

2006/01/20

核融合科学研究所
一般共同研究成果報告会

LHD 数値解析システム利用共同研究

トーラスプラズマ時間発展解析コアコードの開発

福山 淳 (京大工)

内容

- トロイダルプラズマ解析コード : **TASK**
- 主な成果
- まとめと今後の課題

TASK コードの特色

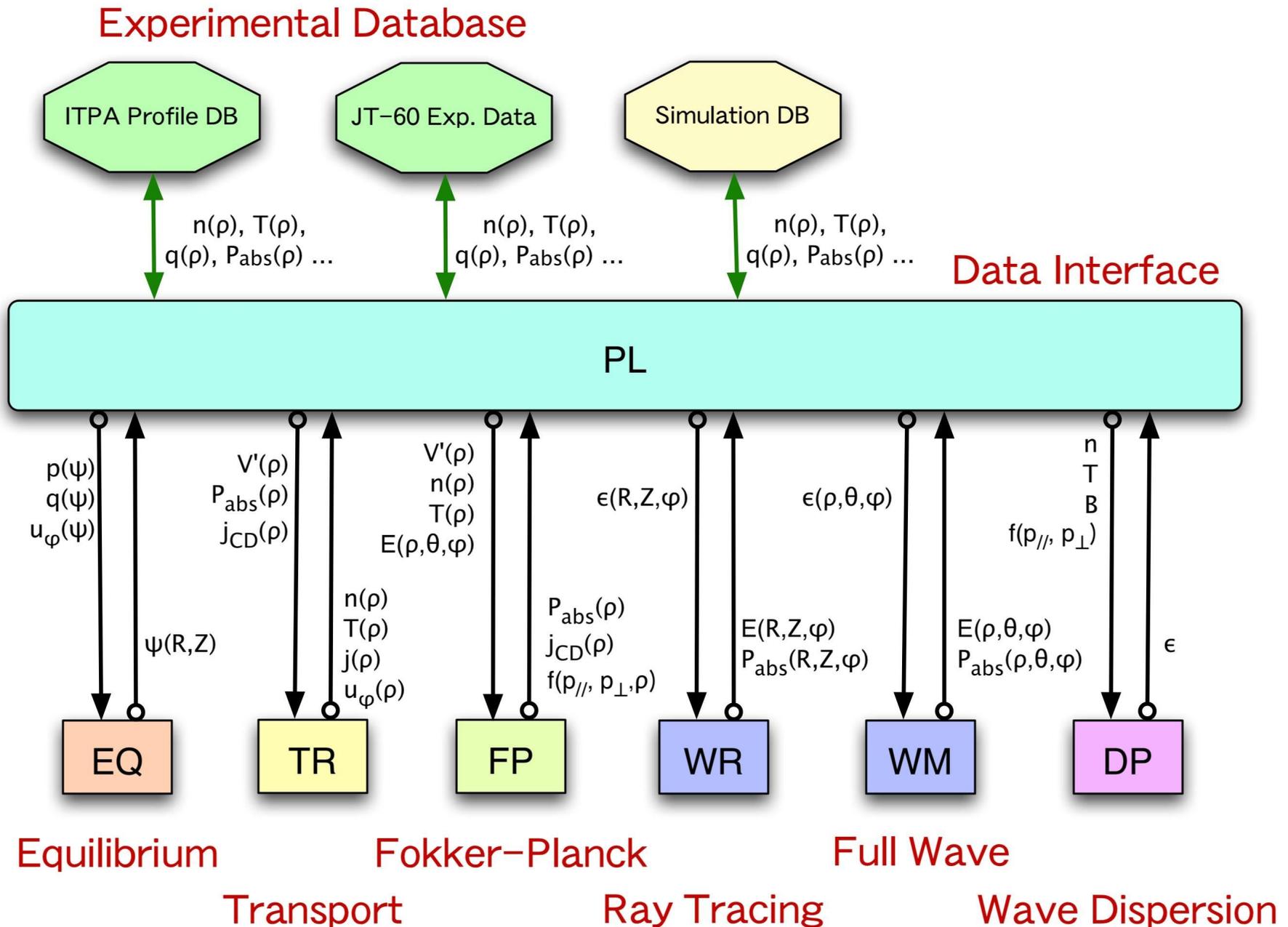
- トカマクの時間発展シミュレーション
 - モジュール構造の統合シミュレーション
 - 様々な加熱・電流駆動機構
 - 高い移植性
 - ヘリカル系への拡張
 - MPI ライブラリを用いた並列分散処理
 - 実験データベースの利用
- 核燃焼プラズマ統合コード構想のコアコード
 - 最小限の統合コード：モジュールは交換可能
 - インターフェースの標準化：実装の検証
 - 利用者の拡大：マニュアル等の整備

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 コードの構成



進展状況

- ソースプログラムの公開
 - <http://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task/>
 - 2005-11-18: Prerelease: NCLASS, GLF23, Weiland を含まず
- 輸送シミュレーション：
 - 拡散型輸送シミュレーション：EQ/TR：
- 波動シミュレーション：
 - 輸送コードと組み合わせた統合シミュレーション：EQ/TR/WM
 - 速度分布関数の時間発展を含めた自己無撞着な解析：WM/FP/DP
- 統合コード
 - プラズマ記述変数の標準化
 - TASK/EQ の改良： $\langle j_{\parallel}(\rho) \rangle$, $q(\rho)$

開発状況

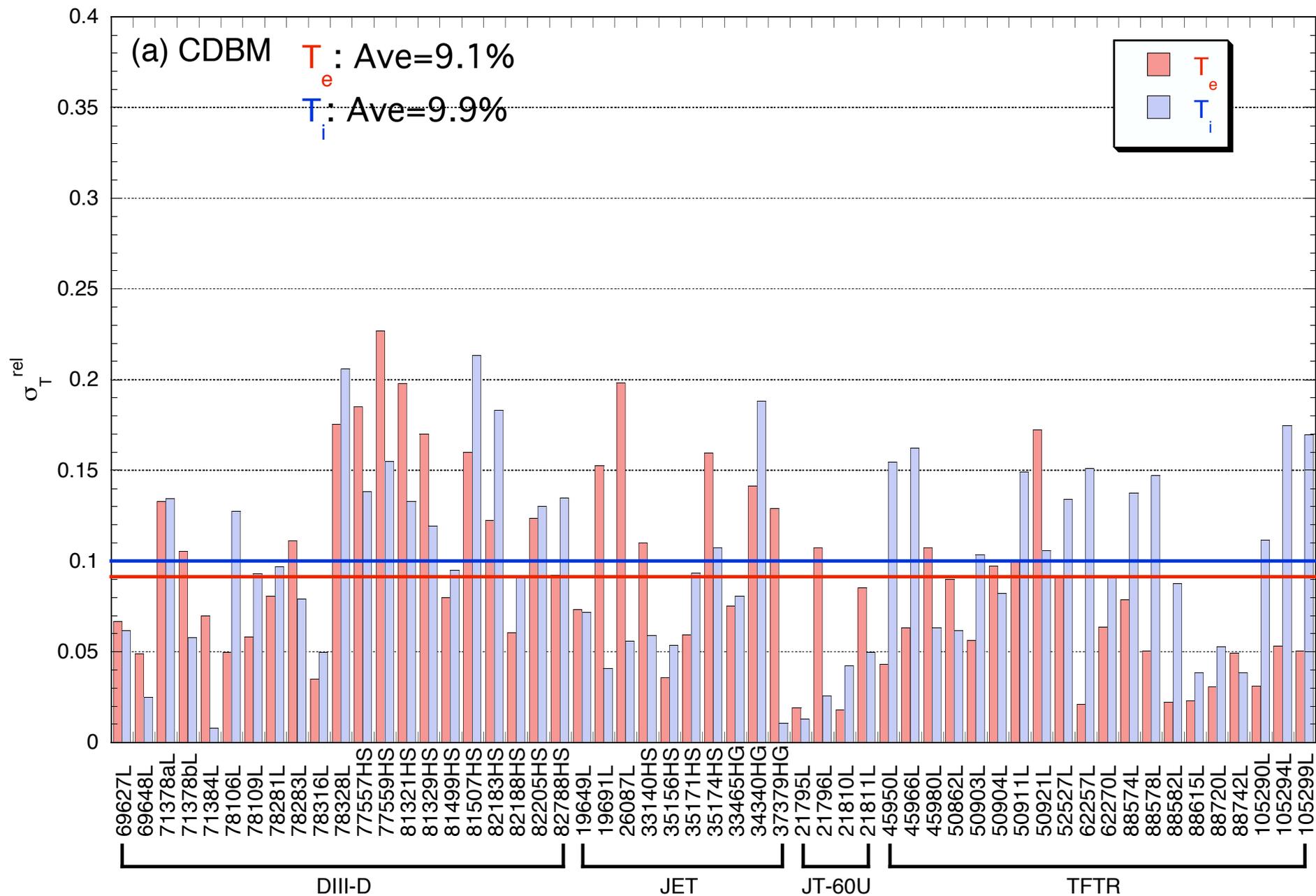
- **TASK/EQ** : トカマク平衡
 - 自由境界 : プラズマ立ち上げのシミュレーション
 - 有限要素法 : 精度向上
- **TASK/TR** : 流体型輸送シミュレーション
 - 周辺輸送障壁モデルの導入 , 中性粒子ビーム加熱
- **TASK/TX** : 流体型輸送シミュレーション
 - プラズマ回転 , 径方向電界 , 粒子輸送
- **TASK/WM/WR/DP/FP** : 波動シミュレーション (加熱 , 電流駆動 , 固有モード)
 - 積分形誘電率テンソルの導入 : 有限ラーモア半径効果
 - ジャイロ運動論誘電率テンソルの一般化
 - フォッカープランク解析の複数粒子種化 , 並列化
- **統合コード**
 - コードインターフェースの標準化
 - コードの Fortran95 化

The Way of Simulation

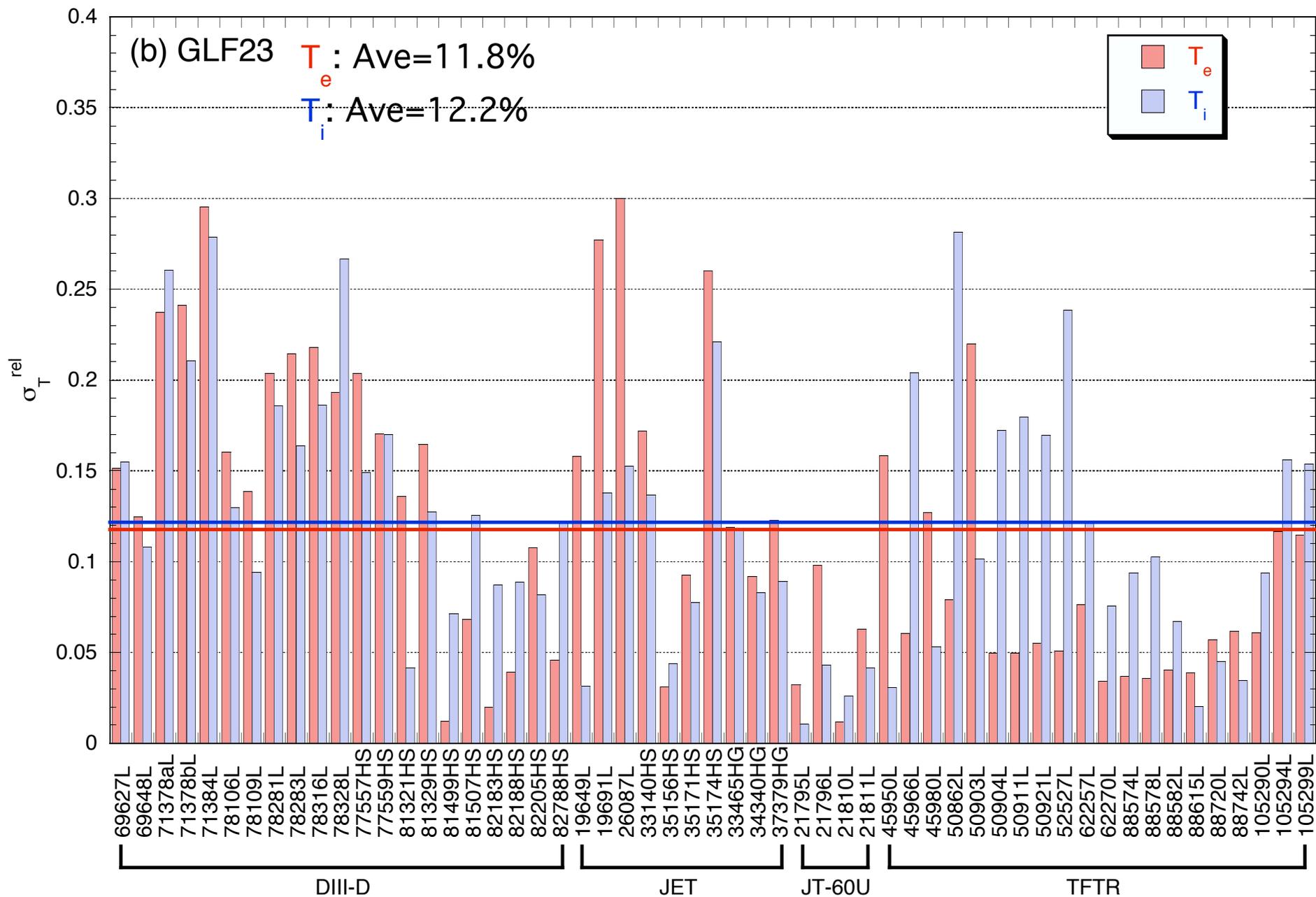
- **Neoclassical Transport Models: NCLASS⁶**
- **Turbulent Transport Models: CDBM, GLF23 v1.61 (retuned)⁶, Weiland**
 - CDBM: No $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ shearing (ω_{E1}) and magnetic curvature (κ_*) effects
 - GLF23: Using toroidal rotation velocity (V_{tor}) from exp. data
 - Weiland: Assuming $k_{\theta}\rho_s = 0.316$
- **Solve thermal transport equations**
 - **Fixed density profiles**
 - Taken from experimental analysis data in **ITPA profile database**
 - 1D: $R, a, I_p, B_t, \kappa, \phi_a$
 - 2D: $T_{e,i}, n_{e,\text{bulk,imp}}, Z_{\text{eff}}, j, Q_{\text{heating}}, S_{\text{NB,wall}}, V_{\text{rot}}, \text{Metrics}$
 - $T_{e,i}$ data used only for initial profiles and boundary conditions
 - q data used only if j is not available.
 - **Boundary conditions** enforced at $\rho \leq 0.9$
 - **Particle flux calculated from $S_{\text{NB,wall}}$ in thermal equations**
 - Diagonal turbulent transport coefficient set to zero if negative

⁶By courtesy of NTCC site (<http://w3.pppl.gov/ntcc/>)

Relative RMS Error for Temperature Profiles (CDBM)



Relative RMS Error for Temperature Profiles (GLF23)



Integrated Analysis of AE in ITER Plasma

- **Combined Analysis**

- **Equilibrium**: TASK/EQ

- **Transport**: TASK/TR

- Turbulent transport model: CDBM

- Neoclassical transport model: NCLASS (**Houlberg**)

- Heating and current profile: given profile

- **Full wave analysis**: TASK/WM

- **Stability analysis**

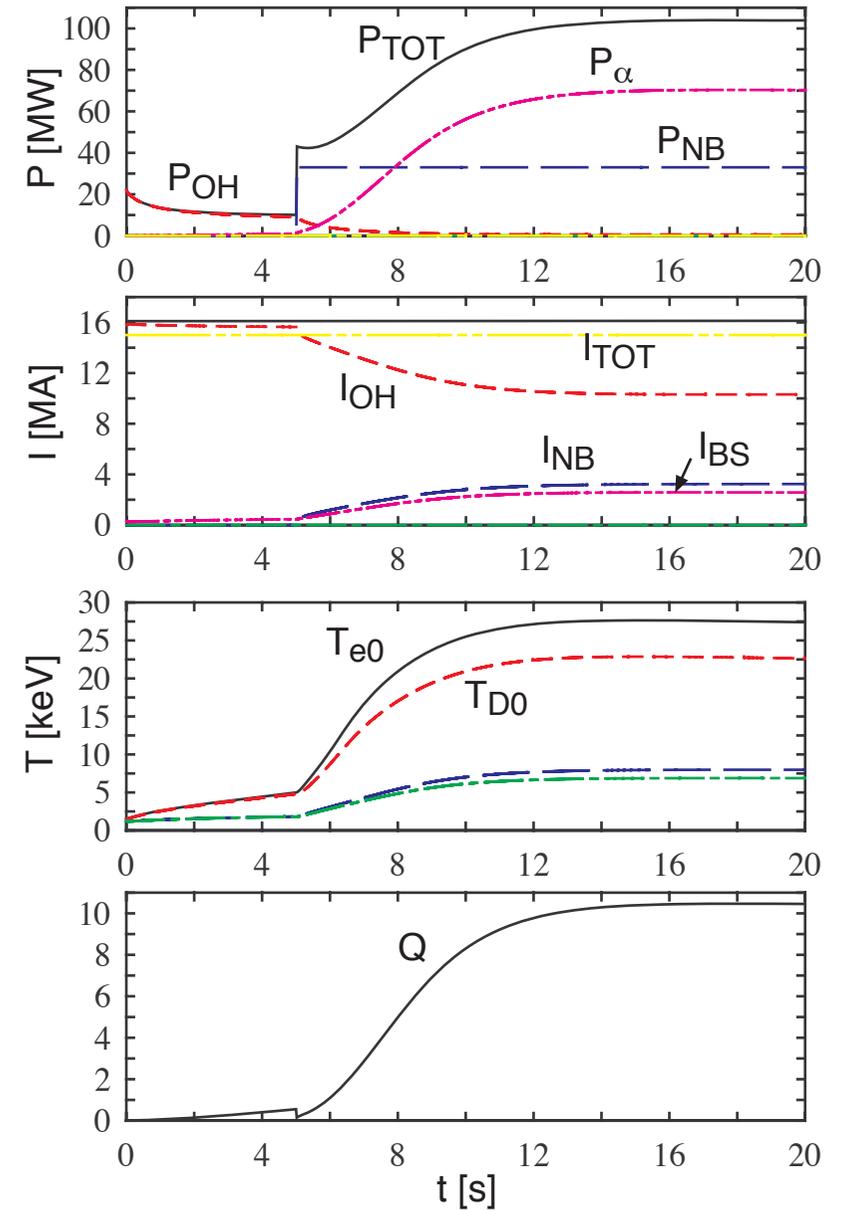
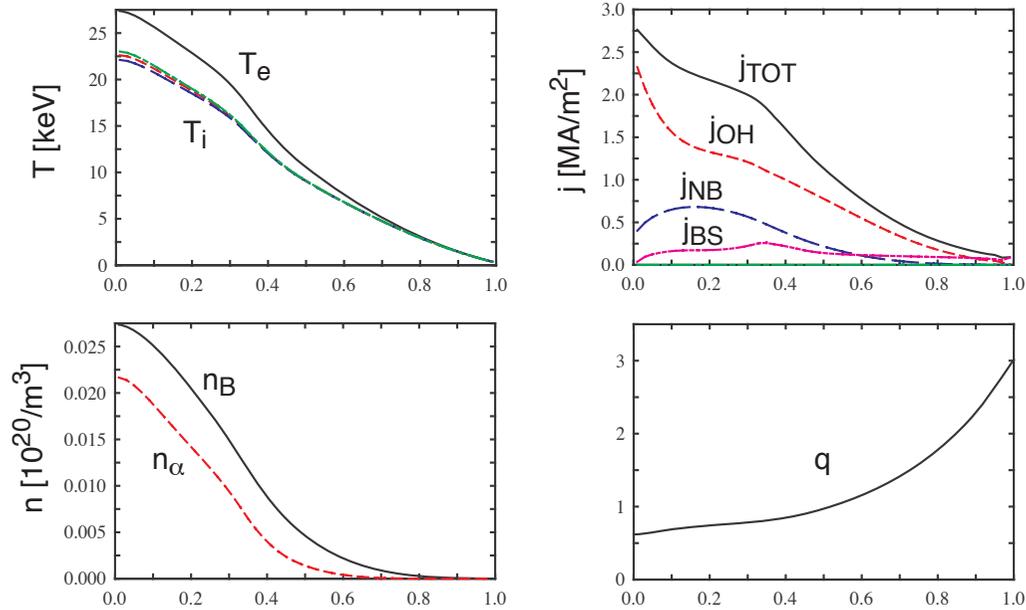
- Standard H-mode operation: $I_p = 15$ MA, $Q \sim 10$

- Hybrid operation: $I_p = 12$ MA, flat q profile above 1

- Steady-state operation: $I_p = 9$ MA, reversed shear

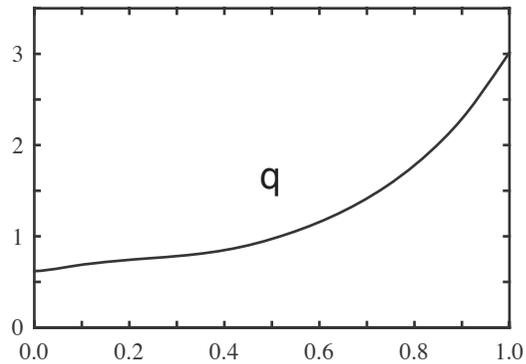
Standard H-mode Operation

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

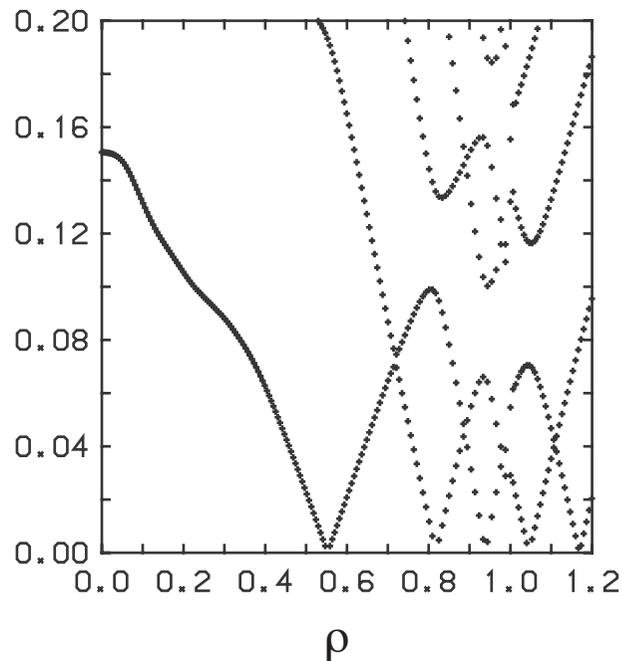


AE in Standard H-mode Operation

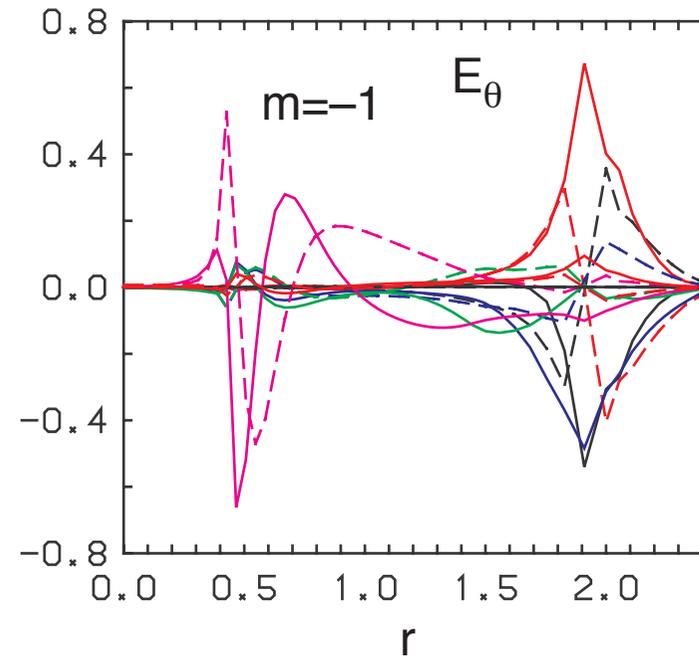
q profile



Alfvén Continuum



Mode structure ($n = 1$)



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

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

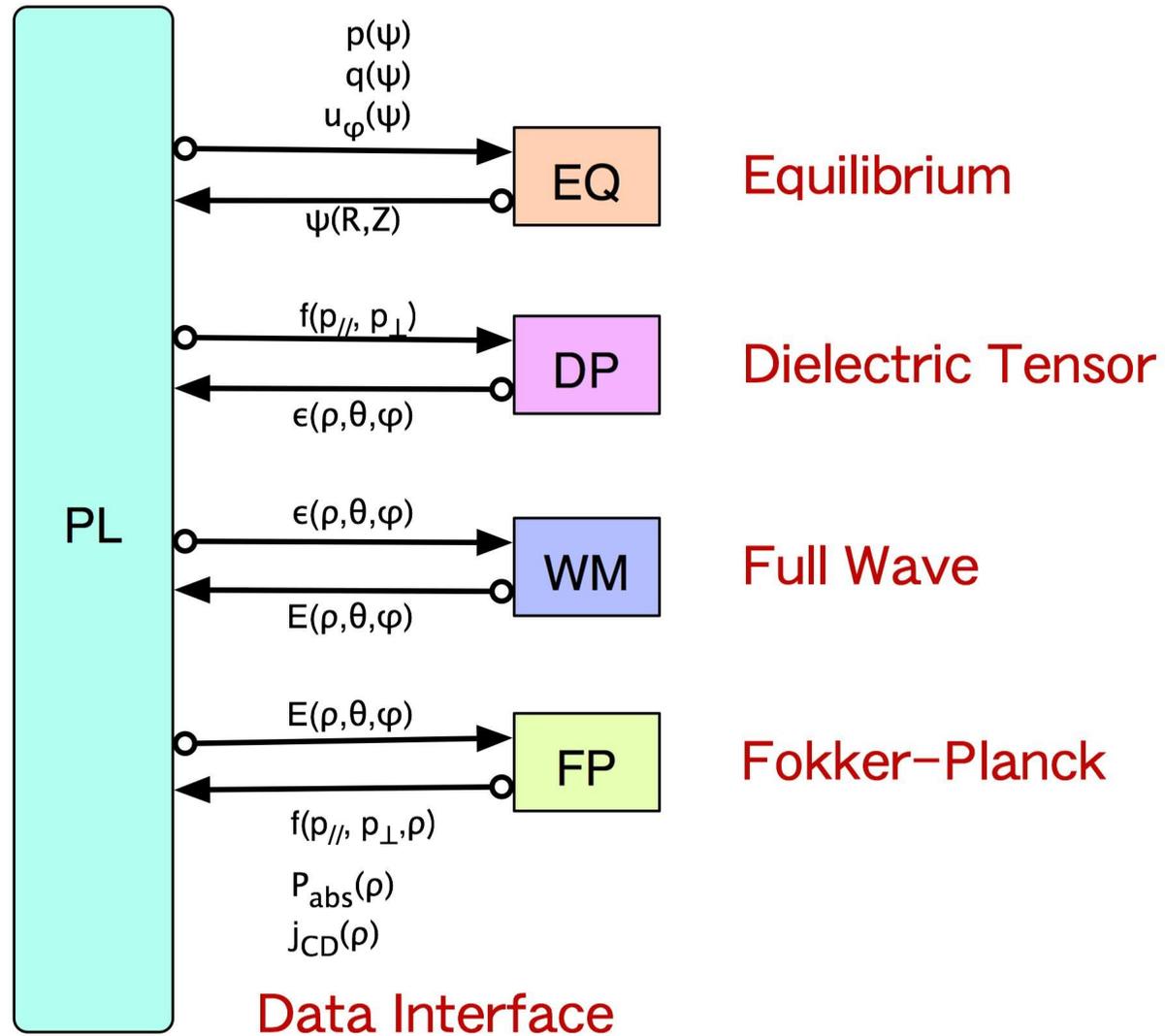
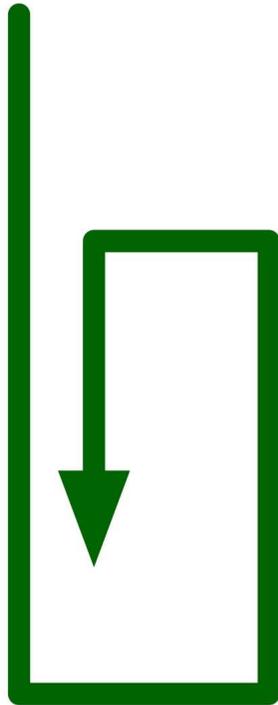
Stabilization due to $q = 1$

Self-Consistent Full Wave Analysis

- **Deviation of velocity distribution from Maxwellian affects**
 - Power absorption of ICRF waves in the presence of energetic ions
 - Stability of modes driven by velocity anisotropy
 - Growth rate of Alfvén eigenmode
- **Systematic analyses including the modification of velocity distribution by TASK code is under way.**
 - **Full wave analysis with arbitrary velocity distribution**
 - **Bounce averaged Fokker-Planck analysis**
- **Upgrade of Fokker-Planck module is not completed yet.**

Procedure of Self-consistent Full Wave Analysis

Time Evolution



まとめ

- 核燃焼プラズマの時間発展を解析する統合シミュレーションのコアコードとして、また共通データインターフェースの参考実装として、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・安定性解析を含めた時間発展解析が可能になりつつある。
- ヘリカル系の波動伝播解析や線形安定性解析は大規模になるので、LHD 数値解析システムを利用する必要度が高い。また、TASK コード利用者のサポートにも、LHD 数値解析システムの利用が必要。
- 今後の課題
 - **コードの整備**：共通インターフェース完全実装，新モジュール開発
 - **複合物理現象の解明**：モジュール連携シミュレーションによる解析
 - **利用者の拡大**：マニュアル作成，利用説明 web
 - **対象の拡大**：ITPA, JT-60, LHD, ST, (TRIAM, LATE, Heliotron-J,...)