107 核融合実験炉用ダイバータ模擬試験体の熱負荷特性

Study on thermal load characteristics of the divertor mock-up for nuclear fusion experimental reactor.

○学 武藤利恵子(茨城大院)* 正 今村好男(茨城大工)** 正 車田亮(茨城大工)**

※: Rieko MUTO, Graduate School of Ibaraki University, 4-12-1, Nakanarusawa, Hitachi, Ibaraki 316-8511.

※※: Yoshio IMAMURA, Akira KURUMADA, Faculty of Engineering, Ibaraki University.

Divertor plates of nuclear fusion experimental reactor are considered to be joined together the plasma facing armor materials having the heat resistance in the heat sink materials of metals cooled actively. In this study, the divertor model was produced by joining together C/C composite in the oxygen free copper using a titanium foil. And electron beam heating tests were carried out for the divertor model. The temperature characteristics in the case of heat load test to the divertor model were obtained analytically, and it were compared and was examined with the heat load experiment. The wear was observed in the heat load test in thermal load over about 12.5 MW/m² on the surface of C/C compsite. When thickness of the titanium foil was 0.05mm, the temperature of each part of the divertor model got analytically showed the value which was smaller than the value got by the heat load experiment.

Key Words: fusion reactor, divertor, C/C compsite, temperature characteristic, heat load test

1. はじめに

現在、核融合実験炉ではプラズマ対向材料として耐熱衝撃性に優れ、高熱伝導性を有する炭素系材料の使用が検討されている。中でも、不純物を排気するダイバータ板は、特に高い熱負荷にさらされる。また、核融合炉の運転に伴う繰り返し熱負荷を受けるために、ダイバータ板を強制的に冷却する必要がある。しかし、炭素系材料だけでは、冷却管構造を構成するのは非常に困難であるためヒートシンク材として熱伝導性に優れた銅が使用されている。

本研究では炭素系複合材料と無酸素銅をチタン箔を用いて接合し、ダイバータ板の模擬試験体を作製した後、繰り返し熱負荷試験を行った。また、その模擬試験体に対する熱負荷時の温度特性を計算により求め、実験と比較し検討した。

2. 実験方法

炭素系材料として東洋炭素(株)製 C/C コンポジット CX-2002U (20×20×10 及び 20[mm])、ヒートシンク材として冷却管付き無酸素銅を厚さ 0.05[mm]のチタン箔を用いて真空中、1000℃で接合し、模擬試験体を作製した。Fig. 1は作製した

Fig. 1 Dimensions of divertor mock-up specimen.

ダイバータ模擬試験体の形状寸法を示す。繰り返し熱負荷試験は、偏向型電子ビーム加熱装置を用い、熱流束が 5～15[MW/m²]の範囲で、冷却水流量 15.2[l/min]、水温 15[℃]で行った。一定の熱流束の電子ビームを 10 秒間照射し、15 秒間隔停止する方法により 1000 回繰り返し行なった。この時、接合部の温度を測定するため、接合部から上下 1mm の場所に熱電対を取り付け、CX-2002U の表面温度は放射温度計で測定した。

次に 5～15[MW/m²]の繰り返し熱負荷試験時の温度特性の計算を行った。ダイバータ模擬試験体全体の熱負荷時の温度特性は米国 LSTC 社によって開発された、有限要素法による陰解法非線形構造解析プログラムである JOH/NIKE2D/3D を用いて熱伝導解析を行った。熱伝導解析を行った時の解析条件 Table 1 に、その時に用いた物性値を Table 2 に、解析形状を Fig. 2 に示す。Table 2 は 20℃における物性値である。密度以外の物性は、温度依存性を考慮して解析を行った。この物性は、レーザーフラッシュ法によりそれぞれの温度について測定した。

Table 1 Analyzing condition

	CX-2002U	Cu	Ti
熱流束[MW/m ²]	5,10,15		
冷却水温度[K]		288	
初期温度[K]		293	
要素数		2379	
節点数		3460	
要素形状	四角、三角	四角、三角	三角

Table 2 Physical properties of divertor model

	密度[kg/m ³]	比熱[J/kgK]	熱伝導[W/mK]	ふく射率
CX-2002U	1720	710	230	0.052
Cu	8960	384	398	0.5
Ti	4507	522	21.9	-

Fig.2 Divertor model used for analyzing

3、結果及び考察

Fig.3 は、繰り返し熱負荷試験の照射時間に対する各部の温度と熱流速の例を示したものである。1000 回の繰り返し熱負荷試験においては、各部の最高温度値は一定で変化がなかったことから、接合部の健全性は保たれていると考えられる。また、黒鉛材料は 1200°C 以上では、照射促進効果により急速に表面が損耗するといわれる。しかし、本実験では、Fig.4 に示すように $12[\text{MW}/\text{m}^2]$ の繰り返し熱負荷試験で初めて照射面に損傷が確認された。このことから、CX-2002U は $10[\text{MW}/\text{m}^2]$ までの電子ビーム照射には耐え得ると考えられる。

Fig.5 は Ti 厚さ 0.05mm で冷却水温度が 288K の時の各熱流速と各部の温度について実験値と計算値を比較したものである。計算値の方が各部とも実験値より低い値を示した。これは計算に用いた各物性値の温度依存性や接合部の考え方に問題があると考えられる。物性値の温度依存性についてはレーザーフラッシュ法により測定したが、実験によりバラツキが見られ、更に詳細に検討する必要があると思われる。接合部については Ti 箔の厚さを 0.05mm として計算したが、模擬試験体接合部において $0.2\sim 0.4\text{mm}$ の Ti-Cu の拡散層が観察された。このことから Ti 層の厚さは 0.05mm とするより、更に厚いものとして考慮するほうが妥当と考えられる。一例として、Ti の厚さを 0.4mm として計算すると CX-2002U の表面温度は $5[\text{MW}/\text{m}^2]$ で実験値とほぼ一致し、 $15[\text{MW}/\text{m}^2]$ では逆に実験値より大きい値となった。

4、結論

本研究は炭素系複合材料 (CX-2002U) と無酸素銅を Ti 箔を用いて接合し、ダイバタ模擬試験体を作製した。次いで電子ビーム照射による繰り返し熱負荷試験および計算によりその温度特性を求めた。得られた結果は次のとおりである。

Fig.3 Typical temperature responses of each part under heat load test ($10[\text{MW}/\text{m}^2]$).

Fig. 4 Surface appearances of CX-2002U after heat load test.

Fig.5 Relation between heat flux and temperature of each part. (experiment and analysis)

1. CX-2002U 模擬試験体は $10[\text{MW}/\text{m}^2]$ までは使用し得る。
2. 計算による各部の温度は実験値よりも低い値を示した。
3. 各部の温度依存性や接合部の特性を今後、更に検討する必要があると考えられる。

5、参考文献

- (1) 日本原子力研究所、核融合炉をめざして (1999)
- (2) 機械工学選書 伝熱工学 相原利雄著
- (3) T. Oku, Y Imamura, et al, International Symposium on Carbon, (1998) 460-461