

HPC利用による光量子・プラズマ・流体科学の開拓

ITERプラズマに向けた 核燃焼統合シミュレーション

福山 淳

京都大学 大学院工学研究科

ITER (国際熱核融合実験炉)

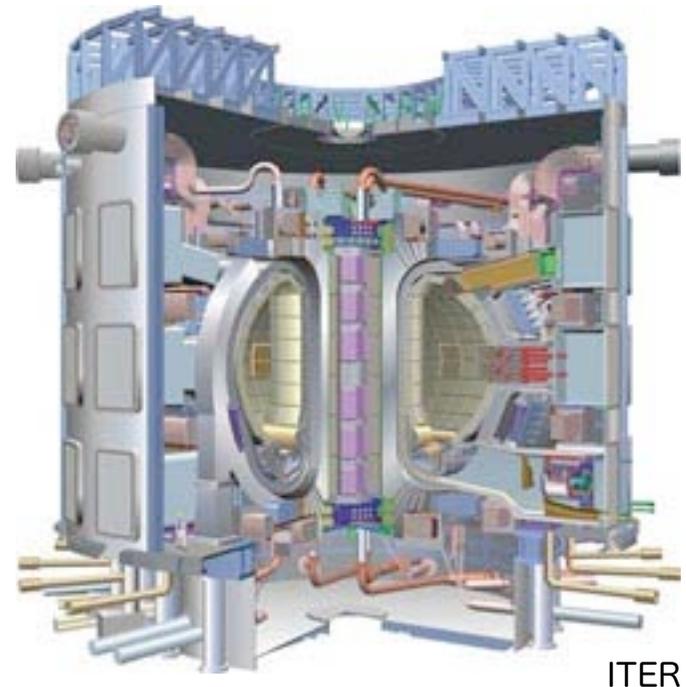


EU, 日本, ロシア, 米国,
中国, 韓国, インドによる
国際プロジェクト



2006年11月 ITER協定調印

- トカマク型磁場閉じ込め核融合実験炉
- ドーナツ型プラズマ
- プラズマ中の電流で閉じ込め維持
- 核融合出力 500 MW
- 運転時間 500 s 以上

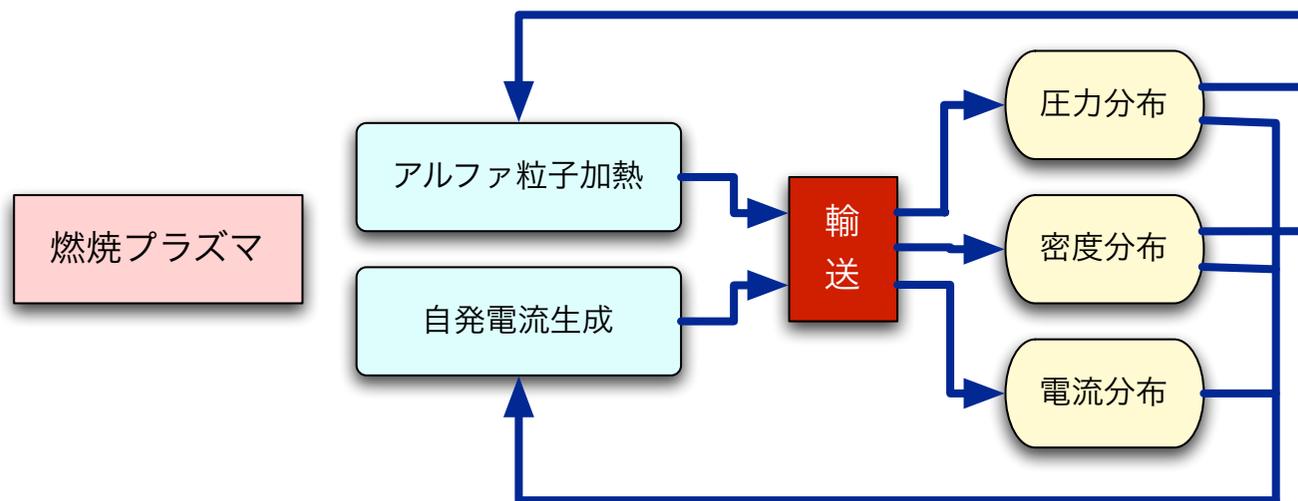


2007年 建設開始 (南仏 Cadarache)
2016年 運転開始予定

核燃焼プラズマの高自律性

核融合反応が持続的に維持される核燃焼プラズマ

- 核融合反応 → α 粒子加熱が外からの加熱を上回る
- プラズマ電流 → 自発電流が外から駆動される電流を上回る



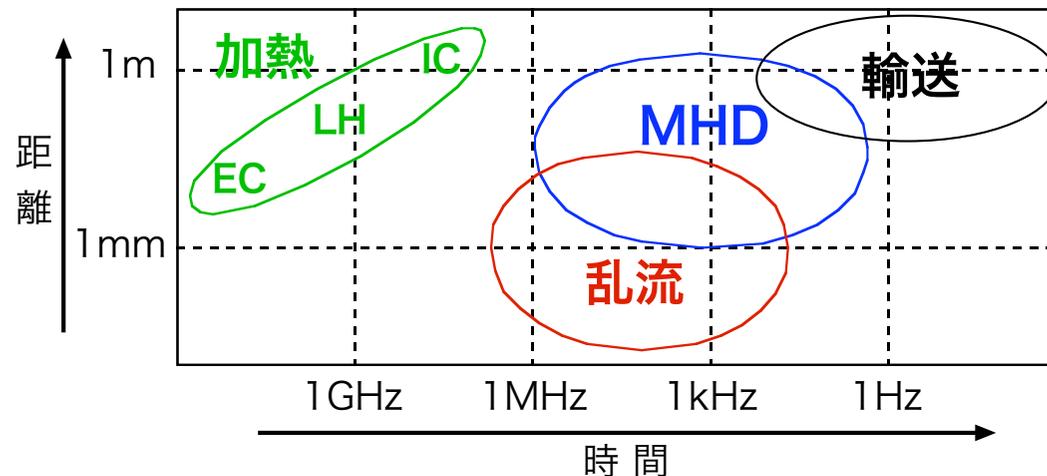
- α 粒子加熱や自発電流は、圧力や電流の空間分布に敏感
- 圧力や電流の空間分布は、加熱パワーと駆動電流に依存

高い自律性：精密な制御が必要

核燃焼プラズマシミュレーション

- ▶ 核燃焼プラズマの予測・解明
- ▶ ITERの目的達成・性能向上に向けた運転シナリオ最適化
- ▶ 原型炉・実用炉開発に向けたコード戦略
- ▶ 基礎科学としてのチャレンジ

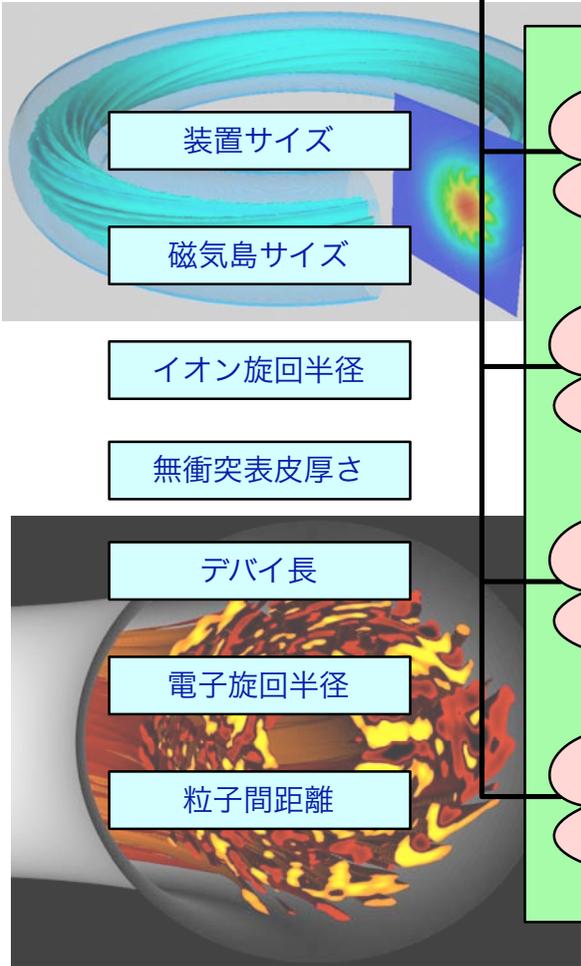
時間・空間スケールの異なるさまざまな現象の複合体



多要素統合シミュレーション
多階層連結シミュレーション

多階層連結・多要素結合シミュレーション

多階層連結シミュレーション



装置サイズ

磁気島サイズ

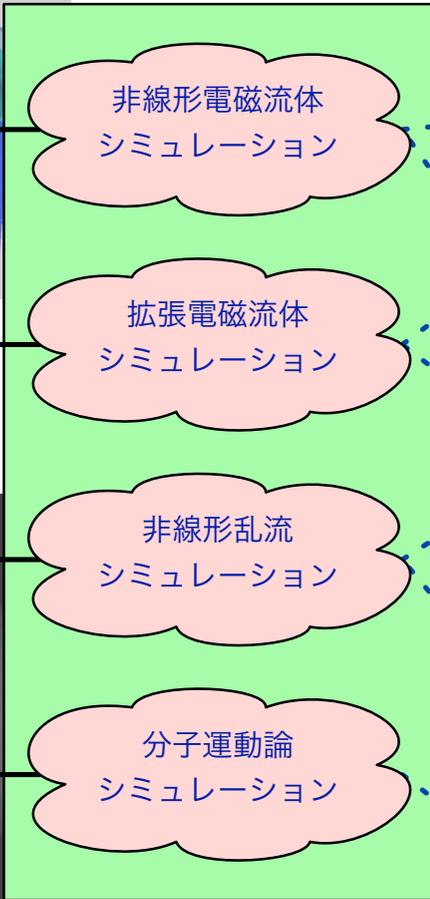
イオン回旋半径

無衝突表皮厚さ

デバイ長

電子回旋半径

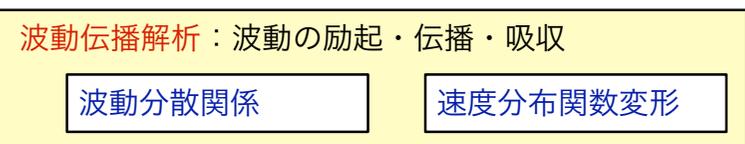
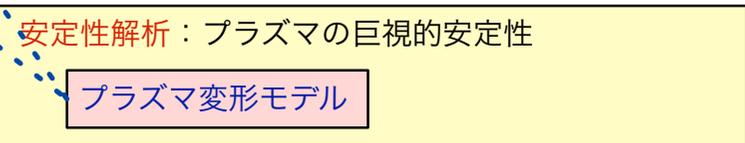
粒子間距離



多要素統合シミュレーション

プラズマ計測モデル

プラズマ制御モデル

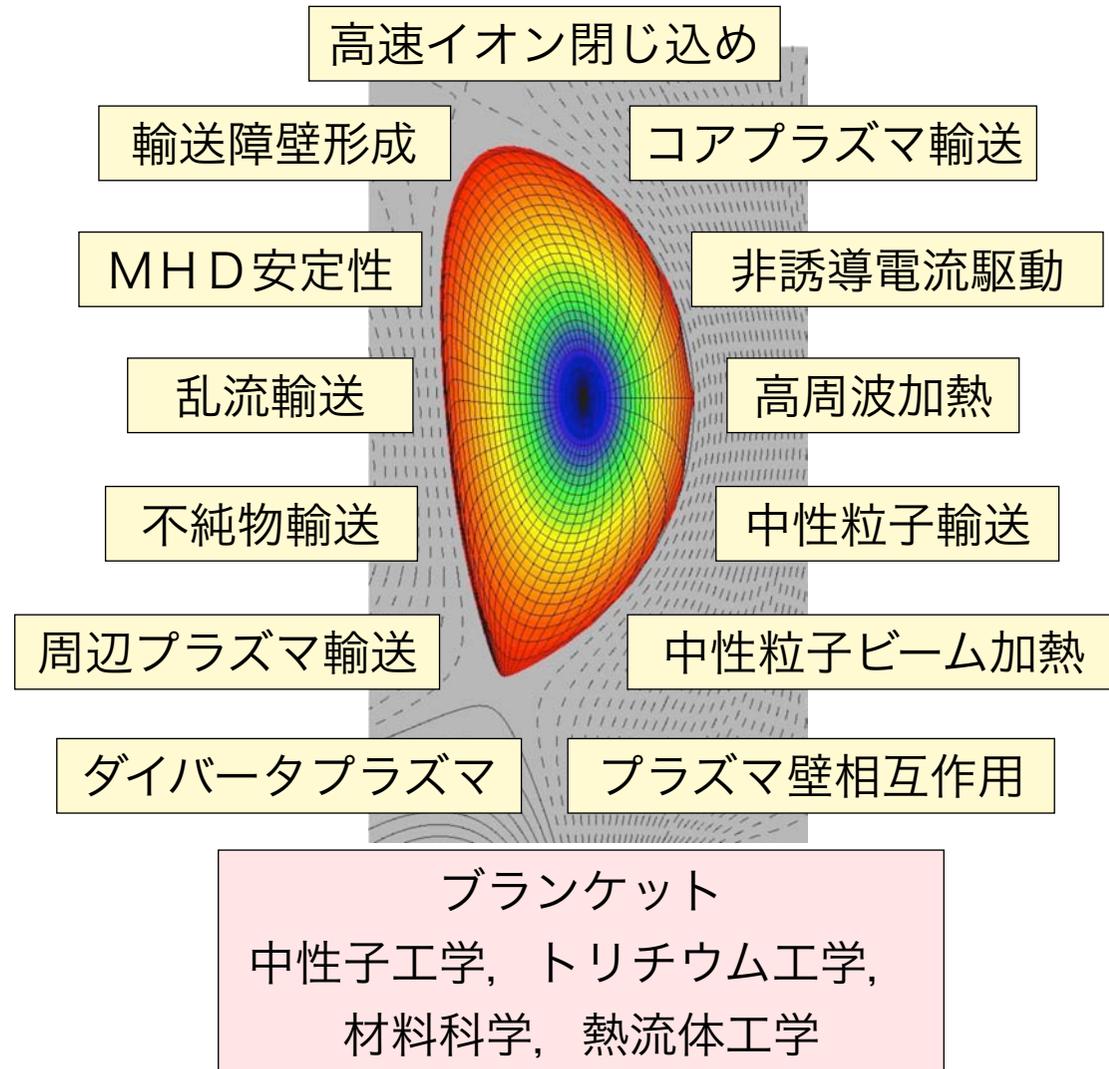


多要素統合シミュレーション

閉じ込め高性能化
運転長時間化
運転シナリオ最適化
核融合炉開発の基盤



炉心プラズマ全体の
放電時間全体にわたる
自己完結的な
時間発展シミュレーション



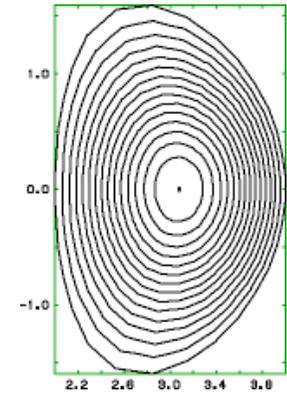
トカマク統合コード：TASK

- ▶ トカマクの時間発展シミュレーション
 - モジュール構造の統合シミュレーション
 - 様々な加熱・電流駆動機構の実装
 - 高い移植性（UNIX系），オープンソース，CVS
 - MPI ライブラリを用いた並列分散処理
 - 実験データベースの利用
 - ヘリカル系への拡張
- ▶ 核燃焼プラズマ統合コード構想のコアコード
 - 最小限の統合コード：モジュールは交換可能
 - インターフェースの標準化：API実装の検証
 - 利用者の拡大：UIの共通化，マニュアル等の整備

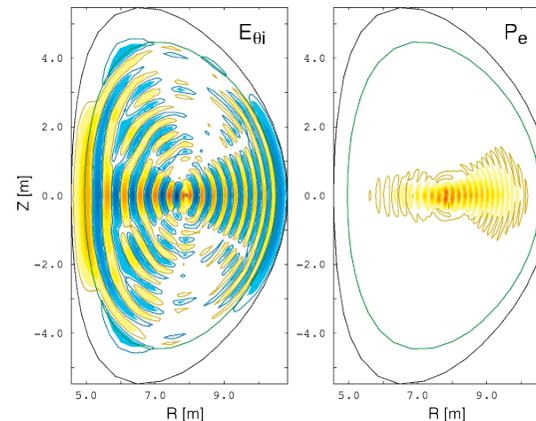
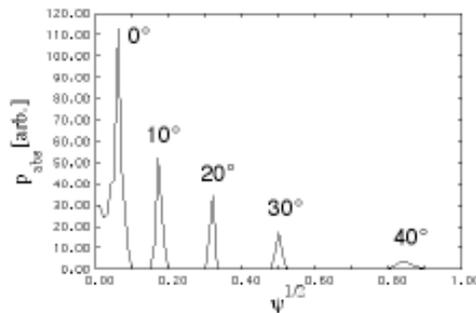
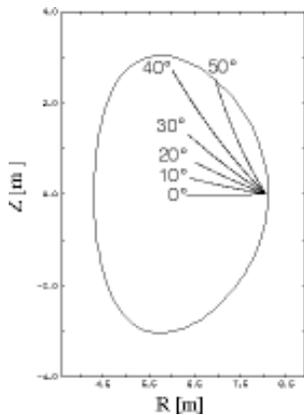
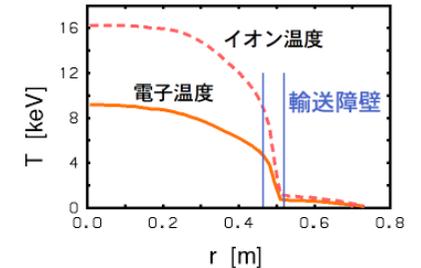
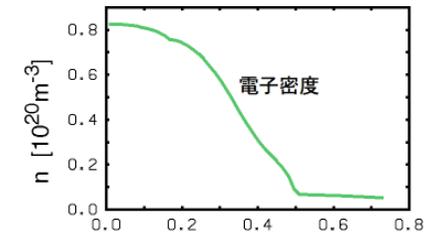
TASK の構成

機能毎のモジュール構成

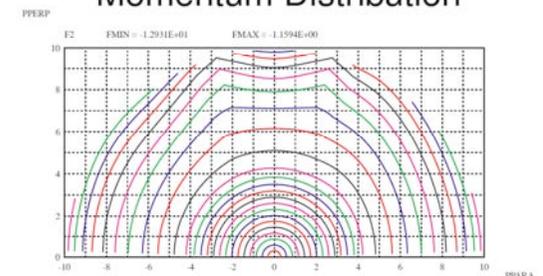
	解析	機能
EQ	2次元MHD平衡	プラズマ形状
TR	1次元径方向輸送	密度・温度・電流分布
WR	光線追跡法	波動伝播 (短波長)
WM	波動方程式	波動伝播 (長波長)
FP	3次元FP方程式	粒子速度分布関数
DP	波動分散関係	波動伝播特性
PL	データインターフェース	座標変換, 実験データ



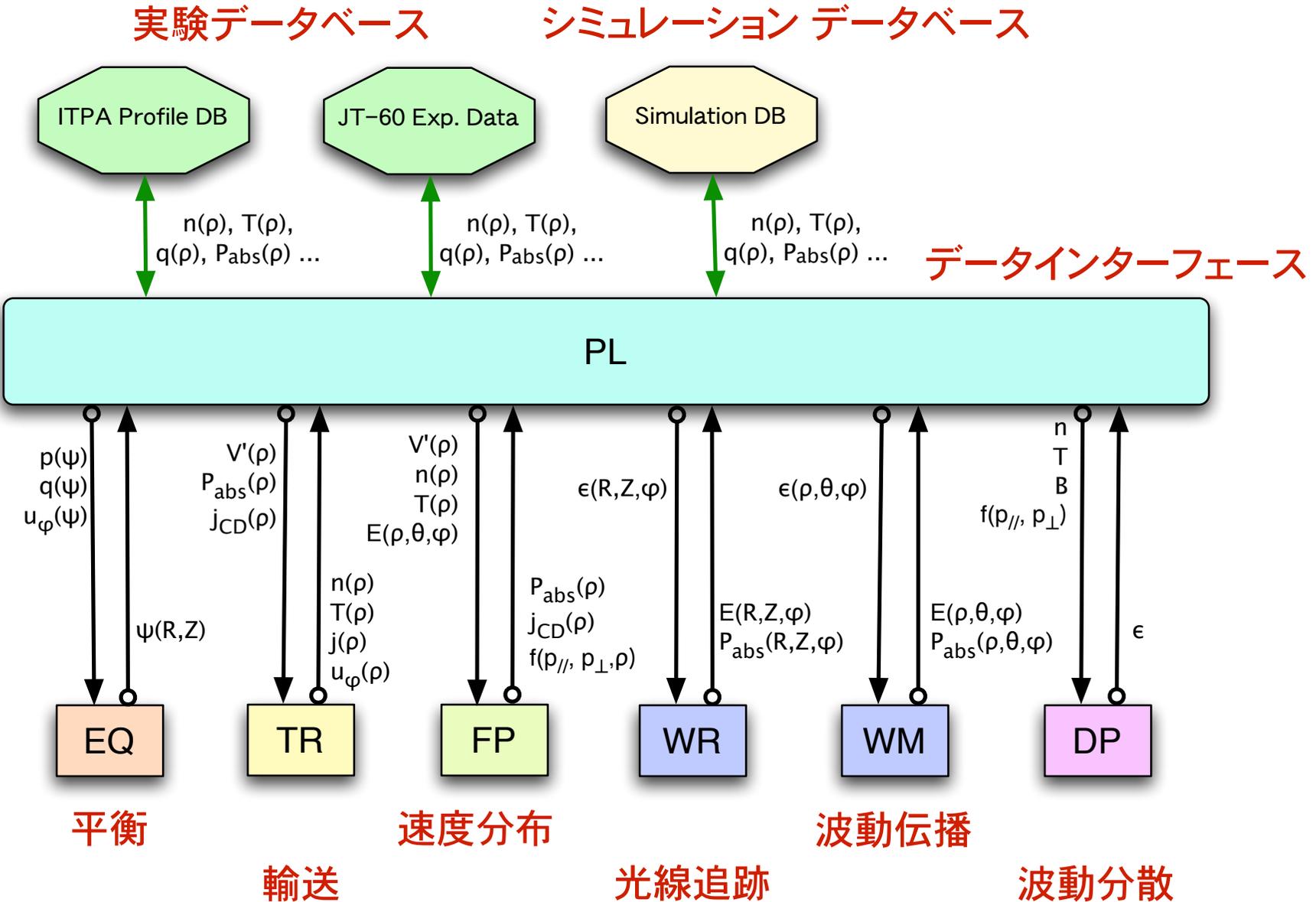
輸送シミュレーション結果



Momentum Distribution



TASK のモジュール構造



モジュール間連携機構：PL

▶ データ交換

- 交換データの標準化
 - データ内容, データ構造
- データ交換インターフェースの開発
 - データ作成, データ取得
 - データ補間, 座標変換
 - 時系列データの保存
 - ファイル入出力：スクリプト処理
 - 実験データベースとの入出力

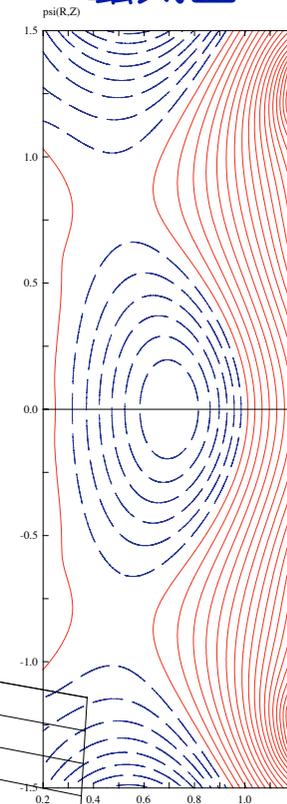
▶ 実行制御

- 初期化, パラメータ読込, 終了
- 初期分布設定, 実行
- 再実行処理

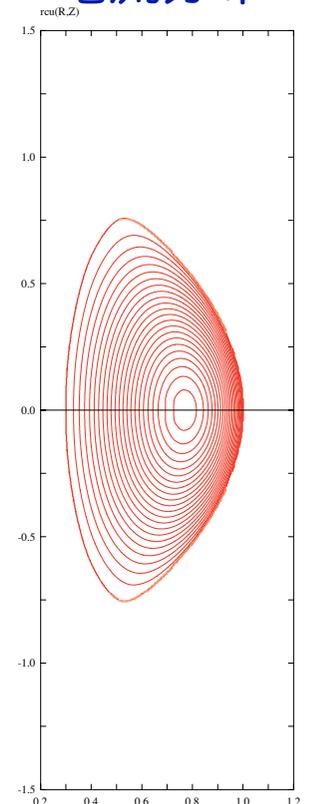
TOPICS/EQU との結合

- ▶ 原子力機構が開発している統合コード TOPICS から自由境界平衡モジュール EQU を移植
- ▶ 九州大学応用力学研究所が建設中の QUEST トカマクの解析に利用

磁気面

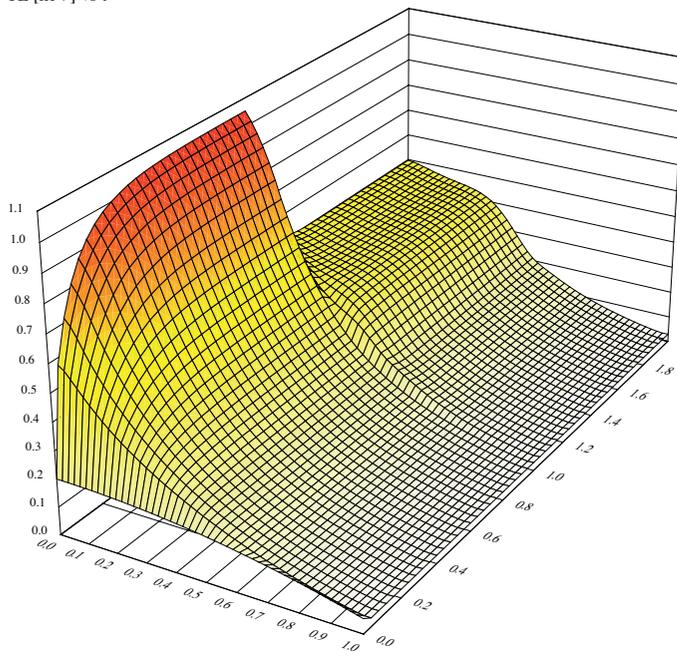


電流分布



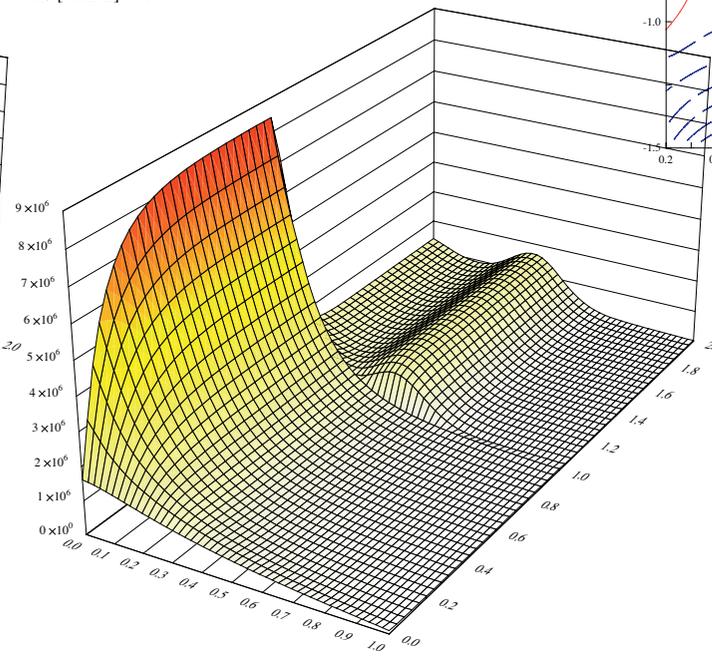
温度分布の時間発展

TE [keV] vs t



電流分布の時間発展

AJ [A/m^2] vs t



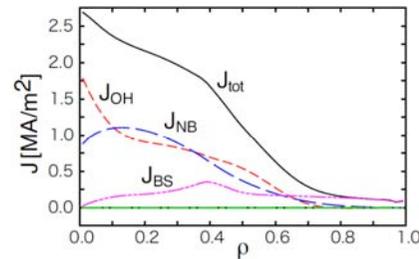
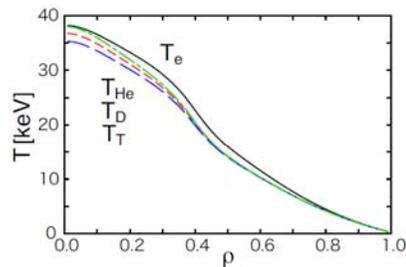
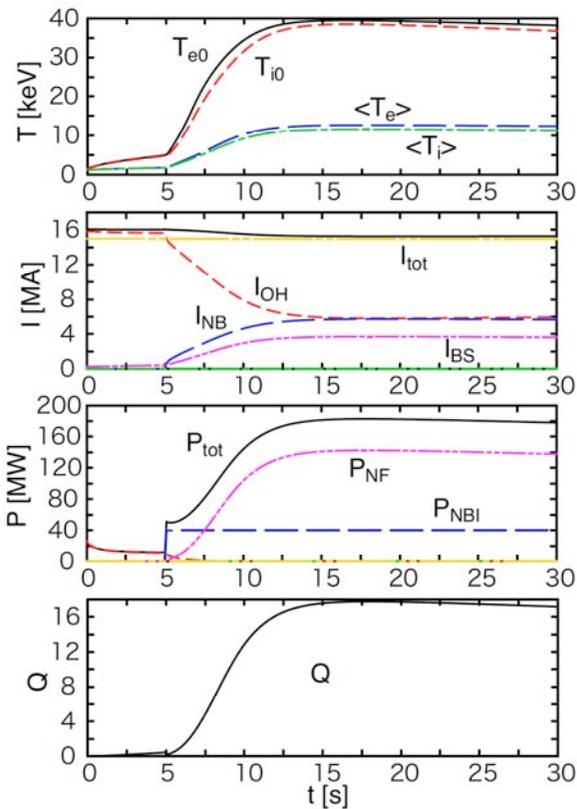
ITER 運転シナリオ シミュレーション

Inductive operation (15MA)

CDBM05

$$\beta_N = 2.63$$

$$\tau_E = 3.1 \text{ s}$$



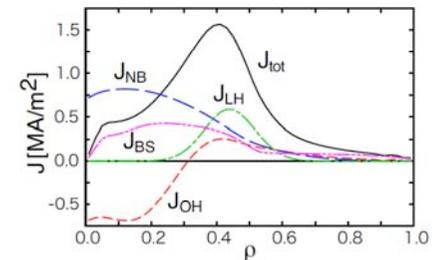
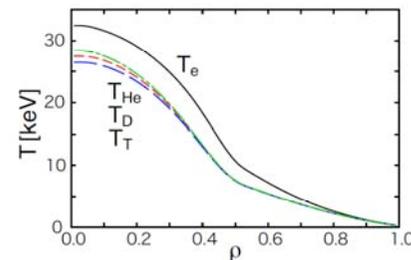
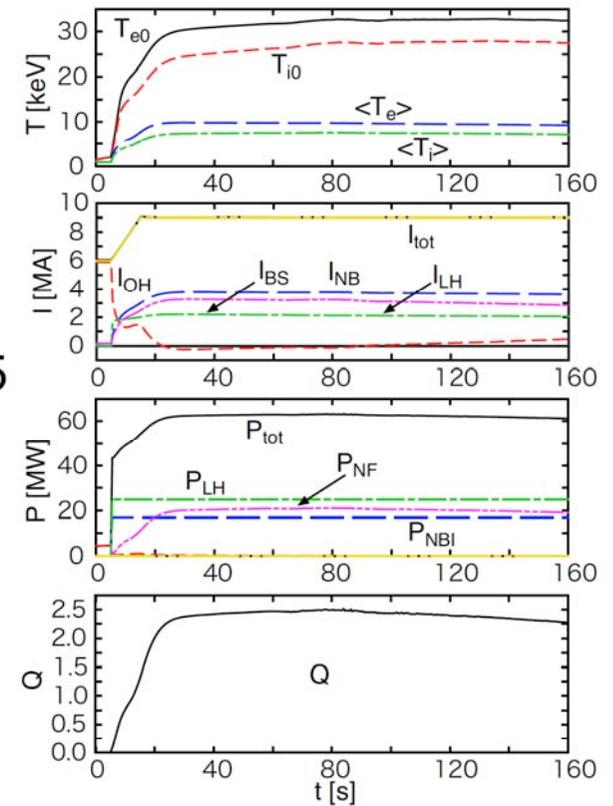
$$P_{NB} = 40 \text{ MW}$$

Steady-state operation (9MA)

CDBM05

$$\beta_N = 1.55$$

$$\tau_E = 3.2 \text{ s}$$



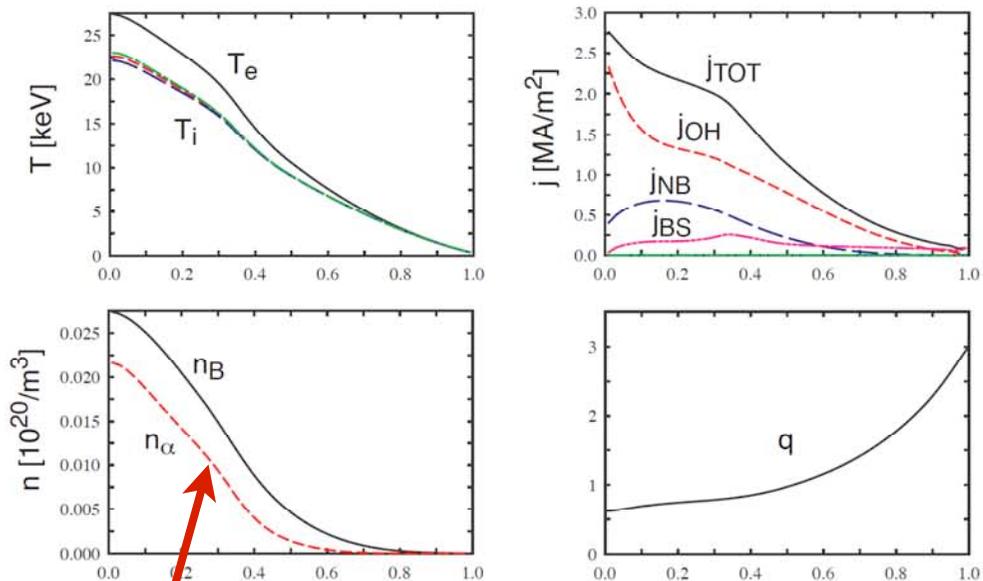
$$P_{NB} = 17 \text{ MW}$$

$$P_{LH} = 25 \text{ MW}$$

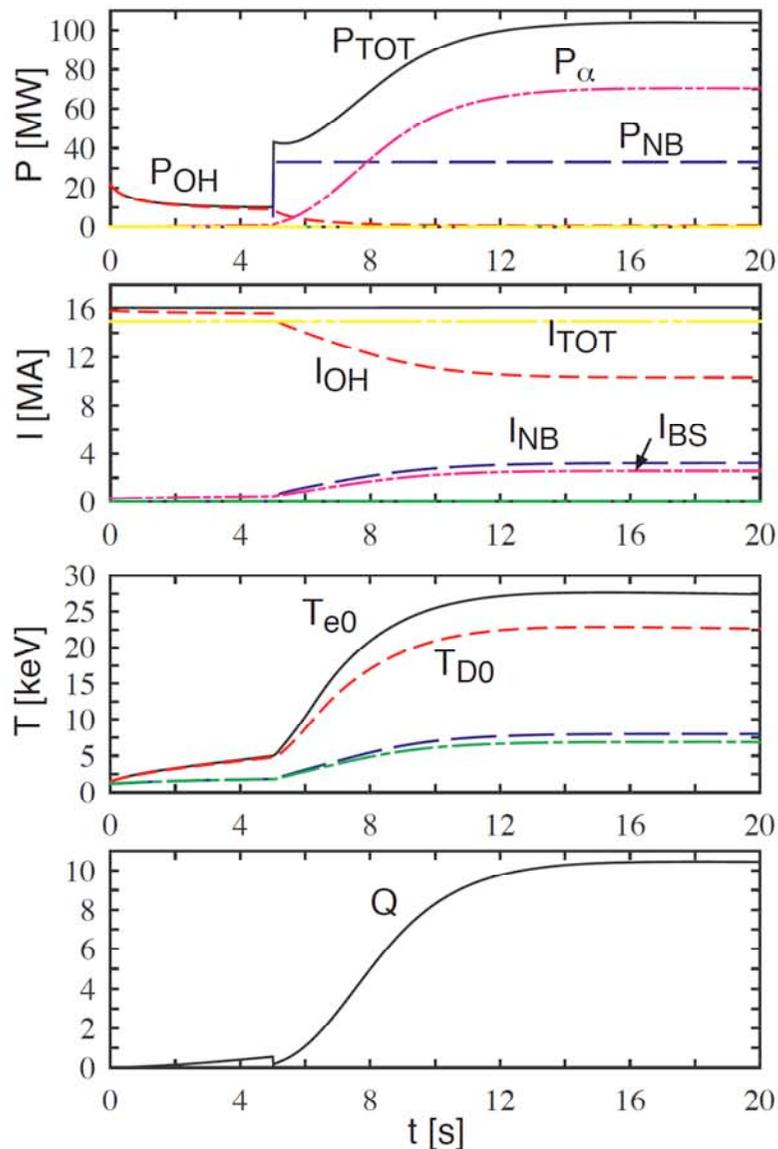
ITERにおける α 粒子励起不安定性の解析 (1)

EQ + TR + DP + WM

- $I_p = 15 \text{ MA}$
- $P_{\text{NB}} = 33 \text{ MW}$
- $\beta_N = 1.3$



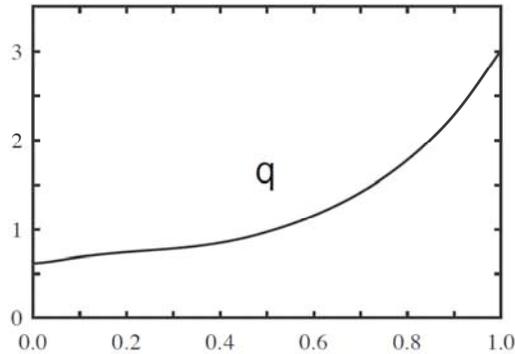
α 粒子密度分布



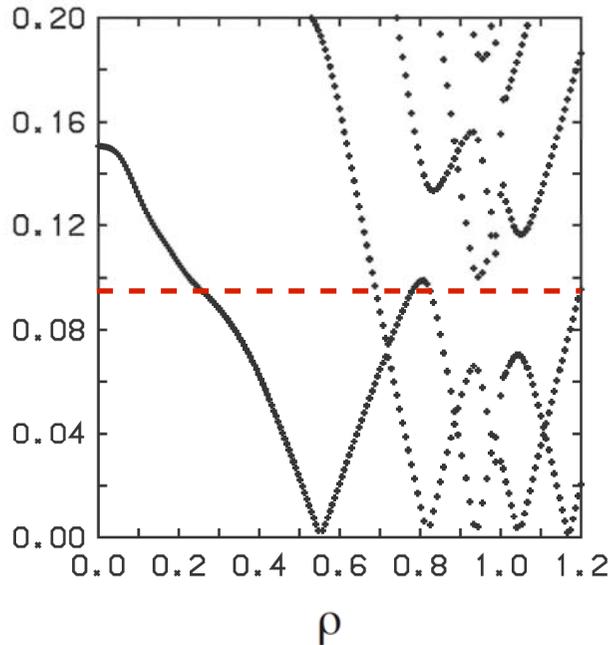
ITERにおける α 粒子励起不安定性の解析 (2)

アルヴェン固有モードの線形安定性解析

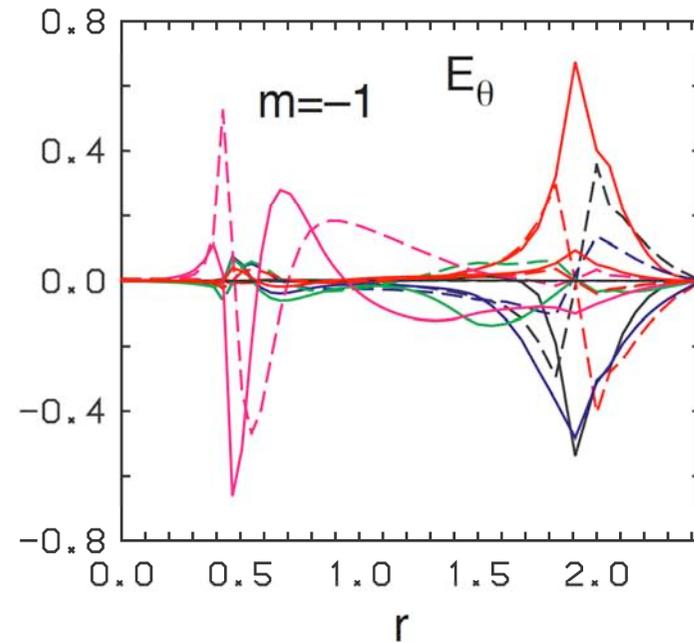
q profile



Alfvén Continuum



Mode structure ($n = 1$)

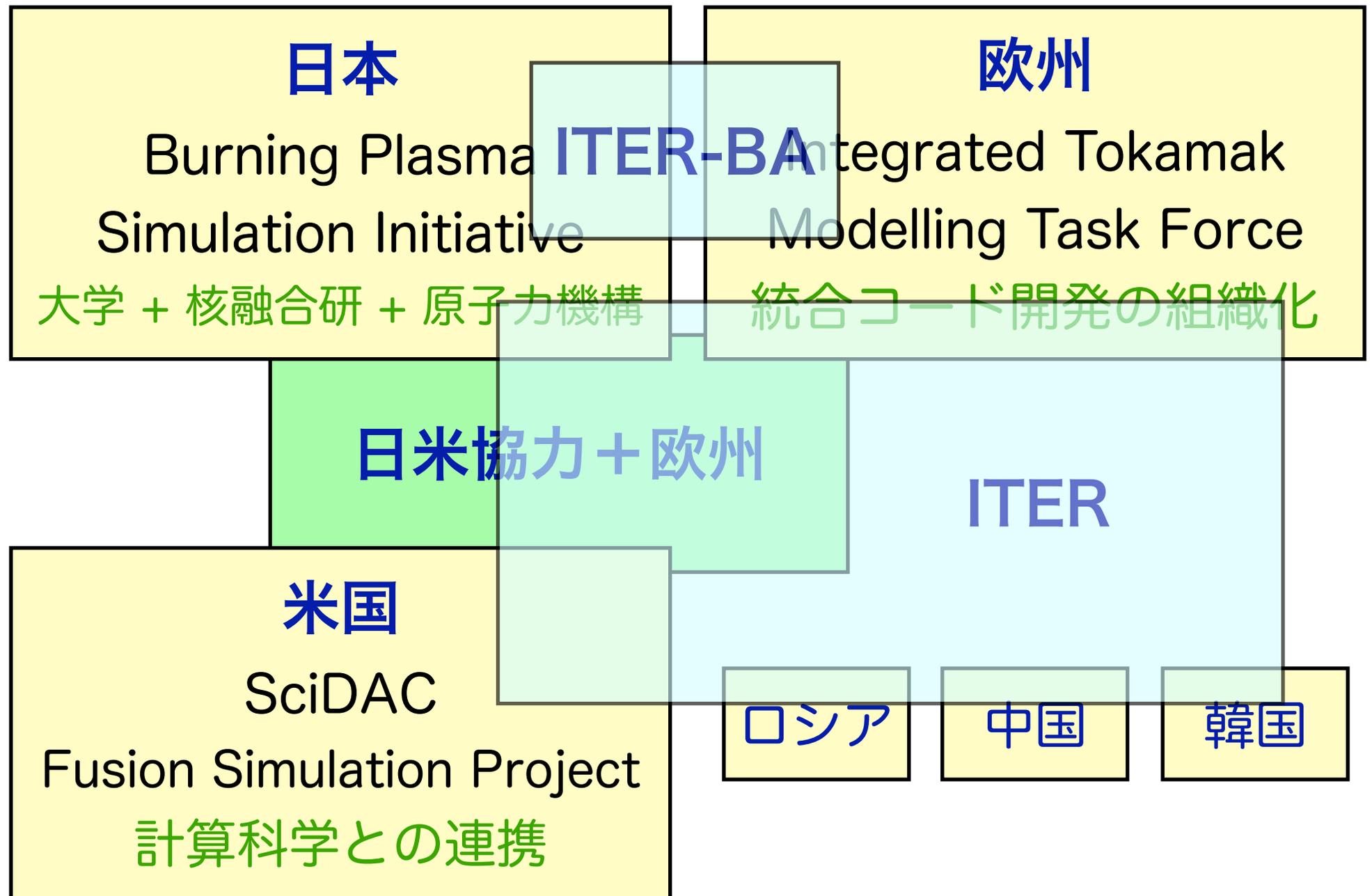


$$f_r = 95.95 \text{ kHz}$$

$$f_i = -1.95 \text{ kHz}$$

Stabilization due to $q = 1$

統合シミュレーションの国際連携



まとめ

- ▶ ITER（国際熱核融合実験炉）が建設に向けて動き始め、核燃焼プラズマを記述するシミュレーションの開発が急務となっている。
- ▶ 核燃焼プラズマシミュレーションにむけて、基本原理にもとづく多階層連結シミュレーションと総合的理解をめざす多要素統合シミュレーションの二つのアプローチによる研究が進められている。
- ▶ 多要素統合シミュレーションのコアコードとして、統合モデリングコード TASK の開発を進めている。コンポーネント間のデータ交換および実行制御の標準化を実装し、ITER プラズマの予測シミュレーションが実現しつつある。
- ▶ 統合コード開発に向けて国内連携・国際連携が重要。
- ▶ 今後の発展には計算科学との緊密な協力が必要