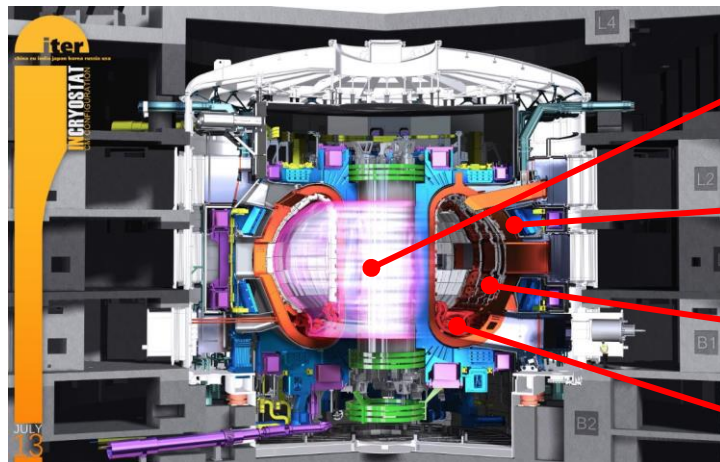


2024年 2月28日  
核融合エネルギーフォーラム  
全体会合

**激動する世界のフュージョンエネルギー開発競争の中で  
学術研究の果たすべき役割**

核融合科学研究所  
吉田善章



**炉心プラズマ**：閉じ込め性能・システム安定性

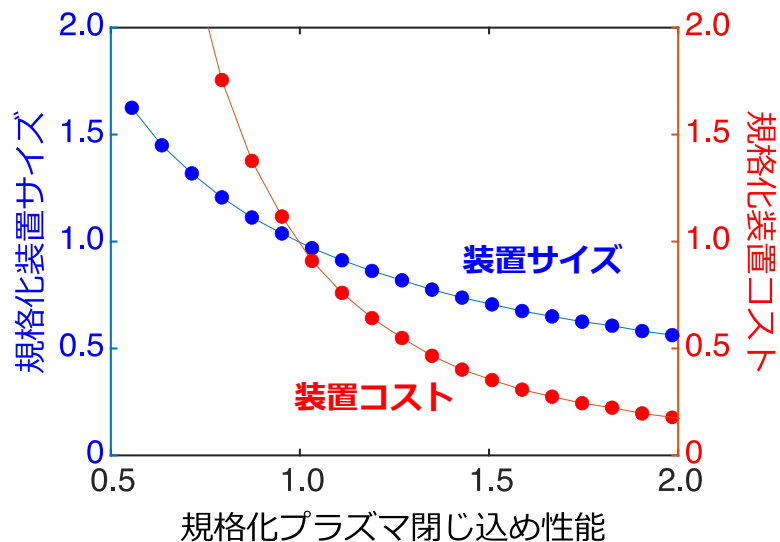
**超伝導マグネット・低温技術**：高温超伝導，水素・窒素冷却

**炉材料**：照射損傷，放射化

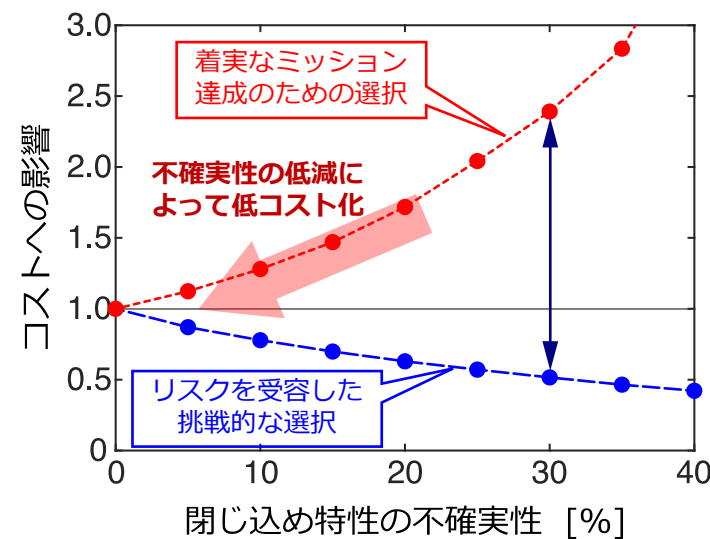
**ダイバータ**：超高熱流束

**指導原理**

- ✓ 核融合の多様な利用
- ✓ 高性能概念への挑戦



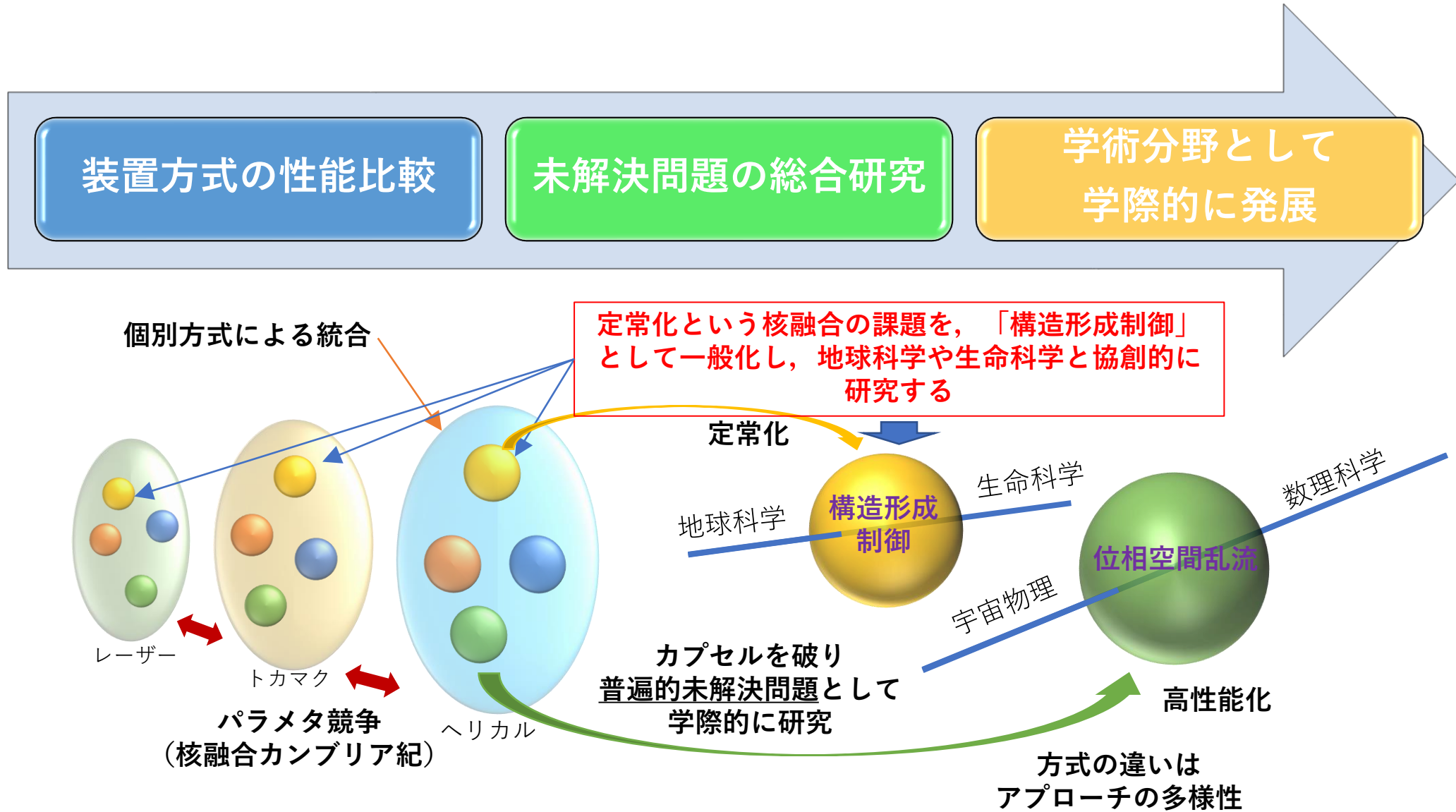
閉じ込め性能の向上により，コンパクトで経済的な核融合炉が実現\*



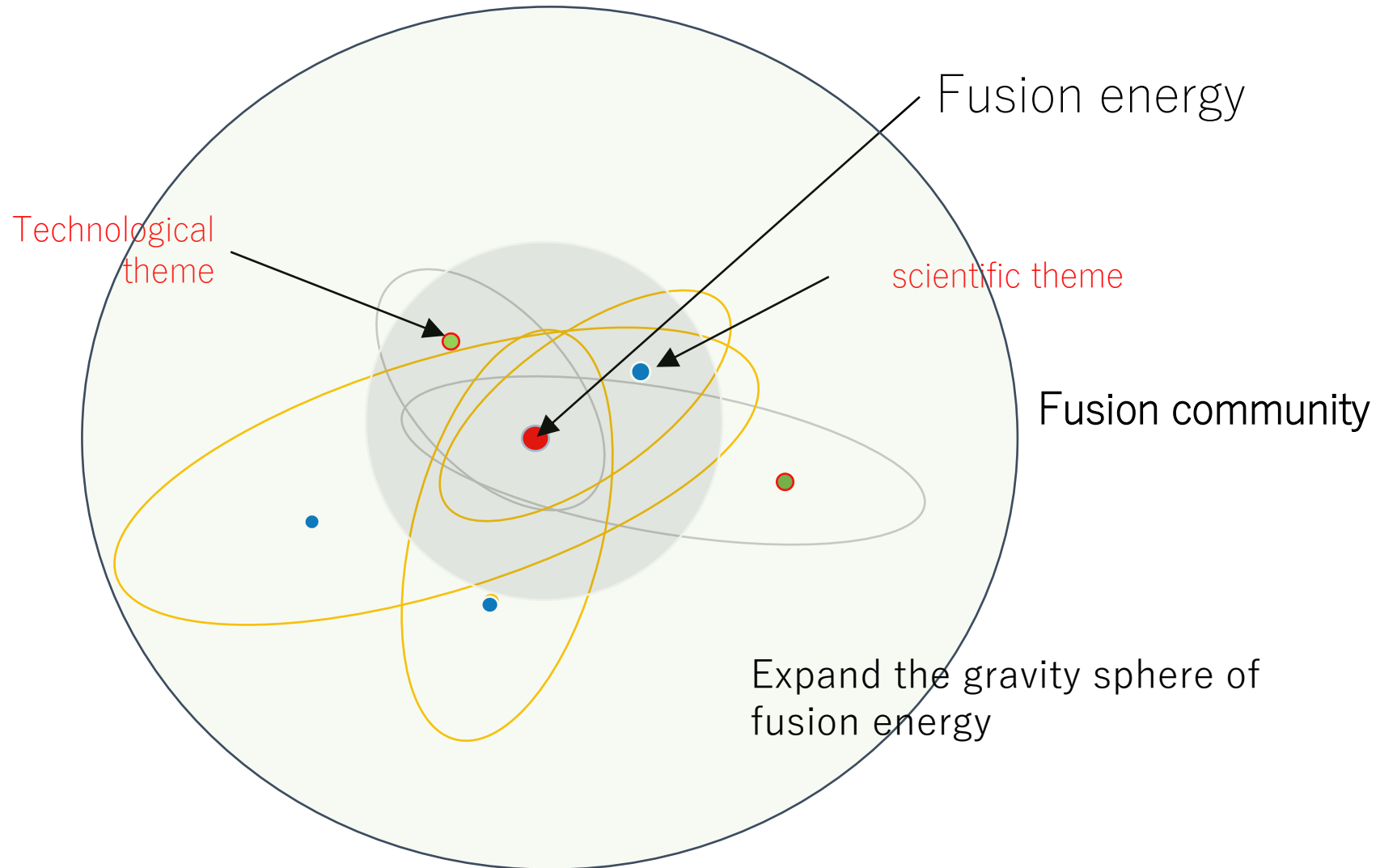
プラズマ特性の高精度予測が核融合炉のコスト削減にインパクト\*

\*Fusion Engineering and Design 86 (2011) 2879 に基づく評価

# 核融合科学のパラダイム転換 — 学問的進化を先導

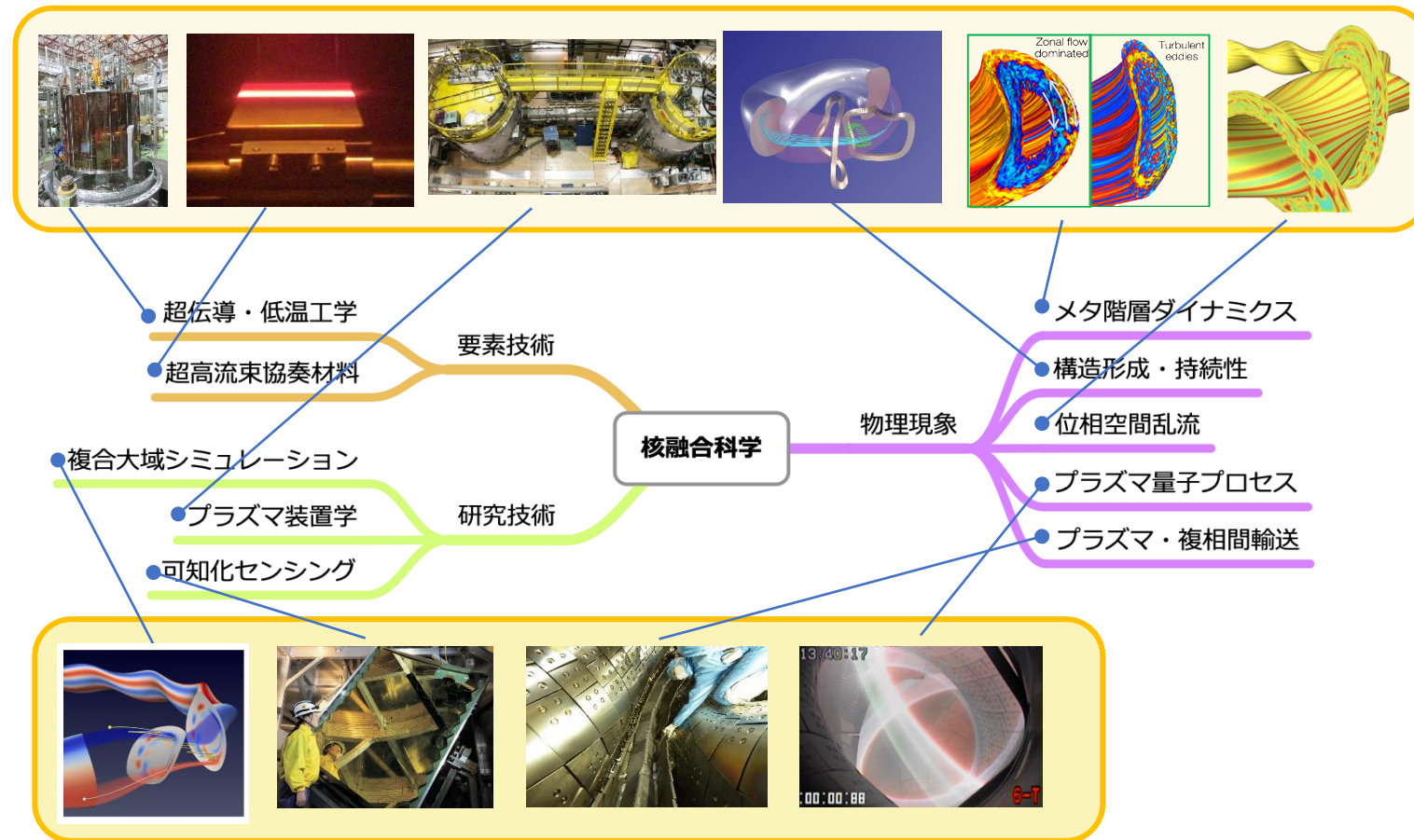


# Ellipse model of aufheben → expand dimension



# ユニット体制によって広がる学際連携

## 核融合の未解決問題に学際的に取り組む



# NIFSのユニット体制 ユニット一覧 (1/2)

核融合の「未解決問題」を「学術的に定式化」し「学際的な共同研究体制」を構築して取り組む

| ユニット名   | 軸         | 研究テーマ  |
|---|-----------|--|
| <b>メタ階層ダイナミクス</b><br>meta-hierarchy dynamics                        | ダイナミクス・時空 | 核融合プラズマを高性能化する鍵は、自発的に生まれてくる様々なスケールを持つ揺らぎや構造を制御することである。そのためには、マイクロとマクロが連関する複雑現象を表現する物理モデルを構築し、そこに内在する普遍的メカニズムを解明する必要がある。既定の階層分離を前提としないメタ的な視点からダイナミクスを捉え直し、生体や経済システムなど他の複雑系との類似性と相違を明らかにすることで、核融合科学から集団現象の科学に新しい学理を確立する。                     |
| <b>構造形成・持続性</b><br>Structure formation and sustainability           | システム      | 核融合炉の高効率化・小型化を目指す研究において、プラズマの閉じ込め改善と定常化が中心的な課題である。その鍵となるのが、プラズマが自発的に内部構造を形成し、維持しようとするメカニズムを理解することである。我々は、対称性やエントロピーといった物理学の根本的な概念を再検討することで、構造形成の原理を解明する。それに基づいて、高性能の閉じ込め配位を探索する。プラズマの構造形成は、磁気圏や降着円盤などの天体にも共通する現象であり、宇宙を理解する基本的な学理となる。      |
| <b>位相空間乱流</b><br>Phase space turbulence                             | 揺らぎ・乱流・輸送 | 経済性の高い核融合炉を実現するため、炉心プラズマの高性能化が求められる。プラズマの性能を決定する要因の一つが、乱流によるプラズマ熱伝導・輸送である。我々は、プラズマを構成する粒子の運動の多様性に注目し、粒子集団が創発する揺らぎ(マイクロ集団現象)と乱流輸送のメカニズムを解明する。マイクロ集団現象の物理は、核融合イノベーションの指導原理となると同時に、宇宙・天体など他のプラズマ現象に通底する、非平衡・非線形物理の根本的な学理となる。                  |
| <b>プラズマ量子プロセス</b><br>Plasma Quantum Processes                       | 素過程・相互作用  | 核融合システムの中では、内部自由度を持たない粒子たちの集団運動モデルでは記述できない様々な物理現象が起こり、核融合炉の性能を決める大きな要因となる。我々は、粒子内の電子状態の変化や電磁波との相互作用、あるいはスピン等の効果を支配する量子プロセスを正確に扱うことで、非平衡プラズマや高密度プラズマの物理モデルの構築を目指す。この問題は、天体・宇宙プラズマ物理、さらには原子核物理にも共通する普遍的な課題であり、プラズマ量子プロセスの新たな展開をもたらす。         |
| <b>プラズマ・複相間輸送</b><br>Transports in Plasma Multi-Phase Matter System | 異相連成現象    | 核融合炉では、ダイバータへの強大な熱・粒子負荷が大きな問題となる。我々は、極限的条件下の物理機構に分け入り、プラズマと、物質の気相・固相・液相という異相間の相互作用を研究する。環状および直線型プラズマ装置による実験と計算機シミュレーションを用いて、複雑な輸送現象を解明し、核融合炉の成立条件を明らかにする。プラズマと異相間の相互作用の研究は、宇宙におけるプラズマと物質の相互作用研究などにも共通するものであり、生命の素となる物質創成の物理・化学過程の解明にもつながる。 |



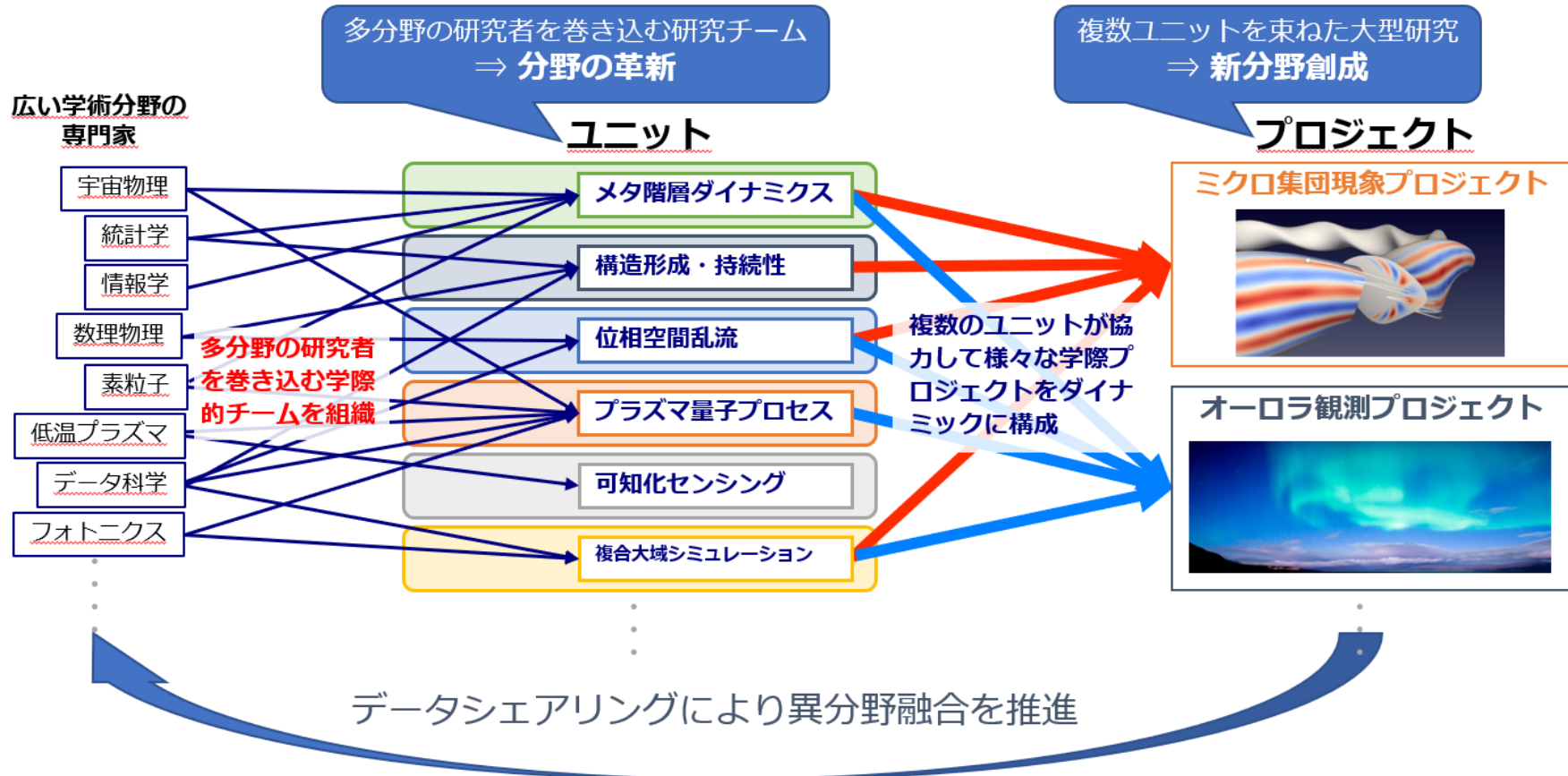
核融合の「未解決問題」を「学術的に定式化」し「学際的な共同研究体制」を構築して取り組む

| ユニット名   | 軸      | 研究テーマ   |
|---|--------|---|
| <b>可知化センシング</b><br>S&I: Sensing and Intellectualization     | 計測・データ | <p>超高温プラズマの挙動を観測し、予測し、制御することは、核融合炉の高性能化に必須の課題である。我々は、飛躍的に高精度なプラズマ計測法を開発し、プラズマをホリスティックかつ精密に観測できるシステムを構築する。さらに、データサイエンスを駆使して解析し、視覚・聴覚・触覚などの情報へと変換して「可知化」する。計測・データ解析・表現手法を専門とする研究者らが一丸となって知的探究プロセスを体系化するこの取り組みは、核融合科学にとどまらず、多くの科学分野における現象理解に革新をもたらす。</p> |
| <b>プラズマ装置学</b><br>Plasma Apparatus                          | 装置学・技術 | <p>核融合研究のゲームチェンジャーとなる破壊的イノベーションの重要性が指摘されている。そのためには、プラズマの複雑な集団現象に関する学理を深化させることで、革新的なプラズマ技術を生み出す挑戦が必要である。核融合炉心に限らず、プラズマの斬新な応用を作業仮説にすることで、他分野との連携・融合を進め、集団現象の未解明な創発性に光を当てる。プラズマ装置学のイノベーションは、様々な自然科学研究と科学技術の新しい地平を拓く。</p>                                 |
| <b>複合大域シミュレーション</b><br>Complex Global Simulation            | 計算科学   | <p>核融合プラズマの内部で起こる複雑現象を解明するために、シミュレーション研究が重要な役割を果たす。超高温プラズマでは、ミクロな粒子運動からマクロな揺らぎが創発される。我々は、多階層を連結する計算手法やデータ科学を活用する計算手法を独創的なアイデアで開発し、プラズマ全体のシミュレーションを実現することで、核融合燃焼プラズマの正確な予測を目指す。この手法は宇宙・天体プラズマにも適用可能であり、シミュレーション科学の新たな展望を開く。</p>                        |
| <b>超高流束協奏材料</b><br>Ultrahigh-flux concerting materials      | 材料学    | <p>強力な粒子線と熱に曝されること(超高流束)による材料の劣化は核融合炉のアキレス腱となり得る。炉材料の耐性向上という核融合の核心課題を解決するには、材料変質に関わる物性物理の深い理解と制御技術が必要である。我々は、変質を抑えるという従来の発想を転換し、負荷が大きいためこそ発現する強化・機能因子を「適応」と捉え、自ら変化して超高流束と協奏する材料の創製を目指す。このアプローチは、過酷環境が避けられない原子力、宇宙、航空、化学プラント材料にも革新をもたらす。</p>           |
| <b>超伝導・低温工学</b><br>Applied Superconductivity and Cryogenics | 低温     | <p>超伝導と低温の技術におけるイノベーションは、核融合研究のゲームチェンジャーとなる大きな可能性をもっている。我々は、高温超伝導などの先進的な超伝導材料を核融合炉用のマグネットとして実用化するため、線材化・大電流導体化の技術や、安定的に強磁場を発生できるコイルシステム技術、水素を用いる経済的な冷凍技術、また水素の生産・利用に関する基礎技術の研究を推進する。超伝導や水素利用の技術革新は、カーボンニュートラルでエネルギー持続可能な新たな社会環境の実現に広く貢献する。</p>        |

# ユニットの generative な機能

## 様々な最前線へ展開するユニット連合

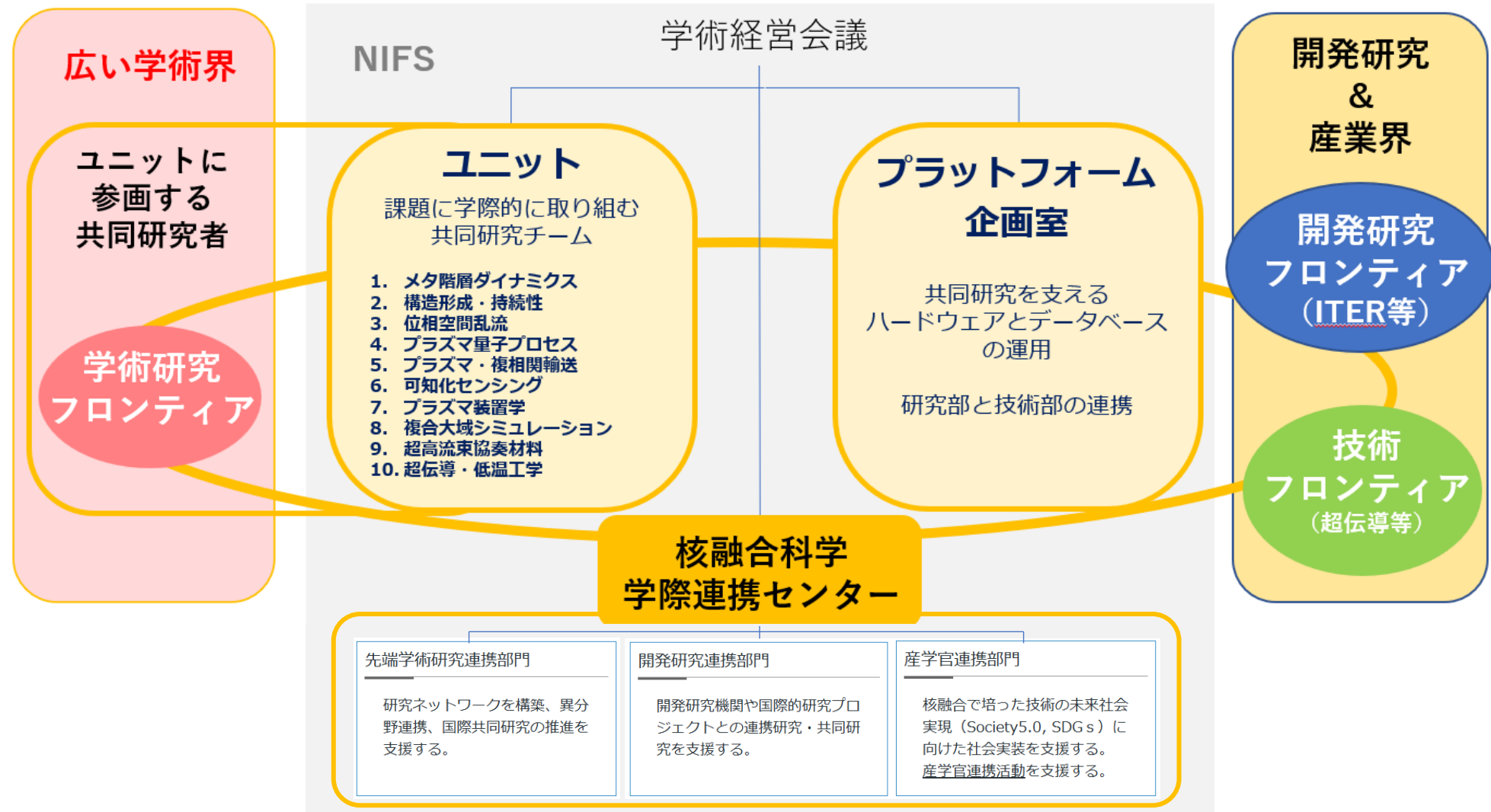
「研究者」「ユニット」「プロジェクト」の階層をダイナミックに構造化する





# 核融合科学研究所の新しい組織体制（2023年度～）

- ユニット：学際的研究テーマの具体化
- プラットフォーム企画室：研究施設運用の組織的合理化
- 学際連携センター：学際的連携（3つのベクトル）のイニシアティブ



# ロードマップ2023に記載された核融合学術研究の計画

研究基盤と学術的成果をシームレスに発展させ、世界的リーダーシップを発揮



## 超高性能プラズマの定常運転の実証

(自然科学研究機構核融合科学研究所)

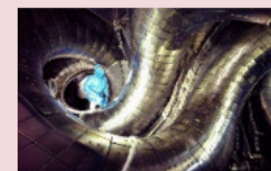
我が国独自のアイデアによる「大型ヘリカル装置(LHD)」により、高温高密度プラズマの実現と定常運転の実証を目指す。また、将来の核融合炉の実現に必要な学理の探求と体系化を目指す。



## 超高温プラズマ学術研究基盤 (LHD) 計画

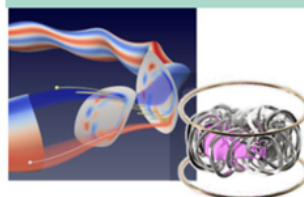
(自然科学研究機構核融合科学研究所)

超高温プラズマを安定的に生成できる大型ヘリカル装置 (LHD) を学際的な研究基盤として活用し、その世界最高性能の計測システムによって、核融合に限らず、宇宙・天体プラズマにも共通する様々な複雑現象の原理を解明。



## 超高温プラズマの「マイクロ集団現象」と核融合科学

(自然科学研究機構核融合科学研究所)



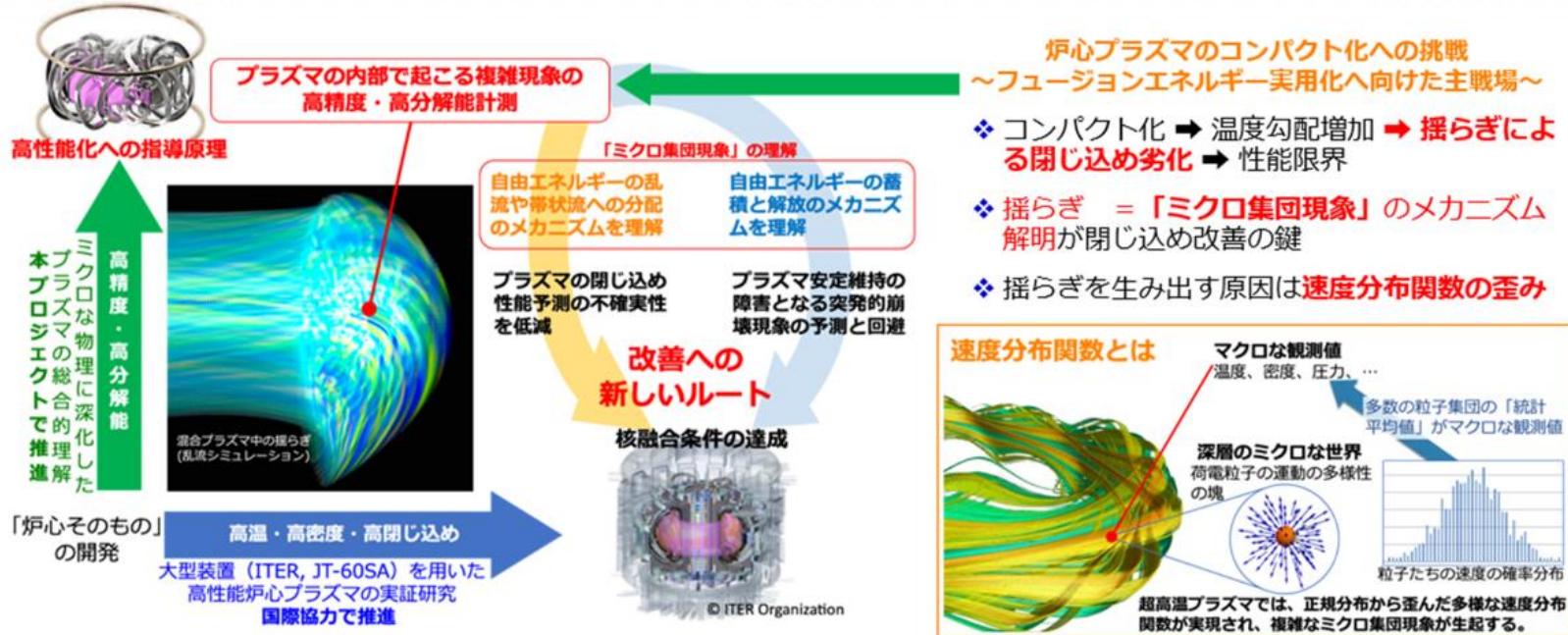
超高温プラズマを高精度で制御・操作し、世界最高の分解能で計測する実験システムを構築することで、核融合炉のみならず宇宙・天体にも共通するプラズマに独特な揺らぎの発生原因とその影響を解明する。計測と理論・シミュレーションを連携し、核融合イノベーションを駆動する科学的指導原理の構築を目指す。

# ロードマップ2023 (優先的に推進すべきビッグサイエンスの一つ)

## 超高温プラズマの「マイクロ集団現象」と核融合科学

自然科学研究機構  
核融合科学研究所

フュージョンエネルギー実用化に向けた最大の課題は、核融合システムのコンパクト化である。炉心を小さくすると、プラズマ中の温度勾配が大きくなり、複雑な揺らぎが発生して、閉じ込めの劣化や、突発的な不安定性が起こる。核融合炉のみならず宇宙・天体にも共通する、プラズマに独特な揺らぎの発生原因とその影響を解明するために、超高温プラズマのマイクロな状態を高精度で制御・操作し、世界最高の分解能で計測する実験システムを構築する。計測と理論・シミュレーションを連携し、核融合イノベーションを駆動する指導原理を提示する。



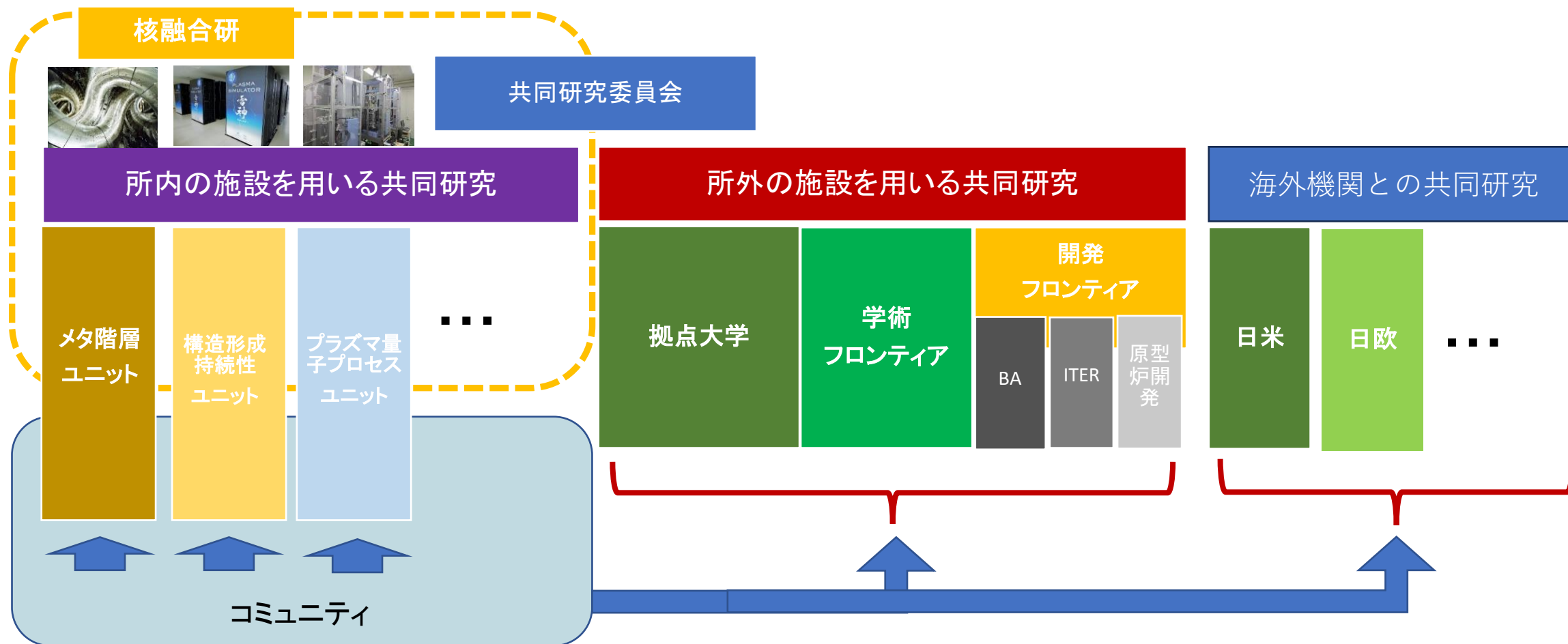
<所要経費 (百万円)> 総額：33,040 (設備費：21,300、人件費：400、運営費：11,340)

| <年次計画> | 1年目                             | 2年目     | 3年目   | 4年目   | 5年目 | 6年目 | 7年目 | 8年目     | 9年目 | 10年目 |
|--------|---------------------------------|---------|-------|-------|-----|-----|-----|---------|-----|------|
| 装置整備   | 既存プラズマ装置<br>新規プラズマ装置<br>計測・制御装置 | 整備      | 製作・導入 | 移設・整備 | 整備  | 増強  | 増強  | 増強      |     |      |
| 実験・研究  |                                 | フェーズ1実験 |       |       |     |     |     | フェーズ2実験 |     |      |
|        | 実験と連携した理論・シミュレーション研究            |         |       |       |     |     |     |         |     |      |

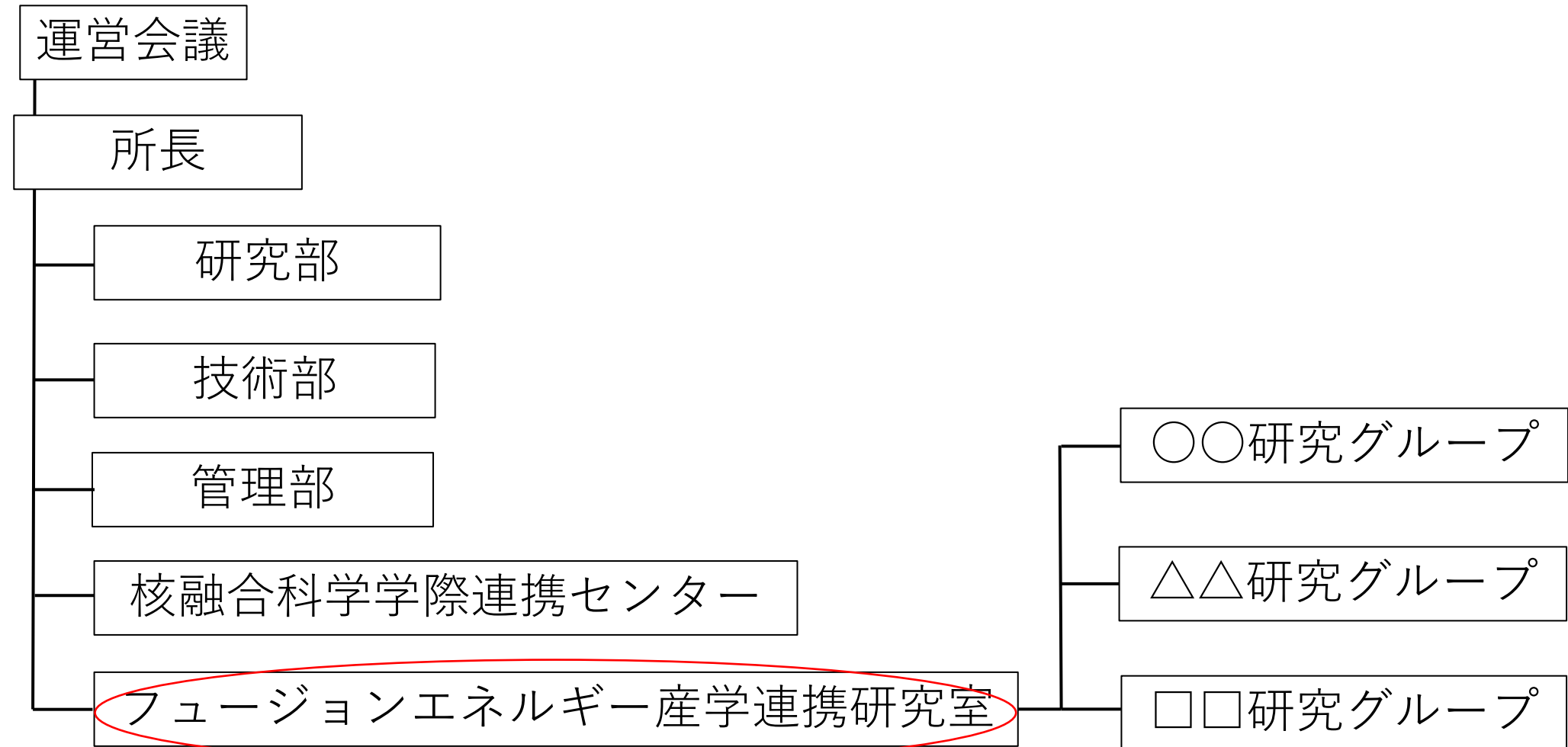


# 共同研究の強化に向けた改革

- テーマ（ソフト）と道具（ハード）の多様な組み合わせから生まれる創造的な共同研究
- 自律的 & 自立的な研究拠点を連携させる共同研究のイニシアティブ = **共同研究運営委員会**



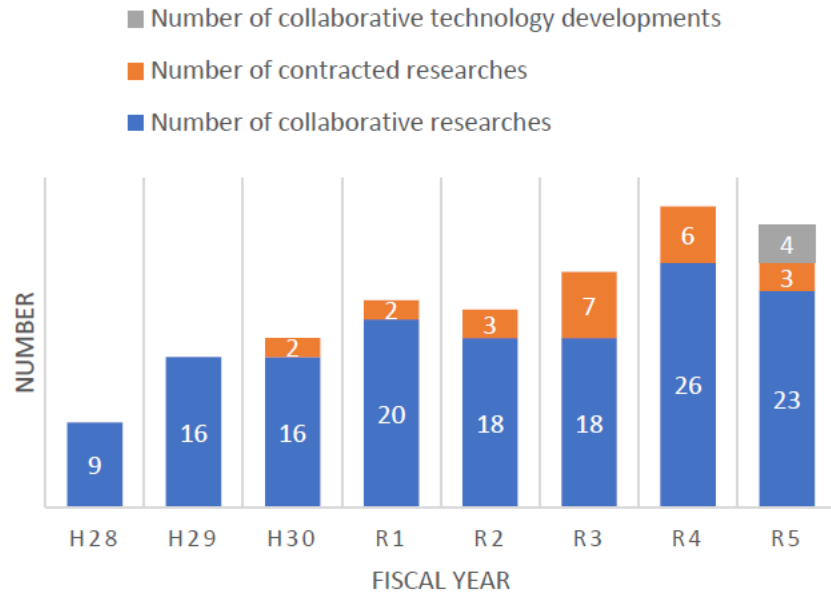
# 産学官連携を強化するための組織体制



※室に、研究グループ（大学共同利用機関法人自然科学研究機構産学官連携研究部門に関する規程に定める産学官連携研究部門）を設置する。

# 急増する産学官連携

## NUMBER CHANGES OF COLLABORATIVE RESEARCHES, CONTRACTED RESEARCHES AND COLLABORATIVE TECHNOLOGY DEVELOPMENTS



## ACCEPTED AMOUNT CHANGES OF COLLABORATIVE RESEARCHES, CONTRACTED RESEARCHES AND COLLABORATIVE TECHNOLOGY DEVELOPMENTS

