

15pE533

共催シンポジウム：

大型ヘリカル装置LHDプロジェクトが切り開いたプラズマ物理の地平

1. 全体統括／ LHDの28年間の軌跡

自然科学研究機構
核融合科学研究所

坂本 隆一

紹介内容

1. はじめに
2. 達成されたプラズマパラメータ
3. 新しい現象の発見と理解
4. 学際的な波及
5. まとめ

1. はじめに

❖ LHDプロジェクトは1980年代に構想

■ 時代背景

- ▶ 世界において、大型トカマク装置（JT-60, JET, TFTR）が臨界プラズマ実験に向けて順調に滑り出し
- ▶ 大学において、大小様々な研究計画が進展して核融合プラズマ研究の共通基盤形成、同時に、様々な閉じ込め方式が群雄割拠して研究費増大

■ 学審核融合部会作業会による議論

『学術審議会特定領域推進分科会 核融合部会作業会「中間報告」について』, 核融合研究 55 (1986) 47.

- ▶ 大学における核融合の学術研究に最も効果的な次期大型装置計画を策定
 - 研究目標の設定
 - その目標に向けた取り組み

❖ 導き出されたミッション

- 大学の次期大型装置としてヘリカル系を選択し,
 1. トカマクを含む環状系の諸問題を解決するための研究を実施
 2. 外部導体系の持つ工学的な長所を利用して定常炉を実現する可能性を探究

LHD研究の背景とミッション

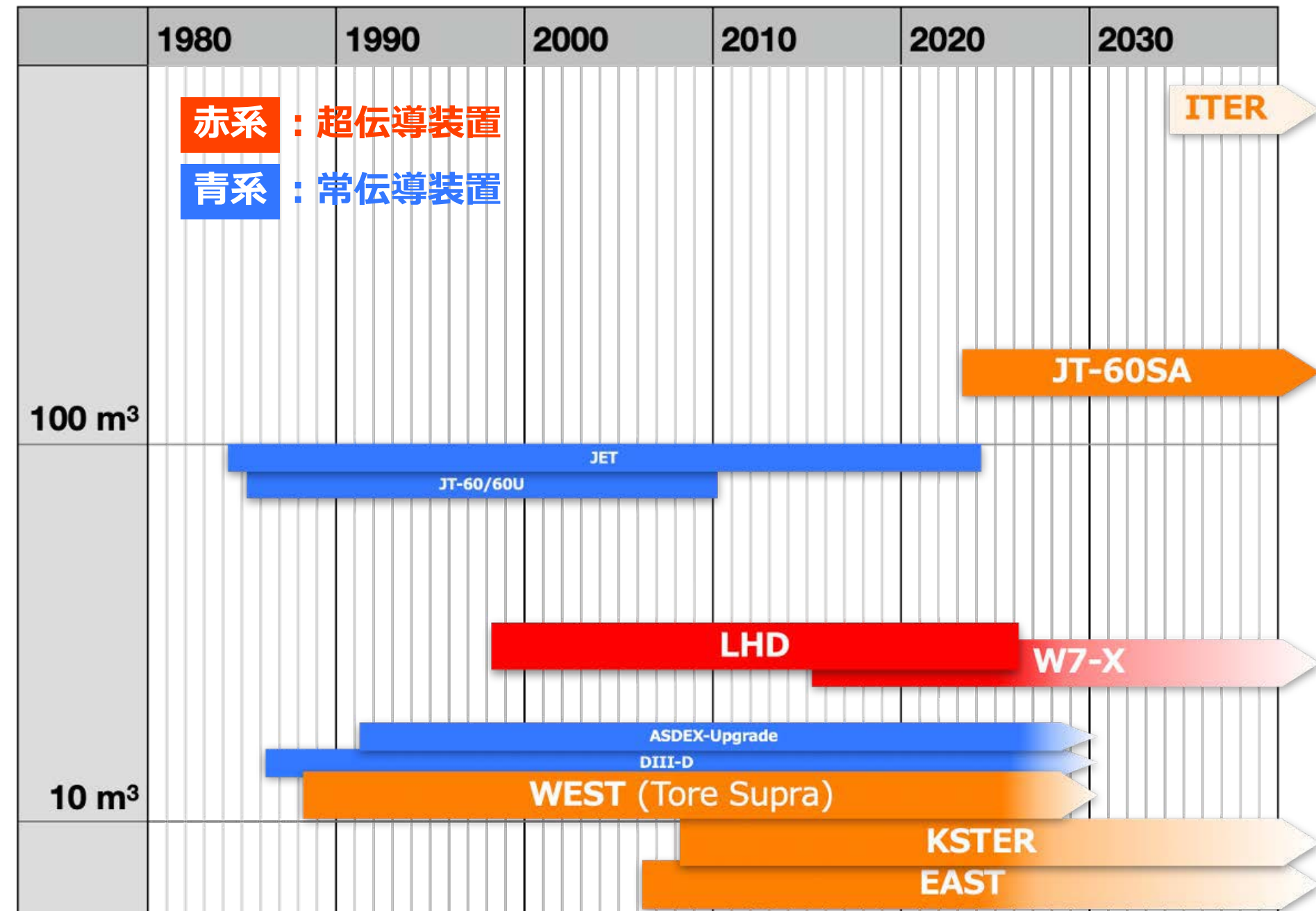
❖ LHDのミッション

- トーラスプラズマの総合的理解
- 外部導体系の持つ炉工学的な長所を利用した定常運転炉の可能性の探索

❖ LHDの特徴

- 世界最大級の超伝導プラズマ閉じ込め装置
- 世界最高の時空間分解能をもつ計測装置群

プラズマ体積 (対数スケール)



世界の超伝導プラズマ閉じ込め装置の運用期間

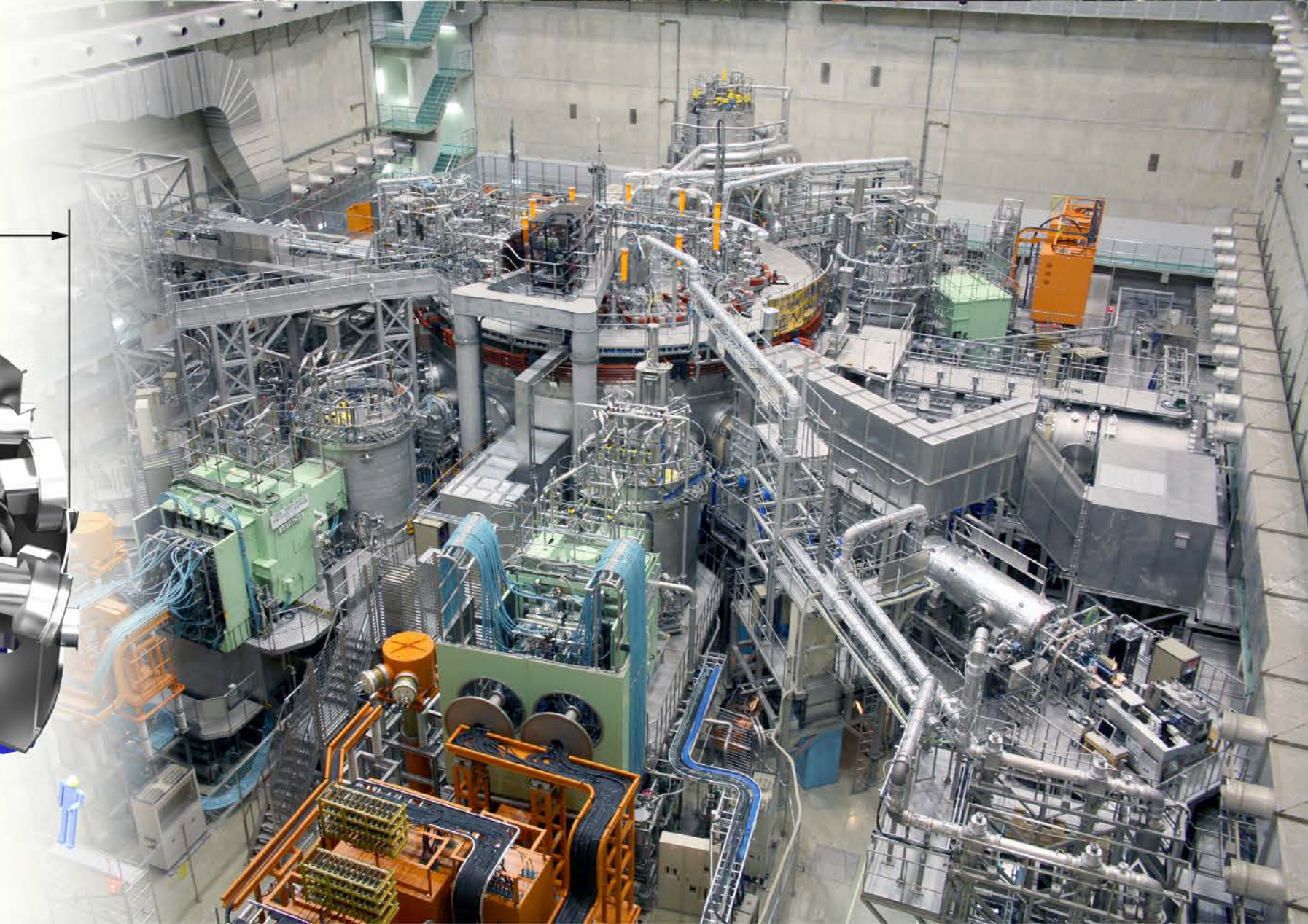
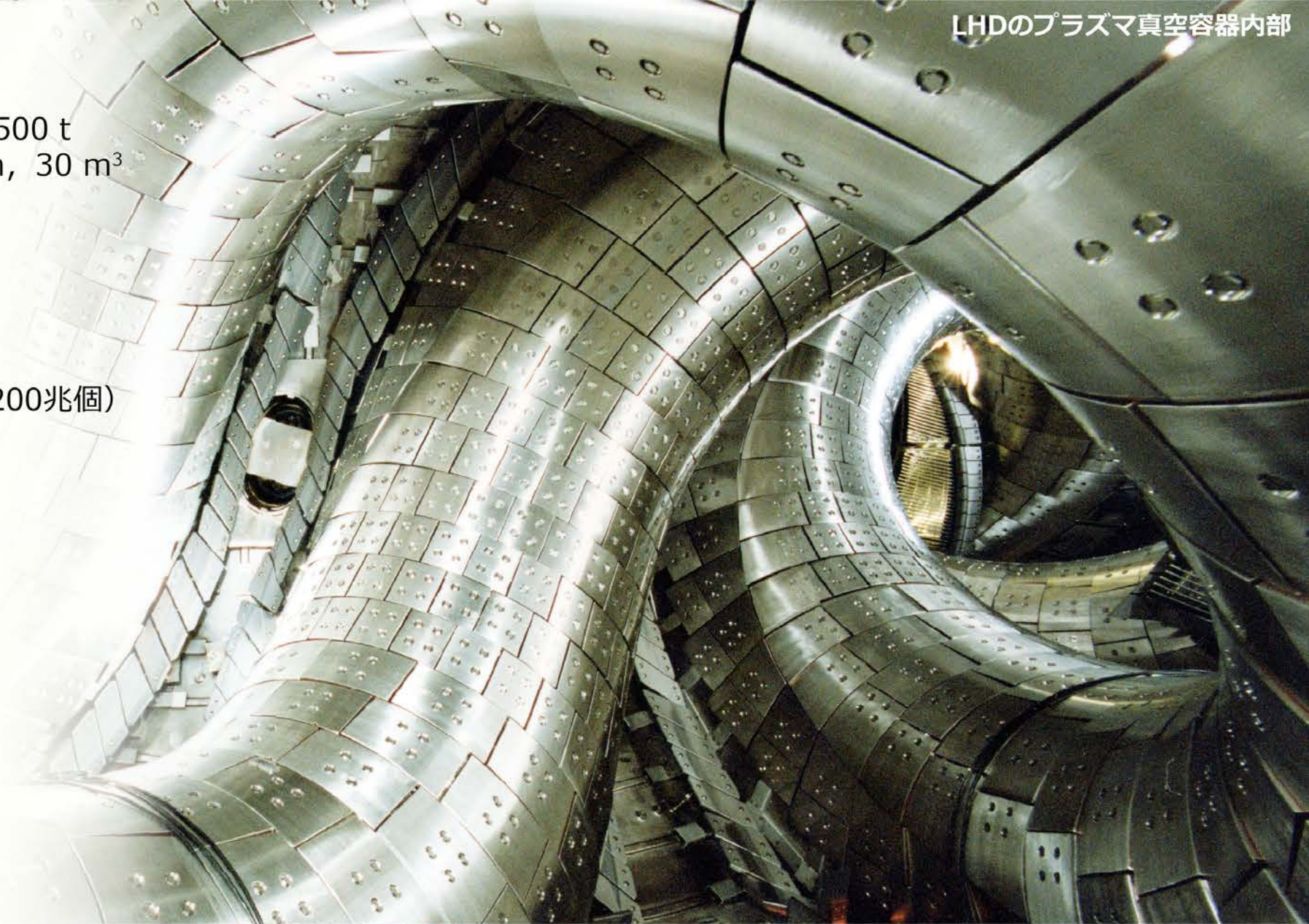
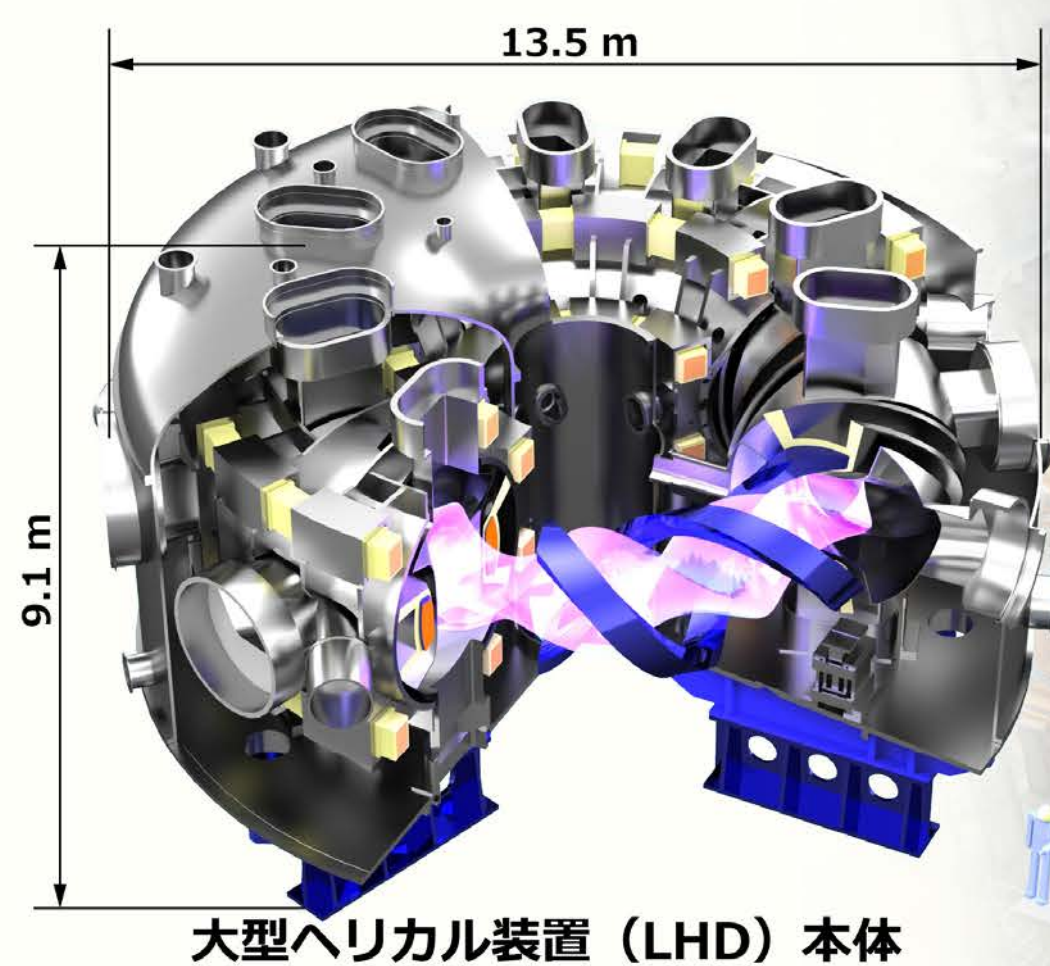
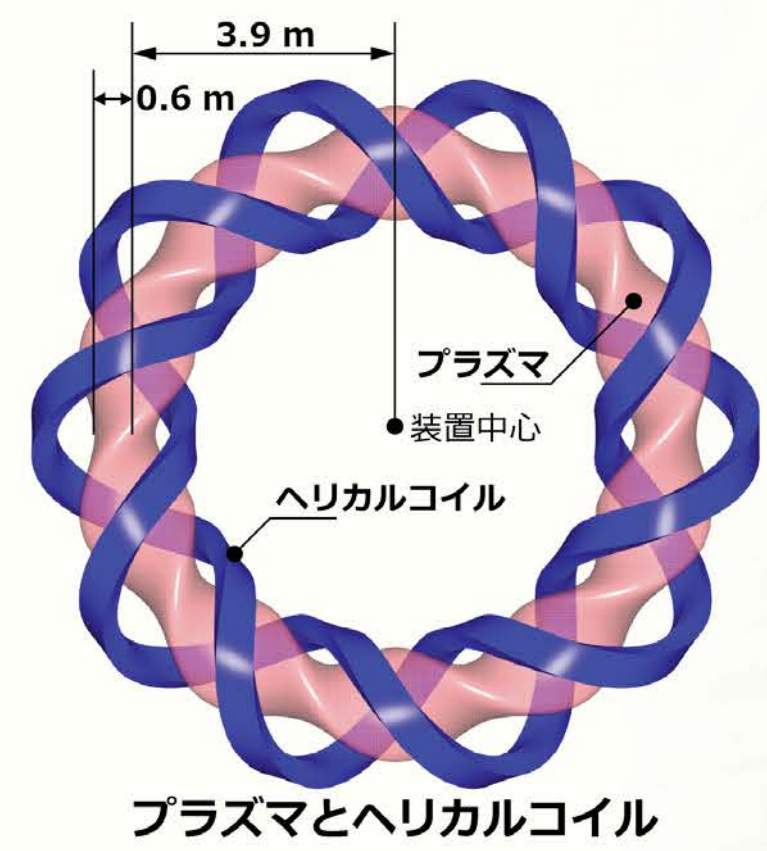
学術研究基盤LHD

装置パラメータ

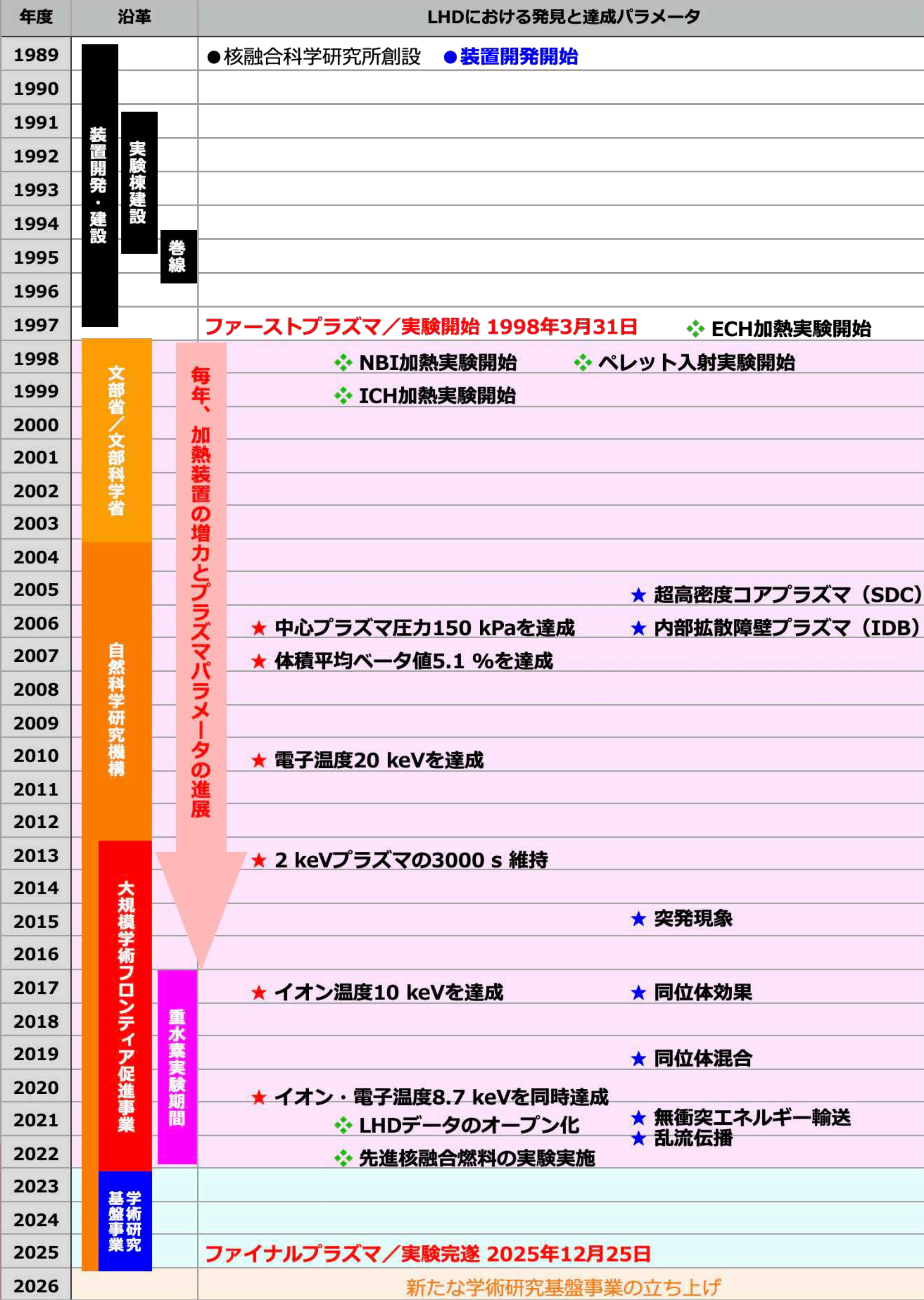
装置の外径, 高さ, 総重量: 13.5 m, 9.1 m, 1,500 t
 プラズマの大半径, 小半径, 体積: 3.9 m, 0.6 m, 30 m³
 磁場強度: 3 T (3万ガウス)
 総加熱電力: 36 MW (3万6000キロワット)

プラズマパラメータ

最高イオン温度: 10 keV (1億2000万℃)
 最高電子温度: 20 keV (2億3000万℃)
 最大到達密度: $1.2 \times 10^{21} / \text{m}^3$ (1立方cm当たり1200兆個)



大型ヘリカル装置LHDとは



8年間の建設期間および28年間の実験期間にわたり、
不断の装置開発を進めることで多様な物理成果を創出

1. 数値目標の達成
- ▶ヘリカルプラズマのパラメータ領域の拡大

➡★核融合炉を見通せる高性能プラズマ実験
2. 科学の新しい発見
- ▶プラズマの高分解能計測による複雑現象の発見

▶シミュレーション研究との連携による新しい理解

➡★核融合炉心プラズマの高性能化への指導原理
3. 技術のイノベーション
- ▶プラズマ実験のための独自の技術開発

➡核融合炉を高性能化する革新的基幹技術
4. 学際的な波及
- ▶プラズマ実験から他分野への波及

➡学際的な頭脳循環による協創的发展

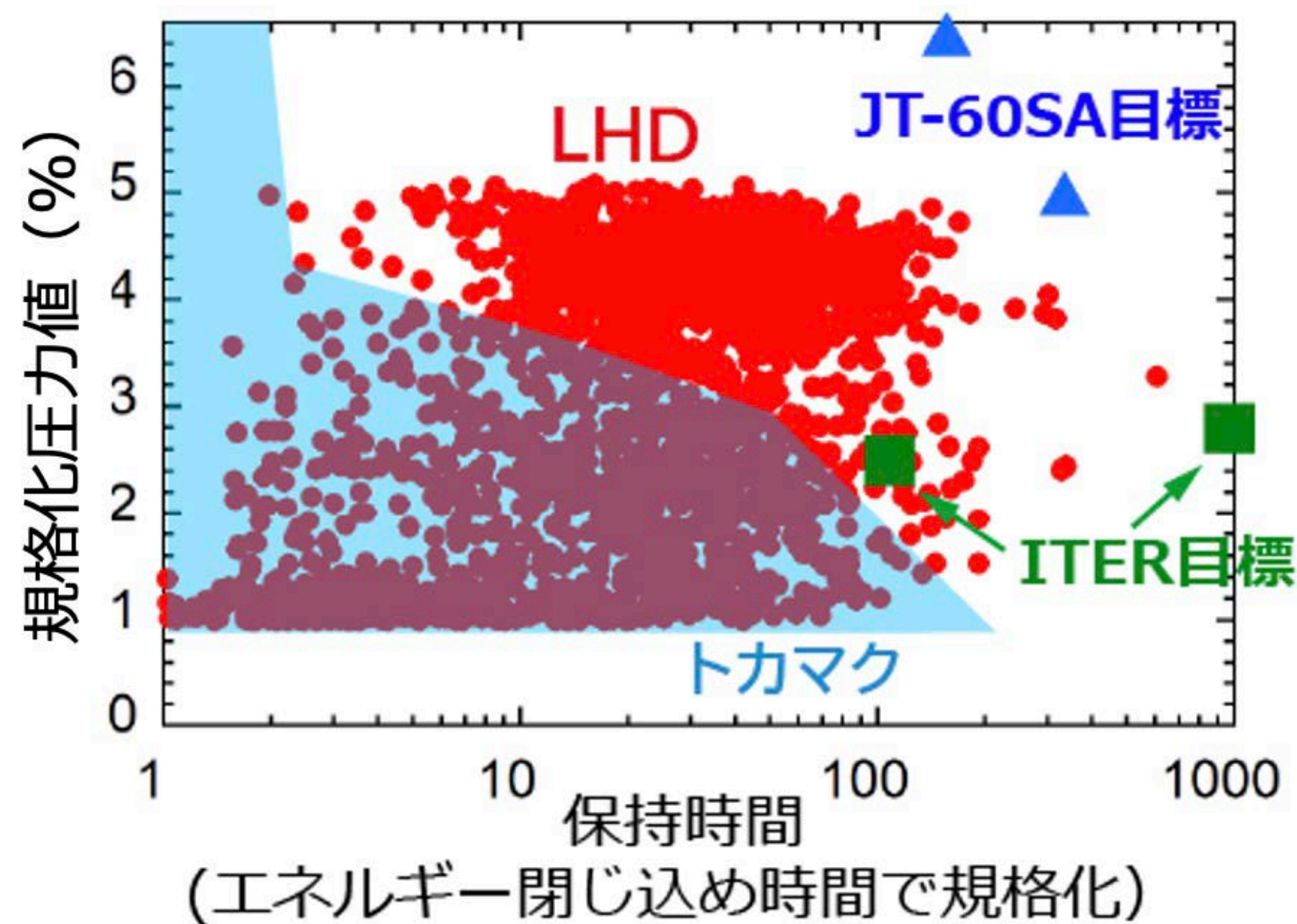
LHDの歴史と成果

2. 達成されたプラズマパラメータ

ープラズマ運転領域の拡大ー

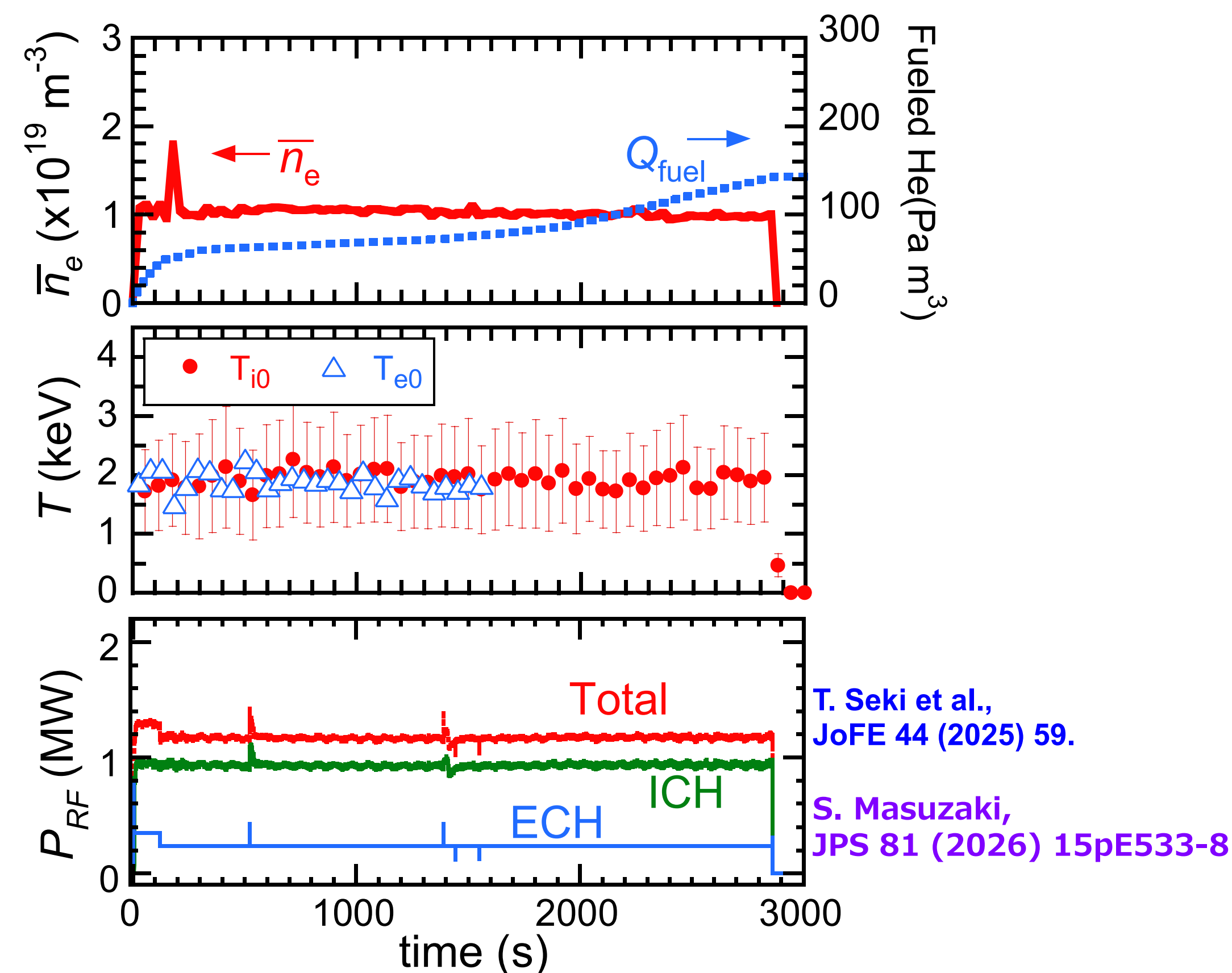
❖ 理論予測を超える高圧カプラズマ

- 体積平均5 %の β 値を閉じ込め時間の100倍の時間保持
 - ▶ 従来の理論予測の再考を喚起



❖ 定常磁場による長時間放電

- 2 keVのプラズマを48分間維持
 - ▶ 壁の状態は定常に達せず, 放電に影響
 - ▶ プラズマ・壁相互作用の重要性を再認識



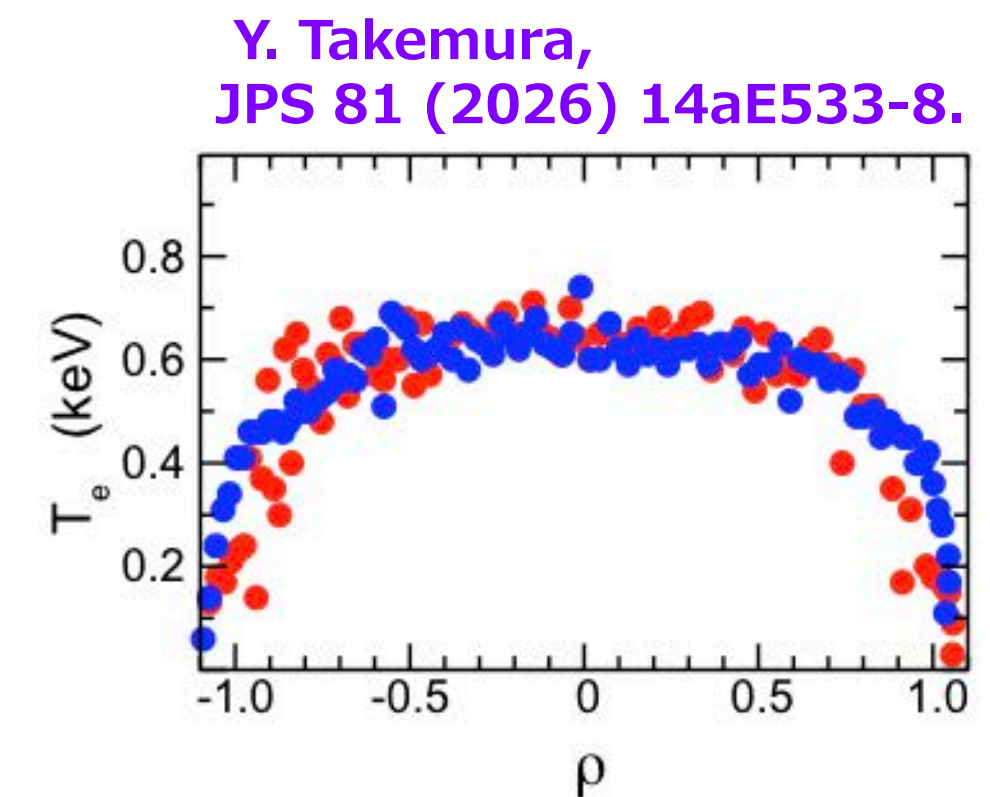
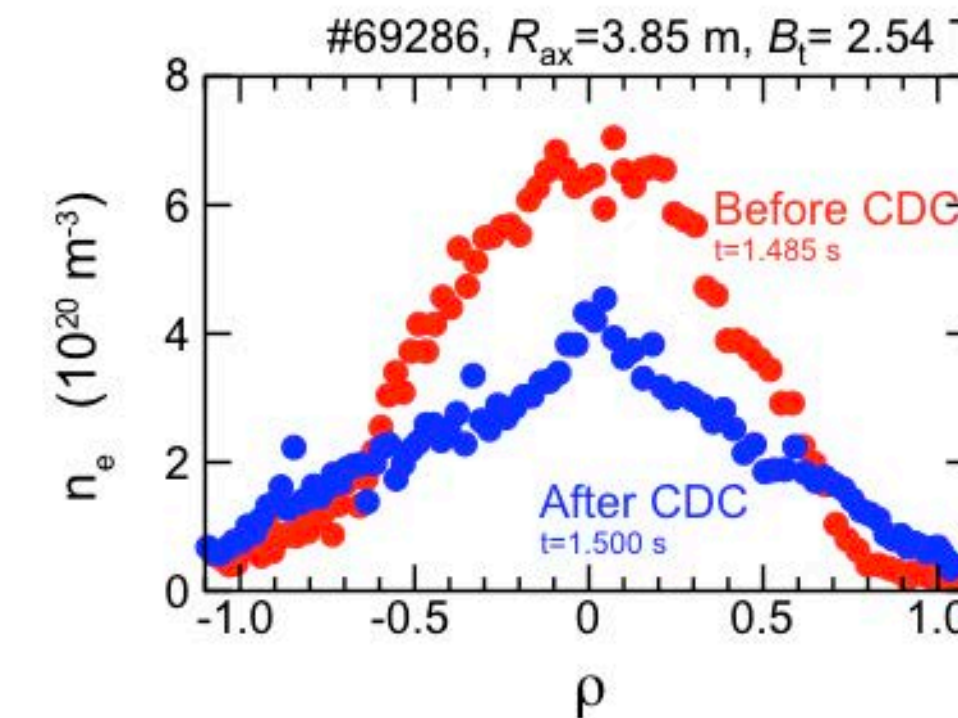
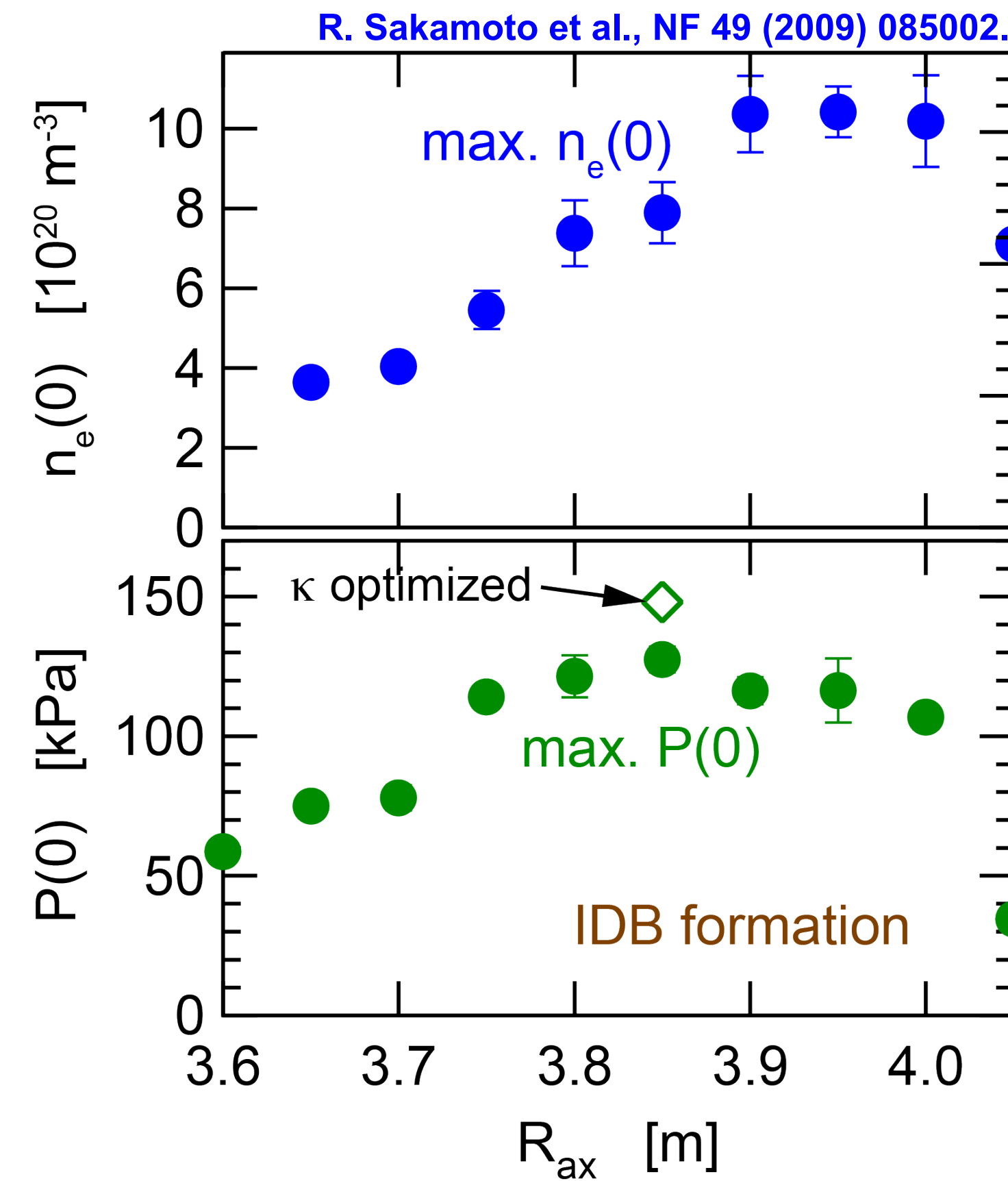
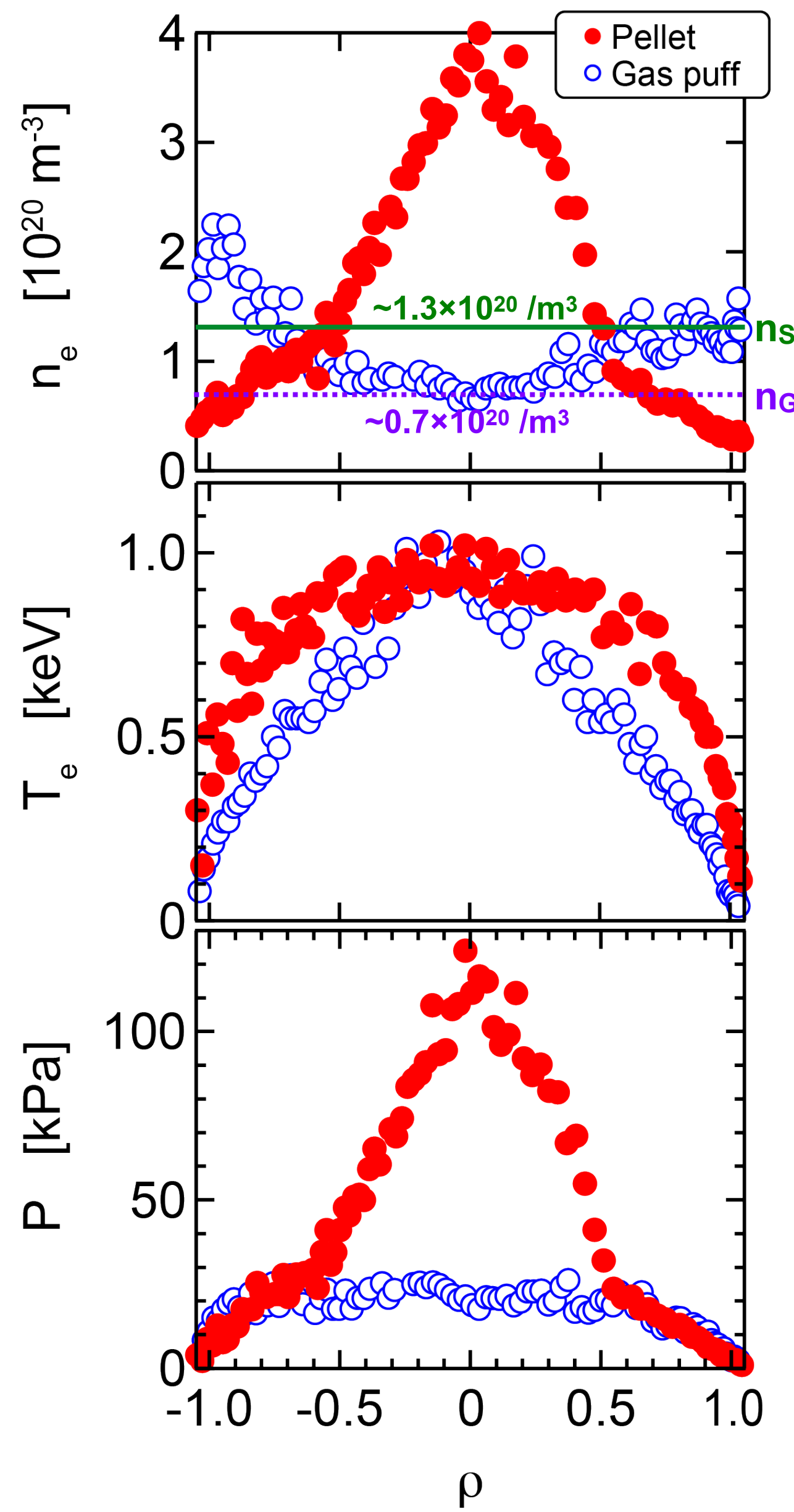
達成されたプラズマパラメータ

❖ 高密度, 高圧カプラズマの達成

- 固体水素ペレット入射による集中的な粒子供給によって内部拡散障壁が形成

- ▶ 密度限界を大きく越える中心密度 $> 1 \times 10^{21} / \text{m}^3$
- ▶ 大気圧を越える中心圧力 **150 kPa**

- コア密度崩壊 (CDC) による到達圧力の制限



CDCでは、中心密度が1 ms以内で崩壊、
温度分布はほとんど変化しない

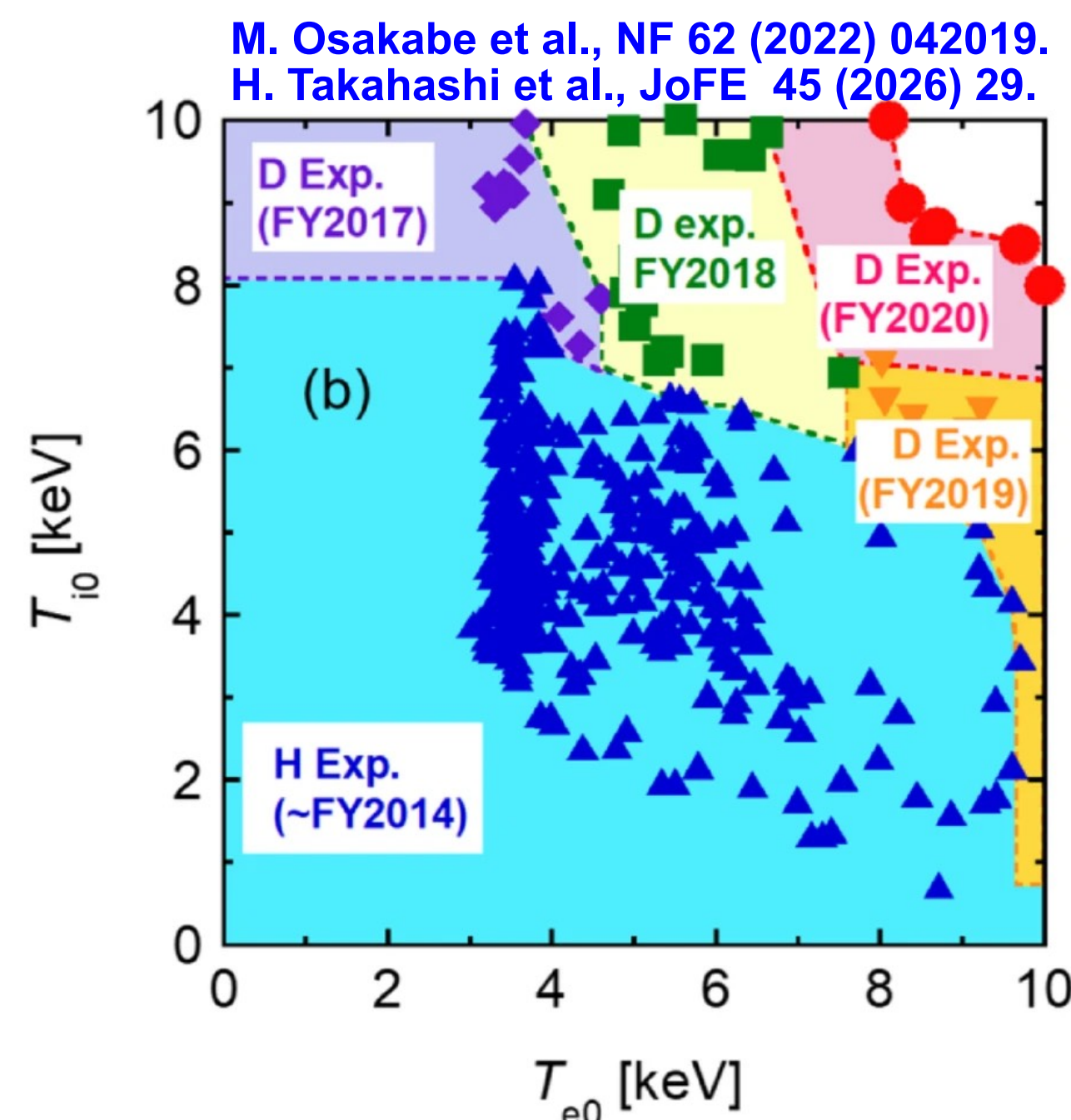
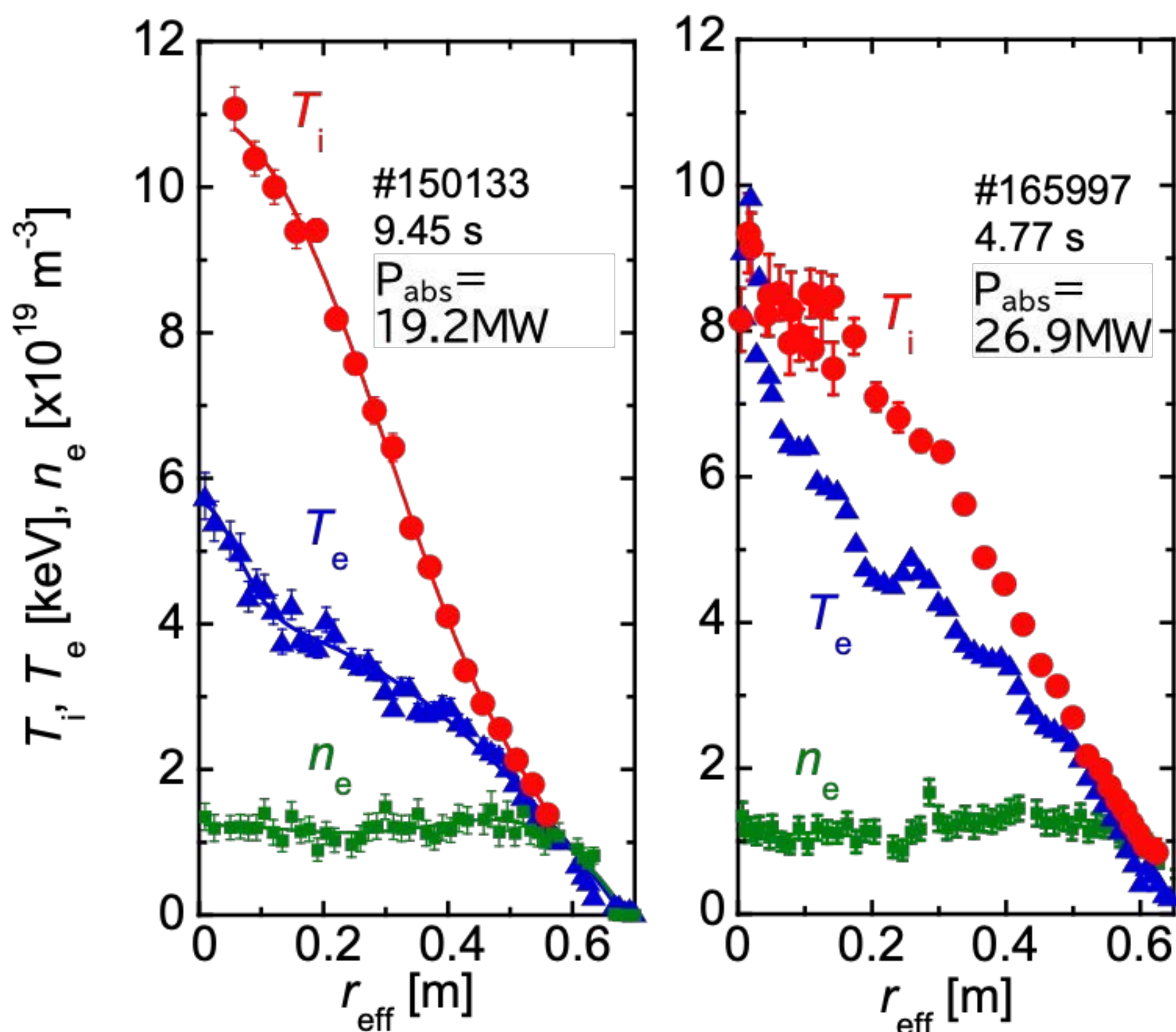
達成されたプラズマパラメータ

❖ 高イオン温度の達成

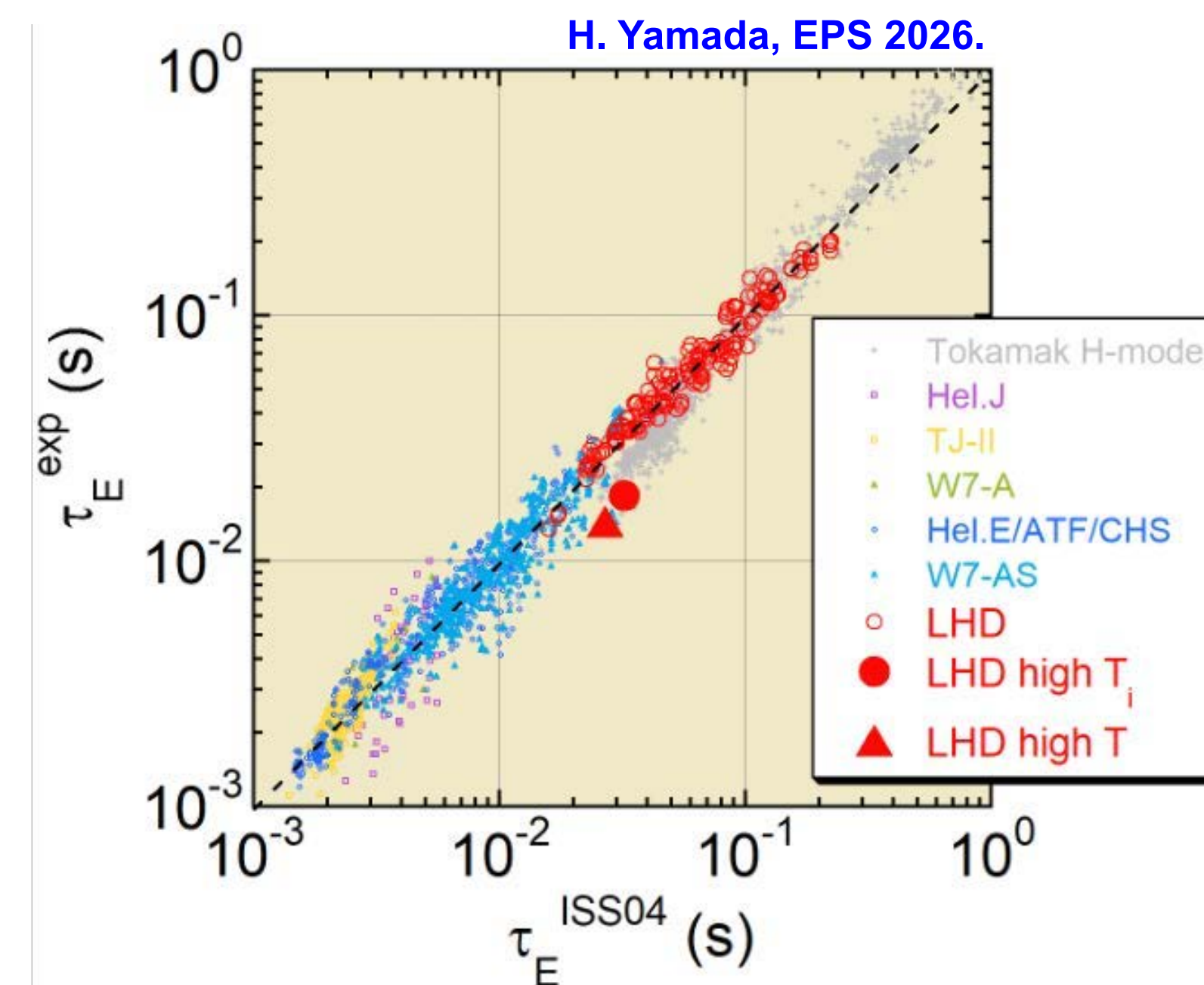
- 重水素プラズマにおいて, 高イオン温度の運転領域が大きく拡大
 - ▶ イオン温度 **>10 keV**
 - ▶ イオン・電子温度の同時達成 **~8.7 keV**

■ 達成条件

- ▶ 同位体効果：重水素プラズマの熱輸送抑制
 - 帯状流によるITG乱流の抑制
- ▶ リサイクリング低減
- ▶ 不純物制御（カーボンペレット入射）



NBIによる中心イオン加熱とECHによる中心電子加熱の最適化により運転領域を拡大



高イオン温度プラズマにおいて、グローバルな閉じ込め特性は劣化

達成されたプラズマパラメータ

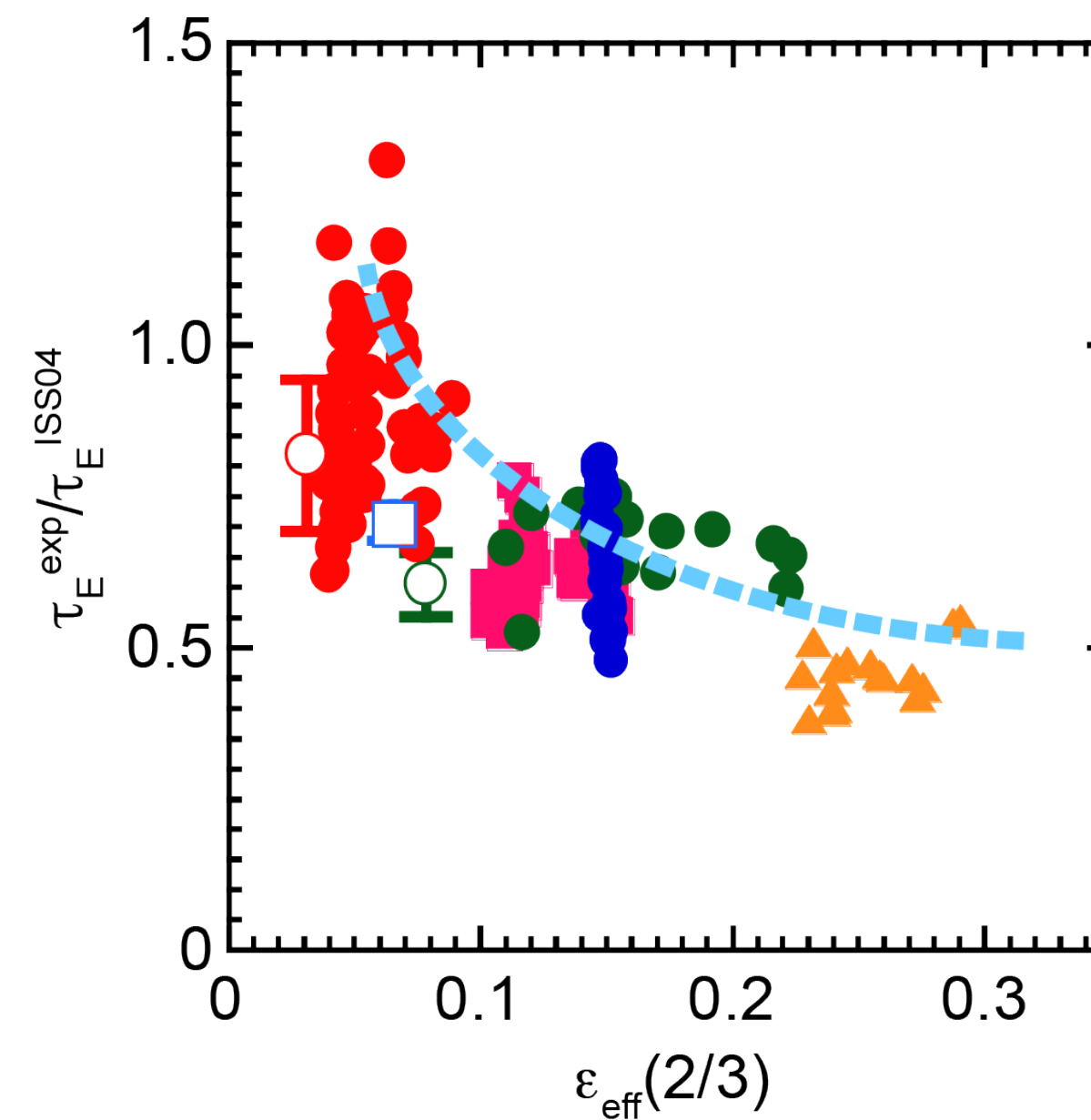
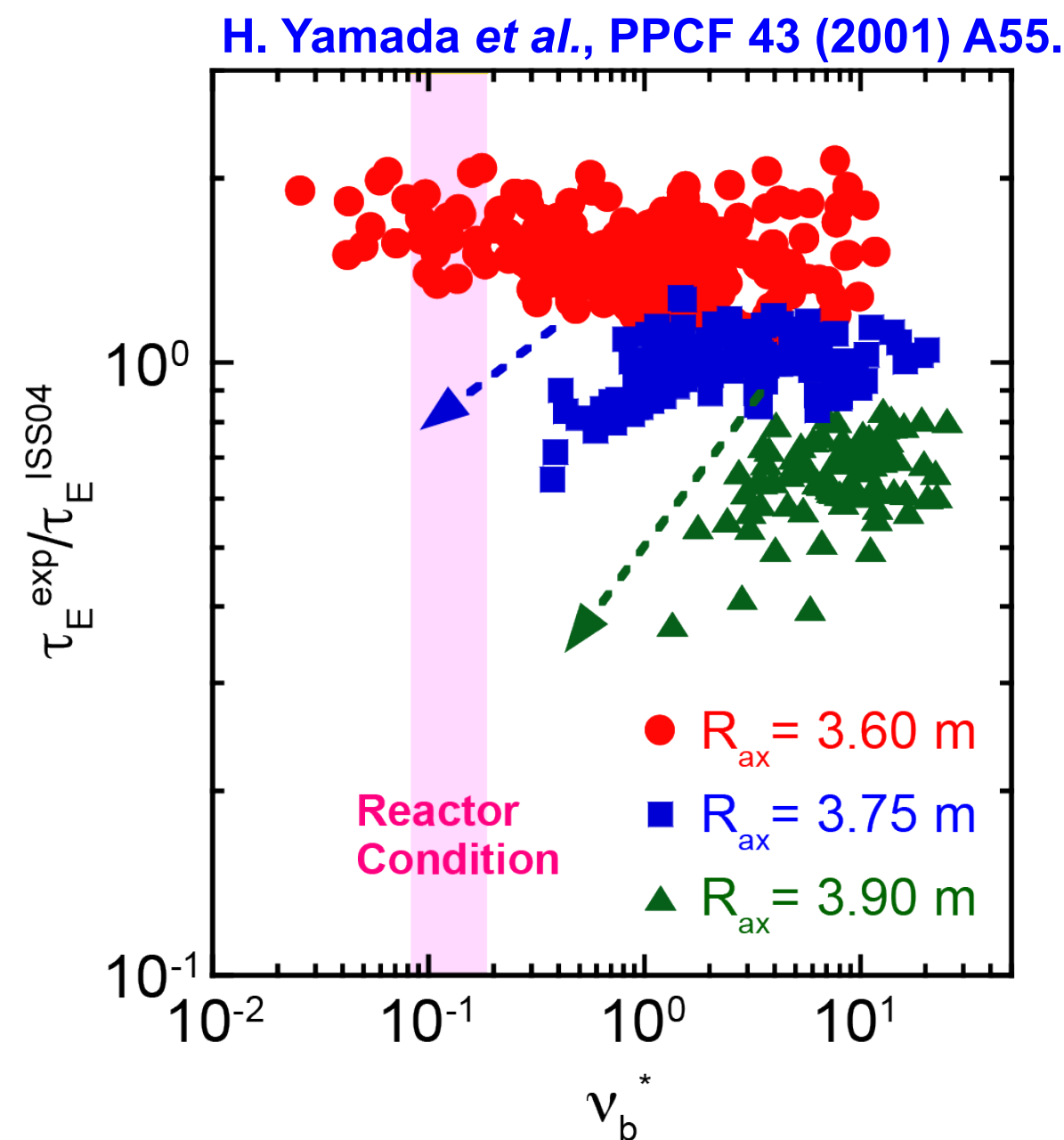
3. 新しい現象の発見と理解

ーシミュレーション研究との連携ー

LHDで観測された閉じ込め性能の改善の物理的メカニズムを 大規模シミュレーションによって再現

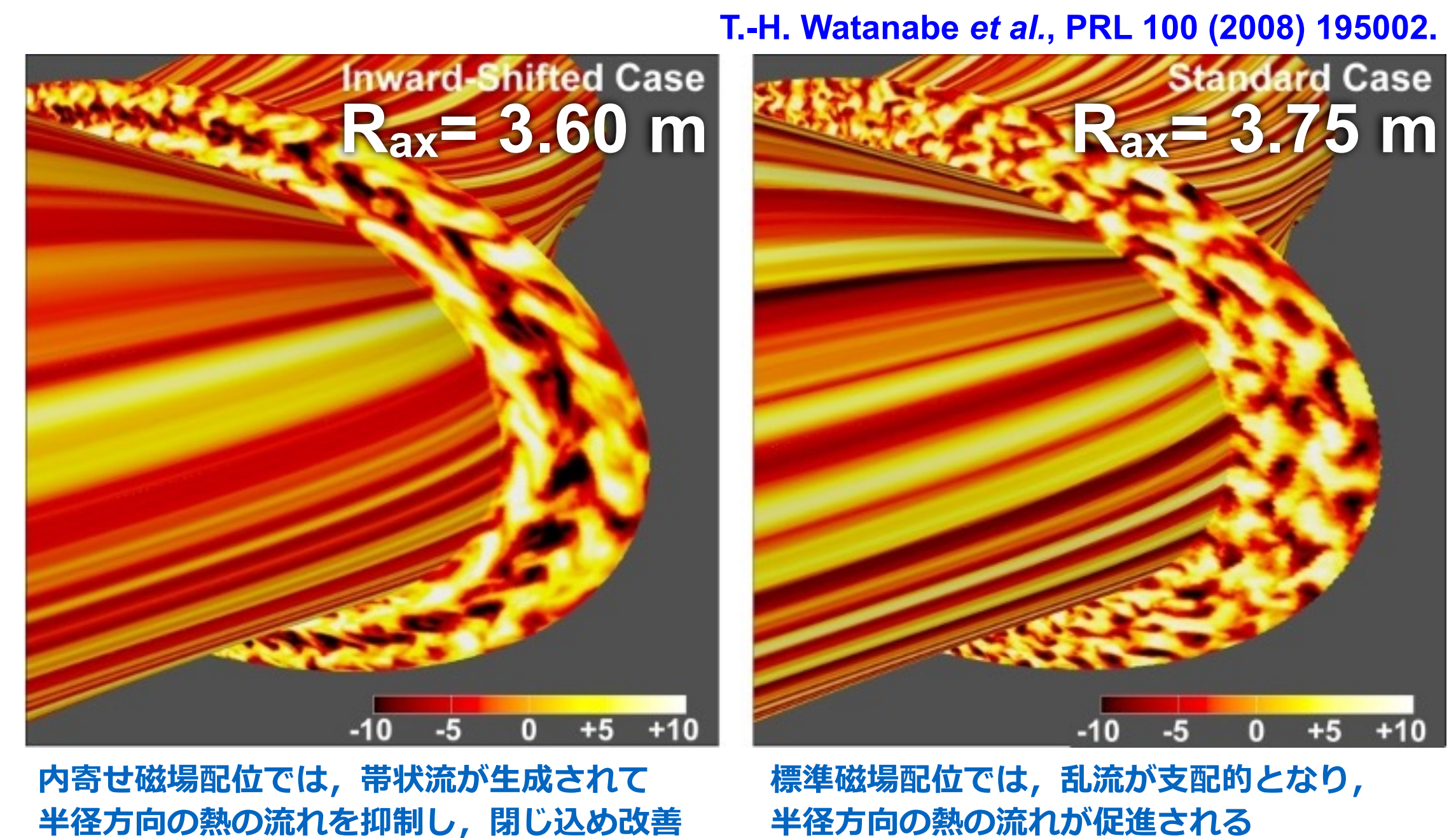
❖ LHD実験による発見

- 従来の予測では説明がつかない磁場配位による閉じ込め性能の改善
- ヘリカルリップルが改善に相関
➡ 仮説の創出



❖ GKVシミュレーション

- 乱流が創発する**帯状流**がエネルギーの輸送を制限して、閉じ込め性能を改善することを定性的に再現
- ヘリカルリップル補足粒子が残留帯状流を減衰
➤ 新古典輸送の最適化によって残留帯状流を維持

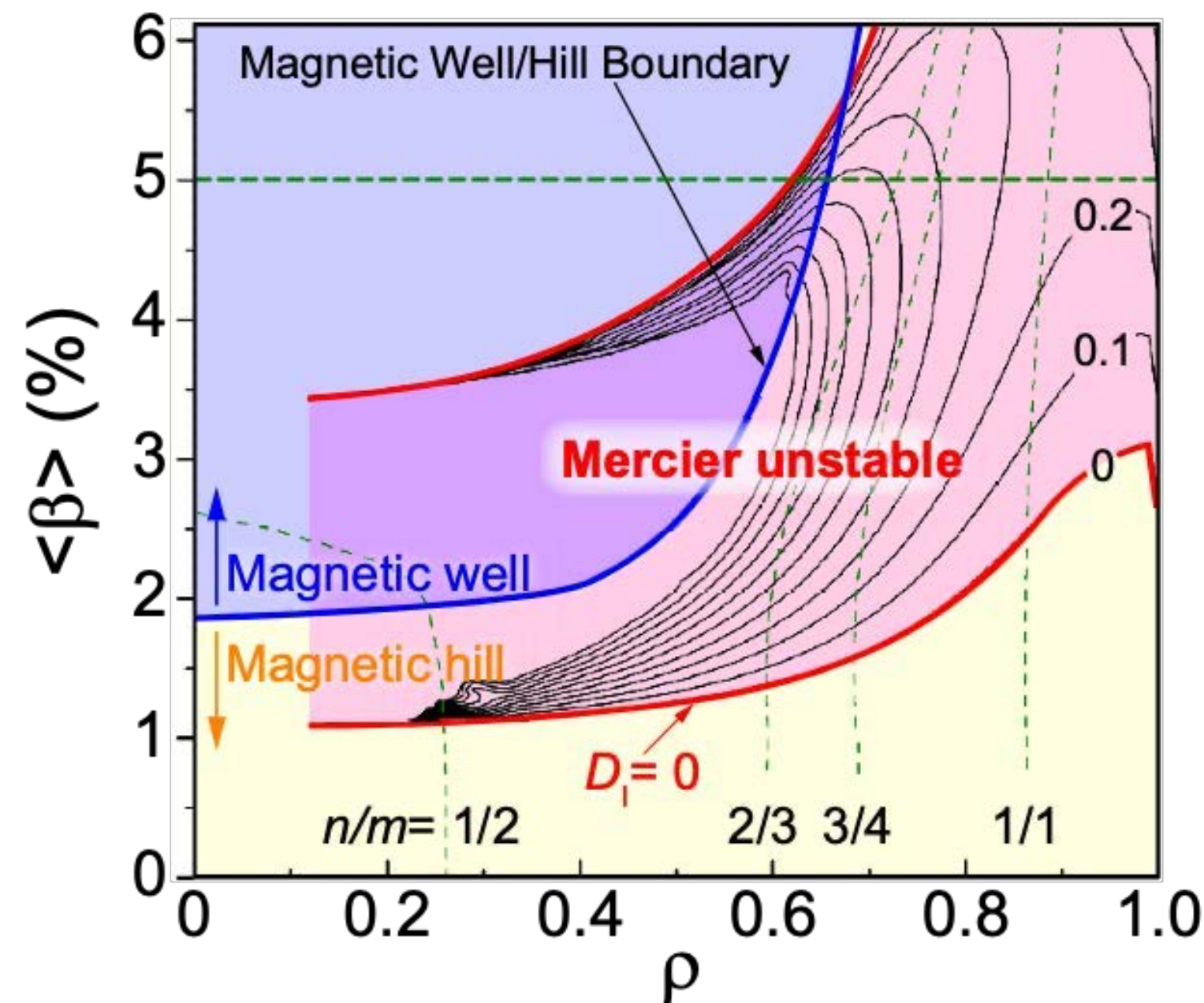


磁場配位による閉じ込め性能の改善

従来の理論予測を大きく超える高い圧力のプラズマを安定に維持 できるという謎を解明

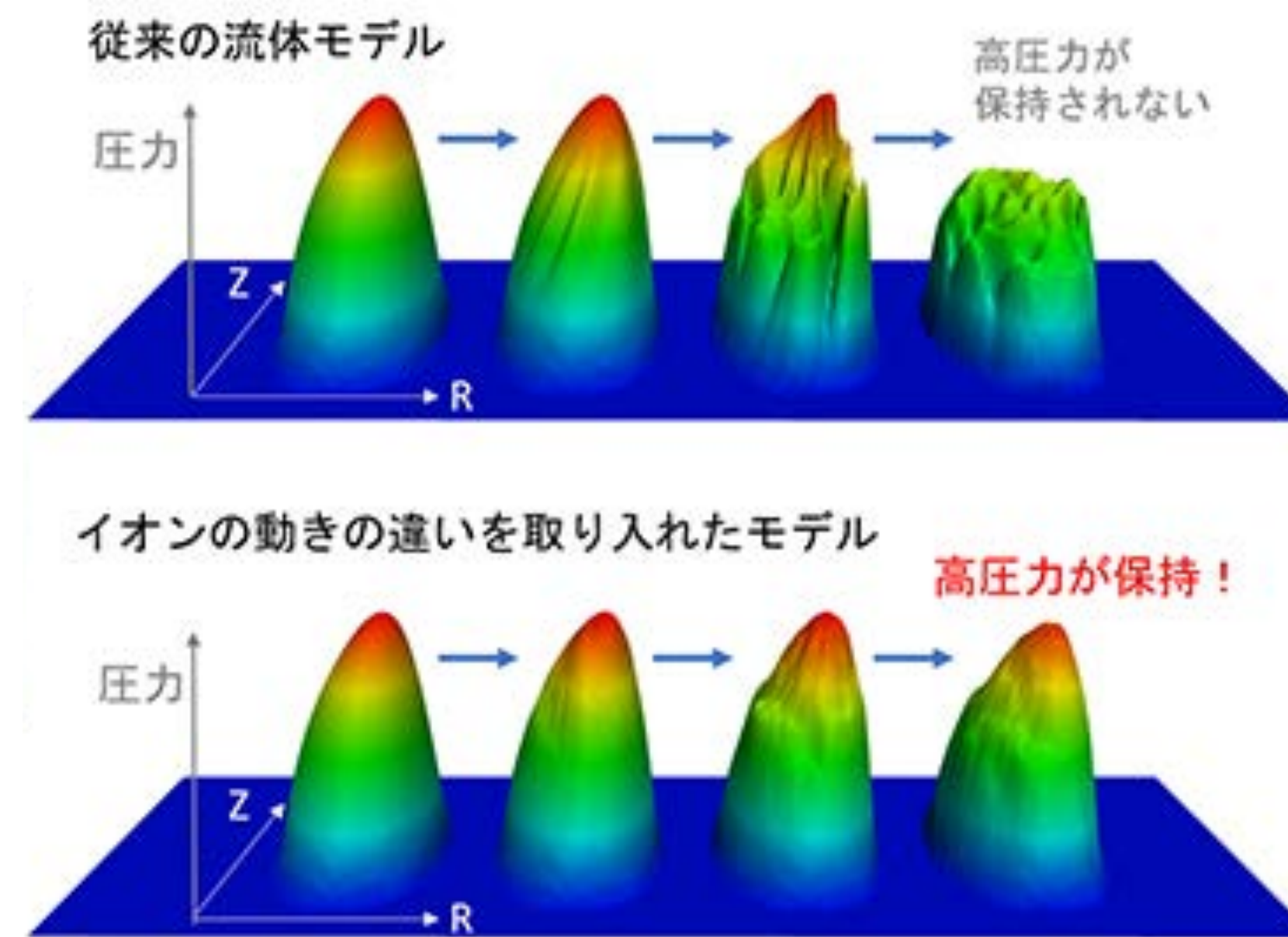
❖ LHD実験による発見

- 従来の理論では不安定とされる高い圧力の領域でも安定にプラズマを保持
➡ 従来の理論予測の再考を喚起

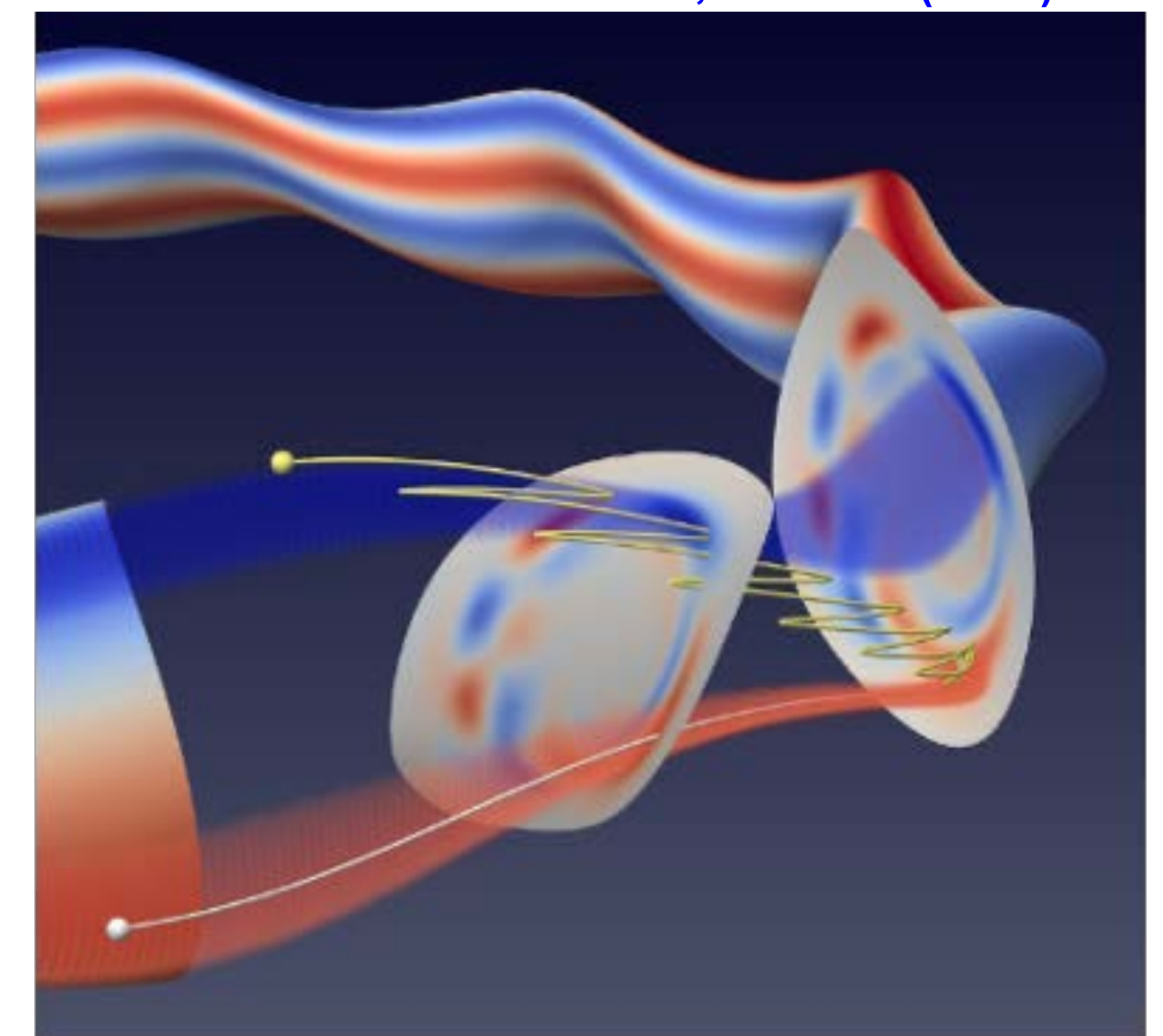


❖ 運動論-MHDハイブリッドシミュレーション

- プラズマ圧力に起因する不安定性が捕捉
イオンの運動論的效果によって安定化



M. Sato and Y. Todo, NF 61 (2021) 116012.
M. Sato and Y. Todo, JoFE 45 (2026) 31.



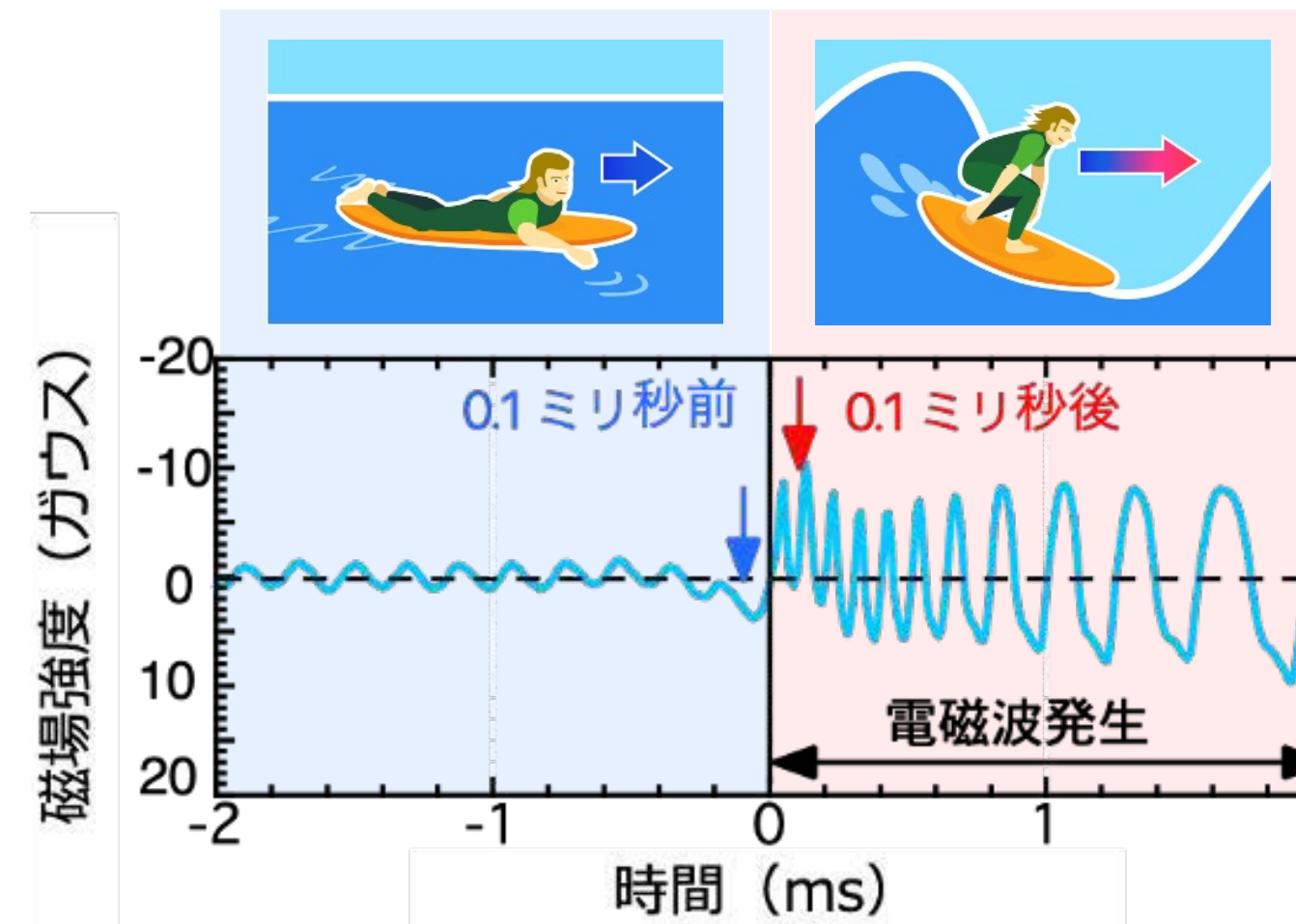
高圧カプラズマの安定維持

4. 学際的な波及

荷電交換分光の高精細・高速計測によって、電磁波の発生によって引き起こされた速度空間の歪みの時間変化を測定 → ランダウ減衰の直接観測

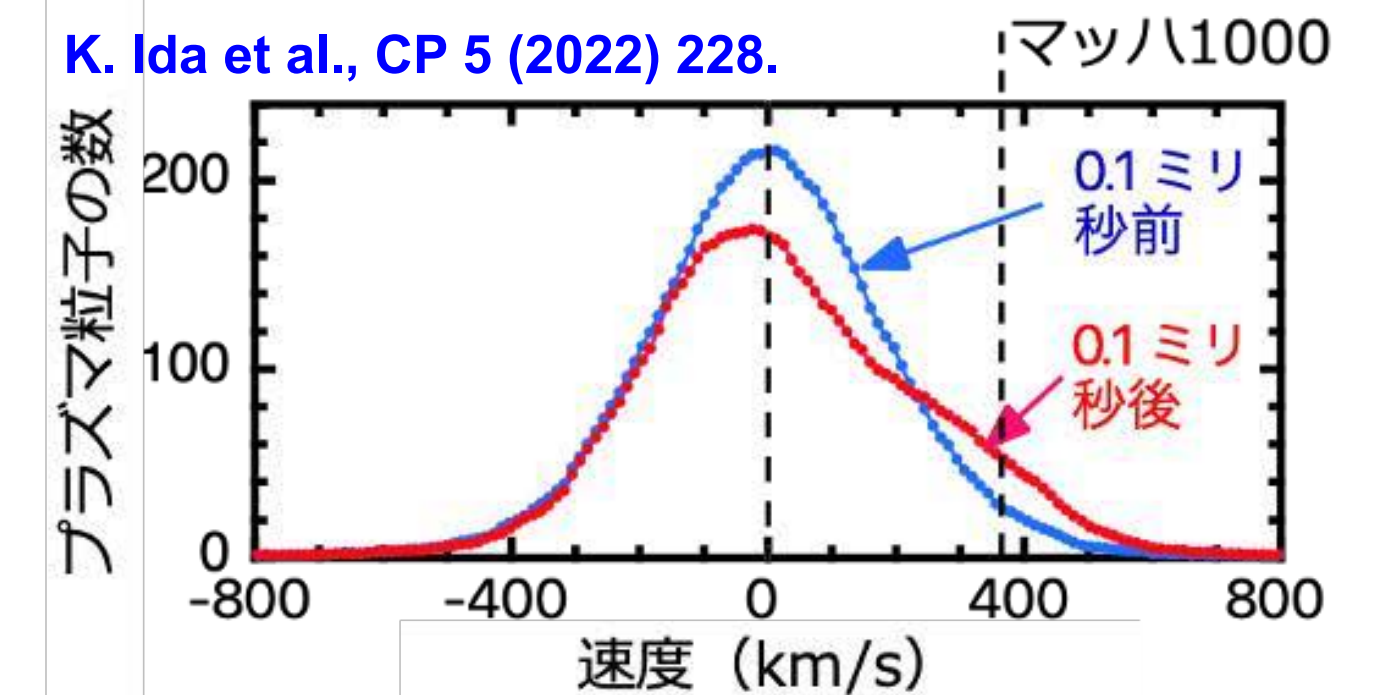
❖ 核融合研究へのインパクト

- 核融合炉における、アルファ粒子による**電磁波を介したイオン加熱**（アルファチャネリング）を実証



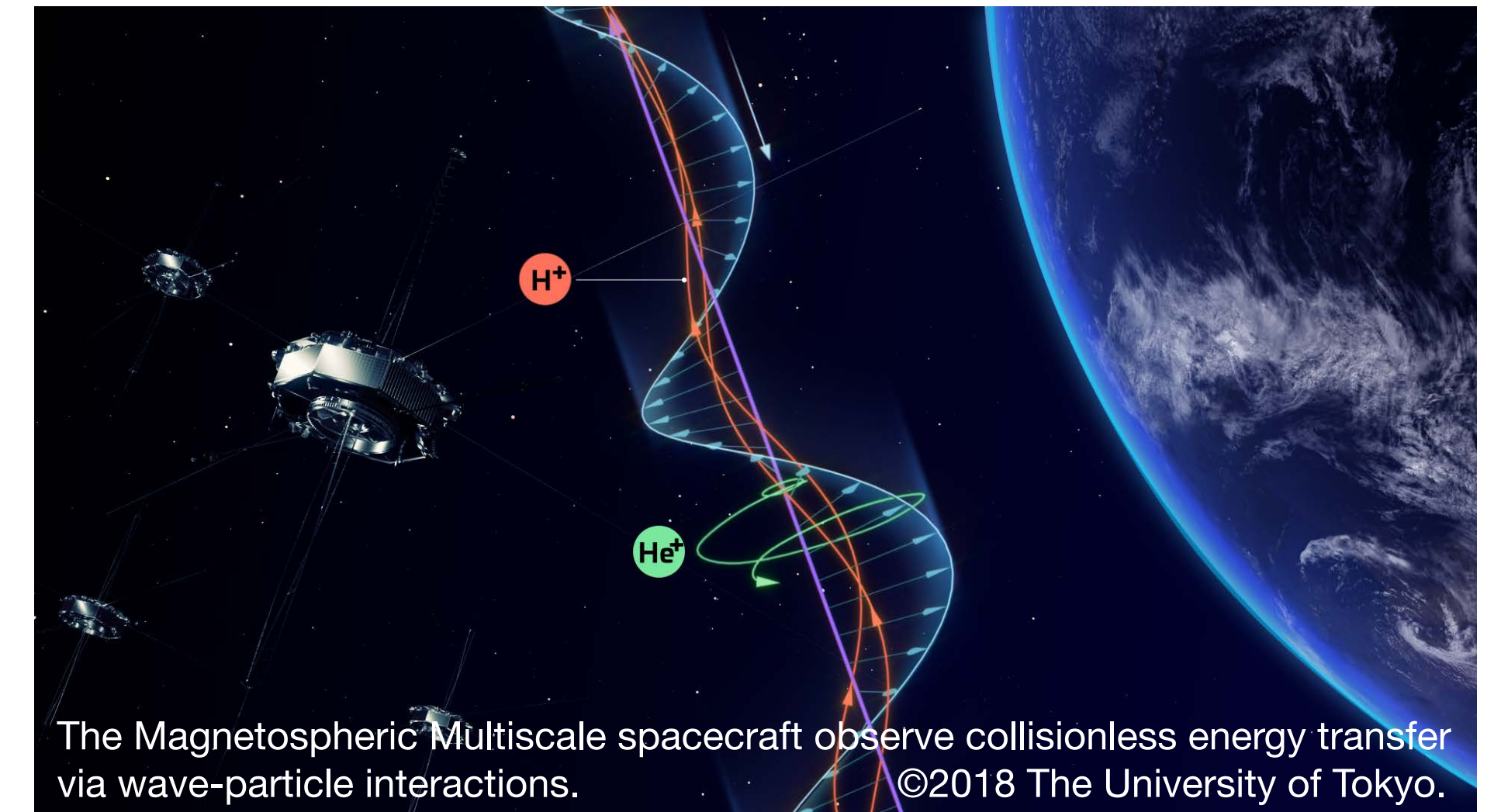
- 電磁波が発生すると、0.1 ms後に速度分布の変形が観測
- 速度分布の変化は300 MWの加熱に相当

K. Ida et al., CP 5 (2022) 228.



❖ 地球磁気圏研究への展開

- 宇宙プラズマにおける無衝突エネルギー輸送の観測 (Magnetospheric Multiscale spacecraft (MMS))
- LHDにおいて、電磁波を介したエネルギー輸送の空間分布や時間変化を詳細に調べる事で、地球磁気圏の現象に物理的な説明を与える

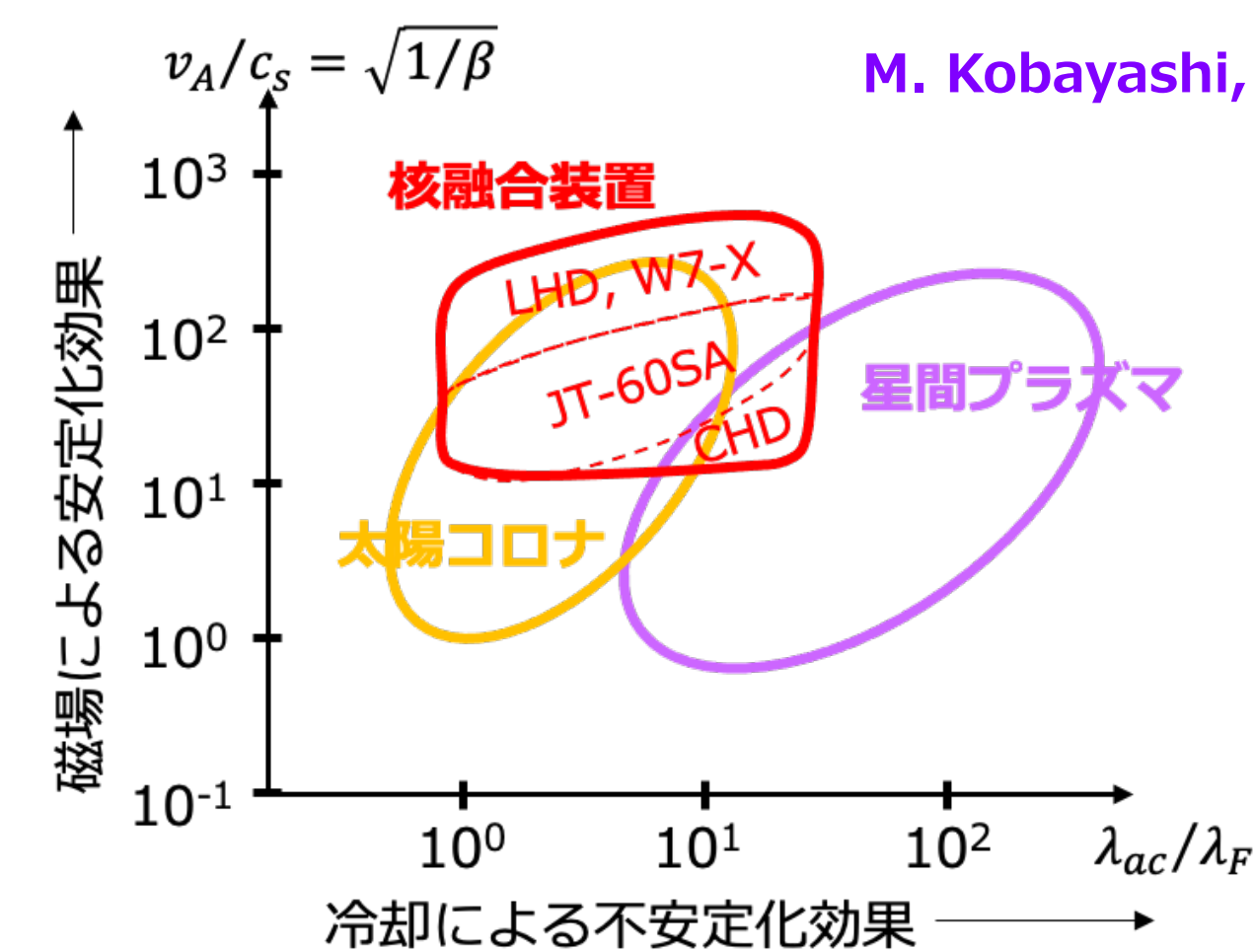


無衝突エネルギー輸送

実験室プラズマと数値シミュレーション，天体観測（星間プラズマ，太陽コロナ）の比較を通して，熱的不安定性が駆動するプラズマの熱的非平衡状態，相転移現象，構造形成を広いパラメータ空間で統合的に理解

◆ダイバータの放射冷却運転

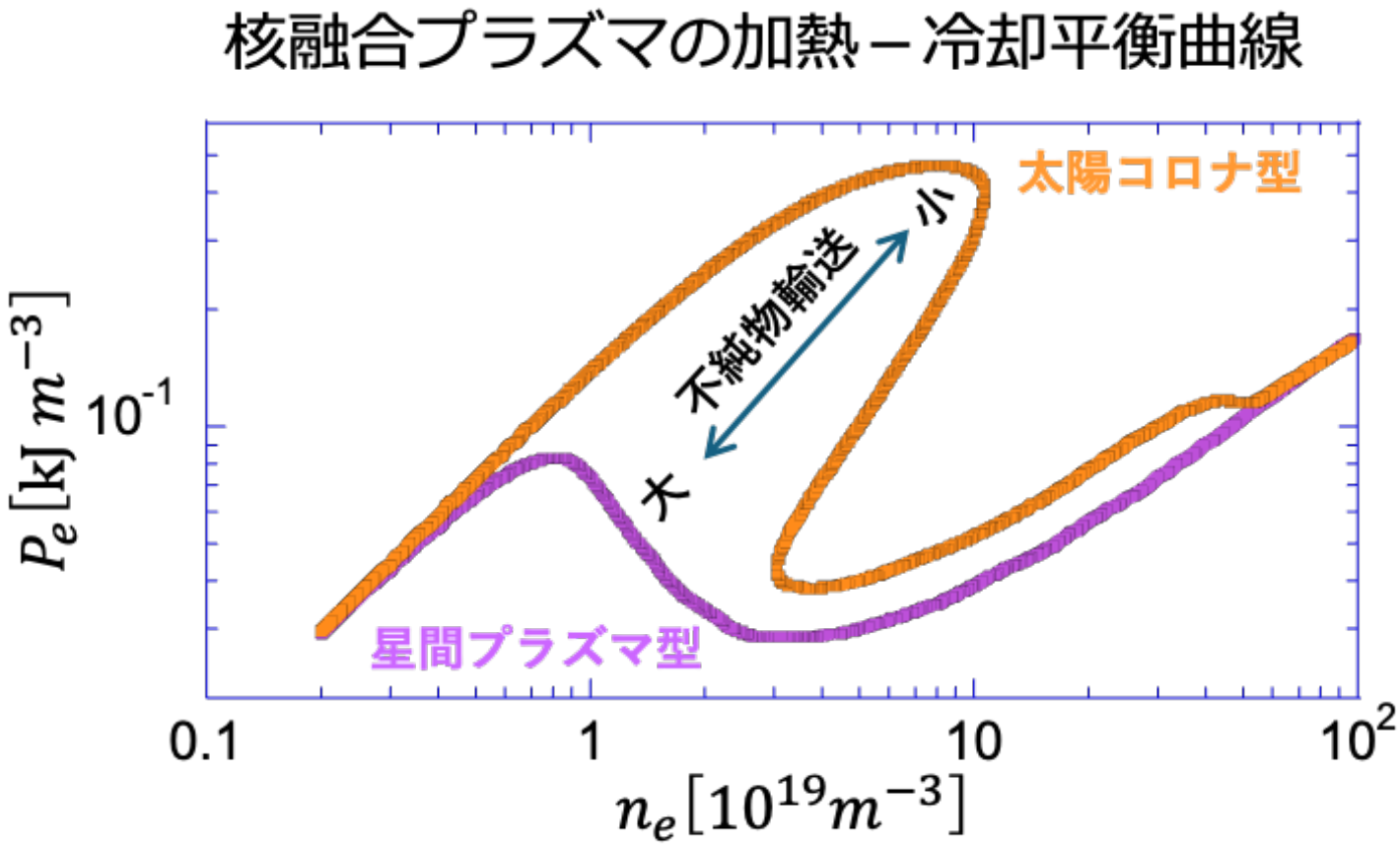
- 不純物ガスを導入し，軌道電子の電子衝突励起・脱励起による放射により，プラズマのエネルギーを光に変えて，放射冷却により熱負荷集中を回避
- 放射冷却運転は熱的不安定性を伴い，放射領域の安定化等，が課題



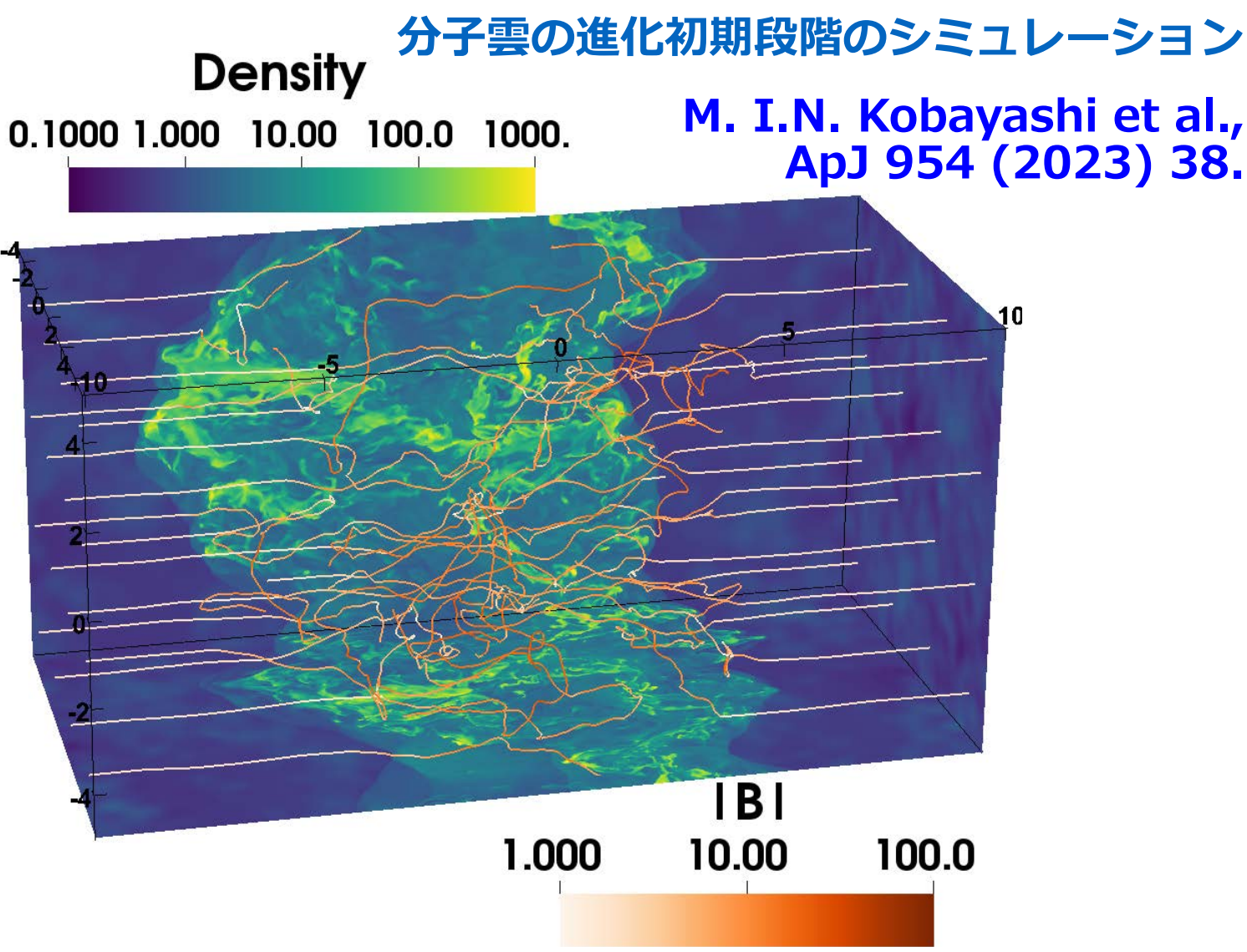
熱的不安定性を特徴づける無次元パラメータ空間における核融合・太陽・星間プラズマの位置づけ

◆星間分子雲や太陽コロナでも同様な現象

- 星間衝撃波などによる強い摂動により，熱的不安定性が駆動され，温かい星間ガス（WNM）が，より低温で高密度な星間ガス（CNM）へと進化
- 熱的不安定性によって，太陽コロナで生成された低温高密度のガス塊が太陽表面に落下



核融合プラズマによる太陽コロナ・星間プラズマの平衡曲線の再現
→ 実験室プラズマによる多様な熱的遷移過程の研究

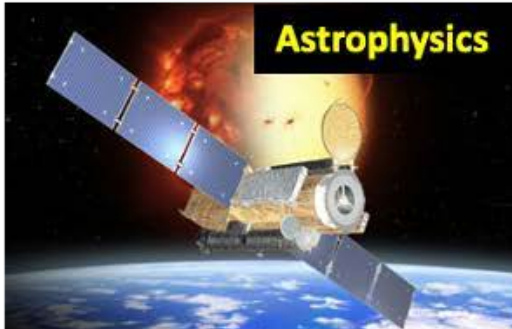


プラズマの熱的不安定性

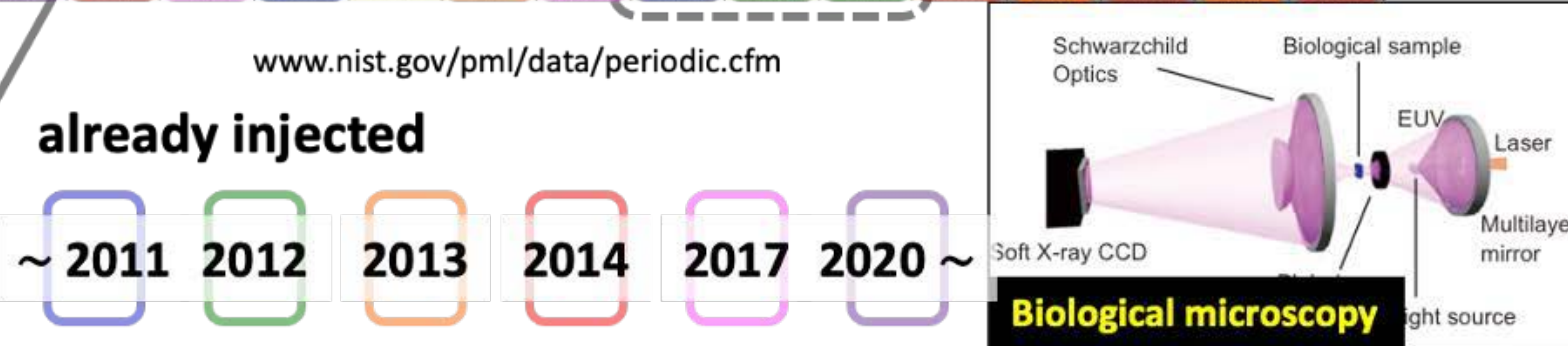
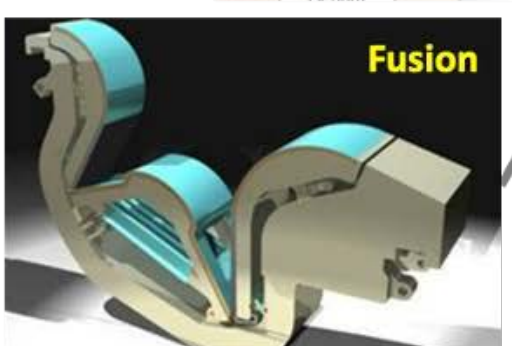
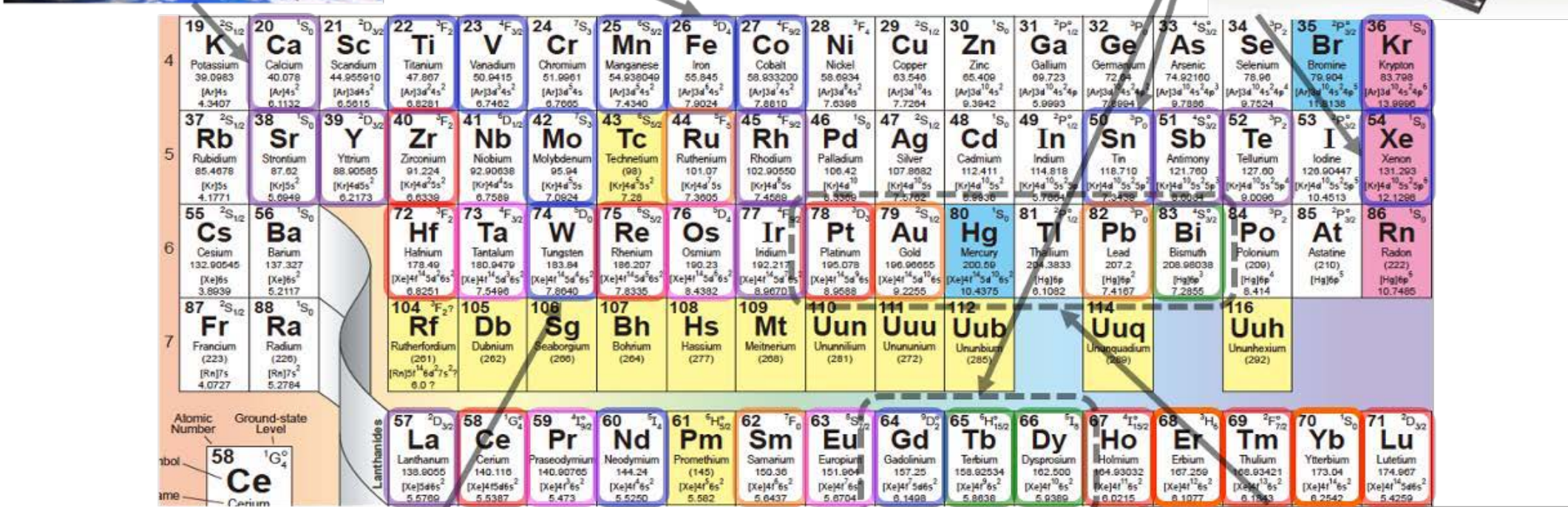
LHDプラズマを利用して、高い原子番号の原子発光データベースを拡張

❖天文分野、産業分野からの要請

- 天文分野：太陽コロナの密度計測、中性子星合体（キロノバ）時の重原子合成メカニズムの解明
- 生物分野：生体用顕微鏡のためのEUV光源の開発
- 新たな半導体回路生成のためのEUVリソグラフィ光源の開発



C. Suzuki, JPS 81 (2026) 15aE522-1.
T. Oishi, JPS 81 (2026) 15pE533-7.

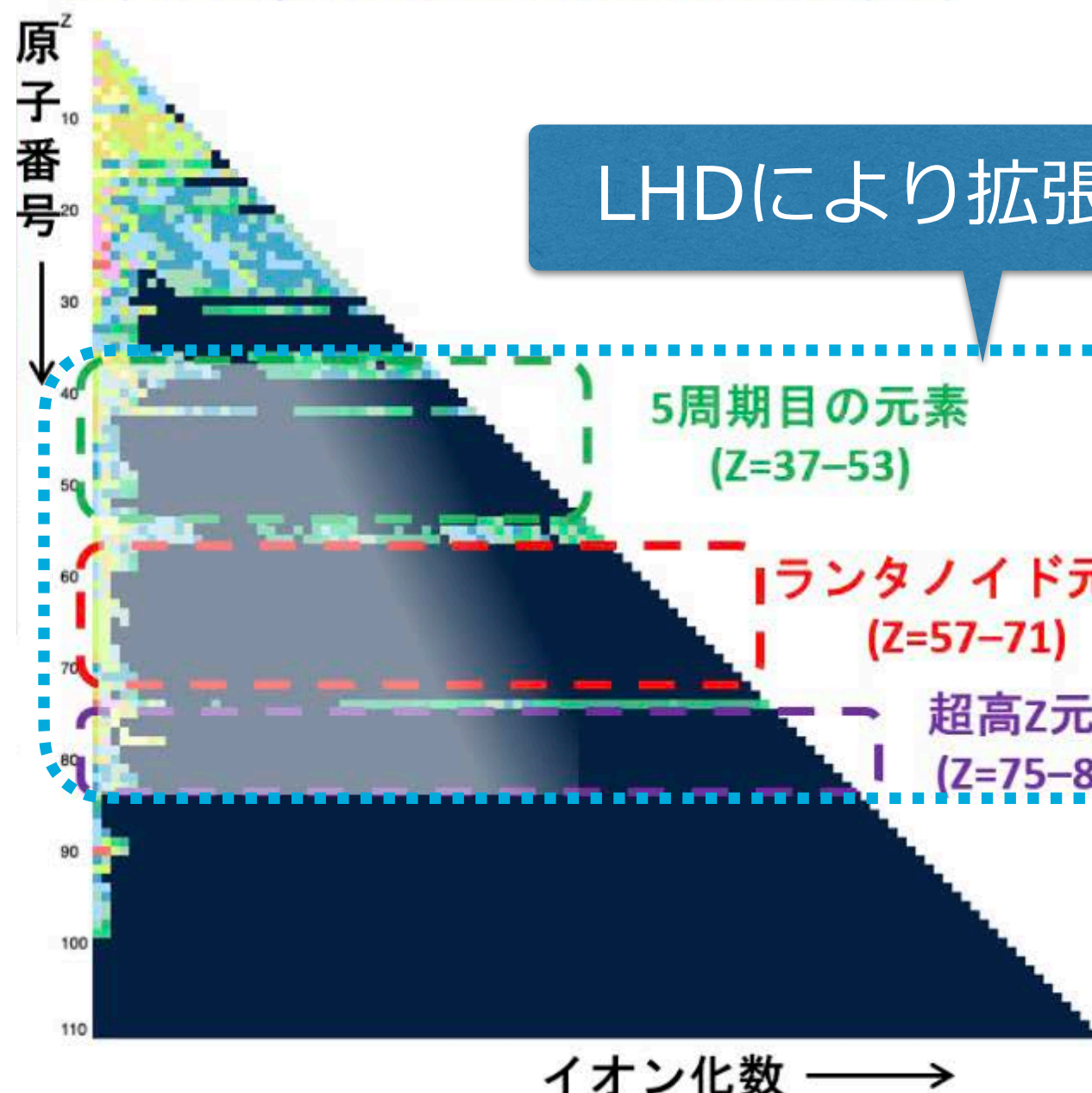


LHDプラズマに入射してデータベース拡張を進めた高原子番号原子

❖擾乱に強く安定なLHDプラズマを光源として利用

- 高原子番号・高イオン化のデータ取得には高温プラズマが有効
- 正確なデータベース構築には精度の高い温度・密度データが必要

Complete holdings for lines (move mouse over the clickable squares)



LHDにより拡張可能な領域

NIST（米国国立標準技術研究所）が公表する原子発光データベース
（上図の濃紺領域が未整備の領域）
https://physics.nist.gov/cgi-bin/ASD/lines_pt.pl

原子分子スペクトル

LHD実験データから、今後多くの新たな発見を期待

❖ 計測器数は120を超え、1回の実験あたりのデータ収集量は最大で0.9 TBに到達

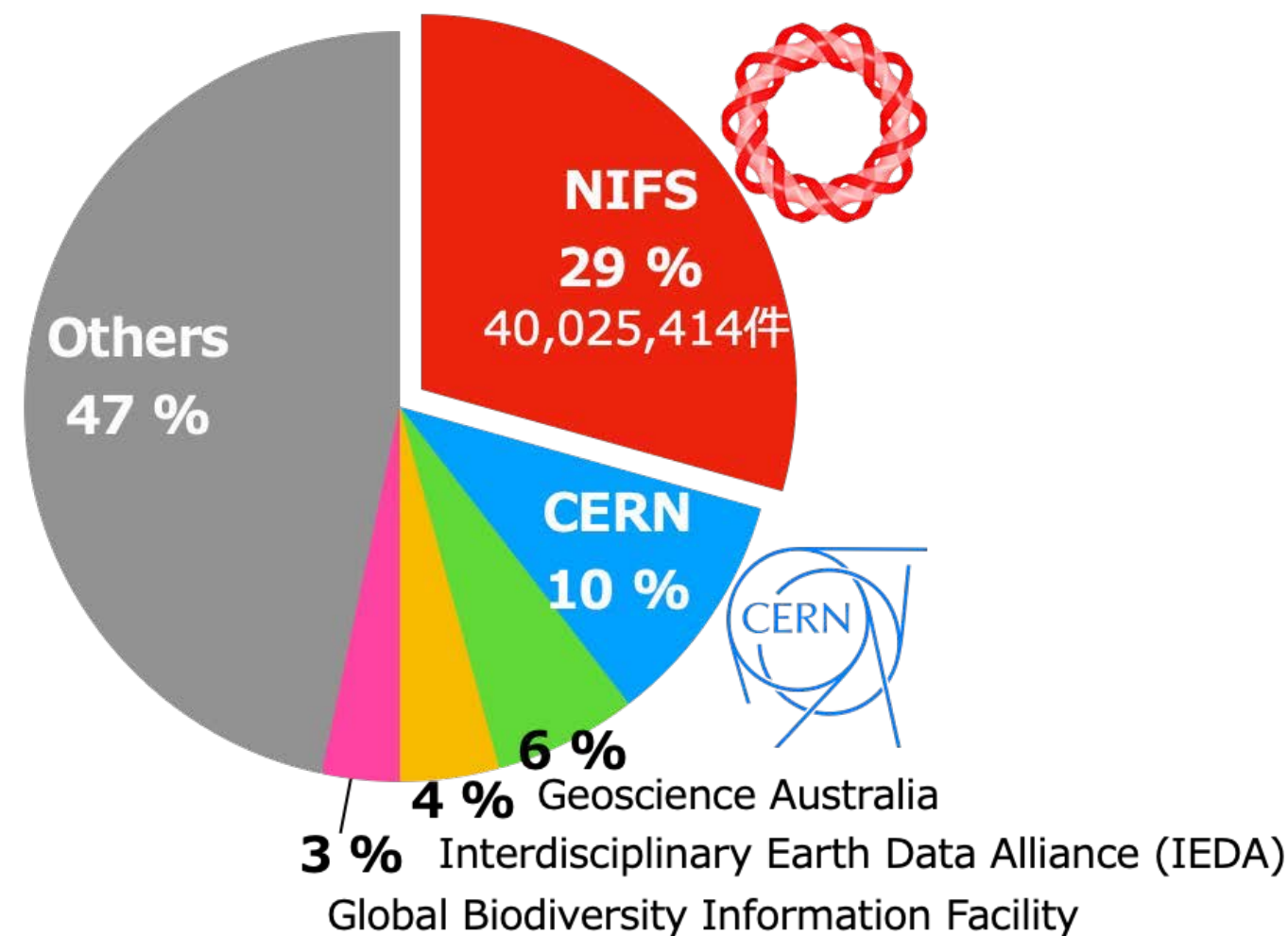
- ITERのデータ収集（予測値：1 TB）を模擬できる世界で唯一のデータ収集系

❖ 2021年度以降、プラズマ・核融合分野では世界に先駆けて計測・解析データを完全オープン化

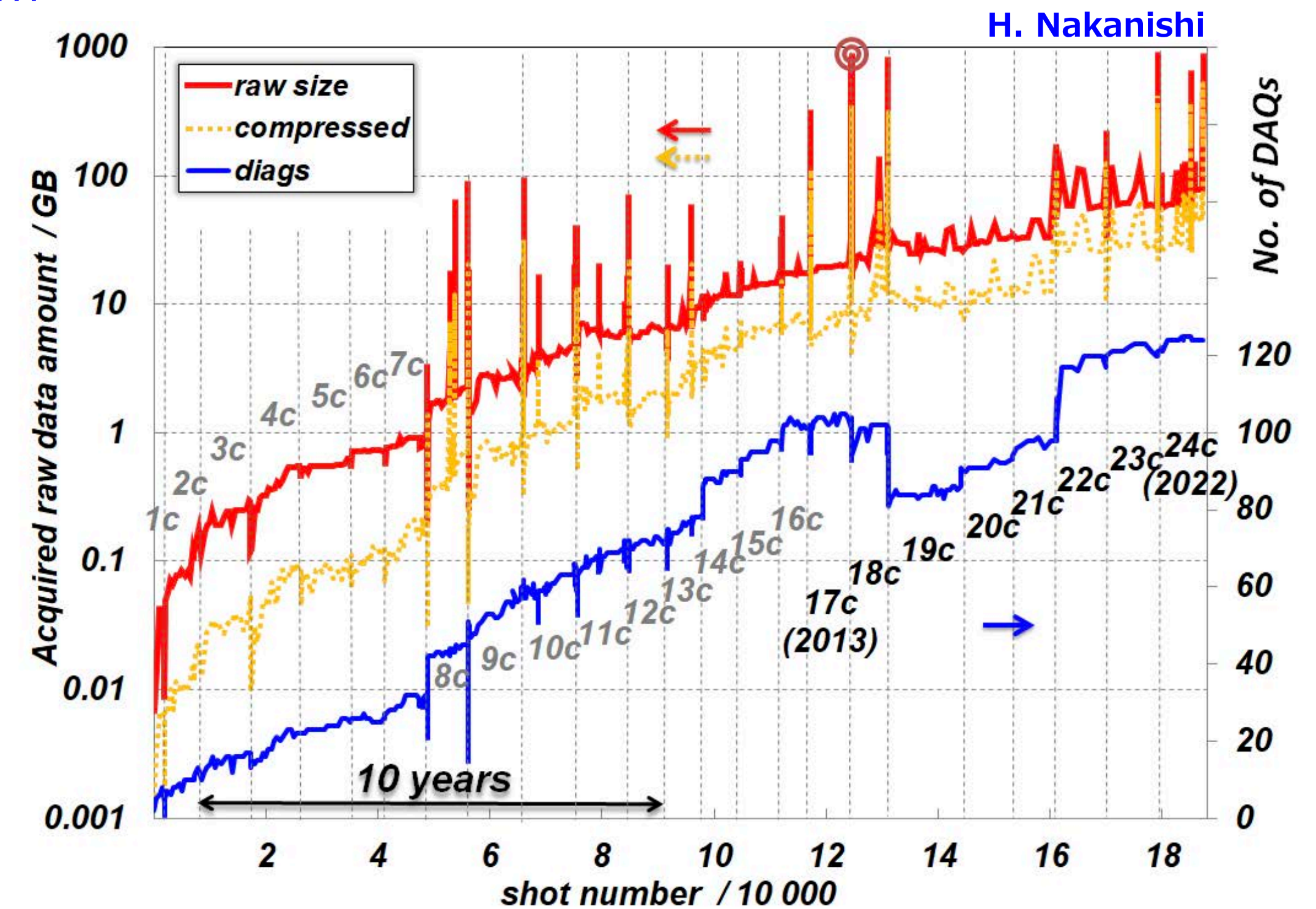
- 解析データ：<https://doi.org/10.57451/lhd.analyzed-data>
- 生データ：【NIFS】https://w3.lhd.nifs.ac.jp/LHD_Opendata.htm
もしくは、【AWS】<https://registry.opendata.aws/nifs-lhd/>

❖ 全データをDOI登録、永続的にデータ公開

- 世界のオープンサイエンスの潮流の中で、先導・先駆的役割



LHDデータのDOI登録状況（2026年）



LHD計測数と生データ収録サイズの変遷

オープンデータ

❖ 普遍的な学術研究を推進するためにヘリカル装置を選択し，LHDプロジェクトを推進

❖ 28年間のLHDのプラズマ実験の成果

- 高温プラズマを安定的に生成できる特性を活かし，プラズマ内部で生起する複雑現象の物理的起源を解明
- 高温プラズマの運転領域を拡大し，核融合炉を見通せるパラメータを達成
- 学際的に波及する成果を創出

❖ LHDのプラズマ実験は終了したが，蓄積された膨大なデータは永続的に公開し，共同研究を継続

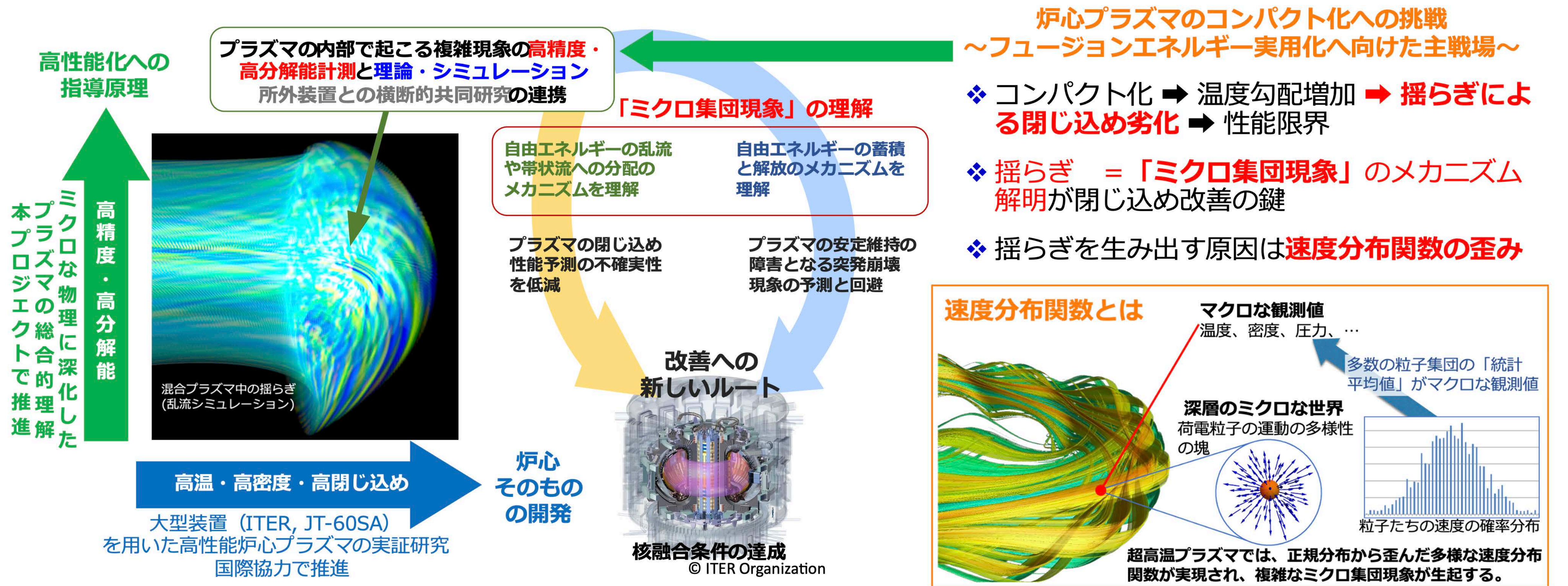
- 今後も多くの新たな発見を期待

❖ ポストLHD計画へと邁進していくための盤石な基盤

- 超高温プラズマの「ミクロ集団現象」を中核とした核融合科学の学術研究基盤計画

まとめ

- 科学目標：** 超高温プラズマの振る舞い（核融合プラズマ，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
- 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



2026年度から10年間の学術研究基盤事業

超高温プラズマの「マイクロ集団現象」を
中核とした核融合科学の学術研究基盤計画