

JAERI-M

6908

JRR-2円筒燃料孔で照射した被覆燃料
粒子用キャプセルの温度解析

1977年1月

林 悌二*・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 円筒燃料孔で照射した被覆
燃料粒子用キャプセルの温度解析

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部
林 悌二*・宮坂 靖彦⁺・岩本 多実
(1977年1月10日受理)

JRR-2・6C照射孔で被覆燃料粒子の照射試験を行うために、温度無制御キャプセルを二体製作し照射を行った。燃焼度測定およびモニターワイヤーのドシメトリーの結果をもとに、キャプセル半径方向の温度分布に関して簡単な解析を行った。照射ベッドの被覆燃料粒子を単純な形に置きかえると計算値と実測値の間に良い一致が見られた。また、照射ベッドの実効熱伝導度の評価も行った。

*) 動力炉・核燃料開発事業団(派遣先:日本原子力研究所大洗研究所放射性廃棄物処理課)

+) 日本原子力研究所東海研究所研究炉管理部

Temperature Analysis of Coated-Fuel-Particle
Capsules Irradiated in JRR-2

Teiji HAYASHI*, Yasuhiko MIYASAKA⁺ and Kazumi IWAMOTO

Division of Nuclear Fuel Research, Tokai, JAERI

(Received January 10, 1977)

Intended for irradiation of coated fuel particles, two capsules without a temperature control system were irradiated in an irradiation hole 6C of JRR-2. Radial temperature distributions in the capsules were examined by means of burn-up determination and flux-monitoring wire dosimetry after irradiation. In calculation, a simple model of the spherical coated fuel particle was used. The results were in good agreement with those observed. Effective thermal conductivity of the packed bed was also estimated.

*) Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp.

+) Division of Research Reactor Operation, Tokai, JAERI

目 次

概 要	1
I. 序	1
II. キャプセルの構造および照射	1
III. 線出力の評価	2
IV. 温度の実測値と計算値の比較	4
V. 被覆粒子充填層の実効熱伝導度	5
VI. 結 論	6
VII. 謝 辞	6
参考文献	6

概 要

JRR-2・円筒燃料孔で二体の温度無制御方式 キャプセルにより被覆燃料粒子を照射し、簡単な核熱解析を行なった報告である。原子炉出力をステップ状に上げ、キャプセルの5ヶ所に設置した熱電対で测温した。照射済被覆燃料粒子の燃焼度測定結果とTHERMOSコードによる熱中性子束分布より線出力を決定した。これらの結果に基づいて多重管の各ノードの温度を求め、実測値との比較を行った。その結果、被覆燃料粒子が照射容器中に比較的分散して装荷されたキャプセルでは、計算値と実測値の間に良い一致が見られ、一方、分散させずに装荷されたキャプセルでは球状の燃料粒子を円柱と仮定すると、この両者の間に比較的良好な一致が見られた。また、実測温度から被覆燃料粒子充填層の実効熱伝導度を求めた。

I. 序

高温ガス炉に使用される被覆燃料粒子の炉内照射における核分裂生成物の保持力および物理化学的安定性を知ることは、被覆燃料粒子（以下被覆粒子）の製造開発研究と相まって重要な問題である。1970年以来、燃料工学部燃料照射研究室では、JRR-2およびJMTRを使用し、国内外で製造された被覆粒子を照射してきた。JRR-2では、1970年～1973年の期間に、EFTL-2水ループ、HWL-1水ループ、VT-1垂直照射孔および6Cインコア照射孔を利用して合計12本のキャプセル照射が実施された。本報告は、JRR-2・6Cインコア照射孔で照射した二本のキャプセルの照射温度に関するものである。当該照射孔は熱中性子束と速中性子束の比がほぼ2:1であり、エピサーマル中性子束が比較的に大で高温ガス炉の炉心の中性子スペクトルと類似しているほか、照射位置が炉心装荷燃料方向のはず中央を占めるため、出力制御にともなう中性子束の変動が小であるので安定した温度で照射できる利点がある。一方、これらキャプセル自体に温度制御機能を持たないため、目的とする温度で照射するためには、キャプセルの設計段階での十分な検討はもとより、照射実績に基づき解析結果を次の照射に反映させることが必要である。本報告では、まずキャプセルの構造を述べ、次に、温度解析に必要とする線出力、照射温度の計算値と実測値の比較および照射下における被覆粒子充填層の実効熱伝導度に関して述べる。

II. キャプセルの構造および照射

本キャプセルは、被覆粒子をインコア照射孔で照射するところから、IP-1およびIP-2と名づけた。これらのうち、IP-2の組立前の部品をFig. 1に、またそれぞれの組立て断面図をFig. 2に示す。二体のキャプセルは、被覆粒子の照射容器（以下照射容器）を除いて、同一の製作仕様とした。IP-1では2.0cm ϕ ×4.2cmの5個のグラファイト製照射容器、IP-2では2.0cm ϕ ×3.0cmの7個のグラファイト製照射容器を製作し、各照射容器の孔(IP-1 IP-2それぞれ外側孔2.0mm ϕ および2.5mm ϕ 、内側孔11mm ϕ)および2.6mm ϕ に被覆粒子を充填した。Table 1には、照射すべき被覆粒子の内訳を示す。照射容器はタンタル管に縦軸上の熱遮蔽用アルミナ・スペイサーおよびスプリングとともに挿入し、TIG溶接により封入した。耐熱

概 要

JRR-2・円筒燃料孔で二体の温度無制御方式 キャプセルにより被覆燃料粒子を照射し、簡単な核熱解析を行なった報告である。原子炉出力をステップ状に上げ、キャプセルの5ヶ所に設置した熱電対で测温した。照射済被覆燃料粒子の燃焼度測定結果とTHERMOSコードによる熱中性子束分布より線出力を決定した。これらの結果に基づいて多重管の各ノードの温度を求め、実測値との比較を行った。その結果、被覆燃料粒子が照射容器中に比較的分散して装荷されたキャプセルでは、計算値と実測値の間に良い一致が見られ、一方、分散させずに装荷されたキャプセルでは球状の燃料粒子を円柱と仮定すると、この両者の間に比較的良い一致が見られた。また、実測温度から被覆燃料粒子充填層の実効熱伝導度を求めた。

I. 序

高温ガス炉に使用される被覆燃料粒子の炉内照射における核分裂生成物の保持力および物理化学的安定性を知ることは、被覆燃料粒子（以下被覆粒子）の製造開発研究と相まって重要な問題である。1970年以来、燃料工学部燃料照射研究室では、JRR-2およびJMTRを使用し、国内外で製造された被覆粒子を照射してきた。JRR-2では、1970年～1973年の期間に、EFTL-2水ループ、HWL-1水ループ、VT-1垂直照射孔および6Cインコア照射孔を利用して合計12本のキャプセル照射が実施された。本報告は、JRR-2・6Cインコア照射孔で照射した二本のキャプセルの照射温度に関するものである。当該照射孔は熱中性子束と速中性子束の比がほぼ2:1であり、エピサーマル中性子束が比較的に大で高温ガス炉の炉心の中性子スペクトルと類似しているほか、照射位置が炉心装荷燃料方向のはず中央を占めるため、出力制御にともなう中性子束の変動が小であるので安定した温度で照射できる利点がある。一方、これらキャプセル自体に温度制御機能を持たないため、目的とする温度で照射するためには、キャプセルの設計段階での十分な検討はもとより、照射実績に基づき解析結果を次の照射に反映させることが必要である。本報告では、まずキャプセルの構造を述べ、次に、温度解析に必要とする線出力、照射温度の計算値と実測値の比較および照射下における被覆粒子充填層の実効熱伝導度に関して述べる。

II. キャプセルの構造および照射

本キャプセルは、被覆粒子をインコア照射孔で照射するところから、IP-1およびIP-2と名づけた。これらのうち、IP-2の組立前の部品をFig. 1に、またそれぞれの組立て断面図をFig. 2に示す。二体のキャプセルは、被覆粒子の照射容器（以下照射容器）を除いて、同一の製作仕様とした。IP-1では2.0cmφ×4.2cmの5個のグラファイト製照射容器、IP-2では2.0cmφ×3.0cmの7個のグラファイト製照射容器を製作し、各照射容器の孔(IP-1 IP-2それぞれ外側孔2.0mmφおよび2.5mmφ、内側孔11mmφ)および2.6mmφに被覆粒子を充填した。Table 1には、照射すべき被覆粒子の内訳を示す。照射容器はタンタル管に縦軸上の熱遮蔽用アルミナ・スペイサーおよびスプリングとともに挿入し、TIG溶接により封入した。耐熱

概 要

JRR-2・円筒燃料孔で二体の温度無制御方式 キャプセルにより被覆燃料粒子を照射し、簡単な核熱解析を行なった報告である。原子炉出力をステップ状に上げ、キャプセルの5ヶ所に設置した熱電対で测温した。照射済被覆燃料粒子の燃焼度測定結果とTHERMOSコードによる熱中性子束分布より線出力を決定した。これらの結果に基づいて多重管の各ノードの温度を求め、実測値との比較を行った。その結果、被覆燃料粒子が照射容器中に比較的分散して装荷されたキャプセルでは、計算値と実測値の間に良い一致が見られ、一方、分散させずに装荷されたキャプセルでは球状の燃料粒子を円柱と仮定すると、この両者の間に比較的良い一致が見られた。また、実測温度から被覆燃料粒子充填層の実効熱伝導度を求めた。

I. 序

高温ガス炉に使用される被覆燃料粒子の炉内照射における核分裂生成物の保持力および物理化学的安定性を知ることは、被覆燃料粒子（以下被覆粒子）の製造開発研究と相まって重要な問題である。1970年以来、燃料工学部燃料照射研究室では、JRR-2およびJMTRを使用し、国内外で製造された被覆粒子を照射してきた。JRR-2では、1970年～1973年の期間に、EFTL-2水ループ、HWL-1水ループ、VT-1垂直照射孔および6Cインコア照射孔を利用して合計12本のキャプセル照射が実施された。本報告は、JRR-2・6Cインコア照射孔で照射した二本のキャプセルの照射温度に関するものである。当該照射孔は熱中性子束と速中性子束の比がほぼ2:1であり、エピサーマル中性子束が比較的に大で高温ガス炉の炉心の中性子スペクトルと類似しているほか、照射位置が炉心装荷燃料方向のはず中央を占めるため、出力制御にともなう中性子束の変動が小であるので安定した温度で照射できる利点がある。一方、これらキャプセル自体に温度制御機能を持たないため、目的とする温度で照射するためには、キャプセルの設計段階での十分な検討はもとより、照射実績に基づき解析結果を次の照射に反映させることが必要である。本報告では、まずキャプセルの構造を述べ、次に、温度解析に必要とする線出力、照射温度の計算値と実測値の比較および照射下における被覆粒子充填層の実効熱伝導度に関して述べる。

II. キャプセルの構造および照射

本キャプセルは、被覆粒子をインコア照射孔で照射するところから、IP-1およびIP-2と名づけた。これらのうち、IP-2の組立前の部品をFig. 1に、またそれぞれの組立て断面図をFig. 2に示す。二体のキャプセルは、被覆粒子の照射容器（以下照射容器）を除いて、同一の製作仕様とした。IP-1では2.0cmφ×4.2cmの5個のグラファイト製照射容器、IP-2では2.0cmφ×3.0cmの7個のグラファイト製照射容器を製作し、各照射容器の孔(IP-1 IP-2それぞれ外側孔2.0mmφおよび2.5mmφ、内側孔11mmφ)および2.6mmφに被覆粒子を充填した。Table 1には、照射すべき被覆粒子の内訳を示す。照射容器はタンタル管に縦軸上の熱遮蔽用アルミナ・スペイサーおよびスプリングとともに挿入し、TIG溶接により封入した。耐熱

材としてのタンタルは、ニオブに比べて熱中性子吸収断面積が大きく、照射後試験の一環であるホットラボにおける作業上、その高い放射能の観点から不利であるが、安価であり、入手の事情からこれを構造材に使用した。タンタル容器内の封入ガスとしてIP-1ではヘリウム、IP-2ではアルゴンを使用した。このタンタル容器を二ツ割りの三本のアルミニウム筒に入れ、さらにこれをSUS-304の円筒中に設置した。タンタル容器はその両端をインコネル600製スプリングで支持されたアルミニウムのブロックで固定した。照射温度の測定のためFig. 2に示すように二組のタングステン/レニウム熱電対を中央に位置する照射容器の中心部およびその外側位置に、また、三組のクロメル/アルメル熱電対をアルミニウム筒に溝を切ってそれぞれ設置した（Fig. 2はキャプセル中央部位の一断面であるから、四組の当熱電対が示めされている）。さらにIP-2にはアルミニウム表面に溝を切りモニターワイヤーを設置した。タンタル容器の外側には二体のキャプセルのいずれもヘリウムでほぼ1気圧に充填した。組上ったキャプセルは照射に先立ち、X線透過試験およびヘリウム・リークディテクターによる検査を行い、キャプセルの健全性を確認した。

組立てた二体のキャプセルをJRR-2・6C孔でそれぞれR2-46-09 (IP-1) および R2-48-4 (IP-2) 原子炉サイクルで照射した。いずれの照射も10MW定格運転に至るまで、10KW, 1, 3, 5, 8MWとステップ状に出力を上げ、各出力時のキャプセルの温度を測定した。Fig. 3にIP-1の照射温度記録を示す。照射期間中、各キャプセルからの異状な信号は認められず順調な照射が行われたことを確認した。

III. 線出力の評価

キャプセル照射における線出力の評価にあたって、被覆粒子の燃焼度測定を次の手順で行った。それぞれのキャプセルをホットラボで解体し、照射済被覆粒子を取り出した。IP-1で照射した被覆粒子のうち、中央部の容器から70FC2を8粒、ボトム部の容器から70FC3Aの10粒の健全な被覆粒子をペリスコープを介して取り出し、燃焼度測定試料とした。（なお、70FC2および70FC3Aの燃料核は同一の同位体比を有するUC₂である。）前者は、塩化白金酸セシウム法によるセシウム-137の定量値と、アルセナゾーⅢ発色・分光々度法によるウランの定量値から燃焼度を求めた。後者は、試料をメノウ乳鉢で破碎の後、硝酸でウランを浸出させた溶液から核分裂生成物をイオン交換樹脂で除染し、そのウランの同位体比と、その未照射被覆粒子からのウランの同位体比を質量分析計で測定した。IP-2に関しては、中央部の照射容器から健全な72FC2を2粒取り出し、1粒ごとに、セシウム-137に関しては非破壊ガンマ線スペクトロメトリー、ウランに関してはIP-1の被覆粒子と同様な処理をした後、分光々度法により燃焼度を求めた。一方、キャプセル材の原子炉内γ線による発熱量に関しては、宮坂らがR2-44-05サイクルで6C孔中央位置で実測した値を使用した。

実測した燃焼度はIP-1の中央部照射容器の70FC2に対し、 1.25×10^{-2} %FIMA (Fissions per Initial Metal Atoms), IP-2の中央部照射容器の72FC2に対し、 1.25×10^{-1} %FIMA (ただし、二回の平均値)であった。これらの測定はIP-1の場合、照射容器の外側に設けた8粒の試料照射孔から、IP-2の場合、照射容器の内側に設けた試料照射孔から採取した2粒の被覆粒子に関する測定結果である。したがって、線出力の評価をするには、実測した

材としてのタンタルは、ニオブに比べて熱中性子吸収断面積が大きく、照射後試験の一環であるホットラボにおける作業上、その高い放射能の観点から不利であるが、安価であり、入手の事情からこれを構造材に使用した。タンタル容器内の封入ガスとしてIP-1ではヘリウム、IP-2ではアルゴンを使用した。このタンタル容器を二ツ割りの三本のアルミニウム筒に入れ、さらにこれをSUS-304の円筒中に設置した。タンタル容器はその両端をインコネル600製スプリングで支持されたアルミニウムのブロックで固定した。照射温度の測定のためFig. 2に示すように二組のタンダステン/レニウム熱電対を中央に位置する照射容器の中心部およびその外側位置に、また、三組のクロメル/アルメル熱電対をアルミニウム筒に溝を切ってそれぞれ設置した（Fig. 2はキャプセル中央部位の一断面であるから、四組の当熱電対が示めされている）。さらにIP-2にはアルミニウム表面に溝を切りモニターワイヤーを設置した。タンタル容器の外側には二体のキャプセルのいずれもヘリウムでほぼ1気圧に充填した。組上ったキャプセルは照射に先立ち、X線透過試験およびヘリウム・リークディテクターによる検査を行い、キャプセルの健全性を確認した。

組立てた二体のキャプセルをJRR-2・6C孔でそれぞれR2-46-09 (IP-1) およびR2-48-4 (IP-2) 原子炉サイクルで照射した。いずれの照射も10MW定格運転に至るまで、10KW, 1, 3, 5, 8MWとステップ状に出力を上げ、各出力時のキャプセルの温度を測定した。Fig. 3にIP-1の照射温度記録を示す。照射期間中、各キャプセルからの異状な信号は認められず順調な照射が行われたことを確認した。

Ⅲ. 線出力の評価

キャプセル照射における線出力の評価にあたって、被覆粒子の燃焼度測定を次の手順で行った。それぞれのキャプセルをホットラボで解体し、照射済被覆粒子を取り出した。IP-1で照射した被覆粒子のうち、中央部の容器から70FC2を8粒、ボトム部の容器から70FC3Aの10粒の健全な被覆粒子をペリスコープを介して取り出し、燃焼度測定試料とした。（なお、70FC2および70FC3Aの燃料核は同一の同位体比を有するUC₂である。）前者は、塩化白金酸セシウム法によるセシウム-137の定量値と、アルセナゾーⅢ発色・分光々度法によるウランの定量値から燃焼度を求めた。後者は、試料をメノウ乳鉢で破碎の後、硝酸でウランを浸出させた溶液から核分裂生成物をイオン交換樹脂で除染し、そのウランの同位体比と、その未照射被覆粒子からのウランの同位体比を質量分析計で測定した。IP-2に関しては、中央部の照射容器から健全な72FC2を2粒取り出し、1粒ごとに、セシウム-137に関しては非破壊ガンマ線スペクトロメトリー、ウランに関してはIP-1の被覆粒子と同様な処理をした後、分光々度法により燃焼度を求めた。一方、キャプセル材の原子炉内γ線による発熱量に對しては、宮坂らがR2-44-05サイクルで6C孔中央位置で実測した値を使用した。

実測した燃焼度はIP-1の中央部照射容器の70FC2に対し、 1.25×10^{-2} %FIMA (Fissions per Initial Metal Atoms), IP-2の中央部照射容器の72FC2に対し、 1.25×10^{-1} %FIMA (ただし、二回の平均値)であった。これらの測定はIP-1の場合、照射容器の外側に設けた8粒の試料照射孔から、IP-2の場合、照射容器の内側に設けた試料照射孔から採取した2粒の被覆粒子に関する測定結果である。したがって、線出力の評価をするには、実測した

かった部位で照射した被覆粒子の燃焼度を推定する必要がある。そこで、THERMOS コードを使用して二体のキャプセルの半径方向の熱中性子束分布を求め、その結果を燃焼度を推定する手掛りとした。それぞれの照射容器はFig. 2に示されるように、熱源として被覆粒子を挿入した外側部位の領域（たゞし、IP-1の場合、天然被覆粒子を挿入）と健全性を評価すべき被覆粒子を挿入した内側部位の領域から構成されている。計算結果によれば、IP-1に関するこの二領域での実効核分裂断面積は、いずれも 359 バーン、IP-2では、いずれも 361 バーンであること、また、Fig. 4に示すように熱中性子束分布はいずれのキャプセルも、この二領域において平滑であることが認められた。以上のことから、前記の内側部位および外側部位の領域での被覆粒子の燃焼度を、実測値を基準にして、濃縮度を考慮して単純な比例計算より求めた。その結果、IP-1の内側領域の被覆粒子の燃焼度として 3.39×10^{-1} %FIMA、IP-2の被覆粒子の場合、 3.23×10^{-1} %FIMA が得られた。

ウランの照射前後の同位体比の測定値のうち、 ^{235}U および ^{236}U の比 ($R_{6/5}$ および $R_{6/5}^{\circ}$ 、たゞし肩につけた $^{\circ}$ は照射前、また、 $^{\circ}$ のないものは照射後を示す) から ^{235}U の全核分裂数 F_5 を算出するには次式が使用される。

$$\frac{F_5}{N_5^{\circ}} = \frac{R_{6/5} - R_{6/5}^{\circ}}{R_{6/5} - \alpha_5 (1 + R_{6/5})}$$

たゞし N_5° は、照射前の ^{235}U の全原子数を示す。いま、 ^{235}U の核分裂断面積に対する捕獲断面積の比 α_5 が当該キャプセルの照射位置で不明確であるので、同位体比の測定値から燃焼度の算出は行なわず、この測定値だけをTable 4に示す。

一方、IP-2に設置したコバルト/アルミニウム・モニターワイヤーの誘導放射能分布を見ると、燃焼度測定に使用した被覆粒子を挿入した部位に相当する位置（当ワイヤーのほぼ中央部）はほぼ平坦な放射能を示している（Fig. 5）。

以上の結果をまとめると、IP-2の場合、THERMOS コードの計算結果より、照射容器の内側および外側に充填した被覆粒子は等しい核分裂断面積値で照射されていること、また、モニターワイヤーのドシメトリーの結果よりキャプセルの縦軸方向の照射条件はほぼ一様であることが示され、また一方、IP-1の場合、THERMOS コードの計算結果よりIP-2と同じことが結論づけられること、また、当キャプセルにはモニターワイヤーを設置していなかったが照射条件はIP-2とほとんど変わらないことから、キャプセルの縦軸方向の照射条件はほぼ一様であると判断できる。これらの結果から、定格運転時間を考慮して計算し、核分裂による線出力をそれぞれのキャプセルについて次のように結論づけた。すなわち、

IP-1 : 線出力 = 86 watt / cm

IP-2 : 線出力 = 84 watt / cm

セシウム-137 およびウランの定量分析値などを含めて、線出力に関するデータはTable 2に示されている。

IV. 温度の実測値と計算値の比較

被覆粒子の燃焼度およびキャプセル構造材のガンマ発熱量から求められるキャプセル内の半径方向の各ふし（ノード）における温度と、キャプセル照射時における実測温度（照射容器の中心部および外側孔並びにアルミニウム筒外表面温度）との比較を行った。

いま、均一な内部発熱のある円筒の内面温度は次式で与えられる。

$$T_i = T_o + \frac{G(r_o^2 - r_i^2)}{4K} + \frac{Q}{4\pi K} - \frac{G\rho r_i^2}{2K} \log_e \frac{r_o}{r_i} \quad (1)$$

また、ガスギャップにおける伝導による熱流束 (Q_K) およびふく射による熱流束 (Q_R) は各々次式で与えられる。

$$Q_K = \frac{2\pi K (T_i - T_o)}{\log_e (r_o/r_i)} \quad (2)$$

$$Q_R = 5.67 \times 10^{-4} \left\{ \frac{2\pi r_i [(T_i/100)^4 - (T_o/100)^4]}{1/E_i + (r_i/r_o) [(1/E_o) - 1]} \right\} \quad (3)$$

ここで

- T_o : 円筒の外側の温度 (°C)
- T_i : 円筒の内側の温度 (°C)
- r_o : 円筒の外径 (cm)
- r_i : 円筒の内径 (cm)
- K : 熱伝導率 (w/cm·°C)
- ρ : 密度 (g/cm³)
- G : r 線による発熱量 (w/g)
- E_o : ガスギャップの外側ノード材のふく射係数
- E_i : ガスギャップの内側ノード材のふく射係数

計算は、まず炉内の重水温度を 62°C と設定し、構造材の内側ノードの温度は(1)式より求める。また、ガスギャップの内側ノードの温度に関しては、内側温度として想定し得る範囲で 1°C ごとの変化分を与えたとき、各場合ごとの $Q_K + Q_R - Q_t$ (温度評価すべきノードより内側の発熱量) が最小となる温度 (T_i) を求めるべき温度とする。このくり返し計算を順次、各ノードごとに実行してそれぞれの温度を設定した後、その各ノードの熱膨張の補正を行い、この補正値を用いて再び温度計算を最初からやり直す。このくり返し計算を、各ノードの熱膨張代修正値がある収束値以下に収まるまで実行する。この収束値として、キャプセル製作時に使用したマイクロメーターの最小目測読み値である 25 μ m を用いた。この温度計算に使用した常数を Table 3 に示す。

Fig. 6 は、前記の手続きで行った計算結果と、熱電対による実測値を示したものである。図中、IP-1 の①および IP-2 の計算結果はいずれも被覆粒子をすべて照射容器の中心部熱電対

挿入部につめ込まれたと仮定した場合である。IP-2の場合、照射容器の中心部温度の実測値は計算値に比べてわずか36℃上まわっているに過ぎず、工学的見地からすれば、両者は良い一致を示しているとして良い。この理由は、Fig. 2 から判るように、被覆粒子挿入孔の配置が分散しており、本計算に用いたこれら挿入孔の配置の変更による場合と比較して熱流の抵抗に大きな差がないためであると考えられる。一方、IP-1の①では、照射容器中心部の温度は実測値の方が260℃も高くなった。これは計算で仮定したように、被覆粒子を照射容器の中心に配置換えをしたことが不適当であったことによる。

そこで、IP-1の熱計算における仮定を次のように変更した。このキャプセルの照射容器には被覆粒子は半径方向には、5粒子並んで充填されている。いま、被覆粒子をFig. 7 に示したように、被覆粒子と同じ直径、同じ体積を有する円柱とし、この両面の中心位置に、長さ $1/3R$ の突起物を有するモデルに置き換える（ $2/3R$ は相接する球の平均空間距離である）。このモデルに基づいて構成されるキャプセル表面から照射容器中心部に設けたタンタル表面までの17のノードに関して、円柱間の空間距離および突起物の断面積を独立のパラメータにとって熱計算を行った。

まず、突起物の長さを一定値 $1/3R$ とし、突起物の断面の半径を $5\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ の範囲にわたって $20\mu\text{m}$ ごとに変えて計算を行なったところ、キャプセルの中心部の温度は高々20℃の差を生ずるに過ぎなかった。したがって、この断面の半径を一定値（ $5\mu\text{m}$ ）にとり、円柱間の距離を変更させた場合の影響を計算した。これらの変更は、個々の被覆粒子の真球からのずれや大きさのバラツキから生ずる被覆粒子間の接触面積や平均空間距離として実態に即して考えられる範囲内で行った。計算結果の一例をFig. 7 に示す。図中の点線は、定格運転に至るまで、1, 3, 5, 8 MWに出力上昇させたときの熱電対の指示値であり、実線は計算値を示している。こゝでは、円柱間距離を $2/3R$ からさらに $40\mu\text{m}$ 離れた場合と、反対に $80\mu\text{m}$ 近づけた場合の二例についての結果を示してある。この図で示されているごとく、アルミニウムの表面温度に関しては、計算値と実測値の間に良い一致が見られるが、照射容器の中心部および外側部の孔ではいずれも計算値の方が低い結果となっている。この原因として、キャプセル材および被覆粒子の熱伝導率およびふく射係数の値の不正確さや、計算に用いた仮定に関して更に修正すべきことが考えられる。Fig. 6のIP-1②は、円柱間距離を $2/3R$ 、突起物の断面半径を $5\mu\text{m}$ とし定格運転時のプロフィールである。照射容器の外側部位の実測値とは80℃の開きはあるが、他の部位に関しては、計算値との間にかなり良い一致が見られた。

V. 被覆粒子充填層の実効熱伝導度

被覆粒子をキャプセル照射するのにあたって、被覆粒子充填層の実効熱伝導度を知っておくことは、キャプセルの設計上から重要である。そこで、IP-1に関して炉の出力上昇ごとに測定された照射容器の中心部および外側部の孔の温度から(2)式を用いて実効熱伝導度を求めた。(この式において Q_K は、伝導およびふく射による熱流、 K は実効的な熱伝導度を表わしている。また、中心の熱電対は、タンタル管を無視し、グラファイトの照射容器の内壁に位置しているとした。) Fig. 9にはこの二ヶ所の算術平均温度に対して実効熱伝導度をプロットした。すなわち、ヘリウム零囲気での照射下における被覆粒子充填層の実効熱伝導度は次式で表現できる。

挿入部につめ込まれたと仮定した場合である。IP-2の場合、照射容器の中心部温度の実測値は計算値に比べてわずか36℃上まわっているに過ぎず、工学的見地からすれば、両者は良い一致を示しているとして良い。この理由は、Fig. 2 から判るように、被覆粒子挿入孔の配置が分散しており、本計算に用いたこれら挿入孔の配置の変更による場合と比較して熱流の抵抗に大きな差がないためであると考えられる。一方、IP-1の①では、照射容器中心部の温度は実測値の方が260℃も高くなった。これは計算で仮定したように、被覆粒子を照射容器の中心に配置換えをしたことが不適当であったことによる。

そこで、IP-1の熱計算における仮定を次のように変更した。このキャプセルの照射容器には被覆粒子は半径方向には、5粒子並んで充填されている。いま、被覆粒子をFig. 7 に示したように、被覆粒子と同じ直径、同じ体積を有する円柱とし、この両面の中心位置に、長さ $1/3R$ の突起物を有するモデルに置き換える（ $2/3R$ は相接する球の平均空間距離である）。このモデルに基づいて構成されるキャプセル表面から照射容器中心部に設けたタンタル表面までの17のノードに関して、円柱間の空間距離および突起物の断面積を独立のパラメータにとって熱計算を行った。

まず、突起物の長さを一定値 $1/3R$ とし、突起物の断面の半径を $5\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ の範囲にわたって $20\mu\text{m}$ ごとに変えて計算を行なったところ、キャプセルの中心部の温度は高々20℃の差を生ずるに過ぎなかった。したがって、この断面の半径を一定値（ $5\mu\text{m}$ ）にとり、円柱間の距離を変更させた場合の影響を計算した。これらの変更は、個々の被覆粒子の真球からのずれや大きさのバラツキから生ずる被覆粒子間の接触面積や平均空間距離として実態に即して考えられる範囲内で行った。計算結果の一例をFig. 7 に示す。図中の点線は、定格運転に至るまで、1, 3, 5, 8 MWに出力上昇させたときの熱電対の指示値であり、実線は計算値を示している。こゝでは、円柱間距離を $2/3R$ からさらに $40\mu\text{m}$ 離れた場合と、反対に $80\mu\text{m}$ 近づけた場合の二例についての結果を示してある。この図で示されているごとく、アルミニウムの表面温度に関しては、計算値と実測値の間に良い一致が見られるが、照射容器の中心部および外側部の孔ではいずれも計算値の方が低い結果となっている。この原因として、キャプセル材および被覆粒子の熱伝導率およびふく射係数の値の不正確さや、計算に用いた仮定に関して更に修正すべきことが考えられる。Fig. 6のIP-1②は、円柱間距離を $2/3R$ 、突起物の断面半径を $5\mu\text{m}$ とし定格運転時のプロフィールである。照射容器の外側部位の実測値とは80℃の開きはあるが、他の部位に関しては、計算値との間にかなり良い一致が見られた。

V. 被覆粒子充填層の実効熱伝導度

被覆粒子をキャプセル照射するのにあたって、被覆粒子充填層の実効熱伝導度を知っておくことは、キャプセルの設計上から重要である。そこで、IP-1に関して炉の出力上昇ごとに測定された照射容器の中心部および外側部の孔の温度から(2)式を用いて実効熱伝導度を求めた。(この式において Q_K は、伝導およびふく射による熱流、 K は実効的な熱伝導度を表わしている。また、中心の熱電対は、タンタル管を無視し、グラファイトの照射容器の内壁に位置しているとした。) Fig. 9にはこの二ヶ所の算術平均温度に対して実効熱伝導度をプロットした。すなわち、ヘリウム零圧気での照射下における被覆粒子充填層の実効熱伝導度は次式で表現できる。

$$K \text{ (Watt / cm} \cdot \text{C)} = 3 \times 10^{-5} t \text{ (C)} + 0.02$$

この充填層には、半径方向におよそ5個の被覆粒子が並んでいる。まえに述べたモデルを用いて、それぞれの粒子間の伝導による熱 Q_K とふく射による熱流 Q_R の寄与の変化の様子を、これらの比によってFig. 8に示した。

なお、Fig. 9には、Fig. 7で示したカーブのうち、Xが0の場合の計算結果から得られる実効熱伝導度を Δ 印で記した。この計算では、被覆粒子の熱伝導度として、 $0.1 \text{ Watt / cm} \cdot \text{C}$ を用い、かつガンマ発熱の寄与の一部を無視している。同図には、西独・ユーリッヒ研究所で得られたデータを参考のために記した。このデータは、 UC_2 核BISO型被覆粒子を用いて、ヘリウム零囲気での圧力をパラメーターに取り、炉外実験によって得られた結果である。

本照射実験で得られた充填層の実効熱伝導度の信頼性に関しては、ほかのキャプセル照射したデータ解析により、精度の向上が期待される。一方、データ解析に使用する仮定を修正し、修正に応じて精度が高い物性値を適切に計算に使用する必要がある。これらの結果に加えて速中性子量の測定をすることにより、各種温度勾配下における被覆粒子の照射挙動を定量的に評価できると考えられる。

VI. 結論

JRR-2・6C孔で被覆粒子をキャプセル照射し、原子炉のステップ状出力上昇時のキャプセル温度を測定した。一方、照射済被覆粒子の燃焼度測定値などを用い核熱計算を行い、実測温度との比較を試みた結果、次の点が明らかとなった。

1) IP-2キャプセル照射容器のように、被覆粒子挿入孔が比較的分散している場合、計算上の仮定として、被覆粒子を照射容器の中心位置に配置換えをすることにより実測値と計算値の間に良い一致が見られ、IP-1キャプセル照射容器のように、被覆粒子挿入孔が照射容器の中央部に比較的大きく取られている場合、被覆粒子を円柱状に置換えると、実測値と計算値の間に比較的良い一致が見られる。

2) 照射下におけるTRISO-II型20%濃縮 UC_2 核被覆粒子充填層のヘリウム零囲気での実効熱伝導度は $K \text{ (Watt / cm} \cdot \text{C)} = 3 \times 10^{-5} t \text{ (C)} + 0.02$ と表わされる。

VII. 謝辞

本実験を遂行するにあたって多くの方達の御協力と御指導を賜った。キャプセルの製作にあたっては工作課・井上利昭氏など、照射に関しては炉利用課・一色正彦氏など、キャプセルの解体などに関してはホットラボの各試験担当者のほか、ウランの同位体比測定には分析センター・郡司勝文氏、核熱解析にはJRR-2・島敬二郎氏、遮蔽研・宮坂駿一氏、計算センター・鈴木忠和氏にお世話になった。また、全般の検討には野村燃料工学部長の御指導を仰いだ。ここに、深くお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- (1) 岩本多実 外、被覆粒子燃料研究状況報告・4 (1972)。
- (2) 同上、同上、6 (1972)。

$$K \text{ (Watt / cm} \cdot \text{C)} = 3 \times 10^{-5} t \text{ (C)} + 0.02$$

この充填層には、半径方向におよそ5個の被覆粒子が並んでいる。まえに述べたモデルを用いて、それぞれの粒子間の伝導による熱 Q_K とふく射による熱流 Q_R の寄与の変化の様子を、これらの比によってFig. 8に示した。

なお、Fig. 9には、Fig. 7で示したカーブのうち、Xが0の場合の計算結果から得られる実効熱伝導度を△印で記した。この計算では、被覆粒子の熱伝導度として、 $0.1 \text{ Watt / cm} \cdot \text{C}$ を用い、かつガンマ発熱の寄与の一部を無視している。同図には、西独・ユーリッヒ研究所で得られたデータを参考のために記した。このデータは、UC₂核BISO型被覆粒子を用いて、ヘリウム零圧気でのこの圧力をパラメーターに取り、炉外実験によって得られた結果である。

本照射実験で得られた充填層の実効熱伝導度の信頼性に関しては、ほかのキャプセル照射したデータ解析により、精度の向上が期待される。一方、データ解析に使用する仮定を修正し、修正に応じて精度が高い物性値を適切に計算に使用する必要がある。これらの結果に加えて速中性子量の測定をすることにより、各種温度勾配下における被覆粒子の照射挙動を定量的に評価できると考えられる。

VI. 結論

JRR-2・6C孔で被覆粒子をキャプセル照射し、原子炉のステップ状出力上昇時のキャプセル温度を測定した。一方、照射済被覆粒子の燃焼度測定値などを用い核熱計算を行い、実測温度との比較を試みた結果、次の点が明らかとなった。

1) IP-2キャプセル照射容器のように、被覆粒子挿入孔が比較的分散している場合、計算上の仮定として、被覆粒子を照射容器の中心位置に配置換えをすることにより実測値と計算値の間に良い一致が見られ、IP-1キャプセル照射容器のように、被覆粒子挿入孔が照射容器の中央部に比較的大きく取られている場合、被覆粒子を円柱状に置換えると、実測値と計算値の間に比較的良い一致が見られる。

2) 照射下におけるTRISO-II型20%濃縮UC₂核被覆粒子充填層のヘリウム零圧気での実効熱伝導度は $K \text{ (Watt / cm} \cdot \text{C)} = 3 \times 10^{-5} t \text{ (C)} + 0.02$ と表わされる。

VII. 謝辞

本実験を遂行するにあたって多くの方達の御協力と御指導を賜った。キャプセルの製作にあたっては工作課・井上利昭氏など、照射に関しては炉利用課・一色正彦氏など、キャプセルの解体などに関してはホットラボの各試験担当者のほか、ウランの同位体比測定には分析センター・郡司勝文氏、核熱解析にはJRR-2・島敬二郎氏、遮蔽研・宮坂駿一氏、計算センター・鈴木忠和氏にお世話になった。また、全般の検討には野村燃料工学部長の御指導を仰いだ。ここに、深くお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- (1) 岩本多実 外, 被覆粒子燃料研究状況報告・4 (1972).
- (2) 同上, 同上, 6 (1972).

$$K \text{ (Watt / cm} \cdot \text{ }^\circ\text{C)} = 3 \times 10^{-5} t \text{ (}^\circ\text{C)} + 0.02$$

この充填層には、半径方向におよそ5個の被覆粒子が並んでいる。まえに述べたモデルを用いて、それぞれの粒子間の伝導による熱 Q_K とふく射による熱流 Q_R の寄与の変化の様子を、これらの比によってFig. 8に示した。

なお、Fig. 9には、Fig. 7で示したカーブのうち、Xが0の場合の計算結果から得られる実効熱伝導度を Δ 印で記した。この計算では、被覆粒子の熱伝導度として、 $0.1 \text{ Watt / cm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ を用い、かつガンマ発熱の寄与の一部を無視している。同図には、西独・ユーリッヒ研究所で得られたデータを参考のために記した。このデータは、UC₂核BISO型被覆粒子を用いて、ヘリウム零圧気でのこの圧力をパラメーターに取り、炉外実験によって得られた結果である。

本照射実験で得られた充填層の実効熱伝導度の信頼性に関しては、ほかのキャプセル照射したデータ解析により、精度の向上が期待される。一方、データ解析に使用する仮定を修正し、修正に応じて精度が高い物性値を適切に計算に使用する必要がある。これらの結果に加えて速中性子量の測定をすることにより、各種温度勾配下における被覆粒子の照射挙動を定量的に評価できると考えられる。

VI. 結論

JRR-2・6C孔で被覆粒子をキャプセル照射し、原子炉のステップ状出力上昇時のキャプセル温度を測定した。一方、照射済被覆粒子の燃焼度測定値などを用い核熱計算を行い、実測温度との比較を試みた結果、次の点が明らかとなった。

1) IP-2キャプセル照射容器のように、被覆粒子挿入孔が比較的分散している場合、計算上の仮定として、被覆粒子を照射容器の中心位置に配置換えをすることにより実測値と計算値の間に良い一致が見られ、IP-1キャプセル照射容器のように、被覆粒子挿入孔が照射容器の中央部に比較的大きく取られている場合、被覆粒子を円柱状に置換えると、実測値と計算値の間に比較的良い一致が見られる。

2) 照射下におけるTRISO-II型20%濃縮UC₂核被覆粒子充填層のヘリウム零圧気での実効熱伝導度は $K \text{ (Watt / cm} \cdot \text{ }^\circ\text{C)} = 3 \times 10^{-5} t \text{ (}^\circ\text{C)} + 0.02$ と表わされる。

VII. 謝辞

本実験を遂行するにあたって多くの方達の御協力と御指導を賜った。キャプセルの製作にあたっては工作課・井上利昭氏など、照射に関しては炉利用課・一色正彦氏など、キャプセルの解体などに関してはホットラボの各試験担当者のほか、ウランの同位体比測定には分析センター・郡司勝文氏、核熱解析にはJRR-2・島敬二郎氏、遮蔽研・宮坂駿一氏、計算センター・鈴木忠和氏にお世話になった。また、全般の検討には野村燃料工学部長の御指導を仰いだ。こゝに、深くお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- (1) 岩本多実 外, 被覆粒子燃料研究状況報告・4 (1972).
- (2) 同上, 同上, 6 (1972).

$$K \text{ (Watt / cm} \cdot \text{ }^\circ\text{C)} = 3 \times 10^{-5} t \text{ (}^\circ\text{C)} + 0.02$$

この充填層には、半径方向におよそ5個の被覆粒子が並んでいる。まえに述べたモデルを用いて、それぞれの粒子間の伝導による熱 Q_K とふく射による熱流 Q_R の寄与の変化の様子を、これらの比によってFig. 8に示した。

なお、Fig. 9には、Fig. 7で示したカーブのうち、Xが0の場合の計算結果から得られる実効熱伝導度を Δ 印で記した。この計算では、被覆粒子の熱伝導度として、 $0.1 \text{ Watt / cm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ を用い、かつガンマ発熱の寄与の一部を無視している。同図には、西独・ユーリッヒ研究所で得られたデータを参考のために記した。このデータは、 UC_2 核BISO型被覆粒子を用いて、ヘリウム零圧気でのこの圧力をパラメーターに取り、炉外実験によって得られた結果である。

本照射実験で得られた充填層の実効熱伝導度の信頼性に関しては、ほかのキャプセル照射したデータ解析により、精度の向上が期待される。一方、データ解析に使用する仮定を修正し、修正に応じて精度が高い物性値を適切に計算に使用する必要がある。これらの結果に加えて速中性子量の測定をすることにより、各種温度勾配下における被覆粒子の照射挙動を定量的に評価できると考えられる。

VI. 結論

JRR-2・6C孔で被覆粒子をキャプセル照射し、原子炉のステップ状出力上昇時のキャプセル温度を測定した。一方、照射済被覆粒子の燃焼度測定値などを用い核熱計算を行い、実測温度との比較を試みた結果、次の点が明らかとなった。

1) IP-2キャプセル照射容器のように、被覆粒子挿入孔が比較的分散している場合、計算上の仮定として、被覆粒子を照射容器の中心位置に配置換えをすることにより実測値と計算値の間に良い一致が見られ、IP-1キャプセル照射容器のように、被覆粒子挿入孔が照射容器の中央部に比較的大きく取られている場合、被覆粒子を円柱状に置換えると、実測値と計算値の間に比較的良い一致が見られる。

2) 照射下におけるTRISO-II型20%濃縮 UC_2 核被覆粒子充填層のヘリウム零圧気での実効熱伝導度は $K \text{ (Watt / cm} \cdot \text{ }^\circ\text{C)} = 3 \times 10^{-5} t \text{ (}^\circ\text{C)} + 0.02$ と表わされる。

VII. 謝辞

本実験を遂行するにあたって多くの方達の御協力と御指導を賜った。キャプセルの製作にあたっては工作課・井上利昭氏など、照射に関しては炉利用課・一色正彦氏など、キャプセルの解体などに関してはホットラボの各試験担当者のほか、ウランの同位体比測定には分析センター・郡司勝文氏、核熱解析にはJRR-2・島敬二郎氏、遮蔽研・宮坂駿一氏、計算センター・鈴木忠和氏にお世話になった。また、全般の検討には野村燃料工学部長の御指導を仰いだ。ここに、深くお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- (1) 岩本多実 外, 被覆粒子燃料研究状況報告・4 (1972).
- (2) 同上, 同上, 6 (1972).

- (3) 岩本多実 外, 被覆粒子燃料研究状況報告・7 (1973).
- (4) 同 上 , 同 上 . 8 (1974).
- (5) Hall . C. Roland, ORNL-TM-1942, (1967).
- (6) H. J. Leyers, et al., JÜL-511-RX, (1968).
- (7) P. S. Salgado, et al., Nucl. Technol., vol. 11, May (1971).

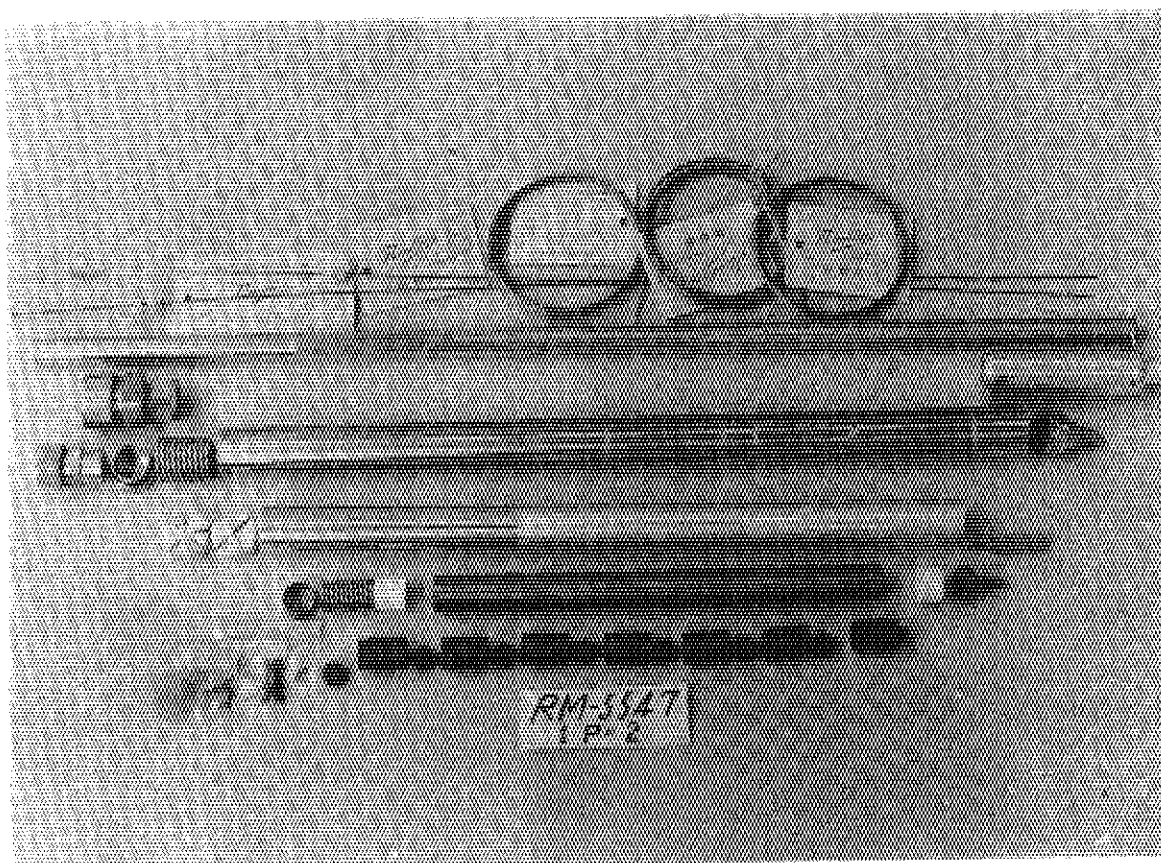


FIG. 1 PARTS OF IP-2 CAPSULE

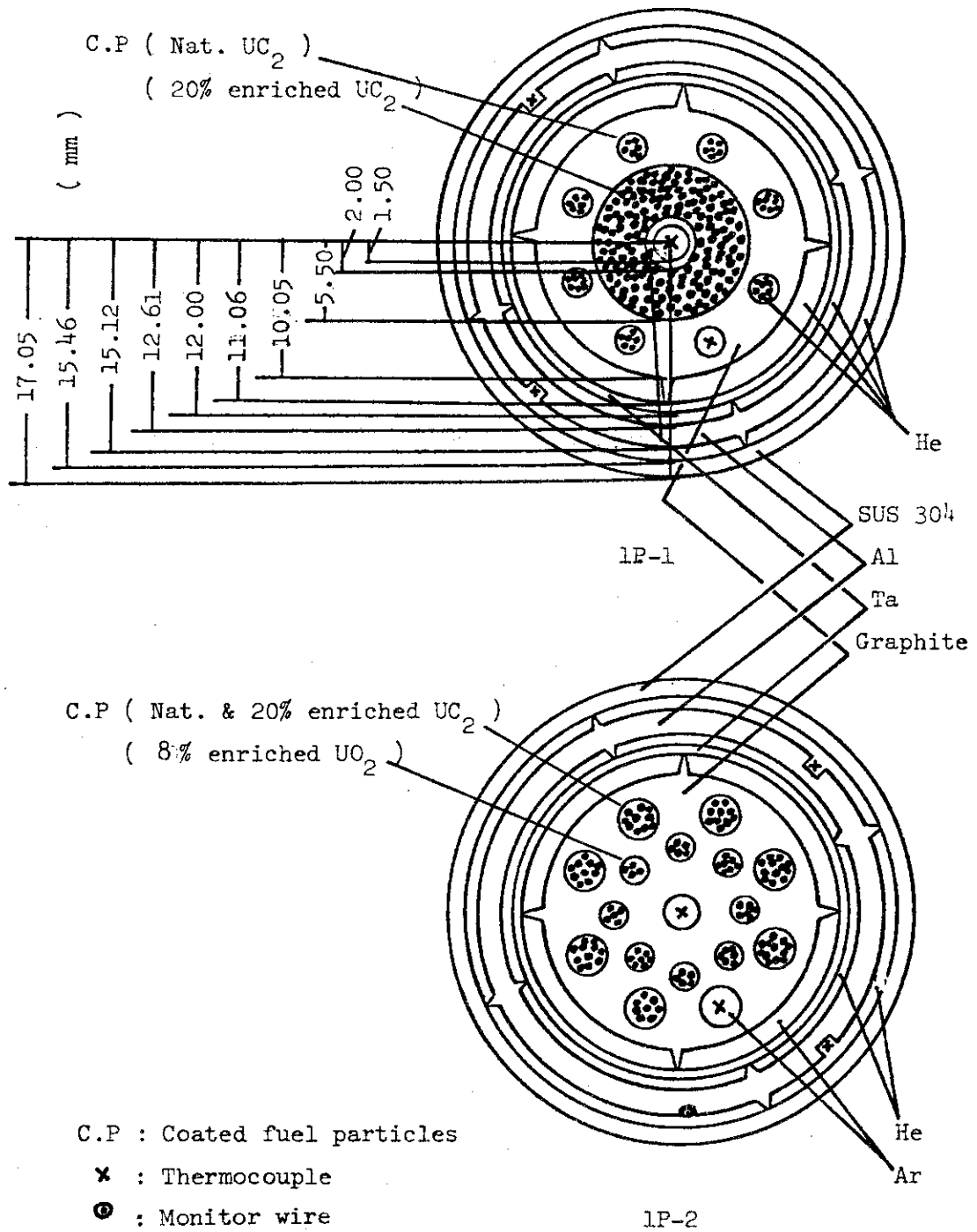


Fig. 2 Cross section of LP-capsules

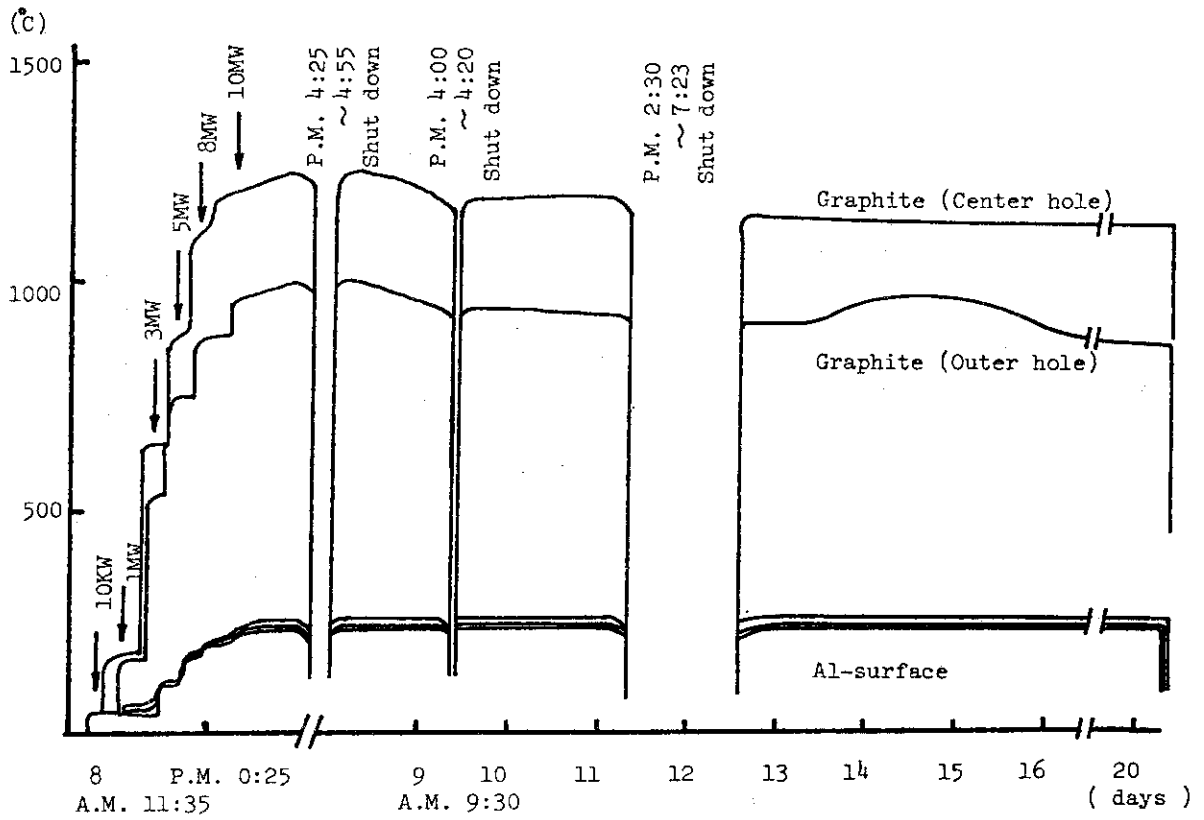


Fig. 3 Irradiation temperature (IP-1)

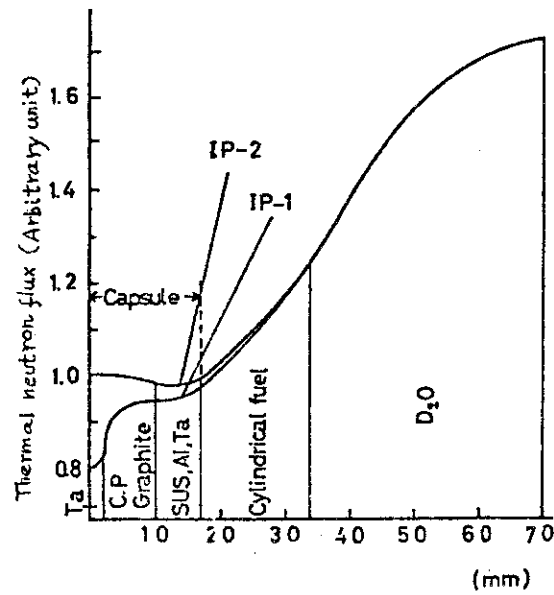


Fig. 4 Thermal neutron flux distribution calculated by THERMOS code

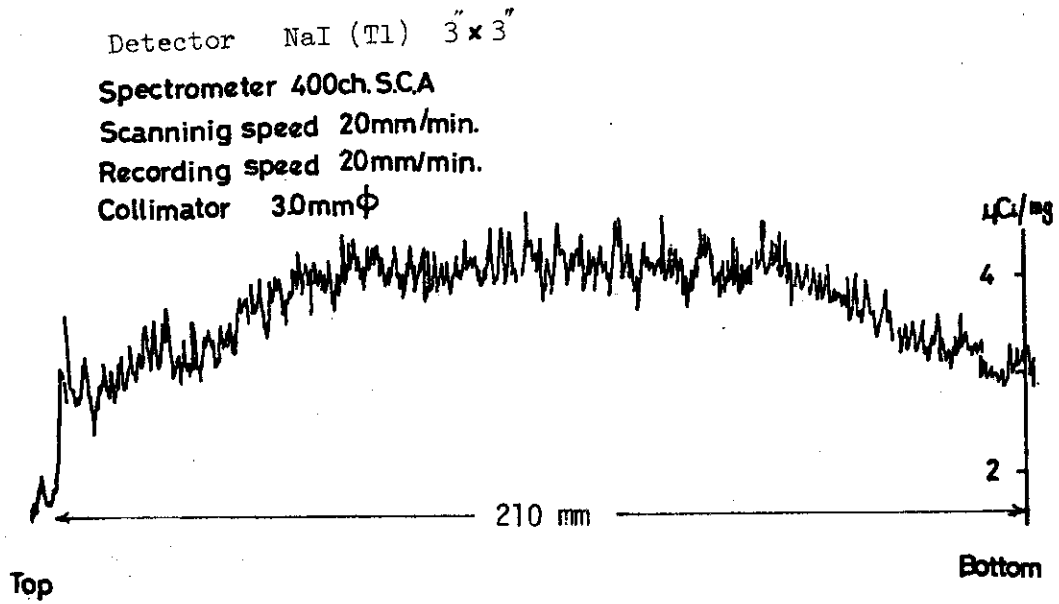


Fig. 5 Gamma ray profile of Co-Al wire

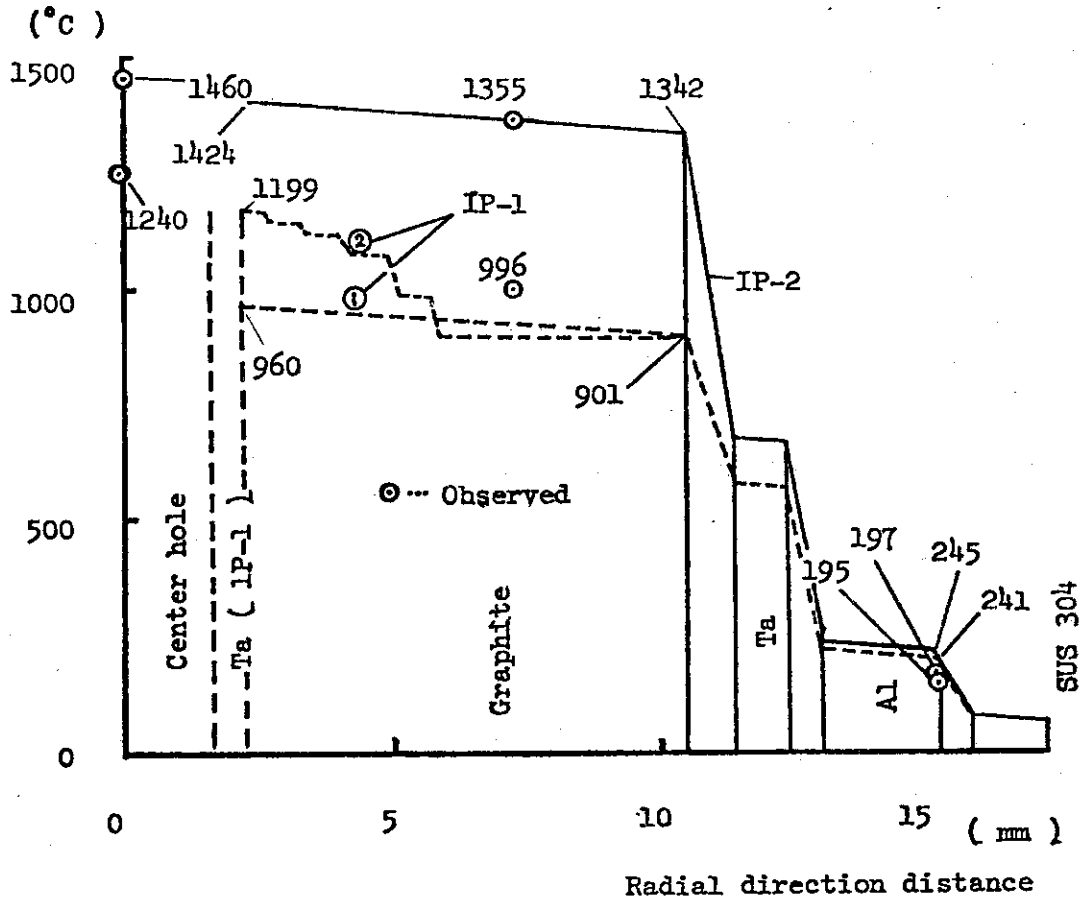


Fig. 6 Temperature on each node of IP-capsules in 10MW

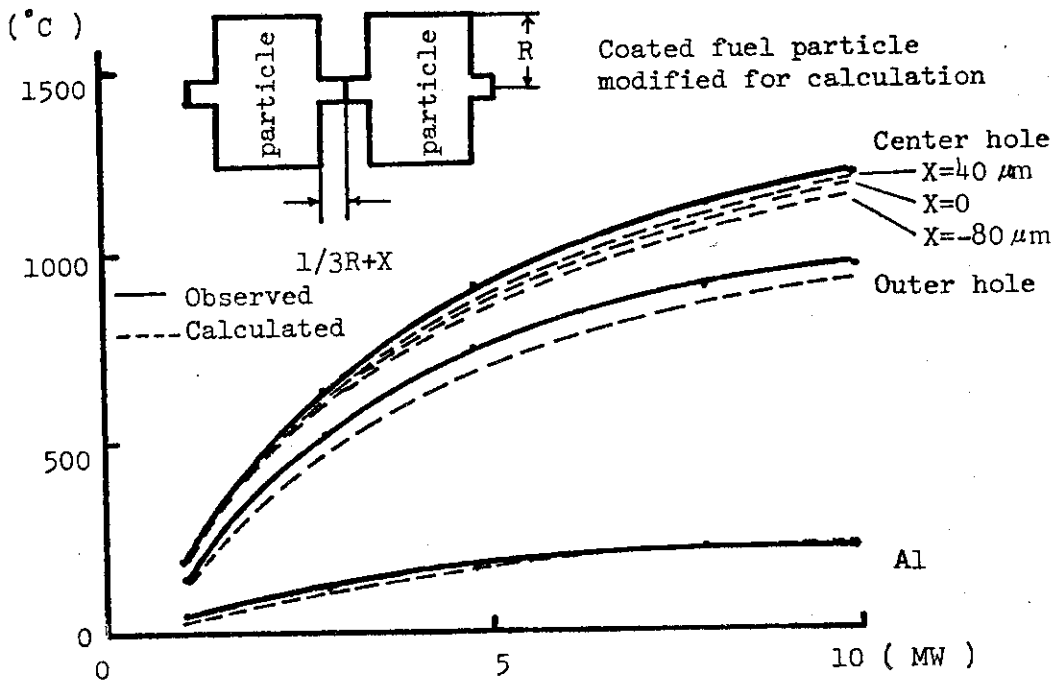


Fig. 7 Temperature of capsule materials vs. reactor power

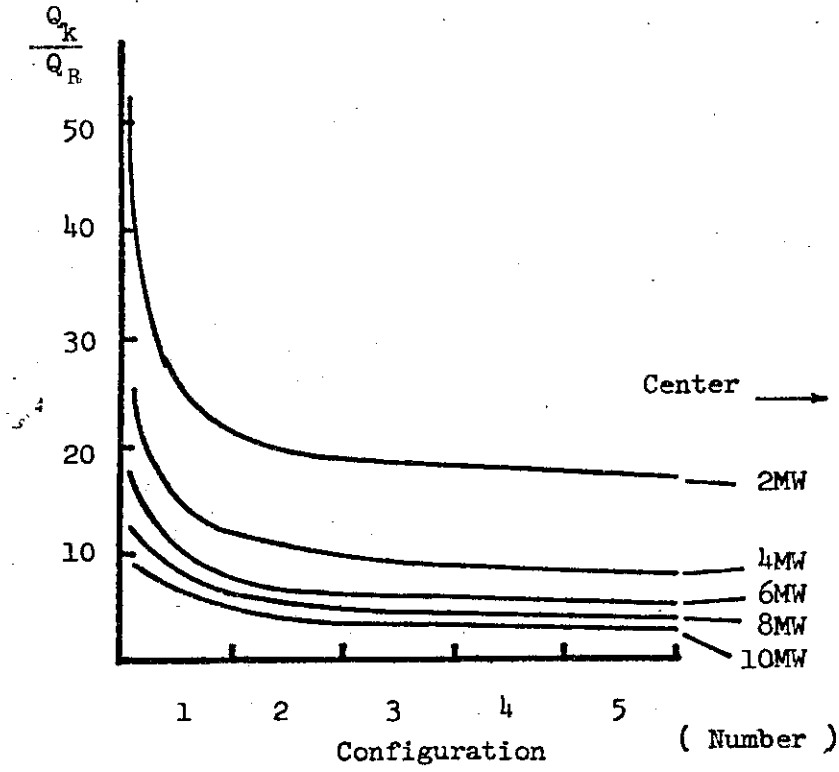


Fig. 8 Configuration number of coated fuel particles loaded in radial direction vs. Q_K/Q_R

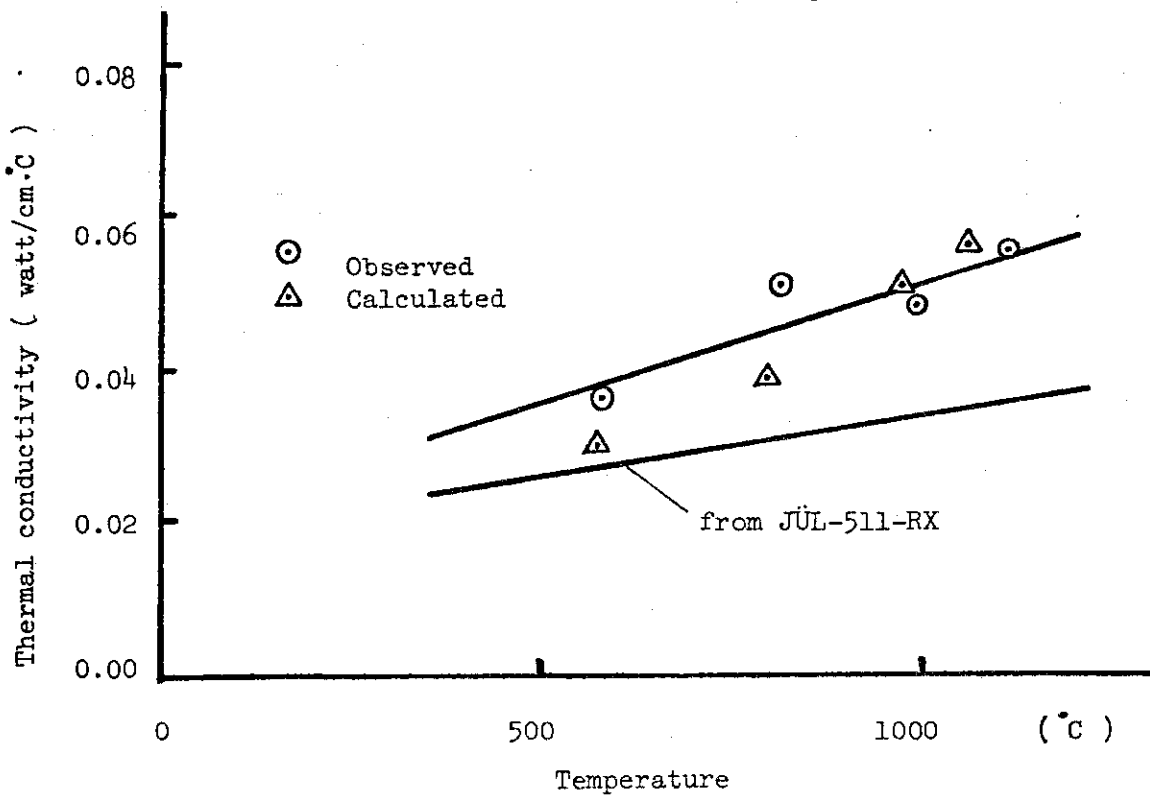


Fig. 9 Thermal conductivity in the packed bed

Table I Description of Coated Fuel Particles for Capsule Irradiation

Capsule	Sample	Fuel kernel			Coating thickness (μ)					Outer diameter (μ)
		Composition	Enrichment (%)	U/Th	Diameter (CM)	1st layer	2nd layer	3rd layer	4th layer	
1P-I	70FC2	UC ₂	20	-	460	PyC(50 μ)	PyC(35 μ)	SiC(25 μ)	PyC(50 μ)	680
	70FC3A	UC ₂	20	-	460	PyC(45 μ)	SiC(30 μ)	PyC(45 μ)	-	700
	70FC6	UC ₂	20	-	460	PyC(36 μ)	SiC(33 μ)	PyC(56 μ)	-	710
	70FH1	UC ₂	nat.	-	460	PyC(50 μ)	-	-	-	560
1P-2	72FC1	UO ₂	8	-	502	PyC(39 μ)	PyC(33 μ)	SiC(26 μ)	PyC(48 μ)	793
	72FC2	UO ₂	8	-	502	PyC(40)	PyC(34)	SiC(25)	PyC(46)	792
	72FC3	UO ₂	8	-	512	PyC(37)	PyC(27)	SiC(27)	PyC(48)	800
	72FC4	UO ₂	8	-	512	PyC(41)	PyC(32)	SiC(28)	PyC(45)	807
	72FC5	UO ₂	8	-	512	PyC(38)	PyC(30)	SiC(24)	PyC(46)	793
	72FC6	UO ₂	8	-	512	PyC(42)	PyC(31)	SiC(23)	PyC(45)	793
	72FC7	UO ₂	8	-	512	PyC(40)	PyC(27)	SiC(28)	PyC(43)	804
	72FC8	UO ₂	8	-	512	PyC(38)	PyC(26)	SiC(29)	PyC(42)	797
	72FC9	UO ₂	8	-	512	PyC(39)	PyC(26)	SiC(27)	PyC(44)	819
	72FC10	UO ₂	8	-	512	PyC(38)	PyC(25)	SiC(28)	PyC(43)	817
	72FC11	UO ₂	8	-	512	PyC(40)	PyC(27)	SiC(28)	PyC(43)	806
	72FC12	UO ₂	8	-	512	PyC(40)	PyC(26)	SiC(27)	PyC(48)	793
	72FC13	UO ₂	8	-	512	PyC(37)	PyC(26)	SiC(29)	PyC(45)	800
	72FC14	UO ₂	8	-	512	PyC(38)	PyC(25)	SiC(28)	PyC(43)	790
	72FC15	UO ₂	8	-	512	PyC(36)	PyC(26)	SiC(22)	PyC(44)	818
	72FC16	UO ₂	nat.	-	502	PyC(50 μ)	-	-	-	625
70FH1	UC ₂	20	-	460	PyC(50 μ)	-	-	-	560	
70FH2	UC ₂	20	-	460	PyC(50 μ)	-	-	-	560	

Table 2 Results of linear heat rate determined due to fission

Capsule	Coated fuel particles loaded (g)	Weight of U-235 (g)	Number of Cs-137 atoms determined	Number of U atoms determined	% FIMA	Full power operation time (sec)	Linear heat rate** (watt/cm)
IP-1	20% enriched UC2 TRISO-I, 15.25 g	1.35			3.39x10 ⁻¹ *	9.36x10 ⁵	86
	Natural UC2 TRISO-I, 6.0 g	0.02	4.90x10 ¹³	5.95x10 ¹⁸	1.25x10 ⁻²		
IP-2	20% enriched UC2 BISO, 5.21 g	0.82			3.20x10 ⁻¹ *	8.44x10 ⁵	84
	8% enriched UO2 TRISO-II, 9.94 g	0.45	8.44x10 ¹³ 1.18x10 ¹⁴	1.01x10 ¹⁸ 1.46x10 ¹⁸	1.27x10 ⁻¹ 1.23x10 ⁻¹		
	Natural UC2 BISO, 5.6 g	0.02					

* Calculated value, ** Heat released/fission = 180 MeV, length of fuel loading = 210 mm.

Table 3 Constants used for calculation

Item	SUS 304	Al	Ta	Graphite	He	Ar
Thermal expansion coefficient (°C ⁻¹)		2.3x10 ⁻⁵	7.0x10 ⁻⁶	5.6x10 ⁻⁶		
Thermal conductivity (watt/cm.°C)	0.16	2.3	0.54	0.08(5) 0.4	3x10 ⁻⁶ T+1.5x10 ⁻³ (1) 2.5x10 ⁻⁶ T+1.7x10 ⁻³ (2)	2.2x10 ⁻⁷ T+2.5x10 ⁻⁴ (3)
Emmissivity coefficient		0.2	0.3	1.0		
Gamma heat rate (watt/g) (4)	1.5	1.5	1.5	1.5		

(1) 200~500°C, (2) 500~1550°C, (3) 800~1400°C, (4) Measured in 10MW, by H.Miyasaka
(5) Pyrolytic carbon

Table 4 Result of mass spectrometric analyses

sample	$R^{\circ}(236/235)$	$R(236/235)$
70FC6 irradiated		0.00992 ± 0.00026
70FC3A irradiated		0.01015 ± 0.00020
70FC3A unirradiated	0.00633 ± 0.00018	