

核融合科学研究所・運営会議説明資料

核融合科学の課題と将来計画

パラダイム転換による 新たな学際的共同研究体制の構築

2022年5月18日

核融合科学研究所



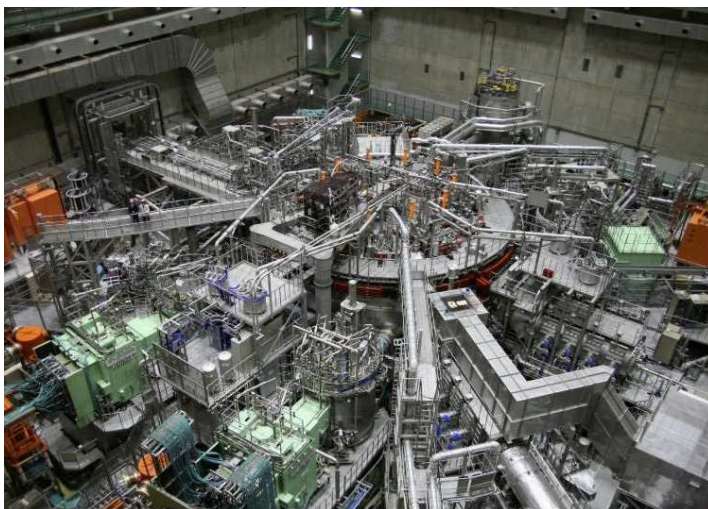
LHDフロンティア促進事業（2022年度で終了）

2013

LHD プロジェクト
(フロンティア促進事業)

大型ヘリカル装置 LHD

核融合の高性能化, 安定的持続の課題を解決するために建設(1997年)



2022

post フロンティア促進事業
学術的展開

- 世界最大級の超伝導※プラズマ実験装置
- 定常・高精度磁場を活かした多様な物理研究
- 世界最高精度の計測装置群によってプラズマ内部構造を解明 → 宇宙の万象を実験研究

※電気コイルを超低温にし、電気抵抗をなくすることにより、プラズマを閉じ込める協力的な磁場を発生させる。





核融合科学の今後の在り方についてコミュニティをあげて議論

❖ プラズマ・核融合コミュニティ全体への呼びかけ (~1600名)

- NIFS全共同研究者ML
- 核融合ネットワークML
- プラズマ核融合学会ML

❖ より広い議論と情報発信

- **在り方WG（運営会議で設置）からの提言：**幅広い学術研究の必要性，分野の発展を支える学術基盤の必要性
- **学術会議・プラズマサイエンス小委員会設置，物理学会シンポジウム開催：**学問論
- **ユニットテーマの策定：**毎週定例のユニット構築会議（40回）やテーマ別Zoom会議（>120回）による議論，公聴会を経て11のテーマを構築
- **LHD資産の学術基盤としての利用：**研究会を開催して議論

❖ コミュニティからの意見

■ 学問論としてあった意見

- ・ 研究グループ間ではもとより核融合コミュニティにとどまらないより広い学際的なつながりを横断・拡大できる柔軟で開かれた仕組みを持つ必要
- ・ 学問の進展に対応した大学共同利用機関の先導的なモデルが形成されることを期待

■ NIFSと大学の「関係」に関する意見

- ・ 広く大学等の研究者を巻き込んだ学際的な研究グループを組織化
- ・ 大学単独では実現不可能な大型の学際的・国際的プロジェクトを可能とするために，所員と大学などの研究者コミュニティが協力して未来設計

■ 改革への期待

- ・ ユニット体制により，研究推進力を核とする複数の求心力が核融合研にあることは，複数分野間の連携の観点から，そのメリットは大きい

■ NIFSの未来への懸念

- ・ 核融合研究は長年の研究を通じて知識を蓄積することで進んできた．中核装置がなくなることにより，これまでのNIFSの蓄積が壊れてしまうのではないかと懸念
- ・ 中核研で行うべき大学では実施できないプロジェクトが見えてこない，NIFSが大学と同じレベルになることを懸念



INDEX

核融合科学のパラダイム転換

新しい核融合科学の学際的展開に必要な

学術基盤としてのLHD

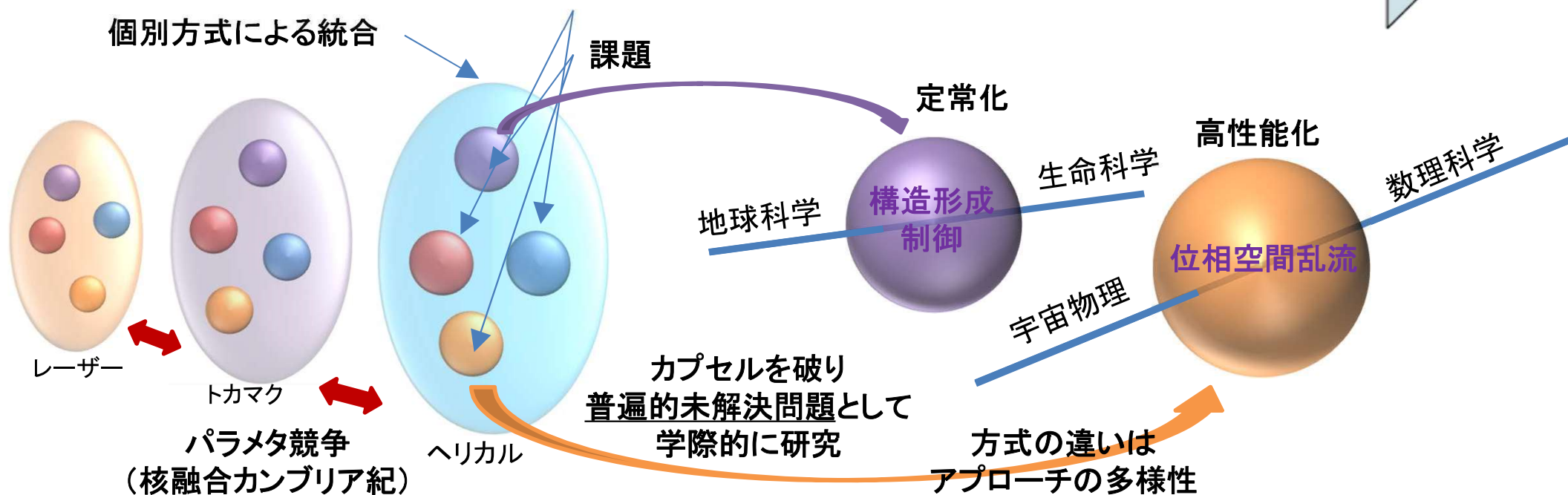


核融合科学の未来を牽引する パラダイム転換

装置方式の性能比較

未解決問題の総合研究

学術分野として
学際的に発展





学術研究の進化とは

黎明期

様々な方式のカンブリア爆発

→ ダーウィニズム

成長初期

熱核融合反応の実現

→ 「そのもの」を作ってみる

成長・発展期

学術テーマの分節化・定式化

→ 一般化
→ イノベーション・新展開



背景・必要性

【現状・課題点】

- ✓ 核融合研究は、実験炉(ITER)から原型炉開発へ向けた新しい段階への移行期にある。
- ✓ 核融合科学は多数の未踏科学技術を束ねる複合的な分野であるが、世界的な学術研究の動向として、核融合エネルギー実現に向けた開発が進む一方で、研究内容が特殊化しており、学術としての一般性の再構築が課題になっている。
- ✓ 核融合科学研究所(NIFS)に対して幅広い分野から多角的な問題意識に基づく共同利用・共同研究の要求が高まっており、そのニーズに応えられるよう、より未来志向で分野融合的なテーマ設定の下にNIFSの研究体制を再編することが求められている。

【必要性】

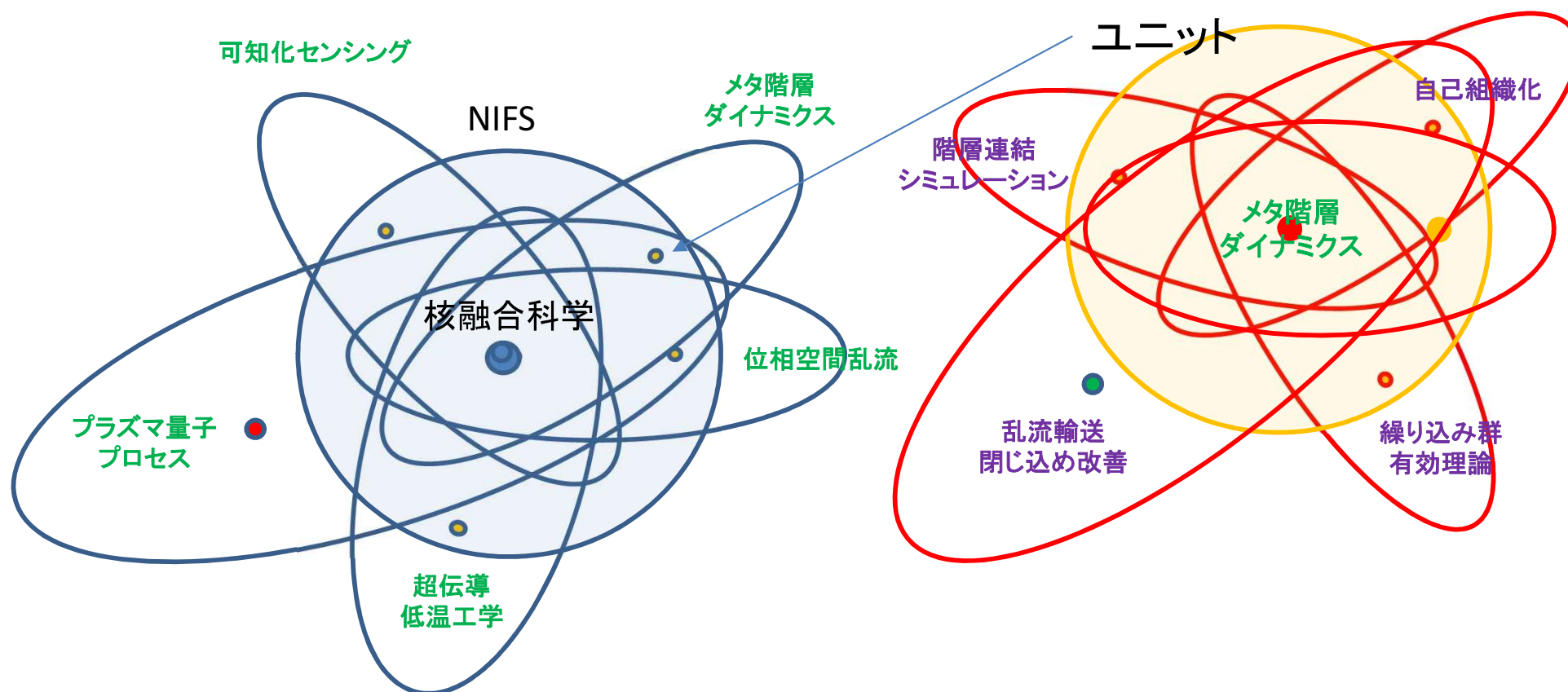
- ✓ カーボンニュートラル社会の実現と安定的な維持のためには核融合エネルギーが不可欠であり、その科学技術基盤を確立することは、我が国のエネルギー政策にとって核心的に重要
- ✓ 今後30年を要する研究開発を推進するためには、核融合科学が広く学術界と問題意識を共有する先端分野として学際化することが急務
- ✓ 核融合科学の学際化への期待が高まっており、分野を超えて広い学術界が最先端の研究施設(LHD, JT-60SA, ITERなど)を共同利用できる高度な連携体制の構築が必要
- ✓ 学際化による異分野融合を実効的にするためには、新たな展開の方向性を明示した機能的な研究グループ(ユニット)の活動を安定的かつ効率的に支える「核融合科学学際連携センター(仮称)」が必要
- ✓ 学際的で先端的な研究現場で国際的に活躍できる若手リーダーの育成が必要



「核融合科学」の分節化・定式化 → ユニット構築

ユニットテーマ： 核融合の「未解決問題」を「学術的研究テーマ」に分節化する。

下図の例では、プラズマの乱流をよりよく理解するために、「メタ階層ダイナミクス」(後述)というユニットテーマを設定し、そのテーマに取り組むために、自己組織化や階層連結シミュレーションといった多様な研究分野の研究者から成るユニットを構築する。



NIFS全体としては、「ユニット＝学術的意味の単位」の協働によってプロジェクトを構成する。



ユニット：核融合の未解決問題を学際的に研究する体制

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。

※定式化とは、複雑な対象を論理的に整理し、一般性のある道具や概念で研究できるようにすること。

軸	ユニットテーマ	資料	核融合科学としてのキーワード	学際的なキーワード
ダイナミクス・時空	メタ階層ダイナミクス meta-hierarchy dynamics	 発表資料	大域的マルチスケール乱流 遷移・崩壊現象 境界層・原子分子・照射表面 速度空間ダイナミクス 多階層シミュレーション・モデリング 非平衡プラズマの高効率・大電力加熱 非等方的電子・イオン温度 非接触プラズマ プラズマ-壁相互作用	階層性 渦・輸送現象・自己組織化 非平衡開放性と突発現象 運動論・流体ダイナミクス 繰り込み群・有効理論 自由エネルギーランドスケープ アクティブマター 非線形波動粒子相互作用 非等方性速度分布 エネルギー循環 誘電率計測・モデリング 偏光プラズマ分光 連結階層アルゴリズム 粒子シミュレーション 分子動力学 密度汎関数理論 分子シミュレーション 高次元非線形構造 天体・宇宙地球環境・生物など
システム	構造形成・持続性 Structure formation and sustainability	 発表資料	閉じ込め遷移現象 フロー分布と安定性 プラズマ加熱 複数イオン種輸送 先進的閉じ込め配位	自己組織化 エントロピー 非熱的粒子 隠れた対称性 多目的最適化
揺らぎ・乱流・輸送	位相空間乱流 Phase space turbulence	 発表資料	乱流輸送 非拡散・非局所輸送 瞬時・突発輸送 無衝突プラズマ 核燃焼プラズマ ノンマックスウェル分布 速度空間計測 位相空間構造計測 波動加熱	多次元乱流スケールリング 乱流ミキシング 非平衡プラズマ物性 ゆらぎの定理 エントロピー トポロジカル電磁波 集団性 深層学習
素過程・相互作用	プラズマ量子プロセス Plasma Quantum Process	 発表資料	高Z多価イオン 非等方非平衡プラズマ プラズマ物質相互作用 負イオン レーザー核融合 レーザープラズマ相互作用 量子エネルギー変換 達成現象制御 達成現象モデル化	原子分子素過程 ミュオン原子分子 高エネルギー密度プラズマ 太陽コロナ キロノバ X線天体 重元素起源 星間物質 極端紫外・軟X線光源開発 地球大気・惑星大気 プラズマエッチング 医療 バイオプラズマ超高压物性科学 レーザー量子ビーム科学 量子真空物理学 新材料 放射線化学 同位体科学 中性子リソグラフィ
異相連成現象	プラズマ・複相間輸送 Transports in Plasma Multi-Phase Matter System	 発表資料	周辺プラズマ・不純物輸送 非接触プラズマ プラズマ・壁相互作用 粒子・エネルギー循環 プラズマ対向機器	プラズマと固・液・気体間相互作用 非平衡交差輸送 原子・分子過程 プラズマ誘起構造形成 固体表面物性 微細構造解析 異材接合
計測・データ	可知化センシング S&I: Sensing and Intellectualization	 発表資料	プラズマ計測技術 高時間・高空間分解能 速度分布関数 乱流・揺動計測 核融合炉心プラズマ制御 環境放射線(能)計測 遠隔実験	データ同化制御 統計数理モデリング データ駆動 レーザー・光工学 光渦 レギュラトリーサイエンス 可視化情報学 オープンサイエンス 地球化学・環境科学
装置学・技術	プラズマ装置学（仮称） Plasma Apparatus	 発表資料	プラズマ装置取扱技術 プラズマ・荷電粒子の生成・閉じ込め・輸送・制御技術 プラズマ加熱装置技術 プラズマ計測装置技術 数値計算技術 基礎/応用プラズマ装置 プラズマ理工学 ミュオン触媒核融合	学術ネットワーク型研究 量子ビーム科学 反物質科学 ミュオン科学 アクシオン探索 宇宙機 宇宙天気予報
計算科学	スマートグローバルシミュレーション Smart Global Simulation	 発表資料	核燃焼プラズマ MHD ジャイロ運動論 乱流 周辺プラズマ 不安定性・飽和	大域的シミュレーション 多階層 秩序構造 散逸構造 データ科学 計算科学
材料学	エネルギー・粒子高流束下材料学（仮称） Materials technology at high flux of energy and particles	 発表資料	核融合炉材料 ブランケット ダイバータ 真空容器 低放射化材 燃料増殖材 中性子増倍材 水素同位体 水素透過 高熱流束 重照射	淮安定相 自己組織化 メソスケール構造 物性 新材料創製 強度 水素超透過 水素貯蔵 格子欠陥 変形 拡散 金属 セラミクス 複合材料 被覆 界面
低温	超伝導・低温工学（仮称） Superconductivity and cryogenics	 発表資料	高信頼性 安全性 先進超伝導体 大型超伝導コイル コイル冷却 極低温流体 高強度・高磁場化	SDGs（省電力） 超伝導応用 超極細線材加工 液体水素 液体ヘリウム 量子技術 AI予知保全 規格化・標準化
核融合炉システム	核融合原型炉・基礎研究 Innovation of academic issues for Fusion DEMO	 発表資料	核融合原型炉 磁場閉じ込め核融合 レーザー核融合 燃料トリチウム循環 水素同位体挙動 環境・生体トリチウム 固体金属・液体金属 溶融塩 制御システム 安全解析 データ駆動科学 ブランケット ダイバータ ハイブリッド電力システム	閉鎖系物質循環 熱化学分解 触媒効果 水素製造 電力需給調整力 エネルギー貯蔵 エネルギー変換 モデル予測制御



(例) メタ階層ダイナミクス ユニット

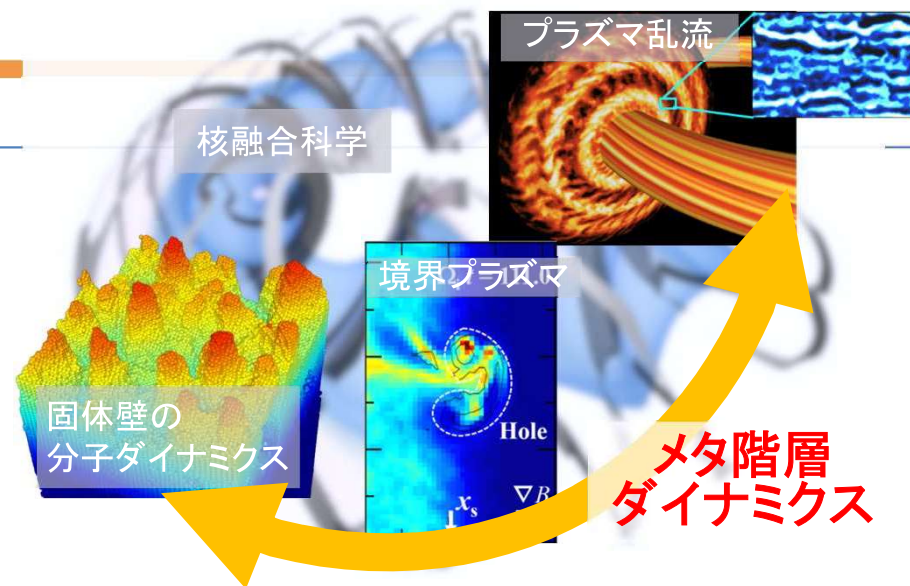
ミッション

核融合科学の問題

核融合プラズマの高性能化のために、炉心プラズマ、周辺希薄領域、固体壁、不純物までが強く影響を及ぼし合う「広大なダイナミックレンジをもつ非線形現象の統合的理解が必要。

学術的定式化

様々な分野に波及している「階層」の概念の限界と問題点を明らかに、それを超える科学のパースペクティブを確立する。空間スケールだけでなく、波数空間、エネルギー、時間のスケールによる階層、複雑系故のファジーな階層など、これら「広義の階層」を「**メタ階層**」として再定式化する。



研究計画

階層性の定量化

広義の階層に対して、何をもって「階層」と呼べるのかを、新たな理論の構築、計測原理の提案、多変量同時計測を駆使して探求。

階層間の相互作用

非平衡開放系の突発現象、階層が不可分となる現象の記述。特に、これまでに提案されてきた連結階層法に対して、手法の「尤もらしさ」の評価法を、実験と連携して追求。

ネットワーク

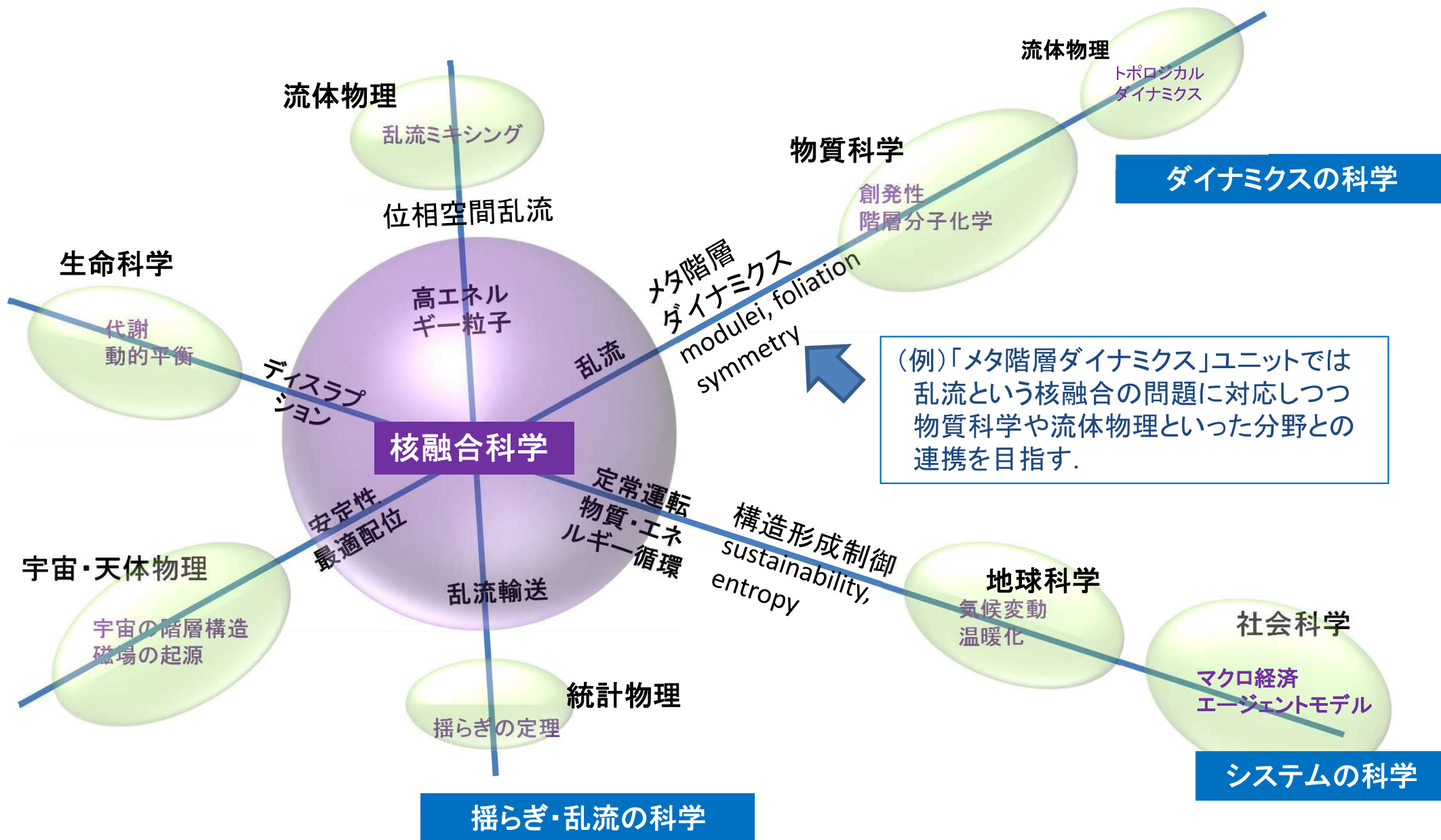
核融合プラズマを舞台に階層性を追求し、物理学(素粒子・物性)、天文学、生物学、分子科学などに係わる共通課題として取り組む。

階層性の定量化と相互作用の法則性を階層力学として体系化することで、他分野で検証・応用を行う。



核融合未解決問題の学術的定式化（ユニット）と学際的展開

「ユニット」が掲げる学術的テーマの軸に沿った共同研究および人材の水平移動を実現





INDEX

核融合科学のパラダイム転換

新しい核融合科学の学際的展開に必要な

学術基盤としてのLHD



LHD 資産の重要性と必要性

- プラズマ温度などのパラメタ競争型プロジェクトからの脱却
 - 学際的な共同研究により学術の地平を拡大, 新分野創出
- ユニット(学際的共同研究チーム)の活動を支える学術研究基盤の必要性
- 核融合科学の学際化 → 協創的研究体制 → 人材育成・確保
- 世界トップの性能をもつ研究基盤が必要
- **LHDがもつ唯一無二の特長 学術研究基盤としての高いポテンシャル**
 - 「高精度計測システム」(温度計測における世界最高の時間分解能・空間分解能※)
 - プラズマ内部状態を詳細に透視
 - 超伝導ヘリカル磁場による「高定常性」(プラズマの長時間維持が可能)
 - 長時間現象の解明
 - 無電流プラズマによる「高安定性」(プラズマに電流を流さないヘリカル方式はプラズマが安定)
 - 精密な揺らぎ計測が可能
- ビックデータの公開により大学の研究力強化(オープンサイエンス、データサイエンス)

※時間的、空間的に高密度の測定が可能



LHDの国際的な位置づけ

SC: 超伝導

NC: 常伝導

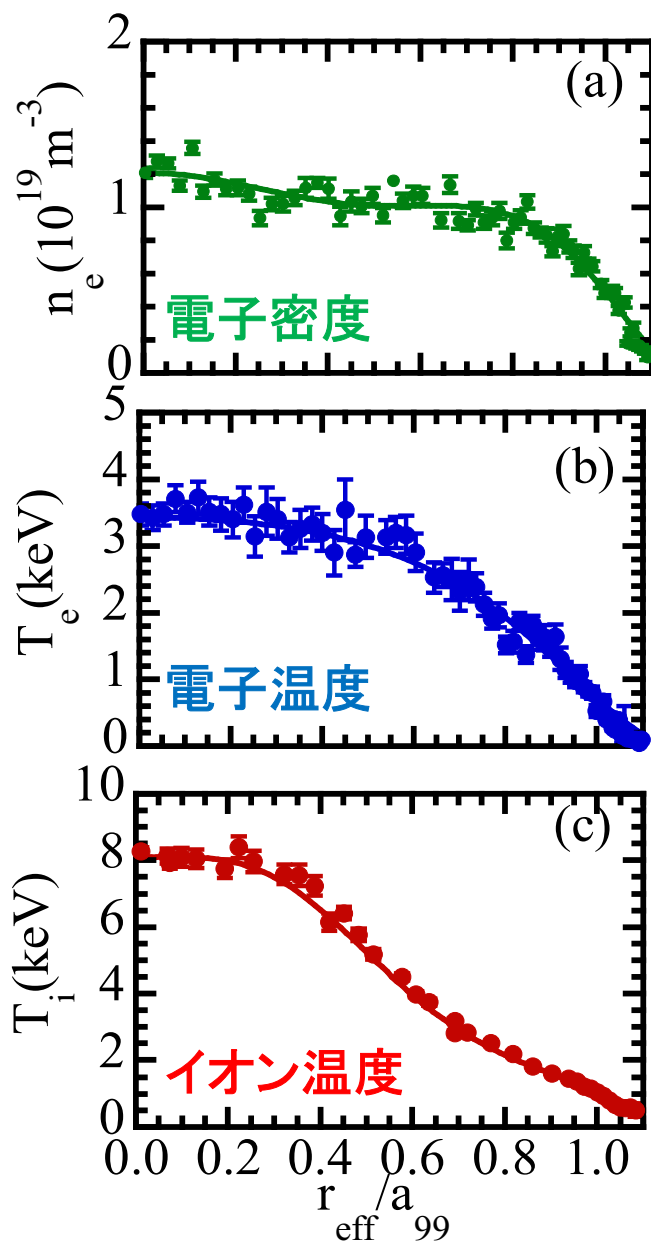
装置名	閉じ込め形式	組織 (国)	運転開始年 (改造)	導体	磁場強度 [T]	大半径 [m]	小半径 [m]	体積 [m³]
ITER	Tokamak	IO (France/International)	2025予定	SC	5.3	6.2	2.0	840
JT-60SA	Tokamak	QST (Japan/EU)	2022予定	SC	2.25	2.96	1.18	131
JET	Tokamak	CCFE (UK/EU)	1984	NC	3.45	2.96	1.25	100
LHD	Helical	NIFS (Japan)	1998	SC	3.0	3.9	0.63	30
NC-LHD	Helical	NIFS (Japan)		NC	0.5	3.9	0.63	30
Wendelstein 7-X	Helical	IPP (Germany)	2015	SC	3.0	5.5	0.53	30
HL-2M	Tokamak	SWIP (China)	2020	NC	2.2	1.78	0.65	
DIII-D	Tokamak	GA (USA)	1986	NC	2.2	1.67	0.67	
ASDEX-Upgrade	Tokamak	IPP (Germany)	1991	NC	3.1	1.65	0.65	13
WEST (Tore Supra)	Tokamak	CEA IRFM (France)	1988 (2016)	SC	3.65	2.5	0.5	
KSTAR	Tokamak	KFE (Korea)	2008	SC	3.5	1.8	0.5	
EAST	Tokamak	ASIPP (China)	2006	SC	3.5	1.85	0.45	
NSTX-Upgrade	Tokamak (ST)	PPPL (USA)	1999 (2022予定)	NC	0.3	0.85	0.68	
MAST-Upgrade	Tokamak (ST)	CCFE (UK)	1999 (2020)	NC	0.55	0.9	0.6	8
QUEST	Tokamak (ST)	Kyushu-U (Japan)	2008	NC	0.50	0.68	0.4	
TJ-II	Helical	CIEMAT (Spain)	1997	NC	1.0	1.5	0.22	1.1
TCV	Tokamak	EPFL (Switzerland)	1992	NC	1.43	0.88	0.25	
Heliotron-J	Helical	Kyoto-U (Japan)	2000	NC	1.5	1.2	0.2	
SST-1	Tokamak	IPR (India)	2005	SC	3.0	1.1	0.2	
HSX	Helical	U-Wisconsin Madison (USA)	1999	NC	1.25	1.2	0.15	0.44



高精度計測システム（世界最高の空間分解能）

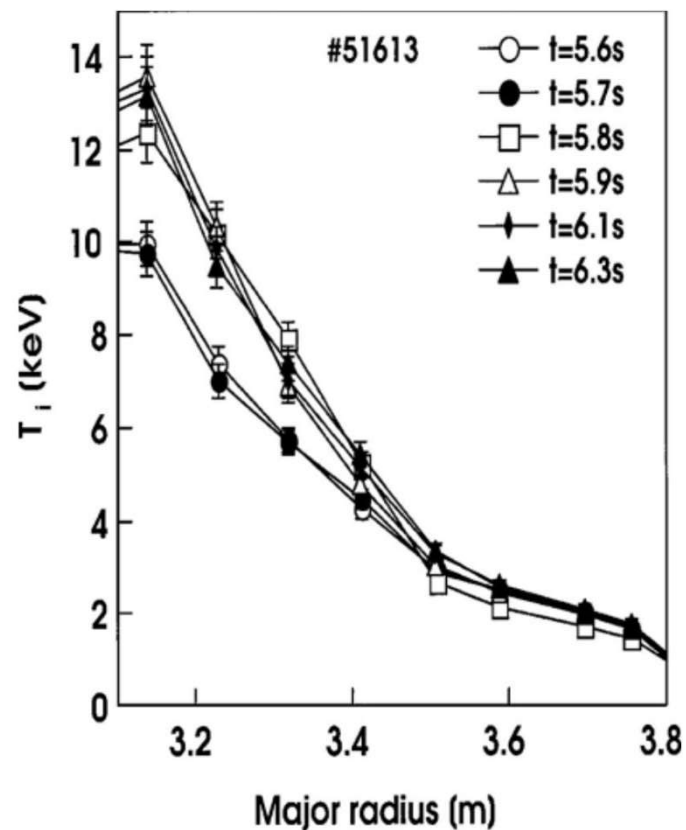
装置の中心からの距離によってプラズマの密度や温度が変化の様子を、LHDでは他装置よりも圧倒的に精密に観測できる。

大型ヘリカル装置（LHD）



世界最大の装置（JET） イギリス

イオン温度



K.Ida et. al.,
Plasma Phys Control Fusion 60
(2018) 033001



核融合研の改革に向けた主要な事業計画（まとめ）

従来の体制と運営（～2022）

- LHDフロンティア促進事業を中核とするパラメタ競争集中型研究
- ヘリカル研究部一部門体制によるヘリカルに特化した研究

主要成果

- ヘリカル型プラズマの高性能化（重水素プラズマによる高温化）
- プラズマの物理メカニズム解明（乱流，高エネルギー粒子，速度空間構造，磁場対称性）
- 独創的基幹技術（n-NBI, 超伝導，レーザー応用技術，統合シミュレーション，VR等）

課題

- 学際的展開
- 産学連携，社会実装
- 人材育成



改革後の体制と運営（2023～）

- 最先端の学術研究課題を掲げた学際的なネットワーク型共同研究（ITER等の集中型の開発研究と二元化）
- 広領域にわたる共同研究者と連携する**ユニット体制**によって総合的な学術研究を実施（共同研究を行う分野を大幅に拡大）

パラダイム転換

これまでのヘリカル方式高性能化プロジェクトから，幅広い学術研究による学際的展開・社会的貢献へ転換

世界トップレベルの学際的研究推進と連携構築のために

- LHD: 超高温プラズマ学術研究基盤

フロンティア促進事業 → **学術研究基盤事業**

- 核融合科学学際連携センター（仮称）
 - LHD学術基盤等を用いた学際的連携・新分野創成
 - 産学連携による独創的基幹技術の社会実装
 - 所外の最先端研究施設を活用する開発研究連携