

2005/01/14

大阪大学レーザーエネルギー学センター  
シミュレーション GRID 情報交換会

# トカマクプラズマ解析コード TASK の現状と課題

福山 淳 (京大工)

## 内容

- 核燃焼プラズマ統合コード構想 : **BPSI**
- トロイダルプラズマ解析コード : **TASK**
- 今後の課題 ( 並列化 , 分散化 , ... )

# 核燃焼プラズマ統合コード構想

## BPSI: Burning Plasma Simulation Initiative

ITER に向けて，自律性の高い核燃焼プラズマの定量的記述が必要

- 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に向けて，  
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

### 大規模シミュレーション

非線形物理現象の解明に大きな成果

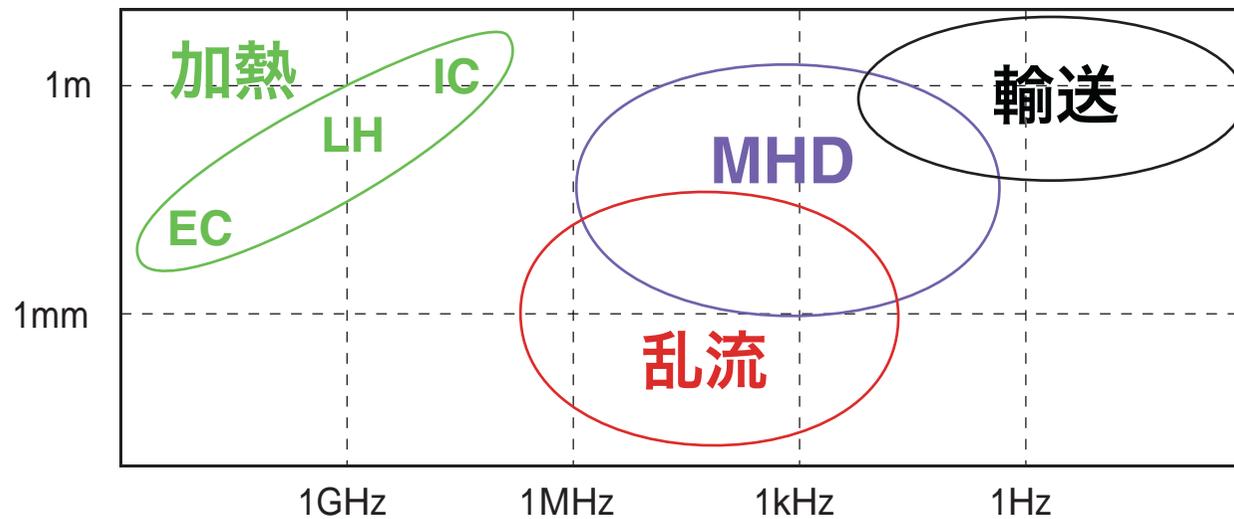
**MHD不安定性，乱流輸送現象，波-プラズマ相互作用等**

個々の現象を詳細に解析

# 核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  $\mu$  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

複数のコードを統合したシミュレーションが必要

# 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

## 新しい物理モデル：階層型物理モデル

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・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

計算機クラスター間の連携：計算資源の有効利用  
図形表示の高度化

# 核燃焼プラズマ統合シミュレーション構想

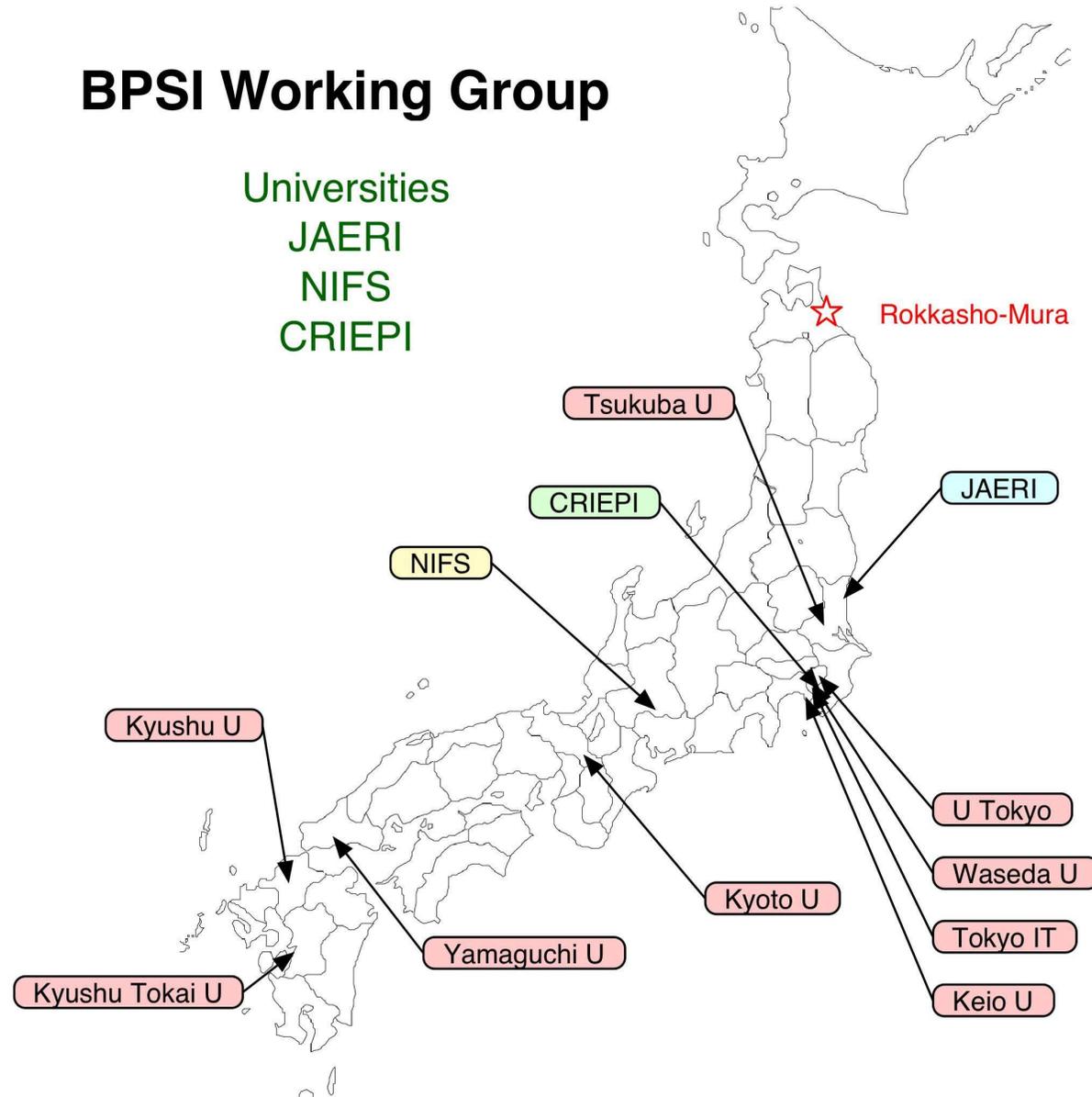
## BPSI Working Group

Universities

JAERI

NIFS

CRIEPI



# TASK コードの特色

---

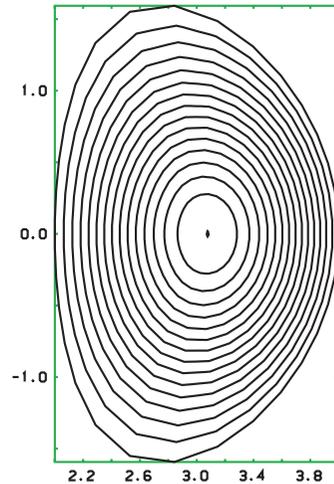
- トカマクの時間発展シミュレーション
  - モジュール構造の統合シミュレーション
  - 様々な加熱・電流駆動機構
  - 高い移植性
  - ヘリカル系への拡張
  - MPI ライブラリを用いた並列分散処理
  - 実験データベースの利用
- 核燃焼プラズマ統合コード構想のコアコード
  - 最小限の統合コード：モジュールは交換可能
  - インターフェースの標準化：実装の検証
  - 利用者の拡大：マニュアル等の整備

# TASK コード

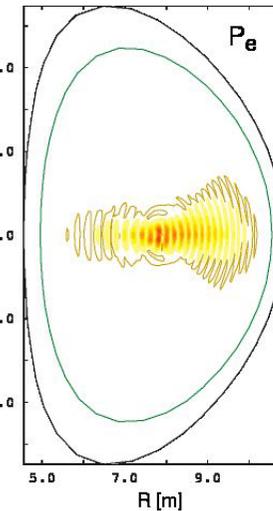
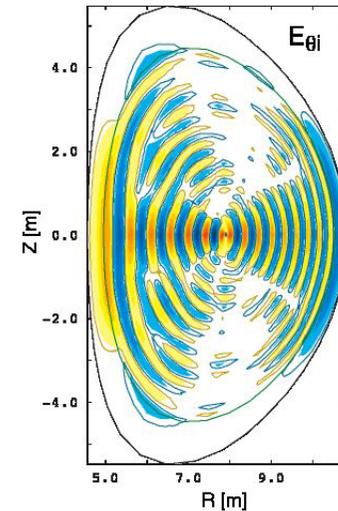
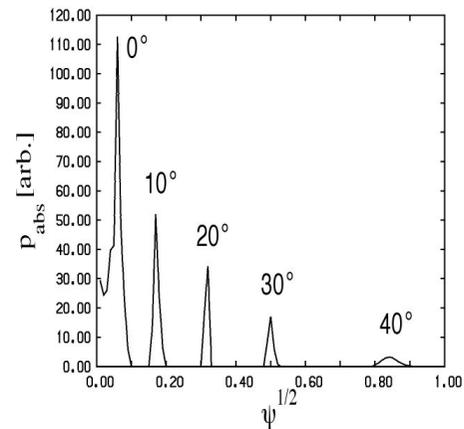
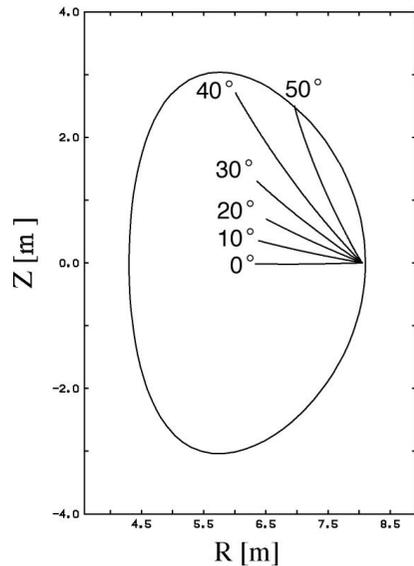
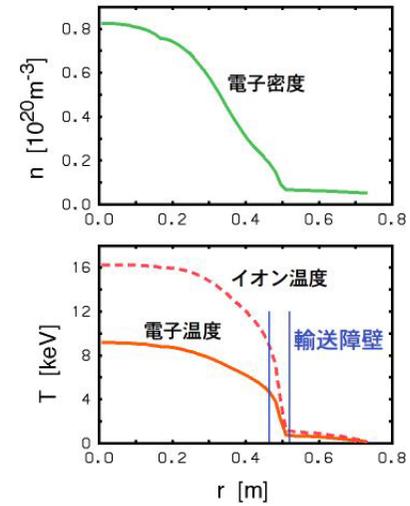
- Transport Analyzing System for tokamak
- モジュール

<b>TASK/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</b>	共通ライブラリ	行列解法，特殊関数
<b>PL</b>	分布データ変換	磁気面座標 ↔ 実座標，分布データベース
<b>EX</b>	2次元平衡解析	自由境界，有限要素法
<b>TX</b>	1次元輸送解析	流体型輸送方程式，輸送モデル
<b>WA</b>	線形安定性解析	波動解析，MHD不安定性，運動論的效果

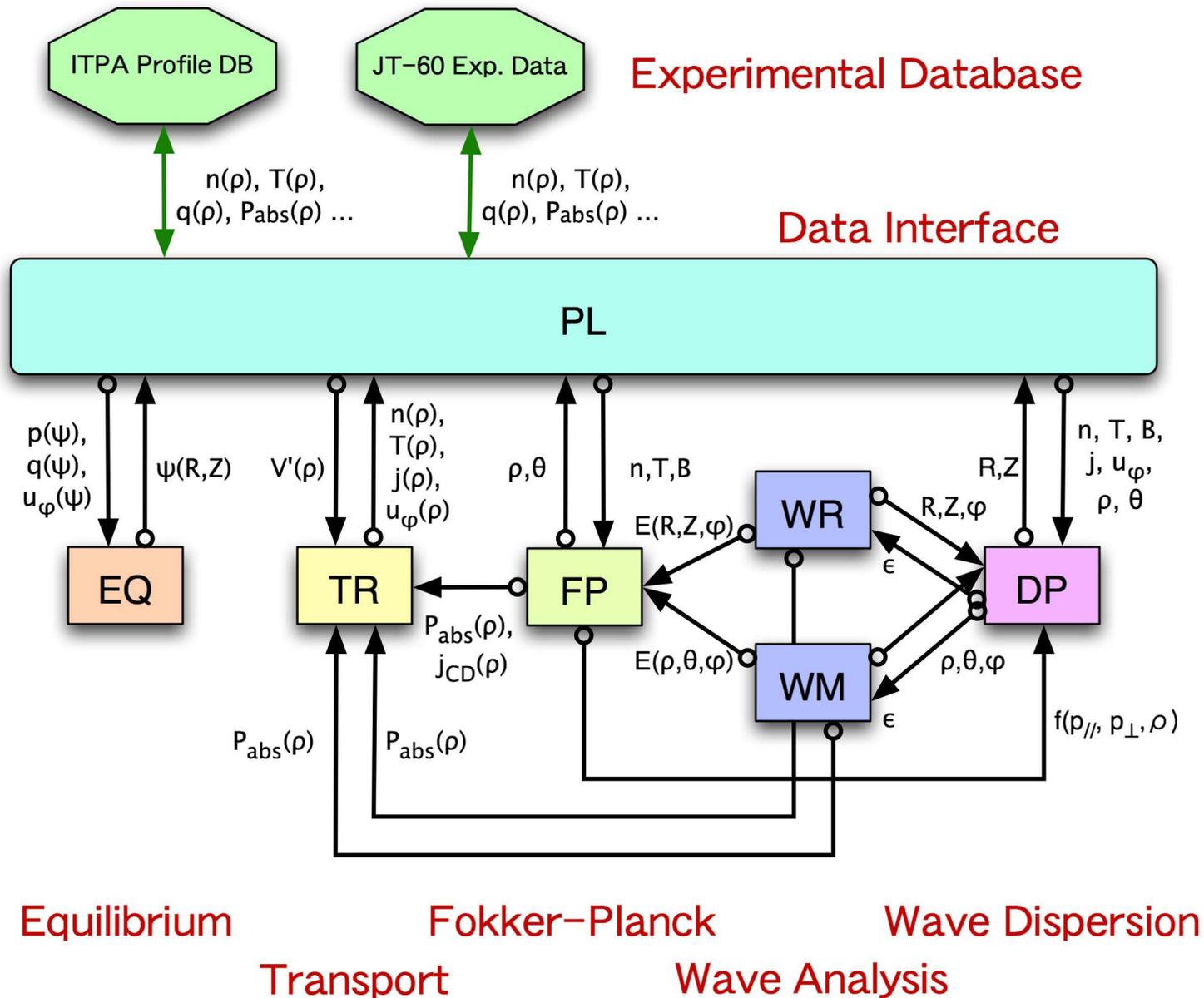
# TASK コードのモジュール EQ, TR, WR, WM による解析例



輸送シミュレーション結果



# TASK コードの現在の構成

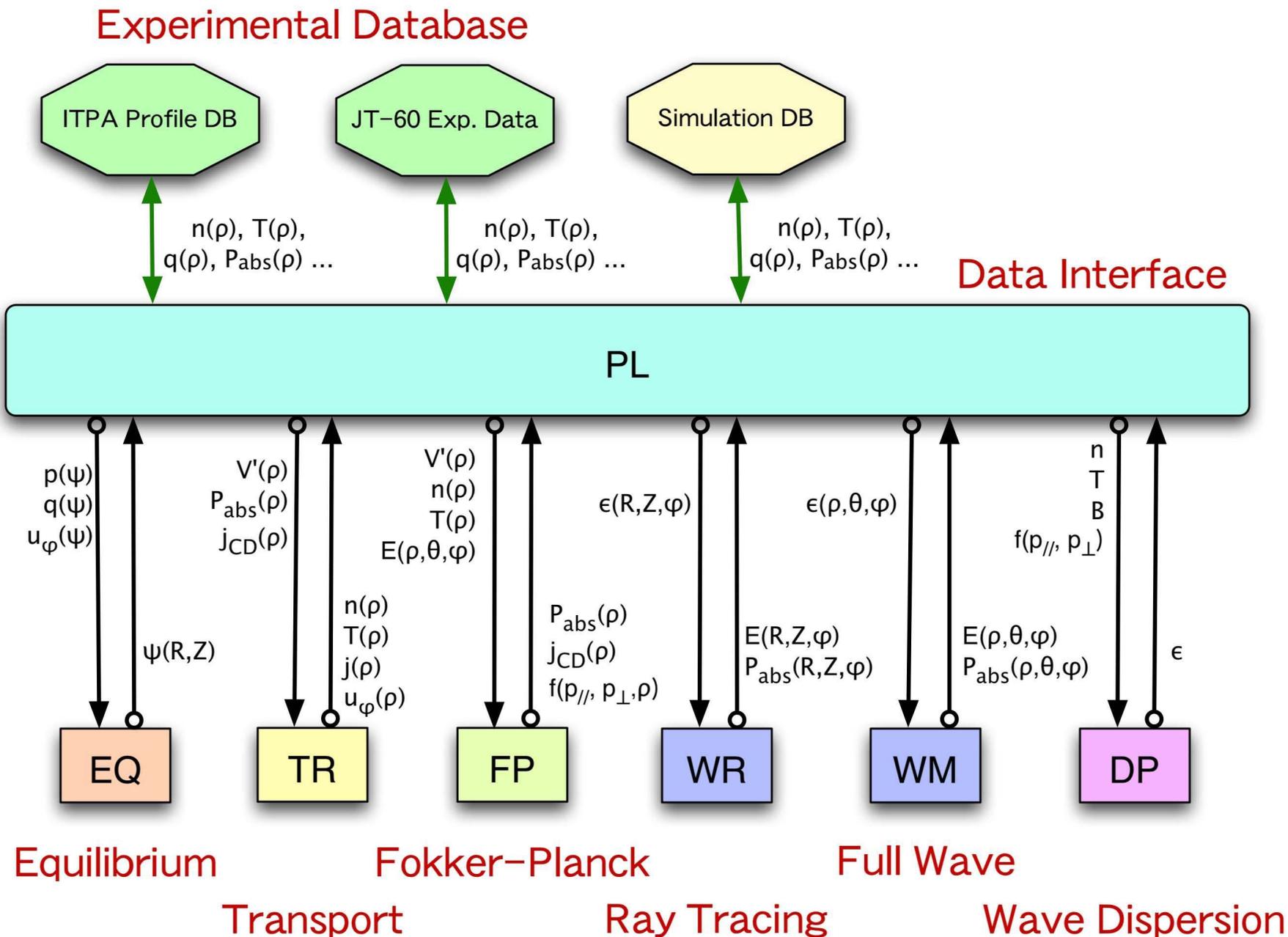


# 開発中

---

- **新しいモジュール**
  - **EX**: 自由境界の2次元平衡解析 (プラズマ立ち上げ)
  - **TX**: 流体型輸送解析 (プラズマ回転, 径方向電界)
  - **WA**: 運動論効果を含めた巨視的安定性解析
  - **WI**: 積分方程式による波動伝播解析 (有限幅軌道効果, 磁気ミラー効果)
- **3次元ヘリカル配位への拡張**
  - **3次元データ構造**
  - **3次元平衡コードとの結合: VMEC, HINT**
  - **波動解析**: 既に3次元
  - **輸送解析**: 新しい輸送モデルが必要
- **新しいモジュール構造**

# TASK コードの新しい構成



# ITPA Profile Database

---

- **The International Multi-Tokamak Confinement Profile Database**
  - <http://tokamak-profiledb.ukaea.org.uk/>
  - Maintained mainly by ITPA/CDBM group
  - Very convenient for transport modeler
- **Contents**
  - **1998 Public Release**
  - **Working Database** (Restricted)
  - **ITB Database** (Restricted)
- **Structure**
  - **0D data**: machine ID, shot ID
  - **1D data**: Time dependent global data
  - **2D data**: Time dependent profile data

# List of Stored Data

---

- **Definition:**

<http://tokamak-profiledb.ukaea.org.uk/DOCS/PDBMAN/pdbman.html>

- **0D data:**

TOK	UPDATE	DATE	SHOT	TIME	AUXHEAT	PHASE	STATE	PGASA	PGASZ
BGASA	BGASZ	BGASA2	BGASZ2	PIMPA	PIMPZ	PELLET	RGEO	RMAG	AMIN
SEPLIM	XPLIM	KAPPA	DELTA	INDENT	AREA	VOL	CONFIG	IGRADB	WALMAT
DIVMAT	LIMMAT	EVAP	BT	IP	VSURF	Q95	BEPMHD	BETMHD	BEPDIA
NEL	DNELDT	ZEFF	PRAD	POHM	ENBI	PINJ	BSOURCE	PINJ2	BSOURCE2
COCTR	PNBI	ECHFREQ	ECHMODE	ECHLOC	PECH	ICFREQ	ICSCHEME	ICANTEN	PICRH
LHFREQ	LHNPAR	PLH	IBWFREQ	PIBW	TE0	TI0	WFANI	WFICRH	MEFF
ISEQ	WTH	WTOT	DWTOT	PL	PLTH	TAUTOT	TAUTH		

- **1D data:**

IP	BT	AMIN	RGEO	KAPPA	DELTA	INDENT	PNBI	PECH	PICRH
PLH	PIBW	PFLOSS	PRAD	ZEFF	NEL	VSURF	LI	NMAIN0	THNT
WTH	WTOT	TE0	TI0	Q95	POHM	IBOOT	PHIA	PFUSION	

- **2D data:** (+: error bar, \*: raw, fitted, error bars)

TE*	TI*	NE*	NM1*	NM2*	NM3*	NIMP*	VROT*
QNBIE	QICRHE	QECHE	QLHE	QIBWE	SNBIE	QFUSE	QWALLE
QNBII	QICRHI	QECHI	QLHI	QIBWI	SNBII	QFUSI	QWALLI
CURTOT+	CURICRH	CURECH	CURLH	Q+	IOTAVAC		
QOHM	QEI	ZEFFR+	NFAST	QRAD	SWALL		
CHIE	CHII	DWER	DWIR	DNER			
BPOL	RMAJOR	RMINOR	VOLUME	KAPPAR	DELTAR	INDENTR	
SURF	GRH01	GRH02					

# Necessary Data for Integrated Modeling

---

- **Machine ID, Shot ID, Model ID**
- **Equilibrium Data:** e.g. EFIT
- **Plasma Status Data**
  - **Plasma Fluid Data:** Fluid quantities
  - **Plasma Kinetic Data:** Momentum distribution
  - **Electromagnetic Data:** Quasi-static  $B, j, E$
- **Wave Data**
  - **Wave Characteristics:**  $f, k$ , Power
  - **Electromagnetic Wave Data:**  $E, B$ , Ray characteristics
- **Transport Data**
  - **Particle Source and Sink:**  $S$
  - **Momentum Source and Sink:**  $j_{CD}, M_\phi$
  - **Power Source and Sink:**  $P_{OH}, P_{abs}, P_{rad}$
  - **Transport Coefficients:**  $D, \chi$

# 実験データベース

---

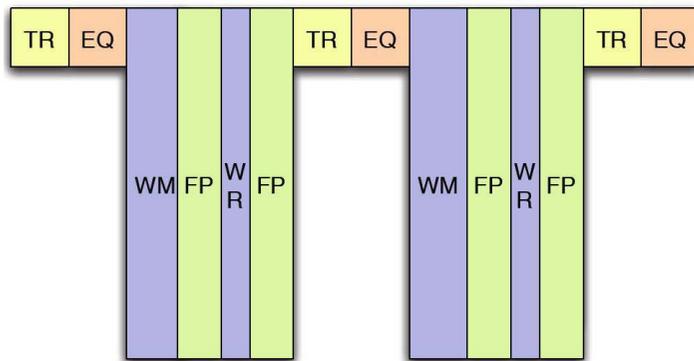
- **FTP server:** UFILE (ascii data)
- **MDSPlus:** <http://www.mdsplus.org/>
  - 実験データベースマネージャー
  - MIT で開発．米国の多くの実験装置や ITPA 分布データベースで利用．
  - 階層化されたデータベース
    - 装置名
    - ショット番号
    - データ種類

# TASK コードの並列化・分散化

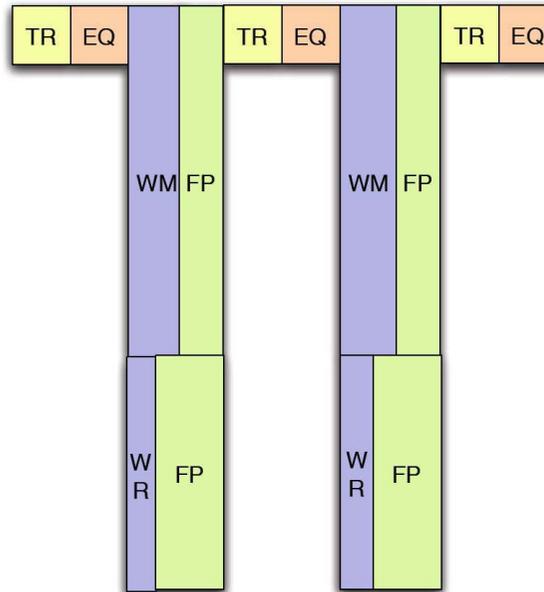
## 逐次型



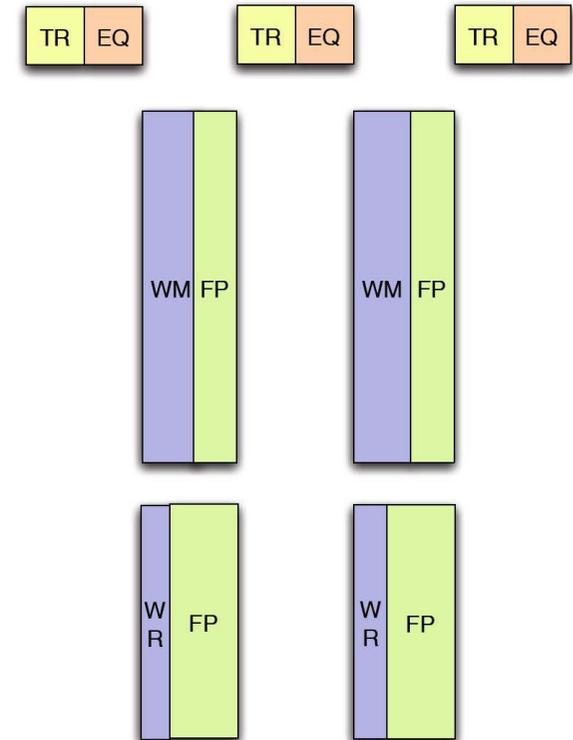
## 単純並列型



## 多重並列型



## 分散並列型



# TASK コードの今後の課題

---

- **短期課題** : 日米ワークショップ ( 9月 ) , ITPA ( 1 1月 )
  - **コード構成の変更** : インターフェースの統一 ( データ , 実行 , ユーザー )
  - **データ交換インターフェース仕様の策定**
  - **ソースプログラムの公開** : CVS による開発
  - **モジュール連携の検証** : EQ/TR/WR/FP/DP : 定常運転シナリオ
  - **簡易マニュアルの作成**
  - **TASK/EQ の改良** :  $q(r)$  vs.  $j(r)$
- **中期課題** : 1 年後
  - **輸送モデルの改良** : ITG+KBM : ITPA 分布 DB との比較 , JT-60U 実験データ
  - **自由境界平衡モジュール TASK/EX の導入** : プラズマ立ち上げ
  - **流体型輸送モジュール TASK/TX の導入** : エッジプラズマモデル
  - **LHDにおける電流分布時間発展** ( NIFS 共同研究 : 代表 中村 )
  - **波動加熱・電流駆動の改良** : 局所波動減衰 vs. 軌道平均準線形拡散
  - **FORTRAN90 への移行** , 並列処理の拡大 , クラスタ間連携

# まとめ

---

- 核燃焼プラズマの時間発展をシミュレーションするため，平衡・輸送解析をベースにした統合コード構想が進展している．そのコアとなるコードとして TASK コードを開発している．
- TASK コードには，平衡，輸送，波動伝播，速度分布等のモジュールが含まれ，モジュール間のデータ交換により，加熱・電流駆動を含めた時間発展解析が可能である．
- 今後の目標
  - インターフェース策定：データ交換，実行制御
  - コードの整備：
    - モジュール間連携
    - モジュール内並列化
    - モジュールの分散実行
    - 新モジュールの開発
  - 利用者の拡大：マニュアル作成，ソース公開，利用説明 web
  - 対象の拡大：ITPA, JT-60, LHD, ST, RFP

# 拡散型輸送解析：TASK/TR

---

- 勾配と流束の関係を用いた輸送方程式
  - 多種粒子成分：例：電子，重水素イオン，三重水素イオン，ヘリウム  
— 密度，熱エネルギー（トロイダル回転）
  - 2つのビーム成分：ビームイオン，高速 粒子等  
— 密度，トロイダル回転
  - 中性粒子：2温度成分（冷，熱），拡散方程式
  - 不純物：バルク粒子成分に含まれるか，固定分布
- 輸送モデル
  - 新古典輸送モデル: Wilson, Hinton & Hazeltine, Sauter, NCLASS
  - 乱流輸送モデル: CDBM (current diffusive ballooning mode), GLF23 (V1.61), IFS/PPPL, Weiland
- 実験分布データとのインターフェース
  - UFILE (ITPA profile DB)
  - MDSPlus (data base manager)

# 波動分散解析：TASK/DP

---

- 誘電率テンソルのさまざまなモデル: (利用可能, 開発中)
  - 抵抗性 MHD モデル
  - 衝突を含めた冷たいプラズマモデル
  - 衝突を含めた暖かいプラズマモデル
  - 運動論的プラズマモデル (Maxwellian, 非相対論的)
  - 運動論的プラズマモデル (Maxwellian, 相対論的)
  - 運動論的プラズマモデル (任意速度分布, 非相対論的)
  - 運動論的プラズマモデル (任意速度分布, 相対論的)
  - ジャイロ運動論的プラズマモデル (Maxwellian, 非相対論)
  - ジャイロ運動論的プラズマモデル (任意速度分布, 非相対論的)
- 入力パラメータ：
  - $n, u_{\parallel}, T, B$
  - $n, u_{\parallel}, T, B, \nabla_{\perp} n, \nabla_{\perp} T, \nabla_{\perp} B, E_{\perp}$

# 幾何光学的波動伝播解析：TASK/WR

- 光線追跡法：

- 媒質の不均一の特性長  $L$  に比べて波長  $\lambda$  が十分小さい場合
- 伝播方向に対して垂直な方向の広がり  $d$  が十分大きい平面波

- ビーム追跡法

- 回折効果を含めて有限の太さをもつ波動ビームの伝搬を解析
- 展開パラメータ  $\delta = \sqrt{\lambda/L} \ll 1$
- **ビーム形状**：ガウシアンビームの場合（エルミート多項式  $H_n$ ）

$$E(\mathbf{r}) = \text{Re} [C(\delta^2 \mathbf{r}) \mathbf{e}(\delta^2 \mathbf{r}) e^{i s(\mathbf{r}) - \phi(\mathbf{r})}]$$

— 振幅： $C$ ，偏波ベクトル： $\mathbf{e}$ ，位相： $s(\mathbf{r}) + i\phi(\mathbf{r})$

$$s(\mathbf{r}) = s_0(\tau) + k_\alpha^0(\tau)[r^\alpha - r_0^\alpha(\tau)] + \frac{1}{2} s_{\alpha\beta}[r^\alpha - r_0^\alpha(\tau)][r^\beta - r_0^\beta(\tau)]$$

$$\phi(\tau) = \frac{1}{2} \phi_{\alpha\beta}[r^\alpha - r_0^\alpha(\tau)][r^\beta - r_0^\beta(\tau)]$$

—  $r_0$  はビーム軸の位置， $k^0$  は軸上での波数

— ビームの等位相面の**曲率半径**： $R_\alpha = 1/\lambda s_{\alpha\alpha}$ ，**ビーム径**： $d_\alpha = \sqrt{2/\phi_{\alpha\alpha}}$

# 速度分布解析：TASK/FP

---

- 速度分布関数  $f(p_{\parallel}, p_{\perp}, \psi, t)$  に対するフォッカー-プランク方程式

$$\frac{\partial f}{\partial t} = E(f) + C(f) + Q(f) + L(f) \quad (1)$$

- $E(f)$  : 直流電界による加速項
  - $C(f)$  : クーロン衝突による衝突項
  - $Q(f)$  : 波との共鳴によって生じる準線形拡散項
  - $L(f)$  : 空間的拡散項
- 軌道平均 : バナナ軌道幅は 0 として軌道平均 , 捕捉粒子効果
  - 相対論的 : 運動量  $p$  , 衝突項は弱相対論的
  - 3 次元の : 空間拡散 ( 古典的 , 新古典的 , 乱流拡散 )

# 波動光学的波動伝播解析：TASK/WM

- 平衡解析から得られた**磁気面座標**： $(\psi, \theta, \varphi)$

- **マクスウェル方程式**の境界値問題

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \frac{\omega^2}{c^2} \overleftrightarrow{\epsilon} \cdot \mathbf{E} + i\omega\mu_0 \mathbf{j}_{\text{ext}}$$

- 運動論的效果を含めた**誘電率テンソル**： $\overleftrightarrow{\epsilon}$

- **波一粒子共鳴相互作用**： $Z[(\omega - n\omega_c)/k_{\parallel}v_{\text{th}}]$
- **高速イオン：ドリフト運動論**

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t} + v_{\parallel} \nabla_{\parallel} + (\mathbf{v}_d + \mathbf{v}_E) \cdot \nabla + \frac{e_{\alpha}}{m_{\alpha}} (v_{\parallel} E_{\parallel} + \mathbf{v}_d \cdot \mathbf{E}) \frac{\partial}{\partial \mathcal{E}} \right] f_{\alpha} = 0$$

- **ポロイダルおよびトロイダルモード展開**

- **正確な  $k_{\parallel}$  評価**

- **固有モード解析**：電界振幅を最大とする**複素固有周波数**

- **電子密度に比例する励起**

# Coordinates

---

- **One dimensional**

RHO      Radial ( $\rho$ )

Square root of normalized toroidal magnetic flux:  $\rho = \sqrt{\phi_t / \phi_t|_{\text{surface}}}$

- **Two dimensional**

RZ      Cylindrical ( $R, Z$ )

RT      Toroidal ( $r, \theta$ )

RC      Flux ( $\rho, \chi$ )

- **Three dimensional**

XYZ      Rectangular ( $X, Y, Z$ )

RPZ      Cylindrical 1 ( $R, \phi, Z$ )

RZP      Cylindrical 2 ( $R, Z, \phi$ )

RTP      Toroidal 1 ( $r, \theta, \phi$ )

RCP      Flux 1 ( $\rho, \chi, \phi$ )

RCX      Flux 2 ( $\rho, \chi, \xi$ )

VMEC

Boozer

# Example of Data Interface (1)

---

- **Device data**

RR	$R$ m	Geometrical major radius
RA	$a$ m	Average minor radius $(R_{\max} - R_{\min})/2$
RB	$b$ m	Wall radius
BB	$b$ T	Vacuum toroidal magnetic field at $(RR, 0)$
RKAP	$\kappa$	Elongation of plasma boundary
RDLT	$\delta$	Triangularity of plasma boundary
RIP	$I_p$ MA	Typical plasma current

- **Equilibrium data**

PSIP	$\psi_p(R, Z)$ Tm <sup>2</sup>	2D poloidal magnetic flux
PSIR	$\psi(\rho)$ Tm <sup>2</sup>	Poloidal magnetic flux
PPSI	$p(\rho)$ MPa	Plasma pressure
TPSI	$T(\rho)$ Tm	$B_\phi R$
QPSI	$1/q(\rho)$	Safety factor
JPAV	$j_{\parallel}^{\text{ave}}(\rho)$	Averaged parallel current density

# Example of Data Interface (2)

---

- **Fluid plasma data**

<b>NSMAX</b>	$s$	<b>Number of particle species</b>
<b>PA</b>	$A_s$	<b>Atomic mass</b>
<b>PZ0</b>	$Z_s$	<b>Charge number</b>
<b>PZ</b>	$Z_s$	<b>Charge state number</b>
<b>PNR</b>	$n(\rho) 10^{20} \text{m}^3$	<b>Number density</b>
<b>PTR</b>	$T(\rho) \text{keV}$	<b>Temperature</b>
<b>PUR</b>	$u_\phi(\rho) \text{m/s}$	<b>Toroidal rotation velocity</b>

- **Example:** PROF1D(NR)%SPECIES(NS)%PNR

- **Kinetic plasma data**

<b>FP</b>	$f(p, \theta_p, \rho)$	<b>momentum distribution at <math>\theta = 0</math></b>
-----------	------------------------	---

- **Full wave field data**

<b>CE</b>	$E(\rho, \chi, \xi)$	<b>Complex wave electric field</b>
<b>CB</b>	$B(\rho, \chi, \xi)$	<b>Complex wave magnetic field</b>

# Data Exchange Interface in BPSI

---

- **Language**

- **Fortran95**: Derived type data, Module inheritance, Namelist

- **Data category**

- **Predefined Data**
- **Additional Data**

- **Data manipulation**

- **Specify data**: machine, shot, model, time
- **Acquire data**: 0D, 1D( $\rho$ ), 2D( $\rho, \chi$ ), 2D( $R, Z$ ), 0D(t), 1D( $\rho, t$ ), 2D( $\rho, \chi, t$ ), 2D( $R, Z, t$ ),
- **Change data**: 0D, 1D( $\rho$ ), 2D( $\rho, \chi$ ), 2D( $R, Z$ )
- **Define data**
- **Save data in file**
- **Load data from file**
- **Plot data**

# Execution Control Interface in BPSI (1)

---

- Example for TASK/TR

<b>TR_INIT</b>	Initialization (Default value, Read file)	<b>BPSM_INIT('TR')</b>
<b>TR_PARM(PSTR)</b>	Parameter setup (Namelist input)	<b>BPSM_PARM('TR',PSTR)</b>
<b>TR_PROF(T)</b>	Profile setup (Spatial profile, Time)	<b>BPSM_PROF('TR',T)</b>
<b>TR_EXEC(DT)</b>	Exec one step (Time step)	<b>BPSM_EXEC('TR',DT)</b>
<b>TR_GOUT(PSTR)</b>	Plot data (Plot command)	<b>BPSM_GOUT('TR',PSTR)</b>
<b>TR_SAVE</b>	Save data in file	<b>BPSM_SAVE('TR')</b>
<b>TR_LOAD</b>	load data from file	<b>BPSM_LOAD('TR')</b>
<b>TR_TERM</b>	Termination	<b>BPSM_TERM('TR')</b>

# Execution Control Interface in BPSI (2)

---

- Example for transport module

<b>CDBM_INIT</b>	Initialization (Default value, Read file)	
	Define data	<b>BPSM_DEFINE('CDBM1D', CDBM1D)</b>
<b>CDBM_PARM(PSTR)</b>	Parameter setup (Namelist input)	
<b>CDBM_CALC</b>	Get profile	<b>BPSM_GET('PROF1D', T, PROF1D)</b>
	Calculate	
	Set data	<b>BPSM_SET('CDBM1D', CDBM1D)</b>

- Calling sequence of the transport module

```
BPSM_REGISTER('CDBM', CDBM_INIT, CDBM_PARM, CDBM_CALC)  
BPSM_INIT('CDBM')  
BPSM_PARM('CDBM', PSTR)  
BPSM_CALC('CDBM')  
BPSM_GET('CDBM1D', CDBM1D)
```