

JAERI-M

6913

JRR-2, VT-1孔用被覆粒子燃料
照射キャプセルの開発

1977年2月

菊池 輝男・菊地 章・飛田 勉・鹿志村 悟
宮坂 靖彦・岩本 多實

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、お申しこしてください。

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.

JRR-2, VT-1 孔用被覆粒子燃料照射
キャプセルの開発

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部
菊池輝男・菊地 章⁺・飛田 勉・鹿志村悟
宮坂靖彦⁺⁺・岩本多実

(1977年1月12日受理)

多目的高温ガス炉燃料の照射挙動を調べるために開発したキャプセルについて照射計画，設計および照射結果をのべた。キャプセルは全部で5体計画し，そのうち3体を燃料コンパクトの照射に，他の2体を被覆粒子のアメーバ効果を調べるための照射に使用した。各々のキャプセルはJRR-2，中央垂直実験孔(VT-1孔)において1原子炉サイクル照射した。燃料コンパクト用キャプセルの照射温度は，950～1500℃の範囲にあり，試料の燃焼度の推定値は，0.74～0.87% FIMAであった。アメーバ効果試験用キャプセルの照射温度の推定値は，1650～1670℃，試料の燃焼度の推定値は0.33～0.38% FIMAであった。

+) 日本原子力研究所東海研究所安全工学部
++) " " 研究炉管理部

VHTR-Fuel Irradiation Capsules for VT-1 Hole of JRR-2

Teruo KIKUCHI, Akira KIKUCHI[†], Tsutomu TOBITA,
Satoru KASHIMURA, Yasuhiko MIYASAKA^{††}, Kazumi IWAMOTO
Division of Nuclear Fuel Research, Tokai, JAERI

(Received January 12, 1977)

Irradiations of VHTR fuels were made in the VT-1 irradiation hole of JRR-2. Three capsules, VP-1, VP-2 and VP-4, which contained fuel compacts, were irradiated for 300 hr at temperatures of 950°, 1370° and 1500 °C up to the estimated burn-ups of 0.74, 0.87 and 0.80 %FIMA, respectively. And, to study the amoeba effect of fuel particles, two capsules, VP-3 and VP-5, were irradiated for 300 hr at temperatures of 1650° and 1670 °C up to the estimated burn-ups of 0.38 and 0.33 %FIMA, respectively.

†) Division of Reactor Safety, Tokai, JAERI

††) Division of Research Reactor Operation, Tokai, JAERI

目 次

1. 緒 言	1
2. VT-1孔の特徴	2
3. 燃料コンパクト照射キャプセル (VP-1, VP-2, VP-4)	3
3.1 キャプセル設計製作	3
1) 照射目的と設計方針	3
2) キャプセルの構造	4
3) 温度分布の推定	4
4) 照射試料	6
3.2 照射結果	6
1) VP-1キャプセル	6
2) VP-2キャプセル	7
3) VP-4キャプセル	7
3.3 考 察	8
1) キャプセルの線出力密度	8
2) 有効熱中性子束	8
3) 温度分布	9
4) 燃 焼 度	10
5) 設 計 法	11
4. アメーバ効果試験用キャプセル (VP-3, VP-5)	13
4.1 キャプセル設計製作	13
1) 照射目的	13
2) キャプセルの構造	13
3) 温度分布の推定	13
4) 照射試料	15
4.2 照射結果	15
1) VP-3キャプセル	15
2) VP-5キャプセル	16
4.3 考 察	16
1) 温 度	16
2) 燃 焼 度	16
3) 設 計 法	18
5. ま と め	19
参 考 文 献	21

1. 緒 言

冷却ガス出口温度 1,000°C を目標とする多目的高温ガス炉の開発が、1970年に開始され、同時にこれに装荷する燃料の研究開発が始められた。諸外国の経験を参考に、パイロカーボンおよびシリコンカーバイトをコーティングした被覆燃料粒子およびこれを黒鉛炭素マトリックス中に分散した燃料コンパクトが試作され、高温耐久性等の照射前試験がおこなわれたが、原子炉燃料は原子炉での照射試験を経てはじめて健全性が確認される。そこで、これらの燃料の照射による影響を調べると同時に、キャプセルの開発、照射、照射後試験等の問題を解明するために照射試験を計画した。

燃料キャプセルの照射に利用できる原子炉には、JMTRおよびJRR-2があるが、前者は後者にくらべて熱中性子束および高速中性子束が高く、比較的短時間で大きな照射効果が得られるところに特徴があり、燃料開発のように短かい期間に試作と評価を数多くくりかえす必要のある仕事に適している。これに対してJRR-2は研究炉としての性格が強く、照射計画に対して融通性があり、また、中央垂直実験孔(VT-1孔)ではキャプセルの照射位置を任意に変えられるなどの特徴がある。しかし、熱中性子束および高速中性子束は、JMTRにくらべれば約1桁低い。そこで、これらの特徴を生かした照射を行なうべく、JRR-2(VT-1孔)を利用したキャプセル照射を計画した。照射試料は昭和45年および昭和46年に試作した被覆燃料粒子および燃料コンパクトを用いることにし、これらの試料の照射目的を、それぞれアメーバ効果を解明するための基礎データの収集および高温ガス炉燃料の照射データの収集においた。VT-1孔による照射キャプセルは、VPキャプセルと命名し、VP-1からVP-5まで計5体設計され照射された。照射試料としてVP-1、VP-2およびVP-4キャプセルには縮小寸法の燃料コンパクトを、VP-3およびVP-5キャプセルには被覆粒子を封入した。これらのキャプセルは昭和46年の後半から昭和48年の前半にかけて照射された。本報告はこれらのキャプセルの照射計画、設計および照射について述べる。ホットラボでの照射後試験については、別に報告する予定である。

2. VT-1 孔 の 特 徴

本キャプセルの照射を行なう JRR-2 原子炉は、93%濃縮ウラン燃料、重水減速冷却、10MW出力の研究用原子炉である。その運転パターンは、3週間を1サイクルとし、内12日間を原子炉の運転に、残りの日数を点検保守に当てている。JRR-2で被覆粒子燃料の照射に適する照射孔には、インコア照射孔と中央垂直実験孔(VT-1孔)とがある。前者は高速中性子密度が高いことから高速中性子照射量を重視した実験に、後者は熱中性子密度が高く、照射孔が大きいので、計装照射キャプセルの設計が容易であって高温を得る実験に適している。

VT-1孔は、Fig. 1に示すように、JRR-2の燃料領域の中心にある垂直実験孔で、照射キャプセルの位置を任意に変えられるところに特徴がある。その10MW出力時における熱中性子束の分布をFig. 2に示す。ここで、横軸は原子炉の縦方向における炉心中心からの距離で、その燃料要素との位置関係を、Fig. 1の右に示す。熱中性子束は、中心で最大 $2 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ が得られるが、高速中性子束は $\approx 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ である。照射孔の内径は101mmと大きく、除熱方法は炉心減速材と通ずる重水により行なう。このため、高発熱の試料を照射する場合には、フィン付照射キャプセルを使用する必要がある。この方法で、全発熱量4kw(線出力密度約600W/cm)の試料を照射した経験を有する。また、JRR-2の余剰反応度は平衡炉心で約7~8%で、照射試料のためにはこのうち2~3%が使用できるが、VPキャプセルの他にも多くの試料が照射されていることから、VPキャプセルの反応度としては0.5%以下であることが望ましいとされている。

3. 燃料コンパクト照射キャプセル (VP-1, VP-2, VP-4)

3.1 キャプセルの設計製作

1) 照射目的と設計方針

VP-1, VP-2およびVP-4キャプセルは、多目的高温ガス炉用試作燃料コンパクトの高温における照射挙動を調べるために計画されたものである。一般に、原子炉燃料の開発にあたっては、その燃料が原子炉中でさらされる温度において、予定された燃焼度および高速中性子照射量を達成させ、その結果燃料中でおこった変化を調べるが、JRR-2での照射でこれらの条件を全て同時に満足する照射結果を得るにはその原子炉特性からして困難であるため、ここでは高温における照射挙動に限定し、燃焼度および高速中性子照射量については特に目標値をもうけなかった。これらのキャプセルが一応達成すべき温度のめやすとして1600℃を設定した。発熱密度が高いほど高温の達成は容易であるから、ここでは20%濃縮ウランを用いることにした。また、照射試料としては予備設計仕様の燃料コンパクトが望ましいが、この試料を照射するためには新たにキャプセルの技術開発を行なう必要があり、既製のキャプセル技術をそのまま転用するわけにはいかないので、やむを得ず縮小寸法の燃料コンパクトを照射することにした。

JRR-2のVT-1照射孔でこれまで主として照射してきた試料は軽水炉用 UO_2 燃料ペレットで、高温ガス炉燃料の照射ははじめての経験であるため、このキャプセルの熱設計に必要なデータ、特に熱中性子束のdepression factorや燃料コンパクトの熱伝導率およびギャップコンダクタンス等については、全くないのが現状である。そこでこれらのデータを、3体のキャプセルのなかで最初に照射するVP-1キャプセルの照射結果から求めることにした。VP-1キャプセルの概念設計は宮坂¹⁾によりなされたものであるが、このキャプセルの熱計算では、熱中性子のdepression factorを1とし、燃料コンパクトの熱伝導率を黒鉛のそれによって代用し、黒鉛スリーブと燃料コンパクトの接触面のギャップコンダクタンスは無視した。その他材料の熱伝導率についてはこれまでのキャプセル設計に用いたデータを使用した。

VP-1キャプセルでは中心の最高温度の目標値を1400℃に設定した。このため燃料コンパクトの線出力密度は200W/cmが必要であり、単位長さあたりの ^{235}U 量を0.050g/cmとすればJRR-2のVT-1孔の炉心の中央から40cmの位置で目的を達成できる計算であった。しかし、この初期設計では熱中性子束のdepression factorを詳細に計算に入れてないので試料の出力が小さく、照射温度も低かった。このVP-1キャプセルはVT-1での照射中に移動可能な構造であったが、VP-1の場合VT-1の中心部に他の材料照射試料が入っていたので移動できず、中心温度は950℃にとどまった。VP-2以後のキャプセルはVP-1の照射データを参考にして、ヘリウムギャップの間隔を大きくすると同時に、VT-1孔内の移動可能範囲を大きくし、目的の照射温度に合せられるよう考慮した。さらにVP-4キャプセルでは、キャプセル中心の温度を1600℃を達成することを目標にすると同時に、HWL-1ループで照射する予定であった被覆粒子をこのキャプセルで照射した。

2) キャプセルの構造

VP-1, VP-2, VP-4 キャプセルは、三者ともその構造がほとんど同じであるので、VP-2 キャプセルによりその概略を説明する。キャプセルの全体の構成を Fig. 3 に、試料部の詳細を Fig. 4 に示す。キャプセルは外側から順に、フィン付アルミ外筒、アルミ熱媒体、タンタル内筒、黒鉛熱媒体、燃料コンパクトで構成されている。燃料コンパクトは7ヶ封入し、その両端にタンタル板、アルミナペレットを配置している。アルミナペレットは軸方向の熱移動に対する断熱材であり、タンタル板は燃料コンパクトとアルミナペレットを直接接触させたときにおこる化学反応を防止するために使用している。

キャプセルの長さ方向の中央の位置には、Fig. 4 に示すように、タングステン-レニウム熱電対2対を、燃料コンパクトの中心温度 TC-1 および黒鉛熱媒体中の温度 TC-2 を測定するために、またクロメルアルメル熱電対2対をアルミニウム熱媒体中の温度 TC-3, TC-4 を測定するため配置した。アルミ熱媒体中には、この他に中央から上下30mmの位置に各2対づつクロメルアルメル熱電対を計4対 (TC-5, TC-6, TC-7, TC-8) を配置した。これらの熱電対は、キャプセルに接続されたアルミニウムの導管を通して炉外に導びかれる。タンタル内筒およびフィン付アルミ外筒はその接続部を、全て溶接することにより、照射中におけるFPの環境への放出を防止している。

VP-1 キャプセルとVP-2 キャプセルの構造上の相違は、Heギャップのみであり、VP-2 とVP-4 キャプセルの構造上の相違は、ホットラボでの解体が容易であるように一部改良を加えたことと、燃料コンパクトの封入量を7ヶから5ヶに減らし、このあいたスペースに被覆燃料粒子二種と燃焼率測定のためのモニター粒子を封入したことである。

このほか、各キャプセルには、コバルトをアルミニウムで希釈した直径0.3mmのワイヤを、熱中性子モニタとしてアルミ熱媒体中に封入した。

3) 温度分布の推定

キャプセルの温度分布の計算には、まずキャプセルの単位長さあたりの発熱量、いわゆる線出力密度、 Q (W/cm) を推定する。これは次の式により計算する。

$$Q = m \cdot \frac{6.02 \times 10^{23}}{235} \cdot \frac{\sigma_f \cdot \phi_{th} \cdot F}{C} \quad (\text{W/cm}) \quad (1)$$

ここで、 m は単位長さ当りの ^{235}U 量 (g)、 σ_f は ^{235}U の核分裂断面積 (cm^2) である。 σ_f は中性子のエネルギーにより変わるもので、熱中性子のマクスウェル分布および温度補正すると約 $480 \times 10^{-24} \text{cm}^2$ となる。 C は $1 \text{W} \cdot \text{sec}$ を発生するのに必要な核分裂数である。 ^{235}U は1核分裂あたり約 200MeV のエネルギーを発生するが、中性微子に相当する量および γ 線エネルギーのうち炉心外にもれる量を除くと、 185MeV が熱エネルギーに変換される。これから C を求めると $347 \times 10^{10} \text{ fission/W} \cdot \text{sec}$ になる。 ϕ_{th} は VT-1 孔内の熱中性子束 ($\text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$)、 F は depression factor (-) で、照射試料およびキャプセル材料の量に依存する。VP-1 キャプセルの熱計算では depression factor を1として、試料の発熱量を計算した。VP-2 キャプセルでは、VP-1 キャプセルの照射結果を解析し、 F を求めこれを熱計算に使用した。VP-4 の計算も同様である。

VP-1 キャプセルの線出力密度は、炉心高さの中央位置から40cmの高さにキャプセル中央位置

がくるものとして、Fig. 2に示した熱中性子束を使い、かつ $F=1$ として計算した結果、 $Q=200\text{ W/cm}$ が得られた。なお、VP-1キャプセルの封入試料の単位長さ当り ^{235}U 量は、 0.05 g である。VP-2およびVP-4キャプセルの線出力密度は、これらのキャプセルの照射位置として炉心中央からそれぞれ 30 cm および 20 cm を採り、また単位長さ当り ^{235}U 量として両キャプセルとも 0.088 g を採り、さらにFig. 2に示した熱中性子束をVP-1キャプセルの照射結果から求めた F により補正し計算した結果、それぞれ 125 W/cm および 160 W/cm が得られた。キャプセルの照射ではウランの分裂による発熱の他に、 γ 線の吸収による発熱があるが、こゝではこの寄与を無視する。

キャプセルの温度分布は、燃料コンパクト内に発生した熱が、材料内では伝導により、Heギャップ内ではHeガスの伝導および輻射の両者により、それぞれ半径方向に定常的に流れると仮定して計算した。計算式は伝導の場合、

$$Q = 2\pi\lambda(T_n - T_m) / \ell_n \frac{r_m}{r_n} \quad (2)$$

である。こゝで、 T_n は半径 r_n (cm)における温度($^{\circ}\text{C}$)、 T_m は半径 r_m (cm)における温度($^{\circ}\text{C}$)であり、 λ は材料の熱伝導率($\text{W/cm}\cdot^{\circ}\text{C}$)である。Heギャップの場合には、

$$Q = \frac{T_n - T_m}{R_C} + \frac{T_n - T_m}{R_R} = Q_C + Q_R \quad (3)$$

こゝで、

$$R_C = \ell_n \frac{r_m}{r_n} / 2\pi\lambda_{\text{He}} \quad (4)$$

$$Q_R = \frac{2\pi r C}{\left(\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_b} - 1\right)} \left[\left(\frac{T_n}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_m}{100}\right)^4 \right] \quad (5)$$

で与えられる。こゝで T_m は半径 r_m (cm)における温度($^{\circ}\text{K}$)、 T_n は半径 r_n (cm)における温度($^{\circ}\text{K}$)、 λ_{He} はHeガスの熱伝導率($\text{W/cm}\cdot^{\circ}\text{C}$)、 ϵ_a 、 ϵ_b は材料a、bの輻射率(-)、 r は平均半径(cm)、 C は黒体輻射定数($\text{W/cm}^2\text{ K}^4$)である。燃料コンパクトの中心温度は、

$$T_C - T_S = \frac{Q}{4\pi\lambda_{\text{compact}}} \quad (6)$$

から求められる。こゝで T_C は燃料コンパクトの中心の温度($^{\circ}\text{C}$)、 T_S は燃料コンパクトの表面の温度($^{\circ}\text{C}$)、 λ_{compact} は燃料コンパクトの熱伝導率($\text{W/cm}\cdot^{\circ}\text{C}$)である。

温度分布の計算をVP-2キャプセルを例にとって以下に示す。まずキャプセルの照射位置を定め、この位置に対応する熱中性子束をFig. 2から読みとり、depression factorをVP-1キャプセルの照射結果から求める。これらの数値を(1)式に代入し、 Q を算出する。次にこゝで求めた Q 、キャプセル材料の外径、内径およびその材料の熱伝導率を(2)式に代入し、キャプセル材料内に生ず

る温度勾配を順次計算していく。ここで、キャプセル最外層のフィン付アルミ外筒については、フィンの熱伝達を計算しなければならないが、この計算は省略し外径60mm、内径52mmの単純円筒と考え、その表面温度を100℃とする。Heギャップについては(3)式に従って計算するが、温度が低い場合には(500℃以下)輻射による伝熱を無視する。このようにして計算したキャプセルの半径方向の温度分布をFig. 5に示す。この図はキャプセルの照射位置10cmと30cmの場合の計算結果を示した。照射位置は任意に選択することができ、その位置でのキャプセルの半径方向中心の温度が設定値とかけはなれている場合には、照射位置を変更して設定した温度に近づくまで計算をくりかえす。

このようにして計算したVP-1、VP-2およびVP-4キャプセルの温度分布の計算結果を、Table 2に、これらの計算に用いた物理定数をTable 1に示す。

4) 照射試料

VP-1キャプセルの照射試料は、45年度試作被覆粒子(70FC6)を、黒鉛粉末と炭素からなるマトリックス中に均一に分散させたもので、粒子充填率23%、寸法10.1φ×10ℓ(mm)に自家調製したものである。70FC6は20%濃縮ウランのUC₂核をTRISO被覆した粒子で、粒子密度は261g/cm³である。

VP-2キャプセルには、昭和46年度試作の燃料コンパクト71FP4Bおよび71FP5Bを封入した。これらの燃料コンパクトの仕様をTable 3に示す。これら2種の燃料コンパクトには異なった名称がつけられているが、製造ロットのみ異なり、製法、寸法、被覆粒子充填率、カサ密度等の仕様は全く同じである。71FP4Bには被覆粒子71FC4が、71FP5Bには被覆粒子71FC5が充填されている。

VP-4キャプセルには、VP-2と全く同じ仕様の燃料コンパクトを封入したが、この他に被覆粒子2種を封入した。この仕様をTable 4に示す。

3.2 照射結果

1) VP-1キャプセル

VP-1キャプセルは、R2-46-04サイクル(46.6.21~46.7.3)において照射された。原子炉へのキャプセル装荷に際し炉出力を10kWで運転し、キャプセルの反応度を測定したあと、キャプセルを炉心高さの中央から上方30cmの位置にセットした(本報告書に記載したキャプセルの照射位置は、原子炉炉心高さの中央から上方にキャプセルの中心がどの程度の距離にあるかを示している)。原子炉の運転開始に際しては炉出力を1, 5, 8, 10MWとステップ状に上昇させ、キャプセルの温度を測定した。定常出力に達してからのキャプセルの中心温度(TC-1)は560℃、黒鉛熱媒体中の温度(TC-2)は447℃、アルミ熱媒体中の中心側熱電対(TC-3)の指示温度は93℃、同じく外側熱電対(TC-4)の指示温度は89℃であった。

原子炉の起動から1~2日間は、制御棒その他の微調整にともなう中性子束の分布の変動がおこるため、キャプセルの温度もこれにともなって変化するのが普通である。そこで、原子炉の起動から2日程度経過して原子炉が安定してから、キャプセルの中心温度を設計値にあわせるための位置調整を行なった。キャプセル中心を炉心高さ中央位置から30, 25, 20, 15, 10cmと5cmずつ下に移動させたときの各位置における温度および10cmの位置にキャプセルを固定し、制御棒を

動かしたときの熱電対の指示温度を Table 5 に示す。この表で左端の欄の数値は、熱電対の番号を示す。炉中心から 10 cm におけるキャプセルの中心温度 (TC-1) は 925°C, 黒鉛熱媒体中の温度 (TC-2) は 800°C, アルミ熱媒体中の中心側熱電対の指示温度 (TC-3) は 151°C, 同じく外側熱電対の指示温度 (TC-4) は 147°C で、さらに制御棒の位置調整により昇温を試みた結果、中心温度 (TC-1) は 950°C, 黒鉛熱媒体中の温度 (TC-2) は 850°C, アルミ熱媒体中の中心側熱電対の指示温度 (TC-3) は 153°C, 同じく外側熱電対の指示温度 (TC-4) は 149°C であった。

キャプセルを 30 cm の位置から炉中心に向かって下に 20 cm 移動することにより、キャプセルの中心温度を 365°C 上昇させることができた。また、制御棒の位置調整によりキャプセルの中心温度を 25°C 上昇させることができた。これからわかるように、キャプセルの照射温度をあげるためには、キャプセルを炉心内で上下方向に移動させ、適当な熱中性子束を確保することが効果的であり、制御棒の移動はそれほど効果がないことがわかる。

2) VP-2 キャプセル

VP-2 キャプセルは、JRR-2, R2-47-04 サイクル (昭和 47 年 6 月 19 日～昭和 47 年 7 月 1 日) において、1 原子炉サイクル照射された。原子炉の定常出力での照射に先立ち、炉出力 10 W において VP-1 同様キャプセルの反応度を測定した。その結果を Fig. 6 に示す。キャプセルは炉中心から 27.7 cm で照射を開始した。原子炉の起動に際しては、その出力をステップ状に上昇させ、キャプセルの昇温状態を調べた。10 MW に達した時点では 1230°C を示した。この位置で 2 日間照射を続けた結果 1385°C になり、このキャプセルの目標値である 1400°C に近い値が得られたのでこのまま照射を続けた。

VP-2 キャプセルの中心温度 (TC-1) および黒鉛熱媒体中の温度 (TC-2) の照射中の変化を Fig. 7 に示す。キャプセルの中心温度は、照射開始後 2 日でほぼ安定し、その後 50°C 程度減少したが、照射終了 1 日前になって再び 30°C 程度上昇した。径方向の温度分布の設計値と実測値の比較を Fig. 8 に示す。この結果から、アルミ熱媒体中で約 100°C, 黒鉛の熱媒体中で約 50°C 高く推定したことになるが、燃料コンパクトの中心では一致する結果を得た。

3) VP-4 キャプセル

VP-4 キャプセルも、VP-1 および VP-2 キャプセルと同様に照射した。VP-4 キャプセルの反応度を、他のキャプセルのそれとまとめて、Fig. 6 に示す。原子炉の起動の際のステップ状の出力上昇に対するキャプセルの中心温度は、炉出力 3, 5, 7 および 10 MW に対して、それぞれ 703, 940, 1,112 および 1405°C であった。この位置で照射を続け、2 日後にキャプセルの中心温度を測定した結果 1,500°C になっていたので、このまま照射を続けた。(キャプセル位置 21.5 cm)

VP-4 キャプセルの熱電対 TC-1, TC-2 および TC-3 の照射中の温度の経時変化を Fig. 9 に示す。キャプセルの中心温度は、照射開始後 1 日で約 100°C 上昇し、2 日間この温度を維持し、その後約 100°C 程度低下し、以後 1,390°C を保っていた。Fig. 10 に VP-4 キャプセルの径方向の温度分布の設計値ならびに実測値を示す。両者の間では、アルミ熱媒体中ではよい一致がみられるが、黒鉛の熱媒体中および燃料コンパクト中心で約 100°C 設計値が大きくなっている。

3.3 考 察

1) キャプセルの線出力密度

キャプセルの半径方向の温度勾配がわかれば、(2)式から逆に照射中のキャプセルの線出力密度を算出することができる。アルミ熱媒体の長さ方向中央位置に配置した熱電対TC-3およびTC-4の温度勾配から求めた線出力密度をTable 6に示す。VP-1では132W/cm, VP-2では158W/cm, VP-4では256W/cmである。これら3者のキャプセルのなかでは、VP-4が他の2者にくらべて特に大きくなっている。これらの照射位置における各キャプセルの線出力密度を、depression factorを全く考慮せずにVT-1孔内の空間的な熱中性子束および ^{235}U 量から計算により求めると、VP-1, VP-2およびVP-4キャプセルでそれぞれ265, 287および352W/cmとなり、両者の間には大きな差があるものの、大きさの順序は一致している。有効熱中性子束を他の方法(例えばフラックスモニタの測定)から求めることができるならば、温度勾配から求めた線出力密度に含まれる誤差がどのくらいであるか評価することができるが、その測定はまだ行っていないので、こゝでは温度の測定にかゝわる問題点について記述する。

こゝで求めた線出力密度の精度は、結局温度の測定精度いかんにかゝっている。計算には(2)式を用いたが、これが成立する条件は、無限円筒の半径方向における理想的な熱移動の場合で、実際のキャプセルの場合有効発熱長が十分でなく、また熱伝対を導く導管が上方にのびているなどキャプセルの形状が対称でないこと、さらにVT-1孔の熱中性子束の分布の極大値の位置が、キャプセルの長さ方向の中心と一致していないことなどを考えると、キャプセル軸方向中心における熱の移動方向は、必ずしもキャプセルの軸に対し直角ではない。これらの影響はわずかであると推定されるが、くわしく調べておくことが望ましいと考えられる。以上が温度の測定に関する第1の問題点であり、つぎがアルミ熱媒体中の温度の測定方法の問題である。

これらのキャプセルのように、2対の熱電対がアルミのような熱の良導体中に、それもあまり間隔をおかずに封入されている場合、両熱電対間に生ずる温度差は小さいのが普通である。このような場合熱電対の熱起電力の絶対値を測定するのではなく、両熱電対間の熱起電力の差を測定する方法を採用した方が、より正確な測定ができる。本照射実験ではそれぞれの熱電対の熱起電力の絶対値を測定しており、2対の熱電対間の電位差を測定する方法にくらべて、あきらかに精度ではおとっている。キャプセルの照射計画を実施するにあたって、照射後試験結果を待たずに次のキャプセルの設計に入らなければならないことが度々あり、この場合キャプセルの設計精度を向上させるためにも、このような照射中の温度の測定データが重要な役割をはたす。その意味で、温度の測定データはできるだけ精度がよいことが望ましく、さらに照射後試験によりフラックスモニタおよびバーンアップの解析を確実にこなして、これらのデータの信頼性を向上させておく必要がある。

2) 有効熱中性子束

すでにTable 6にVP-1, VP-2およびVP-4キャプセルの照射結果から求めた線出力密度とVT-1孔内の空間的な熱中性子分布から求めた線出力密度を示した。前にも述べたようにVT-1孔内に空間的に分布する熱中性子は、キャプセルを構成する材料による吸収がおこるため、照射試料の実際に受ける熱中性子束はこの値をかなり下まわっている。この材料による中性子吸収の程度をあらわしている因子が、depression factorで、照射結果から算出した試料の線出力密度とVT-1孔の空間的中性子束から計算した線出力密度との比がこれに相当する。以上の定義に従っ

てVP-1, VP-2およびVP-4キャプセルのdepression factorを計算すると, それぞれ0.50, 0.55および0.72となり, VT-1孔内の空間的熱中性子束をかなり下まわっていることがわかる。

depression factorはキャプセルの材料および照射試料の種類およびその量に依存する量であるから, キャプセルの製作に使用した材料の種類およびその量が全く同じであるならば同じ値になってよいはずである。VP-1, VP-2およびVP-4キャプセルはこれらの種類および量がほとんど同じであると推定されるにもかかわらず異なるdepression factorを示しているのは, 次の理由によるものと推定される。線出力密度はアルミの熱媒体中の温度から求めたもので, この温度は記録計の指示値から読みとる結果, $\pm 2\%$ 程度の読みとり誤差が含まれること, またVT-1孔内の熱中性子束の分布が全く変わらないと仮定しているが, 熱中性子束の分布はその近くに挿入されている制御棒や他の照射試料により若干変動をうけるなどの理由による。

3) 温度分布

照射前にキャプセルの安全性を評価するうえで, 照射温度をできるだけ正しく推定することが望ましいが, これは必ずしも簡単ではない。前にも述べたように, 新しくキャプセルを設計する場合には, 有効熱中性子束が不明であることが多い。そこでdepression factorを1として照射試料の線出力密度を求め, これを用いてキャプセル内のおよその温度分布を推定する。この計算ではキャプセル内の温度を実際より高く評価していることになるから, この温度の範囲内で照射するかぎり安全上問題はない。第2回目のキャプセルの設計からは, 第1回のキャプセルの照射データが使用できるので, 第1回のキャプセルの設計にくらべてより確実な温度の推定ができることになる。VP-2およびVP-4キャプセルの温度が, VP-1キャプセルにくらべて計算値と実験値の差が小さくなっているのはそのためである。

キャプセルのように金属材料および黒鉛材料を円筒状に数層配列し, その各々の材料の境界にクリアランスが存在する物体中の温度分布を計算する場合, これらの材料の熱伝導率に多少の誤差が含まれていても, 全体の温度分布の計算結果におよぼす影響は少ないが, クリアランス内でこのようなことになるとその影響はきわめて大きい。従って, クリアランス内のヘリウムの熱伝導率の考察は重要である。VP-1, VP-2およびVP-4キャプセルの照射結果から求めた線出力密度をもとに, 各キャプセルの温度指示値に合うように, Heの熱伝導率を求めた結果をTable 7に示す。ヘリウムの熱伝導率は文献によって若干異なるが, 室温から 1500°C では $15 \times 10^{-3} \sim 40 \times 10^{-3} \text{W/cm}^2$ で, これらの実験の推定値とオーダー的には一致しているものの, 両者の間には大きな差がみられる。気体の熱伝導率の特性として, 温度に対する変化は比較的大きく, ヘリウムの場合温度の上昇とともに増加するが, Table 7に示した熱伝導率は必ずしもこのようにはなっていない。この原因の1つとして, ヘリウムギャップの両側に配置されている材料の表面状態の影響が考えられるが, これを調べるためには更に実験が必要である。

燃料コンパクトの熱伝導率および黒鉛スリーブと燃料コンパクトの接触面の熱伝達率をキャプセルの照射結果から算出するには, コンパクト内の温度の測定点が1点しかなく不可能であるため, 燃料コンパクトの熱伝導率の文献値をもとに, 今後のキャプセルの設計の参考のために接触面の熱伝達率を試算してみる。燃料コンパクトの熱伝達率は製造条件により異なるが, Everettら³⁾に

よれば, 1000°Cにおいて0.21W/cm·°C, Johnson⁴⁾によれば, 1000°Cで約0.11W/cm·°C, Goeddel⁵⁾によれば, 1200°Cで0.38W/cm·°Cで一般に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, 0.2~0.3W/cm·°Cとされている。この実験に用いた燃料コンパクトの熱伝導率を0.25W/cm·°Cと仮定し, キャプセルの中心温度および燃料コンパクトの半径を(6)式に代入し, 燃料コンパクト表面の温度を求め, これと黒鉛スリーブ内表面の温度の推定値とから接触面に生ずる温度ギャップを計算すると, VP-1, VP-2およびVP-4キャプセルで, それぞれ45°C, 119°Cおよび124°Cを得た。これから接触面における熱伝達率を求めると, それぞれ0.93, 0.42, および0.66W/cm²·°Cとなる。これをBtu/ft²h_r°Fに換算すると, それぞれ1,634, 737および1,159となり, 高温ガス炉の設計に用いられている1,000Btu/ft²h_r°Fに比較的近い。

4) 燃 焼 度

各キャプセルの燃焼度を, 前に述べた有効熱中性子束から次式に従って計算する。

$$N_f = N_{235} \cdot \sigma_f^{235} \cdot \phi_{thE} \cdot t \quad (8)$$

ここで, VP-1キャプセルについては, $\sigma_f^{235} = 480 \times 10^{-24} \text{ (cm}^2\text{)}$, $\phi_{thE} = \phi_{th} \cdot F = 1.5 \times 10^{14} \times 0.50 \text{ (n/cm}^2 \cdot \text{sec)}$, $t = 290 \text{ h} \times 3600 \frac{\text{sec}}{\text{h}} = 1.0 \times 10^6 \text{ (sec)}$, $N_{235} = \frac{6.02 \times 10^{23}}{235} \times 0.050 \times \frac{\pi}{4} (1.05)^2 = 1.11 \times 10^{20} \text{ (atom/cm}^3\text{)}$ であるから,

$$N_f = 4.12 \times 10^{18} \quad (\text{fission/cm}^3)$$

燃焼度 α % FIMA は,

$$\alpha = \frac{N_f}{N_{235}} \times 100 = \frac{4.12 \times 10^{18}}{1.11 \times 10^{20}} \times 100 = 3.71 \% \text{ FIMA}$$

この照射試料は 20%濃縮ウランを用いているから, 燃焼度 β % FIMA は,

$$\beta = 3.71 \times \frac{1}{5} = 0.74 \% \text{ FIMA}$$

となる。一方, 燃焼度をMWD/TUで求めると, 前に述べたように²³⁵U 1 fission 当り 185 MeVが熱エネルギーに転換されるから, 1%FIMAの燃焼度 r は 8,665 MWD/TU^{*}に相当し,

$$r = 0.74 \times 8,665 = 6,412 \text{ MWD/TU}$$

*)
$$\frac{1 \text{ (ton)} \times 10^6 \left(\frac{\text{g}}{\text{ton}} \right) \times 0.01 \times 6.02 \times 10^{23} \text{ (n/mol)}}{238 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \times 185 \text{ (MeV)} \times 1.6 \times 10^{-13} \left(\frac{\text{W} \cdot \text{sec}}{\text{MeV}} \right) \times \frac{1}{3,600 \times 24 \times 10^6} \left(\frac{\text{MWD}}{\text{W} \cdot \text{sec}} \right) = 8,665 \left(\frac{\text{MWD}}{\text{TU}} \right)$$

となる。

同様に、VP-2キャプセルの燃焼度 N_f は、

$$N_f = 4.87 \times 10^{18} \quad (\text{fission/cm}^3)$$

燃焼度 α %FIFAは、

$$\alpha = \frac{N_f}{N^{235}} \times 100 = 4.38 \% \text{FIFA}$$

燃焼度 β %FIMAは、

$$\beta = 0.87 \% \text{FIMA}$$

MWD/TUでは

$$r = 7,538 \quad \text{MWD/TU}$$

となる。

同様に、VP-4キャプセルについては、

$$N_f = 7.96 \times 10^{18} \quad (\text{fission/cm}^3)$$

$$\alpha = 4.07 \% \text{FIFA}$$

$$\beta = 0.81 \% \text{FIMA}$$

$$r = 7,018 \quad \text{MWD/TU}$$

となる。

これら三者のキャプセルの燃焼度は7,000~8,000MWD/TUであり、諸外国における高温ガス炉燃料の燃焼度は60,000MWD/TU、日本の開発中のそれは20,000MWD/TUで、燃料コンパクトの照射健全性を調べる目的からすればいかにも小さい。しかし、これは照射時間を3~4サイクルまで延長すれば、20,000MWD/TU以上になり燃焼度の目標値を達成できることになるから、今後この方向で検討すべきである。また、これらのキャプセルの照射試験を行なって、これらの温度勾配から求めた燃焼度との比較検討を行なうべきである。

5) 設計法

燃料キャプセルの照射を計画する場合、まず照射試料の照射条件、温度、燃焼度および高速中性子照射量を定める。つきにこの条件を基準にしてキャプセル材料を選択し、キャプセル設計を行なうわけであるが、ここで特に注意すべきことは照射中にキャプセルが絶対に破損をおこさないよう安全解析を十分に行なうことである。キャプセルの材料の選択の基準としては、核的性質、熱的性質、耐蝕性、機械的特性、価格、供給量を考慮して決定する。安全解析については、照射中のキャプセル中心が到達する温度、キャプセル内の温度分布、生成放射能量、FP放出量、照射中材料内に発生する応力等について行なうが、VPキャプセルの場合、キャプセル内の照射温度のみを考慮すれば十分である。

キャプセル内の温度分布の計算は、3.1.3)に述べた方法に従って、 ^{235}U 量と熱中性子束から発熱

量 Q を算出し、これと材料の熱伝導率から求めるが、照射温度が設定値に達しない場合には、ギャップの間隔およびキャプセルに充填するガスの種類およびその圧力を変えることによって調整する。このギャップの熱伝達の計算には、いろいろ経験的要素が多く、実験値と計算値が一致しないのが普通であるが、照射試料の温度はこの値により支配されるから、あらかじめ調べておくとよい。また、はじめてキャプセルを設計する場合、depression factor が未定であることが多く、この場合できれば模擬キャプセルをつくり、原子炉を低出力で運転し、これを照射し、中性子フラックスモニターの解析を行なって照射試料のうける有効熱中性子束を求めるとよい。

以上の設計方法に従ってキャプセルを製作し照射を行ない、設計通りの値が得られたかどうかを調べる。各材料の熱伝導率は照射中のキャプセルの温度の実測値から評価されるが、熱中性子束は最終的には照射後試験まで待たなければならない。そしてこのようにして評価した値を次のキャプセルの設計に応用する。要するにキャプセルの設計は試行錯誤のくりかえしであり、経験を重ねるごとに改良されすぐれたものになっていく。照射温度は、炉内の中性子束の変化、キャプセルの構造、試料の量などで変わるので、全部のデータを完全に解析したキャプセルを照射することは困難である。この点を総合的に解決する一方法として炉内のキャプセルの移動方式がある。今後、自動的に位置調整可能な flux fitting capsule が、照射研究に有効な手段と考えられる。

4. アメーバ効果試験用キャプセル (VP-3, VP-5)

4.1 キャプセルの設計製作

1) 照射目的

被覆粒子燃料の原子炉中での特異な現象にアメーバ効果がある。これは被覆粒子燃料を高温において温度勾配の存在する条件下で照射した場合、燃料核が高温側に移動する現象であり、この結果被覆層に破損が生じFPの放出がおこるので、高温ガス炉燃料の研究開発においては是非とも解明しておかなければならない重要な課題の一つである。この現象は燃料核に UC_2 を用いた場合と UO_2 を用いた場合ではその移動のメカニズムが異なる。 UC_2 の場合は温度勾配が駆動力となる熱拡散として説明され、一般的にもこの説が受け入れられているが、 UO_2 の場合にはまだ十分に理解されていない。というのは、 UO_2 の場合核分裂の結果生成するフリーの酸素が、アメーバ効果に関与しているからである。そして、ガス相における炭素移動だけでなく、 UO_2 の場合にみられるような固相拡散も重要な役割を演ずると考えられており、この現象を一層複雑なものにしている。

以上述べたように UO_2 核の場合のアメーバ効果を調べるには、フリーの酸素の存在が必要であり、どうしても核分裂の力を借りなければならない。そこで計画されたのがVP-3およびVP-5キャプセルによる照射である。これらのキャプセルは照射中に高温を発生させ、照射試料粒子に温度勾配が生ずるよう工夫し、 UO_2 核被覆粒子だけでなく、 UC_2 核被覆粒子も試料として照射された。

2) キャプセルの構造

VP-3およびVP-5キャプセルの寸法および形状はVP-2キャプセル(Fig. 3)と同じであるが、試料部(タンタル内筒より内側の部分)の構造は、照射下のアメーバ効果を調べるといった目的を達成するため、被覆粒子に温度勾配がつくような構造に変えた。炉外におけるアメーバ効果試験は、中心にヒーターを置き、そのまわりの円筒形黒鉛ホルダーに被覆粒子を充填し、熱が外部に向かって流れる際その方向に生ずる温度勾配を利用して行なっている。VP-3およびVP-5キャプセルもこれと同じ原理を採用し、中心ヒーターのかわりに中心に被覆粒子を充填し、その核分裂発熱を利用して、そのまわりに配置した試料粒子を加熱することにした。

VP-3およびVP-5キャプセルの試料ホルダーの構造をFig. 11に示す。中心に充填されている被覆粒子がヒーターの作用を有し、そのまわりの円環孔内に充填されている被覆粒子を加熱する。試料粒子に生ずる温度勾配は、その両側においた熱電対により検出する。被覆粒子充填用黒鉛ホルダーは3ヶ直列に並べ、それぞれのホルダーに種類の異なる被覆粒子を充填した。黒鉛ホルダーの上下端には、燃焼度測定のための天然ウラン被覆粒子を入れた円板状黒鉛ホルダーを置いた。なお、VP-3キャプセルでは、円環孔内に被覆粒子のみを充填したのに対し、VP-5キャプセルでは被覆粒子の充填層のすきまに黒鉛粉末を充填し、円環孔の両面に生ずる温度差を小さくするようにした。

3) 温度分布の推定

キャプセルの半径方向の温度分布の推定は、20%濃縮ウラン被覆粒子を充填した円環孔については別に考慮する必要があるが、それ以外の部分については前述したコンパクト照射キャプセルと全

く同様に計算してよい。まず線出力密度を被覆粒子の封入量と照射予定位置における熱中性子束から、VP-2キャプセルの計算に用いた方法に従って算出した。Table 8およびTable 9に示したキャプセルの被覆粒子の封入量に対し、炉中心から33.5 cmおよび25.0 cmの位置で、それぞれVP-3およびVP-5キャプセルの線出力密度を計算すると、 $Q = 157 \text{ W/cm}$ および 184 W/cm が得られた。Table 8および9に示したI, II, IIIの記号は被覆粒子を充填した黒鉛ホルダの番号で、キャプセルの上からこの順で封入されている。これらの線出力密度とキャプセル構成材の熱伝導率およびそれらの寸法を(2)式および(3)式に代入し、温度勾配を計算する。

円環孔内の温度分布は、中心孔内に封入した被覆粒子と円環孔内に充填した被覆粒子と両者からの影響を受けるため、その計算は(2)式および(3)式で示される関係とは異なる。その計算は以下の通りである。円筒形状を有する物体の中心に熱源があり、外周部に向って熱が移動し、かつ中心から r_1 (cm)と r_2 (cm)の間で、単位時間、単位体積当り W (W/cm^3)の熱が発生しているときには、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{W}{C_p \rho} \quad (9)$$

という関係が成立する。

ここで λ は被覆粒子の充填層の熱伝導率である。定常状態では、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

であるから、

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{W}{\lambda} \quad (11)$$

積分して、

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{W}{2\lambda} r + \frac{a}{r} \quad (12)$$

境界条件

$$r = r_1, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

から a を求めると、

$$a = \frac{W}{2\lambda} r_1^2 \quad (13)$$

(12)式を積分して、

$$T = -\frac{W}{4\lambda} r^2 + a \log r + b \quad (14)$$

こゝで、 r_2 、 T_2 を代入すると、

$$b = T_2 + \frac{W}{4\lambda} r_2^2 - \frac{W}{2\lambda} r_1^2 \log r_2 \quad (15)$$

となる。

円環孔内の温度分布は(14)式から算出することができるが、こゝで円環孔内の被覆粒子充填層の熱伝導率が未知であるため、VP-3キャプセルではとりあえずHeギャップとして計算し、VP-5キャプセルでは、粉体の熱伝導率

$$\lambda = \lambda_s (1 - \epsilon)$$

に従って計算した。こゝで ϵ は空隙率、 λ_s は粉体の結晶の熱伝導率である。また、中心孔内の被覆粒子の充填層の直径中心の温度は、燃料コンパクトの場合と同程度の温度差があると仮定し、燃料コンパクトキャプセルの照射において観察された値を、黒鉛容器の内表面温度に加えて、これをもってキャプセルの半径方向中心の温度とした。

4) 照射試料

VP-3およびVP-5キャプセルに封入した被覆粒子の種類をTable 8およびTable 9に、その仕様をTable 3およびTable 11に示す。これらの被覆粒子のうちで、70FCと表示されているものは、昭和45年度試作の被覆粒子である。71FCと表示されているものは、昭和46年度試作の被覆粒子である。70FC3Aおよび70FC4Bの燃料核は UC_2 、濃縮度は両者とも20%である。前者の被覆はTRISO型3重、後者のそれはTRISO II型4重である。71FC4および71FC5の燃料核は UO_2 で、濃縮度は両者とも20%で、被覆は両者ともTRISO II型である。円環孔のギャップは0.8mmにしてあり、粒子の直径よりやや大きい目であるので、粒子はほぼギャップを埋める形で円環状に入れられている。円環孔にはアメーバ効果に対する燃料核の化学組成の影響を調べるために、 UO_2 核被覆粒子および UC_2 核被覆粒子を充填した。

4.2 照射結果

1) VP-3キャプセル

VP-3キャプセルはR2-47-13サイクル(48.3.19~48.3.31)において照射を行った。キャプセルの反応度を測定したあと、キャプセルを炉中心から335mmにセットした。原子炉の起動に際しては、炉出力を1, 3, 5, 8および10MWとステップ状に上昇させ、キャプセル内の温度を測定した。それぞれの出力における円環孔の内側に封入されている熱電対の指示値は、それぞれ260, 660, 920, 1,215および1,380°Cであった。2日後同熱電対の指示値を調べたところ1,495°Cを示していたので、そのまま照射をつづけた。照射中のVP-3キャプセル内の温度の経時変化をFig. 12に示す。この図で、TC-1, TC-2およびTC-3はいずれもキャプセルの長さ方向中央上に配置されている熱電対で、TC-1は円環孔の内側の黒鉛筒内に、TC-2は円環孔の外側の黒鉛筒内に、TC-3はアルミ熱媒体内に封入されている。照射の前半ではほとんど温度の変化はなく、後半における温度のみだれは原子炉がスクラムし、VT-1孔付近の制御棒の位置が変わった結果であると推定される。VP-3キャプセルの半径方向の温度分布の計算値と実測値を

Fig. 13 に示す。

2) VP-5 キャプセル

VP-5 キャプセルは、R2-48-02 サイクル(48. 6. 20~48. 6. 30)において照射した。このキャプセルは最初原子炉炉心高さの中央から29.0 cmの位置で照射を開始し、3日後に25.0 cmに移動した。キャプセルの熱電対、TC-1、TC-2およびTC-3(熱電対の封入位置はVP-3と同じ)の指示温度の経時変化をFig. 14に示す。照射開始後3日目における温度の急上昇は、キャプセルの位置変更の結果で、約100℃の上昇がみられた。半径方向の温度分布の実測値と計算値の比較をFig. 15に示す。粉体の伝熱の式に従って円環孔内の温度分布を推定した結果は、実測値を大巾に下まわっていることがわかる。また、このキャプセルでは円環孔の外側の黒鉛筒中に封入した熱電対の作動が正常でなく、実際の温度をかなり下まわる温度を示していた。円環孔の内側の黒鉛筒中の指示温度を参考にして円環孔から内側の温度分布を補正すると、Fig. 15の点線のようになり、キャプセルの半径方向中心では1,670℃、円環孔内では約280℃の温度差が生じているものと推定される。

4.3 考 察

1) 温 度

VP-3およびVP-5キャプセルの特徴は、中心孔と円環孔とに被覆粒子を分けて封入したことで、中心孔内の被覆粒子は円環孔内に封入した粒子を加熱するためのヒーターとしての機能もっている。円環孔内に封入した粒子は照射中のアメーバ効果を調べるための試料で、これらの現象がおこるか否かは粒子の照射温度とこの粒子の両極に生じた温度差如何にかゝっている。このことをVP-3キャプセルについて、Fig. 13に示した結果からみると、円環孔内に生じた温度差は約350℃、照射温度は1,100℃以上であると推定される。これまでの研究によれば、被覆粒子のアメーバ効果のおこる条件は、被覆粒子を約900℃以上で長時間加熱し、その両極に温度勾配が存在することであるから、この照射条件はアメーバ効果をおこさせるに十分であると推定される。

被覆粒子のアメーバ効果において、燃料核の移動速度は温度勾配に比例するから、温度勾配が大きいほどその効果はいちじるしいが、実際の原子炉内での条件と比較し、あまりにもかけはなれているのは好ましくない。そこで、VP-3キャプセルの温度条件を緩和するために試みたのが、VP-5キャプセルで行なった被覆粒子を充填し更にそのすきまに黒鉛粉末を充填する方法である。この効果をFig. 15からみたところ、円環孔内に生じた温度差は約280℃と推定され、若干その効果はみとめられるが、期待したほどではなかった。

2) 燃 焼 度

前述の燃料コンパクトキャプセルの場合に用いたのと全く同じ方法で、depression factorを算出し、これをもとにVP-3およびVP-5キャプセルの照射試料の燃焼度の計算を試みる。キャプセル材料による熱中性子の吸収が全くおこらないと仮定して(1)式から求めた線出力密度およびアルミ熱媒体中の温度勾配から(2)式に従って求めた線出力密度をTable 12に示す。これらの計算に用いたデータは以下の通りである。アルミ熱媒体中の2対の熱電対により測定した半径方向の温度差は、VP-3およびVP-5キャプセルでそれぞれ4.9℃および4.5℃、2本の熱電対の中心からの距離はそれぞれ1.6 cmおよび2.2 cmで、アルミの熱伝導率は2.25 W/cm・℃を使用した。

照射試料の燃焼度は次の式に従って計算する。なお、VP-3キャプセルのdepression factor Fは0.52、照射時間、tは 1.04×10^6 sec、 N^{235} は 4.12×10^{20} atom/cm³である。

$$N_f = N^{235} \cdot \sigma_f^{235} \cdot \phi_{thE} \cdot t$$

ここで、 $\sigma_f^{235} = 480 \times 10^{-24}$ cm²、 $\phi_{thE} = \phi_{th} \cdot F = 0.73 \times 10^{14} \times 0.52 = 0.38 \times 10^{14}$ n/cm²·secを代入し、

$$N_f = 7.84 \times 10^{18} \quad (\text{fission/cm}^3)$$

を得る。

燃焼度 α %FIFAは、

$$\alpha = \frac{N_f}{N^{235}} \times 100 = \frac{7.84 \times 10^{18}}{4.12 \times 10^{20}} \times 100 = 1.90 \% \text{FIFA}$$

この照射試料は20%濃縮ウランを用いているから、燃焼度 β %FIMAは、

$$\beta = 1.90 \times \frac{1}{5} = 0.38 \% \text{FIMA}$$

となる。一方、燃焼度をMWD/TUで求めると、1%FIMAの燃焼度は、8,665 MWD/TUに相当するから、

$$r = 0.38 \times 8,665 = 3,293 \text{ MWD/TU}$$

となる。

VP-5キャプセルについては、 $\phi_{thE} = \phi_{th} \cdot F = 1.00 \times 10^{14} \times 0.41 = 0.41 \times 10^{14}$ (n/cm²·sec)、t = 8.25×10^5 sec、 $N^{235} = 3.47 \times 10^{20}$ atom/cm³であるから、

$$N_f = 5.65 \times 10^{18} \quad (\text{fission/cm}^3)$$

燃焼度 α %FIFAは、

$$\alpha = 1.63 \% \text{FIFA}$$

燃焼度 β %FIMAは、

$$\beta = 0.33 \% \text{FIMA}$$

MWD/TUでは、

$$r = 2,859 \text{ MWD/TU}$$

となる。

一方、VP-3およびVP-5キャプセルの中段の黒鉛ホルダーに封入した被覆粒子の燃焼度の実測値は、それぞれ0.487および0.469%FIMAで、アルミ熱媒体中の温度勾配から求めた燃焼度、0.38および0.33%FIMAに比較し実測値の方が大きい。この差は、測定による誤差(例えば温度

など)と近似計算による誤差(例えば線出力密度の計算には ^{238}U および ^{239}Pu の核分裂による発熱は無視している。)とが重なった結果であると推定される。なお、参考までに燃焼度の実測値からVP-3およびVP-5キャプセルの線出力密度の算出を試みると、0.487および0.469%FIMAはそれぞれ4.442および4.278MWD/TUに相当するから、これをWD/gUに換算し、照射日数で除し、cm当りU量を乗ずれば、それぞれ297および304W/cmを得る。これらの線出力密度を用いてVP-3およびVP-5キャプセルのdepression factor, Fおよびアルミ熱媒体中の2本の熱電対の間に生じた温度差 ΔT を求めると、Fはそれぞれ0.71および0.63となり、 ΔT はそれぞれ6.7および6.8°Cとなり、温度の実測値との間に1.8および2.3°Cの差が生じている。

3) 設計法

アメーバ効果測定用キャプセルは、前の燃料コンパクト照射キャプセルとくらべて異なるところは、その照射目的が被覆粒子のアメーバ効果を調べることとあり、被覆粒子を円環孔と中心孔とに分けて封入したことである。従って、このキャプセルでは円環孔内の温度勾配および中心孔の径方向中心の温度の推定をどうするかが問題である。VP-3キャプセルでは便宜的にヘリウムギャップとして計算したが、VP-5キャプセルでは粉体の伝熱から計算した。ヘリウムギャップとして計算した結果、実測値と計算値とは比較的よく一致したが、これはあくまでも偶然の一致であり、一方、VP-5キャプセルの場合粉体の伝熱として取扱った結果大きな誤差が実験値との間に生じた。

そこで、VP-3キャプセルの照射結果を(14)式に代入し、円環孔内の被覆粒子の充填層の熱伝導率を求めたところ

$$\lambda = 0.041 \quad (\text{W/cm}\cdot\text{C})$$

を得た。Leyers⁸⁾の結果によれば、0.5気圧のヘリウム中のバイソ被覆粒子充填層の熱伝導率は、1300°Cにおいて0.036W/cm・Cであるから、比較的よく一致している。参考までに彼らの測定した熱伝導率を用いて中心孔内の被覆粒子充填層の中心と側面の温度差を求めると、VP-3では194°C、VP-5では207°Cとなった。しかし、中心孔の温度については熱電対が全く封入されていないので、確認のしようがない。

VT-1孔において今後もアメーバ効果キャプセルの照射をつづけるという前提にたつて、このキャプセルの改善すべき点を述べると、ヒーターには被覆粒子を用いるよりは、穴あき燃料コンパクトをそれも発熱量に十分余裕のある燃料コンパクトを用いた方がよい。こうすることによってキャプセルの半径方向中心に熱電対を挿入することができ、さらにVP-3およびVP-5キャプセルのような断続的なヒーターでなくなるばかりでなく、試料粒子に対する濃縮度の制限がなくなる。さらに、被覆粒子はVP-3およびVP-5キャプセルのように円環孔内に一層に並べるのではなく、円板に小さな穴をあけ、この穴に被覆粒子を1ケづつ充填し、さらにフェノール樹脂などで固定する方式にした方がよい。熱電対はキャプセルの直径中心に1対、試料粒子の内側と外側にそれぞれ1対づつ、さらにアルミ熱媒体中に6対封入することが望ましい。このような方針で設計するとタンタル円筒の直径は若干大きくなるが、VT-1孔の直径は大きいから問題ないと考えられる。

5. ま と め

JRR-2の中央垂直実験孔(VT-1)において、被覆粒子燃料コンパクトおよび被覆燃料粒子の照射を行なった。燃料コンパクトは、VP-1、VP-2およびVP-4キャプセルにより照射し、照射中の試料の最高温度としてはそれぞれ950°C、1380°Cおよび1500°Cが得られた。VP-1キャプセルは、一連のVPキャプセルの基礎となったもので、その照射温度は予想外に低かったが、キャプセル設計に必要ないくつかのデータを提供した。VP-2およびVP-4キャプセルでは、アルミ熱媒体中のギャップ間隔を拡大し、径方向および軸方向に対する熱抵抗を大きくした結果、ほぼ希望する温度を得ることができた。

VP-3およびVP-5キャプセルは照射中の被覆粒子のアメーバ効果を調べることを目的に照射を行なった。被覆粒子はキャプセル内の円環孔に一層並べて照射した結果、被覆粒子の両極でそれぞれ340°Cおよび280°Cの温度差が生じた。その被覆粒子の照射温度は両キャプセルとも1100°C以上であった。これらの照射温度条件から判断すると、これらのキャプセルに封入した被覆粒子にはアメーバ効果がおこっているものと推定される。

アルミ熱媒体中に挿入して熱電対の温度勾配から試料の線出力密度を求め、これからdepression factorを算出した結果、VP-1、VP-2およびVP-4キャプセルではそれぞれ0.50、0.55および0.72で、これをもとに推定した燃焼度は、それぞれ0.74、0.87および0.81%FIMAであったが、これらの値についてはフラックスモニタおよび試料の燃焼率を実測し検討する必要がある。被覆粒子照射キャプセルVP-3およびVP-5について、同様にdepression factorを算出した結果0.52および0.41で、これをもとに推定した燃焼度は0.38および0.33%FIMAであった。なお、VP-3およびVP-5キャプセルについて燃焼度を実測した結果、それぞれ0.49%FIMAおよび0.47%FIMAで、温度勾配からの推定値に比較し約30~40%大きい。

これらのキャプセル照射において目的とする温度が容易に得られたのは、VT-1孔の照射孔径が大きいこと、キャプセルの設計において、内筒、熱媒体の厚さおよびギャップ間隔等を余裕をもって設定することができたこと、キャプセルの照射位置を任意に変えられたことにある。キャプセルの照射時間は、いずれも1原子炉サイクルで、高温ガス炉燃料の健全性の評価のための照射量としてはいささか小さいが、照射温度はほぼ満足すべき結果であり、さらに照射時間を5原子炉サイクル程度に増加させるならば、高温ガス炉燃料の開発に寄与するデータが得られるものと確信する。また、これらのキャプセルの照射を通して、キャプセル設計に必要な種々のデータが得られ、今後同種のキャプセルを設計する場合の参考になる。

これらのキャプセルは、多目的高温ガス炉の開発研究が開始されてまもなくの時期に照射されたものであり、今からみれば被覆粒子も燃料コンパクトも不完全なものであったが、1000°C以上でこれらの試作燃料を照射した意義は大きい。これら5体のキャプセルの照射後試験は、ホットラボにおいてすでに完了しており、近いうちに報告書が出されるであろう。これらの結果から熱中性子束および燃焼度が明らかにされ、本報告での計算値との比較がなされるであろう。これらのキャプセルのなかではその中心の最高温度が1700°Cにも達していると推定されるにもかかわらず、黒鉛とタンタル内筒との反応および癒着などの現象は全くみられず、熱電対も照射完了まで正常に作動して

おり、熱電対のシースの破損も全くみられなかった。

キャプセルのアルミ熱媒体中の温度は正確に測定する必要がある、できれば精度のよい電圧計を用いて、熱電対の熱起電力を絶対値だけでなく、熱電対間の熱起電力の差も同時に測定しておく必要がある、またアルミの熱伝導率もあらかじめ測定しておくならば、VPキャプセルの熱計算の精度はさらに向上するであろう。

JRR-2の改修もおわり、現在運転が再開されたのを機会に、燃料照射研究室では再びJRR-2を利用し、アマーバ効果を調べるためのキャプセル照射を計画し、その照射を現在行なっている。

謝 辞

本キャプセルの照射にあたり、キャプセルの設計製作を担当された工作課、井上利昭氏をはじめ関係された各位、キャプセルの装荷、温度計測等を担当された利用課、一色正彦氏をはじめ関係された各位、原子炉の運転を担当されたJRR-2管理課の諸氏に深く感謝の意を表す。

また、本報告を刊行するにあたって御配慮いただいた燃料工学部長 野村末雄博士に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 宮坂靖彦, 被覆粒子燃料の照射試験方法, (1971)
- 2) 東京天文台編, 理科年表, 丸善, 東京 (1967)
- 3) Everett, M. R., Manzel, R., Barr, P., Mayr, K., D. P. Report 686, Oct. (1969)
- 4) Johnson, W. R., GA-A12910, (1974)
- 5) Goedel, W. V., Pontelandolfo, J. M., GAMD 4441 (1963)
- 6) Leyers, H. J., Binkele, L., Beuth, J., Jül-511-RX (1968)

謝 辞

本キャプセルの照射にあたり、キャプセルの設計製作を担当された工作課、井上利昭氏をはじめ関係された各位、キャプセルの装荷、温度計測等を担当された利用課、一色正彦氏をはじめ関係された各位、原子炉の運転を担当されたJRR-2管理課の諸氏に深く感謝の意を表す。

また、本報告を刊行するにあたって御配慮いただいた燃料工学部長 野村末雄博士に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 宮坂靖彦, 被覆粒子燃料の照射試験方法, (1971)
- 2) 東京天文台編, 理科年表, 丸善, 東京 (1967)
- 3) Everett, M. R., Manzel, R., Barr, P., Mayr, K., D. P. Report 686, Oct. (1969)
- 4) Johnson, W. R., GA-A12910, (1974)
- 5) Goedel, W. V., Pontelandolfo, J. M., GAMD 4441 (1963)
- 6) Leyers, H. J., Binkele, L., Beuth, J., Jül-511-RX (1968)

Table 1 VP-1, VP-2およびVP-4キャプセルの
熱計算に用いた物理定数

		VP-1	VP-2	VP-3
a: フィン付アルミ外筒	λ_{Al} (W/cm \cdot °C)	2.2	2.18	2.18
b: He ギャップ	λ_{He} (W/cm \cdot °C)	2.2×10^{-3}	2.5×10^{-3}	4.12×10^{-3}
c: アルミ熱媒体	λ_{Al} (W/cm \cdot °C)	2.3	2.25	2.31
d: He ギャップ	λ_{He} (W/cm \cdot °C)	3×10^{-3}	3.3×10^{-3}	4×10^{-3}
	ϵ_{Al} (-)	0.2	0.2	0.2
	ϵ_{Ta} (-)	0.2	0.2	0.2
	C (W/cm $^2 \cdot$ °K 4)	5.67×10^{-4}	5.67×10^{-4}	5.67×10^{-4}
e: タンタル筒	λ_{Ta} (W/cm \cdot °C)	0.7	0.54	0.54
f: He ギャップ	λ_{He} (W/cm \cdot °C)	3.9×10^{-3}	4.3×10^{-3}	3.8×10^{-3}
	ϵ_{Gr} (-)	1.0	1.0	1.0
	ϵ_{Ta} (-)	0.3	0.3	0.3
	C (W/cm $^2 \cdot$ °K 4)	5.67×10^{-4}	5.67×10^{-4}	5.67×10^{-4}
g: 黒鉛熱媒体	λ_{Gr} (W/cm \cdot °C)	0.26	0.42	0.42
h: 燃料コンパクト	λ_{comp} (W/cm \cdot °C)	0.26	0.085	0.064

Table 2 VP-1, VP-2およびVP-4キャプセル温度分布計算結果

	VP-1	VP-2	VP-4
燃料コンパクト線出力密度 (W/cm)	200	125	160
a: フィン付アルミ外筒表面温度 T_1 (°C)	85	100	100
b: フィン付アルミ外筒内表面温度 T_2 (°C)	87	101	102
c: アルミ熱媒体外表面温度 T_3 (°C)	468	379	320
d: アルミ熱媒体内表面温度 T_4 (°C)	478	385	327
e: タンタル筒外表面温度 T_5 (°C)	884	770	789
f: タンタル筒内表面温度 T_6 (°C)	888	773	793
g: 黒鉛熱媒体外表面温度 T_7 (°C)	1388	1227	1367
h: 黒鉛熱媒体内表面温度 T_8 (°C)	1473	1255	1402
i: 燃料コンパクト中心温度 T_9 (°C)	1535	1372	1602

Table 3 VP-2キャプセル用照射試料

燃 料 コ ン パ ク ト		7 1 F P 4 B	7 1 F P 5 B
充 填 粒 子		7 1 F C 4	7 1 F C 5
寸 法	外 径 (mm)	10.5±0.05	
	内 径 (mm)	2.0±0.05	
	長 さ (mm)	15.0±0.5	
充 填 率 (%)		22±2	
嵩 密 度 (g/cm ³)		2.1±0.2	
破 損 率		< 5×10 ⁻³	
被 覆 粒 子		7 1 F C 4	7 1 F C 5
寸 法 (μ)		740±60	
嵩 密 度 (g/cm ³)		4.0±0.4	
真 球 度 dmax/dmin		< 1.2	
露 出 ウ ラ ン (%)		< 5×10 ⁻³	
破 壊 強 度 kg/ヶ		> 3	
燃 料 核	ウ ラ ン 濃 縮 度 (%)	20	
	寸 法 (μ)	460±40	
	密 度 %TD	96±1.5	
	O/U	2.00± ^{0.02} ₀	
被 覆 層	第 一 層	厚 さ (μ)	40±5
		密 度 (g/cm ³)	1.1±0.1
		La (A)	-
	第 二 層	厚 さ (μ)	30±5
		密 度 (g/cm ³)	1.8±0.1
		BAF La (A)	< 1.2 50±10
	第 三 層	厚 さ (μ)	25±5
		密 度 (g/cm ³)	3.2±0.1
第 四 層	Si/SiC	< 0.5	
	厚 さ (μ)	45±5	
	密 度 (g/cm ³)	1.8±0.1	
BAF La (A)		< 1.2 50±10	

Table 4 VP-4キャプセル封入被覆粒子

被 覆 粒 子		7 1 F C 3	7 0 N C 5
寸 法 (μ)		740±60	671~776
嵩 密 度 (g/cm^3)		4.0±0.4	
真 球 度 d_{max}/d_{min}		< 1.2	
露 出 ウ ラ ン (%)		< 5×10^{-3}	
破 壊 強 度 $kg/\text{ヶ}$		> 3	
燃 料 核	ウ ラ ン 濃 縮 度	天 然	天 然
	寸 法	460±40	315~420
	密 度	96±1.5	
	O/U	2.00± $^{0.02}_0$	
被 覆 層	第 一 層	厚 さ (μ) 密 度 (g/cm^3) La (A)	40±5 1.1±0.1 -
	第 二 層	厚 さ (μ) 密 度 (g/cm^3) BAF La (A)	30±5 1.8±0.1 < 1.2 50±10
	第 三 層	厚 さ (μ) 密 度 (g/cm^3) Si/SiC	28±5 3.2±0.1 < 0.5
	第 四 層	厚 さ (μ) 密 度 (g/cm^3) BAF La (A)	45±5 1.8±0.1 < 1.2 50±10

Table 5 JRR-2 10MW出力時における
VP-1キャプセルの指示温度と照射位置

	No.	キャプセル中心の炉中心からの距離 (cm)					制御棒調整
		30	25	20	15	10	
温 度 (°C)	1	560	665	750	843	925	950
	2	477	570	650	728	800	815
	3	93	107	122	137	151	154
	4	89	104	119	134	147	149
	5	88	102	116	130	142	144
	6	86	101	115	128	141	142
	7	84	98	111	125	138	140
	8	84	97	111	124	136	139

Table 6 VP-1, VP-2, VP-4 キャプセルの線出力密度

	VP-1	VP-2	VP-4
キャプセル照射位置 (cm)	10.0	27.7	21.5
熱中性子束 ($n/cm^2 \cdot sec$)	1.5×10^{14}	0.92×10^{14}	1.13×10^{14}
^{235}U (g/cm)	0.05	0.088	0.088
線出力密度計算値 ($F=1.0$) (W/cm)	265	287	352
線出力密度実測値 (W/cm)	132	158	256
depression factor (-)	0.50	0.55	0.72

Table 7 VP-1, VP-2およびVP-4 キャプセル温度分布

	VP-1		VP-2		VP-4	
	Q=132 (W/cm)		Q=158 (W/cm)		Q=256 (W/cm)	
	°C	熱伝導率	°C	熱伝導率	°C	熱伝導率
A	100		100		100	
B	101	$\lambda_{Al} = 2.18$	102	$\lambda_{Al} = 2.18$	110	$\lambda_{Al} = 2.18$
C	147	$\lambda_{He} = 9 \times 10^{-3}$	277	$\lambda_{He} = 5 \times 10^{-3}$	303	$\lambda_{He} = 7.3 \times 10^{-3}$
D	156	$\lambda_{Al} = 2.25$	284	$\lambda_{Al} = 2.25$	315	$\lambda_{Al} = 2.25$
E	427	$\lambda_{He} = 3.3 \times 10^{-3}$	646	$\lambda_{He} = 4.9 \times 10^{-3}$	704	$\lambda_{He} = 7.4 \times 10^{-3}$
F	431	$\lambda_{Ta} = 0.54$	650	$\lambda_{Ta} = 0.54$	711	$\lambda_{Ta} = 0.54$
G	815	$\lambda_{He} = 6.3 \times 10^{-3}$	1190	$\lambda_{He} = 4.3 \times 10^{-3}$	1285	$\lambda_{He} = 7.3 \times 10^{-3}$
H	858	$\lambda_{Gr} = 0.42$	1225	$\lambda_{Gr} = 0.42$	1341	$\lambda_{Gr} = 0.42$

Table 8 VP-3キャプセル被覆粒子封入量

封入位置	円環孔		中心孔		$\frac{g^{235}U}{cm}$
	被覆粒子	封入量	被覆粒子	封入量	
I	70FC3A	0.8805	71FC5	1.2939	0.094
II	71FC5	2.9285	71FC5	2.0325	0.161
III	70FC4B	1.0821	71FC5	1.0016	0.072

Table 9 VP-5キャプセル被覆粒子封入量

封入位置	円環孔		中心孔		$\frac{g^{235}U}{cm}$
	被覆粒子	封入量	被覆粒子	封入量	
I	70FC4B	0.824	71FC4	0.981	0.0843
II	71FC5	2.172	71FC4	2.012	0.1360
III	70FC3A	0.704	71FC4	1.284	0.0939

Table 10 VP-3およびVP-5温度分布計算結果

	VP-3	VP-5
燃料コンパクト線出力密度 (W/cm)	157	184
a:フィン付アルミ外筒外表面温度 T_1	100	100
b:フィン付アルミ外筒内表面温度 T_2	102	102
c:アルミ熱媒体外表面温度 T_3	316	319
d:アルミ熱媒体内表面温度 T_4	324	326
e:タンタル筒外表面温度 T_5	777	785
f:タンタル筒内表面温度 T_6	781	789
g:黒鉛外筒外表面温度 T_7	1163	1174
h:黒鉛外筒内表面温度 T_8	1187	1198
i:黒鉛内筒外表面温度 T_9	1464	1219
j:黒鉛内筒内表面温度 T_{10}	1516	1271
k:キャプセル中心温度 T_{11}	1663	1444

Table 11 VP-3 キャプセル封入被覆粒子仕様

被 覆 粒 子		70FC3A	70FC4B	
寸 法	(μ)	660	720	
嵩 密 度	(g/cm^3)	-	-	
真 球 度	dmax/dmin	-	-	
露 出 ウ ラ ン	(%)	-	-	
破 壊 強 度	kg/ヶ	2.44	2.82	
燃 料 核	ウ ラ ン 濃 縮 度 (%)	20	20	
	寸 法 (μ)	400	400	
	密 度 % T.D	> 85	> 85	
	C/U	2.15	2.15	
被 覆 層	第 一 層	厚 さ (μ)	50	50
		密 度 (g/cm^3)	0.9	0.9
		La (A)	20	20
	第 二 層	厚 さ (μ)	/	30
		密 度 (g/cm^3)		1.8
		B A F La (A)		50
	第 三 層	厚 さ (μ)	30	30
		密 度 (g/cm^3)	3.1	3.1
	第 四 層	厚 さ (μ)	50	50
		密 度 (g/cm^3)	1.8	1.8
		B A F La (A)	50	50

Table 12 VT-3およびVT-5の線出力密度

	VP-3	VP-5
キャプセル照射位置 (cm)	33.5	25.0
熱中性子束 ($n/cm^2 \cdot sec$)	0.73×10^{14}	1.0×10^{14}
^{235}U (g/cm)	0.161	0.136
Q 計算値 (W/cm) (F=1.0)	416	486
Q 実測値 (W/cm)	216	198
depression factor F (-)	0.52	0.41

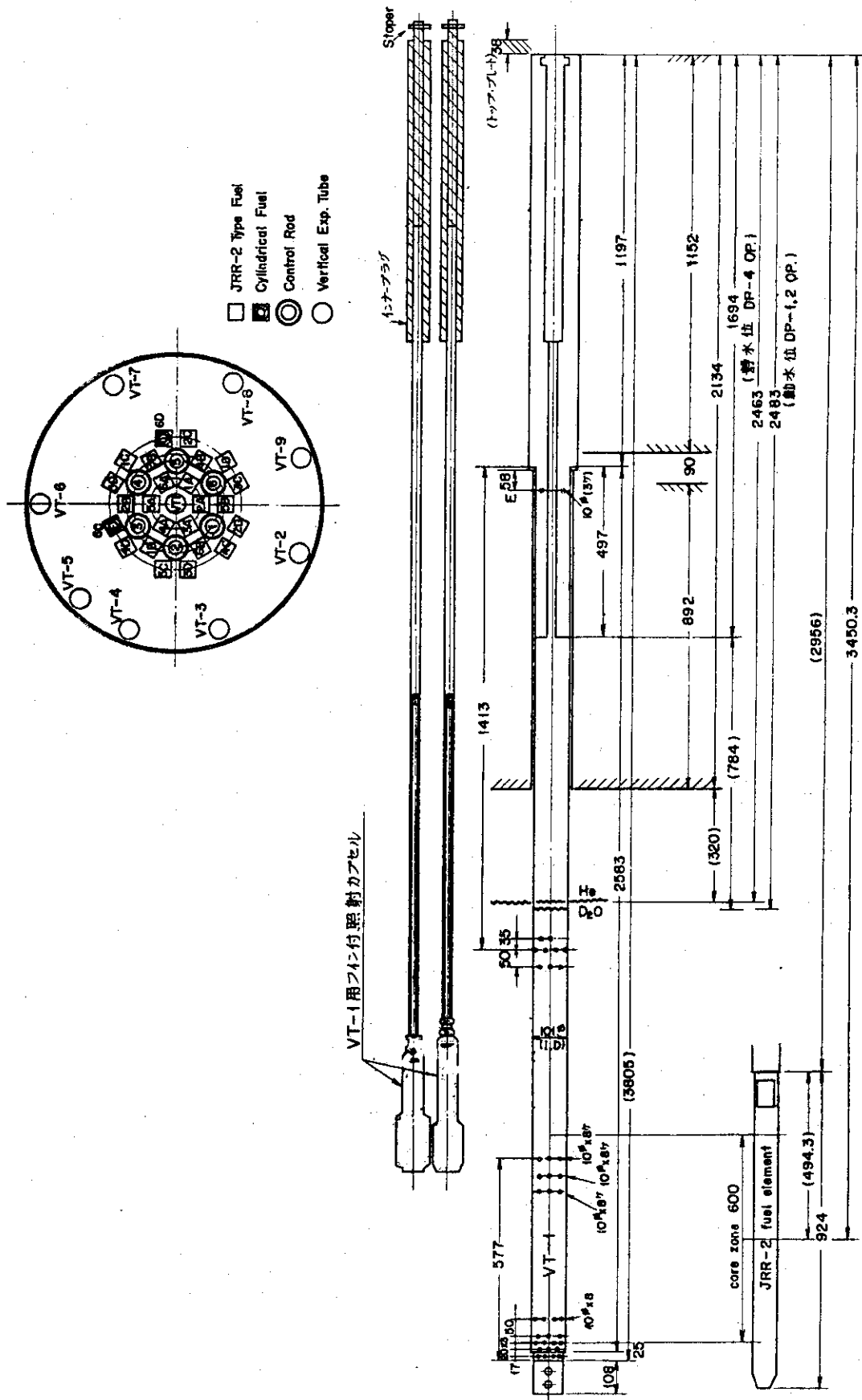


Fig. 1 中央垂直実験孔 (VT-1) の概略図と炉心位置

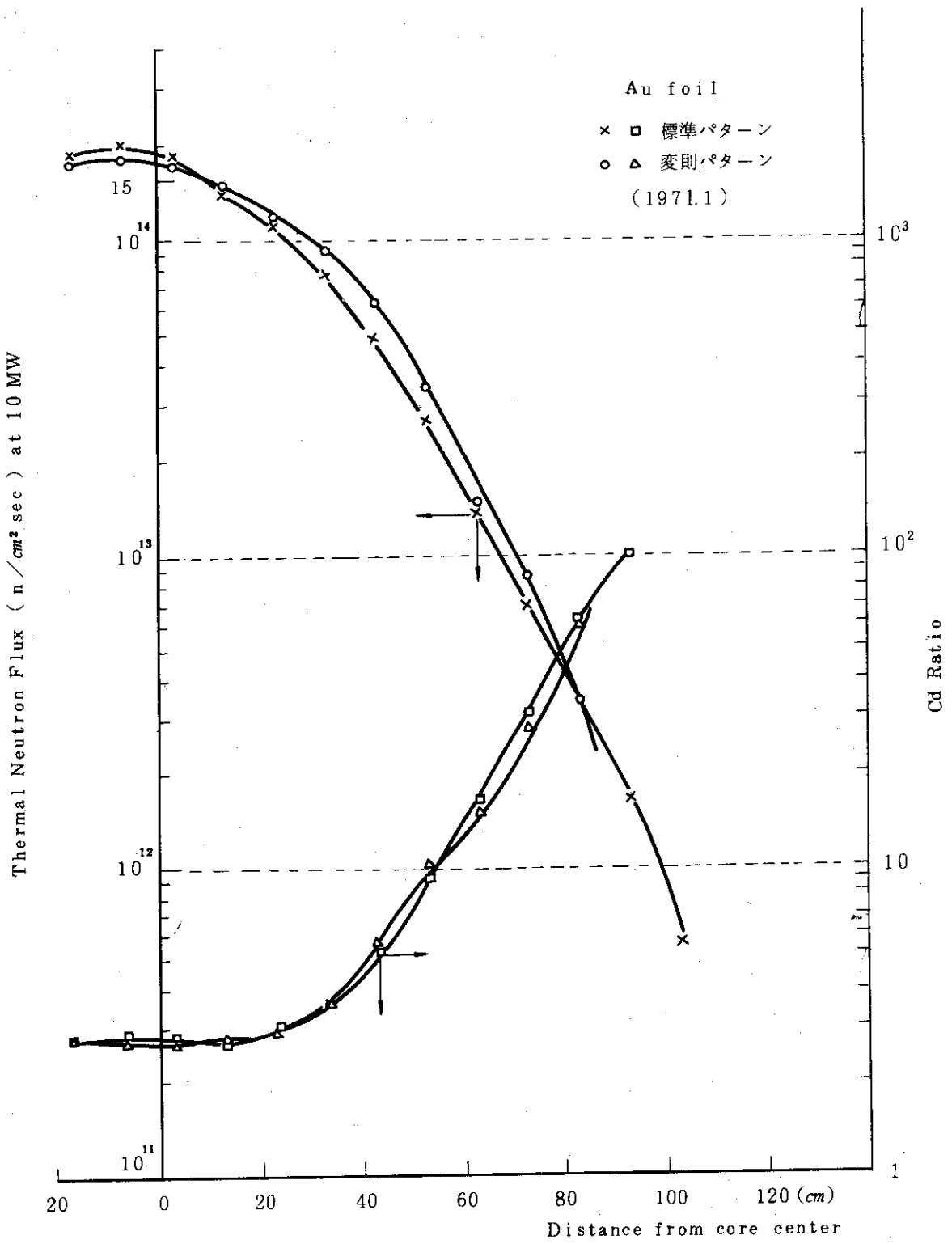


Fig. 2 中央垂直実験孔 (VT-1) の熱中性子束分布

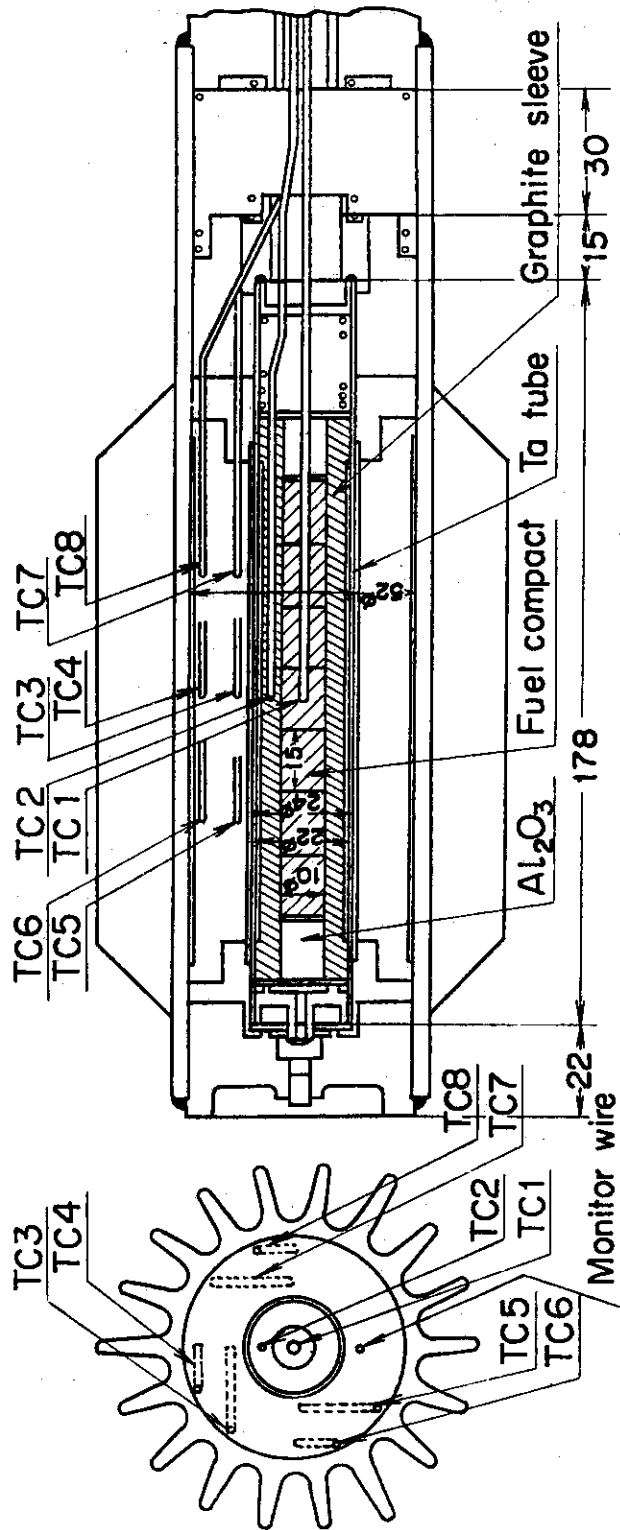


Fig. 4 VP-2キャプセルの構造

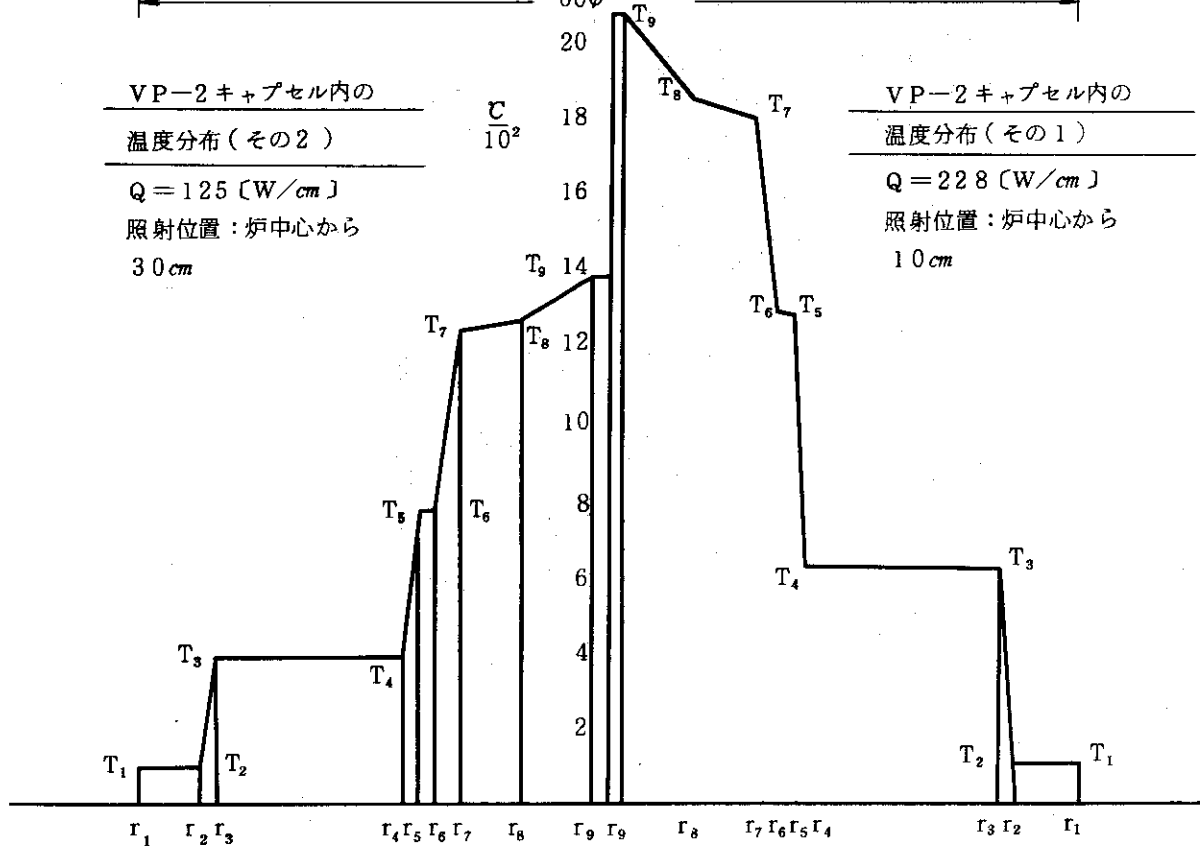
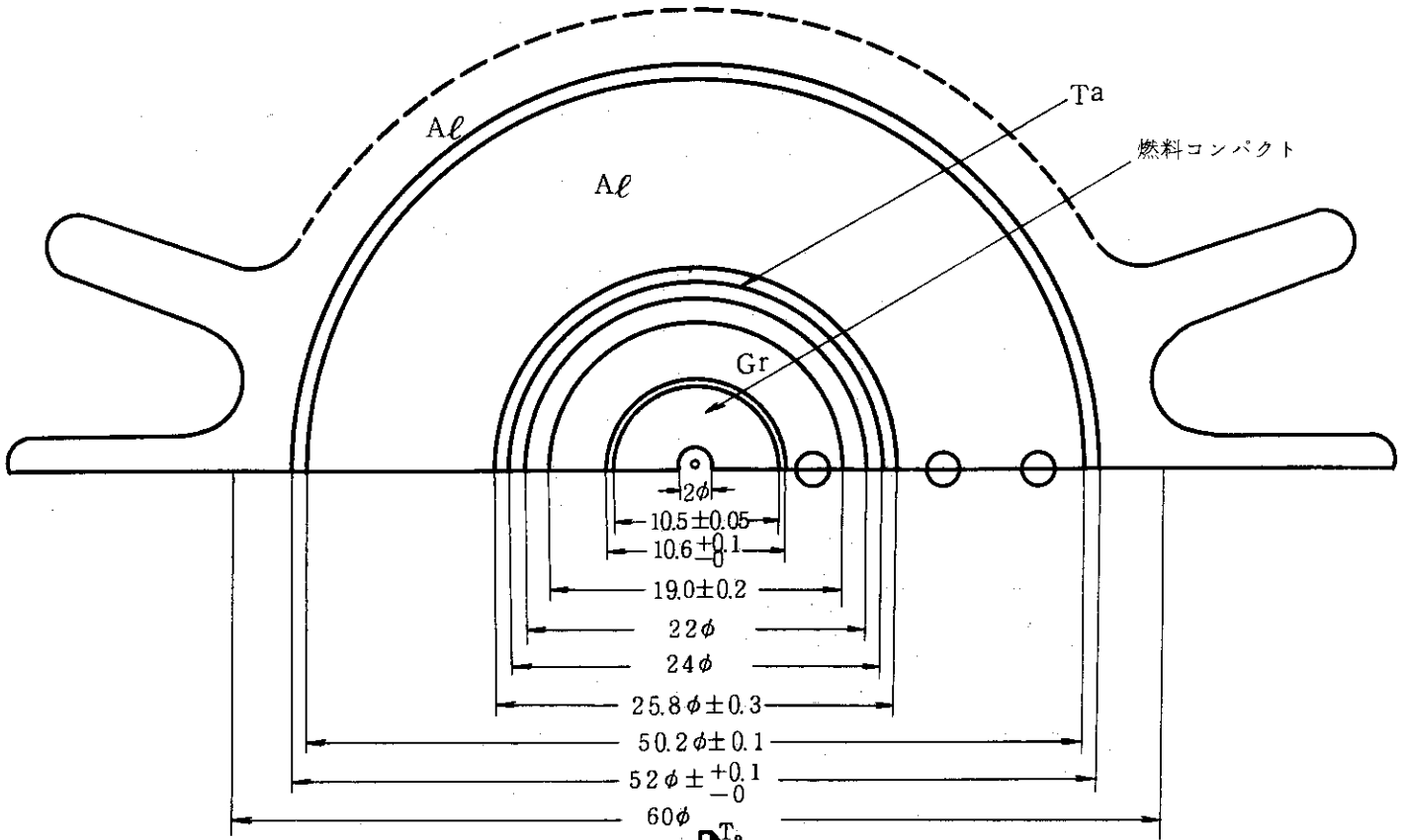


Fig. 5 VP-2 キャプセル温度分布計算結果

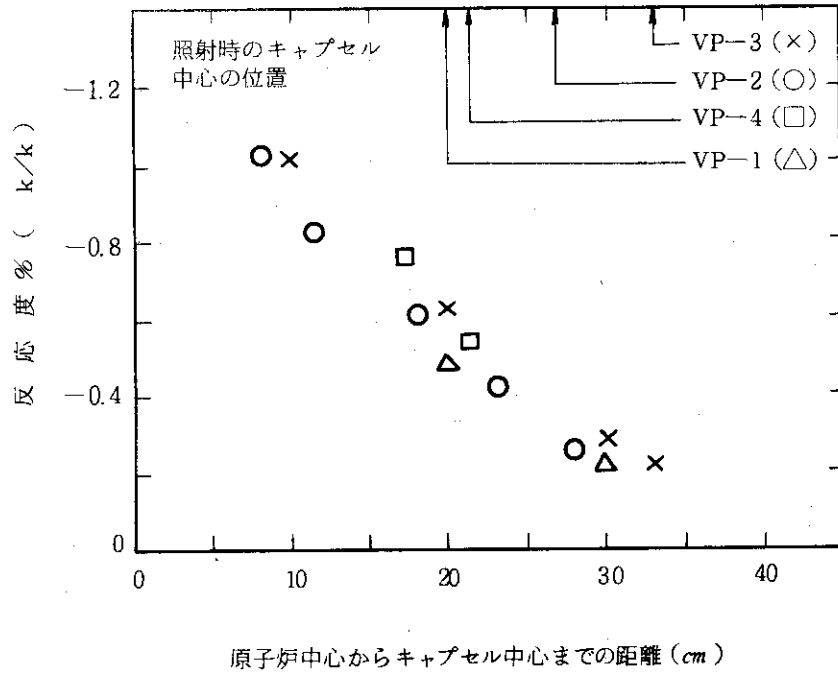


Fig. 6 VT-1 孔中の VP キャプセルの反応度

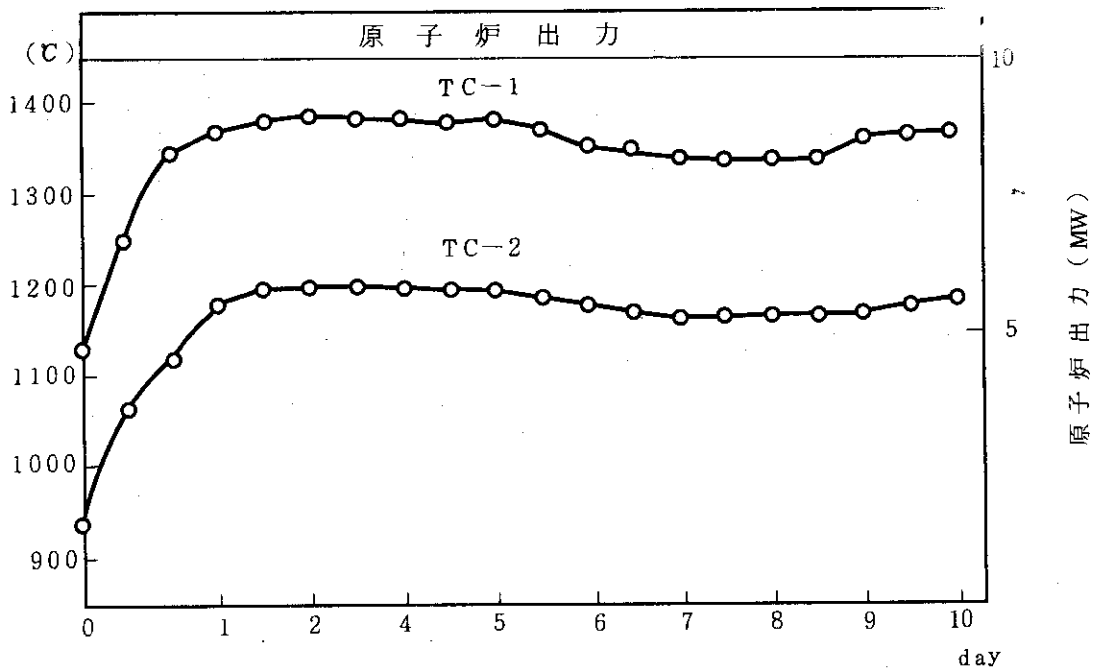


Fig. 7 VP-2 キャプセル照射中の TC-1 および TC-2 の温度変化

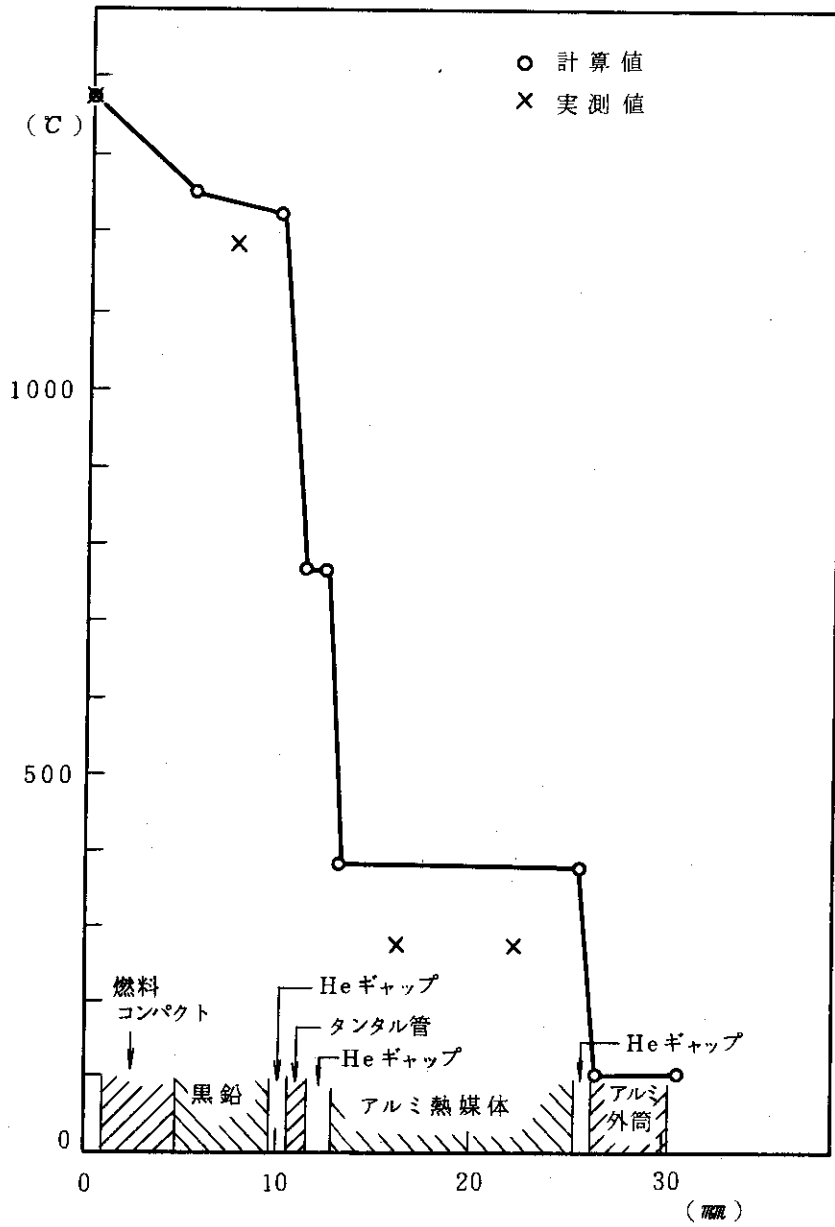


Fig. 8 VP-2 キャプセルの半径方向の温度分布

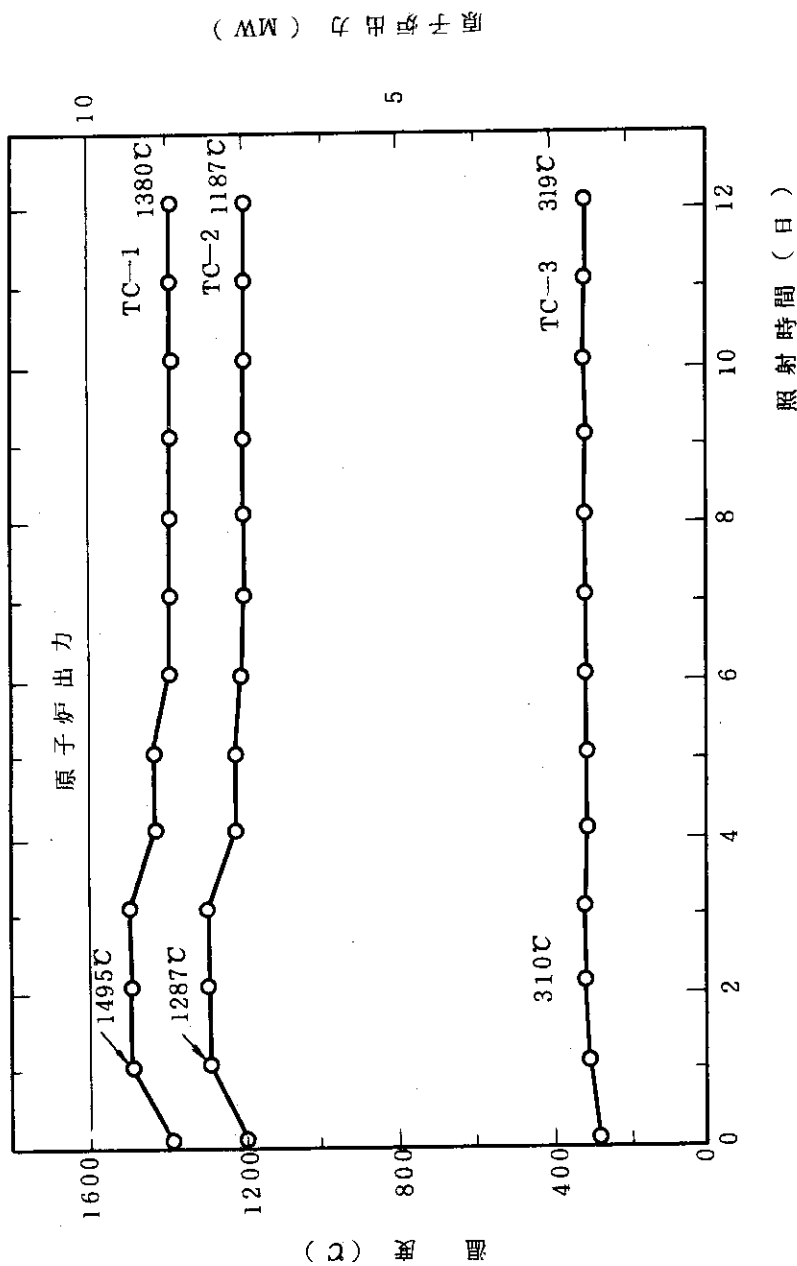


Fig. 9 VP-4 キャプセル照射中の温度変化

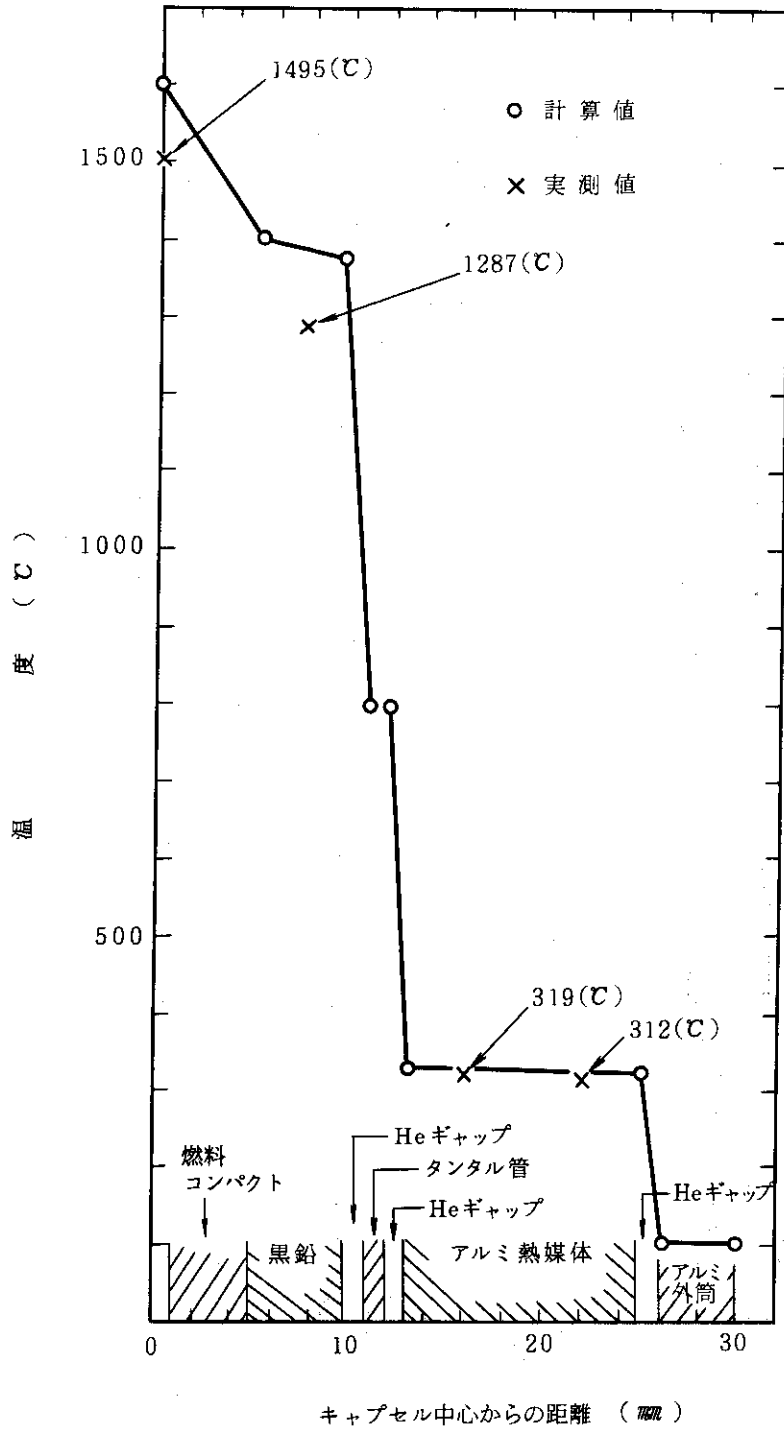


Fig. 10 VP-4 キャプセルの半径方向の温度分布

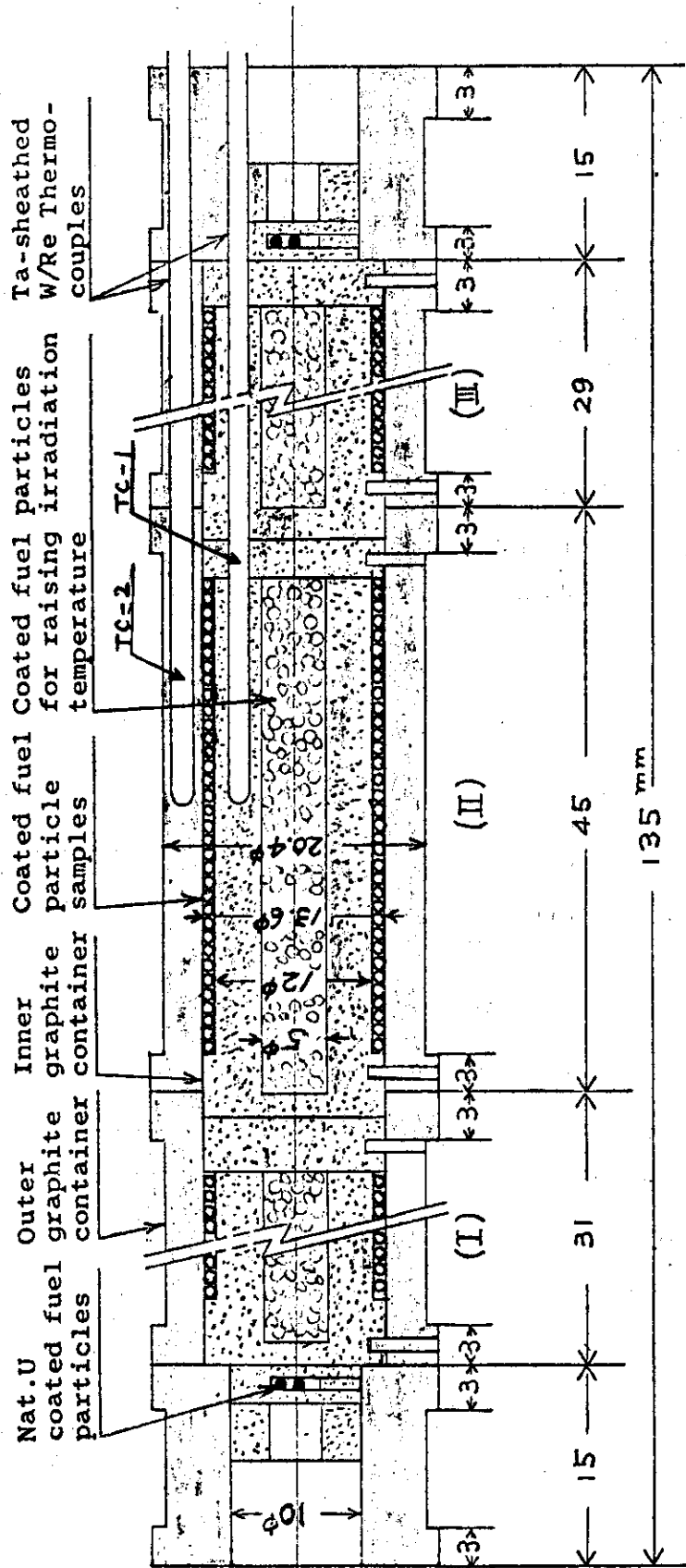


Fig. 11 VP-3 キャプセルの試料ホルダー

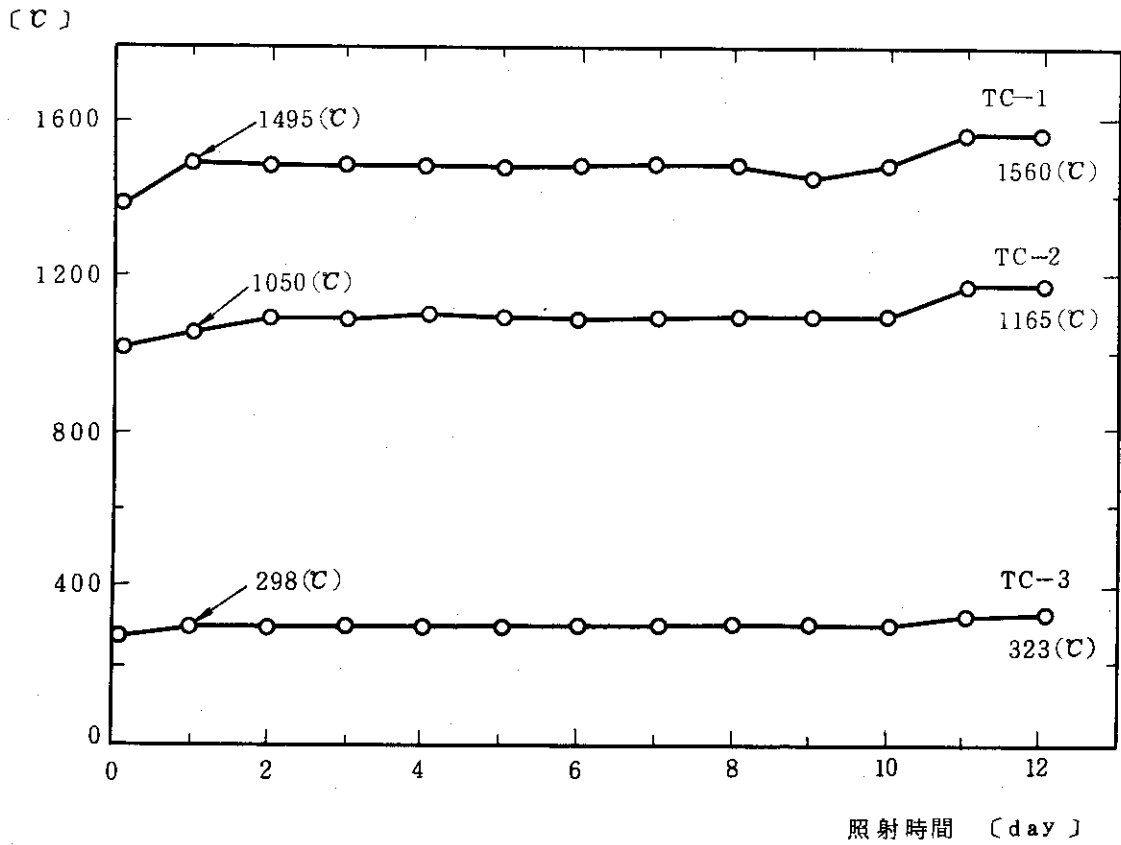


Fig. 12 VP-3 キャプセルの照射温度変化

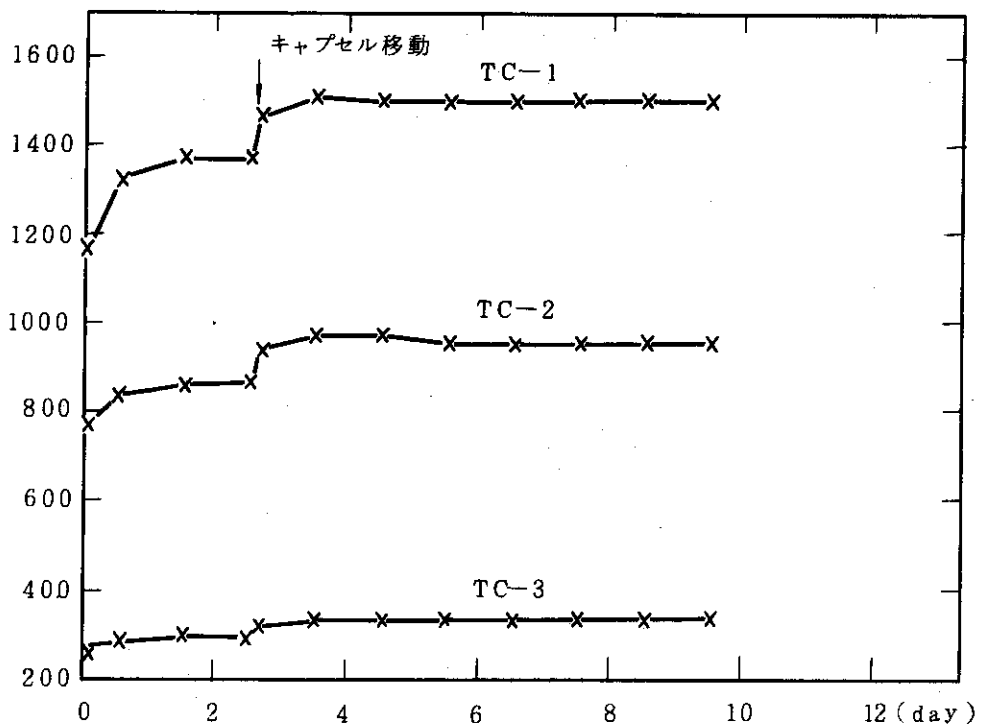


Fig. 14 VP-5 キャプセル照射中の温度変化

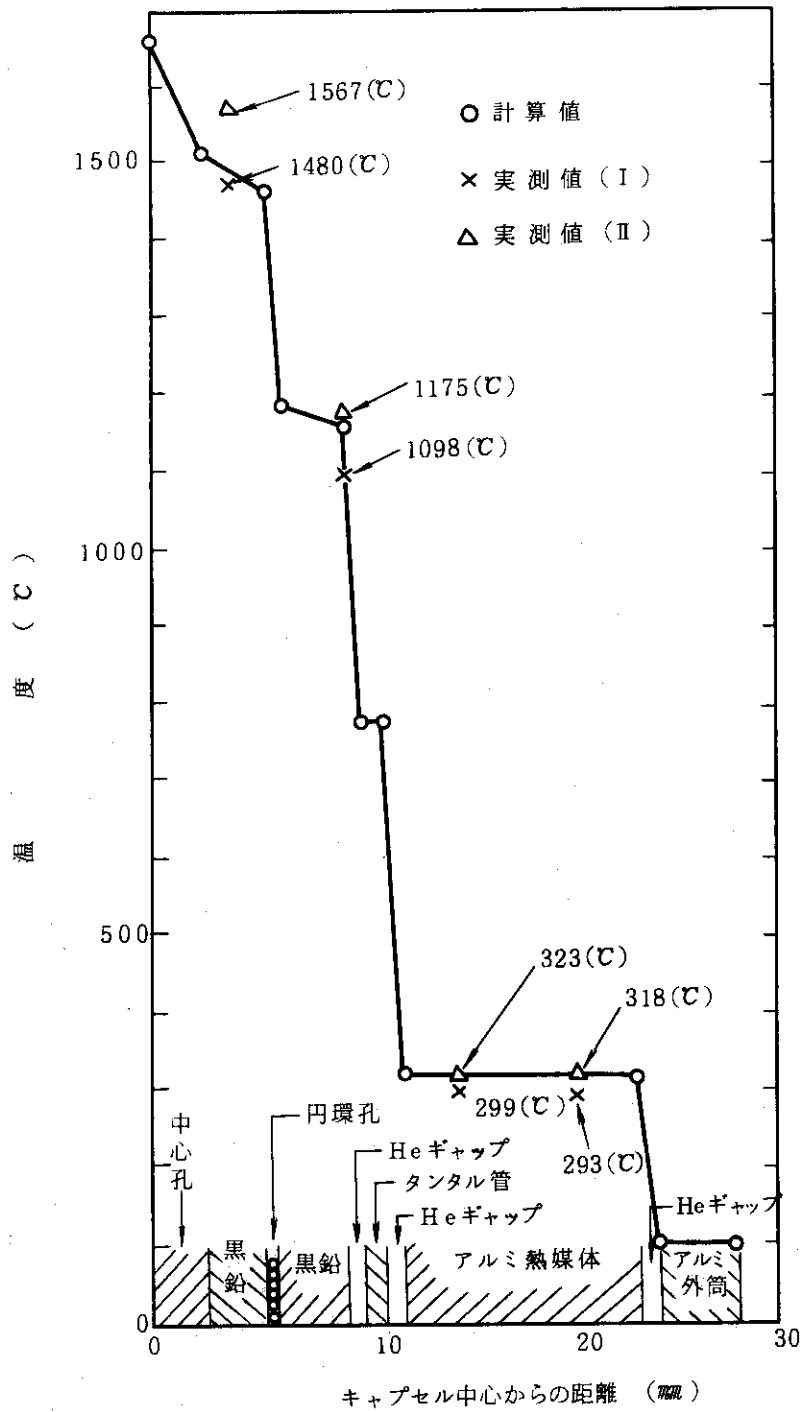


Fig. 13 VP-3 キャプセルの半径方向の温度分布

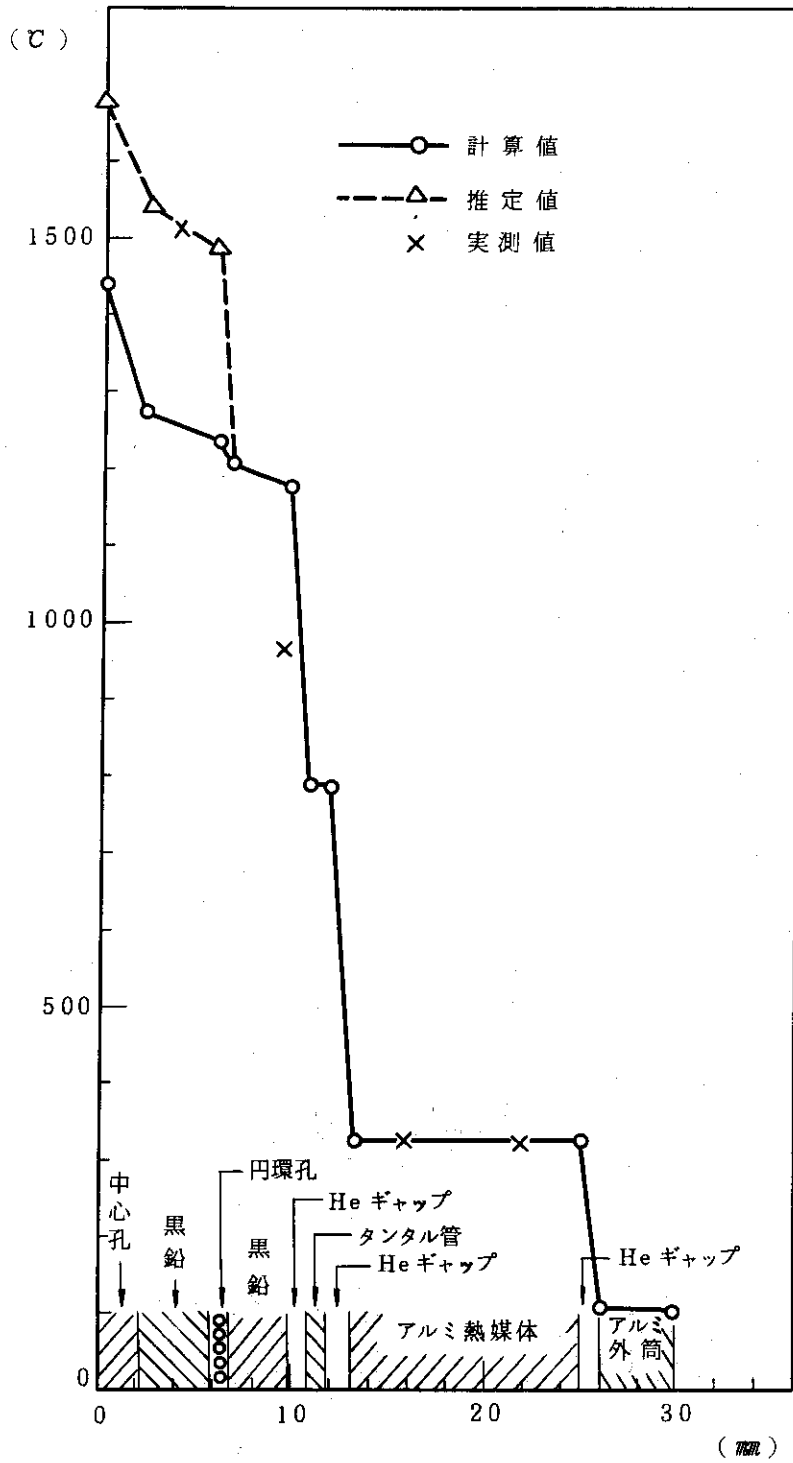


Fig. 15 VP-5 キャプセルの半径方向の温度分布