

JT60ダイバータタイルにおける 炭素再堆積層の損耗特性

**日本原子力研究所 那珂研究所
谷口 正樹、江里 幸一郎**



研究の背景

- 炭素系のプラズマ対向材料はプラズマからの高い熱・粒子負荷を受けることにより、表面には昇華による損耗や炭素の再堆積など様々な変質が生じる。
- ダイバータのストライキングポイント近傍では、表面には炭素の再堆積層が形成され、これが材料の損耗特性に大きな影響を与えるものと予想されている。
- 特にITERダイバータのアーマ材の寿命は炭素の再堆積による効果を考慮に入れているため、その損耗特性を把握することは極めて重要である。



研究の内容

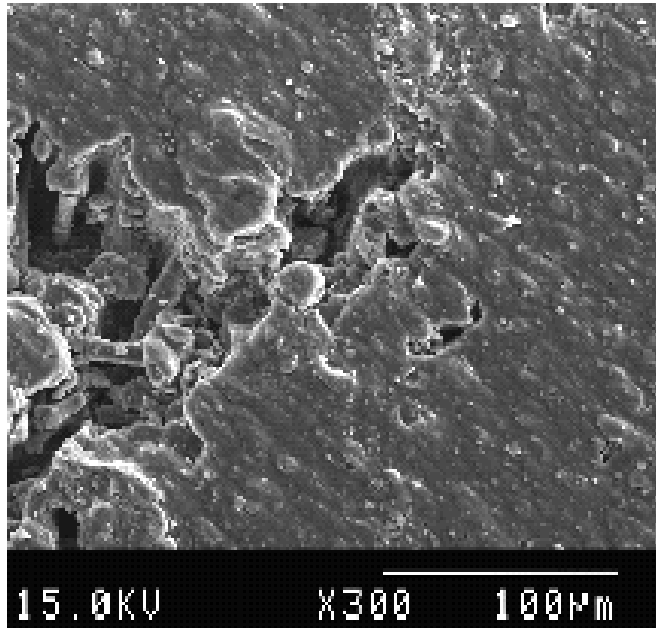
- JT-60で水素放電実験で使用されたダイバータタイルを用いて再堆積層の損耗特性を評価
 - タイル表面のSEM観察
 - 低エネルギー水素粒子照射装置によるスパッタリング試験
 - 電子ビーム照射装置によるディスラプション損耗試験
(熱負荷 $>1000\text{MW}/\text{m}^2$)
- カーボン-タングステン混合材の損耗特性評価
 - カーボン、タングステン電極間のアーク放電を利用して、混合材を作成
 - 混合材の低エネルギー水素粒子によるスパッタリング試験



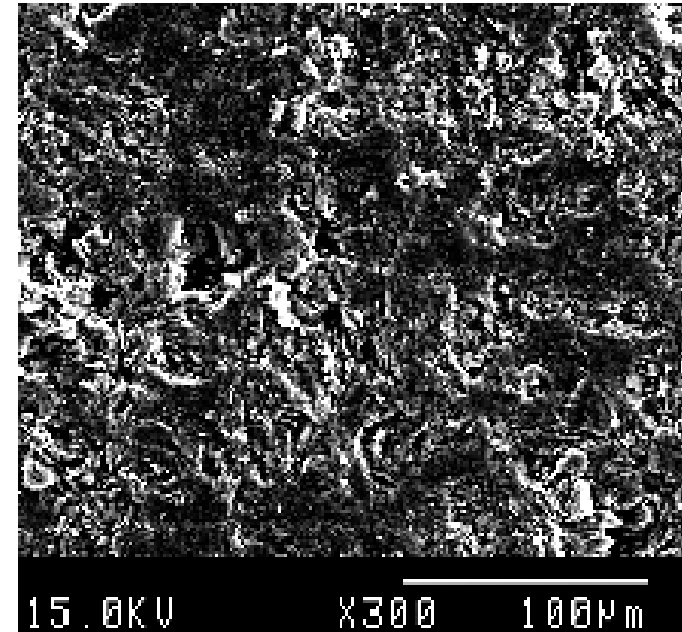
JT-60ダイバータタイル上の 再堆積層の損耗特性

- サンプルとして、JT60にて水素放電実験に使用されたダイバータタイル（炭素繊維複合材料；CFC）を使用
- 照射前後での表面観察(SEM)を実施した結果、JT-60タイル上では、2種の再堆積層が観察された。
 - ストライクポイント近傍の緻密な再堆積層
 - ストライクポイント周辺部の、厚い再堆積層
- 超低エネルギー水素照射装置（SLEIS）にてサンプルを照射後、重量損耗からスパッタリング収率を評価

ストライクポイント近傍における再堆積層



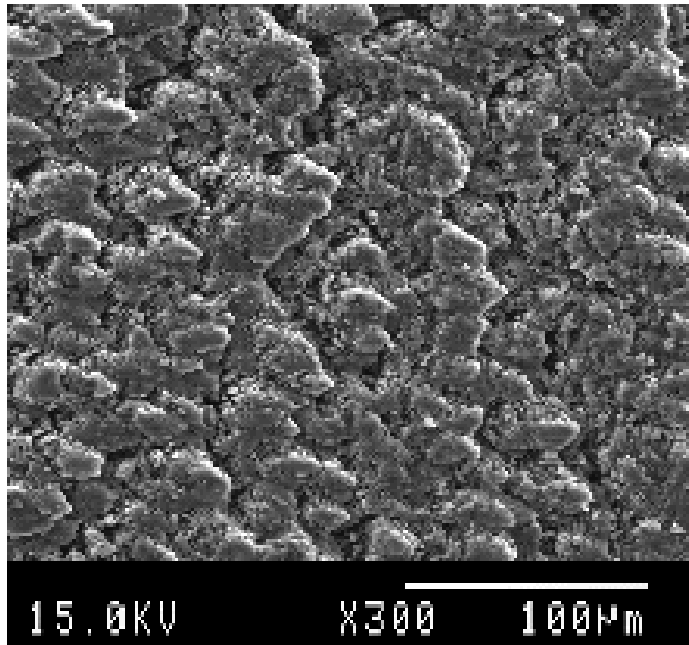
炭素再堆積層 (x300倍)



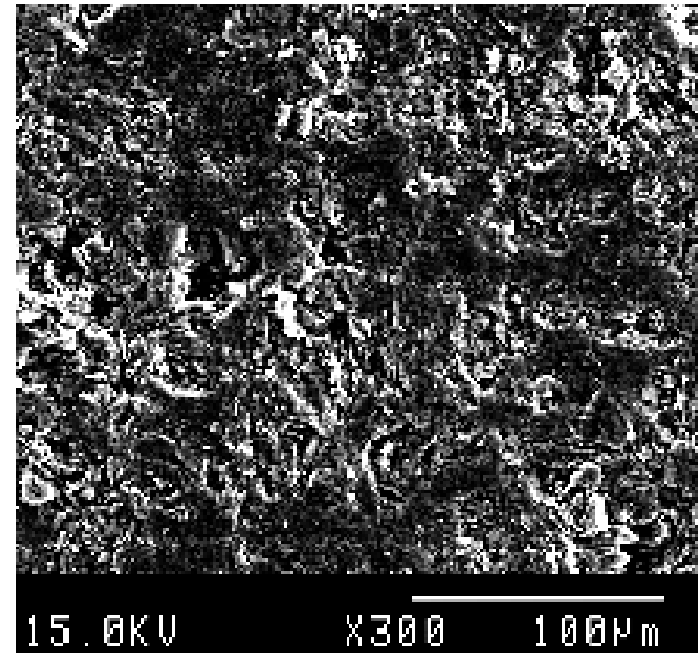
使用前のダイバータタイル

- ストライクポイント近傍では、比較的緻密な再堆積層が観察される。
- 熱負荷により損耗、再堆積が繰り返され、緻密な炭素膜が形成されたと考えられる。

ストライクポイント周辺部における再堆積層



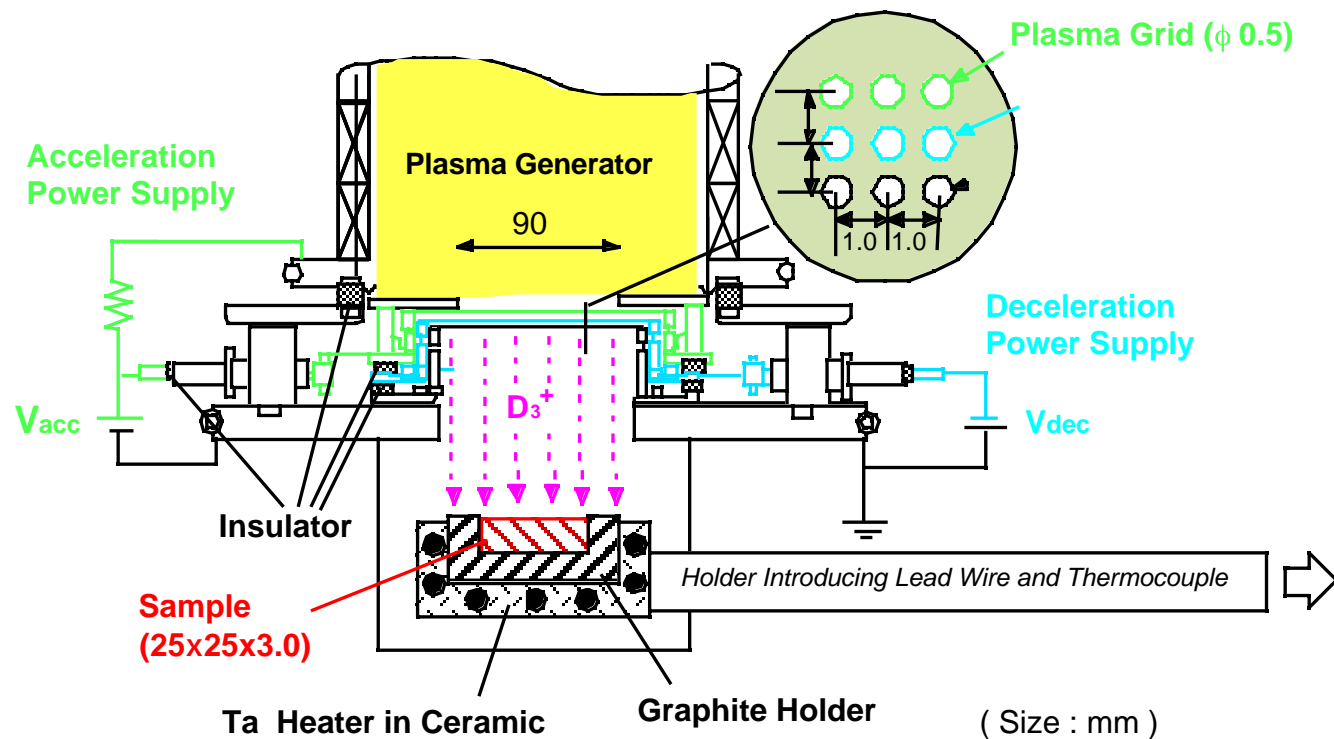
ストライクポイント周辺部



使用前

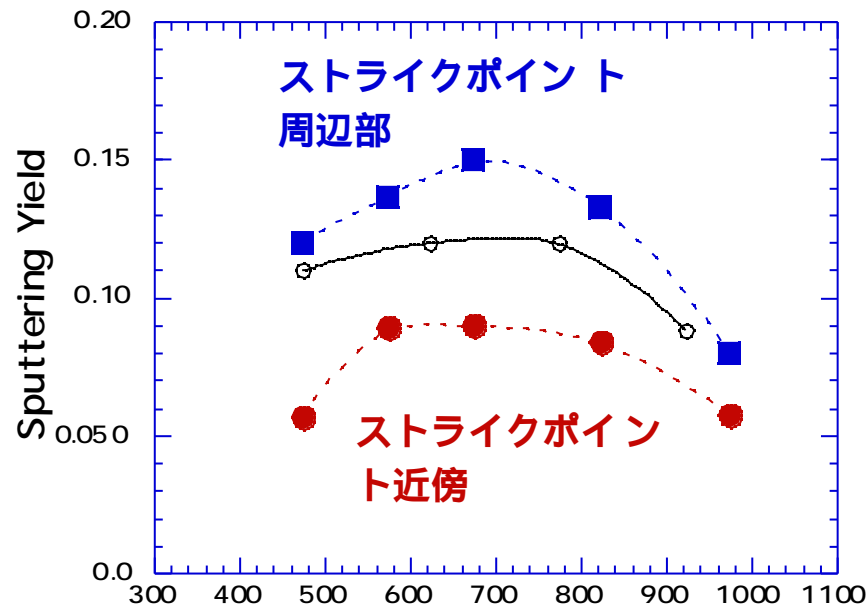
- ストライクポイント周辺部においては、炭素層が積み重なり、ストライクポイントとは異なる厚い再堆積層が観察される。

超低エネルギー水素イオン源 (SLEIS)



- **イオン種** D_3^+
- **加速エネルギー** 200eV
- **照射温度** 室温 ~ 973K
- **フラックス** $5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2/\text{s}$
- **フルエンス** $3.6 \times 10^{24} \text{ n/cm}^2$

スパッタリング実験結果（1）



JT60 使用済みタイルのスパッタリング
試験結果

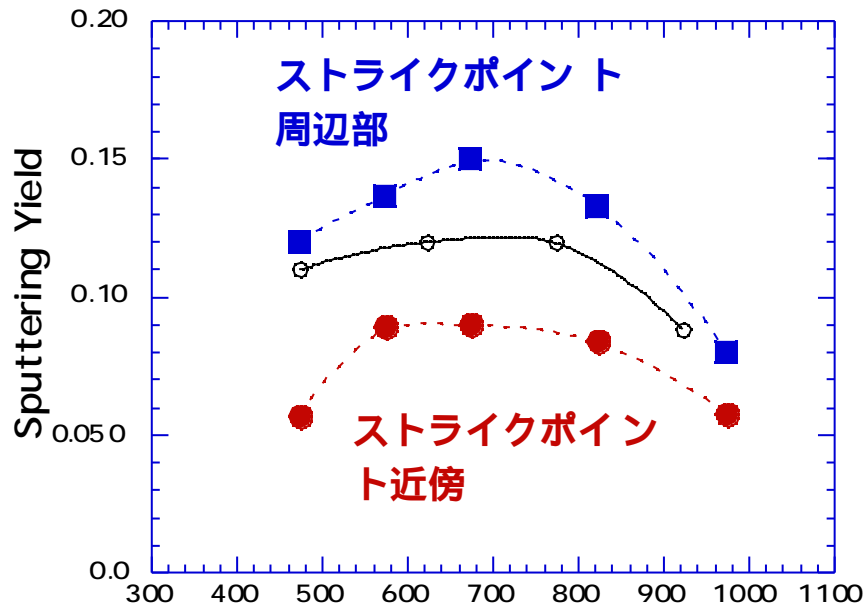
ストライクポイント周辺部

- 再付着層のスパッタリング収率は、母材に比して20%程度の増加が見られた。
- 再付着層の非晶質構造
- - 水素の共堆積による炭化水素形成の促進



化学スパッタリングの促進

スパッタリング実験結果（２）

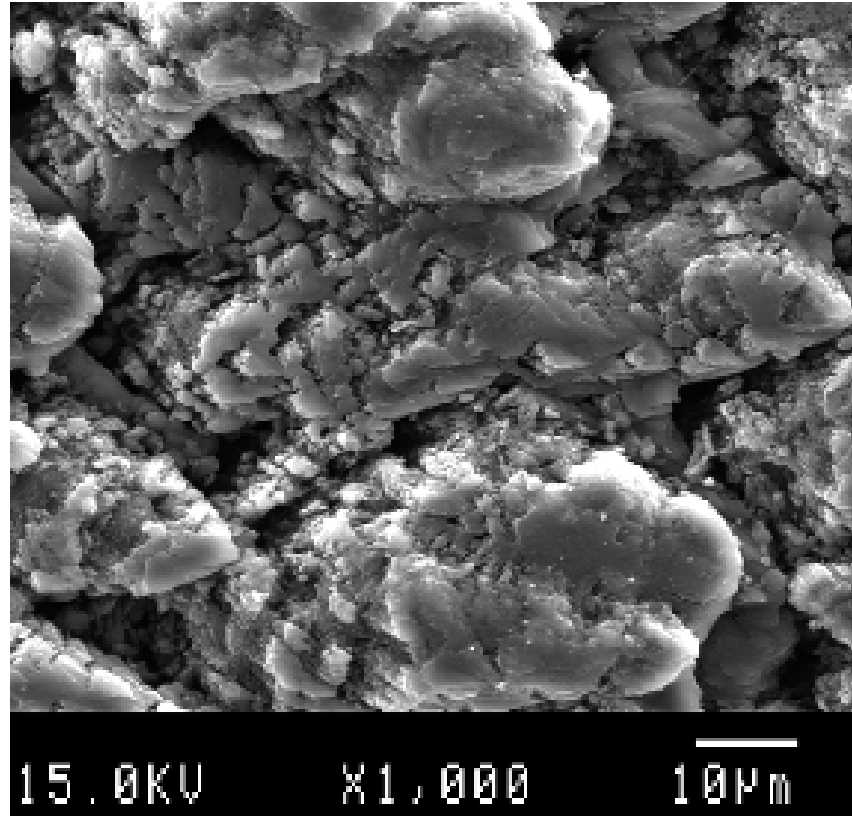


ストライクポイント近傍

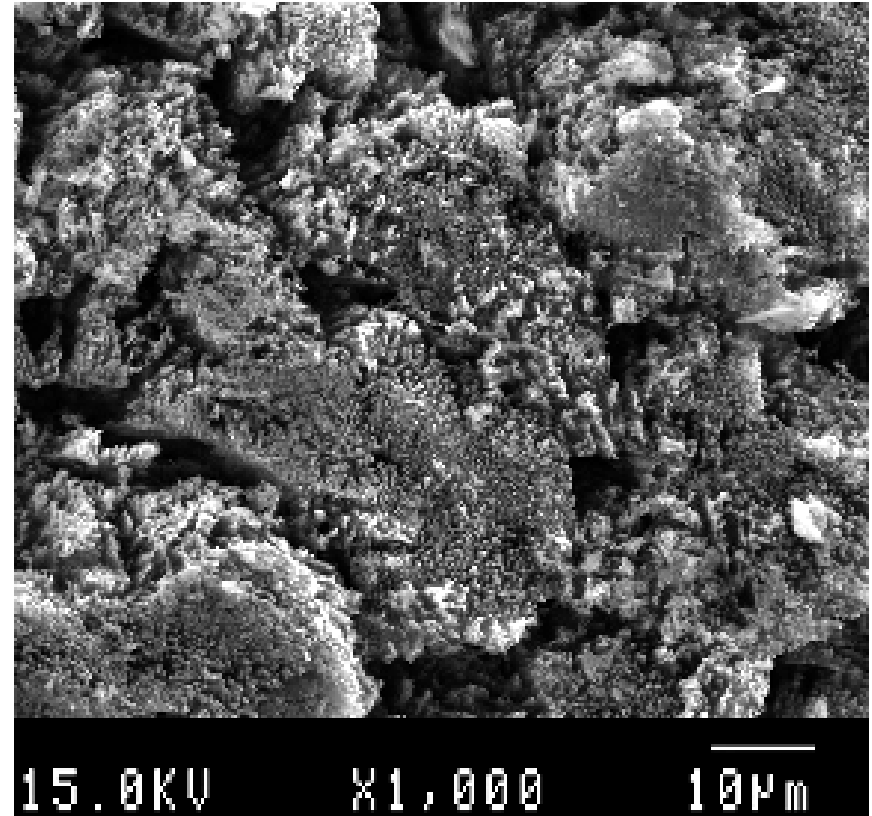
- 損耗部のスパッタリング収率は、母材より小さく、Pyro-Graphiteに近い値を示した。
- 比表面積の小さい緻密な表面
- 熱負荷による黒鉛化度の増加

JT60 使用済みタイルのスパッタリング
試験結果

照射前後での表面SEM像



照射前



照射後



カーボン・タングステン混合材の損耗特性

背景

-ITERでは、アーマ材料としてカーボン、及びタングステン材料が併用される。

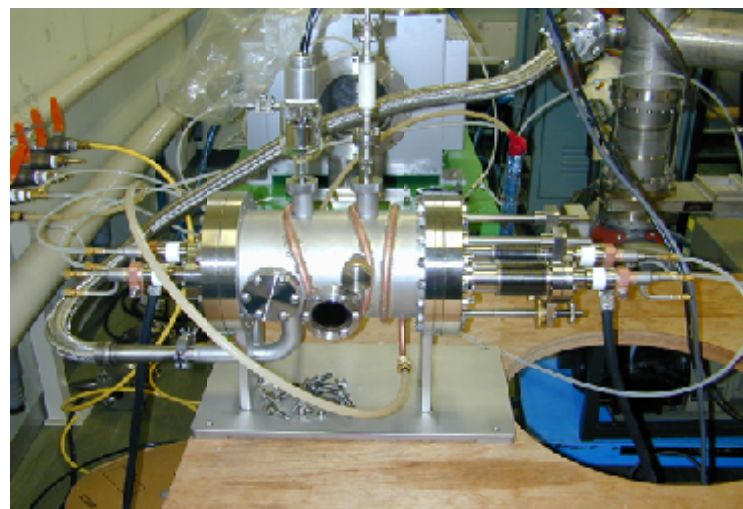


アーマ材表面にはカーボン、タングステン混合材 (Mixed-material)層が形成される。

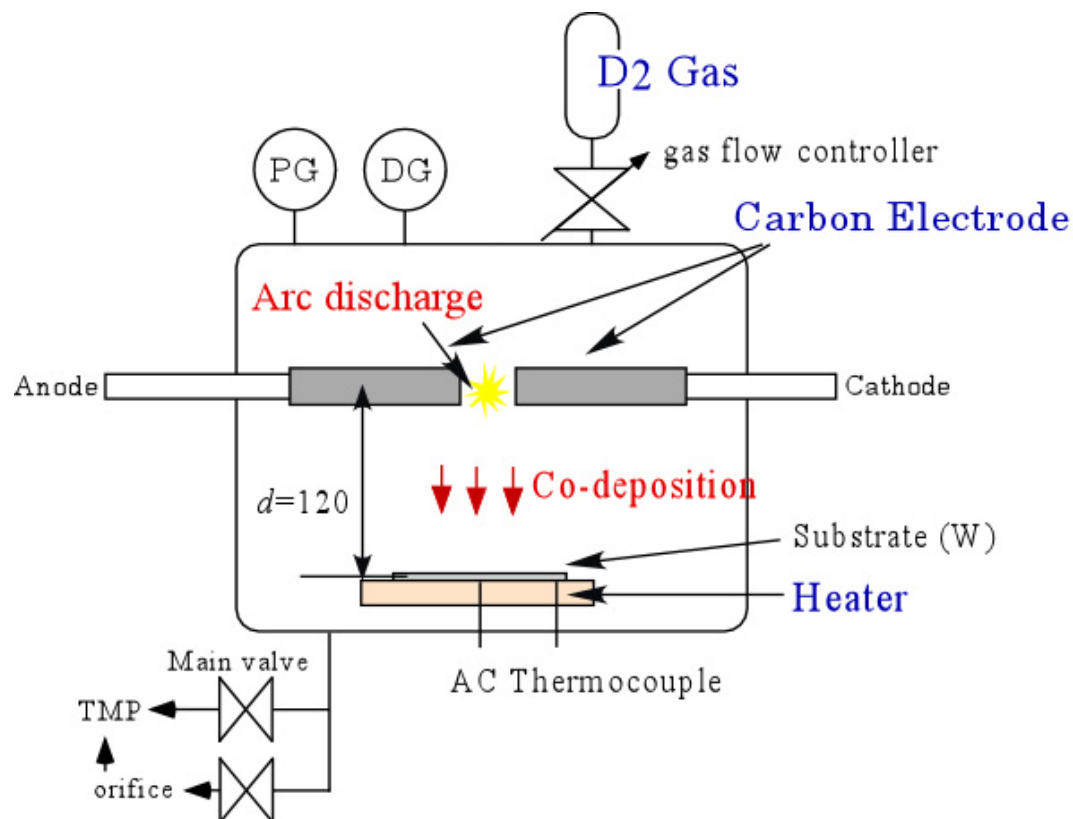
研究内容

アーク放電装置を用いてカーボン・タングステン混合材を作成し、混合材の損耗特性を評価する。

C/W混合材の作成

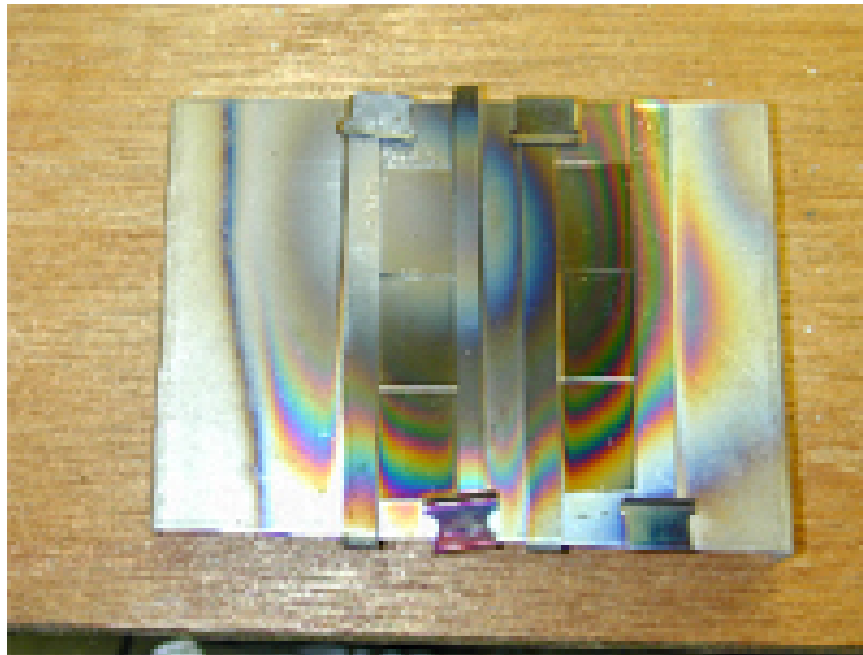


混合材作成装置外観図



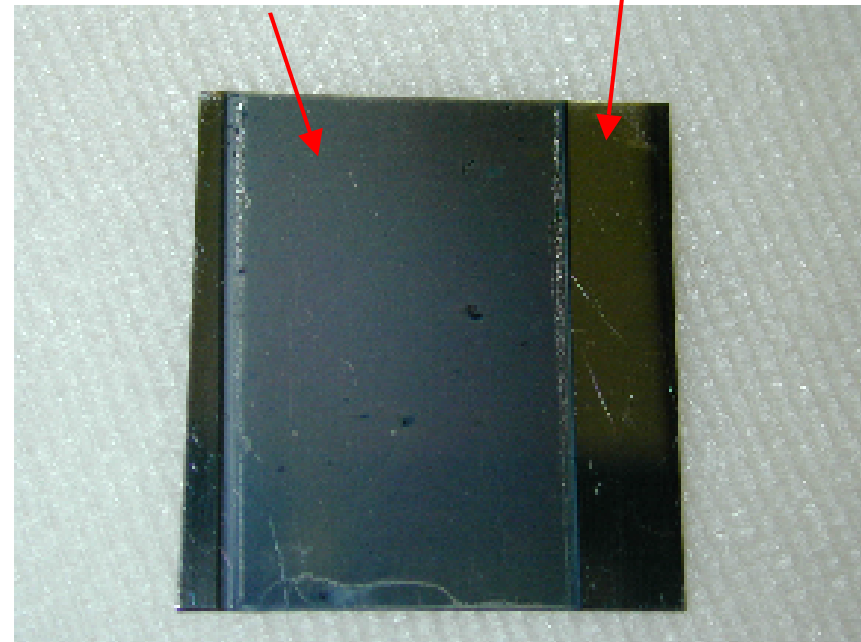
- C/W混合材は、炭素-タングステン電極間の重水素アーク放電で昇華、蒸発する電極材料をモリブデン基盤上に堆積させることにより作成した。
- 放電時の重水素圧力は1 ~ 10 Pa、基盤温度は室温で行った。

C/W混合膜の作成



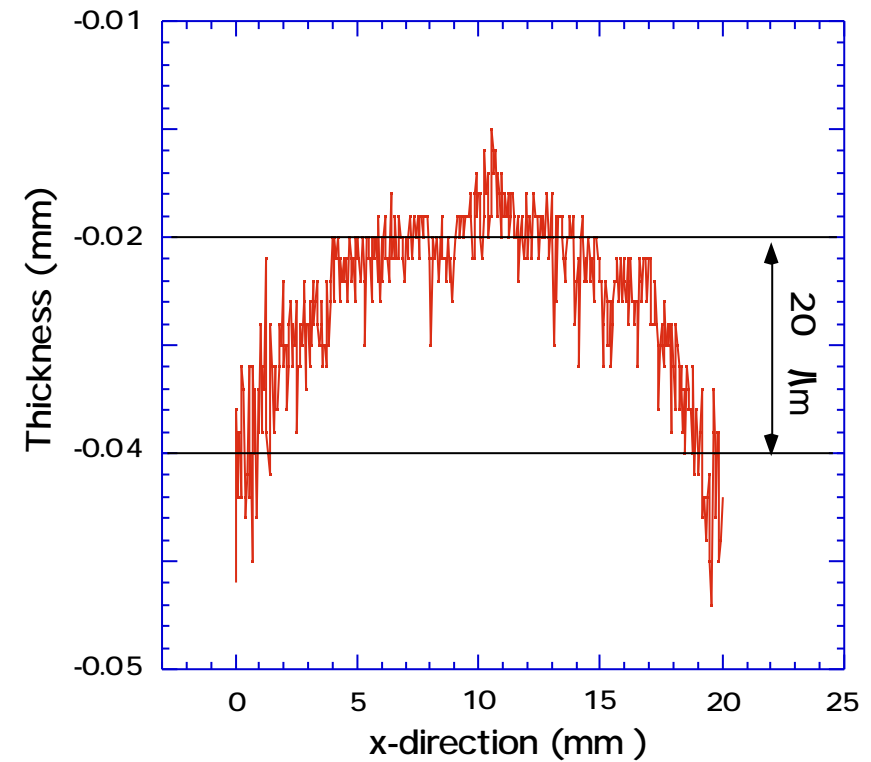
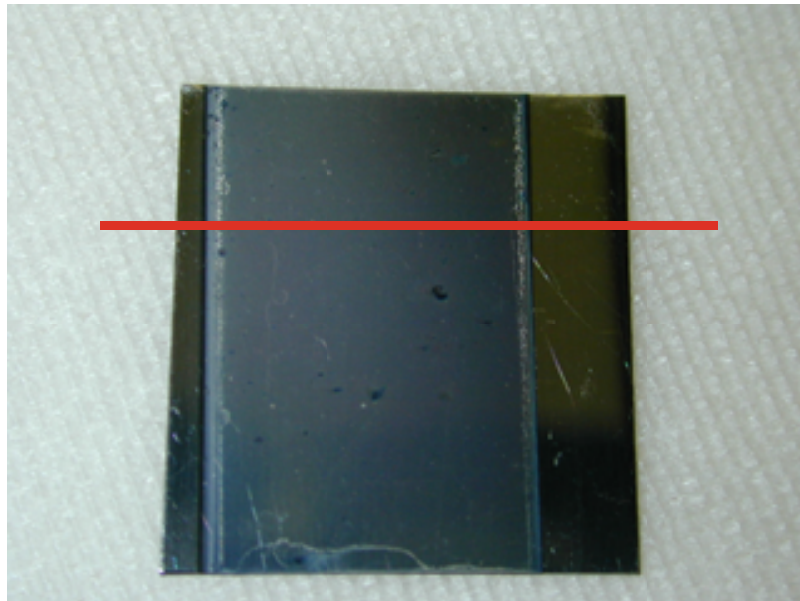
C/W混合膜

Mo基盤



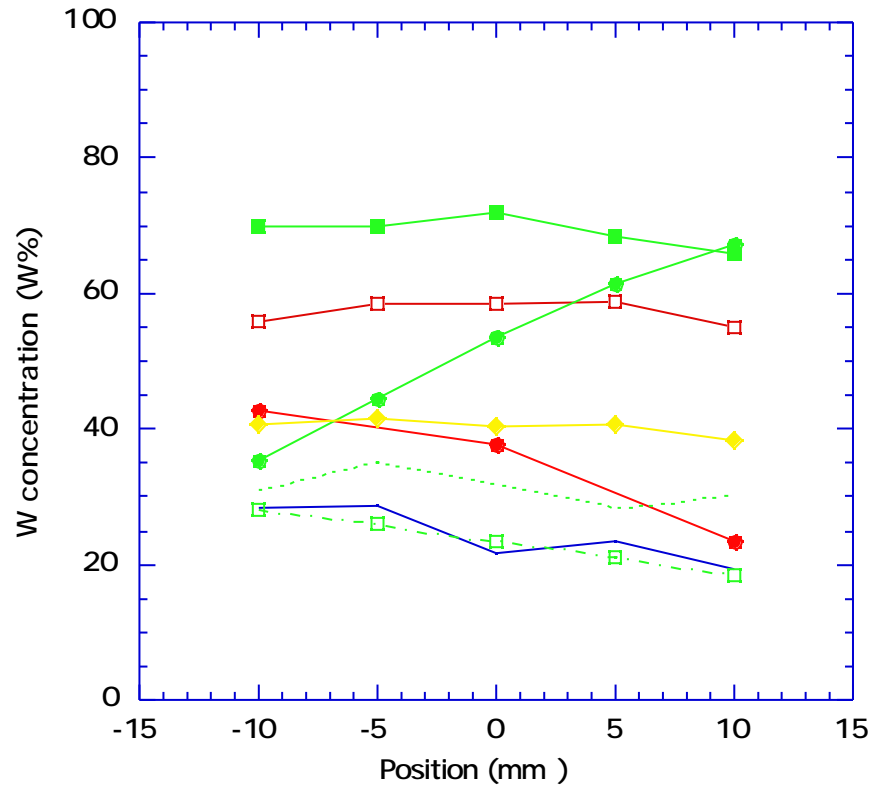
- 放電電流、基盤位置を制御することにより、W含有率の異なる混合膜を作成した。

C/W混合材の膜厚測定結果



- 中央付近で約20 μmのW/C混合膜が得られた。

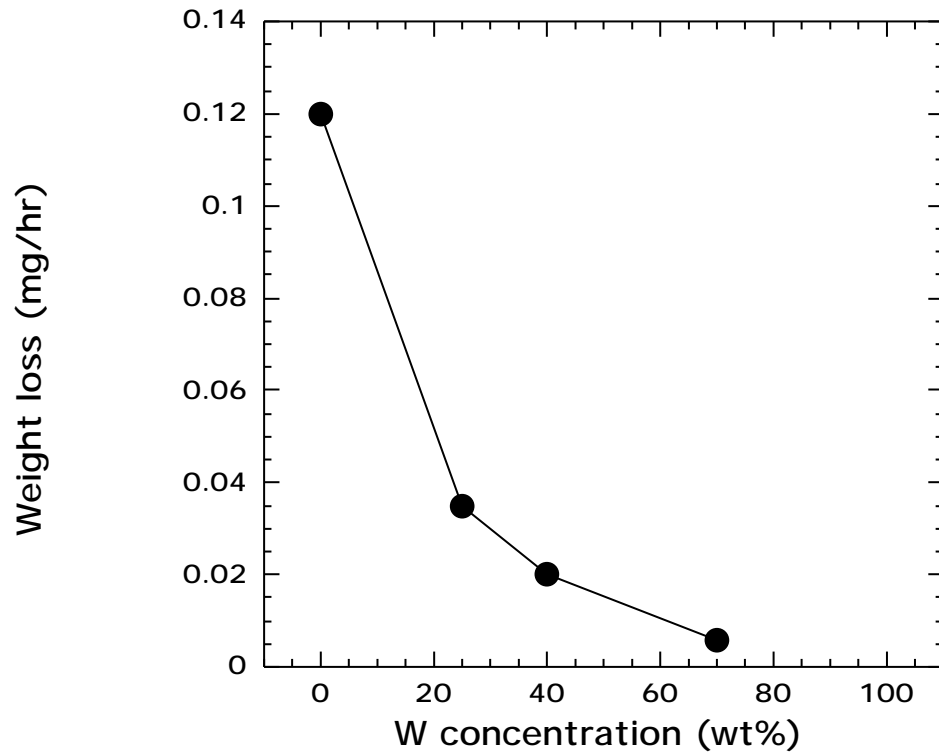
C/W混合膜中のW分布



C/W混合膜中のW含有量分布

- 作成したC/W混合材のW含有量をEPMAにより分析した。
- 多くのサンプルで、W含有量はほぼ一様であった。
- 25 ~ 70 at-%のW含有率で、一様なW分布を持つ試料をスパッタリング試験に使用した。

W/C混合膜のスputタリング試験結果



W/C混合膜のスputタリング損耗量

- 超低エネルギー水素ビーム照射装置にて673Kで67eVの重水素照射試験を実施した。
- 重量減少量は、W含有率が増加するに伴って減少する。
- W-C結合の形成により、スputタリング収率が減少していると考えられる。



まとめ

- JT-60で水素放電実験に使用されたダイバータタイルの表面観察、スパッタリング試験を行った。
 - JT-60で使用済みのダイバータタイル上には、ストライクポイントと周辺部で異なる2種類の再堆積層が観察された。
 - ストライクポイントでは層状の緻密な再堆積層が観測され、他方、その周辺部では柱状の荒い再堆積層が観測される。
 - 緻密な再堆積層のスパッタリング収率は母材より減少したが、荒い柱状の再堆積層では逆に収率は増加した。これは、再堆積層の構造の違いに起因するものと考えられる。
- アーク放電で作成したカーボン・タングステン混合材のスパッタリング試験を実施し、以下の知見が得られた。
- 炭素膜のスパッタリング収率はタングステン含有量が増加するにつれ減少した。
 - 混合膜中に形成されるW-C結合がスパッタリング抑制に効いていると考えられる。



今後の課題

再堆積層の表面分析

- 炭素の結合状態; ラマン分光、赤外吸収分析、X線光電子分光
- 水素の吸蔵量、結合状態評価; 昇温脱離、赤外吸収分析

再堆積層のディスラプション損耗試験

- 電子ビーム照射装置により、 $> 1000\text{MW/m}^2$ の熱負荷が短時間 ($\sim \text{ms}$) で入射した際の損耗率の評価

カーボン-タングステン混合膜の表面分析

- 炭素の結合状態; ラマン分光、赤外吸収分析、X線光電子分光
- 照射後のサンプルの分析; EPMA, XPS etc...