

今後の核融合研究開発の在り方について

5. 理論・計算機シミュレーション研究

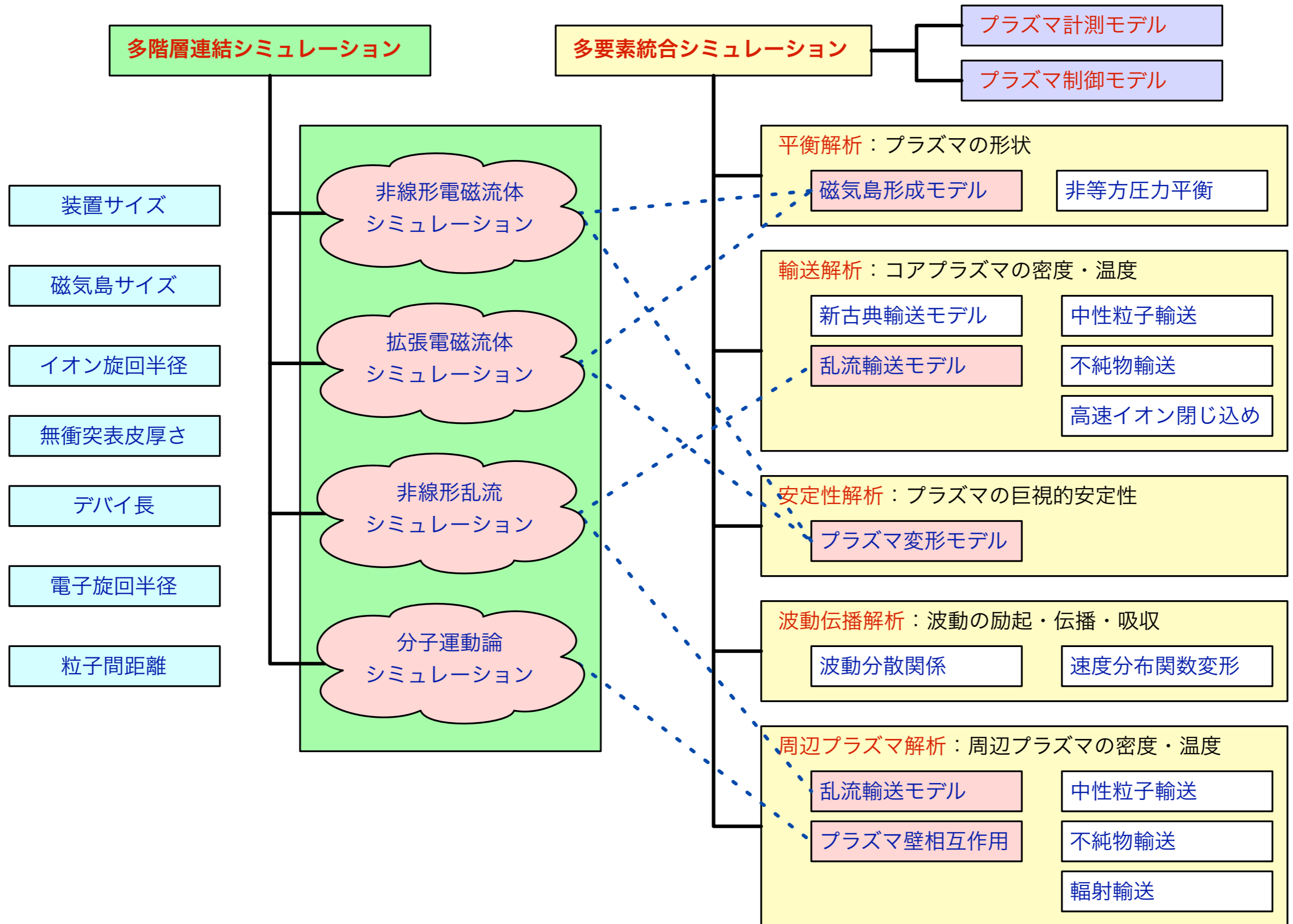
福山 淳

京都大学 大学院工学研究科

原型炉概念の構築と設計作業に向けた 理論・計算機シミュレーション研究の役割

- * これまでの核融合研究における理論・シミュレーション研究の役割
 - ▶ 非線形物理現象の解明（個別的：乱流現象, MHD現象, 高速粒子）
 - ▶ プラズマの予測（簡約化された物理モデル, 時間発展解析）
- * これからの理論・シミュレーション研究が目指す炉設計統合コード開発
 - ▶ 実験データによって十分に検証された核燃焼プラズマ統合解析
 - ▶ 核融合炉構成要素を総合的に記述する炉工学統合解析
- * 核燃焼プラズマ統合解析に向けた車の両輪
 - ▶ 多階層連結シミュレーション（第一原理的, 超大規模）
 - ▶ 多要素統合シミュレーション（多様な現象の相互作用）

多階層連結 vs 多要素統合



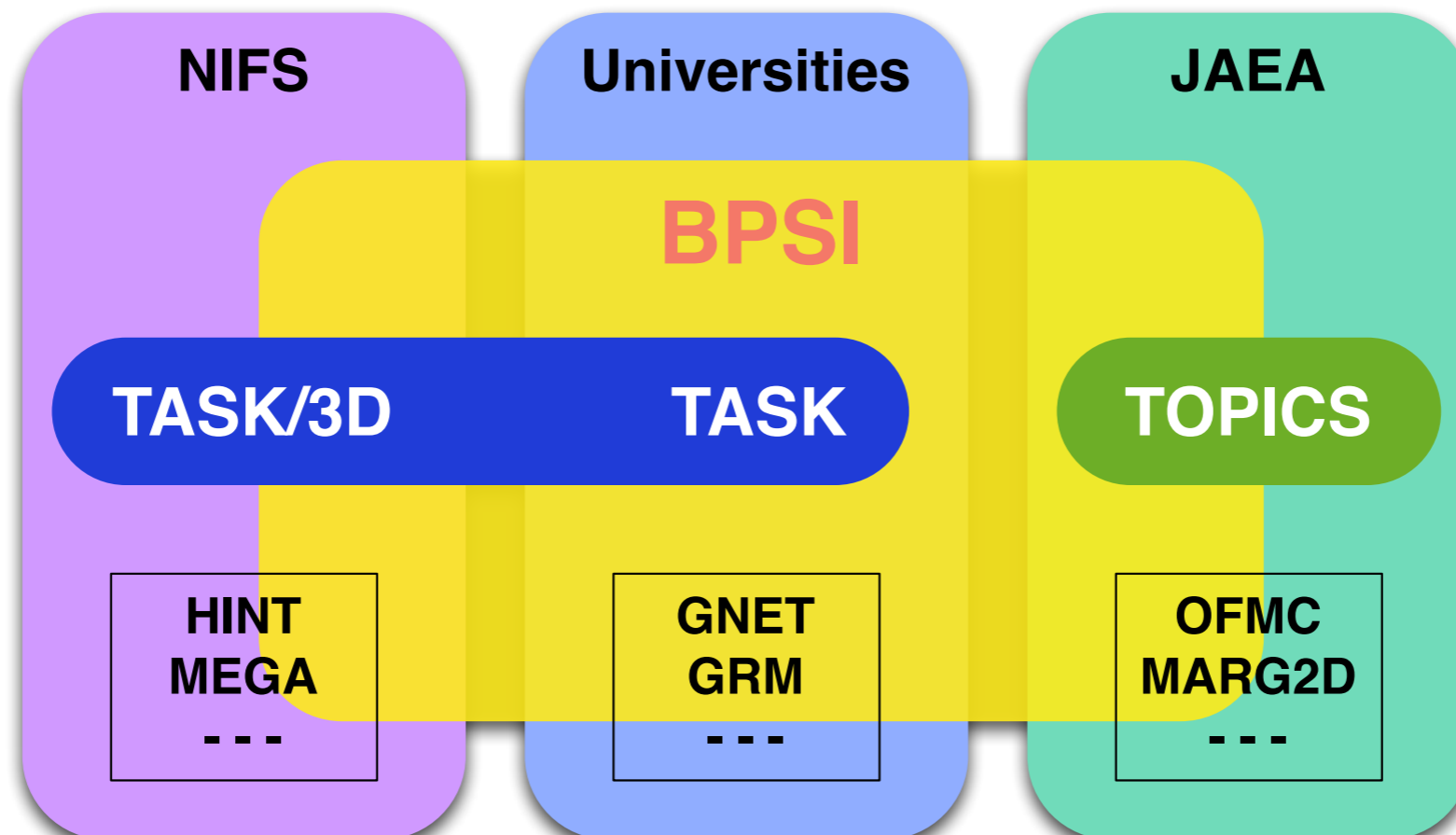
統合コードに期待される特性

- * モジュラー構造：物理モデルの容易な拡張
 - ▶ 必須モデルの包含：平衡, 輸送, 入力源, 安定性
 - ▶ 異なるレベルをもつ物理モデルの許容：高速, 標準, 正確, 厳密
 - ▶ 新しい物理モデル：容易な組み込み
- * 標準化されたインターフェース
 - ▶ 標準化されたモジュールインターフェース：効率的なコード開発
 - ▶ 実験データベースとのインターフェース：物理モデルの検証
 - ▶ 統一されたユーザーインターフェース：実験研究者の容易な利用
- * 並列処理による高速化：計算時間の短縮
- * 高い移植性：必須ライブラリの組み込み, 多様なOS, コンパイラ
- * ソースプログラムの公開：利用者の拡大, 容易な拡張
- * 計算結果の可視化：物理現象の把握

核燃焼プラズマ統合コード構想 BPSI

大学，核融合研，原子力機構等の研究協力（2002年より）
日米協力，日韓協力，国際トカマク物理活動等による国際協力

- 統合コード：コード間連携の枠組み開発
- 新しい物理モデル：階層連結型物理モデル
- 新しい計算手法：ネットワーク分散並列処理



BPSI にもとづく統合モデリング活動

* 統合コードの開発

- ▶ TASK: トカマク等 (京大他)
- ▶ TOPICS-IB + SONIC + MARG2D: トカマク (原子力機構)
- ▶ TASK3D: ヘリカル系, トカマク 3次元効果 (核融合研, 京大)

* 標準インターフェースの開発

- ▶ データ交換インターフェース (BPSD)

* モジュールの交換

- ▶ TOPICS-IB + TASK/WM: ITER運転シミュレーション
- ▶ TASK + SONIC: コアプラズマと周辺プラズマの結合

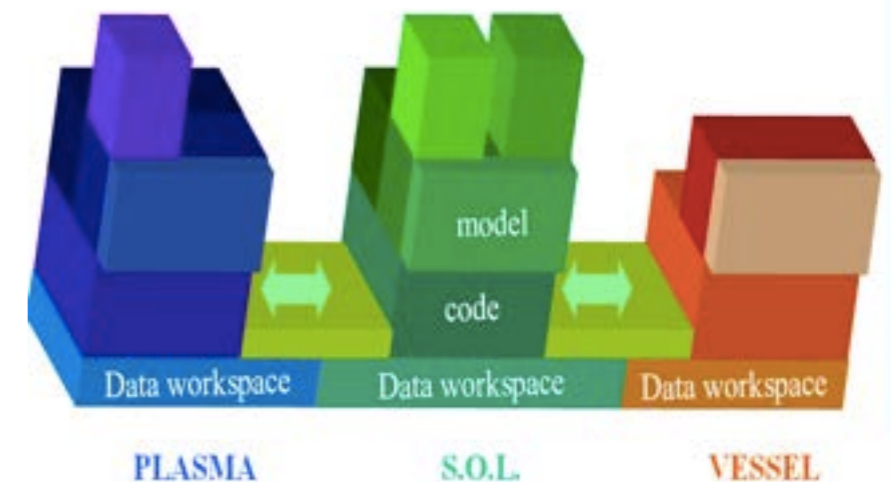
* 解析対象の拡張

- ▶ TASK for ST: 球状トカマク (QUEST や LATE と協力)
- ▶ TASK for RFP: 逆磁場ピンチ (日大と協力)
- ▶ TASK for RT: 双極子磁場 (東大と協力)

欧州における統合コード開発

* ITM-TF: Integrated Transport Modeling Task Force

- ▶ 組織的な統合コード開発（コード連携の標準化）
 - トカマクモデリングの検証と統合のためのフレームワーク開発
 - ITERに向けたモデルとツールの開発と既存の実験に基づく検証
 - 開発されたツールを用いたITERのモデリング
- ▶ EFDA からのサポート
- ▶ 2004 start
- ▶ 2010 時点で 60ppy, 240名参加



* EUFORIA : EU Fusion for ITER Application

- ▶ 大規模シミュレーションコードの開発：並列処理, グリッド
- ▶ I3-INFISO からのサポート
- ▶ 2009時点で15ppy, 45名参加

米国における統合コード開発

* SciDAC: Scientific Discovery through Advanced Computing

- ▶ 2001から
- ▶ DOE program : 5分野の一つ (Fusion Energy Sciences)
- ▶ 大規模シミュレーション⇒ Exa-scale computing
- ▶ Proto FSP として CPES, SWIM, FACETS, CSWPI のプロジェクト

* FSP: Fusion Simulation Project

- ▶ 大規模シミュレーションの統合
- ▶ 2002年から構想
- ▶ Proto FSP は認められたが、
FSP はまだ認められていない。
- ▶ 問題点



- 米国では Whole plasma modeling の評価が低い
- フレームワークの乱立

ITER機構における統合コード開発

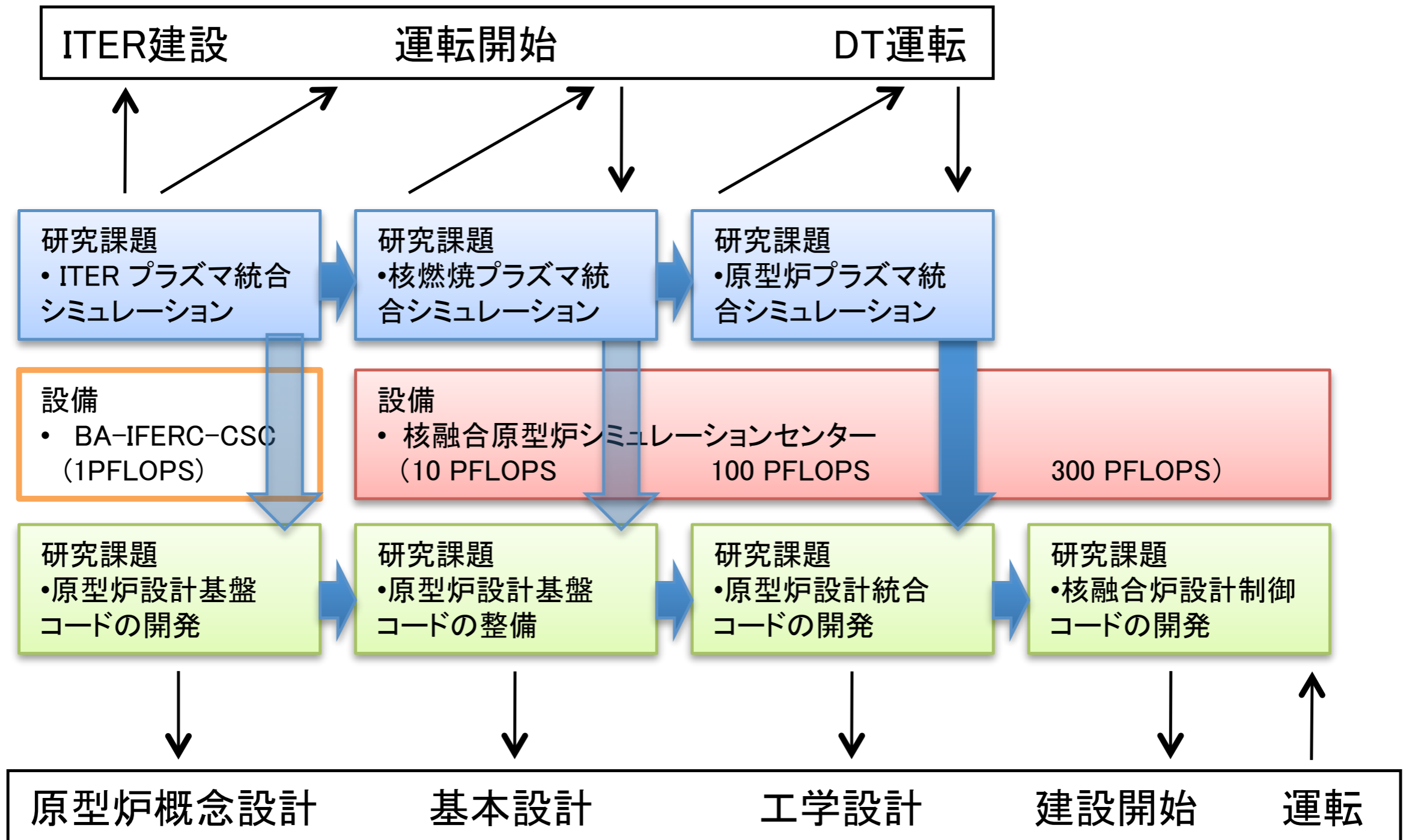
* IMEG: 統合モデリング専門家グループ：国際協力

- ▶ 統合モデル解析コード群の開発
 - IMAS: Integrated Modelling Analysis Suite
- ▶ ITER 参加極から提供されるモジュールを組み合わせて作成
- ▶ 現在の所、欧州主導で概念設計が進行中

* 各極の戦略：米国，欧州，日本：国際競争

- ▶ IMAS に採用されるモジュールの開発
- ▶ 先進的モジュールの開発（妥当性，精度，計算速度）
- ▶ 独自コードによる ITER 実験計画作成での主導権獲得
- ▶ 炉設計につながる統合コード開発

原型炉に向けた炉設計コード開発ロードマップ



各段階の研究課題

	ITER プラズマ 統合シミュレーション	核燃焼プラズマ 統合シミュレーション	原型炉プラズマ 統合シミュレーション
目的	既存のトカマクにおける実験データを再現し、ITERプラズマの時間発展を予測	ITERおよびJT-60SAにおける実験データを再現し、核燃焼プラズマを予測	ITERにおける核燃焼プラズマ実験データを再現し、原型炉炉心プラズマを予測
用途	ITER プラズマにおける物理現象の解明	核燃焼プラズマにおける物理現象の解明	原型炉核燃焼プラズマの予測
	ITER 加熱機器・制御機器等の詳細設計	核燃焼プラズマを記述する物理モデルの検証	原型炉核燃焼プラズマ制御システムの開発
	ITER 運転シナリオの開発	ITER 運転シナリオの最適化	
検証対象	JT-60U 実験データ 国際トカマク分布データベース	JT-60SA実験データ ITER実験データ 国内外トカマク実験データ	ITER核燃焼実験データ 国内外トカマク実験データ

炉設計コードとの統合

* 炉設計システムコード

▶ 現在：0D, 定常

- エネルギーバランス＋ダイバータ条件＋トリチウム増殖

▶ 開発中：1D, 定常

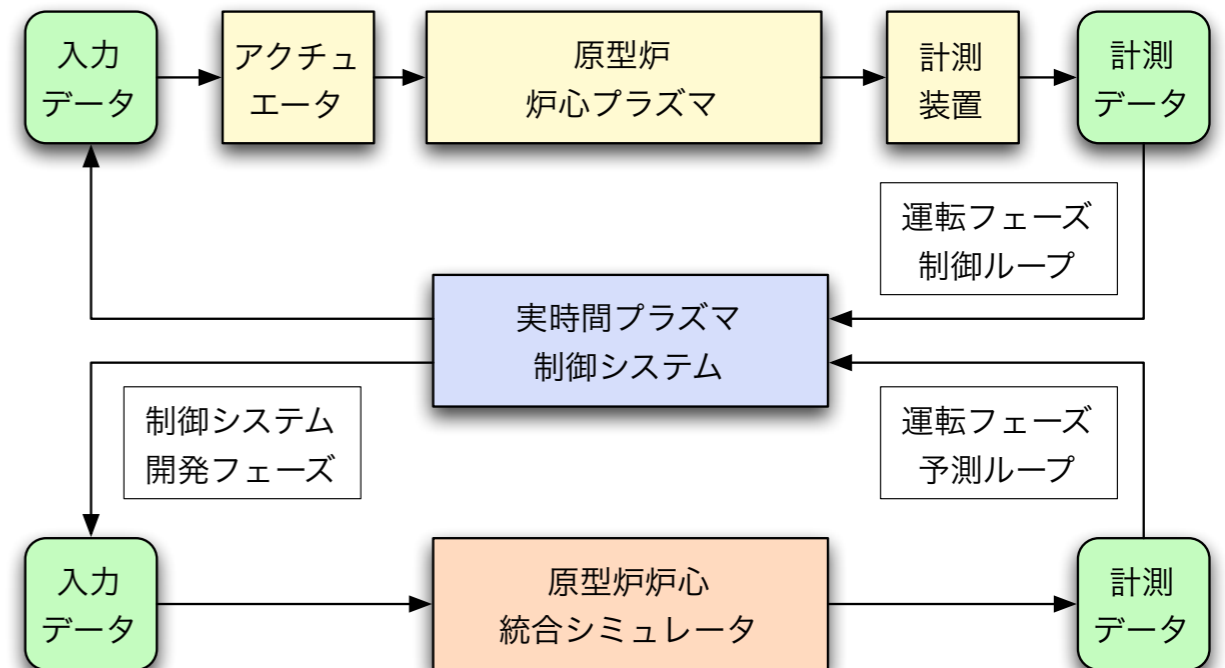
- 平衡＋輸送モデル＋加熱・電流駆動＋ダイバータ＋ブランケット

* 炉設計統合コード

▶ 時間発展：運転シナリオの最適化

▶ 炉心プラズマ統合コード ＋ブランケット統合コード

▶ 計測モデリングを含めた 制御システム開発へ



まとめ

* 理論・シミュレーションによる予測手段の確保について

- ▶ 実験データによって十分に検証された物理モデルにもとづく統合コードにより，核燃焼プラズマの予測が可能になる。

* デジタルデザイン技術を用いた工学設計について

- ▶ 統合コードを用いた動的解析にもとづく設計条件を組み込むことにより，効率的な工学設計が期待される。

* 核融合原型炉シミュレーションセンターの設置について

- ▶ BA 終了後もオールジャパンで ITER の解析，物理モデルの検証，原型炉の設計に関連するシミュレーション研究を推進するためには，高性能計算機システムを運用し，必要な計算コードの開発，高性能化，利便性向上を図るための研究を行うとともに人材育成を図る核融合原型炉シミュレーションセンターの設置が必要。