

二色混合型クラスタ燃料における 局所出力ピーキング係数の測定

箔放射化法による測定

1975年5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)

1975年 5 月

二色混合型クラスタ燃料における 局所出力ピーキング係数の測定

箔放射化法による測定

報告者 仁 紫 明 人*
若 林 利 男*
戸 村 和 二*
八 谷 雄 喜*

期 間 1975年3月～1975年5月

目 的 二色混合型クラスタ燃料の局所出力ピーキング係数を箔放射化法により測定し、ピーキングが低減されることを実証する。またこの結果を設計コードN \bar{O} AH-IIと比較し、計算精度を評価する。

要 旨 内側2層を0.87w/o PuO₂-UO₂、外側を0.54w/o PuO₂-UO₂とした2色混合型クラスタ燃料9体を炉心中央に、そのまわりに1.2w/o UO₂クラスタ燃料を、格子間隔22.5cm・冷却材ボイド率0%のDCA炉心に装荷した。この中心0チャンネル・クラスタの各層燃料棒内に挿入された濃縮ウラン箔とプルトニウム箔を照射後棒内から取り出し、箔内に生じた核分裂生成物からの γ 線を測定し、得られた比放射能分布から、2色混合型燃料の局所ピーキング係数を求めた。今回の箔放射化法による二色混合型クラスタ燃料の局所出力ピーキング係数<LPF>は

$$\langle \text{LPF} \rangle = 1.08 \pm 0.02$$

となった。この結果は0.54w/oまたは0.87w/o PuO₂-UO₂の単色クラスタ燃料より大巾に改善されている。格子設計コードN \bar{O} AH-IIによる<LPF>の計算値は1.11となり2.8%過大評価していることがわかった。この計算誤差の原因は、²³⁹Puの共鳴吸収が正確に取り扱われていない、と推論される。

*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、竹下徳人、福村信男、仁紫明人、飯島一敬、浅野雄一郎、戸村和二、相原永史、米田平（現電発）、平山卓、若林利男、小綿泰樹、磯村和利、菅原昇三、市原泉、大塚剛宏（'75年4月から）、草別幸夫（'75年4月から）、皆月功（'75年5月から）

May 1975

Decrease in Power Peaking in a Cluster
of Different Enrichment Fuel Pins

Measurement with Foil Activation Method

Akito NISHI*
Toshio WAKABAYASHI*
Katsuji TOMURA*
Yuuki HACHIYA*

Abstract

In order to study feasibility of the decreasing local power peaking factor, a special type of cluster was assembled by arranging 0.87% enriched $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ fuel pins in the inner two layers and 0.54% pins in the outer, among three concentric layers of a cluster. Nine of such clusters with H_2O coolant (0% voidage) were loaded in the central region of DCA core of 22.5 cm lattice pitch and 1.2% enriched UO_2 fuel clusters in the surrounding region. Measurement was made in the central channel (fuel cluster) of the core.

In contrast to the usual method of measuring local power peaking factor <LPF> by direct γ -ray scanning of fuel pins, power contribution from each nuclei ^{235}U of ^{239}Pu has been specified by present foil activation method using high-enriched uranium and plutonium foils. The resultant factor <LPF> of the different enrichment fuel pins' cluster was obtained as follows.

$$\langle \text{LPF} \rangle = 1.08 \pm 0.02$$

This value is favorably less than that of the ordinary uniform arrangement cluster of 0.54% or 0.87% $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ fuel pins.

Calculational value by NOAH-II code is 1.11 and the value is overestimated by 2.8% of the experimental one. This

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

discrepancy is explained due to little dependence of ^{239}Pu absorption cross section on thermal neutron spectrum in the NOAH-II calculation, because in the present experiment it was revealed that the cross section (in the form of ratio of ^{239}Pu to ^{235}U fissions) depends largely on thermal neutron energy spectrum.

目 次

1. 目 的	1
2. 測定原理	2
2.1 局所出力ピーキング係数 <LPF> の定義とその導出	2
2.2 測定方法	3
3. 実 験	5
3.1 実験体系	5
3.2 箱の照射条件	5
3.3 ^{235}U と ^{239}Pu の核分裂率の計測	5
4. 結果と検討	6
4.1 高さ補正	6
4.2 $P_{49}(t)$ による補正	6
4.3 測定結果	6
4.4 測定精度	6
4.5 NOAH-II による計算	7
4.6 結果の考察	8
5. 結 論	10
謝 辞	10
参考文献	10
附録 I NOAH-II 入力定数	19

1. 目 的

クラスタ型燃料中では、熱中性子束に対する自己吸収が大きく、出力ピーキング・ファクターが大きな値を示すのが一つの特徴となっている。これを低減、改善することが発電用原子炉燃料として使用されるための重要な条件の一つである。

今回DCA実験において、クラスタ燃料の内側2層を0.87w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 、外側を0.54w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ とした2色混合型燃料を組み立て、クラスタ燃料にくらべてピーキングが低減されることを実証する。またこの実験結果は格子設計コードの計算精度の確認を行い実際の燃料を設計する際に役立てられる。

ピーキングの測定は、一般に燃料ピン自身のF.P.による γ 線強度を直接スキヤニングして行なわれている¹⁾。そこで、この方法と独立した今回の箔放射化法による測定によって、従来から行なわれている燃料ピン自身のスキヤニング法の測定手法、精度等の評価検討が可能になる。また<LPF>測定の際得られるマイクロパラメータの一つ δ_{25}^{49} は、熱領域附近の中性子スペクトル変化の影響を強く受ける²⁾ので、燃料ピン位置依存の δ_{25}^{49} を測定することは混合型燃料格子の炉物理現象の解明に役立つ。またこの関係の解明は<LPF>の計算手法、精度を評価検討する上でも重要である。

2. 測定原理

2.1 局所出力ピーキング係数 <LPF> の定義とその導出

クラスタ燃料を使用する格子内の局所出力ピーキング係数 <LPF> は一般に燃料集合体の平均燃料棒出力に対するピーキングのある燃料棒出力の比で定義される。今回の実験に使用した3層構造28本の二色混合型クラスタ燃料 (Fig. 2 参照) の場合には、第3層目の燃料棒にピーキングがあるので <LPF> を下記の <LPF>₃ で定義する。

$$\langle \text{LPF} \rangle_3 \equiv \frac{P_3}{(4P_1 + 8P_2 + 16P_3)/28} \left(= \frac{P_3}{(P_1 + 2P_2 + 4P_3)/7} \right) \quad (1)$$

(1)式における P_1, P_2, P_3 は各層の1本当りの出力でその係数 (4, 8, 16) は燃料棒の本数である。ここで熱源として ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu による核分裂のみを考慮すると

$$P_i \propto K^{26}(N^{25} \sigma_f^{26} \phi)_i + K^{28}(N^{28} \sigma_f^{28} \phi)_i + K^{49}(N^{49} \sigma_f^{49} \phi)_i + K^{41}(N^{41} \sigma_f^{41} \phi)_i \quad (2)$$

但し、 i : クラスタの何層目かを示すインデックス。

$K^{26}, K^{28}, K^{49}, K^{41}$ は $^{235}\text{U}, ^{238}\text{U}, ^{239}\text{Pu}, ^{241}\text{Pu}$ による核分裂当りの放出熱エネルギー。

N_j は燃料ペレット中の単位体積当りの j 核種の個数。

(2)式において、 ^{235}U の核分裂率当りにすると、

$$P_i \propto K^{26}(N^{25} \sigma_f^{26} \phi)_i \left\{ 1 + \frac{K^{28}}{K^{26}} \cdot \frac{(N^{28} \sigma_f^{28} \phi)_i}{(N^{25} \sigma_f^{26} \phi)_i} + \left(1 + \frac{K^{49}}{K^{26}} \frac{K^{41} N_i^{41} \sigma_f^{41} \phi_i}{K^{49} N_i^{49} \sigma_f^{49} \phi_i} \right) \frac{(N^{49} \sigma_f^{49} \phi)_i}{(N^{25} \sigma_f^{26} \phi)_i} \right\} \quad (2')$$

ここで $K^{41} \approx K^{49}$, $\sigma_f^{41} \approx \sigma_f^{49}$ と考えて $(K^{41} N_i^{41} \sigma_f^{41} \phi_i)$ を $(K^{49} N_i^{41} \sigma_f^{49} \phi_i)$ とおきかえ、さらに

$\frac{K^{28}}{K^{26}} = \frac{2.97^*}{3.10} \frac{K^{49}}{K^{26}} = \frac{3.22^*}{3.10}$ また $\frac{N_i^{41}}{N_i^{49}} = 0.010^{**}$ を代入すると、(今回は高次化の進んでいない

プルトニウム燃料であるので $(K^{41} N_i^{41} \sigma_f^{41} \phi_i)$ を $(K^{49} N_i^{41} \sigma_f^{49} \phi_i)$ した誤差は、0.1%以下である。)'

$$P_i \propto N_i^{25} (A_E)_i \{ 1 + 0.958 (\delta_{25}^{28})_i + 10491 (\delta_{25}^{49})_i \} \quad (3)$$

但し、 $(A_E)_i$: 位置 i における ^{235}U による核分裂反応率

$$(\delta_{25}^{28})_i \equiv \frac{(N^{28} \sigma_f^{28} \phi)_i}{(N^{25} \sigma_f^{26} \phi)_i} \quad (4)$$

$$(\delta_{25}^{49})_i \equiv \frac{(N^{49} \sigma_f^{49} \phi)_i}{(N^{25} \sigma_f^{26} \phi)_i} \quad (5)$$

* NOAH-II コードによる計算結果と比較するのでコードに用意されているライブラリーの値を引用

** 二色クラスタ燃料は二色とも同じスタンダード・グレイド・プルトニウムを使用して

いる。

2.2 測定方法

今回使用した濃縮ウラン箔 (EU) およびプルトニウム箔 (PU) の比放射能 $A_E(t)$, $A_P(t)$ はそれぞれ(6)(7)式で示される。

$$A_E(t) = \epsilon_E \{ u^{25}(t) N_E^{25}(\sigma_f^{25} \phi) + u^{28}(t) N_E^{28}(\sigma_f^{28} \phi) \} \quad (6)$$

$$A_P(t) = \epsilon_P \{ u^{29}(t) N_P^{49}(\sigma_f^{49} \phi) + u^{40}(t) N_P^{40}(\sigma_f^{40} \phi) + u^{41}(t) N_P^{41}(\sigma_f^{41} \phi) \} \quad (7)$$

ここで、

インデックス E, P は EU 箔, PU 箔を示す。

$A_x(t)$: 照射後 t 分における x 箔の比放射能

$N_x^i(t)$: x 箔内にある i 核種の個数

$u^i(t)$: i 核種の核分裂あたりの r 線強度

ϵ_x : x 箔の検出効率

今回の照射条件では $N_E^{25}(\sigma_f^{25} \phi) \gg N_E^{28}(\sigma_f^{28} \phi)$, $N_P^{49}(\sigma_f^{49} \phi) > N_P^{41}(\sigma_f^{41} \phi) \gg N_P^{40}(\sigma_f^{40} \phi)$ である。また

$\sigma_f^{41} \approx \sigma_f^{49}$ と考えれば $(\frac{N_P^{41}}{N_P^{49}}) \ll 1$ であるので誤差 0.1% 以下である)

$$A_E(t) \approx \epsilon_E u^{25}(t) N_E^{25}(\sigma_f^{25} \phi) \quad (6')$$

$$A_P(t) \approx \epsilon_P u^{49}(t) (N_P^{49} + N_P^{41})(\sigma_f^{49} \phi) \quad (7')$$

EU 箔と PU 箔とでは、箔の組成また ^{235}U と ^{239}Pu の F, P 生成が違うために $\epsilon_E = \epsilon_P$, $u^{25}(t) = u^{49}(t)$ とできない。

そこでこの差 $P_{49}(t)$ を定義する。

$$P_{49}(t) \equiv \frac{\epsilon_E u^{25}(t)}{\epsilon_P u^{49}(t)} \quad (8)$$

この $P_{49}(t)$ は、熱中性子性 TC における照射実験から求めることができる。即ち(6')(7)式から(9)式を得る。(9)式における $\phi(M)$ は Maxwell 分布を意味する)

$$P_{49}(t) = \frac{(N_P^{49} + N_P^{41})}{N_E^{25}} \cdot \left[\frac{A_E(t)}{A_P(t)} \right]_{TC} \cdot \frac{(\sigma_f^{49} \phi(M))}{(\sigma_f^{25} \phi(M))} \quad (9)$$

この $P_{49}(t)$ が求まると(6')(7)より(5)式で定義された $(\delta_{25}^{49})_i$ が求まる。

$$(\delta_{25}^{49})_i = \left(\frac{N_i^{49}}{N_i^{25}} \right) \cdot P_{49}(t) \cdot \frac{N_E^{25}}{N_P^{49} + N_P^{41}} \cdot \left[\frac{A_E(t)}{A_P(t)} \right]_i \quad (10)$$

なお、燃料の個数比をかけていないスペクトル・インデックス的な量 $(q_{25}^{49})_i$ を下記の様に定義する。

$$(q_{25}^{49})_i \equiv \frac{(\sigma_i^{49} \phi)_i}{(\sigma_i^{25} \phi)_i} \quad (11)$$

とすると $(\delta_{25}^{49})_i$ との関係は下式で示される。

$$(\delta_{25}^{49})_i = \left(\frac{N_i^{49}}{N_i^{25}} \right) (q_{25}^{49})_i \quad (10')$$

3. 実 験

3.1 実験体系

今回行なった実験体系は、格子間隔 225 cm、冷却材ボイド率 0% の DCA 炉心の中央に、二色混合型クラスター燃料 9 体を装荷し、その周りに 112 体の 1.2% UO_2 燃料を装荷した、二領域炉心である。炉心条件を表 1、図 1 に、また二色クラスター燃料配置を図 2 に示した。表 2 には、1.2% U、0.54% s Pu、0.87% s Pu の燃料組成を示した。

3.2 箔の照射条件

実験に使用した濃縮ウラン箔 (EU箔) およびプルトニウム箔 (PU箔) の仕様を表 3 に示す。EU箔とPU箔の各一枚を組にして Al シートで被覆し一対の照射用カセットを作成した。(図 3 参照) このカセットを燃料ペレット下端より約 40 cm 附近のペレットの間に挿入した。(図 3 参照) この箔のセットされた燃料棒を図 2 に示されている、第 1 層、第 2 層、第 3 層の F-1、F-2、F-3、F-3' の位置に入れて組みあげた二色クラスターを炉心中心 0-CH に装荷し、1 kW × 75 分間で照射を行なった。

3.3 ^{235}U と ^{239}Pu の核分裂率の計測

照射された燃料棒をグローブ・ボックス内にバック・インし、被覆管 (Zry-2) を切断し照射されたカセットを取り出し、その表面に付着した PuO_2-UO_2 燃料を除去した。これを別のグローブ・ボックス内に移して、カセット内部の検出箔がプルトニウムで汚染しない様に注意して Al 被覆を取りはずし、検出箔を取り出す。これをさらに超音波洗浄器で洗浄した後グローブ・ボックスよりバック・アウトし、汚染検査後測定を開始した。この照射された濃縮ウラン箔、またプルトニウム箔内に生じた核分裂生成物から放出する 0.72 MeV 以上の γ 線を NaI シンチレーション検出器で照射後、約 1000 分から数回計測した。(測定系の詳細については別報を参照されたい。³⁾) F.P. γ 線の時間補正は数回の測定値を二次式でフィットして行なった。計測結果を表 4 に示す。なお熱中性子場 (TC) における結果も表 4 に示している。

4. 結果と検討

4.1 高さ補正

燃料棒内にセットされた箔の高さが、各層によって違うので高さ補正をする必要がある。補正式は下式によった。

$$\cos \left\{ \frac{\pi}{(H + \delta_{\pm})} (z - z_0) \right\} \quad (12)$$

なお、 H は臨界重水水位、 δ_{\pm} は外挿距離、 z は箔のセット位置、 z_0 は分布ピークの位置である。 $\delta_{\pm} = 1.116 \pm 0.28$ 、 $z_0 = 45.39 \pm 0.50$ はCu-wireによる、冷却材領域中心点の軸方向分布測定結果を引用した。⁴⁾

4.2 $P_{49}(t)$ による補正

第2.2節で述べたように、熱中性子場(TC)における照射実験より求めた。なお

$$\frac{(\sigma_f^{49} \phi(M))}{(\sigma_f^{25} \phi(M))} = 1.347 \text{ の値は } T_m = 22 \text{℃ における NOAH-II コード内の定数を用いた。} \quad (9) \text{より}$$

$$P_{49}(t = 1300) = 1.117 \pm 0.022 \quad (13)$$

の値を得た。

4.3 測定結果

^{235}U と ^{239}Pu による核分裂の反応率分布 $(\sigma_f^{25} \phi)$ 、 $(\sigma_f^{49} \phi)$ を第1層目で規格化した結果を、また $P_{49}(t)$ を代入して求めた ^{235}U の核分裂と ^{239}Pu のそれとの割合を示す q_{25}^{49} 、 δ_{25}^{49} の結果を、表5と図4に示す。また以上の分布と δ_{25}^{49} を(3)式に代入して(なお δ_{25}^{25} はNOAH-IIによる計算結果を代入した)求めた出力分布も表5と図4に示す。表5に示されているようにEU箔とPU箔による箔放射化法によって求めた局所出力ピーキング係数 $\langle \text{LPF} \rangle_3$ は下記の通りである。

$$\langle \text{LPF} \rangle_3 = 1.08 \pm 0.02 \quad (14)$$

4.4 測定精度

1. 検出箔の比放射能の計数誤差

- ・検出箔の不純度、キズ、平面度、重量からくる誤差
- ・箔セット位置、被覆管の曲り、クラスターの曲り等、照射条件からくる誤差
- ・箔の計数の際の、核崩壊の統計的ゆらぎ、計数時の箔のセット位置、計測系の変動等からくる誤差

上記の誤差は、第3層目の燃料棒内の二点の計数の差から評価した。即ち、EU箔、PU

箔の比放射能の誤差はそれぞれ±2.0%と±3.5%とした。なお箔による中性子束の歪は1～2%あると思われるが、第1、第2、第3層とその補正量が同じと考えると、分布には影響しないので、無視した。

- | | | |
|-----|---|-------|
| 2 | δ_{25}^{49} の誤差 | ±3.7% |
| 2.1 | EU箔とPU箔による比の計数誤差 | ±3.0% |
| | (EU箔とPU箔は一对の組にして照射しているので単独の比放射能の誤差伝播からくる誤差より小さい。) | |
| 2.2 | ^{239}Pu と ^{235}U の燃料の個数比からくる誤差 ⁵⁾ | ±1.0% |
| 2.3 | $P_{49}(t)$ の測定誤差 | ±2.1% |
| | (T.C場の照射実験によるPU/EUの反応率比の誤差±1.5%また $(\sigma_f^{49}\text{M})/(\sigma_f^{235}\phi)$ 定数は $\Delta T_m = 20^\circ\text{C}$ とした時の差から±1.5%とした。) | |

- | | | |
|----|--|------|
| 3. | $\frac{K^{28}}{K^{25}} \delta_{25}^{28}$ の誤差 | ±16% |
|----|--|------|
- 今回は δ_{25}^{28} は測定していないのでNOAH-IIの計算結果を代入している。NOAH-IIの δ_{25}^{28} 最大の誤差15%を採用した。⁶⁾ またKの誤差は $K^{28}/K^{25} = 1$ とした時との差から、±2%とした。

- | | | |
|----|---------------------|-------|
| 4. | K^{49}/K^{25} の誤差 | ±2.0% |
|----|---------------------|-------|
- $K^{49}/K^{25} = 1$ とした時の差から評価した。
- | | | |
|----|--|-------|
| 5. | ^{235}U の燃料個数比の誤差 ⁵⁾ | ±1.0% |
|----|--|-------|

出力係数Pの相対値への誤差は、上記1.2.3.4.5.を(3)式に代入し、その伝播誤差から±4%と評価し、出力係数 P_j の誤差は(1)式における各相対出力係数からの伝播誤差で評価した。すなわち、

$$\Delta P_1/P_1 = \pm 4\%, \quad \Delta P_2/P_2 = \pm 3\%, \quad \Delta P_3/P_3 = \pm 2\%$$

と評価した。なお径方向のグロス分布によるクラスタ内燃料棒各層への影響は0.1%であるので無視した。また二領域炉心による影響も中心では計算によると0.1%以下であったので無視した。

4.5 NOAH-IIによる計算

計算は格子設計コードNOAH-IIにより行なった。入力はDCA炉心の諸元に基づいて作成した。実際の入力定数は付録Iに示した。なお物質バックリング B_m^2 は $k_{\text{eff}} = 1.0000 \pm 0.0001$ になる様に決定されている。NOAH-IIのピン・パワー・係数の出力には、核種による放出熱エネルギーの違いが考慮されていないので、出力された反応率の計算結果を2.1節に示された(1)～(5)に代入して局所ピーキング係数を求め、これをNOAH-IIによる計算値とした。

4.6 結界の考察

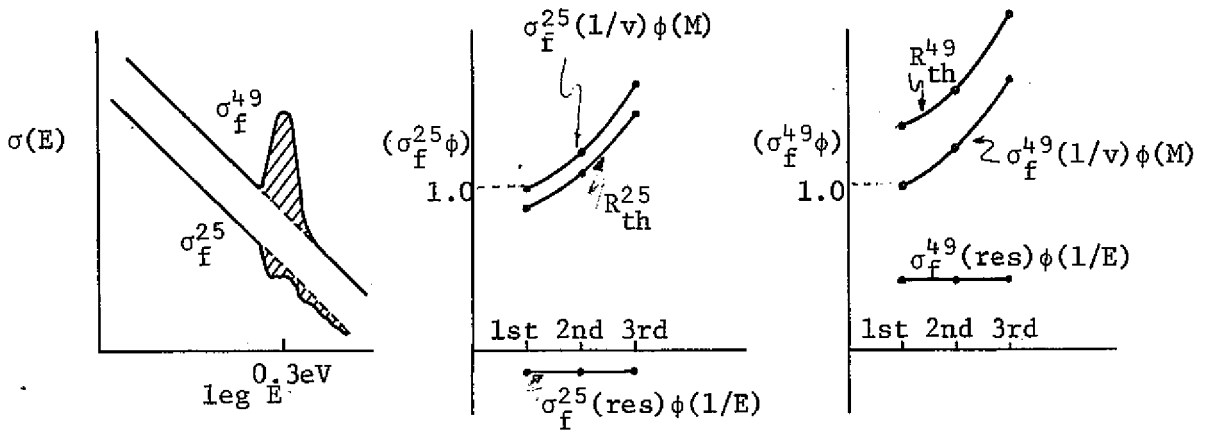
二色混合型クラスタ内における ^{239}Pu の核分裂による反応率分布は、 ^{235}U による分布と大きく違っている。一方、NOAH-II による計算値では、 ^{239}Pu の反応率分布は、 ^{235}U の分布とほぼ一致している。

これは、「クラスタ内の燃料各層における ^{235}U の反応率分布は、ほぼMaxwell パート（熱群の中性子束はMaxwell パートと $1/E$ パートから近似的に構成されている）の熱中性子束の分布に比例するが、一方、 ^{239}Pu の反応率分布は熱群のMaxwell パートだけでなく、 $1/E$ パート特に ^{239}Pu の共鳴エネルギー 0.3eV 附近の中性子束分布にも強く影響を受ける。」と考えると、実験値と計算値の違いが説明できる。即ち、熱群の反応率を $1/V$ 断面積による部分 $[=\sigma_f(1/V)\phi_{th} \sim \sigma_f(1/V)\phi(M)]$ とそれ以外の部分 $[=\sigma_f(res)\phi_{th} \sim \sigma_f(res)\phi(1/E)]$ とにわけて考える。

$$R_{th}^{25} (\equiv \sigma_f^{25}(E)\phi_{th}(E)) \approx \sigma_f^{25}(1/V)\phi(M) + \sigma_f^{25}(res)\phi(1/E) \quad (15)$$

$$R_{th}^{49} (\equiv \sigma_f^{49}(E)\phi_{th}(E)) \approx \sigma_f^{49}(1/V)\phi(M) + \sigma_f^{49}(res)\phi(1/E) \quad (16)$$

(ATR型格子体系における ^{235}U または ^{239}Pu による核分裂のカドミ比はどちらも 10 を越えているので ^{235}U や ^{239}Pu による核分裂反応率の定性的な議論では、Sub-Cd の中性子による反応率のみ考えればよい。)これを模式的に図示すると下図のようになる。



(模式図の分布は燃料第1層目の反応率 $\sigma_f(1/V)\phi(M)$ で規格化している)

$\sigma_f^{25}(E)$ は 0.1eV 附近を越えると $1/V$ 断面積よりやや小さい。 $\sigma_f^{49}(E)$ では逆に大きな共鳴吸収のために $1/V$ 断面積より大きい。従って(15)式における $\sigma_f^{25}(res)\phi(1/E)$ は負であるが、その値は $\sigma_f^{25}(1/V)\phi(M)$ に比較して、非常に小さい。一方(16式における $\sigma_f^{49}(res)\phi(1/E)$ は正でその値は大きい。従って R_{th}^{25} は $[\sigma_f^{25}(res)\phi(1/E)]$ を減じた分だけその勾配は急になるが、その影響は小さい。反対に R_{th}^{49} は、 $[\sigma_f^{49}(res)\phi(1/E)]$ の影響が大きく、それを加算した分だけ、その分だけ、その勾配はゆるやかになる。

一方、NOAH-II における計算では、熱群の平均断面積 $\bar{\sigma}_f$ をライブラリーより入力する際には中性子スペクトルを考慮して行なわれているが、格子計算における群内では σ_f は定数 $\bar{\sigma}_f$ と

して扱われているので、反応率の計算は熱群の平均断面積と中性子束の積 $\bar{\sigma}_f \cdot \bar{\phi}_{th}$ で示され熱群のスペクトルに依存しない。〔熱群は④群（燃料中で形成される熱群スペクトル）と⑤群（重水中で形成されるスペクトル）の和で形成される overlapping モデルが採用されている。従って燃料クラスタ内における熱群は、ほぼ④群のみと考えられ⑤群のウェイトは小さい。また、この overlapping モデルではエネルギー領域を二分割にしているわけではないので今回のようにPuの共鳴エネルギー 0.3eV 附近の中性子束変化をほとんど取り入れることができない。以上のことからNOAH-IIの計算においては、熱群のスペクトルに依存しないと言える〕従ってNOAH-IIの計算における燃料各層の反応率分布は、熱群 $\bar{\phi}_{th}$ に比例するので、 ^{235}U でも ^{239}Pu でもほぼ同じ分布をする。これをPU箔とEU箔の反応率比 q_{25}^{49} でみるとさらに明確になる。即ち、クラスタ中心程、スペクトルがハードになっていると推論されるので q_{25}^{49} は中心程大きい値になるはずである。 q_{25}^{49} の実験結果は中心程、大きな値になるのに対して、計算結果はほとんど変化していない。

以上のことからNOAH-IIの計算は「 ^{239}Pu の共鳴吸収が正確に取り扱われていない」と言うことができる。

最後にこれを出力分布から考えると、「NOAH-IIによる計算では ^{235}U による熱出力分布の勾配は、やや小さく評価しているが、 ^{239}Pu では逆に大きく過大評価しているために、その和である局所出力ピーキングは、結局過大評価している。」と推論される。

5. 結 論

- 1) 今回の箔放射化法による, 225 cm格子間隔, 0%冷却材ボイド率における, 二色混合型クラスタ燃料の局所出力ピーキング係数 $\langle \text{LPF} \rangle_3$ は,

$$\langle \text{LPF} \rangle_3 = 1.08 \pm 0.02$$

このピーキング係数は 0.5 W/o または 0.87 W/o PuO_2 - UO_2 燃料を使用したクラスタ型のピーキング係数 1.17 or 1.15¹⁾ にくらべて大巾に低減されている。

- 2) 誤差はEU箔, PU箔の比放射能の測定誤差のほか, $P_{49}(t)$, K, 燃料 ^{235}U , ^{239}Pu の個数比等の誤差を考慮して $\langle \text{LPF} \rangle_3$ の総合誤差として $\pm 2\%$ を採用した。
- 3) 格子設計コード NOAH-II による $\langle \text{LPF} \rangle_3$ の計算値は実験値より 2.8% 過大評価している。

この原因は「 ^{235}U による出力分布の勾配はやや過小評価し, ^{239}Pu では逆に大きく過大評価しているために, その和である $\langle \text{LPF} \rangle_3$ は結局, 過大評価している」と推論される。

- 4) 今回の二色混合型クラスタ燃料は中心程中性子スペクトルがハードになっていることが Q_{25}^{49} の測定結果から結論される。一方, 計算値はクラスタ内ではほとんど変化していない。これは ^{239}Pu の共鳴吸収が正確に取り扱われていないと推論される。

謝 辞

この研究を進めるにあたり強力な御支援をいただきました宮脇良夫室長をはじめ室員の皆様に深く感謝の意を表わします。特に実験にあたり多大な援助を頂いた福村信男副主任研究員に, また研究結果の検討に関して有益なコメントを頂いた小綿泰樹研究員に深く感謝します。

参考文献

- 1) 小綿, 他 ZN 941 74-67 「プルトニウム燃料部分装荷炉心特性の解析(II)」
- 2) N. Fukumura and A. Nishi, "Measurements of Fission Rate Ratios on PuO_2 - UO_2 Fueled Lattice", to be submitted to ANS Fall Meeting in 1975.
- 3) 福村, 他 ZN 941 74-44 「プルトニウム燃料部分装荷炉心の単位格子実験」
- 4) 浅野, 他 私信
- 5) 飯島, 他 SN 941 74-22 「DCAハンドブック」
- 6) 仁紫, 他 SN 941 74-25 「ウラン炉心における炉物理定数の考察」

Table 1 Experimental Conditions of the core

Lattice pitch	22.5 cm
Coolant void fraction	0% (H ₂ O level 888 mm)
Critical level of D ₂ O	888.6 mm
Number of cluster loaded in the core	9(0.87w/o & 0.54w/o PuO ₂ -UO ₂) in the central and 108 (1.2%UO ₂) in the outer surrounding region

Table 2 Dimensions and compositions of fuel pin

Fuel ID	1.2w/o U	0.54w/o sPu	0.87w/o sPu
Fuel pellet			
Outer dia. (cm)	1.48	1.47	1.47
Density (g/cc)	10.36	10.17	10.17
Isotope (w/o)			
U-235	1.057	0.6214	0.6194
U-238	86.793	86.782	86.503
Pu-238	—	0.000102	0.000145
Pu-239	—	0.4304	0.6849
Pu-240	—	0.04115	0.06584
Pu-241	—	0.004359	0.006960
Pu-242	—	0.000303	0.000510
O-16	12.150	12.12	12.12
Sheath			
Inner dia. (cm)	1.503	1.506	1.506
Outer dia. (cm)	1.673	1.668	1.668
Material	Al	Zry-2	Zry-2

Table 3 Specifications of detector foil

Foil I.D.	Dimension	Content
EU (old) or (new)	14.8 mm ϕ 0.1 mmt	(old) 18.04w/o U-Al metal 89.84w/o $^{235}\text{U}/\text{U}$ (new) 8.53w/o U-Al metal 89.84w/o $^{235}\text{U}/\text{U}$
PU	14.5 mm ϕ 0.11 mmt	PuO ₂ -Polyethylene Mixture 36.8w/o PuO ₂ /Mixture 87.46w/o Pu/PuO ₂ 0.023w/o- $^{238}\text{Pu}/\text{Pu}$, 90.21w/o- $^{239}\text{Pu}/\text{Pu}$ 8.758w/o- $^{240}\text{Pu}/\text{Pu}$, 0.937w/o- $^{241}\text{Pu}/\text{Pu}$, 0.073w/o- $^{242}\text{Pu}/\text{Pu}$

Table 4 Foil conditions and γ -ray counts from fission products in their foil

Foil I.D.	Position (cm)	Weight (^{235}U or ^{239}Pu) (mg)	Average of γ count at 1300min	Count error ($\pm\%$)	Value corrected for position
EU-1-1 (new)	F-1 (40.2)	3.51	0.1480	1.1	0.1481
Pu-19-4	" (")	5.92	0.2892	0.9	0.2893
EU-1-13(new)	F-2 (39.6)	3.60	0.2250	1.1	0.2288
Pu-20-2	" (")	5.87	0.3698	1.0	0.3749
EU-20 (old)	F-3 (39.4)	8.13	0.3617	1.1	0.3682
Pu-2-1	" (")	6.63	0.5324	0.9	0.5419
EU-3 (old)	F-3' (39.6)	9.84	0.3563	1.1	0.3622
Pu-3-5	" (")	7.22	0.4940	1.0	0.5022
EU-54 (old)	TC I-5	7.21	0.2839	1.1	—
Pu-8-1	"	5.94	0.3531	1.0	—
EU-55 (old)	TC I-4	7.94	0.1905	1.1	—
Pu-8-2	"	6.12	0.2306	0.9	—

Table 5 Results of distributions of ^{235}U and ^{239}Pu fission reaction rate, q_{25}^{49} , δ_{25}^{49} and power ratio dependent on pin position in a fuel cluster

Lattice: [0.87sPu(1st,2nd)+0.54sPu(3rd)]fuel-0%Void-22.5cmL.P.)

Position (layer)	$\sigma_f^{25}\phi$ ($N^{25}\sigma_f^{25}\phi$)		$\sigma_f^{49}\phi$ ($N^{49}\sigma_f^{49}\phi$)		δ_{25}^{28} ($= \frac{\Sigma_f^{28}\phi}{\Sigma_f^{25}\phi}$)		q_{25}^{49} ($= \frac{\sigma_f^{49}\phi}{\sigma_f^{25}\phi}$)		δ_{25}^{49} ($= \frac{N^{49}\sigma_f^{49}\phi}{N^{25}\sigma_f^{25}\phi}$)		Power ratio	
	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.
1st	1.000±0.020 (1.000)	1.000 (1.000)	1.000±0.040 (1.000)	1.000 (1.000)	0.2156	1.000 (1.000)	2.146	1.642	2.333±0.093	1.785	0.721±0.029	0.771
2nd	1.545±0.030 (1.545)	1.179 (1.179)	1.296±0.052 (1.296)	1.179 (1.179)	0.1762	1.179 (1.179)	1.800	1.641	1.957±0.078	1.784	0.982±0.030	0.897
3rd	2.466±0.049 (2.474)	1.977 (1.984)	1.482±0.059 (1.143)	1.930 (1.213)	0.0913	1.930 (1.213)	1.570	1.602	1.069±0.043	1.091	1.079±0.022	1.109

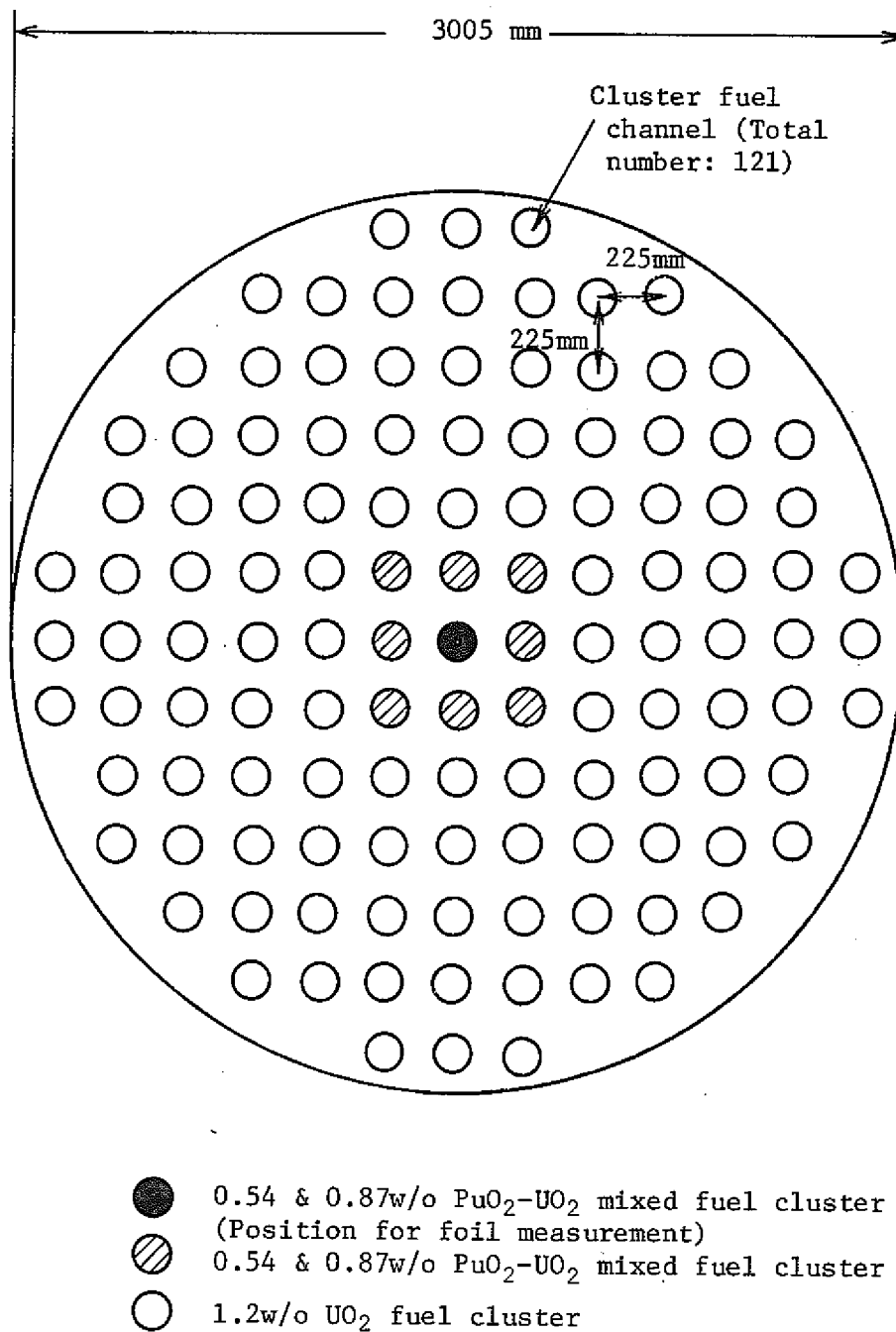


Fig. 1 DCA core configuration of 22.5 cm pitch lattice

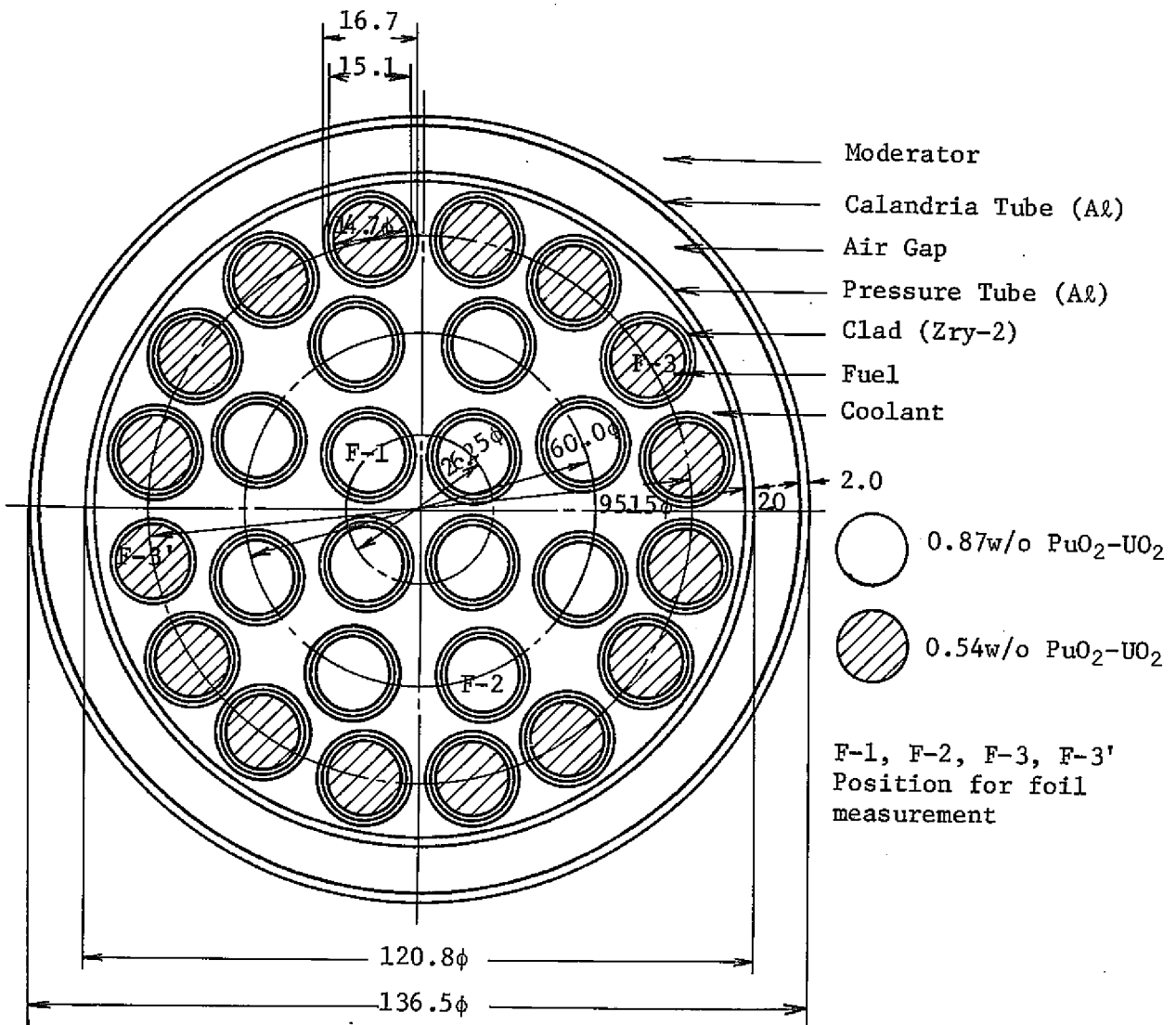


Fig. 2 Cross sectional view of 0.54 & 0.87 /wo PuO₂-UO₂ mixed fuel cluster

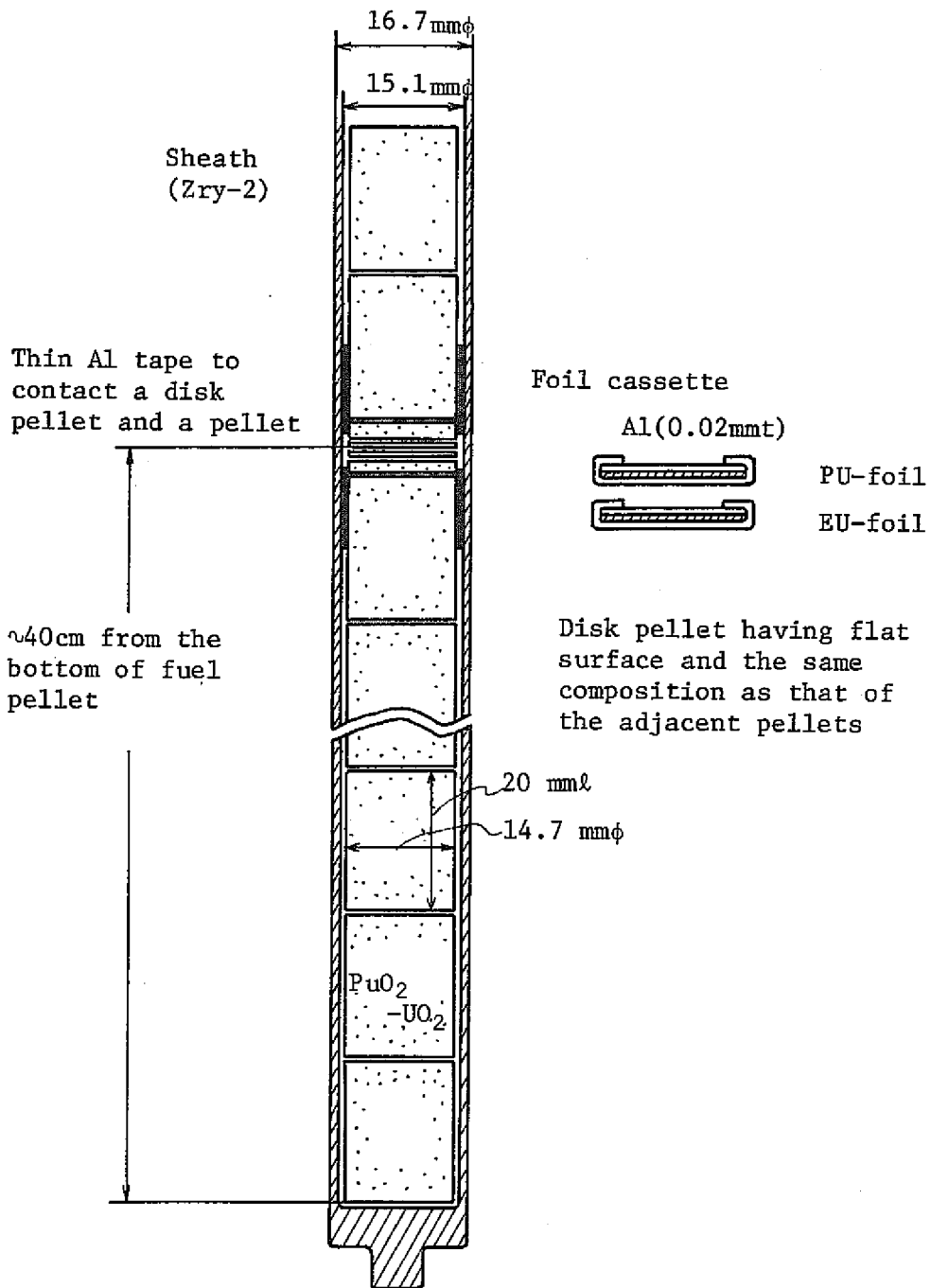


Fig. 3 Foil arrangement in PuO₂-UO₂ fuel pin .

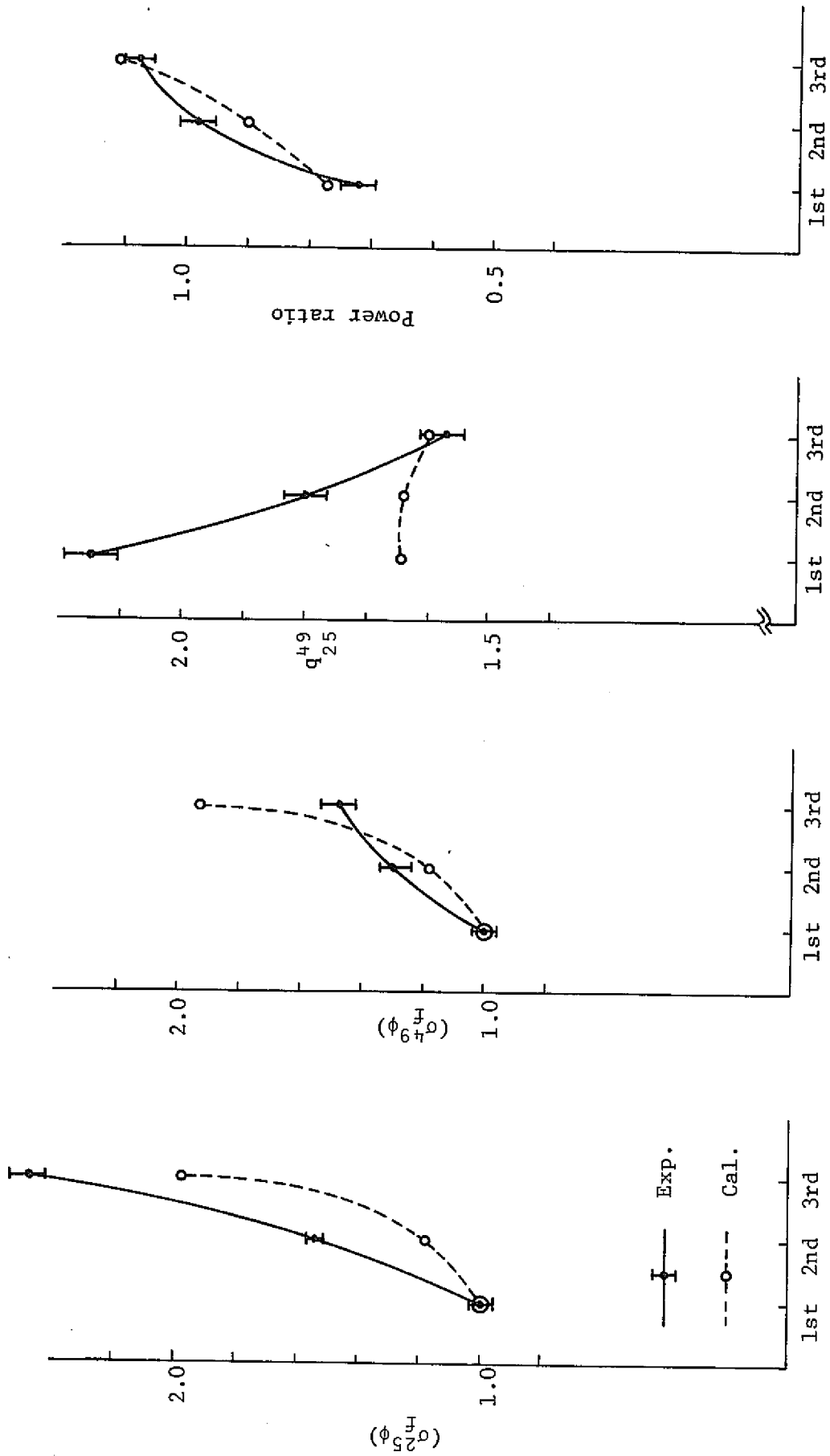


Fig. 4 Distributions of ^{235}U and ^{239}Pu fission reaction rate, q_{25}^{49} and power ratio dependent on pin position in a cluster

附録 I NOAH-IIの入力定数

*NOAH-2 22.5LP MIXED FUEL (5S AND 8S PU02-U02)	0% VOID	
POLYGON(1.00) 0		* FUEL1
DIAMET(1.00) 11.28		*
TEMPER(1.00) 22.0		*
DIAMET(1.11) 1.472		* PELLET
DENSIT(1.11) 10.17		*
INGRED(1.11) 7,18,0.6194,20,86.5031,21,0.6849,22,0.06584,Y		*
23,0.006960,34,0.000510,2,12.119		*
TEMPER(1.11) 22.0		*
DIAMET(1.12) 1.668		*
DENSIT(1.12) 5.3477		*
INGRED(1.12) 5,3,98.22,10,1.48,6,0.14,11,0.10,7,0.06		*
TEMPER(1.12) 22.0		*
DENSIT(1.10) 0.99777	*	
INGRED(1.10) 2,1,11.1901,2,88.8099	*	
LAYER 2=1		*
DIAMET(1.31) 1.469		* PELLET
TEMPER(1.31) 22.0		*
DENSIT(1.31) 10.171		*
INGRED(1.31) 7,18,0.6214,20,86.7823,21,0.4304,22,0.04115,Y		*
23,0.004359,34,0.000303,2,12.120		*
DIAMET(1.32) 1.668		*
DENSIT(1.32) 5.3728		*
INGRED(1.32) 5,3,98.22,10,1.48,6,0.14,11,0.10,7,0.06		*
TEMPER(1.32) 22.0		*
DENSIT(1.30) 0.99777	*	
INGRED(1.30) 2,1,11.1901,2,88.8099	*	
POLYGON(2.00) 0		* W.G
DIAMET(2.00) 11.68		*
DENSIT(2.00) 0.99777		*
INGRED(2.00) 2,1,11.1901,2,88.8099		*
TEMPER(2.00) 22.0		*
RARE REGION(2.00) *		
POLYGON(3.00) 0		* P.T
DIAMET(3.00) 12.08		*
DENSIT(3.00) 2.674		*
INGRED(3.00) 1,9,100.0		*
TEMPER(3.00) 22.0		*
RARE REGION(3.00) *		
POLYGON(4.00) 0		* AIR.G
DIAMET(4.00) 13.25		*
AIRGAP(4.00)		*
POLYGON(5.00) 0		* C.T
DIAMET(5.00) 13.65		*
DENSIT(5.00) 2.674		*
INGRED(5.00) 1,9,100.0		*
TEMPER(5.00) 22.0		*
RARE REGION(5.00) *		
POLYGON(6.00) 0		* MOD
DIAMET(6.00) 25.39		*
DENSIT(6.00) 1.1078		*
INGRED(6.00) 3,1,0.05036,38,20.0223,2,79.9283		*
TEMPER(6.00) 22.0		*
APRAY TYPE 4,3,1,3125,3,00,4.7575,4,8,16		*
BUCKLING 0.001613739*		*
RESONANCE 6,18,20,21,22,23,34		*

```

FIVE GROUP
DG LAYER 1,0,2
SPECTRUM 4,2,1.00,2.00
SPECTRUM 5,4,3.00,4.00,5.00,6.00
EPSILON 0.0001
GEOMETRY 10,10,10,5,5,5,5,20
RECORD 36,2,20,0.58830,4,20,1.45646,5,20,0.53940,20,18,2.43,Y
      20,21,2.87099,20,23,2.96899,108,2,1.0004,108,3,0.98434,Y
      108,5,0.99258,108,11,2.42680,108,12,2.88799,108,13,3.10404*
FINAL OUTPUT 3,64,69,94,96,171,171
ITERATE 5 *
BEGIN CALCULATION
*NOAH-2 22.5LP MIXED FUEL (5S AND 8S PUO2-UO2) 100% VOID
DENSIT(1.10) 0.000455
INGRED(1.10)2,1,11.1901,2,88.8099 *
DENSIT(1.20) 0.000455
INGRED(1.20)2,1,11.1901,2,88.8099 *
DENSIT(1.30) 0.000455
INGRED(1.30)2,1,11.1901,2,88.8099 *
DENSIT(2.00) 0.000455
INGRED(2.00)2,1,11.1901,2,88.8099 *
BUCKLING 0.001144234*
BEGIN CALCULATION *

```