

2006/03/06

核融合フォーラム 物理クラスター合同会合

「燃焼プラズマのモデリング

京都テルサ

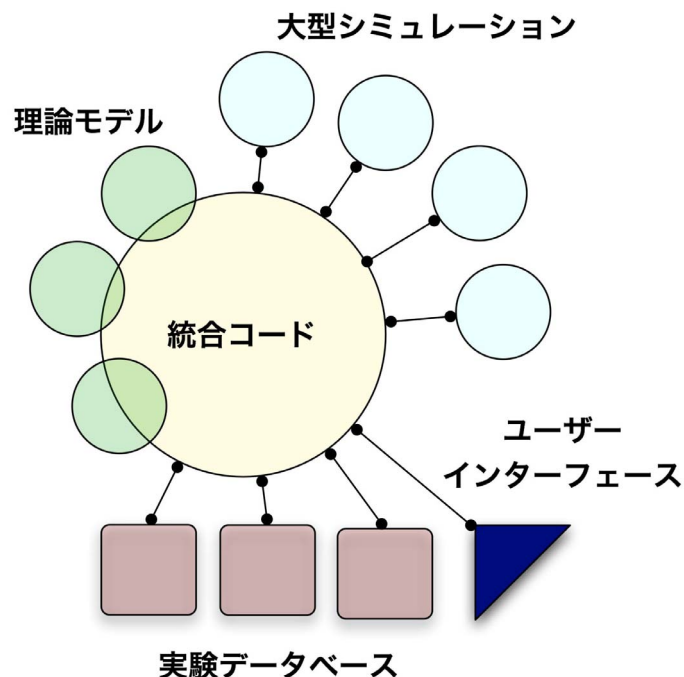
## TASKコードによる統合モデリング

福山 淳 (京大工)

- BPSI
- TASK コードの現状
- ITPA に向けた解析
- 中小型装置の解析
- 今後の課題

# BPSI: 核燃焼プラズマ統合コード構想

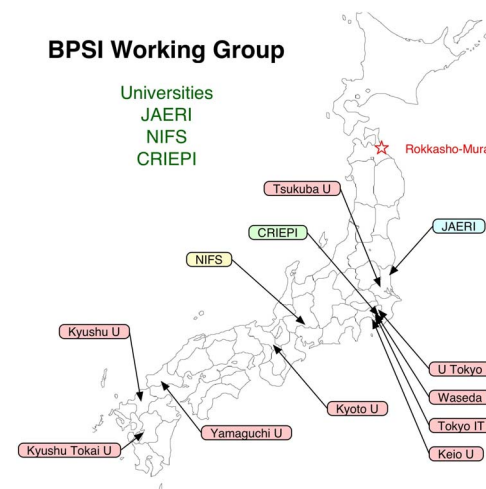
- 核燃焼プラズマ解析コードの枠組み



- 既存の解析コードの結合
- 理論モデルの迅速な導入
- 経験的モデルの容易な導入
- 大規模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 , 共同研究 : 九大応力研 , 核融合研 , 原子力機構等



# BPSI: 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

# TASK コードの特色

---

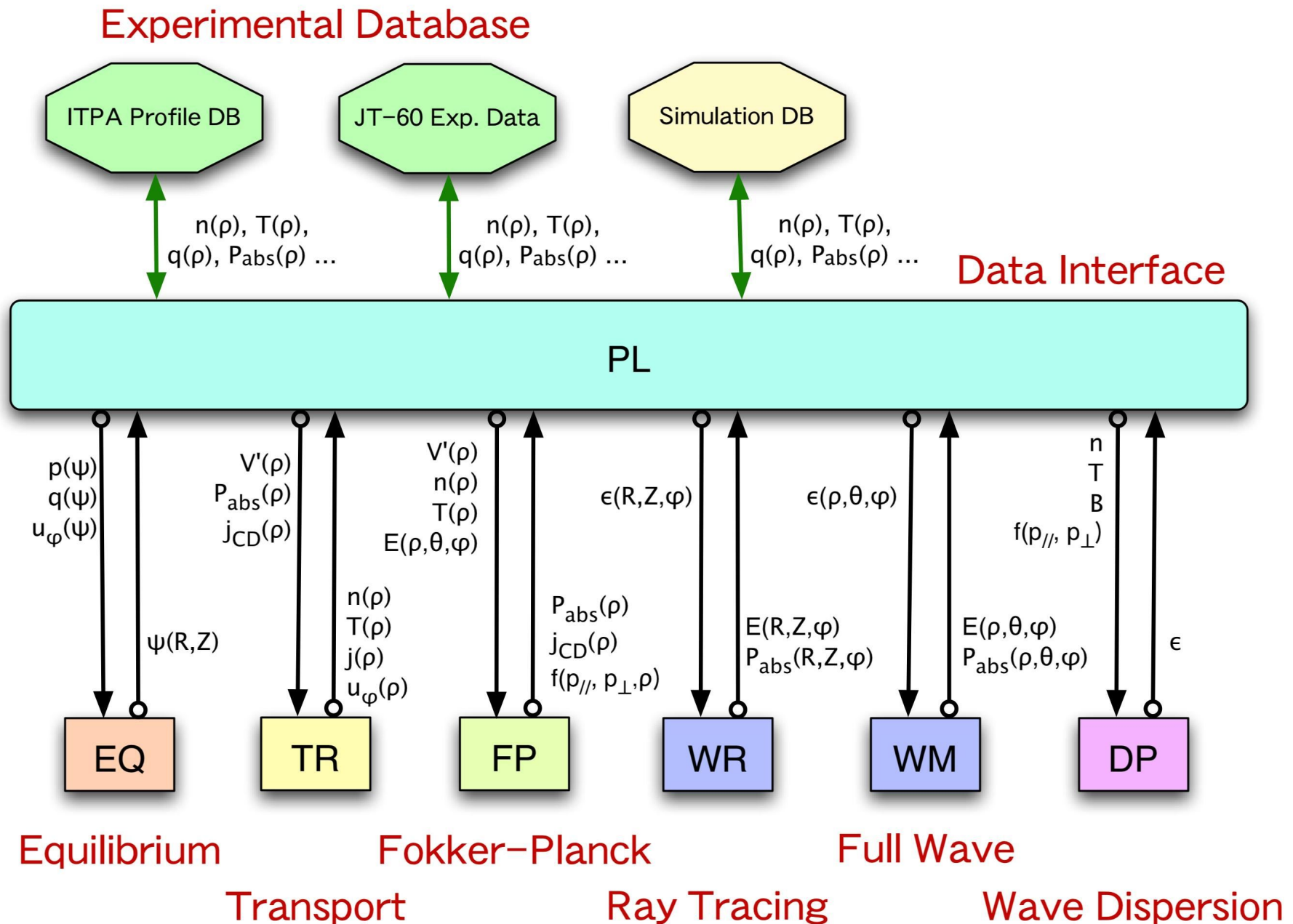
- トカマクの時間発展シミュレーション
  - モジュール構造の統合シミュレーション
  - 様々な加熱・電流駆動機構の実装
  - 高い移植性：UNIX系 (Linux, MacOSX, SX-OS 等)
  - **MPI** ライブラリを用いた並列分散処理
  - 実験データベースの利用：ITPA 分布データベース
  - ヘリカル系への拡張：LHD 計画研究（代表：中村祐司）
- 核燃焼プラズマ統合コード構想のコアコード
  - 最小限の統合コード：モジュールは交換可能
  - インターフェースの標準化：実装の検証
  - 利用者の拡大：マニュアル等の整備

# TASK コードの構成

- 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 |
| 開発中：EQ  | 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，運動論的效果  |
| WI      | 積分形波動解析   | FLR 効果，高次サイクロトロン高調波  |

# TASK コードのモジュール構造



# ITPA へ向けた解析

---

- 輸送・閉じ込め

- **TR:** CDBM/GLF23/Weiland 輸送モデルの比較（本多）
- **TR:** ITB 形成の輸送シミュレーション（本多）
- **TX:** 運動量入力による密度分布変化（本多）

- 定常運転

- **TR/EQ:** ITER 運転シナリオ（本多）
- **WR/DP/FP:** EC 電流駆動の解析（福山）
- **WM/DP/EQ:** ICRF 加熱の解析（福山）

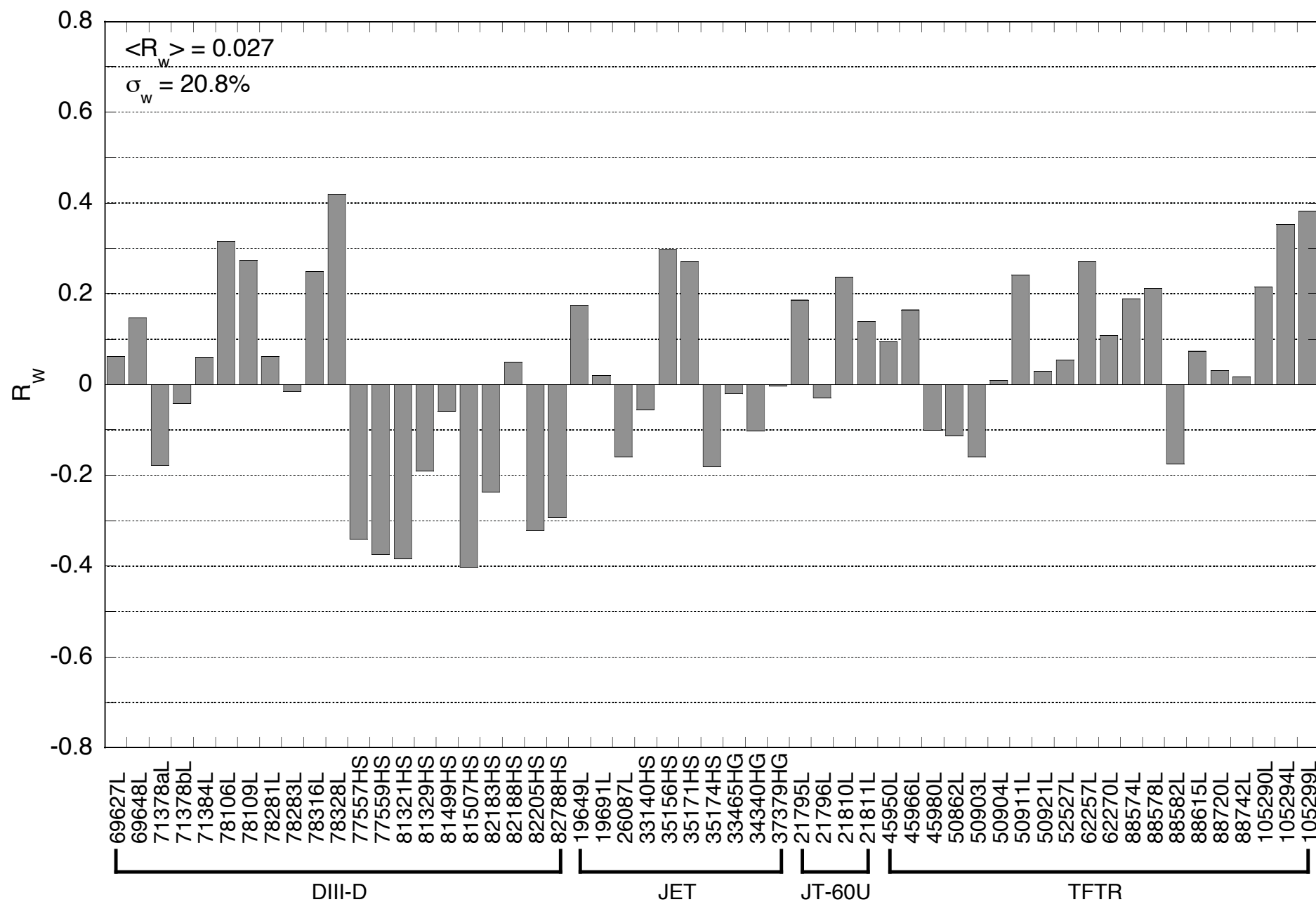
- MHD

- **WM/DP/EQ/TR:** アルヴェン固有モードの解析（福山）
- **WA:** 抵抗性壁モードの解析（阿久津）

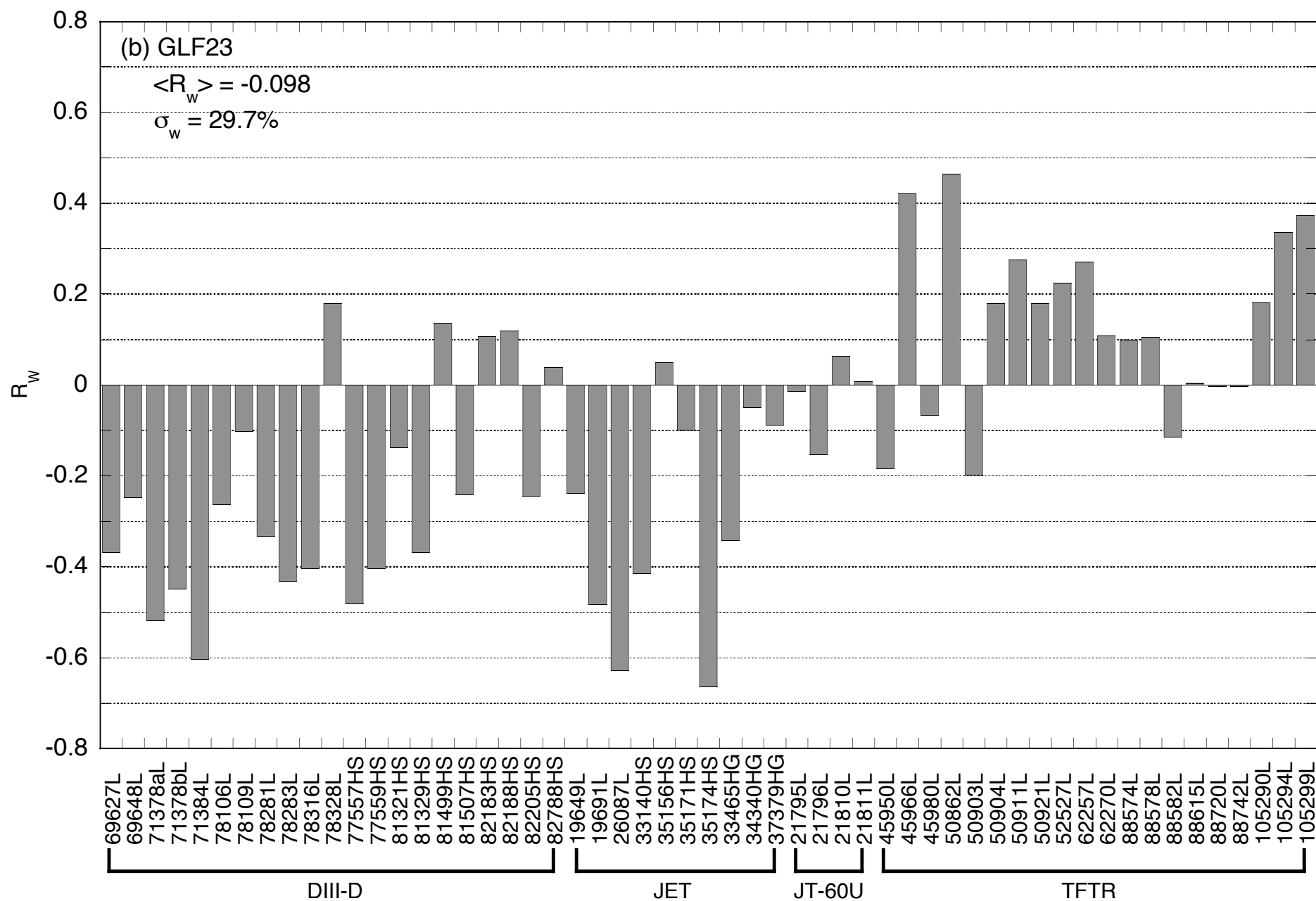
- ペデスタル・ELM

- **TX:** ETB 形成の輸送シミュレーション（本多）

# 蓄積エネルギーの偏差（非円形度効果を含めたCDBM）

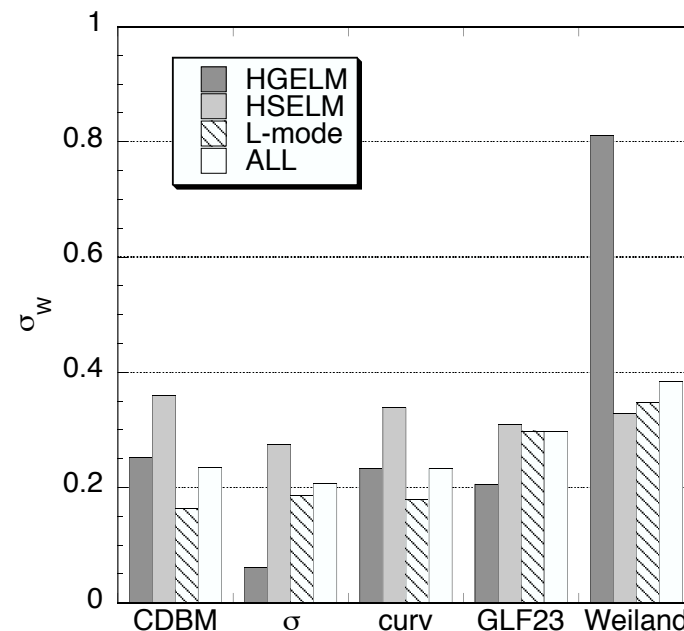
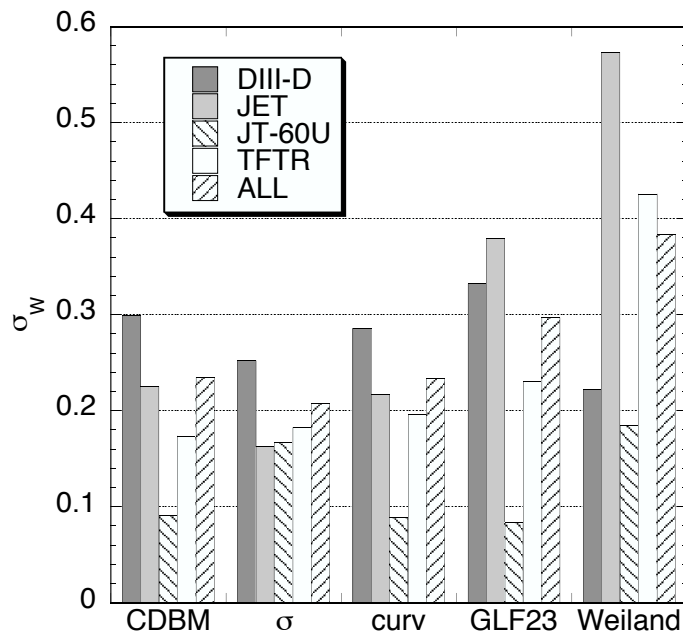


## 蓄積エネルギーの偏差 (GLF23)



## 5つのモデルによる $\sigma_W$ の比較

- 各運転モードと全放電に対して5つのモデルが計算した $\sigma_W$ を比較する。
- 明らかに全放電では非円形度の効果を含めた**CDBM**モデルによる結果が最良
  - L-mode** ... **CDBM**モデル
  - HSELM** ... 非円形度効果を含めた**CDBM**モデル
  - HGELM** ... 非円形度効果を含めた**CDBM**モデル
- L-modeにおいては、WeilandモデルとGLF23モデルが予測した $\sigma_W$ はほぼ同等であり、HSELMにおいてはWeilandモデルとCDBMモデルの結果はほぼ同等であるが、全放電ではHGELMの標準偏差が大きいこととそれほど良いモードが無かったことが影響して、Weilandモデルの予測精度が最も悪かった。



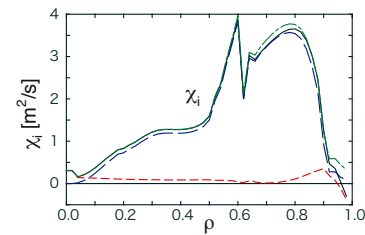
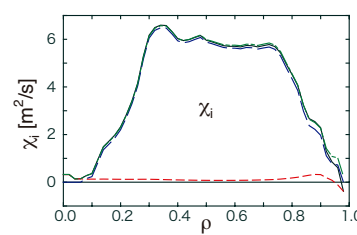
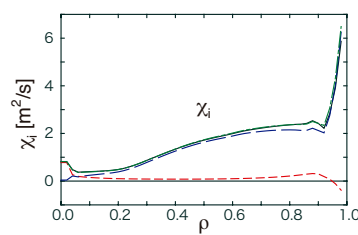
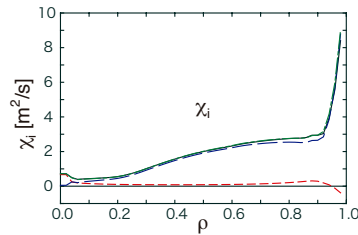
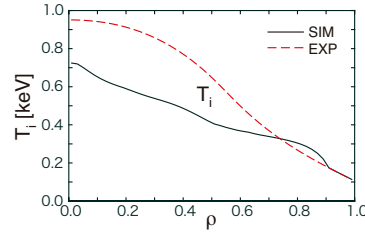
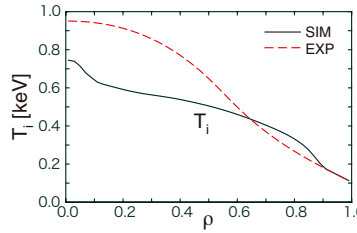
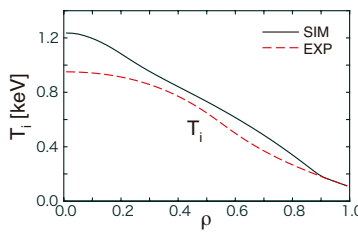
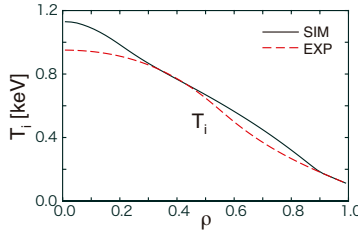
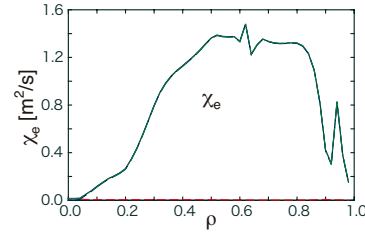
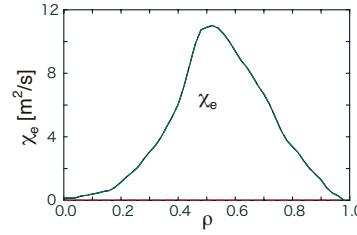
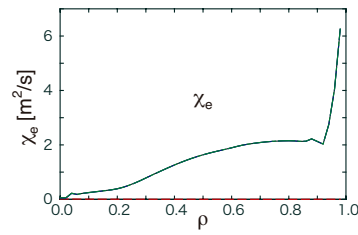
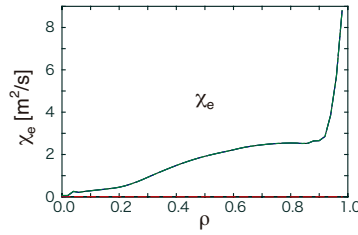
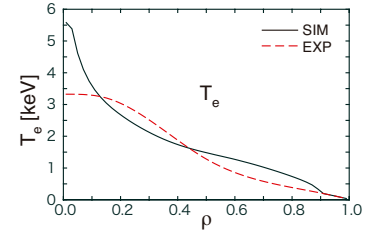
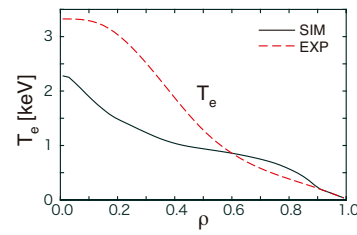
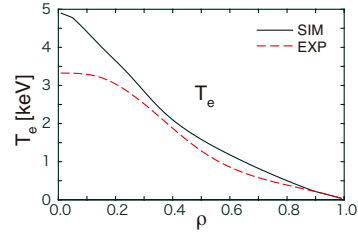
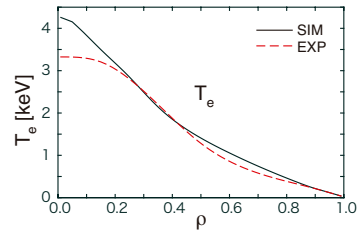
# DIII-D #78316 (L-mode, ECH and ICH heatings)

**CDBM**

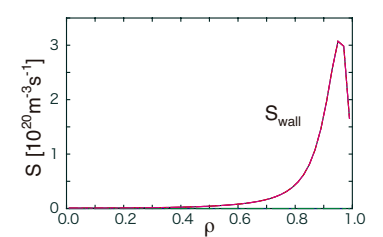
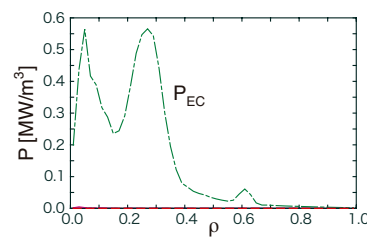
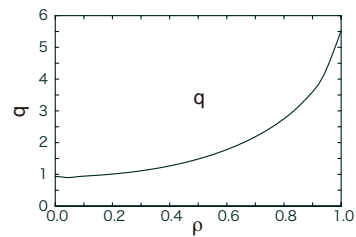
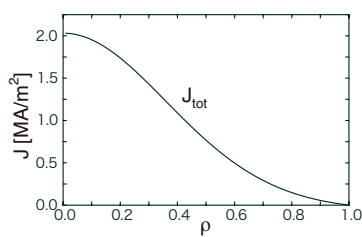
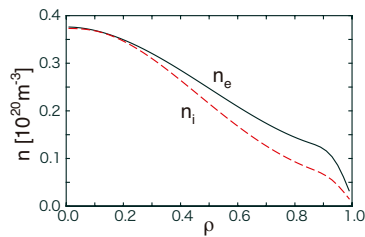
**CDBM  $\kappa$**

**GLF23**

**Weiland**



## Common Profiles

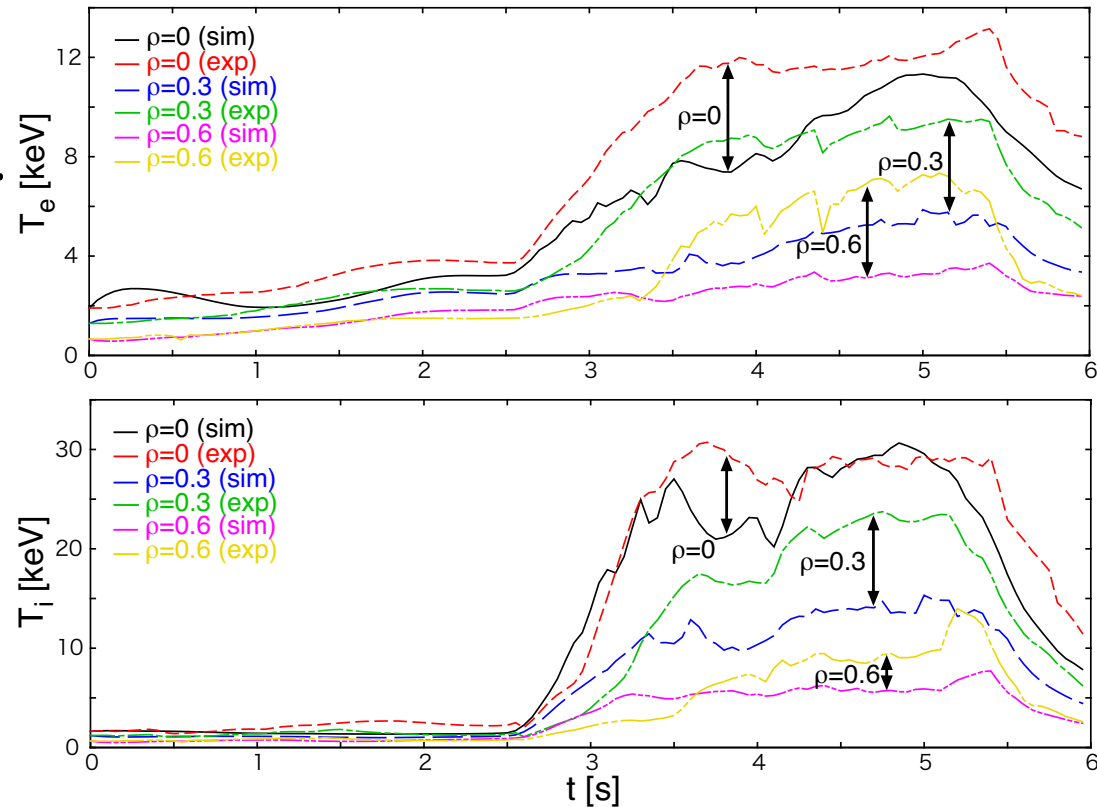


## ● 放電の特徴

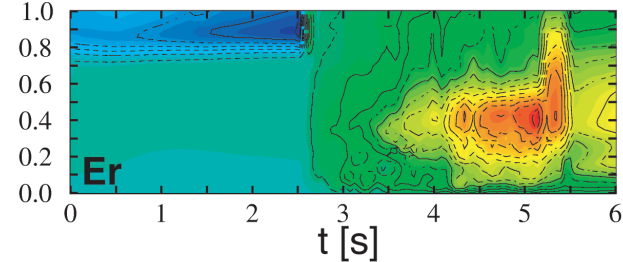
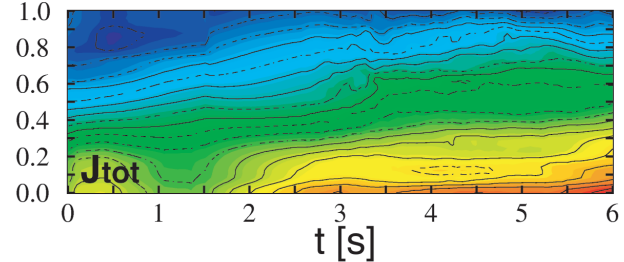
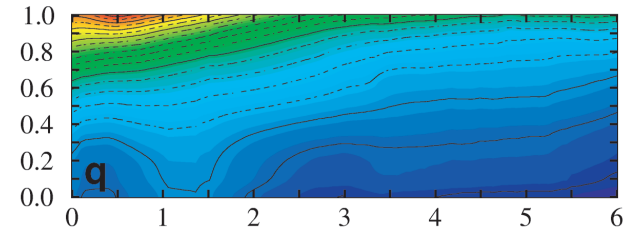
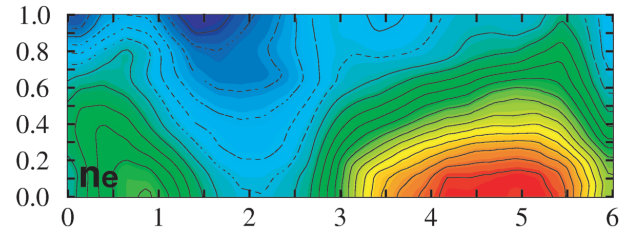
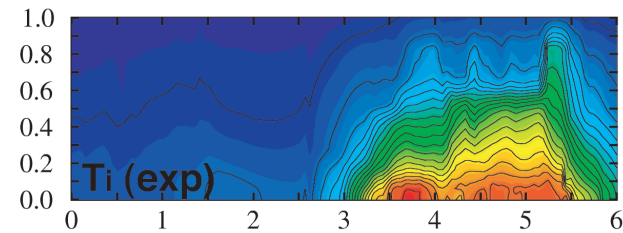
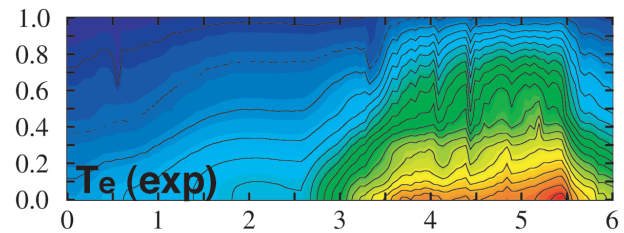
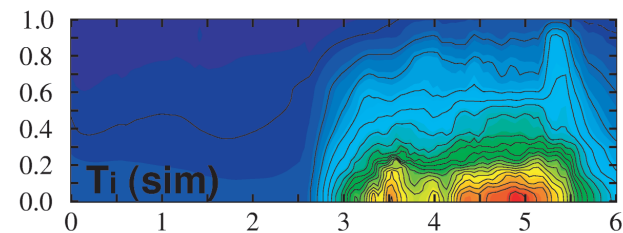
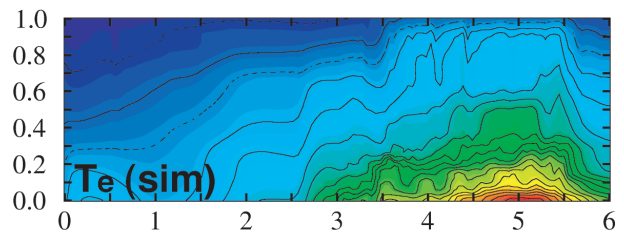
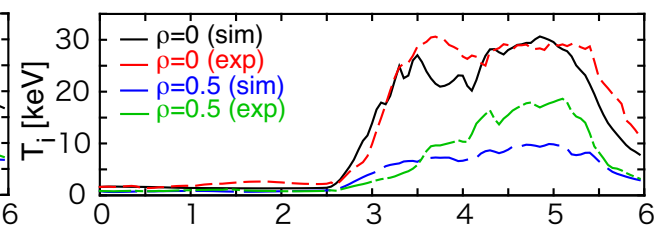
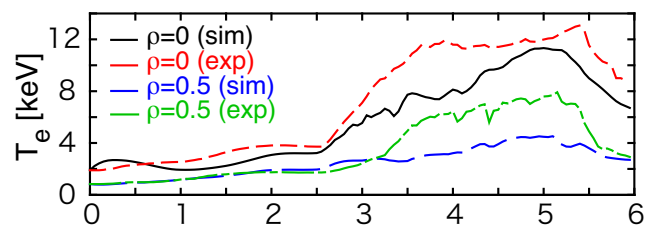
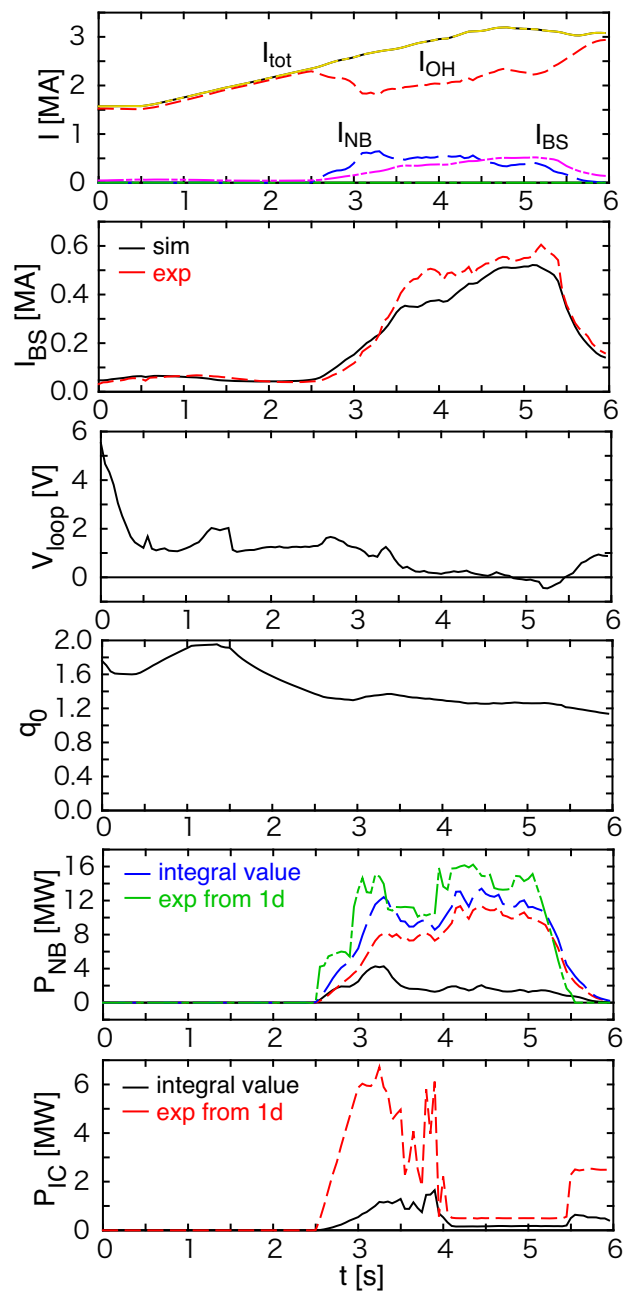
- 1.5 MA から 3 MA への立ち上げの中，段階的に NBI を 14 MW まで引き上げ
- $q(0) > 1.0$  during the discharge  $\Rightarrow$  no sawtooth activities
- ITB 形成後 2 秒ほど定常状態となる．(fig.  $V_{\text{loop}}$ )

## ● 計算結果

- $E \times B$  シア効果を含めることで実験と同時刻に ITB が形成され始めた．
- イオンにおいてはほぼ同程度のピーク温度を再現
- 電子の ITB は実験に比べて弱い．
- 実験と比較してイオン，電子とも  $\rho_{\text{foot}}$  (ITB foot) が小さい  $\Rightarrow$  閉じ込め改善領域が狭い
- 2 ~ 4 s での温度の低さは ICRF パワーが正確に反映されていないことを示唆している可能性も．



# JET #40542



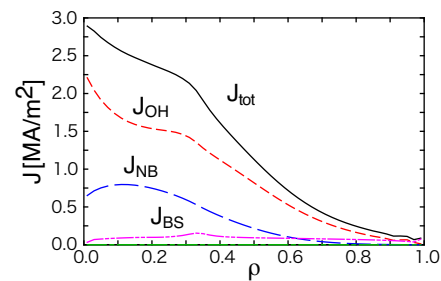
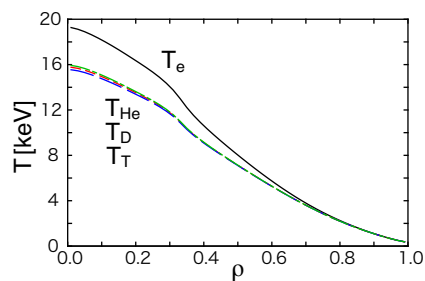
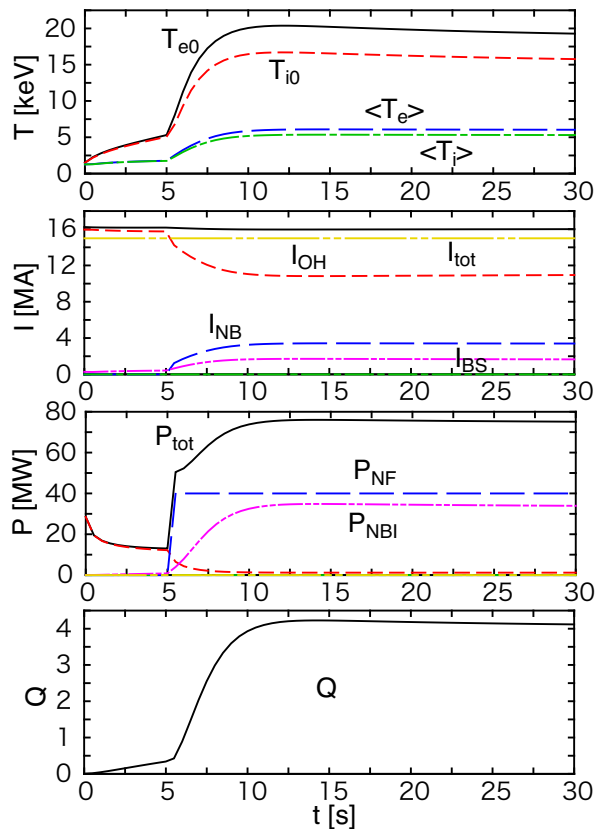
# 標準（高Q）運転シナリオ

- 大電流:  $I_p = 15$  MA, 軸上加熱:  $P_{NB} = 40$  MW
- 正磁気シア分布, 大きめの  $f_{OH}$

CDBM

$$\beta_N = 1.15$$

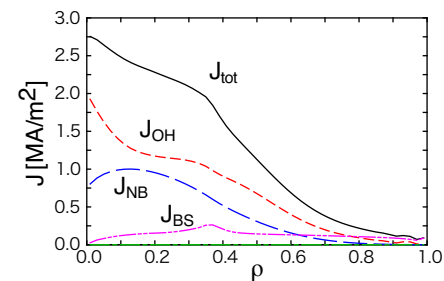
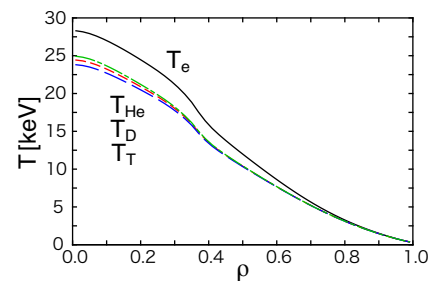
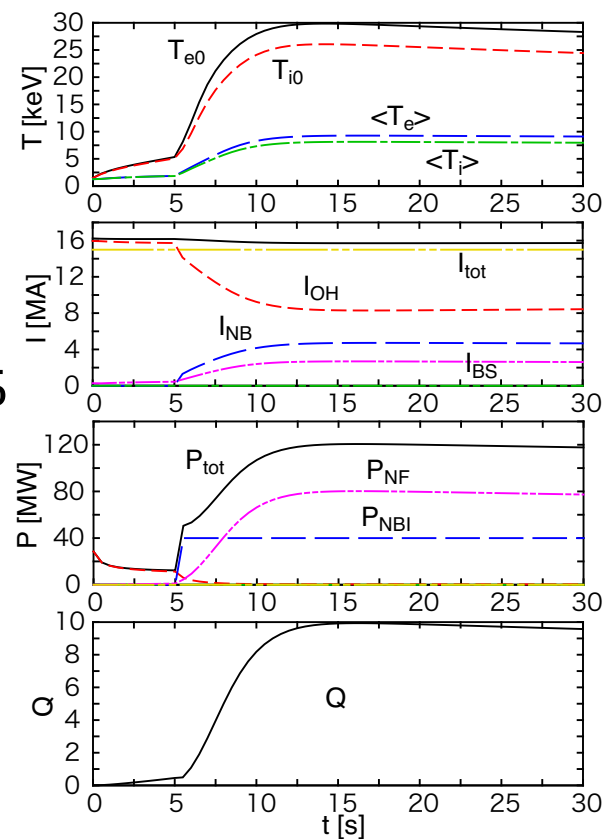
$$\tau_E = 2.9$$
 s



CDBM05

$$\beta_N = 1.88$$

$$\tau_E = 3.0$$
 s



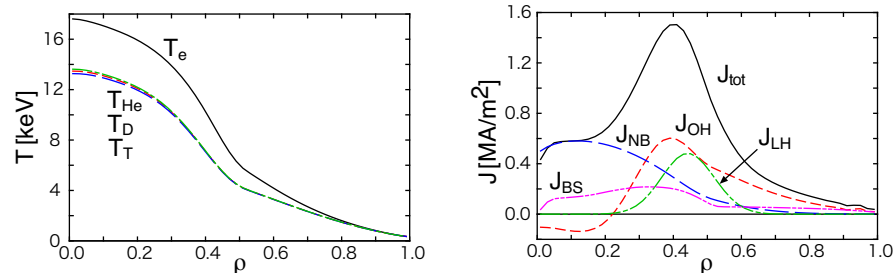
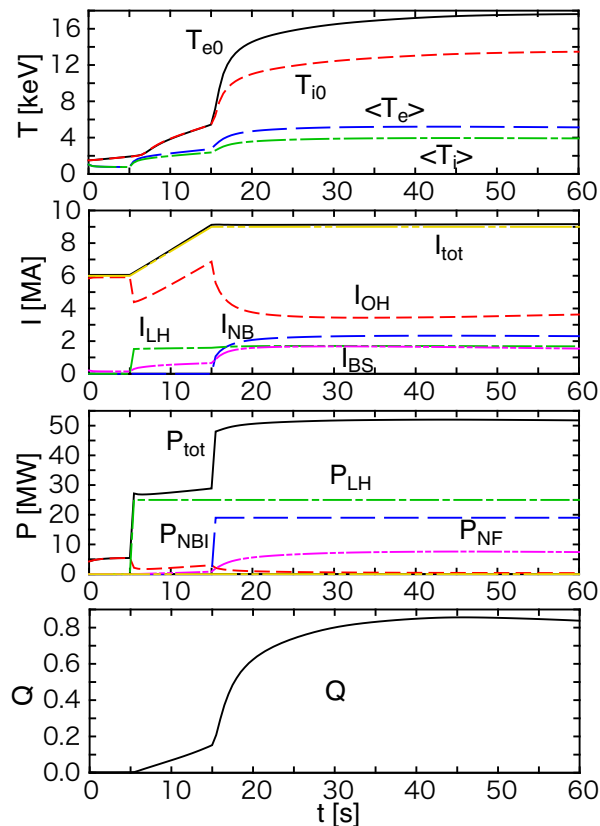
# 準定常運転シナリオ

- $I_p = 6 \rightarrow 9$  MA for 10 s  $P_{NB} = 19$  MW on-axis,  $P_{LH} = 25$  MW off-axis

CDBM

$\beta_N = 0.9$

$\tau_E = 2.0$  s

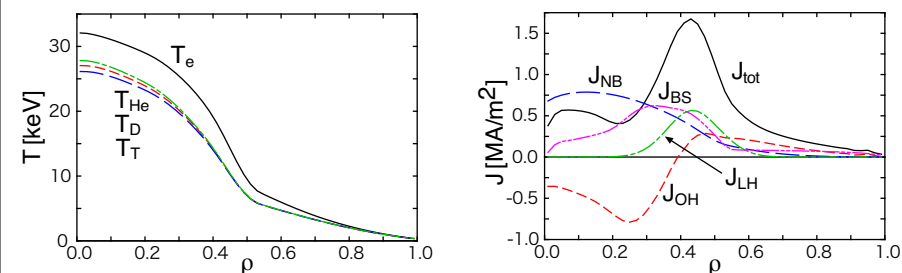
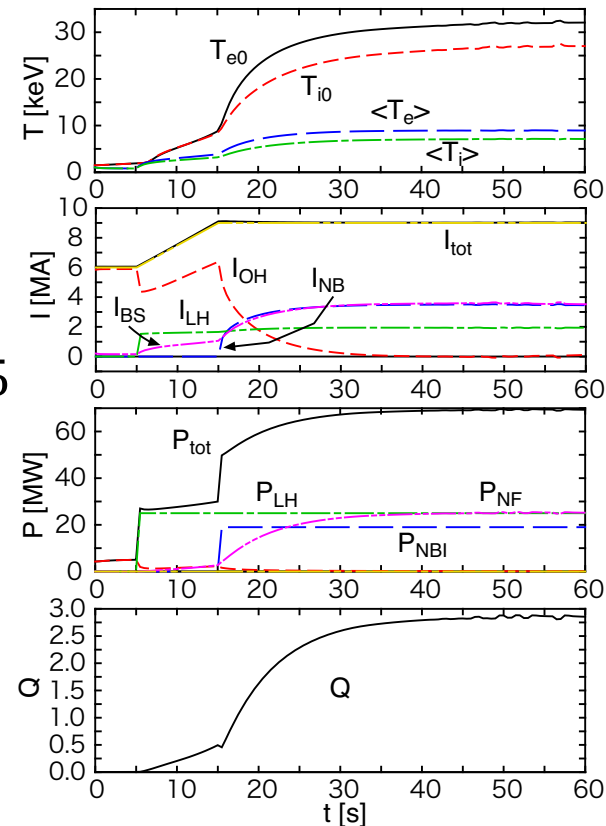


$I_{OH} \neq 0$

CDBM05

$\beta_N = 1.8$

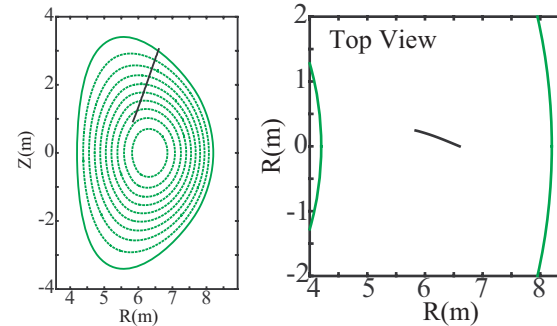
$\tau_E = 3.1$  s



$I_{OH} \sim 0$

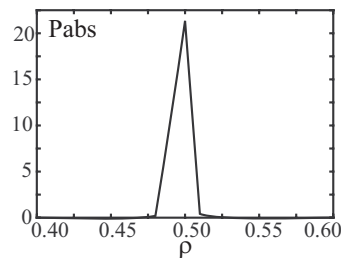
# Analysis of ECCD by TASK Code

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

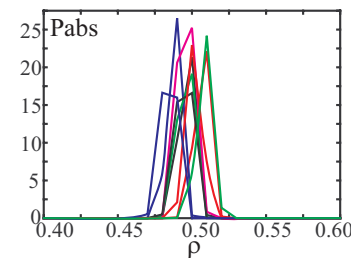


Ray/Beam Profile

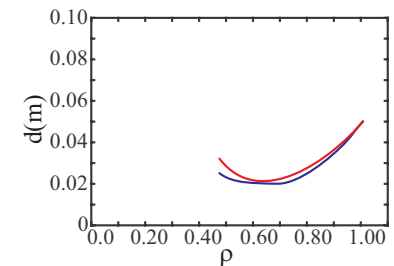
One Ray



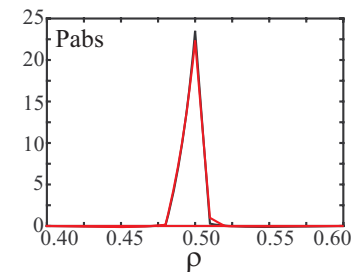
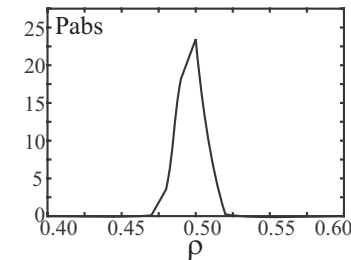
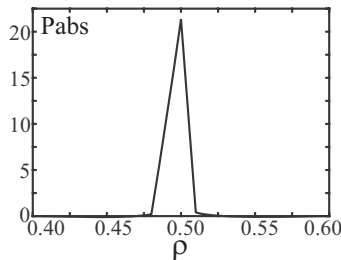
Multi Rays



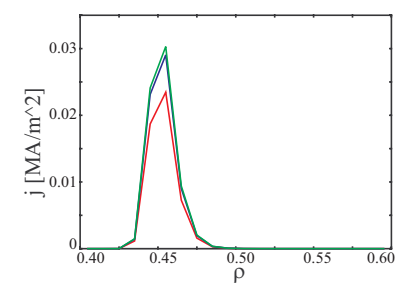
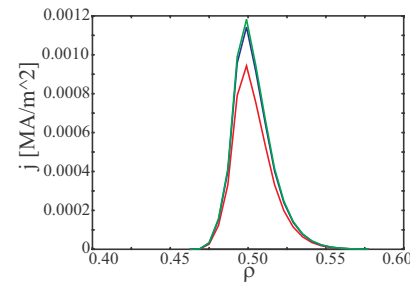
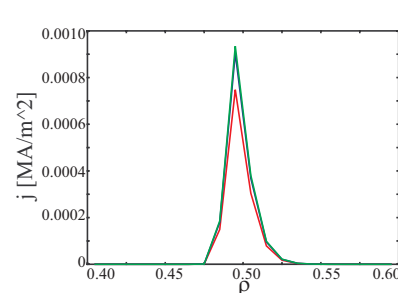
Beam Tracing



$P_{\text{abs}}$  Profile

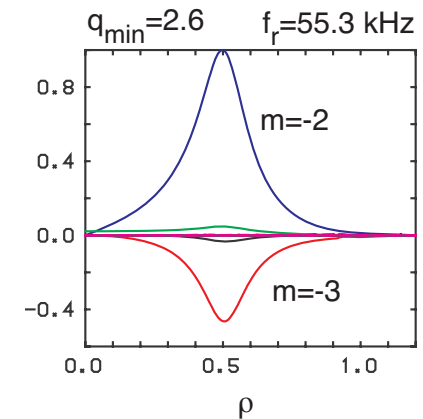
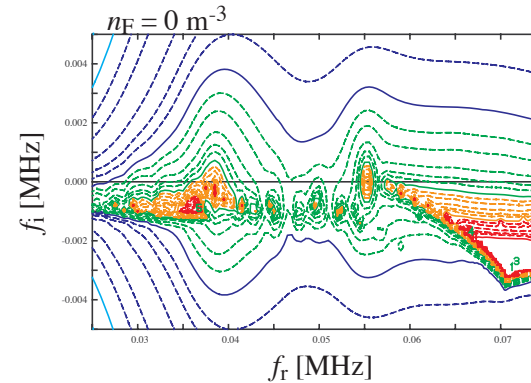
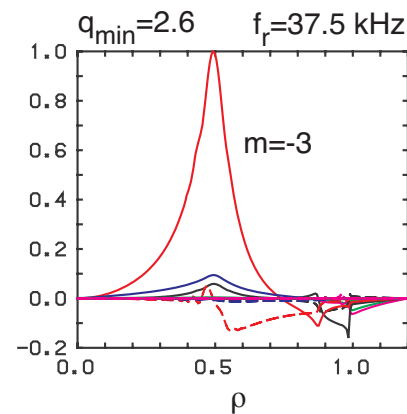


$j_{\text{CD}}$  Profile



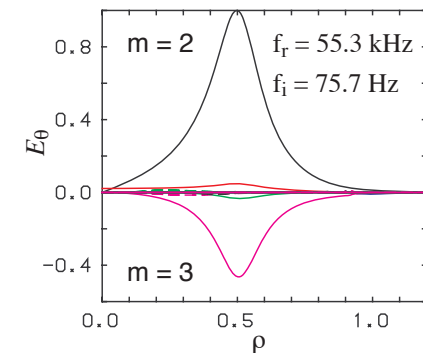
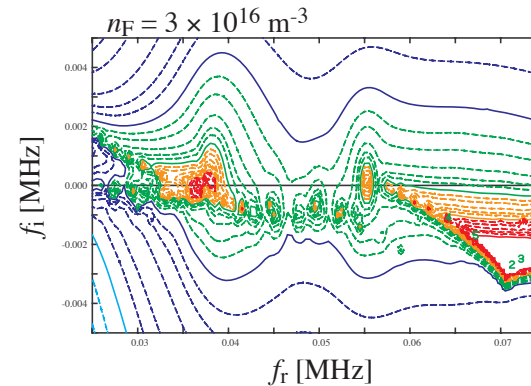
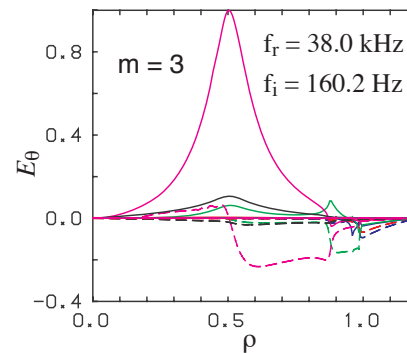
# Excitation by Energetic Particles ( $q_{\min} = 2.6$ )

- Without EP



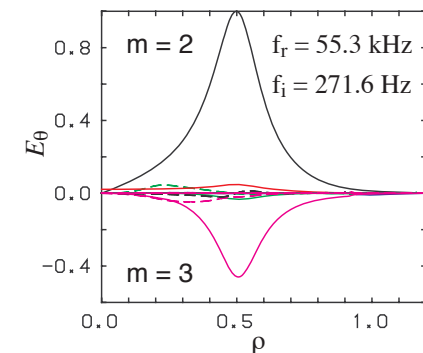
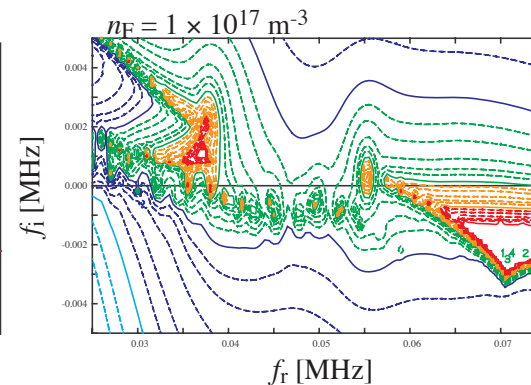
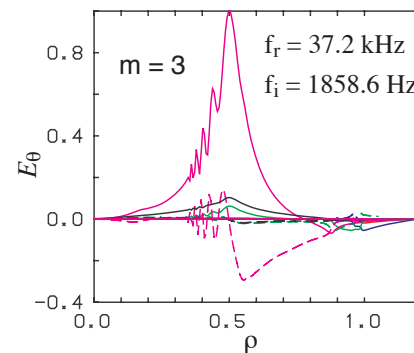
- With EP

$3 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$   
360 keV  
0.5 m



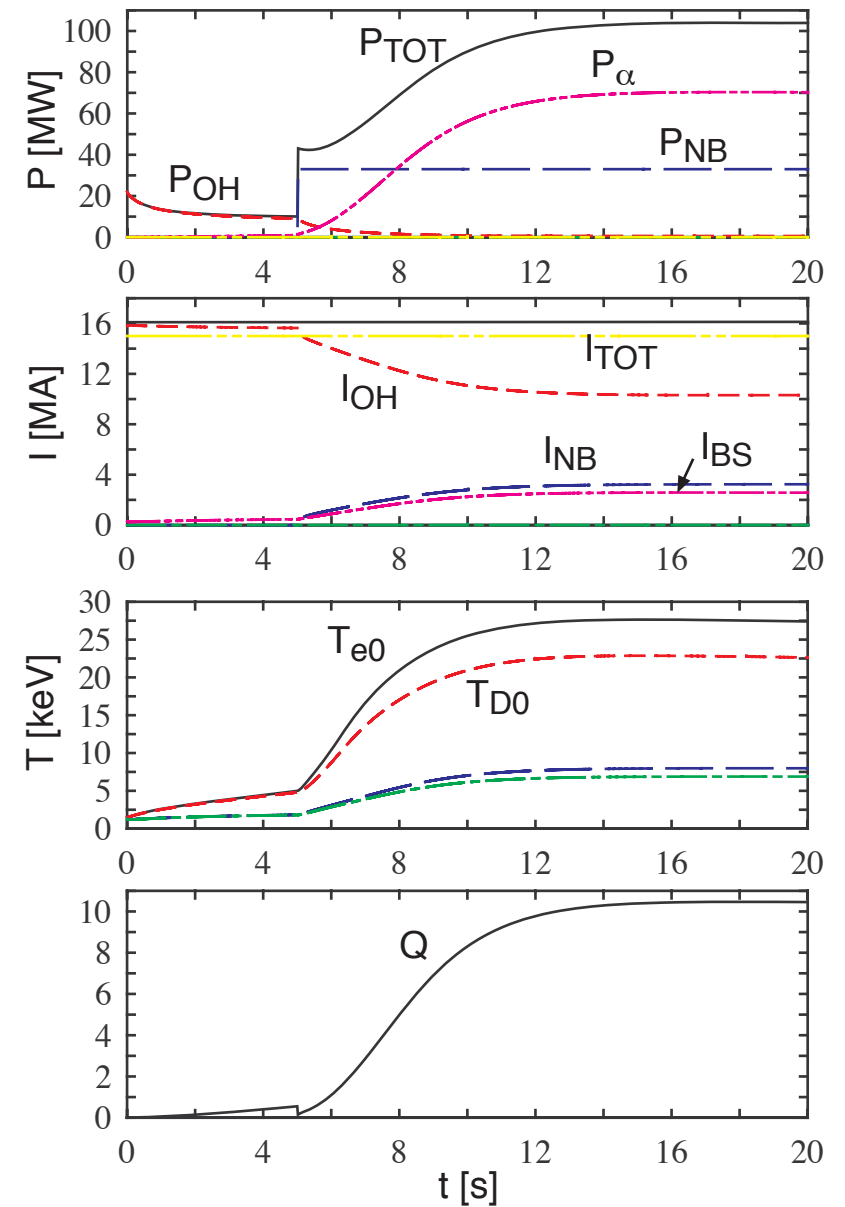
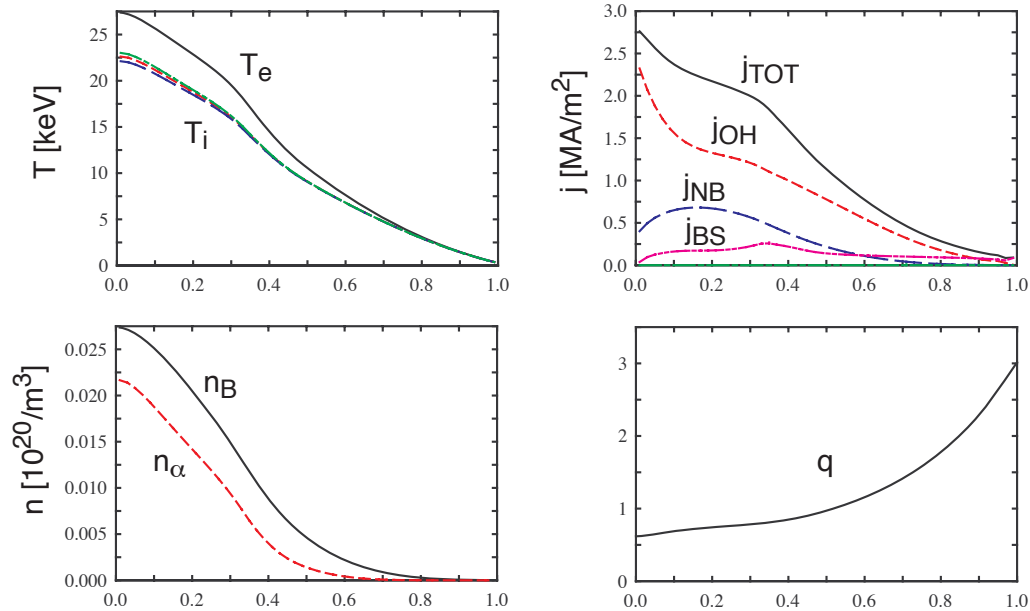
- With EP

$1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$   
360 keV  
0.5 m



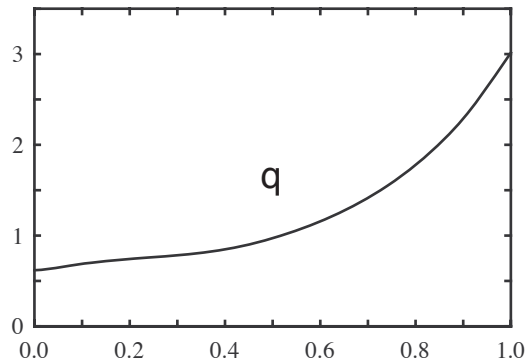
# Standard H-mode Operation

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

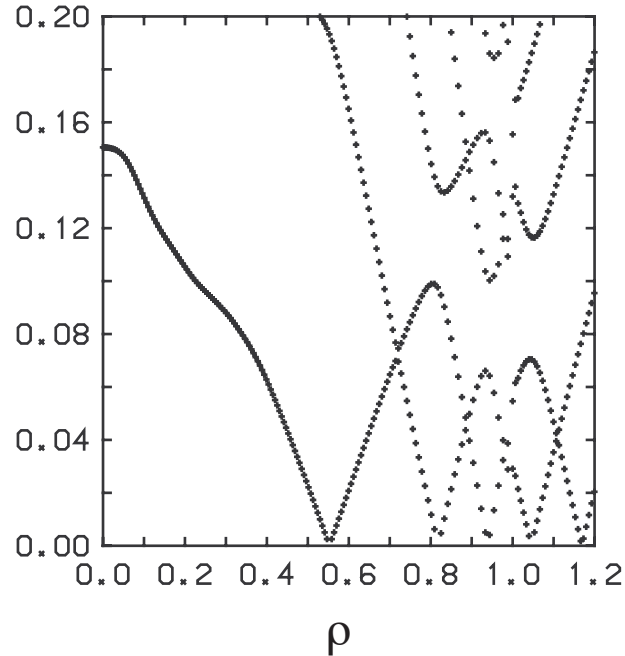


# AE in Standard H-mode Operation

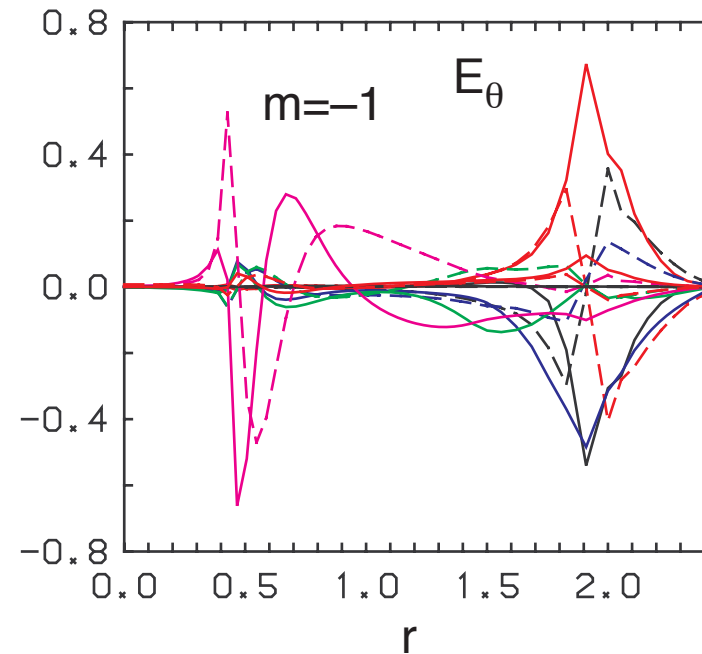
$q$  profile



Alfvén Continuum



Mode structure ( $n = 1$ )



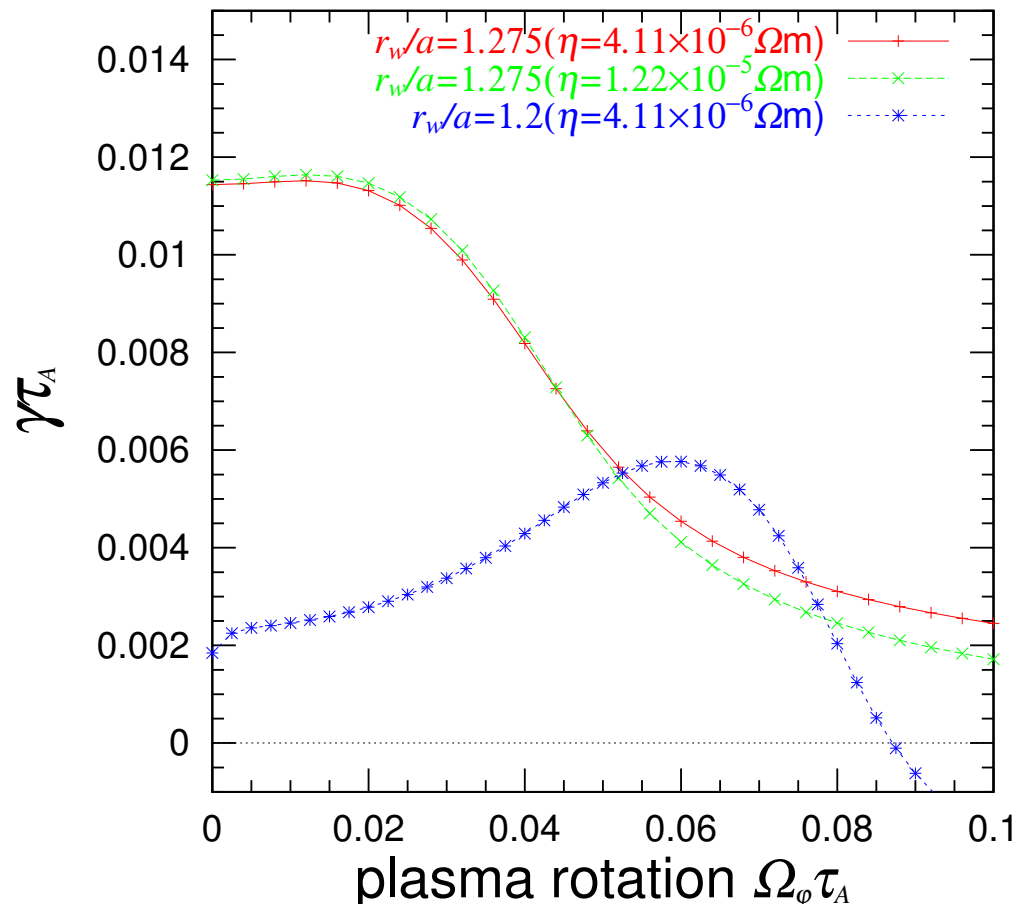
$$f_r = 95.95 \text{ kHz}$$

$$f_i = -1.95 \text{ kHz}$$

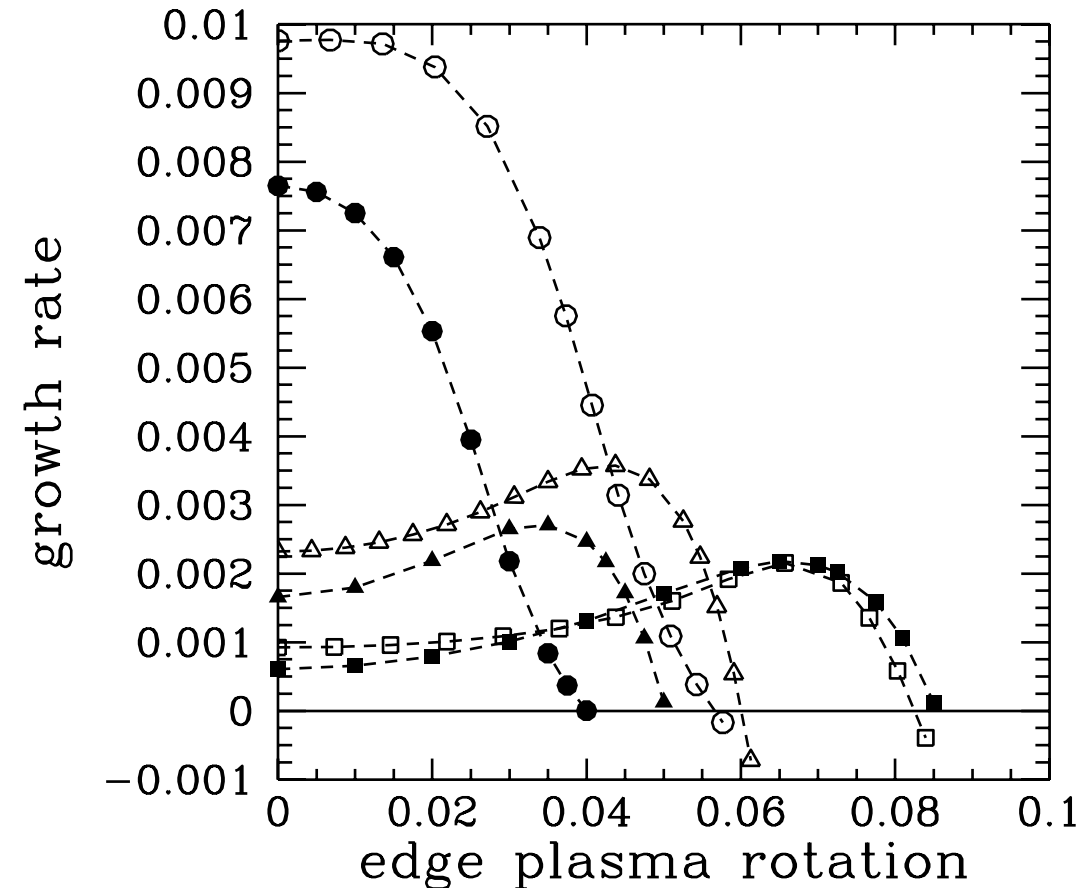
Stabilization due to  $q = 1$

# m=2/n=1 抵抗性壁モード(3)

## ● RWMの成長率に対するトロイダル剛体回転の影響



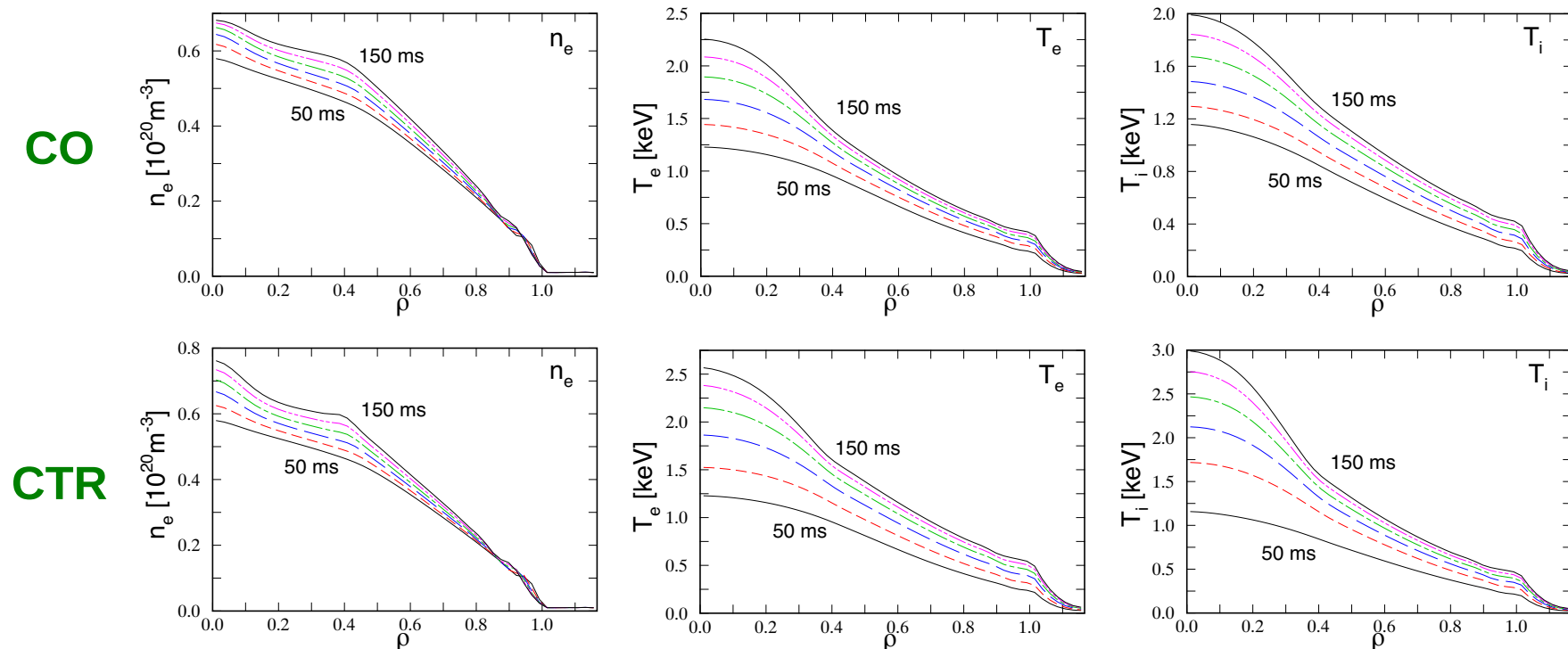
TASK/WA コードの計算結果．Fitzpatrick[1]による結果よりも安定化効果が弱い． $r_w = 1.275$  ,  $\eta = 4.11 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$  の場合 ,  $\Omega_\phi\tau_A > 0.49$  で安定化される．



Fitzpatrick[1]による結果．黒いマークはCTDコードによる数値計算結果．白いマークは解析解．丸，三角，四角はそれぞれ抵抗性壁の位置が $1.275a$ ,  $1.2a$ ,  $1.09a$ の場合に対応する．

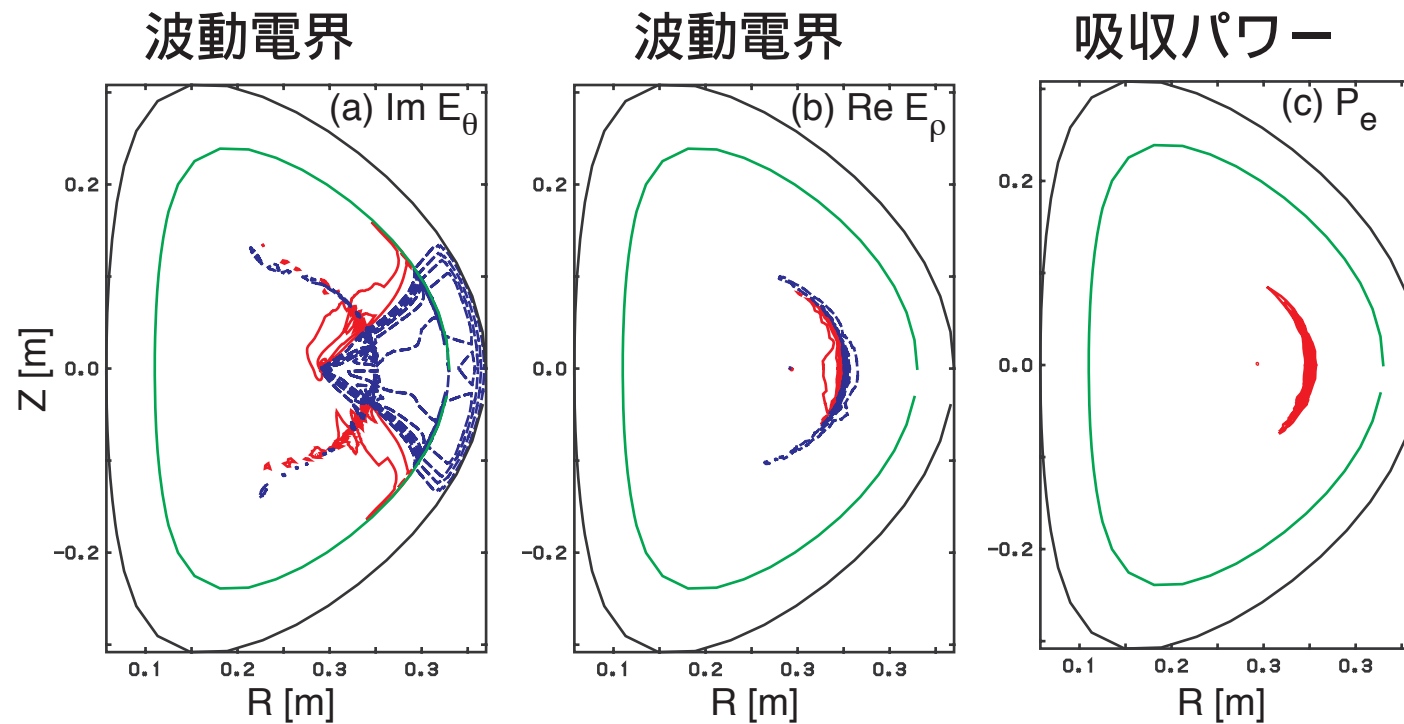
# 密度ピーキングシミュレーション(1)

- 乱流輸送モデルに **CDBM モデル** を使用
- シミュレーション開始 50 ms 後から **NBI 6.5 MW** 入射
- シミュレーション結果
  - **CO** 入射の時の中心密度は **CTR** に比べて約 12% 高く , ピーキングが見られる
  - 実験と異なり , **CTR** 入射の時の温度は高い



# 中小型装置の解析

- 小型球形トカマク LATE における電子サイクロトロン波伝播（福山）
  - 右回り遮断層を透過した異常波の高域混成共鳴における吸収



- TRIAM-1M における EC 電流駆動解析（出射）
- Heliotron-J における ICRF 加熱解析（鳥居，北川）

# 利用者拡大のために (1)

---

- 想定する利用者

- シミュレーション研究者：初期条件，背景空間分布
- モデリング研究者：既存コードとの結合，統合シミュレーション
- 理論研究者：新しい理論モデルの検証
- 実験研究者：実験予測，経験的モデルの導入，実験データの解析

- TASK コードの利用環境：

- Unix 環境：Linux, MacOSX, SX-OS 等
- Compiler：Fortran77, C  $\Rightarrow$  Fortran95, C
  - g77/gfortran/g95, pgf77/pgf95, ifort, xlf/xlf95, sxf90
- X Window System：EPS file に出力可能

## 利用者拡大のために (2)

---

- **TASK コードの利用 :**

- **Open Source:** 開発中 , NCLASS, GLF23 等を除く ( stable version )
  - <http://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task/>
- **Full Source:** password 必要 . download 可能 ( unstable version )
  - `cvs -d :pserver:anonymous@p-grp.nucleng.kyoto-u.ac.jp/cvs/`
- **Developer:** account 必要 . upload 可能 ( developer version )
  - `cvs -d account@p-grp.nucleng.kyoto-u.ac.jp/cvs/`

- **マニュアルの整備**

- **利用説明書 ( 暫定版 ) :** インストール , モジュール利用説明 ( 部分的 )
- **英文解説書 ( 今年中を予定 ) :** モデル解説
- **初心者向け利用説明書 :** 要望あり ( 御手洗先生 ? )
- **利用者情報交換 : Wiki :** 検討中

# 今後の課題

---

- **TASK コードの開発**

- **FORTRAN95 化**
- **標準データインターフェースの完全導入**
- **他のコードとのベンチマーク**
- **平衡**: 自由境界, プラズマ回転
- **輸送**: 輸送係数や加熱源等のモジュール化, TX の整備
- **波動**: 有限ラーモア半径効果
- **運動量分布関数**: 並列化, 輸送解析

- **利用者の拡大**

- **既存のコードとの結合**: 安定性解析, ヘリカル系, TOPICS 等
- **マニュアルの整備**
- **利用者間の情報交換**