

# プラズマにおける 統合シミュレーションの進展

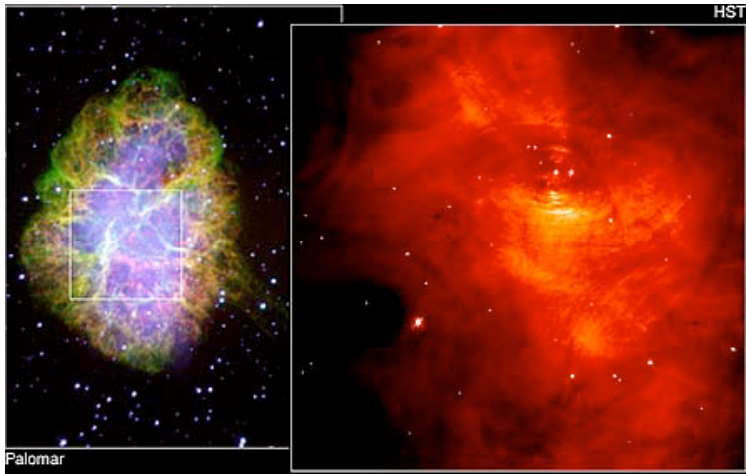
福山 淳

京大工

プラズマ統合シミュレーション  
核燃焼プラズマ統合コード構想  
高周波プラズマ生成解析コード  
まとめ

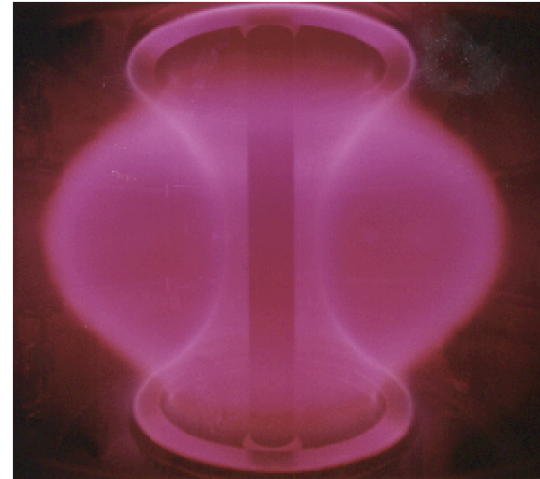
# さまざまなプラズマ

## 自然界のプラズマ



かに星雲

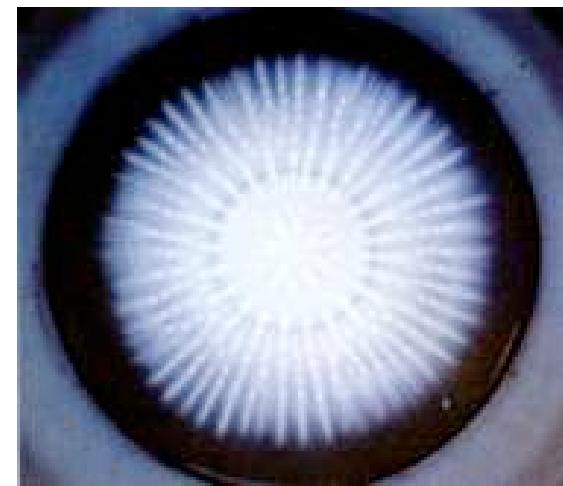
## 人工のプラズマ



球形トカマク

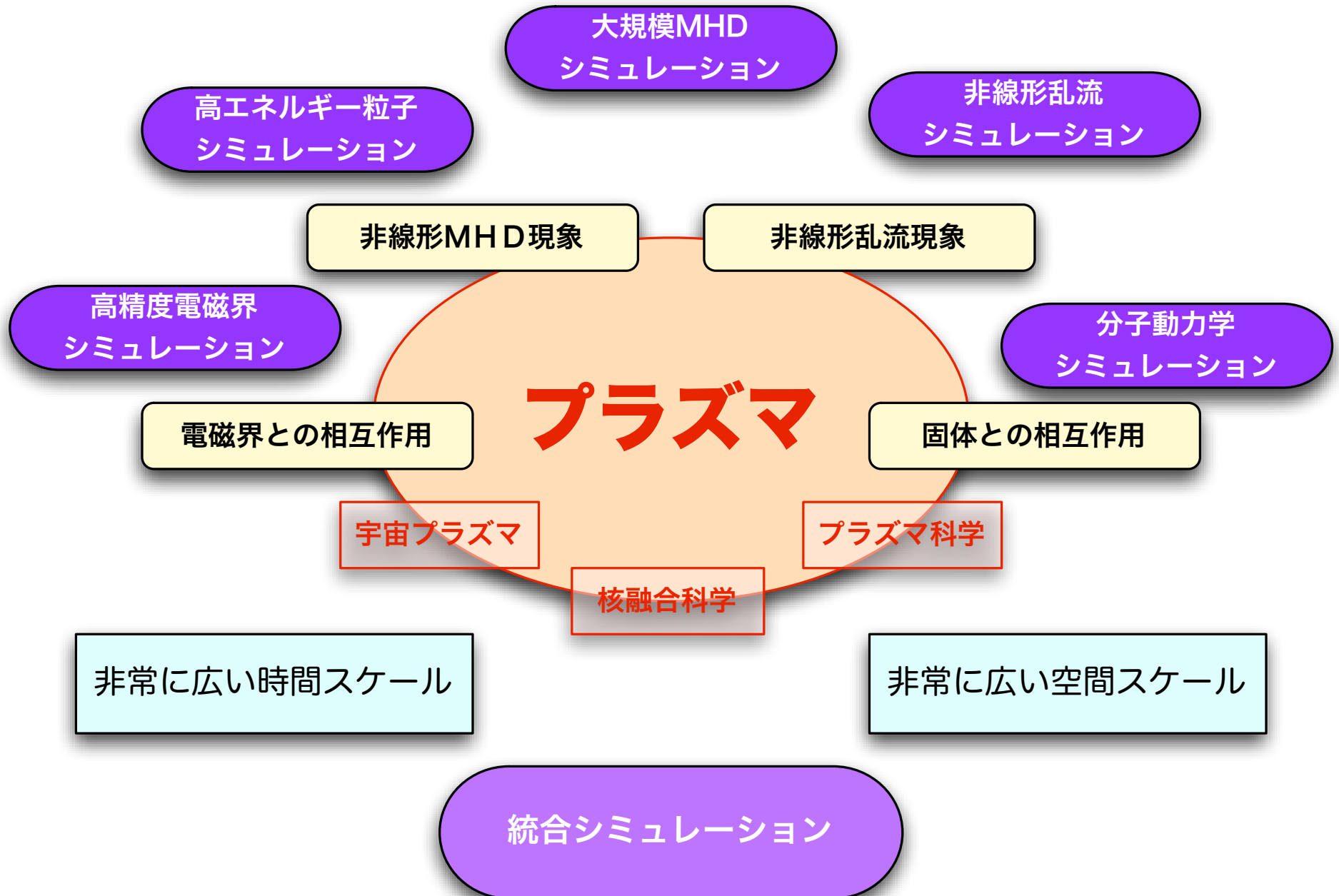


オーロラ



プロセッシングプラズマ

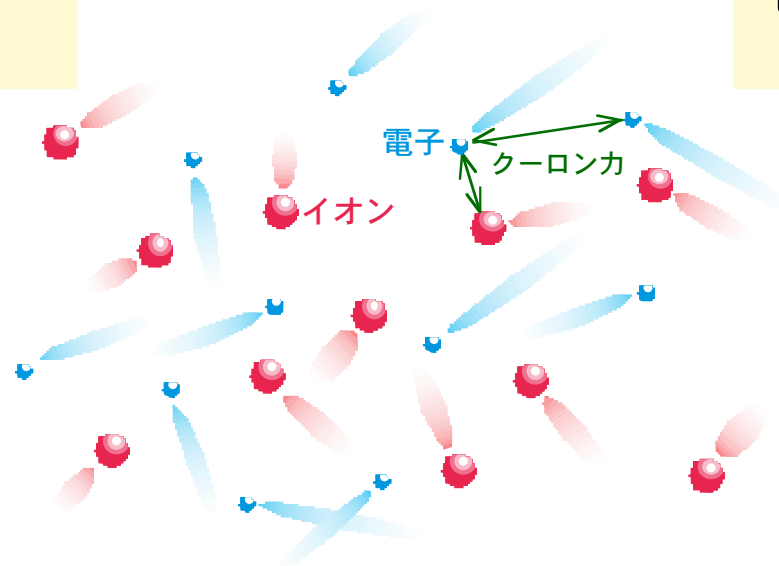
# プラズマ中のさまざまな現象



# プラズマのシミュレーション

粒子的性質

電磁流体的性質



粒子モデル	位相流体モデル	流体モデル
ジャイロ粒子モデル	ジャイロ位相流体モデル	ジャイロ流体モデル
運動方程式	ボルツマン方程式	流体方程式

ジャイロモデル：サイクロトロン運動する荷電粒子を輪あるいは円盤の形状をもち、ドリフト運動をする粒子として取り扱う

# プラズマの統合シミュレーション

---

個々の現象の解析

複数の解析コードの結合

多数の解析コードの連携

データインターフェースの標準化

実行制御の標準化

データ可視化の標準化

単一モデルによるすべての現象の記述

# プラズマにおける統合コード

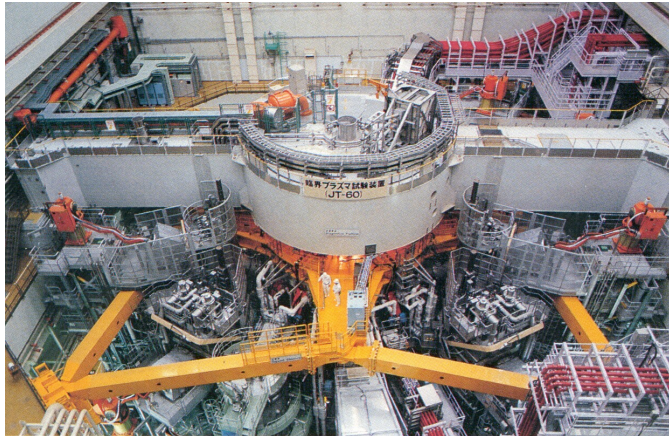
---

核燃焼プラズマ統合コード構想

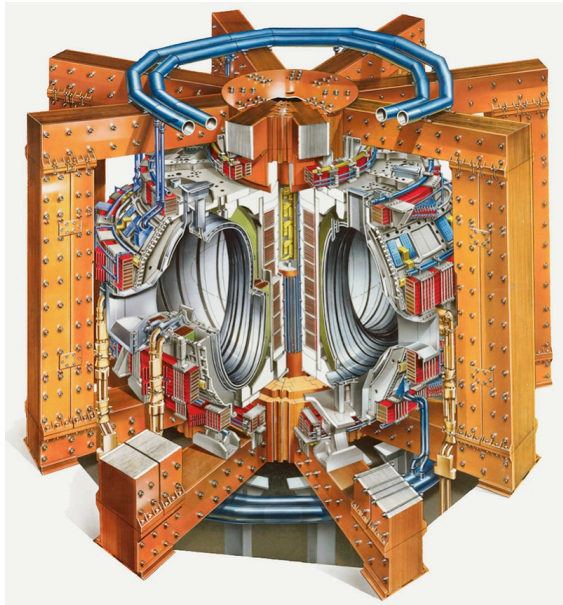
高周波プラズマ生成解析コード

# 核燃焼プラズマ

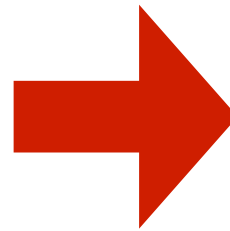
核融合反応が持続的に維持されるプラズマ



JT-60U

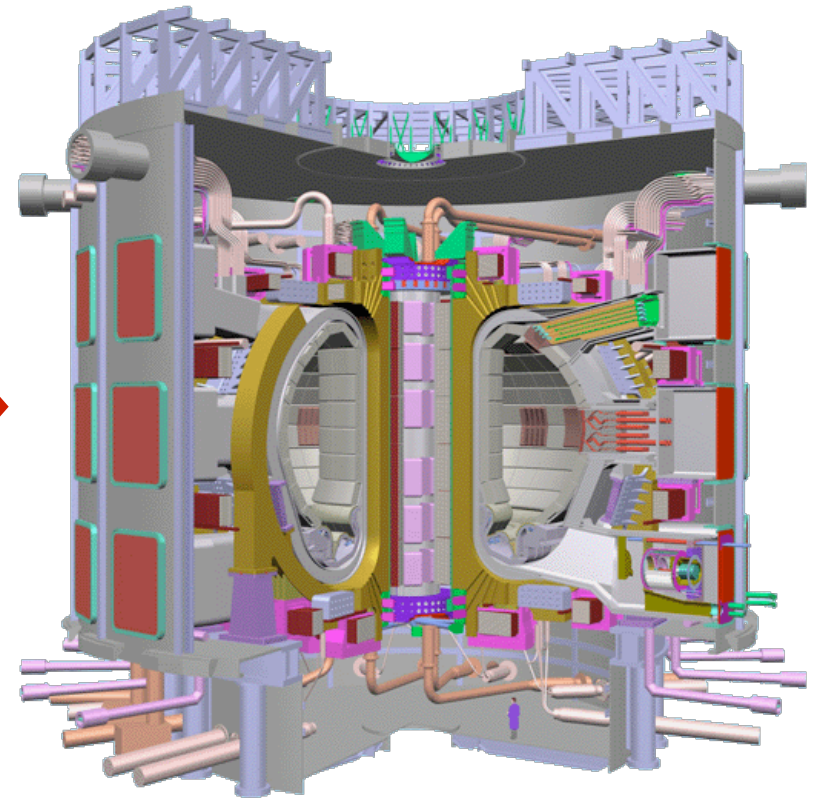


JET (EU)



定量的  
予測

ITER



# 核燃焼プラズマ

核融合反応が持続的に維持されるプラズマ

## 高い自律性

核融合反応によって発生した $\alpha$ 粒子による加熱  
強い圧力勾配が駆動する自発電流  
核融合反応による粒子構成の変化

## 高エネルギー粒子の存在

MeV級のエネルギーをもつ粒子の振る舞い  
背景プラズマとの相互作用

## 高熱流束の流出

周辺プラズマおよび固体・流体壁との相互作用



# 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

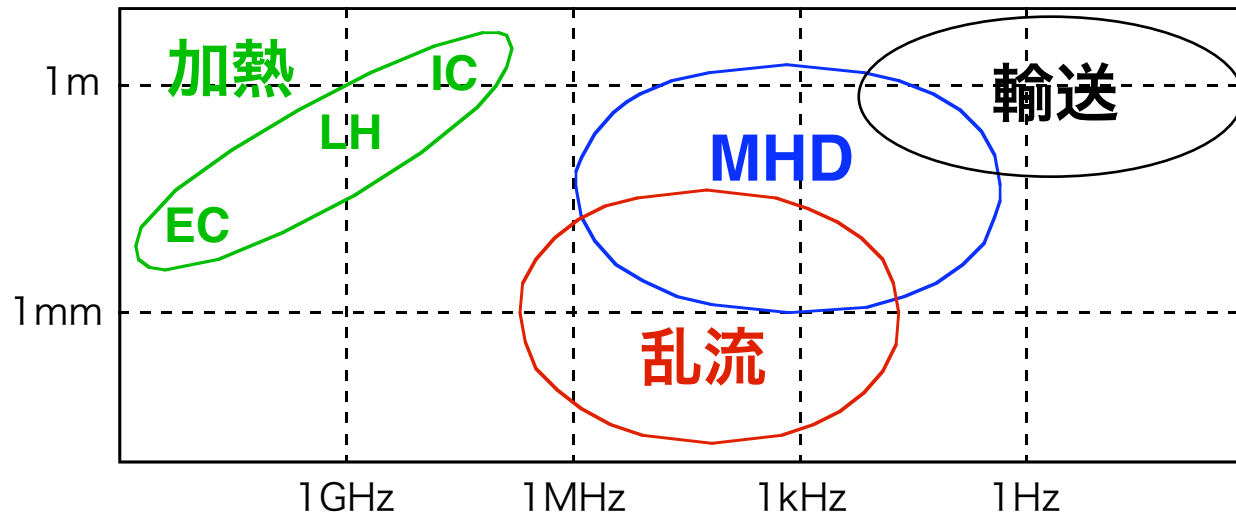
炉心プラズマ全体の  
放電時間全体にわたる  
自己完結的な時間発展シミュレーション

核燃焼プラズマ統合シミュレーションコードが必要

# 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 $\mu$ 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

# 階層化物理モデル

## 従来解析

MHD現象や輸送現象における時間・空間尺度の分離を仮定

	輸送係数	低次モード	平衡分布
乱流解析	解析対象	無視	固定
MHD不安定性解析	無視	解析対象	解析対象
輸送解析	固定	無視	解析対象

## 階層化物理モデル

MHD現象や輸送現象における相互作用を系統的に繰り返し

# 核燃焼プラズマ統合コード構想

---

BPSI: Burning Plasma Simulation Initiative

## 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：階層化物理モデル

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

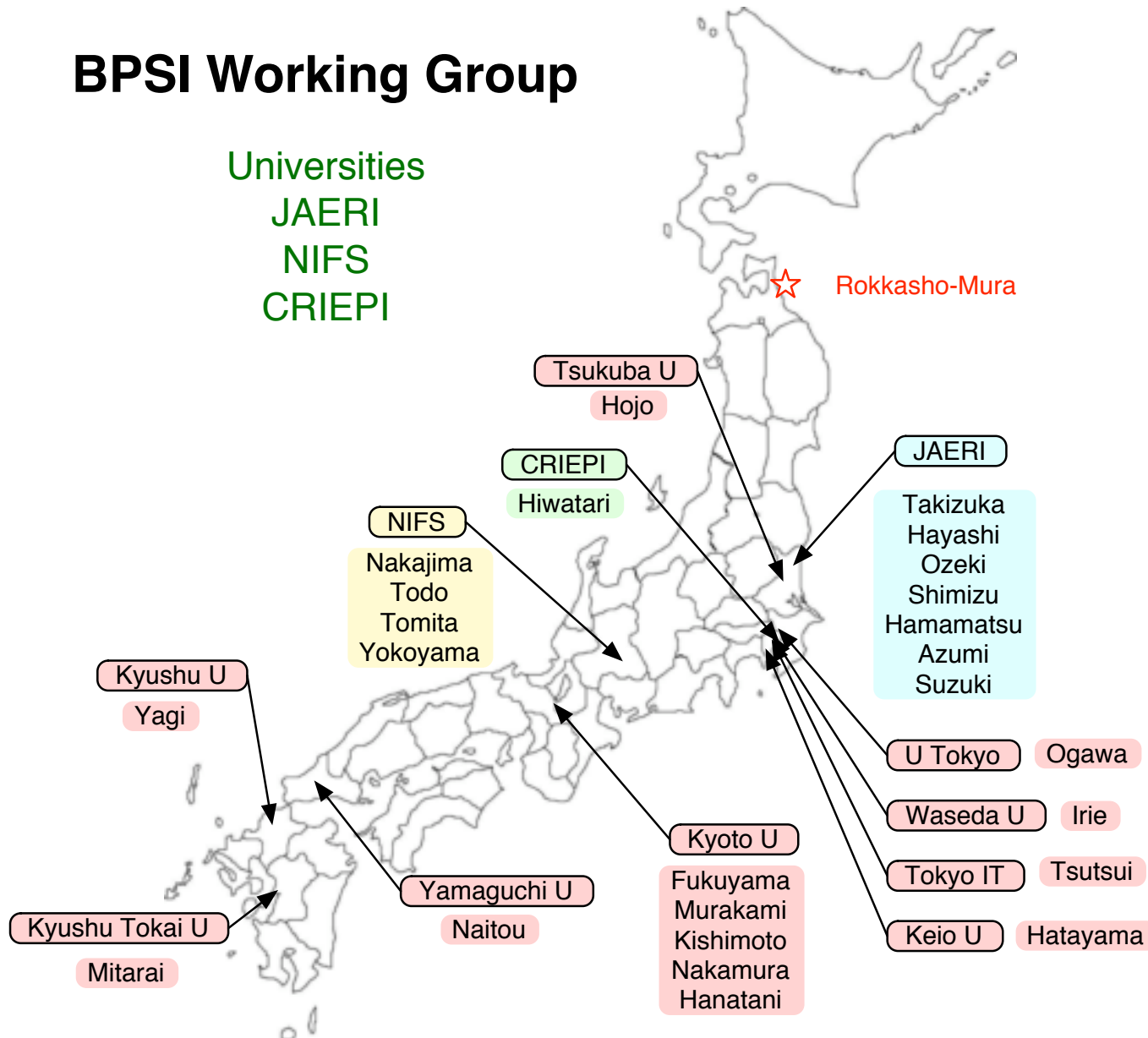
計算機クラスター間の連携：計算資源の有効利用

図形表示の高度化

# BPSI: 全国的な研究協力

<http://bpsi.nucleng.kyoto-u.ac.jp/>

## BPSI Working Group



# トカマク統合輸送解析コード

---

TASK: Transport Analyzing System for tokamak

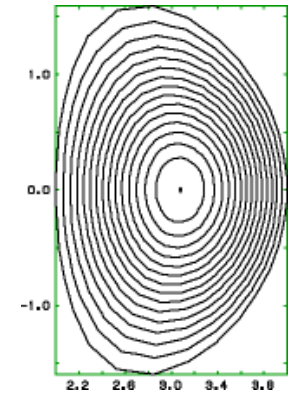
- トカマクの時間発展シミュレーション
  - モジュール構造の統合シミュレーション
  - 輸送・平衡＋様々な加熱・電流駆動機構
  - 高い移植性
  - MPIライブラリを用いた並列分散処理
  - 実験データベースの利用
  - ヘリカル系への拡張
- 核燃焼プラズマ統合コード構想のコアコード
  - 最小限の統合コード：モジュールは交換可能
  - インターフェースの標準化：実装の検証
  - 利用者の拡大：マニュアル等の整備

# コアコード: TASK

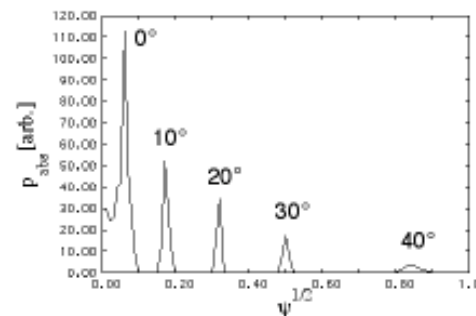
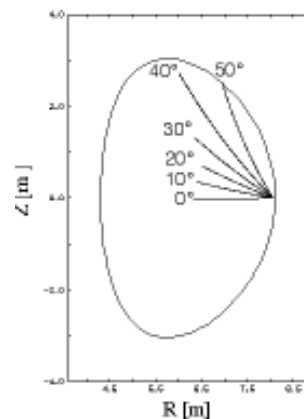
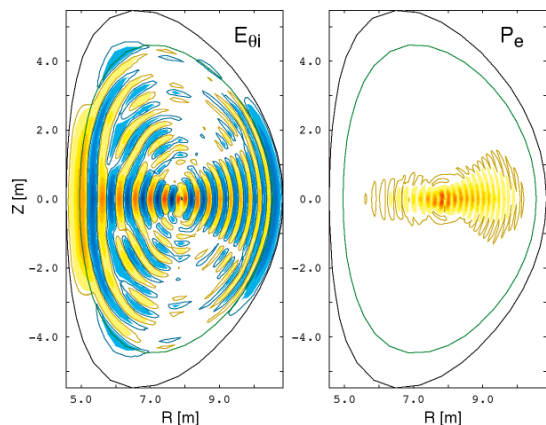
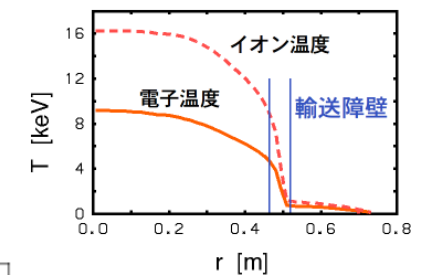
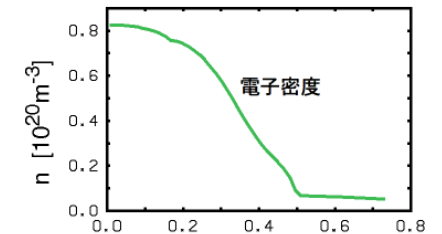
## 機能毎のモジュール構造

	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

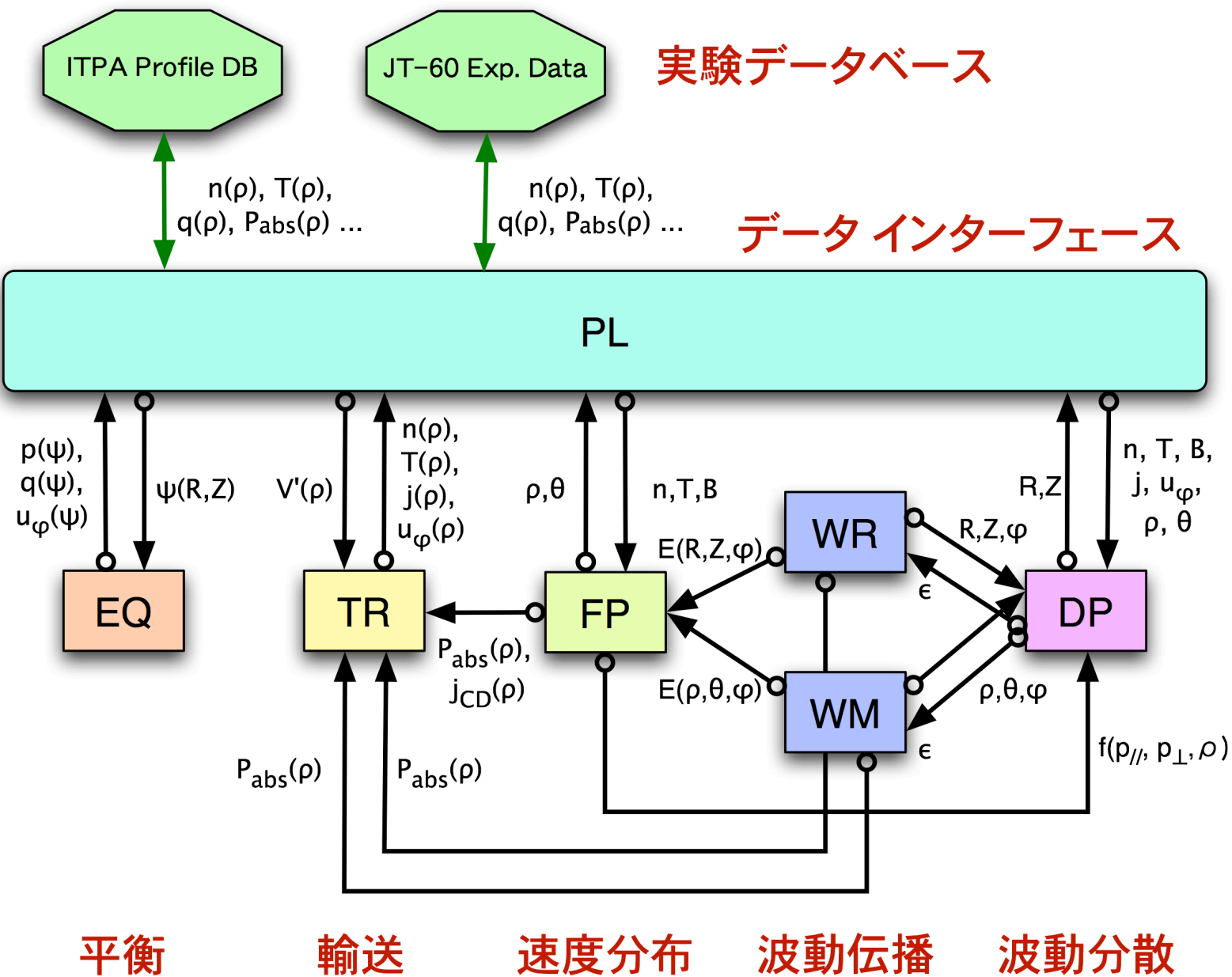
FP方程式: フォッカープランク方程式



輸送シミュレーション結果

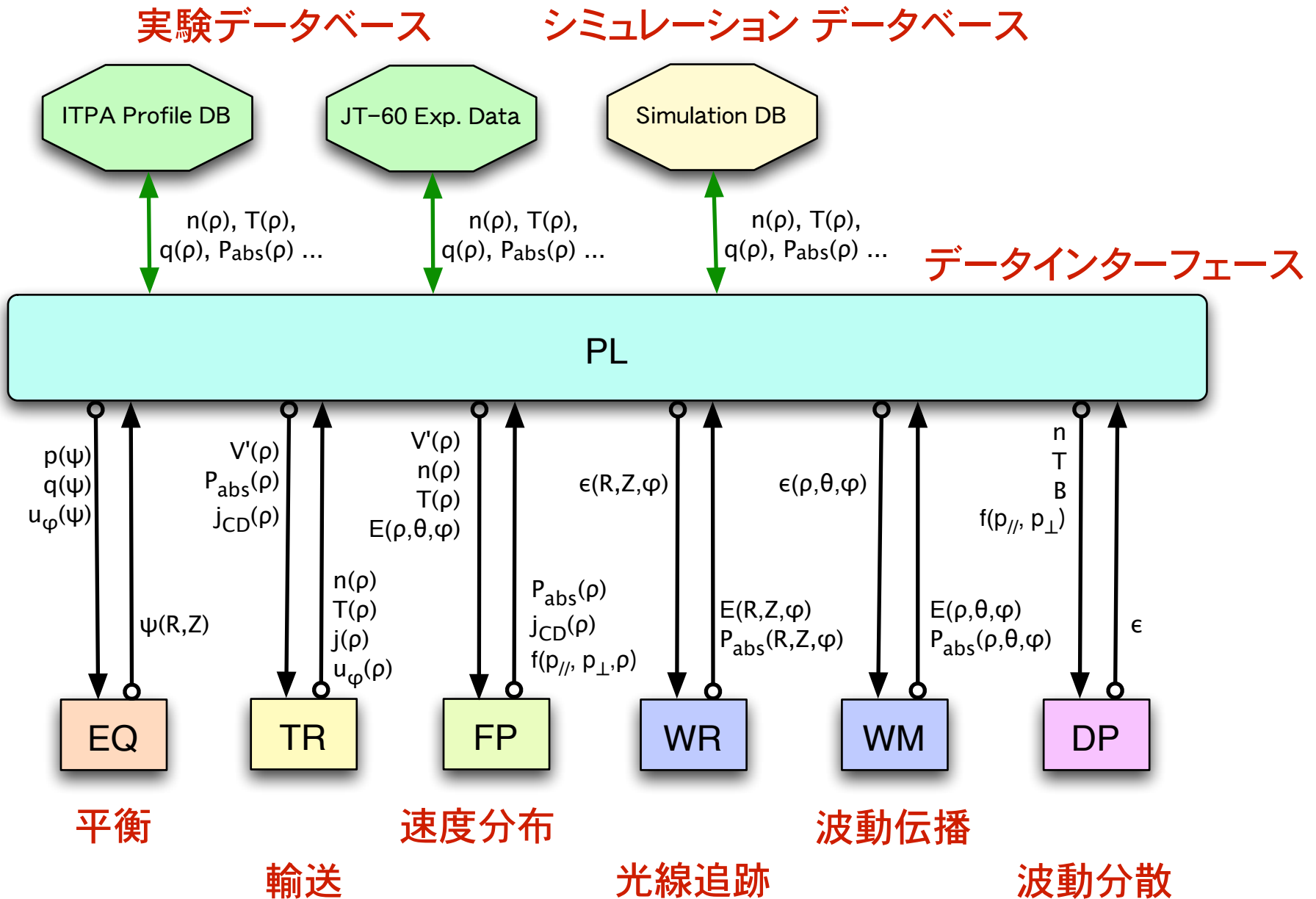


# 統合コード TASK の旧構造

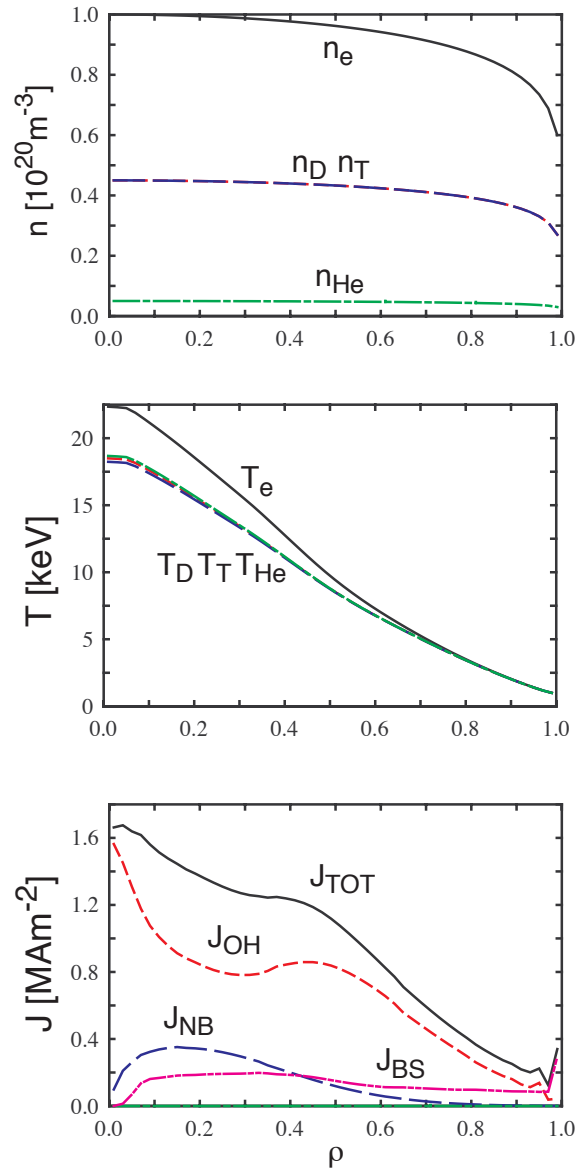
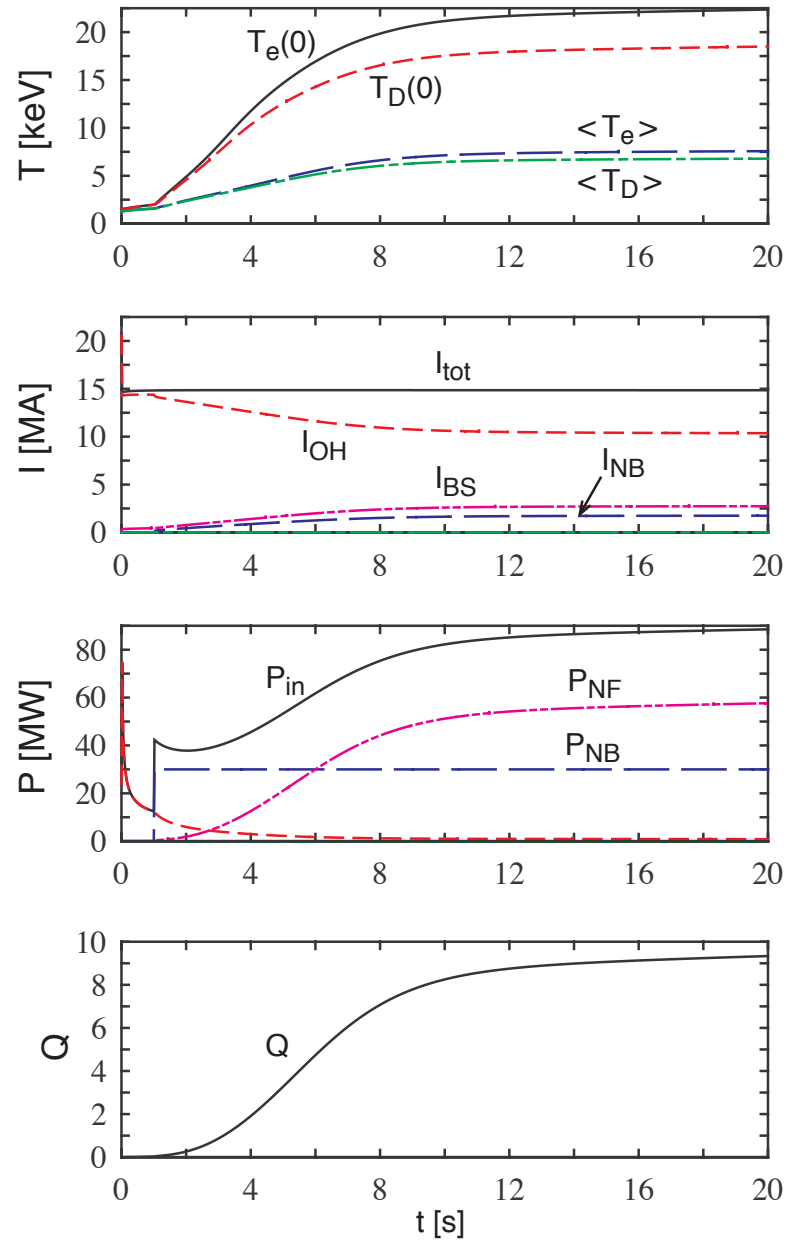




# 統合コード TASK の現在の構造



# ITER Standard Operation (Preliminary)



$$I_p = 15 \text{ MA}$$

$$P_{NB} = 30 \text{ MW}$$

$$Q = 9.1$$

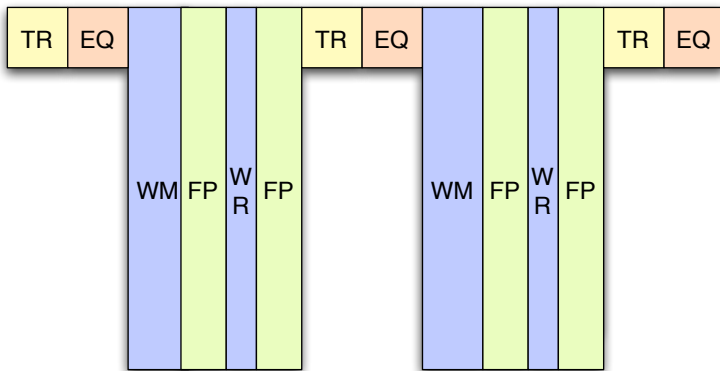
**(Preliminary)**

# 実行形態

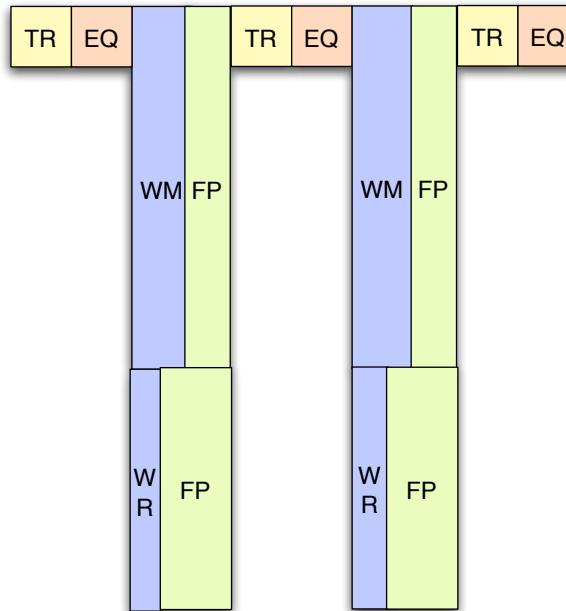
## 逐次型



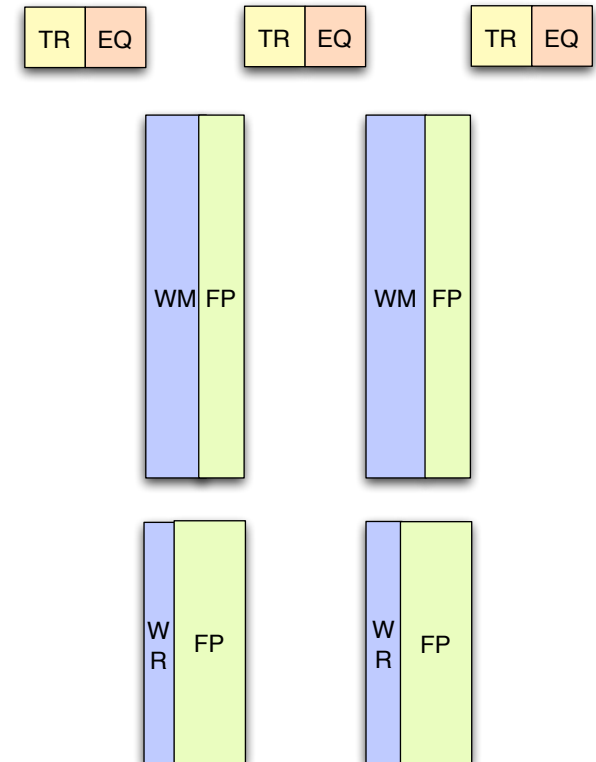
## 単純並列型



## 多重並列型



## 分散並列型



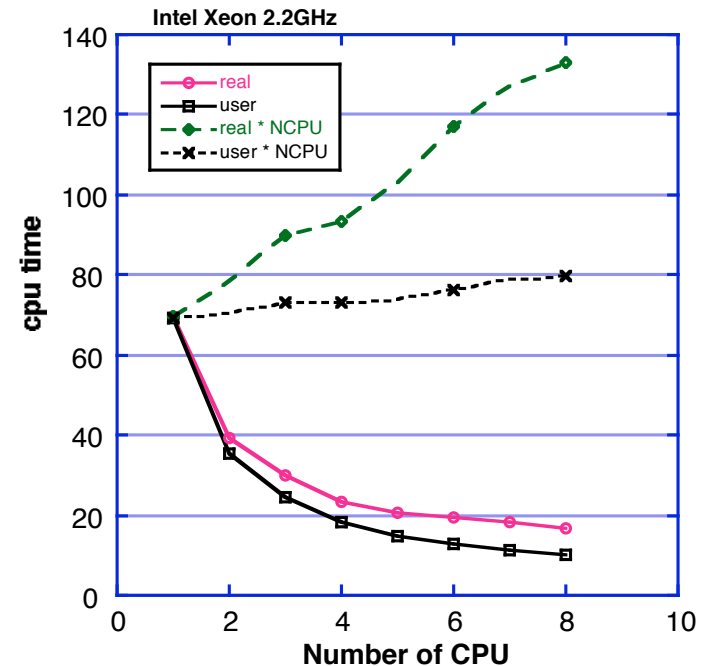
# ITBLの利用

- TASKコードをITBLに移植し，現在テスト中
- 並列処理による高速化を期待
- 計算手法に適した計算機の利用

- 課題

- ssh の利用
- cvs の利用
  - ▶ 分散開発環境
- ITBL以外の計算機との連携

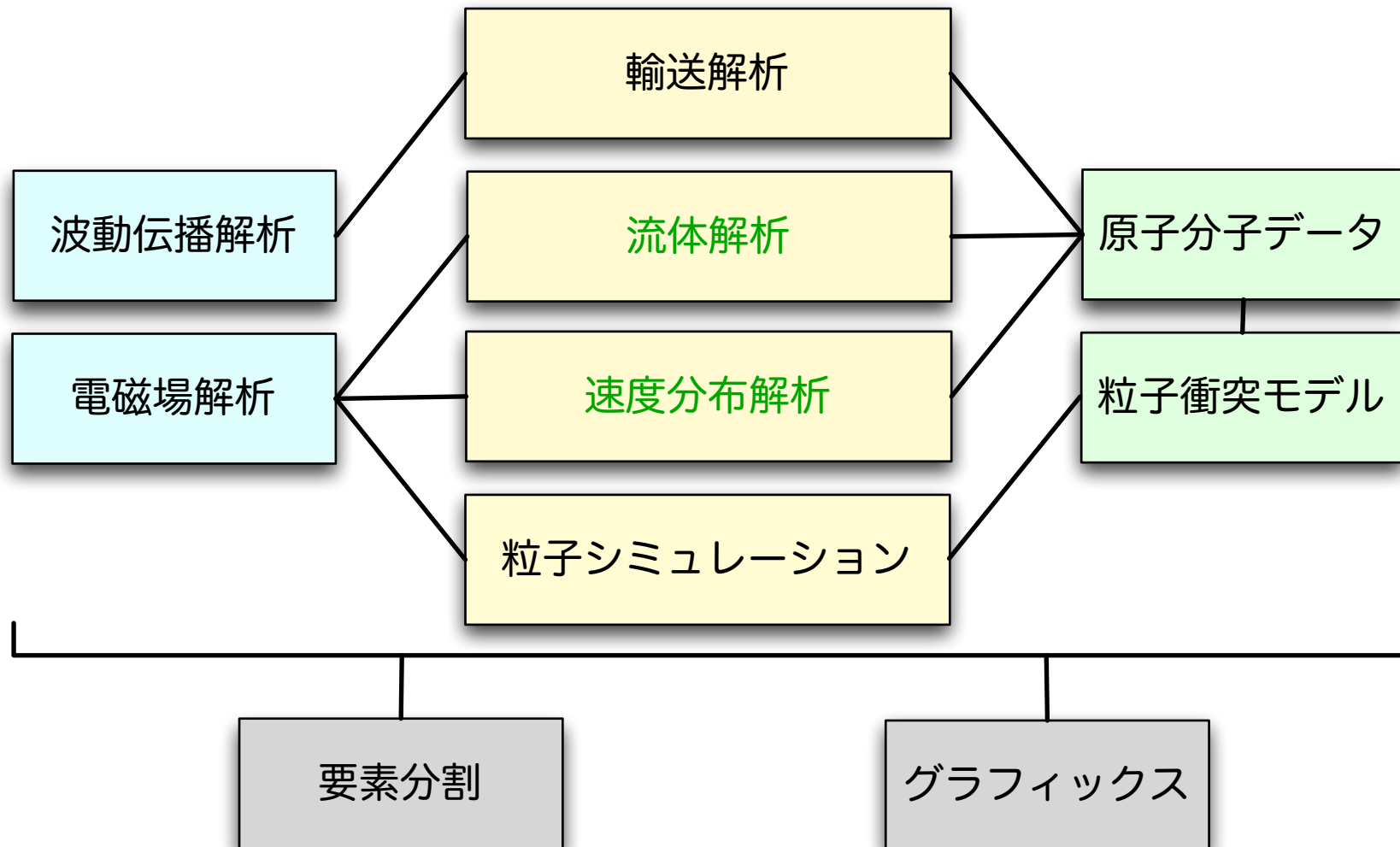
波動伝播解析コード  
TASK/WMの並列化



# 高周波プラズマ生成解析コード

PAF : Plasma Analysis by FEM

三角形／四面体要素を用いた有限要素法



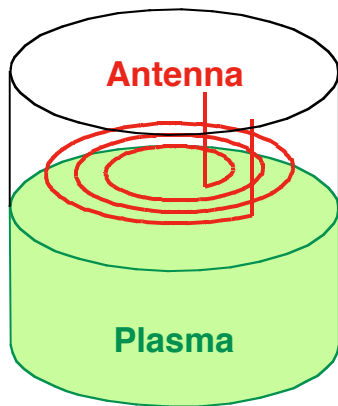
# らせんアンテナによる三次元波動解析

円柱プラズマ：

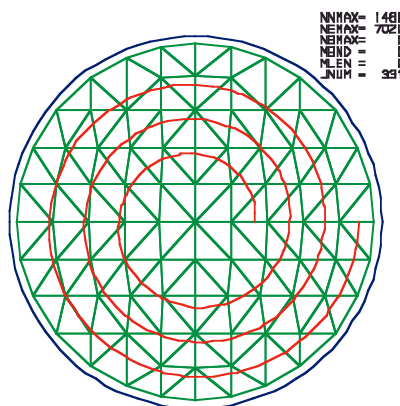
直径 0.48m, 高さ 0.3m

周波数：13.56 MHz

配位

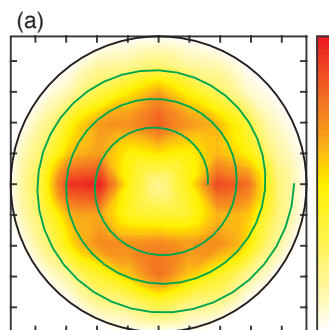


要素分割

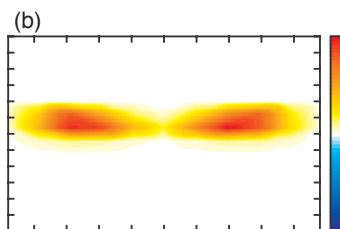


NNMAX= 1488  
NEMAX= 7020  
NEHD = 0  
NLEN = 1  
NNUM = 391

吸収パワー

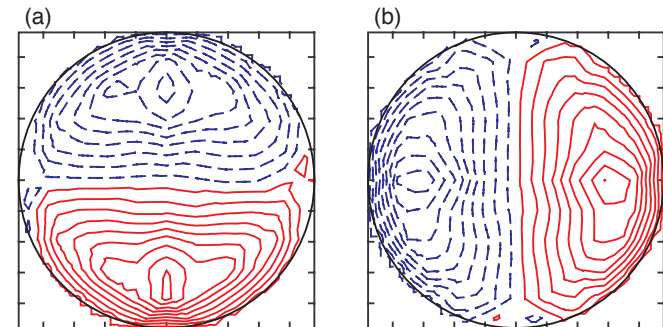


PIC(XY) Z=0.16  
MAX= 2.15E+00  
MIN= 0.00E+00  
TOP= 0.00E+00



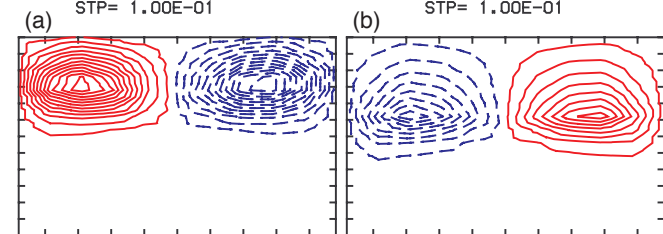
PIC(YZ) X=0.0  
MAX= 1.81E+00  
MIN=-1.40E-15  
TOP= 1.81E+00

波動電界



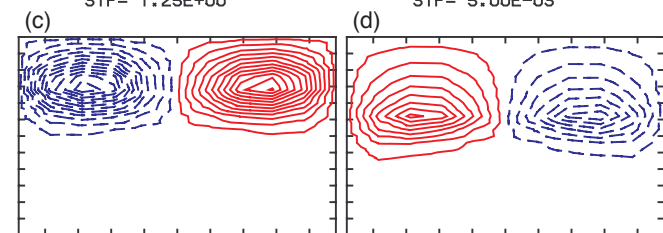
EXI(XY) Z=0.16  
MAX= 8.89E-01  
MIN=-8.00E-01  
STP= 1.00E-01

EYI(XY) Z=0.16  
MAX= 8.53E-01  
MIN=-9.14E-01  
STP= 1.00E-01



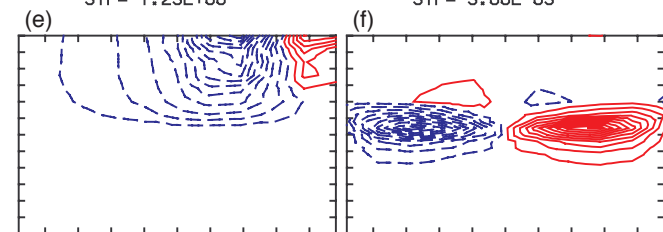
EXI(YZ) X=0.0  
MAX= 1.50E+01  
MIN=-1.49E+01  
STP= 1.25E+00

EXR(YZ) X=0.0  
MAX= 4.04E-02  
MIN=-4.20E-02  
STP= 5.00E-03



EYI(XZ) Y=0.0  
MAX= 1.46E+01  
MIN=-1.54E+01  
STP= 1.25E+00

EYR(XZ) Y=0.0  
MAX= 3.92E-02  
MIN=-3.65E-02  
STP= 5.00E-03



EZI(XZ) Y=0.0  
MAX= 5.54E+00  
MIN=-1.32E+01  
STP= 1.00E+00

EZR(XZ) Y=0.0  
MAX= 2.49E-03  
MIN=-2.58E-03  
STP= 2.50E-04

# 三角形要素を用いた粒子シミュレーション

- 任意境界形状配位におけるシミュレーション
  - 粒子が存在する要素の検出が必要

2.45 GHz 高周波によるプラズマ生成

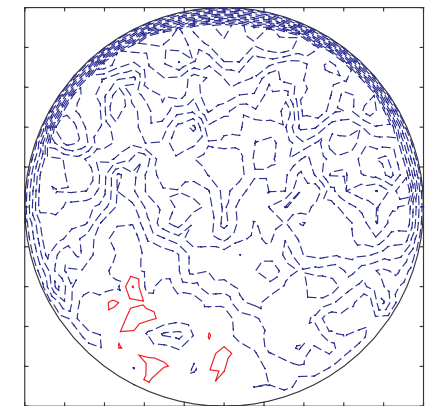
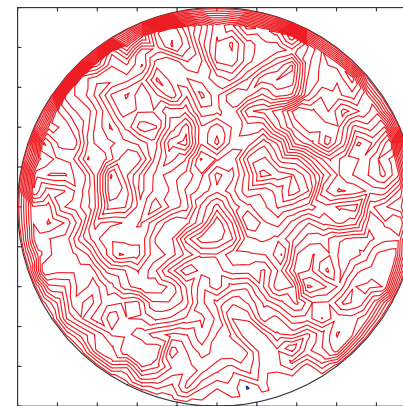
粒子種 : Ar

初期粒子 : 電子, イオン, 中性粒子

粒子密度 :  $n_e=n_i=10^{16}m^{-3}$ ,  $n_g=10^{22}m^{-3}$

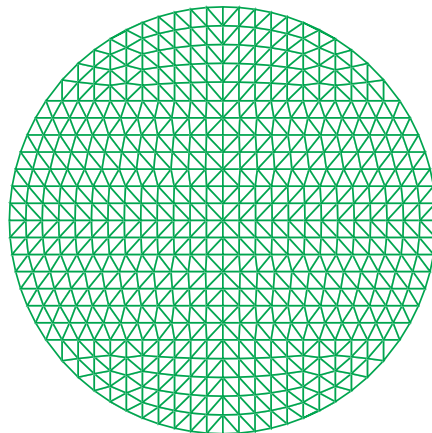
粒子温度 :  $T_e=1eV$ ,  $T_i=T_g=0.03eV$

ポテンシャル分布

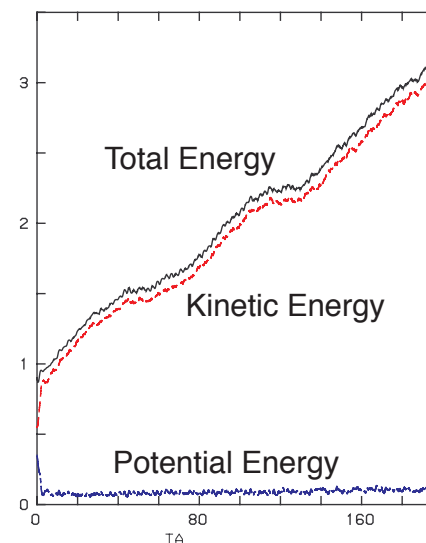


要素分割

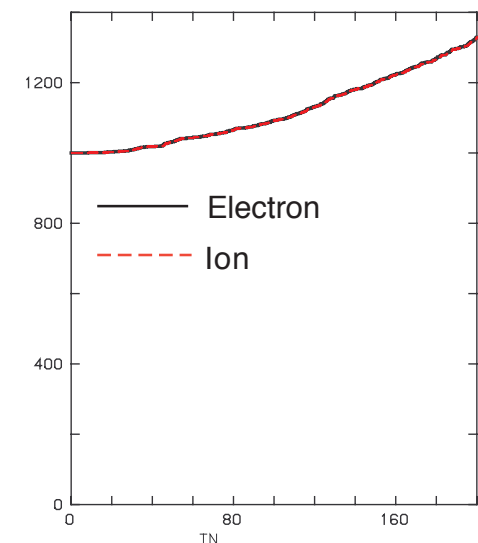
NNMAX = 612  
NEMAX = 1100



エネルギーの時間発展



粒子数の時間発展



# まとめ

---

- 核燃焼プラズマ統合コード構想
  - 核燃焼プラズマ解析コードの枠組み
  - コアコード TASK の開発
  - 全国的な研究協力：分散開発環境
  - 計算資源の有効利用：ITBLの利用
- 高周波プラズマ生成解析コード
  - プロセスプラズマや基礎プラズマの解析
  - 有限要素法を用いた解析の統合化
  - 産業応用への適用