JAEA-Technology 2008-094



超高温ガス炉用炭素複合材料の照射による 特性変化の測定

一寸法、熱膨張率、弾性率一

Measurement on Irradiation-induced Property Change of Carbon Composite Material for Very High Temperature Reactor - Irradiation-induced Dimensional Change, Coefficient of Thermal Expansion and Elastic Modulus -

高木 俊 牧田 太陽 國本 英治 柴田 大受 沢 和弘

Takashi TAKAGI, Taiyo MAKITA, Eiji KUNIMOTO, Taiju SHIBATA and Kazuhiro SAWA

原子力基礎工学研究部門 耐熱燃料・材料開発グループ

High Temperature Fuel and Material Group Nuclear Science and Engineering Directorate

P

日本原子力研究開発機構

March 2009

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

超高温ガス炉用炭素複合材料の照射による特性変化の測定 一寸法、熱膨張率、弾性率一

日本原子力研究開発機構

原子力基礎工学研究部門核熱応用工学ユニット 高木 俊^{**1}、牧田 太陽^{*2}、國本 英治^{*3}、柴田 大受、沢 和弘

(2008年12月25日 受理)

高温ガス炉の性能及び安全性を向上させる手段として、金属に替わるより高温で使用できる 耐熱性材料の炉内構造物への使用が望まれている。高温に耐え得る材料の一つとして、炭素繊 維強化型炭素複合材料(C/C コンポジット)が有望な材料であり、超高温ガス炉(VHTR)において も制御棒等炉内構造物への C/C コンポジットの採用が検討されている。

本報告は、材料試験炉(JMTR)において 03M-47AS キャプセルで照射された C/C コンポジットの 照射による特性変化として照射後試験で実測した照射誘起寸法変化、熱膨張率、弾性率につい てまとめたものである。

原子力科学研究所(駐在) :〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

※1 外来研究員(イビデン株式会社)

- ※2 外来研究員(東海カーボン株式会社)
- ※3 技術開発協力員(東洋炭素株式会社)

JAEA-Technology 2008-094

Measurement on Irradiation-induced Property Change of Carbon Composite Material for Very High Temperature Reactor - Irradiation-induced Dimensional Change, Coefficient of Thermal Expansion and Elastic Modulus -

Takashi TAKAGI^{**1}, Taiyo MAKITA^{**2}, Eiji KUNIMOTO^{**3}, Taiju SHIBATA and Kazuhiro SAWA

> Nuclear Applied Heat Technology Division Nuclear Science and Engineering Directorate Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

> > (Received December 25, 2008)

To advance the performance and safety of High Temperature Gas-cooled Reactors (HTGRs), it is expected to use heat-resistant materials substitute for metallic materials in the core internal structural components of HTGRs at higher temperature. Carbon fiber reinforced carbon-carbon composite (C/C composite) is one of candidates as heat-resistant materials, and investigations are under going to apply the core internal structural components such as the control rod for the Very High Temperature Reactor (VHTR).

This report describes the experimental results of irradiation effects on dimensional change, coefficient of thermal expansion and elastic modulus obtained by PIE (Post-Irradiation Examinations) for C/C composite irradiated in 03M-47AS capsule at the Japan Materials Testing Reactor (JMTR).

Keywords: HTGRs, C/C Composite, VHTR, Dimensional Change, Coefficient of Thermal Expansion, Elastic Modulus, PIE

※1 Visiting Researcher (from IBIDEN CO.,LTD.)
※2 Visiting Researcher (from TOKAI CARBON CO.,LTD.)
※3 Collaborating Engineer (from TOYO TANSO CO.,LTD.)

目 次

1. はじめに	1
2. 照射後試験の概要	4
2.1 試験体	4
2.2 試験体の照射実績	6
3. 照射後試験方法	14
3.1 寸法測定	14
3.2 熱膨張率測定	14
3.3 弹性率測定	15
4. 照射後試験結果	17
4.1 寸法測定結果	17
4.2 熱膨張率測定結果	17
4.3 弹性率測定結果	20
5. 結論	21
謝辞	22
参考文献	22

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Post Irradiation Examination	4
2.1 Samples	4
2.2 Irradiation History of Samples	6
3. Examination method of Post Irradiation Examination	14
3.1 Dimension	14
3.2 Coefficient of thermal expansion	14
3.3 Elastic modulus	15
4. Results of Post Irradiation Examination	17
4.1 Dimension	17
4.2 Coefficient of thermal expansion	17
4.3 Elastic modulus	20
5. Concluding Remarks	21
Acknowledgements	22
References	22

This is a blank page.

1. はじめに

高温のガスを炉外に取出せる高温ガス炉は、固有の安全性に優れた原子炉として位置付けられ、特に 900℃以上の高温のガスを取り出すことを目的とした超高温ガス炉(VHTR)は、第四世 代原子炉システム(GEN-IV)の一つとして、国際的にも精力的な研究開発が展開されようとして いる。我が国では、日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センターの高温工学試験研究炉 (HTTR)を用いて高温ガス炉の研究開発を進めている。¹⁾

高温ガス炉の性能及び安全性を向上させる手段として、金属に替わるより高温で使用出来る 耐熱性材料の炉内構造物への使用が望まれている。高温に耐え得る材料の一つとして、炭素繊 維強化型炭素繊維複合材料(C/Cコンポジット)が有望な材料である。C/Cコンポジットの高温ガ ス炉の炉内構造物への応用として、その薄板形状の製作性と高強度から固定反射体を外側から 締め付ける炉心拘束機構や、耐食耐熱超合金(Alloy 800H)の代替材料として制御棒の中性子吸 収材を収納する被覆管への利用が期待される。HTTRの原子炉本体の構造をFig.1^{1),2)}、制御棒 の構造例をFig.2²に示す。

制御棒の被覆管には、高温強度、部材の製作性及びコストの観点から特に二次元 C/C コンポ ジット(2D-C/C コンポジット)が有望視されているが、炭素繊維の繊維方向、積層方向によって、 機械的・熱的に高い異方性を有している。制御棒の被覆管に検討されている 2D-C/C コンポジッ ト材料の一例を Fig. 3 に示す。これらの新しい材料を原子炉の炉内構造物として使用するには、 熱や中性子による損傷に対する方向性に着目した基礎データの取得が必要であり、材料試験炉 (Japan Material Testing Reactor, JMTR)を用いた照射試験が進められてきた。

本報告は、材料試験炉(JMTR)において 03M-47AS キャプセルで照射された C/C コンポジットの 照射による特性変化について、照射誘起寸法変化、熱膨張率、弾性率について照射後試験の結 果をまとめたものである。



Fig.1 Core internal structural components of HTTR 1), 2)



Fig.2 Control rod of HTGR ²⁾



Fig.3 Mock up with C/C composite (CX-270G)

2. 照射後試験の概要

照射後試験では、03M-47AS キャプセルで照射された 2D-C/C コンポジット材料 CX-270G(東洋 炭素株式会社製)の繊維方向及び積層方向ロッド形状試験片について、寸法、熱膨張率、弾性率 を測定した。

試験に用いた CX-270G は、樹脂含浸した平織りの PAN 系炭素繊維クロスを積層した前駆体を 熱成形、ピッチ含浸・焼成を数回繰り返した後、2800℃黒鉛化処理、高純度化処理したもので ある。

2.1 試験体

照射後試験に用いた試験体の詳細³⁾を Table 1、試験片の詳細を Fig. 4 に示す。 また、CX-270G の主要な特性⁴⁾を Table 2、素材外観及び表面拡大を Fig. 5 に示す。

Table 1 Cylindrical specimens for the 03M-47AS capsule in JMTR ³⁾

Classified	Specimen	Dimension (mm)	Number
Defenences	C/C , CX-270G-v ,rod	φ5×20	4
References	C/C , CX-270G-p ,rod	φ5×20	4

C/C: 2-dimensional carbon fiber reinforcement carbon composite.

v: vertical to lamina of axes.

 \mathbf{p} : parallel with fiber.



Vertical to lamina of axes (-v)

Parallel with fiber (-p)



		Bulk	Electrical	Bending	Tensile	Compressive
Grade		density	resistivity	strength	strength	strength
		(g/cm ³)	$(\mu \Omega \cdot m)$	(MPa)	(MPa)	(MPa)
(2D-C/C)	//	1.69	6.5	-	-	69
CX-270G	\perp	1.03	-	133	167	89
(Graphit	e)	1 77	11	20	95	79
IG-110		1.77	11	39	25	18

Table 2 Physical properties of CX-270G $^{\rm 4)}$

Grade		Interlayer	Elastic	Coefficient	Thermal
		shear	Modulus	of thermal	Conductivity
		strength		expansion	
		(MPa)	(GPa)	(10 ⁻⁶ /K)	(W/m • K)
(2D-C/C)	//		81	0.2	129
CX-270G	\perp	ə. /	-	10.8	26
(Graphit	(Graphite)		10	4.0	110
IG-110		-	10	4.0	116

// : Parallel to lamina

☆ Coefficient of thermal expansion : RT-1273K

 $\bot\colon \mathbf{Perpendicular}$ to lamina



Fig.5 Photo of CX-270G (un-irradiated)

2.2 試験体の照射実績 3)

材料試験炉 (JMTR)の照射孔 E-10 において、#157 から#162 サイクルまで合計 6 サイクルの運 転期間中、4188.67 時間の照射運転を行った。使用したキャプセルの概略構造を Fig.6 に示す。 Table 4 に示す多種類の参照試料を収納するため、Fig.7 に示したように黒鉛製熱媒体に 10 孔 の穴を加工し各試験片を配置した。高速中性子 (E>1.0MeV)の平均値、高速中性子のピーク値、 熱中性子 (E<0.683eV)の平均値及び熱中性子のピーク値の積算照射量は各々6.22×10²⁴ (m⁻²)、 8.22×10²⁴ (m⁻²)、2.15×10²⁵ (m⁻²)、2.77×10²⁵ (m⁻²)であった。なお、高速中性子の平均値は、キ ャプセル中心軸における軸方向の平均値 (炉中心±375mm)、ピーク値はキャプセル中心軸におけ る軸方向ピーク値である。熱中性子の平均値はキャプセルを含む反射体の平均値 (炉中心± 375mm)、ピーク値はキャプセルを含む軸方向ピーク値である。

照射温度は#01 熱電対を使用して 600℃目標で温度制御した。各サイクルの照射温度履歴を Fig. 8~10 に示す。また、最終サイクル#162 の照射温度平均値を Table 3 に示す。

TC	95%_confidence interval	Min(°C)	Max(°C)
#01	$600{\pm}1$	597	603
#02	553 ± 3	550	557
#03	553±11	540	565
#04	492 ± 18	477	508
#05	$414{\pm}16$	386	434
#06	417±17	390	439

Table 3 Averaged temperature of 03M-47AS in JMTR operation cycle #162.³⁾

照射試験中の特記事項

● 157 サイクル (2005/1/27-2005/2/26)

本キャプセルは、Heダンプ状態での照射を予定していたが、原子炉出力 50MW到達時 点の試料温度が予想温度に比べて低すぎるため、真空温度制御で試料温度を上昇させるこ とにした。昇温は1月31日10時12分に開始し、10時51分にTC01で600℃の定常運転条 件に到達させた。

今サイクルはこの条件で照射運転を継続し、2月26日の原子力出力降下と同時に降温、 第157サイクルの照射運転を終了した。

● 158 サイクル (2005/3/5-2005/4/4)

本キャプセルは、3月6日の原子力出力 50MW到達時 16時 46分から昇温を開始し、17時 28分に TC01 で 600℃の定常温度条件に到達させた。

今サイクルはこの条件で照射運転を継続し、4月4日の原子炉出力降下と同時に降温、第 158 サイクルの運転を終了した。 ● 159 サイクル (2005/5/11-2005/6/9)

本キャプセルは、5月11日の原子炉出力50MW到達後16時51分から昇温を開始し、17時13分にTC01で600℃の定常運転条件に到達させた。

今サイクルはこの運転条件で照射運転条件を継続し、6月9日の原子炉出力降下と同時に 降温、第159サイクルの照射運転を終了した。

● 160 サイクル (2005/6/18-2005/7/18)

本キャプセルは、6月18日の原子炉出力50MW到達後16時5分から昇温を開始し、16時39分にTC01で600℃の定常照射条件に到達させた。

その後はこの条件で照射運転を継続していたが、7月7日16時39分に落雷による商用電源の停電があり、原子炉が自動停止した。

原子炉は7月9日9時から再起動した。本キャプセルは、原子炉出力50MW到達後13時23分から昇温を開始し、13時36分にTC01で600℃の定常照射条件に到達させた。その後はこの条件で照射運転を継続し、7月18日の原子炉出力降下と同時に降温、第160サイクルの照射運転を終了した。

● 161 サイクル (2005/12/17-2006/1/28)

当サイクルは、12月17日から27日までの前半サイクルと1月9日から28日までの後半 サイクルに分けて照射運転を実施した。

前半サイクルは、12月17日の原子炉出力 50MW到達後18時15分から昇温を開始し、18時28分にTC01で600℃の定常照射温度に到達させた。その後はこの条件で照射運転を継続し、12月27日の原子炉出力降下と同時に降温、第161サイクル前半サイクルの照射運転を終了した。

後半サイクルは、1月9日の原子炉出力 50MW到達後18時15分から昇温を開始し、18時25分にTC01で600℃の定常照射温度に到達させた。その後はこの条件で照射運転を継続し、1月28日の原子炉出力降下と同時に降温、第161サイクルの照射運転を終了した。

● 162 サイクル (2006/2/23-2006/3/26)

本キャプセルは、2月23日の原子炉出力 50MW 到達後18時12分から昇温を開始し、18時37分にTC01で600℃の定常運転条件に到達させた。

今サイクルはこの運転条件で照射運転条件を継続し、3月26日の原子炉出力降下と同時 に降温、第162サイクルの照射運転を終了した。



- 8 -

Classified	Specimen	Dimension (mm)	
	SiC/SiC Composite	φ4.8×19	2
	SiC/SiC Composite	φ5×19	2
	Graphite (IG-430 Improved)	φ5×18	3
	Graphite (IG-110)	φ5×20	3
	C/C Composite(CX-270G-v)	φ5×20	4
	C/C Composite(CX-270G-p)	φ5×20	4
	Graphite (IG-430)	φ5×19	3
	Temperature Monitor (SiC)	φ5×18	3
References	Temperature Monitor (Bi-Sb)	φ5×50	3
	C/C Composite(CX-270G-v)	φ10×2	4
	C/C Composite(CX-270G-p)	φ10×2	4
	Graphite (IG-430)	φ10×1.75	3
	Graphite (IG-430 Improved)	φ10×1.5	3
	Graphite (IG-110)	φ10×2	3
	Super plastic zirconium	φ10×1	3
	Super plastic zirconium	φ10×2	3
	Super plastic zirconium	3×4×34	4

Table 4 References specimen for 03M-47AS $^{\scriptscriptstyle 3)}$















3. 照射後試験方法

照射後の寸法、熱膨張率、弾性率の測定は、全て JMTR ホットラボ施設内で行った。

3.1 寸法測定

直径及び長さ寸法測定は、デジタルマイクロメーター(測定範囲:0~25mm,最小表示量:0.001mm ミツトヨ製)を用いて行った。

3.2 熱膨張率測定

熱膨張率の測定には、熱機械分析装置(thermo mechanical analysis, TMA(TMA-8310H, リガ ク製)を用いた。本装置は、セラミックス材料等の熱膨張率を室温から 1500℃まで測定する機 能を有しており Table 5 に本装置の概略仕様を示す。

測定条件は室温から1673Kまで10K/minの昇温速度、高純度窒素ガス流動速度100ml/minとし、 昇温時のデータを収集した。相対測定用の基準材には、アルミナ(α-Al₂O₃)を使用した。

Method / Range	Specification
Measurement Temperature Range	RT~1500°C (Common Use, RT~1400°C)
Measurement Range	Displacement : $\pm 2500 \mu$ m, Sensitivity : 250μ m \sim
	Load : ±100gf, Sensitivity : 0.001gf \sim
Specimen Dimension	φ5×20mm (Max φ9mm)
Programmable Temperature Rising	$\pm 0.016 (1^{\circ}C/hr) \sim 100^{\circ}C/min$
Rate	
Measurement Mode	Expansion Measurement
	(Compression measurement)
Cooling Method	Built-in Cooling Unit (Air-cooling Fan)
Output Signal	Temperature, displacement, Load,
	Differential Calculus Signal (Analog/Digital)
Atmosphere Gas / Flow Quantity	Inert gas (He , N ₂), 0~250 (ml/min)
Power Supply	AC100V, 1.2KVA-50Hz

Table 5 Specification of TMA (Rigaku-8310H) ⁵⁾

3.3 弹性率測定

弾性率の測定には、超音波探傷装置(USI550, クラウトクレーマー社製)を用いた。Table 6 に本装置の概略仕様を示す。

Method / Range	Specification
Measurement Range	2.5mm~9700mm
Velocity of Sound	500~15000m/s
Transmission Unit	Spike Pulse
Reception Frequency Range	0.5~20.0MHz
Rectify	Full Wave, Positive Half-wave,
	Negative Half-wave, RF
Rejection	0~90%
Flaw Detection Mode	Single Mode / Dual Mode
Gain	0~110dB, 0.5dB Step
DAC/TCG	40dB Dynamic Range, 6dB/µs
Power Supply	AC100V
Operating Temperature	$5^{\circ}\mathbb{C}\sim 35^{\circ}\mathbb{C}$

Table 6 Specification of Ultrasonic flaw detection equipment (KRAUTKRAMER JAPAN USI550)

超音波探傷装置を使用した音速測定は、透過(二探触子法)による垂直・直接接触法を用いた。 測定では、良好なカップリング(試験片と探触子境界での減衰が小さい状態)を得るため、接触 媒体を用い、試験片を振動子に一定の押し付け力を与え固定するため、ユニバーサルジョイン トを備えた専用治具を使用した。これらの試験装置及び試験条件で縦波音速(V_L),横波音速(V_S) を測定した。

探触子: 1.0MHz 縦波用及び横波用 振動子寸法: φ6mm 接触媒体:

縦波用: 超音波用接触媒質 コンクリートたて波用 ソニコート-E

横波用: 横波用超音波接触媒質 ソニコート SHN-C45

弾性率は、慣用的に縦波音速から計算される計算式(1)及び JIS R1602-1995「ファインセラミックスの弾性率試験方法」を参考に、縦波音速と横波音速を用いた計算式(2)から算出した。 また、ポアソン比を計算式(3)から算出した。

$$E = V_L^2 \times \rho \qquad (1)$$

- E : 弹性率 (GPa)
- ρ : 試験片の見掛け密度
- V_L : 縦波音速 (m/sec)

$$E = \rho \times \frac{3 V_{S}^{2} \cdot V_{L}^{2} - 4V_{S}^{4}}{V_{L}^{2} - V_{S}^{2}}$$
(2)

- E : 弾性率 (GPa)
- ρ : 試験片の見掛け密度

V_L : 縦波音速 (m/sec)

V_s : 橫波音速 (m/sec)

$$\sigma = 0.5 \times \frac{V_{L}^{2} - 2V_{S}^{2}}{V_{L}^{2} - V_{S}^{2}}$$
(3)

V_s : 横波音速 (m/sec)

4. 照射後試験結果

4.1 寸法測定結果

3.1の測定方法により、測定したロッド形状試験片の外径、長さ及び照射前の試験片寸法デ ータをもとにした照射前、照射後の外径及び長さの変化率をTable 7 に示した。

Table 7 Irradiation-induced dimension	al change rate ((irradiated /	un-irradiated)
---------------------------------------	------------------	---------------	----------------

Sample Name	Direction	Size (mm)	Change rate of	Change rate of	
			O.D. (%)	Length (%)	
CX-270G_v, rod 1	_	φ5×20	-0.600	-0.140	
CX-270G_v, rod 2	—	φ5×20	-0.819	-0.015	
CX-270G_v, rod 3	_	φ5×20	-0.700	-0.040	
CX-270G_v, rod 4	_	φ5×20	-0.620	-0.030	
CX-270G_p, rod 1	Vertical	φ5×20	-0.602	-0.615	
	Parallel	φ5×20	-0.340	-0.015	
CV-970C m and 9	Vertical	φ5×20	-1.040	-0.620	
$CX^2 / 0G_p$, rou 2	Parallel	φ5×20	-0.060	-0.620	
CV-970C m and 2	Vertical	φ5×20	-0.504	-0.415	
$CX^2 / 0G_p$, rod 3	Parallel	φ5×20	-0.320	-0.415	
OX 2700 1.4	Vertical	φ5×20	-0.602	-0.465	
OA^{-2}/OG_p , rod 4	Parallel	φ5×20	-0.160	-0.400	

4.2 熱膨張率測定結果

3.2の測定方法により、1回目の測定で1400℃の高温に加熱されることによる照射試験片の アニーリング効果を確認するため、繰り返し2回の測定を行った。照射前との比較を行うため、 照射前試験体の予備品を同一測定方法で測定し、50-400℃、50-1000℃、50-1350℃の各温度範 囲における平均熱膨張係数について計算式(4)を使用して照射前と照射後(測定1回目)とアニ ール後(測定2回目)の変化を計算し、Fig. 11~13に示した。熱膨張率測定は、CX-270G_v_rod 3 及び CX-270G_p_rod 4 を除く繊維方向、積層方向の各3試験片で行った。

$$\alpha_2$$

照射前・後の熱膨張係数比 = ____ (4)
 α_1

α₁: 照射前試験片の熱膨張係数

α₂: 照射後試験片の熱膨張係数



Fig.11 Irradiation-induced change rate of coefficient of thermal expansion (irradiated / un-irradiated, $50-400^{\circ}$ C)



Fig.12 Irradiation-induced change rate of coefficient of thermal expansion (irradiated / un-irradiated, 50-1000°C)



Fig.13 Irradiation-induced change rate of coefficient of thermal expansion (irradiated / un-irradiated, 50-1350°C)

4.3 弾性率測定結果

3.3の測定方法により各試験片について縦波音速及び横波音速の測定を行った。また、照射前との比較を行うため、照射前試験体の予備品を同一方法で測定した。測定された縦波音速及び横波音速と計算から得られた弾性率及びポアソン比について、照射前試験片測定値との比で Table 8 に示した。

Table 8 Irradiation-induced elastic modulus change rate (irradiated / un-irradiated)

	Change rate of material		Change	Change rat	e of Elastic
G I N	velocity		rate of	modulus	
Sample Name	Longitudinal	Transverse	Poisson's	Calculating	Calculating
	wave	wave	ratio	formula (1)	formula (2)
CX-270G_v, rod 1	1.178	1.173	2.125	1.415	1.422
CX-270G_v, rod 2	1.096	1.099	0.250	1.210	1.215
CX-270G_v, rod 3	1.122	1.086	8.125	1.250	1.242
CX-270G_v, rod 4	1.122	1.123	0.625	1.259	1.265
CX-270G_p, rod 1	0.799	1.006	0.675	0.614	0.958
CX-270G_p, rod 2	0.777	1.006	0.623	0.615	0.989
CX-270G_p, rod 3	0.858	1.016	0.790	0.670	0.999
CX-270G_p, rod 4	0.876	0.928	0.942	0.764	0.912

5. 結論

JMTR キャプセル(03M-47AS)で照射された 2D-C/C コンポジットについて繊維方向、積層方向 ロッド形状試験片を用いて、寸法、熱膨張率、弾性率の測定を行い未照射試験片と比較した。 その結果、以下が明らかとなった。

(1) 寸法変化

C/C コンポジット材料の照射誘起寸法変化は、炭素繊維の積層方向に小さく、繊維方向が大きい。これらの照射による寸法変化の挙動は、Burchellの報告⁶⁾と同様の傾向である。 (2) 熱膨張率

C/Cコンポジット材料の熱膨張率は、炭素繊維の積層方向に大きく、繊維方向では、ほとん ど熱膨張を示さない。熱膨張係数の 50-400℃、50-1000℃、50-1350℃の各温度範囲での平均熱 膨張率の照射前、照射後の比較において、炭素繊維の積層方向は照射による変化もほとんど無 く、1回測定後のアニール効果による変化も見られない。炭素繊維の繊維方向では、未照射材 が温度上昇とともに収縮から膨張に転じるのに対して、照射材は、1350℃までの温度範囲全体 で収縮のみの挙動を示す。また1回測定後のアニール効果により、収縮量の減少が認められた。 (3) 弾性率

C/C コンポジット材料の弾性率は、炭素繊維の積層方向は極めて小さく、繊維方向は大きな 値を示す。照射により積層方向では、縦波音速、横波音速ともに微増の傾向にあるが、繊維方 向では、縦波音速が大きく低下するのに対して、横波音速は、ほとんど変化しない。このため、 ポアソン比の変化が認められた。弾性率の計算においてもこのポアソン比変化の影響を受け、 計算式により異なる評価結果となった。複合材料への超音波の適用には、さらに動的弾性率測 定法等との比較による測定方法を用いる必要がある。

以上、照射誘起寸法変化、熱膨張率、弾性率の測定結果において、炭素繊維の積層方向と繊 維方向で照射挙動が異なる理由としては、C/Cコンポジット材料を構成する炭素繊維とマトリ ックス、気孔の存在等個々の照射挙動が複合し影響しているものと考えられる。

謝辞

照射試験片のPIEデータ取得にあたり、ご助言、ご指導頂きました原子炉施設管理部ホット ラボ管理課の川又氏、相沢氏、田山氏、田口氏をはじめとするホットラボ管理課の皆様、放射 線管理課の皆様に感謝いたします。また、貴重なコメントを頂いた照射試験炉センター石原副 センター長に感謝いたします。

参考文献

- 1) 角田淳弥 柴田大受 中川繁昭 伊与久達夫 沢和弘、「高温ガス炉セラミック製炉内構 造物の構造設計手法検討(受託研究)」、 JAEA-Research 2008-036 (2008).
- 2) S.Saito, et al., Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) JAERI 1332 (1994).
- 3) 馬場信一 山地雅俊 松井義典 石原正博 沢和弘、「熱勾配下における円筒形状 C/C 複 合材料の照射クリープ」、JAEA-Technology 2007-012 (2007).
- 5) 馬場信一 山地雅俊 柴田大受 石原正博 沢和弘、「先端的基礎研究用セラミックス材 料の予備照射試験」、JAERI-Tech 2005-002 (2005).
- 6) Burchell T. D, CONF-940412-3.

表 1. SI 基本単位			
甘木昌	SI 基本ì	单位	
本平里	名称	記号	
長さ	メートル	m	
質 量	キログラム	kg	
時 間	秒	s	
電 流	アンペア	Α	
熱力学温度	ケルビン	Κ	
物質量	モル	mol	
光度	カンデラ	cd	

和午春	SI 基本単位		
和卫星	名称	記号	
面積	平方メートル	m ²	
体積	立法メートル	m ³	
速 さ , 速 度	メートル毎秒	m/s	
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2	
波 数	毎メートル	m ⁻¹	
密度,質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³	
面 積 密 度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²	
比 体 積	立方メートル毎キログラム	m³/kg	
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2	
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m	
量濃度 ^(a) ,濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³	
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³	
輝 度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²	
屈折率	(数字の) 1	1	
比透磁率) (数字の) 1	1	

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度 (a) 重要な (and tone internation) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 組立単位	
組立量	夕む	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
	泊你	記与	表し方	表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立 体 角	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 ^(b)	$m^{2/}m^2$
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{\cdot 3}$
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静 電 容 量	ファラド	F	C/V	$m^{2} kg^{1} s^{4} A^{2}$
電 気 抵 抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	\mathbf{S}	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Η	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	m ² s ⁻²
カーマ		c, j	0,116	in 5
線量当量,周辺線量当量,方向	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
性線量当量,個人線量当量	2 - 7 F I	~.		
<u>酸素活性</u>	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはベ コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (c)潤光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用言れる。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (b)セルジクス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (b)定数についである。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

	W/ / Is a state tests		$\Delta = \alpha \pi 4 \alpha + \omega 2 (1) - 1 \alpha$
表4.	単位の中に固っ	自の名称と記号を	含むSI組立里位の例

	SI 組立単位			
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 kg s^2$	
表 面 張 力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹	
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³	
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$	
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA	
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA	
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA	
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ^{2} A ^{2}	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$	
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$	
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA	
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$	
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$	
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	$m^2 m^{-2} kg s^{-3} = kg s^{-3}$	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol	

表 5. SI 接頭語						
乗数	接頭調	語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	Э	Þ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼ	9	Z	10^{-2}	センチ	с
10^{18}	エク	サ	Е	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	~	タ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テ	ラ	Т	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギ	ガ	G	10^{-12}	ピコ	р
10^{6}	メ	ガ	Μ	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キ		k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘク	ŀ	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デ	力	da	10^{-24}	ヨクト	у

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位			
名称	記号	SI 単位による値	
分	min	1 min=60s	
時	h	1h=60 min=3600 s	
日	d	1 d=24 h=86 400 s	
度	۰	1°=(п/180) rad	
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad	
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad	
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²	
リットル	L, l	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	1t=10 ³ kg	

表7.	SIに属さないが、	SIと併用される単位で、	SI 単位で

表され	表される数値が実験的に得られるもの			
名称	記号	SI 単位で表される数値		
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J		
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg		
統一原子質量単位	u	1u=1 Da		
天 文 単 位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m		

表8.	SIに属さないが、	SIと併用されるその他の単位

	名称		記号	SI 単位で表される数値
バ	1	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートルmmHg		mmHg	1mmHg=133.322Pa	
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np ~	SI単位しの粉値的な間接け
ベ		N	В	対数量の定義に依存。
デ	ジベ	N	dB -	

表9.固有の名称をもつCGS組立単位			
名称	記号	SI 単位で表される数値	
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J	
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N	
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s	
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$	
スチルブ	$^{\rm sb}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd m}^{\cdot 2}$	
フォト	$_{\rm ph}$	1 ph=1cd sr cm 2 10 ⁴ lx	
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²	
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$	
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$	
エルステッド ^(c)	Oe	$1 \text{ Oe} \triangleq (10^3/4\pi) \text{A m}^{-1}$	

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」 は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
	3	名利	Б		記号	SI 単位で表される数値
+	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\boldsymbol{\nu}$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\boldsymbol{\nu}$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		\sim		\checkmark	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	I.		N	1		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット						1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カ			IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
Ξ	ク		П	\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$