

TRIAM-1Mにおける長時間電流駆動放電時の不純物挙動と材料損傷

俵, 邦孝

徳永, 和俊
九州大学応用力学研究所 : 助手

藤原, 正

室賀, 健夫
九州大学応用力学研究所 : 助教授

他

<https://doi.org/10.15017/4743969>

出版情報 : 応用力学研究所所報. 75, pp.69-87, 1993-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



TRIAM-1Mにおける長時間電流駆動放電時の 不純物挙動と材料損傷

俵 邦 孝* 徳 永 和 俊†
藤 原 正‡ 室 賀 健 夫§
吉 田 直 亮¶ 伊 藤 智 之||
トリアムグループ#

概 要

実機トカマク装置におけるプラズマ対向材の原子レベルでの材料損傷を調べること及び長時間トカマク放電下における不純物発生・輸送挙動を調べ、不純物の低減化法を検討することを目的として、TRIAM-1Mにおいてコレクタープローブ実験を行うと共に、放電実験で使用されたリミターの損傷観察を行った。その結果、プラズマ放電に曝した試料には、高エネルギーの荷電交換中性水素粒子の照射による転位ループや低エネルギー水素照射による水素集合体が形成されることが明らかとなった。これらは、材料の劣化や水素リサイクリングに大きな影響を与えるものと予想される。また、長時間放電下ではリミターエッジ先端からの蒸発によりモリブデンが放出され主プラズマ中に混入するが、スパッタリング等により真空容器から放出される鉄、クロム等は、スクレイプオフ層のスクリーニング効果により主プラズマ中に混入し難いことがわかった。さらに、金属不純物の低減化法、及び長時間プラズマ放電における問題点について指摘した。

Key words : Plasma wall interactions, Tokamak, Long duration discharge, Hydrogen bombardment, Dislocation loop, Hydrogen cluster, Thermal heat load, Melting, Evaporation, Screening effect, Scrape-off layer

*九州大学大学院総合理工学研究科高エネルギー物質科学専攻修士課程（現三菱自動車工業㈱）

†九州大学助手、応用力学研究所

‡文部技官、九州大学応用力学研究所

§九州大学助教授、応用力学研究所

¶九州大学教授、応用力学研究所

#九州大学応用力学研究所

1 序 論

磁場閉じ込め型核融合炉では高温プラズマが磁場により真空容器に閉じ込められている。磁場に捕捉されない中性粒子、電磁波等は真空容器に直接衝突すると共に境界の周辺プラズマは壁と相互作用をする¹⁾。近年、トカマク型では、長パルス放電や高パワー入力加熱実験が行われ、プラズマ・壁相互作用による材料の損傷と共にこの際発生する不純物や水素リサイクリングがプラズマに大きな影響を及ぼすようになってきており、このプラズマ・壁相互作用の問題は核融合炉開発における重要な課題の一つとなっている^{2) 3)}。

JT-60, TETR, JET 等の大型装置をはじめ磁場閉じ込め型プラズマ閉じ込め装置においてプラズマ・壁相互作用に関する研究が行われている。しかし、これらのトカマク型装置では msec から sec オーダーのパルス放電が主流でありパルスの PWI の問題についての報告がほとんどである。しかし、将来の核融合炉ではプラズマの連続運転による定常放電時の PWI が問題となる。また、プラズマ対向材料の損傷に関しては、損耗等について調べられているが、材料の表面近傍の強度や化学的な性質及び水素リサイクリング特性等に影響を及ぼすことが予想されるプラズマ照射による原子レベルでの損傷に関する問題に対しては、ほとんど研究されていない^{4) 5)}。

そこで本研究では、実機プラズマ照射によって引き起こされるプラズマ対向材料内部の原子レベルでの損傷を調べることに、及び、長時間電流駆動放電時におけるプラズマ中の不純物発生源、輸送機構を明らかにし、不純物の低減化法を検討することを目的として、長時間の電流駆動放電が可能である超伝導強磁場トカマク TRIAM-1M においてコレクタープローブ実験を行うと共に放電実験に使用されたりミターの損傷観察を行った。

2 実験方法

2.1 実験装置

2.1.1 超高真空試料搬送装置

TRIAM-1M は、主半径 0.84m、リミター内径 0.24m×0.36m のトカマク型のプラズマ閉じ込め実験装置で、真空容器は Fe, Cr, Ni が主成分である SUS304 で製作されており、焼結 Mo 製のリング状固定リミターが 3 箇所に取り付けられている⁶⁾。図 1 に TRIAM-1M に接続されている超高真空試料搬送装置の写真を示した。図 2 は超高真空試料搬送装置の概略図である。ターボポンプが使用されており 5×10^{-9} Torr の超高真空まで到達する。真空チャンバーは、試料搬送室と試料準備室の 2 つに分かれており、コレクタープローブを試料準備室に挿入し、真空排気することにより試料搬送室の 10^{-9} torr オーダーの超高真空を壊さずにコレクタープローブをトライアム本体の真空容器のスクレイプオフ層に導入することができる。プラズマ放電後、コレクタープローブを取り出し、試料の観察及び分析を行う。

2.1.1 コレクタープローブ

図 3 に、前述の超高真空試料搬送装置の先端に接続されるコレクタープローブの概略図及び写真を示した。コレクタープローブには電子サイド、イオンサイドに一对の外部からの操作により回転可能な円盤型

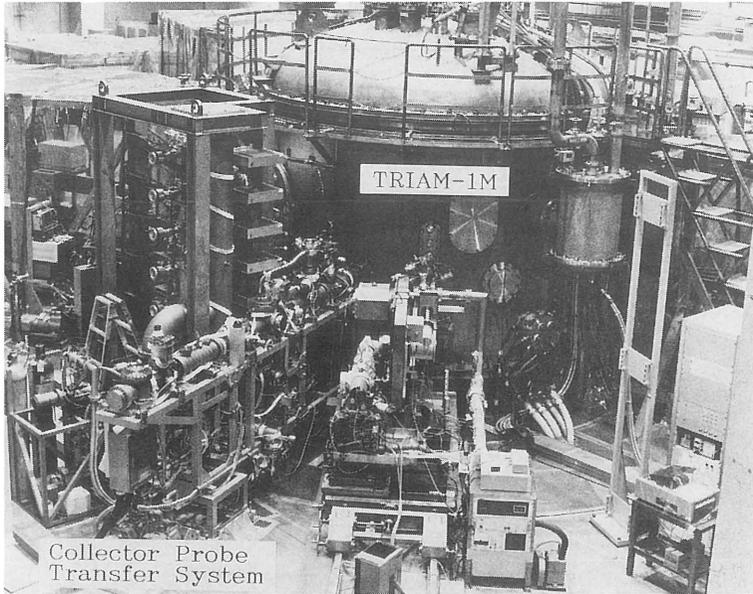


図1 TRIAM-1M に接続された超高真空試料搬送装置

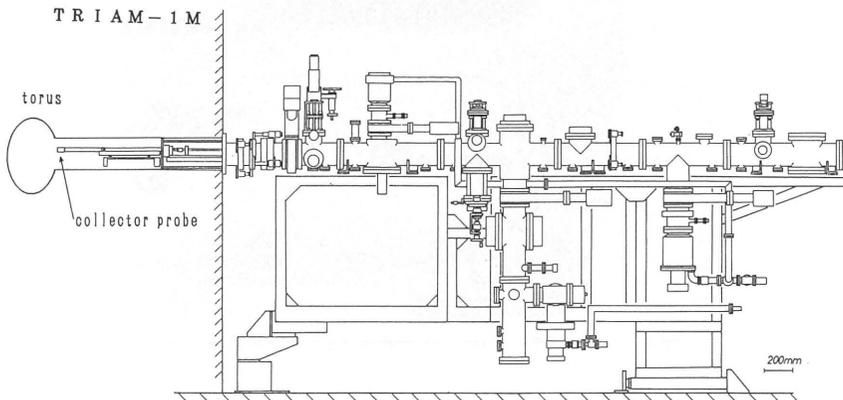


図2 超高真空試料搬送装置の概略図

試料を取り付けられ、開き角が 10° のスリットを通して飛来してきた不純物等が試料表面に付着し、堆積する。放電中この試料を回転させ、その後表面分析することによって、放電時間とプラズマからの距離の関数として不純物の堆積挙動を調べることができる。また、原子レベルでの照射損傷を調べるための電子顕微鏡用試料をプラズマサイド、電子サイド、イオンサイド、トップサイドに取り付けることができる。

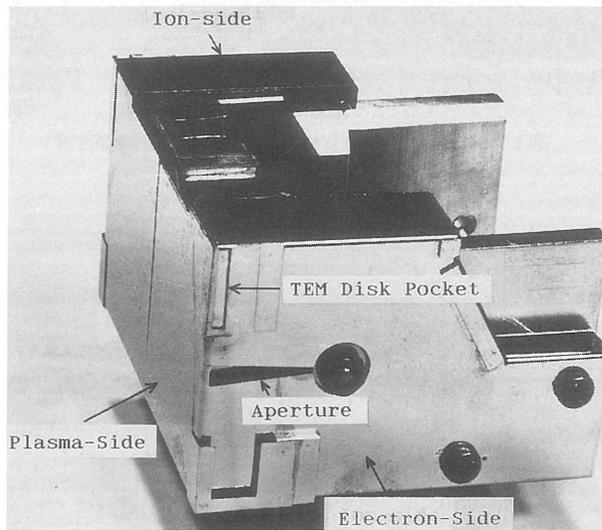
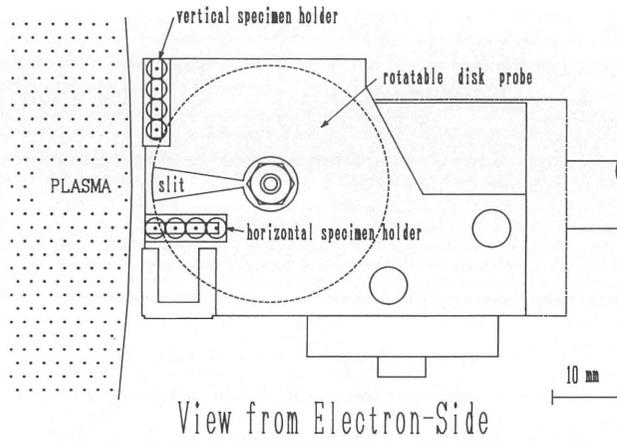


図3 コレクタープローブの概略図(上)とその写真(下)

2.2 試料

コレクタープローブのプラズマサイド、電子サイド、イオンサイドに、Cu, Mo, SUS304Lの電子顕微鏡用薄膜試料を装着した。またプラズマからの距離の関数として損傷および不純物堆積挙動を調べるために電子サイドとイオンサイドにAl薄膜試料を水平方向に四個並べて固定した。

2.3 放電条件

今回のコレクタープローブ実験は、放電時間が、 $t = 628$ (sec) と $t = 674$ (sec) の放電を2回行った。いずれの放電においてもプラズマ電流は、 $I_p = 23$ (kA)、線平均電子密度は、 $n_e = 2.0 \times 10^{18}$ (m^{-3}) であり、高周波の入力パワーは約20 (kW) であった。

2.4 分析方法

2.4.1 透過型電子顕微鏡観察及び不純物堆積分析

透過型電子顕微鏡 (JEOL JEM-2000FX) を用いて、電子顕微鏡用薄膜試料の組織変化を調べると共に、Al 薄膜試料の不純物堆積量を透過型電子顕微鏡 (TEM) に備え付けてあるエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) を用いて測定した。その際、Al 薄膜の分析部分の厚さを等厚干渉縞により評価し、これを用いて不純物堆積量の定量分析を行った。

2.4.2 電子線照射実験

Al, Mo, Cu の薄膜試料においてプラズマ放電により発生した欠陥の種類と同定のため、透過型電子顕微鏡 (TEM) による 200keV 電子線照射実験、超高圧電子顕微鏡 (HVEM) による 1MeV 電子線照射実験及びその場観察を行った。

2.4.3 Mo リミターの損傷観察

前述のコレクタープローブ実験を含め約2000回の放電実験に使用された Mo 製固定リミターを取り出し、表面形状を光学顕微鏡、走査型分析電子顕微鏡 (JEOL JSM-T300) を用いて調べた。また、Mo リミターとプラズマの相互作用の様子を調べるために、放電中のプラズマ断面のテレビ観察を行った。

3 実験結果

3.1 コレクタープローブ実験結果

透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察では、薄膜試料 (Al, Cu, Mo, SUS304L) に格子欠陥が多数観察された。以下に詳細について述べる。

3.1.1 Al 薄膜試料内部の損傷組織

図4に電子サイド、イオンサイド、プラズマサイドに固定された Al 薄膜試料の TEM 観察結果 (暗視野像) を示した。数字はプラズマエッジ (リミターの先端) からの距離 (単位 mm) を表している。プラズマに近い E-6.5 と I-9.5 を除いてプラズマ照射により欠陥が多数発生していることがわかる。像の特徴からこれらの欠陥は転位グループと考えられる。E-6.5 と I-9.5 の試料には、電子回折パターンに回折リングが観察されることや後述の EDS 分析結果から、内部損傷の発生は表面に堆積した厚い不純物層により妨げられたものと考えられる。また、プラズマエッジより 10mm 以上離れた部分におかれた試料は、真空容器の壁よりも外側でポートの影になるにもかかわらず欠陥が形成されている。

図5は Al 薄膜試料 (P-0.5mm 及び E-9.5mm) に発生した欠陥の深さ分布をステレオ法により測定したものである。欠陥は約 100 nm 以下の部分に存在しており、約 20~40nm の深さの所にピークを持っていることがわかる。

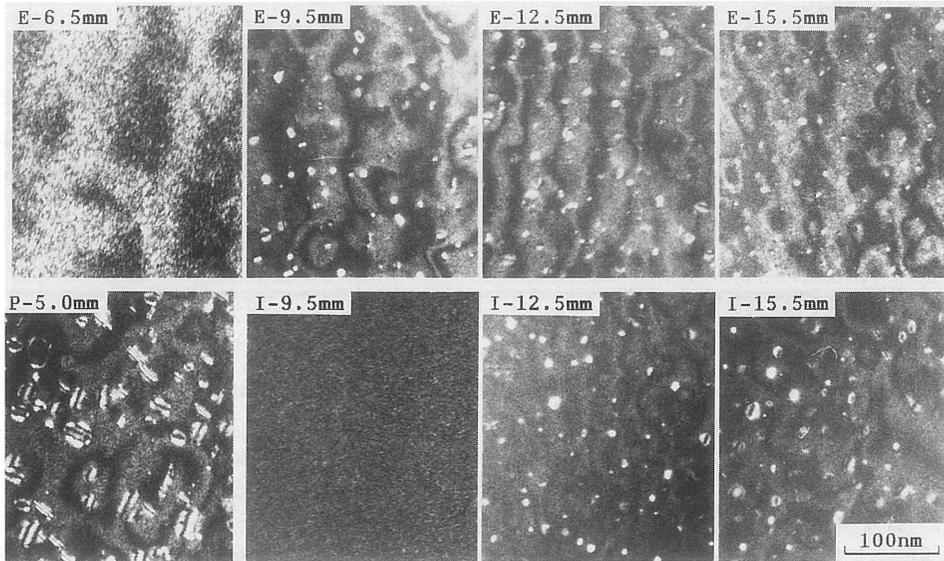


図4 Al 薄膜試料の損傷を示す透過型電子顕微鏡写真(暗視野像)
E, I, Pは, それぞれ電子サイド, イオンサイド, プラズマサイドを示している. 数字はプラズマエッジ(リミター先端)からの距離(mm)を表している.

3.1.2 Mo 薄膜試料内部の損傷組織

図6にMo 薄膜試料のTEM 観察結果(暗視野像)を示す. Mo は実際にリミター等にも使用されている. プラズマサイドに固定されたMo 薄膜試料には白いコントラストの欠陥が発生していた. 電子サイド, イオンサイドは上記で述べたような欠陥は観察されないが, 不純物の堆積が顕著である.

3.1.3 Cu 薄膜試料の組織観察

図7にCu の薄膜試料の暗視野像を示す. プラズマサイドではAl, Mo で観察されたものと同様な欠陥が発生している. ステレオ観察により欠陥は試料の最表面だけではなく, 内部にも形成されていることが確認された. 電子サイド, イオンサイドでは白いコントラストをもつ大き

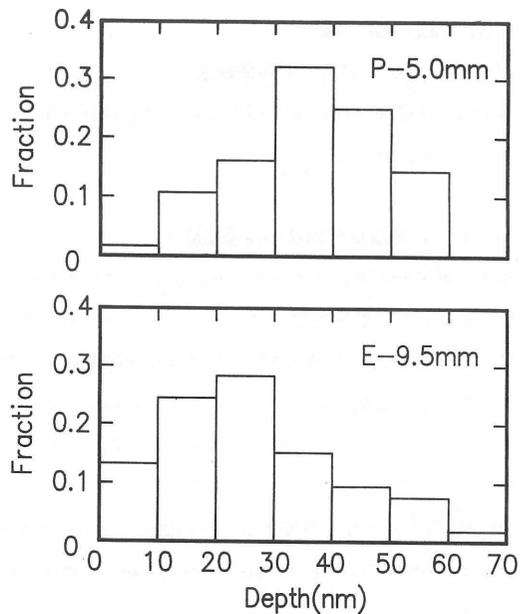


図5 Al 薄膜試料に発生した欠陥の深さ分布. P-5.0は, プラズマサイド, プラズマエッジから5mm外側の位置, またE-9.5は, 電子サイドプラズマエッジから9.5mm外側の位置に置かれた試料である事を示している.

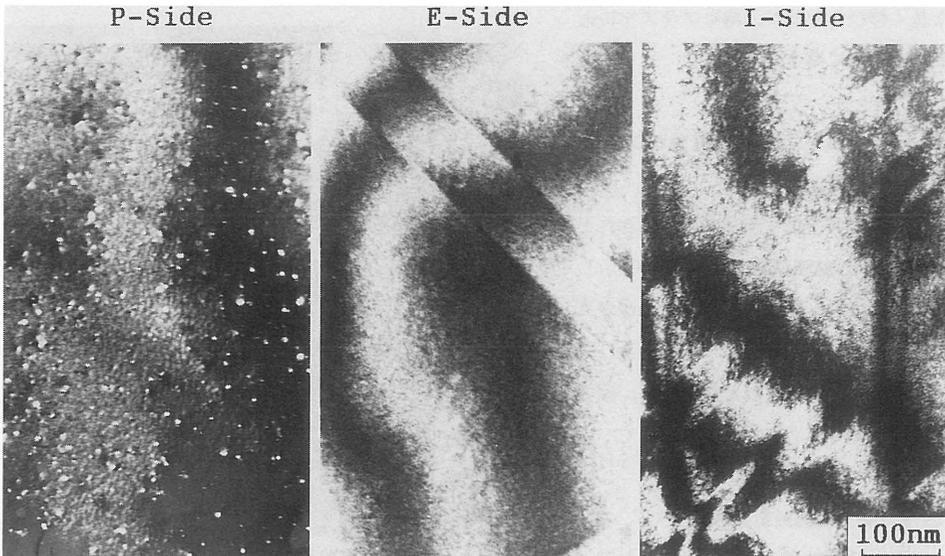


図6 Mo 薄膜試料の透過電子顕微鏡写真（暗視野像）
P-Side, E-Side, I-Side は、それぞれプラズマサイド、電子サイド、イオンサイドを示している。

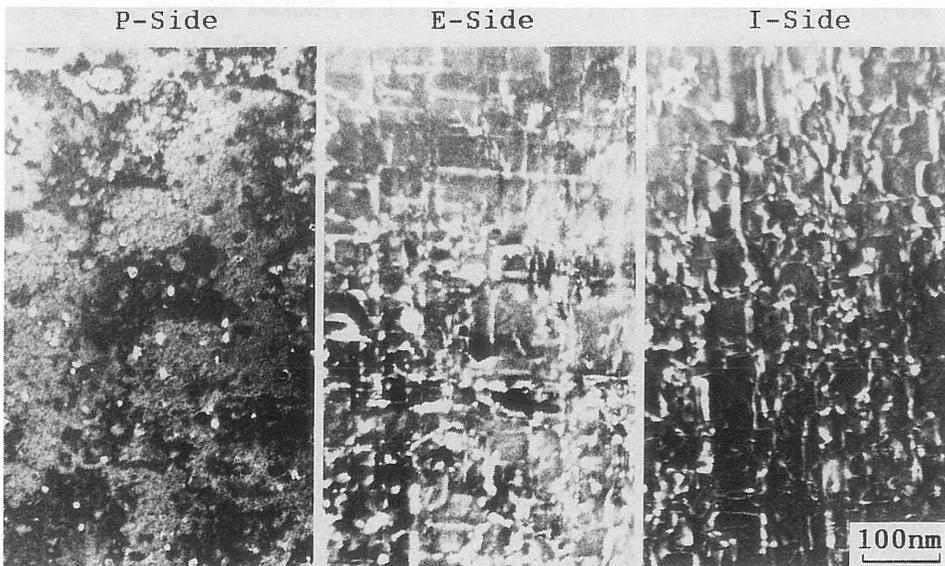


図7 Cu 薄膜試料の透過電子顕微鏡写真（暗視野像）
P-Side, E-Side, I-Side は、それぞれプラズマサイド、電子サイド、イオンサイドを示している。

な長く伸びた欠陥が、特にプラズマに近接した試料に発生している。

3.1.4 SUS304L 薄膜試料の組織観察

図8に、プラズマサイドに固定されたSUS304Lの薄膜試料の暗視野像を示した。白いコントラストをもつ欠陥が多量に形成されている。電子サイド、及びイオンサイドに固定された試料には、顕著な変化は見られなかった。

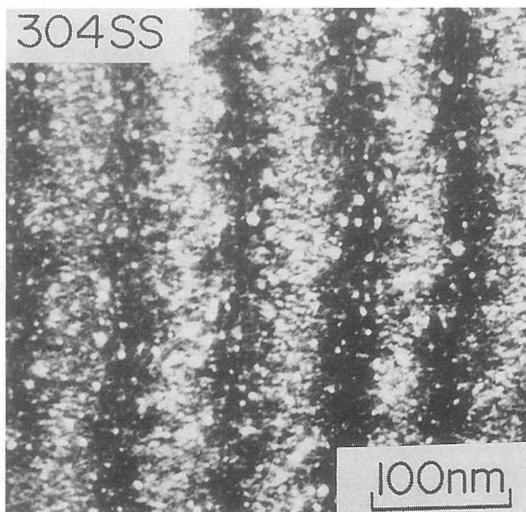


図8 SUS304L 薄膜試料の透過電子顕微鏡写真(暗視野像)
(プラズマサイド)

3.2 電子線追照射実験

欠陥の種類を調べるために行った電子線追照射実験の結果を示す。実験には、

不純物の堆積が少ないプラズマから離れた試料を用いた。

図9は、イオンサイドの12.5mmの位置でプラズマに曝されたAl薄膜試料を室温で200keVの電子線を照射した際の損傷組織変化を示す連続写真(暗視野像)である。写真の上部に記された数字は、電子線

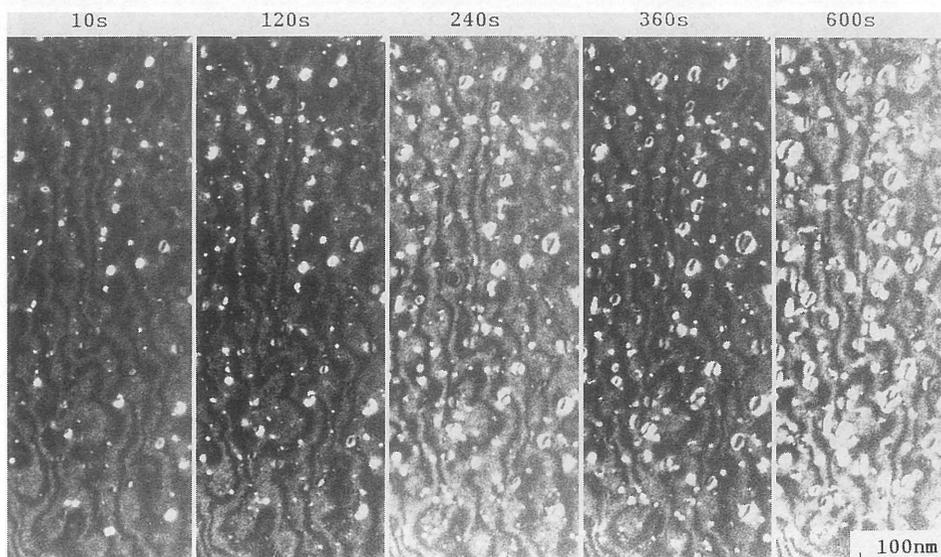


図9 Al 薄膜試料に発生した欠陥の電子線照射下の挙動
(電子線照射条件 200keV, 室温)

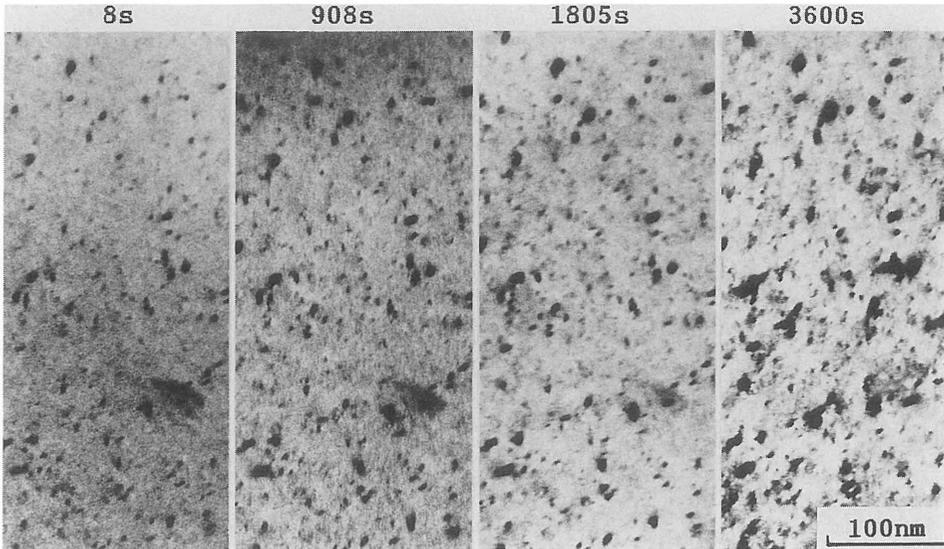


図10 Mo 薄膜試料に発生した欠陥の電子線照射下の挙動
(電子線照射条件 1MeV, 室温)

の照射時間を示したもので、いずれの欠陥も電子線照射により徐々に成長した。これらの欠陥は、照射によって発生する格子間原子を吸収しさらに成長していくことから、格子間原子型の転位ループであることが判明した。

図10(明視野像)は、プラズマサイドに固定された薄膜 Mo 試料を、室温で1MeVの電子線照射を約1時間行い、連続観察を行ったものである。黒いコントラストの欠陥は、電子線を照射することで徐々に成長していく。アルミと同様に、これらの欠陥も、コントラストの特長や、電子線を照射する事により、さらに成長していくことから、格子間原子型の転位ループであることが判明した。

図11(明視野像)は、プラズマサイドに固定された薄膜 Cu 試料を、室温で1MeVの電子線を照射しその場観察した連続写真である。欠陥が成長していくことからこれらの欠陥は Al や Mo に発生していた欠陥と同様に格子間原子型転位ループであることがわかった。

3.3 TEM-EDS 分析

図12は、放電においてリミターエッジから9.5mm外側に固定された Al 薄膜電頭用試料の TEM-EDS 分析結果である。Al 基盤上に不純物として Mo, Fe, Cr, Ni が検出された。図13は、薄膜 Al 試料に堆積した不純物の TEM-EDS 分析結果をもとに、リミターの先端(プラズマエッジ)からの距離の関数としてそれぞれのサイドにおける不純物量の堆積速度を求めたものである。記号 I-s はイオンサイド、E-s は電子サイド、P-s はプラズマサイドを示している。プローブ試料上には Mo, Fe, Cr, Ni が検出され、蓄積量はプローブを装着したサイドやプラズマからの距離に依存しており、プラズマからの距離が増すほど、著しく不純物の量が減少している。

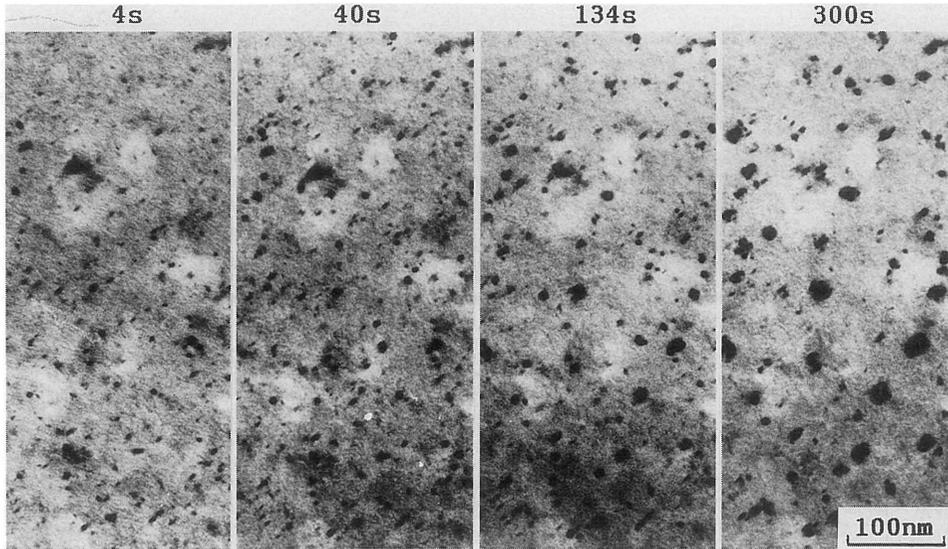


図11 Cu 薄膜試料に発生した欠陥の電子線照射下の挙動
(電子線照射条件 1MeV, 室温)

TN-5400 KYUSHU UNIVERSITY
Cursor: 0.000keV = 0

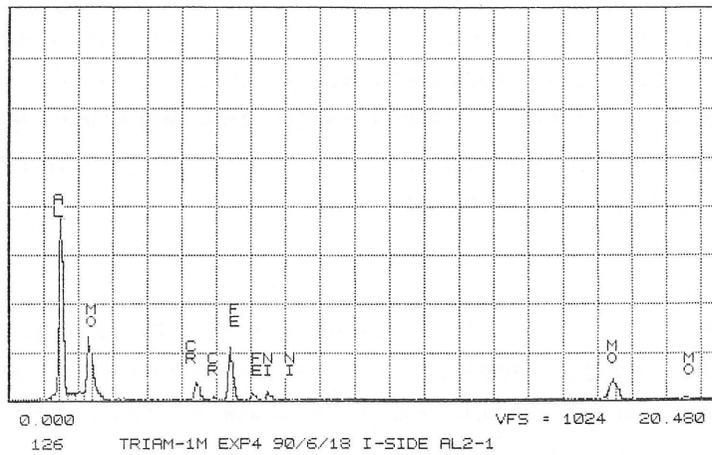


図12 リミッターエッジから9.5mm外側に固定された Al 薄膜試料の TEM-EDS 分析
(試料)

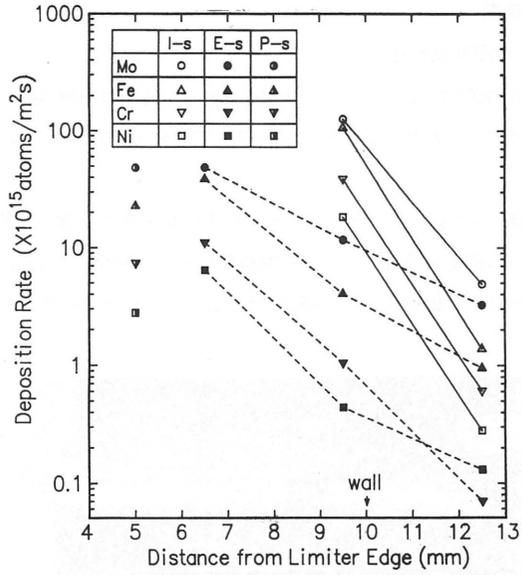


図13 不純物の堆積速度
(記号 I-s は、イオンサイド、E-s は、電子サイド、P-s は、プラズマサイドを示している。)

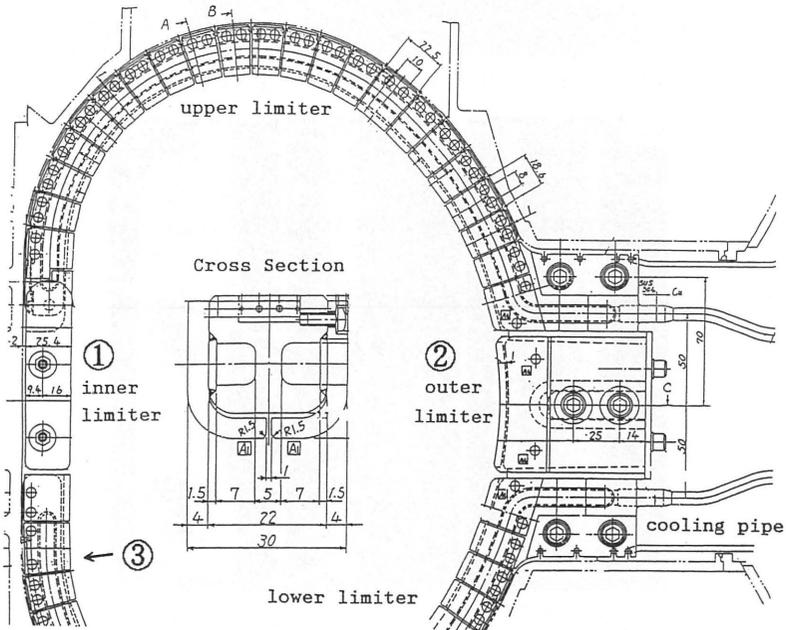


図14 リミターの断面図

3.4 Mo リミターの損傷

3.4.1 Mo リミター表面形状変化

図14は、リミターの断面図である。リミターは水冷されている SUS304 製の台座に取り付けられている。損傷は、局部的に発生しておりインナーリミタ①、アウターリミタ②で最も激しい損傷が発生していた。

図15は、最も損傷の激しい#4 ポートのアウターリミターをプラズマ側から撮影した写真である。特に、電子サイド側の部品の損傷が顕著で、大きな熱負荷によって発生したものと見られる溶融、亀裂、変形などが広い範囲にわたって観察された。図16に#1 ポートのインナーリミターの写真を示した。(a)、

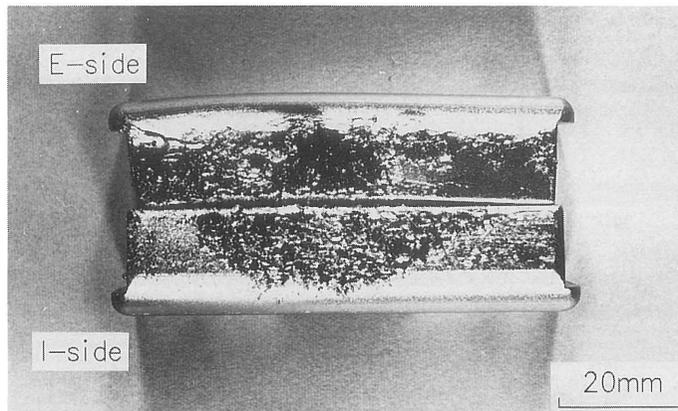


図15 #4 ポートの外リミターをプラズマサイドから撮影した写真

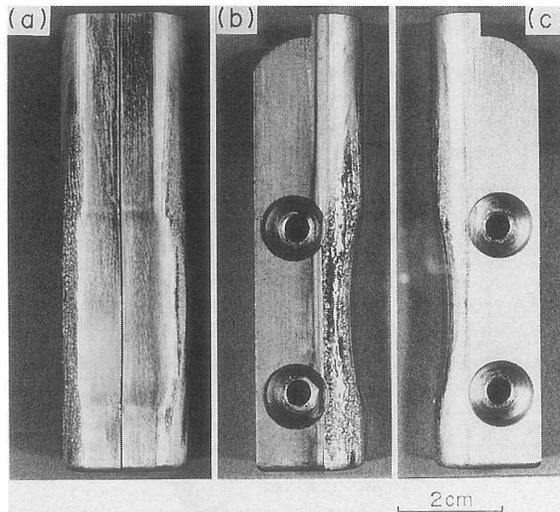


図16 #1 ポートの内リミターの写真 ((a)(b)(c) は、それぞれプラズマサイド、電子サイド、イオンサイドから撮影したもの)

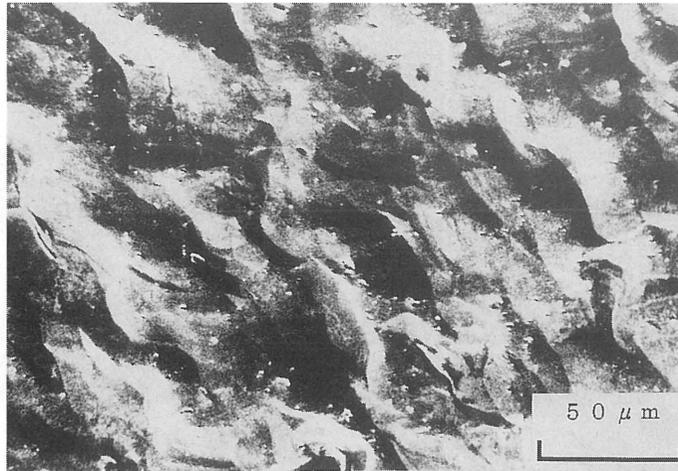


図17 下リミターの電子サイドに発生したスパッタリングを示す写真

(b), (c)は、それぞれプラズマサイド、電子サイド及びイオンサイドから撮影したものである。プラズマサイドの電子サイド側のエッジ部分は、広い範囲にわたり熔融凝固したことがわかる。凝固表面の形状は、激しく熔融し液滴が飛散している#4ポートのアウトターリミターとは異なり、比較的滑らかである。この差は、両者で熱負荷条件が異なることを示すもので、前者は、ディスプラブション時に msec の時間オーダで極めて高い熱負荷により発生したものと考えられ、後者は、長時間放電時に除々にリミターの温度が上昇し表面が熔融に至ったものと考えられる。また Mo 不純物の放出源となっていることが予想される。

リミターエッジよりやや離れているリミターの部分にスパッタリングによる損耗が観察された。図17は、図14に示された下リミターの③部品の電子サイド側のSEM像で、典型的なスパッタリングの損傷模様が見られる。このことは、リミターからは昇華、蒸発と共にスパッタリングによって Mo が放出されていることを示している。また、このスパッタリングによる損耗はプラズマから比較的離れた場所のリミター表面観察されていることから真空容器においても同様にスパッタリングによる不純物が発生しているものと予想される。

3.4.2 プラズマ断面の観察

プラズマ断面のビデオ画像を図18に示す。周辺部で強く光る部分があるがこれはプラズマが接した部分が加熱され発生していることを示している。特に、加熱が激しい場合には Mo の液滴が飛散するのが観察された。リミターの表面の温度は液滴が飛散すること等から、Mo の融点である2610°C以上上昇していると考えられる。これらのことにより、リミターから蒸発した Mo がプラズマ中及びスクレイブオフ層に混入していると考えられ、リミターの損傷観察の結果とも一致している。

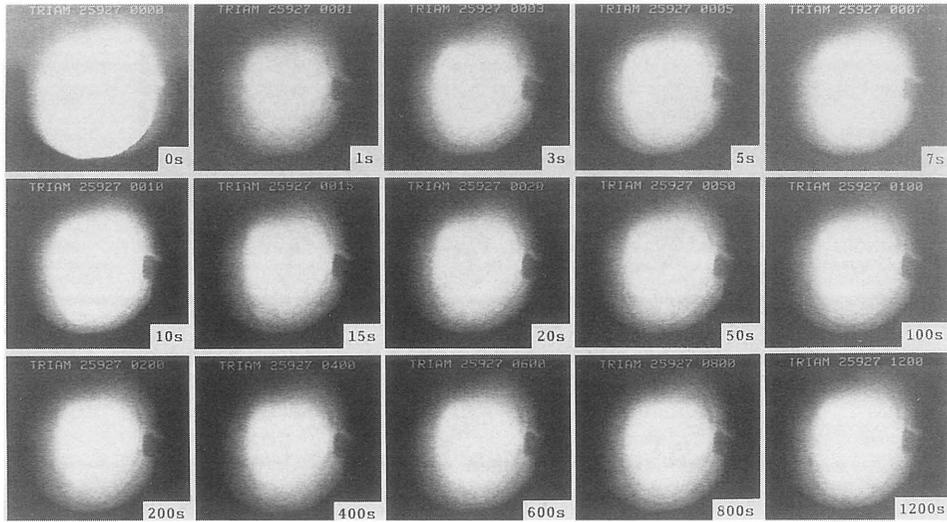


図18 プラズマ断面の連続ビデオ画像

4 考 察

4.1 中性水素粒子照射による弾き出し損傷

転位ループが形成されるには、原子の弾き出しが起こる必要がある。原子間の弾性衝突における最大の移送エネルギーは、二体衝突を仮定すると

$$2M_1M_2E/(M_1+M_2)^2 \quad (1-1)$$

と表すことができる。ここで M_1 , M_2 はそれぞれ入射粒子及び試料原子の質量, E は入射粒子のエネルギーである。この移送エネルギーが原子の弾き出しの最低しきいエネルギーよりも大きな場合, 弾き出しが起こる⁷⁾。弾き出しの最低しきいエネルギーの値⁸⁾と (1-1) 式を用いて, それぞれの試料において, 弾き出しを起こす水素の最低エネルギーを計算した結果を表1に示した。しきいエネルギーが最も大きい Mo の場合では, 弾き出しが起こるには 860eV のエネルギーの水素の照射が必要となる。本実験におけるプラズマの中心イオンエネルギーは, 約 0.6keV であるが³⁾, イオンエネルギーは中性粒子検出器で測定されている⁹⁾ ようにマックスウエル分布をしていると考えられ, エネルギー分布の中の高エネルギーのテール部分の水素粒子の照射により弾き出しが発生しているものと考えられる。

イオンサイド及び電子サイドの Al 試料においては, ポートの側面の陰となる真空容器の外側部に固定された試料にもサイズは多少小さいものの, 転位ループが形成されていた。水素イオンは, 磁力線に沿って移動するため, スクレイブオフ層の外側部分にはほとんど飛来しないものと考えられる。同様に,

表1 はじき出しが起こる水素の最低エネルギー (E) の値。E_d は, 原子のはじきだしのしきいエネルギーを示している。

	E _d (eV)	E (eV)
Al	16	116
Cu	25	406
Mo	35	858
W	40	1860

イオン化されている Mo, Fe, Cr 等の不純物の堆積が、この部分ではほとんど見られないことがこのことを示している。従って上記の転位ループは磁場に捕捉されない中性の水素粒子の照射により形成されたものと考えられる。特に、エネルギーの高いプラズマ中心付近において、荷電交換によって発生した中性水素粒子がそのまま真空容器付近の試料に衝突し弾き出し損傷を起し転位ループが形成されたものと考えられる。この中性粒子は、リミター近傍に多く存在するものと考えられるが、磁場の影響を受けないので、プラズマに対向する材料に衝突するものと思われ、比較的広範囲の領域に影響を与えることが予想される。

低エネルギー水素イオンによる照射組織観察実験の損傷組織と比較することにより水素粒子のエネルギーは、2keV 以下であり、フルエンスは、 $1 \times 10^{21}(\text{m}^{-2}) \sim 3 \times 10^{21}(\text{m}^{-2})$ であると評価された。

4.2 水素集合体の形成

イオンサイド、電子サイドに固定された Cu 試料には、転位ループとは異なる表面近傍に存在する大きく長く伸びた欠陥が観察された。keV 程度の水素イオンを多量に注入した金属において同様な欠陥が形成され、これらは水素集合体であることが知られている¹⁰⁾。従って、この欠陥は、スクレイブオフ層において磁力線に沿って運動する低エネルギーで多量に存在する水素イオンの衝突によって発生したものと考えられる。この水素集合体は、材料の劣化と共に水素吸蔵、水素リサイクリングに影響を及ぼすことも考えられ、今後定量的な評価を行う必要がある。

4.3 スクレイブオフ層における不純物挙動

ここでは、リミターや真空容器からの不純物の発生とそのプラズマへの輸送機構について考察する。3.3で述べたように Al 試料上には、リミター材である Mo と真空容器の主成分である Fe, Cr, Ni がほぼ同量程度堆積しており、このことはスクレイブオフ層ではこれらの不純物が同程度に存在することを示している。また、リミターの損傷観察やプラズマ放電中のプラズマの断面観察により、不純物は、Mo リミターのエッジからの昇華、蒸発、Mo リミターと真空容器からのスパッタリングにより放出されていることがわかった。一方、真空紫外分光による不純物測定の結果、プラズマ中の不純物としてはモリブデン、酸素が存在しているが、鉄、クロム、ニッケルは検出限界以下であることがわかった¹¹⁾。以上のことから、スクレイブオフ層では、モリブデン、鉄、クロム、ニッケルが存在するが、主プラズマ中は、モリブデン、酸素しか存在していないことが明らかとなった。

この結果は、以下のように説明することができる。すなわちリミターエッジより昇華、蒸発により放出されたモリブデンはそのまま主プラズマ中へ混入するが、真空容器やリミター側面からスパッタリングにより放出された鉄、モリブデン等はスクレイブオフ層においてスクレイブオフプラズマによる電子衝撃、イオン衝撃、光衝撃によりイオン化され、その後は、磁力線に沿ってトーラス方向に運動し、リミターの側面に衝突し表面に付着することにより主プラズマへの混入が抑えられているものと考えられる。酸素は、イオン化エネルギーが金属成分と比較して大きいことイオン化しにくいことや Fe 等と同様にイオン化されても、リミターの側面に衝突した際、ガス成分のため付着確率が低く、その多くは反射

するため主プラズマへ混入しやすいものと考えられる。

4.1項において推定した水素粒子の照射量とエネルギーを用いステンレス製の真空容器表面からスパッタリングにより放出される粒子数を求め、これがスクレイブオフ層をトラス方向に移動しコレクタープローブ試料表面に飛来すると仮定し堆積量を評価した結果について以下に示す。ステンレスの数keVの水素によるスパッタリング率は、最大でおよそ 10^{-2} atoms / particuleである。従って、フルエンスが 1×10^{21} / m^2 の場合、放出量は、 1×10^{19} atoms / m^2 となる。真空容器の面積を考慮すると総放出量は、概略 $\sim 10^{20}$ atoms程度である。さらにスクレイブオフ層の断面積及び放電時間を考慮すると堆積量レートは、 4×10^{18} atoms / m^2 secと評価される。図13の実験結果より、プラズマエッジ近傍のスクレイブオフ層の堆積レートはおよそ $10^{18} \sim 10^{19}$ atoms / (m^2 sec)と外挿されるので、上記の考察結果と概略としては一致している。このことは、真空容器から放出されたFe, Cr等の不純物はスクレイブオフ層におけるスクリーニング効果により主プラズマ中に混入しないことを裏づけている。

次に、電子衝突によるイオン化のrate coefficient¹²⁾を使いイオン化距離を求めた結果を示す。イオン化の平均自由行程 l_1 は、下記の式によって与えられる¹³⁾。

$$l_1 = v_i S_i / n_e \quad (1-2)$$

ここで、 v_i は、粒子の速度、 n_e は、電子密度、 S_i は、電子衝突によるイオン化のrate coefficientである。真空容器から、スパッタリングにより中性のFeが放出されたとする。スパッタリングにより、放出される原子の典型的なエネルギーは、数eVであるので、ここでは、放出されるFeのエネルギーは3eVとして計算を行った。この結果を図19に示した。スクレイブオフ層の電子のエネルギーは、数eVから数十eVと予想されまた、線平均密度は 2×10^{18} (m^{-3})であるので、電子のエネルギー及び密度を

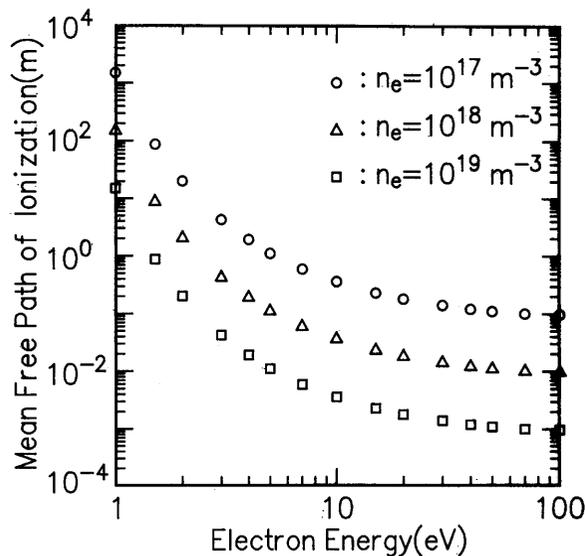


図19 イオン化距離の計算値

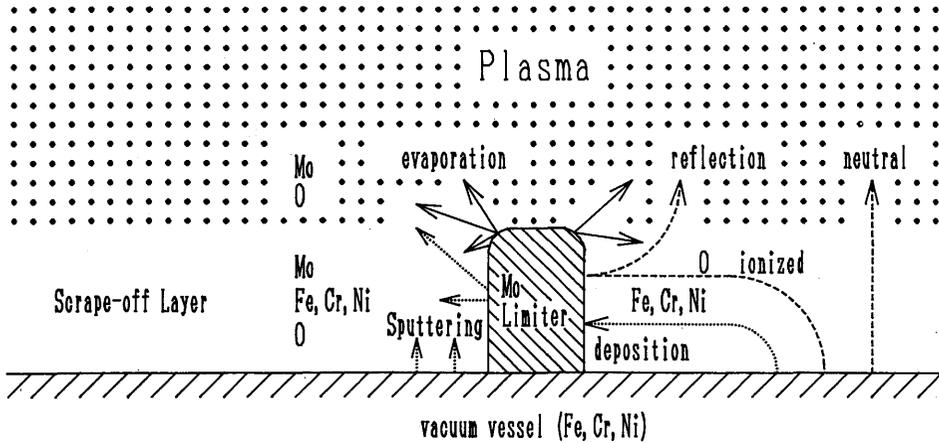


図20 スクレイプオフ層における不純物の挙動を示す概念図

20 (eV), $1 \times 10^{18} \text{ (m}^{-3}\text{)}$ とするとイオン化距離は、およそ18 (mm) となる。スクレイプオフ層の大きさは、10 (mm) なので、イオン化距離が18 (mm) では、Feの多くはプラズマ中に混入してしまうこととなり、上記の考察と矛盾している。この原因としては、電子衝撃以外のイオン化過程、たとえば光イオン化等が存在すること、壁から放出される原子が、中性ではなくイオンで放出される割合があること、rate coefficientの誤差が30%と大きいこと等が考えられ、さらに正確な計算を行う必要がある。図20に、以上のスクレイプオフ層における不純物挙動に関する概念図を示した。

4.4 プラズマ中の金属不純物の低減化法

TRIAM-1Mの長時間放電時の主プラズマに混入する不純物の放出機構は、Moリミターエッジ部分からの蒸発であることがわかった。蒸発量Jは、Langmuirの式により

$$J = (2\pi MkT)^{-1/2} P_0 \exp(-\Delta H/kT) \tag{1-3}$$

と表わされる¹⁴⁾。ここで、Mは、質量、kはボルツマン定数、Tは、表面温度、 P_0 は、平衡定気圧、 ΔH は、蒸発のエンタルピーである。また、表面の上昇温度 T_0 は、

$$T_0 \propto Ft^{1/2} \tag{1-4}$$

と表される¹⁵⁾。ここで、Fは、熱流束密度、tは負荷時間である。従って、以上の式より受熱面積を広くするにしたがい温度上昇が低くなり、これにともなって放出量は、指数関数的に減少することがわかる。また、エッジ部分は熱拡散が悪いのでエッジが少ない構造にすることも有効であると考えられる。さらに、放電時間が短い場合では材料の熱容量により熱を吸収することができるが、放電時間が、長くなると断熱系では材料の温度は無限に上昇するため、除熱の能力を高めることが特に必要である。

5 結 論

本研究では、実機トカマクプラズマ閉じこめ装置において長時間電流駆動放電時におけるプラズマに

よって引き起こされるプラズマ対向材料内部の損傷を調べ、またプラズマ中の不純物発生源、発生機構を明らかにし、不純物の低減化法を検討することを目的とし、コレクタープローブ実験とリミターの損傷観察を行った。その結果以下のことが明かとなった。

- (1) プラズマ放電に曝した薄膜金属試料には、転位ループ、水素集合体が発生していた。転位ループは、荷電交換中性水素粒子の照射によるはじき出し損傷により形成されたものと考えられる。また、水素集合体は、比較的低エネルギーの水素が、多量に照射されたことにより発生したものと考えられる。
- (2) これらの欠陥や水素は、材料の表面近傍の性質を変え、材料劣化や水素リサイクリングに影響を及ぼすものと考えられる。特に、中性水素粒子は、磁場の影響を受けないのでプラズマに対向する比較的広範囲の部分に影響を与えることが予想される。
- (3) リミター先端から蒸発により発生した Mo はそのままプラズマ中に混入するが、真空容器からスパッタリング等により発生した、Fe, Cr, Ni はスクレイブオフ層のスクリーニング効果によりリミターの側面にトラップされ、中心プラズマ中への流入はほとんどないことがわかった。
- (4) プラズマ中の金属不純物の濃度を下げるためには、特に Mo リミターの先端からの蒸発を抑えることが必要で、リミターの温度を下げるためにリミターの冷却能力及び構造の改善を行うとさらに良好な結果が得られると考えられる。
- (5) 定常プラズマ放電では、ディスラプション時の短時間の熱負荷とともに長時間にわたる熱負荷により加熱されるプラズマ対向材の効率的な除熱を行うこと重要であることがわかった。

参 考 文 献

- 1) D. E. Post and R. Behrisch (Eds.), Physics of Plasma-Wall Interactions in Controlled Fusion (Plenum, New York, 1986)
- 2) 徳永和俊, 藤原 正, 吉田直亮, 室賀健夫, 伊藤智之, トライウムグループ: 九州大学応用力学研究所所報 第68号 平成元年 p. 365
- 3) M. Ulrickson, the JET Team and TFTR Team: J. Nucl. Mater. 176 & 177 (1990) 44.
- 4) S. Veprek, M. D. Wiggins and R. Gotthardt: J. Nucl. Mater. 140 (1986) 28.
- 5) K. Tokunaga, T. Muroga, Y. Miyamoto, T. Fujiwara, N. Yoshida, K. Nakamura, N. Hiraki, S. Itoh and the TRIAM Group: J. Nucl. Mater. 179-181 (1991) 356.
- 6) S. Itoh, N. Hiraki, Y. Nakamura, K. Nakamura, A. Nagao, S. Moriyama, T. Fujita, E. Jotaki and S. Kawasaki: Plasmas Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Vol. 1 (IAEA Vienna) p. 733.
- 7) 日本金属学会編; 原子力材料 日本金属学会 (1989) p. 36-p. 75
- 8) N. L. Petersen and S. D. Harkness (Eds): Radiation Damage in Metals, American Society of Metals, Ohio, (1975).
- 9) 永尾明博, 川崎昌二, 上瀧恵理子, 森山伸一, 中村一男, 平城直治, 中村幸男, 伊藤智之: 九州大学応用力学研究所所報 第66号 昭和33年 p. 401.

- 10) N. Yoshida, N. Ashizuka, T. Fujiwara, T. Kurita and T. Muroga: J. Nucl. Mater. 155-157 (1988) 775.
- 11) 深見 大, 川崎昌二, 上瀧恵理子, 藤田隆明, 森山伸一, 永尾明博, 中村一男, 中村幸男, 伊藤智之: 九州大学応用力学研究所所報 第73号 平成4年 p. 57
- 12) W. Lotz: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching bei München IPP 1/76
- 13) 川村孝式: 核融合研究 第56巻第5号 (1986) 305.
- 14) S. Dushman: Science Foundation of Vacuum Technique (Wiley, 1963)
- 15) H. S. Carslaw and J. C. Jaeger: Conduction of Heat in Solid (Oxford University Press, 1959)
(平成5年5月28日受理)