

プルトニウム燃料部分装荷炉心の 冷却材ボイド反応度(II)

0.87%富化プルトニウム燃料

1976年1月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

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)

プルトニウム燃料部分装荷炉心の冷却材ボイド反応度 (II)

0.87 w/o 富化プルトニウム燃料

報告者 小 綿 泰 樹 *
柴 公 倫 *
飯 島 一 敬 *

期 間 1974年5月8日～1975年1月14日

目 的 プルトニウム燃料装荷炉心における冷却材ボイド反応度のプルトニウム同位体組成比およびプルトニウム燃料装荷体数依存性を実験により明らかにするとともに、設計コードの計算精度を検討する。

要 旨

22.5 cm格子ピッチをもつDCAの1.2 w/o 濃縮ウラン燃料装荷炉心ならびにこの炉心の中央部の燃料を逐次0.87 w/o 富化プルトニウム燃料に置換していった二領域炉心において冷却材喪失時のボイド反応度を測定した。反応度はパルス中性子によって測定し、即発中性子生成時間の変化による補正を行なった。プルトニウム燃料としては、同一富化度をもつが、核分裂性プルトニウムの同位体組成比の異なる二種類の燃料を使用することにより、ボイド反応度の核分裂性プルトニウム同位体割合ならびにプルトニウム燃料置換体数依存性を明らかにした。更に、METHUSELAH-II&CITATION コードによる計算値と比較検討した。下表に示された結果より、次のようなことが結論される。

- (1) 冷却材喪失時のボイド反応度はプルトニウム燃料の置換体数の増加とともに負側に移行する。
- (2) プルトニウム燃料中の核分裂性プルトニウム同位体割合の増加はボイド反応度を負側に移行させる。
- (3) METHUSELAH-II&CITATION コードはボイド反応度を実験値より正側に見積り、実験値と計算値との不一致は核分裂性プルトニウム同位体割合が増加するほど大きい。

* 大洗工学センター重水臨界実験室

DCA実験グループ

宮脇 良夫	八谷 雄喜	樋口幸次郎	柴 公倫	福村 信男
仁紫 明人	飯島 一敬	浅野雄一郎	相原 永史	戸村 和二
若林 利男	平山 卓	小綿 泰樹	大塚 剛宏	皆月 功
草別 幸夫	菅原 昇三	市原 泉		

表 冷却材喪失時ボイド反応度

置換燃料	置換体数	ボイド反応度 (β)	
		実験値	計算値
—	0	- 7.33 ± 0.46	- 6.26
0.87w/o (S.G) PuO ₂ -UO ₂	1	- 7.82 ± 0.44	- 6.77
	5	- 10.52 ± 0.57	- 9.25
	9	- 13.75 ± 0.70	- 11.96
	13	- 16.09 ± 1.00	- 14.07
	21	- 19.79 ± 1.40	- 17.94
	25	- 21.54 ± 1.13	- 19.19
0.87w/o (R.G) PuO ₂ -UO ₂	1	- 7.46 ± 0.43	- 6.58
	5	- 8.90 ± 0.55	- 7.98
	9	- 10.47 ± 0.55	- 9.42
	13	- 11.79 ± 0.64	- 10.65
	21	- 13.62 ± 0.73	- 12.98
	25	- 14.20 ± 0.74	- 13.84

(S.G), (R.G): 核分裂性Pu同位体割合がそれぞれ約91w/o および約74w/o

Void reactivity of the core partially loaded with plutonium fuel

0.87 wt% enriched $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ fuel

Yasuki Kowata*

Kiminori Shiba*

Kazuyoshi Iijima*

Abstract

Void reactivities caused by loss of coolant have been measured in DCA core (which has a 22.5-cm lattice pitch) by changing the number of PuO_2 (0.87 wt%)- UO_2 fuel assemblies from 0 up to 25. The $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ fuel assemblies were progressively loaded from the core center, being surrounded by the 1.2 wt% enriched UO_2 fuel region. In order to find out the effect of the fissile content in plutonium on void reactivities, two kinds of mixed fuels were used in the experiment: one enriched with standard grade plutonium (91 wt% Pu fissile) and the other with reactor grade plutonium (74 wt%). Void reactivities were measured by means of pulsed neutron source technique. When evaluating void reactivities from measured prompt decay constants, corrections were made to the neutron generation time of a largely subcritical system, which accounted for up to 5% maximum.¹

In the Table, measured void reactivities were compared with the values calculated by METHUSELAH-II and CITATION codes. The following are concluded from this study.

- (1) Void reactivities gradually shift to negative side by loading of more $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ fuel.
- (2) The increase of fissile contents in plutonium also makes void reactivity shift to the more negative side.
- (3) Measured void reactivities are more negative than calculated ones. The discrepancy between calculation and experiment becomes greater with increase in fissile contents in plutonium.

* Heavy Water Critical Experiment Section, Oarai Engineering Center, P.N.C.

Table Void reactivity in loss of coolant

Substituted fuel	The No. of substituted fuel	Void reactivity (β)	
		Experiment	Calculation
_____	0	-7.35±0.46	-6.26
0.87w/o(S.G) PuO ₂ -UO ₂	1	-7.84±0.44	-6.77
	5	-10.55±0.57	-9.25
	9	-13.80±0.70	-11.96
	13	-16.17±1.01	-14.07
	21	-19.90±1.41	-17.94
	25	-21.67±1.14	-19.19
0.87w/o(R.G) PuO ₂ -UO ₂	1	-7.47±0.43	-6.58
	5	-8.92±0.55	-7.98
	9	-10.50±0.55	-9.42
	13	-11.83±0.64	-10.65
	21	-13.67±0.73	-12.98
	25	-14.25±0.74	-13.84

(S.G), (R.G): They mean standard grade and reactor grade depending on their fissile contents, respectively.

目 次

1. 緒 論	1
2. 炉心構成	1
3. 即発中性子減衰定数の測定	5
4. 即発中性子減衰定数と軸方向バックリングとの関係	7
5. 反応度の導出と生成時間の補正	7
6. 実験結果	11
7. ボイド反応度の誤差の検討	12
8. 計算方法および計算結果	13
9. 実験値と計算値との比較	14
10. 結 論	15
謝 辞	15
参考文献	15

1. 緒 論

22.5 cm ピッチの正方格子をもつ重水臨界実験装置 (DCA) において、1.2 w/o 濃縮ウラン 燃料装荷炉心の中央部燃料から順次プルトニウム燃料で置換していった炉心の冷却材喪失時ボイド反応度は、1.2 w/o 濃縮ウラン炉心と比較して次第に負側に移行してゆくことが、核分裂性Pu 同位体の割合が約 91% の 0.54 w/o 富化プルトニウム燃料を使用した炉心で既に確認された。^{1),2)}

このように圧力管型重水炉では、プルトニウム燃料はボイド反応度を安全側に移行させる効果を有している。今回は冷却材ボイド反応度に対するプルトニウム燃料組成の依存性のうち、核分裂性Pu 同位体の割合を変化させることにより燃焼の進行度を模擬した 2 種類の 0.87 w/o 富化プルトニウム燃料を用いて、プルトニウム燃料の核分裂性Pu 同位体割合ならびに置換体数依存性を明らかにする。

反応度はパルス中性子法によって測定した。測定された即発中性子減衰定数と Simmons & King の式から求められる値に即発中性子生成時間の補正を行なって冷却材ボイド反応度を求めた。

2. 炉 心 構 成

冷却材ボイド反応度を測定した体系は、燃料集合体が全体で 121 体装荷できる。格子ピッチ 22.5 cm の DCA 炉心である。DCA 炉心の平面図を第 1 図に示す。

対象とする炉心は 1.2 w/o 濃縮ウラン燃料装荷炉心 (基準炉心) ならびにこの炉心の中央部燃料を 0.87 w/o 富化プルトニウム燃料に順次 1, 5, 9, 13, 21, 25 体置換した 7 種の炉心である。パラメータとして、全Pu に対する核分裂性Pu 同位体の割合が約 91 w/o の standard grade (S.G) type および約 74 w/o の reactor grade (R.G) type の 2 種類のプルトニウム燃料が使用された。プルトニウム燃料の置換方法は第 2 図に示すように炉心中心に対して 4 回転対称になるように行なわれた。第 2 図において N 体置換炉心は $\leq N$ の燃料がすべて置換された状態である。使用された燃料の組成ならびにその他の諸元を第 1-1 ~ 1-2 表に示す。

冷却材が軽水である 0% ボイド炉心の場合は、圧力管内軽水々位を臨界重水々位とほぼ等しくなるように調整された。なお、減速材の重水濃度は約 99.45 mol % である。

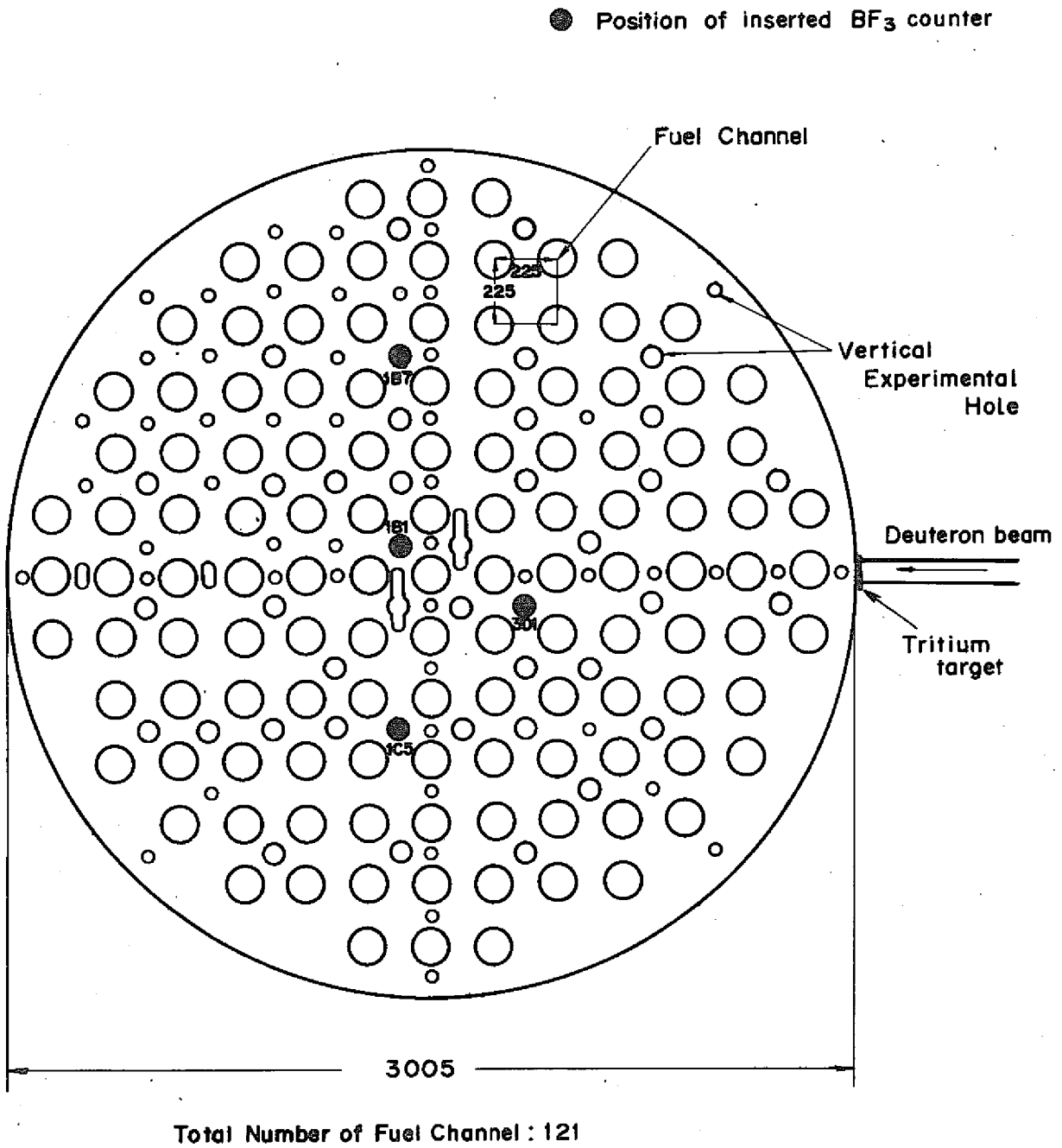


Fig. 1 Configuration of DCA core which has a 22.5-cm lattice pitch

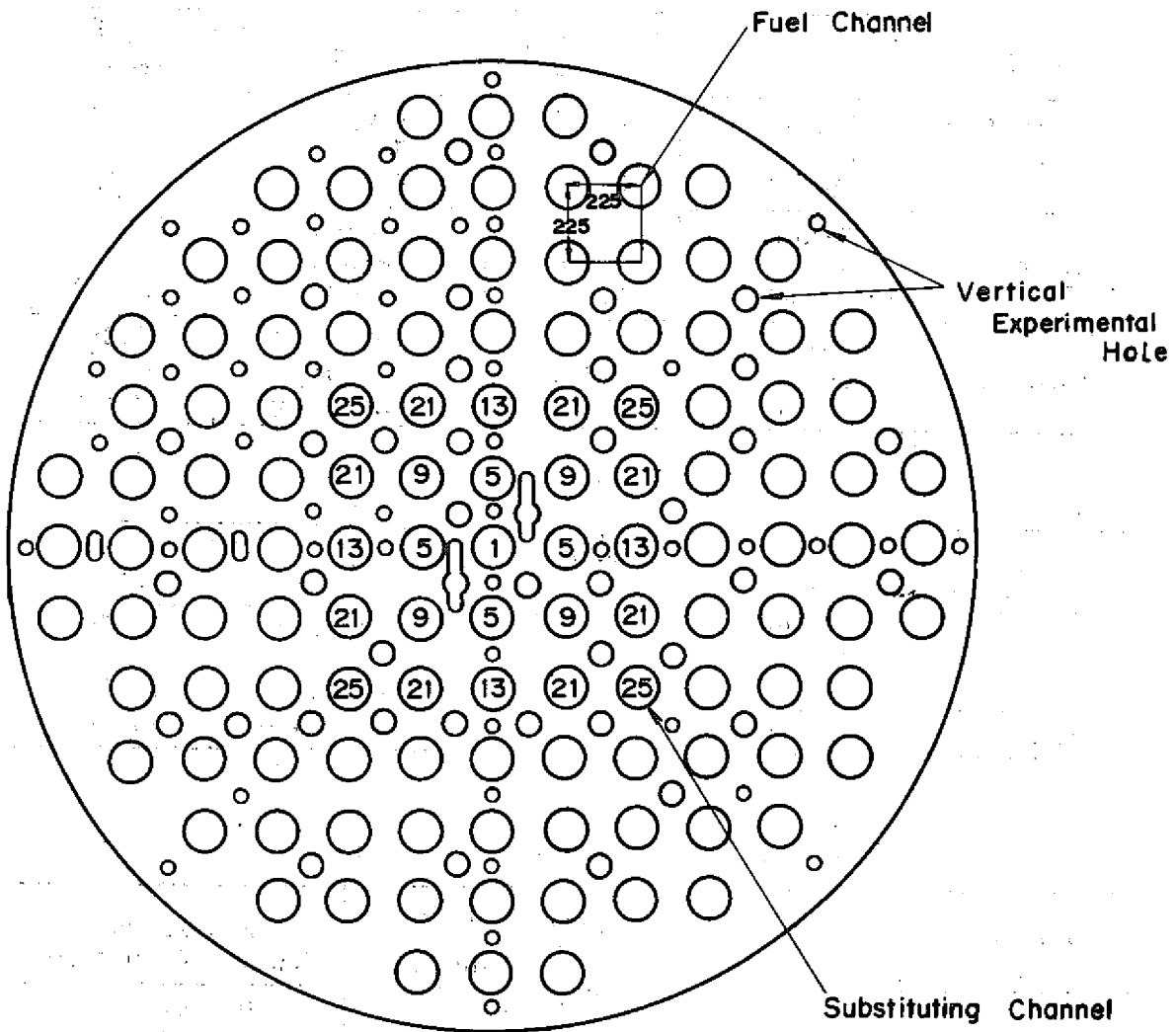


Fig. 2 Substituted patterns of PuO_2UO_2 fuel assemblies

Table 1-1 Specification of DCA core

(a)

Fuel		Outer dia. (cm)	Material	Density (g/cm ³)
0.87 w/o (S.G) PuO ₂ -UO ₂	Pellet	1.472	PuO ₂ -UO ₂	10.17
	Gap	1.506	Helium	—
	Sheath	1.668	Zry-2	6.523
0.87 w/o (R.G) PuO ₂ -UO ₂	Pellet	1.468	PuO ₂ -UO ₂	10.25
	Gap	1.506	Helium	—
	Sheath	1.668	Zry-2	6.523
1.2 w/o UO ₂	Pellet	1.480	UO ₂	10.36
	Gap	1.503	Helium	—
	Sheath	1.673	Al-Mg alloy	2.674

(b)

	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 1-2 Composition of fuel pellet

Pellet	Nuclide	Proportion (w/o)		Atomic No. density (×10 ²⁴ /cm ³)
		Pu	whole	
0.87 w/o (S.G) 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	0.0000001291
	O-16	—	12.12	0.04641
0.87 w/o (R.G) PuO ₂ -UO ₂ **	U-235	—	0.6194	0.0001627
	U-238	—	86.493	0.02243
	Pu-238	0.84	0.00641	0.00000166
	Pu-239	64.92	0.4953	0.0001279
	Pu-240	21.77	0.1661	0.00004272
	Pu-241	9.46	0.07217	0.0000184
	Pu-242	3.01	0.02296	0.000005856
	O-16	—	12.13	0.0468
1.2 w/o 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

** Date of analysis : 16 June 1973

3. 即発中性子減衰定数の測定

冷却材喪失時のボイド反応度を測定するために、未臨界状態にある100%ボイド炉心に打込まれたパルス中性子による即発中性子減衰定数 α と軸方向バックリング B_2^2 との関係を減速材重水々位を変化させて測定した。

パルス中性子を発生させる際、パルス中性子発生装置のトリチウムターゲットは炉心の外壁に設置し、 $D(T, \alpha)n$ 反応によって生ずる14 MeVのパルス中性子を炉心に打込んだ。このパルス中性子の時間幅は1.1msecであり、パルスの繰り返し数は体系の未臨界度に応じて9 Hzから0.5 Hzまで適当に変化させた。

中性子密度の減衰は $\frac{1}{2}$ インチ ϕ のBF₃計数管4本をそれぞれ炉心の垂直実験孔1C0, 3D1, 1C5および1B7に挿入して測定した。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。使用したBF₃計数管は、S.G-プルトニウム燃料置換炉心の場合が20th Century社製、基準炉心およびR.G-プルトニウム燃料置換炉心の場合がReuter Stokes社製である。即発中性子減衰定数を測定するために使用したBF₃計数管の挿入位置を第1図に、測定系のブロックダイヤグラムを第3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の入力としてある。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、チャンネル幅は即発中性子減衰の程度とバックグラウンドの大きさに応じて30~300 μ secの範囲の値を適当に選んだ。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、基本モードが形成されるまでの時間に応じて、約5~10 msec遅延させ時間分析器の掃引時間原点信号とした。

測定された各BF₃計数管の計数値 $n(t)$ は最小二乗法によって $n(t) = Ae^{-\alpha t} + C$ なる関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 との関係をプロットして、 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 の値を平均した後求める α の値とした。

α と B_2^2 との関係を測定する場合、減速材水位を0%ボイド炉心臨界水位よりも低い水位から臨界近傍の水位まで2~3 cmの間隔で適当に約10点変化させながら α の測定を行なった。即発中性子減衰定数を測定した際の実験条件を測定した炉心ごとに第2-1~2-13表に示した。これらの表には中性子収量のモニターとして $D(T, \alpha)n$ 反応により発生する α 粒子の計数値と4本のBF₃計数管で測定された即発中性子減衰定数の平均値も載せてある。

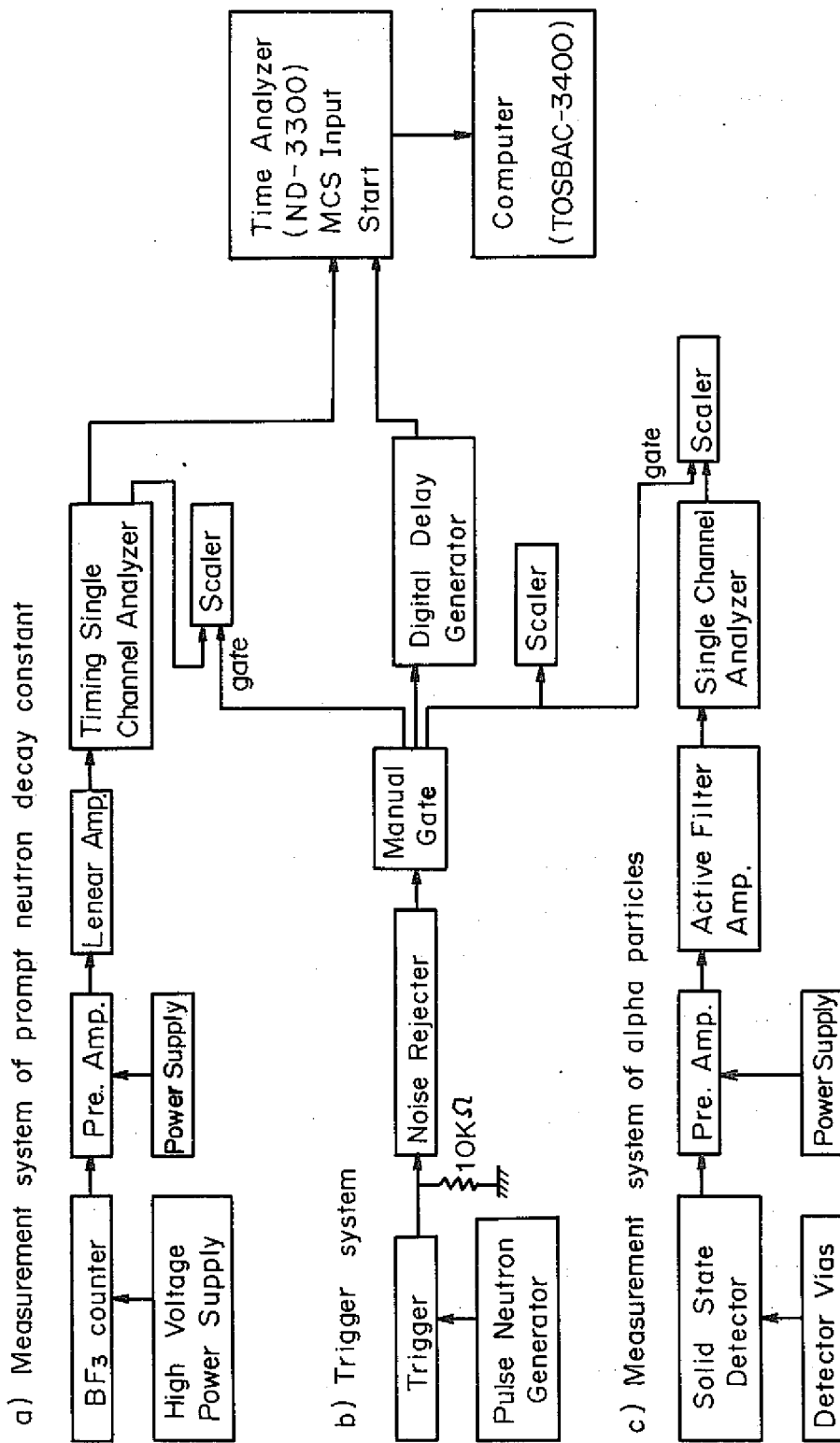


Fig. 3 Block diagram of measurement system

4. 即発中性子減衰定数と軸方向バックリングとの関係

測定された即発中性子減衰定数 α と軸方向バックリング B_z^2 とのデータを

$$\alpha (B_z^2) = \alpha_c + \beta (B_z^2 - B_{zc}^2) + r (B_z^2 - B_{zc}^2)^2 \quad (4-1)$$

なる式に最小二乗法でフィッティングさせて、臨界時の即発中性子減衰定数 α_c および1次、2次の係数 β 、 r を各BF₃計数管ごとに求めることにより、 α と B_z^2 との関係を実験的に結びつけることができる。ここで、 B_{zc}^2 は臨界時の軸方向バックリングである。但し、動径方向バックリングはプルトニウム燃料置換体数に依らず不変とみなした。軸方向バックリングを算出する際に使用する軸方向外挿距離はCuワイヤの放射化法によって、基準炉心において測定された値であり、軸方向外挿距離もプルトニウム燃料の置換体数により変わらないものとして取扱った。

5. 反応度の導出と生成時間の補正

逆時間方程式より測定される基本モードの即発中性子減衰定数 α と反応度 ρ との関係は

$$\rho = \alpha A + \sum_{i=1}^L \frac{\alpha \beta_i}{\alpha + \lambda_i} \quad (5-1)$$

なる式で表わされる。 β_i は*i*群の先行核から放出される実効遅発中性子発生割合である。遅発中性子先行核の崩壊定数 λ_i に比べて α が十分大きいものと仮定すれば、(5-1)式は次のようになる。

$$\rho \approx \alpha A + \beta_{\text{eff}} \quad (5-2)$$

ここで、

$$A = \ell_p / k_{\text{eff}} \quad (5-3)$$

但し、 A 、 ℓ_p 、 β_{eff} はそれぞれ即発中性子生成時間、即発中性子寿命および実効遅発中性子発生割合である。

従って、ドル反応度は(5-2)、(5-3)式から

$$\frac{\rho}{\beta_{\text{eff}}} = 1 - \frac{\alpha}{G(\alpha)} \quad (5-4)$$

ここで、

$$G(\alpha) = \alpha_c \left(\frac{A_c}{A} \right) = \frac{\beta_{\text{eff}} \cdot k_{\text{eff}}}{l_p} \quad (5-5)$$

なる式で表わされる。但し、 α_c 、 A_c はそれぞれ臨界時の即発中性子減衰定数および臨界時の即発中性子生成時間³⁾である。(5-5)式において、臨界未満度が大きくなることにともなう生成時間 A および実効遅発中性子発生割合 β_{eff} の変化が無視できるものと仮定すれば、 $G(\alpha)$ の値は、 $G(\alpha) \approx \alpha_c$ と近似できる。このような状況ではドル反応度は Simmons & King の式⁴⁾

$$\frac{\rho}{\beta_{\text{eff}}} = 1 - \frac{\alpha}{\alpha_c} \quad (5-6)$$

となる。ここで、 β_{effc} 、 l_{pc} をそれぞれ臨界時の実効遅発中性子発生割合および即発中性子寿命とすれば、 α_c は次のようになる。

$$\alpha_c = \beta_{\text{effc}} / l_{pc} \quad (5-7)$$

このような仮定のもとで α および α_c を測定し、(5-6)式を使用すれば、容易にドル反応度を求めることができる。しかし大きな負の反応度が加わった炉心においては、一般に生成時間ならびに実効遅発中性子発生割合が変化し、(5-6)式からは正確な反応度を求めることは困難で、 A および β_{eff} の変化を補正しなければならない。実験では、 α と軸方向バックリング B_z^2 との関係を測定するために、 B_z^2 を変化させながら α を測定するが、この際、 B_z^2 の増大にともなう即発中性子寿命の変化に比較して実効遅発中性子発生割合の変化量は非常に小さいとみなすことができるので、 $\beta_{\text{eff}}(B_z^2) \approx \beta_{\text{effc}}$ と近似できる。すると、(5-5)式から A の補正を含む $G(\alpha)$ は

$$G(\alpha) = \alpha_c \left(\frac{l_{pc}}{l_p} \right) k_{\text{eff}} \quad (5-8)$$

となり、生成時間の変化による補正は即発中性子寿命の変化の補正に帰結される。(5-8)式において k_{eff} の値に (5-6)式で求められる実験値を使用することを考えて変形すれば

$$G(\alpha) = \alpha_c \left(\frac{l_{pc}}{l_p} \right) \frac{1}{(1 - \beta_{\text{effc}} \rho(\$))} \quad (5-9)$$

となる。ここで、 (l_{pc}/l_p) 、 β_{effc} の値に計算値を使用し、 $\rho(\$)$ の値に Simmons & King の式から求められる実験値を使用して繰り返し計算を行えば、生成時間の変化を補正したドル反応度が求められる。

$\ell_p, \ell_{pc}, \beta_{effc}$ の計算値は、METHUSELAH-II コードによる群定数を用いて、後述のように CITATION コードから求められる値を使用した。

従って、(5-9)式より軸方向バックリングが B_z^2 の未臨界炉心における $G(\alpha)$ および生成時間 A は次式から近似的に求めることができる。

$$G(\alpha) \approx \alpha_c \left\{ 1 - \beta_{effc} \rho(\beta) + \frac{1}{\ell_{pc}} \frac{\partial \ell_p}{\partial B_z^2} (B_z^2 - B_{zc}^2) \right\}^{-1} \quad (5-10)$$

$$A = \beta_{effc} / G(\alpha) \quad (5-11)$$

但し、軸方向バックリングが B_z^2 の体系における ℓ_p の値は次のようにして求めた。

$$\ell_p(B_z^2) = \ell_{pc} + \frac{\partial \ell_p}{\partial B_z^2} (B_z^2 - B_{zc}^2) \quad (5-12)$$

ここで、 B_{zc}^2 は臨界時の軸方向バックリングである。

以上に示す方法でもって、(5-4)式および(5-10)式から、軸方向バックリング B_z^2 で即発中性子減衰定数 α をもつ未臨界炉心のドル反応度を求めることができる。ボイド反応度は、0%ボイド炉心の臨界軸方向バックリングにおける即発中性子減衰定数を(4-1)式より求めれば、同様に求められる。ここで求められるボイド反応度の定義は、冷却材として軽水が満たされている臨界炉心において、バックリングが不変のまま急速に冷却材が喪失した際に加わる反応度を表わす。

生成時間の補正の際に使用する ℓ_p, β_{effc} の値は随伴中性子束 ϕ^* を重みとしてそれぞれ次式⁵⁾

$$\ell_p = \frac{\sum_n \sum_i \left\langle \frac{1}{v} \right\rangle_n V_i \phi_{i,n}^* \phi_{i,n}}{k_{eff}^{-1} \sum_i V_i \sum_g \chi(g) \phi_{i,g}^* \sum_n \nu \Sigma_{f,n} \phi_{i,n}} \quad (5-13)$$

$$\beta_{effc} = \frac{\sum_i V_i \sum_j \sum_g \chi'(j,g) \phi_{i,g}^* \sum_b \beta_{b,j} N_{b,i} \sum_n \sigma_{f,n,b,i} \phi_{i,n}}{\sum_i V_i \sum_g \chi(g) \phi_{i,g}^* \sum_n \nu \Sigma_{f,n} \phi_{i,n}} \quad (5-14)$$

から求められた。但し、 $\sum_g \chi(g) = 1$ である。文字は通常使用するものであり、添字は、 n, g がエネルギー群、 i が空間座標であり、 b, j はそれぞれ核種および遅発中性子先行核のグループを示す。 ℓ_p の計算に使用される中性子速度の逆数の平均値 $\left\langle \frac{1}{v} \right\rangle_n$ ⁶⁾ は、中性子密度を重み関数として求めた。但し、中性子スペクトルは、熱中性子群についてはマックスウェル分布、熱外中性子より高いエネルギー群については $1/E$ スペクトルと仮定した。すると、熱中性子群の中性子速度の逆数の平均値 $\left\langle \frac{1}{v} \right\rangle_{th}$ は次式から求められる。

$$\begin{aligned}
 \left\langle \frac{1}{v} \right\rangle_{th} &\equiv \frac{\int_0^{\infty} \frac{1}{v} n(E) dE}{\int_0^{\infty} n(E) dE} \\
 &= \frac{\int_0^{\infty} \frac{1}{v_T} e^{-E/E_T} dE}{\int_0^{\infty} \sqrt{\frac{E}{E_T}} e^{-E/E_T} dE} \\
 &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{v_T} \tag{5-15}
 \end{aligned}$$

但し、 $v_T = \sqrt{2kT/m} = \sqrt{2E_T/m}$

ここで、 $T=293.6^\circ\text{K}$ のとき、 $E_T = kT = 0.0253\text{eV}$ ($=E_0$)、 $v_T = 2200\text{m/sec}$ ($=v_0$)である。
 熱外中性子群については次式で求められる。

$$\begin{aligned}
 \left\langle \frac{1}{v} \right\rangle_{epi} &\equiv \frac{\int_{E_1}^{E_2} \frac{1}{v} n(E) dE}{\int_{E_1}^{E_2} n(E) dE} \\
 &= \frac{\int_{E_1}^{E_2} \frac{1}{v_0} \frac{E_0}{E} \frac{dE}{E}}{\int_{E_1}^{E_2} \sqrt{\frac{E_0}{E}} \frac{dE}{E}} \\
 &= \frac{\sqrt{E_0}}{2v_0} \left(\frac{1}{\sqrt{E_1}} + \frac{1}{\sqrt{E_2}} \right) \tag{5-16}
 \end{aligned}$$

E_2 、 E_1 はそれぞれ熱外中性子群の上、下限のエネルギーである。 $\left\langle \frac{1}{v} \right\rangle_{th}$ の値は熱中性子群の平均速度 $\langle v \rangle_{th}$ との関係

$$\left\langle \frac{1}{v} \right\rangle_{th} = \frac{4}{\pi} \frac{1}{\langle v \rangle_{th}}$$

から求められた。但し、 $\langle v \rangle_{th}$ の値は METHUSELAH-IIコードで計算された値を使用した。

6. 実験結果

核分裂性Pu 同位体の割合が異なる2種類のプルトニウム燃料の置換体数を変化させ、これら各炉心の約10点の未臨界減速材水位について炉心の4ヶ所に設置したBF₃ 計数管で測定された即発中性子減衰定数の平均値 α と測定条件とを第2-1~2-13表に示す。測定された即発中性子減衰定数 α と軸方向バックリング B_z^2 とのデータをBF₃ 計数管ごとに(4-1)式にフィットさせて、臨界時の即発中性子減衰定数 α_c および軸方向バックリングの変化量($B_z^2 - B_{zc}^2$)に対する1次、2次の係数 β , r を求めた。 α_c , β , r の値としては各々の計数管で求められた値の平均値を採用した。この結果をS.G-プルトニウム燃料置換炉心については第4-1表に、R.G-プルトニウム燃料置換炉心については第4-2表に示し、また求められた α_c , β , r の値を用いて計算した α と B_z^2 との関係をそれぞれ第4~5図に示した。

このようにして求めた α_c の値を用いて、測定された即発中性子減衰定数 α に§5で述べた方法により生成時間の補正を行ない、各軸方向バックリングにおける反応度を求めた。この際、生成時間の補正量(A/A_0)の値は(5-5)式から $\alpha_c/G(\alpha)$ の値として求められるので、この値を(5-10)式から計算し、各軸方向バックリングにおける反応度とともに第3-1~3-13表に示した。生成時間の補正のためにCITATIONコードを用いて計算された臨界時の即発中性子寿命 ℓ_{pc} ならびに実効遅発中性子発生割合 β_{eff} および即発中性子寿命の軸方向バックリングに対する微係数 $\partial \ell_p / \partial B_z^2$ をS.G-プルトニウム燃料およびR.G-プルトニウム燃料置換炉心について第5-2表に示した。

次に、プルトニウム燃料の置換体数をパラメータにして、測定された0%ボイド炉心の臨界軸方向バックリングと求められた α_c , β , r の値を用いて(4-1)式よりこのバックリングにおける即発中性子減衰定数 α を見積り、更にこの α の値と(5-4)および(5-10)式とから生成時間の変化を補正したボイド反応度を求めた。このようにして、S.G-あるいはR.G-プルトニウム燃料を置換した炉心における冷却材喪失時ボイド反応度の測定値を即発中性子減衰定数および生成時間の補正量(A/A_0)とともにそれぞれ第4-3~4-4表に示す。反応度に対する生成時間の補正量は未臨界度に比例して増加し、約20\$のボイド反応度に対する補正量は約5%に達する。これに対して、ボイド反応度の誤差は統計的変動による α の誤差、(4-1)式に対するフィット誤差ならびにバックリングの誤差に起因し、その値は約4~7%である。但し、反応度に対する生成時間の補正にともなう誤差は無視した。生成時間の補正には一部計算値を使用した⁷⁾が、 ℓ_p の変化は比の形であるのでこの誤差は小さいものと予想されるので、生成時間の誤差はほぼ β_{eff} の精度に依存するものと考えられる。

次に、ボイド反応度の核分裂性Pu 同位体割合ならびにプルトニウム燃料の置換体数依存性を調べるために置換するプルトニウム燃料の種類をパラメータにしてプルトニウム燃料で置換する領域のもつ統計的⁷⁾重み W_0 に対するボイド反応度との関係を第6図に示した。第6図には W_0 に対応する置換体数をも付記した。 $W_0=1.0$ は全炉心がプルトニウム燃料で置換されたことを意味する。今回の実験の場合、炉心中央25体を置換した炉心の統計的⁷⁾重みは $W_0=0.484$ であり、全置換炉心の場合の約 $\frac{1}{2}$ に相

当する。

第6図の結果から測定されたボイド反応度はすべて負の値をもち、かつ置換するプルトニウム燃料体数の増加とともに単調に負側に移行してゆくことが分かる。また、ボイド反応度を負側に移行させる効果は、同一Pu 富化度の燃料であっても、核分裂性Pu 同位体の割合の多い燃料ほど大きいことを示している。

7. ボイド反応度の誤差の検討

ボイド反応度へ及ぼす測定誤差としては次の7つが考えられる。①軸方向外挿距離の測定誤差、② α を求める際のフィッティング開始チャンネルの選び方に基因する誤差、③計数率の統計的変動に伴うフィッティング誤差、④重水濃度、炉心温度特に重水温度の変化による臨界水位の変動、⑤重水々位計の誤差、⑥重水と軽水両者の水位が異なった状態で臨界水位を測定した場合、両者を等水位臨界水位になるように補正する際の誤差、⑦安全棒案内管の臨界水位へ及ぼす影響。

以上の項目がボイド反応度の誤差に定量的にどの程度影響するかを検討してみた。これらのうち、⑤の重水々位計の誤差はたかだか ± 0.2 mm であり、水位計零点の変動も実験期間内では無視できるので、水位計誤差による影響は極めて小さい。また、④の重水温度の変化は実験期間を通じて \pm 約 1°C 程度で、臨界水位への影響は \pm 約 0.5 mm であり⁸⁾、重水濃度の変化も無視できる。このため④、⑤の影響は臨界水位の再現性として軸方向外挿距離の誤差に含めてデータ処理した。しかし、特に重水濃度の変化による反応度係数は、0%ボイド炉心では正であるが、100%ボイド炉心は負である⁸⁾ため、ボイド反応度の重水濃度による影響は極めて鋭敏である。従って、重水濃度、温度が変化する場合は、臨界水位を補正したのちボイド反応度を求める必要がある。⑥は臨界水位測定の際あらかじめ水位差が \pm 約 5 mm 以内になるように調整してあるので、等水位補正による誤差は ± 0.5 mm 以下であるとみなされる。⑦については案内管は0%、100%ボイド炉心の両炉心に挿入されているので、ボイド反応度の案内管による影響は両炉心における案内管反応度の差であり、この影響はS.G-プルトニウム燃料9体置換炉心の場合約0.7%で無視できる。

上記の微小な影響を無視すれば、ボイド反応度の誤差は主として①～③から評価される。③のフィッティング開始チャンネルの移動ごとに求められる α の値はすべて1%以下の統計精度であるので、 α およびその誤差はむしろ②のフィッティング開始チャンネルの選択の仕方で多少変化する。求めるべき α の値は未臨界度が小さい場合は開始チャンネルの選択の仕方に殆んど依存しないが、未臨界度が大きくなる程高次モードの影響が利いてくる為開始チャンネルの選び方に依存してくる。しかし、このように未臨界度が大きい場合であってもパルスを打込んだ後ある時間内に観測する即発中性子の減衰は開始チャンネルの選択の仕方で一定しないが開始チャンネルをある時間以上遅らせれば、高次モードの影響は小さくなり、かなり一定の基本モードの減衰が観測されることが分った。従って、高未

臨界炉心における α のデータ処理に当っては、開始チャンネルの変化に依存しなくなった領域の α を適当に選択しているが、多少の任意性が入ることは避けられない。ボイド反応度を算出する際に、以上の方法で求めた α を使用した場合と、開始チャンネルを遅らせるごとに求められる α をすべて考慮に入れた場合とを比較すると両者でボイド反応度はS.G-プルトニウム燃料25体置換炉心の場合士約2.5%変化する。

①の軸方向外挿距離の測定誤差は④、⑤による臨界水位の誤差とともに軸方向バックリングの誤差に直接影響してくる。軸方向外挿距離は銅ワイヤの放射化率から求められるが、データ処理の際原子炉境界付近のデータをどの程度除外するかによって、あるいは軸方向に完全な裸の原子炉ではないことによる反射体節約を含むため、ある程度変動することがこれまで確かめられている⁹⁾この外挿距離の誤差は領域、炉心高さ、冷却材ボイド率によって変化するが、士約1 cm程度であることが分っている。0%および100%ボイド炉心ともに軸方向外挿距離が最大の誤差でそれぞれ約13%、約10%変化すればS.G-プルトニウム燃料25体置換炉心の場合ボイド反応度は士約5%変化し、この誤差がボイド反応度に最も影響していることが分る。但し、0%および100%ボイド炉心の軸方向外挿距離 λ_0 、 λ_{100} の値として、 $\lambda_0 = 7.5 \pm 1.0 \text{ cm}$ 、 $\lambda_{100} = 11.3 \pm 1.1 \text{ cm}$ を用いてデータ処理を行なった。

以上の検討結果より、ボイド反応度の実験誤差は5~10%で測定されている。

8. 計算方法および計算結果

冷却材喪失時のボイド反応度の計算値は、METHUSELAH-IIコードで計算された冷却材喪失前後における単位格子の群定数を使用し、CITATIONコードでX-Y 2次元、3群拡散計算を行なって求められた⁹⁾。実験値と比較可能なドル単位のボイド反応度の計算値は次式で求めた。

$$\rho (\$) = \frac{1}{\beta_{\text{eff}}} \left(1 - \frac{1}{k_{\text{eff}}} \right) \quad (8-1)$$

ここで、 k_{eff} は、100%ボイド炉心において軸方向バックリング B_z^2 の値が0%ボイド炉心の臨界時の B_z^2 をもつ場合の実効増倍係数である。 β_{eff} は100%ボイド炉心における実効遅発中性子発生割合であり、 β_{eff} の値もCITATIONコードで(5-14)式から計算された。炉心計算で使用した3群のエネルギー領域は

- 1群 (高速群) : 10 MeV ~ 5.5 KeV
- 2群 (熱外群) : 5.5 keV ~ 0.625 eV
- 3群 (熱群) : 0.625 eV ~ 0eV

である。METHUSELAH-IIコードで計算された各燃料格子の3群定数を第5-1表に示す。

METHUSELAH-IIおよびCITATIONコードを使用して、実験値に対応する冷却材喪失時のボイド反応度を計算した。この計算値をプルトニウム燃料の種類、置換体数ごとに第5-3~5-4表に示す。また、これらの結果を第6図に図示した。

9. 実験値と計算値との比較

第6図から冷却材喪失時のボイド反応度の計算値は実験値と同様に、プルトニウム燃料の置換体数と共に単調に負側に移行してゆく。しかし、計算値を実験値と比較すれば、R.G-プルトニウム燃料21体および25体置換炉心の計算値が実験誤差範囲で実験値と一致する以外は、核分裂性Pu同位体の割合および置換体数に拘らず、METHUSELAH-II&CITATIONコードはボイド反応度を約5～15%正側に見積る傾向がある。計算値と実験値との定量的不一致を調べるために、核分裂性Pu同位体の割合をパラメータにし、プルトニウム燃料の置換体数に対する実験値 $\rho_v(\text{exp})$ と計算値 $\rho_v(\text{cal})$ とのずれおよび臨界軸方向バックリング B_{zc}^2 の実験値と計算値とのずれを第5-5表に示す。第5-5表から、ボイド反応度の実験値と計算値との不一致は基準炉心で最大であり、プルトニウム燃料の置換体数が13体までは10～13%ではほぼ一定であるが、プルトニウム燃料の置換体数が21体以上になると不一致は小さくなる様相を示す。特に、R.G-プルトニウム燃料置換炉心では不一致はみられない。計算値は冷却材喪失による固有値 k_{eff} のずれをドル単位で示されているため、実験値と計算値が一致するには冷却材喪失の前後で臨界軸方向バックリング B_{zc}^2 が一致していることおよび冷却材喪失炉心の β_{eff} の値が正しく評価されていることが必要である。しかし、第4-1～4-4表および第5-3～5-4表に載せてある B_{zc}^2 の実験値と計算値とを比較すると、基準炉心では0%ボイドの場合、両者はよく一致しているが、100%ボイドの場合には計算値が約6%実験値を過大評価しているため、1.2 w/o 濃縮ウラン燃料炉心での不一致は主に冷却材喪失時の格子における中性子漏洩の見積りに依存しているといえる。即ち、100%ボイド炉心では中性子漏洩効果を過少評価しているものと思われる。

次に、プルトニウム燃料が置換されていった炉心についてはボイド率に無関係に B_{zc}^2 の計算値は実験値を過少評価してゆく傾向を示すため、プルトニウム燃料の置換体数が21体程度の炉心でボイド反応度の不一致が小さくなるのは、冷却材喪失前後における両者の不一致がみかけ上最小になったためと考えられる。この事は、格子計算によるプルトニウム燃料格子の(生成/消滅)の値を過少評価していることに起因しているものと考えられる。

以上の事から、METHUSELAH-IIコードは冷却材の喪失した格子ならびにプルトニウム燃料格子特に核分裂性Pu同位体の割合が大きくなる程、不一致は大きくなっているが、この原因を明らかにするためには更に詳細な中性子スペクトルの測定が必要である。

10. 結 論

格子ピッチ 22.5cm の 1.2 w/o 濃縮ウラン燃料装荷炉心ならびにこの炉心の中央部燃料を 0.87 w/o 富化プルトニウム燃料にそれぞれ 1, 5, 9, 13, 21, 25 体置換した炉心において冷却材喪失時ボイド反応度を測定した。核分裂性 Pu 同位体割合の異なる 2 種類のプルトニウム燃料を使用し、ボイド反応度の核分裂性 Pu 同位体割合およびプルトニウム燃料置換体数の依存性が明らかになった。更に、METHUSELAH-II と CITATION コードによる計算値と実験値との比較検討を行なった。

基準炉心から順次 0.87 w/o 富化プルトニウム燃料に置換していった炉心の冷却材ボイド反応度は、基準炉心に比べて負側に移行し、プルトニウム燃料の置換体数あるいは核分裂性 Pu 同位体割合の増加とともに更に負側に移行する。

METHUSELAH-II と CITATION コードはボイド反応度を正側に見積る傾向があり、計算値と実験値との不一致の程度は核分裂性 Pu 同位体割合が多い程大きくなる。この不一致の原因は、冷却材喪失した格子ならびにプルトニウム燃料格子における格子計算の精度が不十分であることが挙げられる。

謝 辞

本実験を遂行するにあたり、0.87 w/o (S.G) 富化プルトニウム燃料装荷炉心における測定に関しては現在、敦賀建設事務所に所属している村松精氏に、またパルス中性子発生装置の運転に際しては、同じく現在敦賀建設事務所所属の磯村和利氏に多大の協力および助言を頂きました。ここに心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 柴, 村松, 広田, 坂田: SN 941 73-10 (1973)
- 2) 村松, 柴, 飯島, 坂田: SN 941 74-15 (1974)
- 3) G.R.Keepin: Physics of Nuclear Kinetics (1965)
- 4) B.E.Simmons & J.S.King: Nucl. Sci. Eng., 3 (1958)
- 5) T.B.Fowler, D.R.Vondy & G.W.Cunningham: Nuclear Reactor Core Analysis Code :
CITATION
- 6) 柴: 私信 (1969)
- 7) 広田, 柴, 村松, 坂田: SN 941 73-13 (1973)
- 8) 柴, 飯島, 小綿, 磯村: SN 941 75-50 (1975)
- 9) 小綿, 浅野, 米田, 宮脇: ZN 941 74-67 (1974)

Table 2-1 Experimental conditions and results of measurement

The number of substituted PuO_2 - UO_2 fuel assemblies ; 0.

Void fraction; 100%

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement		
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μ s)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec^{-1})
1	84.20	9	1.1	30	5	4932	72778	325.1 \pm 10.9
2	86.97	9	1.1	30	6	7316	103874	287.2 \pm 8.5
3	90.04	9	1.1	30	6	7053	105715	247.7 \pm 6.4
4	92.89	9	1.1	40	7	4341	64807	213.4 \pm 4.9
5	95.84	9	1.1	50	8	6345	95618	180.1 \pm 3.6
6	99.09	9	1.1	50	10	3428	49954	145.8 \pm 2.6
7	103.07	9	1.1	50	10	3106	46981	106.9 \pm 1.6
8	106.03	9	1.1	70	10	1123	16447	80.1 \pm 1.1
9	108.91	0.7	1.1	200	10	413	3478	55.6 \pm 0.7
10	111.52	0.7	1.1	200	10	387	3536	34.6 \pm 0.5
11	112.75	—	—	—	—	—	—	$\alpha_c = 25.1 \pm 0.4$

Date of experiment: 74/12/13

Table 2-2 Experimental conditions and results of measurement

The number of substituted 0.87w/o (S.G) PuO_2 - UO_2 fuel assemblies ; 1

Void fraction; 100%

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement		
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μ s)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec^{-1})
1	83.00	8.0	1.1	30	6	8892	278334	342.2 \pm 2.9
2	86.01	8.0	1.1	30	6	7726	237783	299.5 \pm 2.3
3	88.99	8.0	1.1	50	7	5786	176330	259.9 \pm 1.8
4	91.93	6.0	1.1	60	7	4486	127285	222.6 \pm 1.4
5	95.01	4.0	1.1	80	8	2736	81815	187.0 \pm 1.1
6	98.00	4.0	1.1	90	9	2713	62960	154.1 \pm 0.9
7	101.63	2.0	1.1	100	10	1445	38056	116.8 \pm 0.6
8	104.00	1.0	1.1	200	10	634	17171	94.0 \pm 0.5
9	107.00	1.0	1.1	200	10	410	10887	66.7 \pm 0.4
10	108.99	1.0	1.1	200	10	415	11444	49.5 \pm 0.4
11	110.02	0.5	1.1	300	10	311	8474	40.8 \pm 0.3
12	111.86	—	—	—	—	—	—	$\alpha_c = 25.8 \pm 0.3$

Date of experiment: 74/5/16

Table 2-3 Experimental conditions and results of measurement

The number of substituted 0.87w/o (S.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 5

Void fraction; 100%

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement		
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μ s)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)
1	76.08	8.0	1.1	30	6	10495	258051	426.1 \pm 3.4
2	78.98	8.0	1.1	30	6	8430	209440	378.1 \pm 2.8
3	81.99	8.0	1.1	50	6	8062	190692	330.9 \pm 2.2
4	84.99	8.0	1.1	60	7	5469	136879	286.3 \pm 1.8
5	88.00	8.0	1.1	60	8	6407	162221	244.2 \pm 1.4
6	91.00	8.0	1.1	70	9	5372	134963	204.6 \pm 1.1
7	94.00	6.0	1.1	80	9	4012	94100	167.3 \pm 0.9
8	97.03	4.0	1.1	90	10	2613	61066	131.8 \pm 0.7
9	99.99	2.0	1.1	100	10	1484	31787	99.3 \pm 0.6
10	103.00	1.0	1.1	200	10	517	11566	68.1 \pm 0.5
11	106.00	0.5	1.1	300	10	324	7405	38.8 \pm 0.4
12	107.45	—	—	—	—	—	—	$\rho_c=25.3 \pm 0.4$

Date of experiment: 74/5/15

Table 2-4 Experimental conditions and results of measurement

The number of substituted 0.87w/o (S.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 9

Void fraction; 100%

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement		
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μ s)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)
1	74.12	8.0	1.1	30	6	13150	261548	437.6 \pm 3.1
2	76.92	8.0	1.1	40	6	9097	177640	388.2 \pm 2.5
3	80.09	8.0	1.1	40	7	6076	144245	335.6 \pm 2.0
4	83.06	8.0	1.1	60	7	6724	159479	288.1 \pm 1.6
5	86.06	6.0	1.1	60	8	5600	127823	242.7 \pm 1.2
6	89.07	6.0	1.1	80	9	3180	72496	199.7 \pm 1.0
7	91.88	4.0	1.1	80	10	3240	78015	160.6 \pm 0.8
8	95.06	2.0	1.1	100	10	1636	38604	121.0 \pm 0.6
9	98.06	1.0	1.1	200	10	457	10860	85.0 \pm 0.5
10	99.99	1.0	1.1	200	10	451	10180	62.9 \pm 0.4
11	102.00	0.5	1.1	300	10	221	5175	40.8 \pm 0.4
12	103.57	—	—	—	—	—	—	$\rho_c=24.2 \pm 0.4$

Date of experiment: 74/5/14

Table 2-5 Experimental conditions and results of measurement

The number of substituted 0.87w/o (S.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 13
Void fraction; 100%

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement		
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μ s)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)
1	71.00	8.0	1.1	30	6	13842	283595	478.3 \pm 8.9
2	73.90	8.0	1.1	30	6	11041	234120	423.2 \pm 7.0
3	77.00	8.0	1.1	40	6	6600	147306	366.6 \pm 5.4
4	80.00	8.0	1.1	60	7	7188	161058	314.3 \pm 4.2
5	83.00	5.0	1.1	80	8	4738	106222	264.3 \pm 3.3
6	85.99	3.0	1.1	100	9	2600	55010	217.5 \pm 2.6
7	89.00	3.0	1.1	100	9	2032	47796	172.7 \pm 2.0
8	92.00	3.0	1.1	100	10	1435	30576	130.6 \pm 1.5
9	95.00	1.0	1.1	200	10	557	13471	90.9 \pm 1.2
10	97.00	0.6	1.1	200	10	492	11828	65.7 \pm 1.0
11	99.00	0.6	1.1	200	10	343	7488	41.5 \pm 0.9
12	100.54	—	—	—	—	—	—	$\alpha_c = 23.5 \pm 0.9$

Date of experiment: 74/5/10

Table 2-6 Experimental conditions and results of measurement

The number of substituted 0.87w/o (S.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 21
Void fraction; 100%

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement		
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μ s)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)
1	72.00	8.0	1.1	30	6	10217	243354	426.3 \pm 9.7
2	75.00	8.0	1.1	40	7	12044	225332	366.1 \pm 7.4
3	78.00	8.0	1.1	60	8	6413	151961	308.3 \pm 5.6
4	81.00	5.0	1.1	60	8	4495	111339	253.2 \pm 4.2
5	84.00	5.0	1.1	80	9	2666	66969	200.9 \pm 3.1
6	87.00	3.0	1.1	100	9	1440	37517	151.4 \pm 2.3
7	90.00	1.0	1.1	100	9	988	24577	104.6 \pm 1.7
8	92.00	0.5	1.1	100	10	643	16537	74.8 \pm 1.4
9	93.00	0.5	1.1	200	10	360	9407	60.1 \pm 1.3
10	94.00	0.5	1.1	200	10	344	9459	46.2 \pm 1.2
11	95.67	—	—	—	—	—	—	$\alpha_c = 23.2 \pm 1.1$

Date of experiment: 74/5/9

Table 2-7 Experimental conditions and results of measurement

The number of substituted 0.87w/o (S.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 25
Void fraction; 100%

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement		
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μ s)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)
1	70.00	8.0	1.1	30	5	13800	251435	451.9 \pm 4.7
2	74.01	8.0	1.1	40	6	10202	185135	368.2 \pm 3.3
3	77.00	8.0	1.1	50	7	7348	132429	308.5 \pm 2.5
4	80.00	4.0	1.1	50	8	5431	127770	251.5 \pm 1.9
5	83.00	2.0	1.1	70	9	2486	57042	197.3 \pm 1.4
6	86.00	2.0	1.1	90	10	1959	44839	145.9 \pm 1.1
7	89.00	2.0	1.1	100	10	1253	27437	97.4 \pm 0.8
8	90.50	0.8	1.1	100	10	1103	16644	74.2 \pm 0.7
9	92.00	0.5	1.1	200	10	660	8301	51.7 \pm 0.6
10	94.00	—	—	—	—	—	—	$\lambda_c = 22.6 \pm 0.6$

Date of experiment: 74/5/8

Table 2-8 Experimental conditions and results of measurement

The number of substituted 0.87w/o (R.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 1
Void fraction; 100%

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement		
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μ s)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)
1	83.94	9	1.1	30	5	5160	73176	325.4 \pm 3.8
2	86.88	9	1.1	30	6	5686	93013	283.8 \pm 2.9
3	89.97	9	1.1	30	6	5319	83024	245.1 \pm 2.2
4	93.03	9	1.1	40	7	400	60931	208.2 \pm 1.7
5	95.84	9	1.1	50	8	3244	47298	176.5 \pm 1.3
6	99.01	9	1.1	60	10	3180	47816	142.9 \pm 0.9
7	102.05	9	1.1	70	10	2530	38048	112.9 \pm 0.7
8	104.97	9	1.1	70	10	1548	22476	85.8 \pm 0.5
9	108.00	0.7	1.1	200	10	509	5800	59.4 \pm 0.3
10	111.08	0.7	1.1	200	10	347	4037	34.2 \pm 0.3
11	112.20	—	—	—	—	—	—	$\lambda_c = 25.4 \pm 0.3$

Date of experiment: 74/12/13

Table 2-9 Experimental conditions and results of measurement

The number of substituted 0.87w/o (R.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 5
Void fraction; 100%

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement		
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μ s)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)
1	82.11	9	1.1	30	5	7768	125267	339.9 \pm 7.2
2	84.83	9	1.1	30	6	5835	98502	301.2 \pm 5.9
3	88.05	9	1.1	30	6	3116	51591	257.9 \pm 4.5
4	90.82	9	1.1	30	8	4580	76274	222.8 \pm 3.6
5	93.84	9	1.1	50	9	4086	67635	186.7 \pm 2.8
6	97.17	9	1.1	60	9	2010	32813	149.3 \pm 2.1
7	100.14	9	1.1	60	10	2216	36144	118.1 \pm 1.6
8	103.01	9	1.1	70	10	4222	75284	89.7 \pm 1.2
9	106.10	0.7	1.1	100	10	500	7707	60.9 \pm 0.8
10	109.00	0.7	1.1	200	10	760	7147	35.4 \pm 0.7
11	110.38	—	—	—	—	—	—	$\rho_c = 24.6 \pm 0.6$

Date of experiment: 75/1/14

Table 2-10 Experimental conditions and results of measurement

The number of substituted 0.87w/o (R.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 9
Void fraction; 100%

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement		
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μ s)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)
1	80.30	9	1.1	30	5	5739	86089	361.3 \pm 2.0
2	83.04	9	1.1	30	5	5703	88182	320.5 \pm 1.6
3	86.13	9	1.1	30	6	5493	86691	276.7 \pm 1.3
4	89.27	9	1.1	30	6	5419	80115	234.6 \pm 1.0
5	91.95	9	1.1	50	8	2965	44872	200.6 \pm 0.8
6	95.11	9	1.1	50	10	2960	45761	162.6 \pm 0.7
7	99.15	9	1.1	70	10	2104	32817	117.3 \pm 0.5
8	101.09	0.7	1.1	80	10	907	13214	96.8 \pm 0.4
9	104.10	0.7	1.1	100	10	665	9874	66.4 \pm 0.3
10	107.01	0.7	1.1	200	10	251	3893	38.7 \pm 0.3
11	108.61	—	—	—	—	—	—	$\rho_c = 24.1 \pm 0.3$

Date of experiment: 74/12/12

Table 2-11 Experimental conditions and results of measurement

The number of substituted 0.87w/o (R.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 13

Void fraction; 100%

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement		
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μ s)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)
1	77.11	9	1.1	30	5	8739	86696	410.1 \pm 7.4
2	80.03	9	1.1	30	5	8339	85508	361.5 \pm 5.9
3	83.08	9	1.1	40	7	9557	107485	313.6 \pm 4.6
4	86.13	7	1.1	40	9	12748	127123	268.4 \pm 3.6
5	88.98	7	1.1	50	10	8432	87356	228.7 \pm 2.8
6	92.01	7	1.1	50	10	7538	73891	188.9 \pm 2.1
7	95.02	5	1.1	60	10	4910	38417	151.8 \pm 1.6
8	97.99	3	1.1	60	10	3549	27421	117.3 \pm 1.1
9	100.99	1	1.1	60	10	1055	8235	84.6 \pm 0.8
10	104.07	1	1.1	70	10	1470	111077	46.9 \pm 0.4
11	106.01	1	1.1	100	10	569	4454	34.2 \pm 0.3
12	107.12	—	—	—	—	—	—	$\alpha_c = 23.8 \pm 0.3$

Date of experiment: 74/12/10

Table 2-12 Experimental conditions and results of measurement

The number of substituted 0.87w/o (R.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 21

Void fraction; 100%

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement		
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μ s)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)
1	77.07	8	1.1	30	5	6001	82152	391.9 \pm 5.2
2	80.00	8	1.1	30	5	5899	69106	343.2 \pm 4.1
3	82.99	8	1.1	30	5	6492	72009	296.1 \pm 3.2
4	85.92	8	1.1	40	7	6299	73694	252.2 \pm 2.6
5	89.10	5	1.1	50	8	3461	44971	207.2 \pm 1.9
6	92.05	5	1.1	60	9	3463	43931	167.9 \pm 1.5
7	95.05	3	1.1	60	10	2397	37654	130.2 \pm 1.1
8	96.92	1	1.1	70	10	999	16283	107.8 \pm 0.9
9	99.06	1	1.1	80	10	571	9681	83.1 \pm 0.7
10	101.05	1	1.1	90	10	746	10829	61.1 \pm 0.6
11	103.00	0.5	1.1	100	10	440	6571	40.4 \pm 0.5
12	104.66	—	—	—	—	—	—	$\alpha_c = 23.4 \pm 0.5$

Date of experiment: 74/12/5

Table 2-13 Experimental conditions and results of measurement

The number of substituted 0.87w/o (R.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 25

Void fraction; 100%

No.	Moderator level (cm)	Pulsed neutron source		Time analysis		Result of measurement		
		Repetition rate (Hz)	Pulse width (ms)	Channel width (μ s)	Delay time (ms)	Total burst counts	Alpha counts	Average decay constant (sec ⁻¹)
1	79.91	5	1.1	30	5	9181	74225	339.0 \pm 2.1
2	83.00	5	1.1	30	5	7465	60440	289.3 \pm 1.5
3	85.89	5	1.1	40	6	5884	45914	245.3 \pm 1.1
4	88.92	5	1.1	50	7	5342	42667	201.7 \pm 0.8
5	91.96	5	1.1	50	7	2383	26647	160.5 \pm 0.6
6	95.04	3	1.1	50	7	2503	30831	121.2 \pm 0.5
7	98.02	1	1.1	70	9	918	12293	85.4 \pm 0.4
8	99.99	1	1.1	90	10	804	10770	62.9 \pm 0.4
9	101.96	1	1.1	100	10	588	7901	41.3 \pm 0.4
10	103.66	—	—	—	—	—	—	$\rho_c = 23.3 \pm 0.4$

Date of experiment: 74/12/3

Table 3-1 Relation between axial buckling, decay constant and reactivity
 The number of substituted PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 0
 Void fraction : 100%

No.	Moderator level (cm)	Axial buckling* (m ⁻²)	Decay constant (sec ⁻¹)	Λ/Λ_c	Reactivity (- β)
1	84.20	10.82 ± 0.30	325.1 ± 10.9	1.042	12.52 ± 0.47
2	86.97	10.22 ± 0.27	287.2 ± 8.5	1.038	10.89 ± 0.37
3	90.04	9.61 ± 0.25	247.7 ± 6.4	1.033	9.21 ± 0.28
4	92.89	9.09 ± 0.23	213.4 ± 4.9	1.028	7.76 ± 0.22
5	95.84	8.60 ± 0.21	180.1 ± 3.6	1.024	6.36 ± 0.17
6	99.09	8.10 ± 0.19	145.8 ± 2.6	1.019	4.93 ± 0.12
7	103.07	7.55 ± 0.17	106.9 ± 1.6	1.013	3.32 ± 0.08
8	106.03	7.17 ± 0.16	80.1 ± 1.1	1.009	2.23 ± 0.05
9	108.91	6.83 ± 0.15	55.6 ± 0.7	1.005	1.23 ± 0.03
10	111.52	6.54 ± 0.14	34.6 ± 0.5	1.002	0.38 ± 0.01
11	112.75**	6.41 ± 0.13	$\alpha_c=25.1 \pm 0.4$	1.00	—

Table 3-2 Relation between axial buckling, decay constant and reactivity
 The number of substituted 0.87w/o (S.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 1
 Void fraction : 100%

No.	Moderator level (cm)	Axial buckling* (m ⁻²)	Decay constant (sec ⁻¹)	Λ/Λ_c	Reactivity (- β)
1	83.00	11.10 ± 0.31	342.2 ± 2.9	1.041	12.80 ± 0.20
2	86.01	10.42 ± 0.28	299.5 ± 2.3	1.037	11.03 ± 0.16
3	88.99	9.81 ± 0.25	259.9 ± 1.8	1.032	9.39 ± 0.14
4	91.97	9.25 ± 0.23	222.6 ± 1.4	1.028	7.86 ± 0.11
5	95.01	8.73 ± 0.21	187.0 ± 1.1	1.023	6.41 ± 0.09
6	98.00	8.26 ± 0.20	154.1 ± 0.9	1.019	5.08 ± 0.07
7	101.63	7.74 ± 0.18	116.8 ± 0.6	1.014	3.59 ± 0.05
8	104.00	7.42 ± 0.17	94.0 ± 0.5	1.010	2.68 ± 0.04
9	107.00	7.05 ± 0.16	66.7 ± 0.4	1.006	1.60 ± 0.02
10	108.99	6.82 ± 0.15	49.5 ± 0.4	1.004	0.92 ± 0.01
11	110.02	6.71 ± 0.14	40.8 ± 0.3	1.002	0.58 ± 0.01
12	111.86**	6.51 ± 0.14	$\alpha_c=25.8 \pm 0.3$	1.00	—

* Evaluated by using 11.3 ± 1.1 cm as an extrapolation length
 ** Critical level

Table 3-3 Relation between axial buckling, decay constant and reactivity
 The number of substituted 0.87w/o (S.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 5
 Void fraction : 100%

No.	Moderator level (cm)	Axial buckling* (m ⁻²)	Decay constant (sec ⁻¹)	Λ/Λ_c	Reactivity (- β)
1	76.08	12.93 ± 0.39	426.1 ± 3.4	1.046	16.65 ± 0.31
2	78.98	12.11 ± 0.35	378.1 ± 2.8	1.043	14.61 ± 0.27
3	81.99	11.34 ± 0.32	330.9 ± 2.2	1.038	12.60 ± 0.23
4	84.99	10.65 ± 0.29	286.3 ± 1.8	1.034	10.72 ± 0.19
5	88.00	10.01 ± 0.26	244.2 ± 1.4	1.029	8.95 ± 0.16
6	91.00	9.43 ± 0.24	204.6 ± 1.1	1.024	7.30 ± 0.13
7	94.00	8.90 ± 0.22	167.3 ± 0.9	1.020	5.75 ± 0.10
8	97.00	8.41 ± 0.20	131.8 ± 0.7	1.015	4.30 ± 0.08
9	99.99	7.97 ± 0.19	99.3 ± 0.6	1.011	2.97 ± 0.05
10	103.00	7.56 ± 0.17	68.1 ± 0.5	1.006	1.71 ± 0.03
11	106.00	7.17 ± 0.16	38.8 ± 0.4	1.002	0.54 ± 0.01
12	107.45**	7.00 ± 0.15	$\alpha_c=25.3 \pm 0.4$	1.00	—

Table 3-4 Relation between axial buckling, decay constant and reactivity
 The number of substituted 0.87w/o (S.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 9
 Void fraction : 100%

No.	Moderator level (cm)	Axial buckling* (m ⁻²)	Decay constant (sec ⁻¹)	Λ/Λ_c	Reactivity (- β)
1	74.15	13.52 ± 0.41	437.6 ± 3.1	1.046	17.96 ± 0.31
2	76.96	12.67 ± 0.37	388.2 ± 2.5	1.043	15.76 ± 0.27
3	80.09	11.82 ± 0.34	335.6 ± 2.0	1.038	13.43 ± 0.23
4	83.06	11.09 ± 0.31	288.1 ± 1.6	1.034	11.33 ± 0.19
5	86.06	10.41 ± 0.28	242.7 ± 1.2	1.029	9.34 ± 0.15
6	89.07	9.80 ± 0.25	199.7 ± 1.0	1.024	7.46 ± 0.12
7	91.96	9.26 ± 0.23	160.6 ± 0.8	1.019	5.77 ± 0.09
8	95.06	8.73 ± 0.21	121.0 ± 0.6	1.014	4.08 ± 0.07
9	98.06	8.25 ± 0.20	85.0 ± 0.5	1.009	2.55 ± 0.04
10	99.99	7.97 ± 0.19	62.9 ± 0.4	1.006	1.62 ± 0.03
11	102.00	7.69 ± 0.18	40.8 ± 0.4	1.002	0.69 ± 0.01
12	103.57**	7.48 ± 0.17	$\alpha_c=24.2 \pm 0.4$	1.00	—

* Evaluated by using 11.3±1.1 cm as an extrapolation length

** Critical level

Table 3-5 Relation between axial buckling, decay constant and reactivity

The number of substituted 0.87w/o (S.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 13
Void fraction : 100%

No.	Moderator level (cm)	Axial buckling* (m ⁻²)	Decay constant (sec ⁻¹)	Λ/Λ_c	Reactivity (- β)
1	71.00	14.57 ± 0.46	478.3 ± 8.9	1.048	20.39 ± 0.86
2	73.90	13.60 ± 0.42	423.2 ± 7.0	1.045	17.86 ± 0.74
3	77.00	12.66 ± 0.37	366.6 ± 5.4	1.041	15.27 ± 0.62
4	80.00	11.84 ± 0.34	314.3 ± 4.2	1.036	12.89 ± 0.52
5	83.00	11.10 ± 0.31	264.3 ± 3.3	1.031	10.63 ± 0.42
6	85.99	10.43 ± 0.28	217.5 ± 2.6	1.026	8.51 ± 0.34
7	89.00	9.81 ± 0.25	172.7 ± 2.0	1.020	6.52 ± 0.26
8	92.00	9.25 ± 0.23	130.6 ± 1.5	1.015	4.65 ± 0.18
9	95.00	8.73 ± 0.21	90.9 ± 1.2	1.010	2.91 ± 0.12
10	97.00	8.42 ± 0.20	65.7 ± 1.0	1.006	1.82 ± 0.07
11	99.00	8.11 ± 0.19	41.5 ± 0.9	1.003	0.77 ± 0.03
12	100.54**	7.89 ± 0.18	$\alpha_c=23.5 \pm 0.9$	1.00	—

Table 3-6 Relation between axial buckling, decay constant and reactivity

The number of substituted 0.87w/o (S.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 21
Void fraction : 100%

No.	Moderator level (cm)	Axial buckling* (m ⁻²)	Decay constant (sec ⁻¹)	Λ/Λ_c	Reactivity (- β)
1	72.00	14.22 ± 0.44	426.3 ± 9.7	1.042	18.18 ± 0.98
2	75.00	13.25 ± 0.40	366.1 ± 7.4	1.038	15.40 ± 0.81
3	78.00	12.38 ± 0.36	308.3 ± 5.6	1.033	12.75 ± 0.66
4	81.00	11.59 ± 0.33	253.2 ± 4.2	1.027	10.23 ± 0.53
5	84.00	10.87 ± 0.30	200.9 ± 3.1	1.022	7.87 ± 0.40
6	87.00	10.21 ± 0.27	151.4 ± 2.3	1.016	5.64 ± 0.29
7	90.00	9.62 ± 0.25	104.6 ± 1.7	1.011	3.56 ± 0.18
8	92.00	9.25 ± 0.23	74.8 ± 1.4	1.007	2.25 ± 0.12
9	93.02	9.07 ± 0.23	60.1 ± 1.3	1.005	1.61 ± 0.09
10	94.00	8.90 ± 0.22	46.2 ± 1.2	1.003	1.00 ± 0.06
11	95.67**	8.63 ± 0.21	$\alpha_c=23.2 \pm 1.1$	1.00	—

* Evaluated by using 11.3 ± 1.1 cm as an extrapolation length

** Critical level

Table 3-7 Relation between axial buckling, decay constant and reactivity

The number of substituted 0.87w/o (S.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 25
Void fraction : 100%

No.	Moderator level (cm)	Axial buckling* (m ⁻²)	Decay constant (sec ⁻¹)	Λ/Λ_c	Reactivity (- β)
1	70.00	14.93 ± 0.48	451.9 ± 4.7	1.044	19.85 ± 0.55
2	74.01	13.56 ± 0.41	368.2 ± 3.3	1.038	15.89 ± 0.43
3	77.00	12.66 ± 0.37	308.5 ± 2.5	1.033	13.09 ± 0.35
4	80.00	11.84 ± 0.34	251.5 ± 1.9	1.028	10.42 ± 0.28
5	83.00	11.10 ± 0.31	197.3 ± 1.4	1.022	7.91 ± 0.21
6	86.00	10.43 ± 0.28	145.9 ± 1.1	1.016	5.55 ± 0.15
7	89.00	9.81 ± 0.25	97.4 ± 0.8	1.010	3.35 ± 0.09
8	90.50	9.52 ± 0.24	74.2 ± 0.7	1.007	2.30 ± 0.06
9	92.00	9.25 ± 0.23	51.7 ± 0.6	1.004	1.29 ± 0.04
10	94.00**	8.90 ± 0.22	$\alpha_c=22.6 \pm 0.6$	1.00	—

Table 3-8 Relation between axial buckling, decay constant and reactivity

The number of substituted 0.87w/o (R.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 1
Void fraction : 100%

No.	Moderator level (cm)	Axial buckling* (m ⁻²)	Decay constant (sec ⁻¹)	Λ/Λ_c	Reactivity (- β)
1	83.94	10.88 ± 0.30	325.4 ± 3.8	1.040	12.31 ± 0.19
2	86.96	10.22 ± 0.27	283.8 ± 2.9	1.036	10.56 ± 0.15
3	89.97	9.62 ± 0.25	245.1 ± 2.2	1.031	8.93 ± 0.12
4	93.03	9.07 ± 0.23	208.2 ± 1.7	1.026	7.40 ± 0.09
5	95.84	8.60 ± 0.21	176.5 ± 1.3	1.022	6.09 ± 0.07
6	99.01	8.11 ± 0.19	142.9 ± 0.9	1.017	4.72 ± 0.06
7	102.05	7.68 ± 0.18	112.9 ± 0.7	1.013	3.50 ± 0.04
8	104.97	7.30 ± 0.16	85.8 ± 0.5	1.009	2.40 ± 0.03
9	108.00	6.94 ± 0.15	59.4 ± 0.3	1.005	1.35 ± 0.02
10	111.08	6.59 ± 0.14	34.2 ± 0.3	1.001	0.35 ± 0.00
11	112.20**	6.47 ± 0.14	$\alpha_c=25.4 \pm 0.3$	1.00	—

* Evaluated by using 11.3 ± 1.1 cm as an extrapolation length

** Critical level

Table 3-9 Relation between axial buckling, decay constant and reactivity

The number of substituted 0.87w/o (R.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 5

Void fraction : 100%

No.	Moderator level (cm)	Axial buckling* (m ⁻²)	Decay constant (sec ⁻¹)	Λ/Λ_c	Reactivity (- β)
1	82.11	11.31 ± 0.32	339.9 ± 7.2	1.042	13.37 ± 0.45
2	84.83	10.68 ± 0.29	301.2 ± 5.9	1.038	11.68 ± 0.38
3	88.05	10.00 ± 0.26	257.9 ± 4.5	1.033	9.81 ± 0.30
4	90.82	9.46 ± 0.24	222.8 ± 3.6	1.028	8.30 ± 0.25
5	93.84	8.93 ± 0.22	186.7 ± 2.8	1.024	6.75 ± 0.20
6	97.17	8.39 ± 0.20	149.3 ± 2.1	1.019	5.17 ± 0.15
7	100.14	7.95 ± 0.19	118.1 ± 1.6	1.014	3.86 ± 0.11
8	103.01	7.55 ± 0.17	89.7 ± 1.2	1.010	2.68 ± 0.08
9	106.10	7.16 ± 0.16	60.9 ± 0.8	1.006	1.48 ± 0.04
10	109.00	6.82 ± 0.15	35.4 ± 0.7	1.002	0.44 ± 0.01
11	110.28**	6.68 ± 0.14	$\alpha_c=24.6 \pm 0.6$	1.00	—

Table 3-10 Relation between axial buckling, decay constant and reactivity

The number of substituted 0.87w/o (R.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 9

Void fraction : 100%

No.	Moderator level (cm)	Axial buckling* (m ⁻²)	Decay constant (sec ⁻¹)	Λ/Λ_c	Reactivity (- β)
1	80.30	11.76 ± 0.33	361.3 ± 2.0	1.043	14.61 ± 0.19
2	83.04	11.09 ± 0.31	320.5 ± 1.6	1.039	12.79 ± 0.16
3	86.13	10.40 ± 0.28	276.7 ± 1.3	1.034	10.86 ± 0.14
4	89.27	9.76 ± 0.25	234.6 ± 1.0	1.029	9.00 ± 0.11
5	91.95	9.26 ± 0.23	200.6 ± 0.8	1.025	7.52 ± 0.09
6	95.11	8.72 ± 0.21	162.6 ± 0.7	1.020	5.87 ± 0.07
7	99.15	8.09 ± 0.19	117.3 ± 0.5	1.014	3.93 ± 0.05
8	101.09	7.81 ± 0.18	96.8 ± 0.4	1.011	3.05 ± 0.04
9	104.10	7.41 ± 0.17	66.4 ± 0.3	1.007	1.77 ± 0.02
10	107.01	7.05 ± 0.16	38.7 ± 0.3	1.002	0.61 ± 0.01
11	108.61**	6.86 ± 0.15	$\alpha_c=24.1 \pm 0.3$	1.00	—

* Evaluated by using 11.3 ± 1.1 cm as an extrapolation length

** Critical level

Table 3-11 Relation between axial buckling, decay constant and reactivity

The number of substituted 0.87w/o (R.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 13
Void fraction : 100%

No.	Moderator level (cm)	Axial buckling* (m ⁻²)	Decay constant (sec ⁻¹)	Λ/Λ_c	Reactivity (- β)
1	77.11	12.63 ± 0.37	410.1 ± 7.4	1.047	17.06 ± 0.38
2	80.03	11.83 ± 0.34	361.5 ± 5.9	1.043	14.86 ± 0.31
3	83.08	11.08 ± 0.31	313.6 ± 4.6	1.038	12.69 ± 0.25
4	86.13	10.40 ± 0.28	268.4 ± 3.6	1.033	10.66 ± 0.20
5	88.98	9.82 ± 0.25	228.7 ± 2.8	1.028	8.89 ± 0.16
6	92.01	9.25 ± 0.23	188.9 ± 2.1	1.023	7.13 ± 0.12
7	95.02	8.73 ± 0.21	151.8 ± 1.6	1.018	5.50 ± 0.09
8	97.99	8.26 ± 0.20	117.3 ± 1.1	1.014	4.00 ± 0.07
9	100.99	7.83 ± 0.18	84.6 ± 0.8	1.009	2.59 ± 0.04
10	104.70	7.34 ± 0.16	46.9 ± 0.4	1.003	0.98 ± 0.02
11	106.01	7.17 ± 0.16	34.2 ± 0.3	1.002	0.44 ± 0.01
12	107.12**	7.04 ± 0.15	$\alpha_c=23.8 \pm 0.3$	1.00	—

Table 3-12 Relation between axial buckling, decay constant and reactivity

The number of substituted 0.87w/o (R.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 21
Void fraction : 100%

No.	Moderator level (cm)	Axial buckling* (m ⁻²)	Decay constant (sec ⁻¹)	Λ/Λ_c	Reactivity (- β)
1	77.07	12.64 ± 0.37	391.9 ± 5.2	1.042	16.47 ± 0.39
2	80.00	11.84 ± 0.34	343.2 ± 4.1	1.038	14.25 ± 0.33
3	82.99	11.10 ± 0.31	296.1 ± 3.2	1.033	12.10 ± 0.27
4	85.92	10.44 ± 0.28	252.2 ± 2.6	1.029	10.11 ± 0.22
5	89.10	9.79 ± 0.25	207.2 ± 1.9	1.024	8.08 ± 0.18
6	92.05	9.24 ± 0.23	167.9 ± 1.5	1.019	6.33 ± 0.14
7	95.05	8.73 ± 0.21	130.2 ± 1.1	1.015	4.65 ± 0.10
8	96.92	8.43 ± 0.20	107.8 ± 0.9	1.012	3.67 ± 0.08
9	99.06	8.10 ± 0.19	83.1 ± 0.7	1.008	2.59 ± 0.06
10	101.05	7.82 ± 0.18	61.1 ± 0.6	1.005	1.63 ± 0.04
11	103.00	7.56 ± 0.17	40.4 ± 0.5	1.002	0.73 ± 0.02
12	104.66**	7.34 ± 0.16	$\alpha_c=23.4 \pm 0.5$	1.00	—

* Evaluated by using 11.3 ± 1.1 cm as an extrapolation length

** Critical level

Table 3-13 Relation between axial buckling, decay constant and reactivity
 The number of substituted 0.87w/o (R.G) PuO₂-UO₂ fuel assemblies ; 25
 Void fraction : 100%

No.	Moderator level (cm)	Axial buckling* (m ⁻²)	Decay constant (sec ⁻¹)	Λ/Λ_c	Reactivity (- β)
1	79.91	11.86 ± 0.34	339.0 ± 2.1	1.037	14.05 ± 0.26
2	83.00	11.10 ± 0.31	289.3 ± 1.5	1.032	11.79 ± 0.22
3	85.89	10.45 ± 0.28	245.3 ± 1.1	1.027	9.80 ± 0.18
4	88.92	9.83 ± 0.26	201.7 ± 0.8	1.023	7.84 ± 0.14
5	91.96	9.26 ± 0.23	160.5 ± 0.6	1.018	6.00 ± 0.11
6	95.04	8.73 ± 0.21	121.2 ± 0.5	1.013	4.26 ± 0.08
7	98.02	8.26 ± 0.20	85.4 ± 0.4	1.008	2.69 ± 0.05
8	99.99	7.97 ± 0.19	62.9 ± 0.4	1.005	1.71 ± 0.03
9	101.96	7.69 ± 0.18	41.3 ± 0.4	1.002	0.77 ± 0.02
10	103.66**	7.47 ± 0.17	$\alpha_c=23.3 \pm 0.4$	1.00	—

* Evaluated by using 11.3 ± 1.1 cm as an extrapolation length

** Critical level

Table 4-1 Parameters evaluated from relation between decay constant and axial buckling

Void fraction : 100%

The number of loaded fuel assemblies		Critical level (cm)	Axial buckling at critical** B_{ZC}^2 (m^{-2})	α_c (sec^{-1})	β ($sec^{-1} \cdot m^2$)	γ ($sec^{-1} \cdot m^4$)
PuO ₂ -UO ₂ *	1.2 w/o UO ₂					
0	121	112.75	6.41±0.13	25.06±0.42	73.84±1.27	-1.31±0.48
1	120	111.86	6.51±0.14	25.82±0.33	75.69±0.43	-1.48±0.10
5	116	107.45	7.00±0.15	25.26±0.42	77.99±0.40	-1.75±0.07
9	112	103.57	7.48±0.17	24.15±0.38	80.26±0.36	-1.95±0.06
13	108	100.54	7.89±0.18	23.45±0.89	81.65±0.86	-2.03±0.15
21	100	95.67	8.63±0.21	23.16±1.13	84.16±1.21	-2.17±0.22
25	96	94.00	8.90±0.22	22.63±0.58	84.21±0.56	-2.16±0.09

* 0.87 w/o (S.G) PuO₂ enriched.

** Evaluated by using 11.3±1.1 cm as an extrapolation length.

Table 4-2 Parameters evaluated from relation between decay constant and axial buckling

Void fraction : 100%

The number of loaded fuel assemblies		Critical level (cm)	Axial buckling at critical** B_{ZC}^2 (m^{-2})	α_c (sec^{-1})	β ($sec^{-1} \cdot m^2$)	γ ($sec^{-1} \cdot m^4$)
PuO ₂ -UO ₂ *	1.2 w/o UO ₂					
0	121	112.75	6.41±0.13	25.06±0.42	73.84±1.27	-1.31±0.48
1	120	112.20	6.47 0.14	25.43±0.25	73.79±0.48	-1.31±0.16
5	116	110.28	6.68 0.14	24.64±0.63	75.68±1.09	-1.65±0.24
9	112	108.61	6.86 0.15	24.14±0.28	78.34±0.31	-1.94±0.05
13	108	107.12	7.04 0.15	23.77±0.31	78.41±0.87	-1.66±0.18
21	100	104.66	7.34 0.16	23.36±0.46	79.72±0.70	-1.92±0.13
25	96	103.66	7.47 0.17	23.34±0.41	80.03±0.18	-1.87±0.10

* 0.87 w/o (R.G) PuO₂ enriched.

** Evaluated by using 11.3±1.1 cm as an extrapolation length.

Table 4-3 Void reactivity measured on PuO₂-UO₂ fuel loaded core

The number of loaded fuel assemblies PuO ₂ -UO ₂ *	Critical level of 0% void core (cm)		Axial buckling at critical ** B _z ² (m ⁻²)	Decay constant α (sec ⁻¹)	Λ/Λ _c	Void reactivity (-β)
	1.2 w/o UO ₂	96				
0	121	97.56	8.94±0.17	203.4±12.3	1.027	7.33±0.46
1	120	95.85	9.24±0.18	221.7±12.2	1.028	7.82±0.44
5	116	89.12	10.57±0.22	281.6±14.4	1.033	10.52±0.57
9	112	83.45	11.93±0.26	342.8±16.6	1.039	13.75±0.70
13	108	79.80	12.95±0.30	384.6±19.1	1.042	16.09±1.00
21	100	74.10	14.82±0.36	461.4±23.7	1.044	19.79±1.40
25	96	72.14	15.56±0.39	487.7±22.4	1.046	21.54±1.13

* 0.87 w/o (S.G) PuO₂ enriched.

** Evaluated by using 7.5±1.0 cm as an extrapolation length of 0% void core

Table 4-4 Void reactivity measured on PuO₂-UO₂ fuel loaded core

The number of loaded fuel assemblies PuO ₂ -UO ₂ *	Critical level of 0% void core (cm)		Axial buckling at critical ** B _z ² (m ⁻²)	Decay constant (sec ⁻¹)	Λ/Λ _c	Void reactivity (-β)
	1.2 w/o UO ₂	96				
0	121	97.56	8.94±0.17	203.4±12.3	1.027	7.33±0.46
1	120	96.72	9.09±0.17	209.5±11.8	1.026	7.46±0.43
5	116	93.49	9.68±0.19	236.8±13.2	1.030	8.90±0.55
9	112	90.57	10.26±0.21	267.9±13.7	1.033	10.47±0.55
13	108	88.21	10.77±0.23	293.6±15.4	1.036	11.79±0.64
21	100	84.65	11.62±0.25	329.6±16.4	1.037	13.62±0.73
25	96	83.52	11.91±0.26	342.1±16.7	1.037	14.20±0.74

* 0.87 w/o (R.G) PuO₂ enriched.

** Evaluated by using 7.5±1.0 cm as an extrapolation length of 0% void core.

Table 5-1 Three energy group constants of unit cell
calculated by METHUSELAH-II

(a) Void fraction : 0%

Cell	Energy group	D (cm)	Σ_a ($\times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$)	Σ_r ($\times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$)	$v\Sigma_f$ ($\times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$)	$\langle 1/v \rangle$ ($\text{sec} \cdot \text{cm}^{-1}$)
0.87w/o(S.G) PuO ₂ -UO ₂ fuel	1	1.58134	1.61090	2.84569	2.05903	4.87445 $\times 10^{-9}$
	2	1.25635	5.18195	2.49226	1.94576	4.62139 $\times 10^{-7}$
	3	0.85853	13.76054	—	20.72638	4.84232 $\times 10^{-6}$
0.87w/o(R.G) PuO ₂ -UO ₂ fuel	1	1.57809	1.59944	2.85345	2.03219	4.87445 $\times 10^{-9}$
	2	1.25639	5.55267	2.49111	1.84660	4.62139 $\times 10^{-7}$
	3	0.85660	13.28369	—	19.33042	4.87260 $\times 10^{-6}$
1.2w/oUO ₂ fuel	1	1.58152	1.55996	2.86061	2.02947	4.87445 $\times 10^{-9}$
	2	1.26213	4.28786	2.51569	1.38671	4.62139 $\times 10^{-7}$
	3	0.84766	11.11779	—	14.85018	4.86726 $\times 10^{-6}$
D ₂ O moderator	1	1.43175	0.38348	2.78297	0.39610	4.87445 $\times 10^{-9}$
	2	1.22606	0.0	1.879	0.0	4.62139 $\times 10^{-7}$
	3	0.84768	0.12803	—	0.0	4.86726 $\times 10^{-6}$

(b) Void fraction : 100%

Cell	Energy group	D (cm)	Σ_a ($\times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$)	Σ_r ($\times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$)	$v\Sigma_f$ ($\times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$)	$\langle 1/v \rangle$ ($\text{sec} \cdot \text{cm}^{-1}$)
0.87w/o(S.G) PuO ₂ -UO ₂ fuel	1	1.79020	1.45503	1.83110	1.70327	4.87445 $\times 10^{-9}$
	2	1.43388	4.44990	1.31016	1.99180	4.62139 $\times 10^{-7}$
	3	0.92198	14.59741	—	23.59124	4.51353 $\times 10^{-6}$
0.87w/o(R.G) PuO ₂ -UO ₂ fuel	1	1.78466	1.44344	1.83515	1.67516	4.87445 $\times 10^{-9}$
	2	1.43109	4.73587	1.31554	1.89831	4.62139 $\times 10^{-7}$
	3	0.92573	14.10302	—	22.13911	4.55887 $\times 10^{-6}$
1.2w/oUO ₂ fuel	1	1.79563	1.40622	1.84283	1.66913	4.87445 $\times 10^{-9}$
	2	1.46739	3.57163	1.32498	1.42212	4.62139 $\times 10^{-7}$
	3	0.96374	11.19925	—	16.54936	4.52526 $\times 10^{-6}$
D ₂ O moderator	1	1.40295	0.32798	2.91889	0.33877	4.87445 $\times 10^{-9}$
	2	1.22606	0.0	1.793	0.0	4.62139 $\times 10^{-7}$
	3	0.84912	0.11819	—	0.0	4.52526 $\times 10^{-6}$

Table 5-2 Calculated values used in correction
of prompt generation time

Void fraction : 100%

Substituted fuel	The number of loaded fuel assemblies		β_{effc} (%)	l_{pc} (μsec)	$\partial l_{\text{p}}/\partial B_2^2$ ($\mu\text{sec}/\text{m}^{-2}$)
	PuO ₂ -UO ₂	1.2 w/o UO ₂			
—————	0	121	0.737	345.6	-3.33
0.87w/o(S.G) PuO ₂ -UO ₂	1	120	0.728	342.8	-3.29
	5	116	0.688	331.1	-3.17
	9	112	0.649	319.9	-3.10
	13	108	0.620	311.2	-2.99
	21	100	0.570	296.7	-2.77
	25	96	0.554	292.0	-2.67
0.87w/o(R.G) PuO ₂ -UO ₂	1	120	0.730	343.5	-3.30
	5	116	0.701	335.5	-3.21
	9	112	0.674	328.1	-3.15
	13	108	0.652	321.8	-3.08
	21	100	0.612	310.8	-2.94
	25	96	0.598	306.7	-2.86

Table 5-3 Void reactivity calculated by METHUSELAH-II & CITATION

The number of loaded fuel assemblies		Void fraction (%)	Axial buckling at critical (m ⁻²)	β_{eff} at critical (%)	Void reactivity	
PuO ₂ -UO ₂ *	1.2 w/o UO ₂				(-ΔK/K)	(-β)
0	121	0	8.832	0.729	4.61	6.26
		100	6.821	0.737		
1	120	0	9.079	0.717	4.92	6.77
		100	6.927	0.728		
5	116	0	10.147	0.662	6.36	9.25
		100	7.329	0.688		
9	112	0	11.197	0.608	7.77	11.96
		100	7.707	0.649		
13	108	0	11.994	0.575	8.72	14.07
		100	8.033	0.620		
21	100	0	13.341	0.524	10.23	17.94
		100	8.605	0.570		
25	96	0	13.772	0.512	10.64	19.19
		100	8.815	0.554		

*0.87w/o (S.G) PuO₂ enriched

Table 5-4 Void reactivity calculated by METHUSELAH-II & CITATION

The number of loaded fuel assemblies		Void fraction (%)	Axial buckling at critical (m ⁻²)	β_{eff} at critical (%)	Void reactivity	
PuO ₂ -UO ₂ *	1.2 w/o UO ₂				(-ΔK/K)	(-β)
0	121	0	8.832	0.729	4.61	6.26
		100	6.821	0.737		
1	120	0	8.964	0.720	4.80	6.58
		100	6.865	0.730		
5	116	0	9.485	0.684	5.59	7.98
		100	7.015	0.701		
9	112	0	9.981	0.648	6.35	9.42
		100	7.147	0.674		
13	108	0	10.393	0.621	6.94	10.65
		100	7.269	0.652		
21	100	0	11.110	0.578	7.95	12.98
		100	7.477	0.612		
25	96	0	11.364	0.564	8.27	13.84
		100	7.561	0.598		

* 0.87 w/o (R.G) PuO₂ enriched.

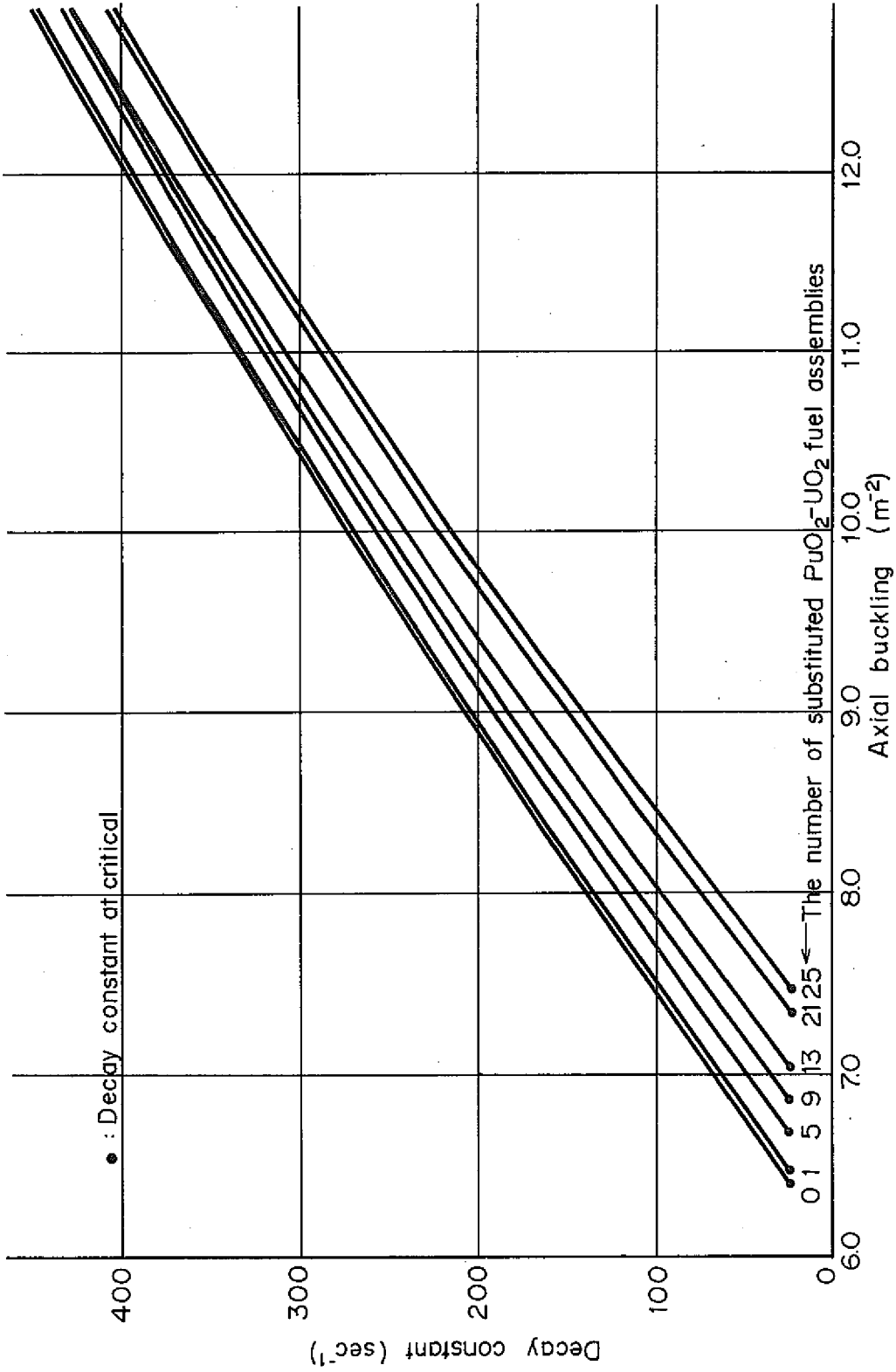


Fig. 5 Decay constant vs. axial buckling on 0.87% (R.G) PuO₂-UO₂ fuel loaded core

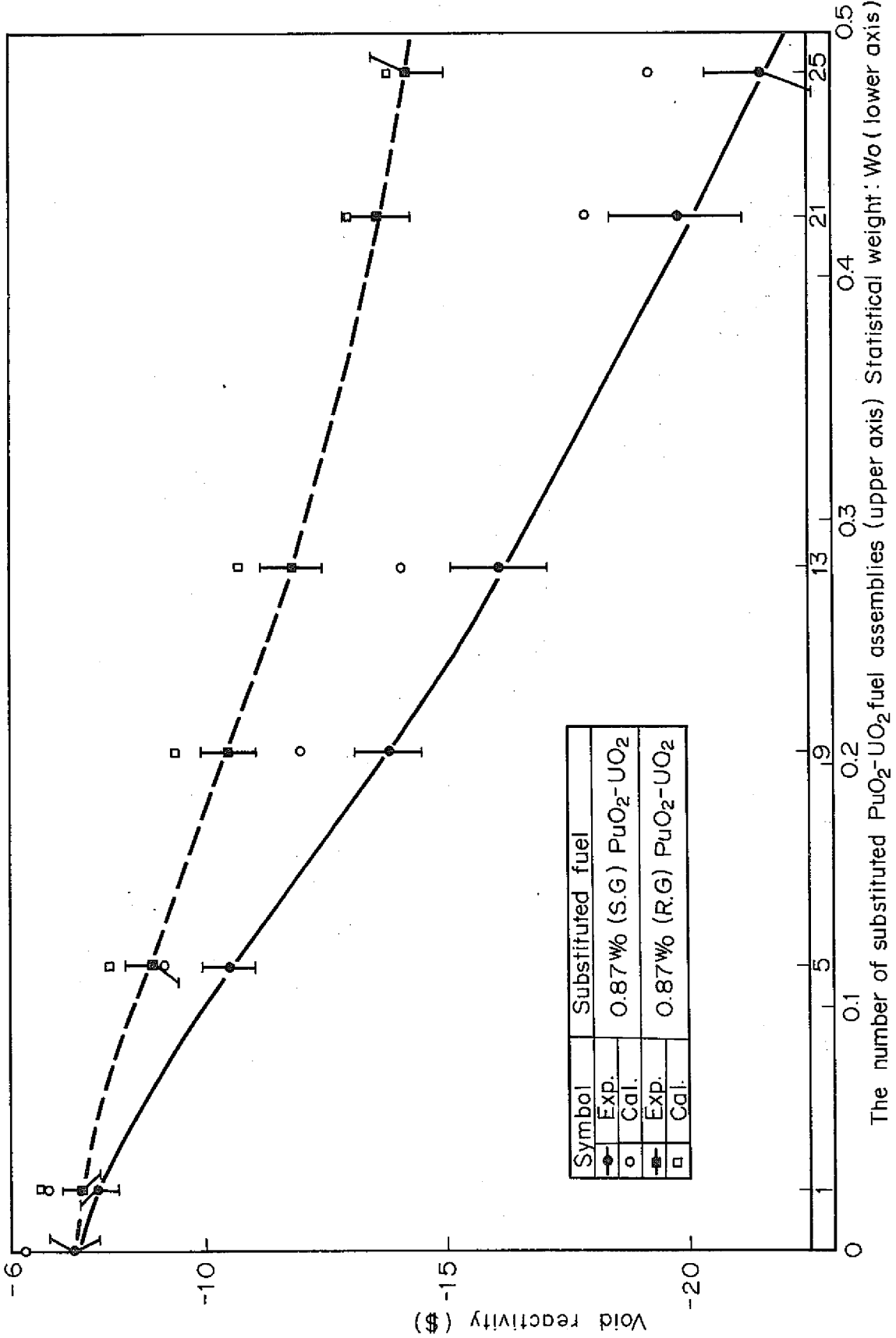


Fig. 6 Void reactivity in $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ fuel loaded core

付 録 1

測定された軸方向バックリング B_z^2 と即発中性子減衰定数 α とを (4-1) 式に最小二乗法でフィッティングさせて係数 α_c, β, r を求めるコードである。

データ処理は計数管ごとに測定された α あるいは各計数管で測定された α の平均値をそれぞれフィッティングして各係数を求めた。更に、後者の方法で求められた α_c, β, r を用いて、(5-9) 式から α を測定した B_z^2 における未臨界度も求めてある。

```

YJOB          ID=MERCURY

YEXC          FTC

C
C
C *** THIS PROGRAM WAS PREPARED FOR PULSE EXP.
C
C *** MAIN PROGRAM ***
C
1  DIMENSION YY(15,4),EYY(15,4),X(31),EX(31),Y(31),EY(31),Z(15),EZ(15
1  *) ,R(15),ER(15),RR(15),GTF(15),GT(15),H(15)
2  DIMENSION TITLE(9),ITEM(60),ISTART(60),IEND(60),NEQ(60)
3  CALL SETSEP(1H,)
4  2222 READ(5,101) (TITLE(I),I=1,9)
5  IF(TITLE(1).EQ.8HYSTOP ) GO TO 9
6  READ(5,102) N,M,NN
7  NM=N*M
8  READ(5,104) HC
9  READ(5,104) (H(I),I=1,N)
10 READ(5,105) PLTC,PLTBZ,BEFF
11 READ(5,103) (ITEM(I),ISTART(I),IEND(I),I=1,NN)
12 IF(NN.EQ.0) GO TO 14
13 READ(5,102) (NEQ(I),I=1,NN)
14 DO 10 I=1,N
15 DO 10 J=1,M
16 IP=M*(I-1)+J
17 IS=ISTART(IP)
18 IE=IEND(IP)
19 CALL ALPHA(IS,IE,ALF,EALF)
20 DO 11 LL=1,NN
21 NOZOKU=NEQ(LL)
22 IF(IP.EQ.NOZOKU) GO TO 12
23 11 CONTINUE
24 YY(I,J)=ALF
25 EYY(I,J)=EALF
26 GO TO 10
27 12 YY(I,J)=0.0
28 EYY(I,J)=0.0
29 10 CONTINUE
30 1111 READ(5,105) RAM,ERAM
31 IF(RAM.NE.0.) GO TO 18
32 IF(RAM.EQ.0.) PAUSE 1
33 GO TO 2222
C
34 101 FORMAT(9A8)
35 102 FORMAT(10I8)
36 103 FORMAT(4(A8,2I3))
37 104 FORMAT(10F8.2)
38 105 FORMAT(3F9.5)
C
39 18 DO 20 I=1,N
40 X(I)=H(I)
41 20 CONTINUE

```

```

42      EX(1)=HC
43      EX(2)=RAM
44      EX(3)=ERAM
45      CALL BUCK(N,X,EX,Z,EZ)
      C
45      WRITE(6,201) (TITLE(I),I=1,9)
47      WRITE(6,202) HC,RAM,ERAM
48      WRITE(6,301) X(31),EX(31)
49      WRITE(6,303) PLTC
50      WRITE(6,304) PLTBZ
51      WRITE(6,305) BEFF
52      WRITE(6,203)
53      WRITE(6,204) (H(I),Z(I),EZ(I),X(I),EX(I),YY(I,1),EYY(I,1),YY(I,2),
53      *EYY(I,2),YY(I,3),EYY(I,3),YY(I,4),EYY(I,4),I=1,N)
54      WRITE(6,205)
55      WRITE(6,206) (ITEM(I),ISTART(I),IEND(I),I=1,NM)
56      IF(NN.EQ.0) GO TO 30
57      WRITE(6,207)
58      WRITE(6,208) (NEQ(I),I=1,NN)
59      30 WRITE(6,302)
60      WRITE(6,209)
61      DO 40 J=1,M
62      DO 50 I=1,N
63      Y(I)=YY(I,J)
64      EY(I)=EYY(I,J)
65      50 CONTINUE
66      CALL ALFFIT(N,X,EX,Y,EY)
67      WRITE(6,210) J
68      WRITE(6,211) (X(I),EX(I),I=28,30)
69      WRITE(6,212) Y(30)
70      WRITE(6,213)
71      WRITE(6,214) (EY(I),I=22,30)
72      40 CONTINUE
      C
73      DO 51 I=1,N
74      AVEY=0.0
75      EAVEY=0.0
76      TWE=0.0
77      LA=0
78      DO 52 J=1,M
79      AY=YY(I,J)
80      IF(AY.LT.1.0) GO TO 54
81      WE=(1.0/EYY(I,J))**2
82      AVEY=AVEY+WE*YY(I,J)
83      EAVEY=EAVEY+1.0/WE
84      TWE=TWE+WE
85      GO TO 52
86      54 LA=LA+1
87      52 CONTINUE
88      LB=M-LA
89      IF(LB.EQ.0) GO TO 55
90      AVEY=AVEY/TWE
91      EAVEY=SQRT(EAVEY/FLOAT(LB))
92      GO TO 56

```

```

93      55 AVEY=0.0
94      EAVEY=0.0
95      58 Y(I)=AVEY
96      EY(I)=EAVEY
97      51 CONTINUE
98      CALL ALFFIT(N,X,EX,Y,EY)
99      DO 53 I=1,N
100     YX=Y(I)/X(28)
101     RR(I)=YX-1.0
102     DOL=RR(I)
103     PLT=PLTC-PLTBZ*X(I)
104     GTF(I)=PLT/PLTC
105     45 R(I)=YX*GTF(I)*(1.0+BEFF*DOL)-1.0
106     P=ABS(R(I)-DOL)/R(I)
107     IF(P.LT.0.001) GO TO 46
108     DOL=R(I)
109     GO TO 45
110     46 GTF(I)=GTF(I)*(1.0+BEFF*DOL)
111     GT(I)=GTF(I)/X(28)*BEFF
112     ER(I)=R(I)*SQRT((EY(I)/Y(I))**2+(EX(28)/X(28))**2)
113     53 CONTINUE
114     WRITE(6,302)
115     WRITE(6,209)
116     WRITE(6,215)
117     WRITE(6,216) (Z(I),EZ(I),Y(I),EY(I),R(I),ER(I),RR(I),GTF(I),GT(I),
118     *I=1,N)
118     WRITE(6,217)
119     WRITE(6,211) (X(I),EX(I),I=28,30)
120     WRITE(6,212) Y(30)
121     WRITE(6,213)
122     WRITE(6,214) (EY(I),I=22,30)
C
123     K=1
124     DO 60 J=1,M
125     DO 60 I=1,N
126     Y(K)=YY(I,J)
127     EY(K)=EYY(I,J)
128     X(K)=X(I)
129     EX(K)=EX(I)
130     IF(NN.EQ.0) GO TO 70
131     DO 70 L=1,NN
132     NER=NEQ(L)
133     IF(K.EQ.NER) Y(K)=0.0
134     70 CONTINUE
135     K=K+1
136     60 CONTINUE
137     K=K-1
138     CALL ALFFIT(K,X,EX,Y,EY)
139     WRITE(6,209)
140     WRITE(6,218)
141     WRITE(6,211) (X(I),EX(I),I=28,30)
142     WRITE(6,212) Y(30)
143     WRITE(6,213)
144     WRITE(6,214) (EY(I),I=22,30)

```

```

145      GO TO 1111
145      201 FORMAT(1H1,6X,9A8,/)
147      202 FORMAT(1H ,6X,'CRITICAL LEVEL = ',F6.2,' CM',//,7X,'EXTRAPOLATION
147      *DISTANCE = ',F6.2,'+',F6.2,' CM',/)
148      203 FORMAT(1H ,7X,'H(I)',4X,'BZ(I)',7X,'DBZ(I)',5X,'ALF(I,1)',4X,'ALF(
148      *I,2)',4X,'ALF(I,3)',4X,'ALF(I,4)',/)
149      204 FORMAT(6X,F6.2,F6.2,'+',F5.2,F6.2,'+',F5.2,F6.1,'+',F5.1,F6.1,'+',
149      *F5.1,F6.1,1H+,F5.1,F6.1,1H+,F5.1)
150      205 FORMAT(1H0,6X,'START AND END CHANNEL',/)
151      206 FORMAT(7X,A8,2I3,5X,A8,2I3,5X,A8,2I3,5X,A8,2I3)
152      207 FORMAT(1H0,7X,'EXCEPTED DATA',/)
153      208 FORMAT(7X,10I6)
154      209 FORMAT(1H0,7X,'*****',/)
155      210 FORMAT(1H0,7X,'*** COUNTER NO. ',I1,' ***',/)
156      217 FORMAT(1H0,7X,'*** RESULT BY USING AVERAGE ALPHA-VALUES ***',/)
157      218 FORMAT(1H0,7X,'*** RESULT BY FITTING ALL ALPHA-VALUES ***',/)
158      211 FORMAT(1H ,6X,'ALPHA = (',F6.2,' +',F5.2,' ) + (',F6.2,' +',F5.2,'
158      * )*( DBZ**2 ) + (',F5.2,' +',F5.2,' )*( DBZ**4 )',/)
159      212 FORMAT(1H0,7X,'SQUARE OF RESIDUAL = ',E12.5,/)
160      213 FORMAT(1H ,6X,'ELEMENTS OF VARIANCE-COVARIANCE MATRIX',/)
161      214 FORMAT(1H ,6X,E12.5,2X,E12.5,2X,E12.5)
162      215 FORMAT(1H ,9X,'BZ(I)',8X,'ALPHA(I)',6X,'ROHC(I)',6X,'ROH(I)',2X,'G
162      *.T-FACTOR',2X,'GENERATION TIME',/)
163      216 FORMAT(1H ,6X,F6.2,'+',F5.2,F8.2,'+',F6.2,F7.2,'+',F5.2,F7.2,4X,F8
163      *.3,4X,E12.5)
164      301 FORMAT(1H ,6X,'AXIAL BUCKLING AT CRITICAL = ',F6.2,' +',F5.2,' M-2
164      *',/)
165      302 FORMAT(1H1)
166      303 FORMAT(1H ,6X,'NEUTRON LIFETIME AT CRITICAL = ',F8.3,' -6 SEC',/)
167      304 FORMAT(1H ,6X,'CHANGE OF LIFETIME DUE TO CHANGE IN BZ = ',F8.5,' -4
167      *SEC*M**2',/)
168      305 FORMAT(1H ,6X,'EFF DELAYED NEUTRON FRACTION = ',F8.5,/)
169      9 STOP
170      END

```



```

1      SUBROUTINE ALPHA(ISTART,IEND,ALF,EALF)
      C
      C *** MEAN OF ALPHA ***
      C
2      DIMENSION TITLE(9),A(21),EA(21)
3      CALL SETSEP(1H,)
4      DO 10 I=1,21
5      READ(4,101) (TITLE(II),II=1,9)
6      READ(4,102) A(I),EA(I)
7      10 CONTINUE
8      TY=0.0
9      TW=0.0
10     UA=A(ISTART)+EA(ISTART)
11     DA=A(ISTART)-EA(ISTART)
12     DO 20 I=ISTART,IEND
13     W=(1.0/EA(I))**2
14     Y=A(I)*W
15     TY=TY+Y
16     TW=TW+W
17     UAA=A(I)+EA(I)
18     DAA=A(I)-EA(I)
19     IF(UAA.GT.UA) UA=UAA
20     IF(DAA.LT.DA) DA=DAA
21     20 CONTINUE
22     ALF=TY/TW
23     UA=UA-ALF
24     DA=ALF-DA
25     EALF=UA
26     IF(DA.GT.UA) EALF=DA
27     101 FORMAT(9A8)
28     102 FORMAT(2E12.5)
29     RETURN
30     END

```

```

1:  SUBROUTINE BUCK(N,X,EX,Z,EZ)
      C
      C  *** CALCULATION OF BUCKLING ***
      C
2     DIMENSION H(15),Z(15),EZ(15),X(31),EX(31)
3     CALL SETSEP(1H,)
4     HC=EX(1)
5     RAM=EX(2)
6     ERAM=EX(3)
7     DO 10 I=1,N
8     H(I)=X(I)
9     B=3.1415926/(H(I)+RAM)
10    Z(I)=B**2*10000.
11    EZ(I)=2.*Z(I)*ERAM/(H(I)+RAM)
12    C=3.1415926/(HC+RAM)
13    BC=C**2*10000.
14    EBC=2.0*BC*ERAM/(HC+RAM)
15    X(I)=Z(I)-BC
16    EX(I)=SQRT(EZ(I)*EZ(I)+EBC*EBC)
17    10 CONTINUE
18    X(31)=BC
19    EX(31)=EBC
20    RETURN
21    END

```

```

1      SUBROUTINE ALFFIT(N,X,EX,Y,EY)
C
C      *** FIT OF FUNCTION ' Y = A + B * X + C * X ** 2 ' ***
C
2      DIMENSION A(3,3),P(3),R(15),X(31),EX(31),Y(31),EY(31),Z(15),EZ(15)
3      AO=0.0
4      BO=0.0
5      CO=0.0
6      L=0
7      3333 DO 12 I=1,3
8          P(I)=0.
9          DO 12 J=I,3
10         A(I,J)=0.
11     12 CONTINUE
12     DO 13 I=1,N
13         XX=X(I)
14         EXX=EX(I)
15         YY=Y(I)
16         EYY=EY(I)
17         IF(XX.LT.0.1.OR.EXX.LT.0.1.OR.YY.LT.0.1.OR.EYY.LT.0.1) GO TO 17
18         W=1./((EX(I)*EX(I)*(BO+2.*CO*X(I))*(BO+2.*CO*X(I))+EY(I)*EY(I))
19         U=Y(I)-AO-BO*X(I)-CO*X(I)*X(I)
20         A(1,1)=A(1,1)+W
21         A(1,2)=A(1,2)+W*X(I)
22         A(1,3)=A(1,3)+W*X(I)*X(I)
23         A(2,2)=A(2,2)+W*X(I)*X(I)
24         A(2,3)=A(2,3)+W*X(I)*X(I)*X(I)
25         A(3,3)=A(3,3)+W*X(I)*X(I)*X(I)*X(I)
26         P(1)=P(1)-U*W
27         P(2)=P(2)-X(I)*W*U
28         P(3)=P(3)-X(I)*X(I)*W*U
29         GO TO 13
30     17 L=L+1
31     13 CONTINUE
32         A(3,1)=A(1,3)
33         A(3,2)=A(2,3)
34         A(2,1)=A(1,2)
35         CALL MATINV(A,3,P,1,DD,3)
36         AO=AO-P(1)
37         BO=BO-P(2)
38         CO=CO-P(3)
39         IF(ABS(P(1)/AO) .GT. 0.0001) GO TO 3333
40         IF(ABS(P(2)/BO) .GT. 0.0001) GO TO 3333
41         IF(ABS(P(3)/CO) .GT. 0.0001) GO TO 3333
42         ROH=0.
43         DO 14 I=1,N
44             XX=X(I)
45             EXX=EX(I)
46             YY=Y(I)
47             EYY=EY(I)
48             IF(XX.LT.0.1.OR.EXX.LT.0.1.OR.YY.LT.0.1.OR.EYY.LT.0.1) GO TO 14
49             W=1./((EX(I)*EX(I)*(BO+2.*CO*X(I))*(BO+2.*CO*X(I))+EY(I)*EY(I))
50             ROH=ROH+(Y(I)-AO-BO*X(I)-CO*X(I)*X(I))*(Y(I)-AO-BO*X(I)-CO*X(I)*X(
50             *I))*W

```

```

51      14 CONTINUE
52      NL=N-L-3
53      EAO=0.6745*SQRT(ROH*A(1,1)/FLOAT(NL))
54      EBO=0.6745*SQRT(ROH*A(2,2)/FLOAT(NL))
55      ECO=0.6745*SQRT(ROH*A(3,3)/FLOAT(NL))
56      X(28)=AO
57      X(29)=BO
58      X(30)=CO
59      EX(28)=EAO
60      EX(29)=EBO
61      EX(30)=ECO
62      Y(30)=ROH
63      K=22
64      DO 11 I=1,3
65      DO 11 J=1,3
66      EY(K)=A(I,J)
67      K=K+1
68      11 CONTINUE
69      RETURN
70      END

```

0.87(S)PU- 1 100% VOID 22.5CM PITCH

CRITICAL LEVEL = 111.86 CM

EXTRAPOLATION DISTANCE = 14.40+ 1.40 CM

AXIAL BUCKLING AT CRITICAL = 6.19 + 0.14 M-2

NEUTRON LIFETIME AT CRITICAL = 344.192 -6 SEC

CHANGE OF LIFETIME DUE TO CHANGE IN BZ = 3.28740 -4SEC*M**2

EFF DELAYED NEUTRON FRACTION = 0.00728

H(I)	BZ(I)	DBZ(I)	ALF(I,1)	ALF(I,2)	ALF(I,3)	ALF(I,4)				
83.00	10.40+ 0.30	4.21+ 0.33	340.1+	8.9	338.6+	15.3	338.2+	19.6	354.4+	6.8
86.01	9.79+ 0.27	3.60+ 0.31	299.4+	6.7	292.7+	4.8	295.7+	5.9	312.7+	10.3
88.99	9.23+ 0.25	3.04+ 0.29	258.8+	9.5	254.7+	6.8	255.8+	12.4	264.7+	14.0
91.97	8.72+ 0.23	2.53+ 0.27	223.3+	9.9	220.2+	13.2	221.7+	7.5	226.1+	7.5
95.01	8.24+ 0.21	2.05+ 0.25	184.3+	10.8	188.5+	12.6	186.1+	7.7	190.7+	14.3
98.00	7.81+ 0.19	1.62+ 0.24	154.5+	7.9	155.2+	12.3	152.7+	7.1	157.5+	15.9
101.63	7.33+ 0.18	1.14+ 0.22	115.6+	4.5	117.0+	7.1	118.3+	4.8	116.7+	3.6
104.00	7.04+ 0.17	0.85+ 0.22	93.0+	8.7	93.1+	11.3	93.7+	3.6	94.3+	14.2
107.00	6.70+ 0.15	0.51+ 0.21	67.5+	6.0	66.8+	3.7	66.2+	5.3	66.3+	5.0
108.99	6.48+ 0.15	0.29+ 0.20	49.7+	1.1	49.8+	0.9	49.5+	0.7	49.4+	0.9
110.02	6.38+ 0.14	0.18+ 0.20	40.8+	2.9	40.4+	2.8	40.6+	1.4	40.9+	1.7

START AND END CHANNEL

A-1	1 21	B-1	1 21	C-1	1 21	D-1	11 21
A-2	1 21	B-2	1 21	C-2	1 21	D-2	8 21
A-3	1 21	B-3	1 18	C-3	1 18	D-3	8 21
A-4	1 21	B-4	1 21	C-4	1 21	D-4	5 21
A-5	1 21	B-5	1 21	C-5	1 21	D-5	1 21
A-6	1 21	B-6	1 21	C-6	1 21	D-6	1 21
A-7	1 21	B-7	1 21	C-7	1 21	D-7	1 21
A-8	1 21	B-8	1 21	C-8	1 16	D-8	1 21
A-9	1 21	B-9	1 21	C-9	1 21	D-9	1 21
A-10	1 21	B-10	1 21	C-10	1 21	D-10	1 21
A-11	1 21	B-11	1 21	C-11	1 21	D-11	1 21

ELEMENTS OF VARIANCE-COVARIANCE MATRIX

0.16186E 03 -0.18231E 03 0.37976E 02
-0.18231E 03 0.30543E 03 -0.71896E 02
0.37976E 02 -0.71896E 02 0.18230E 02

*** COUNTER NO. 2 ***

ALPHA = (25.76 + 0.74) + (82.26 + 1.04)*(DBZ**2) + (-2.08 + 0.26)*(DBZ**4)

SQUARE OF RESIDUAL = 0.57504E-01

ELEMENTS OF VARIANCE-COVARIANCE MATRIX

0.16577E 03 -0.19052E 03 0.40261E 02
-0.19052E 03 0.32970E 03 -0.78667E 02
0.40261E 02 -0.78667E 02 0.20118E 02

*** COUNTER NO. 3 ***

ALPHA = (25.66 + 0.41) + (81.99 + 0.57)*(DBZ**2) + (-1.91 + 0.14)*(DBZ**4)

SQUARE OF RESIDUAL = 0.18000E-01

ELEMENTS OF VARIANCE-COVARIANCE MATRIX

0.16276E 03 -0.18634E 03 0.39815E 02
-0.18634E 03 0.31316E 03 -0.75668E 02
0.39815E 02 -0.75668E 02 0.19765E 02

*** COUNTER NO. 4 ***

ALPHA = (25.66 + 0.60) + (81.44 + 0.86)*(DBZ**2) + (-0.73 + 0.21)*(DBZ**4)

SQUARE OF RESIDUAL = 0.37975E-01

ELEMENTS OF VARIANCE-COVARIANCE MATRIX

0.16771E 03 -0.19472E 03 0.40894E 02
-0.19472E 03 0.34486E 03 -0.81861E 02
0.40894E 02 -0.81861E 02 0.20930E 02

BZ(I)	ALPHA(I)	ROHC(I)	ROH(I)	G.T-FACTOR	GENERATION TIME
10.40+ 0.30	347.35+ 13.61	12.79+ 0.61	12.15	1.049	0.28891E-03
9.79+ 0.27	296.74+ 7.21	10.69+ 0.39	10.23	1.041	0.28661E-03
9.23+ 0.25	257.04+ 11.03	9.07+ 0.46	8.73	1.035	0.28504E-03
8.72+ 0.23	223.37+ 9.81	7.71+ 0.40	7.45	1.031	0.28382E-03
8.24+ 0.21	186.70+ 11.60	6.24+ 0.42	6.07	1.025	0.28226E-03
7.81+ 0.19	154.09+ 11.37	4.95+ 0.39	4.83	1.020	0.28089E-03
7.33+ 0.18	116.80+ 5.18	3.48+ 0.18	3.42	1.014	0.27930E-03
7.04+ 0.17	93.58+ 10.18	2.58+ 0.29	2.54	1.010	0.27829E-03
6.70+ 0.15	66.67+ 5.05	1.54+ 0.12	1.52	1.006	0.27714E-03
6.48+ 0.15	49.58+ 0.94	0.88+ 0.03	0.88	1.004	0.27640E-03
6.38+ 0.14	40.68+ 2.29	0.54+ 0.03	0.54	1.002	0.27600E-03

*** RESULT BY USING AVERAGE ALPHA-VALUES ***

$$\text{ALPHA} = (26.42 + 0.72) + (80.09 + 1.03) * (\text{DBZ}^{**2}) + (-1.13 + 0.26) * (\text{DBZ}^{**4})$$

SQUARE OF RESIDUAL = 0.57054E-01

ELEMENTS OF VARIANCE-COVARIANCE MATRIX

0.16090E 03	-0.18629E 03	0.39488E 02
-0.18629E 03	0.32395E 03	-0.77607E 02
0.39488E 02	-0.77607E 02	0.20043E 02

*** RESULT BY FITTING ALL ALPHA-VALUES ***

$$\text{ALPHA} = (22.28 + 12.88) + (90.56 + 16.26) * (\text{DBZ}^{**2}) + (-5.41 + 3.76) * (\text{DBZ}^{**4})$$

SQUARE OF RESIDUAL = 0.18171E 03

ELEMENTS OF VARIANCE-COVARIANCE MATRIX

0.82302E 02	-0.85348E 02	0.16943E 02
-0.85348E 02	0.13119E 03	-0.29425E 02
0.16943E 02	-0.29425E 02	0.69948E 01

付 録 2

α と B_2^3 との関係を表わす α_c, β, r の値を用いて(4-1)式から0%ボイド炉心の臨界軸方向バックリングにおける α の値を見積り、(5-9)式から生成時間の変化を補正したボイド反応度を求めるコードである。更に、付録1と同様に任意の B_2^3 における未臨界度を求めることもできる。


```

YJOB          ID=REACTVY
YEXC          FTC
C             CALCULATION OF REACTIVITY ON MODERATOR LEVEL H(I) BY PULSED NEUTRON METHOD
C             HC IS CRITICAL LEVEL OF VOIDED CORE
C             RAM1,RAM2 ARE EXTRAPOLATION LENGTH AT CORE HEIGHT HC,H(I),RESPECTIVELY
C             PLTC IS PROMPT LIFE TIME IN CRITICAL VOIDED CORE (USEC)UNIT
C             PLTBZ IS CHANGE OF LIFE TIME DUE TO CHANGE IN BZ**2 (USEC/M**-2)UNIT
1:           DIMENSION H(12),B(12),EB(12),X(12),EX(12),ALF(12),EALF(12)
2           DIMENSION R(12),ER(12),GT(12),EGT(12),RR(12),TITLE(9),GTF(12)
3           CALL SETSEP(1H,)
4           BLANK=8H
5           READ(5,103) RAM2,ERAM2
6           1111 READ(5,105) (TITLE(I),I=1,9)
7           READ(5,101) N
8           READ(5,102) (H(I),I=1,N)
9           READ(5,103) HC, RAM1,ERAM1
10          READ(5,104) PLTC,PLTBZ,BEFF
11          BC=3.1415926/(HC+RAM1)
12          BC=BC**2*10000.
13          EBC=2.*BC*ERAM1/(HC+RAM1)
14          WRITE(6,208) (TITLE(I),I=1,9)
15          WRITE(6,205) HC,BC,EBC
16          WRITE(6,203) RAM1,ERAM1
17          WRITE(6,207) PLTC,PLTBZ,BEFF
18          2222 READ(5,103) ALFC,EALFC,BETA,EBETA,GAMMA,EGAMMA
19          IF(ALFC.EQ.0.) GO TO 1111
20          101 FORMAT(I3)
21          102 FORMAT(11F7.2)
22          103 FORMAT(6F8.3)
23          104 FORMAT(2F8.3,F8.5,)
24          105 FORMAT(9A8)
25          DO 1 I=1,N
26          B(I)=3.1415926/(H(I)+RAM2)
27          B(I)=B(I)**2*10000.
28          EB(I)=2.*B(I)*ERAM2/(H(I)+RAM2)
29          1 CONTINUE
30          DO 2 I=1,N
31          X(I)=B(I)-BC
32          EX(I)=SQRT(EB(I)**2+EBC**2)
33          2 CONTINUE
34          DO 3 I=1,N
35          ALF(I)=ALFC+BETA*X(I)+GAMMA*X(I)**2
36          A=EALFC**2
37          BB=(X(I)*EBETA)**2
38          C=(X(I)**2*EGAMMA)**2
39          DD=((BETA+2.*GAMMA*X(I))*EH(I))**2
40          IF(N.NE.1) DD=0.
41          EALF(I)=SQRT(A+BB+C+DD)
42          3 CONTINUE
43          DO 4 I=1,N
44          YX=ALF(I)/ALFC
45          RR(I)=1.0-YX

```

```

45      DOL=RR(I)
47      PLT=PLTC-PLTBZ*X(I)
48      GT(I)=PLT/PLTC
49      5 R(I)=1.0-YX*GT(I)*(1.0-BEFF*DOL)
50      P=ABS(R(I)-DOL)/R(I)
51      IF(P.LT.0.0001) GO TO 6
52      DOL=R(I)
53      GO TO 5
54      6 GTF(I)=GT(I)*(1.0-BEFF*DOL)
55      GT(I)=GTF(I)/ALFC*BEFF
56      ER(I)=ABS(R(I))*SQRT((EALF(I)/ALF(I))**2+(EALFC/ALFC)**2)
57      E=BEFF*ER(I)
58      F=(1.0-BEFF*R(I))*EALFC/ALFC
59      D=PLT/PLTC*BEFF/ALFC
60      EGT(I)=D*SQRT(E*E+F*F)
61      4 CONTINUE
62      WRITE(6,206) ALFC,EALFC,BETA,EBETA,GAMMA,EGAMMA
63      WRITE(6,201)
64      WRITE(6,202) (H(I),B(I),EB(I),ALF(I),EALF(I),R(I),ER(I),RR(I),GT(I)
64      *),EGT(I),GTF(I),I=1,N)
65      GO TO 2222
66      201 FORMAT(10X,'H',8X,'BZ',12X,'ALPHA',9X,'ROHC',8X,'ROH',10X,'G. TIME
66      *',8X,'G. FACTOR',/)
67      202 FORMAT(6X,F6.2,F7.3,'+-',F5.3,F8.2,'+-',F5.2,F7.2,'+-',F5.2,F8.2,E
67      * 12.4,'+-',E9.3,F8.3,/)
68      203 FORMAT(10X,'AXIAL EXTRAPOLATION LENGTH=',F5.1,'+-',F4.1,/)
69      205 FORMAT(10X,'CRITICAL LEVEL=',F7.2,2X,/,10X,'CRITICAL AXIAL BUCKLIN
69      *NG=',F7.3,'+-',F7.3,/)
70      206 FORMAT(/,6X,'ALPHAC=',F6.2,'+-',F5.2,3X,'BETA=',F6.2,'+-',F5.2,3X,
70      *'GAMMA=',F6.2,'+-',F5.2,/)
71      207 FORMAT(10X,'PLTC=',F8.3,3X,'PLTBZ=',F6.3,3X,'BEFF=',F8.5,/)
72      208 FORMAT(1H1,'****',9A8,/)
73      999 STOP
74      END

```

****0.87(S)PU - 9 CORE 100 % VOID REACTIVITY CAL

CRITICAL LEVEL= 103.57

CRITICAL AXIAL BUCKLING= 7.092+- 0.168

AXIAL EXTRAPOLATION LENGTH= 14.4+- 1.4

PLTC= 320.563 PLTBZ= 3.098 BEFF= 0.00649

ALPHAC= 24.04+- 0.54 BETA= 87.21+- 1.14 GAMMA= -2.18+- 0.25

H	BZ	ALPHA	ROHC	ROH	G. TIME	G. FACTOR
---	----	-------	------	-----	---------	-----------

83.45	10.588+-0.197	302.26+-15.08	-12.06+- 0.66	-11.57	0.2806E-03+-0.642E-05	1.039
-------	---------------	---------------	---------------	--------	-----------------------	-------

****0.87(S)PU - 1 CORE 100 % VOID REACTIVITY CAL

CRITICAL LEVEL= 111.86

CRITICAL AXIAL BUCKLING= 6.191+- 0.137

AXIAL EXTRAPOLATION LENGTH= 14.4+- 1.4

PLTC= 344.192 PLTBZ= 3.287 BEFF= 0.00728

ALPHAC= 25.78+- 0.09 BETA= 81.69+- 0.27 GAMMA= -1.55+- 0.30

H	BZ	ALPHA	ROHC	ROH	G. TIME	G. FACTOR
83.00	10.404+-0.299	342.39+- 5.44	-12.89+- 0.21	-12.28	0.2951E-03+-0.111E-05	1.046
86.01	9.789+-0.273	299.64+- 4.00	-11.09+- 0.15	-10.62	0.2936E-03+-0.107E-05	1.040
88.99	9.233+-0.250	259.93+- 2.90	-9.44+- 0.11	-9.08	0.2921E-03+-0.105E-05	1.035
91.97	8.723+-0.230	222.67+- 2.04	-7.90+- 0.08	-7.64	0.2907E-03+-0.103E-05	1.030
95.01	8.245+-0.211	187.02+- 1.38	-6.44+- 0.05	-6.25	0.2893E-03+-0.102E-05	1.025
98.00	7.812+-0.195	154.13+- 0.91	-5.10+- 0.03	-4.98	0.2879E-03+-0.101E-05	1.020
101.63	7.331+-0.177	116.88+- 0.50	-3.60+- 0.02	-3.53	0.2863E-03+-0.100E-05	1.015
104.00	7.040+-0.166	94.04+- 0.33	-2.69+- 0.01	-2.65	0.2853E-03+-0.997E-06	1.011
107.00	6.697+-0.154	66.69+- 0.18	-1.60+- 0.01	-1.59	0.2841E-03+-0.992E-06	1.007
108.99	6.482+-0.147	49.45+- 0.12	-0.93+- 0.00	-0.92	0.2833E-03+-0.989E-06	1.004
110.02	6.376+-0.143	40.80+- 0.10	-0.59+- 0.00	-0.58	0.2829E-03+-0.988E-06	1.002