

トカマク統合コード TASK の現状と課題

福山 淳

京都大学 大学院工学研究科

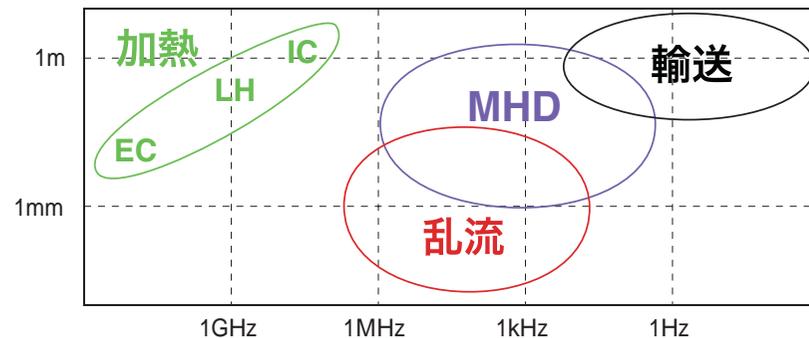
— Contents —

- トカマク統合シミュレーション
- TASK コードの現状
 - 特徴, 構成, モジュール間連携, 解析例 —
- まとめと今後の課題

燃焼プラズマ統合シミュレーション

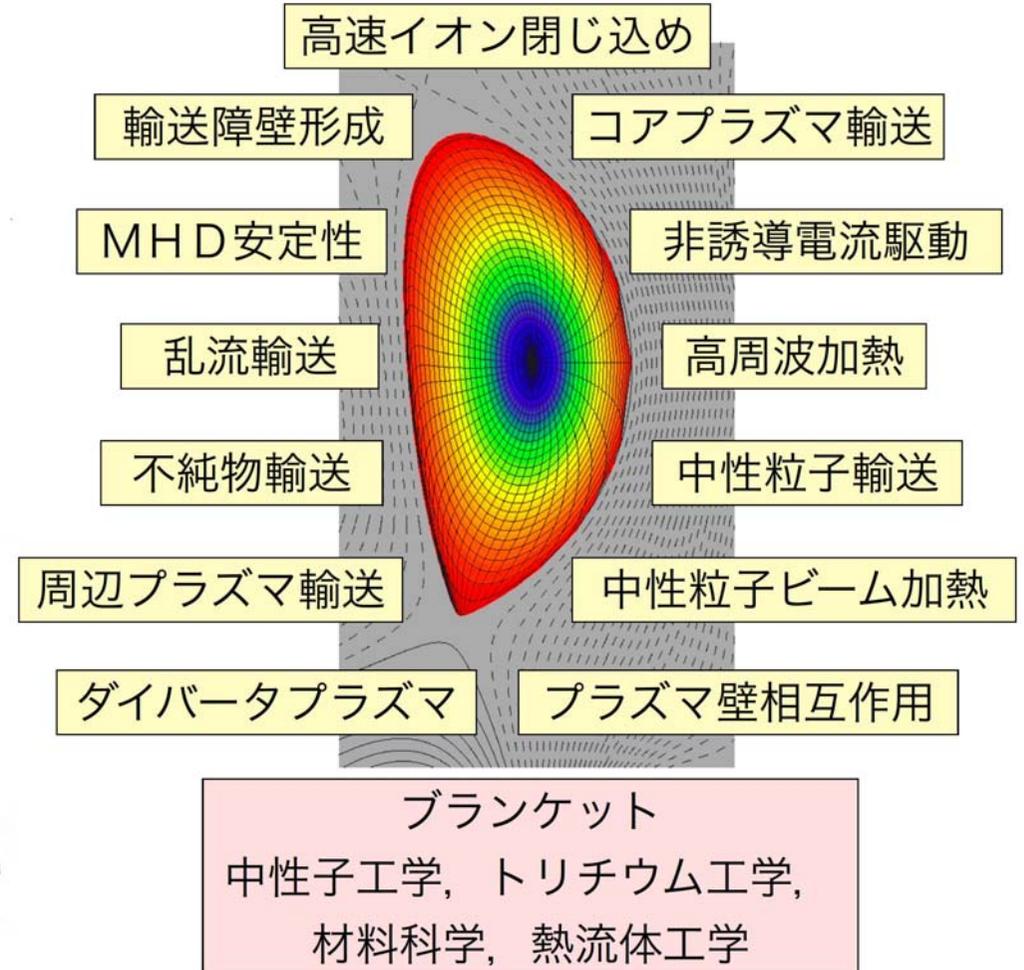
広い時間スケール：
100GHz から 1000s

広い空間スケール：
10 μ m から 10m



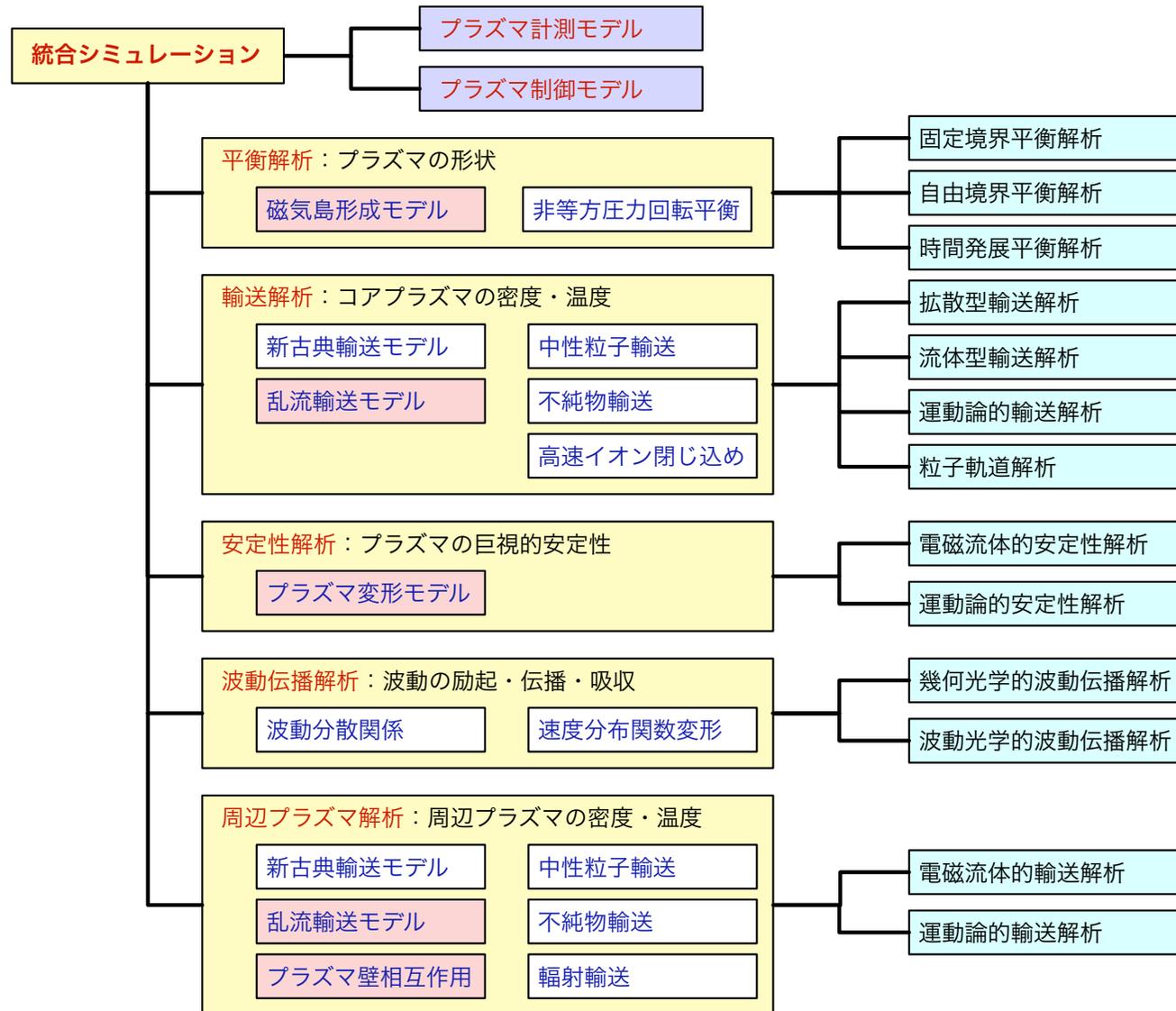
単一のシミュレーションコード
での解析は当面不可能

統合シミュレーション

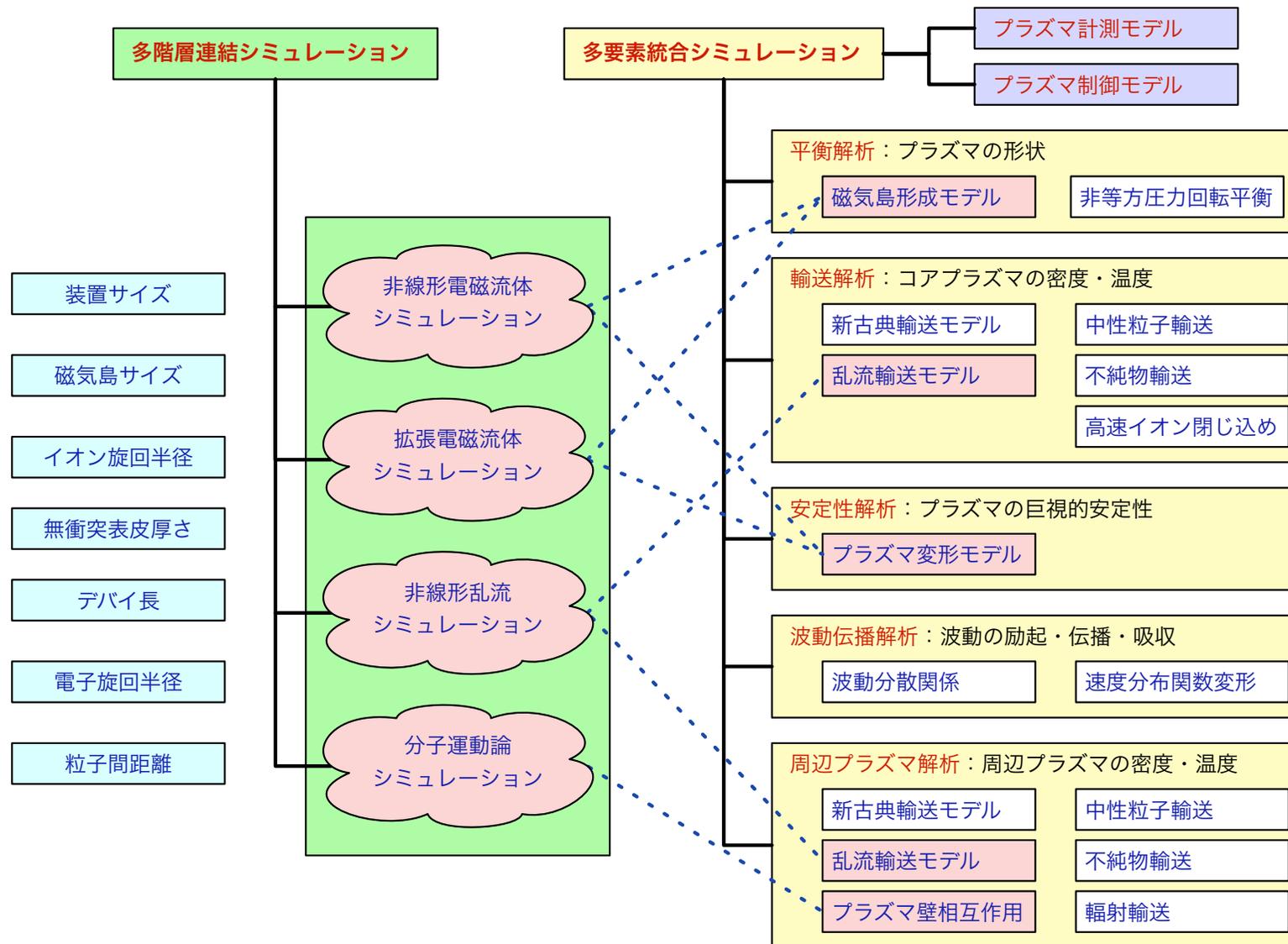


複数のコードを統合したシミュレーションが必要

トカマク統合シミュレーションの構成



多階層連結 vs 多要素連結



TASK コードの特色

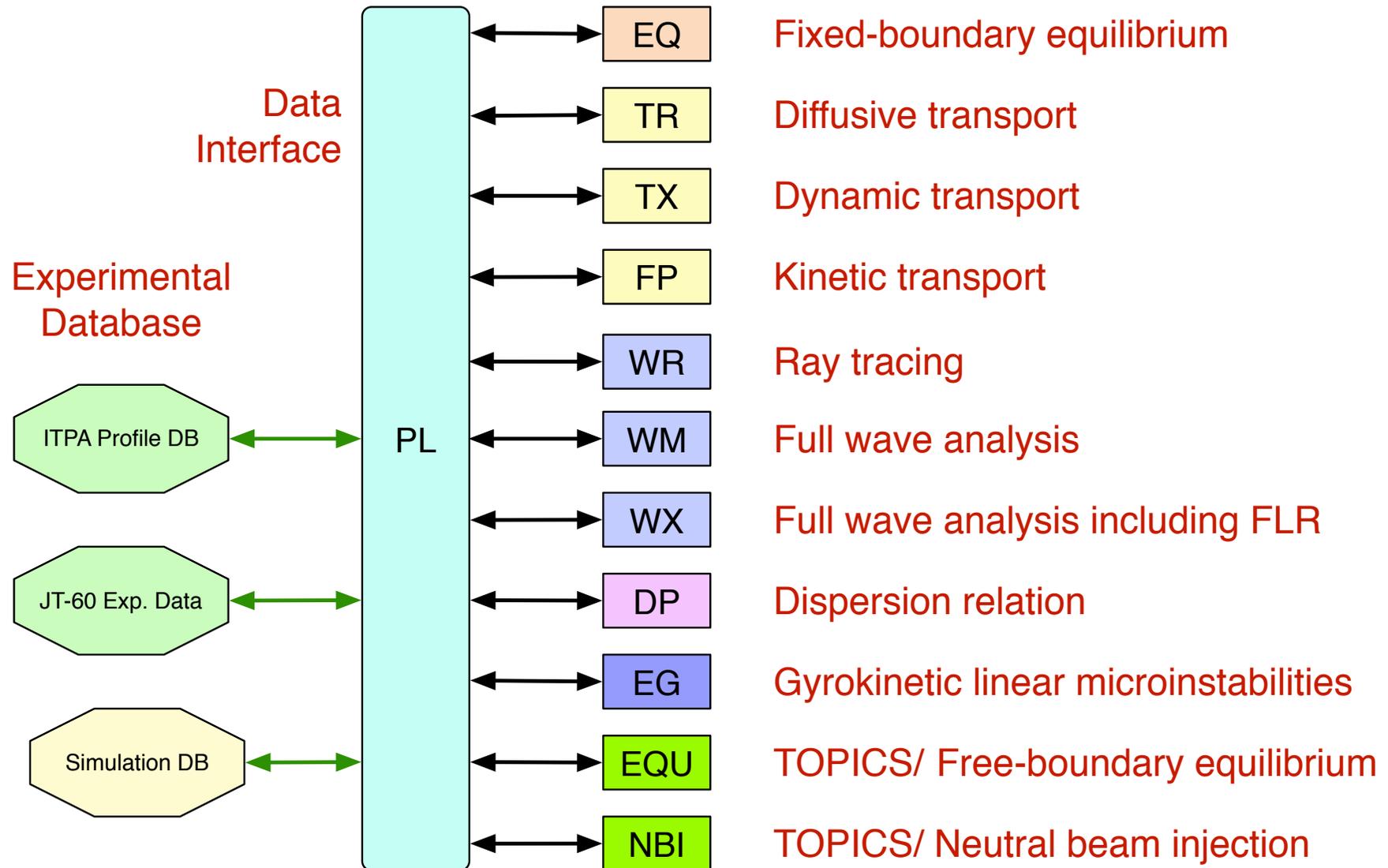
- **トカマクの時間発展シミュレーション**
 - モジュール構造の統合シミュレーション
 - 様々な加熱・電流駆動機構の実装
 - 高い移植性：UNIX系 (Linux, MacOSX, SX-OS 等)
 - MPI ライブラリを用いた並列分散処理
 - 実験データベースの利用：ITPA 分布データベース
 - ソースコードの公開
- **核燃焼プラズマ統合コード構想のコアコード**
 - 最小限の統合コード：モジュールは交換可能
 - インターフェースの標準化：実装の検証
 - ヘリカル系への拡張：NIFS との協力
 - 利用者の拡大：マニュアル等の整備

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 コードのモジュール構造



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
 - 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
 - 共通化されたユーザーインターフェース
- **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,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	$\vec{\epsilon}(\rho, \chi, \zeta)$		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

データ交換インターフェース

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

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

- **プログラム・インターフェース**: モジュールの独立性

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

- **他の機能**:

- 時系列化, ファイル入出力, データ表示共通化

実行制御インターフェース

● TASK/TR の例

TR_INIT	初期化：標準値設定	BPSX_INIT('TR')
TR_PARM(ID,PSTR)	パラメータ設定 (Namelist)	BPSX_PARM('TR',ID,PSTR)
TR_SETUP(T)	初期条件設定：空間分布 (時刻)	BPSX_SETUP('TR',T)
TR_EXEC(DT)	1ステップ実行 (時間ステップ)	BPSX_EXEC('TR',DT)
TR_GOUT(PSTR)	グラフ表示 (図形コマンド)	BPSX_GOUT('TR',PSTR)
TR_SAVE	データ保存：restart file	BPSX_SAVE('TR')
TR_LOAD	データ読込：再実行	BPSX_LOAD('TR')
TR_TERM	終了処理	BPSX_TERM('TR')

● コンポーネント登録

TR_STRUCT%INIT=TR_INIT

TR_STRUCT%PARM=TR_PARM

TR_STRUCT%EXEC=TR_EXEC

...

BPSX_REGISTER('TR',TR_STRUCT)

データ構造例 : **plasmaf**

```
type bpsd_plasmaf_data
  real(8) :: pn      ! Number density [m-3]
  real(8) :: pt      ! Temperature [eV]
  real(8) :: ptp    ! Parallel temperature [eV]
  real(8) :: ptp    ! Perpendicular temperature [eV]
  real(8) :: pu      ! Parallel flow velocity [m/s]
end type bpsd_plasmaf_data
type bpsd_plasmaf_type
  real(8) :: time
  integer :: nrmax    ! Number of radial points
  integer :: nsmax    ! Number of particle species
  real(8), dimension(:), allocatable :: s
                                ! (rho2) : normarized toroidal flux
  real(8), dimension(:), allocatable :: qinv
                                ! 1/q : inverse of safety factor
  type(bpsd_plasmaf_data), dimension(:, :), allocatable :: data
end type bpsd_plasmaf_type
```

コンポーネントの実行手順例

- **TR_EXEC(dt)**

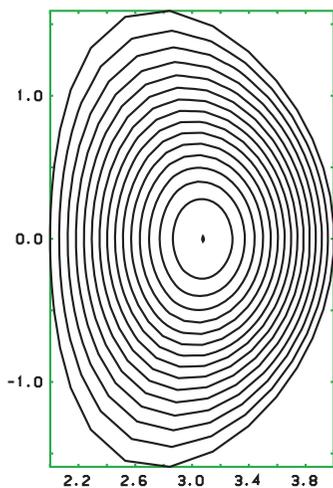
```
call bpsd_get_data(plasmaf,ierr)
call bpsd_get_data(metric1D,ierr)
< local data <- plasmaf,metric1D >
< advance time step dt >
< plasmaf <- local data >
call bpsd_set_data(plasmaf,ierr)
```

- **EQ_CALC**

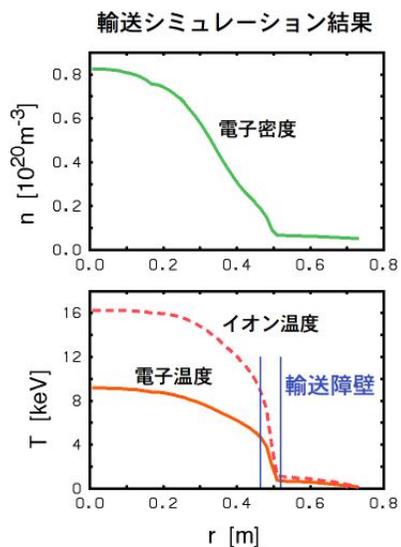
```
call bpsd_get_data(plasmaf,ierr)
< local data <- plasmaf >
< calculate equilibrium >
< update plasmaf >
call bpsd_set_data(plasmaf,ierr)
< equ1D,metric1D <- local data >
call bpsd_set_data(equ1D,ierr)
call bpsd_set_data(metric1D,ierr)
```

TASK コードによる解析例

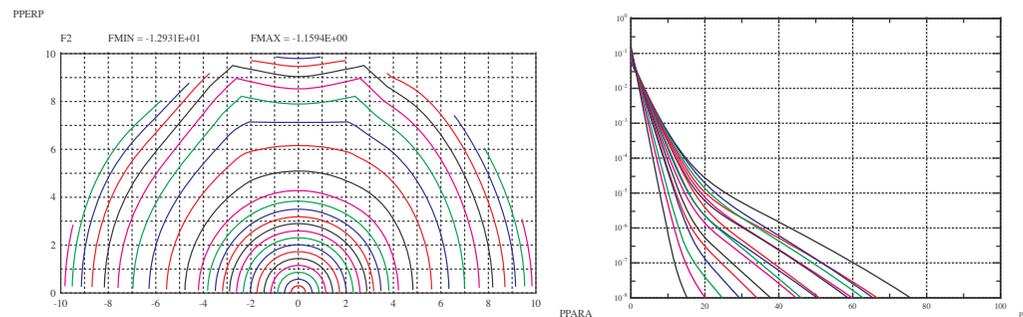
EQ



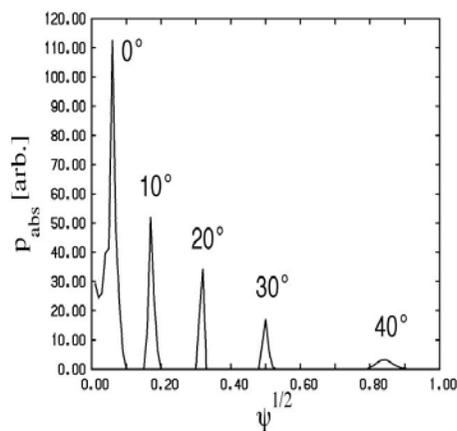
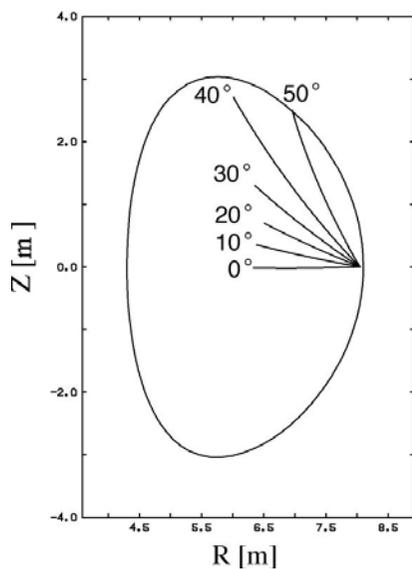
TR



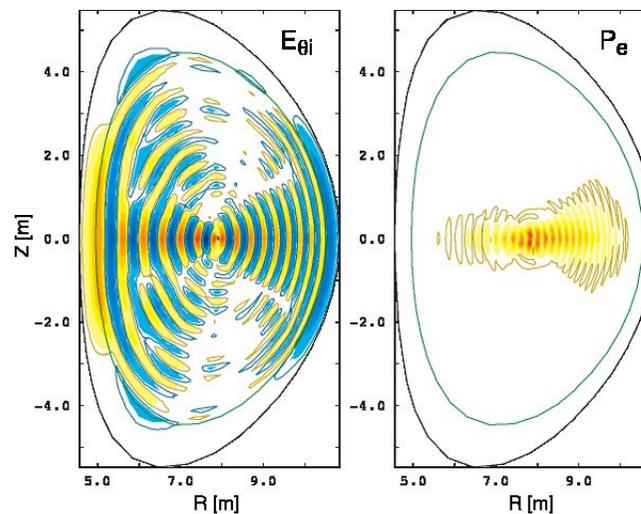
FP (ICRF tail formation)



WR (ECCD ray tracing)



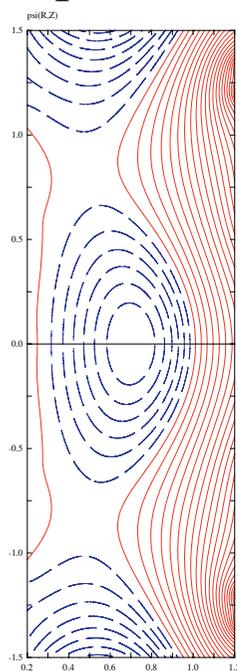
WM (fast wave heating)



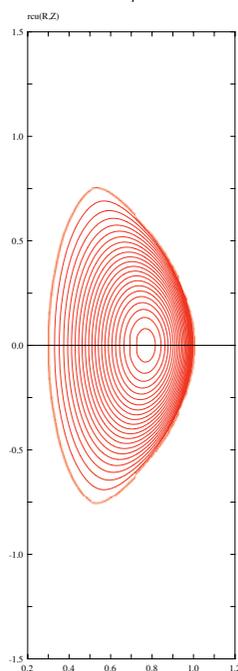
TOPICS/EQU と TASK/TR を組み合わせた解析例

- **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 :
 - $R = 0.64$ m, $a = 0.36$ m, $B = 0.64$ T, $I_p = 300$ kA, **OH+LHCD**

$\psi_p(R, Z)$

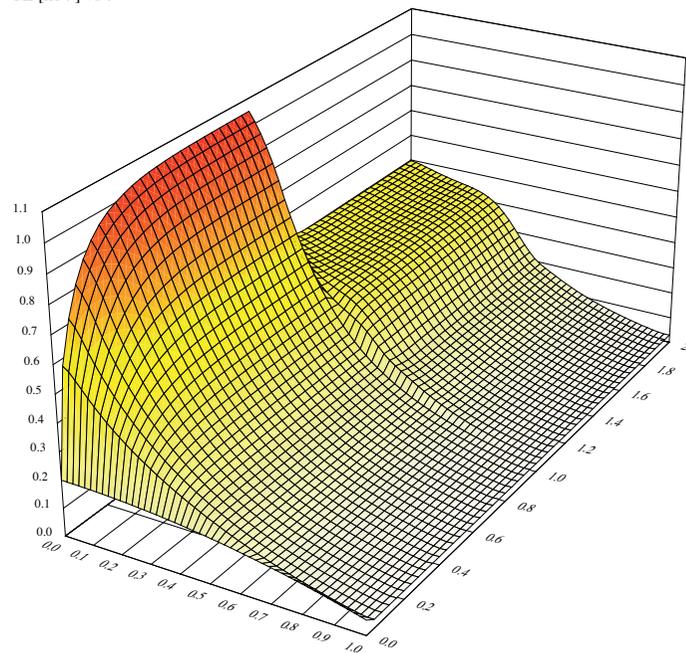


j_ϕ



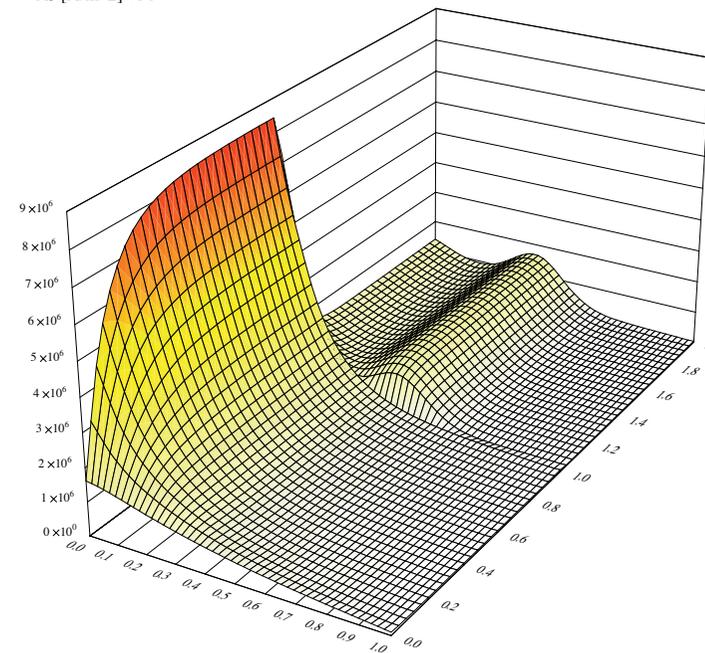
$T_e(\rho, t)$

TE [keV] vs t



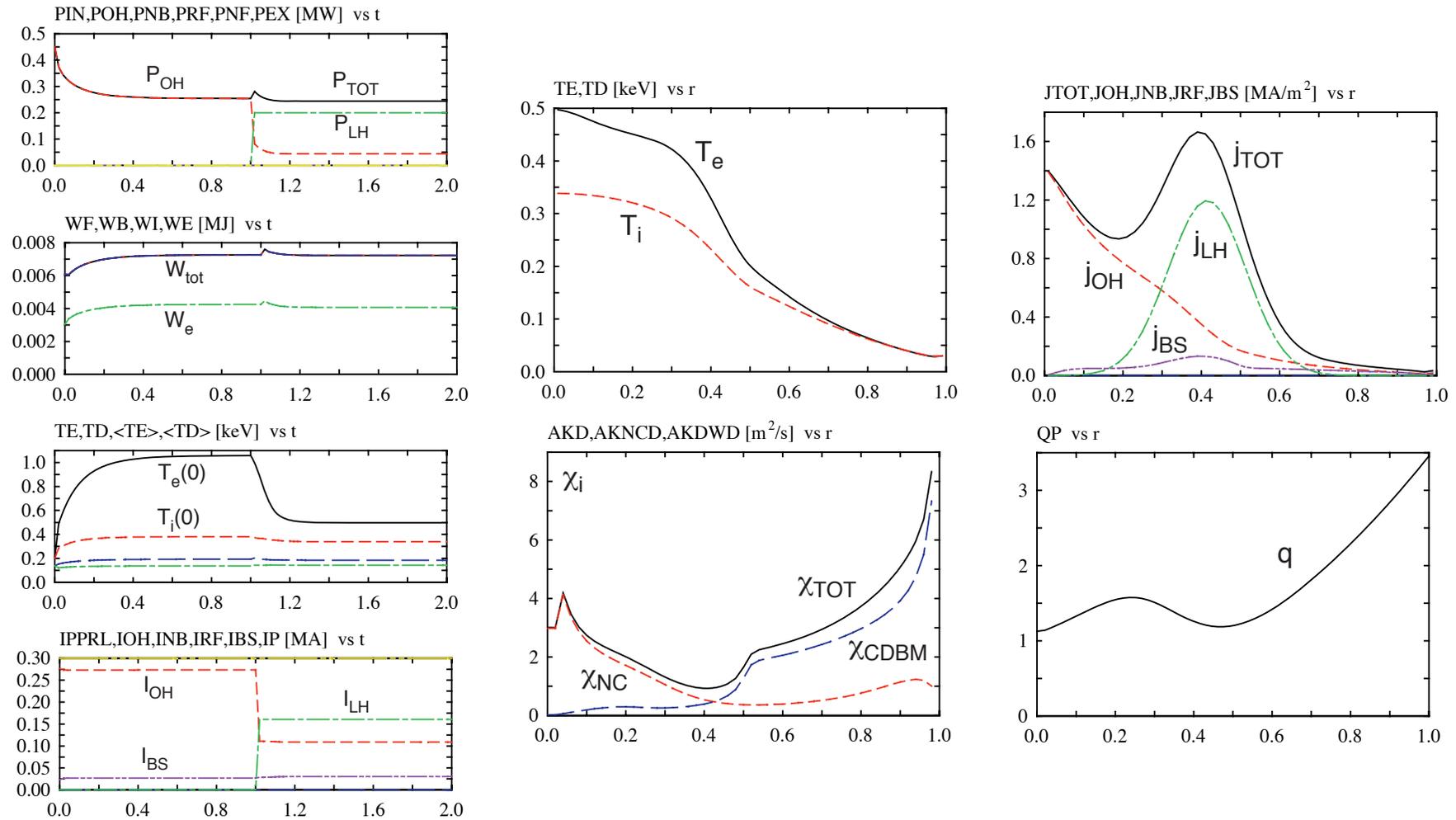
$j_{||}(\rho, t)$

AJ [A/m^2] vs t



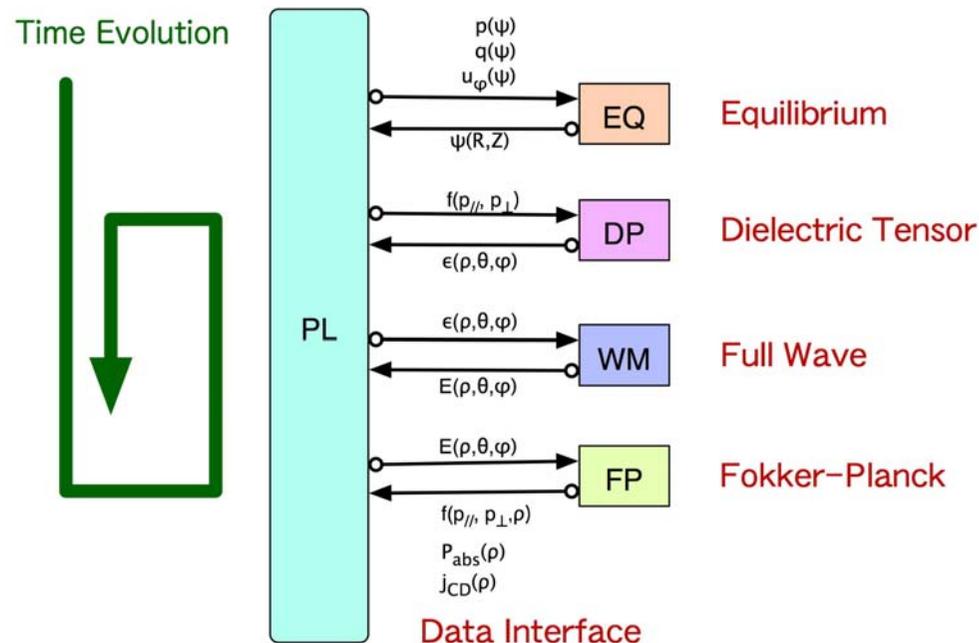
QUEST 輸送シミュレーション例

- OH + off-axis LHCD: 200 kW
- 内部輸送障壁形成 (equilibrium not solved)



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

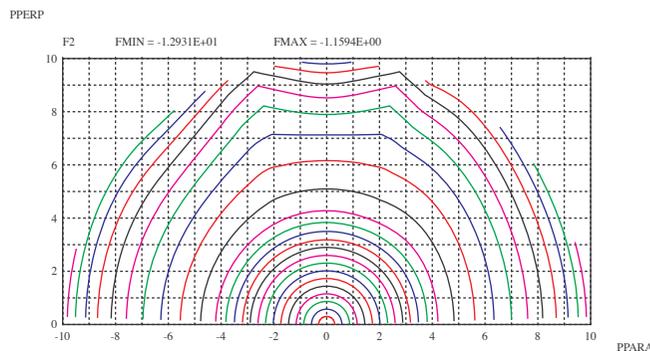
● TASK コードにおける解析

- **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

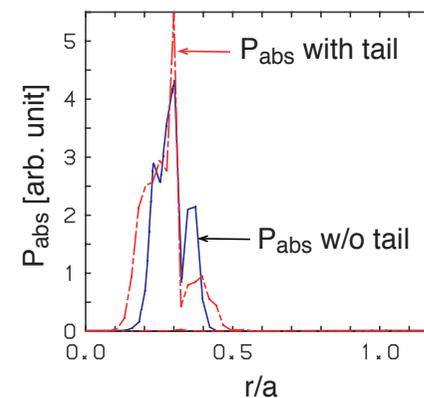
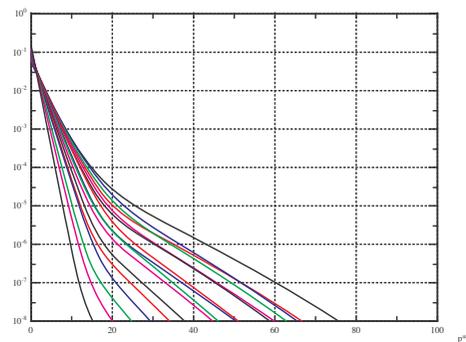
● 高速イオンテイルの形成

- 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



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

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	

統合コードの計算環境

- **必要計算資源の飛躍的増大**
 - 予測対象の増大（モジュールの増加）
 - 予測精度の向上（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 数にスケーラブルな高速化
 - 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．
- 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．