

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：63902

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656579

研究課題名(和文)核融合装置における再堆積層形成機構解明への方向性からのアプローチ

研究課題名(英文)Study of the directionality on the redeposition layer in fusion devices

研究代表者

増崎 貴 (Masuzaki, Suguru)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：80280593

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：核融合装置真空容器内における損耗や再堆積層の形成は、プラズマ対向壁の寿命や燃料である水素同位体蓄積に関わる重要な研究課題である。本研究では再堆積層形成機構の理解を目的として再堆積層形成の方向性に注目した。単純な構造をもつ方向性マテリアルプローブ(DMP)を考案し、核融合研のLHD、九州大のQUESTの第一壁上の特徴的な場所にDMPを設置し、再堆積層に現れる方向性を調べた。LHDでは、第一壁上の再堆積層形成へのプラズマ流の影響は小さいことが分かった。また、LHD真空容器内の主たる材料である鉄と炭素について、場所によって堆積機構に異同があることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Material migration in the vacuum vessel of fusion devices is a crucial issue because it strongly affects the lifetime of plasma facing components and hydrogen isotope retention. In this study, I focused on the "directionality" to understand the mechanism of the redeposition layer formation. I designed the "directional material probe" which consists of the disk on which deposition layer is formed and the pin which makes shadow on the deposition layer if the deposits come to the probe with directionality. The probes were installed in LHD in NIFS and QUEST in Kyushu university. In LHD, it was revealed that the effects of plasma flow on the redeposition layer formation is weak. Carbon and iron are the main components of the in-vessel components of LHD. It was observed by the analysis of the probes that the deposition mechanism of them is same at some places and is different at the other places.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ・壁相互作用 LHD 材料輸送 堆積層 方向性 QUEST EDX グロー放電発光分析法

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め型核融合炉を目指した研究では、プラズマに面するプラズマ対向壁材料物質の再堆積過程が解明すべき一つの課題となっている。再堆積層は、燃料である水素同位体を巻き込んで堆積（共堆積）することによる真空容器内燃料蓄積の問題や、剥離による数マイクロメートルスケールのダストの発生に起因するプラズマ性能の劣化及び安全上の問題があるためである。これまで多くの核融合装置では、実験期間終了後にプラズマ対向壁の一部を取り出して調べる研究の他、材料試料を真空容器内の代表的な場所に設置して実験期間終了後に取り出して表面の堆積・損耗を調べる、いわゆるマテリアルプローブ法による研究が行われてきた。マテリアルプローブ表面を分析するとしばしば、損耗・堆積に方向性が観測されている。方向性は堆積層の断面観察などから解析され、堆積物の飛来方向の推定と、堆積の機構が議論されてきた。そこで、新たに考案した「方向性マテリアルプローブ」を真空容器内に多数設置して、再堆積層形成の方向性を系統的に調べることにした。

2. 研究の目的

本研究は、核融合装置真空容器内において再堆積層がどこに、どのように形成されるのかを、「方向性マテリアルプローブ」を用いて明らかにすることを目的とする。方向性マテリアルプローブにより再堆積層形成の方向性を調べ、プラズマの流れの方向や磁力線の方向との比較を行い、再堆積に方向性が現れる物理機構を明らかにする。得られた結果を基に、将来の核融合炉真空容器内で、どこにどのように再堆積層が形成されるか、予測可能なモデルを構築することを目指す。

3. 研究の方法

本研究の特徴は、極めて単純な構造の方向性マテリアルプローブ（Directional Material Probe, DMP）を用いることにある。DMPは、核融合研のヘリカル型核融合装置LHDにおけるマテリアルプローブ分析や真空容器内機器上で目視観測される方向性をもった堆積層形成から着想を得たものであり、図1に示したように、基盤上にピンを立てた構

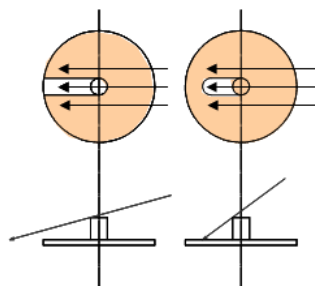
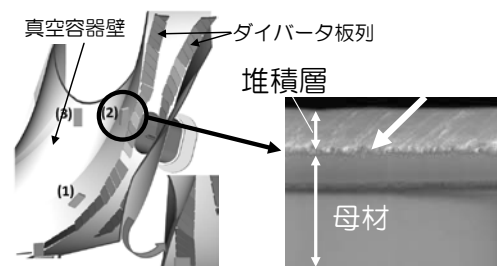


図1 堆積物飛来方向（矢印）と、期待される再堆積層（ハッチ部）の形成

造である。基盤上に堆積物が方向性をもって飛来すれば、堆積層にはピンの影ができる、と考えられる。もし、堆積物の飛来方向が一樣であれば、堆積層厚さは均等になるだろう。後者のような結果も、堆積層形成機構理解のために重要なデータとなる。DMPの場合、方向性のデータに限れば、解析にはそれほど時間はかからない。基盤上に堆積層ができれば、基盤表面の変色が起き、ピンの影を確認することができる。そのため、多くの試料をプラズマ真空容器内の多くの場所に設置しても比較的短い時間で分析を行うことができる。真空容器内の堆積物飛来方向マップを作成することができるのである。

これまで再堆積層に関する研究では、真空容器壁に試料ホルダを取り付けて、試料上に形成された再堆積層の組成や蓄積されている粒子種の分析が行われてきた。このような試料を用いると、試料設置場所での情報は得られるが、なぜ、どのようにこの場所に再堆積層が形成されるのかは単純にはわからない。図2にこのような試料の表面近傍の断面電子顕微鏡写真を示す。堆積層は斜め上方に向かって成長しており、図2（左）に示す場所に設置した試料の堆積層には、堆積物が方向性をもって試料に飛来していたことが示唆されている。このような方向性を真空容器内の多くの場所で調べることにより、大きな空間スケールで、堆積物がどこから、どのような機構で輸送されて再堆積層が形成されるのかを理解することができる。しかし、図2に示したような断面写真は容易には得られない。この写真は集束イオンビーム（FIB）法による断面薄膜試料を作成した後に透過型電子顕微鏡で観察したものであり、1回の観察に時間がかかるため、大量の試料の分析には不向きである。この点、DMPは有利である。



トラス内側側板上試料

図2 LHDで実験終了後に取り出された長期設置型マテリアルプローブの取り付け位置を真空容器のカットモデル中に示す（左図）。表面近傍の断面電子顕微鏡写真（右図）。堆積層の厚みは約1 μ mである。断面試料は集束イオンビーム（FIB）法により作成された。[1]

DMPで得られたデータから堆積物がどのように飛来するかに関する情報が得られた後、その方向性がなぜ現れるのかを理解する必要がある。プラズマ対向壁の配置など、機械

的な要因はもちろんあるが、プラズマ対向壁近傍のプラズマの流れや磁力線の角度などが方向性を決めることも多いと考えられる。本研究では、主として静電プローブを用いたプラズマ計測と、3次元プラズマ・中性粒子輸送コードであるEMC3-EIRENEを用いたシミュレーションにより、プラズマの流れ分布などのデータを取得、DMPのデータから得られる方向性に関するデータの物理的理解を得る。

実験は主として核融合研のLHDで行った。異なる磁場構造の2つの装置において堆積層形成の比較を行うため、九州大の球状トカマク装置QUESTにおいても実験を行った。LHDで2011年、2012年に使用したDMPの側面図を図3に示す。堆積層が形成されるdisk材料はSiとした。寸法は、直径30mmとした。また影を形成するためのピンは、DMP固定用のMoボルトの頭を用いることとした。ピンの高さは5.5mmとした。グロー放電洗浄時にdisk上の堆積層が損耗しないよう、diskは第一壁から電気的に絶縁した。MoとSiは、LHD真空容器内では多くは使われていない材料である。DMPは1実験期間を通して第一壁上に設置し、実験期間終了後に取り出して表面の目視観察、エネルギー分散型X線分光(EDX)などによる詳細分析を行った。従って本実験で得られた結果は、グロー放電洗浄や様々な実験の効果が積分的に反映されている。

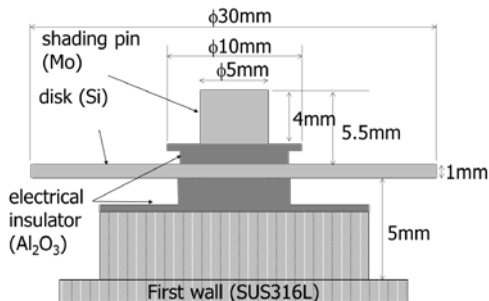


図3 DMPの側面図

4. 研究成果

LHDでは2011年～2013年の各実験期間に、第一壁の特徴的な位置に複数のDMPを設置した。2011年、2012年のDMP設置位置を図4に●で示す。実験期間終了後にDMPを取り出し、目視観察した結果を図5に示す。図5では、DMP上の堆積層に影が生成された場合、その向きと長さを赤線で示している。赤線がない場合は、DMP上に方向性が目視観測されなかったことを示している。これらの結果については、2011年及び2012年の実験で概ね再現されている。また2012年には、異なるトロイダルセクションにもDMPを設置したところ、トロイダルセクション間での大きな違いはなかった。堆積層の方向性は、多い場所では3方向も観測されている。図1で示した

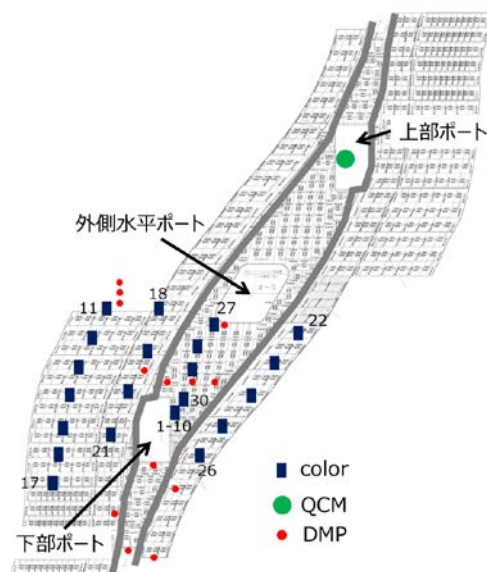


図4 LHDの真空容器展開図(1トロイダルセクション分)上に示したDMP、色分析用試料(color)、水晶振動子膜厚計(QCM)の設置位置。

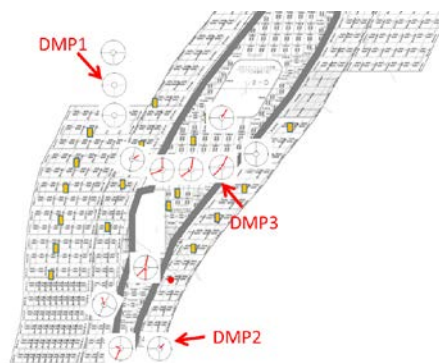


図5 DMP上の堆積層の影の向きと長さ。

ように、影のつき方から堆積物の飛来方向と角度が評価できる。観測されている方向性とそれぞれの場所の磁力線の構造とを比べると、堆積物は磁力線に沿ったプラズマ流に乗って堆積したものではない、と考えられる。

さらに図5中のDMP1～3について詳細な分析を行った。DMP1はLHDの縦長断面トーラス外側赤道面付近に設置された。図6にDMP1の設置状況写真と、ポロイダル断面上の位置を示す。また、図7にDMP1の写真を示す。図7から分かるように、DMP1上に方向性は観

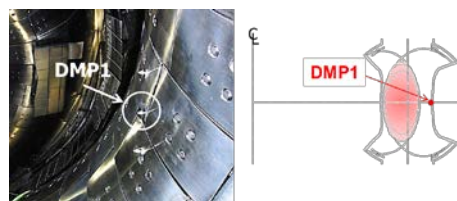


図6 DMP1の設置状況写真(右)とポロイダル断面上の位置(左)

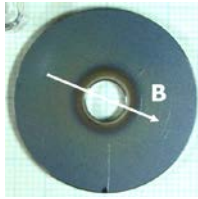


図7 DMP1の写真。矢印は磁場の向き

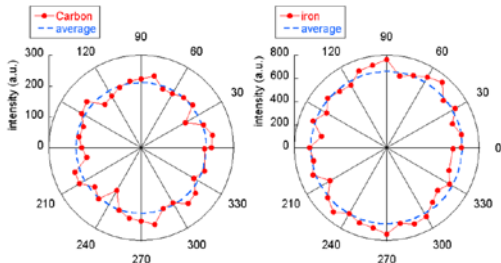


図8 DMP1表面からの特性X線強度の分布。(左)炭素、(右)鉄。

察されなかった。図8に、DMP1のEDX分析結果を示す。特にLHDのダイバータ板材料である炭素と、第一壁材料の主成分である鉄について、特性X線強度の分布を示している。炭素と鉄は、ほぼ等方的に堆積していることがわかる。これらの結果より、DMP1の位置では、磁場の方向に関係なく、炭素と鉄が等方的に飛来して堆積していることが示された。磁場の無いグロー放電時に、第一壁やダイバータ板が損耗し、この位置に堆積したと考えている。

図9にDMP2の設置位置の写真と、ポロイダル断面上のDMP2の位置を示す。DMP2はトラス内側部のヘリカルコイル容器側板に設置されていた。ダイバータ板列近傍である。図2に示した堆積層が形成された場所と、ほぼ同位置にあたる。図10にDMP2の写真を示す。堆積層には明確に方向性が見られる。方向性の向きは、磁力線の方向に対してほぼ垂

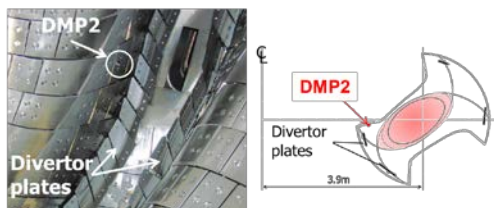


図9 DMP2の設置位置写真(左)とポロイダル断面上の位置(右)

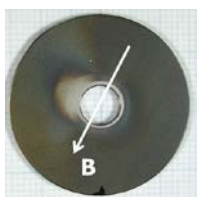


図10 DMP2の写真。矢印は磁力線の向き

直方向であり、DMP2の場合もDMP1と同様に、磁力線に沿ったプラズマ流によって輸送された堆積物ではないと考えられる。DMP2について、EDX分析を行った結果を図11に示す。

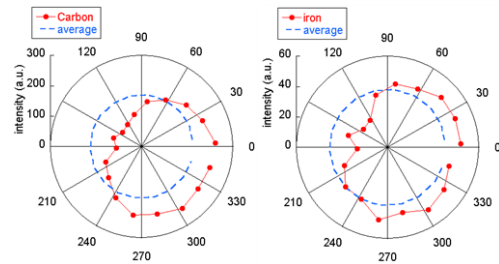


図11 DMP2表面からの特性X線強度の分布。(左)炭素、(右)鉄。

炭素と鉄ともに、特性X線の強度分布に強い方向性が見られる。参考文献[2]で行われた計算機シミュレーションにより、この位置には近傍のダイバータ板が損耗した炭素が直接飛来して堆積することが示されている。図2(参考文献[1])に示した堆積層の方向性は、計算結果と矛盾がないとされている。今回のDMP2の分析結果もまた同様に、計算と矛盾がない結果となった。興味深いのは、炭素と鉄が同じ方向性をもって堆積していることである。このことは、鉄もまた、近傍のダイバータ板上からDMPに飛来したことを示唆している。グロー放電洗浄の際に第一壁が損耗して鉄がダイバータ板上に堆積し、それがプラズマ実験時に損耗してDMP2の位置に堆積したため、炭素と鉄が同様の方向性をもつと考えられる。

図12にDMP3の設置位置の写真と、ポロイダル断面上のDMP3の位置を示す。DMP3はトラス外側の、ダイバータ板列間のプライベート領域のダイバータ板列に近い位置に設置されていた。図13にDMP3の写真を示す。

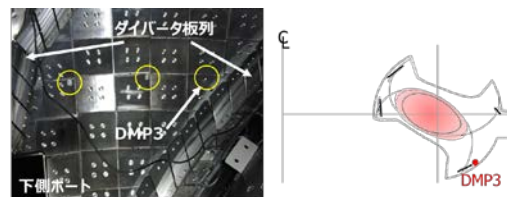


図12 DMP3の設置位置写真(左)とポロイダル断面上の位置(右)

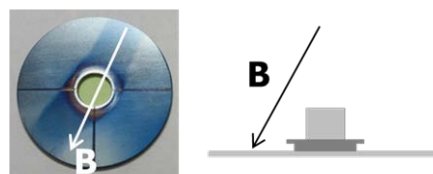


図13 DMP3の写真(左)。矢印は磁力線の向き。DMP3に対する磁力線の入射の様子(右)。

堆積層に、明確に2つの方向性が観測されている。写真では影が disk の端まで伸びていることから、堆積物は disk に対して浅い角度で飛来していると考えられる。一方、図 13 右に示すように磁力線の入射角は disk に対して深いことから、DMP3 の場合も、堆積物はプラズマ流に運ばれてきたものではないと考えられる。図 14 に、DMP3 について EDX 分析を行った結果を示す。DMP2 に比べると、特

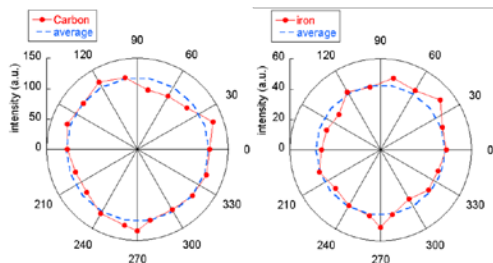


図 14 DMP3 表面からの特性 X 線強度の分布。(左) 炭素、(右) 鉄。

性 X 線分布に現れる方向性は強くないが、図 13 の写真と比べると、影ができて方向の炭素の強度がやや低いように見える。一方、鉄は写真で見られる方向性に対応するような強度の分布は見られない。このことから、DMP3 の位置では炭素と鉄が異なる機構で飛来して堆積したと考えられる。

2013 年の LHD 実験では、堆積層形成による色の変化にも着目し、DMP と合わせてカラーアナライザによる色の変化の定量分析を定量的に行えるような試料を設置した(図 4 の”color”試料)。これらの試料の分析を現在進めつつある。

九州大学の QUEST 装置における DMP の設置場所を図 15 に示す。DMP の disk 材料は、2011 年は Si、2012 年はアルミナを用いている。ピン材料は Mo である。2011 年の実験までは、DMP 表面に明確な堆積層は観測されなかったが、2012 年実験では、図 16 に示すように堆積層が形成された。①と③の試料に強度は弱い方向性が観測されている。方向性がどのような機構で形成されたのかは、現在検討中

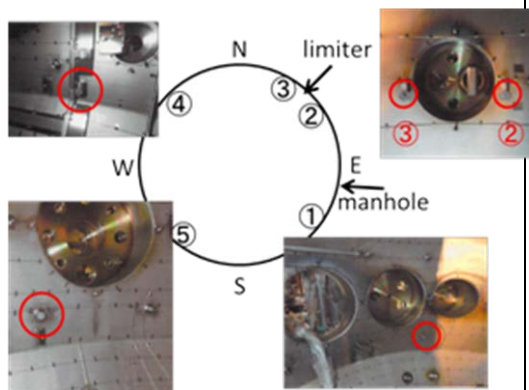


図 15 QUEST における DMP 設置位置。

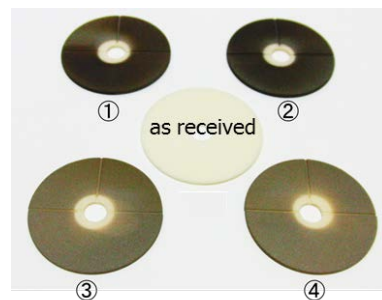


図 16 2012 年秋から冬にかけての実験終了後に取り出した DMP の写真。図中の数字は図 15 の設置位置に対応する。

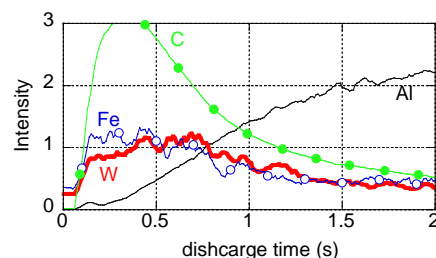


図 17 図 16 の DMP③の、グロー放電発光分析法による分析結果。炭素、鉄、タングステン、アルミニウムの深さ方向分布。

である。図 17 に、図 16 の DMP③についてグロー放電発光分析法を適用して堆積物の深さ方向分布を測定した結果を示す。鉄とタングステンが、ほぼ同じ形の分布となっていることから、これらが同じ機構で飛来して堆積したと考えられる。この機構についても現在検討中である。

以上をまとめると、

- (1) LHD において DMP を多数設置して堆積の方向性を調べた結果から、第一壁位置ではプラズマの影響は小さいと考えられる。
- (2) LHD 真空容器内の主たる材料である炭素と鉄について、場所により同じ機構で、あるいは異なる機構で堆積が起きていることが示された。このような物質による堆積機構の異同を議論できるのも DMP の特長である。
- (3) QUEST において DMP を設置して方向性形成の機構について検討中である。2012 年実験ではタングステンの堆積も観測されている。鉄とタングステンは同様の深さ分布で堆積していることを示した。
- (4) 今後は、LHD、QUEST で観測された方向性について、材料輸送を扱う計算機シミュレーションによる計算結果との比較を行い、将来の核融合炉における堆積層形成予測を可能としたい。

参考文献

- [1] M. Tokitani et al., J. Nucl. Mater. 417, 668 (2011).
[2] G. Kawamura et al., Contrib. Plasma Phys. 50, 451 (2010).

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は下線)

[雑誌論文] (計 1件)

S. Masuzaki, “Directional Material Probe for Deposition Layer Studies”, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 8 (2013) 1202110, DOI: 10.1585/pfr.8.1202110

[学会発表] (計 3件)

(1) S. Masuzaki, M. Tokitani, N. Yoshida and LHD experiment group, “A study of the material migration in LHD”, 21st International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, 27 May 2014, Kanazawa (Japan).

(2) S. Masuzaki, M. Tokitani, P. S. Bawankar, LHD Experiment group, “Deposition layer studies in LHD with directional material probe method”, 40th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2 July 2013, Espoo (Finland).

(3) 増崎 貴、時谷政行、バワンカ・プラカシュ、LHD実験グループ、「方向性マテリアルプローブを用いたLHDにおける堆積層形成機構研究」、プラズマ・核融合学会第29回年会、2012年11月30日、クローバープラザ(春日市)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増崎 貴 (MASUZAKI Suguru)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号：80280593

(3) 連携研究者

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

小林 政弘 (KOBAYASHI Masahiro)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：30399307

大野 哲靖 (OHNO Noriyasu)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60203890

渡辺 英雄 (WATANABE Hideo)
九州大学・応用力学研究所・准教授