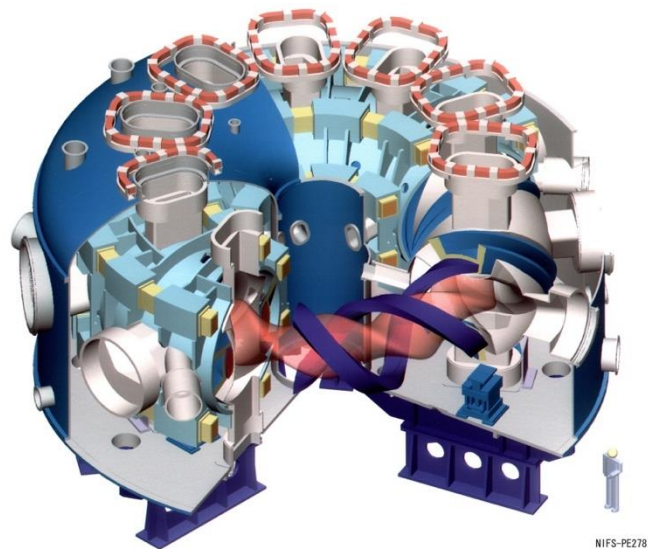


15pE533-2

閉じ込め・輸送特性

Characteristics of Transport and Confinement in LHD plasmas



田村 直樹^A on behalf of the LHD実験グループ^B

マックスプランク・プラズマ物理研究所^A,
核融合科学研究所^B

日本物理学会第81回年次大会

2026年9月15日

● LHDにおける閉じ込め・輸送特性

- 巨視的視点から: エネルギー閉じ込め時間
- 局所的視点から: 熱(エネルギー)輸送、不純物輸送
- 同位体効果

● おわりに

● LHDにおける閉じ込め・輸送特性

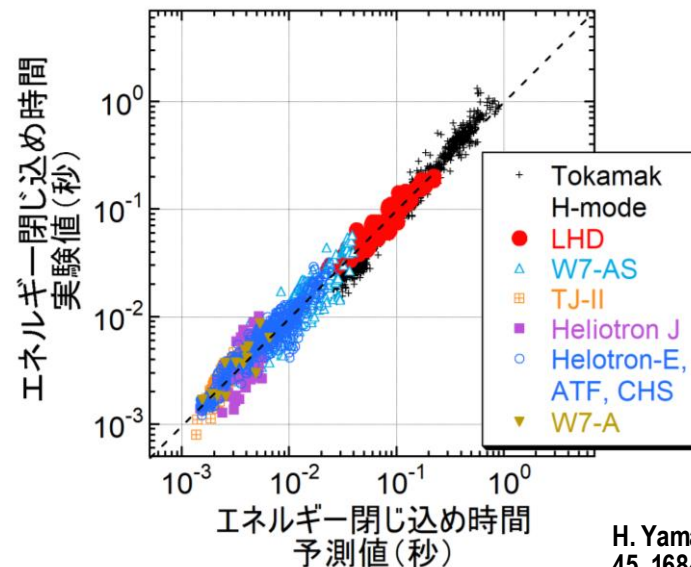
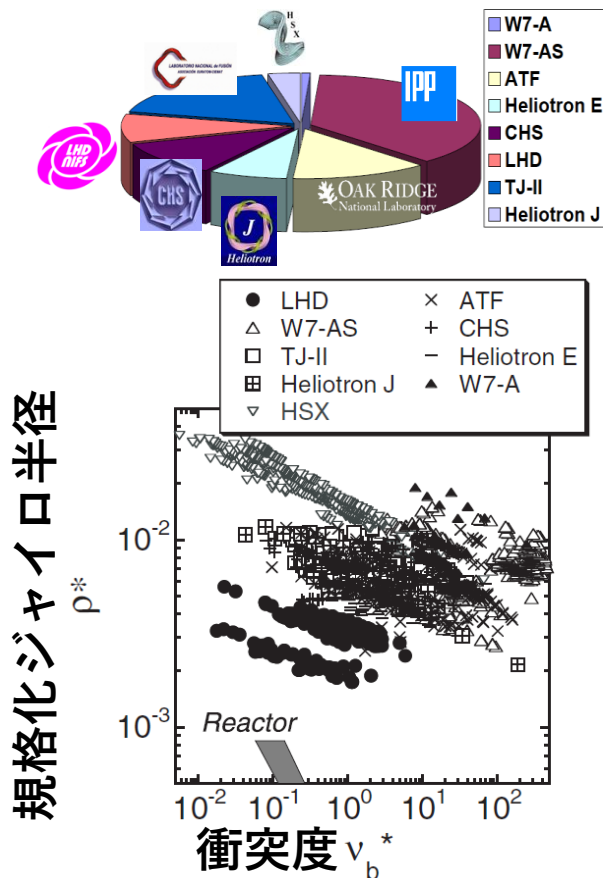
- 巨視的視点から: エネルギー閉じ込め時間
- 局所的視点から: 熱(エネルギー)輸送、不純物輸送
- 同位体効果

● おわりに

LHDの幅広い運転領域で蓄積された実験データは、 国際ステラレータ閉じ込め則 (ISS04) の構築に大きく貢献した

国際ステラレータデータベース: 3,000件以上

回帰統計解析からの経験則



H. Yamada+, Nucl. Fusion
45, 1684 (2005).

$$\tau_E^{\text{ISS04}} = 0.134 a^{2.28} R^{0.64} P^{-0.61} \bar{n}_e^{-0.54} B^{0.84} t_{2/3}^{0.41}$$

トカマクにおける経験則IPB98(y,2)との相違性

β、回転変換、逆アスペクト比ε、**楕円度κ**
→ **環状高温プラズマの総理解への課題**

磁場配位の自由度を活かし、LHD最終サイクル
でもデータ取得 → 更なる知見獲得が期待

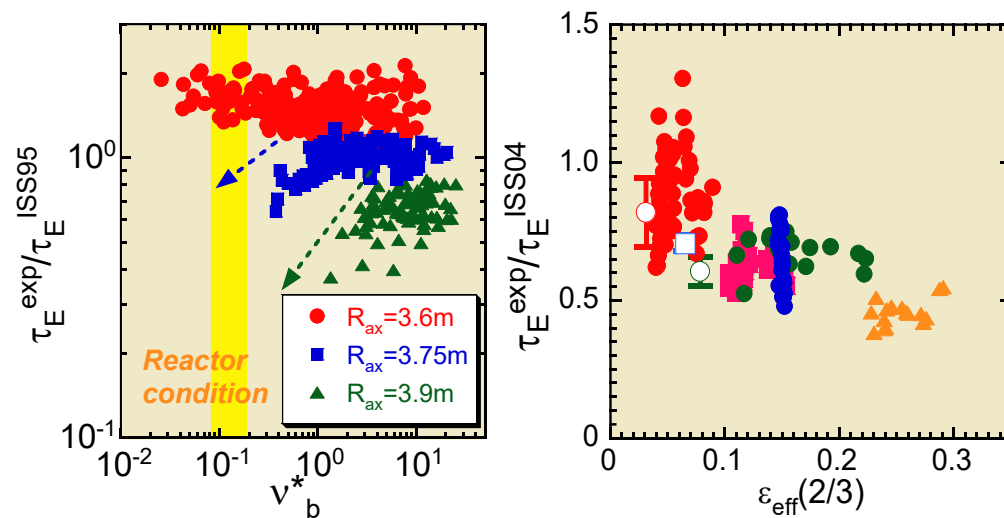
LHDにおける閉じ込め改善研究により、新古典輸送及び乱流輸送の改善機構に関する理解が進展した

実験

内寄せの磁場配位($R_{ax} = 3.6\text{ m}$)

→ 実効ヘリカルリップル ε_{eff} が低減

→ 新古典拡散が最適化



新古典拡散最適化による閉じ込め改善

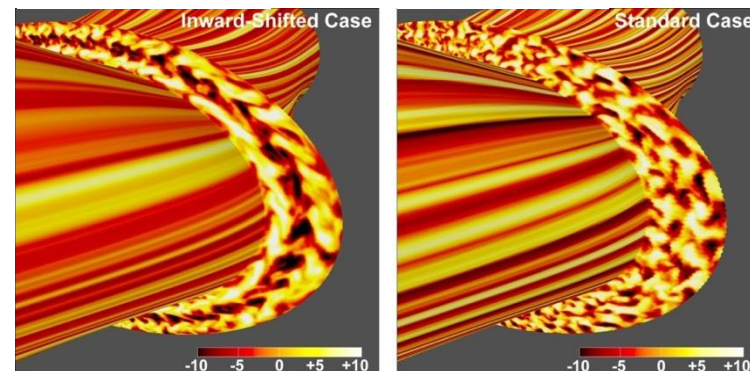
→ 幅広い衝突領域で現れる

シミュレーション

ジャイロ運動論シミュレーションGKVの計算結果

内寄せ配位

標準配位



帯状流強度向上に寄与すると考えられる効果

- 新古典拡散の最適化*
 - 磁力線の測地曲率の最小化**
- 定量的な比較は今後の課題

* T.-H. Watanabe, H. Sugama, and S. Ferrando-Margalet, PRL 100, 195002 (2008).

** M. Nakata, S. Matsuoka, Plasma. Fusion Res. 17, 1203077 (2022).

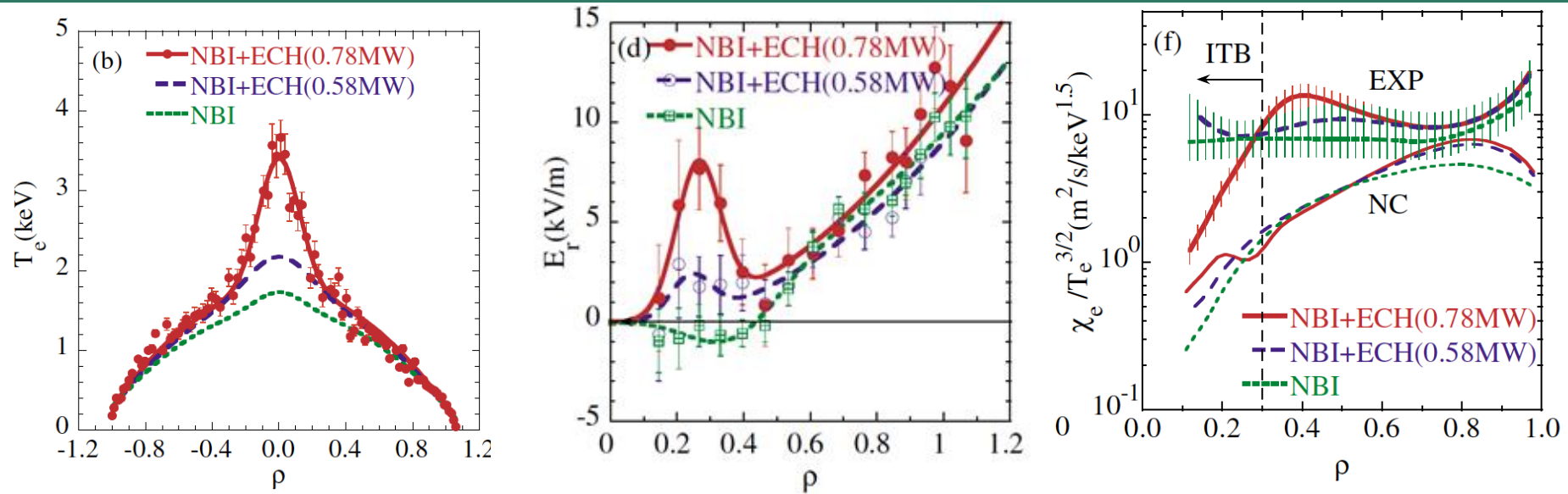
S. Nishimoto+, Plasma Phys. Control. Fusion 66, 045010 (2024).

● LHDにおける閉じ込め・輸送特性

- 巨視的視点から: エネルギー閉じ込め時間
- 局所的視点から: 熱(エネルギー)輸送、不純物輸送
- 同位体効果

● おわりに

電子系内部輸送障壁の発現を始めとして、 径電場構造と輸送特性に関する理解が進展した



K. Ida et al., Phys. Rev. Lett. 91, 085003 (2003).

- LHDでは、低密度領域において両極性条件下で正の径電場を取る解（電子ルート）が存在
- 低密度領域において、中心集光ECHを印加し、電子への加熱入力を増加させると...
 - ➔ 急峻な温度勾配を伴い、中心部の電子温度が急上昇
 - ➔ 中心部に大きな正の径電場と強い径電場シアが形成
 - ➔ 中心部で規格化輸送係数は1桁近く減少（ECH印加に伴う新古典輸送の変化は寄与しない方向）

電子系内部輸送障壁の発現 ➔ 径電場構造と輸送特性に関する理解が進展

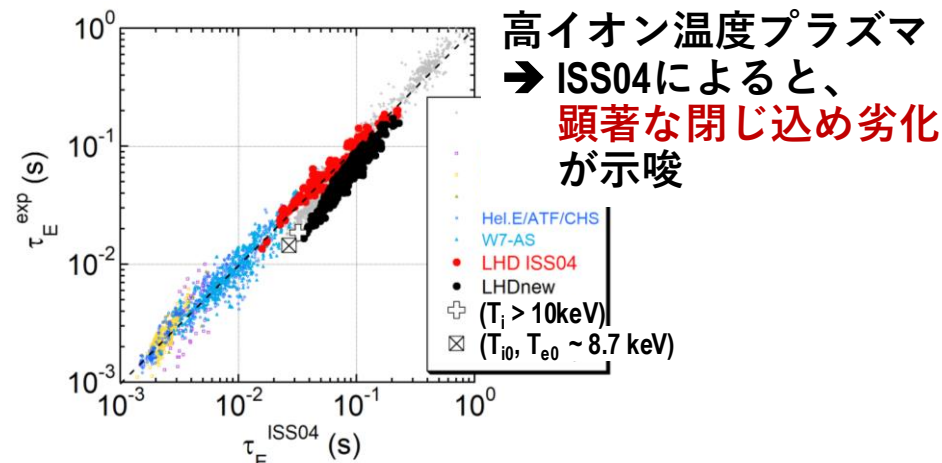
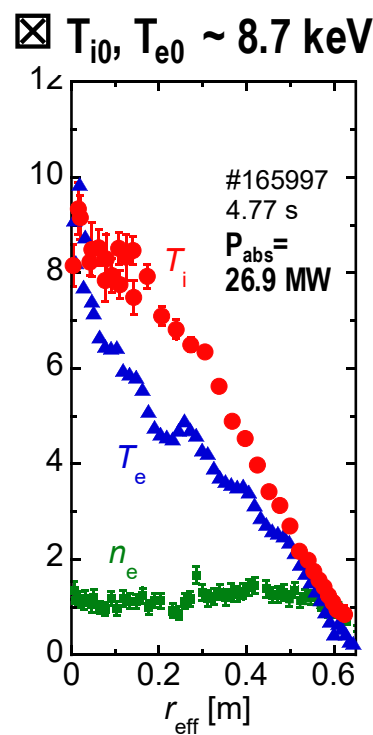
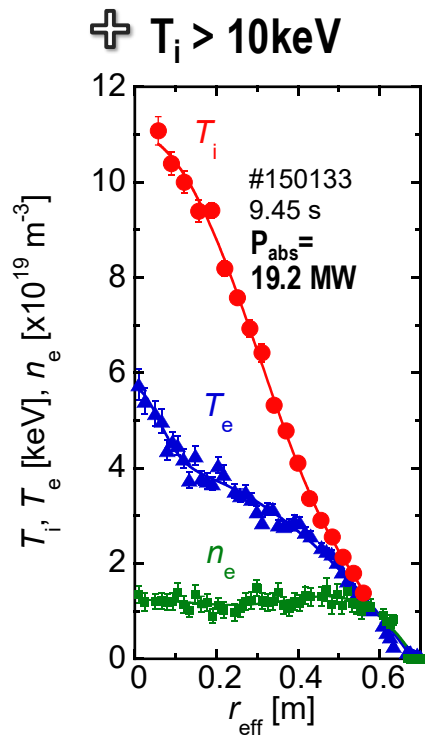
イオン系内部輸送障壁の発現により、 高イオン温度領域の研究が進展した

重水素の利用により、イオンへの加熱入力が増大

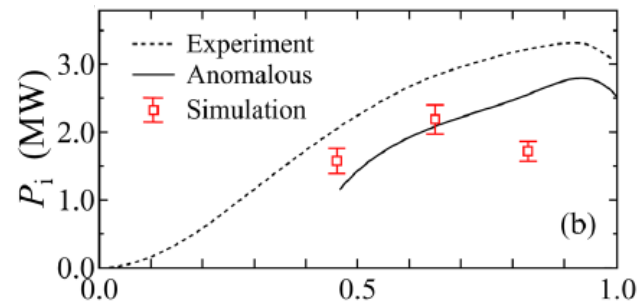
➔ **イオン系内部輸送障壁**の発現

⊕ **10 keVを超えるイオン温度**

⊠ **イオン温度, 電子温度 = 1 億度の同時達成**

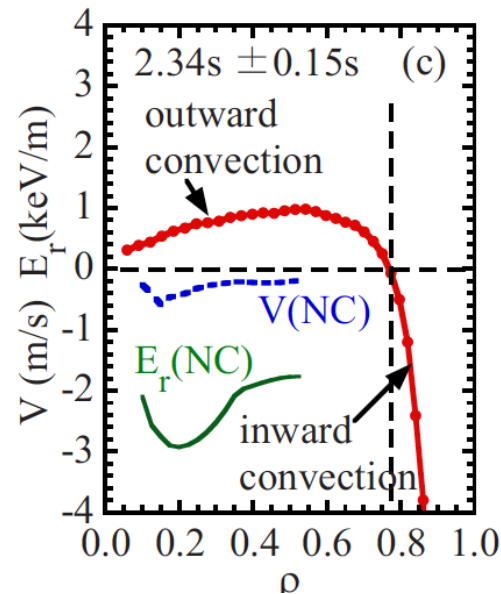
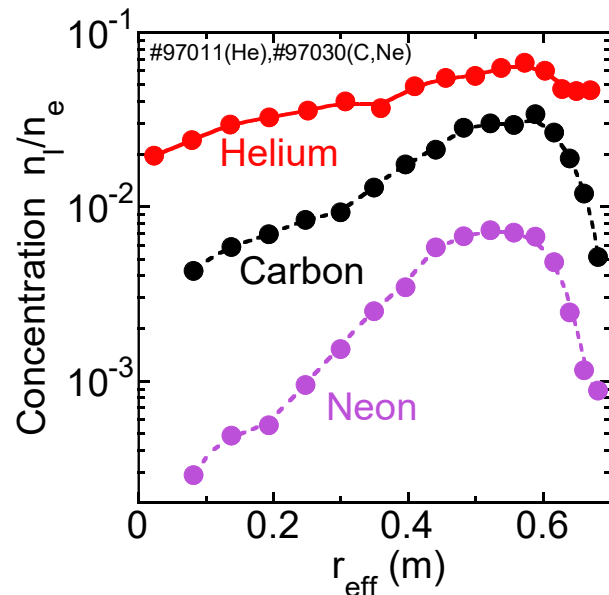
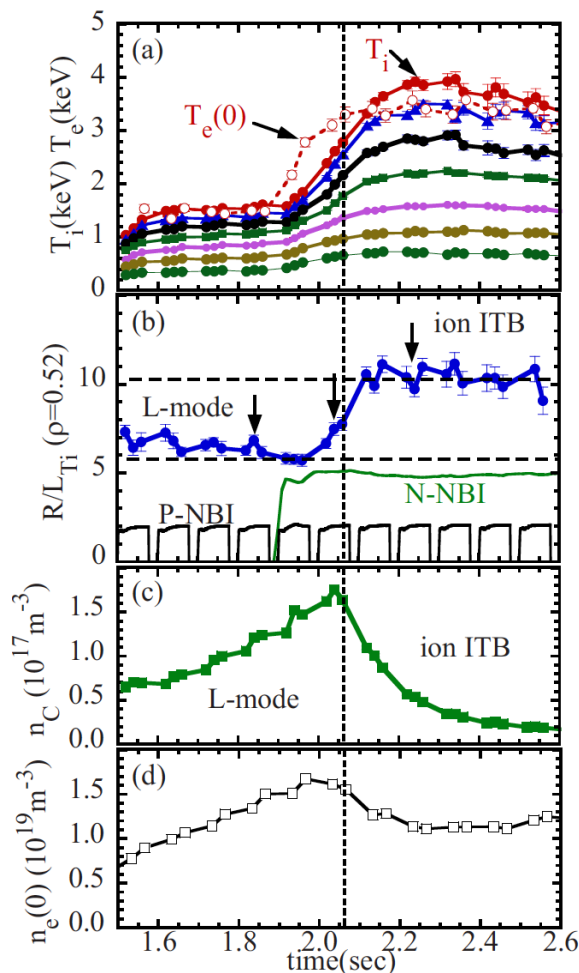


実験結果とジャイロ運動論シミュレーション結果
の定量比較が可能になりつつある



M. Nunami+, Phys. Plasmas 19, 042504 (2012).

イオン系内部輸送障壁を有するプラズマでは、中心部から不純物が掃き出される



- イオン温度勾配の発展(イオン系内部輸送障壁の形成)途中で、突然、不純物密度が減少に転ずる → **不純物ホール**の発現
- 両極性条件下で**負の径電場**を取る解 (イオンルート) の領域にも関わらず、**外向きの不純物粒子束**が発生 (負電場なら内向きのはず) ← グローバル新古典輸送シミュレーション (FORTEC-3D) により、定性的な傾向の再現に成功
→ **定量的な理解は今後の課題**

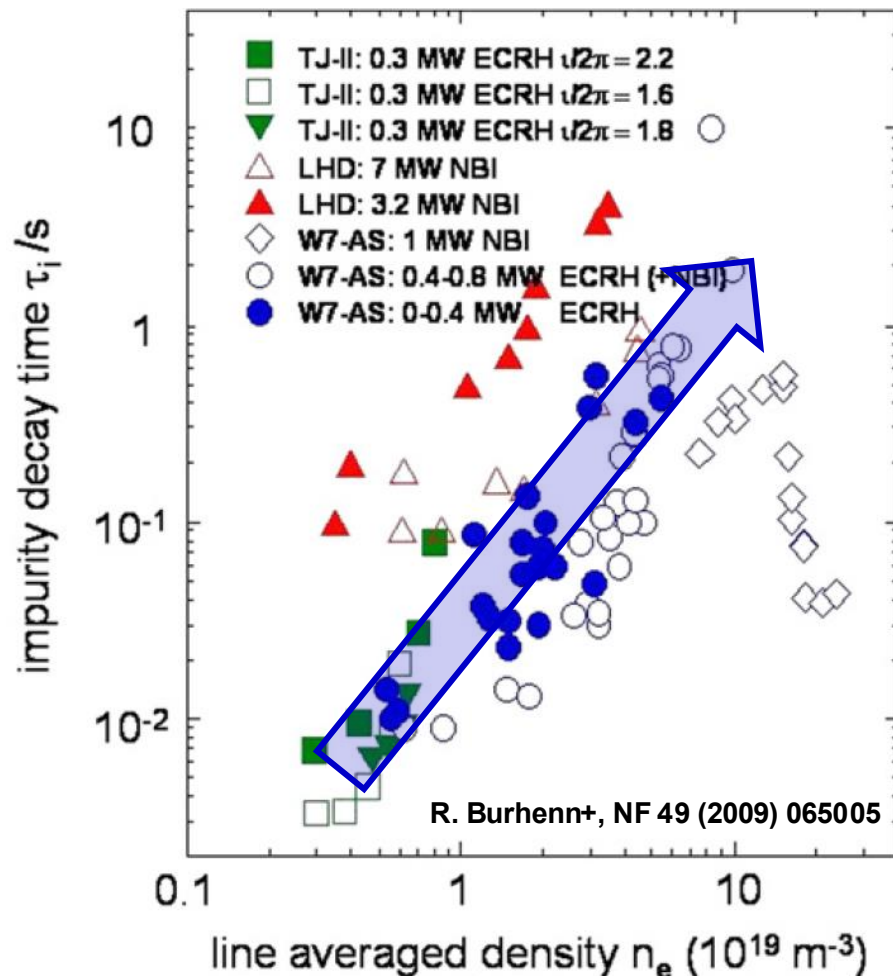
K. Ida⁺, Phys. Plasmas 16, 056111(2009).
K. Fujita⁺, Nucl. Fusion 61, 086025 (2021).

● LHDにおける閉じ込め・輸送特性

- 巨視的視点から: エネルギー閉じ込め時間
- 局所的視点から: 熱(エネルギー)輸送、不純物輸送
- 同位体効果

● おわりに

ヘリカル系では、イオンルートにおける内向きの不純物粒子束によるプラズマ中心部への不純物蓄積が懸念される



ヘリカルプラズマでは、

- 新古典輸送における不純物輸送は、**径電場(E_r)**に強く影響を受ける

$$\Gamma_I^{nc} = -D_{1,I} n_I \left\{ \frac{\nabla n_I}{n_I} + \frac{Z_I e \nabla \phi}{k T_I} + \left(\frac{D_{2,I}}{D_{1,I}} - \frac{3}{2} \right) \frac{\nabla T_I}{T_I} \right\}$$

[V. Tribaldos, PoP 8 (2001) 1229]

Here, the momentum exchanges between the bulk ion and the impurities are ignored

- 不純物閉じ込め時間は、線平均電子密度と共に増加
イオンルート領域 → 負電場
→ 内向きの不純物粒子束

LHD実験の進展により、不純物蓄積を伴わない放電シナリオに関する知見が集積された

LCFSにおける密度・温度で見た LHDにおける不純物蓄積発現領域

低密度・高電子温度領域

● 正電場による排出

[K. Ida+, NF 45 (2005) 391]

低密度・高イオン温度領域

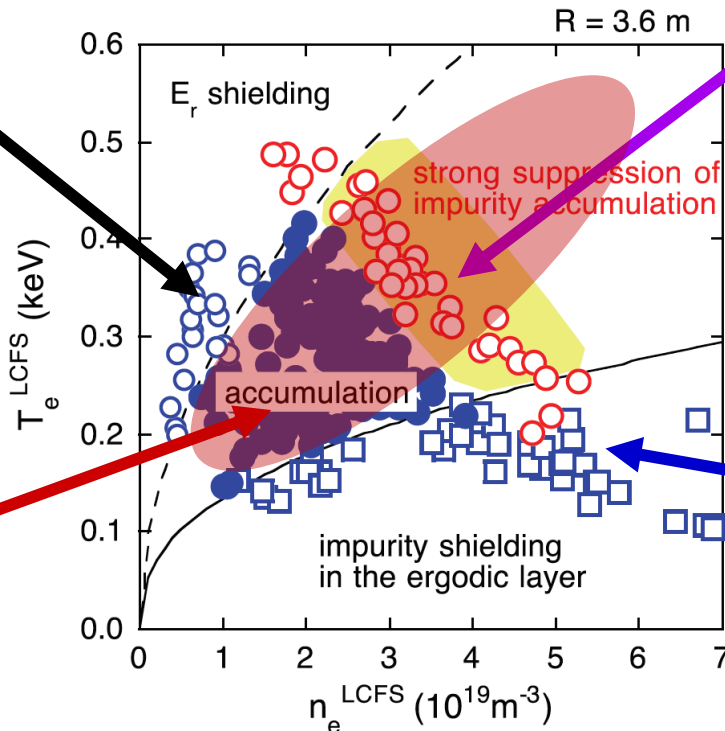
● イオン温度勾配増大に伴う不純物ホールによる排出

[M. Yoshinuma+, NF 49 (2009) 062002]

中密度・中温度領域

× 不純物蓄積発生！

[N. Tamura+, PPCF 58 (2016) 114003]



例外:

高密度・高NBIパワー領域

● 不純物排出を確認

→ イオン温度勾配増大による乱流輸送促進？

→ トロイダル回転増大による外向き輸送促進？

[Y. Nakamura+, Nucl. Fusion 57 (2017) 056003]

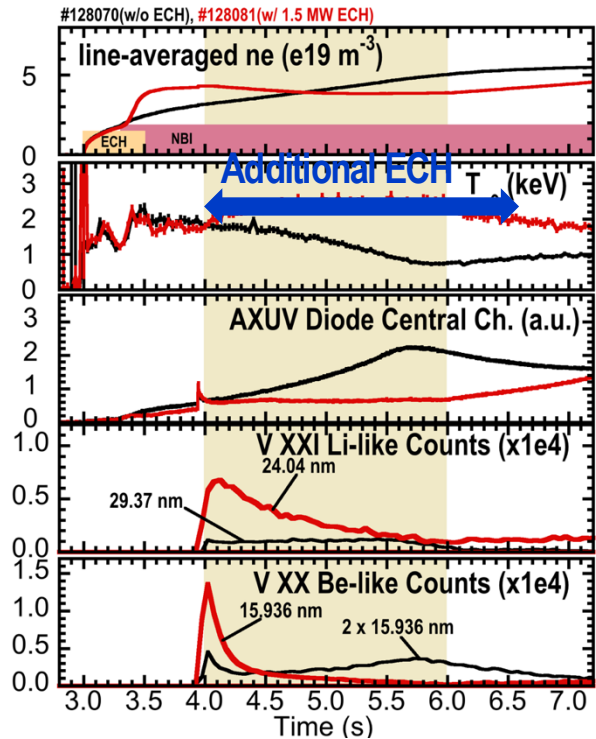
高密度・低温度領域

● SOL領域でのスクリーニング効果

($F_{\text{friction}} \rightleftharpoons F_{\text{thermal}}$)

[M. Kobayashi+, NF 55 (2015) 104021]

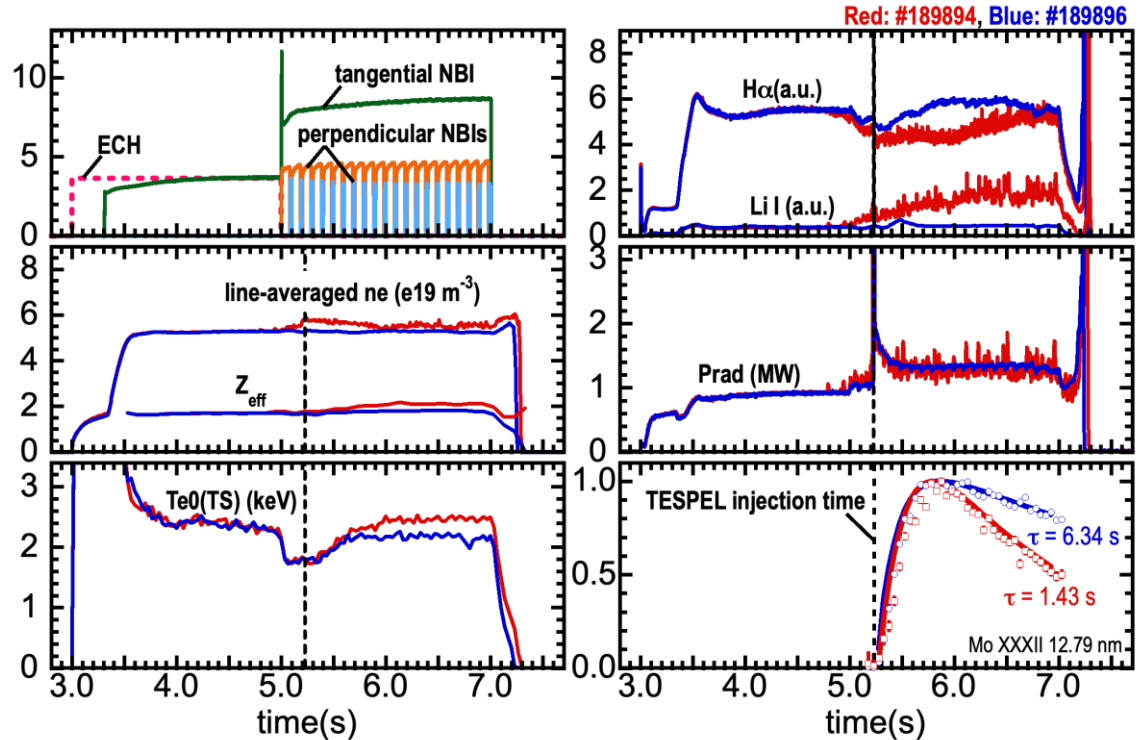
不純物蓄積への対処において、既存の枠組みの他、新しい試みにより、その可能性の幅が広がる



ECHによる追加熱 → 不純物蓄積の抑制
 → 実験的に径電場の変化は確認できず
 → 定性的・定量的な理解は今後の課題

N. Tamura+, Phys. Plasma 24, 056118(2017).

田村直 - 日本物理学会第81回年次大会, 2026年09月15日



L粉末の添加により、モリブデン(Mo^{31+})イオンの減衰時間が短縮
 → 蓄積傾向にあった不純物の排出を促進

一般的には無視されるはずの不純物粒子間の相互作用が要因?
 ← **不純物の新たな利点の発見**

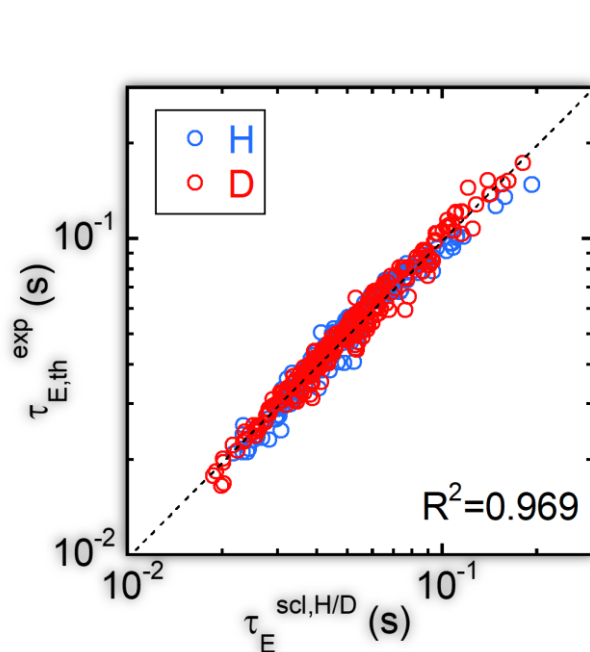
D. Medina-Roque+, Phys. Plasma 33, 050701(2026).

● LHDにおける閉じ込め・輸送特性

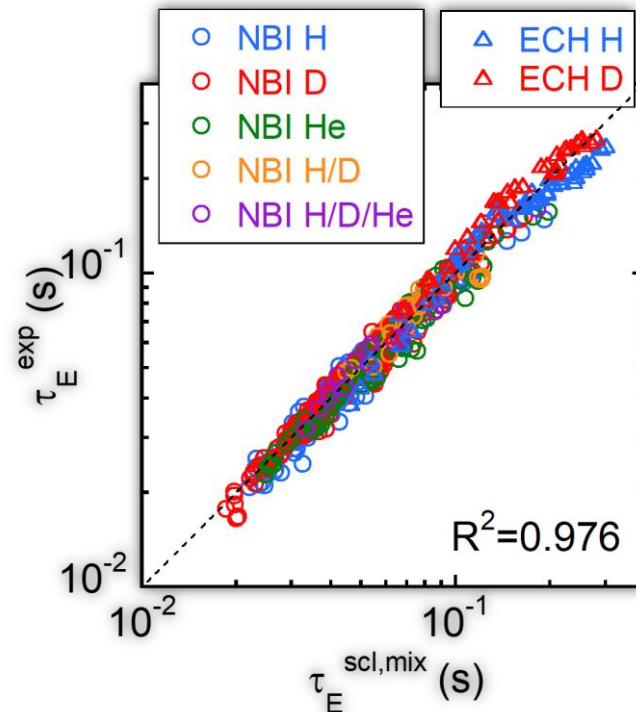
- 巨視的視点から: エネルギー閉じ込め時間
- 局所的視点から: 熱(エネルギー)輸送、不純物輸送
- 同位体効果

● おわりに

同位体効果（質量依存性）は、装置パラメーターによる回帰統計解析には現れない



$$\tau_{E,th}^{scl,HD_NBI} \propto A_{eff}^{0.01} Z_{eff}^{-0.11} B^{0.87} \bar{n}_e^{0.71} P_{abs}^{-0.85}$$

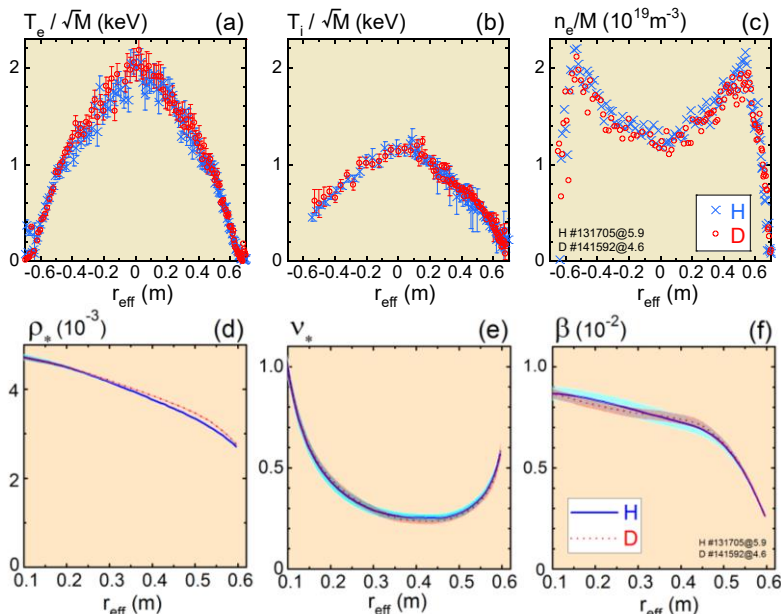


$$\tau_{E,th}^{scl,mix} \propto A_{eff}^{-0.02} Z_{eff}^{-0.08} B^{0.91} \bar{n}_e^{0.67} P_{abs}^{-0.85}$$

軽水素プラズマと重水素プラズマの比較、及び様々な混合イオンプラズマに対する回帰統計解析には、**質量依存性**がほとんど出てこない ← ジャイロ・ボームモデルと整合しない...

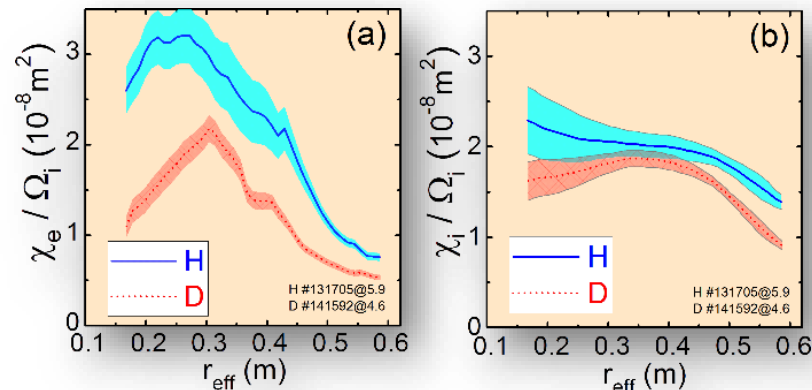
次元相似プラズマに対する局所熱輸送解析では、 軽水素と重水素の熱輸送に明確な差が現れる

制御パラメータ（磁場、密度、加熱パワー）を調整し、規格化ジャイロ半径 ρ^* 、衝突頻度 ν^* 、ベータ値 β がほぼ同じ**軽水素(H)プラズマ**、**重水素Dプラズマ**を生成し、比較



$$B_D = M^{3/4} B_H$$

無次元パラメータとしては、両者は同一
→ 同じ規格化熱拡散係数を持つはず...



結果: **重水素プラズマの方が**、小さい規格化熱拡散係数を持つ、つまり**輸送特性が改善している**ことが明らかに

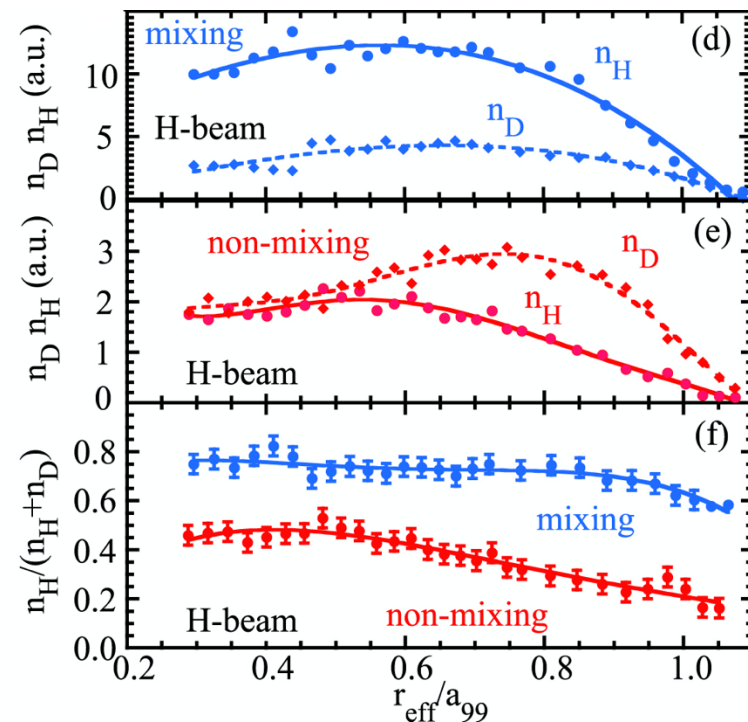
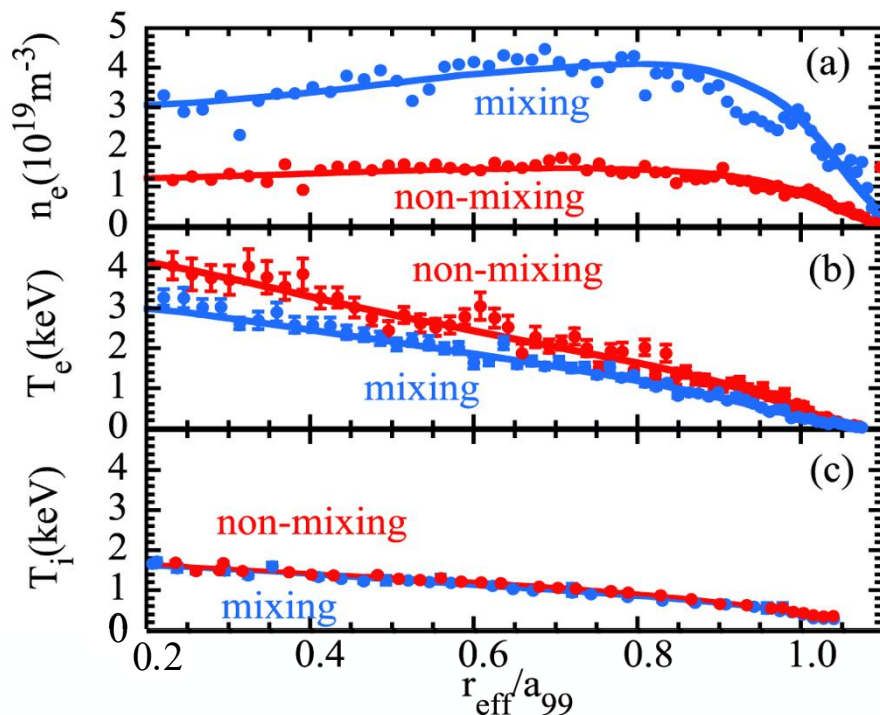
1. ジャイロボームモデルが破綻？
2. ジャイロボームモデル導出時に無視された物理機構が隠れパラメータとして存在？
3. 未知の物理機構の存在？

● **同位体効果の謎は依然として存在** → 次の手は？

軽水素・重水素の混合プラズマにおいて、その混合状態(それぞれの径方向分布)が一致しないことがあることが確認された

低密度 → 軽水素密度の割合 $n_H/(n_H+n_D)$ 分布が尖塔化 → 同位体非混合状態に

高密度 → 軽水素密度の割合 $n_H/(n_H+n_D)$ 分布が平坦化 → 同位体混合状態に



重水素・三重水素の混合プラズマである核融合プラズマの性能予測精度向上に対する重要な知見

→ 今後のプラズマ実験においても、重要な研究課題である

K. Ida⁺, Phys. Rev. Lett. 124 (2020) 025002.
K. Ida⁺, Nucl. Fusion 61 (2020) 016012.

● LHDにおける閉じ込め・輸送特性

- 巨視的視点から: エネルギー閉じ込め時間
- 局所的視点から: 熱(エネルギー)輸送、不純物輸送
- 同位体効果

● おわりに

おわりに

プラズマ閉じ込め装置であるLHDにおいて、そのアイデンティティとも言える閉じ込め・輸送特性研究により、多くのことが得られた

- 既存の理解の拡充
- 新しい知見の獲得（予期せぬ発見）
- 鮮明化されつつも、より深まったプラズマ物理の謎

定性的な理解が深まりつつも、**定量的な理解がまだ不十分** → 今後の課題

- ✓ そのためには、研究の進展により明らかになった、MHD、高エネルギー粒子（非マックスウェル粒子）、非線形/非局所/非定常現象との複雑な相互作用を考慮する必要があるだろう