

2005/07/19

核融合科学研究所共同研究
トロイダルプラズマ閉じ込め・輸送研究会

トカマクプラズマ解析コード TASK の現状と課題

福山 淳, 本多 充, 山端悠介 (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

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

米国・欧州の状況

- **米国** :

- **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)

- **Fusion Simulation Project**

- 組織的なコード開発

- 2005年 New project

- 核融合プラズマにおける境界領域の統合シミュレーション

- 電磁波がプラズマの分布と安定性に与える影響の統合的理解

- **欧州** :

- **EFDA Task Force: Integrated Transport Modelling** (Dec. 2003)

- <http://www.efda-taskforce-itm.org/>

TASK コードの特色

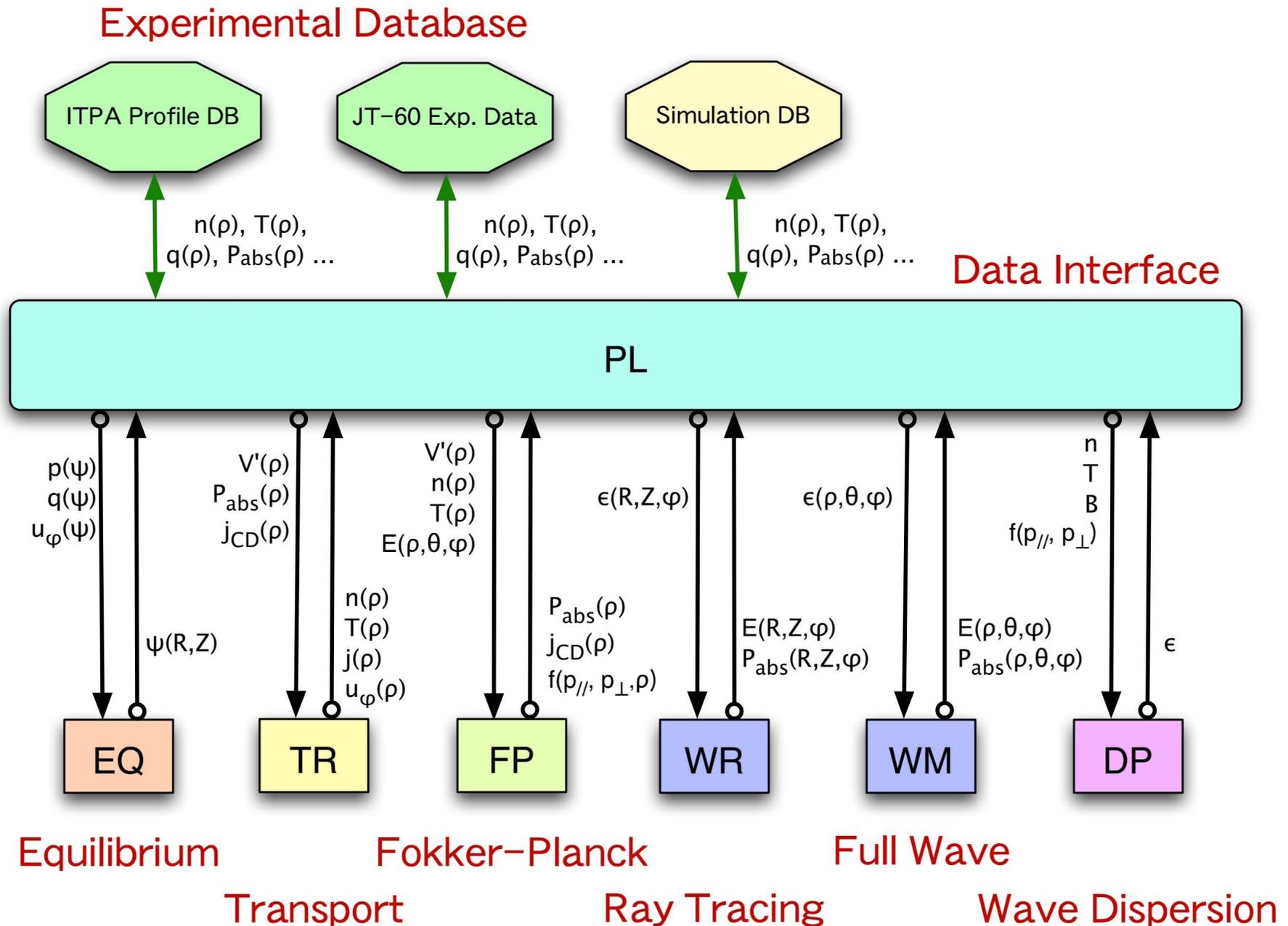
- トカマクの時間発展シミュレーション
 - モジュール構造の統合シミュレーション
 - 様々な加熱・電流駆動機構
 - 高い移植性
 - ヘリカル系への拡張
 - MPI ライブラリを用いた並列分散処理
 - 実験データベースの利用
- 核燃焼プラズマ統合コード構想のコアコード
 - 最小限の統合コード：モジュールは交換可能
 - インターフェースの標準化：実装の検証
 - 利用者の拡大：マニュアル等の整備

TASK コード

- Transport Analyzing System for tokamak
- モジュール

TASK/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	共通ライブラリ	行列解法，特殊関数
PL	分布データ変換	磁気面座標 ↔ 実座標，分布データベース
EX	2次元平衡解析	自由境界，有限要素法
TX	1次元輸送解析	流体型輸送方程式，輸送モデル
WA	線形安定性解析	波動解析，MHD不安定性，運動論の効果
WI	積分形波動解析	FLR 効果，高次サイクロトロン高調波

TASK コードの構成



進展状況

- 輸送シミュレーション：

- 拡散型輸送シミュレーション：TASK/TR：Talk by 本多
— 輸送モデル（CDBM, GLF23, Weiland）, CDBM05
- 流体型輸送シミュレーション：TASK/TX
— プラズマ回転，径方向電界，粒子輸送

- 波動加熱シミュレーション：

- 電子サイクロトロン加熱の波動光学的解析
- 速度分布関数の時間発展を含めた自己無撞着な解析
- 積分形誘電率テンソルを用いた FLR 効果を含めた解析

- 統合コード

- プラズマ記述変数の標準化
- コードの Fortran95 化
- TASK/EQ の改良： $q(r)$ vs. $\langle j_{\parallel}(r) \rangle$
- 簡易マニュアルの作成: <http://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task/>

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 λ 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 ）

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

— 振幅： C ，偏波ベクトル： 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**： (ψ, θ, φ)

- **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**

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

- **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**

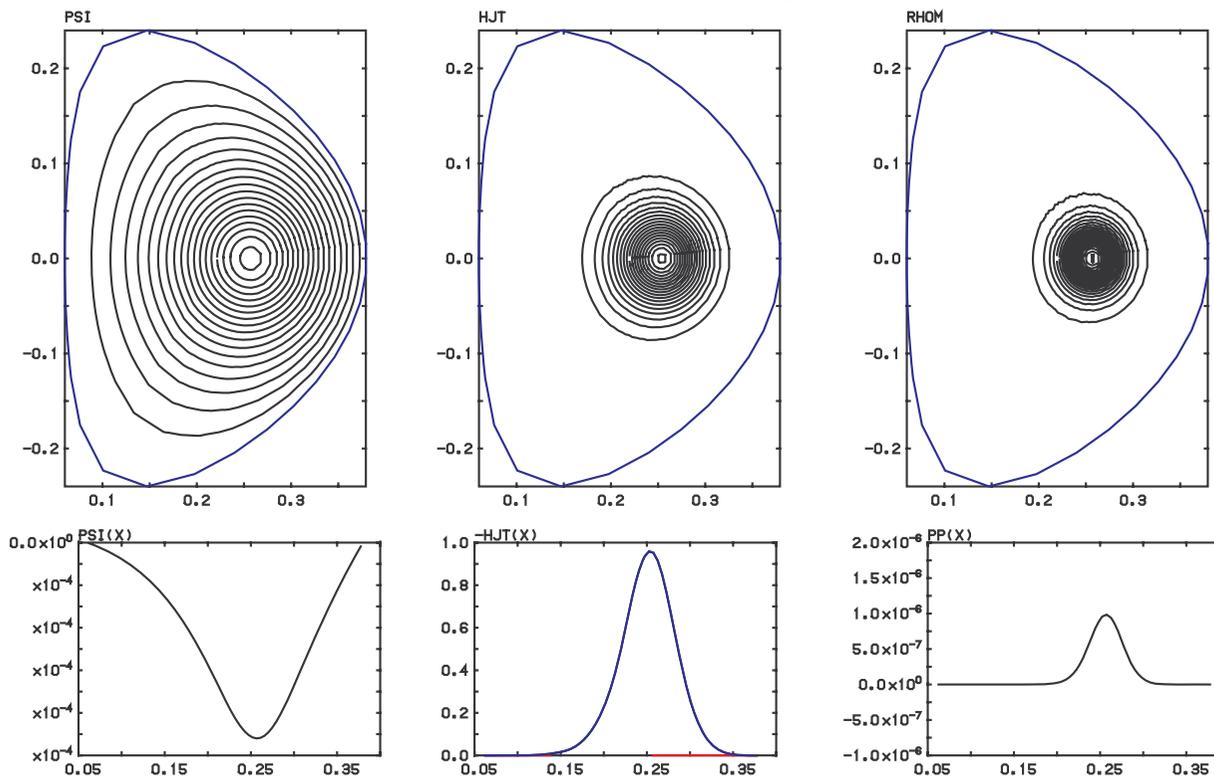
- **固有モード解析**：電界振幅を最大とする**複素固有周波数**

- **電子密度に比例する励起**

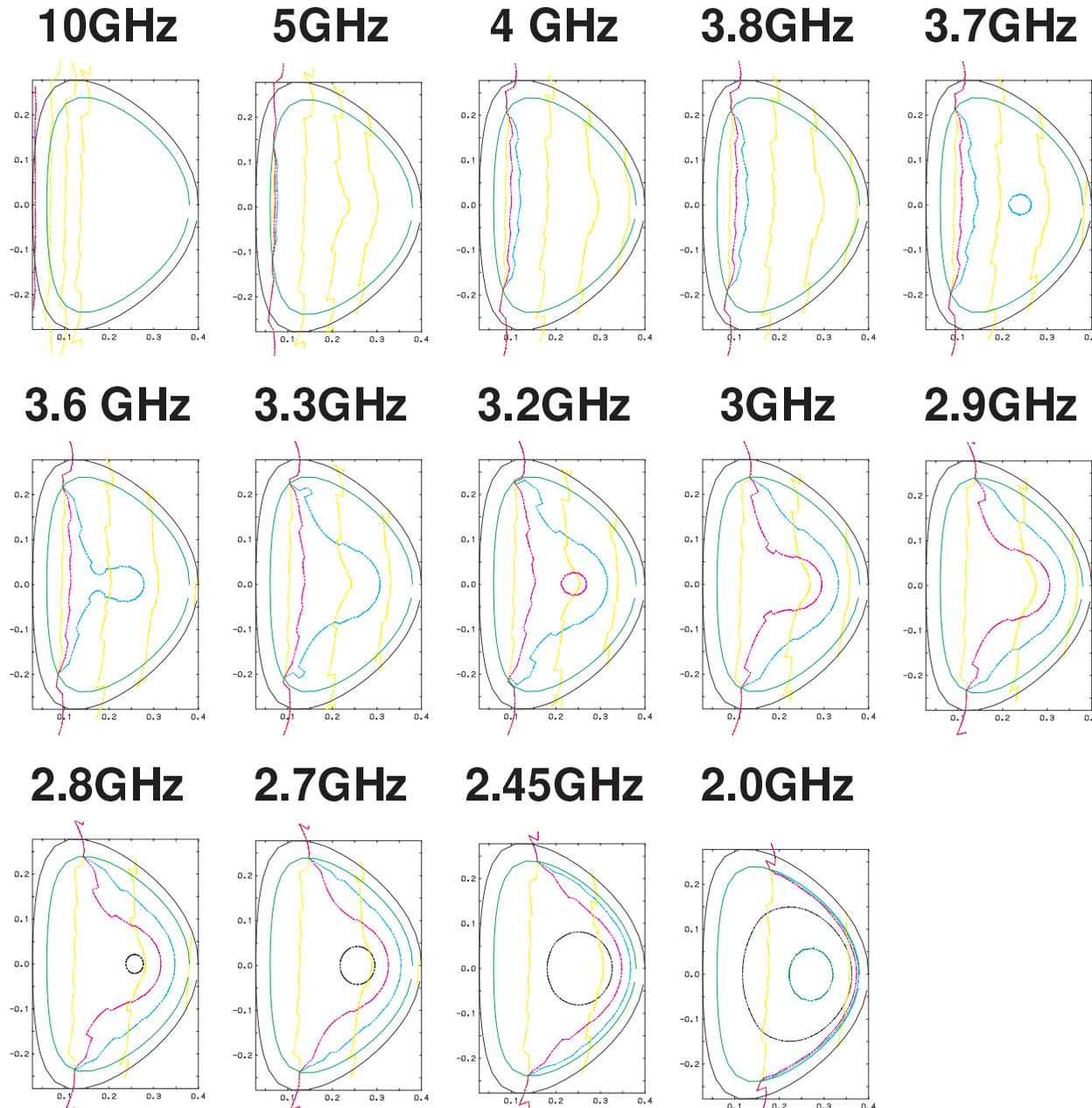
小型トカマクにおける EC 波伝播解析 (1)

- **Small-size spherical tokamak: LATE** (Kyoto University)
 - **T. Maekawa et al., Proc. 20th IAEA Fusion Energy Conf., IAEA-CN-116/EX/P4-27 (Vilamoura, Portuga, 2004)**
 - $R = 0.22$ m, $a = 0.16$ m, $B_0 = 0.0552$ T, $I_p = 6.25$ kA, $\kappa = 1.5$

Poloidal Flux Current Density Number Density



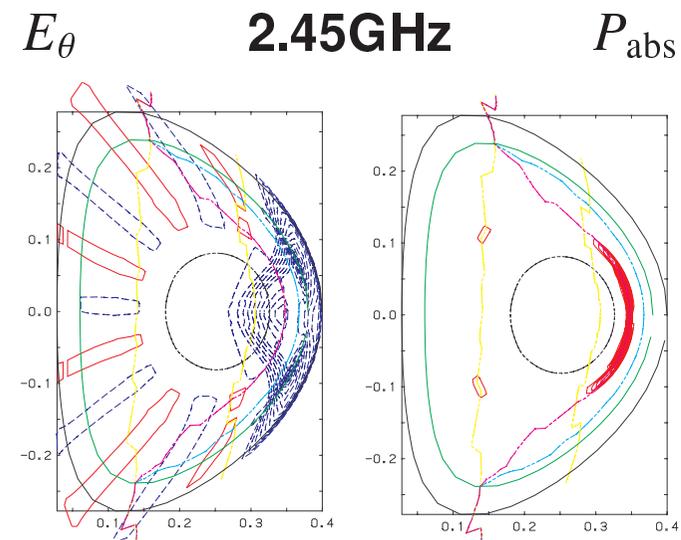
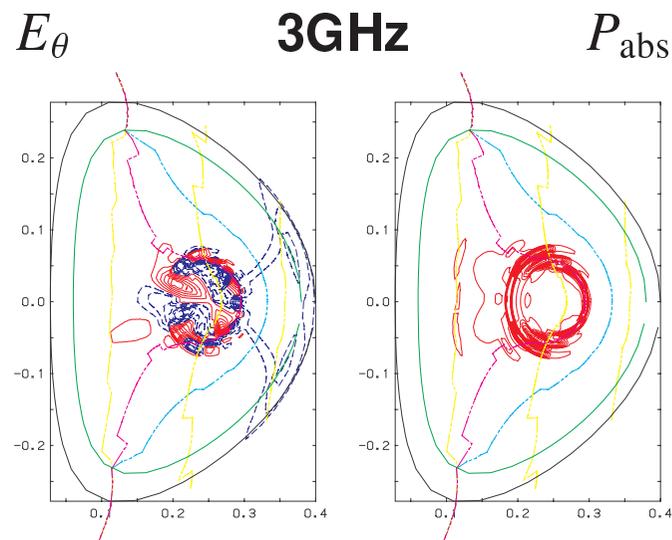
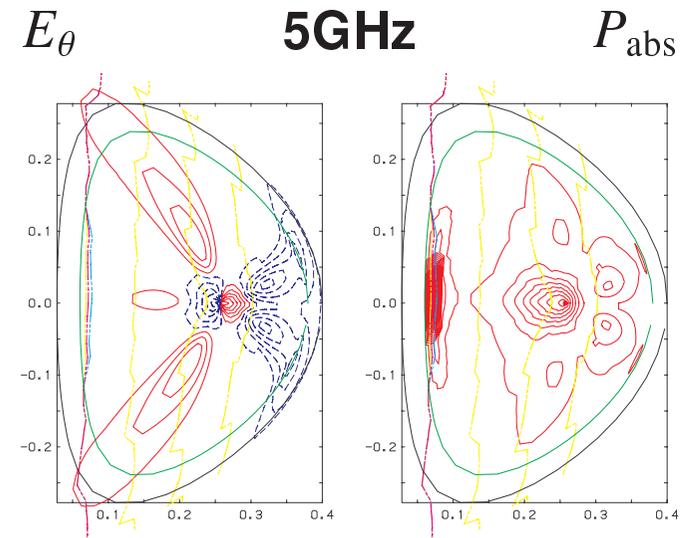
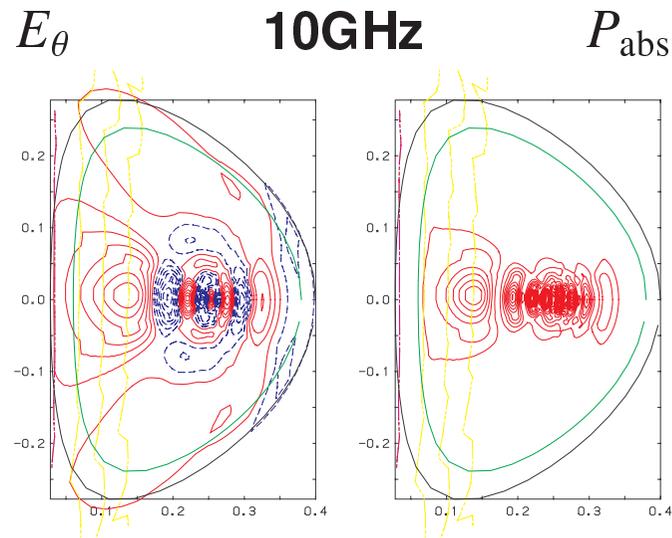
小型トカマクにおける EC 波伝播解析 (2)



Line color	Condition
Yellow	$\omega = n\omega_{ce}$
Violet	$\omega = \omega_{UH}$
Blue	$\omega = \omega_{CR}$
Green	$\omega = \omega_{CL}$
Black	$\omega = \omega_{pe}$

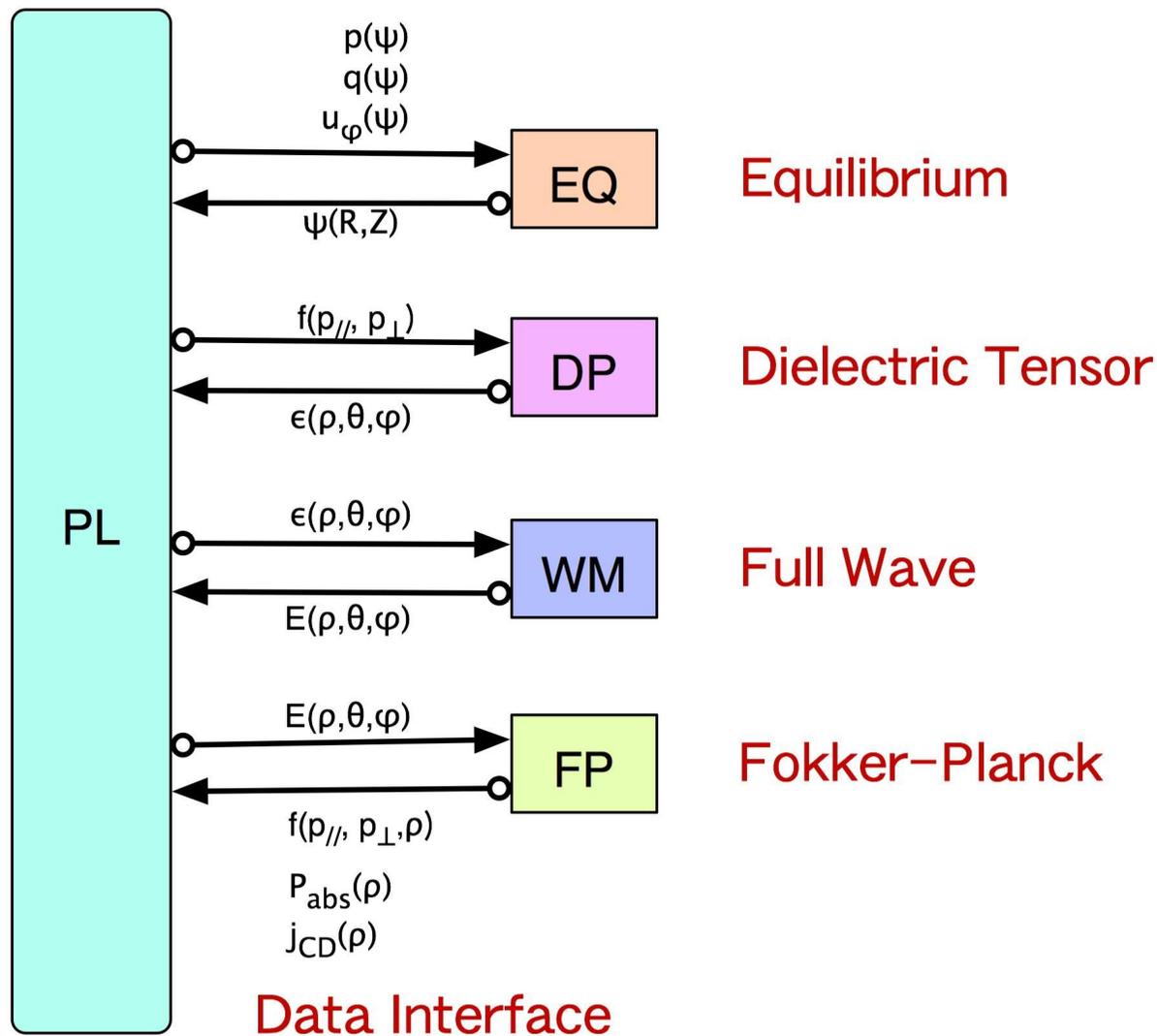
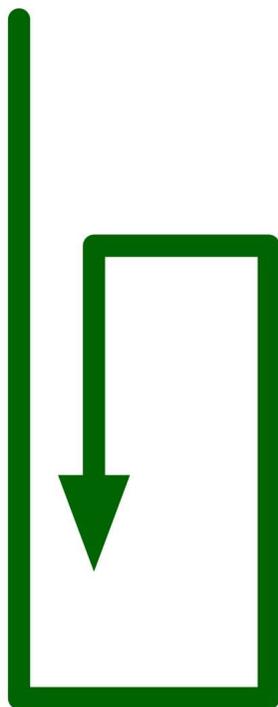
小型トカマクにおける EC 波伝播解析 (3)

- 標準電子密度 : 10^{17} m^{-3} : Extra-ordinary wave excitation



自己無撞着な波動伝播解析

Time Evolution



プラズマ記述変数の標準化

- 装置データ

- $R, a, b, B, \kappa, \delta, I_p$

- 静磁場データ

- $\psi_p(R, Z), \psi(\rho), p(\rho), I_\theta(\rho), q(\psi), j_{\parallel AV}$

- 計量データ

- $\langle 1/R^2 \rangle, \langle |\nabla\rho|^2/R^2 \rangle, \langle |\nabla\rho| \rangle, \langle |\nabla\rho|^2 \rangle, dV/d\rho, \dots, g_{ij}$

- 流体的プラズマデータ

- $A_s, Z_s, n_s(\rho), T_s(\rho), u_{\phi s}, j_{\text{tot}}(\rho)$

- 運動論的プラズマデータ

- $f(p, \theta_p, \rho)$

- 波動伝播解析データ

- $E(\rho, \chi, \xi), \mathbf{B}(\rho, \chi, \xi), P_{\text{abs}}(\rho, \chi, \xi), R_{\text{ray}}(\ell), Z_{\text{ray}}(\ell), \phi(\ell), \mathbf{E}(\ell)$

コードの Fortran95 化

- 目的
 - 配列変数の動的メモリ割当：再コンパイル不要，利用簡易化
 - 構造体の利用：変数引き渡しの簡単化，データの標準化
 - モジュールの利用：変数やルーチンの隠蔽
 - コードの堅牢化：変数定義（local, IN/OUT）
- 利用できるコンパイラ
 - **Free**: gfortran (GNU), g95 (based on GNU)
 - **x86**: ifort (Intel, academic free), pgf90 (PGI)
 - **PowerPC**: xlf90 (IBM)
- 現在のコードでも **FORTRAN95** でコンパイルは可能
 - 徐々に **FORTRAN95** 化
 - 一部，外注により **FORTRAN95** 化

平衡コードの改良

- **Grad-Shafranov 方程式:** $I_\theta = 2\pi R B_\zeta$

$$\nabla \cdot \frac{1}{R^2} \nabla \psi_\theta = \frac{2\pi\mu_0}{R} j_\zeta = -4\pi^2\mu_0 \frac{dp}{d\psi_\theta} - \frac{I_\theta}{R^2} \frac{dI_\theta}{d\psi_\theta}$$

- これまでは

- $p(\psi_\theta), I_\theta(\psi_\theta)$: given

- $p(\psi_\theta), j_\zeta(R_{\text{axis}}, \psi_\theta)$: given

- 輸送コードからは $j_{\parallel\text{av}} \equiv \langle \mathbf{j}_\parallel \cdot \mathbf{B} \rangle / B_0$

$$\frac{dI_\theta}{d\psi_\theta} = -\mu_0 \frac{1}{\langle B^2 \rangle} \left[B_0 j_{\parallel\text{av}} + I_\theta \frac{dp}{d\psi_\theta} \right]$$

- あるいは $\frac{r}{q} = \frac{1}{2\pi B_0} \frac{d\psi_\theta}{dr}$

$$\frac{d}{d\psi_\theta} \frac{1}{2} I_\theta^2 = -\frac{4\pi^2\mu_0}{\langle 1/R^2 \rangle} \frac{dp}{d\psi_\theta} - \frac{4\pi^2 B_0^2}{\langle 1/R^2 \rangle} \frac{r}{q} \frac{1}{V'} \frac{d}{d\psi_\theta} \left[V' \left\langle \frac{|\nabla r|^2}{R^2} \right\rangle \frac{r}{q} \right]$$

TASK コードの今後の課題

- **短期課題**：日米統合コード WS (9/13-15, 九大): 欧州からも参加予定
 - プラズマ記述データの標準化
 - データ交換インターフェース仕様の策定
 - データ交換インターフェースの組み込み
 - ソースプログラムの公開：CVS による開発, Copyright-free
 - ITER ベンチマーク：ECCD:EQ/WR/FP/DP, ICH:EQ/WM/FP/DP
 - ITER 定常運転シナリオ：EQ/TR/WR/FP/DP
- **中期課題**：1年後
 - ITB 形成の動的シミュレーション：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 LHD 計画共同研究：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
 - FORTRAN95 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になりつつある．
- 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：モジュール連携，新モジュール開発
 - 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, (TRIAM, LATE, Heliotron-J,...)