

JAERI-M

9 2 8 7

高温ガス炉用燃料コンパクトの熱伝導率  
及び燃料コンパクト-黒鉛スリーブ間の  
ギャップ熱伝達率

1981年2月

菊池 輝男・岩本 多実・井川 勝市

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

高温ガス炉用燃料コンパクトの熱伝導率及び燃料コンパクト-黒鉛スリーブ間のギャップ熱伝達率

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

菊池輝男・岩本多実・井川勝市

(1980年12月26日受理)

高温ガス炉用燃料コンパクトの熱伝導率およびコンパクト-スリーブ間のギャップ熱伝達率を、400～1000℃の範囲において測定した。測定に使用した試料は、天然黒鉛-石油コークス黒鉛混合粉および針状コークス黒鉛粉に、フェノール樹脂を10%または20%添加したマトリックス材およびこのマトリックス材に、被覆粒子を22%または30%添加した燃料コンパクトである。熱伝導率の測定方法は、中心加熱による比較法によった。測定の結果、マトリックスおよび燃料コンパクトの熱伝導率は、温度の増加に対して減少し、ギャップ熱伝達率は、温度とともに増加することがわかった。なお、天然黒鉛-石油コークス黒鉛混合系マトリックスに、被覆粒子を30%充填した燃料コンパクトの熱伝導率は、900℃において0.23 (W/cm<sup>2</sup>°C)であった。

Thermal Conductivity of Fuel Compacts and Thermal Gap Conductance  
between Fuel Compact and Graphite Sleeve for HTGR

Teruo KIKUCHI, Kazumi IWAMOTO and Katsuichi IKAWA

Division of Nuclear Fuel Research, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received December 26, 1980)

The thermal conductivity of the matrices and fuel compacts, and the thermal gap conductance between fuel compact and graphite sleeve for HTGR were measured in the range of 400 to 1000 °C. The specimen for measurements were the matrices of natural graphite-petroleum coke graphite powder and needle coke graphite powder with 10 or 20 % phenole resin and fuel compacts that contain coated particles 22 or 30 % by volume in these matrices. The thermal conductivity were measured by the comparative method in radial heat flow. The thermal conductivities of the matrices and fuel compacts decreased with increasing temperature and the thermal conductivity of fuel compact that dispersed coated particles 30 % by volume in natural graphite-petroleum coke graphite/carbon matrix is 0.23 ( W/cm °C ) at 900°C. The thermal gap conductance increased with increasing temperature.

Keywords: HTGR, Fuel Rod, Fuel Compact, Coated Particle, Thermal Property,  
Thermal Conductivity, Thermal Gap Conductance

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 実験方法 .....	1
2.1 実験装置 .....	1
2.2 試料の調製 .....	2
3. 熱伝導率およびギャップ熱伝達率の算出方法 .....	3
4. 結果および考察 .....	5
5. まとめ .....	8
謝 辞 .....	8
参考文献 .....	9
付録 種々の高温ガス炉用燃料の熱伝導率 .....	16

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental .....	1
2.1 Experimental apparatus .....	1
2.2 Preparation of specimen .....	2
3. Measurement techniques of thermal conductivity and thermal gap conductance .....	3
4. Results and discussion .....	5
5. Conclusion .....	8
Acknowledgments .....	8
References .....	9
Appendix Thermal conductivity of various fuel for HTGR .....	16

## 1. はじめに

現在、日本原子力研究所が開発をすすめている多目的高温ガス炉は、燃料棒を黒鉛ブロックに保持させ、核分裂により燃料棒内に発生した熱を、燃料棒と黒鉛ブロックの間を流れるヘリウムガスにより、除去する構造を採用している。燃料棒は、燃料コンパクトを黒鉛スリーブ中に納めたものであるから、照射中温度勾配が生じ、燃料コンパクトや黒鉛スリーブ中には熱応力が発生する。これらの燃料棒の熱応力の評価や照射温度の解析には、これらの材料の熱伝導率やコンパクトスリーブ間のギャップ熱伝達率のデータが必要になる。

このように、これらの熱物性データは、高温ガス炉の設計および安全解析をすすめるうえで、きわめて重要であり、イギリス、アメリカおよびドイツにおいては、これらのデータの取得が精力的にすすめられてきた<sup>1)~6)</sup>。しかし、燃料コンパクトの熱伝導率は、その製造方法、製造条件および製造原料等が異なれば、これに応じて変わるために、これらの発表済のデータを用いて、原研が開発をすすめている高温ガス炉の設計および安全解析をするわけにはいかない。それには、やはり実際の燃料コンパクトについて、これらの熱物性データを取得するのが望ましい。

本報告は、高温ガス実験炉に使用する燃料コンパクトと同じ方法および条件に従って製造したものおよび被覆粒子の充填されていないマトリックス成形体について、中心加熱による比較法により、その熱伝導率を測定し、その結果を述べたものである。また、コンパクトスリーブ間のギャップ熱伝達率についても測定したので、あわせてその結果を述べる。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置

本実験での燃料コンパクトの熱伝導率は、中心加熱による比較法により測定した。通常、熱伝導率を比較法により測定する場合、熱伝導率未知の板状試料を、それが既知の板状試料の間にサンドウィッチ状にはさみ、同一熱流による両試料中に生ずる温度勾配、 $\Delta T_1/l_1$ 、 $\Delta T_0/l_0$  を測定し、この値と既知の熱伝導率  $k_0$  とから、次の式に従って未知試料の熱伝導率  $k$  を算出する<sup>11)</sup> のが通例である。

$$k = k_0 \frac{\Delta T_0}{\Delta T_1} \cdot \frac{l_1}{l_0}$$

これに対して、試料が円筒状である場合、中心に熱源を置き、標準試料と測定試料を同心円状に配置すれば、板状試料同様比較法による熱伝導率の測定が可能であると考えられるが、その測定例はあまりみられない。しかし、燃料コンパクトの形状は円筒状であるから、実物を用い

## 1. はじめに

現在、日本原子力研究所が開発をすすめている多目的高温ガス炉は、燃料棒を黒鉛ブロックに保持させ、核分裂により燃料棒内に発生した熱を、燃料棒と黒鉛ブロックの間を流れるヘリウムガスにより、除去する構造を採用している。燃料棒は、燃料コンパクトを黒鉛スリーブ中に納めたものであるから、照射中温度勾配が生じ、燃料コンパクトや黒鉛スリーブ中には熱応力が発生する。これらの燃料棒の熱応力の評価や照射温度の解析には、これらの材料の熱伝導率やコンパクトスリーブ間のギャップ熱伝達率のデータが必要になる。

このように、これらの熱物性データは、高温ガス炉の設計および安全解析をすすめるうえで、きわめて重要であり、イギリス、アメリカおよびドイツにおいては、これらのデータの取得が精力的にすすめられてきた<sup>1)~6)</sup>。しかし、燃料コンパクトの熱伝導率は、その製造方法、製造条件および製造原料等が異なれば、これに応じて変わるために、これらの発表済のデータを用いて、原研が開発をすすめている高温ガス炉の設計および安全解析をするわけにはいかない。それには、やはり実際の燃料コンパクトについて、これらの熱物性データを取得するのが望ましい。

本報告は、高温ガス実験炉に使用する燃料コンパクトと同じ方法および条件に従って製造したものおよび被覆粒子の充填されていないマトリックス成形体について、中心加熱による比較法により、その熱伝導率を測定し、その結果を述べたものである。また、コンパクトスリーブ間のギャップ熱伝達率についても測定したので、あわせてその結果を述べる。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置

本実験での燃料コンパクトの熱伝導率は、中心加熱による比較法により測定した。通常、熱伝導率を比較法により測定する場合、熱伝導率未知の板状試料を、それが既知の板状試料の間にサンドウィッチ状にはさみ、同一熱流による両試料中に生ずる温度勾配、 $\Delta T_1/l_1$ 、 $\Delta T_0/l_0$ を測定し、この値と既知の熱伝導率  $k_0$  とから、次の式に従って未知試料の熱伝導率  $k$  を算出する<sup>11)</sup> のが通例である。

$$k = k_0 \frac{\Delta T_0}{\Delta T_1} \cdot \frac{l_1}{l_0}$$

これに対して、試料が円筒状である場合、中心に熱源を置き、標準試料と測定試料を同心円状に配置すれば、板状試料同様比較法による熱伝導率の測定が可能であると考えられるが、その測定例はあまりみられない。しかし、燃料コンパクトの形状は円筒状であるから、実物を用い

て熱伝導率を測定しようとするなら、同心円状の配列による比較法が最も適当と考えられる。

Fig.1は、測定装置の構成を示したもので、中心にタンタル製棒状ヒーターを、このまわりに窒化ボロンの円筒、黒鉛円筒、実寸の燃料コンパクトおよび標準試料を同心円状に配置している。なお、標準試料にはIG-11黒鉛を使用した。ここで、窒化ボロンの円筒は、棒状ヒーターを試料の中心に配置させるためのものである。棒状ヒーターの寸法は、直径3mm、長さ30cmである。なお、軸方向の熱損失を少なくするために、試料の上下には、3mmの空間と黒鉛円板とを交互に3層ずつ配置し、さらにこの上下に多孔質黒鉛筒を配置した。これらを、黒鉛製およびセラミック製の台に乗せ、ガラスカーボンの炉心管中に入れる。熱電対は、内側の黒鉛筒中に3対、燃料コンパクト中に2対、外側の黒鉛スリーブ中に2対、計7対が装置の下部から挿入されている。内側の黒鉛筒中に挿入されている熱電対は、軸方向の温度分布を測定するためのものであり、これ以外の熱電対は、半径方向の温度分布を測定するためのものである。なお、熱電対にはPR-13を使用した。これらを組上げた外観を、Fig.2に示す。

棒状ヒーターには、変圧器を介して通電し、これを流れる電流及びこれへの印加電圧から、棒状ヒーターの出力を算出した。ヒーターへの印加電圧は、ヒーターの中央から上下にそれぞれ30mmの位置に取付けられた直径0.5mmのTa線により測定した。ヒーターを流れる電流は、変流器を介して測定した。なお電流計は、横河電機製デジタルACメータ、Type 2504を、変流器は、同社製Type 2241を、電圧計は、同社製ユニバーサルデジタル電圧計Type 2502を、温度の測定は、同社製デジタル電圧計Type 2805に、プラグインユニットとして直流電圧ユニットType 2831を取付けて使用した。実験装置の外観をFig.3に、制御部のそれをFig.4に示す。

実験は、中心ヒーターに規定の電圧を印加し、約3時間程度放置して、試料内の熱移動が平衡に達するのをまって、試料内の温度、ヒーターへの印加電圧およびこれを流れる電流を測定した。次に、約100°Cをめやすに棒状ヒーターへの印加電圧を昇圧し、約2時間程度放置し、再び熱移動が平衡に達するのを待って、試料内の温度、ヒーターへの印加電圧およびこれを流れる電流を測定した。以下これを1000°Cまでくりかえし、試料内の温度およびヒーターの出力を測定した。なお、試料内の温度は、常時記録させ、温度の変動状況をモニターし、測定時のみセレクタースイッチにより切換え、デジタル電圧計により測定した。比較法により熱伝導率を測定する場合、通常熱源の発熱量の測定は必要ないが、本実験では測定結果を補正するために、これを測定した。

## 2.2 試料の調製

熱伝導率の測定には、黒鉛粉末の種類およびバインダーの添加率を変えたマトリックス成形体およびこれらのマトリックスに被覆粒子を、22および30vol%充填した燃料コンパクトを使用した。マトリックス成形体および燃料コンパクトの調製方法を以下に示す。

マトリックス成形体については、フェノール樹脂をアルコールに溶かし、これに黒鉛粉末を加えて両者均一になるように十分に混合し、乾燥させたあと粉碎し、金型により温間で中空円筒形にプレス成形する。この生成形体は、電気炉により不活性ガス雰囲気中で、800°Cまで



ゆっくりと昇温して、フェノール樹脂を炭化し、つづいて1800°C、1時間、真空中で加熱し、脱ガス処理を行なう。燃料コンパクトについては、フェノール樹脂と黒鉛粉末の混合物を、回転ドラムを用いて被覆粒子のまわりにオーバーコートし、これを金型により温間プレス成形する。これ以後の工程については、マトリックス成形体の場合と全く同じである。マトリックス成形体及び燃料コンパクトの製造に使用した黒鉛粉末は、針状コークス黒鉛又は天然黒鉛と石油コークス黒鉛粉末を4:1に混合したものに、フェノール樹脂をそれぞれ、重量で20%添加したものである。燃料コンパクトの被覆粒子充填率は、30%および22%である。なお、マトリックス成形体および燃料コンパクトの調製に使用した黒鉛粉末の特性及び粉末の電子顕微鏡写真については、他の報告<sup>8)</sup>を参照されたい。

燃料コンパクトの側面および端面の外観を、それぞれFig.5およびFig.6に、燃料コンパクトの断面を、Fig.7に示す。温度測定用熱電対は、マトリックス成形体の場合、内外側面からそれぞれ、2.0mmに直径1.8mmの孔をあけて、これに挿入した。燃料コンパクトの場合も同様である。

### 3. 熱伝導率およびギャップ熱伝達率の算出

比較法により熱伝導率を測定する場合、通常、平板状の試料を標準試料の間にサンドウィッチ状にはさんで、これらの平板と垂直方向に定常熱流を与えて、試料と標準試料との温度勾配から試料の熱伝導率を求める。この場合、熱源からの熱損失は考慮に入れる必要はないが、定常熱流と垂直方向の熱流を極力押える必要がある。本実験の場合、試料を円筒状に配列している関係で、縦型比較法の場合ほど、垂直方向の熱損失を抑制するのは簡単ではない。そこで本実験では、軸方向の熱損失に対する抑制にはあまり考慮を払わずに、熱伝導率既知の試料を用いてこれらの損失量を求め、この値を用いて結果を補正することにした。

中心ヒーター、燃料コンパクトおよび黒鉛製標準試料が、Fig.8のような配置をとる場合、軸方向への熱ロスが無視できれば、無限円筒の伝熱の式により、(1)式が成立する。

$$Q_0 = \frac{2\pi K_C (T_1 - T_2)}{1_n \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi K_G (T_3 - T_4)}{1_n \frac{r_4}{r_3}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $Q_0$  (w/cm) は、中心ヒーターの発熱量、 $T_1, T_2, T_3$  および  $T_4$  は、それぞれ、 $r_1, r_2, r_3$  および  $r_4$  における温度、 $K_C$  および  $K_G$  は、それぞれ燃料コンパクトおよび標準試料の熱伝導率、 $r_1, r_2, r_3$  および  $r_4$  は、それぞれ燃料コンパクトの内半径、燃料コンパクトの外半径、標準試料の内半径および標準試料の外半径である。

一方、燃料コンパクトと標準試料(黒鉛スリーブ)との間のギャップ熱伝達率  $h$  (w/cm<sup>2</sup>°C) は次の(2)式で定義する。

$$Q = h A \Delta T \quad \dots\dots\dots (2)$$

ゆっくりと昇温して、フェノール樹脂を炭化し、つづいて1800°C、1時間、真空中で加熱し、脱ガス処理を行なう。燃料コンパクトについては、フェノール樹脂と黒鉛粉末の混合物を、回転ドラムを用いて被覆粒子のまわりにオーバーコートし、これを金型により温間プレス成形する。これ以後の工程については、マトリックス成形体の場合と全く同じである。マトリックス成形体及び燃料コンパクトの製造に使用した黒鉛粉末は、針状コークス黒鉛又は天然黒鉛と石油コークス黒鉛粉末を4:1に混合したものに、フェノール樹脂をそれぞれ、重量で20%添加したものである。燃料コンパクトの被覆粒子充填率は、30%および22%である。なお、マトリックス成形体および燃料コンパクトの調製に使用した黒鉛粉末の特性及び粉末の電子顕微鏡写真については、他の報告<sup>8)</sup>を参照されたい。

燃料コンパクトの側面および端面の外観を、それぞれFig.5およびFig.6に、燃料コンパクトの断面を、Fig.7に示す。温度測定用熱電対は、マトリックス成形体の場合、内外側面からそれぞれ、2.0mmに直径1.8mmの孔をあけて、これに挿入した。燃料コンパクトの場合も同様である。

### 3. 熱伝導率およびギャップ熱伝達率の算出

比較法により熱伝導率を測定する場合、通常、平板状の試料を標準試料の間にサンドウィッチ状にはさんで、これらの平板と垂直方向に定常熱流を与えて、試料と標準試料との温度勾配から試料の熱伝導率を求める。この場合、熱源からの熱損失は考慮に入れる必要はないが、定常熱流と垂直方向の熱流を極力押える必要がある。本実験の場合、試料を円筒状に配列している関係で、縦型比較法の場合ほど、垂直方向の熱損失を抑制するのは簡単ではない。そこで本実験では、軸方向の熱損失に対する抑制にはあまり考慮を払わずに、熱伝導率既知の試料を用いてこれらの損失量を求め、この値を用いて結果を補正することにした。

中心ヒーター、燃料コンパクトおよび黒鉛製標準試料が、Fig.8のような配置をとる場合、軸方向への熱ロスが無視できれば、無限円筒の伝熱の式により、(1)式が成立する。

$$Q_0 = \frac{2\pi K_C (T_1 - T_2)}{1_n \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi K_G (T_3 - T_4)}{1_n \frac{r_4}{r_3}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $Q_0$  (w/cm) は、中心ヒーターの発熱量、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  および  $T_4$  は、それぞれ、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  および  $r_4$  における温度、 $K_C$  および  $K_G$  は、それぞれ燃料コンパクトおよび標準試料の熱伝導率、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  および  $r_4$  は、それぞれ燃料コンパクトの内半径、燃料コンパクトの外半径、標準試料の内半径および標準試料の外半径である。

一方、燃料コンパクトと標準試料(黒鉛スリーブ)との間のギャップ熱伝達率  $h$  (w/cm<sup>2</sup>°C) は次の(2)式で定義する。

$$Q = h A \Delta T \quad \dots\dots\dots (2)$$

ギャップ内に温度差  $\Delta T$  (°C) が存在するとき、面積  $A$  (cm<sup>2</sup>) を通して、 $Q$  (w) の熱が流れるときの比例定数  $h$  が熱伝達率である。中心からギャップまでの半径を  $r_m$  (cm)、円筒の長さを  $L$  (cm) とすれば、

$$Q = h 2 \pi r_m L \Delta T \quad \dots\dots\dots (3)$$

$Q_0 = Q / L$ 、 $\Delta T = T_2 - T_3$  であるから

$$Q_0 = 2 \pi r_m h (T_2 - T_3) \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。

ところが、実際には Fig. 9 に示すように、試料の両端面から軸方向への熱ロス  $q_2$  が存在する。そのため、燃料コンパクト中を半径方向に移動する熱量と、黒鉛スリーブ中を半径方向に移動する熱量は等しくなく、(それぞれ  $Q_1$  および  $Q_2$  とする。)  $Q_0$  にある係数  $F_1$  および  $F_2$  を乗じたものとなる。すなわち、

$$Q_1 = Q_0 F_1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Q_2 = Q_0 F_2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

従って、(1)式は(7)および(8)式のようになる。

$$Q_1 = \frac{2 \pi K_C (T_1 - T_2)}{1_n \frac{r_2}{r_1}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$Q_2 = \frac{2 \pi K_G (T_3 - T_4)}{1_n \frac{r_4}{r_3}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $F_1$  および  $F_2$  の推定は、次のようにして行なった。燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブを、熱伝導率既知の黒鉛材を用いて製作し、中心を加熱したときに生ずる温度勾配を実測し、(7)および(8)式から  $Q_1$  および  $Q_2$  を計算し、 $Q_0$  との比から  $F_1$  および  $F_2$  を求める。なお、熱伝導率既知の黒鉛には IG-11 を、その熱伝導率は、野村らのデータ<sup>7)</sup>を用いた。なお、標準試料に IG-11 を選んだ理由については、同製品のロット間での性質のバラツキが少なく、品質が安定しているためである。このようにして求めた  $F_1$  および  $F_2$  を、Table 1 に示す。なお、 $F_1$  および  $F_2$  は、温度とともに変わるものと推定されるが、本実験の温度範囲においては一定とみなし、 $F_1$  は 0.96、 $F_2$  は 0.79 とした。このことは、IG-11 製ダミーコンパクトの部分で  $Q_0$  の 4%、同じく黒鉛スリーブの部分で  $Q_0$  の 17% の熱ロスが存在することを示している。

次に、燃料コンパクトおよびマトリックス成形体の熱伝導率を測定する場合であるが、IG-11 製ダミーコンパクトのかわりに、これらの物質を挿入した場合、これらの物質の熱伝導率は、IG-11 黒鉛よりも小さいから、 $Q_1$  および  $Q_2$  は、前に求めた値よりも小さくなる。この場合の  $Q_1$  の算出は、次のようにして行なった。まず、黒鉛スリーブ中の温度を実測し、(8)式により  $Q_2$  を計算し、 $F_2$  を求める。なお、この場合の  $F_2$  は 0.72 であった。これと先

に求めた  $F_2$  を比較すると、0.07 だけ小さくなっている。すなわち、燃料コンパクトまたはマトリックス成形体を挿入することにより、熱移動に対する抵抗が増加し、半径方向への熱移動量が7%減少すると考えた。

この場合、 $Q_1$  も同じ割合だけ減少すると考え、先に求めた0.96から0.07を減じ、 $F_1$  を0.89とする。この値を用いて、(7)式から燃料コンパクトおよびマトリックス成形体の熱伝導率を算出する。なお、燃料コンパクトとマトリックス成形体では、熱伝導率が異なるから、 $F_1$  および  $F_2$  も異なると考えられるが、本実験においては、値がバラついていたため、両者の間の差を確認することはできなかった。従って同じ値を用いた。

コンパクトスリーブ間のギャップ熱伝達率は、(4)式から算出したが、この場合  $Q_0$  のかわりに  $Q_m = (Q_1 + Q_2) / 2$  を使用した。

#### 4. 結果および考察

種々のマトリックス材の熱伝導率の測定結果を、Fig.10に示す。これらのマトリックス材の熱伝導率は、多結晶黒鉛同様、温度の増加に対して減少しており、その値は多結晶黒鉛のそれよりも小さく、例えばIG-11黒鉛の熱伝導率の70%程度である。このように、マトリックス材の熱伝導の挙動が、多結晶黒鉛のそれと類似しているのは、その組織が両者ともよく似ているためと考えられる。測定に供したマトリックス材は、黒鉛粉末にバインダーとしてフェノール樹脂を添加し、両者混合したあと型込めにより成形し、不活性ガスの雰囲気中で加熱し、フェノール樹脂を炭化して得られるもので、多結晶黒鉛の製造方法とよく似ている。しかし、マトリックス材の場合、バインダーには難黒鉛化性炭素であるフェノール樹脂を、フィラーには黒鉛粉末を用いており、焼成温度は1800°Cであるのに対し、多結晶黒鉛の場合は、バインダーに易黒鉛化性炭素であるピッチなどを、フィラーには層状構造の発達したコークス粒子を用いており、焼成温度は、2600°C以上であるなどのちがいがあ

る。黒鉛の熱伝導率は、フォノンの伝播によるので、空隙の表面や結晶子の不整合などところでは、フォノンの散乱がおこり、熱弾性波が減衰するために、結晶子径が小さく、空隙率の大きい材料では熱伝導率は悪く、逆に、結晶子径が大きく、空隙率の小さい材料では良い。従って、一般的には、黒鉛化性のよい材料の熱伝導はよく、難黒鉛化性材料では悪い。また、熱処理温度の効果も、同一材料について比較した場合、それが高くなるほど熱伝導はよくなる<sup>12)</sup>。マトリックス材は、多結晶黒鉛にくらべて熱処理温度が低いために、無定形炭素の量が多く、さらに黒鉛粉末フィラーとバインダー炭素との境界においては、両者の結合が弱く、結晶が不整合であるために、これらの領域ではフォノンの散乱がおこり、多結晶黒鉛よりも熱伝導が悪くなるものと考えられる。

Fig.10に示した4種のマトリックスのなかでは、針状コークス黒鉛系でバインダー10%のマトリックスの熱伝導率が最も大きく、次いで天然黒鉛-石油コークス黒鉛系でバインダー20%のマトリックス、同じ黒鉛系で、バインダー10%のマトリックス、針状コークス黒鉛

に求めた  $F_2$  を比較すると、0.07 だけ小さくなっている。すなわち、燃料コンパクトまたはマトリックス成形体を挿入することにより、熱移動に対する抵抗が増加し、半径方向への熱移動量が7%減少すると考えた。

この場合、 $Q_1$  も同じ割合だけ減少すると考え、先に求めた0.96から0.07を減じ、 $F_1$  を0.89とする。この値を用いて、(7)式から燃料コンパクトおよびマトリックス成形体の熱伝導率を算出する。なお、燃料コンパクトとマトリックス成形体では、熱伝導率が異なるから、 $F_1$  および  $F_2$  も異なると考えられるが、本実験においては、値がバラついていたため、両者の間の差を確認することはできなかった。従って同じ値を用いた。

コンパクトスリーブ間のギャップ熱伝達率は、(4)式から算出したが、この場合  $Q_0$  のかわりに  $Q_m = (Q_1 + Q_2) / 2$  を使用した。

#### 4. 結果および考察

種々のマトリックス材の熱伝導率の測定結果を、Fig.10に示す。これらのマトリックス材の熱伝導率は、多結晶黒鉛同様、温度の増加に対して減少しており、その値は多結晶黒鉛のそれよりも小さく、例えばIG-11黒鉛の熱伝導率の70%程度である。このように、マトリックス材の熱伝導の挙動が、多結晶黒鉛のそれと類似しているのは、その組織が両者ともよく似ているためと考えられる。測定に供したマトリックス材は、黒鉛粉末にバインダーとしてフェノール樹脂を添加し、両者混合したあと型込めにより成形し、不活性ガスの雰囲気中で加熱し、フェノール樹脂を炭化して得られるもので、多結晶黒鉛の製造方法とよく似ている。しかし、マトリックス材の場合、バインダーには難黒鉛化性炭素であるフェノール樹脂を、フィラーには黒鉛粉末を用いており、焼成温度は1800°Cであるのに対し、多結晶黒鉛の場合は、バインダーに易黒鉛化性炭素であるピッチなどを、フィラーには層状構造の発達したコークス粒子を用いており、焼成温度は、2600°C以上であるなどのちがいがあ

黒鉛の熱伝導率は、フォノンの伝播によるので、空隙の表面や結晶子の不整合などところでは、フォノンの散乱がおこり、熱弾性波が減衰するために、結晶子径が小さく、空隙率の大きい材料では熱伝導率は悪く、逆に、結晶子径が大きく、空隙率の小さい材料では良い。従って、一般的には、黒鉛化性のよい材料の熱伝導はよく、難黒鉛化性材料では悪い。また、熱処理温度の効果を、同一材料について比較した場合、それが高くなるほど熱伝導はよくなる<sup>12)</sup>。マトリックス材は、多結晶黒鉛にくらべて熱処理温度が低いために、無定形炭素の量が多く、さらに黒鉛粉末フィラーとバインダー炭素との境界においては、両者の結合が弱く、結晶が不整合であるために、これらの領域ではフォノンの散乱がおこり、多結晶黒鉛よりも熱伝導が悪くなるものと考えられる。

Fig.10に示した4種のマトリックスのなかでは、針状コークス黒鉛系でバインダー10%のマトリックスの熱伝導率が最も大きく、次いで天然黒鉛-石油コークス黒鉛系でバインダー20%のマトリックス、同じ黒鉛系で、バインダー10%のマトリックス、針状コークス黒鉛

系でバインダー20%のマトリックスの順になっている。これら4種のマトリックスの熱伝導率を比較する場合、前に述べた因子のほかに、ファイラー黒鉛粒子の層面の配列についても、考慮する必要がある。一般に、黒鉛結晶の層平面内の熱伝導率は、C軸方向のその100倍程度大きいから、マトリックス内においてファイラー黒鉛粒子の層面が、半径方向に優先的に配列していれば、それがランダムな配列よりも熱伝導はよいはずである。これらの実験に使用したものと全く同じマトリックス材の組織観察によれば、バインダー10%の場合、20%の場合よりも、ファイラー黒鉛の層面は、半径方向に対して一層優先的に配列していた。そのため、熱膨張の測定では、明らかにバインダー10%の方が、20%の場合よりも大きかった<sup>8)</sup>。しかし、熱伝導の場合は、必ずしもこれと対応せず、天然黒鉛-石油コークス黒鉛系マトリックスの場合には、その順序が逆転している。以上のことから、マトリックス成形体の熱伝導においては、熱膨張にみられたほどの黒鉛粒子の層面の配列の効果がみられないことがわかる。

被覆粒子充填率、マトリックス用黒鉛粉末の種類およびバインダー添加率を変えた場合の燃料コンパクトの熱伝導率の測定結果を、Fig.11に示す。針状コークス黒鉛系燃料コンパクトについては、被覆粒子充填率30v/oの場合のみ測定したが、天然黒鉛-石油コークス黒鉛混合系については、被覆粒子の充填率22v/oと30v/oについて測定した。これらの燃料コンパクトに充填した被覆粒子は、MK-III仕様で、直径600 $\mu$ mの球状UO<sub>2</sub>を核に、低密度PyC、高密度PyC、SiC、高密度PyCを、この順序で被覆したもので、その直径は920 $\mu$ mである。燃料コンパクトのマトリックス密度は、1.65~1.70 $g/cm^3$ の範囲にある。

以上の測定結果から、燃料コンパクトの熱伝導率は、温度に対して減少し、天然黒鉛-石油コークス黒鉛系で、バインダー添加率20%、被覆粒子充填率30v/oの燃料コンパクトの熱伝導率は、900°Cにおいて、0.23(W/cm<sup>2</sup>°C)である。また、燃料コンパクトの熱伝導率は、被覆粒子の充填率の増加に対して小さくなっているが、このような傾向は、Mooreら<sup>4), 5)</sup>およびGoeddelら<sup>6)</sup>の結果にもみられる。これは、充填した被覆粒子のみかけの熱伝導率が小さいことと、コンパクト内でのファイラー黒鉛粒子の配列に起因している。被覆粒子は、熱分解炭素やSiCやUO<sub>2</sub>からなる複合材であるから、個々の材料の熱伝導の寄与を考慮に入れる必要がある。これらの個々の材料の熱伝導率に関してUO<sub>2</sub>のそれは、0.03W/cm<sup>2</sup>°C熱分解炭素のそれは、蒸着条件にもよるが、被覆粒子に乘着した熱分解炭素の場合0.08W/cm<sup>2</sup>°C、SiCのそれは0.36W/cm<sup>2</sup>°Cである。SiCの熱伝導率が、マトリックス材のそれとほぼ同じである以外、他はいずれもマトリックス材のそれを大巾に下まわっているから、被覆粒子のみかけの熱伝導率は、マトリックスのそれよりも小さいと推定される。従って、これを分散した燃料コンパクトは、マトリックス単独の場合よりも熱伝導率が小さい。

測定に供した燃料コンパクトは、オーバーコート法により製造しているために、ファイラー黒鉛粒子の層面は、被覆粒子の表面と平行に配列する傾向にあり、マトリックス成形体内のファイラー黒鉛粒子の層面は、成形圧方向と垂直に配列する傾向にある。前にも述べた通り、黒鉛の熱伝導率は、C軸方向よりも層平面内の方が大きく、熱の移動方向は円筒状成形体の半径方向であるから、熱の移動方向と黒鉛粒子の層面の配列が一致しているマトリックス成形体は、燃料コンパクトよりも熱伝導率が大きくなる。

筆者らと同じオーバーコート-温間プレス法により製造したEverettら<sup>2)</sup>の燃料コンパクト

の熱伝導率と筆者らのそれとを比較すると、筆者らの結果より若干大きい、よく一致している。Everett らの燃料コンパクトの製造に使用した被覆粒子、バインダーおよびマトリックス用黒鉛粉末の諸元、製造条件およびコンパクトの特性など、必ずしも明らかではないが、同じオーバーコート法を採用したために、比較的近い熱伝導率が得られたものと推定される。Johnson<sup>1)</sup>、Mooreら<sup>4),5)</sup>、Goedde ら<sup>6)</sup>は燃料コンパクトおよび燃料ロッドの熱伝導率を測定しているが、製造方法が異なるために、彼らのデータと筆者らのデータを比較しても、あまり意味をなさない。なお、これまでに測定された燃料コンパクトの熱伝導率のデータを、附録にまとめて示した。

燃料コンパクトとスリーブの間のギャップの熱伝達率の測定結果を、Fig.12に示す。これらの測定に供した試料のギャップ間隔を、Table 2に示す。なお、測定雰囲気は、大気圧のHeガスである。ギャップ熱伝達率は、マトリックス材や燃料コンパクトの熱伝導率と異なり、温度とともに増加している。

棒形式の燃料を採用している高温ガス炉において、ギャップ熱伝達率は、重要な設計データであるから、ドラゴン計画およびPeach Bottom 炉の開発においても、この種のデータの収集を行っているが、研究結果は全く公表されていない。軽水炉の場合、Dean<sup>9)</sup>は、焼結 $UO_2$ ペレットとジルカロイ-2被覆管の間の接触熱伝達率を、ペレットおよびジルカロイ-2の表面粗さおよび両材料の接触圧(300-700 (psi))をパラメータにとり測定を試みている。この場合の測定雰囲気は、大気圧のアルゴンである。彼の測定によれば、接触熱伝達率は、接触面に作用する圧力とともに増加し、表面粗さとは、これが粗くなるに従って減少している。彼は、接触面の圧が零の場合の測定は行なっていないが、彼のデータを外挿し、表面粗さの影響を調べてみると、表面粗さが粗くなるに従って、接触熱伝達率は小さくなっている。

$UO_2$ ペレットとジルカロイ-2被覆管の間の接触熱伝達率の測定値を、接触圧零に外挿すると、(この場合 $UO_2$ ペレットの表面粗さ $110^*$  ( $\mu\text{in}$ )、ジルカロイ-2の表面粗さ $55$  ( $\mu\text{in}$ ) 測定雰囲気、Ar, ガス圧、大気圧)  $0.68$  ( $\text{w}/\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )となる。この値は、筆者らの測定した燃料コンパクト-黒鉛スリーブ間のギャップ熱伝達率にくらべてかなり大きい。Deanの測定雰囲気は、大気圧のアルゴンであるのに対し、筆者らのそれは、大気圧のヘリウムである。接触面の熱伝達率は、接触点を通しての熱伝導、雰囲気ガスの伝導および対流による伝熱、放射による伝熱が加算されたものであるから、Ar 1気圧における $UO_2$ -ジルカロイの接触熱伝達率は、He 1気圧におけるコンパクト-黒鉛のそれより小さいはずである。(Heガスの熱伝導率は、Arガスのそれにくらべて約1桁大きい。)このようにならないのはギャップ間隔のちがいによるものと推定される。なぜなら、Deanは、 $UO_2$ ペレットおよびジルカロイ-2の円板状試料を重ね合わせ測定しているのに対し、筆者らは円筒状試料を用いているため、Deanの方が接触がよいものと思われる。

燃料コンパクト-黒鉛スリーブの間のギャップ熱伝達率を、ヘリウムガスの熱伝導率から計算し、その結果をTable 3に示す。この場合、ギャップの熱伝達は、ヘリウムガスの伝導によ

\* 表面粗さは「最大高さ」(microinch)により表わしている。

る伝熱だけを考え、ギャップ間隔は0.25 mm、ヘリウムガスは1気圧、ヘリウムガスの熱伝導率は、TPRCデータ集<sup>10)</sup>から引用した。この結果とFig.12の結果とを比較すると、両者はほぼ一致している。燃料コンパクトと黒鉛スリーブの接触面においては、両者の接触点を通しての伝導、ヘリウムガスの対流による伝熱、熱放射による伝熱の寄与があるから、これらの全てを考慮に入れるならば、実験値は計算値を上まわるはずである。しかし、実験結果はこのようなになっていない。これは、 $Q_c$ の評価が小さすぎたためと推定される。

Fig.12において、マトリックスの種類を変えた場合、ギャップ熱伝達率はそれぞれ異なる値を示している。Deanによれば、ギャップ熱伝達率は、接触面の粗さの影響を受けるが、この4種のコンパクトの表面粗さは、ほとんど同じであるから、これはギャップ間隔のちがいによるものと考えるべきであろう。

## 5. ま と め

天然黒鉛-石油コークス黒鉛混合粉および針状コークス黒鉛粉に、フェノール樹脂を10%または20%添加したマトリックス材およびこれらのマトリックス材に、被覆粒子を22%または30%充填した燃料コンパクトの熱伝導率およびコンパクトと黒鉛スリーブの間のギャップ熱伝達率を測定した。その結果、次のことが判明した。

1. マトリックス材および燃料コンパクトの熱伝導率は、温度の増加に対して減少する。
2. マトリックス材の熱伝導率は、黒鉛材(IG-11)にくらべて小さく、燃料コンパクトの熱伝導率は、マトリックス材のそれよりもさらに小さい。
3. 被覆粒子充填率22%と30%の燃料コンパクトでは、後者の方が熱伝導率は小さく、被覆粒子の充填率が増加すると熱伝導率は減少する。
4. 燃料コンパクトと黒鉛スリーブの間のギャップ熱伝達率は、温度とともに増加する。

## 謝 辞

本報告をまとめるにあたり、種々の有益な御助言を賜った燃料工学部 下川部長に謝意を表す。

また、黒鉛標準試料の熱拡散率を測定していただいた、プルトニウム燃料研究室 福島奨氏に謝意を表す。



る伝熱だけを考え、ギャップ間隔は0.25 mm、ヘリウムガス圧は1気圧、ヘリウムガスの熱伝導率は、TPROデータ集<sup>10)</sup>から引用した。この結果とFig.12の結果とを比較すると、両者はほぼ一致している。燃料コンパクトと黒鉛スリーブの接触面においては、両者の接触点を通しての伝導、ヘリウムガスの対流による伝熱、熱放射による伝熱の寄与があるから、これらの全てを考慮に入れるならば、実験値は計算値を上まわるはずである。しかし、実験結果はこのようなになっていない。これは、 $Q_c$ の評価が小さすぎたためと推定される。

Fig.12において、マトリックスの種類を変えた場合、ギャップ熱伝達率はそれぞれ異なる値を示している。Deanによれば、ギャップ熱伝達率は、接触面の粗さの影響を受けるが、この4種のコンパクトの表面粗さは、ほとんど同じであるから、これはギャップ間隔のちがいによるものと考えらるべきであろう。

## 5. ま と め

天然黒鉛-石油コークス黒鉛混合粉および針状コークス黒鉛粉に、フェノール樹脂を10%または20%添加したマトリックス材およびこれらのマトリックス材に、被覆粒子を22%または30%充填した燃料コンパクトの熱伝導率およびコンパクトと黒鉛スリーブの間のギャップ熱伝達率を測定した。その結果、次のことが判明した。

1. マトリックス材および燃料コンパクトの熱伝導率は、温度の増加に対して減少する。
2. マトリックス材の熱伝導率は、黒鉛材(IG-1)にくらべて小さく、燃料コンパクトの熱伝導率は、マトリックス材のそれよりもさらに小さい。
3. 被覆粒子充填率22%と30%の燃料コンパクトでは、後者の方が熱伝導率は小さく、被覆粒子の充填率が増加すると熱伝導率は減少する。
4. 燃料コンパクトと黒鉛スリーブの間のギャップ熱伝達率は、温度とともに増加する。

## 謝 辞

本報告をまとめるにあたり、種々の有益な御助言を賜った燃料工学部 下川部長に謝意を表す。

また、黒鉛標準試料の熱拡散率を測定していただいた、プルトニウム燃料研究室 福島奨氏に謝意を表す。

る伝熱だけを考え、ギャップ間隔は0.25 mm、ヘリウムガスは1気圧、ヘリウムガスの熱伝導率は、TPRCデータ集<sup>10)</sup>から引用した。この結果とFig.12の結果とを比較すると、両者はほぼ一致している。燃料コンパクトと黒鉛スリーブの接触面においては、両者の接触点を通しての伝導、ヘリウムガスの対流による伝熱、熱放射による伝熱の寄与があるから、これらの全てを考慮に入れるならば、実験値は計算値を上まわるはずである。しかし、実験結果はこのようなになっていない。これは、 $Q_0$ の評価が小さすぎたためと推定される。

Fig.12において、マトリックスの種類を変えた場合、ギャップ熱伝達率はそれぞれ異なる値を示している。Deanによれば、ギャップ熱伝達率は、接触面の粗さの影響を受けるが、この4種のコンパクトの表面粗さは、ほとんど同じであるから、これはギャップ間隔のちがいによるものと考えらるべきであろう。

## 5. ま と め

天然黒鉛-石油コークス黒鉛混合粉および針状コークス黒鉛粉に、フェノール樹脂を10%または20%添加したマトリックス材およびこれらのマトリックス材に、被覆粒子を22%または30%充填した燃料コンパクトの熱伝導率およびコンパクトと黒鉛スリーブの間のギャップ熱伝達率を測定した。その結果、次のことが判明した。

1. マトリックス材および燃料コンパクトの熱伝導率は、温度の増加に対して減少する。
2. マトリックス材の熱伝導率は、黒鉛材(IG-11)にくらべて小さく、燃料コンパクトの熱伝導率は、マトリックス材のそれよりもさらに小さい。
3. 被覆粒子充填率22%と30%の燃料コンパクトでは、後者の方が熱伝導率は小さく、被覆粒子の充填率が増加すると熱伝導率は減少する。
4. 燃料コンパクトと黒鉛スリーブの間のギャップ熱伝達率は、温度とともに増加する。

## 謝 辞

本報告をまとめるにあたり、種々の有益な御助言を賜った燃料工学部 下川部長に謝意を表す。

また、黒鉛標準試料の熱拡散率を測定していただいた、プルトニウム燃料研究室 福島契氏に謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) Johnson, W.R., GA-A12910, Mar. (1974)
- 2) Everett, M.R., Manzel, R., Barr, P., Mayr, K., D.P. Report 686, Oct. (1969)
- 3) Binkele, L., Jül-1096-RW, Aug. (1974)
- 4) Moore, J.P., Eatherly, W.P., Godfrey, T.G., Long, Jr., E.L., Graves, R.S., Weaver, F.J., ORNL-5414, Jul. (1978)
- 5) Moore, J.P., Godfrey, T.G., Graves, R.S., Weaver, F.J., Eatherly, W.P., J. Nucl. Mater., 78, 131 (1978)
- 6) Goeddel, W.V., Koyama, K., Meyer, R.A., Pontelandorfo, J.M., Thompson, J.H., GAMD-4441, Jul. (1963)
- 7) S. Nomura, J. Shimokawa, Y. Sasaki, T. Oku, H. Imai, H. Matsuo, M. Eto, Y. Fukuda, K. Fujisaki, JAERI-M 8068, Feb. (1979)
- 8) 菊池輝男, 岩本多実, 井川勝市, JAERI-M 9052, Aug. (1980)
- 9) Dean, R.A., CVMA-127, May. (1962)
- 10) Touloukian, Y.S., Thermophysical properties of matter, The TPRC Data Series, Vol. 7, (1970)
- 11) 沢田正三, 実験物理学講座, 12, 温度と熱, 共立出版, 東京, Sep. (1975)
- 12) Jamieson, C.P., Mrozowski, S., Proceedings of the 1st Conference on Carbon, 155 (1956)

Table 1  $F_1$  and  $F_2$ 

°C	$F_1$	$F_2$
400	0.96	0.79
500	0.96	0.79
600	0.97	0.79
700	0.96	0.79
800	0.96	0.78
900	0.96	0.76
1000	0.94	0.76

Table 2 Clearance between fuel compact and graphite sleeve

	ギャップ間隔* (mm)
P2N810 - 黒鉛	0.25
P2N820 - 黒鉛	0.30
NOG10 - 黒鉛	0.30
NOG20 - 黒鉛	0.26

\* 直径基準

Table 3 Calculated thermal gap conductance

温度 (°C)	熱伝達率 ( $W/cm^2 \cdot ^\circ C$ )
427	0.185
527	0.204
627	0.223
727	0.242
827	0.259
927	0.277
1027	0.295

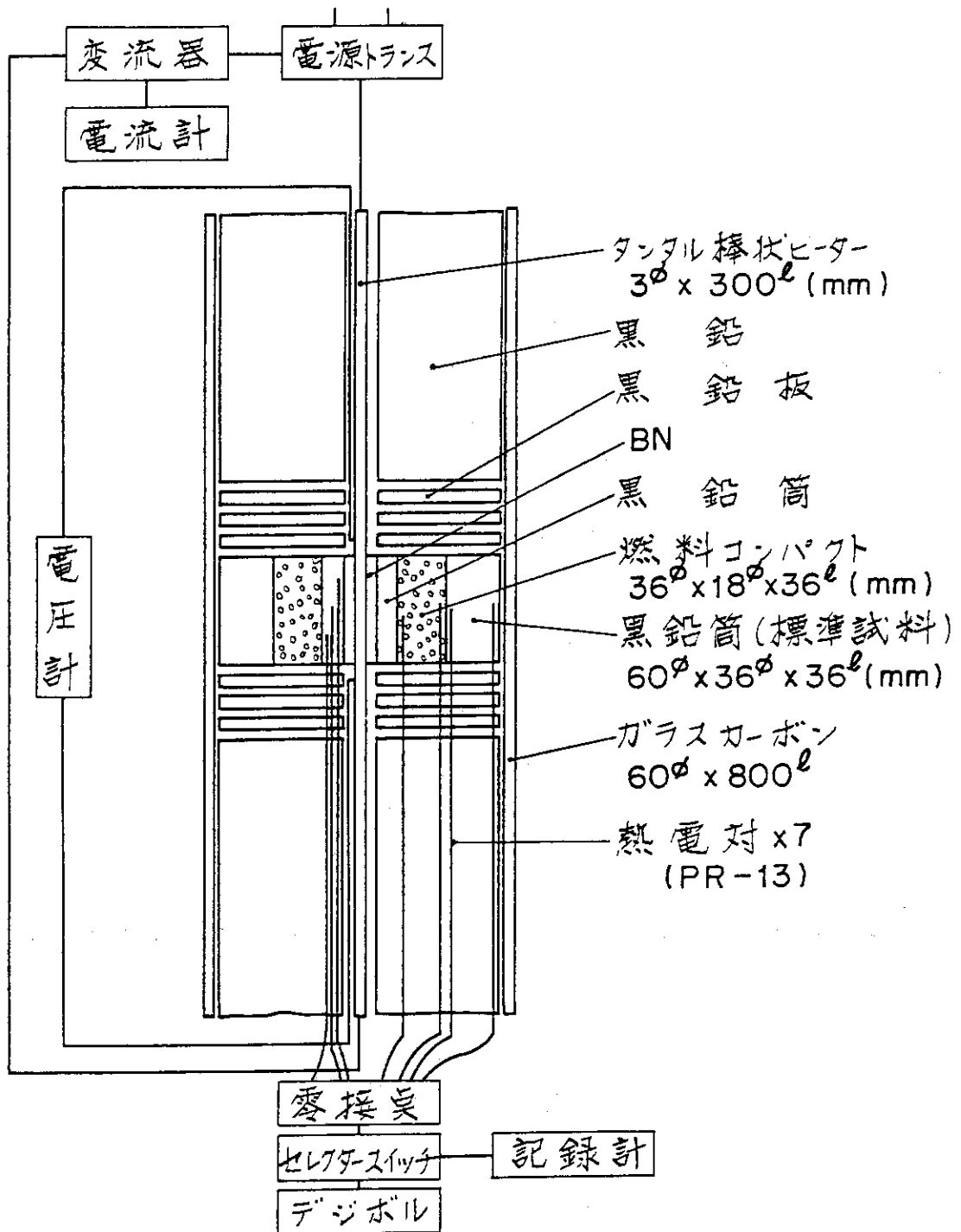


Fig. 1 Schematic representation of apparatus for thermal conductivity measurement

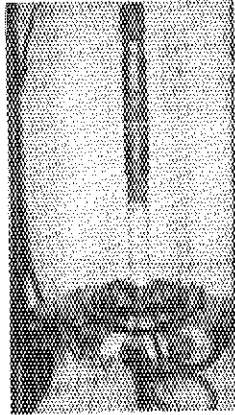


Fig. 2 Photograph of a specimen assembled for measurements

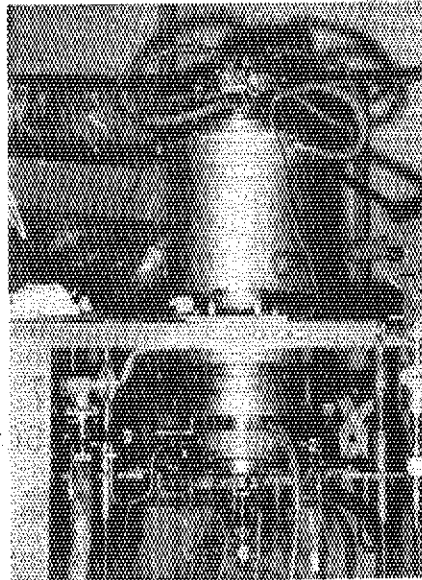


Fig. 3 Appearance of thermal conductivity measuring apparatus

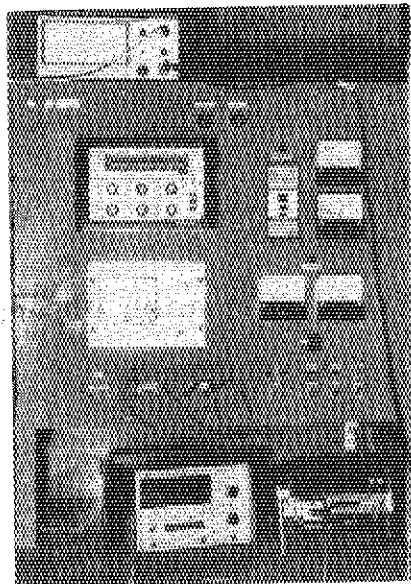


Fig. 4 Appearance of temperature control unit

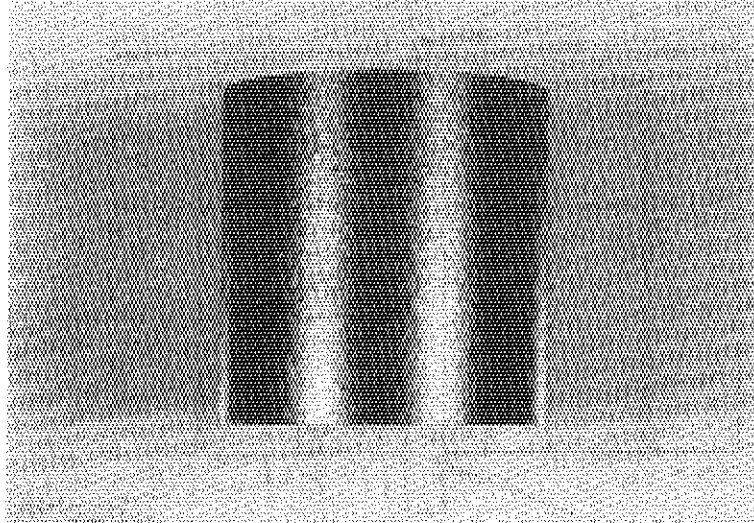


Fig. 5 Side view of fuel compact

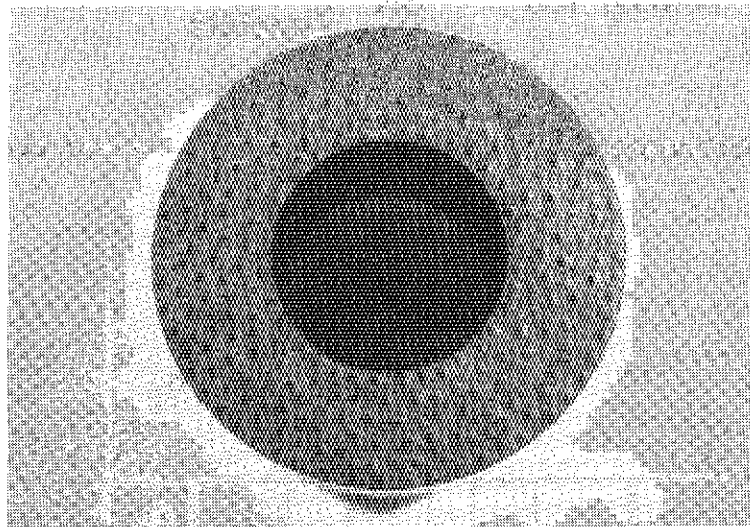


Fig. 6 End view of fuel compact

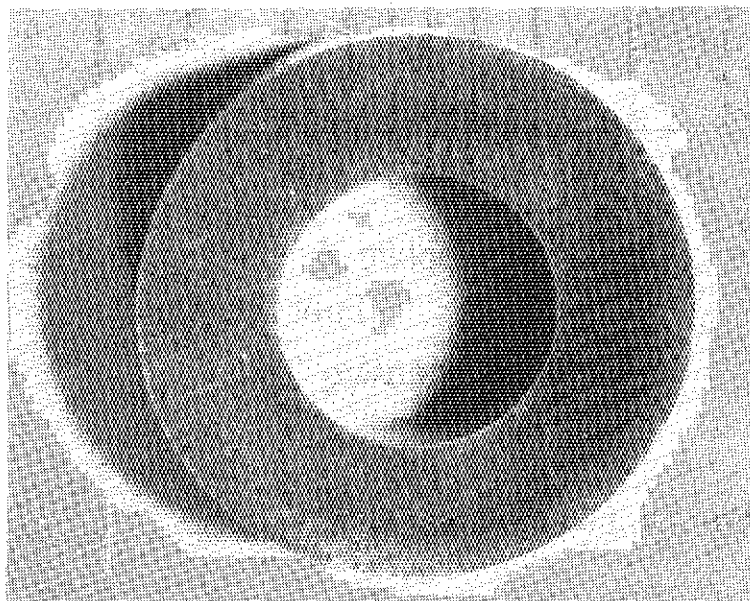


Fig. 7 Cross section of fuel compact

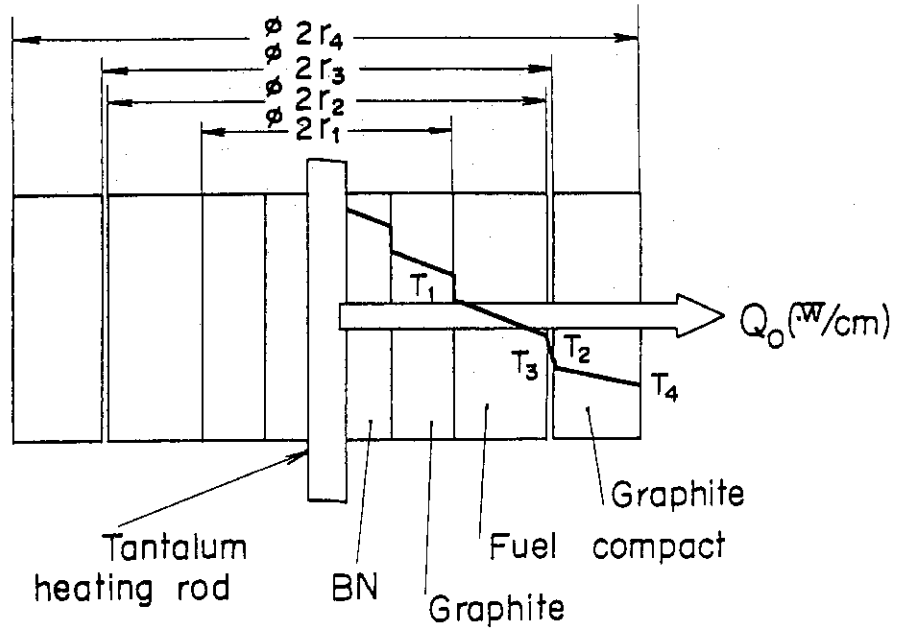


Fig. 8 Configuration of measuring position of thermal conductivity

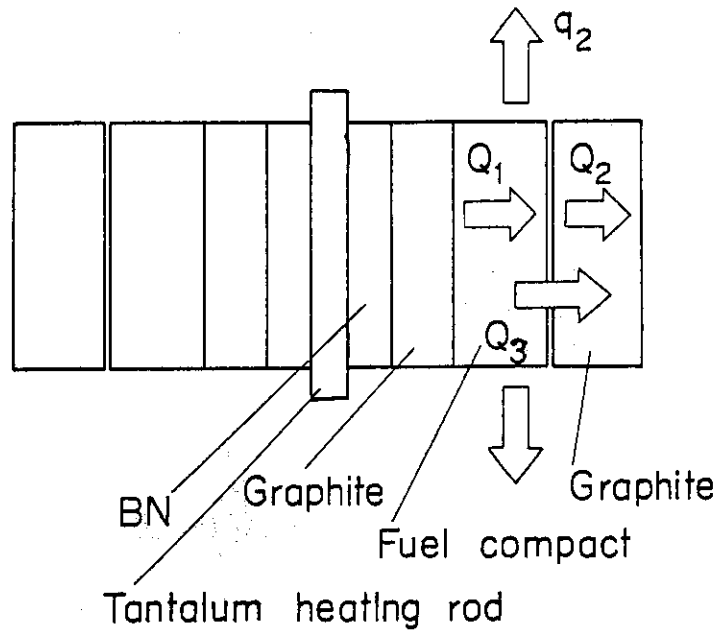


Fig. 9 Heat flow during measurement



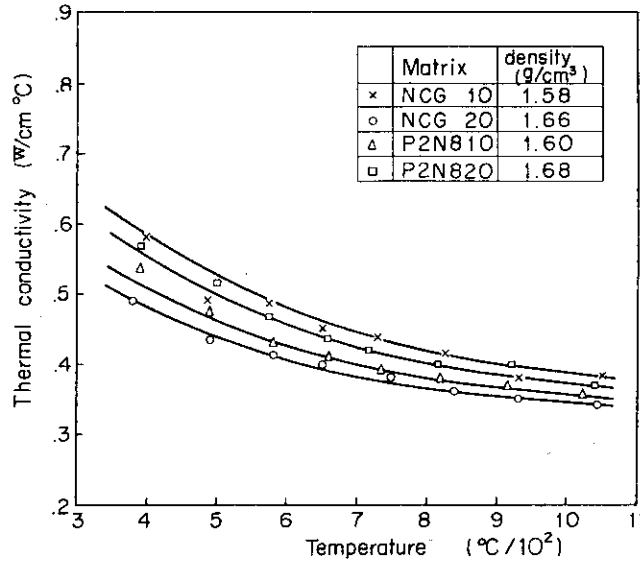


Fig. 10 Thermal conductivity of matrices

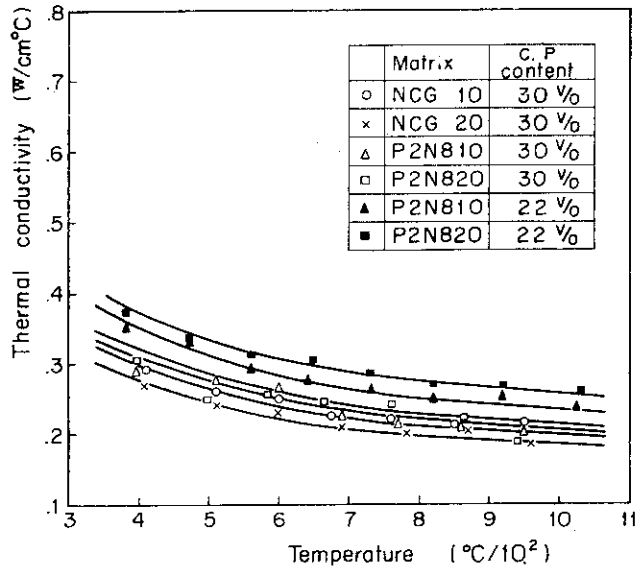


Fig. 11 Thermal conductivity of fuel compacts

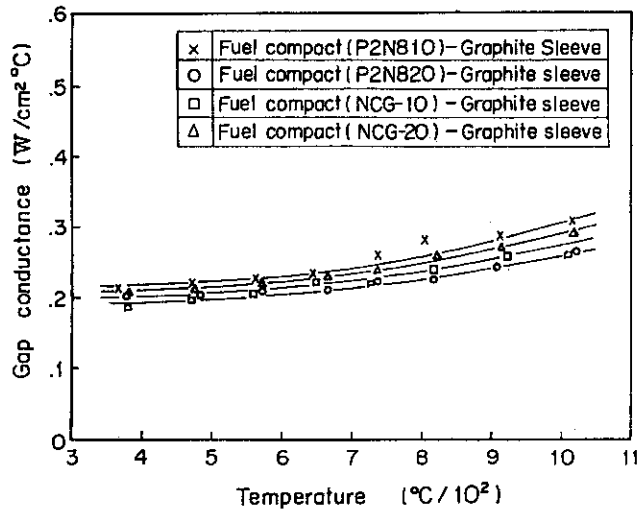


Fig. 12 Thermal gap conductance of fuel compact and graphite sleeve

## 附録 種々の高温ガス炉用燃料の熱伝導率

高温ガス炉用燃料は、その呼び方にちがいはあるものの（燃料コンパクトおよび燃料ロッド）、いずれも被覆粒子を黒鉛—炭素マトリックス中に分散したものを構造の基本としている。高温ガス炉燃料の製造には、いろいろな方法が考案されており、製造方法のちがいにより、得られた燃料の性質もかわってくる。さらに、使用した原料、充填する粒子や粒子充填率のちがいによっても燃料の性質が異なる。これらの燃料の熱伝導率は、燃料の設計および安全解析をすすめるうえで、重要な物性値であることから、多くの報告がなされている。Fig.A1は、これまでに報告された高温ガス炉用燃料の熱伝導率のなかから、入手できたデータをまとめたものである。測定に供された燃料は、多種多様であり、その明細をTable A1に示す。なおこの図には、比較のために、燃料のほか、被覆粒子の充填されていないマトリックスや黒鉛（IG-11）の熱伝導率も示した。

Fig.A1のNo 1～No 4は、Johnsonのデータ<sup>1)</sup>で、シム粒子の添加率を、0、11、23および36 v/oと変えた場合の燃料ロッドの熱伝導率である。ここで、シム粒子とは、被覆粒子の充填率を調整するために充填する球状の黒鉛粒子のことである。彼の測定では、燃料ロッドの熱伝導率は、シム粒子の充填量とともに増加し、シム粒子の充填率35 v/oの場合の熱伝導率は、シム粒子充填率0の場合に比較し、約2倍大きい。

No 5のデータは、Everettら<sup>2)</sup>の高温ガス炉燃料の照射挙動の抄録から引用したもので、Condeらの測定になるものである。原報文が入手できないため、充填粒子の仕様、マトリックス原料、熱伝導率の測定方法が明らかでないが、コンパクトの製造方法にはオーバーコート法を採用している。筆者らの熱伝導率の測定に供した燃料コンパクトも同じ製造方法に従っており、マトリックスの組織も似ていると推定されることから、その熱伝導率も筆者らの結果（No 20）に近い値が得られている。

No 6のデータは、A-3マトリックスと呼ばれるボール燃料用のマトリックス材の熱伝導率の測定データで、Binkele<sup>3)</sup>によるものである。その組成は、天然黒鉛粉末と石油コークス黒鉛粉末を、4：1に混合し、フェノール樹脂により結合したもので、筆者らのマトリックスと組成は全く同じである。Binkeleの結果と筆者らの結果（No 19）を比較すると、組成はほぼ同じであるにもかかわらず、熱伝導率にはかなり大きなちがいがみられる。

Mooreら<sup>5)</sup>は、被覆粒子充填率、0、13、22および35%における燃料ロッドの熱伝導率を調べている。No 7～No 10は彼らの測定結果である。これらの燃料ロッドは、全て押出し法により製造したものである。No 11もMooreらのデータであるが、スラグ注入法により製造されたものである。なお、これらの燃料ロッドに充填した被覆粒子は、カーボン粒子に熱分解炭素を被覆したもので、 $UO_2$ に熱分解炭素を被覆したのではない。これらの測定から、燃料ロッドの熱伝導率は、被覆粒子の充填率の増加に対して減少することを確認している。また、

引用文献の番号は、本文の参考文献を参照

スラグ注入法により製造した燃料ロッドの熱伝導率は、押出し法により製造したそれに比べて、かなり小さいことがわかった。これは、空隙が多くマトリックス密度が小さいためである。

Goeddeら<sup>6)</sup>は、型込め法(成形温度800°C)および押出し法(成形温度70°C)により製造したコンパクト(直径2.45(mm),長さ5.08(mm))から、巾1.88(mm),厚さ3.17(mm),長さ4.44(mm)の板状試片を切り出し、この試片に直接通電して加熱し、試料の中心および表面の温度をパイロメータで測定し、その温度勾配から、燃料コンパクトおよびマトリックスの熱伝導率を求めている。No 12—No 17はその結果で、温間プレスにより製造した試料については、粒子充填率0, 10および30%, 押出し成形により製造した試料については、粒子充填率0, 20および30%の場合を示している。これらの結果から、いずれの方法により製造した燃料コンパクトも、粒子充填率の増加に対して、熱伝導率は減少した。また、熱間プレスにより製造した試料の方が、押出しプレスにより製造した試料よりも、熱伝導率は大きかった。この原因として、熱間プレスにより製造した燃料コンパクトの方が、マトリックス密度が大きいためであると推定している。

No 18, No 19およびNo 20は、筆者からの結果で、No 18は、微粒子等方質黒鉛IG-11のそれを、No 19は、天然黒鉛粉末に石油コークス黒鉛粉末を重量比で4:1に混合し、フェノール樹脂を20%添加して焼成したマトリックス材のそれを、No 20は、このマトリックス材に、被覆粒子を30%充填した燃料コンパクトのそれである。筆者らの結果も、マトリックス材と燃料コンパクトでは、マトリックス材の方が大きい結果が得られた。

以上のデータをまとめると、

1. マトリックス材および燃料コンパクトの熱伝導率は、温度の増加に対して減少する。
2. 燃料コンパクトの熱伝導率は、粒子充填率の増加に対して減少する。
3. 型込め法および熱間プレス法により製造した燃料コンパクトの熱伝導率は、スラグ注入法により製造した燃料コンパクトのそれよりも大きい。

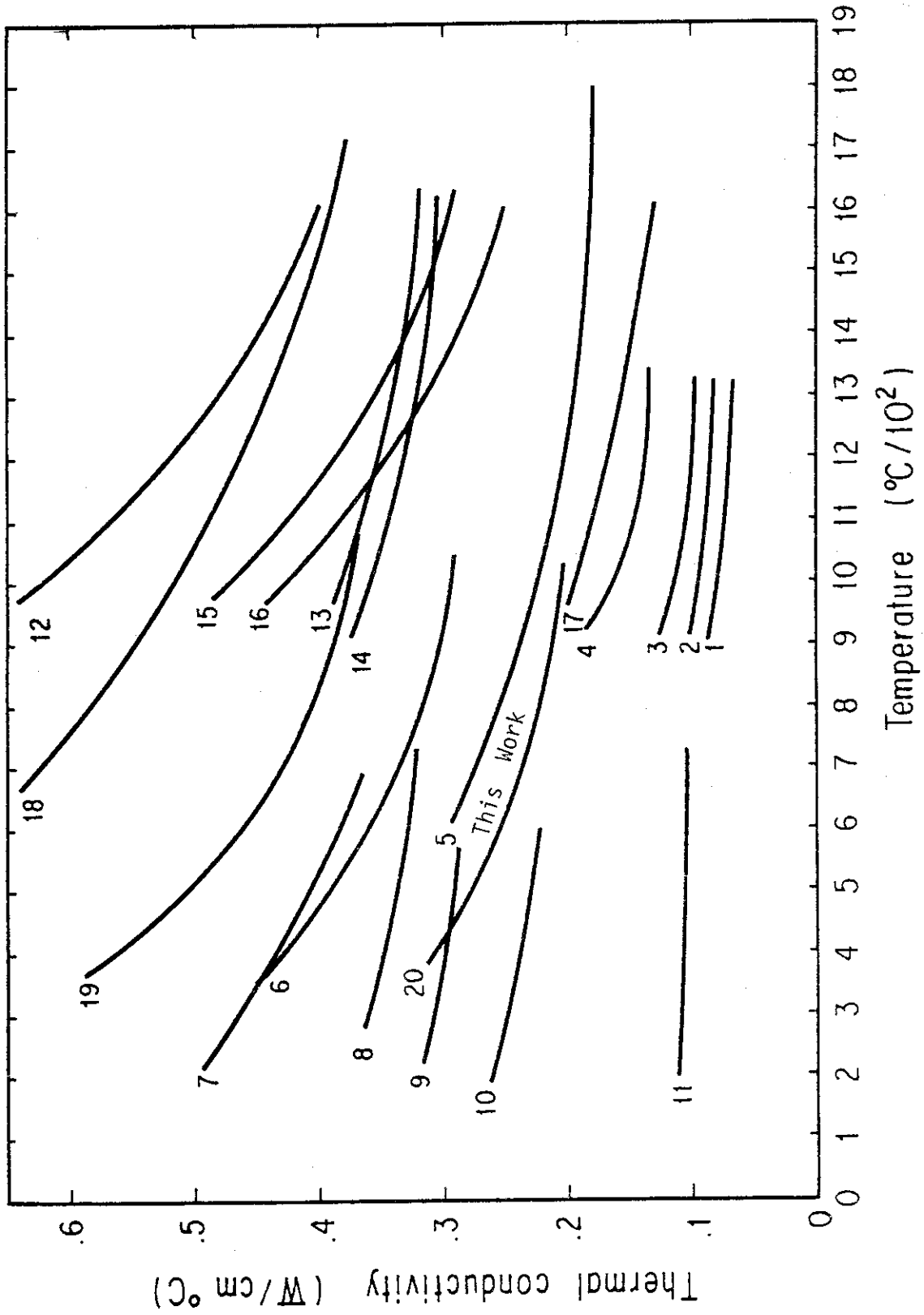


Fig. A-1 Thermal conductivity of fuel compacts and matrices

Table A.1 Fuel specimen used for measurements

No	試料名	試料寸法 (mm)		マトリックス密度 (g/cm <sup>3</sup> )	マトリックス粒子充填率 (%)	充填粒子	マトリックス原料	製法	測定法	文献
		外径	内径							
1	燃料ロッド	15.7	-	6.35	注2	注1	注6	スラグ注入法	径方向熱流法	GA-A12910
2	"	"	-	"	注3	注1	注6	"	"	"
3	"	"	-	"	注4	注1	注6	"	"	"
4	"	"	-	"	注5	注1	注6	"	"	"
5	コンパクト	4.42	3.16	40.3	24	-	型込め法	型込め法	"	D.P. Report 686
6	マトリックス	1.02	3.2	50.8	-	-	天然黒鉛, 石油コークス黒鉛, フェノール樹脂	型込め法	"	Jüli-1096-RW
7	マトリックス	"	"	"	13	注7	天然黒鉛, カーボンブラック, フルフルアルコ	押し出し法	HTL法	ORNJ-5414
8	燃料ロッド	"	"	"	22	注7	天然黒鉛, カーボンブラック, フルフルアルコ	"	"	"
9	"	"	"	"	35	注7	天然黒鉛, カーボンブラック, フルフルアルコ	"	"	"
10	"	"	"	"	58	注7	天然黒鉛, カーボンブラック, フルフルアルコ	"	"	"
11	"	"	"	"	-	-	天然黒鉛, 石油ピッチ	スラグ注入法	"	"
12	マトリックス	2.54	-	50.8	10	注8	黒鉛粉, ピッチ	熱間プレス法	径方向熱流法	GAMD-4441
13	コンパクト	"	-	"	30	注8	黒鉛粉, ピッチ	"	"	"
14	コンパクト	"	-	"	-	-	黒鉛粉, ピッチ	押し出し法	"	"
15	マトリックス	2.54	-	50.8	20	注8	黒鉛粉, ピッチ	"	"	"
16	コンパクト	"	-	"	30	注8	黒鉛粉, ピッチ	"	"	"
17	コンパクト	"	-	"	1.78	-	石油コークス系微粒等方質黒鉛	ラバープレス法	比較法	JAERI-M 8068
18	黒鉛 (IG-11)	36	18	36	-	-	天然黒鉛, 石油コークス黒鉛, フェノール樹脂	型込め法	"	本実験
19	マトリックス	"	"	"	1.67	-	天然黒鉛, 石油コークス黒鉛, フェノール樹脂	"	"	本実験
20	コンパクト	"	"	"	1.68	注9	天然黒鉛, 石油コークス黒鉛, フェノール樹脂	"	"	本実験

注1 充填粒子仕様

	fissile	fertile	shim
核組成	UC <sub>2</sub>	ThO <sub>2</sub>	H451*
核寸法(μ)	199	500	700~900
被覆形式	TRISO	BISO	—
被覆粒子寸法(μ)	594	828	—
平均密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.25	3.50	1.95

\* 黒鉛銘柄名

	粒子充填率 (v/o)			Th/U
	UC <sub>2</sub>	ThO <sub>2</sub>	シム	
注2	11.5	50.5	0	21.26
注3	9.0	40.0	11.0	21.49
注4	7.0	30.0	23.0	20.74
注5	4.5	19.5	36.0	21.0

注6 マトリックス組成

石油ピッチ	65 w/o
天然黒鉛粉末	30 w/o
添加物	5 w/o

## 注7 模擬粒子仕様

核	材 質	カーボン
	密 度 ( $g/cm^3$ )	1.4
	寸 法 ( $\mu m$ )	470
第 一 層	材 質	低密度パイロカーボン
	密 度 ( $g/cm^3$ )	1
	厚 さ ( $\mu m$ )	73
第 二 層	材 質	高密度パイロカーボン
	密 度 ( $g/cm^3$ )	2
	厚 さ ( $\mu m$ )	94

## 注8 被覆粒子仕様

核	材 質	UC <sub>2</sub>
	寸 法 ( $\mu m$ )	177-238
被 覆	材 質	パイロカーボン
	厚 さ ( $\mu m$ )	20
被 覆 粒 子	密 度 ( $g/cm^3$ )	3.87
	U 含有率 (%)	61.3

注9 被覆粒子仕様

核	材 質	UO <sub>2</sub>
	直 径 (μm)	600
	密 度 (g/cm <sup>3</sup> )	10.54
第 一 層	材 質	低密度パイロカーボン
	厚 さ (μm)	60
	密 度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.10
第 二 層	材 質	高密度パイロカーボン
	厚 さ (μm)	30
	密 度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.85
第 三 層	材 質	SiC
	厚 さ (μm)	25
	密 度 (g/cm <sup>3</sup> )	3.2
第 四 層	材 質	高密度パイロカーボン
	厚 さ (μm)	45
	密 度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.85
被 覆 粒 子	直 径 (μm)	920