

JAERI-Tech

2004-055



JP0450780



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  
(受託調査)

2004年8月

角田 淳弥・中野 正明\*・辻 延昌\*・柴田 大受・石原 正博

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, Ibarakiken 319-1195, Japan.

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  
(受託調査)

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部  
角田 淳弥・中野 正明\*・辻 延昌\*・柴田 大受・石原 正博\*

(2004年 7月 1日受理)

高温ガス炉の炉心構成要素や炉内構造物に用いられる黒鉛材は、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の回復現象を生じることが知られている。このため、保守性の観点から現状の燃料最高温度評価では考慮していないこのアニーリング効果を定量的に考慮することにより、事故時の炉心温度挙動評価の高精度化が図られ、高温ガス炉機器の健全性評価手法の高度化を達成することが可能となる。そこで本研究では、高温ガス炉の炉心温度に及ぼす黒鉛熱伝導率に関するアニーリング効果の影響について解析的な検討を行い、アニーリング効果によって、減圧事故時の燃料最高温度の解析値が約 70°C 低くなることを示した。これにより炉心の温度挙動解析において、アニーリング効果を適切に考慮することが重要であることが明らかになった。また、HTTR の黒鉛構造物のアニーリング効果を定量的に評価するために必要な試験方法について検討し、アニーリングデータの取得試験計画を検討した。

---

本研究は、文部科学省からの受託事業「高温ガス炉の固有の安全性の定量的実証」の成果である。

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

\* 企画室

\* 富士電機システムズ株式会社

Preliminary Investigation of Annealing Effect on Thermal Conductivity of Graphite  
and Investigation of Annealing Test Method  
(Contract Research)

Junya SUMITA, Masaaki NAKANO\*, Nobumasa TSUJI\*,  
Taiju SHIBATA and Masahiro ISHIHARA<sup>+</sup>

Department of HTTR Project  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received July 1, 2004)

Neutron irradiation remarkably reduces the thermal conductivity of graphite, and the reduced thermal conductivity is recovered by annealing effect if the graphite is heated above the irradiation temperature. The annealing effect is not considered in the maximum fuel temperature analysis of the HTTR because of a conservative evaluation. Therefore, it is expected that the reduced thermal conductivity of graphite components in the HTGR could be recovered by the annealing effect in accidents, such as a depressurization accident. Moreover, by considering the annealing effect, the temperature analysis of the accident will be carried out more accurately and it could be possible to advance the evaluation method for the integrity of the core components and reactor internals in the HTGR. Then, an analytical investigation of the annealing effect on thermal performance of a HTGR core was carried. The analysis showed that the annealing effect reduces the maximum fuel temperature about 70°C, and it is important to introduce the annealing effect appropriately in the temperature analysis of the core components and reactor internals. In addition, an annealing test method was investigated to evaluate the effect quantitatively, and the test plan was made.

Keywords: Graphite, HTGR, HTTR, Neutron Irradiation, Thermal Conductivity,  
Annealing Effect, Preliminary Analysis, Maximum Fuel Temperature

---

Present study is entrusted of Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan.

\* Office of Planning  
\* Fuji Electric Systems Co., Ltd.

## 目 次

1.	はじめに .....	1
2.	HTTR の炉心構成要素及び炉内構造物の概要 .....	3
3.	炉心温度解析に及ぼすアニーリング効果 .....	8
3.1	解析条件 .....	8
3.2	解析結果 .....	8
4.	アニーリングデータ取得試験計画 .....	17
4.1	試験片 .....	17
4.2	アニーリングデータの取得 .....	17
5.	まとめ .....	21
	謝辞 .....	21
	参考文献 .....	21
	付録 A 燃料領域の等価熱伝導率の計算 .....	23

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	Outline of Core Components and Reactor Internals of the HTTR .....	3
3.	Annealing Effect on Core Temperature Analysis .....	8
3.1	Analytical Condition .....	8
3.2	Result of Analysis .....	8
4.	Test Plan to Obtain Annealing Data of Graphite .....	17
4.1	Specimen .....	17
4.2	Obtaining Annealing Data .....	17
5.	Conclusions .....	21
	Acknowledgement .....	21
	References .....	21
	Appendix A Calculation of Effective Thermal Conductivity in Fuel Region .....	23

This is a blank page.

## 1. はじめに

高温工学試験研究炉(High Temperature Engineering Test Reactor: 以下、「HTTR」と称す)は、原子炉熱出力 30MW、原子炉出口ヘリウムガス温度が最高 950°C を達成する高温ガス炉で、高温ガス炉の技術基盤の確立及び技術の高度化並びに高温工学に関する先端的基礎研究のための試験研究に供される<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。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了。また、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。今後は、安全性実証試験を引き続き行うとともに、核熱利用試験等が計画されている<sup>(2)</sup>。

高温ガス炉の炉心構成要素や炉内構造物に用いられる黒鉛材は、Fig.1-1 に示すように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の回復現象を生じる。Fig.1-2 にアニーリング効果を考慮した場合における減圧事故時の燃料最高温度の時間変化概念図を示す。アニーリング効果による熱伝導率の回復により、燃料最高温度は現在よりも低い値で変化すると考えられる。しかし、HTTR の設計段階では、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。さらに、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<sup>(3)(4)</sup>。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は、炉内構造物の温度をより正確に評価する目的でこのアニーリング効果を考慮し、高温ガス炉機器の健全性評価手法の高度化を目指している。

本研究では、アニーリング効果を考慮した場合の炉心の温度挙動に与える影響を検討するとともに、アニーリング効果を定量的に評価するための試験方法の検討を行った。

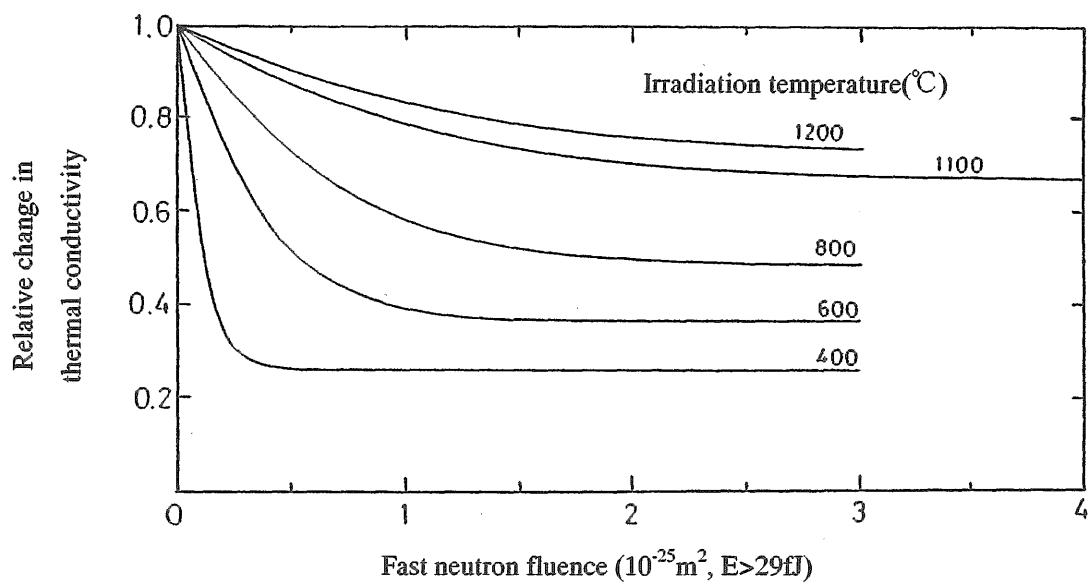
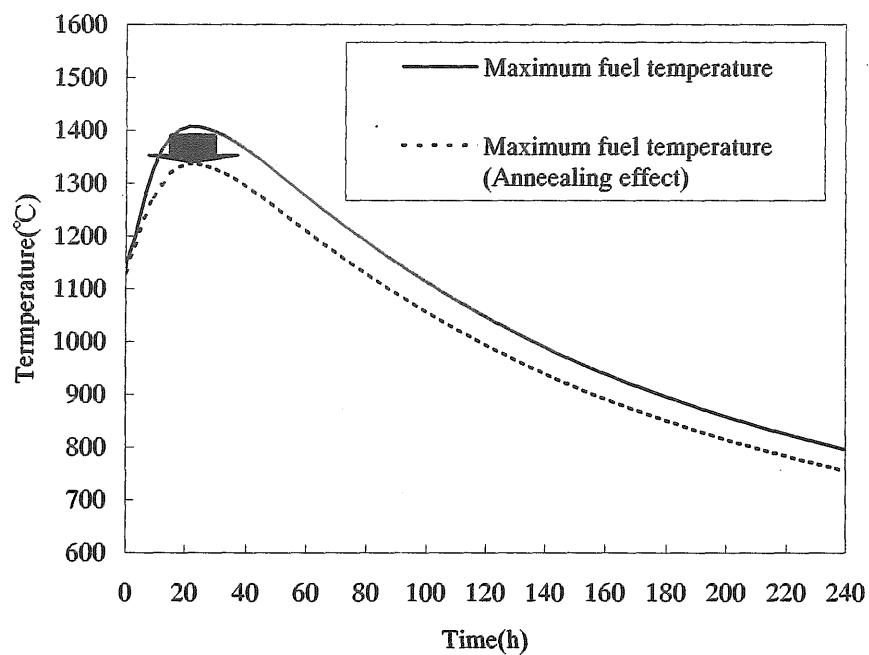
Fig.1-1 Neutron irradiation effect on thermal conductivity of IG-110<sup>(5)</sup>.

Fig.1-2 Transient behavior during depressurization accident.

## 2. HTTR の炉心構成要素及び炉内構造物の概要

HTTR の原子炉本体の構造を Fig.2-1 に示す。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。また、Fig.2-3 に燃料体の構造図を示す。燃料体は、燃料棒及び黒鉛ブロックから構成され、黒鉛ブロックに設けた 31 または 33 箇所の燃料棒挿入孔に燃料棒が装荷される。燃料棒は、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、Fig.2-1 及び Fig.2-4 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。IG-110 は、耐放射線性、耐腐食性及び高強度を有しており、燃料体、可動反射体ブロック、サポートポスト及びキー等に使用される。原子炉級準等方性黒鉛(PGX 黒鉛)は大型の構造物、即ち固定反射体ブロック、高温プレナムブロック及び炉床部断熱層に使用されている。炭素(ASR-0BR 炭素)は断熱性と長期にわたる寸法安定性に優れ、炉床部断熱層に使用されている。これらの黒鉛及び炭素材料の特性を Table 2-1 に示す<sup>(5)(6)</sup>。

Table 2-1 Typical physical and mechanical properties of graphite and carbon.

(unirradiated)

	IG-110 graphite	PGX graphite	ASR-ORB carbon
Bulk density(Mg/m <sup>3</sup> ) <sup>*</sup>	1.78	1.73	1.65
Mean tensile strength(MPa) <sup>*</sup>	25.3	8.1	6.8
Mean compressive strength(MPa) <sup>*</sup>	76.8	30.6	50.4
Young's modulus(GPa) <sup>*</sup>  ( $\pm \frac{1}{3} Su$ ) <sup>**</sup>	7.9	6.5	8.7
Mean thermal expansion coefficient (293~673K) (10 <sup>-6</sup> K)	4.06	2.34	4.40
Thermal conductivity(W/(m·K)) (673K)	80	75	10
Ash(ppm)	max.100	max.7000	max.5000
Grain size(μm)	mean 20	max.800	max.2000

<sup>\*</sup>: At room temperature<sup>\*\*</sup>: Determined from the slop of the line connecting two points (one point is the one-third of the specified minimum tensile strength and the other is the one-third of the specified minimum compressive strength) on the stress-strain curve.

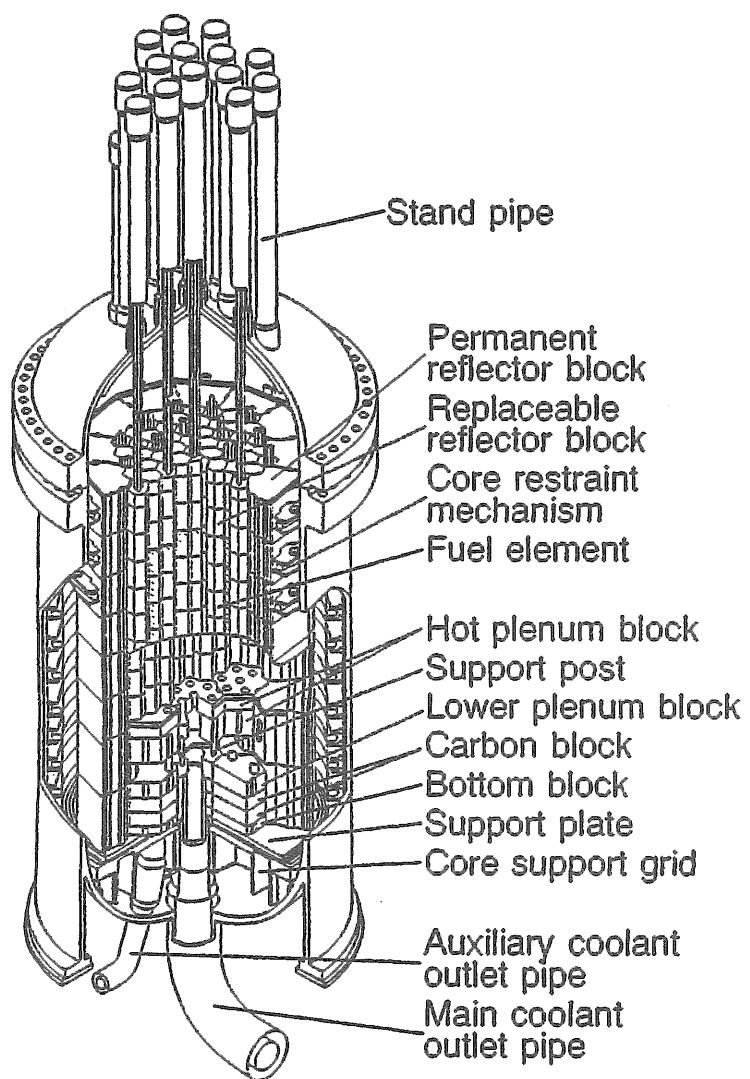
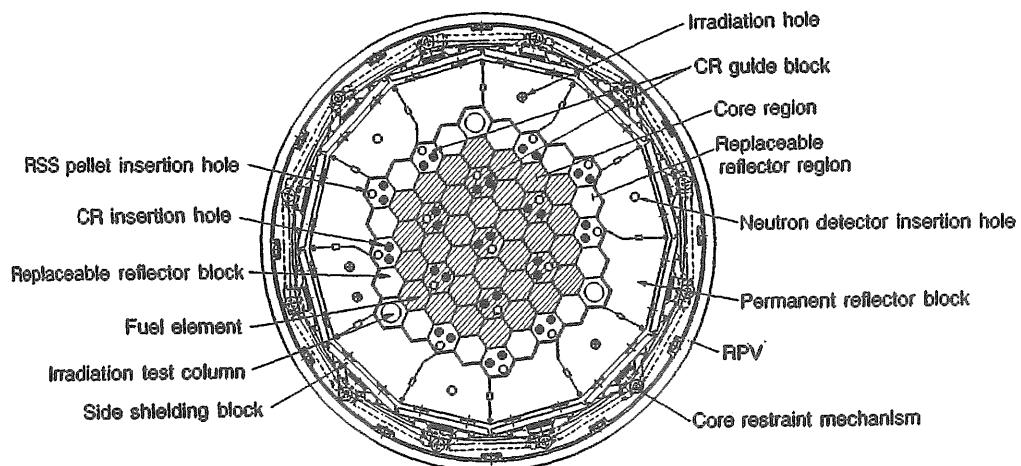


Fig.2-1 Core components, reactor internals and reactor pressure vessel of the HTTR



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

Fig.2-2 Horizontal arrangement of the core.

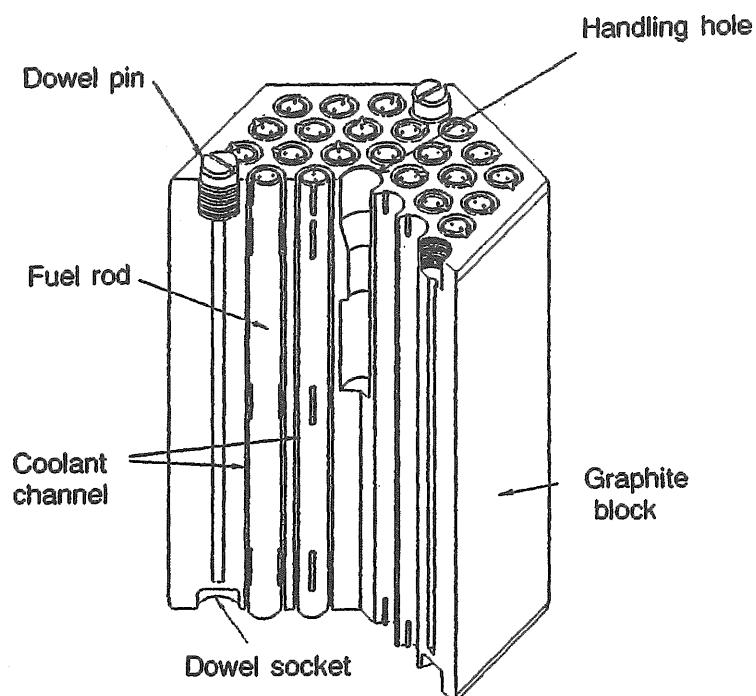


Fig.2-3 Hexagonal graphite block (fuel block).

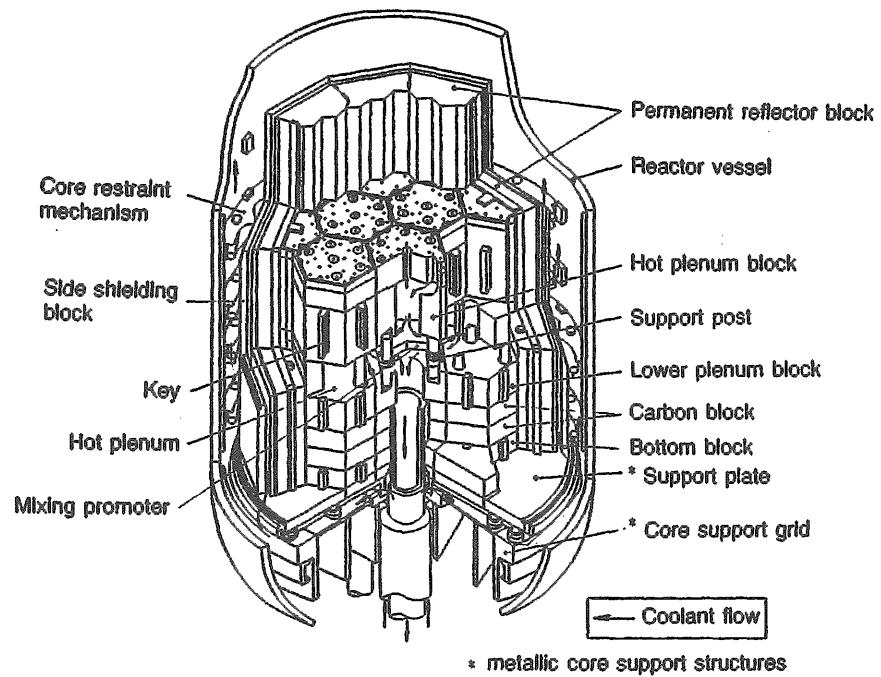


Fig.2-4 Structure of core support components.

### 3. 炉心温度解析に及ぼすアニーリング効果

#### 3.1 解析条件

事故時の黒鉛のアニーリング効果による熱伝導率の回復が燃料温度に与える効果について、原研において設計検討されている高温ガス炉ガスタービン発電システム<sup>(7)</sup>(GTHTR300)の減圧事故を例に解析的な検討を行った。Fig.3-1 に GTHTR300 の炉心構成要素及び炉内構造物を示す。解析には 2 次元の過渡計算伝熱プログラムである TAC-NC コードを用い、黒鉛は IG-110 とした<sup>(8)</sup>。TAC-NC コードは、有限差分法により非定常温度解析を行い、伝熱、放射に加えて減圧事故時に炉心内で発生する自然循環による熱移動を評価することができる。計算モデルの特徴は以下の通りである。

- ・ 温度分布は、2 次元非定常熱伝導方程式から求める。
- ・ 炉心は等価な物性値を持つ均質体としてモデル化し、温度挙動を求める。
- ・ 炉心側部の冷却材領域では対流及び輻射による熱伝達を、上部プレナム及び下部プレナムでは熱伝導と輻射による伝熱を考慮する。
- ・ 炉心部の自然循環流量は、流路が共通のプレナムを持つものとして、それぞれの流路における流動抵抗のバランスから求める。

解析では Fig.3-2 に示すように、炉心燃料領域を軸方向に 24 分割、径方向に 9 分割してモデル化した。なお燃料領域は、黒鉛ブロック、燃料棒及び冷却材流路孔から構成されるところから、温度解析では付録 A に示す等価熱伝導率を用いて均質な体系として扱った。

Fig.3-3 に黒鉛の熱伝導率と燃料領域の等価熱伝導率の関係を示す。等価熱伝導率は、図に示されているように温度が高くなるほど大きくなる。これは、燃料領域の輻射による熱移動が大きくなるためである。Fig.3-4 に仮定したアニーリング効果と等価熱伝導率の関係を示す。これは Kroeger の示した熱伝導率のアニーリング効果<sup>(9)</sup>を参考に、解析用に暫定的に定めた等価熱伝導率である。未照射状態で等価熱伝導率は、上側の線で表される温度依存性を示し、照射されると下側の線で表されるように低下する。ここでの解析では、Kroeger と同様に、約 1000°C でアニーリングが始まり、約 1300°C で完全に未照射状態の熱伝導率に線形的に回復すると仮定した。解析条件を Table3-1 にまとめて示す。

#### 3.2 解析結果

黒鉛のアニーリング効果による熱伝導率の回復を考慮した場合の減圧事故時の燃料最高温度解析結果を Fig.3-5 示す。約 1300°C で未照射の熱伝導率の 100%、50% 及び 20% まで回復した場合及び回復を考慮しない場合について解析を行った。Fig.3-5 より、アニーリング効果を無視した場合と 100% 考慮した場合では、燃料最高温度に約 70°C の違いが現れることがわかる。すなわち、黒鉛の熱伝導率のアニーリング効果を考慮することにより、合理的に保守性を排除することが可能となる。したがって、黒鉛の熱伝導率のアニーリングによる熱伝導率の回復挙動について、アニーリングデータを取得し、適切な評価曲線を確立することが重要である。

Table 3-1 Analysis conditions(1/4)

Thermal conductivity of graphite						
Thermal conductivity of each region (W/mK).						
No.	Irradiation Temperature °C	Fluence $10^{24} \text{m}^{-2}$	Temperature °C			
			400	800	1200	1600
1	630	15.5	26.95	23.53	21.60	20.85
2	690	34.9	28.27	24.53	22.41	21.59
3	740	23.3	30.00	25.83	23.46	22.53
4	810	32.3	32.08	27.36	24.68	23.63
5	590	1.8	57.47	43.93	36.93	34.21
6	860	8.0	46.21	37.02	32.04	30.07
7	590	0.2	76.76	54.38	43.84	39.88
8	600	1.6	60.22	45.52	38.02	35.12
9	700	2.4	59.43	45.06	37.71	34.86
10	750	4.2	52.08	40.70	34.68	32.32
11	750	1.0	71.55	51.71	42.13	38.50
12	—	—	79.59	55.79	44.72	40.60
13	—	—	79.59	55.79	44.72	40.60
14	—	—	79.59	55.79	44.72	40.60
15	—	—	79.59	55.79	44.72	40.60

Region number (Each number correspond to number shown above.)

	Inner reflector	Fuel column	Outer reflector
Upper reflector block			
Fuel block 1st		14	14
Fuel block 2nd		7	7
Fuel block 3rd		8	8
Fuel block 4th		2	
Fuel block 5th		9	9
Fuel block 6th		3	
Fuel block 7th			
Fuel block 8th			
Lower reflector block			
	15		15
		10	10
		4	
	11	6	11
	15	13	15

Thermal conductivities of reflector blocks used in this analysis were 1.2 times larger than those shown above.

Errors were taken into consideration:

irradiated +20%, -5%	unirradiated +10%, -10%
----------------------	-------------------------

Table 3-1 Analysis conditions(2/4)

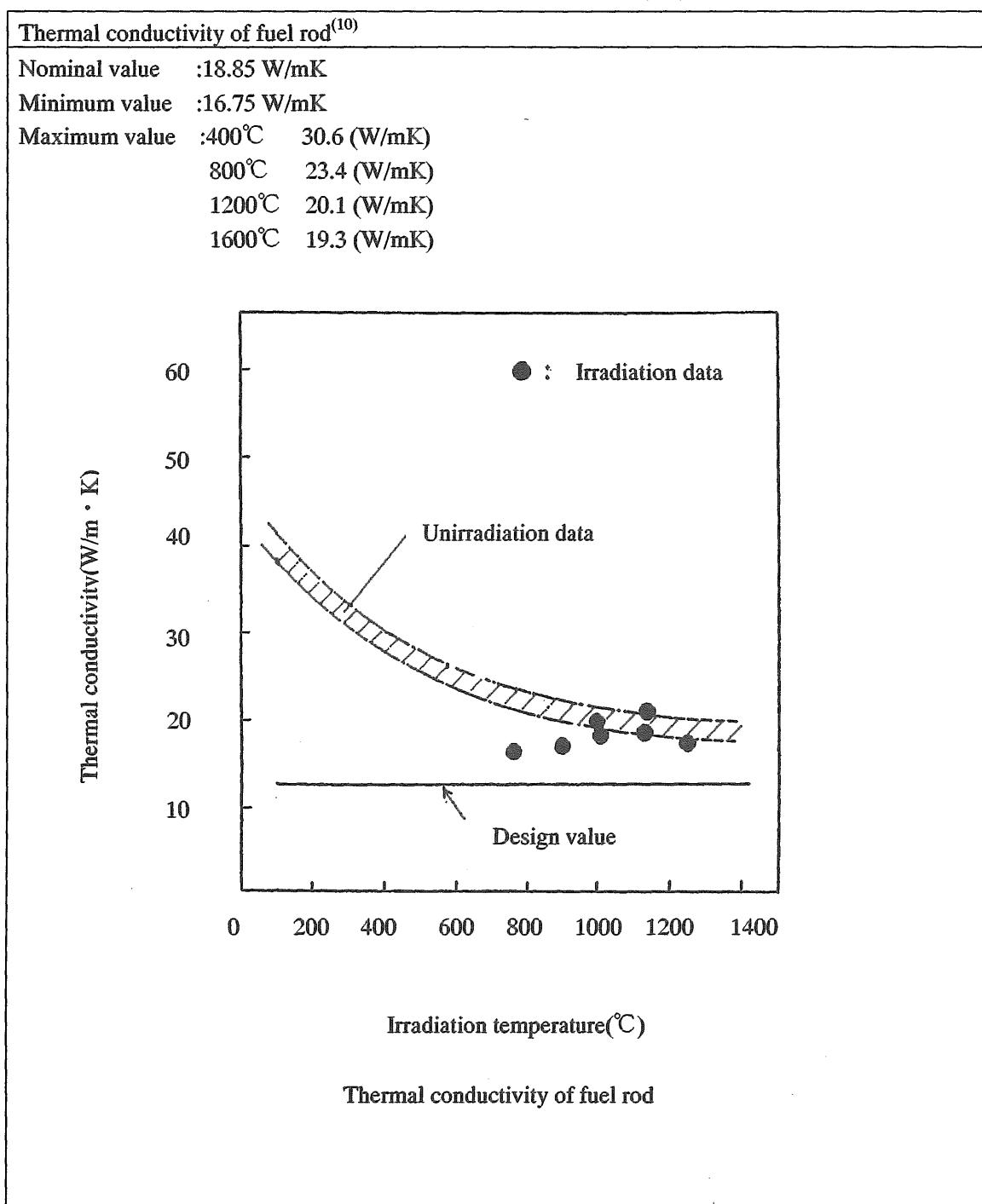


Table 3-1 Analysis conditions(3/4)

Fractional thermal radiation of graphite <sup>(11)</sup>								
Nominal value	:0.85							
Minimum value	:0.8							
Maximum value	:1.0							
Effective thermal conductivity of fuel and reflector								
To evaluate fuel temperature (Minimum value)								
Radius effective thermal conductivity $\lambda_r$ (W/mK)								
No.	Temperature°C							
	400	800	1200	1600				
1	9.51	10.95	13.53	16.88				
2	9.86	11.26	13.82	17.20				
3	10.31	11.67	14.20	17.59				
4	10.85	12.13	14.62	18.05				
5	51.31	39.22	32.97	30.54				
6	42.91	34.38	29.75	27.92				
7	64.49	59.55	57.03	55.71				
8	52.00	51.39	50.23	49.44				
9	51.40	50.96	49.86	49.10				
10	45.80	46.81	46.24	45.71				
11	85.86	62.05	50.55	46.20				
12	71.05	49.80	39.92	36.24				
13	73.91	51.80	41.53	37.70				
14	66.62	60.83	58.05	56.64				
15	95.51	66.95	53.67	48.72				

Axial effective thermal conductivity  $\lambda_a$  (W/mK)

Fuel region : Material thermal conductivity  $\lambda \times$  Volume of graphite  $\times 1.6$  (radiant heat to axial)

Reflector region : Material thermal conductivity  $\lambda \times$  Volume rate graphite

Table 3-1 Analysis conditions(4/4)

<b>Heat capacity of graphite</b>																																									
Specific heat of graphite	Cp : J/kgK																																								
$Cp=4186.8(0.54212-2.42667E-6*T-90.2725/T-4.34493E4/T^2+1.59309E7/T^3-1.43688E9/T^4)$																																									
T : Temperature (K)																																									
Density of graphite $\rho = 1.78 \text{Mg/m}^3$																																									
Errors of heat capacity																																									
Fuel region	: $\pm 10\%$																																								
Reflector region	: $\pm 5\%$																																								
<b>Core barrel Alloy 800H (NCF800H)</b>																																									
Fractional radiant heat	: 0.5 ~ 0.8																																								
Nominal value 0.65																																									
Upper shroud: Stainless steel																																									
Fractional radiant heat	: 0.36 ~ 1.0																																								
Nominal value 0.45																																									
<b>Power distribution</b>																																									
Shown below																																									
<table border="1"> <caption>Data points estimated from the Power distribution graph</caption> <thead> <tr> <th>Axial position (m)</th> <th>Inner of core (MW/m³)</th> <th>Centre of core (MW/m³)</th> <th>Outer of core (MW/m³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>14.0</td><td>14.0</td><td>14.0</td></tr> <tr><td>1.05</td><td>13.0</td><td>13.0</td><td>13.0</td></tr> <tr><td>2.10</td><td>10.5</td><td>10.5</td><td>10.5</td></tr> <tr><td>3.15</td><td>14.0</td><td>14.0</td><td>14.0</td></tr> <tr><td>4.20</td><td>4.5</td><td>4.5</td><td>4.5</td></tr> <tr><td>5.25</td><td>3.0</td><td>3.0</td><td>3.0</td></tr> <tr><td>6.30</td><td>2.5</td><td>2.5</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>7.35</td><td>2.0</td><td>2.0</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>8.40</td><td>1.5</td><td>1.5</td><td>1.5</td></tr> </tbody> </table>		Axial position (m)	Inner of core (MW/m³)	Centre of core (MW/m³)	Outer of core (MW/m³)	0.00	14.0	14.0	14.0	1.05	13.0	13.0	13.0	2.10	10.5	10.5	10.5	3.15	14.0	14.0	14.0	4.20	4.5	4.5	4.5	5.25	3.0	3.0	3.0	6.30	2.5	2.5	2.5	7.35	2.0	2.0	2.0	8.40	1.5	1.5	1.5
Axial position (m)	Inner of core (MW/m³)	Centre of core (MW/m³)	Outer of core (MW/m³)																																						
0.00	14.0	14.0	14.0																																						
1.05	13.0	13.0	13.0																																						
2.10	10.5	10.5	10.5																																						
3.15	14.0	14.0	14.0																																						
4.20	4.5	4.5	4.5																																						
5.25	3.0	3.0	3.0																																						
6.30	2.5	2.5	2.5																																						
7.35	2.0	2.0	2.0																																						
8.40	1.5	1.5	1.5																																						
Power distribution of the core																																									

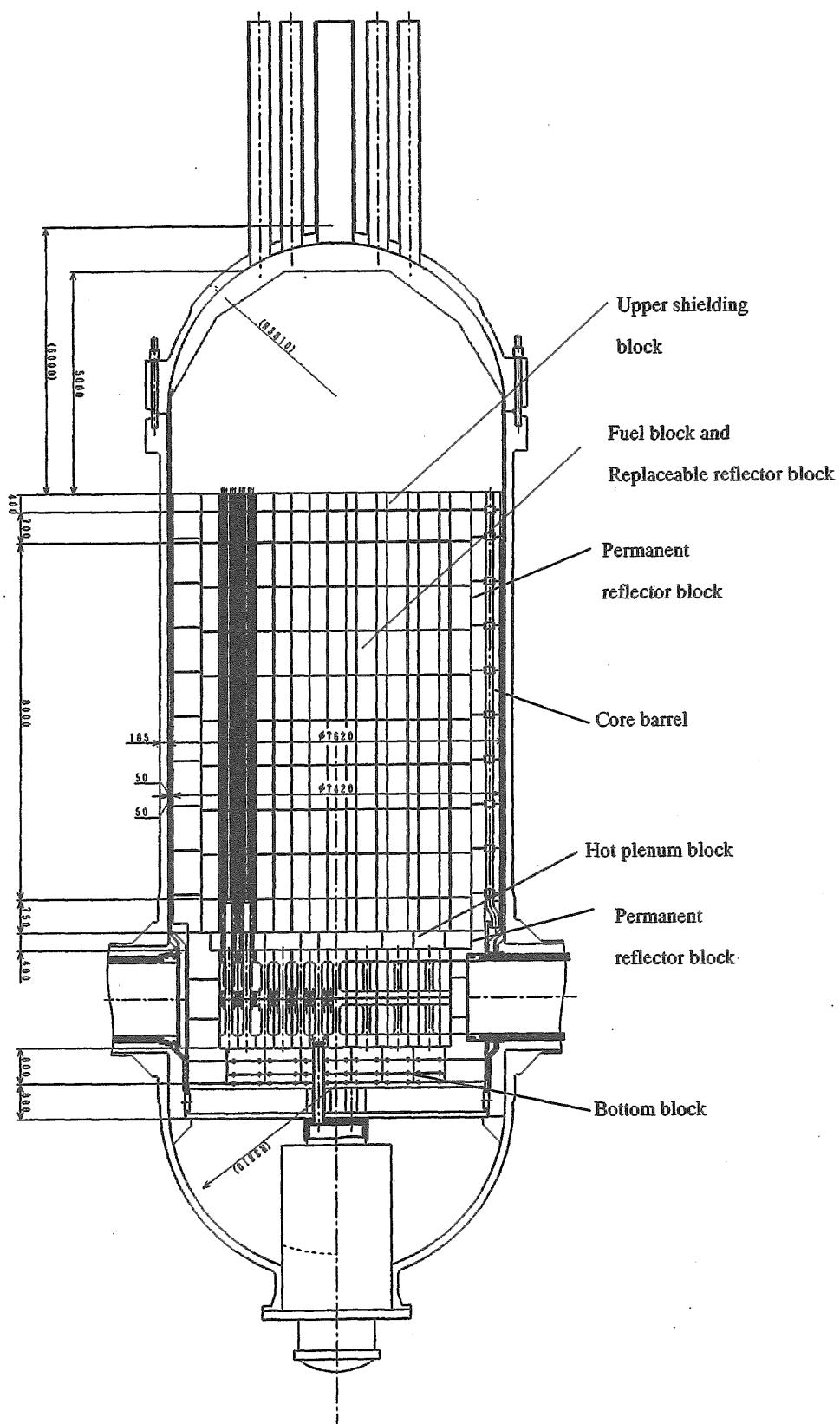
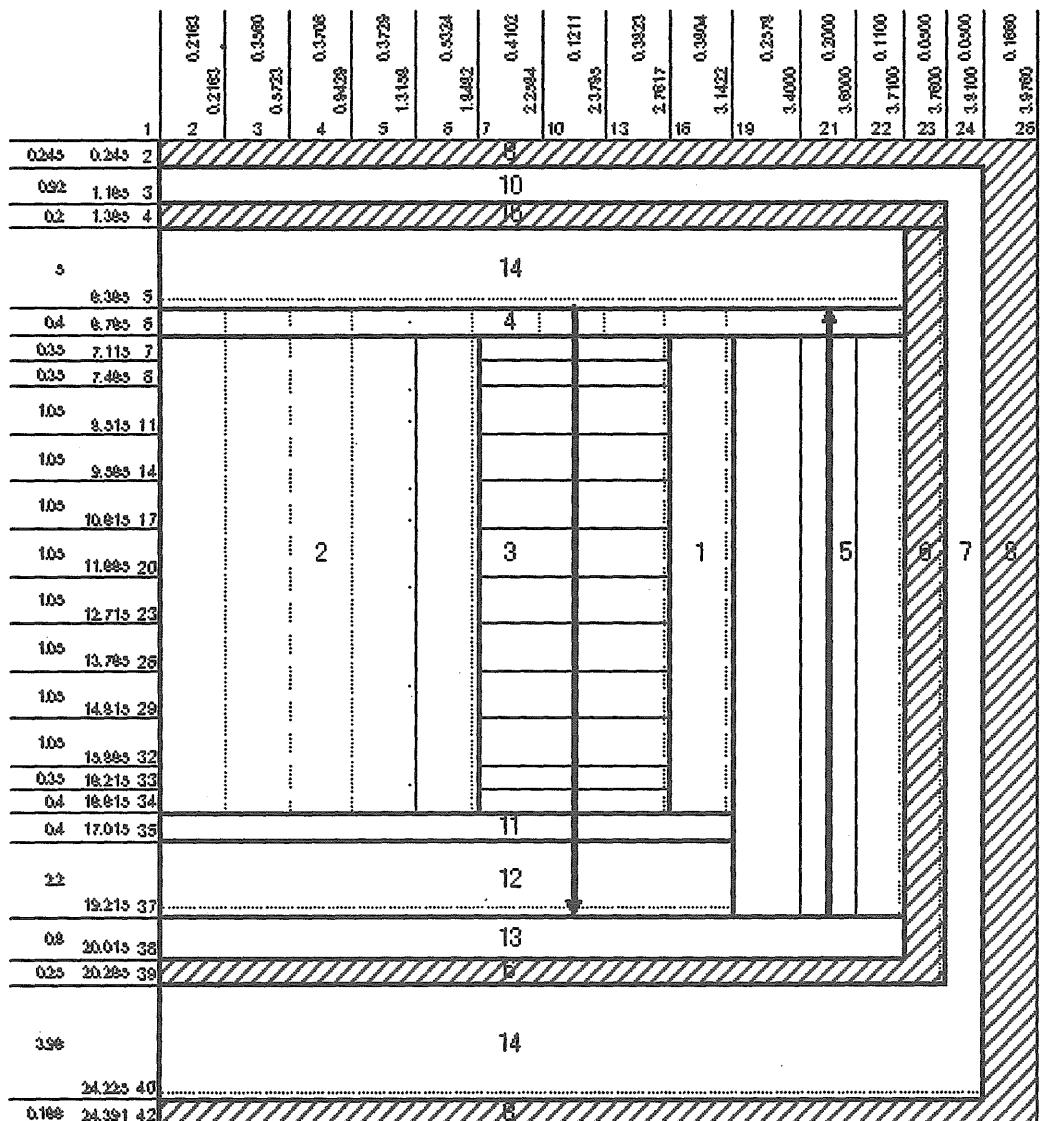


Fig.3-1 Core components and reactor internals in the GT-HTR300<sup>(7)</sup>.



(Unit : m)

No.		No.	
1	Outer replaceable reflector	8	Pressure vessel
2	Inner replaceable reflector	10	Upper space
3	Fuel, upper and lower replaceable reflector	11	Hot plenum block
4	Upper shielding block	12	Hot plenum
5	Permanent reflector block	13	Core bottom insulator
6	Core barrel	14	Lower space
7	Side region	15	Shroud

Fig.3-2 Analytical model

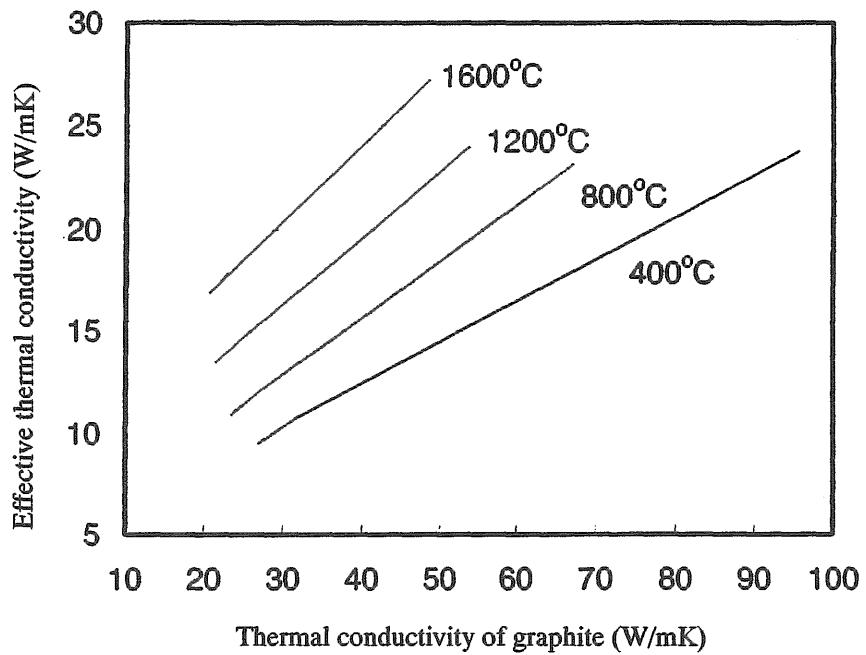


Fig.3-3 Thermal conductivity of graphite vs. effective thermal conductivity of fuel region.

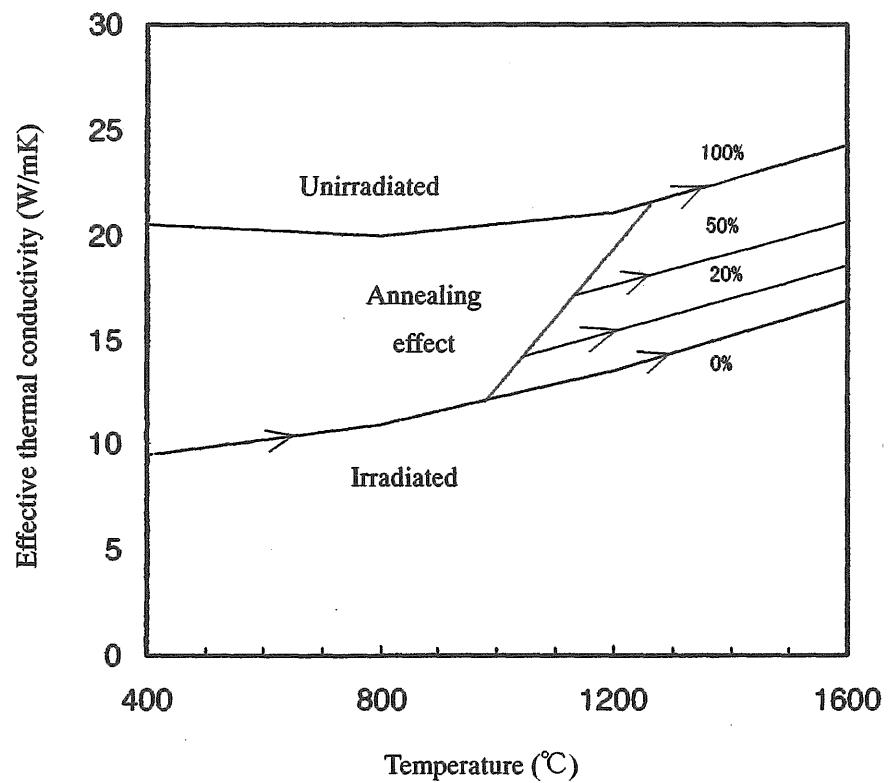


Fig.3-4 Annealing effect assumption of effective thermal conductivity.

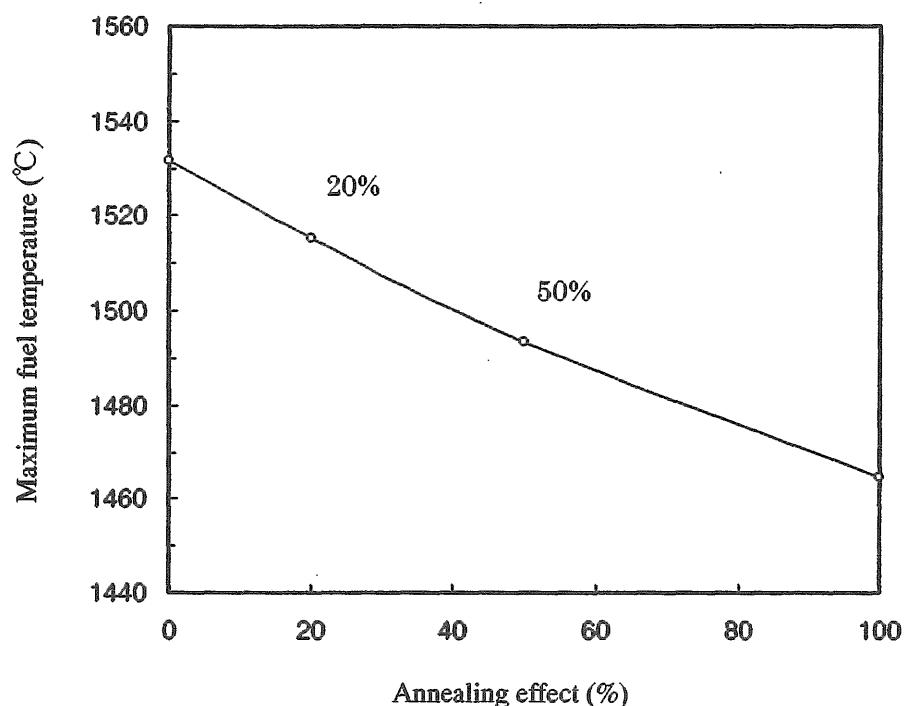


Fig.3-5 Change of maximum fuel temperature as a function of annealing effect.

#### 4. アニーリングデータ取得試験計画

黒鉛の熱伝導率に関するアニーリング効果については、1章で述べたように現在までの研究開発状況から利用できるデータベースはほとんど皆無の状況である。そこで、炉心用IG-110 黒鉛について、以下のデータ取得計画を検討した。

##### 4.1 試験片

黒鉛の熱伝導率に関するアニーリング効果の測定試験は、IG-110 黒鉛について行う。試験片は、原研の材料試験炉(JMTR)で照射したもので、寸法は  $\phi 10 \times 4.5$  (mm) である。Table4-1 に試験片の照射条件を示す。

アニーリングは、照射により黒鉛の格子構造内に生じた欠陥が、昇温により拡散することが関与しているので、温度だけでなく、高温に維持される時間も関係すると考えられる。そこで、各照射温度で 2 個ある試験片について、加熱温度及び加熱保持時間の影響を調べる試験について、照射温度毎に試験片を 1 個、また残った試験片のうち、HTTR の安全性実証試験を模擬した温度履歴での測定に試験片 1 個を使用する計画である。

##### 4.2 アニーリングデータの取得

###### (1) 基礎データの取得

黒鉛材の照射後アニーリング効果についてのデータ取得条件を Table4-2 に示す。測定は以下の 3 つの温度域について行う。

###### ① 照射温度以下の測定

室温から測定を開始し、一定温度毎に昇温・測定を繰り返す。昇温後は温度が目標とする値に安定してから熱伝導率を測定する。

###### ② 照射温度以上の測定

照射温度以上の測定ではアニーリングを調べるために、目標の温度に達した後、その温度を保持しながら一定時間毎に熱伝導率測定を繰り返す。測定値が十分安定した、つまり、アニーリング効果がその温度で飽和したと判断した後、次の測定温度に昇温する。

###### ③ 温度下降時の測定

最高測定温度に達した後の温度下降時についても熱伝導率測定を行う。測定は目標の温度に達した後に温度が安定した時点で測定を行う。

###### ④ 微細構造の観測

適宜、レーザー顕微鏡等を用いて、アニーリングによる微細構造変化を調べる。

Fig.4-1 に熱伝導率の測定概念を示す。同図は 700°C で照射された試料の測定例である。図中の○印の点で熱伝導率の測定を実施する。

(2) 実証データの取得

HTTR の安全性実証試験の温度履歴を試験片に与えながら試料の熱伝導率を測定する。詳細な試験項目の検討、温度予測解析等は今後実施する。

Table4-1 Irradiation condition of specimens.

Irradiation temperature	Fluence n/m <sup>2</sup> , E>0.18MeV	dpa	Number of specimens
<b>Low temperature</b>			
300°C	$2.42 \times 10^{24}$	0.213	2
400°C			2
500°C			2
<b>Middle temperature</b>			
700°C	$1.34 \times 10^{25}$	1.18	2
800°C			2
900°C			2
<b>High temperature</b>			
1000°C	$1.34 \times 10^{25}$	1.18	2
1100°C			2
1200°C			2

Table4-2 Measurement condition of basic test.

Specimen	Measuring Temperature
Irradiation temperature 300°C	
Irradiation temperature 400°C	
Irradiation temperature 500°C	
Irradiation temperature 700°C	
Irradiation temperature 800°C	RT~1500°C~RT
Irradiation temperature 900°C	
Irradiation temperature 1000°C	
Irradiation temperature 1100°C	
Irradiation temperature 1200°C	

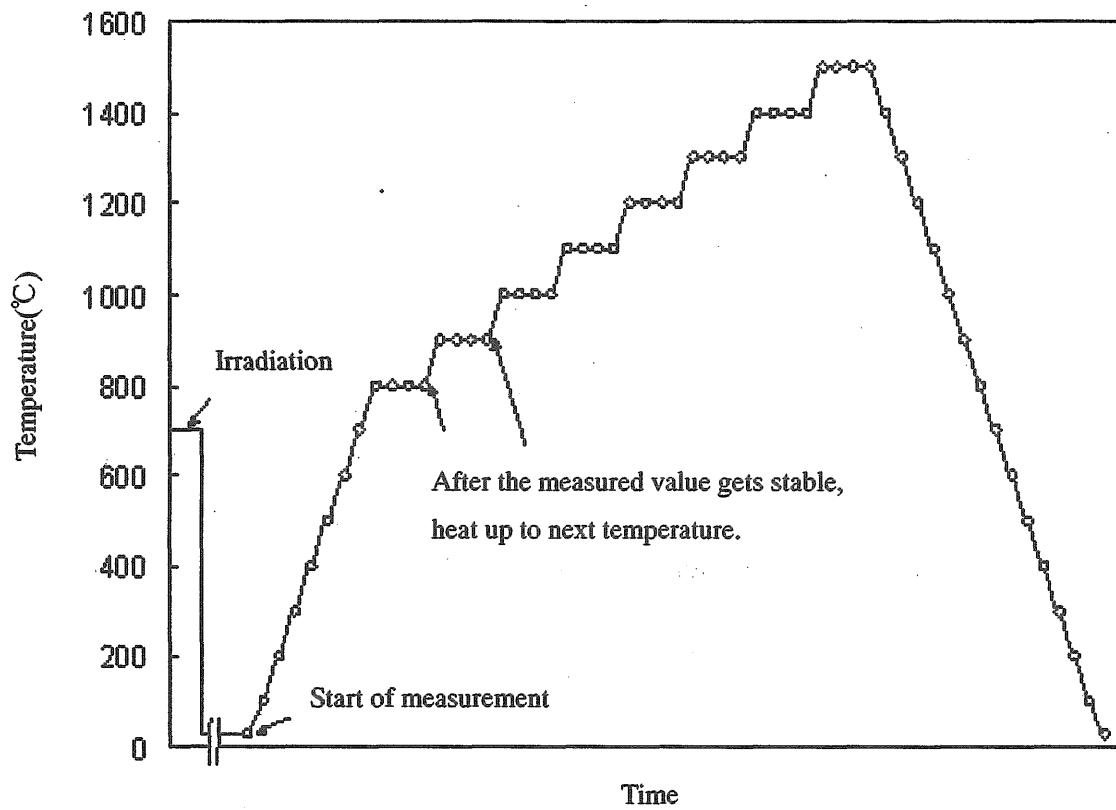


Fig.4-1 An example of measuring method of thermal conductivity.

## 5. まとめ

黒鉛の熱伝導率のアニーリング効果について、炉心の温度挙動に及ぼす影響について解析的な検討を行った。また、アニーリングデータの取得等について検討し、以下の結論を得た。

1. 黒鉛のアニーリングが事故時の燃料温度に与える効果を、GTHTR300 を例として解析により予備評価し、アニーリング効果により燃料最高温度の解析値が約 70°C 低くなることがわかった。
2. 黒鉛熱伝導率のアニーリング効果を考慮することにより、合理的に保守性を排除することが可能となることから、黒鉛熱伝導率のアニーリングによる回復挙動についてデータを取得し、適切な評価曲線を確立することが重要であることを示した。
3. IG-110 について、具体的なアニーリング効果の定量化に必要な実験内容等の検討を行い、基礎データ及び実証データを取得するアニーリングデータ取得試験計画を定めた。

## 謝辞

本検討を行うに当たり、御指導、御助言頂いた藤川正剛高温工学試験研究炉開発部長及び伊与久達夫 HTTR 技術開発室長をはじめとする同部の皆様方に感謝いたします。また、貴重なコメントを頂いた橘幸男 HTTR 計画室長代理に感謝いたします。

## 参考文献

- (1) S.Saito, et. al, "Design of High Temperature Engineering Test Reactor," JAERI-1332(1994).
- (2) 中川繁昭他、「HTTR 安全性実証試験(SR-1/S1C-1)の試験計画」、JAERI-Tech 2003-049(2003).
- (3) T.Maruyama, et. al, "Neutron irradiation effect on the thermal conductivity and dimensional change of graphite materials," Journal of Nuclear materials, 195, 44-50(1992).
- (4) 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, 1-7(1996).
- (5) 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).
- (6) 石原正博他、「高温工学試験研究炉・炉心支持黒鉛構造設計方針における設計用データの解説」、JAERI-M 91-154(1991).
- (7) 國富一彦他、原子力和文論文誌,1[4],352(2002).
- (8) 國富一彦他、「高温工学試験研究炉の減圧事故時の温度分布解析」、JAERI-M 91-163(1991).

- (9) P.G.Kroeger, "Safety evaluation of MHTGR licensing basis accident scenarios," NUREG/CR-5261 BNL-NUREG-52174
- (10)丸山創他、私信(1988).
- (11)佐藤貞夫他、私信(1990).

## 付録 A 燃料領域の等価熱伝導率の計算

TAC-NC を用いた解析では、燃料領域は、燃料ブロック、燃料棒、隙間により構成されており、それらは均一の領域としてモデル化されている。この領域平均の熱伝導率を等価熱伝導率と呼ぶこととし、ここでは、その算出方法について述べる。

### A-1 解析方法

燃料領域の形状をその繰り返し単位のみモデル化して、伝熱解析を行い、その温度差、熱移動量から、次式の等価熱伝導率  $\lambda$  を求めた。

$$\lambda = \frac{lQ}{w\Delta T}$$

- $\lambda$  : 等価熱伝導率 (W/mK)
- $l$  : 伝熱長 (m)
- $w$  : 伝熱幅 (m)
- $\Delta T$  : 温度差 (K)
- $Q$  :  $w$  当たりの熱移動量 (W/m)

解析モデルを Fig.A-1 に示す。ここで、上下の辺の温度を温度差  $\Delta T$  に固定し、上下方向に熱を移動させ、その際の熱移動量  $Q$  を求めた。図中、横幅が  $w$ 、縦が 1 である。解析には、有限要素法プログラム ANSYS を用いた。なお、 $\Delta T$  が等価熱伝導率に与える影響を調べたところ影響が無いことを確認したので、ここでは  $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$  とした。但し照射量、照射温度により、黒鉛熱伝導率が異なり、また、輻射率の不確定幅を考慮する必要がある。TableA-1 示すケースについて解析を行った。

### A-2 解析結果

温度分布の解析結果を Fig.A-2 に示す。

TableA-1 Analysis cases of effective thermal conductivity

	Thermal conductivity of graphite	Thermal conductivity of fuel rod	Fractional radiant heat
Nominal analysis	Nominal value	Nominal value	Nominal value (0.85)
Analysis of fuel temperature	Minimum value (Irradiated $\times$ 0.95)	Minimum value	Minimum value (0.8)
Analysis of pressure vessel	Maximum value (Unirradiated $\times$ 1.1)	Maximum value (Unirradiated)	Maximum value (1.0)

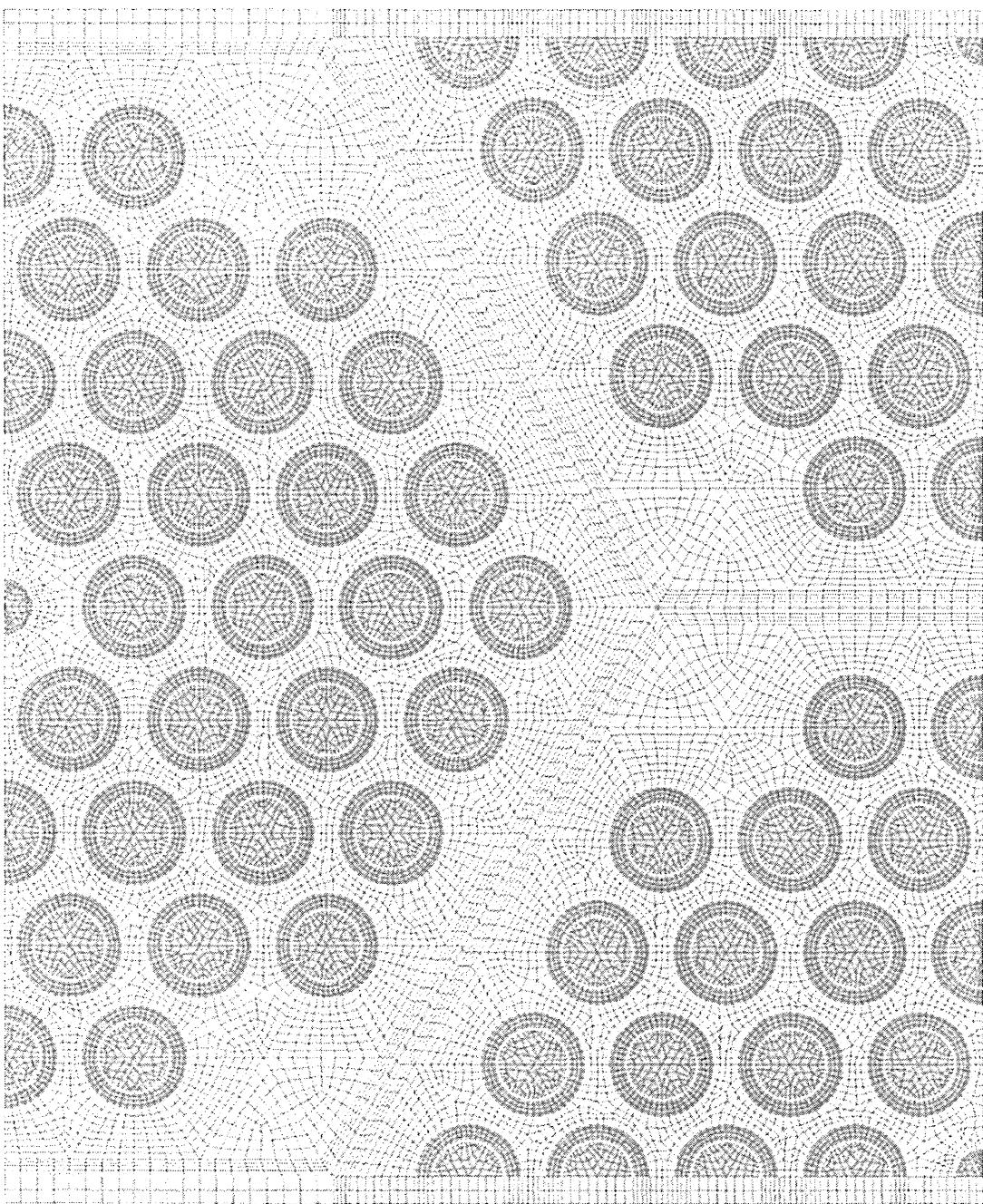


Fig.A-1 Heat transfer analysis using finite element method (FEM).

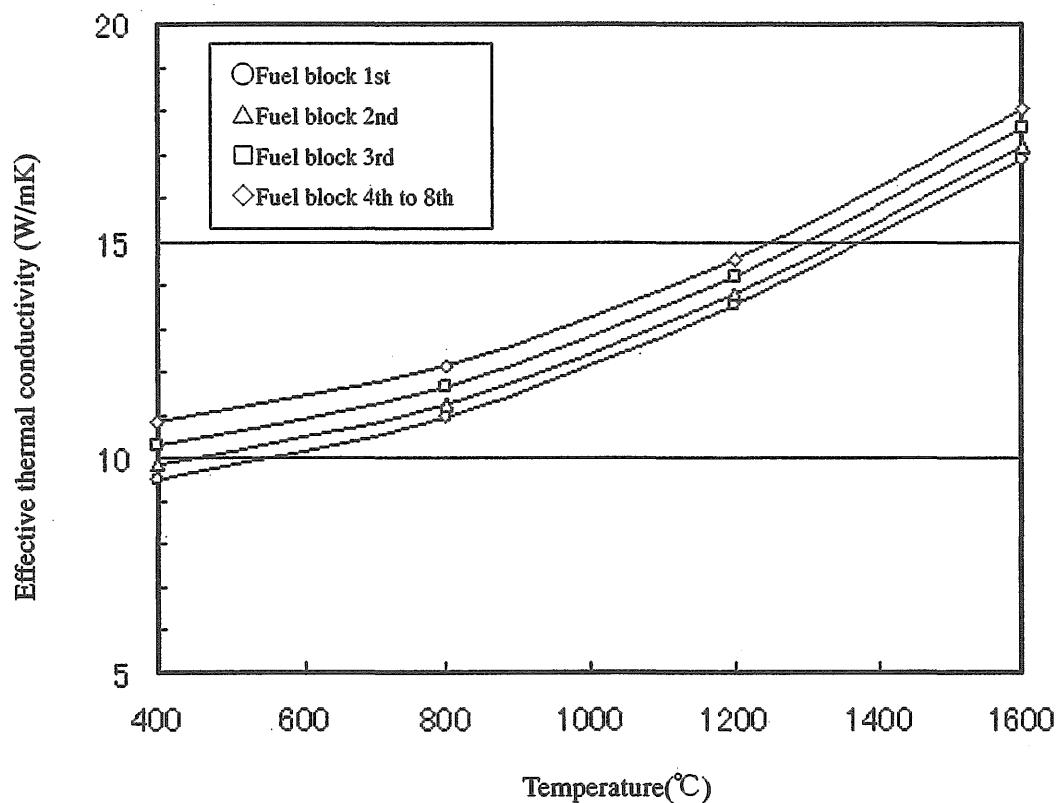


Fig.A-2 Results of effective thermal conductivity analysis.

This is a blank page.

# 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	$s^{-1}$
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	$N/m^2$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
工率、放射束	ワット	W	$J/s$
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、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	$\Omega$	$V/A$
コンダクタンス	ジーメンス	S	$A/V$
磁束	ウェーバ	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	$Wb/A$
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	$lm/m^2$
放射能	ベクレル	Bq	$s^{-1}$
吸収線量	グレイ	Gy	$J/kg$
線量当量	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	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
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

(注)

- 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。
- 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。
- 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。
- 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。

## 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

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
	$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	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 = 4.18605 J(計量法) = 4.184 J(熱化学) = 4.1855 J(15 °C) = 4.1868 J(国際蒸気表)
	1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	$6.24150 \times 10^{18}$	
	9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{19}$	
	$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{26}$	
	4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{19}$	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$	= 735.499 W
	$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	$2.70270 \times 10^{-11}$		1	100
	$3.7 \times 10^{10}$	1	0.01	1	

照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	3876		1	100
	$2.58 \times 10^{-4}$	1		0.01	1

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（受託調査）



古紙配合率100%  
白色度70%の再生紙を使用しています