



## 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)

An Investigation of Structural Design Methodology  
for HTGR Reactor Internals with Ceramic Materials  
(Contract Research)

角田 淳弥 柴田 大受 中川 繁昭 伊与久 達夫  
沢 和弘

Junya SUMITA, Taiju SHIBATA, Shigeaki NAKAGAWA, Tatsuo IYOKU  
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

JAEA-Research

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 (<http://www.jaea.go.jp>)  
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

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)

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  
角田 淳弥・柴田 大受・中川 繁昭・伊与久 達夫・沢 和弘

(2008年 1月 30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としては、炭素繊維強化型炭素複合材料(C/C コンポジット)及び超塑性ジルコニアが有望な材料である。

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、構造物の環境や荷重条件に対する健全性を確保する構造設計手法を確立することが必要である。そこで本報告では、VHTR の炉内構造物として特に期待されている C/C コンポジットに着目し、C/C コンポジットを適用する際の構造設計手法の検討を行うとともに、代表的な構造物への応用にあたり基礎的な成立性を検討した。その結果、C/C コンポジットの強度評価において競合リスク理論を用いた評価が有用であり、C/C コンポジットを炉内構造物として適用できる見通しを得た。

---

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  
本報告は、旧電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、日本原子力研究開発機構が実施した平成 16 年度～平成 18 年度「高温ガス炉固有の安全性の定量的実証」の成果です。

An Investigation of Structural Design Methodology for HTGR Reactor Internals with Ceramic Materials  
(Contract Research)

Junya SUMITA, Taiju SHIBATA, Shigeaki NAKAGAWA,  
Tatsuo IYOKU and Kazuhiro SAWA

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

(Received January 30, 2008)

To advance the performance and safety of HTGR, heat-resistant ceramic materials are expected to be used as reactor internals of HTGR. C/C composite and superplastic zirconia are the promising materials for this purpose.

In order to use these new materials as reactor internals in HTGR, it is necessary to establish a structure design method to guarantee the structural integrity under environmental and load conditions. Therefore, C/C composite expected as reactor internals of VHTR is focused and an investigation on the structural design method applicable to the C/C composite and a basic applicability of the C/C composite to representative structures of HTGR were carried out in this report. As the results, it is found that the competing risk theory for the strength evaluation of the C/C composite is applicable to design method and C/C composite is expected to be used as reactor internals of HTGR.

---

Keywords: HTGR, VHTR, C/C Composite, Structural Design Methodology

Present study is the result of "The quantitative demonstration of HTGR inherent safety features" entrusted to the Japan Atomic Energy Agency by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan (MEXT).

## 目 次

1.	はじめに .....	1
2.	応用が期待される炉内構造物 .....	2
	2.1 HTTR 炉内構造物 .....	2
	2.2 炉心拘束機構 .....	2
3.	セラミックス製炉内構造物の構造設計手法の検討 .....	6
	3.1 短期荷重 .....	6
	3.2 長期荷重 .....	8
	3.3 繰り返し荷重 .....	9
	3.4 環境効果 .....	9
4.	セラミックス製炉内構造物の基礎的成立性の検討 .....	24
5.	まとめ .....	28
	謝辞 .....	28
	参考文献 .....	28
	付録 .....	30

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	Reactor internals expected to apply ceramic materials .....	2
	2.1 Reactor internals of HTTR .....	2
	2.2 Core restraint mechanism .....	2
3.	Structural design methodology for ceramic reactor internals .....	6
	3.1 Temporary load .....	6
	3.2 Continuous load .....	8
	3.3 Cyclic load .....	9
	3.4 Environmental effect .....	9
4.	Investigation of basic applicability of ceramic materials to reactor internals .....	24
5.	Summaries .....	28
	Acknowledgements .....	28
	References .....	28
	Appendix .....	30

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づけられ、特に 900°C 以上の高温のガスを取り出すことを目標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（以下、「原子力機構」と略す）大洗研究開発センターの高温工学試験研究炉 (High Temperature Engineering Test Reactor : 以下、「HTTR」と略す) を用いて、高温ガス炉の研究開発を進めている<sup>(1)</sup>。

HTTR は 1998 年 11 月 10 日に初臨界に達した後、1999 年 9 月から出力上昇試験を開始し、2001 年 12 月 7 日に原子炉出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 850°C を達成した。また、2002 年 3 月 6 日には、定格運転(原子炉出口冷却材温度 850°Cまでの運転)の使用前検査合格証を取得し、2004 年 4 月 19 日には原子炉出口冷却材温度 950°C の高温試験運転を達成した<sup>(2)</sup>。さらに、高温ガス炉技術の高度化に資することを目的に、2002 年度から HTTR を用いて安全性実証試験を実施しているところである<sup>(3)</sup>。

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としては、炭素繊維強化型炭素複合材料(以下、「C/C コンポジット」と称す)及びその他の耐熱性セラミックスのなかでも圧延加工や接合が可能となる超塑性ジルコニアが有望な材料である。C/C コンポジットを高温ガス炉の炉内構造物として使用する場合、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付ける炉心拘束機構としての機能が期待される。また、超塑性ジルコニアについては、複雑形状への加工性の観点から、例えば高温ガス炉におけるコアバレルの高温部分への使用が考えられる。

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、構造物の環境や荷重条件に対する健全性を保証する構造設計手法の確立が必要である。そこで文部科学省の革新的原子力システム技術開発公募事業である「高温ガス炉固有の安全性の定量的実証」に関する技術開発において、炉内構造物の健全性評価手法の高度化を目的として、C/C コンポジット及び超塑性ジルコニアを用いた構造設計手法の検討及びそれに必要な基礎データの取得を行ってきた。

本報告では、VHTR の炉内構造物として特に期待されている C/C コンポジットに着目し、C/C コンポジットに適用できる構造設計手法について述べるとともに、それを代表的な構造物に適用した場合の基礎的な成立性の検討を行う。

## 2. 応用が期待される炉内構造物

本報告においては、C/C コンポジットについて高温ガス炉の炉心拘束機構を適用例とする。ここでは HTTR を例として、その炉内構造物、炉心拘束機構の機能・構造を解説する。

### 2.1 HTTR 炉内構造物<sup>(4)</sup>

HTTR の原子炉本体は炉心構成要素、炉内構造物、反応度制御設備及び原子炉圧力容器から構成され、そのうち炉内構造物は、炉心支持黒鉛構造物、炉心支持鋼構造物及び遮へい体等から構成される。炉心支持黒鉛構造物は固定反射体ブロック、高温プレナムブロック、サポートポスト及び炉床部断熱層から構成される。これらの炉心支持黒鉛構造物は、Fig.2.1 に示すように燃料体、制御棒案内ブロック及び可動反射体ブロック等の炉心黒鉛構造物を支持し、荷重を原子炉圧力容器に伝えるとともに熱遮へい及び放射線遮へい等の機能を有している。炉心支持鋼構造物は Fig.2.2 に示すように、炉床部断熱層の下部に設ける炉心支持板、炉心支持格子、炉心支持黒鉛構造物の側部に設ける炉心拘束機構等から構成される。

### 2.2 炉心拘束機構

炉心拘束機構は Fig.2.3 に示すように、原子炉圧力容器の内側にあって、隣接する固定反射体ブロック間の隙間を流れる 1 次冷却材の漏れ流量を抑制するために、固定反射体を周方向に緊縛するとともに、固定反射体を所定に位置に支持し地震時の炉心及び炉内構造物の水平荷重を受け、水平方向変位に対して炉心を拘束する。炉心拘束機構は、側部遮へい体の外面に設置するバンド支え、拘束バンド、レストレイントリング及びレストレイントリングに加わる荷重を原子炉圧力容器に伝えるために原子炉圧力容器の内面に取り付けるラジアルキー等から構成する。拘束バンドは Fig.2.4 に示すように、炉心を取巻いたバンド状の鋼構造物で、側部遮へい体を介して固定反射体を周方向に緊縛する。拘束バンドは、引張荷重に対応するものとして SNB16、圧縮荷重に対応するものとして SUS316 を使用し、黒鉛と熱膨張率が同程度となるように熱膨張率を調整している。レストレイントリングは、各段の拘束バンドの上下に設置したリング状の鋼板で、地震時の拘束バンドの変位を制限する。炉心の水平荷重は、レストレイントリングからラジアルキーを介して原子炉圧力容器で支持する。万一、拘束バンドが損傷してもレストレイントリングで直接荷重を支持し、地震時の炉心の水平方向の過大な変位を拘束する。

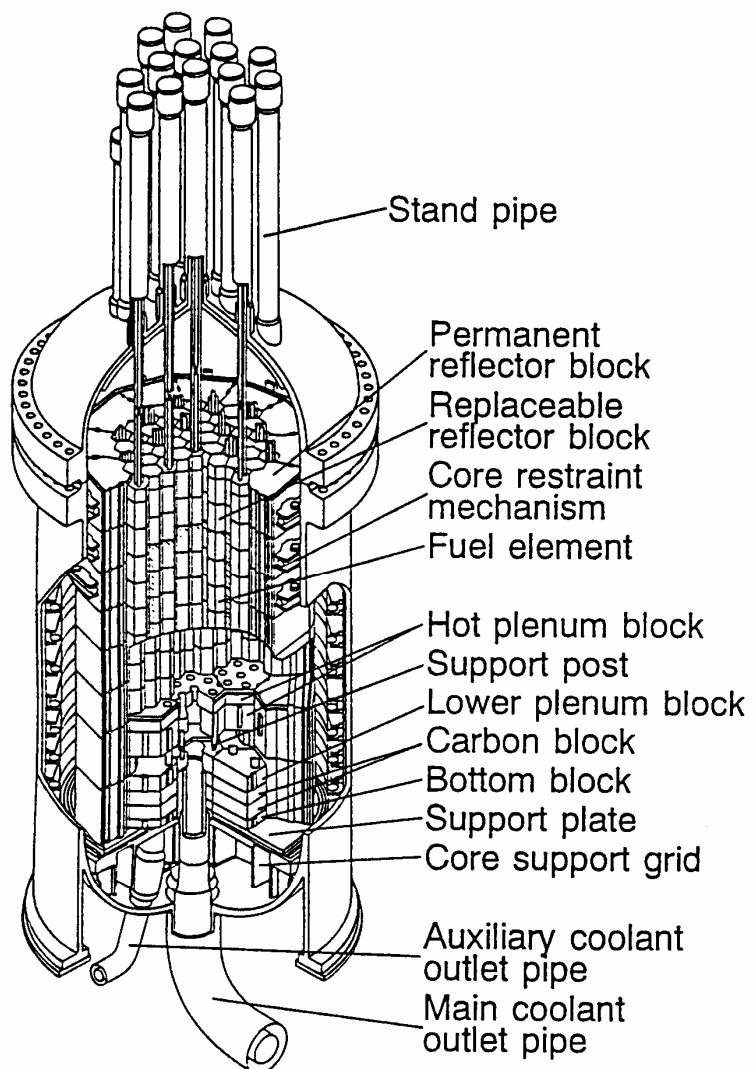


Fig.2.1 Core components, reactor internals and reactor pressure vessel of the HTTR

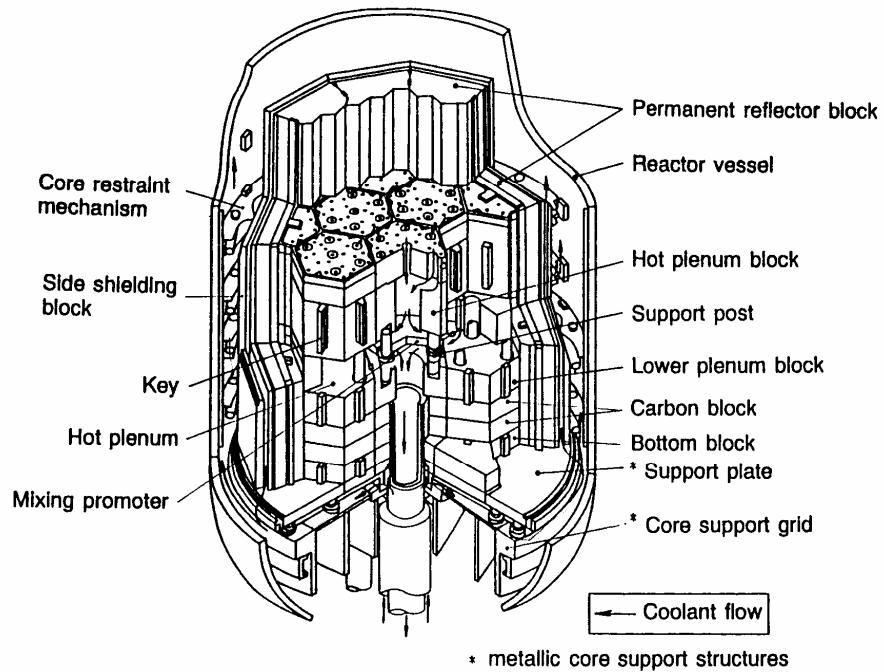


Fig.2.2 Structure of core support components.

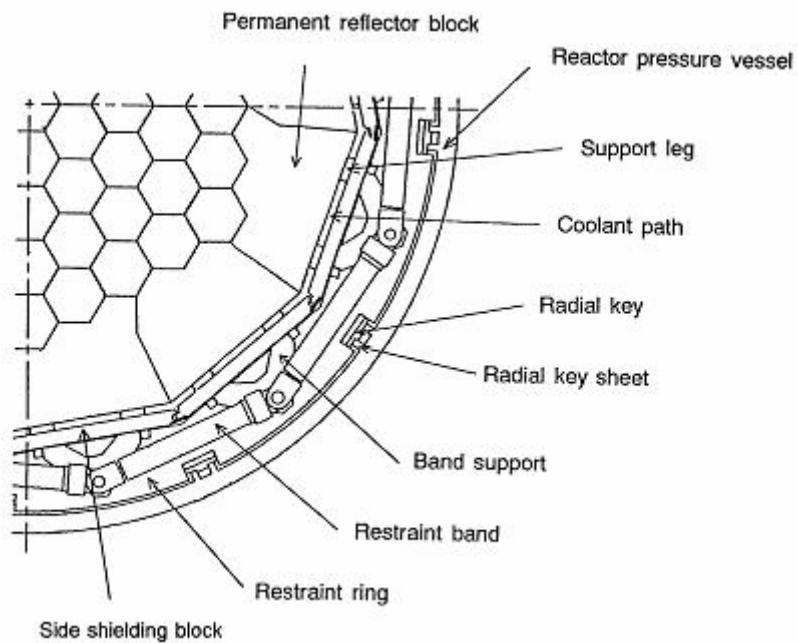


Fig.2.3 Core restraint mechanism

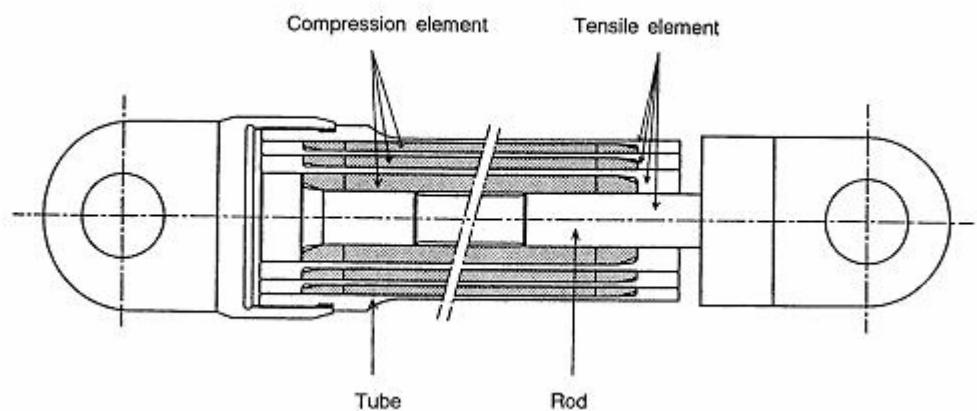


Fig.2.4 Core restraint band

### 3 セラミックス製炉内構造物の構造設計手法の検討

炭素繊維と炭素マトリックスからなる先進複合材料の一種がC/Cコンポジットで、軽量で比強度、比剛性が高く、2000°Cの高温においても高い強度を持つ高温材料である。また、耐熱性、耐摩耗性、導電性、高強度等の優れた特性を有しており、航空関連のロケットノズル、タービンブレード、一般工業用途としての高温成形用型材などに使用されている。一方、耐磨耗材料としては、航空機や高速車両のブレーキ材、モーターのブラシ材などに、また、骨、関節などの生体用材料としての用途もある。原子力分野においても高温ガス炉用材料や核融合炉構造材料等への利用が期待されており、高温ガス炉の分野においては、VHTRの制御棒被覆管としての使用が検討されるなど、国際的にも積極的な研究開発が進められている<sup>(5)</sup>。

原子力機構ではC/Cコンポジットの高温ガス炉や核融合炉構造材料等への応用に早くから着目し、C/Cコンポジットの基礎的な物性データの取得や適用可能な破壊則の検討を行ってきた<sup>(6)~(10)</sup>。C/Cコンポジットの中でも高温強度特性及びコストの観点から、高温ガス炉の炉内構造物としては特に2次元C/Cコンポジット(以下、2D-C/Cコンポジットと称す)が有望と考えられている。これまで、原子力機構が高温ガス炉への適用のため研究開発を行ってきた2D-C/Cコンポジット、CX-270G(東洋炭素株式会社製)の製造工程のフローチャートをFig.3.1に、IG-110黒鉛と比較した主要な特性をTable3.1に示す<sup>(11)</sup>。CX-270Gは、6K平織りクロスにしたポリアクリロニトリル(PAN)系炭素繊維に樹脂塗工したプリプレグを用い、最終的に約2800°Cで熱処理を行い黒鉛の結晶性を高め、高純度化処理によって不純物濃度を低減化したものである。曲げ強度及び引張強度は100MPa以上で、圧縮強度は黒鉛と同程度であるが、層間せん断強度は小さい。また、黒鉛と比較すると小さな熱膨張率及び大きな熱伝導率を示す。2D-C/Cコンポジットは高強度・耐熱性材料であるが、Table3.1に示すように繊維と平行方向と繊維と垂直方向とで機械的・熱的に異方性を有し、破壊メカニズムである亀裂の発生・伝播が金属材料とは全く異なり、繊維/マトリックス界面との相互作用などにより複雑になるため、その破壊のメカニズムは明らかになっていない。そのため炉内構造物としての設計手法が未だ確立されておらず、C/Cコンポジットを炉内材料として適用した事例は国内外を含めてこれまでに存在しない。そこで、C/Cコンポジットを高温ガス炉の炉内構造物に適用する際の構造設計手法を検討する。

#### 3.1 短期荷重

##### 3.1.1 応力評価

金属及び黒鉛材料は最大せん断応力説や最大主応力説を基本的な破壊則として、適切な安全率をかけて短期荷重に対する応力制限を設定している。2D-C/Cコンポジットは炭素繊維と炭素マトリックスの複合材であり、いずれの素材も脆性破壊をする材料であるため、短期荷重に対しては黒鉛と同様に弾性挙動の範囲に制限する必要がある。また、材料の異方性と荷重方向・強化繊維と応力主軸方向の関係により、たとえ一軸荷重条件であっても、引張・圧縮・せん断等の独立な破壊様式が生じるため、荷重と繊維方向の関係を考慮した強度評価が必要である。

一般に、X軸、Y軸を主軸とする直交異方性板のX軸からθの角度をなすx軸、y軸に関する弾性係数は、繊維方向と荷重方向が一致する場合すなわちθ=0の場合、直交異方性板の弾性係数 $E_x$ 、 $E_y$ 、 $G_{xy}$ 、 $\nu_x$ 、 $\nu_y$ を用いて以下の式で表される<sup>(12)</sup>。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_x}{1-\nu_x\nu_y} & \frac{\nu_y E_x}{1-\nu_x\nu_y} & 0 \\ \frac{\nu_y E_x}{1-\nu_x\nu_y} & \frac{E_y}{1-\nu_x\nu_y} & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3-1)$$

2D-C/C コンポジットに対する応力解析は、直交異方性材料に対する弾性解析を適用する。また、解析に必要な物性値は、縦弾数係数、ポアソン比、せん断弾性係数である。Table3.2 に解析に必要な新たに取得した CX-270G の縦弾数係数、ポアソン比及びせん断弾性係数を示す<sup>(13)</sup>。

### 3.1.2 破壊則の選定

複合材料の破壊機構は、纖維方向と纖維に直角方向の荷重ではまったく異なる。一般に纖維方向の引張荷重に対しては、纖維のヤング率がマトリックスに比べて十分に大きければ破壊は纖維に生じるので、単純に含まれる纖維の強度で複合材の強度が決まる。しかし、C/C コンポジットではマトリックス側が破壊することも多く、破壊機構は一様ではない。纖維に直角方向の引張荷重では、纖維とは無関係に破壊強度はマトリックス側の破壊機構で決まる。また、纖維方向の圧縮荷重に対しては、纖維の局部的な座屈とマトリックスのせん断破壊が考えられる。複合材料の破損則としては、最大応力説、最大ひずみ説、Tsai-Hill 則や Tsai-Wu 則の適用が試みられている<sup>(14)(15)</sup>。ここでは、従来の破壊則として HTTR の黒鉛構造設計方針で採用されている最大主応力説、複合材料の破損則である Tsai-Wu 則及び 2D-C/C コンポジットの破壊則として原子力機構が提案している競合リスク理論を代表的な破壊評価法として取り上げ<sup>(9)(10)</sup>、単軸引張強度の纖維方向のなす角度(off-axis 角)依存性について検討する。各破壊則の詳細を Appendix に示す。Fig.3.2 に単軸強度の角度依存性の検討結果を示す。最大主応力説では、破壊機構が纖維方向引張応力破壊モードからせん断応力破壊モード、纖維垂直方向引張応力破壊モードへと変化するため、強度が滑らかに変化しない。Tsai-Wu 則では、最大応力説と比較すると強度が滑らかに変化する結果が得られた。一方、競合リスク理論に基づく破壊モデルは、纖維方向引張応力の破壊モード、纖維垂直方向引張及びせん断応力の破壊モードによる強度をより忠実に包絡するものであることがわかった。

次に、競合リスク理論を用いて評価した強度と、荷重と纖維方向の off-axis 角が 0, 45° の CX-270G 材試験片について実測した引張試験結果と比較検討する。競合リスク理論を用いた強度評価においては、引張応力による破壊モード、圧縮応力による破壊モード及びせん断応力による破壊モードを考慮する。特に、せん断破壊において荷重と纖維方向が一致しない場合に生じる層内せん断応力による破壊モード及び各層で熱膨張率に違いがある場合等に生じる層間せん断応力による破壊モードを考慮し、4 つの破壊モードを考慮する。Table3.3 に競合リスク理論で用いる各モードのパラメータ、Table3.4 に比較結果を示す。ここで、解析より求めた引張強度は、競合リスク理論で破壊確率が 0.5 の時の引張強度である。off-axis 角が 0° の時は、引張応力による破壊が支配的であり、競合リスク理論による引張強度は試験結果とよく一致している。一方、off-axis 角 45° の場合には層内せん断による危険率が支配的になり、強度が低下するという実験結果をよく表しており、off-axis 角 45° の場合では引張強度の予測値(55.5 MPa)が実測値(34.9 MPa)に比べて大きい。これは、試験片の製作上側面で纖維を切断せざるを得ないことから、特に試験片端部の纖維が連続する領域と切断される領域の境界で応力分布が微細組織構造の影響を受けているためと考えられ、ここでは実施していないがこれを考慮した応力評価を行えば高精度の強度予測が期待できる。

以上から、C/C コンポジットの強度評価に競合リスク理論の適用が可能と考えられる。

### 3.1.3 設計基準強さ

C/C コンポジットはこれまで述べたとおり破壊機構が単一ではなく、荷重と纖維方向によって多様な破壊機構が存在するので、設計基準強さとしては、多様な破壊機構（引張、せん断、圧縮）を含んだ包括的なバラツキを考慮する必要がある。

C/C コンポジットは、纖維もマトリックスも炭素材料であり脆性破壊をするが、マクロ的にはマトリックス内にクラックが生じても纖維の存在によってクラックの進展が止まったり、方向が変えられたりして見かけ上の延性を示す。HTTR における黒鉛構造設計基準と同様に二次応力を一次応力と区別せずに扱うかは、C/C コンポジットにおいてはマトリックス内のマイクロクラックの発生を許容するかどうかの判断に相当する。現状では、二次応力を一次応力と区別せずに考える。

また、実際の構造物では据付や締付けのためにボルトを使用すること等により、孔などの構造不連続部が生じる。この構造不連続部は模擬構造の強度試験により強度を確認する必要がある。例えば、C/C コンポジットの端部をピンで連結する構造を考えると、Fig.3.3 に示すように引張応力、圧縮応力及び層内せん断応力の 3 つの破壊モードが考えられる。これらの破壊モードはピンとピン孔をモデル化して積層要素を使用した FEM 解析と競合リスク理論によって評価できるが、ピン孔によって纖維が切断された部分でミクロな組織構造による応力配分が生じており、この影響を模擬構造の強度試験により確認する必要がある。

## 3.2 長期荷重

### 3.2.1 中性子照射の影響

マトリックスとなる黒鉛の照射クリープ特性から類推して、一般に高速中性子フルエンスが  $10^{24} \text{n}/\text{m}^2$  以下ならば C/C コンポジットにおいても照射による寸法変化・クリープは無視できると思われる。しかし、現状の VHTR の設計において、C/C コンポジットを制御棒の被覆管に使用する計画があるため、中性子照射クリープのデータの取得が必要である。

### 3.2.2 負荷荷重

ある温度以上で使用する場合は、高温で纖維とマトリックスの熱膨張差によりマトリックス側にマイクロクラックが生じることで界面の強度が低下して擬似的なクリープ現象が起きる可能性がある。そこで、室温及び高温における C/C コンポジットの長期荷重負荷特性を行い、その影響を検討する。

#### (1) 室温荷重負荷試験

負荷荷重は、C/C コンポジット試験片の室温における 30 本の引張強さの平均約 160MPa を基に 95% (152MPa) とし、錐により荷重負荷した。また、変位はひずみゲージにより計測し、荷重方向を X 方向、纖維面で荷重と垂直方向を Y 方向、纖維積層方向を Z 方向とした。Fig.3.4 に室温荷重負荷試験結果を示す。地震等の影響によりひずみの変動が観測されたが、破断には至らず変化量は大きくなかった。本試験は、1 本の試験片について 1 年以上もの間破断荷重の 95% の大きさで負荷を続けてきたが、有意な破損は観測されなかった。従って室温においては、C/C コンポジットは長期荷重負荷による顕著な変形はないと考えられる。

#### (2) 高温長期荷重負荷試験

C/C コンポジットの炉内での使用温度を 800°C と想定し、負荷荷重は C/C コンポジット試験片の室温における 30 本の引張強さの平均約 160MPa を基に、90% (144MPa) ~ 100% (160MPa) として

錘により荷重負荷した。また、変位は変位計により計測した。Table3.5 に高温長期荷重負荷試験の試験条件、Fig.3.5 にこれまでに得られた高温長期荷重負荷試験の結果の代表例を示す。室温長期荷重負荷試験と比較するとひずみの変化量はわざがではあるが増加傾向にある。これは高温で纖維とマトリックスの熱膨張差によりマトリックス側にマイクロクラックが生じることで界面の強度低下が起きている可能性、または纖維の引抜による擬似的なクリープ起きている可能性が考えられる。さらに、一度試験を中断し室温まで降温後、再び 800°Cまで加熱した直後に試験片が破断する場合もあることから、高温から室温に戻すことによる残留応力が生じ強度が低下していることも考えられる。

### (3) レーザー顕微鏡による観察

上記試験により破断した試験片を微細構造の観点から観察するために、微細構造計測用レーザー顕微鏡(島津製作所製：OLS3000MS)による観察を行った。Fig.3.6 に高温荷重負荷試験開始前の観察写真 Fig.3.7 に試験終了後の観察写真の代表例を示す。写真では C/C コンポジットの纖維部分とマトリックス部分を良く観察することができ、Fig.3.7 からマトリックス部分の空隙が試験開始前と比較して多くなっていることが観察できた。Fig.3.8 には破断した C/C コンポジットの観察写真を示す。写真より纖維が破断した部分と破断していない部分が観察できる。これから、C/C コンポジットの破断はまず強度の低いマトリックス部分が脆的に破壊され、次に強度の大きい纖維部分が徐々に引抜かれ破断に至るものと考えられる。

## 3.3 繰り返し荷重

C/C コンポジットの場合、疲労破壊はマトリックス内のクラック及び纖維とマトリックス界面の剥離が主な原因と考えられる。このため、単純引張荷重のみならずせん断荷重についても疲労試験を実施する必要がある。

また、室温から高温を繰り返すこと（温度サイクル）により、纖維とマトリックスの熱膨張差に起因してマトリックス内にクラックが生じ、強度が低下する可能性がある。そこで、試験片の温度条件を変化させて高温荷重負荷試験を行った。温度条件として、800°Cまで昇温後約 4 日間荷重を負荷した状態で保持し、室温まで降温後約 3 日間除荷して保持し、その後再度 800°Cまで昇温という温度サイクルを試験片が破断するまで行った。試験条件を Table3.6 に示す。また、Fig.3.9 にこれまでに得られた高温長期荷重負荷試験結果の代表例を示す。温度サイクルを与えると 1 から 5 サイクルで破断した。これは温度サイクルを繰り返し与えることにより、熱膨張差に起因してマトリックス内にクラックが生じたため、高温荷重負荷試験とほぼ同じくらいのひずみ量でも破断したためと考えられる。

## 3.4 環境効果

C/C コンポジットの強度に影響を及ぼす環境効果として、高温ガス炉内での使用を考えると酸化を考慮する必要がある。C/C コンポジットの酸化は、黒鉛と同様に 400–500°C くらいから生じる。黒鉛では酸化は表面から進行していくが、C/C コンポジットではマトリックスと纖維の界面に生じるき裂空間に酸素が浸透し材料内部でも酸化が進むと考えられ<sup>(16)</sup>、この現象による強度低下を強度設計に反映する必要がある。

以上、2D-C/C コンポジットの構造設計基準の考え方を黒鉛と比較してまとめたものを Table3.7 に示す。Table3.7 に同時に示した超塑性ジルコニアの構造設計基準の考え方については、別途報告する。

Table3.1 Material properties of 2D-C/C (CX-270G) and IG-110 graphite<sup>(1)</sup>

Grade	Bulk density Mg/m <sup>3</sup>	Electrical resistivity $\mu \Omega \cdot m$	Bending strength MPa	Tensile strength MPa	Compressive strength MPa	Interlayer shear strength MPa	Young's modulus GPa	$10^{-6}/K(RT \sim 1273K)$	Thermal conductivity W/m · K
2D-C/C CX-270G	1.63	6.5(pl)	133(pp)	167(pp)	69(pl)/89(pp)	5.7	81	0.2(pl), 10.8(pp)	129(pl), 26(pp)
Graphite IG-110	1.77	11	39	25	78	—	10	4.6	116

(pl) parallel to lamia

(pp) perpendicular to lamia

Table3.2 Parameter for stress analysis<sup>(13)</sup>

Direction	Modulus of longitudinal elasticity (GPa)	Poisson's ratio	Modulus of transverse elasticity (GPa)
pl	106.5	0.12	47.5
pp	0.8	0.74	-

(pl) parallel to lamia, (pp) perpendicular to lamia

Table3.3 Model parameters of CX-270G for strength evaluation with competing risk theory

Mode	Direction	Scale parameter $\sigma_{0i}$ (MPa)	Shape parameter $m_i$	Volume of specimen (mm <sup>3</sup> )	Factor $F_v$
Tensile	pl	227	21.8	625(5×5×25)	1.34
	pp	19	1.94	625(5×5×25)	2.73
Compressive	pl	110	22.9	500	1.31
	pp	220	11.4	500	1.72
Inner shear	—	31	8.9	28(Φ 6×1)	1.45
Inter shear	—	8.4	27.9	28(Φ 6×1)	1.16

(pl) parallel to lamia, (pp) perpendicular to lamia

Scale parameters are standard volume (at 1mm<sup>3</sup>).

$$F_v = \left( \frac{V_{tp}}{1} \right)^{\gamma_m}$$

$V_{tp}$  : Volume of specimen (mm<sup>3</sup>)

Table3.4 Comparison of tensile strength from competing risk theory with experimental results

		Off-axis = 0°	Off-axis = 45°
Experiment	Tensile strength (MPa)	165.3	34.9
Competing risk theory	Tensile strength * (MPa)	161	55.5
	Risk of rupture (tensile:pp)	0.683	0
	Risk of rupture (inner shear)	0.010	0.693
	Risk of rupture (inter shear)	0	0

\*Fracture probability = 0.5

Table3.5 Test condition for constant load test at high temperature

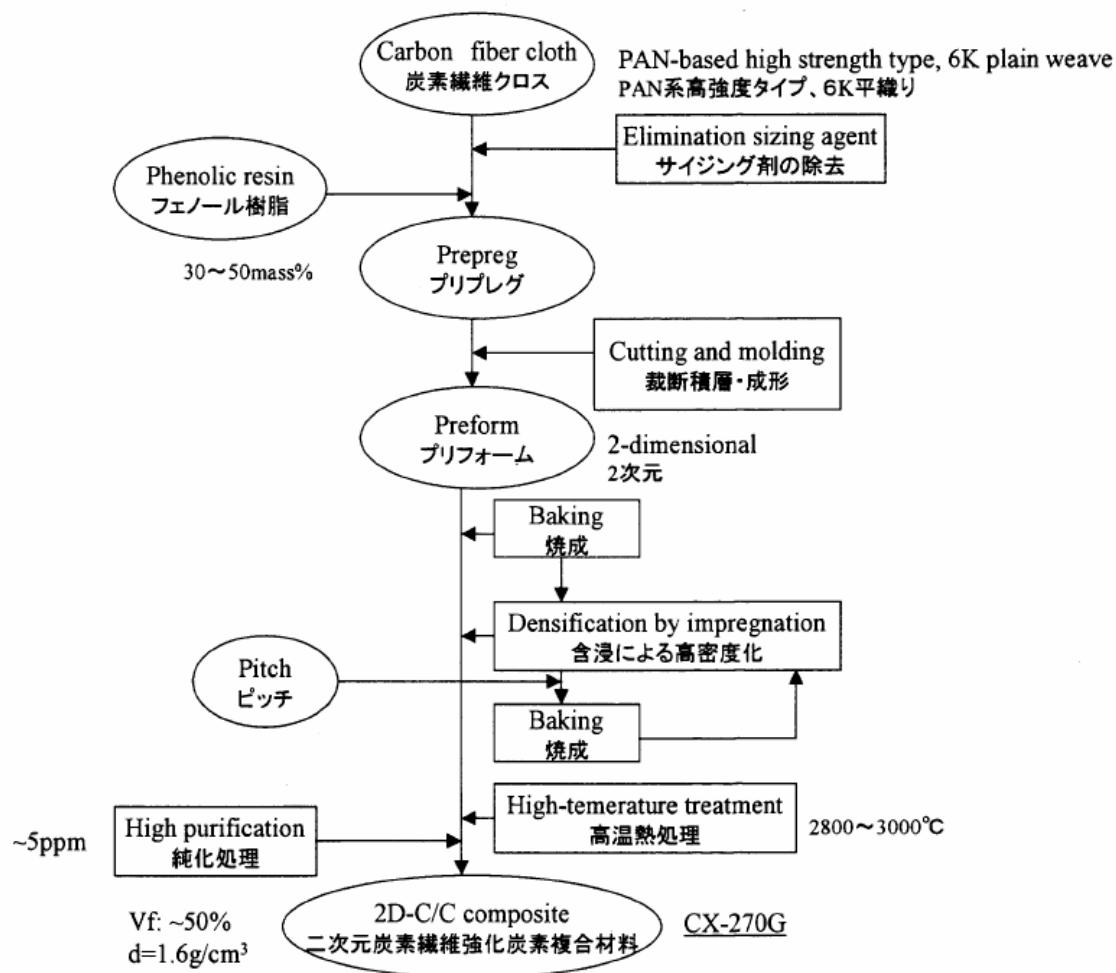
Specimen No.	Stress (MPa)	Temperature (°C)
50	144(90%)	853
	152(95%)	853
61	144	847
62	144	847
64	144	851
65	144	844
	152	844
	156(97.5%)	844
69	152	843
	156	843
	160(100%)	843
70	152	851
	152	847
	156	847
	160	847
71	152	847
	156	852
	160	852

Table3.6 Test condition for thermal cyclic load test at high temperature

Specimen No.	Stress (MPa)	Temperature (°C)
73	152	857
74	152	848
76	152	853
79	152	859
82	152	863
83	144	858
91	144	861
92	144	861
93	144	862

Table3.7 Concept of design standard for ceramics materials

	graphite	2D-C/C composite	Superplastic zirconia
Temporary load	Maximum principal stress theory	Competing risk theory	maximum principal stress theory
Continuous load	Irradiation creep	Irradiation creep	Irradiation creep
Cyclic load	Fatigue limit	Fatigue limit	Fatigue limit
Environmental effect	Oxidation	Oxidation	Reduction

Fig.3.1 Manufacturing process of CX-270G<sup>(11)</sup>

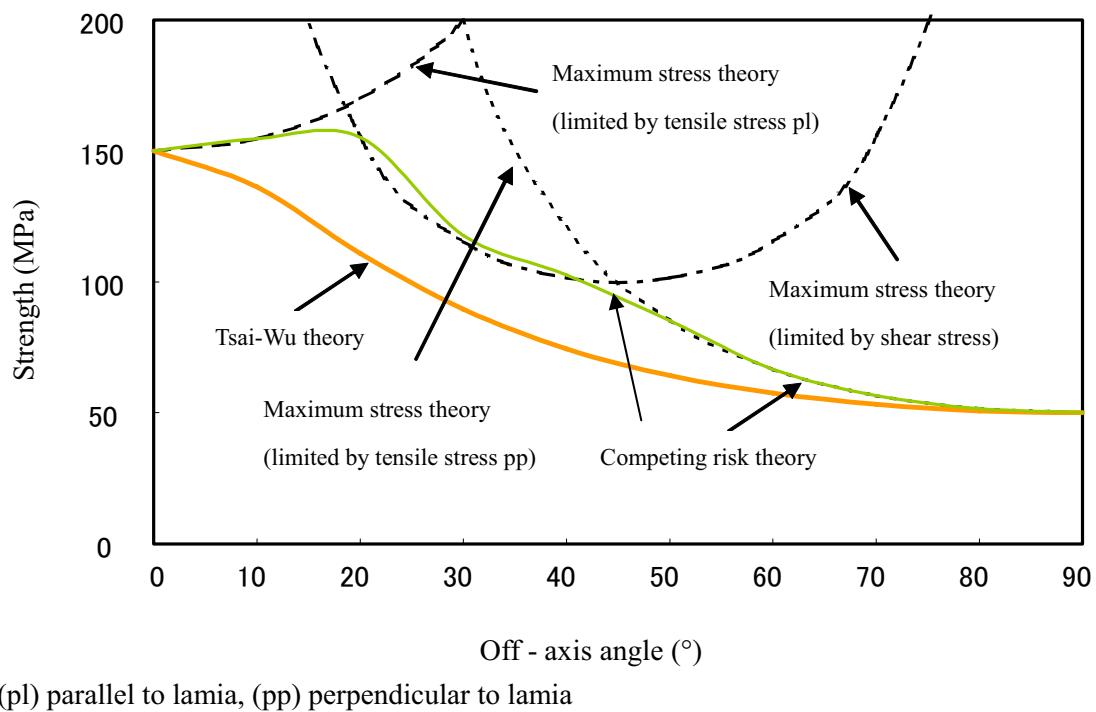


Fig.3.2 Comparison of tensile strength evaluation by three theories

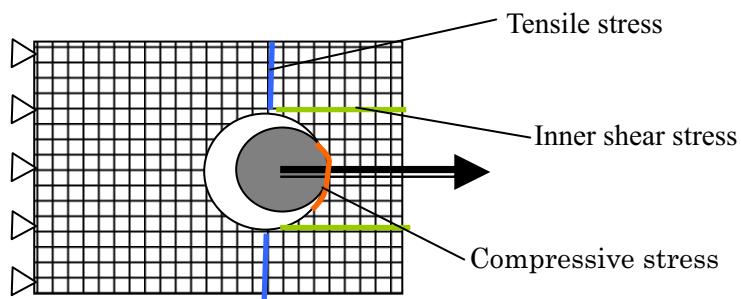


Fig.3.3 An example of discontinuous structure

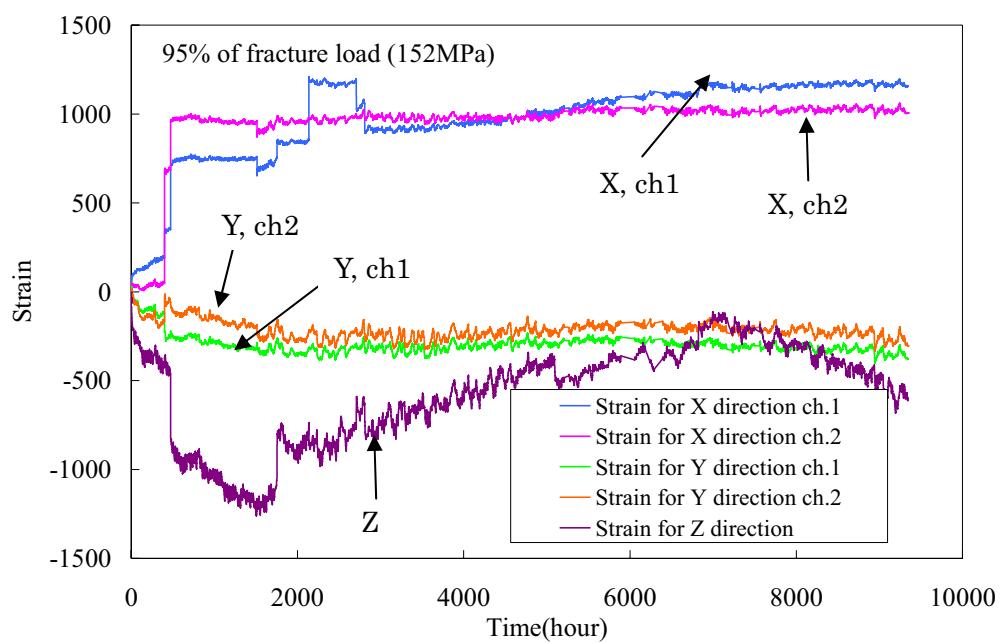


Fig.3.4 Constant load test of C/C composite at room temperature

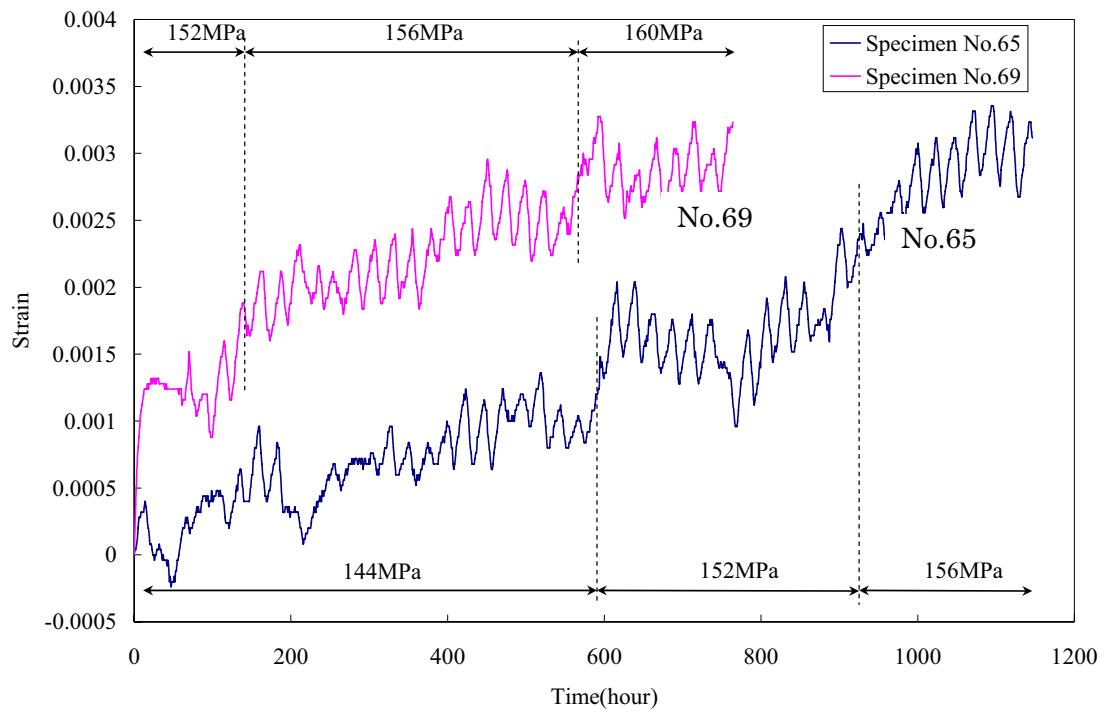


Fig.3.5 Constant load test of C/C composite at high temperature (1/2)

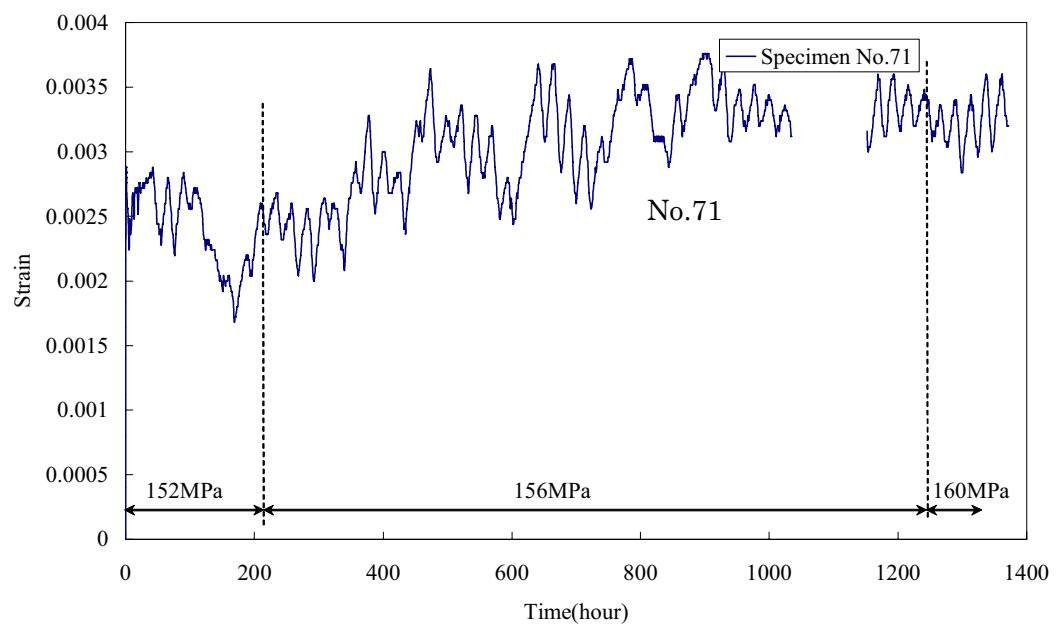


Fig.3.5 Constant load test of C/C composite at high temperature (2/2)

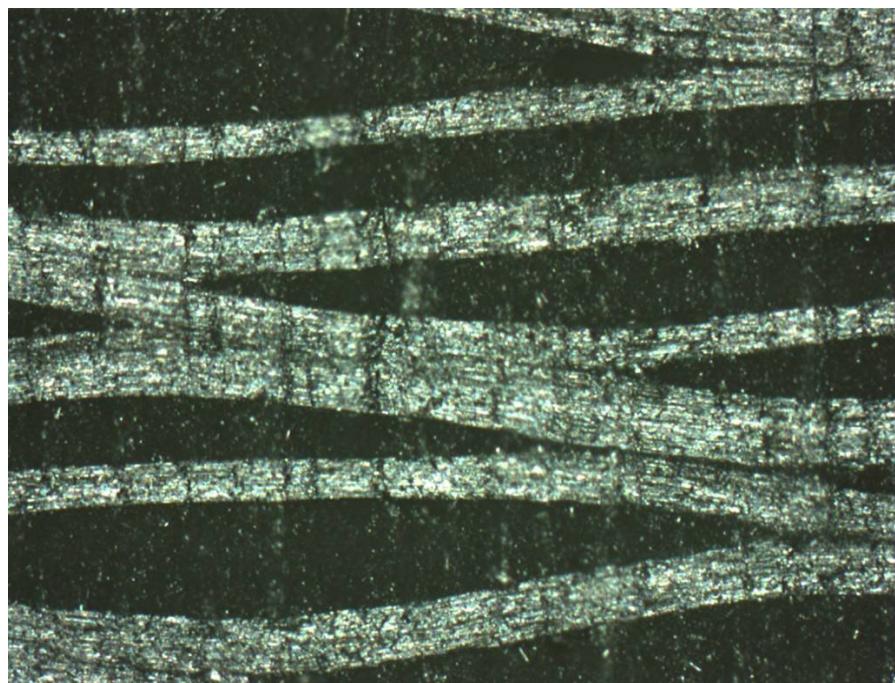


Fig.3.6 Laser microscope image of C/C composite before constant load test (1/2)

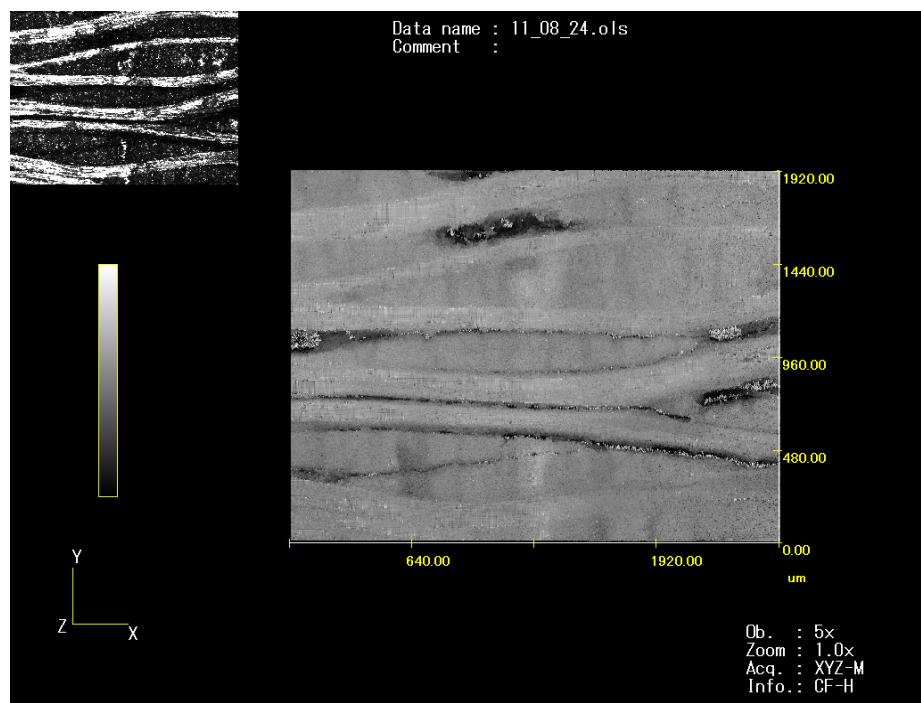


Fig.3.6 Laser microscope image of C/C composite before constant load test (2/2)

This is a blank page.

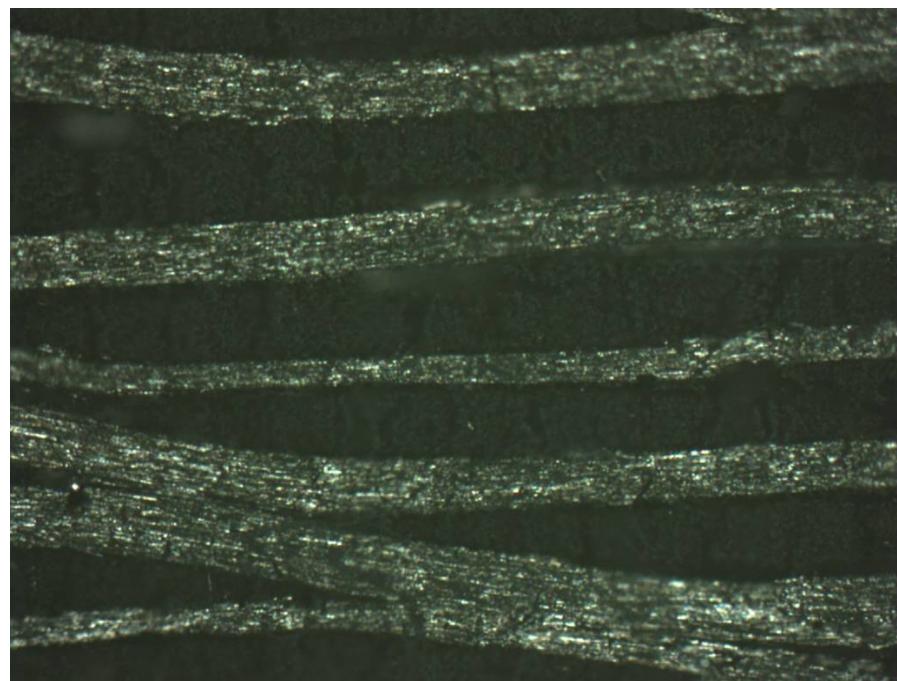


Fig.3.7 Laser microscope image of C/C composite after constant load test (1/2)

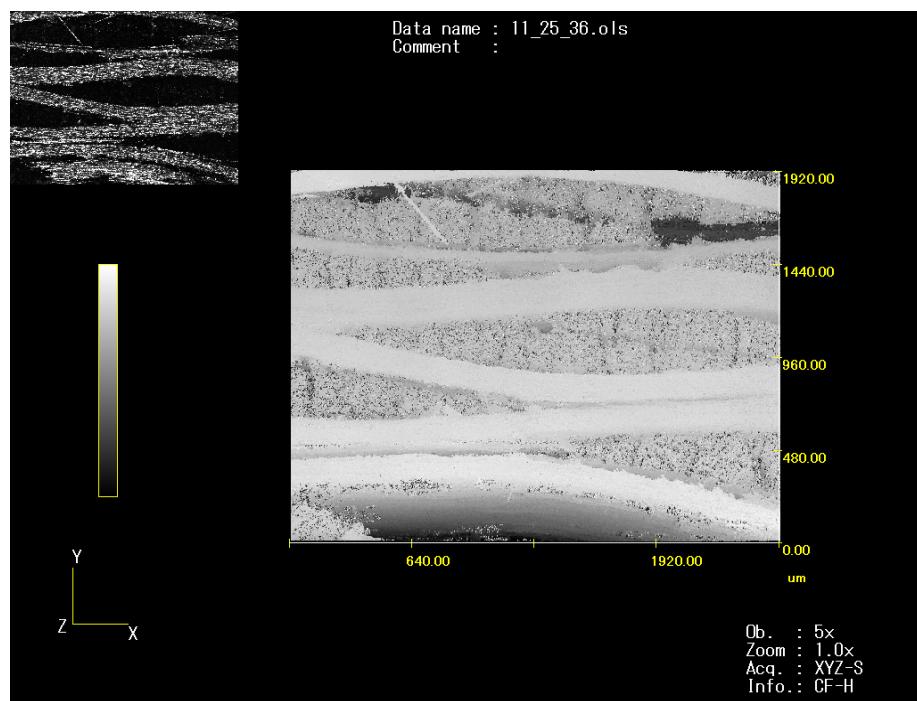


Fig.3.7 Laser microscope image of C/C composite after constant load test (2/2)

This is a blank page.

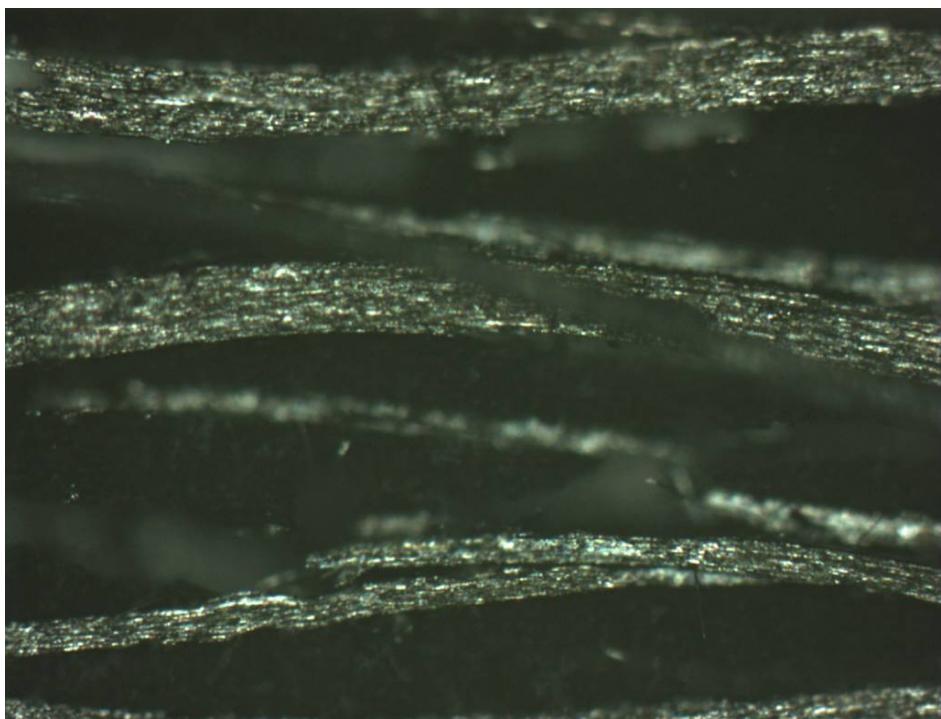


Fig.3.8 Laser microscope image of rupture C/C composite specimen

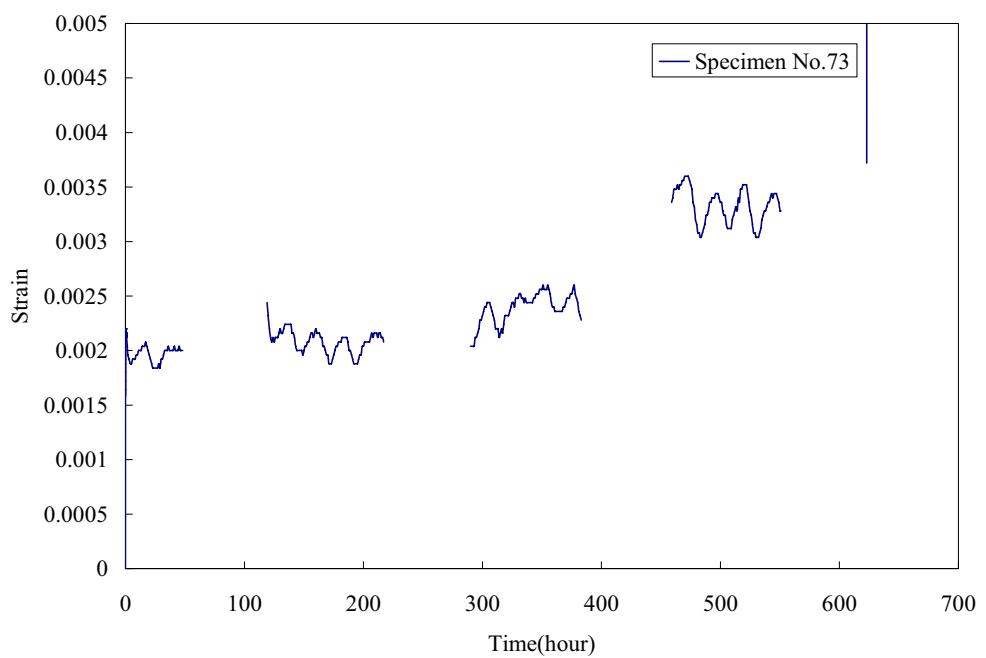


Fig.3.9 Thermal - cyclic - load test of C/C composite at high temperature (1/3)

This is a blank page.

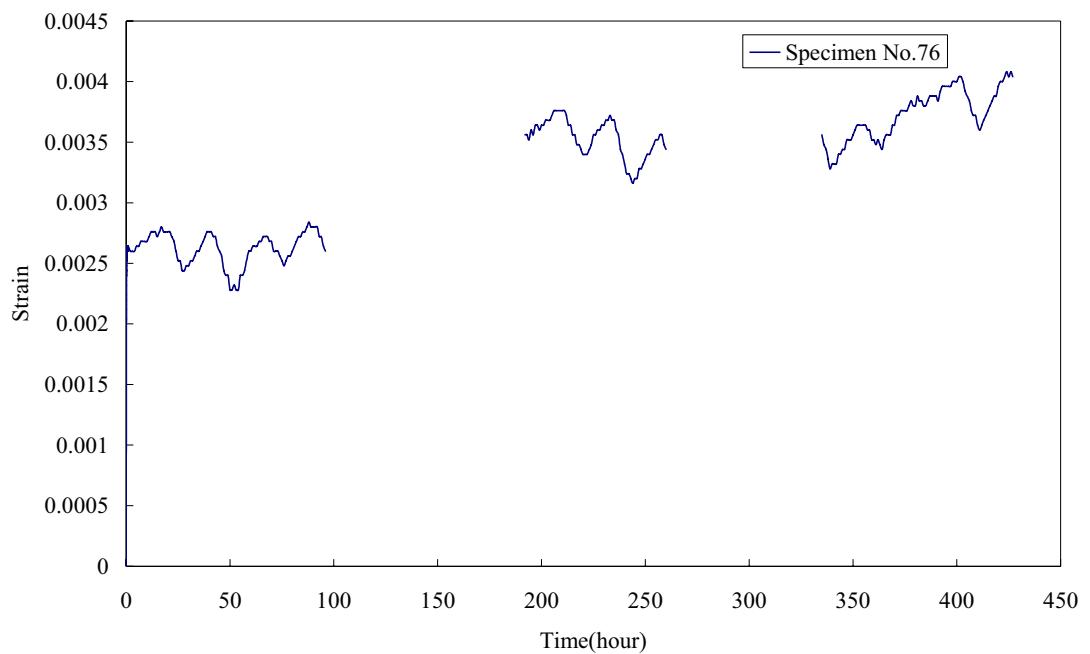


Fig.3.9 Thermal - cyclic - load test of C/C composite at high temperature (2/3)

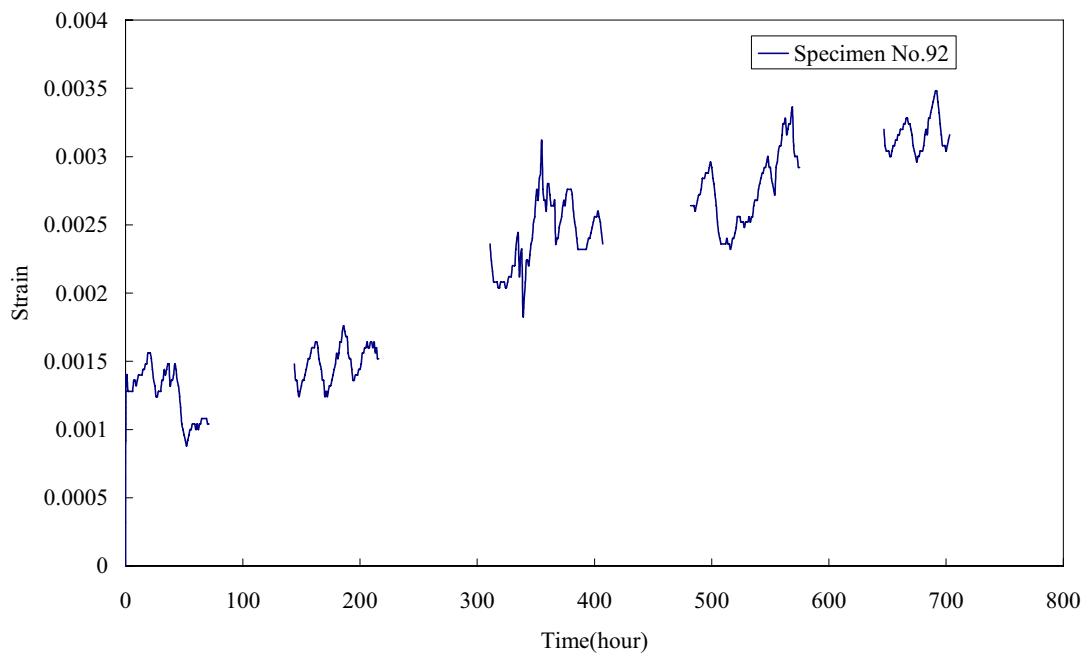


Fig.3.9 Thermal - cyclic - load test of C/C composite at high temperature (3/3)

#### 4 セラミックス製炉内構造物の基礎的成立性の検討

セラミックス製炉内構造物の代表的候補部位として、C/C コンポジット製炉心拘束機構の基礎的成立性を検討する。HTTR の炉心拘束機構では、熱膨張率が黒鉛と同程度になるように金属を組合せているが、C/C コンポジット製炉心拘束機構では、Fig.4.1 に示すように C/C コンポジットで固定反射体を取り巻き、C/C コンポジット特有の微小な熱膨張率を利用して締付け力を発生させる構造を一例として取り上げる<sup>(17)</sup>。固定反射体と C/C コンポジットの健全性の観点から、C/C コンポジット製炉心拘束機構から発生する締付け力を FEM を用いた熱応力解析により評価し、C/C コンポジット製炉心拘束機構の成立性を検討する。

まず、黒鉛の固定反射体ブロックの健全性の観点から最適な炉心拘束機構の厚さ求めるために、炉心拘束機構の厚さ、拘束力及び固定反射体ブロックに生じる圧縮応力の関係を調べた。Fig.4.2 に熱応力解析モデルを、Table4.1 に解析に用いた物性値、Table4.2 に解析条件を示す。Fig.4.3 に示すように、拘束力及び固定反射体ブロックに生じる圧縮応力はいずれも、C/C コンポジットの厚さが増すにつれて大きくなる。固定反射体ブロックの圧縮基準強さは約 61MPa であり、設計上の安全率を考慮すると圧縮応力は約 15MPa 以下にする必要があるため、炉心拘束機構の厚さは 50mm 以下にしなければならない。

次に、C/C コンポジットの健全性の観点から炉心拘束機構の厚さと C/C コンポジットに生ずる周方向応力の関係を調べるために、炉心拘束機構と固定反射体の間にギャップを考慮した熱応力解析を実施した。Table4.3 に熱応力解析パラメータ、熱応力解析の結果を Table4.4 に示す。ここで、C/C コンポジット製炉心拘束機構の安全裕度を評価するために、引張強度に対する周方向応力の比を示してある。引張強度は、Table3.1 から 167MPa とした。周方向の応力は、黒鉛製の固定反射体と C/C コンポジット製炉心拘束機構とのギャップが大きくなると減少し、炉心拘束機構が厚くなると減少する。また、拘束力は炉心拘束機構が厚くなると増加する。ここで、C/C コンポジットの応力制限値を炉心支持黒鉛構造物と同じ 1/4 と仮定すると、C/C コンポジット製炉心拘束機構の厚さが 30mm 及び C/C コンポジット製炉心拘束機構とのギャップが 6mm の時、C/C コンポジット製炉心拘束機構が成立する。

以上から、C/C コンポジット製炉心拘束機構の厚さと C/C コンポジット製炉心拘束機構とのギャップを適切に考慮することにより、C/C コンポジット製炉心拘束機構は成立可能であるといえる。

Table4.1 Material properties of graphite and C/C composite for thermal stress analysis

Material properties	Graphite (IG-110 graphite)	C/C composite (CX-270G)
Elastic moduls [GPa]	9.4	106.5 (pl) 0.8 (pl)
Shear moduls [GPa]	4.2	3.0
Poisson's ratio	0.11	0.12
CTE [1/ $^{\circ}$ C]	$4.3 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^{-7}$ (pl) $10.8 \times 10^{-6}$ (pp)

(pl) parallel to lamia, (pp) perpendicular to lamia

Table4.2 Parameters for the analysis of optimal thickness

Thickness of C/C composite	2mm, 10mm, 30mm, 50mm
Temperature at the inner surface of reflector block	600 $^{\circ}$ C
Temperature at the outer surface of C/C composite	510 $^{\circ}$ C

Table4.3 Parameters for the analysis of thermal stress

Thickness of C/C composite	10mm, 30mm
Gap between reflector block and core restraint	0mm, 3mm, 6mm
Temperature at the inner surface of reflector block	600 $^{\circ}$ C
Temperature at the outer surface of C/C composite	510 $^{\circ}$ C

Table4.4 Relationship between circumferential stress and thickness or gap

Thickness of C/C composite (mm)	Gap (mm)	Circumferential stress (MPa)	Restraint force (kN)	Circumferential stress /Tensile strength ( $R_{ct}$ )
10	0	159	1270	159/167
	3	102	816	102/167
	6	44	350	44/167
30	0	102	2470	102/167
	3	67	1610	67/167
	6	31	740	31/167

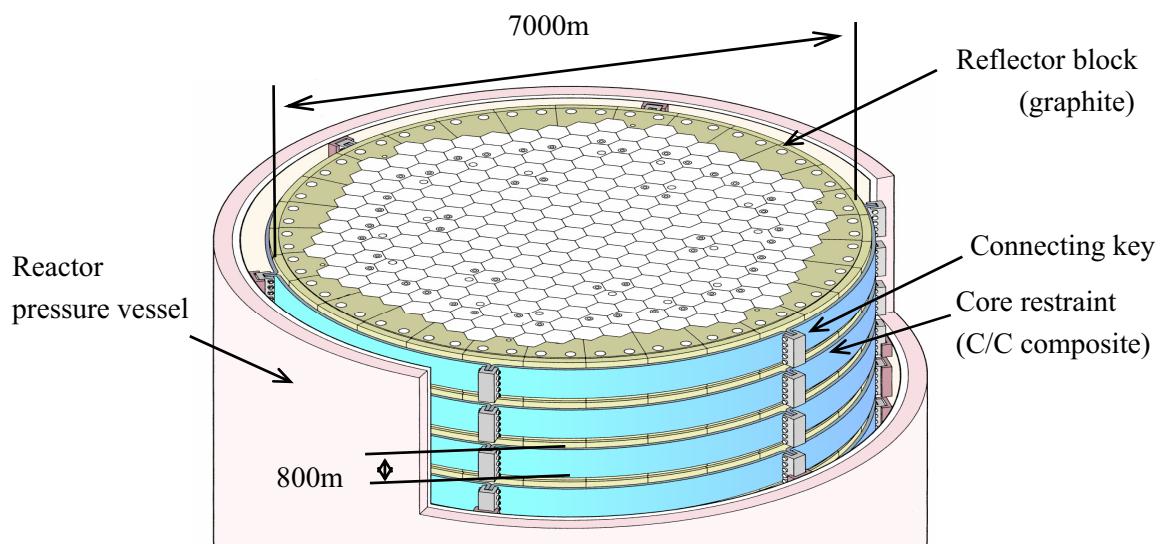


Fig.4.1 Proposed core restraint mechanism made of C/C composite for VHTR

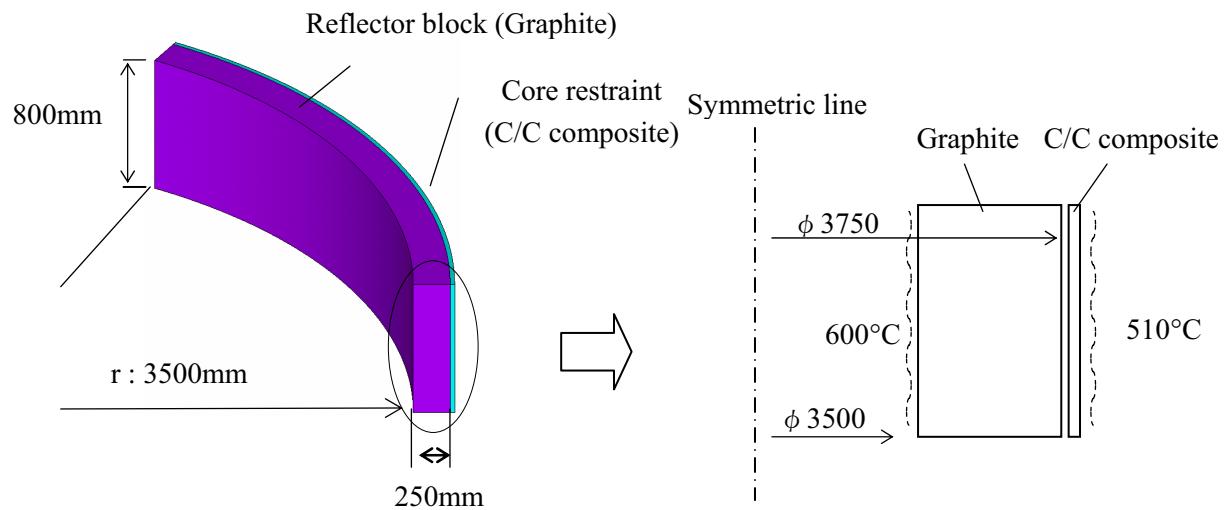


Fig.4.2 Analytical model for thermal stress analysis

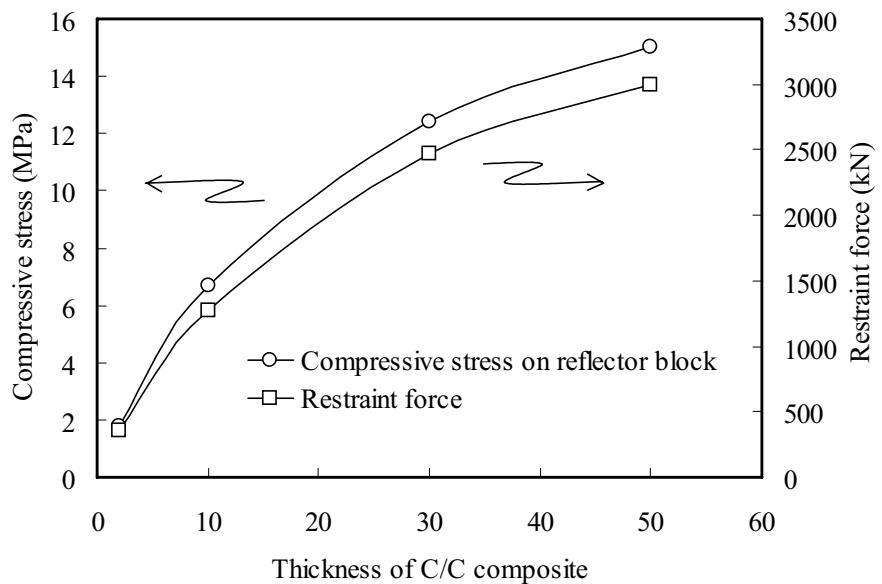


Fig.4.3 Relationship between thickness and restraint force of restraint and compressive stress of reflector block

## 5. まとめ

セラミックス製炉内構造物として、C/C コンポジットを適用する際の構造設計手法の検討を行うとともに、代表的な構造物への応用にあたり基礎的な成立性を検討し、以下の結論を得た。

- (1) 異方性を有する 2D-C/C コンポジットを高温ガス炉の炉内構造物として用いるための構造設計手法を検討した結果、強度評価において競合リスク理論を用いる方法が有用である。
- (2) 2D-C/C コンポジットの高温ガス炉への適用部位として、炉心拘束機構を取り上げ基礎的な成立性を検討した結果、厚さやギャップを適切に調整することで適用が可能である。

## 謝辞

本報をまとめるにあたり、貴重なご助言を頂きました大洗研究開発センター照射試験炉センターの石原正博副センター長に深く感謝いたします。また、実験データの取得にあたりご助言・ご指導頂きました核熱利用試験技術課の馬場信一技術副主幹に感謝いたします。さらに、受託事業の取り纏めてくださった高温ガス炉特性・安全性試験グループの武田哲明グループリーダーに感謝いたします。

## 参考文献

- (1) M. Ogawa, et. al., "Present status of energy in Japan and HTTR project," Nuclear Engineering and Design, 233, pp.5-10 (2004).
- (2) S. Fujikawa, H. Hayashi, T. Nakazawa, et. al, "Achievement of reactor - outlet coolant temperature of 950°C in HTTR", J. Nucl. Sci. Technol., 41[12], pp.1245-1254 (2004).
- (3) S. Nakagawa, et. al., "Safety demonstration tests using high temperature engineering test reactor," Nuclear Engineering and Design, 233, pp.301-308 (2004).
- (4) 日本原子力研究、「日本原子力研究所 大洗研究所 原子炉施設設置変更許可申請書[HTTR(高温工学試験研究炉)原子炉施設の設置]本文及び添付書類(一~十)」、平成元年2月(平成元年11月一部補正)(平成2年10月一部補正)。
- (5) 石原正博、「炭素繊維強化炭素複合材料の原子力分野への応用」、炭素、No.208, pp.135-144(2003).
- (6) H. Matsuo, T. Nagasaki, "Effect of Neutron Irradiation on Dimensional Changes of Carbon-carbon Composites" , Journal of Nuclear Materials 207, pp.330-332 (1993)
- (7) H. Matsuo, T. Nagasaki, "Thermal Diffusivity of Neutron-Irradiated Carbon-carbon Composite" , Journal of Nuclear Materials 217, pp.300-303 (1994)
- (8) M. Eto, S. Ishiyama, H. Ugachi, K. Fukaya, S. Baba, "Mechanical Properties of Neutron-induced Carbon-carbon Composite for Plasma Facing Components" , Journal of Nuclear Materials 212-215, pp.1223-1227 (1994)
- (9) M. Ishihara, S. Hanawa, T. Sogabe, Y. Tachibana et. al, "Proposal of the prediction method using a competing risk model on the bending strength of 2D-C/C composite" , Materials Science Research International, Vol.10, No.1, pp.65-70(2004).
- (10) 塙悟史、石原正博、柴田大受、本橋嘉信、「2D-C/C 複合材料構造物の強度予測法の提案」、材料、Vol.55, No.9, pp.868-873(2006)

- (11)曾我部敏明、石原正博、馬場信一、小嶋崇夫他、「高温ガス炉用炭素繊維強化炭素複合材料の開発」、JAERI-Research 2002-026(2002).
- (12)日本機械学会編、「機械工学便覧 A 編(基礎編) A4 材料力学」(1986).
- (13)私信
- (14)S. W. Tsai, “Strength theories of filamentary structure”, R. T. Schwartz and H. S. Schwartz, ed., Fundamental aspects of fiber reinforced plastic composites, pp.3-11, Wiley Interscience(1968).
- (15)S. W. Tsai and E. M. Wu, “A general theory of strength for anisotropic materials”, Journal of composite materials, Vol. 5, No. 1, pp.58-80(1971).
- (16)石沢修一、町田隆志、「C/C コンポジットの高温強度に及ぼす酸化損耗の影響」日本器械学会論文集(A 編)、63 卷、608 号(1997).
- (17)S. Hanawa, J. Sumita, T. Shibata, M. Ishihara, et al., “Stress Analysis of Two-dimensional C/C Composite Components for HTGR's Core Restraint Mechanism”, Proc. of SMiRT18, C06-1, Beijing, China (2005)

## 付録

C/C コンポジットの破壊強度評価法として検討した最大主応力説、Tsai-Wu 則及び競合リスク理論についてそれぞれの考え方を示す。

### (A-1)最大主応力説

最大応力説は最も単純な破壊であり、纖維方向及び纖維に垂直な方向の各主軸方向の応力成分が、その方向の破壊強度に達した場合に破壊が生じるとする説である。Fig.A.1 に示すように纖維方向と x 軸とのなす角度(off-axis 角)を  $\theta$  とすると、纖維方向 1 及び纖維に垂直な方向 2 の応力成分  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  及び  $\tau_{12}$  は次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2\sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2\sin \theta \cos \theta \\ -\cos \theta \sin \theta & \cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (A-1)$$

応力成分  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  及び  $\tau_{12}$  の強度は次式で表される。

$$F_{Lc} < \sigma_1 < F_{Lt}, \quad F_{Tc} < \sigma_2 < F_{Tt}, \quad |\tau_{12}| < F_{LT} \quad (A-2)$$

ここで、 $F_{Lt}$ 、 $F_{Lc}$  及び  $F_{Tt}$ 、 $F_{Tc}$  はそれぞれ纖維方向、纖維に垂直な方向の引張強度、圧縮強度を、 $F_{LT}$  はせん断強度を表す。本報告では、纖維方向から角度  $\theta$  傾いた方向に单一引張応力  $\sigma$  だけが作用しているとし、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\tau_{12}$  は、(A-1)式で  $\sigma_x = \sigma$ 、 $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$  として計算した。

### (A-2)Tsai-Wu 則

Tsai-Wu 則において、纖維方向 1 及び纖維に垂直な方向 2 の応力成分  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  及び  $\tau_{12}$  に対する Tsai-Wu 則パラメータ  $P_{TW}$  は次式で与えられる<sup>(15)</sup>。

$$P_{TW} = f_1 \sigma_1 + f_2 \sigma_2 + f_{11} \sigma_1^2 + f_{22} \sigma_2^2 + 2f_{12} \sigma_1 \sigma_2 + f_{66} \tau_{12}^2 \quad (A-3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{F_{Lt}} + \frac{1}{F_{Lc}} & f_2 &= \frac{1}{F_{Tt}} + \frac{1}{F_{Tc}} \\ f_{11} &= \frac{1}{F_{Lt} F_{Lc}} & f_{22} &= \frac{1}{F_{Tt} F_{Tc}} \\ f_{66} &= \frac{1}{F_{LT}^2} \end{aligned} \quad (A-4)$$

であり、破壊しない条件は、

$$P_{TW} < 1 \quad (\text{A-5})$$

である。 $f_{12}$ は2軸応力の強度試験から求めることができる。また、 $f_{12}$ は繊維方向が引張荷重方向と45°の試験片の単純引張試験から、Uを引張荷重方向と45°の試験片の引張強度とし、 $\sigma_1=\sigma_2=\tau_{12}=U/2$ とおいて次式で定めることができる。

$$f_{12} = \frac{2}{U^2} \left[ 1 - \frac{U}{2} \left( \frac{1}{F_{L_t}} + \frac{1}{F_{L_c}} + \frac{1}{F_{T_t}} + \frac{1}{F_{T_c}} \right) - \frac{U^2}{4} \left( \frac{1}{F_{L_t} F_{L_c}} + \frac{1}{F_{T_t} F_{T_c}} + \frac{1}{F_{LT}^2} \right) \right] \quad (\text{A-6})$$

ここでは、 $f_{12}$ は(A-6)式において、文献(13)で示された値  $U=34.9\text{MPa}$  を用い、繊維方向から角度  $\theta$  傾いた方向に单一引張応力  $\sigma$ だけが作用している場合について計算した。

### (A-3)競合リスク理論

競合リスク理論は、複数の破壊機構が混在し荷重負荷に伴ってそれぞれの破壊機構による破壊が並行して進む場合に説明できる破壊則である。 $j$ 種類の破壊機構が構造物の破壊の起点になるとして、構造物は破壊機構の競合により最も弱い破壊機構により破壊すると仮定する。 $R_i(\sigma)$ を  $i$ 番目の破壊機構による破壊の危険度とすると  $R_i(\sigma)$ は、

$$R_i(\sigma) = \int_i \left( \frac{\sigma - \sigma_{ui}}{\sigma_{0i}} \right)^{m_i} dv_i \quad (\text{A-7})$$

- $v_i$  :  $i$ 番目の破壊機構の体積
- $\sigma_{ui}$  :  $i$ 番目の破壊機構の位置母数
- $\sigma_{0i}$  :  $i$ 番目の破壊機構の尺度母数
- $\sigma$  :  $i$ 番目の破壊機構の発生応力
- $m_i$  :  $i$ 番目の破壊機構の形状母数(ワイブル係数)

$i$ 番目の破壊確率  $P_{fi}(\sigma)$ は、ワイブルの強度理論に基づき以下のように表される。

$$P_{fi}(\sigma) = 1 - \exp\{-R_i(\sigma)\} \quad (\text{A-8})$$

$j$ 番までの累積破壊確率  $P_f(\sigma)$ は、

$$P_f(\sigma) = 1 - \exp\left\{ - \sum_{i=1}^{i=j} R_i(\sigma) \right\} \quad (\text{A-9})$$

従って、構造物が破壊する時破壊の危険度はすべての破壊機構の危険度の和で求められ、以下の式で表される。

$$R_{total} = \sum_{i=1}^j R_i(\sigma) \quad (A-10)$$

曲げ強さを例にとると、曲げ試験における破壊機構は引張・圧縮・せん断であるので破壊機構ごとに強度分布を測定し、下式で破壊の危険度  $R$  を評価する。

$$R = R_t + R_c + R_\tau \quad (A-11)$$

ここで、 $R_t$ 、 $R_c$ 、 $R_\tau$  はそれぞれ、引張強度の破壊の危険度、圧縮強度の危険度、せん断強度の危険度であり以下の式で表される。

$$R_t = 2 \int_{\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left( \frac{\sigma_t}{\sigma_{0t}} \right)^{m_t} b dx dy \quad (A-13)$$

$$R_c = 2 \int_{\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_{0c}} \right)^{m_c} b dx dy \quad (A-14)$$

$$R_\tau = 2 \int_{\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \left( \frac{\sigma_\tau}{\sigma_{0\tau}} \right)^{m_\tau} L b dy \quad (A-15)$$

- $L$  : 試験片の長さ
- $b$  : 試験片の幅
- $h$  : 試験片の厚さ
- $\sigma_{0t}$  : 引張強度の尺度母数
- $m_t$  : 引張強度の形状母数(ワイブル係数)

Transverse to lamia direction 2

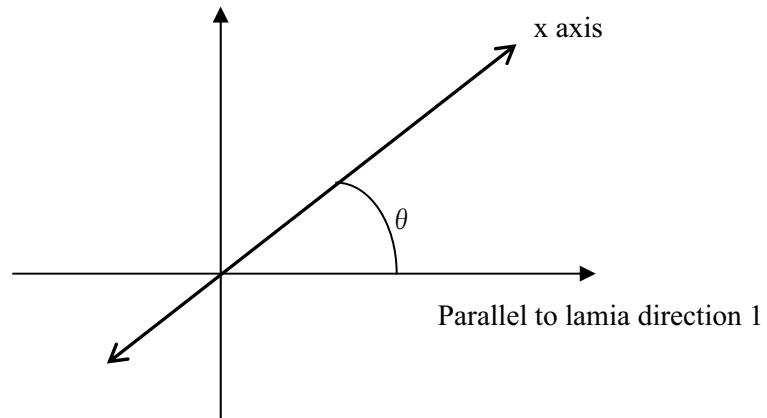


Fig.A.1 Relationship between fiber direction and off-axis angle

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	メートル毎秒	m <sup>-1</sup>
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率	(数の)1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1}$ <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2}$ <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
圧力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率、電気量	ワット	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	C/V
静電容量	フアード	F	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジemens	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2$
インダクタンス	ヘンリイ	H	$Wb/A$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C	K
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種)放射能	ベクレル	Bq	$lm \cdot m^{-2}$
吸収線量、質量エネルギー一分率	グレイ	Gy	$lm/m^2$
線量当量、周辺線量当量	カーマ		$m^2 \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	シーベルト	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b)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“1”は明示されない。

(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	毎ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル每ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム		
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每スチラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每スチラジアン	W/(m <sup>2</sup> ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
$10^{24}$	ヨタ	Y	$10^{-1}$	デシ	d
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	c
$10^{18}$	エクサ	E	$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{15}$	ペタ	P	$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{12}$	テラ	T	$10^{-9}$	ナノ	n
$10^9$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	p
$10^6$	メガ	M	$10^{-15}$	フェムト	f
$10^3$	キロ	k	$10^{-18}$	アト	a
$10^2$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼット	z
$10^1$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	°	°=(π/180) rad
分	'	'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg
ネーベル	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里每時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1a=1 dam^2=10^2 m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
バーン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイニン	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m/s$
ガウス	G	$1 G \triangleq 10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe \triangleq (1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx \triangleq 10^{-8} Wb$
スチルブ	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホル	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	X unit	$1 X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 γ=1 nT=10^{-9} T$
ジャニスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr = (101.325/760) Pa$
カリヨーン	cal	$1 atm = 101.325 Pa$
ミクロ	μ	$1 μ = 1 μm = 10^{-6} m$

