

LHDにおけるPWI研究・制御の進展

～LHD 定常-PWIテーマグループ実験～



時谷政行, 上田良夫, 吉田直亮, 増崎 貴,
笠原寛史, 吉村泰夫, 長崎百伸, 芦川直子, 武藤 敬,
LHD実験グループ

16サイクルで進めたPWIに関する研究課題

① プラズマ粒子の捕捉/放出特性の理解と制御

- He損傷を受けた壁面が定常放電プラズマへ与える影響の評価
- ICH加熱とECH加熱におけるHeの壁排気特性評価
- アモルファス系炭素堆積層の構造に関する詳細解析と水素保持特性
- LHDボロン膜に対するトリチウム滞留挙動と炭素・酸素不純物との相乗効果に関する研究
- マテリアルプローブによるLHDプラズマ壁相互作用及び共堆積炭素膜特性の評価

② 不純物生成の抑制

- Mixed-material堆積層の構造および粒子捕捉特性評価
- バイアス電圧印加によるLHD内ダストの輸送制御
- LHD内ダスト量モニタリング法の開発
- ダストの移動メカニズムに関する実験
- Experimental study of the optimized castellation for a new ITER W-divertor in LHD Stellarator
- Dust counting by electrostatic dust detector in LHD

③ 新たな対向材料の開発

- ナノ構造タングステンの核融合炉内での影響と利用
- 先進的タングステン被覆SiC/SiC複合材料およびSiC基複合材料の実機プラズマへの適応評価
- 高温領域でのタングステンのスパッタリング特性

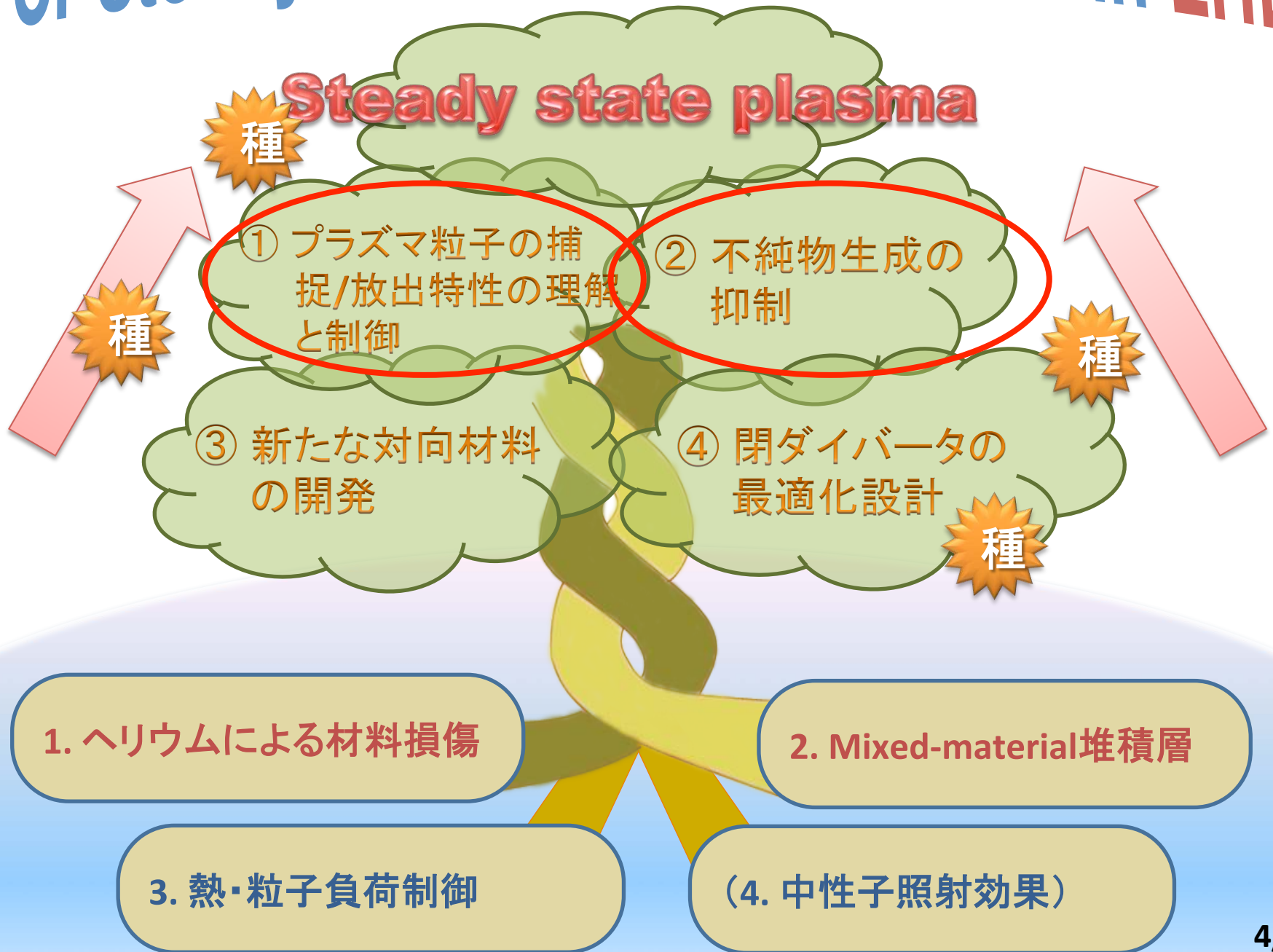
④ 閉ダイバータの最適化設計

- 閉ダイバータ化に伴うプラズマ対向壁の特性変化

PSI会議テーマとの関連

1. Physics processes at the plasma-material interface
 - Experimental study of the optimized castellation for a new ITER W-divertor in LHD Stellarator
2. Material erosion, migration, mixing, and dust formation
 - Mixed-material堆積層の構造および粒子捕捉特性評価
 - アモルファス系炭素堆積層の構造に関する詳細解析と水素保持特性
 - マテリアルプローブによるLHDプラズマ壁相互作用及び共堆積炭素膜特性の評価
 - 閉ダイバータ化に伴うプラズマ対向壁の特性変化
 - LHDにおけるレーザー光散乱による微粒子の発生と挙動の解析
3. Plasma fuelling, particle exhaust and control, tritium retention
 - He損傷を受けた壁面が定常放電プラズマへ与える影響の評価
 - ICH加熱とECH加熱におけるHeの壁排気特性評価
4. Wall conditioning and tritium removal techniques
 - LHDボロン膜に対するトリチウム滞留挙動と炭素・酸素不純物との相乗効果に関する研究
5. Impurity sources, transport and control
 - バイアス電圧印加によるLHD内ダストの輸送制御
 - LHD内ダスト量モニタリング法の開発
 - ダストの移動メカニズムに関する実験
 - Dust counting by electrostatic dust detector in LHD
6. Edge and divertor plasma physics
7. Power exhaust, plasma detachment, and heat load control
8. Far SOL transport and plasma wall interaction in main chamber
9. Plasma edge and first wall diagnostics
10. Plasma exhaust and plasma material interaction for fusion reactor
 - ナノ構造タングステンの核融合炉内での影響と利用
 - 先進的タングステン被覆SiC/SiC複合材料およびSiC基複合材料の実機プラズマへの適応評価
 - 高温領域でのタングステンのスパッタリング特性

For steady state plasma operation in LHD



第16サイクルの目標

LHD第16サイクルの目標および方向性について(目標)

- $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ を超える密度での1時間定常維持(高性能定常放電の実現)
- 金属第一壁が受ける損傷と水素捕捉量の定量的な相関関係評価
- プラズマ対向材料としてのタングステンの特性評価

ダスト挙動の解明

ダスト源推定(CCD)

ダスト挙動評価(高速カメラ)

粒子評価・制御

マスフロー導入

(小 $< 0.2 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

大 $< 1.7 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)

SSGPによる水素供給

局所加熱の低減

HAS(dipole運転)によるRFシース加熱低減

熱負荷の高い箇所へのCFC材の適用



PFC材料の表面変質

Heプラズマ照射と堆積層が粒子捕捉特性に与える影響

→ PWI発表で報告

加熱源増強・充実

ICH:4系統(HAS,PA)

(2MW/CW)(イオン加熱)

制御システムの改善

ECH:3系統(82,77GHz)

(0.7MW/CW)

NBI:BL4

0.5MW/1イオン源@90s)

【目標】定常放電で解決すべき事項は？

(A)

密度上昇による
プラズマ崩壊

急激な密度上昇



維持密度通過
プラズマ崩壊

① プラズマ粒子の捕捉/
放出特性の理解と
制御

粒子評価・制御

マスフロー導入

SSGPによる水素供給

局所加熱の低減

HAS(dipole運転)によるRFシース加熱低減

熱負荷の高い箇所へのCFC材の適用



PFC材料の表面変質

Heプラズマ照射と堆積層が粒
子捕捉特性に与える影響

ダスト挙動の解明

ダスト源推定(CCD)

ダスト挙動評価(高速カメラ)

(B)

不純物混入による
定常放電の停止

スパーク、スパッタリング
鉄(不純物)の混入



プラズマ冷却

② 不純物生成の
抑制

加熱源増強・充実

ICH:4系統(HAS,PA)

制御システムの改善

ECH:3系統(82,77GHz)

(0.7MW/CW)

NBI:BL4

0.5MW/1イオン源@90°

(A) 密度上昇によるプラズマ崩壊

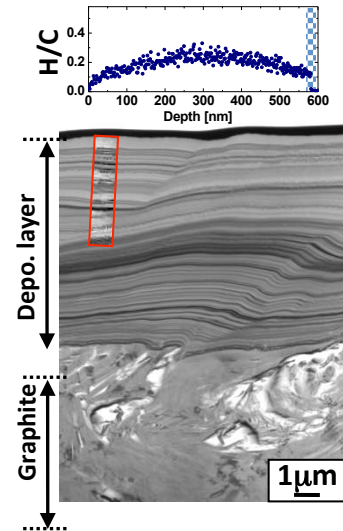
課題

- 壁がsourceとなり, 燃料粒子供給過多
 - ⇒どのような壁面状態が燃料粒子放出を促進するのか?
 - ⇒場所によってsourceとsinkが異なるのか?
 - ⇒時間が経過すると, sinkがsourceになるのか?
 - ⇒加熱手法(ICH or ECH)との関係性が不明

PWIの観点からわかっていること

- 金属と炭素材のMixed-materialの形成とHeによる損傷層の形成が壁面の粒子捕捉特性を変化させ得る。

定常+PWI研究として考えられるテーマ(A)



・定常放電時の粒子バランス研究

⇒Global particle balance (定常) + 材料分析 (PWI)

1. He損傷を受けた壁面が定常放電プラズマへ与える影響の評価

2. ICH加熱とECH加熱におけるHeの壁排気特性評価

⇒ダイバータと第一壁は分けて考える必要がある。

第16サイクルは第一壁材料(SUS316L)に対して評価。

(A) ステンレス鋼の照射実験を実施

1. He損傷を受けた壁面が定常放電プラズマへ与える影響の評価

He損傷を受けたステンレス壁面で水素の捕捉特性を調べる。

◆ 実験前半に実施 (2012, 10/26(金), 29(月))

前半 (ICH+ECH) A: ICH+ECH (He) 948s + ECH (H) 175s

前半 (ECH) B: ECH (H) 174s

2. ICH加熱とECH加熱におけるHeの壁排気特性評価

加熱方式(ICHとECH)の違いで、対向材料へのHeの吸蔵・放出特性がどのように異なるのかを検証する。

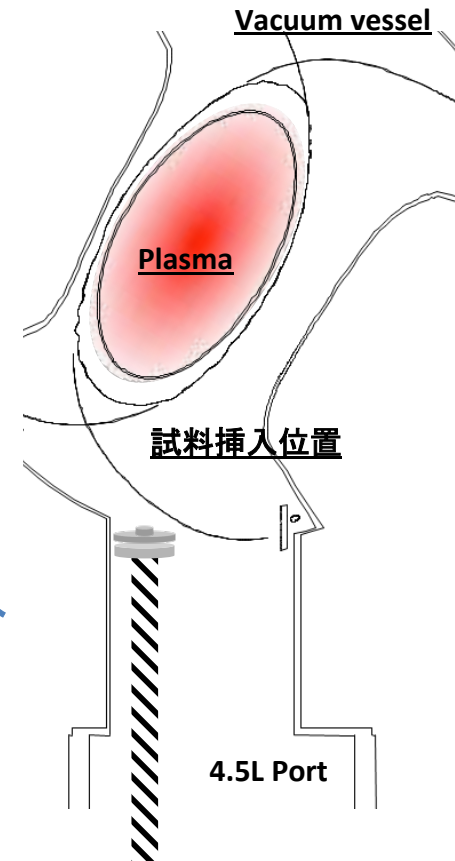
◆ 実験後半に実施 (2012, 12/5(水), 6(木) 実施)

後半 (ECH) A: ECH (He) 1000s

後半 (ICH+ECH) B: ICH+ECH (He) 1000s

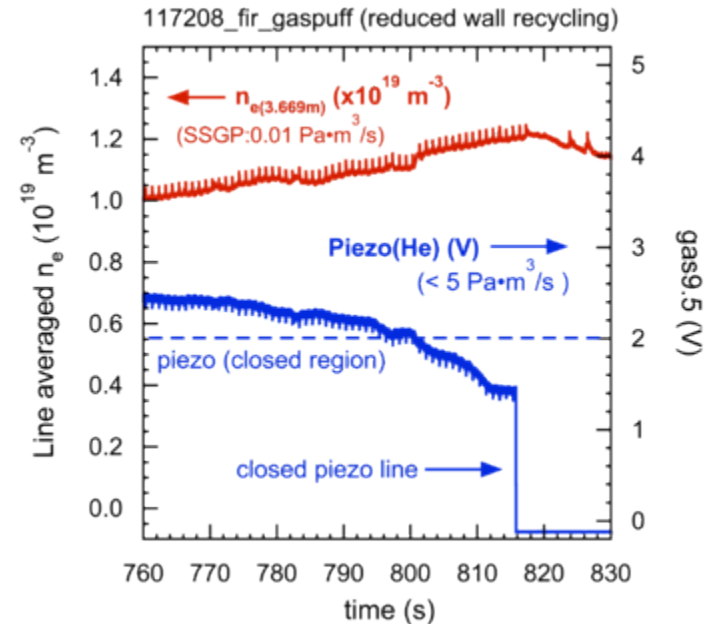
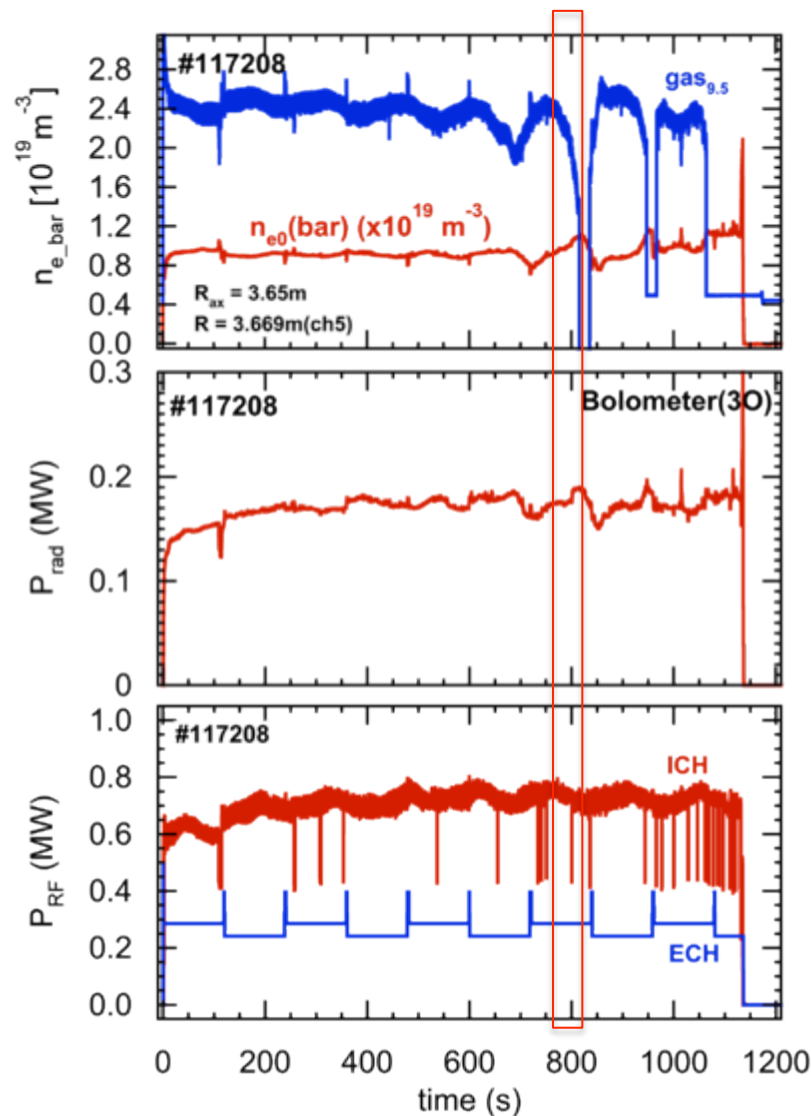
ステンレス(SUS316L)試料 ⇒ 4.5Lポートの試料駆動装置より第一壁位置へ挿入

試料: SUS316L
TDS: 4個
GD-OES: 2個
TEM: 4個
FIB: 0個



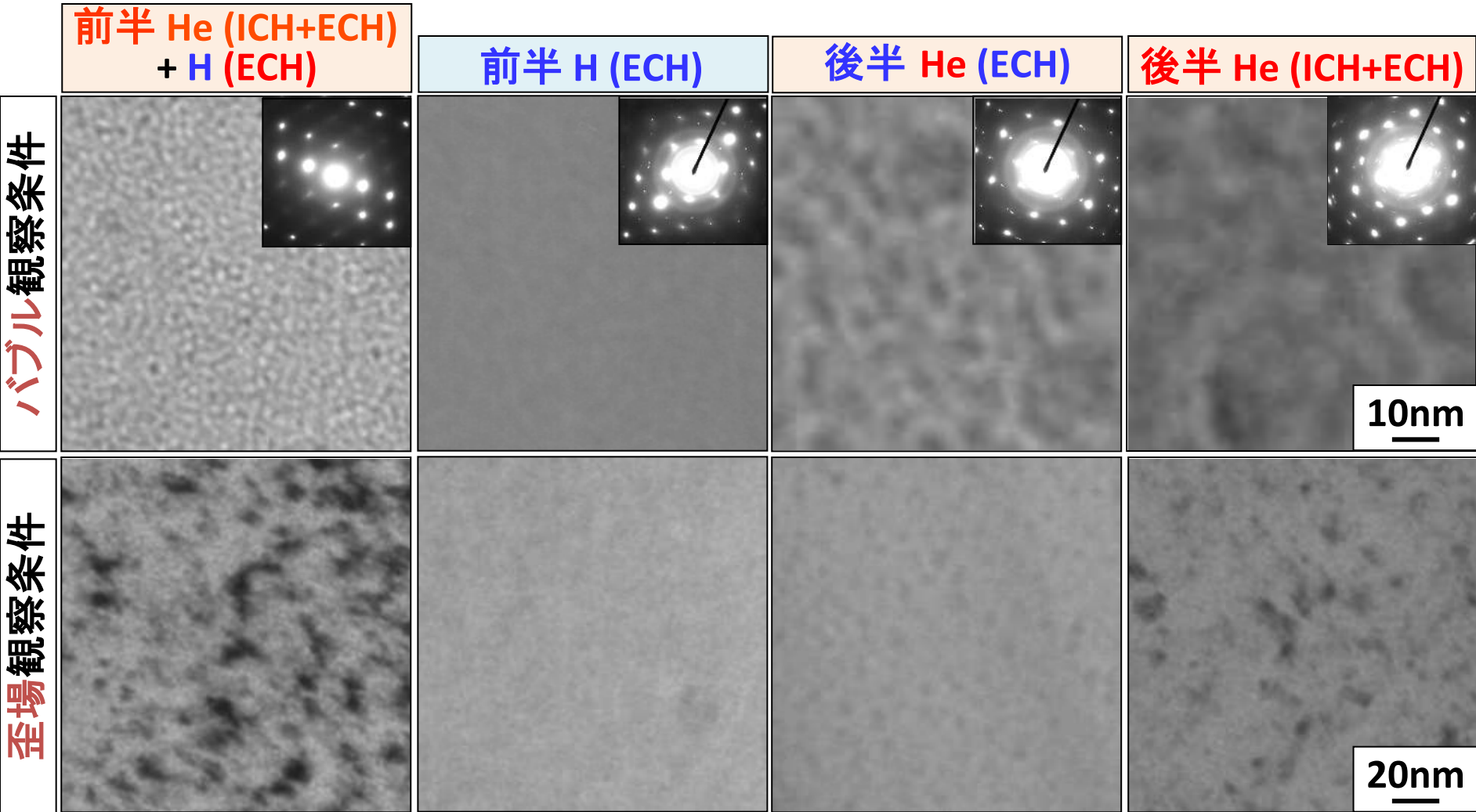
ICH長時間放電時のHe粒子供給量の変化

必要粒子供給量の低減



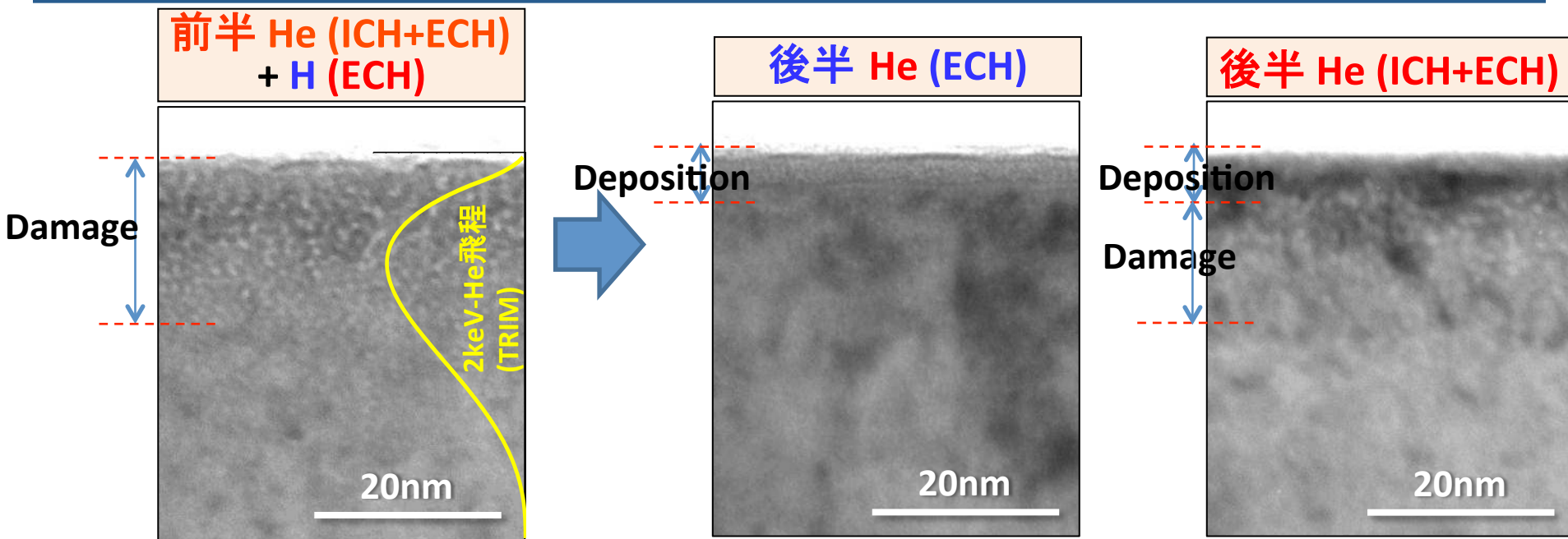
- 600s程度までは制御可能(磁気軸swingによる加熱入力の変動に合わせて、密度制御を達成)
- 600sを超えると、粒子供給量過多になり密度がゆっくり上昇する
- 800sで外部からの粒子供給著しく減らす必要が生じる

定常放電曝露後のSUS微細構造(TEM)



	前半 He (ICH+ECH) + H (ECH)	前半 H (ECH)	後半 He (ECH)	後半 He (ICH+ECH)
Damage	あり	なし	なし	あり
Deposition	なし	あり	あり	あり

SUS試料の微細構造(断面)



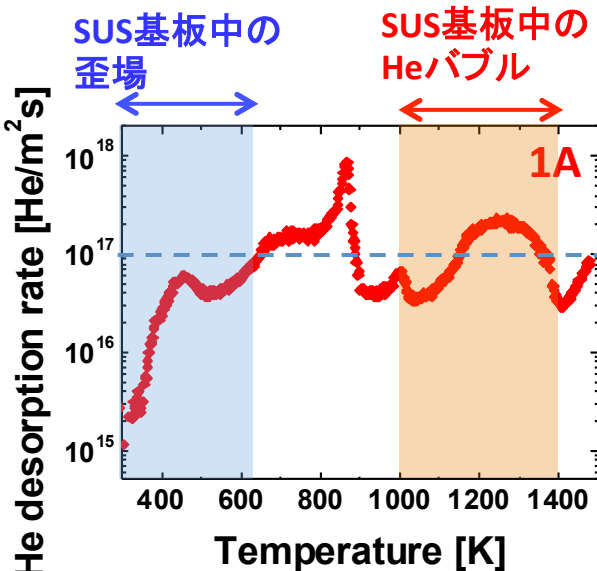
◆ポイント

- ECHではSUS基板(マトリクス)に到達するイオンが少ない。
- ICHでは、~2keV程度のエネルギーのイオンが多く入射され、損傷を形成する。
- 実験前半よりも後半に、堆積層の形成量が多い。
⇒ 積算放電時間が長くなると、堆積層の形成されやすい環境に変化

SUS試料からの He のTDSスペクトル

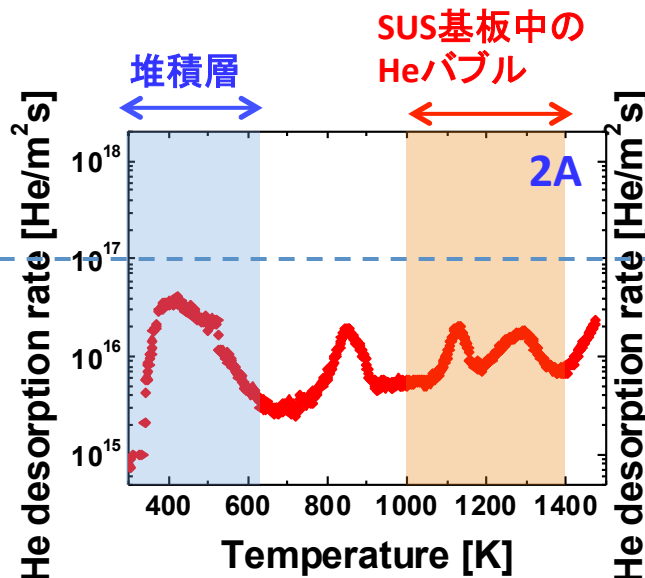
①

前半 He (ICH+ECH)
+ H (ECH)



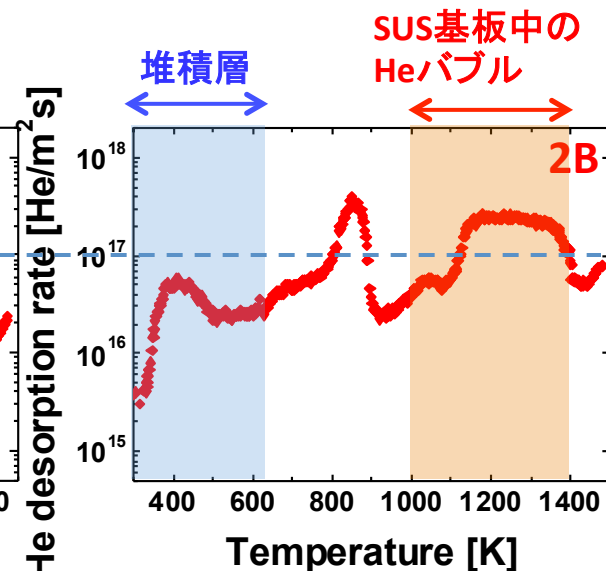
②

後半 He (ECH)



③

後半 He (ICH+ECH)



➤ Heの総捕捉量は ICH放電のほうが大きい.

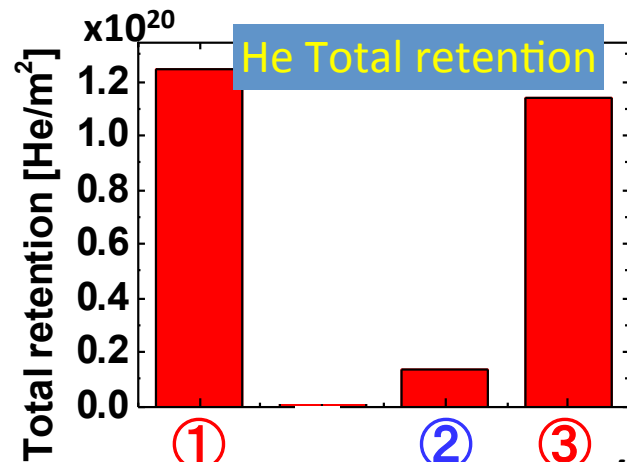
➤ SUS基板中のHe蓄積量が多い

➤ 主なHe捕捉サイトが3つの試料で異なる.

① : SUS基板.

② : Mixed-material堆積層.

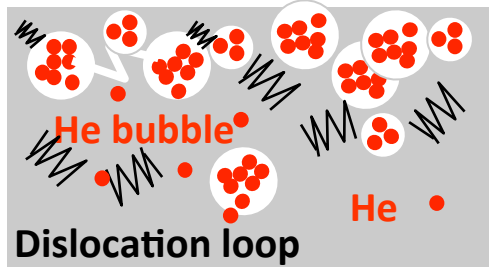
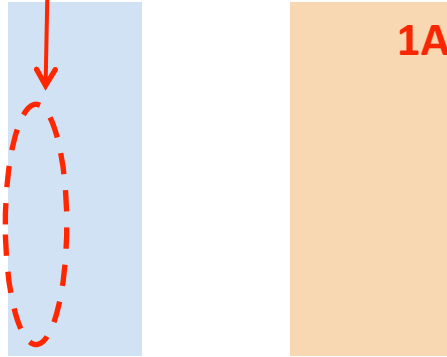
③ : Mixed-material堆積層とSUS基板.



定常放電で問題となるHe保持/放出機構

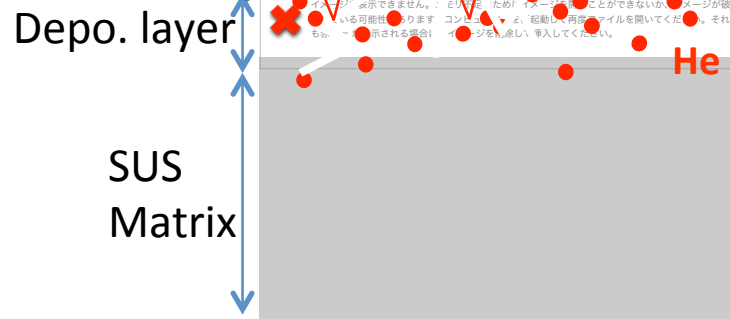
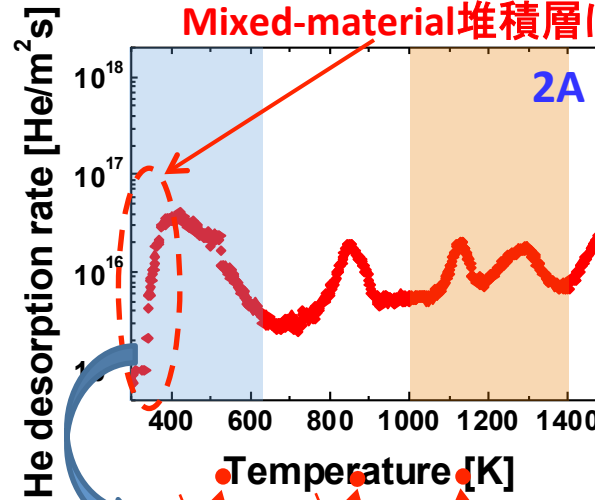
前半 He (ICH+ECH) + H (ECH)

Heバブル周辺の歪場による捕捉

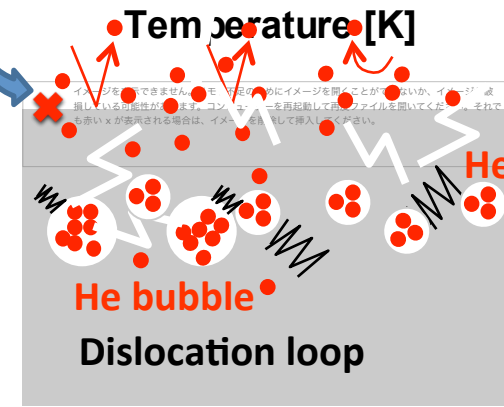
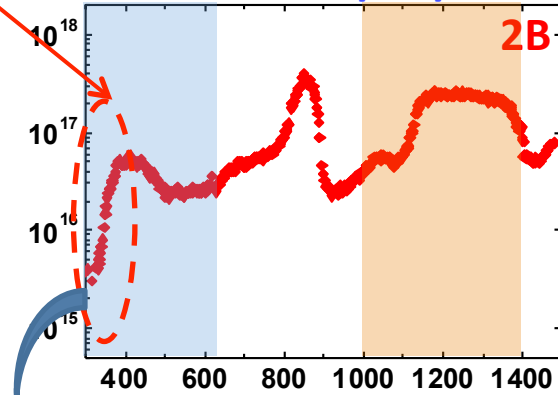


後半 He (ECH)

Mixed-material堆積層による捕捉 $\Rightarrow \sim 10^{19} \text{He/m}^2/10 \text{nm}$



後半 He (ICH+ECH)



Heの弱い捕捉機構(室温~200℃程度の放出)が2種類あることがわかる。

1. Heバブル周辺の歪場。
2. Mixed-material堆積層。 $\Rightarrow$ 温度が上がり易く、予期しないガス放出を招く
 $\Rightarrow$ 高い水素吸蔵能力を持っていることもわかっている。

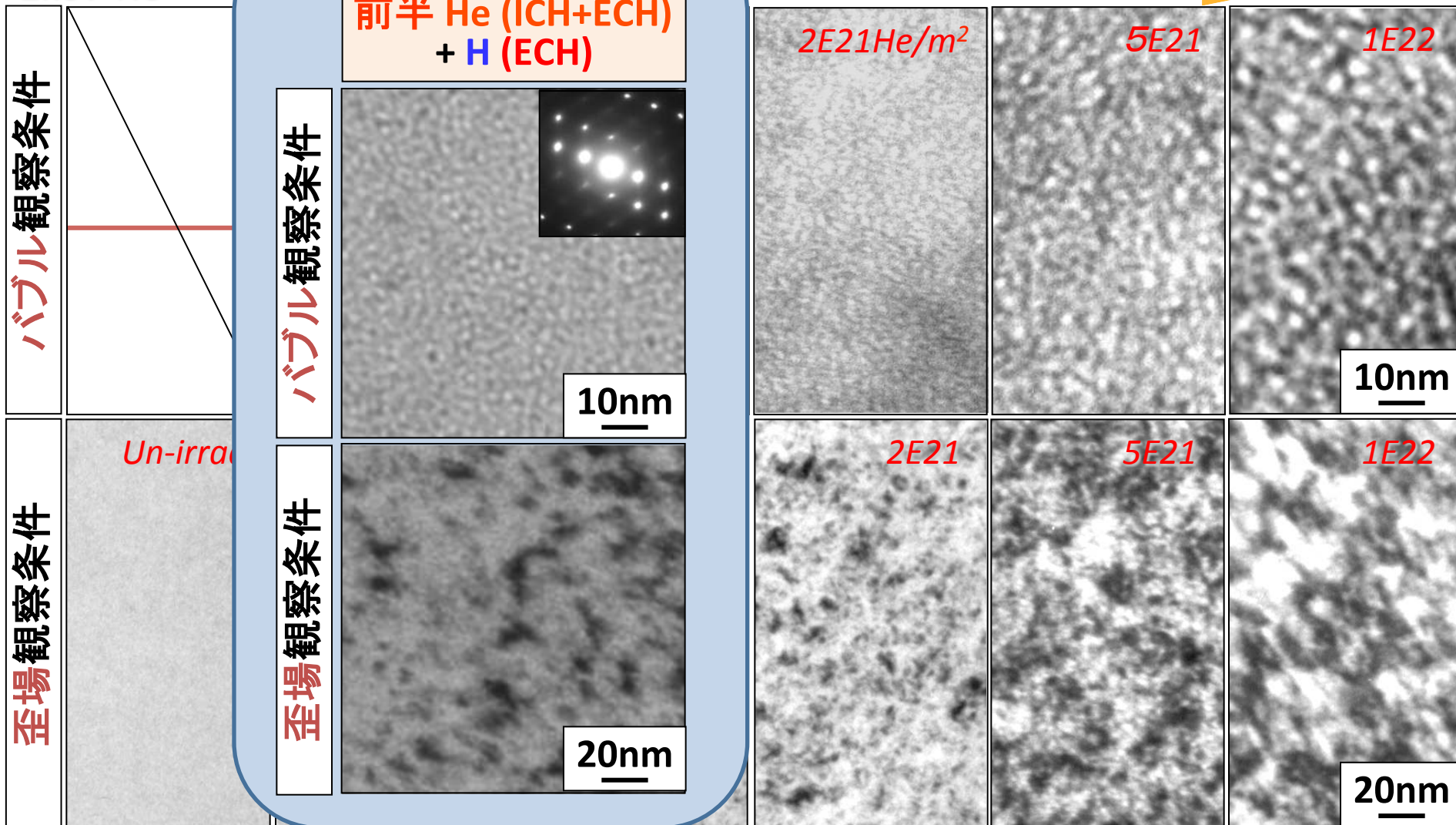
$\rightarrow$ これら2つが室温壁マシンであるLHDの粒子リサイクリングに影響

イオンビーム実験による組織との比較

◆ He照射中のSiC試料の連続TEM観察像

2keV-He⁺

点状欠陥の増加・Heバブルの成長



前半 He (ICH+ECH)+ H (ECH)試料は 2keV-Heを~10²¹He/m²照射した程度のダメージ

Summary

課題: (A) 密度上昇によるプラズマ崩壊

- 定常放電(He)中の第一壁表面にはHeを捕捉するMixed-material堆積層が形成される。
- Mixed-material堆積層でもバルクのステンレス鋼でも低温域(室温~200°C)で急激なHe放出を招く。Mixed-material堆積層のHe吸蔵能は $\sim 10^{19}$ He/m²程度。
 - しかし、熱伝導率の低いMixed-material堆積層では温度上昇が起きやすく(さらに、基板との密着性も弱い)、バルクと比較して急激なHe放出が発生し易い。
- 積算放電時間が長くなると第一壁に堆積層ができやすくなる。
 - 理由として考えられるのは、(1)ダイバータ炭素材が損耗と再堆積を繰り返して移動し、第一壁に到達する、あるいは、(2)フレーク状堆積物が形成されたのち、剥離して(もしくは、アーキングにより)プラズマ中に入り、その後第一壁に堆積する。
- ICHの場合はSUS基板に損傷形成可能なエネルギーの粒子(keVオーダー)が入射されるが、ECHではほとんどない。

- Mixed-Material 堆積層とSUSマトリクスにおける粒子捕捉/放出挙動の理解が進んだ。
- ICH放電とECH放電の壁材料に与える影響の違いが明らかになった。
- 今後は、グローバルな粒子挙動との関連性をより明確にし、粒子制御の方策を示す必要がある。

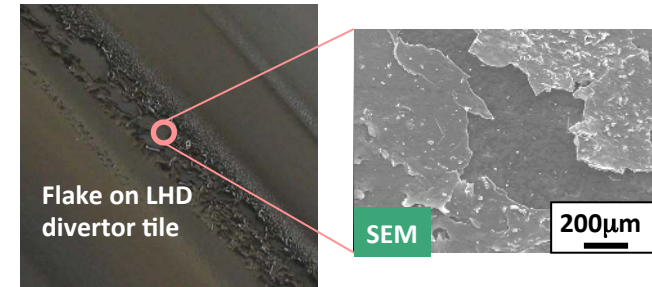
(B) 不純物混入による定常放電の停止

課題

- ・Feの混入により密度維持困難・放射崩壊でプラズマ放電停止に至る.
- ・混入経路と原因がわからない.

PWIの観点からわかっていること

- ・金属と炭素材のMixed-material堆積層が至る所でフレーク状に形成されている. これらの剥離・放出が急激な不純物混入の原因ではないか？



定常+PWI研究として考えられるテーマ(B)

- ・堆積層の真空容器内での分布調査
- ・堆積層剥離・放出機構の解明

1. ICHアンテナファラデーシールド
2. 閉ダイバートドーム上
3. 閉ダイバートドーム下

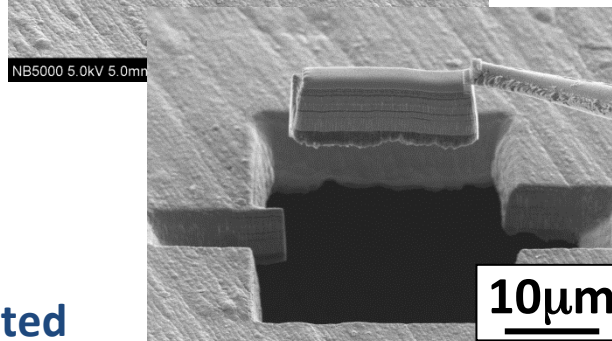
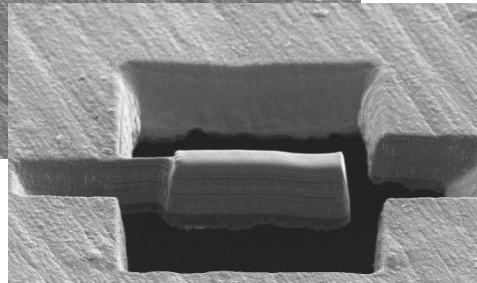
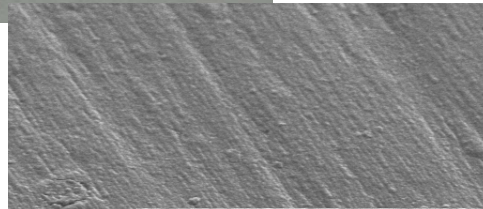
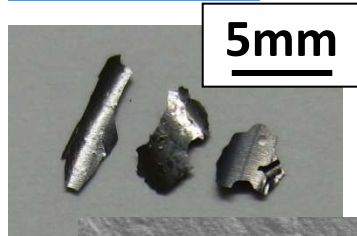
3ヶ所に形成されたMixed-material
堆積層の微細構造解析を実施

1. ICH ファラデーシールド上のフレーク状堆積物

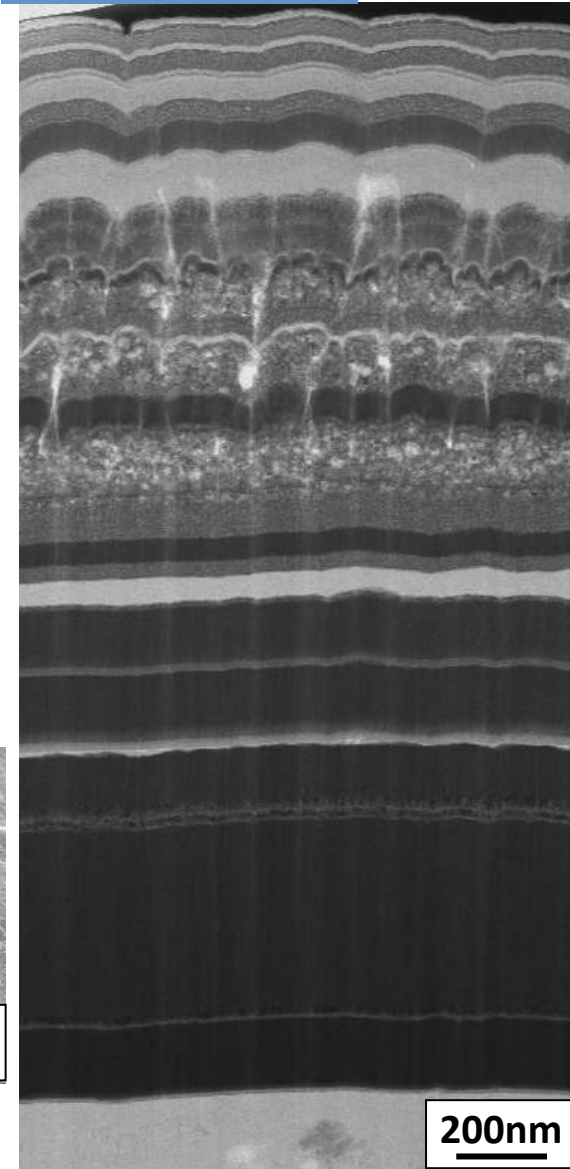
採取場所



ナノ加工



断面 TEM 像



- ◆ FIB nano-fabrication was conducted
 - 緻密な層構造を持つMixed-material堆積層.
 - 機械的に脆い構造.

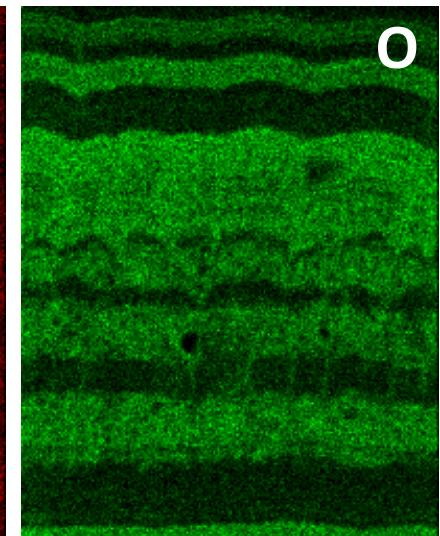
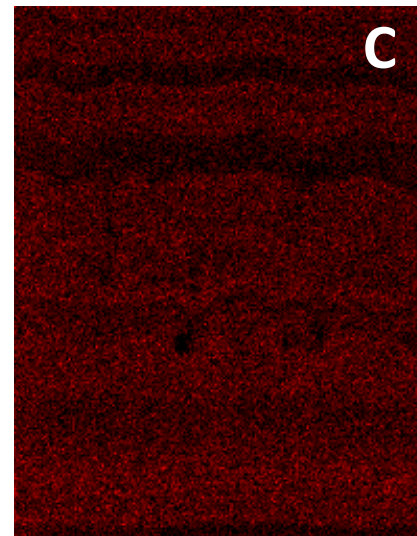
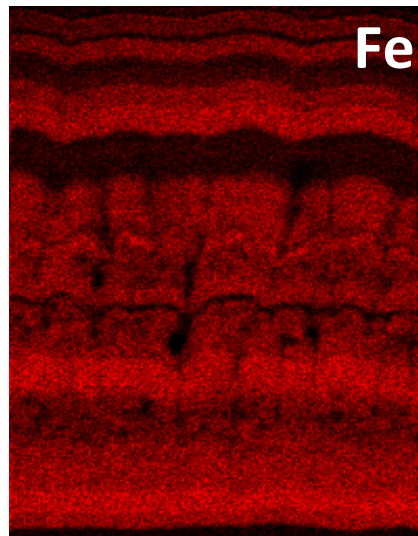
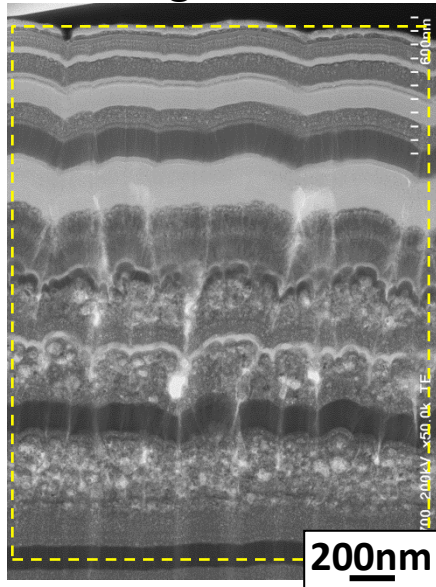
200nm

Mixed-material堆積層のSTEM-mapping

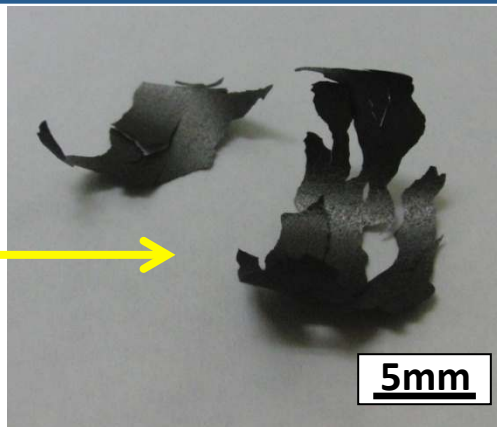
◆ フレークの構造と組成

- Fe, C, Oを含むMixed-material 堆積層.他の堆積層よりもOが特に多い.
- 酸化Fe であるため構造上硬く脆い.
- 主構成元素はFe. SUSが損耗して近距離輸送により再堆積していると考えられる.
- ファラデーシールドを, 低スパッタリング率の金属(W, Moなど)に交換すれば, フレーク状堆積物はかなり抑制できると考えられる.

BF image



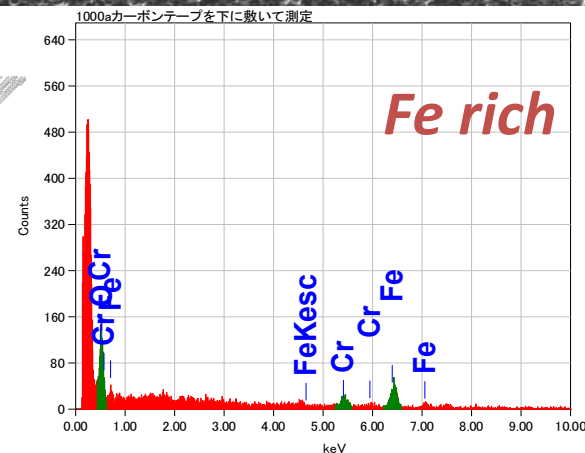
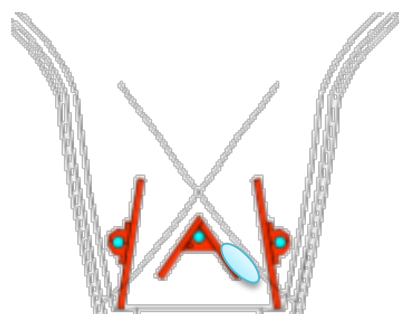
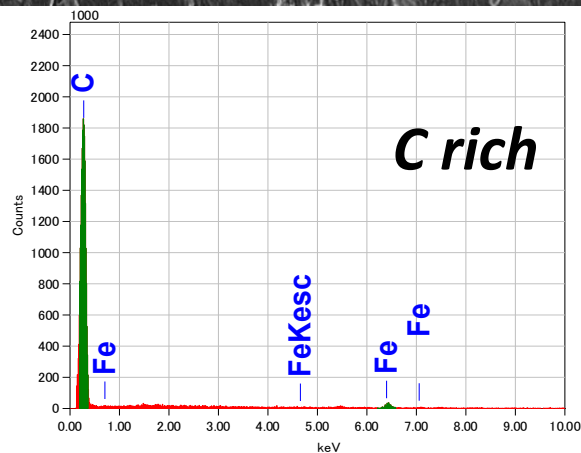
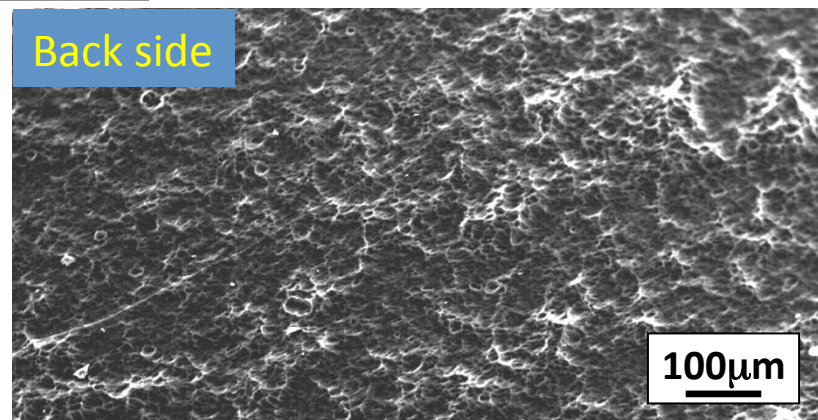
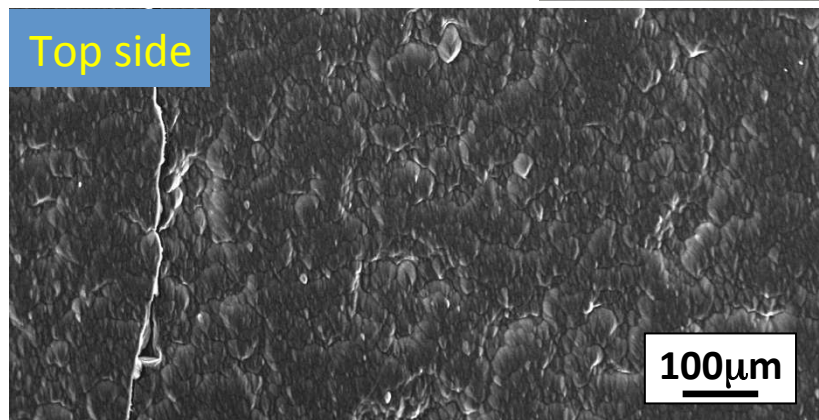
2. 閉ダイバータ “DOME上”



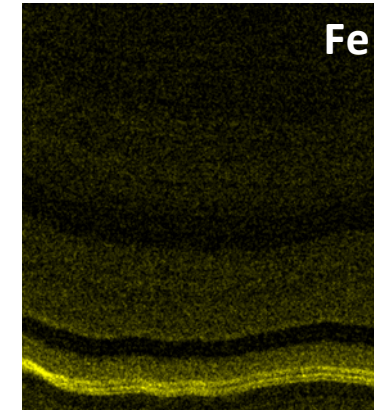
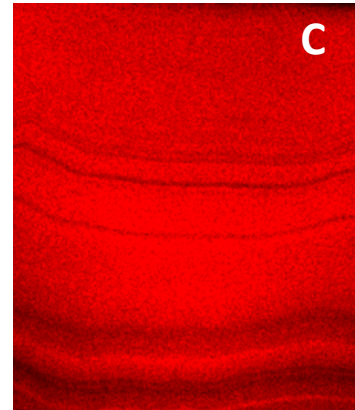
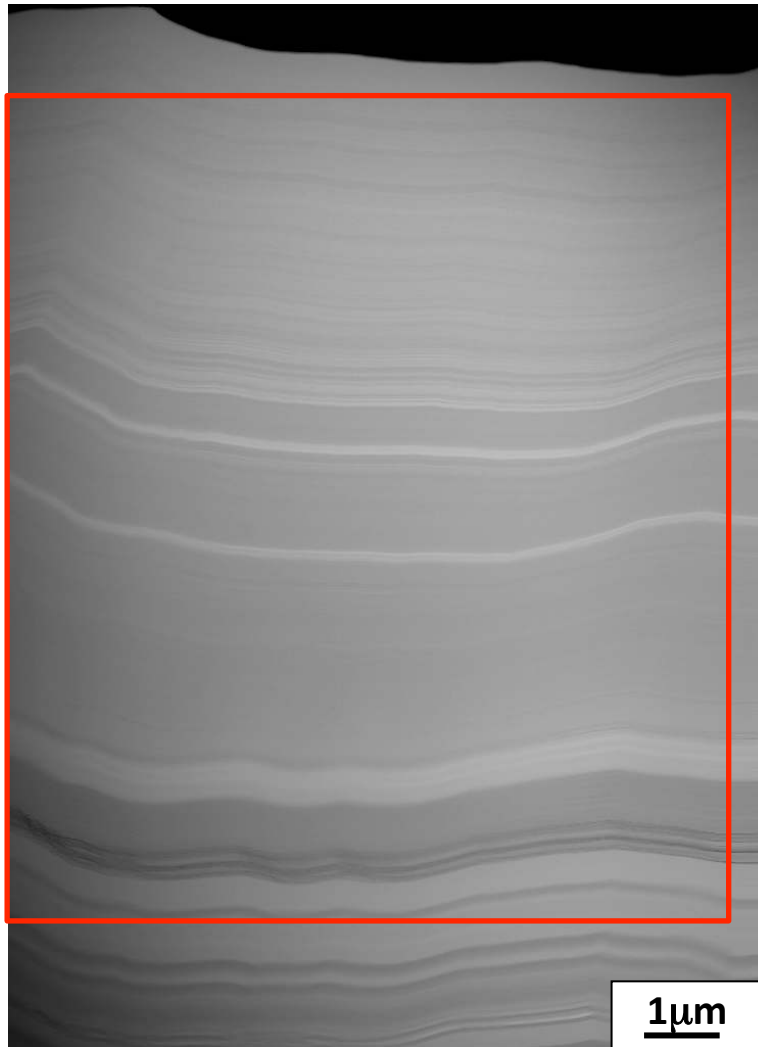
サイクル初期にFe堆積層が形成された後、サイクル後期には主要な構成元素はCに移り変わる。

金属堆積層が堆積層剥離の起点となり、フレークを生成する。 [1]

[1] M. Tokitani et al., J. Nucl. Mater. 417 (2011) 668



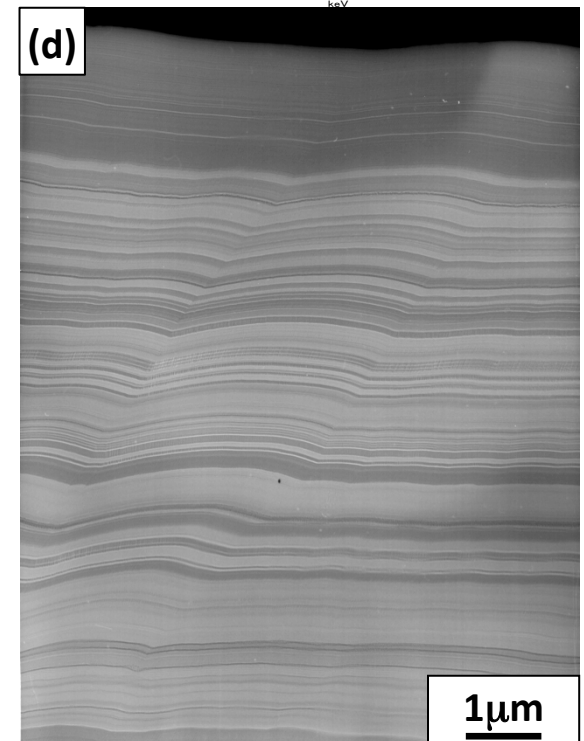
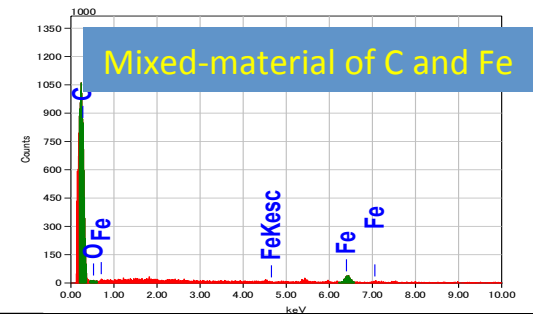
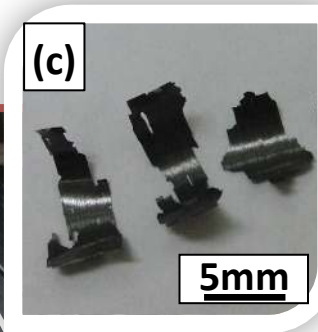
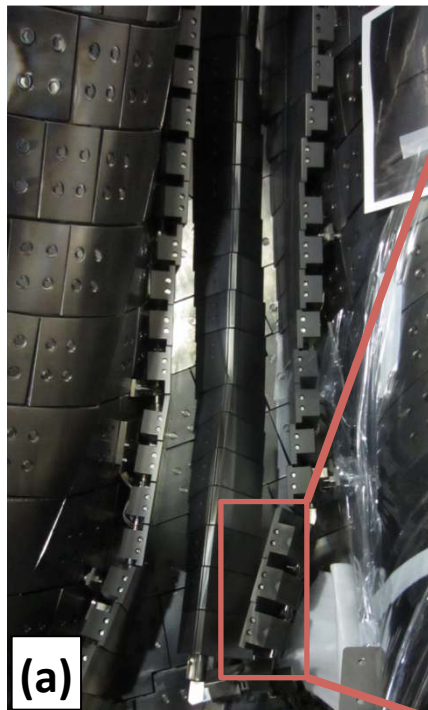
Mixed-material 堆積層 “DOME上”



- 緻密な層構造で構成されている.
- 主要構成元素はC
- ダイバータの炭素板の損耗と近距離輸送・再堆積により, 炭素主体の堆積層が形成される.
- このような堆積層では, Cが水素同位体を多量に捕捉し, Fe層で剥離して真空容器中に放出される.

3. 閉ダイバータ “DOME下”

フレーク状堆積物が多量に存在

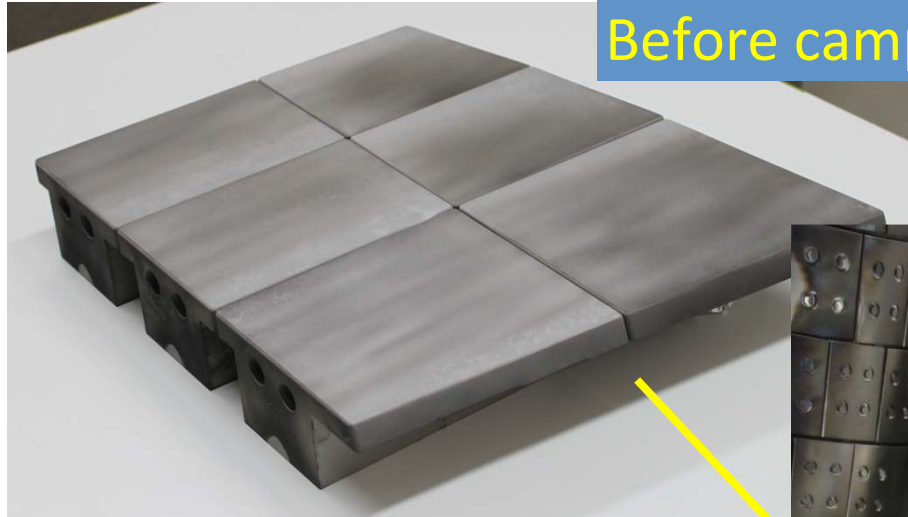


- ◆ 緻密な層構造を持つMixed-material堆積層
- ◆ 主要構成元素はCで僅かにFe層を含む
- ◆ ドーム上と同様に、炭素の損耗と近距離輸送・再堆積によりフレーク状堆積層が形成される。

ダイバータ受熱板をWタイルに交換

Mixed-material堆積層抑制のため、ダイバータ受熱板を
VPS-W コーティングタイルに交換

Before campaign



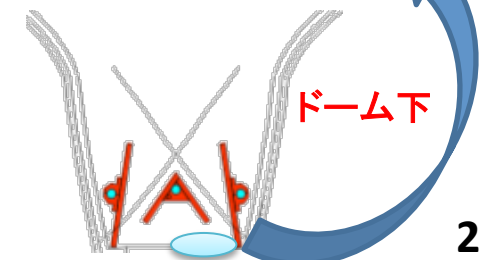
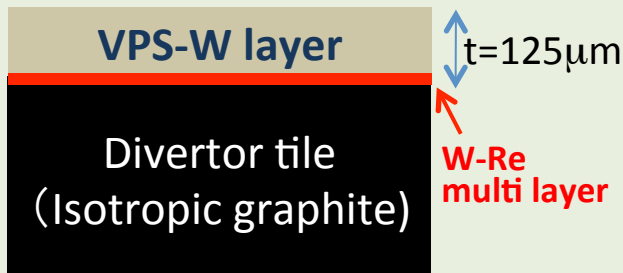
(a)

ドーム下壁表面に多量の
フレーク状堆積物を確認。

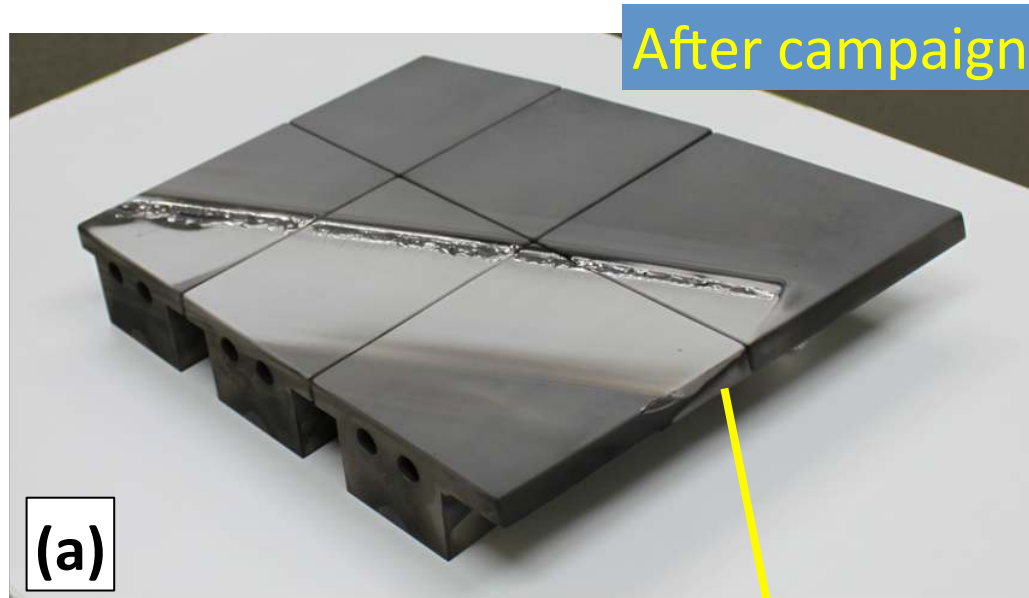


(b)

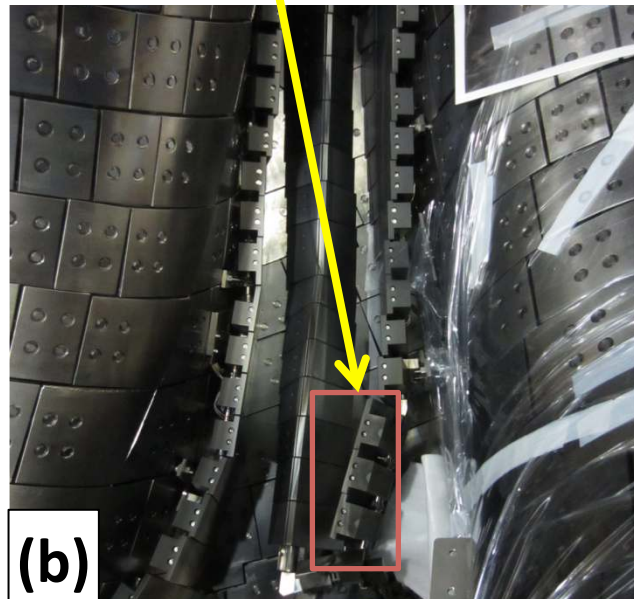
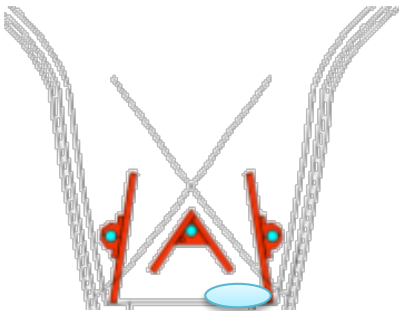
The VPS-W with 125 μ m thickness
was coated on the IG tile.



フレーク状堆積物を抑制できた “NO DEPOSITS”



VPS-W コーティングタイル
はMixed-material堆積層
の抑制に効果的である。



Summary

課題: (B)不純物混入による定常放電の停止

1. アンテナファラデーシールド, 2. 閉ダイバータドーム上, 3. 閉ダイバータドーム下, に形成されたMixed-material堆積層について微細構造を解析し, 堆積層の剥離・放出機構について以下のように検討した.

1. ICHアンテナファラデーシールド

- 酸化鉄を主とするMixed-material堆積層. ⇒ファラデーシールドで損耗した鉄の近距離輸送・再堆積
- ファラデーシールドの材料を低損耗材料(MoやW)などに交換すればフレーク状堆積物は抑制できると考えられる.

2. 閉ダイバータドーム上

- Cを主とするMixed-material堆積層 ⇒閉ダイバータ材料である炭素の近距離輸送・再堆積

3. 閉ダイバータドーム下

- Cを主とするMixed-material堆積層 ⇒閉ダイバータ材料である炭素の近距離輸送・再堆積
- VPS-Wコーティングタイルをダイバータ受熱板に使用することでフレーク状堆積物はほぼ完全に抑制できた.

フレーク状不純物の抑制

・フレーク状不純物は, 堆積場所の近傍で損耗された壁材料元素が主であり, 損耗の少ない材料(Wなど)を使用すると抑制できる.

PWI制御による定常放電の安定化

粒子供給制御

0.034Pa·m³/s@5min
壁飽和 ~ 800 sec
壁飽和後の粒子制御が重要

プラズマ加熱

PAアンテナ(7.5)で、急激なインピーダンス変化多発の原因解明が重要

プラズマ

加熱入力不足により密度維持困難 ~ 数秒

PWIで発表

粒子

熱・高エネルギー粒子

放出
捕捉

不純物混入

不純物混入

アンテナ
スパーク

ファラデーシールドの低損耗材料化により、フレーク層の抑制が可能

フレーク、堆積層の形成

損耗率の高い炭素の再堆積層に蓄積されたHeが粒子バランスや不純物混入に影響する可能性あり

定常-PWI連携による効果

◆時定数の長いPWI現象の解明

◆定常

$1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 2.5 keVのプラズマを長時間(19分)維持できた。



◆PWI

炭素堆積層におけるHeの吸蔵/放出挙動や、ICHとECHによる表面状態の違いが、定常放電に試料を曝露することで明らかになった。

◆定常

C(III)スパイク状信号の発生頻度がサイクル後半で増加することが明らかになった。



◆PWI

炭素堆積層の形成量がサイクル後半で増加した。フレーク状堆積物の形成やアーキングなどとの関係が示唆されるが、今後さらに検討が必要。