昇温脱離法による各種黒鉛材料の吸蔵ガス量の測定

赤石 憲也*・久保田 雄輔*・宮原 昭*

Measurements of Occluded Gas Amounts in Graphites and
Carbon-Carbon Composites with Thermal Desorption Method

Kenya AKAISHI, Yusuke KUBOTA and Akira MIYAHARA

(Institute of Plasma Physics, Nagoya University)

(Received September 28, 1988, Accepted February 4, 1989)

From purpose of vacuum use of graphite and carbon as a plasma facing material in fusion devices, test samples made from these materials which are available in Japan are prepared and occluded gas amounts in these samples have been measured with thermal desorption method. At first total gas amounts evolved on heating as-received samples in a thermal bath with a linear ramp rate from room temperature to 1400°C have been measured. The gas amounts which are normalized with sample volume of 5 cm³, distribute in the range from 7.5×10^{-1} to 1.8×10^{-2} Torr l/cm³, depending on outgassing treatments for the materials by manufacturers. The lowest value for the gas amounts is obtained from among materials which are supplied after degassing in vacuum at 2000°C at makers. Secondly some of samples after the first thermal desorption test have been subsequently exposed to air for 50 days and reabsorbed gas amounts in the samples have been also measured. A saturation on the gas recovering has been observed and the average saturated gas amount is nearly the same value with the lowest gas amount for as-received samples after the higher temperature degassing. Finally derivation of a formular to calculate internal surface area of graphite is discussed according to a modeling presented for pore structure of isotropic graphite and the measured gas amount for the graphite is expressed with another normalized quantity as trapped gas molecules per unit surface area.

1. 序

最近の大型トカマク装置は、プラズマ対向材料として黒鉛タイルを採用しており、数10 MWにも及ぶ高加熱入力下で運転されている^{1,2,3,4)}。実機への黒鉛の採用に伴い、黒鉛材料に対する脱ガス特性の研究が行われている^{5,6)}。黒鉛や炭素材料の脱ガス特性については古くから真空管の電極材料への応用の見地から報告されている⁷⁾。これをみると現在と比べて、実験方法が限定されており、またガス分析計が普及していなかったため、放出ガスの同定において異った報告がされている。しかし脱ガス処理方法の評価については今日とあまり変わっていない。

核融合プラズマ実験装置への黒鉛材料の応用に関連して脱ガス特性の研究には、昇温脱離法が主として用いられている。実機においては黒鉛タイルはプラズマから高熱負荷を受け、1000°Cを超える高温に熱せられるので、高温時の脱ガス特性を知るのには昇温脱離法は適切な手段であろう。昇温脱離法では試験片から放出するガスの量と種類の情報が得られる。従来の研究では脱ガス量に関連して黒鉛製品に対する脱ガス処理の効果の判定、カサ密度依存性、および内部表面依存性などが調べられている^{8,9)}。また黒鉛の気孔構造の模型化に基づく、脱ガスの試料形状に対する相関が考察されている¹⁰⁾。ガスの種類に関しては黒鉛の製造工程における原材料と混合物質の反映が当初注目されたが、注目すべき放出ガスの違いはなく、製品の溶剤洗浄の効果や保管方法に関する知見が指摘されている⁹⁾。しかし現状では一部の黒鉛製

* 名古屋大学プラズマ研究所 (名古屋市中種区不老町)

Fig. 1 Schematic drawing of a thermal desorption apparatus.

品についてのみ脱ガスデーターが得られており、炭素製品も含めた多くの材料についての脱ガスデーターの蓄積は十分でなく、黒鉛および炭素材料全般に対する脱ガス特性についての真空工学的評価は今後に残されている。

本研究は上記の観点から極力多くの種類の黒鉛および炭素製品をとりあげ、それらにおける吸蔵ガス量を測定し、データーの蓄積を図っている。得られたデーターから①吸蔵ガス量と脱ガス条件の関係、②吸蔵ガス量の規格化方法および③等方性黒鉛に限定されるが、気孔構造からみた気体の内部表面への吸収について考察する。

2. 実験装置

昇温脱離装置は Fig. 1 に示すように、予備排気室、試料保持機構、試料加熱室、主排気装置、B-A 真空計およびガス分析計から構成されている⁹⁾。予備排気室は試料を外部から加熱室まで移送する時、空気の手込みにより主排気装置内の真空圧力を極度に悪化させないために設けられている。予備室と主排気装置との間はゲートバルブにより隔離され、試料はステンレス鋼製パイプを用いて移送される。試料の標準寸法は10 mm×10 mm×50 mm の直方体である。Fig. 2 に試料とその保持方法を示す。試料は厚さ50 μm のタンタル製ベルトにより保持され、駆動パイプとの接続のために白金-ロジウム (Pt-Rh) 熱電対線が使用され、この線により吊り下げられる。

試料加熱室は直径40 mmφ、長さ400 mm の石英管である。この管の外側に赤外線ゴールドイメージ炉が配置

Fig. 2 Standard size and holding method of test sample.

され、内部試料を最高1500°Cにまで加熱できる。炉は熱電対の出力電圧を帰還信号として使い、加熱プログラムに従って運転される。主排気装置は窒素ガスに対して170 l/s の排気速度を持つターボ分子ポンプにより排気される。加熱室も含めた真空容器の到達圧力は 5×10^{-9} Torrである。通常試料の昇温脱ガス中は真空容器は

150°Cの温度でベーキングしている。これにより試料からの放出ガスの容器壁への吸着排気を防止し、脱ガス量に対する測定精度の保証を図っている。

3. 吸蔵ガス量の測定方法

試料に対する加熱脱ガスのパラメーターは、昇温速度 $\Delta T/\Delta t=10^\circ\text{C}/\text{min}$ 、加熱最高温度 $T_m=1400^\circ\text{C}$ である。そして最高温度到達後の保持時間は30分である。保持時間経過後は炉の加熱電力を切り、試料は自然冷却される。

温度 T における試料からのガス放出率を $y(T)$ (Torr l/deg) とすると、室温 $T=T_0$ から最高温度 $T=T_m$ までに放出される全ガス量 Y_m (Torr l) は次式で表わされる

$$Y_m = \int_{T_0}^{T_m} y(T) dT, T=T_0 + \frac{\Delta T}{\Delta t} t. \quad (1)$$

ガス放出率 $y(T)$ は排気装置における圧力変化に関係する。排気装置の体積を $v(l)$ 、B-A 真空計の場所での圧力と放出ガスに対する排気速度をそれぞれ $p(t)$ (Torr), $S(l/s)$ とすると圧力変化 $p(t)$ は

$$\begin{cases} v \frac{dp}{dt} = -Sp + y(t) \\ p = P - P_0 \end{cases} \quad (2)$$

の排気式で表わされる。ここで P_0 , P は加熱室に試料を置かずに試料保持金具のみを1400°Cにまで加熱した時のバックグラウンド圧力と、試料装着時の圧力とである。全ガス放出量は(2)式の時間積分により

$$\begin{cases} Y_m = S \int_0^{t_m} p dt + v \int_0^{t_m} dp \\ t_m = \frac{T_m - T_0}{\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)} \end{cases} \quad (3)$$

として計算される。

Fig. 3 に黒鉛試料について得た昇温脱離スペクトルの例を示す。バックグラウンド圧力は1100°C以上の温度で増大しており、その補正が要るのがわかる。本研究では $T_m=1400^\circ\text{C}$ までの昇温脱ガスをもって全ガス放出量を試料の吸蔵ガス量と定義している。しかし実際にはより高温で放出するガスは存在しよう。昇温脱離法でこの高温域の含有ガス量を問題とするには技術的な限界がある。炉からの放射赤外線により装置壁や石英管が加熱されるため大きなバックグラウンド圧力となるからである。本測定において定義される吸蔵ガス量が実際の含有ガス量と比べて同等かそれ以下であるのかは考察において言及する。

Fig. 3 Thermal desorption spectra for POPC DFP-3 graphite sample on subsequent heating, where BG is background pressure without sample in the heating bath.

4. 結 果

4.1 as-received 試料

メーカーからの as-received 試料について測定された吸蔵ガス量を Table 1 に示す。吸蔵ガス量はメーカー側で実施する脱ガス処理の有無、出荷時に製品を真空パックするかしないかで大きく増減している。異常に吸蔵ガス量が多い試料は No. 29 のカーボン・カーボン複合材である。この試料の加熱ではガス放出が激しいため、標準寸法の1/10に減じ(重量0.5 g)その脱ガスを測っている。それにもかかわらず脱ガス量が多いので、この製品を真空用材料として扱うには検討を要する。

メーカー側では試料に対して A, B および C の三つの等級に分類される前処理条件を提示している。ユーザーの立場からは C ランクの処理を経た材料が最も吸蔵ガス量が少ないという理由で、この処理が製品の受け入れの場合の指定条件となり得よう。

4.2 大気中保管と再吸収ガス量

as-received 試料では前処理が異っているため、各製品

Table 1 Total occluded gas amounts measured for as-received samples of graphite and carbon materials

sample number	commercial model	kind	apparent density (g/cm ³)	total desorbed gas amount $\times 10^{-2}$ (Torrl)	treatment at maker
1	IG-11	IG	1.77	190	A
2	IG-110	"	"	131	"
3	IG-110U	"	"	28	C
4	ISO-63	"	1.78	97	B
5	ISO-630U	"	"	13	C
6	ISO-880	"	1.90	138	A
7	T-6P	"	1.88	152	"
8	ETP-10	"	1.75	46	"
9	ST-50P	"	1.78	16	B
10	ST-50B	"	"	50	"
11	ST-60P	"	1.87	15	"
12	ST-60B	"	1.77	38	"
13	MT-200K	"	1.80	54	"
14	AX-650K	"	1.83	75	"
15	AX-280K	"	1.82	56	"
16	YPD	AG	2.00	157	"
17	880	"	1.82	63	A
18	980	"	1.90	252	"
19	PD-600S	IG	1.81	11	B
20	PD-330S	"	1.82	9	"
21	POCODFP	"	1.84	101	A
22	C-139	C/C	1.68	174	"
23	KK-1200	"	1.43	375	"
24	TORAYCA	"	1.57	81	B
25	AMT	"	1.80	86	"
26	BMT	"	1.84	83	"
27	CX-2002U	"	1.70	9	C
28	FMI HDFT	"	1.71	48	A
29	FMI 4D	"	1.95	6500	"

IG: isotropic graphite, AG: anisotropic graphite, C/C: carbon-carbon composite, A: no treatment, B: vacuum packing, C: vacuum packing after degassing.

の固有な特長を知ることは難しい。そこで1400°Cの昇温試験後いくつかの試料について、引き続き大気中に50日間放置し再吸収ガス量を測定し比較してみた。

Table 2 は任意に選んだ試料とそれらの再吸収ガス量を示している。大気中放置により大気ガスの再吸収が進行するが、その量は50日後においても as-received 試料で C ランクの処理を実施した場合の吸蔵ガス量と同等かそれ以下である。製品間に有為の差があるとみなすよりは、むしろ似たようなガス保持特性を呈示しているとみなされる。再吸収ガス量は平均値で $\langle Y_m \rangle = 1.2 \times 10^{-1}$

Table 2 Total occluded gas amounts measured for samples after exposure air for 50 days following on degassing at 1400°C

sample number	adsorbed gas amount $\times 10^2$ (Torrl)
1	11
4	9
8	6
9	6
11	15
13	15
14	12
15	9
18	23
22	15
23	19
24	6
28	10

average adsorbed gas amount: $\langle Y_m \rangle = 1.2 \times 10^{-1}$ Torrl

Torr l であり、固々の製品の吸収量は平均値に対して factor 2 以内に分布している。なおガス分析の結果主要な再吸収気体の種類は炭化水素系ガス、水素、水および一酸化炭素である。

4.3 再吸収ガスの脱ガス温度依存性

黒鉛を実機に大量に内装したときは、黒鉛壁のベーキング温度が問題とされる。大型トカマクではすでに黒鉛内装後の運転実績を有しており、350°Cのベーキングが一般的に行われている。そしてこの温度がプラズマ生成に先立って黒鉛壁に対しての前処理条件として受け入れられている。

Table 3 は昇温最高温度を $T_m = 100^\circ\text{C}$ から 1200°C までの間で変えてみて、試料内に残存する吸蔵ガス量を測定した結果を示している。200°Cまでの昇温脱ガスで吸蔵ガスの80%以上が放出される。500°Cまでで約90%が放出される。

Fig. 4 は $T_m = 1400^\circ\text{C}$ で脱ガスした試料を1気圧、25°C、湿度40%の雰囲気中のプラスチック製容器中に22日間保管したのち、得られた昇温脱離スペクトルを示している。放出ガスの脱離ピークは一つであり、いずれの試料についても温度230°Cの位置に共通して現われている。

Table 3 および **Fig. 4** の結果から、黒鉛タイルを内装したトカマクで350°Cのベーキングを採用することが、吸蔵ガスの除去のために適切な条件であることがわかる。

Fig. 4 Comparison of thermal desorption spectra for test samples which were initially degassed at 1400°C and subsequently exposed to air for 22 days.

4.4 吸蔵ガス量の規格化

材料中の吸蔵ガス量を積分値として評価するためには規格化ガス量を定めなければならない。従来からの採用されている規格化ガス量は、吸蔵ガス量を試料の重量で除した

$$q_1 = \frac{Y_m}{w} \text{ (Torr l/g), } w = \rho v \text{ (g)} \quad (4)$$

で表わされている。ここで W は試料の重さ、 ρ はかさ密度 (g/cm^3)、 V は体積 (cm^3) である。(4)式で Y_m 値が ρ と V のどちらに依存するかを検討しよう。Fig. 5 は同一種類の黒鉛試料で、体積を変えて吸蔵ガス量を測定した結果を示している。 Y_m 値は体積 V に比例して変わることがわかる。

次にかさ密度 π に対する依存性は、試料の処理条件を一定にそろえて比較しなければならないが、Table 2 のデータから判定される。各試料のかさ密度は $\rho = 1.43$ から 1.87 g/cm^3 まで変化しているが、 Y_m 値は ρ に依らず平均値 $\langle Y_m \rangle = 1.2 \times 10^{-1} \text{ Torr l}$ のまわりに分布しており、 ρ に対する比例性は明確ではない。むしろ ρ に無関係であるとみなされる。

Fig. 5 Change of occluded gas amount as a function of sample volume of model 880 graphite.

以上の結果から、(4)式は

$$q_{11} = \frac{Y_m}{v} \text{ (Torr l/cm}^3\text{)} \quad (5)$$

のように修正される。(4)式に従うときは製品のかさ密度が大きい程吸蔵ガス量が少なく見積られるが、実機におけるように内装材料が多量な場合吸蔵量の絶対値の見積りに大きな誤差を見込むことになる。

5. 考 察

5.1 受け入れ材料と保管

本実験における吸蔵ガス量に対する測定精度は、バックグラウンド圧力の変動、および昇温開始までの真空排気中試料からの室温下での脱離に影響されてきまる。特定の試料を選び吸蔵ガス量をくり返し測定したり、また精密天秤を用いて試料の真空中での初期重量の減少を測定して検討した結果、吸蔵ガス量に対する測定誤差は最大25%であった。Table 1 および Table 2 に示す吸蔵ガス量にはこの程度の誤差が含まれている。

as-received 試料の吸蔵ガス量はメーカー側での脱ガス処理を反映して、2桁にわたって変動している。そしてCランクの処理を経た試料において最も少ない吸蔵ガス量となっている。このように as-received 試料では、3種類の異なる条件の試料がバラバラに存在するため、吸蔵ガスが多い少ないの比較から各製品を等級づけてみることは無意味である。

等級づけの観点から1400°Cで脱ガスしたのち、大気放置により各製品の再吸収ガス量がどのように分布するかを検討した。結果はどの製品からなる試料も等量の空気成分ガスを吸収、保持することが示され、製品の区別はつけられないことがわかった。再吸収による保持ガス量は平均値で $\langle q_{11} \rangle = 2.4 \times 10^{-2} \text{ Torr l/cm}^3$ である。この

値は as-received 試料の C ランクの処理を経た場合と等価でもある。

以上のことから吸蔵ガスは元来黒鉛や炭素製品の製造工程中に発生あるいは含有されていて、この初期吸蔵ガスはその後実施する処理に応じて減少される。C ランクはハロゲン処理や2000°Cの真空脱ガスに対応するが、このうち大気中に材料を保管しても、ガスの再吸収は続くのではなく、一つの飽和傾向を示す。保管環境としては炭化水素系ガスの存在しない乾燥した雰囲気が必要である。

5.2 ベーキング条件

Table 3 の結果が示すように200°C以上の温度で黒鉛を脱ガスすると、吸蔵ガスの80%以上が容易に放出除去される。また Fig. 4 で脱離ピークは一つであり、ピーク温度も230°Cと低温領域である。また放出気体の主成分は、前節において特に述べていないが、ガス分析の結果⁹⁾炭化水素系ガスであった。このことから吸収気体の脱離の活性化エネルギーはあまり大きくないようであり、気体は黒鉛の内部表面に弱く結合されて保持されていると予想される。ちなみに本研究と異なる昇温脱離の例を参照するならば、芦田らは^{11,12)}黒鉛に高速水素イオンを打込み、トラップされた水素の昇温脱離特性を調べている。この場合脱離ピークは600°Cから900°Cの高温領域に三つ現われる。解析された脱離の活性化エネルギーは650°Cの第1ピークに対して43 kcal/mol、750°Cの第2ピークに対して59 kcal/mol となっている。解離水素が黒鉛内の遊離炭素と強く結合する結果、このように大きな脱離の活性化エネルギーを持ちかつ脱離のピーク温度も高くなっている。

5.3 吸蔵ガス量の内部表面積との相関

C ランクの脱ガス処理後の試料の平均の吸蔵ガス量は分子数換算で $\langle q_{II} \rangle = 8.5 \times 10^{17}$ molecules/cm³ である。吸蔵ガスがバルク中に溶解して捕獲されるのではなく、主として弱い結合力で内部表面に吸着しているのであれば、可能なもう一つの規格化ガス量は単位面積当りの吸着ガス分子数としての表示である。

この規格量を示すためには、黒鉛中の内部表面積を定めなければならない。これを知るのに表面粗さ測定器がある。しかしこの方法による測定例はきわめて少ないのが現状である。他方黒鉛の気孔特性を表わすパラメーターとして気孔率や気孔径があり、等方性黒鉛の何種類かについて水銀ポロシメーターにより測定され。カタログ値として提示されている。ここではこれらのパラメーターを用い、これと気孔構造のモデルとから内部表面積を見積る公式を導出してみる。

等方性黒鉛に対して提案されているモデルによれば¹⁰⁾,

Table 3 Change of desorbed gas amount measured as a parameter of maximum heating temperature for the KK-1200, C-C composite sample

T_m (°C)	relative desorbed gas amount (%)
0	100
100	67
200	20
500	12
700	11
1000	5
1200	4

気孔率 $\Delta V/V$ は

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{3\pi}{4} (d^2 N) \quad (6)$$

で与えられる、ここで d は黒鉛中に分布する毛細管の平均直径 (cm), N は表面密度で定義される毛細管の平均分布本数 (cm⁻²) である。また毛細管を考慮した内部表面積を A (cm²) と書くと、

$$A = 3\pi (dN) v \quad (7)$$

で与えられる、ここで V は黒鉛試料の体積 (cm³) である。気孔径 D (cm) は水銀ポロシメーターの測定から定められるが、それは気孔率の50%をもって定義されている。そしてこの D 値は平均直径 d に比べてやや大きく提示される。そこで補正係数 β を導入し、両者の関係をと

$$D = \beta d \quad (8)$$

と表わす。(6), (7)および(8)式から d, N を消去すると、 A に対する表式として

$$A = 4v \left(\frac{\Delta v}{v} \right) \frac{\beta}{D} \quad (9)$$

を得る。(9)式からわかるように β 値が指定できれば、内部表面積を見積ることが出来る。

幸い広畑ら⁸⁾が6種類の黒鉛について比表面積 ($=A/V$) の測定結果を与えている。またそれらの材料の気孔率と気孔径も測定されている。従って(9)式にこれらの数値を代入して β の推定が可能である。Table 4 に計算結果を示す。一つだけ $\beta=6$ と大きな数値となっているが、他の五つについて β 値は2と3の間の値をとっている。 $\beta=2.5$ と仮定し、今回試験した試料で気孔率と気孔径が提示されているものについて、内部表面積を(9)式により見積り、これと Y_m 値とから新しい規格化ガス量

$$q_{III} = k \frac{Y_m}{A} \text{ (molecules/cm}^2\text{)},$$

Table 4 Estimated values for d , N and β with pore structure parameters of specific surface area, porosity and pore size for graphite

Sample	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3
apparent density ρ (g/cm ³)	1.90	1.82	1.77	1.91	1.78	1.75
sample volume V (cm ³) $\times 10^{-2}$	—1.25—					
specific surface area ⁵⁾ A/W (m ² /g)	1.34	0.80	0.70	0.84	0.54	0.44
porosity $\Delta V/V$ (%)	15	13	16	9	15	13
pore size D (cm) $\times 10^{-5}$	4	11	30	5	10	20
average diameter d (cm) $\times 10^{-5}$	2.36	3.57	5.17	2.24	6.24	6.75
average number density N (cm ⁻²) $\times 10^7$	11.5	4.33	2.54	7.59	1.92	1.21
correction factor $\beta = D/d$	2	3	6	2	2	3

$$k = 3.5 \times 10^{19} / \text{Torr l} \quad (10)$$

を計算してみた。結果を **Table 5** に示す。as-received 試料では吸着分子数は1/10から1分子層の間に分布する。大気放置の再吸収では1/100分子層となっている。面積当りに換算された吸着分子数は、Beutler ら¹³⁾がレーザー照射法により Pyrolytic グラファイトに対して測定した水素含有量と比較すると、2000°Cの脱ガス後で 10^{13} H/cm²であり、本実験の再吸収ガス量とよく対応している。本研究では1400°Cの昇温脱ガスをもって吸蔵ガス量を定義しているが、この規定はレーザー法の結果からも支持される。今回の試料の体積は $V=5$ cm³ と小片であるが、この体積中に占める内部表面積は数 m² にも達している。この事実からたとえ吸着分子数が 10^{13} molecules/cm²と少なくとも、吸着総面積がきわめて大きいことが、黒鉛材料からのガス放出が金属材料に劣らず問題とされる点であろう。

6. 結 論

可能な限り多数の黒鉛および炭素材料をとりあげ、各試料について昇温脱離法により吸蔵ガス量の測定を行った。その結果明らかにされたことは次のとうりである。

- (1) 試料中の吸蔵ガス量は製造直後に最も多い。そして脱ガス処理に従って約2桁は減少される。
- (2) 200°Cの真空脱ガスおよびハロゲン処理が吸蔵ガス量の低減のために最も有効である。
- (3) as-received 試料に対する最大吸蔵ガス量は $7.5 \times$

Table 5 Normalized occluded gas amounts with internal surface area for graphites listed in Table 1 and 2

sample number	internal surface area A (m ²)	Y_m/A (molecules/cm ²) $\times 10^{13}$	
		as-received	after air exposure
1	6.17	110	6.3
4	7.30	47	4.3
8	3.86	42	5.4
9	4.80	11	4.4
13	0.70	270	76
14	1.68	160	25

10^{-1} Torr l/cm³ であり、最小吸蔵ガス量は 1.8×10^{-2} Torr l/cm³ である。

- (4) 脱ガス後の試料では大気中保管において気体の吸蔵状態を回復するが、吸蔵量において試料間に差はなく平均飽和吸収量として 2.4×10^{-2} Torr l/cm³ を得た。
- (5) 保管中の再吸収ガス量をベーキングにより脱ガスする場合は、少なくとも200°C以上の温度のベーキングが必要である。
- (6) 黒鉛および炭素材料中の吸蔵ガス量を規格化表示するためには、単位体積当たりまたは単位面積当たりのガス量で表示するのが適切である。後者の表示のためには材料の内部表面積を見積る必要がある。等方性黒鉛について有効と思われる内部表面積の計算公式を導いた。

【文 献】

- 1) H. F. Dylla and TFTR Team: J, Nucl, Materials, 145-147 (1987) 48
- 2) L. De. Kock: J, Nucl, Materials, 145-147 (1987) 26
- 3) Annual Report of Naka Fusion Research Establishment for Period of April, 1, 1986 to March, 31, 1987, JAERI-M, 88-069 (1988) p. 230-231
- 4) 宮 直之, JT-60 チーム: 核融合研究, 60(1988) 138
- 5) 山科俊郎編:「核融合炉第一壁としての黒鉛共通材料の総合目的特性評価」昭和61年度文部省科学研究費「核融合特別研究, 第一班炉内材料」研究成果報告書
- 6) A. Miyahara and K. L. Wilson 編: "Proceedings of the Japan-U.S. Workshop P-92 on Plasma Materials Interaction/High Heat Flux Data Needs for the Next Step Ignition and Steady State Devices" January 26-30 (1987), IPP, Nagoya University, IPPJ-AM-50
- 7) W. H. Kohl: "Materials and Techniques for Electron

- Tubes*” (Reinhold Publishing Co, New York, N.Y. Kinokuniya Bookstore, Co, LTD, Tokyo, Japan, 1960)
- 8) 広畑優子, 隅田 寛, 福田 伸, 日野友明, 山科俊郎: 真空, **30** (1987) 288
 - 9) 久保田雄輔, 官原 昭: 「各種炉壁材料の昇温脱ガス特性」名古屋大学プラズマ研究所, IPPJ-DT-139
 - 10) 赤石憲也: 真空, **31** (1988)
 - 11) 芦田 完, 渡辺国昭: 「熱分解黒鉛に捕獲された水素同位体の昇温脱離スペクトルの解析」富山大学トリチウム科学センター研究報告, **5** (1985) p. 31-40
 - 12) K. Ashida, K. Kanamori and K. Watanabe: J. Vac, Sci and Technol, **A6** (1988) 2232
 - 13) R. Beutler, A. A. Haasz and P. C. Stangeby: J. Nucl. Materials, 145-147 (1987) 280