



2023年11月21日

核融合研究を取り巻く世界情勢と核融合科学研究所が見据える未来

Part 1

核融合研究の最前線と学術研究基盤

自然科学研究機構 核融合科学研究所 所長 吉田善章



INDEX

核融合研究の現状とこれから	▶ 1
核融合科学のパラダイム転換	▶ 5
学術研究の役割	▶ 9
核融合科学研究所の取り組み	▶ 17
まとめ	▶ 25



激動する核融合研究の中で学術研究が果たすべき役割

*内閣府HP https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/fusion_gaiyo.pdf

内閣府 Cabinet Office フュージョンエネルギー・イノベーション戦略の概要

- ✓ **フュージョンエネルギーを新たな産業として捉え、構築されつつある世界のサプライチェーン競争に我が国も時機を逸せずに参加。**
- ✓ ITER計画/BA活動、原型炉開発と続くアプローチに加え、産業化等の多面的なアプローチによりフュージョンエネルギーの実用化を加速。
- ✓ **産業協議会の設立、スタートアップ等の研究開発、安全規制に関する議論、新興技術の支援強化、教育プログラム等を展開。**

核融合科学

- 実用化を加速する方策
- 実用化に先駆けて行うべきこと

エネルギー・環境問題の解決策としてのフュージョンエネルギー

- 2050年カーボンニュートラルの実現
- ロシアのウクライナ侵略により国際的なエネルギー情勢が大きく変化
- エネルギー安全保障の確保

フュージョンエネルギーの特徴 (①カーボンニュートラル、②豊富な燃料、③固有の安全性、④環境保全性)

エネルギーの覇権が資源から技術を保有する者へとパラダイムシフト

新たな産業としてのフュージョンエネルギー

- 諸外国におけるフュージョンエネルギー開発への民間投資の増加
- 米国や英国政府はフュージョンエネルギーの産業化を目標とした国家戦略を策定 (= 自国への技術の囲い込みを開始)
- 技術的優位性と信頼性を有する我が国が、技術で勝って事業で負けるリスク
- 他国にとっては有力なパートナーであり、海外市場を獲得するチャンス

出典: <https://science.osti.gov/-/media/fes/pdf/fes-presentations/2022/WuZuo-FEB-Liuhong-roundtalk>

開発を加速するためには科学的な不確実性を低減する必要

フュージョンインダストリーの育成戦略 Developing the Fusion industry

【見える】

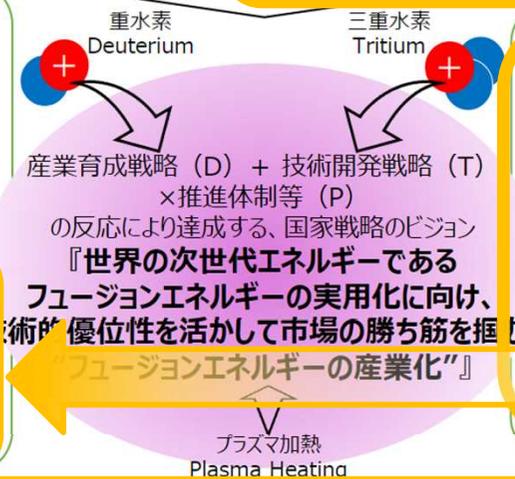
- 研究開発の加速による原型炉の早期実現
- 技術及び産業マップ作成による**ターゲット明確化**

【繋がる】

- R5年度の設立を目指す核融合産業協議会でのマッチング

【育てる】

- 民間企業が保有する**技術シーズと産業ニーズのギャップを埋める支援をR5年度から強化**
- 安全規制・標準化に係る同志国間での議論への参画
- 固有の安全性等を踏まえた**安全確保の基本的な考え方の策定**



フュージョンテクノロジーの開発戦略 Technology

- ゲームチェンジャーとなりうる**小型化・高度化等の** 独創的な新興技術の支援策の強化
- ITER計画/BA活動を通じて**コア技術の獲得**
- 将来の**原型炉開発を見据えた研究開発の加速**
- フュージョンエネルギーに関する**学術研究の推進**
- 新技術を取り組むことを念頭においた**原型炉開発のアクションプランの推進**

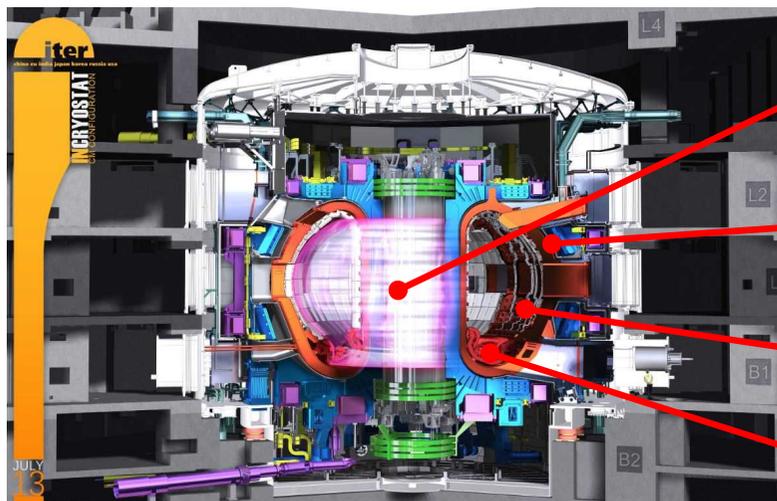
イノベーションの指導原理となる強力な基礎学術が必要

核融合を支える広範で強靱な産業構造を構築するためには学際化が必要

フュージョンエネルギー・イノベーション戦略の推進体制等 Promotion

- 内閣府が政府の司令塔となり、関係省庁と一丸となって推進
- 原型炉開発に向けて、QSTを中心にアカデミアや民間企業を結集して技術開発を実施する体制 (フュージョンテクノロジー・イノベーション拠点の設立)
- 将来のキャリアパスを明確化し、フュージョンエネルギーに携わる人材を産学官で計画的な育成
- 国内大学等における人材育成を強化するとともに、他分野や他国から優秀な人材の獲得 (フュージョンエネルギー教育プログラムの提供)
- 国民の理解を深めるためのアウトリーチ活動の実施

果敢な挑戦を支援する学術基盤が必要



炉心プラズマ：閉じ込め性能・システム安定性

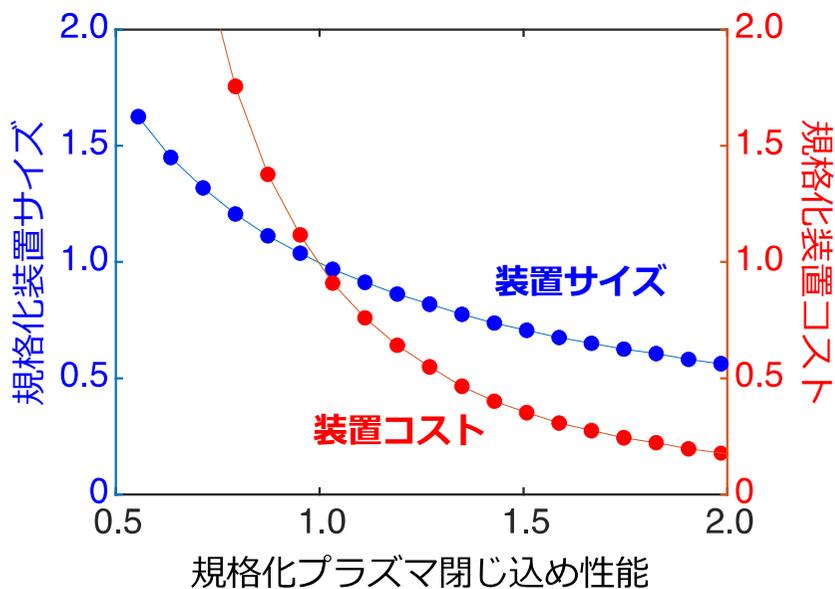
超伝導マグネット・低温技術：高温超伝導，水素・窒素冷却

炉材料：照射損傷，放射化

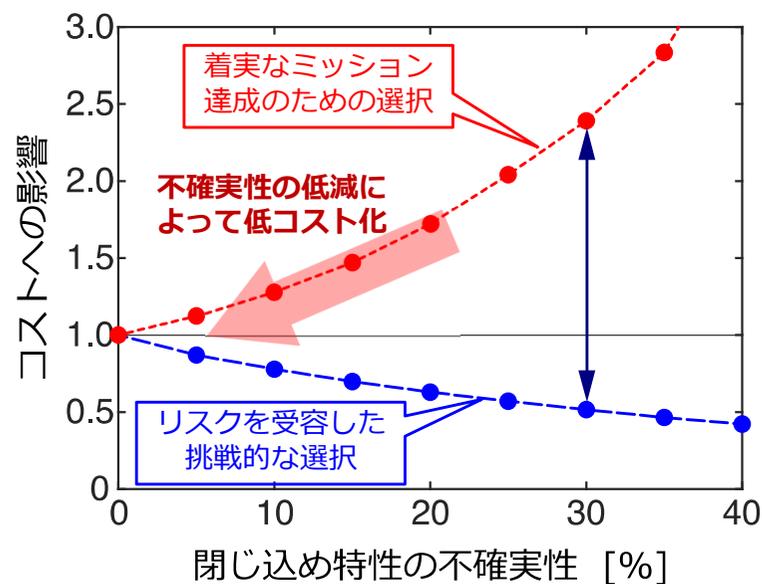
ダイバータ：超高熱流束

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*



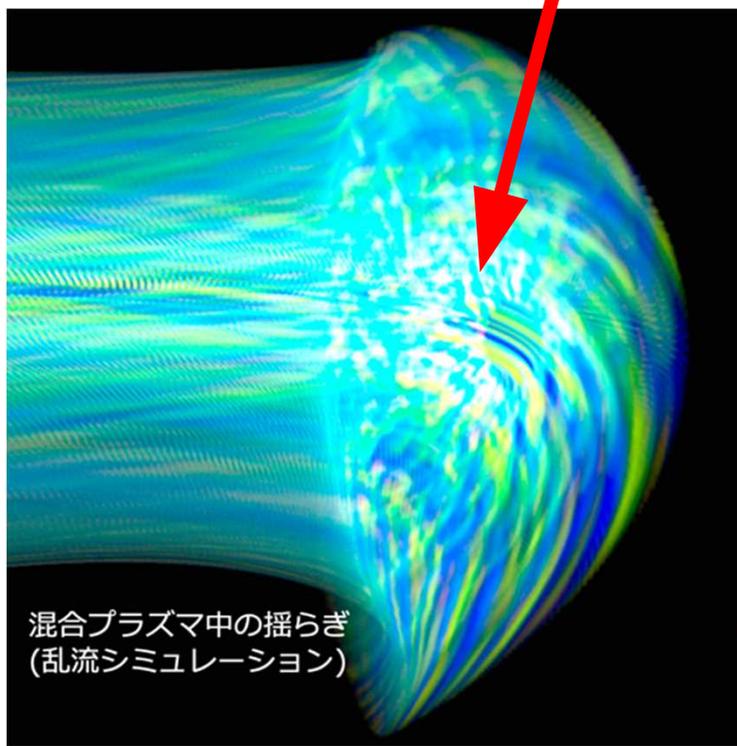
プラズマ特性の高精度予測が核融合炉のコスト削減にインパクト*

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

高性能化への
指導原理

高精度・高分解能
ミクロな物理に深化した
プラズマの総合的理解
本プロジェクトで推進

プラズマの内部で起こる複雑現象の
高精度・高分解能計測



混合プラズマ中の揺らぎ
(乱流シミュレーション)

「マイクロ集団現象」の理解

自由エネルギーの乱流や帯状流への分配のメカニズムを理解

自由エネルギーの蓄積と解放のメカニズムを理解

プラズマの閉じ込め性能予測の不確実性を低減

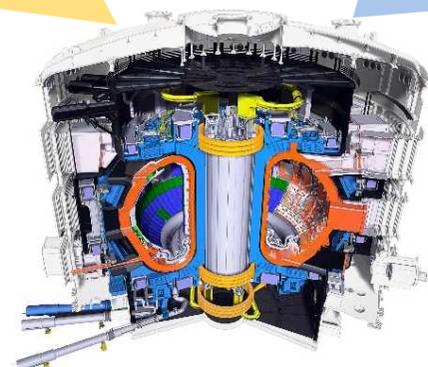
プラズマ安定維持の障害となる突発的崩壊現象の予測と回避

改善への
新しいルート

「炉心そのもの」
の開発

高温・高密度・高閉じ込め

大型装置 (ITER, JT-60SA) を用いた
高性能炉心プラズマの実証研究
国際協力で推進

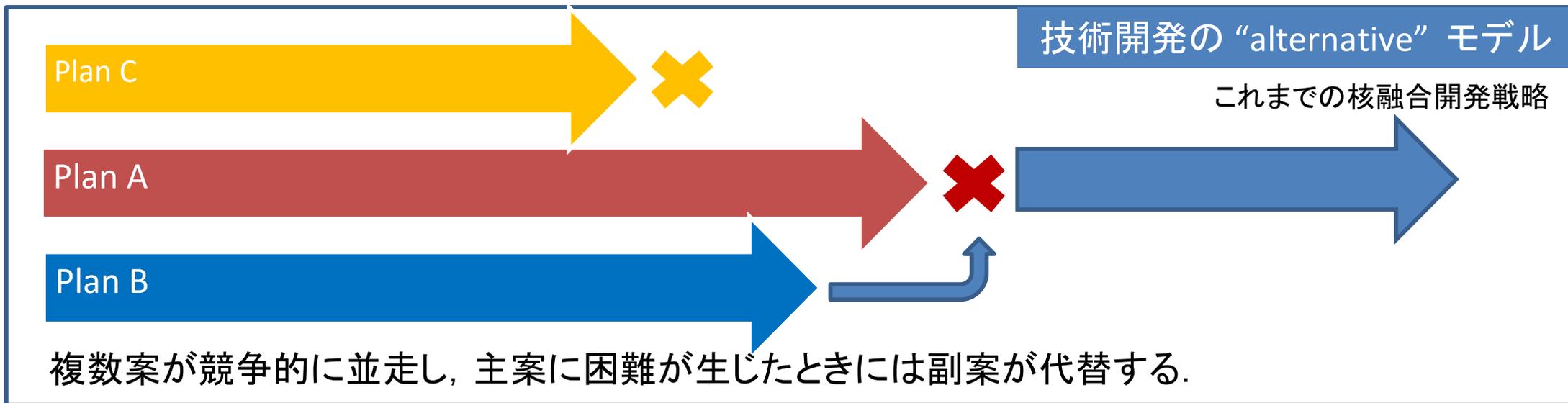


核融合条件の達成

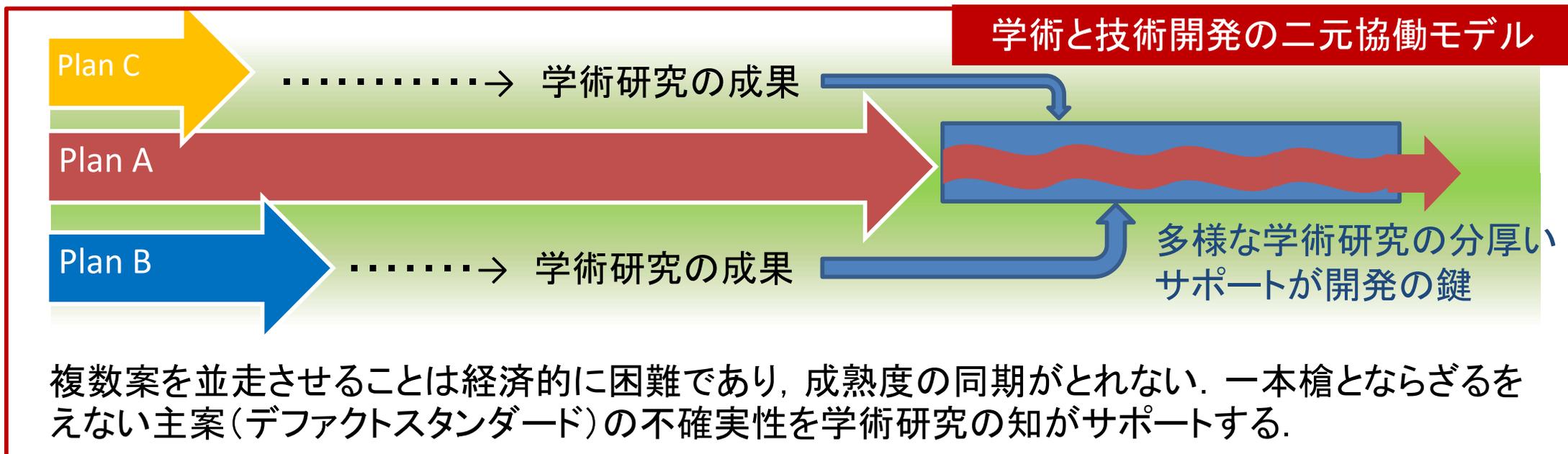


INDEX

- 核融合研究の現状とこれから ▶ 1
- 核融合科学のパラダイム転換 ▶ 5**
- 学術研究の役割 ▶ 9
- 核融合科学研究所の取り組み ▶ 17
- まとめ ▶ 25



これからの核融合開発戦略

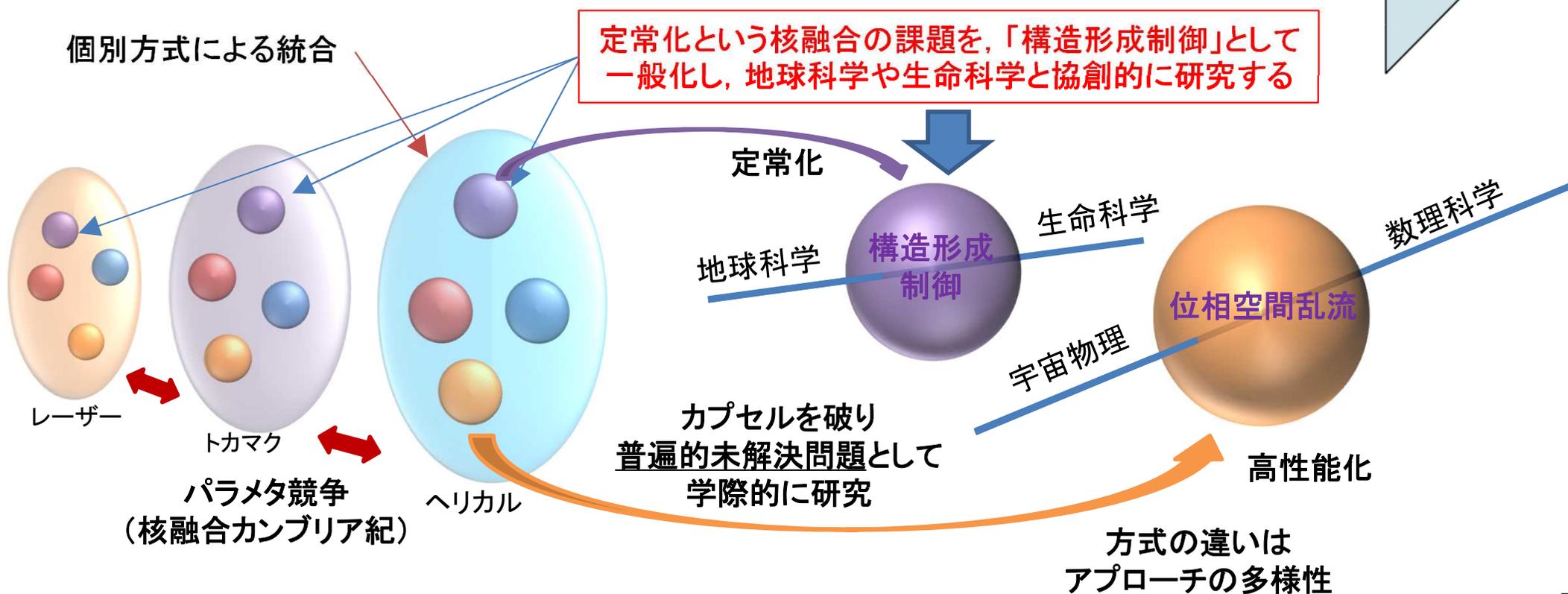


核融合科学のパラダイム転換 — 学問的進化を先導

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



研究の進化：「そのもの」の研究から「一般性」の研究へ

黎明期

成長初期

成長・発展期

星のメカニズム
に学ぶ

色々な方式で
パラメタ競争

「そのもの」を作ってみなく
ては何も分からない

学際的に定式化された課題に
分節化できるレベルに進化

様々な方式の
カンブリア爆発

熱核融合反応の実証

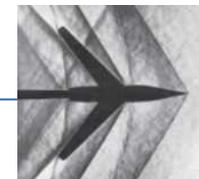
参考：航空機開発と流体物理の関係

自然に学ぶ

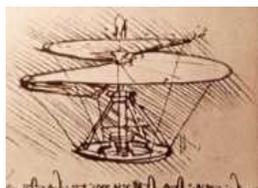
色々な方式の提案

飛行の実証

「そのもの」の研究から「分節化・定式化された科学」へ



学術研究がイノベーションを駆動



開発研究
実用化





INDEX

- 核融合研究の現状とこれから ▶ 1
- 核融合科学のパラダイム転換 ▶ 5
- 学術研究の役割 ▶ 9**
- 核融合科学研究所の取り組み ▶ 17
- まとめ ▶ 25

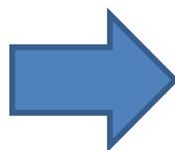


核融合エネルギー実現への学術研究の貢献

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



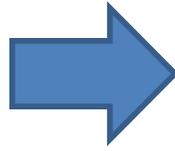
開発研究への貢献

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

突発現象のトリガーマカニズムの発見

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マカニズムがプラズマの高速計測を用いた実験で発見

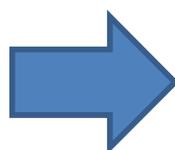


核融合プラズマの突発的崩壊（ディスラプション）の回避

トリガーマカニズムの解明は、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

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

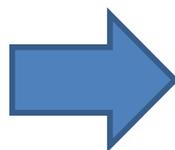


燃焼プラズマの自己加熱の予測精度向上

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

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



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

ITER
建設

ITER
運転

核燃焼

原型炉

現実世界の複雑性を理解する

世界とは？ → 複雑なので「細分化」して考える



- 「要素」に分解 → 「物」の成り立ちを理解する
- 「テーマ」に分解 → 「事」の在り様を理解する

集団現象の科学

多くの可能性 のなかで、何が どのように 実現するのか？

- 世界はどのように構成されているのか？ どこまでが可能か？

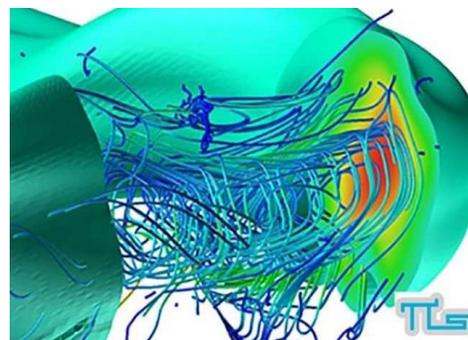
- 何が選択されるのか？

作用（ラグランジアン）の「和」と「制限」
 変分原理：作用原理とエントロピー原理
 対称性，モジュライ，階層，葉層構造
 カオス，乱流

- 秩序はどのように生まれ，どのように働く？
- 無秩序はどのように展開し，どのように働く？

具体的なテーマ

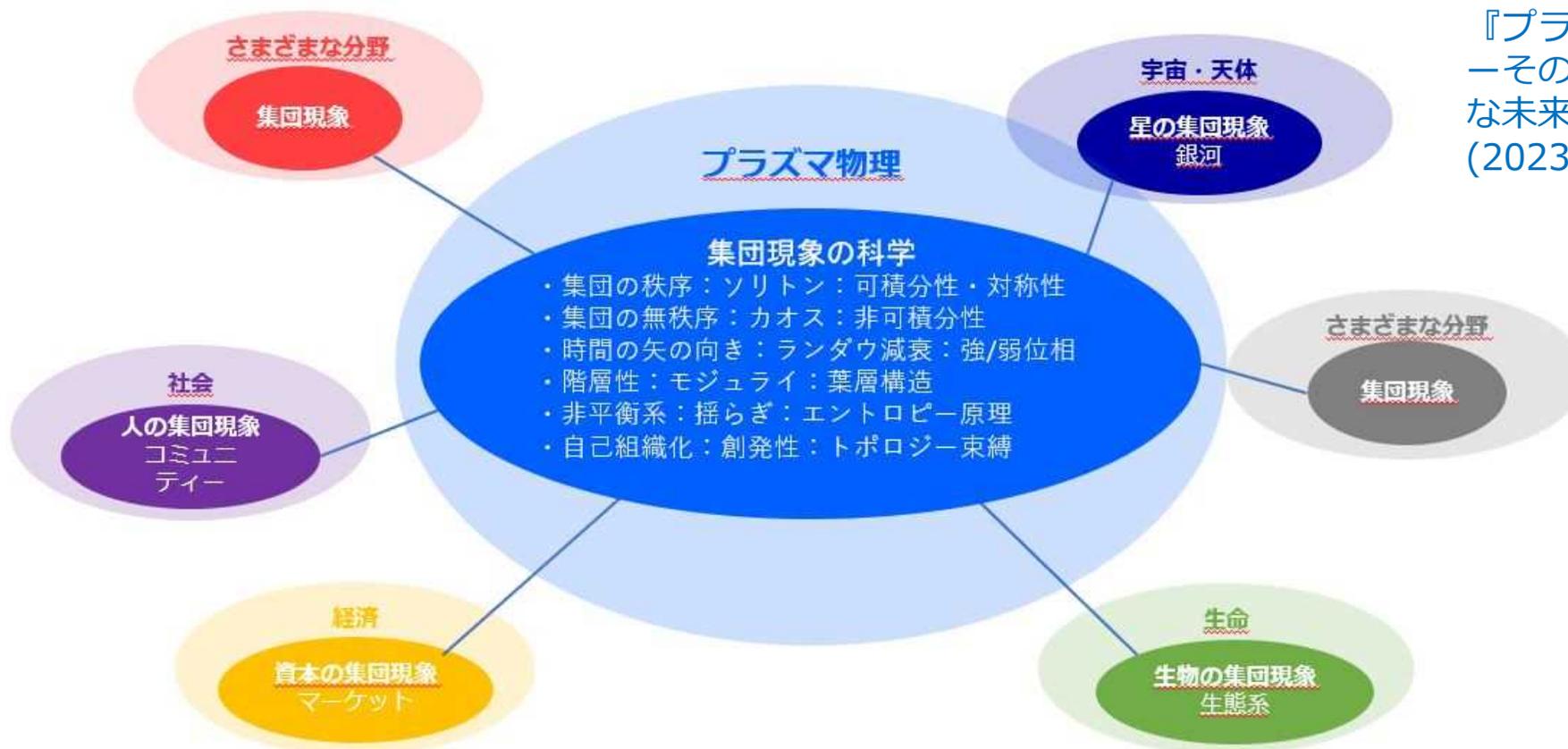
- 局所的な現象は拡大するのか消散するのか？
- 突発的な大域的現象はどのようにして生まれるのか？
- 大域化した運動は秩序をもつのか乱れるのか？
- 大域的な運動は世界（環境）をどのように変えるのか？



学際的連携の中でプラズマ物理が果たす役割

- プラズマ物理は、膨大な数の荷電粒子の集団から構成されるマクロな系「プラズマ」において生起する多様な複雑現象をあつかう
- 荷電粒子の集団であるプラズマは、電磁場（光を含む）を用いた様々な計測法や制御法を駆使できる → 高い精度と蓋然性をもつ研究

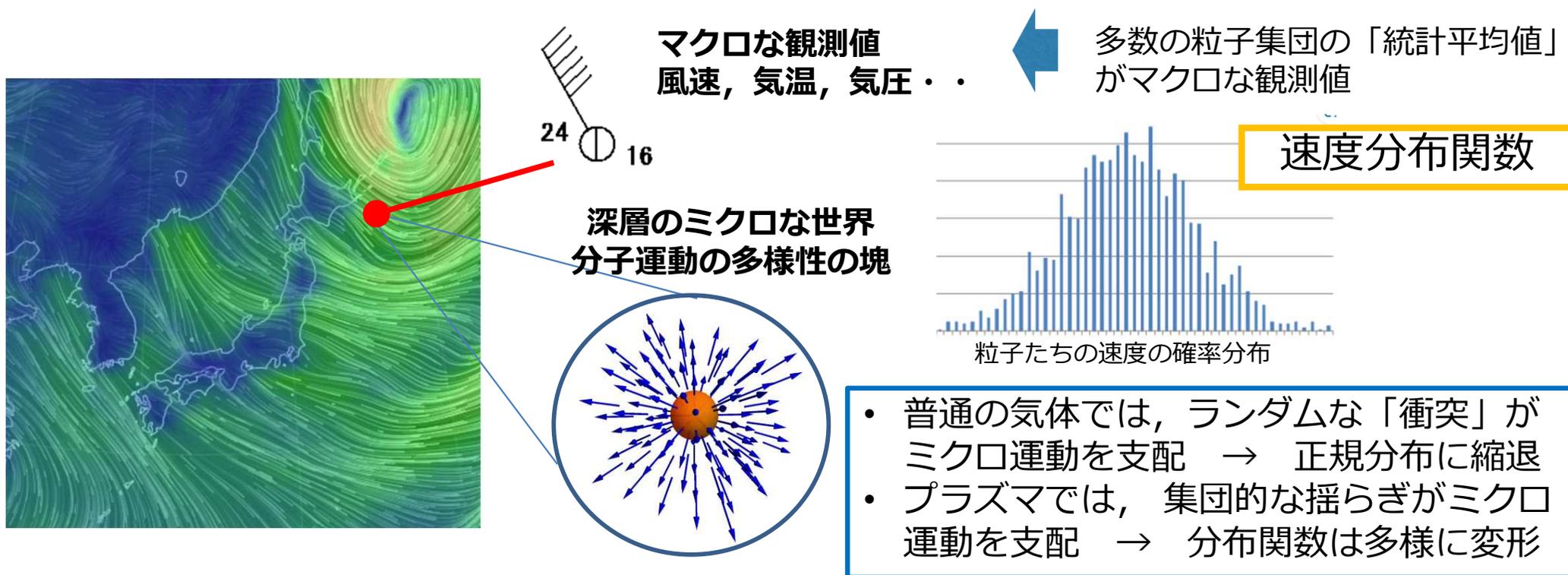
日本学術会議・見解
『プラズマサイエンス
—その学際的发展と豊かな未来社会のために—』
(2023年), P.12



核融合プラズマの閉じ込め特性を支配するマイクロ集団現象の解明

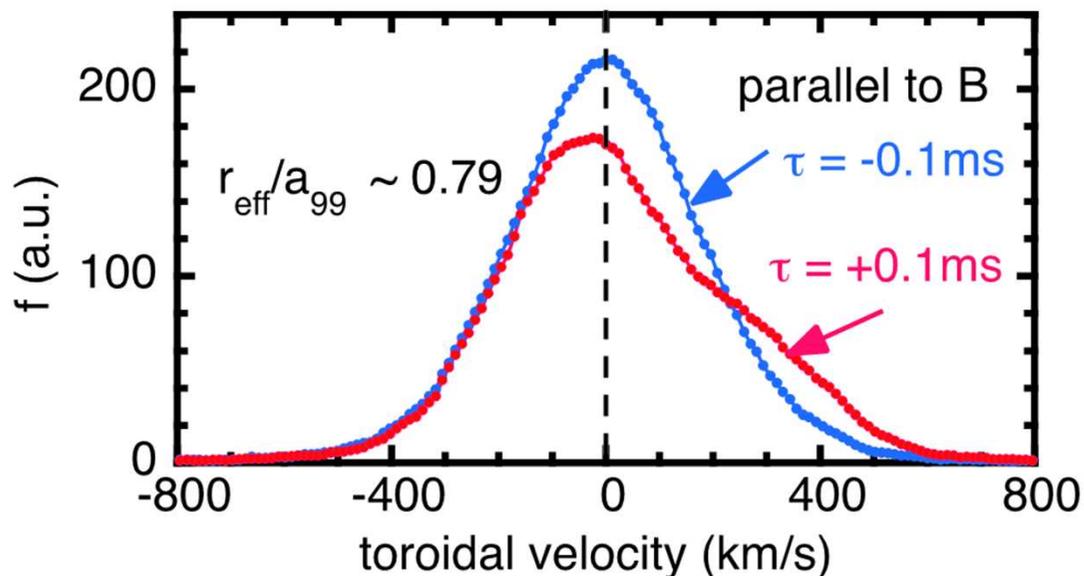
→ 核融合プラズマの性能の科学的評価

- **科学目標**：超高温プラズマの振る舞い（核融合炉心，宇宙・天体に共通）を支配する「マイクロ集団現象」の物理を確立する。
- **方法**：「集団的な揺らぎ」を創発する「マイクロ階層」に分け入り「速度分布関数」を直接計測・制御。
- **アウトカム**：「集団的な揺らぎ」が引き起こす「閉じ込めの劣化」や「崩壊現象」の原因を解明し，核融合技術の科学的不確実性を低減。流転する万象に通底する集団現象の理解を深化。

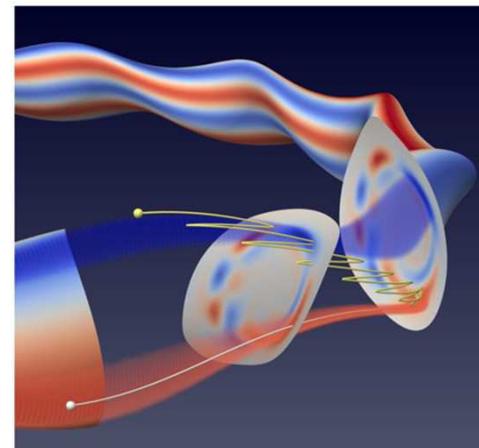


速度分布関数*を高精度・高時間空間分解能で計測・制御する

* 速度分布関数が一様な正規分布から歪むことで、揺らぎを創発する「自由エネルギー」が生まれる。



速度分布関数の突発的変化を精密に計測
(世界最高性能の荷電交換分光計測)



電場の揺らぎ（カラーコード）の中の
多様な粒子軌道
(世界最高性能のマイクロ・マクロ階層
連結シミュレーション)

マイクロ集団現象：速度分布関数でプラズマを理解

量子論：波動関数で物質を理解

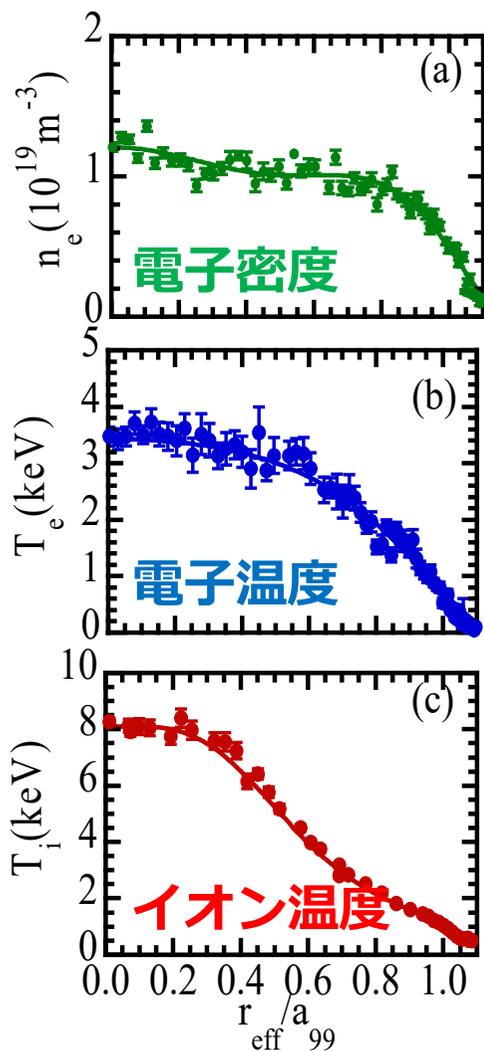


プラズマ・イノベーション

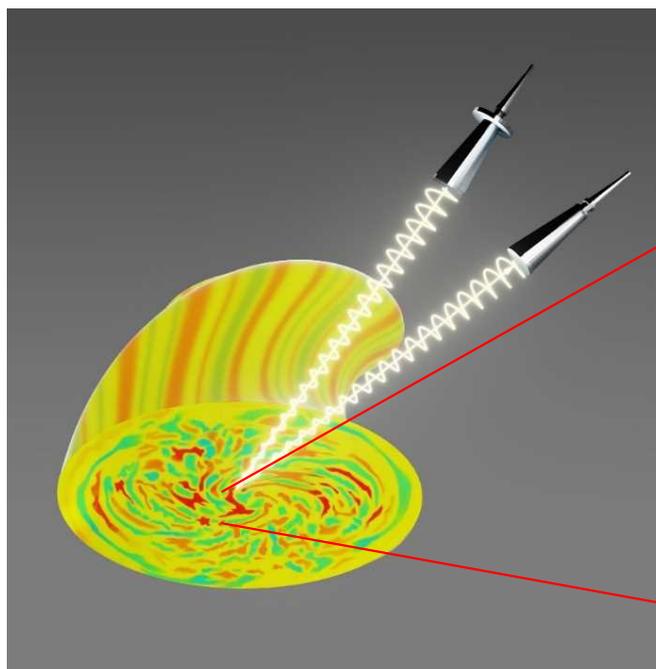
デバイス・イノベーション

マクロ物理量（温度，密度など）の分布を，ミクロ・マクロ連結シミュレーションで予測できる物理モデルを確立する → **高性能装置設計の指導原理**

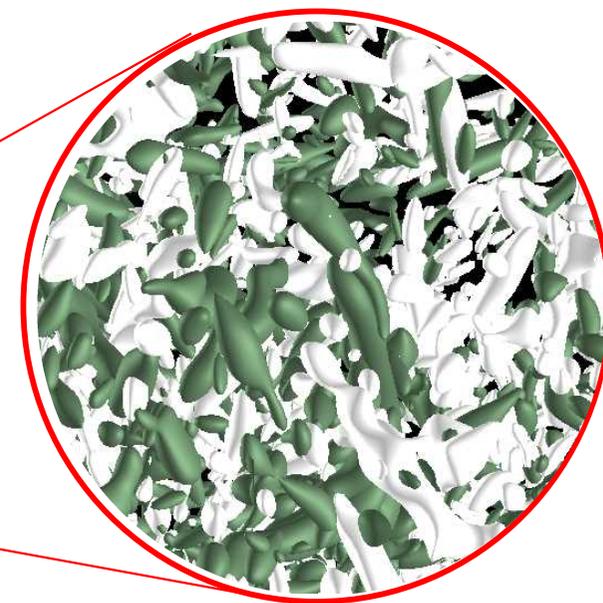
マクロな物理過程



マイクロ波反射計



ミクロな物理過程



乱流構造シミュレーションの妥当性を乱流計測で検証する

炉心プラズマ性能の
予測精度を向上
→設計の指導原理



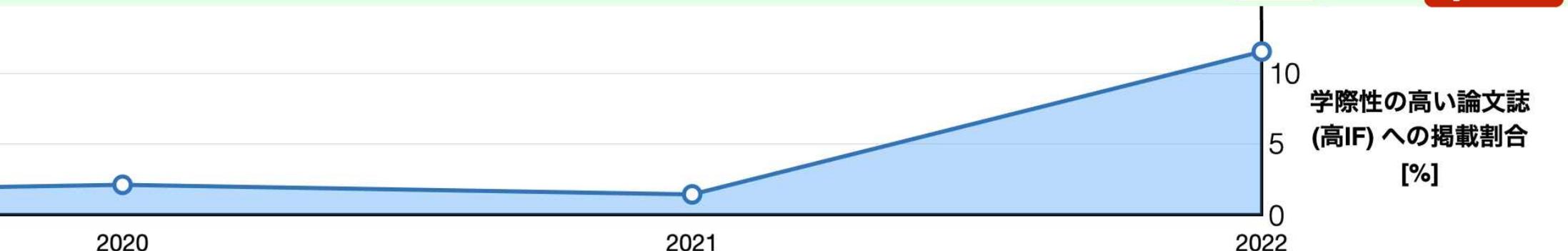
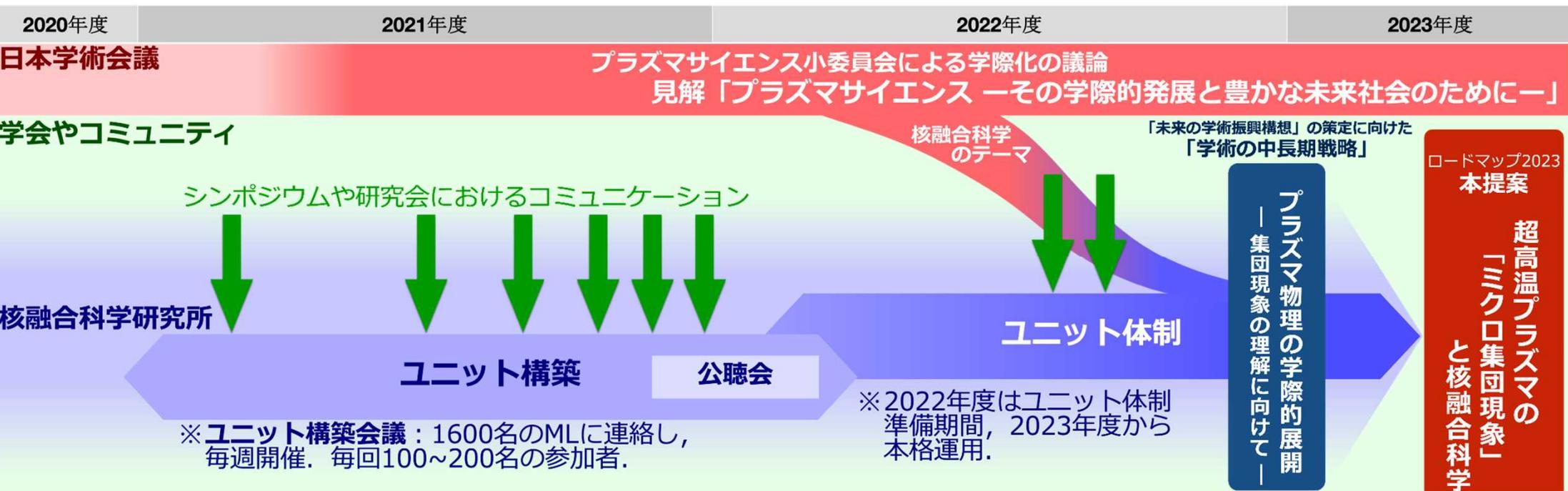
INDEX

- 核融合研究の現状とこれから ▶ 1
- 核融合科学のパラダイム転換 ▶ 5
- 学術研究の役割 ▶ 9
- 核融合科学研究所の取り組み ▶ 17**
- まとめ ▶ 25



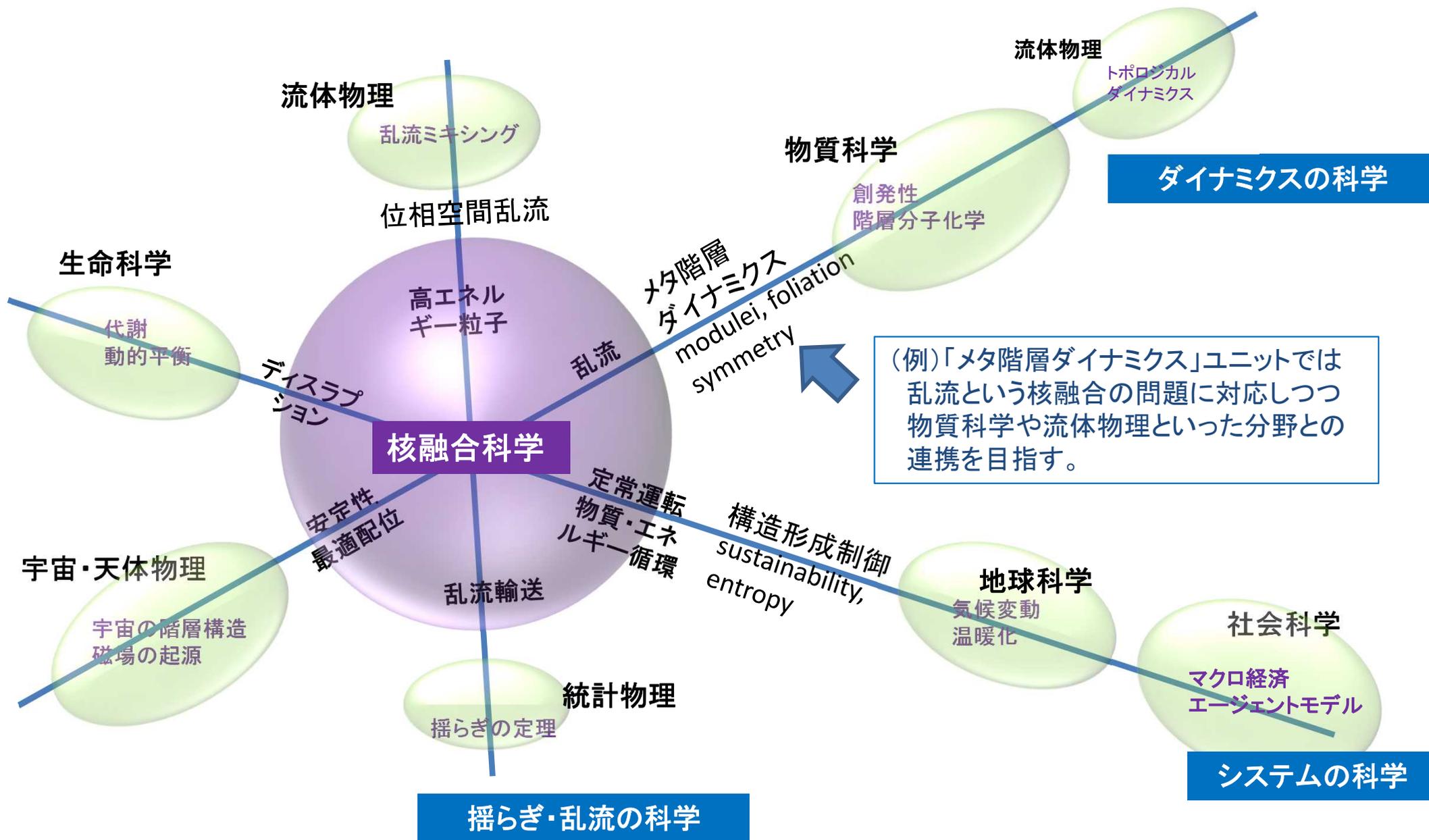
学際的な議論を通じた核融合科学の改革

- 日本学術会議・プラズマサイエンス小委員会における俯瞰的議論*
- 全国の研究者が参加し、2年間の議論を経て「ユニット」を構築
- 若手研究者（30代～40代）が議論をリード。ユニットリーダーの平均年齢は45歳
- 所内外の学際的なメンバーで構成される共同研究チームである6つの「ユニット」が連携して推進
- 学際化へ向けたパラダイム転換によって、発表論文の学際化が急速に進展中



* 日本学術会議・見解 <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-25-k230926-14.pdf>

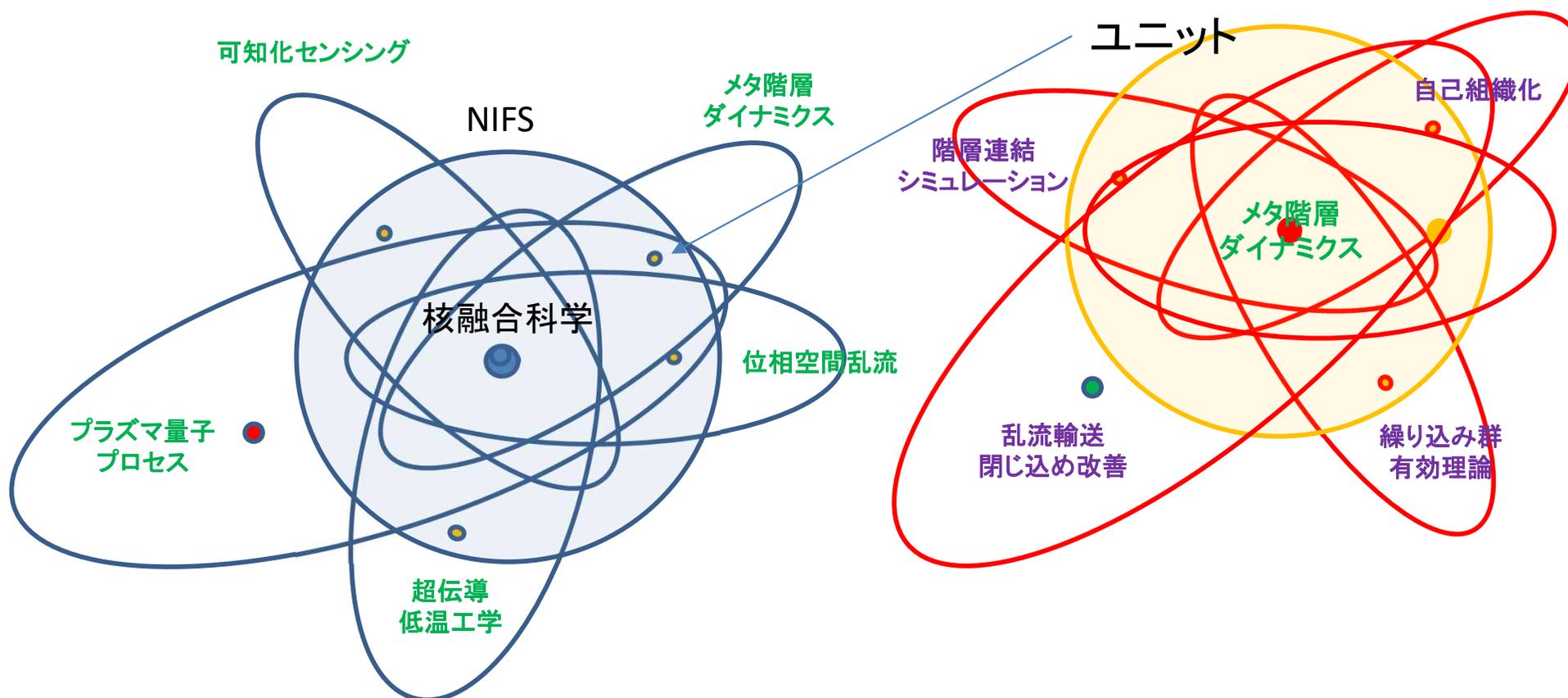
「ユニット」が掲げる学術的テーマの軸に沿った共同研究および人材の水平移動を実現



「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。



「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。

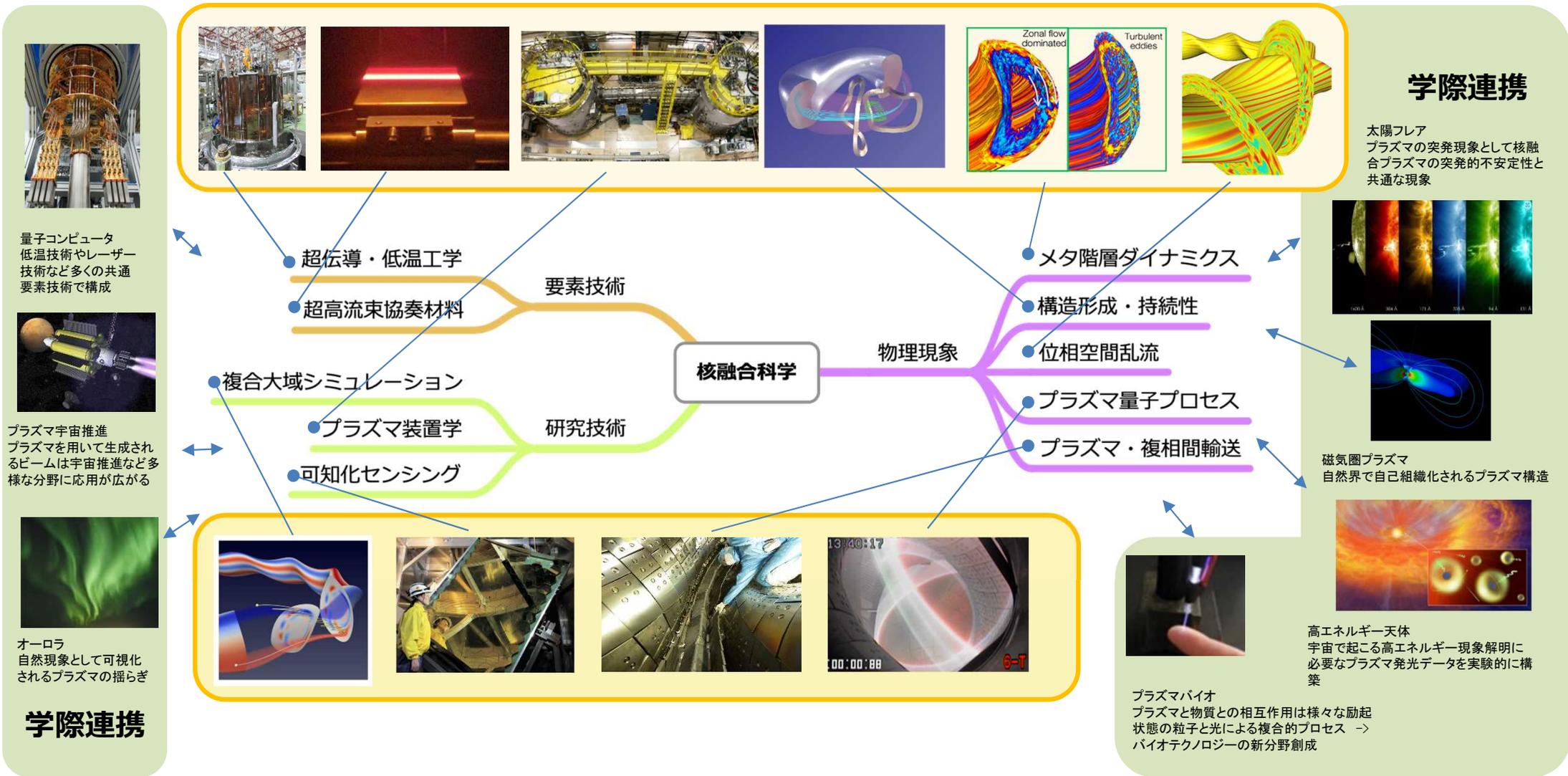
核融合の「未解決問題」を「学術的に定式化」し「学際的な共同研究体制」を構築して取り組む

ユニット名	軸	研究テーマ
メタ階層ダイナミクス 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、ミ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。
構造形成・持続性 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。
位相空間乱流 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(ミクロ集団現象)と乱流輸送のメカニズムを解明する。ミ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。
プラズマ量子プロセス 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。
プラズマ・複相間輸送 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

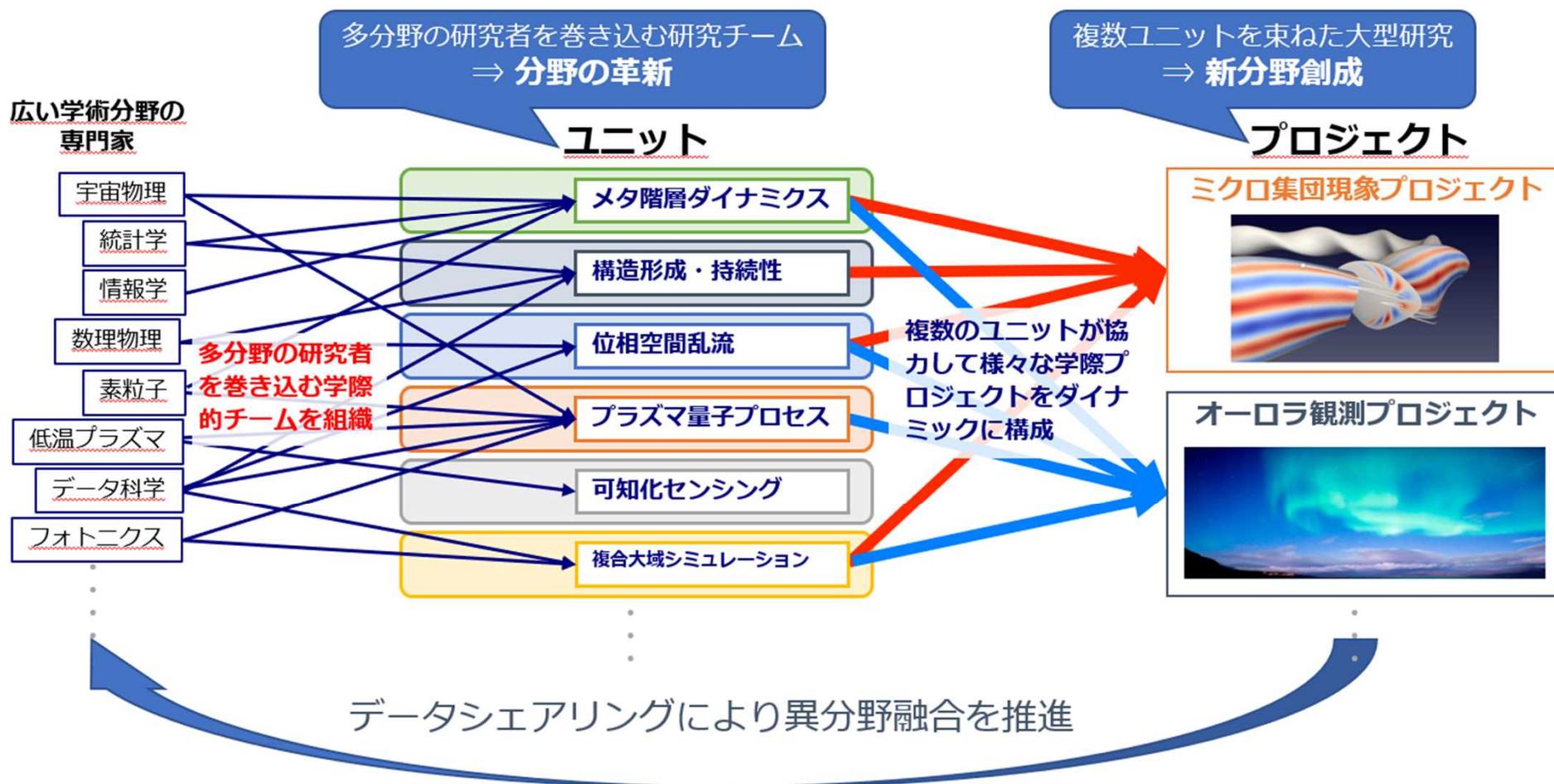
ユニット名	軸	研究テーマ
可知化センシング S&I: Sensing and Intellectualization	計測・データ	超高温プラズマの挙動を観測し、予測し、制御することは、核融合炉の高性能化に必須の課題である。我々は、飛躍的に高精度なプラズマ計測法を開発し、プラズマをホリスティックかつ精密に観測できるシステムを構築する。さらに、データサイエンスを駆使して解析し、視覚・聴覚・触覚などの情報へと変換して「可知化」する。計測・データ解析・表現手法を専門とする研究者らが一丸となって知的探究プロセスを体系化するこの取り組みは、核融合科学にとどまらず、多くの科学分野における現象理解に革新をもたらす。
プラズマ装置学 Plasma Apparatus	装置学・技術	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。
複合大域シミュレーション Complex Global Simulation	計算科学	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。
超高流束協奏材料 Ultrahigh-flux concerting materials	材料学	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、負荷が大きいからこそ発現する強化・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。
超伝導・低温工学 Applied Superconductivity and Cryogenics	低温	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。

核融合の未解決問題に学際的に取り組むユニット体制



ユニット連合で学術のフロンティアへ展開

「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





INDEX

- 核融合研究の現状とこれから ▶ 1
- 核融合科学のパラダイム転換 ▶ 5
- 学術研究の役割 ▶ 9
- 核融合科学研究所の取り組み ▶ 17
- まとめ ▶ 25**

- 核融合エネルギーの実現にむけた各国独自の取り組み
→ **フュージョンエネルギー・イノベーション戦略**
- 核融合システムのコンパクト化へ向けた挑戦的な研究開発
→ **「科学知」によって開発のリスクを低減**
- イノベーションを駆動する確固たる指導原理が必要
→ **ミクロ集団現象の物理**
- 核融合研究の黎明期から築いてきた盤石な学術基盤
→ **求心力のあるプロジェクトの現場で人材育成**

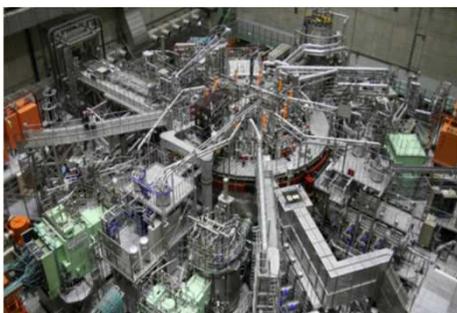


參考資料

超高温プラズマ学術研究基盤 (LHD)計画 ← LHDミッションの再定義

概要 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。

大型ヘリカル装置 LHD



LHDの内部

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)

2013

フロンティア事業

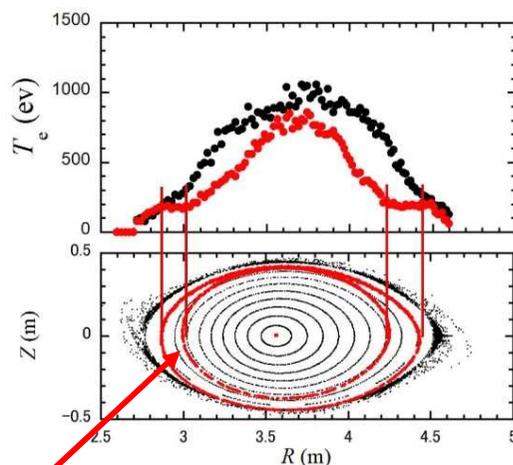
ヘリカル型核融合炉の可能性実証

重水素実験

2023

学術研究基盤事業

パラダイム転換: 核融合科学の学際的展開



プラズマ内部の粒子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。このデータでは、磁気島(プラズマを破壊する「癌」)を高精度CTで発見。

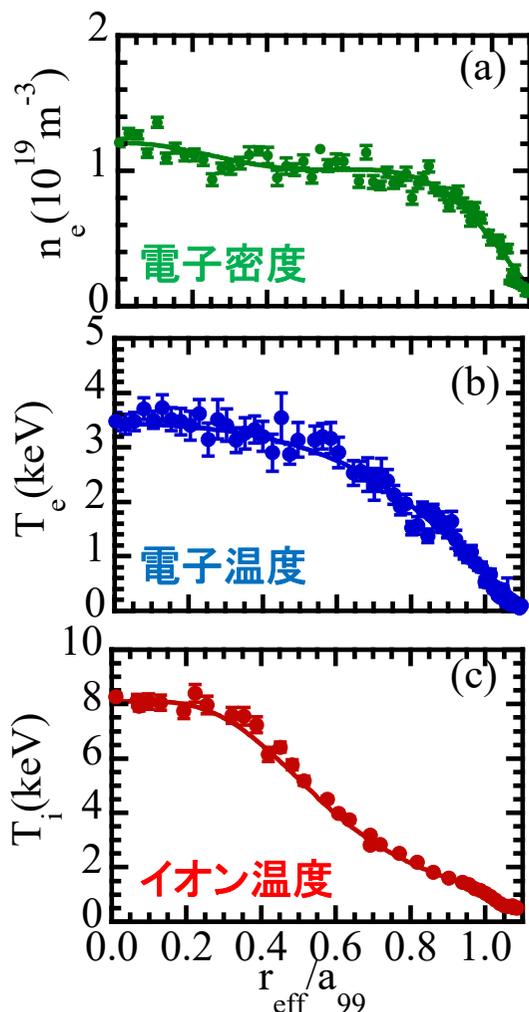
- 世界最大級の超伝導プラズマ実験装置
- 定常・高精度磁場を活かした精密な研究
- 世界最高精度の計測装置群によってプラズマ内部構造を解明

→ 宇宙の万象を実験研究

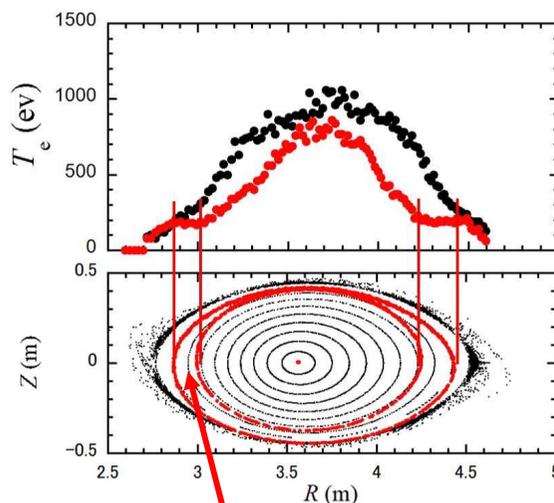
学際的展開: プラズマ物理学は、現実世界のリアルな在り様を理解したいという中核的問題意識をもち、それを宇宙・天体、大気・海洋、生命、社会の科学、数理科学等と共有している。プラズマは、荷電粒子たちの集団であり、電磁場・光を用いた様々な計測法や制御法を駆使して研究できる。精密性、定量性、再現性の高い研究から、新しい科学の概念や方法を生み出す。

世界最高性能の「CT」で解明する核融合プラズマの病理

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。

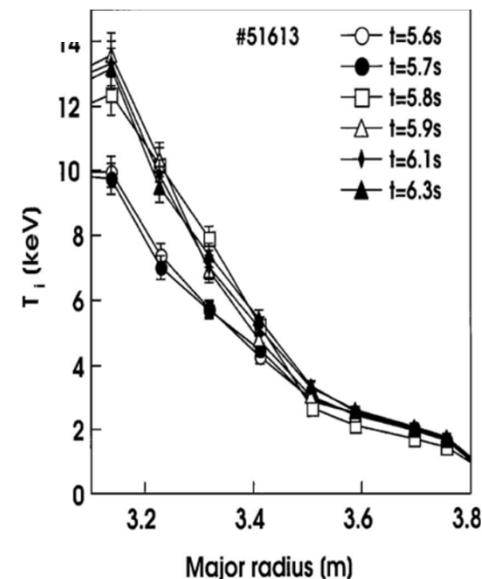


磁気島を発見(プラズマを破壊する「癌」を高精度CTで診断)

世界最大の装置 (JET) イギリス

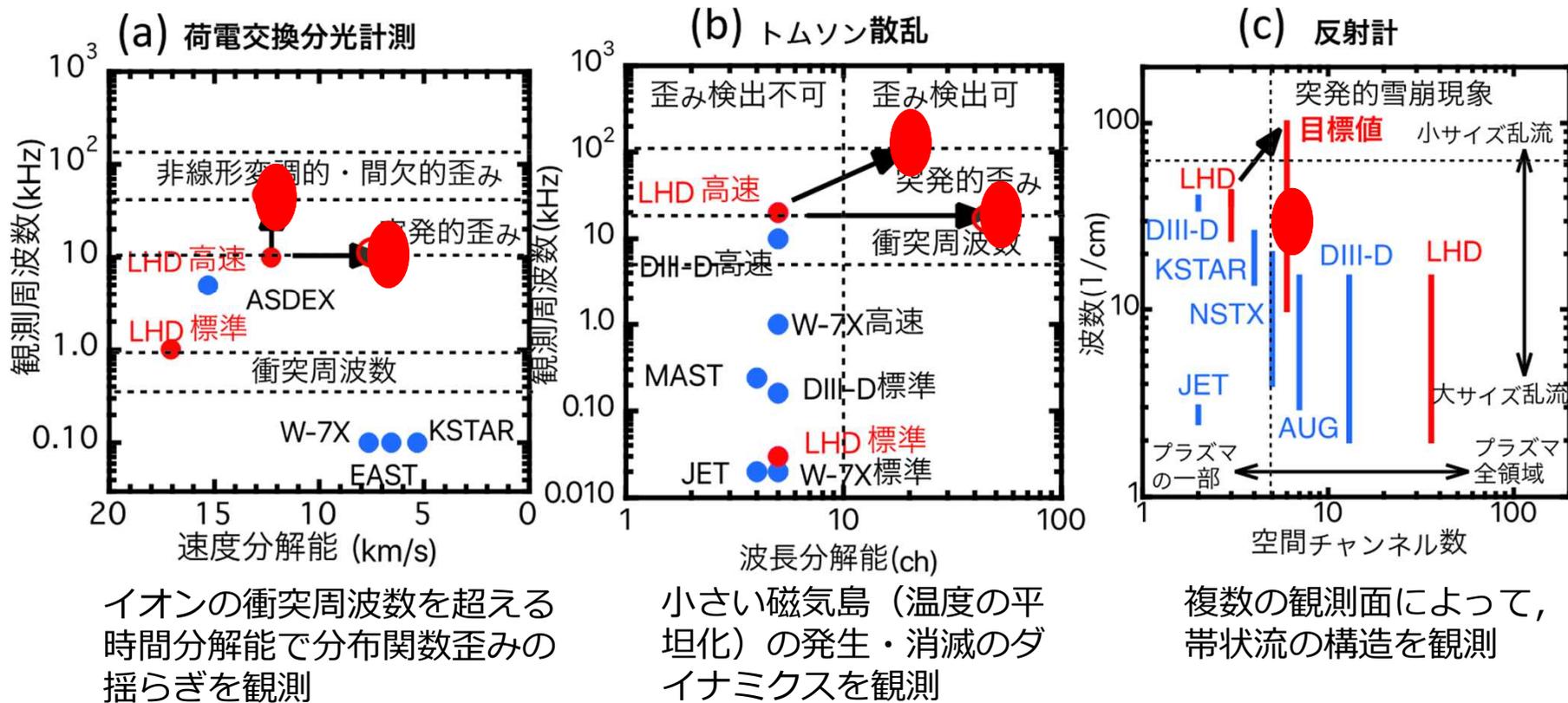
トップデータの立証のためには、この程度の精度で十分だが、物理研究のためには精密な計測が必要

イオン温度

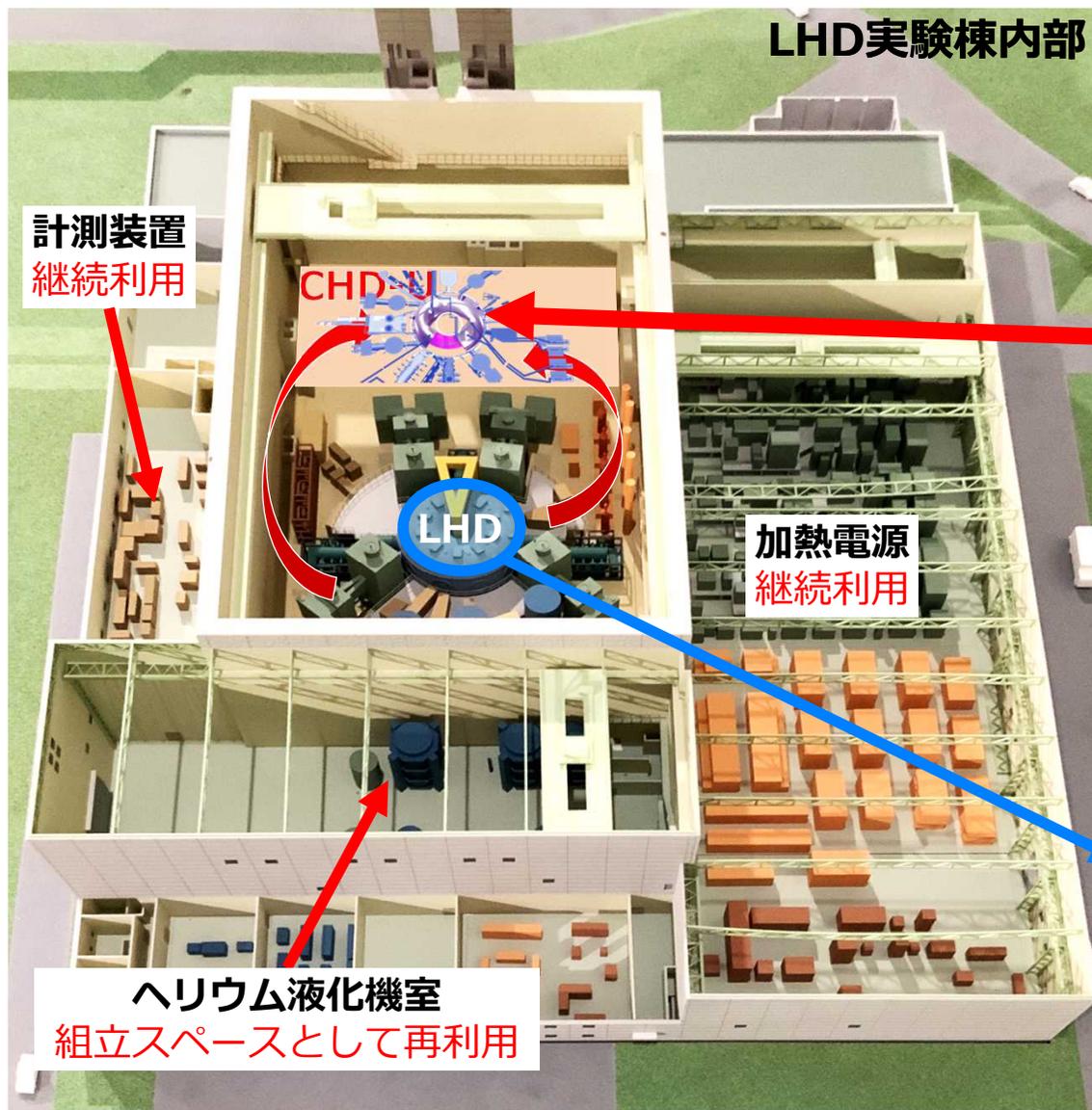


トップデータを狙う研究が遭遇する課題を解決するためには、「病理学」のための精密な診断が必要

LHDプロジェクトの中で築いてきた世界をリードする計測器群の時間・空間分解能



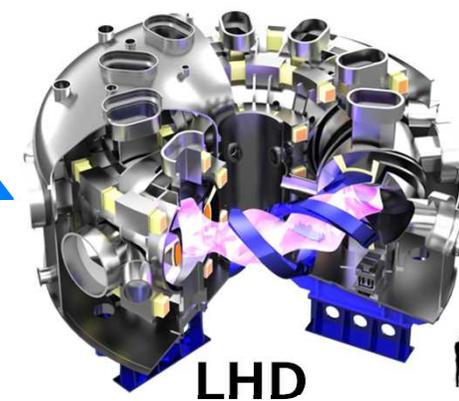
- 桁違いに高い分解能により、スケールの限界を超えて新たな世界を解明
- 世界一の精度でプラズマの内部を診断する「CT」。世界から多くの共同研究受け入れ
- これらの計測性能を更に強化し世界をリードする



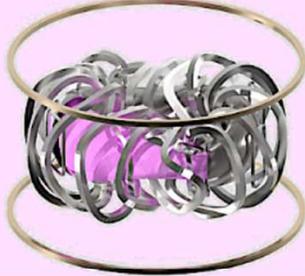
❖ LHD実験棟内外の様々な既存の設備を**継続利用**してCHD-Uを整備



CHD-U ; 新装置
LHD実験室内の旧組立スペースに設置



2025年運用終了

学術研究基盤LHD（現行計画）	Phase-I				Phase-II					
	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
<p>準備期間</p> <p>計測セクション：52億円</p> <p>マンピュレータセクション：51億円</p> <p>プラズマ装置：110億円</p>										
<p>• ミクロ集団現象のメカニズムと効果を解明するために必要な速度分布関数を高精度で制御、計測する装置群（計測セクション、マンピュレータセクション）を、これまでの学術研究基盤（LHD）を最大限活用して整備。</p> <p>• 既存のプラズマ装置（CHS）を活用してCHDとして整備し、Phase-I実験を実施。</p> <p>• Phase-I実験に並行して、プラズマ装置（CHD-U）の製作を進め、5年目に入れ替えて、Phase-II実験を実施。</p>	移設, 導入	移設, 導入	移設, 導入	移設, 導入	増強	増強	増強	増強	増強	
	CHDの整備	CHD-Uの制作・導入			Phase-I実験			Phase-II実験		
<p>LHD</p> 	<p>CHD</p>  <p>Phase-Iの実験に並行してCHD-Uを製作</p>			<p>CHD-U</p>  <p>磁場配位を幅広く制御することが可能</p>						
<p>プラズマの体積</p> <p>粒子を閉じ込める能力 註1</p> <p>分布関数を歪める能力 註2</p> <p>分布関数の自由度 註3</p>	<p>30 m³</p> <p>1 (基準値)</p> <p>1 (基準値)</p> <p>1 (基準値)</p>	<p>1 m³</p> <p>0.2 倍</p> <p>1.5 倍</p> <p>0.7 倍</p>	<p>4 m³</p> <p>0.5 倍 ~ 10 倍</p> <p>1.5 倍</p> <p>1.2 倍</p>	<p>(自在に変化させることが可能)</p>						

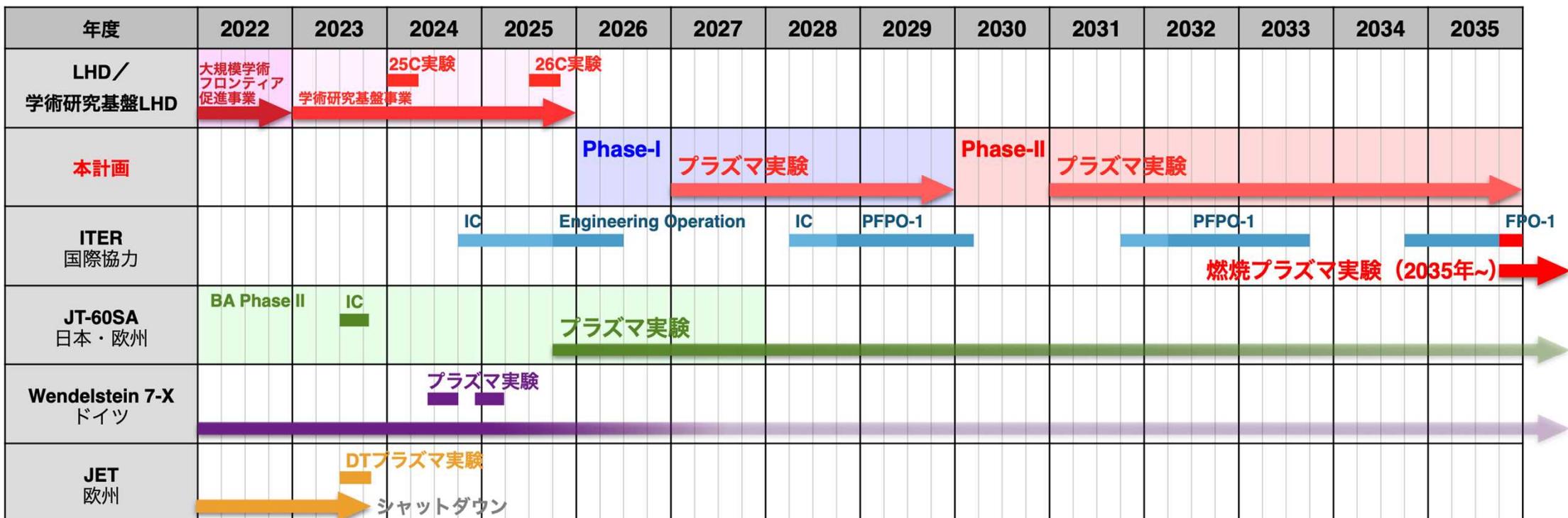
註1：新古典輸送(1/v 領域)の改善度, 註2：加熱パワー密度, 註3：規格化した平均自由行程
「超高温プラズマ学術研究基盤（LHD）計画」（現行学術研究基盤事業）および
「非平衡極限プラズマ連携」（ロードマップ2014）からのシームレスな発展



研究目標・アウトプット・アウトカム

	学術的達成目標	研究のアウトプット	核融合科学のアウトカム
			学際的なアウトカム
研究基盤の整備と運用	速度分布関数を高精度で制御・計測する装置群を、これまでの研究基盤を最大限活用して整備	<ul style="list-style-type: none"> プラズマに対して粒子ビーム、電磁波ビーム、固体ペレット等の入射、さらに磁場構造の変形により、速度分布関数を直接的にマニピュレート 色々な光や電磁場の揺らぎ、粒子ビームなどを用いた高時空間分解の計測によって、速度分布関数の変化を高精度で同時計測 	
マイクロ集団現象の研究	<p>【閉じ込め高性能化】</p> <p>「閉じ込め限界」を規定する揺らぎ=マイクロ集団現象を駆動する分布関数の歪み=自由エネルギーを解明</p>	<ul style="list-style-type: none"> イオンの速度空間におけるマクスウェル分布からのずれ(歪み)の揺らぎの計測時間分解能を10kHzまで向上させ、乱流の研究を「実空間」から「位相空間(実空間+速度空間)」に拡張 	<ul style="list-style-type: none"> 炉心コンパクト化のイノベーションを駆動する科学的指導原理を確立し、性能改善への新しいルートを開拓する マイクロから創発される集団現象を速度分布関数によって理解する一般物理を発展させ、例えば磁気圏や降着円盤など宇宙・天体プラズマのダイナミクス理解に応用する
	<p>【定常性の確立】</p> <p>「突発的な閉じ込め崩壊」の原因となる分布関数の歪み=自由エネルギーとその解放メカニズムを解明</p>	<ul style="list-style-type: none"> プラズマ中の温度・磁場・電場・乱流を10kHz以上の高時間分解で計測するシステムを構築 	<ul style="list-style-type: none"> 閉じ込め崩壊を招く突発現象のメカニズムを解明し、予測と回避の方策を開拓する 局所的な揺らぎが大域化して構造変化を引き起こす現象の一般的特徴を解明し、例えば太陽フレアやX線バーストなどの宇宙の爆発現象の理解に応用する
	<p>【予測性の改善】</p> <p>マイクロから創発されるマクロ現象を正確にシミュレーションで予測できる物理モデルとスキームを確立</p>	<ul style="list-style-type: none"> 実験と比較検証することにより、マクロ現象として観測される「閉じ込め限界」や「突発的な閉じ込め崩壊」の原因となるマイクロ集団現象を再現・予測できるマイクロ・マクロ連結シミュレーションを開発 	<ul style="list-style-type: none"> 核融合炉心プラズマの性能をシミュレーションで予測可能とする マイクロからマクロの広いスケール階層を超越する複雑現象のシミュレーションスキームを開発し、例えば宇宙・天体プラズマ現象の理解や災害の予測・予防に応用する

世界の大型計画



- ❖ ITERにおける核燃焼プラズマの本格的な実験は2035年以降に実施される計画
- ❖ それまでに、広い学术界からの研究参加に向けた学術研究基盤の拡充と人材育成の強化が必要
- ❖ 本計画の推進は、我が国の研究力アップと学際的・国際的ネットワーク強化のために不可欠
- ❖ 計画で開発する世界最高性能の計測システムは、ITERの実験において、日本の研究チームがリーダーシップをとるための強力な武器
- ❖ 実験データとシミュレーションを連携させる研究（データ同化技術など）も進める必要

フュージョンエネルギー研究開発の全体像

- ◆ ITER計画等への参画を通じて科学的・技術的実現性を確認した上で、原型炉への移行を判断。
- ◆ 科学技術・学術審議会 核融合科学技術委員会等における議論を踏まえ、原型炉に必要な技術開発の進捗を定期的に確認しつつ、研究開発を推進。

SBIRフェーズ3基金 (Small Business Innovation Research)

✓ 中小企業イノベーション創出推進基金を造成し、スタートアップなどの有する先端技術の社会実装を促進



核融合の挑戦的な研究の支援の在り方に関する検討会

✓ ムーンショット型研究開発制度を活用し、未来社会像からのバックキャストによる挑戦的な研究開発を推進

未来社会像からのバックキャストによるアプローチ