

核融合プラズマ分野 特定研究

核燃焼プラズマ統合コード計画

福山 淳^A, 矢木雅敏^B

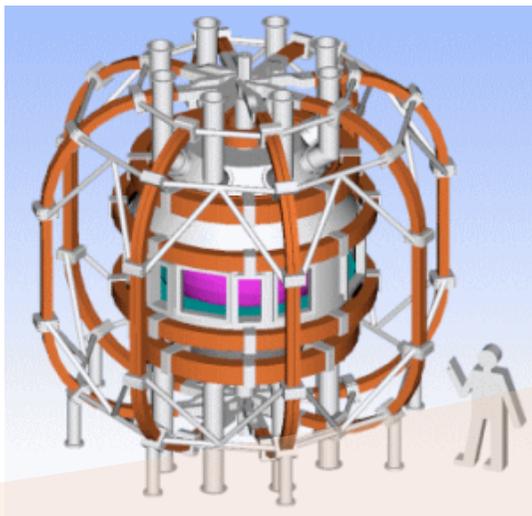
^A京都大学工学研究科

^B九州大学応用力学研究所

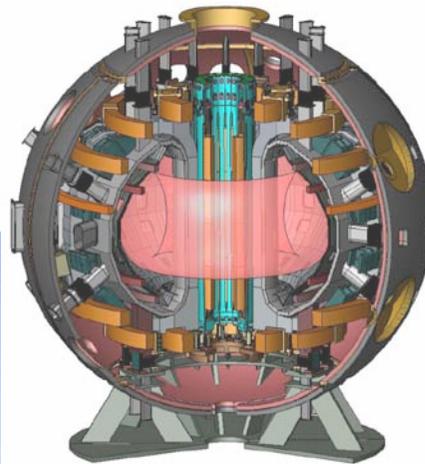
核燃焼プラズマへ

- ▶ 核融合反応が持続的に維持されるプラズマ
 - 高い自律性（圧力，電流，密度）
 - 高エネルギー粒子の存在
 - 高熱流束の流出

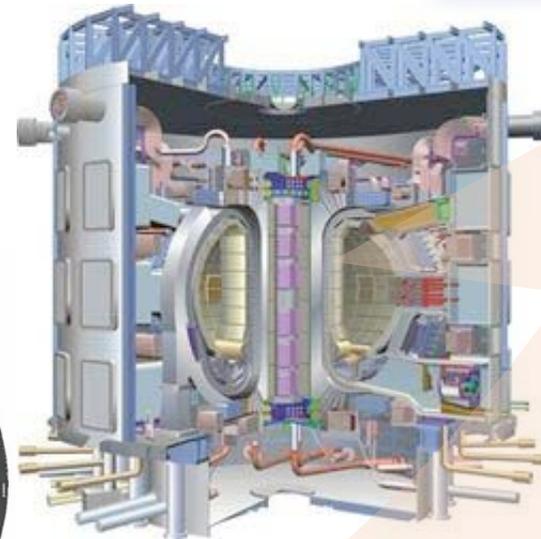
DEMO



QUEST



JT-60SA

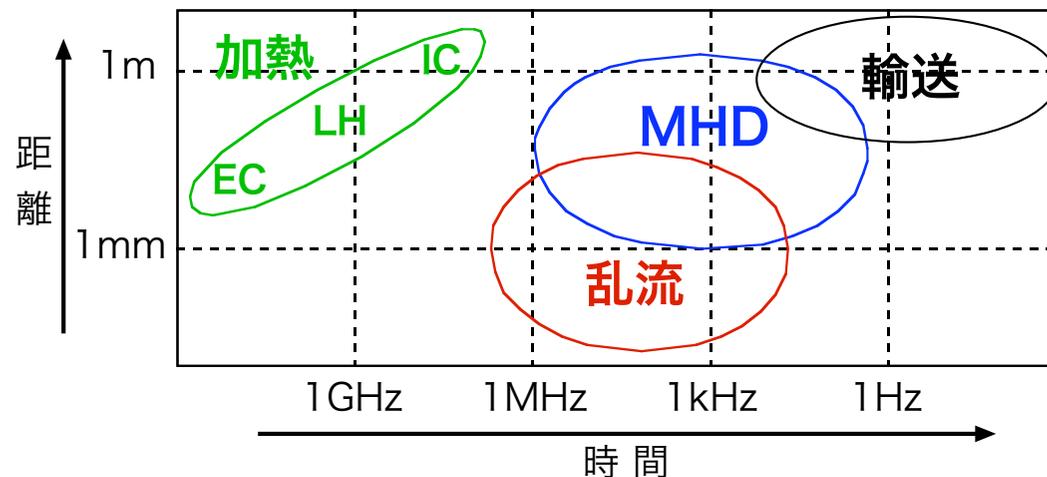


ITER

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

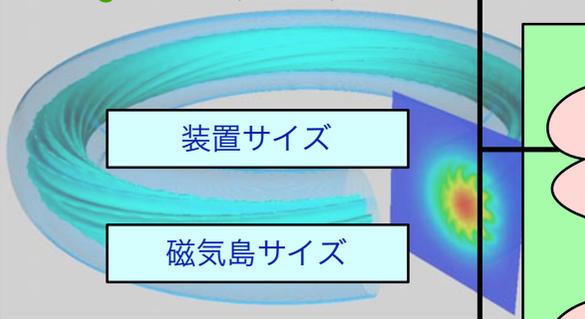


多要素統合シミュレーション
多階層連結シミュレーション

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

Y. Kagei et al (JAEA)

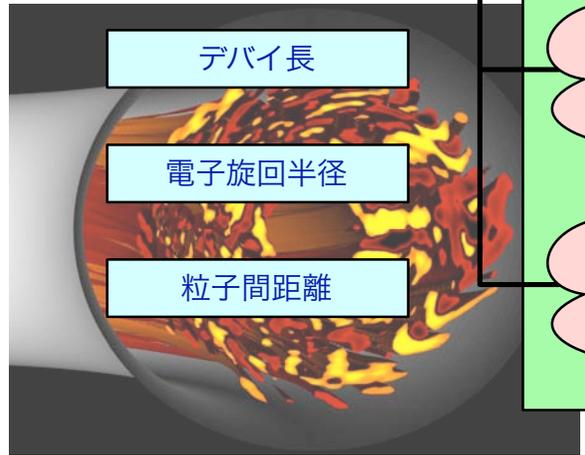


装置サイズ

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

Y. Idomura et al (JAEA)

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

平衡解析：プラズマの形状

磁気島形成モデル

非等方圧力平衡

輸送解析：コアプラズマの密度・温度

新古典輸送モデル

中性粒子輸送

乱流輸送モデル

不純物輸送

高速イオン閉じ込め

安定性解析：プラズマの巨視的安定性

プラズマ変形モデル

波動伝播解析：波動の励起・伝播・吸収

波動分散関係

速度分布関数変形

周辺プラズマ解析：周辺プラズマの密度・温度

乱流輸送モデル

中性粒子輸送

プラズマ壁相互作用

不純物輸送

輻射輸送

非線形電磁流体
シミュレーション

拡張電磁流体
シミュレーション

非線形乱流
シミュレーション

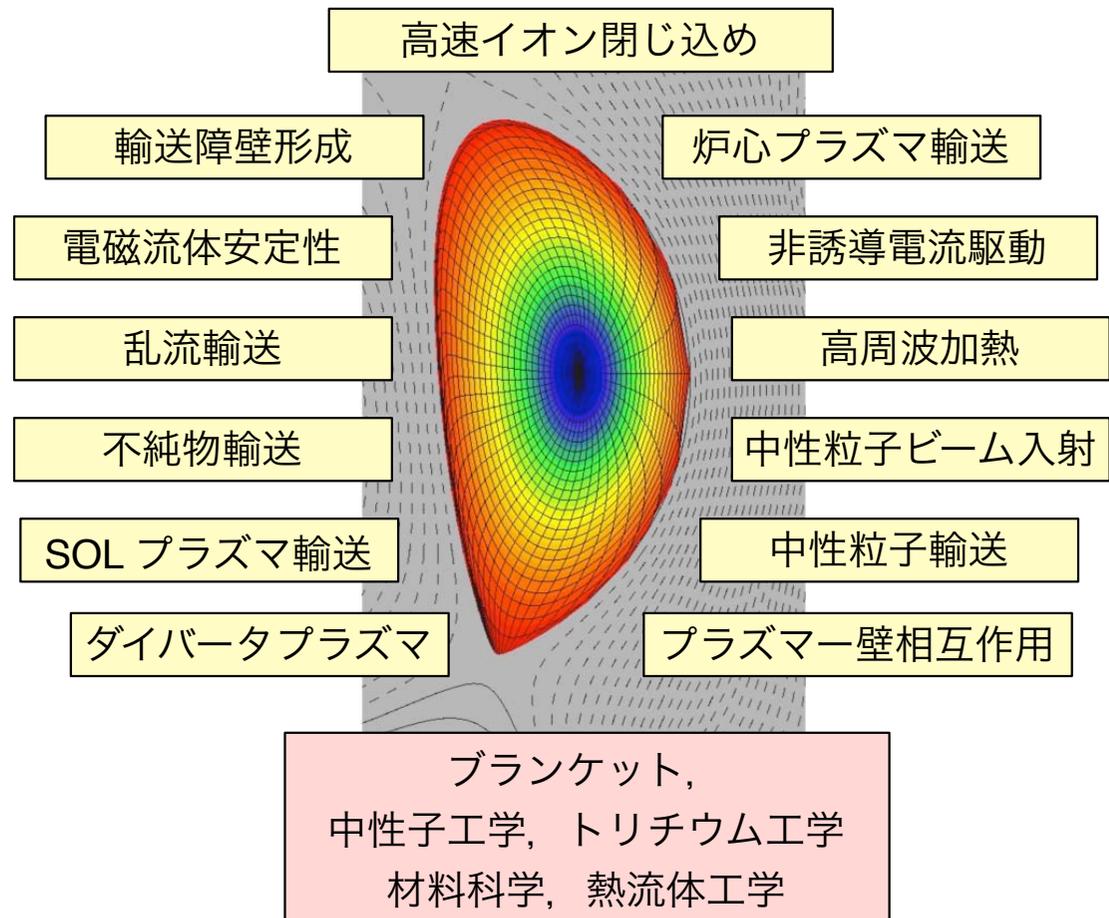
分子運動論
シミュレーション

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



ITER・DEMOに向けたシミュレーション研究

▶ ITER:

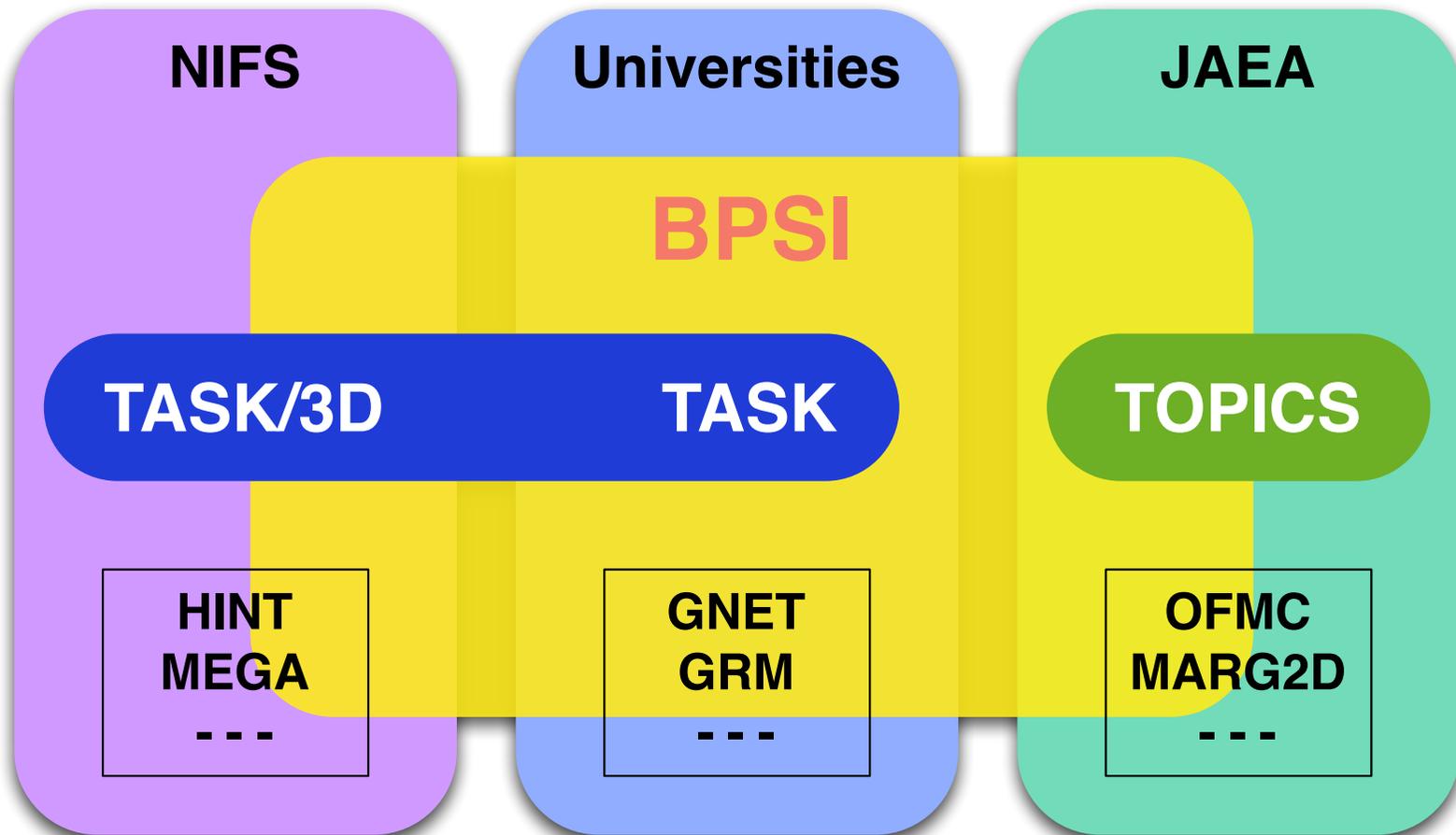
▶ Broader Approach: 2007年6月 日欧協定発効

- 核融合エネルギー研究におけるより広範な取り組み
- サテライト トカマク (JT-60SA)
- 国際核融合材料照射施設 工学実証・工学設計活動
- 国際核融合エネルギー研究センター (IFERC)
- 動力用原型炉設計開発研究調整センター
- 計算機シミュレーションセンター (CSC)
 - 核融合プラズマに関するデータ解析
 - ITER 運転シナリオの作成
 - ITER プラズマの性能予測
 - 原型炉設計に貢献する大規模シミュレーション
- ITER 遠隔実験センター

2012年の CSC 運用開始に向けたコード開発が必要

核燃焼プラズマ統合コード構想 BPSI

大学，核融合研，原子力機構等の研究協力（2002年より）
日米協力，日韓協力，国際トカマク物理活動等による国際協力



核燃焼プラズマ統合コード構想 BPSI

- 統合コード：コード間連携の枠組み
 - コアコードの開発・整備・公開
 - 既存解析コードとの連携：インターフェース仕様の共通化
 - 実験データベースとの連携：ITPA, JT-60, LHD, 中小型装置
- 新しい物理モデル：階層連結型物理モデル
 - 時間スケールの異なる現象の間の相互作用
 - 異なる空間領域の間の相互作用：コア \leftrightarrow 周辺プラズマ
- 新しい計算手法：ネットワーク分散並列処理

応用力学研究所 研究集会
核燃焼プラズマ統合コード研究会
2003年～

特定研究 核燃焼プラズマ統合コード計画

5つのサブテーマで構成

研究テーマ

- ▶ プラズマ輸送理論
- ▶ 乱流シミュレーション
- ▶ 拡張MHDシミュレーション
- ▶ 周辺プラズマモデリング
- ▶ 輸送・加熱電流駆動シミュレーション

研究代表者

伊藤（核融合研）
矢木（九大応力研）
徳田（原子力機構）
滝塚（原子力機構）
福山（京大）

プラズマ輸送理論

トロイダルプラズマにおける
乱流輸送と構造形成の理論基盤構築

帯状流を伴う乱流による輸送係数

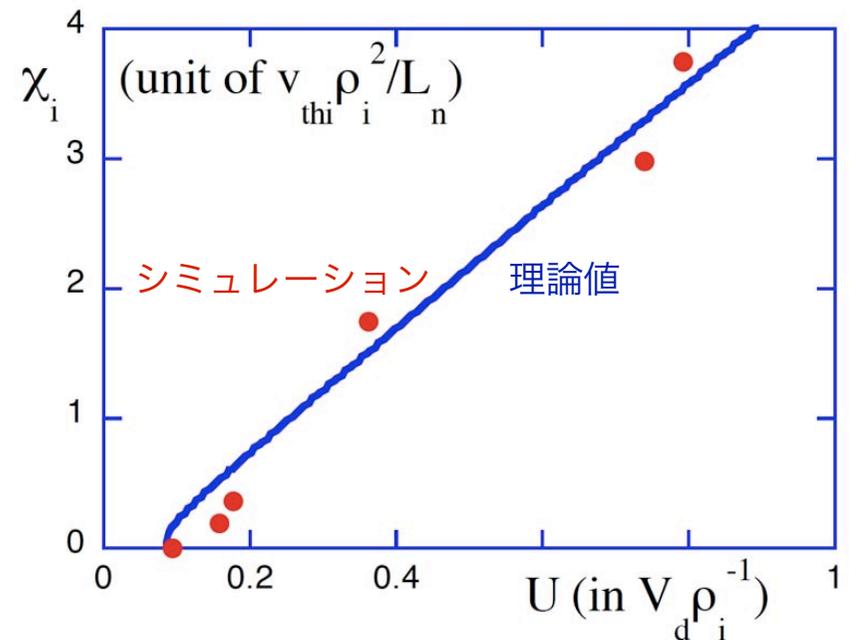
$\gamma_L < \gamma_{L,c}$ (弱い乱流駆動)

$$\chi_{I+II} = \frac{\sqrt{\nu}}{\sqrt{\gamma_L} + \sqrt{\nu}} \frac{\gamma_L}{k_r^2}$$

$\gamma_L > \gamma_{L,c}$ (強い乱流駆動)

$$\chi_{III} = A \left(\sqrt{1 + \frac{2}{A} \frac{\gamma_L - \gamma_{L,c}}{\gamma_L}} - 1 \right) \frac{\gamma_L}{k_r^2}$$

乱流輸送係数 vs イオン温度勾配



輸送シミュレーションにおける
乱流輸送係数の高度化

多スケール乱流シミュレーション

MHDとドリフト波乱流の相互作用を取り入れた
グローバルシミュレーション

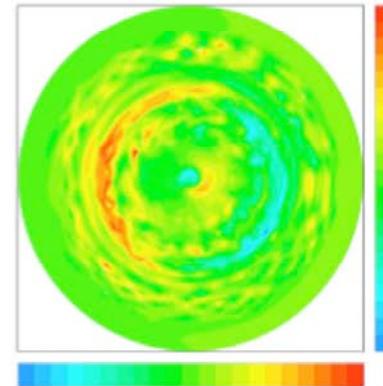
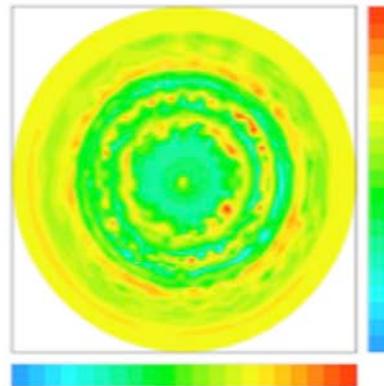
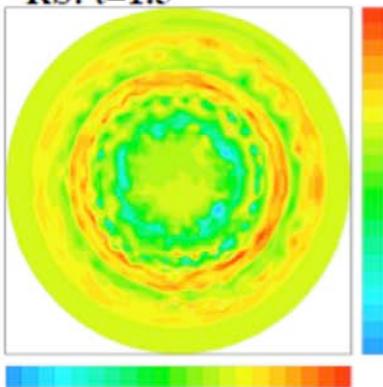
グローバル ITG コードによる非線形シミュレーション

$$\tilde{T}_i(r, \theta, z=0)$$

$$\tilde{\phi}(r, \theta, z=0)$$

$$V(r, \theta, z=0)$$

RS: t=1.5



→ 輸送障壁形成?

負磁気シア

交換型不安定

弱い帯状流

正磁気シア

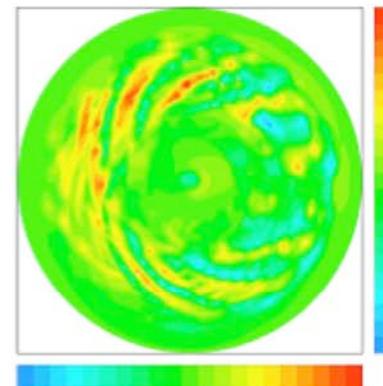
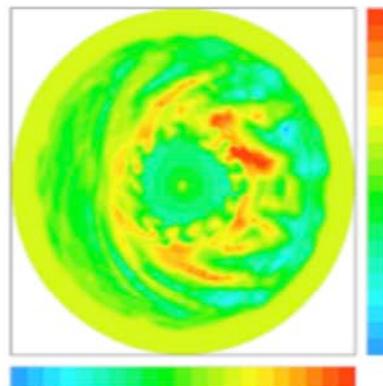
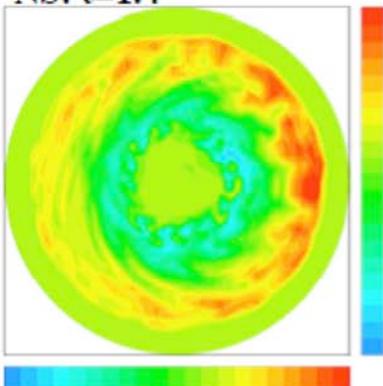
バルーニング

不安定

帯状流

低 m モード

NS: t=1.4



多スケール拡張MHDシミュレーション

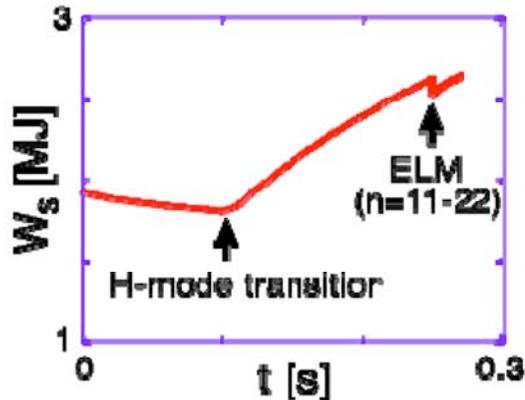
コアプラズマとの相互作用を含めた
プラズマ周辺におけるMHD現象

高精度 MHD 線形安定性解析 : MARG2D

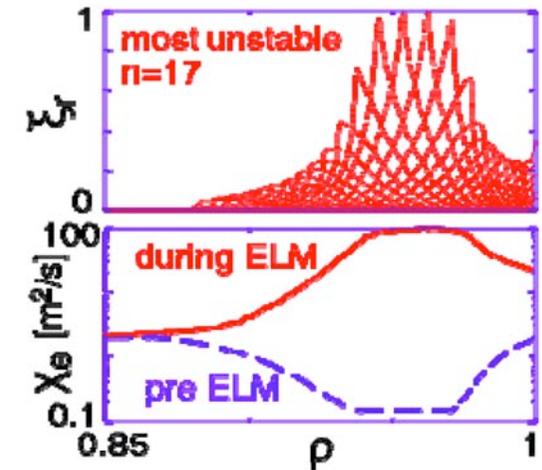
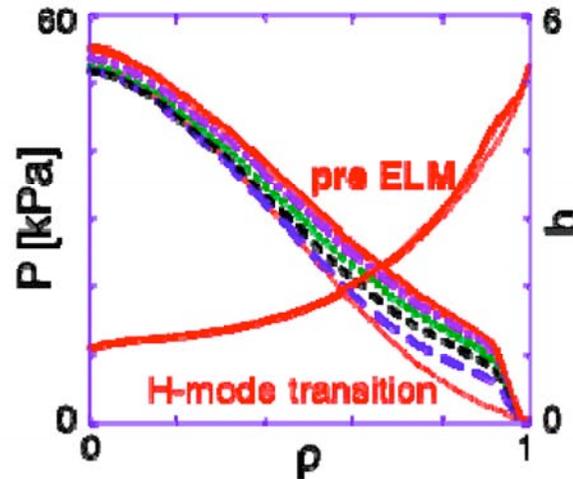
炉心プラズマ輸送コード : TOPICS

周辺プラズマ簡易モデル : Five-Point Model

- ELM phenomena is simulated in JT-60 parameters. N. Hayashi et al. (JAEA)



Pedestal formation : Neoclassical transport in peripheral region and anomalous in inside region.



Stabilities of $n=1-30$ modes are examined in each time step.

周辺プラズマのモデリング

周辺プラズマ統合コード SONIC

SOLDOR

2次元流体プラズマモデル

NEUT2D

中性粒子モンテカルロモデル

IMPMC

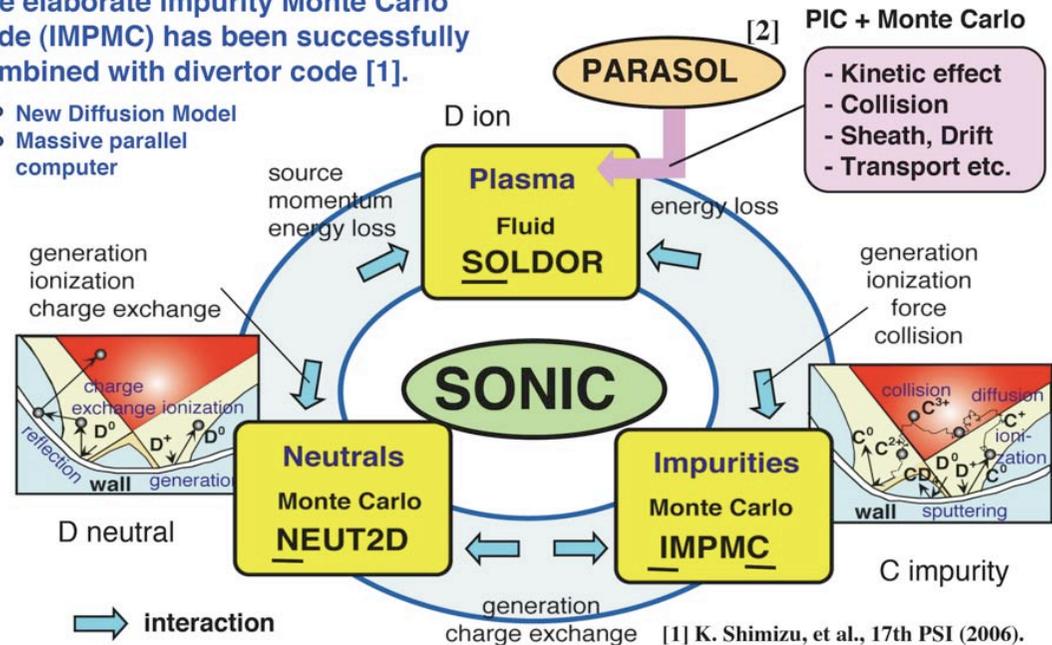
不純物モンテカルロモデル

PARASOL

2次元粒子シミュレーション

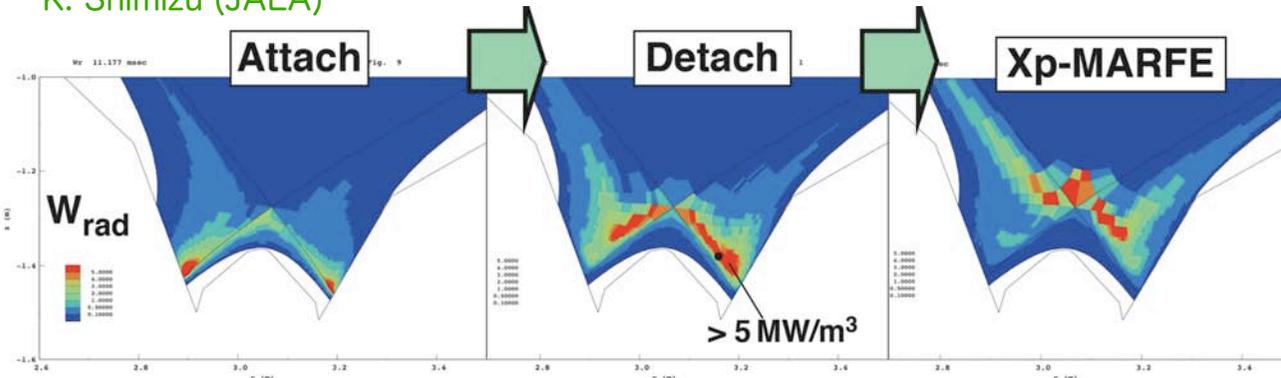
The elaborate impurity Monte Carlo code (IMPMC) has been successfully combined with divertor code [1].

- New Diffusion Model
- Massive parallel computer



[1] K. Shimizu, et al., 17th PSI (2006).
[2] T. Takizuka, et al., 15th PSI (2002).

K. Shimizu (JAEA)



炉心プラズマ統合コード
TASK との結合

輸送と加熱・電流駆動のシミュレーション

炉心プラズマ統合コード TASK の開発

モジュール構造の標準化

乱流輸送モデルの検証

ITER 運転シナリオのシミュレーション

波動による加熱・電流駆動の統合シミュレーション

波動加熱に伴う速度分布関数の変形

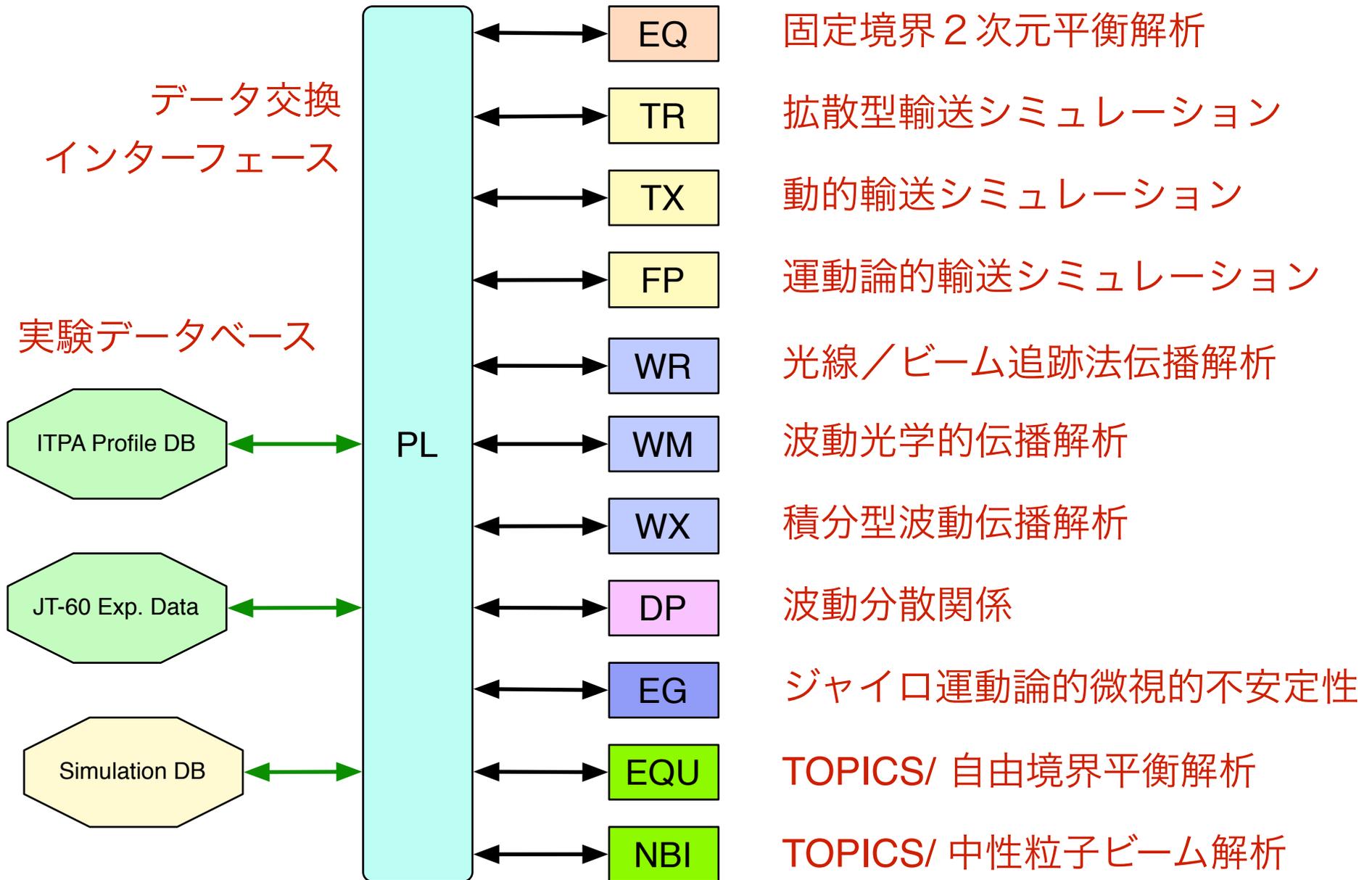
任意の速度分布関数をもつプラズマ中の波動伝播

有限幅軌道効果を取り入れた波動伝播解析

炉心プラズマ統合コード 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 (Linux, MacOSX, SX-OS 等)**
 - **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：**ITPA** 分布データベース
 - ソースコードの公開
- 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：実装の検証
 - ヘリカル系への拡張：**NIFS** との協力
 - 利用者の拡大：マニュアル等の整備

TASK コードのモジュール構成



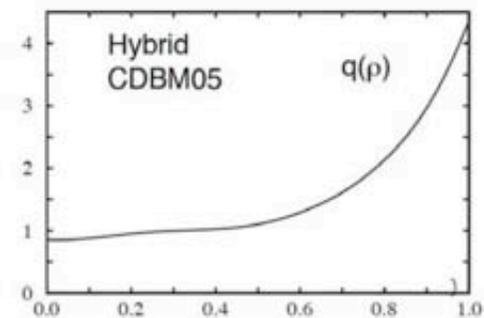
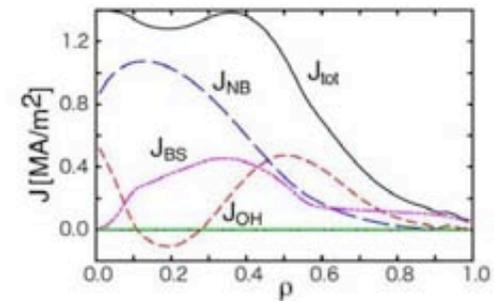
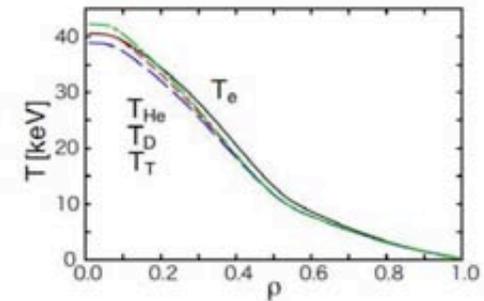
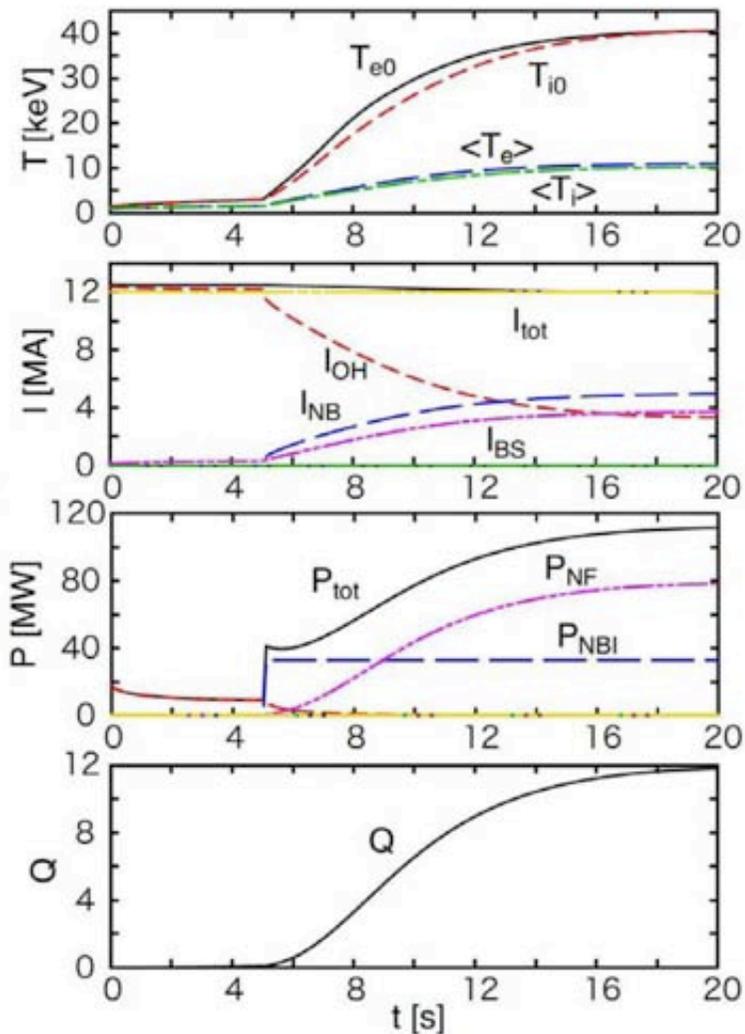
ITER Hybrid 運転シナリオ シミュレーション例

- Moderate plasma current: $I_p = 12$ MA, On-axis: $P_{NB} = 33$ MW
- Flat q profile with small ITB inside $\rho = 0.4$

CDBM05

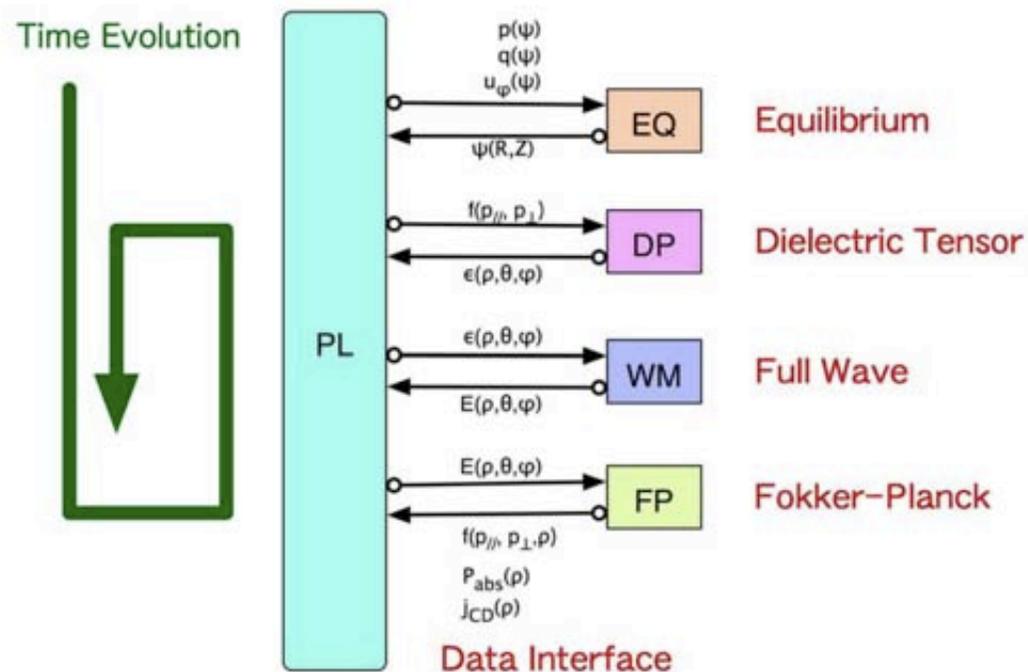
$\beta_N = 2.58$

$\tau_E = 3.6$ s



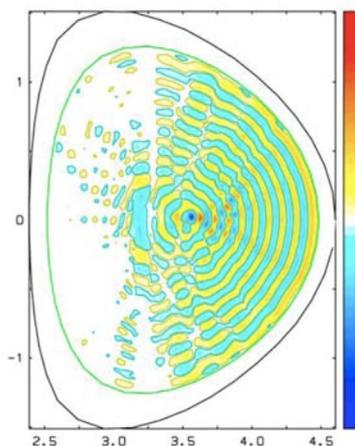
速度分布関数の変形を考慮に入れた波動伝播・吸収解析

- 速度分布関数の **Maxwellian** からの変形
 - イオンサイクロトロン波加熱に伴う高速イオンの生成
 - 低域混成波電流駆動における電子速度分布関数の平坦化・高速電子生成
 - 電子サイクロトロン波電流駆動における電子速度分布関数の変形
- $f(v)$ の変形を取り入れた自己無撞着な波動解析

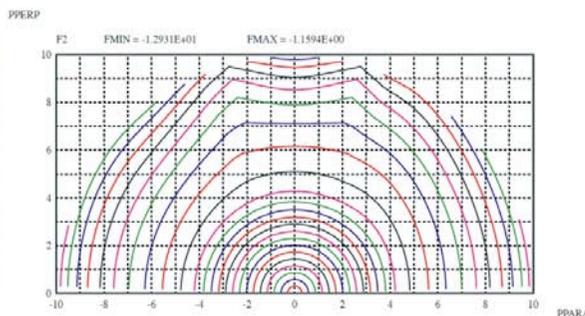


ICRF 少数イオン加熱の自己無撞着な解析

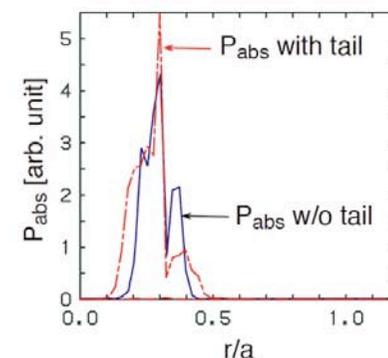
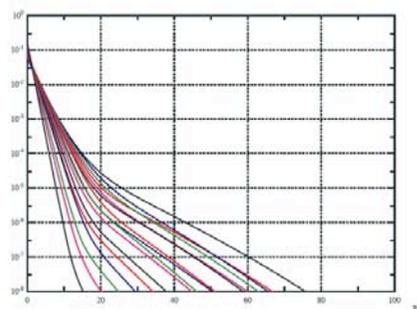
- **TASK** コードにおける解析
 - **DP:** 任意の $f(v)$ に対する誘電率テンソルの計算
 - **WM:** その誘電率テンソルを用いた波動伝播解析
 - **FP:** 得られた波動電界による速度分布関数解析
 - 反復による定常解収束あるいは時間発展解析
- 高速イオンテイルの形成
 - 吸収パワー密度分布の幅拡大



速度分布関数



イオンテイル形成 吸収パワー密度



まとめ

- 核燃焼プラズマ統合コードの目標
 - 核燃焼プラズマ統合コードに向けた
 - コード間連携の Framework 標準化
 - 標準 Framework を実装したコード開発
 - 多階層連結シミュレーションの開発
- 主な研究成果
 - トカマク統合コード TASK の開発
 - 乱流+MHD, MHD+輸送, 波動+速度分布, 周辺プラズマ等の統合シミュレーション実現
- 今後の課題
 - 実験データとの比較による検証, ITPA 貢献