プラズマ対向機器用タングステン接合材料の機械的性質と微細組織に関する研究

Study on Mechanical Properties and Microstructures of Tungsten Joining Materials for Plasma Facing Components

OMOHD YUSAIRY BIN JAMIL¹ (茨城大院) 車田 亮² (茨城大工) 伊藤 吾朗² (茨城大工)

渡辺 英雄³ (九大応力研) 松尾 明⁴ (日タン)

¹:OMOHD YUSAIRY BIN JAMIL, Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University,
4-12-1, Nakanarusawa, Hitachi, Ibaraki, 316-8511.

²: Akira KURUMADA, Goro ITOH, College of Engineering, Ibaraki University.

³: Hideo WATANABE, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University,
6-1, Kasugakouen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580.

⁴: Akira MATSUO, Japan Tungsten Co, Ltd. 3173-2, Sonobe, Kiyama, Miyaki, Saga, 841-0203.

Plasma facing materials for fusion experimental devices are required to have high thermal resistance, high thermal conductivity, thermal shock resistance, radiation damage resistance and so on. There are no materials of which properties are sufficient to meet the requirements. Because the plasma facing components are severely exposed to the high heat load and particles with high energy from fusion plasma, the high melting point metal such as a tungsten material is expected as a candidate material.

In this study, high energy ions are irradiated to the tungsten joining materials to apply them as an advanced structure material to the next fusion experimental devices. The relationship among the mechanical properties, the microstructures and the effects of radiation damage at the boundary parts of tungsten are made clear by an ultra micro hardness tester, SEM and TEM. And the thermal responses of the tungsten joining materials are also evaluated by electron beam heating tests.

Keywords: plasma facing materials, tungsten, mechanical properties, microstructure, radiation damage

1. 序言

核融合炉用プラズマ対向材料は、高熱負荷、高粒子負荷、中性子による照射損傷などを受けるため、耐熱性、高熱伝導性、耐熱衝撃性、耐照射損傷性などに優れていなければならない。現在、それら特性を十分に満足する材料は皆無に等しい。このような中で、タングステン等の高融点金属材料の使用が検討されている。

本研究では、タングステン接合材料及びその母材の機械的特性に及ぼす照射損傷の影響を究明するために、中性子照射を模擬したイオン照射試験を行い、その照射前後で、超微小硬さ試験と微細組織の観察を行った。さらに、電子ビーム加熱試験を行い、熱応答特性の評価も行った。

2. 実験方法

本研究では、日本タングステン(株)製の純度 99.95[%]の微細結晶粒純タングステン(JT-01W)と純度 99.99[%]の粗大結晶粒純タングステン(JT-02W)を中心に、市販の純度 99.5%の純タングステンも加えて実験に用いた。

Fig.1(a)とFig.1(b)は、JT-01WとJT-02Wの組織写真を示す。JT-01WとJT-02Wの結晶粒径は、それぞれ、約10[μm]及び710[μm]である。これらのタングstenは、市販のタングstenとは異なり、層状の結晶組織を示さず、ほぼ球状の等方的な組織を示している。

JT-01WおよびJT-02Wと無酸素銅との接合には、応力緩和のためモリブデンを中間材として用いた冶金接合法と、直接接合するNDB(Non Defective Bonding)接合法を用いた。

これらの接合材料に、九州大学応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置を用いて、2.4MeVの銅イオン(Cu²⁺)を照射した。その場合の銅部分及びタングsten部分の照射損傷

(a) JT-01W (b) JT-02W
Fig.1 Microstructures of tungsten materials

量は、それぞれ、銅部分では、5.5[dpa]、55[dpa]照射となり、タングsten部分では3.6[dpa]、36[dpa]照射となった。

機械的特性は、超微小硬さ試験により評価した。試験荷重は照射イオンの飛程付近の特性変化を求めるため、19.6mNとした。この試験によるダイナミック硬さは次式で算出される。

$$D_h \equiv \alpha L / h^2$$

ここで、 L [mN]は試験荷重、 h [μm]は圧子の試料への侵入量(押し込み深さ)、 α は圧子形状による定数で、三角錐圧子の場合 $\alpha=3.8584$ となる。硬さの試験結果は、照射領域を中心部とその外周部に分けて、0-1、1-2、2-3、3-4mmの領域内で詳細に検討した。それぞれの部分で5~10回の測定を行い、その平均値で評価した。また、電子ビーム加熱装置を用いて、接合界面の熱応答特性の比較評価を行った。

3. 実験結果及び考察

Fig.2は、中間材にMoを挿入したJT-01W及びJT-02Wの接合材について、ダイナミック硬さの未照射との増加率を示す。Fig.2(a)より、JT-01Wタングsten部分(0.0~1.0mm)

(a) JT-01W-Mo-Cu

(b) JT-02W-Mo-Cu

Fig.2 Increasing rate of dynamic hardness at W-Mo-Cu joining parts due to Cu^{2+} ion irradiation.

においては、未照射との増加率をその領域内で平均した場合、3.6[dpa]照射で約 6[%]のダイナミック硬さの増加、36[dpa]照射で約 12[%]のダイナミック硬さの増加を示した。また、Fig.2(b)より、JT-02W タングステン部分 (0.0~1.0mm) においては、未照射との増加率をその領域内で平均した場合、3.6[dpa]照射で約 3[%]のダイナミック硬さの増加、36[dpa]照射で約 11[%]のダイナミック硬さの増加を示した。この照射硬化は、照射欠陥の増大及び転位の移動阻害などが原因であり、照射量の増大に伴って増大した。

Fig.3 は、JT-01W と JT-02W を用いた NDB 接合材について、未照射との増加率を示す。前述と同様に、接合界面近傍の 1mm の領域内で、未照射との増加率を平均した場合、JT-01W タングステン部分 (1.0~2.0mm) においては、室温での 3.6[dpa]照射では 5%の増加、36[dpa]照射では 20%の増加、573K での 36[dpa]照射では 22%の増加を示した。また、JT-02W タングステン部分 (1.0~2.0mm) においては、室温での 3.6[dpa]照射では 18%の増加、573K での 3.6[dpa]照射では 20%の増加を示した。573K の高温照射においても、室温照射とほぼ等しい照射硬化を示した。

Fig.2 と Fig.3 より、タングステンの照射硬化は、モリブデンや銅よりも小さく、タングステンが耐照射損傷性を有していた。また、NDB 接合法による接合界面付近の硬さは、Mo を挿入した場合よりも硬さの増加率が大きいことがわかった。一方、中間材に Mo を挿入した JT-01W および JT-02W の接合試験体の熱負荷試験の結果は、12[MW/m²]の高熱負荷時では、JT-01W が純タングステンの表面温度より若干低い値を示し、その表面温度が約 1400K になった。また、NDB 接合法で接合した JT-01W と JT-02W の接合試験体の熱負荷試験の温度を外挿してみると、12[MW/m²]の熱負荷に対して、

(a) JT-01W-Cu

(b) JT-02W-Cu

Fig.3 Increasing rate of dynamic hardness at W-Cu joining parts by NDB due to Cu^{2+} ion irradiation.

JT-01W の場合で約 1100[K]、JT-02W の場合で約 1200[K]と予想され、タングステンの再結晶温度以下であった。以上の結果、NDB 法によるタングステンプラズマ対向機器は、良好な熱応答特性を示し、次期核融合実験装置への応用が期待できた。

4. 結言

本研究は、タングステン材料を核融合炉用プラズマ対向機器へ応用するために、イオン照射試験を行い、タングステン接合材料の機械的特性に及ぼすイオン照射効果を究明した。また、電子ビーム加熱試験による接合試験体の熱応答特性の評価も行った。以下に得られた結果を示す。

- (1) Cu^{2+} イオン照射試験を行った結果、照射欠陥の増大、転位の移動阻害などにより、照射量の増大に伴うダイナミック硬さの増加を示した。また、タングステンの照射硬化は、モリブデンや銅よりも小さく、タングステンが耐照射損傷性を有していることが分かった。
- (2) JT-01W および JT-02W と無酸素銅との直接的に NDB 接合した接合試験体は、12[MW/m²]の熱負荷に対して、その表面温度が約 1100~1200[K]で、タングステンの再結晶温度以下であった。従って、NDB 法によるタングステンプラズマ対向機器は、良好な熱応答特性を示し、次期核融合実験装置への応用が期待できた。

参考文献

- (1) 小林,本橋,他,日本機械学会講演論文集, Vol.37, (2002), pp.104-105.
- (2) 田辺,丸山,他,プラズマ・核融合学会誌,Vol.69,No.5,(1993), pp. 441-444.