

LHD ダイバータタイル上に形成された再堆積層中の水素同位体の定量評価

研究代表者名

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・時谷政行

研究分担者名

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・増崎 貴

東北大学・金属材料研究所・永田晋二, 土屋 文

1. はじめに

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)では、1999年よりヘリカルダイバータのタイルに等方性黒鉛(IG-430U)が使用され、金属不純物の減少やプラズマ蓄積エネルギーの増大など、LHD 実験の進展に大きく貢献した。しかしながら、炭素系の材料は金属材料に比べてスパッタ率が高く水素同位体の捕捉率が高いなどの特徴を有するため、ダイバータタイルに捕捉された水素量を定量的に評価することは、プラズマ制御において重要な課題である。さらに、LHDの第一壁はステンレス鋼(SUS316L)であるため、そこから放出されたFe不純物がタイル上に堆積することでタイル表面は金属不純物や炭素不純物が混在したMix-material再堆積層に覆われることがわかっている。実際に、LHDの長時間放電では、Feの混入により放電の持続が困難となることも報告されている。Feの混入源について現時点では明らかになっていないが、ダイバータタイル上に堆積したFeを含む層状の再堆積層からの混入も十分に考えられる。層状の堆積層には水素同位体が多量に捕捉されることが予想されるため、高性能プラズマ実現に向けてMix-material再堆積層の材料物性と捕捉水素量との関係を早急に把握する必要がある。本研究では、ラザフォード後方散乱方(RBS)、弾性反跳粒子検出方(ERD)の同時測定法からLHDのヘリカルダイバータタイル上のMix-material再堆積層の材料物性とそこに捕捉される水素同位体濃度の関係を明らかにすることを目的とした。

2. 研究経過

分析に用いたタイルは、トーラス内側のヘリカルダイバータタイルで、2003~2006年度にかけて使用されたものである。まず初めに、走査型電子顕微鏡(SEM)とエネルギー分散型X線分析装置(EDS)を用いて表面の形状と組成分布を導出した。図1に、分析したダイバータタイルの写真と表面のSEM像(a~d)およびEDSを用いて測定された元素組成分布(E,F)を示す。タイルの右側がダイバータプラズマのPrivate sideに対応する。また、(a~d)の各像はそれぞれダイバータタイル上に記した位置に対応し、比較のために未照射試料のSEM像(Virgin surface)も示した。

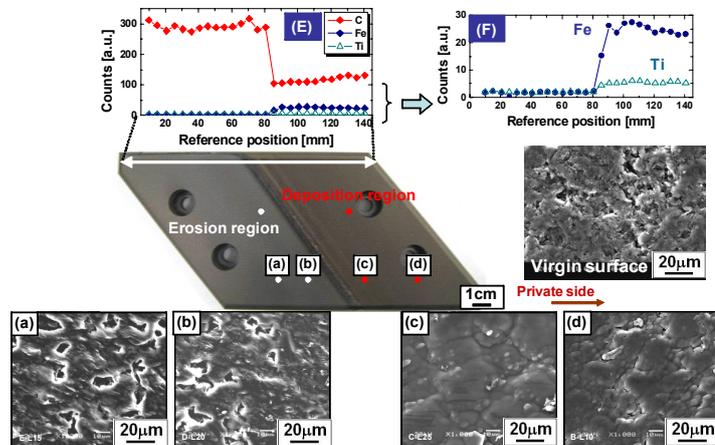


図1 ダイバータタイル表面のSEM像(a~d)とEDSを用いて測定された元素組成分布(E,F)

また、(F)は(E)の組成分布図においてFe, Ti部を拡大した図である。タイル表面にはダイバータプラズマのストライクポイントの変動に伴う複数の照射痕(フットプリント)が確認できる。タイル左側は等方性黒鉛本来の色(黒色)を有しているが、逆側(Private side)は茶褐色に変色していることから、左側はスパッタリング損耗、Private side側は不純物堆積が優位な領域に区分することができる。Private side側(c,d)のSEM像では数 μm の凹凸が見られ、EDS組成分布ではFe, Tiなどの金属系元素の堆積が他の場所と比較して顕著であることが確認できる。Feは、グロー放電洗浄(GDC)によって真空容器壁がスパッタされ、再堆積したため、Tiは壁コンディショニングで使用されるTiゲッターリング時のTiが要因と考えられ、この場所ではいわゆるMix-material再堆積層が形成されていることがわかる。一方、損耗領域の表面は比較的平滑であり、未照射試料に近いことが確認できる。また、EDS組成分布を見てもFe, Tiなどの不純物はほとんど確認されなかった。

3. 研究成果

今年度の共同研究では、特に、**Mix-material** 再堆積層にどの程度の水素同位体が捕捉されているのかについて、**RBS**, **ERD** の同時測定法により検証した。図 1 の写真のタイルを、東北大金研加速器の試料ホルダーに設置可能な大きさに切断し、測定を実施した。図 2 にその結果を示す。(a)は損耗領域、(b)は堆積領域の典型的なスペクトルである。**ERD** スペクトルでは、横軸が深さ方向の情報に対応し、縦軸が深さに対する水素の検出量(捕捉量)を示している。測定深さに対する水素の定量評価を実施するには、堆積層の物理量について慎重に検討する必要があるため、現時点ではまだ実施していない。これまでの測定結果から判断して、**Channel number** に対する深さの単位は $1.5 \text{ nm}/1 \text{ Channel}$ であると粗く予測することができる。同様に、**RBS** スペクトルでは、横軸が表面近傍元素の深さ分布に対応し、縦軸は後方散乱されたプローブビーム(**He**)の検出量を示している。損耗領域(a)では、**RBS** スペクトルより、表面に僅かの金属元素が検出されたものの、その量は極めて少ない。水素の深さ方向への分布については、表面にピークを持ち、深さ方向にかけて減衰していることが明らかとなった。このような水素の分布形状は、フレッシュな等方性黒鉛に水素イオンビームを打ち込んだ場合の分布に類似している。これに対して堆積領域(b)では、表面から深さ方向にかけて **C**, **Fe**, **Mo**, **O** を含む **Mix-material** 再堆積層が予想した通り形成されており、この場合の水素の深さ分布量は損耗領域と比較して極めて高く、表面から深さ方向にかけて多量の水素が捕捉されていることが明らかになった。本結果より、**Mix-material** 再堆積層が形成された表面には、通常の黒鉛表面と比較して極めて多量の水素同位体捕捉サイトが存在することが示された。

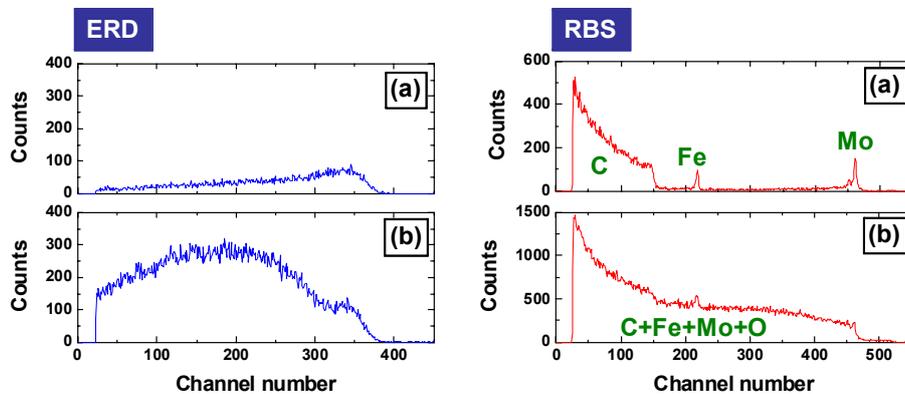


図 2 損耗領域(a)、堆積領域(b)における ERD と RBS スペクトル

4. まとめ

本研究結果より、**Mix-material** 再堆積層が形成された場合における水素同位体捕捉量について重要な知見が得られた。将来の核融合炉においては、炭素材料が使用される可能性が高いが、この場合のトリチウムインベントリーなどの安全面については、本研究結果を踏まえ慎重に検討する必要がある。さらに、再堆積層は機械的に脆く剥離し易い状態であることがわかっており、ダストとしてプラズマ中に混入した場合、その中には多量の燃料粒子が捕捉されていることになり、燃料粒子バランスを踏まえたプラズマ制御の観点においてもその制御法の確立を検討しておく必要がある。

プラズマ計測用ミラー材の光学的性質変化の基礎機構解明と材料創製

研究代表者名

九州大学・応用力学研究所・徳 永 和 俊

研究分担者名

九州大学・応用力学研究所・藤原 正、荒木 邦 明
九州大学大学院・総合理工学府 飯田 康 正
東北大学・金属材料研究所・永田 晋二、土屋 文

1. はじめに

本研究では、核融合炉のプラズマ計測用ミラー材に関して、以下の点を解明することを目的とする。

- (a)燃料である水素同位体及び核融合反応で発生するヘリウムビームの照射により発生するスパッタリング、プリスタリング及びフレーキング等による表面微細形状変化やプラズマ・壁相互作用により発生する不純物堆積による組成変化が光学的性質に及ぼす影響を明らかにする。
- (b)極表面内部において水素及びヘリウムビーム照射により形成されるバブル等の照射欠陥が光学的性質に及ぼす影響を明らかにする。
- (c)さらに、機構論に基づき、光学や固体物理学的考察による反射率低下の少ないミラー材を考案すると共に、低下した反射率の回復法を構築する。

2. 研究経過

昨年度は、Mo に対して、水素同位体及びヘリウム照射した場合の光学的性質変化について調べた。今年度は、プラズマ・壁相互作用により発生する不純物堆積による組成・組織変化が光学的性質に及ぼす影響を調べた。特に、現在建設中の国際熱核融合実験炉(ITER)では、第一壁に Be を使用するため、今回の実験では、Be を含む D-He 混合プラズマをダイバータの表面材料である W に照射し、対向する面に形成される堆積層の光反射スペクトルを測定すると共に、堆積層の組成及び D、He の深さプロファイルをラザフォード後方散乱法(RBS)及び弾性反跳粒子検出法(ERD)を用いて調べた。プラズマの照射条件は、照射中ほぼ一定に固定され、D と He のトータルのフラックスは、 $3 \cdot 6 \times 10^{22} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ で、入射エネルギーは 60eV である。また、W 試料の温度は、ほぼ 1123K に保たれ、照射時間を 1050s から 10100s 程度変化させた。D と He の比や Be の混入量は、分光測定により定量的に評価された。典型的な放電では、D に対する He の比は、0.2 である。また、表面形状を走査型電子顕微鏡(SEM)、原子間力顕微鏡(AFM)を用いて調べた。尚、透過型電子顕微鏡による組織観察のための金属薄膜試料も対向面に設置しており、今後、観察を進めて行く予定である。さらに、RBS 分析結果とシミュレーション計算を比較することにより、組成深さプロファイルを求めた。

3. 研究成果

W 試料の対向する位置に置かれたグラッシーカーボン表面には、堆積層が形成されており、照射時間が増すと共に、その厚みは増加している。照射時間が 10100s の試料では、表面には 100nm 程度のドーム状の形状が観察された。RBS 分析では、Be や O、C 及び照射試料の W やそのホルダー成分である Mo が検出された。W や Mo では、照射エネルギーの 60eV の D や He では、スパッタされないため、恐らく、O や C の不純物のスパッタにより放出し堆積したものと考えられる。また、RBS 分析結果とシミュレーション計算の比較により、堆積層の深さ方向の組成変化及び厚みを定量的に求めることができた。その結果、堆積層の組成は、殆ど Be であるが、深さ方向に対して C、W、Mo の組成の異なる層が層状に堆積していることがわかった。また、表面や層間の一部には、O の膜が存在している。ERD 分析では、堆積層中には、D や H、He が含まれており、スパッタにより W 試料表面から放出された Be と共堆積しているものと考えられる。光反射スペクトルでは、照射時間(堆積層の厚み)が異なる試料では、そのスペクトルが異なっており、また、厚みが厚い程、Be の光学定数から算出した反射スペクトルに近いものとなった。しかし、Be の光の浸透深さは、可視光域で 40nm であり、今回作製された堆積層は、これより厚い。従って、スペクトルの違いは、光学的性質が異なるためであると考えられる。この堆積層は、ミラーの光反射率を変化させ、さらに、水素同位体の吸蔵、リサイクリングに影響を与える。また、ダスト形成の要因となるものと考えられ、その特性をさらに把握することが必要である。

4. まとめ

本研究により、現在、国際協力で建設が進められている国際熱核融合実験炉(ITER)で発生する Be 混入 D-He 混合プラズマプラズマ・壁相互作用により形成される再堆積層の光学的性質及び組成や水素同位体等の保持特性を明らかにすることができた。