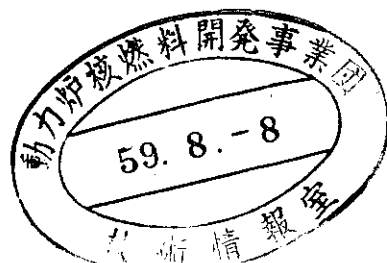


軸方向非均質炉心模擬実験の検討

(FBR炉心設計(JUPITER)専門委員会
軸非均質炉心実験検討ワーキング・グループ報告)

1982年10月



動力炉・核燃料開発事業団
高速増殖炉開発本部

軸方向非均質炉心模擬実験の検討

動力炉・核燃料開発事業団

FBR炉心設計（JUPITER）専門委員会

軸非均質炉心実験検討ワーキング・グループ

主査 吉田 弘 幸（日本原子力研究所）

石黒 幸 雄（ ” ）

中野 正 文（ ” ）

稲垣 達 敏（電気事業連合会）

関 雄 次（三菱原子力工業株式会社）

井上 孝太郎（株式会社日立製作所）

鈴木 聖 夫（東京芝浦電気株式会社）

加藤 恭 義（高速炉エンジニアリング株式会社）

白方 敬 章（動力炉・核燃料開発事業団）

池上 哲 雄（ ” ）

活動期間 1982年7月～10月

目 次

序 文	1
1. 軸方向非均質炉心の模擬実験の必要性	1
2. 大型臨界実験装置を用いた炉物理的模擬実験	2
2.1 実験体系	2
2.2 実験項目と実験期間の推定	3
2.3 JUPITER-IIの1部としての模擬実験	4
3. FCAによる軸方向非均質炉心模擬実験の可能性	5
4. 付 帯 意 見	6
5. 検討に用いたデータ	6

序 文

FBR 炉心設計 (JUPITER) 専門委員会の中に標題の検討を目的とした軸非均質炉心実験検討ワーキング・グループを設立し、1982年7月から10月にかけて4回の検討会を開催した。本グループは軸方向非均質炉心に対する炉物理実験の必要性、この炉心概念の炉物理的特徴に着目した模擬実験に関する議論を行ない、一応の結論を得たのでここに報告する。

1. 軸方向非均質炉心の模擬実験の必要性

本ワーキング・グループは炉心概念の優劣を議論し、決定する場ではなく、明確かつ決定的な欠点の指摘がないかぎり、模擬実験の意義づけと実験内容に議論を集中する立場をとった。

1000 MWe 級高速増殖炉の設計例による均質炉心、径方向非均質炉心、軸方向非均質炉心の比較検討によると、軸方向非均質炉心は、比較的単純な炉心構成によって、適切な増殖性と高い安全性を確保する可能性を有し、均質炉心、径方向非均質炉心と比肩できる炉心概念である。

軸方向非均質炉心は、内部ブランケットが炉心によって囲まれた形状を有し、内部ブランケットの軸方向および径方向の広がりによって炉心結合度に影響を及ぼす。したがって、内部ブランケットの寸法、形状が出力分布、反応度値分布に影響を及ぼす可能性が大きい。更に、炉心が内部ブランケットによって分離されていることにより、特に、制御棒部分挿入時の種々炉物理特性はこの炉心概念に特徴的なものとなる可能性が大きい。

均質炉心に対する JUPITER-I、径方向非均質炉心に対する JUPITER-II の実験とその解析によって解決する点も多々あると考えられるが、大型炉心に関する軸方向非均質炉心の炉物理実験は未だ行なわれていないので、上述軸方向非均質炉心の炉物理的特徴を考慮した模擬実験を行なう必要がある。

2. 大型臨界実験装置を用いた炉物理的模擬実験

大型臨界実験装置としてZPPRを対象とし、径方向非均質炉心に対するJUPITER - II相当の炉物理的模擬実験について主に検討し、ZPPR X-1, X-2, X-3, X-4と称する4種類の軸方向非均質炉心に対する実験体系を選定した。次に、JUPITER - IIの一部として軸方向非均質炉心の模擬実験を組込む場合についても検討し、ZPPR X-1を中心とした実験が望ましいということになった。実験体系の選定に際して、以下の条件を考慮した。

- (1) 軸方向非均質炉心の炉物理的特徴が模擬でき、設計解析手法の検証に有効である。
- (2) 核分裂性Pu装荷量がZPPRの所有量であるZPPR-10Dのそれ以下である。
- (3) 炉心外形寸法は、いずれの実験体系に対しても一定である。
- (4) 基本セルはZPPR-10Dセルに基くものとする。

2.1 実験体系

1.で述べた軸方向非均質炉心の炉物理的特徴を考慮して、以下に示す4種類の実験体系を選定した。

(1) ZPPR X-1

等価半径90.3 cm, 厚さ20.4 cmの内部ブランケットを有する炉心である。特定の制御棒フォロワー・チャンネルを設けないクリーン体系であり、軸方向非均質炉心の一般特性の測定を行なう。

(2) ZPPR X-2

等価半径90.3 cm, 厚さ30.6 cmの内部ブランケットを有する炉心である。クリーン体系であり、内部ブランケット厚さの影響に関する測定を行なう。

(3) ZPPR X-3

等価半径70.3 cm, 厚さ20.4 cmの内部ブランケットを有する炉心である。クリーン体系であり、内部ブランケット径の影響に関する測定を行なう。

(4) ZPPR X-4

ZPPR X-1に類似し、19本の制御棒およびフォロワー・チャンネルを有する体系であり、制御棒(天然ボロン)挿入時の炉物理特性に関する測定を行なう。

臨界性を考慮し、制御棒挿入状態の相違によって、

- (a) ZPPR X-4(1); 第2層制御棒6本が半挿入

(b) ZPPR X-4 (2) ; 第 2 , 3 層共に制御棒 3 本が半挿入
の 2 フェーズを考える。

以上の 4 種類の実験体系について実験を行なう場合、後述の炉心装荷変更および実験に
要する期間を考慮すると、JUPITER - II の範ちゅうでは考えられず、JUPITER - III と
して考える必要がある。

2.2 実験項目と実験期間の推定

実験項目は、他の炉心概念の場合と共通し、特殊な実験はないが、いずれも軸方向非均
質炉心の臨界性、増殖性、安全性に関する炉物理的情報をうるために必要となる。実験期
間については、ZPPR-9, ZPPR-10 に関する実験スケジュールに基き、推定した。

(1) 実験項目

実験項目		実験体系	ZPPR X-1	ZPPR X-2	ZPPR X-3	ZPPR ¹⁾ X-4	備 考
臨 界 点			○	○	○	○	
反 応 率 分 布	Foil, Counter		○	○	○	○	径軸方向 ; ⁴⁹ F, ²⁵ F, ²⁸ F, ²⁸ C
	T L D		○				
サ ン プ ル ・ ワ ー ス			○	○	○	○	径軸方向 ; Pu-239, U-235, U-238
Naボイド ワ ー ス	Map		○	○	○	○	径軸方向
	広 領 域		○				中心ボイド
ド ッ プ ラ ー 係 数			○			○	²³⁸ U ; 内部ブランケット中心 炉心中心
空 間 動 特 性			○	○	○		Rod drop 法 β/l Noise 法
制 御 棒 ワ ー ス			○ ²⁾	○ ³⁾	○ ³⁾	○ ³⁾	中性子源増倍法
燃料スランピング反応度			○ ⁴⁾				炉心→内部ブランケット

- 1) ZPPR X-4 (1) , ZPPR X-4 (2) の 2 炉心について実験
- 2) 径方向トラバース, 複数本制御棒, 中心制御棒 S 字カーブ
- 3) 径方向トラバース
- 4) 図 6 参照

(2) 実験期間の推定

(単位；月)

項目 \ 実験体系	ZPPR X-1	ZPPR X-2	ZPPR X-3	ZPPR X-4
臨 界 近 接	2	1	1	1
実 験	3	2	2	3
所 要 期 間	5	3	3	4

合計 15 ヶ月

2.3 JUPITER - II の 1 部としての模擬実験

1. で述べた軸方向非均質炉心の炉物理的特徴を実験的に把握するには ZPPR X-1 ~ X-4 体系についての実験が必要であるが、実験期間として15 ヶ月が推定されるので、JUPITER - II の 1 部として希望することは無理である。しかし、ZPPR X-1 に基く一般特性の実験によっても、軸方向非均質炉心の核設計に多大の貢献があるものと考えられる。以上の考え方から、JUPITER - II の 1 部として軸方向非均質炉心に関する模擬実験が3 ~ 4 ヶ月間認められうるのであれば、上述 ZPPR X-1 に関する実験を行なうことが望ましい。期間を 2.2 (2) の 5 ヶ月を短縮するためには、基本セルを ZPPR-10D から ZPPR-13 のセルにすることによって装荷変更に係る時間を節約し、実験項目を適宜選択することによって計画を縮小する。このことによって、3 ~ 4 ヶ月程度の軸方向非均質炉心に関する模擬実験計画にすることは充分可能である。

3. FCAによる軸方向非均質炉心模擬実験の可能性

FCAの所有する核分裂性Pu量は極めて少なく、 ^{235}U 所有量を加えても、ZPPR X1-4の所要量の $\frac{1}{2}$ 程度である。したがって、ある程度以上大きな高速炉を模擬実験対象とする場合、部分模擬体系にならざるをえない。しかも、対象とする炉物理量に対して、組成的、形状的に種々の部分模擬体系を組むことが必要となる可能性が大きい。問題は、これらの部分模擬体系による実験から有用な結果が得られるか否かにあり、そのことを明らかにするためには詳細な検討が必要であり、本ワーキング・グループに許された期間内で結論を出すことは困難である。

ここでは、軸方向非均質炉心の炉物理実験をFCAにおいて行なう場合の一般的な考え方を示すにとどめる。この考え方の妥当性を含め、軸方向非均質炉心に関するFCAによる炉物理実験のあり方は、他の大型炉心概念と共に、近く発足する炉物理実験検討ワーキング・グループにおいて議論、検討することが望ましい。

(1) 対象とする高速炉の特性を推定するための実験

模擬体系に関する実験と比較的単純な解析に基き、対象とする高速炉の特性が予測できる。この種の実験が可能であれば部分模擬体系による実験としてもっとも望ましい実験となる。軸方向非均質炉心の場合、中心軸近傍の規格化分布特性（反応率、サンプルワース分布）については可能性が高いが、絶対値を問題とする炉物理量については、中心軸近傍と云えども更に検討する必要がある。

(2) 大型装置による測定結果に対する補完的実験

大型臨界装置による実験結果、例えばZPPR X1-4の実験結果を解析し、両者の相違が著しい場合に、更に分析することによって、基本的問題に分離し、個々についてFCAによる実験を通して実験的に確めることは可能である。模擬実験としては、(1)に次いで望ましい姿であろう。

(3) データ・アンド・メソッドの確証のための実験

対象とする高速炉の組成的、形状的模擬にとらわれず、軸方向非均質炉心の特性が把握でき、かつデータ・アンド・メソッドの確証に資することのできる実験である。

4. 付 帯 意 見

本ワーキング・グループは各炉心概念の設計例の比較により、軸方向非均質炉心は、潜在的利点が多々見受けられ、決定的欠点を指摘できない現段階では、均質炉心、径方向非均質炉心と比肩しうる炉心概念であると判断し、この炉心概念に関する模擬実験の意義づけを行なった。しかし、この検討過程において、いくつかの疑問およびコメントが出されたが、今後の検討に待つところが多い。以下に、疑問点、コメントについて略記する。

- (1) 内部ブランケットを設けることによる燃料加工コスト増加
- (2) Pu 富化度は 1 種類でも、燃料ピン加工的には 2 種類以上
- (3) 内部ブランケットを内蔵するピンの照射挙動が未確認
- (4) 内部ブランケットへの炉心燃料落下挿入時の反応度印加の可能性

5. 検討に用いたデータ

本ワーキング・グループの検討に用いたデータは以下の通りである。

表 1 : 炉心主要特性比較

表 2 : 期待される軸方向非均質炉心の特長

表 3 : 実験体系の主要特性

表 4 : ZPPR-X4 の固有値計算結果

表 5 : 実験体系のスペクトル・インデックス比較

図 1 : 実験体系の軸方向出力分布の比較

図 2 : 実験体系の径方向出力分布の比較

図 3 : 実験体系の軸方向積算出力分布の比較

図 4 : ZPPR-X4 の XY 断面図

図 5 : 内部ブランケット中心中性子スペクトル

図 6 : 内部ブランケット中心随伴中性子スペクトル

図 7 : 燃料スランピング実験 2 次元 RZ モデル

補足資料 ; ZPPR-13 燃料の使用可能性に関する検討

表1 炉心主要特性比較

炉心 特性	均質炉心		徑方向非均質炉心		軸方向非均質炉心	
	基準燃料	大型集合体	細徑燃料	基準燃料	基準燃料	大型集合体
1. 寸法						
a. 炉心徑	325	328	329	331	325	328
b. 炉心高	100	100	100	100	95(含IB)	95(含IB)
c. 徑方向/軸方向ブランケット厚	40.3/35.0	30.6/35.0	39.4/35.0	39.7/35.0	40.3/40.0	45.9/40.0
2. 燃料(炉心/徑方向ブランケット)						
a. 配列ピッチ	88/13.5	88/12.9	78.7/10.0	88/10.0	88/13.5	88/12.9
b. 燃料ピン徑	7.4/12.2	7.4/11.85	6.5/9.0	7.4/9.0	7.4/12.2	7.4/11.85
c. 被ふく肉厚	0.4/0.41	0.4/0.41	0.4/0.4	0.4/0.4	0.4/0.41	0.4/0.41
d. 燃料ピン全長	3000/3000	3000/3000	3000/3000	3000/3000	3000/3000	3000/3000
e. 燃料スミア密度	90/91.1	90/91.1	85/91.1	90/92.7	90/91.1	90/91.1
f. 燃料集合体数(炉心/内部+徑ブランケット)	420/250	336/232	345/94+250	345/94+250	420/250	336/232
g. 燃料ピン数/集合体(炉心/ブランケット)	217/91	271/127	271/169	217/169	217/91	271/127
3. 核熱特性						
a. 燃料富化度(内側/外側炉心)	11.4/14.4	11.3/15.0	17.7	16.3	14.6	15.3
b. 増殖率*	1.24	1.23	1.28	1.29	1.27	1.26
c. 倍增時間**	35	36	38	31	31	32
d. 燃料単位長出力(ノミナル最大)	430	428	360	450	430	430
e. 燃料インベントリー	3.5	3.5	3.5	3.7	3.7	3.5
f. 燃料交換間隔	1	1	1	1	1	1
g. 燃料炉内滞在期間	3	3	2/3	3	3	3
h. 平均取出し燃焼度	74000	73800	62500	81200	76000	76100
i. 燃焼反応度	2.4	2.3	2.6	1.9	2.0	2.2
j. 被ふく管肉厚中心最高温度	658	663	662	670	662	658
4. 安全特性						
a. 全炉心Naポイドワース	4.8	—	2.9	—	4.4	4.1
b. 全炉心ドップラー係数	-7.4×10^{-2}	—	-7.5×10^{-2} (約IB-2.8)	—	-9.0×10^{-2} (内IB-2.2)	-8.4×10^{-2} (内IB-2.0)

* Pu²⁴¹の崩壊を含む。 ** 炉外インベントリー(50%), 再処理損失(2%)を含む。

表 2. 期待される軸方向非均質炉心の特長

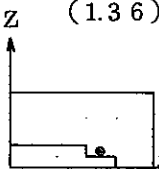
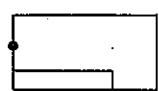
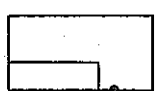
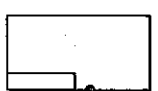
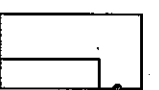
A. 均質炉心と比較して

- (1) 増殖率が高く，燃料倍増時間が短縮
- (2) 燃焼反応度が小さく，必要制御棒ワースが減少
- (3) 燃料の Pu 富化度が 1 種類
- (4) Na ボイド・ワースが特に炉心中心付近で小さい
- (5) 燃料の軸方向ワース分布が平坦

B. 径方向非均質炉心と比較して

- (1) 炉心構成が単純
- (2) 炉心部（炉心＋内部ブランケット）の体積，燃料インベントリー共に均質炉心並に小さい
- (3) 制御棒操作および燃焼による集合体出力の変動が均質炉心並に小さく，したがって集合体出口冷却材温度が均質炉心並に均一

表3 実験体系の主要特性

	レファレンス	ZPPR-X1	ZPPR-X2	ZPPR-X3	ZPPR-X (参考)
炉心外径	327.9	260.6	260.6	260.6	260.6
高さ	95.0	101.8	101.8	101.8	101.8
内部ブランケット (厚さ×半径)(cm)	22.0×100.9 12.0×132.9	2.04×90.3	3.06×90.3	2.04×70.3	4.08×90.3
keff (拡散計算)	1.053	1.000	1.003	1.000	1.000
炉心体積 (IB除く) (ℓ)	7.037	4.903	4.643	5.109	4.382
体積比 IB/(IB+Core)	0.123	0.0966	0.145	0.0584	0.193
Pu fissile (kg)	3,349.9	2,570.6	2,631.4*	2,490.8	2,615.8
Pu 富化度	1.46	1.13	1.21	1.06	1.26
ピーキング係数 ()内は炉心平均出力密度にIB含まず ・はピーク位置	1.52 (1.36) 	1.47 (1.35) 	1.54 (1.34) 	1.59 (1.51) 	1.74 (1.43) 

* ZPPR-10Dと同一

表4 ZPPR-X4の固有値計算結果

	基準体系	中心制御棒挿入 (1本)	第1層制御棒挿入 (6本)	第2層制御棒挿入 (12本)
keff	1.0122	1.0061	0.97660	0.94832
$\Delta k/kk'$	—	6.0×10^{-3}	3.60×10^{-2}	6.65×10^{-2}

* 2次元 RZ計算

表 5 実験体系のスペクトル・インデックスの比較

spectrum index	体系		レファレンス	ZPPR-X1	ZPPR-X2	ZPPR-X3	ZPPR-X
	I.B. 中心	Core 中心 (軸方向)					
$^{28}\sigma_f / ^{49}\sigma_f$	I.B. 中心		0.00856	0.00879	0.00580	0.00827	0.00388
	Core 中心 (軸方向)		0.0286	0.0287	0.0295	0.0272	0.0288
$^{40}\sigma_f / ^{49}\sigma_f$	I.B. 中心		0.108	0.112	0.0891	0.108	0.0732
	Core 中心 (軸方向)		0.225	0.233	0.237	0.225	0.231
$^{25}\sigma_f / ^{49}\sigma_f$	I.B. 中心		1.161	1.157	1.168	1.159	1.172
	Core 中心 (軸方向)		1.072	1.030	1.025	1.040	1.037
$^{28}\sigma_c / ^{49}\sigma_f$	I.B. 中心		0.153	0.156	0.154	0.156	0.151
	Core 中心 (軸方向)		0.149	0.142	0.141	0.145	0.143

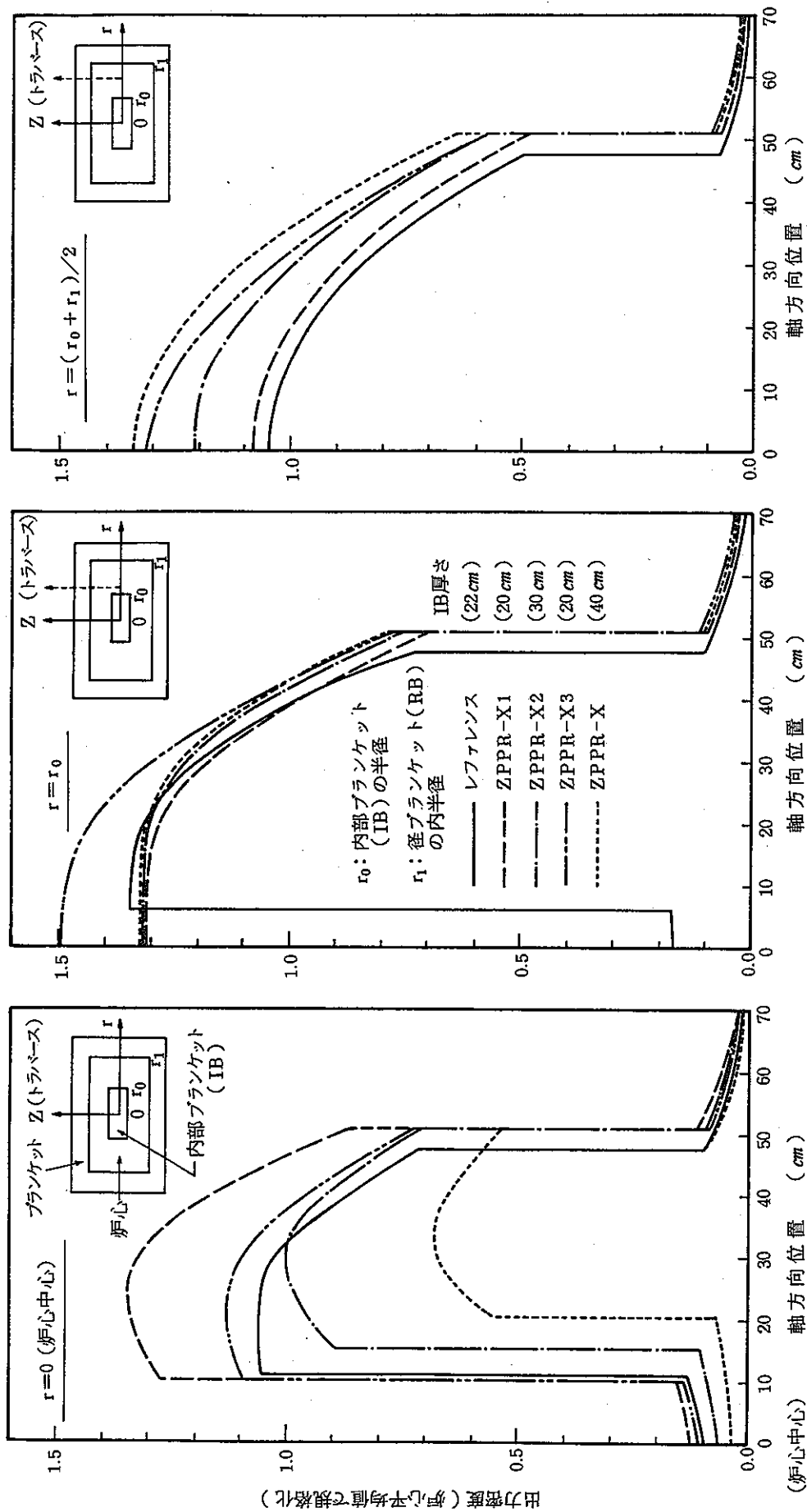


図1 実験体系の軸方向出力分布の比較

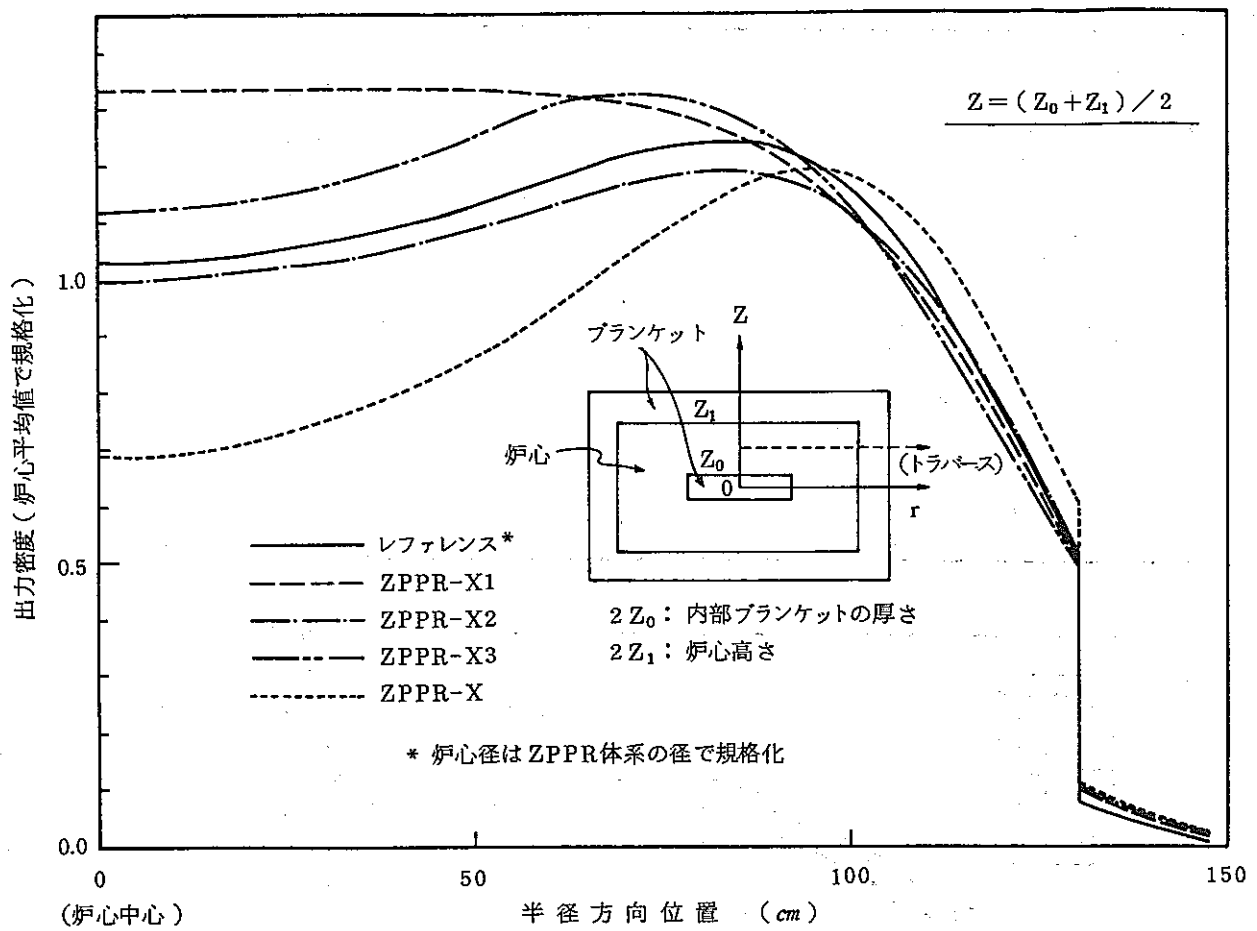


図2 実験体系の径方向出力分布の比較

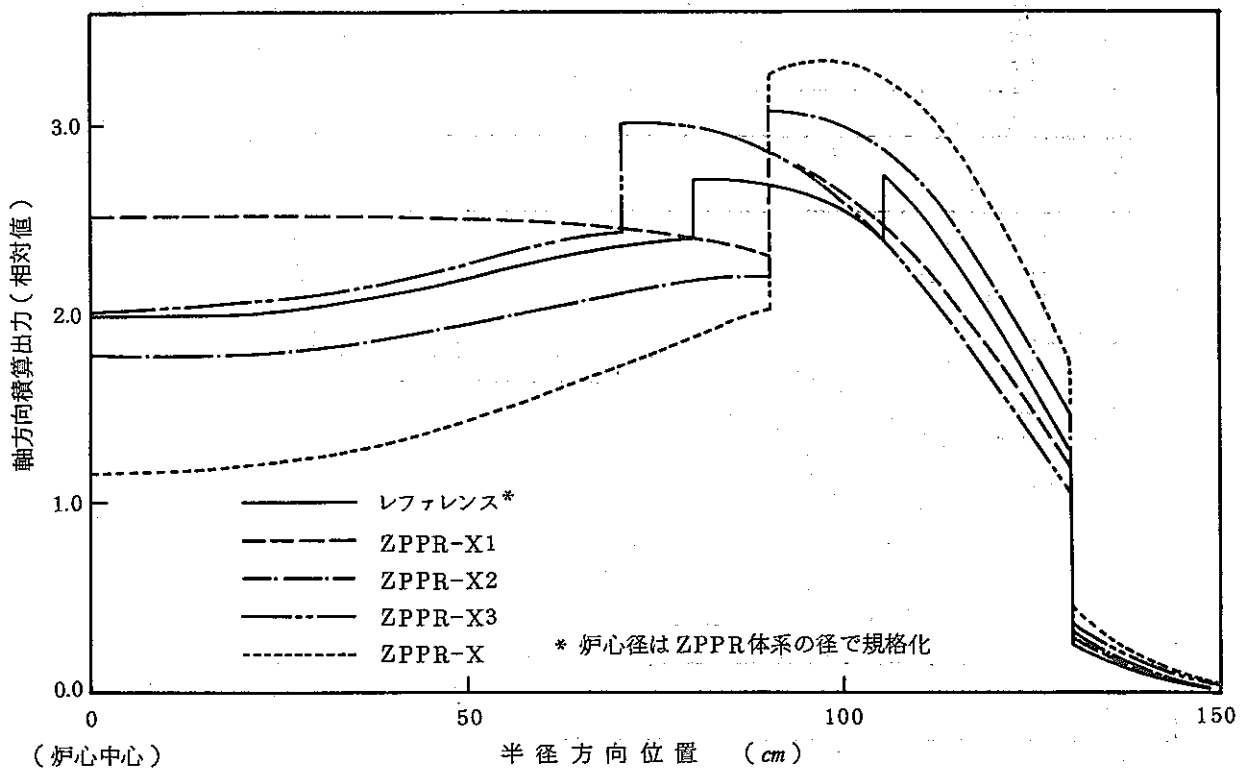


図3 実験体系の軸方向積算出力分布の比較

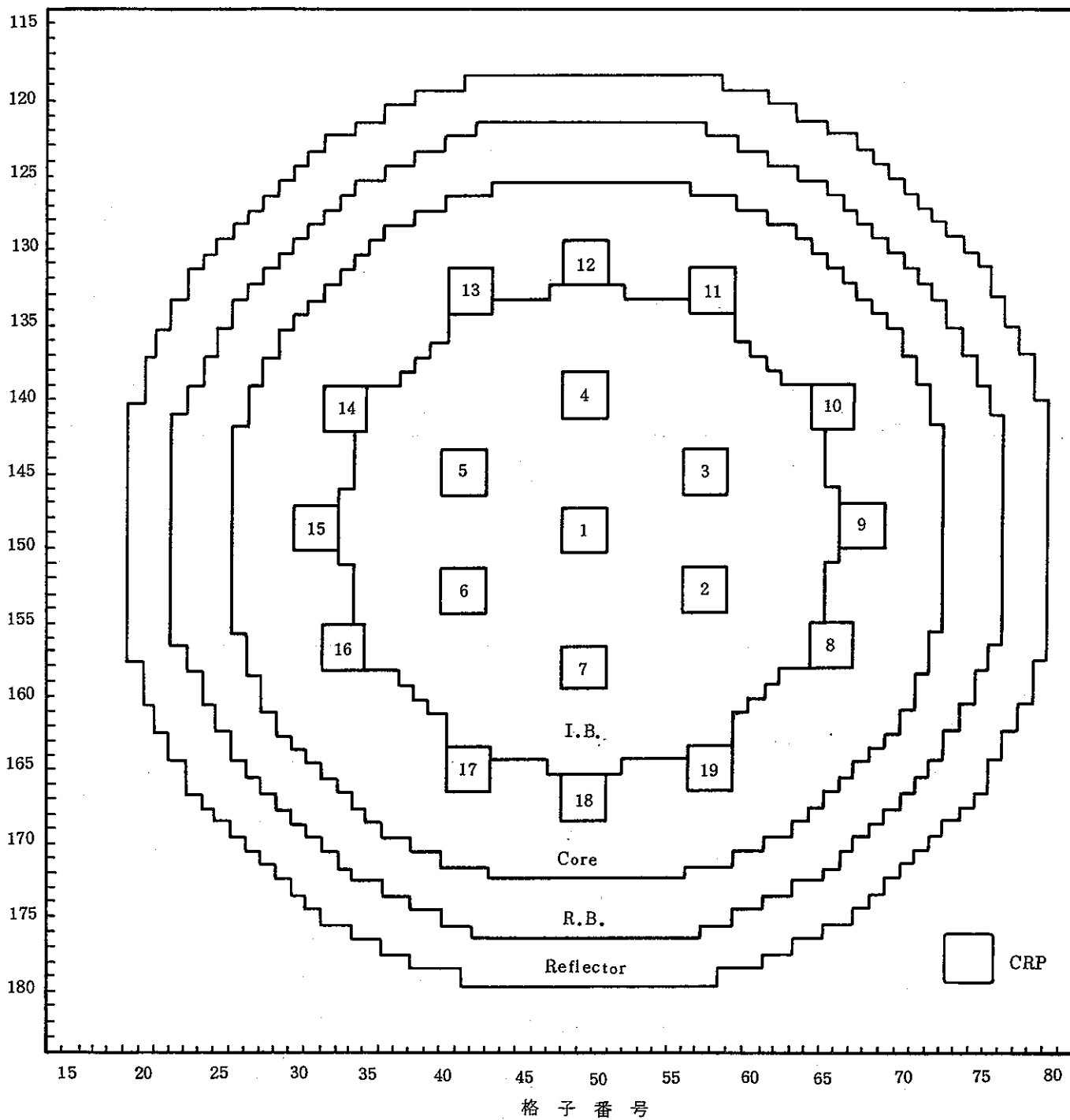


図4 ZPPR-X4のXY断面図

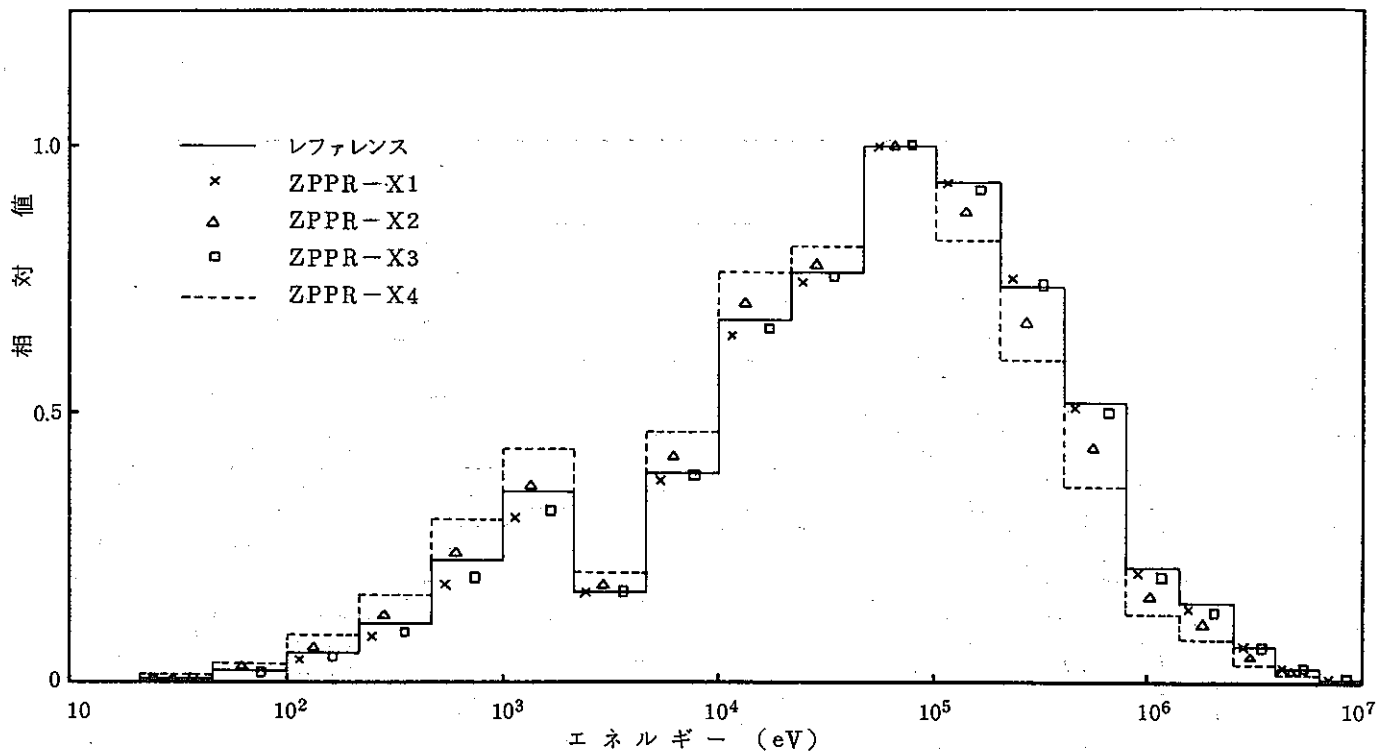


図5 内部ブランケット中心中性子スペクトル

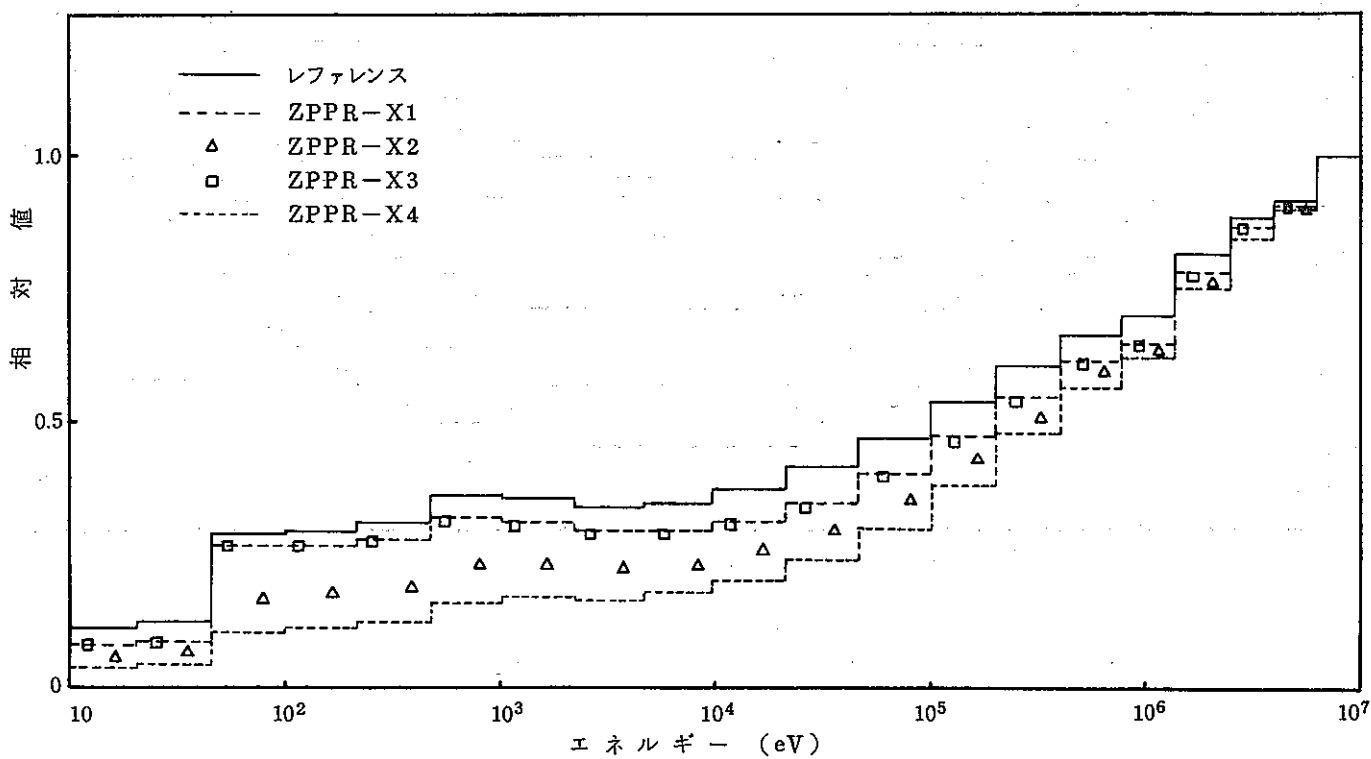


図6 内部ブランケット中心随伴中性子スペクトル

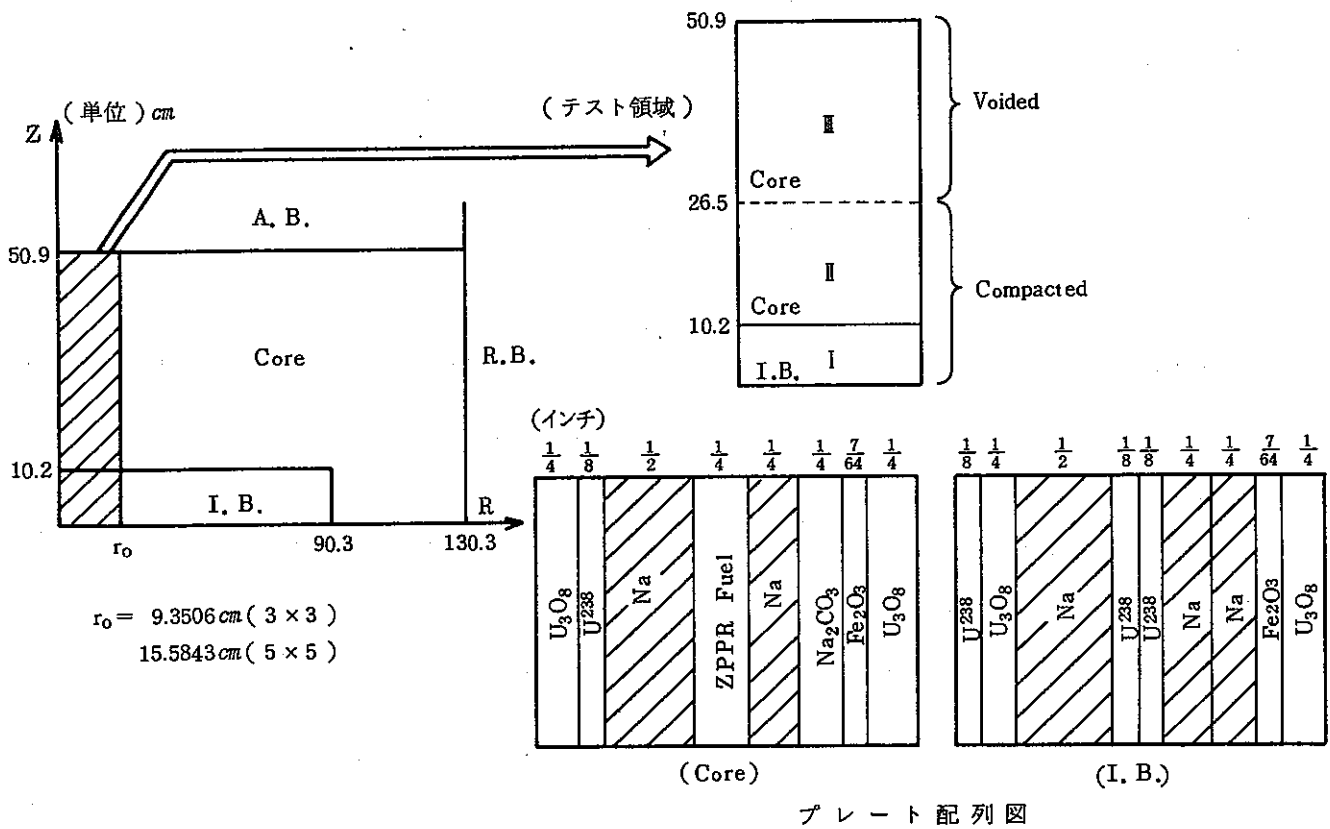


図7 燃料スランピング実験 2次元RZモデル

ZPPR-13 燃料の使用可能性に関する検討

これまで、ZPPR-10D体系の燃料をベースにして検討したが、軸方向非均質炉心模擬体系をZPPR-13から組替えることを想定して、ZPPR-13燃料をベースとした場合について検討した。

(1) ZPPR-13A体系

ZPPR-13体系は、径方向非均質炉心であり、炉心部はSCFD (Single Column Fuel Drawer ; Pu 富化度 13.2%) と DCFD (Double Column Fuel Drawer ; Pu 富化度 25.5%) それぞれ 792 体、2088 体が一様かつ対称に配列されている。

ZPPR-13A体系の特徴をZPPR-10D体系と比較して以下に示す。

	ZPPR - 13 A	ZPPR - 10 D
Fissile Pu 装荷量	2 4 7 0 kg	2 6 1 0 kg
Pu 富化度	22.2%	11.7%
炉心軸方向高さ	91.6 cm	101.8 cm

(2) ZPPR-13A燃料の使用について

ZPPR-13A燃料をベースにして、SCFDとDCFDの割合を変えて、Fissile Pu装荷量がZPPR-13Aの量以下であるという条件のもとに体系を選定した。

標準体系 (ZPPR-X1 相当、内部ブランケット厚さ 20 cm) の寸法及び組成を以下に示す。

炉心寸法	炉心	半径 138 cm, 高さ 101.8 cm
	内部ブランケット	半径 98 cm, 厚さ 20 cm
燃料 ドロワ数	SCFD	2 8 2 7 体
	DCFD	1 0 9 3 体
Pu 富化度		1 6.6 %

以上の検討の結果、Pu 富化度を調整することにより、ZPPR-13の燃料で、これまでの検討とほぼ同様の軸方向非均質炉心模擬実験体系を組むことが可能であると言える。