

JAERI-M

5361

NSRRの制御棒効果の解析
(NSRRの炉物理と核設計・3)

1973年8月

伊勢 武治・中原 康明

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.

NSRRの制御棒効果の解析
(NSRRの炉物理と核設計・3)

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

(1973年7月19日受理)

NSRR(安全性研究炉)の予備設計の一環として行われた制御棒効果の計算法とその結果を示し、合わせてその際の問題点を指摘する。

この原子炉は、その構造上の特徴として中央に大きな空孔を持ち、また、小型円環状炉心を有することから、NSRRの制御棒効果について次の結論が得られた。

i) パルス発生用制御棒3本挿入のときでも、制御棒間の相互干渉は無視できず、プラスの効果を持つ。

ii) 実験孔からの中性子の洩れは、制御棒効果に影響を及ぼす。また、炉心の中性子束分布にも影響を及ぼす。

iii) 制御棒効果は、中央実験孔に存在する物質によって影響を受ける。本報で取扱った実験物と炉心との中性子束の相互干渉は殆んどない。

iv) 制御棒の引抜きパターンが非対称になると、拡散方程式の反復数値解法の収束性が悪くなる。

Analysis of Control Rod Worths in the NSRR

(Reactor Physics and Nuclear Design of the
Nuclear Safety Research Reactor-III)

Takeharu ISE and Yasuki NAKAHARA

Division of Reactor Engineering, Tokai, JAERI

(Received July 19, 1973)

The present report shows the calculational method and the results of analysis of control rod worths for the NSRR (Nuclear Safety Research Reactor), the study being performed as a part of the preliminary design calculation of the reactor.

The characteristic feature of the reactor structure lies in the presence of a big experimental hole at the center of the compact annular core. As a result of this, the present calculation has given the following conclusions on the control rod effects:

- i) The interference among control rods gives a non-negligible positive effect to the worth, even when only 3 transient rods are inserted in the core.
- ii) The control rod worths and the neutron flux distributions in the core are affected by the neutron leakage through the experimental hole.
- iii) The control rod worths depend on a material in the experimental hole.

There is little interference, however, in the neutron flux between the experimental material and the reactor core.

- iv) The convergence achieved through the iteration in the diffusion calculation becomes poor as the arrangement of the control rods becomes asymmetric.

目 次

1. はじめに	1
2. 制御棒の種類	1
3. 計算方法	5
4. 結果と考察	11
4.1 実験孔が空孔の場合の制御棒効果	11
4.2 実験孔に物質が入った場合の制御棒効果	18
4.3 中性子束分布について	20
5. あとがき	26
6. 謝 辞	26
7. 文 献	27
付録A 群定数について	29
付録B いろいろなケースの K_{eff} と2次元拡散計算上の問題点	37
付録C 制御棒の引抜き度と制御棒効果の関係	42
付録D 一点動特性モデル：Fucks - Nordheim	44
付録E 2次元拡散計算で用いられたメッシュ・ポイント	45

1. はじめに

NSRR (Nuclear Safety Research Reactor , 安全性研究炉) は、この原子炉で発生させたパルス (burst pulse) で、試験燃料の破壊テストをさせるように設計された原子炉である。このパルスは、制御棒の引抜きによる炉心への反応度添加とこの原子炉固有の大きな負の即発的溫度係数によって作られる (自己制御性と呼ばれる)。溫度係数については〔 NSRR の炉物理と核設計-1 〕として別報¹⁷⁾にゆずるので、ここでは、この原子炉のパルス発生に重要な制御棒値について、その計算法と、この原子炉における問題点を指摘する。なお、〔 NSRR の炉物理と核設計- II 〕には反應度係数について述べている¹⁸⁾。

NSRR では、通常の原子炉に用いられるスクラム用制御棒 (safety rods) および調整用制御棒 (regulating rods) の他に、上に述べたように、パルス発生用のパルス棒 (transient rods) が新たに加わっている。制御棒は、凡そ、同心円上に均等に分配されているが、Fig. 1.1 に示してあるように、この原子炉が中央に大きな実験孔 (flux trap) として用いる。直径約 2.4 cm) を有し、さらに炉心が、かなり小型 (半径 3.3 cm , 高さ 3.8 cm) なので (Fig. 1.1 参照)、中性子輸送や相互干渉などの制御棒自身の問題の他に、原子炉自体が物理的環境の影響を受けやすい点に注意を要する。

使用した群定数および本論の筋道についてわずらわしい議論は付録に記述しておいた。

2. 制御棒の種類

NSRR の制御は、三つのグループからなる 11 本の制御棒によってなされる。

第一のグループは、3本からなりパルス棒 (3 transient rods) と呼ばれる。これを用いてパルスを発生させる為に必要な反應度添加を行わせるもので、急速に炉心から引抜くことができるように設計されている。第二のグループは、6本からなる調整棒 (6 regulating rods) で、通常の原子炉におけるように、臨界性の調整、反應度補償等に用いられるものである。これらは緊急時 (emergency) にはスクラム棒としても用いられる。第三のグループは、2本からなる安全棒 (2 safety rods) で、専ら、緊急時用のスクラムバックアップとして使用される。

これらの制御棒は、できるだけ炉心に均等に配置するために、お互いに、同心円上に配置されているが、その際、炉心内の燃料の位置を利用するので、実験物装填管の上部構造の関係から Fig. 3.1 のように馬蹄形 (horse shoe) に配置されている。被覆材はステンレス・スチール (SST 304) で、制御棒としての吸収材としては、天然ボロンからなる B_4C (natural Boron - B_4C) が用いられている^{*1)}。これらの種類の制御棒の構造は Fig. 2.1

*1) 現在では、種々の検討の結果より大きなパルス用反應度を得るために、濃縮ボロン (93% full enriched Boron - $^{10}B_4C$) をパルス棒のみに使う予定になっている。この場合、吸収の増加は主に epithermal energy で、反應度として 10 数% 増すとと思われる。⁶⁾

1. はじめに

NSRR (Nuclear Safety Research Reactor , 安全性研究炉) は、この原子炉で発生させたパルス (burst pulse) で、試験燃料の破壊テストをさせるように設計された原子炉である。このパルスは、制御棒の引抜きによる炉心への反応度添加とこの原子炉固有の大きな負の即発的溫度係数によって作られる (自己制御性と呼ばれる)。溫度係数については〔 NSRR の炉物理と核設計 - I 〕として別報¹⁷⁾にゆずるので、ここでは、この原子炉のパルス発生に重要な制御棒値について、その計算法と、この原子炉における問題点を指摘する。なお、〔 NSRR の炉物理と核設計 - II 〕には反応度係数について述べている¹⁸⁾。

NSRR では、通常の原子炉に用いられるスクラム用制御棒 (safety rods) および調整用制御棒 (regulating rods) の他に、上に述べたように、パルス発生用のパルス棒 (transient rods) が新たに加わっている。制御棒は、凡そ、同心円上に均等に分配されているが、Fig. 1.1 に示してあるように、この原子炉が中央に大きな実験孔 (flux trap) として用いる。直径約 2.4 cm) を有し、さらに炉心が、かなり小型 (半径 3.3 cm , 高さ 3.8 cm) なので (Fig. 1.1 参照)、中性子輸送や相互干渉などの制御棒自身の問題の他に、原子炉自体が物理的環境の影響を受けやすい点に注意を要する。

使用した群定数および本論の筋道についてわずらわしい議論は付録に記述しておいた。

2. 制御棒の種類

NSRR の制御は、三つのグループからなる 11 本の制御棒によってなされる。

第一のグループは、3本からなりパルス棒 (3 transient rods) と呼ばれる。これを用いてパルスを発生させる為に必要な反応度添加を行わせるもので、急速に炉心から引抜くことができるように設計されている。第二のグループは、6本からなる調整棒 (6 regulating rods) で、通常の原子炉におけるように、臨界性の調整、反応度補償等に用いられるものである。これらは緊急時 (emergency) にはスクラム棒としても用いられる。第三のグループは、2本からなる安全棒 (2 safety rods) で、専ら、緊急時用のスクラムバックアップとして使用される。

これらの制御棒は、できるだけ炉心に均等に配置するために、お互いに、同心円上に配置されているが、その際、炉心内の燃料の位置を利用するので、実験物装填管の上部構造の関係から Fig. 3.1 のように馬蹄形 (horse shoe) に配置されている。被覆材はステンレス・スチール (SST 304) で、制御棒としての吸収材としては、天然ボロンからなる B_4C (natural Boron - B_4C) が用いられている^{*1)}。これらの種類の制御棒の構造は Fig. 2.1

*1) 現在では、種々の検討の結果より大きなパルス用反応度を得るために、濃縮ボロン (93% full enriched Boron - $^{10}B_4C$) をパルス棒のみに使う予定になっている。この場合、吸収の増加は主に epithermal energy で、反応度として 10 数% 増すとと思われる。⁶⁾

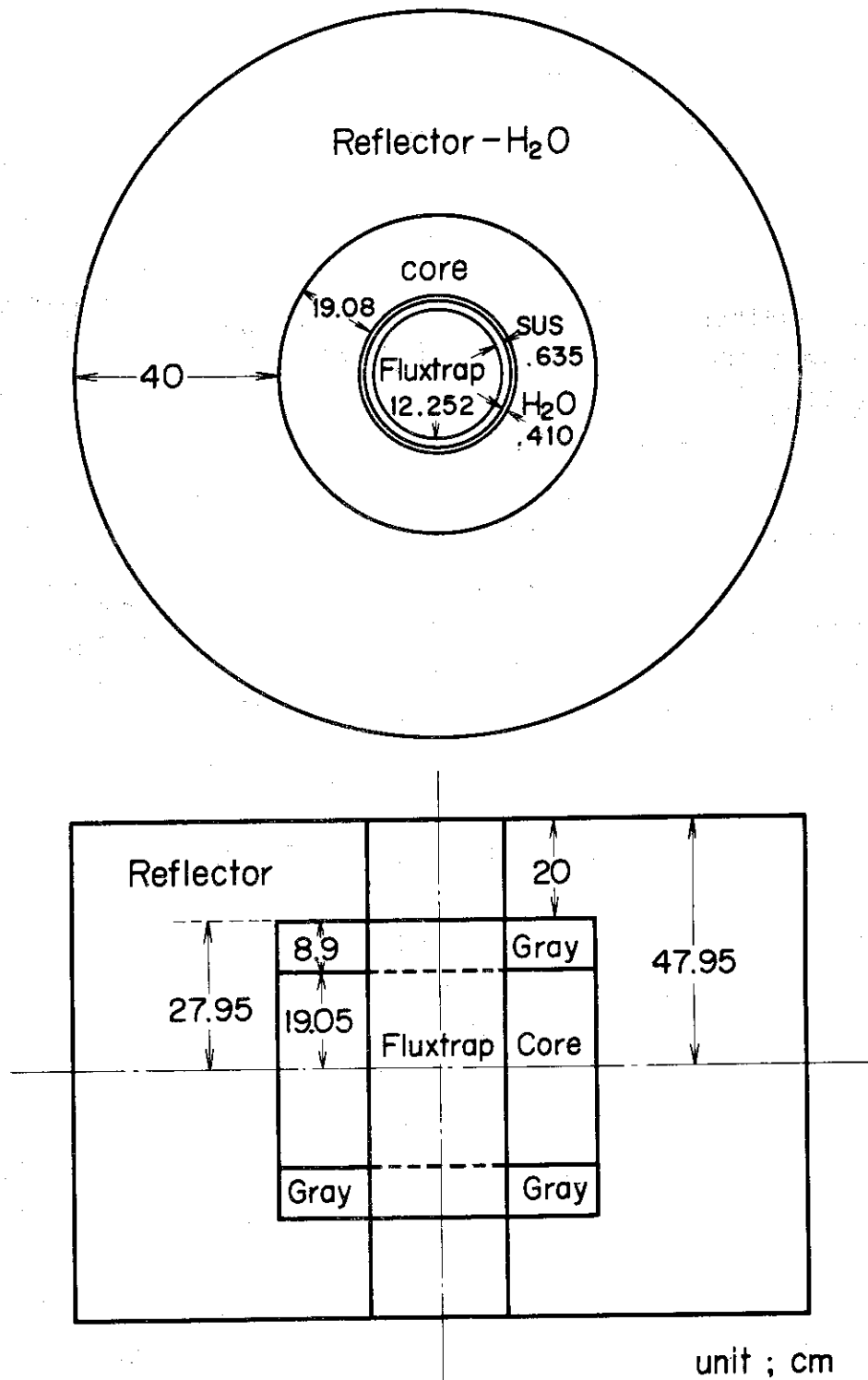


Fig. 1.1 TWO DIMENSIONAL GEOMETRY FOR DIFFUSION CALCULATION

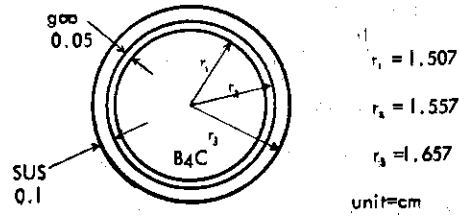


Fig. 2.1 CROSSSECTION CONTROL ROD

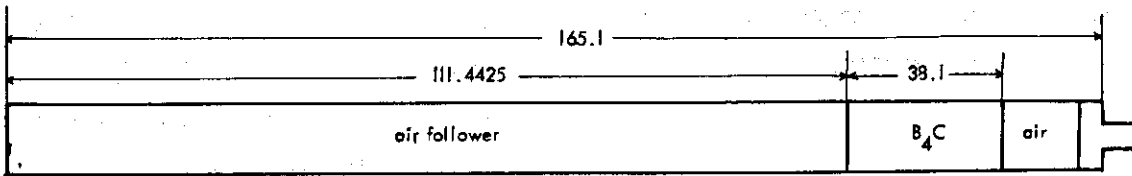


Fig. 2.2a ADJUSTABLE TRANSIENT ROD(in mm)

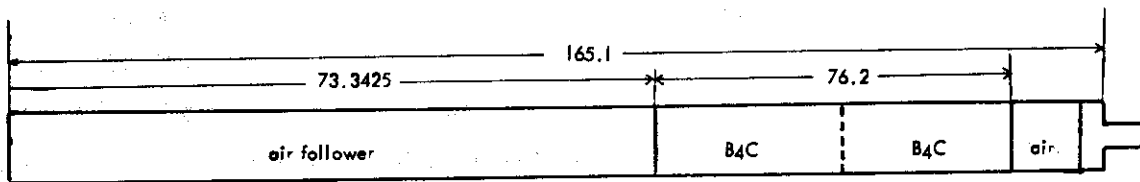


Fig. 2.2b FAST TRANSIENT ROD(in mm)

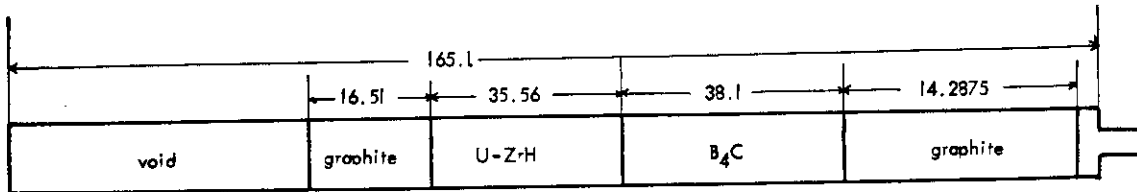


Fig. 2.2c REGULATING ROD AND SAFETY ROD(in mm)

および Fig. 2.2a, Fig. 2.2b, Fig. 2.2c に示されている。

パルス棒は、1本の調整用パルス棒 (one adjustable transient rod) と2本の高速パルス棒 (two fast transient rods) からなっている。

調整用パルス棒は Fig. 2.2a に示すように 38.1 cm 長の毒物部分 (B_4C) を持ち、この制御棒が炉心に挿入されているときは、この毒物部が炉心内に収まるようになっている。毒物部の長さは、次の高速パルス棒と合わせて、希望のパルス反応度の大きさに見合うように調整されるべきものである。この制御棒の上下は、中性子束のピーキングを抑えるとともに急速に引抜くときに便利なようにできるだけ軽くする為、空気フォロー (air filled follower) が付いている。

高速パルス棒は Fig. 2.2b に示すように、76 cm 長さすなわち炉心高さの約2倍の毒物部を持ち、上下には空気フォローが付いている。希望するパルスを作る為の反応度の大部分はこの制御棒が受けもつ。平常時には、この毒物部の上半分が炉心内に収まっていて、パルス発生時には急速に引抜かれる。毒物部が炉心長の2倍あるのは、このパルス棒を動かしているとき、前半の38 cm のストロークでは、炉心内に下半分が未だ収まっているので、反応度の変化は起らず、このままできるだけ高い速度にまで、このパルス棒の引抜き速度を加速させることができる。したがって、下半分の38 cm の部分が動いているときは、最大の速さのストロークなので、非常に速い反応度変化、すなわち、パルスを得ることができる。

調整棒 (6 regulating rods) および安全棒 (2 safety rods) は同一構造で、Fig. 2.2c に示すように炉心の高さと同じ38 cm の毒物部を持ち、この部分が毒部としてさらに有効に働らくように、その下部に36 cm 長さの燃料部を有している。したがって通常はこの燃料部が炉心内に収まっている。調整棒は臨界性の調整等に合わせて適当に毒物部が挿入されるが、緊急時には、パルス棒とともに落下してスクラム用としての役割も果す。安全棒は専ら、緊急時のときのバックアップとして炉心内に落下するよう設計される。

制御棒は以上のようにいろいろあるが、制御棒効果の計算の際には、炉心内における実質的な働きから、高速パルス棒と調整用パルス棒とは同じ、また、調整棒と安全棒とは同じ種類として扱う。

3. 計 算 方 法

制御棒効果の計算は、Fig. 3.1に示されるように、制御棒が同心円上に配置されているので、2次元拡散コードEXTERMINATOR-2⁵⁾を用いる際に、 $R-\theta$ 座標を適用して行われた。Fig. 3.2に示すように、制御棒領域(図の $a'a''b'b''$ 内の面積)は制御棒面積と等価に採っている。制御棒はこれを厳密に取り扱うのは難しいので、ここでは制御棒セルを考えて、これに輸送方程式を適用して得られた中性子束から、制御棒境界に対する対数微分条件(logarithmic derivative condition $C \equiv -(D/\phi) \cdot (d\phi/dr)$)を求め、この結果を2次元拡散コードの入力として用いる。この対数微分条件を求める場合、制御棒セルはFig. 3.3に示すようにバウムクーヘン型の炉心の6分の1と等価な円を考える。これは調整棒6本が配置されているときに相当するが、他の制御棒計算にもこれから求められたものを用いる。Fig. 3.4は実際に解かれるべき制御棒セルを示している。Table 3.1に制御棒セル計算の際に用いられた原子数密度を示す。この計算では、非制御棒領域は均質として扱ったが、これは全炉心体系での制御棒効果を計算する場合と同じ近似条件で対数微分条件を定めておく必要があるからである。

2次元拡散コードに入力する群定数としては、すなわち、炉心および反射体の群定数は、既に反応度係数を求めるときに作られた非均質炉心群定数を用いる。熱群の上限境界は1.125eVを採っているので、熱外エネルギーの一部をも含んでいる熱群と考えられる。最も顕著な制御棒効果を与えるのはこのエネルギー領域なので、対数微分境界を求める計算は熱群に対してのみ適用された。この原子炉では、熱中性子スペクトルが反応度計算の精度にかなり効いてくるので、熱群の群数は多い方がよいが、温度係数の計算の際の経験から、4を採用した⁹⁾。高速群は制御棒領域、非制御領域ともB1近似を適用して求められた群定数が用いられた。B1近似は中性子減速方程式を積分型で解くので、この原子炉のように全減速散乱マトリックスを必要とする体系を解くのに適している。燃料および実験物の共鳴吸収計算には非均質補正Dancoff correction^{*2)}を採り入れている。エネルギーの分け方はTable 3.2に示してある。これらは高速エネルギー側に対しては、分裂スペクトル、共鳴の分離領域、非分離領域などを考慮して分けられた。熱エネルギー側に対しては、散乱カーネルの計算の際の減速材(ZrH および H_2O)中の水素の振動数スペクトルの構造などを考慮して分けられている¹⁷⁾。

以上の計算手段は炉心および実験物に対して適用されたが、一覧表をTable 3.3に示す。

実験物は現在のところBWR燃料の1本ピン、4本ピン、9本ピン、49本ピンおよびFBRアセンブリ(付録Aの図を参照)などを予定しているが、ここではBWR燃料についてのみの検討を記す。実験物領域には試験燃料ピンセルを解いて得られた中性子束でWrapper tube内を平均化して求めた群定数が用いられている。炉心および試験燃料ピンの群定数については温度依存性は採り入れられていない。実験孔内の空気(ポイド)に対する群定数は酸素(O_2)

*2) 格子状に配置されている燃料の幾何学的表面積を S として、燃料相互間のshadowingによる影響を考慮した実効表面積を S_{eff} とすると、Dancoff correction C の物理的意味は次式によって示される。 $S_{eff} = (1-C)S$ 。ここでは格子系を正確に積分型輸送理論で解いて求める計算コードFDASQH E⁴⁾によった。

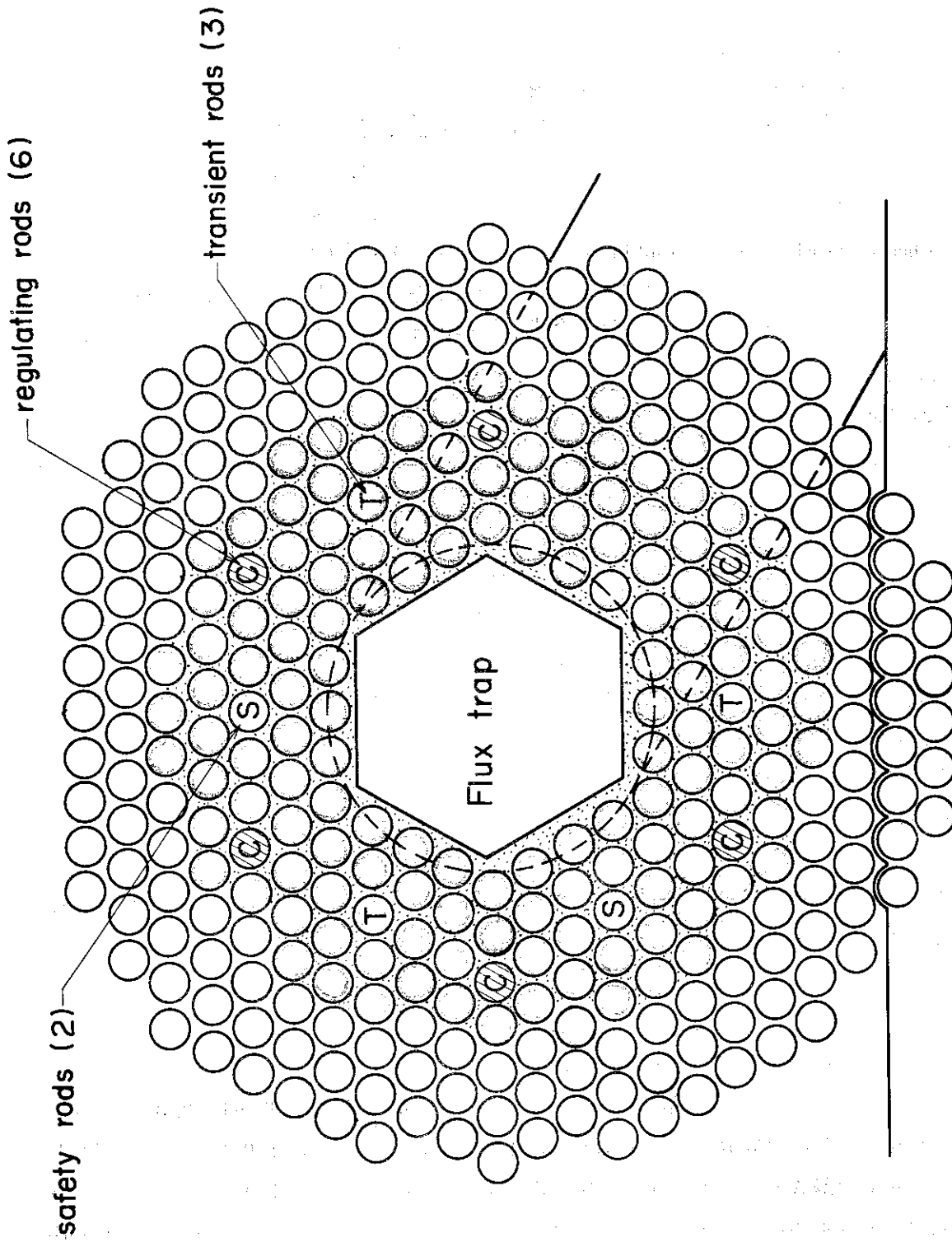


Fig. 3.1 NSRR CORE ARRANGEMENT

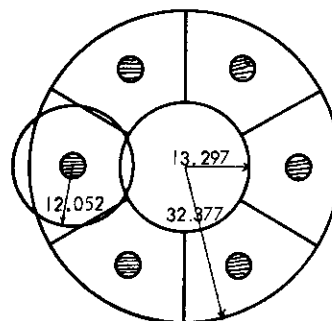
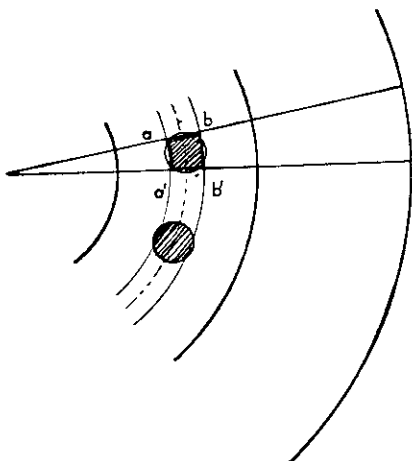


Fig. 3.2 B₄C REGION IN R- θ DIFFUSION CALCULATION

Fig. 3.3 B₄C ROD CELL EQUIVALENT TO 1/6-CORE (in cm)

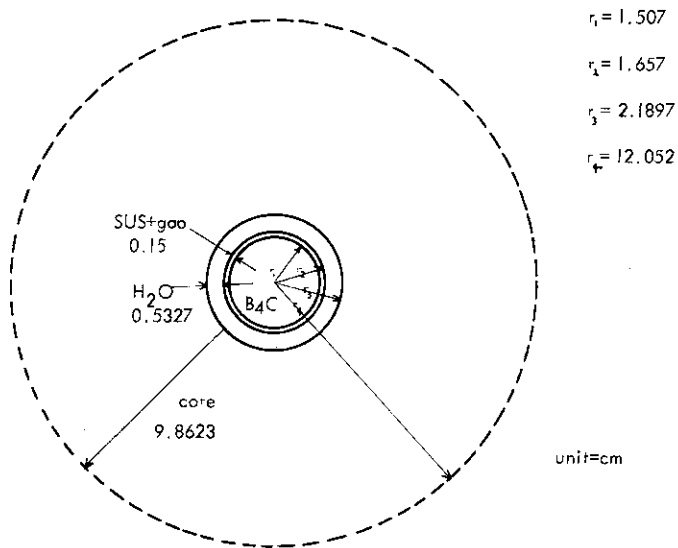


Fig. 3.4 CONTROL ROD CELL

Table 3.1 ATOMIC DENSITY FOR NUCLIDES USED IN CONTROL ROD CALCULATIONS

Nuclide	B ₄ C	cladd.	core
B	0.02177		
C	0.005442		
SUS (SST)		0.05709	3.2425×10^{-3}
Fe		0.040864	2.4545×10^{-3}
or Ni		0.004994	2.9995×10^{-4}
Cr		0.01123	6.7459×10^{-4}
H (ZrH)			0.034919
H (H ₂ O)			0.017577
Ox			0.087887
²³⁵ U			2.28596×10^{-4}
²³⁸ U			9.16347×10^{-4}
Zr			0.022298

unit = 10^{24} atoms/cc

Table 3.2 BROAD GROUP ENERGY BOUNDARIES

group number	fast	thermal
1	10. MeV - 3.68 MeV	6 1.125 - 0.42 eV
2	3.68 MeV - 1.35 MeV	7 0.42 - 0.14 eV
3	1.35 MeV - 0.64 MeV	8 0.14 - 0.05 eV
4	0.64 MeV - 9.12 KeV	9 0.05 - 0.0 eV
5	9.12 KeV - 1.125 eV	

Table 3.3 CALCULATIONAL METHODS

Thermal Group

group constants	THERMOS
sigma library	30 energy points, below 1.125 eV
kernels	UNCLE (SUMMIT) for ZrH_2 GASKET-FLANGE for H_2O free gas for others

Fast Group

all	GAM-1 , GGC
-----	-------------

One Dimensional Diffusion

temperature coefficients	GURNET-1
λ_p, β_{eff}	GURNET-2

Two Dimensional Diffusion

control rod worths	EXTERMINATOR-2
logarithmic boundary conditions	THERMOS

を考えているが、その拡散係数 D は、GEESで行われた実験孔内が全て空気および軽水の場合についての2次元計算(R-Z)の結果の K_{eff} ⁶⁾に対して、 D をパラメータとしてEXTERMINATOR-2のR-Z計算の結果を規格化して定められた値を参考にして修正した。^{*3)} またこの拡散係数は、空孔を含む系の空孔の拡散係数を解析的に求めるGarelis²¹⁾の方法によっても確かめられ、ほぼ一致した。

*3) 空孔のように極端に大きな拡散係数の領域があると、EXTERMINATOR-IIで採用されているline overrelaxation法を用いた反復解法のみでは、解の収束性は非常に悪く、正確な解は得にくい。このような場合coarse mesh rebalancing法の併用が有効であることがGEESでの計算例⁶⁾で分っている。EXTERMINATOR-IIでは、このcoarse mesh rebalancing法が用いられていないので、便法として実効拡散係数を用いることにした。この際、実験孔内空気の場合と比較して軽水にした場合の軽水の反応度効果- $\$ 7.40$ を規格化の規準とした。

4. 結果と考案

制御棒効果 (control rod worth) としては、次のように定義しておく。

制御棒効果 (control rod worth)

$$= \frac{K_{out} - K_{in}}{K_{out}} = \frac{\Delta K}{K} \quad \left(\begin{array}{l} \text{反応度単位} \\ \text{in reactivity} \end{array} \right) \quad (4.1)$$

あるいは、

$$= \frac{\Delta K}{K} \frac{1}{\beta_{eff}} \quad \left(\begin{array}{l} \text{ドル単位} \\ \text{in dollars} \end{array} \right) \quad (4.2)$$

ここで、

K_{out} = 指定された制御棒が炉心外に抜かれている状態の K_{eff}

K_{in} = 指定された制御棒が炉心内に収まっている状態の K_{eff}

β_{eff} = 実効遅発中性子割合 (effective delayed neutron fraction)

また、制御棒間の相互干渉の目安としては、相互干渉効果 (interference factor) を次のように定義しておく。

相互干渉効果 (interference factor)

$$= \frac{1 \text{ 本平均の制御棒効果}}{1 \text{ 本単独の制御棒効果}} \\ = \frac{\frac{1}{N} \times [N \text{ rods worth }]}{\text{one rod worth}} \quad (4.3)$$

制御棒効果は、実験孔内に何が入るかによって異なるが、はじめに空気が入っている (ボイドと考えるとよい) ときのいろいろな状態について調べ、後で軽水が満たされたときの状態について述べる。最後に燃料ピン (BWR 燃料ピンのみ) が実験物として挿入されたときの影響についてふれる。

次の 4.1 および 4.2 節の全ての例についていえることは、この原子炉では制御棒の相互干渉はプラス (相乗作用) であったことで、一般的には、他のタイプの熱中性子炉でも制御棒の配置はこのようになるように配慮されている⁷⁾。

4.1. 実験孔が空孔の場合の制御棒効果

実験孔には空気 (ここでは空気中の酸素のみを考慮して) が入っているとして、また 2 本の安全棒はスクラムバックアップとして用いられるので、引抜き状態にあると考える。したがって安全棒のあった位置は炉心になっている。このような系での制御棒効果の計算をまず行った。その結果を Table 4.1 に示す。ここで単なる all rods worth とあるのは、調整棒 6 本、バルス棒 3 本、計 6 本が同時に挿入状態から引抜き状態になったことを示す。Control-

Table 4.1 CALCULATED WORTHS OF CONTROL RODS FOR THE NSRR

Case No.	Worth	With	$\Delta k/k$	total \$ each
1	All rods		0.09644	13.49
2	6 Control-safety	3 transient out	0.05937	8.30 1.38
3	6 Control-safety	3 transient in	0.06372	8.98 1.50
4	3 Transient	6 control-safety out	0.03345	4.69 1.56
5	3 Transient	6 control-safety in	0.03940	5.51 1.83
6	1 Control-safety	others in	0.01586	2.22 2.22
7	1 Transient	others in	0.01672	2.34 2.34
8	1 Transient	2 transient out, 6 control-safety in	0.01038	1.45 1.45
9	2 Transient	1 transient out, 6 control-safety in	0.02307	3.22 1.61
10	2 Transient	others in	0.02933	4.10 2.05
11	1 Transient	others out	0.00911	1.27 1.27
12	2 Transient	others out	0.01978	2.77 1.38
13	2 Back-up safety	6 control-safety in, 3 transient out	0.02569	3.59 1.80
14	2 Back-up safety	6 control-safety in, 3 transient in	0.03478	4.86 2.43
15	All 11 rods		0.1279	17.88

The calculations were performed for air in the central cavity.

$$\beta_{\text{eff}} = 0.00715$$

safety は実際の制御棒としての役割から調整棒のことを指す。同様に、Back-up safety は安全棒を指す。Transient はパルス棒を指す。with として示されている欄は、対象となっている制御棒以外の制御棒の状態を示している。制御棒効果は、 $\Delta k / k$ 或いは、 $\$$ で示してある。 $\$$ を計算するとき用いられた β_{eff} (実効遅発中性子割合) は、全てのケースに対して、実験孔に空気が入っていたとして求められた値を用いている。厳密には実験孔内の物質に依って $\beta_{\text{eff}}^{\text{B}}$ の値は異なるが、それも高々 3% 程度 (軽水のときが 0.00731, BWR 4 本ピンのときが 0.00709)¹²⁾ であるのでこの値を採用した。^{*4)} each は制御棒本数で割って 1 本当りの制御棒効果を算出したものである。以下に種々のケースについての結果とその検討を行う。特別な場合を除いては、炉心内径が 26.64 cm, 外径が 66.2 cm, 反射体の厚さが 10 cm のときの値である。

安全棒 2 本が引抜かれている状態で

- 1) 全制御棒効果は 13.49 ドルであった (case 1)。
調整棒のみの効果は 8.30ドル, パルス棒のそれは 4.69ドルで, 計 12.99ドル, したがって 4% が調整棒とパルス棒との相乗効果 (相互干渉) と思われる。調整棒とパルス棒との距離は約 8 cm である。
- 2) 全調整棒の効果は 8.30ドル から 8.98ドル の範囲で, 全パルス棒が挿入されているときの方が 8% 大きい。これはパルス棒による相乗効果の為と思われる (case 2, 3)。
- 3) 全パルス棒の効果は 4.69ドル から 5.51ドル の範囲で, 全調整棒が挿入されているときの方が 17% 大きい。これは調整棒による相乗効果の為と思われる (case 4, 5)。
- 4) パルス棒を含む全制御棒が挿入されているときのパルス棒 1 本の効果は 2.34ドル, 調整棒 1 本の効果 2.22ドル より大きい。これはパルス棒の方が調整棒より 3 cm 内側にあり, さらにパルス棒間の距離 33 cm が, 空孔実験孔を横切るのので, 直接相互作用し合うのは, 空孔の分を差し引いた 12 cm である (case 6, 7)。
- 5) 他の制御棒が一切挿入されていない状態で, パルス棒を 1 本, 2 本, 3 本と挿入していくと, パルス棒間の相互干渉を調べることができる。それぞれ 1 本当りの平均にすると 1.27ドル 1.38ドル, 1.56ドル で, パルス棒 2 本間の相互干渉は 9%, 3 本間のそれは 23% である (case 11, 2, 4)。因みにパルス棒間は 33 cm 離れているが空孔実験孔の為 12 cm が実際的と思われることは既に述べた。
- 6) 調整棒が挿入されている状態のときのパルス棒の 1 本, 2 本, 3 本の効果は, 1 本当りに換算して, それぞれ 1.45ドル, 1.61ドル, 1.83ドル とパルス棒の数の増加にしたがって増加していく。これは各々のパルス棒と周囲の調整棒の相乗作用プラスパルス棒間の相互干渉効果が加わった為と思われる。因みに一番近いパルス棒と調整棒との距離は約 8 cm である (case 8, 9, 5)。

実際には, パルス運転の際には, 希望のパルス反応度の大きさを得る為, 調整棒は炉心内の適当な位置にあるはずである。したがって, パルス棒の効果は 5) と 6) の間にあるはずである。Fig. 4.1 にそれを示した。曲線の勾配は, 制御間の相互干渉の様子を示し, 破線は調整棒が抜かれているとき, 一点破線は調整棒が挿入されているときである。実線はひとつの例

*4) 制御棒のいろいろな挿入状態のときでも β_{eff} の値が異なると思われるが今回の計算では調べていない。

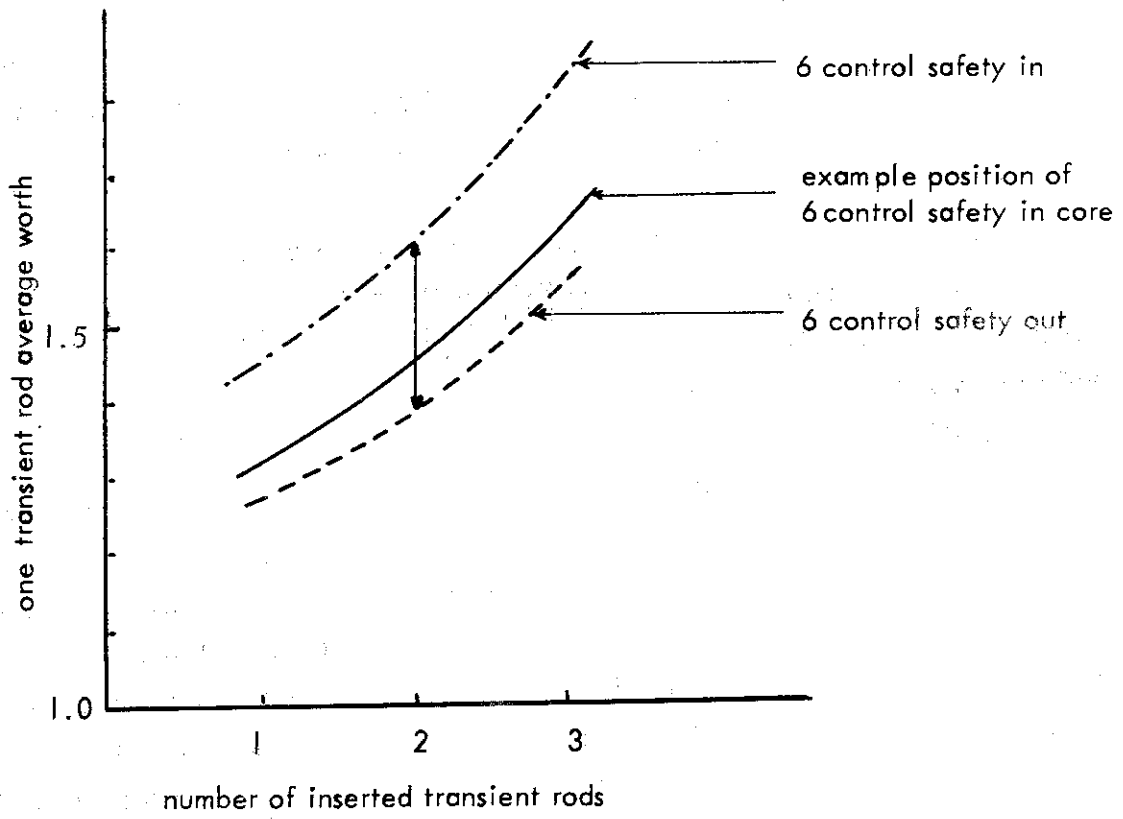


Fig. 4.1 ONE ROD AVERAGE WORTH OF TRANSIENT ROD

として調整棒が炉心に何割か挿入されているときを示す。調整棒の炉心内の位置とパルス棒効果との関係はS字形といわれているが、炉心中央部では直線近似が成り立つ(これについての詳細は付録Cを参照)。

7) 他の制御棒が全て挿入されているときのパルス棒の効果は1本のときは2.34ドル, 2本のときは4.10ドル, 3本のときは5.51ドルで, 1当りに平均するとそれぞれ2.34ドル, 2.05ドル, 1.83ドルである。この減少する方向は, それぞれ他のパルス棒が少なくなることによる影響による(case 7, 10, 5)。

2本の安全棒は, パルス棒が存在する同心円上で, パルス棒と異なって, 抜けた後は燃料と入れ換っている(パルス棒は, ボイドと入れ換わる)。したがって

8) 他の制御棒が入っているとき, 2本の安全棒の効果4.86ドルは, 2本のパルス棒の効果4.10ドルより19%高くなっている。

9) パルス棒の位置は通常パルス棒が抜かれている状態ではボイドであるが何かの原因で軽水が入った場合のパルス棒1本の効果をTable 4.2に示す。ボイドのときの1.95ドルに対して, 軽水のときは, 2.15ドルで10%増加する。このことはボイドのときより軽水のときの方が, パルス棒チャンネル内に熱中性子が多く存在することによるとと思われる(付録Table B. 2の K_{eff} を見よ)。

10) Table 4.3には炉心の周囲の環境がいろいろ変ったときの制御棒効果を示す。

イ) 炉心寸法(半径方向)が1cm小さくなると, 全制御棒効果(調整棒とパルス棒)は0.2%大きくなる。このことは, この程度の炉心寸法の変化では炉心の中性子束分布には殆んど影響しないと思われる(case 18)。

ロ) 現在の炉心反射体(軽水)は計算時間の都合上約10cmしかとっていないが, 一般には経験的に30cm程度必要と思われる。ここで厚さ10cmのときと30cmのときとの全制御棒効果を比較すると, 厚さ30cmのときの方が10%減少する。このこと反射体の厚さはこのような小型原子炉では, 炉心の制御棒附近までの中性子束分布に影響を及ぼすことを示す。

ハ) 現在中央実験孔に対する群定数の拡散係数Dは既に第3章で述べたようにパラメーターサーベイで定めた値であるが, 元の群定数そのままのボイドのDを用いると, 全制御棒効果12.55ドルで現在の効果13.49ドルと異ってこの差は無視できない。これはボイドの群定数をどう定めるかという問題に帰着する(case 20)。

case 21 以下は中央実験孔に何か物質を入れた場合なので次の4.2節で記述する。

ここで実際に原子炉を運転する際の手順と余裕度(margin)について調べてみよう。Table 4.4参照。

(i) 余裕反応度(excess)を10.2ドルとすると, 原子炉停止余裕反応度(shut down margin)は3.29ドルなので, 充分であると思われる。更に, その際何かの原因で1本の調整棒が炉心から抜け出したとしても尚1.07ドルの余裕があり, 或いは1本のパルス棒が抜け出たとしても約1.0ドルの余裕がある(one rod stuck margin)。

(ii) 原子炉の停止状態から, 6本の調整棒を同時に37%($3.29 \div 8.98 = 0.37$)*5) 引抜く

*5) 制御棒引抜き度と制御棒効果とは一般にS字形曲線の関係があるがここでは直線近似とした。付録C参照。

Table 4.2 ONE TRANSIENT ROD WORTHS FOR WATER INSTEAD OF VOID IN THE TRANSIENT ROD REGION

Case No.	Worth	With	$\Delta k/k$	\$	Note
16	1 Transient	6 control-safety out, 2 transient in	0.01537	2.15	water in transient rod
17	1 Transient	6 control-safety out, 2 transient in	0.01395	1.95	void in transient rod

Table 4.3 CALCULATED WORTHS FOR VARIOUS CIRCUMSTANCES

Case No.	Worth without safety rods	$\Delta k/k$	total (\$)	each	Notes
18	All	0.09668	13.52		core size = 32.066 cm cf. 13.49 for 33.066 cm
19	All	0.08661	12.11		reflector width = 30 cm cf. 13.49 for 10. cm
20	All	0.08975	12.55		$D \sim \times 10^3$, $B^2 \sim \times 10^{-7}$ for void
21	All	0.1048	14.66		flux trap = water, cf. 13.49 for void
22	3 Transient without control	0.03241	4.53	1.51	flux trap = water, cf. 1.56 for air
23	1 Transient without control	0.00797	1.12	1.12	flux trap = water, cf. 1.27 for air

Table 4.4 CALCULATED OPERATIONAL SEQUENCES (IN DOLLARS)

(i)

excess	10.2	
all rods	-13.49	with safety rods out
<hr/>		
	-3.29 shutdown margin
one control rod out	+2.22	
(one transient rod out	+2.34)	
<hr/>		
	-1.07 margin for one control rod pulled
	(-0.95) (margin for one transient rod pulled)

(ii)

excess	10.2	
all rods	-13.49	
<hr/>		
	-3.29	
	+3.29 raise 6 control rods bank by 37 % out
<hr/>		
	0 reactor critical at low power
	5.0 pulse appropriate to transient rods
	-13.49 scram after pulse, inserts all rods
<hr/>		
	-8.49 shutdown margin after pulse

と原子炉が臨界状態を保ち、このとき、5ドルの反応度を持つパルス棒を引き抜いたとすると、パルス発生後、原子炉を停止されたときの停止余裕反応度は (shut down margin after pulse) は、8.49ドルとなる。調整棒の引き抜き位置とパルス棒効果との関係は Fig. 4.1 に示してあることは既に述べた。

4.2. 実験孔に物質が入った場合の制御棒効果

前節で、実験孔が空孔の場合についていろいろ調べてきたので、ここではいくつかの点について、中央実験孔に軽水およびBWR燃料ピンが入った場合について調べておく。

実験孔に水が入っている場合 (Table 4.3 参照)。

- 1) 実験孔が空孔から水に換わると全制御棒効果 (調整棒とパルス棒) は9%の増加となって現われる。このことは実験孔の物質の存在が炉心の制御棒位置の中性子束空間分布に、少なくとも、空間から軽水に換われれば影響を及ぼすことを示す (case 21, case 1)。
- 2) パルス棒間の干渉効果は、空孔実験孔の場合の22% (case 4.11) に比べて、軽水実験孔の場合は35% (case 22, 23) とかなりの増加を示す。実験孔内の軽水は、減速材および反射体としての機能を持つと同時に中性子の実験孔透過に対しては、吸収体としても影響を及ぼし、これら3つの機能が競合して、制御棒効果に作用する。パルス棒間の干渉効果が空孔実験孔の場合より、軽水実験孔の場合の方が大きくなるのは、空孔の場合には、そのまま突き抜けてしまい中性子が、軽水があると途中で減速されるため、制御棒挿入による中性子束分布の歪みの波及が熱群にしわ寄せされるためと考えられる。
- 3) 実験孔が空孔から軽水に換わると、パルス棒3本の効果そのものは3%減少し (case 4.22)、パルス棒1本の効果は12%減少する (case 11, 23)。実験孔が軽水で満たされると干渉効果は増加するのに制御棒効果そのものの絶対値が減少するのは、軽水の減速および吸収作用により、制御効果のウェイトの大きい6,7群の中性子分布が、パルス棒位置で8,9群に比較して相対的に低下する為と考えられる。このことがパルス棒本数が少ないときの方が中央実験孔の影響を受けやすいことを示すと思われる。

実験孔にBWR燃料ピンが入っている場合 (Table 4.5 参照)。

ここで計算対象としたのは、JPDR (BWR) 燃料ピンの1本、4本、9本、49本の場合で、図面については付録Aを参照されたい。原子炉のパルス運転のことを考えて、ここでは、パルス棒効果についてのみ記述する。

燃料ピン1本の場合	4.74 ドル
燃料ピン4本の場合	4.69 ドル
燃料ピン9本の場合	4.70 ドル
燃料ピン49本の場合	4.43 ドル

比較のために実験孔内が空孔のときと軽水のときを示すと

空孔の場合	4.69 ドル
軽水の場合	4.53 ドル

上の燃料ピンの場合は49本を除いては空孔の場合と変わらないと考えてよい。

燃料ピン49本の場合は明らかに9本までの場合とは異っており、かつ軽水が実験孔に満た

Table 4.5 CONTROL ROD WORTH WITH EXPERIMENTAL MATERIALS

Worth	Experiments	k with		$\Delta k/k$	\$	Convergence		C.P.U. Time (min.)
		C, V	C, B			flux	k	
3 Transient without 6 control	1 pin	1.12091	1.08289	0.03392	4.74	$10^{-3}(10^{-3})$	$10^{-5}(10^{-7})$	150 (160)
	4 pins	1.12869	1.09026	0.03352	4.69	$10^{-3}(10^{-5})$	$10^{-5}(10^{-5})$	150 (160)
	9 pins	1.13185	1.09374	0.03363	4.70	10^{-3}	10^{-5}	200
	49 pins	1.13095	1.09507	0.03170	4.43	10^{-3}	10^{-5}	150

C = fuel instead of regulating rod, V = void instead of transient rod, B = B₄C.

The quantity in () shows the convergence for [C, B] case.

された場合より制御棒効果は低くなっている。これは燃料ピンが9本までは実験孔内のかなりの部分はボイドになっているのに反して、49本の場合はボイド部分が少なくなっており、試験燃料を収めたキャプセル内の軽水と燃料の吸収作用が効いてくるようになるためであろう。

4.3 中性子束分布について

ここでは、実験孔内に物質が入ったとき、炉心中性子分布、すなわち制御棒に対して、どのように影響を及ぼすかを中心に議論する。実験孔内の物質について、空孔、軽水および前節でとりあげたBWR燃料ピンをとりあげる。中性子束分布は、熱群の第9群（一般の原子炉の熱中性子エネルギーに相当）を図示してあるが、Fig. 4.2 aとFig. 4.3は比較の為第5群（高速群に入る）と第6群（熱群に入る）とを一緒に示しておいた。

イ) 実験孔内が空孔の場合と軽水の場合については全制御棒（調整棒とパルス棒）が挿入されているときを調べる。Fig. 4.2 aはパルス棒上を通る半径方向の中性子束分布で、実験孔が空孔の場合である。実験孔内の中性子束分布は、炉心中性子束分布によって著しく影響を受けることがわかる。実験孔内には減速物質がないので、高速中性子は、減速しないまま通過してしまふ。第5群には、制御棒に対する対数微分条件を適用していないので、熱中性子群中性子束分布のように制御棒周辺の中性子束分布が忠実に再現されていない。Fig. 4.2 bは、パルス棒の中心を通る円周上の角度方向の中性子束分布（第9群）である。調整棒による相乗作用の影響が現われている。

Fig. 4.3には、実験孔内に軽水が入ったときの半径方向の中性子束分布（第5群、第6群および第9群）である。実験孔の影響は空孔の場合よりはかなり小さくなっているが、若干の影響が見られる。実験孔内で軽水によって熱中性子が作られるので、第5群と熱中性子群の中性子数（中性子束）の割合は全く異っている。空孔の場合は、第5群、第9群、第6群と中性子束が減少していくが、軽水の場合は、第9群、第5群、第6群と減少していくのが、そのことである。

ロ) 実験孔内にJPDR(BWR)燃料ピンが入っている場合については、実際面から、パルス棒3本が挿入されたときを考える。半径方向の中性子束分布で第9群（一番熱化の強い群）をとり上げる。

Fig. 4.4から明らかなように、燃料1本ピンの実験孔内の中性子分布はパルス棒による影響を殆んど受けない。このことは実験物と炉心を核的にdecoupleするという設計目標を裏付けるものである。一方、反射体と制御棒との相互干渉の結果が見られる。圧力管(Pressure tube)として用いられる厚さ約1cmのステンレススチール(SUS)は、吸収材として働き、ボイド(void)中の中性子束分布に勾配を持たせている。燃料ピンの隣りの軽水は、燃料ピンにかなりの熱中性子束を与える要素となっている。

Fig. 4.5は、燃料ピンが4本の場合である。燃料ピンと炉心との相互干渉が見られないことと、反射体と制御棒との干渉の存在などは1本ピンの場合と同様である。ボイド中の中性子束の勾配が見られないことと、燃料ピンで差程熱中性子が得られないのは、1本に比して、ボイドの領域が広く、したがって軽水の領域が狭くなっている為と思われる。ボイド領域からのZ方向への洩れを考えると、ボイド領域の広い方がボイド領域内の中性子束分布の勾配が大

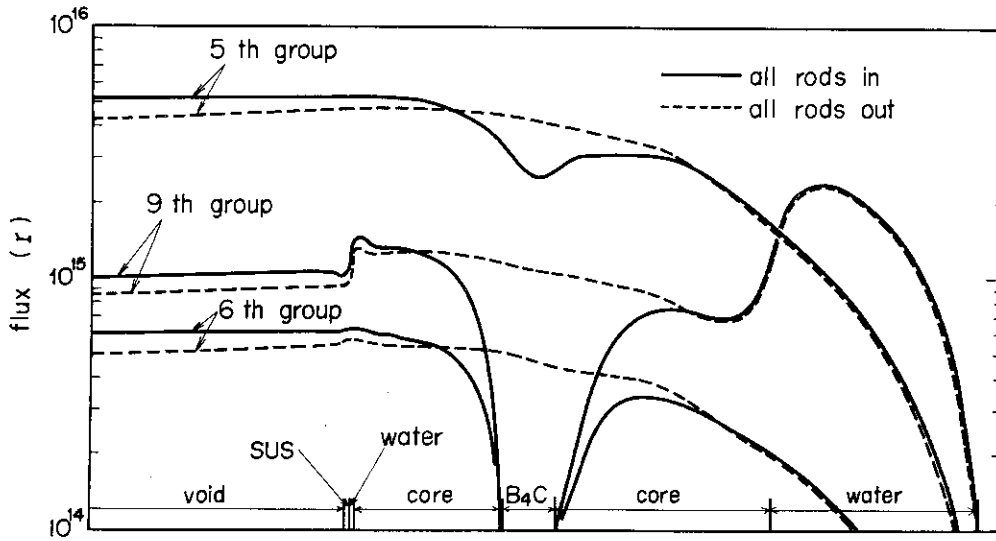


Fig. 4.2a FLUX DISTRIBUTION IN THE FLUX TRAP WITH AIR

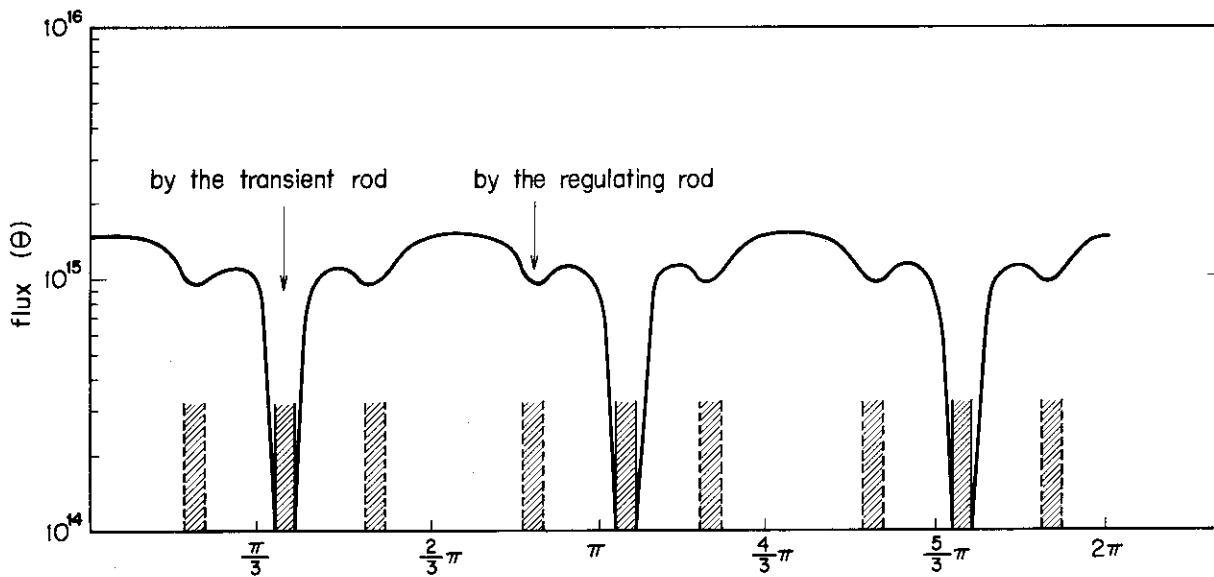


Fig. 4.2b ANGULAR FLUX DISTRIBUTION IN THE FLUX TRAP WITH AIR

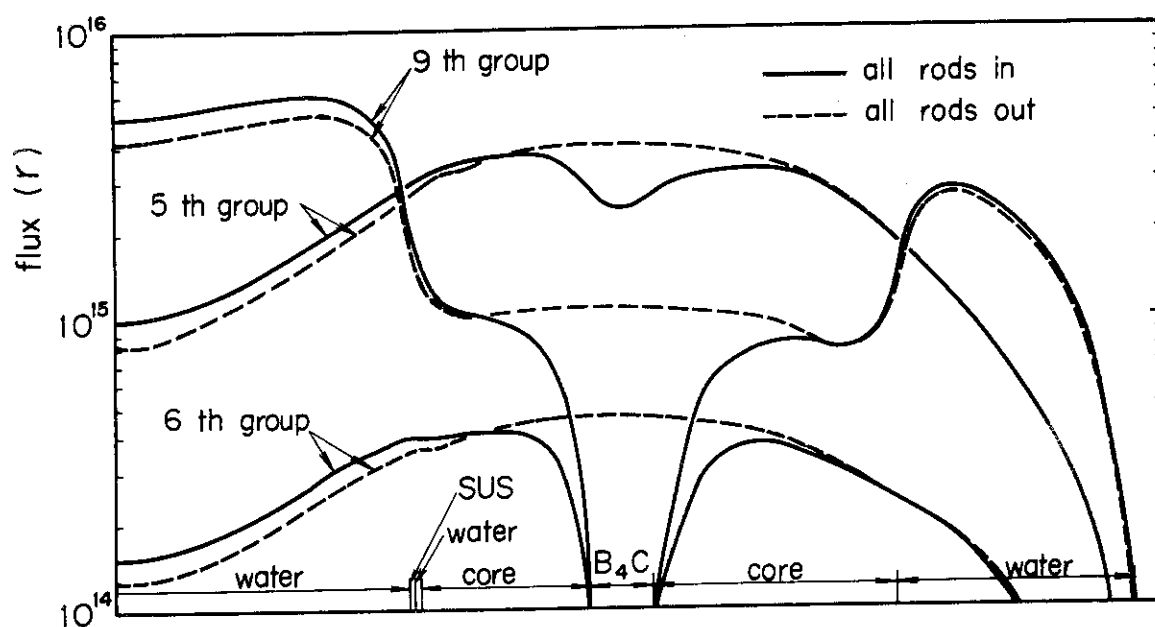


Fig.4.3 FLUX DISTRIBUTION IN THE FLUX TRAP WITH WATER

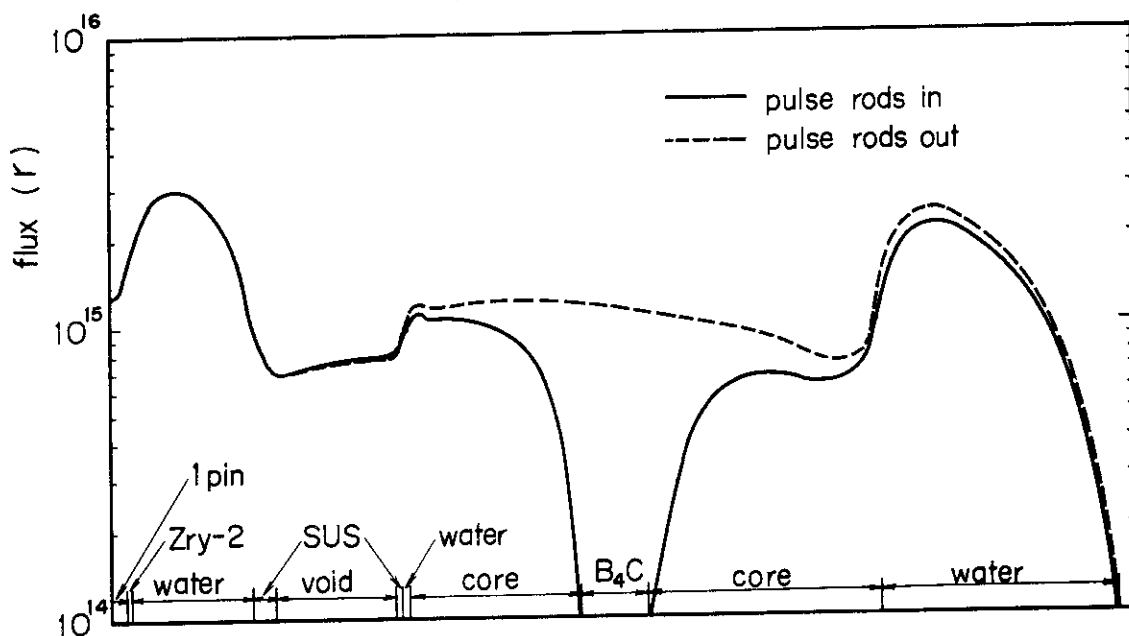


Fig.4.4 FLUX DISTRIBUTION IN THE FLUX TRAP WITH 1 PIN

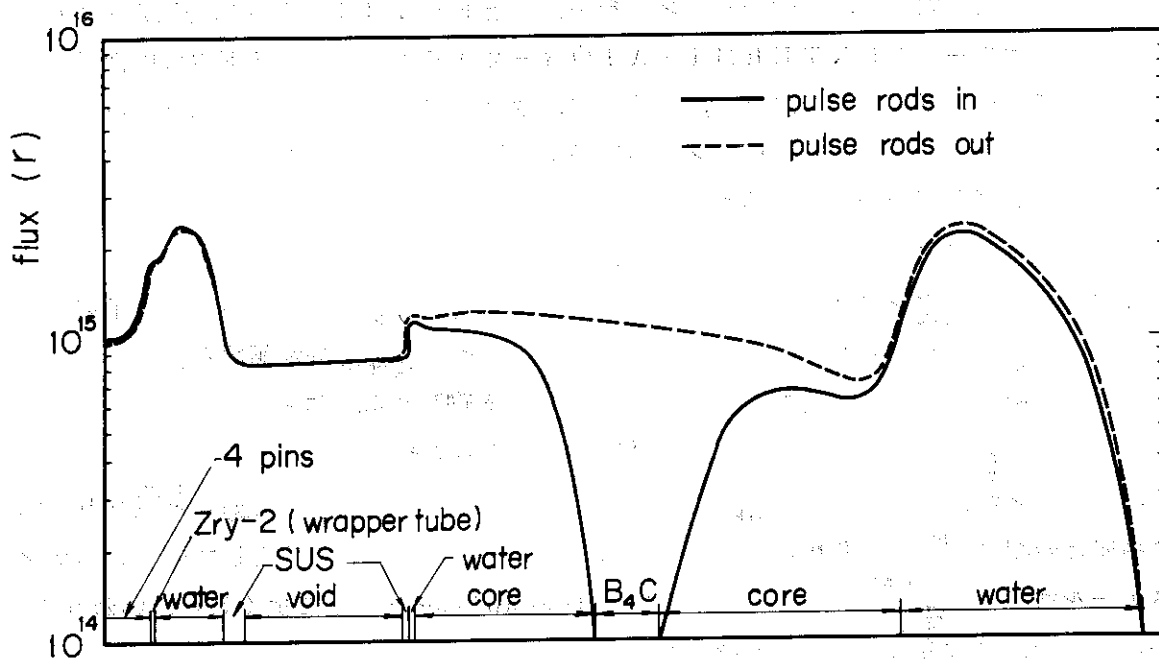


Fig.4.5 FLUX DISTRIBUTION IN THE FLUX TRAP WITH 4 PINS

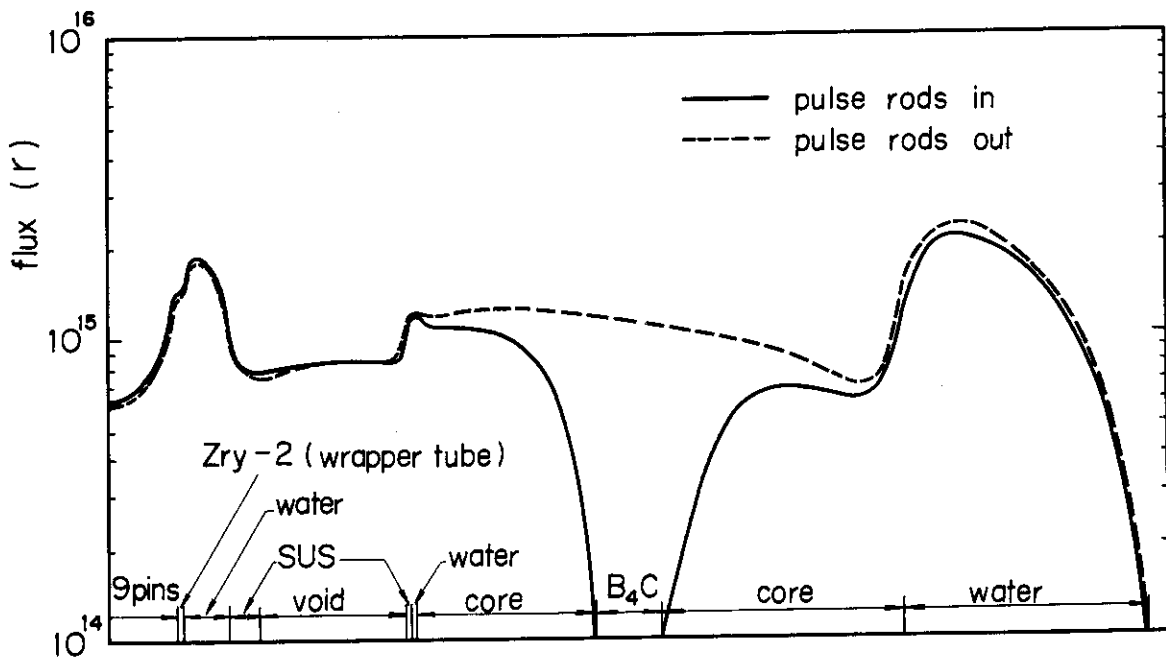


Fig.4.6 FLUX DISTRIBUTION IN THE FLUX TRAP WITH 9 PINS

きくなるように思えるかも知れないが、実験孔内の軽水によって熱化された中性子のSUSによる吸収の方が効果が大きく、中性子バランスを考えるとFig. 4.4のように勾配がであるのである。しかし拡散コード(EXTERMINATOR-2)で計算したボイド内の中性子束分布それ自体の意味を重視するのではなく、あくまで、中性子バランスで考えるべきであろう。燃料ピンの領域が広くむったのも燃料ピン内中性子束に影響を及ぼすことと思われる。

Fig. 4.6は、燃料ピン9本の場合である。4本ピンと同様のことが同じような理由でいえるが、燃料ピン内の中性子束は一層下っている。

Fig. 4.7は、燃料ピン49本の場合である。この場合は、燃料ピンと炉心の中性子束の干渉は見られるが若干である。実験物領域が広がって、ボイド領域と軽水領域が狭くなっているため、ボイドの中性子束が圧力管(SUS)の中性子吸収の為、勾配がかなり急になっているのと、燃料ピン内の中性子束が小さくなっているのが見られる。

以上、燃料ピンが実験孔に入った場合は、燃料ピンと炉心との相互干渉は殆んど見られないが、反射体との相互干渉が見られることが共通した結論といえる。圧力管としての厚いステンレススチールは、実験物と炉心との核的分離体(decoupling)として働くことがいわれている⁶⁾が、我々の計算でもこのことが確認されたといえる。

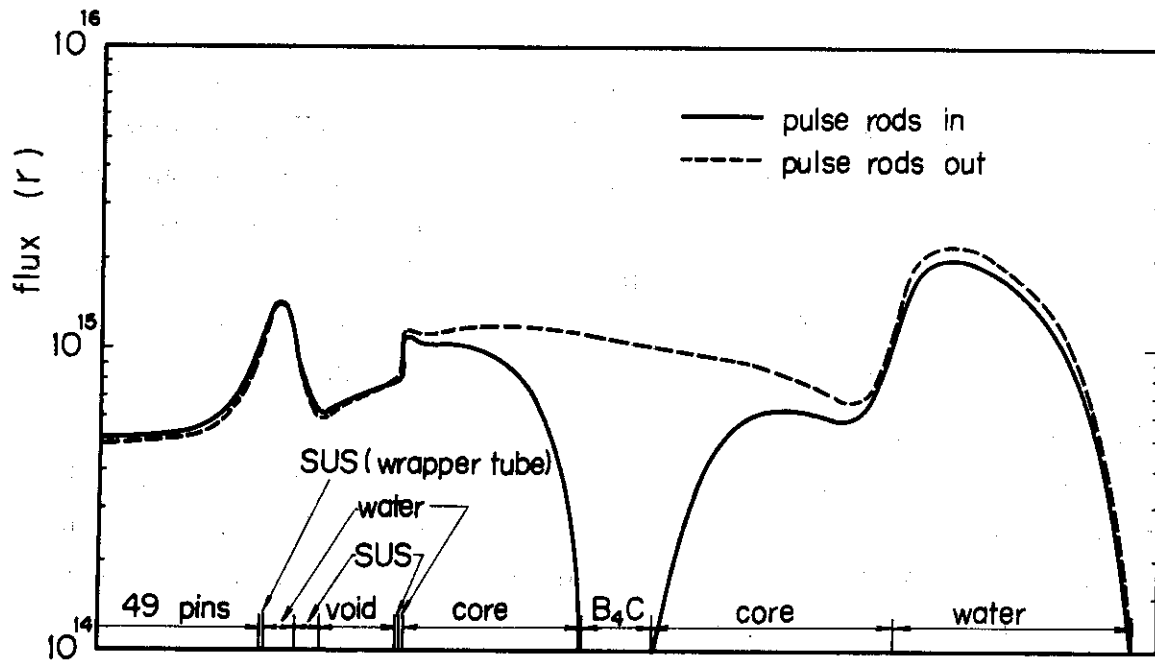


Fig.4.7 FLUX DISTRIBUTION IN THE FLUX TRAP WITH 49 PINS

5. あ と が き

制御棒効果はいいふるされていることではあるが、臨界計算以上に困難な点が多い。特に、2つの比較的近い量の K_{eff} の差をとるので、非常に高い精度少くとも 10^{-5} 以上の精度が要求される。また、制御棒自身強い吸収体であるので、その影響が、拡散近似では充分追跡できないことが多い。我々の計算では、この点では、炉心の対称性が使えなくて、大変長い計算（1ケース2時半以上）かかった。また、NSRRでは、別の報告¹⁰⁾でも述べたように多群、特に熱エネルギーを多群にしなければならなかったことで、そのため、2次元拡散計算で上方散乱を考慮しなければならぬことになり、一層計算時間がかかった理由でもある。対数微分条件を計算する際の問題点は、対数微分条件は、中性子束からの計算では、選ぶメッシュ点によりなかなか一義的に定まらないことである。しかしながらいろいろな制御棒効果の相関関係については、かなり良い結果を得られたと思われる。特にGEESの計算⁶⁾では、全体系をR- θ でなく、X-Y方向に分割している（これはGAMBLEコード¹⁴⁾では、R-ZとX-Yしか出来ない為と思われる）点に比して、炉心の制御棒配置から、我々の方がかなり多いと思われる。

実験物を考慮した場合についてはGEES⁶⁾では、行われていないので、我々の計算結果は今後参考になるであろう。

今後の改良点としては、現在の熱群データライブラリーのエネルギー点を更に細かくすることと、上に述べたような種々の問題点、とりわけかなりの時間数がかかるのであるので、制御棒効果計算において、できるだけ早い2次元輸送コードなど¹⁶⁾の適用も考慮されるべきかも知れない。あるいは、2次元拡散コードEXTERMINATORの改良（粗格子リバランス²⁰⁾など取り入れて）をはかる必要があろう。一方、ZrHを減速材とするTRIGA型原子炉の炉物理実験データは意外と乏しいので、実験も並行して行われ、理論と実験とを対比できる体制ができることが望ましい。

6. 謝 辞

NSRRの一連の研究に関心を持ち、激励された桂木学氏（核設計研究室長）に謝意を表わします。石川迪夫氏（反応度安全解析研究室長）にはGEESからTRIGA炉に関するデータをいろいろ頂きました。金子義彦氏（炉物理実験研）には、制御棒に関する議論をして頂きました。平川隆氏（計算センター室長）はFACOMの使用で大変便宜をはかってくださいました。ここに合わせて、謝意を表わす次第です。

5. あ と が き

制御棒効果はいいふるされていることではあるが、臨界計算以上に困難な点が多い。特に、2つの比較的近い量の K_{eff} の差をとるので、非常に高い精度少くとも 10^{-5} 以上の精度が要求される。また、制御棒自身強い吸収体であるので、その影響が、拡散近似では充分追跡できないことが多い。我々の計算では、この点では、炉心の対称性が使えなくて、大変長い計算（1ケース2時半以上）かかった。また、NSRRでは、別の報告¹⁰⁾でも述べたように多群、特に熱エネルギーを多群にしなければならなかったことで、そのため、2次元拡散計算で上方散乱を考慮しなければならないことになり、一層計算時間がかかった理由でもある。対数微分条件を計算する際の問題点は、対数微分条件は、中性子束からの計算では、選ぶメッシュ点によりなかなか一義的に定まらないことである。しかしながらいろいろな制御棒効果の相関関係については、かなり良い結果を得られたと思われる。特にGEESの計算⁶⁾では、全体系をR- θ でなく、X-Y方向に分割している（これはGAMBLEコード¹⁴⁾では、R-ZとX-Yしか出来ない為と思われる）点に比して、炉心の制御棒配置から、我々の方がかなり多いと思われる。

実験物を考慮した場合についてはGEES⁶⁾では、行われていないので、我々の計算結果は今後参考になるであろう。

今後の改良点としては、現在の熱群データライブラリーのエネルギー点を更に細かくすることと、上に述べたような種々の問題点、とりわけかなりの時間数がかかるのであるので、制御棒効果計算において、できるだけ早い2次元輸送コードなど¹⁶⁾の適用も考慮されるべきかも知れない。あるいは、2次元拡散コードEXTERMINATORの改良（粗格子リバランス²⁰⁾など取り入れて）をはかる必要があるだろう。一方、ZrHを減速材とするTRIGA型原子炉の炉物理実験データは意外と乏しいので、実験も並行して行われ、理論と実験とを対比できる体制ができることが望ましい。

6. 謝 辞

NSRRの一連の研究に関心を持ち、激励された桂木学氏（核設計研究室長）に謝意を表わします。石川迪夫氏（反応度安全解析研究室長）にはGEESからTRIGA炉に関するデータをいろいろ頂きました。金子義彦氏（炉物理実験研）には、制御棒に関する議論をして頂きました。平川隆氏（計算センター室長）はFACOMの使用で大変便宜をはかってくださいました。ここに合わせて、謝意を表わす次第です。

7. 文 献

- 1) NSRRによる原子炉安全性に関する実証試験計画
 - 第3報 JAERI-M 3957 (1970年3月)
 - 第4報 JAERI-M 4229 (1970年11月)
 - 第5報 JAERI-M 4444 (1971年5月)
 - 第6報 JAERI-memo 4704 (1972年2月)(未公開)
- 2) 伊勢武治, 堀上邦彦 “熱群炉定数作成コード; THERMOS-MUG” JAERI-M 4394 (1971年4月)
- 3) Adir J. and Lathrop K. D. “Theory of Methods used in GGC-4 (II) Multigroup Cross Section Code” GA-9021 (1968) CDC6600 version, FACOM230/6.0には現在整備中。
- 4) Carlyk L. “Dancoff Correction in Square and Hexagonal Lattice” Nucl. Sci. Eng. 29, 325-336 (1967)
- 5) Fowler T. B. et al. “EXTERMINATOR-2: A Fortran IV Code for Solving Multigroup Neutron Diffusion Equations in Two Dimensions” ORNL-4078 (1967)
- 6) West G. B. private communication (GEES) および A. Hansenkamp “Final Safety Analysis: Annular Core Pulse Reactor” SC-RR-66-2609
- 7) 金子義彦, 黒川良彦, 北館憲二 “高温ガス冷却炉の実験用制御棒効果の測定” JAERI-memo 4834 (1972年5月)(未公開)
- 8) 松浦祥次郎, 小林岩夫, 鶴田晴通, 橋本政男, 大野秋男 “JPDR型制御棒効果に関する臨界実験” JAERI-M 2871 (1967年8月)
- 9) 伊勢武治, 中原康明, 秋元正幸, 堀上邦彦 “U-ZrH 炉の炉物理 (I)セル効果の解析” 原子力学会分科会 B 39 (1970年)
- 10) 伊勢武治, 中原康明 “U-ZrH 炉の炉物理 (II)群定数と温度係数” 原子力学会年会 F 9 (1971年)
- 11) 伊勢武治, 中原康明 “U-ZrH 炉の炉物理 (III)上方散乱の寄与を考慮した動特性パラメータの計算” 原子力学会分科会 B 41 (1971年)
- 12) 伊勢武治, 中原康明 “U-ZrH 炉の炉物理 (IV)安全性研究炉 (NSRR) の反応度係数” 原子力学会年会 B 16 (1973年)
- 13) Ise T. and Ishibashi A. “One Dimensional Multigroup Diffusion Theory Code with Perturbation Calculation” JAERI report (to be published)
- 14) Dorsey J. P. and Froehlich R. “GAMBLE-5 A Program for the Solution of the Multigroup Neutron-Diffusion Equations in Two

Dimensions, with Arbitrary Group Scattering, for the UNIVAC-1108 Computer" (1967)

15) 例えば, Stone, R. S et al. "Transient Behavior of TRIGA, a Zirconium-Hydride, Water-Moderated Reactor" Nucl. Sci. Eng., vol 6, P255~259 (1959)

16) 例えば, Lathrop K. D. and Brinkley F. W. "Theory and Use of the General-Geometry TWOTRAN Program" LA-4432 (1970)

17) 伊勢武治, 中原康明 "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 (I))" JAERI-M (to be published)

18) 伊勢武治, 中原康明 "NSRRの反応度係数と実験物価値 (NSRRの炉物理と核設計 (II))" JAERI-M (to be published)

19) 例えば, Stewart H. B. and Merrill M. H. "5.2 Analytic Methods and Their Applications to the TRIGA and TREAT Reactors" P511, Technology of Nuclear Reactor Safety, volume I, M. I. T. Press

20) Froelich R. "Flux Synthesis versus Difference Approximation for Efficient Determination of Flux Distribution in Fast and Thermal Reactors" IAEA-SM-154/14, P591, Numerical Reactor Calculations (1972)

21) Garelis E. "Treatment of Annular Void in Diffusion Theory" Nucl. Sci. Eng. vol. 12, 4 (1962)

付録 A 群定数について

ここでは、2次元拡散 (EXTERMINATOR-2⁵) 計算の入力として用いられた群定数と、その制御棒周辺との関連などについて述べる。

イ) 2次元拡散計算で用いられた群定数を Table A. 1 に示す。4本以上のBWRピンに対する群定数は、1本のピンに対するセル解析 (THERMOS², GAM³) で求める)の結果得られた中性子束で、wrapper tube 内を均質化して作られたものである。1本ピンの場合は、そのままセル解析で求められた群定数を用いる。

制御棒に対する群定数は、熱群に対しては、制御棒セルを解いて得られた中性子から対数微分条件を算出している。その際の中性子束はB₄Cと被覆材の境界と、その一番内側の点の値を用いた (Fig. A-5の cell-1 参照)。この制御棒セルのときの計算では炉心を均質として扱っているが差し支えないと思われる。高速群の群定数は、GAMで求められたそのままのB₄Cのデータを用いる。対数微分条件から見ると高エネルギーの方(第6群)でもかなりの強い吸収があることを示している。

ロ) ここでは制御棒セルの計算の際に、制御棒の断面積が冷却材や炉心などの状況にどのように関連するかを調べる。このセル計算の結果の中性子束が制御棒計算に用いられるので、ここで得られた結果を用いるのではない。

制御棒セルを冷却材を別に扱い cell-I と、炉心と一緒にして取り扱う (すなわち、冷却材領域はないとして) cell-II とを考える (Fig. A. 5 参照)。

冷却材および炉心温度によるB₄C- Σ の影響を Table A. 2 に示す。この表によると、cell-I の方の値が低エネルギーで大きく、高エネルギーで小さく、その差は3%である。また、B₄C- Σ は、炉心温度 (23°C と 100.0°C) 上昇によって変動し、3%程度の差を生ずる。反対にこれらのセルの違いが炉心群定数に与える影響は、Table A. 3 によると、冷却材の軽水の存在は、炉心のDを20%大きくさせ、 Σ_a を3%、 Σ_s を10%、 $\nu\Sigma_f$ を0.1%小さくさせる。そしてこの変動は、エネルギーの低い方では殆んどなくなっている。

バルス棒が引き抜かれると、B₄Cの後には空孔(ポイド)となるので、その際の炉心群定数への影響を調べる。Fig. A. 6 および Table A. 4 によると炉心の Σ の制御棒領域による影響は0.4%で、炉心温度が低くなったり、エネルギーが小さい方向では、この変動は更に少なくなる。

以上のことから、制御棒と炉心とは群定数の点から見ると、高エネルギー側と高い温度の方が影響を及ぼし合っていて、このことは、制御棒計算あるいは更に温度係数計算のような、より高い精度のK_{eff}を求めるときに効いてくると思われる。

Table A.1 GROUP CONSTANTS USED FOR DIFFUSION CALCULATION

COMPOSITION SPECIFICATIONS

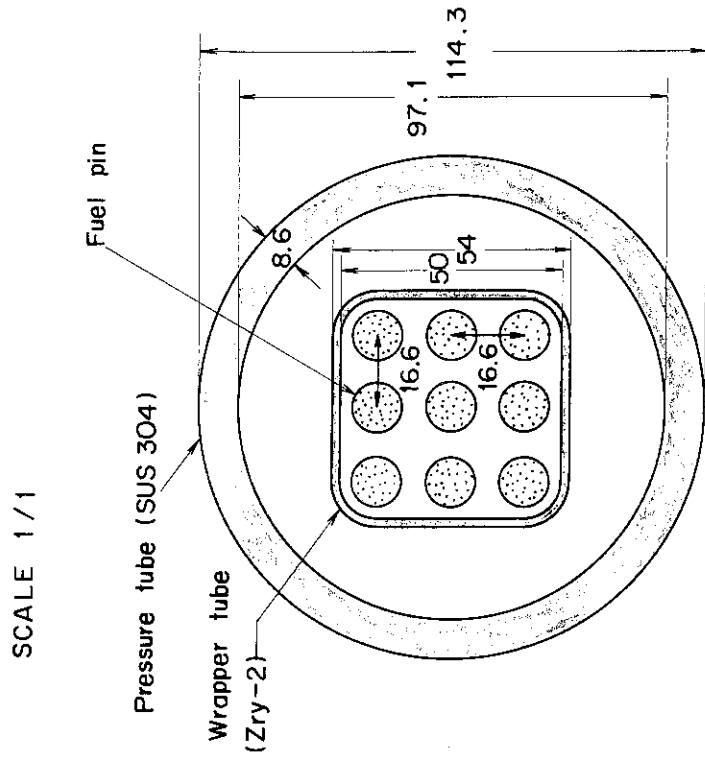
COMP	GRP	D	SIGR	SIGA	NUSIGF	SOURCE	BS _g	K _{1g} F
1	1	2.22160E 00	1.12537E-01	1.73850E-03	2.87090E-03	0.0	2.00000E-03	0.0
	2	1.74170E 00	1.25109E-01	8.09700E-04	2.09710E-03	0.0	2.00000E-03	0.0
	3	1.34040E 00	1.77866E-01	5.91360E-04	7.80930E-04	0.0	2.00000E-03	0.0
	4	9.25780E-01	1.38747E-01	1.67840E-03	1.05980E-03	0.0	2.00000E-03	0.0
	5	9.88390E-01	1.08349E-01	2.50810E-02	1.40210E-02	0.0	2.00000E-03	0.0
	6	4.81400E-01	3.74460E-01	2.55400E-02	3.99700E-02	0.0	2.00000E-03	0.0
	7	3.31100E-01	4.99191E-01	5.91100E-02	9.98800E-02	0.0	2.00000E-03	0.0
	8	2.24900E-01	2.16920E-01	1.00100E-01	1.67200E-01	0.0	2.00000E-03	0.0
	9	1.12600E-01	2.38340E-01	1.77300E-01	2.91100E-01	0.0	2.00000E-03	0.0
2	1	2.76940E 00	9.74184E-02	3.20890E-03	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	2	2.14080E 00	1.30766E-01	0.0	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	3	1.71700E 00	2.21712E-01	0.0	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	4	1.20570E 00	1.76762E-01	0.0	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	5	6.64180E-01	1.49032E-01	3.99340E-04	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	6	4.84600E-01	6.52489E-01	4.18900E-03	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	7	2.73900E-01	8.89340E-01	8.01900E-03	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	8	1.97600E-01	6.72463E-01	1.29860E-02	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	9	1.05700E-01	5.35673E-01	2.47040E-02	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
3	1	1.95500E 00	1.14925E-01	3.24080E-05	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	2	1.75300E 00	5.35071E-02	2.09340E-04	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	3	1.81000E 00	2.33890E-02	4.63850E-04	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	4	1.22990E 00	1.71550E-03	1.05950E-03	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	5	4.82380E-01	3.64400E-04	4.35730E-03	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	6	3.63500E-01	1.60070E-02	4.61930E-02	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	7	3.47200E-01	8.09127E-02	8.84220E-02	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	8	3.27900E-01	7.94157E-02	1.43200E-01	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	9	2.88500E-01	6.04396E-02	2.72420E-01	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
4	1	1.97800E 00	7.80875E-02	5.44200E-03	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	2	1.40600E 00	5.91600E-02	2.00000E-02	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	3	1.41800E 00	5.86800E-03	3.03800E-03	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	4	7.03000E-01	1.35800E-03	4.76800E-02	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	5	4.30400E-01	9.32700E-21	1.88100E-01	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	6	0.0	4.62816E-02	2.43105E 01	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	0.0	3.33025E-02	2.06047E 01	0.0	0.0	0.0	0.0
	8	0.0	8.57300E-02	1.73432E 01	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	1.76917E-01	1.11521E 01	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1	4.29690E-01	2.49249E-05	4.83750E-06	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	2	3.85880E-01	1.72550E-05	0.0	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	3	2.66380E-01	2.71250E-05	0.0	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	4	2.22680E-01	9.38460E-07	0.0	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	5	2.43820E-01	6.39710E-09	0.0	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	6	1.71100E-01	2.05730E-05	9.02080E-10	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	7	1.70670E-01	2.70409E-05	1.60320E-09	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	8	1.69510E-01	3.36207E-05	2.74580E-09	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	9	1.65360E-01	3.34630E-05	4.84000E-09	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
6	1	2.77000E 00	6.62058E-02	0.0	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	2	2.47000E 00	3.80190E-02	1.50000E-04	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	3	1.77000E 00	1.14016E-02	3.30000E-04	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	4	9.51000E-01	1.10000E-03	9.20000E-04	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	5	1.16000E 00	6.24000E-04	4.23000E-03	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	6	9.65000E-01	0.0	3.73000E-03	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	7	9.66000E-01	0.0	3.44000E-03	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	8	9.61000E-01	0.0	5.46000E-03	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	9	9.50000E-01	0.0	1.02000E-02	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
7	1	1.87000E 00	8.40142E-02	1.64000E-02	4.75000E-02	0.0	2.00000E-03	0.0
	2	1.79000E 00	7.86266E-02	1.36000E-02	3.37000E-02	0.0	2.00000E-03	0.0
	3	1.15000E 00	3.81273E-02	5.10000E-03	5.00000E-03	0.0	2.00000E-03	0.0
	4	7.76000E-01	3.40000E-03	8.98000E-03	5.50000E-03	0.0	2.00000E-03	0.0
	5	3.75000E-01	2.50000E-03	9.82000E-02	6.65000E-02	0.0	2.00000E-03	0.0
	6	6.34000E-01	2.31880E-02	1.17000E-01	2.15000E-01	0.0	2.00000E-03	0.0
	7	4.70000E-01	4.64790E-02	3.03000E-01	5.60000E-01	0.0	2.00000E-03	0.0
	8	3.74000E-01	3.70600E-02	4.87000E-01	9.38000E-01	0.0	2.00000E-03	0.0
	9	2.49000E-01	2.24055E-02	1.02000E 00	1.97000E 00	0.0	2.00000E-03	0.0
④	1	4.29690E-01	2.49249E-05	4.83750E-06	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	2	3.85880E-01	1.72550E-05	0.0	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	3	2.66380E-01	2.71250E-05	0.0	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	4	2.22680E-01	9.38460E-07	0.0	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	5	2.43820E-01	6.39710E-09	0.0	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	6	1.71100E-01	2.15100E-05	9.08200E-10	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	7	1.70700E-01	2.72120E-05	1.61000E-09	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	8	1.69500E-01	3.38320E-05	2.73300E-09	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
	9	1.64500E-01	3.08645E-05	3.08400E-09	0.0	0.0	2.00000E-03	0.0
⑦	1	2.69300E 00	8.97183E-02	8.56000E-03	1.69600E-02	0.0	2.00000E-03	0.0
	2	1.88900E 00	1.00736E-01	4.57500E-03	1.16400E-02	0.0	2.00000E-03	0.0
	3	1.29900E 00	1.42886E-01	1.67000E-03	1.61100E-03	0.0	2.00000E-03	0.0
	4	9.30300E-01	9.88119E-02	2.10600E-03	1.89300E-03	0.0	2.00000E-03	0.0
	5	6.04300E-01	6.72300E-02	3.28300E-02	2.38000E-02	0.0	2.00000E-03	0.0
	6	6.14200E-01	3.75300E-01	3.58900E-02	6.58800E-02	0.0	2.00000E-03	0.0
	7	3.93100E-01	4.02731E-01	8.27600E-02	1.50600E-01	0.0	2.00000E-03	0.0
	8	2.69900E-01	3.98090E-01	1.35400E-01	2.32200E-01	0.0	2.00000E-03	0.0
	9	1.43000E-01	3.67639E-01	2.36600E-01	4.38200E-01	0.0	2.00000E-03	0.0

SCATTERING MATRIX

COMP	GRP	TO GRP	1	2	3	4	5	6	7
1	1		0.0	7.35510E-02	2.05100E-02	1.83080E-02	1.67490E-04	1.30110E-08	7.55760E-09
	2		0.0	0.0	7.05190E-02	5.39100E-02	6.79530E-04	5.28810E-08	3.07170E-08
	3		0.0	0.0	0.0	1.75490E-01	2.37530E-03	1.85070E-07	1.07500E-07
	4		0.0	0.0	0.0	0.0	1.38730E-01	1.07240E-05	6.22920E-06
	5		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.88310E-02	3.95180E-02
	6		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.33200E-01
	7		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.90600E-04	0.0
	8		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.33700E-07	3.02200E-02
	9		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.83700E-08	1.58400E-02
2	1		0.0	6.67020E-02	1.61990E-02	1.43120E-02	2.05340E-04	1.60110E-08	9.30020E-09
	2		0.0	0.0	7.34100E-02	5.65370E-02	8.18510E-04	6.38190E-08	3.70710E-08
	3		0.0	0.0	0.0	2.18730E-01	2.98160E-03	2.32480E-07	1.35040E-07
	4		0.0	0.0	0.0	0.0	1.76740E-01	1.36220E-05	7.91230E-06
	5		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.48480E-02	5.41840E-02
	6		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.22300E-01
	7		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.30000E-03	0.0
	8		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.81240E-07	6.62430E-02
	9		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.36100E-08	1.32230E-02
3	1		0.0	5.65790E-02	3.67710E-02	2.15740E-02	1.41820E-06	0.0	0.0
	2		0.0	0.0	3.89240E-02	1.45820E-02	1.07680E-06	0.0	0.0
	3		0.0	0.0	0.0	2.33890E-02	2.13720E-08	0.0	0.0
	4		0.0	0.0	0.0	0.0	1.71550E-03	0.0	0.0
	5		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.64600E-04	0.0
	6		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.60070E-02
	7		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	8		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.86660E-04
	9		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.14270E-03
4	1		0.0	7.72100E-02	5.15900E-04	3.61650E-04	0.0	0.0	0.0
	2		0.0	0.0	5.91600E-02	0.0	0.0	0.0	0.0
	3		0.0	0.0	0.0	5.86800E-03	0.0	0.0	0.0
	4		0.0	0.0	0.0	0.0	1.35800E-03	0.0	0.0
	5		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.32700E-21	0.0
	6		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.62400E-02
	7		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	8		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.08100E-03
	9		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.45800E-10
5	1		0.0	2.45100E-05	2.46410E-07	1.68510E-07	0.0	0.0	0.0
	2		0.0	0.0	1.72550E-05	0.0	0.0	0.0	0.0
	3		0.0	0.0	0.0	2.71250E-05	0.0	0.0	0.0
	4		0.0	0.0	0.0	0.0	9.38460E-07	0.0	0.0
	5		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.39710E-09	0.0
	6		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.05730E-05
	7		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	8		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.77620E-07
	9		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.26270E-06
6	1		0.0	2.36000E-02	2.79000E-02	1.47000E-02	5.82000E-06	0.0	0.0
	2		0.0	0.0	2.24000E-02	1.56000E-02	1.90000E-05	0.0	0.0
	3		0.0	0.0	0.0	1.14000E-02	1.61000E-06	0.0	0.0
	4		0.0	0.0	0.0	0.0	1.10000E-03	0.0	0.0
	5		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.24000E-04	0.0
	6		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	7		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	8		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	9		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	1		0.0	2.93000E-02	2.86000E-02	2.61000E-02	1.42000E-05	0.0	0.0
	2		0.0	0.0	4.45000E-02	3.41000E-02	2.60000E-05	0.0	0.0
	3		0.0	0.0	0.0	3.81000E-02	2.73000E-05	0.0	0.0
	4		0.0	0.0	0.0	0.0	3.40000E-03	1.30000E-10	0.0
	5		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.50000E-03	0.0
	6		0.0	0.0	0.0	0.0	4.88000E-04	0.0	2.27000E-02
	7		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.99000E-04	0.0
	8		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.42000E-12	4.66000E-03
	9		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.53000E-06
8	1		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	4		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	6		1.11200E-01	3.00600E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	7		3.44100E-01	1.54300E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	8		0.0	1.86700E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	9		2.22500E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	1		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	4		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	6		1.02200E-01	2.79890E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	7		7.15430E-01	1.72610E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	8		0.0	6.06220E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	9		5.22450E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	4		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	6		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	7		8.02260E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	8		0.0	7.02730E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	9		6.04390E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

4	1	0.0	0.0						
	2	0.0	0.0						
	3	0.0	0.0						
	4	0.0	0.0						
	5	0.0	0.0						
	6	1.59700E-06	0.0						
	7	3.01100E-02	1.11500E-04						
	8	0.0	1.89300E-02						
	9	1.76700E-01	0.0						
5	1	0.0	0.0						
	2	0.0	0.0						
	3	0.0	0.0						
	4	0.0	0.0						
	5	0.0	0.0						
	6	0.0	0.0						
	7	2.65410E-05	2.22730E-08						
	8	0.0	2.63580E-05						
	9	3.34580E-05	0.0						
6	1	0.0	0.0						
	2	0.0	0.0						
	3	0.0	0.0						
	4	0.0	0.0						
	5	0.0	0.0						
	6	0.0	0.0						
	7	0.0	0.0						
	8	0.0	0.0						
	9	0.0	0.0						
7	1	0.0	0.0						
	2	0.0	0.0						
	3	0.0	0.0						
	4	0.0	0.0						
	5	0.0	0.0						
	6	3.47000E-08	0.0						
	7	4.54000E-02	8.00000E-05						
	8	0.0	3.24000E-02						
	9	2.24000E-02	0.0						
④	1	0.0	2.45100E-05	2.46410E-07	1.68510E-07	0.0	0.0	0.0	
	2	0.0	0.0	1.72550E-05	0.0	0.0	0.0	0.0	
	3	0.0	0.0	0.0	2.71250E-05	0.0	0.0	0.0	
	4	0.0	0.0	0.0	0.0	9.38460E-07	0.0	0.0	
	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.39710E-09	0.0	
	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.15100E-05	
	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.09700E-07	0.0	
	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.07400E-06	
	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.47000E-09	
⑤	1	0.0	0.0						
	2	0.0	0.0						
	3	0.0	0.0						
	4	0.0	0.0						
	5	0.0	0.0						
	6	0.0	0.0						
	7	2.67800E-05	2.23100E-08						
	8	0.0	2.67600E-05						
	9	3.08600E-05	0.0						
⑦	1	0.0	5.39000E-02	1.82900E-02	1.74100E-02	1.16300E-04	8.91000E-09	5.17600E-09	
	2	0.0	0.0	5.53300E-02	4.49400E-02	4.66400E-04	3.56700E-08	2.07200E-08	
	3	0.0	0.0	0.0	1.41200E-01	1.68600E-03	1.30600E-07	7.58500E-08	
	4	0.0	0.0	0.0	0.0	9.88000E-02	7.51900E-06	4.36800E-06	
	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.30300E-02	2.42000E-02	
	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.01600E-01	
	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.06100E-03	0.0	
	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.07800E-07	5.12900E-02	
	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.18800E-08	8.73900E-03	
⑦	1	0.0	0.0						
	2	0.0	0.0						
	3	0.0	0.0						
	4	0.0	0.0						
	5	0.0	0.0						
	6	5.78500E-02	1.58500E-02						
	7	3.22700E-01	7.79700E-02						
	8	0.0	3.46800E-01						
	9	3.58900E-01	0.0						

COMP shows composition material : 1=core, 2=water, 3=stainless steel, 4=B₄C, 5=void, 6=Zr₂-2, 7=UO₂, ④=void instead of B₄C, ⑤=BWR pin data homogenized within wrapper tube, GRP, D, SIGR, SiGA, NUSIGF, and BSQ show the energy group number, diffusion coefficient, scattering removal- Σ_s , Σ_a , $\nu\Sigma_f$, and B² respectively. Σ_a with the group number from 6 to 9 for B₄C show the quantities of logarithmic derivative condition for control rod.

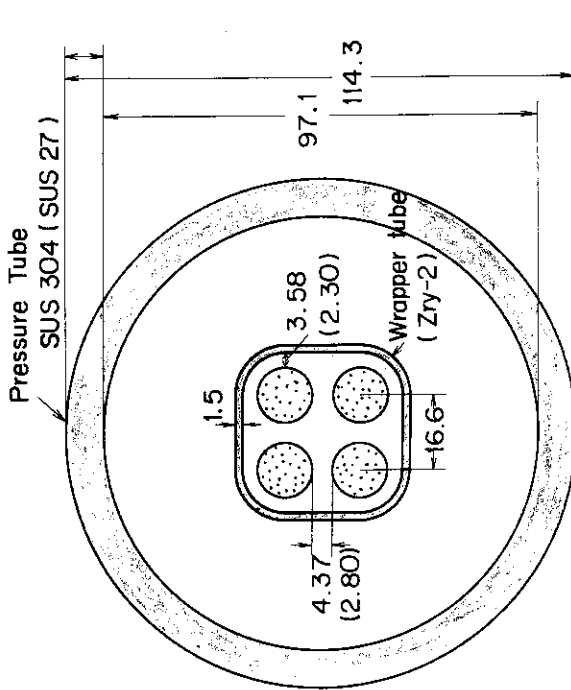


SCALE 1/1

unit : mm

Fig. A.2

9 JPDR(BWR) FUEL PINS IN EXPERIMENTAL HOLE



unit : mm

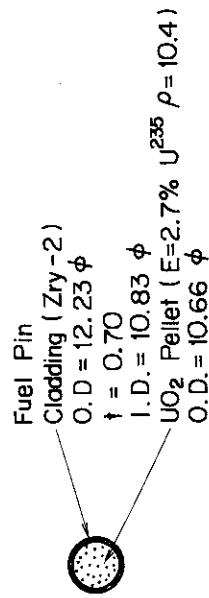
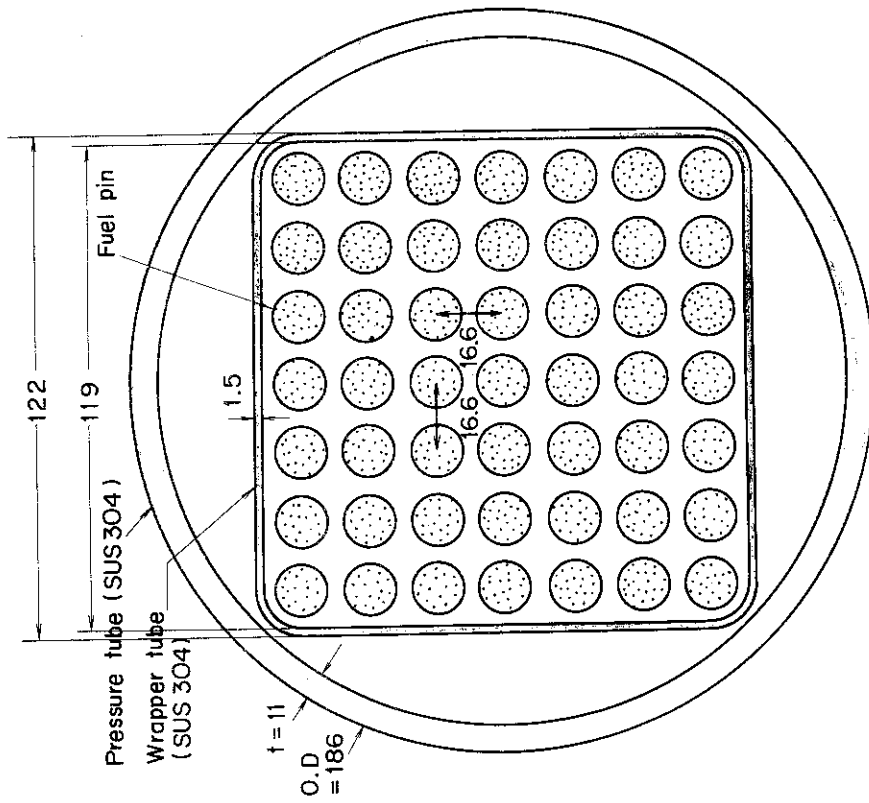
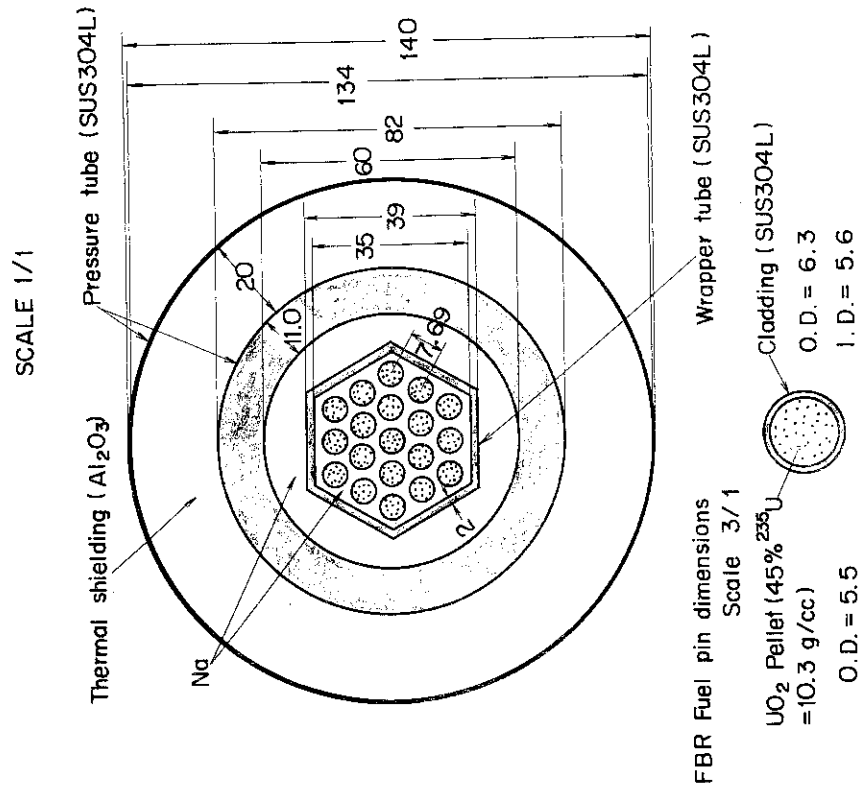


Fig. A.1

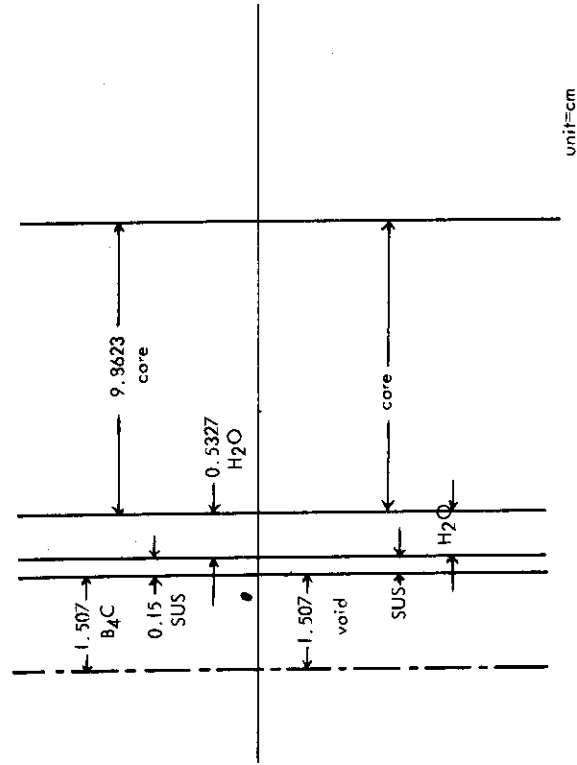
4 JPDR(BWR) FUEL PINS IN EXPERIMENTAL HOLE



unit : mm

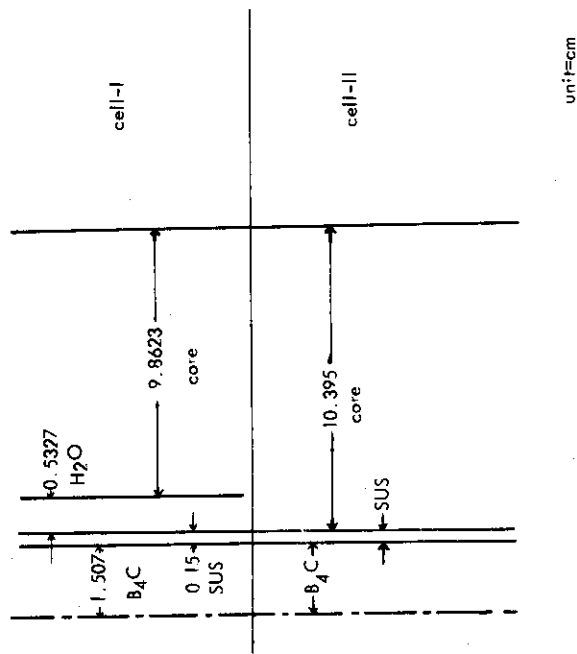
Fig.A.4
19 FBR FUEL PINS IN EXPERIMENTAL HOLE

Fig.A.3
49 JPDR(BWR) FUEL PINS IN EXPERIMENTAL HOLE



unit=cm

Fig.A.6
GEOMETRY CONFIGURATION CORRESPONDING TO
Table A.4



unit=cm

Fig.A.5
GEOMETRY CONFIGURATION CORRESPONDING TO
Table A.2 and Table A.3

Table A.2
INFLUENCE OF THE CELL TYPES ON B₁₀-Σ

group number	temperature °C	cell type	Σ _o	Σ _s	D
6	23	cell - I	3.077	1.0026x10 ⁻¹	1.0497x10 ⁻¹
		cell - II	3.0788	1.0021x10 ⁻¹	1.0481x10 ⁻¹
	1000	cell - I	3.1294	1.0021x10 ⁻¹	1.0316x10 ⁻¹
		cell - II	3.1548	1.0021x10 ⁻¹	1.0283x10 ⁻¹
7	23	cell - I	5.2791	1.0057x10 ⁻¹	6.0626x10 ⁻²
		cell - II	5.3938	1.0057x10 ⁻¹	6.0052x10 ⁻²
	1000	cell - I	5.2787	1.0057x10 ⁻¹	6.0019x10 ⁻²
		cell - II	5.3219	1.0055x10 ⁻¹	6.1456x10 ⁻²
8	23	cell - I	9.2550	1.0966x10 ⁻¹	3.5626x10 ⁻²
		cell - II	9.1405	1.0952x10 ⁻¹	3.4681x10 ⁻²
	1000	cell - I	9.0555	1.0954x10 ⁻¹	3.4596x10 ⁻²
		cell - II	8.7474	1.0944x10 ⁻¹	3.7644x10 ⁻²
9	23	cell - I	14.922	1.1217x10 ⁻¹	2.2182x10 ⁻²
		cell - II	14.723	1.1205x10 ⁻¹	2.2496x10 ⁻²
	1000	cell - I	14.917	1.1217x10 ⁻¹	2.2188x10 ⁻²
		cell - II	14.443	1.1189x10 ⁻¹	2.2912x10 ⁻²

Table A.3
INFLUENCE OF THE CELL TYPES ON CORE-Σ

group number	temperature °C	cell type	Σ _o	Σ _s	νΣ _f	D
6	23	cell - I	2.900x10 ⁻²	1.1356	4.0546x10 ⁻²	5.9121x10 ⁻¹
		cell - II	2.860x10 ⁻²	1.2723	4.0544x10 ⁻²	4.7395x10 ⁻¹
	1000	cell - I	2.337x10 ⁻²	1.1484	4.1149x10 ⁻²	6.0222x10 ⁻¹
		cell - II	2.4128x10 ⁻²	1.2844	4.1144x10 ⁻²	4.8343x10 ⁻¹
7	23	cell - I	5.7999x10 ⁻²	1.3962	9.6404x10 ⁻²	3.8546x10 ⁻¹
		cell - II	5.9322x10 ⁻²	1.5329	9.6361x10 ⁻²	3.3266x10 ⁻¹
	1000	cell - I	5.7806x10 ⁻²	1.4352	9.5252x10 ⁻²	3.6705x10 ⁻¹
		cell - II	5.8614x10 ⁻²	1.5719	9.5218x10 ⁻²	3.1898x10 ⁻¹
8	23	cell - I	9.9373x10 ⁻²	1.8212	1.7089x10 ⁻¹	2.4605x10 ⁻¹
		cell - II	1.0174x10 ⁻¹	1.937	1.7086x10 ⁻¹	2.2498x10 ⁻¹
	1000	cell - I	9.3912x10 ⁻²	1.8583	1.6033x10 ⁻¹	2.4004x10 ⁻¹
		cell - II	9.4179x10 ⁻²	1.9950	1.6056x10 ⁻¹	2.1835x10 ⁻¹
9	23	cell - I	2.0412x10 ⁻¹	3.0843	3.5678x10 ⁻¹	1.1653x10 ⁻¹
		cell - II	2.0843x10 ⁻¹	3.2210	3.5606x10 ⁻¹	1.1110x10 ⁻¹
	1000	cell - I	1.9236x10 ⁻¹	3.4560	3.3596x10 ⁻¹	1.0776x10 ⁻¹
		cell - II	1.9854x10 ⁻¹	3.5928	3.3579x10 ⁻¹	1.0084x10 ⁻¹

Table A.4
INFLUENCE OF THE MATERIALS IN ROD REGION ON CORE-Σ

group number	temperature °C	rod region	Σ _o	Σ _s	νΣ _f	D
6	23	B4C	2.9003x10 ⁻²	1.1356	4.0546x10 ⁻²	5.9121x10 ⁻¹
		Void	2.9004x10 ⁻²	1.1357	4.0548x10 ⁻²	5.9118x10 ⁻¹
	1000	B4C	2.5317x10 ⁻²	1.1484	4.1149x10 ⁻²	6.0222x10 ⁻¹
		Void	2.5329x10 ⁻²	1.1489	4.1170x10 ⁻²	6.0181x10 ⁻¹
7	23	B4C	5.7999x10 ⁻²	1.3962	9.6404x10 ⁻²	3.8546x10 ⁻¹
		Void	5.8018x10 ⁻²	1.3964	9.6403x10 ⁻²	3.8534x10 ⁻¹
	1000	B4C	5.7306x10 ⁻²	1.4352	9.5252x10 ⁻²	3.6705x10 ⁻¹
		Void	5.7323x10 ⁻²	1.4354	9.5279x10 ⁻²	3.6693x10 ⁻¹
8	23	B4C	9.9373x10 ⁻²	1.8212	1.7039x10 ⁻¹	2.4605x10 ⁻¹
		Void	9.9400x10 ⁻²	1.8216	1.7044x10 ⁻¹	2.4797x10 ⁻¹
	1000	B4C	9.3912x10 ⁻²	1.8583	1.6033x10 ⁻¹	2.4004x10 ⁻¹
		Void	9.3941x10 ⁻²	1.8587	1.6068x10 ⁻¹	2.3997x10 ⁻¹
9	23	B4C	2.0412x10 ⁻¹	3.0843	3.5678x10 ⁻¹	1.1653x10 ⁻¹
		Void	2.0412x10 ⁻¹	3.0844	3.5678x10 ⁻¹	1.1653x10 ⁻¹
	1000	B4C	1.9236x10 ⁻¹	3.4560	3.3596x10 ⁻¹	1.0776x10 ⁻¹
		Void	1.9236x10 ⁻¹	3.4561	3.3591x10 ⁻¹	1.0776x10 ⁻¹

付録B いろいろなケースの K_{eff} と2次元拡散計算上の問題点

Table B. 1, Table B. 2 および Table B. 3 は第4章の Table 4.1, Table 4.2 および Table 4.3 の計算の元になった K_{eff} をそれぞれ示している。ここで、〔K, with〕と示されている欄内のCは制御棒が抜かれているところが燃料となっているとき、Vはバルス棒が抜かれているとき、Bは調整棒あるいはバルス棒が挿入されているときを示す。したがって、〔C, B〕と書いてあるときは、6本の調整棒が抜けていて、3本のバルス棒が挿入されていることを示す。他のときも同様である。またSは調整棒を、Tはバルス棒を、BSは安全棒を示し、この文字の前に付いている数字は、それぞれの制御棒の本数を示す。

制御棒計算は2次元拡散コードEXTERMINATOR-2の $R-\theta$ 座標を用いて行われたが、制御棒の配置 (Fig. 3.1 参照) から考えて、対称性から、炉心を何等分かした方が得策かと思われる。そこで3分の1炉心 (θ -座標について) と 2π 炉心について、いくつかの例で検討を行った。Table B. 4 を Table B. 1 を参照しながら検討すると、次のことがいえると思う。

バルス棒全部挿入のときで、 K_{eff} の比較では3分の1炉心と 2π 炉心とでは0.15%、調整棒全部挿入のときで、0.20%、バルス棒および調整棒が全部挿入のときで、0.31%と炉心に挿入された制御棒が増えるにしたがって、その差が増えていく (Table B. 5 参照)。これは、吸収体による中性子束の歪みが充分回復していないのに3分の1炉心のときは、そこに対称条件を適用していることによる誤差である。したがって、制御棒のような強い吸収体が配置されているような炉心体系に幾何学的配置が対称であるからと対称条件を適用するのは充分注意が必要と思われる。制御棒計算では、ふたつの K_{eff} の差をとって計算するので、このような K_{eff} の差が大変効いてくる。例えば全制御棒効果 (安全棒は考慮しない) では、3%、調整棒効果で3%から5%、2本のバルス棒効果で10%、1本のバルス棒効果では20%と一般に幾何学的対称性がくずれてくると、差が大きくなっていく。

計算時間について述べる。Table 4.5の右側の3つの欄は、収束性について述べていて、中性子束の収束 (flux convergence)、 K_{eff} の収束 (K_{eff} convergence) およびそれに要した計算時間を分で (C. P. U. time in min) 示してある。実験物を入れたときのような、比較的空孔が多い体系では150分から200分時間がかかり、 K_{eff} 収束で 10^{-5} の精度である。実験孔が軽水になると、同じ K_{eff} 収束の精度で、100分ぐらいとかなり時間が短くなっていく。このように、空孔を含む体系では、収束が大変悪い。現在のEXTERMINATOR-2は、使用上の便利さの点では優れているが、上記のように、収束性は良くない。同じ2次元拡散コードGAMBLE-5¹⁴⁾では、粗格子再平衡法 (coarse mesh rebalancing) をとり入れて良い結果²⁰⁾を得ているので、EXTERMINATOR-2にも、この方法の適用が望まれる。計算では、空間格子点は、拡散距離を基準にし、過去の経験を加味して、それより多くとっておいた。付録Eに、このことについて述べておいた。

Table B.1 K_{eff} USED IN Table 4.1

Worth	k	with	k/k	\$	each
All (6 Control / 3 Transient)	C, V 1.14113	B, B 1.03109	0.09644	13.49	
6 Control / 3 Transient Out	C, V 1.14113	B, V 1.07338	0.05937	8.30	1.38
6 Control / 3 Transient In	C, B 1.10126	B, B 1.03109	0.06372	8.98	1.50
3 Transient / 6 Control Out	C, V 1.14113	C, B 1.10296	0.03345	4.69	1.56
3 Transient / 6 Control In	B, V 1.07338	B, B 1.03109	0.03940	5.51	1.83
1 Control / Others In	1S=B, 1T=V, 3T=B 1.04770	B, B 1.03109	0.01586	2.22	2.22
1 Transient / Others In	6S=B, 1T=V, 2T=B 1.04862	B, B 1.03109	0.01672	2.34	2.34
1 Transient / 2 Transient Out / 6 Control In	B, V 1.07338	6S=B, 1T=B, 2T=V 1.06224	0.01038	1.45	1.45
2 Transient / 1 Transient Out / 6 Control In	B, V 1.07338	6S=B, 1T=V, 2T=B 1.04862	0.02307	3.22	1.61
2 Transient / Others In	6S=B, 1T=B, 2T=V 1.06224	B, B 1.03109	0.02933	4.10	2.05
1 Transient / Others Out	C, V 1.14113	6S=C, 1T=B, 2T=V 1.13074	0.00911	1.27	1.27
2 Transient / Others Out	C, V 1.14113	6S=C, 2T=B, 1T=V 1.11856	0.01978	2.77	1.38
2 Backup Safety / 6 Control In / 3 Transient Out	2BS=C, 6S=B, 3T=V 1.07338	2BS=B, 6S=B, 3T=V 1.04581	0.02569	3.59	1.80
2 Backup Safety / 6 Control In / 3 Transient In	6S=B, 3T=B 1.03109	All rods=B 0.99523	0.03478	4.86	2.43
11 Rods All	C, V 1.14113	All Rods=B 0.99523	0.1279	17.88	

Table B.2 K_{eff} USED IN Table 4.2

Worth	k with	$\Delta k/k$	\$	each
1 Transient / 6 Control Out (Water) / 2 Transient In	6S=C, 2T=B, 1T=W 1.12017	0.01537	2.15	2.15
1 Transient / 6 Control Out (Void) / 2 Transient In	6S=C, 2T=B, 1T=V 1.11856	0.01395	1.95	1.95

Table B.3 K_{eff} USED IN Table 4.3

Worth	k with	$\Delta k/k$	\$	each
All	C, V 1.12717	0.09668	13.52	
All	B, B 1.01819	0.08661	12.11	
All	C, V 1.14773	0.08975	12.55	
All	B, B 1.01000	0.1048	14.66	
3 Transient	C, V 1.05990	0.03241	4.53	1.51
1 Transient	C, V 1.05990	0.00797	1.12	1.12

at core size = 32.066, cf. = 13.49 \$
at core size = 33.066, 0.2 % more
at reflector thickness = 30.0 cm,
cf. = 13.49 \$, 10.3 % less
with $D = 10^3$
 $B^2 = 10^{-7}$ of void
cf. = 13.49 \$, 6.9 % less
with H₂O in flux trap, cf. = 13.49 \$ with void, 8.7 % more
with H₂O flux trap 1.56 (air) 3% less
with H₂O flux trap 1.27 (air) 13% less

Table B.4 K_{eff} AND CONTROL ROD WORTH IN 1/3-CORE CALCULATION

Worth	k	k with	$\Delta k/k$	\$	each	
All	C, V 1.14112	B, B 1.03433	0.09358	13.09		cf. 13.49 at 2 π core, 3.0% less
6 Control / 3 Transient Out	C, V 1.14112	B, V 1.07550	0.05751	8.04	1.34	cf. 8.30 (1.38), 3.2% less
6 Control / 3 Transient In	C, B 1.10296	B, B 1.03433	0.06222	8.70	1.45	cf. 9.11 (1.52), 4.6% less
1 Control / Others In	6S=B, 1T=V, 2T=B 1.04770	B, B 1.03433	0.01276	1.79		cf. 2.08, 14% less
1 Transient / Others In	6S=B, 1T=B, 2T=B 1.04862	B, B 1.03433	0.01363	1.91		cf. 2.34, 18.4% less
1 Transient / 2 Transient Out 6 Control In	B, V 1.07550	1T=B B, 2T=V 1.06224	0.01233	1.72		
2 Transient / 1 Transient Out 6 Control In	B, V 1.0755	1T=V B, 2T=B 1.04862	0.02688	3.50	1.75	
2 Transient / Others In	1T=B B, 2T=V 1.06224	B, B 1.03433	0.02628	3.67	1.84	

Notes common from Table B.1 to Table B.4 : C= fuel instead of regulating rod, V=void instead of transient rod, B=B₄C. The quantity in () one rod averaged worth.

Table B.5 COMPARISON OF K_{eff} BETWEEN 2π - and $1/3$ -CORE

Core type	k_{eff}		Difference %
	2π - core	$1/3$ - core	
Without any control rod	1.14113	1.14112	0.0
3 Transient rods in	1.10126	1.10296	0.15
6 Regulating rods in	1.07338	1.07550	0.20
9 Rods all in	1.03109	1.03433	0.31

付録C 制御棒の引抜き度と制御棒効果の関係

制御棒を炉心から引抜くとき、その位置と、制御棒効果とは必ずしも直線関係ではない。ここではこのことを調べる為に、1本の制御棒（制御棒効果の変化が著しいと思われる調整棒を取り上げた）を考え、これがZ方向に抜けていく様子を追跡することにした。Fig. C. 1にはこのときの制御棒の抜けていくときの図を示してある。Fig. C. 2 (Table C. 1)に示すように制御棒効果は一般に制御棒の位置とともにS字曲線（S letter curve）を示す。しかしながら、制御棒が4分の1から4分の3ぐらい迄の間、抜けていつあるときは、直線近似が成り立っていることがわかる。尚、計算はEXTERINATOR-2のR-Z計算でRに関しては12 cmの半径を持っているものとした。

Table C.1 CONTROL ROD WORTH ACCORDING TO INSERTION INTO CORE

B ₄ C position	k	Δk/k	\$	C.P.U.time(min.)
out of core	1.2358			106
1/4 in	1.2216	0.01149	1.607	106
half in	1.2086	0.02194	3.069	105
3/4 in	1.1938	0.03394	4.747	107
full in	1.1881	0.03857	5.394	106

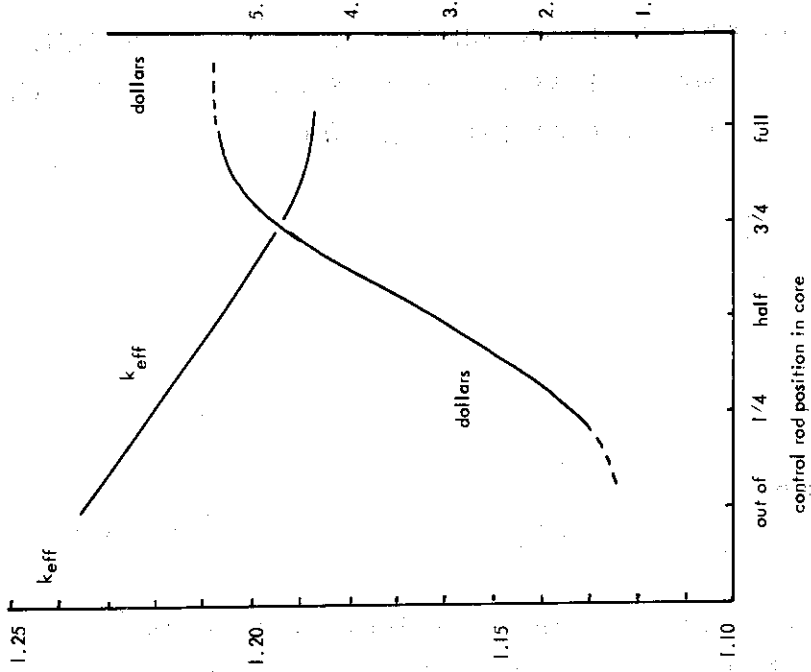
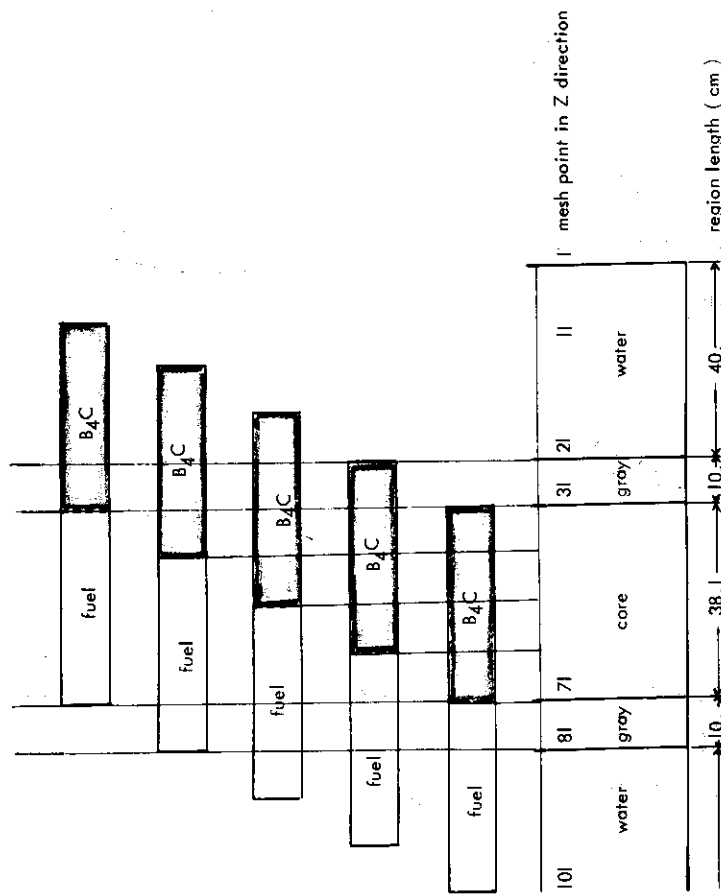


Fig. C.2
CONTROL ROD WORTH TO ROD POSITION IN CORE



付録D 一点動特性モデル：Fucks - Nordheim

ここでは、本文で引用された Fucks-Nordheim モデルについて簡単に記しておく。一点で、且つ、熱伝達および遅発中性子を無視するこの簡単なモデルが、TRIGA型のパルス解析によく合う¹⁵⁾ことが知られている (TRIGAはNSRRのモデルになったGEESの研究炉)。

必要なパラメータは

$$\ell_p = \text{即発中性子寿命}$$

$$\alpha = \text{即発的負の温度係数}$$

$$C = \text{パルス発生の際の炉心の全熱容量}$$

$$\Delta\bar{T} = \text{パルス発生による炉心平均温度の変化量}$$

$$\Delta k_p = \text{パルス発生に要する制御棒 (パルス棒) による反応度添加。}$$

反応度が炉心に急激に挿入される (step insertion) と、Fig. D. 1 に示すように、時刻 t の経過とともに、炉用期 T ($T = \ell_p / \Delta k_p$) をもつ $\exp(t/\tau)$ の形で急激に出力は上昇していく。炉心の熱容量一定、温度係数一定とすると、炉心温度は $\Delta k_p / \alpha$ に比例して上昇し、最後に臨界以上の即発的反應度と燃料温度とによる効果で相殺してしまふ。このとき炉心出力は最高に達し、それからは、温度係数によって急激に下がってくる。一方、炉心の温度は、最高出力のときの温度の2倍の高さ迄上昇し続ける。

すなわち、

$$\Delta\bar{T} = 2 \cdot \frac{\Delta k_p}{\alpha} = \frac{E}{C}$$

そして、パルス発生の際の全エネルギーは

$$E = \frac{2 \cdot C \cdot \Delta k_p}{\alpha}$$

最高出力は

$$P_{\max} = \frac{C \cdot (\Delta k_p)^2}{2 \cdot \alpha \cdot \ell_p} + P_0$$

となる。 P_0 は初期出力である。

このモデル¹⁹⁾によると、パルス発生の際に重要な量は、即発的負の温度係数、熱容量、即発中性子寿命および反応度添加であるが、とり分け、制御棒による反応度添加が他の量と違って、自乗のオーダーで効いてくることに注目したい。このことは制御棒計算をできるだけ精度良く計算せよということになり、付録Bにも述べたように、長い時間の拡散計算をやらなければならないこととなる。

付録E 2次元拡散計算で用いられたメッシュ・ポイント

ここでは、2次元 (EXTERMINATOR-2) 計算で用いられたメッシュ・ポイントとそれに対応する角度および半径を Table E. 5までに、それぞれ、中央実験孔が軽水又は空孔、1燃料ピン、4燃料ピン、9燃料ピン、49燃料ピンのケースについて示した。全てのケースについて、角度メッシュは共通の107点(単位は無次元)で、 2π の範囲について分割してあるし、また、半径方向メッシュは、実験孔が軽水あるいは空孔のときは、51点(単位はcm)、実験孔が燃料ピンのときは、56点で燃料ピンの太さに応じてメッシュ分割を考慮してある。さらに制御棒内はメッシュ点を細かくしてある。

Table 内でO印は領域境界を示し、直線のアンダーラインはバルス棒の領域、点線のそれは、調整棒の領域を示す。

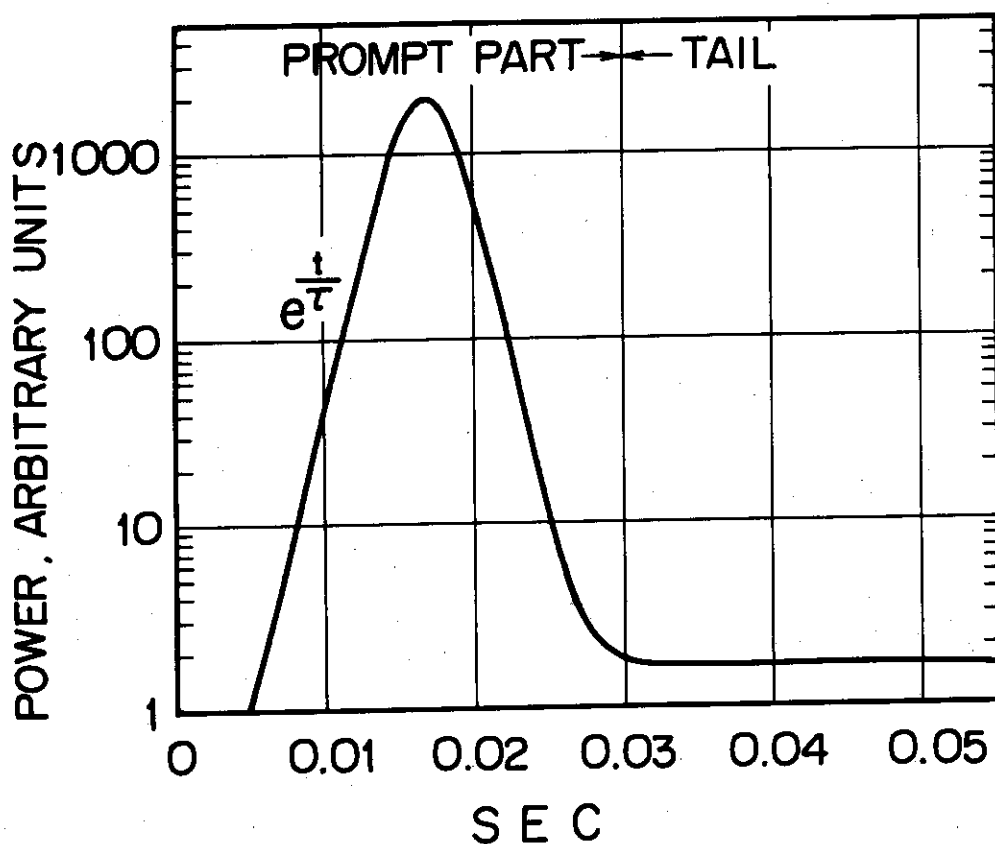


Fig.D.1 BURST PULSE SHAPE DUE TO FUCKS-NORDHEIM MODEL

Table E.1 MESH POINTS OF DIFFUSION CALCULATION FOR THE FLUX TRAP FILLED WITH WATER OR AIR

DIMENSION SPECIFICATIONS											
I DIST. angular mesh in radian											
I	DIST.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.155	0.310	0.465	0.525	0.585	0.610	0.635	0.660	0.685		
2	0.710	0.770	0.830	0.925	1.020	1.080	1.140	1.165	1.190		
3	1.215	1.240	1.265	1.325	1.385	1.479	1.574	1.634	1.694		
4	1.719	1.744	1.769	1.794	1.819	1.879	1.939	2.004	2.064		
5	2.404	2.539	2.619	2.679	2.704	2.729	2.754	2.779	2.804		
6	2.864	2.924	2.949	2.974	3.019	3.079	3.139	3.199	3.259		
7	3.334	3.359	3.384	3.419	3.479	3.539	3.599	3.659	3.719		
8	3.838	3.863	3.888	3.913	3.973	4.033	4.093	4.153	4.213		
9	4.058	4.113	4.168	4.228	4.288	4.348	4.408	4.468	4.528		
10	5.018	5.113	5.208	5.268	5.328	5.388	5.448	5.508	5.568		
11	5.823	5.913	5.973	6.033	6.093	6.153	6.213	6.273	6.333		
12	5.928	5.983	6.008	6.068	6.128	6.188	6.248	6.308	6.368		
J DIST. radial mesh in cm											
J	DIST.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.942	1.885	2.827	3.769	4.712	5.654	6.596	7.538	8.481		
2	9.423	10.365	11.308	12.250	13.193	14.135	15.078	16.020	16.963		
3	16.824	17.706	18.589	19.471	20.353	21.235	22.117	23.000	23.882		
4	25.434	26.316	27.198	28.080	28.962	29.844	30.726	31.608	32.490		
5	30.107	31.093	32.080	33.066	34.052	35.038	36.024	37.010	38.000		
6	39.066	40.066	41.066	42.066	43.066	44.066	45.066	46.066	47.066		

Table E.2 MESH POINTS OF DIFFUSION CALCULATION FOR THE FLUX TRAP WITH 1 BWR PIN

DIMENSION SPECIFICATIONS											
I DIST. angular mesh in radian											
I	DIST.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.155	0.310	0.465	0.525	0.585	0.610	0.635	0.660	0.685		
2	0.710	0.770	0.830	0.925	1.020	1.080	1.140	1.165	1.190		
3	1.215	1.240	1.265	1.325	1.385	1.479	1.574	1.634	1.694		
4	1.719	1.744	1.769	1.794	1.819	1.879	1.939	2.004	2.064		
5	2.404	2.539	2.619	2.679	2.704	2.729	2.754	2.779	2.804		
6	2.864	2.924	2.949	2.974	3.019	3.079	3.139	3.199	3.259		
7	3.334	3.359	3.384	3.419	3.479	3.539	3.599	3.659	3.719		
8	3.838	3.863	3.888	3.913	3.973	4.033	4.093	4.153	4.213		
9	4.058	4.113	4.168	4.228	4.288	4.348	4.408	4.468	4.528		
10	5.018	5.113	5.208	5.268	5.328	5.388	5.448	5.508	5.568		
11	5.823	5.913	5.973	6.033	6.093	6.153	6.213	6.273	6.333		
12	5.928	5.983	6.008	6.068	6.128	6.188	6.248	6.308	6.368		
J DIST. radial mesh in cm											
J	DIST.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.133	0.267	0.400	0.533	0.666	0.800	0.933	1.066	1.200		
2	4.923	6.001	6.501	7.001	7.501	8.056	8.556	9.056	9.556		
3	12.911	13.321	14.204	15.086	15.968	16.850	17.733	18.615	19.497		
4	20.380	21.038	21.697	22.355	23.013	23.672	24.330	24.988	25.647		
5	28.617	29.187	29.757	30.327	30.897	31.467	32.037	32.607	33.177		
6	34.093	35.093	36.093	37.093	38.093	39.093	40.093	41.093	42.093		

Table E.3 MESH POINTS OF DIFFUSION CALCULATION FOR THE FLUX TRAP WITH 4 BWR PINS

DIMENSION SPECIFICATIONS																	
I	DIST.	angular mesh in radian	4	0.465	5	0.525	6	0.585	7	0.610	8	0.635	9	0.660	10	0.685	
2	0.155	3	0.310														
11	0.710	12	0.770	13	0.830	14	1.080	15	1.080	16	1.150	17	1.150	18	1.150	19	1.190
20	1.215	21	1.240	22	1.265	23	1.325	24	1.385	25	1.479	26	1.574	27	1.634	28	1.694
29	1.719	30	1.744	31	1.769	32	1.794	33	1.819	34	1.879	35	1.939	36	2.094	37	2.249
38	2.404	39	2.559	40	2.619	41	2.679	42	2.704	43	2.729	44	2.754	45	2.779	46	2.804
47	2.864	48	2.924	49	3.019	50	3.114	51	3.174	52	3.234	53	3.259	54	3.284	55	3.309
56	3.334	57	3.359	58	3.419	59	3.479	60	3.574	61	3.669	62	3.729	63	3.789	64	3.813
65	3.838	66	3.863	67	3.888	68	3.913	69	3.973	70	4.033	71	4.188	72	4.343	73	4.498
74	4.653	75	4.713	76	4.773	77	4.798	78	4.823	79	4.848	80	4.873	81	4.898	82	4.928
83	5.018	84	5.113	85	5.208	86	5.268	87	5.328	88	5.353	89	5.378	90	5.403	91	5.428
92	5.453	93	5.513	94	5.573	95	5.668	96	5.763	97	5.823	98	5.883	99	5.908	100	5.933
101	5.958	102	5.983	103	6.008	104	6.068	105	6.128	106	6.283	107	6.437				

DIMENSION SPECIFICATIONS																	
J	DIST.	radial mesh in cm	4	0.780	5	1.040	6	1.300	7	1.560	8	1.820	9	1.880	10	2.938	
11	3.897	12	4.855	13	5.285	14	5.715	15	7.027	16	8.339	17	9.651	18	10.963	19	12.275
20	12.910	21	13.320	22	14.202	23	15.084	24	15.967	25	16.849	26	17.731	27	18.614	28	19.496
29	20.378	30	21.037	31	21.695	32	22.354	33	23.012	34	23.671	35	24.329	36	24.987	37	25.645
38	25.616	39	26.186	40	27.172	41	28.159	42	29.145	43	30.132	44	31.118	45	32.105	46	33.091
47	34.091	48	35.091	49	36.091	50	37.091	51	38.091	52	39.091	53	40.091	54	41.091	55	42.091
56	43.091																

Table E.4 MESH POINTS OF DIFFUSION CALCULATION FOR THE FLUX TRAP WITH 9 BWR PINS

DIMENSION SPECIFICATIONS																	
I	DIST.	angular mesh in radian	4	0.465	5	0.525	6	0.585	7	0.610	8	0.635	9	0.660	10	0.685	
11	0.710	12	0.770	13	0.830	14	1.080	15	1.080	16	1.150	17	1.150	18	1.150	19	1.190
20	1.215	21	1.240	22	1.265	23	1.325	24	1.385	25	1.479	26	1.574	27	1.634	28	1.694
29	1.719	30	1.744	31	1.769	32	1.794	33	1.819	34	1.879	35	1.939	36	2.094	37	2.249
38	2.404	39	2.559	40	2.619	41	2.679	42	2.704	43	2.729	44	2.754	45	2.779	46	2.804
47	2.864	48	2.924	49	3.019	50	3.114	51	3.174	52	3.234	53	3.259	54	3.284	55	3.309
56	3.334	57	3.359	58	3.419	59	3.479	60	3.574	61	3.669	62	3.729	63	3.789	64	3.813
65	3.838	66	3.863	67	3.888	68	3.913	69	3.973	70	4.033	71	4.188	72	4.343	73	4.498
74	4.653	75	4.713	76	4.773	77	4.798	78	4.823	79	4.848	80	4.873	81	4.898	82	4.928
83	5.018	84	5.113	85	5.208	86	5.268	87	5.328	88	5.353	89	5.378	90	5.403	91	5.428
92	5.453	93	5.513	94	5.573	95	5.668	96	5.763	97	5.823	98	5.883	99	5.908	100	5.933
101	5.958	102	5.983	103	6.008	104	6.068	105	6.128	106	6.283	107	6.437				

DIMENSION SPECIFICATIONS																	
J	DIST.	radial mesh in cm	4	0.806	5	1.012	6	2.015	7	2.418	8	2.821	9	3.021	10	3.631	
11	4.242	12	4.852	13	5.282	14	5.712	15	7.024	16	8.336	17	9.648	18	10.960	19	12.272
20	12.907	21	13.317	22	14.199	23	15.082	24	15.965	25	16.848	26	17.731	27	18.614	28	19.497
29	20.372	30	21.031	31	21.692	32	22.351	33	23.009	34	23.668	35	24.327	36	24.986	37	25.645
38	25.613	39	26.183	40	27.169	41	28.156	42	29.142	43	30.129	44	31.115	45	32.102	46	33.088
47	34.088	48	35.088	49	36.088	50	37.088	51	38.088	52	39.088	53	40.088	54	41.088	55	42.088
56	43.088																

Table E.5 MESH POINTS OF DIFFUSION CALCULATION FOR THE FLUX TRAP WITH 49 BWR PINS

DIMENSION SPECIFICATIONS															
I	DIST.	angular mesh in radian													
1	0.155	3	0.310	4	0.465	5	0.585	7	0.610	8	0.635	9	0.660	10	0.685
11	0.710	12	0.770	13	0.830	14	0.920	16	1.080	17	1.140	18	1.165	19	1.190
20	<u>1.215</u>	21	<u>1.240</u>	22	<u>1.265</u>	23	1.325	25	1.479	26	1.574	27	1.634	28	1.694
29	1.719	30	1.744	31	1.769	32	1.794	34	1.819	35	1.939	36	2.094	37	2.249
38	2.404	39	2.559	40	2.619	41	2.679	42	2.704	44	2.754	45	2.779	46	2.804
47	2.864	48	2.924	49	3.019	50	3.114	51	3.174	52	3.259	54	3.284	55	3.309
56	3.334	57	3.359	58	3.419	59	3.479	60	3.574	61	3.669	62	3.729	64	3.813
65	3.838	66	3.863	67	3.888	68	3.913	69	3.973	70	4.033	71	4.188	73	4.498
74	4.653	75	4.713	76	4.773	77	4.798	78	4.848	80	4.873	81	4.898	82	4.958
83	5.018	84	5.113	85	5.208	86	5.268	87	5.328	89	5.378	90	5.403	91	5.428
92	5.453	93	5.513	94	5.573	95	5.668	96	5.763	97	5.823	98	5.883	99	5.933
101	5.958	102	5.983	103	6.008	104	6.068	105	6.128	106	6.283	107	6.437		
J	DIST.	radial mesh in cm													
2	0.839	3	1.678	4	2.517	5	3.356	6	4.195	7	5.034	8	5.873	9	6.712
11	7.530	12	8.198	13	8.748	14	9.298	15	9.893	16	10.488	17	11.082	18	11.677
19	12.907	20	13.517	22	14.199	23	15.082	24	15.964	25	16.846	26	17.728	27	18.611
28	20.375	30	21.034	31	21.692	32	22.351	33	23.009	34	23.456	35	23.902	36	24.472
38	25.613	39	26.183	40	27.169	41	28.156	42	29.142	43	30.129	44	31.115	45	32.102
47	34.088	48	35.088	49	36.088	50	37.088	51	38.088	52	39.088	53	40.088	54	41.088
56	43.088													55	42.088

Notes on Table E.1 to Table E.5

Mark O shows the boundary of material region, mark — in the underline shows the transient region, and mark — — in the underline shows the regulating rod region.