

## 熱交換器の革新的高効率伝熱性能向上のための ネオ放電モード型スパッタ装置の開発と超撥水化に関する研究

佐賀大学理工学部 教授 大津康徳

佐賀大学 海洋エネルギー研究センター 助教 安永 健

### 1. はじめに

工場等で使用している熱の約 65%以上は未利用であり、特に、工場からの廃熱温度は 100~150°C が多くを占めている。今後、エネルギー利用の高効率化に伴い、益々 100°C 以下の低温度廃熱(温水顕熱としての廃熱、以下“低エンタルピー熱”)は増加することが予想される。このエクセルギーを十分に活用するためには、多段の熱利用発電システムが有効であり、このシステムの不可避な共通課題は、高い伝熱性能だけでなく、低い圧力損失である革新的な熱交換器の開発である。この伝熱技術の確立により産業界の革新的な熱利用の確立に繋がる。

本研究の目的は、低エンタルピー熱を高効率に利用するために、これまで開発したネオ放電モード型スパッタにより、熱交換器のプレート表面に超撥水性膜を合成する技術を確立し、超撥水性膜による作動流体の蒸発及び凝縮の伝熱促進効果を明らかにし、低エンタルピー熱と熱機関の伝熱時の性能を飛躍的に向上させることである。

### 2. ネオ放電モード型スパッタ装置の構築と空間分布計測

超撥水性薄膜を合成するために、ネオ放電モード型スパッタ装置を構築した(図 1)。各部品の接続が終了後、油回転真空ポンプとターボ分子ポンプを組み合わせ、スパッタ装置を真空引きし、真空度試験を行った。その結果、 $10^{-5}$ Pa 台の高真空を達成できることが分かった。この真空度は、既存のスパッタ装置に比べて 1 桁程度低い圧力を達成できており、不純物の少ない高真空装置を実現していることがわかった。その後、装置上部にあるスパッタ源に高周波電源を接続した。材料ターゲットには、直径 4 インチ、厚み

10mm のフッ素系樹脂円板を設置した。アルゴンガス圧力 1Pa、高周波電力 200W をスパッタ源に供給することにより、安定放電を確認した(図 2)。

スパッタ法による超撥水性薄膜合成において、薄膜材料ターゲットや基板への入射するプラズマ中のイオンフラックス分布が重要な役割を果たす。そこで、マグネトロンスパッタプラズマ中のイオンフラックスの空間構造を静電プローブ法により計測した。イオンフラックスは、静電プローブに負のバイアス電圧(-50V)を印加した際に、静電プローブに流入するイオン飽和電流から算出する。静電プローブの形状は、直径 0.25 mm、長さ 3 mm であり、材質はタングステンである。スパッタされるフッ素系樹脂の粒子は絶縁物であるので、静電プローブ表面への絶縁膜堆積を避けるために、静電プローブ先端をヒーター加熱した。マグネトロンスパッタプラズマはドーナツ状であるため、プラズマは軸対称を仮定して、静電プローブを方位角方向に回転させて任意の位置の半径を計測した。マグネトロンスパッタターゲットからの距離  $z$  を変化させたときのイオン飽和電流の半径方向分布を計測した。ターゲットから  $z = 15$  mm では、 $15$  mm  $< r < 30$  mm の範囲で、イオン飽和電流  $I_{is}$  はピークをもっていた。 $z = 20$  mm になると、そのピーク位置は  $20$  mm  $< r < 30$  mm の範囲に移動していた。その後、 $z$  が大きくなると、即ち、ターゲットから離れると、 $I_{is}$  の半径方向分布は、均一になっていた。また、 $I_{is}$  の値も減少している。基板の位置近傍である  $z = 50$  mm ではほぼ均一になっていることがわかった。即ち、その位置で撥水性膜を行うことが示唆された。

### 3. ネオ放電モード型スパッタ装置を用いた金属板表面への超撥水化

熱交換器内では、金属板表面が親水性であるため、その効率が低下する原因になっている。本研究で開発したネオ放電モード型スパッタ装置(図1)を用いて、金属板表面にフッ素系樹脂の薄膜合成を実施した。金属板基板として、材質はステンレス304とし、サイズと形状は20×20×1mm及び40×40×1mmの2種類の正方形を使用した。実験条件は、アルゴンガス圧力1Pa、マグネトロンスパッタ高周波電力50から200W、材料ターゲットと基板間距離5cm、スパッタ時間は10から60minとした。ターゲット材料にはポリテトラフルオロエチレン(PTFE)と四フッ化エチレンとパーフルオロアルコキシエチレンとの共重合体(PFA)を使用した。

図3に、ネオ放電モード型スパッタ装置を用いて薄膜合成したステンレス表面(40×40×1mm)の水滴の様子を示す。水滴がほぼ球状になっていることがわかる。この時の水滴接触角は約150°に達しており、超撥水性を示している。実験条件を変化させた結果、高周波電力50W、スパッタ時間10minの条件でも超撥水性を実現できることがわかった。

よって、本装置により、熱交換器へ革新的の高効率伝熱性能向上を実現できる金属板表面の超撥水化に成功した。

超撥水性膜の作動流体による伝熱性能に関する研究を行った結果、超撥水性膜の伝熱促進剥離耐性試験を行った結果、成膜プレートでは約90日まで撥水性の水滴接触角を維持できており、皮膜が剥がれた兆候は見られておらず、撥水性が保たれていた。

超撥水性膜の伝熱性能評価試験条件においては、膜状凝縮現象でも、成膜プレートでは優位に伝熱性能が向上したことが推測された。成膜プレートは非成膜に比べて、優位に伝熱性能が向上していた。

#### 4. まとめ

熱交換器の革新的の高効率伝熱性能向上のために、ネオ放電モード型スパッタ装置を開発した。その装置を用いて、熱交換器内に組み込む金属板表面に薄膜合成を実施した結果、従来の絶縁物薄膜スパッタ

の注入電力量[1]のほぼ半分に相当する8.3Wh(高周波電力50W、スパッタ時間10min)の条件下において、水滴接触角約150°を示す超撥水性を実現させることに成功した。成膜プレートは非成膜に比べて、優位に伝熱性能が向上していた。

#### 参考文献

[1] 毛塚和哉, 上村彰宏, 岩本 暁, 第48回真空に関する連合講演会プロシーディングス, J. Vac. Soc. Jpn., Vol. 51, No. 3, 2008, pp.201-204.

#### 謝辞

本研究は公益財団法人JKA小型自動車等機械振興補助事業の支援を受けて実施されました。



図1 ネオ放電モード型スパッタ装置



図2 プラズマ発光の様子



図3 超撥水性を示す水滴の様子