

# TASKコードによる トカマク統合シミュレーション

福山 淳

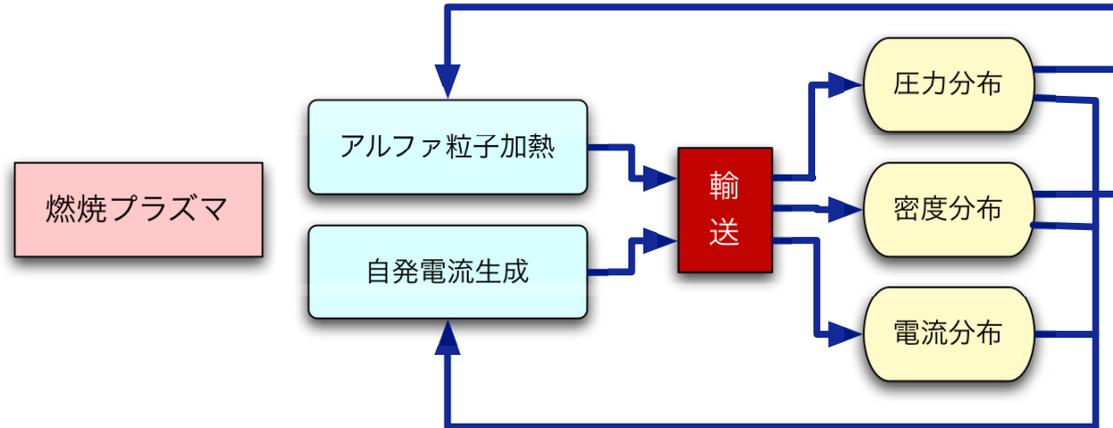
京都大学 大学院工学研究科

- 燃焼プラズマシミュレーション
- 多要素統合シミュレーション
- TASK コードの現状
- 今後の課題

# 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 →  $\alpha$  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



- $\alpha$  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**

# 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 **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 **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

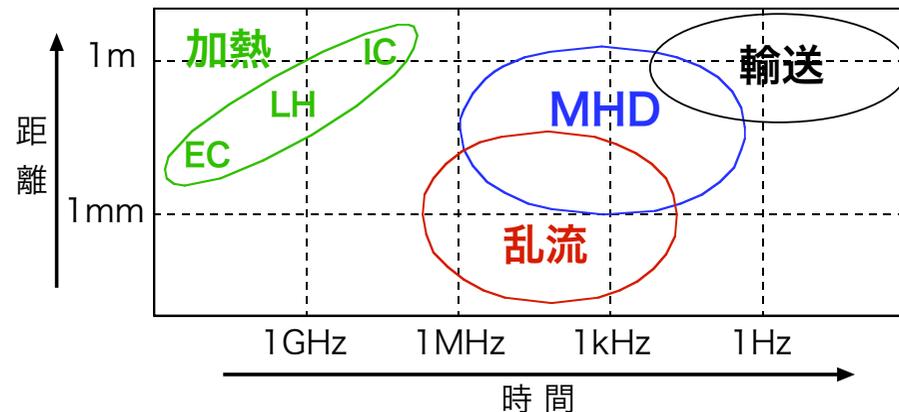
炉心プラズマ全体の放電時間全体にわたる  
自己完結的な時間発展シミュレーションが必要

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

# 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



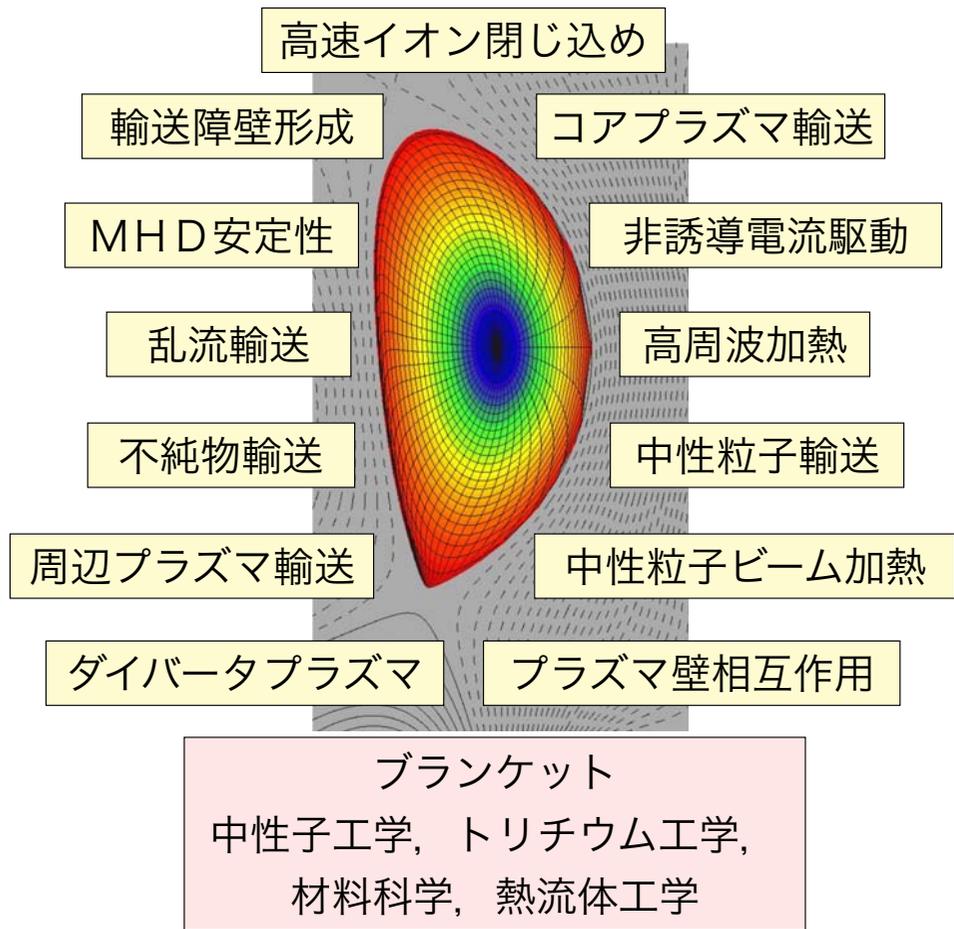
多要素統合シミュレーション  
多階層連結シミュレーション

# 多要素統合シミュレーション

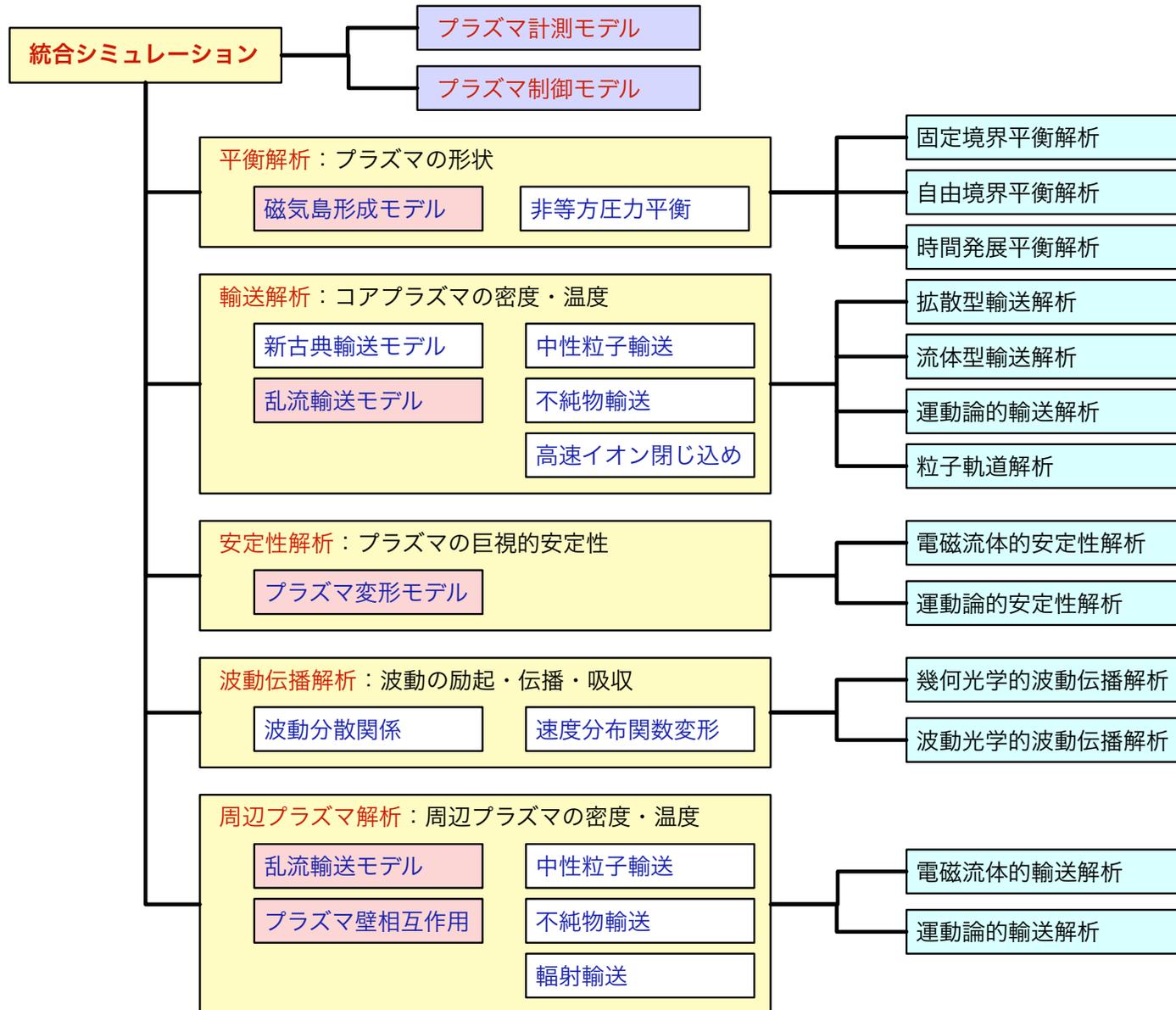
閉じ込め高性能化  
運転長時間化  
運転シナリオ最適化  
核融合炉開発の基盤



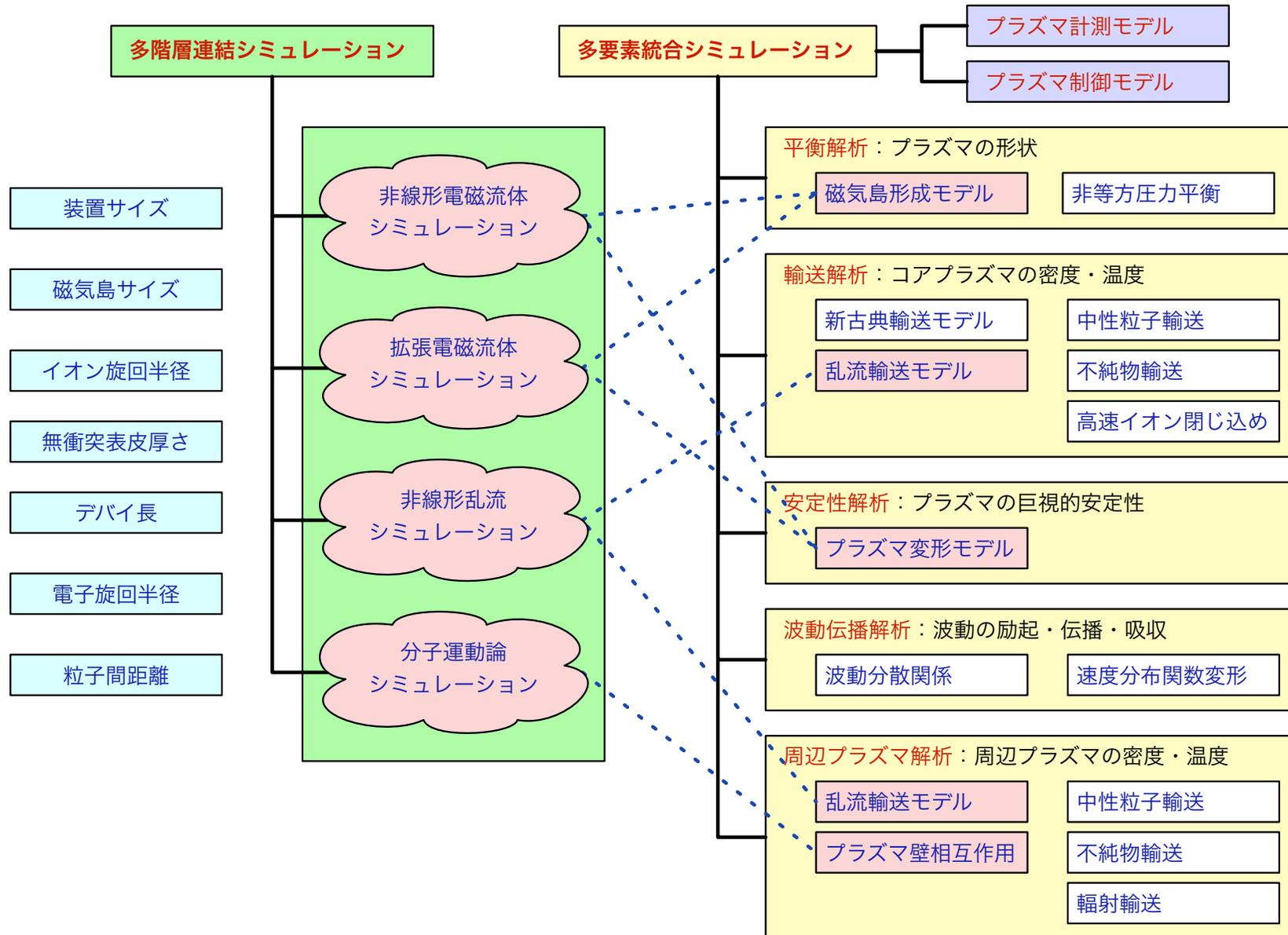
炉心プラズマ全体の  
放電時間全体にわたる  
自己完結的な  
時間発展シミュレーション



# 多要素統合シミュレーション



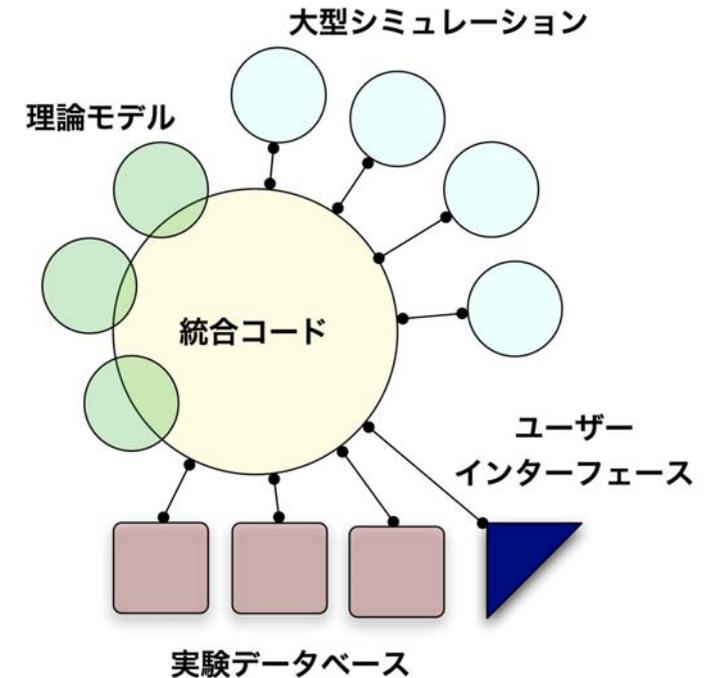
# 多階層連結と多要素統合



# 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

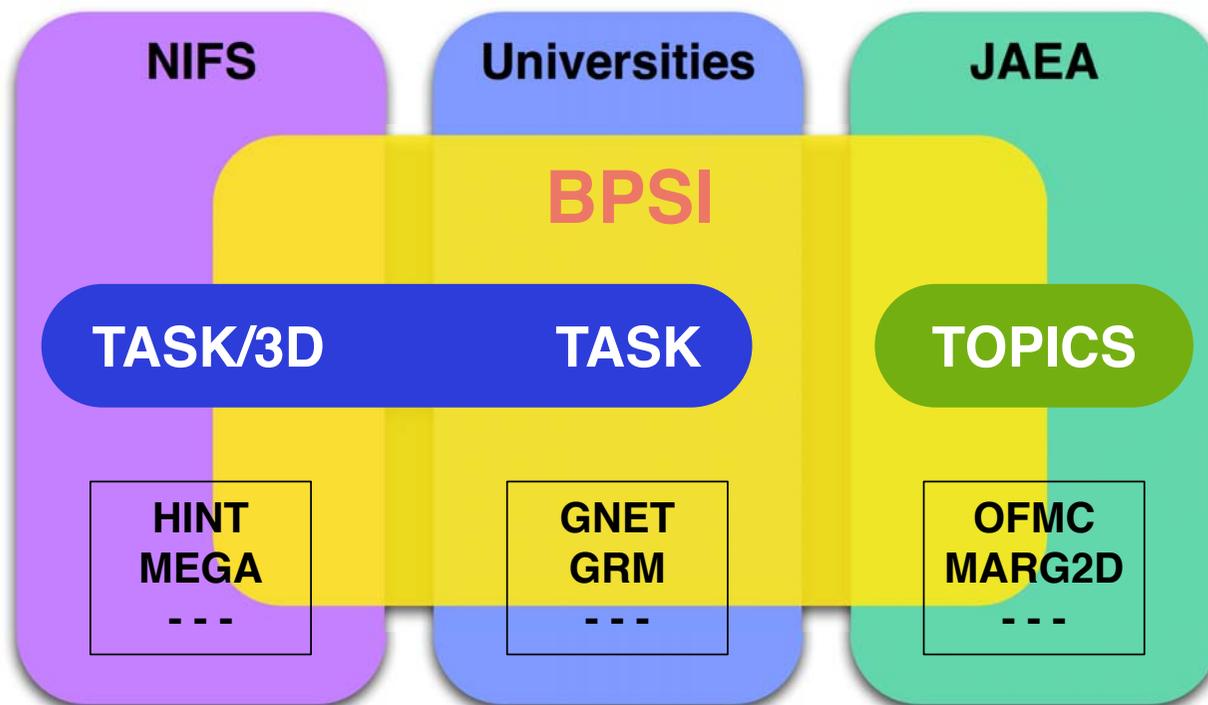
- 必須機能を備えたコアコード
- 既存の解析コードの結合
- 新しい理論モデルの迅速な導入
- 経験的モデルの容易な導入
- 実験データベースとの比較による検証
- 大規模シミュレーションとの連携
- 実験家にも容易に利用できるユーザーインターフェース
- 国際互換性のあるプログラムインターフェース
- ヘリカル系への拡張
- 並列分散処理による高速化
- 拡張の容易な構成



# 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**:
    - **International fusion collaboration**
    - **Integrated software environment**

# 欧州の状況

---

- **EFDA Task Force: Integrated Transport Modelling (Dec. 2003)**
- **The Code Platform Project (CPP):**
  - コード統合, 利用者ツール
- **The Data Coordination Project (DCP):**
  - データ構造 (XML schemas, ITM database), データ品質評価, 妥当性検証
- **Five Integrated Modelling Projects (IMPs)**
  - 平衡, 線形 MHD 安定性:
    - 平衡再構成, 高解像度, 安定性, EFIT-ITM
  - 非線形 MHD, ディスラプション: RWM, Sawtooth
  - 輸送コード, 放電時間発展:
    - 輸送モデルおよび境界条件のインターフェース共通化
  - 輸送過程, 微視的不安定性: ベンチマーク
  - 加熱, 電流駆動, 高速粒子: 自己無撞着解析

# TASK コードの特色

---

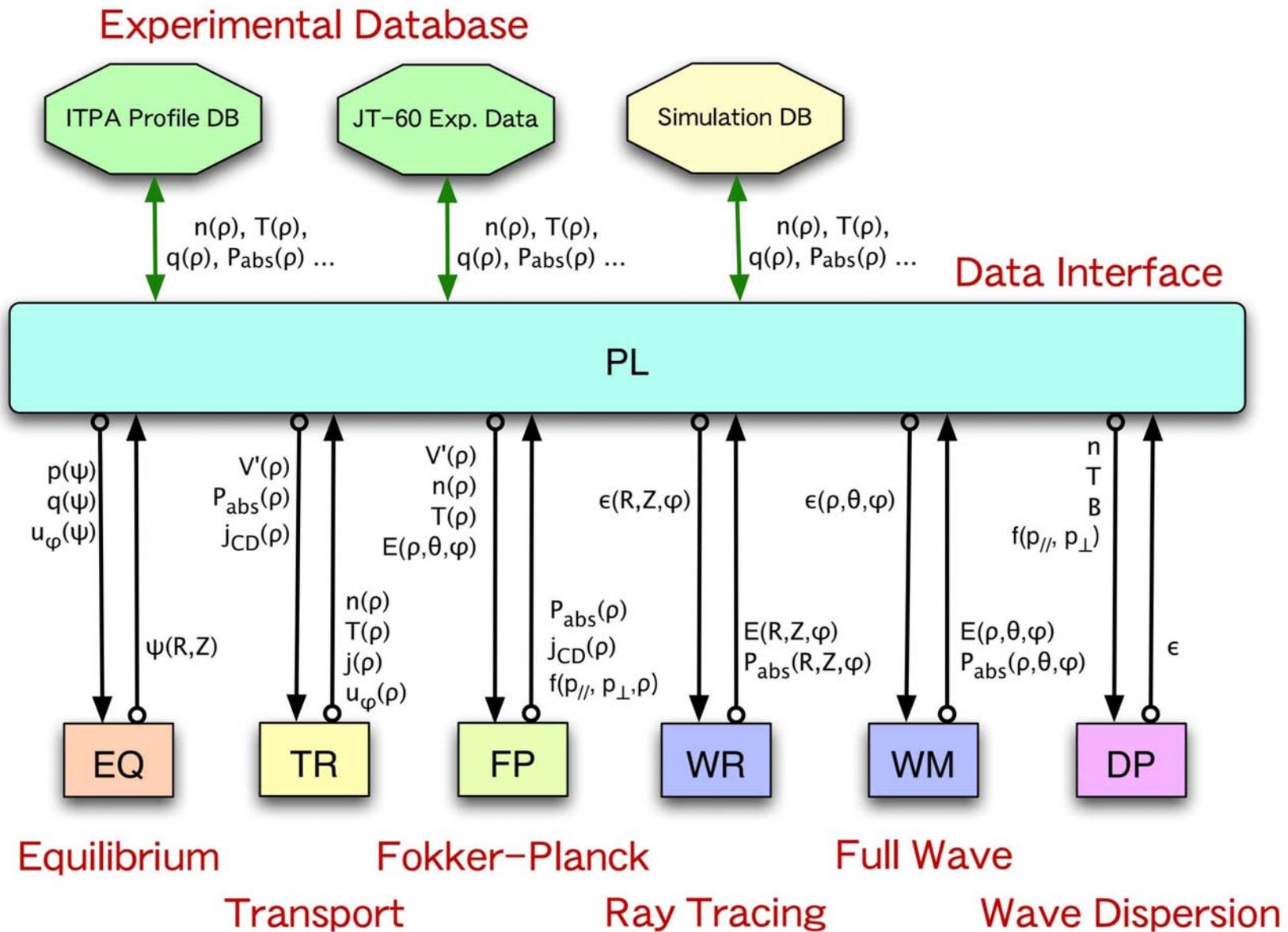
- **トカマクの時間発展シミュレーション**
  - モジュール構造の統合シミュレーション
  - 様々な加熱・電流駆動機構の実装
  - 高い移植性：UNIX系 (Linux, MacOSX, SX-OS 等)
  - MPI ライブラリを用いた並列分散処理
  - 実験データベースの利用：ITPA 分布データベース
  - ソースコードの公開
- **核燃焼プラズマ統合コード構想のコアコード**
  - 最小限の統合コード：モジュールは交換可能
  - インターフェースの標準化：実装の検証
  - ヘリカル系への拡張：NIFS との協力
  - 利用者の拡大：マニュアル等の整備

# TASK コードの構成

- Transport Analyzing System for tokamak

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

- 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）
- 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:

- 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）
- 共通化されたユーザーインターフェース（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	$\kappa$		Elongation at boundary
RDLT	$\delta$		Triangularity at boundary
RIP	$I_p$	A	Typical plasma current

### 平衡データ: (Level 1)

PSI2D	$\psi_p(R, Z)$	$\text{Tm}^2$	2D poloidal magnetic flux
PSIT	$\psi_t(\rho)$	$\text{Tm}^2$	Poloidal magnetic flux
PSIP	$\psi_p(\rho)$	$\text{Tm}^2$	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	$n_s(\rho)$	$\text{m}^3$	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	$B(\rho, \chi, \zeta)$	$\text{Wb/m}^2$	Wave magnetic field

## 光線・ビーム追跡データ

RRAY	$R(\ell)$	m	$R$ of ray at length $\ell$
ZRAY	$Z(\ell)$	m	$Z$ of ray
PRAY	$\phi(\ell)$	rad	$\phi$ 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

# データ交換インターフェース

---

- **データ構造**: **Derived type** (Fortran95): 構造体

	<b>time</b>	<b>plasmaf%time</b>
	<b>number of grid</b>	<b>plasmaf%nrmax</b>
e.g.	<b>square of grid radius</b>	<b>plasmaf%s(nr)</b>
	<b>plasma density</b>	<b>plasmaf%data(nr)%pn</b>
	<b>plasma temperature</b>	<b>plasmaf%data(nr)%pt</b>

- **プログラム・インターフェース**: モジュールの独立性

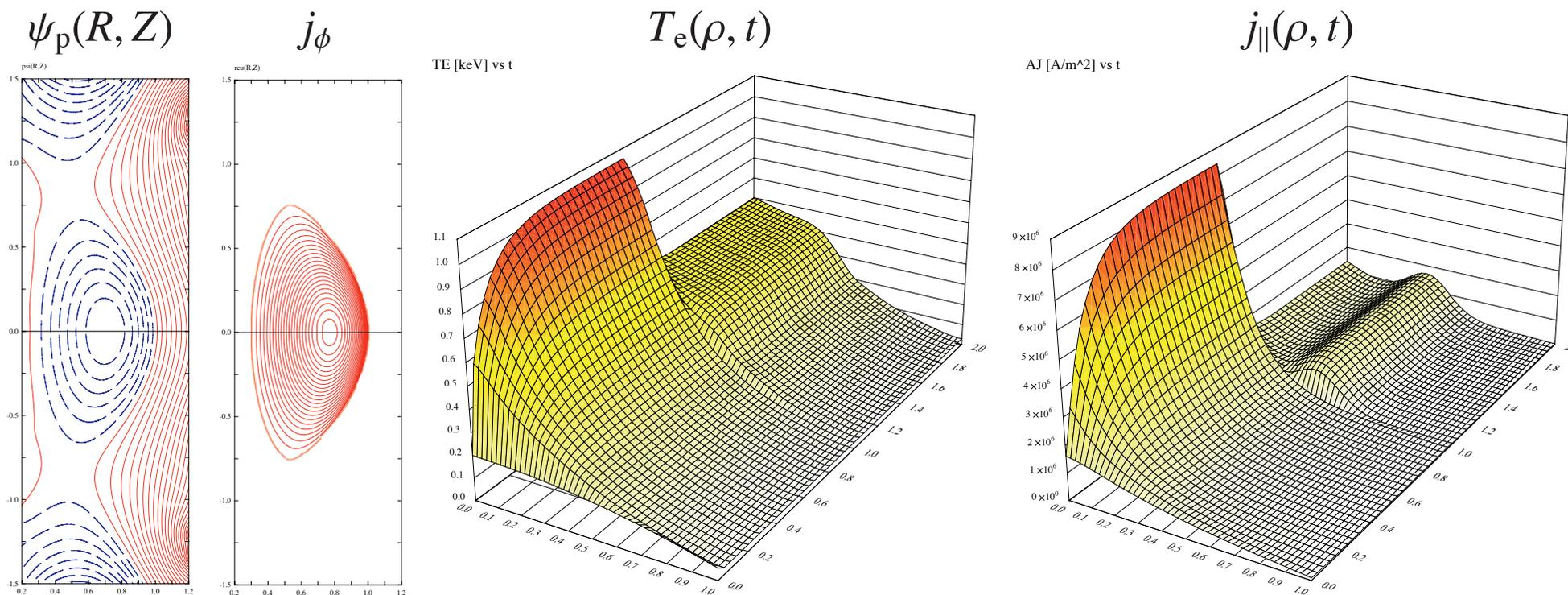
	<b>Initialize</b>	<b>bpsd_init_data(ierr)</b>
e.g.	<b>Set data</b>	<b>bpsd_set_data('plasmaf',plasmaf,ierr)</b>
	<b>Get data</b>	<b>bpsd_get_data('plasmaf',plasmaf,ierr)</b>

- **他の機能**:

- 時系列化, ファイル入出力, データ表示共通化

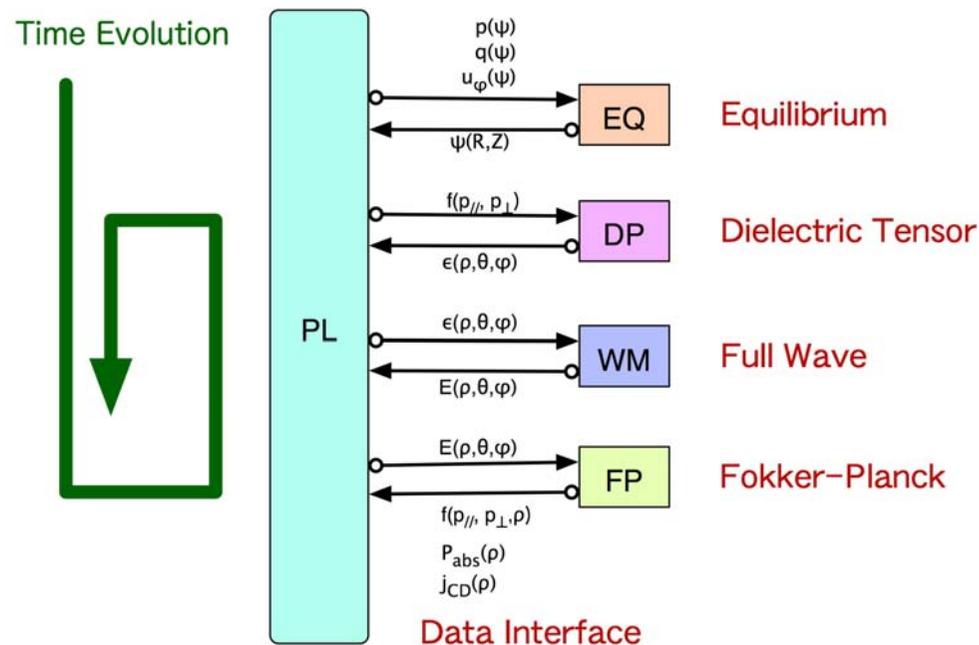
# TOPICS/EQU と TASK/TR を組み合わせた解析例

- **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**



# Self-Consistent Wave Analysis with Modified $f(v)$

- **Modification of velocity distribution from Maxwellian**
  - Absorption of ICRF waves in the presence of energetic ions
  - Current drive efficiency of LHCD
  - NTM controllability of ECCD (absorption width)
- **Self-consistent wave analysis including modification of  $f(v)$**



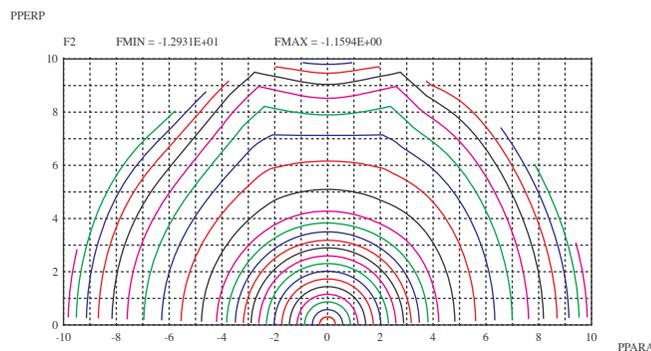
# Development of Self-Consistent Wave Analysis

- **Code Development in TASK**

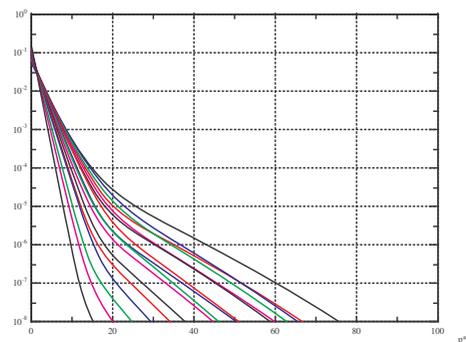
- Ray tracing analysis with arbitrary  $f(v)$ : **Already done**
- Full wave analysis with arbitrary  $f(v)$ : **Completed**
- Fokker-Plank analysis of ray tracing results: **Already done**
- Fokker-Plank analysis of full wave results: **Almost completed**
- Self-consistent iterative analysis: **Preliminary**

- **Tail formation by ICRF minority heating**

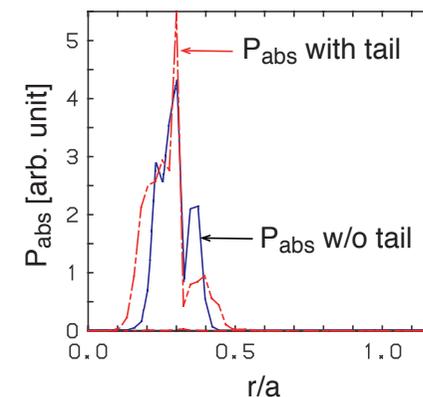
Momentum Distribution



Tail Formation



Power deposition



# 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**

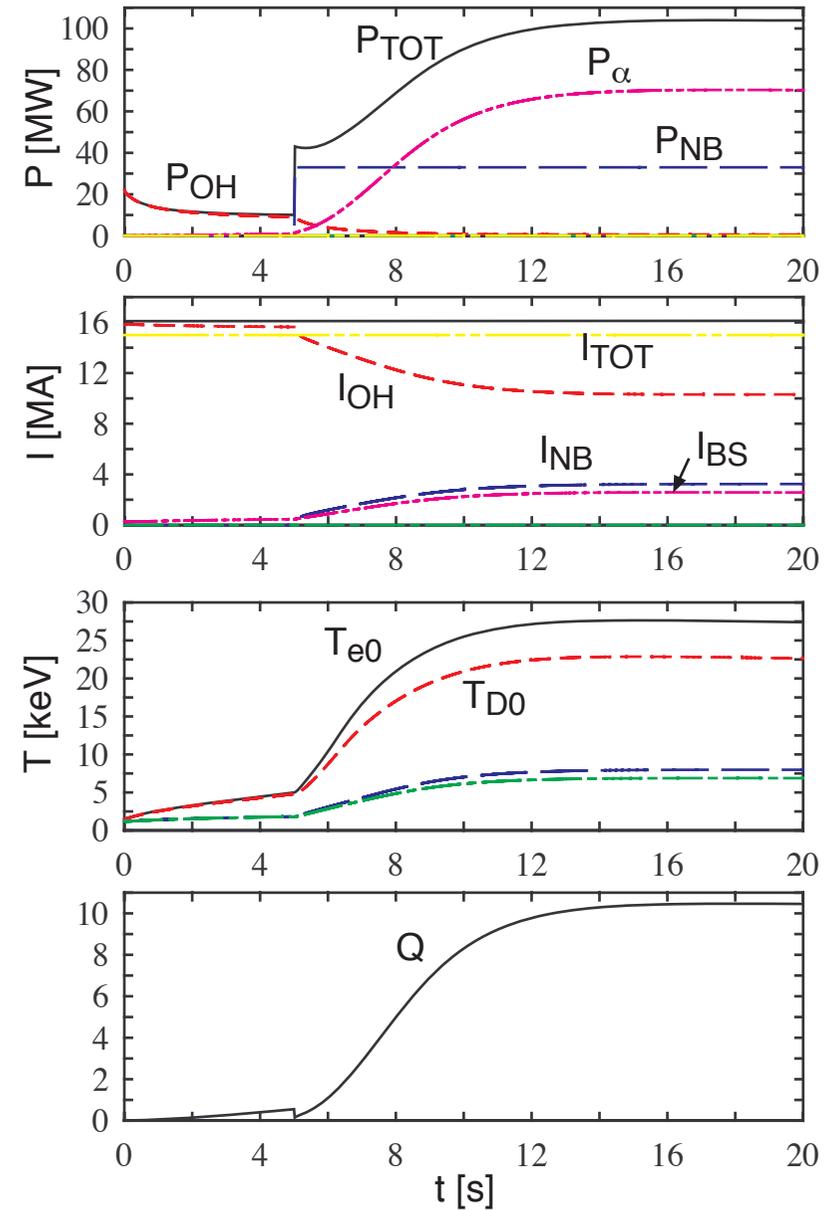
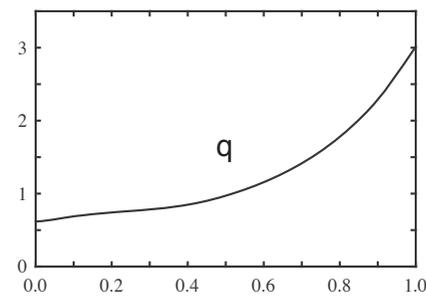
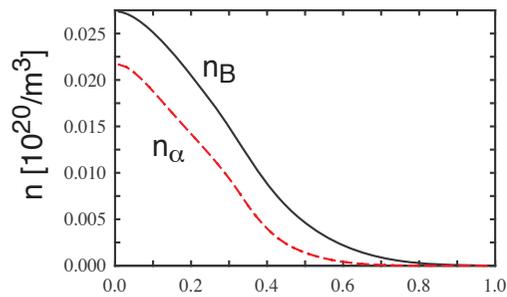
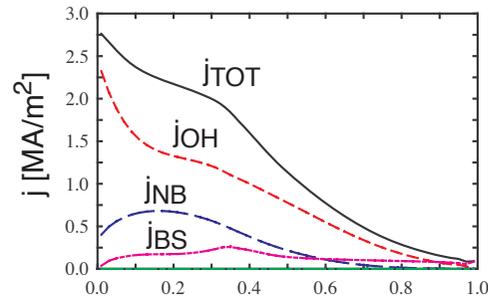
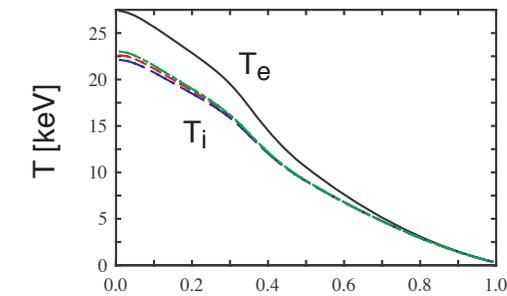
- Standard H-mode operation:  $I_p = 15 \text{ MA}$ ,  $Q \sim 10$

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

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

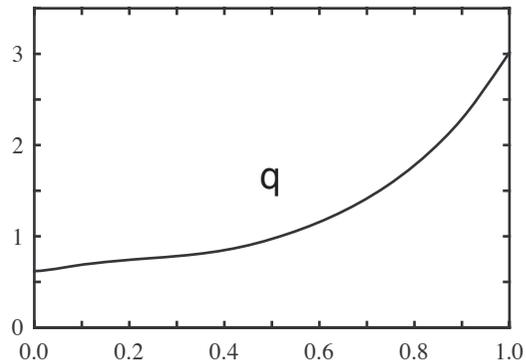
# Standard H-mode Operation

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

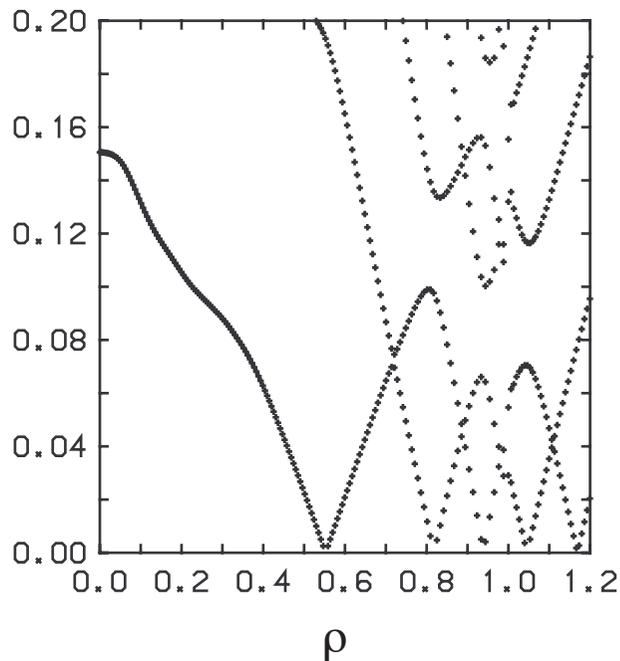


# AE in Standard H-mode Operation

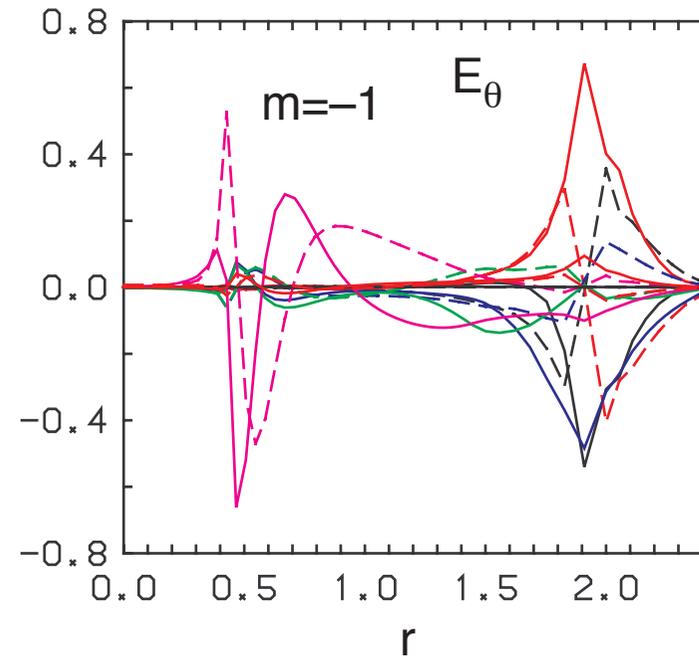
$q$  profile



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DESTAL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

# TASK のロードマップ

	現状	短期 (2年)	中期 (5年)
平衡	固定/自由境界	平衡時間発展	プラズマ立ち上げ解析
炉心プラズマ輸送	1次元拡散型輸送 1次元流体型輸送	1次元運動論型輸送	2次元流体型輸送
SOL プラズマ輸送		2次元流体型輸送	プラズマ・壁相互作用
中性粒子輸送	1次元拡散型輸送	軌道追跡	
高速粒子	運動論的時間発展	軌道追跡	
波動ビーム伝播	光線・ビーム追跡	ビーム伝播法	
波動構造	運動論的誘電率	旋回平均誘電率	軌道平均誘電率
安定性	鋸歯状振動	ティアリングモード	組織的安定性解析
	ELM モデル	抵抗性壁モード	
乱流輸送モデル	CDBM モデル	線形 GK + 帯状流	非線形 ZK + 帯状流
		診断モジュール	
		制御モジュール	

# 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。
- 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が必要であり、**ITER-BA の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重要である。
- 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。