

# トカマクにおける核燃焼プラズマの 統合輸送シミュレーション I

京大工：福山 淳，本多 充

## 内 容

- 目 的
- トカマク統合輸送解析コード TASK
- 核燃焼プラズマの輸送シミュレーション
  - 高Q運転シナリオ：初期電流分布依存性
  - 定常運転シナリオ
- まとめ

# トカマク統合輸送解析コード TASK

---

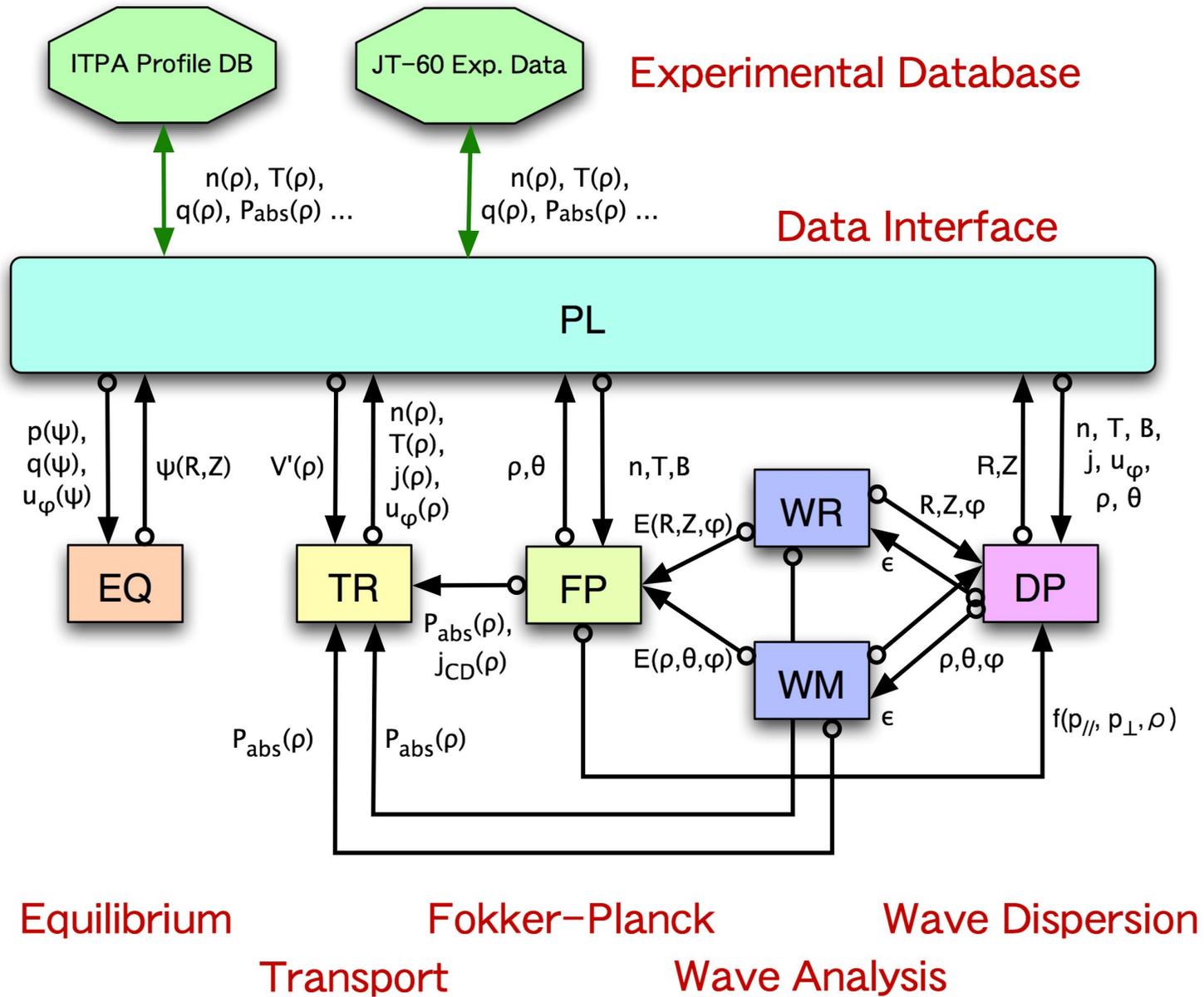
- **T**ransport **A**nalyzing **S**ystem for tokama**K**
- **トカマクの時間発展シミュレーション**
  - モジュール構造の統合シミュレーション
  - 様々な加熱・電流駆動機構：EC, LH, IC, NB
  - 高い移植性：
  - **ヘリカル系への拡張**
  - **MPI ライブラリを用いた並列分散処理**
  - **実験データベースの利用**
- **核燃焼プラズマ統合コード構想 (BPSI) のコアコード**
  - **最小限の統合コード**：モジュールは交換可能
  - **インターフェースの標準化**：実装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

# TASK コードの構成

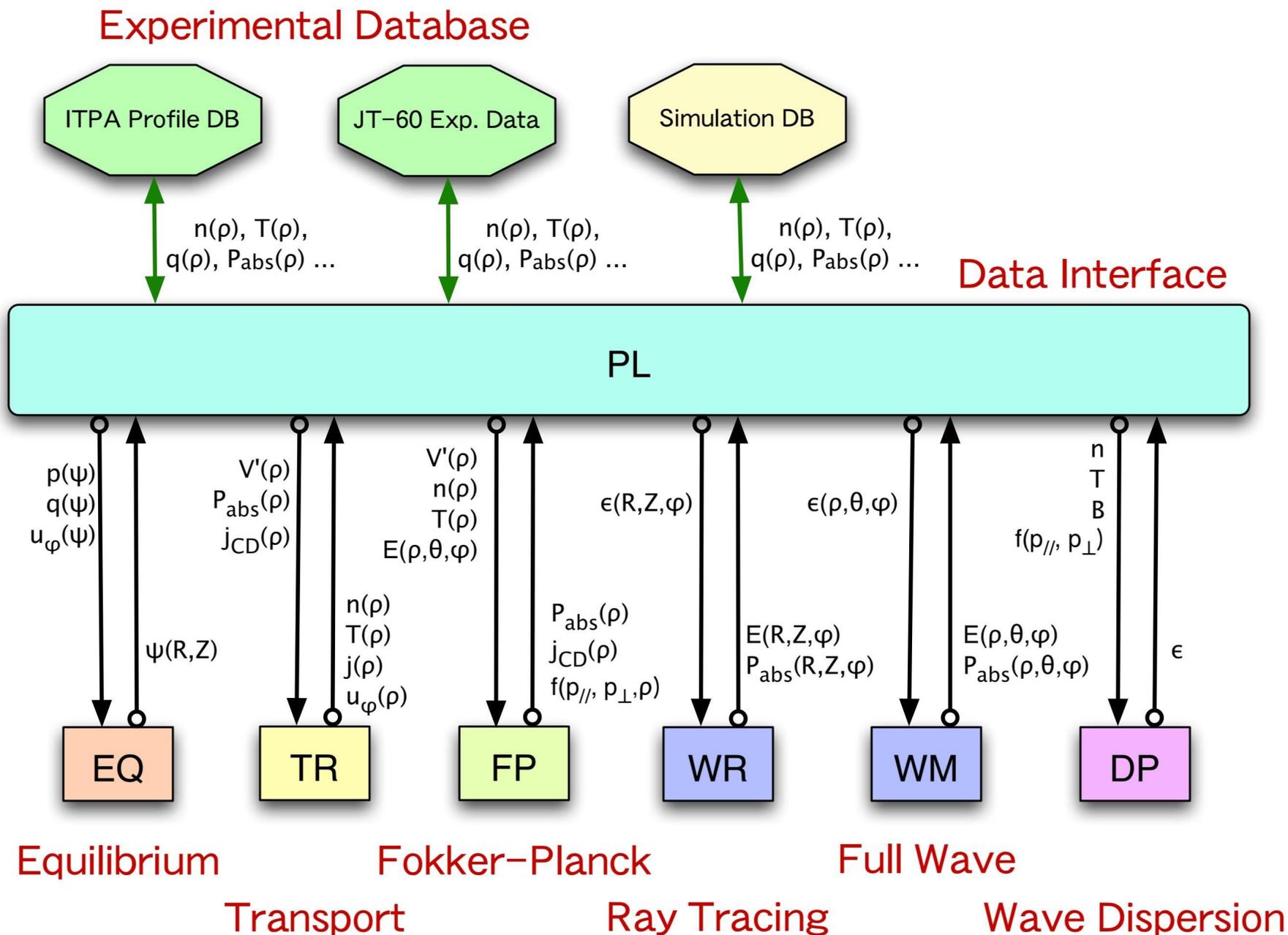
## • モジュール

TASK/PL	データ交換	インターフェース, 分布データベース	
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	
開発中	EX	2次元平衡解析	自由境界, 有限要素法, プラズマ形成
	TX	1次元輸送解析	流体型輸送方程式, 回転と径方向電界
	WA	線形安定性解析	運動論効果を含めた巨視的安定性解析

# TASK コードの元の構造



# TASK コードの新しい構造



# 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, GLF23, 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)

# CDBM 輸送モデル

- 電流拡散性バルーニングモード  
乱流輸送モデルの熱拡散係数

$$\chi_{\text{TB}} = F(s, \alpha, \kappa, \omega_{E1}) \alpha^{3/2} \frac{c^2}{\omega_{pe}^2} \frac{v_A}{qR}$$

---

磁気シア  $s \equiv \frac{r}{q} \frac{dq}{dr}$

圧力勾配  $\alpha \equiv -q^2 R \frac{d\beta}{dr}$

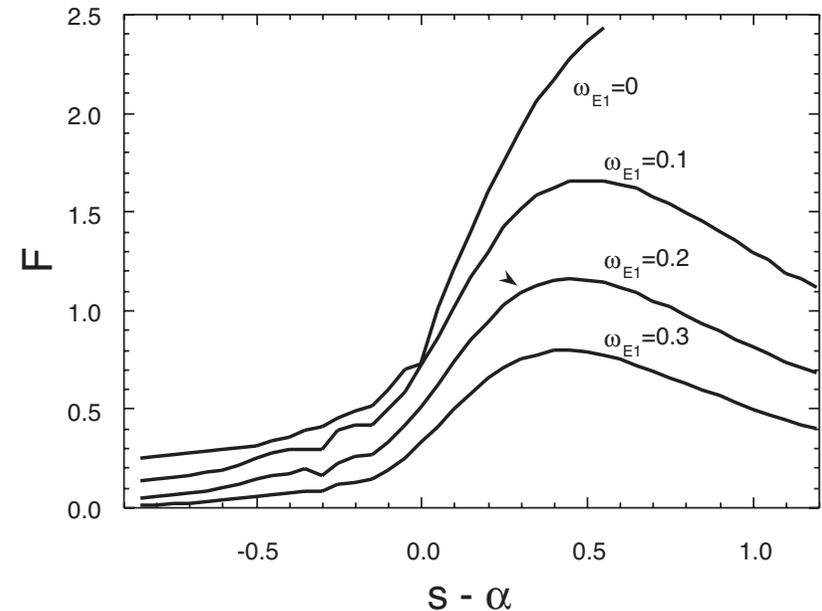
磁気曲率  $\kappa \equiv -\frac{r}{R} \left( 1 - \frac{1}{q^2} \right)$

$E \times B$  回転シア  $\omega_{E1} \equiv \frac{qR}{sv_A B_\theta} \frac{dE}{dr}$

---

- 負磁気シアは輸送を減少させる。
- $E \times B$  回転シアは輸送を減少させる。

- $F(s, \alpha, \kappa, \omega_{E1})$  の  $s - \alpha$  依存性



- 近似式

$$F_{\text{BM}} = \begin{cases} \frac{1}{1 + G_1 \omega_{E1}^2} \frac{1}{\sqrt{2(1 - 2s')(1 - 2s' + 3s'^2)}} & \text{for } s' = s - \alpha < 0 \\ \frac{1}{1 + 9\sqrt{2}s'^{5/2}} & \\ \frac{1}{1 + G_1 \omega_{E1}^2} \frac{1}{\sqrt{2(1 - 2s' + 3s'^2 + 2s'^3)}} & \text{for } s' = s - \alpha > 0 \end{cases}$$

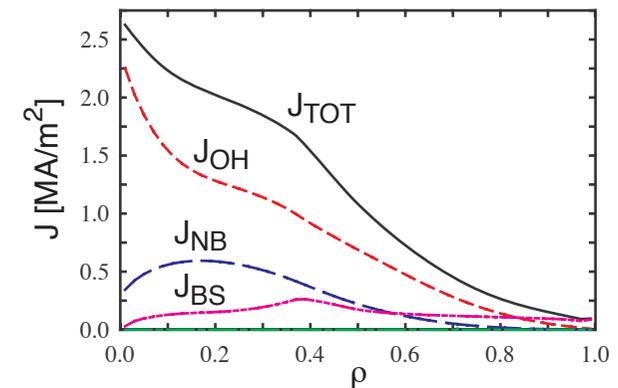
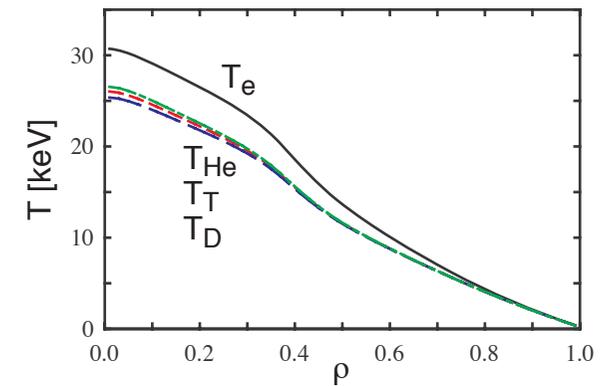
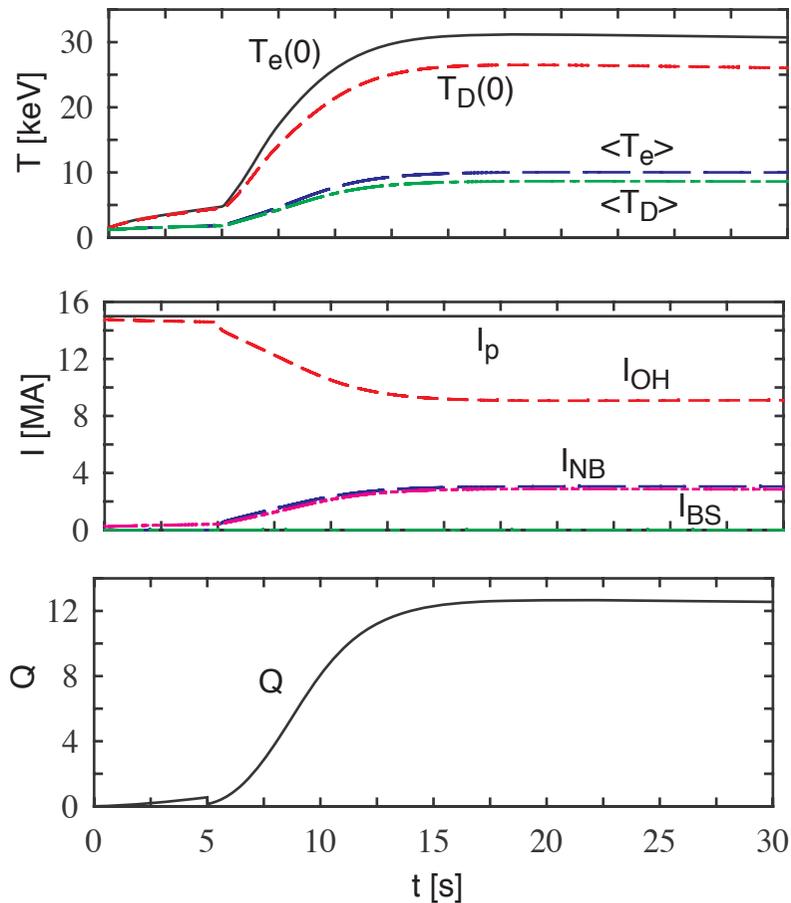
# 今回の解析の目的

---

- **CDBM 輸送モデルを用いて**
  - Lモードの閉じ込め時間比例則をほぼ再現
  - 内部輸送障壁形成や電流ホール形成を再現
  - ITPA トカマク分布データベースをかなりよく再現．（次の講演参照）
- **簡単な加熱・電流駆動モデルを用いて**
  - 吸収パワー分布を仮定
  - 電流駆動効率として近似的な解析式
- **ITER 運転シナリオを再現できるパラメータをさがす．**
  - 強い自律性と輸送モデルの非線形性
  - 今回は熱輸送と電流拡散の時間発展を解く
  - 厳密な粒子ビーム軌跡や波動伝播の解析は次のステップ

# 高 Q 運転モード

- 大電流 :  $I_p = 15 \text{ MA}$
- 加熱・電流駆動 :  $P_{\text{NB}} = 40 \text{ MW (on axis)}$
- エネルギー増倍率 :  $Q \sim 12.4$

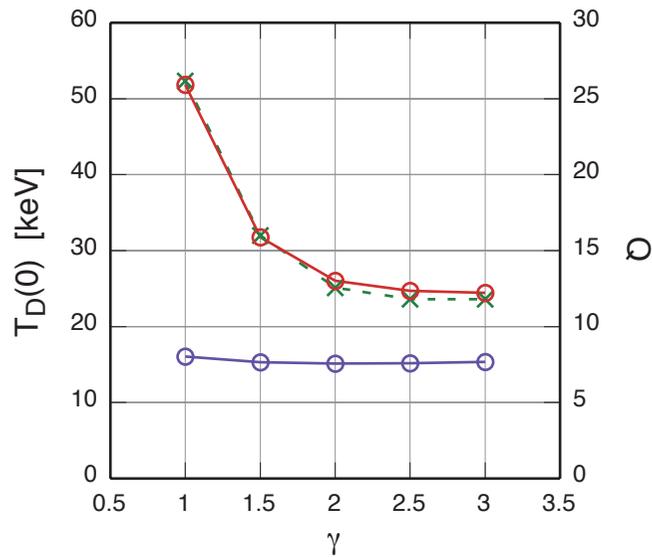


# 初期電流分布依存性

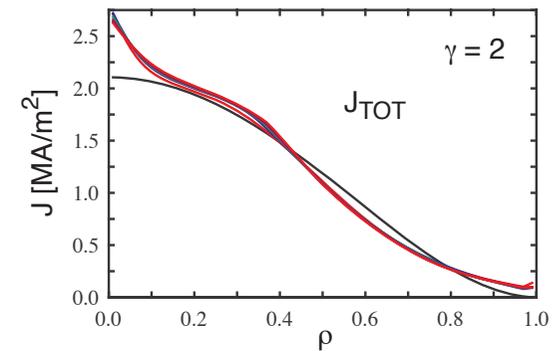
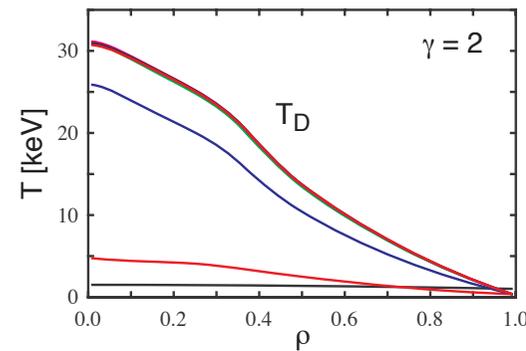
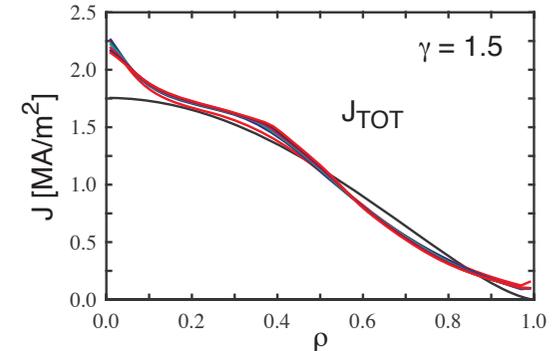
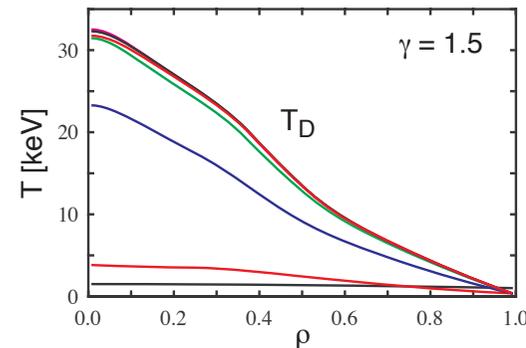
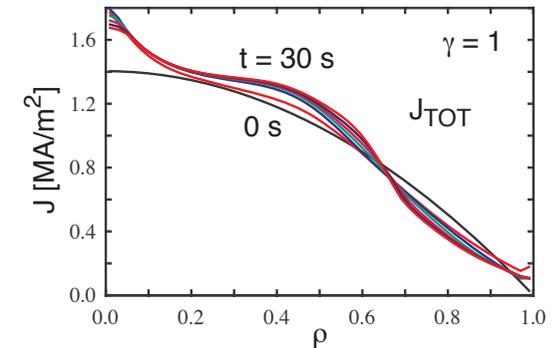
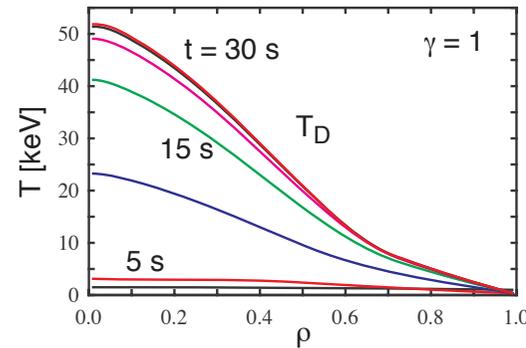
- 初期電流分布

$$j(\rho) = j_0(1 - \rho^2)^\gamma$$

- 広がった初期電流分布
- 電流分布の収縮
- 内部輸送障壁形成

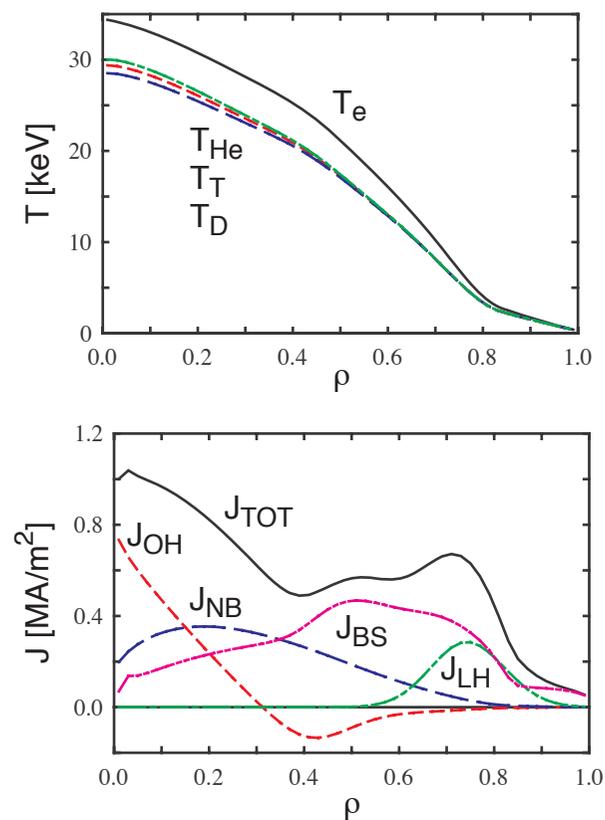
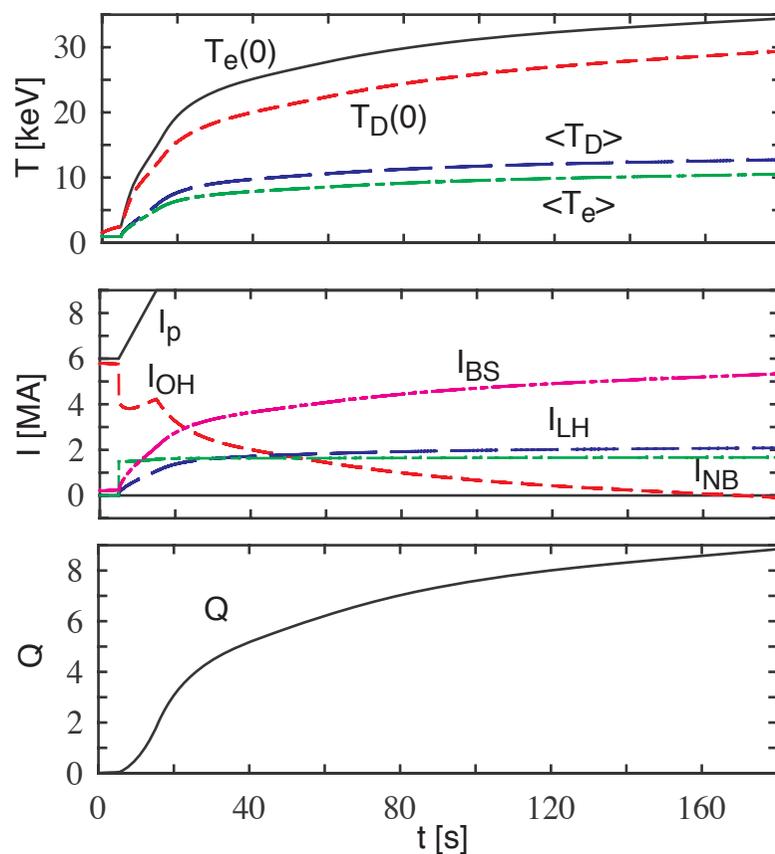


## 温度分布と電流分布の $\gamma$ 依存性



# 定常運転モード

- 電流立ち上げ :  $I_p = 6 \text{ MA} \rightarrow 9 \text{ MA in } 10 \text{ sec}$
- 加熱・電流駆動 :  $P_{\text{NB}} = 18 \text{ MW (on axis)}$ ,  $P_{\text{LH}} = 27.5 \text{ MW (off axis)}$
- 完全電流駆動 :  $I_{\text{OH}} \sim 0$ , エネルギー増倍率 :  $Q \sim 8.9$



# 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が検討されている．そのコアとなり得るコードとしてTASK コードを開発している．
- 輸送解析モジュール TASK/TR と CDBM 輸送モデルを用いて，ITER の標準運転シナリオおよび定常運転シナリオが実現可能かを，比較的簡単なモデルで解析した．
- 大電流の標準運転シナリオでは， $Q \sim 12.4$  が実現できた．
- ジュール電流が 0 の定常運転シナリオも，加熱・電流駆動パワーを精密に定めることにより，時間発展を含めて実現できた．
- **今後の課題**
  - より現実的なモデルに発展させる：密度分布，不純物，境界条件．
  - 加熱・電流駆動モデルとの連携
  - MHD 安定性解析コード等との結合