

ITER 燃焼プラズマに向けたシミュレーション研究の課題と取り組みを考える

統合モデリングコードによる 燃焼プラズマシミュレーション

Simulation of Burning Plasma
Using Integrated Modeling Codes

福山 淳 (京大工)

A. Fukuyama (Dept. Nucl. Eng., Kyoto U)

- 燃焼プラズマシミュレーション
- 統合化・モデル開発・計算手法
- 現状と課題

燃焼プラズマシミュレーション

自律性の高い燃焼プラズマ

- プラズマ加熱の大部分が，密度と温度に依存する α 粒子加熱
- プラズマ電流の多くが，圧力勾配とポロイダル磁界に依存する 自発電流
- プラズマ中心部では，燃料イオン密度と温度に依存する α 粒子生成

炉心プラズマの予測と制御手法の開発
ITER プラズマの運転シナリオ策定
より魅力ある炉設計への貢献

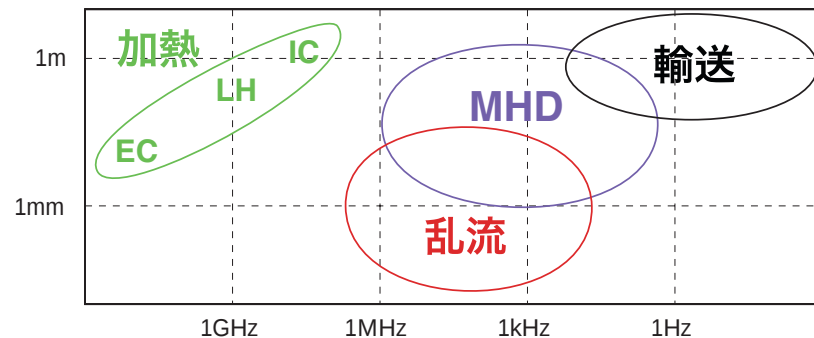
炉心プラズマ全体の放電時間全体にわたる
自己完結的な時間発展シミュレーションが必要

将来的には，ブランケット等を含めた
炉システムのシミュレーションを目指す

燃焼プラズマ統合シミュレーション

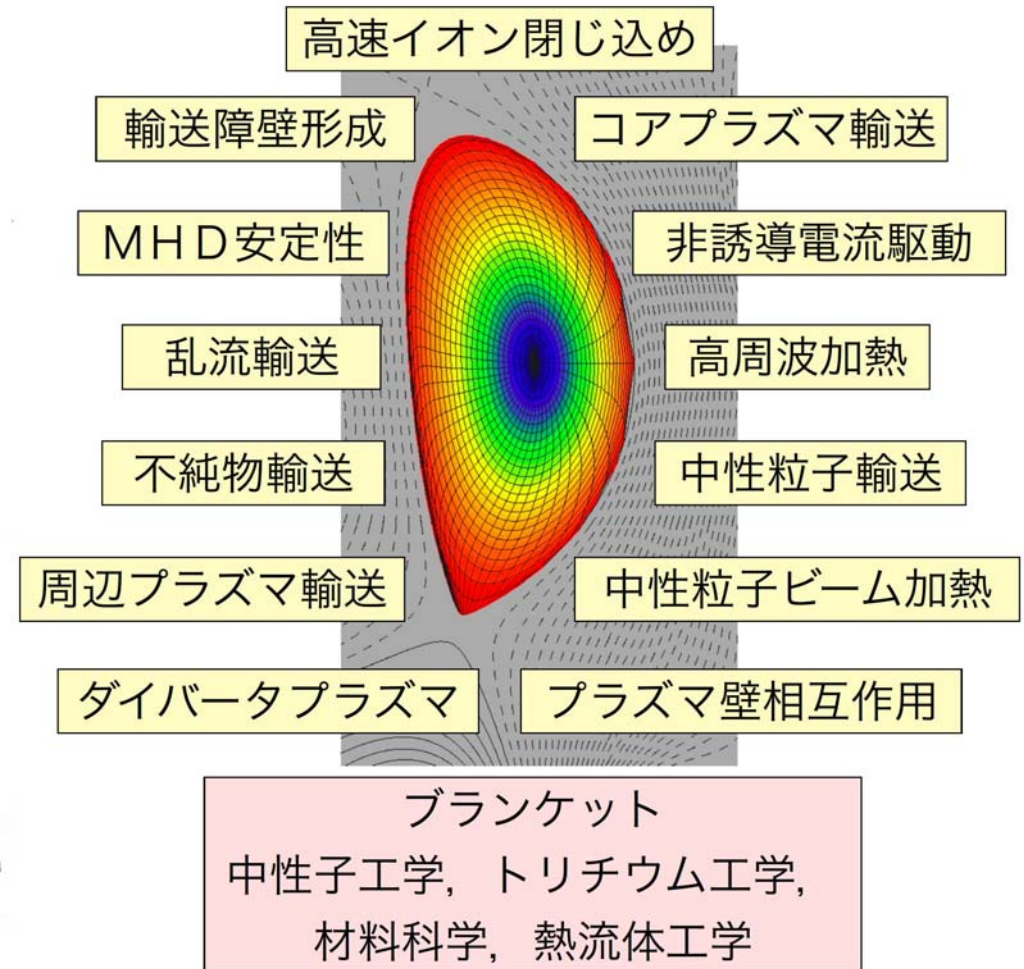
広い時間スケール：
100GHz から 1000s

広い空間スケール：
10 μ m から 10m



単一のシミュレーションコードでの
解析は当面不可能

統合シミュレーション

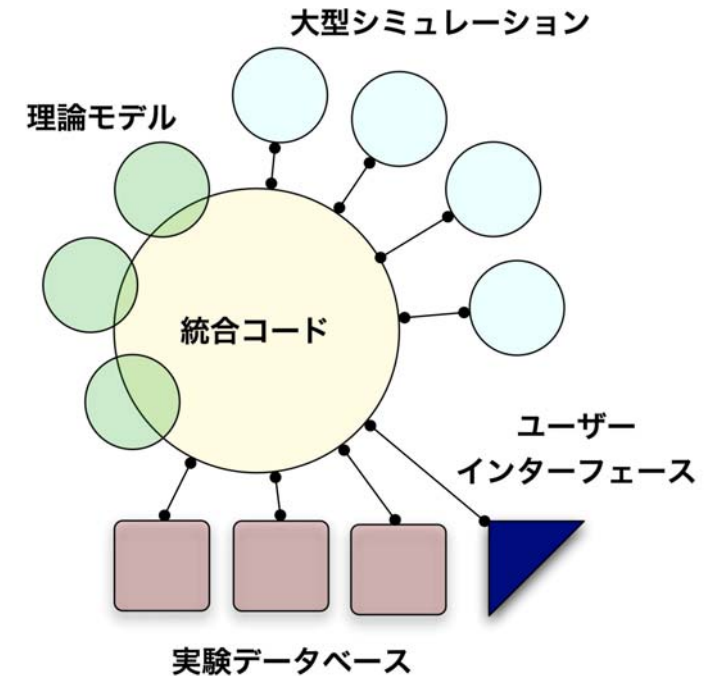


複数のコードを統合したシミュレーションが必要

統合モデリングコード

- 統合モデリングコードに期待されること

- 必須機能を備えたコアコード
- 既存の解析コードの結合
- 新しい理論モデルの迅速な導入
- 経験的モデルの容易な導入
- 実験データベースとの比較による検証
- 大規模シミュレーションとの連携
- 実験家にも容易に利用できるユーザーインターフェース
- 国際互換性のあるプログラムインターフェース
- ヘリカル系への拡張
- 並列分散処理による高速化
- 拡張の容易な構成



BPSI: 核燃焼プラズマ統合コード構想

統合コード：フレームワーク

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

モデル開発：新しい物理モデルの提案・実装・検証

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・周辺プラズマ

未解決の問題：輸送障壁，3次元効果，輸送モデルの高度化

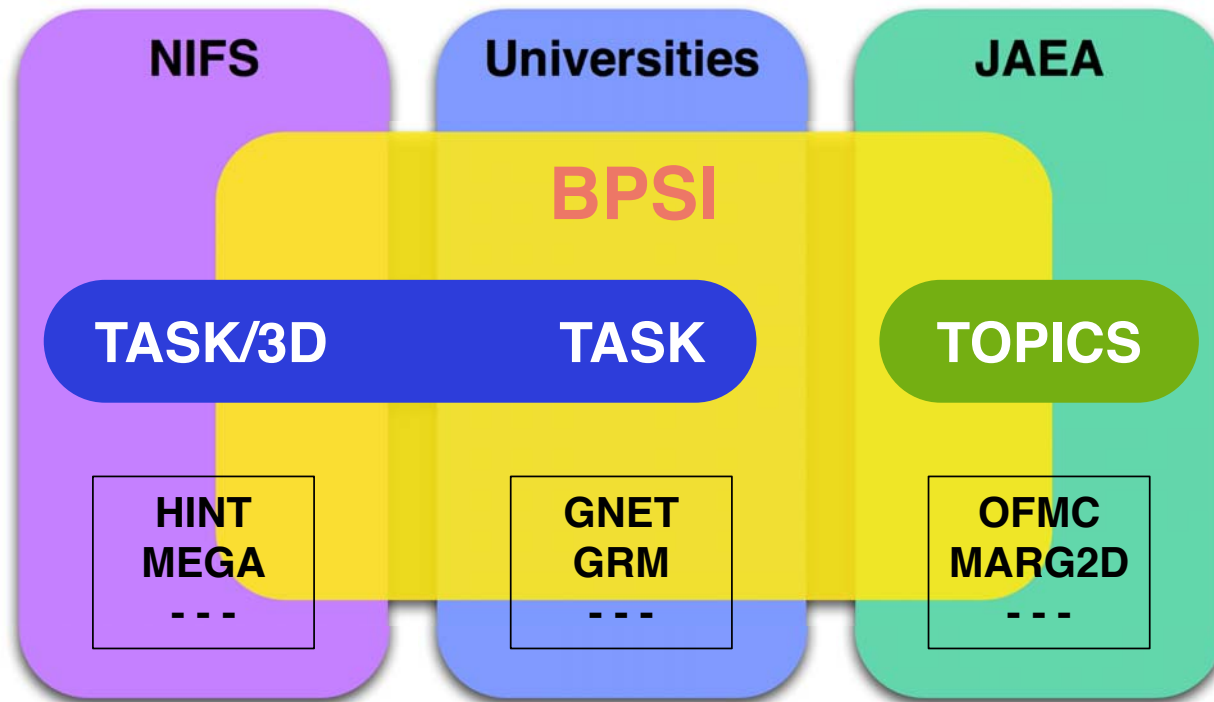
計算手法：ネットワーク分散並列処理

計算機クラスターにおける並列処理による高速化

計算機クラスター間の連携：計算資源の有効利用

統合コード開発

国内



国外

US : SciDAC/FSP

EU : ITM-TF

米国の状況

- **NTCC** (National Transport Code Collaboration)
 - 輸送コード , モジュールライブラリ (GLF23, NCLASS, ...)
- **SciDAC** (Scientific Discovery through Advanced Computing)
 - 大規模シミュレーション , 研究連携 (National Fusion Collaboration)
 - Turbulence, Extended MHD, Wave-Particle, Reconnection, Peripheral
- **New SciDAC projects**: Fusion Simulation Project
 - **2005**:
 - Center for Plasma Edge Simulation (**CPES**)
 - Simulation of Wave Interactions with MHD (**SWIM**)
 - **2006/01/10**: Request for new proposals of SciDAC research program
 - The development of techniques to facilitate **international fusion collaboration**
 - The development of an **integrated software environment** for multi-physics, multi-scale simulations of fusion plasmas

欧州の状況

- **EFDA Task Force: Integrated Transport Modelling** (Dec. 2003)
- **Integrated Modelling**
 - Physics integration
 - Code integration
 - Discipline integration: Theorist/Modeller/Computer Scientist/Experimentalist
- **Projects**
 - **The Code Platform Project** (CPP): code interface, data structure
 - **The Data Coordination Project** (DCP): verification and validation
 - **Five Integrated Modelling Projects** (IMPs)
 - Equilibrium and linear MHD stability
 - Non-linear MHD and disruptions
 - Transport code and discharge evolution
 - Transport processes and micro-stability
 - Heating, current drive and fast particles

TASK コードの特色

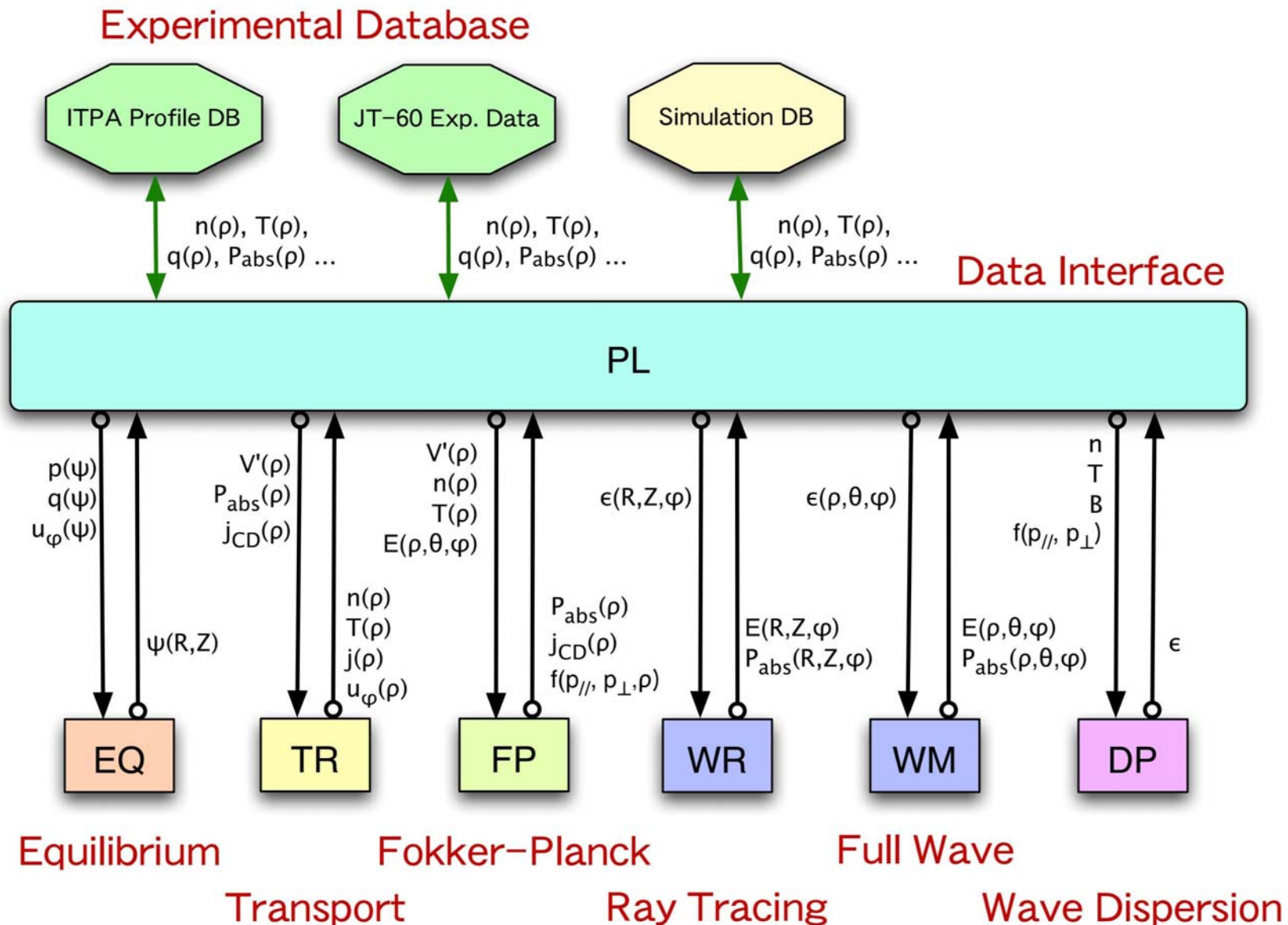
- トカマクの時間発展シミュレーション
 - モジュール構造の統合シミュレーション
 - 様々な加熱・電流駆動機構の実装
 - 高い移植性：UNIX系 (Linux, MacOSX, SX-OS 等)
 - MPI ライブラリを用いた並列分散処理
 - 実験データベースの利用：ITPA 分布データベース
 - ソースコードの公開
- 核燃焼プラズマ統合コード構想のコアコード
 - 最小限の統合コード：モジュールは交換可能
 - インターフェースの標準化：実装の検証
 - ヘリカル系への拡張：NIFS との協力
 - 利用者の拡大：マニュアル等の整備

TASK コードの構成

- **T**ransport **A**nalyzing **S**ystem for tokama**K**

TASK/PL	データ交換	磁気面座標 ↔ 実座標 , 分布データベース
EQ	2次元平衡解析	固定境界 , トロイダル回転効果
TR	1次元輸送解析	拡散型輸送方程式 , 輸送モデル
WR	幾何光学的波動解析	EC, LH: 光線追跡法 , ビーム追跡法
WM	波動光学的波動解析	IC, AW: アンテナ励起 , 固有モード
FP	速度分布解析	相対論的 , 軌道平均 , 3次元
DP	波動分散解析	局所誘電率テンソル , 任意速度分布
LIB, MTX, MPI	共通ライブラリ	特殊関数 , 行列解法 , MPI
開発中 : TX	1次元輸送解析	流体型輸送方程式 , 輸送モデル
WX	積分形波動解析	FLR 効果 , 高次サイクロトロン高調波
TOPICS : EQU	2次元平衡解析	自由境界 , 高速
NBI	中性粒子ビーム	ビーム軌跡 , 1次元 F P 解析

TASK のモジュール構造



モジュール間連携機能：TASK/PL

- 連携機能の目的

- モジュール間のデータ交換:

- ー 標準データセット：交換の対象となるデータを限定（cf. ITPA 分布DB）
 - ー データ交換用インターフェース仕様（初期化，書込，読取）

- モジュールの実行制御:

- ー 実行制御用インターフェース仕様（初期化，初期分布，実行，表示，終了）
 - ー 共通化されたユーザーインタフェース（パラメータ入力，図形出力，他）

- データ交換用インターフェースの役割：TASK/PL

- プラズマの現在の状況を保管

- プラズマの時間発展を保存

- ファイルへのデータ保存・ファイルからの読込

- 実験分布データベースとのインターフェース

標準データセット（暫定版）

ショットデータ

Machine ID, Shot ID, Model ID

装置データ: (Level 1)

RR	R	m	Geometrical major radius
RA	a	m	Geometrical minor radius
RB	b	m	Wall radius
BB	B	T	Vacuum toroidal mag. field
RKAP	κ		Elongation at boundary
RDLT	δ		Triangularity at boundary
RIP	I_p	A	Typical plasma current

平衡データ: (Level 1)

PSI2D	$\psi_p(R, Z)$	Tm ²	2D poloidal magnetic flux
PSIT	$\psi_t(\rho)$	Tm ²	Poloidal magnetic flux
PSIP	$\psi_p(\rho)$	Tm ²	Poloidal magnetic flux
ITPSI	$I_t(\rho)$	Tm	Poloidal current: $B_\phi R$
IPPSI	$I_p(\rho)$	Tm	Toroidal current
PPSI	$p(\rho)$	MPa	Plasma pressure
QINV	$1/q(\rho)$		Inverse of safety factor

計量データ

1D: $V'(\rho), \langle \nabla V \rangle(\rho), \dots$

2D: $g_{ij}, \dots$

3D: $g_{ij}, \dots$

運動論的プラズマデータ

FP $f(p, \theta_p, \rho)$ momentum dist. fn at $\theta = 0$

流体的プラズマデータ

NSMAX	s	Number of particle species
PA	A_s	Atomic mass
PZ0	Z_{0s}	Charge number
PZ	Z_s	Charge state number
PN	$n_s(\rho)$	m ³ Number density
PT	$T_s(\rho)$	eV Temperature
PU	$u_{s\phi}(\rho)$	m/s Toroidal rotation velocity
QINV	$1/q(\rho)$	Inverse of safety factor

誘電率テンソル

CEPS $\overleftrightarrow{\epsilon}(\rho, \chi, \zeta)$ Local dielectric tensor

波動電磁界データ

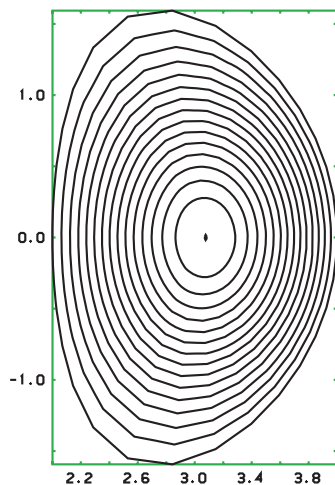
CE	$E(\rho, \chi, \zeta)$	V/m Wave electric field
CB	$B(\rho, \chi, \zeta)$	Wb/m ² Wave magnetic field

光線・ビーム追跡データ

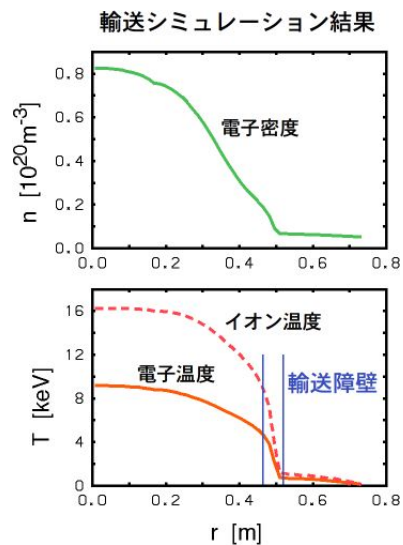
RRAY	$R(\ell)$	m	R of ray at length ℓ
ZRAY	$Z(\ell)$	m	Z of ray
PRAY	$\phi(\ell)$	rad	ϕ of ray
CERAY	$E(\ell)$	V/m	Wave electric field
PWRAY	$P(\ell)$	W	Wave power
DRAY	$d(\ell)$	m	Beam radius
VRAY	$v(\ell)$	1/m	Beam curvature

TASK コードによる解析例

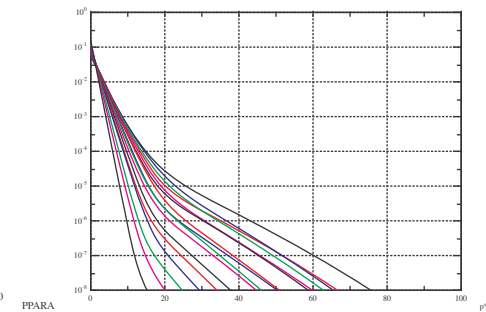
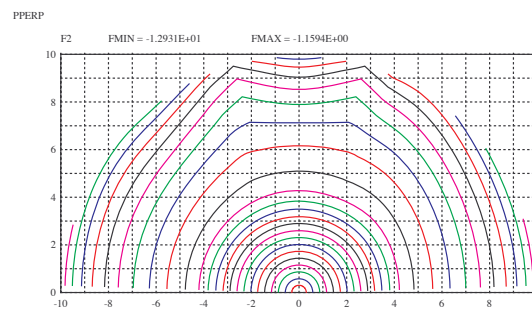
EQ



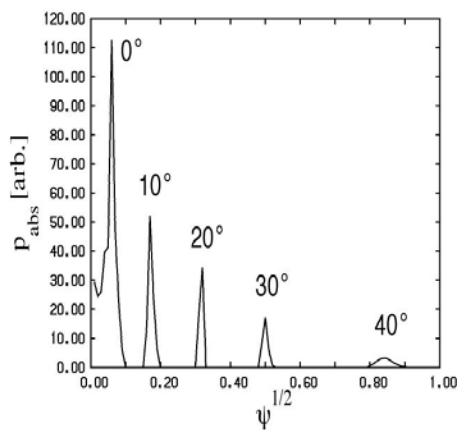
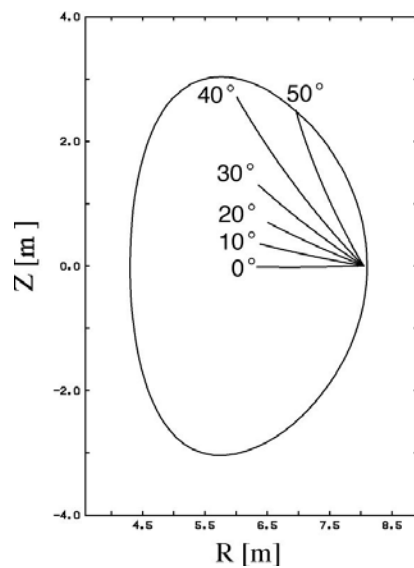
TR



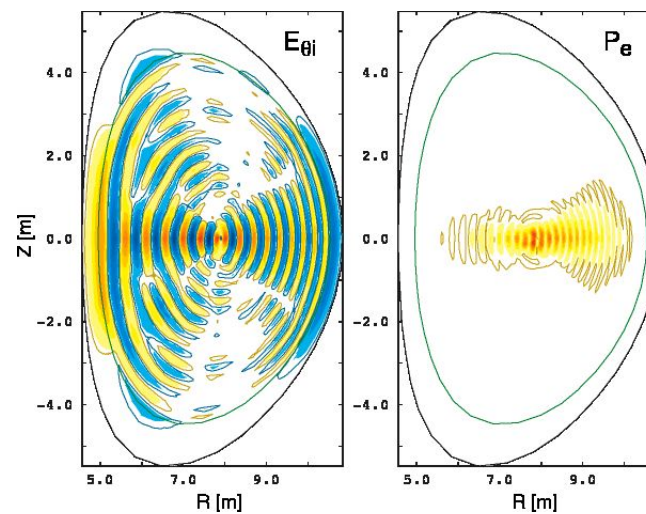
FP (ICRF tail formation)



WR (ECCD ray tracing)

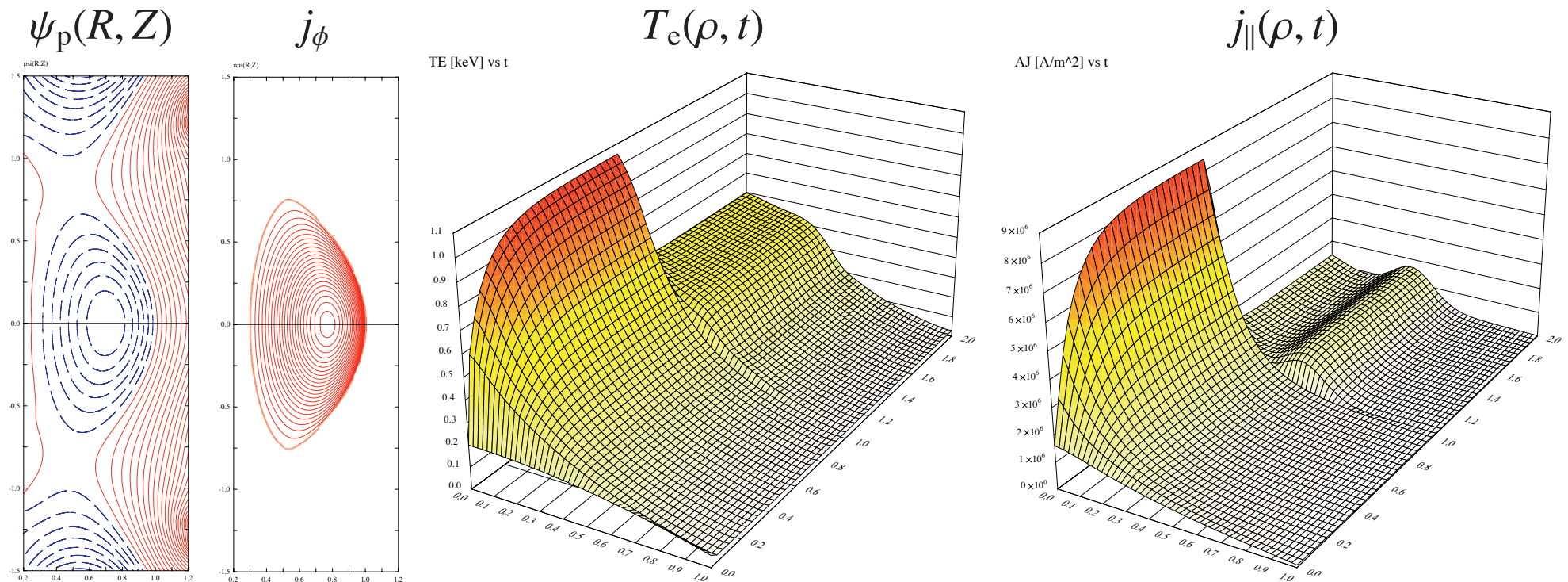


WM (fast wave heating)



TOPICS/EQU と TASK/TR を組み合わせた解析例

- **TOPICS/EQU**: 自由境界 2 次元平衡
- **TASK/TR** 拡散型 1 次元輸送 (CDBM + Neoclassical)
- **QUEST** パラメータ :
 - $R = 0.64 \text{ m}$, $a = 0.36 \text{ m}$, $B = 0.64 \text{ T}$, $I_p = 300 \text{ kA}$, **OH+LHCD**



Integrated Analysis of AE in ITER Plasma

- **Combined Analysis**

- **Equilibrium**: TASK/EQ

- **Transport**: TASK/TR

- Turbulent transport model: CDBM

- Neoclassical transport model: NCLASS (**Houlberg**)

- Heating and current profile: given profile

- **Full wave analysis**: TASK/WM

- **Stability analysis**

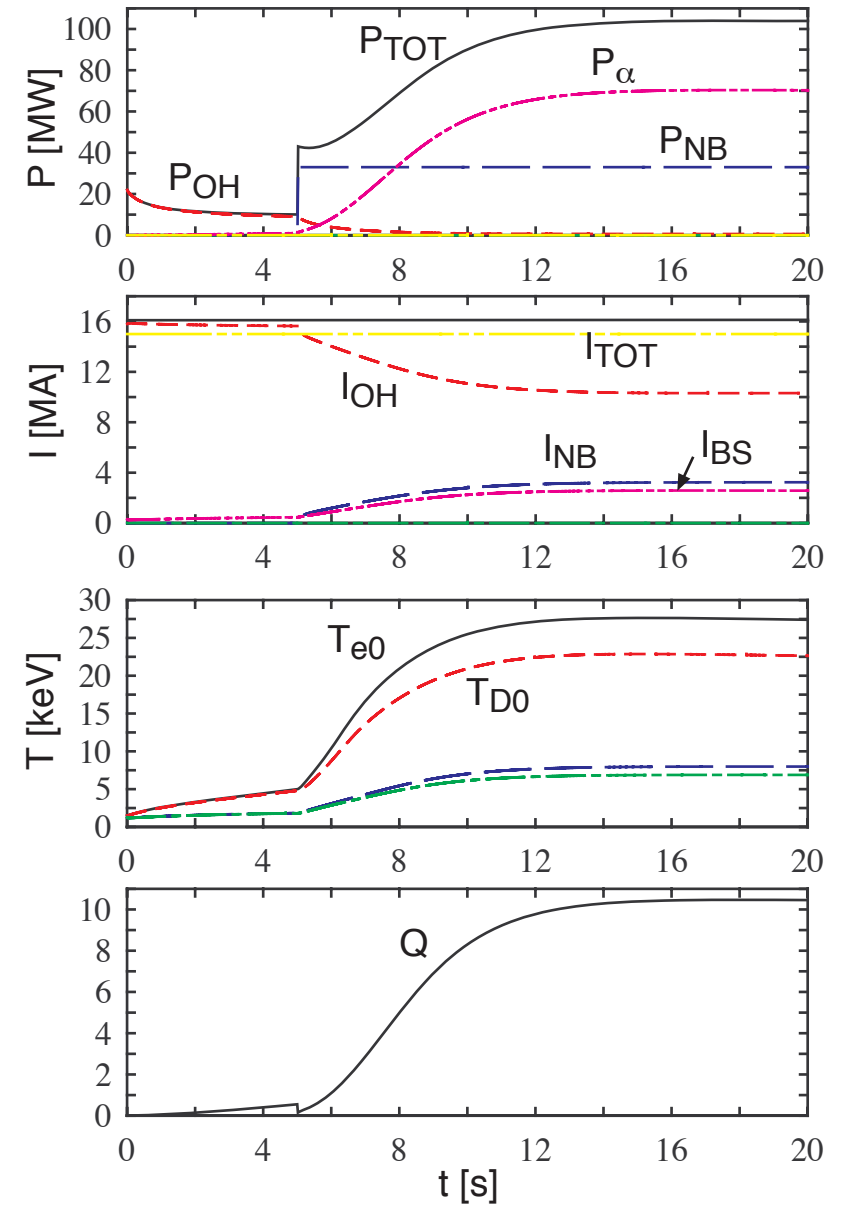
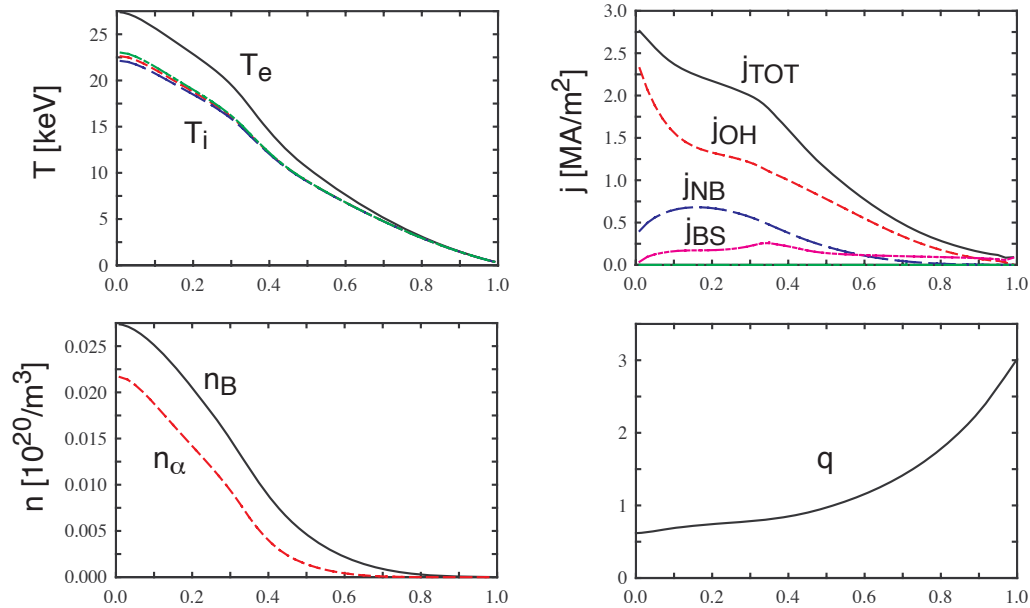
- Standard H-mode operation: $I_p = 15 \text{ MA}$, $Q \sim 10$

- Hybrid operation: $I_p = 12 \text{ MA}$, flat q profile above 1

- Steady-state operation: $I_p = 9 \text{ MA}$, reversed shear

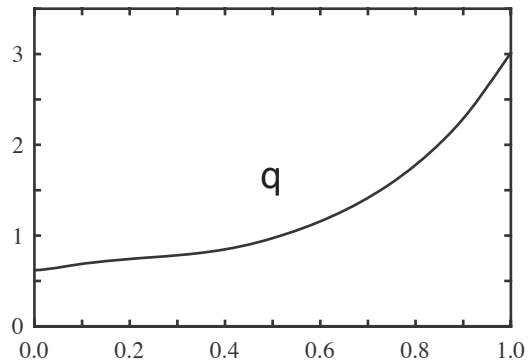
Standard H-mode Operation

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

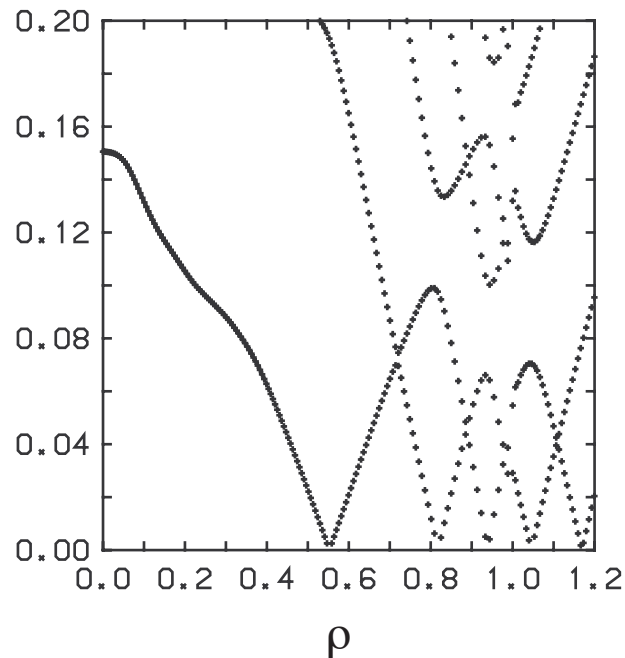


AE in Standard H-mode Operation

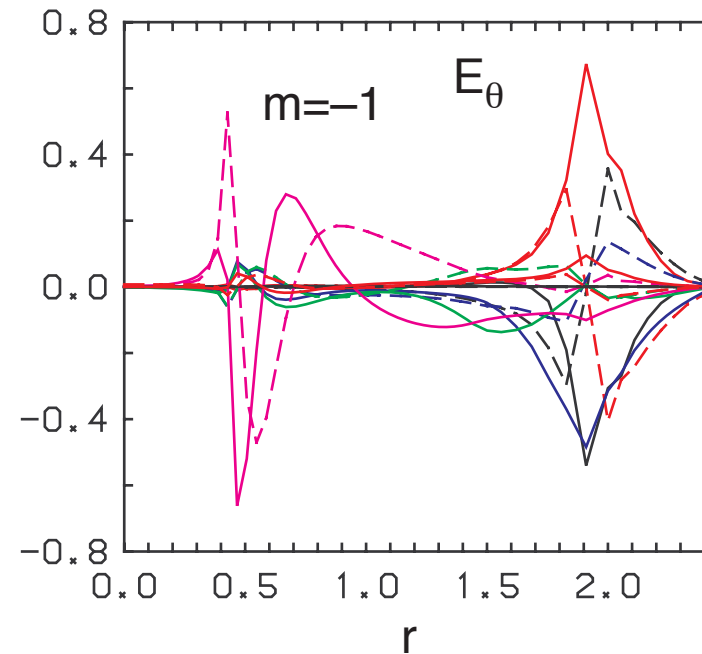
q profile



Alfvén Continuum



Mode structure ($n = 1$)



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

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

Stabilization due to $q = 1$

モデル開発における課題の例

- **ITER 性能予測** :

- **ETB 形成機構** : LH 遷移条件 , ペデスタル幅 , **Type I** 以外の ELM
- 乱流輸送モデル : 線形解析 , 非線形解析 , 帯状流 , 回転シア
- プラズマ回転を含めた平衡・安定性解析 : **RWM, NTM**, 運動論効果
- **SOL-ダイバータ**解析 : コアとの結合 , 壁との相互作用
- 計測モジュール・制御モジュールの開発・結合

- **モデルの高度化** : 予測精度の向上

- **輸送モデル** : 拡散型
 - ― 流体型 : プラズマ回転 , 径方向電界 , 過渡現象
 - ― 運動論型 : 速度分布関数 , 加熱・電流駆動と無撞着な解析
- **3次元平衡** : 2次元平衡
 - ― 周辺部におけるリップル効果
 - ― 磁気島が存在する場合の平衡・安定性・輸送

統合コードの計算環境

- 必要計算資源の飛躍的増大
 - 予測精度の向上（モジュールの増加，時間空間ステップ数の増加）
 - パラメータ数および変化範囲の拡大
 - 運転シナリオの最適化
- 並列処理による高速化
 - 利用 **CPU** 数にスケラブルな高速化
 - 行列方程式の大規模並列ソルバーの導入
 - 数理科学や計算科学との協力
- さまざまなタイプの計算コードの実行
 - 計算規模に合わせた計算資源割当の最適化

最後に

- **ITER 燃焼プラズマの時間発展シミュレーション**ならびに**原型炉の設計**に向けて、統合コード開発の必要性がますます高くなってきている。
- **国内における燃焼プラズマ統合コード開発**は、大学・核融合研・原子力機構の自主的な研究協力によって進められており、統合モデリングの成果が上がりつつある。
- **ITER-BA の計算機シミュレーションセンター**は、燃焼プラズマシミュレーションを実現する統合モデリングコードの組織的開発の契機となることが期待される。
- 計算機シミュレーションセンターの稼働開始に向けて、その性能を最大限に破棄できる統合コードをそれまでに開発しておくことが必要である。
- 炉工学分野におけるシミュレーションも視野に入れて、**組織的なコード開発プロジェクト**を早急に立ち上げ、核融合炉開発における国際競争力を確保することを目指す必要がある。