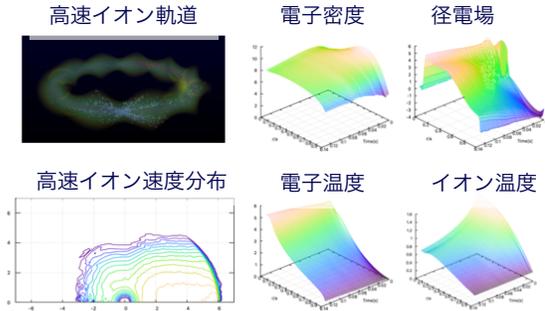
“高自律性解放系の統合的記述と制御・機能性設計” 研究テーマの具体的例など (取り組んできた/進行中のテーマが主)

提案者：山口裕之
核融合理論シミュレーション研究系
統合シミュレーション研究部門
ver. 2021.06.08

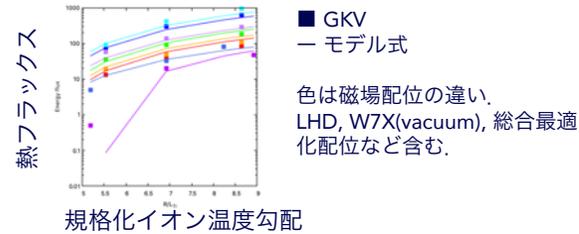
統合モデリング

粒子供給・加熱・運動量注入・輸送により温度・密度・流れ等の分布が変化し、それらが平衡・安定性、また、輸送・加熱を変化させる。さらに壁の状態を反映して、炉心プラズマの長時間挙動が決定される。アルファ粒子による自己加熱が支配的、かつTe>Tiとなる核燃焼プラズマで何が起るのか、その予測、制御手法・運転シナリオ検討、また設計において、自己無撞着な統合シミュレーションは必須となっている。

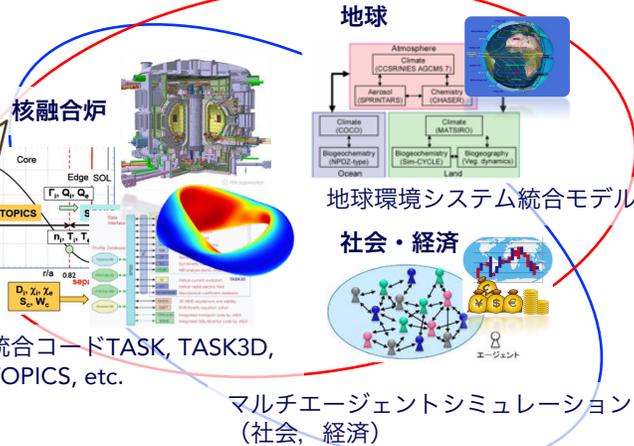
運動論的高エネルギー粒子と電場・輸送の結合 (GNET-TD + DGN/LHD) 中性粒子計算・周辺フラックスモデルにより密度を自由境界として計算。



ITG乱流熱フラックスの磁場配位依存性の検討

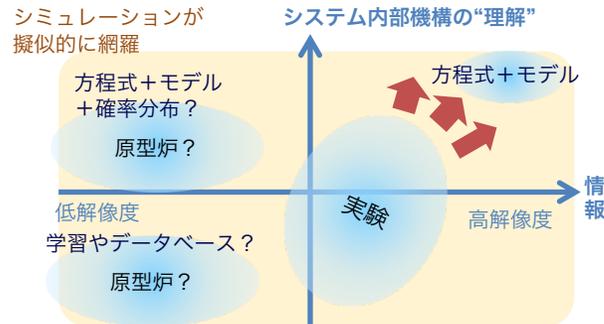


使用した説明変数 (R_0/L_n , T_e/T_i 等は固定) :
 ・磁気面内ドリフト ($\sim \kappa_n |\nabla \rho| / B$) の良/悪曲率領域平均値
 ・帯状流の発散 ($\sim \nabla \cdot \mathbf{V}_{ExB}$) の磁気面平均値
 ・磁気シア



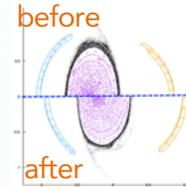
制御

実験装置に限らず、数値シミュレーションも対象として、低解像度の情報に基づく複雑系の予測・制御に関する研究を行う。

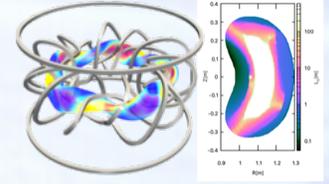


最適化・機能性設計

磁場配位・コイル形状の最適化を通じた機能発現、高性能化、具体形を示す。



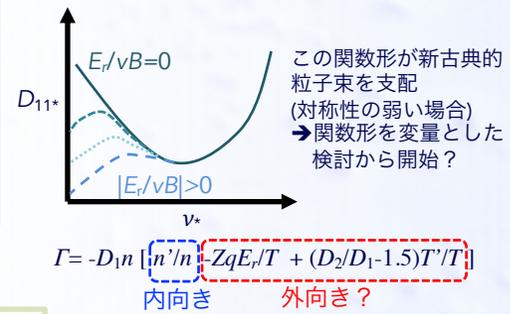
B-spline曲線を用いたヘリカルコイルの最適化による、ヘリオトロピック配位におけるプラケットスペース増大。



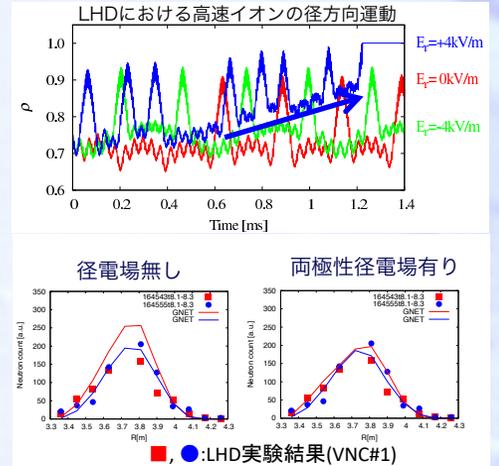
ヘリカルコイルによる準ヘリカル対称配位とダイバタレック構造

乱流抑制/高磁場化等によって閉じ込めを改善できたとしても、He灰、不純物の炉心プラズマへの蓄積による出力低下という課題は残る。磁場配位の自由度を活かした炉心プラズマの機能性設計 (=従来の意味での高性能化)が必要。

He灰の定期的吐き出しは可能か?



アルファ粒子熱化位置の制御は可能か?



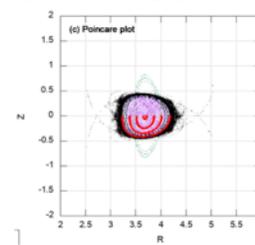
物理・検証/実証

要素現象の個別的な研究、実験を通じた検証、実証

- ・対称性、粘性とフロー、閉じ込めの関係
- ・非等方分布と輸送、波動
- ・位相空間と場の発展
- ・etc...

実験/新配位の提案→原理実証

例) LHDコイル電流の乱流輸送に対する最適化



例) 総合最適化配位 CONCEPT: Configuration Optimized for Neo-Classical, Energetic Particle, and Turbulence

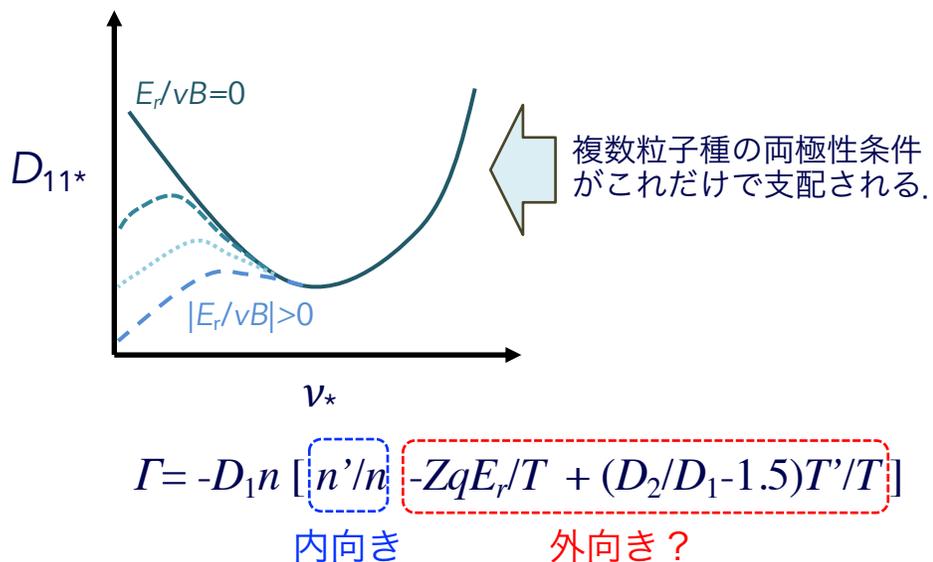


アップデートされた核融合炉像を常に提示

機能的設計の考え方の例： He²⁺の選択的排出

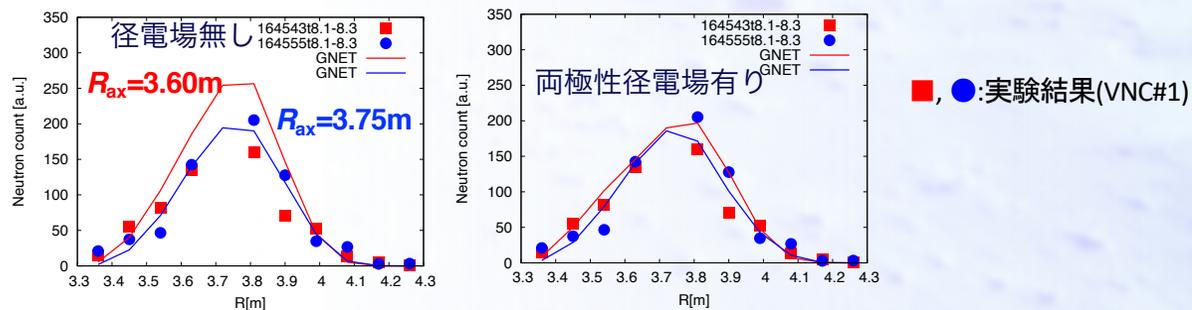
新古典輸送の枠組みで定常的な吐き出しは可能か

局所・mono-energeticな近似においては、新古典輸送は拡散係数 $D_{11*} = D_{11}*(v_*, E_r/vB)$ で特徴付けられる（対称性の高い配位や、強いトルクの存在下では運動量保存を含む枠組みで考える必要がある）。例えば D_{11*} の関数形そのものを変量として、両極性条件においてHeだけが外向きフラックスとhollowな密度分布を保つような条件の存在を調べることは可能なのではないか？

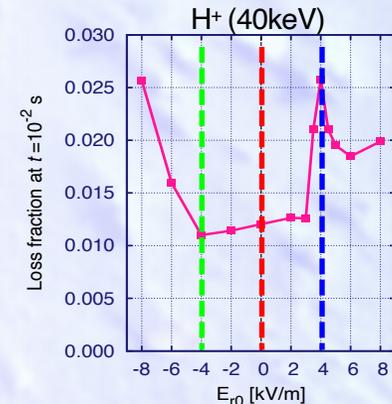
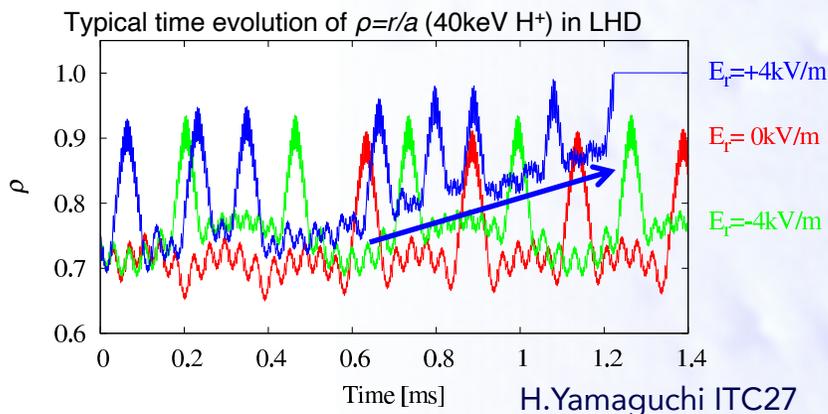


アルファ粒子の熱化位置の確率分布を周辺付近にピークさせることは可能か

LHDにおける径電場による高速イオン(~60keV)閉じ込めの変化



高速イオンの径方向ドリフト成分を平均化する役割を果たすヘリカルな歳差運動とExB回転の重ね合わせの結果、特定のエネルギーで永年的な径方向運動が発生
→利用できる？ そのような条件にアクセスできる配位の設計、最適化



参考：アンケートに書いたこと

回答1.

他分野には無い核融合（炉）研究の特徴の一つは、強い非線形性を示し、かつ多要素からなる複雑なシステムを「いかに制御するか」を本質的な課題・目標として含んでいる点にあると考える。本研究テーマでは、予算やマシンタイムなどの物理的制約に縛られる実験装置に限らず、数値シミュレーションまで対象を広げて、予測や制御、情報に関する研究を行う。例として、統合コードを一つの自己完結した物理系と見立て、制御対象として扱う。シミュレーション結果を誤差を含む時空間的に限られた計測データに変換し、計測データおよび過去の履歴（入力に対して系がどのように応答したか含め）から、核融合出力の制御、突発現象の回避などを実現するための制御研究を実施する。“いかにして「情報」から「秩序」が生み出されるのか”という、生物学・熱力学的の普遍的な問いを核心に据える。

回答2.

非軸対称磁場配位においては高エネルギー粒子の軌道幅が大きくなり、局所的な取り扱いができないことが明らかとなっている。高エネルギー粒子に関して大域的に取り扱うシミュレーションコードを中核とし、新古典輸送、平衡、波動伝播、安定性解析等のコードを結合し、プラズマ全体の挙動を記述する自己完結したシミュレーション体系を構築する。実験データとの比較により高エネルギー粒子分布、乱流輸送、MHD不安定性、粒子バランス等に関するバリデーションおよびモデリングを行い、核融合炉の運転制御システム開発やシナリオ策定のための統合コード完成を目指す。特に、アルファ粒子閉じ込め、TAEとの相互作用、He灰の排気に関する最適化等を重要課題と位置付ける。