

ITER研究と将来展望

ITER 研究と両輪をなす 理論・シミュレーション研究

福山 淳

京都大学大学院工学研究科

- I. ITER・DEMOに向けたシミュレーション研究
- II. ITER-BA 計算機シミュレーションセンター
- III. 提案：ITER-BA と国内研究体制

ITER建設期の理論シミュレーション研究

原理実証型シミュレーション
単階層大規模シミュレーション

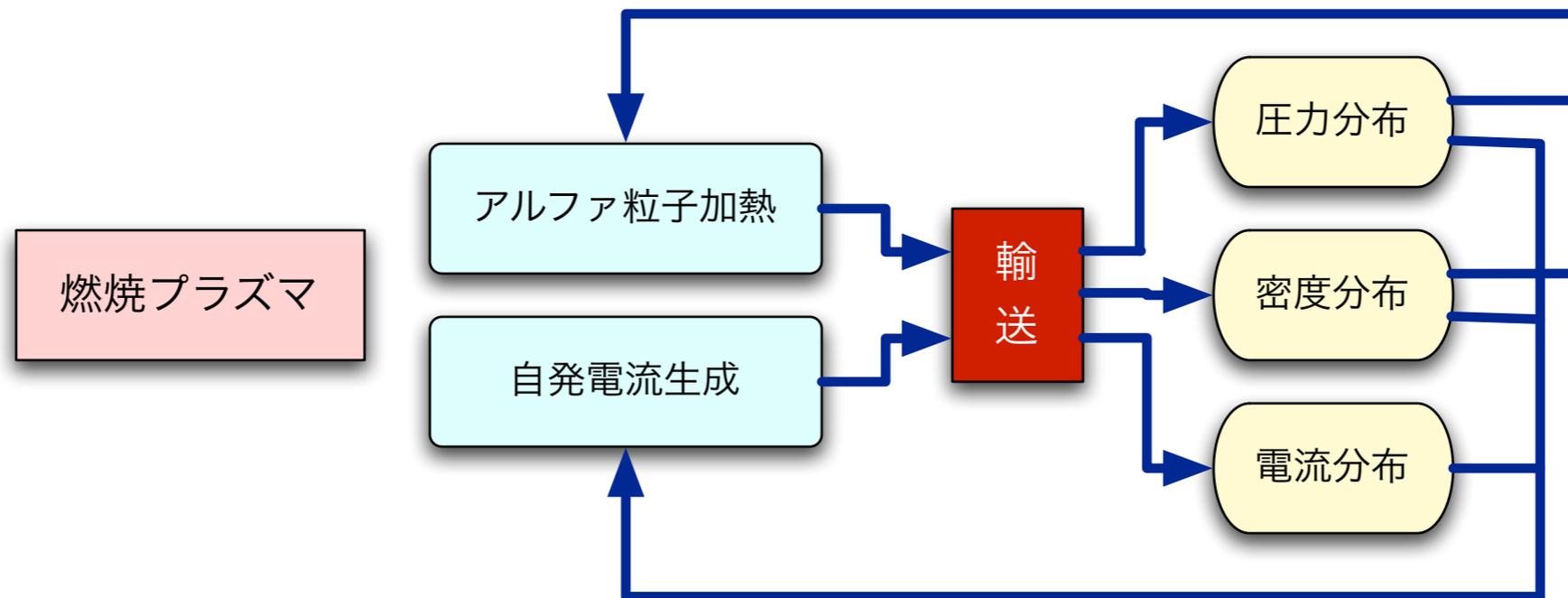
- ▶ 核融合燃焼プラズマの新しい側面
- ▶ ITERの目的達成・性能向上
- ▶ 炉開発に向けたコード戦略
- ▶ 基礎科学としてのチャレンジ

多要素統合シミュレーション
多階層連結シミュレーション

核燃焼プラズマの高自律性

自由度が高く，散逸の弱い高温プラズマ

- 核融合反応 → α 粒子加熱が外からの加熱を上回る
- プラズマ電流 → 自発電流が外から駆動される電流を上回る

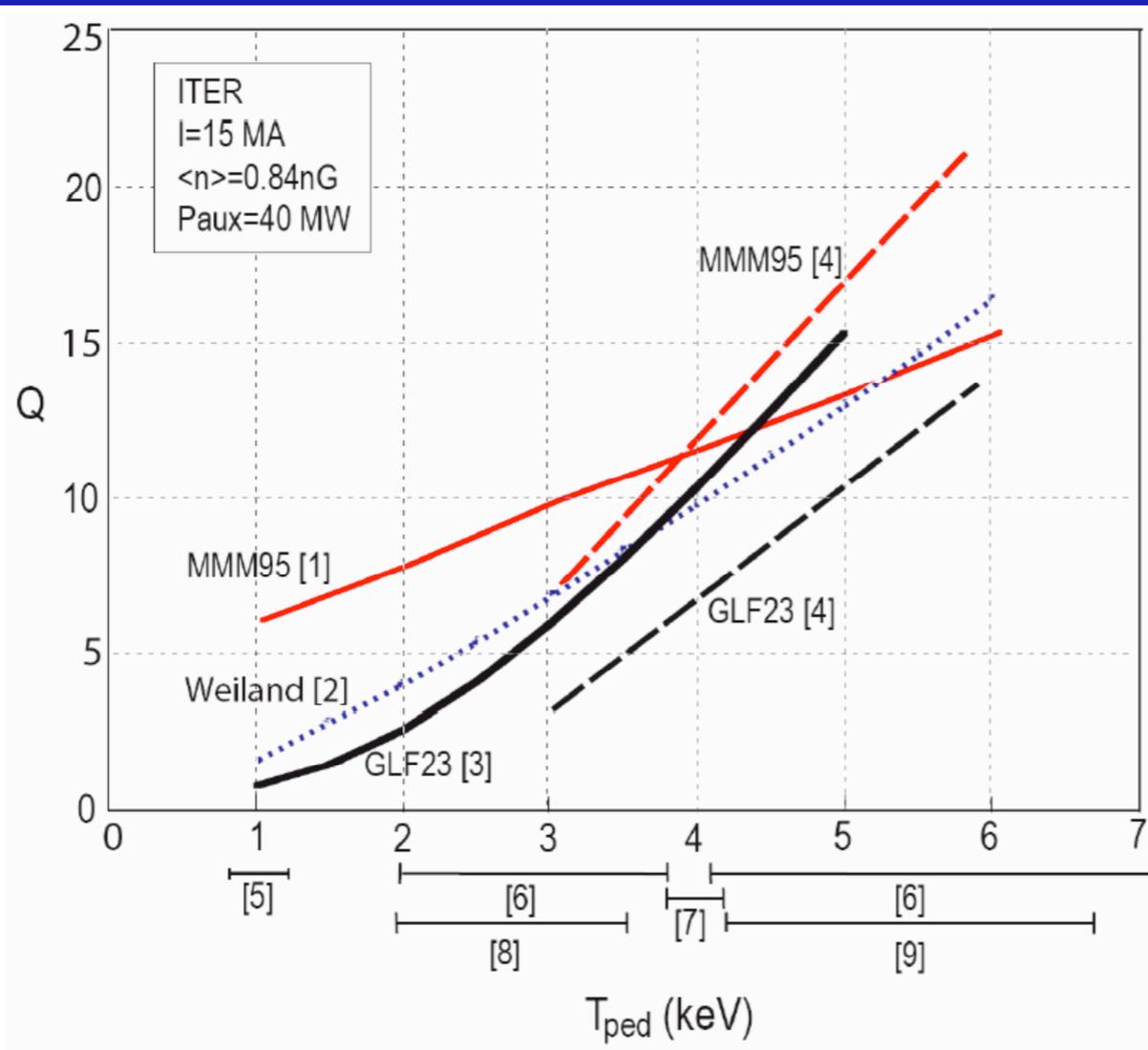


自律性の高い核燃焼プラズマ

- α 粒子加熱や自発電流は，圧力や電流の空間分布に敏感
- 圧力や電流の空間分布は，加熱パワーと駆動電流に依存

T_{ped}の不確かさがQの大きくなばらつき

Q vs T_{ped} in ITER Inductive Regime from MMM, GLF23 and Weiland Models



Exponents in scaling $Q \propto (T_{ped})^\alpha / (P_{aux})^\gamma$

Model	α	γ
MMM95 [1]	0.6	0.5
MMM95 [4]	1.8	-
GLF23 [3]	1.9	0.9
GLF23 [4]	2.2	-
Weiland [2]	1.3	-

GLF23: $P_{fus} \propto (\beta_{ped})^2 B^4 (f_{DT})^2 C_{form}$

$$\propto (T_{ped})^2 I^2 (n_i/n_G)^2 (n_{ped}/n_e)^2$$

$$\propto (T_{ped})^2 I^2$$

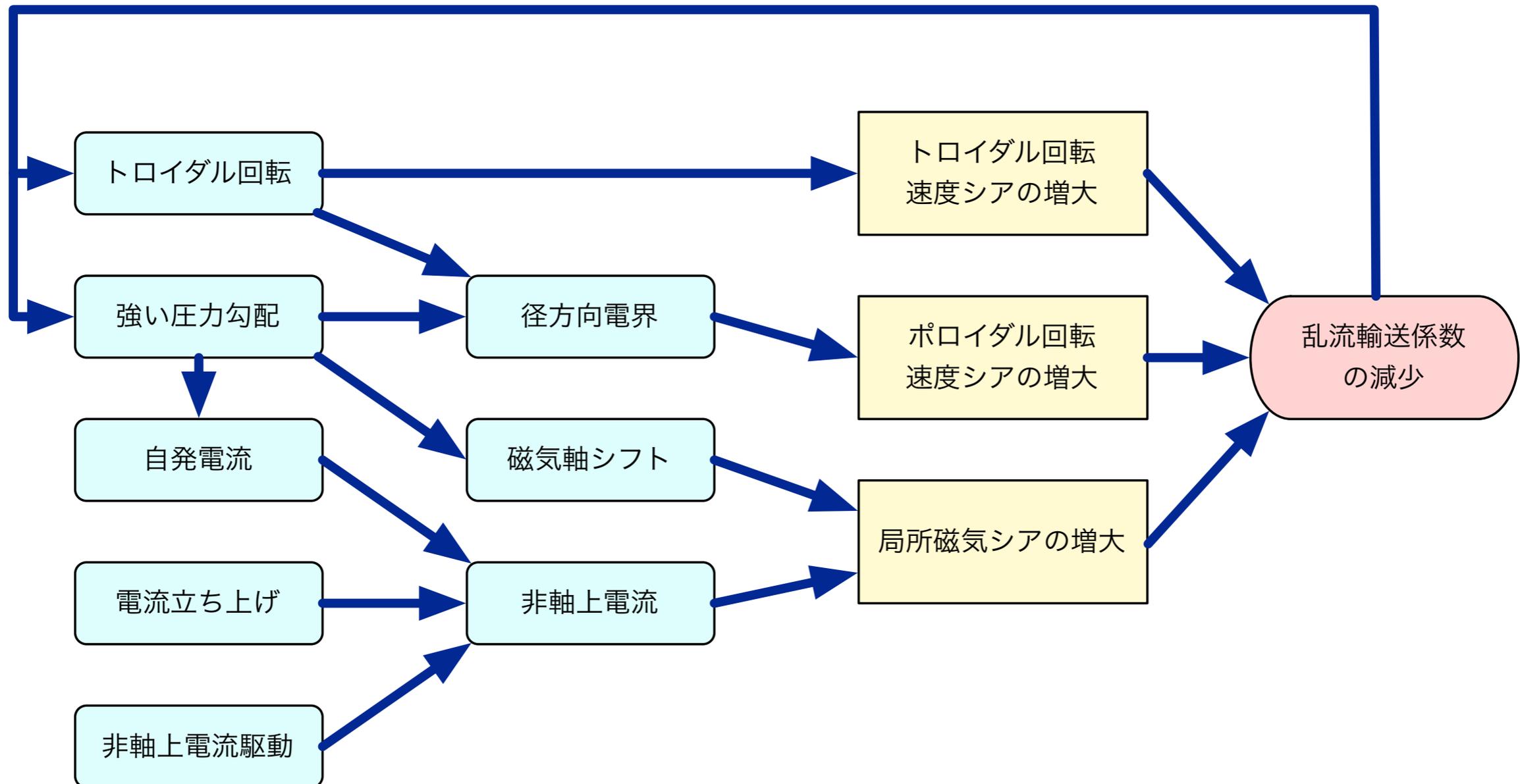
at $(n_i/n_G)=const, (n_{ped}/n_G)=const,$

$$P_{aux} = const \Rightarrow T_{ped} \propto I^{-1}$$

輸送障壁形成の物理機構

乱流輸送が抑制される輸送障壁の形成が、さらに乱流輸送を抑制

さまざまな乱流抑制機構が複雑に関与



多要素統合シミュレーション

従来の大規模シミュレーション

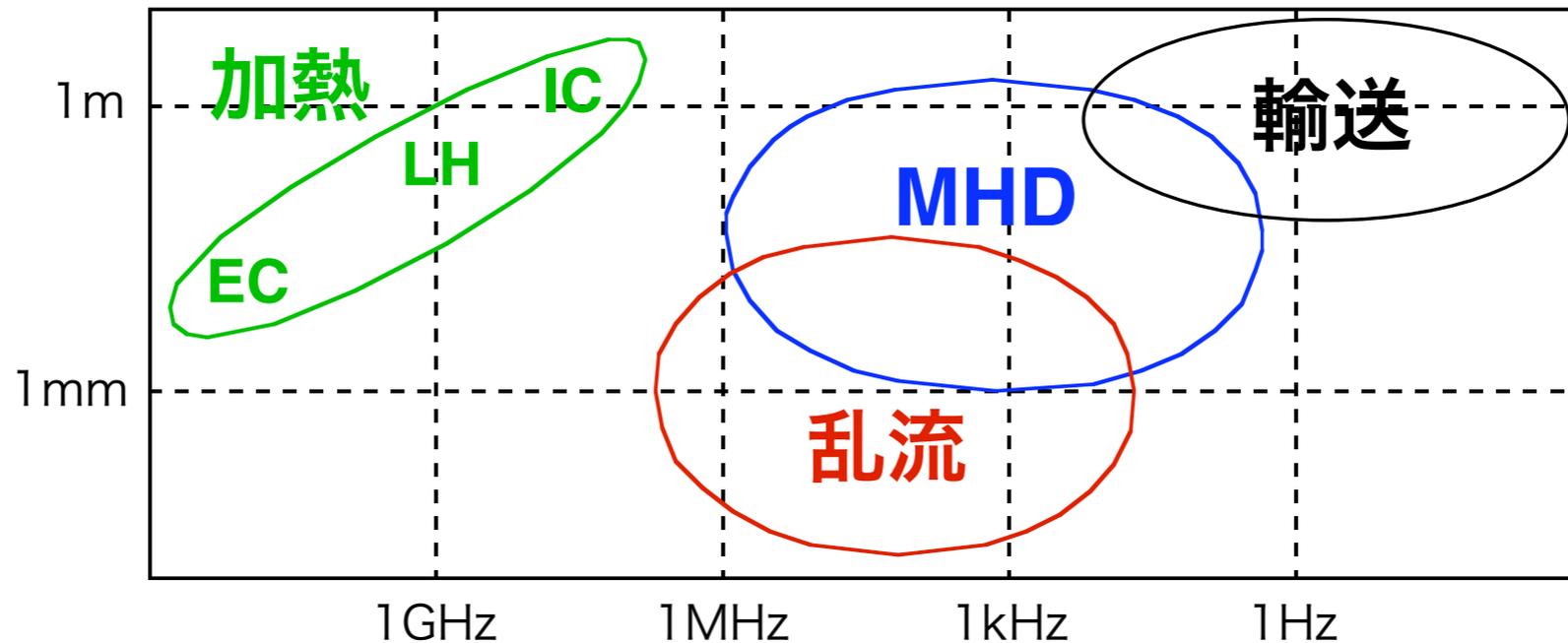
MHD不安定性, 乱流輸送現象, 波-プラズマ相互作用等
個々の現象を詳細に解析

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

**多数の要素モデリングを系統的に統合できる
シミュレーションコードが必要**

多階層連結シミュレーション

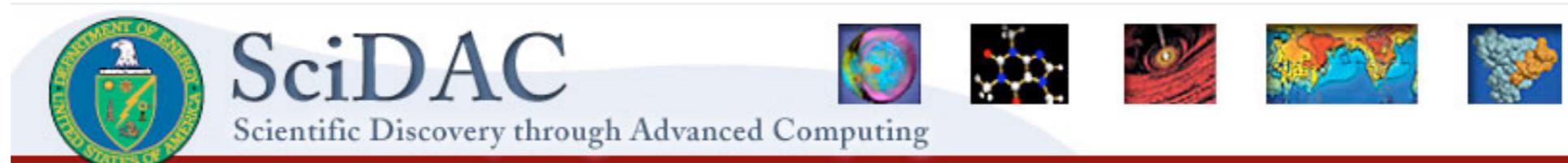


▶ 複数の階層にまたがる大規模シミュレーション

- MHD + 乱流 + 帯状流
- 乱流 + 帯状流 + 輸送
- 波動加熱・電流駆動 + MHD
- 高速粒子 + MHD
- コア + SOL
- + ダイバータ
- ELM + SOL
- + ダイバータ

他極の動向：米国

- ▶ **NTCC** (National Transport Code Collaboration: 1998)
 - 輸送コード, モジュールライブラリの公開
- ▶ **SciDAC** (Scientific Discovery through Adv. Comp.: 2001)



- Extended MHD, Turbulence, Wave-particle, Atomic physics, Magnetic reconnection
- National fusion collaboratory
- **New projects (2005) related to FSP (15 years)**
 - Simulation of wave interactions with MHD
 - Center for plasma edge simulation
- **Collaboration with Computer Science Researchers**

他極の動向：欧州



- ▶ **EFDA Task Force: Integrated Tokamak Modelling**
 - *The aim of the task force is to coordinate the development of a coherent set of validated simulation tools f, with the ultimate aim of providing a comprehensive simulation package for ITER plasmas. (June 2003)*
- ▶ **CPP (Code Platform Project) :**
 - Code platform structure
- ▶ **DCP (Data Coordination Projects) :**
 - Verification and Validation, standard data interface
- ▶ **IMPs (Integrated Modelling Projects) :**
 - Extended linear MHD, Core/Edge MHD, Core/Edge transport, turbulence, H&CD and fast particles

他極の動向：アジア

▶ 中国

- これからコード開発に着手：米国と密接に協力
- Workshop on ITER Simulation, 2006/05/14-19



▶ 韓国

- 2次元トカマク輸送コード (C2D) 等を開発
- 若手が米国で研究. 組織的コード開発はこれから.

▶ インド

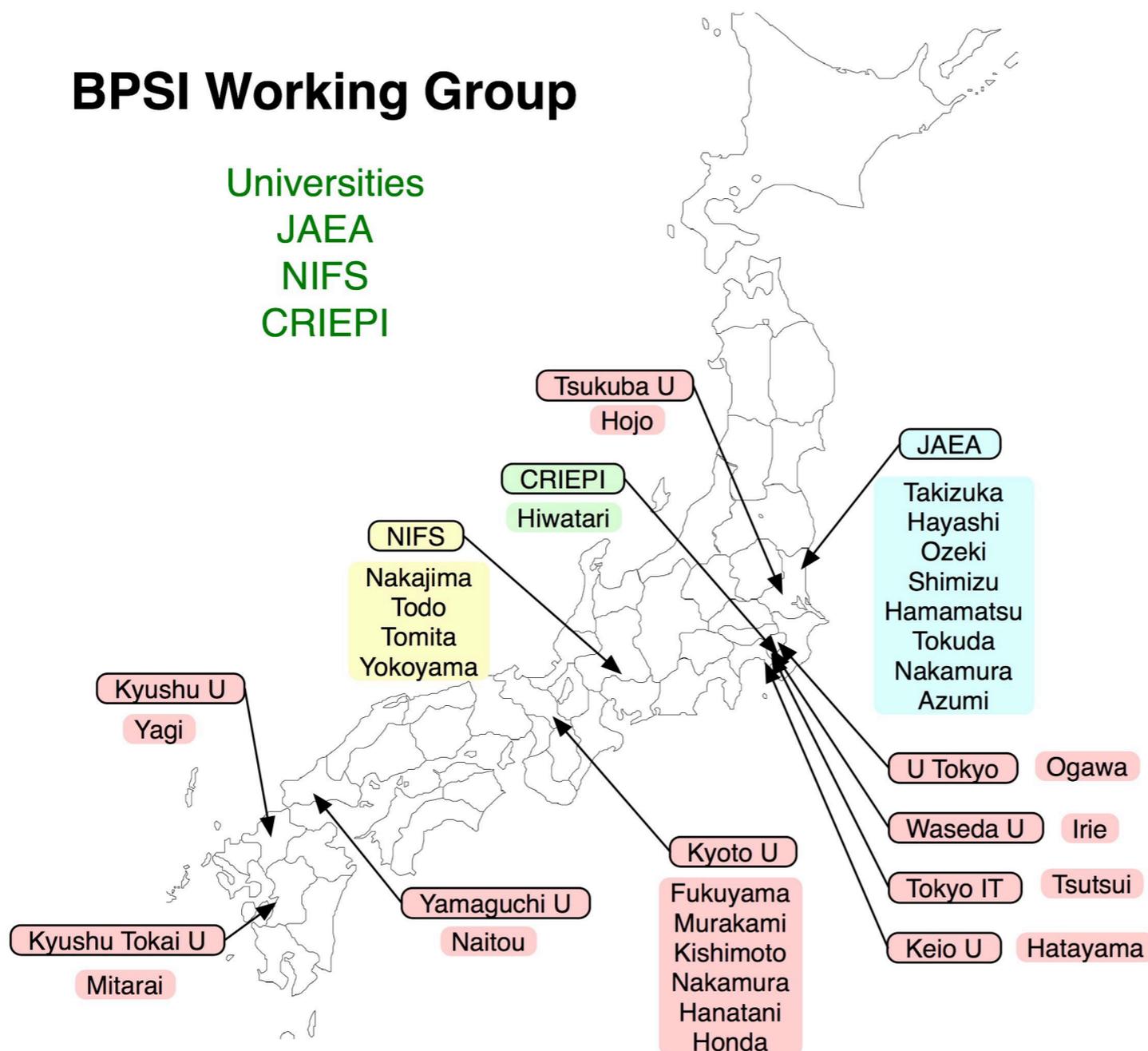
- 理論研究者は多いが, シミュレーションはこれから

核燃焼プラズマシミュレーション構想

BPSI : Burning Plasma Simulation Initiative

大学, 核融合研, 原子力機構等の研究連携

BPSI Working Group



主に会議開催

科研基盤 B

日米協力

九大応力研

共同研究

核融合研

LHD計画共同研究

原研

共同研究

等

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

ヘリカルプラズマへの拡張

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：輸送 \leftrightarrow MHD

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

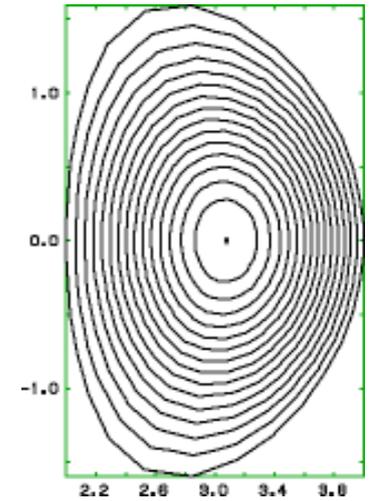
計算機クラスター間の連携：計算資源の有効利用

図形表示の高度化

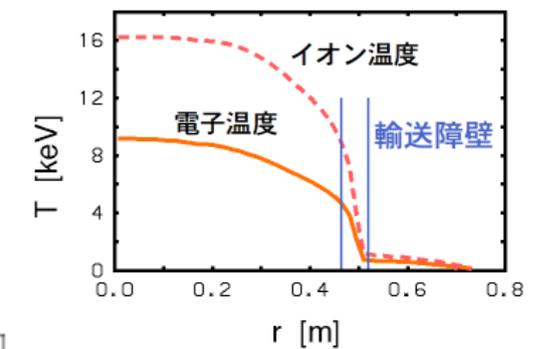
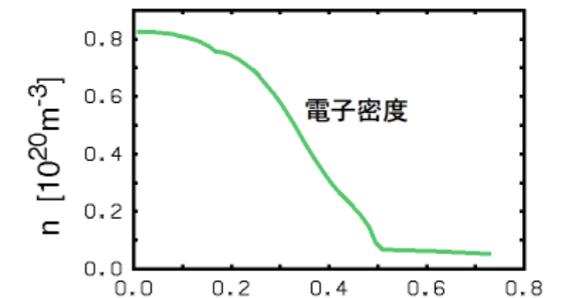
コアコード: TASK

機能毎のモジュール構造

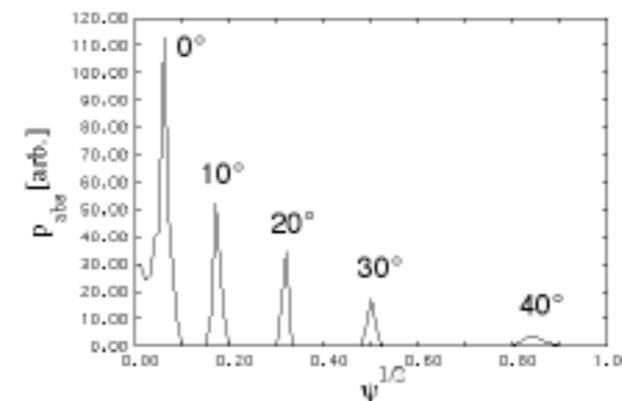
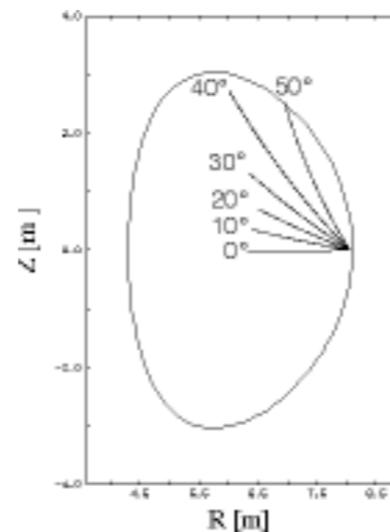
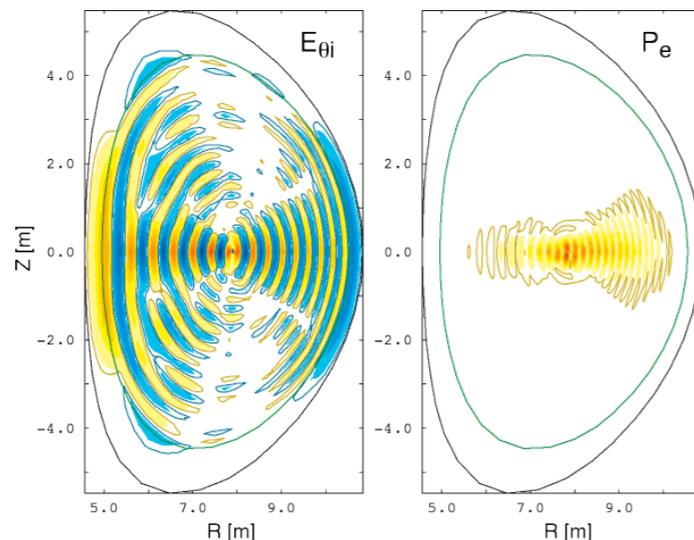
	解析	機能
EQ	2次元MHD平衡	プラズマ形状
TR	1次元径方向輸送	密度・温度・電流分布
WR	光線追跡法	波動伝播 (短波長)
WM	波動方程式	波動伝播 (長波長)
FP	3次元FP方程式	粒子速度分布関数
DP	波動分散関係	波動伝播特性
PL	データインターフェース	座標変換, 実験データ



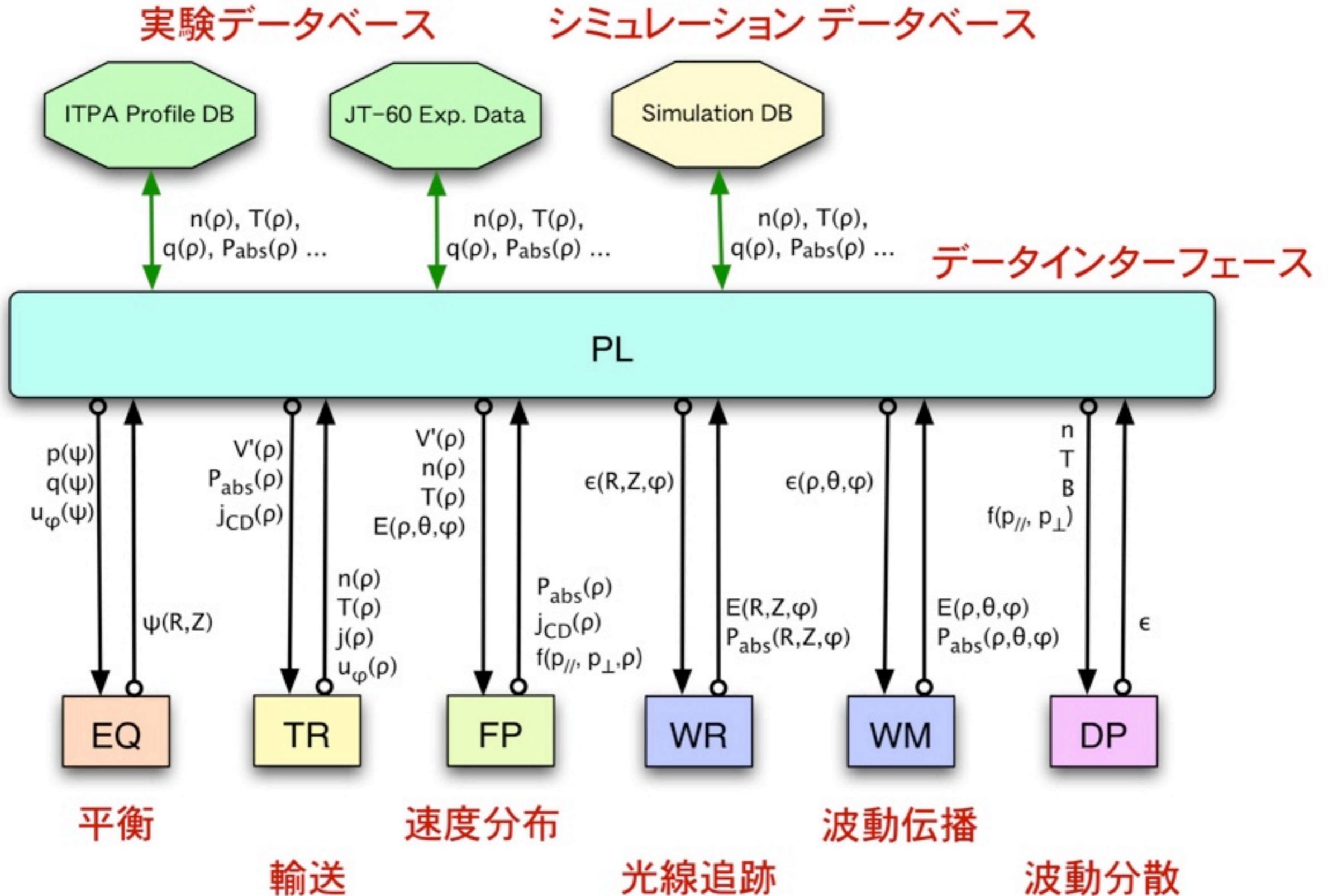
輸送シミュレーション結果



FP方程式: フォッカープランク方程式



コアコード TASK の構造



ITER 運転シナリオ シミュレーション

Inductive operation (15MA)

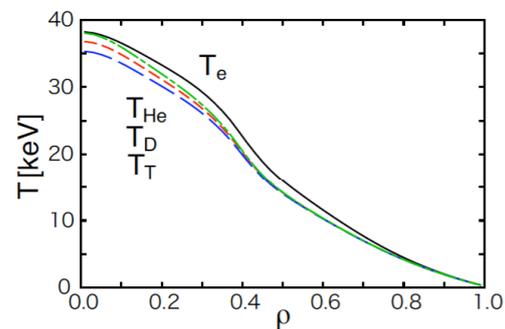
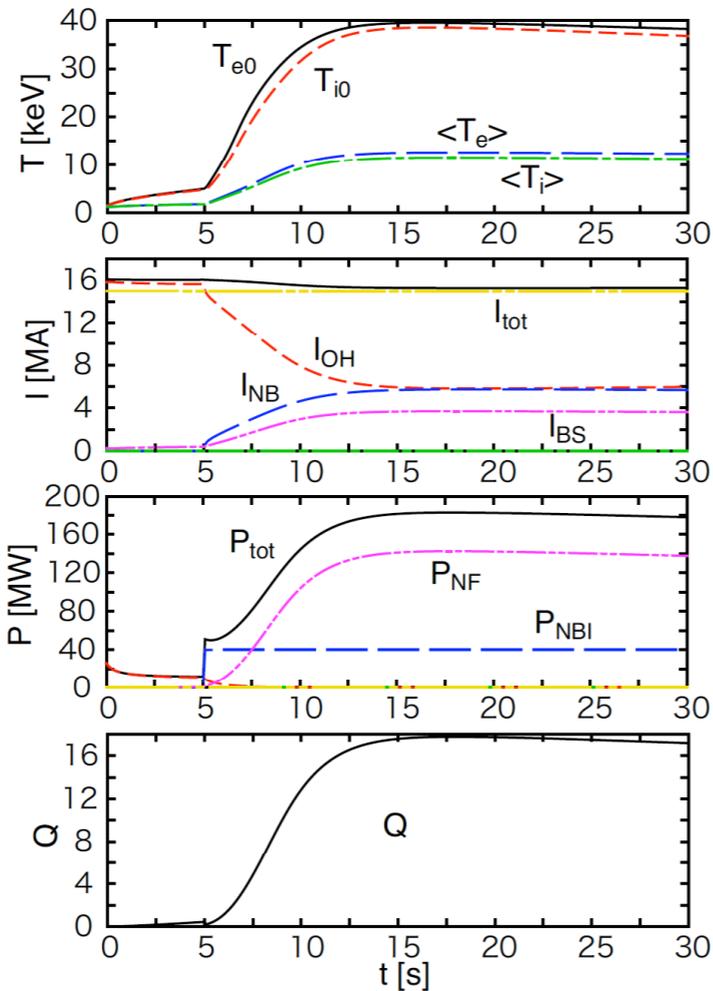
Steady-state operation (9MA)

Preliminary

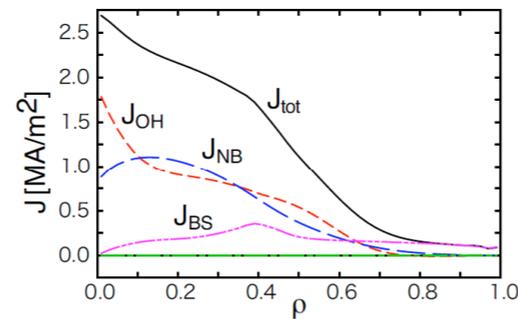
CDBM05

$$\beta_N = 2.63$$

$$\tau_E = 3.1 \text{ s}$$



$$P_{NB} = 40 \text{ MW}$$

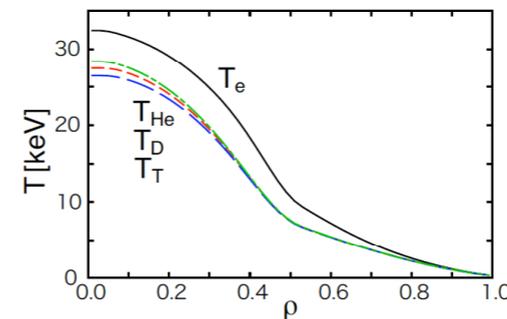
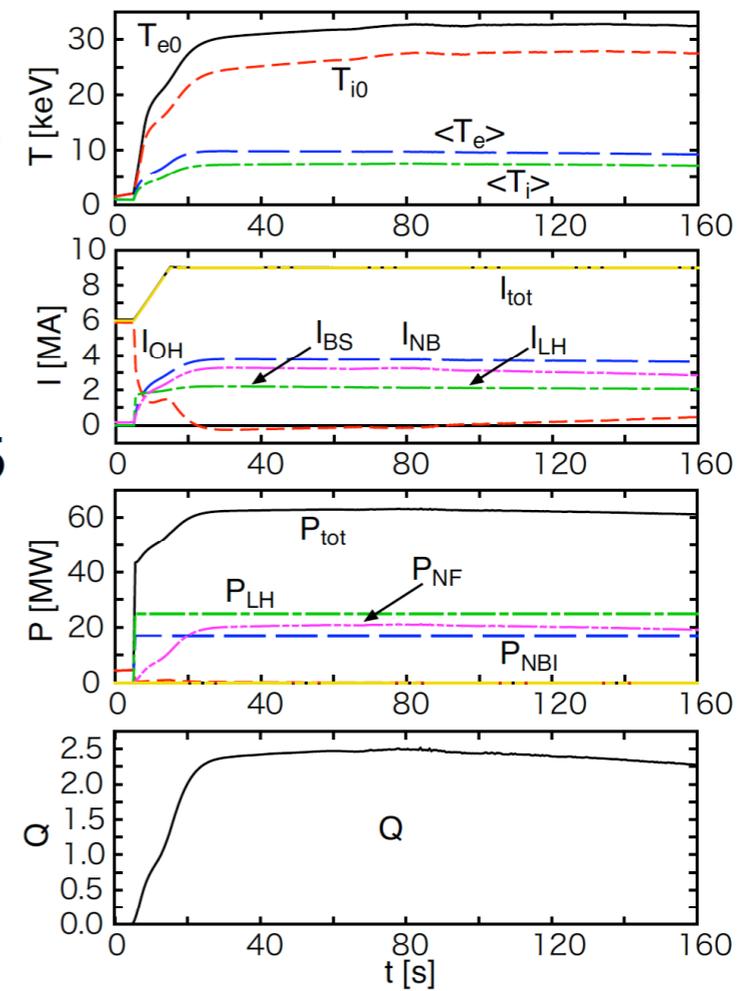


Preliminary

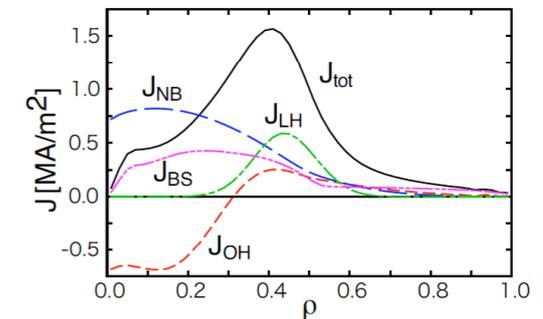
CDBM05

$$\beta_N = 1.55$$

$$\tau_E = 3.2 \text{ s}$$



$$P_{NB} = 17 \text{ MW}$$



$$P_{LH} = 25 \text{ MW}$$

DEMOに向けたシミュレーション

▶ 炉工学シミュレーションとの連携

- プラズマ壁相互作用シミュレーション
- 炉材料シミュレーション
- ブランケットシミュレーション
 - 中性子・トリチウム増殖
 - 中性子遮蔽・発熱
 - 熱輸送・構造力学

▶ 炉設計コードの高度化

▶ 事故評価コードの開発

IFERC-CSC 検討の経緯 (1)

▶ 2005年9月：ITER-BA プロジェクト選定

- 国際核融合エネルギー研究センター (IFERC)

- 核融合計算センター (CSC) は、スーパーコンピュータを用いて、燃焼プラズマの挙動やプラントの安全性等に関連する計算・解析を行い、その成果を ITER の運転シナリオの最適化や次世代炉の設計等に反映させる。

▶ 2006年1月：WG 発足

- EU：K. Lackner (Garching), A. Becoulet (Cadarche),
A. Loarte (Garching), S.C. Lorenzo (Brussel)
- 日本：小関 (原子力機構), 福山 (京大), 中島 (核融合研),
岸本 (京大/原子力機構), 平山 (原子力機構)

IFERC-CSC 検討の経緯 (2)

- ▶ 2006年1月～3月：TV会議 5回
- ▶ 2006年3月：WG Report
 - WG Report をベースに協定付属文書として、Mission Report が作成される予定

IFERC-CSC の概要 (1)

▶ Mission

- To establish a Centre of Excellence (COE) for the simulation and modelling of ITER, NCT and other fusion experiments, and for the design of future fusion power plants, in particular DEMO.

▶ シミュレーション研究対象

- 核融合炉の炉心プラズマ
- 第一原理シミュレーション
- プラズマ-壁相互作用およびプラズマ対向材
- 核融合炉の構造材料および機能材料
- 核融合炉の中性子工学
- ITER, JT-60SA 等で検証されたこれらすべての側面を原型炉の発電プラントシミュレーションに統合する.

IFERC-CSC の計画

- ▶ **2010年：仕様策定作業開始（日欧共同）**
- ▶ **2012年：CSC 発足（BA 期間の後半5年）**
 - 200 TFLOPS (Scalar換算) 以上が想定される、
2012年時点で価格性能比最高の計算機
 - ITER site を含む欧州から十分な通信速度で接続
 - 日本，欧州，日欧共同の研究プロジェクト
 - CSC on site での作業会の実施（資源優先配分）
 - ワークショップ，夏の学校の実施可能
 - 日欧間で公平で同等な計算機資源配分
- ▶ **迅速な立ち上げのため，発足以前から共同研究**

IFERC-CSC の研究体制

▶ CSC 本体（まだ明確ではない）

- プロジェクト・リーダー
- 常駐の計算機スタッフ（若手研究者？）
- シミュレーション研究者：短期滞在

▶ CSC 設置以前の段階でコード開発が必要

- JAEA シミュレーション研究グループ？
- 大学国際連携センター？
 - 大学・核融合研等からの併任あるいは常駐
 - 若手研究者（PD）
 - アジアからの PD 採用，研究者受入

提案：CSC の位置づけ

▶ IFERC-CSC

- 統合シミュレーションコード開発の拠点
- アジアにおける核融合シミュレーション研究の拠点

▶ 原子力機構

- 核融合プラズマ計算科学の拠点
- JT-60SA実験における検証・予測

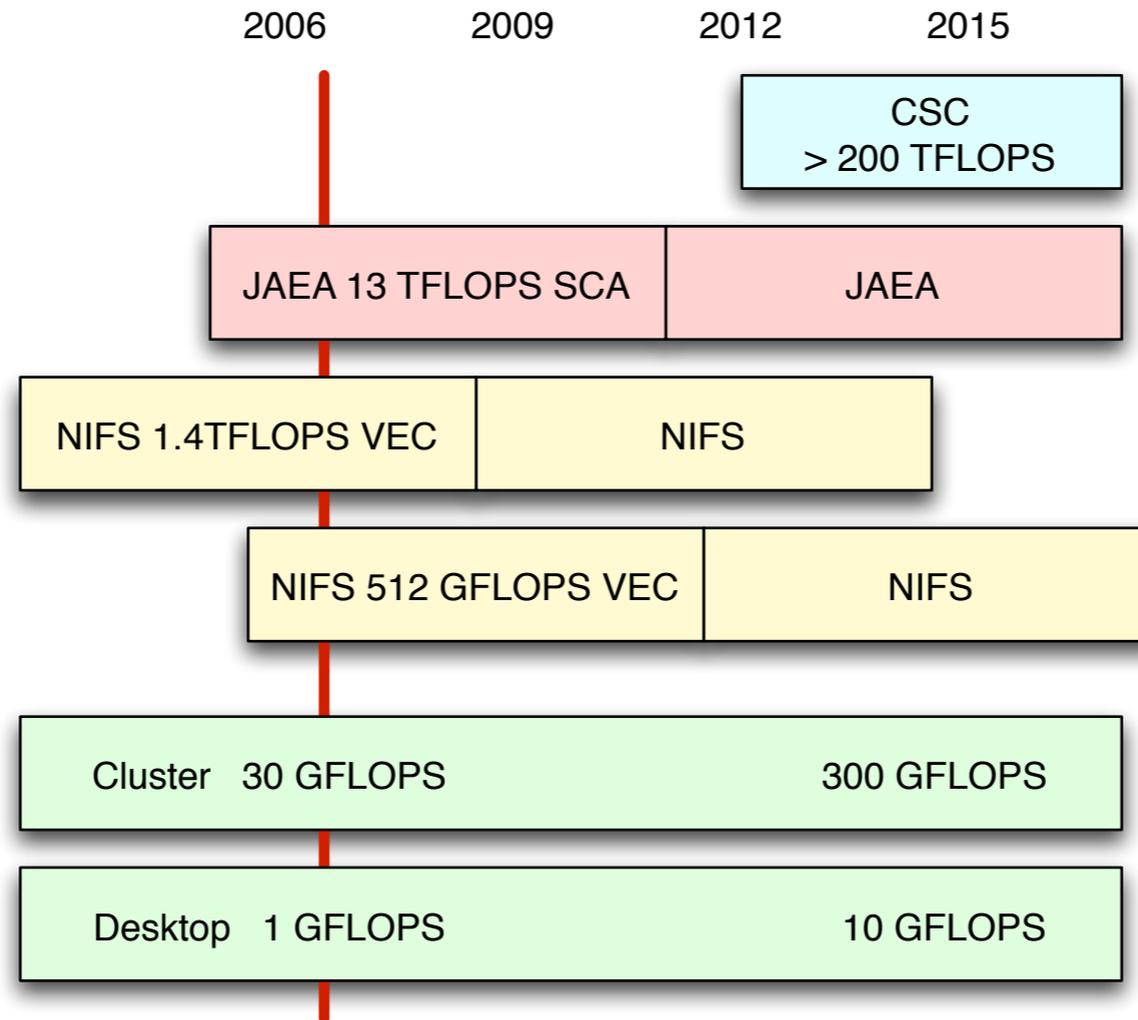
▶ 核融合研

- 第一原理シミュレーション研究の拠点
- ヘリカルプラズマ統合コード開発の拠点

▶ 大学

- 第一原理シミュレーションの基礎研究
- 基盤的シミュレーション研究

提案：計算機資源



▶ グリッドコンピューティングの時代へ

- 解析対象に適切な計算機アーキテクチャー
- 計算機資源の有効利用
- 計算機資源および共同利用基盤の国内戦略が必要

提案：研究体制

- ▶ CSC の計算機資源を最大限に有効利用
- ▶ 国際競争力のあるシミュレーションコードの開発

CSC 設置までの6年間の
準備・コード開発が不可欠

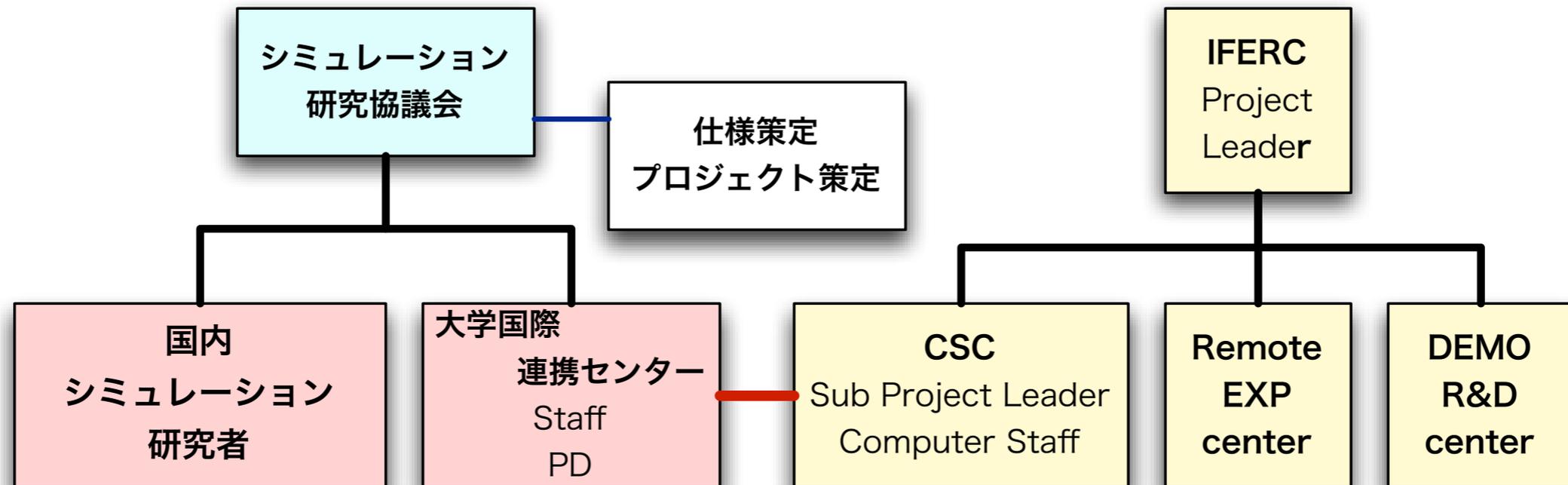
- ▶ 優秀な若手研究者の長期的確保
- ▶ アジア諸国における研究基盤の育成

PD 15 名程度を含む研究組織の早期立ち上げが必要
(CSC, JAEA, 大学国際連携センター?)

- ▶ 国内シミュレーション研究連携の議論
- ▶ 研究目標達成の評価・責任

核融合シミュレーション協議会の設置

提案：CSCと国内研究体制



まとめ

- ▶ ITER プラズマの高性能化や長時間運転実現には、さまざまなトカマクにおける実験結果によって検証され、第一原理シミュレーションによって裏付けられた、統合シミュレーションコードによる予測・最適化が不可欠
- ▶ 欧米では統合コードの組織的な開発が始まっており、ITER における運転シナリオ策定のリーダーシップを確保しようとしている。
- ▶ ITER に向けては統合コードの国際協力が進行中であるが、DEMO に向けては国際競争になる可能性がある。
- ▶ 国内においても統合コードの組織的開発を進めるために、CSC に向けたシミュレーション研究組織の早期立ち上げが必要と考える。