



JAEA-Research

2008-007

## 高温ガス炉黒鉛構造物の熱伝導率に関する アニーリング効果の設計式検討 (受託研究)

Investigation of Design Curve of Annealing Effect on Thermal Conductivity  
for Graphite Components of HTGR  
(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

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは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/index.shtml>)  
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行つ  
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4  
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  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

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.029-282-6387, Fax.029-282-5920

高温ガス炉黒鉛構造物の熱伝導率に関するアニーリング効果の設計式検討  
(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15日受理)

高温ガス炉の炉内構造物に用いられる黒鉛材料は、運転中の中性子照射により熱伝導率が大きく低下するが、減圧事故等の事故時に照射温度以上の高温に加熱されるとアニーリング効果によって熱伝導率が回復することが期待できる。このアニーリング効果は、HTTR の燃料最高温度評価では解析の保守性の観点から考慮していないが、定量的な考慮ができれば、事故時の炉心温度挙動が合理的に高精度に評価できる。本研究は、高温ガス炉の事故時温度評価の高度化のため、中性子照射済試料を用いた試験結果からアニーリング効果を定量的に評価し、高温ガス炉に用いられる熱伝導率の設計式を提案するものである。

---

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15年度及び平成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。

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

Investigation of Design Curve of Annealing Effect on Thermal Conductivity  
for Graphite Components of HTGR  
(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 15, 2008)

Neutron irradiation remarkably reduces the thermal conductivity of graphite components in HTGR. The reduced thermal conductivity is expected to be recovered by annealing of irradiation-induced defects, when the graphite components are heated above the irradiation temperature. The annealing effect is not considered in the maximum fuel temperature analysis of the HTTR design from a viewpoint of conservative evaluation for the maximum fuel temperature. Therefore, it is expected that the temperature evaluation at accident conditions could be carried out more accurately with a reasonable stand point by considering the annealing effect. In order to advance the evaluation method for temperature analysis of accident in the HTGR, the annealing effect on thermal conductivity of graphite was evaluated quantitatively and the design curve on the thermal conductivity for graphite components of HTGR was proposed in this study.

---

**Keywords:** HTGR, Graphite, Thermal Conductivity, Annealing Effect

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.	黒鉛構造物 .....	3
	2.1 黒鉛の熱伝導率への照射の影響 .....	3
	2.2 HTTR の炉心構成要素及び炉内構造物の概要 .....	4
3.	アニーリング試験 .....	7
	3.1 試験方法 .....	7
	3.2 試験結果 .....	8
4.	設計式の検討 .....	13
	4.1 アニーリング効果の定量評価 .....	13
	4.2 黒鉛熱伝導率の設計式検討 .....	14
5.	まとめ .....	29
	謝辞 .....	29
	参考文献 .....	29

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	Graphite Structure .....	3
	2.1 Irradiation Effect on thermal Conductivity of Graphite .....	3
	2.2 Outline of Core Components and Reactor Internals of the HTTR .....	4
3.	Annealing Experiment .....	7
	3.1 Method .....	7
	3.2 Result .....	8
4.	Investigation of Design Curve .....	13
	4.1 Quantitative investigation of Annealing Effect .....	13
	4.2 Investigation of Design Curve of Thermal Conductivity of Graphite .....	14
5.	Conclusion .....	29
	Acknowledgement .....	29
	References .....	29

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、国際的に精力的な研究開発が展開されている。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) を中心に、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 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>。

高温ガス炉の燃料ブロック等の黒鉛材料は、Fig.1.1 に示すように中性子照射による欠陥の生成で熱伝導率が低下するが<sup>(4)</sup>、事故時に照射されている温度以上に高温となると、アニーリング効果により劣化が回復し、炉心温度の上昇を抑制する効果が期待される。一方、HTTR の設計においては、燃料最高温度を保守的に評価する観点から黒鉛材料の熱伝導率に及ぼすアニーリング効果を考慮していない<sup>(5)(6)</sup>。また、今まで黒鉛の熱伝導率に関するアニーリング効果については一部試験データがあるが体系的に研究した例はほとんどない。

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、このアニーリング効果を考慮し、炉内構造物の温度をより合理的に精度良く評価する目的で、高温ガス炉の事故時温度評価の高度化を進めてきた。これまで、黒鉛の熱伝導率に関するアニーリング効果が事故時の燃料温度に及ぼす影響について、原子力機構が設計検討した高温ガス炉ガスター・ビン発電システム(GTHTR300)<sup>(7)</sup>の減圧事故を例に解析的な検討を行ない、燃料最高温度が約 70°C 低くなることを示した<sup>(8)</sup>。

本報告は、照射済試料を用いて黒鉛の熱伝導率に関するアニーリング効果の試験結果からアニーリング効果を定量的に評価し、高温ガス炉に用いられる黒鉛熱伝導率の設計式を示したものである。

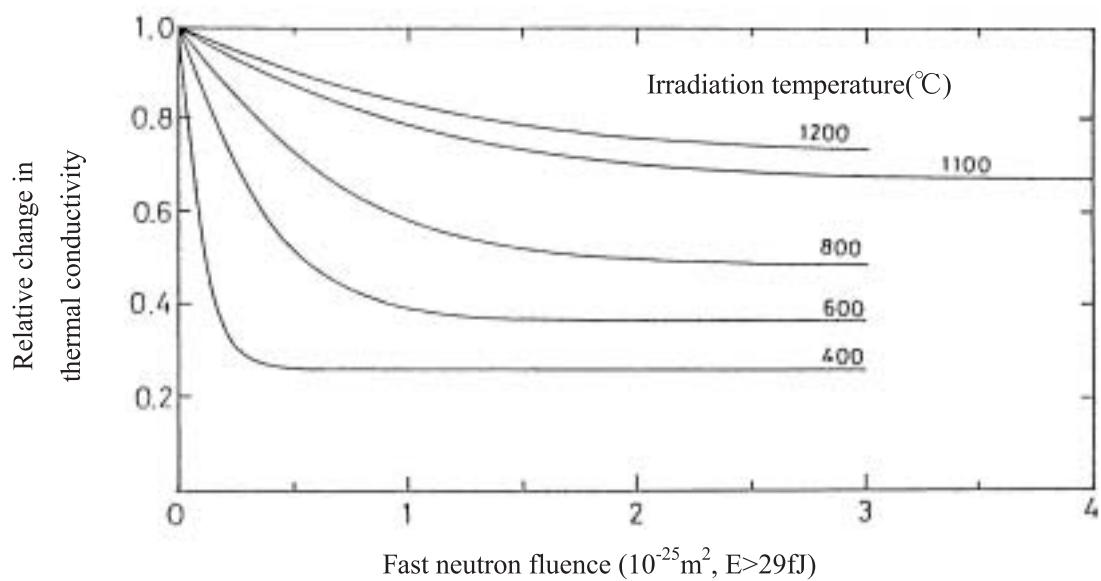


Fig.1.1 Neutron irradiation effect on thermal conductivity of IG-110<sup>(4)</sup>

## 2. 黒鉛構造物

### 2.1 黒鉛の熱伝導率への照射の影響

固体中の熱伝導を担うもの、キャリアーには電子、フォノン(格子振動)、フォトン(放射)などがあり、これらの各々のキャリアーの寄与が重なって全体の熱伝導率が決定される。伝導電子(自由電子)の数が多い金属では電子の寄与が多く、金属以外の絶縁体ではフォノンの寄与が大きい。格子振動は熱によって励起され、その振動が次々と伝播することによって熱が伝えられる。その際、フォノンと呼ばれる単位粒子が、気体中の分子運動のようにランダムな衝突過程を伴った拡散により格子中を移動することにより熱を運ぶと考えられる。

黒鉛の熱伝導率  $k$  は次式のように表される<sup>(9)</sup>。

$$k = \frac{1}{3} C_p \sigma v \quad (2-1)$$

$C_p$  : 格子比熱

$\lambda$  : 散乱格子振動の平均自由行程

$v$  : 格子振動の有効速度

式(2-1)より、フォノンが散乱を受けなければ熱伝導率は無限に大きくなるが、実際の固体は結晶子が有限なので、低温で  $\lambda$  は結晶子の大きさにほぼ比例する。温度が上昇すると  $\lambda$  は温度の逆数に比例して減少し、ある温度で一定となるため熱伝導率は最大となり、その温度以上では温度の逆数に比例して減少する。また、固体中に含まれる不純物や欠陥等は熱伝導率に影響を及ぼす。さらに、黒鉛熱伝導率は、結晶粒の大きさ、結晶度(黒鉛化度)及び優先方位(平行方向 with-grain と垂直方向 across-grain)等に依存することが知られている<sup>(10)</sup>。

黒鉛の熱伝導率は、Fig.1.1 に示すように照射温度が低い時ほど大きく低下するが、照射温度が高くなるにつれて照射による低下量が減少する。黒鉛材料が照射されると、材料中の原子の正規の格子位置からのはじき出しが起こり、その結果原子空孔や格子間原子などの格子欠陥が生成される。これらの照射欠陥はフォノンを散乱するため、特に低温における熱伝導率を低下させる。また、照射欠陥の一部は、高温に保持することにより再結合等のプロセスにより消滅する。これが黒鉛の熱伝導率のアニーリング効果と考えられる。従って、低温照射では熱伝導率の変化量が大きく、高温照射では小さくなる<sup>(11)</sup>。また、照射による黒鉛の熱伝導率変化は結晶方向に差異はなく、優先方位にも依存しないことが知られている<sup>(12)</sup>。

## 2.2 HTTR の炉心構成要素及び炉内構造物の概要

HTTR の原子炉本体は Fig.2.1 に示すとおり、炉心構成要素、炉内構造物等から構成される。

炉心構成要素は、6 角柱状の黒鉛ブロックである燃料体、制御棒案内ブロック及び可動反射体ブロックから構成され、炉心はこれらの炉心構成要素を円柱状に積み上げたものである。ブロックを積み上げた軸方向の 1 列をカラムと称し、炉心は、30 カラムの燃料体と 7 カラムの燃料領域制御棒案内ブロックから構成され、12 カラムの可動反射体ブロック、9 カラムの反射体領域制御棒案内ブロック及び 3 カラムの照射試験カラムに囲まれている。Fig.2.2 に HTTR 炉心の水平方向断面図を示す。燃料体は、燃料棒及び黒鉛ブロックから構成され、燃料棒と燃料棒装荷孔との間の冷却材流路を下向きに流れる 1 次冷却材によって除熱される。黒鉛ブロックは減速材としての機能も有し、原子炉級微粒等方性黒鉛(IG-110)が使用される。

HTTR の炉内構造物は、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ている。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ている。これらの炉心支持黒鉛構造物は、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。

これらの炉心構成要素及び炉内構造物の熱伝導率は、原子炉の運転期間中の中性子照射により低下するが、照射量と照射温度との関係から特に燃料体及び可動反射体ブロックの熱伝導率の低下が最も大きくなる。冷却材が喪失するような事故時には、冷却材の強制循環ができず、炉心の崩壊熱は炉心の燃料体及び可動反射体ブロックの熱伝導により径方向に向かって圧力容器に伝わり、最終的には圧力容器外側に配置された炉容器冷却設備(VCS)によって除熱されることになるが、この時アニーリング効果により燃料体ブロック及び可動反射体ブロックの熱伝導率が回復すれば、炉心外側への熱の移動が容易になり、事故時の燃料温度上昇を抑制することが期待できる。従って、燃料体及び可動反射体ブロックでの照射条件における黒鉛熱伝導率の回復挙動を的確に評価することが重要である。

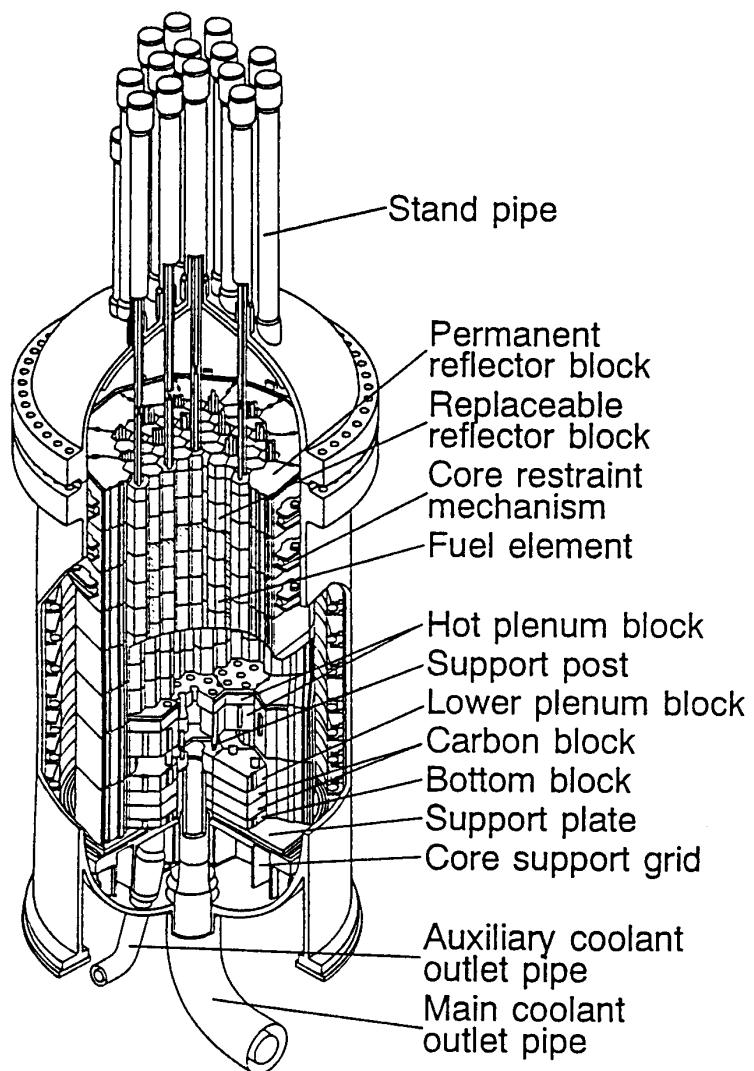
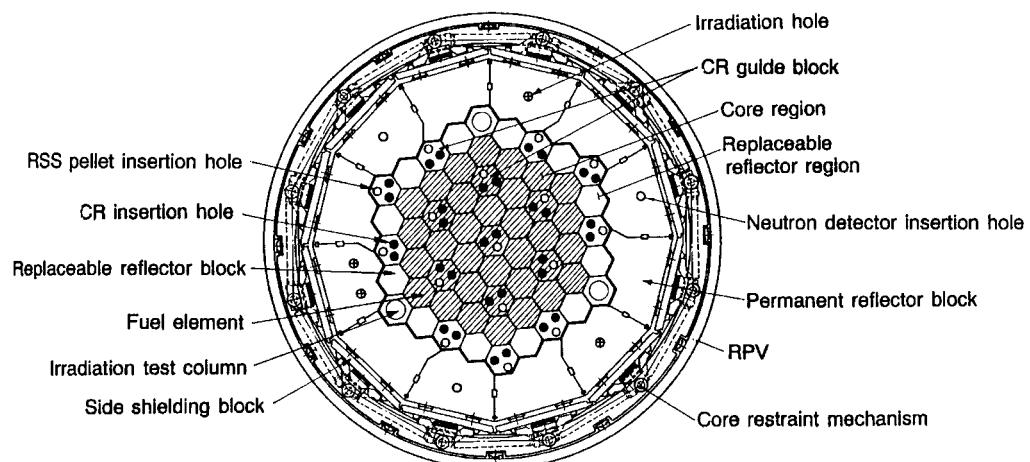


Fig.2.1 Core components, reactor internals and reactor pressure vessel of the HTTR



CR:Control Rod, RPV:Reactor Pressure Vessel, RSS:Reserved Shutdown System

Fig.2.2 Horizontal arrangement of the core

### 3. アニーリング試験

黒鉛の熱伝導率に関するアニーリング効果については、前述のとおり有用なデータベースはほとんど皆無である。そこで、HTTR 炉心黒鉛構造物に用いられている IG-110 黒鉛について、アニーリングデータを取得した。

#### 3.1 試験方法

黒鉛の熱伝導率に関するアニーリング効果の測定では、微粒等方性 IG-110 黒鉛を用いた。試験片は、原子力機構の材料試験炉(JMTR)で照射したもので、寸法は  $\phi 10 \times 4.5$  (mm)である。Table3.1 に試験片の照射条件を示す。照射量は 0.20~1.5dpa 程度、照射温度は 400°C~1200°C の範囲とした。また、照射後の全ての試験片について寸法測定及び重量測定を行い、かさ密度を算出した。熱拡散率は、JMTR ホットラボにおいてレーザーフラッシュ法を用いて測定した。Fig.3.1 に測定手順のフローチャートを示す。測定の手順は以下の通りである。

- (a) 照射温度  $T_i$  で照射した試料を準備する。
- (b) 室温  $T_r$  で熱拡散率の測定を行う。
- (c) アニーリング温度  $T_{n,a}$  まで昇温する。 $(n=1,2,3,\dots, T_{1,a}=T_i$  となるように設定する)。
- (d)  $T_{n,a}$  における熱拡散率を数回測定する。
- (e)  $T_{n,a}$  で熱拡散率が変化しないことを確認した後、 $T_r$  まで降温する。
- (f)  $T_r$  で熱拡散率を測定し、 $T_{n,a}$  におけるアニーリングによる熱伝導率の回復の有無を確認する。
- (g) 次のアニーリング温度( $T_{n+1,a}$ )まで昇温する。 $T_{n+1,a} = T_{n,a} + 100^\circ\text{C}$ とする。
- (h)  $T_{n+1,a}$  における熱拡散率を数回測定する。
- (i)  $T_{n+1,a}$  で熱拡散率が変化しないことを確認した後、 $T_r$  まで降温する。
- (j)  $T_r$  で熱拡散率を測定し、 $T_{n+1,a}$  におけるアニーリングによる熱伝導率の回復の有無を確認する。
- (k)  $T_{n,a}=1500^\circ\text{C}$ での熱拡散率測定が終了したら、 $T_r$  まで降温後熱拡散率を測定して試験を終了し、次の試料の測定を行う。

また、熱伝導率は熱拡散率、かさ密度及び定圧比熱を用いて以下の式から求めた。

$$K = \rho C \zeta \quad (3-1)$$

- |          |                           |
|----------|---------------------------|
| $K$      | :熱伝導率(W/m · K)            |
| $\rho$   | :かさ密度(Mg/m <sup>3</sup> ) |
| $C$      | :定圧比熱(J/Mg · K)           |
| $\alpha$ | :熱拡散率(m <sup>2</sup> /s)  |

定圧比熱は HTTR の設計時のデータを用い、照射による変化はないものと仮定した<sup>(13)</sup>。

### 3.2 試験結果

Table3.1 に示した条件で照射した IG-110 黒鉛の熱伝導率( $K$ )の測定結果を Fig.3.2 に示す。照射した黒鉛の熱伝導率は、未照射、室温における熱伝導率( $K_0$ )で規格化してある。照射後の  $K/K_0$  の値は 0.2 から 0.5 程度であり、照射温度が 550°C の試料の値が最も大きく、照射温度 900°C の試料の値が最も小さくなつた。照射した黒鉛の熱伝導率の変化は照射量と照射温度に依存し、照射量が大きいと熱伝導率は大きく低下し、照射温度が高くなると熱伝導率は低下の割合が小さくなる。照射温度 1150°C の試料については照射量が大きいが、照射温度が高いので照射中に熱拡散による欠陥の回復が起こつていると考えられ、熱伝導率の減少はそれほど大きくなかったものと考えられる。

各試料におけるアニール後の室温熱伝導率( $K_a$ )を Fig.3.3 に示す。アニール後の室温熱伝導率は、未照射、室温における熱伝導率( $K_0$ )で規格化してある。この試験において、熱伝導率はアニーリング温度が照射温度以上にならないと回復しないと仮定し、試料を照射温度以上に加熱後降温し、室温熱伝導率を測定した。この図から 1500°Cまで加熱した時、照射温度 400、550°C の試料については、未照射、室温熱伝導率の約 80%まで回復し、また照射温度 900、1150°C の試料については約 40%の回復率であった。熱伝導率の回復は照射量と照射温度に依存するため、低温で照射量が小さい前者では熱伝導率の回復が大きく、照射量が大きい後者では回復が小さくなつたと考えられる。

Table3.1 Irradiation conditions of test specimen

Irradiation temperature	dpa	Number
Low temperature		
400° C	0.203	1
550° C	0.261	1
Middle temperature		
700° C	0.990	1
800° C	1.073	1
900° C	1.465	1
High temperature		
1050° C	0.381	1
1150° C	1.318	1

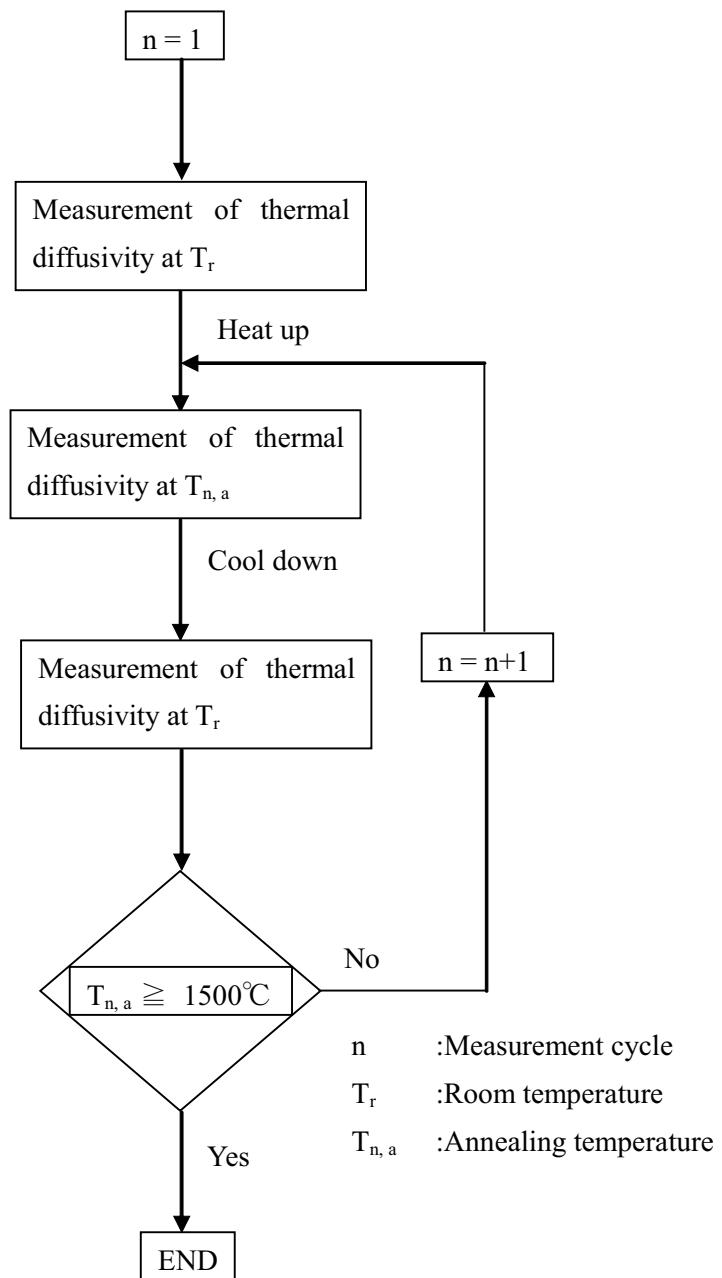


Fig.3.1 Flowchart of measurement procedure for annealing effect of thermal conductivity

This is a blank page.

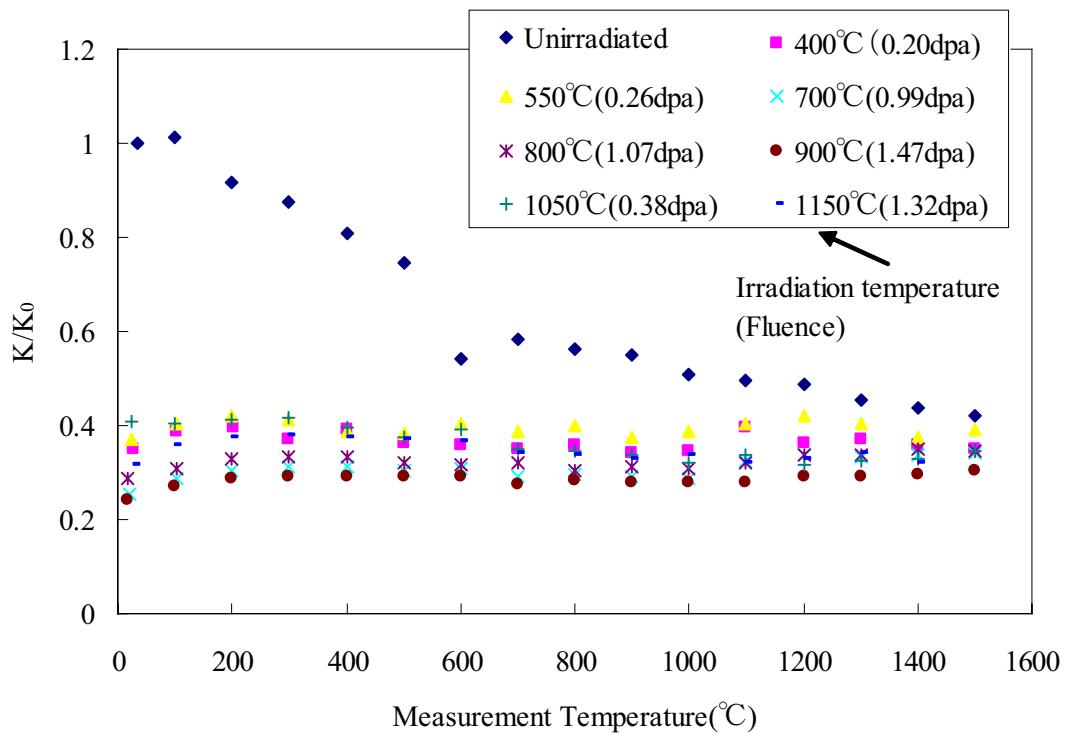


Fig.3.2 Thermal conductivity of irradiated graphite dependent on measurement temperature

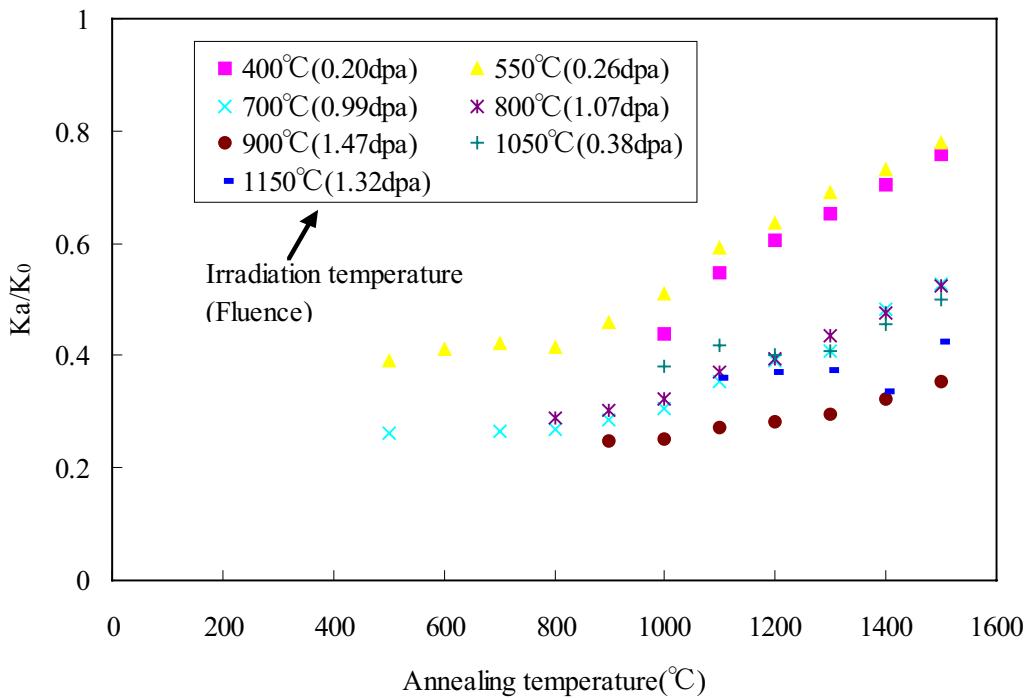


Fig.3.3 Thermal conductivity of irradiated graphite at room temperature in relation to annealing temperature

This is a blank page.

## 4. 設計式の検討

### 4.1 アニーリング効果の定量評価

黒鉛熱伝導率のアニーリング効果を定量的に評価するため、照射温度  $T_i(\text{°C})$ 、照射量 A (dpa) で照射された黒鉛の室温熱伝導率を  $K$ 、アニーリング時間  $K_a(t)$ 、アニーリング温度  $T_a(\text{°C})$  でアニールした後の室温熱伝導率を  $K_a$  とし、アニーリングによる熱伝導率の回復を表す回復因子  $R_0$  を以下のように定義する。

$$R_0 \mid \frac{K_a}{K} \quad (4-1)$$

$R_0$  : 室温におけるアニーリング後熱伝導率のアニーリング前熱伝導率に対する回復因子

$K$  :  $T_i, \Phi$  でのアニーリング前の室温における熱伝導率

$K_a$  : アニーリング温度  $T_a$  でアニーリング後の室温における熱伝導率

前述のようにアニーリング効果は照射温度及び照射量に依存するので、それを定量化するパラメータとして  $Q$  を導入する。

$$Q \mid \frac{A}{T_{ik}} (\text{dpa/K}) \quad (4-2)$$

$T_{ik}$  : 絶対温度で表した照射温度(K)

Fig.4.1～3 に試験結果から求めた回復因子  $R_0$  の照射温度、照射量、 $Q$  依存性を示す。ここで、照射温度 1050°C、照射量 0.38dpa の場合  $R_0$  は、Fig.4.3 中で囲んだようにほぼ 1 で変化がなかった。これは Fig.4.4 に示した黒鉛の熱伝導率変化と照射温度の関係から理解できるように<sup>(13)</sup>、照射温度が高く、かつ照射量が小さい時には熱伝導率の変化は未照射における熱伝導率変化と同程度になるため、 $R_0$  の変化がなかったと考えられる。従って、今回の検討においては、照射温度 1050°C、照射量 0.38dpa の条件を除外して進めた。

Fig.4.1～3 より  $R_0$  は照射温度、照射量及び  $Q$  が大きくなるにつれて小さくなるという結果になった。これは、照射温度が高い場合、熱伝導率の低下が小さいため  $R_0$  の値も小さくなつたためと考えられる。また照射量が低い場合、はじき出しによって作られた黒鉛中の欠陥はまだ比較的小さな点欠陥の集合体からなり、格子間欠陥や空孔が容易に消滅することによって比較的低温でのアニーリングによっても回復しやすいことを示し、照射量が大きくなると欠陥の集合体も大きくなり、回復しにくいことを示している。これらのアニーリングによる熱伝導率の回復が拡散による回復であることを確認するため、次式を適用して評価する。

$$R_0 \mid r_0 \exp\left(4 \frac{q}{R_{gc} T_a}\right) \quad (4-3)$$

$r_0$  : 頻度因子

$q$  : 拡散の活性化エネルギー(J/mol)

$R_{gc}$  : 気体定数(J/K/mol)

$T_a$  : アニーリング温度(K)

Fig.4.5 は実測値を  $\ln(R_0)$  と  $1/T_a$  で整理したものである。 $\ln(R_0)$  と  $1/T_a$  において線形の関係が認められることから、熱伝導率の回復が拡散の式で評価できることがわかる。Table4.1 に拡散の活性化エネルギー  $q$  と頻度因子  $r_0$  を示す。

次にアニーリング効果を  $R_0$  と  $Q$  を用いて定量化する。 $R_0$  と  $Q$  の関係を Fig.4.6 に示す。 $R_0$  と  $Q$  において線形の関係が認められることから、 $R_0$  を以下の式を用いて表す。

$$R_0 = A + BQ \quad (4-4)$$

Table4.2 に各アニーリング温度における A と B の値を示す。

#### 4.2 黒鉛熱伝導率の設計式検討

定量化した黒鉛の熱伝導率に関するアニーリング効果を用いて、高温ガス炉の設計式の検討を行う。熱伝導率のある測定温度における回復因子を  $R_m$  とすると、 $R_m$  を(4-1)式の関係を考慮して以下のように定義する。

$$R_m \mid \frac{K_{ma}}{K_m} \quad (4-5)$$

- $R_m$  :ある測定温度  $T_m$  における回復因子
- $K_m$  : $T_i, \Phi$  での測定温度  $T_m$  に対する熱伝導率
- $K_{ma}$  : $T_i, \Phi, T_a$  での測定温度  $T_m$  に対する熱伝導率

$R_m$  の値は、実験データがないため文献(6)を用いて求める。Table4.3 にアニーリング温度 1200°C の場合の各測定温度における  $R_m$  の値を示す。 $T_m=20^\circ\text{C}$  の時  $R_m=R_0$  である。Table4.3 から、 $R_m/R_0$  の関係はアニーリング温度に依存しないと仮定すると以下のように表される。

$$\frac{R_m}{R_0} \mid 42.2 \Delta 10^{47} T_m^2 21 \quad T_m \leq 1200^\circ\text{C} \quad (4-6)$$

$$\frac{R_m}{R_0} \mid 0.72 \quad T_m > 1200^\circ\text{C} \quad (4-7)$$

以上より、 $T_i, \phi, T_a$  での測定温度  $T_m$  に対する熱伝導率は以下のように表される。

$$K_{ma} \mid (42.2 \Delta 10^{47} T_m^2 21)(A 2 B \frac{\lambda}{T_{iK}}) K_m \quad T_m \leq 1200^\circ\text{C} \quad (4-8)$$

$$K_{ma} \mid 0.72(A 2 B \frac{\lambda}{T_{iK}}) K_m \quad T_m > 1200^\circ\text{C} \quad (4-9)$$

(4-8)及び(4-9)式を用いて熱伝導率を求め、未照射材の熱伝導率の設計値で規格化した結果を

Table4.4 に示す。Table4.4 で表中太い黒線で囲った部分がアニーリング効果により熱伝導率が回復したことを示している。アニーリング温度 800°Cにおいて低い照射量で若干の回復が現れ始め、アニーリング温度 1500°Cでは広範囲の温度、照射量領域でアニーリングによる回復が確認された。Fig.4.7 及び Fig.4.8 に例として①照射量 1dpa、照射温度 900°C、及び②照射量 0.1dpa、照射温度 500°Cにおいて、1000°C及び 1500°Cでアニーリングした場合の設計曲線を示す。この条件は、HTTR における燃料体及び可動反射体ブロックの温度に相当するものである。アニーリング温度 1000°Cの場合には、②の条件で熱伝導率は未照射材と同等レベルまでの回復が見られたが、①の条件では全く回復が見られなかった。また、アニーリング温度 1500°Cの場合には、②の条件では未照射材と同じレベルまで完全に回復し、①の条件でも未照射材と同等レベルまで回復した。

以上の結果より、アニーリング効果を考慮した熱伝導率の導出が可能になり、炉内構造物の温度をより正確に評価することができる。

Table4.1 Activation energy  $q$  and frequency factor  $r_0$ 

T <sub>i</sub> (°C)	r <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> /s)	q (kJ/mol)
400	2.2	14.5
550	6.5	24.6
700	12.5	35.0
800	50.0	51.6
900	35.7	55.9
1150	2.4	27.2

Table4.2 A and B in equation (4-4)

T <sub>a</sub> (°C)	A	B
800	1.16	-129.9
900	1.31	-221.9
1000	1.40	-266.4
1100	1.72	-470.5
1200	1.87	-554.5
1300	2.05	-650.7
1400	2.17	-647.3
1500	2.31	-619

Table4.3 Dependence of R on measurement temperature at 1200°C of annealing temperature

Measurement temperature(°C)	R <sub>m</sub>	R <sub>m</sub> /R <sub>0</sub> (Experiment)	R <sub>m</sub> /R <sub>0</sub> (Calculation)
20	1.53(=R <sub>0</sub> )	1.00	1.00
400	1.47	0.96	0.96
500	1.43	0.93	0.95
600	1.40	0.92	0.92
700	1.37	0.90	0.89
800	1.27	0.83	0.86
900	1.27	0.83	0.82
1000	1.20	0.78	0.78
1100	1.17	0.76	0.73
1200	1.10	0.72	—
1400	1.10	0.72	—

Table4.4 Proposed thermal conductivity considering annealing effect(1/8)

Table 4.4 Proposed thermal conductivity considering annealing effect (2/8)

Table4.4 Proposed thermal conductivity considering annealing effect (3/8)

dpa	Annealing temperature 1000°C											
	Irradiation temperature (Measurement temperature)											
	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
0.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.1	1.32	1.29	1.18	1.11	1.08	1.06	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.2	1.28	1.26	1.24	1.20	1.16	1.11	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.3	1.24	1.23	1.21	1.18	1.14	1.10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.4	1.20	1.20	1.18	1.15	1.12	1.08	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.5	1.16	1.16	1.15	1.13	1.10	1.06	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.6	1.12	1.13	1.12	1.11	1.08	1.04	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.7	1.09	1.10	1.10	1.08	1.06	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.8	1.05	1.07	1.07	1.06	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.9	1.01	1.03	1.04	1.03	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.0	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Table4.4 Proposed thermal conductivity considering annealing effect (4/8)

dpa	Annealing temperature 1100°C											
	Irradiation temperature (Measurement temperature)											
	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
0.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.1	1.59	1.34	1.18	1.11	1.08	1.06	1.04	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.2	1.53	1.51	1.39	1.24	1.16	1.11	1.08	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.3	1.46	1.45	1.44	1.38	1.25	1.17	1.13	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.4	1.39	1.40	1.39	1.36	1.33	1.23	1.17	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.5	1.32	1.34	1.34	1.32	1.29	1.25	1.20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.6	1.26	1.28	1.29	1.28	1.25	1.22	1.17	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.7	1.19	1.22	1.24	1.23	1.22	1.18	1.14	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.8	1.12	1.17	1.19	1.19	1.18	1.15	1.11	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.9	1.05	1.11	1.14	1.15	1.14	1.12	1.08	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.0	1.00	1.05	1.09	1.10	1.10	1.08	1.05	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.1	1.00	1.00	1.04	1.06	1.06	1.05	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.2	1.00	1.00	1.00	1.02	1.03	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Table4.4 Proposed thermal conductivity considering annealing effect (5/8)

dpa	Annealing temperature 1200°C										
	Irradiation temperature (Measurement temperature)										
400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
0.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.1	1.72	1.34	1.18	1.11	1.08	1.06	1.04	1.03	1.00	1.00	1.00
0.2	1.64	1.63	1.39	1.24	1.16	1.11	1.08	1.06	1.00	1.00	1.00
0.3	1.56	1.56	1.54	1.38	1.25	1.17	1.13	1.09	1.00	1.00	1.00
0.4	1.48	1.49	1.48	1.46	1.34	1.23	1.17	1.13	1.00	1.00	1.00
0.5	1.40	1.42	1.43	1.41	1.38	1.30	1.21	1.16	1.00	1.00	1.00
0.6	1.32	1.36	1.37	1.36	1.34	1.30	1.25	1.19	1.00	1.00	1.00
0.7	1.24	1.29	1.31	1.31	1.29	1.26	1.22	1.16	1.00	1.00	1.00
0.8	1.16	1.22	1.25	1.26	1.25	1.22	1.18	1.13	1.00	1.00	1.00
0.9	1.09	1.15	1.19	1.21	1.20	1.18	1.15	1.10	1.00	1.00	1.00
1.0	1.01	1.09	1.13	1.16	1.16	1.15	1.12	1.07	1.00	1.00	1.00
1.1	1.00	1.02	1.08	1.11	1.12	1.11	1.08	1.04	1.00	1.00	1.00
1.2	1.00	1.00	1.02	1.05	1.07	1.07	1.05	1.01	1.00	1.00	1.00
1.3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.03	1.03	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00
1.4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Table4.4 Proposed thermal conductivity considering annealing effect (6/8)

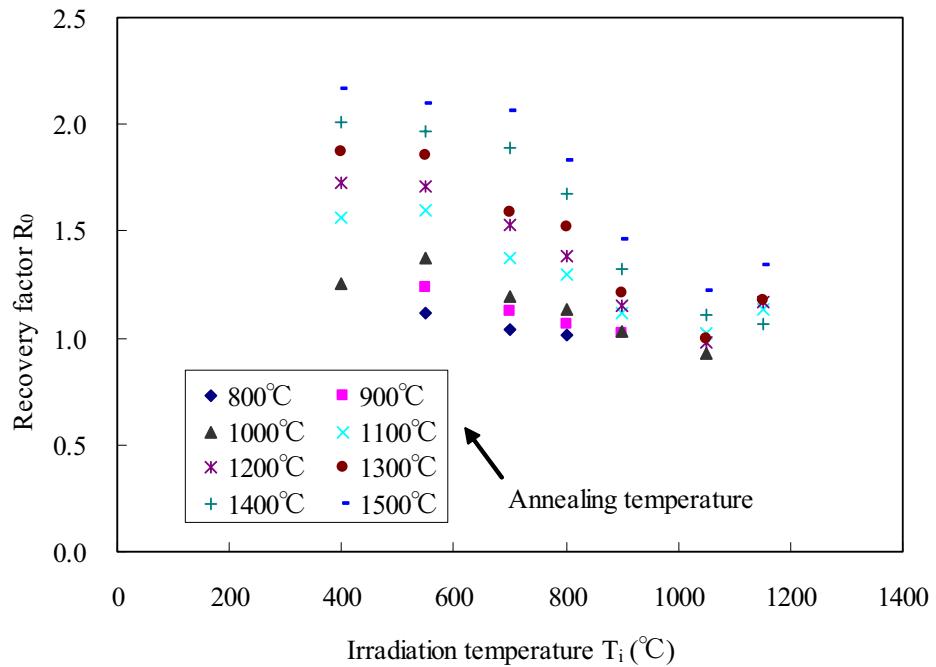
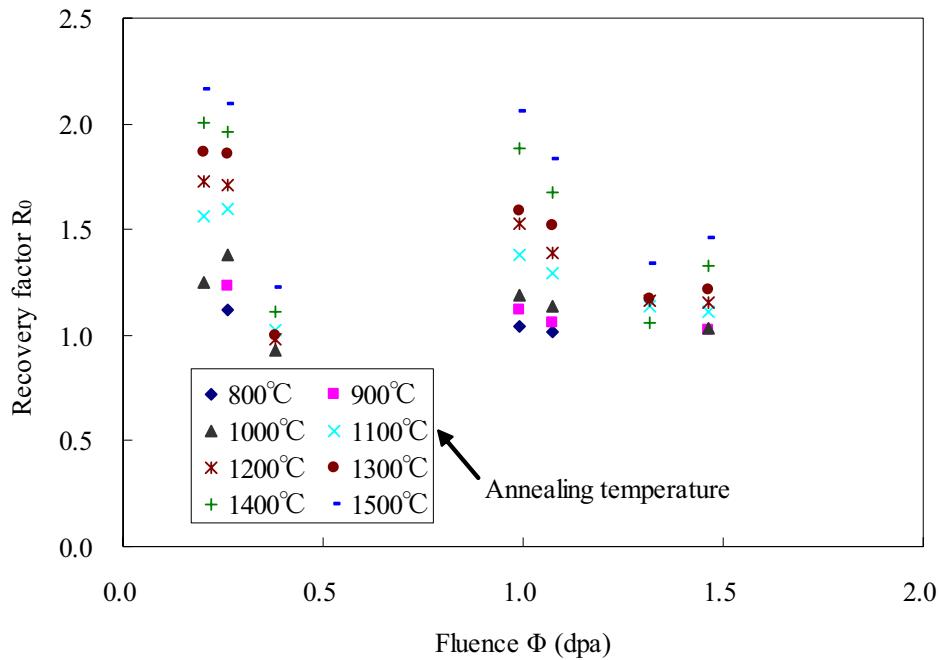
dpa	Annealing temperature 1300°C										
	Irradiation temperature (Measurement temperature)										
400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
0.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.1	1.89	1.34	1.18	1.11	1.08	1.06	1.04	1.03	1.02	1.00	1.00
0.2	1.80	1.76	1.39	1.24	1.16	1.11	1.08	1.06	1.05	1.00	1.00
0.3	1.70	1.70	1.62	1.38	1.25	1.17	1.13	1.09	1.07	1.00	1.00
0.4	1.61	1.62	1.62	1.52	1.34	1.23	1.17	1.13	1.09	1.00	1.00
0.5	1.52	1.54	1.55	1.53	1.43	1.30	1.21	1.16	1.12	1.00	1.00
0.6	1.42	1.46	1.48	1.48	1.45	1.35	1.25	1.19	1.14	1.00	1.00
0.7	1.33	1.38	1.41	1.42	1.40	1.37	1.29	1.21	1.16	1.00	1.00
0.8	1.24	1.31	1.34	1.36	1.35	1.32	1.28	1.23	1.16	1.00	1.00
0.9	1.14	1.23	1.27	1.30	1.30	1.28	1.24	1.19	1.13	1.00	1.00
1.0	1.05	1.15	1.21	1.24	1.24	1.23	1.20	1.16	1.10	1.00	1.00
1.1	1.00	1.07	1.14	1.18	1.19	1.19	1.16	1.13	1.07	1.00	1.00
1.2	1.00	1.00	1.07	1.12	1.14	1.14	1.12	1.09	1.04	1.00	1.00
1.3	1.00	1.00	1.00	1.06	1.09	1.10	1.08	1.06	1.01	1.00	1.00
1.4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.04	1.05	1.04	1.02	1.00	1.00	1.00
1.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Table4.4 Proposed thermal conductivity considering annealing effect (7/8)

dpa	Annealing temperature 1400°C										
	Irradiation temperature (Measurement temperature)										
400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
0.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.1	2.00	1.34	1.18	1.11	1.08	1.06	1.04	1.03	1.02	1.02	1.00
0.2	1.90	1.76	1.39	1.24	1.16	1.11	1.08	1.06	1.05	1.04	1.00
0.3	1.81	1.81	1.62	1.38	1.25	1.17	1.13	1.09	1.07	1.05	1.00
0.4	1.72	1.73	1.72	1.52	1.34	1.23	1.17	1.13	1.09	1.07	1.00
0.5	1.63	1.65	1.65	1.64	1.43	1.30	1.21	1.16	1.12	1.09	1.00
0.6	1.53	1.57	1.59	1.58	1.51	1.35	1.25	1.19	1.14	1.10	1.00
0.7	1.44	1.49	1.52	1.52	1.50	1.41	1.29	1.21	1.16	1.12	1.00
0.8	1.35	1.41	1.45	1.46	1.45	1.42	1.33	1.24	1.18	1.13	1.00
0.9	1.26	1.34	1.38	1.40	1.40	1.37	1.33	1.27	1.20	1.14	1.00
1.0	1.16	1.26	1.31	1.34	1.34	1.33	1.29	1.24	1.18	1.16	1.00
1.1	1.07	1.18	1.24	1.28	1.29	1.28	1.25	1.21	1.15	1.17	1.00
1.2	1.00	1.10	1.18	1.22	1.24	1.24	1.21	1.17	1.12	1.18	1.00
1.3	1.00	1.02	1.11	1.16	1.19	1.19	1.17	1.14	1.09	1.17	1.00
1.4	1.00	1.00	1.04	1.10	1.14	1.15	1.13	1.11	1.06	1.15	1.00
1.5	1.00	1.00	1.00	1.04	1.08	1.10	1.10	1.07	1.03	1.12	1.00
1.6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.03	1.05	1.06	1.04	1.00	1.09	1.00
1.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.00	1.00	1.06	1.00
1.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.03	1.00
1.9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Table4.4 Proposed thermal conductivity considering annealing effect (8/8)

dpa	Annealing temperature 1500°C										
	Irradiation temperature (Measurement temperature)										
400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
0.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.1	2.03	1.34	1.18	1.11	1.08	1.06	1.04	1.03	1.02	1.02	1.01
0.2	2.06	1.76	1.39	1.24	1.16	1.11	1.08	1.06	1.05	1.04	1.03
0.3	1.97	1.96	1.62	1.38	1.25	1.17	1.13	1.09	1.07	1.05	1.04
0.4	1.88	1.88	1.85	1.52	1.34	1.23	1.17	1.13	1.09	1.07	1.05
0.5	1.79	1.81	1.81	1.66	1.43	1.30	1.21	1.16	1.12	1.09	1.06
0.6	1.70	1.73	1.74	1.72	1.51	1.35	1.25	1.19	1.14	1.10	1.07
0.7	1.61	1.66	1.67	1.67	1.60	1.41	1.29	1.21	1.16	1.12	1.08
0.8	1.52	1.58	1.61	1.61	1.59	1.46	1.33	1.24	1.18	1.13	1.09
0.9	1.43	1.51	1.54	1.55	1.54	1.51	1.37	1.27	1.20	1.14	1.10
1.0	1.35	1.43	1.48	1.50	1.49	1.47	1.40	1.29	1.21	1.16	1.11
1.1	1.26	1.36	1.41	1.44	1.44	1.43	1.39	1.31	1.23	1.17	1.12
1.2	1.17	1.28	1.35	1.38	1.39	1.38	1.35	1.30	1.24	1.18	1.13
1.3	1.08	1.20	1.28	1.33	1.34	1.34	1.31	1.27	1.21	1.17	1.14
1.4	1.00	1.13	1.22	1.27	1.30	1.30	1.27	1.24	1.18	1.15	1.14
1.5	1.00	1.05	1.15	1.21	1.25	1.25	1.24	1.20	1.15	1.12	1.14
1.6	1.00	1.00	1.09	1.16	1.20	1.21	1.20	1.17	1.12	1.09	1.11
1.7	1.00	1.00	1.02	1.10	1.15	1.17	1.16	1.14	1.09	1.06	1.09
1.8	1.00	1.00	1.00	1.04	1.10	1.12	1.12	1.10	1.06	1.03	1.06
1.9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.05	1.08	1.09	1.07	1.04	1.00	1.03
2.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.04	1.05	1.04	1.01	1.00	1.00
2.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00
2.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Fig.4.1 Recovery factor  $R_0$  in relation to irradiation temperatureFig.4.2 Recovery factor  $R_0$  in relation to neutron fluence

This is a blank page.

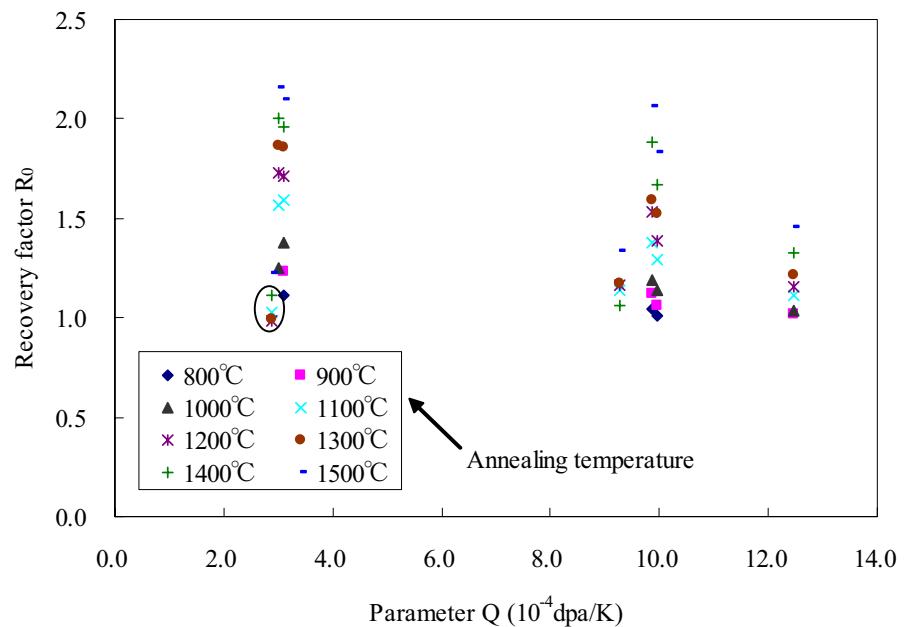
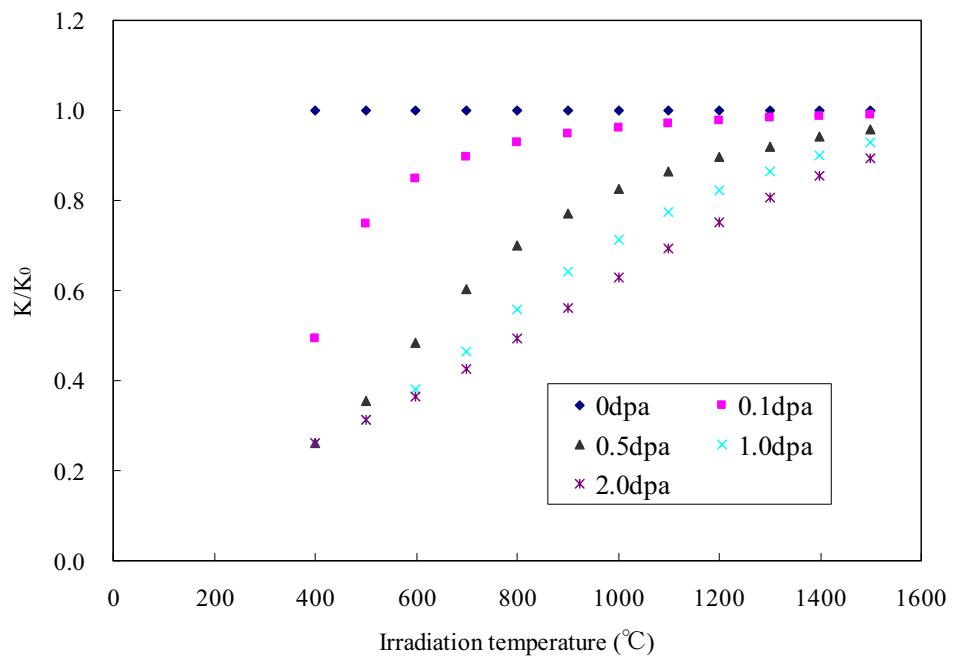
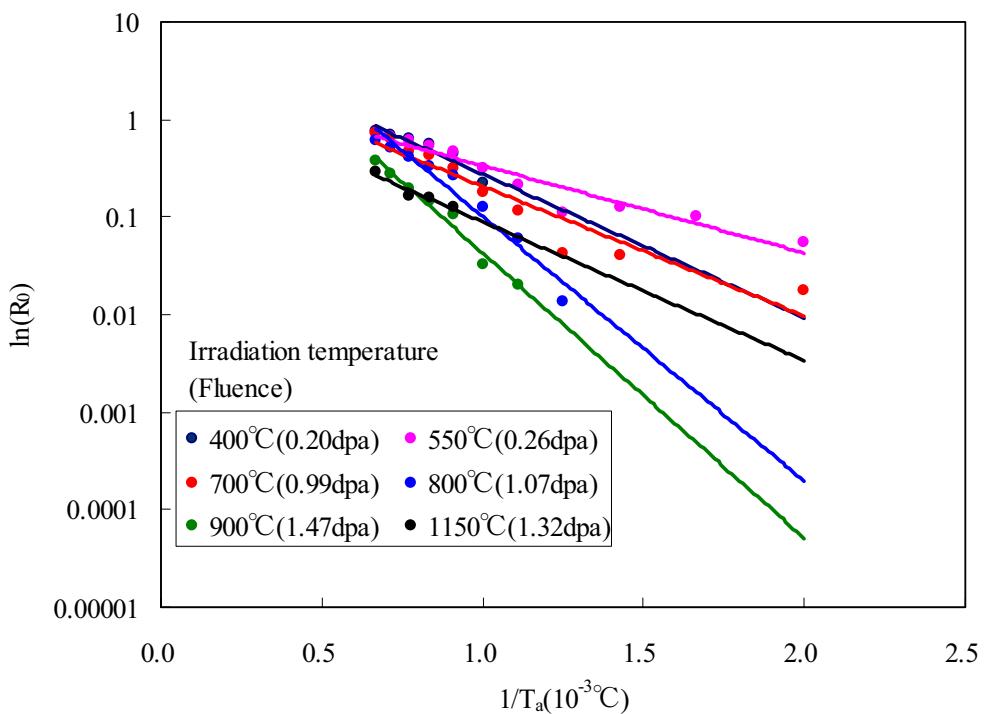
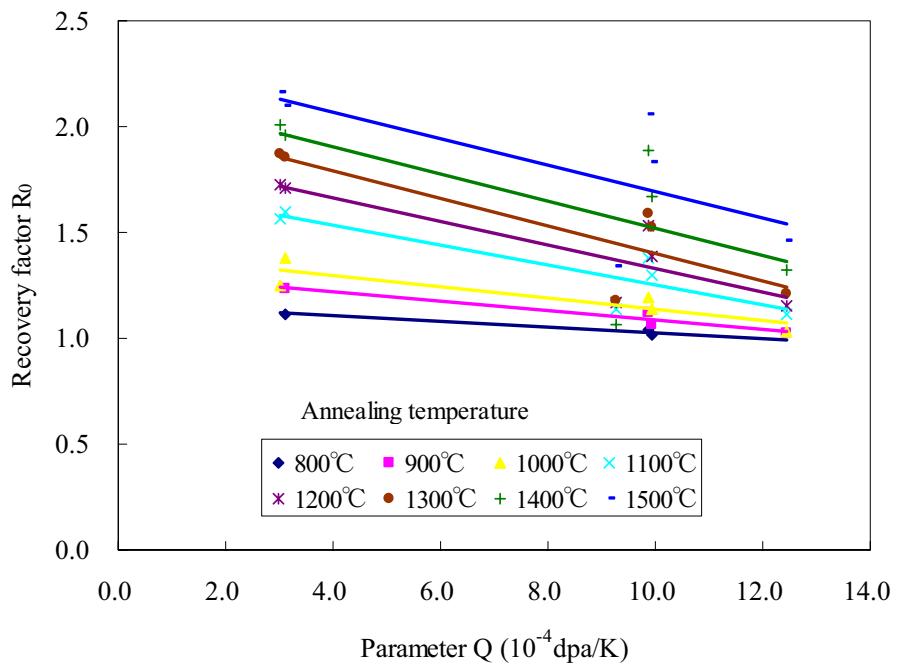
Fig.4.3 Recovery factor  $R_0$  in relation to  $Q$ 

Fig.4.4 Thermal conductivity of irradiated graphite dependent on irradiation temperature

This is a blank page.

Fig.4.5 Arrhenius plot of recovery factor  $R_0$ Fig.4.6 Relationship between  $R$  and  $Q$

This is a blank page.

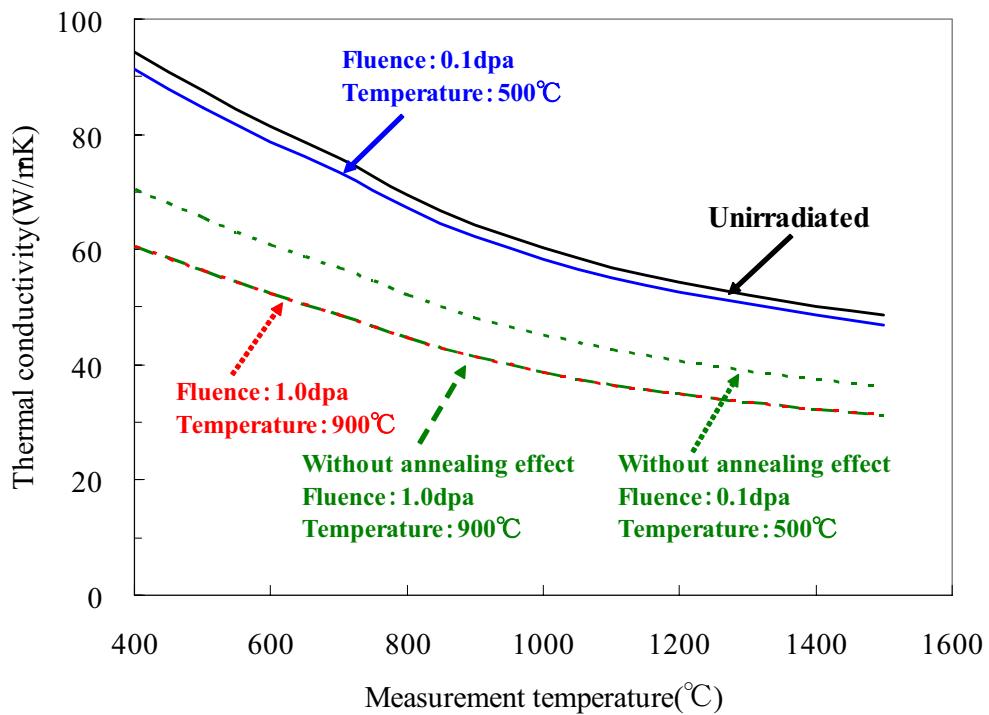


Fig.4.7 Thermal conductivity of graphite considering annealing effect  
at annealing temperature 1000°C.

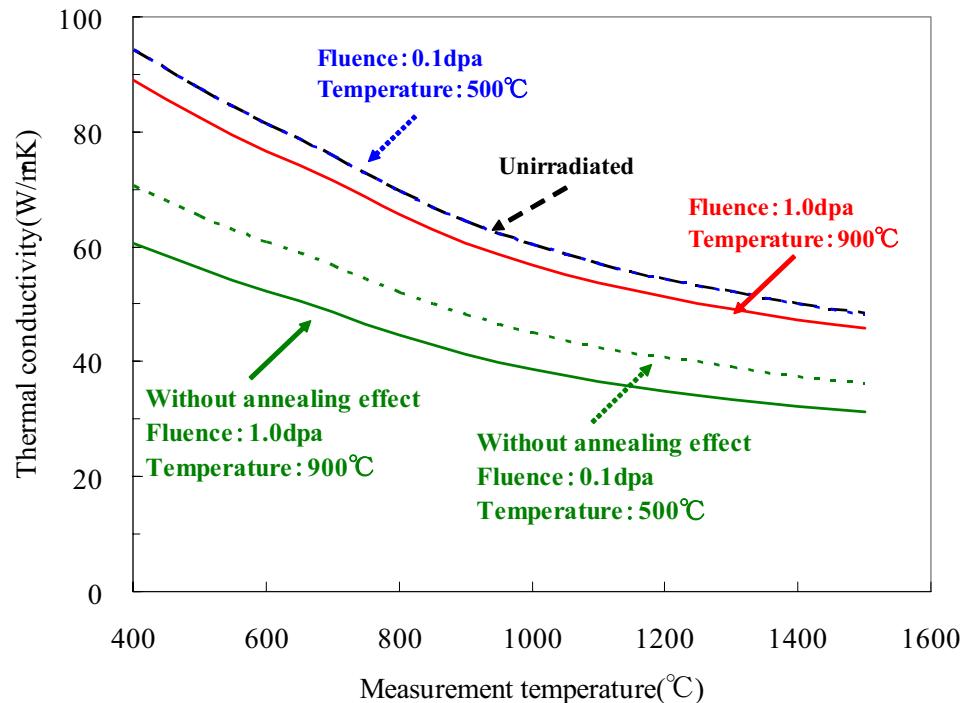


Fig.4.8 Thermal conductivity of graphite considering annealing effect  
at annealing temperature 1500°C.

This is a blank page.

## 5. まとめ

高温ガス炉の事故時温度評価の高度化のため、照射済試料を用いて黒鉛の熱伝導率に関するアニーリング効果の実験データからアニーリング効果を定量的に評価するとともに、高温ガス炉に用いられる黒鉛熱伝導率の設計式の検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) アニーリング効果を回復因子  $R_0$  とパラメータ  $Q$  を用いて評価し、 $R_0$  と  $Q$  の関係は本試験の照射量及び照射温度の範囲ではほぼ直線の形で表すことができた。
- (2)  $R_0$  と  $Q$  の関係式を用いてアニーリング効果の定量化を行い、測定温度  $T_m$  におけるアニーリング後の熱伝導率  $K_{ma}$  は、照射量  $\phi$ 、照射温度  $T_{iK}$  の時、 $A$  及び  $B$  をアニーリング温度  $T_a$  に依存する係数として、測定温度  $T_m$  における照射後熱伝導率  $K_m$  を用いて以下の関係式で表されることを示した。

$$K_{ma} | (42.2 \Delta 10^{47} T_m^2 2 1)(A 2 B \frac{\lambda}{T_{iK}}) K_m \quad T_m \leq 1200^\circ\text{C}$$

$$K_{ma} | 0.72(A 2 B \frac{\lambda}{T_{iK}}) K_m \quad T_m > 1200^\circ\text{C}$$

- (3) アニーリング効果の定量化により、アニーリング効果を考慮した熱伝導率の設計式の導出が可能になり、炉内構造物の温度をより正確に評価することができるることを示した。

## 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及び照射試験炉センター原子炉施設管理部ホットラボ管理課の皆様に感謝いたします。さらに、受託事業を取り纏めて頂いた高温ガス炉特性・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) 石原正博他、「高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針における設計用データの解説」、JAERI-M 91-153(1991).
- (5) T. Maruyama, et. al, "Neutron irradiation effect on the thermal conductivity and dimensional change of graphite materials," Journal of Nuclear materials, 195, pp.44-50(1992).

- (6) S.Ishiyama, et. al, "The effect of high fluence neutron irradiation on the properties of a fine-grained isotropic nuclear graphite," Journal of Nuclear materials, 230, pp.1-7(1996).
- (7) 國富一彥他、原子力学会和文論文誌,1[4],352(2002).
- (8) 角田淳弥、中野正明、辻信昌、柴田大受、他、「黒鉛熱伝導率に関するアニーリング効果の予備検討及びアニーリングデータ測定試験方法の検討(受託研究)」、JAERI-Tech 2004-055(2004).
- (9) R.E. Nightingale, "Nuclear Graphite," Academic Press, New York & London, pp.304-309(1962).
- (10) J. H. W. Simmons, "Radiation damage in graphite", Pergamon Press Ltd., pp.102-105(1965).
- (11) 炭素材料学会、「新・炭素材料入門」、(株)アライズ社(1996).
- (12) B. T. Kelly, "Physics of graphite", Applied Science, London, pp.442-445(1981).
- (13) 私信

# 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)	立方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
(物質量の)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5. SI 接頭語

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

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	$m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー, 仕事, 熱量	ジユール	J	$N \cdot m$
功率, 放射束	ワット	W	$N \cdot m \cdot s^{-1}$
電荷, 電気量	クーロン	C	$J \cdot s$
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	ファラード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	Ω	$V/A$
コンダクタンス	ジemens	S	$A/V$
磁束密度	ウェーバー	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2$
インダクタンス	ヘンリイ	H	$kg \cdot s^2 \cdot A^{-1}$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C	$Wb/A$
光束度	ルクス	lx	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種の)放射能吸収線量, 質量エネルギー一分率, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	ベクレル	Bq	$lm \cdot m^2$
			$cd \cdot sr \cdot m^2 \cdot cd = cd$
			$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
			$s^{-1}$
			$m^2 \cdot s^{-2}$
			$J/kg$
			$m^2 \cdot s^{-2}$
			$J/kg$
			$m^2 \cdot s^{-2}$

(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つ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	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot s^{-1}$
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-3}$
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), 質量エンタルピー	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
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	ワット毎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	ボルト毎メートル	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	フアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	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	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンタルピー	ジュール毎モル毎ケルビン	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	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot kg \cdot s^{-3}$

表6. 國際単位系と併用されるが國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	°	1°=(1/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(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. 國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) × 10 <sup>-19</sup> J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10) × 10 <sup>-27</sup> kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30) × 10 <sup>11</sup> m

表8. 國際単位系に属さないが國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海里毎時=(1852/3600)m/s
アード	ル	1a=1 dam <sup>2</sup> =10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>
ヘクタール	ha	1ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
バル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 <sup>-10</sup> m
バーン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

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 <sup>-7</sup> J
ダイニン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ボアズ	P	1 P=1 dyn · s/cm <sup>2</sup> =1 Pa · s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
ガウス	G	1 G=10 <sup>-8</sup> T
エルステッド	Oe	1 Oe=1(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 <sup>-8</sup> Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
ホルト	ph	1 ph=10 <sup>4</sup> lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

表10. 國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 × 10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58 × 10 <sup>-2</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
X線単位	IX unit	1 IX unit=1.002 × 10 <sup>-4</sup> nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
ジャンスキ	Jy	1 Jy=10 <sup>-26</sup> W · m <sup>-2</sup> · Hz <sup>-1</sup>
フェルミ	fermi	1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット	metric carat	1 metric carat = 200 mg = 2 × 10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カラリ	cal	1 cal=1J=10 <sup>-4</sup> kg · m <sup>2</sup> · K
ミクロ	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

