

2002-026



## 高温ガス炉用炭素纖維強化炭素複合材料の開発

2002年11月

曾我部 敏明・石原 正博・馬場 信一  
小嶋 崇夫・橘 幸男・伊与久 達夫  
星屋 泰二・平岡 利治\*・山地 雅俊\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

## 高温ガス炉用炭素纖維強化炭素複合材料の開発

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部

曾我部 敏明・石原 正博・馬場 信一・小嶋 崇夫<sup>+</sup>・橘 幸男<sup>+</sup>  
伊与久 達夫<sup>+</sup>・星屋 泰二・平岡 利治<sup>\*</sup>・山地 雅俊<sup>\*</sup>

(2002年10月1日受理)

高温工学に関する先端的基礎研究のうち、高温ガス炉技術の高度化のための原子炉要素技術の研究開発として炭素纖維強化炭素複合材料（C/C 複合材料）製制御棒被覆管の研究開発を進めている。また、実用化に反映可能となる物性予測、評価に関する基礎的な研究を「耐熱セラミックス複合材料の照射損傷機構に関する予備試験」の一環として進めている。本報告は、これまで行ってきた C/C 複合材料に関する研究開発についてまとめたものである。開発に当たっては、材料特性、構造物の製作可能性、安定供給性、コストなどを考慮し、C/C 複合材料の試作・検討により有望な材料を開発した。材料特性としては、引張強さや曲げ強さ等の機械的強度が高いこと、破断ひずみが大きくかつ韌性が高いこと、中性子照射に対して寸法変化が少なく安定性が高いこと等を考慮している。その結果、炭素纖維としてポリアクリロニトリル系の平織りクロス、マトリックス材としてピッチを用い、さらに耐照射損傷性を高めるための特別な熱処理および原子炉級に不純物を除去する高純度化を施した 2 次元炭素纖維強化炭素複合材料（2D-C/C 複合材料）を開発した。

---

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

<sup>+</sup> 高温工学試験研究炉開発部

<sup>\*</sup> 東洋炭素株式会社

## Development of the Carbon Fiber Reinforced Carbon-carbon Composite for High Temperature Gas-cooled Reactors

Toshiaki SOGABE, Masahiro ISHIHARA, Shin-ichi BABA, Takao KOJIMA<sup>+</sup>, Yukio TACHIBANA<sup>+</sup>,  
Tatsuo IYOKU<sup>†</sup>, Taiji HOSHIYA, Toshiharu HIRAOKA<sup>\*</sup> and Masatoshi YAMAJI<sup>\*</sup>

Department of Advanced Nuclear Heat Technology  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 1, 2002)

Carbon Fiber Reinforced Carbon-carbon Composites, C/C composites, have been developed and extensively studied their characteristics under the research on radiation damage mechanism of heat-resistant ceramic composite on an innovative basic research on high temperature engineering. C/C composites are considered to be one of the promising materials for the application of a control rod in the next high performance high temperature gas-cooled reactors. In the present paper, details of the development of the candidate C/C composite are described. In the material development, especially, feasibility of the production, stableness of the supply and cost are much taken into consideration. As the physical properties of the material, high mechanical strength such as tensile and bending, high fracture strain and fracture toughness and low dimensional change by neutron irradiation have to be met. The developed 2D-C/C composite consists of plain-weave PAN-based carbon fiber cloth and pitch derived matrix. Also, high purification up to the level of nuclear grade was successfully attained in the composite.

Keywords: Carbon Fiber Reinforced Carbon-carbon Composite, C/C Composite, 2D-C/C Composite, Control Rod, PAN-base Carbon Fiber, High Purification, Pitch Impregnation, High Temperature Gas-cooled Reactor

---

<sup>+</sup> Department of HTTR Project

\* TOYO TANSO Co., Ltd.

## 目 次

1. 序論	1
2. 本論	1
2.1 材料設計と C/C 複合材料の形態の選択	1
2.1.1 使用条件	1
2.1.2 設計条件	1
2.1.3 C/C 複合材料の形態の検討	2
2.2 2D-C/C 複合材料の製作条件の検討	3
2.2.1 物理および化学特性の測定方法	3
2.2.2 試作・開発試験	5
2.2.3 製造工程、物理特性および組織	8
3. 結論	9
謝辞	10
参考文献	10

## Contents

1. Introduction	1
2. Main Subject	1
2.1 Material Design and Selection of Type of the C/C Composite	1
2.1.1 Conditions in the Reactor	1
2.1.2 Major Specifications	1
2.1.3 Selection of Type of the C/C Composite	2
2.2 Manufacturing Conditions of 2D-C/C Composite	3
2.2.1 Measuring Method of Physical and Chemical Properties	3
2.2.2 Trial Production and Determination of Manufacturing Process	5
2.2.3 Manufacturing Process, Physical Properties and Texture	8
3. Conclusions	9
Acknowledgement	10
References	10

This is a blank page.

## 1. 序論

高温工学に関する先端的基礎研究では、将来の技術革新の契機となる新素材の技術創出の観点からガス炉技術の高度化について、原子炉要素技術の研究開発における高温用制御棒被覆管の開発にも反映可能となる基礎的研究を進めている。高温用制御棒被覆管用材料としては、一般的に高温での機械的信頼性および熱的安定性に優れる炭素繊維強化炭素複合材料（C/C 複合材料）を候補に挙げることができる。本研究の目的は、本用途に適合すると考えられる C/C 複合材料を開発することにある。開発に当たっては、性能面では、引張強さや曲げ強さ等の機械的強度が大きいこと、破断ひずみが大きく韌性が高いこと、中性子照射に対してより安定性が高いことなどを考慮した。さらに、必要な形状への製作可能性、安定供給性およびコストも考慮して開発を行った。

## 2. 本論

### 2.1 材料設計と C/C 複合材料の形態の選択

まず、制御棒として機能上要求すべき物理特性を満足することが条件であり、それに適合した材料設計をする必要がある。その上で、形状を含む製作可能性、安定供給性、さらにはコスト面も考慮する必要がある。本節では、まず使用条件およびこれらの設計条件を示す。これまで得られている知見を基に本開発における C/C 複合材料の形態を選択した根拠を説明する。

#### 2.1.1 使用条件

C/C 複合材料の使用条件は以下の通りである。

使用雰囲気：ヘリウムガス

使用温度：400～1200°C

高速中性子照射量： $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$  (E>29fJ)

#### 2.1.2 設計条件

##### ① 制御棒の機能上望まれる物理特性

###### (i) 機械的特性

引張り強さや曲げ強さ等の機械的強度が大きいこと。破断ひずみが大きく韌性が高いことという、黒鉛には無い特性を有すること、すなわち脆性的な破壊ではなく、安定的な亀裂の進展による破壊形態を示すことが望ましい。

###### (ii) 熱的特性

熱的安定性を有すること。すなわち熱膨張係数が小さく熱伝導率が高いこと、すなわち発生する熱応力が小さくかつ熱衝撃特性が優れることが望ましい。

###### (iii) 耐放射線損傷特性

中性子照射によってもたらされる寸法変化が少ないと。

## (iv) 耐酸化特性

耐酸化特性に優れること。すなわち、通常運転時の微量な  $O_2$ 、 $H_2O$  による酸化、空気進入事故時および水進入時の酸化が低いこと。

## ② 材料の製作性および供給性

材料が必要とされる大きさおよび形状のものに製作できること。制御棒の場合、内径 100mm 外形 110mm 長さ 500mm 程度の円筒形に製作できるとともに、ピン形状や棒状、ボルト・ナット形状の製作が必要となる。また、特性の安定した材料が供給されることが重要である。例えば、ロット毎にあるいは製造する時期によって特性が大きく変わらないこと。このためには、使用する原料である炭素繊維やマトリックスが安定して供給されていること、将来的にも安定に供給できることが必要条件となる。材料の製作においても基礎的手法が確立されおり品質安定性が確保されることが必要である。これらに加えて、実用化を考えると低コストで材料が供給されることも必要である。

## 2.1.3 C/C 複合材料の形態の検討

C/C 複合材料は、幾つもの特徴有る集合組織をとることができ、様々な形態を示す。まず、C/C 複合材料の一般的な製造方法<sup>1)</sup>を簡単に述べる。C/C 複合材料の製造工程のフローチャート<sup>2)</sup>を Fig.1 に示す。C/C 複合材料の製造工程は、大きく 2 段階に分けることができる。一つは炭素繊維に樹脂やビッチを加えて成形してブリフォームを作る段階であり、もう一つはそれを高密度化して熱処理する段階である。炭素繊維の組み合わせ方はいろいろと工夫されており、フェルト状のもの、チョップを用いて成形するもの、ワインディングによって一方向に繊維を揃えたものや筒状にしたもの、2 次元のクロスを重ねたもの、繊維を 3 方向にした 3 次元織りやもっと多くの方向に繊維を向けた多次元織りがある。高密度化の方法は、樹脂やビッチを含浸する方法および、熱分解炭素の化学蒸着法(CVD; Chemical Vapor Deposition)によって蒸着させる方法の大きく 2 つに分類される。熱処理には、焼成および黒鉛化の工程があり目的に応じて温度や方法を選択する。

C/C 複合材料の場合も組織の制御により、炭素繊維の組み合わせ方によって集合組織を大きく変化させることができる。また、CVD による高密度化では、温度や原料ガスの濃度や分圧を制御することによってマトリックスの微細組織を制御することができる。樹脂やビッチの含浸による高密度化においては、繊維の存在によってマトリックスの黒鉛化が促進される応力黒鉛化が発生する。この場合、繊維とマトリックスの界面の状態を制御することによって、マトリックスの微細組織が制御できるものと考えられる。

各種の C/C 複合材料の特徴について、文献<sup>1),3)</sup>を参考に比較して簡単にまとめたものを Table 1 に示す。

2D-C/C 複合材料は得られる形状や大きさなど製作性の幅が広く、本用途にも適合性が高いと考えられる。また、多量に生産されておりコスト的に有利である。

炭素繊維の種類は、ビッチ系とポリアクリロニトリル(PAN)系とレーヨン系がある。ビッチ系と PAN 系のものが多く用いられている。ビッチ系炭素繊維は、PAN 系に比較して黒鉛の結晶性が高い。従って、繊維方向(クロス面方向)の引張強度は高いが、弾性係数が高く破断ひずみが

小さい。本用途には韌性が重視されると考えられるので、PAN系の方が適合性は高いと考えられる。また、コスト面では、一般的に PAN 系の繊維の方がピッチ系のものに比べて 2 分の 1 から 5 分の 1 程度安価である。

Eto ら<sup>4)</sup>は、ピッチ系と PAN 系の繊維をそれぞれ使用した 2 種類の二次元織りの C/C 複合材料（ピッチ含浸による高密度化後、約 3000°C の最終の熱処理）について照射による強度変化の試験を実施している。その結果、照射前の強度試験において、高強度タイプの PAN 系の繊維の複合材料の方が破壊までの変形量が大きいことを示している。また、高強度タイプの PAN 系の繊維を用いた複合材料の中性子照射試験を行い、制御棒被覆管としての健全性が確保できることを示している。

以上、検討の結果、C/C 複合材料の形態として、高強度タイプの PAN 系の炭素繊維を使用した二次元織りの C/C 複合材料を選択した。なお、PAN 系の炭素繊維も各種グレードのうち、高強度タイプ PAN 系炭素繊維は、広く使用されており安定的に入手でき、かつコスト的にも安価であるというメリットを有する。（以下、単に“PAN 系”と記す場合は高強度タイプ PAN 系炭素繊維をいう。）

## 2.2 2D-C/C 複合材料の製作条件の検討

PAN 系の炭素繊維を使用した 2D-C/C 複合材料の製作条件については、試作・開発試験により検討した。試作・開発試験の項目を以下に示す。

### プリフォーム製作段階と試作・開発試験の項目

#### (1) 炭素繊維クロスの選択

クロスの織り方

サイジング剤の効果…引張り強さおよび応力 - 歪特性

繊維束数…固有抵抗、曲げ強さおよび引張り強さ

#### (2) 炭素繊維の容量分率の最適化と成形方法

### 高密度化段階と試作・開発試験の項目

#### (3) 最終熱処理温度の最適化

2000°C および 2800°C … 固有抵抗、曲げ強さおよび引張り強さ

#### (4) 高密度化に使用する炭素前駆体の選択

ピッチおよび樹脂… 固有抵抗、曲げ強さおよび引張り強さ

#### (5) 原子炉級に純度を高める検討

### 2.2.1 物理および化学特性の測定方法

Fig.2 に各試験に用いた各種試験片を示す。

(1) 機械的強度の評価は、インストロン材料試験機 MODEL 1175 を用いて行った。クロスヘッドスピードはいずれの試験においても 0.5mm/min. で行った。ここでは、荷重をクロス層(lamina)に平行な方向に与えた場合に（//）と表現し、垂直に与えた場合を（⊥）と表現する。

- (a) 引張強さの測定は、Fig.2 の①の試験片を用いて行った。ひずみ量の測定は、荷重線に平行にひずみゲージ（共和電業製 KFC-5-C1-11, ゲージ長さ 5mm）を試験片に貼って行った。荷重は、クロス層に平行な方向に加えた。引張り強さ( $\sigma_T$ )は、(1)式で求めた。

$$\sigma_T = P_{\max}/S \quad \cdots \quad (1)$$

ここで、 $P_{\max}$ ：最高荷重、 $S$ ：荷重を受ける部分の断面積である。

- (b) 曲げ強さの測定は、Fig.2 の②の試験片を用いて行った。3 点曲げでスパン 30mm で行った。3 点曲げ強さ( $\sigma_{3B}$ )は、(2)式で求めた。荷重は、クロス層(lamina)に対して垂直方向に加えた。

$$\sigma_{3B} = 3 P_{\max} L / 2 W T^2 \quad \cdots \quad (2)$$

ここで、 $P_{\max}$ ：最高荷重、 $L$ ：スパン、 $W$ ：試験片の幅、 $T$ ：試験片の高さである。

- (c) 層間せん断強( $\sigma_L$ )さは、Fig.2 の③の試験片を用いて行った。スパン 30mm で曲げ試験と同様に荷重を与えて(3)式で求めた。

$$\sigma_L = 3 P_{\max} / 4 W T \quad \cdots \quad (3)$$

- (d) 圧縮強さ( $\sigma_S$ )は、Fig.2 の④の試験片を用いて行い、(4)式で求めた。

$$\sigma_S = P_{\max}/S \quad \cdots \quad (4)$$

- (2) 弹性係数(E)は、Fig.2 の②の試験片を用いて測定した。試験片の長手方向の弾性係数を、長手方向を透過する音速を測定して(5)式より求めた。音速の測定装置は、株マリイ MIN-005-1-50 を用いた。なお、音速によるファインセラミックスの弾性係数の測定は JIS R1602 に定められており縦波と横波の両方を測定して求めることになっているが、本材料は減衰が大きく横波の測定が困難であることから、ここでは簡易的に縦波のみを測定して求めた。

$$E = v^2 d \quad \cdots \quad (5)$$

ここで、 $v$ ：試験片を透過する音速、 $d$ ：材料のかさ密度である。

- (3) 固有抵抗は、Fig.2 の②の試験片を用いて 4 端子法で行った。試験片の長手方向に一定電流 (2.5A) を流して、試験片の一部の電圧降下を測定して求めた。

- (4) 热伝導率は、Fig.2 の⑤の試験片を用いてレーザーフラッシュ法によって室温で測定し、 $t_{1/2}$  法に従って求めた。測定によって求めた熱拡散率にかさ密度と比熱を掛けて求めた。比熱は黒鉛の文献値<sup>5)</sup>を用いた。測定には、レーザーフラッシュ法熱定数測定装置（アルバック理工株、TC-7000 型）を用いた。

- (5) 热膨張係数は、石英をリファレンスとして用いて、室温から 1000°C の温度範囲で測定した。測定には、热機械特性測定装置（リガク株、モデル TMA8310）を用いた。

- (6) 灰分量の測定は試料を燃焼させて残りの灰分量を測定することによって求めた。試料の燃焼は、950°C に保った電気炉内にサンプルを入れ酸素を約 3 l/min で供給しながら恒量になるまで保持した。

- (7) 元素の純度分析は炭素材で確立した方法でなされ、それぞれの元素に応じた前処理を行つて ICP 発光法（誘導結合プラズマ：Inductively Coupled Plasma）、原子吸光分析法および吸光光度法によって実施した。

- (8) 酸化消耗試験は、東洋炭素株の装置を用いて行った。試験方法は文献<sup>6)</sup>に詳細が記されている。ここでは 600°C に保持した炉内に 4 l/min で乾燥空気を導入して、12.5 x 20 x 32 mm の寸法の試験片を 24 h の間空気酸化させ、重量減少率をもって酸化消耗率とした。

## 2.2.2 試作・開発試験

### (1) 炭素繊維クロスの選択

炭素繊維クロスは平織りが最も一般的であるが、朱子織りもある。まず、朱子織りが特性の向上上有効であるかどうかについて検討を行った。平織りと5枚朱子織りの模式図をFig.3に示す。

また、C/C複合化において、サイジング剤の有無が特性に与える影響も検討した。炭素繊維のクロスは、通常サイジング剤が塗布されている状態で供給されている。サイジング剤は、炭素繊維のモノフィラメントを束であるトウまたはストランドに集結させる際の毛羽立ちを防止して集結を可能にするために、通常、硬化剤を含まないエポキシ樹脂やポリビニールアルコール等が塗布されている。これらのサイジング剤は、炭素繊維がマトリックスの強化にそのまま使用できるよう考慮されている。

さらに、クロスの纖維束数(フィラメント数)の違いが特性に及ぼす影響についても検討した。

#### (i) 実験

高弾性タイプPAN系3K平織りおよび3Kの5枚朱子織りのクロスを用いて2D-C/C複合材料を製作した。C/C複合化は、フェノール樹脂を塗布したプリプレグを厚さが10~15mmになるように重ねたのち熱圧成形を行い、ピッチ含浸・焼成を数回繰り返して高密度化を行った後に約2000°Cで最終の熱処理を施した。なお、3Kは1つの纖維束が3000本の纖維で構成されている場合である。

サイジング剤を除去した3KのPAN系平織りクロスを用いた場合とサイジング剤を除去しないクロスを用いて上記の方法と同様に製作した2D-C/C複合材料の引張試験を行った。

サイジング剤を除去したPAN系1K、3K、6Kおよび12Kの平織りクロスを用いて上記と同様の方法で2D-C/C複合材料を製作した。これらの材料の固有抵抗、曲げ強さおよび圧縮強さを測定した。

#### (ii) 結果と評価

平織りのクロスを用いた場合と5枚朱子織りのクロスを用いた場合の2D-C/C複合材料の機械的強度は、同等若しくは朱子織りのクロスを用いた場合の方が大きな値を示した。本開発に当つては、平織りクロスを使用することにした。その理由としては、次に述べるサイジング剤除去の際に朱子織りのクロスは目ズレを起こして取扱いが難しいことおよびコスト高になることを勘案して利点が得られないことによる。

サイジング剤を除去した3KのPAN系平織りクロスを用いた場合とサイジング剤を除去しない場合の応力-歪曲線をFig.4に示す。なお、C/C複合化工程は、上に示したものと同じである。サイジング剤を除去したクロスを用いた場合の方が、引張強さが高く、破断ひずみもかなり大きくなる事が明らかとなった。

纖維束数の異なる平織りクロスを用いた2D-C/C複合材料の物理特性をTable 2に示す。3点曲げ強さは、6Kのクロスを用いた場合が最も大きな値を示し、1Kと3Kでは差異が無く、12Kの場合に低い値となっている。圧縮強さは3Kの場合が最も高くなった。3Kおよび6Kの場合は、ピッチ含浸によって高密度化しやすいとも言える。6Kのクロスの方が曲げ強さが最も高いことおよび、3Kのクロスより安価なことから6Kクロスを用いる方が最適であると考えられる。なお、12Kクロスを使用した場合は機械的強度が弱く、織りの単位が大きくて製品加工性に難点がある。

これまでの検討結果により、炭素繊維クロスは、サイジング剤を除去した PAN 系の 6K 平織りクロスを使用するのが適切であるとの結論を得た。

ちなみに、クロスのコストは平織りと朱子織りでは朱子織りの方がやや高い。繊維束数は小さくなるとよりコスト高になる。現状、1K の場合はかなり高価になるが、重量単価で 3K、6K、12K を比較すると 6K は 3K の半分程度、12K は 6K より 2 から 3 割程度安価である。

## (2) 炭素繊維の容量分率の最適化と成形方法

本検討は、成形方法の確立と連携している。2D-C/C 複合材料の機械的特性は一般的に複合則に従うので、炭素繊維の多い方が引張り強さなどの機械的特性は向上する。従って、容量分率の最適化は、非常に重要な事柄であると言える。なお、より高い容量分率を確保することが好ましい。

### (i) 実験

容量分率の最適化を検討するために、サイジング剤を除去した PAN 系 6K の平織りクロスを用いて、フェノール樹脂を塗布した面積が  $300 \times 300 \text{mm}^2$  のプリプレグを厚さが 10~15mm になるよう重ねて熱圧成形を行った。この時、成形圧力を変化させるとともに、プリプレグ作製の際はプリプレグの樹脂の添加量を変化させた。

### (ii) 結果と評価

プリプレグの作製の際に樹脂量が多くなると、成形体の炭素繊維の容量分率が小さくなる。従って、樹脂量を少なくした場合についても成形を行った結果、樹脂量が少なすぎると成形体においても充分な結合力が得られず、炭素化のための熱処理の際にクラックや剥離が生じてしまう。結果として、この場合は樹脂量が炭素繊維に対して 30~50mass% が最適な量であった。この時の成形圧力は  $1\text{kgf/cm}^2$  ( $98\text{kPa}$ ) 程度が適当であった。なお、熱圧プレスを用いる場合は、しばしば樹脂の塗布量の条件設定をした上で、厚み制御によって行われる。

成形がクラックや剥離などがなく良好であったものについて、ピッチ含浸・焼成を数回繰り返して高密度化を行った後に約  $2000^\circ\text{C}$  で最終の熱処理を施し、試験片を試作した。この  $2000^\circ\text{C}$  で熱処理を行った 2D-C/C 複合材料の炭素繊維の容量分率 ( $V_f$ ) は 47% であった。また、1 層当たりの厚みは、およそ  $0.3\text{mm}$  である。この 2D-C/C 複合材料はサイズ  $300 \times 300 \times 15\text{mm}$ 、かさ密度  $1.65\text{g/cm}^3$  であった。

## (3) 最終熱処理温度の最適化

ここでは、本 2D-C/C 複合材料に関して、最終の熱処理温度が  $2000^\circ\text{C}$  の場合と  $2800^\circ\text{C}$  の場合における物理特性の違いを比較した。

2D-C/C 複合材料においても、黒鉛の結晶構造が発達した材料の方が中性子の照射による寸法変化が少ないと考えられる。具体例としては、黒鉛の中性子の照射による寸法変化は 1960 年には米国や欧州から研究報告がなされている<sup>7)</sup>。そこでは、炭素材の熱処理温度を  $2700^\circ\text{C}$  程度に高くして黒鉛の結晶性を高めた方が、中性子の照射による寸法変化が少ないことが報告されている。このため原子炉用には炭素質の材料ではなく、いわゆる黒鉛材が使用されている。

2D-C/C 複合材料の場合も一般の人造黒鉛と同様に、最終の熱処理温度は  $2800^\circ\text{C}$  前後の温度が好ましい。マトリックスに使用するフェノール樹脂およびピッチは  $2800^\circ\text{C}$  で黒鉛の結晶構造を形

成する温度とされている<sup>8)</sup>。また、高強度タイプのPAN系炭素繊維の結晶子の大きさ並びに格子定数も2500°C以上から大きく変化しない<sup>9)</sup>。炭素繊維単独ではその機械的強度は2800°C処理によって少し低下する<sup>9)</sup>ので機械的特性の変化を調査する必要がある。

#### (i) 実験

2D-C/C複合材料は、先の試作すなわち、Table 2に示す材料のうちフィラメント数が6Kの材料を2800°Cで熱処理を行った。2800°Cの熱処理は、等方性黒鉛の製造<sup>10)</sup>の場合と同様にアチソン炉を使用して行った。この材料の固有抵抗、曲げ強さおよび圧縮強さを測定した。

#### (ii) 結果と評価

この材料の物理特性を元の材料の(2000°C処理)の値と比較してTable 3に示す。2800°Cの熱処理によってかさ密度が大きくなっている。これは黒鉛化の過程で材料が収縮することによるものである。また、黒鉛化の発達の効果によって固有抵抗が低下した。2800°Cの熱処理による機械的特性の変化としては、曲げ強さが2000°C処理の場合に比べて16%小さくなり、圧縮強さが45%小さくなかった。なお、人造黒鉛の製造過程においても低温で熱処理する、いわゆる炭素質の方が、曲げ強さおよび圧縮強さが大きな値を示し、圧縮強さの減少率が大きい。曲げ強さと圧縮強さの差の偏りが小さくなると、材料に韌性が発現することが経験的に知られている。

従って、2D-C/C複合材料最終の熱処理温度に関しては、黒鉛の結晶構造が発達する2800°C前後の温度で行うこととした。

なお、最終の熱処理を2800°Cにした場合は、先の2000°Cの熱処理段階に比較して計算を行い、炭素繊維の容量分率( $V_f$ )は50%と見積もられた。これは2000°Cの熱処理段階より、厚み方向(クロス積層方向)が減少した体積と炭素繊維が体積減少する体積を勘案して炭素繊維の材料全体に占める割合を計算した。

### (4) 高密度化に使用する炭素前駆体の選択

2.1.3で説明したように、プリフォームを熱処理するだけでは材料の密度が低く必要とされる機械的強度などの特性が得られない。その高密度化に使用する充填材として、ピッチ含浸もしくは樹脂含浸が一般的に行われる。ここでは、ピッチ含浸および樹脂含浸の場合それぞれの方法で得られた2D-C/C複合材料の物理特性の違いを比較した。

#### (i) 実験

高密度化の工程はFig.1に示すように、含浸と焼成による炭素化を繰り返す。ピッチ含浸工程は通常の等方性黒鉛製造の場合と同様に行うことができる。樹脂含浸工程は、樹脂は液体レゾールタイプのフェノール樹脂を用いた。その工程は、まずオートクレーブ中に被含浸材を入れてオートクレーブ中を減圧にした後、そのままの状態で樹脂を導入して被含浸材を樹脂で完全に浸す。次に、例えばオートクレーブ中を窒素ガス3MPaで加圧する。最後に被含浸材をオートクレーブから取り出して乾燥機を用いて200°C程度の温度をかけて樹脂を硬化する。

なお、この含浸工程は数回繰り返すことによって高密度化を図ることが一般に行われる。含浸回数が増えるとかさ密度の上昇度合いが小さくなってくる。実質的な効果と経済性を勘案して、2D-C/C複合材料この工程を2~5回繰り返すことが一般的である。

#### (ii) 結果と評価

高密度化に使用する炭素前駆体に対して、樹脂含浸とピッチ含浸で高密度化を行った 2D-C/C 複合材料の物理特性を Table 4 に比較して示す。(ピッチ含浸の場合の値は Table 3 に示すものである。) 樹脂含浸の場合はかさ密度が上がりにくく、曲げ強さと圧縮強さとともにピッチ含浸の場合よりも小さな値となった。また、固有抵抗も大きく樹脂含浸の場合に黒鉛化度がより発達しているということも認められなかった。従って、高密度化の工程はピッチ含浸によることとした。

#### (5) 原子炉級に純度を高める検討

##### (i) 実験

純度を高めるには、高純度黒鉛を得る方法<sup>10)</sup>を利用して行うことができる。これは、高温下で材料をハロゲンガス中で処理する事で不純物をハロゲン化して除去するものである。さらに高純度が要求される場合には、減圧下で処理が行われる。このようにして得られた 2D-C/C 複合材料の灰分量の測定と主な元素の純度を分析した。

##### (ii) 結果と評価

CX-270G の灰分量は、この高純度化処理によってその高純度化処理前の 49 mass ppm からさらに小さな 5mass ppm 以下に減少した。黒鉛材料に比べると高純度化処理がやや困難と思われたが、この値は非常に小さな値で、高純度の材料を得ることに成功した。ちなみに、高純度化処理前の純度もかなり低いレベルに有る。Table 5 に 2D-C/C 複合材料（グレード名：CX-270G）の純度の分析結果を示す。いずれの元素でも測定限界値以下の値を示した。

#### 2.2.3 製造工程、物理特性および組織

以上の検討結果に基づいた 2D-C/C 複合材料（グレード名：CX-270G）の製作工程のフローチャートを Fig.5 に示す。

ここで開発した材料の物性を HTTR の炉内構造物に使用されている等方性黒鉛 IG-110 と比較して Table 6 に示す。なお、Table 6 に示した特性は平板形状のものから Fig.2 に示す試験片を採取したものである。曲げ強さおよび引張強さは 100MPa 以上の値であった。圧縮強さは黒鉛とほぼ同等な値であり、またクロス層に垂直に荷重を加えた場合にやや大きな値であった。機械的強度は層間せん断強度が小さいのでそのモードであまり負荷が掛からない設計にする必要がある。クロス層に平行方向の弾性係数は黒鉛よりかなり大きな値であった。熱膨張係数はクロス層方向では黒鉛より更に 1 枝小さな値であった。クロス層に垂直な方向においては、黒鉛に比べて 2 倍程度に止まる小さな値を示した。熱伝導率は、クロス層方向では黒鉛と同等な値であった。クロス層に垂直な方向の値ではクロス層方向に対して 5 分の 1 程度の値であった。

本材料のクロスに対して垂直な面およびクロス面の SEM 写真を Fig.6 に示す。Fig.6 (a) がクロス層を横から観察したものであり、Fig.6 (b) はクロス層面を観察したものである。Fig.6 (a) より 1mm の範囲にクロスが 3 層程度含まれている。なお、Fig.6 (a) では纖維は長手方向と纖維断面と両方が見えている。クロスの隙間にマトリックスが存在している。黒く見える部分が気孔である。Fig.6 (b) では、纖維クロスの網目の様子が伺える。

CX-270G の空気による 600°Cでの酸化消耗率は、 $5 \times 10^{-4} \text{ g/g}\cdot\text{h}$  であった。材料の表面積当たりの酸化消耗率は、 $4 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$  であった。IG-110 黒鉛の 600°Cでの酸化消耗率は  $10\sim20 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$  との報

告例がある<sup>11)</sup>。CX-270G の値は、その値よりも 1/3 から 1/5 と小さな値を示した。従って、測定方法の違い等を勘案しても現在使用されている高温ガス炉に使用されている黒鉛と比較して、CX-270G は同等もしくは優れた耐酸化性を有すると考えられる。

本複合材料を 550°Cで空気酸化させた時のクロス面に垂直方向の走査型電子顕微鏡写真(SEM 写真)を Fig.7 (a)~(d)に示す。それぞれ(a) 酸化前、(b) 2.2 mass%酸化後、(c) 5.5 mass%酸化後および(d) 10.8 mass%酸化後である。2.2 mass%酸化後においては、繊維束と繊維束の間のマトリックス部分がやや損耗しているのが観察される。5.5 mass%酸化後においては、マトリックス部分が明確に損耗しているのが認められる。10.8 mass%酸化後においては、マトリックス部分がかなり損耗し隙間を生じさせているのが明確に認められ、かつ繊維の損耗も観察された。以上の観察から酸化消耗はマトリックス部分から優先的に起こることが分かった。酸化消耗が組織や物理特性に与える影響については、現在研究中である。

### 3. 結論

HTTR の高性能炉心開発における制御棒に適合すると考えられる 2 次元炭素繊維強化炭素複合材料 (2D-C/C 複合材料 CX-270G) を開発した。

開発に当たっては、材料特性、構造物形状の製作可能性、安定供給性、コストなどを考慮した。ここで開発した材料の特徴を以下に示す。

- (1) 二次元の繊維の配向性を有する 2D-C/C 複合材料である。
- (2) PAN 系の炭素繊維を使用した 6K 平織りクロスに樹脂塗工したプリプレグを用いる。
- (3) 高密度化のための充填剤はピッチである。
- (4) 繊維の容量分率は、約 50%である。
- (5) 最終の熱処理は 2800°C程度で行い、黒鉛の結晶性をより高めたものとする。
- (6) 高純度化処理等によって不純物濃度を低減したものである。
- (7) 優れた耐酸化特性を示す。
- (8) かさ密度が 1.6 g/cm<sup>3</sup>程度であり、3 点曲げ強さ（荷重負荷方向がクロス面に垂直）が 100 MPa 以上確保できる。
- (9) 異方性を有するものの全体的に小さな熱膨張係数および大きな熱伝導率を示し、好ましい熱的特性を有する。
- (10) 汎用性が高く製作性が広範囲の工程や材料を採用することにより、コストを低減したものである

以上、ここで開発された 2D-C/C 複合材料(CX-270G)について、現在、非照射下での一連の熱・機械特性を取得中で、今後照射特性も含めた材料データベースを構築するとともに構造設計基準および材料検査基準についての検討を進める計画である。

### 謝辞

本材料の開発および本報告書をまとめるに当たり貴重な助言と激励を頂きました核熱利用研究部長、塩沢周策氏並びに東洋炭素株式会社、専務取締役技術開発本部長、近藤純子氏に感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 稲垣道夫、菱山幸有：ニューカーボン材料 技報堂出版, pp.177-200 (1994).
- 2) 曽我部敏明：学位論文（北海道大学）第1章 (1996).
- 3) 田邊靖博：新・炭素材料入門第2章 2.3節, 炭素材料学会 pp.99-104 (1996).
- 4) Eto M., Ishiyama S., Ugachi H.: JAERI-Research 96-043 (1996).
- 5) Butland A.T.D., Maddison R.J. AEEW-R-815 (1972).
- 6) Sogabe T., Matsuda T., Kuroda K., Hirohata Y., Hino T., Yamashina T.: Carbon 33, pp.1783-1788 (1995).
- 7) Ed.Nightingale R.E.: Nuclear Graphite, Academic Press, New York and London, p.286 (1962).
- 8) 白石稔：改訂 炭素材料入門第3章 炭素材料学会, pp.29-40 (1984).
- 9) 斎藤保、馬場信一、衛藤基邦：JAERI-Research 99-070 (2000).
- 10) 黒田浩二：機能材料 1990年8月号, pp.44-51 (1990).
- 11) Eto, M., Sugihara, T.: International Conference on Carbon, New Processing and New Applications Extended Abstracts pp.240-243, Toyohashi, Japan (1981).

List of Figures and Tables

Fig.1 Schema of general manufacturing process of carbon fiber reinforced carbon composite (C/C composite).

Fig.2 Test specimens. (//): Parallel to lamina, (⊥): Perpendicular to lamina.

- ① Tensile strength (//)      ② 3-point bending strength (⊥)
- ③ Interlayer shear strength, ILSS    ④ Compressive strength, (a) for (⊥), (b) for (//)
- ⑤ Thermal conductivity, (a) for (//), (b) for (⊥)
- ⑥ Thermal expansion coefficient, (a) for (//), (b) for (⊥)

Fig.3 Structural geometry of plain (a) and 5 end stain (b) woven fabrics.

Fig.4 Tensile stress-strain curves for C/C composites. The effect of sizing agent in the fabrication of the composite is shown.

Fig.5 Manufacturing process of CX-270G.

Fig.6 Secondary electron micrographs of CX-270.

- (a) Parallel to lamina, (b) Perpendicular to lamina

Fig.7 Secondary electron micrographs of CX-270 in parallel to lamina before and after air-oxidation.

- (a) non-oxidized, (b) 2.2mass% oxidized, (c) 5.5mass% oxidized, and (d) 10.8mass% oxidized.

Table 1 各種 C/C 複合材料の一般的な特徴 Comparison of various types of C/C composites.

Table 2 Effect of filament count on the properties of C/C composite.

Table 3 Effect of heat-treatment temperature on the properties of C/C composite.

Table 4 Effect of matrix precursor on the properties of C/C composite.

Table 5 Impurities of main elements in CX-270G.

– Impurities before purification are also shown for comparison –

Table 6 Physical properties of CX-270G (prototype).

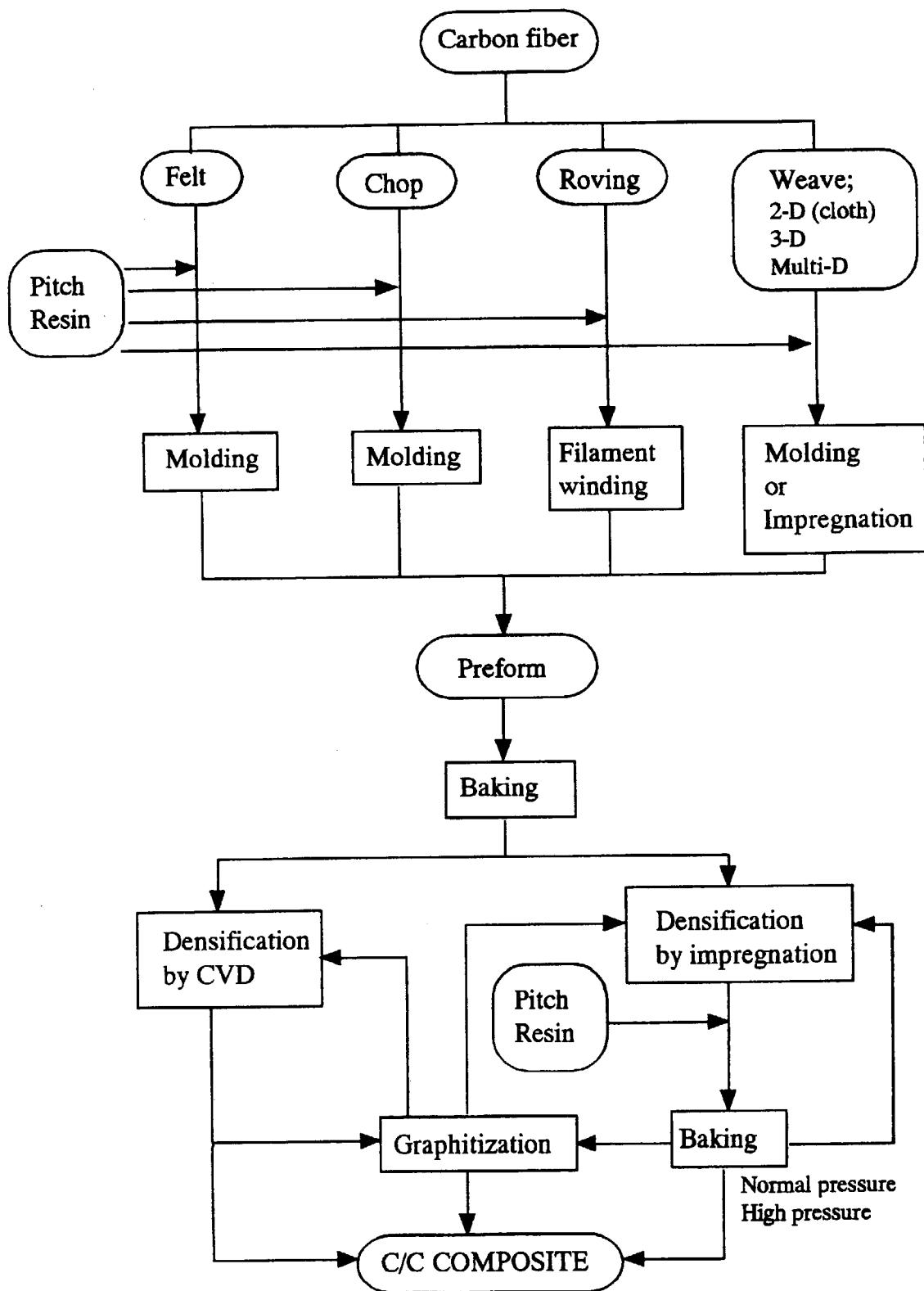


Fig.1 Schema of general manufacturing process of carbon fiber reinforced carbon composite (C/C composite).

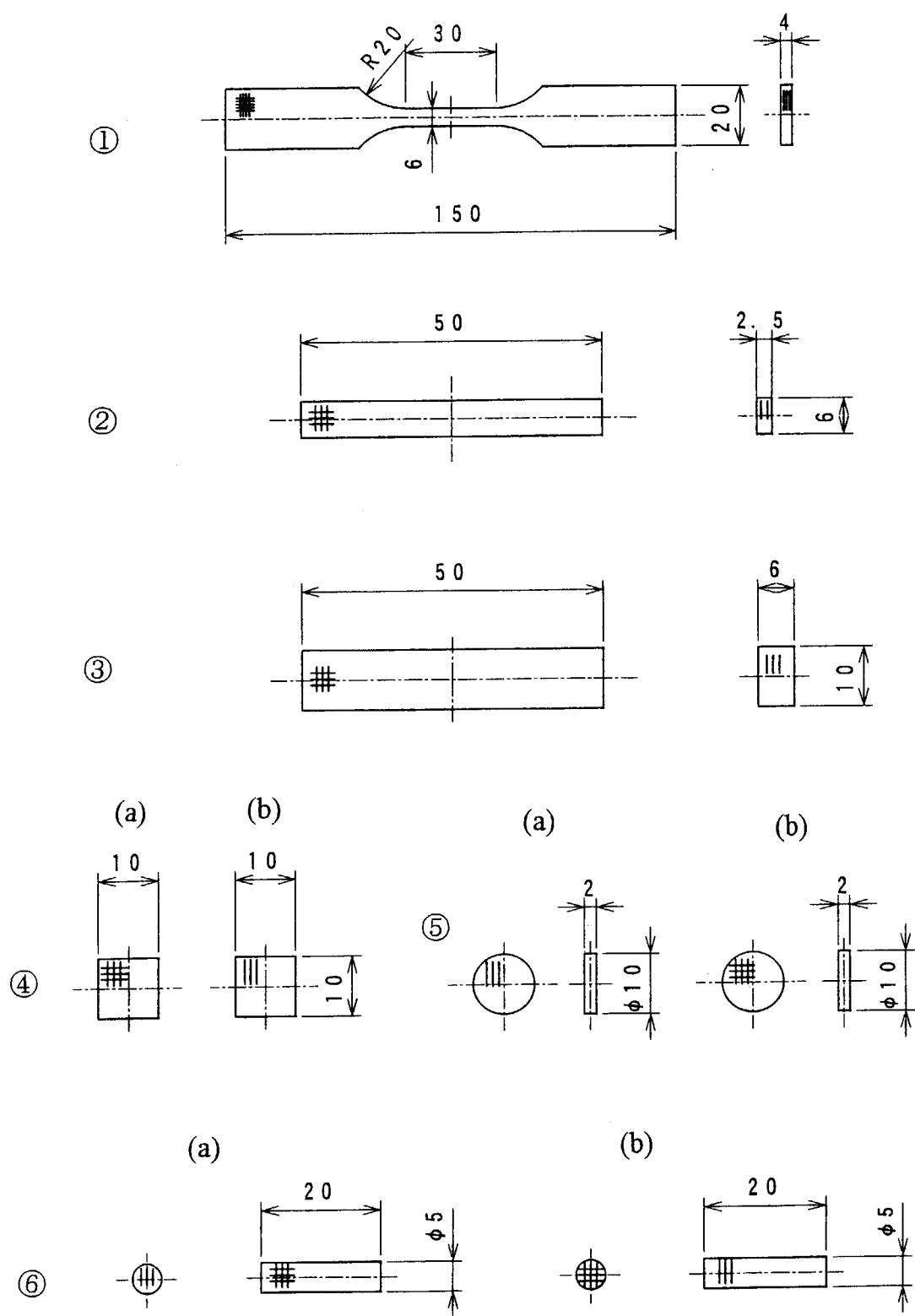
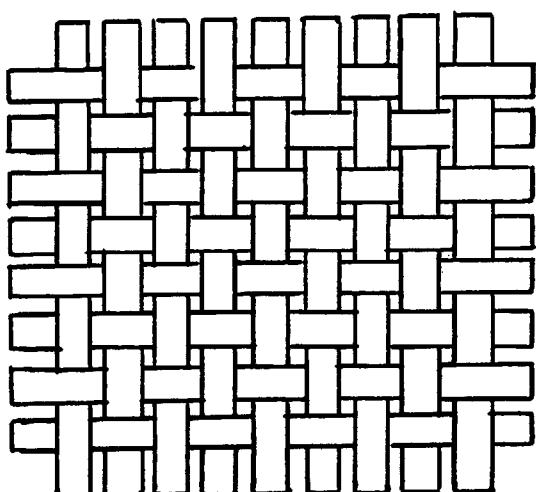
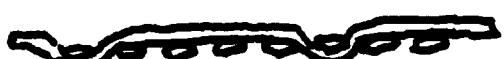
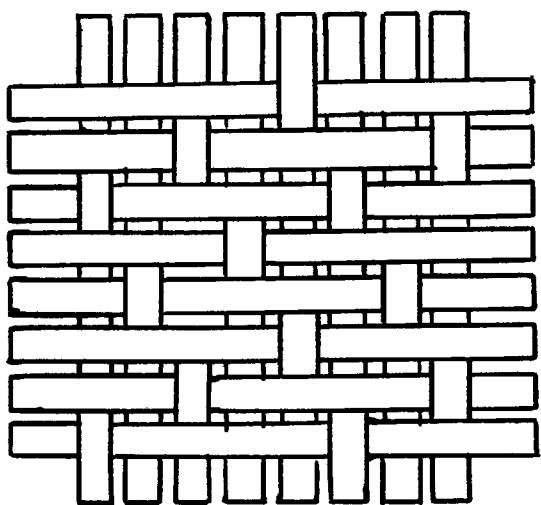


Fig.2 Test specimens. (//): Parallel to lamina, (⊥): Perpendicular to lamina.

- ① Tensile strength (//)
- ② 3-point bending strength (⊥)
- ③ Interlayer shear strength, ILSS
- ④ Compressive strength, (a) for (⊥), (b) for (//)
- ⑤ Thermal conductivity, (a) for (//), (b) for (⊥)
- ⑥ Thermal expansion coefficient, (a) for (//), (b) for (⊥)



(a)



(b)

Fig.3 Structural geometry of plain (a) and 5 end stain (b) woven fabrics.

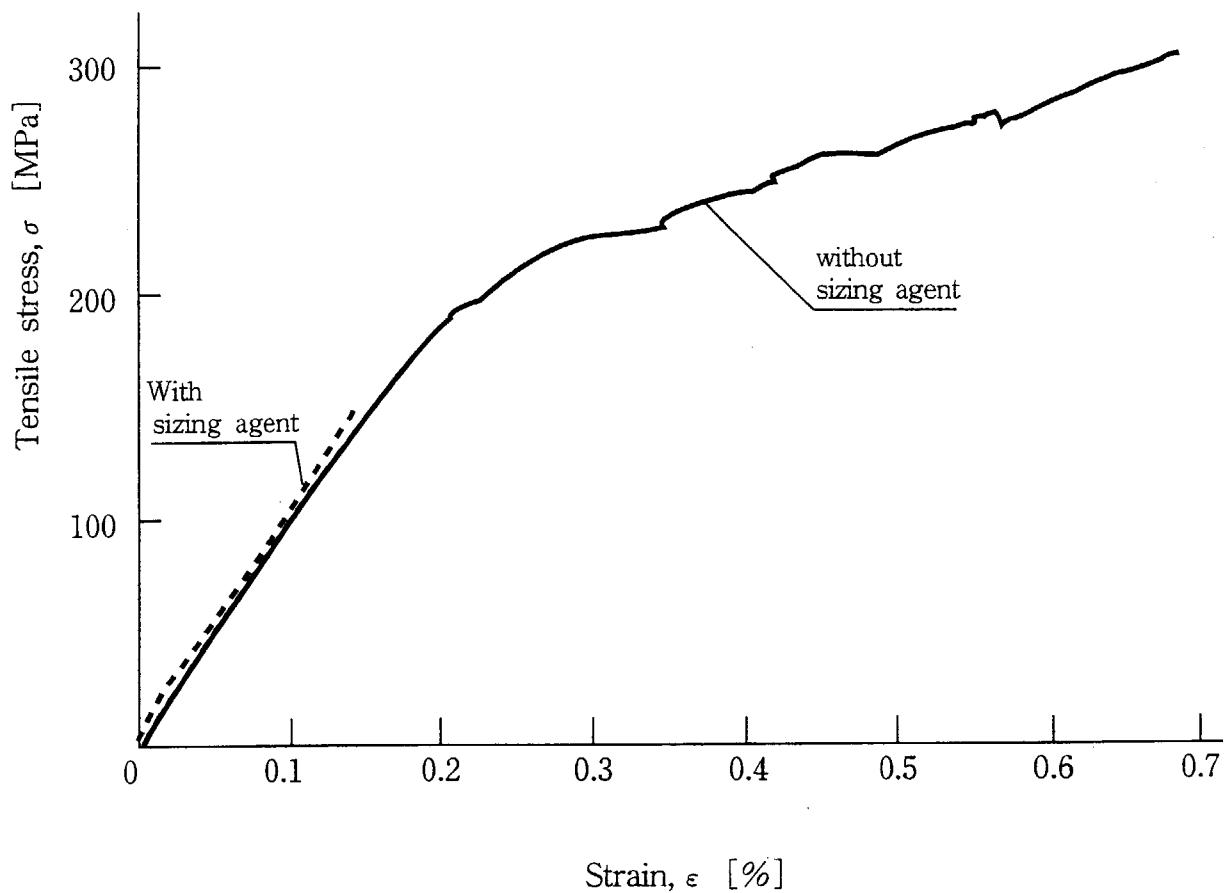


Fig.4 Tensile stress-strain curves for C/C composites. The effect of sizing agent in the fabrication of the composite is shown.

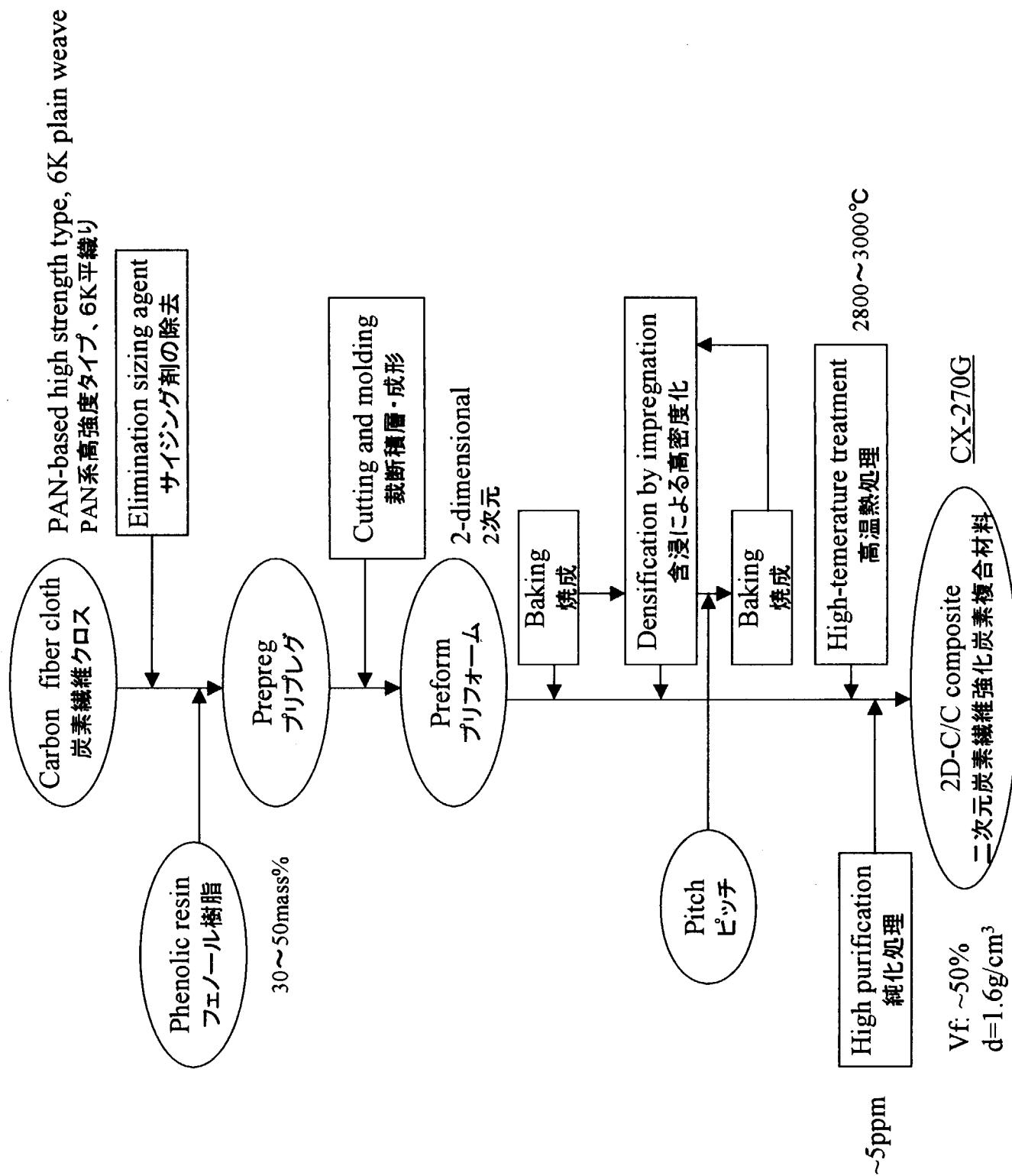


Fig.5 Manufacturing process of CX-270G.

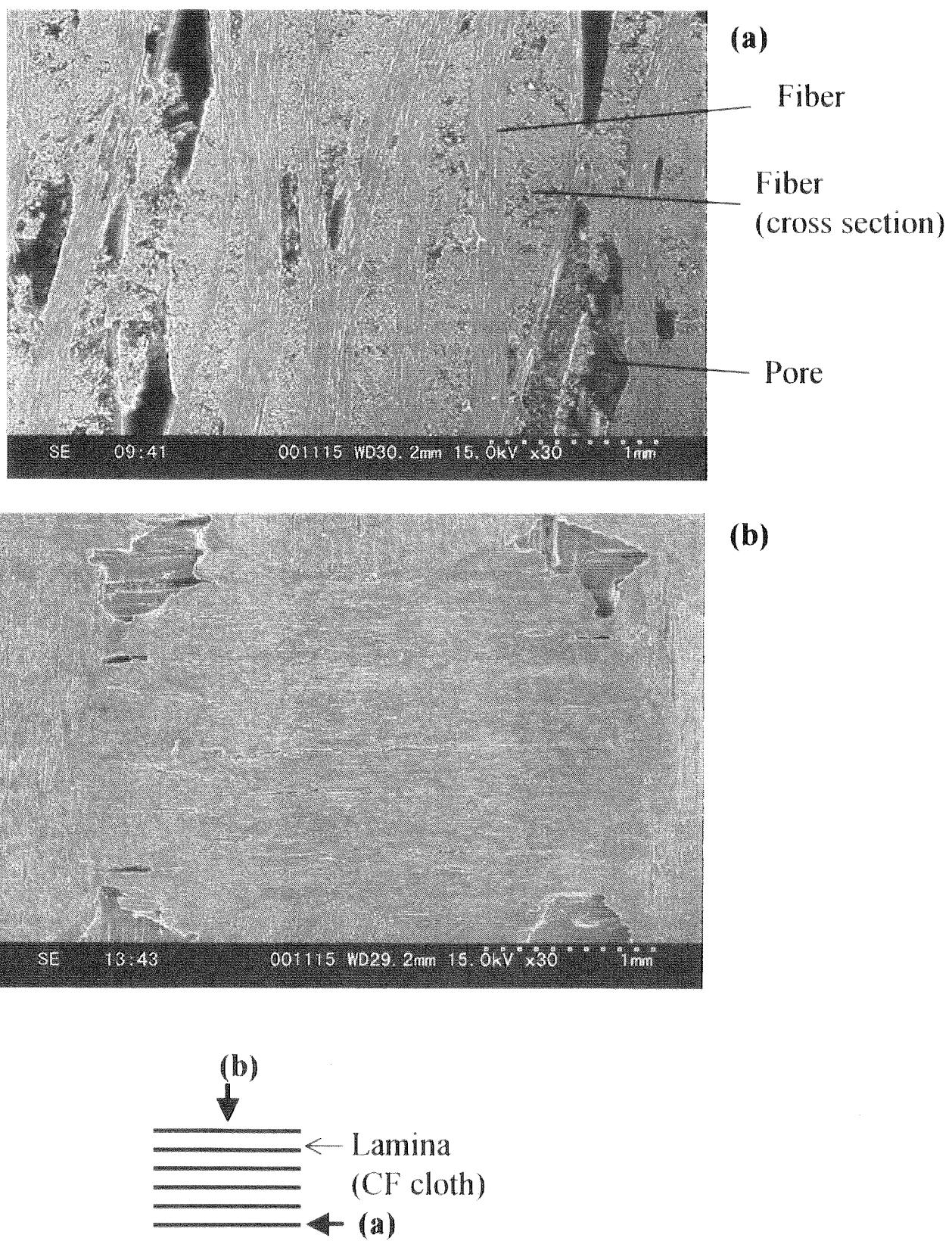


Fig 6 Scanning electron micrographs of CX-270G.  
(a) Parallel to lamina, (b) Perpendicular to lamina.

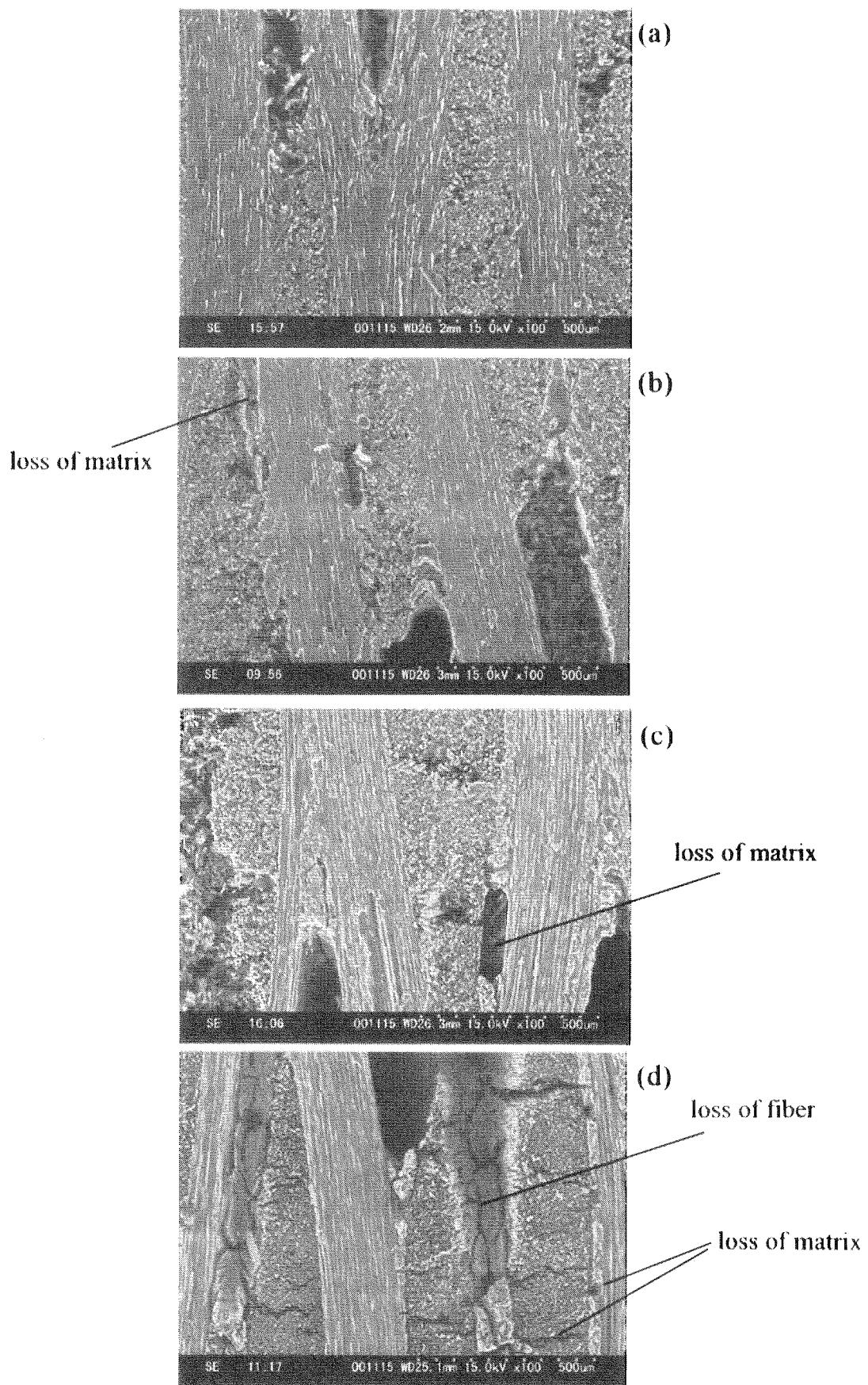


Fig.7 Secondary electron micrographs of CX-270 in parallel to lamina before and after air-oxidation.  
(a) non-oxidized, (b) 2.2mass% oxidized, (c) 5.5mass% oxidized, and (d) 10.8mass% oxidized.

Table 1 各種C/C複合材料の一般的な特徴 Comparison of various types of C/C composites.

形態	構成	特徴・用途	製作の難易度	安定供給性	コスト
フェルト	炭素繊維の容積分率は10%前後と低く、フェルト(はむしろマトリックスを構成するための補助的な役割を果たす。炭素繊維フェルトの空隙をピッチもしくは樹脂含浸やCVD(化学蒸着)法によって炭素マトリックスで充填させる。	等方的に近い物理特性を示す特徴がある。CVD法で高密度化した材料は、高い熱伝導性を示す。ヒートシンクや核融合炉のプラスマ対向材に利用される。	中。サイズが限定される場合がある。	特に問題無し。	やや高い
	マトリックスに短纖維が分散されている。纖維は補強や性能の向上の目的補助的な役割としてされることが多い。C/C複合材よりもしきる樹脂やセラミックスをマトリックスとして組み合わされることが多い。	数%の短纖維をコンクリートに加えた材料がよく知られている。	特に問題無し。	安価	
一次元	長炭素繊維が一方向に揃えて作製したものである。炭素繊維の体積分率は50%若しくはそれ以上である。炭素繊維の軸方向において使用した炭素繊維の特徴が顕著に現れる。高密度化(マトリックス部分の構築)は主としてピッチもしくは樹脂含浸によつて行われる。CVD法も利用されることがある。	1方向に大きな引張強さが必要な部材への利用として、ホットプレスのダイスがある。1方向に高い熱伝導性を有する材料は除熱板や核融合炉のプラスマ対向材に利用される。	中。サイズや形状が限られる場合がある。	特に問題無し。	高い
	長炭素繊維を縦横2次元に織ったクロスまたは不織布を積層して作製する。高密度化は一般にはピッチもしくは樹脂含浸によって行われる。	2次元的に補強された材料である。高い剛性を有する。熱処理用の炉の部品をはじめ一般産業用に広く利用されている。	中。特殊な技術は必要とされるが汎用化されており熟成されている。作製できる形状やサイズの幅が広い。	最も多く生産され安価	
二次元	2.5次元、3次元、それ以上の多次元方向に長纖維束を配向させて作製する。高密度化はピッチもしくは樹脂含浸またはCVD法によって成される。	多次元的に炭素繊維によつて補強されているので等方的な物理特性を示す。ロケットノズルに利用されている。	高い。特殊な装置や技術が必要とされている。ロケットノズルに利用される。	織物を製作できる所が限定される。問題あり。	かなり高い
多次元					

Table 2 Effect of filament count on the properties of C/C composite.

Filament count	Bulk-density [g/cm <sup>3</sup> ]	Electrical resistivity (//) [μΩ·m]	Bending strength (⊥) [MPa]	Compressive strength (⊥) [MPa]
1K	1.54	19.8	153	223
3K	1.67	16.5	152	320
6K	1.65	18.0	170	220
12K	1.53	24.3	103	177

Table 3 Effect of heat-treatment temperature on the properties of C/C composite.

HTT [°C]	Bulk-density [g/cm <sup>3</sup> ]	Electrical resistivity (//) [μΩ·m]	Bending strength (⊥) [MPa]	Compressive strength (⊥) [MPa]
2000	1.65	18.0	170	220
2800	1.68	6.6	143	122

Table 4 Effect of matrix precursor on the properties of C/C composite.

Matrix precursor	Bulk-density [g/cm <sup>3</sup> ]	Electrical resistivity (//) [μΩ·m]	Bending strength (⊥) [MPa]	Compressive strength (⊥) [MPa]
Phenolic Resin	1.58	10.2	100	104
Pitch	1.69	6.6	143	122

**Table 5 Impurities of main elements and ash in CX-270G.****- Impurities before purification are also shown for comparison. -**

Element	CX-270G (mass ppm)	Before purified (mass ppm)	Measuring method
Al	<0.08	1.1	ICP-AES
B	<0.1	0.3	ICP-AES
Ca	<0.04	10	ICP-AES
Fe	<0.04	6.9	ICP-AES
K	<0.1	0.4	AAS
Mg	<0.02	0.04	ICP-AES
Na	<0.05	0.87	AAS
Ni	<0.1	0.5	ICP-AES
Si	<0.1	8.2	AM
Ti	<0.09	2.4	ICP-AES
V	<0.07	1.4	ICP-AES
Ash	<5	49	-

ICP-AES: Inductively Coupled Plasma-Absorption Emission Spectroscopy

AAS: Atomic Absorption Spectroscopy

AM: Absorptiometry

Table 6 Physical properties of CX-270G (prototype).

Grade (2D-C/C)	Bulk- density [g/cm <sup>3</sup> ]	Electrical resistivity [μΩ·m]	Bending strength (//) [MPa]	Tensile strength (⊥) [MPa]	Compressive strength (//) [MPa]	Interlayer shear strength (//) [MPa]	Elastic modulus (//) [GPa]	Thermal expansion coefficient [10 <sup>-6</sup> /K] (RT~1273K)	Thermal conductivity [W/m·K]
CX-270G (Graphite)	1.63	6.5	133	167	69 (//) / 89 (⊥)	5.7	81	0.2 (//) / 10.8 (⊥)	129 (//) / 26 (⊥)
IG-110	1.77	11	39	25	78	-	10	4.6	116

(//): Parallel to lamina

(⊥): Perpendicular to lamina

## 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
圧力、応力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
工率、放射束	ジュール	J	N·m
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クロン	C	A·s
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	アラド	F	C/V
コンダクタンス	オーム	Ω	V/A
磁束	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
セルシウス温度	ヘンリイ	H	Wb/A
光束度	セルシウス度	°C	
照度	ルーメン	lm	cd·sr
放射能	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
吸収線量	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
線量等量	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

1. 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラード	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

### 換 算 表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

粘度 1 Pa·s(N·s/m<sup>2</sup>)=10 P(ボアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1m<sup>2</sup>/s=10<sup>4</sup>St(ストークス)(cm<sup>2</sup>/s)

力	MPa(=10bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
1	10.1972	9.86923	7.50062×10 <sup>3</sup>	145.038	
0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
1.33322×10 <sup>-4</sup>	1.35951×10 <sup>-3</sup>	1.31579×10 <sup>-3</sup>	1	1.93368×10 <sup>-2</sup>	
6.89476×10 <sup>-3</sup>	7.03070×10 <sup>-2</sup>	6.80460×10 <sup>-2</sup>	51.7149	1	

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu		ft·lbf	eV	1 cal= 4.18605J (計量法)		
					1	0.277778×10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813×10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150×10 <sup>18</sup>	= 4.184J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407×10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487×10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082×10 <sup>19</sup>				= 4.1855J (15°C)
	3.6×10 <sup>6</sup>	3.67098×10 <sup>5</sup>	1	8.59999×10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522×10 <sup>6</sup>	2.24694×10 <sup>25</sup>				= 4.1868J (国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279×10 <sup>-6</sup>	1	3.96759×10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272×10 <sup>19</sup>				仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072×10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515×10 <sup>21</sup>				= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616×10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506×10 <sup>-3</sup>	1	8.46233×10 <sup>18</sup>				= 735.499W
	1.60218×10 <sup>-19</sup>	1.63377×10 <sup>-20</sup>	4.45050×10 <sup>-26</sup>	3.82743×10 <sup>-20</sup>	1.51857×10 <sup>-22</sup>	1.18171×10 <sup>-19</sup>	1				

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy		rad
				1	2.70270×10 <sup>-11</sup>	
	3.7×10 <sup>10</sup>	1	0.01	1		

照射線量	C/kg	R	吸収線量	Gy	
				1	2.58×10 <sup>-4</sup>
				1	

線量当量	Sv	rem	吸収線量	Gy	
				1	100
				0.01	1

(86年12月26日現在)

