平成25年度PWI合同会合 平成25年8月29-30日 於:つくばサイエンスインフォメーションセンター大会議室

# 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

LHD NIFS

# 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ヘ与える影響の評価
- ▶ 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 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



#### 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)

- ・ 1x10<sup>19</sup> m<sup>-3</sup>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



# 【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 ダスト挙動評 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) −ス加熱低減

**(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@906/26

### (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Hel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)



26

・定常放電時の粒子バランス研究 ⇒Global particle balance (定常) + 材料分析 (PWI)

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
 ⇒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) : ICH+ECH (He) 948s + ECH (H) 175s 前半 (ECH) : 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)
 ト: ECH (He) 1000s
 後半 (ICH+ECH)
 ト: ICH+ECH (He) 1000s





### ICH長時間放電時のHe粒子供給量の変化





- 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 10/2	26

## 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



### 定常放電で問題となるHe保持/放出機構



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. ⇒温度が上がり易く,予期しないガス放出を招く
  - ⇒高い水素吸蔵能力を持っていることもわかっている.

→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





前半 He (ICH+ECH)+ H (ECH)試料は 2keV-Heを~10<sup>21</sup>He/m<sup>2</sup>照射した程度のダメージ 14/26

### 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~10<sup>19</sup> He/m<sup>2</sup>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.

<u>PWIの観点からわかっていること</u>

 ・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?



 $\checkmark$ 

・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

ICHアンテナファラデーシールド
 閉ダイバータドーム上
 閉ダイバータドーム下

3ヶ所に形成されたMixed-material 堆積層の微細構造解析を実施



# 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"



# 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<u>近距離輸送・</u> <u>再堆積</u>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"





- ◆ 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。

21/26



### 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





#### ◆時定数の長いPWI現象の解明

◆定常 1x10<sup>19</sup> m<sup>-3</sup>, 2.5 keVのプラズマを長時間(19分)維持できた.



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.



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。