核融合シミュレーションとその広がり

核融合科学研究所　シミュレーション科学研究部　中島徳嘉
大阪大学　レーザーエネルギー学研究センター長　三間圀興

発表の趣旨
核融合シミュレーションは、大規模シミュレーションの典型として発展し、プラズマ物理は、プラズマのモデリング・数値計算手法を通して核融合シミュレーションの学術基盤を形成している。

1. プラズマの特徴とシミュレーション
2. 磁場閉じ込め核融合シミュレーション
3. レーザー核融合シミュレーション
4. プラズマ物理シミュレーションの広がり
5. 共同研究ネットワーク（核融合研究コンソーシアム）
6. 人材育成等
7. おわりに

1.　プラズマの特徴とシミュレーション

- プラズマの特徴

  階層性と階層間相互作用

  異なる時空間スケールの揺らぎの共存と相互作用

  例：高エネルギー粒子と背景流体プラズマ、乱流輸送、磁気再結合等

  複合物理の存在

  多様な物理、例えば原子物理、固体物理、プラズマ物理が共存する複合系

  例：アブレーション、プラズマ－壁相互作用等

  ⇒ 第一原理シミュレーションのみならず、多様なシミュレーションモデル開発が必要

- シミュレーションの現状（プラズマ・核融合はシミュレーション研究をリード）

  要素物理から多階層・複合物理シミュレーションへと展開中

  核融合シミュレーションが、米国SciDacプログラムの主要要素

- シミュレーションの基本要素

  モデリング（第一原理式から粗視化されたモデルの構築）

  数値計算手法（計算機アーキテクチャーに適した高速アルゴリズム）

  検証（理論・実験との比較、ベンチマークテスト）

  ⇓

- 関連分野も含む広範なモデル開発が、核融合シミュレーションの発展のために必要

2.　磁場閉じ込め核融合シミュレーション（中島、徳田、福山）

現状の課題　長時間核燃焼の実現 ⇒ 核融合をエネルギー源とした新型炉へ

核燃焼（D + T → He + n）の条件	課題（障害）となる現象	シミュレーションの役割
生成されるα粒子（3.5MeV）がプラズマを加熱して10keV以上を維持	巨視的な不安定性が発生してアルファ粒子が損失	プラズマの特性予測（高エネルギー粒子・電磁流体連結シミュレーション）
高温プラズマ（10 keV以上）実現して核融合反応を持続	乱流の発生・発達が熱損失を引き起こす	プラズマ密度・温度分布の予測（乱流輸送シミュレーション）

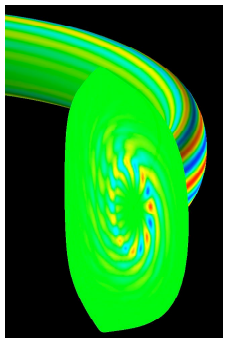
モデリング：　階層間相互作用の導入

高エネルギー粒子・電磁流体連結モデル　α粒子運動（5D）+磁気流体運動（3D）
乱流輸送モデル　電子/イオン運動（5D） + 帯状流（3D）
} 統合

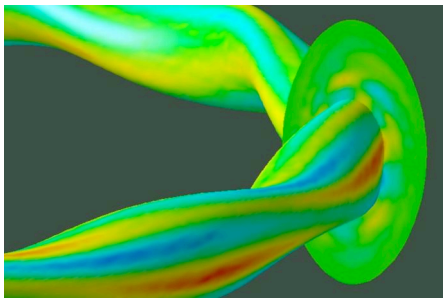
モデリング・数値計算手法の検証：多様な閉じ込め磁場配位で検証

例：高速イオンの損失

2D平衡



⇐ MEGA ⇒



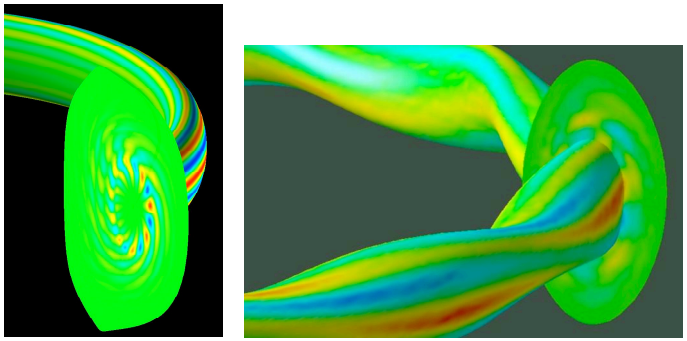
3D平衡

2.　磁場閉じ込め核融合シミュレーション（中島、徳田、福山）

現状とその展開

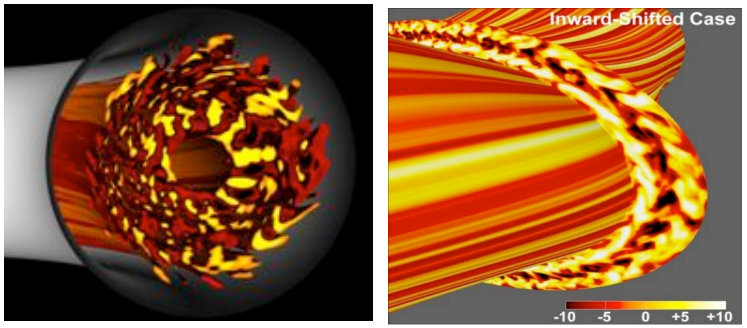
物理要素から多階層連結シミュレーションへ

高速イオン損失（巨視スケール）



- TFTR実験結果の再現
- LHD実験結果の解釈

乱流輸送（微視スケール）



- 温度・密度分布形成過程の解明
- 輸送の磁場配位依存性の解明

NIFS
プラズマ
シミュレータ

BA計算機

次世代計算機

α粒子加熱と
乱流輸送を統合化
した長時間核燃焼
シミュレーション

次世代計算機による本格計算のための準備

多階層統合化のためのモデリング・計算手法の構築・検証・改良
（LHD、JT60U実験結果と実スケールシミュレーションでの比較）

複合物理過程の統合化へ向けた検討

周辺プラズマ領域の影響

2.　磁場閉じ込め核融合シミュレーション（中島、徳田、福山）

5年後の目標とその後の展開

5年後の目標

長時間核燃焼統合シミュレーションの実現（Peta FLOPS 10日以上）

乱流による熱損失の予測

＋

エネルギー出力の予測

既存装置（LHD）実験の予測
ITER実験の事前予測

ITER実験時間獲得に向けた国際競争力の確保・向上

その後

核融合炉心シミュレータの実現

モデリングによる周辺プラズマ領域の複合物理過程の導入

- 熱損失を最小化、エネルギー出力を最大化する手段の確立

核融合材料開発研究（材料シミュレーション）
魅力的な材料の開発

核融合炉シミュレータ（数値試験炉）の実現（炉の開発期間短縮と開発コスト低減を実現）

3.　レーザー核融合シミュレーション（三間、長友、山際）

現状の課題

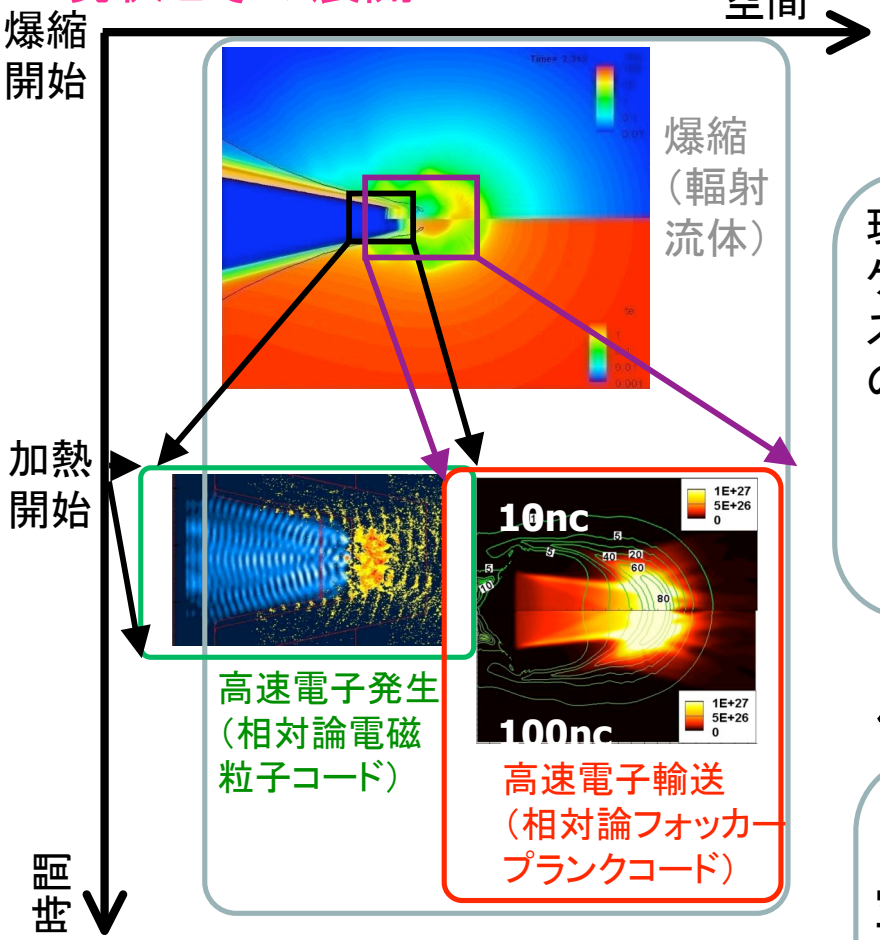
高速点火核融合のマイルストーン	未解明な現象	シミュレーションの役割
高密度プラズマを加熱し、イオン温度5 keVを得る。 (FIREX-I；駆動型燃焼の実現)	高速電子発生・輸送の詳細なメカニズム	高速電子発生・輸送のメカニズム解明と、要素物理に基づくコード群の統合シミュレーションによる数値予測手法の確立
大規模な高密度プラズマを加熱し、α粒子による加熱を確認する。 (FIREX-II；自己燃焼条件の解明)	大規模高密度プラズマの形成。α粒子加熱のメカニズム	実スケールの大規模シミュレーションの実施。加熱効率の向上。高密度プラズマ形成の最適化。実験炉の炉心設計

モデリング：　階層間相互作用の導入
例：爆縮によって生成される磁場の高速電子輸送への影響、高速電子の帰還電流の影響

統合シミュレーションによるコード検証、実験炉の炉心プラズマの設計：
高速点火核融合炉の実現には、大規模な高密度プラズマでの加熱・燃焼の実証が必要である。そのためには、大規模・実スケールシミュレーションの実施が不可欠である。

3.　レーザー核融合シミュレーション（三間、長友、山際）

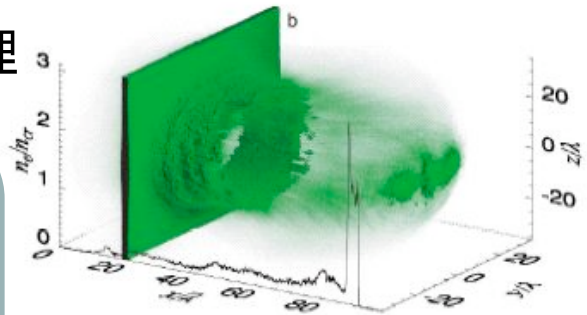
現状とその展開



高速点火の多階層シミュレーション；異なる3つのコードを時間的、空間的に階層化したコードが完成している。

要素物理のシミュレーション研究では

例；粒子加速の物理



現状；　2次元で、実スケールよりも小さいサイズで定性的な物理現象の解明が中心

格子点数；~10^7 個
粒子数；~10^9 個
メモリー；250 GB

5年後；2次元実スケールのシミュレーションの実施

格子点数；~10^9 個
粒子数l ~10^{11} 個
メモリー ；25 TB

例；輻射流体の物理

現状；　2次元で、空間格子点数
空間格子点数；~10^5
輻射エネルギー空間格子点数；64
計算時間；
128GFLOPS x15 days

5年後；　3次元による定量的な解析が必要
空間格子点数；~10^7
輻射エネルギー空間格子点数；128
計算時間；
100TFLOPS x10 days

3.　レーザー核融合シミュレーション（三間、長友、山際）

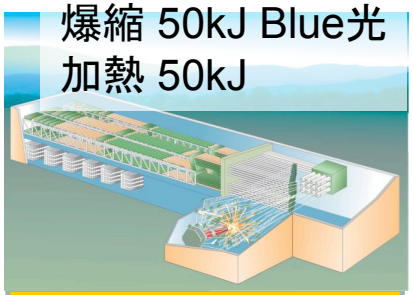
5年後の目標とその後の展開

高速点火原理実証 T> 5kV加熱 → 点火・燃焼の実証 Q> 5 →

FIREX-I 稼働

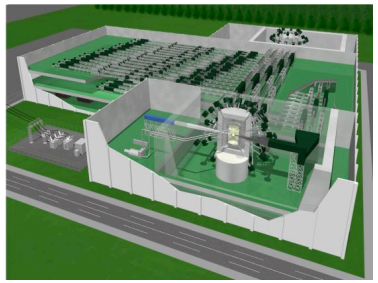
爆縮 10kJ Green光
加熱 10kJ

FIREX-II 判断



爆縮 50kJ Blue光
加熱 50kJ

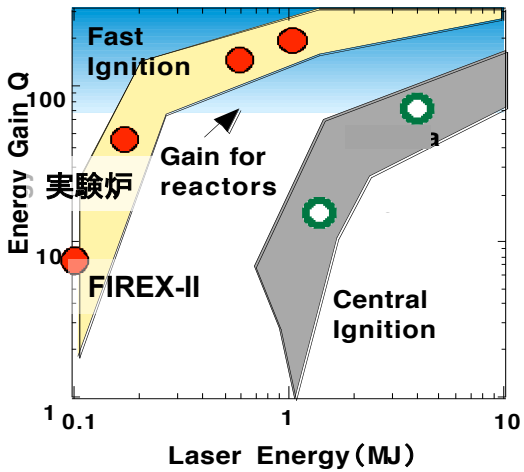
FIREX-II 稼働



レーザー核融合実験炉の設計

年度	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28

実験解析、コード検証　　実験指針　　コード検証



FI^3
（高速点火統合コード）

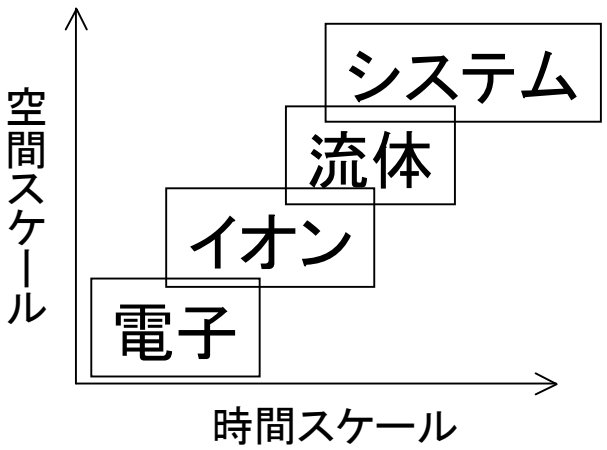
5年後；階層間相互作用の導入によるコードの精度向上。FIREX-I実験結果との比較・コード検証を得て、統合実験の再現。

10年後；実験炉の炉心の実スケールシミュレーションによる最適化設計（爆縮効率、加熱効率の最適化）

4.　プラズマ物理シミュレーションの広がり（草野、堀内）

シミュレーション科学としてのプラズマ物理の特徴と課題

階層性



複合性

- 太陽対流層、彩層、コロナ
- 太陽圏
- 地球磁気圏 電離圏

学際性

- 核融合プラズマ
- 宇宙プラズマ
- プラズマ応用
- プラズマ物性論

現状：個別要素モデル（電磁流体、粒子プラズマモデル）の大規模化

→　各スケールにおける非線形現象の理解に貢献

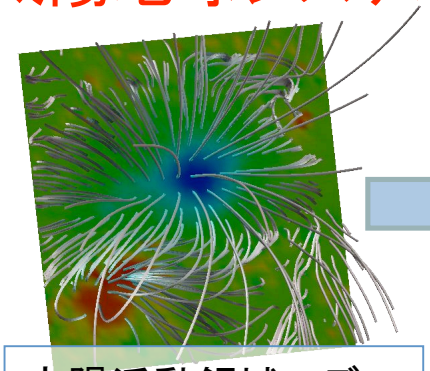
課題：スケール間相互作用、領域間相互作用の理解と予測

- システムとしての宇宙プラズマ環境の理解
- 宇宙天気の数値予報：太陽フレア・磁気嵐予測、高エネルギー粒子予測
- 天文学、宇宙科学への貢献：天体ダイナモ、磁気リコネクション、粒子加速

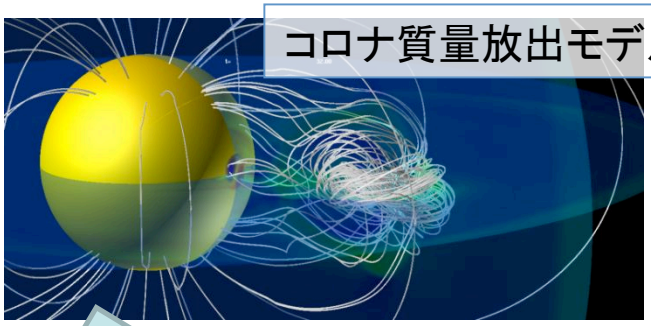
⇒ **核融合の基本物理の深化、モデリング・数値計算手法に貢献**

4.　プラズマ物理シミュレーションの広がり（草野、堀内）

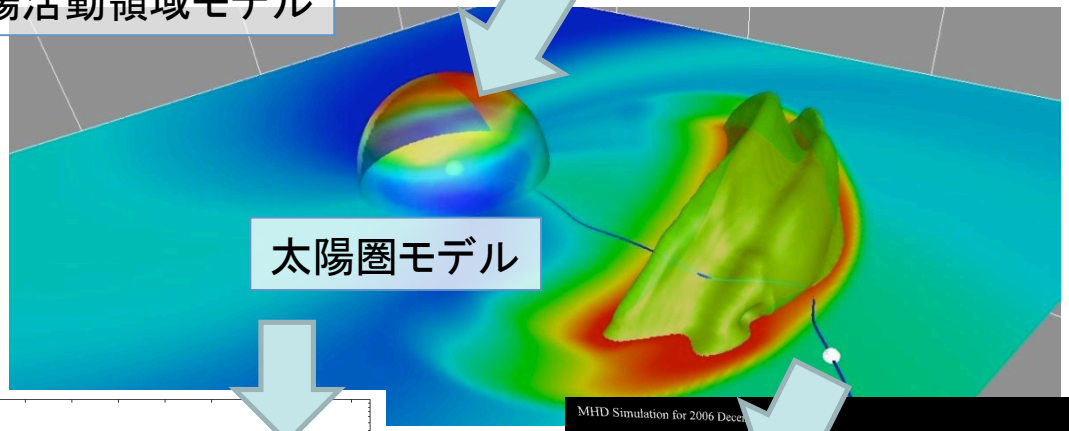
太陽地球システムダイナミクスの理解と予測



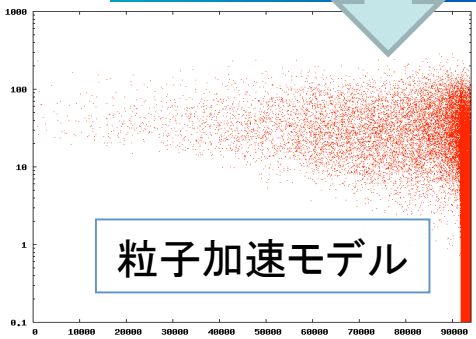
太陽活動領域モデル



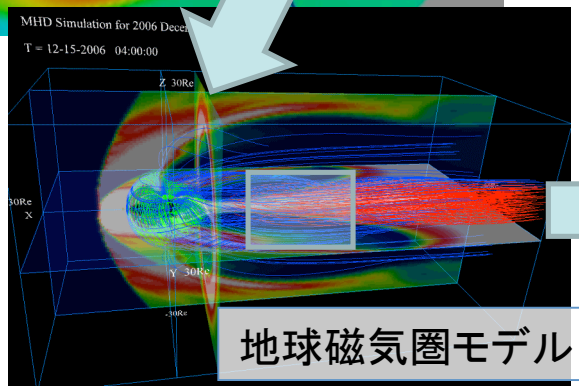
コロナ質量放出モデル



太陽圏モデル



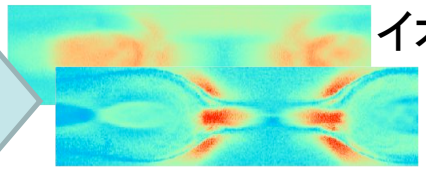
粒子加速モデル



地球磁気圏モデル

個別要素モデルの集合からシステムシミュレーションへ

- 太陽高エネルギー粒子、放射線帯の形成機構の解明
- 太陽フレア、磁気圏サブストームの理解
- 磁気圏電離圏結合のモデル化
- 太陽コロナ加熱の解明



イオン

電子

ミクロスケール
リコネクションモデル

4.　プラズマ物理シミュレーションの広がり（草野、堀内）

5年後の目標とその後の展開

5年後の目標

太陽フレア爆発の数値予測

太陽活動領域の形成から消滅までのマルチスケールシミュレーション

太陽地球システムの擾乱予測

衛星観測データとの多次元同化シミュレーションによるコロナ質量放出の再現と予測

磁気圏不安定性の運動論解明

粒子流体連結シミュレーション
マクロ流体モデル：システム全体を多層格子化（100TB,100Tflops）
ミクロ粒子モデル：電子スケールから10^2イオンスケールまで（1PB, 4Pflops）

その後

太陽圏統合シミュレーション
- 比較惑星磁気圏学の創成
- 太陽系周辺環境の解明
- 宇宙線による太陽圏診断

宇宙環境の定量予測と影響評価
- 太陽黒点活動予測
- 衛星障害への予報技術確立

宇宙と地球環境の相関解明
- 環境自然変動の理解

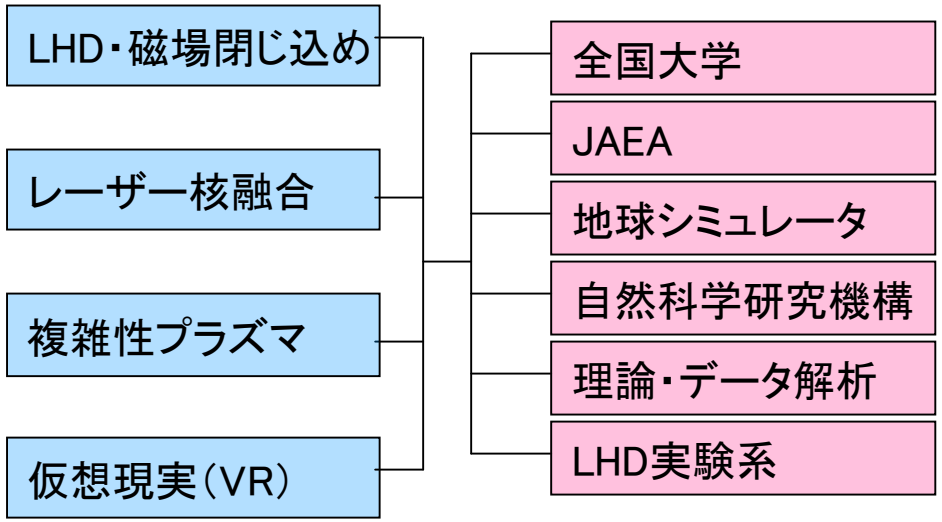
天体プラズマシミュレーションへの拡張と応用
- 地球型惑星の環境予測
- 惑星形成過程の解明

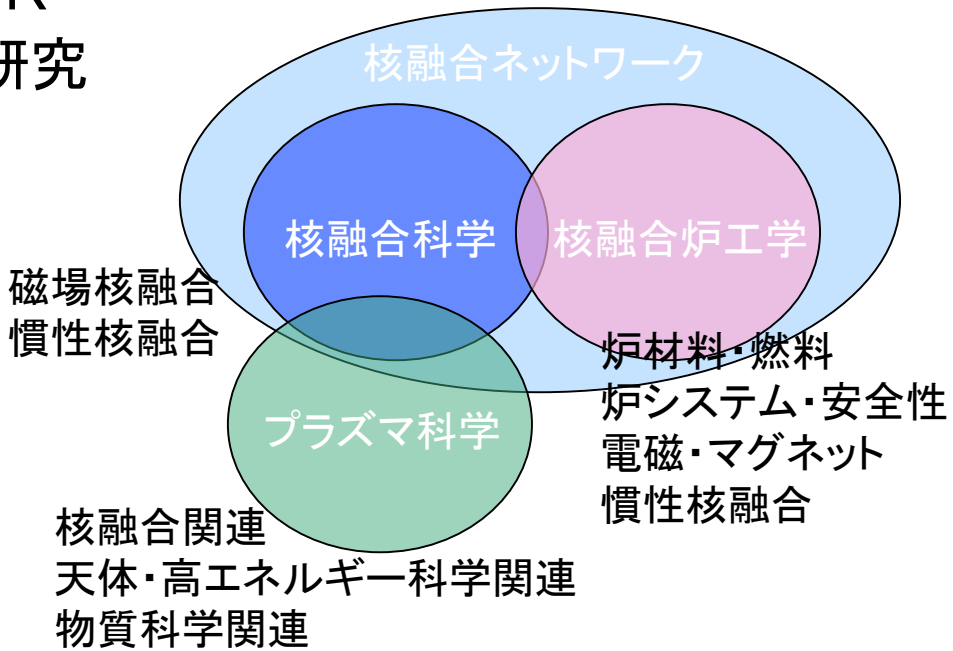
5. 共同研究ネットワーク（*核融合研究コンソーシアム*）

大学共同利用機関法人
NIFS シミュレーション科学研究部

- 3シミュレーションプロジェクト + VR
- 理論、シミュレーション科学共同研究

核融合ネットワーク
（プラズマ核融合学会、
日本物理学会第2領域等）





シミュレーション研究を効率的に
進める共同研究体制

大学等における核融合学術
研究の全国展開ネットワーク

6. 人材育成、連携研究、産業界との連携

理研次世代スパコン、
関連施設

日本原子力研究開発機構(JAEA)
- 那珂研究所
- システム計算科学センター
- 関西光科学研究所

核融合科学研究所（NIFS）
シミュレーション科学研究部
及び理論・データ解析研究系
- 理論、シミュレーション科学共同研究
- 総合研究大学院大学　核融合科学専攻
- 連携大学院
- 特別共同利用研究員制度

国際高等研究所
- 多階層連結コンピューティンググフォーラム
  コピーマートによるコード等
  シミュレーション知財権の共有

九州大学
- 工学院　総合理工学研究科
- 応用力学研究所

京都大学
- 工学研究科
- エネルギー科学研究科
- 理学研究科
- エネルギー理工学研究所

山口大学

筑波大学

摂南大学

大阪大学
- 工学研究科
- レーザーエネルギー学研究センター

7. おわりに

- 核融合プラズマ研究において大規模シミュレーションは、実験・理論と共に、必須の構成要素であり、核融合研究は極めて大規模なシミュレーション資源を必要とする典型例として、常に最先端のスパコンを活用してきた。

- ITER、LHD、FIREX 等の大型核融合プロジェクトの推進には、次世代スパコンによる大規模シミュレーションは極めて有効である。

- 大学、NIFS、JAEAの共同研究ネットワークに基づく大規模シミュレーション研究は、核融合の開発研究並びに学術研究を大きく飛躍させる。

- 核融合とプラズマ物理シミュレーションは、連携して発展し、大きな学術的広がりを持つと共に、モデリング、数値計算手法等で補完関係にある。

- 大学、NIFS、JAEAの共同研究ネットワークは、核融合分野とその関連分野の大規模シミュレーション研究を担う人材育成を加速する。