

JAERI-M

5613

N S R R の試験燃料1本ピンの発熱計算  
(N S R R の炉物理と核設計・4)

1974年3月

伊勢 武治・中原 康明

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

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.

N S R R の試験燃料 1 本ピンの発熱計算  
( N S R R の炉物理と核設計・4 )

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部  
伊勢 武治・中原 康明  
( 1 9 7 4 年 2 月 7 日受理 )

N S R R の実験孔で照射する軽水キャップセル内の、試験燃料 1 本ピンに対する最大発熱量を与える諸条件がサーヴェイされた。炉心全発生エネルギーを固定し、B W R, J P 2, P W R および F B R 用の燃料 1 本ピンについて計算が行われた。計算結果は次の事を示した。

ピンのウランの濃縮度は大きい程、ピンの太さは細い程、ピン内の単位体積当たりの発熱量は大きい。群定数の T H E R M O S 法と G A T H E R 法の値には、発熱量にいくらか差があるので、非均質効果を考慮した T H E R M O S 法の群定数を使つた方がベターである。キャップセル内の軽水の厚さが 5.3 cm 附近で、全ての場合、発熱量はピークを示し、ピンの太さ、および濃縮度には殆んど依らない。キャップセル壁の厚さは、薄い程、発熱量は大きく、壁材としてインコネルが使えれば発熱量は大きくとれる。また炉心の寸法が増加すると、ピンの発熱量は小さくなる。

Heat Deposition in a Single Test Fuel Pin in the NSRR  
(Physics and Nuclear Analysis of the Nuclear Safety  
Research Reactor-IV)

Takeharu ISE and Yasuaki NAKAHARA

Division of Reactor Engineering, Tokai, JAERI

(Received February 7, 1974 )

Extensive parametric studies have been performed on feasibilities and conditions to get maximum heat depositions in  $\text{UO}_2$  test pins located in the central cavity of the NSRR in the pulsed mode.

The present study is concerned only with a single  $\text{UO}_2$  pin in a test capsule filled with water, although the fuel pins of BWR, JP2, PWR and FBR have been selected as sample pieces. As a result of the calculations, the following conclusions are obtained.

Higher the enrichment of  $\text{UO}_2$  and smaller the thickness of the pin, more the heat deposition per unit volume of the test pin. The heat deposition estimated by using the THERMOS data differs to some extent from that by GATHER data. The heat deposit depends on a water sheath around the pin; the optimum thickness to give the maximum deposit is 5.3 cm independent of the enrichment of uranium and the size of the test pin. Thinner the capsule wall, more the heat deposition; the heat deposition is increased by using Inconel instead of Stainless steel as a capsule material. On the other hand, the heat deposition in a pin decreases as the core become large.

## 目 次

1.はじめに	1
2.計算方法	1
2.1 原子炉体系	1
2.2 UO <sub>2</sub> ピンの発熱量	2
3.計算結果および結論	3
3.1 試験燃料ピンの種類	3
3.2 UO <sub>2</sub> ピン内の核分裂数	3
3.3 試験燃料キャブセル内の中性子束分布	4
3.4 試験燃料ピン内および炉心内の出力分布	4
3.5 UO <sub>2</sub> の濃縮度と発熱量との関係	4
3.6 UO <sub>2</sub> ピン群定数モデルの発熱量への影響	5
3.7 キャブセル内の軽水の最適の厚さ	6
3.8 キャブセル壁の厚さの発熱量への影響	7
3.9 炉心および反射体の寸法の発熱量への影響	7
3.10 UO <sub>2</sub> ピンの反応度効果	8
4.あとがき	8
謝 辞	9
5.文 献	9
付 錄	36
A 各領域の原子数密度	36
B GATHERとTHERMOSの群定数	36

## 1. はじめに

NSRR (Nuclear Safety Research Reactor, 安全性研究炉)<sup>1)</sup> では、中央にある大きな実験孔の中で、試験燃料の破壊実験を行う。初めに予定されているのは、冷却材を軽水とした燃料の試験で、軽水を満たしたキャップセル (water capsule) 内に、試験燃料ピンが1本だけ装荷されている。NSRRでは、この試験燃料ピンを炉心で発生した単発パルスによるエネルギーで、溶融させるのが目的なので、試験燃料ピンに最大のエネルギー（すなわち、試験燃料内に最大発熱）を与えるよう、キャップセルおよび実験孔内の設計を行わなければならない。

試験燃料ピンとしては、 $\text{UO}_2$ 燃料を取り上げて、ピンの寸法の異ったもの（半径が、0.62 cm, 0.533 cm, 0.466 cm および 0.27 cm）を考える。上記のピンを順に、BWRピン, JRP2ピン, PWRピンおよびFBRピンと名付けておく。 $\text{UO}_2$ の濃縮度については、2.6%, 5.2%, 10.0% および 20.0% のときを考える。

目的は、キャップセルの最適設計にあるので、ここでの $\text{UO}_2$ ピン内の発熱計算は、一次元拡散コードGURNETによったパラメトリック・サーベイである。 $\text{UO}_2$ の濃縮度による発熱量への影響、 $\text{UO}_2$ ピンの太さによる影響、群定数の差による影響、キャップセル内の軽水の厚さによる影響、キャップセル壁の厚さによる影響、炉心および反射体の寸法による影響などが調べられた。

## 2. 計算方法

実験孔を含む原子炉体系自身についての種々の議論は、本シリーズでの他の報告書で行っているので、<sup>2), 3)</sup> ここでは、計算手法については簡単に記す。初めに中性子束を計算するまでの過程について述べ、次に試験燃料ピンについての発熱量について述べる。

### 2.1 原子炉体系

試験燃料ピンの発熱量計算の解析には、次のコード群が用いられた。

- (a) GGC-4 (GAM-GATHER-COMBO)<sup>5)</sup>
- (b) THERMOS-MUG<sup>6)</sup>
- (c) GURNET<sup>7)</sup>

これらのコードは、いずれも FACOM 230/60 版で使用可能なものばかりである。

GGC-4 と THERMOS-MUG は、群定数計算用コードである。GGC-4 は均質系媒質の高速中性子スペクトラム (GAM) および熱中性子スペクトラム (GATHER) を計算するのに用いられた。THERMOS-MUG は、もっぱら非均質媒質の熱中性子スペクトラムを計算するのに用いられた。したがって、NSRR 燃料 ( $\text{U-ZrH}$ ) の装荷された炉心領域に対しては、GAM と THERMOS-MUG を用いて群定数が計算され、その他の非炉心領域に対しては、GGC-4 を直接適用し、得られた軽水の中性子スペクトラムで平均した群定数が用いられた。

## 1. はじめに

N S R R ( Nuclear Safety Research Reactor, 安全性研究炉)<sup>1)</sup> では、中央にある大きな実験孔の中で、試験燃料の破壊実験を行う。初めに予定されているのは、冷却材を軽水とした燃料の試験で、軽水を満たしたキャップセル (water capsule) 内には、試験燃料ピンが 1 本だけ装荷されている。N S R R では、この試験燃料ピンを炉心で発生した単発パルスによるエネルギーで、溶融させるのが目的なので、試験燃料ピンに最大のエネルギー (すなわち、試験燃料内に最大発熱) を与えるよう、キャップセルおよび実験孔内の設計を行わなければならぬ。

試験燃料ピンとしては、UO<sub>2</sub>燃料を取り上げて、ピンの寸法の異ったもの (半径が、0.62 cm, 0.533 cm, 0.466 cm および 0.27 cm) を考える。上記のピンを順に、BWR ピン, J P 2 ピン, PWR ピンおよび FBR ピンと名付けておく。UO<sub>2</sub>の濃縮度については、2.6%, 5.2%, 10.0% および 20.0% のときを考える。

目的は、キャップセルの最適設計にあるので、ここでの UO<sub>2</sub> ピン内の発熱計算は、一次元拡散コード GURNET によったパラメトリック・サーベイである。UO<sub>2</sub>の濃縮度による発熱量への影響、UO<sub>2</sub> ピンの太さによる影響、群定数の差による影響、キャップセル内の軽水の厚さによる影響、キャップセル壁の厚さによる影響、炉心および反射体の寸法による影響などが調べられた。

## 2. 計 算 方 法

実験孔を含む原子炉体系自身についての種々の議論は、本シリーズでの他の報告書で行っているので、<sup>2), 3)</sup> ここでは、計算手法については簡単に記す。初めに中性子束を計算するまでの過程について述べ、次に試験燃料ピンについての発熱量について述べる。

### 2.1 原子炉体系

試験燃料ピンの発熱量計算の解析には、次のコード群が用いられた。

- (a) GGC-4 (GAM-GATHER-COMBO)<sup>5)</sup>
- (b) THERMOS-MUG<sup>6)</sup>
- (c) GURNET<sup>7)</sup>

これらのコードは、いずれも FACOM 230/60 版で使用可能なものばかりである。

GGC-4 と THERMOS-MUG は、群定数計算用コードである。GGC-4 は均質系媒質の高速中性子スペクトラム (GAM) および熱中性子スペクトラム (GATHER) を計算するのに用いられた。THERMOS-MUG は、もっぱら非均質媒質の熱中性子スペクトラムを計算するのに用いられた。したがって、N S R R 燃料 (U-ZrH) の装荷された炉心領域に対しては、GAM と THERMOS-MUG を用いて群定数が計算され、その他の非炉心領域に対しては、GGC-4 を直接適用し、得られた軽水の中性子スペクトラムで平均した群定数が用いられた。

試験燃料ピンに対する群定数は、軽水スペクトラムで平均されたものが用意されたが、発熱量の精度をチェックする為に、より精度の高い、THE RMOS-MUGで直接試験燃料ピンについて非均質計算をして得られた群定数も熱中性子領域に対して用意された。 $ZrH$  および軽水( $H_2O$ )の散乱カーネルは、それぞれ、UNCLE<sup>8)</sup> およびGASKET-FLANGE<sup>9)</sup> で計算されたものを用いた。

群定数を求める際の縮約エネルギー構造は、Table 2.1に示す如く、高速中性子領域が5つ、熱中性子領域が4つで合計9群である。このエネルギー群数は、反応度係数の計算の際の経験から定められたものである。<sup>2)</sup>

GURNETは一次元拡散計算コードである。我々の解くべき体系には巾の広い(約5 cm)ボイド領域を含んでいるので、二次元拡散計算コード( EXTERMINATOR-2 )のR-Z計算の際には二次元差分の影響で物理的に不合理な結果が生ずるが、<sup>\*1)</sup> GURNETでは、合理的な結果を与える。この計算をする際のメッシュ数は、拡散距離( $L = \sqrt{D/\Sigma_a}$ )を基準にして、メッシュ巾を定めたが、試験燃料ピン附近の中性子束分布は詳しいことが望ましいので、実験孔内のメッシュ巾は細かくとっておいた(Table 2.2 参照)。反射体の厚さも約40 cmとつておいたので十分と思われる。

軸方向に対するバックリングは、GURNETコード内で計算される領域毎エネルギー依存バックリングを用いた。すなわち、中性子束分布のつり合いの式を

$$D_m^i \nabla^2 \phi^i + \Sigma_m^i \phi^i = \frac{1}{k_{eff}} \chi_m^i \Sigma_j (\nu \Sigma_f)_m^j \phi^j + \Sigma_{j(\neq i)} \Sigma_m^{ji} \phi^j \quad (2.1)$$

$$\Sigma_m^i = \Sigma_{a,m} + \Sigma_{j(\neq i)} \Sigma_m^{ji} + [\text{軸方向の洩れ}] \quad (2.2)$$

すると、バックリング $B^2$ は、

$$[\text{軸方向の洩れ}] = D_m^i (B^2)_m^i = D_m^i \left( \frac{2\pi}{Z + 2.13 D_m} \right)^2 \quad (2.3)$$

で与えられる。ここで、 $i, j$ はエネルギーグループ、 $m$ は領域、 $\Sigma^{ji}$ は、 $j$ から $i$ への散乱を示す断面積である。バックリングを示す(2.3)式の中の $Z$ は、軸方向の長さで入力されるべき量である。その他の記号の意味は通常の定義に従った。

## 2.2 $UO_2$ ピンの発熱量

試験燃料ピンの  $UO_2$  内で発生する発熱量(heat deposits)を計算する公式は、ピン内と炉心内で発生する全即効的エネルギーの比が、ピン内と炉心内の核分裂数の比に等しいことから求められる。<sup>10)</sup> すなわち：

$$H_{sp} = UO_2 \text{ 内で発生した熱量 (heat deposits in } UO_2, \text{ cal/cc})$$

$$E_p = \text{炉心の全発生エネルギー (total prompt burst energy release from the core, } 100 \text{ MW-sec} = 23.889 \times 10^6 \text{ cal})$$

$$F_s = \text{試験燃料ピン内の核分裂数 (total fissions in a } UO_2 \text{ pin)}$$

$$F_c = \text{炉心内の核分裂の数 (total fissions in the core)}$$

$$V_s = \text{試験燃料ピンの体積 (volume of a } UO_2 \text{ pin (cc))}$$

\*1) この報告では実験孔における中性子輸送問題についてはふれないが、この問題については文献3)で述べる。

$M_S$  = 試験燃料ピンの質量 (mass of a  $\text{UO}_2$  pin (gr))

とおくと、試験燃料ピン内の発熱量は、次式で示される。

$$H_{SP} (\text{cal/cc or cal/gr}) = E_p \times \frac{F_s}{F_c} \times \frac{1}{V_s (\text{or } M_S)} \quad (2.4)$$

ここで、ピンの体積  $V_s$  (cc) で割った方の式を用いれば、発熱量は  $\text{cal/cc}$  の単位で求められ、 $M_S$  (gr) で割った方の式を用いれば、 $\text{cal/gr}$  の単位で求められる。いづれにせよ、上の (2.4) 式で求められた量は、試験燃料ピン内で発生した平均発熱量である。ここでは  $F_s$  および  $F_c$  を算出する段階において、 $\Sigma_f \phi$  の代りに  $\nu \Sigma_f \phi$  を用いたが、発熱量に寄与するのは殆んど熱中性子で、熱中性子の  $\nu$  はエネルギー依存しない定数なので、上記の置換による誤差は、0.2%程度である。熱中性子の全体に対する寄与については 3.2 節で述べる。

あらかじめ  $\text{cal/cc}$  で求められた発熱量を  $\text{cal/gr}$  に換算するには、 $\text{UO}_2$  の密度を  $\rho_s$  (gr/cc) とすると、次式によって求められる。

$$H_{SP} (\text{cal/gr}) = \frac{H_{SP} (\text{cal/cc})}{\rho_s (\text{gr/cc})} \quad (2.5)$$

### 3. 計算結果および結論

#### 3.1 試験燃料ピンの種類

ここで用いられた NSRR の標準体系は Table 2.2 に示す如く、反射体が約 40 cm、炉心が約 180 本の燃料棒装荷に相当して 19.1 cm 巾、flux trap としての実験孔内のボイドが約 5 cm 巾、試験燃料ピンが入っている水キャップセル (water capsule) のステンレススチール (SUS 304) の壁が約 1 cm 巾、キャップセル内の軽水の厚さが、約 5 cm で、中心に試験燃料ピンが存在する。実験孔内のボイドと軽水の厚さは、試験燃料に最大の発熱量を与えるよう定められるべき量で、キャップセル壁のステンレススチールの厚さは、試験燃料ピンの破壊ときの衝撃に対する強度上の要求から定められた。試験燃料ピンは、現在、まず考えられているのは、4 つの太さの種類のピンで、いずれも、ジルカロイ-2 (Zry-2) 被覆である。 $\text{UO}_2$  の濃縮度については、濃縮度との関係について調べる為に、2.6%，5.2%，10.0%，20.0% の 4 つが選ばれた。試験燃料ピンの仕様は、Table 2.3 に示す。ここでは  $\text{UO}_2$  の密度は 10.89 gr/cc としている。ピンの長さはすべて、38.1 cm である。

#### 3.2 $\text{UO}_2$ ピン内の核分裂数

$\text{UO}_2$  内の核分裂は、その中性子束のエネルギーおよび空間分布に従って起るが、その空間分布について積分して、エネルギー・グループ毎の核分裂数を図示したのが Fig. 3.1 である。数値については、Table 3.1 および Table 3.2 に示しておいた。Table の中で、炉心 (core) で示されている値は、試験燃料ピンの濃縮度 (Table 3.1) およびピンの種類 (Table 3.2) に対応するものである。

これらの結果から、熱中性子による核分裂は全体の核分裂の 95% 以上を占めていることが

$M_S$  = 試験燃料ピンの質量 (mass of a  $\text{UO}_2$  pin (gr))

とおくと、試験燃料ピン内の発熱量は、次式で示される。

$$H_{SP} (\text{cal/cc or cal/gr}) = E_p \times \frac{F_s}{F_0} \times \frac{1}{V_s (\text{or } M_S)} \quad (2.4)$$

ここで、ピンの体積  $V_s$  (cc) で割った方の式を用いれば、発熱量は  $\text{cal/cc}$  の単位で求められ、 $M_S$  (gr) で割った方の式を用いれば、 $\text{cal/gr}$  の単位で求められる。いづれにせよ、上の (2.4) 式で求められた量は、試験燃料ピン内で発生した平均発熱量である。ここでは  $F_s$  および  $F_0$  を算出する段階において、 $\Sigma_f \phi$  の代りに  $\nu \Sigma_f \phi$  を用いたが、発熱量に寄与するのは殆んど熱中性子で；熱中性子の  $\nu$  はエネルギー依存しない定数なので、上記の置換による誤差は、0.2%程度である。熱中性子の全体に対する寄与については 3.2 節で述べる。

あらかじめ  $\text{cal/cc}$  で求められた発熱量を  $\text{cal/gr}$  に換算するには、 $\text{UO}_2$  の密度を  $\rho_s$  (gr/cc) とすると、次式によって求められる。

$$H_{SP} (\text{cal/gr}) = \frac{H_{SP} (\text{cal/cc})}{\rho_s (\text{gr/cc})} \quad (2.5)$$

### 3. 計算結果および結論

#### 3.1 試験燃料ピンの種類

ここで用いられたNSRRの標準体系は Table 2.2 に示す如く、反射体が約 40 cm、炉心が約 180 本の燃料棒装荷に相当して 19.1 cm 巾、flux trap としての実験孔内のポイドが約 5 cm 巾、試験燃料ピンが入っている水キャップセル (water capsule) のステンレススチール (SUS 304) の壁が約 1 cm 巾、キャップセル内の軽水の厚さが、約 5 cm で、中心に試験燃料ピンが存在する。実験孔内のポイドと軽水の厚さは、試験燃料に最大の発熱量を与えるよう定められるべき量で、キャップセル壁のステンレススチールの厚さは、試験燃料ピンの破壊ときの衝撃に対する強度上の要求から定められた。試験燃料ピンは、現在、まず考えられているのは、4つの太さの種類のピンで、いずれも、ジルカロイ-2 (Zry-2) 被覆である。 $\text{UO}_2$  の濃縮度については、濃縮度との関係について調べる為に、2.6%，5.2%，10.0%，20.0% の 4 つが選ばれた。試験燃料ピンの仕様は、Table 2.3 に示す。ここでは  $\text{UO}_2$  の密度は 10.89 gr/cc としている。ピンの長さはすべて、38.1 cm である。

#### 3.2 $\text{UO}_2$ ピン内の核分裂数

$\text{UO}_2$  内の核分裂は、その中性子束のエネルギーおよび空間分布に従って起るが、その空間分布について積分して、エネルギー・グループ毎の核分裂数を図示したのが Fig. 3.1 である。数値については、Table 3.1 および Table 3.2 に示しておいた。Table の中で、炉心 (core) で示されている値は、試験燃料ピンの濃縮度 (Table 3.1) およびピンの種類 (Table 3.2) に対応するものである。

これらの結果から、熱中性子による核分裂は全体の核分裂の 95% 以上を占めていることが

わかる。また、炉心の核分裂は  $\text{UO}_2$  ピンの濃縮度に依存しない（1%以内）ことも図から理解できる。このことは、炉心装荷燃料の総量に比較すると、ピン中の燃料は極めて少量であることから当然である。また、ピン中の核分裂数は、 $\text{UO}_2$  の濃縮度とは比例関係になく、それより低い率で漸増することも図から理解できる。尚、核分裂数として載せた Table 中の数値で、 $F_s$  および  $F_0$  は、 $\nu E_f$  より示してあるが、一番寄与の大きい低いエネルギーでは、 $\nu$  は定数であるので、いずれ  $\nu$  は落ちてしまう（式（2.4）参照）。また、体積積分の際の  $2\pi$  はすでに溶してある。

### 3.3 試験燃料キャプセル内の中性子束分布

ここでは試験燃料キャプセル内の中性子束分布（半径方向）について議論する。Fig.3.2は、2.6%濃縮のBWRピンが装荷された水キャプセルが実験孔に装填されたときの中性子束分布である。実験孔内にある軽水によって、 $\text{UO}_2$  ピンのある位置でかなり高い中性子束がとれる。この傾向は特に熱中性子束において顕著である。

Fig.3.3 から Fig.3.6 までは、BWR, J P 2, PWR, および FBR の 4 種類の  $\text{UO}_2$  ピンについて、濃縮度をパラメーターにして、軽水キャプセル内の熱中性子束分布（代表として第 9 エネルギー・グループ）を示した。ピン内の熱中性子の吸収によって、太いピンの方が、キャプセル内の中性子束の歪み（flux tilt）が大きく、また、濃縮度の大きい方が、やはり、歪みが大きいことがわかる。ここではボイドの巾を固定（5.27 cm）したので、ピンの太さによって軽水の巾は異なる。軽水の巾の発熱量に対する影響については、3.7 節で述べる。

### 3.4 試験燃料ピン内および炉心内の出力分布

試験燃料ピン内で、直接発熱量に関連するのは、出力分布で、出力分布は中性子束と核分裂面積の積から求められる。Fig.3.7 から Fig.3.10 までに、4 種類の燃料ピンに対する出力密度分布（半径方向）を示しておいた。いつのピンに対しても、炉心より高い値を有している。これが結局、NSRR で、実験孔内で中性子束をとれるように工夫すれば（すなわち、flux trap として実験孔内を設計すれば）、炉心を破壊せずに、実験孔内の試験燃料ピンが破壊できる理由のひとつなのである。このときの実験孔内の軽水は、 $\text{UO}_2$  内で最も出力の高い（中性子束の高い）熱中性子を作るのに重大な役割を果す。

Fig.3.7 から Fig.3.10 までの図からわかるように、試験燃料ピン内の出力分布は、 $\text{UO}_2$  の濃縮度の大きい方が高い値を有し、また、濃縮度の差による影響は、ピンの細い程大きい。これはピンが細い程、Fig.3.3～Fig.3.6 で見たように、ピン中での中性子束の歪みの濃縮度による増加が少ないからである。Fig.3.11 に BWR ピンと J P 2 ピン中の出力分布の比較を示しておいた。ピンの太さは Table 2.3 に示したように、J P 2 ピンの方が BWR ピンより細い。

### 3.5 $\text{UO}_2$ の濃縮度と発熱量との関係

我々の目的のひとつは、溶融させることのできる  $\text{UO}_2$  ピン中の濃縮度を知ることである。Table 3.3 には、cal/cc および cal/gr で示した発熱量の係数 ( $H_{SP}$ ) が載せてある。Fig.

3.12は、Table 3.3 およびTable 3.4を図示したもので cal/cc で示してある。BWR, J P 2 およびPWRの燃料ピンは、寸法が比較的近いので（それぞれ、半径が 0.62 cm, 0.533 cm, 0.466 cm.), 濃縮度と発熱量との曲線も似たような形を示しているが、FBRピンは、他のピンよりかなり細い（0.27 cm の半径）ので、そのカーブは、他のピンのカーブと異って、勾配が急である。

BWR, J P 2 およびPWRのピンは現存する発電炉の燃料である。したがって、Fig.3.12 の実線をより詳しく図示したものが Fig.3.13 である。曲線の黒点は、計算値を示す。Fig.3.14 は、任意の太さの試験燃料ピンの水キャップセルを考えたときの図である。BWR, J P 2, PWR およびFBRのピンについては矢印で示しておいた。

Fig.3.12 の点線は、バッククリングを変えてみたときの  $UO_2$  の発熱量である。ここでは、バッククリングを約4分の1にしたのであるが、発熱量への影響は高々、プラス4%である。炉心上下の構造変動などによる実在体系のバッククリングの変化は、これよりずっと小さいので、発熱量への影響は無視できると考えられる。Table 3.4 には、上記の点線における数値が示されている。

### 3.6 $UO_2$ ピン群定数モデルの発熱量への影響

今までの発熱量計算の元になる試験燃料ピンの群定数は、高速中性子および熱中性子両方に對して、軽水スペクトラムで平均したものが用いられてきた。<sup>10)</sup>このモデルでは、ピンに対する群定数にピン内の吸収による中性子束分布の歪みの影響、すなわち、自己遮蔽因子を考慮していない。このモデルによる発熱量に対する影響は、一般には、ピンが太くなる程、また、ウランの濃縮度が高くなる程、大きく効くと思われるが、ここでは、BWRピンとJ P 2ピンについてサーヴェイした結果を報告する。

3.2節でも述べたように、ピン内の発熱は、殆んど熱中性子によるものである。したがって、熱中性子に対してのみ、試験燃料ピンに対して空間依存性を考慮した輸送理論コード（THERMOS - MUG）で正確に解いて得られた群定数を適用してみる。

Table 3.5 に両方のモデルで計算した発熱量の比較が示されている。GATHERで示されている値は、軽水スペクトルで平均された群定数（GGCコードのGATHERルーチンで計算される）を用いて得られたもの、THERMOSで示されている値は、上に述べた如く、ピンによる自己遮蔽の効果を考慮した群定数を用いて得られたものである。両方のモデルの差は、いづれも4%以内にあるが、低濃縮のときは、THERMOSによる結果の方が若干大きい値を示し、高濃縮になると、THERMOSによる結果の方が小さい値を示す。勿論、THERMOSによる結果による方が正しいのであるが、この差はピンの群定数を求めるときのスペクトラム平均の方法による。GATHERルーチンの計算では、ピンの核断面積を軽水スペクトラムで平均する際に、拡散係数 D は、次式で示される如く軽水中の中性子流と中性子束のみで算出されてしまうので、軽水中と同じ流れを与えるように算出される；

$$\text{拡散係数} = \frac{1}{\text{軽水のバッククリング}} \times \frac{\text{中性子流}}{\text{中性子束}}$$

すなわち、拡散係数は  $UO_2$  の濃縮度には無関係な群定数である。また、 $UO_2$  の濃縮度が高くな

れば、それに比例して、 $\text{UO}_2$ 内の吸収が増加して、それが群定数に現われる。

一方、THERMOS 法によれば、 $\text{UO}_2$ の濃縮度が高くなれば、それに比例して、 $\text{UO}_2$ の吸収が増す一方、吸収によって熱中性子束の減少が起り、これが特にエネルギーの低い方で顕著となる。これらの相乗作用が群定数に現われるので、GATHER 法による値程、濃縮とともに実効断面積の増加はしない。

したがって、 $\text{UO}_2$ の発熱量計算では、上記の実効断面の差の影響が出てくる。

### 3.7 キャップセル内の軽水の最適の厚さ

水キャップセルの設計で最も重要なことは、試験燃料ピンそれぞれに対して、最大の発熱量を与えるよう、キャップセル内の軽水の厚さを定めることである。

Fig. 3.15 と Fig. 3.16 にピンの種類をパラメータにして、軽水の厚さの関数として  $\text{UO}_2$  の発熱量を示しておいた。ピンの太さが太い程軽水の最適の厚さは、いくらか小さいが、変動幅は、高々、0.5 cm 以内であるので、我々のとり上げた試験燃料ピンの範囲内では、ピンの太さによる変動はないと考えてよい。

Fig. 3.17 から Fig. 3.20 までには、それぞれのピンにおける、 $\text{UO}_2$  の濃縮度による軽水の最適の厚さへの影響を示しておいたが、いつのピンに対しても濃縮度の差による影響はないとしてよい。

結局、試験燃料ピンに最大の発熱を与える軽水の最適の厚さは 5.3 cm 程度と思われる。上記の図に用いられた数値は Table 3.6 から Table 3.9 までに載せてある。これらの Table 中で一番下の行の値は 1 cm のステンレススチールを軽水に置き換えたときの場合である。この置き換えは、いつのピンおよび濃縮度に対しても 9% 程度発熱量の増加をもたらす。これは、熱中性子の、ステンレススチールによる吸収が大きくなり、キャップセル内の中性子束に影響を及ぼしたことを意味し、Fig. 3.21 の図で理解できる。ステンレススチールの厚さによる発熱量に及ぼす影響については、3.8 節で述べる。

キャップセル内の軽水の厚さの変動に対しては、燃料ピン内発熱量に最大値が表されることの理由は、次のように考えられる。先にも述べたように、発熱量の殆どの部分は、ピン中の熱中性子束分布によって決まるが、その分布には、キャップセル内の軽水の存在が、大きく作用する。軽水は炉心からキャップセルへ流入する中性子に対して、減速材、反射体および吸収材としての機能を持っており、これら機能の競合条件がピン内の熱中性子束分布を左右する。すなわち、ある一定の軽水の厚さまでは減速材としての機能のためピン中の熱中性子は増加するが、それ以上の厚さになると、吸収材としての効果が、減速材としての効果を打ち消し始め、また反射材としての効果が、中性子の軽水透過を妨げて、そのため、ピン中の熱中性子は減少し始める。したがって、最大発熱量を与える軽水の最適の厚さが存在する。この最適の厚さがピンの種類に殆ど依存しないのは、ピン中の熱中性子分布はピン中の核分裂で発生した中性子より炉心から流入する中性子によって支配されるためである。

### 3.8 キャブセル壁の厚さの発熱量への影響

軽水キャブセルの壁 (SUS 304<sup>\*</sup>) の厚さは、試験燃料ピンで生ずる破壊エネルギーに対する耐圧の強度で定められる値であるが、発熱量計算の立場からは、キャブセル壁の厚さは許せる範囲内で薄い方が望ましい。ここでは、一番影響の大きいBWRピンに対してサーベイした結果を報告する。

Fig.3.22 に  $\text{UO}_2$  の濃縮度をパラメータにして、キャブセル壁の厚さと発熱量との関係を図示しておいたが、この図から、両者の関係は、キャブセル内の軽水の場合に対するときと異つて、直線関係で厚さと共に単調減少することがわかる。これはステンレススチールは、熱中性子に対しては、殆んど吸収物質であるからである。図で示されている通り、高濃縮の方が、キャブセル壁の厚さによる影響を受けやすいが、その勾配は低濃縮の方に比べて、1%以内の差があるので、同じ勾配とみてよい。いつれの濃縮度に対しても、ステンレススチールの厚さを半分 (1 cm から 0.5 cm) にすると発熱量は 5% 増することになる。Table 3.10 に、図に用いた数値を載せてある。

ステンレススチールの代りに更に強度の高いインコネルを用いたときの値が Table 3.11 に示してある。Fig.3.23 に図示してあるように、傾向はステンレススチールのときと同じであるが、中性子の吸収断面積がより大きい為に、 $\text{UO}_2$  ピンの発熱量としては、5% 程少ない。しかししながらインコネルは、ステンレススチールと比較して引張り強度 (tensile strength) が約 2.3 倍大きいので、ステンレススチールの 4 割程度の厚さにすることが可能である。したがって、インコネル 0.4 cm の厚さに対応する  $\text{UO}_2$  ピン (BWR 2.6% 濃縮で) の発熱量は、2090 cal/cc で、ステンレススチール 1 cm の厚さに対応する 1960 cal/cc の約 7% 増しとなる。

### 3.9 炉心および反射体の寸法の発熱量への影響

キャブセルは同じものを用いるとして、炉心の寸法 (半径方向) が変化すると、 $\text{UO}_2$  ピンの発熱量にどのように影響を及ぼすかについて述べる。

どの  $\text{UO}_2$  ピンをとりあげても傾向は同じ筈であると思われる所以、ここでは、2.6% 濃縮の BWR ピンをとりあげる。Fig.3.24 に示すように、炉心寸法の外側の半径が増すに従って、 $\text{UO}_2$  の発熱量は殆んど直線的に減少する。炉心半径 3.2 cm 附近で、半径 1 cm 当り 8% 減少する。Table 3.12 にはこれらの数値を示しておいた。炉心寸法を内側に増加させてみると (Table 3.12 の \*印)，これも同様に減少し、その値は 1 cm 当り 3% となり、減少率は少くなくなる。

以上のことから、炉心寸法を増加させると  $K_{eff}$  は増加するが、試験燃料ピンの発熱量は、全発生エネルギーを固定しているので減少する。半径 1 cmあたりの減少率は、内側半径の変化の方が外側半径より少なくなる。Fig.3.25 に発熱量に大きく寄与する熱中性子束分布を比較しておいた。

最後に、反射体 (軽水) の厚さと  $\text{UO}_2$  ピンの発熱量との関係を調べてみると (Table 3.13)，炉心のときと同様に、反射体の厚さが増加すると、 $K_{eff}$  は増加し、発熱量は 0.5% / 10 cm (反射体の厚さ 40 cm 附近) と減少する。

\*) SUS 304 を構成する核種については付録 A の Table A.4 に示してある。

### 3.10 UO<sub>2</sub> ピンの反応度効果

ここでは、UO<sub>2</sub>ピンの反応度の絶対値を議論するのではなく、UO<sub>2</sub>ピンキャップセルの中で何か一番反応度に寄与するかをサーヴェイする。

Fig.3.26 にUO<sub>2</sub>ピンの種類をパラメータにして、UO<sub>2</sub>の濃縮度とN S R R の炉心の反応度との関係を図示した。BWR, JP2 および PWR ピンはお互に太さも差程違わない（それぞれ、半径が 0.62 cm, 0.533 cm, 0.466 cm）ので、太さによる反応度の差は、0.1 %以内であるが、FBR は半径 0.27 cm と細いので、他のピンとの差は、0.2 %程度ある。濃縮度が増す（2.6 %から 20.0 %へ）と BWR ピンで 3.5 %, JP2 ピンで 3.0 %, PWR ピンで 2.9 % 反応度が増加するが、FBR ピンでは 1.0 %と増加は小さく、直線的を形であるのが特長である。GATHER モデルと THERMOS モデルとの差はないとして差し支えない（Table 3.5 参照）。

キャップセル内の軽水の厚さが増加すると軽水の中性子の吸収によって反応度が減少する（Table 3.6 から Table 3.9 まで参照）。最も影響を受ける BWR ピンについて Fig.3.27 に図示する。最大発熱量に対する軽水の厚さをわち、5 cm から 5.5 cm までの間の反応度の減少は約 0.2 %で、濃縮度が増加しても、減少率は変わらない。

キャップセル壁の厚さを減らすと軽水のときと同様に中性子の吸収の減少によって反応度は増加するが、直線的であり、増加率は 0.4 % / 0.5 cm である。UO<sub>2</sub>の濃縮度による増加率の差は 0.2 %以内で小さい（Fig.3.28）。

## 4. あとがき

ここでは一次元拡散コードによる検討であるが、キャップセル設計の際のおおかたの問題点の把握はできたと思われる。すなわち、

- (1) 炉心の全発生エネルギー一定の条件のもとでは、試験燃料ピンの細い程、UO<sub>2</sub>の濃縮の高い程、ピン内の単位体積あたりの発熱量は大きい。UO<sub>2</sub>の溶融点 2880°C に相当する UO<sub>2</sub>内の発熱量を 2540 cal/cc (密度 10.89 gr/cc 相当) と想えると、2.6 % 濃縮のピンならば、半径が 0.43 cm 以内のもの、半径 0.62 cm の BWR ピンならば、濃縮度 4.2 %以上のものであれば、UO<sub>2</sub>の溶融が可能である。これらの値は、ピン内の平均の発熱量であるので、部分的には、より少い発熱量で溶融可能である。
- (2) UO<sub>2</sub>内の発熱は、95 %以上が熱中性子に依り、この割合の濃縮度による差は 2 %程度で、ピンの太さによる差は 1 %程度である。熱群が定数による違い、GATHER による方法と THERMOS による方法とでは、発熱量に差が認められる。したがって、THERMOS による方法を使う方がベターである。
- (3) 発熱量は、キャップセル内の軽水が 5.2 cm ~ 5.5 cm のときに最大を示す。一方キャップセル壁は薄い程発熱量は大きい。ステンレススチールの代りにインコネルを用いることができれば、強度の関係でキャップセル壁が薄くできるので、発熱量が大きくとれる。
- (4) 原子炉の炉心の寸法が大きくなると、炉心全発生エネルギーを一定としている条件のため、ピン内の発熱量が減少する。

### 3.10 UO<sub>2</sub> ピンの反応度効果

ここでは、UO<sub>2</sub>ピンの反応度の絶対値を議論するのではなく、UO<sub>2</sub>ピンキャップセルの中で何か一番反応度に寄与するかをサーヴェイする。

Fig.3.26 にてUO<sub>2</sub>ピンの種類をパラメータにして、UO<sub>2</sub>の濃縮度とNSRRの炉心の反応度との関係を図示した。BWR、JP2およびPWRピンはお互い太さも差程違わない（それぞれ、半径が0.62 cm, 0.533 cm, 0.466 cm）ので、太さによる反応度の差は、0.1%以内であるが、FBRは半径0.27 cmと細いので、他のピンとの差は、0.2%程度ある。濃縮度が増す（2.6%から20.0%へ）とBWRピンで3.5%，JP2ピンで3.0%，PWRピンで2.9%反応度が増加するが、FBRピンでは1.0%と増加は小さく、直線的な形であるのが特長である。GATHERモデルとTHERMOSモデルとの差はないとして差し支えない（Table 3.5参照）。

キャップセル内の軽水の厚さが増加すると軽水の中性子の吸収によって反応度が減少する（Table 3.6からTable 3.9まで参照）。最も影響を受けるBWRピンについてFig.3.27にて図示する。最大発熱量に対する軽水の厚さすなわち、5 cmから5.5 cmまでの間の反応度の減少は約0.2%で、濃縮度が増加しても、減少率は変わらない。

キャップセル壁の厚さを減らすと軽水のときと同様に中性子の吸収の減少によって反応度は増加するが、直線的であり、増加率は0.4%/0.5 cmである。UO<sub>2</sub>の濃縮度による増加率の差は0.2%以内で小さい（Fig.3.28）。

## 4. あとがき

ここでは一次元拡散コードによる検討であるが、キャップセル設計の際のおおかたの問題点の把握はできたと思われる。すなわち、

- (1) 炉心の全発生エネルギー一定の条件のもとでは、試験燃料ピンの細い程、UO<sub>2</sub>の濃縮の高い程、ピン内の単位体積あたりの発熱量は大きい。UO<sub>2</sub>の溶融点2880°Cに相当するUO<sub>2</sub>内の発熱量を2540 cal/cc（密度10.89 gr/cc相当）と考えると、2.6%濃縮のピンならば、半径が0.43 cm以内のもの、半径0.62 cmのBWRピンならば、濃縮度4.2%以上のものであれば、UO<sub>2</sub>の溶融が可能である。これらの値は、ピン内の平均の発熱量であるので、部分的には、より少い発熱量で溶融可能である。
- (2) UO<sub>2</sub>内の発熱は、95%以上が熱中性子に依り、この割合の濃縮度による差は2%程度で、ピンの太さによる差は1%程度である。熱群炉定数による違いは、GATHERによる方法とTHERMOSによる方法とでは、発熱量に差が認められる。したがって、THERMOSによる方法を使う方がベターである。
- (3) 発熱量は、キャップセル内の軽水が5.2 cm～5.5 cmのときに最大を示す。一方キャップセル壁は薄い程発熱量は大きい。ステンレススチールの代りにインコネルを用いることができれば、強度の關係でキャップセル壁が薄くできるので、発熱量が大きくとれる。
- (4) 原子炉の炉心の寸法が大きくなると、炉心全発生エネルギーを一定としている条件のため、ピン内の発熱量が減少する。

以上の事から、物理的に見ても、原子炉の炉心自身の設計と実験孔内の設計とでは、思想が異なることが認識できる。2次元空間を考慮に入れたり、また、輸送理論を適用して、更に精度の高い値を求めるることは、次の機会にゆづるが、実験孔内にかなりのボイドがあるので、輸送理論の適用が重要と思われる。

## 謝 詞

GGC-4コードの使用に当っては、UNIVACから FACOM への変換をして下さった筒井恒夫氏（原子炉数値解析研究室）に大変お世話になりました。ここに謝意を表わします。

## 5. 文 献

- 1) 原子炉安全性研究炉委員会“反応度事故研究の概要と安全性研究炉（NSRR）計画” JAERI-M 4031 ('70), あるいは、石川迪夫“原研のNSRR計画－特集－原子炉の安全に関する諸問題”日本原子力学会誌 14, 9, 496～498 ('72)。
- 2) 伊勢、中原“NSRRの熱中性子スペクトルと温度係数計算上の問題点（NSRRの炉物理と核設計・1）”JAERI-M (to be published)。
- 3) 伊勢、中原“NSRRの反応度係数と実験物反応度価値（NSRRの炉物理と核設計・2）”JAERI-M (to be published)。
- 4) 伊勢、中原“NSRRの制御棒効果の解析（NSRRの炉物理と核設計・3）”JAERI-M 5391 ('73)。
- 5) Adir J. and Lathrop K.D.“Theory of methods used in GGC-4 multigroup cross section code” GA-9021 ('68)。このコードは現在 FACOM 230/60 と CDC 6600 で使用可能である。4冊の厚いマニュアルが用意されているが、使用経験に基づいて1冊のマニュアルにしたJAERI-memoが刊行される予定である。
- 6) 伊勢、堀上“熱群炉定数作成コード：THERMOS-MUG”JAERI-M 4394 ('71)。
- 7) 伊勢、久保“汎用一次元拡散コードGURNET”JAERI-1215 ('71)。
- 8) Nakahara Y., Tsutsui T., Iijima S., and Tokizawa M.“How to use UNCLE code” JAERI-memo 2354 ('66)。
- 9) 角谷浩亨、大竹誠，“散乱核計算コード(FLANGE)のコードマニュアル”JAERI-memo 3416 ('69)。
- 10) Rothenstein M. and West G.B.“Using TRIGA ACPR to melt UO<sub>2</sub> samples” GAGD-9206 ('69)。
- 11) Wilcox T.P. and Perkins S.T.“AGN-GAM, An IBM 7090 code to calculate spectra and multigroup constants” AGN-TM-407 ('65)。
- 12) 森島淳好、栗山実、原山泰雄“第1集 燃料設計に必要な物性値及び計算図表”JAERI-M 4881 ('72)。

以上の事から、物理的に見ても、原子炉の炉心自身の設計と実験孔内の設計とでは、思想が異なることが認識できる。2次元空間を考慮に入れたり、また、輸送理論を適用して、更に精度の高い値を求めるることは、次の機会にゆづるが、実験孔内にかなりのボイドがあるので、輸送理論の適用が重要と思われる。

## 謝 詞

GGC-4コードの使用に当っては、UNIVACから FACOM への変換をして下さった筒井恒夫氏（原子炉数値解析研究室）に大変お世話になりました。ここに謝意を表わします。

## 5. 文 献

- 1) 原子炉安全性研究炉委員会“反応度事故研究の概要と安全性研究炉（NSRR）計画” JAERI-M 4031 ('70), あるいは、石川迪夫“原研のNSRR計画－特集・原子炉の安全に関する諸問題”日本原子力学会誌 14, 9, 496～498 ('72)。
- 2) 伊勢, 中原“NSRRの熱中性子スペクトルと温度係数計算上の問題点（NSRRの炉物理と核設計・1）”JAERI-M (to be published)。
- 3) 伊勢, 中原“NSRRの反応度係数と実験物反応度価値（NSRRの炉物理と核設計・2）” JAERI-M (to be published)。
- 4) 伊勢, 中原“NSRRの制御棒効果の解析（NSRRの炉物理と核設計・3）” JAERI-M 5391 ('73)。
- 5) Adir J. and Lathrop K.D.“Theory of methods used in GGC-4 multigroup cross section code” GA-9021 ('68)。このコードは現在 FACOM 230/60 と CDC 6600 で使用可能である。4冊の厚いマニュアルが用意されているが、使用経験に基づいて1冊のマニュアルにしたJAERI-memoが刊行される予定である。
- 6) 伊勢, 堀上“熱群炉定数作成コード：THERMOS-MUG” JAERI-M 4394 ('71)。
- 7) 伊勢, 久保“汎用一次元拡散コードGURNET” JAERI-1215 ('71)。
- 8) Nakahara Y., Tsutsui T., Iijima S., and Tokizawa M. “How to use UNCLE code” JAERI-memo 2354 ('66)。
- 9) 角谷浩亨, 大竹誠, “散乱核計算コード(FLANGE)のコードマニュアル” JAERI-memo 3416 ('69)。
- 10) Rothenstein M. and West G.B. “Using TRIGA ACPR to melt UO<sub>2</sub> samples” GADD-9206 ('69)。
- 11) Wilcox T.P. and Perkins S.T. “AGN-GAM, An IBM 7090 code to calculate spectra and multigroup constants” AGN-TM-407 ('65)。
- 12) 森島淳好, 栗山実, 原山泰雄“第1集 燃料設計に必要な物性値及び計算図表” JAERI-M 4881 ('72)。

以上の事から、物理的に見ても、原子炉の炉心自身の設計と実験孔内の設計とでは、思想が異なることが認識できる。2次元空間を考慮に入れたり、また、輸送理論を適用して、更に精度の高い値を求めるることは、次の機会にゆづるが、実験孔内にかなりのボイドがあるので、輸送理論の適用が重要と思われる。

## 謝　　辞

GOC-4コードの使用に当っては、UNIVACから FACOM への変換をして下さった筒井恒夫氏（原子炉数值解析研究室）に大変お世話になりました。ここに謝意を表わします。

## 5. 文　　献

- 1) 原子炉安全性研究炉委員会“反応度事故研究の概要と安全性研究炉（NSRR）計画” JAERI-M 4031 ('70), あるいは、石川迪夫“原研のNSRR計画－特集－原子炉の安全に関する諸問題”日本原子力学会誌 14, 9, 496～498 ('72)。
- 2) 伊勢, 中原“NSRRの熱中性子スペクトルと温度係数計算上の問題点（NSRRの炉物理と核設計・1）”JAERI-M (to be published)。
- 3) 伊勢, 中原“NSRRの反応度係数と実験物反応度価値（NSRRの炉物理と核設計・2）”JAERI-M (to be published)。
- 4) 伊勢, 中原“NSRRの制御棒効果の解析（NSRRの炉物理と核設計・3）”JAERI-M 5391 ('73)。
- 5) Adir J. and Lathrop K.D.“Theory of methods used in GOC-4 multigroup cross section code” GA-9021 ('68)。このコードは現在 FACOM 230/60 と CDC 6600 で使用可能である。4冊の厚いマニュアルが用意されているが、使用経験に基づいて1冊のマニュアルにしたJAERI-memoが刊行される予定である。
- 6) 伊勢, 堀上“熱群炉定数作成コード：THERMOS-MUG”JAERI-M 4394 ('71)。
- 7) 伊勢, 久保“汎用一次元拡散コードGURNET”JAERI-1215 ('71)。
- 8) Nakahara Y., Tsutsui T., Iijima S., and Tokizawa M.“How to use UNCLE code” JAERI-memo 2354 ('66)。
- 9) 角谷浩亨, 大竹誠, “散乱核計算コード(FLANGE)のコードマニュアル”JAERI-memo 3416 ('69)。
- 10) Rothenstein M. and West G.B.“Using TRIGA ACPR to melt UO<sub>2</sub> samples” GADD-9206 ('69)。
- 11) Wilcox T.P. and Perkins S.T.“AGN-GAM, An IBM 7090 code to calculate spectra and multigroup constants” AGN-TM-407 ('65)。
- 12) 深島淳好, 栗山実, 原山泰雄“第1集 燃料設計に必要な物性値及び計算図表”JAERI-M 4881 ('72)。

Table 2.1 Broad energy group structure

Energy regime	Group number	Energy interval (eV)
Fast group for GAM	1	$15 \times 10^6 - 3 \times 10^6$
	2	$3 \times 10^6 - 1.5 \times 10^6$
	3	$1.5 \times 10^6 - 0.6 \times 10^6$
	4	$0.6 \times 10^6 - 9.12 \times 10^3$
	5	$9.12 \times 10^3 - 1.125$
Thermal group for GATHER or THERMOS	6	1.125 - 0.42
	7	0.42 - 0.14
	8	0.14 - 0.05
	9	0.05 - 0.0

Table 2.2 Standard radial mesh intervals (cm) in the diffusion calculations

	UO <sub>2</sub> * pin	Zry-2	Water	SUS	Void	SUS	Water	Core	Reflector
Region width	0.62	0.095	5.285	1.0	5.270	0.640	0.410	19.10	3.846
Mesh width	0.124	0.0475	0.5285	0.2	0.527	0.32	0.205	0.6367	1.9230
Number of meshes	5	2	10	5	10	2	2	3.0	20

(\*) For BWR pin

Table 2.3 Specifications of test pins

Type of test pins	Enrichment(%) : 2.6, 5.2, 10.0, 20.0			
	BWR	J P 2	PWR	FBR
Radius of UO <sub>2</sub> meat (cm)	0.62	0.533	0.466	0.27
Thickness of Zry-2 cladd. (cm)	0.085	0.0785	0.070	0.0325
Length of test pin (cm)	3.81	3.81	3.81	3.81

Table 3.1 Relative number of fissions in a BWR pin and the core as a function of  $\text{UO}_2$  enrichment

	Enrichment in $\text{UO}_2$	Energy group								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
BWR	2.6	$2.217 \times 10^6$	$4.465 \times 10^6$	$3.574 \times 10^{-7}$	$6.791 \times 10^{-7}$	$7.543 \times 10^{-6}$	$4.159 \times 10^{-6}$	$2.125 \times 10^{-5}$	$1.884 \times 10^{-4}$	$3.494 \times 10^{-4}$
	5.2	$2.6705 \times 10^6$	$5.205 \times 10^6$	$6.646 \times 10^{-7}$	$14.71 \times 10^{-7}$	$15.56 \times 10^{-6}$	$8.398 \times 10^{-6}$	$3.836 \times 10^{-5}$	$3.006 \times 10^{-4}$	$4.869 \times 10^{-4}$
	10.0	$3.208 \times 10^6$	$6.189 \times 10^{-6}$	$12.80 \times 10^{-7}$	$30.43 \times 10^{-7}$	$30.81 \times 10^{-6}$	$16.07 \times 10^{-6}$	$6.383 \times 10^{-5}$	$4.293 \times 10^{-4}$	$5.947 \times 10^{-4}$
	20.0	$3.971 \times 10^6$	$7.796 \times 10^6$	$26.62 \times 10^{-7}$	$65.21 \times 10^{-7}$	$63.25 \times 10^{-6}$	$30.98 \times 10^{-6}$	$10.19 \times 10^{-5}$	$5.707 \times 10^{-4}$	$6.692 \times 10^{-4}$
	2.6	$3.852 \times 10^4$	$1.044 \times 10^3$	$2.909 \times 10^{-4}$	$8.337 \times 10^{-4}$	$1.098 \times 10^{-2}$	$3.587 \times 10^{-3}$	$1.433 \times 10^{-2}$	$6.002 \times 10^{-2}$	$6.763 \times 10^{-2}$
	5.2	$3.849 \times 10^4$	$1.043 \times 10^3$	$2.905 \times 10^{-4}$	$8.329 \times 10^{-4}$	$1.097 \times 10^{-2}$	$3.584 \times 10^{-3}$	$1.432 \times 10^{-2}$	$5.996 \times 10^{-2}$	$6.756 \times 10^{-2}$
Core*	1.0.0	$3.847 \times 10^4$	$1.041 \times 10^3$	$2.902 \times 10^{-4}$	$8.322 \times 10^{-4}$	$1.097 \times 10^{-2}$	$3.582 \times 10^{-3}$	$1.431 \times 10^{-2}$	$5.991 \times 10^{-2}$	$6.750 \times 10^{-2}$
	2.0.0	$3.845 \times 10^4$	$1.040 \times 10^3$	$2.900 \times 10^{-4}$	$8.316 \times 10^{-4}$	$1.096 \times 10^{-2}$	$3.580 \times 10^{-3}$	$1.430 \times 10^{-2}$	$5.987 \times 10^{-2}$	$6.746 \times 10^{-2}$

\* The enrichment here shows that of  $\text{UO}_2$  pins.

Table 3.2 Relative number of fissions in the 2.6% enriched pin and the core as a function of test pin types

Enrichment	Types of test pin	Energy group								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
2.6%	BWR	$2.217 \times 10^{-6}$	$4.465 \times 10^{-6}$	$3.574 \times 10^{-7}$	$6.791 \times 10^{-7}$	$7.543 \times 10^{-6}$	$4.159 \times 10^{-6}$	$2.125 \times 10^{-5}$	$1.884 \times 10^{-4}$	$3.494 \times 10^{-4}$
	J P 2	$1.543 \times 10^{-6}$	$3.164 \times 10^{-6}$	$2.486 \times 10^{-7}$	$4.830 \times 10^{-7}$	$5.828 \times 10^{-6}$	$3.119 \times 10^{-6}$	$1.666 \times 10^{-5}$	$1.547 \times 10^{-4}$	$3.853 \times 10^{-4}$
	PWR	$1.113 \times 10^{-6}$	$2.326 \times 10^{-6}$	$1.798 \times 10^{-7}$	$3.572 \times 10^{-7}$	$4.603 \times 10^{-6}$	$2.410 \times 10^{-6}$	$1.335 \times 10^{-5}$	$1.286 \times 10^{-4}$	$2.599 \times 10^{-4}$
	FBR	$0.292 \times 10^{-6}$	$0.667 \times 10^{-6}$	$0.481 \times 10^{-7}$	$1.065 \times 10^{-7}$	$1.678 \times 10^{-6}$	$0.829 \times 10^{-6}$	$0.515 \times 10^{-5}$	$0.557 \times 10^{-4}$	$1.265 \times 10^{-4}$
	BWR	$3.852 \times 10^{-4}$	$1.044 \times 10^{-3}$	$2.909 \times 10^{-4}$	$8.337 \times 10^{-4}$	$1.098 \times 10^{-2}$	$3.587 \times 10^{-3}$	$1.433 \times 10^{-2}$	$6.002 \times 10^{-2}$	$6.763 \times 10^{-2}$
	J P 2	$3.853 \times 10^{-4}$	$1.044 \times 10^{-3}$	$2.910 \times 10^{-4}$	$8.340 \times 10^{-4}$	$1.099 \times 10^{-2}$	$3.588 \times 10^{-3}$	$1.434 \times 10^{-2}$	$6.004 \times 10^{-2}$	$6.765 \times 10^{-2}$
Core	PWR	$3.854 \times 10^{-4}$	$1.045 \times 10^{-3}$	$2.911 \times 10^{-4}$	$8.342 \times 10^{-4}$	$1.099 \times 10^{-2}$	$3.588 \times 10^{-3}$	$1.434 \times 10^{-2}$	$6.005 \times 10^{-2}$	$6.767 \times 10^{-2}$
	FBR	$3.856 \times 10^{-4}$	$1.046 \times 10^{-3}$	$2.914 \times 10^{-4}$	$8.349 \times 10^{-4}$	$1.099 \times 10^{-2}$	$3.591 \times 10^{-3}$	$1.435 \times 10^{-2}$	$6.011 \times 10^{-2}$	$6.773 \times 10^{-2}$

Table 3.3 Heat deposits in UO<sub>2</sub> for the buckling with a half height of 19.05 cm  
( cal/cc and cal/gr )

	Enrichment of UO <sub>2</sub> (%)	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> ( 10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	Heat deposit	
					H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)	H <sub>SP</sub> (10 <sup>2</sup> cal/gr)
BWR	2.6	1.0092	0.57840	0.15910	1.888	1.734
	5.2	1.0103	0.85986	0.15895	2.809	2.579
	10.0	1.0115	1.1485	0.15882	3.755	3.448
	20.0	1.0127	1.4570	0.15872	4.766	4.376
J P 2	2.6	1.0088	0.48644	0.15915	2.147	1.972
	5.2	1.0098	0.75018	0.15900	3.315	3.044
	10.0	1.0108	1.0338	0.15886	4.572	4.198
	20.0	1.0119	1.3425	0.15874	5.942	5.456
PWR	2.6	1.0084	0.41283	0.15919	2.383	2.188
	5.2	1.0093	0.66007	0.15905	3.814	3.502
	10.0	1.0102	0.94073	0.15890	5.442	4.997
	20.0	1.0113	1.2570	0.15877	7.276	6.681
PBR	2.6	1.0073	0.19093	0.15933	3.281	3.013
	5.2	1.0075	0.35849	0.15922	6.164	5.660
	10.0	1.0078	0.62215	0.15906	10.709	9.834
	20.0	1.0083	1.0436	0.15883	17.989	16.519

Table 3.4 Heat deposits in UO<sub>2</sub> for the buckling with a half height of 38.1 cm (cal/cc)

Fuel	Enrichment of UO <sub>2</sub> (%)	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)
BWR	2.6	1.0 9 4 8	0. 6 0 2 4 3	0.1 5 9 0 9	1. 9 6 6
	5.2	1.0 9 6 1	0. 8 9 3 8 7	0.1 5 8 9 3	2. 9 2 0
	1 0 . 0	1.0 9 7 4	1. 1 9 1 5	0.1 5 8 8 0	3. 8 9 5
	2 0 . 0	1.0 9 8 8	1. 5 0 8 1	0.1 5 8 7 0	4. 9 3 4
F P 2	2.6	1.0 9 4 3	0. 5 0 6 8 6	0.1 5 9 1 4	2. 2 3 8
	5.2	1.0 9 5 4	0. 7 8 0 3 8	0.1 5 8 9 9	3. 4 4 8
	1 0 . 0	1.0 9 6 6	1. 0 7 3 4	0.1 5 8 8 5	4. 7 4 7
	2 0 . 0	1.0 9 7 9	1. 3 9 1 1	0.1 5 8 7 3	6. 1 5 7
PWR	2.6	1.0 9 3 9	0. 4 3 0 4 9	0.1 5 9 1 9	2. 4 8 5
	5.2	1.0 9 4 9	0. 6 8 7 3 4	0.1 5 9 0 4	4. 2 0 0
	1 0 . 0	1.0 9 6 0	0. 9 7 8 1 4	0.1 5 8 8 9	5. 6 5 8
	2 0 . 0	1.0 9 7 2	1. 3 0 4 1	0.1 5 8 7 5	7. 5 5 0
FBR	2.6	1.0 9 2 6	0. 1 9 9 4 3	0.1 5 9 3 3	3. 4 2 7
	5.2	1.0 9 2 8	0. 3 7 4 2 7	0.1 5 9 2 2	4. 4 3 6
	1 0 . 0	1.0 9 3 1	0. 6 4 9 2 2	0.1 5 9 0 5	1 1. 1 7 5
	2 0 . 0	1.0 9 3 7	1. 0 8 8 1	0.1 5 8 8 1	1 8. 7 5 8

Table 3.5 Comparison of heat deposits calculated with GATHER and THE RMOS data

	Enrichment %	$K_{eff}$	$F_S (10^{-3})$	$F_C$	$H_{SP} (10^3 \text{ cal/cc})$	Difference %
2.6	GATHER	1.0092	0.5784	0.15910	1.888	3.8
	THE RMOS	1.0093	0.60019	0.15907	1.959	
5.2	GATHER	1.0103	0.85986	0.15895	2.809	3.0
	THE RMOS	1.0104	0.88542	0.15890	2.893	
10.0	GATHER	1.0115	1.1485	0.15882	3.755	0.7
	THE RMOS	1.0115	1.1563	0.15879	3.781	
20.0	GATHER	1.0127	1.4570	0.15872	4.766	-3.0
	THE RMOS	1.0125	1.4141	0.15877	4.624	
2.6	GATHER	1.0088	0.48644	0.15915	2.147	3.3
	THE RMOS	1.0089	0.50265	0.15913	2.219	
5.2	GATHER	1.0098	0.75018	0.15900	3.315	2.7
	THE RMOS	1.0098	0.77027	0.15897	3.404	
10.0	GATHER	1.0108	1.0338	0.15886	4.572	0.6
	THE RMOS	1.0108	1.0395	0.15884	4.598	
20.0	GATHER	1.0119	1.3425	0.15874	5.942	-3.3
	THE RMOS	1.0118	1.2990	0.15879	5.747	

Table 3.6 Heat deposits in a BWR pin as a function of water thickness ( cal/cc )

Thickness ( cm )	2.6 % E.U.				20.0 % E.U.			
	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)
1.0	1.0419	0.19022	0.15930	0.6170	1.0442	0.5663	0.15911	1.849
3.0	1.0294	0.44170	0.15916	1.441	1.0330	1.1157	0.15885	3.647
5.0	1.0117	0.57287	0.15910	1.870	1.0153	1.4360	0.15872	4.697
7.0	0.99484	0.52141	0.15914	1.701	0.99719	1.3030	0.15881	4.260
9.0	0.98123	0.41026	0.15922	1.338	0.98247	1.0367	0.15895	3.386
5.285	1.0092	0.5784	0.15910	1.888	1.0127	1.4570	0.15872	4.766
6.285*	1.0113	0.6407	0.15910	2.091	1.0150	1.6022	0.15869	5.242

\* 1 cm stainless steel replaced with water.

Table 3.7 Heat deposits in a JP2 pin as a function of water thickness

Thickness (cm)	2.6% F.U.				2.00% F.U.			
	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)
1.0	1.0424	0.15169	0.15932	0.6689	1.0443	0.47844	0.15915	2.112
3.0	1.0299	0.36410	0.15920	1.607	1.0333	0.98892	0.15890	4.372
5.0	1.0122	0.47912	0.15915	2.115	1.0155	1.3079	0.15876	5.788
7.0	0.99528	0.43760	0.15919	1.931	0.99748	1.1923	0.15884	5.273
9.0	0.98165	0.34602	0.15925	1.526	0.98282	0.96053	0.15897	4.245
5.285	1.0088	0.48644	0.15915	2.147	1.0119	1.3425	0.15874	5.942
6.285*	1.0108	0.53668	0.15916	2.369	1.0142	1.4723	0.15872	6.517

\* 1 cm stainless steel replaced with water.

Table 3.8 Heat deposits in a PWR pin as a function of water thickness

Thickness (cm)	2.6 % E.U.			2.00 % E.U.				
	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)
1.0	1.0428	0.12320	0.15934	0.7106	1.0445	0.41079	0.15918	2.372
3.0	1.0303	0.30386	0.15924	1.754	1.0334	0.88958	0.15894	5.144
5.0	1.0125	0.40474	0.15919	2.337	1.0155	1.2085	0.15879	6.995
7.0	0.99566	0.37090	0.15923	2.141	0.99770	1.1066	0.15886	6.402
9.0	0.98198	0.29432	0.15928	1.698	0.98306	0.90269	0.15898	5.219
5.464	1.0084	0.41283	0.15919	2.383	1.0113	1.2570	0.15877	7.276
6.464*	1.0104	0.45441	0.15920	2.623	1.0135	1.3768	0.15874	7.971

\* 1 cm stainless steel replaced with water.

Table 3.9 Heat deposits in a FBR pin as a function of water thickness

Thickness (cm)	2.6 % E.U.				20.0 % E.U.			
	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)
1.0	1.0439	0.049106	0.15938	0.8435	1.0448	0.21280	0.15928	3.658
3.0	1.0312	0.13249	0.15934	2.276	1.0330	0.57286	0.15908	9.859
5.0	1.0133	0.18389	0.15933	3.160	1.0147	0.90233	0.15890	15.547
7.0	0.99640	0.16993	0.15935	2.920	0.99741	0.83522	0.15896	14.385
9.0	0.98279	0.13666	0.15938	2.347	0.98318	0.74165	0.15902	12.769
5.675	1.0073	0.19093	0.15933	3.281	1.0083	1.0436	0.15883	17.989
6.675*	1.0092	0.20898	0.15935	3.590	1.0102	1.1405	0.15881	19.661

\* 1 cm stainless steel replaced with water.

Table 3.10 Heat deposits in a BWR pin as a function of SUS thickness  
in the flux trap

Thickness (cm)	2.6 % F.U.			5.2 % F.U.				
	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)
1.0	1.0093	0.60019	0.15907	1.959	1.0104	0.88542	0.15890	2.893
0.8	1.0107	0.61349	0.15906	2.003	1.0119	0.90460	0.15890	2.956
0.5	1.0136	0.63601	0.15906	2.076	1.0149	0.93708	0.15888	3.062
0.3	1.0160	0.65163	0.15905	2.127	1.0173	0.95956	0.15888	3.136
0.1	1.0185	0.66629	0.15905	2.175	1.0119	0.98058	0.15887	3.205
Thickness (cm)								
1.00 % F.U.								
Thickness (cm)	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)
	1.0115	1.1563	0.15879	3.781	1.0125	1.4141	0.15877	4.624
0.8	1.0130	1.1808	0.15878	3.861	1.0140	1.4435	0.15876	4.721
0.5	1.0161	1.2223	0.15876	3.997	1.0171	1.4935	0.15874	4.885
0.3	1.0185	1.2511	0.15875	4.092	1.0197	1.5280	0.15873	4.998
0.1	1.0212	1.2779	0.15874	4.180	1.0224	1.5602	0.15872	5.104

(THERMOS data)

Table 3.11 Heat deposits in a BWR pin as a function of  
Inconel-X thickness

Thickness (cm)	2.6% enriched			
	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)
1.0	1.0026	0.57213	0.15908	1.867
0.8	1.0038	0.58601	0.15907	1.913
0.5	1.0062	0.60817	0.15906	1.985
0.3	1.0083	0.62284	0.15906	2.033
0.1	1.0107	0.63508	0.15905	2.073

(THERMOS data)

Table 3.12 Heat deposits in a BWR pin as a function of  
the core size

Outer radius (cm)	2.6% enriched			
	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)
2.9.00	0.95317	0.79027	0.15892	2.582
2.9.50	0.96247	0.75718	0.15895	2.473
2.9.94	0.97032	0.72977	0.15897	2.383
3.0.00	0.97137	0.72616	0.15897	2.372
3.0.50	0.97987	0.69703	0.15900	2.276
3.1.00	0.98801	0.66965	0.15902	2.186
3.1.353	0.99350	0.65144	0.15903	2.127
3.1.50	0.99580	0.64658	0.15904	2.111
3.2.00	1.0033	0.61955	0.15905	2.022
3.2.42	1.0093	0.66019	0.15907	1.959
	1.0202	0.57726	0.15909	1.884 (*)
3.2.50	1.0104	0.59660	0.15907	1.947
3.3.00	1.0173	0.57491	0.15909	1.877

(THERMOS data)

(\*) The core size was increased inward by 1 cm.

Table 3.13 Heat deposits in a 2.6% enriched BWR pin  
as a function of the reflector thickness

Thickness (cm)	2.6 % UO <sub>2</sub>				
	K <sub>eff</sub>	F <sub>S</sub> (10 <sup>-3</sup> )	F <sub>C</sub>	H <sub>SP</sub> (10 <sup>3</sup> cal/cc)	Differ (%)
1 0 . 0	1 . 0 0 7 3	0 . 6 0 7 0 1	0 . 1 5 9 0 2	1 . 9 8 1	2 . 3
2 0 . 0	1 . 0 0 8 3	0 . 6 0 3 7 7	0 . 1 5 9 0 4	1 . 9 7 1	1 . 7
3 0 . 0	1 . 0 0 8 8	0 . 6 0 2 2 2	0 . 1 5 9 0 5	1 . 9 6 6	1 . 5
4 0 . 0	1 . 0 0 9 4	0 . 5 9 9 7 8	0 . 1 5 9 0 7	1 . 9 5 8	1 . 1
5 0 . 0	1 . 0 1 0 1	0 . 5 9 6 8 8	0 . 1 5 9 0 9	1 . 9 4 8	0 . 6
6 0 . 0	1 . 0 1 0 9	0 . 5 9 3 6 3	0 . 1 5 9 1 1	1 . 9 3 7	0 . 0

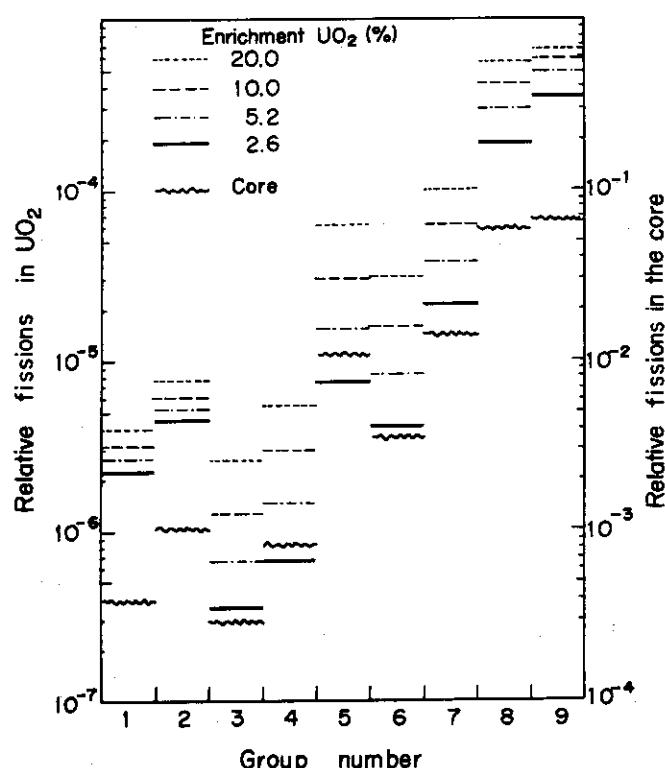


Fig. 3.1 Relative number of fissions in a BWR pin  
and in the core as a function of energy-groups

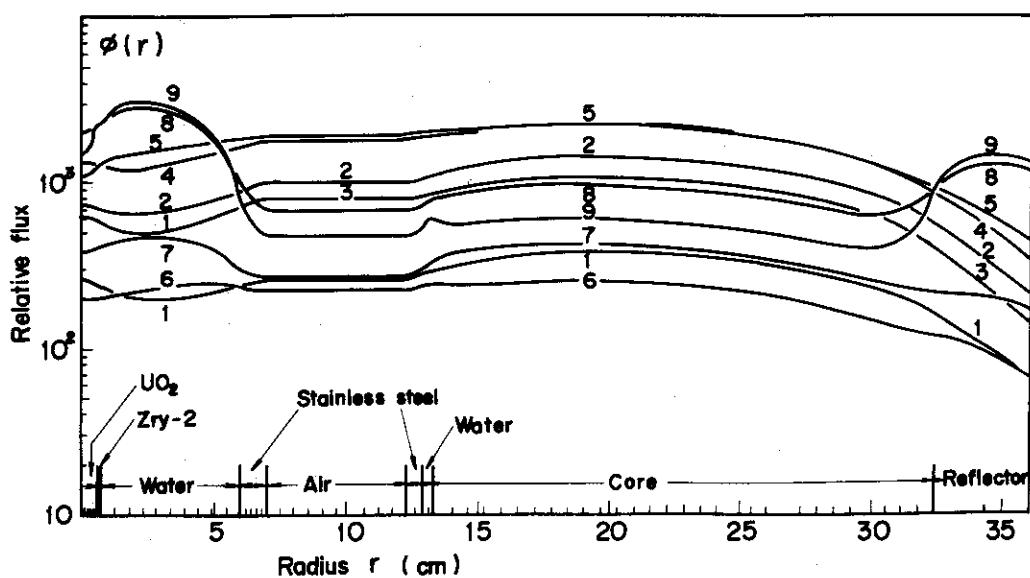


Fig. 3.2 Flux distribution in NSRR with a capsule  
containing a 2.6% enrichment BWR pin

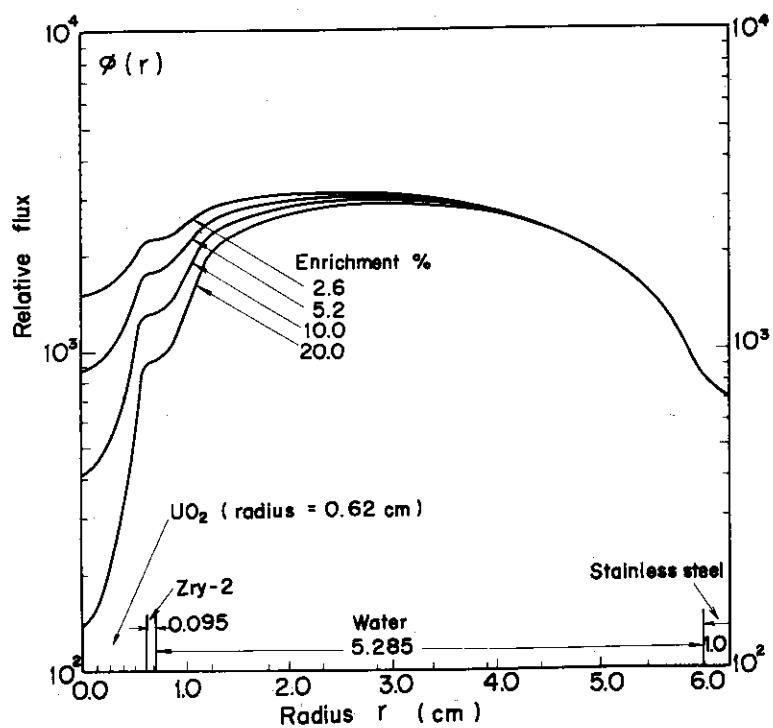


Fig.3.3 Thermal neutron flux tilt in a BWR pin

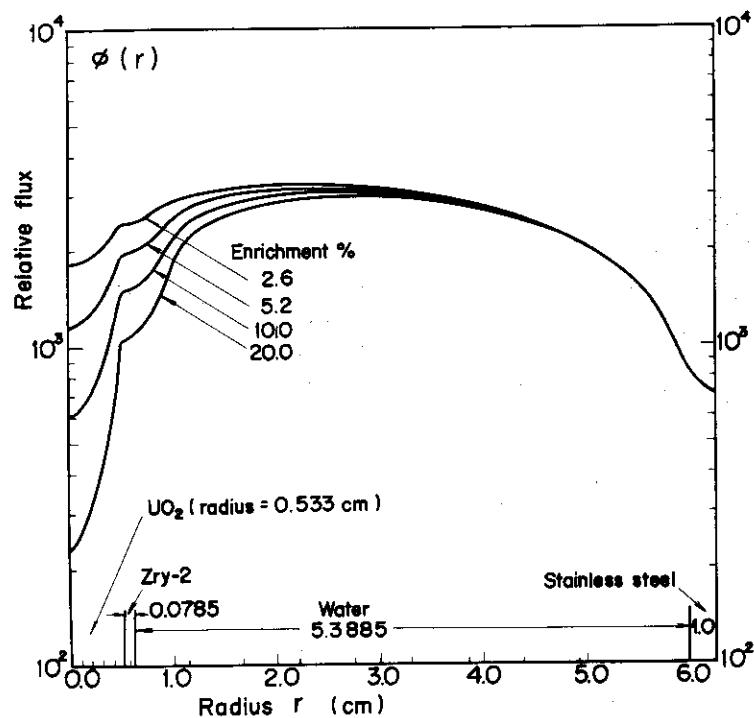


Fig.3.4 Thermal neutron flux tilt in a JP2 pin

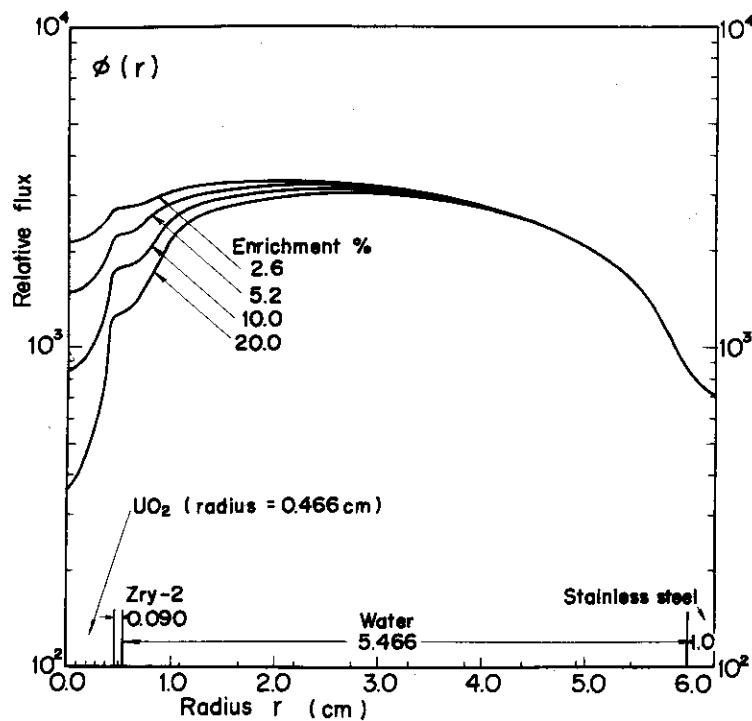


Fig. 3.5 Thermal neutron flux tilt in a PWR pin

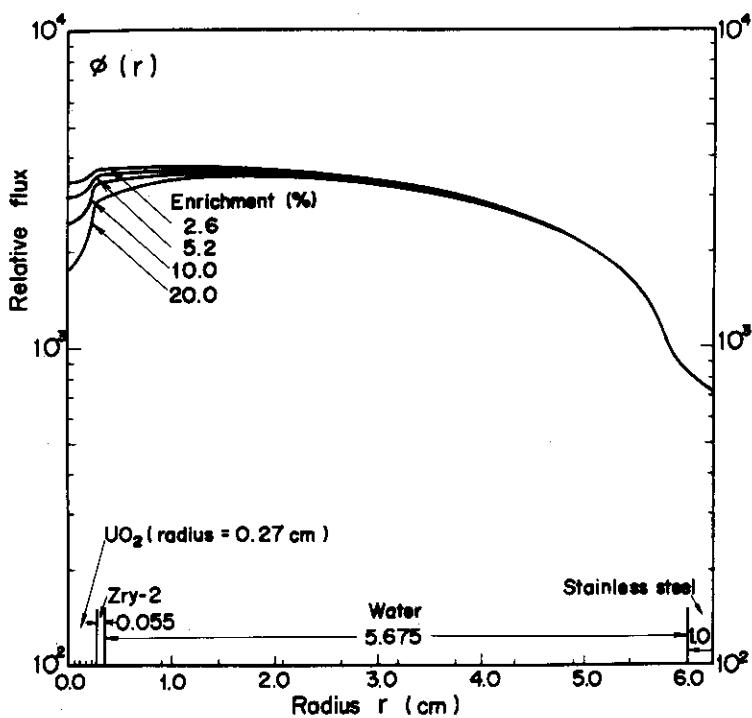


Fig. 3.6 Thermal neutron flux tilt in a FBR pin

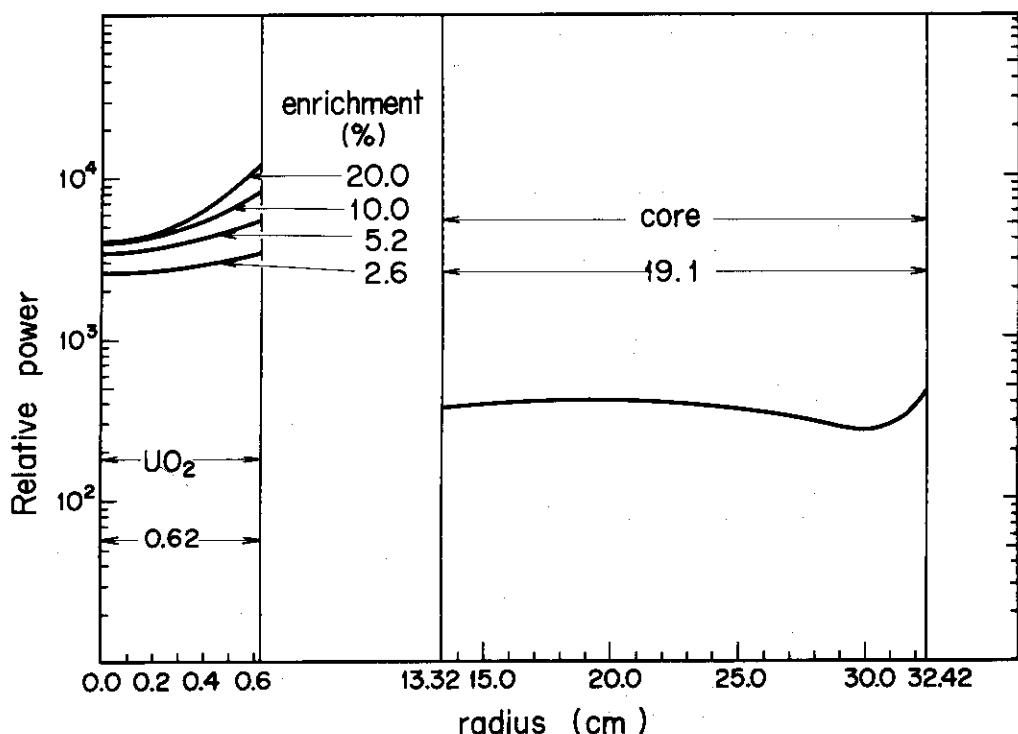


Fig. 3.7 Power distribution in NSRR with a BWR pin  
in the flux trap

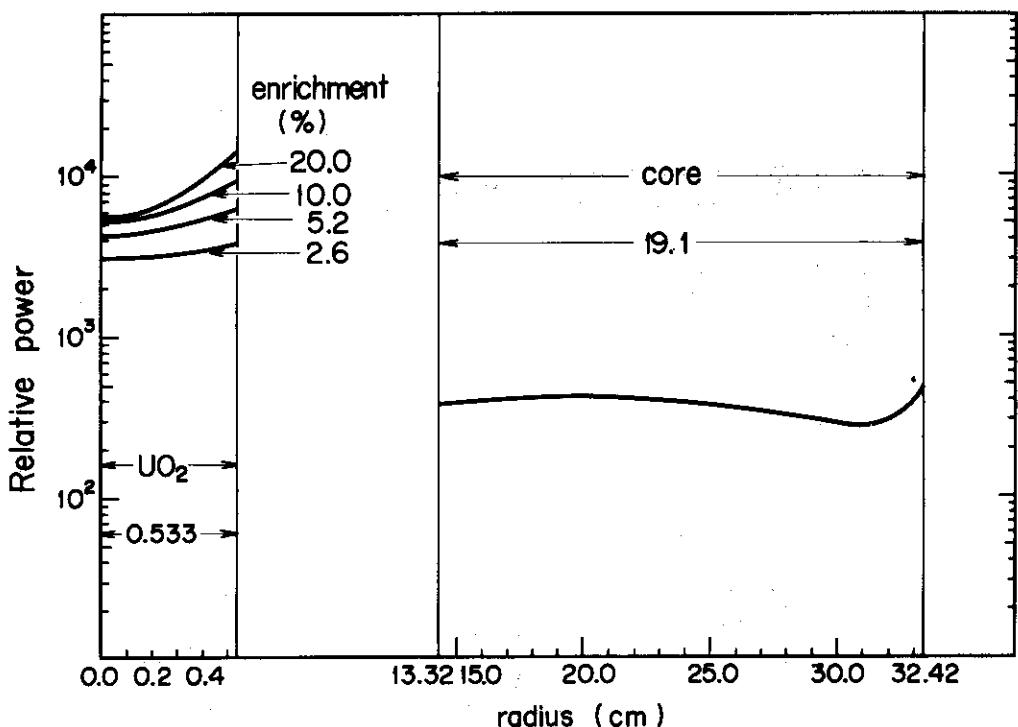


Fig. 3.8 Power distribution in NSRR with a JP2 pin  
in the flux trap

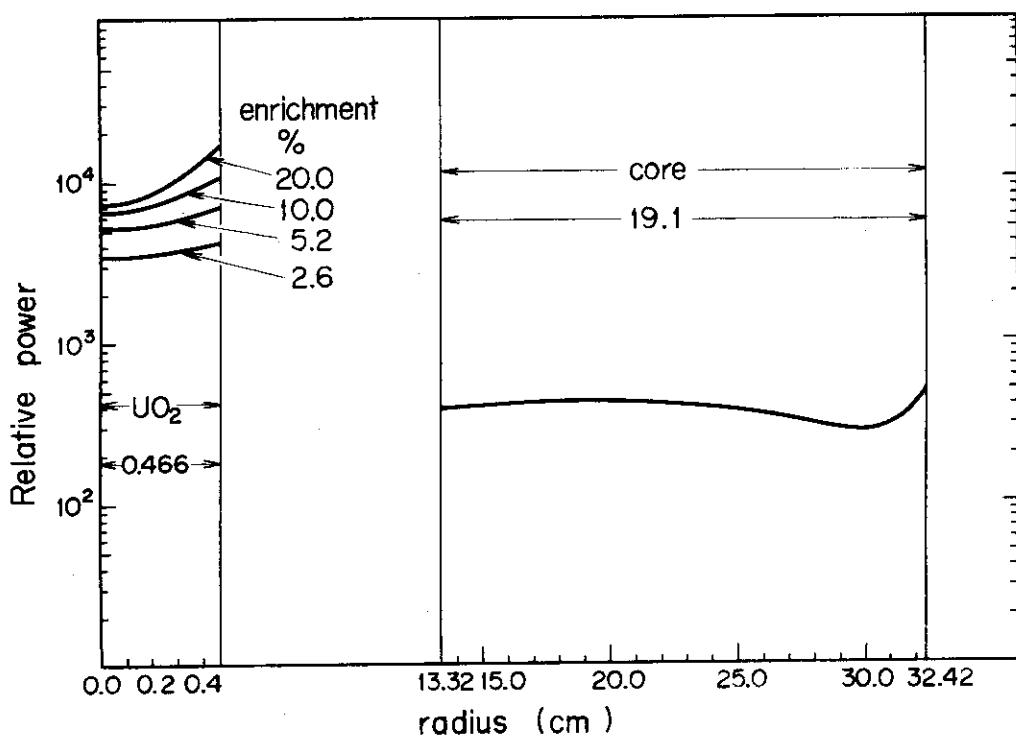


Fig. 3.9 Power distribution in NSRR with a PWR pin  
in the flux trap

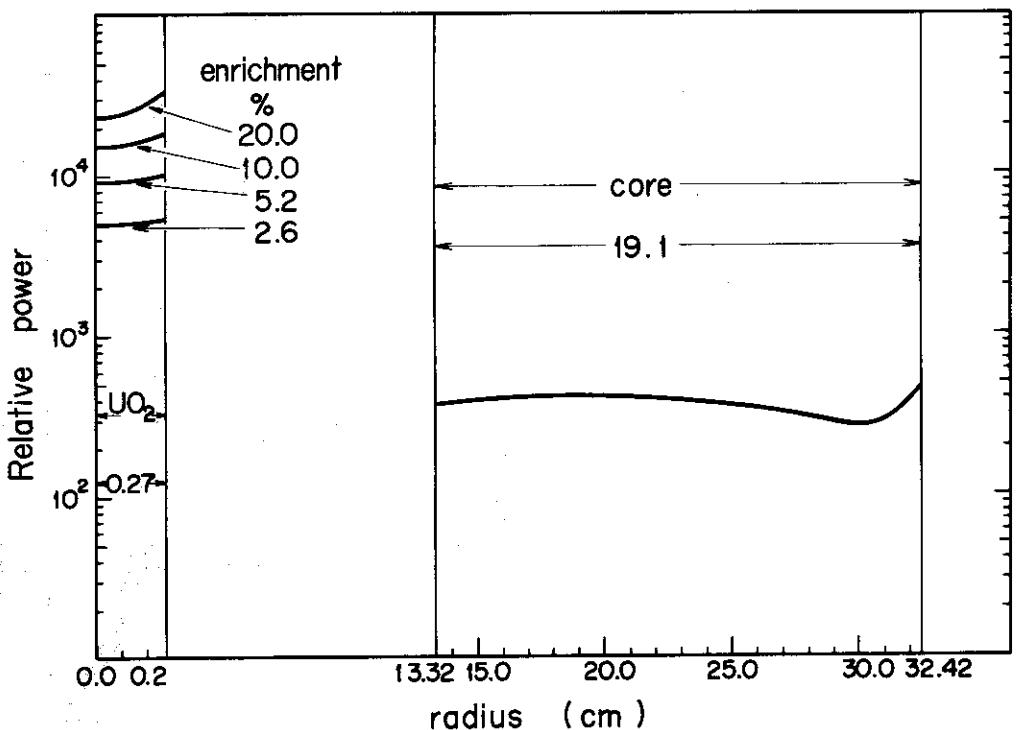


Fig. 3.10 Power distribution in NSRR with a FBR pin  
in the flux trap

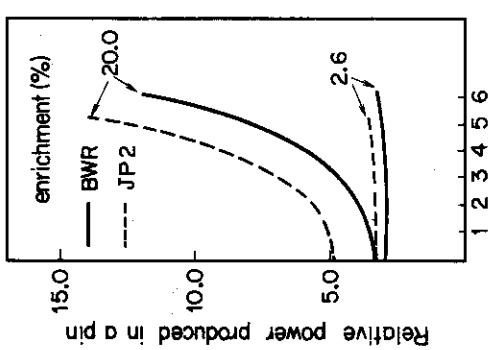


Fig. 3.11 Comparison of power distributions in a BWR pin and a JP2 pin

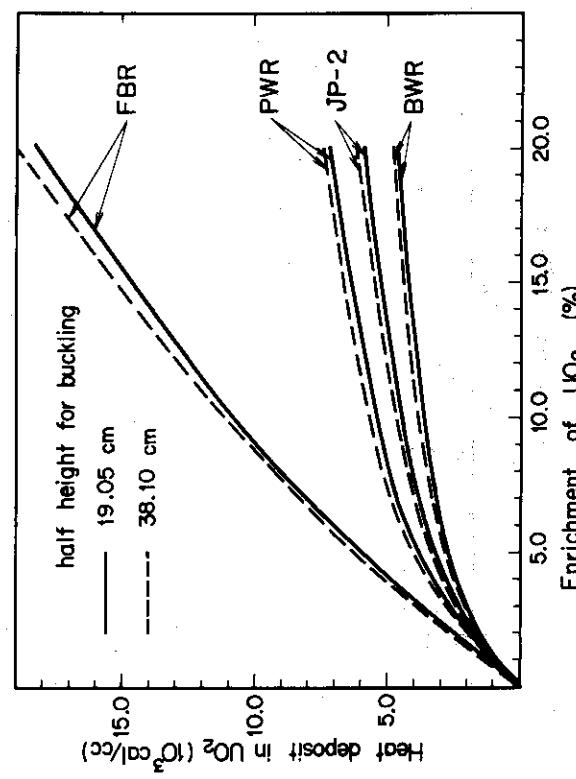


Fig. 3.12 Heat deposits in various  $\text{UO}_2$  fuel pins as a function of  $\text{UO}_2$  enrichment

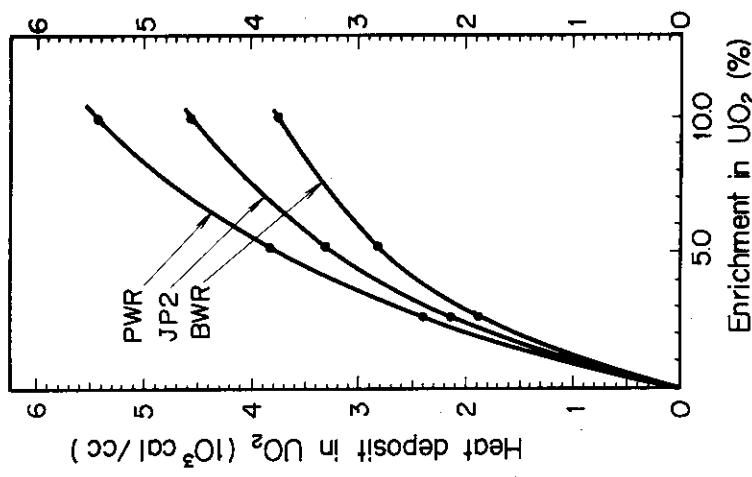


Fig. 3.13 Heat deposits in  $\text{UO}_2$  pins of BWR, JP2 and BWR

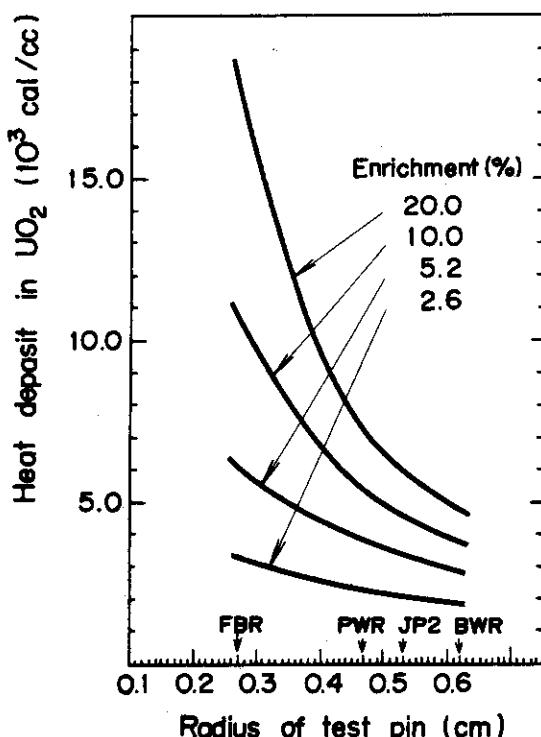


Fig. 3.14 Heat deposits in  $\text{UO}_2$  pins as a function of the pin radius

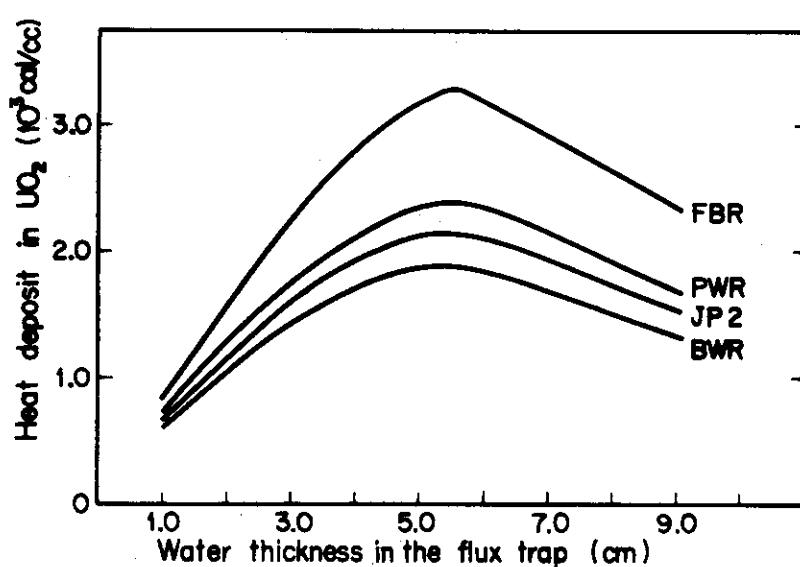


Fig. 3.15 Heat deposits in 2.6% enriched  $\text{UO}_2$  pins as a function of water thickness in the flux trap

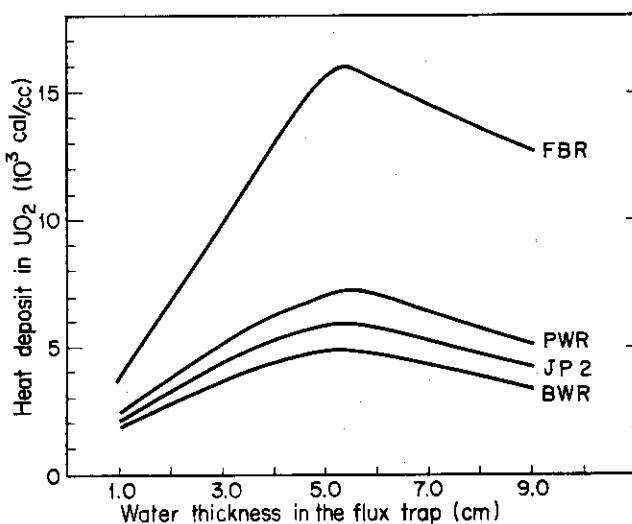


Fig. 3.16 Heat deposits in 20.0% enriched  $\text{UO}_2$  pins as a function of water thickness in the flux trap

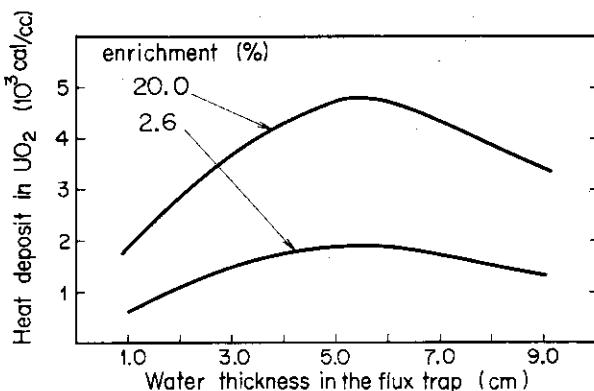


Fig. 3.17 Heat deposits in a BWR pin as a function of water thickness in the flux trap

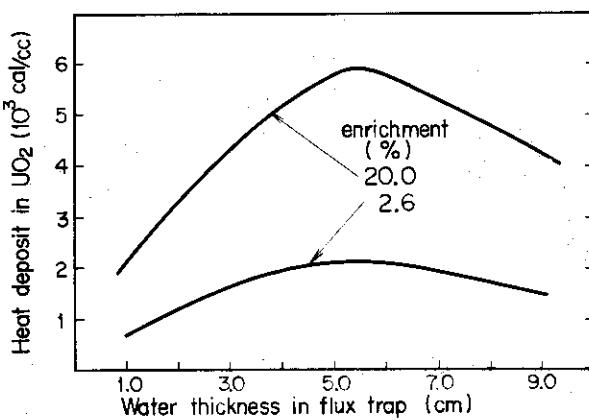


Fig. 3.18 Heat deposits in a JP2 pin as a function of water thickness in the flux trap

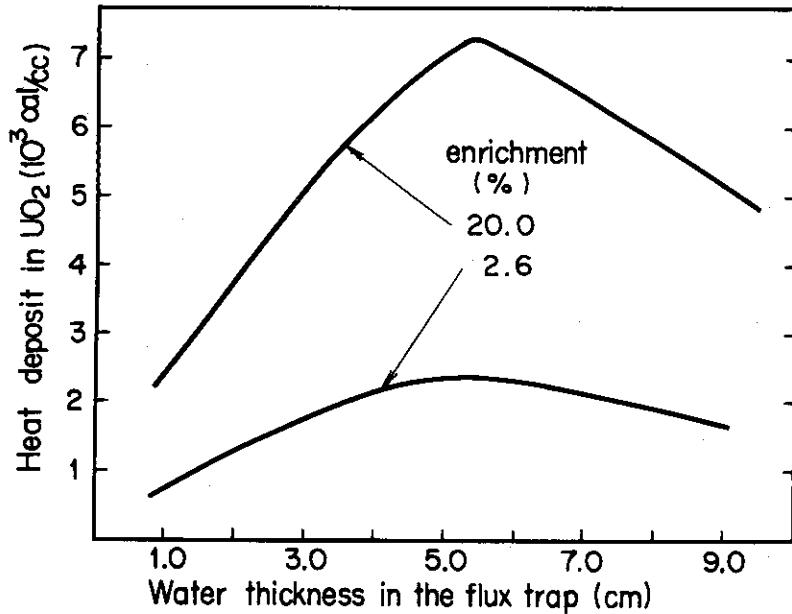


Fig. 3.19 Heat deposits in a PWR pin as a function of water thickness in the flux trap

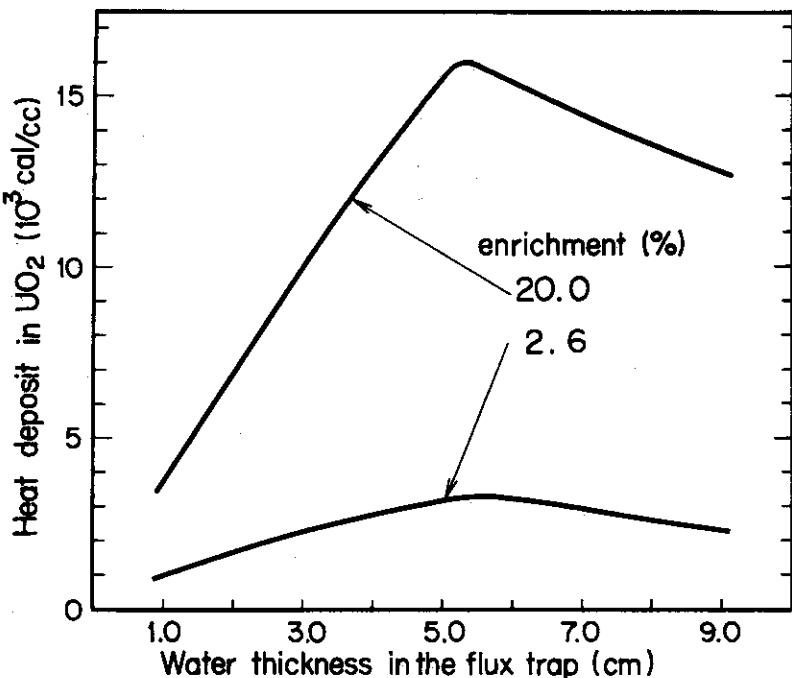


Fig. 3.20 Heat deposits in a FBR pin as a function of water thickness in the flux trap

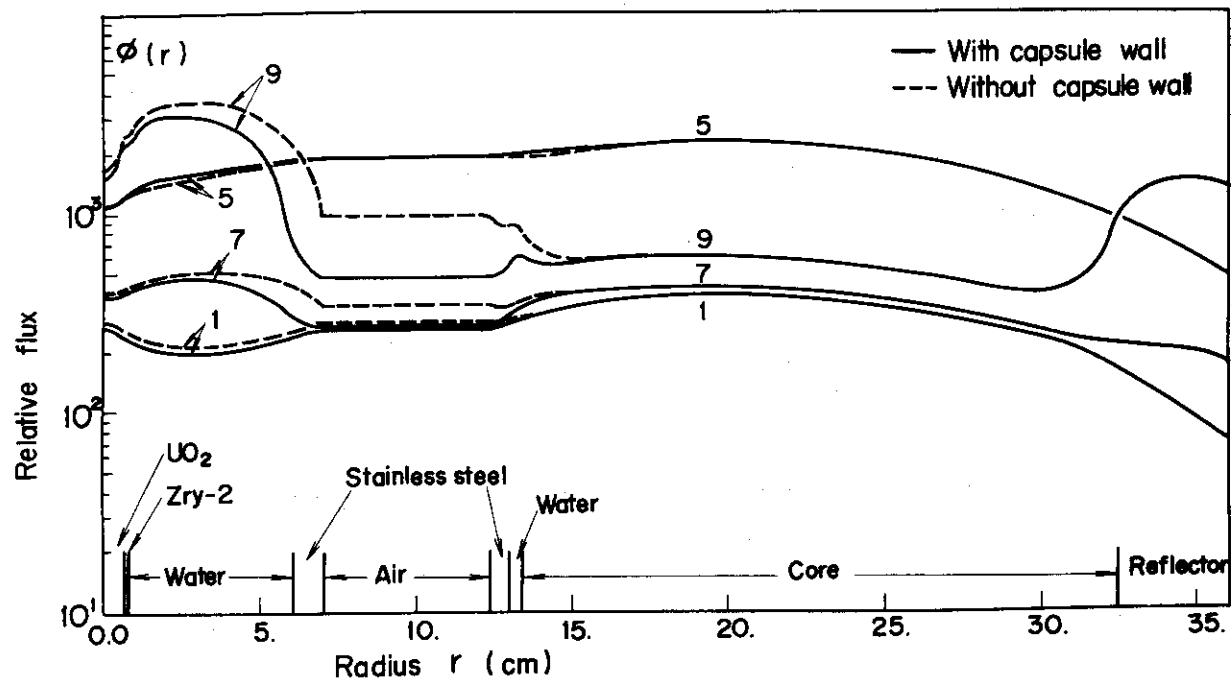


Fig. 3.21 Comparison of the flux distributions in NSRR with a BWR test pin with and without the capsule wall

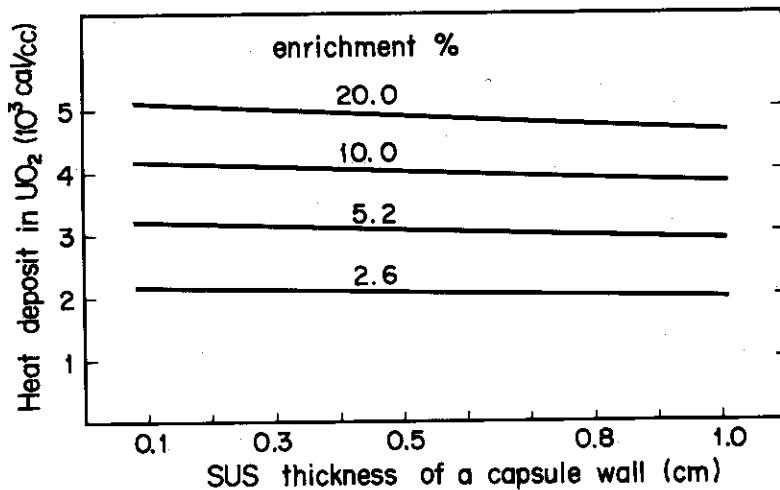


Fig. 3.22 Heat deposits in a BWR pin as a function of the capsule wall (SUS) thickness

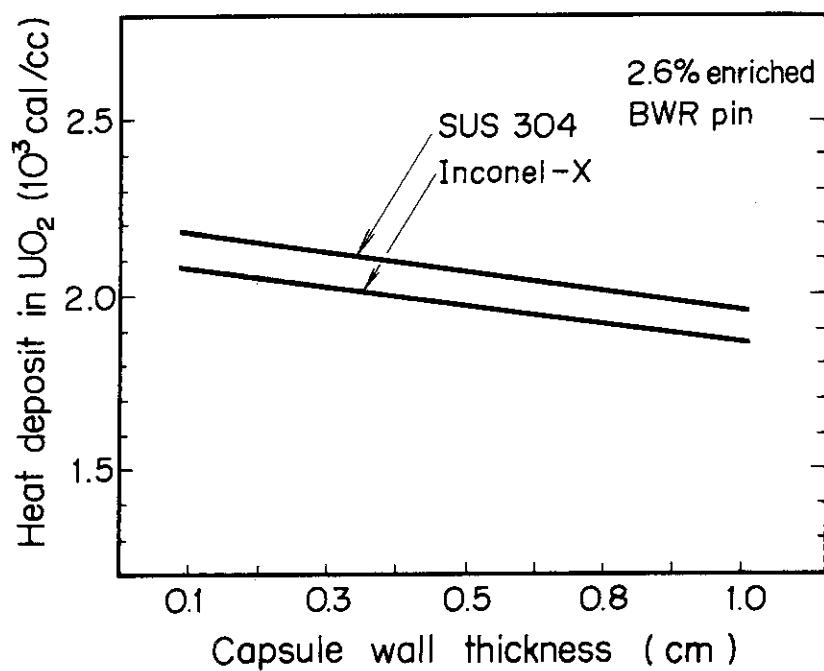


Fig. 3.23 Comparison of the heat deposits in a  $\text{UO}_2$  pin with SUS and Inconel capsule wall

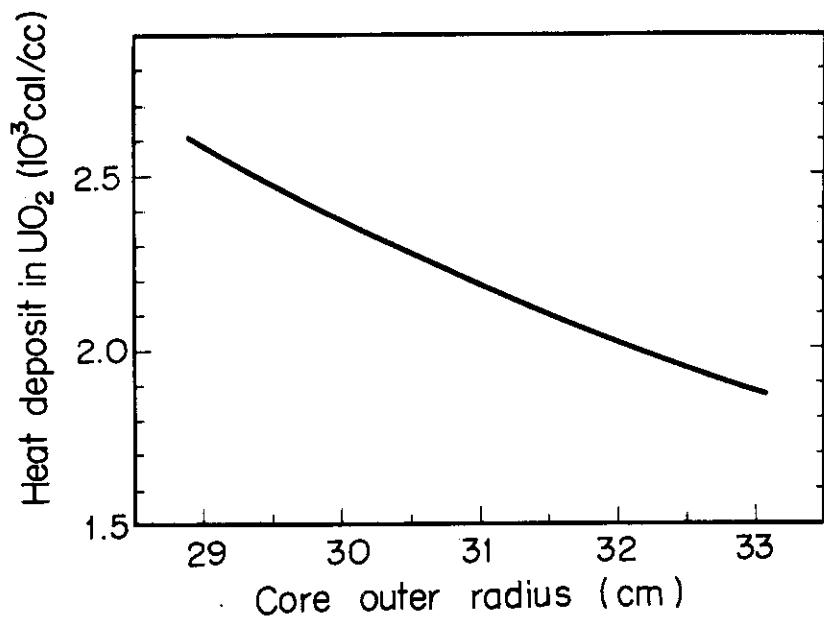


Fig. 3.24 Heat deposits in a BWR pin as a function of the core size

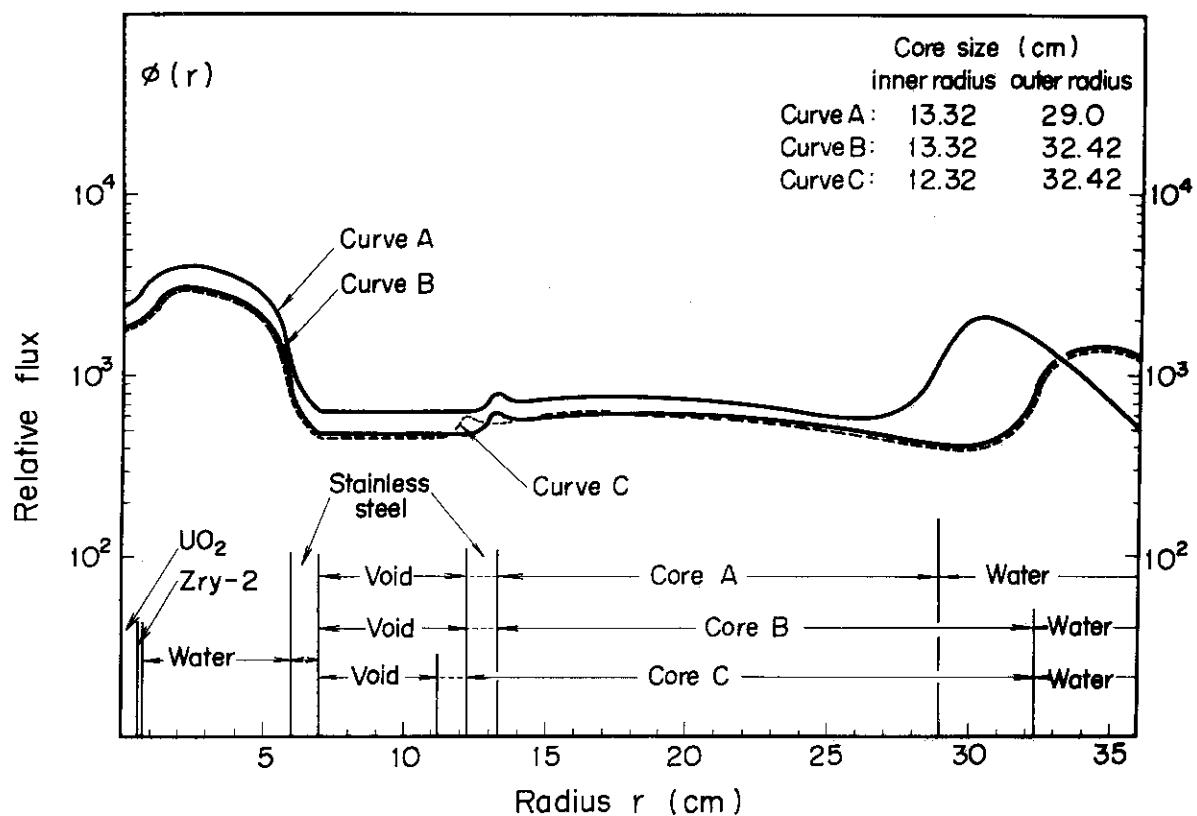


Fig. 3.25 Comparison of the thermal flux distributions for different core sizes

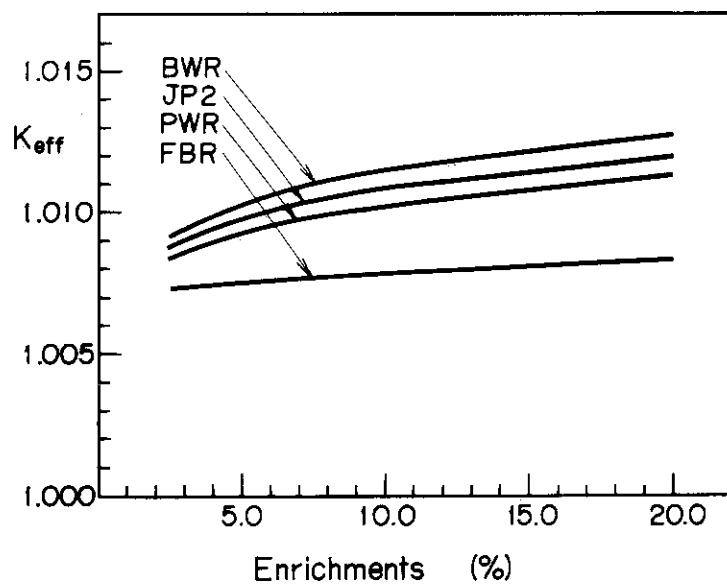


Fig. 3.26 Effective multiplication factors of NSRR as a function of  $\text{UO}_2$  enrichment of test fuel pins in the flux trap

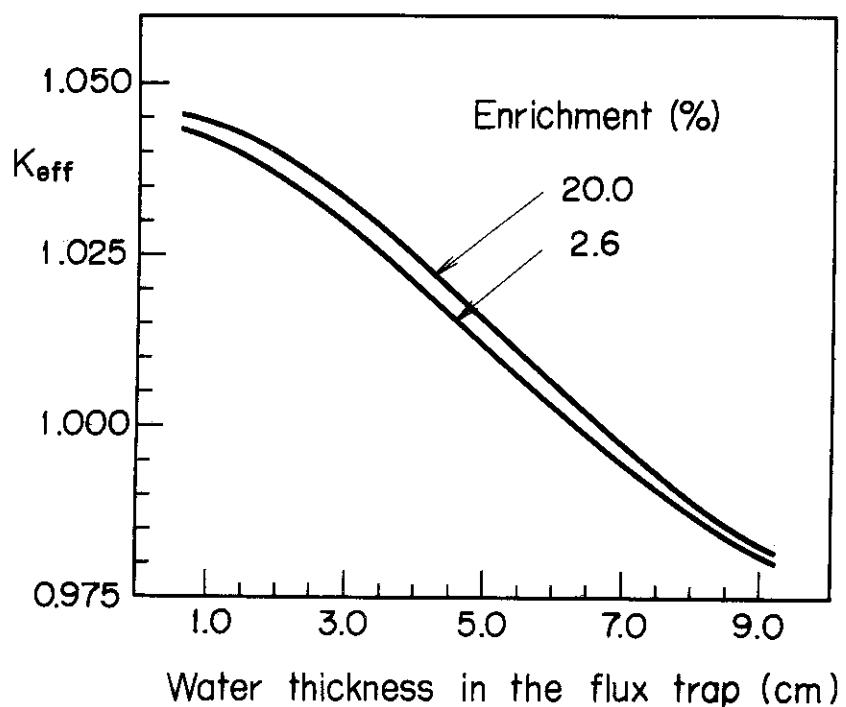


Fig. 3.27 Effective multiplication factors of NSRR as a function of water thickness of a BWR pin in the flux trap

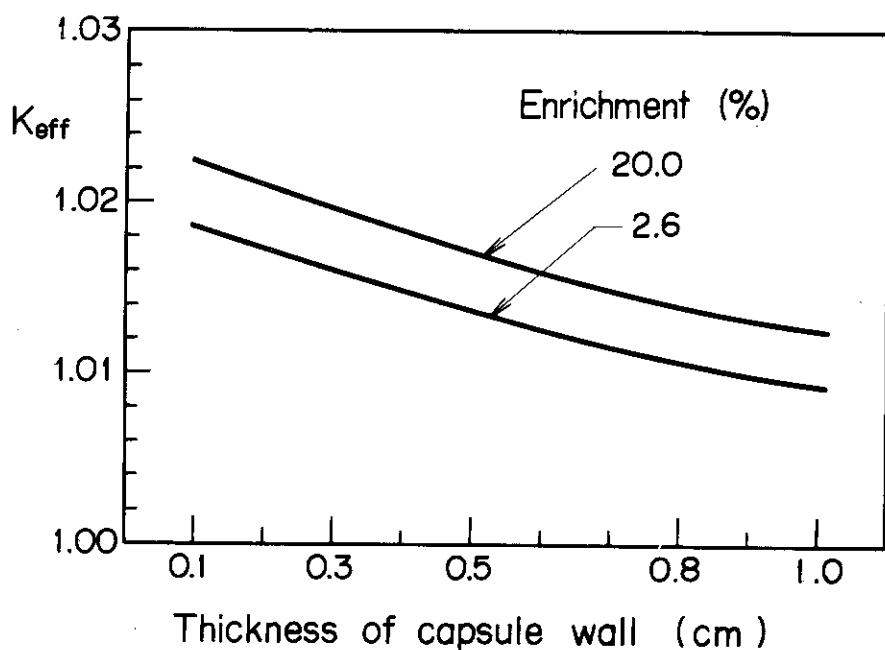


Fig. 3.28 Effective multiplication factors of NSRR as a function of capsule wall thickness of a BWR pin in the flux trap

## 6. 付 錄

### A 各領域の原子数密度

ここに、群定数を求める際に必要な、それぞれの物質を構成する核種の原子数密度 ( $10^{24}$  個/ $\text{cc}$ ) を Table A.1 から Table A.5 までに示す。Table A.3 の中で、炉心 (core) については、燃料セルを均質化した値である。燃料セルは、体積比 26.82% の軽水に囲まれた 0.0508 cm のステンレススチールの被覆、0.04318 のギャップを持つ直徑 3.7465 cm の燃料要素から成っている。炉心の群定数は、このセルについて算出した値から計算されている。

### B GATHER と THERMOS の群定数

3.6 節で述べた GATHER から得られた燃群炉定数と THERMOS-MUG から得られたそれを、比較のため、Table B.1 から Table B.4 に示した。GATHER の方法は、 $\text{UO}_2$  ピンの太さに関係なく、軽水のスペクトラムで  $\text{UO}_2$  の拡散係数として軽水に対する値が算出されてしまうのと、 $\text{UO}_2$  ピンの太さによる影響が考慮されていない欠点を持つ。THERMOS の方法は、軽水キャップセル中の  $\text{UO}_2$ について、直接、積分型輸送方程式を解いて、その結果の  $\text{UO}_2$  ピン内の中性子スペクトラムで平均するので厳密な方法である。

Table A.1 Atomic densities for  $\text{UO}_2$  with various enrichments  
 $(10^{24} \text{ atoms/cc})$

Nuclide	Enrichment of $\text{UO}_2$ (%)			
	2.6	5.2	10.0	20.0
Oxygen	0.0486	0.0486	0.0486	0.0486
$^{235}\text{U}$	0.00063172	0.0012636	0.002430	0.004860
$^{238}\text{U}$	0.023665	0.023036	0.021870	0.019440

$\text{UO}_2$  density = 10.89 g/cc.

Table A.2 Atomic densities for Zry-2<sup>12)</sup>

Nuclide	Atomic concentration	
	$10^{24} \text{ atoms/cc}$	Fraction (%)
Cr	$7.7162 \times 10^{-5}$	0.18
Fe	$1.1213 \times 10^{-4}$	0.26
Ni	$3.8997 \times 10^{-5}$	0.09
Zr	$4.2467 \times 10^{-2}$	98.30
Sn	$5.0434 \times 10^{-4}$	1.17

Table A.3 Atomic densities for various regions of the NSRR ( $10^{24}$  atoms/cc)

Materials	Materials					
	Core	Water or Reflector	SUS	Axial Reflector	Void	Zry-2
Muclides						*1 of $\text{UO}_2$
H ( Zr H )	0.035592					
H ( $\text{H}_2\text{O}$ )	0.017916	0.0668		0.017916		
Oxygen	0.008958	0.0334		0.008958	$5.4 \times 10^{-5}$	0.0486
Zr	0.022728					0.04263
$^{235}\text{U}$	$2.33 \times 10^{-4}$					0.0012636
$^{238}\text{U}$	$9.34 \times 10^{-4}$					0.023036
Stainless steel	0.003305		0.0843	0.003305		
C				0.055616		

\*1. The ingredients of Zry-2 are for the calculation of the core characteristics.  
 The more detailed ingredients are used for the calculation of  $\text{UO}_2$  heat deposits  
 (cf. Table A.2).

\*2 For 5.2% enriched  $\text{UO}_2$ .

Table A.4 Atomic densities for SUS 304<sup>11)</sup>

Nuclide	Atomic concentration	
	$10^{24}$ atoms/cc	Fraction (%)
C	$3.035 \times 10^{-4}$	0.36
Si	$1.6439 \times 10^{-3}$	1.95
Cr	$1.6818 \times 10^{-2}$	19.95
Mn	$1.6776 \times 10^{-3}$	1.99
Fe	$4.9714 \times 10^{-2}$	66.91
Ni	$7.4521 \times 10^{-3}$	8.84

Table A.5 Atomic densities for Inconel-X<sup>11)</sup>

Nuclide	Atomic concentration	
	$10^{24}$ atoms/cc	Fraction (%)
Al	$1.294 \times 10^{-3}$	1.53
Cr	$1.4896 \times 10^{-2}$	17.62
Fe	$6.264 \times 10^{-3}$	7.41
Co	$4.227 \times 10^{-4}$	0.50
Ni	$6.1148 \times 10^{-2}$	72.33
Nb	$5.157 \times 10^{-4}$	0.61

Table B.1 Thermal neutron group constants for 2.6% enriched  $\text{UO}_2$  pin

JAERI-M 5613

Model	Group i	Group constants					
		D <sup>i</sup>	$\Sigma_a^i$	$(\nu\Sigma_p)^i$	$\Sigma_s^{i \rightarrow 6}$	$\Sigma_s^{i \rightarrow 7}$	$\Sigma_s^{i \rightarrow 8}$
GATHER	6	0.5295	0.06528	0.1085	2.2359 $\times 10^{-2}$	4.1718 $\times 10^{-8}$	
	7	0.3004	0.1643	0.2817	8.6558 $\times 10^{-4}$	4.8394 $\times 10^{-2}$	1.0761 $\times 10^{-4}$
	8	0.1933	0.2626	0.4670	1.7321 $\times 10^{-12}$	5.2881 $\times 10^{-3}$	3.2988 $\times 10^{-2}$
	9	0.1192	0.5476	0.9883	8.1889 $\times 10^{-6}$	2.3565 $\times 10^{-2}$	
UO <sub>2</sub>	6	0.7546	0.06422	0.1067	0.1943 $\times 10^{-1}$		
	7	0.6204	0.1592	0.2729	0.3120 $\times 10^{-3}$	0.3820 $\times 10^{-1}$	0.3399 $\times 10^{-4}$
	8	0.5147	0.2682	0.4757	0.5001 $\times 10^{-2}$		0.3379 $\times 10^{-1}$
	9	0.3634	0.5321	0.9593	0.3736 $\times 10^{-5}$	0.3268 $\times 10^{-1}$	
THERMOS	6	0.7546	0.06424	0.1068	0.1943 $\times 10^{-1}$		
	7	0.6200	0.1595	0.2735	0.3023 $\times 10^{-3}$	0.3875 $\times 10^{-1}$	0.3455 $\times 10^{-4}$
	8	0.5145	0.2685	0.4763	0.4950 $\times 10^{-2}$		0.3400 $\times 10^{-1}$
	9	0.3622	0.5351	0.9647	0.3686 $\times 10^{-5}$	0.3233 $\times 10^{-1}$	
J P 2	6	0.7545	0.06425	0.1068	0.1943 $\times 10^{-1}$		
	7	0.6196	0.1599	0.2742	0.2916 $\times 10^{-3}$	0.3938 $\times 10^{-1}$	0.3519 $\times 10^{-4}$
	8	0.5143	0.2687	0.4768	0.4903 $\times 10^{-2}$		0.3418 $\times 10^{-1}$
	9	0.3611	0.5377	0.9696	0.3643 $\times 10^{-5}$	0.3203 $\times 10^{-1}$	
THERMOS	6	0.7545	0.06425	0.1069	0.1942 $\times 10^{-1}$		
	7	0.6187	0.1607	0.2755	0.2691 $\times 10^{-3}$	0.4070 $\times 10^{-1}$	0.3653 $\times 10^{-4}$
	8	0.5137	0.2694	0.4781	0.4783 $\times 10^{-2}$		0.3469 $\times 10^{-1}$
	9	0.3574	0.5470	0.9864	0.3511 $\times 10^{-5}$	0.3109 $\times 10^{-1}$	

Table B.2 Thermal neutron group constants for 5.2% enriched UO<sub>2</sub> pin

Model	Group i	Group constants					
		D <sup>i</sup>	$\Sigma_a^i$	$(\nu\Sigma_f)^i$	$\Sigma_s^{i \rightarrow 6}$	$\Sigma_s^{i \rightarrow 7}$	$\Sigma_s^{i \rightarrow 8}$
GATHER UO <sub>2</sub>	6	0.5295	0.1161	0.2170	0.2236 $\times 10^{-1}$	0.4172 $\times 10^{-7}$	0.4879 $\times 10^{-1}$
	7	0.3004	0.3099	0.5934	0.8656 $\times 10^{-3}$	0.4879 $\times 10^{-1}$	0.1076 $\times 10^{-3}$
	8	0.1933	0.4867	0.9341	0.1732 $\times 10^{11}$	0.5288 $\times 10^{-2}$	0.3299 $\times 10^{-1}$
	9	0.1192	1.0230	1.9770	0.8149 $\times 10^{-5}$	0.2357 $\times 10^{-1}$	
THERMOS BWR	6	0.6766	0.1141	0.2132	0.1923 $\times 10^{-1}$		
	7	0.4966	0.2921	0.5426	0.3417 $\times 10^{-3}$	0.3671 $\times 10^{-1}$	0.3247 $\times 10^{-4}$
	8	0.3810	0.4905	0.9470	0.5213 $\times 10^{-2}$		0.3289 $\times 10^{-1}$
	9	0.2458	0.9707	1.8740	0.3958 $\times 10^{-5}$	0.3424 $\times 10^{-1}$	
THERMOS J P 2	6	0.6765	0.1141	0.2133	0.1925 $\times 10^{-1}$		
	7	0.4960	0.2929	0.5441	0.3288 $\times 10^{-3}$	0.3739 $\times 10^{-1}$	0.3316 $\times 10^{-4}$
	8	0.3806	0.4953	0.9485	0.5140 $\times 10^{-2}$		0.3318 $\times 10^{-1}$
	9	0.2447	0.9764	1.8850	0.3895 $\times 10^{-5}$	0.3382 $\times 10^{-1}$	
THERMOS PWR	6	0.6764	0.1142	0.2134	0.1927 $\times 10^{-1}$		
	7	0.4955	0.2935	0.5453	0.3182 $\times 10^{-3}$	0.3796 $\times 10^{-1}$	0.3374 $\times 10^{-4}$
	8	0.3803	0.4959	0.9497	0.5080 $\times 10^{-2}$		0.3342 $\times 10^{-1}$
	9	0.2437	0.9817	1.8960	0.3841 $\times 10^{-5}$	0.3344 $\times 10^{-1}$	
THERMOS PBR	6	0.6762	0.1143	0.2136	0.1933 $\times 10^{-1}$		
	7	0.4939	0.2958	0.5496	0.2825 $\times 10^{-3}$	0.3998 $\times 10^{-1}$	0.3578 $\times 10^{-4}$
	8	0.3794	0.4980	0.9539	0.4888 $\times 10^{-2}$		0.3423 $\times 10^{-1}$
	9	0.2400	1.0020	1.9360	0.3650 $\times 10^{-5}$	0.3212 $\times 10^{-1}$	

Table B.3 Thermal neutron group constants for 10.0% enriched  $\text{UO}_2$  pin

Model	Group i	Group constants					
		$D^i$	$\Sigma_a^i$	$(\nu\Sigma_f)^i$	$\Sigma_s^{i \rightarrow 6}$	$\Sigma_s^{i \rightarrow 7}$	$\Sigma_s^{i \rightarrow 8}$
GATHER	6	0.5295	0.2100	0.4173	0.2236 $\times 10^{-1}$	0.4172 $\times 10^{-7}$	
	7	0.3004	0.5616	1.0840	0.8656 $\times 10^{-3}$	0.4839 $\times 10^{-1}$	0.1076 $\times 10^{-3}$
	8	0.1933	0.9003	1.7960	0.1732 $\times 10^{-11}$	0.5288 $\times 10^{-2}$	0.3299 $\times 10^{-1}$
$\text{UO}_2$	9	0.1192	1.9010	3.8020	0.0	0.8149 $\times 10^{-5}$	0.2357 $\times 10^{-1}$
	6	0.5686	0.2057	0.4090	0.1888 $\times 10^{-1}$		
	7	0.3636	0.5356	1.036	0.3768 $\times 10^{-3}$	0.3517 $\times 10^{-1}$	0.3092 $\times 10^{-4}$
BWR	8	0.2581	0.9089	1.810	0.5491 $\times 10^{-2}$		0.3178 $\times 10^{-1}$
	9	0.1549	1.764	3.5270	0.4205 $\times 10^{-5}$	0.3597 $\times 10^{-1}$	
	6	0.5684	0.2059	0.4094	0.1895 $\times 10^{-1}$		
THERMOS	7	0.3629	0.5373	1.040	0.3613 $\times 10^{-3}$	0.3591 $\times 10^{-1}$	0.3166 $\times 10^{-4}$
	8	0.2578	0.9107	1.8130	0.5399 $\times 10^{-2}$		0.3213 $\times 10^{-1}$
	9	0.1543	1.7730	3.5450	0.4140 $\times 10^{-5}$	0.3554 $\times 10^{-1}$	
J P 2	6	0.5683	0.2060	0.4096	0.1900 $\times 10^{-1}$		
	7	0.3624	0.5387	1.0420	0.3481 $\times 10^{-3}$	0.3656 $\times 10^{-1}$	0.3231 $\times 10^{-4}$
	8	0.2575	0.9122	1.8160	0.5321 $\times 10^{-2}$		0.3244 $\times 10^{-1}$
THERMOS	9	0.1537	1.7820	3.5620	0.4080 $\times 10^{-5}$	0.3514 $\times 10^{-1}$	
	6	0.5678	0.2064	0.4104	0.1917 $\times 10^{-1}$		
	7	0.3605	0.5436	1.0520	0.3042 $\times 10^{-3}$	0.3885 $\times 10^{-1}$	0.3462 $\times 10^{-4}$
PWR	8	0.2564	0.9176	1.8270	0.5056 $\times 10^{-2}$		0.3353 $\times 10^{-1}$
	9	0.1510	1.820	3.6390	0.3847 $\times 10^{-5}$	0.3357 $\times 10^{-1}$	

Table B.4 Thermal neutron group constants for 20.0% enriched  $\text{UO}_2$  pin

Model	Group	i	$D_i$	Group constants			
				$\Sigma_a^i$	$(\nu \Sigma_f)^i$	$\Sigma_s^{i \rightarrow 6}$	$\Sigma_s^{i \rightarrow 7}$
GATHER $\text{UO}_2$	6	0.5295	0.4056	0.8347	$0.2236 \times 10^{-1}$	$0.4172 \times 10^{-7}$	
	7	0.3004	1.0980	2.1670	$0.8656 \times 10^{-3}$	$0.4839 \times 10^{-1}$	$0.1076 \times 10^{-3}$
	8	0.1933	1.7620	3.5930	$0.1732 \times 10^{-11}$	$0.5288 \times 10^{-2}$	$0.3299 \times 10^{-1}$
THERMOS BWR	9	0.1192	3.7300	7.6030	$0.8149 \times 10^{-5}$	$0.2357 \times 10^{-1}$	
	6	0.4273	0.3954	0.8146	$0.1827 \times 10^{-1}$		
	7	0.2340	1.0390	2.0570	$0.4185 \times 10^{-3}$	$0.3371 \times 10^{-1}$	$0.2944 \times 10^{-4}$
THERMOS JP2	8	0.1549	1.7650	3.5920	$0.5835 \times 10^{-2}$		$0.3053 \times 10^{-1}$
	9	0.08793	3.4000	6.9310	$0.4428 \times 10^{-5}$	$0.3760 \times 10^{-1}$	
	6	0.4270	0.3959	0.8156	$0.1841 \times 10^{-1}$		
THERMOS PWR	7	0.2335	1.0430	2.0640	$0.4015 \times 10^{-3}$	$0.3440 \times 10^{-1}$	$0.3013 \times 10^{-4}$
	8	0.1546	1.7690	3.6000	$0.5739 \times 10^{-2}$		$0.3088 \times 10^{-1}$
	9	0.08765	3.4120	6.9550	$0.4382 \times 10^{-5}$	$0.3730 \times 10^{-1}$	
THERMOS FBR	6	0.4268	0.3963	0.8164	$0.1852 \times 10^{-1}$		
	7	0.2330	1.0460	2.070	$0.3864 \times 10^{-3}$	$0.3506 \times 10^{-1}$	$0.3078 \times 10^{-4}$
	8	0.1544	1.7720	3.6060	$0.5652 \times 10^{-2}$		$0.3121 \times 10^{-2}$
THERMOS FBR	9	0.08738	3.4230	6.9790	$0.4335 \times 10^{-5}$	$0.3699 \times 10^{-1}$	
	6	0.4260	0.3977	0.8190	$0.1887 \times 10^{-1}$		
	7	0.2311	1.0570	2.0930	$0.3320 \times 10^{-3}$	$0.3761 \times 10^{-1}$	$0.3333 \times 10^{-4}$
THERMOS FBR	8	0.1535	1.7850	3.6330	$0.5317 \times 10^{-2}$		$0.3252 \times 10^{-1}$
	9	0.08604	3.4830	7.100	$0.4110 \times 10^{-5}$	$0.3550 \times 10^{-1}$	