

核燃焼プラズマ統合コード構想

--- 核融合開発における理論・シミュレーション研究 ---

京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻 福山 淳

内容

理論・シミュレーション・モデリング

核燃焼プラズマ統合コード構想

日本の核融合理論・シミュレーション研究

- **理論**：基礎的普遍的な研究で着実に成果
 - － 非線形波動，磁気座標，径方向電界・・・
 - － 構造形成，分岐現象，状態遷移
- **シミュレーション**：
豊かな計算機資源を利用して成果
 - － 非線形シミュレーション：
 - ・ 安定性，磁気再結合，乱流，・・・
 - － 非線形数値計算：
 - ・ 平衡，波動，粒子軌道，・・・
 - － 非線形物理，自己組織化，複合ダイナミクス

日本の核融合モデリング研究

- モデリング：
 - 実験を定量的に説明するモデルの開発
 - ・ 物理モデルの提案
 - ・ 計算コードの開発
 - ・ 実験との系統的な比較
 - 例：輸送解析，MHD 安定性解析，波動解析
 - 日本では活動やや低調：
 - ・ 解析で裏付けられた実験が比較的少ない
 - ITPA 活動への寄与が必要
 - ・ モデルの妥当性検証，実験解析
 - ・ ITER 運転シナリオ

輸送モデリングの例

- GLF23 輸送モデル：GA グループ (Waltz, Kinsey) 開発

- 20 モードのジャイロ流体的線形安定性解析
- 線形成長率から拡散係数評価 (準線形 Mixing Length Rule)

$$\chi \propto \frac{\gamma - \gamma_E}{k^2} \frac{\gamma_d \gamma}{\omega^2 + \gamma^2}, \quad \gamma_E : E \times B \text{ shear rate}, \quad \gamma_d : n = 0 \text{ damping rate}$$

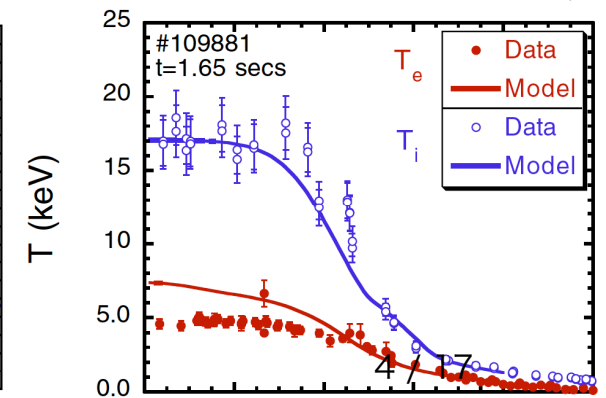
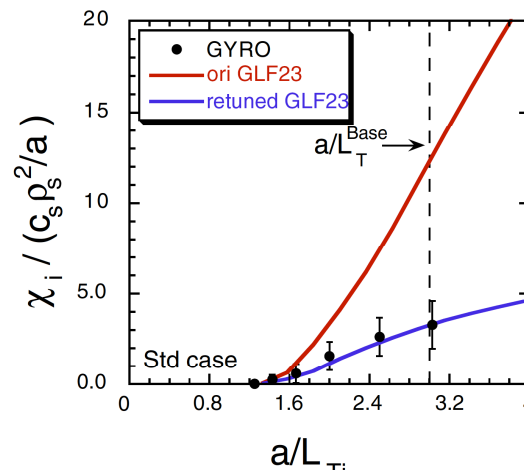
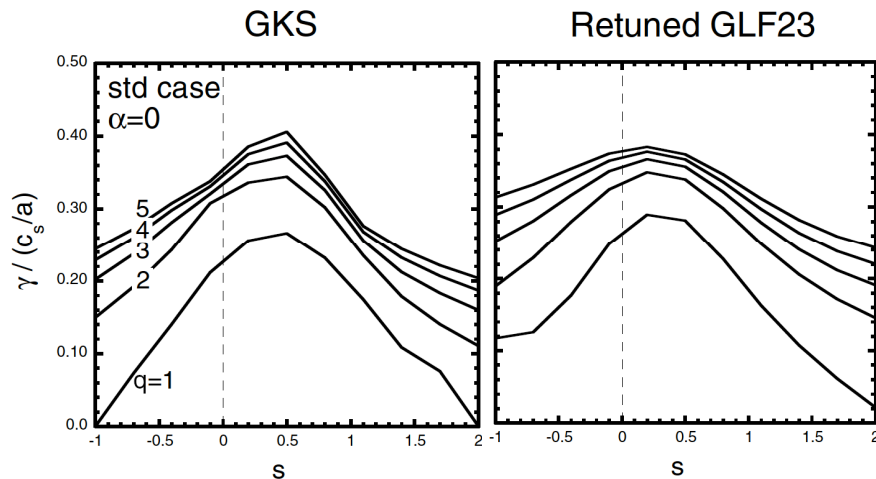
- 理論：ジャイロ運動論的線形安定性解析：GKS

- いろいろな配位のプラズマに対して線形安定性を比較し，係数を較正

- シミュレーション：ジャイロ運動論的非線形：GYRO

- 線形成長率と拡散係数との関係を較正

・ 実験 (DIII-D) を
かなりよく再現



核燃焼プラズマの定量的解析に向けて

- ITER に向けて、自律性の高い核燃焼プラズマの振る舞いを定量的に予測することが必要
 - － プラズマ加熱の大部分が
 - α 粒子加熱：密度と温度に依存
 - － プラズマ電流の多くが
 - 自発電流：圧力勾配とポロイダル磁界に依存
 - － プラズマ中心部で
 - α 粒子生成：燃料イオン密度と温度に依存

核燃焼プラズマのシミュレーション

従来の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

核融合実験炉の実現に向けて
炉心プラズマの予測
制御手法の開発

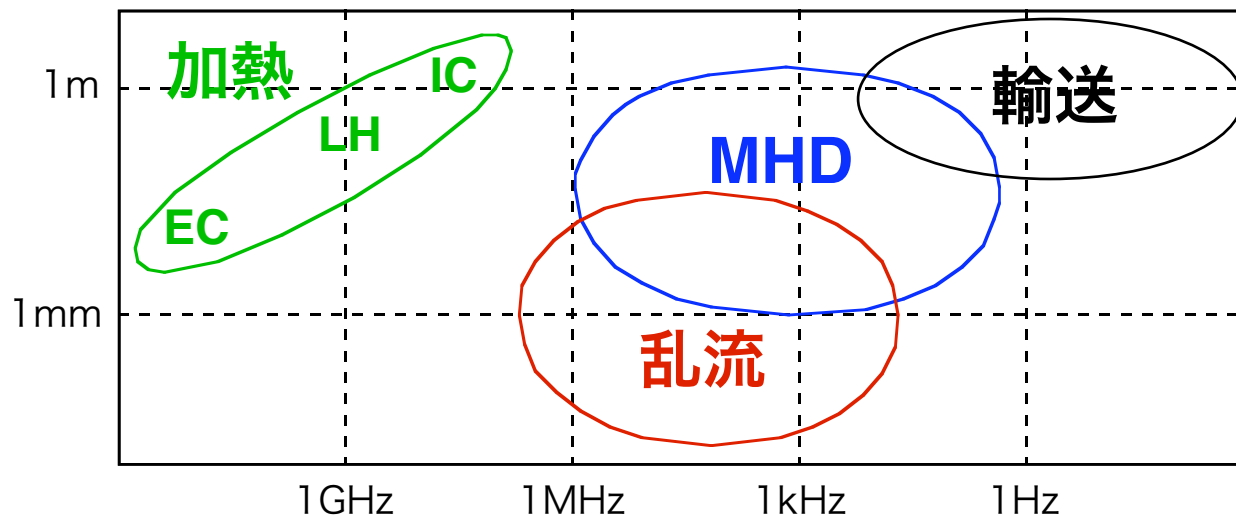
炉心プラズマ全体の
放電時間全体にわたる
自己完結的な時間発展シミュレーション

核燃焼プラズマ統合シミュレーションコードが必要 6 / 17

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 μ m から10m



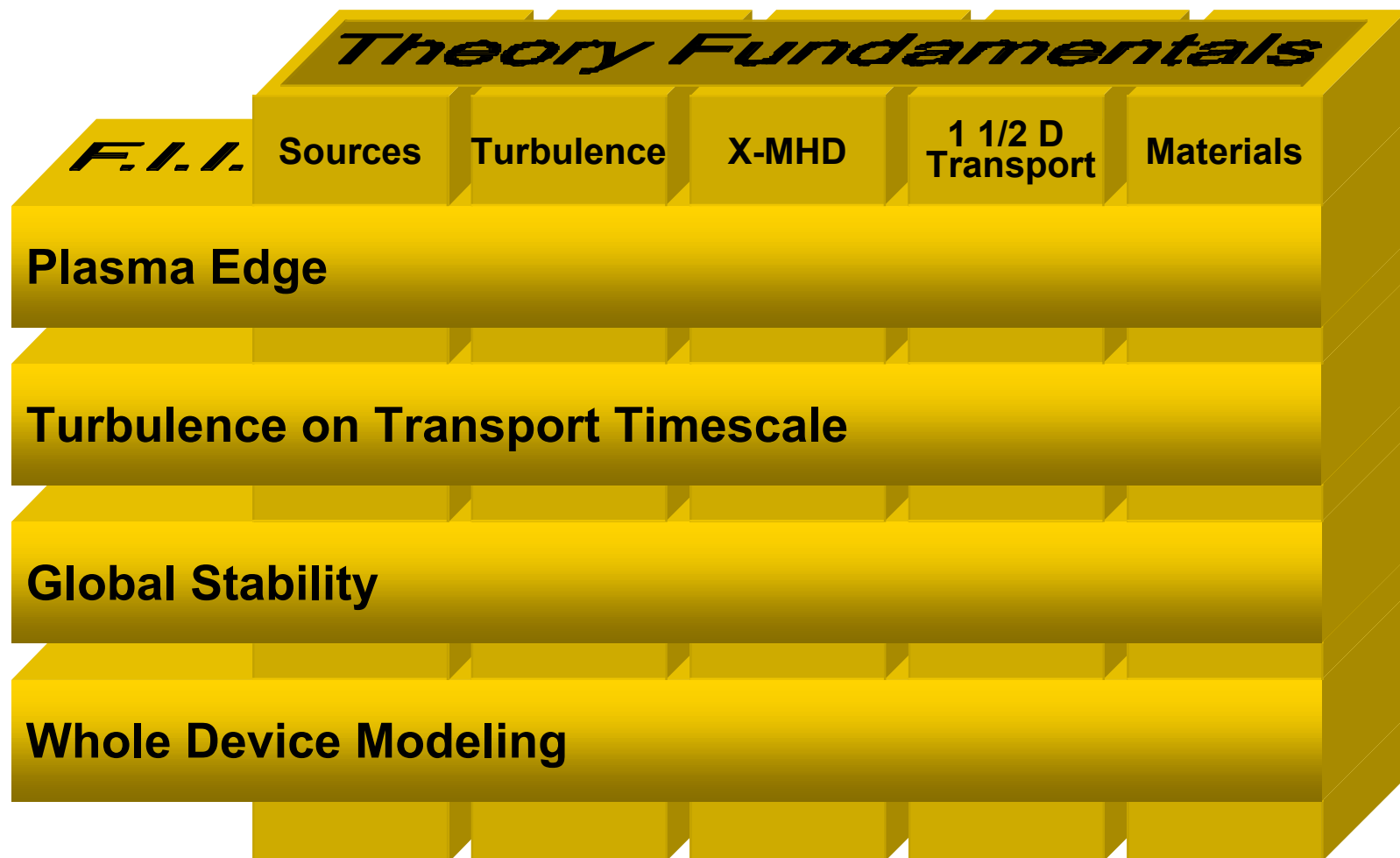
単一のシミュレーションコードでの解析は不可能
複数のコードを統合したシミュレーションが必要

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：
 - 統合コードに向けて理論・シミュレーションの再編成

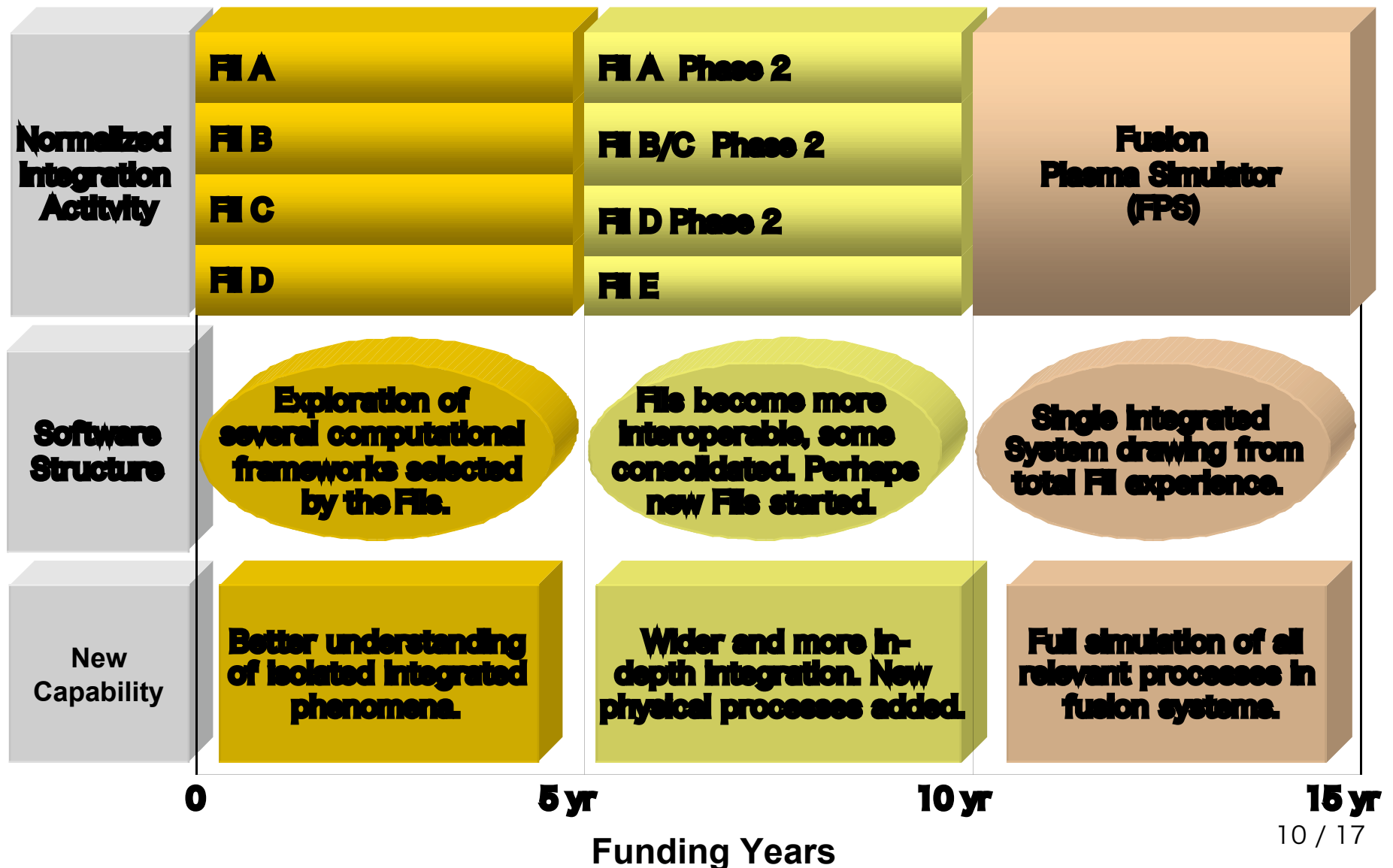
米国 FSP の主要課題

Focused Integration Initiatives are built from Fundamentals of varying complexity with selected algorithms using interoperable software



米国 FSP のロードマップ

We expect a 15 year timeline is required to produce the FPS



統合コード

- トーラスプラズマ中のさまざまな現象を記述し、現在の装置における実験で検証された解析コードを組み合わせて、核燃焼プラズマ全体の時間発展を解析する統合コードの開発
- 理論研究：
 - － 質的変化の解析
 - － 定量的なモデル化：スケーリング
- シミュレーション研究：
 - － パラメータサーベイ，実験との比較
 - － 非線形機構の解明：法則化

核燃焼プラズマ統合コード構想の目的

- なるべく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
 - 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 \leftrightarrow 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

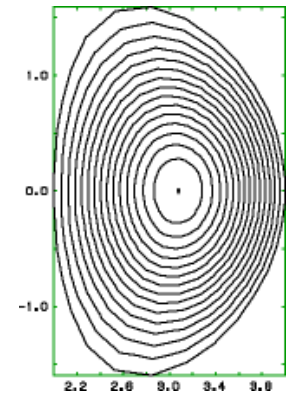
図形表示の高度化

コアコード: TASK

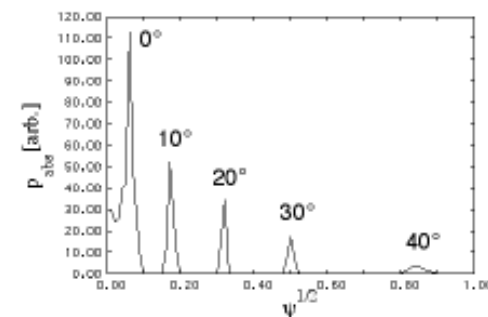
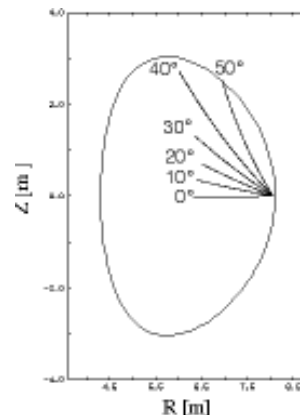
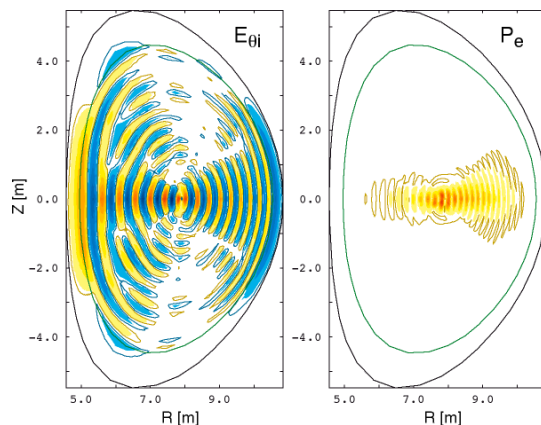
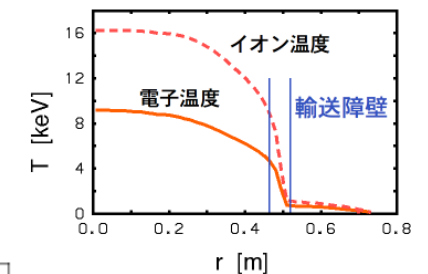
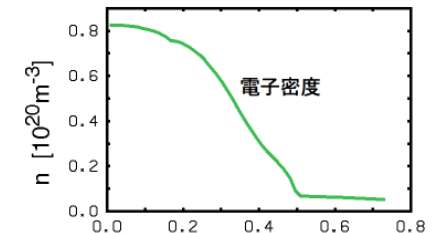
機能毎のモジュール構造

	解析	機能
EQ	2次元MHD平衡	プラズマ形状
TR	1次元径方向輸送	密度・温度・電流分布
WR	光線追跡法	波動伝播（短波長）
WM	波動方程式	波動伝播（長波長）
FP	3次元FP方程式	粒子速度分布関数
DP	波動分散関係	波動伝播特性
PL	データインターフェース	座標変換, 実験データ

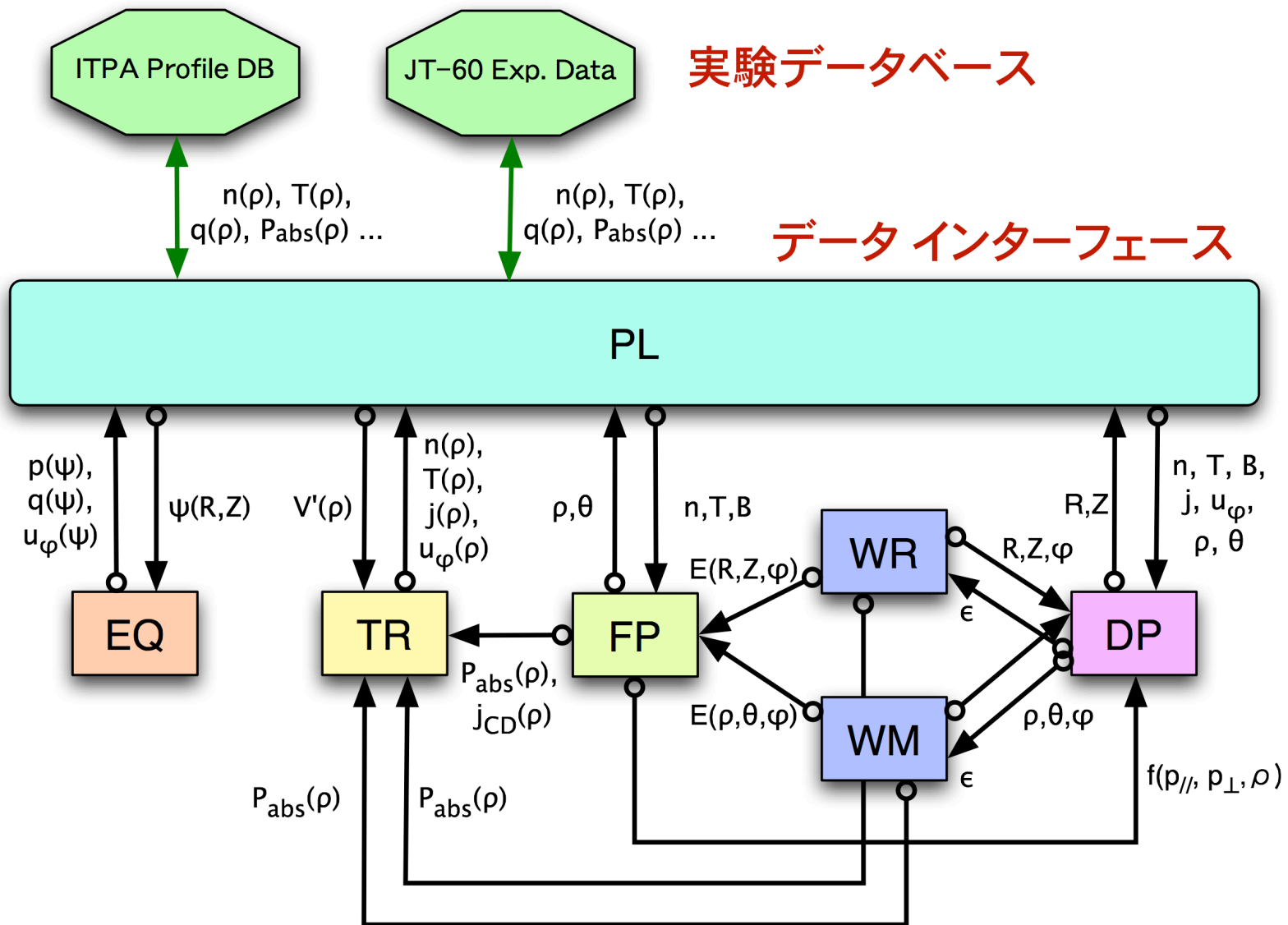
FP方程式: フォッカープランク方程式



輸送シミュレーション結果



コアコード TASK の構造



平衡

輸送

速度分布

波動伝播

波動分散

統合コード活動

- 活動環境

- － 大学，核融合研，原研等の連携

(京大，九大，山口大，東大，慶応大，筑波大，核融合研，原研，電中研等)

- さまざまな形で活動

- － 科研費特定領域研究申請

核燃焼プラズマにおける構造形成と複合ダイナミクス

- － 日米ワークショップ

Theory-Based Modeling and Integrated Simulation of Burning Plasmas (2003/12/15-17, Kyoto): US 8名, EU 3名, 日本 24名

- － 核融合研共同研究，九大応力研共同研究

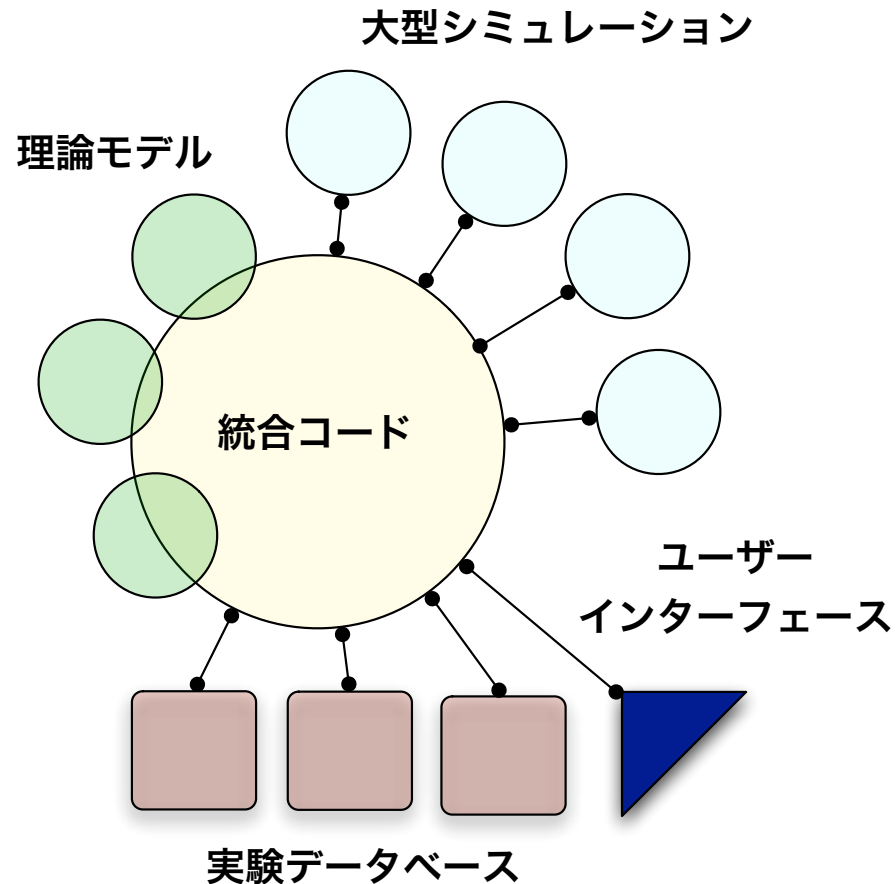
- － 原研協同研究

- 中期的サポートが必要

- － 理論・データ解析・コード開発：若手研究者

まとめ

- 核燃焼プラズマ統合コード



- 長期的人材育成

- 大学における教育研究ポストの確保