

核融合炉材料のタングステン被覆

長坂 琢也

核融合炉のプラズマに面した機器の材料表面を優れた特性を有するものに改質あるいは保護するために、基板材料の性能を劣化させることなくタングステンを被覆する技術開発が進められています。タングステンは金属の中で最も溶ける温度(融点)が高く(3410°C)、非常に重い(1ccあたり19.3g)ことなどが良く知られていますが、この他に、プラズマによる損耗率が低い(削られにくい)、燃料である水素を吸収しにくい、熱伝導率が高いなど、核融合炉で使用するのに好ましい性質をもっています。

しかし、タングステン被覆はそう簡単ではありません。タングステンは高融点であるがゆえに、どうしても被覆処理の温度が高くなり、基板材料が傷んでしまうからです。さらに、核融合炉では大面積(約500平方メートル：畳300畳分)で比較的厚い(0.1ミリメートル以上)被覆が必要となりますので、手法は限られます。

現在、被覆の手法として有望なのは、プラズマスプレー法、ロウ付け法、拡散接合法などです。プラズマスプレー法では、タングステンの微粒子を、アルゴンと水素の高温プラズマ中で溶かし、基板材料にスプレーします(図1)。溶けたタングステンは基板に到達するとすぐに冷やされて固まるので、基板が溶け

てしまうことはなく、比較的熱負荷が小さくて済みます。溶けたタングステンは基板へ当たるときの衝撃で扁平になり、被覆は扁平なタングステンが積み重なった層状構造になります。図2は実際にプラズマスプレー法でタングステン被覆をした基板材料の断面写真です。基板の材質と被覆の厚さが様々ですが、この方法は、基板の種類や形状を選ばず、スプレーの回数を変えることで被覆の厚さを自在に変えられるのが特長です。この方法によって、基板材料よりも優れた熱伝導率と強度を有するタングステン被覆に成功しました。また、この方法では溶解や焼結で作られたタングステンよりも欠陥を多く含むことも明らかになりました。図3は図2の被覆部分にある欠陥の拡大写真を示しており、プラズマ中で溶け残ったタングステンの粒子(図中のa)の周りに隙間欠陥(図中のb)ができていたり、扁平なタングステンの層と層の間に隙間欠陥(図中のc)ができていことがわかります。このような欠陥の存在により被覆タングステンの密度は熔融タングステンの密度の89%であり、その熱伝導率や強度は、密度100%のタングステンの1/2~1/3ですが、それでも基板材料よりも良いので、この程度の劣化は許容範囲と考えられます。

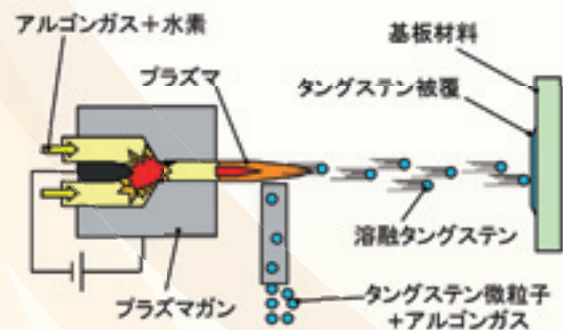


図1 プラズマスプレー法の原理

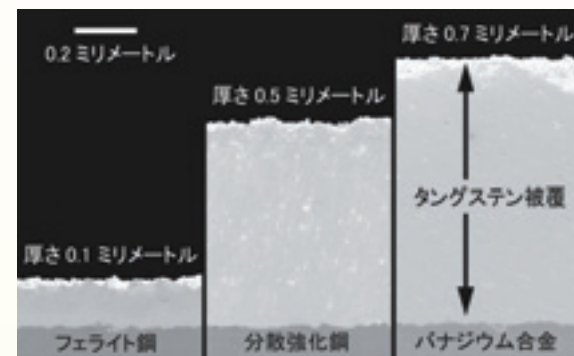


図2 タングステン被覆された核融合炉材料の断面
分散強化鋼は核融合炉用フェライト鋼の強度を改良した材料です。

ロウ付け法、拡散接合法では、上記のような隙間欠陥のない密度100%のタングステンを基板材料に貼り付けます。ロウ付け法では、タングステンよりも融点の低いロウ材(鉄などの金属に、さらに融点を下げるホウ素やシリコンが添加されたもの等)を、タングステンと基板材料でサンドイッチして、荷重をかけながら熱処理します。熱処理でロウ材が溶けて、接着剤の役目を果たします。拡散接合法は、この接着剤すら使用せず、単純にタングステンと基板材料をお互いに接触させて、荷重をかけた状態で熱処理をして、原子の拡散(陶器の焼成と同じ原理)で接合する方法です。必要な熱処理温度はプラズマスプレー法よりだいぶ高くなり、ロウ付け法で1200°C程度、拡散接合法で1500°C程度になります。この温度では基板の変質が起こることがあります。また、あらかじめタングステンを接合面と同じ形状に加工し、なおかつ接合する際に全ての面に必要な荷重がかかるようにしなければなりませんので、現実的には、ロウ付け法、拡散接合法が使えるのは比較的単純な形状での接合に限られます。

このようなタングステン被覆処理の際の熱負荷によって、基板が変質するのかわかを、被覆後のバナジウム合金基板の衝撃試験により明らかにしました(図4)。衝撃試験では、材料が破壊するときに吸収するエネルギーを測定します。吸収エネルギーが大きいほど壊れにくく良い材料であるといえます。被覆前

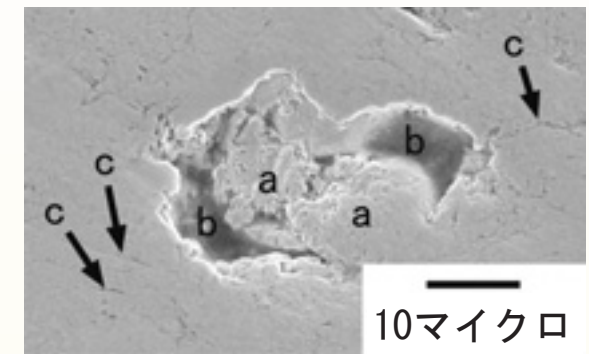


図3 プラズマスプレー被覆の欠陥
aはプラズマ中で溶かされずに残ったタングステンの粒子です。
bはその粒子のまわりにできた隙間欠陥です。
cは溶融したあと基板へ当たった衝撃で扁平になったタングステンの層の間の隙間欠陥です。

の吸収エネルギーは84ジュールです。ロウ付け法で被覆した基板の吸収エネルギー(図中のロウ付けまま)は被覆前と同じですが、プラズマスプレー法で被覆した基板の吸収エネルギー(図中のスプレーまま)は55ジュールとなっていて、被覆前に比べて小さくなってしまったことがわかります。これは、プラズマ中に含まれる水素をバナジウム合金が吸収して硬くなり、脆くなったことが原因でした。脆くなった基板を真空中400°Cの熱処理で脱水素したところ、吸収エネルギーを被覆前の値まで回復させることができました(図中で400°C熱処理)。いずれの被覆も、被覆ままで、あるいは適切な熱処理をすれば室温の衝撃エネルギーの低下が無いことがわかりました。今後は、核融合炉環境で長時間使用した場合でも、吸収エネルギーが低下しないことを確認する予定です。

これらの被覆を核融合炉で使用できるかどうかを検討するため、現在、核融合科学研究所と京都大学、九州大学を中心とした多くの大学が参加している共同研究で、各種評価がなされています。どの被覆法が最も優れているかということ議論するのではなく、それぞれの被覆の特長を生かし、うまく組み合わせで使用することが重要です。

(核融合システム研究系 准教授)

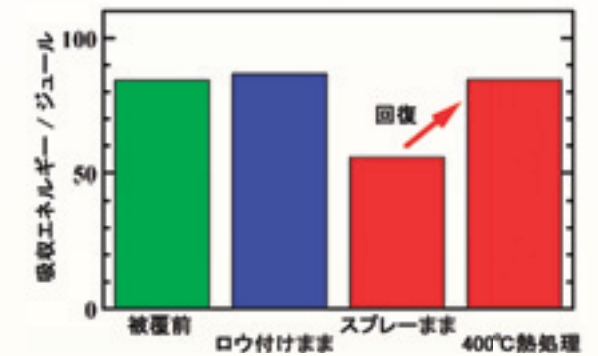


図4 室温の衝撃試験で得られた吸収エネルギー
シャルピーVノッチ試験片(寸法3.3×3.3×25.4ミリメートル)を使用しています。
縦軸は基板のバナジウム合金が破壊するときに、1センチメートル四方あたりどれだけのエネルギーを吸収するのかわを表わしています。
プラズマスプレー被覆後の熱処理の時間は1時間です。