

先進的ろう付接合法によるタングステン/銅合金ダイバータ受熱機器開発

時 谷 政 行

核融合炉では、高温のプラズマを磁力線のかごに閉じ込めることで核融合反応を持続させることができます。反応によって熱エネルギーが連続的に生み出され、発電に利用されるわけですが、熱だけではなく、プラズマにとっては不純物となるヘリウム(He)も同時に発生します。そこで、磁力線のかごの端部をダイバータと呼ばれる排気装置に繋げることで、不要なヘリウムを効率的に除去できる仕組みになっています(ダイバータについての詳細はNIFSニュース2010/194号の「研究最前線」をご覧ください)。不純物が除去されるため、プラズマにとってはありがたい話ですが、高温プラズマと直接接触しなければならないダイバータの表面(ダイバータ受熱機器と呼びます)は、極めて過酷な高熱負荷及び高粒子負荷環境にさらされます。このような環境に耐えられると考えられ、現在世界中で研究開発が行われているダイバータ受熱機器構造は、プラズマと接触する表面には高温に耐えられて粒子による損傷に強い「タングステン」を使用し、そのすぐ裏側に強靱で熱伝導率の良い「銅合金」の冷却板を接合させるものです。

この構造で一番難しいことは、タングステンと銅合金を強力に接着する必要があることです。両材料は原子レベルで混ざり合わないため、一般的にはろう材と呼ばれる接着剤の役割をする物質を間に挟み込み、900℃以上の高温で溶かして接着させる「ろう付接合法」が用いられます。しかし、タングステンと銅合金は高温での熱膨張係数(温度によって体積が変化する比率)が大きく異なるため、従来のろう付接合法では、図1(a)のようにクッションの役割をする純銅などの柔らかい材料(緩衝材と呼びます)をろう材とタングステンの間に同時に挟みこみ、接着する必要がありました。この方法は、現在大型国際プロジェクトとしてフランスに建設が進められている国際熱核融合実験炉(ITER)のダイバータ受熱機器でも採用されていますが、タングステンと銅合金を直接接合する

場合に比べると異なる材料の接合界面の数が増え、その面積も広くなるため、除熱性能への影響と、製造コストが高くなるという点で懸念があります。

核融合科学研究所の核融合工学研究プロジェクトでは、図1(b)に示すように、ろう材にはBNi-6(成分はニッケル:89%、リン:11%)という材料を、銅合金には酸化物分散強化銅(GlidCop®)をそれぞれ選択し、接合時の熱処理条件を最適化することで、緩衝材を使わなくても接合部自身にクッションの役割を持たせることに成功しました。我々は、この方法を「先進的ろう付接合法」と名付けました。また、その後の調査で、接合部の強度はタングステン素材に比較しうる程度に良好であり、靱性を有することが分かりました。通常、ろう付接合部は単なる接着剤の役割を担うだけであり、強度としては弱くてしかも脆いはずですので、これは驚くべき結果です。なぜこのような強靱な接合部が

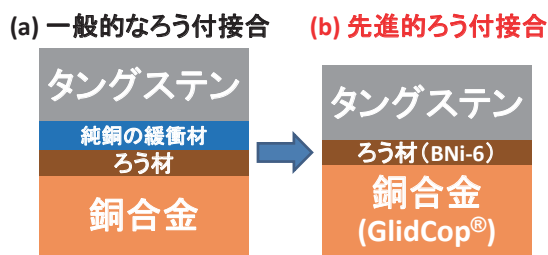


図1 一般的なろう付接合と先進的ろう付接合の違い

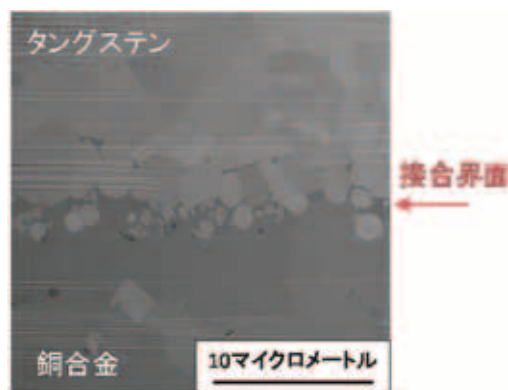


図2 タングステンと銅合金接合部の電子顕微鏡像(1マイクロメートルは1ミリメートルの1000分の1)

得られたのかを調べるために、接合部を電子顕微鏡で観察しました。その写真が図2です。この写真では、タングステンと銅合金が互いに入り組んでおり、あたかも当初から連続した材料であるかのように緻密に接合されていることがわかります。このように緻密な接合界面が両材料を強靱に結び付けていると考えられます。ここで疑問に思うことは、最初に挟み込んでいたBNi-6ろう材はどこにいったのか？ということです。実は、900℃を超える温度でのろう付熱処理中に溶けて、銅合金の中に拡散していったことがその後の調べでわかりました。つまり、ろう材はタングステンと銅合金を緻密に接合するための手助けをして、後はその場からいなくなったというわけです。これにより、ろう材すら存在しないタングステンと銅合金の本当の意味での直接接合が実現したことになります。この事実は、ダイバータ受熱機器としてタングステンが高い熱を受け止めたときに、すぐ裏の銅合金の冷却板へと効率的に熱を逃がすことが

できるという利点に繋がります。

先進的ろう付接合法の長所が詳しく分かったので、次に、この方法で図3(a)の写真に示す小型ダイバータ試験体を試作しました。そして、小型ダイバータ試験体に対して、超高熱負荷試験装置(ACT2)を用いて図3(b)に示すように電子ビーム熱負荷試験を実施しました(ACT2の詳細はNIFSニュース2016/233号の「研究最前線」をご覧ください)。図3(c)は加熱パワーを上げていったときの図(b)のA点、B点での温度を示しています。15MW/m²(MW:加熱パワーを表す単位で、1MWは100万ワット)の加熱パワーにおいてもタングステンの温度(A点)は650℃程度に維持されています。この温度は、タングステンが脆くなり始める温度である約1,100℃に比べて十分に低い温度であり、除熱性能にはまだまだ余裕があることがわかります。この結果を得て、大型ダイバータ試験体の製造に着手し、図4に示すようにその第1号の製造に成功しました。今後はこの大型試験体の除熱性能を確認し、実際のプラズマ閉じ込め装置での運用試験に移行する予定です。

今回得られた技術進展は、核融合炉の中で最も過酷な環境にさらされるダイバータ受熱機器の高性能化に寄与するものであり、長期間安全に運転可能な核融合炉の実現に向けての大きな一歩となります。

(核融合システム研究系 助教)

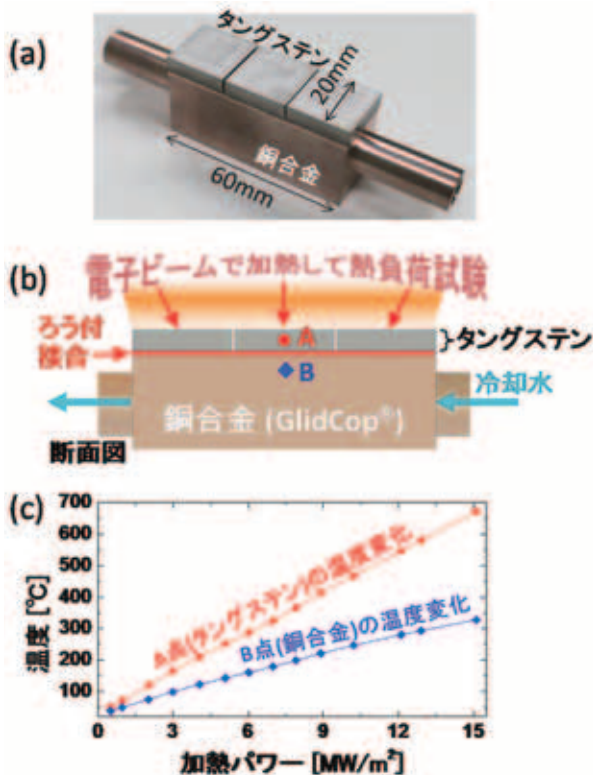


図3 (a)小型ダイバータ試験体の写真。(b)小型ダイバータ試験体の断面模式図。(c)小型ダイバータ試験体への熱負荷試験結果。A点、B点は、それぞれ(b)で示したダイバータ試験体の断面図のA、Bの位置に対応。15MW/m²の加熱パワーにおいてもタングステンの温度(A点)は650℃程度に維持されている。

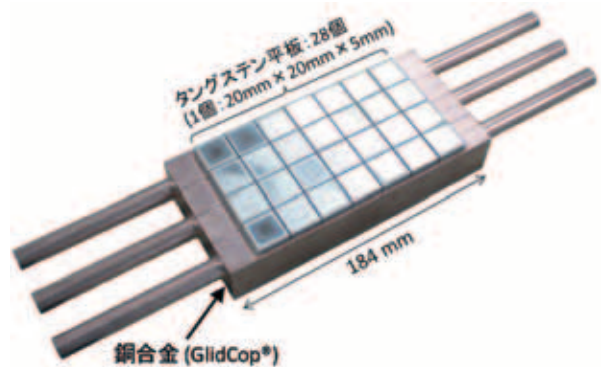


図4 先進的ろう付接合法で製作した大型ダイバータ試験体の写真