

25cm ピッチ格子のブルトニウム燃料
部分装荷炉心における冷却材喪失時
反応度の測定と解析

1979年2月

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

25-cmピッチ格子のプルトニウム燃料部分装荷炉心における 冷却材喪失時反応度の測定と解析

小 綿 泰 樹*
飯 島 一 敬*
柴 公 倫*

要 旨

A TR 型炉における冷却材喪失時の反応度を燃料組成、ウラン燃料とプルトニウム燃料の装荷割合ならびに可燃性毒物として減速材へ添加された¹⁰B の濃度をパラメータとして 25-cm ピッチ正方格子の重水境界実験装置で測定した。反応度の測定はパルス中性子法によって行い、また即発中性子減衰定数からドル反応度への変換は生成時間の変化を考慮した Simmons & King の式を用いて行った。体系は 1.2 wt % 濃縮ウラン燃料—棒炉心の中央部を、プルトニウムと天然ウラン混合酸化物の組成のプルトニウム燃料に順次置き換えた種々の二領域炉心の構成である。その結果プルトニウム燃料領域の統計的過重率は 0 から最大 0.6 まで変化させたことになる。使用されたプルトニウム燃料は 91 wt % の核分裂性プルトニウムを含み、その富化度がそれぞれ 0.54 wt %, 0.87 wt % の 2 種類である。また減速材としてはボロンを含有しない 99.45 mol % の重水およびこれに 3.9 ppm の ¹⁰B を溶解させた重水の 2 種類である。

冷却材喪失時反応度の理論解析は BENOIST 理論に基づく拡散係数の異方性を考慮し、MET-HUSELAH-II および CITATION 両コードを用いて行われた。この計算コードから得られる結果を振動理論に適用して冷却材の喪失にともなう中性子補強、中性子スペクトルならびに正味の中性子発生率の変化にもとづく各反応度成分について詳細な検討を加えた。

表に示した実験および理論解析結果から以下のことが結論される。

(1) 25-cm ピッチ炉心における実験結果と同様に今回の 25-cm ピッチ炉心においても燃料中の核分裂物質の重化率が等価であれば、プルトニウム燃料はウラン燃料より冷却材喪失時反応度を負側へ移行させる効果が大きく、また余剰反応度抑制の目的で減速材へ添加するボロンは冷却材喪失時反応度を正側へ移行させる効果を有する。

(2) BENOIST 理論に基づいた拡散係数の異方性を考慮して求めた理論値は異方性を考慮しない場合に比べて実験値との不一致は大幅に改善されるようになり 0.8 % 以内で実験値を再現す

* 大洗工務センター重水境界実験室

る。

(3) 冷却材の喪失による反応度と中性子漏れ量の変化による成分とその他の成分に分離すれば、冷却材喪失時反応度の符号とは無関係に冷却材の喪失は必ず中性子漏れを増加させるため漏れによる反応度成分は負になる。

(4) 冷却材喪失時反応度の正側または負側への主たる変化分は中性子漏れによるものの以外の反応度成分であり、この成分の変化分は特に冷却材喪失にともなう中性子スベクトルの変化の程度に基づく反応度の変化分である。

25-cm ピッチ格子の炉心における冷却材喪失時反応度

減速材 ^{10}B 濃度 (ppm)	燃料集合体	$\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料 領域の統計的重率	冷却材喪失時反応度 (S)	
			実験値	計算値
0	1.2 wt % UO_2	0	-0.51 $\pm$ 0.13	+0.23
		0.03	-0.76 $\pm$ 0.18	+0.04
		0.15	-1.61 $\pm$ 0.30	-0.76
		0.26	-2.39 $\pm$ 0.38	-1.58
		0.36	-3.06 $\pm$ 0.43	-2.24
		0.53	-4.26 $\pm$ 0.56	-3.50
		0.59	-4.65 $\pm$ 0.57	-3.93
		0.03	-0.98 $\pm$ 0.20	-0.23
		0.15	-3.22 $\pm$ 0.42	-2.47
		0.26	-5.65 $\pm$ 0.62	-4.87
3.9	0.87 wt % $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ & 1.2 wt % UO_2	0.36	-7.28 $\pm$ 0.73	-6.51
		0.53	-10.28 $\pm$ 0.99	-9.46
		0.59	-10.96 $\pm$ 1.05	-10.32
	1.2 wt % UO_2	0	+3.90 $\pm$ 0.20	+4.14
	0.54 wt % $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ & 1.2 wt % UO_2	0.59	-0.01 $\pm$ 0.03	+0.75
				+1.41
				+4.55
				-8.98
				-8.19
				-5.52

Measurements and Analysis of Loss-of-Coolant Reactivities

In Two Region Lattice Fueled with UO_2 and $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ * Yasuki Kowata, Kiminori Shiba
and Kazuyoshi Iijima

Abstract

Loss-of-coolant reactivities in D_2O lattice with 28-fuel-rod clusters have been measured as functions of plutonium enrichment in $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ fuel, statistical weight of $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ fueled region and ^{10}B concentration in D_2O moderator.

The measurements were done by using Deuterium Critical Assembly having a square lattice of a 25.0-cm pitch. $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ clusters were progressively substituted for 1.2 wt% enriched UO_2 clusters from the core center, as being surrounded by UO_2 fueled region. The statistical weight of plutonium fueled region was changed from zero up to 0.6. The enrichments of PuO_2 in $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ fuel are 0.54 and 0.87 wt%; also, fissile content in each plutonium is about 91 wt%. The concentration of ^{10}B in D_2O moderator of 99.45 mol% was zero or 3.9 ppm.

Pulsed neutron source technique was applied to determine the reactivities. Prompt neutron decay constants were converted into reactivities in dollars by means of Simmons & King's formula. Changes in prompt generation time were corrected in the conversions.

Calculational values of the reactivities were obtained by the codes of METHUSELAH-II and CITATION, and are in good agreement with experimental ones. Effect of anisotropic neutron diffusion was introduced into the calculation, on the basis of Benoist's theory. Perturbation theory was applied to resolve calculated reactivities into components concerning changes in neutron leakage, neutron spectrum

* Heavy Water Critical Experiment Section, O-arai Engineering Center,
PNC.

25-cmピッチ格子のプルトニウム燃料部分装荷炉心における 冷却材喪失時反応度の測定と解析

小 柳 泰 樹*
飯 島 一 敬*
柴 公 倫*

要 旨

A TR 型炉における冷却材喪失時の反応度を燃料組成、ウラン燃料とプルトニウム燃料の装荷割合ならびに可燃性毒物として減速材へ添加された ^{10}B の濃度をパラメータとして25-cmピッチ正方格子の重水臨界実験装置で測定した。反応度の測定はバルス中性子法によって行い、また即発中性子減衰定数からドブル反応度への変換は生成時間の変化を考慮したSimmons & Kingの式を用いて行った。体系は1.2wt%濃縮ウラン燃料一様炉心の中央部を、プルトニウムと天然ウラン混合酸化物の組成のプルトニウム燃料に順次置き換えた種々の二領域炉心の構成である。その結果プルトニウム燃料領域の統計的重率は0から最大0.6まで変化させたことになる。使用されたプルトニウム燃料は91 wt %の核分裂性プルトニウムを含み、その富化度がそれぞれ0.54 wt %、0.87 wt %の2種類である。また減速材としてはボロンを含有しない99.45 mol %の重水およびこれに3.9 ppmの ^{10}B を溶解させた重水の2種類である。

冷却材喪失時反応度の理論解析はBENOIST理論に基づく拡散係数の異方性を考慮し、MET-HUSELAH-IIおよびCITATION IIコードを用いて行われた。この計算コードから得られる結果を振動理論に適用して冷却材の喪失にともなう中性子補強、中性子スペクトルならびに正味の中性子発生率の変化にもとづく各反応度成分について詳細な検討を加えた。

表に示した実験および理論解析結果から以下のごとく結論される。

(1) 25-cmピッチ炉心における実験結果と同様に今回の25-cmピッチ炉心においても燃料中の核分裂物質の重電率が等価であれば、プルトニウム燃料はウラン燃料より冷却材喪失時反応度を負側へ移行させる効果が大きく、また余剰反応度抑制の目的で減速材へ添加するボロンは冷却材喪失時反応度を正側へ移行させる効果を有する。

(2) BENOIST理論に基づいた拡散係数の異方性を考慮して求めた理論値は異方性を考慮しない場合に比べて実験値との不一致は大幅に改善されるようになり0.8%以内で実験値を再現す

* 大船工学センター重水臨界実験室

る。

(3) 冷却材の喪失による反応度を中性子補償量の变化による成分とその他の成分に分離すれば、冷却材喪失時反応度の符号とは無関係に冷却材の喪失は必ず中性子補償を増加させるため陽性による反応度成分は負になる。

(4) 冷却材喪失時反応度の正側または負側への主たる変化分は中性子補償によるもの以外の反応度成分であり、この成分の変化分は特に冷却材喪失にともなう中性子スペクトルの硬化の程度に基づく反応度の変化分である。

25-cm ピッチ格子の炉心における冷却材喪失時反応度

冷却材 ^{10}B 濃度 (ppm)	燃料混合体	$\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料 領域の統計的重率	冷却材喪失時反応度 (β)	
			実験値	計算値
	1.2 wt % UO_2	0	-0.51±0.13	+0.23 +0.62
		0.03	-0.76±0.18	+0.04 +0.45
		0.15	-1.61±0.30	-0.76 -0.26
		0.26	-2.39±0.38	-1.58 -1.00
		0.36	-3.06±0.43	-2.24 -1.59
		0.53	-4.26±0.56	-3.50 70
		0.59	-4.65±0.57	-3.93 08
0		0.03	-0.98±0.20	-0.23 20
		0.15	-3.22±0.42	-2.47 35
		0.26	-5.65±0.62	-4.87 31
		0.36	-7.28±0.73	-6.51 32
		0.53	-10.28±0.99	-9.46 19
		0.59	-10.96±1.05	-10.32 -8.98
3.9	1.2 wt % UO_2	0	+3.90±0.20	+4.14 +4.55
	0.54 wt % $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ & 1.2 wt % UO_2	0.59	-0.01±0.03	+0.75 +1.41

Feb., 1979

Measurements and Analysis of Loss-of-Coolant Reactivities

In Two Region Lattice Fueled with UO_2 and $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$

Yasuki Kowata*, Kiminori Shiba*
and Kazuyoshi Iijima*

Abstract

Loss-of-coolant reactivities in D_2O lattice with 28-fuel-rod clusters have been measured as functions of plutonium enrichment in $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ fuel, statistical weight of $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ fueled region and ^{10}B concentration in D_2O moderator.

The measurements were done by using Deuterium Critical Assembly having a square lattice of a 25.0-cm pitch. $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ clusters were progressively substituted for 1.2 wt% enriched UO_2 clusters from the core center, as being surrounded by UO_2 fueled region. The statistical weight of plutonium fueled region was changed from zero up to 0.6. The enrichments of PuO_2 in $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ fuel are 0.54 and 0.87 wt%; also, fissile content in each plutonium is about 91 wt%. The concentration of ^{10}B in D_2O moderator of 99.45 mol% was zero or 3.9 ppm.

Pulsed neutron source technique was applied to determine the reactivities. Prompt neutron decay constants were converted into reactivities in dollars by means of Simmons & King's formula. Changes in prompt generation time were corrected in the conversions.

Calculational values of the reactivities were obtained by the codes of METHUSELAH-II and CITATION, and are in good agreement with experimental ones. Effect of anisotropic neutron diffusion was introduced into the calculation, on the basis of Benoist's theory. Perturbation theory was applied to resolve calculated reactivities into components concerning changes in neutron leakage, neutron spectrum

* Heavy Water Critical Experiment Section, O-arai Engineering Center,
PNC.

and net production rate. The comparison between the experiment and calculation are given in the table.

The following are concluded from the present study.

- (1) If $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ and UO_2 fuels are equal in content of fissile atoms, $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ fuel is more effective in shifting the loss-of-coolant reactivity to the negative side; on the other hand, boron in D_2O moderator shifts the loss-of-coolant reactivity to the positive side. These results have the same tendency as obtained in the 22.5-cm pitch lattices.
- (2) In all experimental cases, use of the anisotropic diffusion coefficients can make calculation agree with experiment within 0.8\$.
- (3) The leakage component always gives negative contribution to the reactivity, because coolant voiding increases neutron leakage from the systems.
- (4) Whether loss-of-coolant reactivity has positive or negative value is dominantly subjected to the non-leakage components caused by changes in neutron spectrum and net production rate; furthermore, the non-leakage component is mainly produced by hardening in neutron spectrum due to coolant voiding.

Loss-of-coolant reactivity in 25-cm pitch lattice

^{10}B content (ppm)	Loaded fuel	Statistical weight of $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ region	Loss-of-coolant reactivity (\$)	
			Experiment	Calculation
0	1.2wt% UO_2	0	-0.51 ± 0.13	$+0.23$
	0.54wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 1.2wt% UO_2	0.03 0.15 0.26 0.36 0.53 0.59	-0.76 ± 0.18 -1.61 ± 0.30 -2.39 ± 0.38 -3.06 ± 0.43 -4.26 ± 0.56 -4.65 ± 0.57	$+0.04$ -0.76 -1.58 -2.24 -3.50 -3.93
	0.87wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 1.2wt% UO_2	0.03 0.15 0.26 0.36 0.53 0.59	-0.96 ± 0.20 -3.22 ± 0.42 -5.65 ± 0.62 -7.28 ± 0.73 -10.28 ± 0.99 -10.96 ± 1.05	-0.23 -2.47 -4.87 -6.51 -9.46 -10.32
3.9	1.2wt% UO_2	0	$+3.90 \pm 0.20$	$+4.14$
	0.54wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 1.2wt% UO_2	0.59	-0.01 ± 0.03	$+0.75$

* Calculated by using anisotropic diffusion coefficient based on BENOIST's theory
 ** Calculated by using isotropic diffusion coefficient

目 次

1. 結 言	1
2. 実験方法	2
2.1 炉心構成および臨界水位の測定	2
2.2 即発中性子減衰定数と軸方向バックリングの測定	3
3. 実験データ処理方法	5
3.1 反応度の導出方法	5
3.2 正の冷却材ボイド反応度の導出方法	8
3.3 測定値の補正	9
4. 実験結果とその考察	11
5. 計算値の評価	14
5.1 計算方法	14
5.2 実験値と計算値との比較	15
6. 振動論による解析	17
6.1 解析方法	17
6.2 冷却材ボイド反応度の成分	20
6.3 数値解析の方法とその結果	21
6.4 中性子補償効果と非補償効果	22
6.5 中性子非補償効果の成分	23
6.6 冷却材ボイド反応度の物質組成依存性	25
7. 結 論	27
参考文献	28
謝 辞	29
付録1. パルス中性子実験条件および測定データ	68
付録2. パルス中性子実験結果	86
付録3. 振動論による反応度解析コード	104

1. 緒 言

225-cm ピッチ正方格子としたウラン燃料— moderator 炉心の中央部をプルトニウム・ウラン混合燃料（以下プルトニウム燃料とよぶ）で順次置換した二領域炉心における冷却材喪失時の反応度（以下冷却材ポイド反応度とよぶ）の測定結果から、プルトニウム燃料はウラン燃料に比べて冷却材ポイド反応度を負側へ移行させる効果が大きく、そして減速材へ添加するボロンは逆に正側へ移行させる効果をもつことが確認された。⁽¹⁾⁽²⁾

熱中性子炉としてのATRは燃焼初期炉心において最大の余剰反応度をもつため、制御棒の他減速材に添加させる可燃性毒物によって完全に抑制させなければならない。初期炉心では可燃性毒物としてのボロンによって冷却材ポイド反応度が正側へ移行する性質があるが、燃焼が進めば初装荷燃料としてウラン燃料を使用した場合でも、プルトニウムや核分裂生成物の蓄積によって冷却材ポイド反応度は負側へ移行する性質がある。⁽³⁾したがって燃焼初期炉心の冷却材ポイド反応度をいかに抑制させるかはATR型炉の開発上重要な課題となっている。

プルトニウム燃料を利用する原子炉ではボロン添加による冷却材ポイド反応度の正側への変化分を打消す手段として、プルトニウムのもつ冷却材ポイド反応度抑制効果は有効であると考えられる。このため減速材ボロンまたはプルトニウム燃料の冷却材ポイド反応度に対する効果を実験によって定量的に把握するとともに実験データにより計算コードによる理論値の精度評価をしておくことは、設計へのフィードバックのために重要である。原子炉の設計においては冷却材喪失時の反応度は負の値であること、または正の値であっても燃料が破損しない程度の値であることが要求される、このような設計条件を保証させるためにも炉心の物質組成等の実験条件を種々変化させた体系における豊富な実験データの集積およびそれらの正確な炉物理的理解を得ることが要求される。

以上の理由から225-cmピッチ正方格子からなる重水臨界実験装置(DCA)においてプルトニウム燃料を格子とする領域の大きさ、プルトニウム富化度ならびに減速材¹⁰B濃度をパラメータにして冷却材ポイド反応度をパルス中性子法によって測定し、冷却材ポイド反応度のこれらパラメータ依存性を明らかにする。これまで冷却材ポイド反応度の理論解析には主としてMBT-IIUSELAH⁽⁴⁾およびCITATION⁽⁵⁾ 両コードによって行われてきたが、原子炉の設計を進めるには冷却材の喪失にともなう炉物理現象を正確に理解しておくことはいうまでもない。反応度を振動論によって解析すれば、冷却材ポイド反応度は冷却材喪失にともなう中性子増殖、中性子スペクトルおよび正味の中性子発生率等の変化にもとづく観点から考察できると期待されるので、これらのコードで得られた計算結果に振動論を応用することを試みた。

2. 実験方法

2.1 炉心構成および臨界水位の測定

冷却材ボイド反応度の測定は重水臨界実験集塊 (DCA) でパルス中性子法によって行われた。

第1図に示すようにDCA炉心は、燃料集合体、減速材、冷却材等が厚さ10cmのアルミニウム製のカランドリアタックとよばれる炉心タック内におさまられた構造になっている。燃料集合体の配置等を示す第2図から分るように、DCA炉心は動燃方向にはほとんど反射体のないいわゆる裸の状態でみなすことができる。しかし、炉心下部には炉心タック支持構造材等が、また上部には炉心有効長以外にも燃料延長部等が存在しているため、軸方向には厳密には裸ではなく、したがって軸方向外周距離は反射体遮蔽が含まれた実効的なものである。

臨界調整は炉心タック内の減速材重水の水位を上昇または下降させることによって行われる。炉心タック重水水位は連通管内の水位をサーボモーターで0.01mmの精度で測定される。

実験に使用された燃料は第3図に示すような構造のクワスタ型燃料集合体で、28本の燃料棒を第4図に示すように3本の同心円周上に配置されている。燃料集合体は炉心タック内の圧力管内に装着されたのち冷却材で満たされる。圧力管の外側にはさらに空気層を隔てたカランドリアタック下板グリッド板によって25.0cmピッチの正方形格子状にカランドリアタック内に配置された(第2図)。圧力管内の冷却材は通常軽水(0%ボイド)であるが、冷却材が喪失して反応度を印加させた状態では空気(100%ボイド)になっている。実験では、圧力管内軽水水位と減速材重水水位とが等しくなるように調整された。減速材の重水は、純度99.45mol%で通常は中性子吸収物質としての硼は含有していない。減速材中に可燃性基物を溶解させる場合は、硼酸(H_3BO_3)を減速材中へ溶解させ、均一に混合させて ^{10}B 濃度で39ppmとした。 ^{10}B 濃度の同定はサンプリングした重水試料を同位体希釈法にて行った⁽⁶⁾。

実験に使用された燃料集合体は、1.2wt%濃縮ウラン酸化物(以下1.2wt% UO_2 という)および0.54wt%プルトニウム濃化または0.87wt%プルトニウム富化のプルトニウム・ウラン混合酸化物(以下0.54wt% PuO_2 - UO_2 または0.87wt% PuO_2 - UO_2 という)の3種類である。これらの燃料の組成ならびに燃料集合体の諸元⁽⁷⁾をそれぞれ第1、第2表に示す。 PuO_2 - UO_2 燃料における全Puに対する核分裂性Pu同位体の重量比は約91wt%(standard grade type)である。

まず、全燃料チャンネル(97)に1.2wt% UO_2 燃料を装荷した単頭域炉心を構成し、この1.2wt% UO_2 一様炉心の燃料を中央部より0.54wt% PuO_2 - UO_2 燃料または0.87wt% PuO_2 - UO_2 燃料に順次置換した際の二領域炉心を構成しながら実験を行った。置換方法は第5図に示すよ

うに、炉心中心軸に対して4回軸対称になるように行われた。すなわち、1体の置換からはじめて順次5、9、13、21体として最大25体まで置換された体系を構成した。このようにして炉心全領域に占めるプルトニウム燃料領域の純出の重率⁽⁸⁾を0から最大約0.6まで順次変化させた。第5図に示すようにプルトニウム燃料のN体置換炉心は、N番以下の番号の1.2wt% UO_2 燃料がすべて PuO_2 - UO_2 燃料に置換された状態であることを表す。

以上のような体系を構成しながら実験を行うことにより、冷却材ボイド反応度の燃料組成、減速材 ^{10}B 濃度をおよびプルトニウム燃料領域の統計的重率依存性が求められる。

2.2 即発中性子減衰定数と軸方向バックリングの測定

反応度はパルス中性子法によって求められるため、まず軸方向バックリングの函数として即発中性子減衰定数が測定された。

炉心に打込むパルス中性子は、第1、第5図に示すようにコッククロフト・ウォルトン型加速器(パルス中性子発生装置)で加速された重水素イオンと炉心の外壁に設置したトリチウムターゲットとによるD(T, α)n反応によってパルス状に発生させた14MeVの中性子であり、このパルス中性子を炉心タック壁より打込んだ。パルス中性子の時間幅は11msecであり、パルスの繰り返し数は体系の未臨界度に応じて10Hzから0.1Hzまで適当に変化させた。

中性子密度はReuter Stokes 社製の1/2インチφBF₃計数管4本をそれぞれ炉心の垂直方向孔1B1、3D1、1C5および1B7に挿入して測定された。このときのBF₃計数管の炉心軸方向位置は減速材水位のほぼ中点になるように調整された。BF₃計数管の挿入位置ならびに測定系のコックダイヤグラムをそれぞれ第5〜6図に示す。4本のBF₃計数管の出力信号はそれぞれ前置増幅器および主増幅器で増幅され、シングルチャンネル波高分析器で雑音と弁別された後、時間分析器ND-3300の人力としてある。時間分析器の計数管あたりの全チャンネル数は1Kであり、チャンネル幅は中性子密度の減衰の精度とバックグラウンドの大きさに応じて20〜300μsecの範囲の値を適当に選択した。また、パルス中性子発生装置のトリガー信号は遅延時間発生器により基本モードで形成されるまでの時間に応じて5msecから11msecまで遅延させ時間分析器の描引時間原点信号とした。

測定された各BF₃計数管の計数値 $n(t)$ のデータはオンラインでTOSBAC-3400計算機に転送された後、最小二乗法によって $n(t) = A e^{-\alpha t} + C$ なる函数にフィットさせて即発中性子減衰定数 α を求めた。この際、フィッティングを開始する時点を選択して10チャンネルずつ遅らせてゆき、このフィッティング開始チャンネルと α との関係プロットして α の値がフィッティング開始時点の相異に依存せず、誤差範囲内で一致する領域内の α の値を4計数管で平均して求める α の値とした。

パルス中性子法で負の冷却材ボイド反応度を測定する場合は、反応度が印加された後の状態で、ある100%ボイドの未臨界炉心で減速材重水水位すなわち未臨界度を種々変化させることにより、

即発中性子減衰定数と減速材水位との関係が測定された。冷却材ボイド反応度が正になる炉心では、反応度印加前の状態である0%ボイド炉心においてもこれらの関係が測定された。この場合、100%(0%)ボイドの体系の減速材水位は、0%(100%)ボイドの体系の臨界水位よりも十分低い高さから臨界近傍の高さまで2~3cmの間隔で測定し約10点変化させながら即発中性子減衰定数が測定された。

減速材水位は軸方向実効外挿距離を用いて実効的な軸方向バックリング(以後単に軸方向外挿距離および軸方向バックリングとよぶ)に変換された。軸方向外挿距離は1.2 wt % $^{235}\text{UO}_2$ 一様炉心における中性子分布から定められた。中性子束分布は3mmφの銅ワイヤの照射による放射化率分布から決定された。軸方向中性子束分布は炉心中央の燃料集合体の中心およびこの単位格子の境界である減速材中で測定された。各位置で測定された軸方向中性子束分布を余弦関数に最小二乗フィットさせて実効炉心高さが求められるが、炉心タンク構造材時に依存しない炉心高さを求めるために炉心境界近傍のデータをフィッティングから除くことによりフィッティング領域の範囲に依存しない値が得られた。また、このようなデータ処理によって求めた実効炉心高さは銅ワイヤの照射位置に依存しなかった。したがって、求められた実効炉心高さを臨界炉心高さを差引くことによって反射体節約を含む軸方向外挿距離を定めることができた。ここで、求められた軸方向外挿距離は燃料組成、冷却材ボイド率等炉心の構成物質によって変化することが予想されたが、冷却材ボイド率が同一であれば燃料組成および減速材ボイド率を変化させて求められた各々の軸方向外挿距離に有意の差はなかった。以上のことから軸方向バックリングは第5表に示すように冷却材ボイド率にのみ依存した軸方向外挿距離を用いて求めたものである。

3. 実験データ処理方法

3.1 反応度の導出方法

プルトニウム燃料の臨界体数の変化により軸径方向の中性子束分布は歪みを受けるが、これは炉心高さには依存せず一定であると考えることができる。一方、軸方向中性子束分布は、減速材水位の変化に対しては、形状バックリングの大きさのみで決まる余弦分布で歪化してゆくものと考えることができる。したがって、即発中性子減衰定数 α は軸方向バックリング B_2^2 のみの関数となるので、 α と B_2^2 とのデータをプルトニウム燃料の置換体数を変化させた体系ごとに次式に最小二乗法でフィッティングさせた。

$$\alpha(B_2^2) = \alpha_c + \beta(B_2^2 - B_{2c}^2) + r(B_2^2 - B_{2c}^2)^2 \quad (3-1)$$

(3-1)式によって臨界時の即発中性子減衰定数 α_c および α の B_2^2 に対する1次、2次の係数 β 、 r を定めることにより α と B_2^2 との関係を実験的に結びつけた。ここで、 B_{2c}^2 は臨界時の軸方向バックリングである。ある B_2^2 に対応して(3-1)式で求められた $\alpha(B_2^2)$ は即発中性子生成時間 Λ の変化を補正したSimmons & Kingの式⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

$$\frac{\rho}{\beta_{\text{eff}}} = 1 - \frac{\alpha(B_2^2)}{\alpha_c} \cdot \frac{\Lambda(B_2^2)}{\Lambda_c} \quad (3-2)$$

を用いて β 反応度に変換された。サフィックスCは臨界状態を示すものとする。ここで、即発中性子生成時間の補正項 Λ/Λ_c ⁽¹¹⁾は

$$\frac{\Lambda(B_2^2)}{\Lambda_c} = \frac{\beta_p(B_2^2)}{\beta_{pc}} \left\{ 1 - \beta_{\text{eff}}(\rho/\beta_{\text{eff}}) \right\} \quad (3-3)$$

のように表わされるが、(3-4)式のように近似して求められた。

$$\frac{\Lambda(B_2^2)}{\Lambda_c} \approx 1 - \beta_{\text{eff}}(\rho/\beta_{\text{eff}}) + \frac{1}{\beta_{pc}} \frac{\partial \beta_p}{\partial B_2^2} (B_2^2 - B_{2c}^2) \quad (3-4)$$

β_p 、 β_{eff} の値にMETHUSELAH-IIコードによる計算値を使用し、 β 反応度 $(\rho/\beta_{\text{eff}})$ の値を繰り返し計算によって求めると(3-2)、(3-4)式より即発中性子生成時間の補正した β 反応度が求められる。冷却材ボイド反応度 $(\Lambda_{0 \rightarrow v}/\beta_{\text{eff}})$ が負であれば、 $(\rho_{0 \rightarrow v}/\beta_{\text{eff}})$ は

$$\frac{\rho_{0 \rightarrow v}}{\beta_{\text{eff}}} = 1 - \frac{\alpha(B_{20}^2)}{\alpha_c} \cdot \frac{\Lambda(B_{20}^2)}{\Lambda_c} \quad (3-2')$$

で求められる。ここで、 B_{20}^2 は反応度印加前の0%ボイドの状態における臨界軸方向バックリングである。即発中性子生成時間の補正に使用する β_p 、 β_{eff} の値は

$$\mathcal{L}_0 = \frac{k_0}{F} \iint \frac{1}{v} \phi(E) \phi^*(E) dV dE \quad (3-5)$$

$$\mathcal{L}_0 = \frac{1}{F} \sum_i \iint x_i(E) \beta_i \nu \Sigma_i(E') \phi(E') \phi^*(E) dV dE dE' \quad (3-6)$$

ただし、

$$F = \iiint x(E) \nu \Sigma_i(E') \phi(E') \phi^*(E) dV dE dE' \quad (3-7)$$

として求められた。i は燃料中の核分裂性物質の種類を示し、 β_i は i 物質の先行核の全グループから発生する全速発中性子の割合である。なお、実際の計算では空間メッシュを適当に粗かくとり、エネルギー群は少数群にして積分は和におさかえられた。 $\mathcal{L}_0$ の計算における中性子速度の逆数 $1/v$ は、各エネルギー群の中性子密度を重みとして求められる平均値を用いた。ただし、中性子スペクトルとしては熱中性子群をマックスウェル分布、共鳴領域を含む熱エネルギー以上の高速中性子群を一括して $1/E$ と仮定した。このとき熱中性子群についての $1/v$ の平均値 $\langle 1/v \rangle_1$ は、

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{1}{v} \right\rangle_1 &= \frac{\int_0^\infty \frac{1}{v} n_1(E) dE}{\int_0^\infty n_1(E) dE} \\ &= \frac{1}{n} \int_0^\infty \frac{1}{v_T} \sqrt{\frac{E_T}{E}} n_1(E) dE \\ &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{v_T} \end{aligned} \quad (3-8)$$

となる。ただし、

$$\frac{n_1(E) dE}{n} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{E}{E_T}} \sqrt{\frac{E}{E_T}} \frac{dE}{E_T} \quad (3-9)$$

$$v_T = \sqrt{2kT/m} = \sqrt{2E_T/m} \quad (3-10)$$

ここで、 $T = 2936^\circ \text{K}$ (20.4°C) のとき、 $E_T = kT = 0.0253 \text{ eV}$ 、 $v_T = 2200 \text{ m/sec}$ である。また熱中性子速度の平均値 $\langle v \rangle_1$ は

$$\begin{aligned} \langle v \rangle_1 &= \frac{\int_0^\infty v n_1(E) dE}{\int_0^\infty n_1(E) dE} \\ &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_T \int_0^\infty e^{-\frac{E}{E_T}} \sqrt{\frac{E}{E_T}} \frac{dE}{E_T} \end{aligned} \quad (3-11)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_T \\ &\left\langle \frac{1}{v} \right\rangle = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{\langle v \rangle_1} \end{aligned} \quad (3-12)$$

となるので、 $\langle 1/v \rangle_1$ と $\langle v \rangle_1$ との関係は

となり、 $\langle v \rangle_1$ の値が分れば、 $\langle 1/v \rangle_1$ の値は計算できることになる。またエネルギー群 (E_1, E_2) の高速中性子群についての ($1/v$) の平均値 $\langle 1/v \rangle_2$ は

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{1}{v} \right\rangle_2 &= \frac{\int_{E_1}^{E_2} \frac{1}{v} n_1(E) dE}{\int_{E_1}^{E_2} n_1(E) dE} \\ &= \frac{\int_{E_1}^{E_2} \frac{1}{v_0} \frac{E_0}{E} \frac{dE}{E}}{\int_{E_1}^{E_2} \sqrt{\frac{E_0}{E}} \frac{dE}{E}} \\ &= \frac{\sqrt{E_0}}{2v_0} \left(\frac{1}{\sqrt{E_1}} + \frac{1}{\sqrt{E_2}} \right) \end{aligned} \quad (3-13)$$

となる。ここで、 E_0, v_0 は基準となる中性子エネルギーおよびそのエネルギーに対応する中性子速度である。一方、高速中性子速度の平均値 $\langle v \rangle_2$ は、

$$\begin{aligned} \langle v \rangle_2 &= \frac{\int_{E_1}^{E_2} v n_1(E) dE}{\int_{E_1}^{E_2} n_1(E) dE} \\ &= \frac{\int_{E_1}^{E_2} \frac{E_0}{E} \frac{dE}{E}}{\int_{E_1}^{E_2} \frac{1}{v} \frac{E_0}{E} \frac{dE}{E}} \end{aligned} \quad (3-14)$$

$$= \frac{v_0}{2\sqrt{E_0}} \frac{\mathcal{L}_n(E_1/E_2)}{(1/\sqrt{E_1} - 1/\sqrt{E_2})}$$

となり、同様に $\langle 1/v \rangle_2$ も $\langle v \rangle_2$ が計算できれば

$$\left\langle \frac{1}{v} \right\rangle = \frac{1}{\langle v \rangle_1} \cdot \frac{\sqrt{E_0} (1/\sqrt{E_1} + 1/\sqrt{E_2})}{2v_0} \quad (3-15)$$

なる式で結びつけることができる。

3.2 正の冷却材ボイド反応度の導出方法

格子ピッチが拡大し、かつ減速材中にネロンを添加した炉心を構成すると臨界体系は大きくなり、ボイドの発生にともなう生ずる中性子漏洩による負の反応度効果の格与が小さくなるので、冷却材ボイド反応度が正に移行することが予想される。パルス中性子法では正の反応度を直接測定することはできないが、ここではパルス中性子実験で得られたデータをもとに次のような方法で間接的に正の冷却材ボイド反応度を求めた。

まず、ボイド率の0%→V%変化による冷却材ボイド反応度 $\rho_{0 \rightarrow V}$ が負のときの $\rho_0(B_1^2)$ 、 $\rho_0(B_2^2)$ をそれぞれ軸方向バックリング B_1^2 におけるボイドの発生前(0%)、発生後(V%)の未臨界度とすれば、 $\rho_{0 \rightarrow V}$ は

$$\rho_{0 \rightarrow V} = \rho_0(B_1^2) - \rho_0(B_2^2) \quad \left| \begin{array}{l} \rho_0(B_1^2) = \Delta \rho(B_1^2 = B_{20}^2) \\ \rho_0(B_2^2) = \rho_{20}^2 \end{array} \right. \quad (3-16)$$

で表わされる。(3.13)式より $\rho_{0 \rightarrow V}$ は B_1^2 vs. $\Delta \rho(B_1^2)$ の関係で $B_2^2 = B_{20}^2$ 、すなわち $\rho_0 = 0$ のときの値であることに注目する。ただし、ボイド発生前および発生後の炉心の臨界軸方向バックリングをそれぞれ B_{20}^2 、 B_{2V}^2 とする。 $B_1^2 \geq B_{2V}^2$ 、 $B_2^2 \geq B_{20}^2$ の場合、すなわちボイドの発生前後の炉心でともに未臨界になる B_1^2 の範囲では0%ボイドおよびV%ボイド炉心における未臨界度差 $\Delta \rho(B_1^2)$ は、 α vs B_1^2 の関係から次のように表わすことができる(生成時間の変化は無視する)。

$$\Delta \rho(B_1^2) \approx \left(\frac{\tau_0}{\alpha_{00}} - \frac{\tau_V}{\alpha_{0V}} \right) B_1^2 + \left(\frac{\beta_{00}}{\alpha_{00}} - \frac{\beta_{0V}}{\alpha_{00}} \right) B_1^2 + \left(\frac{\beta_{00} B_{20}^2}{\alpha_{00}} - \frac{\beta_{0V} B_{2V}^2}{\alpha_{0V}} \right) \quad (3-17)$$

この式を書き変えると

$$\Delta \rho(B_1^2) \approx \left| \rho_{0 \rightarrow 0} \right| + \beta' \Delta B_1^2 + \gamma' \Delta B_1^2 \quad (3-18)$$

のように表わされる。ただし、 $\left| \rho_{0 \rightarrow 0} \right|$ 、 ΔB_1^2 はそれぞれ

$$\left| \rho_{0 \rightarrow 0} \right| = \left| \Delta \rho(B_1^2 = B_{20}^2) \right|, \quad \Delta B_1^2 = B_1^2 - B_{20}^2$$

である。(3-18)式で $\left| \rho_{0 \rightarrow 0} \right|$ はボイド率のV%→0%変化による反応度である。 $\rho_{0 \rightarrow V} < 0$ の場合は $\rho_{0 \rightarrow 0} > 0$ となつて $\rho_{0 \rightarrow 0}$ を直接測定できないが、 $\rho_{0 \rightarrow V} > 0$ になる場合は逆に $\rho_{0 \rightarrow 0}$ の値は直接測定できる値となり、 β' および γ' はともに定数となつて $\rho_{0 \rightarrow V}$ を(3-16)式を用いて実験的に定めることができる。

したがって、 $\rho_{0 \rightarrow V} > 0$ ($B_{20}^2 < B_{2V}^2$)の場合、まずボイド発生前後の炉心のともに未臨界になる B_1^2 の範囲($B_1^2 > B_{2V}^2$)でそれぞれその炉心の生成時間の変化を考慮した未臨界度差 $\Delta \rho(B_1^2)$ を B_1^2 を変化させながら実験により求める。次に、(3-18)式が $B_{20}^2 \leq B_1^2 \leq B_{2V}^2$ の範囲まで取り立つものと仮定して $\Delta \rho(B_1^2)$ vs. ΔB_1^2 の関係を(3-18)式にフィットし係数 β' 、 γ' を定め、 B_1^2 を B_{20}^2

まで外挿すれば(3-16)式と同様に $\rho_{0 \rightarrow V}$ を求めることができる。ただし、このような方法で正の反応度を求める場合は $\Delta \rho(B_1^2)$ を測定した B_1^2 の範囲に比べてボイド発生前後の炉心の臨界軸方向バックリングの差($B_{2V}^2 - B_{20}^2$)が小さいことが必要条件であるのであまり大きな正の反応度を求めることは難しいといえる。

このような方法によって、減速材に¹⁰Bが3.9 ppm添加された1.2wt %²³⁵U_{0.1}-¹⁰B炉心で軸方向バックリングを種々変化させながら測定された未臨界度差の軸方向バックリングに対する関係を第7図に示す。

3.3 測定値の補正

即発中性子減速定数やバックリング等の測定値が炉心温度の変動、検出器案内管の数値や配置によって影響を受けることが考えられる。しかし、冷却材ボイド反応度の格子ピッチ、燃料組成および減速材¹⁰B濃度等各種パラメータ依存性を求める場合または理論値との評価においても、基準となる炉心条件は同一でなければならぬので、測定条件が異なる測定値に対してはこれらの効果を補正する必要がある。重水炉々は較正されたサーボモーターで測定されるが、マノメータの零点変動については補正を行った。この補正によって臨界水位は最大0.25%変動した。即発中性子減速定数の安全棒案内管による影響も考えられるが、この案内管反応度値の冷却材ボイド率依存性は約1%程度で冷却材ボイド反応度への影響は無視できると分った^[9]。この影響については即発中性子減速定数に系統誤差として含めるにとどめた。測定される即発中性子減速定数は検出器案内管を挿入した体系の値であるが、この案内管は安全棒案内管のように内部が重水で満たされるのではなく空洞構造であるため、これによる反応度は格ずピッチ、冷却材ボイド率および減速材¹⁰B濃度等によって値と符号が変化することが予想された。実験ではあらかじめ検出器案内管による反応度効果を臨界水位差法で測定しておき、この値を用いて案内管を挿入しない炉心における値に補正した。

炉心温度、重水純度等の変動によって、形状バックリングが同一であっても即発中性子減速定数が変化したり、臨界バックリングも変化する。特に、冷却材ボイド反応度の重水純度依存性は著しいことが明らかになっている^[10]。99.45 mol %の重水減速材の経時変化は無視できるので、測定値は重水純度が99.45 mol %の場合の値である。炉心温度は減速材重水温度で代表されるものと仮定すれば最高と最低の重水温度差は約5℃であり、また実験でも1~2℃の変化が観測された。各パラメータ毎の即発中性子減速定数やバックリングの重水温度依存性に対する補正にはME THUSELAH-IIコードによる計算値を用いた。二領域炉心の場合にはそれぞれの領域における温度係数の値を統計的重算で加重平均して求めた。測定値は基準炉心温度22℃における値に規格化された。以上のような補正を施すことによって冷却材ボイド反応度は温度が22℃で、重水純度が99.45 mol %の場合に規格化して求められた。

1) 検出器案内管の補正

即発中性子減衰定数 α は案内管を上下に移動する中性子検出器を用いて測定される。検出器案内管が挿入されない炉心における α の案内管が挿入されたことによる微小変化量 $\delta\alpha$ は案内管反応度 $\delta\rho$ を用いて(3-19)式で近似される。

$$\delta\alpha \approx -\alpha_c' \cdot \delta\rho \quad (3-19)$$

ここで α_c' は臨界炉心に案内管を挿入して測定された即発中性子減衰定数であり、 $\delta\rho$ が軸方向バックリングの変化に依存しないとすれば、 $\delta\alpha$ は一定値になる。したがって、 $\delta\rho$ をあらかじめ測定しておけば案内管の挿入しない炉心における即発中性子減衰定数 α は

$$\alpha = \alpha_c' + \alpha_c' \cdot \delta\rho \quad (3-20)$$

から求められる。ここで、 α_c' は未臨界炉心に案内管を挿入して測定された即発中性子減衰定数である。

2) 炉心温度の補正

幾何学バックリングが B^2 の炉心で、基準炉心温度 T および炉心温度 T のときの即発中性子減衰定数をそれぞれ $\alpha_c(B^2)$ 、 $\alpha(B^2)$ とする。ここで、 α の B^2 に対する1次、2次の微係数 β 、 T の大小関係は $B^2 \gg T$ でかつ T の温度依存性 $\partial T / \partial T$ はMETHUSELAH-IIコードで求めた結果無視できることが分かったので、 α を測定している時の炉心温度が基準炉心温度から変化したことによる α の変化量 $\Delta\alpha (= \alpha - \alpha_c)$ は、

$$\Delta\alpha = (\alpha_c - \alpha_{c0}) - (\beta \cdot B_c^2 - \beta_0 \cdot B_{c0}^2) + (\beta - \beta_0) \cdot B_c^2 \quad (3-21)$$

となる。(3-21)式で、基準炉心温度 T_0 における α_{c0} 、 β_0 、 B_{c0}^2 の値は、炉心温度 T に変化すればそれぞれ α_c 、 β 、 B_c^2 に変化することを示す。 α_c 、 β 、 B_c^2 が炉心温度変化 δT によって

$$\left. \begin{aligned} \alpha_c &= \alpha_{c0} + \frac{\partial \alpha_c}{\partial T} \delta T & \beta &= \beta_0 + \frac{\partial \beta}{\partial T} \delta T \\ B_c^2 &= B_{c0}^2 + \frac{\partial B_c^2}{\partial T} \delta T \end{aligned} \right\} \quad (3-22)$$

に変化するものとし、2次の微小量を無視すれば、 $\Delta\alpha$ は、

$$\Delta\alpha \approx \left[\frac{\partial \alpha_c}{\partial T} - \beta \frac{\partial B_c^2}{\partial T} + \frac{\partial \beta}{\partial T} (B_c^2 - B_{c0}^2) \right] \delta T \quad (3-23)$$

となる。 δT 、 β 、 B_c^2 は測定される値であるので、 $\partial \alpha_c / \partial T$ 、 $\partial \beta / \partial T$ 、 $\partial B_c^2 / \partial T$ の各値に第3表に示すMETHUSELAH-IIコードによる計算値を用いて α の炉心温度変化による補正値を求めた。

4. 実験結果とその考察

パルス中性子法で冷却材ボイド反応度を求めるにあたって、即発中性子減衰定数の関数としての反応度(未臨界度)が軸方向バックリングが B_c^2 を変化させながら測定された、25-cmピッチ格子の1.2wt % UO_2 一様炉心ならびにプルトニウム燃料の組成およびその置換体数を変化させた各炉心におけるパルス中性子実験条件ならびに結果を付録1の第A-1～第A-17表に示す。これらの表には即発中性子減衰定数の平均値ならびに中性子収量のモニターとして測定した $D(T, \alpha)$ n反応による α 粒子の計数値も示した。即発中性子減衰定数 α および臨界軸方向バックリング B_c^2 に炉心温度変化の補正を行った後、 α と B_c^2 とのデータを(3-1)式に最小二乗法でフィットさせて α_c 、 β および T の値を求めた。このようにしてプルトニウム燃料の組成およびその置換領域を変化させた未臨界体系における α と B_c^2 との関係を第6表に示す。第8～第10図に、 α_c 、 β および T の値を用いて求められた α と B_c^2 との関係をプルトニウム燃料の置換体数をパラメータにして示す。また、 α_c 、 β および T の値と(3-2)式とから種々の軸方向バックリングに対する未臨界度(Subcritical reactivity)を付録2の第A-2-1～第A-2-17表に示す。第11～第12図に、1.2wt % UO_2 一様炉心ならびにプルトニウム燃料の置換体数がそれぞれ9、25体の各炉心については α と未臨界度との関係を示す。次に、反応度印加前である0 %ボイド時の臨界軸方向バックリングを用いて、このバックリングをもつ反応度印加後の体系における α を見限り、冷却材ボイド反応度を求めた。その結果をプルトニウム燃料の置換体数をパラメータにして第7表に示す。求められた反応度には生成時間の変化についての補正が行われた。第4表に生成時間の補正に使用された臨界時の即発中性子寿命 λ_{pc} 、実験環境中性子発生割合 β_{eff} および λ_p の B_c^2 に対する微係数の計算値を示す。燃料組成や減速材ボロン濃度の異なる炉心の冷却材ボイド反応度に対する生成時間の補正値(4/4 λ_c)を第13図に示す。第13図に示すように(4/4 λ_c)の値は体系の組成にはほとんど依存せず、主として反応度の大きさに依存することが分かった。生成時間の補正値は-10 %の反応度で約2 %、+4 %で-約1.5 %程度である。

UO_2 格子と PuO_2-UO_2 格子とからなる二領域炉心における冷却材ボイド反応度を統一的に整理するため、プルトニウム燃料領域の統計的重率 W_0 なる量を導入する。ただし、二領域炉心の中は炉心分布は一様炉心に比べて歪を生じるが、統計的重率を計算する際の中性子束分布は0次ベッセル関数と仮定した。このようにすれば二領域炉心における PuO_2-UO_2 格子の全領域が占める統計的重率 W_0 は

$$W_0 = \frac{1}{\pi R^2 (J_0(\lambda_0))^2} \int_0^R W(r) \left[J_0\left(\frac{\lambda_0}{R} r\right) \right]^2 r dr \quad (4-1)$$

なる式で求められる。⁽¹³⁾ここで、

R : 炉心の実効倍率

$\lambda_0, \lambda_1, \dots$: それぞれ0次, 1次の第一ベッセル関数

λ_n : 0次ベッセル関数の第1番目の零点

$$W(r) = \begin{cases} 1.0 : \text{プルトニウム燃料を格子とする領域} \\ 0.0 : \text{ウラン燃料を格子とする領域} \end{cases}$$

である。(4-1)式により求められた25-cmピッチ格子の炉心においてプルトニウム燃料を格子とした領域の統計的重率とプルトニウム燃料の置換体数との関係を第14図に示す。なお第14図には25.5cmピッチ格子の炉心における両者の関係も示した。

(4-1)式により求められたプルトニウム燃料格子の占める領域の統計的重率 W_0 に対して、炉心温度22℃における冷却材ポイド反応度 ρ_{0-22} を第15図に示す。ここで、パラメータとして置換されたプルトニウム燃料のPu富化度および減速材¹⁰B濃度を選んだ。第15図に示すように燃料中の核分裂物質の重率率がウラン燃料と等価か、またはそれ以上の重率率のプルトニウム燃料を格子とする領域を増加させれば、冷却材ポイド反応度はウラン燃料一様炉心での値に対して単調に負側へ移行してゆく。しかし、減速材¹⁰B濃度の増加は逆にその値を両者に正側へ移行させることが分る。

プルトニウム燃料による冷却材ポイド反応度抑制効果は、ウラン燃料一様炉心に対してプルトニウム燃料領域の統計的重率の増加に対する冷却材ポイド反応度の負側への減少量である負の微係数 $(\partial \rho_{0-22} / \partial W_0)$ の値によって表わされるものと考えられる。一方、¹⁰B濃度の変化による冷却材ポイド反応度の正側への移行効果も同様にして¹⁰B濃度Cに対する ρ_{0-22} の正の微係数 $(\partial \rho_{0-22} / \partial C)$ の値によって表わすことにする。これらの微係数は¹⁰B濃度の増加による冷却材ポイド反応度の正側への増分を抑制させるプルトニウム燃料の所要量を把握する指標を与える重要な意味をもつものと理解される。このため、実験を行なった範囲では ρ_{0-22} と W_0 あるいは ρ_{0-22} とCとは比例するものとみなして、 ρ_{0-22} と W_0 またはCとの関係を一次式にフィッティングさせてそれぞれの微係数の値を定めた。第8表に求められた $(\partial \rho_{0-22} / \partial W_0)$ および $(\partial \rho_{0-22} / \partial C)$ の値を示す。 $(\partial \rho_{0-22} / \partial W_0)$ の値はプルトニウム燃料のPu富化度が高いほど小さくなることを示している。このことは冷却材ポイド反応度の抑制にはウラン燃料よりプルトニウム燃料が有効であり、かつプルトニウム燃料の占める領域を増加させることが有効であることが分る。また、このような結果から約10%のPu富化度の増加は $(\partial \rho_{0-22} / \partial W_0)$ の値の変化率に換算すれば約40%以上もより負の値に変化させる効果を有することから分るようにプルトニウム燃料中のPu富化度が高いほど冷却材ポイド反応度の抑制に効果的である。なお $(\partial \rho_{0-22} / \partial W_0)$ 、 $(\partial \rho_{0-22} / \partial C)$ の値のそれぞれC、 W_0 に対する依存性には、実験を行なった範囲に関する限り有意の差は見出されない。第8表に示す $(\partial \rho_{0-22} / \partial W_0)$ 、 $(\partial \rho_{0-22} / \partial C)$ の値から冷却材ポイド反応度の抑制について次のような事が導きだすことができる。25-cmピッチ正方格子をもつ1.2wt %UO₂一様炉

心では、1ppmの¹⁰B添加による冷却材ポイド反応度の正側への増加分は、燃料中核分裂物質の重率率で1.2wt %UO₂燃料と等価な0.54wt %PuO₂-UO₂燃料を統計的重率約0.16で使用するることによって相殺できることを示す。また、より富化度が高い0.87wt %PuO₂-UO₂燃料ではさらに小さい統計的重率約0.06で反応度上昇分を抑制できることが分る。

5. 計算値の評価

5.1 計算方法

冷却材ボイド反応度を計算するにあたって、冷却材喪失前後における各単位格子の群定数は各燃料組成および各ボイド率ごとにMETHUSELAH-IIコードを用いて計算された。冷却材ボイド反応度の計算に、圧力管型格子の非均質性を考慮するため、動径方向に対する軸方向の中性子拡散の異方性を取り入れた。このため、動径方向および軸方向の拡散係数がBENOISTの理論⁽¹⁴⁾にもとづいて計算された。したがって、群定数を求める格子計算において入力された形状バックリングは、動径方向については $1.2 \text{ wt } \% \text{ ウラン燃料}$ 一級炉心で測定した中性子束分布を0次元ベッセル関数とみなして求めたバックリング、軸方向については固有値がほぼ1.0になるように調整されたバックリングである。METHUSELAH-IIコードによる格子計算におけるエネルギー領域の区分はそれぞれ高速中性子群2、共鳴中性子群1、熱中性子群2の計5群であるが、炉心計算の際にはこの5群で求められた群定数はさらに次の3群のエネルギー領域

- 1 群 (高速中性子群) : $10 \text{ MeV} \sim 5.5 \text{ keV}$
- 2 群 (共鳴中性子群) : $5.5 \text{ keV} \sim 0.625 \text{ eV}$
- 3 群 (熱中性子群) : $0.625 \text{ eV} \sim 0 \text{ eV}$

に縮約して使用された。このようなエネルギー領域で計算された各燃料の単位格子における均質化した3群定数を第9表に示す。また、第17図にMETHUSELAH-IIコードで計算された燃料組成変化ならびに冷却材ボイド率変化による単位格子内の3群の各レサージ幅における平均中性子スペクトルの一部を示す。第17図に示した中性子スペクトルは一定のバックリング ($B^0 = 8.5 \text{ m}^2$) を入力して計算されたものである。各々の格子で固有値 k_{eff} は異なっているが、 $k_{\text{eff}} = 1.0$ のときの各々の中性子スペクトルを比較してもそれらに有意の差はなかった。

冷却材ボイド反応度は、格子を均質化して求められたエネルギー3群の群定数を用いて2次元X-Y形状の拡散計算によって求められた。漏洩量の計算に使用される拡散係数としては前述したように動径方向と軸方向とで異なる値を入力した。燃料クラスタの配置は4回転対称となるので炉心は第16図に示すように1/4の断面をもつ形状を利用して拡散計算を実行した。第16図に示すように計算の際には燃料組成等が異なる領域ごとにそれぞれの単位格子を均質化し、また、炉心周辺部の各単位格子に隣接するわずかな重水反樹領域はその隣接する範囲で面積が保存するよう考慮した。炉心計算における軸方向炉心高さは境界サッチーで求められた軸方向バックリングで与えられた。冷却材ボイド反応度の計算値を実験値の β 反応度に対応させるため β/k 単位で得られた反応度は実験測定中性子発生割合 β_{eff} を用いて β 反応度に変換された。 β_{eff} は(3-6)式で定義され、まず、単位格子内の中性子束の微細分布を考慮した各単位格子の実効的 β

を求め、次に、この値にさらに炉心の重複的中性子束を考慮して各炉心の β の実効値 β_{eff} を求めた。第4表にこのようにして求めた冷却材喪失時の結果が炉心における β_{eff} の値を示す。

第17図に示すように燃料組成変化ならびに冷却材ボイド率変化によるバックリングの増加とともにかなり硬ベクトルは、冷却材ボイド率の増加またはプルトリウム富加度の増加とともにかなり硬化することが分る。これに対して、3.9 ppmの ^{10}B 添加によるバックリング変化は前者に比べると大きな変化は観測されなかった。拡散計算は、共鳴エネルギー領域の中性子群を取扱うか否かによって計算結果にかなり影響するものと予想して3群で行われたが、このような中性子スペクトルから明らかにならないように高速ならびに共鳴領域のスペクトルはほぼ平坦であるので、2群理論で十分であろうと思われる。このことから今後いくつかの炉心現象の説明には2群理論にもとづいて行うことにする。同様に、第18図にウラン燃料格子およびプルトリウム燃料格子においてCITATIONコードで得られた格子平均中性子スペクトルを示す。ここに示した中性子スペクトルも第17図の中性子スペクトルと同様に考え方で計算された。すなわち、炉心直径を3.0 mとして軸方向バックリングを 6.0 m^2 として得られたものである。この中性子スペクトルは中性子スペクトルとは異なりプルトリウム燃料格子よりウラン燃料格子における方がより硬化し、また減速材ボロン濃度が高いほど硬化することが分った。

5.2 実験値と計算値との比較

炉心温度22℃のときの実験値に対応した冷却材ボイド反応度の計算結果を第11表および第15図に示す。第11表には拡散係数を等方性であると仮定して求めた計算結果もあわせて示してある。第15図に示すように実験値と計算値との差の程度は減速材の ^{10}B 濃度や燃料の濃度にもともなうプルトリウム燃料の領域の領域の大きさ等体系の種類のほぼ一定となり、計算値は実験値を0.7~0.8\$正値に評価するものとおおむねよく一致するものと考えられる。したがって、プルトリウム燃料領域の増大にともなう生ずる冷却材ボイド反応度の減少割合を示す微係数も、実験値のその傾向をよく再現しており、特にプルトリウムの含有値が増加したことによる実験値と計算値との不一致の増大傾向は現出されないと判断される。実験値と計算値にはほぼ一定の差が生じたひとつの理由は、炉心境界部の上下部に種々の構造材および燃料延長部の存在を計算に取り入れなかったことおよび実験測定中性子発生割合を過小評価している等起因していると考えられる。前者の理由についてはこれらの物質による反応度効果が冷却材ボイド率の相異によってある値は異なることが考えられる。

第11表に示すようにこれまでの解析手法である等方拡散係数を用いた冷却材ボイド反応度の計算値⁽²⁾は異方拡散係数を用いて求めた値よりさらに実験値を正側に評価し(第11表参照)、この不一致の程度は体系が小さくなるほど大きくなる傾向が生じている。すなわち燃料の濃度にもともなうプルトリウム燃料領域の増大によって軸方向バックリングが大きくなるほど、拡散計算にお

ける偏視量の見直し精度が冷却材ポイド反応度に関与して大きく依存して行くため拡散係数の異方性の取扱が重要になるものと考えられる。METHUSELAH-II コードで HENCOIST の理論によつて算出された動座方向と軸方向のセル平均拡散係数の異方性割合 (D_x/D_y) の値は、第10表に示すように軸中性子については 0% ポイドの格子で +4~5%, 100% ポイドの格子で +2~4% であった。圧力降型格子は他の軸中性子がの格子に比べて非均質性が強い、このため、体積によつては中性子偏視量が如心の座標軸方向によつて数% 変化する。したがって、格子の非均質性によつて拡散係数の異方性を計算に取り入れると、異方性を取り入れない場合に出るべき実験値と計算値との不一致はプルトニウム燃料領域の大きさに応じて 0.4~1.4% 改善されるようになった。異方性の導入はプルトニウムの濃化度またはプルトニウム燃料の領域が大きい体系ほど不一致を改善させる効果が大いことが分る。特に 3.9 ppm ^{10}B 添加の 0.54 wt % $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料 25 体積換如心では約 90% 不一致が減少されている。

格子平均中性子スベクトルは第17図に示すように、冷却材ポイドの発生による中性子スベクトル硬化の程度は燃料組成の変化によるスベクトル硬化の程度より著しく大きい。それに応じて中性子偏視量も冷却材ポイド率変化に依存して大きく変化する。また、体系によっては中性子偏視量が如心の座標軸方向によつても大きく変化する。以上のことから、冷却材ポイド反応度の計算において、中性子偏視量を正しく評価するためにも拡散係数の異方性を取り入れることが必要であり、特にプルトニウム燃料の領域が大きい体系では中性子偏視量に対する異方性の考慮がいっそう有効である。

(小綿)

6. 振動論による解析

6.1 解析方法

物質の密度、偏度、組成等の変化によつて中性子断面積、中性子スベクトルおよび拡散係数の因子の変化によつて反応度が変化する。一般に、冷却材にポイドが発生することによつて如心の核的特性には主に次のような効果をもたらすものと考えられる。

- 1) 圧力槽内の冷却材平均密度が小さくなるため、軽水による寄生吸収が減少して中性子利用率が増大する。
- 2) 軽水による減速、熱化作用が減少するため中性子スベクトルが硬化する。
- 3) 中性子ストリーミングが発生して中性子漏洩が増加する。

これらの効果が冷却材ポイド反応度にどのように寄与しているか、そしてその寄与分がプルトニウム燃料領域の増大もしくは軽水の ^{10}B 濃度の増加によりどのような変化を受けるかを定量的、定性的に明らかにすることは冷却材ポイド反応度を物理的に考察する上で大変興味あるものである。このような理由により、振動論を用いて冷却材ポイド反応度を前述した各効果を成分に分解して考察することを試みた。⁽¹⁵⁾ ここでは、一般的に冷却材ポイド率変化によつて固有値の変化から静的反応度として得られる反応度を多群拡散理論⁽¹⁶⁾で解析する。

いま、冷却材ポイド率が $V\%$ の如心を無振動系、ポイド率が $V\%$ に変化した如心を振動系とし、ポイド率の $V \rightarrow V'$ の変化によつて生ずる冷却材ポイド反応度 $\rho_{\infty \rightarrow V'}$ を導くことにする。如心の軸方向には一様な物質で、動座方向については多領域の物質から構成される円筒形原子炉を考慮することにする。軸方向ベックリングを変化させることによつて振動が加わる前後の如心の境界調整ができるものとすれば無振動系における原子炉内の中性子の振舞いは次の固有値方程式に使う。

$$\lambda F \phi = (L + A - M) \phi \quad (6-1)$$

ここで、 ϕ は固有値 λ に対応する固有関数 (中性子束ベクトル) であり、 F, L, A, M はそれぞれ中性子の発生、減速、吸収および散乱にともなう演算子を表わす。(6-1) 式の各演算子および固有関数はそれぞれ次のようにエネルギー g 群で表示される。ただし、 $\lambda = 1/k_{\text{eff}}$ である。

$$F = \begin{bmatrix} x_1 \nu \Sigma_{f1}(r) & x_1 \nu \Sigma_{f2}(r) & \cdots & x_1 \nu \Sigma_{fg}(r) \\ x_2 \nu \Sigma_{f1}(r) & x_2 \nu \Sigma_{f2}(r) & \cdots & x_2 \nu \Sigma_{fg}(r) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_g \nu \Sigma_{f1}(r) & x_g \nu \Sigma_{f2}(r) & \cdots & x_g \nu \Sigma_{fg}(r) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 L &= \begin{bmatrix} (-\text{div } D_r, \text{grad} + D_{r1} B_1^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (-\text{div } D_{r2} \text{grad} + D_{r2} B_2^2) \end{bmatrix} \\
 A &= \begin{bmatrix} \Sigma_{n1}(r) & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma_{n2}(r) & 0 \\ 0 & 0 & \Sigma_{n3}(r) \end{bmatrix} \\
 M &= \begin{bmatrix} -\Sigma_{r1}(r) & \Sigma_{r2}^{j \rightarrow i}(r) & \Sigma_{r3}^{j \rightarrow i}(r) \\ \Sigma_{r1}^{i \rightarrow j}(r) & -\Sigma_{r2}(r) & \Sigma_{r3}^{i \rightarrow j}(r) \\ \Sigma_{r1}^{j \rightarrow k}(r) & \Sigma_{r2}^{j \rightarrow k}(r) & \Sigma_{r3}(r) \end{bmatrix} \\
 \Phi &= \begin{bmatrix} \phi_1(r, z) \\ \phi_2(r, z) \\ \phi_3(r, z) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

記号は通常使用のものである。したがって、(6-1)式に対応する無振動系の連伴方程式は次のように表わされる。

$$\lambda F^T \Phi^+ = (L + A - M^T) \Phi^+ \quad (6-2)$$

ただし、サフィックスTは転置マトリクスであることを示す。ここで、冷却材ボイド率がV%に変化した振動系の演算子 L^* 、 A^* 、 M^* および F^* がそれぞれ

$$\begin{aligned}
 L^* &= L + \delta L \quad A^* = A + \delta A \quad M^* = M + \delta M \quad F^* = F + \delta F \\
 \lambda^* F^* \Phi^{*+} &= (L^* + A^* - M^{*T}) \Phi^{*+} \quad (6-3)
 \end{aligned}$$

ただし、冷却材ボイド応度を求めるに際し、振動が加わっても軸方向ベクトリング B_2^2 は変化しないものとする。(6-2)式の両辺に Φ^{*+} 、(6-3)式の両辺に Φ^{*+} を乗じて全エネルギー、全炉心空間について積分するとともに次の随伴条件

$$\begin{aligned}
 \langle \Phi^+, F^T \Phi^+ \rangle &= \langle \Phi^+, F \Phi^+ \rangle \\
 \langle \Phi^+, M^T \Phi^+ \rangle &= \langle \Phi^+, M \Phi^+ \rangle
 \end{aligned} \quad (6-4)$$

を考慮して、それぞれの式の差をとると次式のようになる。

$$\begin{aligned}
 \lambda^* \langle \Phi^+, F^* \Phi^* \rangle &= \lambda \langle \Phi^+, F \Phi^+ \rangle \\
 &= \langle \Phi^+, \delta L \Phi^+ \rangle + \langle \Phi^+, \delta A \Phi^+ \rangle = \langle \Phi^+, \delta M \Phi^+ \rangle
 \end{aligned} \quad (6-5)$$

ここで、 $\langle \Phi^+, L \Phi^+ \rangle$ の表式は、変数を一括して ϵ で表わすことにすれば

$$\langle \Phi^+, L \Phi^+ \rangle = \int_V \Phi^+ (\epsilon) L (\epsilon) \Phi^+ (\epsilon) d\epsilon \quad (6-6)$$

で定規されるものとする。(6-6)式の積分は変数 ϵ の考えられる全領域についてなされるものとする。(6-5)式において中性子漏洩による反応度成分

$$\langle \Phi^+, L \Phi^+ \rangle = \langle \Phi^+, (-\text{div } D_r \text{grad} + D_r B_r^2) \Phi^+ \rangle$$

についてガウスの定理を用いると

$$\begin{aligned}
 \langle \Phi^+, L \Phi^+ \rangle &= \langle \Phi^+, (-\text{grad } D_r \text{grad} - D_r r^2 + D_r B_r^2) \Phi^+ \rangle \\
 &= \langle D_r | \text{grad } \Phi^+ \cdot \text{grad } \Phi^+ | \rangle + \langle \Phi^+, D_r B_r^2 \Phi^+ \rangle
 \end{aligned}$$

となるから(6-5)式は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 \lambda^* \langle \Phi^+, F^* \Phi^* \rangle &= \lambda \langle \Phi^+, F \Phi^+ \rangle \\
 &= \langle \delta D_r | \text{grad } \Phi^+ \cdot \text{grad } \Phi^+ | \rangle + \langle \Phi^+, \delta D_r B_r^2 \Phi^+ \rangle \\
 &+ \langle \Phi^+, \delta A \Phi^+ \rangle = \langle \Phi^+, \delta M \Phi^+ \rangle
 \end{aligned} \quad (6-7)$$

(6-7)式において無振動系が臨界の場合を考え、ボイド率のV→V%変化による冷却材ボイド反応度 $\rho_{v \rightarrow v'}$ を $\rho_{v \rightarrow v'} = (1 - \lambda^*)$ とおけば、 $\rho_{v \rightarrow v'}$ は

$$\begin{aligned}
 \rho_{v \rightarrow v'} &= \langle \Phi^+, (\delta F + \delta M - \delta A) \Phi^+ \rangle = \langle \delta D_r | \text{grad } \Phi^+ \cdot \text{grad } \Phi^+ | \rangle \\
 &+ \langle \Phi^+, \delta D_r B_r^2 \Phi^+ | \rangle / P
 \end{aligned} \quad (6-8)$$

なる式で表わすことができる。ただし、Pは次のように表わされる。

$$P = \langle \Phi^+, F^* \Phi^+ \rangle \quad (6-9)$$

冷却材ボイド反応度の中性子漏洩による成分ならびにそれ以外の成分をそれぞれ $(\rho_{v \rightarrow v'})_{\text{leakage}}$ 、 $(\rho_{v \rightarrow v'})_{\text{non-leakage}}$ とすれば、 $\rho_{v \rightarrow v'}$ は

$$\rho_{v \rightarrow v'} = (\rho_{v \rightarrow v'})_{\text{non-leakage}} + (\rho_{v \rightarrow v'})_{\text{leakage}} \quad (6-10)$$

である。演算子F、M、Aおよび固有関数 Φ を単純にそれぞれ $\lambda \lambda \Sigma_1$ 、 $\Sigma_2^{j \rightarrow i}$ 、 Σ_3 および ϕ で示すことにすれば、 $(\rho_{v \rightarrow v'})_{\text{non-leakage}}$ 、 $(\rho_{v \rightarrow v'})_{\text{leakage}}$ はそれぞれ

$$\begin{aligned} (\rho_{0 \rightarrow \nu})_{\text{non-leakage}} &= \langle \phi^{\dagger}, (\lambda \delta \nu \Sigma_f - \delta \Sigma_a + \delta \Sigma_s^{\dagger}) \phi^* \rangle / P \\ (\rho_{0 \rightarrow \nu})_{\text{leakage}} &= \langle \phi^{\dagger}, \text{grad } \phi^* \cdot \text{grad } \phi^* | \rangle + \langle \phi^{\dagger}, \delta D_1 B_1^2 \phi^* \rangle / P \end{aligned} \quad (6-11)$$

のように表わされる。

このように振動論を応用して導かれた冷却材ポイド反応度はポイド発生にともなう中性子漏洩、正味の中性子発生割合および中性子スペクトルの変化が炉心全体での中性子発生と消滅のバランスを乱す各反応度成分に分離されることが示された。振動論で導かれた冷却材ポイド反応度を表わす式の算数子および固有関数として格点計算で得られる各反応度断面値、拡散係数ならびに拡散計算で得られる中性子束、随伴中性子束を用いて数値解析を実行すれば、冷却材ポイド反応度とともにそれを構成する各反応度成分についての各パラメータ依存性を考察することができる。

6.2 冷却材ポイド反応度の成分

冷却材ポイド反応度は燃料領域、減速材ポロン濃度ならびにプルトニウムとウランとの二領域炉心ではプルトニウム燃料領域の大きさ等のパラメータに大きく依存することが明らかになった。一般に、冷却材ポイド反応度はポイド発生前後の格子の物質組成による正味の中性子発生割合や中性子スペクトルの変化にも、とづく反応度成分(中性子非漏洩効果)ならびに炉心の幾何学的形状と拡散係数の変化に依存した中性子漏洩による反応度成分(中性子漏洩効果)とからなる。実際ではそれぞれの効果を単独に測定することは困難である。しかし、冷却材ポイド反応度に体系の大きさによって中性子漏洩効果が異なるため、漏洩が無視できるような体系を考えた場合、または格子の物質に依存した量として考えた場合には中性子非漏洩効果が重要になってくる。

中性子非漏洩効果を前述の2)~3)の効果に対応させて考えれば、(6-12)式に示すように中性子スペクトルの変化に関する成分 $(\rho_{0 \rightarrow \nu})_{\text{spectral}}$ および正味の中性子発生率の変化に関する成分 $(\rho_{0 \rightarrow \nu})_{\text{product}}$ として考えることができる。

$$\begin{aligned} (\rho_{0 \rightarrow \nu})_{\text{spectral}} &= \langle \phi^{\dagger}, \delta \Sigma_s^{\dagger} \phi^* \rangle / P \\ (\rho_{0 \rightarrow \nu})_{\text{product}} &= \langle \phi^{\dagger}, (\delta \Sigma_a + \lambda \delta \nu \Sigma_f) \phi^* \rangle / P \end{aligned} \quad (6-12)$$

また、中性子漏洩効果は(6-13)式に示すように動径方向と軸方向との面成分 $(\rho_{0 \rightarrow \nu})_{\text{leakage}}$ 、 $(\rho_{0 \rightarrow \nu})_{\text{leakage}}$ からなるものと考えられる。

$$\begin{aligned} (\rho_{0 \rightarrow \nu})_{\text{leakage}} &= \langle \phi^{\dagger}, \text{grad } \phi^* \cdot \text{grad } \phi^* | \rangle / P \\ (\rho_{0 \rightarrow \nu})_{\text{leakage}} &= \langle \phi^{\dagger}, \delta D_1 B_1^2 \phi^* \rangle / P \end{aligned} \quad (6-13)$$

このように冷却材ポイド反応度 $\rho_{0 \rightarrow \nu}$ の変化を前述1)~3)の効果に対応した以上のような成分の変化の観点から分析することにする。

ここで注意しておくべきことは振動論で導かれた $(\rho_{0 \rightarrow \nu})_{\text{non-leakage}}$ 成分は漏洩のある体系の

中性子束および随伴中性子束を重みにして計算されるため厳密な意味では漏洩による効果を含んでいないとはいえない。同様に、 $(\rho_{0 \rightarrow \nu})_{\text{leakage}}$ 成分についてもポイド発生による断面値変化が生じた体系の中性子束と随伴中性子束を重みにして計算しているため、中性子漏洩のみの効果であるとはいえない。すなわち $(\rho_{0 \rightarrow \nu})_{\text{non-leakage}}$ については中性子束分布によって漏洩による効果が、そして $(\rho_{0 \rightarrow \nu})_{\text{leakage}}$ については断面値によって非漏洩による効果がそれぞれ含まれていることを示唆しているが、ここでは各体系に応じた断面値および中性子束分布をもつものとしてそれぞれの成分を求めた。

6.3 数値解析の方法とその結果

冷却材ポイド反応度の計算値は実験値ならびにその傾向をよく再現していると考えられるので、METHUSELAH-II および CITATION 両コードで得られる結果に振動論を応用して計算コード(付録1)により各パラメータ変化に応じた冷却材ポイド反応度を計算した。振動論による数値解析はMETHUSELAH-II および CITATION 両コードで得られた結果をそのまま使用するために中性子エネルギーを3群とし、また動径方向には多領域の炉心として実行された。(6-8)式の積分、積分を全炉心にわたって実行するには、更に既製のコードを使用したり、または新たに厳密に計算するコードを開発しなければならず、計算が複雑になる。ここでは、振動計算より簡単なモデルで、かつできるだけ精度よく実行させるため、種々の燃料格子の配置ならびに中性子束分布の空間積分、積分を行うにあたって次のような近似を行った。

1) 炉心方位角 θ 方向の中性子束分布の異方性およびプルトニウム燃料領域の形状を考慮して、炉心形状はX-YからR- θ に置き換え、そして炉心の方位角を45°間隔でさらに8分割し、その各々の範囲では中性子束分布は一様である。

2) プルトニウム燃料とウラン燃料とからなる二領域炉心は炉心中心に対して4回対称であるので、第20図のように各方位角45°の範囲内でプルトニウム燃料領域の面積が保存されるように円弧で置き換え、その範囲内では群定数も一様である。

3) 動径方向中性子束分布は方位角の90°方向および45°方向のものを代表して用いた。すなわち、それぞれの方向を中心線としてその両側22.5°の範囲では中性子束分布の方位角依存性はない。

4) $\text{grad } \phi$ のうち、中性子束分布の動径方向に関する勾配 $|\partial \phi / \partial r|$ については空間メッシュ点間における中性子束の微係数として求めた。また方位角方向に関する勾配 $|\partial \phi / \partial \theta|$ については、常以外の微係数をもつ境界の長さが炉心半径に比べて小さく、かつ燃料の組成が多少異なる境界付近においても $|\partial \phi / \partial \theta| < |\partial \phi / \partial r|$ であるので $|\partial \phi / \partial \theta|$ に関する $\langle |\partial \phi / \partial \theta|^2 \rangle$ の項は2次の微少量であるので無視した。

このような方法により(6-12)、(6-13)式に示す成分を0.54wt %PuO₂-UO₂燃料の表層領域の大きさに基づいて減速材"B濃度を変化させて求め、その結果を第13表に示す。この結果、

移動論で導いた冷却材ボイド反応度の値が炉心の構成物質に依らず固有値計算で求められた値と 0.03 %Δ/k 以内で一致することから、このような体系における移動計算では上記の近似がほぼ成立していると考えられる。(4-11)式で求めたプルトニウム燃料格子的占める統計的比率 W_0 と $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{non-leakage}}$ または $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{leakage}}$ との関係を減速材ボイド濃度 $\phi_{0 \rightarrow v}$ として第20図に示す。同様にして $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{leakage}}$ または $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{leakage}}$ については第21図に、そして $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{spectral}}$ または $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{product}}$ については第22図にそれぞれ示す。

6.4 中性子漏洩効果と非漏洩効果

$(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{leakage}}$ および $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{leakage}}$ について定量的、定性的に考察してある。第20図に示すようにプルトニウム燃料格子的領域の増大もしくは減速材¹⁰B濃度の増加により生ずる $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{non-leakage}}$ および $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{leakage}}$ はともに冷却材ボイド反応度 $\rho_{0 \rightarrow v}$ の変化傾向に対応して変化する事が明らかになった。すなわち、 $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{non-leakage}}$ および $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{leakage}}$ はともにプルトニウム燃料領域の増大とともに負側へ移行するが、減速材へのボロンの添加に対してはいずれの成分も正側へ移行する。しかし、0.54 wt %PuO₂-UO₂ 燃料領域を増加させたことにより生ずる冷却材ボイド反応度の負側への変化分のうち、負の中性子漏洩効果の増大による割合は約15%であり、また減速材への¹⁰B添加により生ずる冷却材ボイド反応度の正側への変化分のうち約35%が中性子漏洩効果の減少によるものであることが分る。25-cmピッチの単位格子では冷却材の占める体積率は7%以上に及ぶことから、そして体系の小さい炉心ではストリーミングによる中性子漏洩効果の寄与が大きいものと予想されるが、冷却材ボイド反応度の主たる変化分は物質組成にほとんどづいて中性子非漏洩効果の変化によるものであることが移動論による数値解析から示された。次に、 $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{leakage}}$ について考察してみる。プルトニウム燃料領域の統計的比率または減速材¹⁰B濃度の値如何に拘らず、ボイドの発生によって当然中性子漏洩が増加することから $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{leakage}}$ は負の効果をもっている。臨界炉心の大きさを減速材水位によって調整させて $\rho_{0 \rightarrow v}$ を測定しているため、(6-13)式に示すように $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{leakage}}$ は主に軸方向バックリングの大きさに依存している。プルトニウム燃料領域の増大は臨界体積を小さくするため、負の効果は増加し、逆に減速材¹⁰B濃度の増加によってこの負の効果は減少する。炉心直径が定められている炉心では、第22図に示すようにボイド発生による動径方向漏洩効果 $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{leakage}}$ は燃料組成や減速材¹⁰B濃度の変化による動径係数や中性子束分布の変化にはほとんど依存せず約-0.6 %Δ/k の一定値であることが分る。したがって、このような場合ボイド発生による負の漏洩効果 $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{leakage}}$ の変化量はほぼ軸方向漏洩効果 $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{leakage}}$ の変化値に対応していることが示された。

$(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{non-leakage}}$ については、第20図および第22図に示すように、ボイド発生にともなう中性子スペクトル効果 $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{spectral}}$ および正味の中性子発生効果 $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{product}}$ の相反する符号をもち2成分の競合によって $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{non-leakage}}$ の符号も変化する事が分る。すなわち、

$(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{non-leakage}}$ の値は、1.2 wt %UO₂・・・機炉心では正であるが、プルトニウム燃料領域の増大とともに急速に負側へ移行し、吸収断面積が1.2 wt %UO₂ 燃料より約14%増加させた0.54 wt %PuO₂-UO₂ 燃料の・・・機炉心では負の値になる。このことは、0.54 wt %PuO₂-UO₂ 燃料格子では負の漏洩効果の寄与がなくなると冷却材ボイド反応度は負になりうることを示している。

以上の結果から、体系の大きい炉心ではボイド発生により生ずる負の漏洩効果の寄与は小さいので、核燃料物質の単位原子数密度あたりの非漏洩効果がウランより負側の値をもつプルトニウムの利用は冷却材ボイド反応度の低減に大きな効果を発揮することが分る。

6.5 中性子非漏洩効果の成分

6.1節(1), (2) の効果に対応する $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{non-leakage}}$ の2つの成分 $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{spectral}}$ と $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{product}}$ について考察する。これら2成分とプルトニウム燃料領域の統計的比率との関係を示した第22図から次のようなことが推察される。

ボイドの発生によって軽水の中性子自己遮蔽効果が減少するため熱中性子利用率が増加し、 $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{product}}$ は正の値をとる。一方、中性子の減速効果が減少すると第17図に示すように中性子スペクトルが硬化し、核分裂しにくくなるエネルギー領域の中性子が増加するので $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{spectral}}$ は負の値になるものと予想される。このように $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{non-leakage}}$ の符号はこれらの相反する符号をもち2成分の絶対値如何によって定まってくる。

次に、両者の成分の減速材¹⁰B濃度ならびにプルトニウム燃料領域の変化に対する感度を考察してみる。 $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{product}}$ が減速材¹⁰B濃度の影響をほとんど受けないけれども、この値はプルトニウム燃料領域の増大とともにやや負側へ移行する。 $(\rho_{0 \rightarrow v})_{\text{product}}$ が減速材¹⁰B濃度の影響を受けにくい理由は、減速材が燃料集合体から空間的に離れているため、¹⁰B濃度が数ppm変化しても、ボイド発生にともなう熱中性子利用率は変化しにくいものと考えられる。また、PuO₂-UO₂ 燃料中のプルトニウム割合の増加は燃料の平均吸収断面積 Σ_a^f を増加させるけれども、ボイド発生にともなう冷却材吸収断面積 Σ_a^c の減少量 $\Delta \Sigma_a^c$ と Σ_a^f との比 $(\Delta \Sigma_a^c / \Sigma_a^f)$ はプルトニウム割合の増加に応じて小さくなる。一方、単位格子内の熱中性子利用率 f の増加率 $(\Delta f / f)$ は

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\left[\left(\frac{\Sigma_a^c \phi^c}{\Sigma_a^f \phi^f} \right)^{\text{void}} - \left(\frac{\Sigma_a^c \phi^c}{\Sigma_a^f \phi^f} \right)^{\text{non-void}} \right] \frac{V^c}{V^f}}{1 + \left(\frac{\Sigma_a^c \phi^c}{\Sigma_a^f \phi^f} \right)^{\text{void}} \frac{V^c}{V^f}} \quad (6-14)$$

で表わされる。ここで、サフィックス c, f はそれぞれ冷却材、燃料であり、 ϕ , V はそれぞれ平均中性子束、体積を表わす。(6-14)式において冷却材ボイド率が増大した格子内では $(\Sigma_a^c \phi^c / \Sigma_a^f \phi^f)^{\text{void}} \ll 1.0$ であり、そして $(V^c / V^f) \approx 1.0$ であるので(6-14)式は

$$\frac{dI}{I} \sim - \left(\frac{\Sigma_a^c \phi^c}{\Sigma_a^f \phi^f} \right)^{\text{non-void}} \cdot \frac{V^c}{V^f} \quad (6-15)$$

で近似される。 (dI/I) は負の値をもつ。プルトニウム富化度の増加に応じて冷却材と燃料における吸収反応率の割合 $(\Sigma_a^c \phi^c / \Sigma_a^f \phi^f)^{\text{non-void}}$ の絶対値は小さくなり、それに応じて I の増加率も小さくなる。このことから、プルトニウム割合が増加するほど、ボイド発生による熱中性子利用効率の増加率が減少する $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{product}}$ は小さくなる。単位格子における $(6-15)$ 式の説明と同様に、炉心全体でプルトニウム燃料領域が増加すれば、ボイド発生にともなう炉心平均熱中性子利用効率の増加率が小さくなるので $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{product}}$ の正側への移行が抑制されることになる。

$(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{spectral}}$ については、プルトニウム燃料領域の増大とともに単側に負側へ、また減速材 ^{10}B 濃度の増加とともに両側に正側へ各々移行することが第22図から示された。ボイド発生による減速断面面積の減少量の燃料組成および減速材 ^{10}B 濃度依存性は第9表の結果より無視できるとみなされるにも拘らず、 $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{spectral}}$ は燃料組成や ^{10}B 濃度に強く依存する。この理由はたとえ ^{10}B 濃度変化によって中性子スペクトルが変化しなくても重率関数の随伴中性子スペクトル(第18図)の変化に依存するものと考えられる。前述のように、中性子スペクトルから2群理論による解析で十分ながことが分ったのでボイド発生による減速断面面積 Σ_r の減少量 $\delta \Sigma_r$ の燃料組成や減速材 ^{10}B 濃度による変化量を無視すれば、 $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{spectral}}$ が中性子インポートランスの割合に依存する理由は2群拡散理論によって明らかにできる。一次の摂動論によると $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{spectral}}$ は

$$\begin{aligned} (\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{spectral}} &= \frac{\left\langle \begin{pmatrix} \phi_1^+(r) \phi_2^-(r) \\ \phi_1^-(r) \phi_2^+(r) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +\delta \Sigma_r / 0 \\ -\delta \Sigma_r / 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_1^-(r) \\ \phi_2^-(r) \end{pmatrix} \right\rangle}{\left\langle \begin{pmatrix} \phi_1^+(r) \phi_2^-(r) \\ \phi_1^-(r) \phi_2^+(r) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & \nu \Sigma_{sc}(r) \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_1^-(r) \\ \phi_2^-(r) \end{pmatrix} \right\rangle} \quad (6-15) \\ &= \frac{\left\langle -\delta \Sigma_r \phi_1^+(r) \phi_2^-(r) (1 - \phi_1^+(r) / \phi_2^-(r)) \right\rangle}{\left\langle \phi_1^+(r), \nu \Sigma_{sc}(r) \phi_2^-(r) \right\rangle} \end{aligned}$$

なる式で表わされる。ここで、 ϕ, ϕ^+ はそれぞれ無摂動系の中性子束、随伴中性子束であり、 $\langle \cdot \cdot \rangle$ は空間積分を示す。 $(6-15)$ 式から (ϕ_1^+ / ϕ_2^+) の値は $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{spectral}}$ の値を変化させる大きな因子であることが分る。この結果、 $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{spectral}}$ は (ϕ_1^+ / ϕ_2^+) が小さくなるほどより負側へ移行することが分る。ここで、 (ϕ_1^+ / ϕ_2^+) の値が炉心の物質組成の変化とともにどのように変化するかを定性的に把握するために体系を一領域炉心とすれば中性子インポートランスの割合 (ϕ_1^+ / ϕ_2^+) は

$$\frac{\phi_1^+}{\phi_2^+} = \frac{1}{k_{\infty}} (1 + B^2 (D_1 / \Sigma_1)) \quad (6-16)$$

なる式で表わされる。ここで、 D_1, Σ_1 はそれぞれ熱中性子群の拡散係数、全断面積であり、 B^2

はバックリングである。 $(6-16)$ 式に示すように B^2 および D_1 を一定と考えれば、 (ϕ_1^+ / ϕ_2^+) の値は主に Σ_1, k_{∞} の値により定まるものと考えられる。第12表にエネルギー境界を0.625 eVとして各群の燃料格子で計算された中性子インポートランスの割合 (ϕ_1^+ / ϕ_2^+) の値を示した。第12表および $(6-16)$ 式から分るように、1.2 wt % UO_2 格子を0.54 wt % $\text{PuO}_2 \cdots \text{UO}_2$ 格子に置換すれば、または、プルトニウム濃化度を増加させれば k_{∞} および Σ_1 が増加するので (ϕ_1^+ / ϕ_2^+) の値は小さくなり、一方減速材 ^{10}B を添加させれば Σ_1 の増加より k_{∞} の減少が利いてくるので (ϕ_1^+ / ϕ_2^+) の値は大きくなる。前述、第18図に示す随伴中性子スペクトルもこの傾向を裏付けていることが分る。

このように、随伴中性子スペクトルの軟化が冷却材ボイド反応度を負側へ移行させる理由は次のように考えられる。高いエネルギーの中性子インポートランスが減少すれば、核分裂しやすい熱エネルギー領域へ減速してゆくべき中性子密度が減少してゆくことに対応するため反応度を負側へ移行させるものと予想される。したがって、第22図に示すようにウラン燃料領域に対してプルトニウム燃料領域が増加すれば $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{spectral}}$ を負側へ移行させ、逆に、減速材への ^{10}B の添加はこれを正側へ移行させることになる。以上の考察により、冷却材ボイド反応度の負側への抑制効果は $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{spectral}}$ の変化と密接に対応しており、随伴中性子スペクトルを軟化させるプルトニウム燃料領域の増大は $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{spectral}}$ を負側へ移行させる効果が大きいことが示された。

6.6 冷却材ボイド反応度の物質組成依存性

以上の考察ならびに第20図の結果から、炉心の物質組成を表わすパラメータの変化量に対する $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{non-leakage}}$ あるいは $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{leakage}}$ の変化量の割合の大小関係は、プルトニウム燃料領域の統計的重率 W_0 を変数にとれば

$$\begin{aligned} \left| \partial (\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{non-leakage}} / \partial W_0 \right| &> \left| \partial (\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{leakage}} / \partial W_0 \right| \\ \left| \partial (\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{non-leakage}} / \partial C \right| &> \left| \partial (\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{leakage}} / \partial C \right| \end{aligned}$$

の関係にあり、また、減速材 ^{10}B 濃度Cの変数に対しても同様に

の関係になる。このように、炉心の物質組成変化にともなう生ずる冷却材ボイド反応度の2成分 $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{non-leakage}}, (\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{leakage}}$ の変化分のうち物質組成の変化の影響を受けやすいのは前者の中性子漏洩効果よりも中性子非漏洩効果であることが理解できる。このため、冷却材ボイド反応度の低減には中性子非漏洩効果による成分を抑制させることが重要である。

また、中性子非漏洩効果のうちでは、中性子生成効果 $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{product}}$ は物質組成の影響を受けにくい。減速材中のボロンは微量でも反応度をかなり低下させるものの、4 ppm 程度の添加はこの値は変化しないことが分る。これに対し、主に随伴中性子スペクトルに依存する中性子スペクトル効果 $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{spectral}}$ は物質組成変化に対する影響を大きく受けることが分る。25-cmドッチ格子体系において、プルトニウム燃料領域の増大にともない生ずる $(\rho_{0 \rightarrow v})^{\text{non-leakage}}$ の負

側への変化分は $(\rho_{n \rightarrow v})_{\text{spectral}}$ の負側への移行に負うところが大きく、また、減速材への ^{10}B 添加により生ずるこの効果の正側への変化分は $(\rho_{n \rightarrow v})_{\text{spectral}}$ の正側への著しい移行に起因するものであることが示された。以上の考察により、中性子スペクトル効果は冷却材ポイド反応度の値を評価する上で主要な因子であることが理解される。

(小堀)

7. 結 論

25cm 格子ピッチの炉心における冷却材喪失時ポイド反応度の炉心物質組成に対する依存性ならびに MEYHUSELAH-II, CITATION 両コードによる理論解析の結果が明らかにされた。さらに振動論の応用によって物質組成変化による冷却材ポイド反応度の変化分における種々の反応度成分についての理解が深まった。以上の研究により以下のことが明らかになった。

- (1) 22.5cm ピッチ炉心と同様に 25cm ピッチ炉心においても、燃料中の核分裂物質の重積率が等価であればプルトニウム燃料はウラン燃料に比べて冷却材ポイド反応度をより負側へ移行させる効果が大さいが、減速材への ^{10}B の添加はこれをより正側へ移行させる効果を有する。
- (2) BENOIST 理論にもとづく拡散係数の異方性を考慮した理論値は異方性を考慮しない場合と比較して実験値との不一致が大幅に改善され、体系の種類に依存せず 0.8\$ 以内に実験値と一致する。
- (3) 振動論を用いた計算値は固有値計算で求められる静的反応度とよく一致しており、冷却材ポイド反応度の詳細な解析に有効な手法である。
- (4) 冷却材ポイド反応度の符号如何に拘らず、冷却材喪失にともなう中性子漏洩効果は必ず負であるが、中性子非漏洩効果は炉心の物質組成によって符号が変化する。後者はプルトニウム富化度またはプルトニウム燃料領域の増大に対して負側に、また減速材 ^{10}B 濃度の増加に対して正側に作用する。
- (5) 冷却材ポイド反応度の主たる変化分は中性子非漏洩効果による変化分、すなわち種々の物質組成変化に起因する反応度変化分である。この効果はさらに相異なる符号の2つの成分に区別できる。正の成分は冷却材喪失にともなう反応断面積の変化に基づき、負の成分は中性子スペクトルの変化に基づくものである。種々の物質組成変化に対するこれら両成分の変化率は、前者より後者が大きいので、これが中性子非漏洩効果の変化分の主要な因子となっている。
- (6) 中性子非漏洩効果のうち中性子スペクトルの変化に基づく反応度成分の負側への移行の主たる要因は、随伴中性子スペクトルの軟化によるものである。

参 考 文 献

- (1) 村松 雅, 他: PNC 報告書, SN 941 74-15, (1974).
- (2) 小堀 榮樹, 他: PNC 報告書, ZN 941 76-00, (1976).
- (3) 若林 利男, 他: PNC 報告書, SN 941 78-13, (1978).
- (4) ALPHEA, A.: AEEW-R 155, (1963).
- (5) FOWLER, T. B., et al.: ORNL-TM-2486, Rev. 2, (1969).
- (6) 和田 淳男, 他: PNC 報告書, SN 841-77-28, (1977).
- (7) 飯島 一敬, 他: PNC 報告書, SN 941 74-22, (1974).
- (8) GLASSTONE, S., EDLUND, M.C.: "The Element of Nuclear Reactor Theory", (1952).
- (9) SIMMONS, B. E., KING, J. S.: Nucl. Sci. Eng., 3, (1958).
- (10) 柴公倫: 日本原子力学会物理炉工学分科会要旨集, B 1, (1972).
- (11) AMANO, F.: J. Nucl. Sci. Technol., 6 (12), (1969).
- (12) 柴公倫, 他: PNC 報告書, SN 941 75-50, (1965).
- (13) 柴公倫: PNC 報告書, SN 941 77-195, (1977).
- (14) BENJIST, P.: AERE-Trans. 842, (1958).
- (15) GOINJOHN, A. J., PUMIANING, G. G.: "Reactor Physics, Vol. II", (1966).
- (16) GLASSTONE, S.: "Nuclear Reactor Theory", (1970).
- (17) 大塚益比古: "原子炉物理", (1972).

謝 辞

本研究を遂行するにあたり多大の御支援ならびに御指導をしていただきました前重水臨界実験室長宮脇良夫氏に深く感謝の意を表します。

また其縁の遂行においては磯村和利氏(現教習建設事務所)をはじめとする重水臨界実験室員の方々の献身的な御協力をいただきました。さらに、計研コードの作成にあたっては市原康氏(現三菱重工(株)神戸造船所)の尽力によるものであります。ここに深く感謝いたします次第です。

本報告書をまとめるにあたっては幾多の貴重なコメントをいただいた重水臨界実験室長八谷雄祐氏に深く感謝いたします。

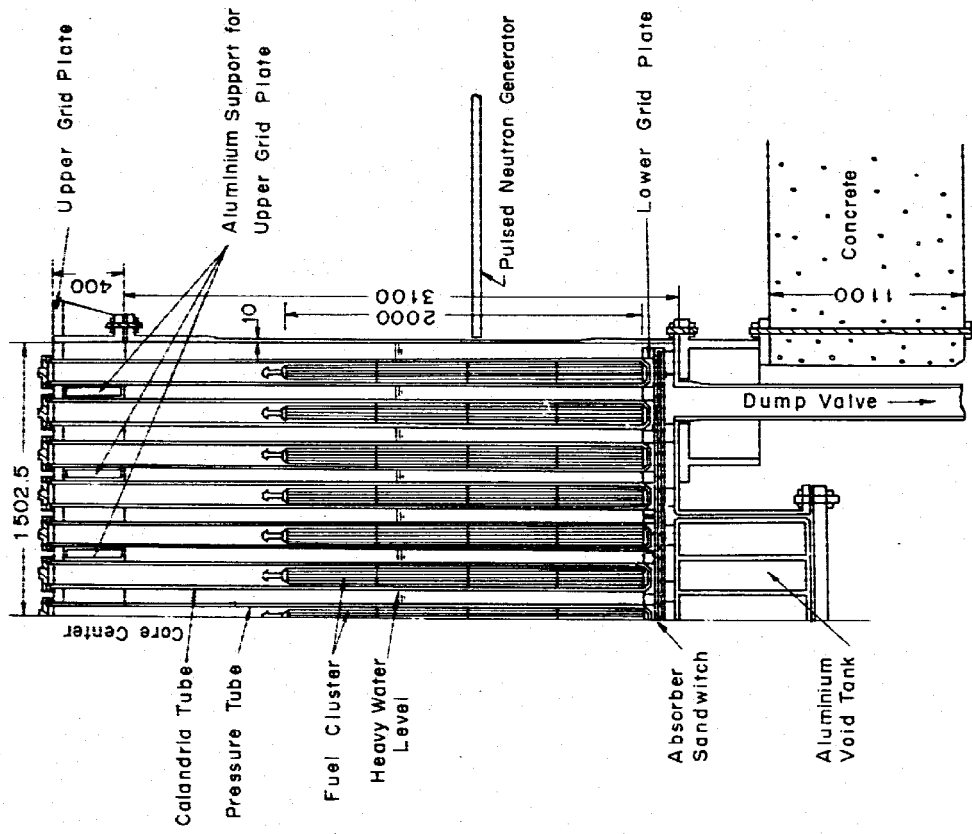


Fig.1 Schematic drawing of the core configuration of Deuterium Critical Assembly (DCA)

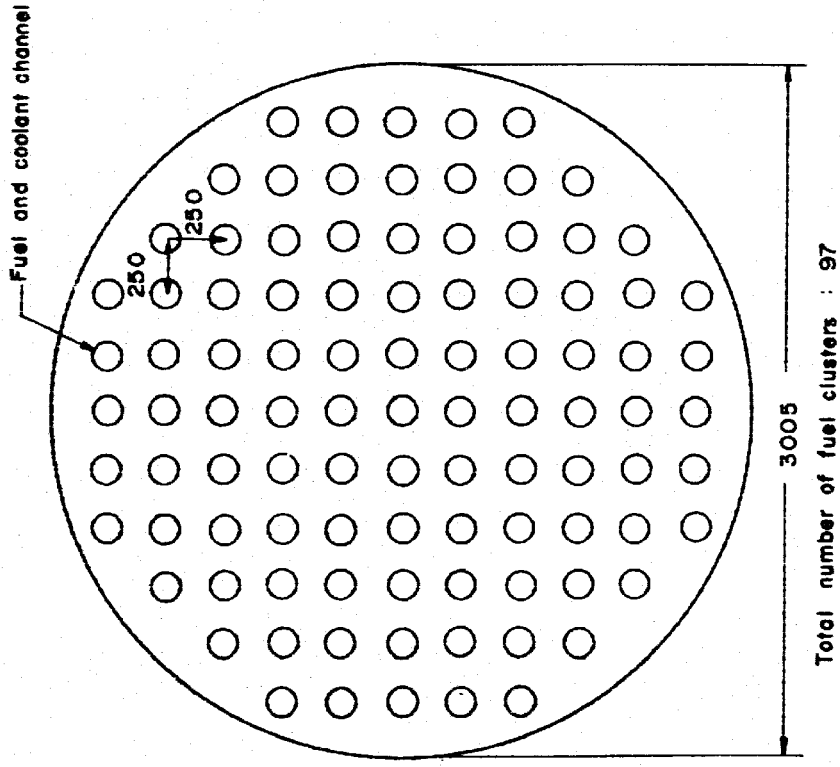


Fig.2 Configuration of DCA lattice having 25-cm pitch

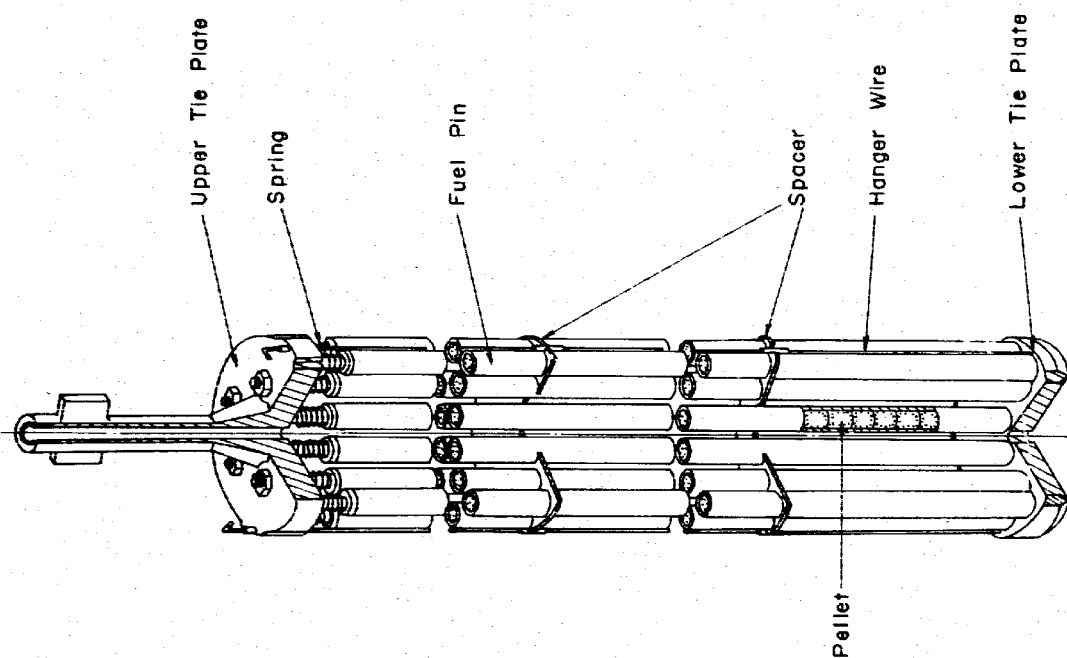


Fig. 3 Schematic drawing of a fuel cluster

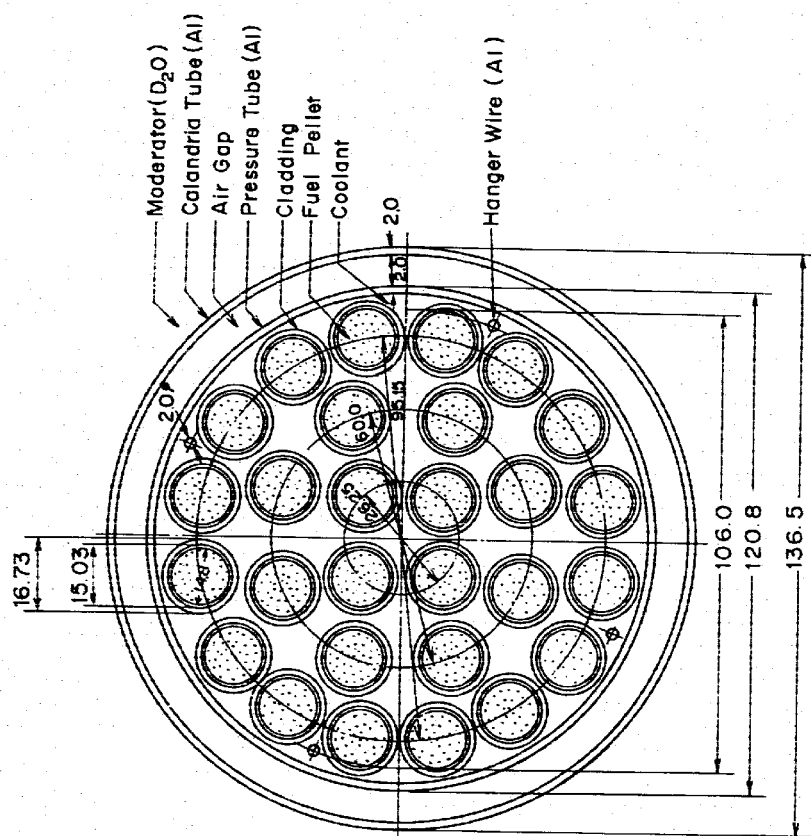


Fig. 4 Cross sectional view of fuel assembly

● position of 1/2" ϕ BF₃ detector

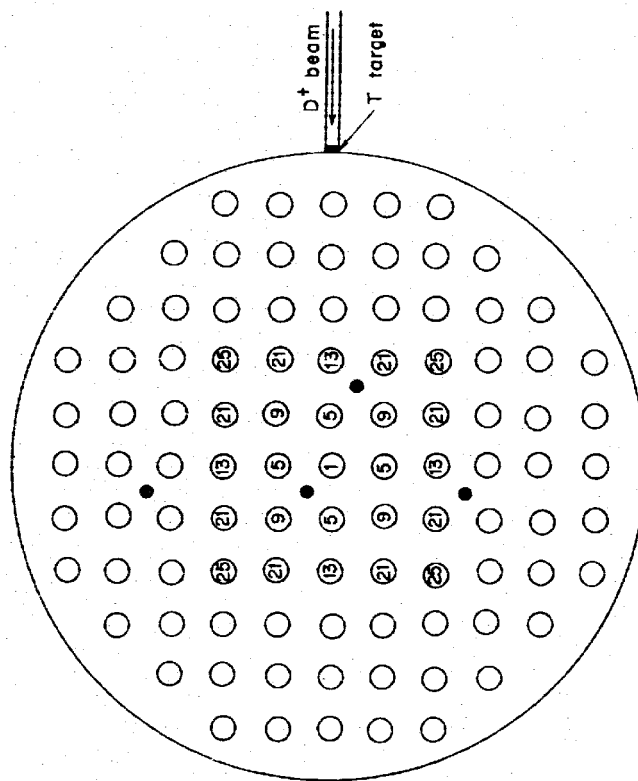


Fig.5 Loading patterns of plutonium fuel clusters which are represented by numbered positions. Plutonium fuel clusters are placed at positions numbered from 1 to N_i in the plutonium fuel region composed of N clusters.

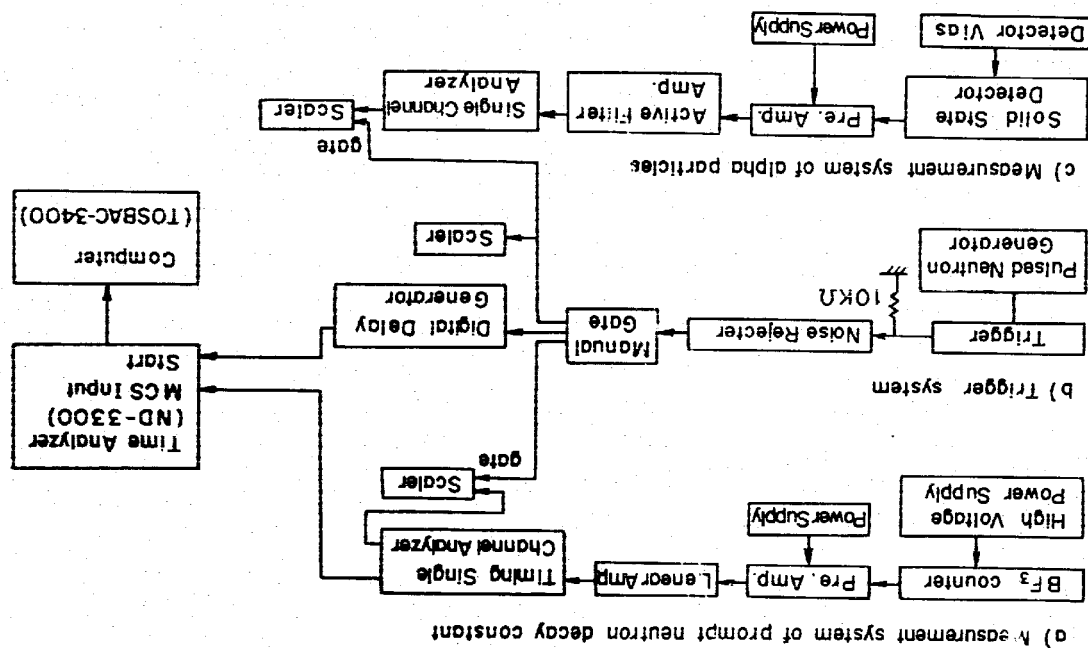


Fig. 6 Block diagram of measurement system

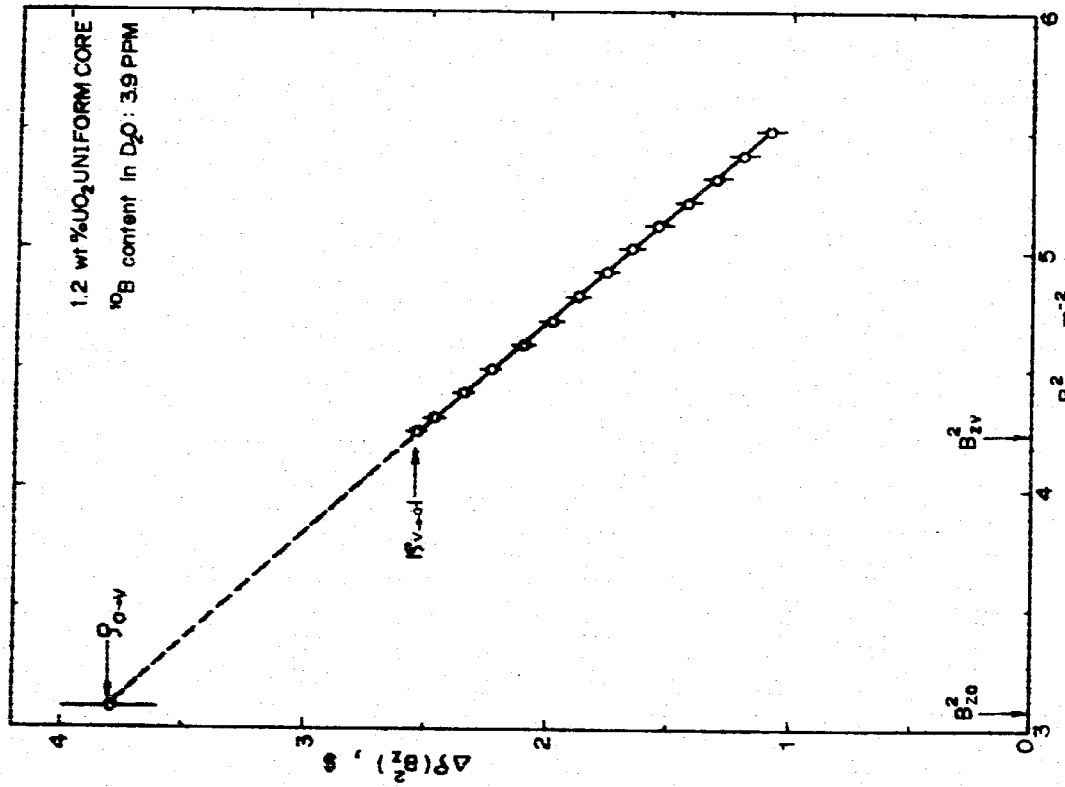


Fig. 7 Change in difference of subcritical reactivities as a function of axial buckling

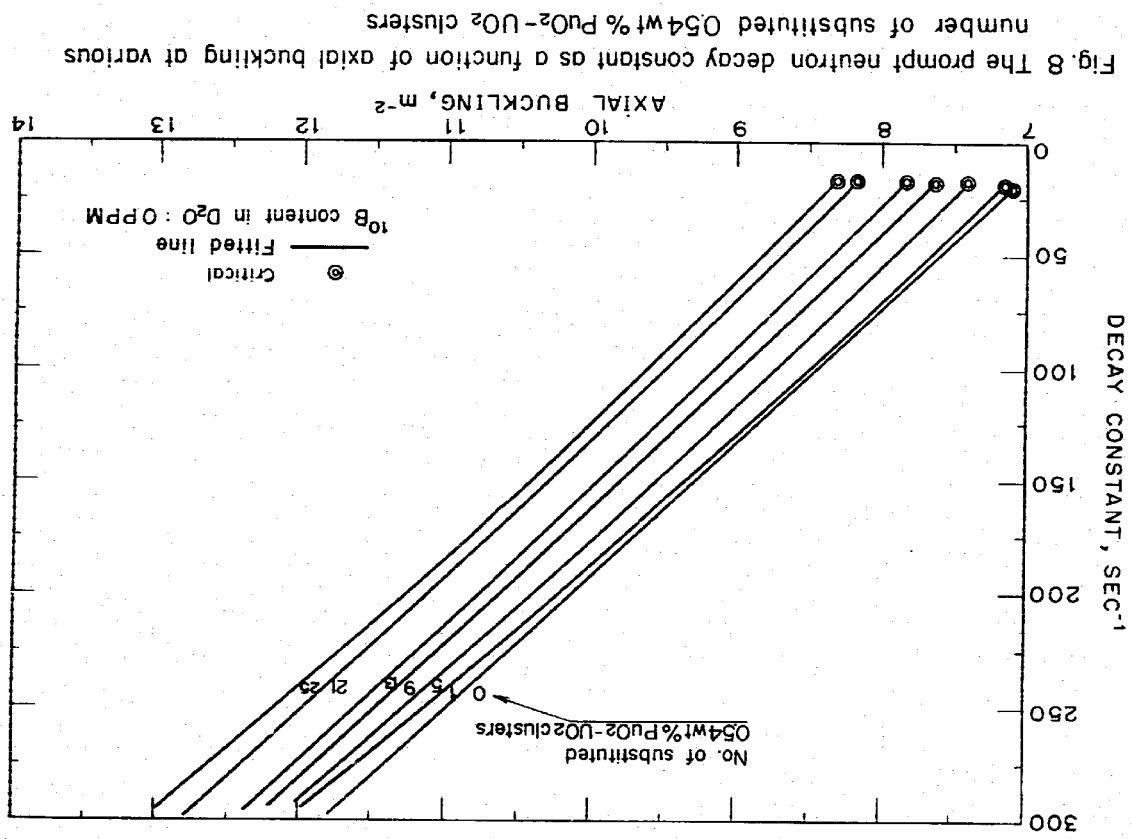


Fig. 8 The prompt neutron decay constant as a function of axial buckling at various number of substituted 0.54 wt% PuO_2 - UO_2 clusters

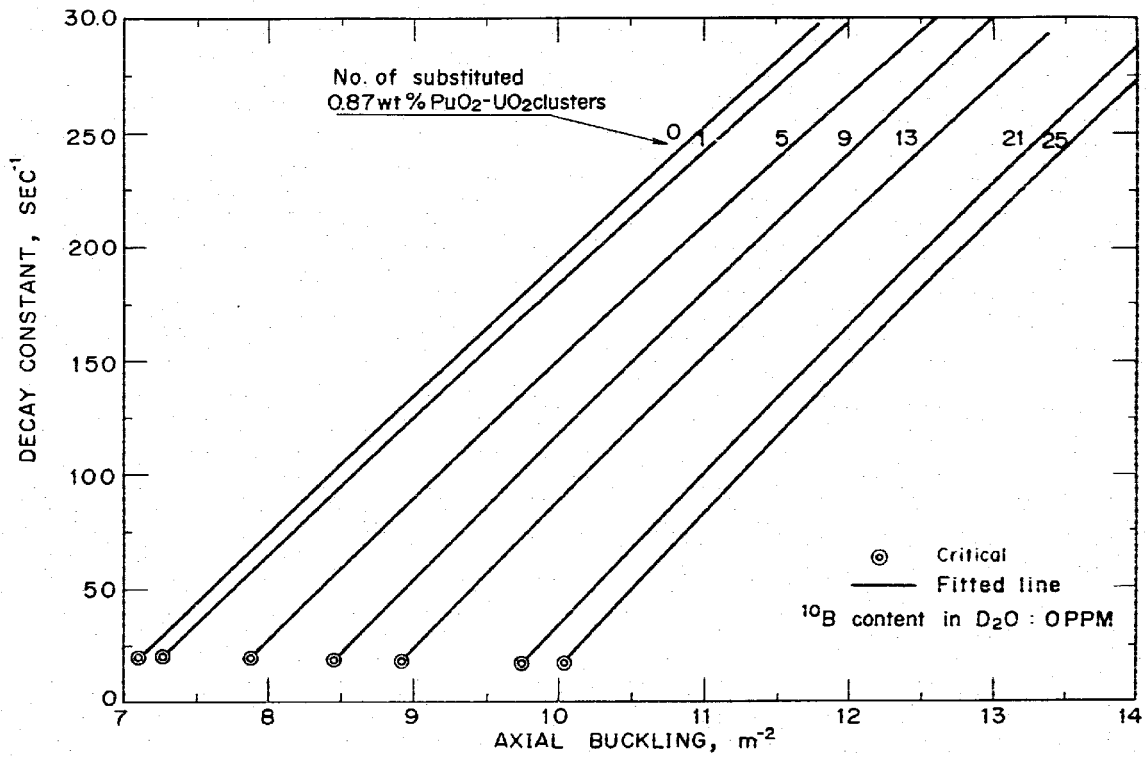


Fig. 9 The prompt neutron decay constant as a function of axial buckling at various number of substituted 0.87wt% PuO₂-UO₂ clusters

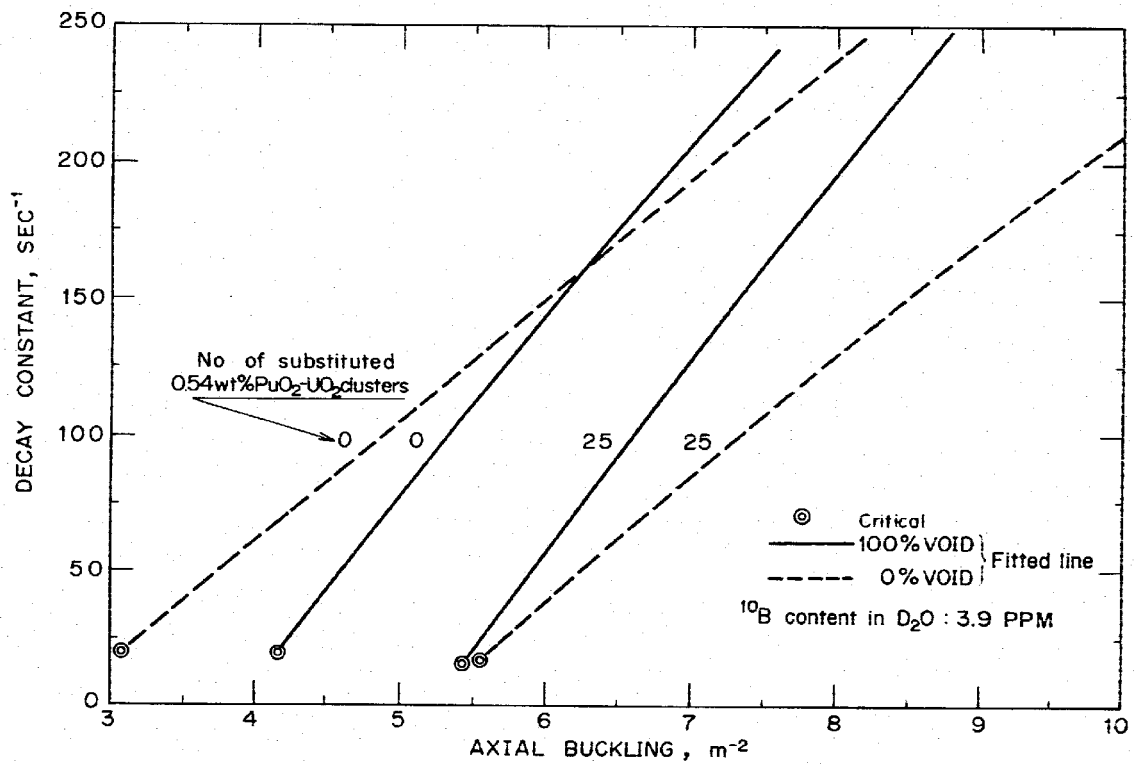


Fig.10 The prompt neutron decay constant as a function of axial buckling at various void fraction and substituted 0.54wt% PuO₂-UO₂ clusters

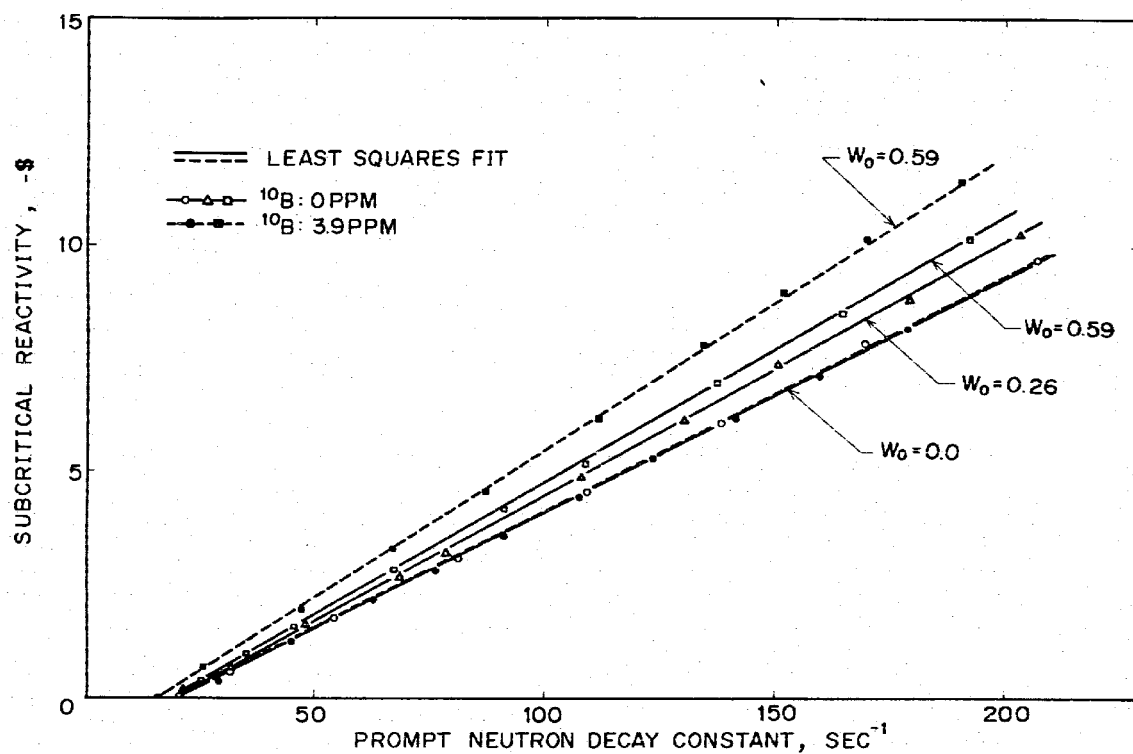


Fig.11 Relation between subcritical reactivity and prompt neutron decay constant at different statistical weight of 0.54wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ fueled region

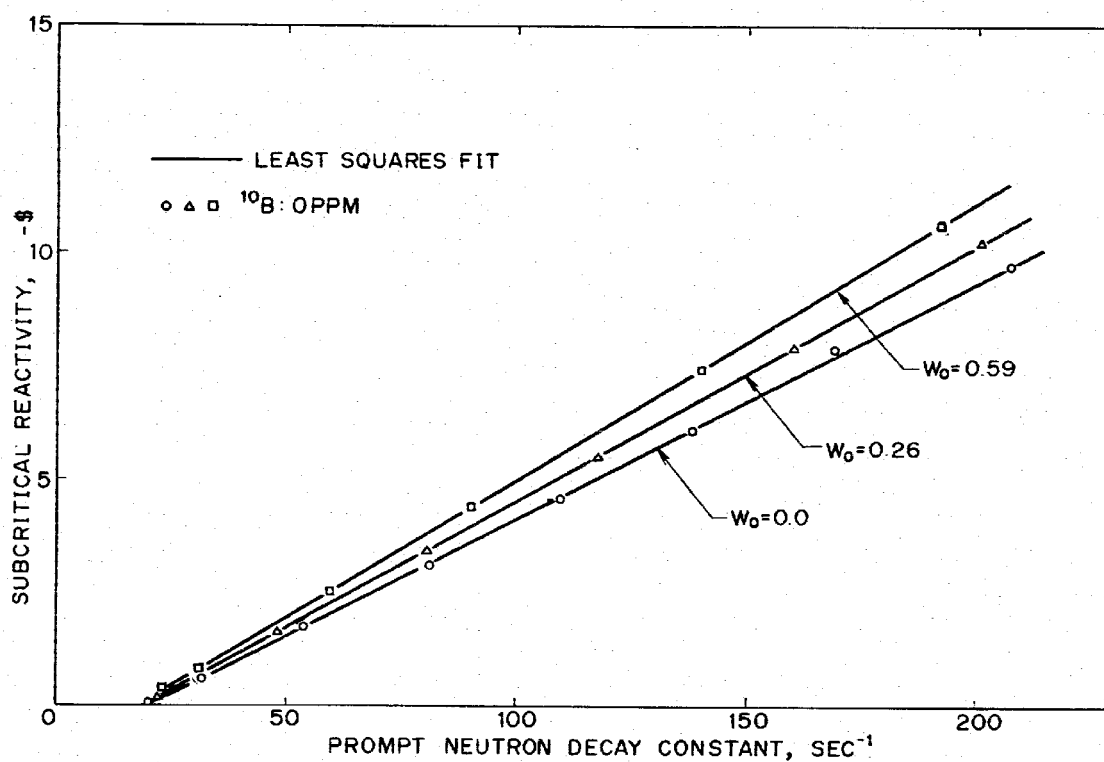


Fig.12 Relation between subcritical reactivity and prompt neutron decay constant at different statistical weight of 0.87wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ fueled region

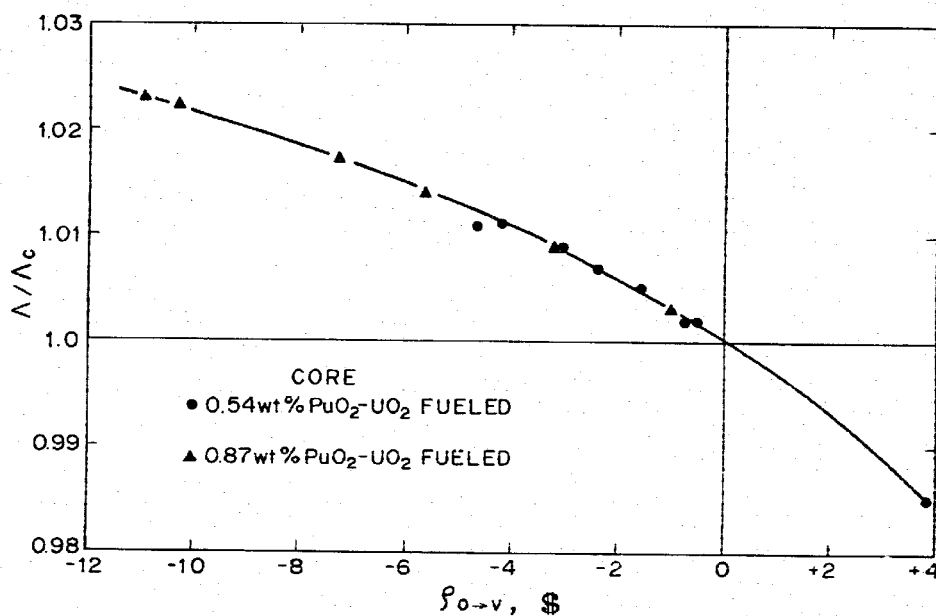


Fig. 13 Change in correction for prompt generation time with loss-of-coolant reactivity

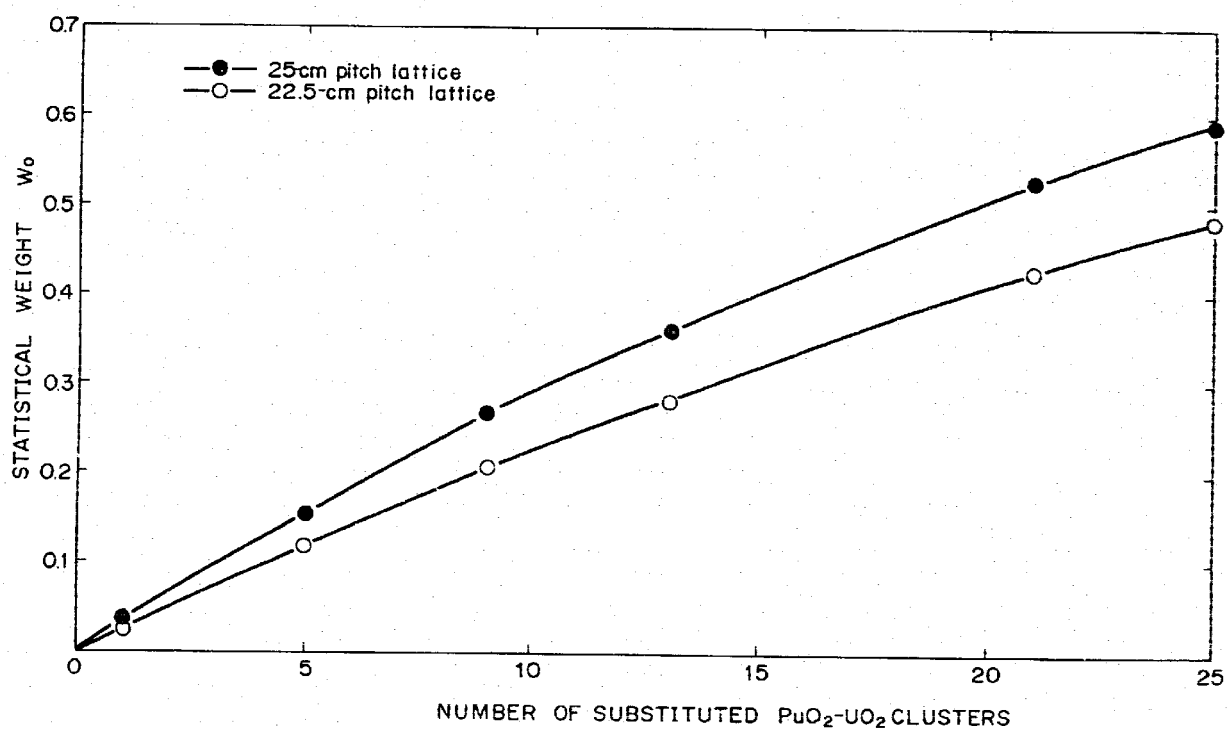


Fig. 14 Relation between number of substituted PuO₂-UO₂ clusters and statistical weight of PuO₂-UO₂ fueled region

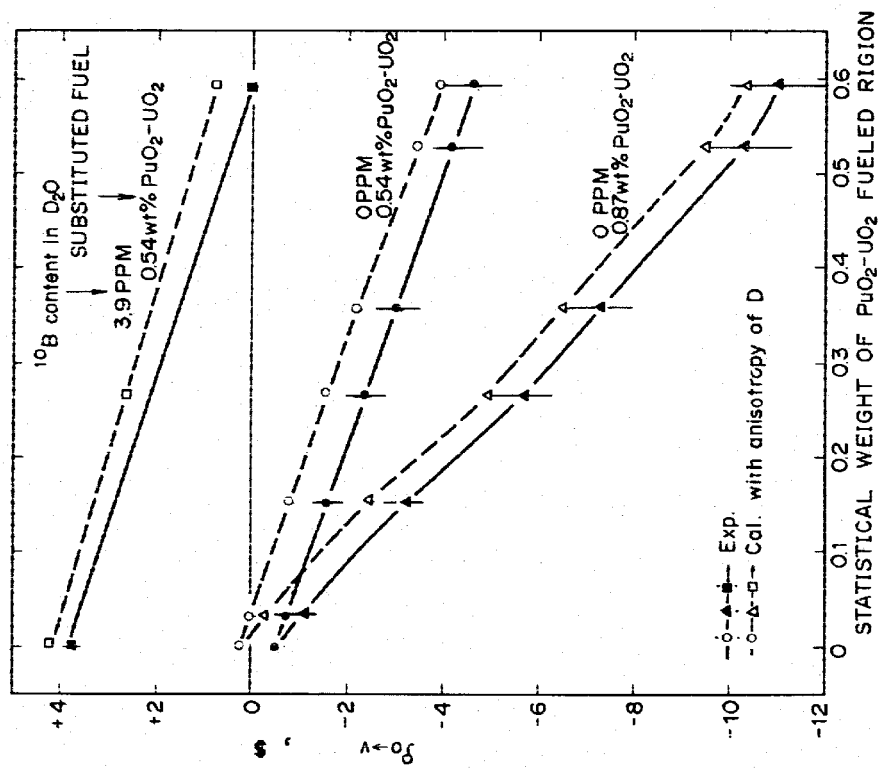


Fig.15 Change in loss-of-coolant reactivity as a function of statistical weight of PuO_2-UO_2 fueled region

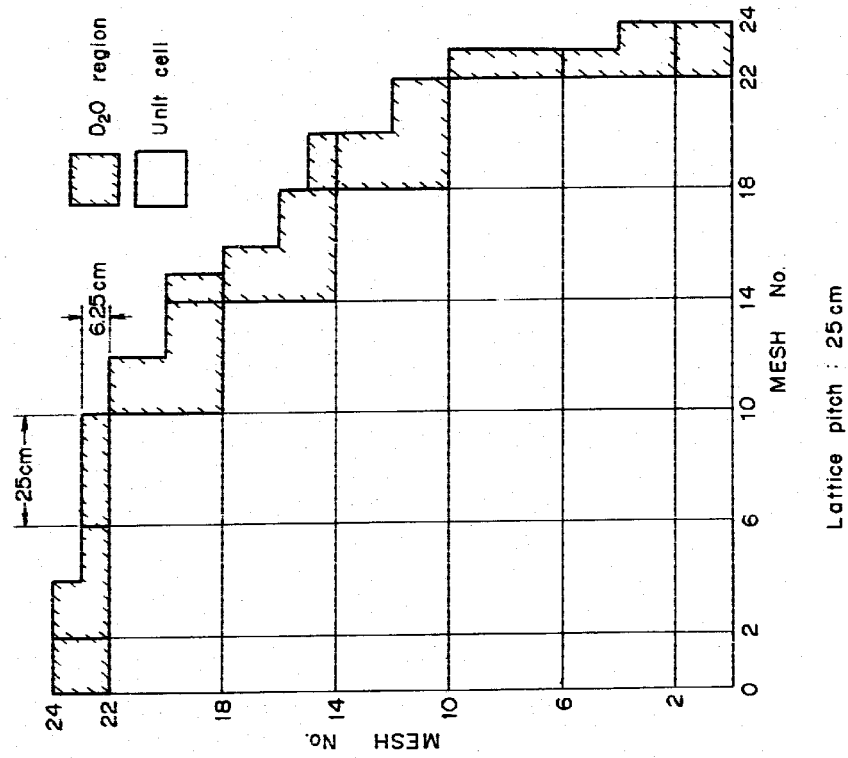


Fig.16 Geometrical model of quarter cross-section of 25-cm pitch lattice for diffusion calculation

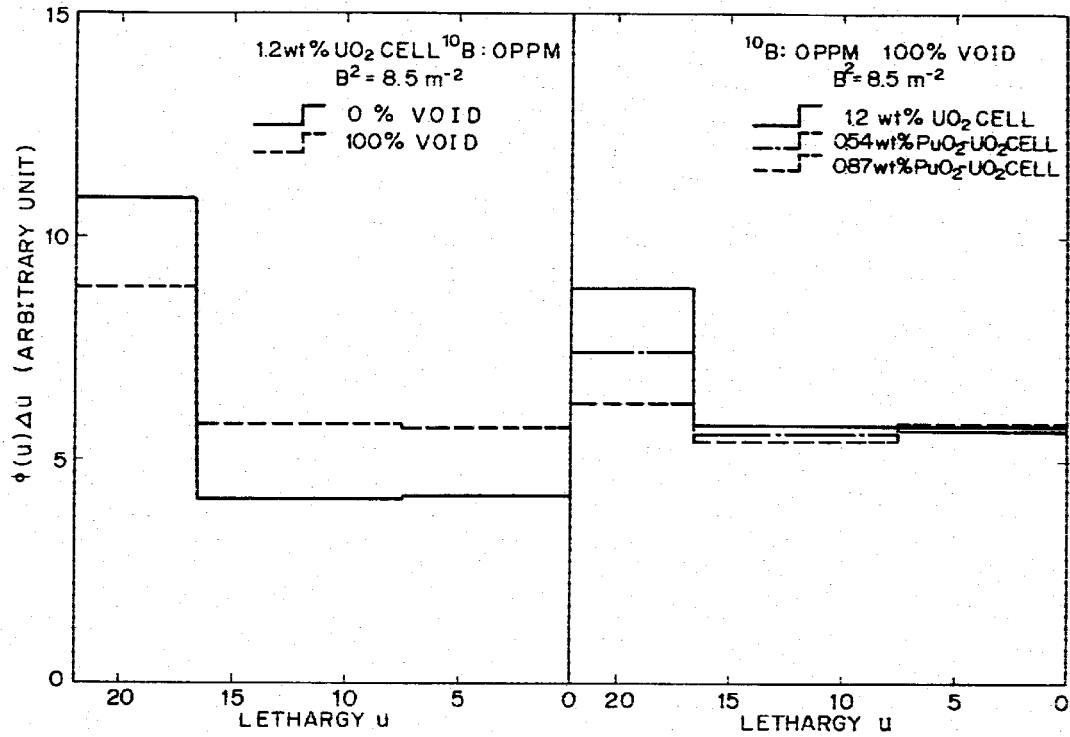


Fig. 17 Change in cell averaged neutron spectra with coolant void fraction and fuel composition by METHUSELAH-II

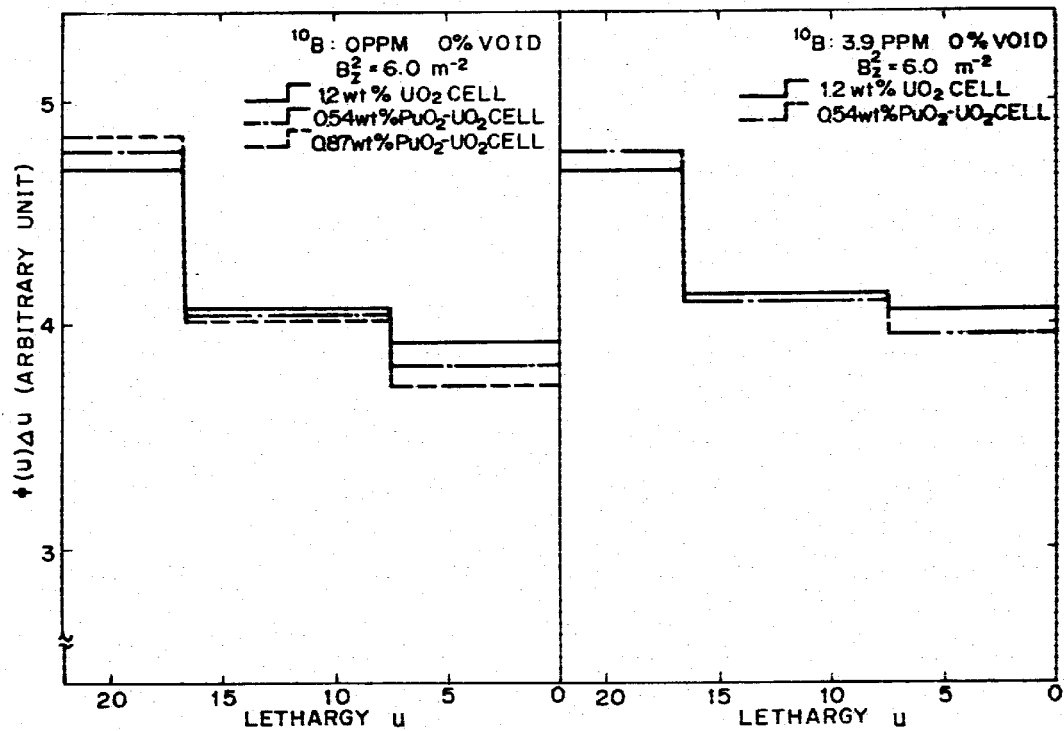


Fig. 18 Change in cell averaged adjoint neutron spectra with fuel composition by METHUSELAH-II and CITATION

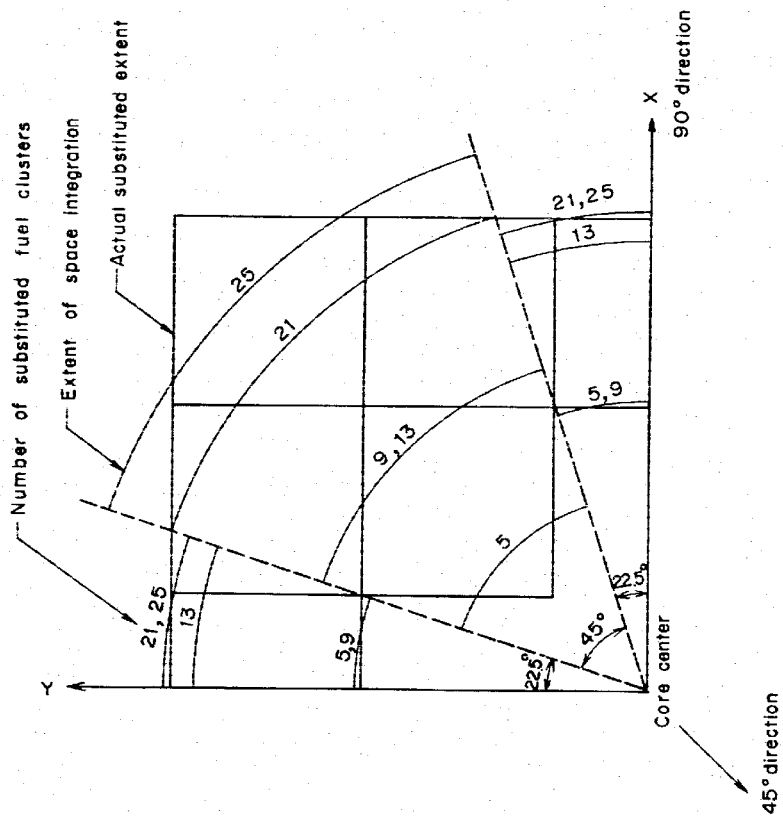


Fig. 19 Extent of space integration in analysis of loss-of-coolant reactivity by perturbation method

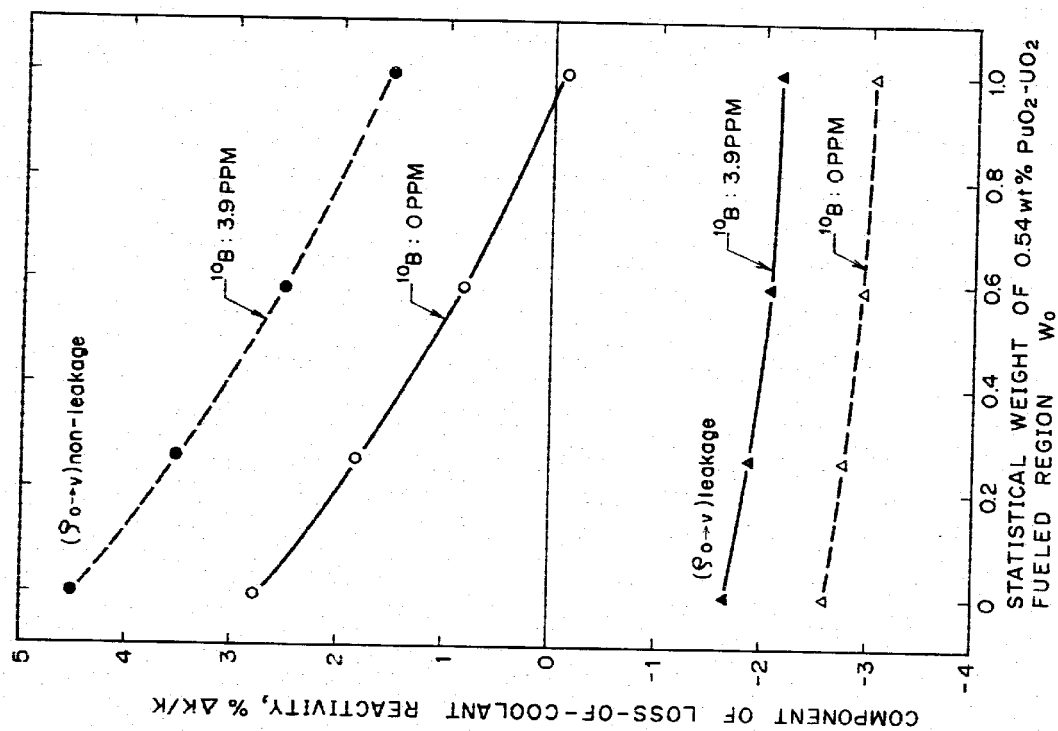


Fig. 20 Non-leakage and leakage components of loss-of-coolant reactivity by perturbation method

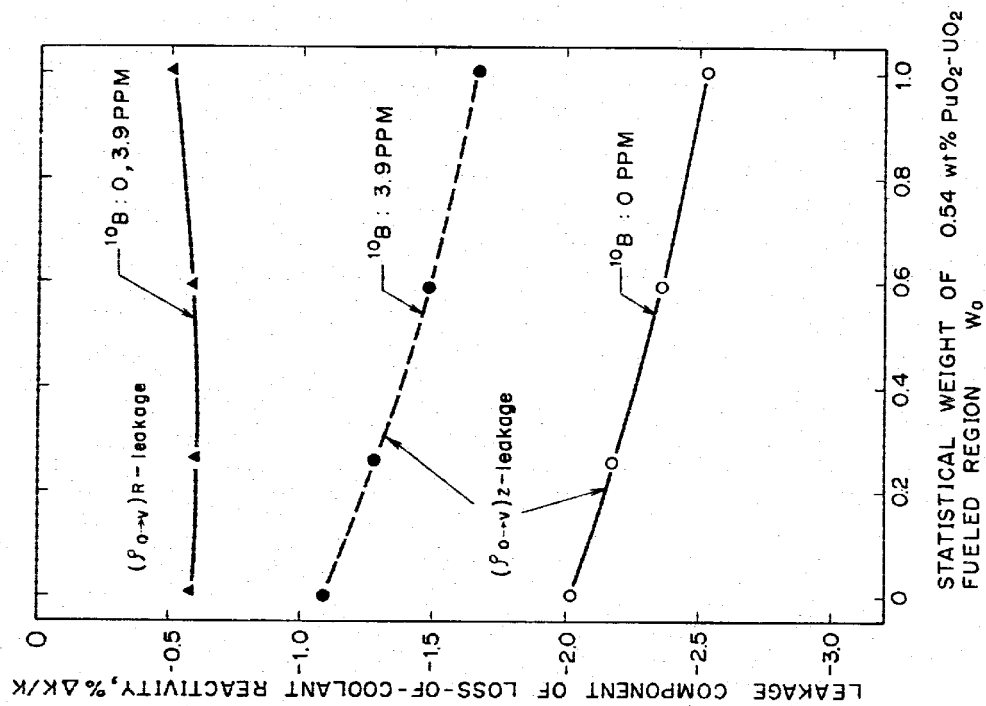


Fig. 21 Radial and axial leakage components of loss-of-coolant reactivity by perturbation method

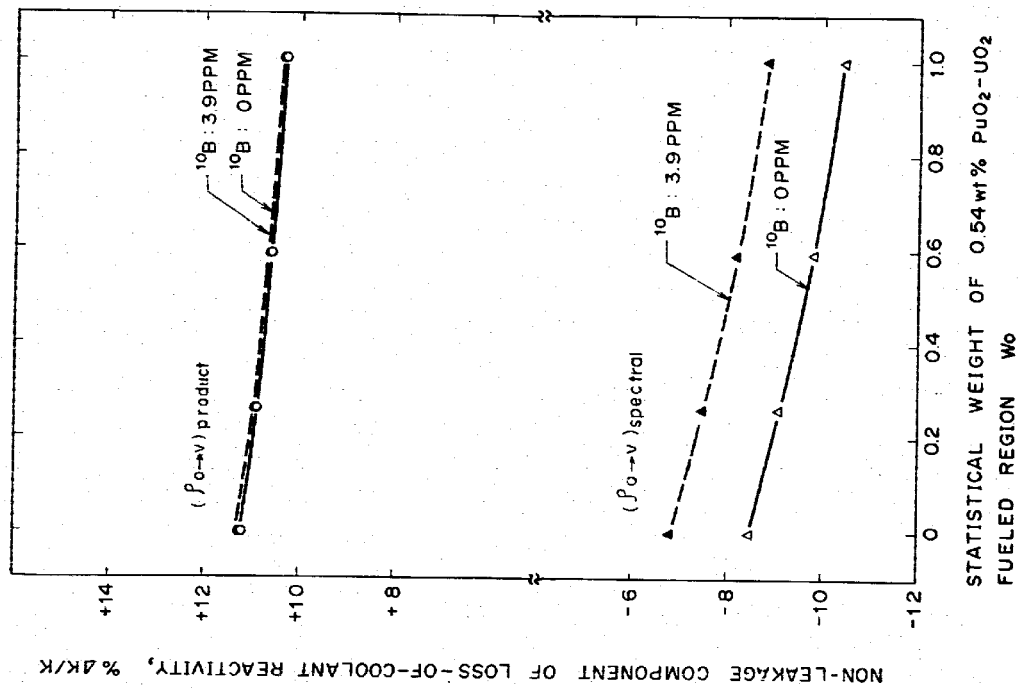


Fig. 22 Non-leakage components of loss-of-coolant reactivity by perturbation method

Table 1 Specification of DCA core

(a)

Fuel		Outer dia. (cm)	Material	Density (g/cm ³)
0.54 wt% PuO ₂ -UO ₂	Pellet	1.469	PuO ₂ -UO ₂	10.17
	Gap	1.506	Helium	—
	Sheath	1.668	Zry-2	6.523
0.87 wt% PuO ₂ -UO ₂	Pellet	1.472	PuO ₂ -UO ₂	10.17
	Gap	1.506	Helium	—
	Sheath	1.668	Zry-2	6.523
1.2 wt% UO ₂	Pellet	1.480	UO ₂	10.36
	Gap	1.503	Helium	—
	Sheath	1.673	Al-Mg alloy	2.674

(b)

Material	Inner dia. (cm)	Thickness (cm)	Material	Density (g/cm ³)
Pressure tube	11.68	0.2	Al-Mg alloy	2.674
Gap	12.08	0.59	Air	—
Calandria tube	13.25	0.2	Al-Mg alloy	2.674
Moderator	13.65	—	99.45 mol% D ₂ O	1.1045

Table 2 Composition of fuel pellet

Pellet	Nuclide	Proportion (wt%)		Atomic No. density (x10 ²⁴ /cm ³)
		Pu	whole	
0.54 wt% PuO ₂ -UO ₂ *	U-235	—	0.6214	0.0001620
	U-238	—	86.782	0.02233
	Pu-238	0.021	0.000102	0.000000026
	Pu-239	90.360	0.4304	0.0001103
	Pu-240	8.640	0.04115	0.0000105
	Pu-241	0.915	0.004359	0.000001708
	Pu-242	0.064	0.000303	0.000000077
	O-16	—	12.12	0.04640
0.87 wt% PuO ₂ -UO ₂ *	U-235	—	0.6194	0.0001615
	U-238	—	86.503	0.02226
	Pu-238	0.019	0.000145	0.000000037
	Pu-239	90.314	0.6849	0.0001755
	Pu-240	8.682	0.06584	0.0000168
	Pu-241	0.918	0.00696	0.000001769
	Pu-242	0.067	0.00051	0.000000129
	O-16	—	12.12	0.04641
1.2 wt% UO ₂	U-235	—	1.057	0.0002806
	U-238	—	86.793	0.02275
	O-16	—	12.150	0.04738

* Date of analysis : 23 August 1971

Table 3 Temperature coefficient of α_c , β and B_c^2 calculated by METHUSELAH-II

^{10}B content (ppm)	Enrichment PuO_2 (PuO_2+UO_2) (wt%)	PuO_2-UO_2 1.2wt% UO_2		No. of loaded fuel clusters	Statistical weight W_0	β_c/AT ($\text{sec}^{-1}/^\circ\text{C}$)	$\beta\beta/\text{AT}$ ($\text{sec}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}/^\circ\text{C}$)	$\beta\beta_c^2/\text{AT}$ ($\text{m}^{-2}/^\circ\text{C}$)
		0	0.54					
0	—	0	97	0	0.014	0.077	-0.011	-0.011
	0.54	1	96	0.0326	0.014	0.077	-0.011	-0.011
		5	92	0.1529	0.015	0.079	-0.011	-0.011
		9	88	0.2636	0.016	0.080	-0.010	-0.010
		13	84	0.3569	0.016	0.082	-0.010	-0.010
		21	76	0.5277	0.018	0.084	-0.010	-0.010
		25	72	0.5923	0.018	0.085	-0.010	-0.010
	0.87	1	96	0.0326	0.014	0.078	-0.011	-0.011
		5	92	0.1529	0.016	0.081	-0.011	-0.011
		9	88	0.2636	0.017	0.083	-0.011	-0.011
		13	84	0.3569	0.019	0.086	-0.010	-0.010
		21	76	0.5277	0.021	0.090	-0.010	-0.010
25		72	0.5923	0.022	0.091	-0.010	-0.010	
3.9	—	0	97	0	0.018*	0.062*	-0.002*	-0.006
	0.54	1	96	0.0326	0.015	0.083	-0.005	-0.005
		5	92	0.1529	0.012	0.075	-0.006	-0.006
		9	88	0.2636	0.012	0.075	-0.006	-0.006
		13	84	0.3569	0.012	0.062*	-0.002*	-0.002*
		21	76	0.5277	0.012	0.075	-0.006	-0.006
		25	72	0.5923	0.015	0.083	-0.005	-0.005

* Value at 0 % void fraction

Table 4 Calculated values used in correction for prompt generation time

Void fraction : 100 %

^{10}B content (ppm)	Enrichment PuO_2 (PuO_2+UO_2) (wt%)	No. of loaded clusters		β_{eff} (%)	β_{pc} (msec)	$\frac{\partial \beta_{\text{pc}}}{\partial B_c^2}$ (msec/m 2)
		PuO_2-UO_2	1.2wt% UO_2			
0	0.54	0	97	0.691	0.456	-5.16
		1	96	0.679	0.454	-5.14
		5	92	0.649	0.446	-4.99
		9	88	0.621	0.439	-4.86
		13	84	0.599	0.434	-4.74
		21	76	0.561	0.424	-4.55
		25	72	0.548	0.421	-4.46
	0.87	1	97	0.676	0.451	-5.12
		5	96	0.629	0.433	-4.85
		9	88	0.585	0.416	-4.66
		13	84	0.556	0.405	-4.44
		21	76	0.508	0.386	-4.05
		25	72	0.495	0.381	-3.90
3.9	0.54	0	97	0.686*	0.474*	-4.58*
		25	72	0.691	0.429	-4.76
				0.538	0.398	-4.12

* Value at 0 % void fraction

Table 5 Axial extrapolation length in 25-cm pitch lattice

^{10}B content (ppm)	Void fraction (%)	Axial extrapolation length λ (cm)
0	0	10.1 $\pm$ 1.0
	100	12.4 $\pm$ 1.0
3.9	0	10.1 $\pm$ 1.0
	100	12.4 $\pm$ 1.0

Table 6 Parameters evaluated from relation between prompt decay constant and axial buckling

(a) ^{10}B content in D_2O : 0 ppm

Void fraction : 100 %

Enrichment PuO_2 $(\text{PuO}_2 + \text{UO}_2)$ (wt%)	No. of loaded clusters		Critical moderator level (cm)	Axial buckling at critical $B_{2v}^2 (\text{m}^{-2})$	α_c (sec^{-1})	β ($\text{sec}^{-1} \cdot \text{m}^2$)	γ ($\text{sec}^{-1} \cdot \text{m}^4$)
	$\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$	1.2wt% UO_2					
—	0	97	105.40	7.11 ± 0.12	19.76 ± 0.54	60.32 ± 0.74	-0.24 ± 0.19
0.54	1	96	105.03	7.16 ± 0.12	19.35 ± 0.42	63.09 ± 0.69	-1.29 ± 0.22
	5	92	103.02	7.41 ± 0.13	18.54 ± 0.51	63.68 ± 0.82	-0.97 ± 0.27
	9	88	101.24	7.64 ± 0.13	18.35 ± 0.56	62.55 ± 0.94	-0.52 ± 0.31
	13	84	99.80	7.84 ± 0.14	18.26 ± 0.43	63.93 ± 0.55	-0.65 ± 0.14
	21	76	97.44	8.18 ± 0.15	17.68 ± 0.71	64.67 ± 1.20	-0.86 ± 0.40
	25	72	96.50	8.32 ± 0.15	17.58 ± 0.29	66.49 ± 0.51	-1.50 ± 0.18
0.87	1	96	104.15	7.27 ± 0.13	19.80 ± 0.22	61.40 ± 0.33	-0.57 ± 0.09
	5	92	99.53	7.88 ± 0.14	19.21 ± 0.44	63.24 ± 0.46	-0.83 ± 0.09
	9	88	95.61	8.46 ± 0.16	18.34 ± 0.51	64.62 ± 0.85	-0.58 ± 0.28
	13	84	92.75	8.93 ± 0.17	18.10 ± 0.42	66.90 ± 0.50	-1.21 ± 0.12
	21	76	88.19	9.75 ± 0.19	16.75 ± 0.39	68.07 ± 0.47	-1.05 ± 0.11
	25	72	86.76	10.04 ± 0.20	17.01 ± 0.44	68.97 ± 0.53	-1.11 ± 0.12

(b) ^{10}B content in D_2O : 3.9 ppm

(continued)

No. of loaded clusters		Void fraction (%)	Critical level (cm)	Axial buckling at critical $B_{2v}^2 (\text{m}^{-2})$	α_c (sec^{-1})	β ($\text{sec}^{-1} \cdot \text{m}^2$)	γ ($\text{sec}^{-1} \cdot \text{m}^4$)
0.54wt% $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$	1.2wt% UO_2						
0	97	0	168.59	3.08 ± 0.03	20.10 ± 0.27	44.21 ± 0.25	0.0 ± 0.0
		100	140.13	4.16 ± 0.05	19.94 ± 0.15	70.27 ± 0.28	-1.70 ± 0.11
25	72	0	122.92	5.56 ± 0.08	17.25 ± 0.23	48.80 ± 0.39	-1.17 ± 0.14
		100	120.65	5.44 ± 0.08	15.69 ± 0.76	74.07 ± 1.24	-1.46 ± 0.42

Table 7 Experimental value of loss-of-coolant reactivity

10g content (ppm)	Enrichment PuO_2 (wt%)	No. of loaded clusters	Critical level at 0% void (cm)	β_{ZO}^2 (m ⁻²)	α (sec ⁻¹)	M/A _c	β_{OXY} (\$)
0	0.54	0	106.35	7.28±0.13	29.8±7.6	1.002	-0.51±0.13
0	0.84	1 5 9 88 84 76 21 25	105.46 101.83 98.68 96.34 92.65 91.46	7.39±0.13 7.88±0.14 8.34±0.15 8.71±0.16 9.35±0.18 9.57±0.19	34.0±8.9 48.2±8.9 61.8±9.5 73.5±10.3 92.0±11.5 98.1±11.9	1.002 1.005 1.007 1.008 1.011 1.011	-0.76±0.18 -1.61±0.30 -2.39±0.38 -3.06±0.43 -4.26±0.56 -4.65±0.57
3.9	0.54	1 5 9 88 84 76 21 25	104.01 95.46 88.95 84.92 79.39 77.72	7.58±0.13 8.86±0.17 10.06±0.20 120.2±12.9 10.93±0.23 12.32±0.28	39.0±8.1 80.4±10.4 120.2±12.9 147.4±14.3 184.7±17.3 198.9±18.4	1.003 1.009 1.014 1.017 1.022 1.023	-0.98±0.20 -3.22±0.42 -5.65±0.62 -7.28±0.73 -10.28±0.99 -10.96±1.05
3.9	0.54	0	122.92	3.09±0.04	15.4±6.0	0.985	+3.90±0.20

Table 8 Differential coefficient of loss-of-coolant reactivity to statistical weight of $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ fueled region or ^{10}B content in D_2O

(a)

Fuel	Statistical weight W_0	$\frac{\partial \rho_{\text{OXY}}}{\partial C}$ (\$/ppm ^{10}B)
1.2wt% UO_2	0	+1.11±0.08
0.54wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ & 1.2wt% UO_2	0.592	+1.04±0.18

(b)

Substituted cluster	^{10}B content C (ppm)	$\frac{\partial \rho_{\text{OXY}}}{\partial W_0}$ (\$/0.1 weight)
0.54wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	0	-0.70±0.03
0.87wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	3.9	-0.74±0.03
	0	-1.82±0.03

Table 9 Three energy group constants of 25 cm pitch lattice by METHSELAH-II

(a) Void fraction: 0% ^{10}B content in D_2O : 0 ppm

Lattice	Energy group	D (cm)		Σ_a ($\times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$)	Σ_r ($\times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$)	$v\Sigma_f$ ($\times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$)	$\langle 1/v \rangle$ ($\text{sec} \cdot \text{cm}^{-1}$)
		Radial	Axial				
1.2wt% UO_2	1	1.528	1.567	1.475	2.851	0.1944	4.99×10^{-9}
	2	1.226	1.259	3.493	2.429	0.1129	4.62×10^{-7}
	3	0.812	0.851	8.220	—	1.0906	4.93×10^{-6}
0.54wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	1	1.526	1.565	1.494	2.847	0.1918	4.99×10^{-9}
	2	1.218	1.252	3.903	2.425	0.1258	4.62×10^{-7}
	3	0.814	0.853	9.052	—	1.2747	4.93×10^{-6}
0.87wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	1	1.527	1.566	1.521	2.837	0.1967	4.99×10^{-9}
	2	1.218	1.252	4.217	2.408	0.1579	4.62×10^{-7}
	3	0.816	0.856	9.945	—	1.4887	4.91×10^{-6}
D_2O	1	1.397	1.397	0.307	2.960	0.0317	4.99×10^{-9}
	2	1.229	1.229	0.010	1.903	0.0	4.62×10^{-7}
	3	0.848	0.848	0.140	—	0.0	4.93×10^{-6}

(b) Void fraction: 100% ^{10}B content in D_2O : 0 ppm

Lattice	Energy group	D (cm)		Σ_a ($\times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$)	Σ_r ($\times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$)	$v\Sigma_f$ ($\times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$)	$\langle 1/v \rangle$ ($\text{sec} \cdot \text{cm}^{-1}$)
		Radial	Axial				
1.2wt% UO_2	1	1.662	1.737	1.342	1.926	0.1651	4.99×10^{-9}
	2	1.410	1.460	2.875	1.465	0.1142	4.62×10^{-7}
	3	0.940	0.957	8.606	—	1.2671	4.67×10^{-6}
0.54wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	1	1.659	1.733	1.360	1.917	0.1631	4.99×10^{-9}
	2	1.390	1.436	3.300	1.462	0.1276	4.62×10^{-7}
	3	0.922	0.953	9.807	—	1.5102	4.70×10^{-6}
0.87wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	1	1.660	1.733	1.389	1.914	0.1681	4.99×10^{-9}
	2	1.389	1.434	3.586	1.455	0.1591	4.62×10^{-7}
	3	0.909	0.937	10.883	—	1.7539	4.66×10^{-6}
D_2O	1	1.380	1.380	0.274	3.042	0.0283	4.99×10^{-9}
	2	1.229	1.229	0.010	1.855	0.0	4.62×10^{-7}
	3	0.849	0.849	0.130	—	0.0	4.67×10^{-6}

Void fraction (%)	Lattice	Energy group	D (cm)		Σ_a ($\times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$)	Σ_r ($\times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$)	Σ_f ($\times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$)	λ/ν (sec $\cdot\text{cm}^{-1}$)	
			Radial	Axial					
0	1.2wt%UO ₂	1	1.526	1.565	1.472	2.860	0.1936	4.99 $\times 10^{-9}$	
		2	1.226	1.258	3.528	2.429	0.1130	4.62 $\times 10^{-7}$	
		3	0.810	0.842	9.115	—	1.1141	4.90 $\times 10^{-6}$	
	0.54wt%PuO ₂ -UO ₂	1	1.524	1.564	1.492	2.855	0.1911	4.99 $\times 10^{-9}$	
		2	1.218	1.252	3.938	2.425	0.1260	4.62 $\times 10^{-7}$	
		3	0.811	0.850	9.983	—	1.3041	4.91 $\times 10^{-6}$	
	D ₂₀	1	1.397	1.397	0.307	2.961	0.0317	4.99 $\times 10^{-9}$	
		2	1.229	1.229	0.040	1.902	0.0	4.62 $\times 10^{-7}$	
		3	0.846	0.846	0.997	—	0.0	4.90 $\times 10^{-6}$	
	100	1.2wt%UO ₂	1	1.660	1.734	1.337	1.932	0.1638	4.99 $\times 10^{-9}$
			2	1.409	1.460	2.905	1.464	0.1142	4.62 $\times 10^{-7}$
			3	0.939	0.974	9.296	—	1.2657	4.65 $\times 10^{-6}$
0.54wt%PuO ₂ -UO ₂		1	1.657	1.730	1.355	1.923	0.1619	4.99 $\times 10^{-9}$	
		2	1.390	1.436	3.331	1.462	0.1276	4.62 $\times 10^{-7}$	
		3	0.920	0.950	10.519	—	1.5103	4.62 $\times 10^{-6}$	
D ₂₀		1	1.380	1.380	0.274	3.043	0.0283	4.99 $\times 10^{-9}$	
		2	1.229	1.229	0.050	1.854	0.0	4.62 $\times 10^{-7}$	
		3	0.847	0.847	0.957	—	0.0	4.65 $\times 10^{-6}$	

(c) ¹⁰B content in D₂₀ : 3.9 ppm

Table 10 Anisotropy of cell averaged diffusion coefficient for thermal group by Benoist's formula

¹⁰ B content (ppm)	Cell Fuel composition	D _z /D _r		D _y /D _o	
		0% void (o)	100% void (v)	Radial (r)	Axial (z)
0	1.2wt%UO ₂	1.048	1.018	1.138	1.125
	0.54wt%PuO ₂ -UO ₂	1.048	1.033	1.132	1.117
	0.87wt%PuO ₂ -UO ₂	1.048	1.031	1.113	1.095
3.9	1.2wt%UO ₂	1.040	1.038	1.159	1.157
	0.54wt%PuO ₂ -UO ₂	1.048	1.033	1.134	1.117

Table 11 Calculated value of loss-of-coolant reactivity by METHUSELAH-II and CITATION

¹⁰ B content (ppm)	Loaded fuel	W ₀	P _{eff} at critical (%)	ρ _{o-v} (β)	
				BENOIST*	TRANSPORT**
0	1.2wt%UO ₂	0.0	0.69	+0.23	+0.62
	0.03	0.03	0.68	+0.04	+0.45
	0.15	0.15	0.65	-0.76	-0.26
	0.26	0.26	0.62	-1.58	-1.00
	0.36	0.36	0.60	-2.24	-1.59
	0.53	0.53	0.56	-3.50	-2.70
0	0.54wt%PuO ₂ -UO ₂ & 1.2wt%UO ₂	0.59	0.54	-3.93	-3.08
	0.03	0.03	0.64	-0.23	+0.20
	0.15	0.15	0.63	-2.47	-1.85
	0.26	0.26	0.59	-4.87	-4.01
	0.36	0.36	0.56	-6.51	-5.52
	0.53	0.53	0.51	-9.46	-8.19
3.9	1.2wt%UO ₂	0.59	0.49	-10.32	-8.98
	0.54wt%PuO ₂ -UO ₂ & 1.2wt%UO ₂	0.0	0.69	+4.14	+4.55
3.9	0.54wt%PuO ₂ -UO ₂ & 1.2wt%UO ₂	0.59	0.54	+0.75	+1.41

* Calculation by using of anisotropic diffusion coefficient based on BENOIST's theory.

** Calculation by using of isotropic diffusion coefficient.

Table 12 The proportion of importance with fast neutron to thermal neutron obtained by METHUSELAH-II and CITATION

(Cut-off energy: 0.625 eV)

Fuel composition	^{10}B content (ppm)	ϕ_f/ϕ_t	ϕ_f^+/ϕ_t^+	$(1 - \frac{\phi_f^+}{\phi_t^+})$
1.2wt%UO ₂	0	0.757	1.702	-0.702
	3.9	0.795	1.749	-0.749
0.54wt%PuO ₂ -UO ₂	0	0.861	1.646	-0.646
	3.9	0.904	1.688	-0.688
0.87wt%PuO ₂ -UO ₂	0	0.985	1.598	-0.598

suffix f: fast t: thermal

Table 13 Loss-of-coolant reactivity in components obtained by perturbation method

(Unit of reactivity: %Δk/k)

^{10}B content in D ₂ O (ppm)		0				3.9			
No. of loaded clusters	0.54wt%PuO ₂ -UO ₂	0	9	25	97	0	9	25	97
	1.2wt%UO ₂	97	88	72	0	97	88	88	0
Statistical weight W_0		0	0.26	0.59	1.0	0	0.26	0.59	1.0
B_2^2 (m ⁻²)		7.86	8.78	9.82	10.94	3.94	4.93	6.04	7.21
Core diameter (m)		3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
$\langle \phi^+, \delta \Sigma_f \phi^* \rangle / P$		10.97	11.43	11.91	12.39	9.20	9.69	10.18	10.65
$\langle \phi^+, \delta \Sigma_a \phi^* \rangle / P$		0.27	-0.50	-1.30	-2.08	2.10	1.29	0.48	0.30
$\langle \phi^+, \delta \Sigma_{i \rightarrow j} \phi^* \rangle / P$		-8.46	-9.11	-9.78	-10.41	-5.79	-7.46	-8.18	-8.82
$\langle \delta D_T \nabla \phi^+ \cdot \nabla \phi^* \rangle / P$		-0.58	-0.60	-0.59	-0.50	-0.58	-0.60	-0.59	-0.50
$\langle \phi^+, \delta D_2 B_2^2 \phi^* \rangle / P$		-2.02	-2.18	-2.36	-2.53	-1.08	-1.28	-1.48	-1.66
$(\rho_{O \rightarrow V})_{\text{reaction}}$		11.23	10.93	10.61	10.30	11.31	10.99	10.66	10.36
$(\rho_{O \rightarrow V})_{\text{spectral}}$		-8.46	-9.11	-9.78	-10.41	-6.79	-7.46	-8.18	-8.82
$(\rho_{O \rightarrow V})_{\text{non-leakage}}$		2.77	1.82	0.83	-0.10	4.52	3.52	2.49	1.54
$(\rho_{O \rightarrow V})_{\text{leakage}}$		-2.60	-2.78	-2.95	-3.03	-1.66	-1.88	-2.07	-2.16
$\rho_{O \rightarrow V}$		0.18	-0.96	-2.12	-3.13	2.86	1.64	0.42	-0.62
(Calculated from eigen values)		(0.16)	(-0.98)	(-2.15)	(-3.16)	(2.86)	(1.64)	(0.40)	(-0.63)

付録1 パルス中性子実験条件および測定データ

1.2wt %UO₂ 燃料の燃料クラスタを順次 0.54wt %PuO₂、--UO₂ 燃料または 0.87wt %PuO₂、-UO₂ 燃料クラスタに置換した各炉心およびこれらのうち一部の炉心の減速材へ¹⁰Bを3.9 ppm 添加した炉心について減速材重量率を変化させながら行ったパルス中性子実験についてパルス中性子源の運転条件、時間分析器の測定条件および即発中性子減衰定数の測定値等を第A1-1～A1-17表に示した。

Table A1-1 Experimental condition and result of measurement

1.2 wt%UO₂ uniform core (97-clusters)
¹⁰B content in D₂O : 0 ppm
Void fraction : 100 %

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source			Time analysis			Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)			
1	77.02	10	1.1	40	5	11144	166766	—	23	—	
2	80.02	10	1.1	50	5	8302	131308	—	23	—	
3	83.00	10	1.1	50	5	6697	104287	245.3 ± 2.6	23	—	
4	86.00	10	1.1	60	6	5746	87180	207.7 ± 1.5	23	—	
5	88.95	10	1.1	70	6	4831	71689	169.7 ± 1.4	23	—	
6	92.07	5	1.1	90	7	2534	37006	139.1 ± 2.1	23	—	
7	95.00	5	1.1	100	7	2656	37382	109.7 ± 1.4	23	—	
8	97.99	3	1.1	150	8	1128	15941	81.6 ± 1.3	23	—	
9	101.17	3	1.1	150	8	875	11634	55.0 ± 1.1	23	—	
10	104.00	1	1.1	300	8	437	6007	32.0 ± 1.1	23	—	
11	105.48	1	1.1	400	8	268	3727	21.1 ± 1.1	23	—	

Date of experiment : 1975/10/30

Table A1-2 Experimental condition and result of measurement

No. of substituted 0.54 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 1Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)	
1	85.95	10.0	1.1	80	5	35228	49386	205.1 ± 1.7	25
2	88.25	10.0	1.1	80	5	28980	48973	179.3 ± 1.2	25
3	90.01	10.0	1.1	80	6	28752	45859	158.1 ± 1.9	25
4	92.14	10.0	1.1	80	6	25986	36087	137.3 ± 1.5	25
5	94.13	10.0	1.1	80	6	21942	28435	119.0 ± 1.8	25
6	96.05	10.0	1.1	80	7	21398	31412	100.8 ± 1.1	25
7	98.06	10.0	1.1	100	7	25972	22212	81.0 ± 1.6	25
8	100.04	10.0	1.1	100	8	30378	19312	62.9 ± 1.2	25
9	102.00	10.0	1.1	100	8	5378	16410	47.1 ± 1.2	25
10	103.96	3.0	1.1	200	8	1692	6810	31.6 ± 1.2	25
11	104.98	3.0	1.1	200	8	1968	4026	23.5 ± 1.2	25

Date of experiment : 1975/7/31

Table A1-3 Experimental condition and result of measurement

No. of substituted 0.54 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 5Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)	
1	84.00	10.0	1.1	80	6	21356	58189	212.6 ± 1.7	23
2	86.03	10.0	1.1	80	5	14666	48246	191.2 ± 1.8	23
3	88.09	10.0	1.1	80	6	12838	42111	166.5 ± 1.5	23
4	90.03	10.0	1.1	80	7	20770	45309	146.1 ± 2.2	23
5	92.08	10.0	1.1	80	7	10654	35481	122.8 ± 1.1	23
6	94.48	10.0	1.1	80	7	8858	31536	99.6 ± 1.5	24
7	96.01	10.0	1.1	80	7	10624	28226	83.5 ± 1.3	24
8	98.03	10.0	1.1	100	8	7770	20084	64.8 ± 1.3	24
9	100.03	3.0	1.1	200	8	4000	11753	46.3 ± 1.2	24
10	102.00	3.0	1.1	200	8	2522	9487	31.0 ± 1.1	24

Date of experiment : 1975/7/30

Table A1-4 Experimental condition and result of measurement

No. of substituted 0.54 wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ clusters : 9
 Void fraction : 100 % ^{10}B content in D_2O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec^{-1})	
1	84.00	10.0	1.1	80	5	16448	48092	205.1 ± 1.4	24
2	86.04	10.0	1.1	80	5	11066	69639	180.8 ± 1.8	24
3	88.08	10.0	1.1	80	6	6808	45099	151.9 ± 1.6	24
4	90.02	10.0	1.1	80	7	10338	51993	131.5 ± 1.6	24
5	92.03	10.0	1.1	80	7	7724	41301	109.0 ± 1.4	24
6	95.04	10.0	1.1	80	7	6070	40763	79.3 ± 1.2	24
7	96.05	3.0	1.1	100	9	6064	23747	69.5 ± 1.1	24
8	97.99	3.0	1.1	200	9	2600	10283	48.9 ± 1.3	24
9	99.98	3.0	1.1	200	9	1876	7833	32.9 ± 1.1	24
10	101.04	3.0	1.1	300	10	1064	4073	22.6 ± 1.2	24

Date of experiment : 1975/7/29

Table A1-5 Experimental condition and result of measurement

No. of substituted 0.54 wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ clusters : 13
 Void fraction : 100 % ^{10}B content in D_2O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec^{-1})	
1	79.90	10.0	1.1	80	5	10474	58674	254.4 ± 1.5	24
2	81.97	10.0	1.1	80	5	9896	60555	223.3 ± 1.1	24
3	84.18	10.0	1.1	80	5	9262	54122	192.4 ± 1.4	24
4	86.13	10.0	1.1	80	5	9488	52523	167.3 ± 1.7	24
5	88.09	10.0	1.1	80	6	9602	46063	143.0 ± 1.8	24
6	90.50	1.0	1.1	80	6	5446	25935	116.0 ± 1.4	24
7	91.96	3.0	1.1	100	8	5384	35485	100.6 ± 1.3	24
8	94.05	3.0	1.1	100	8	4642	25347	77.9 ± 1.2	24
9	96.04	3.0	1.1	200	8	4018	19810	56.5 ± 1.2	24
10	98.01	3.0	1.1	200	8	2486	14052	38.2 ± 1.2	24
11	99.02	3.0	1.1	300	10	1162	6326	27.8 ± 1.2	24

Date of experiment : 1975/7/25

Table A1-6 Experimental condition and result of measurement

No. of substituted 0.54 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 21Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)	
1	90.03	10.0	1.1	80	5	14228	82629	225.2 ± 2.4	23
2	82.21	10.0	1.1	80	5	13592	74790	199.8 ± 1.6	23
3	84.06	10.0	1.1	80	6	9274	77598	170.9 ± 1.5	23
4	86.08	10.0	1.1	80	6	7864	62745	146.9 ± 1.5	23
5	88.02	10.0	1.1	80	6	6404	52879	124.1 ± 1.3	23
6	90.03	10.0	1.1	80	7	6206	51550	99.5 ± 1.3	23
7	92.05	10.0	1.1	100	8	6716	44599	75.5 ± 1.2	23
8	94.04	10.0	1.1	100	9	5560	40744	54.3 ± 1.1	23
9	95.99	0.7	1.1	200	10	2006	11940	34.5 ± 1.1	23
10	97.01	0.7	1.1	300	10	1070	8284	24.9 ± 1.1	23

Date of experiment : 1975/7/23

Table A1-7 Experimental condition and result of measurement

No. of substituted 0.54 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 25Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)	
1	79.98	10.0	1.1	20	5	12594	70340	—	23
2	81.98	10.0	1.1	80	5	9136	50892	193.4 ± 1.7	23
3	84.07	10.0	1.1	80	7	16586	93439	165.3 ± 1.3	23
4	86.10	10.0	1.1	80	7	11764	66162	138.0 ± 1.5	23
5	88.58	10.0	1.1	80	7	9792	54316	109.2 ± 1.1	23
6	89.99	10.0	1.1	80	9	5128	28139	91.6 ± 1.3	23
7	92.06	10.0	1.1	100	9	6116	32346	67.8 ± 1.4	23
8	94.04	0.7	1.1	200	10	1246	11852	46.0 ± 1.1	23
9	95.03	0.7	1.1	200	10	888	7356	35.6 ± 1.1	23
10	96.01	0.7	1.1	200	10	700	6088	25.5 ± 1.1	23

Date of experiment : 1975/7/23

Table A1-8 Experimental condition and result of measurement

No. of substituted 0.87 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 1Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)	
1	75.92	10	1.1	40	5	6908	142340	—	23
2	78.05	10	1.1	40	5	6147	147005	308.3 ± 1.1	23
3	80.92	10	1.1	50	5	4080	97321	261.2 ± 1.5	23
4	83.94	10	1.1	60	6	3574	85403	224.0 ± 2.0	23
5	86.91	10	1.1	60	6	3328	78934	186.6 ± 1.7	23
6	90.06	10	1.1	70	6	2644	62438	151.6 ± 1.3	23
7	93.07	5	1.1	100	6	1423	31996	119.6 ± 1.5	23
8	96.50	2	1.1	200	8	726	15286	87.0 ± 1.6	23
9	99.00	1	1.1	200	8	396	8088	64.6 ± 1.4	23
10	101.97	1	1.1	200	8	427	8865	39.3 ± 1.1	23
11	103.59	1	1.1	300	8	500	4848	26.1 ± 1.1	23

Date of experiment : 1975/10/29

Table A1-9 Experimental condition and result of measurement

No. of substituted 0.87 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 5Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)	
1	74.11	10	1.1	40	5	6124	163277	—	23
2	76.01	10	1.1	50	5	4614	103636	305.5 ± 1.6	23
3	78.97	10	1.1	50	5	3540	90946	258.7 ± 1.9	23
4	82.06	10	1.1	60	6	3440	85552	217.0 ± 1.5	23
5	85.04	10	1.1	80	6	3138	72324	176.4 ± 2.0	23
6	88.06	5	1.1	100	7	1453	36306	140.1 ± 1.6	23
7	91.55	2	1.1	200	7	586	13859	99.3 ± 2.1	23
8	94.05	2	1.1	200	7	507	11691	74.7 ± 1.2	23
9	97.04	2	1.1	200	7	484	11053	45.1 ± 1.2	23
10	99.54	1	1.1	300	8	228	5047	21.5 ± 1.1	23

Date of experiment : 1975/10/27

Table Al-10 Experimental condition and result of measurement

No. of substituted 0.87 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 9Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)	
1	70.02	10	1.1	30	5	12482	204124	—	24
2	71.96	10	1.1	40	5	6322	134399	—	24
3	74.91	10	1.1	50	6	6491	129033	—	24
4	77.92	10	1.1	50	6	4657	92250	255.9 ± 1.4	24
5	80.96	10	1.1	60	6	5965	117087	202.3 ± 1.1	24
6	83.90	10	1.1	80	7	3201	62510	161.3 ± 1.9	24
7	87.02	5	1.1	100	7	1664	32385	118.4 ± 1.5	24
8	90.07	2	1.1	150	8	1026	19155	81.2 ± 1.2	24
9	93.02	2	1.1	300	8	541	9818	49.0 ± 1.2	24
10	95.57	2	1.1	300	9	481	8884	21.4 ± 1.1	24

Date of experiment : 1975/10/24

Table Al-11 Experimental condition and result of measurement

No. of substituted 0.87 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 13Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)	
1	68.03	10	1.1	30	5	8380	206425	—	23
2	69.95	10	1.1	30	5	6335	159334	—	23
3	71.92	10	1.1	40	5	5265	127045	328.3 ± 1.6	23
4	74.93	10	1.1	40	5	3649	86719	271.5 ± 1.1	23
5	78.04	10	1.1	50	6	4412	101595	221.3 ± 1.5	23
6	81.06	10	1.1	60	6	2102	55037	173.6 ± 1.3	23
7	83.94	10	1.1	80	7	1737	45255	133.1 ± 1.6	23
8	87.01	5	1.1	100	7	1541	39089	90.6 ± 1.2	23
9	90.00	1	1.1	200	8	609	13693	53.3 ± 1.2	23
10	92.01	1	1.1	300	8	281	5919	30.2 ± 1.1	23

Date of experiment : 1975/10/23

Table A1-12 Experimental condition and result of measurement

No. of substituted 0.87 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 21
 Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)	
1	65.11	10	1.1	30	5	53559	208762	—	23
2	66.93	10	1.1	30	5	39667	149018	—	23
3	68.95	10	1.1	30	5	26010	126807	—	23
4	72.06	10	1.1	40	5	15876	115794	282.1 ± 1.6	23
5	75.07	10	1.1	50	6	14755	105510	225.1 ± 1.1	23
6	78.08	10	1.1	60	6	9956	71423	172.7 ± 1.9	23
7	81.04	10	1.1	80	7	10304	79390	124.2 ± 1.3	23
8	84.04	10	1.1	90	8	4176	31968	77.1 ± 1.4	23
9	86.08	5	1.1	200	8	1875	10638	48.9 ± 1.2	23
10	88.07	1	1.1	300	8	622	4070	22.3 ± 1.1	23

Date of experiment : 1975/10/22

Table A1-13 Experimental condition and result of measurement

No. of substituted 0.87 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 25
 Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)	
1	64.08	10	1.1	30	5	7530	222783	—	22
2	66.05	10	1.1	30	5	27590	235952	—	22
3	67.98	10	1.1	30	5	17220	151147	—	22
4	70.00	10	1.1	40	5	11680	108921	308.6 ± 1.6	22
5	73.00	10	1.1	40	5	11928	114140	249.6 ± 2.5	22
6	75.99	10	1.1	50	6	9015	64844	193.2 ± 1.5	23
7	79.00	10	1.1	60	6	6756	50527	140.9 ± 1.4	23
8	82.01	10	1.1	80	7	4432	37434	90.5 ± 1.2	23
9	84.00	5	1.1	100	8	2410	21109	59.7 ± 1.3	23
10	86.00	0.5	1.1	200	8	972	7224	31.6 ± 1.1	23
11	86.60	0.1	1.1	300	8	197	1507	23.8 ± 1.2	23

Date of experiment : 1975/10/22

Table A1-14 Experimental condition and result of measurement

1.2 wt% UO₂ uniform core (97-clusters)Void fraction : 0 % ¹⁰B content in D₂O : 3.9 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)	
1	135.80	10	1.1	90	8	10986	38000	88.0 ± 1.2	25.0
2	138.96	8	1.1	120	8	5160	26461	80.0 ± 1.3	25.0
3	142.04	6	1.1	140	9	—	23117	71.2 ± 1.1	25.0
4	145.10	6	1.1	140	10	2018	11574	64.6 ± 1.1	25.0
5	149.01	6	1.1	150	10	2400	13346	55.3 ± 1.1	25.0
6	153.71	4	1.1	180	11	1228	10587	45.5 ± 1.2	25.0
7	157.10	3	1.1	200	11	1472	6321	39.2 ± 1.2	25.0

Date of experiment : 1976/9/16

Table A1-15 Experimental condition and result of measurement

1.2 wt% UO₂ uniform core (97-clusters)Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 3.9 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)	
1	108.94	10	1.1	50	5	15386	59722	178.9 ± 1.5	24.5
2	111.99	10	1.1	70	6	10537	42389	159.1 ± 1.2	24.5
3	114.98	6	1.1	80	6	7901	40420	141.3 ± 1.5	24.5
4	117.99	6	1.1	80	6	5987	34483	123.6 ± 1.1	24.5
5	120.92	5	1.1	100	6	4522	19408	107.6 ± 1.5	24.5
6	124.14	4	1.1	120	6	1757	16594	90.9 ± 1.1	24.5
7	127.13	4	1.1	120	6	1804	15373	76.3 ± 1.2	24.5
8	129.98	4	1.1	140	6	1571	13780	62.5 ± 1.4	24.5
9	134.11	2	1.1	160	6	1134	8863	44.7 ± 1.0	24.5
10	138.10	1	1.1	200	6	620	5482	28.8 ± 1.1	24.5

Date of experiment : 1976/9/29

Table A1-16 Experimental condition and result of measurement

No. of substituted 0.54 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 25Void fraction : 0 % ¹⁰B content in D₂O : 3.9 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)	
1	99.90	10	1.1	80	8	10962	51671	135.7 ± 1.8	25.0
2	101.93	10	1.1	80	6	7102	41797	123.4 ± 1.7	25.0
3	103.99	10	1.1	90	8	5000	43620	111.2 ± 1.7	25.5
4	106.10	6	1.1	90	8	3640	33264	99.1 ± 1.4	25.5
5	109.04	6	1.1	100	8	3045	31125	82.2 ± 1.1	25.5
6	112.03	4	1.1	120	10	2480	21601	66.9 ± 1.2	25.5
7	115.00	4	1.1	130	10	1690	16878	52.2 ± 1.4	25.5
8	118.05	1	1.1	180	11	740	7399	38.5 ± 1.1	25.5
9	120.99	1	1.1	200	10	—	—	25.6 ± 1.2	25.5

Date of experiment : 1976/9/21

Table A1-17 Experimental condition and result of measurement

No. of substituted 0.54 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 25Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 3.9 ppm

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement			Temperature of moderator (°C)
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μs)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)	
1	95.98	10	1.1	60	5	12589	52603	208.4 ± 1.6	24.0
2	97.92	10	1.1	60	5	9732	54624	190.9 ± 2.3	24.0
3	99.94	10	1.1	60	6	11277	57771	170.4 ± 1.3	24.5
4	101.93	10	1.1	60	6	9580	45836	151.9 ± 2.0	24.5
5	103.98	10	1.1	70	6	7776	36597	135.2 ± 1.5	25.0
6	107.02	10	1.1	80	6	7082	32040	112.3 ± 1.4	25.5
7	110.16	8	1.1	90	7	4339	22290	87.8 ± 1.3	25.5
8	112.99	5	1.1	100	7	2790	20083	67.9 ± 1.1	25.5
9	116.02	5	1.1	140	6	1642	11002	47.5 ± 1.2	25.5
10	119.03	2	1.1	200	7	1013	6331	25.8 ± 1.2	25.5

Date of experiment : 1976/9/24

付録2 バルス中性子実験結果

バルス中性子実験で軸方向バックリングを変化させながら測定された即発中性子減衰定数に対して炉心温度変化および検出器案内管の影響を補正し、(3-2)式から各軸方向バックリングにおいて即発中性子減衰定数に対する未減果度を、 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料クラスタに置換した各炉心で求め第A 2-1~A 2-17 表に示した。

Table A2-1 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

12 wt% UO_2 uniform core (97-clusters)Void fraction : 100 %
 ^{10}B content in D_2O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	B^2_z (m^{-2})	Measured decay constant α' (sec^{-1})	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec^{-1})	Corrected decay constant α (sec^{-1})*	$\frac{\lambda}{\Lambda}$	Subcritical reactivity (- β)
1	82.79	10.89 ± 0.23	245.3 ± 2.6	-1.0 ± 0.5	244.3 ± 2.6	1.031	11.75 ± 0.37
2	85.79	10.24 ± 0.21	207.7 ± 1.5	-0.9 ± 0.5	206.8 ± 1.6	1.027	9.70 ± 0.30
3	88.74	9.65 ± 0.19	169.7 ± 1.4	-0.9 ± 0.4	168.8 ± 1.5	1.022	7.86 ± 0.24
4	91.86	9.80 ± 0.17	139.1 ± 2.1	-0.8 ± 0.4	138.3 ± 2.1	1.017	6.08 ± 0.18
5	94.79	8.59 ± 0.16	109.7 ± 1.4	-0.8 ± 0.4	108.9 ± 1.5	1.013	4.56 ± 0.14
6	97.78	8.13 ± 0.15	81.6 ± 1.3	-0.8 ± 0.4	80.8 ± 1.4	1.009	3.13 ± 0.09
7	100.96	7.68 ± 0.14	55.0 ± 1.1	-0.7 ± 0.4	54.3 ± 1.2	1.005	1.74 ± 0.05
8	103.79	7.51 ± 0.13	32.3 ± 1.1	-0.7 ± 0.3	31.6 ± 1.1	1.002	0.61 ± 0.02
9	105.27	7.13 ± 0.12	21.1 ± 1.1	-0.7 ± 0.3	20.4 ± 1.1	1.000	0.05 ± 0.0

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-2 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

No. of substituted 0.54wt% PuO₂-UO₂ clusters : 1Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m ⁻²)	Measured decay constant α' (sec ⁻¹)	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec ⁻¹)	Corrected decay constant α (sec ⁻¹)*	$\frac{\Lambda}{\Lambda_c}$	Subcritical reactivity (- β)
1	85.74	10.25 ± 0.21	205.1 ± 1.7	- 2.8 ± 0.5	202.3 ± 1.8	1.026	9.71 ± 0.26
2	88.04	9.78 ± 0.19	179.3 ± 1.2	- 2.7 ± 0.5	176.6 ± 1.3	1.023	8.31 ± 0.21
3	89.80	9.45 ± 0.18	158.1 ± 1.9	- 2.6 ± 0.4	155.5 ± 1.9	1.021	7.29 ± 0.18
4	91.93	9.07 ± 0.17	137.3 ± 1.5	- 2.5 ± 0.4	134.8 ± 1.6	1.018	6.11 ± 0.15
5	93.92	8.73 ± 0.16	119.0 ± 1.8	- 2.5 ± 0.4	116.5 ± 1.8	1.015	5.06 ± 0.12
6	95.84	8.42 ± 0.16	100.8 ± 1.1	- 2.4 ± 0.4	98.4 ± 1.2	1.012	4.09 ± 0.10
7	97.85	8.12 ± 0.15	81.0 ± 1.6	- 2.3 ± 0.4	78.7 ± 1.6	1.010	3.12 ± 0.07
8	99.83	7.84 ± 0.14	62.9 ± 1.2	- 2.3 ± 0.4	60.6 ± 1.3	1.007	2.20 ± 0.05
9	101.79	7.57 ± 0.13	47.1 ± 1.2	- 2.2 ± 0.4	44.9 ± 1.3	1.004	1.34 ± 0.03
10	103.75	7.36 ± 0.13	31.6 ± 1.2	2.1 ± 0.4	29.5 ± 1.3	1.002	0.52 ± 0.01
11	104.77	7.19 ± 0.12	23.5 ± 1.2	- 2.1 ± 0.4	21.4 ± 1.3	1.00	0.10 ± 0.0

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-3 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

No. of substituted 0.54 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 5Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m ⁻²)	Measured decay constant α' (sec ⁻¹)	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec ⁻¹)	Corrected decay constant α (sec ⁻¹)*	$\frac{\Lambda}{\Lambda_c}$	Subcritical reactivity (- β)
1	83.79	10.67 ± 0.22	212.6 ± 1.7	- 1.0 ± 0.5	211.6 ± 1.8	1.030	10.98 ± 0.36
2	85.82	10.23 ± 0.21	191.2 ± 1.8	- 0.9 ± 0.5	190.3 ± 1.9	1.026	9.55 ± 0.31
3	87.88	9.81 ± 0.20	166.5 ± 1.5	- 0.9 ± 0.4	165.6 ± 1.6	1.023	8.17 ± 0.26
4	89.82	9.45 ± 0.18	146 ± 2.2	- 0.9 ± 0.4	145.2 ± 2.2	1.020	6.93 ± 0.22
5	91.87	9.08 ± 0.17	122.8 ± 1.1	- 0.8 ± 0.4	122.0 ± 1.2	1.017	5.70 ± 0.17
6	94.27	8.67 ± 0.16	99.6 ± 1.5	- 1.6 ± 0.4	98.0 ± 1.6	1.013	4.33 ± 0.13
7	95.80	8.43 ± 0.16	83.5 ± 1.3	- 1.6 ± 0.4	81.9 ± 1.4	1.011	3.50 ± 0.11
8	97.82	8.12 ± 0.15	64.8 ± 1.3	- 1.5 ± 0.4	63.3 ± 1.4	1.008	2.46 ± 0.07
9	99.82	7.84 ± 0.14	46.3 ± 1.2	- 1.5 ± 0.4	44.8 ± 1.3	1.005	1.47 ± 0.05
10	101.79	7.57 ± 0.13	31.0 ± 1.1	- 1.4 ± 0.4	29.6 ± 1.2	1.002	0.55 ± 0.02

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-4 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

No. of substituted 0.54 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 9
 Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m ⁻²)	Measured decay constant α' (sec ⁻¹)	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec ⁻¹)	Corrected decay constant α (sec ⁻¹) *	$\frac{\Lambda}{\Lambda_c}$	Subcritical reactivity (- β)
1	83.79	10.67 ± 0.22	205.1 ± 1.4	- 1.8 ± 0.5	203.3 ± 1.5	1.027	10.34 ± 0.38
2	85.83	10.23 ± 0.21	180.8 ± 1.8	- 1.8 ± 0.4	179.0 ± 1.8	1.023	8.85 ± 0.32
3	87.87	9.82 ± 0.20	151.9 ± 1.6	- 1.7 ± 0.4	150.2 ± 1.6	1.020	7.44 ± 0.26
4	89.81	9.45 ± 0.18	131.5 ± 1.6	- 1.6 ± 0.4	129.9 ± 1.6	1.017	6.18 ± 0.21
5	91.82	9.07 ± 0.17	109.0 ± 1.4	- 1.6 ± 0.4	107.4 ± 1.5	1.014	4.94 ± 0.17
6	94.83	8.58 ± 0.16	79.3 ± 1.2	- 1.5 ± 0.4	77.8 ± 1.3	1.009	3.22 ± 0.11
7	95.84	8.42 ± 0.16	69.5 ± 1.1	- 1.5 ± 0.4	68.0 ± 1.2	1.008	2.67 ± 0.09
8	97.78	8.13 ± 0.15	48.9 ± 1.3	- 1.4 ± 0.4	47.5 ± 1.4	1.005	1.67 ± 0.06
9	99.77	7.84 ± 0.14	32.9 ± 1.1	- 1.4 ± 0.3	31.5 ± 1.2	1.002	0.69 ± 0.02
10	100.83	7.70 ± 0.14	22.6 ± 1.2	- 1.4 ± 0.3	21.2 ± 1.3	1.001	0.19 ± 0.01

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-5 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

No. of substituted 0.54 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 13
 Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m ⁻²)	Measured decay constant α' (sec ⁻¹)	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec ⁻¹)	Corrected decay constant α (sec ⁻¹) *	$\frac{\Lambda}{\Lambda_c}$	Subcritical reactivity (- β)
1	79.69	11.64 ± 0.25	254.4 ± 1.5	- 2.0 ± 0.5	252.4 ± 1.6	1.031	13.22 ± 0.35
2	81.76	11.13 ± 0.24	223.3 ± 1.1	- 1.9 ± 0.5	221.4 ± 1.2	1.028	11.48 ± 0.30
3	83.97	10.63 ± 0.22	192.4 ± 1.4	- 1.8 ± 0.5	190.6 ± 1.5	1.024	9.74 ± 0.25
4	85.92	10.21 ± 0.21	167.3 ± 1.7	- 1.7 ± 0.4	165.6 ± 1.8	1.021	8.29 ± 0.21
5	87.88	9.81 ± 0.20	143.0 ± 1.8	- 1.7 ± 0.4	141.3 ± 1.9	1.018	6.91 ± 0.17
6	90.29	9.36 ± 0.18	116.0 ± 1.4	- 1.6 ± 0.4	114.4 ± 1.5	1.014	5.32 ± 0.13
7	91.75	9.10 ± 0.17	100.6 ± 1.3	- 1.6 ± 0.4	99.0 ± 1.4	1.012	4.41 ± 0.11
8	93.84	8.74 ± 0.16	77.9 ± 1.2	- 1.5 ± 0.4	76.4 ± 1.3	1.009	3.17 ± 0.08
9	95.83	8.43 ± 0.15	56.5 ± 1.2	- 1.4 ± 0.4	55.1 ± 1.3	1.006	2.06 ± 0.05
10	97.80	8.13 ± 0.14	38.2 ± 1.2	- 1.4 ± 0.3	36.8 ± 1.3	1.003	1.01 ± 0.03
11	98.81	7.98 ± 0.14	27.8 ± 1.2	- 1.4 ± 0.3	26.4 ± 1.3	1.001	0.49 ± 0.01

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-6 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

No. of substituted 0.54 wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ clusters : 21
 Void fraction : 100 % ^{10}B content in D_2O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m^{-2})	Measured decay constant α' (sec^{-1})	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec^{-1})	Corrected decay constant α (sec^{-1})*	$\frac{\lambda}{\lambda_c}$	Subcritical reactivity ($-\beta$)
1	79.82	11.61 ± 0.25	225.2 ± 2.4	-1.0 ± 0.5	224.2 ± 2.5	1.028	12.31 ± 0.60
2	82.00	11.08 ± 0.23	199.8 ± 1.6	-0.9 ± 0.5	198.9 ± 1.7	1.024	10.45 ± 0.49
3	83.85	10.65 ± 0.22	170.9 ± 1.5	-0.9 ± 0.4	170.0 ± 1.6	1.021	8.95 ± 0.41
4	85.87	10.22 ± 0.21	146.9 ± 1.5	-0.8 ± 0.4	146.1 ± 1.6	1.018	7.41 ± 0.34
5	87.81	9.83 ± 0.20	124.1 ± 1.3	-0.8 ± 0.4	123.3 ± 1.4	1.015	6.00 ± 0.27
6	89.82	9.45 ± 0.18	99.5 ± 1.3	-0.8 ± 0.4	98.7 ± 1.4	1.012	4.61 ± 0.20
7	91.84	9.08 ± 0.17	75.5 ± 1.2	-0.8 ± 0.4	74.7 ± 1.3	1.008	3.30 ± 0.14
8	93.83	8.75 ± 0.16	54.3 ± 1.1	-0.7 ± 0.4	53.6 ± 1.2	1.005	2.07 ± 0.09
9	95.78	8.43 ± 0.16	34.5 ± 1.1	-0.7 ± 0.3	33.8 ± 1.2	1.002	0.93 ± 0.04
10	96.80	8.28 ± 0.15	24.9 ± 1.1	-0.7 ± 0.3	24.2 ± 1.2	1.001	0.35 ± 0.02

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-7 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

No. of substituted 0.54 wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ clusters : 25
 Void fraction : 100 % ^{10}B content in D_2O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m^{-2})	Measured decay constant α' (sec^{-1})	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec^{-1})	Corrected decay constant α (sec^{-1})*	$\frac{\lambda}{\lambda_c}$	Subcritical reactivity ($-\beta$)
1	81.77	11.13 ± 0.24	193.4 ± 1.7	-0.9 ± 0.5	192.5 ± 1.8	1.023	11.86 ± 0.24
2	83.86	10.65 ± 0.22	165.3 ± 1.3	-0.9 ± 0.4	164.4 ± 1.4	1.020	10.20 ± 0.20
3	85.89	10.22 ± 0.21	138.0 ± 1.5	-0.8 ± 0.4	137.2 ± 1.6	1.017	8.53 ± 0.16
4	88.37	9.72 ± 0.19	109.2 ± 1.1	-0.8 ± 0.4	108.4 ± 1.2	1.013	6.99 ± 0.13
5	89.78	9.45 ± 0.19	91.6 ± 1.3	-0.8 ± 0.4	90.8 ± 1.4	1.010	5.20 ± 0.09
6	91.85	9.08 ± 0.17	67.8 ± 1.4	-0.7 ± 0.4	67.1 ± 1.5	1.007	4.22 ± 0.08
7	93.83	8.75 ± 0.16	46.0 ± 1.1	-0.7 ± 0.4	45.3 ± 1.2	1.004	1.60 ± 0.05
8	94.82	8.59 ± 0.16	35.6 ± 1.1	-0.7 ± 0.3	34.9 ± 1.1	1.003	0.99 ± 0.02
9	95.80	8.43 ± 0.16	25.5 ± 1.1	-0.7 ± 0.3	24.8 ± 1.1	1.001	0.41 ± 0.01

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-8 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

No. of substituted 0.87 wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ clusters : 1
 Void fraction : 100 % ^{10}B content in D_2O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m^{-2})	Measured decay constant α' (sec^{-1})	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec^{-1})	Corrected decay constant α (sec^{-1}) [*]	$\frac{\lambda}{\lambda_c}$	Subcritical reactivity ($-\beta$)
1	77.84	12.12 ± 0.27	308.3 ± 1.1	-1.0 ± 0.5	307.3 ± 1.2	1.036	14.93 ± 0.21
2	80.71	11.38 ± 0.24	261.2 ± 1.5	-1.0 ± 0.5	260.2 ± 1.6	1.032	12.71 ± 0.17
3	83.73	10.68 ± 0.22	224.0 ± 2.0	-1.0 ± 0.5	223.1 ± 2.1	1.028	10.56 ± 0.14
4	86.70	10.05 ± 0.20	186.6 ± 1.7	-0.9 ± 0.4	185.7 ± 1.7	1.023	8.63 ± 0.11
5	89.85	9.44 ± 0.18	151.6 ± 1.3	-0.9 ± 0.4	150.8 ± 1.4	1.019	6.75 ± 0.08
6	92.86	8.91 ± 0.17	119.6 ± 1.5	-0.8 ± 0.4	118.8 ± 1.6	1.014	5.10 ± 0.06
7	96.29	8.35 ± 0.15	87.0 ± 1.6	-0.8 ± 0.4	86.3 ± 1.6	1.010	3.39 ± 0.04
8	98.79	7.98 ± 0.14	64.6 ± 1.4	-0.7 ± 0.3	63.9 ± 1.4	1.007	2.23 ± 0.03
9	101.76	7.57 ± 0.13	39.3 ± 1.1	-0.7 ± 0.3	38.6 ± 1.1	1.003	0.96 ± 0.01
10	103.38	7.36 ± 0.13	26.1 ± 1.1	-0.6 ± 0.3	25.5 ± 1.1	1.001	0.30 ± 0.0

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-9 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

No. of substituted 0.87 wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ clusters : 5
 Void fraction : 100 % ^{10}B content in D_2O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m^{-2})	Measured decay constant α' (sec^{-1})	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec^{-1})	Corrected decay constant α (sec^{-1}) [*]	$\frac{\lambda}{\lambda_c}$	Subcritical reactivity ($-\beta$)
1	75.80	12.69 ± 0.29	305.5 ± 1.6	-1.0 ± 0.5	304.5 ± 1.7	1.034	15.37 ± 0.38
2	78.76	11.88 ± 0.26	258.7 ± 1.9	-1.0 ± 0.5	257.7 ± 2.0	1.030	12.87 ± 0.32
3	81.85	11.11 ± 0.24	217.0 ± 1.5	-0.9 ± 0.5	216.1 ± 1.6	1.025	10.47 ± 0.26
4	84.83	10.44 ± 0.21	176.4 ± 2.0	-0.9 ± 0.4	175.5 ± 2.0	1.021	8.34 ± 0.20
5	87.85	9.82 ± 0.20	140.1 ± 1.6	-0.8 ± 0.4	139.3 ± 1.6	1.016	6.35 ± 0.15
6	91.34	9.17 ± 0.18	99.3 ± 2.1	-0.8 ± 0.4	98.5 ± 2.1	1.011	4.24 ± 0.10
7	93.84	8.74 ± 0.16	74.7 ± 1.2	-0.7 ± 0.4	74.0 ± 1.3	1.008	2.85 ± 0.07
8	96.83	8.27 ± 0.15	45.1 ± 1.2	-0.7 ± 0.3	44.4 ± 1.2	1.004	1.30 ± 0.03
9	99.33	7.90 ± 0.14	21.5 ± 1.1	-0.7 ± 0.3	20.8 ± 1.1	1.000	0.09 ± 0.0

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-10 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

No. of substituted 0.87 wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ clusters : 9
 Void fraction : 100 % ^{10}B content in D_2O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m^{-2})	Measured decay constant α' (sec^{-1})	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec^{-1})	Corrected decay constant α (sec^{-1}) [*]	$\frac{\Lambda}{\Lambda_c}$	Subcritical reactivity ($-\beta$)
1	77.71	12.15 ± 0.27	255.9 ± 1.4	-1.0 ± 0.5	254.9 ± 1.5	1.029	12.98 ± 0.44
2	80.75	11.37 ± 0.24	202.3 ± 1.1	-0.9 ± 0.5	201.4 ± 1.2	1.024	10.26 ± 0.34
3	83.69	10.69 ± 0.22	161.3 ± 1.9	-0.8 ± 0.4	160.5 ± 1.9	1.019	7.86 ± 0.25
4	86.81	10.03 ± 0.20	118.4 ± 1.5	-0.8 ± 0.4	117.6 ± 1.6	1.014	5.53 ± 0.17
5	89.86	9.44 ± 0.18	81.2 ± 1.2	-0.7 ± 0.4	80.5 ± 1.3	1.009	3.45 ± 0.11
6	92.81	8.92 ± 0.17	49.0 ± 1.2	-0.7 ± 0.4	48.3 ± 1.3	1.004	1.61 ± 0.05
7	95.36	8.50 ± 0.16	21.4 ± 1.1	-0.7 ± 0.3	20.7 ± 1.2	1.000	0.14 ± 0.01

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-11 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

No. of substituted 0.87 wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ clusters : 13
 Void fraction : 100 % ^{10}B content in D_2O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m^{-2})	Measured decay constant α' (sec^{-1})	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec^{-1})	Corrected decay constant α (sec^{-1}) [*]	$\frac{\Lambda}{\Lambda_c}$	Subcritical reactivity ($-\beta$)
1	71.71	13.95 ± 0.33	328.3 ± 1.6	-1.1 ± 0.6	327.2 ± 1.7	1.033	17.48 ± 0.46
2	74.72	13.00 ± 0.30	271.5 ± 1.1	-1.1 ± 0.6	270.5 ± 1.3	1.029	14.39 ± 0.37
3	77.83	12.12 ± 0.27	221.3 ± 1.5	-1.0 ± 0.5	220.3 ± 1.6	1.024	11.43 ± 0.29
4	80.85	11.35 ± 0.24	173.6 ± 1.3	-0.9 ± 0.5	172.7 ± 1.4	1.020	8.75 ± 0.22
5	83.73	10.68 ± 0.22	133.1 ± 1.6	-0.8 ± 0.4	132.3 ± 1.7	1.015	6.38 ± 0.16
6	86.80	10.03 ± 0.20	90.6 ± 1.2	-0.8 ± 0.4	89.8 ± 1.3	1.010	4.04 ± 0.10
7	89.79	9.45 ± 0.18	53.3 ± 1.2	-0.7 ± 0.4	52.6 ± 1.3	1.005	1.93 ± 0.05
8	91.80	9.09 ± 0.17	30.2 ± 1.1	-0.7 ± 0.4	29.5 ± 1.2	1.002	0.61 ± 0.02

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-12 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

No. of substituted 0.87 wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ clusters : 21
 Void fraction : 100 % ^{10}B content in D_2O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m^{-2})	Measured decay constant α' (sec^{-1})	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec^{-1})	Corrected decay constant α (sec^{-1}) [*]	$\frac{\Lambda}{\Lambda_c}$	subcritical reactivity ($-\beta$)
1	71.85	13.90 ± 0.33	282.1 ± 1.6	-1.1 ± 0.5	281.0 ± 1.7	1.033	16.46 ± 0.42
2	74.86	12.96 ± 0.30	225.1 ± 1.1	-1.0 ± 0.5	224.1 ± 1.2	1.027	12.75 ± 0.32
3	77.87	12.11 ± 0.27	172.7 ± 1.9	-0.9 ± 0.5	171.8 ± 2.0	1.021	9.45 ± 0.23
4	80.83	11.36 ± 0.24	124.2 ± 1.3	-0.8 ± 0.5	123.4 ± 1.4	1.015	6.45 ± 0.16
5	83.83	10.66 ± 0.22	77.1 ± 1.4	-0.8 ± 0.4	76.3 ± 1.5	1.009	3.66 ± 0.09
6	85.87	10.22 ± 0.21	48.9 ± 1.2	-0.7 ± 0.4	48.2 ± 1.3	1.005	1.89 ± 0.05
7	87.86	9.82 ± 0.20	22.3 ± 1.1	-0.7 ± 0.4	21.6 ± 1.2	1.001	0.26 ± 0.01

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-13 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

No. of substituted 0.87 wt% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ clusters : 25
 Void fraction : 100 % ^{10}B content in D_2O : 0 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m^{-2})	Measured decay constant α' (sec^{-1})	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec^{-1})	Corrected decay constant α (sec^{-1}) [*]	$\frac{\Lambda}{\Lambda_c}$	Subcritical reactivity ($-\beta$)
1	69.79	14.61 ± 0.36	308.6 ± 1.6	0.0 ± 0.6	308.6 ± 1.7	1.034	17.79 ± 0.50
2	72.79	13.60 ± 0.32	249.6 ± 2.5	0.0 ± 0.5	249.6 ± 2.5	1.028	14.03 ± 0.39
3	75.78	12.69 ± 0.29	193.2 ± 1.5	-1.0 ± 0.5	192.2 ± 1.6	1.022	10.56 ± 0.29
4	78.79	11.87 ± 0.26	140.9 ± 1.4	-0.9 ± 0.4	140.0 ± 1.5	1.016	7.34 ± 0.20
5	81.80	11.12 ± 0.24	90.5 ± 1.2	-0.8 ± 0.4	89.7 ± 1.3	1.010	4.38 ± 0.12
6	83.79	10.67 ± 0.22	59.7 ± 1.3	-0.8 ± 0.4	58.9 ± 1.4	1.006	2.55 ± 0.07
7	85.79	10.24 ± 0.21	31.6 ± 1.1	-0.7 ± 0.4	30.9 ± 1.2	1.002	0.81 ± 0.02
8	86.39	10.11 ± 0.20	23.8 ± 1.2	-0.7 ± 0.4	23.1 ± 1.3	1.001	0.31 ± 0.01

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-14 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

1.2 wt% UO_2 uniform core (97-clusters)Void fraction : 0 % ^{10}B content in D_2O : 3.9 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m^{-2})	Measured decay constant α' (sec^{-1})	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec^{-1})	Corrected decay constant α (sec^{-1}) [*]	$\frac{\Lambda}{\Lambda_c}$	Subcritical reactivity ($-\beta$)
1	135.60	4.64 ± 0.06	88.0 ± 1.2	0.6 ± 0.1	88.6 ± 1.2	1.008	3.45 ± 0.05
2	138.76	4.44 ± 0.06	80.0 ± 1.3	0.6 ± 0.1	80.6 ± 1.3	1.007	3.01 ± 0.04
3	141.84	4.26 ± 0.06	71.2 ± 1.1	0.6 ± 0.1	71.8 ± 1.2	1.006	2.62 ± 0.04
4	144.90	4.10 ± 0.05	64.6 ± 1.1	0.6 ± 0.1	65.2 ± 1.3	1.005	2.25 ± 0.03
5	148.81	3.90 ± 0.05	55.3 ± 1.1	0.7 ± 0.1	56.0 ± 1.1	1.004	1.80 ± 0.03
6	153.51	3.68 ± 0.04	45.5 ± 1.2	0.7 ± 0.1	46.2 ± 1.2	1.003	1.31 ± 0.02
7	156.90	3.53 ± 0.04	39.2 ± 1.2	0.8 ± 0.1	40.0 ± 1.2	1.002	0.99 ± 0.02

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-15 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

1.2 wt% UO_2 uniform core (97-clusters)Void fraction : 100 % ^{10}B content in D_2O : 3.9 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m^{-2})	Measured decay constant α' (sec^{-1})	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec^{-1})	Corrected decay constant α (sec^{-1}) [*]	$\frac{\Lambda}{\Lambda_c}$	Subcritical reactivity ($-\beta$)
1	108.74	6.55 ± 0.11	178.9 ± 1.5	-0.4 ± 0.4	178.5 ± 1.6	1.027	8.20 ± 0.08
2	111.79	6.24 ± 0.10	159.1 ± 1.2	-0.4 ± 0.4	158.7 ± 1.4	1.024	7.16 ± 0.06
3	114.78	5.95 ± 0.09	141.3 ± 1.5	-0.3 ± 0.4	141.0 ± 1.5	1.021	6.20 ± 0.05
4	117.79	5.68 ± 0.09	123.6 ± 1.1	-0.3 ± 0.4	123.3 ± 1.3	1.018	5.30 ± 0.05
5	120.72	5.44 ± 0.08	107.6 ± 1.5	-0.3 ± 0.4	107.3 ± 1.6	1.016	4.47 ± 0.04
6	123.94	5.19 ± 0.08	90.9 ± 1.1	-0.2 ± 0.4	90.7 ± 1.3	1.013	3.61 ± 0.03
7	126.72	4.97 ± 0.07	76.3 ± 1.2	-0.2 ± 0.4	76.1 ± 1.4	1.010	2.85 ± 0.02
8	129.78	4.77 ± 0.07	62.5 ± 1.4	-0.1 ± 0.4	62.4 ± 1.5	1.008	2.18 ± 0.02
9	133.91	4.51 ± 0.06	44.7 ± 1.0	-0.1 ± 0.4	44.6 ± 1.3	1.005	1.26 ± 0.01
10	137.90	4.28 ± 0.06	28.8 ± 1.1	0.0 ± 0.4	28.8 ± 1.3	1.002	0.43 ± 0.00

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-16 Relation between axial buckling, prompt decay and subcritical reactivity

No. of substituted 0.54 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 25Void fraction : 0 % ¹⁰B content in D₂O : 3.9 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m ⁻²)	Measured decay constant α' (sec ⁻¹)	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec ⁻¹)	Corrected decay constant α (sec ⁻¹)*	$\frac{\Lambda}{\Lambda_c}$	Subcritical reactivity (- β)
1	99.70	8.16 ± 0.15	135.7 ± 1.8	0.1 ± 0.2	135.8 ± 1.8	1.011	6.98 ± 0.12
2	101.73	7.86 ± 0.14	123.4 ± 1.7	0.1 ± 0.2	123.5 ± 1.7	1.011	6.23 ± 0.10
3	103.79	7.58 ± 0.13	111.2 ± 1.7	0.2 ± 0.2	111.4 ± 1.7	1.009	5.50 ± 0.09
4	105.90	7.31 ± 0.13	99.1 ± 1.4	0.3 ± 0.2	99.4 ± 1.5	1.008	4.79 ± 0.08
5	108.84	6.95 ± 0.12	82.2 ± 1.1	0.4 ± 0.2	82.6 ± 1.2	1.007	3.84 ± 0.06
6	111.83	6.62 ± 0.11	66.9 ± 1.2	0.4 ± 0.2	67.3 ± 1.3	1.005	2.93 ± 0.04
7	114.80	6.31 ± 0.10	52.2 ± 1.4	0.5 ± 0.2	52.7 ± 1.4	1.004	2.08 ± 0.03
8	117.85	6.01 ± 0.09	38.5 ± 1.1	0.6 ± 0.2	39.1 ± 1.2	1.002	1.26 ± 0.02
9	120.79	5.74 ± 0.09	25.6 ± 1.2	0.6 ± 0.2	26.2 ± 1.2	1.001	0.51 ± 0.01

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

Table A2-17 Relation between axial buckling, prompt decay constant and subcritical reactivity

No. of substituted 0.54 wt% PuO₂-UO₂ clusters : 25Void fraction : 100 % ¹⁰B content in D₂O : 3.9 ppm

No.	Moderator level (cm)	B_z^2 (m ⁻²)	Measured decay constant α' (sec ⁻¹)	Correction for α' $\delta\alpha$ (sec ⁻¹)	Corrected decay constant α (sec ⁻¹)*	$\frac{\Lambda}{\Lambda_c}$	Subcritical reactivity (- β)
1	95.78	8.19 ± 0.15	208.4 ± 1.6	- 0.3 ± 0.4	208.1 ± 1.7	1.036	12.73 ± 0.68
2	97.72	7.91 ± 0.14	190.9 ± 2.3	- 0.3 ± 0.4	190.6 ± 2.3	1.033	11.46 ± 0.61
3	99.74	7.63 ± 0.13	170.4 ± 1.3	- 0.5 ± 0.4	169.9 ± 1.5	1.029	10.19 ± 0.54
4	101.73	7.37 ± 0.13	151.9 ± 2.0	- 0.5 ± 0.4	151.4 ± 2.0	1.026	9.00 ± 0.47
5	103.78	7.12 ± 0.12	135.2 ± 1.5	- 0.7 ± 0.4	134.5 ± 1.6	1.023	7.83 ± 0.41
6	106.82	6.76 ± 0.11	112.3 ± 1.4	- 0.7 ± 0.4	111.6 ± 1.6	1.019	6.19 ± 0.32
7	109.96	6.42 ± 0.10	87.8 ± 1.3	- 0.7 ± 0.4	87.1 ± 1.5	1.014	4.61 ± 0.24
8	112.79	6.14 ± 0.10	67.9 ± 1.1	- 0.6 ± 0.4	67.3 ± 1.4	1.010	3.28 ± 0.17
9	115.82	5.86 ± 0.09	47.5 ± 1.2	- 0.6 ± 0.4	46.9 ± 1.4	1.006	1.95 ± 0.10
10	118.83	5.59 ± 0.08	25.8 ± 1.2	- 0.4 ± 0.4	25.4 ± 1.3	1.002	0.71 ± 0.04

* Being corrected to the value at 22°C for the core temperature and for the effect due to insertion of the detector guide tube

付録3 振動論による反応度解析コード

第6章「振動論による解析」の第6.1節「解析方法」にちとづき、二値線形心で中性子エネルギーが3群の広散計算結果を用いて振動論による冷却材ボイド反応度の解析ができるように計算コードを作成した。コードの内容および出力結果の一例を示した。

```

YJOB      ID=PERTURBO
YFTTC

C ***** REACTIVITY CALCULATION *****
C ***** MAIN PROGRAM *****
C
1  COMMON /FLUX/  FA(3,100),FB(3,100),N,TITLE(10)
2  COMMON /DCA1/  X(3),SFAC(3,3),CFAC(3,100),M,NRG
3  COMMON /DCA2/  SRA(3,3),SRH(3,3)
4  COMMON /DCA3/  DRA(3,3),DRR(3,3),DZA(3,3),DZB(3,3),DZC(3,3),BZ,RR
5  COMMON /DCA4/  SAA(3,3),SAR(3,3)
6  COMMON /DOUT/  BUNBO,BNS11,BNS12,BNS13,BNS14,BNS15
7  COMMON /OUTP/  BNSIC,BNSIP,WFIGT
8  COMMON /REGN/  MNC6)
9  DATA DEND /8HYSTOP /
10 C
100 FORMAT(10A8)
C
11 CONTINUE
12 READ(5,100)TITLE
13 IF(TITLE(1).EQ. DEND) GO TO 999
14 CALL CDREAD
15 CALL CAL1
16 CALL CAL2
17 CALL CAL3
18 CALL CAL4
19 CALL CAL5
20 CALL CAL6
21 CALL OUTPUT
22 GO TO 10
23 999 CONTINUE
24 STOP
25 END

```

```

23 READ(5,10)DH,M,NRG
24 MM=2*NRG-1
25 READ(5,10) (MNC(I),I=1,MM)
26 IF(MNC(1).EQ.1) MNC(1)=M
27 READ(5,10)IX
28 NRG=100*IX
29 READ(5,10)HZ
30 DO 30 I=1,NRG
31 READ(5,100) (SAC(I,J),J=1,3)
32 READ(5,100) (SAC(I,J),J=1,3)
33 READ(5,100) (CRAC(I,J),J=1,3)
34 READ(5,100) (CRAC(I,J),J=1,3)
35 READ(5,100) (OZAC(I,J),J=1,3)
36 READ(5,100) (OZAC(I,J),J=1,3)
37 DO 40 I=1,NRG
38 READ(5,100) (SARC(I,J),J=1,3)
39 READ(5,100) (SARC(I,J),J=1,3)
40 READ(5,100) (SFB(I,J),J=1,3)
41 READ(5,100) (SFB(I,J),J=1,3)
42 READ(5,100) (ORBI(I,J),J=1,3)
43 READ(5,100) (ORBI(I,J),J=1,3)
44 READ(5,100) (OZBI(I,J),J=1,3)
45 READ(5,100) (OZBI(I,J),J=1,3)

```

```

1 SUBROUTINE COREAD
2 COMMON /FNUX/ FNA(3,100),FNB(3,100),FNC(3,100),FND(3,100)
3 COMMON /GFA/ GFA(3,100),GFH(3,100),GFI(3,100),GFJ(3,100)
4 COMMON /DCA1/ X(3),SFA(3,3),SFH(3,3),SFI(3,3),SFJ(3,3)
5 COMMON /DCA2/ SRA(3,3),SRH(3,3),SRI(3,3),SRJ(3,3)
6 COMMON /DCA3/ DRA(3,3),DRH(3,3),DRI(3,3),DRJ(3,3)
7 COMMON /DCA4/ SAA(3,3),SAH(3,3),SAI(3,3),SAJ(3,3)
8 COMMON /HFCN/ MN(6)
9
10 C
11 C
12 C
13 C
14 C
15 C
16 C
17 C
18 C
19 C
20 C
21 C
22 C
23 C
24 C
25 C
26 C
27 C
28 C
29 C
30 C
31 C
32 C
33 C
34 C
35 C
36 C
37 C
38 C
39 C
40 C
41 C
42 C
43 C
44 C
45 C
46 C
47 C
48 C
49 C
50 C
51 C
52 C
53 C
54 C
55 C
56 C
57 C
58 C
59 C
60 C
61 C
62 C
63 C
64 C
65 C
66 C
67 C
68 C
69 C
70 C
71 C
72 C

```

```

42 40 CONTINUE
43 DO 10 J=1,3
44 READ(5,120)(FA(J,I),I=1,N)
45 10 CONTINUE
46 DO 20 J=1,3
47 READ(5,120)(FR(J,I),I=1,N)
48 20 CONTINUE
49
50 WRITE(6,200)TITLE
51 WRITE(6,210)X
52 WRITE(6,220)
53 DO 50 I=1,NRG
54 IF(1.GT.3) WRITE(6,300)
55 WRITE(6,230) 1
56 WRITE(6,260) (SFA(I,J),J=1,3)
57 WRITE(6,270) (SAA(I,J),J=1,3)
58 WRITE(6,280) (SRA(I,J),J=1,3)
59 WRITE(6,285) (DRA(I,J),J=1,3)
60 WRITE(6,290) (DZA(I,J),J=1,3)
61 50 CONTINUE
62 WRITE(6,240)
63 DO 60 K=1,NRG
64 IF(K.GT.3) WRITE(6,300)
65 WRITE(6,230) K
66 WRITE(6,260) (SFR(K,J),J=1,3)
67 WRITE(6,270) (SAR(K,J),J=1,3)
68 WRITE(6,280) (SRB(K,J),J=1,3)
69 WRITE(6,285) (DRB(K,J),J=1,3)
70 WRITE(6,290) (DZB(K,J),J=1,3)
71 60 CONTINUE
72 RETURN
73 END

```

```

1      SUBROUTINE CAL1
2      COMMON /FLUX/ FA(3,100),FB(3,100),N,TITLE(10)
2      1      ,GFA(3,100),GFB(3,100),M,NRG
3      COMMON /DCA1/ X(3),SFA(3,3),SFB(3,3)
4      COMMON /DOUT/ BUNBO,BNSI1,BNSI2,BNSI3,BNSI4,BNSI5
5      COMMON /REGN/ MN(6)

C
C
6      SUM=0.0
7      DO 10 I=1,N
8      IVOL=I
9      DO 10 J=1,3
10     DO 10 K=1,3
11     GO TO (30,40,50),NRG
12     30 L=1
13     IF(I.GT.M) IVOL=I-M
14     GO TO 60
15     40 IF(I.LE.MN(1).OR.MN(2).LT.I.AND.I.LE.MN(3)) L=1
16     IF(MN(1).LT.I.AND.I.LE.MN(2).OR.MN(3).LT.I) L=2
17     IF(I.GT.MN(2)) IVOL=I-M
18     GO TO 60
19     50 IF(I.LE.MN(1).OR.MN(3).LT.I.AND.I.LE.MN(4)) L=1
20     IF(MN(1).LT.I.AND.I.LE.MN(2).OR.MN(4).LT.I.AND.I.LE.MN(5)) L=2
21     IF(MN(2).LT.I.AND.I.LE.MN(3).OR.MN(5).LT.I) L=3
22     IF(I.GT.MN(3)) IVOL=I-M
23     60 SUM=SUM+(X(J)*SFB(L,K)*FA(J,I)*FB(K,I))*FLOAT(IVOL)
24     10 CONTINUE
25     BUNBO=SUM
26     RETURN
27     END

```

```

1      SUBROUTINE CAL2
2      COMMON /FLUX/ FA(3,100),FB(3,100),N,TITLE(10)
2      1      ,GFA(3,100),GFB(3,100),M,NRG
3      COMMON /DCA1/ X(3),SFA(3,3),SFB(3,3)
4      COMMON /DOUT/ BUNBO,BNSI1,BNSI2,BNSI3,BNSI4,BNSI5
5      COMMON /REGN/ MN(6)

C
C
6      SUM=0.0
7      DO 10 I=1,N
8      IVOL=I
9      DO 10 J=1,3
10     DO 10 K=1,3
11     GO TO (30,40,50),NRG
12     30 L=1
13     IF(I.GT.M) IVOL=I-M
14     GO TO 60
15     40 IF(I.LE.MN(1).OR.MN(2).LT.I.AND.I.LE.MN(3)) L=1
16     IF(MN(1).LT.I.AND.I.LE.MN(2).OR.MN(3).LT.I) L=2
17     IF(I.GT.MN(2)) IVOL=I-M
18     GO TO 60
19     50 IF(I.LE.MN(1).OR.MN(3).LT.I.AND.I.LE.MN(4)) L=1
20     IF(MN(1).LT.I.AND.I.LE.MN(2).OR.MN(4).LT.I.AND.I.LE.MN(5)) L=2
21     IF(MN(2).LT.I.AND.I.LE.MN(3).OR.MN(5).LT.I) L=3
22     IF(I.GT.MN(3)) IVOL=I-M
23     60 SUM=SUM+(X(J)*(SFB(L,K)-SFA(L,K))*FA(J,I)*FB(K,I))*FLOAT(IVOL)
24     10 CONTINUE
25     BNSI1=SUM
26     RETURN
27     END

```

```

1 SUBROUTINE CAL3
2 COMMON /FLUX/ FAC(3,100),FAC(3,100),N,TITLE(1)
3 COMMON /GFA(3,100)/GFA(3,100),M,NRG
4 COMMON /DCA2/ SRAC(3,3),SRAC(3,3)
5 COMMON /FIS3/ FIAC(3,3),FIAC(3,3)
6 COMMON /DOUT/ DUNBO,BNS11,BNS12,BNS13,BNS14,BNS15
7 COMMON /OUTP/ BNSIC,BNS1F,WEIGT
8 COMMON /REGN/ MNC(6)
9
10 SUM=0.0
11 SUMW=0.0
12 SUMC=0.0
13 SUMD=0.0
14 SUME=0.0
15 DO 10 J=1,3
16 DO 10 I=1,N
17 IVOL=1
18 GO TO (30,40,50),NRG
19
20 L=1
21 IF(1,GT,9) IVOL=1-M
22 GO TO 60
23 IF(1,LE,MN(1),OR,MN(2),LT,1,AND,1,LE,MN(3)) L=1
24 IF(MN(1),LT,1,AND,1,LE,MN(2),OR,MN(3),LT,1) L=2
25 IF(1,GT,MN(2)) IVOL=1-M
26 GO TO 60
27 IF(1,LE,MN(1),OR,MN(3),LT,1,AND,1,LE,MN(2)) L=1
28 IF(MN(1),LT,1,AND,1,LE,MN(2),OR,MN(3),LT,1,AND,1,LE,MN(5)) L=2
29 IF(1,GT,MN(3)) IVOL=1-M
30 SUM=SUM+FA(J,I)*FB(J,I)*FLOAT(IVOL)
31 SUMC=SUMC+(SAK(L,I)-FIB(L,I))-(SAA(L,I)-FIA(L,I))*FA(J,I)*FB(J,I)
32 SUMD=SUMD+(SRH(L,I)-SRAL(J,I)*FA(J,I))*FB(J,I)*FLOAT(IVOL)
33 SUME=SUME+(SRH(L,I)-SAA(L,I))*FA(J,I)*FB(J,I)*FLOAT(IVOL)
34 SUMF=SUMF+(SRH(L,I)-SAA(L,I))*FA(J,I)*FB(J,I)*FLOAT(IVOL)
35
36 CONTINUE
37 DO 20 J=1,3
38 GO TO (100,200,300),NRG
39 NA=MNC(3)
40 DO 20 I=1,NW
41 IF(1,LE,MN(1),OR,MN(2),LT,1) LI=1
42 IF(MN(1),LT,1,AND,1,LE,MN(3)) LI=0
43 IVOL=1
44 IF(1,GT,MN(2)) IVOL=1-M
45 GO TO 400
46 NA=MNC(4)
47 DO 20 I=1,NW
48 IF(1,LE,MN(1),OR,MN(3),LT,1) LI=1
49 IF(MN(1),LT,1,AND,1,LE,MN(3)) LI=0
50 IVOL=1
51 IF(1,GT,MN(2)) IVOL=1-M
52 SUMW=SUMW+FA(J,I)*FB(J,I)*FLOAT(IVOL*LI)
53
54 CONTINUE
55 WEIGT=SUMW/SUM
56
57 BNS13=SUMA
58 BNS1C=SUMC
59 BNS1R=SUMD
60 RETURN
61 END

```

```

1 SUBROUTINE CAL3
2 COMMON /FLUX/ FAC(3,100),FAC(3,100),N,TITLE(1)
3 COMMON /GFA(3,100)/GFA(3,100),M,NRG
4 COMMON /DCA2/ SRAC(3,3),SRAC(3,3)
5 COMMON /DOUT/ DUNBO,BNS11,BNS12,BNS13,BNS14,BNS15
6 COMMON /REGN/ MNC(6)
7
8 SUM=0.0
9 SUMW=0.0
10 SUMC=0.0
11 SUMD=0.0
12 SUME=0.0
13 DO 10 J=1,3
14 DO 10 I=1,N
15 IVOL=1
16 GO TO (30,40,50),NRG
17
18 L=1
19 IF(1,GT,9) IVOL=1-M
20 GO TO 60
21 IF(1,LE,MN(1),OR,MN(2),LT,1,AND,1,LE,MN(3)) L=1
22 IF(MN(1),LT,1,AND,1,LE,MN(2),OR,MN(3),LT,1,AND,1,LE,MN(5)) L=2
23 IF(1,GT,MN(2)) IVOL=1-M
24 GO TO 60
25 IF(1,LE,MN(1),OR,MN(3),LT,1,AND,1,LE,MN(2)) L=1
26 IF(MN(1),LT,1,AND,1,LE,MN(2),OR,MN(3),LT,1,AND,1,LE,MN(5)) L=2
27 IF(1,GT,MN(3)) IVOL=1-M
28 SUM=SUM+FA(J,I)*FB(J,I)*FLOAT(IVOL)
29 SUMC=SUMC+(SAK(L,I)-FIB(L,I))-(SAA(L,I)-FIA(L,I))*FA(J,I)*FB(J,I)
30 SUMD=SUMD+(SRH(L,I)-SRAL(J,I)*FA(J,I))*FB(J,I)*FLOAT(IVOL)
31 SUME=SUME+(SRH(L,I)-SAA(L,I))*FA(J,I)*FB(J,I)*FLOAT(IVOL)
32 SUMF=SUMF+(SRH(L,I)-SAA(L,I))*FA(J,I)*FB(J,I)*FLOAT(IVOL)
33
34 CONTINUE
35 DO 20 J=1,3
36 GO TO (100,200,300),NRG
37 NA=MNC(3)
38 DO 20 I=1,NW
39 IF(1,LE,MN(1),OR,MN(2),LT,1) LI=1
40 IF(MN(1),LT,1,AND,1,LE,MN(3)) LI=0
41 IVOL=1
42 IF(1,GT,MN(2)) IVOL=1-M
43 GO TO 400
44 NA=MNC(4)
45 DO 20 I=1,NW
46 IF(1,LE,MN(1),OR,MN(3),LT,1) LI=1
47 IF(MN(1),LT,1,AND,1,LE,MN(3)) LI=0
48 IVOL=1
49 IF(1,GT,MN(2)) IVOL=1-M
50 SUMW=SUMW+FA(J,I)*FB(J,I)*FLOAT(IVOL*LI)
51
52 CONTINUE
53 WEIGT=SUMW/SUM
54
55 BNS13=SUMA
56 BNS1C=SUMC
57 BNS1R=SUMD
58 RETURN
59 END

```



```

1 SUBROUTINE CAL/5
2 COMMON /FLUX/ FAC(3,100),FR(3,100),N,TITLF(10)
3 ,FPA(3,100),CFR(3,100),M,ARG
4 COMMON /DCA3/ DRA(3,3),DRB(3,3),D7AC(3,5),D7BC(3,5),WZ,MF
5 COMMON /DOIT/ DOHRO,IBN(11),NSIP2,IBN513,IBN514,IBN515
6 COMMON /RECH/ MH(6)
7
8 X=M
9 XFMESH=150.0/ X4
10 XVMESH=XFMESH*20RT(2.0)
11 M1=M+1
12 M2=M-1
13
14 DO 10 J=1,3
15 DO 16 I=1,M1
16 K=1+I
17 IF(1.-CF, .4) GO TO 11
18 GFAC(J,2)=ABS((FAC(J,K)-FAC(J,1))/XFMESH)
19 GFCBJ,K)=ABS((FBC(J,K)-FBC(J,1))/XFMESH)
20 GO TO 16
21 11 CONTINUE
22 IF(K .NE. M1) GO TO 12
23 GFAC(J,K)=ABS((FAC(J,K)-FAC(J,1))/XFMESH)
24 GFCBJ,K)=ABS((FBC(J,K)-FBC(J,1))/XFMESH)
25 GO TO 16
26 12 CONTINUE
27 GFAC(J,K)=.35((FAC(J,K)-FAC(J,1))/XFMESH)
28 GFCBJ,K)=.35((FBC(J,K)-FBC(J,1))/XFMESH)
29 16 CONTINUE
30 16 CONTINUE
31
32 SUM=D,0
33 DO 20 J=1,3
34 DO 20 I=1,M
35 IVOL=1
36 GO TO (30,40,50),NEG
37 L=1
38 IF(1.-GT,M) IVOL=1-M
39 GO TO 50
40 IF(1.-LF,MN(1),OP,MN(2),LT,1,AND,1,1F,MN(3)) L=1
41 IF(MN(1),LT,1,AND,1,1F,MN(2),OP,MN(3),LT,1) L=2
42 IF(1.-GT,MN(2)) IVOL=1-M
43 GO TO 50
44 IF(1.-LF,MN(1),OP,MN(3),LT,1,AND,1,1F,MN(4)) L=1
45 IF(MN(1),LT,1,AND,1,1F,MN(2),OP,MN(4),LT,1,AND,1,1F,MN(5)) L=1
46 IF(MN(2),LT,1,AND,1,1F,MN(3),OP,MN(5),LT,1) L=5
47 IF(1.-GT,MN(3)) IVOL=1-M
48 SUM=SUM+((DRH(L,J)-DRA(L,1))*GFA(J,1)+GFB(J,1))*FLOAT(IVOL)
49 20 CONTINUE
50 IBN515=SUM
51 RETURN
52 END

```

```

1 SUBROUTINE CAL5
2 COMMON /FLUX/ FAC(3,100),FBC(3,100),N,TITLE(10)
3 COMMON /DC3/ DRA(3,3),DRB(3,3),DZA(3,3),DZB(3,3),BZ,BR
4 COMMON /DOUT/ BUNBO,BNS11,BNS12,BNS13,BNS14,BNS15
5 COMMON /RECN/ MN(6)
6
7 B=H2
8 SUM=B.0
9 DO 10 J=1,3
10 DO 10 I=1,N
11 IVOL=1
12 CO TO (30,40,50),NRC
13 L=1
14 IF(I.GT.M) IVOL=I-M
15 GO TO 60
16 IF(MN(1).OR.MN(2).LT.1.AND.1.LE.MN(3)) L=1
17 IF(MN(1).LT.1.AND.1.LE.MN(2).OR.MN(3).LT.1) L=2
18 IF(I.GT.MN(2)) IVOL=I-M
19 GO TO 60
20 IF(1.LE.MN(1).OR.MN(2).LT.1.AND.1.LE.MN(3)) L=1
21 IF(MN(1).LT.1.AND.1.LE.MN(2).OR.MN(3).LT.1) L=2
22 IF(MN(2).LT.1.AND.1.LE.MN(3).OR.MN(5).LT.1) L=3
23 IF(1.GT.MN(3)) IVOL=I-M
24 SUM=SUM+((DZB(L,J)-DZA(L,J))*B*FA(J,I))*FBOAT(IVOL)
25 ENSI4=SUM
26 RETURN
27 END

```

*** G-100 X VOID REACTIVITY 0.54 PU 5 + 1.20 92 25CM-PITCH R10-0PP4

GROUP CONSTANT
FISSION SPECTLE

NON-PERTURBED CORE

REGION NO. 1

FAST

RESONANCE

THESE

NO FISSION

0.19178E-02

0.125825-02

8.1278E-01

REMOVAL

0.28465E-01

0.24242.0

0

2-DIFFUSION-2

0.15652F 01

0.12523E 01

0.85295E 00

REGION NO.

4343

RESONANCE

THE

NU FISSION

0.19439E-02

U. 112891-02

10-395601-0

REMOVAL

0.28512E-01

0.24294F-01

10

Z-NOISE-2

0.15671E 01

01 125566

00 767058-0

PERTURBED CORE

REGION NO.	1	FAST	RESONANCE	THERMAL
NU FISSION		0.16314E-02	0.12759E-02	0.15102E-01
ABSORPTION		0.13603E-02	0.33002E-02	0.98073E-02
REMOVAL		0.19169E-01	0.14624E-01	0.
DIFFUSION-R		0.16593E 01	0.13903E 01	0.92167E 00
DIFFUSION-Z		0.17326E 01	0.14363E 01	0.95249E 00

REGION NO.	2	FAST	RESONANCE	THERMAL
NU FISSION		0.16509E-02	0.11417E-02	0.12670E-01
ABSORPTION		0.13420E-02	0.23750E-02	0.86060E-02
REMOVAL		0.19255E-01	0.14646E-01	0.
DIFFUSION-R		0.16621E 01	0.14095E 01	0.94006E 00
DIFFUSION-Z		0.17365E 01	0.14604E 01	0.95700E 00

GROUP 1

POS.	NON-PERTURBED ADJOINT	PERTURBED FLUX	NON-PERTURBED (GLAD)	PERTURBED (GLAD)
1	0.45070E 01	0.66690E 01	0.	0.
2	0.44640E 01	0.66100E 01	0.63300E-02	0.94400E-02
3	0.43810E 01	0.64960E 01	0.13240E-01	0.18240E-01
4	0.42630E 01	0.63410E 01	0.13340E-01	0.24400E-01
5	0.41150E 01	0.61390E 01	0.23580E-01	0.32325E-01
6	0.39440E 01	0.58610E 01	0.27360E-01	0.44480E-01
7	0.37560E 01	0.54270E 01	0.37380E-01	0.69440E-01
8	0.35550E 01	0.51140E 01	0.32160E-01	0.50080E-01
9	0.33480E 01	0.48370E 01	0.33120E-01	0.44320E-01
10	0.31370E 01	0.45660E 01	0.33740E-01	0.43360E-01
11	0.29240E 01	0.42910E 01	0.34780E-01	0.44000E-01
12	0.27080E 01	0.40070E 01	0.34560E-01	0.45440E-01
13	0.24910E 01	0.37140E 01	0.34720E-01	0.46880E-01
14	0.22710E 01	0.34140E 01	0.35200E-01	0.48060E-01
15	0.20510E 01	0.31070E 01	0.35900E-01	0.49120E-01
16	0.18300E 01	0.27950E 01	0.35360E-01	0.49920E-01
17	0.16090E 01	0.24800E 01	0.35360E-01	0.50460E-01
18	0.13890E 01	0.21620E 01	0.35900E-01	0.50880E-01
19	0.11720E 01	0.18440E 01	0.34720E-01	0.50880E-01
20	0.95780E 00	0.15220E 01	0.34720E-01	0.51520E-01
21	0.74830E 00	0.11920E 01	0.33360E-01	0.52800E-01
22	0.55000E 00	0.83350E 00	0.31880E-01	0.57360E-01
23	0.35550E 00	0.34280E 00	0.31120E-01	0.78512E-01
24	0.16870E 00	0.11620E 00	0.29780E-01	0.36256E-01
25	0.44210E 01	0.65380E 01	0.97298E-02	0.14821E-01
26	0.42580E 01	0.61120E 01	0.18441E-01	0.48196E-01
27	0.40320E 01	0.57140E 01	0.25569E-01	0.45029E-01
28	0.37690E 01	0.53570E 01	0.29755E-01	0.40390E-01
29	0.34870E 01	0.50060E 01	0.31905E-01	0.39711E-01
30	0.31940E 01	0.46420E 01	0.33149E-01	0.41182E-01
31	0.28940E 01	0.42570E 01	0.33641E-01	0.43556E-01
32	0.25850E 01	0.38520E 01	0.34620E-01	0.45821E-01
33	0.22760E 01	0.34290E 01	0.35299E-01	0.47857E-01
34	0.19690E 01	0.29920E 01	0.35751E-01	0.49441E-01
35	0.16420E 01	0.25430E 01	0.35978E-01	0.50799E-01
36	0.13240E 01	0.20810E 01	0.35978E-01	0.52692E-01
37	0.10090E 01	0.15780E 01	0.35638E-01	0.56998E-01
38	0.69940E 00	0.74790E 00	0.35027E-01	0.93515E-01
39	0.37810E 00	0.25930E 00	0.36351E-01	0.55279E-01

GROUP 2

POS.	NON-PERTURBED ADJOINT	PETURBED FLUX	NON-PERTURBED (GLAD)	PETURBED (GLAD)
1	0.47670E 01	0.64660E 01	0.	0.
2	0.47190E 01	0.64990E 01	0.76400E-02	0.51200E-02
3	0.46270E 01	0.62980E 01	0.14720E-01	0.17750E-01
4	0.44960E 01	0.61430E 01	0.20560E-01	0.24500E-01
5	0.43330E 01	0.59470E 01	0.26080E-01	0.31350E-01
6	0.41410E 01	0.57100E 01	0.30720E-01	0.37920E-01
7	0.39300E 01	0.54490E 01	0.33760E-01	0.41760E-01
8	0.37100E 01	0.51740E 01	0.35200E-01	0.44000E-01
9	0.34830E 01	0.48990E 01	0.35520E-01	0.44000E-01
10	0.32660E 01	0.46220E 01	0.35520E-01	0.44320E-01
11	0.30430E 01	0.43400E 01	0.35560E-01	0.45120E-01
12	0.28180E 01	0.40510E 01	0.35800E-01	0.46240E-01
13	0.25920E 01	0.37540E 01	0.36160E-01	0.47520E-01
14	0.23630E 01	0.34500E 01	0.36540E-01	0.48840E-01
15	0.21340E 01	0.31390E 01	0.36540E-01	0.49760E-01
16	0.19040E 01	0.28240E 01	0.36400E-01	0.50400E-01
17	0.16740E 01	0.25040E 01	0.36300E-01	0.51200E-01
18	0.14450E 01	0.21810E 01	0.36540E-01	0.51600E-01
19	0.12180E 01	0.18560E 01	0.36320E-01	0.52000E-01
20	0.99430E 00	0.15300E 01	0.35792E-01	0.52160E-01
21	0.77430E 00	0.12020E 01	0.35200E-01	0.52400E-01
22	0.56120E 00	0.87940E 00	0.34795E-01	0.51616E-01
23	0.36040E 00	0.55930E 00	0.32364E-01	0.51216E-01
24	0.16650E 00	0.24480E 00	0.31788E-01	0.50320E-01
25	0.46690E 01	0.63470E 01	0.11287E-01	0.13453E-01
26	0.44790E 01	0.61110E 01	0.21496E-01	0.26700E-01
27	0.42210E 01	0.57890E 01	0.29189E-01	0.36430E-01
28	0.39320E 01	0.54370E 01	0.32697E-01	0.39824E-01
29	0.36320E 01	0.50730E 01	0.33941E-01	0.41182E-01
30	0.33250E 01	0.46970E 01	0.34733E-01	0.42549E-01
31	0.30120E 01	0.43040E 01	0.35412E-01	0.44463E-01
32	0.26930E 01	0.38930E 01	0.36091E-01	0.46499E-01
33	0.23680E 01	0.34640E 01	0.36779E-01	0.48536E-01
34	0.20400E 01	0.30210E 01	0.37109E-01	0.50120E-01
35	0.17090E 01	0.25630E 01	0.37448E-01	0.51817E-01
36	0.13760E 01	0.20890E 01	0.37675E-01	0.53627E-01
37	0.10440E 01	0.15960E 01	0.37562E-01	0.55777E-01
38	0.72200E 00	0.11010E 01	0.36430E-01	0.56003E-01
39	0.38650E 00	0.54070E 00	0.37957E-01	0.63391E-01

GROUP 3

POS.	NON-PERTURBED ADJOINT	PETURBED FLUX	NON-PERTURBED (GLAD)	PETURBED (GLAD)
1	0.56330E 01	0.87130E 01	0.	0.
2	0.55750E 01	0.86670E 01	0.92800E-02	0.73600E-02
3	0.54620E 01	0.85770E 01	0.13530E-01	0.14450E-01
4	0.53060E 01	0.84340E 01	0.24960E-01	0.22880E-01
5	0.51090E 01	0.82540E 01	0.31520E-01	0.26800E-01
6	0.48650E 01	0.80770E 01	0.39400E-01	0.28320E-01
7	0.45560E 01	0.79840E 01	0.49440E-01	0.34880E-01
8	0.42830E 01	0.77280E 01	0.43580E-01	0.40860E-01
9	0.40230E 01	0.73890E 01	0.41600E-01	0.54240E-01
10	0.37660E 01	0.70040E 01	0.41120E-01	0.61600E-01
11	0.35060E 01	0.65900E 01	0.41280E-01	0.66240E-01
12	0.32490E 01	0.61570E 01	0.41440E-01	0.69230E-01
13	0.29830E 01	0.57090E 01	0.41760E-01	0.71640E-01
14	0.27250E 01	0.52470E 01	0.42180E-01	0.73920E-01
15	0.24600E 01	0.47760E 01	0.42400E-01	0.75360E-01
16	0.21950E 01	0.42970E 01	0.42400E-01	0.76640E-01
17	0.19300E 01	0.38130E 01	0.42400E-01	0.77440E-01
18	0.16670E 01	0.33290E 01	0.42380E-01	0.77440E-01
19	0.14050E 01	0.28500E 01	0.41920E-01	0.76640E-01
20	0.11460E 01	0.23850E 01	0.41440E-01	0.74400E-01
21	0.89060E 00	0.19520E 01	0.40460E-01	0.69280E-01
22	0.63780E 00	0.15320E 01	0.40440E-01	0.59200E-01
23	0.38650E 00	0.13150E 01	0.40200E-01	0.42720E-01
24	0.18470E 00	0.64360E 00	0.35488E-01	0.10666E 00
25	0.55110E 01	0.86370E 01	0.13003E-01	0.85934E-02
26	0.52150E 01	0.86530E 01	0.33489E-01	0.14102E-02
27	0.48790E 01	0.84830E 01	0.37814E-01	0.19235E-01
28	0.45350E 01	0.81340E 01	0.34919E-01	0.39435E-01
29	0.41870E 01	0.76630E 01	0.39372E-01	0.52722E-01
30	0.38330E 01	0.71290E 01	0.40735E-01	0.60231E-01
31	0.34720E 01	0.65430E 01	0.40642E-01	0.66294E-01
32	0.31040E 01	0.59210E 01	0.41634E-01	0.70371E-01
33	0.27300E 01	0.52710E 01	0.42313E-01	0.73539E-01
34	0.23520E 01	0.46000E 01	0.42766E-01	0.75915E-01
35	0.19750E 01	0.39180E 01	0.43218E-01	0.77159E-01
36	0.15860E 01	0.32460E 01	0.43445E-01	0.76024E-01
37	0.12000E 01	0.25430E 01	0.43671E-01	0.68222E-01
38	0.79150E 00	0.24330E 01	0.46216E-01	0.23759E-01
39	0.40490E 00	0.15630E 01	0.43739E-01	0.63425E-01

*** 0-100% VOID REACTIVITY 0.54 PU 5 + 1.2U 92 25CM-PITCH B10-0PFM

RESULT

STATISTICAL WEIGHT OF CENTRAL REGION W= 0.18453

AXIAL BUCKLING 0.85595E-03 M-2

DENOMINATOR (D)	0.63944E 02
NUMERATOR (N1)	0.72170E 01
NUMERATOR (N2)	-0.56393E 01
NUMERATOR (N3)	0.16618E 00
NUMERATOR (N4)	0.13747E 01
NUMERATOR (N5)	0.37451E 00
NUMERATOR (NC)	0.16618E 00

CONTRIBUTION OF VARIOUS COMPONENT

(N1) / (D)	11.28646 %DK/K	NU-FISSION
(N2) / (D)	-8.89735 %DK/K	SLOWING DOWN
(N3) / (D)	-0.25989 %DK/K	ABSORPTION
(N4) / (D)	-2.14979 %DK/K	AXIAL LEAKAGE
(N5) / (D)	-0.58569 %DK/K	RADIAL LEAKAGE
(NC) / (D)	-0.25989 %DK/K	CAPTURE
(N1+N2+N3) / (D)	2.12921 %DK/K	NON-LEAKAGE
(N4+N5) / (D)	-2.73548 %DK/K	LEAKAGE TOTAL

REACTIVITY -0.60627 %DK/K