

定常プラズマの物理

増崎 貴

核融合研、総研大

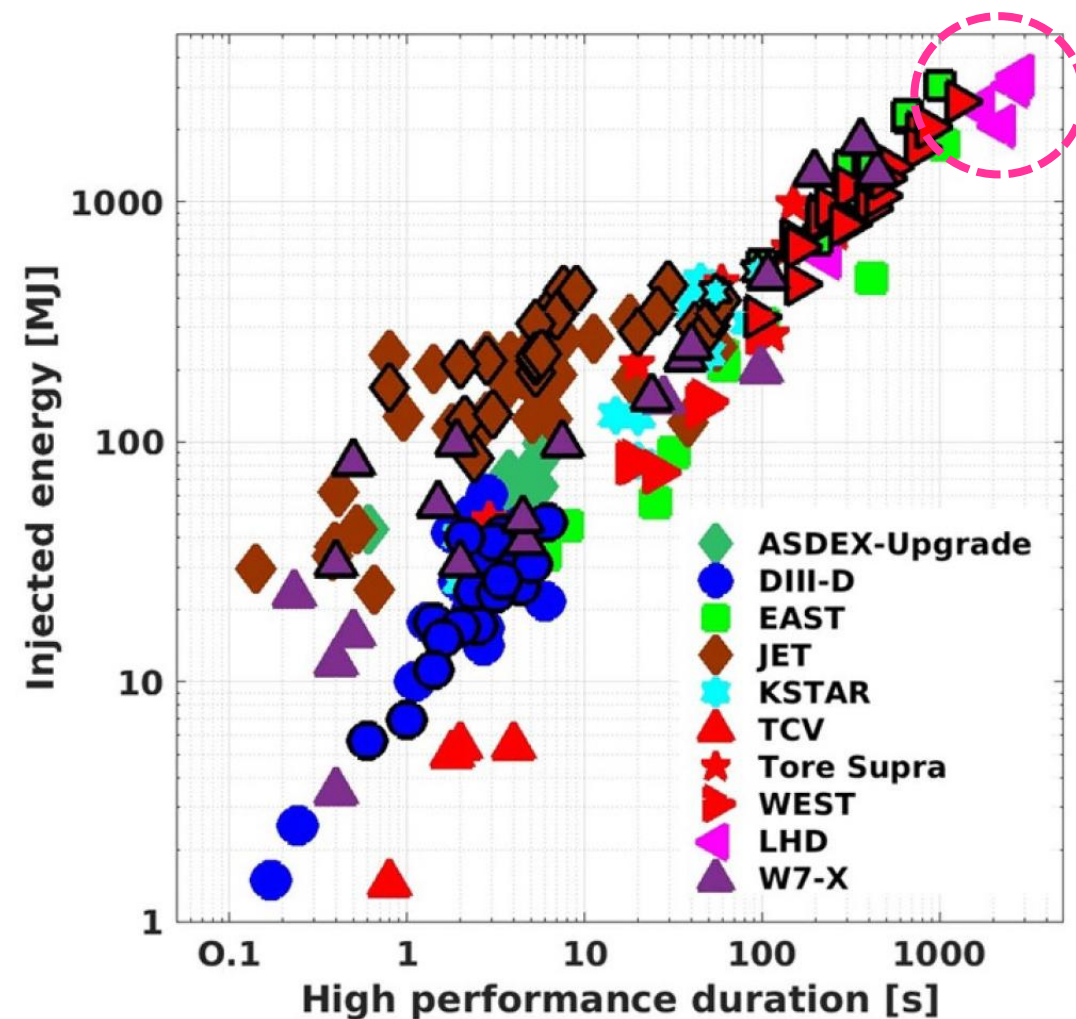
はじめに

- 磁場核融合発電の実現に向けて、定常プラズマ運転は重要な課題
 - LHDの重点課題の一つ「ダイバータを設置して、無電流プラズマの長パルス実験を行い、定常運転に必要な基礎資料を得る」
- 高温プラズマは閉じた磁気面内にあるが、荷電交換粒子束やダイバータプラズマにより、壁と繋がっている
- 長パルス放電は物理と工学の統合運転
 - プラズマ加熱機器開発と改良
 - 粒子制御機器開発と改良
 - プラズマ・壁相互作用の理解
 - 壁の温度上昇に伴う壁からのガス放出による密度の上昇
 - ダストの突入による突発的な密度、放射損失の増加
 - プラズマ運転の高度化



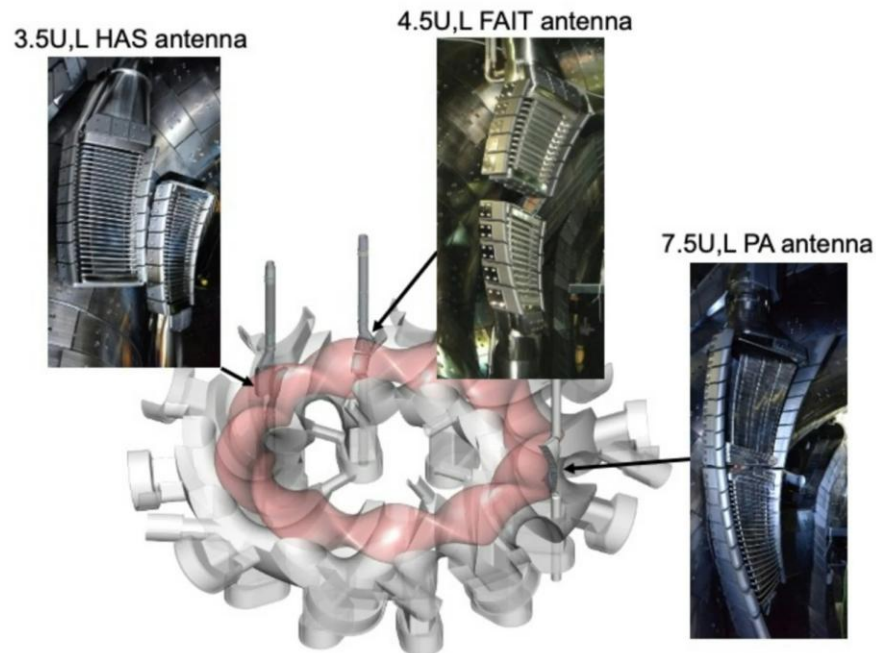
LHDの長パルス放電の達成パラメータ

- **48分放電（世界最高 3.36 GJ）**：ICRF+ECHの高パワー（約1.2 MW）入力で $n_e \sim 1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $T_{e0} \sim T_{i0} \sim 2 \text{ keV}$ の高密度・高温度ヘリウムプラズマを47分39秒維持し、総注入エネルギー 3.36 GJを達成
- 54分放電（総注入エネルギー 1.6 GJ）：ICRF+ECH加熱（約0.5 MW）により、 $n_e \sim 0.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $T_{e0} \sim T_{i0} \sim 1 \text{ keV}$ のヘリウムプラズマを54分28秒維持
- ECH単独で1時間超の長パルス放電維持：約0.11MWで $n_e \sim 0.15 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $T_{e0} = 1\text{-}1.5 \text{ keV}$
- ECH単独で長パルス高パラメータ維持：約0.35 MWで、 $n_e \sim 1.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $T_{e0} > 2.5 \text{ keV}$ のヘリウムプラズマを39分間維持
- ECH単独放電で、**電子内部輸送障壁**（e-ITB, $n_e \sim 1.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $T_{e0} \sim 3.5 \text{ keV}$ ）を5分程度安定して維持

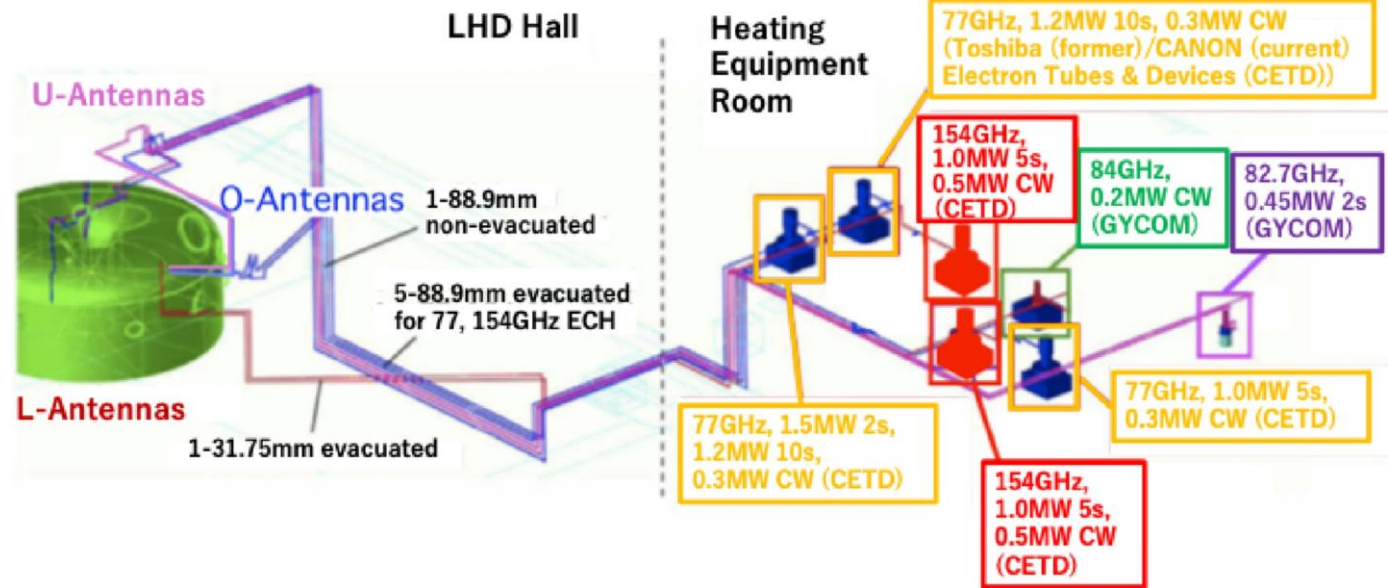


X. Litaudon+, Nucl. Fusion 66 (2026) 095001

プラズマ加熱機器の長パルス放電への対応



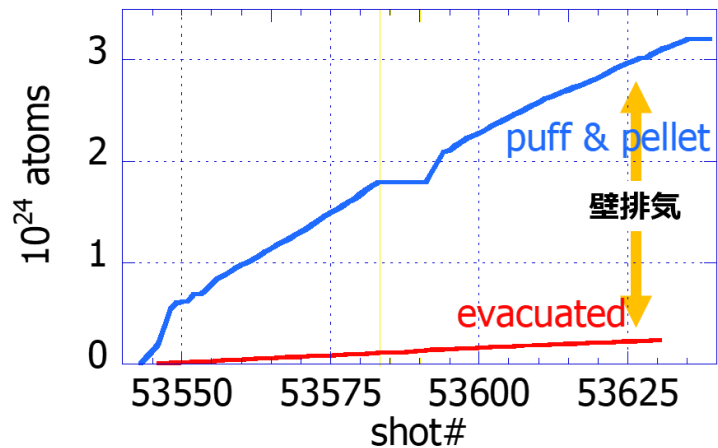
ICHアンテナ (T. Seki +, J. Fus. Energy 2026)



ECHシステム (Y. Yoshimura +, J. Fus. Energy 2026)

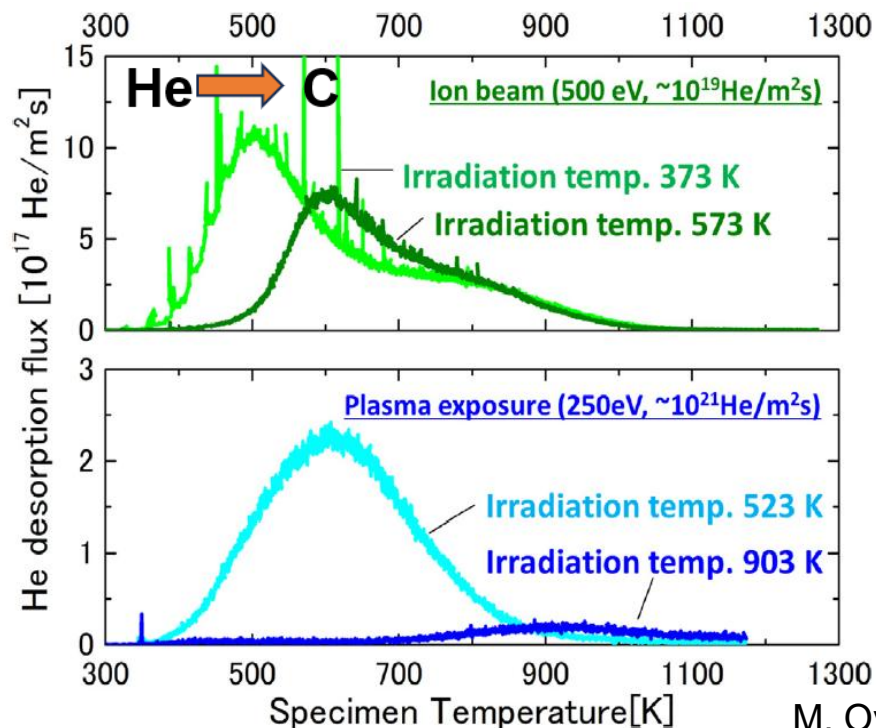
- ICHはHeプラズマにHを少数イオンとする少数イオン加熱運転 ⇒ **LHDでの多くの実験はHeプラズマ放電**
 - 第19～23サイクル実験の重水素キャンペーンでは、DプラズマにHを少数イオンとした実験も実施
 - ECH単独の長パルス実験ではHプラズマでの実験も実施
- **長パルス実験で起きる問題への取り組み**
 - ICH: アンテナ近傍でのアーク発生や平行高周波電界とRFシース電位を抑制するため、PAアンテナのファラデーシールドを撤去、HAS・FAITアンテナを開発
 - ECH: 77GHzジャイロトロン管内の圧力上昇→ 2 台のジャイロトロン of 交互運転

壁による燃料粒子の蓄積と放出



- あるH放電実験日の粒子バランス
- 壁に残留する粒子数（排気量）は飽和していない

M. Kobayashi +, J. Nucl. Mater. 2006



Heイオンビーム、Heプラズマ照射した炭素材に蓄積されたHeの昇温脱離スペクトラム
壁材料に蓄積された粒子は、壁材料の温度が上がると放出される

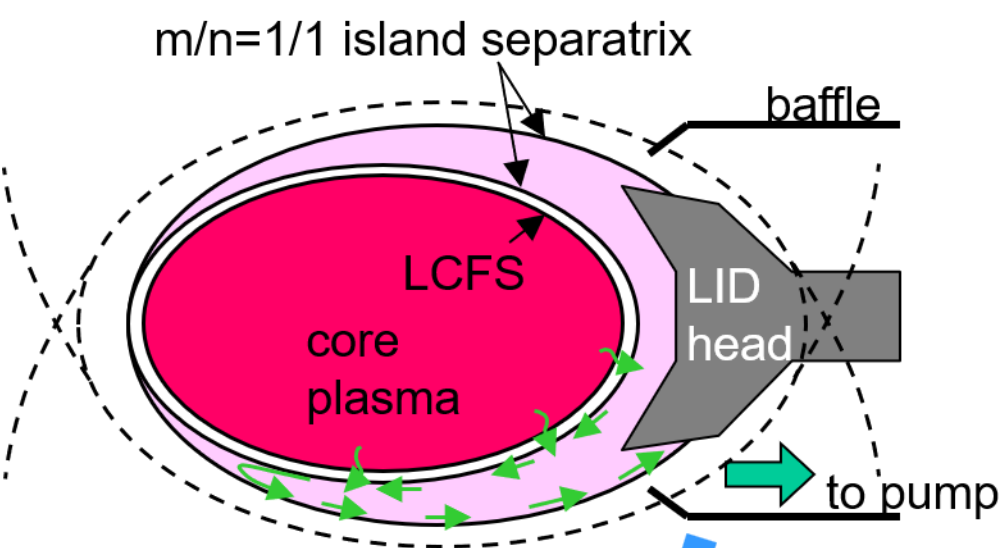
- 長パルス放電中に壁温度が上がれば蓄積されたガスが放出
- 壁温度を低く保てば、強いガス放出はない ⇒ **壁の冷却、デタッチメント**

照射時の材料温度が高くなれば、蓄積されるHe量は小さくなる

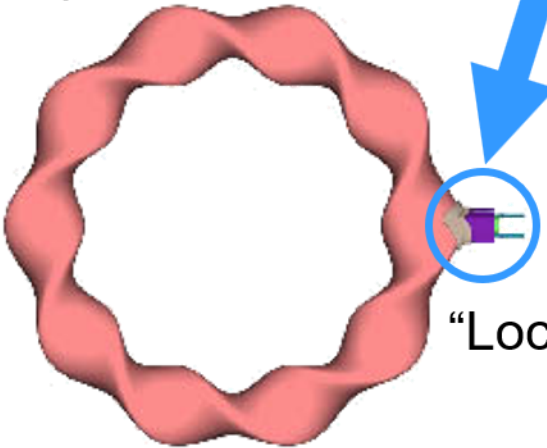
- あらかじめ壁の温度を高くとおければ、壁からの放出ガスは問題にならない
長パルス放電中に壁に入る粒子が少なければ壁が飽和に至るまで時間が伸びる ⇒ **ダイバータ排気**

M. Oya +, Nucl. Mater. Energy 2017

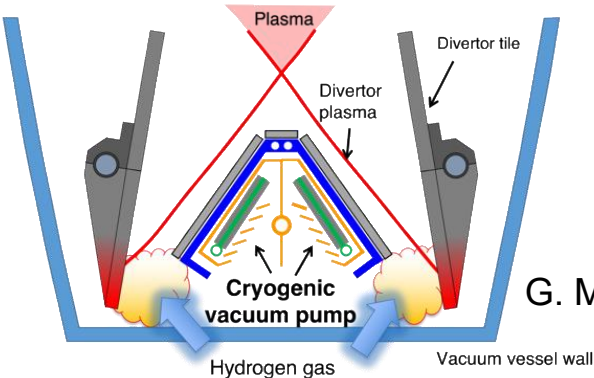
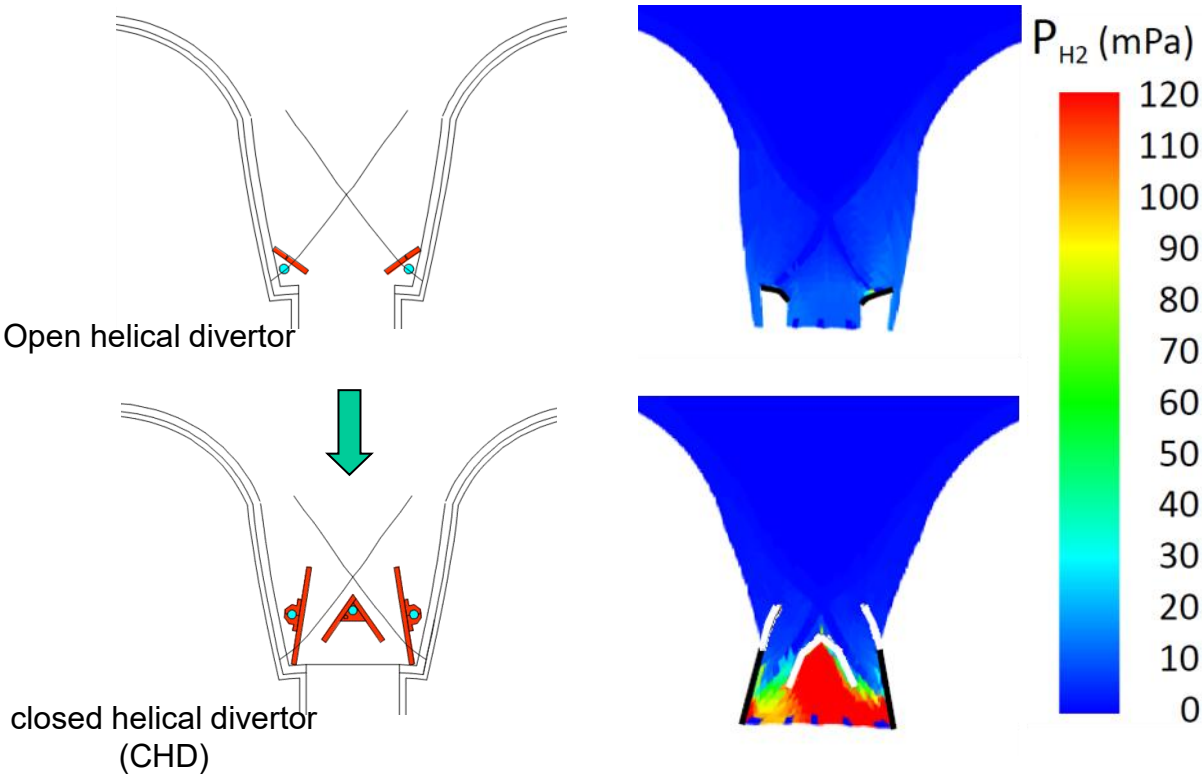
ダイバータによる粒子制御 LIDと閉構造ヘリカルダイバータ (CHD)



LHD plasma

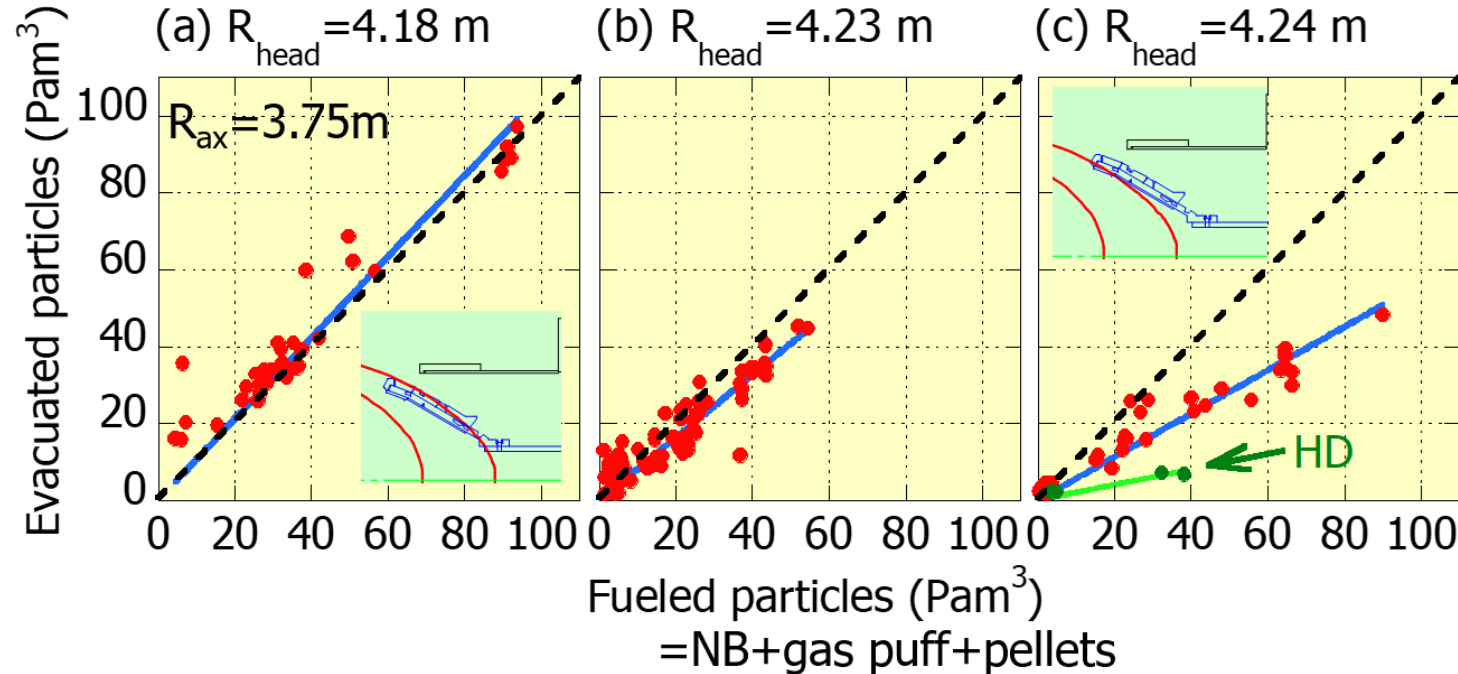


“Local” island divertor

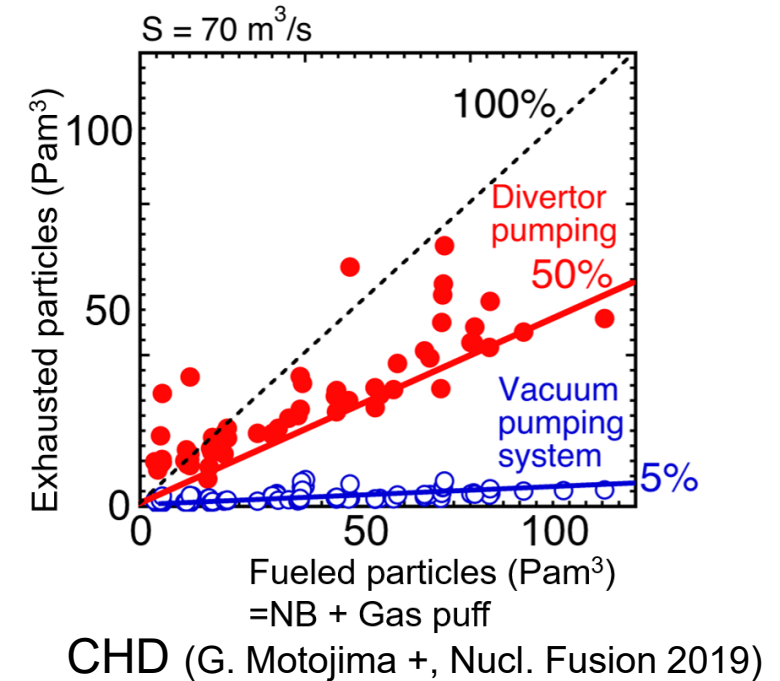


G. Motojima +, PSI 2026

ダイバータ排気の効果 プラズマに導入した粒子の多くを排気

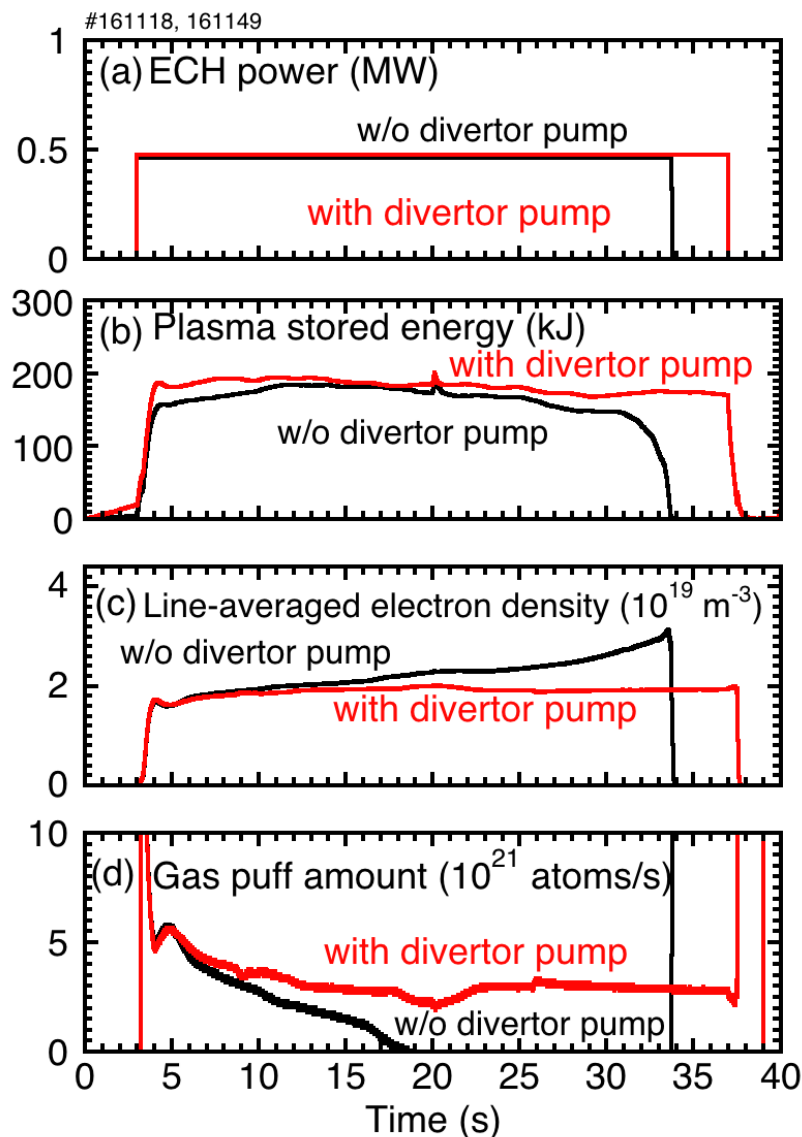


LID (S. Masuzaki +, J. Nucl. Mater. 2007)



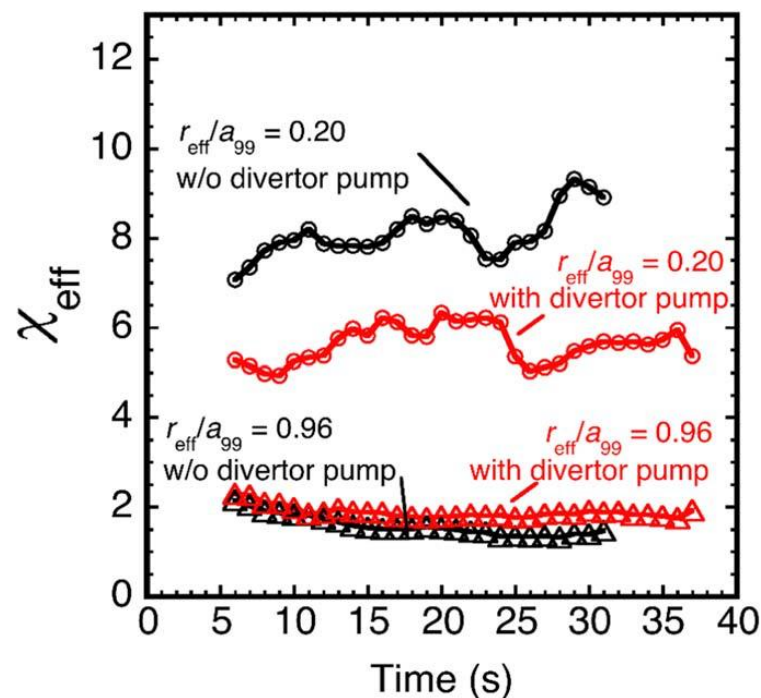
- NBI加熱水素プラズマでダイバータ排気実験を実施
- プラズマに導入した粒子を効率よく排気することで、壁に蓄積する粒子を低減できる
- LIDはダイバータの濡れ面積が小さく、熱・粒子負荷が大きいため長パルス実験では使えなかったが、SDCの発見などで中性粒子制御により主プラズマへ影響を与えることを示した
- CHDはトラス内側のダイバータ部だけであり、LIDほどの粒子排気は得られなかったが、長パルス実験で効果を示した。

CHDによるダイバータ排気の効果



G. Motojima +, Plasma Fus. Res. 2021

- ECH加熱のHプラズマ
- ダイバータ排気無しでは粒子供給を停止しても密度が上昇して放射崩壊
- ダイバータ排気がある場合は粒子供給による密度制御が持続

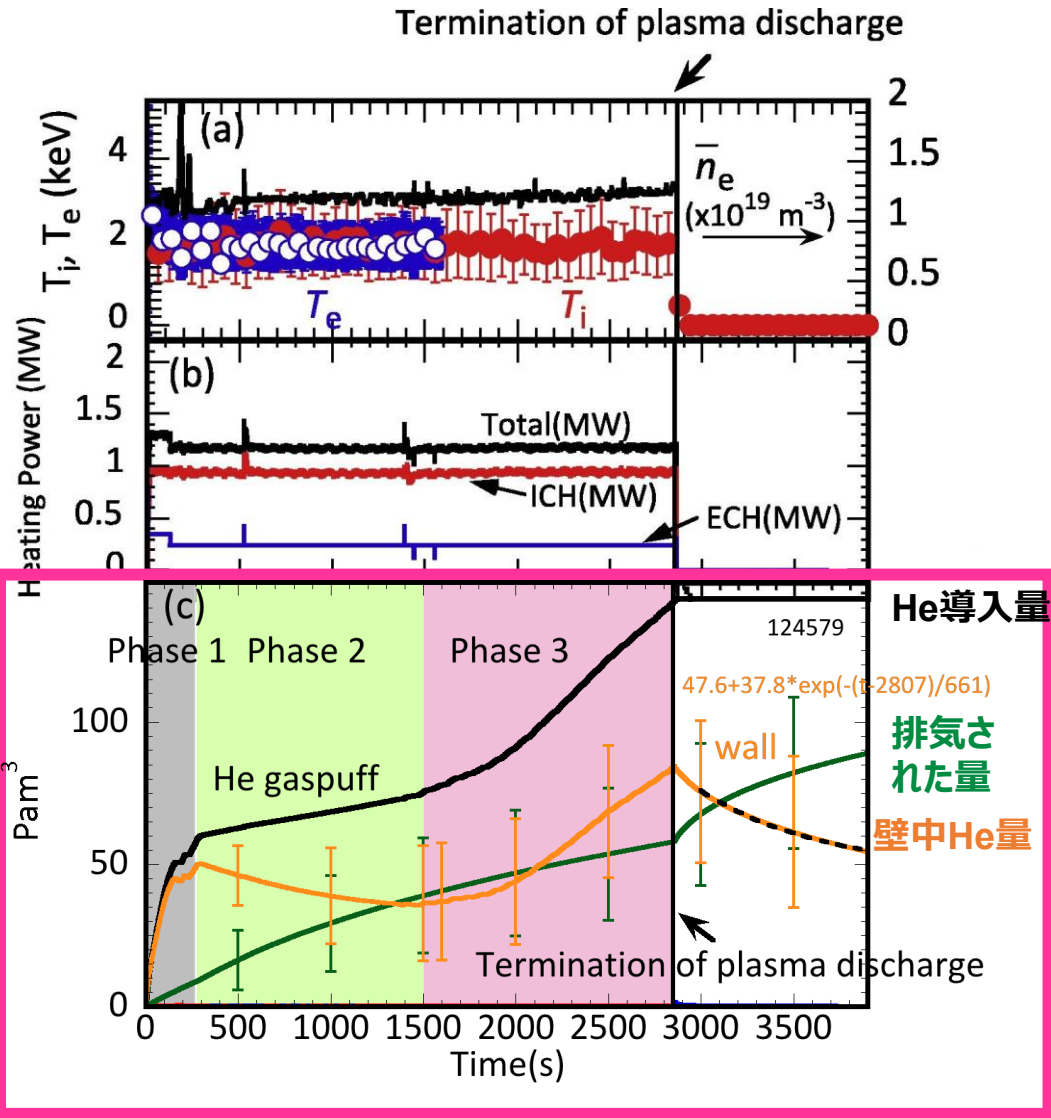


G. Motojima +, Phys. Scr. 2022

- ダイバータ排気の、周辺プラズマ輸送への影響は小さい
- 主プラズマ中で輸送の変化を観測

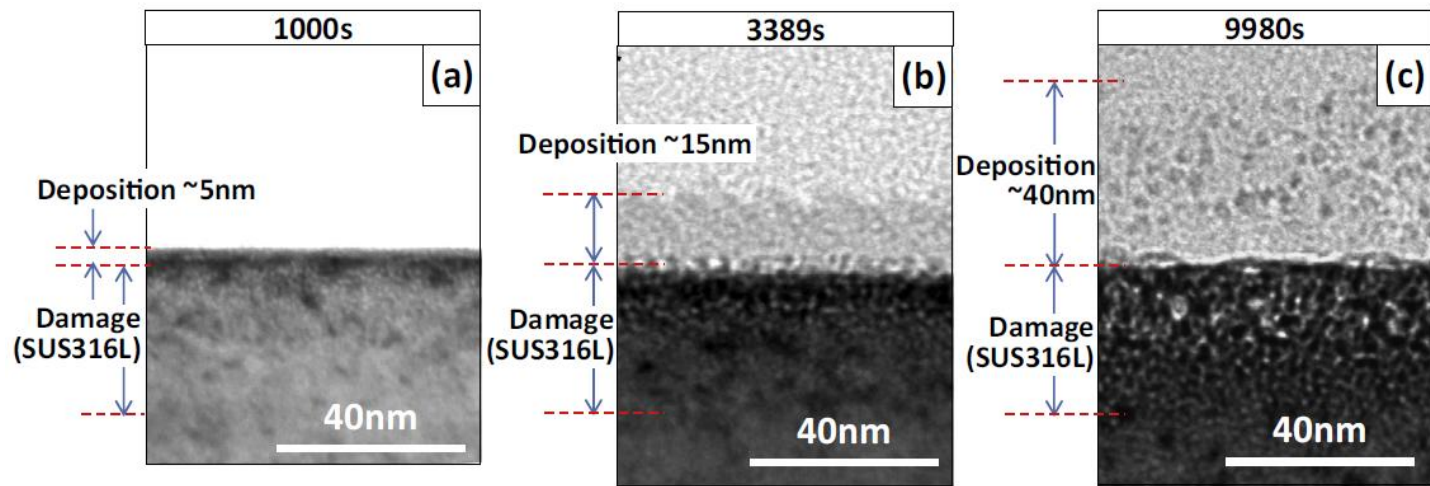
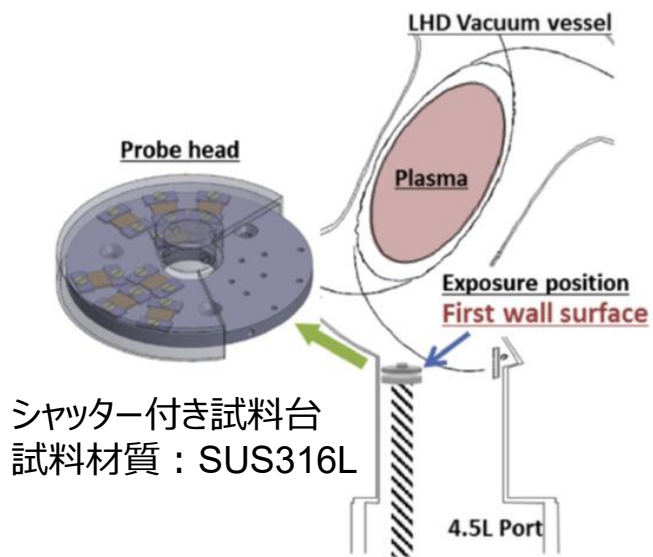
Core-Edge Coupling

粒子バランス 1 長パルス実験中の壁への粒子蓄積と放出

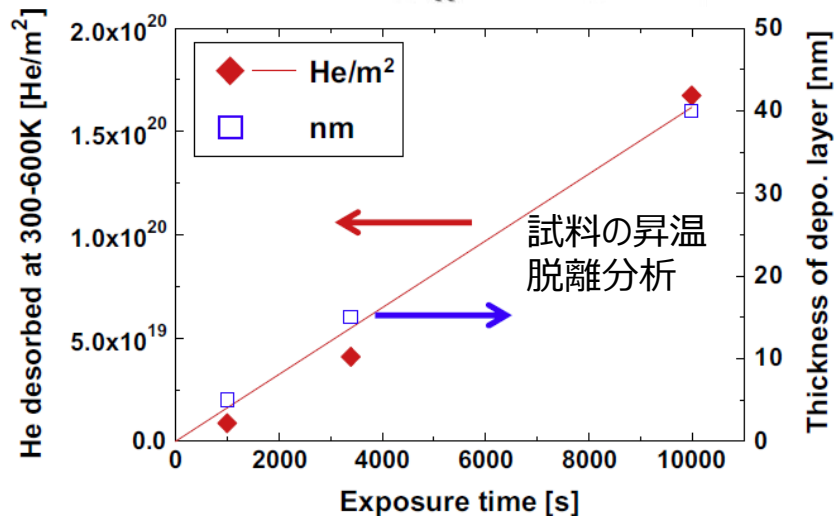


- 長パルス放電中に、壁排気の動的挙動を観測
- (Heの導入量) - (排気装置により排気された量) = (壁に蓄積された量)
- Phase 1 : ヘリウムが壁に蓄積される
- Phase 2 : 壁からヘリウムが放出される
- Phase 3 : 再びヘリウムが壁に蓄積される

粒子バランス2 壁表面微細構造の変化とヘリウム蓄積



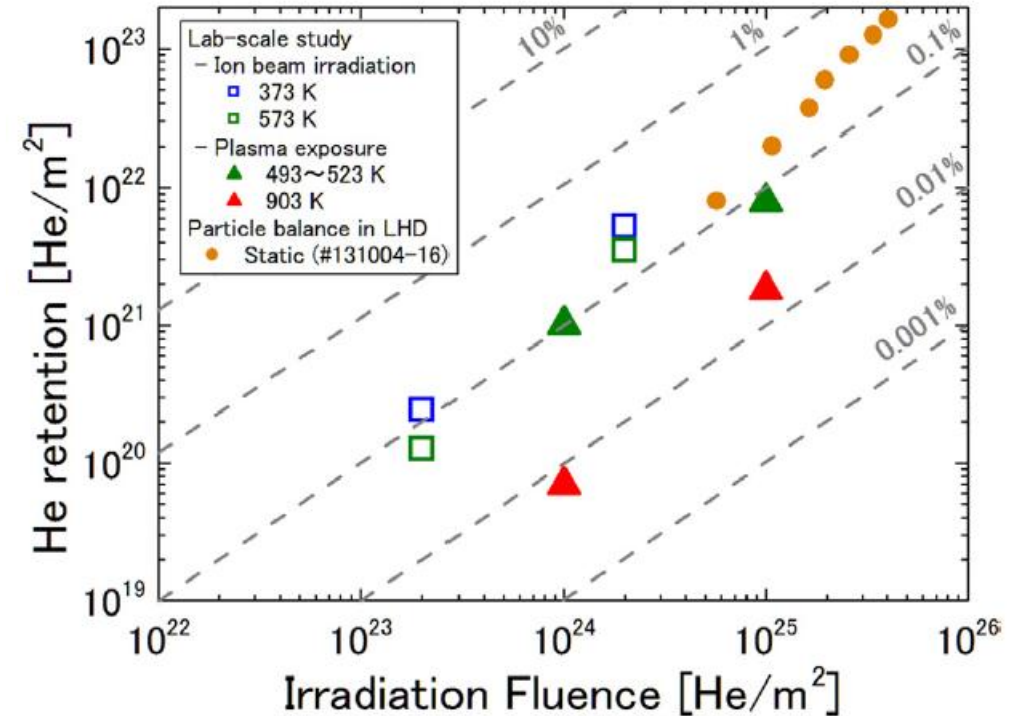
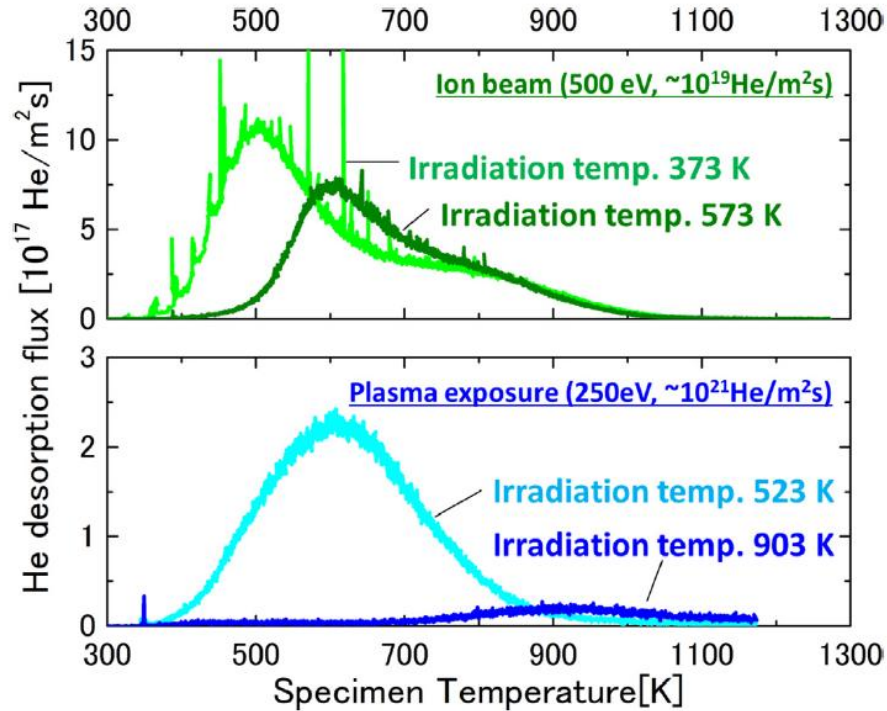
総照射量1000秒、3389秒、9980秒の試料の表面断面TEM像



共堆積および高圧のヘリウム気泡の周囲にある転位ループや強い歪み場に捕獲されたと考えられるヘリウム量

- マニピュレータによりSUS316L試料を第一壁位置に設置
- シャッター機構によりプラズマ照射時間を変えた試料を作成
- 微細構造分析：
 - 再堆積層（炭素約98%、鉄約2%）の厚さ、Heバブルのサイズと密度は照射時間とともに増加
 - Heバブルの深さ分布から、入射エネルギーは数keV程度
- 昇温脱離ガス分析：再堆積層の厚さと低温脱離He量は比例関係にあり、9980秒の長パルス暴露においてもHe捕獲の飽和傾向が見られない
- 実験中に観測された継続的なHe蓄積は再堆積層の成長が主因

粒子バランス3 黒鉛ダイバータ板へのヘリウム蓄積

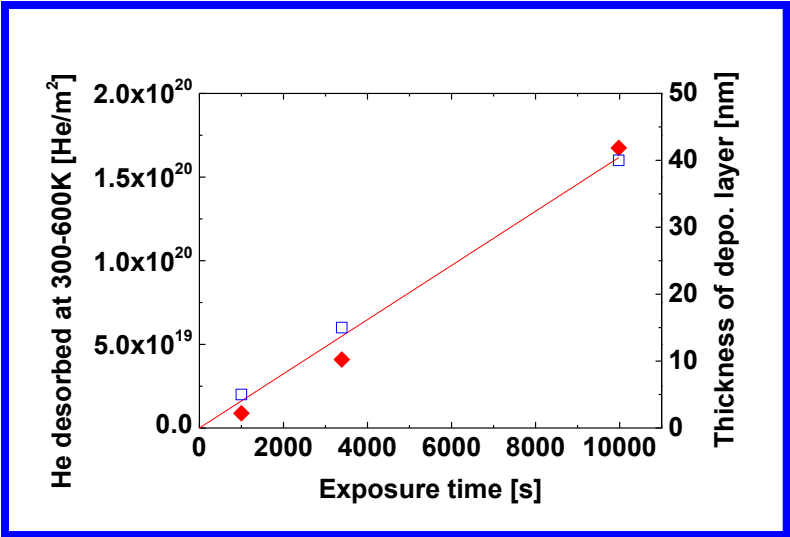
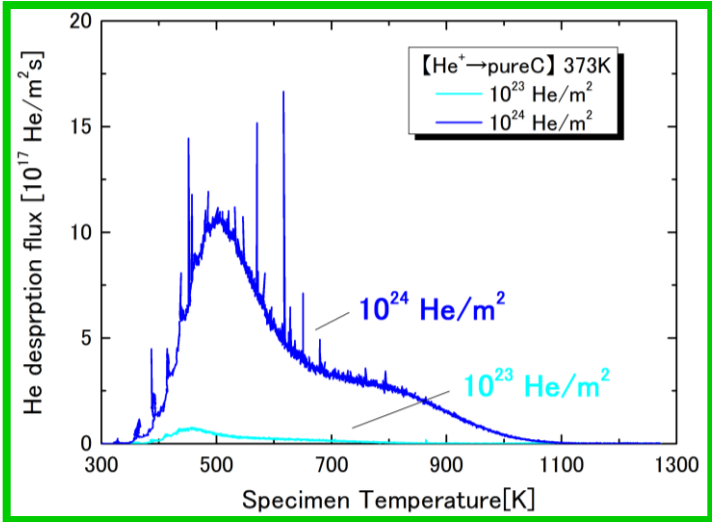


M. Oya +, Nucl. Mater. Energy 2017

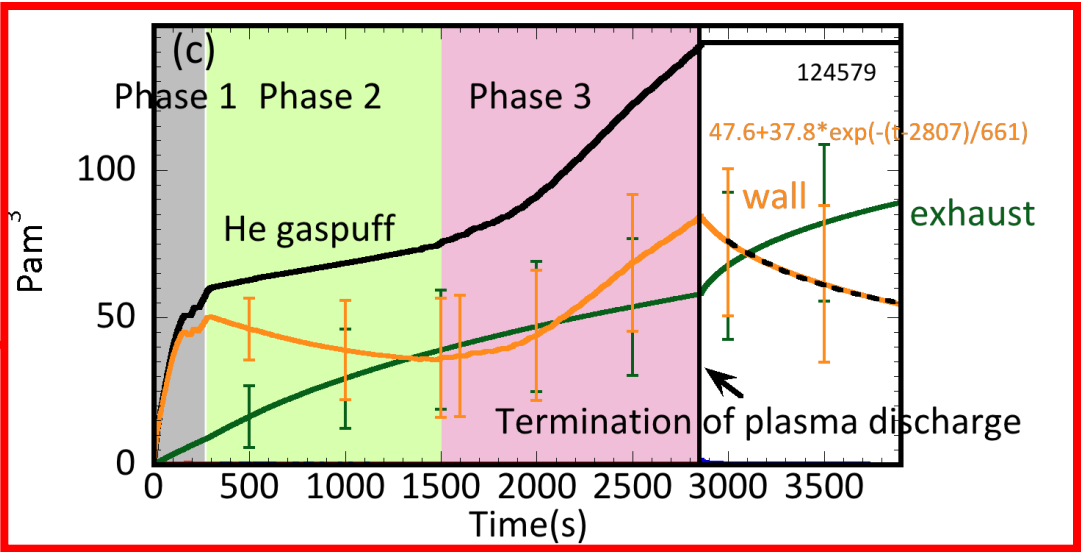
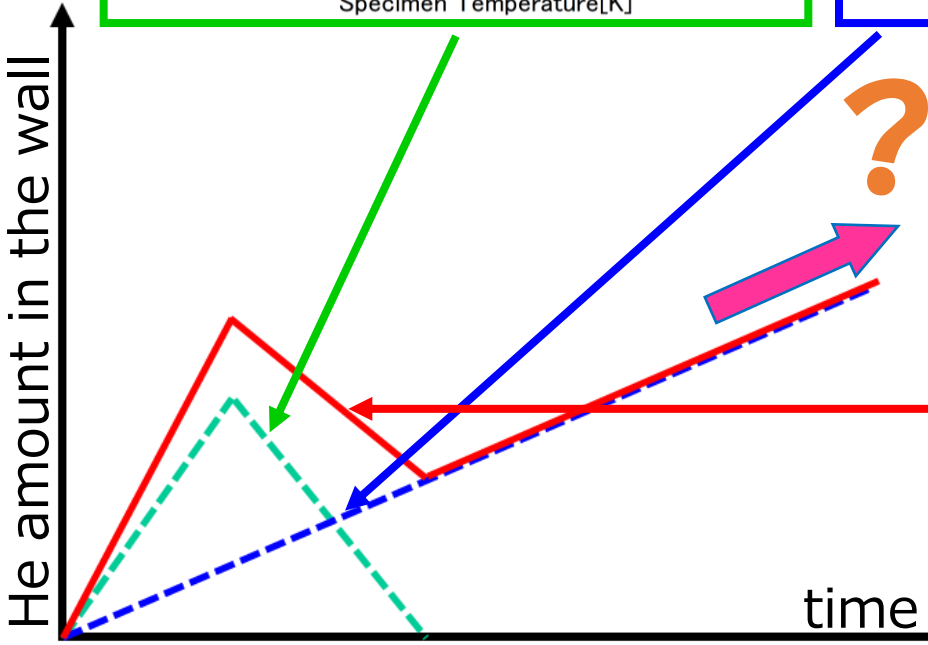
- 実験室でのイオンビーム照射、プラズマ照射と昇温脱離ガス分析から、LHDの黒鉛ダイバータ板へのHe蓄積を調べた
- 黒鉛ダイバータ板にもHeは蓄積される
- 本実験におけるHe保持率は 0.1% ~ 0.5% となり、LHDでの粒子バランス解析結果（約0.4%~0.45%）と良く一致
- 温度の上昇により蓄積したHeは脱離

粒子バランス 4 複数のHe蓄積・放出機構

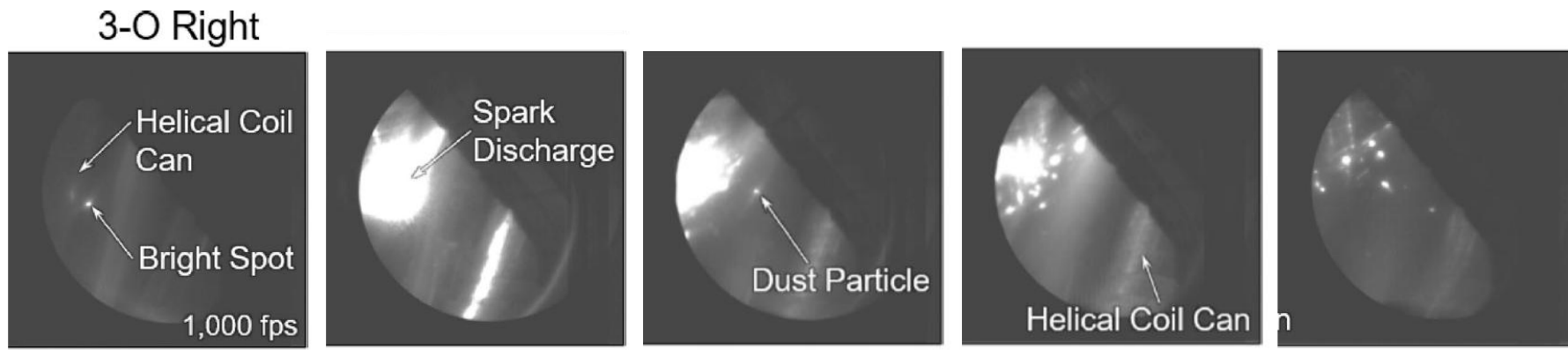
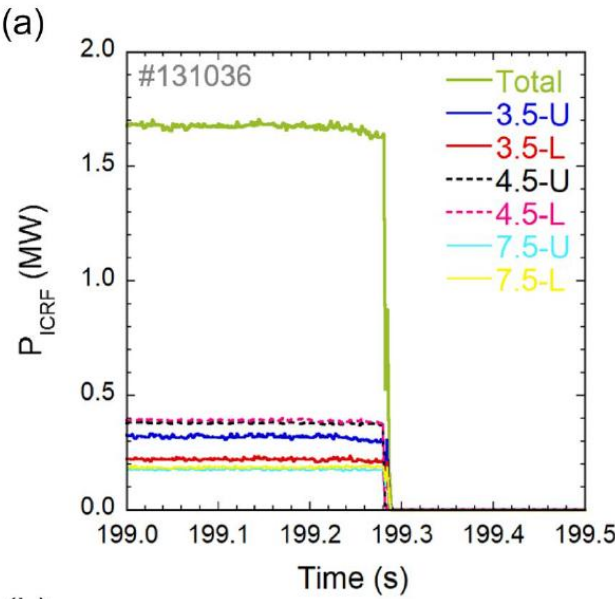
黒鉛ダイバータ板への蓄積
→ 温度上昇とともにHeを放出



第一壁に形成される再堆積層への蓄積
→ 継続的にHe蓄積

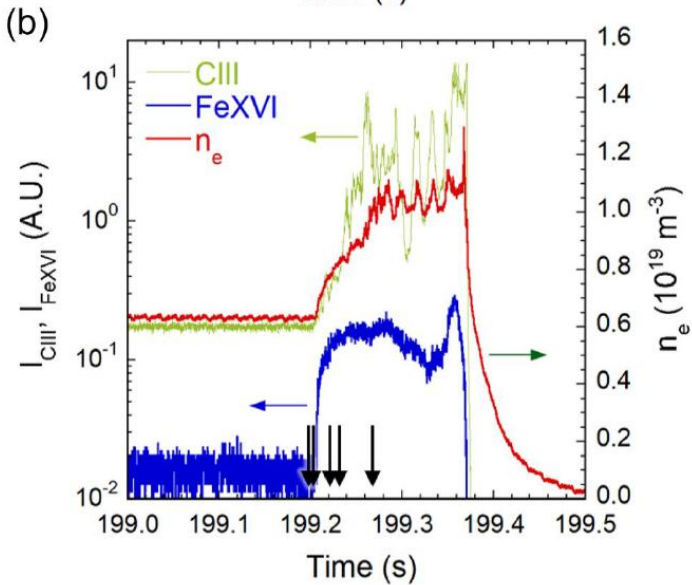


ダスト1 ダストの突入による長パルス放電の停止



M. Shoji +, J. Fus. Energy 2025

- ICHアンテナ、ダイバータ、第一壁で、強い発光 (spark) とその後ダストがプラズマ中に突入し放電が停止
- 鉄や炭素の発光線強度が増大し放射崩壊に至る
- 放電がある程度長く続いた後に発生
- 高速カメラと計算機シミュレーションから、ある程度大きなダスト (1mmより大) しか主プラズマ中に突入できない (M. Shoji +, Nucl. Fusion 2015)

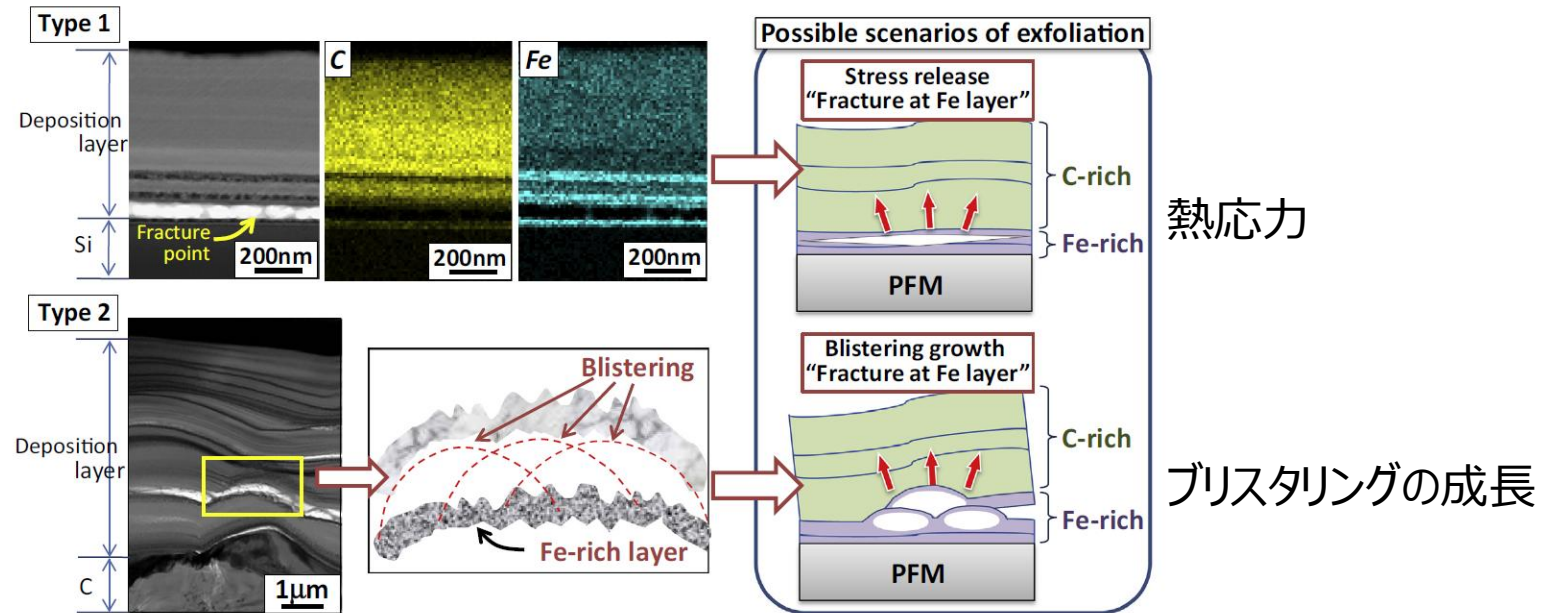
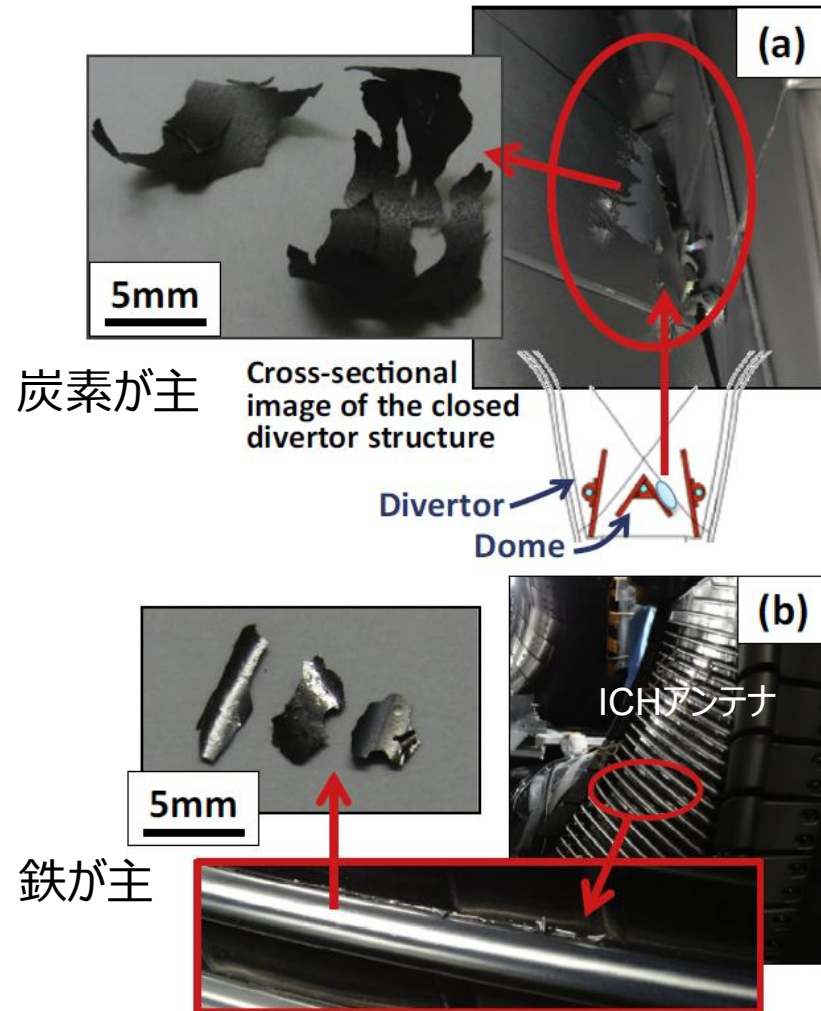


長パルス放電中の
ダイバータプラズマ



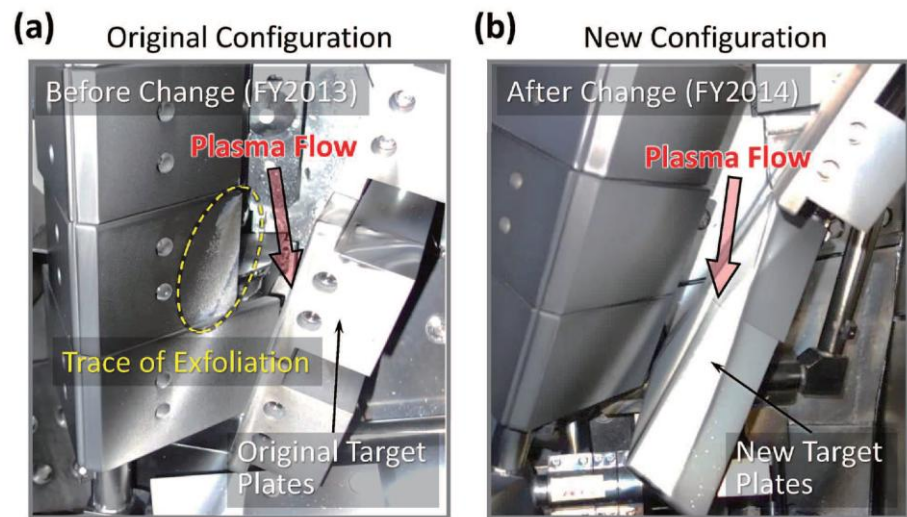
長パルス放電中の
ICHアンテナ近傍

ダスト2 再堆積層形成と剥離

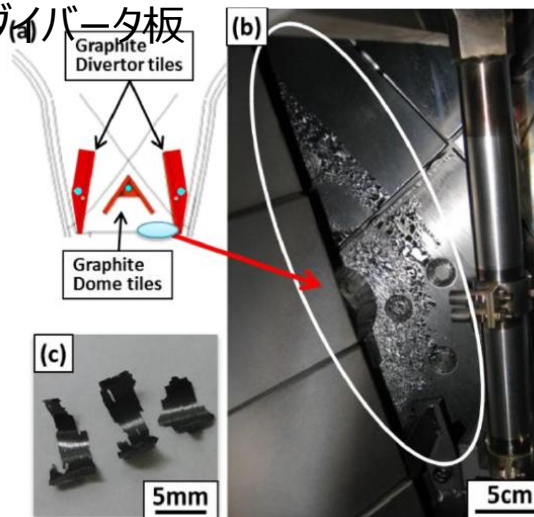


- ダイバータ、ダイバータ板近傍の第一壁、ICHアンテナで再堆積層の形成と剥離
- 微細構造分析から、いずれの再堆積層もナノメートルレベルでアモルファス状かつ非常に微細な層状構造を形成
- 主成分が採取場所の周辺材料に強く依存することから、混合材料堆積層の形成がスパッタリング材料の短距離輸送に支配されている←計算機シミュレーションで確認されている
- 再堆積層剥離は熱応力やブリストリングの成長が原因

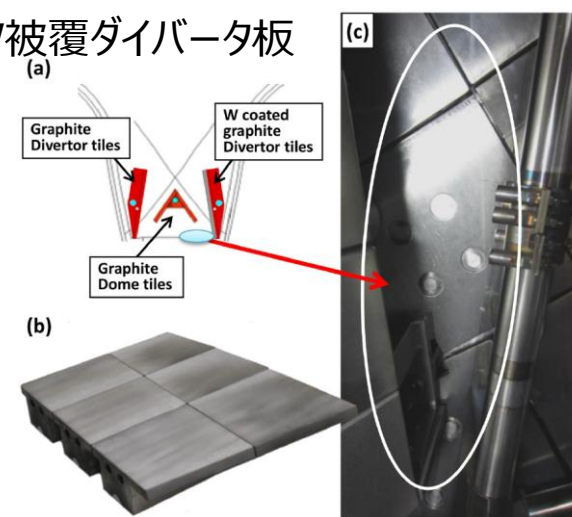
ダスト3 堆積層形成の抑制



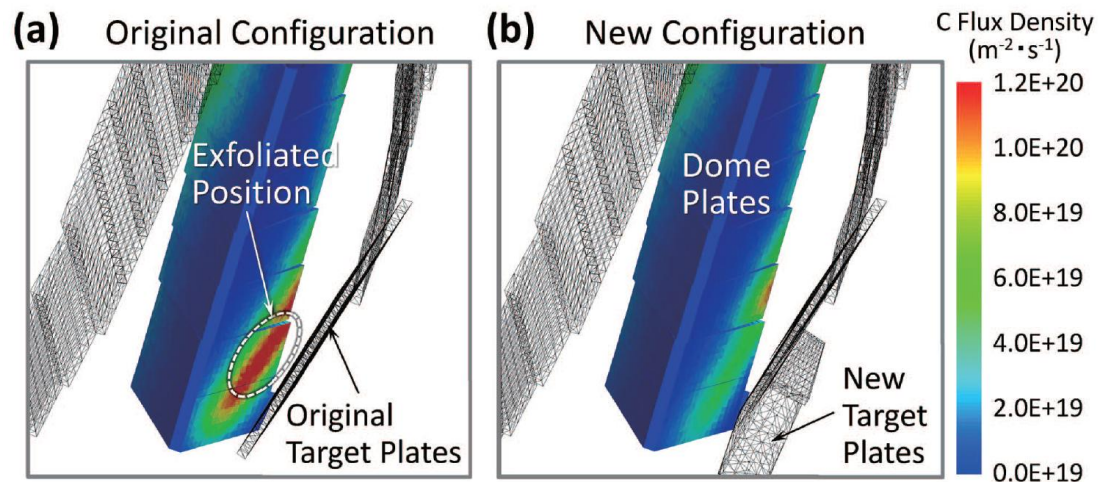
黒鉛ダイバータ板



W被覆ダイバータ板



M. Tokitani +, Nucl. Mater. Energy 2019

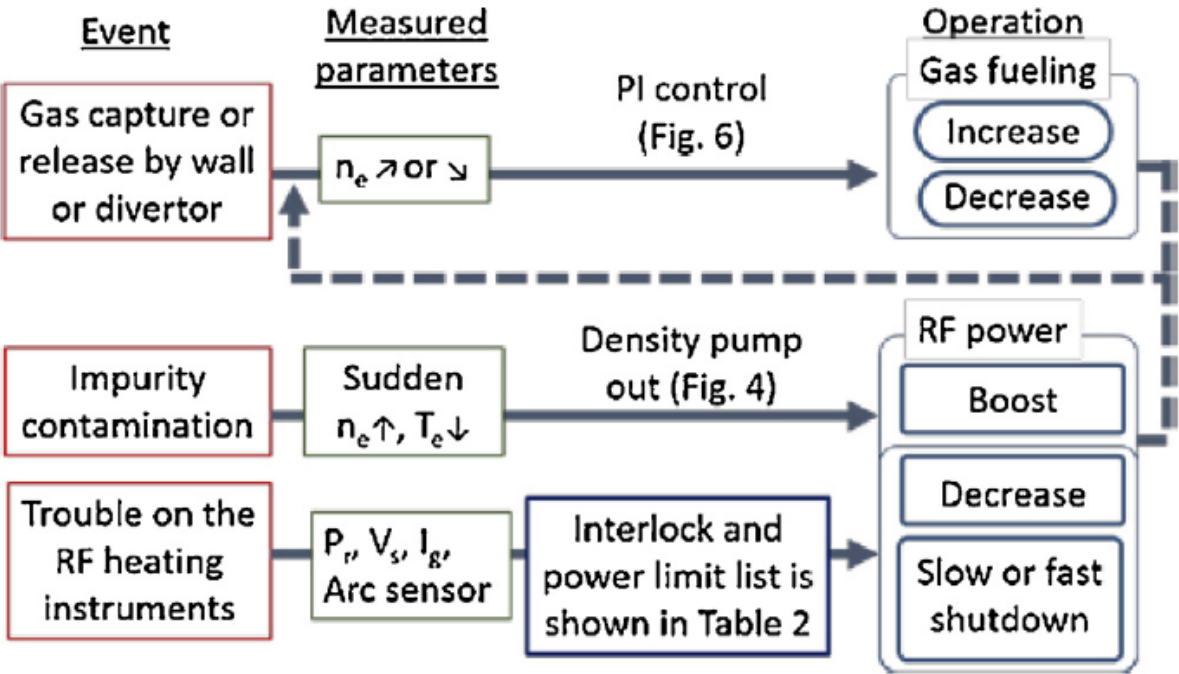


M. Shoji +, Plasma Fus. Res. 2021

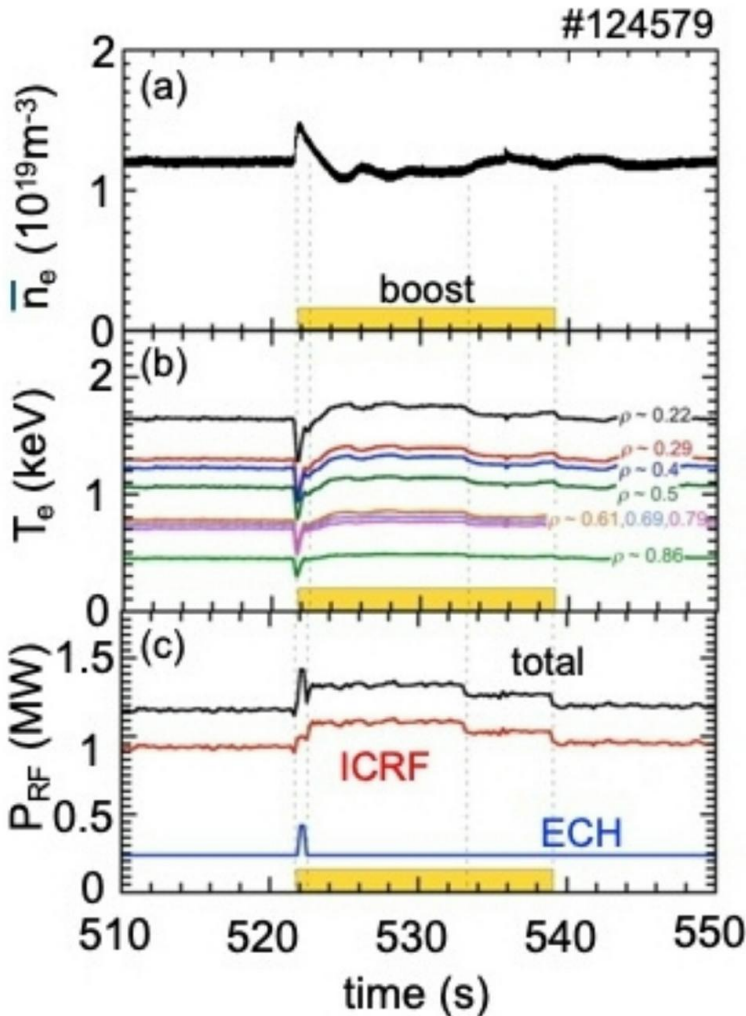
- ダイバータ板形状の工夫やタングステン被覆ダイバータ板の導入により、再堆積層の形成・剥離は抑制できる。
- 2019年の実験でトロイダルセクション9のトラス内側のCHDのダイバータ板をタングステン被覆材とした。さらに2020年の実験から、同セクションのトラス外側ダイバータ板を同様の材料とした。
 - プラズマへのタングステンの影響は明確ではなかった
 - 他のセクションの炭素がタングステン表面に堆積

加熱電力と燃料供給を連動した統合制御システムの構築

ダストの突入による突発的な密度上昇・温度低下に対してパルス的に追加加熱電力を投入することで放電停止を回避する

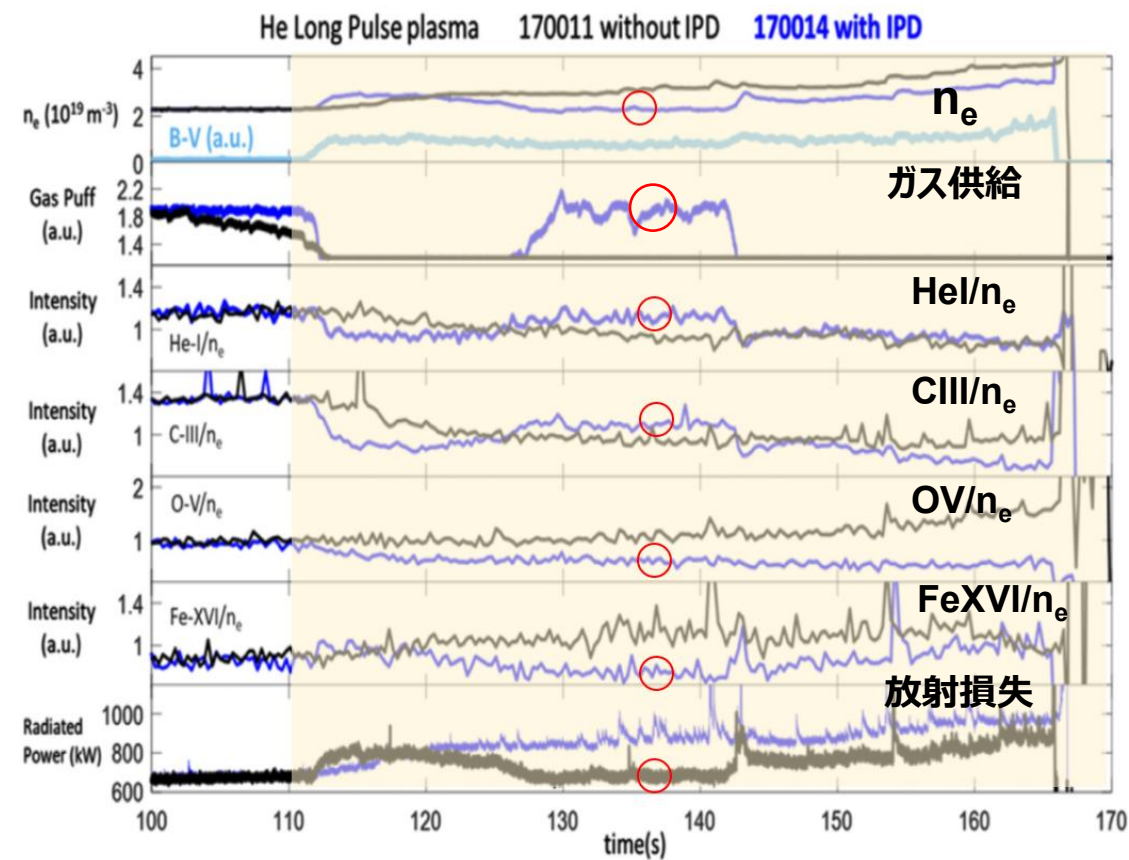
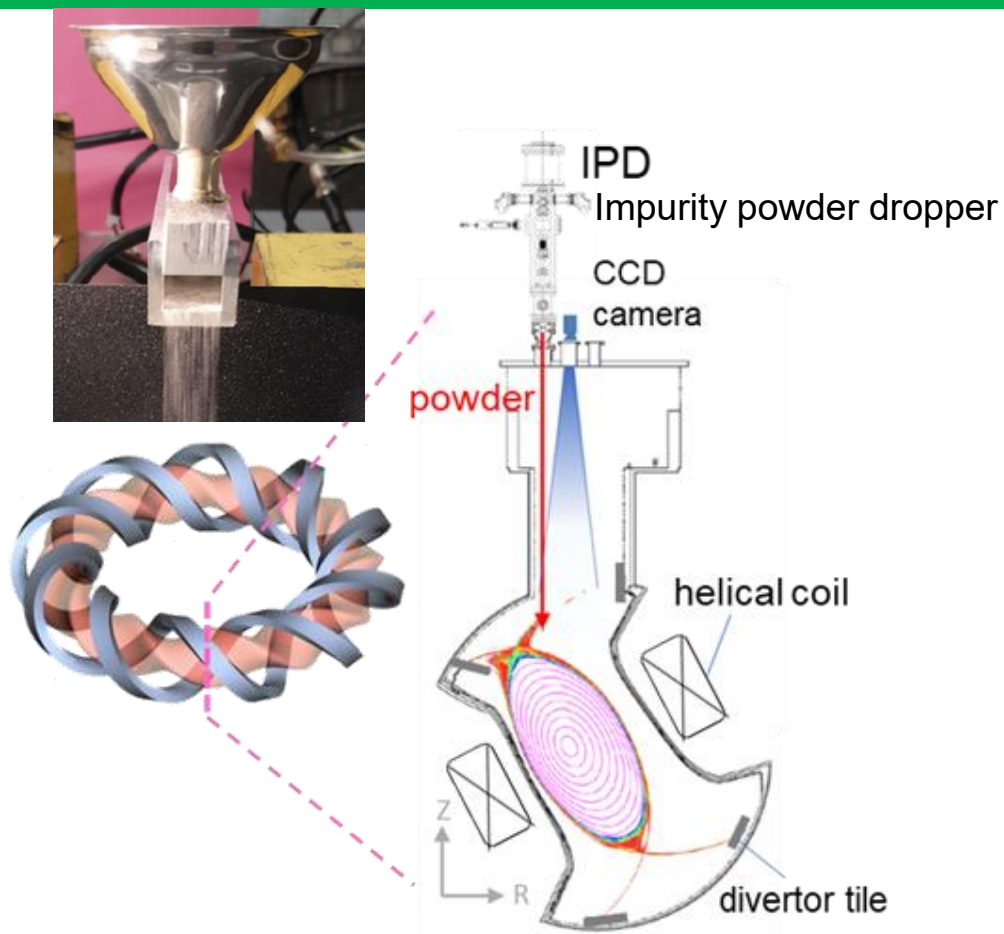


S. Kamio +, Fus. Eng. Des. 2015



T. Seki +, J. Fus. Energy 2026

不純物粉末入射による実時間壁コンディショニング



R. Lunsford +, Nucl. Fusion 2022

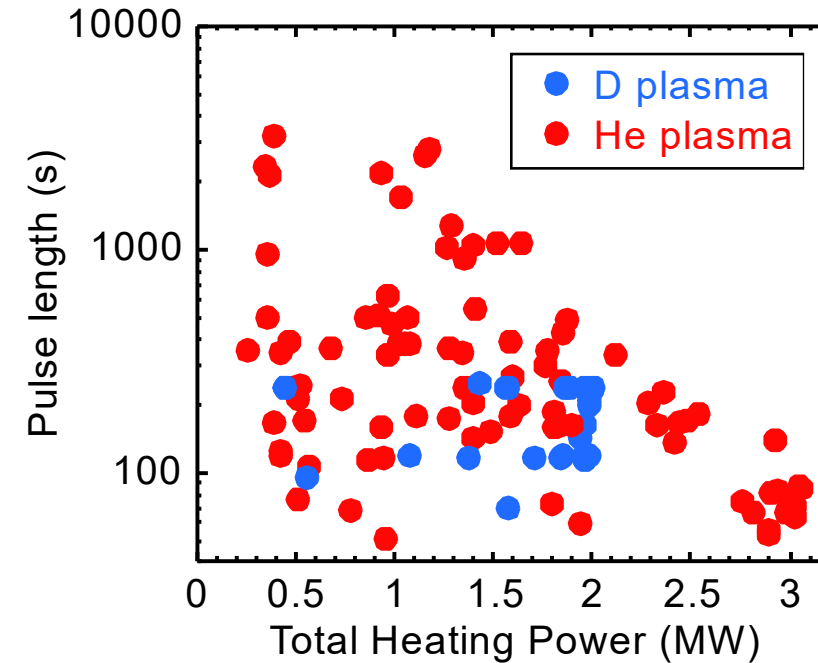
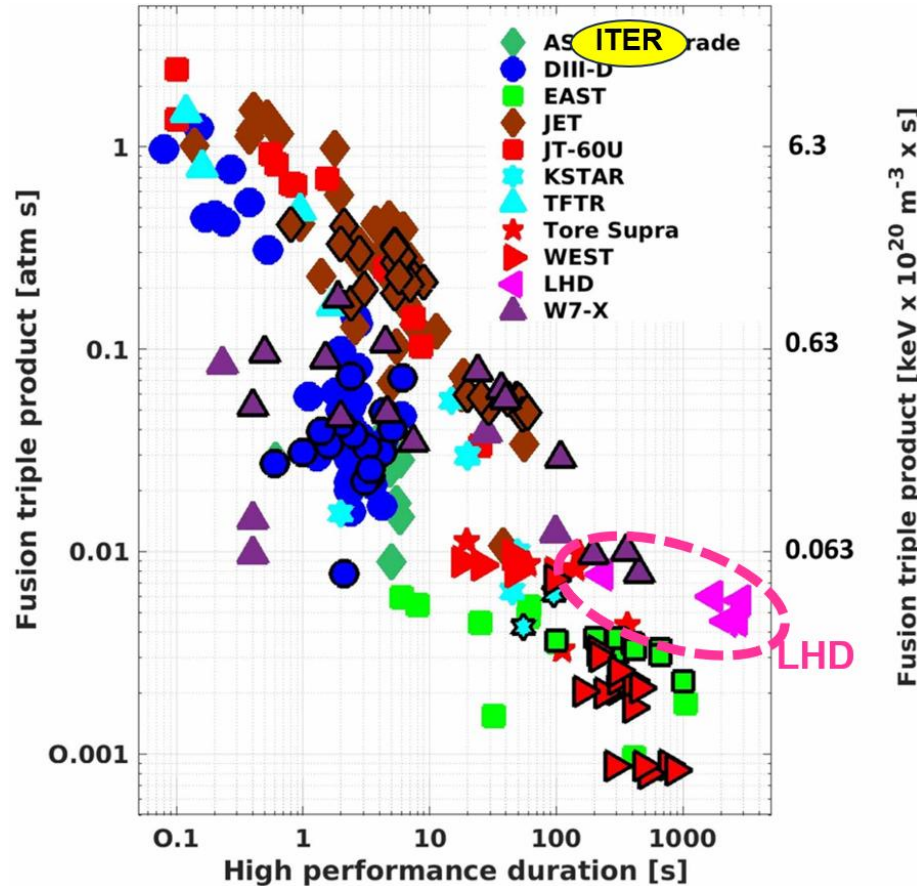
- PPPLとの共同実験でサブミリサイズのボロン粉末を重力により投下してプラズマ中に入射
- 酸素、鉄が顕著に低下
- 共堆積によると考えられるリサイクリングの抑制 → 重水素だけでなくヘリウムにも効果

まとめ

- プラズマ加熱機器開発と改良
 - ICHアンテナ構造の工夫によりアンテナの局所高温、不純物発生、ダイバータの局所加熱を抑制
 - ECHのジャイロトン管内の圧力上昇は解決には至らず
- 粒子制御機器開発と改良
 - ヘリカルダイバータの部分的閉構造化
- プラズマ・壁相互作用の理解
 - 壁排気のメカニズム 再堆積層が強く影響
 - ダスト発生に至る再堆積層剥離のメカニズム
- プラズマ運転の高度化
 - 安定した密度制御を可能とするフィードバック制御ガスパフシステム
 - 突発的密度上昇に対応するブースト加熱システム
 - ボロン等粉末入射による実時間壁コンディショニング
 - データ駆動科学に基づく放射崩壊前兆検出
 - 不純物ガス入射や磁気島生成によるダイバータデタッチメント
- 再堆積層形成を抑制できるか？
 - タングステン壁トカマクでも形成されている
 - 壁の温度が高い原型炉ではどうなるか
- デタッチメントなどの運転を安定に維持する制御の高度化

ITERの目標でも1000秒パルス 日、月、年スケールの放電では何が起こり得るか

放電持続時間とプラズマ性能



H. Kasahara+, Phys. Plasma 2014

- プラズマ対向機器を冷却していない装置では、長パルス放電では加熱電力は限られる
- トカマクの性能が運転時間に対して急速に落ちるのに、LHDは緩やか。なぜか？花田先生からの質問
- 傾きが緩やかなのは、プラズマ対向壁冷却をそれなりにしているので、トカマクに比べて大きく加熱電力を落とさず長パルス実験ができているということ。