

JAERI - M
82-134

キャプセル照射による高温ガス炉用燃料
棒の伝熱物性の測定(I)

1982年10月

菊池輝男・岩本多実・井川勝市

JAERI-M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。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 磯高野高速印刷

キャプセル照射による高温ガス炉用燃料棒の伝熱物性の測定(I)

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

(1982年9月2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接触熱コンダクタンスを、キャプセル照射により調べた。縮小寸法の燃料棒を、キャプセルに封入し、JRR-2, VT-1 において、700~1400°Cで、2サイクル照射し、燃料コンパクトおよびギャブ内に生ずる温度勾配を実測し、これと燃料コンパクトの発熱量とから、これらの熱物性値を求めた。その結果、これらの温度における燃料コンパクトの熱伝導率は $0.13 \sim 0.18 \text{ (W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)}$ 、コンパクトスリーブ間の接触熱コンダクタンスは、 $0.07 \sim 0.12 \text{ (W cm}^{-2} \text{ K}^{-1}\text{)}$ が得られた。一方、コンパクトスリーブ間の接触熱コンダクタンスを、軽水炉燃料の実験式から推定した結果、よい一致がみられた。

Measurement of Heat Transfer Properties of HTGR Fuel Pin by Capsule Irradiation (I)

Teruo KIKUCHI, Kazumi IWAMOTO and Katsuichi IKAWA

Division of Nuclear Fuel Research, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 2, 1982)

Thermal conductivity of fuel compact and contact thermal conductance between fuel compact and graphite sleeve for HTGR were studied by capsule irradiation. Fuel rod of reduced size was irradiated in JRR-2, VI-1 hole in the temperature range of 700 to 1400 °C and the temperature gradient in the fuel compact and at the fuel compact-graphite sleeve interface was measured. From these values and estimated linear heat rate of fuel pin, the thermal conductivity of the fuel compact and the contact thermal conductance were calculated. In this temperature range, the thermal conductivity of the fuel compact is 0.13 to 0.18 W cm⁻¹K⁻¹ and the contact thermal conductance is 0.07 to 0.12 W cm⁻²K⁻¹. It is found that the prediction of contact thermal conductance by the semi-experimental equation for light water reactor allows a relatively good description of that for HTGR.

Keywords; HTGR, Fuel Compact, Coated Particle, Capsule, Irradiation,
Heat Transfer Property, Thermal Conductivity, Contact
Thermal Conductance

目 次

1. はじめに	1
2. V1F-11H キャプセルの構造	2
3. 照射試料	2
4. 熱伝導率および接触熱コンダクタンスの測定方法	3
5. 結果および考察	4
5.1 燃料コンパクトの熱伝導率	4
5.2 接触熱コンダクタンス	6
6. ま と め	10
謝 辞	10
参 考 文 献	11

CONTENTS

1. Introduction	1
2. V1F-11H capsule	2
3. Specimen description	2
4. Measurement techniques of thermal conductivity and contact thermal conductance	3
5. Results and discussion	4
5.1 Thermal conductivity of fuel compact	4
5.2 Contact thermal conductance	6
6. Conclusion	10
Acknowledgment	10
References	11

1. はじめに

高温ガス炉用燃料コンパクトの熱伝導率やコンパクトスリーブ間の接触熱コンダクタンスは、高温ガス炉の設計および安全解析をすすめるうえで、きわめて重要な物性値である。すでに、燃料コンパクトの熱伝導率については、いくつか報告がみられるが¹⁾⁻³⁾、これらはいずれもスラグ注入法や押し出し法または熱間プレス法により製造したものについて測定した結果で、オーバーコート法により製造した燃料コンパクトについては、Everett ら⁴⁾の報告をみるにすぎない。また、コンパクトスリーブ間の接触熱コンダクタンスにいたっては、全く報告をみていない。

筆者らは、先に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接触熱コンダクタンスを、炉外で測定した⁵⁾。これらの測定に使用した燃料コンパクトは、オーバーコート法により製造した多目的高温ガス実験炉のMK-III仕様のもので、その測定は中心加熱による比較法により行なった。なお、この実験においては燃料コンパクトや黒鉛の熱伝導率がよいために、軸方向の熱損失が大きく、また、モリブデン金属製の中心ヒーターを使用しているために黒鉛からの脱ガスにより金属ヒーターが酸化されやすく、1000℃以上における熱伝導率のデータの取得は不可能であった。しかし、高温ガス実験炉の定常運転条件における燃料温度は、1200～1400℃が予定されており、これらの温度における熱物性データの取得が望まれている。本部告は、これらの温度領域における熱物性データを、燃料棒のキャプセル照射により取得することを試みたものである。実験に使用した燃料コンパクトは、先に報告したものと寸法以外は全て同じ仕様に従って調整し、これをキャプセルに封入して、JRR-2、VT-1孔で照射し、照射中の温度と発熱量から、燃料コンパクトの熱伝導率とコンパクトスリーブ間の接触熱コンダクタンスを算出した。本照射実験において、燃料コンパクトの受けた速中性子照射量は、VT-1孔の速中性子束が小さいうえに、照射時間が約600時間と短いことから、速中性子の照射の効果はほとんどないものと考えられる。

このキャプセルにつづいて、粒子充填率を変えた場合の燃料コンパクトの熱伝導率やギャップ間隔を変えた場合の接触熱コンダクタンスについても調べる予定であり、これらは本報告につづいて報告する予定である。

2. V1F-11H キャプセルの構造

照射に使用したV1F-11H キャプセルの構造を、Fig.1に示す。直径18mm、長さ18mmの燃料コンパクト（Fig.2）7個を、内径18mm、外径40mm、長さ150mmの黒鉛スリーブ（Fig.3）に入れ、これらをNb-1Zrの筒に入れて溶接により封じた。燃料コンパクトのスタックの両端には、黒鉛のダミーコンパクト、ニオブ板およびアルミナの熱遮蔽板が、この順で配置されている。なお、燃料コンパクトと、黒鉛スリーブの間のギャップ間隔は、0.16mm（直径基準）である。Nb-1Zr筒は、熱媒体（Al）で囲って、アルミニウム外筒中に封入した。Nb-1Zr筒中には、ヘリウムとアルゴン、1:9（体積比）の混合ガスが、Nb-1Zr筒とアルミニウム外筒との間には、ヘリウムが充填されているが、後者の充填ガスは、任意に換えることができ、キャプセルの照射温度の制御に利用される。なお、温度制御用ガスは、キャプセルの下部から導入し、上部から抜出す構造であり、この目的のためのガスにはヘリウムおよびネオンを用いた。

熱電対は、W-5Re / W-26Reを、燃料コンパクト中に3対、黒鉛スリーブ中に4対、先端を同一直径上にそろえて配置し、燃料棒の半径方向に生ずる温度勾配を測定した。燃料コンパクトにもうけた3個の穴は、熱電対を挿入するためのものである。W-Re熱電対の挿入位置を、Fig.1の右下に示す。キャプセルの軸方向の温度分布は、アルミニウムの熱媒体中に挿入した3対のCA熱電対により測定した。熱中性子照射量は、アルミニウムの熱媒体中に装荷したAl-Co合金（Coの含有率0.38%）を、照射終了後放射能分析を行ない求めた。

3. 照射試料

本照射試験に使用した燃料コンパクトは、球状の UO_2 核を熱分解炭素および熱分解炭化硅素で四重に被覆した粒子を、黒鉛粉末およびフェノール樹脂と混合し、温間で金型により円柱状に成形し、これを焼成炭化したものである。被覆粒子の特性の概要をTable 2に、燃料コンパクトのそれをTable 1に、燃料コンパクトの外観を、Fig.2に示す。これらの仕様は、炉外における熱伝導率の測定⁵⁾に使用した燃料コンパクトと、寸法以外は全て同じである。燃料コンパクトの断面を、Fig.4に示す。

2. V1F-11H キャプセルの構造

照射に使用したV1F-11H キャプセルの構造を、Fig.1に示す。直径18mm、長さ18mmの燃料コンパクト（Fig.2）7個を、内径18mm、外径40mm、長さ150mmの黒鉛スリーブ（Fig.3）に入れ、これらをNb-1Zrの筒に入れて溶接により封じた。燃料コンパクトのスタックの両端には、黒鉛のダミーコンパクト、ニオブ板およびアルミナの熱遮蔽板が、この順で配置されている。なお、燃料コンパクトと、黒鉛スリーブの間のギャップ間隔は、0.16mm（直径基準）である。Nb-1Zr筒は、熱媒体（Al）で囲って、アルミニウム外筒中に封入した。Nb-1Zr筒中には、ヘリウムとアルゴン、1：9（体積比）の混合ガスが、Nb-1Zr筒とアルミニウム外筒との間には、ヘリウムが充填されているが、後者の充填ガスは、任意に換えることができ、キャプセルの照射温度の制御に利用される。なお、温度制御用ガスは、キャプセルの下部から導入し、上部から抜出す構造であり、この目的のためのガスにはヘリウムおよびネオンを用いた。

熱電対は、W-5Re/W-26Reを、燃料コンパクト中に3対、黒鉛スリーブ中に4対、先端を同一直径上にそろえて配置し、燃料棒の半径方向に生ずる温度勾配を測定した。燃料コンパクトにもうけた3個の穴は、熱電対を挿入するためのものである。W-Re熱電対の挿入位置を、Fig.1の右下に示す。キャプセルの軸方向の温度分布は、アルミニウムの熱媒体中に挿入した3対のCA熱電対により測定した。熱中性子照射量は、アルミニウムの熱媒体中に装荷したAl-Co合金（Coの含有率0.38%）を、照射終了後放射能分析を行ない求めた。

3. 照射試料

本照射試験に使用した燃料コンパクトは、球状の UO_2 核を熱分解炭素および熱分解炭化硅素で四重に被覆した粒子を、黒鉛粉末およびフェノール樹脂と混合し、温間で金型により円柱状に成形し、これを焼成炭化したものである。被覆粒子の特性の概要をTable 2に、燃料コンパクトのそれをTable 1に、燃料コンパクトの外観を、Fig.2に示す。これらの仕様は、炉外における熱伝導率の測定⁵⁾に使用した燃料コンパクトと、寸法以外は全て同じである。燃料コンパクトの断面を、Fig.4に示す。

4. 熱伝導率および接触熱コンダクタンスの測定方法

燃料棒内の温度分布の1例を、Fig.5に示す。燃料棒内では、燃料コンパクト自身が、ウランの核分裂により発熱しているために、放物線状の分布をとるが、黒鉛スリーブは、それ自身発熱していないから（実際は γ 線の吸収による発熱があるが、本実験では無視した。）対数曲線に従う。また、コンパクトとスリーブの間のギャップ内では、ガスの熱伝導が固体のそれに比較して著しく悪いために、大きな温度降下を生じる。ここで、 r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 および r_6 における温度を、それぞれ T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 および T_6 とする。 r_3 は燃料コンパクトの半径で8.985 mm, r_4 は黒鉛スリーブの内半径で、9.065 mm, r_2, r_5, r_6 および r_6 は、熱電対の挿入位置で、それぞれ、燃料コンパクトの中心、中心から7.0, 11.0, 17.0 mmに位置している。

燃料コンパクトの熱伝導率およびコンパクトとスリーブの間の接触熱コンダクタンスの算出は、無限円筒の場合の伝熱の式に従っている。燃料コンパクトの単位長さ当りの発熱量を Q ($W cm^{-1}$), 熱伝導率を kc ($W cm^{-1} K^{-1}$) とすれば、

$$Q = 4 \pi kc (T_1 - T_3) \quad (1)$$

の関係があるから、 Q, T_1, T_3 が既知なら kc を求めることができる。ここで、 T_1 および T_3 は実測により、 Q はウラン量と熱中性子束とから計算により求めるか、または黒鉛スリーブ内の温度勾配を実測し、(2)式から求める。この場合黒鉛スリーブの熱伝導率は既知でなければならない。本実験では、黒鉛スリーブの温度勾配から求めた Q を使用し、ウラン量から算出した Q は参考にとどめた。

$$Q = \frac{2 \pi k_G (T_5 - T_6)}{1 n \frac{r_6}{r_5}} \quad (2)$$

ここで、 T_5 および T_6 は、黒鉛スリーブの半径 r_5 および r_6 における温度、 k_G は黒鉛の熱伝導率である。なお、黒鉛スリーブはIG-1黒鉛により製作し、その熱伝導率は文献値⁷⁾に依った。参考までに、VT-1孔内の熱中性子束および高速中性子束の分布を、それぞれFig.6およびFig.7に示す。

この実験で実測しているのは、燃料コンパクトの側面温度 T_3 ではなく、側面からわずかなかの部分の半径 r_2 における温度 T_2 である。直径 $2 r_2$ の燃料コンパクトの線出力密度を Q , 直径 $2 r_3$ の燃料コンパクトの線出力密度を Q' とすれば、 Q と Q' の間には(3)式の関係があるから、これを用いて Q を Q' に変換する。

$$Q' = \frac{r_3^2}{r_2^2} Q \quad (3)$$

燃料コンパクトの熱伝導率 kc は、次の(3)-a式から求めた。

$$k_c = \frac{Q'}{4\pi(T_1 - T_2)} \quad (3)-a$$

燃料コンパクトと黒鉛スリーブの接触面の接触熱コンダクタンス h ($W\text{cm}^{-2}\text{K}^{-1}$) は、黒鉛スリーブの内表面温度 T_4 および燃料コンパクトの表面温度 T_3 を、(4) および (5) 式から求め、これらを (6) 式に代入して算出した。

$$T_4 = \left(T_5 + \frac{Q}{2\pi k_G} \ln r_5 \right) - \frac{Q}{2\pi k_G} \ln r_4 \quad (4)$$

$$T_3 = -\frac{W}{4k_c} r_3^2 + T_2 + \frac{W}{4k_c} r_2^2 \quad (5)$$

$$h = \frac{Q}{2\pi r_m (T_3 - T_4)} \quad (6)$$

ここで、 $W = \frac{Q}{\pi r_3^2}$ ($W\text{cm}^{-2}$)、 r_m は r_3 と r_4 の算術平均である。

キャプセルは、JRR-2 の VT-1 孔内の所定の位置にセットし、温度制御ガスには He を充填し、照射を開始した。照射中のキャプセルの温度は、横河電機製デジタル電圧計 Type 2805 に、直流電圧ユニット Type 2831 をプラグインし、測定した。同じ温度での照射を 2 日間程度つづけ、次に約 100°C をめやすに、キャプセルの照射温度を変えた。キャプセルの照射温度の制御は、キャプセルの位置の調整および温度制御用ガス置換により行なった。なお、温度制御用ガスとしてヘリウムおよびネオンを用いたが、ネオンのかわりにアルゴンを用いれば、温度制御範囲は広がるが、中性子により放射化されるため、このガスを減衰させるための崩壊タンクが必要になる。キャプセルの照射位置は、 $57-43\text{cm}$ の範囲で調整した。以上の方法によりキャプセルの照射温度を制御し、 $700\sim 1400^\circ\text{C}$ を達成することができた。なお、キャプセル内の熱電対の番号 TC-10, TC-9, TC-7, TC-6, TC-5 および TC-4 は、Fig.5 に示した T_1, T_2, T_5 および T_6 の温度とそれぞれ対応している。本報告の燃料コンパクトおよびギャップの照射温度とは、それぞれの平均温度のことである。

5. 結果および考察

5.1 燃料コンパクトの熱伝導率

VIF-11H キャプセルは、JRR-2, VT-1 孔において、R2-53-03 サイクル (昭和53年6月19日~6月30日) から R2-53-04 サイクル (昭和53年7月10日~7月21日) まで照射した。VIF-11H キャプセルの照射温度を、Fig.8 および

$$k_c = \frac{Q'}{4\pi(T_1 - T_2)} \quad (3)-a$$

燃料コンパクトと黒鉛スリーブの接触面の接触熱コンダクタンス h ($\text{W cm}^{-2} \text{K}^{-1}$) は、黒鉛スリーブの内表面温度 T_4 および燃料コンパクトの表面温度 T_3 を、(4) および (5) 式から求め、これらを (6) 式に代入して算出した。

$$T_4 = (T_5 + \frac{Q}{2\pi k_G} \ln r_5) - \frac{Q}{2\pi k_G} \ln r_4 \quad (4)$$

$$T_3 = -\frac{W}{4k_c} r_3^2 + T_2 + \frac{W}{4k_c} r_4^2 \quad (5)$$

$$h = \frac{Q}{2\pi r_m (T_3 - T_4)} \quad (6)$$

ここで、 $W = \frac{Q}{\pi r_3^2}$ (W cm^{-3})、 r_m は r_3 と r_4 の算術平均である。

キャプセルは、JRR-2 の VT-1 孔内の所定の位置にセットし、温度制御ガスには He を充填し、照射を開始した。照射中のキャプセルの温度は、横河電機製デジタル電圧計 Type 2805 に、直流電圧ユニット Type 2831 をプラグインし、測定した。同じ温度での照射を 2 日間程度つづけ、次に約 100°C をめやすに、キャプセルの照射温度を変えた。キャプセルの照射温度の制御は、キャプセルの位置の調整および温度制御用ガス置換により行なった。なお、温度制御用ガスとしてヘリウムおよびネオンを用いたが、ネオンのかわりにアルゴンを用いれば、温度制御範囲は広がるが、中性子により放射化されるため、このガスを減衰させるための崩壊タンクが必要になる。キャプセルの照射位置は、57-43 cm の範囲で調整した。以上の方法によりキャプセルの照射温度を制御し、700~1400°C を達成することができた。なお、キャプセル内の熱電対の番号 TC-10、TC-9、TC-7、TC-6、TC-5 および TC-4 は、Fig. 5 に示した T_1 、 T_2 、 T_5 および T_6 の温度とそれぞれ対応している。本報告の燃料コンパクトおよびギャップの照射温度とは、それぞれの平均温度のことである。

5. 結果および考察

5.1 燃料コンパクトの熱伝導率

V1F-11H キャプセルは、JRR-2、VT-1 孔において、R2-53-03 サイクル (昭和 53 年 6 月 19 日~6 月 30 日) から R2-53-04 サイクル (昭和 53 年 7 月 10 日~7 月 21 日) まで照射した。V1F-11H キャプセルの照射温度を、Fig. 8 および

Fig.9 に示す。ここで、TC-7 は燃料コンパクトの中心に挿入した熱電対の指示温度 (T_1 に対応) であり、TC-5 は黒鉛スリーブの内側面近くに挿入した熱電対のそれ (T_5 に対応) である。これら以外の熱電対については、これらの図への記入を省略したが、この図の温度変化と同じパターンを示していた。これらの図の最上段には、原子炉内におけるキャプセルの位置を、中段にはキャプセル内に充填されている温度制御ガスを示す。これらの結果から、キャプセルを炉心側に約 30 mm 近づけることにより、燃料コンパクトの照射温度を約 120 °C、温度制御ガスをヘリウムからネオンに変えることにより、燃料コンパクトの照射温度を約 100 °C 上昇できることがわかる。

キャプセルの半径方向の温度分布に関して、燃料コンパクトの中心と外側面近傍の熱電対間の温度差は、照射温度の上昇とともに増加し、800 °C では約 9 °C であったが、1400 °C では約 30 °C であった。同様に、黒鉛スリーブ内の 2 本の熱電対による半径方向の温度差は、650 °C では約 4 °C であったが、1200 °C では約 12 °C であった。ギャップ内の温度差は、700 °C では約 70 °C であったが、1300 °C では約 120 °C であった。

Fig.10 および Fig.11 は、黒鉛スリーブ中に挿入した 4 本の熱電対、TC-4、TC-5、TC-9 および TC-10 からそれぞれ半径方向の温度差を求め、この値と黒鉛スリーブの熱伝導率とから(2)式に従って算出した燃料コンパクトの線出力密度 Q を、燃料コンパクトの中のウラン量と照射孔内の熱中性子束とから計算により求めた線出力密度とを比較したもので、照射時間に対してプロットした。Fig.10 は JRR-2 の 03 サイクルにおける結果を、Fig.11 は同じく 04 サイクルにおける結果を示す。これらの図の上部には、Fig.8 および Fig.9 同様、キャプセルの照射位置およびキャプセル内に充填されている温度制御ガスを示す。図中 O で示したのが、黒鉛スリーブ中の温度差の実測値から求めたキャプセルの線出力密度である。計算から求めた線出力密度で、熱中性子束の補正係数が 1.0 の場合を実線で、0.7 の場合を点線で示す^{*}。実測値から熱中性子束の補正係数を求めると、約 0.6 である。一方、このキャプセルの照射後試験において、Al-Co フルエンスモニタの解析から求めた補正係数は 0.54²³⁾ で、比較的近い値である。

Fig.12 および Fig.13 は、燃料コンパクト内および黒鉛スリーブ内に挿入した熱電対間の温度差および黒鉛スリーブ内の温度差とその熱伝導率とから算出した燃料コンパクトの熱伝導率を対応して示したもので、照射時間に対してプロットした。Fig.12 は JRR-2 の 03 サイクルにおける結果、Fig.13 は同じく 04 サイクルにおける結果である。なおこれらの図で、熱電対 TC-4 と TC-10、TC-5 と TC-9 は、キャプセルの中心に対してそ

* 線出力密度の計算には、熱中性子束として Fig.6 の値を、熱中性子束の補正係数として 0.7 を、核分裂断面積として 4.80×10^{-22} (cm²) を、1 W・sec 毎の核分裂数として 3.47×10^{10} を使用した。これらの値は、この種のキャプセルの熱計算に経験的に使用してできたものである。

一方、このキャプセルの安全解析のために、THEMOS コードにより評価した核分裂断面積は、 4.77×10^{-22} (cm²) であり、1 Wsec 毎の核分裂数は、 3.28×10^{10} 、熱中性子束の補正係数は、0.76 である。

両者による線出力密度の計算値を比較すると、前者は後者よりも約 13% 小さい。

それぞれ対称の位置に装荷されている。燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブ内の温度差は、照射温度と対応し、ステップ状に上昇している。Fig.1 3 において、照射サイクルの末期にみられる燃料コンパクト内の温度差の急激な降下は、熱電対の異常によるものである。またこの図で黒鉛スリーブ内においても、熱電対TC-9とTC-10の間の温度差が若干大きくなっているが、これも熱電対の異常にもとづくものと推定される。

Fig.1 4 は、Fig.1 2 およびFig.1 3 に示した燃料コンパクトの熱伝導率を、照射温度に対してプロットした結果である。なお同図には、炉外実験⁵⁾において求めた燃料コンパクトの熱伝導率も、比較のために示した。照射試験から求めた燃料コンパクトの熱伝導率は、炉外試験の結果と比較して若干小さい。燃料コンパクトおよび燃料コンパクト用マトリックス材の熱伝導率は、高速中性子照射により減少するが^{3), 4), 24)}、このキャプセルの高速中性子照射量は、 1.5×10^{18} (cm²) であるから²³⁾、その減少量はごくわずかであると推定される。

この実験における燃料コンパクトの熱伝導率の算出には、無限円筒における伝熱の式を用いているので、円筒内に発生した熱は半径方向のみ流れ、軸方向の熱の移動はないと考えている。燃料棒内の軸方向の温度分布は測定していないが、キャプセル中央とその上下5.4 cmの位置に、それぞれ1対づつアルミニウム熱媒体中に挿入されている熱電対により、軸方向の温度分布を調べてみると、下部の熱電対の指示値は中央のそれより4℃と高く、上部の熱電対のそれは中央のそれよりも約3℃低い。燃料コンパクトのスタック内での軸方向の温度勾配は、更に大きいと考えられるから、軸方向への熱損失は無視できないものと考えられる。本実験で求めた燃料コンパクトの熱伝導率が、炉外実験で求めた燃料コンパクトのそれより小さいものは、軸方向の熱損失のためと考えられるが、本実験では軸方向の熱損失の評価を行っていないので、それがどの程度寄与しているか明らかでない。今後、燃料棒内の軸方向の温度分布を測定し、計算コードによる軸方向の熱移動の解析を行う必要があると考える。

5.2 接触熱コンダクタンス

Fig.1 5 およびFig.1 6 は、燃料コンパクトと黒鉛スリーブとの間のギャップ内の温度差と、これを用いて算出した接触熱コンダクタンスで、Fig.1 5 はJRR-2の53-03サイクルにおける結果を、Fig.1 6 は53-04サイクルの結果を示す。このギャップ内に充填されているガスは、ヘリウムとアルゴン1:9(容積比)の混合ガスである。Fig.1 7 は、Fig.1 5 およびFig.1 6 の燃料コンパクトと黒鉛スリーブの間の接触熱コンダクタンスの結果を、照射温度に対してプロットしたものである。燃料コンパクトの熱伝導率は、温度の上昇に対して減少するのに対し、接触熱コンダクタンスは逆に増加する。これは後述するように、前者は固体の熱伝導支配であるのに対し、後者はガスの伝導および輻射伝熱が支配的であるためである。

接触熱コンダクタンスは、前述したように、燃料コンパクトと黒鉛スリーブとの間の接触面における温度差を ΔT (K)、接触面積 A (cm²)を通しての熱の移動速度を q (W)とした場合、(7)式の比例定数 h (W cm⁻² K⁻¹)として定義される。

$$q = h A \Delta T \quad (7)$$

なお、本実験の場合、線出力密度は単位長さ当りの値を用いているから、 q のかわりに Q ($W cm^{-1}$) を、面積 A の代りに $2 \pi r$ (cm) を用いる。

高温ガス炉用燃料棒の燃料コンパクトと、黒鉛スリーブの間の接触熱コンダクタンスについては、報告をみていないが、軽水炉燃料のジルカロイ被覆管と UO_2 ペレットの間のそれについては、いくつか報告がみられる⁹⁾⁻¹⁵⁾。高温ガス炉燃料の黒鉛スリーブと燃料コンパクトの間の接触面の熱伝達についても、軽水炉の場合と同じメカニズムにより起ると考え、軽水炉燃料の接触熱伝達につづいて誘導された式を用いて、高温ガス炉燃料のその算出を試みる。接触面の熱伝達は、接触面における固体の接触点を通しての熱伝導、ギャップ内に充填されているガスの熱伝導、輻射による熱伝導および充填ガスの対流による熱伝達の和であり、それぞれの熱伝達率をそれぞれ、 h_c , h_g , h_r および h_v とすれば、

$$h = h_c + h_g + h_r + h_v \quad (8)$$

とあらわされる。ここで、 h_c は黒鉛スリーブおよび燃料コンパクトの熱伝導率、接触面の押しつけ圧力、黒鉛スリーブおよび燃料コンパクトの硬さおよび表面あらさに依存し、 h_g はガスの熱伝導率およびギャップ間隔に依存し、 h_r は燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブの温度および輻射率に依存する。それゆえ(8)式は(9)式のように書かれる⁹⁾。なお、対流による熱伝達は、ギャップ間隔が非常にせまいことから、ここでは省略する。

$$h = \frac{k_m \cdot P}{a_0 \cdot R^{0.5} \cdot H} + \frac{kg}{d + g_1 + g_2} + 5.67 \times 10^{-4} \left[\frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \right] \frac{\left[\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_4}{100} \right)^4 \right]}{T_3 - T_4} \quad (9)$$

この式の第1、第2および第3項は、それぞれ h_c , h_g および h_r に対応している。ここで、 k_m は、 $\frac{2k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}$ ($W cm^{-1} K^{-1}$) により与えられる値で、 k_1 および k_2 は、燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブの熱伝導率 ($W cm^{-1} K^{-1}$) である。 P は接触面の押しつけ圧力 ($kgf cm^{-2}$)、 a_0 は (長さ)^{1/2} の次元を持つ定数、 R は $\left(\frac{R_1^2 + R_2^2}{2} \right)^{1/2}$ (cm) により与えられる値で、 R_1 および R_2 はそれぞれ燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブの表面粗さの高さの算術平均、 H は接触している物質のうち柔らかい方の物質のマイヤー硬度 ($kgf cm^{-2}$)、 kg はギャップ内に充填されているガスの熱伝導率 ($W cm^{-1} K^{-1}$) d は2面間の距離、 g_1 および g_2 は、温度ジャンプ距離と呼ばれる値である。(g_1 および g_2 の物理的意味については、文献9参照) ϵ_1 および ϵ_2 , T_1 および T_2 は、それぞれ燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブの輻射率および表面温度である。なお、軽水炉の場合、ギャップ内の平均温度が低いから、輻射による熱伝達は無視できるが、高温ガス炉の場合、ギャップ内の平均温度が、 $1000^\circ C$ 以上になることも予想されるため、

考慮に入れなければならない。

Table 3 は、燃料コンパクトおよび黒鉛スリーブ中に装荷した熱電対、TC-5 および TC-6 の指示値から、燃料コンパクトの表面温度および黒鉛スリーブの内側面温度を推定し、これらの温度における燃料コンパクトの外径および黒鉛スリーブの内径を、それぞれの熱膨脹データ^{16),17)}から計算により求めた結果である。黒鉛 (IG-11) よりも、燃料コンパクトの熱膨脹係数が小さいから、ギャップ間隔は温度の上昇に対して、わずかではあるが増加していることがわかる。

燃料コンパクトの線出力密度、その表面温度および黒鉛スリーブの内側面表面温度は測定済であるので、これらの値を用いて輻射による熱伝達速度、 Q_r ($W cm^{-1}$) を、次式から計算し、その結果を Table 4 に示す。

$$Q_r = \frac{2 \pi r C}{\left(\frac{1}{\epsilon_G} + \frac{1}{\epsilon_C} - 1\right)} \left[\left(\frac{T_3}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_4}{100}\right)^4 \right] \quad (10)$$

ここで、 r には Table 3 から求めた平均半径を、 $\epsilon_G = \epsilon_C = 0.8$ ¹⁸⁾ を、 C には 5.67×10^{-4} ($W cm^{-2} K^{-4}$) を、燃料コンパクトの表面温度 T_3 および黒鉛スリーブの表面温度 T_4 には実測値を代入した。この計算の結果から、本実験の温度範囲では、輻射による熱移動量は、相当大きな割合をしめしていることがわかる。Table 4 の B を、同じ Table に示されている温度差および $2 \pi r$ で除せば、輻射による熱伝導率 hr が求められる。この結果を Table 5 に示す。

ギャップ内に充填されているガスの熱伝導による熱伝達率 hg は、まず(11)式から混合ガスの熱伝導率 kg を求め⁹⁾、次にこの値を $(d + g_1 + g_2)$ により除せばよい。

$$kg = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \phi_{ij} \frac{\chi_j}{\chi_i}} \quad (11)$$

$$\phi_{ij} = \frac{1.065}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)^{\frac{1}{2}} \left[1 + \left(\frac{k_i}{k_j}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_i}{M_j}\right)^{\frac{1}{4}}\right]^2 \quad (12)$$

ここで、 k_i, k_j は、各成分ガスの熱伝導率、 M_i, M_j は成分ガスの分子量であり、 χ_i, χ_j は成分ガスのモル分率である。 d については、Table 3 の値を、 g_1 および g_2 については、軽水炉燃料の UO_2 ペレットとジルカロイ被覆管のために誘導された、次の(13)式を使用する¹⁹⁾。

$$g_1 + g_2 = 0.385 \left[\frac{\mu_m}{P} \left(\frac{T}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (13)$$

ここで μ_m は混合ガスの粘性係数 ($\text{g cm}^{-1}\text{sec}^{-1}$) , P はガスの圧力 (kgf cm^{-2}) , T はガスの温度(K), M は混合ガスの分子量である。ここで, μ_m は次式から求める。

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{1 + \frac{1}{\chi_i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \chi_j \phi_{ij}} \quad (14)$$

$$\phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2}{\frac{4}{\sqrt{2}} \left[1 + \frac{M_i}{M_j} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (15)$$

M_i および M_j , χ_i および χ_j は, (11)式と同じであり, μ_i , μ_j は成分気体の粘性係数である。成分ガス (ヘリウムおよびアルゴン) の熱伝導率および粘性係数は, 文献値^{22),23)}を使用した。このようにして求めた $g_1 + g_2$ の値を, Table 6 に示す。d は 10^{-2} のオーダーであるが, $g_1 + g_2$ は 10^{-5} のオーダーであるから, hg を求めるうえで無視できる。hg の計算結果を, Table 7 に示す。

Table 8 は, このようにして計算により推定したギャップ熱伝達率と輻射熱伝達率の和を示したものであり, Fig.17 は, これらの値と接触熱コンダクタンスの実測値を, 同じ座標上に示したものである。この図からギャップ熱伝達率と接触熱伝達率の和は接触熱コンダクタンスの実測値にほぼ等しく, 両者の差はたかだか 10% 程度であることがわかる。Table 3 の熱膨脹の計算結果が示す通り, 黒鉛スリーブの内径は, 常に燃料コンパクトの外径より大きく, 温度の上昇に対してギャップ間隔は拡大するために, 接触面に対して押し付け圧は全く作用しないばかりでなく, 燃料コンパクトと黒鉛スリーブの接触面は, ごく一部だけが接触しているにすぎない。このことは, (9)式の第1項の寄与すなわち固体の接触点を通しての熱移動を, 無視して計算しても, 全体の熱伝達に対する影響はあまりないことを示している。さらに, 中性子の照射量の増加に対して, 燃料コンパクトの方が, 黒鉛スリーブよりも収縮率が大きいから, ギャップ間隔はさらに拡大する方向にあり, 固体の接触点を通しての熱移動の寄与は, さらに小さくなる。従って, 高温ガス炉燃料の接触熱コンダクタンスを推定する場合, ギャップ熱伝達率と輻射熱伝達率を考慮すれば十分であり, また, 軽水炉燃料の場合の接触熱コンダクタンスの計算式を用いて, 高温ガス炉燃料の接触熱コンダクタンスを推定することが可能であることがわかる。

6. ま と め

寸法以外は多目的高温ガス実験炉のMK-Ⅲ仕様に準じて製作した燃料棒を、計装キャプセルに封入して原子炉で照射し、炉外実験では取得の困難であった1000℃以上における燃料コンパクトの熱伝導率およびコンパクト—スリーブ間の接触熱コンダクタンスのデータを得ることができた。

オーバーコート—プレス法により製造した燃料コンパクトの熱伝導率は、1000～1400℃の温度範囲では、0.13～0.18 ($\text{W cm}^{-1} \text{K}^{-1}$)の範囲にあり、炉外試験において求めた燃料コンパクトのそれにくらべて、若干小さい値であった。

実験から求めた黒鉛スリーブと燃料コンパクトの間の接触熱コンダクタンスは、1000～1400℃の範囲では、0.07～0.12 ($\text{W cm}^{-2} \text{K}^{-1}$)であった。一方、軽水炉燃料の接触熱コンダクタンス (UO_2 ペレット—ジルカロイ被覆管)の計算式を用いて、高温ガス炉用燃料の接触熱コンダクタンスを推定した結果、実験値とよい一致を示した。また、この解析から、燃料コンパクトから黒鉛スリーブへの熱伝達は、主としてギャップ内流填ガスの熱伝導および輻射伝熱に支配され、コンパクトとスリーブとの固体の接触点を通しての熱伝導は、ほとんど無視できることがわかった。

謝 辞

本キャプセルの照射にあたり、キャプセルの製作を担当された東海研究所工作課の各位、キャプセルの設計およびキャプセルのJRR-2への装荷、運転中の点検等を担当された研究炉利用課、宮内武次郎氏はじめ関係各位に深く感謝の意を表する。

また、本報告を刊行するにあたり、御指導いただいた下川燃料工学部長に感謝する。

6. ま と め

寸法以外は多目的高温ガス実験炉のMK-Ⅲ仕様に準じて製作した燃料棒を、計装キャプセルに封入して原子炉で照射し、炉外実験では取得の困難であった1000℃以上における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接触熱コンダクタンスのデータを得ることができた。

オーバーコートプレス法により製造した燃料コンパクトの熱伝導率は、1000～1400℃の温度範囲では、0.13～0.18 ($\text{W cm}^{-1} \text{K}^{-1}$)の範囲にあり、炉外試験において求めた燃料コンパクトのそれにくらべて、若干小さい値であった。

実験から求めた黒鉛スリーブと燃料コンパクトの間の接触熱コンダクタンスは、1000～1400℃の範囲では、0.07～0.12 ($\text{W cm}^{-2} \text{K}^{-1}$)であった。一方、軽水炉燃料の接触熱コンダクタンス (UO_2 ペレット-ジルカロイ被覆管)の計算式を用いて、高温ガス炉用燃料の接触熱コンダクタンスを推定した結果、実験値とよい一致を示した。また、この解析から、燃料コンパクトから黒鉛スリーブへの熱伝達は、主としてギャップ内流填ガスの熱伝導および輻射伝熱に支配され、コンパクトとスリーブとの固体の接触点を通しての熱伝導は、ほとんど無視できることがわかった。

謝 辞

本キャプセルの照射にあたり、キャプセルの製作を担当された東海研究所工作課の各位、キャプセルの設計およびキャプセルのJRR-2への装荷、運転中の点検等を担当された研究炉利用課、宮内武次郎氏はじめ関係各位に深く感謝の意を表す。

また、本報告を刊行するにあたり、御指導いただいた下川燃料工学部長に感謝する。

参 考 分 献

1. Johnson, W.R., GA-A 12910, Mar. (1974)
2. Goeddel, W.V., Pontelandolfo, J.M., GAMD-4441, Jul. (1963)
3. Moore, J.P., Eatherly, W.P., Godfrey, T.G., Long, Jr., E.L., Graves, R.S., Weaver, F.J., ORNL-5414, Jul. (1978)
4. Everett, M.R., Manzel, R., Barr, P., Mayr, K., D.P.Report 686, Oct. (1969)
5. 菊池輝男, 岩本多実, 井川勝市, JAERI-M 9287, Jan. (1981)
6. Touloukian, Y.S., Liley, P.E., Saxena, S.C., Thermal conductivity, Nonmetallic liquids and gases, IFI/Plenum.N.Y.Washington. 1970
7. Nomura, S., Shimokawa, J., Sasaki, Y., Oku, T., Imai, H., Matso, H., Eto, M., Fukuda, Y., Fujisaki, K., JAERI-M 8068, Feb. (1979)
8. 宮内武次郎, 私信, Jan. (1981)
9. Ross, A.M., Stoute, R.L., CRFD-1075 (1962)
10. 佐野川好母, 原子炉工学講座, 5卷, 燃料要素の伝熱 (1971)
11. MacDonald, P.E., Thompson, L.B., TREE-NUREG-1005 (1976)
12. Dean, R.A., CVNA-127 (1962)
13. Garnier, J., Begej, S., NUREG/CR-330 (1980)
14. Dearien, J.A., Berna, G.A., Bohn, M.P., Coleman, D.R., Laats, E.T., TREE-NUREG-1107 (1977)
15. Chandola, V.K., Loyalka, S.K., Nuc. Teck., 56, P434 (1982)
16. 松尾秀人, 私信, (1979)
17. 菊池輝男, 岩本多実, 井川勝市, JAERI-M 9052 (1980)
18. Touloukian, Y.S., Thermophysical properties of matter, TPRC Data series, Vol. 8., (1972)
19. Hann, C.R., Bayer, C.E., Parchen, L.J., BNWL-1778 (1973)
20. 日本機械学会, 伝熱工学資料調査分科会編, 伝熱工学資料, 改訂第3版 (1975)
21. Touloukian, Y.S., Thermophysical properties of matter, TPRC Data series, Vol. 3., (1970)
22. 日本機械学会, 伝熱工学資料調査分科会編, 伝熱工学資料 (1959)
23. 菊池輝男, 井川勝市, JAERI-M 82-085 (1982)
24. Everett, M.R., Leushacke, D.F., Delle, W., BNES Conf., London, Nov. (1974)

Table 1 Characteristics of fuel compacts

Lot No.		77FPTC
Dimensions (mm)	Diameter	17.98
	Length	18.0
Weight (g)		11.1
Geometrical density (g/cm ³)		2.52
Coated particle		Table 2
Coated particle loading density (%)		30
Graphite powder		Natural and petroleum coke graphite
Binder		Phenol resin
Content of binder resin (%)		20
Density of matrix (g/cm ³)		1.7
Exposed U fraction		9×10^{-5}

Table 2 Characteristics of coated particles

Lot No.		77FPTCP	
Kernel	Chemical form		UO ₂
	Enrichment (%)		4.0
	Diameter (μ m)		591.5
	Density (%TD)		95.6
	O/U ratio		2.00
Coating	1st layer	Material	PyC
		Thickness (μ m)	59.6
		Density (g/cm ³)	1.13
	2nd layer	Material	PyC
		Thickness (μ m)	28.5
		Density (g/cm ³)	1.85
	3rd layer	Material	SiC
		Thickness (μ m)	24.4
		Density (g/cm ³)	3.21
	4th layer	Material	PyC
		Thickness (μ m)	42.8
		Density (g/cm ³)	1.81
Coated particle	Diameter (μ m)		901.1

Table 3 Gap distance between fuel compact and graphite sleeve

Fuel compact		Graphite Sleeve		2d Gap distance (mm)
Surface temperature (°C)	diameter (mm)	Surface temperature (°C)	Inner diameter (mm)	
20	17.970	20	18.130	0.160
757	17.991	675	18.183	0.192
883	17.997	791	18.194	0.197
992	18.002	889	18.203	0.201
1113	18.008	997	18.216	0.208
1202	18.015	1104	18.224	0.209
1374	18.021	1230	18.237	0.216

Table 4 Heat conduction by radiation

Surface temperature of fuel compact (K)	Inner surface temperature of graphite sleeve (K)	Temperature difference in gap (K)	A	B	$\frac{B}{A}$	A-B (W cm ⁻¹)
			Linear heat rate (W cm ⁻¹)	Heat conduction by radiation (W cm ⁻¹)		
1031	948	83	41.2	13.8	0.335	27.4
1156	1064	92	49.6	21.6	0.436	28.0
1265	1162	103	62.8	31.6	0.504	31.2
1304	1208	96	59.3	32.7	0.551	26.6
1386	1270	117	74.6	46.7	0.626	27.9
1475	1377	98	70.3	48.8	0.694	21.5
1495	1365	129	87.2	65.4	0.749	21.8

Table 5 Radiation conductance hr

Temperature (K)	Radiation conductance, hr ($W\ cm^{-2}K^{-1}$)
989	0.029
1,110	0.041
1,213	0.054
1,256	0.060
1,328	0.070
1,426	0.088

Table 6 Temperature jump distance, $g_1 + g_2$

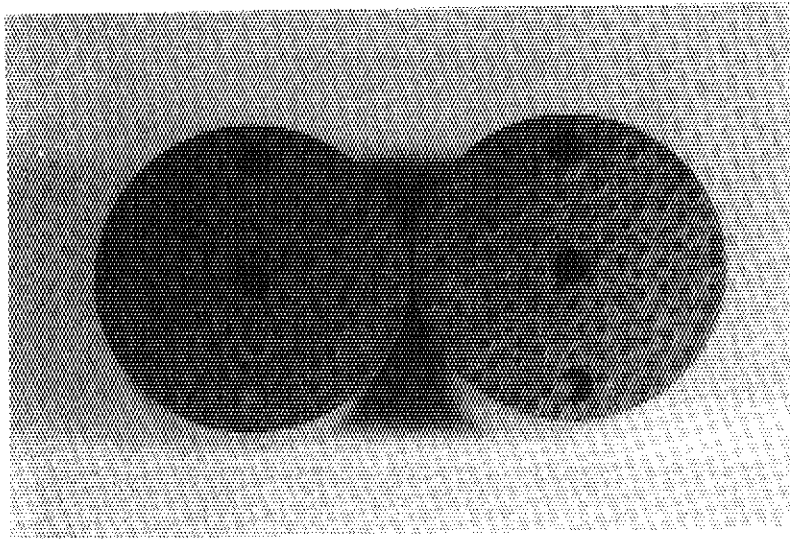
Temperature (K)	Temperature jump distance, $g_1 + g_2$, (cm)
989	3.91×10^{-5}
1,110	3.98×10^{-5}
1,213	4.02×10^{-5}
1,256	4.03×10^{-5}
1,328	4.08×10^{-5}
1,426	4.11×10^{-5}

Table 7 Thermal conductivity of gas mixture, kg and gap conductance, hg .

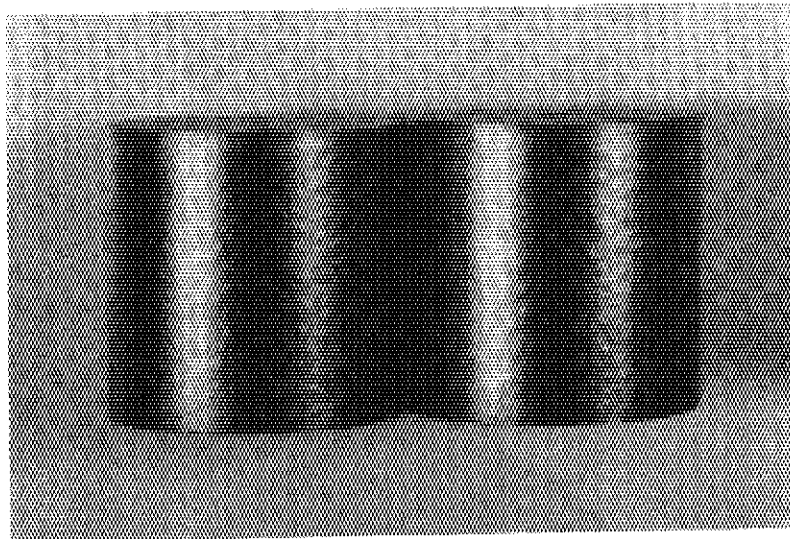
Temperature (K)	Thermal conductivity of gas mixture, kg ($\text{W cm}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Gap conductance hg ($\text{W cm}^{-2} \text{K}^{-1}$)
989	5.37×10^{-4}	0.056
1110	5.79×10^{-2}	0.059
1213	6.15×10^{-4}	0.061
1256	6.32×10^{-4}	0.061
1328	6.56×10^{-4}	0.063
1426	6.90×10^{-4}	0.064

Table 8 Sum of gap conductance, hg and radiation conductance, hr

Temperature (K)	hg + hr ($\text{W cm}^{-2} \text{K}^{-1}$)
716	0.085
837	0.091
940	0.115
983	0.121
1055	0.133
1153	0.152



End view



Side view

Fig. 2 Fuel compacts

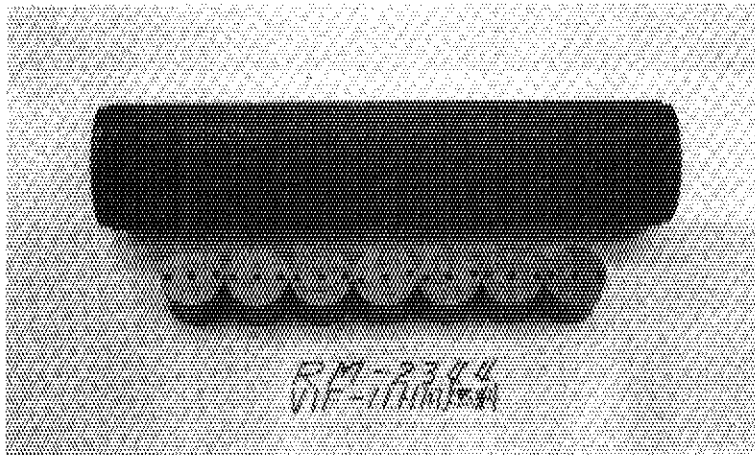
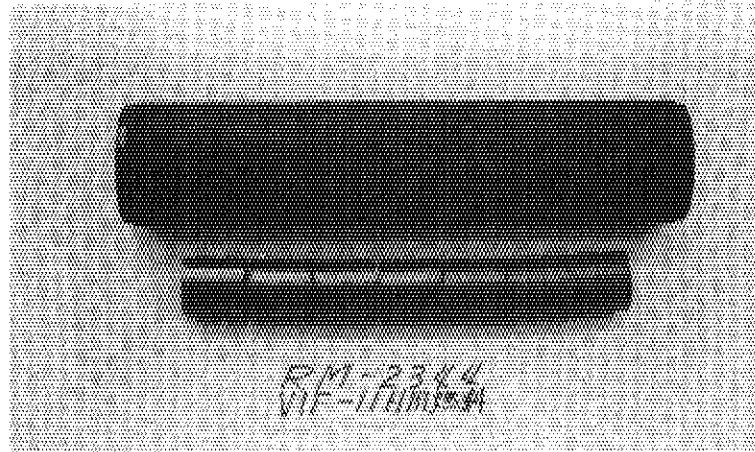


Fig. 3 Graphite sleeve and Fuel compacts

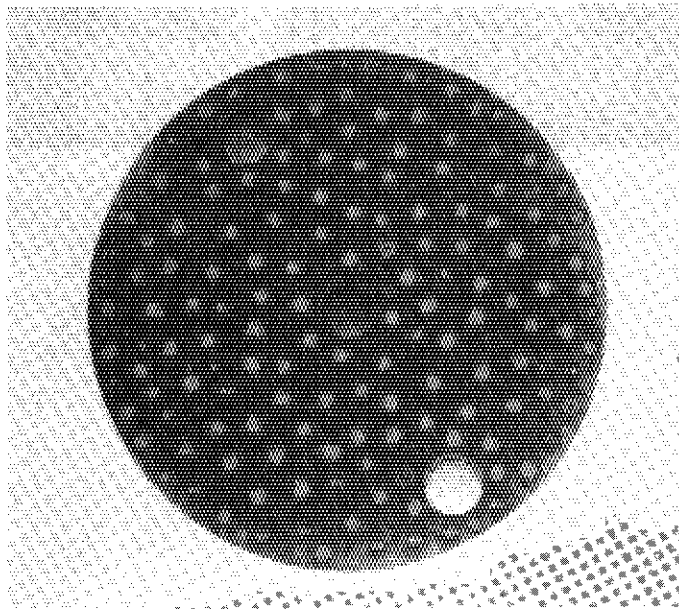


Fig. 4 Cross section of fuel compact

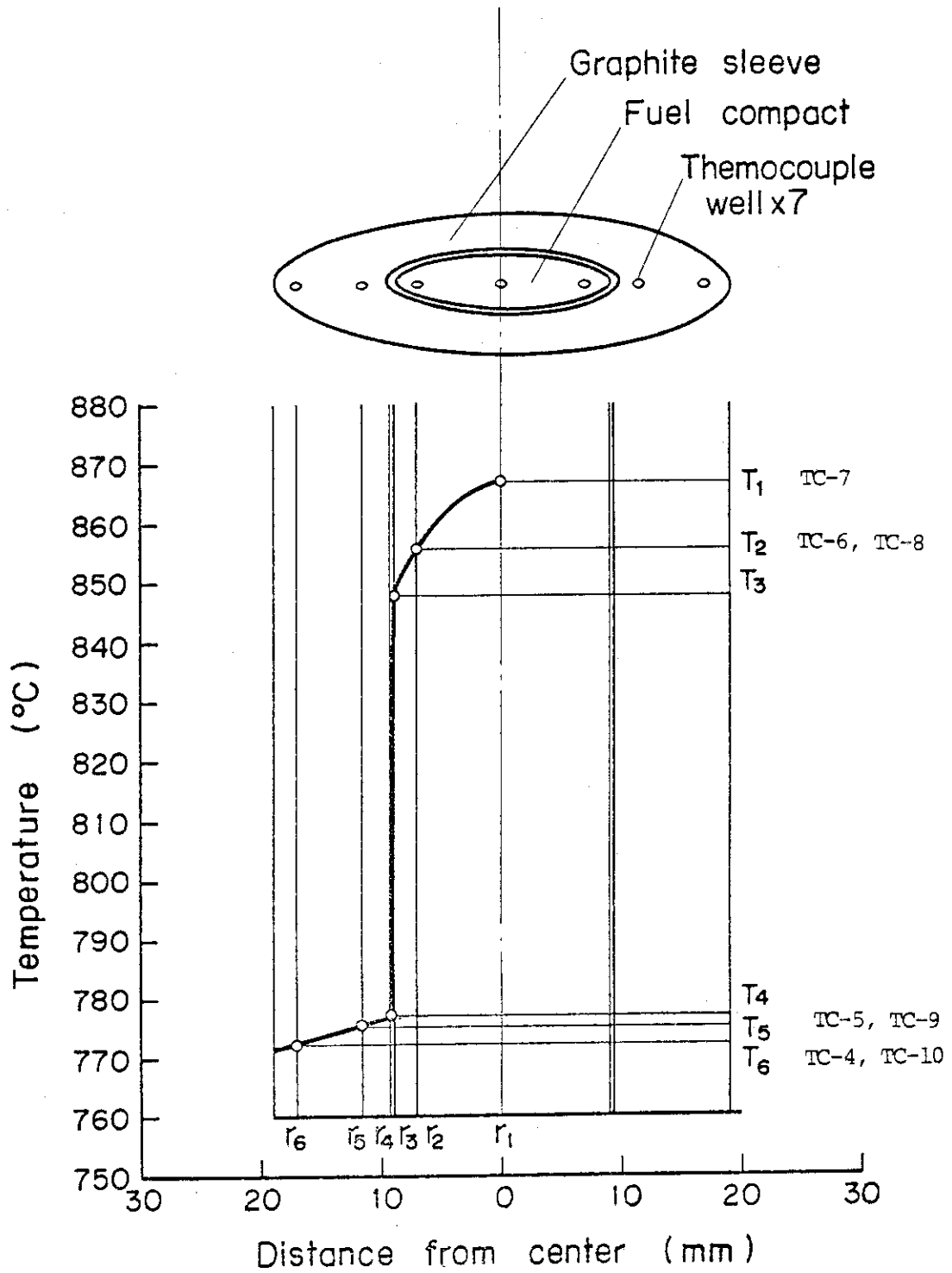


Fig. 5 Temperature profile in fuel rod

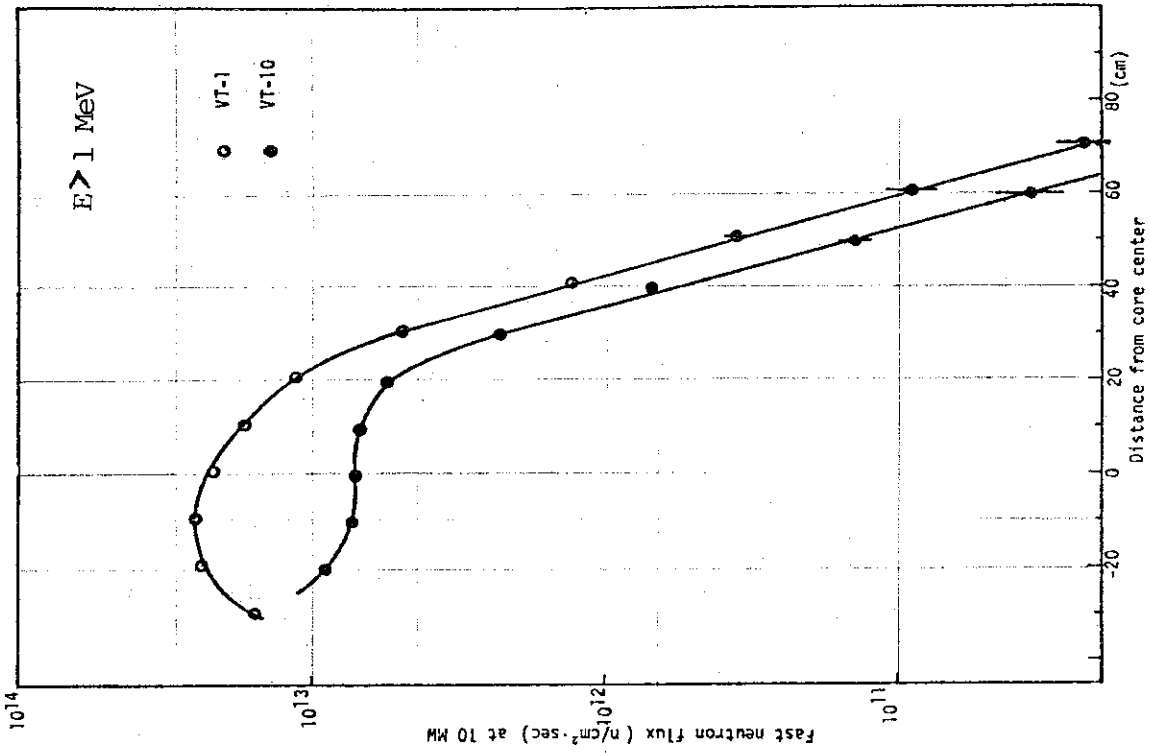


Fig.7 Fast neutron flux distribution in VT-1 and VT-10*

* JAERI-M 6943

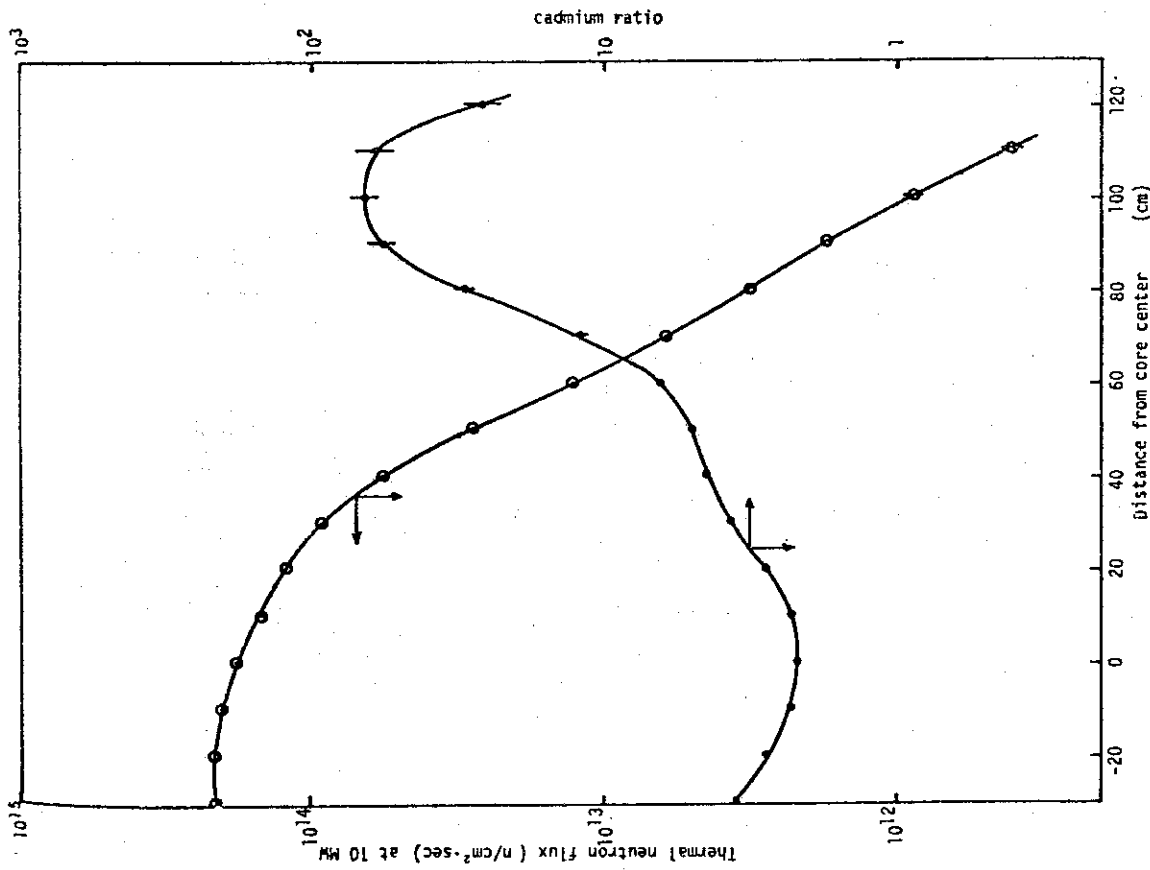


Fig.6 Thermal neutron flux distribution in VT-1*

* JAERI-M 6943

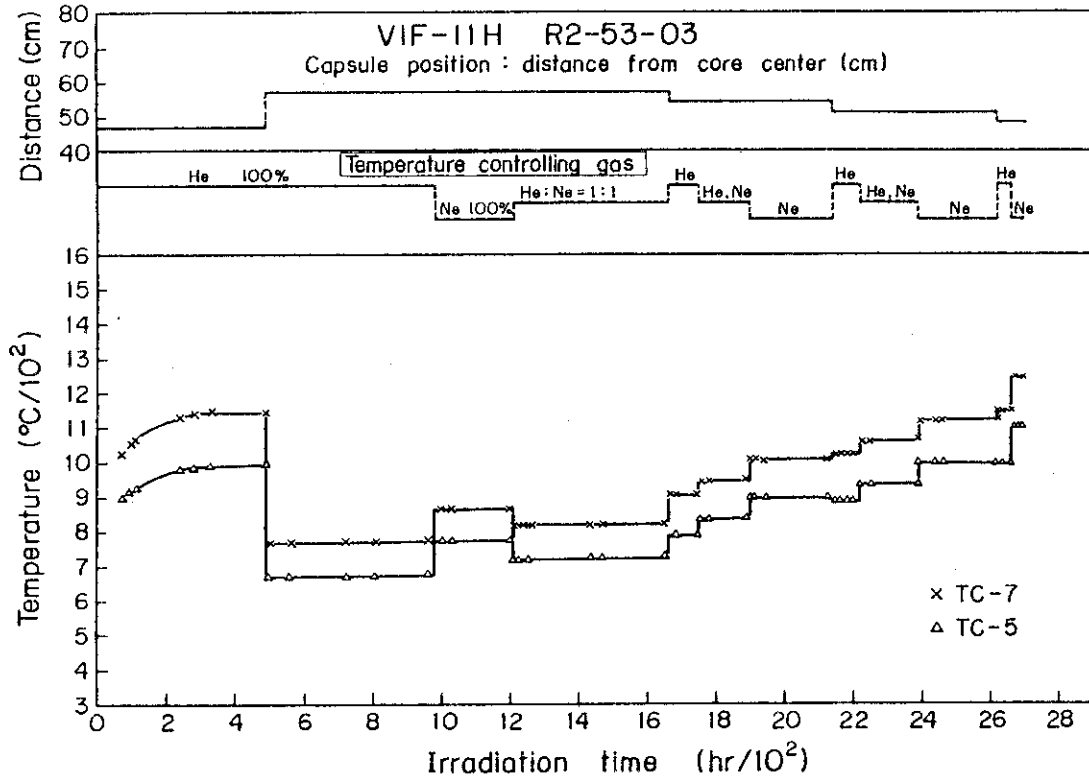


Fig.8 Irradiation temperature of V1F-11H capsule in JRR-2-03 reactor cycle

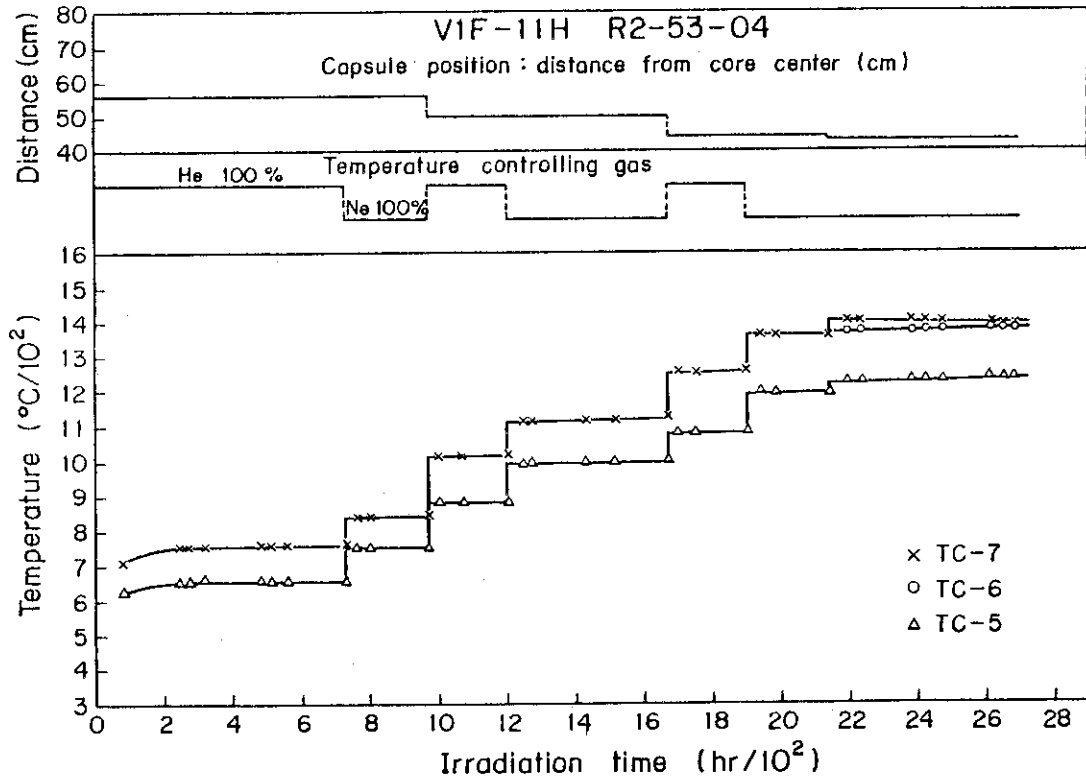


Fig.9 Irradiation temperature of V1F-11H capsule in JRR-2-04 reactor cycle

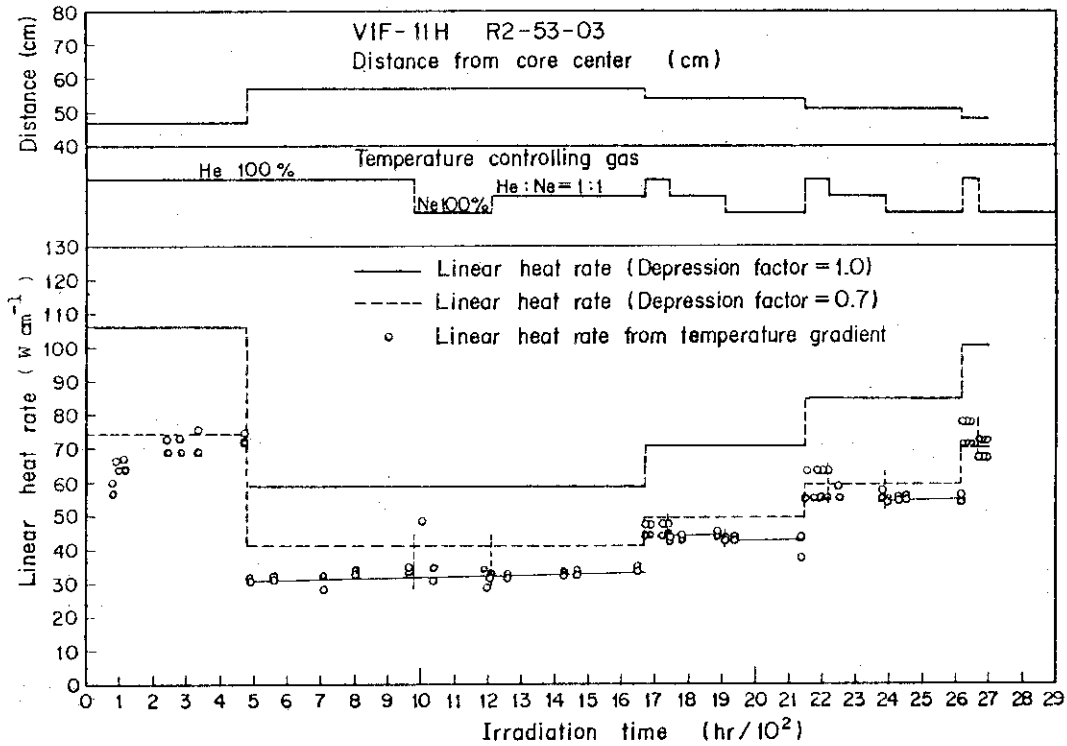


Fig.10 Linear heat rate of V1F-11H capsule in JRR-2-03 reactor cycle

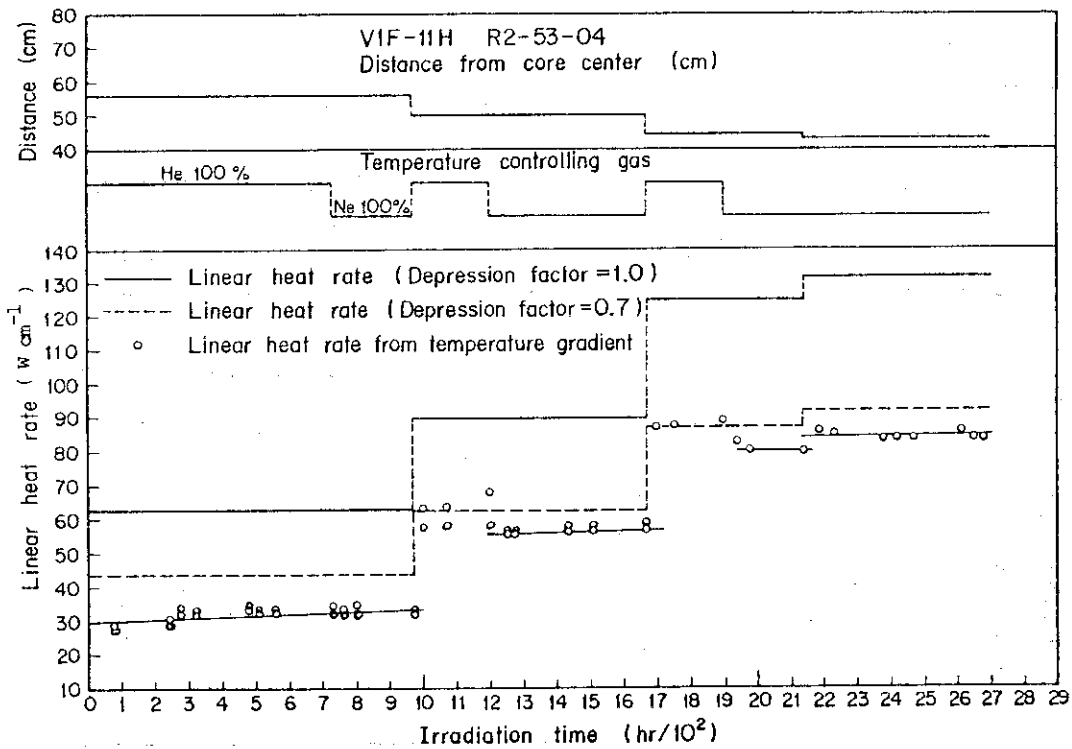


Fig.11 Linear heat rate of V1F-11H capsule in JRR-2-04 reactor cycle

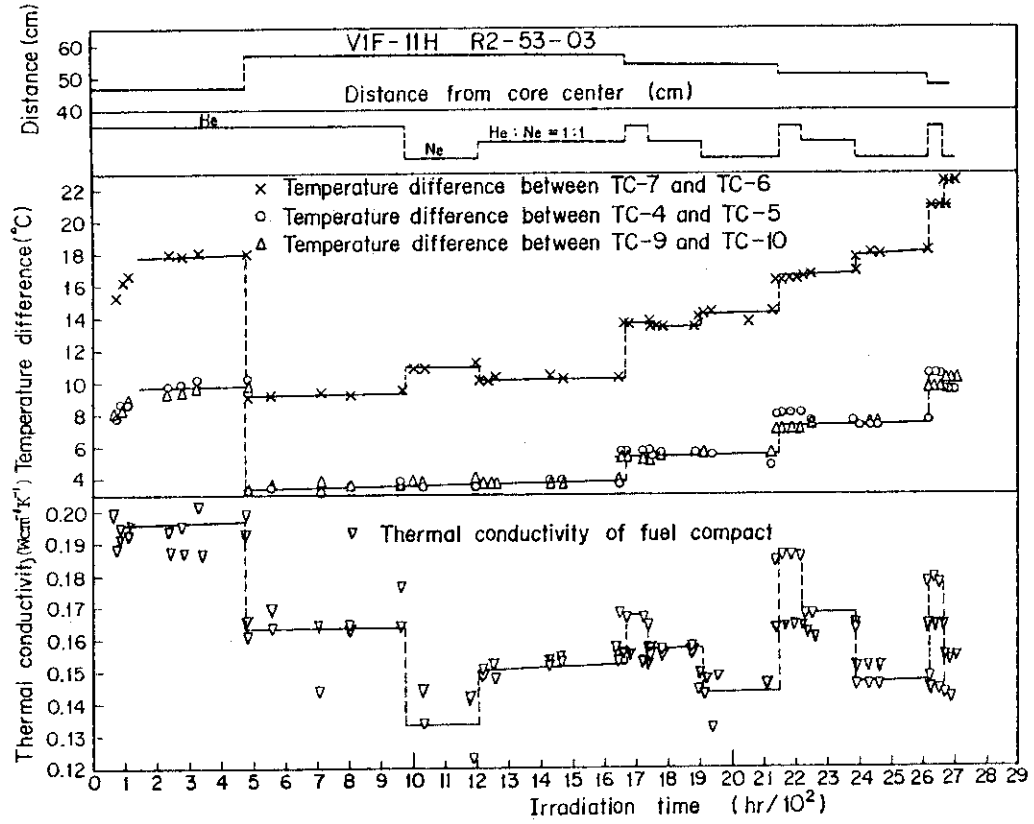


Fig.12 Temperature difference and thermal conductivity in JRR-2-03 reactor cycle

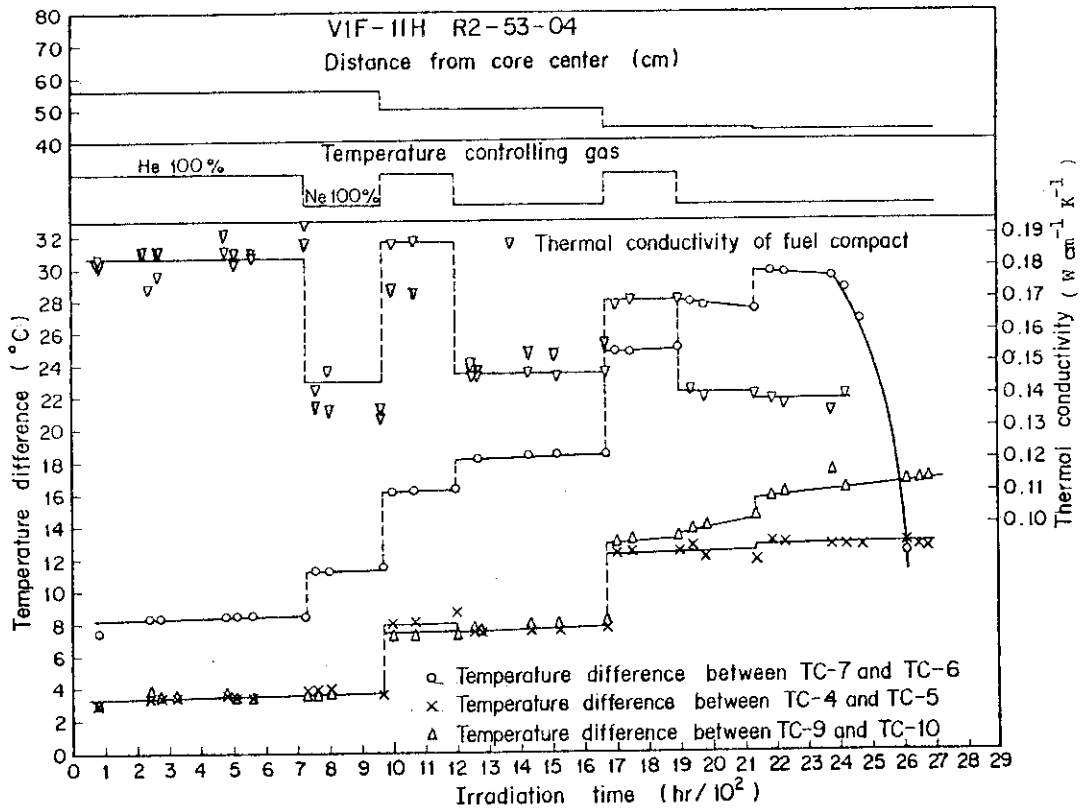


Fig.13 Temperature difference and thermal conductivity in JRR-2-04 reactor cycle

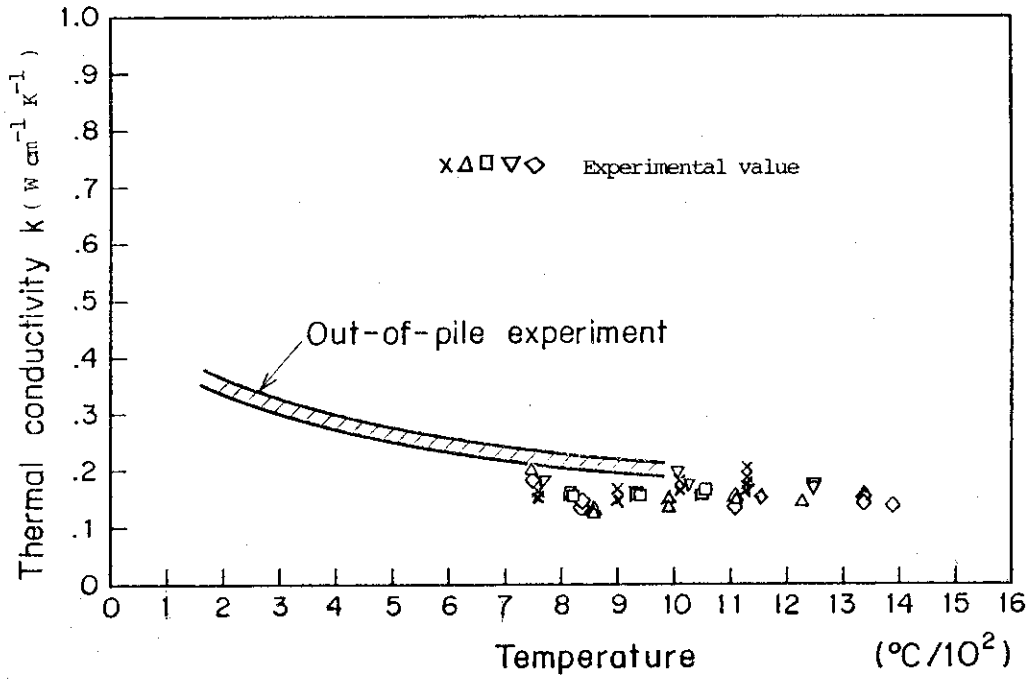


Fig.14 Thermal conductivity of fuel compact

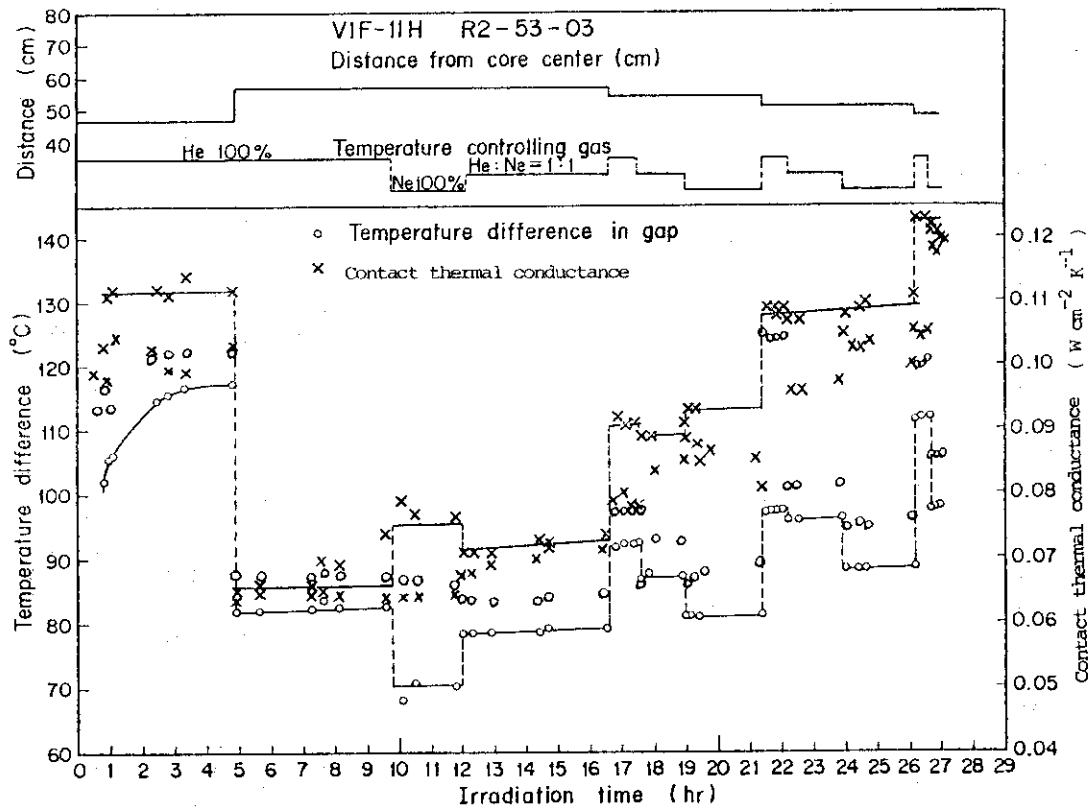


Fig.15 Temperature difference in gap and contact thermal conductance in JRR-2-03 reactor cycle

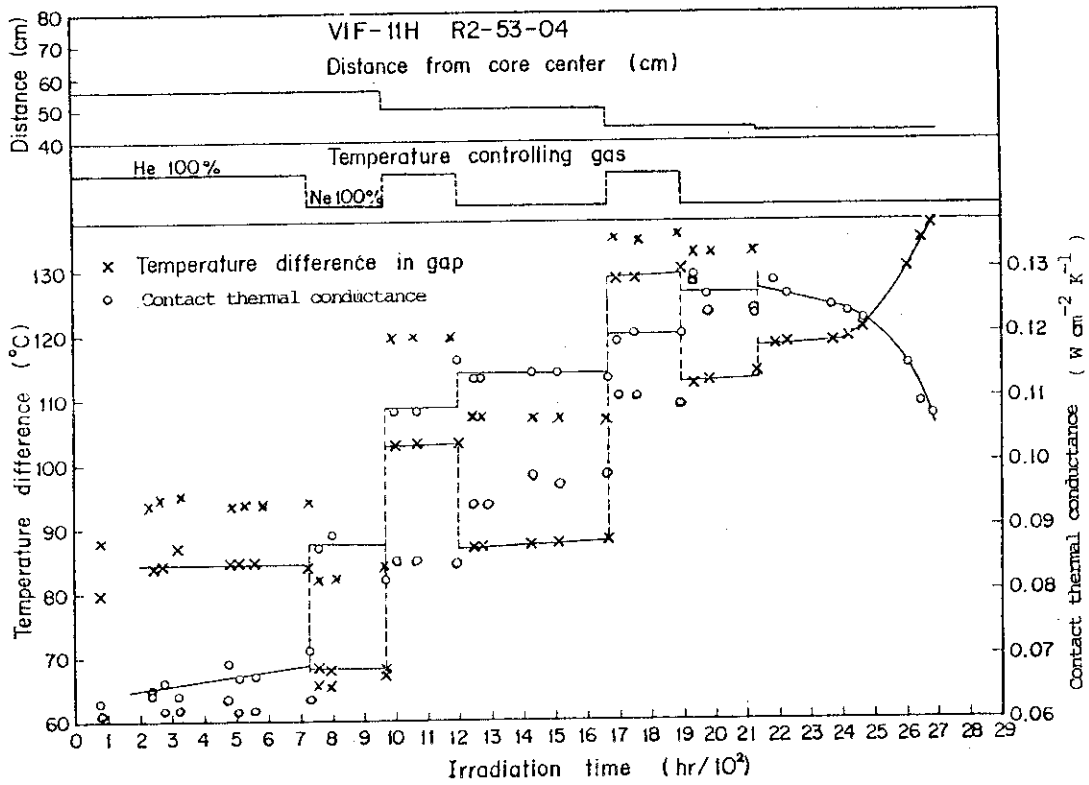


Fig.16 Temperature difference in gap and contact thermal conductance in JRR-2-04 reactor cycle

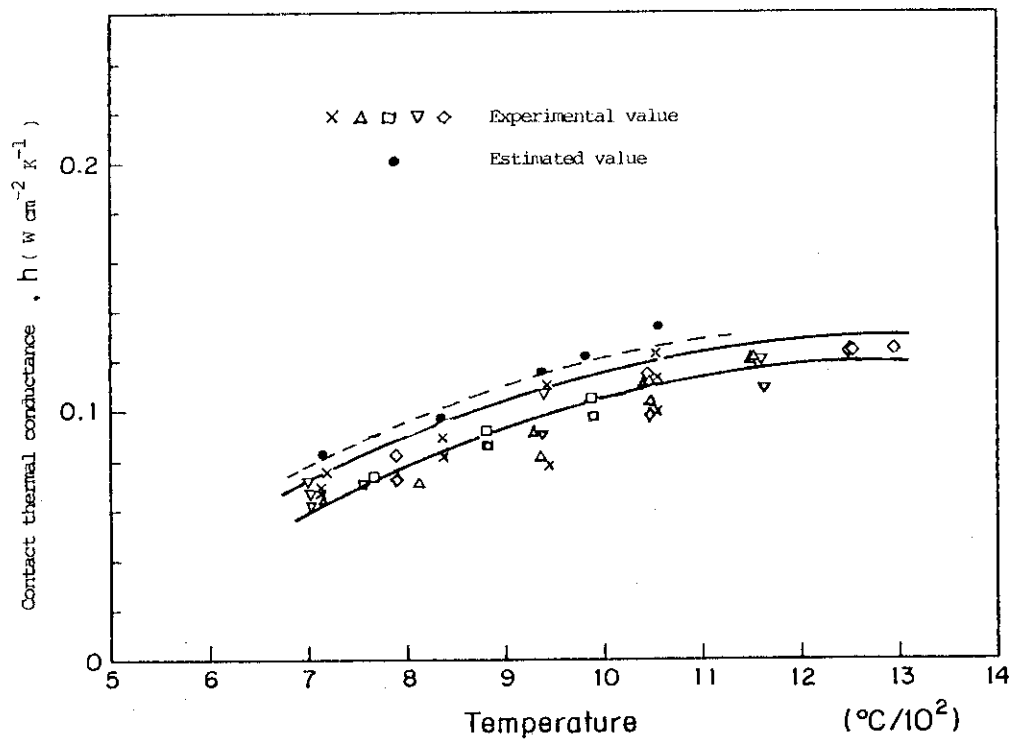


Fig.17 Contact thermal conductance between graphite sleeve and fuel compact filled with He : Ar (1 : 9 vol) gas mixture