



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	核融合炉ダイバータ用炭素繊維強化複合材/無酸素銅接合材のガス放出特性
Author(s)	六反田, 崇; Rokutanda, Takashi; 広畑, 優子 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 178, 13-23
Issue Date	1996-10-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42476
Type	departmental bulletin paper
File Information	178_13-24.pdf



核融合炉ダイバータ用炭素繊維強化複合材
/無酸素銅接合材のガス放出特性

六反田崇 広畑優子 日野友明 山科俊郎
(平成7年12月22日受理)

**Gas desorption property of carbon fiber composite/oxygen-free
high conductivity copper brazed material
as a divertor plate for a nuclear fusion device**

Takashi ROKUTANDA, Yuko HIROHATA, Tomoaki HINO, Toshiro YAMASHINA
(Received December 22, 1995)

Abstract

In a fusion device since, the divertor plate is irradiated with high heat flux, the temperature of the divertor component shall become very high. In order to reduce the heat load, a carbon fiber composite (CFC)/oxygen-free, high conductivity copper (OFHC-Cu) brazed material with a pipe for water cooling was developed as a divertor component. However, gas desorption from the divertor component occurs during the plasma discharge. In this study, we investigated the gas desorption property of this brazed material following electron beam irradiation by thermal desorption spectroscopy (TDS). Two CFCs (CX-2002U and MFC-1) were used as the plasma facing material (PFM). The results were compared with the case before electron beam irradiation.

For TDS measurement, the brazed material was cut into small pieces of five different positions (two pieces from the CFC part, two pieces from the part containing a brazed layer, and the OFHC-Cu part). The desorbed gases from the material following irradiation were very similar to those from the material before irradiation at every sampling position. The main desorbed gases were H_2 , H_2O , CO, and CO_2 .

For the surface of CFC, the total amount of desorbed gases from the material following an irradiation was about four times larger than that before irradiation. For the OFHC-Cu, a large desorption peak was observed in the TDS spectrum of CO_2 . The total amount of desorbed gases from the material following irradiation was 0.6-1.5 times that before irradiation. For the sample containing a brazed layer of an MFC-1 series brazed component, the total amount of gases desorbed from the material following irradiation was 7 times larger than that before irradiation. However, in the case of CX-2002U series brazed component, there was little difference in between the total amount of desorbed gases from the materials before and after irradiation.

Based on the desorption amounts of the three samples, i.e, the CFC, the OFHC-Cu and the sample containing a brazed layer, we estimated the gas desorption amount from a brazed layer with a thickness of $50\mu\text{m}$. In the case of an MFC-1 series brazed component, the gas desorption amount from the brazed layer of the material after irradiation was estimated to be 20 times larger than that before irradiation. The contribution of the brazed layer to the total desorption of the entire brazed material greatly increased by electron irradiation.

1. はじめに

現在, JET (Joint European Tokamak) では核融合反応の3重積 $[n_1 \cdot T_1 t (\text{keV} \cdot \text{sec} \cdot \text{m}^3)]$ が $T_1 \approx 20 \text{ keV}$ で $9 \times 10^{20} \text{ keV} \cdot \text{sec} \cdot \text{m}^3$ となりすでに臨界条件を達成し¹⁾, JT-60 U でも $T_1 \approx 40 \text{ keV}$ で $1 \times 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{sec} \cdot \text{m}^3$ を越え²⁾ 臨界条件に近づきつつある。しかし核融合炉実現のためには, まだ課題を残している。その課題の一つとして, プラズマ中の不純物濃度を極力低減することがあげられる。現在, 核融合実験装置では, 磁場を制御することによってプラズマ中の高エネルギーの不純物粒子をダイバータ板に集め, ダイバータ板以外のプラズマ対向壁に高エネルギー粒子が衝突することを抑制している。このため, ダイバータ板は高熱負荷にさらされる。国際協力によって建設が計画されている国際熱核融合実験炉 (ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor) の概念設計では, この熱負荷は定常時でも $5 \sim 15 \text{ MW/m}^2$ と予想されている^{2),3)}。従って, ダイバータ板には強制冷却機構を備え付けた構造をもつダイバータ材を用い, 熱負荷を減少させなければならない。さらに, ダイバータ板には熱伝導特性, 耐熱衝撃性に優れた材料を用いる必要がある。ダイバータ材の候補として炭素繊維強化複合材 (CFC : Carbon Fiber Composite) が用いられている。この CFC 材に無酸素銅 (OFHC-Cu : Oxygen Free High Conductivity Copper) を接合し OFHC-Cu 部に冷却水用のパイプを取り付けたダイバータ用接合材が日本原子力研究所で開発された (Fig. 1)。しかし, この様な構造をもつダイバータ材を用い強制冷却を行っても, 高熱負荷によりダイバータ板の温度が上昇し, ダイバータ板からガスが放出することが予想される。また熱負荷によりダイバータ板表面が変質し, その後のガス放出特性や熱伝導特性が大きく変わることも考えられる。特にダイバータ板から放出するガスはプラズマ中の不純物となり, プラズマ閉じこめ特性の劣化の原因となる。

本研究では, 熱負荷を受けた

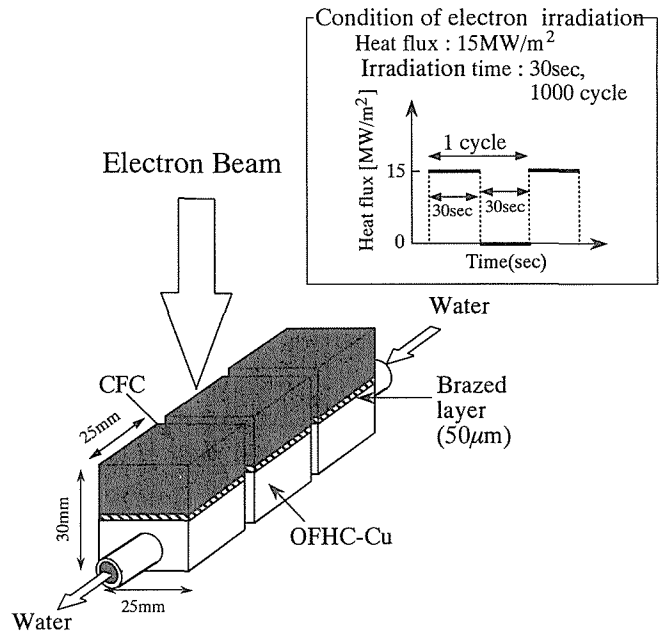


Fig. 1 Schematic diagram of a CFC/OFHC-Cu brazed component.

接合材のガス放出特性を調べた。Fig. 1 に示す接合材に CFC 材側から電子ビームを照射することによって熱負荷を与え（照射試料），その後のガス放出特性を昇温脱離分析（TDS）法で評価し，照射前の接合材（未照射試料）⁴⁾と比較検討した。

2. 実験方法

2.1 CFC/OFHC-Cu 接合材とサンプリング位置

本研究で評価するダイバータ板は，Fig.1 に示すように CFC，OFHC-Cu および接合層からなっている。CFC には三菱化学社製の MFC-1（1次元ピッチタイプ）と東洋炭素社製の CX-2002U（2次元フェルトタイプ）の2つを用いた。2つの CFC の大きな違いは熱伝導率である（Table 1⁵⁾）。MFC-1 は一方向（z 軸）にのみ高い熱伝導率を有し，他の二方向の熱伝導率は z 軸の約 1/10 である。CX-2002U は二方向の熱伝導率を高くするように繊維を編み込み，さらにもう一方の熱伝導率も他の二方向の 1/3 程度とし，熱伝導特性の等方化を図ったものである。両 CFC とも z 軸方向に高い熱伝導率を持つように接合している。これらの CFC 材を冷却水用のパイプを付けた OFHC-Cu に銀ろうを用いて接合した。接合層の厚さは約 50 μm である。銀ろうの成分は Ag=63.8%，Cu=34.6%，Ti=1.6% である。この様な接合材の異なる 5つの場所から 12 mm×12 mm×1 mm の平板状にサンプリングしたものを試料として用いた。サンプリング位置を Fig. 2 に示す。CFC 部分，接合層を含む部分からそれぞれ 2箇所と OFHC-Cu 部分から 1 箇所の計 5 箇所からサンプリングした。

Table 1 Thermal conductivities of MFC-1 and CX-2002U materials.

Direction	Thermal Conductivity [W/m·K]		
	x	y	z
MFC-1	50~30	50~30	460~360
CX-2002U	290 (at RT)	116 (at RT)	290 (at RT)

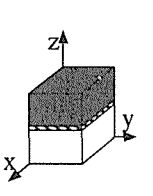
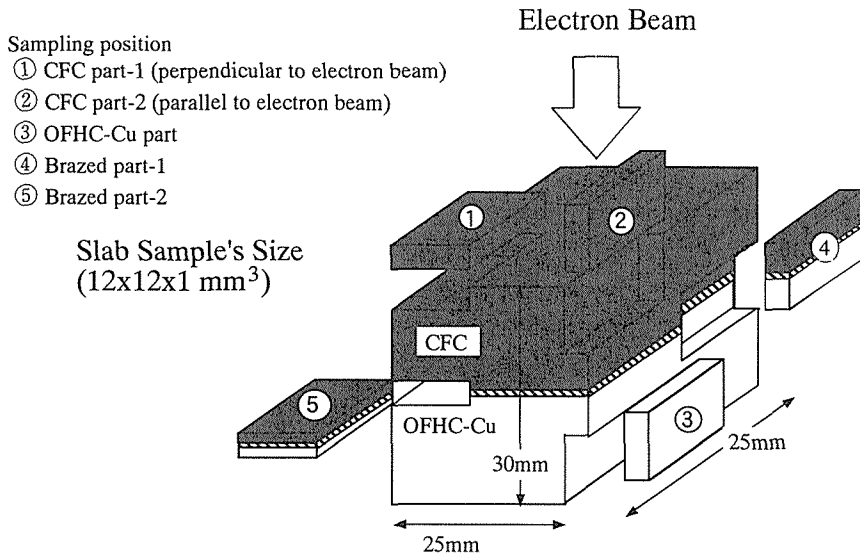



Fig. 2 Sampling position for the measurement of TDS.

2.2 電子ビーム照射による熱負荷実験

電子ビームの照射は、日本原子力研究所那珂研究所の JABIS 装置で行われた。照射は CFC 側から行い、その条件はビームの熱流束を 15 MW/m^2 とし、30 秒照射、30 秒休止を 1 サイクルとして 1000 サイクル行った (Fig. 1)。

2.3 ガス放出特性

接合材からサンプリングした平板材料 (MFC-1 シリーズ及び CX-2002U シリーズより各 5 箇所) のガス放出特性の評価は TDS 法で行った。実験装置の概略図を Fig. 3 に示す。装置は試料準備室と試料分析室とからなる。分析室を十分排気し Ta ヒーターの脱ガスを行った後、準備室から試料を Ta ヒーターに移し、ヒータを加熱することによる傍熱加熱で試料を加熱した。試料の温度測定は Ta ヒーター下部に点溶接してある熱電対で行った。試料の加熱は熱電対からの信号を PID コントローラーで制御して、昇温速度 (β) を $10^\circ\text{C}/\text{min}$ で室温 (RT) から 1073 K (800°C) までとした。加熱の上限温度は OFHC-Cu の融点を考慮して決めた。脱離するガスの種類の分析には四重極質量分析計 (QMS) を用いた。各ガスの脱離率は、気体の排気速度 S と QMS の感度係数 K を用いて計算することができる⁶⁾。本研究では、 S と K とを掛け合わせた値 (SK 値) をあらかじめ測定し、その値を用いて脱離率を求めた。ただし、 H_2O の SK 値の測定は技術的に困難であるため、 N_2 の感度を用いて評価した。また、1073 K までの脱離率を積算した脱離量を求めた。

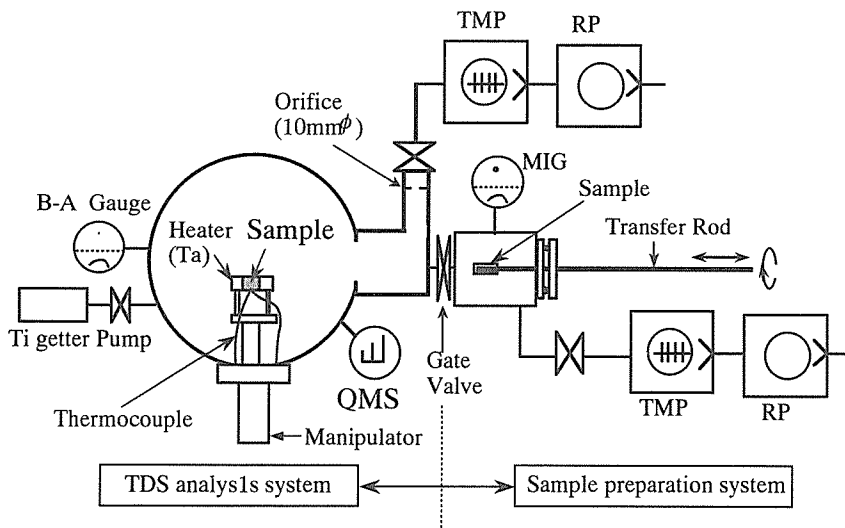


Fig. 3 Schematic diagram of TDS apparatus.

3. 結 果

本研究では二種類の CFC 材を用いた接合材について電子ビーム照射前後の各部分のガス放出特性を調べたが、ここでは一次元 CFC 材である MFC-1 を用いた接合材の結果を中心に述べる。また CFC 部分、接合層を含む部分からは 2 箇所ずつサンプリングしたが、CFC 部分からは直接電子ビームを受ける CFC 表面 (CFC part-1: Fig-2) の結果を例として、接合層を含む部分からは含まれる接合層の体積が多い接合層近傍 (Brazed part-2: Fig-2) の結果を例として示す。

3.1 CFC 表面のガス放出特性

Fig. 4 に質量スペクトルの一例として、照射後の CFC 表面 (MFC-1) の 1000 K のものを示す。放出気体種は H_2 , H_2O , CO , CO_2 および炭化水素であった。またこれら放出気体種はサンプリング位置によらず、かつ電子ビーム照射前後でも変わらなかった。炭化水素の脱離量は SK 値を考慮すると他の 4 つの気体の脱離量の 1/10 程度であった。

Fig. 5 に CFC 表面の主な放出気体の TDS スペクトルを示す。a) は未照射試料の、b) は照射試料のスペクトルである。両図とも縦軸は単位面積当たりの脱離率、横軸は温度である。照射試料では、主な気体の脱離率が未照射試料より 150 K 程度低温側の約 500 K から上昇し始めた。このことは CX-2002U を用いた接合材でも同様であった。また、 H_2 が 900 K 以上の高温側で多量に脱離する傾向は未照射試料と同じであったが、脱離量は未照射試料の約 2 倍に増加していた。

Table 2 の a), b) の第 2 欄に未照射及び照射試料の主な放出気体の 800 K までの積算放出量を示す。これより、 H_2 以外の気体の脱離量も未照射試料より増加する傾向にあることが分る。4 つの気体の脱離量を積算した総脱離量で比較すると未照射試料の 3 倍程度に増加した。照射後、 H_2 が 900 K 以上の高温側で

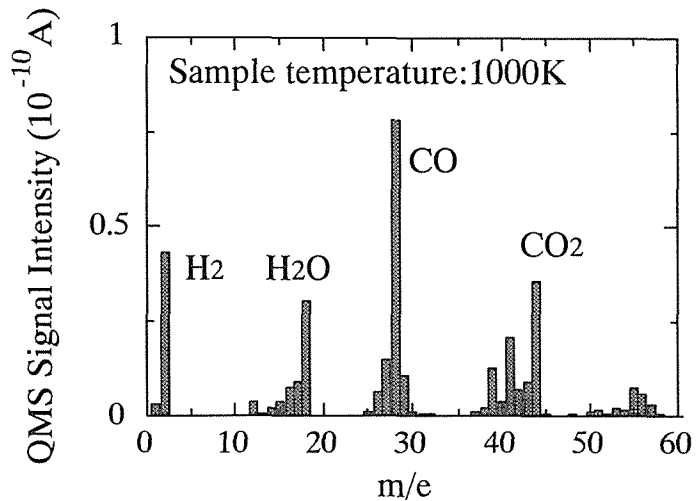


Fig. 4 Typical mass spectrum of CFC surface of the brazed material (MFC-1 series).

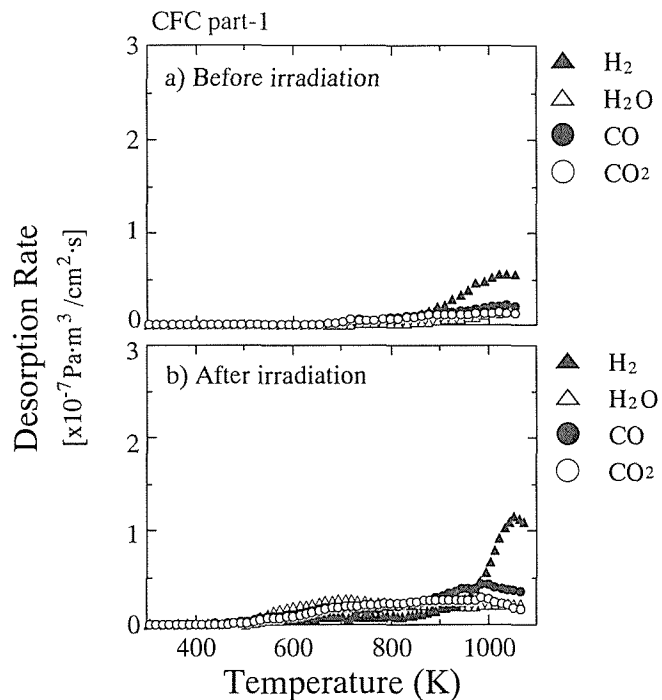


Fig. 5 TDS spectra of main gases desorbed from CFC surface (MFC-1 series).

a) before irradiation, and b) after irradiation.

多量に脱離すること、各気体の脱離量が増加することは CX-2002U を用いた試料でも同じであった。しかし、CX-2002U では 600 K~800 K の温度範囲での各気体の脱離率が MFC-1 より大きくなり、総脱離量は MFC-1 より約 3 倍多くなった。電子ビーム照射中の CX-2002U の表面温度は、熱伝導率の違いから MFC-1 の表面温度より約 200 K 高い約 1473 K となった。そのため、CX-2002U では電子ビームによって表面の変質が MFC-1 より著しく、気体が吸着しやすい表面状態になったと思われる。

Table 2 Amount of gases desorbed from each element of the brazed materials (MFC-1 series).

MFC-1 series

a) Non irradiated sample [x10¹⁶ molecules / cm²]

Species of desorbed gases	CFC part-1	OFHC-Cu part	Brazed part-2	Brazed lyear
H ₂	1.1	1.1	1.4	49
H ₂ O	0.3	1.2	1.1	60
CO	0.6	1.5	11	16
CO ₂	0.5	3.2	2.0	20
Total amount	2.5	7.0	5.6	145

b) Electron beam irradiated sample [x10¹⁶ molecules / cm²]

Species of desorbed gases	CFC part-1	OFHC-Cu part	Brazed part-2	Brazed lyear
H ₂	2	1.3	5.4	524
H ₂ O	1.7	2.3	7.9	823
CO	1.9	1.8	6.4	637
CO ₂	1.6	4.9	13	1371
Total amount	7.2	10.3	32.7	3355

3.2 OFHC-Cu 部のガス放出特性

Fig. 6 に OFHC-Cu 部の主な脱離気体の TDS スペクトルを示す。a) は未照射試料の、b) は照射試料のスペクトルである。OFHC-Cu 部では脱離率が上昇し始める温度は、CFC 部分と同じように未照射試料よりも低温側にシフトし約 500 K であった。しかしそのシフト幅は 50 K 程度で CFC 部よりも狭かった。このことは CX-2002U を用いた接合材の OFHC 部でも同様であった。

OFHC-Cu 部では両試料とも CO₂ の脱離率が最も大きい。CO₂ の TDS スペクトルには、未照射試料では約 600 K と約 750 K の 2 箇所に CO₂ の脱離ピークが認められ、CO₂ の脱離ピークと同じ温度に CO も脱離ピーク(ショルダー)が認められた。照射試料でも、600 K と 750 K に対応すると思われる脱離ピークが各々 650 K と約 800 K に認められ、同じ温度に CO の小さい脱離ピークも存在した。Fig. 7 は無酸素銅 (OFHC-Cu) の素材のガス放出特性を調べたものである。その結果、約 700 K 及び 800 K の 2 箇所に CO₂ の脱離ピークが存在することが分った。従って、OFHC-Cu には 600 K~700 K と 750 K~800 K の温度領域にそれぞれ結合エネルギーの異なる CO₂ の吸着サイトを持っていることが分った。ここで、照射試料の CO₂ の脱離率が 800 K で大きくなった理由は、照射中にこの吸着サイトに多量の気体が吸着したためと考えられる。すなわち、照射中接合材表面の CFC 部は高温になるが、OFHC-Cu 部は冷却により相対的に温度が低いいため、照射中に接合材から脱離した気体が再吸着することが考えられる。OFHC-Cu 部の接合層側の温度は約 773 K (400°C) で、切り出し方から分かるように OFHC-Cu 部は温度分布を持っている。773 K 以下で脱離するエネルギーで OFHC 部に吸着した気体は、照射中に一部脱離することが考えられる。そのため未照射試料に比べ 600 K 近傍で脱離する CO₂ の脱離率が低下し、約 800

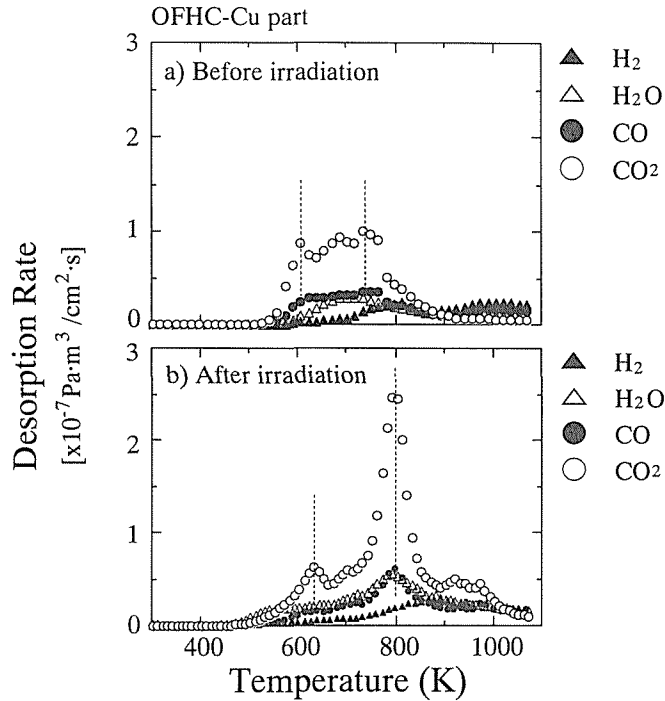


Fig. 6 TDS spectra of main gases desorbed from OFHC-Cu part (MFC-1 series).
a) before irradiation, and b) after irradiation.

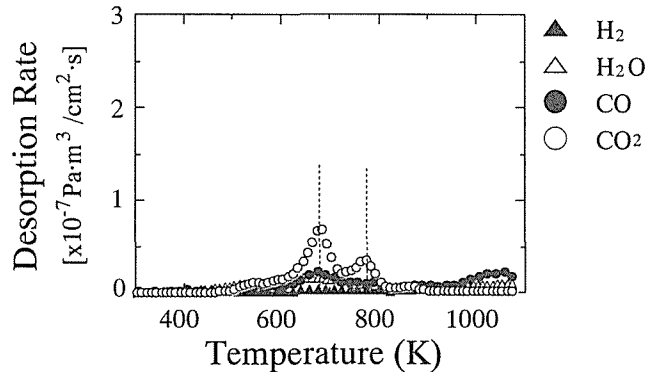


Fig. 7 TDS spectra of OFHC-Cu as non brazed OFHC-Cu.

Kで脱離するCO₂が多くなったものと思われる。

主な放出気体の脱離量を Table 2 の a), b) の第 3 欄に示す。照射試料の OFHC-Cu 部からの各気体の脱離量は未照射試料よりも増加する傾向にあった。総脱離量で比較すると未照射試料の約 2 倍に、また照射した CFC 表面 (MFC-1) の約 1.5 倍に増加した。

CX-2002U を用いた試料でも CO₂ に 2 つの脱離ピークが確認された。しかし、主な脱離気体の脱離量は、未照射試料や照射した CFC 表面 (CX-2002U) よりむしろ減少する傾向にあった。

OFHC-Cu 部分は直接電子ビームを受けないが、接合する CFC 材の熱伝導率によって OFHC 部が受ける熱の影響はことなる。そのため CX-2002U シリーズの OFHC 材からのガス放出の傾向が異なったものと思われる。

3.3 接合部近傍のガス放出特性

Fig. 8 に接合部近傍の主な脱離気体の TDS スペクトルを示す。a) は未照射試料の、b) は照射試料のスペクトルである。ここで、b) の縦軸は a) の 2 倍である。接合部近傍では脱離率が上昇し始める温度が未照射試料よりも 250 K 程度低い約 400 K であった。シフト幅は CFC 部よりも 100 K も広い (Fig. 5-(b))。また、照射試料ではすべての気体の脱離率が未照射試料よりも増加しているのが分かる。

Fig. 2 から分かるように、接合部近傍は CFC 部、OFHC-Cu 部及び接合層から構成されている。

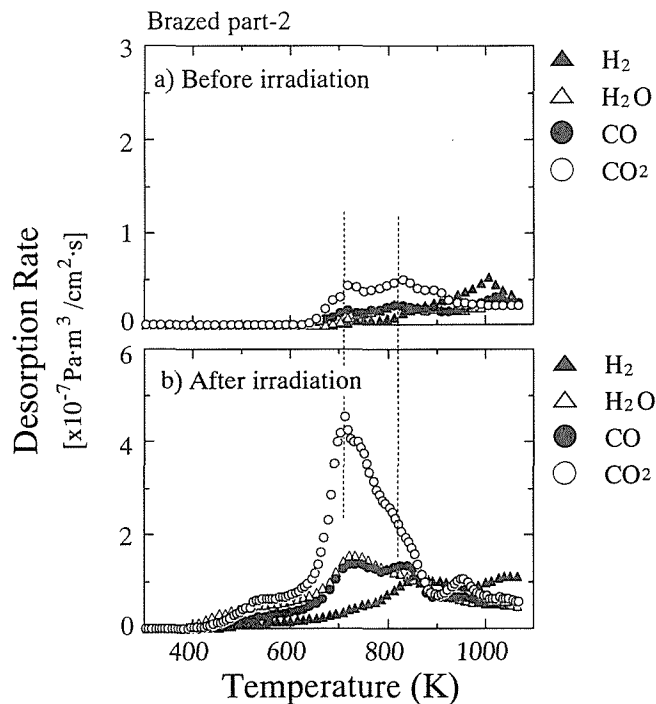


Fig. 8 TDS spectra of main gases desorbed from brazed part-2 (MFC-1 series).
a) before irradiation, and b) after irradiation.

従って、未照射試料の接合部近傍の TDS スペクトルには、その構成要素である CFC 部と OFHC-Cu 部の特徴を合わせ持っている。つまり、接合部近傍では H_2 が高温側で脱離し、 CO_2 が 2 つの脱離ピークを有していた。これらの傾向は照射試料でも確認された。まず、 CO_2 は約 700 K に大きなピークを有し、約 800 K にもショルダーが存在した。これは CO についても同様の傾向にあり、 CO 、 CO_2 の脱離のピーク温度は電子ビームを照射してもほとんど変化しないことが分かった。また OFHC-Cu 部の CO 、 CO_2 の脱離ピーク温度と比べると高温側へシフトしているが、これは未照射試料でも同様の傾向であった。また、 H_2 は高温側で脱離率が大きくなる傾向にあるが、こ

の傾向は未照射試料と同じであるが、約 850 K にも脱離ピークを有している。

主な放出気体の脱離量を Table 2 の a), b) の第 4 欄に示す。未照射試料に比べていずれのガスも 4 ~ 7 倍に、総放出量でも 6 倍に増加し、MFC-1 を用いた接合材では電子ビーム照射により接合層に何らかの変化が生じたものと考えられる。MFC-1 より熱伝導性の劣る CX-2002U を用いた接合材では、接合層近傍からの脱離量は未照射試料とほぼ同じであった。

3.4 接合層からのガス脱離量の見積もり

接合材の CFC 部、OFHC-Cu 部、及び接合産近傍の 3 箇所からのガスの脱離量のデータから接合層のみから脱離する気体の量を見積もった。接合部近傍が CFC 部および OFHC 部の 1/2 (体積で比較) と厚さ 50 μm の接合層からなっていると仮定した。接合部近傍の脱離量から CFC 部および OFHC 部からの脱離量の 1/2 を差し引いた残りの量が、厚さ 50 μm の接合層から脱離しているものとした。この様な過程に基づいて計算した接合層からのガス放出量を単位面積当たりで比較したものを Table 2 の a), b) の第 5 欄に示した。各ガスの単位面積当たりの脱離量を接合材の各要素で比較すると、照射による脱離量の増加は接合層が一番大きく、約 23 倍にも増加した。しかし、試料に用いた接合材がダイバータ材として用いられた場合、Fig. 1 に示すように接合層が真空雰囲気下にさらされる表面積は CFC 部や OFHC 部に比べると非常に小さい。例えば Fig. 1 に示した接合材の 1 ブロック (25×25×30 mm³) で考えると接合層の表面積は CFC 部や OFHC-Cu 部の約 400 分の 1 となる。このことを考慮に入れて各部分からの脱離量を接合材 1 ブロックで評価すると、Table 3 に示す割合となった。未照射試料の場合、接合層からの脱離量が無視できるほど小さかったのに対し、照射試料では CFC 部や OFHC 部と同等となった。

これらの結果から、本研究で用いた接合材が ITER で用いられた場合、温度上昇による接合材からのガス放出がどの程度の圧力上昇になるのかを概算した。ITER の工学設計の段階で、ダイバータの表面積は 100 m² と計画されている。このうち磁力線の走査範囲は推定で 10 m² 前後になるものと考えられる。10 m² の CFC が 1 sec で 800°C まで加熱されたと仮定して、圧力上昇がどの程度になるか概算した。計算を簡単にするために、表面形状が正方形、表面積が 10 m² で厚さ 3 cm (接合層の厚さ 50 μm) のダイバータ板を考える。この場合、CFC 部及び OFHC-Cu 部の表面積はいずれも約 10.2 m² であり、接合層の表面積は約 $6.3 \times 10^{-4} \text{m}^2$ である。CFC 部分から脱離する量は、CFC 表面が 800°C まで加熱されると仮定するので、本研究から得られた 800°C まで総脱離量 ($7.2 \times 10^{16} \text{molec./cm}^2$: Table 2 (b) 第 2 欄) を用い $7.3 \times 10^{21} \text{molec./s}$ となる。OFHC-Cu 及び接合層からの脱離量は、CFC 表面が 800°C まで加熱された時の OFHC-Cu 及び接合層の温度を考慮することにした。Fig. 9 に加熱温度とその温度までに放出された全脱離量の関係を示す。縦軸は各部分の総脱離量を 1 とし規格化してあるので、その温度までに放出された全脱離量の総脱離量に占める割合を示している。厚さ 30 mm の接合材に熱流束 15 MW/m² の電子ビームを照射した場合、接合面の銅側は約 400°C と推定される。よって、CFC 表面が 800°C まで加熱された時、OFHC-Cu 及び接合層から脱離する気体は、Fig. 9 から約 17%以下と考えた。17%の場合、OFHC-Cu 及び接合層からの脱離量は、Table 2 (b) 第 3, 第 5 欄 ($1.03 \times 10^{17} \text{molec./cm}^2$, $3.4 \times 10^{19} \text{molec./}$

Table 3 Ratio of normalized desorption amount for the geometrical area.

	CFC part-1	OFHC-Cu part	Brazed layer
Non-irradiation sample	25	70	5
Irradiation sample	30	40	30

(%)

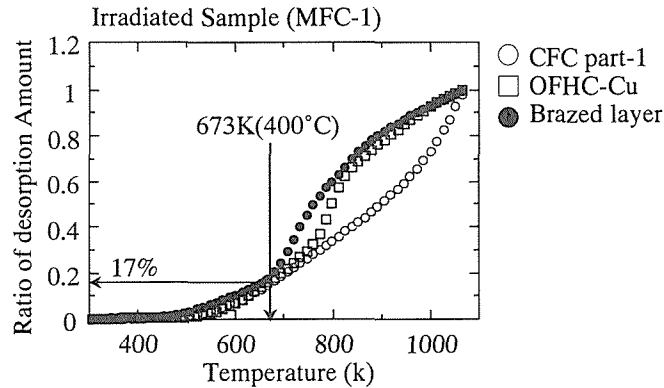


Fig. 9 Annealing temperature dependence of gas desorption amount. Data was normalized as unity by total gas desorption amount.

cm²)から、 1.8×10^{21} molec./s 及び 3.5×10^{19} molec./s となる。3箇所からの脱離量の積算値は約 9×10^{21} molec./s となる。CX-2002U を用いた接合材に関しても同様にして放出量を見積もると、 22×10^{21} molec./s となった。この量を流量に直すと約 $37 \sim 90$ Pa \cdot m³/s に相当する。ITER で使用するポンプの実効排気速度は最大で 700 m³/s と計画されている⁷⁾。従って真空容器内は瞬間的に $0.05 \sim 0.13$ の圧力上昇となる。仮に接合材全体が 800°C まで加熱されたとすると、不純物流入量は約 $74 \sim 107$ Pa \cdot m³/s となる。燃料の流量 ($22 \sim 47$ Pa \cdot m³/s) と比較すると、いずれの CFC を使用した接合材でも瞬時に燃料の $1 \sim 2$ 倍強の不純物が混入することになる。しかし、熱伝導率の優れた材料の開発や冷却効率が最良となる冷却水の条件(流量, 流速や冷却水の温度)を見つけることでこのガス放出量は低減されるものと考えられる。

4. ま と め

核融合実験装置用のダイバータ候補材として日本原子力研究所で開発した炭素繊維強化複合材/無酸素銅接合材電子ビーム照射前後のガス放出特性を調べた。

- (1) 未照射試料では、CFC 部に異なる CFC 材を用いても各部分のガス放出特性に大きな違いが認められなかった。
- (2) しかし、照射試料では CFC 材の種類によって各部分のガス放出特性に大きな違いが認められた。
 - ① 一方向に熱伝導率の大きい MFC-1 を用いた接合材では、未照射試料と比べると、接合部近傍のガス放出量の増加率が最も大きく (約 6 倍)、その量は CFC 部や OFHC-Cu 部のそれぞれ約 4.5 倍、3 倍であった。
 - ② 二方向に高い熱伝導率をもつ CX-2002U を用いた接合材では、未照射試料に比べて CFC 表面からのガスの脱離量の増加率が最も大きく (約 5 倍)、その量は接合部近傍や OFHC-Cu 部のそれぞれ約 2 倍、4 倍であった。
- (3) 本研究で用いた接合材が ITER で用いられた場合、温度上昇による接合材からのガス放出による圧力上昇は、約 $0.05 \sim 0.13$ Pa となることが分かった。

謝 辞

本研究は日本原子力研究所那珂研究所の受託研究の一環として行われた。研究に当たり助言をいただいた日本原子力研究所の中村和幸博士，秋場真人博士に感謝致します。

参考文献

- 1) T. Hino and M. Ulrickson : Proc. of J-US Workshop P243 on HHFC and PSI for Next Fusion Devices Hokkaido Univ., Jan. 31-Feb. 3, 1995
- 2) 秋場真人：プラズマ核融合研究, 70 (1994) 712.
- 3) T. Hino and T. Yamashina : Fusion Engineering and Design, 24 (1994) 425.
- 4) 沖田雅夫：北海道大学修士論文, 1993 年度
- 5) 山本正弘, 安東俊郎, 他：日本原子力研究所, JAERI-M, 90-1 19, (Aug. 1990)
- 6) 中山喜明, 福田 伸, 日野友明, 山科俊郎：真空 32 (1989) 415
- 7) Inter. Atomic Energy Agency (Vienna), ITER Fuel Cycle, ITER Documentation Series, No. 31 (1991)