



Title	黒鉛の核融合第一壁材料としての特性評価
Author(s)	日野, 友明; Hino, Tomoaki; 広畑, 優子 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 139, 107-116
Issue Date	1988-02-20
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/42078">https://hdl.handle.net/2115/42078</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	139_107-116.pdf



## 黒鉛の核融合第一壁材料としての特性評価

日野 友明 広畑 優子 福田 伸  
橋場 正男 山科 俊郎

(昭和62年9月30日受理)

### Characterizations of Graphite as a Fusion First Wall Material

TOMOAKI HINO, YUKO HIROHATA, SHIN FUKUDA, MASAO HASHIBA  
and TOSHIRO YAMASHINA  
(Received September 30, 1987)

#### Abstract

For the isotropic graphite currently used in large fusion devices, vacuum engineering, thermal-mechanical properties and the interactions with hydrogen ion were investigated. For this purpose, eighteen graphite samples were gathered from seven major graphite companies in Japan. It was predicted that the vacuum and the thermal-mechanical properties were superior for high and low density graphites, respectively. However, we could not find this relation. The vacuum property was superior in low density graphite if the production method and the final treatment were same. The thermal-mechanical property depended on the production method. By the experiment of hydrogen ion irradiation, the change of surface state and the hydrogen trapping were studied. The required conditions for the graphite were discussed based on the obtained results.

#### 1. 緒 言

自己点火をめざす次期核融合装置において、不純物制御は最も重要な課題の一つとなっている。プラズマと直接接する第一壁要素として、高温に耐え、かつ構成元素をプラズマ中に混入させないことが要求される。スパッタリングによる不純物の混入はある程度避けることはできないが、プラズマに対するインパクトを最小限にしなければならない。そのため、約2,500℃以下では昇華せず、熱伝導性の良い等方性黒鉛の使用が考えられる。炭素は原子番号が6と低く、プラズマの輻射損失の割合を減らすことができる。核融合装置にみられる典型的な金属不純物である鉄に比べて、輻射損失は2桁も低い<sup>2)</sup>。従って、自己点火プラズマでの最大許容量も約10%と大きいので、黒鉛第一壁からの若干のスパッタリングは許される。また、炭素不純物をプラズマ境界にとどめ、低プラズマ温度領域で顕著な線放射により境界プラズマを冷却するなら、より効果的にスパッタリングを抑えることができよう。

これらの観点から、等方性黒鉛材料は第一壁要素において特に熱負荷およびプラズマ粒子束の大きな部分に用いられてきた。その代表例は、プライマリーリミター (Primary Limiter)<sup>7)</sup> とアーマータイル (Armor Tile)<sup>8)</sup> である。米国の大型トカマク、ダブルット III (Doublet III) において、これらの黒鉛材料は数千回のプラズマ放電に対しても高い耐プラズマ安定性を有することがわかった。また、インコネル 625 でつくられたバンパーリミター (Bumper Limiter) に比べて、その損傷はかなり小さかった。現在の大型トカマク、例えば TFTR, Doublet III D, JET は放電時間も 10 秒程度と長く、プラズマの運動論的および磁氣的蓄積エネルギーも大きい、黒鉛材料が使用されている。

核融合装置の第一壁として黒鉛を用いる場合、その真空工学的特性ならびに熱的機械的特性を明らかにしておく必要がある。また、プラズマとの相互作用についても調べておかなければならない。この総合的特性評価は未だ行われていなかったため、国内の主要な黒鉛メーカー、7 社の協力を得て合計 18 種類の黒鉛材料を提供してもらい、これらを「共通材料」として特性評価を行ってきた。<sup>9)</sup> 本報告では、先づ黒鉛材料の物性値に関する検討を行い、ついで真空工学的特性および水素イオン照射実験について記述する。

## 2. 共通黒鉛材料の特性

核融合装置の第一壁材料として、共通黒鉛試料を(1)真空工学的特性に(2)熱的機械的特性にすぐれていると思われるものに分けて国内の黒鉛メーカーから提供してもらった。試料を提供した会社名とその製品名を Table 1 に示す。試料として種々の厚さ(0.1 mm, 0.2 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, 10.0 mm) のものをそろえ、評価方法により適切な厚さのものを用いた。これらの黒鉛材料のほとんどは異方度が 1.1 以下の等方性黒鉛とみなせるものである。一方、著しく異方度が高い非等性黒鉛 (YPD-K: 4.0, G1950S: 1.6) も含まれている。等方性の高いのは静水圧成形法 (Isostatic Pressing) によるものであり、非等方度の高いのはモールドイング (Molding) により作られたものである。これらの黒鉛材料の物性値を Table 2 に示す。

かさ密度は 1.6 から 2.0 の範囲にあり、一般に密度が高い程粒径、ポアー (空孔) サイズおよびポロシティ (気孔度) が小さい。従って、真空工学的特性はかなり密度に依存するものと考えられる。プラズマへの不純物の混入を抑えるには、黒鉛がプラズマに照射された時、あるいは加熱された時にガス放出 (Outgassing) が小さいことが望ましい。また、プラズマのエネルギー閉じ込め時間を短くするリサイクリング (Recycling) を減らすため、ならびに表面からの不純物放出を少なくするには、表面粗さ (内部表面積) が小さくなければならない。核融合炉においてはトリチウムを燃料として用いるので、炉壁からトリチウムのもれを防ぐために、水素透過率が低くなければならない。黒鉛のかさ密度が高いほどこれらの真空工学的特性が、低いほど熱的機械的特性がすぐれていると予想されたが、必ずしもこの対応はみられなかった。密度が高いほど表面粗さは大きく、水素透過率は低くなる。ガス放出は、純度を高めるために用いられるハロゲンガス処理、真空

Table 1. Product names of graphite materials and the companies.

Company name	Product name of graphite
Ibiden Co.	T-6P, T-4MP, ETP-10
Nippon Steel Chemical Co.	# 880, # 781
Tokai Carbon Co.	G1950, G347S
Toyo Carbon Co.	AX650, KMT200K, AX280K, YPD-K
Toyo Tanso Co.	ISO-880U, ISO-630U, IG-110U
Hitachi Chemical Co.	PDX-80S, PDX-60S
Nippon Carbon Co.	EFG262, EFG301

Table 2. Physical constants of graphite materials.

COMPANY NAME	A			B			C			D			F			G			E		
SAMPLE NAME	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	F-1	F-2	F-3	F-4	G-1	G-2	G-3	E-1	E-2	
APPARENT DENSITY(g/cm <sup>3</sup> )	1.90	1.82	1.77	1.91	1.78	1.75	1.88	1.60	1.80	1.95	1.80	1.82	1.80	1.77	2.0	1.75	1.65	1.98	1.82		
ANISOTROPY RATIO	1.02	1.05	1.05	1.03	1.02	<1.10	1.30	1.10	1.6	1.05	4.0	<1.07	<1.08	<1.07	4.0	1.04	2.3	1.2	1.05		
SPECIFIC HEAT(cal/gK)	0.17	0.17	0.17	0.91	0.18	0.18	0.9	0.18	0.2	0.2	0.18	0.19	0.18	0.18	0.18	0.21	0.18				
THERMAL CONDUCTIVITY (kcal/mhk)	73	50	100	50	8	90	60	100	90	50	100	90	80	100	220/60	100	90	88	100		
COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION (10 <sup>-6</sup> /K)	6.5	(350-450°C) 5.5	4.6	6.5	(50-400°C) 4.7	3.8	4.6	5.0	(RT-500°C) 4.5/5.6	5.4	4.8	4.8	6.0	4.8	1-2/12-13	(RT-500°C) 4.2	5.0	350°C 5.0	4.7		
ELECTRICAL RESISTIVITY (mΩ.cm)	1.5	1.7	1.1	1.6	1.2	1.4	1.5	1.3	1.3/2.1	1.12	1.23	1.40	0.96	0.63/1.65	1.35	1.60	1.3	1.27			
MODULUS OF ELASTICITY (kg/mm <sup>2</sup> )	1,300	1,400	1,000	1,500	1,050	1,100	1,750	1,200	1,225/850	1,075	1,180	1,400	980	1,450/470	1,000	1,200	1,600	1,070			
STRENGTH (kg/cm <sup>2</sup> )	700	580	250	500	300	350	750	650	300/-	350	310	450	270	500/250	450	300					
TENSILE FLEXUAL(*)	950	780	400	1,000	500	600	1,680	1,300	550/400	600	520	750	440	500/250	550	650	900	560			
COMPRESSIVE	1,850	1,750	800	1,750	900	1,000	1,680	1,300	900/700	1,050	950	1,370	800	1,000/650	1,800	1,100					
FRACTURE TOUGHNESS (MPam <sup>1/2</sup> )	1.2	1.2	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.4	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	1.1					
SHORE HARDNESS	90	85	54	85	55	50	75	42	55	60	60	75	50	50/50	55	60	80	65			
ASH CONTENT (ppm)	2	2	2	20	20	10	1,500	1,000	5	5	10	10	10	10	500	500	10	10			
GRAIN SIZE (μm)	5	10	14	1	10	40	10	10	<40	<60	5	10-15	15	10-15	12	7	5	20			
PORE SIZE (μm)	0.4	1.1	3	0.5	1	2	0.3	2.6	<0.5	4	2	1.4	3	0.7	2.5	1.5	0.5	5			
POROSITY(%)	11-12	12-14	14-18	9	15	13	15.9	32.0	8	13	16-18	16-18	16-18	7-8	7-8	1.0	12				
FORMING	ISO	ISO	ISO	ISO	ISO	ISO	MOLD	MOLD	MOLD	ISO	ISO	ISO	ISO	ISO	ISO	MOLD	MOLD	ISO			
TREATMENT	HALOGEN GAS BAKING AT2,000°C	HALOGEN GAS BAKING AT2,000°C	HALOGEN GAS BAKING AT2,000°C	HALOGEN GAS BAKING AT2,000°C	HALOGEN GAS BAKING AT2,000°C	HALOGEN GAS BAKING AT2,000°C															

All data except coefficient of thermal expansion are at room temperature.

\* Third point load. \*\* With grain/across grain

加熱等の作製条件に強く依存することがわかった<sup>3)</sup>。表面粗さおよびガス放出に関して第3章で詳しく説明する。機械的強度も密度とともに良くなっている傾向にあり、熱的特性は主として製造方法に依存している。

第一壁として黒鉛材料は著しく高い熱流束の場にさらされる。熱除去のためには熱拡散率,

$$D = \sqrt{\frac{k}{\rho c}} \quad (1)$$

が大きくなければならない。ここで、 $k$  は熱伝導率、 $\rho$  は質量密度、 $c$  は比熱である。黒鉛の  $D$  はほぼ  $1 \text{ cm}^2/\text{s}$  であり、高温金属材料であるインコネル合金、ステンレス鋼に比べ1桁から2桁大きく、熱特性はすぐれている。しかし、中性粒子ビーム入射時あるいはディスラプション時には、第一壁の表面温度は  $2,000 \sim 3,000^\circ\text{C}$  にもなり炭素が蒸発してしまう。また大きな温度勾配により応力が働き、表面がクラッキングする可能性もある。表面温度の上昇は、 $Q$  を入射熱流束、 $t$  をパルス時間とすると、

$$\Delta T = Q \sqrt{\frac{4t}{\pi \rho ck}} \quad (2)$$

で与えられる<sup>7)</sup>。温度勾配は  $D$  が大きくなるにつれて弱くなるので、蒸発を防ぎ熱応力を軽減するには熱伝導率  $k$  が大きくなければならない。現在の核融合装置において、特にリミターは熱負荷が大きいので、黒鉛の  $k$  の値はさらに向上されなければならない。熱膨張に伴う表面層のクラッキングは、熱膨張率が  $(3.8 \sim 6.5) \times 10^{-6}/\text{K}$  と比較的小さく、熱拡散率が良いことからあまり起らないと予想される。しかし、黒鉛上に TiC とか (C+SiC) をコーティングした場合は熱特性の違いから容易にクラッキングが生じる。

機械的特性として引張り強度、圧縮強度、曲げ強度が与えられており、数  $100 \text{ kg}/\text{cm}^2$  から  $1,000 \text{ kg}/\text{cm}^2$  の値をもっている。トカマク装置ではプラズマ電流が切れる際、第一壁にはうず電流(シェール電流)が誘起され、閉じ込め磁場とのカップリングにより電磁力が働き、黒鉛材料が割れてしまう場合が考えられる。曲げモーメントによる応力が最も危険であるが、比較的小さなタイル(10 cm 四方以下)を用い、さらにサポートを強くするなら破壊を防ぐことができよう。

黒鉛に水素イオンが入射した場合、スパッタリングにより炭素原子がプラズマに放出される。特に、黒鉛の温度が約  $500^\circ\text{C}$  の時は化学パッタリングが起こり、メタンの形で炭素が放出される<sup>4)</sup>。このスパッタリング率は約 10% と著しく大きいので、プラズマの輻射損失を増すばかりではなく、材料自体の損耗が激しくなる。このため黒鉛第一壁を冷却パイプ等で冷す必要がある。また、水素イオン照射により、黒鉛中に水素がトラップされ放電中に炭化水素の形で放出される<sup>3)</sup>。第4章で、水素イオンのトラッピングされる割合および加熱によりどの程度の割合で炭化水素が放出されるのかについて述べる。

黒鉛材料中の金属不純物は何ら処理をしない場合は  $1,000 \text{ ppm}$  程度、ハロゲン処理をすると数 ppm に減らすことができる。自己点火状態をめざす装置ではプラズマ中の金属不純物を 0.01~0.1% 以下にする必要がある。プラズマによる黒鉛中不純物のスパッタリングが含有濃度に比例するならば、 $1,000 \text{ ppm}$  の純度でも十分と考えられるが、軽元素不純物も存在するのでできるだけ黒鉛材料からの寄与を少なくする必要がある。数 ppm 以下なら問題はないであろう。

これまで大型トカマクで使用されてきた黒鉛材料の多くは、米国 POCO 社製の AXF-5Q であった。今回、国内の黒鉛メーカーが提供したサンプルはほぼ AXF-5Q と同様な特性値を有しており、現在の大型核融合装置に適用できるものである。従って、よく調べられていない真空工学的特性

と熱機械的特性を明らかにして、より進んだ材料を開発することは核融合炉の実現のため不可欠な課題である。

### 2. 真空工学的特性の評価

Table 2 に示した共通試料および POCO 社 AXF-5Q に対して、内部表面積を Xe の液体窒素温度下における物理吸着を利用した SRF (表面粗さ係数) 測定装置により測った。Fig. 1 に SRF 測定装置を示す。各黒鉛試料の寸法は  $5 \times 5 \times 0.5$  mm であり、幾可学的表面積 ( $S_0$ ) を約  $0.7 \text{ cm}^2$  に統一した。Xe の吸着実験は、試料を  $300^\circ\text{C}$  で 20 時間加熱脱ガスした後行った。黒鉛材料はポアが多く、このポアを拡散する Xe の速度が吸着過程の律速となるため、平衡圧の測定には十分時

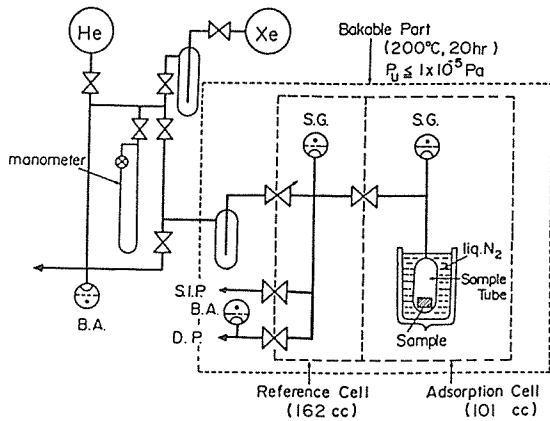


Fig. 1 Block diagram of apparatus for surface area measurement

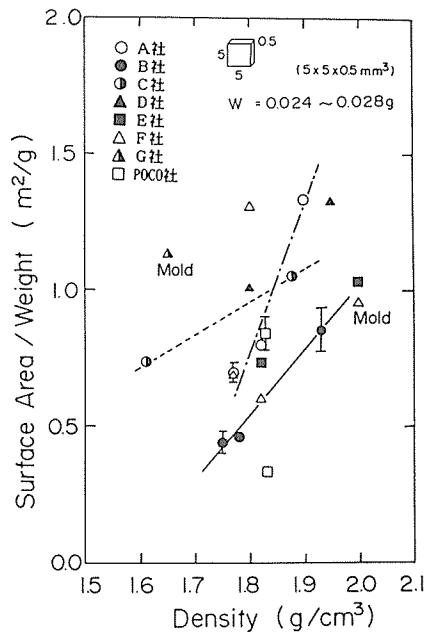


Fig. 3 Relation between apparent density and specific surface area of isotropic graphites

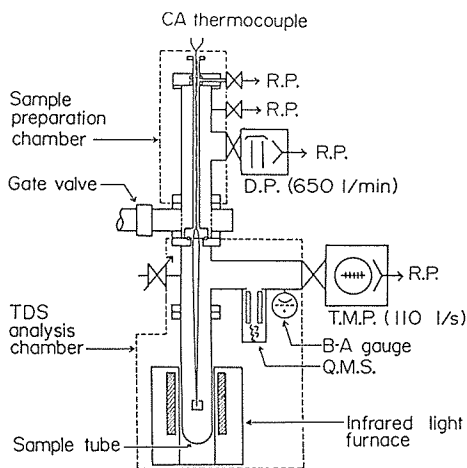


Fig. 2 Apparatus of thermal desorption spectroscopy (TDS)

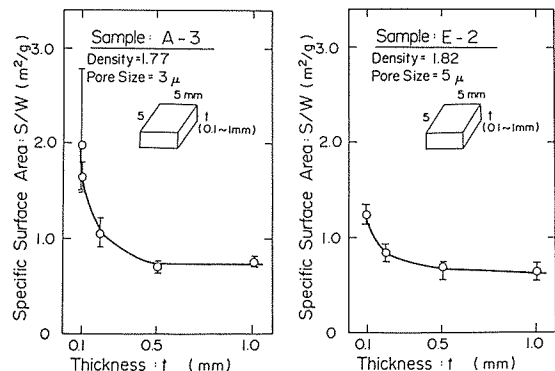


Fig. 4 Changes of specific surface area as a function of thickness

間をかけて行った。内部表面積  $S$  は BET 法にて求め、 $S_0$  との比すなわち表面粗さ係数 (Surface Roughness Factor, SRF) と、重量  $W$  当りの比表面積 ( $S/W$ ) を算出した。

黒鉛材料からのガス放出の測定は Fig. 2 に示してある昇温脱離装置 (Thermal Desorption Spectroscopy, TDS) を用いて行った。試料を装荷してからの真空度を  $2 \times 10^{-6}$  Pa 以下にし、その後赤外線炉で  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  の割合で室温から  $1,000^\circ\text{C}$  まで加熱した。放出ガスを四重極質量分析計 (QMS) で分析し、TDS スペクトルを得た。装置の各気体に対する排気速度、および QMS の感度係数を用いて単位重さ当りからのガス放出量を求めた。

Fig. 3 に等方性黒鉛のかさ密度と比表面積の関係を示す。比表面積は  $0.4 \text{ m}^2/\text{g}$  から  $1.34 \text{ m}^2/\text{g}$  と広範囲にわたっている。SRF の値は  $800 \sim 2700$  となる。かさ密度と比表面積の関係を同じメーカーの試料について調べてみると、かさ密度が大きい程比表面積も大きくなる傾向がある。これは密度が大きなもの程気孔の体積が小さくなり、気孔数も多くなるからであると考えられる。次に試料 A-3 および E-2 に対して厚さを変えた場合、比表面積がどのように変化するか調べた。Fig. 4 に示してあるように何れの場合も厚さとともに減少し、 $0.5 \text{ mm}$  以上ではほぼ一定となる。核融合装置で使用する黒鉛材料の厚さは  $1 \text{ cm}$  以上であるから、実用上表面粗さは  $800 \sim 2700$  とみなしてよい。

TDS によるガス放出実験から、主な放出ガスは  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  であることがわかった。その他、メタン,  $\text{C}_2\text{H}_m$  ( $m/e=26, 27, 28, 29, 30$ ),  $\text{C}_3\text{H}_n$  ( $m/e=37, 38, 40, 41, 42, 43, 44$ ) 等の炭化水素、および水酸基をもっと思われる  $m/e=31$  ( $\text{CH}_2\text{OH}$ ) も検出した。質量スペクトルのパターンおよび強度は製造方法にかなり依存していた。例えば、 $2,000^\circ\text{C}$  でハロゲンガス処理をし、さらに  $2,000^\circ\text{C}$  で加熱脱ガス処理した A-3 と、何ら処理しなかった C-2 を比べると、前者のガス放出量は 2 桁近く低かった。また、A-3 からのスペクトルは  $m/e=28$  に対して 27, 29 が大きく、 $m/e=44$  に対しては 39, 41 が大きい。しかし、C-2 では  $m/e=28, 44$  が大きな値をもっていた。このように製造方法および最終処理条件により、ガス放出の強度とスペクトル分布が異なることがわかった。

次に同じメーカーの密度の異なる試料、B-1, B-2, B-3 に対して求めた  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  の TDS スペク

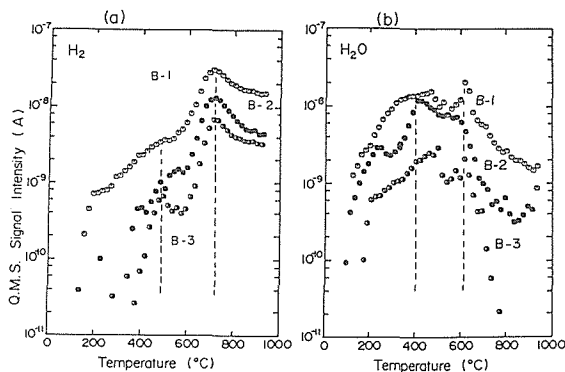


Fig. 5 Thermal desorption curves of  $\text{H}_2$ (a) and  $\text{H}_2\text{O}$ (b) from isotropic graphites with heat and halogen treatments

sample: B-1( $\rho=1.91$  :  $S/W=0.84 \text{ m}^2/\text{g}$ )  
 B-2( $\rho=1.78$  :  $S/W=0.54 \text{ m}^2/\text{g}$ )  
 B-3( $\rho=1.75$  :  $S/W=0.44 \text{ m}^2/\text{g}$ )

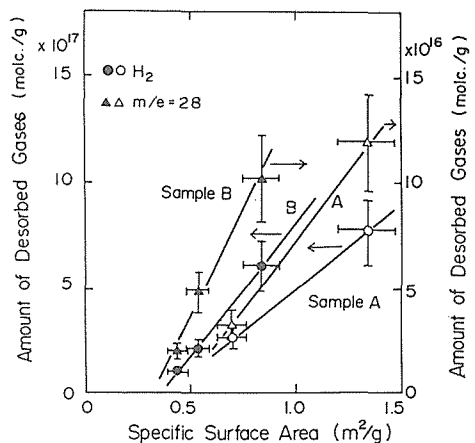


Fig. 6 Relation between specific surface area ( $S/W$ ) and amount of gases desorbed from graphite with heat and halogen treatment

トルを Fig. 5 に示す。これらは 2,000°C でハロゲンガス処理をしたものである。水素は 3 つの試料とも 500°C, 700°C 付近に脱離ピークをもち、水の低温側のピークは試料により異なるが 600°C 付近に脱離ピークをもっている。水素、水および一酸化炭素、二酸化炭素についても、総脱離量は密度が高いものほど大きくなった。同様な傾向が A 社の試料についてもみられた。また、総脱離量は比表面積が大きくなるにつれて増大していくこともわかった (Fig. 6)。試料の厚さを変えて脱離スペクトルを測定した結果、薄い試料ほど単位重さ当りの脱離量が大きくなることもわかった。

以上の結果から、核融合装置内壁に黒鉛材料を装荷する場合、密度の低いものが望ましい。しかし、事前に真空中で十分に脱ガスしておく必要がある。

#### 4. 水素イオン照射実験

自己点火状態のトカクプラズマ放電において、第一壁は約  $10^{17}/\text{cm}^2\text{s}$  以上の粒子束にさらされる。そのプラズマのエネルギーは約 100 eV 以上と考えられる。中性粒子ビーム入射時および  $\alpha$  加熱時においては数 10 keV 以上のプラズマでも直接第一壁に当たるであろう。従って、黒鉛材料と水素イオンとの相互作用を明らかにしておく必要がある。この目的のため、大電流の水素イオンビームを得ることができる ECR イオン源を設計製作し、黒鉛材料に対して照射実験を行った。特に、イオン照射後の黒鉛表面の形態変化と照射後に放出されるガスについて調べた。

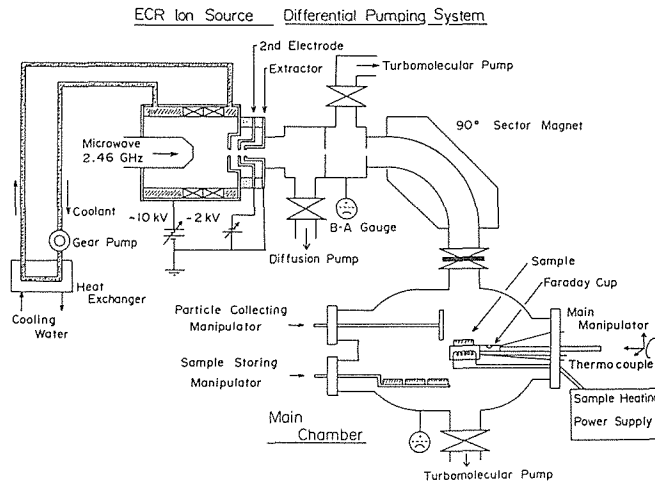
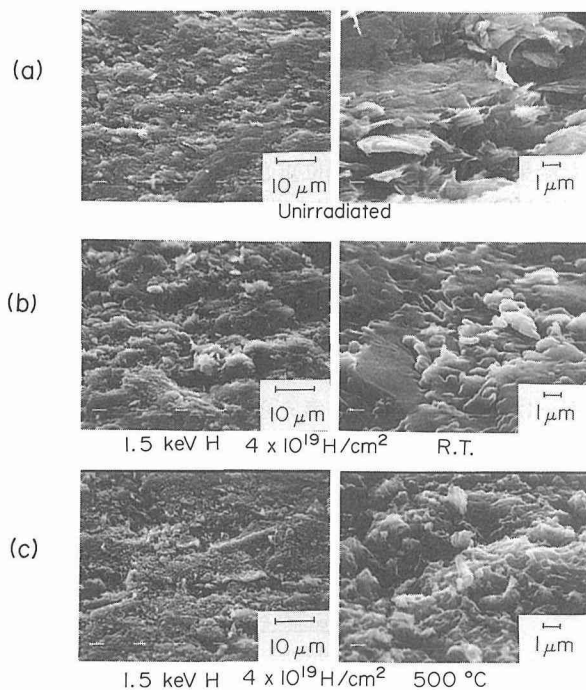


Fig. 7 Schematic representation of ECR ion irradiation apparatus

Fig. 7 に ECR イオン源の概要を示してある。2.45 GHz のマイクロ波で電子共鳴加熱により高密度のプラズマをつくり、引出し電極でイオンを加速してからセクターマグネットで水素イオンのみを選別する。4.5 keV の  $\text{H}^+$  イオンビームで約  $0.1 \text{ mA}/\text{cm}^2$  の電流密度を得ることができる。共通黒鉛試料 A-3 に 4.5 keV の  $\text{H}^+$  イオンビームを照射した後の表面形態の変化を Fig. 8 に示す。未照射の表面ではうろこ状の重なりがみえる。室温で  $4 \times 10^{19} \text{ H}/\text{cm}^2$  の照射を行うと、角ばった部分がエロージョンにより丸みをおびてくる。500°C での照射では、角ばった部分はほとんどみられなくなり、小さな凸凹が発達する。これはこの温度近傍で最大となる水素による化学スパッタリングによるものと考えられる。

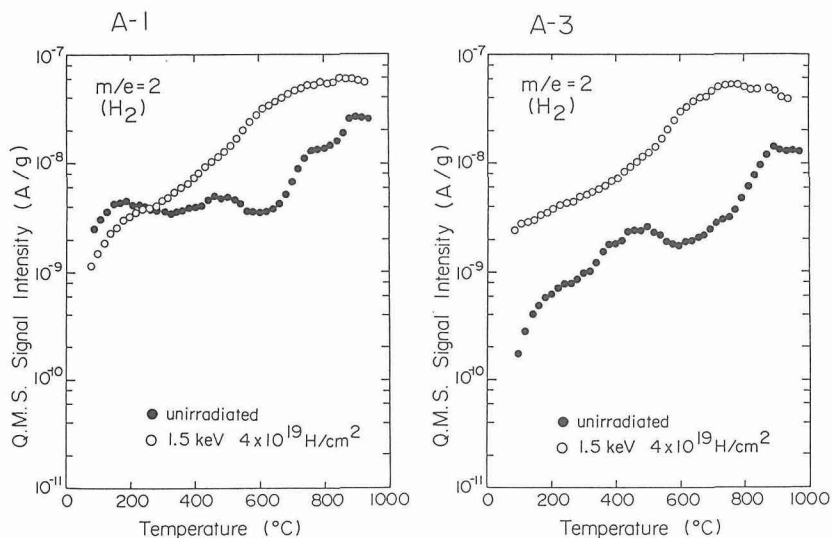
共通試料 A-1 および A-3 について、 $4 \times 10^{19} \text{ H}/\text{cm}^2$  の照射後放出ガスを昇温脱離装置にて分析

## A-3



**Fig. 8** SEM photographs of A-3. a) unirradiated. b) irradiated at room temperature (1.5KeV H,  $4 \times 10^{19}$  H/cm<sup>2</sup>). c) irradiated at 500°C (1.5 KeV H,  $4 \times 10^{19}$  H/cm<sup>2</sup>)

した。Fig. 9 に H<sub>2</sub> の脱離スペクトルを示す。ピーク温度は約 800°C であり、水素のトラップ量は両者とも  $2 \times 10^{17}$  H/cm<sup>2</sup> であった。従って、トラップ量は試料の密度に依存しないと考えられる。



**Fig. 9** TDS spectra of m/e=2 from A-1 and A-3. ● : unirradiated  
○ : irradiated (1.5KeV H,  $4 \times 10^{19}$  H/cm<sup>2</sup>)

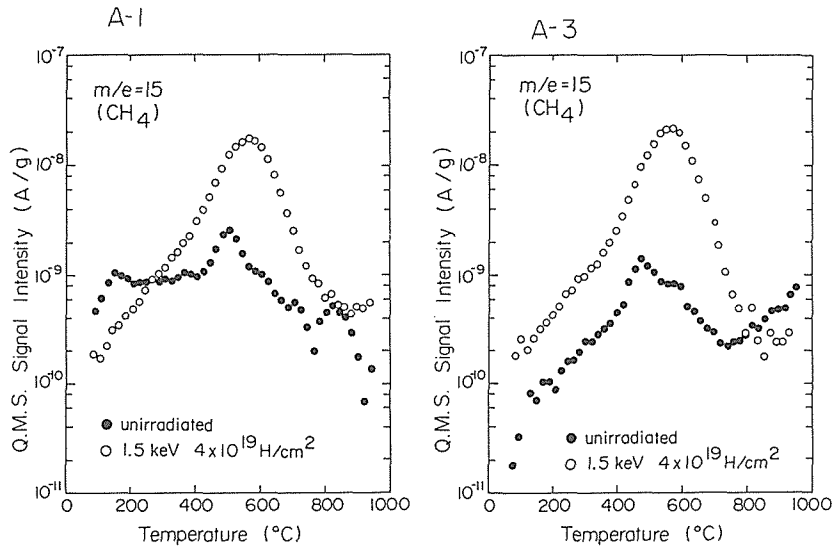


Fig. 10 TDS spectra of  $m/e=15$  from A-1 and A-3. ● : unirradiated  
○ : irradiated ( $1.5 \text{ KeV H}$ ,  $4 \times 10^{19} \text{ H/cm}^2$ )

Fig. 10 に  $\text{CH}_4$  に対する脱離スペクトルを示す。両者とも約  $550^\circ\text{C}$  でピークをもつ。 $\text{CH}_4$  の総脱離量は  $6 \times 10^{15} \text{ CH}_4/\text{cm}^2$  であり、黒鉛表面にトラップされた水素のうち約 12% がメタンの形で脱離することがわかった。また TDS スペクトルには高次の炭化水素もみられており、これらについて現在検討中である。

この照射実験から、核融合プラズマへ炭素が混入する原因として、単にスパッタリングのみならずトラップされた水素の炭化水素としての脱離も重要であることがわかった。

## 5. 総括的討論

核融合装置の第一壁材料として黒鉛の適合性を検討するため、真空工学的および熱的機械的特性について評価した。真空工学的特性は高密度の黒鉛材料ほど良いと予測されていたが、評価の結果、密度の低いものほど良くなる傾向を示した。しかし、黒鉛材料の表面粗さは著しく大きく、今後表面コーティング等により改善していく必要がある。軽元素不純物となる放出ガスを抑えるには、装荷前に真空、高温下で十分脱ガスしておく必要がある。また加熱機構を取り付けて常時吸着ガス量を減らしておく必要もあろう。

黒鉛材料はステンレス鋼やインコネル合金に比べると熱的特性はすぐれているが、核融合プラズマからの熱流束が著しく大きいので、今後より熱伝導率の高い材料の開発が望まれる。トカマクでみられるディスラプション時に起る電磁力に対しては、使用する黒鉛材料の寸法を小さくすれば対処できよう。また、C/C コンポジット材料の適用も考えられる。

黒鉛は  $500^\circ\text{C}$  付近で水素により著しく化学スパッタリングされる。TiC, (C+SiC) コーティングしたり、冷却機構をとりつけてできるだけエロージョンを避けなければならない。また、水素イオン実験ではトラップされた水素がかなり炭化水素の形で放出されていることがわかったので、これらを減らす工夫も必要である。

## 謝 辞

本研究は文部省科学研究費補助金，エネルギー特別研究（核融合）の一環として行われたものである。

本研究の遂行にあたり共通黒鉛試料を提供して頂いたイビデン，新日鉄化学，日本カーボン，東海カーボン，東洋カーボン，東洋炭素，日立化成各社に感謝する。

## 参 考 文 献

- 1) 山科俊郎：核融合炉第一壁としての黒鉛材料の総合的特性評価，(1987)，昭和61年度文部省科学研究費補助金「核融特別研究」研究成果報告書。
- 2) 日野友明，山科俊郎：核融合装置第一壁として黒鉛に要求される特性，炭素，**No 130** (1987)，p. 118.
- 3) 福田 伸，広畑優子，日野友明，山科俊郎：等方性黒鉛の真空工学的特性評価と水素イオンビーム照射，東京大学工学部原子力工学研究報告 UTNL-R206，(1987)，p. 9.
- 4) 福田 伸，毛利 衛，山科俊郎：核融合材料としてのセラミックスとそのキャラクタリゼーション，機能材料，**No 4** (1986)，p. 2
- 5) 広畑優子，隅田 寛，福田 伸，日野友明，山科俊郎：各種等方性黒鉛材料の真空工学的特性評価，**30** (1987)，p. 288.
- 6) G. Hopkins et al: Production and Test Results for the C+SiC Alloy Coatings for the 60 Tile Beam/Limiter Array in Doublet III, (1983), GA Technologies Report GA-A 17373.
- 7) T. Hino et al: Heat Flux During Disruptions and Neutral Beam Injection in Doublet III, J. Nucl. Mater., **121** (1984), p. 337.