

クラスタ型燃料体の局所出力 に関する偏差解析

1980年6月

動力炉・核燃料開発事業団

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)

クラスタ型燃料体の局所出力に関する偏差解析

* 小 綿 泰 樹

* 柴 公 倫

要 旨

「ふげん」に使用されている28本クラスタ燃料集合体の製造・組立誤差に起因する局所出力の偏差を METHUSELAH-II コードを用いて求めた。

局所出力の偏差の算出において考慮した主な因子は、ペレット直径、ペレット密度、富加度（濃縮度）、同位体比、燃料リング中心径、圧力管内径などである。出力偏差を求めるに当って、各々の因子が各々の平均値の近傍でその標準偏差の程度変動したときの局所出力の感度係数（偏微分係数）を METHUSELAH-II コードによって計算した。局所出力の偏差は、(1)燃料ピンに関する因子は、各リングの全燃料ピンで一様な偏差をもつ。(2)各因子の平均値からの偏差には互いに相関がない。(3)各因子の平均値からの偏差の分布関数は正規分布とする。(4)局所出力の平均値からの偏差の2乗が出力の感度係数を重みとする各因子の2乗の1次結合で表わされる。の4つの仮定のもとに導出された。

熱流束の最も大きくなる第3リング燃料ピンの局所出力偏差は、第3リング平均出力に対してプルトニウム・ウラン混合燃料で最大1.25%、ウラン燃料で最大0.75%である。冷却材ボイド率の40～75%の範囲では、局所出力偏差のボイド率依存性は小さく、5%以下である。局所出力偏差の大きさは主として、ペレットに関する因子によるものの寄与であり、とりわけ富加度や核分裂性核種の同位体比など組成のばらつきによる寄与が80%以上である。

A TR 実証炉用の36本クラスタ燃料集合体については、出力の感度係数を28本クラスタと同一の手法で求め、燃料ペレットが同一精度で製造される場合（絶対誤差が同一）の局所出力偏差を予測した。その結果、36本クラスタ燃料では、ペレットに関する因子が28本クラスタより感度係数が最大50%小さくなるので36本クラスタ燃料の局所出力偏差は28本クラスタ燃料より小さくなる。

Analysis of Local Power Deviation in Cluster Type Fuel

Yasuki Kowata*

Kiminori Shiba*

Abstract

Stochastic local power deviations of a 28-pin fuel cluster used in the prototype Fugen-HWR have been evaluated from manufacturing tolerances of dimensional and component factors including pellet diameter, pellet density, fuel enrichment, fuel-ring diameter, etc. The manufacturing tolerance is defined in this analysis as a standard deviation from the average value.

Sensitivity coefficient of local power on a particular factor was introduced in the evaluation by using partial differential coefficient which is calculated with respect to the factor by the code METHUSELAH-II. Furthermore, the following are assumed: (1) deviation of the factor from the average obeys Gaussian distribution, (2) tolerances of factors concerning a fuel pin is independent of location of a fuel-ring, (3) there exists no correlation between any two factors and (4) square of local power deviation is obtained by square summation of product of the tolerance and the corresponding sensitivity coefficient. The sensitivity coefficients were also calculated on 36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ cluster expected to be used as the fuel of the Fugen-type demonstration reactor. Local power deviations of 36-pin cluster were predicted by taking into account the degree of the sensitivity coefficients of local power of 28-pin clusters.

The following are clarified from this analysis.

- (1) Maximum deviation of 3rd-ring pin's power from 3rd-ring average power is 1.25 % for $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ cluster, and 0.75 % for UO_2 cluster.
- (2) Dependence of the local power deviation on coolant void fraction is smaller than 5 % within 40 ~ 75 % of void fraction.
- (3) Main components of the local power deviation arise from the manufacturing tolerances concerning fuel pellet. Among others, most important

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

contribution of the local power deviation is closely connected with the variation of fissile material composition.

- (4) The sensitivity coefficients of the local power of 36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ cluster on the factors with respect to fissile material composition are much smaller by 20 ~ 50 % than that of 28-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ cluster on the same factors. Therefore, if the both fuel pellets were manufactured with the same accuracy, the local power deviation of 36-pin fuel cluster become smaller than that of 28-pin fuel cluster.

目 次

1. 緒 言	1
2. 解析対象	2
3. 計算方法	6
3.1 格子計算	6
3.2 熱水力定数の計算	6
3.3 局所出力分布に変動をもたらす因子	8
3.4 局所出力偏差の導出方法	12
4. 結 果	14
4.1 局所出力分布	14
4.2 局所出力の感度係数	14
4.3 局所出力の偏差	27
5. 考 察	36
5.1 局所出力の感度係数の決定方法が出力偏差へ及ぼす影響	36
5.2 局所出力偏差に関する2次項の影響	36
6. 結 論	43
参考文献	44
謝 辞	44
付録1 28本 PuO_2 - UO_2 クラスタ格子に関する入力データ	45
付録2 36本 PuO_2 - UO_2 クラスタ格子に関する入力データ	49
付録3 局所出力の偏差の計算コードとその計算結果例	54

1. 緒 言

原子炉運転条件の統計的変動，運転状態の計測の不確定性および原子炉各部の製造・組立公差などに起因する熱出力の不確定性を統計的に処理して原子炉の熱的制限条件を定める方式が熱設計に導入されている。このような統計的手法を用いた原子炉の熱設計では，炉心全熱出力の変動，冷却材の圧力，チャンネル流量，燃料集合体各部の製造・組立誤差等に起因して燃料集合体内出力分布（局所出力分布）が確率的に変動した場合にも，燃料ピン表面の熱流束が限界熱流束に達しない集合体が確率的にある値以上に確保されることで熱的余裕を評価している。

ここでは，燃料ピンの健全性保持に影響するこれらの要素のうち，燃料集合体各部の製造・組立誤差に起因する局所出力分布の定格値からの偏差を解析した。まず，局所出力偏差を解析するにあたって，局所出力分布に変動を及ぼすと予想される種々の因子を燃料集合体の各部の仕様から選び出し，これらの因子が定められた基準値から変化した場合に生ずる局所出力の変動量を求めた。この結果から，局所出力の種々の因子に対する感度係数を燃料クラスタの各リングごとに，主に冷却材平均ボイド率をパラメータとして求めた。解析の対象とする燃料集合体は原型炉に使用されている28本クラスタ，ならびに実証炉に使用予定の36本クラスタである。なお，局所出力偏差は，出力の感度係数の計算結果をもとに，燃料集合体各部の検査・分析データを統計処理して得られる標準偏差 σ を用いて28本クラスタについて求められた。また実証炉用36本クラスタについては，局所出力の感度係数のみを求め，28本クラスタでの出力の感度係数との比較から，それぞれ同一精度で製作された場合の出力偏差を推定してみた。

2. 解析対象

燃料集合体各部の製造・組立精度に起因して局所出力分布に変動を及ぼす因子に対する出力の感度係数は、第1表に示すような2種の原型炉用28本クラスタ燃料および実証炉用36本クラスタ燃料について求められた。これらの燃料クラスタの断面の形状を第1～第2図に示す。28本クラスタ燃料については、燃料集合体各部のばらつきを統計処理して得られる標準偏差を用いて出力偏差が求められた。

Table 1 Distribution of fuel enrichment in a cluster

Reactor type	Fuel	Fuel ring	No. of fuel pins	Enrichment (wt%)	
				Pu (fissile)*	²³⁵ U**
Prototype (Fugen)	28-pin PuO ₂ -UO ₂	Inner	4	0.800	0.716
		Middle	8	0.800	0.716
		Outer	16	0.544	0.716
	28-pin UO ₂	Inner	4	0	1.504
		Middle	8	0	1.504
		Outer	16	0	1.504
Demonstration	36-pin PuO ₂ -UO ₂	Inner	6	2.04	0.716
		Middle	12	2.04	0.716
		Outer	18	1.14	0.716

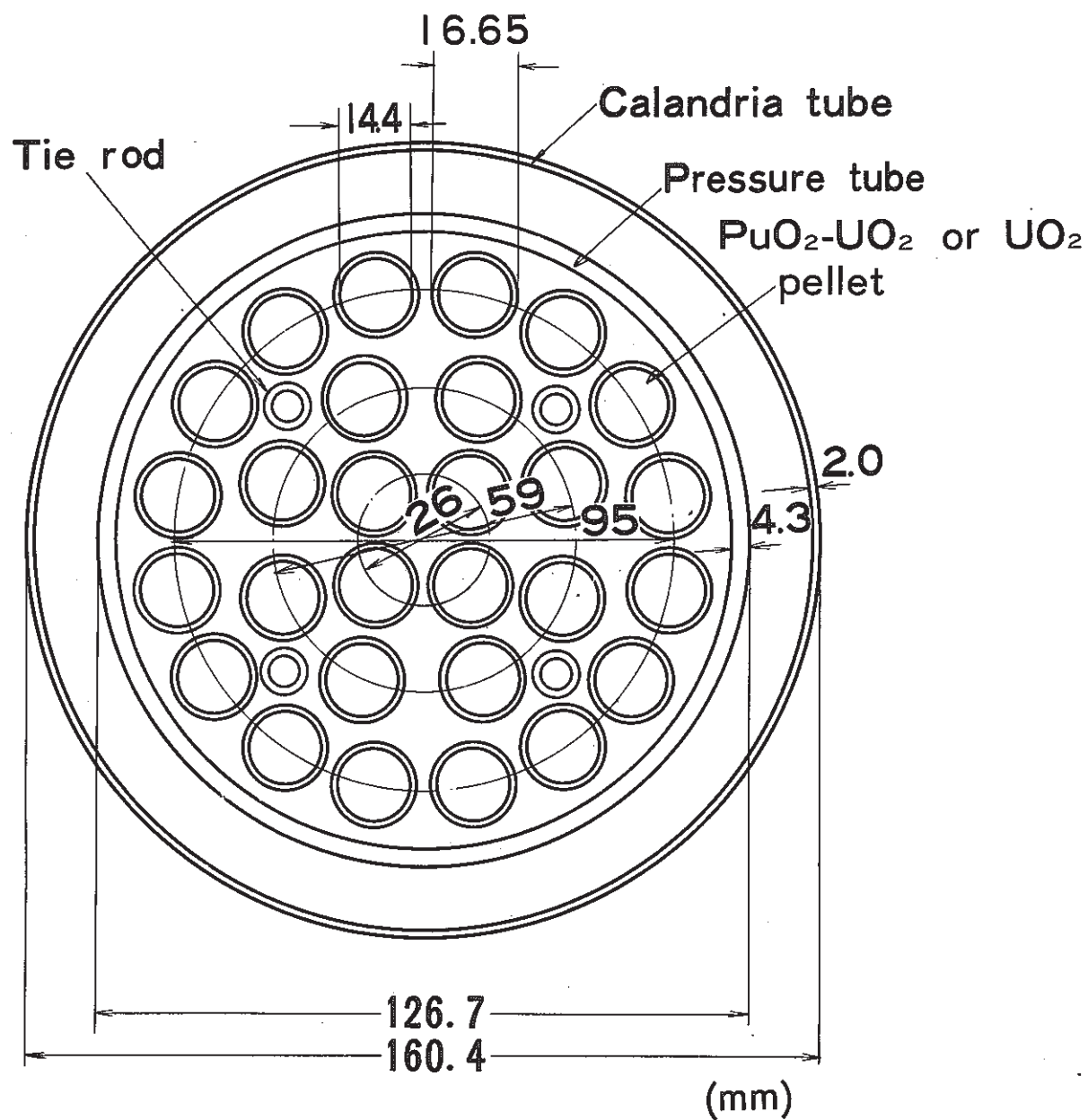
* Pu (fissile)/Pu

** ²³⁵U/U

圧力管およびカランドリア管の寸法ならびに材質はこれらすべての燃料クラスタで同一のものが使用されている。解析に使用した燃料ピン、圧力管およびカランドリア管の諸元は第2表に示してある。これらの燃料クラスタを用いて構成される格子のピッチはすべて24 cmであり、減速材中の¹⁰B濃度は6 ppmとした。圧力管内の冷却材平均ボイド率はパラメータとして40%、60%および75%の3種を選択して計算を行った。

Table 2 Specification of fuel assemblies

Pellet	Diameter (mm)	
	28-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	
	Inner & Middle ring	14.406
	Outer ring	14.409
	28-pin UO_2	14.400
	36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	12.38
	Smeared density (g/cm^3)	
	28-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	9.916
	28-pin UO_2	9.879
	36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	9.916
Sheath	Material	Zircaloy-2
	Outer diameter (mm)	
	28-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	16.434
	28-pin UO_2	16.429
	36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	14.321
	Thickness (mm)	
	28-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	0.869
	28-pin UO_2	0.868
Pressure tube	36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	0.95
	Material	Zr-2.5%Nb
	Inner diameter (mm)	118.13
	Thickness (mm)	4.305
Calandria tube	Material	Zircaloy-2
	Outer diameter (mm)	160.42
	Thickness (mm)	2.025



Lattice pitch 240mm

Fig. 1 Cross-section of 28-pin PuO₂-UO₂ or UO₂ fuel assembly of Fugen.

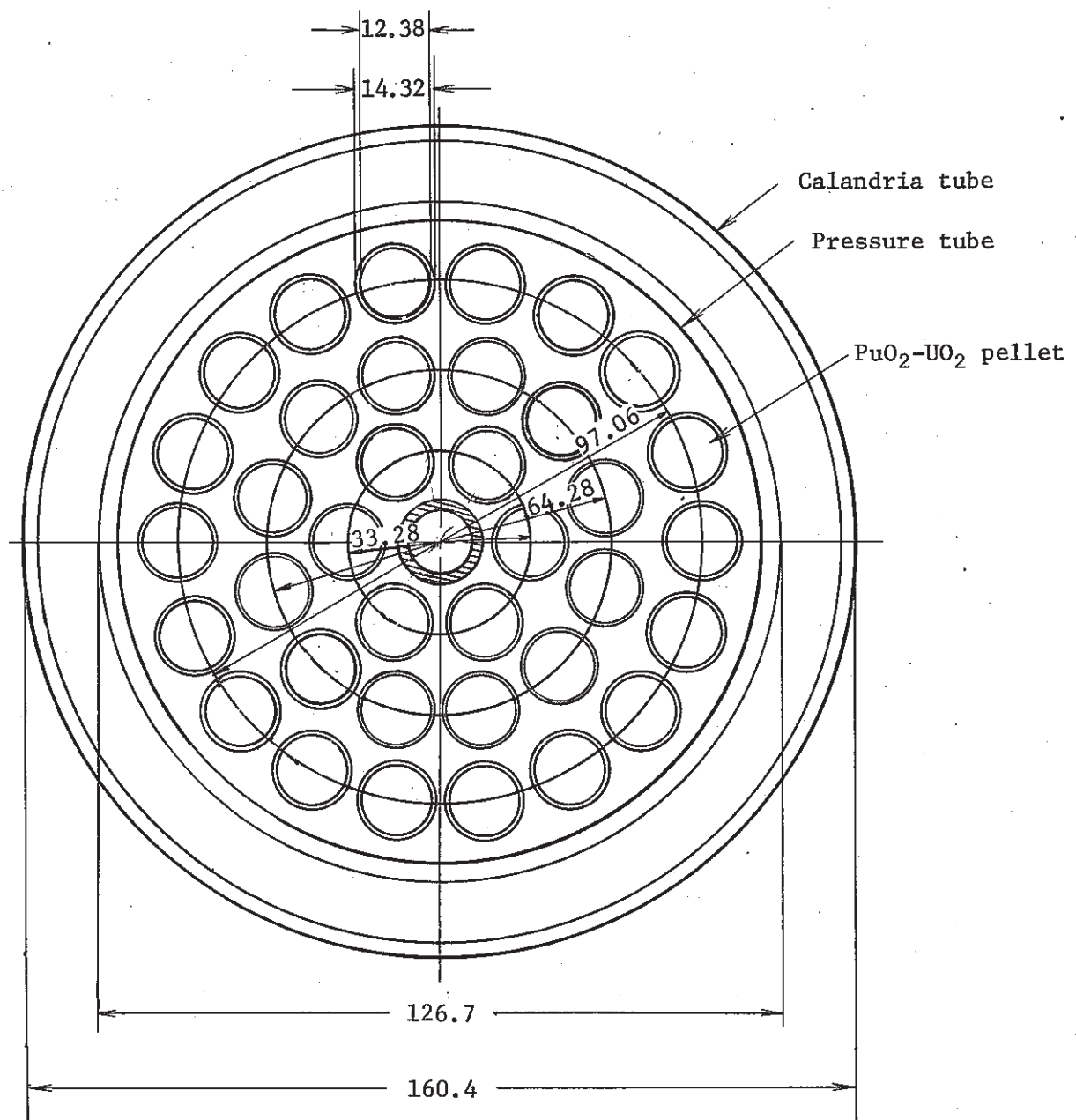


Fig. 2 Cross-section of 36-pin PuO₂-UO₂ fuel assembly of demonstration type reactor.

3. 計 算 方 法

3.1 格子計算

局所出力分布の計算は、圧力管型原子炉の格子計算コードMETHUSELAH-II⁽¹⁾コードを用いて行った。このコードのエネルギー区分は熱外中性子領域3群、熱中性子領域1群の計4群であり、単位格子内の空間メッシュ数を36～38分割とした。格子計数に入力したバックリングは、固有値 k が (1.00 ± 0.06) の範囲になる程度の適当な値を選んだ。

局所出力分布の計算において、スペーサーおよびスペーサタイロッドは燃料被覆管に混入させることにより考慮⁽²⁾したが、制御棒および検出器案内管の存在は無視した。

圧力管内部の動径方向冷却材ボイド率分布は、3.2節に述べるように圧力管内の冷却材サブチャンネル解析で求められた冷却材蒸気重量率分布を、METHUSELAH-IIコードで分割した各燃料層毎の冷却材体積内で平均化したボイド率分布に置き換えることによって考慮された。

METHUSELAH-IIコードへの入力データは付録1～2に示されている。

3.2 熱水力定数の計算

原子炉定格出力に対応する単位格子内各部の温度分布ならびに冷却材蒸気重量率分布等の熱水力定数は、HAPI⁽³⁾およびCOBRA⁽⁴⁾両コードを用いて求められた。

圧力管内各部のある炉心高さでの平均温度はHAPIコードにより求められる。HAPIコードの計算結果をみると、ペレット以外の冷却材に接する各部の温度の軸方向変化は小さいので、これらの温度は軸方向についての平均値を使用した。これに対して、ペレット温度は軸方向出力分布に対応している。しかしここでの局所出力分布の計算では、外層のペレット温度が最大になる炉心軸方向位置におけるペレット内温度分布の平均値を外層ペレット温度とした。内層の燃料リング内のペレット平均温度は、外層ペレット温度を基準として、冷態時で計算された局所出力分布に対応させて定めた。

冷却材は平均圧力70 at、平均温度285℃、平均ボイド率40%の沸騰軽水であるが、COBRAコードを用いた計算結果には、圧力管内サブチャンネルごとの冷却材の温度、圧力損失、蒸気重量率等が炉心高さ依存で与えられている。そこで、冷却材蒸気重量率が、パラメータとして選んだ冷却材ボイド率に対応する値に等しくなっている炉心高さ位置での各サブチャンネルの蒸気重量率を、第1～第3リングの各燃料層ごとに平均して、圧力管内冷却材の密度分布を定めた。この場合、冷却材は同一圧力(70 at)および同一温度(285℃)の湿り蒸気として、ある蒸気重量率をもつ湿り蒸気の飽和水とかわき飽和蒸気それぞれの比容積 v' 、 v'' からボイド率 α の冷却材密度 $\rho_c(\alpha)$ を

$$\rho_c(\alpha) = (1 - \alpha) v'^{-1} + \alpha \cdot v''^{-1} \quad (3.2.1)$$

なる式で求めた、圧力 70 at, 温度 285 °C の時の v' , v'' の値としてそれぞれ, $v' = 1.35 \text{ g/cm}^3$, $v'' = 27.98 \text{ g/cm}^3$ ⁽⁵⁾ を使用した。

以上のようにして求められた単位格子各部の温度、密度等を第 3 ～ 4 表に示した。

3.3 局所出力分布に変動をもたらす因子

局所出力あるいは局所出力分布に変動をもたらす要素としては、①燃料集合体の製造・組立精度、②冷却材熱水力特性の不確定性、③原子炉熱出力、④制御棒位置、⑤減速材中ポイズン濃度、⑥燃焼度、などが考えられる。ここでは、制御棒を挿入してなく、かつ未燃焼の燃料を装荷した格子を考えた場合、燃料集合体各部の製造・組立誤差に起因して局所出力分布に変動をもたらす因子として

- (1) ペレット直径
- (2) ペレット密度
- (3) プルトニウム富加度
- (4) プルトニウム同位体比
- (5) ウラン濃縮度
- (6) 被覆管外径
- (7) 燃料リング中心径
- (8) 燃料クラスタ外側軽水層内径
- (9) 圧力管内径
- (10) カランドリア管外径

のような 10 種類のものを選び出し、これらの因子のばらつきによる局所出力の偏差を求めた。このうち、プルトニウム同位体比については、 ^{239}Pu と ^{240}Pu の割合のみを考慮し、その他のプルトニウム同位体含有量は一定と考えた。以上のように出力に変動をもたらす因子の常温時における検査データにもとづく平均値ならびにそれらの製作誤差^{(2),(6)}を第 5 表に示す。

第 5 表に示した燃料集合体各部の製造・組立誤差は、それぞれの因子 x_{ij} の分布密度関数 $f(x_{ij})$ と x_{ij} の平均値 x_{ijo} を統計処理して得られる標準偏差 σ で示してある。 x_{ij} における i, j はそれぞれ因子の種類および燃料リングを示すサフィックスである。なお第 5 表に示す実証炉用 36 本クラスタ燃料についての各因子としては、公称値のみを載せてある。 x_{ij} のその平均値 x_{ijo} に対するばらつきの割合を $(3\sigma_{ij}/x_{ijo})$ で表わし、この値を「ふげん」に使用されている 28 本クラスタのウラン燃料およびプルトニウム・ウラン混合燃料について、第 3 図に示す。

Table 3 Temperature condition

(1) Pellet

Type of reactor	Pellet	Temperature (°C)		
		Inner layer	Middle layer	Outer layer
Prototype	PuO ₂ -UO ₂	825	930	1130
	UO ₂	690	790	1130
Demonstration	PuO ₂ -UO ₂	575	850	1130

(2) Except pellet

Substance	Temperature (°C)
Sheath	320
Coolant (H ₂ O)	285
Pressure tube	250
Calandria tube	50
Moderator (D ₂ O)	60

Table 4 Condition of coolant

Type of reactor	Fuel	Nominal void(%)	Void fraction (%)			Density (g/cm ³)		
			Inner	Middle	Outer	Inner	Middle	Outer
Prototype (Fugen)	28-pin PuO ₂ -UO ₂	40	40	43	40	0.46	0.44	0.46
		60	62	63	61	0.30	0.30	0.31
		75	76	76	75	0.21	0.21	0.21
	28-pin UO ₂	40	36	43	41	0.49	0.44	0.45
		60	60	62	61	0.32	0.30	0.31
		75	75	76	75	0.21	0.21	0.21
Demonstration	36-pin PuO ₂ -UO ₂	40	39	40	32	0.47	0.46	0.52
		60	63	61	58	0.30	0.31	0.33
		75	77	76	74	0.20	0.21	0.22

Table 5 Factors on manufacturing tolerance affecting local power distribution

(a) Fuel pin

Factor	Fuel	Inner (Middle) ring ($\pm 1\sigma$)	Outer ring ($\pm 1\sigma$)
Diameter (mm)	28-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	14.406 ± 0.006	14.409 ± 0.003
	28-pin UO_2	14.400 ± 0.007	14.400 ± 0.007
	36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	12.38	12.38
Density (smeared) (g/cm^3)	28-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	9.9164 ± 0.0419	
	28-pin UO_2	9.8790 ± 0.0329	
	36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	9.916	
Enrichment of fissile Pu (wt%)	28-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	0.800 ± 0.006	0.544 ± 0.006
	28-pin UO_2	—	—
	36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	2.04	1.14
Ingredient of ^{239}Pu isotope (wt%)	28-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	0.6745 ± 0.0051	0.4578 ± 0.0051
	28-pin UO_2	—	—
	36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	1.0471	0.5853
Enrichment of ^{235}U (wt%)	28-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	0.7159 ± 0.00505	
	28-pin UO_2	1.504 ± 0.0067	
	36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	0.7159	
Outer diameter of sheath (mm)	28-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	16.434 ± 0.01006	
	28-pin UO_2	16.429 ± 0.01343	
	36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	14.321	

(b) Spacer

Factor	Fuel cluster	Diameter (mm)		
		Inner	Middle	Outer
Fuel-ring diameter	28-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	26.42 ± 0.054	59.06 ± 0.116	95.04 ± 0.26
	28-pin UO_2	26.42 ± 0.054	59.06 ± 0.116	95.04 ± 0.26
	36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	33.72	64.52	97.07

(c) The others

Factor	Fuel	Diameter (mm)
Inner diameter of coolant layer	28-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	112.68 ± 0.394
	28-pin UO_2	112.68 ± 0.394
	36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	114.13
Inner diameter of pressure tube	Common	118.13 ± 0.021
Outer diameter of calandria tube	Common	160.42 ± 0.07

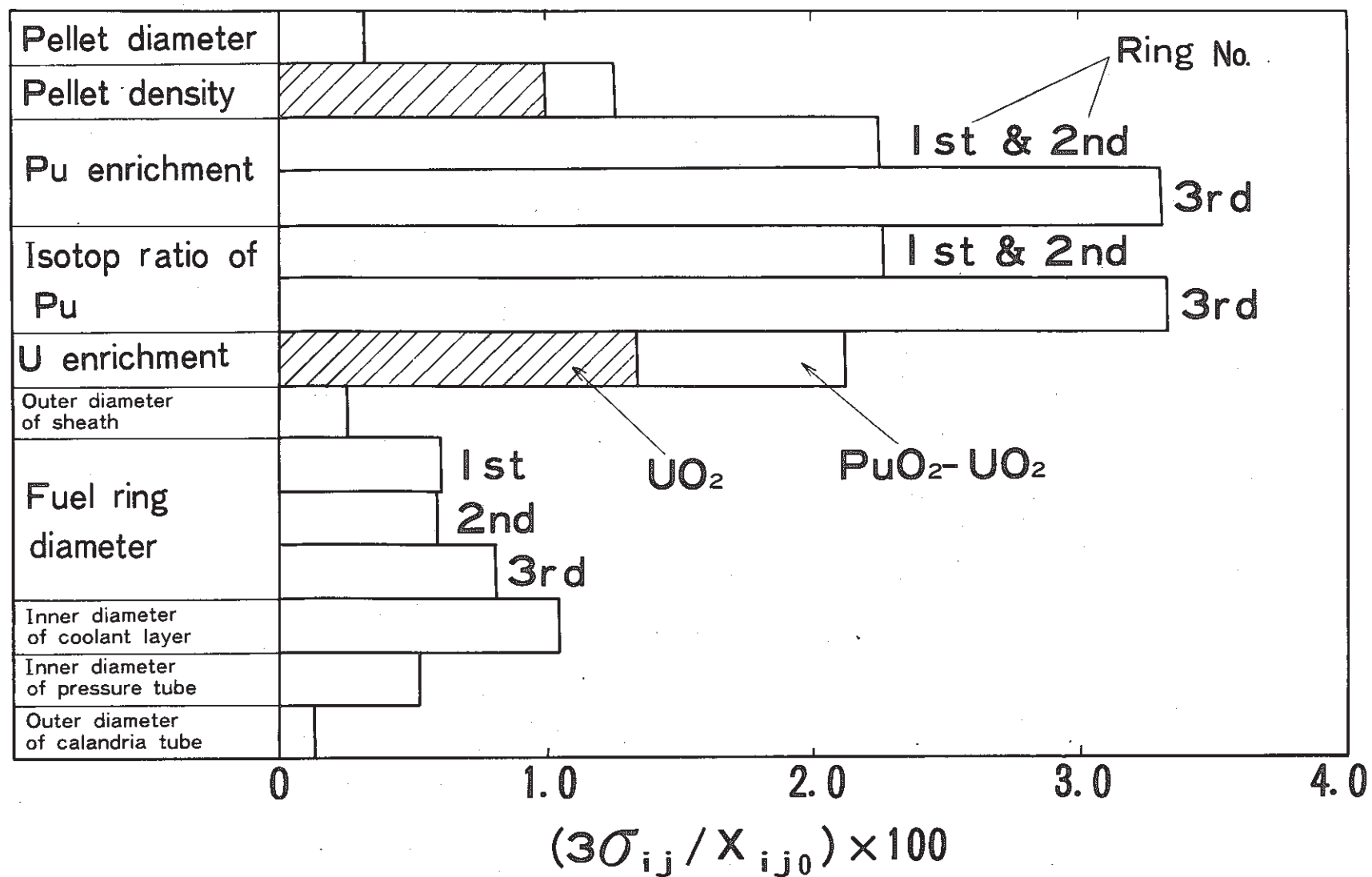


Fig. 3 Deviation of factors on manufacturing tolerance.

3.4 局所出力偏差の導出方法

燃料クラスタの全出力 P_c に対する第 j リングに含まれる燃料ピンの全出力 (局所出力) P_j は

$$P_j = \sum_{\ell=1}^m p_{j\ell} / P_c \quad (3.1)$$

となる。ここで、 $p_{j\ell}$ 、 m はそれぞれ

$p_{j\ell}$: 第 j リングの ℓ 番目の燃料ピン出力

m : 第 j リングに含まれる燃料ピン本数

を示す。 P_j は n ケからなる因子 x_{ij} ($i = 1 \sim n$) を変数とする関数

$$P_j = f_j(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}) : j = 1 \sim 3 \quad (3.2)$$

で表わされる。各リングの平均出力 (Nominal power) P_{jo} は、因子 x_{ij} がすべて平均値 x_{ijo} をとるときの値であって

$$P_{jo} = f_j(x_{1jo}, x_{2jo}, \dots, x_{njo}) : j = 1 \sim 3 \quad (3.3)$$

となる。これらの因子が平均値から変動することによる局所出力偏差を求めるには、局所出力 P_j の各因子に対する感度係数が必要となる。ここで、因子 x_{ij} が製造・組立上の誤差をもっているので、その平均値 x_{ijo} から微小量ずれている時の局所出力 P_j の平均値 P_{jo} のまわりでの変動量 ($P_j - P_{jo}$) は 2 次の微小量を無視すると

$$P_j - P_{jo} = \sum_{i=1}^n (\partial f_j / \partial x_{ij})_{x_{ij}=x_{ijo}} (x_{ij} - x_{ijo}) + O(x_{ij} - x_{ijo})^2 \quad (3.4)$$

となる。(3.4) 式の $(\partial f_j / \partial x_{ij})_{x_{ij}=x_{ijo}}$ を x_{ij} の変動に対する P_j の感度係数とする。ただし、(3.4) 式による計算では、 x_{ij} の平均値 x_{ijo} に微小な変動 Δx_{ij} を与えても燃料クラスタ全出力の変動量は

$$\sum_{j=1}^3 \Delta P_j = \sum_{j=1}^3 (\partial f_j / \partial x_{ij})_{x_{ij}=x_{ijo}} \Delta x_{ij} = 0 \quad (3.5)$$

のように保存するものと考えている。ここで、局所出力の規格化は燃料クラスタ全出力 P_c が

$$P_c = \sum_{j=1}^3 P_{jo} = 1.0 \quad (3.6)$$

になるようにしてある。このような取扱のもとで、因子 x_{ijo} の正負両側でのずれに対する P_j の変化を階差で近似し、因子 x_{ij} に対する局所出力の感度係数 $(\partial f_j / \partial x_{ij})_{x_{ij}=x_{ijo}}$ を

$$(\partial f_j / \partial x_{ij})_{x_{ij}=x_{ijo}} \approx \frac{1}{2 \Delta x_{ij}} \left\{ f_j(x_{ijo} + \Delta x_{ij}) - f_j(x_{ijo} - \Delta x_{ij}) \right\} \quad (3.7)$$

なる式で求めた。 $(\partial f_j / \partial x_{ij})_{x_{ij}=x_{ijo}}$ の計算の際には、着目している因子 x_{ij} 以外の因子の値は平均値に固定してある。

このようにして得られた因子 x_{ij} に対する第 j リングの局所出力 P_j の感度係数を用いて、各リングの出力偏差を次に示す4つの仮定のもとに求めた。

- (1) 燃料ピンに関する因子 x_{ij} は、各リングの全燃料ピンで一様な偏差をもつ。
- (2) 各因子 x_{ij} の平均値 x_{ijo} からの偏差には互いに相関がない。
- (3) 各因子 x_{ij} の平均値 x_{ijo} からの偏差の分布関数は正規分布とする。
- (4) 局所出力の平均値 P_{jo} からの偏差が、出力の感度係数を重みとする各因子の一次結合で表わされる。

したがって、各因子 x_{ij} についてそれぞれその標準偏差 σ_{ij} の変動を与えたときの第 j リングの局所出力 P_j の偏差 δ_{pj} は

$$\delta_{pj}^2 = \sum_{i=1}^n (\partial f_j / \partial x_{ij})_{x_{ij}=x_{ijo}}^2 \cdot \sigma_{ij}^2 \quad (3.8)$$

の平方根で求められる。ここで、3.3節に示した10ケの因子のうち(1)から(7)までの燃料ピンに関する因子については、第 j リングにおけるそれらの因子の変動が他リングの出力分布へも変動を及ぼすことになる。このため δ_{pj}^2 は燃料ピンに関する因子に依存するもの $(\delta_{pj}^2)_f$ と、それ以外に関する因子に依存するもの $(\delta_{pj}^2)_r$ の和で表わされる。

$$\delta_{pj}^2 = (\delta_{pj}^2)_f + (\delta_{pj}^2)_r \quad (3.9)$$

燃料ピンに関する因子のうちの i 番目の因子に対する第 j リング燃料ピンの出力感度係数 $(\partial f_j / \partial x_{ij})_{x_{ij}=x_{ijo}}$ は

$$(\partial f_j / \partial x_{ij})_{x_{ij}=x_{ijo}} = \left[(\partial f_j / \partial x_{i1})_{x_{i1o}}, (\partial f_j / \partial x_{i2})_{x_{i2o}}, (\partial f_j / \partial x_{i3})_{x_{i3o}} \right] \quad (3.10)$$

のように燃料リングの総数に対応した3次元ベクトルで表わされる。(3.10)式において、例えば $(\partial f_j / \partial x_{i3})_{x_{i3o}}$ は、第3リングにおける i 番目の因子 x_{i3} が平均値 x_{i3o} のまわりで変動したときの第 j リングの出力の感度係数を示す。このことを考慮すると、燃料ピンに関する因子のばらつきによる出力偏差 $(\delta_{pj}^2)_f$ は

$$(\delta_{pj}^2)_f = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^3 (\partial f_j / \partial x_{ij})_{x_{ij}=x_{ijo}}^2 \cdot \sigma_{ij}^2 \quad (3.11)$$

で示される。また燃料ピンに関するもの以外の外側軽水層内径、圧力管内径およびカランドリア管外径の因子については、燃料リング依存性がないのでサフィックス j を除くと、これらの因子に対する出力の感度係数は $(\partial f_j / \partial x_i)_{x_i=x_{io}}$ で示され、各燃料リングで1つの成分だけとなる。したがって燃料ピン以外の因子に依存する出力偏差は

$$(\delta_{pj}^2)_r = \sum_{i=8}^{10} (\partial f_j / \partial x_i)_{x_i=x_{io}}^2 \cdot \sigma_i^2 \quad (3.12)$$

で表わされる。

4. 結 果

局所出力偏差を計算したフローチャートを第4図に示す。まずCOBRAおよびHAPIコードを用いて燃料集合体、冷却材等の熱的条件を定めた後、すべての因子が平均値 x_{ij0} をとる時の各リングの平均出力 P_{j0} をとる時の各リングの平均出力 P_{j0} を求めた。次にそれぞれの因子をその平均値の近傍で微小量変動させたときの各リングの出力の変化量から出力の感度係数 ($\partial f_j / \partial x_{ij}$) を求めた。最後にデータ処理コード(付録3)を用いて、すべての因子に対する出力の感度係数および各因子の標準偏差とからリング毎の局所出力偏差を求めた。

4.1 局所出力分布

局所出力分布に変動をもたらす因子 x_{ij} のすべてが平均値 x_{ij0} をとる場合の各リング出力の平均値 P_{j0} ($j = 1 \sim 3$) を、燃料クラスタ全出力 1.0 に規格化して求め、これを第6表に示す。また局所出力分布の代表的なものを第5図に図示する。

これらの結果から分るように、燃料リング別の出力割合は、最外層の第3リング燃料ピンで約60%、中間層の第2リング燃料ピンでは30%であり、内層の第1リングでは15%以下となっている。局所出力分布の冷却材ボイド率依存性は、ボイド率の40%から75%の範囲では極めて小さい。

4.2 局所出力の感度係数

10種の因子に対する局所出力の感度係数を(3.7)式を用いて求め、これを燃料クラスタ全出力に対する割合(%)で表わして第7～第9表に示す。出力の感度係数は、富加度(濃縮度)および核分裂性核種の同位体組成の因子に関するものが、他の因子に関するものより著しく大きくになっている。

10ヶの因子についての感度係数を求める場合、各因子の平均値の近傍での正負両側における局所出力の微係数は、Pu 富加度因子に対する微係数を除き、2%以内で一致する。Pu 富加度因子に関する局所出力の微係数のこのような相異が出力偏差に及ぼす影響については第5章で考察する。

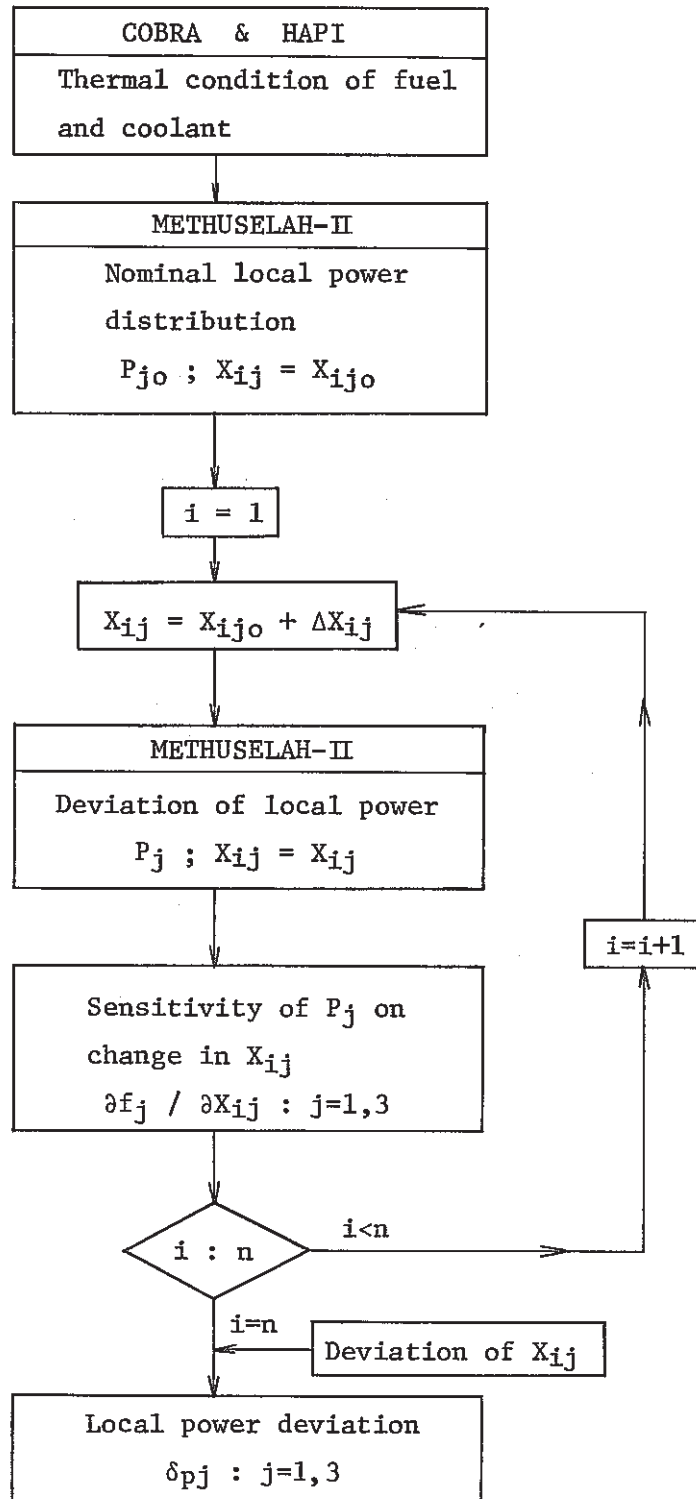


Fig. 4 Flow diagram of calculation of local power deviation.

Table 6 Local power distribution from METHUSELAH-II

 ^{10}B concentration: 6 ppm

Type of reactor	Fuel	Void fraction (%)	Local power P_{jo}/P_c		
			Inner ring	Middle ring	Outer ring
Prototype (Fugen)	28-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	40	0.1091	0.2638	0.6271
		60	0.1094	0.2663	0.6243
		75	0.1108	0.2687	0.6205
	28-pin UO_2	40	0.1044	0.2389	0.6567
		60	0.1034	0.2400	0.6566
		75	0.1042	0.2420	0.6538
Demonstration	36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	40	0.1273	0.3239	0.5489
		60	0.1280	0.3287	0.5433
		75	0.1300	0.3329	0.5371

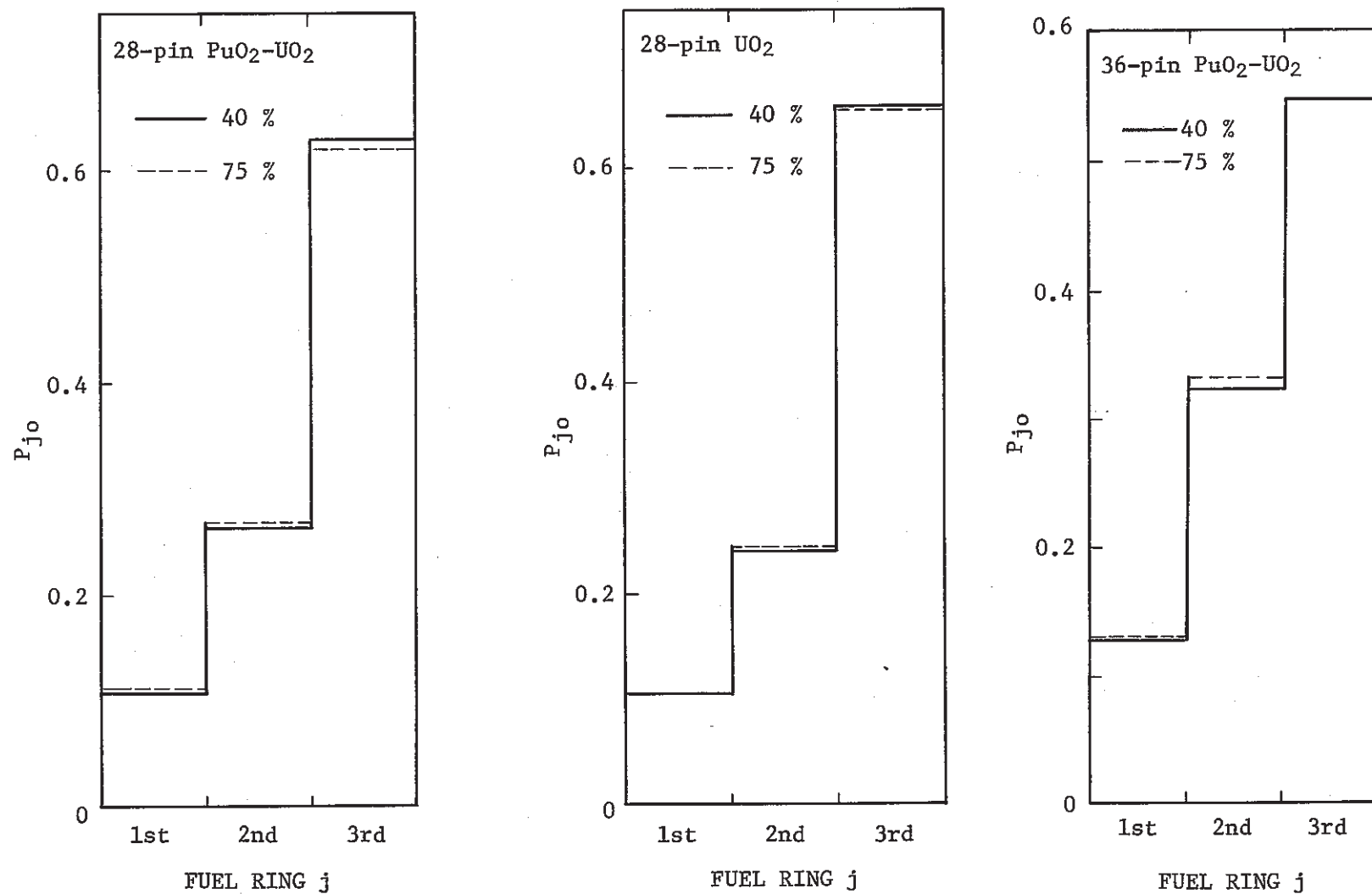


Fig. 5 Local power distributions in fuel clusters

Table 7 Sensitivity coefficients of local power of 28 pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ cluster to the factors with manufacturing tolerance

(a) Void fraction: 40 %

i	Factor x_{ij}	Ring to be given Δx_{ij} to x_{ijo}	$(\partial f_j / \partial x_{ij}) / P_c$ (%)		
			1st ring	2nd ring	3rd ring
1	Pellet diameter (mm)	1st	1.0875	-0.4893	-0.5981
		2nd	-0.6022	2.3537	-1.7514
		3rd	-0.8724	-2.4627	3.3352
2	Pellet density (g/cm^3)	1st	0.7093	-0.3230	-0.3863
		2nd	-0.4286	1.5441	-1.1153
		3rd	-0.6149	-1.7650	2.3800
3	Pu enrichment (wt%)	1st	5.5073	-2.5595	-2.9477
		2nd	-3.1555	12.2590	-9.1034
		3rd	-5.8712	-16.6581	22.5294
4	Isotope ratio of Pu (wt% ^{239}Pu)	1st	6.8867	-2.8105	-4.0761
		2nd	-3.3132	14.8604	-11.5472
		3rd	-6.9207	-18.9288	25.8496
5	Isotope ratio of U (wt% ^{235}U)	1st	3.3715	-1.3217	-2.0499
		2nd	-1.6203	7.4352	-5.8148
		3rd	-3.7691	-10.2103	13.9795
6	Sheath diameter (mm)	1st	-0.1119	-0.0541	0.1659
		2nd	0.0016	-0.0391	0.0375
		3rd	0.0748	0.1766	-0.2514
7	Fuel-ring diameter (mm)	1st	0.0486	0.0464	-0.0950
		2nd	0.0676	0.0823	-0.1498
		3rd	0.0189	0.0359	-0.0549
8	Inner dia. of coolant layer (mm)		-0.0342	-0.1005	0.1348
9	Inner dia. of pressure tube (mm)		0.0048	0.0320	-0.0369
10	Outer dia. of calandria tube (mm)		0.0195	0.0192	-0.0386

(b) Void fraction: 60 %

(continued)

i	Factor x_{ij}	Ring to be given Δx_{ij} to x_{ijo}	$(\partial f_j / \partial x_{ij}) / P_c$ (%)		
			1st ring	2nd ring	3rd ring
1	Pellet diameter (mm)	1st	1.1220	-0.4899	-0.6322
		2nd	-0.6201	2.4002	-1.7801
		3rd	-0.9251	-2.5173	3.4424
2	Pellet density (g/cm ³)	1st	0.7307	-0.3222	-0.4085
		2nd	-0.4451	1.5686	-1.1235
		3rd	-0.6566	-1.8094	2.4661
3	Pu enrichment (wt%)	1st	5.6747	-2.5622	-3.1124
		2nd	-3.2035	12.4013	-9.1977
		3rd	-6.1572	-16.7743	22.9316
4	Isotope ratio of Pu (wt% ²³⁹ Pu)	1st	7.0182	-2.8305	-4.1877
		2nd	-3.3753	14.9824	-11.6071
		3rd	-7.1629	-19.0179	26.1809
5	Isotope ratio of U (wt% ²³⁵ U)	1st	3.4564	-1.3332	-2.1232
		2nd	-1.6781	7.6227	-5.9445
		3rd	-3.9549	-10.4551	14.4100
6	Sheath diameter (mm)	1st	-0.0791	-0.0344	0.1136
		2nd	0.0030	-0.0415	0.0385
		3rd	0.0390	0.1112	-0.1503
7	Fuel-ring diameter (mm)	1st	0.0354	0.0419	-0.0772
		2nd	0.0489	0.0659	-0.1149
		3rd	0.0135	0.0241	-0.0375
8	Inner dia. of coolant layer (mm)		-0.0245	-0.0600	0.0936
9	Inner dia. of pressure tube (mm)		0.0102	0.0261	-0.0363
10	Outer dia. of calandria tube (mm)		0.0155	0.0153	-0.0308

(c) Void fraction: 75 %

(continued)

i	Factor x_{ij}	Ring to be given Δx_{ij} to x_{ijo}	$(\partial f_j / \partial x_{ij}) / P_c$ (%)		
			1st ring	2nd ring	3rd ring
1	Pellet diameter (mm)	1st	1.1549	-0.4950	-0.6599
		2nd	-0.6384	2.4385	-1.8000
		3rd	-0.9679	-2.5549	3.5229
2	Pellet density (g/cm ³)	1st	0.7494	-0.3240	-0.4254
		2nd	-0.4605	1.5871	-1.1266
		3rd	-0.6898	-1.8392	2.5290
3	Pu enrichment (wt%)	1st	5.8089	-2.5729	-3.2360
		2nd	-3.2405	12.4727	-9.2321
		3rd	-6.3662	-16.7841	23.1503
4	Isotope ratio of Pu (wt% ²³⁹ Pu)	1st	7.1429	-2.8554	-4.2874
		2nd	-3.4239	15.0418	-11.6178
		3rd	-7.3528	-19.0082	26.3611
5	Isotope ratio of U (wt% ²³⁵ U)	1st	3.5752	-1.3688	-2.2063
		2nd	-1.7435	7.8113	-6.0678
		3rd	-4.1165	-10.6287	14.7453
6	Sheath diameter (mm)	1st	-0.0665	-0.0177	0.0843
		2nd	-0.0041	-0.0521	0.0564
		3rd	0.0135	0.0449	-0.0584
7	Fuel-ring diameter (mm)	1st	0.0273	0.0365	-0.0639
		2nd	0.0389	0.0512	-0.0901
		3rd	0.0116	0.0145	-0.0262
8	Inner dia. of coolant layer (mm)		-0.0141	-0.0371	0.0512
9	Inner dia. of pressure tube (mm)		0.0100	0.0197	-0.0298
10	Outer dia. of calandria tube (mm)		0.0126	0.0124	-0.0250

Table 8 Sensitivity coefficients of local power of 28-pin UO₂ cluster to the factors with manufacturing tolerance

(a) Void fraction: 40 %

i	Factor x_{ij}	Ring to be given Δx_{ij} to x_{ijo}	$(\partial f_j / \partial x_{ij}) / P_c$ (%)		
			1st ring	2nd ring	3rd ring
1	Pellet diameter (mm)	1st	1.1438	-0.4127	-0.7311
		2nd	-0.4683	2.3178	-1.8494
		3rd	-0.8944	-2.2843	3.1788
2	Pellet density (g/cm ³)	1st	0.7839	-0.2895	-0.4943
		2nd	-0.3474	1.5974	-1.2500
		3rd	-0.6355	-1.6586	2.2941
3	U enrichment (wt%)	1st	5.5518	-1.9229	-3.6289
		2nd	-2.1604	11.3853	-9.2248
		3rd	-4.4467	-11.1675	15.6143
4	Sheath diameter (mm)	1st	-0.0761	-0.0474	0.1235
		2nd	-0.0024	-0.0013	0.0037
		3rd	0.0014	0.1021	-0.1035
5	Fuel-ring diameter (mm)	1st	0.0302	0.0397	-0.0699
		2nd	0.0330	0.0538	-0.0869
		3rd	0.0027	0.0141	-0.0169
6	Inner dia. of coolant layer (mm)		-0.0422	-0.1148	0.1569
7	Inner dia. of pressure tube (mm)		0.0430	0.0729	-0.1160
8	Outer dia. of calandria tube (mm)		0.0185	0.0200	-0.0385

(b) Void fraction: 60 %

(continued)

i	Factor x_{ij}	Ring to be given Δx_{ij} to x_{ijo}	$(\partial f_j / \partial x_{ij}) / P_c$ (%)		
			1st ring	2nd ring	3rd ring
1	Pellet diameter (mm)	1st	1.1520	-0.4057	-0.7462
		2nd	-0.4760	2.3373	-1.8612
		3rd	-0.9255	-2.3322	3.2578
2	Pellet density (g/cm ³)	1st	0.7888	-0.2836	-0.5052
		2nd	-0.3571	1.6052	-1.2482
		3rd	-0.6624	-1.6997	2.3621
3	U enrichment (wt%)	1st	5.5661	-1.8938	-3.6723
		2nd	-2.1774	11.4436	-9.2663
		3rd	-4.5560	-11.3159	15.8719
4	Sheath diameter (mm)	1st	-0.0448	-0.0304	0.0752
		2nd	0.0063	0.0017	-0.0080
		3rd	-0.0107	0.0715	-0.0608
5	Fuel-ring diameter (mm)	1st	0.0212	0.0358	-0.0570
		2nd	0.0201	0.0446	-0.0648
		3rd	-0.0011	0.0089	-0.0077
6	Inner dia. of coolant layer (mm)		-0.0327	-0.0848	0.1175
7	Inner dia. of pressure tube (mm)		0.0388	0.0543	-0.0932
8	Outer dia. of calandria tube (mm)		0.0152	0.0166	-0.0318

(c) Void fraction: 75 %

i	Factor x_{ij}	Ring to be given Δx_{ij} to x_{ijo}	$(\partial f_j / \partial x_{ij}) / P_c$ (%)		
			1st ring	2nd ring	3rd ring
1	Pellet diameter (mm)	1st	1.1687	-0.4079	-0.7607
		2nd	-0.4904	2.3599	-1.8695
		3rd	-0.9574	-2.3705	3.3280
2	Pellet density (g/cm ³)	1st	0.7976	-0.2835	-0.5141
		2nd	-0.3708	1.6139	-1.2431
		3rd	-0.6892	-1.7319	2.4212
3	U enrichment (wt%)	1st	5.6299	-1.9054	-3.7244
		2nd	-2.2214	11.5151	-9.2937
		3rd	-4.6733	-11.4194	16.0928
4	Sheath diameter (mm)	1st	-0.0322	-0.0158	0.0480
		2nd	0.0044	-0.0091	0.0046
		3rd	-0.0157	0.0302	-0.0144
5	Fuel-ring diameter (mm)	1st	0.0161	0.0305	-0.0466
		2nd	0.0149	0.0354	-0.0504
		3rd	-0.0011	0.0049	-0.0038
6	Inner dia. of coolant layer (mm)		-0.0223	-0.0531	0.0754
7	Inner dia. of pressure tube (mm)		0.0299	0.0378	-0.0677
8	Outer dia. of calandria tube (mm)		0.0126	0.0137	-0.0264

Table 9 Sensitivity coefficient of local power of 36-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ cluster to the factors with manufacturing tolerance

(a) Void fraction: 40 %

i	Factor x_{ij}	Ring to be given Δx_{ij} to x_{ijo}	$(\partial f_j / \partial x_{ij}) / P_c$ (%)		
			1st ring	2nd ring	3rd ring
1	Pellet diameter (mm)	1st	1.3280	-0.7525	-0.5754
		2nd	-1.0268	2.8866	-1.8597
		3rd	-0.9645	-3.0442	4.0188
2	Pellet density (g/cm^3)	1st	0.7283	-0.4118	-0.3165
		2nd	-0.5998	1.5635	-0.9636
		3rd	-0.5619	-1.8044	2.3664
3	Pu enrichment (wt%)	1st	2.4941	-1.4737	-1.0204
		2nd	-1.9002	5.6394	-3.7393
		3rd	-3.4236	-10.9179	14.3415
4	Isotope ratio of Pu (wt% ^{239}Pu)	1st	4.3501	-2.2131	-2.1371
		2nd	-2.8647	9.4402	-6.5756
		3rd	-4.9853	-15.1191	20.1044
5	Isotope ratio of U (wt% ^{235}U)	1st	2.2907	-1.1090	-1.1834
		2nd	-1.4138	4.8896	-3.4758
		3rd	-2.6829	-7.9223	10.6052
6	Sheath diameter (mm)	1st	-0.2277	-0.0650	0.2927
		2nd	-0.0033	-0.1508	0.1541
		3rd	0.1189	0.1862	-0.3051
7	Fuel-ring diameter (mm)	1st	0.0691	0.0268	-0.0960
		2nd	0.1010	0.0992	-0.2002
		3rd	0.0318	0.0724	-0.1042
8	Inner dia. of coolant layer (mm)		-0.0372	-0.1011	0.1383
9	Inner dia. of pressure tube (mm)		0.0190	0.0152	-0.0043
10	Outer dia. of calandria tube (mm)		0.0192	0.0184	-0.0380

(b) Void fraction: 60 %

(continued)

i	Factor x_{ij}	Ring to be given Δx_{ij} to x_{ijo}	$(\partial f_j / \partial x_{ij}) / P_c$ (%)		
			1st ring	2nd ring	3rd ring
1	Pellet diameter (mm)	1st	1.3851	-0.7596	-0.6255
		2nd	-1.0650	2.9804	-1.9154
		3rd	-1.0235	-3.1142	4.1378
2	Pellet density (g/cm ³)	1st	0.7562	-0.4131	-0.3431
		2nd	-0.6257	1.6184	-0.9827
		3rd	-0.6013	-1.8530	2.4654
3	Pu enrichment (wt%)	1st	2.5901	-1.4822	-1.1079
		2nd	-1.9189	5.7878	-3.8689
		3rd	-3.5977	-11.0212	14.6189
4	Isotope ratio of Pu (wt% ²³⁹ Pu)	1st	4.4571	-2.2429	-2.2141
		2nd	-2.9465	9.6287	-6.6821
		3rd	-5.1556	-15.2113	20.3669
5	Isotope ratio of U (wt% ²³⁵ U)	1st	2.3618	-1.1228	-1.2391
		2nd	-1.4736	5.0695	-3.5859
		3rd	-2.8194	-8.1457	10.9651
6	Sheath diameter (mm)	1st	-0.1577	-0.0366	0.1944
		2nd	-0.0061	-0.1220	0.1271
		3rd	-0.0684	-0.1211	-0.1895
7	Fuel-ring diameter (mm)	1st	0.0494	0.0271	-0.0765
		2nd	0.0743	0.0784	-0.1527
		3rd	0.0249	0.0513	-0.0762
8	Inner dia. of coolant layer (mm)		-0.0266	-0.0737	0.1003
9	Inner dia. of pressure tube (mm)		0.0074	0.0152	-0.0178
10	Outer dia. of calandria tube (mm)		0.0171	0.0152	-0.0323

(c) Void fraction: 75 %

(continued)

i	Factor x_{ij}	Ring to be given Δx_{ij} to x_{ijo}	$(\partial f_j / \partial x_{ij}) / P_c$ (%)		
			1st ring	2nd ring	3rd ring
1	Pellet diameter (mm)	1st	1.4384	-0.7728	-0.6657
		2nd	-1.1013	3.0513	-1.9500
		3rd	-1.0736	-3.1617	4.2353
2	Pellet density (g/cm ³)	1st	0.7819	-0.4177	-0.3641
		2nd	-0.6480	1.6390	-0.9911
		3rd	-0.6330	-1.8839	2.5169
3	Pu enrichment (wt%)	1st	2.6715	-1.4955	-1.1761
		2nd	-1.9229	5.8615	-3.9386
		3rd	-3.7346	-11.0407	-5.1143
4	Isotope ratio of Pu (wt% ²³⁹ Pu)	1st	4.5711	-2.2821	-2.2890
		2nd	-3.0080	9.7379	-6.7300
		3rd	-5.3035	-15.2069	20.5103
5	Isotope ratio of U (wt% ²³⁵ U)	1st	2.4453	-1.1526	-1.2927
		2nd	-1.5360	5.2097	-3.6736
		3rd	-2.9393	-8.2952	11.2346
6	Sheath diameter (mm)	1st	-0.1189	-0.0171	0.1360
		2nd	-0.0219	-0.1112	0.1331
		3rd	0.0356	0.0591	-0.0948
7	Fuel ring diameter (mm)	1st	0.0359	0.0265	-0.0623
		2nd	0.0592	0.0619	-0.1211
		3rd	0.0232	0.0354	-0.0587
8	Inner dia. of coolant layer (mm)		-0.0167	-0.0445	0.0612
9	Inner dia. of pressure tube (mm)		0.0028	0.0119	-0.0191
10	Outer dia. of calandria tube (mm)		0.0151	0.0124	-0.0276

4.3 局所出力偏差

局所出力の偏差は、METHUSELAH-II コードで求めた出力の感度係数ならびに燃料集合体各部の検査成績書⁽⁶⁾のデータを統計処理して得た各因子の分散をもとにして、28本クラスタのプルトニウム・ウラン混合燃料およびウラン燃料について求められた。

局所出力の偏差を(3.8)式で求めるにあたり、各因子 x_{ij} の平均値のまわりの偏差が、標準偏差 σ_{ij} の2乗を分散とする正規分布に従っているものと仮定し、(3.8)式における各因子の分散 σ_{ij}^2 を $(3 \sigma_{ij})^2$ で置き換えたときの局所出力偏差 $\hat{\delta}_{pj}$ ($= 3 \delta_{pj}$) を求めた。

10ケの因子の製造・組立工程で生ずるばらつき ($3 \sigma_{ij}$) に対して、(3.8)式から計算された各燃料リング毎の局所出力の偏差を第10表に掲げるとともに、出力偏差の冷却材ボイド率依存性をみるために代表的なものを第6図に図示する。第10表ならびに第6図から局所出力偏差は、プルトニウム・ウラン混合燃料の方がウラン燃料よりも40～60%大きくなっている。出力偏差の燃料リング依存性は、ほぼ局所出力分布に対応して外層の燃料リングほど出力偏差が増加する傾向を示している。また第7～第8表に示すように、出力分布およびその感度係数の冷却材ボイド率依存性が小さいので、それに対応して第6図に示すごとく出力偏差の冷却材ボイド率依存性も小さく、5%以下となっている。

次に、各燃料リング毎の平均出力 P_{jo} に対する代表的出力偏差の割合を第7図に図示する。この図からリング平均出力に対する出力偏差の割合は内層ほど大きくなっている。燃料クラスタ内の出力が最大になる第3リングの局所出力偏差は、そのリングの平均出力に対してプルトニウム・ウラン混合燃料で1.25%、そしてウラン燃料で0.75%となる。

局所出力偏差に占める各因子の寄与の割合を明らかにするために、出力偏差の i 番目の因子 x_{ij} に対する成分 $\hat{\delta}_{pi}^i$ を、 $\hat{\delta}_{pi}^i = |\partial f_j / \partial x_{ij}| \cdot 3 \sigma_{ij}$ で定義される式で求めた。このようにして求めた40%の冷却材ボイド率における局所出力偏差の各因子の成分を、リング平均出力に対する割合で表わし、第11表に示す。またこのうち第3リング燃料ピンの出力偏差の成分を代表としてとり上げて、これを各因子の平均値 x_{ijo} からのばらつきの標準偏差の割合 ($3 \sigma_{ij} / x_{ijo}$) とともに第8～第9図に示す。これらの図から、局所出力の偏差は、ほぼ各因子 x_{ij} のばらつきである標準偏差の大きさに対応しており、出力偏差に対する各因子の寄与はおおむねペレットに関する因子に大きく依存していることが分る。出力偏差に対するペレットに関する因子の寄与は、プルトニウム・ウラン混合燃料で95%、そしてウラン燃料では83%に達する。ペレットに関する5種の因子の寄与の中では、特に富加度(濃縮度)および同位体比等ペレット内の核分裂性核種の組成に関する因子の寄与がかなり大きくなっている。一方、ペレット直径またはペレット密度は高い精度で品質管理されていて、それらの製造誤差は極めて小さくなっているけれども、これらの因子に対する出力の感度係数が大きいため、局所出力偏差に与える影響は無視できなくなっている。

燃料集合体各部の製作精度が28本クラスタ燃料と同一であるとした場合、実証炉で仕様が予定

されている36本クラス燃料の局所出力偏差をこれまでの解析結果をもとに推定してみることは極めて興味深いものがある。これまで述べてきたように、出力偏差は主としてペレットに関する種々の因子からの寄与に依存しているため、これらの因子に対する出力の感度係数を28本クラスと36本クラスで比較すれば、36本クラス燃料の出力偏差の変化傾向を概ね予測できるものと考えられる。冷却材ボイド率および減速材中 ^{10}B 濃度を同一条件にして求めた28本クラスと36本クラスの出力の感度係数を比較した結果、ペレット直径で逆の傾向を示すことを除くと、他の因子では同一の傾向を示し、ペレット内核分裂性核種の同位体比および富加度に関する感度係数は、28本クラス燃料に比べ20～50%小さいことが分る。このことから36本クラスのペレットが28本クラスのペレットと同程度の精度（絶対誤差が同一）で製作できるものとするれば、36本クラス燃料体の局所出力偏差は28本クラス燃料体よりも十分小さくなるものと考えられる。

Table 10 Calculational result of local power deviation of 28-pin fuel clusters

(a) Power deviation to total channel power

Fuel	Void fraction (%)	$\hat{\delta}_{pj}/P_c$ (%)		
		1st ring	2nd ring	3rd ring
PuO ₂ -UO ₂	40	0.279	0.659	0.772
	60	0.287	0.660	0.777
	75	0.293	0.660	0.780
UO ₂	40	0.192	0.422	0.498
	60	0.192	0.415	0.488
	75	0.193	0.411	0.481

(b) Power deviation to total ring power

Fuel	Void fraction (%)	$\hat{\delta}_{pj}/P_c$ (%)		
		1st ring	2nd ring	3rd ring
PuO ₂ -UO ₂	40	2.558	2.497	1.232
	60	2.620	2.479	1.245
	75	2.648	2.458	1.257
UO ₂	40	1.842	1.767	0.759
	60	1.855	1.730	0.743
	75	1.850	1.698	0.735

Table 11 Component of local power deviation of the factor on manufacturing allowance in a fuel assembly

(a) 28-pin $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ cluster (Void fraction: 40 %)

i	Factor x_{ij}	$\hat{\delta}_{pj}^i / \hat{\delta}_{pj}$ (%)		
		1st ring	2nd ring	3rd ring
1	Pellet diameter	0.618	0.579	0.270
2	Pellet density	1.189	1.128	0.532
3	Pu enrichment	1.426	1.422	0.702
4	Isotope ratio of Pu	1.443	1.401	0.695
5	Isotope ratio of U	0.644	0.637	0.323
6	Sheath diameter	0.037	0.022	0.014
7	Fuel-ring diameter	0.264	0.154	0.110
8	Inner dia. of coolant layer	0.371	0.450	0.254
9	Inner dia. of pressure tube	0.027	0.076	0.037
10	Outer dia. of calandria tube	0.037	0.015	0.012
$\hat{\delta}_{pj}$		2.558	2.497	1.232

(b) 28-pin UO_2 cluster (Void fraction: 40 %)

i	Factor x_{ij}	$\hat{\delta}_{pj}^i / \hat{\delta}_{pj}$ (%)		
		1st ring	2nd ring	3rd ring
1	Pellet diameter	0.688	0.646	0.268
2	Pellet density	1.009	0.958	0.399
3	U enrichment	1.260	1.190	0.498
4	Sheath diameter	0.029	0.019	0.009
5	Fuel-ring diameter	0.121	0.094	0.053
6	Inner dia. of coolant layer	0.477	0.567	0.282
7	Inner dia. of pressure tube	0.259	0.192	0.111
8	Outer dia. of calandria tube	0.037	0.017	0.012
$\hat{\delta}_{pj}$		1.841	1.767	0.758

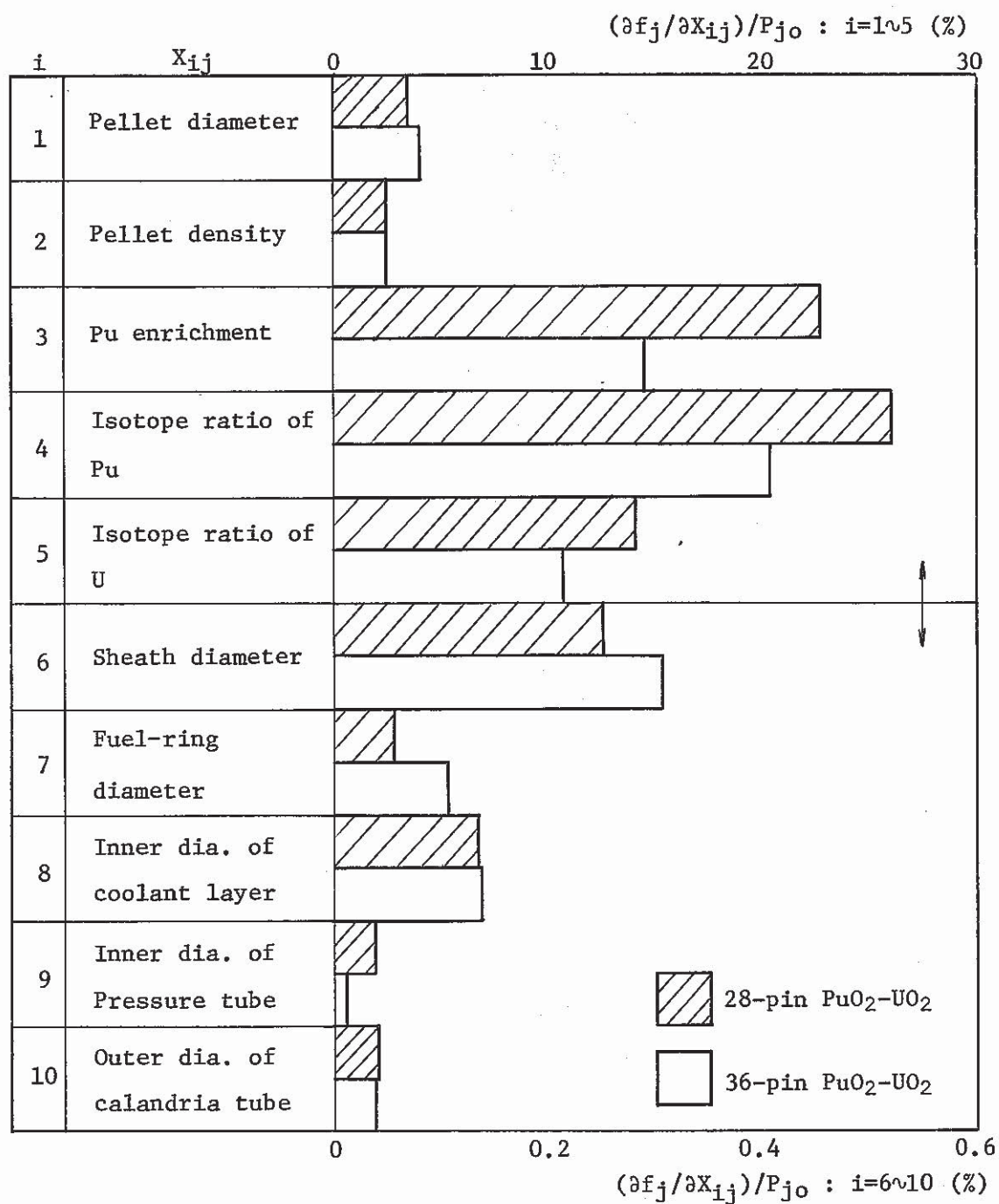


Fig. 10 Comparison of the sensitivity coefficients of local power between 28-pin fuel cluster and 36-pin fuel cluster.

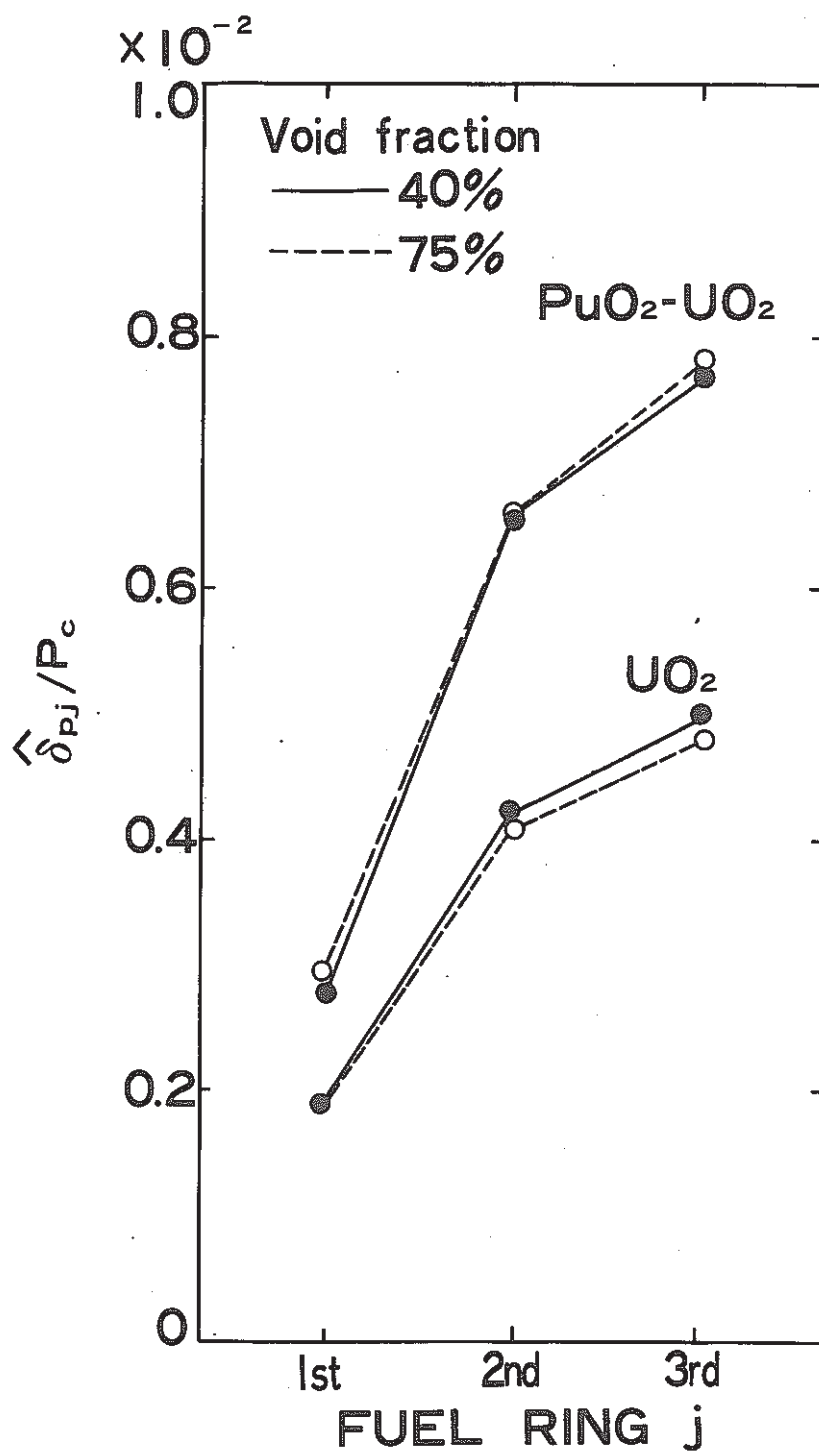


Fig. 6 Local power deviation to total channel power of 28-pin fuel clusters.

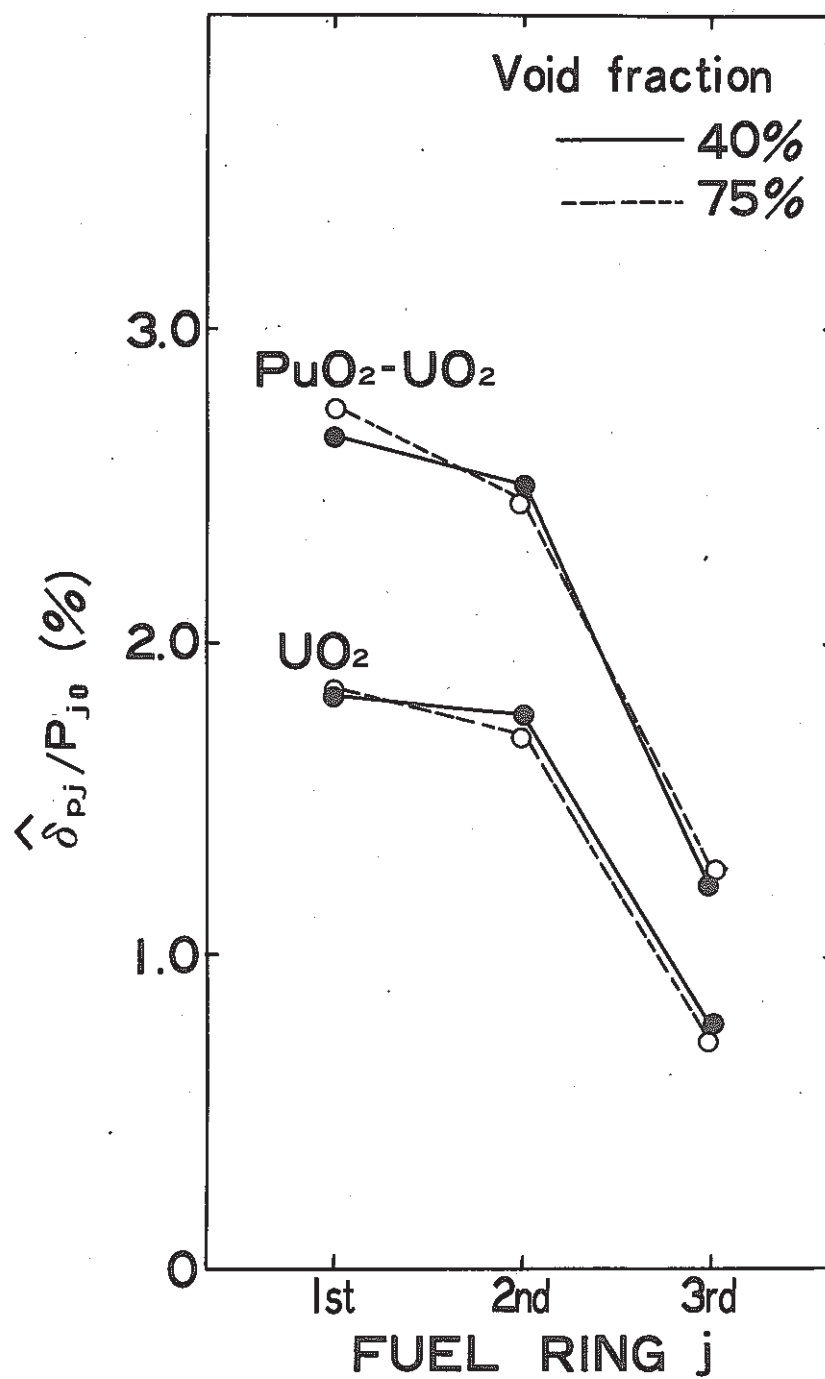


Fig. 7 Local power deviation to total ring power of 28-pin fuel clusters.

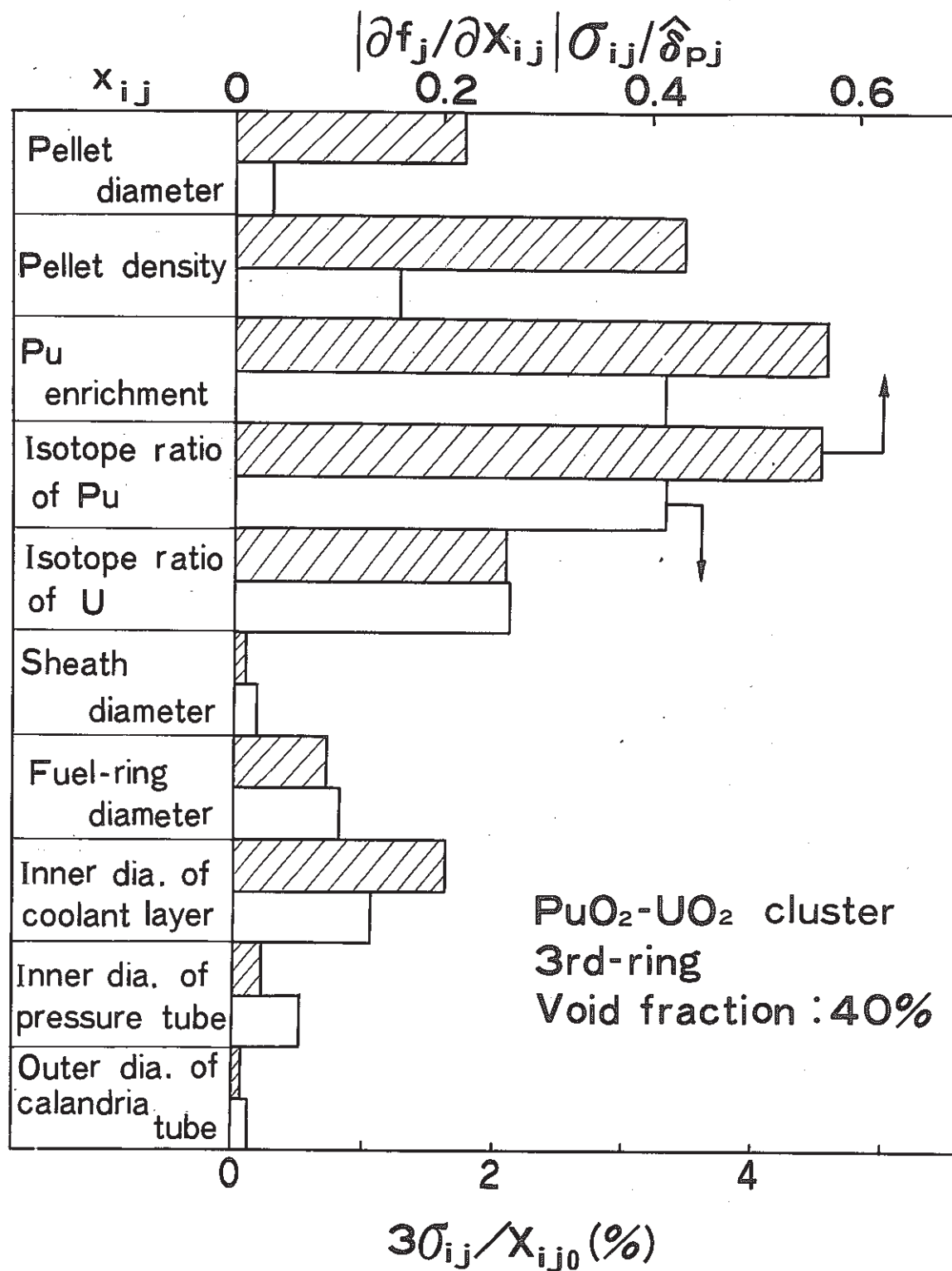


Fig. 8 Components of local power deviation and the standard deviation of the factor with manufacturing tolerance in $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ fuel assembly.

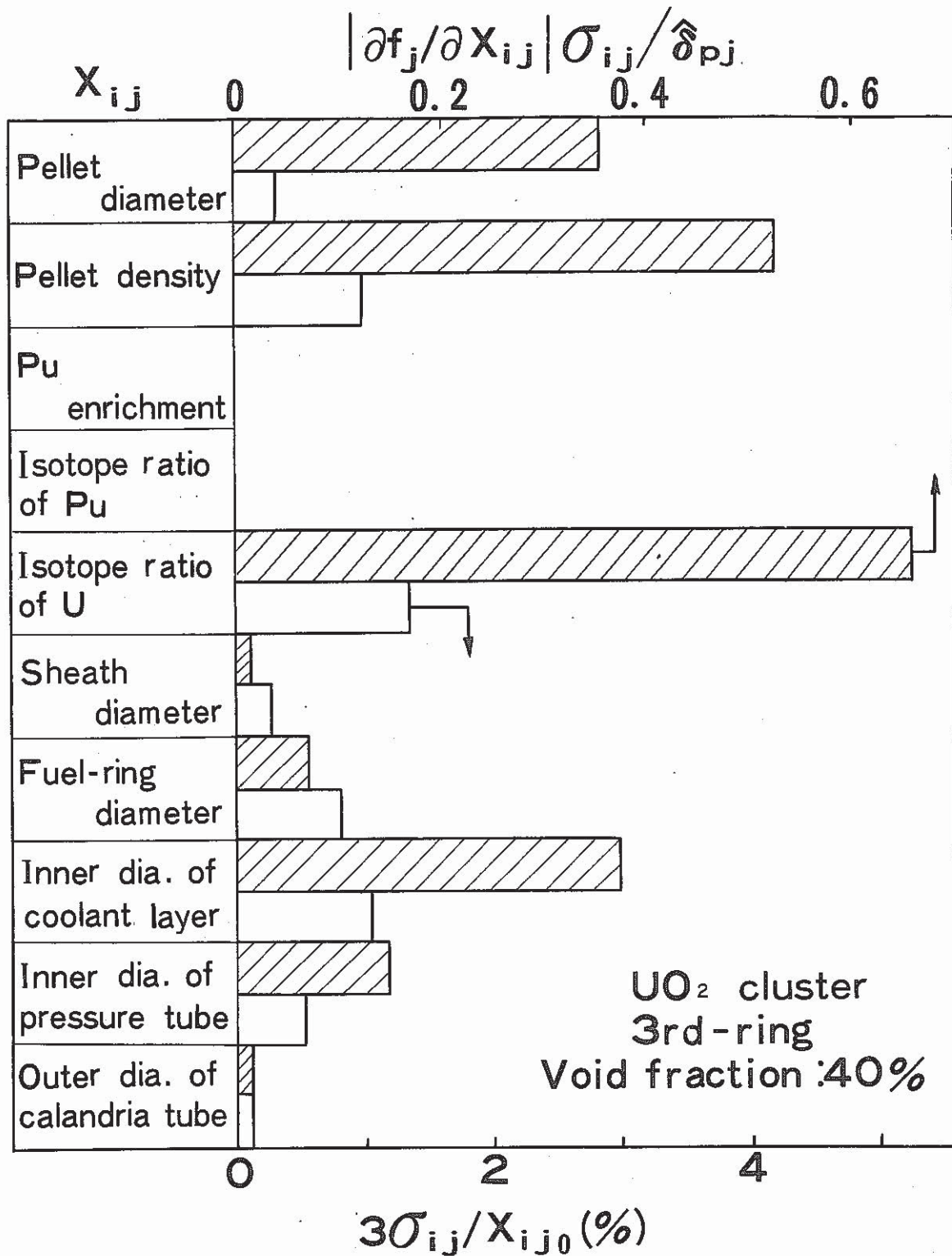


Fig. 9 Components of local power deviation and the standard deviation of the factor with manufacturing tolerance in UO₂ fuel assembly.

5. 考 察

5.1 局所出力の感度係数の決定方法が出力偏差へ及ぼす影響

種々の因子の変動に対する局所出力の感度係数を求める場合、実用的見地では局所出力の変化を線形近似と仮定する方法が有用である。今回の解析においても、平均値 x_{ij0} の正負両側へのずれに対する出力 P_j の変化が線形とみなして、(3.7) 式に示す階差で局所出力の感度係数を求めている。しかし、実際には第12表に示すように、特にペレット内核分裂性核種の組成に関する因子については、 x_{ij0} からの正負両側へのずれに対する局所出力の微係数に差異がみられる。そこでこれらの局所出力の微係数の相異が、局所出力偏差に及ぼす影響について検討を行った。

ペレットに関するいくつかの代表的な因子について、その平均値の正側および負側へのずれに対する局所出力の微係数を第12表に示す。第12表において、上段（下段）の数値は各因子の平均値からの正側（負側）へのずれに対する局所出力の微係数である。この中で、Pu 富加度因子に対する局所出力の微係数は、その平均値からの正負両側への変動に対して最大±約20%変化している。ここでは、Pu 富加因子を取り上げ、これらの相異なる局所出力の微係数のうち、大きい方の値を出力の感度係数に選んで求めた出力偏差が、(3.7) 式で定義される感度係数を用いて求められる出力偏差に対してどの程度の影響を生ずるかを考察してみることにする。その他の因子については、これら2つの局所出力の微係数の相異は、Pu 富加度因子の場合に比べて十分小さいので、この考察においては考えない。

この結果、Pu 富加度因子に対する局所出力の微係数のうち、すべて大きい方だけの値を用いて求めた出力偏差は、(3.7) 式で得られる感度係数を用いて求めた出力偏差に対して4%変化し、その影響は十分小さいといえる。

5.2 局所出力偏差に関する2次項の影響

今回の局所出力偏差の計算では、各因子の変動に対する局所出力の変化は線形近似であると仮定したが、局所出力の変化に2次項を導入した場合の出力偏差を詳細に考察してみることにする。第12表に示すように、出力の微係数についての2次の成分は $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ クラスターの Pu 富加度因子で顕著になることが容易に予想されるが、この考察ではすべての因子について出力変化に2次項を考慮した場合に生ずる28本 $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ クラスターの出力偏差を考えることにする。

ある因子 x の平均値 x_0 からの偏差 z を確率変数とすると、この偏差の分布関数 $f(z)dz$ は

$$f(z)dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}} dz \quad (5.1)$$

なる分散 σ^2 の正規分布に従っているものとする。ここで、ある因子 x に対する局所出力 P の平均値 P_0 からのずれ p が

$$p = a (z + r z^2) \quad (5.2)$$

で表わされるものとする。ただし、(5.2) 式における a および r は因子 x に対する局所出力 P の微係数を用いて

$$a = \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{x=x_0}, \quad r = \frac{1}{2a} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right)_{x=x_0} \quad (5.3)$$

のように表わすことができる。解析では、(5.3) 式の $(\partial P / \partial x)_{x=x_0}$ の値が $(x_0, x_0 - \Delta x)$ で a_- の微係数を、 $(x_0, x_0 + \Delta x)$ で a_+ (大部分の因子について $a_- \approx a_+$ である) の微係数をもつものとするれば、(5.3) 式は

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{x=x_0} = \frac{(a_- + a_+)}{2}, \quad \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right)_{x=x_0} = \frac{(a_+ - a_-)}{\Delta x} \quad (5.4)$$

で近似的に求めることができる。(5.2) 式を z について解いて r の 2 乗以上の微小量を見捨てる

$$z = \frac{1}{2r} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4r}{a} P} \right) \approx \frac{p}{a} \left(1 - \frac{r}{a} p \right) \quad (5.5)$$

となる。(5.5) 式を(5.1)式へ代入すれば局所出力の平均値からのずれの分布関数 $g(p) dp$ は

$$g(p) dp = \frac{dp}{\sqrt{2\pi} \sigma a} \left(1 - \frac{2r}{a} p \right) e^{-\frac{p^2}{2\sigma^2 a^2} \left(1 - \frac{r}{a} p \right)^2}$$

なる式に従う。さらに近似して

$$g(p) dp = \frac{dp}{\sqrt{2\pi} \sigma a} \left(1 - \frac{2r}{a} p + \frac{r}{\sigma^2 a^3} p^3 \right) e^{-\frac{p^2}{2\sigma^2 a^2}} \quad (5.6)$$

を得る。分布密度 $g(p)$ の特性関数⁽⁷⁾ は $g(p)$ を Fourier 変換して

$$\begin{aligned} F(t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma a} \int_{-\infty}^{\infty} dp \left(1 - \frac{2r}{a} p + \frac{r}{\sigma^2 a^3} p^3 \right) e^{-\frac{p^2}{2\sigma^2 a^2} + i p t} \\ &= [1 + i \sigma^2 a r (1 - \sigma^2 a^2 t^2) t] e^{-\sigma^2 a^2 t^2 / 2} \end{aligned} \quad (5.7)$$

と求まる。次に、平均値からの偏差がすべて正規分布に従う n 種の因子を考慮に入れた分布密度

$g_n(p)$ の Fourier 変換は

$$\begin{aligned} F_n(t) &= \prod_{j=1}^n [1 + i \sigma_j^2 a_j r_j (1 - \sigma_j^2 a_j^2 t^2) t] e^{-\sigma_j^2 a_j^2 t^2 / 2} \\ &\approx \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sigma_j^2 a_j^2 t^2 \right) \left[1 + i t \sum_{j=1}^n \sigma_j^2 a_j r_j (1 - \sigma_j^2 a_j^2 t^2) \right] \end{aligned} \quad (5.8)$$

で示される。ただし、(5.8) 式においては r_j の 2 次以上の項は無視した。(5.8) 式を Fourier 逆変換することにより、 n 種の因子を考慮に入れた p の分布密度 $g_n(p)$ が

$$g_n(p) = \frac{\phi(p)}{\sqrt{2\pi \sum_{j=1}^n X_j}} \left[1 + \frac{p}{\sum_{j=1}^n X_j} \left(\sum_{j=1}^n \sigma_j^2 \eta_j - \frac{3 \sum_{j=1}^n \sigma_j^2 \eta_j X_j}{\sum_{j=1}^n X_j} \right) + \frac{\sum_{j=1}^n \sigma_j^2 \eta_j X_j}{\left(\sum_{j=1}^n X_j \right)^3} p^3 \right] \quad (5.9)$$

と求まる。ただし

$$X_j = \sigma_j^2 a_j^2, \quad \eta_j = a_j r_j$$

$$\phi(p) = \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sigma_j^2 a_j^2 \cdot p^2 \right)$$

である。線形近似ならば、 $r_j = 0$ ($j = 1, \dots, n$) なので局所出力の平均値は各因子の平均値を用いて計算されるものと等しくなっている。したがって、 p の平均値 $\bar{p}$ は零である。しかし、2 次項を考慮すれば $\bar{p}$ は

$$\bar{p} = \int_{-\infty}^{\infty} p g_n(p) dp = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 a_i r_i \quad (5.10)$$

のように変化する。また p の 2 乗平均値 $\overline{p^2}$ は

$$\overline{p^2} = \int_{-\infty}^{\infty} p^2 g_n(p) dp = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 a_i^2 \quad (5.11)$$

で与えられるので、局所出力の平均値からのずれの平均値 $\bar{p}$ の分散 σ_n^2 は

$$\sigma_n^2 = \overline{p^2} - \bar{p}^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 a_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 a_i r_i \right)^2 \quad (5.12)$$

から求められる。従って、種々の因子に対する局所出力の微係数に 2 次項を取り入れたときの出力の偏差 δ_p' は

$$\delta_p' = \bar{p} \pm \sigma_n \quad (5.13)$$

となるが、ここで (5.10) 式、(5.12) 式を使えば、 δ_p' は

$$\delta_p' \approx \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 a_i^2} + \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 a_i r_i \left[1 \mp \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 a_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 a_i^2}} \right] \quad (5.14)$$

で与えられる。(5.14) 式から明らかなように、出力偏差は二次の効果を考えると一次結合で求めたものに比べて、(5.14) 式の第 2 項の値だけ変化することが分る。

28 本 $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ クラスターの各リング燃料ピンについて、(5.14) 式の σ_i を $3\sigma_i$ におき換えて求めた出力偏差 $\hat{\delta}_p'$ を第 13 表に示した。第 13 表には (5.13) 式の各成分の他に、(5.14) 式の第 1 項で求まる一次結合による出力偏差の値も示してある。ただし、 a_i 、 r_i の値は、それぞれ燃料ピンに関する各因子の変動が、他リング出力への影響を及ぼさないとして求めてあるので、(3.11) 式を用いて導かれた偏差と (5.14) 式第 1 項とは若干異なっている。(5.13) 式および (5.14) 式によって求めた第 13 表の結果から二次の成分を考慮した出力偏差 $\hat{\delta}_p'$ の、一次項のみによる偏差 $\hat{\delta}_p$ に対する割合は、第 1 および第 2 リングでそれぞれ約 7%、第 3 リングで約 5% となる。このことから局所出力偏差の二次項による寄与は 7% 以内と考えられ、今回行った一次結合による計算手法でも求まる出力偏差は妥当な評価を与えるものと考えられる。

Table 12 Example of partial differential coefficient of local power on 28-pin fuel cluster

(1) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ fuel (Void fraction: 40 %)

Factor x_{ij}	$(\partial f_j / \partial x_{ij}) / P_c$ (%)			
	Ring No.	1st	2nd	3rd
Pellet diameter (mm)	1st	1.088	-0.489	-0.598
		1.088	-0.489	-0.598
	2nd	-0.602	2.353	-1.751
		-0.602	2.354	-1.752
	3rd	-0.872	-2.460	3.332
		-0.873	-2.465	3.338
Pellet density (g/cm ³)	1st	0.706	-0.321	-0.385
		0.713	-0.325	-0.388
	2nd	-0.426	1.535	-1.109
		-0.431	1.553	-1.122
	3rd	-0.610	-1.750	2.360
		-0.620	-1.780	2.400
Pu enrichment (wt%)	1st	6.419	-2.938	-3.480
		4.596	-2.181	-2.415
	2nd	-3.605	14.224	-10.620
		-2.707	10.294	-7.587
	3rd	-6.552	-18.526	25.078
		-5.190	-14.791	19.981
Isotope ratio of Pu (wt%)	1st	6.854	-2.795	-4.059
		6.919	-2.826	-4.093
	2nd	-3.292	14.773	-11.481
		-3.335	14.948	-11.613
	3rd	-6.837	-18.701	25.538
		-7.005	-19.157	26.161

(2) UO_2 fuel (Void fraction: 40 %)

(continued)

Factor x_{ij}	$(\partial f_j / \partial x_{ij}) / P_c$ (%)			
	Ring No.	1st	2nd	3rd
Pellet diameter (mm)	1st	1.144	-0.413	-0.731
		1.144	-0.413	-0.731
	2nd	-0.468	2.318	-1.849
		-0.468	2.318	-1.850
	3rd	-0.894	-2.282	3.175
		-0.895	-2.287	3.182
Pellet density (g/cm ³)	1st	0.782	-0.289	-0.493
		0.786	-0.290	-0.496
	2nd	-0.346	1.592	-1.245
		-0.349	1.603	-1.255
	3rd	-0.631	-1.647	2.278
		-0.640	-1.670	2.310
U enrichment (wt%)	1st	5.534	-1.917	-3.617
		5.570	-1.929	-3.641
	2nd	-2.151	11.336	-9.185
		-2.170	11.435	-9.265
	3rd	-4.412	-11.078	15.490
		-4.482	-11.257	15.739

Table 13 Effect of second order term on local power deviation of 28-pin
PuO₂-UO₂ cluster

Void fraction (%)	Fuel ring	$\hat{\delta}_p = \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 a_i^2 \right)^{1/2} / P_c$ (%)	$\bar{p} / P_c$ (%)	σ_n / P_c (%)	$\hat{\delta}_p'$ (%)	
					$(\bar{p} + \sigma_n) / P_c$	$(\bar{p} - \sigma_n) / P_c$
40	1st	±0.187	0.013	0.186	+0.200	-0.173
	2nd	±0.417	0.028	0.416	+0.444	-0.388
	3rd	±0.702	0.035	0.701	+0.736	-0.666
60	1st	±0.189	0.014	0.189	+0.203	-0.175
	2nd	±0.413	0.029	0.411	+0.441	-0.382
	3rd	±0.706	0.038	0.705	+0.743	-0.667
75	1st	±0.192	0.015	0.192	+0.207	-0.177
	2nd	±0.410	0.031	0.409	+0.440	-0.378
	3rd	±0.709	0.040	0.708	+0.748	-0.668

6. 結 論

「ふげん」に使用されている28本クラス燃料体において、製造・組立上の誤差を有する各部の因子に対する局所出力の感度係数をMETHUSELAHコードによって計算した。28本クラス燃料各部の製造・製作誤差と出力の感度係数とから、28本クラスに関する局所出力偏差が求まった。また、実証炉に使用予定の36本クラスならびに28本クラスにおける局所出力の感度係数を比較することから、36本クラス燃料体の局所出力偏差を予測することができた。これらの解析から次の事項が明らかになった。

1. 28本クラス燃料体の局所出力偏差は、ウラン燃料よりプルトニウム・ウラン混合燃料の方が40～60%大きい。
2. 熱流束の最大になる第3リング燃料ピンの出力偏差の最大値は、第3リングの平均出力に対して、プルトニウム・ウラン混合燃料で1.25%、ウラン燃料で0.75%となる。
3. 局所出力の感度係数の冷却材ボイド率依存性は小さく、ボイド率の40～75%の変化に対する局所出力偏差の冷却材ボイド率依存性は5%以下である。
4. 局所出力偏差の大きさは、ペレットについての因子に大きく依存しており、とりわけ富加度や同位体割合などの核燃料物質の組成に関する因子の寄与が80%以上を占める。
5. ペレットに関する因子に対する出力の感度係数は、おおむね28本クラス燃料体より36本クラス燃料体の方が小さいため、燃料製作精度が両者で同一である（絶対誤差が等しい）とすれば、36本クラス燃料体の局所出力偏差は28本クラス燃料体より小さくなる。
6. 製造・組立誤差をもつ因子の平均値からの偏差と局所出力の平均値からのずれの関係式において、28本クラス燃料体に関する局所出力偏差への2次項の影響を考慮しても、その値は7%以下にとどまった。

参 考 文 献

- (1) A_{LPIAR}, A. : AEEW-R 135, (1963).
- (2) 渡 孔男, 他 : 新型転換炉原型炉 "ふげん" 運転余裕度の検討(I), ZJ 302 77-18, (1977).
- (3) 菅原 悟, 中田清兵衛: 圧力管型原子炉熱水力計算コードHAPI-I の概要と入力方法, ZN 941 75-68, (1975).
- (4) Rowe. D.S : BNWL-3 PT1, (1967).
- (5) 日本機械学会: 蒸気表, (1968).
- (6) 新型転換炉原型炉燃料集合体検査成績書, (1977).
- (7) 伏見 康治: 確率論および統計論, (1942).

謝 辞

本解析を遂行するにあたり多大の御指導をしていただきました小堀哲雄室長, 北原種道室長ならびに八谷雄喜室長に深く感謝の意を表します。

入力データの作成及び結果の整理においてセンチュリー・リサーチ・センタ(株)の鷹見益夫氏及び針山芳晴氏の御協力を得ました, ここに感謝いたします。

付録1. 28本PuO₂-UO₂クラスタ格子に関する入力データ

```

INITIATE
* FUGEN MCPR. PU02-U02 STANDARD-CASE
*      VOID=40 B10=6PPM
DIAMET(1.00) 11.268
TEMPER(1.00) 285.0
DIAMET(1.11) 1.452
TEMPER(1.11) 825.0
DENSIT(1.11) 9.683
INGRED(1.11) 8 18 0.6244 20 86.5878 21 0.6745 22 0.1816 23 0.0275 $
              34 0.0056 2 11.8636 6 0.0750
DIAMET(1.12) 1.665
TEMPER(1.12) 320.0
DENSIT(1.12) 6.833
INGRED(1.12) 11 3 94.05259 5 0.12219 6 1.09443 7 2.20822 $
              8 0.10637 9 0.02037 10 1.41013 11 0.84415 $
              12 0.00163 15 0.10595 55 0.01398
TEMPER(1.10) 285.0
DENSIT(1.10) 0.460
INGRED(1.10) 2 1 11.19 2 88.81
DIAMET(1.21) 1.454
TEMPER(1.21) 930.0
DENSIT(1.21) 9.653
INGRED(1.21) 8 18 0.6244 20 86.5878 21 0.6745 22 0.1816 23 0.0275 $
              34 0.0056 2 11.8636 6 0.0750
DIAMET(1.22) 1.665
TEMPER(1.22) 320.0
DENSIT(1.22) 6.833
INGRED(1.22) 11 3 95.06442 5 0.09123 6 0.85437 7 1.6634 $
              8 0.07942 9 0.01521 10 1.4253 11 0.65585 $
              12 0.00122 15 0.09214 55 0.01044
TEMPER(1.20) 285.0
DENSIT(1.20) 0.438
INGRED(1.20) 2 1 11.19 2 88.81
DIAMET(1.31) 1.457
TEMPER(1.31) 1135.0
DENSIT(1.31) 9.595
INGRED(1.31) 8 18 0.6265 20 86.8807 21 0.4587 22 0.1235 23 0.0187 $
              34 0.0038 2 11.8589 6 0.0751
DIAMET(1.32) 1.665
TEMPER(1.32) 320.0
DENSIT(1.32) 6.833
INGRED(1.32) 11 3 93.0084 5 0.15524 6 1.38189 7 2.7499 $
              8 0.13213 9 0.02555 10 1.39447 11 1.04463 $
              12 0.01145 15 0.11945 55 0.01241
TEMPER(1.30) 285.0
DENSIT(1.30) 0.460
INGRED(1.30) 2 1 11.19 2 88.81
DIAMET(2.00) 11.795
TEMPER(2.00) 285.0
DENSIT(2.00) 0.46
INGRED(2.00) 2 1 11.19 2 88.81
DIAMET(3.00) 12.693
TEMPER(3.00) 250.0

```

DENSIT(3.00) 6.481
 INGRED(3.00) 3 3 97.14 6 0.2678 8 2.6
 DIAMET(4.00) 15.634
 TEMPER(4.00) 170.0
 AIR GAP (4.00)
 DIAMET(5.00) 16.066
 TEMPER(5.00) 50.0
 DENSIT(5.00) 6.566
 INGRED(5.00) 6 3 97.946 6 0.144 7 0.057 10 1.584 11 0.111 15 0.029804
 DIAMET(6.00) 27.0811
 TEMPER(6.00) 60.0
 DENSIT(6.00) 1.091
 INGRED(6.00) 4 1 0.02 2 79.903 38 20.074 29 0.0006
 FIVE GROUP
 ARRAY TYPE 4 3 1.321 2.953 4.752 4 8 16
 BUCKLING 0.000213
 RESONANCE 9 6 7 11 15 18 20 21 22 23
 DG LAYER 1 0 2
 SPECTRUM 4 3 1 2 3
 SPECTRUM 5 2 5 6
 EPSILON 0.00001
 ITERATE 5
 GEOMETRY 4 6 8 4 2 2 2 10
 RARE REGION (2.00)
 RARE REGION (3.00)
 RARE REGION (5.00)
 RECORD 36,2,20,0.58830,4,20,1.45646,5,20,0.53940,20,18,2.43, \$
 20,21,2.87099,20,23,2.96899,108,2,1.0004,108,3,0.98434, \$
 108,5,0.99258,108,11,2.4268,108,12,2.88799,108,13,3.10404
 ADDPAR 1,1,0,0
 BEGIN CALCULATION

CASE NUMBER 2

* FUEL INGREDIENT PU239/PU240 , U235/U238 , Pu-FISSILE
 INGRED(1.11) 8 18 0.6244 20 86.5878 21 0.6592 22 0.1969 23 0.0275 \$
 34 0.0056 2 11.8636 6 0.0750
 BEGIN CAL

CASE NUMBER 3

INGRED(1.11) 8 18 0.6244 20 86.5878 21 0.6898 22 0.1663 23 0.0275 \$
 34 0.0056 2 11.8636 6 0.0750
 BEGIN CAL

CASE NUMBER 4

INGRED(1.11) 8 18 0.6112 20 86.6010 21 0.6745 22 0.1816 23 0.0275 \$
 34 0.0056 2 11.8636 6 0.0750
 BEGIN CAL

CASE NUMBER 5

INGRED(1.11) 8 18 0.6376 20 86.5746 21 0.6745 22 0.1816 23 0.0275 \$
 34 0.0056 2 11.8636 6 0.0750
 BEGIN CAL

CASE NUMBER 6

INGRED(1.11) 8 18 0.6245 20 86.6092 21 0.6602 22 0.1751 23 0.0270 \$
34 0.0054 2 11.8636 6 0.0750

BEGIN CAL

CASE NUMBER 7

INGRED(1.11) 8 18 0.6242 20 86.5650 21 0.6940 22 0.1841 23 0.0284 \$
34 0.0057 2 11.8636 6 0.075

BEGIN CAL

CASE NUMBER 8

INGRED(1.11) 8 18 0.6244 20 86.5878 21 0.6745 22 0.1816 23 0.0275 \$
34 0.0056 2 11.8636 6 0.0750
INGRED(1.21) 8 18 0.6244 20 86.5878 21 0.6592 22 0.1969 23 0.0275 \$
34 0.0056 2 11.8636 6 0.0750

BEGIN CAL

CASE NUMBER 9

INGRED(1.21) 8 18 0.6244 20 86.5878 21 0.6898 22 0.1663 23 0.0275 \$
34 0.0056 2 11.8636 6 0.0750

BEGIN CAL

CASE NUMBER 10

INGRED(1.21) 8 18 0.6112 20 86.6010 21 0.6745 22 0.1816 23 0.0275 \$
34 0.0056 2 11.8636 6 0.0750

BEGIN CAL

CASE NUMBER 11

INGRED(1.21) 8 18 0.6376 20 86.5746 21 0.6745 22 0.1816 23 0.0275 \$
34 0.0056 2 11.8636 6 0.075

BEGIN CAL

CASE NUMBER 12

INGRED(1.21) 8 18 0.6245 20 86.6092 21 0.6602 22 0.1751 23 0.0270 \$
34 0.0054 2 11.8636 6 0.0750

BEGIN CAL

• CASE NUMBER 13

INGRED(1.21) 8 18 0.6242 20 86.5650 21 0.6940 22 0.1841 23 0.0284 \$
34 0.0057 2 11.8636 6 0.075

BEGIN CAL

CASE NUMBER 14

INGRED(1.21) 8 18 0.6244 20 86.5878 21 0.6745 22 0.1816 23 0.0275 \$
34 0.0056 2 11.8636 6 0.0750
INGRED(1.31) 8 18 0.6265 20 86.8807 21 0.4434 22 0.1388 23 0.0187 \$
34 0.0038 2 11.8589 6 0.0751

BEGIN CAL

CASE NUMBER 15

INGRED(1.31) 8 18 0.6265 20 86.8807 21 0.4740 22 0.1082 23 0.0187 \$
34 0.0038 2 11.8589 6 0.0751

BEGIN CAL

CASE NUMBER 16

INGRED(1.31) 8 18 0.6132 20 86.8940 21 0.4587 22 0.1235 23 0.0187 \$
34 0.0038 2 11.8589 6 0.0751

BEGIN CAL

CASE NUMBER 17

INGRED(1.31) 8 18 0.6398 20 86.8674 21 0.4587 22 0.1235 23 0.0187 \$
34 0.0038 2 11.8589 6 0.0751

BEGIN CAL

CASE NUMBER 18

INGRED(1.31) 8 18 0.6266 20 86.9001 21 0.4453 22 0.1181 23 0.0182 \$
34 0.0036 2 11.8589 6 0.0751

BEGIN CAL

CASE NUMBER 19

INGRED(1.31) 8 18 0.6264 20 86.8602 21 0.4757 22 0.1262 23 0.0195 \$
34 0.0039 2 11.8589 6 0.0751

BEGIN CAL

付録2. 36本クラスタ格子に関する入力データ

CASE NUMBER 1

MCPR 36PINS (2.04/2.04/1.14)PU02 24LP 40%VOID 6PPM

INITIATE

DIAMET(1.00) 1.054
 TEMPER(1.00) 285.
 DENSIT(1.00) 0.742
 INGRED(1.00) 2 1 11.1901 2 88.8099
 DIAMET(2.00) 1.454
 TEMPER(2.00) 285.
 DENSIT(2.00) 6.566
 INGRED(2.00) 5 3 98.25 6 0.14 7 0.06 10 1.45 11 0.10
 DIAMET(3.00) 1.9399
 TEMPER(3.00) 285.
 DENSIT(3.00) 0.467
 INGRED(3.00) 2 1 11.1901 2 88.8099
 DIAMET(4.00) 11.413
 TEMPER(4.00) 285.
 DIAMET(4.11) 1.25
 TEMPER(4.11) 575.
 DENSIT(4.11) 9.808
 INGRED(4.11) 7 18 0.6472 20 85.7547 21 1.0370 22 0.4309 \$
 23 0.2524 34 0.0724 2 11.8054
 DIAMET(4.12) 1.4321
 TEMPER(4.12) 320.
 DENSIT(4.12) 6.833
 INGRED(4.12) 11 3 94.05259 5 0.12219 6 1.09443 7 2.20822 \$
 8 0.10637 9 0.02037 10 1.41013 11 0.84415 \$
 12 0.00163 15 0.10595 55 0.01398
 TEMPER(4.10) 285.
 DENSIT(4.10) 0.467
 INGRED(4.10) 2 1 11.1901 2 88.8099
 DIAMET(4.21) 1.25
 TEMPER(4.21) 850.
 DENSIT(4.21) 9.810
 INGRED(4.21) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501
 DIAMET(4.22) 1.4321
 TEMPER(4.22) 320.
 DENSIT(4.22) 6.833
 INGRED(4.22) 11 3 95.06442 5 0.09123 6 0.85437 7 1.6634 \$
 8 0.07942 9 0.01521 10 1.4253 11 0.65585 \$
 12 0.00122 15 0.09214 55 0.01044
 TEMPER(4.20) 285.
 DENSIT(4.20) 0.460
 INGRED(4.20) 2 1 11.1901 2 88.8099
 DIAMET(4.31) 1.25
 TEMPER(4.31) 1130.
 DENSIT(4.31) 9.811
 INGRED(4.31) 7 18 0.6109 20 86.5253 21 0.5853 22 0.2432 \$
 23 0.1425 34 0.0409 2 11.8519
 DIAMET(4.32) 1.4321
 TEMPER(4.32) 320.

DENSIT(4.32) 6.833
 INGRED(4.32) 11 3 93.0084 5 0.15524 6 1.38189 7 2.7499 \$
 8 0.13213 9 0.02555 10 1.39447 11 1.04463 \$
 12 0.01145 15 0.11945 55 0.01241
 TEMPER(4.30) 285.
 DENSIT(4.30) 0.516
 INGRED(4.30) 2 1 11.1901 2 88.8099
 DIAMET(5.00) 11.813
 TEMPER(5.00) 285.
 DENSIT(5.00) 0.516
 INGRED(5.00) 2 1 11.1901 2 88.8099
 RARE REGION(5.00)
 DIAMET(6.00) 12.678
 TEMPER(6.00) 250.
 DENSIT(6.00) 6.481
 INGRED(6.00) 3 3 97.14 6 0.2678 8 2.6
 RARE REGION(6.00)
 DIAMET(7.00) 15.637
 TEMPER(7.00) 170.
 AIR GAP(7.00)
 DIAMET(8.00) 16.042
 TEMPER(8.00) 50.
 DENSIT(8.00) 6.566
 INGRED(8.00) 6 3 97.946 6 0.144 7 0.057 10 1.584 11 0.111 15 0.029804
 RARE REGION(8.00)
 DIAMET(9.00) 27.0811
 TEMPER(9.00) 60.
 DENSIT(9.00) 1.091
 INGRED(9.00) 4 38 20.074 1 0.020 2 79.903 29 0.0030
 ARRAY TYPE 4 3 1.686 3.226 4.8535 6 12 18
 SPECTRUM 4 5 1 2 3 4 5
 SPECTRUM 5 4 6 7 8 9
 GEOMETRY 2 1 1 5 5 5 2 2 2 2 10
 RESONANCE 9 6 7 11 15 18 20 21 22 23
 BUCKLING 0.00100
 FIVE GROUP
 DG LAYER 1,0,2
 EPSILON 0.0001
 RECORD 36,2,20,0.58830,4,20,1.45646,5,20,0.53940,20,18,2.43,\$
 20,21,2.87099,20,23,2.96899,108,2,1.0004,108,3,0.98434,\$
 108,5,0.99258,108,11,2.42680,108,12,2.88799,108,13,3.10404
 FINAL OUTPUT 1,171,171
 ITERATE 5
 BEGIN CAL

CASE NUMBER 2

INGRED(4.11) 7 18 0.6009 20 85.7195 21 1.0576 22 0.4394 \$
 23 0.2574 34 0.07939 2 11.8513
 BEGIN CAL

CASE NUMBER 3

INGRED(4.11) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501
 INGRED(4.21) 7 18 0.6472 20 85.7547 21 1.0370 22 0.4309 \$
 23 0.2524 34 0.0724 2 11.8054
 BEGIN CAL

CASE NUMBER 4

INGRED(4.21) 7 18 0.6009 20 85.7195 21 1.0576 22 0.4394 \$
 23 0.2574 34 0.0739 2 11.8513

BEGIN CAL

CASE NUMBER 5

INGRED(4.11) 7 18 0.6472 20 85.7547 21 1.0370 22 0.4309 \$
 23 0.2524 34 0.0724 2 11.8054

INGRED94.21) 7 18 0.6472 20 85.7547 21 1.0370 22 0.4309 \$
 23 0.2524 34 0.0724 2 11.8054

BEGIN CAL

CASE NUMBER 6

INGRED(4.11) 7 18 0.6009 20 85.7195 21 1.0576 22 0.4394 \$
 23 0.2574 34 0.0739 2 11.8513

INGRED(4.21) 7 18 0.6009 20 85.7195 21 1.0576 22 0.4394 \$
 23 0.2574 34 0.0739 2 11.8513

BEGIN CAL

CASE NUMBER 7

INGRED(4.11) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

INGRED(4.21) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

INGRED(4.31) 7 18 0.6067 20 86.5454 21 0.5760 22 0.2394 \$
 23 0.1402 34 0.0402 2 11.8521

BEGIN CAL

CASE NUMBER 8

INGRED(4.31) 7 18 0.6065 20 86.5137 21 0.5945 22 0.2470 \$
 23 0.1447 34 0.0415 2 11.8521

BEGIN CAL

CASE NUMBER 9

INGRED(4.11) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0318 22 0.4504 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

INGRED(4.31) 7 18 0.6109 20 86.5253 21 0.5853 22 0.2432 \$
 23 0.1425 34 0.0409 2 11.8519

BEGIN CAL

CASE NUMBER 10

INGRED(4.11) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0624 22 0.4198 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

BEGIN CAL

CASE NUMBER 11

INGRED(4.11) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

INGRED(4.21) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0318 22 0.4504 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

BEGIN CAL

CASE NUMBER 12

INGRED(4.21) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0624 22 0.4198 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

BEGIN CAL

CASE NUMBER 13

INGRED(4.11) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0318 22 0.4504 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

INGRED(4.21) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0318 22 0.4504 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

BEGIN CAL

CASE NUMBER 14

INGRED(4.11) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0624 22 0.4198 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

INGRED(4.21) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0624 22 0.4198 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

BEGIN CAL

CASE NUMBER 15

INGRED(4.11) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

INGRED(4.21) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

INGRED(4.31) 7 18 0.6109 20 86.5253 21 0.5700 22 0.2585 \$
 23 0.1425 34 0.0409 2 11.8519

BEGIN CAL

CASE NUMBER 16

INGRED(4.31) 7 18 0.6109 20 86.5253 21 0.6006 22 0.2279 \$
 23 0.1425 34 0.0409 2 11.8519

BEGIN CAL

CASE NUMBER 17

INGRED(4.11) 7 18 0.6023 20 85.7372 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.0731 2 11.8501

INGRED(4.31) 7 18 0.6109 20 86.5253 21 0.5853 22 0.2432 \$
 23 0.1425 34 0.0409 2 11.8519

BEGIN CAL

CASE NUMBER 18

INGRED(4.11) 7 18 0.6287 20 85.7108 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

BEIGN CAL

CASE NUMBER 19

INGRED(4.11) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

INGRED(4.21) 7 18 0.6023 20 85.7372 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.0731 2 11.8501

BEGIN CAL

CASE NUMBER 20

INGRED(4.21) 7 18 0.6287 20 85.7108 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

BEGIN CAL

CASE NUMBER 21

INGRED(4.11) 7 18 0.6023 20 85.7372 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.0731 2 11.8501
 INGRED(4.21) 7 18 0.6023 20 85.7372 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.0731 2 11.8501

BEGIN CAL

CASE NUMBER 22

INGRED(4.11) 7 18 0.6287 20 85.7108 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501
 INGRED(4.21) 7 18 0.6287 20 85.7108 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501

BEGIN CAL

CASE NUMBER 23

INGRED(4.11) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501
 INGRED(4.21) 7 18 0.6155 20 85.7240 21 1.0471 22 0.4351 \$
 23 0.2549 34 0.07310 2 11.8501
 INGRED(4.31) 7 18 0.5977 20 86.5385 21 0.5853 22 0.2432 \$
 23 0.1425 34 0.0409 2 11.8519

BEGIN CAL

CASE NUMBER 24

INGRED(4.31) 7 18 0.6241 20 86.5121 21 0.5853 22 0.2432 \$
 23 0.1425 34 0.0409 2 11.8519

BEGIN CAL

付録3. 局所出力の偏差の計算コードとその計算結果例

```

      ¥JOB          ID-LPDEV

      ¥EXC      FTC

1      DIMENSION TITLE(10),A1H(3,10,3),A1L(3,10,3),A2H(3,15),A2L(3,15)
2      DIMENSION A1(3,10,3),A2(3,15),P(3)
3      DIMENSION SIGX(3,15),SIG(3),DX(15,3)
4      1111 READ(5,101) TITLE
5      IF(TITLE(1).EQ.8H¥STOP      ) GO TO 999
6      READ(5,102) N
7      NN=N-3
8      DO 1 J=1,N
9      IF(J.GT.NN) GO TO 3
10     DO 2 K=1,2
11     READ(5,103) (A1H(I,J,K),A1L(I,J,K),I=1,3)
12     DO 2 I=1,3
13     A1(I,J,K)=(A1H(I,J,K)+A1L(I,J,K))/2.0
14     2 CONTINUE
15     GO TO 1
16     3 READ(5,103) (A2H(I,J),A2L(I,J),I=1,3)
17     DO 1 I=1,3
18     A2(I,J)=(A2H(I,J)+A2L(I,J))/2.0
19     1 CONTINUE
20     DO 5 J=1,N
21     READ(5,103) (DX(J,I),I=1,3)
22     5 CONTINUE
23     DO 6 I=1,3
24     P(I)=1.0
25     6 CONTINUE
26     2222 WRITE(6,201) TITLE
27     WRITE(6,202)
28     DO 7 J=1,N
29     DO 7 I=1,3
30     A2(I,J)=A2(I,J)/P(I)
31     DO 7 K=1,3
32     A1(I,J,K)=A1(I,J,K)/P(I)
33     7 CONTINUE
34     DO 11 J=1,N
35     IF(J.GT.NN) GO TO 13
36     DO 12 K=1,3
37     WRITE(6,203) (J,K,(A1(I,J,K),I=1,3))
38     12 CONTINUE
39     GO TO 11
40     13 WRITE(6,204) (J,(A2(I,J),I=1,3))
41     11 CONTINUE
42     WRITE(6,205)
43     DO 15 J=1,N
44     WRITE(6,204) (J,(DX(J,I),I=1,3))
45     15 CONTINUE
46     DO 21 I=1,3
47     SIG(I)=0.0
48     DO 21 J=1,N
49     SIGX(I,J)=0.0
50     21 CONTINUE

```

```

51      DO 31 I=1,3
52      DO 31 J=1,N
53      IF(J.GT.NN) GO TO 33
54      DO 32 K=1,3
55      SIGX(I,J)=SIGX(I,J)+(A1(I,J,K)*DX(J,K))**2
56      32 CONTINUE
57      SIGX(I,J)=SQRT(SIGX(I,J))
58      GO TO 34
59      33 SIGX(I,J)=ABS(A2(I,J)*DX(J,I))
60      34 SIG(I)=SIG(I)+SIGX(I,J)**2
61      31 CONTINUE
62      DO 35 I=1,3
63      SIG(I)=SQRT(SIG(I))
64      35 CONTINUE
65      WRITE(6,301)
66      DO 41 J=1,N
67      WRITE(6,302) (J,(SIGX(I,J),I=1,3))
68      41 CONTINUE
69      WRITE(6,303) (SIG(I),I=1,3)
70      IF(P(1).NE.1.0) GO TO 8888
71      READ(5,103) (P(I),I=1,3)
72      GO TO 2222
73      8888 GO TO 1111
74      101 FORMAT(10A8)
75      102 FORMAT(I3)
76      103 FORMAT(6F10.5)
77      201 FORMAT(1H1///10X,10A8,/)
78      202 FORMAT(/10X,' N J',4X,'GRAD-1',4X,'GRAD-2',4X,'GRAD-3')
79      203 FORMAT(/10X,I3,I3,3F10.4)
80      204 FORMAT(/10X,I3,3X,3F10.4)
81      205 FORMAT(1H1///10X,' N',8X,'DX-1',6X,'DX-2',6X,'DX-3')
82      301 FORMAT(1H1/10X,' N',4X,'SIGX-1',4X,'SIGX-2',4X,'SIGX-3',/)
83      302 FORMAT(/10X,I3,3F10.4,/)
84      303 FORMAT(/10X,'SIG',3F10.4)
85      999 STOP
86      END

¥DATA
¥LSTACK      1,3
¥TLDR      FTC
¥DKEND

```

THREE TIMES STANDARD DEVIATION $3\sigma_{ij}$

N	DX-1	DX-2	DX-3	
1	0.0444	0.0444	0.0444	Pellet diameter (mm)
2	0.1257	0.1257	0.1257	Pellet density (g/cm ³)
3	0.0180	0.0180	0.0180	Pu enrichment (wt%)
4	0.0153	0.0153	0.0152	Isotope ratio of ²³⁹ Pu (wt%)
5	0.0132	0.0132	0.0133	Isotope ratio of ²³⁵ U (wt%)
6	0.0302	0.0403	0.0302	Sheath diameter (mm)
7	0.1620	0.3480	0.7800	Fuel-ring diameter (mm)
8	1.1820	1.1820	1.1820	Inner dia. of coolant layer (mm)
9	0.6300	0.6300	0.6300	Inner dia. of pressure tube (mm)
10	0.2100	0.2100	0.2100	Outer dia. of calandria tube (mm)

(1)***LOCAL POWER DEVIATION 28-RODS PU02-U02 FUEL 24CM-PITCH 40% VOID

SENSITIVITY COEFFICIENT OF LOCAL POWER $|\partial f_j / \partial x_{ij}| / P_c$

N	J	GRAD-1	GRAD-2	GRAD-3	
1	1	1.0875	-0.4893	-0.5981	Pellet diameter
1	2	-0.6022	2.3537	-1.7514	
1	3	-0.8724	-2.4627	3.3352	
2	1	0.7093	-0.3230	-0.3863	Pellet density
2	2	-0.4286	1.5441	-1.1153	
2	3	-0.6149	-1.7650	2.3800	
3	1	5.5073	-2.5595	-2.9477	Pu enrichment
3	2	-3.1555	12.2590	-9.1034	
3	3	-5.8712	-16.6581	22.5294	
4	1	6.8867	-2.8105	-4.0761	Isotope ratio of Pu
4	2	-3.3132	14.8604	-11.5472	
4	3	-6.9207	-18.9288	25.8496	
5	1	3.3715	-1.3217	-2.0499	Isotope ratio of U
5	2	-1.6203	7.4352	-5.8148	
5	3	-3.7691	-10.2103	13.9795	
6	1	-0.1119	-0.0541	0.1659	Sheath diameter
6	2	0.0016	-0.0391	0.0375	
6	3	0.0748	0.1766	-0.2514	
7	1	0.0486	0.0464	-0.0950	Fuel-ring diameter
7	2	0.0676	0.0823	-0.1498	
7	3	0.0189	0.0359	-0.0549	
8		-0.0342	-0.1005	0.1348	Inner dia. of coolant layer
9		0.0048	0.0320	-0.0369	Inner dia. of pressure tube
10		0.0195	0.0192	-0.0386	Outer dia. of calandria tube

LOCAL POWER DEVIATION $\hat{\delta}_{pj}/P_c$ & ITS COMPONENTS $\hat{\delta}_{pj}^1/P_c$

N	SIGX-1	SIGX-2	SIGX-3	
1	0.0674	0.1528	0.1694	Pellet diameter
2	0.1297	0.2976	0.3339	Pellet density
3	0.1556	0.3751	0.4406	Pu enrichment
4	0.1575	0.3698	0.4362	Isotope ratio of ^{239}Pu
5	0.0703	0.1683	0.2025	Isotope ratio of ^{235}U
6	0.0041	0.0058	0.0092	Sheath diameter
7	0.0288	0.0407	0.0692	Fuel-ring diameter
8	0.0405	0.1188	0.1593	Inner dia. of coolant layer
9	0.0030	0.0202	0.0232	Inner dia. of pressure tube
10	0.0041	0.0040	0.0081	Outer dia. of calandria tube
SIG	0.2790	0.6587	0.7723	$\hat{\delta}_{pj} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{\delta}_{pj}^i)^2}$

(2)***LOCAL POWER DEVIATION 28-RODS PUO2-UO2 FUEL 24CM-PITCH 40% VOID

SENSITIVITY COEFFICIENT OF LOCAL POWER $|\partial f_j / \partial x_{ij}| / P_{j0}$

N	J	GRAD-1	GRAD-2	GRAD-3	
1	1	9.9684	-1.8550	-0.9538	Pellet diameter
1	2	-5.5202	8.9223	-2.7929	
1	3	-7.9963	-9.3357	5.3185	
2	1	6.5018	-1.2244	-0.6161	Pellet density
2	2	-3.9290	5.8533	-1.7786	
2	3	-5.6361	-6.6909	3.7953	
3	1	50.4798	-9.7026	-4.7006	Pu enrichment
3	2	-28.9235	46.4708	-14.5167	
3	3	-53.8148	-63.1469	35.9264	
4	1	63.1228	-10.6539	-6.4999	Isotope ratio of ^{239}Pu
4	2	-30.3680	56.3321	-18.4136	
4	3	-63.4349	-71.7545	41.2209	
5	1	30.9033	-5.0100	-3.2689	Isotope ratio of ^{235}U
5	2	-14.8520	28.1852	-9.2726	
5	3	-34.5472	-38.7047	22.2923	
6	1	-1.0256	-0.2049	0.2646	Sheath diameter
6	2	0.0147	-0.1482	0.0598	
6	3	0.6852	0.6694	-0.4009	
7	1	0.4450	0.1759	-0.1515	Fuel-ring diameter
7	2	0.6192	0.3118	-0.2390	
7	3	0.1732	0.1359	-0.0875	
8		-0.3139	-0.3810	0.2150	Inner dia. of coolant layer
9		0.0435	0.1213	-0.0588	Inner dia. of pressure tube
10		0.1787	0.0726	-0.0616	Outer dia. of calandria tube

LOCAL POWER DEVIATION $\hat{\delta}_{pj}/P_{jo}$ & ITS COMPONENTS $\hat{\delta}_{pj}^i/P_{jo}$

N	SIGX-1	SIGX-2	SIGX-3	
1	0.6181	0.5793	0.2701	Pellet diameter
2	1.1890	1.1280	0.5325	Pellet density
3	1.4265	1.4220	0.7026	Pu enrichment
4	1.4433	1.4019	0.6956	Isotope ratio of ^{239}Pu
5	0.6447	0.6378	0.3230	Isotope ratio of ^{235}U
6	0.0373	0.0220	0.0147	Sheath diameter
7	0.2644	0.1543	0.1103	Fuel-ring diameter
8	0.3711	0.4503	0.2541	Inner dia. of coolant layer
9	0.0274	0.0764	0.0370	Inner dia. of pressure tube
10	0.0375	0.0152	0.0129	Outer dia. of calandria tube
SIG	2.5575	2.4971	1.2316	$\hat{\delta}_{pj} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{\delta}_{pj}^i)^2}$