

LHDダイバータ排気研究から考える粒子循環制御 ~吸着・放出・材料科学への展開~

本島 巖^{1,2,3)}, 菅野 龍太郎^{1,2)}, 森崎 友宏^{1,2)},
増崎 貴^{1,2)}, U. Wenzel⁴⁾, 河村 学思^{1,5)}, 庄司 主^{1,2)}, 田中 宏彦⁶⁾,
伊藤 篤史^{1,2)}, 高山 有道^{1,2)}, 花田 和明⁷⁾, 大塚 裕也⁷⁾,
プラズマ複相間輸送ユニット

¹核融合研, ²総研大, ³北海道大
⁴IPP Greifswald, ⁵QST, ⁶名古屋大学, ⁷九州大

出典：第27回 International Conference on Plasma-Surface Interactions in Controlled Fusion Devices
(27th-PSI) 2026/5 招待講演

内容

✓ LHDダイバータ排気研究の成果

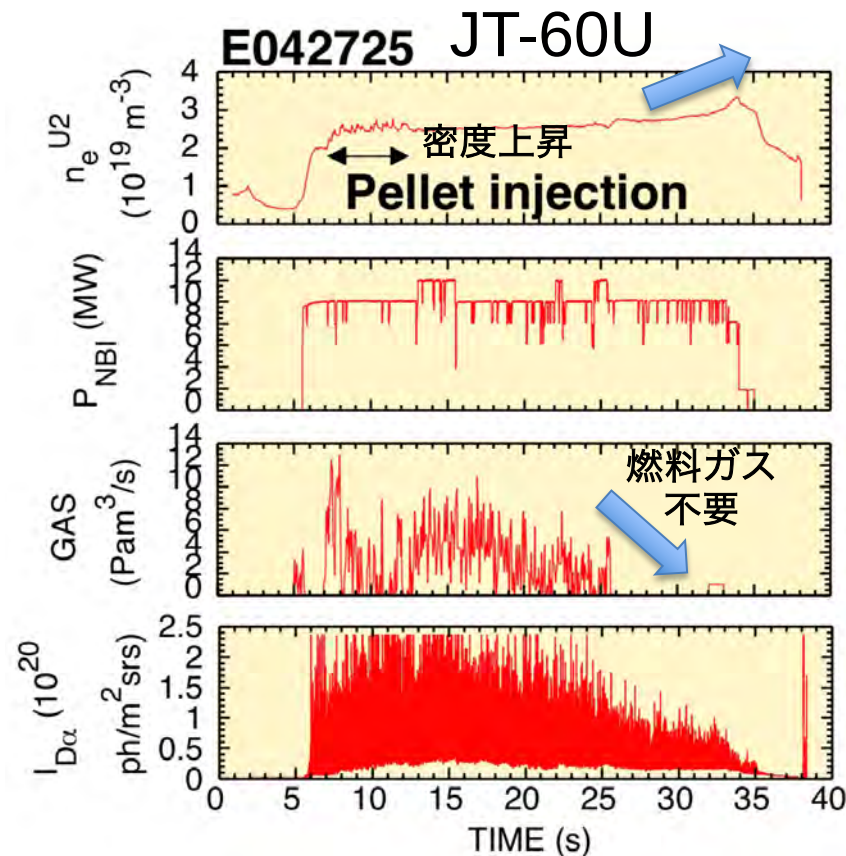
- ❖ 中性粒子圧縮・能動排気・低リサイクリング化を実証
- ❖ ヘリカルダイバータにおける高中性粒子圧力状態を観測

✓ 吸着・排気・材料科学への展開

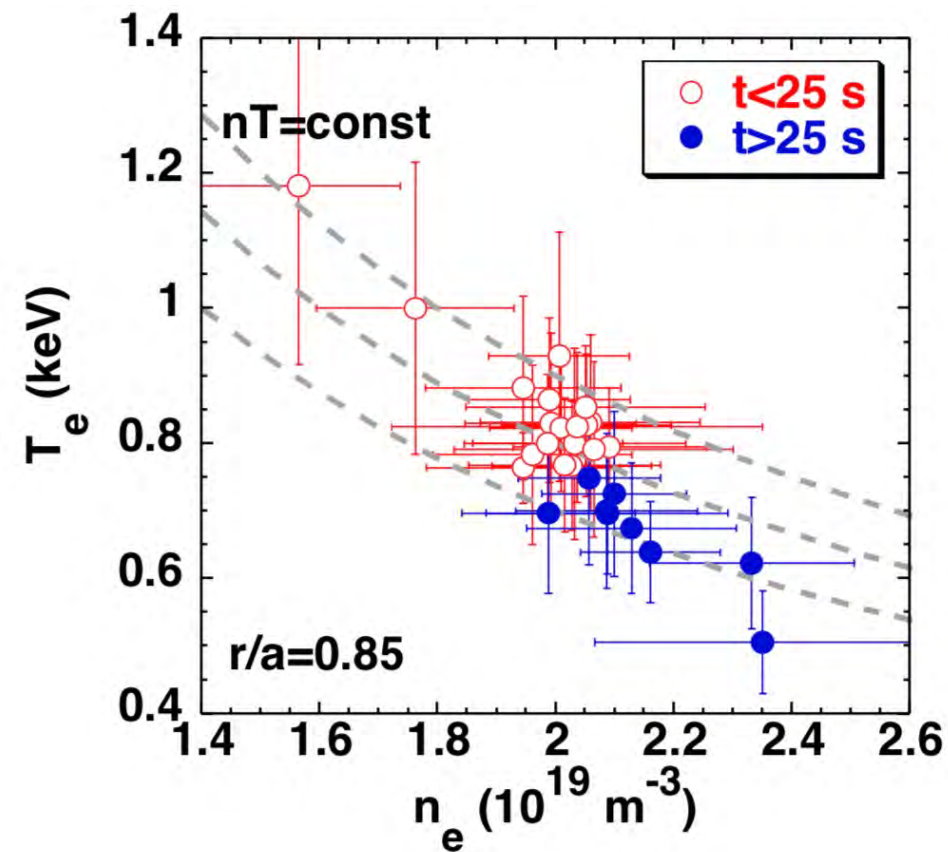
- ❖ 活性炭の吸蔵・放出モデル
- ❖ 水素吸蔵合金による排気

壁リサイクリング制御の重要性

Y. Kamada, Atomic Energy Society 2004



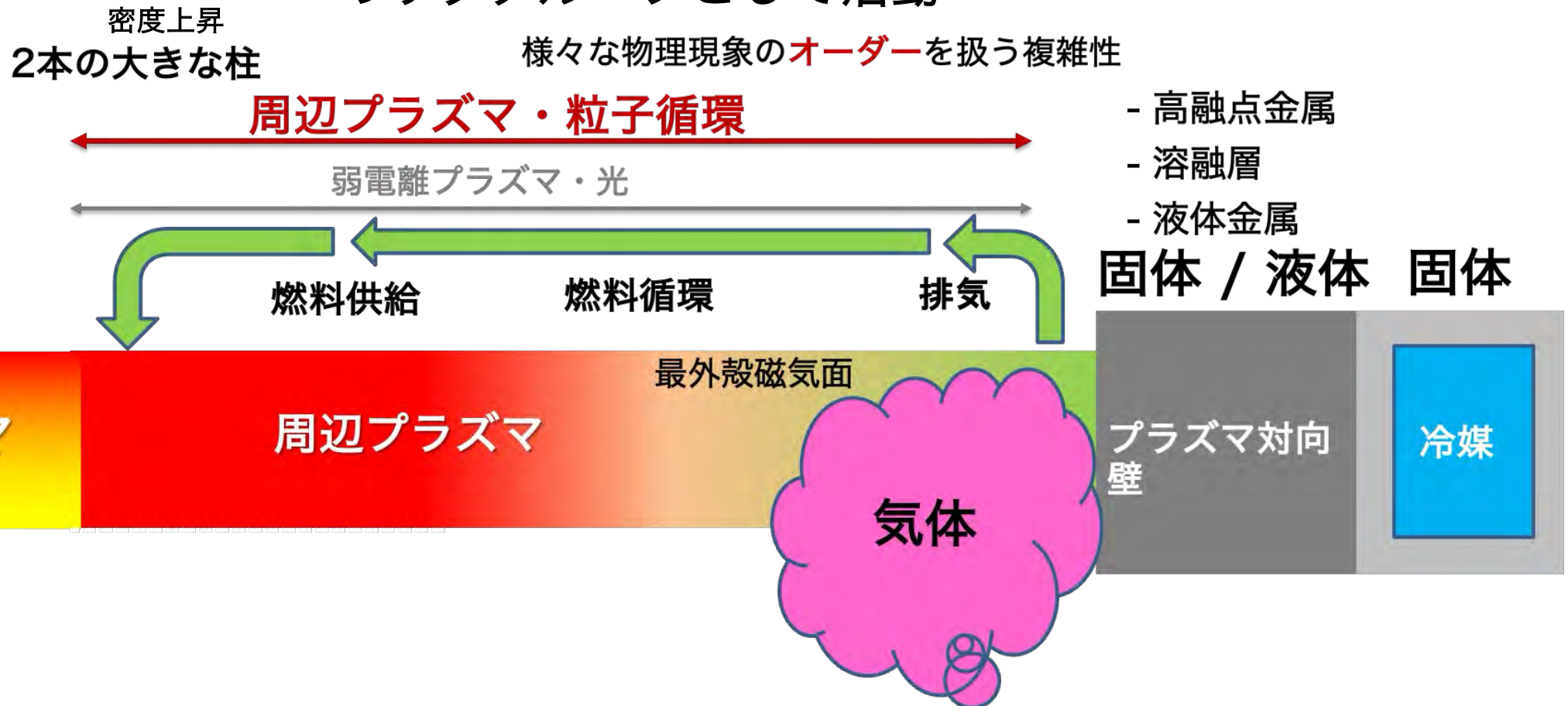
- ✓ 後半ではガス供給が不要
- ✓ 壁飽和が観測



壁飽和により周辺プラズマ圧力が低下

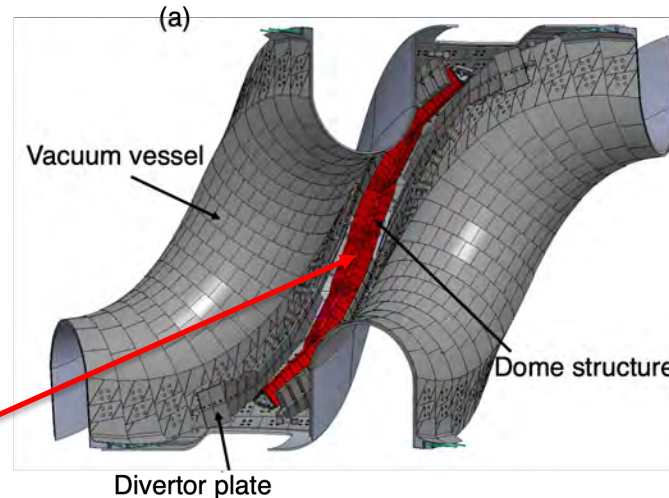
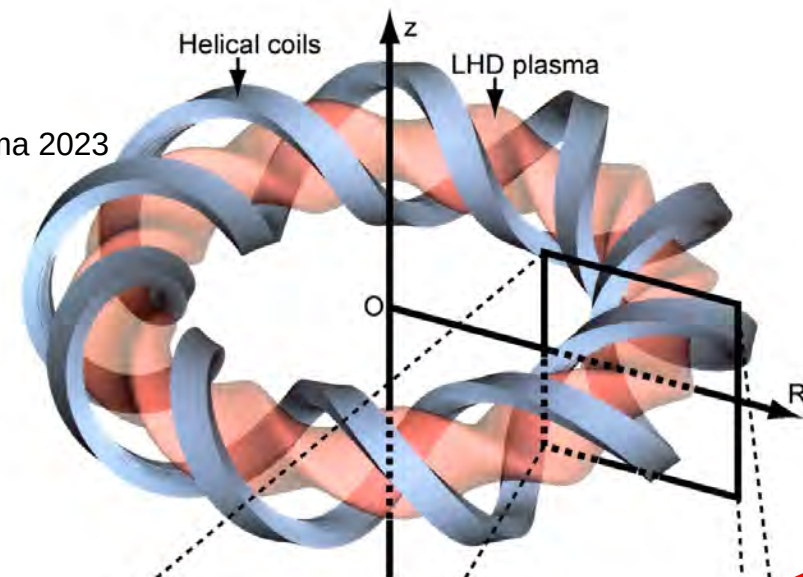
壁リサイクリング制御の重要性

体系的な理解のため、プラズマ複相間ユニット
のサブグループとして活動

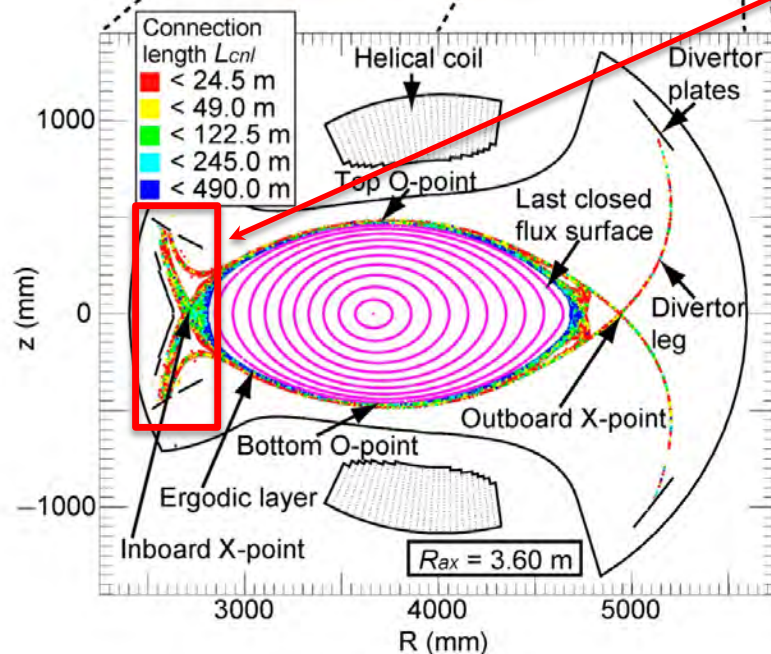
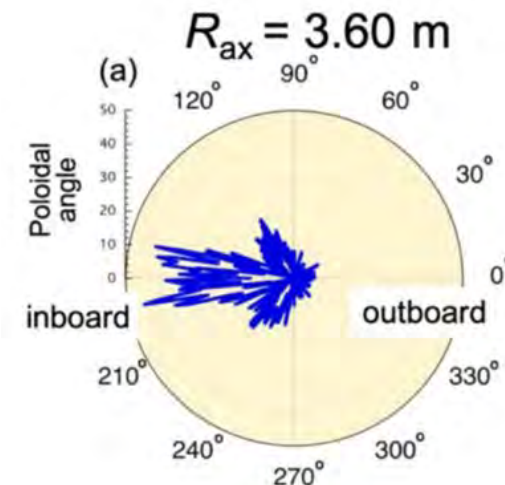


LHD特有のヘリカルダイバータ

T. Oishi+, Plasma 2023

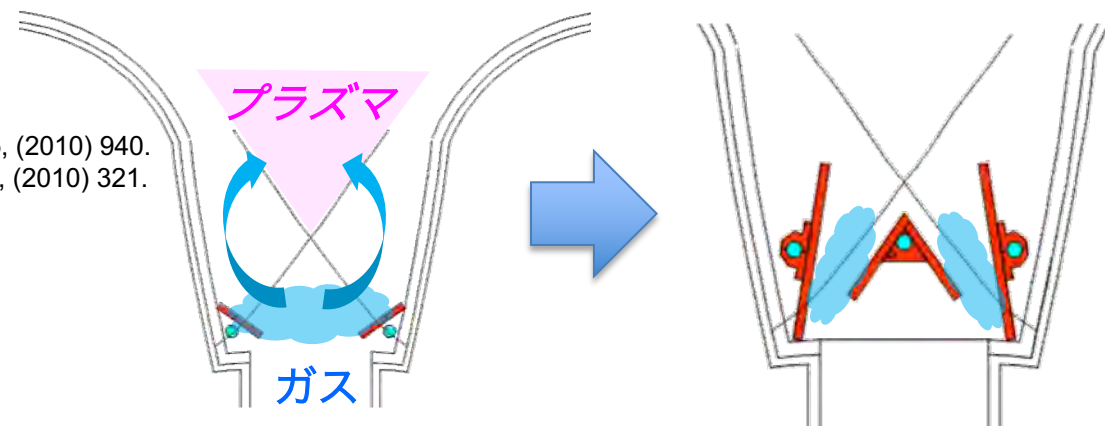


磁気軸内寄配位でトロイダル内側にダイバータ粒子束が集中



ダイバータを「閉」構造化し、中性粒子の高圧縮化を実現

S. Masuzaki+, FED **85**, (2010) 940.
S. Masuzaki+, FST **58**, (2010) 321.



「開」構造ダイバータ

「閉」構造ダイバータ

内寄配位を高ダイバータ圧力配位と呼ぶ*
*ただしトカマクに比べると中性粒子圧力は低い

閉構造ダイバータの高中性粒子圧力達成と強力な粒子排気の導入

S O K E N D A I

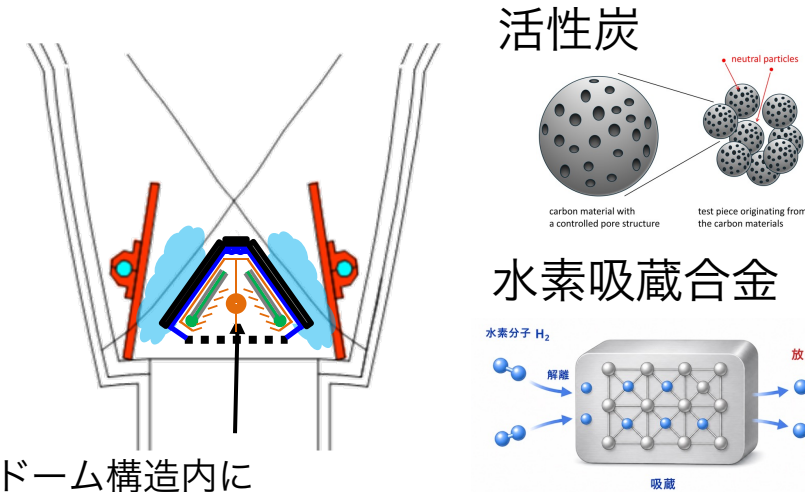
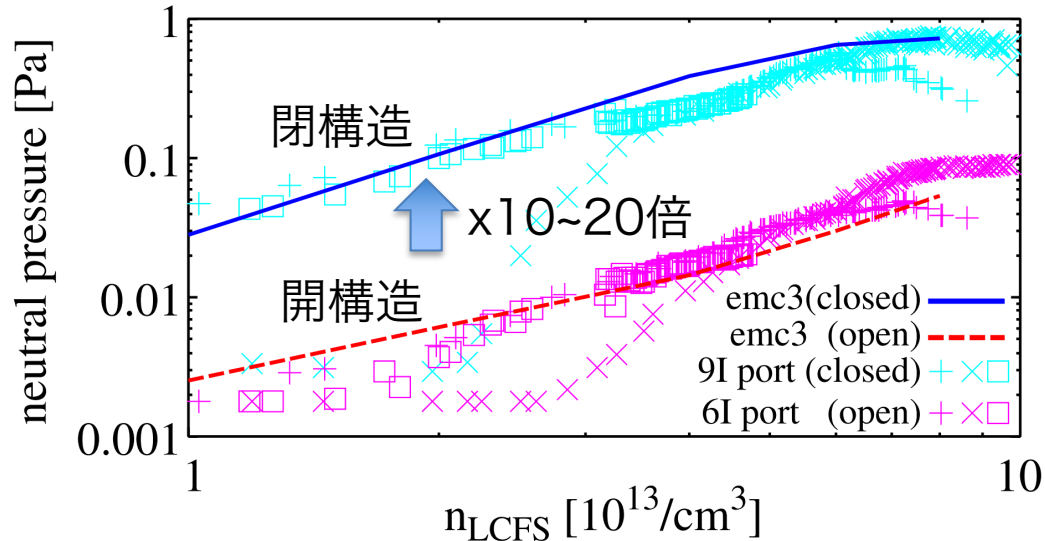
G. Kawamura+, Contrib. Plasma Phys. **54**, (2014) 437.

- ✓ 周辺輸送シミュレーションコードEMC3-EIRENE
 - ✓ EMC3: 磁力線方向の流体輸送に磁力線を横切る拡散輸送を加え、粒子、運動量、エネルギーバランスを満たす定常解をモンテカルロ法で解く

$$\begin{aligned} \nabla_{\parallel} \cdot (n \mathbf{v}_{\parallel}) + \nabla_{\perp} \cdot (-D \nabla_{\perp} n) &= S_p \\ \nabla_{\parallel} \cdot (m_i n \mathbf{v}_{\parallel} \mathbf{v}_{\parallel} - \eta_{\parallel} \nabla_{\parallel} \mathbf{v}_{\parallel}) + \nabla_{\perp} \cdot (-m_i \mathbf{v}_{\parallel} D \nabla_{\perp} n - \eta_{\perp} \nabla_{\perp} \mathbf{v}_{\parallel}) &= -\nabla_{\parallel} p + S_m \\ \nabla_{\parallel} \cdot \left(-\kappa_i \nabla_{\parallel} T_i + \frac{5}{2} n T_i \mathbf{v}_{\parallel} \right) + \nabla_{\perp} \cdot \left(-\chi_i n \nabla_{\perp} T_i - \frac{5}{2} T_i D \nabla_{\perp} n \right) &= k(T_e - T_i) + S_{ei} \\ \nabla_{\parallel} \cdot \left(-\kappa_e \nabla_{\parallel} T_e + \frac{5}{2} n T_e \mathbf{v}_{\parallel} \right) + \nabla_{\perp} \cdot \left(-\chi_e n \nabla_{\perp} T_e - \frac{5}{2} T_e D \nabla_{\perp} n \right) &= -k(T_e - T_i) + S_{ee} \end{aligned}$$

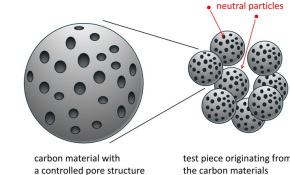
- ✓ EIRENE: 壁で生成された分子・原子を追跡、解離や荷電交換など原子分子過程を含め、電離による消滅まで追跡、定常空間密度分布等を解く

開構造・閉構造ダイバータにおける中性粒子圧力

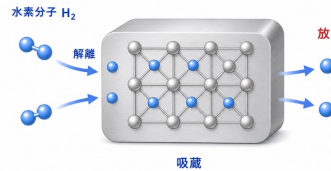


ドーム構造内に
クライオ吸着ポンプ（活性炭）
と非蒸発型ポンプ（水素吸蔵合金）を実装

活性炭



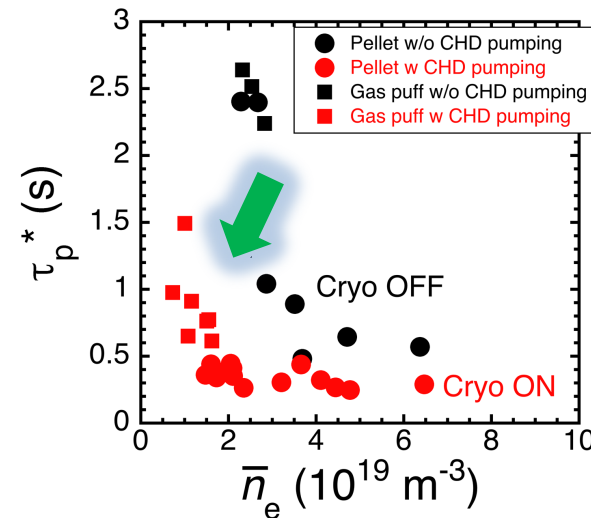
水素吸蔵合金



材料科学
へと進展

G. Motojima+, NF 2018

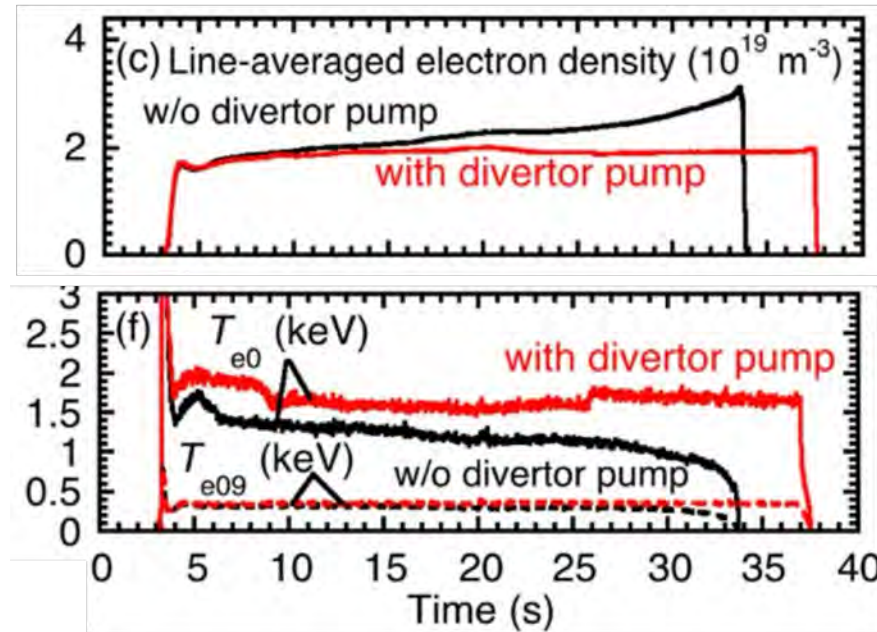
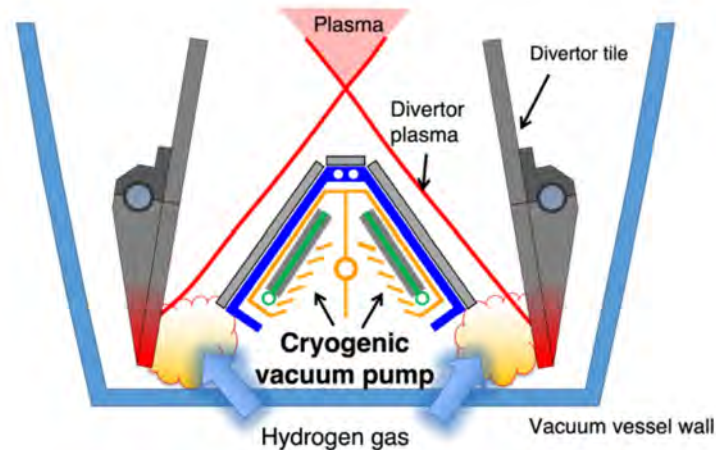
G. Motojima+, NF 2019



$$\tau_p^* = - \frac{\bar{n}_e}{\frac{d\bar{n}_e}{dt}}$$

- ✓ 供給ガスの約**50%**をダイバータで排気
- ✓ 十分なダイバータ排気性能を実証
- ✓ ダイバータ排気により装置全体の低リサイクリング化が可能

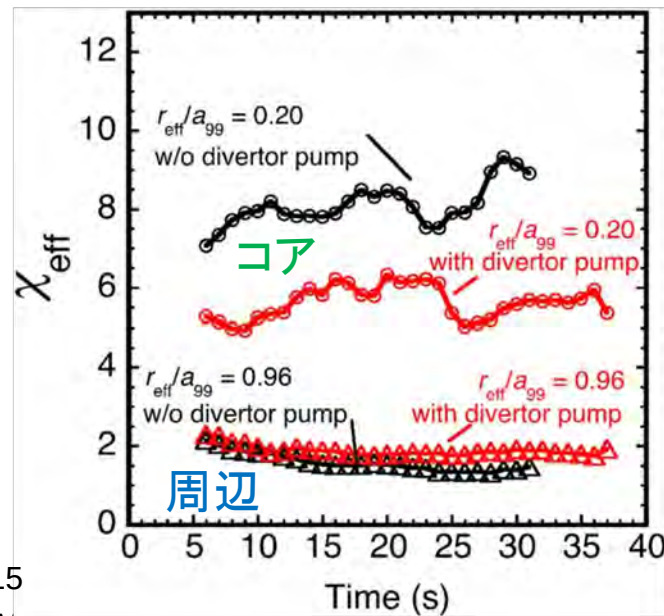
強力な真空排気によるプラズマ粒子制御



ダイバータクライオ吸着ポンプにより、長パルス放電での密度制御が改善。

排気なし
→34秒でプラズマ崩壊

排気あり
→放電終了までプラズマ崩壊なし



ダイバータ排気による周辺輸送への影響は小さい
一方でコア輸送には大きく影響（コア熱輸送係数の低減）



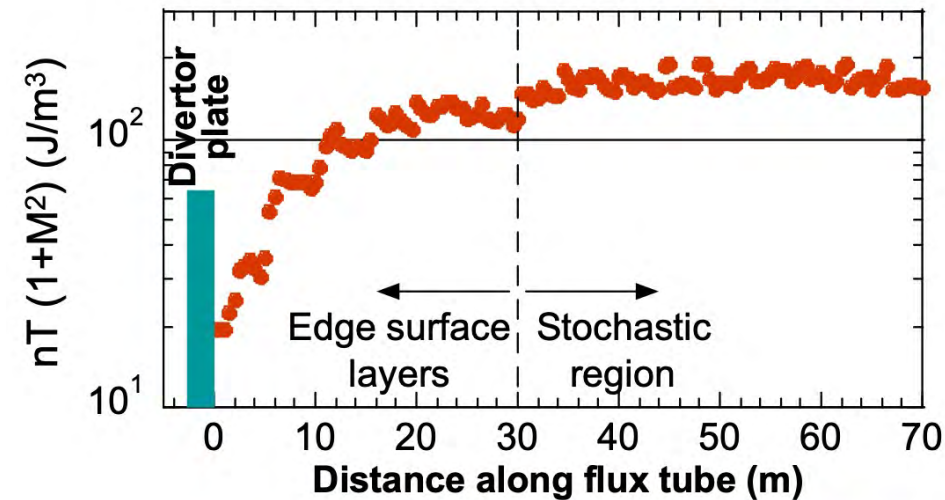
明瞭な周辺ーコア熱輸送カップリング
(非局所輸送の傍証)

G.Motojima+, Phys. Scr. **97**, 035601 (2022)

ステラレータ系のダイバータでは中性粒子圧力が低い

- ✓ 比較的低いサブダイバータ圧力 ($0.01\text{--}0.1\text{ Pa}$) は、低いダイバータ密度に起因
 - ← 磁力線を横切る輸送の増大 (3次元効果) により、磁力線方向の圧力保存が破れる (M. Kobayashi+ 2019, IAEA TM)

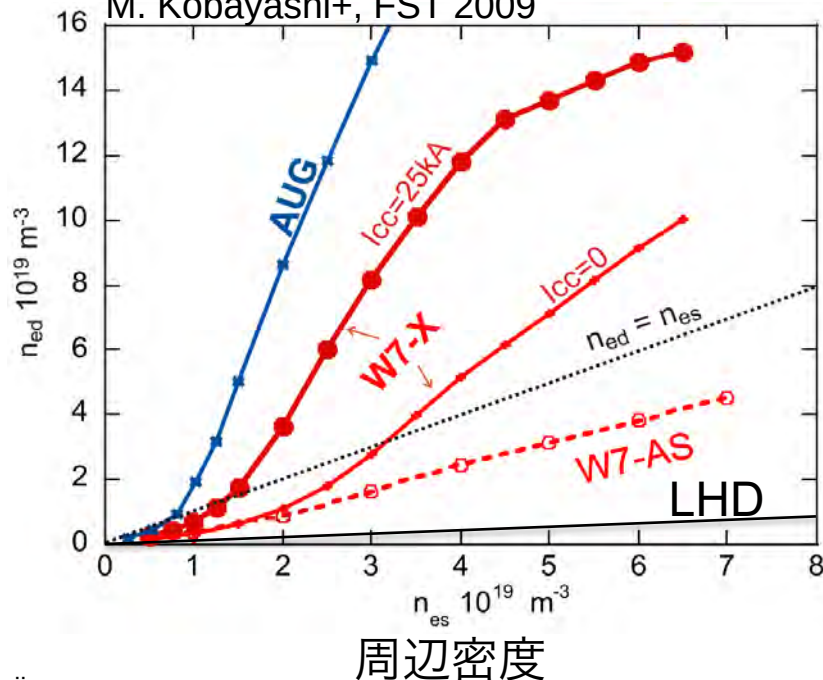
Plasma Pressure profile along flux tube (EMC3-EIRENE)



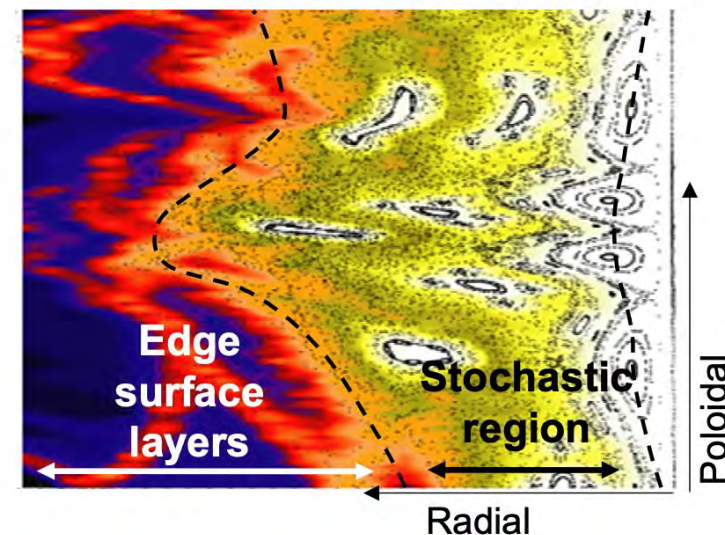
Y. Feng+, PPCF 2011

M. Kobayashi+, FST 2009

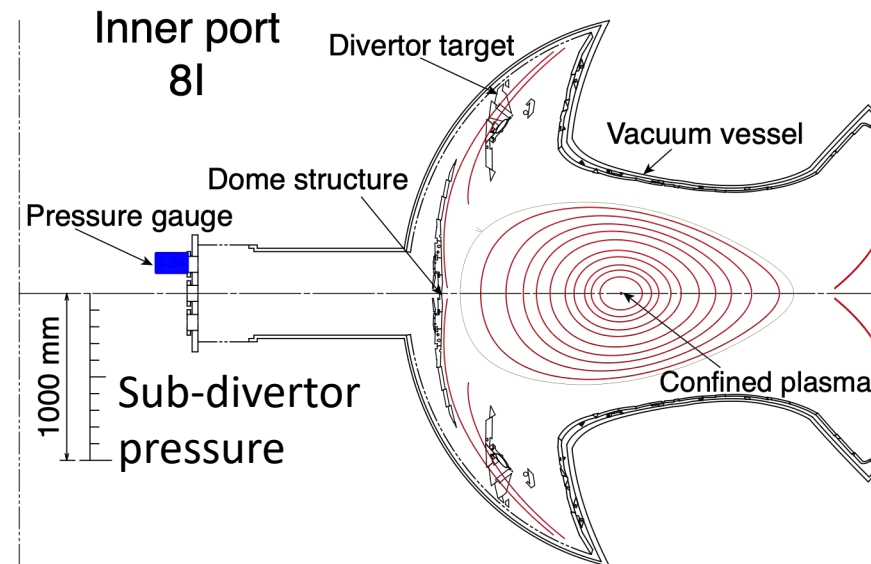
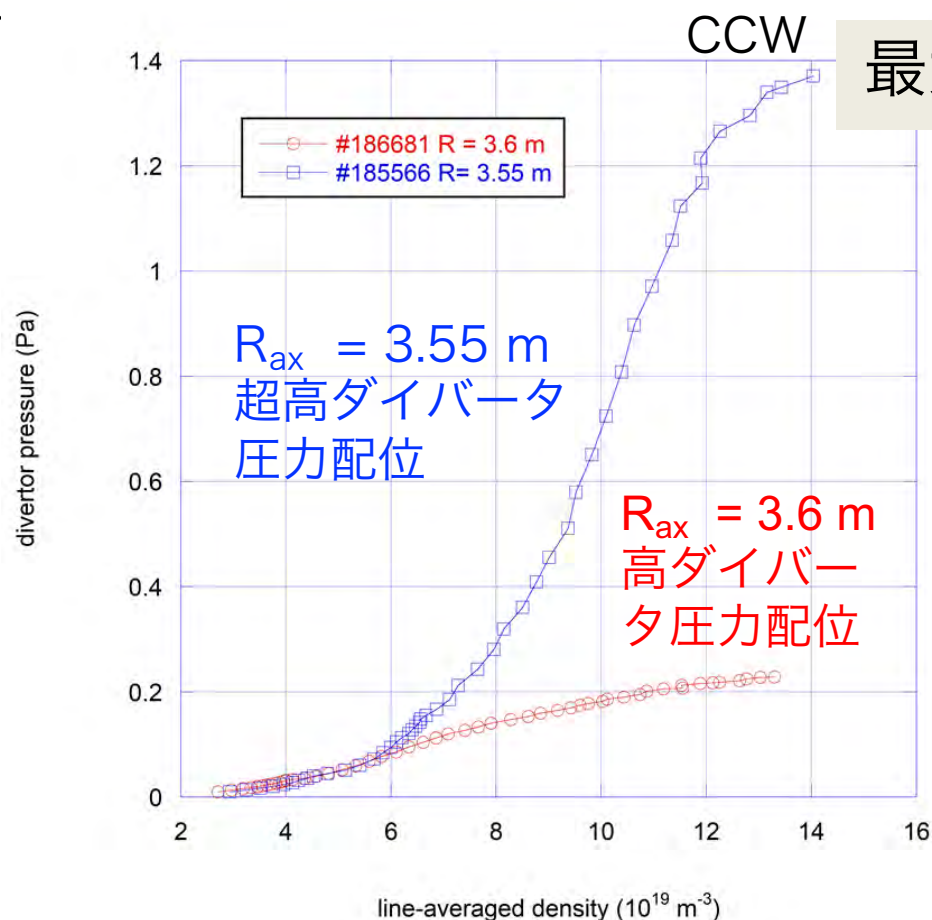
ダイバータ密度



2025年度LHD実験では、
磁場配位とダイバータプラズマ条件
を最適化、
ヘリカルダイバータにおける低中性粒子
圧力限界を克服できる可能性



LHDにおけるダイバータ圧力のスケーリング



- ✓ ダイバータ密度とサブダイバータ中性粒子圧力は線形相関あり ($R_{ax} = 3.6 \text{ m}$ 配位 (高ダイバータ圧力配位))。
- ✓ $R_{ax} = 3.55 \text{ m}$ 配位 (超高ダイバータ圧力配位) では、1.4 Paを超えるサブダイバータ中性粒子圧力が得られた。
- ✓ 密度が $6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ を超える領域では、スケーリングが大きく異なる。この密度しきい値以上では、別の物理過程が関与していると考えられる。
→ダイバータ分光計測によりボルツマン分布を仮定した推定ダイバータ温度は1 eV以下。
体積再結合で定性的な説明可能

U. Wenzel+, 2024 Nucl. Fusion

U. Wenzel+, 2026 JoFE

内容

✓ LHDダイバータ排気研究の成果

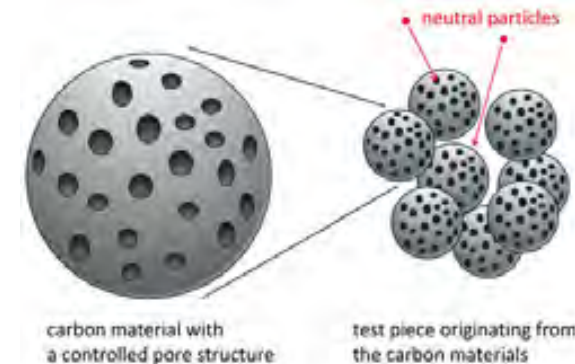
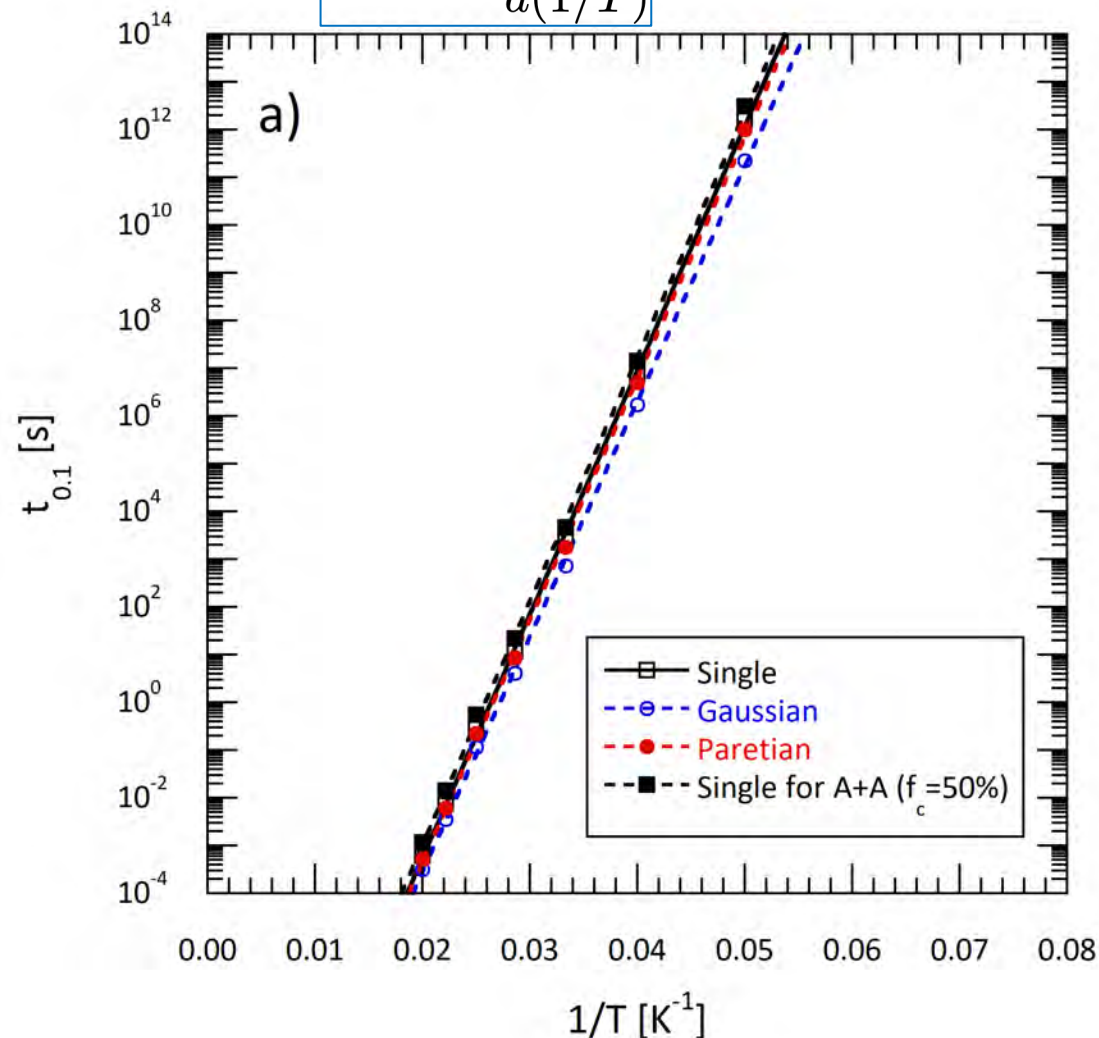
- ❖ 中性粒子圧縮・能動排気・低リサイクリング化を実証
- ❖ ヘリカルダイバータにおける高中性粒子圧力状態を観測

✓ 吸着・排気・材料科学への展開

- ❖ 活性炭の吸蔵・放出モデル
- ❖ 水素吸蔵合金による排気

活性炭の吸着ポテンシャルを読み解く粒子吸蔵・放出モデル

$$E_f = k_B \frac{d \ln t_f}{d(1/T)}$$



Kanno+, Vacuum 2026

- ✓ 放出開始時間 $t_{0.1}$ に着目
 - ❖ $t_{0.1}$ は細孔構造の詳細に鈍感な堅牢指標
 - ❖ アレニウスプロットの傾きから吸着エネルギーを評価
 - ❖ 温度依存性から実効吸着ポテンシャルを推定
- ✓ 展開：逆問題的モデリングへ
 - ❖ 放出分布全体からポーラス構造の統計的特徴を推定
 - ❖ 活性炭を「吸着ポテンシャルを読むファントム材料」として活用

水素吸蔵合金の平衡圧と水素濃度の関係

Sieverts-law

$$\log p_{\text{eq}} = A + 2 \log(q) - \frac{B}{T}$$

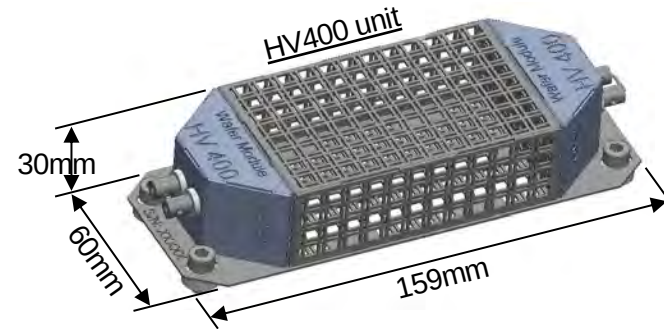


$$p_{\text{eq}} = q^2 10^{(A - \frac{B}{T})}$$

排気条件 $p_{\text{H}_2} > p_{\text{eq}}$

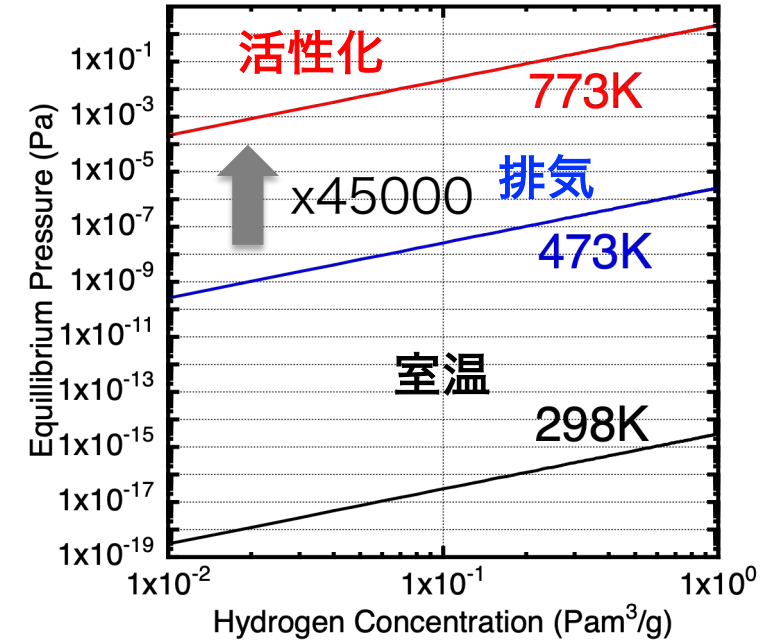
放出条件 $p_{\text{H}_2} < p_{\text{eq}}$

G. Motojima+, FED 2018

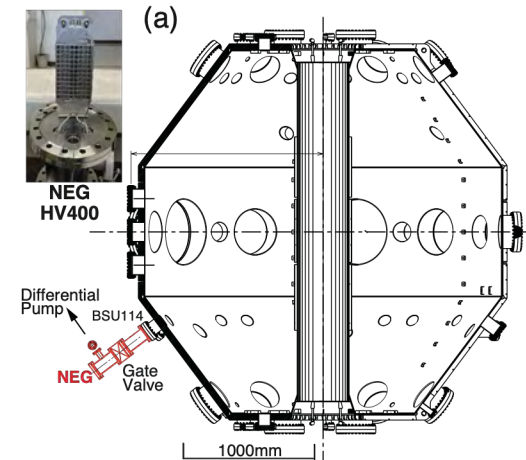


- ・モデル：HV400
- ・合金：Zr, V, Ti, Al
- ・排気速度：0.4 (m³/s)
- ・排気時温度：~200°C
- ・活性化時温度：500-550°C

A=9.635, B=7290



G. Motojima+, PFR 2026*



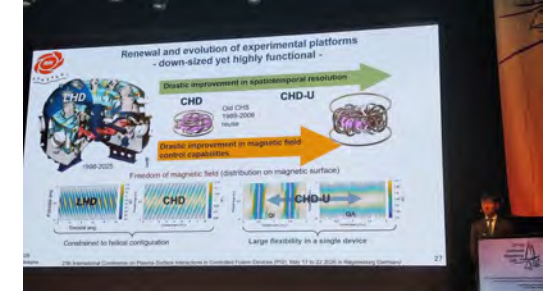
- ✓ ジーベルツ則により平衡水素圧を評価
- ✓ 473 Kは水素拡散・表面反応を促進する実用的温度域
- ✓ QUEST長時間放電に向けて 1 m³/s 級の実効排気を目指す

2026年度核融合科学研究所所外施設利用共同研究課題提案型共同研究 (NIFS25KSPT012)

まとめと今年度の計画1

✓ LHD最終成果の継承・発展(本島+)

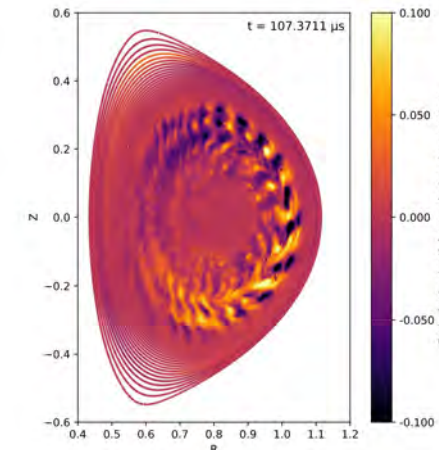
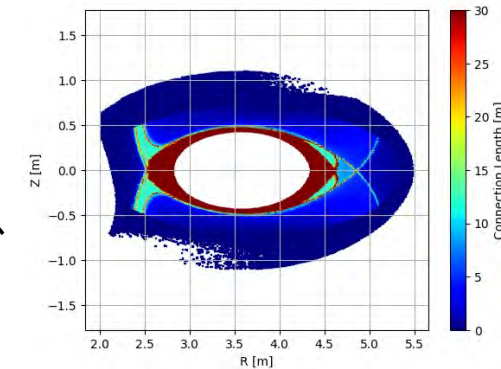
- ❖ LHDダイバータ研究で得られた工学的知見を
CHD-U装置計画に活用



(装置製作、磁場の可変性に対応したダイバータ設計など)
PWIコミュニティとの連携強化 (PSI2026にてCHD-U計画を紹介)

✓ 粒子制御の物理・シミュレーション(河村 (QST, R8客員)、庄司、IPP、森高、力武、本島+)

- ❖ LHDで観測されたダイバータ高中性粒子圧縮の物理理解
EMC3-EIRENEシミュレーションによるガス圧への配位の影響理解
- ❖ 全系 (**壁含む**) シミュレーションX-point Gyrokinetic Code(**XGC**)による**乱流不安定成長解析**
QUESTにおけるアスペクト比依存性



まとめと今年度の計画2

✓ 吸着・排気・材料科学への展開(菅野、本島、森崎、伊藤篤、高山+)

- ❖ 活性炭をファントムモデルとした**吸着ポテンシャルを考慮した粒子吸蔵・放出モデル構築**

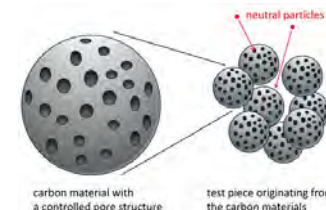
→ **温度不均一性考慮、種子科学への応用**、Kanno+, Vacuum 2026

- ❖ **水素吸蔵合金**によるジーベルツ則に基づく**水素吸着**

→ QUESTの長時間放電への適用、Motojima+, PFR 2026

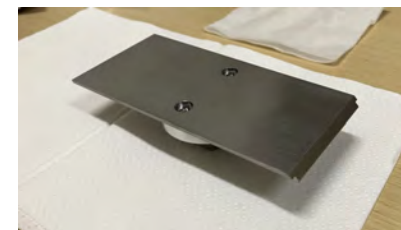
- ❖ SPS (**プラズマ放電焼結**) による**異種金属接合**

W-SUS(QUEST, 九州大との共同研究), W-CuCrZr, W-F82H(JT-60SA, QSTとの共同研究)



$$E_f = k_B \frac{d \ln t_f}{d(1/T)}$$

$$\log p_{eq} = A + 2 \log(q) - \frac{B}{T}$$



長期計画：これらの研究を**統一的に理解**する視点として、
非平衡交差輸送という概念を導入
(例えば、ソレー効果、デュフル効果など)

$$\begin{pmatrix} J_{\text{Particle}} \\ J_{\text{heat}} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \overset{\text{通常拡散}}{L_{cc}} & \overset{\text{非対角項}}{L_{cT}} \\ \overset{\text{デュフル効果}}{L_{Tc}} & \overset{\text{ソレー効果}}{L_{TT}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nabla c \\ \nabla T \end{pmatrix}$$

熱伝導