

2006/01/20

核融合科学研究所
一般共同研究成果報告会

理論共同研究 B

核燃焼プラズマ統合コードに関する研究

福山 淳

所内世話人：中島徳嘉

研究協力者

矢木雅敏，内藤裕志，中村祐司，花谷 清，
村上定義，岸本泰明，小関隆久，滝塚知典，
濱松清隆，清水勝宏，林 伸彦，
藤堂 泰，横山雅之，登田慎一郎

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 α 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 α 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

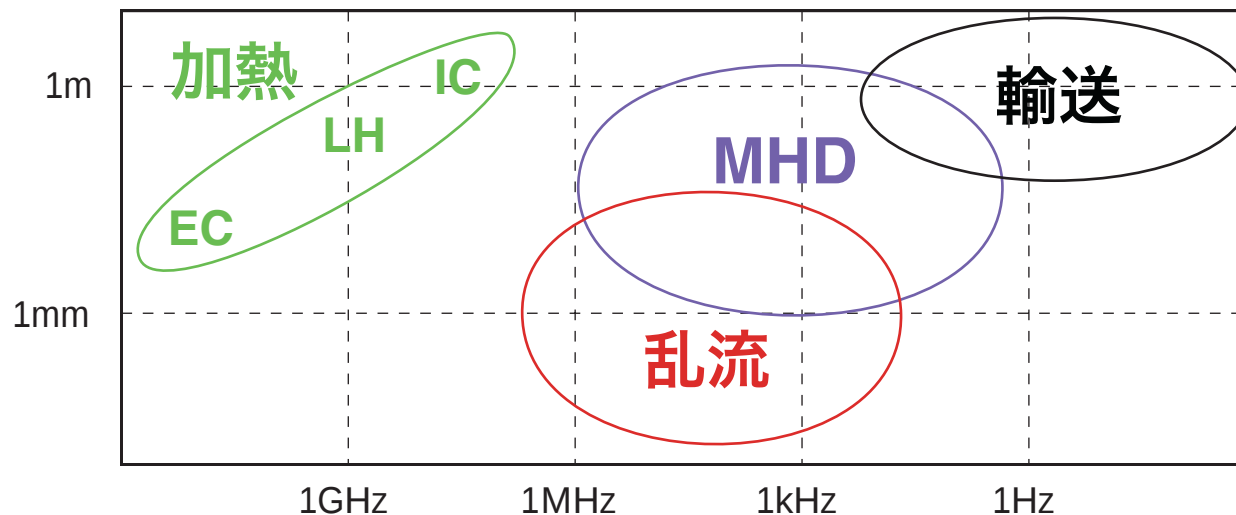
MHD 不安定性，乱流輸送現象，波-プラズマ相互作用等

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 μ 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

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 (GLF23, NCLASS, ...)

- **SciDAC** (Scientific Discovery through Advanced Computing)

- 大規模シミュレーション , 研究連携 (National Fusion Collaboration)

- **2005**: New project: **Fusion Simulation Project**

- ・ Center for Plasma Edge Simulation (CPES)

- ・ Simulation of Wave Interactions with MHD (SWIM)

- **2006**: Request for new proposal:

- ・ International Fusion Collaboration,

- ・ Integrated software environment for fusion simulation

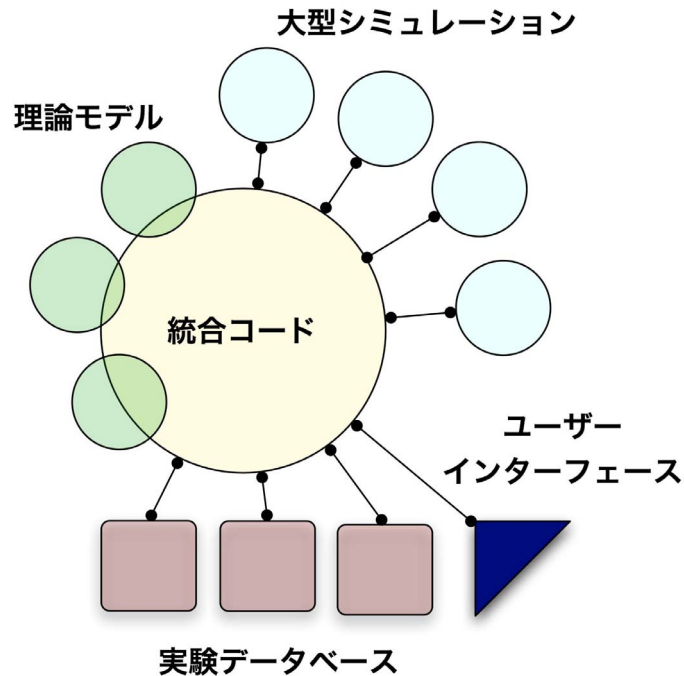
- 欧州 :

- **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

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

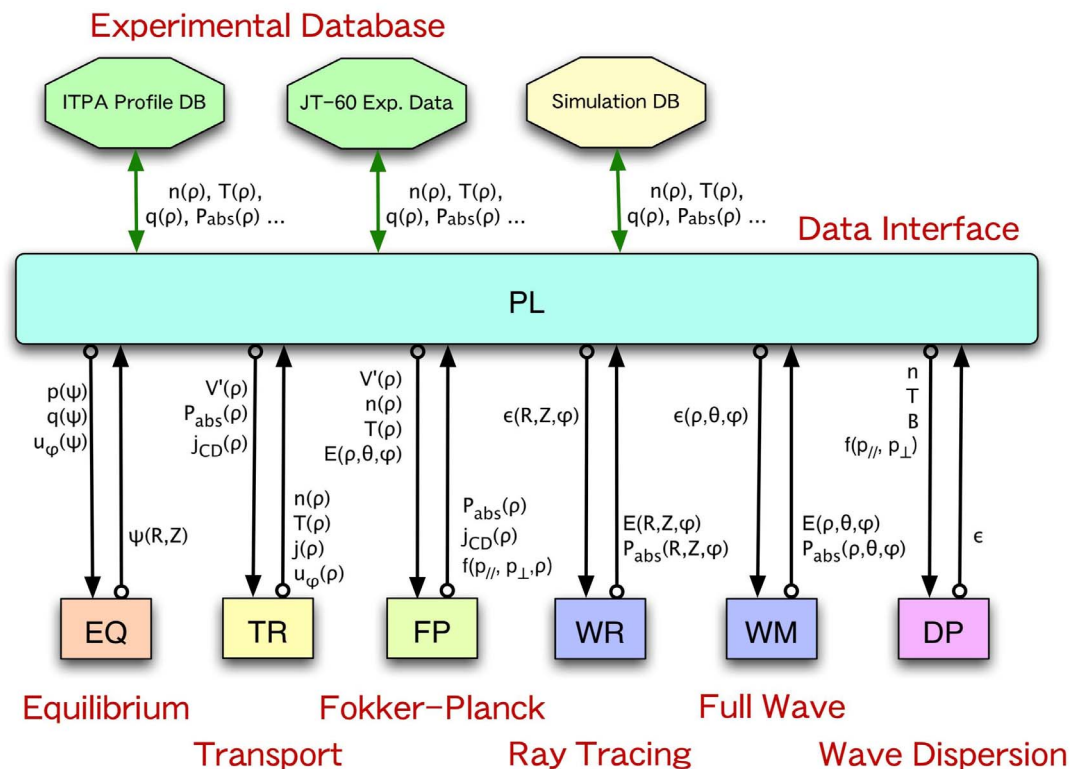
主な成果

- 統合コードに向けた共通インターフェースの開発（福山）
- 3次元トーラス磁場配位における電磁場発展方程式の定式化（中島）
- 輸送現象を取り入れたMHD不安定性の解析（矢木）
- 波動加熱による高速粒子の生成と閉じ込め（村上）
- 周辺プラズマの統合シミュレーション（清水，滝塚）

成果：共通インターフェースの開発

- 共通インターフェース

- データ交換用標準プラズマデータセット
- データ交換用プログラムインターフェース
- 実行制御用プログラムインターフェース



データ交換用標準プラズマデータセット

- 識別データ : Machine ID, Shot ID, Model ID
- 装置データ : $eR, a, b, B, \kappa, \delta, I_p$
- 平衡データ : e.g. EFIT
- プラズマ状態データ
 - 流体的プラズマデータ : $A_s, Z_s, n_s(\rho), T_s(\rho), u_{\phi s}, j_{\text{tot}}(\rho)$
 - 運動論的プラズマデータ : $f(p, \theta_p, \rho)$
 - 準静的電磁場データ : B, j, E
- 波動データ
 - 波動特性 : f, k, Power
 - 電磁場 : $E, B, \text{Ray characteristics}$
- 輸送データ
 - 粒子源 : S , 運動量源 : j_{CD}, M_ϕ , エネルギー源 : $P_{\text{OH}}, P_{\text{abs}}, P_{\text{rad}}$
 - 輸送係数 : D, μ, χ

電磁場発展方程式の定式化

- 3次元トーラス磁場配位における輸送方程式の一般的な定式化
- 回転変換の時間発展方程式

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \mathbf{t}}{\partial t} \right]_{\rho=const} &= \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right]^{-1} \frac{\partial \mathbf{t}}{\partial \rho} \frac{\partial \Phi_T}{\partial t} \Big]_{\rho=const} \\ &+ \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right]^{-1} \frac{\partial}{\partial \rho} \left\{ \eta_{||} \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right] (S_{21}\mathbf{t} + S_{22})^2 \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\frac{S_{11}\mathbf{t} + S_{12}}{S_{21}\mathbf{t} + S_{22}} \right] \right. \\ &\quad \left. - \eta_{||} \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right]^{-1} \frac{\partial V}{\partial \rho} \langle \vec{J}_s \cdot \vec{B} \rangle \right\} \end{aligned}$$

- 径電場の時間発展方程式

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 \varepsilon_r \langle |\nabla \psi|^2 \rangle \frac{\partial}{\partial \tau_0} \frac{d\Phi_0}{d\psi} &= \sum_{a=e,i} \langle \vec{B}_\times \cdot \nabla \cdot \vec{\Pi}_{a1} \rangle \\ &- \sum_{a=e,i} \langle \vec{B}_\times \cdot \vec{S}_{a1} \rangle + e_f \langle n_{f1} \vec{u}_{f1} \cdot \nabla \psi \rangle \end{aligned}$$

- MHD平衡の変化に敏感でない定式化が必要

まとめ

- 核燃焼プラズマの時間発展を解析するためには、時間・空間スケールの異なる現象を記述する複数の計算コードを組み合わせた統合シミュレーションが必要である。
- その実現に向けて、コード間の結合を容易に実現するための枠組み、尺度の異なる複合現象に現れる新しい物理機構の抽出、計算資源の有効利用を図るための計算技術の高度化に関する研究を進めている。
- 核融合研究所の一般共同研究（理論共同研究）として、研究打合せを進めることができ、共通インターフェースの開発や3次元トーラス配位における輸送方程式の一般的な定式化等を進めることができた。
- 実験との系統的な比較や大規模シミュレーションとの連携等、まだ多くの課題が残されているので、今後も統合シミュレーションの実現に向けた共同研究を続けていく必要がある。