

## 閉じ込め・輸送研究の課題と今後の展開

京大工 福山 淳

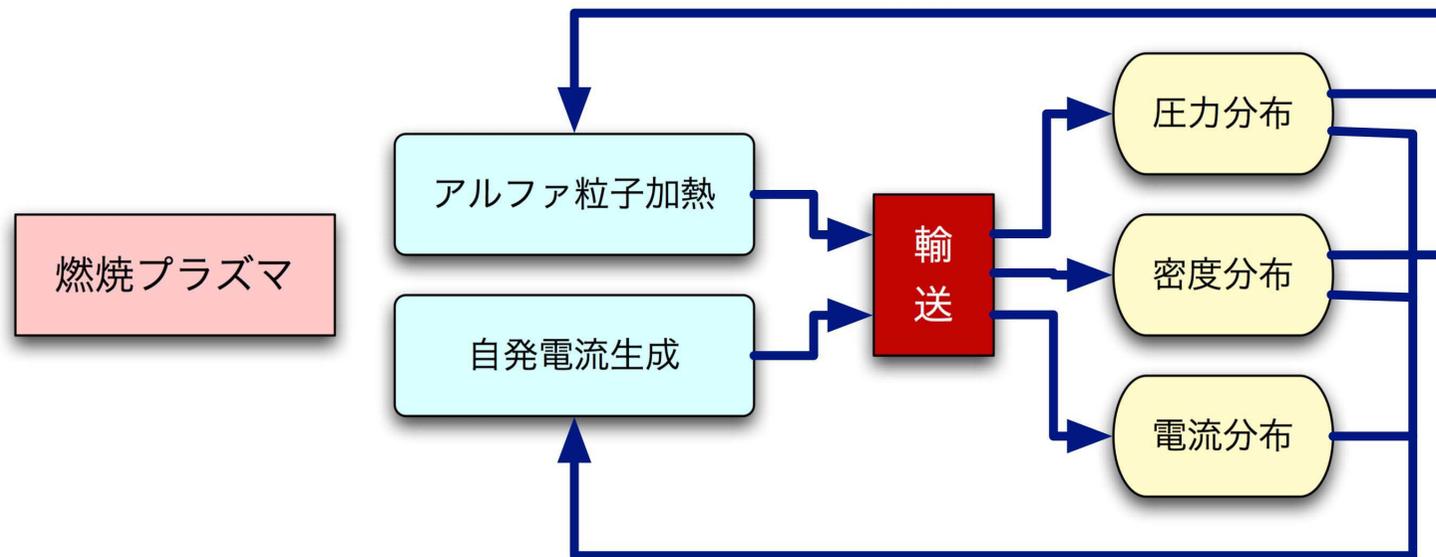
### 内容

- 核燃焼プラズマの閉じ込め・輸送
- 閉じ込め・輸送研究の課題
- 今後の研究の進め方
- まとめ

# 核燃焼プラズマの閉じ込め・輸送

ITERでは、今までのプラズマ物理研究と、どのような点で質的に異なる研究を展開すべきか

- 核融合反応が持続的に維持されている核燃焼プラズマ：高い自律性



- ITER プラズマにおいては、立ち上げ時を除いては、外部からの加熱や電流駆動によって温度分布や電流分布を制御することは容易ではなく、プラズマ密度や回転速度等を通して制御することが重要
- 高い閉じ込め性能を維持するためのプラズマ制御の観点から、輸送と閉じ込めの課題を考える。

# 核燃焼プラズマの閉じ込め制御

---

- **温度分布制御** : 中心部は 粒子加熱が支配的であるが ,  
立ち上げ時と周辺部加熱には有効
- **電流分布制御** : 自発電流割合が高い場合には制御は容易ではないが ,  
拡散しない電流として電流分布形状の決定には有効
- **密度分布制御** : 燃料イオン密度を通して加熱分布を支配  
粒子輸送機構の解明が課題
- **回転速度分布制御** : 径方向電界と結合し , 乱流輸送に影響  
乱流輸送低減の原因か結果か
- **高速イオン分布制御** : 衝突緩和を通して加熱分布に影響  
低ポロイダル磁場中の粒子軌道の解析が必要
- **周辺プラズマ分布制御** : 密度と温度の境界条件として大きく影響  
ダイバータ・SOL・周辺輸送障壁の解明が課題

# プラズマ密度制御

---

- **物理機構**：粒子源と粒子輸送のバランス
  - **粒子源**：ペレット，中性粒子ビーム，ガスパフ：ペレットのモデル化進行中
  - **粒子輸送**：小さな粒子輸送係数
    - 新古典粒子拡散および粒子ピンチ：定量的な検証が必要
    - 乱流粒子拡散および粒子ピンチ：輸送モデルの開発・検証が必要
  - **不純物輸送**：小さな粒子輸送係数
    - 新古典粒子拡散および粒子ピンチ：かなり確立
    - 乱流粒子拡散および粒子ピンチ：輸送モデルの開発・検証が必要
- **実験とシミュレーションの詳細な比較が必要**

# プラズマ回転制御

---

- **物理機構**：乱流抑制に寄与
  - **トロイダル回転**：
    - 駆動源：中性粒子ビーム，高速イオン損失，捕捉イオン（宮本，滝塚他）等
    - 緩和機構：ポロイダル回転通して新古典粘性，衝突緩和，乱流粘性
    - 輸送への影響：乱流輸送モデルの検証が必要
  - **ポロイダル回転**：
    - 駆動源：中性粒子ビーム，イオンバーンシュタイン波，高速イオン損失等
    - 緩和機構：新古典粘性，衝突緩和，乱流粘性
    - 輸送への影響：乱流輸送モデルの検証が必要
  - **径方向電界**：
    - 駆動源：径方向の力の釣り合い，イオン圧力勾配，プラズマ回転
    - 輸送への影響：乱流輸送モデルの検証が必要
- **実験とシミュレーションの定量的な比較が必要**

# 高速イオン分布制御

---

- **物理機構**：有限軌道幅が加熱分布に影響
  - **生成**：核融合反応，中性粒子ビーム，イオンサイクロトロン波加熱
  - **緩和**：有限バナナ軌道幅，衝突緩和
  - 負磁気シア配位において中性粒子ビーム加熱の加熱幅に影響：再評価進行中
  - 負磁気シア配位においては，磁気軸付近のわずかなポロイダル磁界変化により，粒子分布を通して加熱分布に影響を与える可能性がある。
- 解析手法は確立しているが，詳細な解析が必要

# 周辺プラズマ制御

---

- **物理機構**：境界条件として，コアプラズマの閉じ込め性能に大きな影響
  - セパトリクス内側のコアプラズマ周辺部：
    - 比較的温度が低く，外部から圧力分布や電流分布を変化させることが容易
    - L/H 遷移に伴う輸送障壁形成のトリガーや **Greenwald** 密度限界の物理機構の解明が必要
  - セパトリクス外側の **SOL** プラズマ
    - コアプラズマからの高熱流束の受け皿として，解析が急速に進展中
    - 現在は，コアプラズマは **SOL** プラズマ解析の境界条件
    - コアプラズマに対する境界条件としてモデル化が進行中
    - 原子過程や乱流輸送が密接に絡み合っており，定量的な解析は大規模化
- **現在，最も重要なモデリングの課題**

# 今後の研究の進め方

---

- 閉じ込め・輸送研究において
  - 日本がどのような面で主導的な役割を果たせるか
  - そのためにはどのような国内研究体制が必要か
- コアプラズマ・周辺プラズマにおける輸送機構の解明
  - 大型トカマク実験装置の維持：国内重点化トカマク
  - 計測技術の開発：特定領域研究
  - 共同実験の活用
  - 実験データの共有
  - 解析ツールの標準化

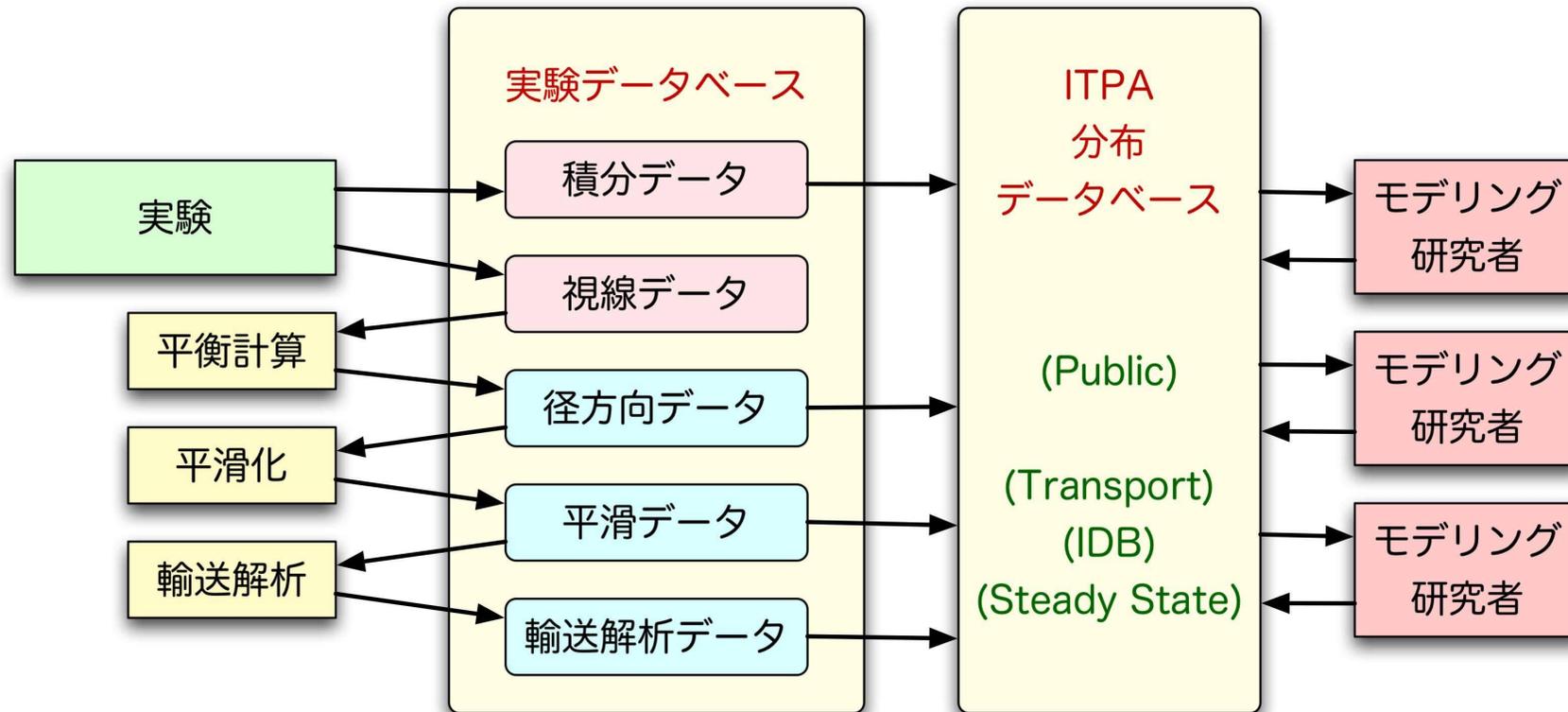
# 共同実験の活用

---

- **ITER における実験**：多国籍 Task Force
- **現在**:
  - **IEA/ITPA 共同実験**：JT-60U, JET, DIII-D, AUG, CMOD, MAST, NSTX 他
  - **EFDA-JET**：EU 内多国籍 Task Force
  - **JT-60U/LHD 共同実験**：NIFS/JAERI 研究協力
  - 日韓共同実験？
- **ITER 実験**
  - 実験提案
  - 運転シナリオ
  - 実験解析
- **今後**，中小型装置でも共同実験の経験が重要

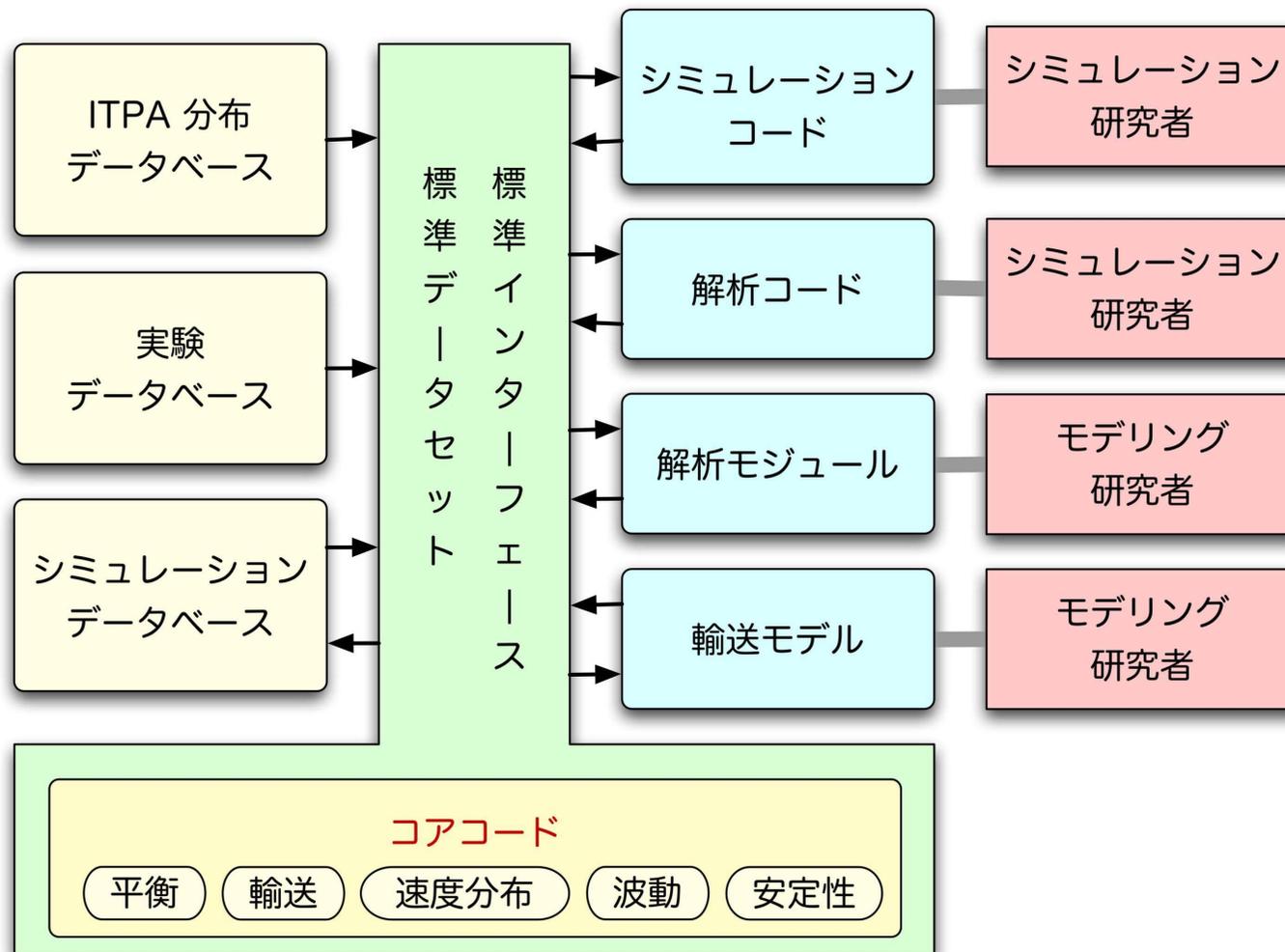
# 実験データの共有

- **Publication** された実験データの公開・利用促進
  - データ解析・モデリング活動の活発化：研究者の拡大
  - 利用しやすい形での実験データ共有：標準化，公開



# 解析ツールの標準化

- データ解析・モデリング・制御システム開発を容易に
  - 標準データセット・標準プログラムインターフェースの策定
  - 基本的解析コードの公開



# まとめ (1)

---

- **高い閉じ込め性能**を維持するためには，
  - **プラズマ密度，プラズマ回転，高速イオン分布，周辺プラズマ等**等の研究がこれまで以上に重要
- これらの課題の多くは，**複数の物理機構が結合あるいは競合して**おり，定量的な解析は容易ではない．
- **さまざまな物理現象**を取り入れることができ，**自己無撞着に解析**することができる**モデリングツール**の開発が必要
- さらに **ITER プラズマに外挿可能なモデリング**を実現するためには，
  - **広範囲の実験データとの定量的な比較**
  - **第一原理シミュレーションによる裏付け**が不可欠

## まとめ (2)

---

- これまでの日本におけるプラズマ実験研究は、内部輸送障壁形成や長時間電流駆動等、インパクトのある実験結果を示しながら、定量的な物理機構の解明を欠いている場合が少なくなかった。
- これからのITER に向けての研究においては、実験と理論・シミュレーションに加えて、実験データを十分に把握し、定量的な解析を実現して、物理機構を解明するモデリングを重視することが必要。