

JAERI-M

85-162

高温ガス炉用黒鉛スリーブの熱サイクル試験

1985年10月

松尾 秀人

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日青工業株式会社

高温ガス炉用黒鉛スリーブの熱サイクル試験

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

松尾 秀人

(1985年10月1日受理)

多目的高温ガス実験炉用候補材料 I G - 11 の実寸大黒鉛スリーブに対して、急熱・自然冷却を繰り返して負荷した場合の耐熱衝撃性について調べた。内径 36 mm, 外径 46 mm, 長さ 550 mm の黒鉛スリーブを 500 °C から 2,000 °C あるいは 2,200 °C まで平均昇温速度 80 °C/s で加熱した後自然冷却しそれぞれ最高 500 回, あるいは 1,000 回加熱と冷却を繰り返して熱衝撃を負荷した後, 寸法, 電気抵抗, ヤング率の変化を測定した。熱衝撃負荷の初期には寸法は膨張し, 電気抵抗やヤング率は減少したが, その後は熱衝撃負荷回数が増えてもほとんど変化しなかった。これらのことから, 実寸大の黒鉛スリーブに急激な熱衝撃を繰り返して負荷した場合に黒鉛スリーブの諸性質は大きな変化を受けず, 熱サイクル負荷に対する健全性は保たれることが明らかになった。

Thermal Cycle Test of a Full-Scale Graphite Sleeve
for Use in the VHTR

Hideto MATSUO

Department of Nuclear Fuel Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 1, 1985)

A full-scale graphite sleeve which was made of the candidate graphite material IG-11 for a very high temperature gas-cooled reactor(VHTR), was tested by the application of a rapid heating and cooling to clarify its endurance for thermal shock. The graphite sleeve having inner diameter 36 mm, outer diameter 46 mm and length 550 mm was heated at an average heating rate of 80 °C per seconds to the maximum temperature of 2000 °C or 2200 °C and then the sleeve was cooled to 500 °C. The thermal cycle was repeated 500 in the case of the maximum temperature 2200 °C and 1000 in the case of 2000 °C. The dimensions, electric resistance and Young's modulus were measured at room temperature after the application of a fixed thermal cycle. The measurements were repeated at a fixed intervals. At the early stage of thermal cycle length expanded, electric resistance and Young's modulus decreased, and they were almost constant in the following thermal cycles. The results showed that the properties of the graphite sleeve were hardly changed due to the application of a rapid heating and cooling and its performance was almost unchanged.

Keywords ; VHTR, Graphite, Graphite Sleeve, Thermal Shock,
Dimension, Electric Resistance, Young's Modulus

目 次

1. はしがき	1
2. 実験方法	2
2.1 試料および試験条件	2
2.2 試験方法	2
(1) 熱衝撃負荷	2
(2) 試験雰囲気	2
(3) 寸法測定	3
(4) 重量測定	3
(5) 電気抵抗測定	3
(6) ヤング率測定	3
3. 実験結果および考察	10
3.1 寸法	10
3.2 電気抵抗	10
3.3 ヤング率	10
3.4 スリーブの耐熱衝撃性	11
4. まとめ	18

Contents

1.	Introduction	1
2.	Experimental procedure	2
2.1	Material and test condition	2
2.2	Method	2
(1)	Application of thermal shock	2
(2)	Test environment	2
(3)	Dimensional change	3
(4)	Weight	3
(5)	Electric resistance	3
(6)	Young's modulus	3
3.	Results and discussion	10
3.1	Dimensional changes	10
3.2	Electric resistance	10
3.3	Young's modulus	10
3.4	Endurance of a graphite sleeve for thermal shock ...	11
4.	Summary	18

1. はしがき

日本原子力研究所で開発研究を進めているピン・イン・ブロック型の多目的高温ガス実験炉（VHTR）では黒鉛製のスリーブが使用される。黒鉛スリーブではその構造および燃料要素としての使用条件から使用時には内側と外側では温度差が生じるとともに原子炉の起動や停止時には熱応力が発生し、それが繰り返される。また、原子炉の制御棒引き抜き事故のうち事象分類Ⅳの制御棒逸出事故では黒鉛スリーブの温度が特に急上昇し、回数は少ないが急激な熱衝撃が負荷される場合もあるとされている。一般に高温材料の中ではセラミックス材料は高温で使用できてもその耐熱衝撃性は良くないが、多結晶黒鉛材料は耐熱衝撃性に比較的すぐれている材料である。多結晶黒鉛材料の熱衝撃に関する研究では小型試験片を用いた研究はすでになされており、試験条件によっては熱衝撃破壊が生じることも明らかにされている。しかし、実際に原子炉内で使用されるような大型の円筒状の黒鉛スリーブの耐熱衝撃性については全く研究報告がなく、熱衝撃破壊が生じるかどうかは明らかでない。このため原子炉内で円筒状の黒鉛スリーブを使用するにあたっては熱衝撃に対する健全性についてあらかじめ調べておく必要がある。

こゝでは多目的高温ガス実験炉用としてその使用が検討されている黒鉛スリーブの熱衝撃に対する健全性試験を行なうために候補材料IG-11を用いて、内径36mm、外径46mm、長さ550mmの形状を有する試験体スリーブを製作した。この黒鉛製スリーブを500℃から2,000℃あるいは2,200℃まで平均昇温速度80℃/sで加熱した後自然冷却し、最高500回あるいは1,000回まで熱衝撃をそれぞれ繰り返して負荷した。一定の熱衝撃負荷後寸法、電気抵抗、ヤング率などを室温で測定し、熱衝撃を繰り返し負荷した場合における実寸大黒鉛スリーブの健全性を確認するための試験を行なった。

2. 実験方法

2.1 試料および試験条件

この試験ではVHTR用燃料体および可動反射体の候補材料として選定されている黒鉛材料IG-11(東洋炭素製)を用いた。試験に供するため大型の黒鉛素材ブロックから中央部が内径36mm、外径46mm、長さ550mmで、その両端に電極接続のためのネジ切りを有する試験体スリーブを加工した。これらの試験体をFig. 1およびFig. 2に示した。

試験の際にはこの黒鉛スリーブ試験体に直接に大電流を流して高温にまで加熱する。このため黒鉛スリーブを支持する電気炉の電極部と黒鉛スリーブとの接触を良好にして局部的な過熱により電極が破壊しないように黒鉛スリーブの両端はネジ切りとした。

制御棒引き抜き事故のうち事象Ⅳの制御棒逸出事故では黒鉛スリーブが非常に高温になるので、この事象を想定してできるだけ高い温度までの健全性を調べることを目的として、試験温度範囲を設定した。この実験では2本の黒鉛スリーブを用いて試験を行ない、このうちの1本は温度範囲が500～2,000℃で最高1,000回まで、他の1本は温度範囲が500～2,200℃で最高500回の熱衝撃を負荷してそれぞれの試験を行なった。これらの試験条件をTable 1に示した。

2.2 試験方法

(1) 熱衝撃負荷

Fig. 3にこの試験に使用した装置のブロックダイアグラムを示した。黒鉛スリーブ試験体は電気炉内にセットされ、200 KVAの交流電源から供給される電流を直接に通電して加熱される。最大電流は約6,000 Aであって、この場合に試験体は2,000℃或は2,200℃まで毎秒80℃の割合で昇温した。試験体の温度は3点で測定し、中心温度は2台の二色光高温計(千野製作所製、1台は500～1,100℃、他の1台は1,000～3,000℃)、他の2点すなわち試験体の中心から180mm離れた2点での温度はW.Re/5-26熱電対で測定し、記録した。試験体の昇温速度はアメリカのResearch Inc.製の高速温度コントローラ(DATA TRAK, Model FGE 5110)で制御し、降温過程は自然冷却とした。500℃まで冷却した後に再び自動的に加熱できるようにし、これらの加熱-冷却-加熱のサイクルを繰り返した。1サイクルに要した時間は約600秒であった。この加熱-冷却曲線の代表例をFig. 4およびFig. 5に示した。Fig. 4は最高試験温度が2,000℃、Fig. 5は最高試験温度が2,200℃の場合である。

熱衝撃負荷の状態では試験体が膨張と収縮を繰り返すために、もし上下両端の電極を固定しておくとも試験体に熱応力が発生し、場合によっては試験体が破壊されることも考えられる。このため、試験体の上側の電極は電気炉の電極部に固定し、また試験体の下側の電極は導電性の液体金属(ガリウム、融点29.6℃)に浸して、試験体が自由に膨張・収縮ができて拘束されないようにし、かつ試験体と電極との電氣的な接触は良好に保たれるようにした。

(2) 試験雰囲気

試験は真空あるいは不活性ガス中のいずれかの雰囲気で行なうことができるように装置は設計

されているが、この研究では真空中で試験した。この場合には排気速度 1,200 l/s の油拡散ポンプ、800 l/min の油回転ポンプを使用した。試験の場合、最初の数サイクルの加熱では試験体からの脱ガスのため真空度が低下したが、その後の加熱サイクルでは試験中の最高試験温度における真空度は約 7×10^{-2} Pa であった。

(3) 寸法測定

試験体の長手方向の寸法測定には、最大および最小の読みが 1,000 mm、0.020 mm の長尺の 1 ギス（三豊製）を用いた。測定する場合には試験体断面で 4 箇所（位置）で各 1 回測定し、その平均値をその測定値とした。用いたノギスの全精度は J I S 7507 第 1 級を満たすものである。なお、長い寸法の試験体を測定する場合には室温の変動による測定精度への影響を考慮しなければならない。例えば、試験体の長さが 700 mm、試験体の室温での熱膨張係数が $3 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ であるとする、室温が 1°C 変化した場合にはその長さは約 2 μm 変化する。この値は用いたノギスの精度内であって無視できる値である。試験中の室温の変動はせいぜい 1~2°C であり、このことから室温の変動による測定精度への影響は無視できるものと考えられる。

試験体の直径は最小目盛が 10 μm のマイクロメーターにより、また内径はシリンダーゲージで測定した。これらは Fig. 1 に示した①~⑤の各位置で 8 回測定してそれらの平均値を各位置における測定値とした。

以上示した長さ、直径、および内径のそれぞれの測定方法を Fig. 6 および Fig. 7 に示した。

(4) 重量測定

最小感度 100 mg（島津製作所製 ED-2000）を用いて測定した。試験前後の重量変化は 2 本の試験体とも 0.037% の減少であった。重量減少による電気抵抗やヤング率の変化については黒鉛材料 IG-11 についてすでに調べられており²⁾、0.037% 程度の重量減少では電気抵抗やヤング率の変化は無視することができる。

(5) 電気抵抗測定

Fig. 1 に示した試験体の A、B、C、D の 4 箇所（位置）で電圧降下法により軸方向の電気抵抗を室温で測定した。加熱することにより軸方向に温度勾配が生じるが、その温度分布は熱衝撃を繰り返し負荷する過程で変化するので発生する熱応力も試験体の位置によって異なる。このため、試験体の各部の電気抵抗の変化から、発生した応力がどのように黒鉛スリーブの健全性へ影響しているかをみるために、電気抵抗の測定位置は Fig. 1 に示した①-②、②-③、③-④、④-⑤、②-④、①-⑤の間とした。なお、Fig. 8 には測定装置の写真を示した。

試験体には約 1 A の直流電流を流し、電圧端子間ならびに 0.01 Ω 標準抵抗の電圧降下を横河電気製のデジタルマイクロボルトメーター（タイプ 2501）で測定し、電気抵抗を求めた。各位置で 4 回測定し、これらの平均値をその位置における測定値とした。

(6) ヤング率測定

振動子としてチタン酸バリウムを用いた発振子から発振した周波数 100 kHz の超音波が試験体を伝播する速度を測定し、その値ならびに同一素材から採取した他の試験片で測定したかさ密度からヤング率を求めた。この測定の場合、試験体が円筒状であるので、電気抵抗の測定と同じように、Fig. 1 に示した試験体の断面の④、⑤、⑥、⑦の 4 箇所（位置）の異なった位置で測定し、その平均値を試験体全体の測定値とした。なお、Fig. 9 にはヤング率測定装置の写真を示した。

Table 1 Samples used for the present experiment of IG-II graphite

Sample NO.	Test condition		
	Temperature range	Maximum number of test cycle	Atmosphere
1	500-2000°C	1000	Vacuum
2	500-2200°C	500	Vacuum

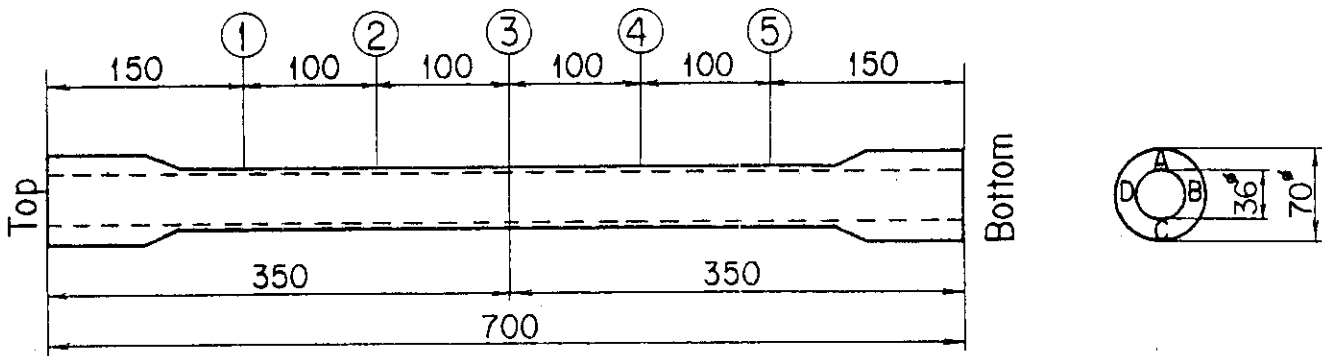


Fig.1 A full-size graphite sleeve for thermal cycle test

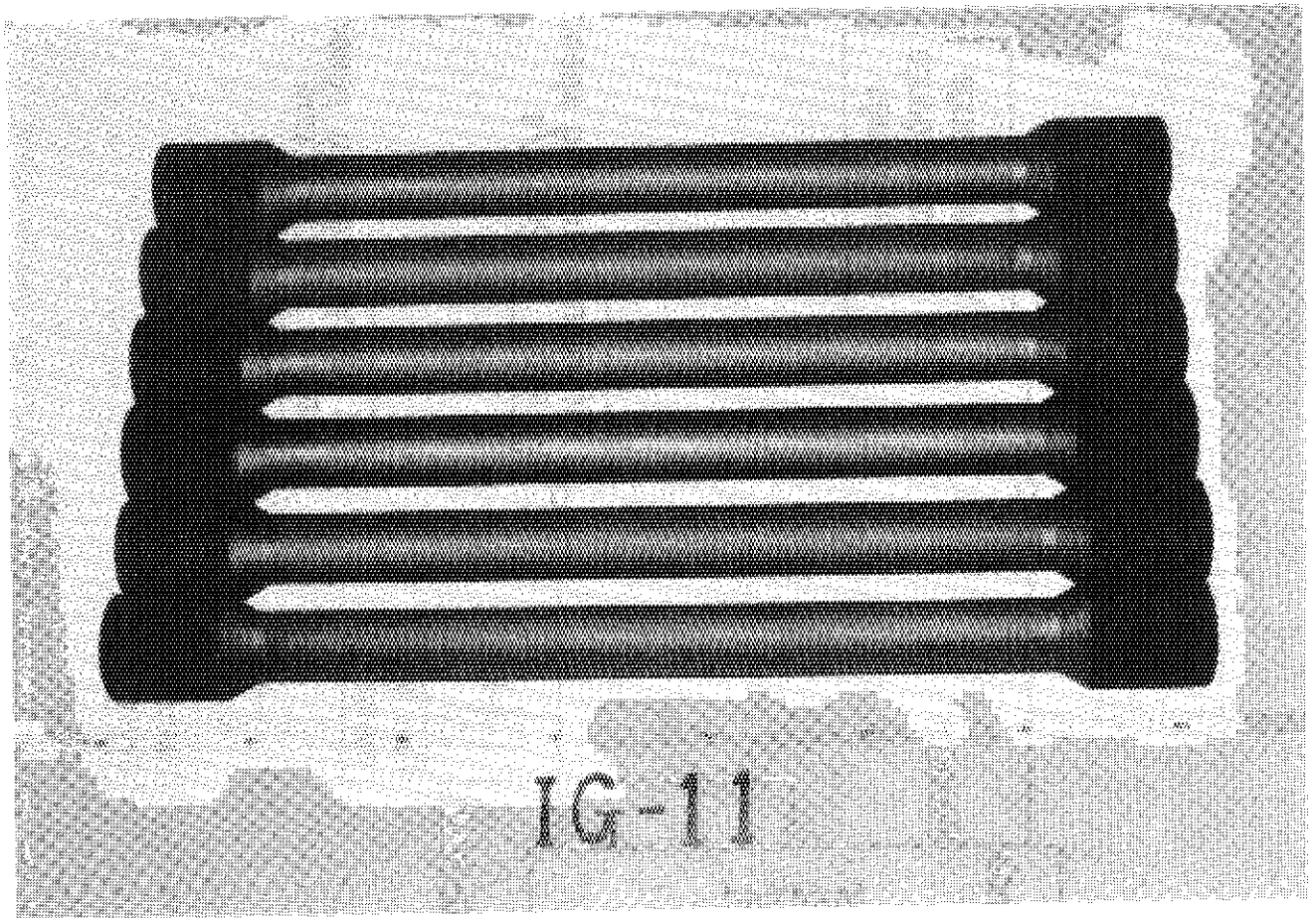


Fig.2 Photograph of IG-11 graphite sleeves

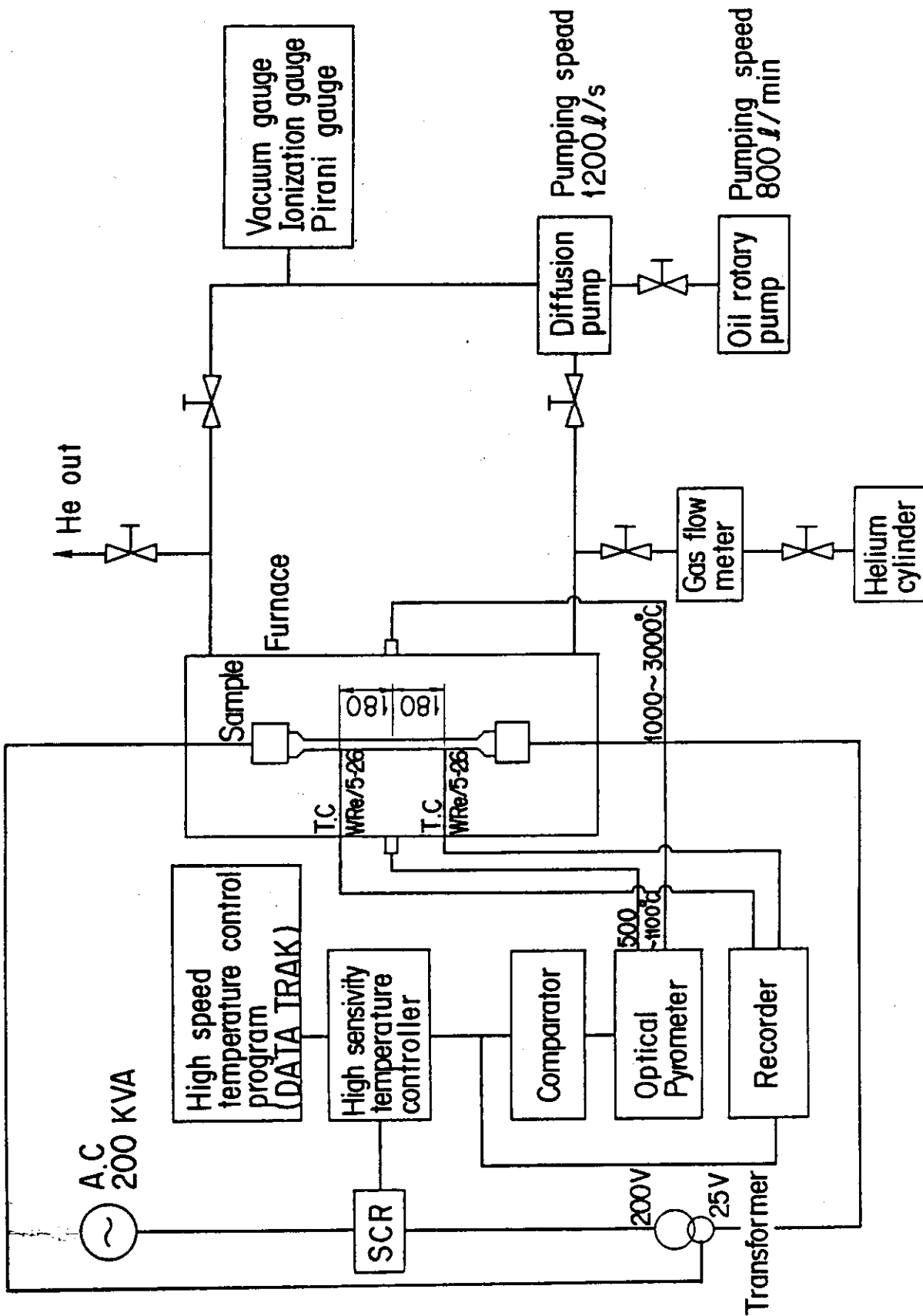


Fig.3 Schematic diagram for test of thermal cycle of a full-size graphite sleeve

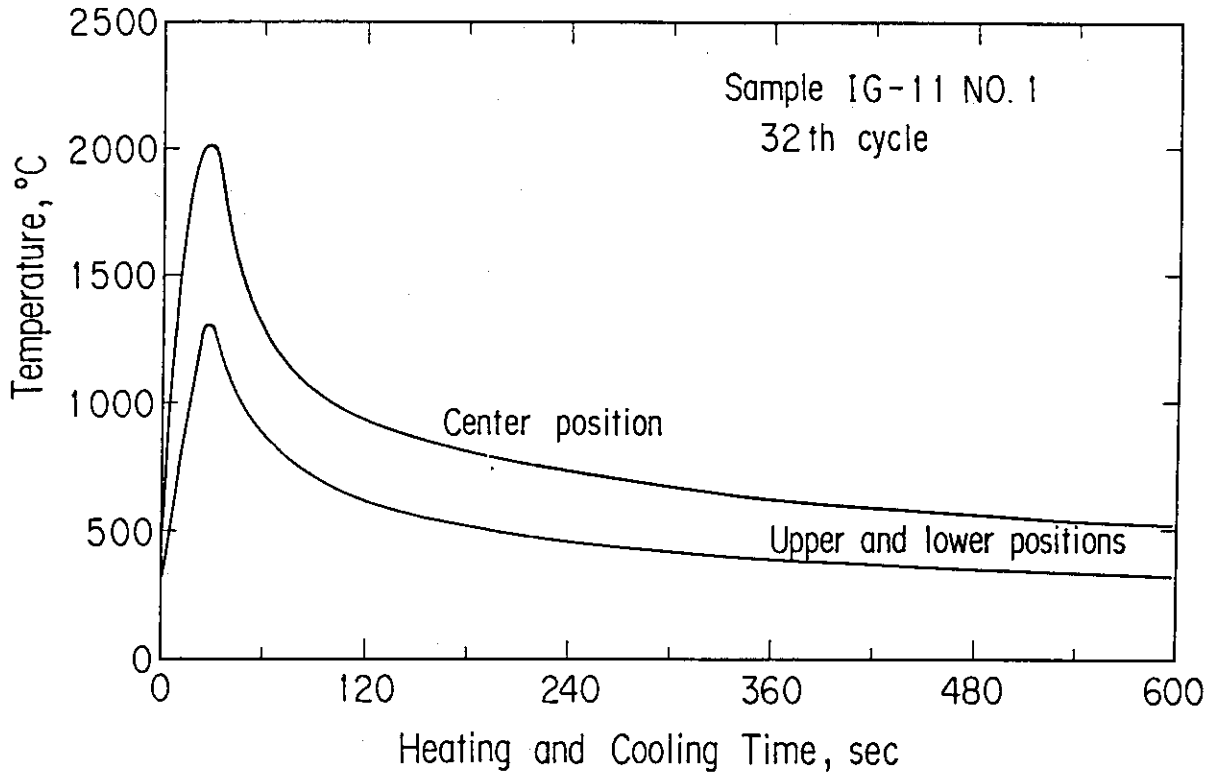


Fig.4 Heating and cooling curves in the case of the maximum test temperature 2000°C

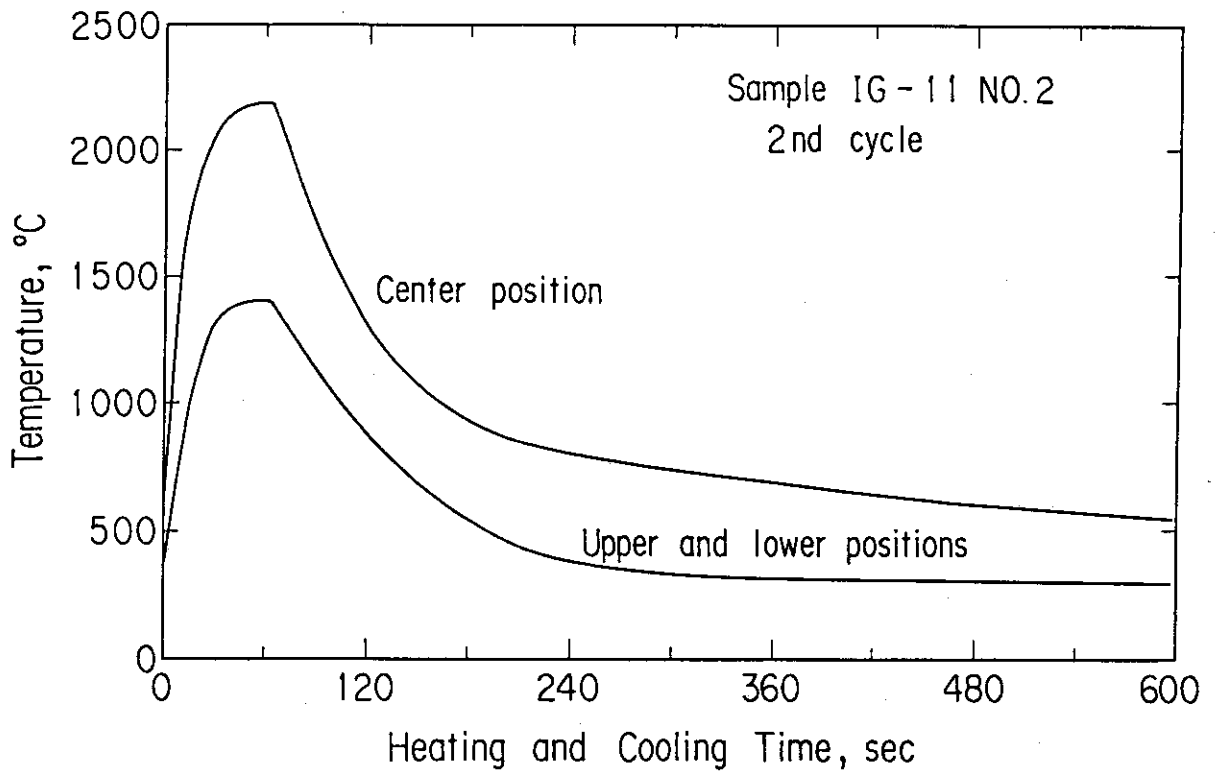


Fig.5 Heating and cooling curves in the case of the maximum test temperature 2200°C

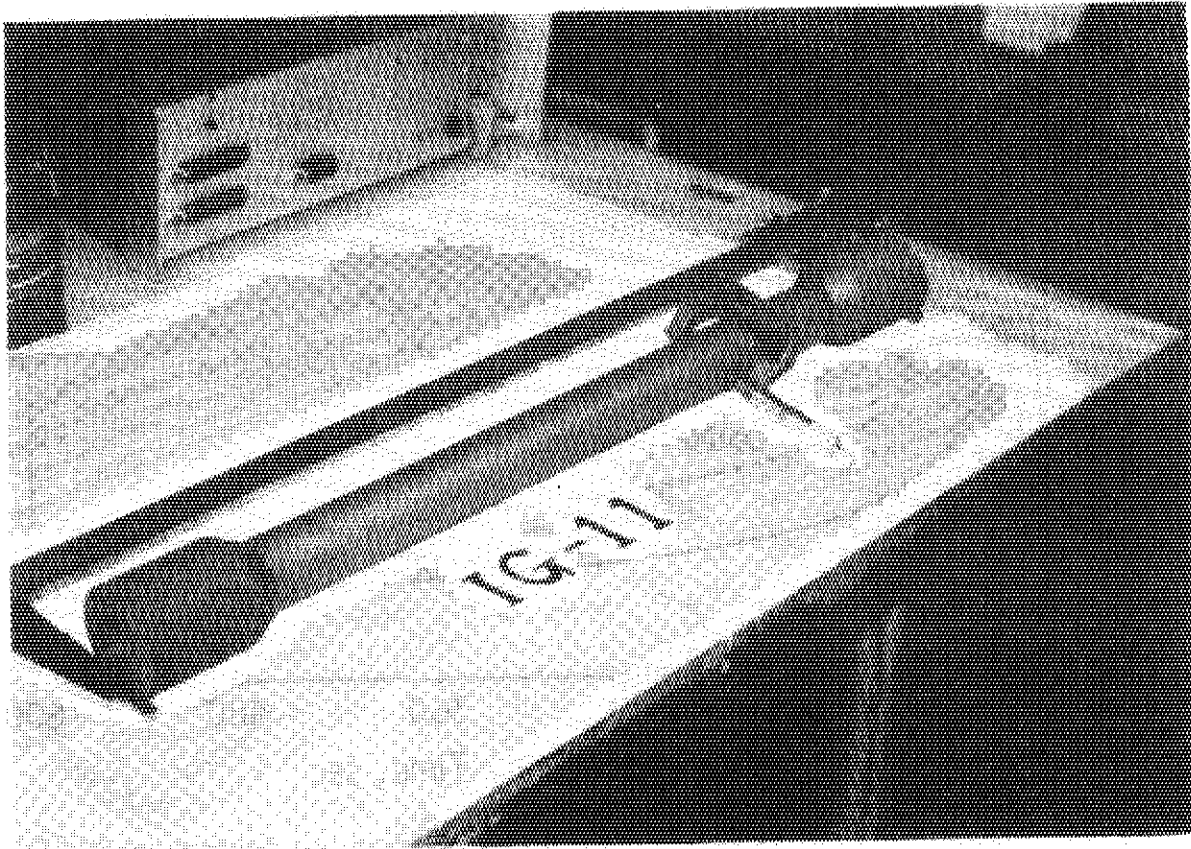


Fig.6 Measurements of length and outer diameter

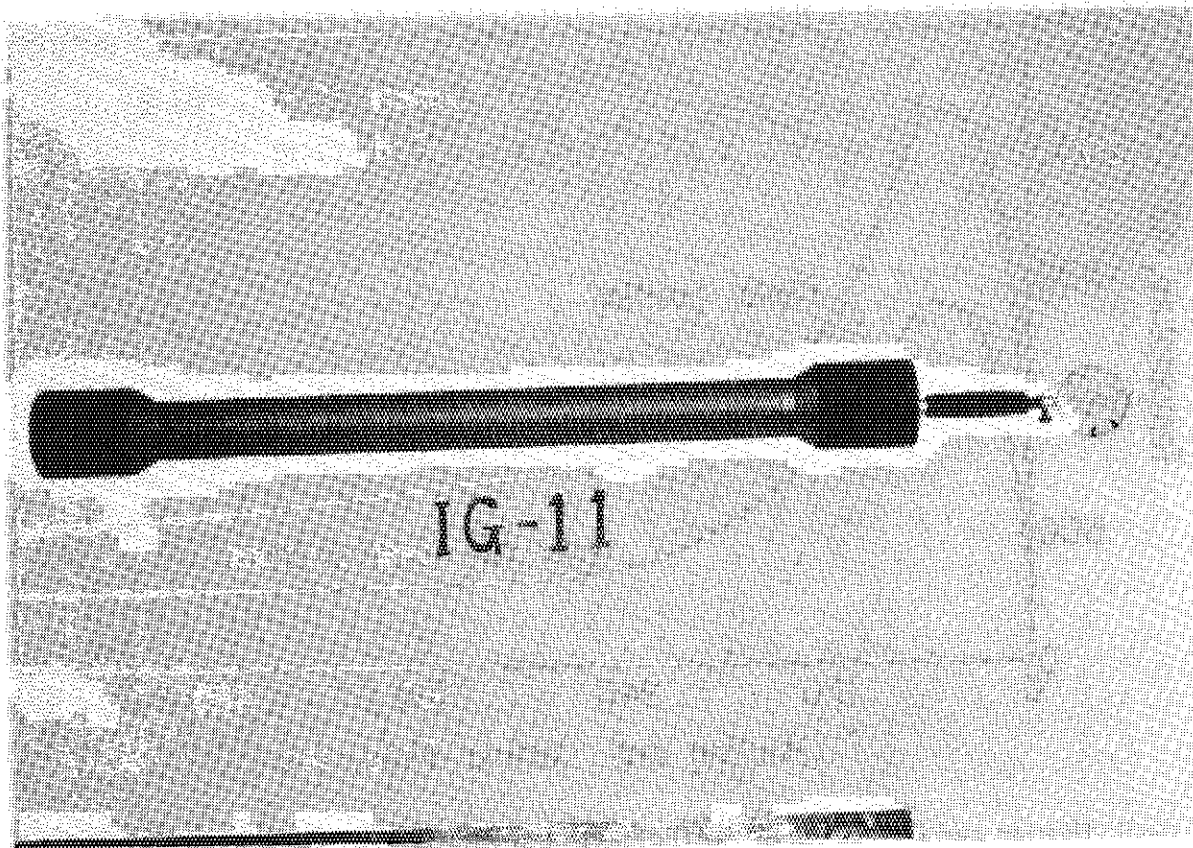


Fig.7 Measurement of inner diameter

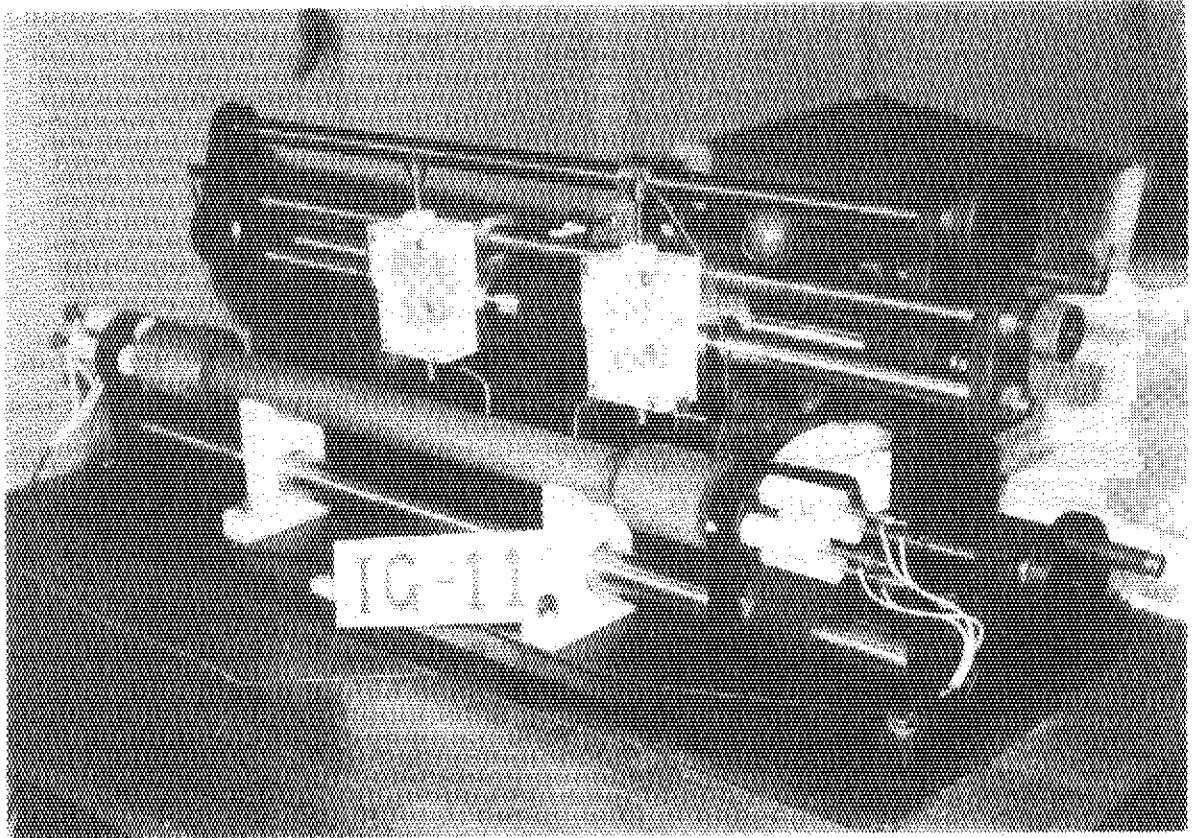


Fig.8 Measurement of electrical resistance

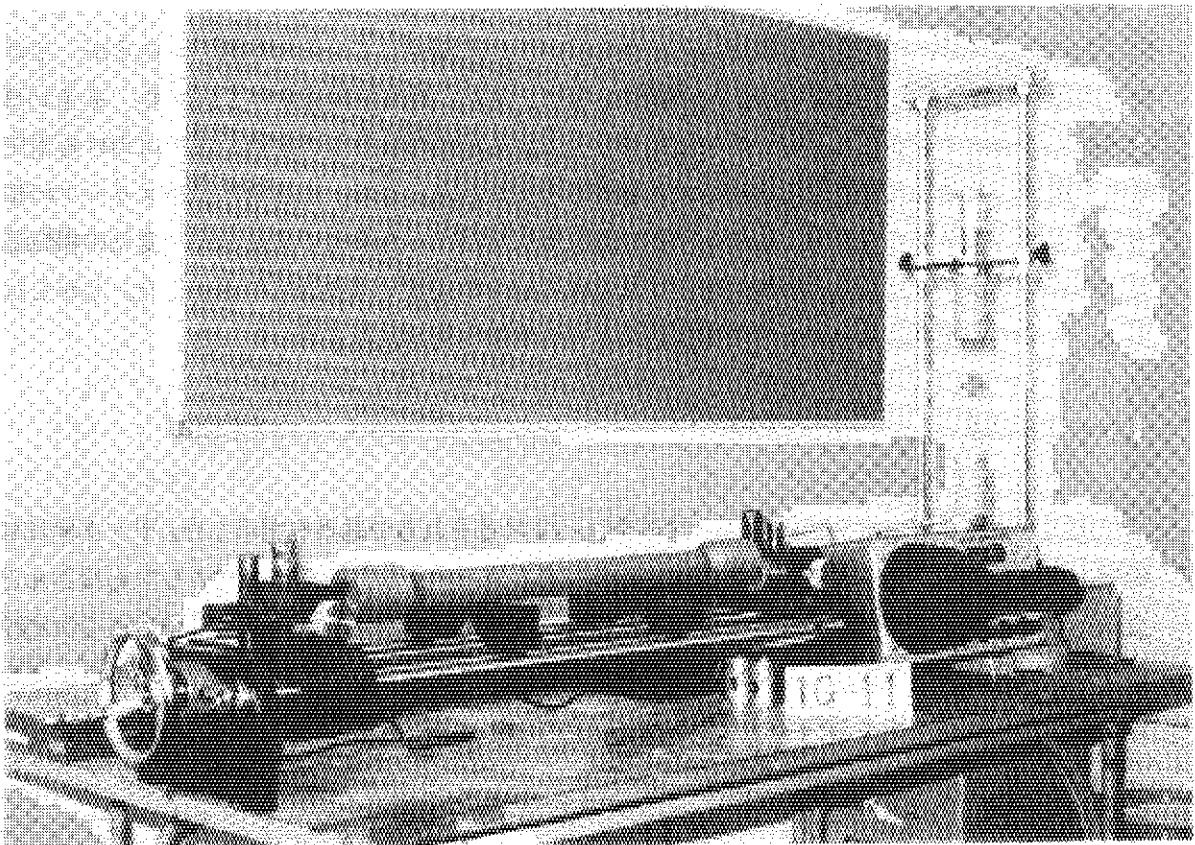


Fig.9 Measurement of Young's modulus

3. 実験結果および考察

3.1 寸法

Table 2～5に熱衝撃を繰返し負荷した場合の試験体の軸方向の寸法、外径、および内径のそれぞれの測定結果を示した。また、Fig. 10～Fig. 11にはそれらの結果を図示した。

試験体の軸方向の寸法は、熱衝撃負荷の初期に最高試験温度が2,200℃の場合には約0.02%、最高試験温度が2,000℃の場合には約0.01%とわずかに膨張するのが認められるが、その後は熱衝撃負荷回数を増やしても変化はほとんど認められない。これらの変化は、試験体全体では約140 μ mならびに約70 μ mの膨張であり、測定誤差を考慮に入れても有意差である。また、試験体の外径および内径はTable 4およびTable 5、ならびにFig. 11に示したようにほとんど変化しない。このように、最高試験温度が2,000℃、あるいは2,200℃までの熱衝撃を繰返し負荷しても寸法、外径、内径などにはいずれも大きい変化は認められなかった。なお、試験体の軸方向でわずかな寸法の膨張が認められたが、この現象は丁度圧縮応力を付加した試料を加熱すると残留膨張が生じるように³⁾高温まで加熱すると蓄積されていた内部応力が解放され、微細構造が変化することによるものと考えられる。

3.2 電気抵抗

Table 6およびTable 7に電気抵抗の測定結果を、またFig. 12およびFig. 13にそれらを図示した。電気抵抗は熱衝撃を負荷した初期にはわずかに減少しているのが認められるが、その後は熱衝撃を繰返し与えてもほとんど変化しない。また、最高試験温度が2,000℃、あるいは2,200℃の場合でもほとんど同じ変化傾向を示した。この熱衝撃負荷の初期の段階における電気抵抗の減少は前述した寸法変化と対応するものと考えられる。なお、加熱時に黒鉛スリーブの軸方向に温度勾配ができるので、加熱と冷却の繰返しを行なった場合の温度分布の変化の電気抵抗への影響を調べるために、黒鉛スリーブ試験体の種々の位置で電気抵抗を測定した。しかしながら、その測定位置の違いによる電気抵抗の変化の明確な差は認められなかった。

3.3 ヤング率

Table 8にヤング率の測定結果を、またFig. 14にはそれらの結果を図示した。ヤング率は熱衝撃を負荷した初期の段階で約2%減少したが、その後は熱衝撃負荷回数を増やしてもほとんど変化しなかった。この初期の段階における変化は、試験体No. 1と試験体No. 2の両者ではほとんど同じであった。熱衝撃を負荷した初期の段階におけるヤング率の減少は前述した寸法ならびに電気抵抗の変化とも対応するものであると考えられる。

3.4 スリーブの耐熱衝撃性

一般に材料の熱衝撃係数 K は次式で与えられる。

$$K = k \cdot \sigma / E \cdot \alpha$$

こゝで、 k は熱伝導率、 σ は機械的強度、 E は弾性係数、 α は熱膨張係数である。

黒鉛スリーブの耐熱衝撃性は、黒鉛スリーブを高温にした場合にどの程度の熱応力が発生してどの程度の熱ひずみが生じるか、そしてその結果、熱伝導率、機械的強度、弾性係数、熱膨張係数などがいかに変化するかによって影響される。黒鉛スリーブ試験体の軸方向には、Fig.4 に示すように、試験体の中心とそれから 180 mm 離れた位置では約 700 °C の温度差があり、平均の温度勾配は 1 cm 当り約 40 °C である。一方、黒鉛スリーブの肉厚は 5 mm であり、試験時における加熱時間が短いことも相まって試験体の半径方向では黒鉛スリーブの外面—中心—内面の温度勾配は軸方向に比較して非常に小さい。このように主に軸方向に温度分布が生じるような状態で熱衝撃を繰返して負荷した場合、熱衝撃負荷の初期において寸法がわずかに膨張し、その結果電気抵抗ならびにヤング率はわずかに減少するのが認められた。しかし、これらの諸性質の変化は黒鉛スリーブの耐熱衝撃性に影響を及ぼす程の大きな変化ではないことが明らかになった。例えば、この実験で認められた 0.02 % 程度のひずみに対しては熱膨張係数や熱伝導率の変化はほとんど無視できる値である^{3, 4)}。また、機械的強度と密接な関連を有するヤング率の変化も非常に小さく³⁾、熱サイクルを加えたとき、耐熱衝撃性は熱サイクルを加える前とほとんど変わらないと考えられる。

Mrozowski⁶⁾によると、黒鉛材料ではその黒鉛化温度から冷却される過程において微結晶の大きな熱膨張の異方性により内部に応力が蓄積され、それが限界を超えた場合にはマイクロクラックが発生して一部の応力は緩和されるとされている。したがって、熱衝撃負荷の初期の段階での諸性質のわずかな変化は、2,000 °C あるいは 2,200 °C まで加熱することによって黒鉛スリーブ内に蓄積されていた内部応力が緩和され、その結果微細構造が変化したために生じたものと解される。

Table 2 Experimental results on the measurement of length and weight for IG-II graphite. Upper and lower value in each column are the measured value and percentage change, respectively

Test cycle	Sample	No.1		No.2	
		Length	Weight	Length	Weight
0		699.83 ^{mm}	1353.4 ^g	699.76 ^{mm}	1347.1 ^g
20		699.90 +0.01	1353.1 -0.022	699.90 +0.02	1346.9 -0.015
50		699.85 0	1353.1 -0.022	699.88 +0.02	1346.8 -0.022
100		699.91 +0.01	1353.1 -0.022	699.90 +0.02	1346.7 -0.030
250		699.91 +0.01	1353.1 -0.022	699.93 +0.02	1346.6 -0.037
500		699.97 +0.02	1253.0 -0.030	-	-
750		699.98 +0.02	1352.9 -0.037	-	-
1000		699.92 +0.01	1352.9 -0.037	-	-

Table 3 Experimental results on the measurement of outer diameter for IG-II No.1 sample. Upper and lower value in each column are the measured value and percentage change, respectively.

Test cycle	Measured point				
	①	②	③	④	⑤
0	46.022 ^{mm}	46.024 ^{mm}	46.019 ^{mm}	46.021 ^{mm}	46.014 ^{mm}
20	46.030 +0.02	46.036 +0.03	46.029 +0.02	46.031 +0.02	46.021 +0.02
50	46.032 +0.02	46.036 +0.03	46.027 +0.02	46.030 +0.02	46.023 +0.02
100	46.030 +0.02	46.036 +0.03	46.032 +0.03	46.032 +0.02	46.023 +0.02
250	46.033 +0.02	46.039 +0.03	46.035 +0.03	46.035 +0.03	46.026 +0.03
500	46.034 +0.03	46.037 +0.03	46.033 +0.03	46.035 +0.03	46.023 +0.02
750	46.035 +0.03	46.039 +0.03	46.035 +0.03	46.036 +0.03	46.028 +0.03
1000	46.033 +0.02	46.039 +0.03	46.035 +0.03	46.034 +0.03	46.024 +0.02

Table 4 Experimental results on the measurement of outer diameter for IG-II No.2 Sample. Upper and lower value in each column are the measured value and percentage change, respectively

Test cycle	Measured point				
	①	②	③	④	⑤
0	45.984 ^{mm}	46.990 ^{mm}	45.994 ^{mm}	46.006 ^{mm}	46.001 ^{mm}
20	45.997 +0.03	46.004 +0.03	46.006 +0.03	46.017 +0.02	46.011 +0.02
50	46.000 +0.03	46.008 +0.04	46.010 +0.03	46.020 +0.03	46.014 +0.03
100	46.002 +0.04	46.008 +0.04	46.010 +0.03	46.019 +0.03	46.013 +0.03
250	46.000 +0.03	46.006 +0.03	46.009 +0.03	46.018 +0.03	46.014 +0.03
500	46.004 +0.04	46.004 +0.03	46.010 +0.03	46.022 +0.03	46.019 +0.04

Table 5 Experimental results on the measurement of inner diameter for IG-II No.2 sample. Upper and lower value in each column are the measured value and percentage change, respectively

Test cycle	Measured point				
	①	②	③	④	⑤
0	36.040 ^{mm}	36.031 ^{mm}	36.031 ^{mm}	36.030 ^{mm}	36.034 ^{mm}
20	36.053 +0.04	36.050 +0.05	36.052 +0.06	36.048 +0.05	36.046 +0.03
50	36.039 0	36.039 +0.02	36.041 +0.03	36.034 +0.01	36.032 0
100	36.042 +0.01	36.046 +0.04	36.048 +0.05	36.042 +0.03	36.039 +0.01
250	36.032 -0.02	36.042 +0.03	36.045 +0.04	36.037 +0.02	36.032 0
500	36.046 +0.02	36.056 +0.07	36.059 +0.08	36.048 +0.05	36.043 +0.02

Table 6 Experimental results on the measurement of electrical resistance for IG-II No.1 Sample. Upper and lower value in each column are the measured value and percentage change, respectively.

Test cycle	Measured position							
	① - ②	② - ③	③ - ④	④ - ⑤	⑤ - ⑥	⑥ - ⑦	⑦ - ⑧	⑧ - ⑨
0	1.816 $\times 10^{-3}\Omega$	1.741 $\times 10^{-3}\Omega$	1.735 $\times 10^{-3}\Omega$	1.759 $\times 10^{-3}\Omega$	7.145 $\times 10^{-3}\Omega$	3.522 $\times 10^{-3}\Omega$		
20	1.821 +0.28	1.743 +0.11	1.738 +0.17	1.761 +0.11	7.145 0	3.519 -0.09		
50	1.820 +0.22	1.742 +0.06	1.735 0	1.761 +0.11	7.125 -0.28	3.503 -0.54		
100	1.824 +0.44	1.743 +0.11	1.738 +0.17	1.762 +0.17	7.118 -0.38	3.516 -0.17		
250	1.826 +0.55	1.749 +0.46	1.741 +0.35	1.767 +0.45	7.138 -0.19	3.515 -0.20		
500	1.821 +0.28	1.744 +0.17	1.737 +0.12	1.761 +0.11	7.126 -0.27	3.511 -0.31		
750	1.822 +0.33	1.748 +0.40	1.742 +0.40	1.767 +0.45	7.150 +0.07	3.521 -0.03		
1000	1.820 +0.22	1.750 +0.52	1.744 +0.52	1.711 +0.68	7.170 +0.35	3.518 -0.11		

Table 7 Experimental results on the measurement of electrical resistance for IG-II No.2 Sample. Upper and lower value in each column are the measured value and percentage change, respectively

Test cycle	Measured position					
	① - ②	② - ③	③ - ④	④ - ⑤	① - ⑤	② - ④
0	$\times 10^{-3}\Omega$ 1.844	$\times 10^{-3}\Omega$ 1.909	$\times 10^{-3}\Omega$ 1.862	$\times 10^{-3}\Omega$ 1.838	$\times 10^{-3}\Omega$ 7.600	$\times 10^{-3}\Omega$ 3.824
20	1.866 +0.11	1.906 -0.16	1.868 +0.32	1.837 -0.05	7.554 -0.71	3.799 -0.65
50	1.891 +0.37	1.916 +0.37	1.872 +0.54	1.848 +0.54	7.064 +0.05	3.814 -0.26
100	1.891 +0.37	1.912 +0.16	1.871 +0.48	1.842 +0.22	7.587 -0.17	3.806 -0.47
250	1.893 +0.48	1.919 +0.52	1.877 +0.81	1.848 +0.54	7.620 +0.26	3.828 +0.10

Table 8 Experimental results on the measurement of Young's modulus for IG-II graphite. Upper and lower value in each column are the measured value and percentage change, respectively

Test cycle	Sample	
	No.1	No.2
0	$\times 10^3$ MPa 9.17	$\times 10^3$ MPa 8.85
20	9.01 -1.74	8.69 -1.81
50	9.01 -1.74	8.85 0
100	9.01 -1.74	8.69 -1.81
250	9.01 -1.74	8.69 -1.81
500	8.93 -2.62	-
750	8.93 -2.62	-
1000	9.01 -1.74	-

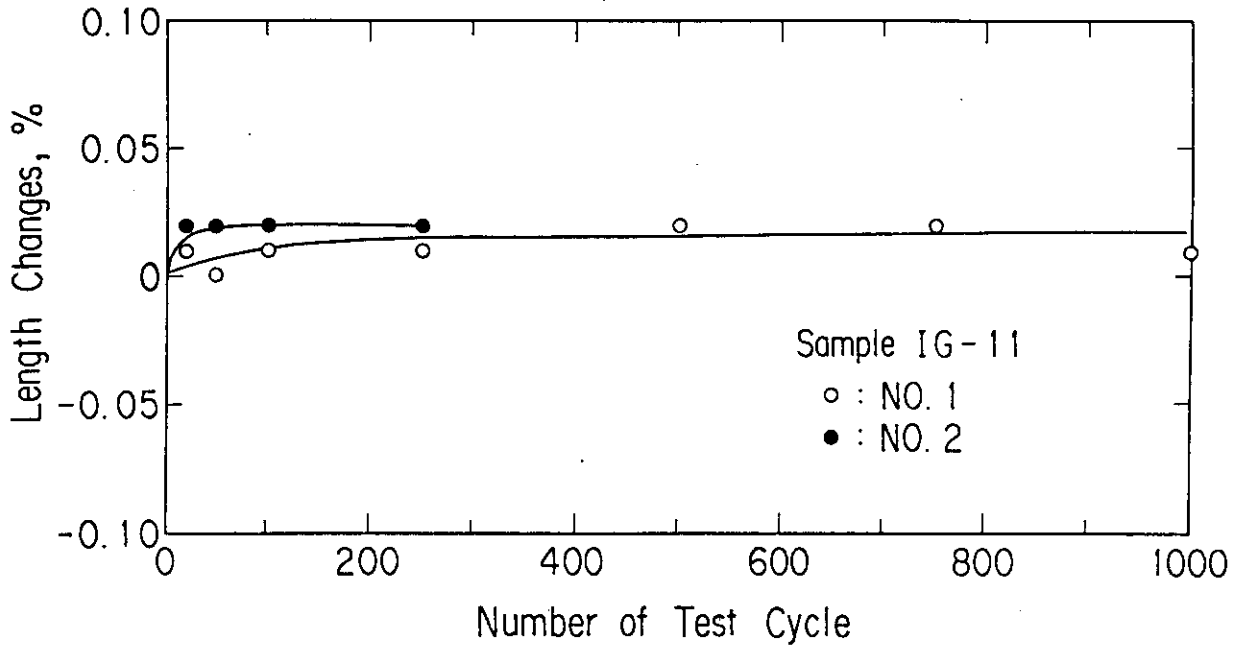


Fig.10 Length changes v.s number of test cycle

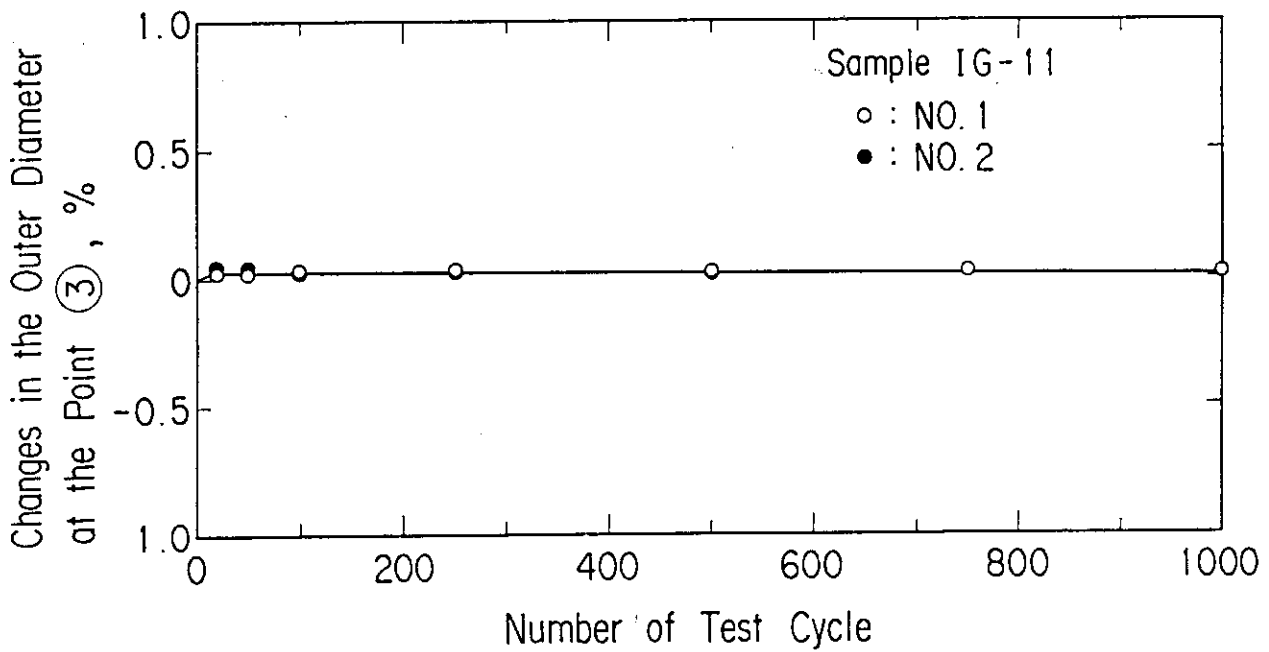


Fig.11 Changes in outer diameter v.s number of test cycle

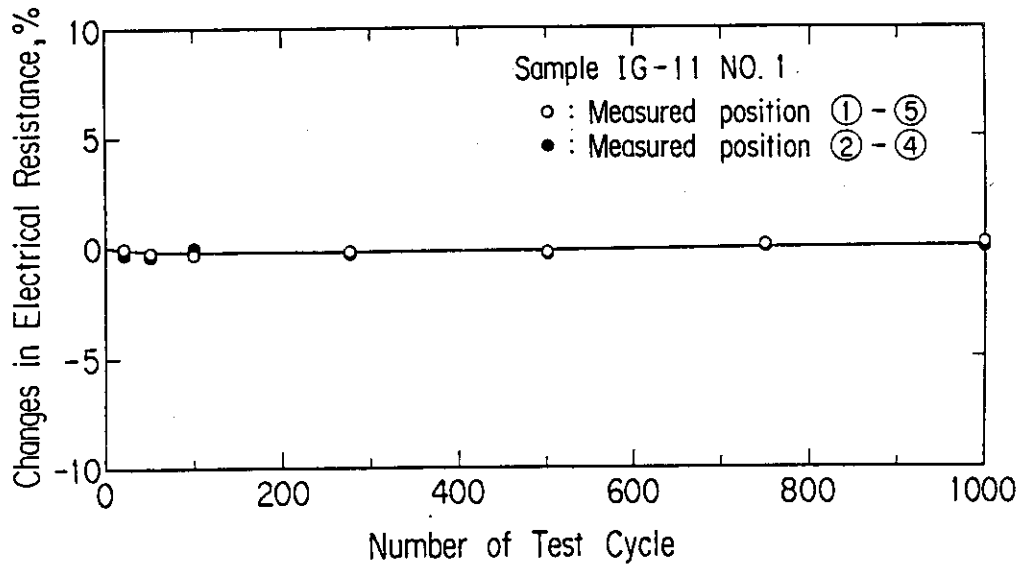


Fig.12 Changes in electrical resistance v.s number of test cycle for the sample IG-11 No 1

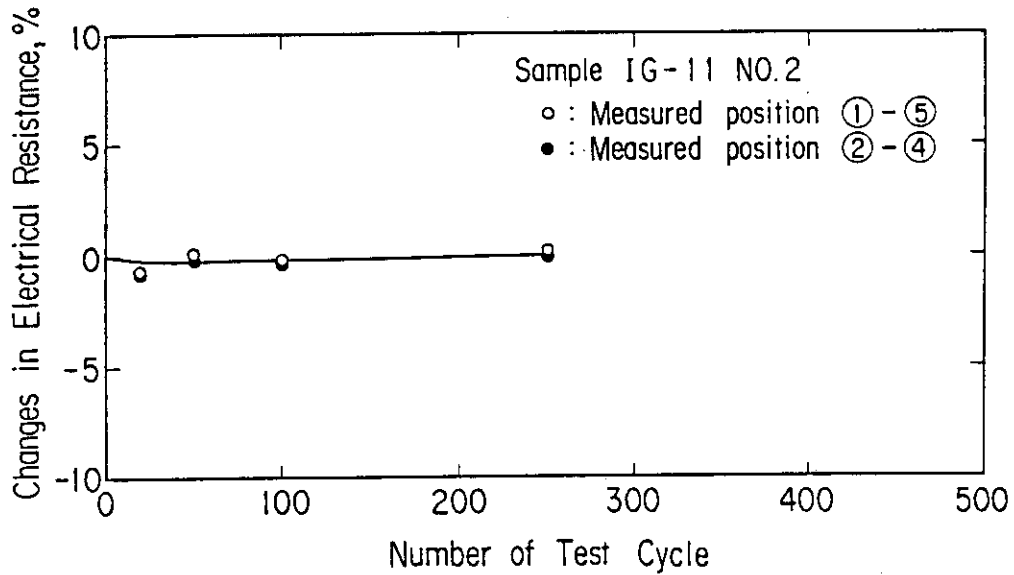


Fig.13 Changes in electrical resistance v.s number of test cycle for the sample IG-11 No 2

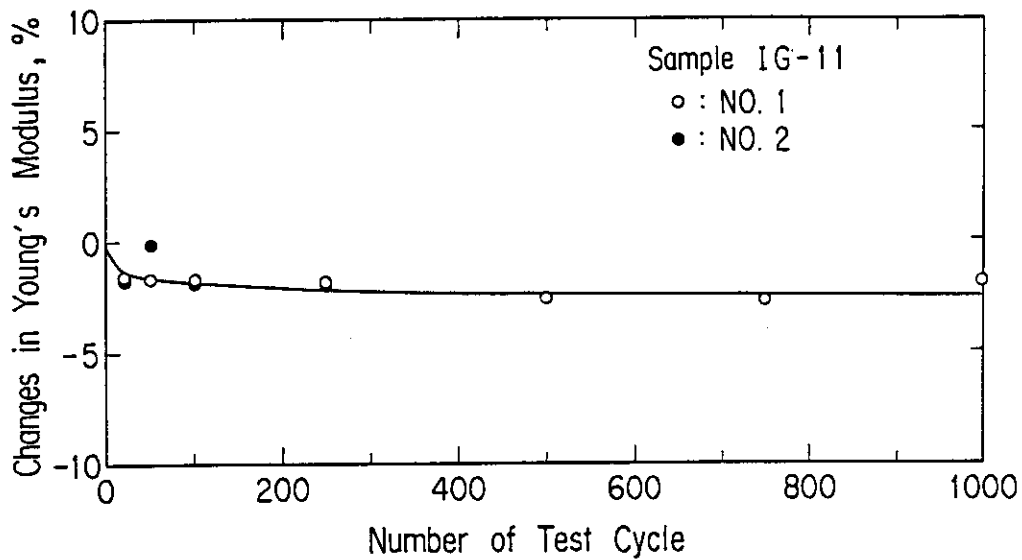


Fig.14 Changes in Young's modulus v.s number of test cycle

4. まとめ

多目的高温ガス実験炉用候補材料 IG-11 の実寸大黒鉛スリーブに対し、500℃から最高2,000℃までは1,000回、最高2,200℃までは500回平均昇温速度80℃/sで加熱した後自然冷却し、それぞれの熱衝撃を繰返し負荷して耐熱衝撃性試験を行なった結果は次のようにまとめられる。

- (1) 試験体の軸方向の寸法は、熱衝撃負荷の初期に、最高試験温度が2,200℃の場合には約0.02%、2,000℃の場合には約0.01%とわずかに膨張するのが認められた。しかし、その後は熱衝撃負荷回数を多くしても変化は認められなかった。
- (2) 試験体の外径および内径は熱衝撃を繰返し負荷しても有意な変化は認められなかった。
- (3) 電気抵抗は熱衝撃を負荷した初期にわずかに減少するのが認められた。しかし、その後は熱衝撃負荷回数を増やしてもほとんど変化しなかった。
- (4) ヤング率は熱衝撃負荷の初期には熱衝撃負荷前の値に比較して約2%減少したが、その後は熱衝撃負荷回数を増やしてもほとんど変化しなかった。

以上の寸法、電気抵抗、ヤング率などに関する実験結果から、実寸大の黒鉛スリーブに急激な熱衝撃を繰返し負荷した場合、黒鉛スリーブの諸性質は大きな変化を受けず、熱サイクルを加えてもその耐熱衝撃性は熱サイクルを加える前とほとんど変わらないことが明らかになった。

謝 辞

本試験研究を遂行するにあたり種々の有益な御助言をいただきました今井 久黒鉛材料研究室長、岩本多實燃料工学部長に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) Sato S., Sato K., Imamura Y. and Kon J. Carbon 13, 309 (1975)
- (2) Matsuo H., Fujii K., Imai H., and Kurosawa T., J. Nucl. Mater. To be published
- (3) Matsuo H., Sasaki Y. Carbon 23, 51 (1985)
- (4) Matsuo H., J. Nucl. Mater. 92, 39 (1980)
- (5) Yoda S., Eto M. and Oku T. J. Nucl. Mater., 119, 278 (1983)
- (6) Mrozowski S., Proc. First and Second Conf. on Carbon, Waverly Press Inc., Maryland, 31 (1956)