

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 27 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420857

研究課題名(和文)実機プラズマ対向材料の表面変質が定常長時間放電に及ぼす影響の解明

研究課題名(英文) Effects of the surface morphologies on the plasma facing materials during the long pulse discharge in the large-sized plasma confinement devices

研究代表者

時谷 政行 (Tokitani, Masayuki)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：30455208

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：材料照射実験とその後の先進的ナノ加工技術による微細構造解析，吸蔵ガス原子の定量評価法を併用し，大型ヘリカル装置(LHD)のプラズマ対向材料の表面変質が定常長時間放電に及ぼす影響の解明を行った。

結果より，「1.ヘリウム照射による損傷形成」と「2.Mixed-material堆積層の形成」が「(1)壁排気の動的変化による密度制御の不安定化」および「(2)突発的な不純物混入によるプラズマ放電の停止」を招き，長時間放電を妨げていることが示された。対向材料に2種類以上の材料を使用しないこと。また，スパッタリング損耗を受け難い材料を使用することが，(1)と(2)双方の課題への解決手段と考えられる。

研究成果の概要(英文)：Effects of the surface morphologies on the plasma facing materials during the long pulse discharge in the large helical devices (LHD) were studied by means of material exposure experiments with a nano-fabrication technique and a quantitative analysis of the retained plasma particles on the plasma facing materials.

It was clarified that two major issues of the "dynamic change of the wall pumping rate" and the "termination of the discharge with the exfoliation of the mixed-material deposition layer" interrupt the steady-state plasma operation. Two physical processes of the "helium radiation effects" and the "formation of the mixed-material deposition layer" can change and control two major issues. If we wish to suppress two major issues, the plasma facing materials should be composed by single element, and low sputtering yield materials are possibly advantageous for reducing the thickness of the mixed-material deposition layer.

研究分野：核融合炉材料学

キーワード：プラズマ・壁相互作用 プラズマ核融合 電子顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

将来の核融合炉では、「高温プラズマ」を「定常長時間」維持しなければ、発電炉として成立しない。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)は、ヘリカル型のプラズマ閉じ込め装置であるが故に、トカマク型の装置と比較すると定常長時間の高温プラズマの維持に有利な装置である。図1に、LHDで定常長時間放電を実現するためのプラズマ壁相互作用(PWI)の観点からの課題とそれらを支配する物理素過程の全体像を、一本の木に例えた概念図で示す。「定常長時間放電」という木の頂点を安定して維持するには、それを支える4つの枝葉(課題)をうまく調整しなければならない。その枝葉とは、図中に示すように「①燃料粒子バランスの制御」、「②対向材料の損耗・劣化」、「③対向材料への熱負荷の制御」、「④不純物(ダスト)生成」である。

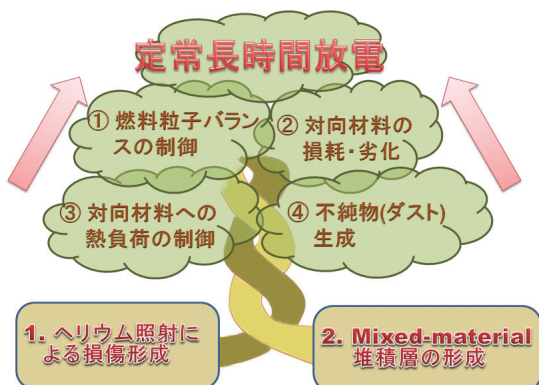


図1. 定常長時間放電実現のためのPWIの観点からの課題(①~④)とそれらを支配する物理素過程(1, 2)の概念図

これら4つの枝葉が、LHDの定常長時間放電に具体的にどのように影響を及ぼしているのかについて説明する。まず、図1の枝葉の①では、例えば、ある一日のLHD実験で供給された燃料粒子とポンプで排気された燃料粒子の積算を求めた場合、何らかのPWIが要因で供給した粒子の半分以上が、ポンプで排気されずにプラズマ真空容器の中に滞留、つまり、壁に吸蔵(壁排気)されたまま残っていることがわかっている。このような粒子の多くはそのままの状態では滞留され続けるわけではなく、定常長時間放電においては、局所的な壁材料の温度上昇が起因となり予期せず放出され、プラズマ密度のコントロールが失われる恐れがある。次に、図1の枝葉の②, ③, ④に関しては、LHDの長時間放電プラズマを観測している限り必ず目の当たりにする現象である「突発的な不純物混入によるプラズマ放電の停止」と深く関連している。LHDのプラズマ対向壁は第一壁がステンレス鋼(SUS316L)、ダイバータが炭素材でできているため、何らかのPWIが要因で壁材料表面にスパークが起これば、対向材料元素がプラズマ中に混入することがある。このような現象が頻発すると、安定した長時間放電を持続させることは困難となる。

2. 研究の目的

さて、ここで疑問となるのが、①~④の枝葉(課題)の引き金となっている何らかのPWIとは何か?である。それが、図1の木の根っこ部分に示した 1. ヘリウム照射による損傷形成, 2. Mixed-material 堆積層の形成であり、実はこの2つの物理過程が、4つの枝葉を支配していると言っても過言ではない。この説を裏付ける手掛かりが、平成20-22年度若手研究(B)「Mix-material 再堆積層の微細構造とプラズマ粒子の保持・放出挙動の解明」、および平成23-25年度(B)「先進的ナノ加工技術を用いたMixed-material 堆積層の構造特性評価」(共に申請者が研究代表者)で実施された研究課題で掘めている。

図2にそのデータの一つを示す。本図は、LHD壁表面に形成されたMixed-material 堆積層の透過型電子顕微鏡(TEM)による微細構造解析像である。この堆積層は、暗いコントラストを有する鉄(Fe)堆積層と明るいコントラストを有する炭素(C)堆積層が、放電の歴史と共に入り組んで堆積しており、まさにMixed-material 堆積層となっている。それだけでなく、拡大図(a)では、Heバブルも同時に含まれており、He照射損傷組織を含む極めて複雑な堆積層であることがわかる。本堆積層の結晶構造はアモルファス状であり、プラズマ粒子をよく吸蔵し、機械的に脆くはがれやすい構造であることが突き止められた。このような表面変質層の形成が、スポンジのように粒子を吸蔵しやすく、かさぶたのように剥がれ易い壁表面を作り、「突発的な不純物混入によるプラズマ放電の停止」をもたらしていると考えられる。このような表面変質が、Heを用いて行っているLHDの定常長時間放電にどのような影響を与えるのかを、定量的に示す研究はこれまでに行われていなかった。

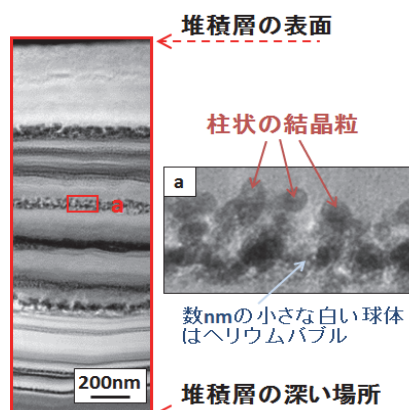


図2. LHD壁表面に形成されたMixed-material 堆積層の断面TEM像[Tokitani et al.]

本研究では、可動式試料駆動装置による材料照射と、その後の先進的ナノ加工技術(FIB)による微細構造解析、ガス原子の吸蔵量の定量評価(加速器&TDS)を併用し、LHDのプラズマ対向材料の表面変質、具体的には、1. ヘリウム照射による損傷形成, 2.

Mixed-material 堆積層の形成が、定常長時間放電に及ぼす影響を解明することを目的とした。さらに、安定した定常長時間放電のためには壁材料選定にどのような注意が必要とされるのか、その方策の提案も目指した。

3. 研究の方法

平成 26 年度からの 3 年間の研究計画を図 3 に示す。当初からの変更点を含めてこの図を基に以下に具体的内容を説明する。

【平成 26 年度】

LHD 既設の可動式試料駆動装置を用いて、LHD 定常長時間放電(He 放電)に試料(SUS316L, Si)を複数回曝露させた。加熱入力には主にイオンサイクロトロン共鳴加熱(ICRF)、電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)によって行われ、最も加熱入力ジュール数が高い放電では、加熱入力パワー $P_{ICH+ECH} \sim 1.2 \text{ MW}$ で、 $n_e \sim 1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $T_{i,e} \sim 2 \text{ keV}$ 、のプラズマを 48 分間にわたって維持した。

図 3 中の試料表面でのプラズマ壁相互作用(PWI)の模式図で示すように、プラズマ対向材料表面は、定常放電プラズマから He 粒子負荷と熱負荷を常に受け続ける。それにより、材料表面には点欠陥と呼ばれる A. He バブルと転位ループが形成されると同時に、B. 材料表面の損耗・再堆積が発生する。それらの影響で、C. 点欠陥への He 捕捉、D. Mixed-material 堆積層への He 捕捉などが起こり、表面近傍のマイクロ構造の変化と同時に粒子捕捉特性も刻一刻と変化を遂げる。平成 26 年度は試料の準備と材料照射、定常放電加熱入力と粒子供給の最適化、粒子バランスデータの解析に主眼を置いた。

【平成 27 年度】

平成 23-25 年度若手研究(B)で実施した、「先進的ナノ加工技術を用いた Mixed-material 堆積層の構造特性評価」の分析技術により、定常長時間放電曝露後の試料において、ナノ微細構造解析を実施した。具体的には、FIB により、図 3 中に示したようなイオンビームナノ加工を実施し、試料表面に形成された表面変質層から TEM で観察できる微細構造解析用のナノ断片薄膜を切り出し、TEM 観察を実施した。これにより、対向材料表面(特に第一壁材料:SUS316L)が、どのような照射損傷を受け、あるいはどのような Mixed-material 堆積層に覆われているのかについての知見を得た。

【平成 28 年度】

定常長時間放電曝露後の試料表面に捕捉された He 粒子を、昇温脱離ガス分析法(TDS)を用いて定量化した。また、加速器を用いたイオンビーム分析により、Mixed-material 堆積層の組成について高精度定量評価を実施した。以上の分析実験の結果を基に、単位面積当たりの He 捕捉量から LHD 壁全体の捕捉量を導出し、平成 26 年度に見積もったグロ

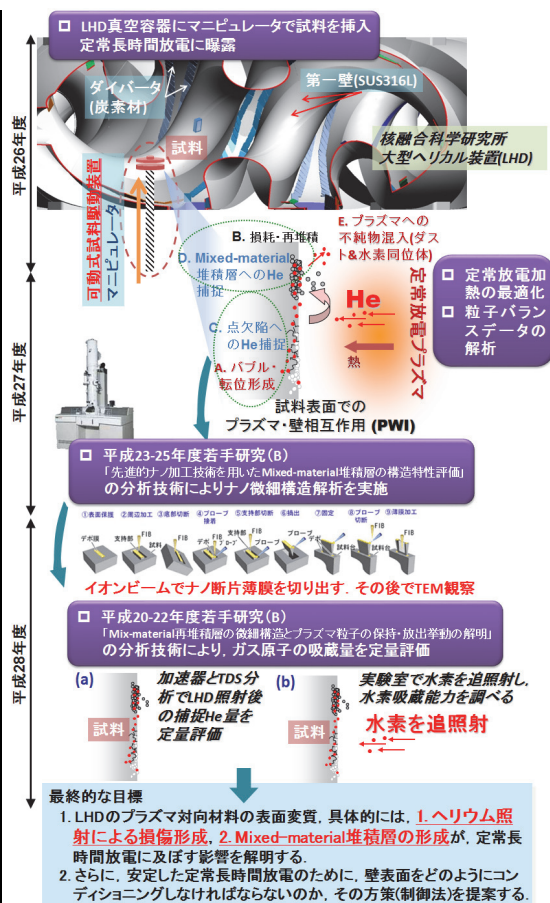


図 3. 研究の方法と期待できる成果

ーバル粒子バランスデータと比較を行った。結果より、どのような壁面状態が、定常長時間放電の粒子バランス制御に影響を及ぼしているのかを考察した。また、追加実験として、LHD 長時間放電曝露後の試料において、実験室で水素同位体を追照射し、定常長時間放電で変質を受けた壁面が、通常の壁面と比較してどの程度水素同位体を捕捉しやすくなっているのかを調べる予定であったが、これについては時間の関係で見送られた。

以上の実験結果を基に、

1. LHD のプラズマ対向材料の表面変質、具体的には、1. ヘリウム照射による損傷形成、2. Mixed-material 堆積層の形成が、定常長時間放電に及ぼす影響を解明した。つまり、1. と 2. が、「①燃料粒子バランス」、「②対向材料の損耗・劣化」、「③対向材料の耐熱負荷特性」、「④不純物(ダスト)生成」にどのように影響しているのかについて定量的な評価を実施した。(図 1 参照)
2. 安定した定常長時間放電のために、壁材料選定にどのような注意が必要とされるのか、その方策を検討した。

4. 研究成果

- (1) 壁排気率の動的変化による密度制御の不安定化

ICRF および ECH 加熱による He 長時間放電において、グローバル粒子バランス解析によって導出された最も長い 48 分間の放電時の壁排気率(Γ_{wall})の変化を表 1 に示す。壁排気

率(Γ_{wall})は大きく分けて 3 つの phase(1~3)に分類することができる。Phase 1 では、約 300 秒にわたって $\Gamma_{\text{wall}} \sim 1.0 \times 10^{20}$ He/s の高い壁排気率で、ほぼ 100%の He が壁に排気されていることがわかる。ところが 400 秒以降の Phase 2 では、それが一転してマイナスの壁排気率 $\Gamma_{\text{wall}} \sim -3.5 \times 10^{18}$ He/s となり、壁に捕捉された He が放出されている。マイナスの壁排気は 1500 秒程度まで継続する。一般的に考えて、壁が粒子放出に転じた場合、壁飽和現象が予想され、同じプラズマ密度・温度が継続される以上、壁排気が復活することは無いと考えていた。ところが、Phase 3 では、 $\Gamma_{\text{wall}} \sim 1.4 \times 10^{19}$ He/s で壁排気が再びプラス側に転じる現象が見られた。

この興味深い壁排気機構を担っている要因を突き止めるために、可動式試料駆動装置

	Phase 1 (0-300 s)	Phase 2 (400-1500 s)	Phase 3 (1900-2800 s)
Γ_{wall} [He/s]	-1.0×10^{20}	-3.5×10^{18}	-1.4×10^{19}

表 1. LHD 長時間放電における動的な壁排気率(Γ_{wall})の変化

を用いて、試料(SUS316L, Si)を計 1000 秒, 3389 秒, 9980 秒 He 長時間放電に曝露させた。図 4 は、それぞれの曝露時間後の SUS316L 試料表面を TEM によって断面観察した結果である。SUS316L 試料表面直下には He バブルによる損傷組織が形成されるだけでなく、表面上には 5nm, 15nm, 40nm の厚さを有する堆積層が形成されていることがわかる。堆積層の電子線回折図形から、その結晶構造はアモルファスに近いことを確認した。また、加速器を用いたラザフォード後方散乱法(RBS)による分析から、堆積層の組成は 1~2%程度の鉄元素を含む炭素で構成される Mixed-material であることがわかった。ダイバータタイル表面がスパッタリング損耗を受け、輸送された炭素元素が第一壁に堆積していると考えられる。放電時間が経過するにつれてその堆積量は増え続けている。Mixed-material 堆積層のみに捕捉された He 粒子の量を TDS 実験とその後のスペクトル解析により求めた結果、1000 秒, 3389 秒, 9980 秒曝露させた試料において、それぞれ 1.1×10^{20} He/m², 1.7×10^{20} He/m², 5.2×10^{20} He/m²であった。図 5 に、Mixed-material 堆積層の厚さとそこに捕捉された He 粒子の放電時間依存性を示す。放電時間が増加するにつれて Mixed-material 堆積層の厚さが線形的に増加し、そこに捕捉

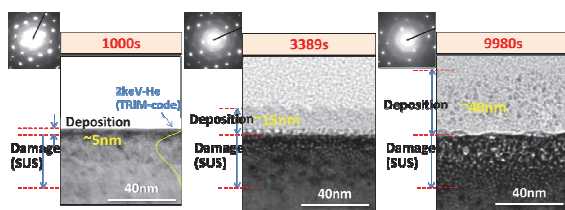


図 4. He 長時間放電に 1000 秒, 3389 秒, 9980 秒曝露した SUS316L 試料の断面 TEM 像。各試料の電子線回折図形を左上方に示した。

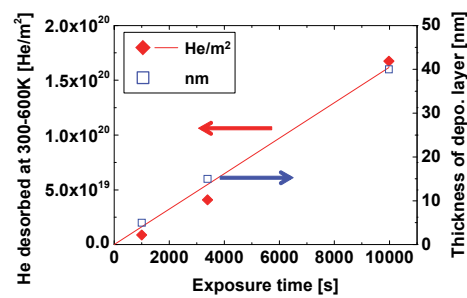


図 5. Mixed-material 堆積層の厚さとそこに捕捉された He 粒子の放電時間依存性。

される He 粒子量は堆積層厚さに比例して増加していることがわかる。この関係から求められる壁排気率は、Mixed-material 堆積層の形成面積が LHD プラズマ対向壁のおおよそ 3/4 と仮定した場合、 8.8×10^{18} He/m²s となる。この値が表 1 で示した Phase 3 の壁排気率に近いことから、LHD 長時間放電時の He 壁排気の担い手は、放電に伴って対向壁面に形成される炭素が主の Mixed-material 堆積層であると結論付けられる。Phase 1, 2, 3 のように、壁排気が動的に変化する理由は、Mixed-material 堆積層がプラズマからの輻射熱により温度上昇を受け、捕捉された He 粒子の脱離と捕捉が競合するためではないかと考えられる。動的な変化はプラズマ密度制御の不安定化を招き、定常状態から逸脱するきっかけと成り得る。このような動的変化の要因は主に Mixed-material 堆積層の形成によってもたらされるため、その形成を抑制する何らかの手段を検討する必要がある。これには、プラズマ対向材料に 2 種類以上の材料を使用しないことが好ましいと考えられ、スパッタリング損耗を受け難い材料の選択が適切であると考えられる。もしくは、Mixed-material 堆積層が形成されたとしても、表面での燃料粒子リサイクル率が 1、もしくは一定の割合で継続するように表面状態を操作し、壁排気を能動的に制御する方策が必要となる。

(2) 突発的な不純物混入によるプラズマ放電の停止

「1. 研究開始当初の背景」でも述べたように、「突発的な不純物混入によるプラズマ放電の停止」は、放電中に対向材料のある場所から局所的なスパークが発生し、プラズマ中で主に鉄と炭素の発光が顕著になり、放射崩壊に至る現象である。これは、LHD 長時間放電が停止する主な要因の一つである。局所的なスパークの原因を突き止めるために、スパークが発生した場所付近を目視で調べた結果、図 6 に示すダイバータタイル表面に行き着いた。図 6(a)では、かさぶたのような状態の堆積層が剥離しかけているところが目視で確認できる。このような剥離途中の堆積層が何らかのメカニズムで完全剥離の後、プラズマ中に大量に混入し、局所的なスパークをもたらししていると考えられる。堆積層剥離の特徴を調べるために、採取したかさぶた状

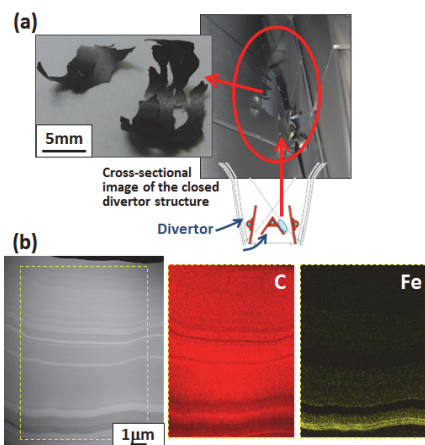


図 6. ダイバータ表面に形成された (a)Mixed-material 堆積層の写真と, (b) その断面 TEM 像および TEM 像に対応する炭素 (C) と鉄 (Fe) の元素マッピング像

の堆積層を FIB でナノ加工し, TEM によって断面微細構造解析を行った. その結果を図 6(b)に示す. 3つの像はそれぞれ TEM 像および TEM 像に対応する炭素 (C) と鉄 (Fe) の元素マッピング像を示している. 解析の結果, 堆積層はアモルファスに近いナノレベルで緻密な層状構造を有し, 炭素が主で鉄を僅かに含む Mixed-material 堆積層であることがわかった. また, 鉄の堆積層は全体の中でも深さ方向で底部に位置することが特徴であった. 後に述べるが, 鉄堆積層の深さ方向の場所が堆積層剥離に重要な意味を持っている. Mixed-material 堆積層がどのような機構で剥離に至るのかを調べるために, 第一壁に堆積基盤として設置した Si 試料上に堆積した Mixed-material 堆積層の分析, ダイバータ表面に堆積した Mixed-material 堆積層の分析など, 複数件の Mixed-material 堆積層の断面微細構造解析を実施した. 代表的な解析結果を図 7 に示した. 複数件の Mixed-material 堆積層の解析により, 堆積層の剥離機構は大きく分けて Type 1, 2 の 2 種類に分類できることが確認された. 図 7 は, Type 1, 2 それぞれの剥離機構を説明するための断面 TEM 像とそこから予想される剥離機構を示している. TEM 像中で暗く見える箇所は鉄を主とする場所, 明るく見える箇所は炭素を主とする場所である. Type 1 では, 堆積層形成の初期過程に鉄を主とする堆積層が厚さ 100-200nm で形成され, その後から 500nm を超す厚さの炭素を主とする堆積層が形成されている. この堆積層の考えられる剥離機構としては, 堆積層表面に何らかの熱負荷が入力され, 炭素が主の堆積層と鉄が主の堆積層の熱膨張係数の違いにより発生した内部熱応力が鉄堆積層に集中し, その応力が破断応力を超えたというものである. 一方, Type 2 は, 鉄が主の堆積層と炭素が主の堆積層が数百 nm のレベルで互いに入り組む中で, 鉄が主の堆積層に集中して数百 nm のオーダーのブリスタリングが発生し, 上方の層全体を

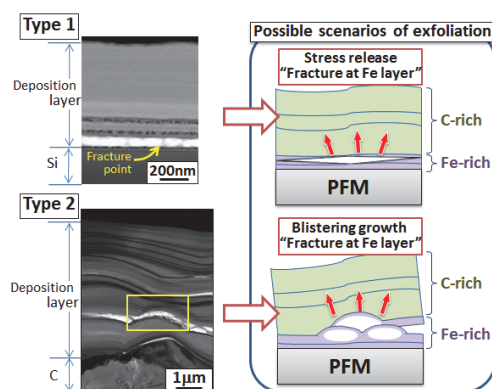


図 7. (Type 1) : LHD に設置した Si 基板上に堆積した Mixed-material 堆積層の断面 TEM 像と予想される堆積層剥離機構の模式図. (Type 2) : LHD 炭素製ダイバータ表面に堆積した Mixed-material 堆積層と予想される堆積層剥離機構の模式図.

持ち上げている状態である. このブリスタリングの層が剥離の基点となっていることがはっきりとわかる. ブリスタリングを発生している層構造の中には He 照射による影響と考えられる微細なバブル構造も含まれている. このように, Type 1, 2 の剥離機構は剥離の機構そのものは異なるが, いずれも Mixed-material 堆積層形成の初期段階に形成された鉄の堆積層が基点となってミリメートルあるいはセンチメートルスケールの大規模な剥離をもたらしていることが明らかである. おそらく, 純粋な炭素堆積層あるいは純粋な鉄堆積層であればこのような剥離には至らないと考えられる. 将来の核融合炉においてこのような剥離を抑制するには, やはり, 「(1) 壁排気率の動的変化による密度制御の不安定化」の節で述べた結論と共通であるが, プラズマ対向材料に 2 種類以上の材料を使用しないことが望まれる. 2 種類以上の材料を使用する場合でも性質の極端に異なるものの組み合わせは避けるべきである. また, 極力スパッタリング損耗を受け難い材料であることが好ましい. ITER の場合, 高 Z 材料であるタングステンと低 Z 材料であるベリリウムが組み合わせられた対向材料の使用が予定されており, どちらかと言えば性質の異なるもの同士の組み合わせとなる. したがって, ITER の場合にも LHD で観測されたような堆積層の剥離が発生する可能性が考えられる.

図 1 の木の絵で示した 1. ヘリウム照射による損傷形成, 2. Mixed-material 堆積層の形成は, LHD 長時間放電において, まず, 「(1) 壁排気の動的変化による密度制御の不安定化」を招くことに繋がり, 特に, Mixed-material 堆積層の形成を抑制あるいは制御する方策が必要であることが示された. 次に, 1. と 2. は, 「(2) 突発的な不純物混入によるプラズマ放電の停止」にも繋がり, 同様に He 損傷組織を含む Mixed-material 堆積層の形成を抑制あるいは制御する必要が

あることが示された。(1)と(2)双方の課題に共通して言える解決方法は、プラズマ対向材料に2種類以上の材料を使用しないこと。2種類以上の材料を使用する場合でも性質の極端に異なるものの組み合わせは避ける。また、極カスパッタリング損耗を受け難い材料を使用すること、であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に下線)
〔雑誌論文〕(計4件)

- ① M. Tokitani, S. Masuzaki, H. Kasahara, Y. Yoshimura, 以下省略6名, Initial growth phase of W-fuzz formation in ultra-long pulse helium discharge in LHD, Nuclear Materials and Energy (2017), 査読有, <http://doi.org/10.1016/j.nme.2016.11.023>, 印刷中
- ② M. Miyamoto, M. Yamamoto, T. Akiyama, N. Yoshida, M. Tokitani, A. Sagara, Application of optical reflectivity measurements to diagnostics for plasma facing materials, Nuclear Materials and Energy 9 (2016) 132-136, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nme.2016.08.012>
- ③ Y. Yoshimura, H. Kasahara, M. Tokitani, 以下省略29名, Progress of long pulse discharges by ECH in LHD, Nuclear Fusion 56 (2016) 046005, 査読有, doi:10.1088/0029-5515/56/4/046005
- ④ M. Tokitani, H. Kasahara, S. Masuzaki, G. Motojima, M. Shoji, Y. Ueda, N. Yoshida, Y. Yoshimura, 以下省略6名, Plasma wall interaction in long-pulse helium discharge in LHD - Microscopic modification of the wall surface and its impact on particle balance and impurity generation, Journal of Nuclear Materials 463 (2015) 91-98, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.062>

〔学会発表〕(計6件)

- ① Y. Yoshimura, H. Kasahara, S. Kamio, M. Tokitani, 以下省略26名, Progress of Steady State Operation Using RF Heating in the LHD, 26th IAEA FEC, Kyoto, Japan 17-22 October 2016
- ② M. Tokitani, S. Masuzaki, H. Kasahara, Y. Yoshimura, 以下省略6名, Tungsten fiberform nanostructure (W-fuzz) formation in ultra-long pulse helium discharge in LHD, 22nd International Conference on Plasma Surface Interactions, Rome, Italy, May 30-June 3, 2016

- ③ 時谷政行, 笠原寛史, 吉村泰夫, 以下省略10名, LHDヘリウム長時間放電におけるプラズマ壁相互作用, プラズマ・核融合学会 第32回年会 2015年11/24-27 名古屋大学

- ④ M. Tokitani, H. Kasahara, Y. Yoshimura, 以下省略10名, Microscopic modification of wall surface by helium bombardment and mixed-material deposition layer during a long pulse discharge in LHD ~its impact on steady state plasma operation~, 8th IAEA Technical Meeting on Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices, Nara, Japan 26-29 May 2015

- ⑤ M. Tokitani, H. Kasahara, S. Masuzaki, G. Motojima, M. Shoji, Y. Ueda, N. Yoshida, Y. Yoshimura, 以下省略6名, Microscopic modification of wall surface by helium bombardment and mixed-material deposition during long pulse discharges in LHD and its impact on the long pulse plasma operation 12th Japan-China Symposium, Shizuoka, Japan 17-20 September 2014

- ⑥ M. Tokitani, H. Kasahara, S. Masuzaki, G. Motojima, M. Shoji, Y. Ueda, N. Yoshida, Y. Yoshimura, 以下省略6名, Plasma wall interaction in long-pulse helium discharge in LHD ~Microscopic modification of the wall surface and its impact on particle balance and impurity generation~, 21st International Conference on Plasma Surface Interactions, Kanazawa, Japan 26-30 May 2014 【招待講演】

6. 研究組織

(1) 研究代表者

時谷 政行 (TOKITANI Masayuki)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号: 30455208

(2) 研究分担者

宮本 光貴 (MIYAMOTO Mitsutaka)
島根大学・総合理工学研究科・准教授
研究者番号: 80379693

笠原 寛史 (KASAHARA Hiroshi)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号: 50435517

吉村 泰夫 (YOSHIMURA Yasuo)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号: 90300730