

2004/07/21

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 (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

## 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

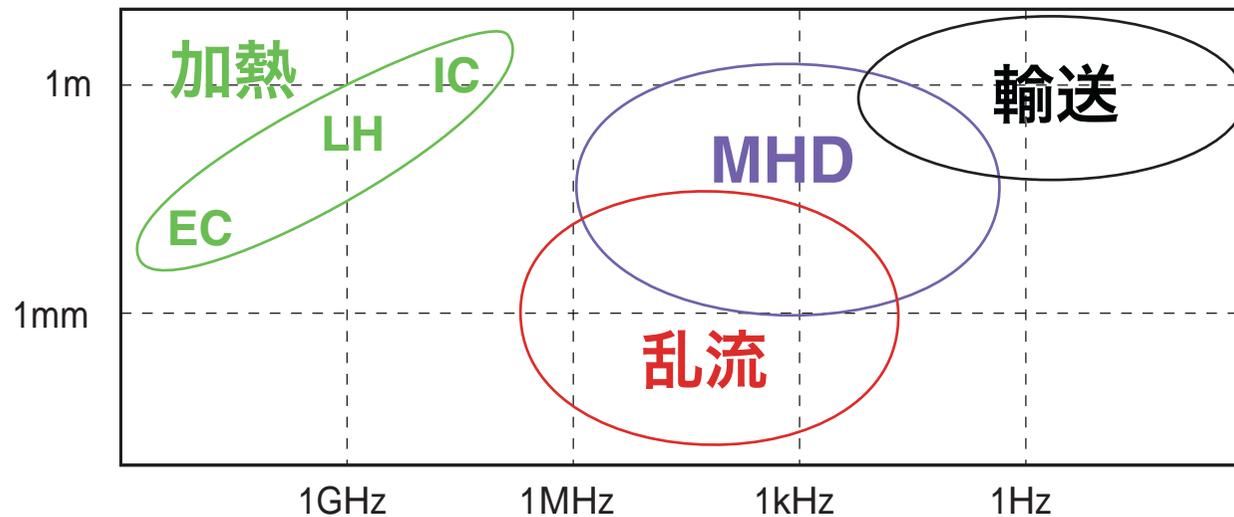
**MHD不安定性，乱流輸送現象，波-プラズマ相互作用等**

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の目的

---

多くの考え方を取り入れる

- 核燃焼プラズマ全体の時間発展を解析できる
  - 実験データとの比較による検証
  - 核燃焼プラズマの予測
  - 運転シナリオの最適化
- ITPA で欧米に対抗できる
- 新しい理論モデルを容易に検証できる
- 大規模シミュレーションの成果を組み込むことができる
- 実験家が容易に利用できる
- ヘリカル系にも拡張できる
- 並列分散処理により高速化できる

これから数年で成果

# 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

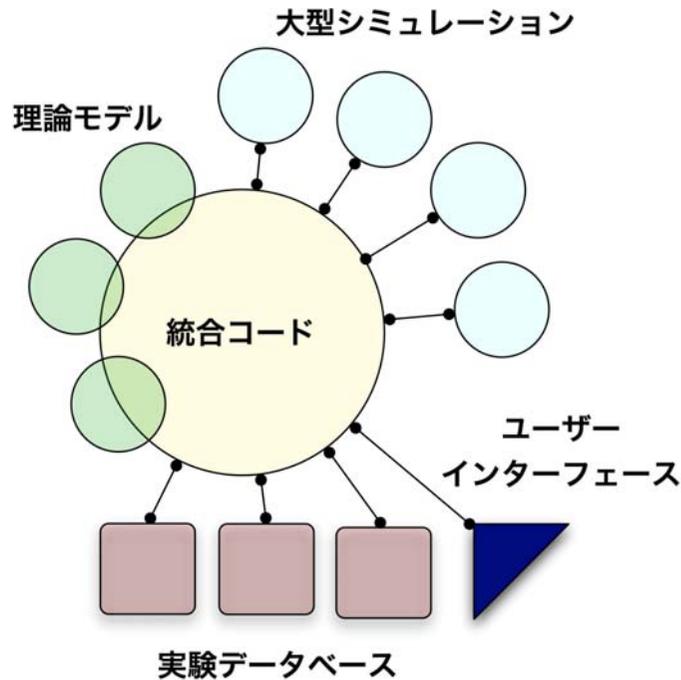
## 米国・欧州の状況

---

- **米国** :
  - **NTCC** (National Transport Code Collaboration)
    - 輸送コード, モジュールライブラリ
  - **SciDAC** (Scientific Discovery through Advanced Computing)
    - Plasma Microturbulence Project
    - Extended MHD Modeling
    - Wave-Particle Interaction
    - National Fusion Collaboratory
    - Computational Atomic Physics
    - Magnetic Reconnection
  - **Fusion Simulation Project**
- **欧州** :
  - **EFDA Task Force: Integrated Transport Modelling** (Dec. 2003)
    - <http://www.efda-taskforce-itm.org/>

# 核燃焼プラズマ統合コード構想の目標

- 核燃焼プラズマ解析コードの枠組み



- 理論モデルの導入
- 大型シミュレーションとの連携
- 実験データベースとの比較による検証

- 核燃焼プラズマに必要なモデリング

- 計算資源利用の効率化

- 全国的な研究協力の組織化

- 科研・基盤B，九大応力研・共同研究，核融合研・共同研究，原研・協同研究等

# TASK コードの特色

---

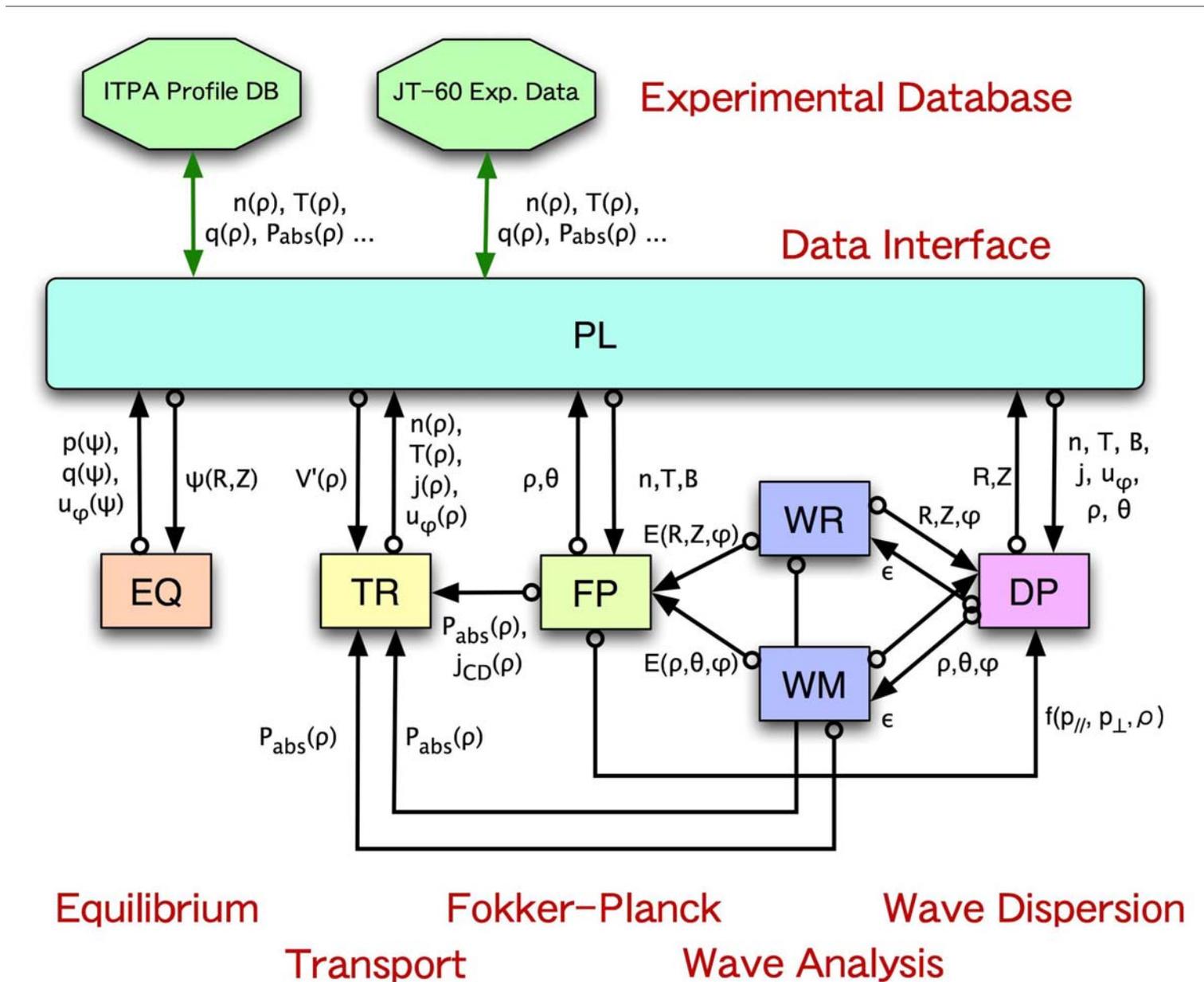
- **トカマクの時間発展シミュレーション**
  - モジュール構造の統合シミュレーション
  - 様々な加熱・電流駆動機構
  - 高い移植性
  - ヘリカル系への拡張
  - **MPI ライブラリを用いた並列分散処理**
  - **実験データベースの利用**
- **核燃焼プラズマ統合コード構想のコアコード**
  - **最小限の統合コード**：モジュールは交換可能
  - **インターフェースの標準化**：実装の検証
  - **利用者の拡大**：マニュアル等の整備

# TASK コード

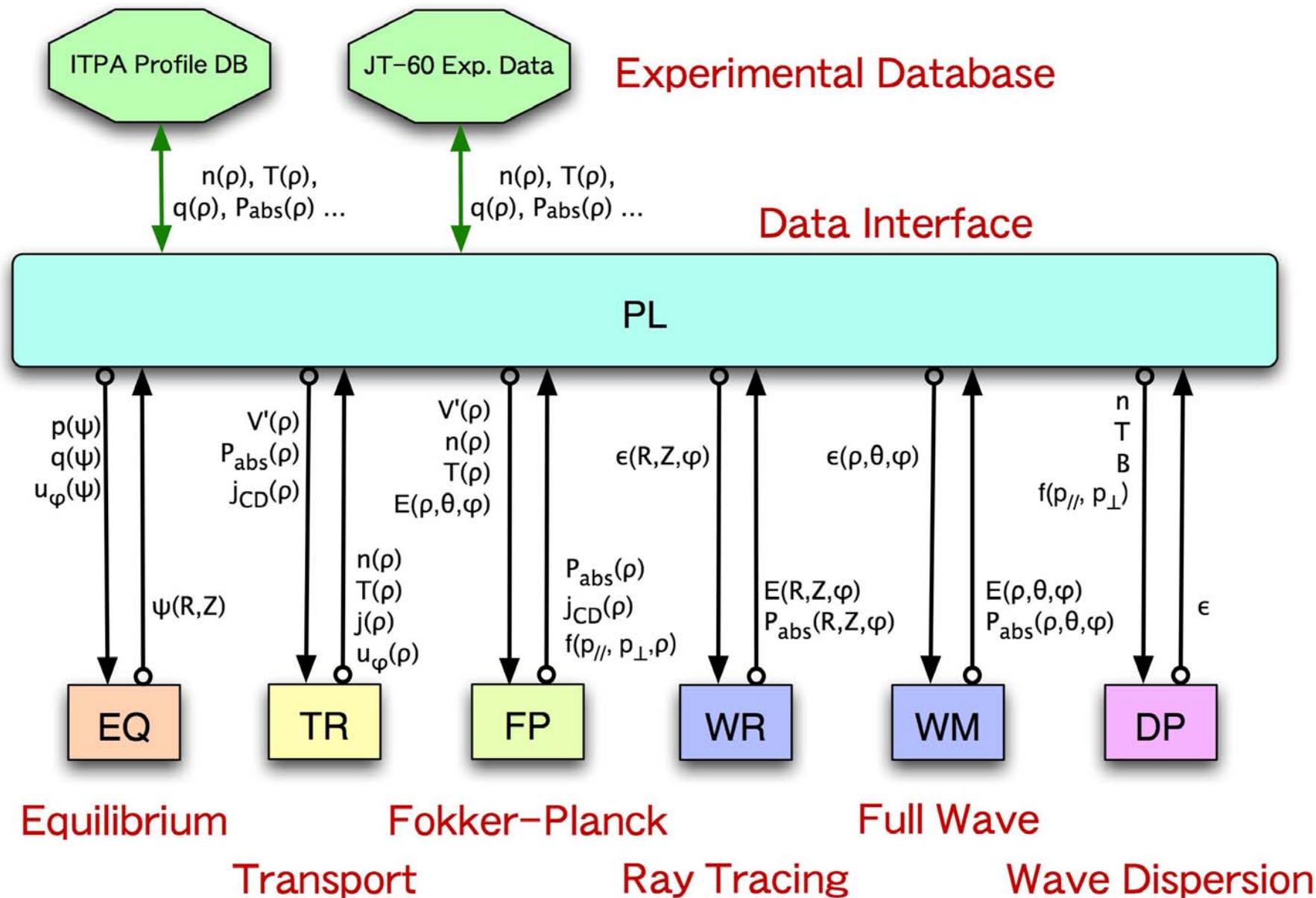
- **T**ransport **A**nalyzing **S**ystem for tokama**K**
- **モジュール**

<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	<b>EC, LH:</b> 光線追跡法，ビーム追跡法
<b>WM</b>	波動光学的波動解析	<b>IC, AW:</b> 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 コードの現在の構成



# TASK コードの新しい構成



# 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  $H_n$ ）

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

— 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**： $d_\alpha = \sqrt{2/\phi_{\alpha\alpha}}$

# ビーム伝搬方程式

- ビーム電界をマクスウェル方程式に代入し，解をもつ条件より

$$\frac{dr_0^\alpha}{d\tau} = \frac{\partial K}{\partial k_\alpha}$$

$$\frac{dk_\alpha^0}{d\tau} = -\frac{\partial K}{\partial r^\alpha}$$

$$\frac{ds_{\alpha\beta}}{d\tau} = -\frac{\partial^2 K}{\partial r^\alpha \partial r^\beta} - \frac{\partial^2 K}{\partial r^\beta \partial k_\gamma} s_{\alpha\gamma} - \frac{\partial^2 K}{\partial r^\alpha \partial k_\gamma} s_{\beta\gamma} - \frac{\partial^2 K}{\partial k_\gamma \partial k_\delta} s_{\alpha\gamma} s_{\beta\delta} + \frac{\partial^2 K}{\partial k_\gamma \partial k_\delta} \phi_{\alpha\gamma} \phi_{\beta\delta}$$

$$\frac{d\phi_{\alpha\beta}}{d\tau} = -\left(\frac{\partial^2 K}{\partial r^\alpha \partial k_\gamma} + \frac{\partial^2 K}{\partial k_\gamma \partial k_\delta} s_{\alpha\delta}\right) \phi_{\beta\gamma} - \left(\frac{\partial^2 K}{\partial r^\beta \partial k_\gamma} + \frac{\partial^2 K}{\partial k_\gamma \partial k_\delta} s_{\beta\delta}\right) \phi_{\alpha\gamma}$$

- これらの常微分方程式(18個)を積分することによって，ビーム軸の軌跡，ビーム軸上での波数，等位相面の曲率，ビームの幅を計算することができる．
- 波の振幅係数  $C_{mn}$  に対する方程式

$$\nabla \cdot (\mathbf{v}_{g0} |C_{mn}|^2) = -2(\gamma |C_{mn}|^2)$$

$\mathbf{v}_{g0}$  は群速度， $\gamma \equiv (\mathbf{e}^* \cdot \overleftrightarrow{\epsilon}_A \cdot \mathbf{e}) / (\partial K / \partial \omega)$  は波の吸収率

# 速度分布解析：TASK/FP

---

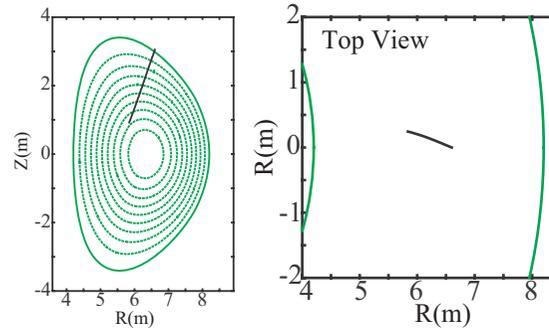
- 速度分布関数  $f(p_{\parallel}, p_{\perp}, \psi, t)$  に対する **フォッカー-プランク方程式**

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

- $E(f)$  : 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** : 空間拡散 (古典的, 新古典的, 乱流拡散)

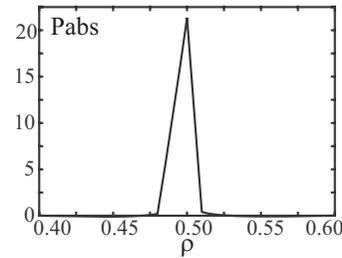
# Analysis of ECCD by TASK Code

Poloidal angle  $70^\circ$   
Toroidal angle  $20^\circ$   
Initial beam radius 0.05 m  
Initial beam curvature 2 m

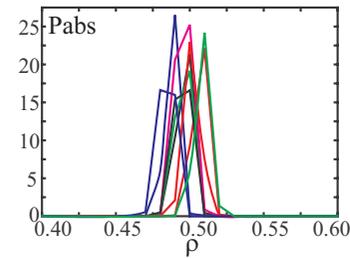


Ray/Beam Profile

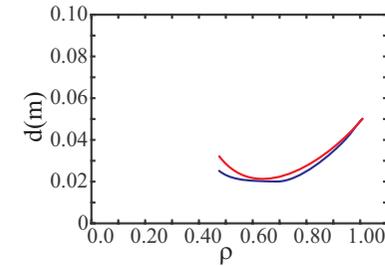
One Ray



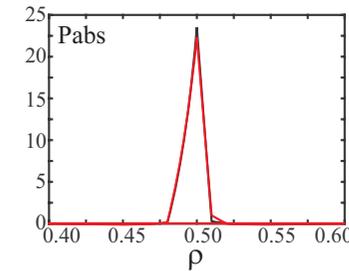
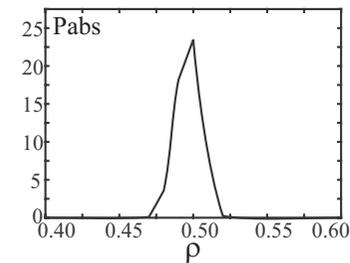
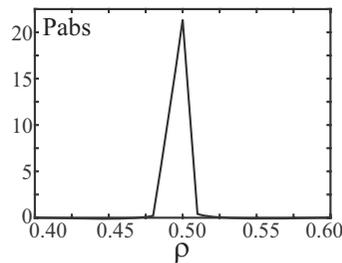
Multi Rays



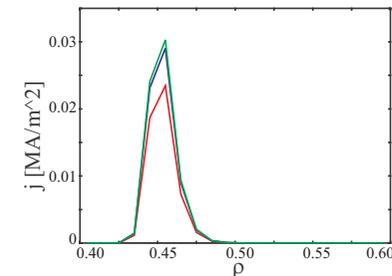
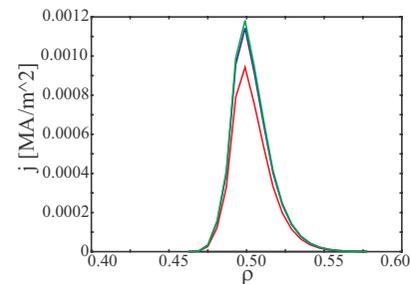
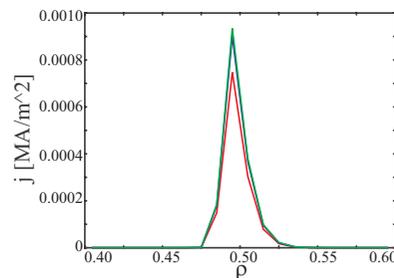
Beam Tracing



$P_{abs}$  Profile



$j_{CD}$  Profile



# 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-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**

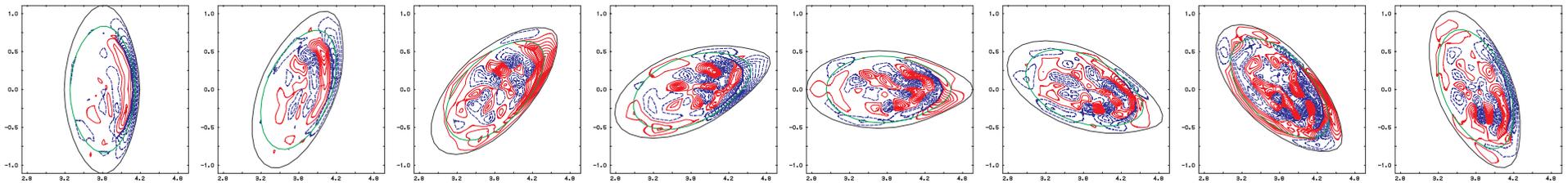
# LHD における ICRF 波の伝播・吸収

LHD ( $B_0 = 3 \text{ T}$ ,  $R_0 = 3.8 \text{ m}$ )

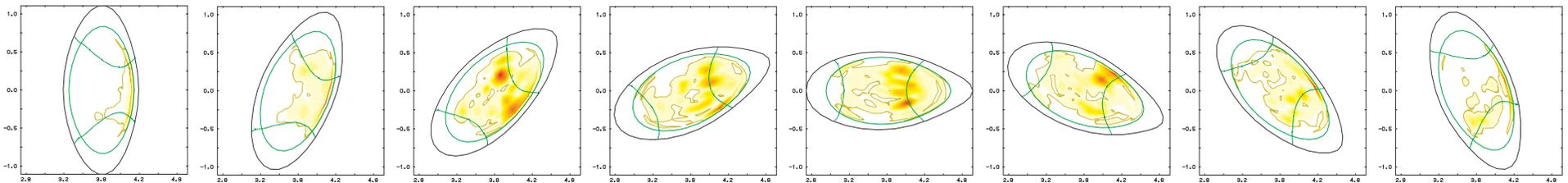
$f = 42 \text{ MHz}$ ,  $n_{\phi 0} = 20$ ,  $n_{e0} = 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ,  $n_{\text{H}}/(n_{\text{He}} + n_{\text{H}}) = 0.235$ ,

$N_{r\text{max}} = 100$ ,  $N_{\theta\text{max}} = 16$  ( $m = -7 \dots 7$ ),  $N_{\phi\text{max}} = 4$  ( $n = 10, 20, 30$ )

波動電界：ポロイダル成分の虚数部

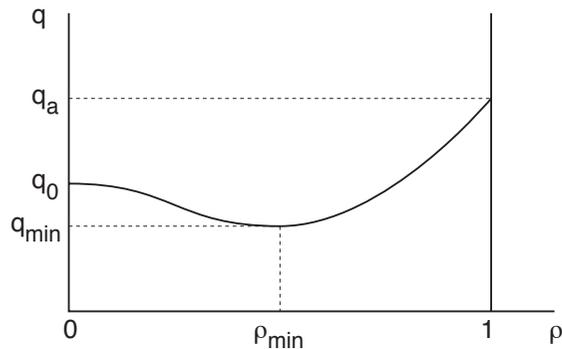


吸収パワー密度：少数イオン



# 負磁気シア配位におけるアルヴェン固有モードの解析

仮定された  $q$  分布



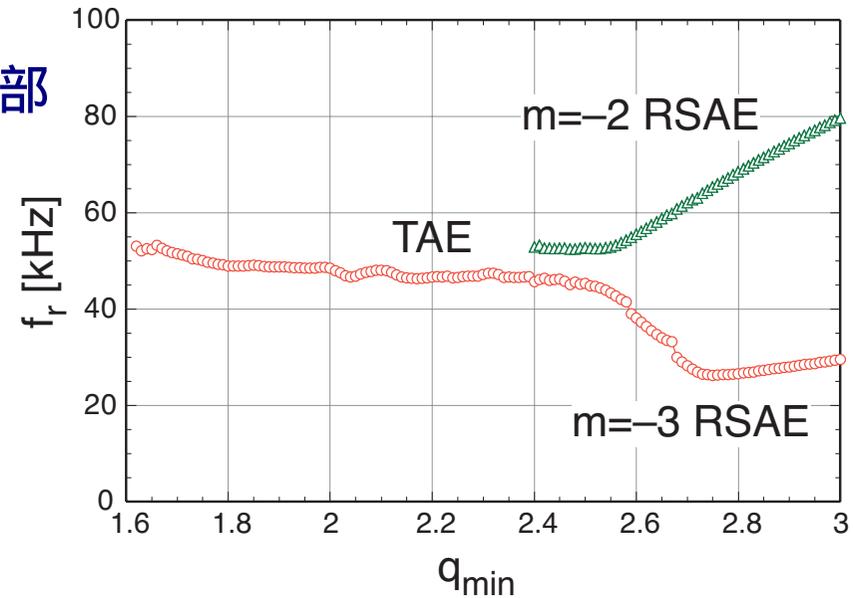
プラズマパラメータ

- $R_0$  3 m
- $a$  1 m
- $B_0$  3 T
- $n_e(0)$   $10^{20} \text{ m}^{-3}$
- $T(0)$  3 keV
- $q(0)$  3
- $q(a)$  5
- $\rho_{\min}$  0.5
- $n$  1

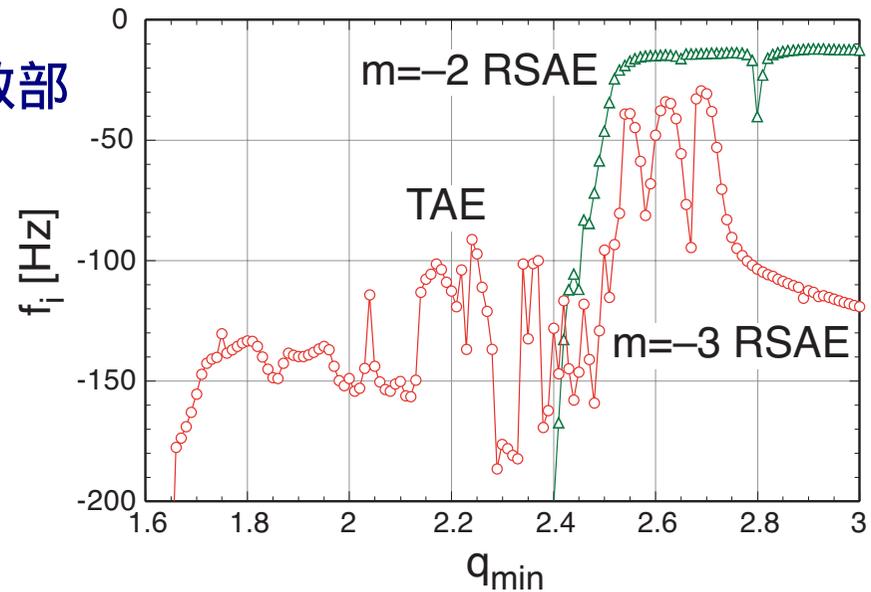
Flat density profile

固有周波数の  $q_{\min}$  依存性

実数部

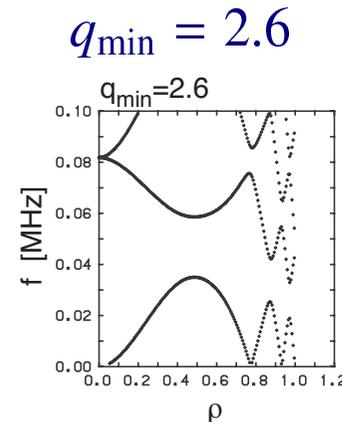
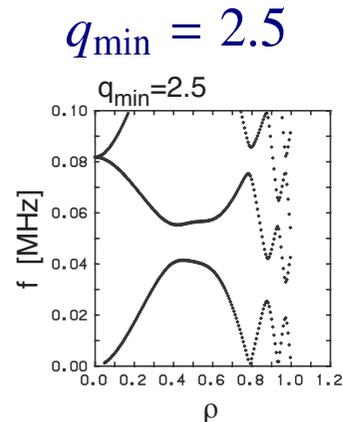
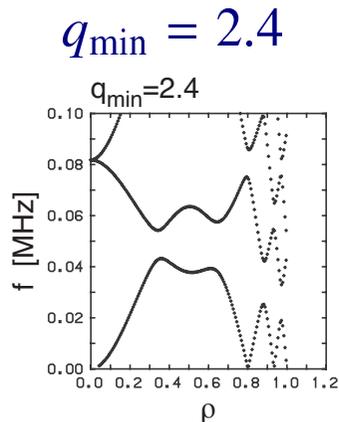


虚数部

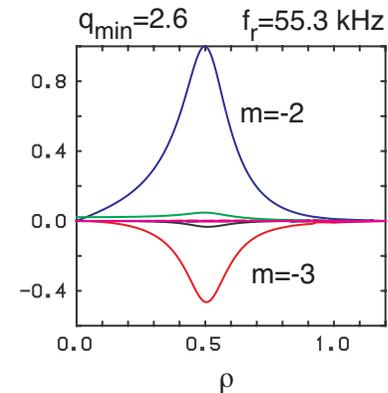
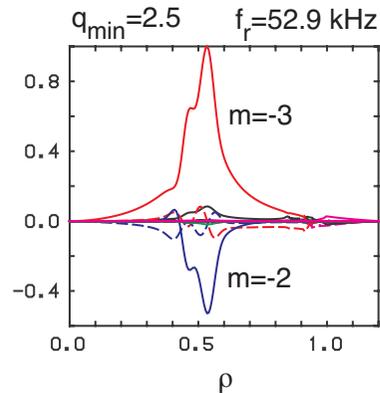
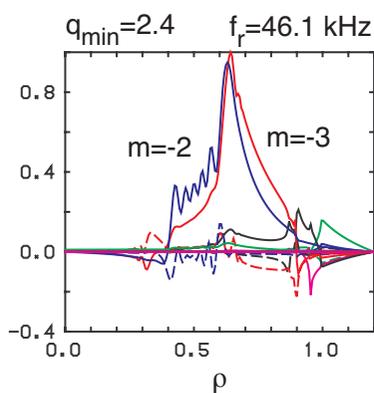


# 固有モード構造

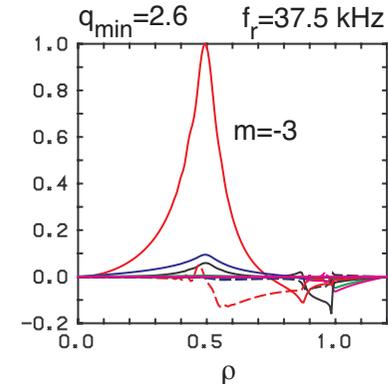
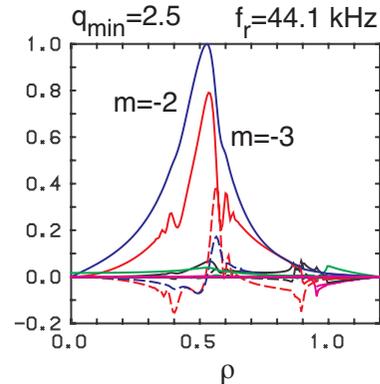
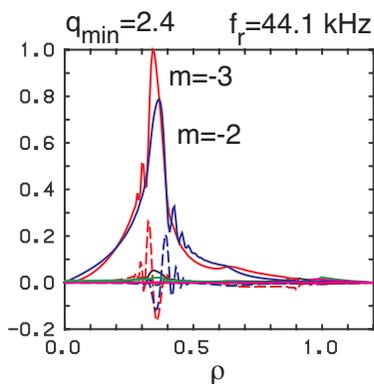
Alfvén resonance



Higher freq.



Lower freq.



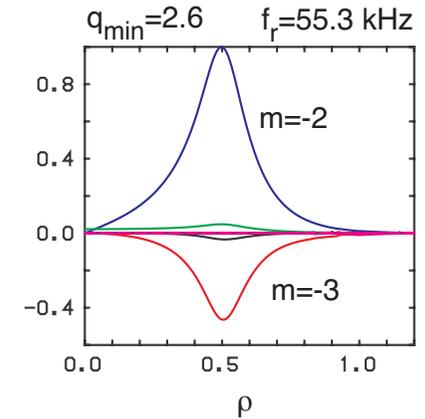
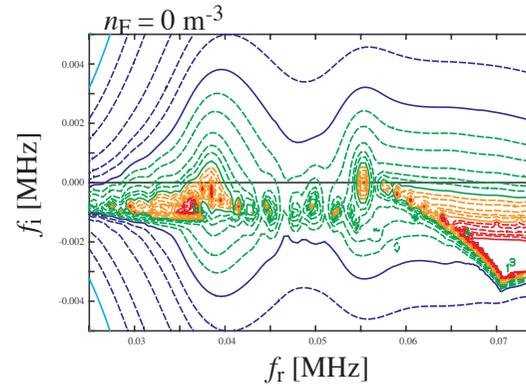
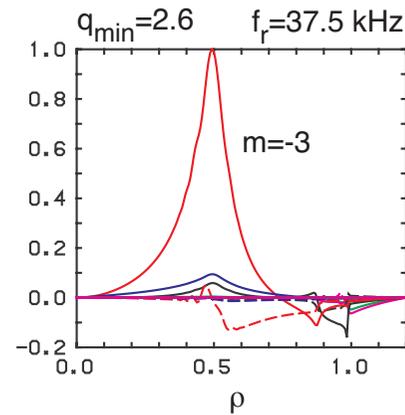
TAEs

Double TAE

RSAE

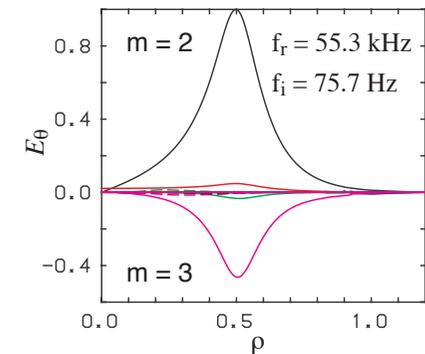
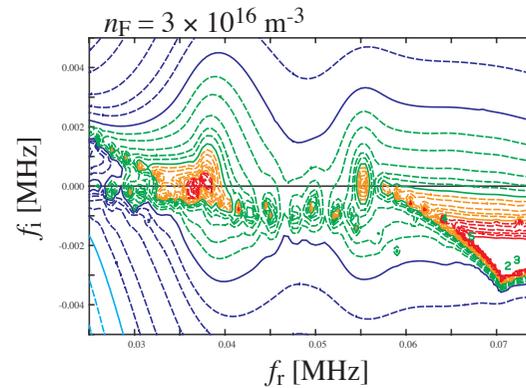
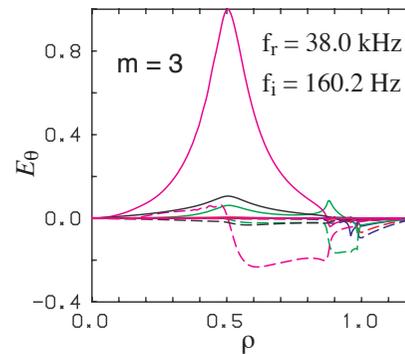
# 高速イオンによる励起 ( $q_{\min} = 2.6$ )

- Without EP



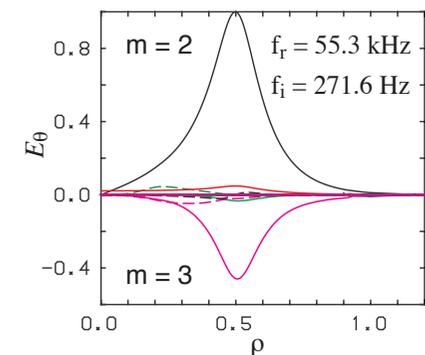
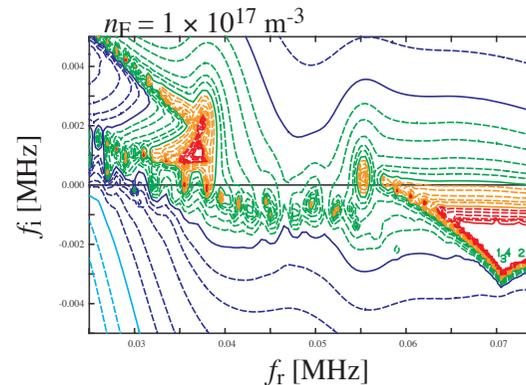
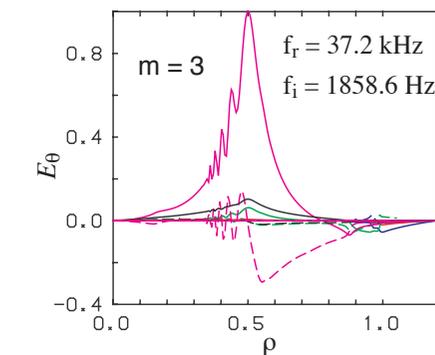
- With EP

$3 \times 10^{16}$  m<sup>-3</sup>  
 360 keV  
 0.5 m



- With EP

$1 \times 10^{17}$  m<sup>-3</sup>  
 360 keV  
 0.5 m



# 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（11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，クラスター間連携

# 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．
- 平衡解析と組み合わせた波動伝播解析の例として，ビーム追跡法による電子サイクロトロン波電流駆動の解析および負磁気シア配位におけるアルヴェン固有モードの解析の結果を示した．
- **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, RFP