

JAERI-M  
9911

SHE-8炉心の制御棒反応度価値および  
臨界時即発中性子減衰定数の解析

— VHTR 核設計法の精度検討 (2) —

1982年2月

土井 猛\*・高野 誠・平野 光将・新藤 隆一

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城  
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 山出軽印刷所

SHE-8 炉心の制御棒反応度値および  
臨界時即発中性子減衰定数の解析  
—— VHTR 核設計法の精度検討(2) ——

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部

土井 猛\*・高野 誠・平野光将・新藤隆一

(1981年12月25日受理)

濃縮ウラン装荷・黒鉛減速臨界集合体 SHE (Semi-Homogeneous Critical Experimental Assembly) における実験のうち、SHE-8 炉心を対象に実験用制御棒の反応度値と、臨界状態における即発中性子減衰定数の解析を行い、実験値と比較・検討した。

解析では、中性子スペクトル計算に高温ガス炉格子燃焼計算コード DELIGHT-5 を、また炉心の中性子減衰定数 ( $\alpha$  固有値) の算出には 2 次元輸送計算コード TWOTRAN-2 を用いるものとし、輸送近似と出来る限り厳密な空間モデルを採用した 18 群  $S_0 P_0$  計算を行った。

解析の結果、制御棒反応度値は 5 % 程度、臨界時即発中性子減衰定数も 5 % 程度の誤差範囲で実験値と一致することが判明し、使用した計算コード、核データおよび計算手法がほぼ妥当なものであることが確認された。

---

\* 業務協力員 (石川島播磨重工)

JAERI-M 9911

An Analysis of Control Rod Reactivity Worth and Prompt Neutron  
Decay Constant of the SHE-8 Critical Assembly  
—— Accuracy Investigation of VHTR Nuclear Design Methods(2) ——

Takeshi DOI\*, Makoto TAKANO, Mitsumasa HIRANO and Ryuiti SHINDO

Division of Power Reactor Projects, JAERI

(Received December 25, 1981)

Reactivity worth of experimental control rod and prompt neutron decay constant at critical state were analyzed for the graphite-moderated Semi-Homogeneous Critical Experimental Assembly SHE-8 with enriched uranium fuel.

Alpha-eigenvalues of the assembly were evaluated by 18group  $S_6P_0$  calculation with two-dimensional transport code TWOTRAN-2, and neutron spectrum were calculated with HTGR lattice burn-up code DELIGHT-5.

Calculated results of control rod reactivity worth and prompt neutron decay constant agreed with the experimental data within the accuracy of 5%. And appropriateness of the calculational codes, nuclear data and analytical methods is verified by this analysis.

Keywords; VHTR, Nuclear Design, Accuracy Analysis, DELIGHT-5, TWOTRAN-2, SHE, Critical Experiment, Control Rod Reactivity Worth, Prompt Neutron Decay Constant, Alpha-eigenvalue

---

\* on leave from Ishikawajima-Harima Heavy Ind.Co.

## 目 次

1. 概要	1
2. 解析方法	3
2.1 $\alpha$ 固有値計算	3
2.2 断面積の作成	4
2.3 核分裂スペクトル	4
3. 解析	11
3.1 解析対象	11
3.2 解析モデル	11
3.3 解析結果	12
4. 検討	29
4.1 計算値と実験値の比較	29
4.2 まとめと今後の課題	30
謝辞	31
参考文献	32

## Contents

1. Abstract .....	1
2. Analytical method .....	3
2.1 Calculation of alpha-eigenvalue.....	3
2.2 Preparation of cross sections .....	4
2.3 Fission spectrum .....	4
3. Analysis .....	11
3.1 Analytical cases .....	11
3.2 Analytical models .....	11
3.3 Calculated results .....	12
4. Discussion .....	29
4.1 Comparison between calculations and experiments .....	29
4.2 Summary and future task .....	30
Acknowledgements .....	31
References .....	32

# 1. 概 要

多目的高温ガス実験炉の核設計に使用される計算コード、核データおよび計算手法の精度は、濃縮ウラン装荷・黒鉛減速臨界集合体 SHE の実験解析を通して検証することが可能である。しかし、SHE は炉心領域が小さく、燃料棒格子あるいは制御棒格子の概念が成立しないため、通常的设计手法をそのまま適用することが困難な面がある。その様な場合には、まず最初に①厳密な計算手法（モデル）のもとに実験解析を行い、計算コード、核データの妥当性が確認された後、②厳密な計算手法と設計手法の比較を実験炉に対して拡張・推定するという2段階の方法を採ることになるであろう。

SHE-8 は、炉心が燃料棒のみから構成される最も基本的な体系である。炉心構成が単純であるため、数多くの実験<sup>(1)</sup>が行われている。この SHE-8 炉心を対象に、前記の第1段階の精度把握を目的として、厳密な計算手法により制御棒反応度値と臨界時即発中性子減衰定数の解析を行った。

制御棒値の解析においては、実験から得られるデータと直接比較することに重点を置き、制御棒が挿入された状態と、制御棒が挿入されない標準状態の  $\alpha$  固有値の差を制御棒値として定義した。また、臨界時の即発中性子減衰定数の解析においては、臨界に調整された状態での  $\alpha$  固有値を求めた。

$\alpha$  固有値の計算では、計算コードと核データの検証という目的からも、出来る限り厳密なエネルギー・空間モデルを採用する必要があるため、ここでは2次元輸送計算コード TWOTRAN-2<sup>(2)</sup>による18群  $S_6 P_0$  計算を行った。計算に必要な断面積は、高温ガス炉格子燃焼計算コード DELIGHT-5<sup>(3)</sup>を用いて算出した。

尚、DELIGHT-5 から得られた断面積は、①反応度を若干大きく評価する傾向<sup>(5)</sup>があること、また②計算の簡便さから炉心の対称性を利用するために、計算で扱った体系の燃料棒本数は、実験体系に最も近い整数本（ $6N+1$ ）を採用したこと、等のため、臨界状態および、制御棒を挿入しない標準状態への調整が必要となるが、これは、中性子束のエネルギー・空間分布を変える恐れのない核分裂中性子発生数を通して行った。

未臨界度の小さい体系では、遅発中性子の効果が顕著に現われ、 $\alpha$  固有値は単純には求めることが出来ないが、この場合には、遅発中性子スペクトルに含まれる  $\alpha$  固有値と時間吸収項の  $\alpha$  固有値が等しくなる様な方法を考案し、その手順に従って  $\alpha$  固有値を求めた。

実験用制御棒には、4種類のボロン濃度の GRAY 制御棒と1種類の BLACK 制御棒を採用し、中心に1本挿入、偏心して1本挿入および偏心して3本挿入された場合の体系について計算を行った。

燃料領域は、GRAY 制御棒が挿入された場合には、燃料ディスクと黒鉛スリーブを個別に扱った非均質形状を採用し、BLACK 制御棒が挿入された場合には、計算時間およびコア容量等の制限から、燃料ディスクと黒鉛スリーブを混合した均質形状を採用した。

解析の結果、制御棒値は輸送計算における収束条件により比較的大きく左右されるが、収

束条件を厳しくとると、制御棒価値は実験値と5%程度の誤差範囲で一致することが分かった。一部の解析結果では、計算時間の制約から収束条件を緩めたため、若干実験値との相違が大きいものもあるが、収束条件を充分厳しくすれば更に良い実験との一致が得られるものと思われる。また、臨界時の即発中性子減衰定数も、計算値は実験値と5%程度の誤差範囲で一致することが分かった。

以上述べて来たように、計算結果と実験値との良い一致が得られ、解析に使用した核データ計算コードおよび解析手法の妥当性が確認された。

尚、核設計法の精度検討のため、SHE 臨界実験に対する種々の解析<sup>(5)-(9)</sup>が行われており、本解析もその一環として行ったものである。



## 2. 解析方針

### 2.1 $\alpha$ 固有値計算

一般的な  $k$  固有値 (増倍率) は、即発および遅発中性子の寄与による 1 世代後の定常的な中性子の増倍割合であるのに対して、 $\alpha$  固有値は、体系の余剰反応度を即発中性子だけの減衰 (あるいは発散) 定数として表わしたものであり、両者が表現される方程式は異なる。

$k$  固有値および  $\alpha$  固有値を求めるために解くべき方程式は、それぞれ、次のように表わされる。

$$L\phi = \frac{1}{K_{\text{eff}}} \left\{ \chi_P(1-\beta) + \sum_{i=1}^6 \beta_i \chi_d^i \right\} F\phi \quad (2.1)$$

$$\frac{\alpha}{v}\phi + L\phi = \left\{ \chi_P(1-\beta) + \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i \chi_d^i}{\lambda_i + \alpha} \right\} F\phi \quad (2.2)$$

但し、

$$L\phi \equiv \Omega \cdot \nabla \phi(r, E, \Omega) + \Sigma_t(r, E)\phi(r, E, \Omega) - \int dE' \int d\Omega' \Sigma_s(r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega)\phi(r, E', \Omega') \quad (2.3)$$

$$F\phi \equiv \int dE' \int d\Omega' \nu \Sigma_f(r, E')\phi(r, E', \Omega') \quad (2.4)$$

変数の意味は以下の通りである。

$\phi(r, E, \Omega)$  : 座標  $r$ , エネルギー  $E$ , 方向  $\Omega$  における中性子束

$\chi_P$  : 核分裂による即発中性子スペクトル

$\chi_d^i$  :  $i$  群の遅発中性子スペクトル

$\beta_i$  :  $i$  群の遅発性中性子生成割合

$\beta$  :  $\beta_i$  の総和 ( $= \sum_{i=1}^6 \beta_i$ )

$\lambda_i$  :  $i$  群の遅発中性子先行核崩壊定数 (1/sec)

$\Sigma_t(r, E)$  : 座標  $r$ , エネルギー  $E$  における中性子の全断面積

$\Sigma_s(r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega)$  : 座標  $r$ , エネルギー  $E'$ , 方向  $\Omega'$  における中性子がエネルギー  $E$ , 方向  $\Omega$  に散乱する断面積

$\nu \Sigma_f(r, E)$  : 座標  $r$ , エネルギー  $E$  における中性子の核分裂生成断面積

定常的な  $k$  固有値計算に用いられる核分裂スペクトルは即発部分と遅発部分の和として表わされ、時間に関係する量は含まれていないのに対して、 $\alpha$  固有値計算に用いられる核分裂スペクトルには、求めるべき  $\alpha$  固有値が時間に関係する量 (体系に依存する量) として含まれている。 $\alpha$  固有値の絶対値が  $\lambda_i$  に比較して非常に大きな体系では、核分裂スペクトルに含まれる  $\alpha$  依存性は無視出来るが、 $\alpha$  固有値の絶対値が  $\lambda_i$  と同程度の場合には無視することは出来なくなる。このため、1 回の輸送計算で  $\alpha$  固有値を直接求めることは不可能であり、以下に述べる考慮が必要となる。

輸送方程式 (2.2) を次のように簡単に表わす。

$$\frac{\alpha}{v} \phi + L \phi = S(\alpha) F \phi \quad (2.5)$$

$$S(\alpha) \equiv \chi_p(1 - \beta) + \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i \chi_d^i}{\lambda_i + \alpha} \quad (2.6)$$

解く過程では、 $\alpha$  固有値を輸送計算で求める前に、核分裂スペクトルに  $\alpha$  固有値を入力しなくてはならない。これを次のように記述する。

$$\frac{\alpha_{OUT}}{v} \phi + L \phi = S(\alpha_{IN}) F \phi \quad (2.7)$$

但し、 $\alpha_{IN}$  は核分裂スペクトルに入力する  $\alpha$  値、 $\alpha_{OUT}$  は輸送計算から得られた  $\alpha$  固有値を意味する。もし、 $\alpha_{IN}$  と  $\alpha_{OUT}$  が等しければ、 $\alpha$  固有値は容易に求められるが、最初から  $\alpha_{OUT}$  を推定することは困難である。そこで、推定値  $\alpha_{guess}$  を入力し、得られた固有値を  $\alpha_1$  とする。次に  $\alpha_1$  を入力し、得られた固有値を  $\alpha_2$  とする。この  $\alpha_{guess}$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  を座標に表わすと Fig. 2.1 のようになる。

座標にプロットする点数が多い方が正しい特性曲線を描くことが出来るが、 $\alpha_{guess}$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  が非常に近い値であれば、直線近似でも良い。この  $\alpha$  固有値の特性曲線と直線  $y=x$  との交点が求めるべき  $\alpha$  固有値である。 $\alpha_{guess}$  には実験値を用いるのが便利である。

## 2.2 断面積の作成

輸送計算に使用する断面積は、DELIGHT-5 コードを用いて算出した。炉心領域の断面積は、単位燃料棒格子の平均中性子スペクトルを用いて、18群に縮約して作成した。反射体の断面積は、黒鉛無限系の中性子スペクトルを用いて縮約した。制御棒の断面積は、燃料棒格子の平均中性子スペクトルを用いて作成し、制御棒が挿入されたことによる中性子スペクトルの変化の影響は、18群構造に対しては小さいものとして無視した。 $1/v$  断面積は、縮約する中性子スペクトルに比較的大きく左右されるが、輸送計算では  $1/v$  断面積の空間依存性を考慮することが出来ないため、中性子束のインポートランスを考え、炉心領域のものを採用した。単位燃料棒格子のモデル化を Fig. 2.2 に示す。また格子計算および炉心計算に使用する定数を作成するための原子数密度を Table 2.1 に示す。制御棒の形状を Fig. 2.3 に示す。制御棒の原子数密度を Table 2.2 に示す。

## 2.3 核分裂スペクトル

DELIGHT-5 から出力される断面積は、反応度を若干大きく評価する傾向があること、また、計算体系では、形状の対称性を利用するため、燃料棒本数が実験体系のものと若干異なることにより、制御棒が挿入されていない標準状態および臨界状態を再現するためには、何らかの調整が必要である。中性子スペクトルのエネルギー・空間分布に影響を及ぼすことなく、反応度を調整することが出来るものは核分裂中性子発生数である。

核分裂中性子発生数は、輸送計算の中では、核分裂スペクトルとの積の形で用いられているため、核分裂中性子発生数を調整する係数は、核分裂スペクトルの中に採り入れた方が便利である。この調整係数は、エネルギーに対する依存性はなく、核分裂発生中性子のエネルギーに関する相対量は保存される。調整は以下の様に行われる。

標準状態に対しては、

$$\chi_{\alpha} = f_{\alpha} \cdot \left\{ \chi_p (1 - \beta) + \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i \chi_d^i}{\lambda_i + \alpha_s} \right\} \quad (2.8)$$

なる核分裂スペクトルを用いて輸送計算を行い、得られた $\alpha$ 固有値が実験値 $\alpha_s$ と等しくなるように $f_{\alpha}$ を調整すれば良い。

臨界状態に対しては、

$$\chi_k = f_k \cdot \left\{ \chi_p (1 - \beta) + \sum_{i=1}^6 \beta_i \chi_d^i \right\} \quad (2.9)$$

なる核分裂スペクトルを用いて輸送計算を行い、得られた $k$ 固有値が1.0に等しくなるように $f_k$ を調整すれば良い。

$^{235}\text{U}$ の遅発中性子データには、ENDF/B-4のものを採用した。Table 2.3に $\lambda_i, \beta_i$ データを示す。

DELIGHT-5から出力される核分裂スペクトルは、 $k$ 固有値計算用のものであるため、 $\alpha$ 固有値計算用核分裂スペクトルは、遅発中性子スペクトル<sup>(4)</sup>を用いて計算する必要がある。

$$\chi_{\alpha} = \chi_k + \sum_{i=1}^6 \left( \frac{\lambda_i \beta_i}{\lambda_i + \alpha} - \beta_i \right) \chi_d^i \quad (2.10)$$

但し、 $\chi_k, \chi_d^i$ には、18群構造に対して以下の数値を用いた。Table 2.4には、18群のエネルギー構造を示す。

$$\chi_k(1) = 0.96723$$

$$\chi_k(2) = 0.03277$$

$$\chi_k(g) = 0.0 \quad (g = 3 \sim 18)$$

$$\chi_d^i(1) = 0.935$$

$$\chi_d^i(2) = 0.065$$

$$\chi_d^i(g) = 0.0 \quad (g = 3 \sim 18)$$

} 各 $i$ 群とも共通と仮定した。

Table 2.1 Atomic number densities of SHE-8 core

( $\times 10^{24}$  n/cm<sup>3</sup>)

Nuclide	Atomic densities for cell calculations			Atomic densities for core calculations					
	Fuel disk		Graphite sleeve	Heterogeneous fuel		Homogeneous fuel		Replaceable reflector	Permanent reflector
	Fuel disk	Graphite sleeve	Fuel disk	Graphite sleeve	Fuel	fuel	Reflector	Reflector	
<sup>235</sup> U	8.4461 - 5	-	8.0942 - 5	-	-	3.4404 - 5	-	-	-
<sup>238</sup> U	3.3671 - 4	-	3.2268 - 4	-	-	1.3716 - 4	-	-	-
<sup>10</sup> B	2.9494 - 9	1.6752 - 9	2.9002 - 9	1.4038 - 9	2.0399 - 9	1.5949 - 9	1.6033 - 9	-	-
<sup>11</sup> B	1.2823 - 8	7.5165 - 9	1.2619 - 8	6.2990 - 9	8.9854 - 9	7.1565 - 9	7.1941 - 9	-	-
<sup>12</sup> C	9.4777 - 2	8.0719 - 2	9.4377 - 2	6.7644 - 2	7.9007 - 2	7.6852 - 2	7.7256 - 2	-	-
<sup>16</sup> O	8.9479 - 4	3.2888 - 5	8.5893 - 4	2.9344 - 5	3.8196 - 4	3.1840 - 5	3.1950 - 5	-	-
Si	2.0248 - 7	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	6.3228 - 8	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe	6.1094 - 8	-	5.8548 - 8	-	2.4886 - 8	-	-	-	-
Cr	2.1873 - 8	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	2.0701 - 8	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	1.9371 - 8	-	-	-	-	-	-	-	-
Mo	2.3709 - 8	-	-	-	-	-	-	-	-
W	3.0932 - 8	-	-	-	-	-	-	-	-
Cd	2.0237 - 10	-	1.9394 - 10	-	8.2433 - 11	-	-	-	-
N	-	2.0439 - 6	-	8.0251 - 6	4.6138 - 6	3.8127 - 6	3.6283 - 6	-	-
H	7.9655 - 5	6.4677 - 5	7.9177 - 5	5.4103 - 5	6.4921 - 5	6.1632 - 5	6.1950 - 5	-	-

(Note) 8.4461 - 5 means  $8.4461 \times 10^{-5}$

Table 2.2 Atomic number densities of control rod

( $\times 10^{24}$  n/cm<sup>3</sup>)

Nuclide	Control rod absorber							Homogeneous mixture of	
	GRAY - 42							AL tube, matrix tube and void	
	1	3	5	7	BLACK - 50/30			GRAY-42	BLACK-50/30
<sup>10</sup> B	8.0971 - 5	4.0608 - 4	1.6276 - 3	8.0644 - 3	1.6450 - 3			7.2046 - 10	9.6464 - 10
<sup>11</sup> B	3.5203 - 4	1.7655 - 3	7.0760 - 3	3.5061 - 2	7.1520 - 3			3.2327 - 9	4.3283 - 9
<sup>12</sup> C	8.7437 - 2	8.5871 - 2	7.9979 - 2	4.8933 - 2	9.3303 - 2			3.4716 - 2	4.6481 - 2
<sup>16</sup> O	3.4997 - 5	3.4370 - 5	3.2012 - 5	1.9586 - 5	3.7345 - 5			1.6580 - 5	2.2548 - 5
Al	-	-	-	-	-			1.0218 - 2	5.8042 - 3
N	-	-	-	-	-			2.8041 - 6	3.7544 - 6
H	6.9989 - 5	6.8735 - 5	6.4019 - 5	3.9168 - 5	7.4684 - 5			2.8090 - 5	3.7609 - 5

(Note) 8.0971 - 5 means  $8.0971 \times 10^{-5}$

Table 2.3 Delayed neutron data

Group	$\lambda_i$ (1/sec)	$\beta_i$	$\lambda_i \beta_i$
1	0.01272	2.6236 - 4	3.3372 - 6
2	0.03177	1.4706 - 3	4.6677 - 5
3	0.116	1.2980 - 3	1.5057 - 4
4	0.311	2.8100 - 3	8.7391 - 4
5	1.4	8.8374 - 4	1.2372 - 3
6	3.87	1.7951 - 4	6.9470 - 4
Total		6.9042 - 3	

(Note)  $\lambda_i$  and  $\beta_i$  are from ENDF/B-4

Table 2.4 Energy boundaries of 18 groups

Energy boundaries of fast region			Energy boundaries of thermal region		
Group	Upper	Lower	Group	Upper	Lower
1	$1.0 \times 10^7$	$1.83 \times 10^5$	10	2.38	1.85
2	$1.83 \times 10^5$	$1.17 \times 10^4$	11	1.85	1.45
3	$1.17 \times 10^4$	$9.61 \times 10^2$	12	1.45	1.10
4	$9.61 \times 10^2$	$1.30 \times 10^2$	13	1.10	1.045
5	$1.30 \times 10^2$	$4.79 \times 10^1$	14	1.045	0.65
6	$4.79 \times 10^1$	$1.76 \times 10^1$	15	0.65	0.255
7	$1.76 \times 10^1$	6.48	16	0.255	0.085
8	6.48	3.93	17	0.085	0.035
9	3.93	2.38	18	0.035	0.0

(Note) unit in eV.

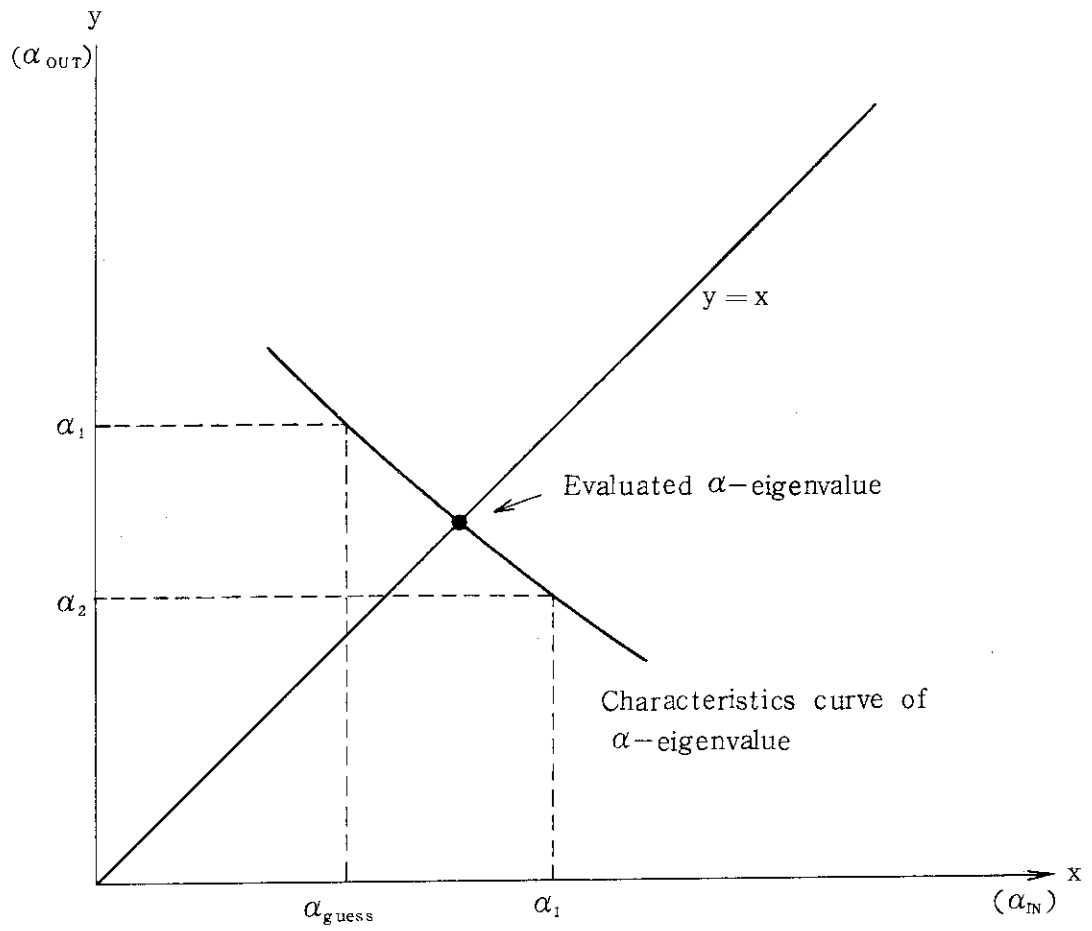


Fig.2.1 Characteristics curve of  $\alpha$ -eigenvalue

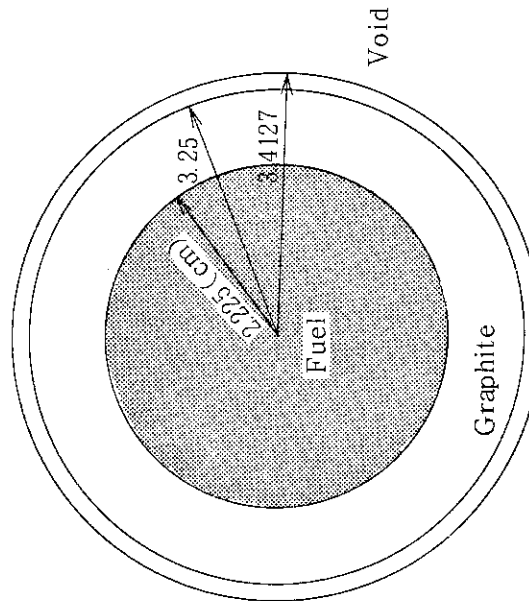
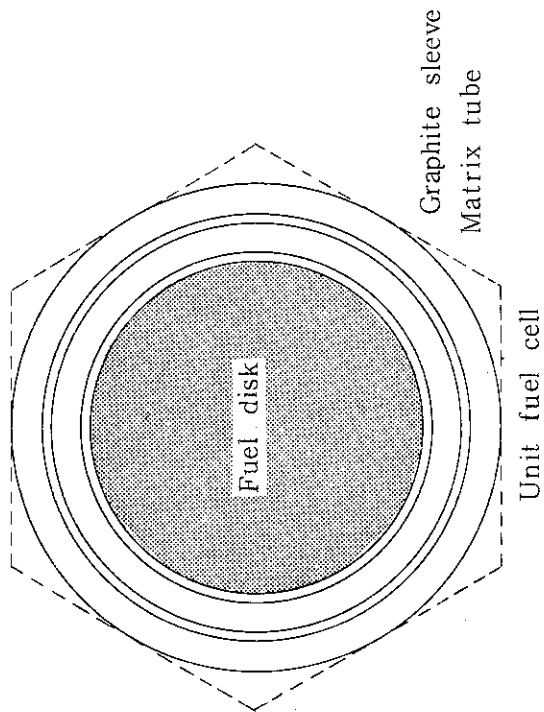
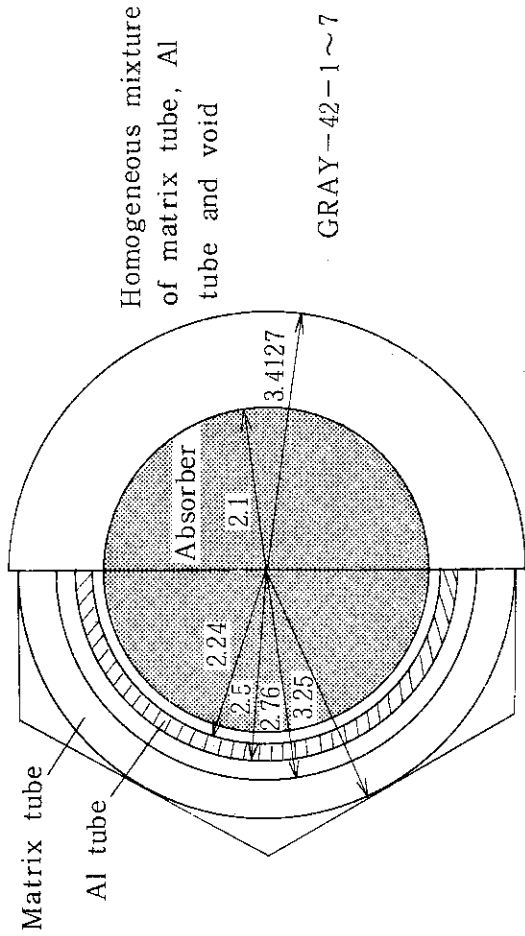


Fig. 2.2 Unit fuel cell of SHE-8



Modeled cross sectional view

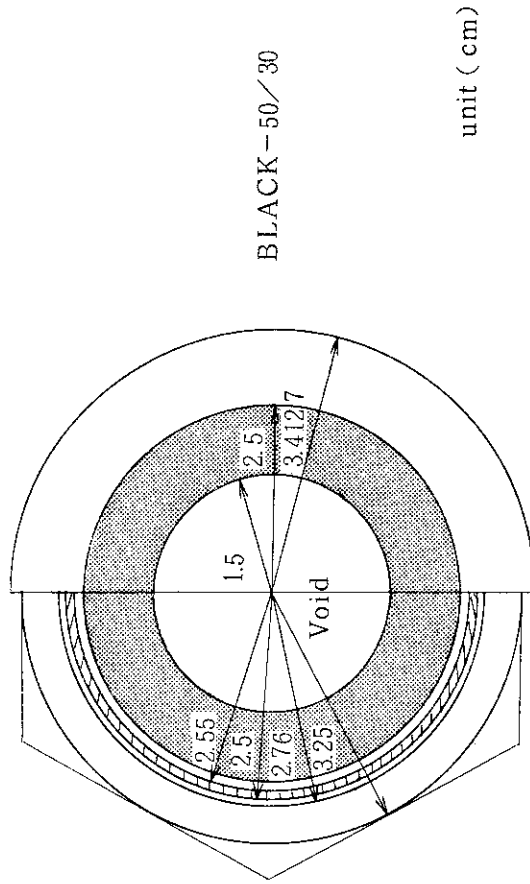


Fig. 2.3 Cross sectional view of control rod



## 3. 解 析

### 3.1 解析対象

解析対象として選択した実験体系をTable 3.1 およびFig. 3.1 に示す。

全ての体系で、炉心領域の要素本数（燃料棒+制御棒）は70本（1/2体系）である。標準状態、臨界状態の実験体系では、制御棒が挿入される位置にも燃料棒が挿入されている。

GRAY制御棒の場合には、中心に1本挿入された状態に対して、ポロン濃度を4種類変えた体系を選んだ。BLACK制御棒の場合には、ポロン濃度は1種類ではあるが、中心に1本挿入された場合、偏心して1本挿入された場合および、制御棒間の干渉効果を検討するために、回転対称に3本挿入した場合を2種類、合計4種類の体系を採用した。

### 3.2 解析モデル

#### (i) 非均質炉心計算形状

燃料ディスクと黒鉛スリーブを均質化せず、分離して扱ったものであり、メッシュ数が非常に多くなるため、対称性を利用して1/4炉心を扱うことの出来る、GRAY制御棒が中心1本挿入された場合にのみ用いた。

標準状態および臨界状態の計算形状をFig. 3.2 に示す。GRAY制御棒が中心1本挿入された場合の計算形状をFig. 3.3 に示す。

燃料棒本数は、実験では70本であるが、この計算形状では対称性を利用するために、73本を採用してある。燃料棒3本の余剰な反応度は、断面積自身の反応度を若干大きく評価する傾向と合わせて、核分裂中性子発生数で調整するようにした。

燃料ディスクは等体積の正方形で近似し、黒鉛スリーブ、ポイドは長方形で近似した。この場合、単位燃料棒格子の体積、六方配列の格子間隔は保存されている。燃料棒格子のモデル化をFig. 3.4 に示す。

#### (ii) 均質炉心計算形状

BLACK制御棒が非対称に挿入される場合には、1/2炉心を扱う必要があり、燃料棒の非均質性を採り入れるとメッシュ数が膨大なものになるため、燃料ディスクと黒鉛スリーブを均質化したモデル化形状を採用した。燃料棒格子の配列は、非均質炉心形状のものと等しく、燃料棒本数も73本である。

標準状態の計算形状をFig. 3.5 に示す。制御棒が中心および偏心1本挿入された場合の計算形状をFig. 3.6, Fig. 3.7 に示す。制御棒が3本挿入された場合の計算形状をFig. 3.8, Fig. 3.9 に示す。また、制御棒中心1本挿入された場合のR- $\theta$ 座標による計算形状をFig. 3.10に示す。

## (iii) 反射体形状

可動反射体は、 $X-Y$ 座標では、階段状の形状で六角形を模擬し、 $R-\theta$ 座標では、等体積の円柱で模擬した。固定反射体は、 $X-Y$ 座標では、真空境界を任意の場所に適用することが出来ないため、等体積の正方形で近似し、 $R-\theta$ 座標では、等体積の円柱で近似した。

## (iv) 制御棒形状

GRAY制御棒、BLACK制御棒のモデルを、Fig. 3.11およびFig. 3.12に示す。

円柱あるいは円環状吸収体は、多数の階段状メッシュにより、等体積の円形に近い形状にモデル化した。吸収体外側のアルミ管、マトリックス管、ボイドは、体積を保存した長方形にモデル化した。

## 3.3 解析結果

TWOTRAN-2を用いた輸送計算には、以下の計算条件を使用した。

群数	18	
$S_N$ 次数	4 (標準状態, 臨界状態)	
	6 (制御棒挿入状態)	
$P_1$ 次数	0 (輸送近似使用)	
中性子束収束条件	$1.0 \times 10^{-3}$	} 場合に応じて採用
	$1.0 \times 10^{-4}$	
核分裂源収束条件	$1.0 \times 10^{-3}$	
	$1.0 \times 10^{-4}$	

臨界時即発中性子減衰定数および制御棒反応度値の解析で行なった計算の結果をTable 3.2にまとめて示す。この表には、体系、制御棒、計算条件および計算結果が記述されている。核分裂スペクトル欄の $f$ 、 $\alpha_{1N}$ は、 $\alpha$ 固有値計算用核分裂スペクトルの計算に用いる核分裂中性子発生数の調整係数と $\alpha$ 固有値である。

CASE-1は体系の実効増倍率を、非均質炉心に対して計算したものであり、1.0372が得られた。この数値は、DELIGHT-5の断面積を使用し、燃料棒73本に対するもので、ほぼ妥当なものである。

CASE-2, 3の臨界時即発中性子減衰定数 $\alpha_c$ の計算においては、実効増倍率の逆数0.96413が核分裂スペクトルの調整係数となる。 $\alpha_c$ 計算では、 $\alpha$ 固有値の絶対値が小さいため、核分裂スペクトルによる繰返し計算をCASE-3で行なっている。

CASE-4~CASE-8は、標準状態 $\alpha_s$ を再現するもので、 $\alpha_s = -14.089$ に対して $f$ は、0.9550となった。

CASE-9~CASE-16は、GRAY制御棒が中心1本挿入された場合の計算である。

CASE-17, 18は、非均質炉心に対するBLACK制御棒中心1本挿入の場合であるが、計算結果と実験値との相違が大きい。CASE-19では、制御棒のメッシュ数を2倍に増した場合であるが、改善は見られない。

次に均質炉心計算を導入する。

CASE - 20, 21は, 均質炉心形状において,  $\alpha_s = -14.32$ を達成するための  $f$  を求める計算である。輸送計算において,  $\alpha_s / v$  を吸収項として加えた場合の実効増倍率 1.0464 の逆数 0.9556 が均質炉心形状に対する  $f$  値となる。ここで, 収束条件によって結果が比較的大きく変化することには, 注意を払う必要がある。

CASE - 22, 23は, 均質炉心を  $R - \theta$  座標で表現した計算であり, 収束条件を  $1 \times 10^{-3}$  から  $1 \times 10^{-4}$  に厳しくすると実験値に非常に良く一致することが分かる。

CASE - 24, 25は, BLACK制御棒中心1本挿入の場合を, 収束条件を変えて計算した場合である。

CASE - 26 ~ CASE - 28は, BLACK制御棒偏心1本挿入の場合を, 収束条件を変え, 制御棒値が小さいため核分裂スペクトルによる繰返しを行なって計算した場合である。

CASE - 29, 30は, BLACK制御棒3本挿入の場合であり, 収束条件は  $1 \times 10^{-3}$  の場合のみ計算を行なった。

計算の結果得られた  $\alpha$  固有値で, 核分裂スペクトルによる繰返し計算を行なっているものは, 内挿を行なう必要がある。 $\alpha_{\text{guess}}$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  による内挿値は

$$\alpha^* = \frac{\alpha_1^2 - \alpha_2 \alpha_{\text{guess}}}{2\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_{\text{guess}}} \quad (3.1)$$

により求められる。

臨界時即発中性子減衰定数  $\alpha_c$  を計算内挿値と実験値を比較すると以下ようになる。

臨界時即発中性子減衰定数 $\alpha_c$ (1/sec)		
計算値	実験値	誤差(%)
-6.653	-7.01	-5.1

制御棒反応度値の計算内挿値と実験値の比較を Table 3.3 に示す。

Table 3.1 Number of elements of analytical cases

No	Experimental control rod		Number of elements in core			Control rod reactivity worth $\alpha_s - \alpha$ (1/sec) (Experiment, from Ref. 1)	
	Type	Number	Position	Fuel rod	Control rod		Total
1	-	-	-	70	0	70	Standard $\alpha_s = -14.32$ Critical $\alpha_c = -7.01$
2	GRAY - 42 - 1	1	Center	69	1	70	21.6
3	GRAY - 42 - 3	1	Center	69	1	70	41.3
4	GRAY - 42 - 5	1	Center	69	1	70	56.3
5	GRAY - 42 - 7	1	Center	69	1	70	70.1
6	BLACK - 50/30	1	Center	69	1	70	64.38
7	BLACK - 50/30	1	D=58.5	70	Control rod in reflector	70	17.33
8	BLACK - 50/30	3	D=6.5	67	3	70	118.1
9	BRACK - 50/30	3	D=19.5	67	3	70	146.6

(Note) ○ Number of elements in core is for the half assembly.

○ D is distance between central axes of core and control rod. (cm)

Table 3.2 Calculational results of SHE-8 control rod reactivity worth

No.	Assembly		Control rod			Calculational condition				Result		Notes
	Geometry	Region of core	Type	Number	Position	S <sub>N</sub> order	Convergence criterion $\epsilon_\phi, \epsilon_k$	Fission spectrum		K <sub>eff</sub>	$\alpha_{out}$	
								f	$\alpha_{1N}$			
1	X-Y	1/4	-	-	-	4	1/1000	1.0	-	1.0372	-	Heterogeneous core
2								0.96413	-7.01*	-	-5.515	$\alpha_c$ calculation
3								0.96413	-5.515	-	-10.286	"
4								1.0	-14.32*	-	20.562	
5								0.95	-14.32*	-	-18.457	
6								0.954	-14.32*	-	-15.941	
7								0.956	-14.32*	-	-12.322	
8								0.955	-14.32*	-	-14.089	Standard state $\alpha_c f = 0.955$
9	X-Y	1/4	GRAY 42-1	1	Center	6	1/1000	0.955	-36.92*	-	-37.346	
10								0.955	-37.346	-	-35.808	
11	X-Y	1/4	GRAY 42-3	1	Center	6	1/1000	0.955	-55.62*	-	-54.635	
12								0.955	-54.635	-	-57.612	
13	X-Y	1/4	GRAY 42-5	1	Center	6	1/1000	0.955	-70.62*	-	-67.898	
14								0.955	-67.898	-	-73.059	
15	X-Y	1/4	GRAY 42-7	1	Center	6	1/1000	0.955	-84.42*	-	-85.133	
16								0.955	-85.133	-	82.303	
17	X-Y	1/4	BLACK 50/30	1	Center	6	1/1000	0.955	78.70*	-	-68.209	Large difference from experiment
18								0.955	68.209	-	-70.099	"
19	X-Y	1/4	BLACK 50/30	1	Center	6	1/1000	0.955	-78.70*	-	-69.473	Double meshes in control rod
20	X-Y	1/4	BLACK 50/30	1	Center	6	1/1000	1.0	-	1.0478	-	Homogeneous core
21								1.0	-	1.0454	-	Standard state $\alpha_c f = 0.9556$
22	R- $\theta$	1	BLACK 50/30	1	Center	6	1/1000	0.9556	-78.70*	-	-69.556	
23								0.9556	-78.70*	-	-80.482	
24	X-Y	1/4	BLACK 50/30	1	Center	6	1/1000	0.9556	-78.70*	-	-67.893	
25								0.9556	-78.70*	-	-77.807	
26	X-Y	1/2	BLACK 50/30	1	D=58.5	6	1/1000	0.9556	-31.65*	-	-29.058	
27								0.9556	31.65*	-	-33.377	
28								0.9556	-33.377	-	34.026	
29	X-Y	1/2	BLACK 50/30	3	D=6.5	6	1/1000	0.9556	-132.42*	-	-129.55	
30	X-Y	1/2	BLACK 50/30	3	D=19.5	6	1/1000	0.9556	-160.92*	-	-146.84	

(Note) ◦ D : distance from central core axis (cm)  
 ◦ \* : experimental value (from Ref. 1)

Table 3.3 Comparison of control reactivity worth between calculation and experiment

No.	Control rod			Calculations (1/sec)				Experiments (from Ref. 1) (1/sec)			Relative error (%)
	Type	Number	Position	$\alpha_s$	$\alpha_{CAL}^*$	$\Delta \alpha_{CAL}$	$\alpha_s$	$\alpha_{EXP}$	$\Delta \alpha_{EXP}$		
1	GRAY 42-1	1	Center	-14.089	-36.606	22.517	-14.32	-35.92	21.60	+4.3	
2	GRAY 42-3	1	Center		-55.375	41.286		-55.62	41.30	-0.03	
3	GRAY 42-5	1	Center		-69.686	55.591		-70.62	56.30	-1.3	
4	GRAY 42-7	1	Center		-84.563	70.474		-84.42	70.10	+0.53	
5	BLACK 50/30	1	Center	-14.32	-77.807	63.487		-78.70	64.38	-1.4	
6	BLACK 50/30	1	D=58.5		-34.417	20.097		-31.65	17.33	+15.6	
7	BLACK 50/30	3	D=6.5		-129.55	115.23		-132.42	118.10	-2.5	
8	BLACK 50/30	3	D=19.5		-148.64	134.32		-160.92	146.60	-9.1	

(Note) o D : distance from central core axis (cm)

o  $\alpha_{CAL}^*$  : interpolated by  $\alpha_{IN}$ ,  $\alpha_{OUT}$

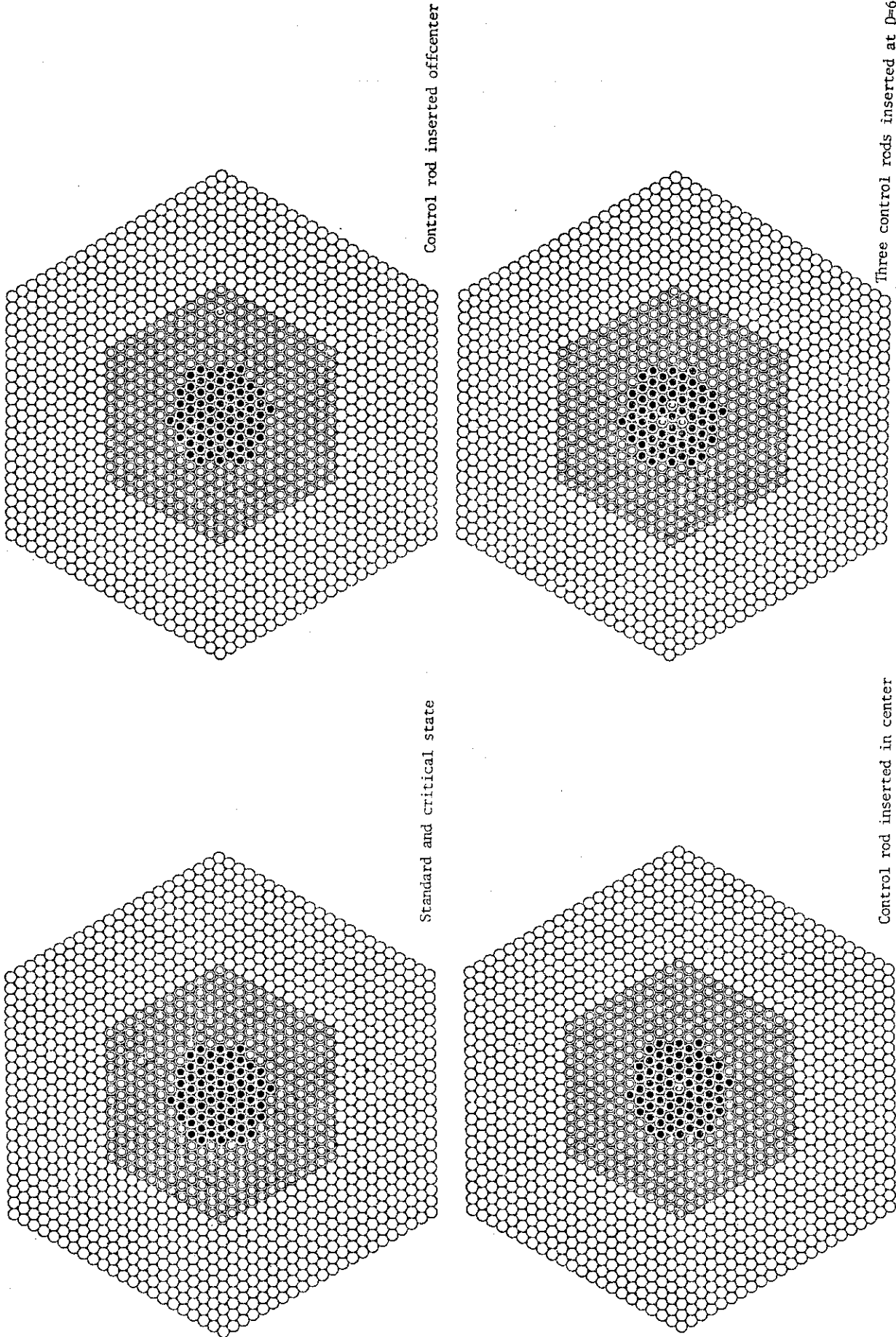
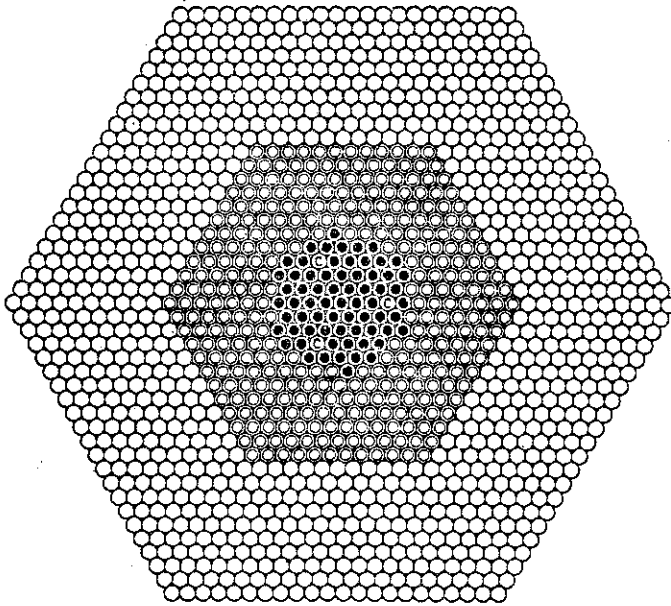


Fig.3.1 Experimental configuration of SHE-8



Three control rods inserted at  $D=19.5\text{cm}$

- Fuel rod
- ⊙ Replaceable reflector
- Permanent reflector
- ⊙ Experimental control rod

Fig.3:1 Experimental configuration of SHE-8(continued)



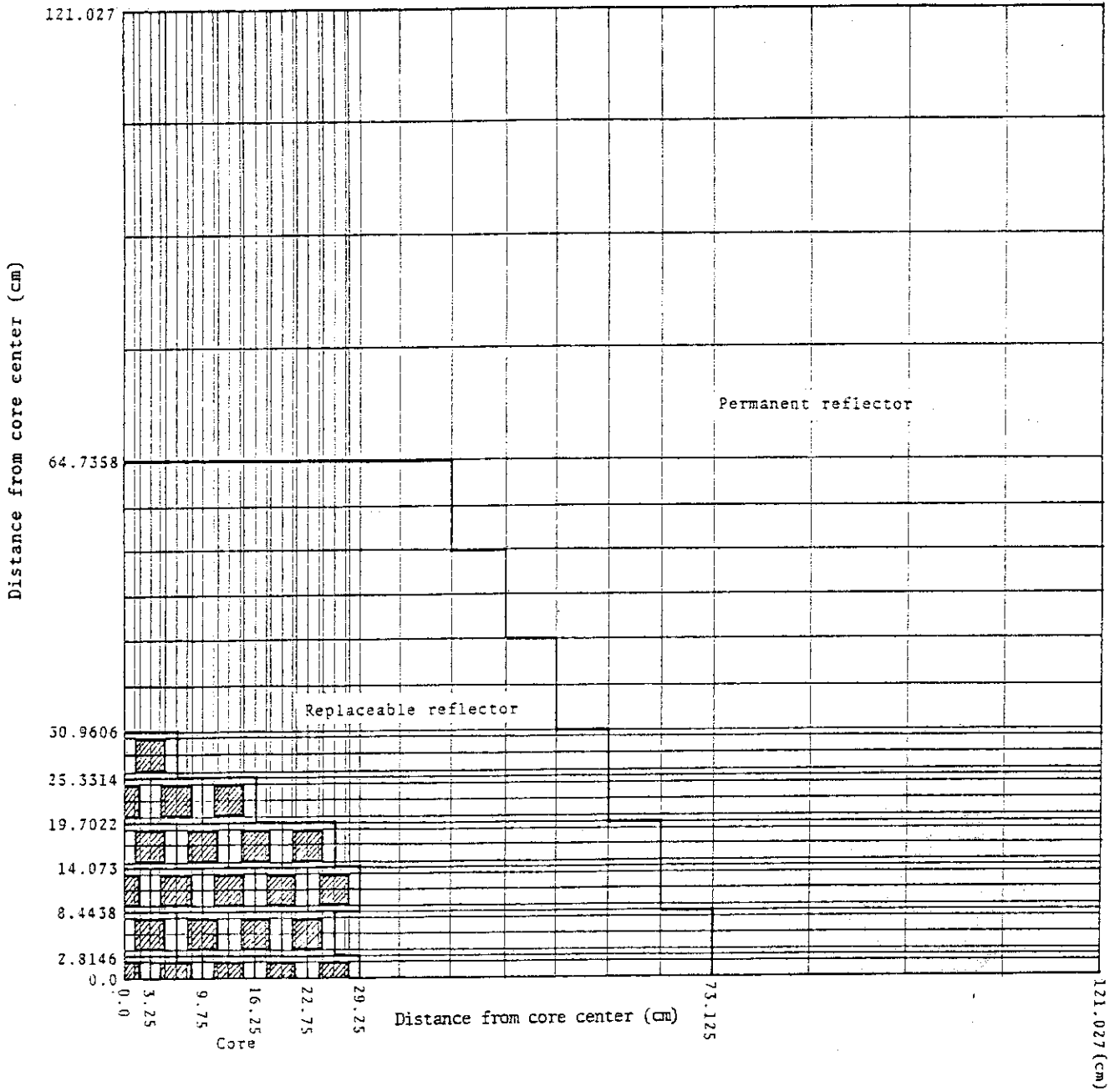


Fig.3.2 Calculational geometry of heterogeneous core (standard and critical state)

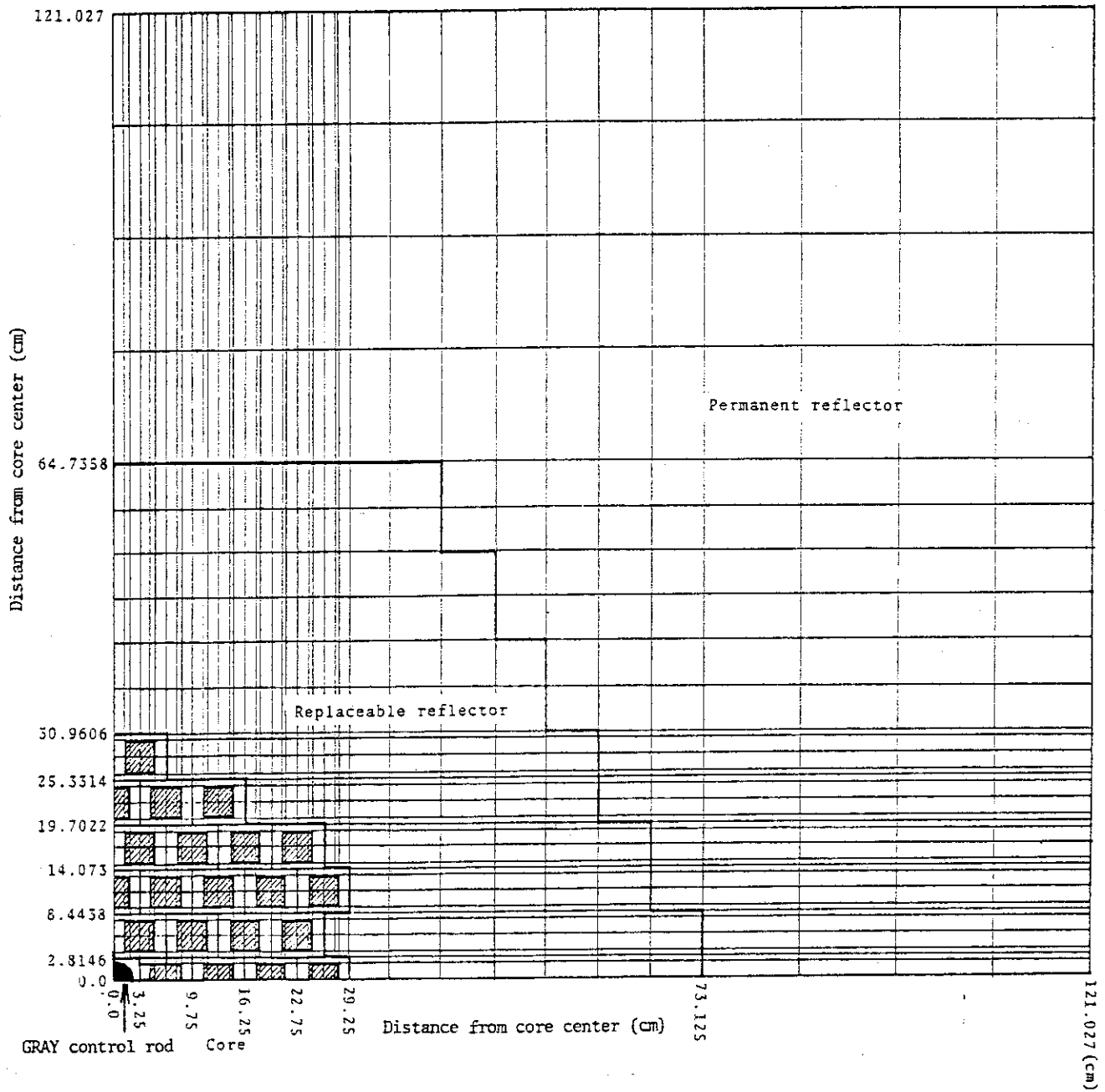


Fig.3.3 Calculational geometry of heterogeneous core (GRAY control rod inserted in center)

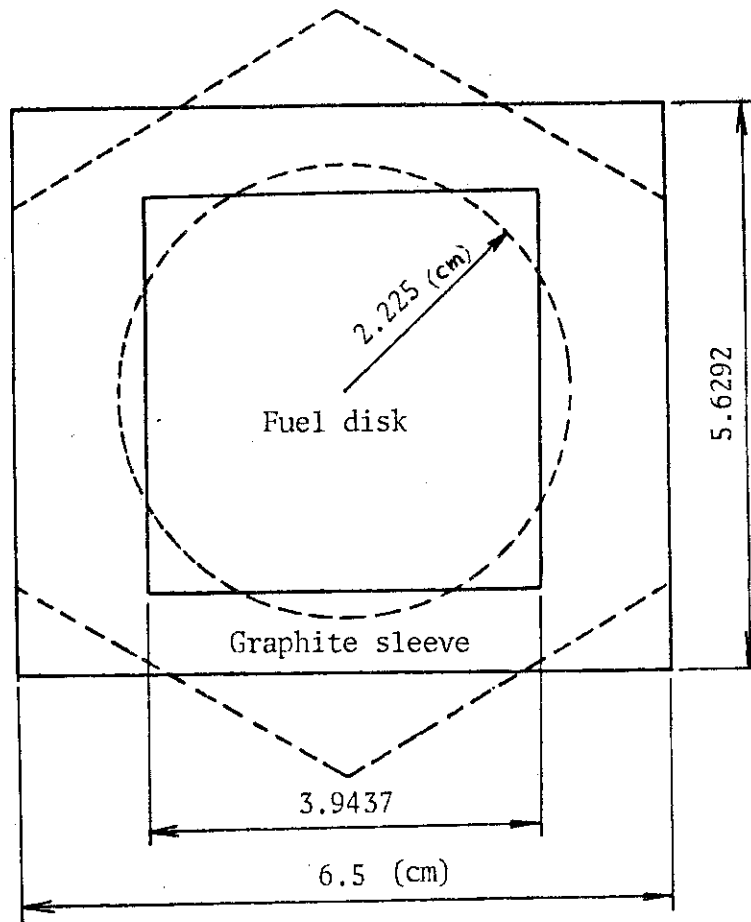


Fig.3.4 Modeled heterogeneous fuel rod

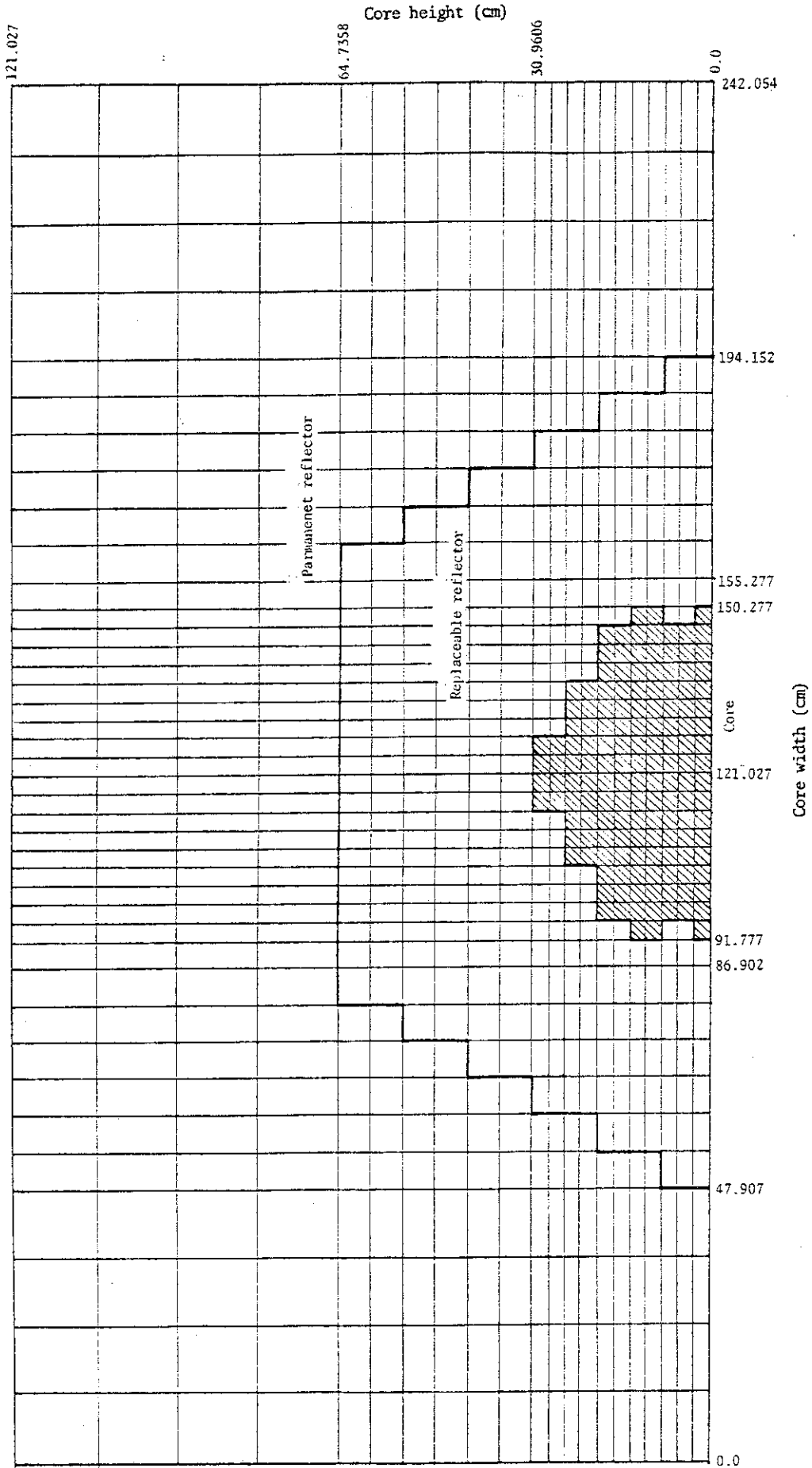


Fig.3.5 Calculational geometry of homogeneous core (standard and critical state)

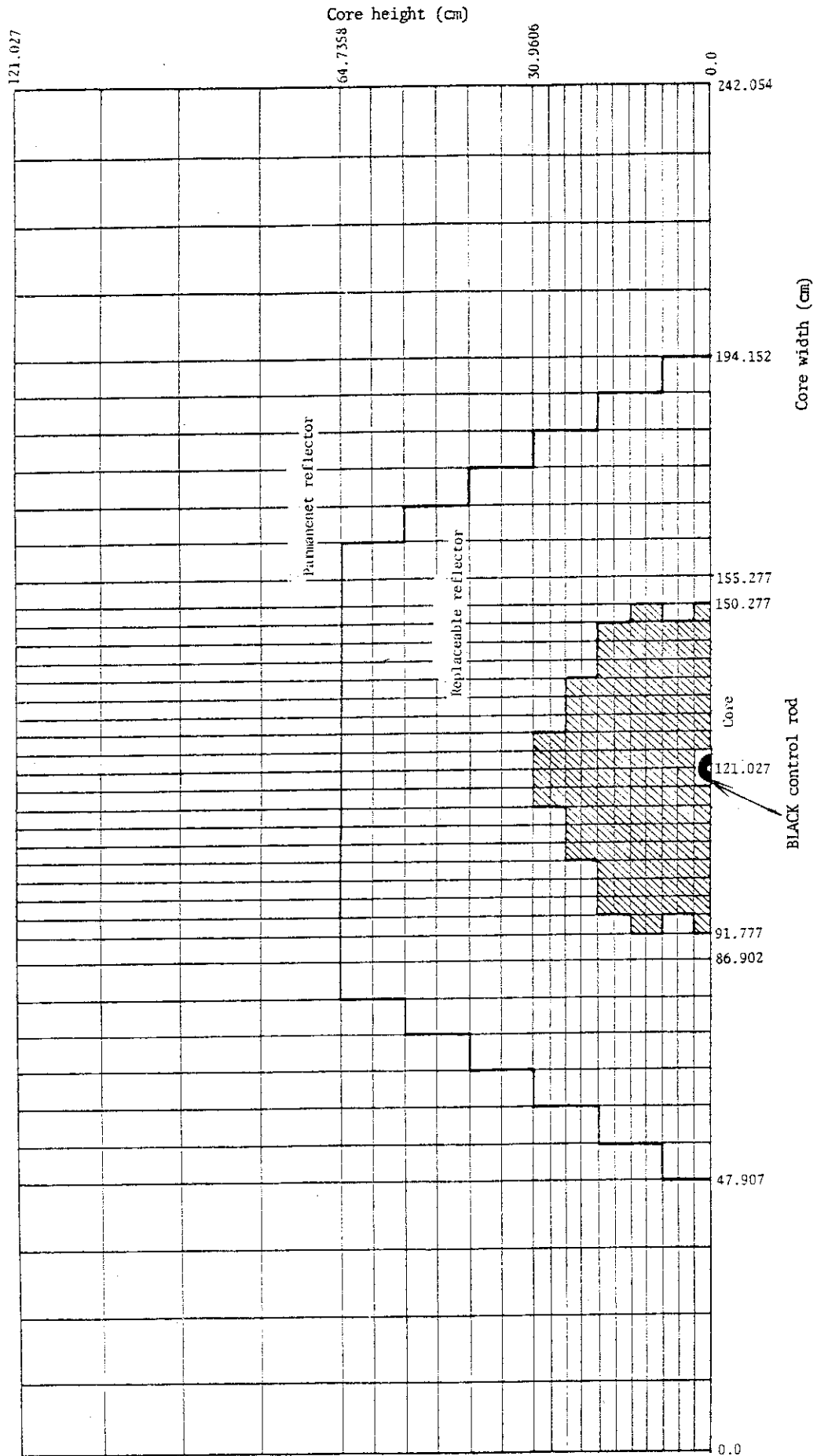


Fig.3.6 Calculational geometry of homogeneous fuel (BLACK control rod inserted in center)

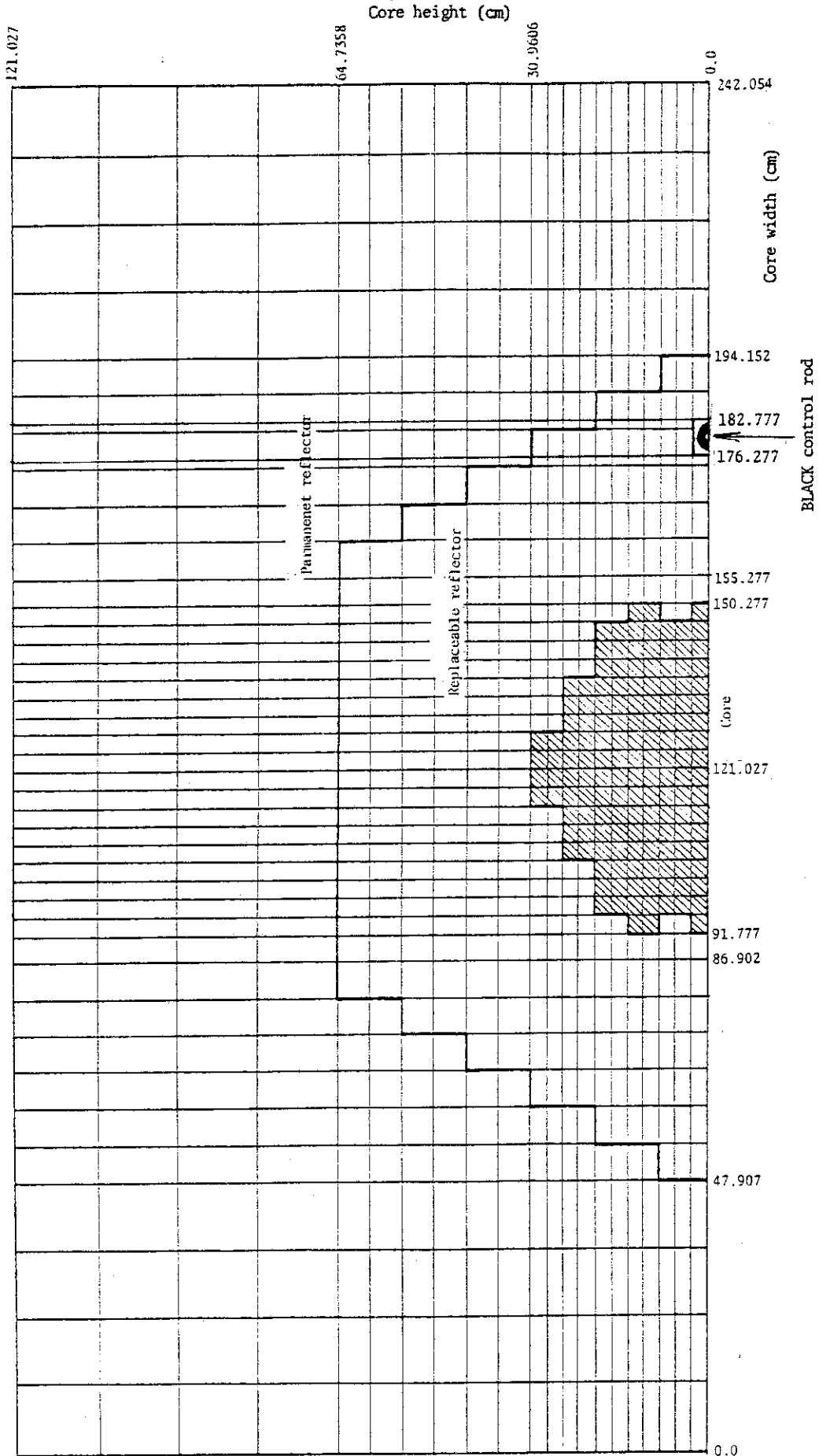


Fig. 3.7 Calculational geometry of homogeneous core (BLACK control rod inserted offcenter)

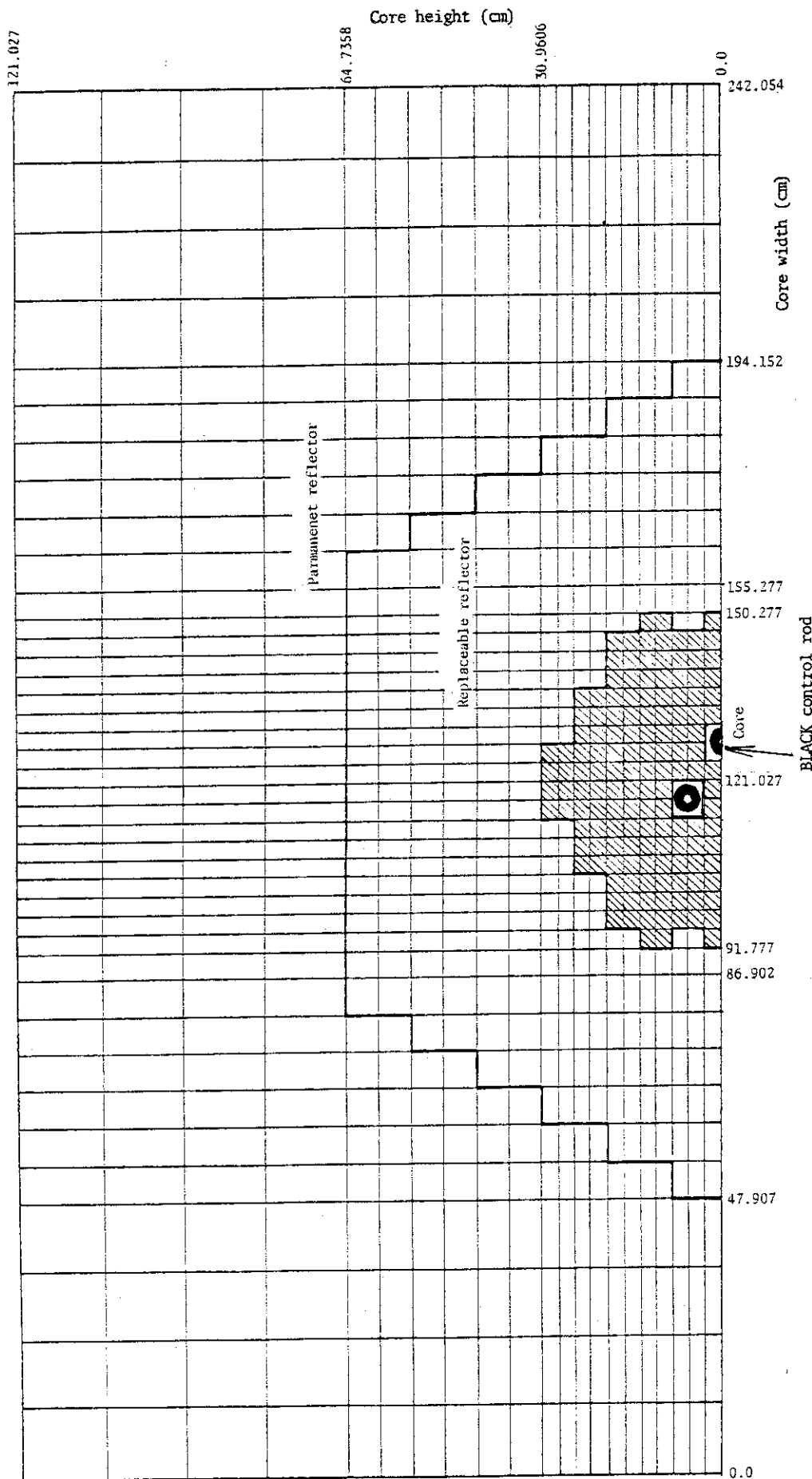


Fig.3.8 Calculational geometry of homogeneous core  
(three BLACK control rods inserted at D = 6.5 cm)

Core height (cm)

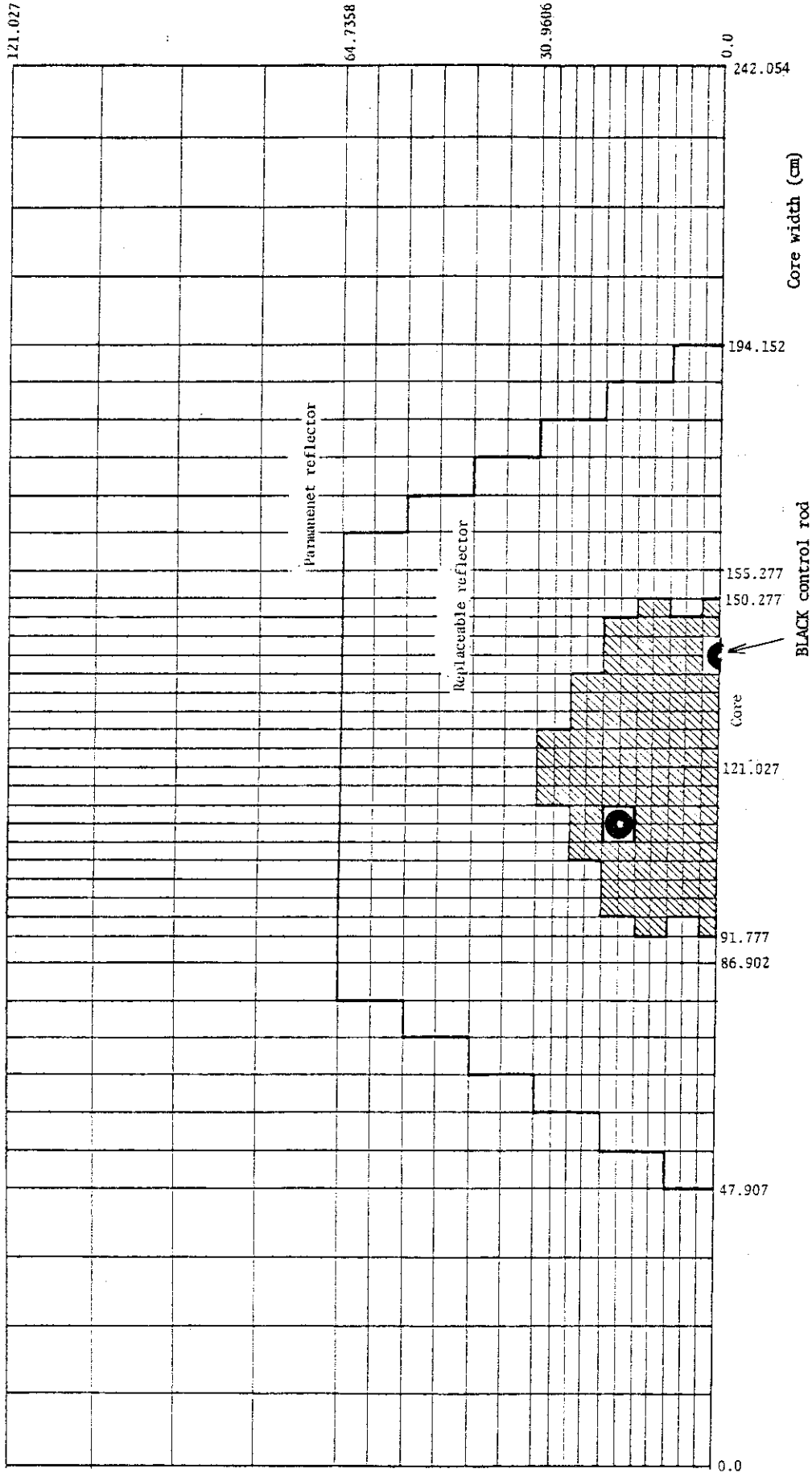


Fig.3.9 Calculational geometry of homogeneous core  
(three BLACK control rods inserted at  $D = 19.5$  cm)



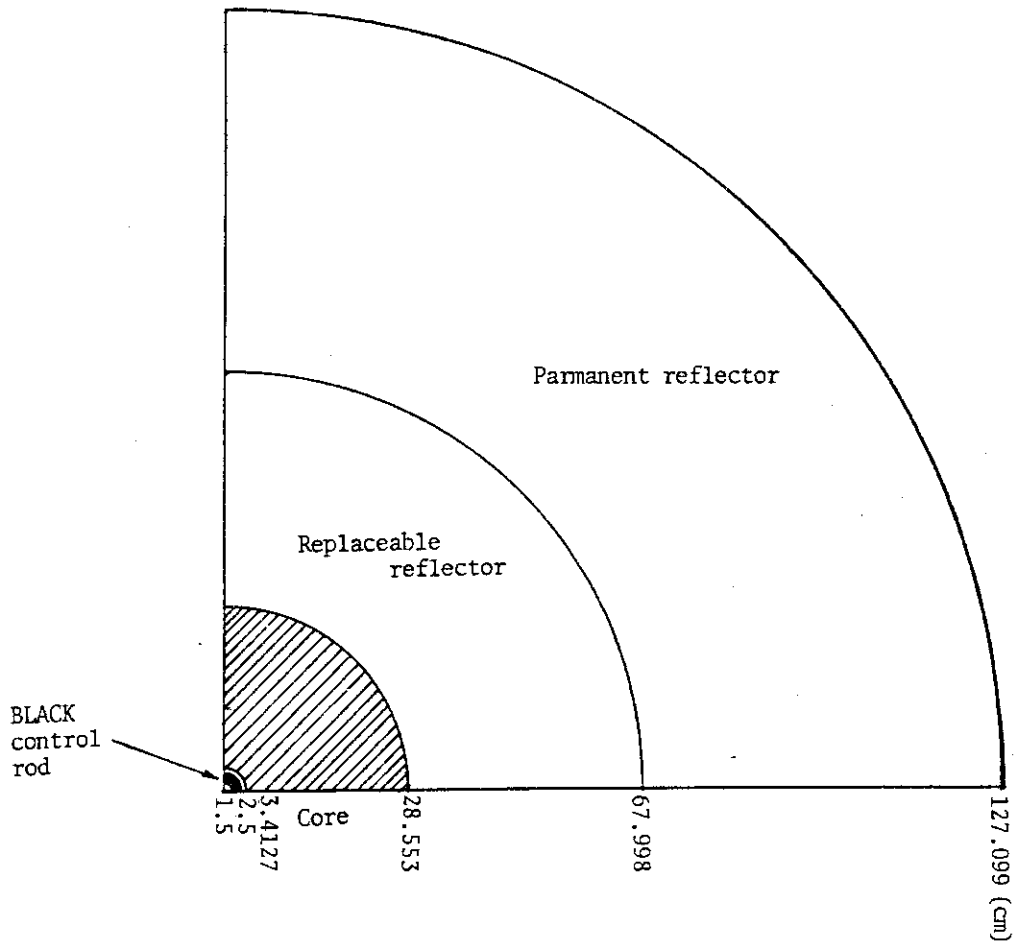


Fig.3.10 Calculational geometry of homogeneous core  
(R-θ geometry)

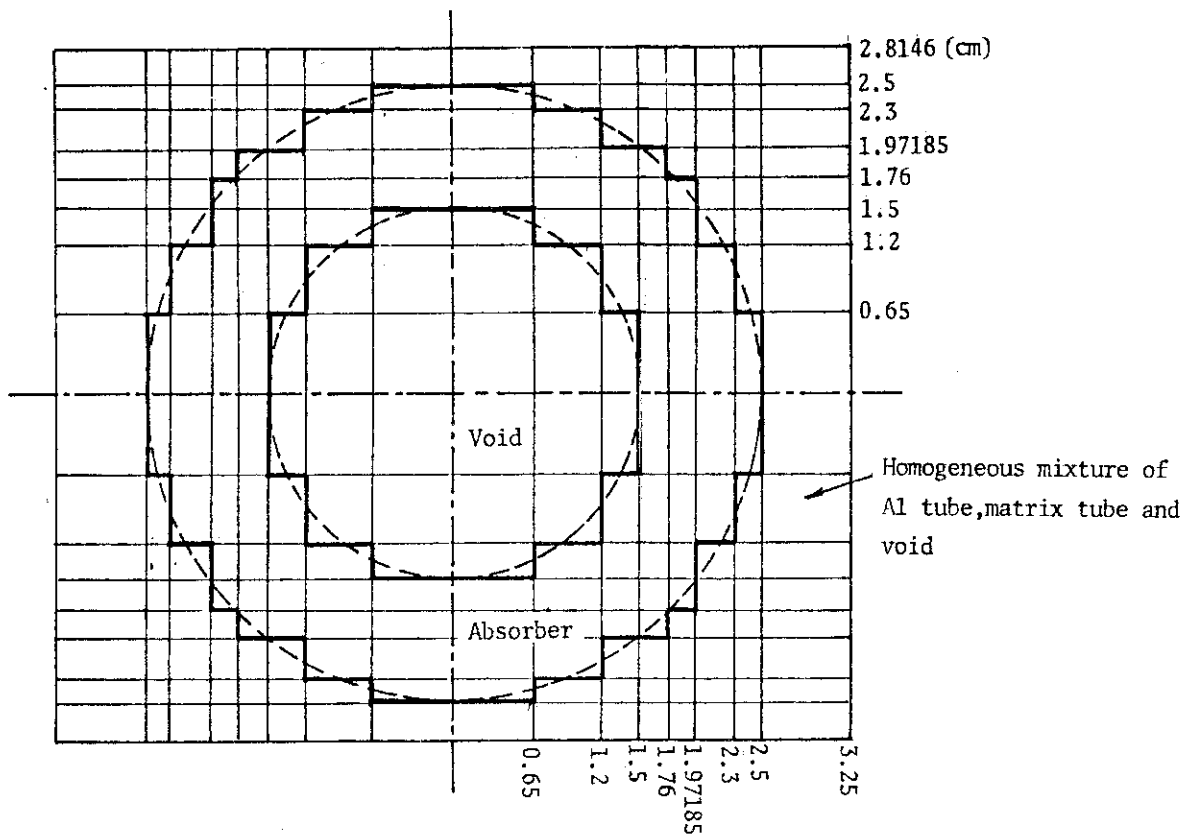


Fig.3.11 Modeled geometry of GRAY control rod

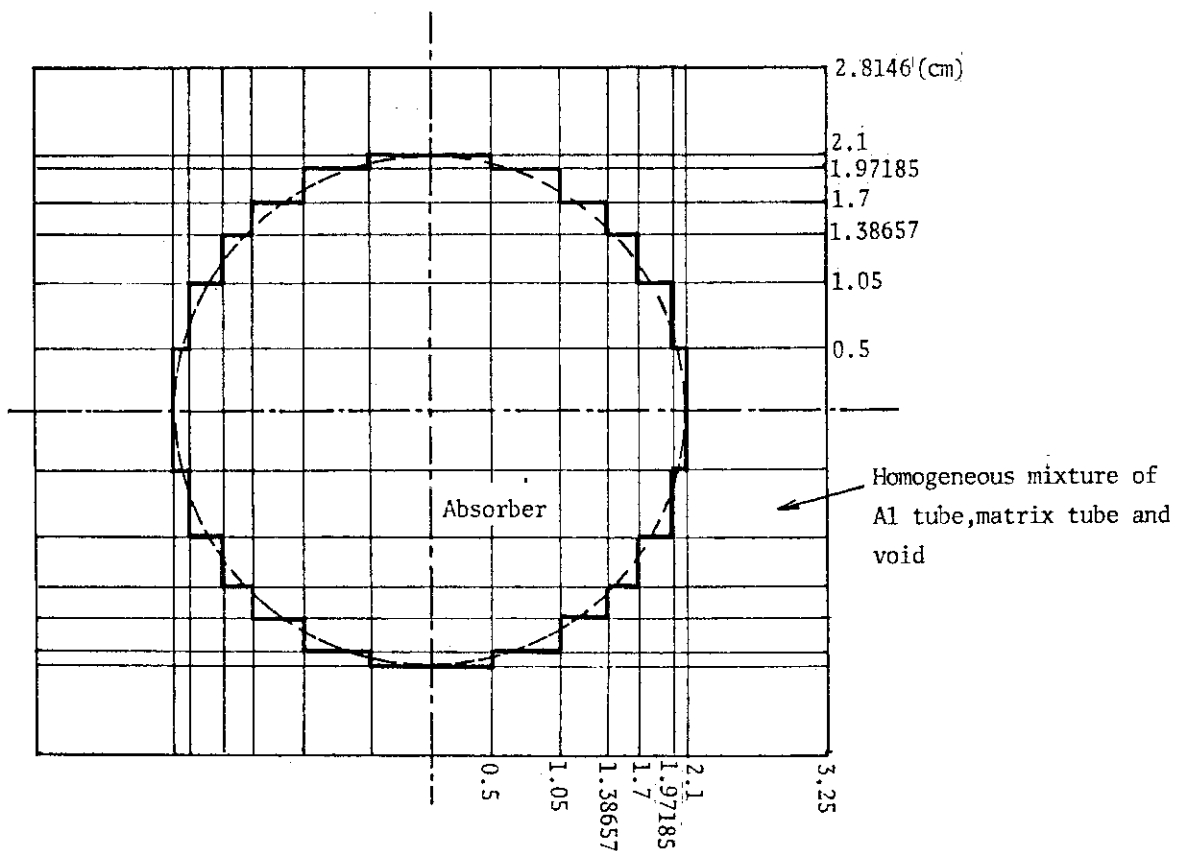


Fig.3.12 Modeled geometry of BLACK control rod

## 4. 検 討

### 4.1 計算値と実験値の比較

#### (i) 臨界時即発中性子減衰定数

臨界時即発中性子減衰定数  $\alpha_c$  では、実験値と計算値の相違は 5.1 % である。 $\alpha_c$  自体が絶対値の小さな数値であり、計算誤差が大きくなるものと予想されたが、制御棒が挿入されていない体系でもあり、核分裂スペクトルによる繰返し計算を行なったため、比較的精度良く計算結果が得られたものと思われる。

#### (ii) 制御棒反応度値

GRAY 制御棒が挿入された場合には、収束条件がゆるいにもかかわらず、計算結果は実験値と良く一致した。4 種類のポロン濃度に対して、誤差の最大なものは 4 % 程度である。

BLACK 制御棒が中心 1 本挿入された場合には、実験値との誤差は 1.4 % である。

BLACK 制御棒の場合、収束条件によって計算結果が大きく左右されるが、これは、吸収体が肉厚の薄い円環状であるためと思われる。すなわち、GRAY 制御棒の場合、吸収体外表面から入射した熱中性子は、吸収体内で急激に減少し、中心軸上で平坦になるのに対し、BLACK 制御棒の場合、熱中性子束が平坦となるのは、吸収体内側表面においてである。この吸収体内側表面における境界条件の適用に際して、収束条件が緩いと、吸収体内の熱中性子束の挙動が正確に表現出来ず、制御棒の遮蔽効果が正しく評価出来なくなるためと思われる。収束条件による計算結果の相違が、計算モデル上の粗さのためでないことは、Table 3.2 における CASE - 22, 23 の  $R-\theta$  座標計算（制御棒形状は正確であり、径方向のメッシュ間隔は細い）から分かる。Table 3.2 には記載されていないが、CASE - 17 において、内側中空部分（遮蔽効果のため、ほとんど反応度的効果はないと思われる）に BLACK 制御棒と同一の吸収体を詰めた場合には、計算結果は実験値と良く一致することからも、収束条件による計算結果の相違が、円環状吸収体のためであることが推定される。

BLACK 制御棒が偏心 1 本反射体内に挿入された場合には、他の解析と異なり、実験値との相違が 15.6 % と非常に大きくなった。この原因としては、制御棒値自体が小さく、計算誤差が大きくなる可能性があること、断面積を縮約する際の炉心と反射体中での中性子スペクトルの相違、 $1/v$  断面積に燃料領域のものを採用したこと、制御棒近辺の反射体メッシュ効果、固定反射体を正方形で近似したこと、等が考えられるが、定量的な検討は今後の課題である。

BLACK 制御棒が反射体内に挿入された場合、他の未臨界度の少ない体系の解析で行なわれていた、 $\alpha$  固有値の内挿は適用されず、結果的には外挿になってしまった。通常の場合のように、核分裂スペクトルに入力する  $\alpha$  値の絶対値を大きくすると、核分裂スペクトルが増加し、

輸送方程式(2.2)式の左辺にある $\alpha$ 固有値の絶対値は減少するという、Fig. 2.1に示されるような $\alpha$ 値に関する減少関数的な特性は、制御棒が反射領域に挿入された場合には見られず、増加関数的な特性により $\alpha$ 固有値の外挿操作を行なった。

BLACK制御棒3本挿入された場合の計算は、 $D=6.5$  cm,  $D=19.5$  cmの2種類について、緩い収束条件で行なった。

$D=6.5$  cmの場合には、実験値との相違は2.5%である。収束条件が緩いにもかかわらず、相違が少ないのは、3本の制御棒間の干渉効果が非常に大きく、吸収体内での収束条件の緩さに基づく中性子束の計算誤差による反応度に及ぼす影響が、干渉効果により押えられているためと思われる。

$D=19.5$  cmの場合には、制御棒間の干渉効果は少なくなり、収束条件のため反応度値は小さく評価され、実験値との相違は9.1%となる。BLACK制御棒の場合収束条件を厳しくすると制御棒値は増加する傾向があるため、制御棒3本挿入された場合の計算も収束条件を厳しくして行なうことにより、更に良い実験との一致が得られるものと思われる。

## 4.2 まとめと今後の課題

解析の結果、臨界時即発中性子減衰定数および制御棒反応度値は、実験値と5%以内の誤差で一致することが分かった。一部の体系では、計算条件や、特殊な体系に対する解析方法に不備な点があったため実験値と若干相違の大きい結果も得られたが、前に述べたモデル上の扱いを慎重に行なうことにより、実験値と5%程度以内の誤差で一致することは確実と思われる。以上の検討から、解析に使用した計算コード、核データおよび解析手法が妥当なものであることが確かめられた。

今後、同様の解析を更に精度良く行なうために念頭に入れるべき項目について述べる。

### (i) DELIGHT-5の断面積

DELIGHT-5から出力される断面積を使用すると実効増倍率を2~3% $K_{eff}$ 高く評価する傾向がある。実験体系との燃料棒本数の相違の効果と合わせて、核分裂中性子発生数による調整を本解析では行なっているが、計算精度向上のためには、この調整の程度を可能な限り少なくする必要がある。

### (ii) 輸送計算

TWOTRAN-2による輸送計算では、輸送断面積と散乱断面積 $P_0$ 成分を用いた輸送近似により解析を行なっているが、制御棒近辺あるいは炉心と反射体の境界近辺等では、中性子流が空間的に一様ではないため、輸送断面積も当然のことながら空間依存性を持つようになる。この効果を正確に採り入れるためには、 $S_0 P_1$ 計算を行なう必要がある。

## (iii) 収束条件

本解析では、収束条件として  $1 \times 10^{-3}$  および  $1 \times 10^{-4}$  を採用してあるが、収束条件が結果に及ぼす影響は比較的大きい。

収束条件には、中性子束に関するもの  $\epsilon$  と、核分裂ソース（あるいは散乱ソース）に関するもの  $\lambda$  があり、本解析では、 $\lambda$ 、 $\epsilon$  とも同じ値を用いている。

BLACK 制御棒の場合、 $1 \times 10^{-3}$  を用いると実験値との相違が大きくなるのに対して、GRAY 制御棒の場合には実験値との良い一致が得られている。従って、BLACK 制御棒における実験値との相違は、エネルギーバランス的なもの ( $\lambda$ ) よりも、むしろ中性子束分布 ( $\epsilon$ ) によるものが大部分であることが分かる。

$\alpha$  計算の場合、 $k$  計算のように固有値自身の収束条件があるわけではなく、ある推定した  $\alpha$  吸収項を輸送方程式中に加えて計算し、 $\lambda$  が 1.0 になるか否かを確認するという  $\alpha$  サーチ法を TWOTRAN-2 では採用しているため、収束条件が  $\alpha$  固有値に及ぼす影響は  $k$  固有値以上に大きなものとなる。

収束条件を厳しくすると、より正確な解が得られるが、計算費用も増大するため、解析の目的に合った適切な収束条件を設定する必要があるが、それと並行して、収束条件に関する感度解析を行ったり、加速パラメーターの適切な選択法を習得することも重要である。また、中性子束分布の大まかなエネルギー・空間分布を拡散計算により求め、それを輸送計算における中性子束初期値として用いることも計算費用節約の一法である。

## 謝 辞

本解析を行なうに際し、SHE に関する詳細なデータを提供していただきました原子炉工学部炉物理研究室の金子義彦室長および秋濃藤義氏に深く感謝いたします。

## (iii) 収束条件

本解析では、収束条件として  $1 \times 10^{-3}$  および  $1 \times 10^{-4}$  を採用してあるが、収束条件が結果に及ぼす影響は比較的大きい。

収束条件には、中性子束に関するもの  $\epsilon$  と、核分裂ソース（あるいは散乱ソース）に関するもの  $\lambda$  があり、本解析では、 $\lambda$ 、 $\epsilon$  とも同じ値を用いている。

BLACK 制御棒の場合、 $1 \times 10^{-3}$  を用いると実験値との相違が大きくなるのに対して、GRAY 制御棒の場合には実験値との良い一致が得られている。従って、BLACK 制御棒における実験値との相違は、エネルギーバランス的なもの ( $\lambda$ ) よりも、むしろ中性子束分布 ( $\epsilon$ ) によるものが大部分であることが分かる。

$\alpha$  計算の場合、 $k$  計算のように固有値自身の収束条件があるわけではなく、ある推定した  $\alpha$  吸収項を輸送方程式中に加えて計算し、 $\lambda$  が 1.0 になるか否かを確認するという  $\alpha$  サーチ法を TWOTRAN-2 では採用しているため、収束条件が  $\alpha$  固有値に及ぼす影響は  $k$  固有値以上に大きなものとなる。

収束条件を厳しくすると、より正確な解が得られるが、計算費用も増大するため、解析の目的に合った適切な収束条件を設定する必要があるが、それと並行して、収束条件に関する感度解析を行ったり、加速パラメーターの適切な選択法を習得することも重要である。また、中性子束分布の大まかなエネルギー・空間分布を拡散計算により求め、それを輸送計算における中性子束初期値として用いることも計算費用節約の一法である。

## 謝 辞

本解析を行なうに際し、SHE に関する詳細なデータを提供していただきました原子炉工学部炉物理研究室の金子義彦室長および秋濃藤義氏に深く感射いたします。

## 参 考 文 献

- (1) 金子義彦, 秋濃藤義, 他「濃縮ウラン黒鉛減速炉心の臨界実験」  
JAERI 1257 (1977年)
- (2) K.D. Lathrop "TWOTRAN - II ; An Interfaced Exportable Version of  
the TWOTRAN Code for Two - Dimensional Transport " LA - 4848 - MS  
(1973年)
- (3) 新藤隆一, 他「高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コードDELIGHT - 4」  
JAERI-M 8097 (1979年)
- (4) J. J. Duderstadt "Nuclear Reactor Analysis" Jahn Wiley & Sons, Inc.
- (5) 高野誠, 他「SHE臨界質量実験の解析 - VHTR核設計法の精度検討(1) -」  
JAERI-M 9955 (1982年)
- (6) 高野誠, 他「SHE - 14 臨界時および制御棒挿入時の即発中性子減衰定数解析  
- VHTR核設計法の検討(3) -」  
JAERI-M 9942 (1982年)
- (7) 土井猛, 他「SHE - 8 炉心における銅反応率分布の解析 - VHTR核設計法の精度検討  
(4) -」  
JAERI-M 9912 (1982年)
- (8) 高野誠, 他「SHE-14可燃性毒物棒反応度値の解析 - VHTR核設計法の精度検討(5)-」  
JAERI-M 9956 (1982年)
- (9) 土井猛, 他「SHE - 14 炉心における温度上昇に伴う反応度変化の解析 - VHTR核設  
計法の精度検討(6) -」私信