

学術研究基盤事業

(令和4年度予算額)

超高温プラズマ学術研究基盤(LHD)【新規】 3,050百万円

(4,028百万円)
※大規模学術フロンティア促進事業として

教育研究組織改革分

核融合科学学際連携センターの創設

～ユニットによる学際研究を先導し支える

戦略的イニシアティブ～ 【新規】 774百万円

(0百万円)

(基盤的設備等整備分を含む)

基盤的設備等整備分

多目的直流電源の改修整備 【新規】 485百万円

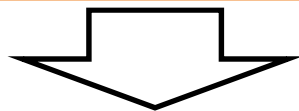
(0百万円)

全体概要

【趣旨】

核融合科学の学際化を進め、既成分野の枠を積極的に越境する挑戦的な共同研究が展開できるよう、教育研究組織を改革、研究基盤を整備する。

- ✓ 核融合科学のパラダイム転換：異分野融合を推進し、新分野創成につながる共同研究を実施するために、所内外の連携チームであるユニットを構築する。ユニットのアカデミックプランはコミュニティをあげた議論によって策定し、不断のC&Rによってダイナミックに再編する。
- ✓ 学術研究基盤事業：世界最高性能のプラズマ内部現象診断力をもつ大型ヘリカル装置LHDを学際的共同研究のための学術研究基盤として活用する。
- ✓ 教育研究組織改革：ユニットが大学と協力して実施する学際的共同研究をサポートするために核融合科学学際連携センターを設置し、核融合科学研究所が有する研究プラットフォームの整備（基盤的設備整備）に加え、国内の主要な研究施設をネットワーク的につなぐ効率的で高度な共同利用を実現する。
 - オープンサイエンスの基盤整備による最先端研究のデータ共同利用推進 → 学際化と人材育成
 - 開発研究機関（QSTなど）の研究施設共同利用体制の構築 → 学術と開発の二元的連携の強化



核融合科学・技術の特性を多角的に活かし、カーボンニュートラル社会の実現に貢献するために、従来の専門領域を超えたエネルギー・環境科学技術の異分野融合を駆動し、専門性の壁を破壊するイノベーションを実現できる国際的リーダーを育成する。

LHDミッションの再定義

2013

フロンティア事業
LHDプロジェクト

重水素実験

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)



2023

Post フロンティア事業
学際的展開

- 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強力な磁場を発生させる。



大規模学術フロンティア促進事業での実績

— 2021年度外部評価(概要)

顕著な成果・研究所のポテンシャル

- ❖ イオン温度 1 億2千万度の達成など、プラズマパラメータの顕著な進歩
- ❖ 卓越した物理学上の成果を著名ジャーナルへ発表
- ❖ 優れた運転によるプラズマ実験の高稼働率、高精度な計測システムの充実

改善すべき点

- ❖ 研究成果の「学術的意義」をアピールすることに一層努力し広い学术界と協力する体制の構築が必要
- ❖ 核融合炉への外挿可能性を総合的観点から明確にするために、根底にある物理的機構の解明により注力すべき
- ❖ 乱流や輸送に関する研究成果についてアピールが不十分

未来への提言

- ❖ 大規模学術フロンティア促進事業としての現行LHD計画の終了に近いことに留意し、より根本的で広い核融合科学の振興を目指すことを期待
- ❖ これまでの研究実績と現有施設は、核融合科学及び関連科学研究の進展を牽引する大きな力の源
- ❖ 当該分野の世界的中枢研究所として、国内外の研究者と協力し、核融合科学のより先進的な学術研究を実施する必要
- ❖ 得られた成果が俯瞰的視野から学術的に体系化され、次段階への手引きとなることを期待
- ❖ さらにLHDの利用可能性の最大化と海外の実験プロジェクトとの協力を通じ、核融合科学の未解決問題に取り組み、核融合エネルギー実現に貢献

その他の留意事項

- ❖ 海外機関との学術交流の強化
- ❖ 核融合研究開発の進展に応じうるキャリアパスの形成
- ❖ 多様な財源の確保

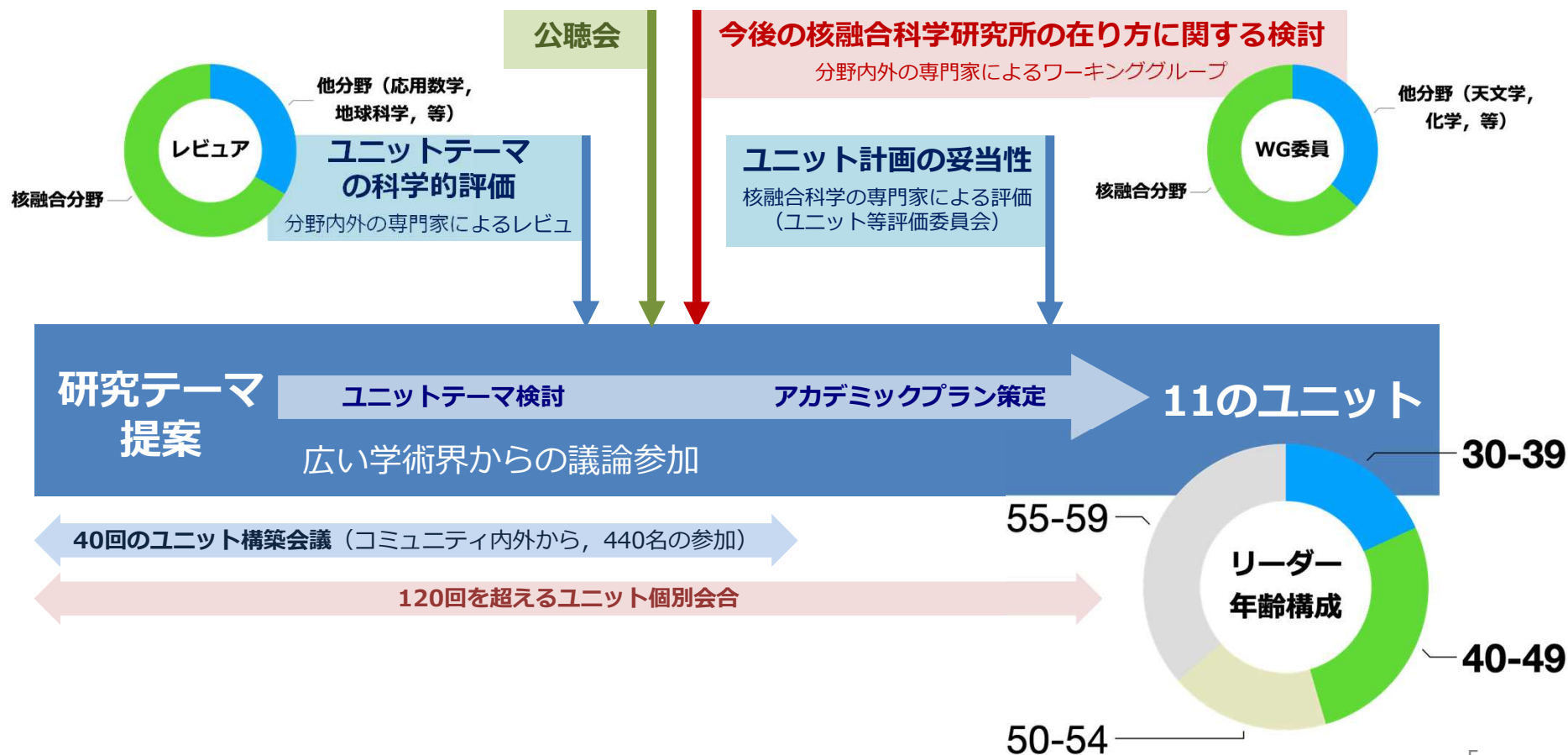
ユニット構築

—若手参画及び異分野との対話による抜本的組織改革

❖ 若手研究者のリーダーシップによるテーマ構築

研究テーマの提案，長期計画の策定，レビューとの議論において若手研究者がリーダーシップを発揮．30代，40代のユニットリーダーが約半数．

❖ 幅広い分野外の専門家を含むレビューによる，テーマの科学的評価，計画の妥当性評価

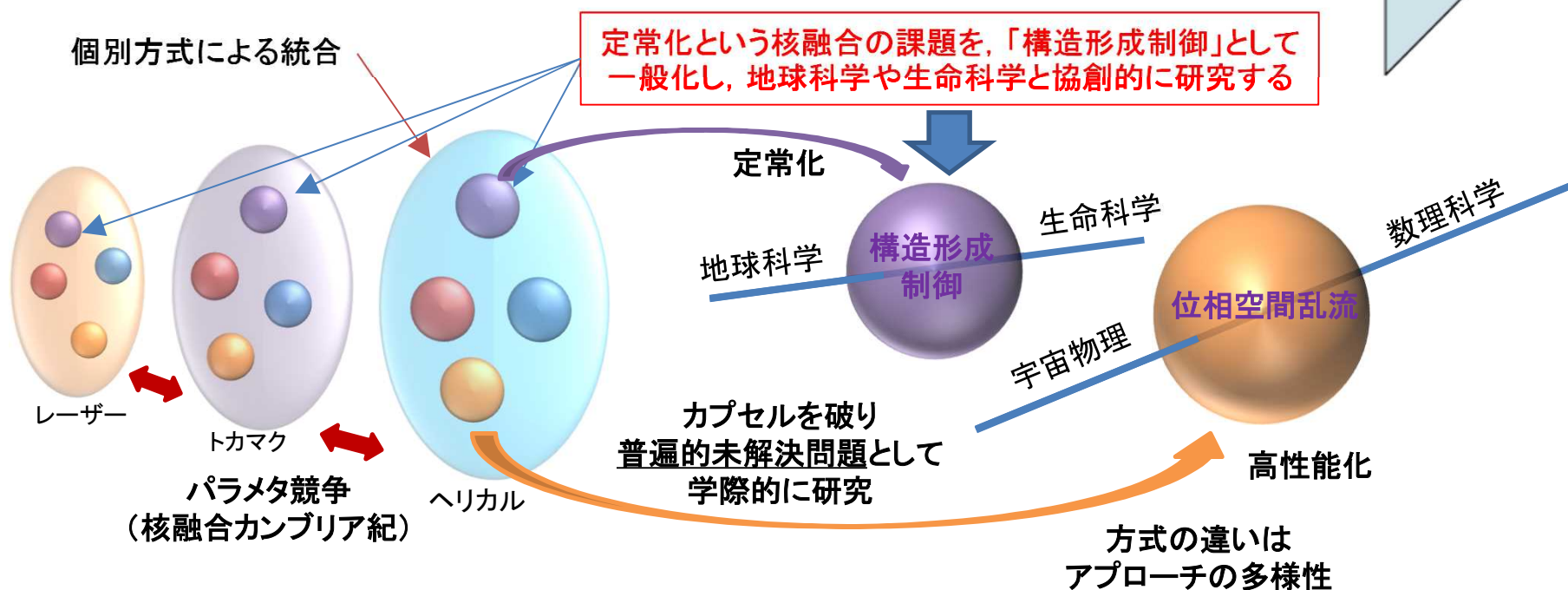


核融合科学のパラダイム転換 — 学問的進化を先導

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



核融合エネルギー実現のための学術研究の役割

核融合研が貢献した学術研究

帯状流の発見

プラズマの中に発生した乱流を抑える帯状の流れが、プラズマ中に実際に存在していることを発見

突発現象のトリガーメカニズムの発見

プラズマ崩壊が突然起こる現象（突発現象）を引き起こすトリガーメカニズムがプラズマの高速計測を用いた実験で発見

同位体混合の発見

プラズマの中に発生した乱流がプラズマの水素同位体を混合していることを実験で発見

無衝突エネルギー移送の発見

プラズマ中に励起された不安定性による電磁波が、高速粒子からプラズマにエネルギーを移送していることを実験で発見

イオン性プラズマの実現

負イオンと正イオンによって構成されるプラズマを実現し、負イオンビーム中の電子成分を抑制

開発研究への貢献

プラズマ性能の向上

帯状流の概念がITERなどの予測性能を向上
→ 大幅なコストダウン

核融合プラズマの突発的崩壊（ディスラプション）の回避

トリガーメカニズムの解明は、ディスラプションをはじめとする核融合プラズマの様々な突発的プラズマ崩壊を予測し回避するための手法を提示

燃焼プラズマの燃料混合とヘリウム灰の排出に関する新アイデア

核燃焼プラズマにおいて、燃料である重水素と三重水素の割合を乱流を使って均一化し、中心で発生したヘリウム灰を排出するための新しい手法を考案

燃焼プラズマの自己加熱の予測精度向上

核燃焼プラズマシミュレーションに、無衝突エネルギー移送プロセスを取り入れることで、自己加熱の予測精度向上

NBIの高性能化

ITERや原型炉級の高エネルギーNBIの高性能化

ITER
建設

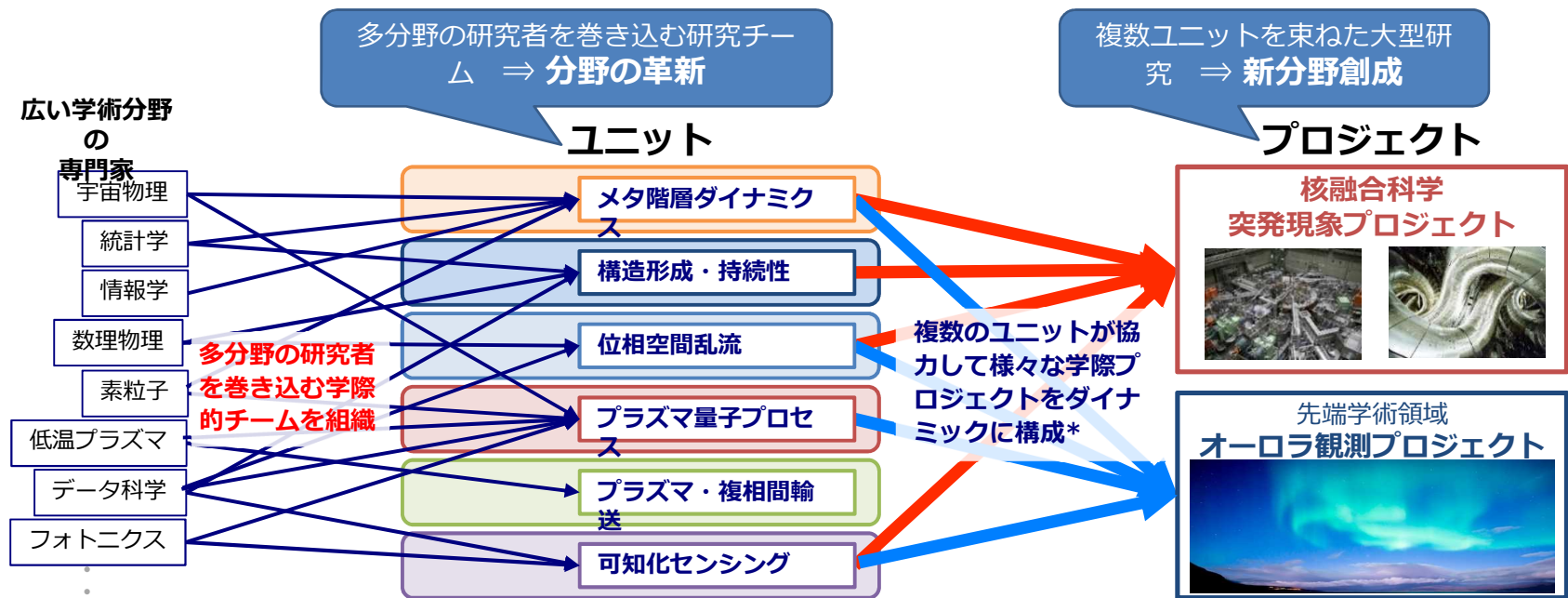
ITER
運転

核燃焼

原型炉

ユニット体制による学際的共同研究の推進 ープロジェクトのダイナミックな編成

「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



- ❖ 研究部は11個のユニットによって構成 (2023年度計画)
- ❖ ユニットのコミュニティをあげた議論で構築
 - ・ 所外委員を中心とする評価委員会によって不断のC&R
 - ・ 臨機応変に再編する

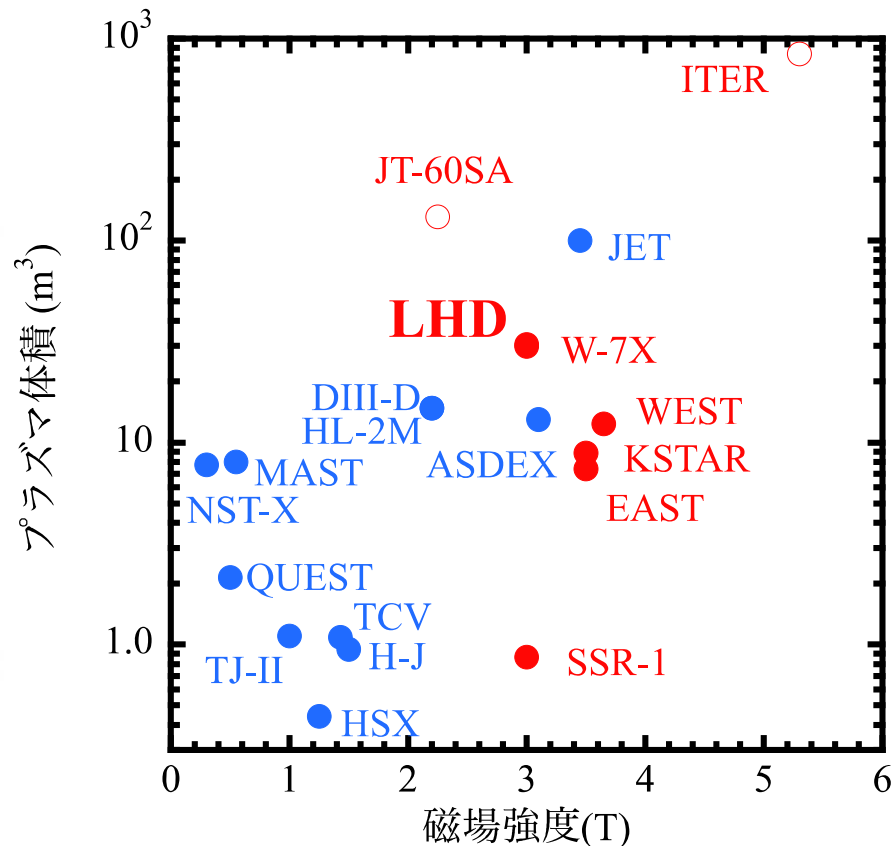
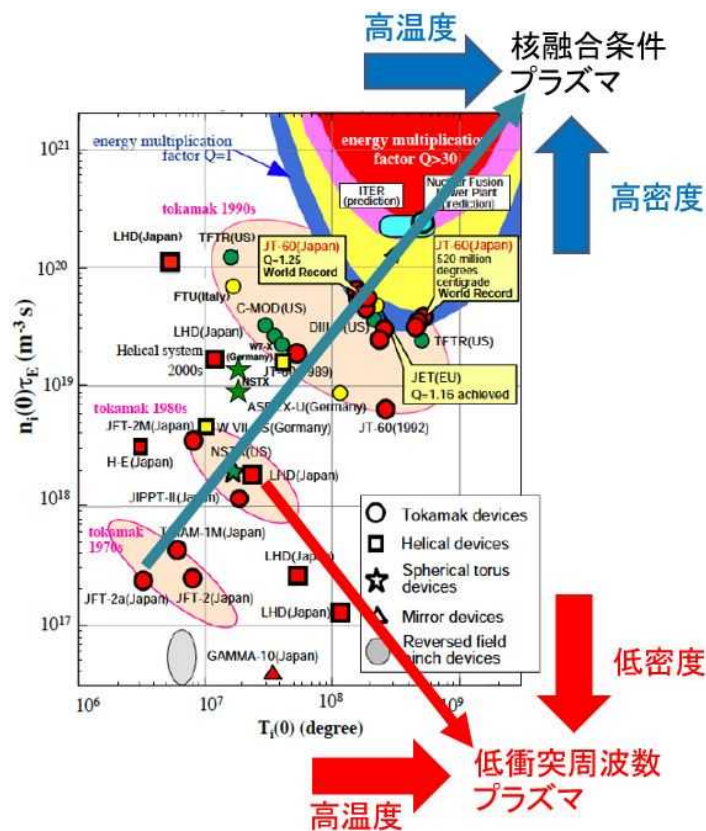
データシェアリングにより異分野融合を推進

*オーロラ、オゾンホール、ペンギンなどの研究チーム(ユニット)を束ねて南極観測プロジェクトが構成される。オーロラのチームは別途、磁気圏観測衛星プロジェクトへも参画するというイメージ

LHD が有する唯一無二の性能

- 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(重水素実験を終了)
 - 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
- 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 ※時間的、空間的に高密度の測定が可能
 - 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)
- 核融合科学の学際化 → 協創的研究体制 → 人材育成・確保

LHDミッションの再定義, LHDの国際的な位置づけ

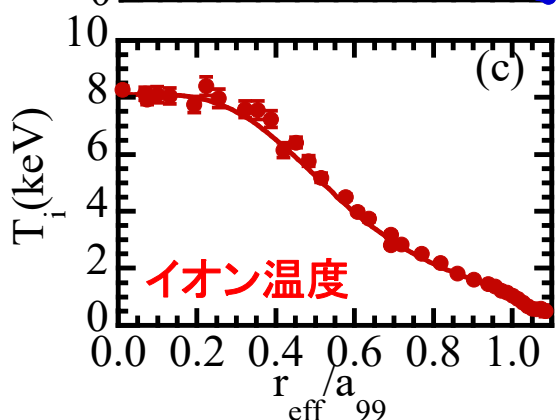
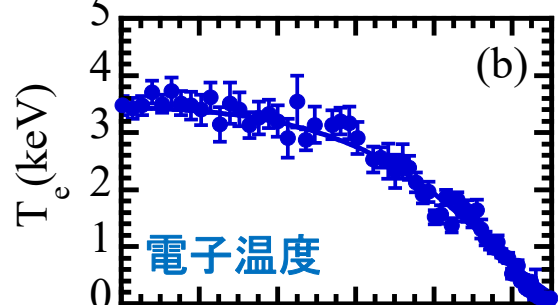
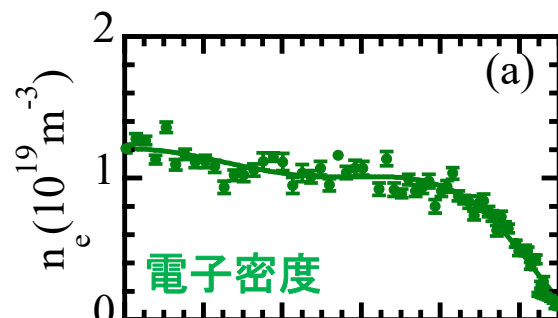


核融合炉開発路線と学術研究路線の直交関係。横軸はプラズマの温度、縦軸は「閉じ込め性能」を表すパラメータ。学術研究基盤として再定義されたLHDは、学術研究としての価値が高い性能を実現しており、世界一の計測性能を活かして、開発研究の「幅を広げる」役割を果たす。

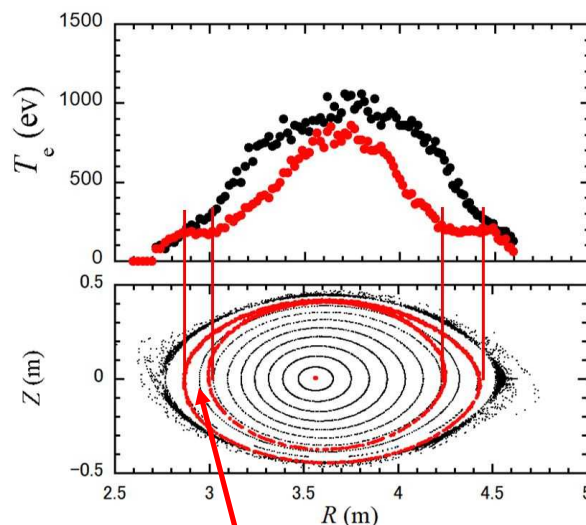
世界で稼働中（●超伝導装置、●常伝導装置）及び稼働予定（○超伝導装置）のプラズマ実験装置の大きさと磁場強度。LHDはパラメータ競争（開発研究の方向性）のミッションを次世代の装置へ譲るも現役装置のなかでトップクラスの規模をもち、学際的な基礎研究の実験装置としては、世界のプラズマ実験装置を凌駕する。

LHDが有する唯一無二の性能 — 世界最高の空間分解能

大型ヘリカル装置 (LHD)



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する様子を、LHDでは他装置よりも圧倒的に精密に観測できる。

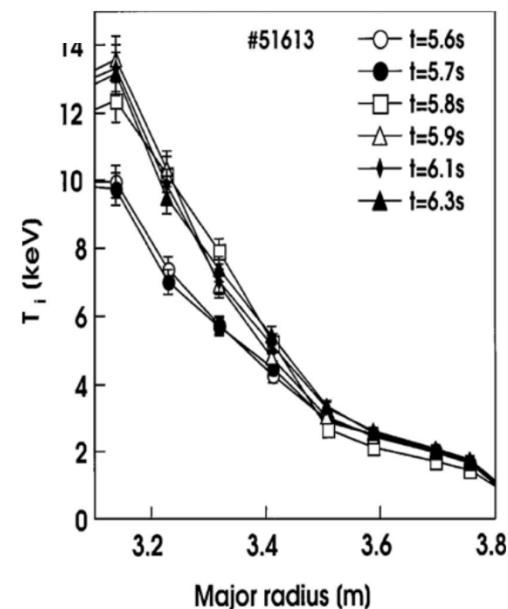


磁気島を発見(プラズマを破壊する「癌」を高精度CTで診断)

世界最大の装置 (JET) イギリス

トップデータの立証のためには、この程度の精度で十分だが、物理研究のためには精密な計測が必要

イオン温度

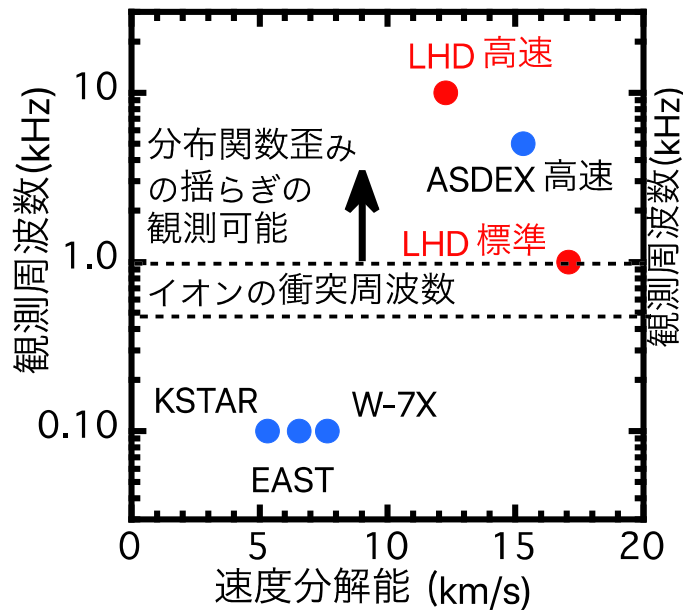


トップデータを狙う研究が遭遇する課題を解決するためには、「病理学」のための精密な診断が必要

LHD学術研究基盤を支える世界最高性能の計測器群

高速イオン速度空間分布計測

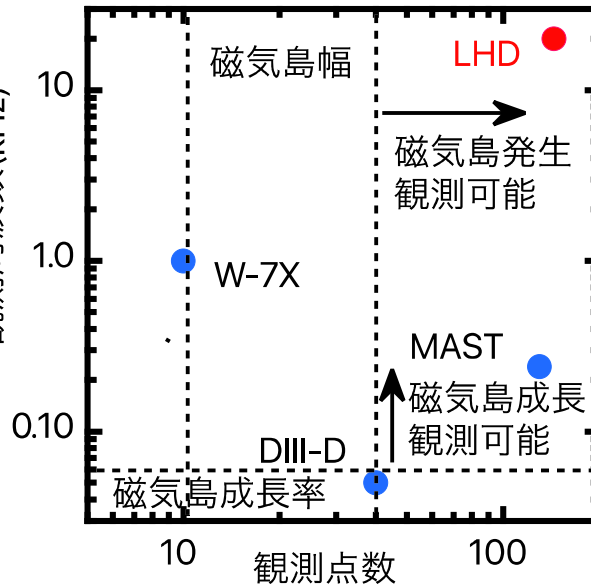
荷電交換分光計測



LHDの荷電交換分光なら、イオンの衝突周波数を超えているので、分布関数歪みの揺らぎが観測できる

高速電子速度空間分布計測

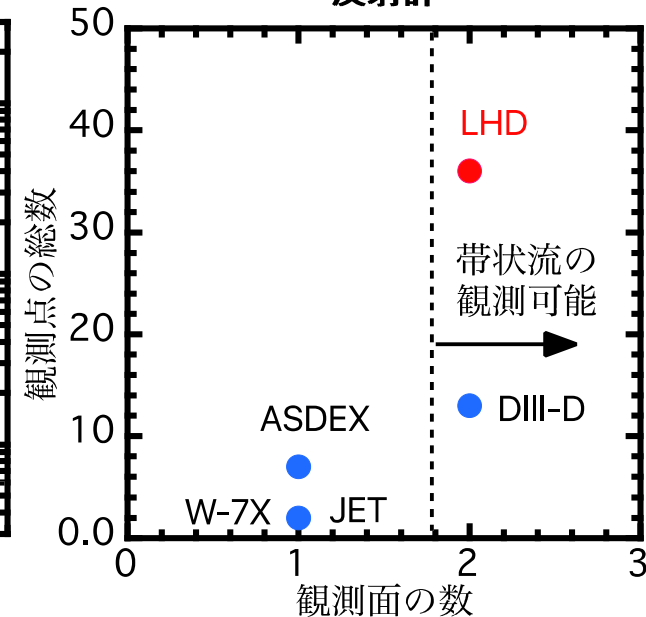
トムソン散乱計測



LHDのトムソン散乱なら、小さい磁気島(温度の平坦化)の発生・消滅も瞬時に観測できる

乱流の空間分布計測

反射計



LHDの反射計なら、観測面が複数あるので、帯状流の観測ができる

目標とする成果と その学術的意義

プラズマという極限的な状態の現象を調べることにより、様々なシステムの複雑な現象を解明する。

「集団現象」を理解する科学

⇔ 粒子物理: 宇宙の「基本単位」を理解する科学

- 万象のダイナミズム(多数要素が連結して生じるマクロ現象)
創発性, 突発現象, 秩序形成, 階層性
- 無限自由度の多様性(平均・分散では捉えきれないミクロ現象)
エントロピーチャレンジ, 位相空間ダイナミクス
- 非平衡・開放系の複雑性(環境と相関する複雑現象)
持続可能性, 物質循環, 異相間相互作用

宇宙・天体

原子, 原子核

環境(大気・海洋, 生態系)

生命現象

量子多体系, マテリアル

社会現象, 経済システム

実験物理の特徴である「精密性」「定量性」「再現可能性」を活かし

分野を超える一般的な「概念」「モデル」「方法論」を生み出す

これまでも「エントロピー」「カオス」「可積分性」「位相混合」

目標とする成果と その学術的意義 – 長期ビジョン

	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	2030年度	2031年度	2032年度	学術的達成目標
研究基盤 の整備と運用	<u>残留トリチウム対策（本体整備）</u>			<u>機器アップグレード</u>							
	<u>計測器整備</u>			<u>計測器整備</u>							
	<u>加熱装置整備</u>										
	<u>装置改修のための設計活動</u>										
核融合研究	プラズマ・異相相互作用（原型炉開発のアクションプランへの取り組み），等										・原型炉開発の加速への 独創的な貢献
	プラズマ量子プロセス（核融合プラズマの不純物挙動研究として）， 位相空間乱流（乱流輸送，帯状流研究として），等										・核融合プラズマの高性能化を可能とする原理の理解
	突發現象のメカニズム（ディスラプション研究として）， プラズマ量子プロセス（ダイバータ熱負荷低減研究として）， プラズマ・異相相互作用（燃料挙動の研究として），等										・核融合プラズマの定常化を可能とする原理の理解
学際的展開	位相空間乱流（磁気圏や太陽における粒子加速研究として），等										・プラズマ現象を通じた 普遍原理・現象の理解
	突發現象のメカニズム（太陽フレア研究として）， プラズマ量子プロセス（キロノバ，高エネルギー天体研究として），等										・実験室物理による宇宙・天文現象の理解
	プラズマ量子プロセス（EUV光源の研究として）， プラズマ・異相相互作用（プロセスプラズマ制御の研究として），等										・核融合科学技術の社会実装

核融合科学のパラダイム転換によって期待される成果・効果

- ✓ 核融合研究の現状分析と未来展望に基づき、**核融合科学の学術的な再定義**で世界に先駆ける。装置方式のパラメタ競争の時代から、**装置方式を超越する一般的な学術的課題を学際的に研究する**時代へパラダイム転換する。
- ✓ LHDの共同利用を真に世界最先端かつ学際的とするために、具体的な研究課題を学際的に定式化し、共同研究チーム「**ユニット**」を構成する。
- ✓ **LHDを学際的な研究基盤(プラットフォーム)として活用**。核融合に限らず、宇宙・天体プラズマの内部構造・ダイナミクスを研究する。**計測性能は世界トップ**。
- ✓ 大学の研究者は、LHDを学術研究基盤として共同利用することで、国際的競争力のあるプロジェクト研究を実施できる。**全国の大学の研究レベルアップ**に貢献する。
- ✓ 核融合研の共同研究で実施される学際的・国際的なプロジェクトに参加する学生、PD、若手研究者は、トップレベルの研究を通じて、**活発な頭脳循環の中で、国際的・学際的リーダーとして育成**される。

核融合科学学際連携センターと関連プロジェクト

核融合科学学際連携センター

開発領域・先端学術領域・技術領域の3つの学際的新領域とユニット群をつなぐ学際的研究を推進

大学や開発研究機関，産業界との共同研究を先導・支援する総合拠点として『核融合科学学際連携センター』を置き，既成分野の枠を越境する挑戦的な共同研究を展開する

- 専門性の高い特任教授による，核融合科学の学際的共同研究の支援
- 外国人客員による，海外の研究機関との研究協力の推進と海外への成果発信
- クロスアポイントメントによる，大学等との強力かつ安定な連携体制構築
- 特別研究員によって，参加する若手研究者のキャリアパスを整備して，国際プロジェクトでリーダーシップを取る人材の育成

開発研究連携部門

核融合開発研究との連携を担う

- 開発研究機関の研究施設の共同利用体制の構築
- 国際的研究プロジェクトとの連携研究の支援

関連プロジェクト (1) 核融合開発共同研究

- 核融合プラズマ実験装置であるJT-60SAを学際的な学術研究に活用するなど，分野を超えた連携
- 大学共同利用の仕組みを活かして，ITERの運転や原型炉の概念設計活動に対する独自の新たな貢献

先端学術研究連携部門

核融合科学の学際化を担う

- 国内外の主要研究施設をつなぐ研究ネットワーク構築
- オープンサイエンスの推進

関連プロジェクト (2) 核融合・プラズマデータベースの構築

- 国内実験装置の実験データリポジトリを構築し，データを共有・公開
- データシェアリングによる他分野との共同研究の促進と国際競争力強化

関連プロジェクト (3) 先進プラズマ装置開発研究

- 所内の研究プラットフォームの整備

産学連携部門

核融合技術の社会実装を担う

- 核融合で培った技術の，未来社会実現 (Society5.0, SDGs) にむけた社会実装支援

産学連携の例

- 液体水素利用による，
 - 高温超伝導技術を用いた，再生可能エネルギーの発電変動補償
 - 極低温冷却量子コンピュータ等の量子技術の開拓
- 世界最高レベルのレーザー装置および光学素子の産業応用
- 光源開発等の産業応用に向けた分光データ整備

核融合研の新たな学術経営体制

広い学術界
との連携

核融合研

所長
リーダーシップ

運営会議

共同利用機関としての運営

戦略室

分析と改善策

学術経営委員会
ユニットとプラットフォーム
の総合調整

ユニット等評価委員会
アカデミックプランのC&R

ユニットに
参画する
共同研究者

クロアポ等
による連携

ユニット

コンテンポラリーな課題を
学際的に「定式化」

1. メタ階層ダイナミクス
2. 構造形成・持続性
3. 位相空間乱流
4. プラズマ量子プロセス
5. プラズマ・複相関輸送
6. 可知化センシング
7. プラズマ装置学
8. グローバルシミュレーション
9. エネルギー・粒子高流束下材料学
10. 超伝導・低温工学
11. 核融合原型炉・基盤研究

プラットフォーム 企画・運営チーム

世界をリードする
共同研究を支える
ハードウェアとデータベース

1. 超高温プラズマ学術研究基盤 (LHD)
2. スーパーコンピュータ (雷神)
3. 革新的計測技術開発施設
4. 低温・超伝導工学研究施設
5. ビーム工学研究施設
6. ブランケット工学研究施設

学際連携センター
(連携事業の推進)

開発研究
との連携

所外の新鋭
研究施設
(ITER, BA等)

先端技術
社会実装
(水素技術, レーザ,
超伝導等)

核融合研改革のための主要な事業計画(まとめ)

従来体制と運営(～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**
- 新展開のための実験研究プラットフォーム整備
基盤的設備等整備分
- 核融合科学学際連携センター **教育研究組織改革分**
 - 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