

PNC TN941 78-84

54本及び60本燃料集合体1体の臨界実験

1978年5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)

54本及び60本燃料集合体1体の臨界実験

若林利男^{*}, 皆月 功^{**}, 草別幸夫^{**}

要 旨

54本又は60本燃料集合体1体を用いた臨界実験により、大型燃料集合体の核特性のうち冷却材ボイド反応度、熱中性子束分布、中性子スペクトル、局所ピーキング係数について調べた。今回の実験結果より次の事が明らかになった。

- (1) 54本燃料集合体の冷却材ボイド反応度は、集合体中心部に軽水を満たし、100%ボイド時にはその軽水がぬける構造にした場合がより負側になる。
- (2) 54本燃料集合体中心部の軽水層にGd、Cd等吸収棒を入れた場合、冷却材ボイド反応度は(1)の場合より1.2～2.1%負側になる。このことより、冷却材ボイド反応度をより負側にする新しい構造の燃料集合体を示すことができた。
- (3) 燃料棒内Dy反応率分布の測定結果より、大型燃料集合体において冷却材ボイド反応度を負側にするメカニズムを説明することができた。
- (4) 燃料棒内の微細Dy反応率分布の測定結果は、燃料棒内の自己遮蔽効果を考えることによりよく説明することができた。
- (5) 燃料中の中性子スペクトルを示すスペクトルインデックスの測定は、各種棒について±3%の精度で求めることができ、計算コードの評価が可能となった。
- (6) 局所ピーキング係数は、60本燃料集合体が一番悪く、54本燃料集合体が一番良くなっている。また、Gd吸収棒が入った場合は、54本燃料集合体より4%程度大きくなっているだけである。

* 大洗工学センター重水臨界実験室

** (現)三菱重工業株式会社

(DCA実験グループ) 八谷雄喜, 柴公倫, 樋口幸次郎, 清野英昭, 福村信男, 仁柴明人, 飯島一敬, 戸村和二, 相原永史, 若林利男, 小綿泰樹, 金内信, 伊藤靖彦, 中川内良継, 北山一宏

One-Rod Critical Experiments on 54 and 60-Pin Fuel Clusters

Toshio Wakabayashi*, Isao Minatsuki**,
Yukio Kusawake**,

Abstract

Nuclear characteristics of 54 and 60-pin fuel clusters, such as coolant void reactivity, thermal neutron flux distribution, neutron spectra and local peaking factor were investigated by single rod experiments, using DCA. From the present experiment, the following results are summarized.

- (1) The loss of H_2O in the central part of 54-pin cluster in the case of the loss of coolant makes the coolant void reactivity shift to the negative side.
- (2) Furthermore, the insertion of Gd or Cd absorber in the central part of fuel assembly produces large negative coolant void reactivity.
- (3) The mechanism to produce more negative coolant void reactivity in 54-pin fuel cluster using the Gd absorber is comprehended from the dysprosium reaction rate distribution in fuel.
- (4) Fine distribution of dysprosium reaction rate in fuel makes the self-shielding effects clear in fuel pellet.
- (5) Spectrum index using various foils becomes to be comparable in detail for neutron spectra in fuel region with calculational code.
- (6) Local power peaking factor in the case of 54-pin cluster with Gd absorber is larger than that of 54-pin cluster without absorber by 4%.

* Heavy Water Critical Experiment Section, Oarai Engineering Center, PNC

** (Present Address) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

目 次

1. 序 論	1
2. 実験条件	5
3. 実験方法	23
3.1 冷却材ボイド反応度の測定	23
3.2 熱中性子束分布の測定	24
3.3 スペクトルインデックスの測定	24
3.4 局所ピーキング係数の測定	25
4. 実験結果と検討	33
4.1 冷却材ボイド反応度	33
4.2 熱中性子束分布	34
4.3 スペクトルインデックス	36
4.4 局所ピーキング係数	37
5. 結 論	85
謝 辞	87
参考文献	87
付録 1. DCA 物理定数	89
付録 2. 大型燃料集合体実験用炉心構造	92

List of Tables

Table #	Title	Page
Table 2-1	Experimental Items	6
Table 3-1	Characteristics of Detector Foils	26
Table 4-1	Critical Level and Coolant Void Reactivity	38
Table 4-2	Dysprosium Reaction Rate Distribution in 60-pin Cluster (0% Void)	39
Table 4-3	Dysprosium Reaction Rate Distribution in 60-pin Cluster (100% Void)	41
Table 4-4	Dysprosium Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster (0% Void)	43
Table 4-5	Dysprosium Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster (100% Void)	45
Table 4-6	Dysprosium Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster with a central Gd-absorber (0% Void)	47
Table 4-7	Dysprosium Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster with a central Gd-absorber (100% Void)	48
Table 4-8	Fine Structure of Dysprosium Reaction Rate Distribution in the Fuel Region of the 60-pin Cluster (0% Void)	49
Table 4-9	Fine Structure of Dysprosium Reaction Rate Distribution in Fuel Region of 54-pin Cluster (0% Void)	50
Table 4-10	Fine Structure of Dysprosium Reaction Rate Distribution in the Fuel Region of 54-pin Cluster (100% Void)	51
Table 4-11	Fine Structure of Dysprosium Reaction Rate Distribution in the Fuel Region of 54-pin Cluster with Gd-absorber at the Center Part (0% Void)	52
Table 4-12	Fine Structure of Dysprosium Reaction Rate Distribution in the Fuel Region of 54-pin Cluster with Gd-absorber at the Center Part (100% Void)	53
Table 4-13	Foil Activities in the Fuel Pins of 60-pin Cluster at 0% Void Fraction	54

List of Tables

Table #	Title	Page
Table 4-14	Foil Activities in the Fuel Pins of 60-pin Cluster at 100% Void Fraction	55
Table 4-15	Foil Activities in the Fuel Pins of 54-pin Cluster at 0% Void Fraction	56
Table 4-16	Foil Activities in the Fuel Pins of 54-pin Cluster at 100% Void Fraction	57
Table 4-17	Foil Activities in the Fuel Pins of 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber at 0% Void Fraction	58
Table 4-18	Foil Activities in the Fuel Pins of 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber at 100% Void Fraction	59
Table 4-19	Spectral Indices Measured in 60-pin Cluster at 0% Void Fraction	60
Table 4-20	Spectral Indices Measured in 60-pin Cluster at 100% Void Fraction	61
Table 4-21	Spectral Indices Measured in 54-pin Cluster at 0% Void Fraction	62
Table 4-22	Spectral Indices Measured in 54-pin Cluster at 100% Void Fraction	63
Table 4-23	Spectral Indices Measured in 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber at 0% Void Fraction	64
Table 4-24	Spectral Indices Measured in 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber at 100% Void Fraction	65
Table 4-25	Local Power Distributions	66

List of Figures

Figure No.	Title	Page
Fig. 2-1	Core Configuration of DCA	7
Fig. 2-2	Schematic View of 60-pin Cluster	8
Fig. 2-3	Schematic View of 54-pin Cluster	9
Fig. 2-4	Schematic View of 54-pin Cluster with Al Tube in the Central Region of the Cluster	10
Fig. 2-5	Schematic View of 54-pin Cluster with Gd-absorber or Cd-absorber in the Central Region of the Cluster	11
Fig. 2-6	Cross Section of Fuel Region	12
Fig. 2-7	Cross Section of 60-pin Cluster	13
Fig. 2-8	Cross Section of 54-pin Cluster	14
Fig. 2-9	Cross Section of 54-pin Cluster with an Air-filled Can	15
Fig. 2-10	Cross Section of 54-pin Cluster with a Central Gd- or Cd-absorber	16
Fig. 2-11	Photograph of Test Fuel Region	17
Fig. 2-12	Photograph of Fuel Cluster	18
Fig. 2-13	Photograph of Fuel Cluster	18
Fig. 2-14	1.5 wt % UO_2 Fuel Pin	19
Fig. 2-15	Cd-absorber Rod (Type-1)	20
Fig. 2-16	Gd-absorber Rod (Type-2)	21
Fig. 3-1	Foil Arrangement in the UO_2 Fuel pin	27
Fig. 3-2	Arrangement of Al Holder in D_2O Moderator	28
Fig. 3-3	Foil Arrangement in the Test Region	29
Fig. 3-4	Foil Cutter for Measurement of Fine Distribution	30
Fig. 3-5	Divided Foils for Measurement of Fine Distribution in Fuel	30
Fig. 3-6	Cu-wire Arrangement for Measurement of Axial and Gross Flux Distribution	31
Fig. 4-1	Dy Reaction Rate Distribution in 60-pin Cluster (0% Void)	67
Fig. 4-2	Dy Reaction Rate Distribution in 60-pin Cluster (100% Void)	68
Fig. 4-3	Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster (0% Void)	69
Fig. 4-4	Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster (100% Void)	70

List of Figures

Figure No.	Title	Page
Fig. 4-5	Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber (0% Void)	71
Fig. 4-6	Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber (100% Void)	72
Fig. 4-7	Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster and 54-pin Cluster with Gd-absorber	73
Fig. 4-8	Fine Structure of Dy Reaction Rate Distribution in 60-pin Cluster (0% Void)	74
Fig. 4-9	Fine Structure of Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster (0% Void)	75
Fig. 4-10	Fine Structure of Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster (100% Void)	76
Fig. 4-11	Fine Structure of Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber (0% Void)	77
Fig. 4-12	Fine Structure of Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber (100% Void)	78
Fig. 4-13	γ -ray Energy Spectrum of ^{152m}Eu	79
Fig. 4-14	γ -ray Energy Spectrum of ^{177m}Lu	80
Fig. 4-15	γ -ray Energy Spectrum of Fission Product of ^{235}U	81
Fig. 4-16	Axial Reaction Rate Distribution in Fuel of 54-pin Cluster (0% Void)	82
Fig. 4-17	Axial Reaction Rate Distribution in D_2O of 54-pin Cluster (0% Void)	83
Fig. 4-18	Radial Reaction Rate Distribution of Core	84

1. 序 論

章 1 序 論

現在、新型転換炉原型炉「ふげん」では、28本燃料集合体で使用されている。「ふげん」以後の大出力の実証炉、実用炉を検討する場合「ふげん」用の28本燃料集合体では、単一チャネル当りの出力が低いため、原子炉出力増大に伴わないチャネル本数も大きく増加させる必要があり、炉心の製作限界を超えることが考えられる。炉心の製作性及び商業炉という観点から経済性も考慮した場合、炉心の小型化、圧力本数の削減が必要となり、必然的にチャネル当りの出力の増大が必要となる。チャネル出力を増大させるには、28本燃料集合体では線出力密度(LHR)を上げることが考えられるが燃料ペレット被覆材相互作用(PCI)問題のためこのまじくはない。このため、燃料本数を多くした、36本、54本、60本等の燃料集合体の検討^{1),2)}が必要となる。

「ふげん」用の28本燃料集合体を装荷した炉心における核特性及び計算精度の評価に関しては重水臨界実験装置(DCA)を用いた多くのパラメータ(格子ピッチ、燃料種類(ウラン及びプルトウウム)、濃縮度(富化度))を基にした実験で今まで十分に確立されている。^{3),4),5)}しかし、54本、60本燃料集合体に関しては、イギリス⁶⁾、カナダ⁷⁾での実験例が示されているがまだ十分に核特性及び計算精度の評価がおこなわれていない。

今回は、54本及び60本燃料集合体について、局所出力ピーキング係数及び冷却材ボイド反応度の改善を加えた場合も含めて、臨界実験により大型燃料集合体の核特性を調べた。

1.1 局所出力ピーキング係数の改善

大型燃料集合体では、燃料本数が増加し、燃料層が増えるにしたがって、燃料集合体内の熱中性子束の低下が大きくなり、局所出力ピーキング係数が悪くなる。このため、4層構造の60本燃料集合体が一番悪いと考えられる。局所出力ピーキング係数を改善する方法としては、次の二つがあげられる。

- (1) 燃料集合体内の燃料濃縮度(富化度)を内側層では高く、外側層では低くし、集合体内で富化度分布をつける方法。
 - (2) 燃料集合体内で出力に寄与する割合の小さい中心層の燃料を取り除く方法。さらに取り出した場所に散乱物質を入れると、より効果的である。
- (2)の方法より、構造的な面から局所出力ピーキング係数を改善するには、60本燃料集合体内の、燃料出力に寄与する割合の少ない中心層の6本の燃料棒を取り、3層構造の54本燃料集合体にし、さらに、中に散乱物質としての軽水を満たした構造が良いと考えられる。

1.2 冷却材ボイド反応度の改善

原子炉安全上大きな問題としては、冷却材喪失事故時の冷却材ボイド反応度がある。この反応度がより負であることが原子炉安全上必要である。

大型燃料集合体を使用する場合、圧力管直径、カランドリア管直径が大きくなり、炉心へのこれら両管の強行性の問題から、格子ピッチが多少大きくなる傾向にある。これにより減速材体積対燃料体積比 (V_m/V_f) が大きくなり、冷却材ボイド反応度が悪くなると考えられる。

冷却材ボイド反応度を改善する方法を検討する場合、負側に移行させるメカニズムを明確にしておく必要がある。そのメカニズムの主なものとしては次の事が考えられる。

(1) 冷却材による熱中性子遮蔽効果

冷却材がぬけた場合、冷却材による熱中性子遮蔽効果がなくなると、圧力管内の熱中性子束が大きくなり、燃料中の反応率が増え、冷却材ボイド反応度が正側になる（熱中性子利用率の増大による）。このため冷却材ボイド反応度を負側に移行させるには、冷却材喪失時においても燃料集合体の自己遮蔽効果の回復を小さくすることが考えられる。これには燃料の濃縮度を増加させ、冷却材が喪失しても燃料自体の自己遮蔽効果により熱中性子束の増大を防ぐか、構造的に自己遮蔽効果の回復を小さくする方法が考えられる。

(2) 熱外中性子領域での散乱効果

冷却材が存在する場合、熱外中性子領域での散乱効果により熱中性子を発生させ、燃料中の反応率が大きくなる。これに対して、冷却材がなくなると、この効果がなくなり、冷却材ボイド反応度を負側に移行させる。この効果の燃料濃縮度（富化度）の依存性は少ない。

(3) ²³⁸Uの共鳴吸収効果

²³⁸Uの共鳴吸収効果は、冷却材が存在する場合の方が、冷却材が少ない場合より大きく、冷却材ボイド反応度を負側に移行させる。

(4) 速中性子核分裂効果

冷却材がなくなった場合の方が、速中性子核分裂効果は大きく、冷却材ボイド反応度を正側に移行させる。

(5) 中性子の体系からのもの効果

中性子のもれが大きい方が、冷却材ボイド反応度を負側に移行させる。冷却材がなくなると、場合、もれを大きくする構造が冷却材ボイド反応度を改善させる。

冷却材ボイド反応度は、これら(1)～(5)の効果の兼ね合いで決定される。このうち、燃料濃縮度（富化度）の増加は、(1)の効果による冷却材ボイド反応度の負側への移行をもたらす。また、格子ピッチの減少は主として(5)の効果を増大させ、冷却材ボイド反応度を負側にする。

今回の検討の様に格子ピッチ、燃料濃縮度（富化度）を変えず、燃料集合体の構造により冷却材

材ボイド反応度を改善する場合は、(1)～(5)の効果すべての相乗効果を考慮しなければならない。

5.4本燃料集合体において、局所ビームキッキング係数を改善するため、燃料集合体中心領域に軽水を満たす構造を示したが、(1)～(5)の効果を検討すれば、この軽水が冷却材喪失時と同時になくなれば、中心に空気が、散乱物質が存在する場合より、冷却材ボイド反応度はより負側になると考えられる。

さらに、この5.4本燃料集合体の中心軽水層の真中に燃料棒と同程度の径の吸収棒を挿入した場合を検討してみる。冷却材が存在する状態では、軽水の中性子の遮蔽効果より、この軽水中心の吸収棒への中性子の吸収は、よわめられるものと考えられる。これに対して、冷却材が喪失した場合は、軽水による中性子の遮蔽効果はなくなり、吸収棒の中性子吸収が増大すると思われる。すなわち、(1)における冷却材が存在する場合と、冷却材が喪失した場合の熱中性子遮蔽効果の差が小さいことより（中性子利用率の回復が小さいこと）、冷却材ボイド反応度を負側に移行させると考えられる。

1.3 今回の燃料集合体の検討

今回の大型燃料集合体の実験では、5.4本及び6.0本燃料集合体の核特性を調べることを目的としたが、5.4本燃料集合体の場合については、1.1、1.2に示した局所出力ピーキング係数、冷却材ボイド反応度の改善策を考慮した、燃料集合体についても実験により特性を調べた。

今回の実験では、各燃料集合体の冷却材ボイド率をパラメータとした反応度、熱中性子束分布、スベクトルインテンシティの測定をおこなった。

2. 実験条件

第 2 章 実 験 条 件

大型燃料集合体の実験は、重水臨界実験装置において、炉心中心部 1 チャンネルに各種燃料集合体を装着し、その周囲のドライバ燃料として、「ふげん」用の 2.8 本燃料集合体を 2.0 cm 格子間隔に 136 体配置して行った。(Fig. 2-1 参照)

中心の燃料チャンネルにおける冷却材は、0.5 ポイドにおいて燃料下端より 2000 mm まで軽水を満たし、10.0% ポイドにおいては空気を満たした。ドライバ燃料には常に空気を満たした。今回の実験では、使用燃料として大型炉燃料には 1.5 wt% UO_2 、2.8 本燃料集合体には 1.2 wt% UO_2 を用いた。

実験に用いられた燃料集合体は 6 種類で、冷却材ポイド率はそれぞれ 2 種類 (0%, 10.0%) を使用した。臨界水位による反応度の測定は全ケースについて行った。また燃料領域の熱中性子束分布の測定は、6.0 本燃料集合体、5.4 本燃料集合体、Gd 吸収棒入り 5.4 本燃料集合体についてのみ行った。

Table 2-1 に実験項目と冷却材ポイド率を示した。

また、Fig. 2-2 ~ Fig. 2-5 には各種燃料集合体の概略図を示した。Fig. 2-6 ~ Fig. 2-10 には、中心チャンネルの断面図及び幾何学的寸法を示した。また付録 1, 2 には、燃料、冷却材その他炉心構造材の詳細を示した。

Fig. 2-11, 2-12, 2-13 には、DCA 炉心に装着された燃料集合体の写真を示した。

Fig. 2-14 には、5.4 本燃料集合体の中心部に挿入された Gd 吸収棒 (A1 被覆管中に $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ 粉末入) 及び Cd 吸収棒 (A1 被覆管中に A1 ベレットを入れ、その被覆管の周囲に 0.5 mm 1 の Cd リングをまいたもの) の断面図を示した。

Table 2-1 Experimental Items

Case Number	Fuel Cluster	Coolant Void Fraction (%)	Reactivity Measurement	Thermal Flux Measurement	Spectral Index Measurement
1	60-pin Cluster	0	○	○	○
2		100	○	○	○
3	54-pin Cluster	0	○	○	○
4		100	○	○	○
5	54-pin Cluster with Central Air-filled Al Can	0	○	-	-
6		100	○	-	-
7	54-pin Cluster with Central Al Tube	0	○	-	-
8		100	○	-	-
9	54-pin Cluster with Central Gd Absorber	0	○	○	○
10		100	○	○	○
11	54-pin Cluster with Central Cd Absorber	0	○	-	-
12		100	○	-	-

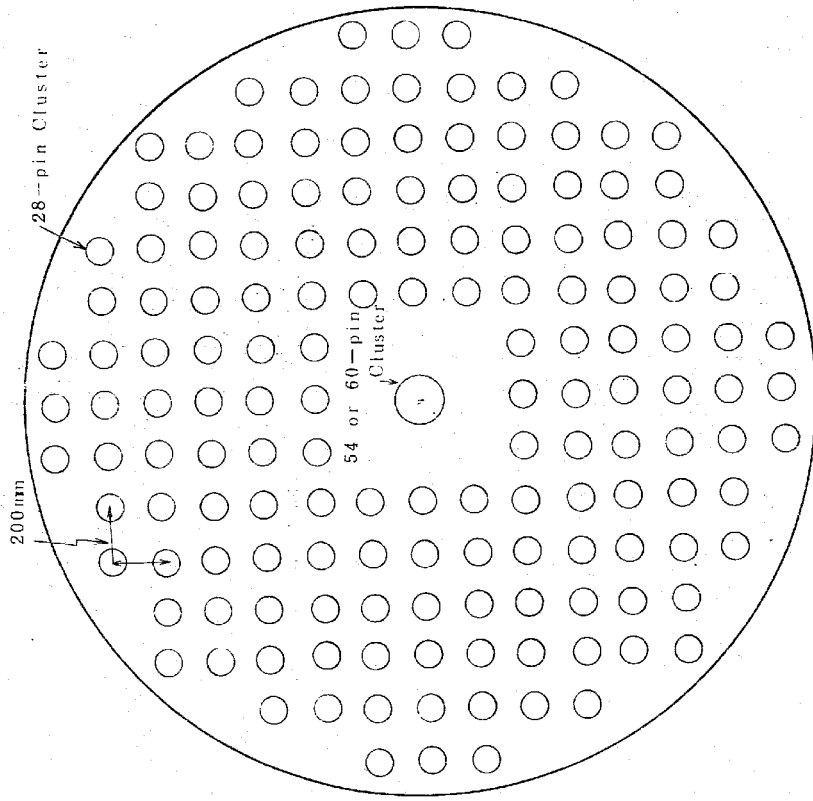


Fig. 2-1 Core Configuration of DCA

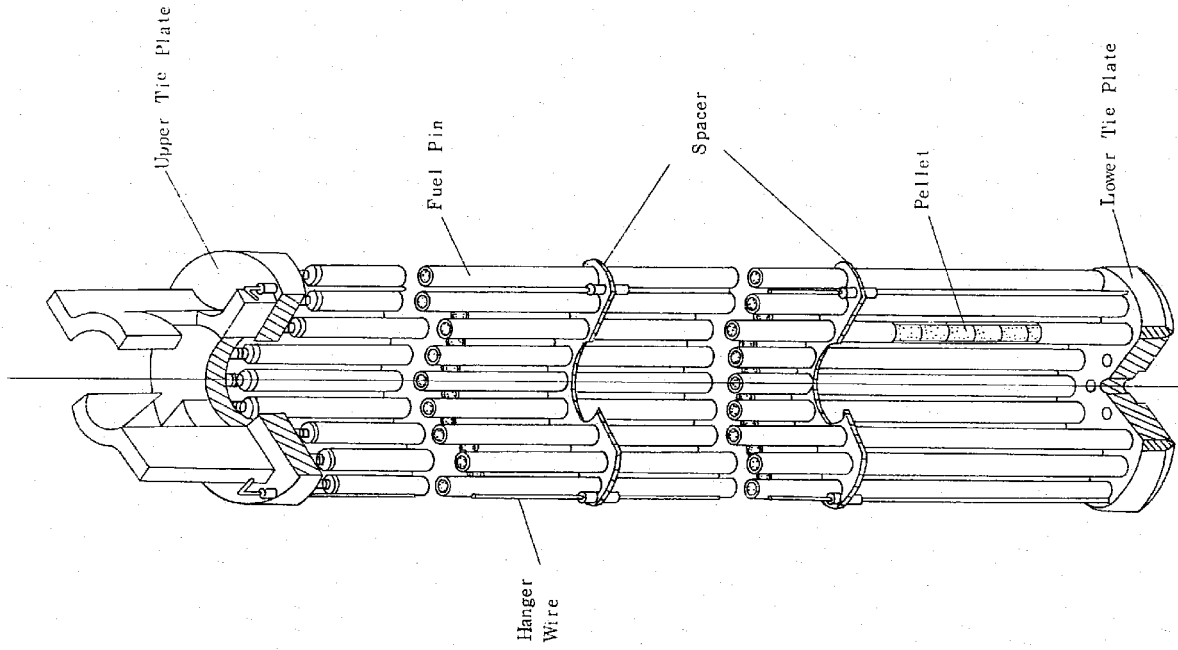


Fig. 2-3 Schematic View of 54-pin Cluster

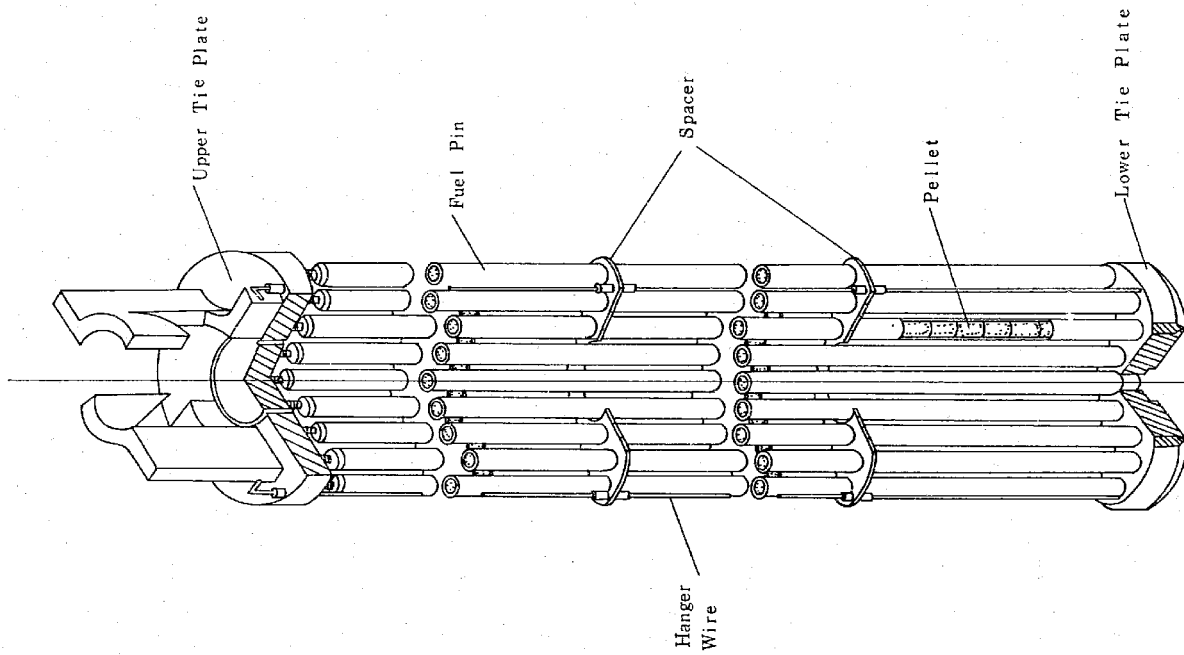


Fig. 2-2 Schematic View of 60-pin Cluster

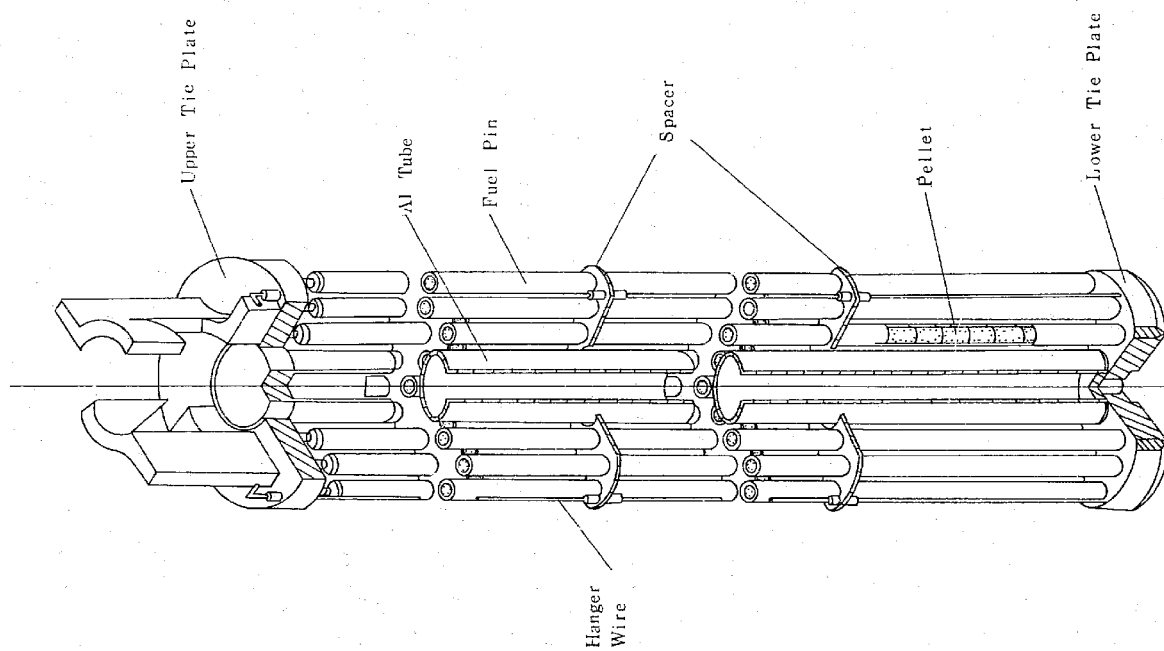


Fig. 2-4 Schematic View of 54-pin Cluster with Al Tube in the Central Region of the Cluster

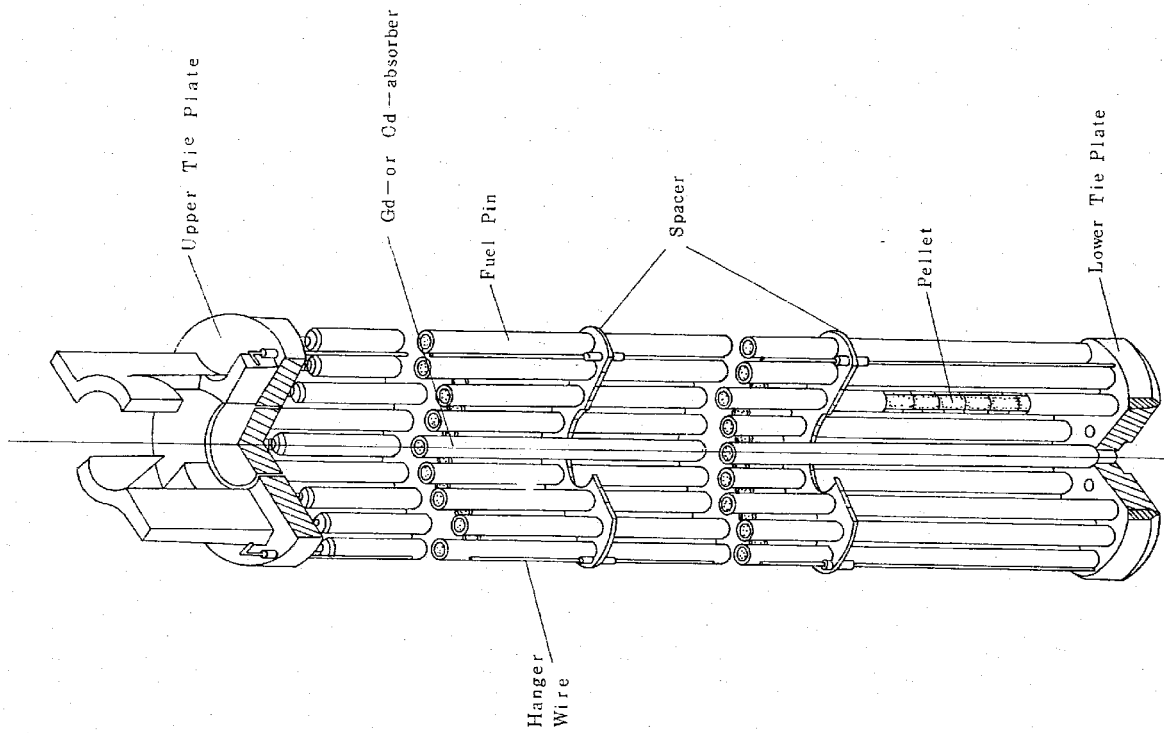


Fig. 2-5 Schematic View of 54-pin Cluster with Gd-absorber or Cd-absorber in the Central Region of the Cluster

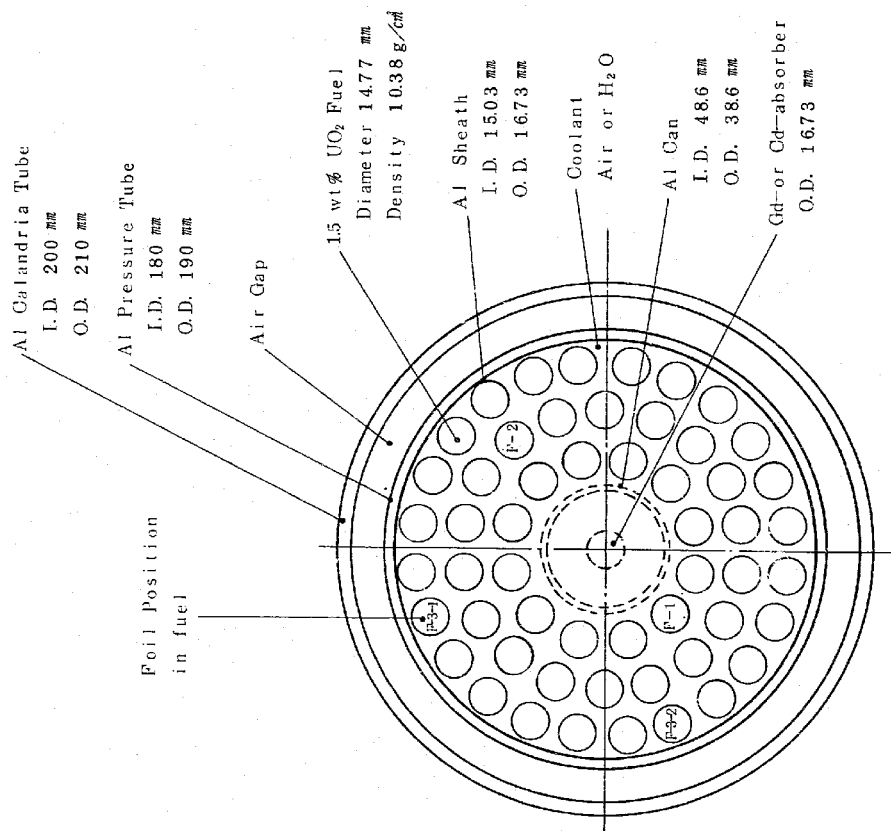


Fig. 2-6 Cross Section of Fuel Region

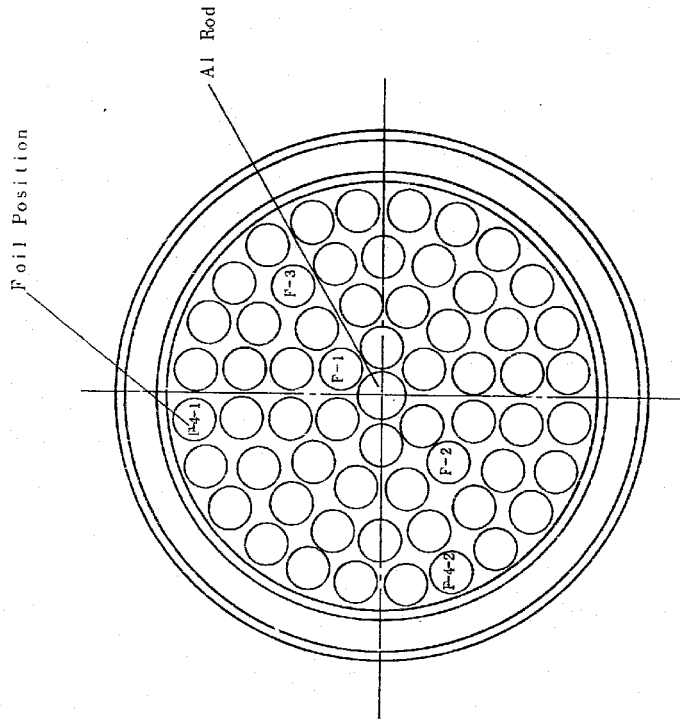


Fig. 2-7 Cross Section of 60-pin Cluster

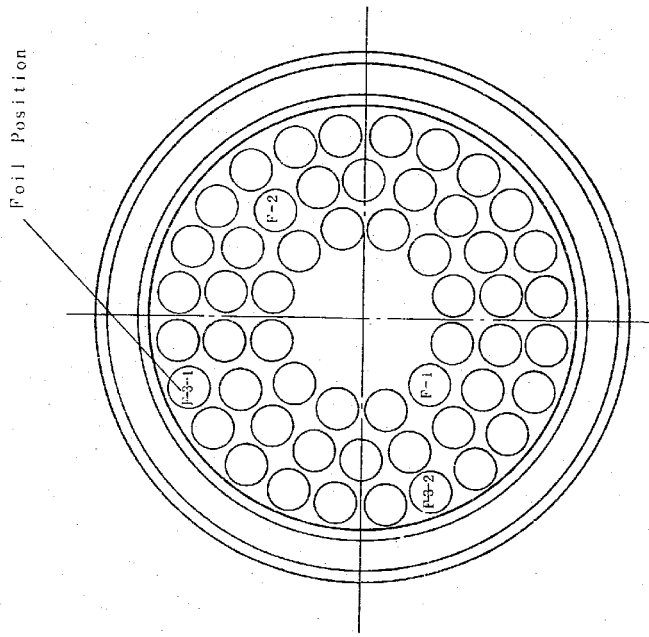


Fig. 2-8 Cross Section of 54-pin Cluster

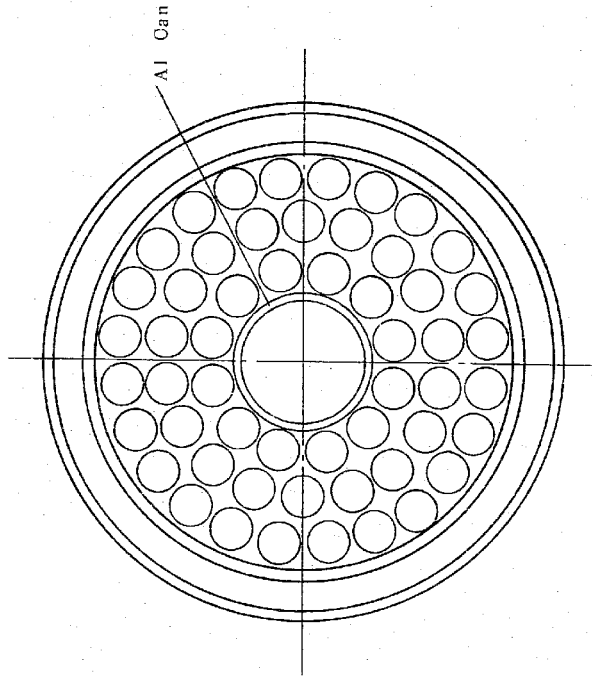


Fig. 2-9 Cross Section of 54-pin Cluster
with an Air-filled Can.

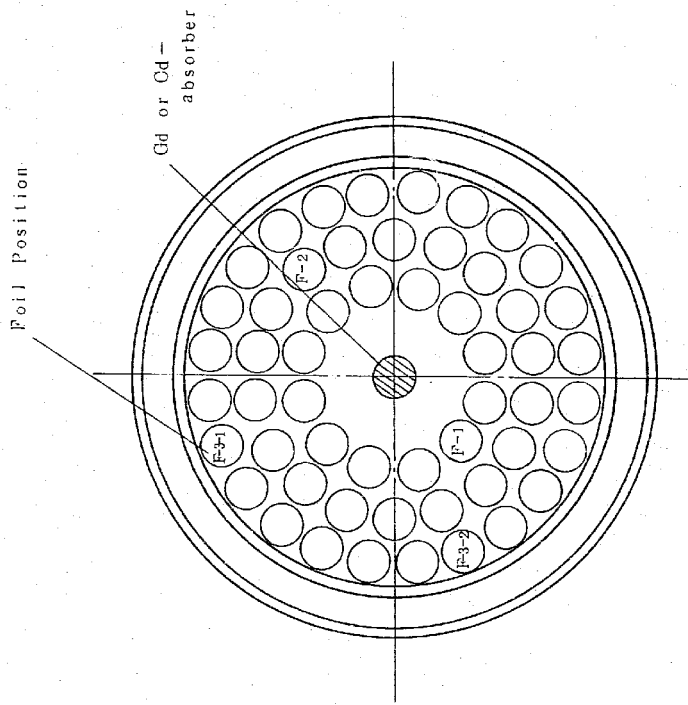


Fig. 2-10 Gross Section of 54-pin Cluster with a Central Cd-or Cd-absorber



Fig. 2-11 Photograph of Test Fuel Region

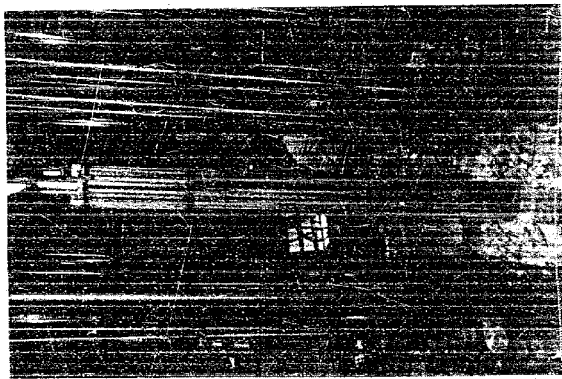


Fig. 2-12 Photograph of Fuel Cluster



Fig. 2-13 Photograph of Fuel Cluster

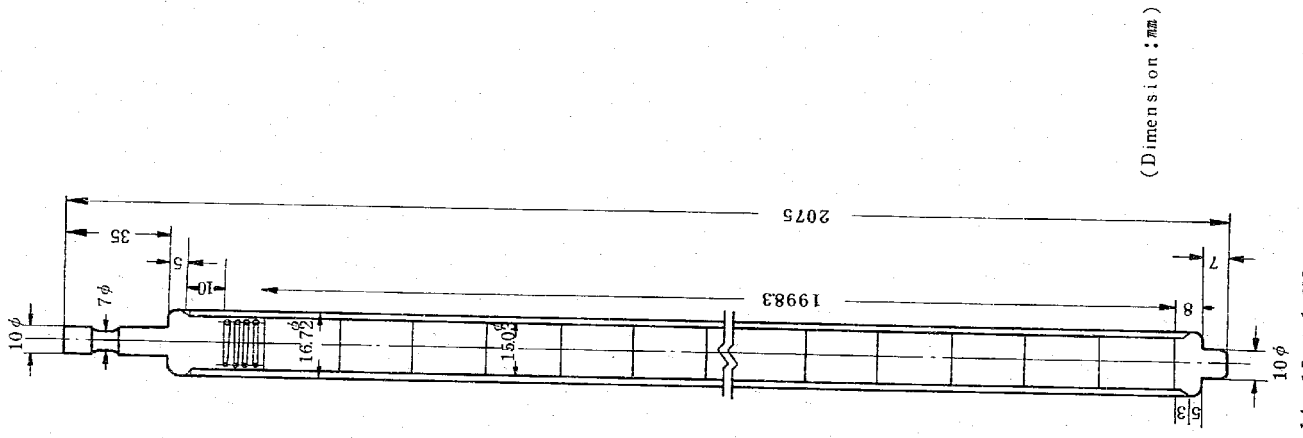


Fig. 2-14 15wt% UO₂ Fuel Pin

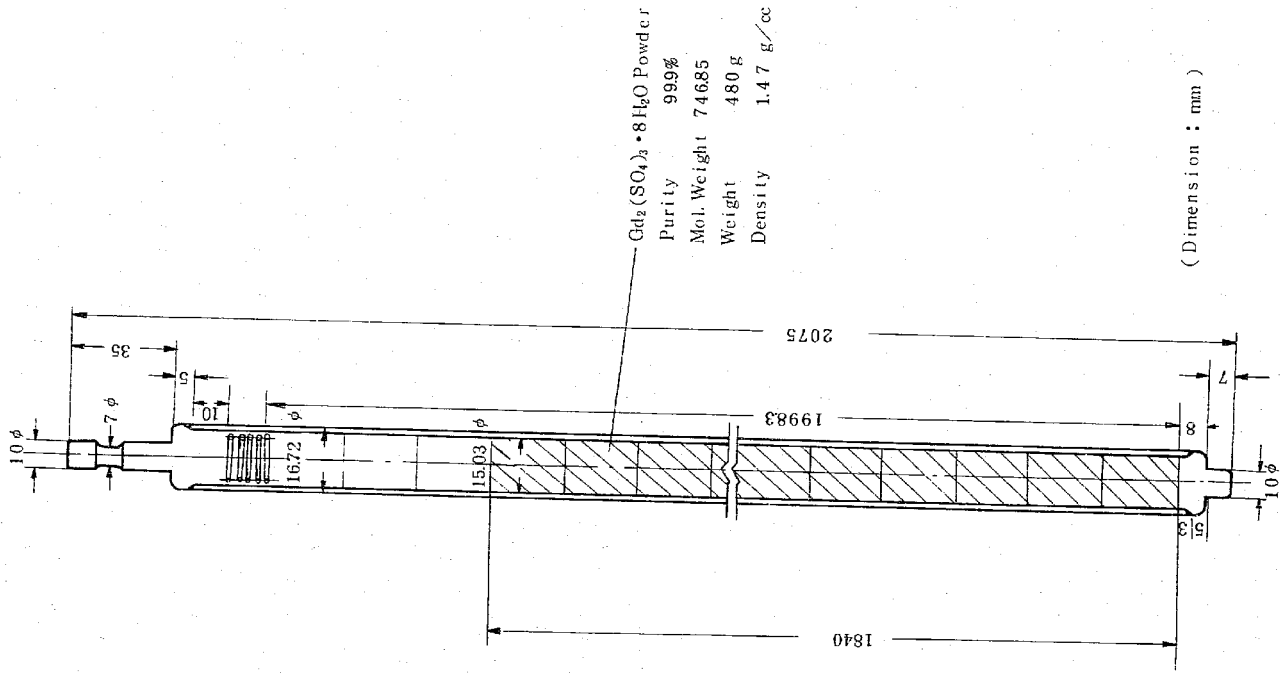


Fig. 2-16 Gd-absorber Rod (Type-2)

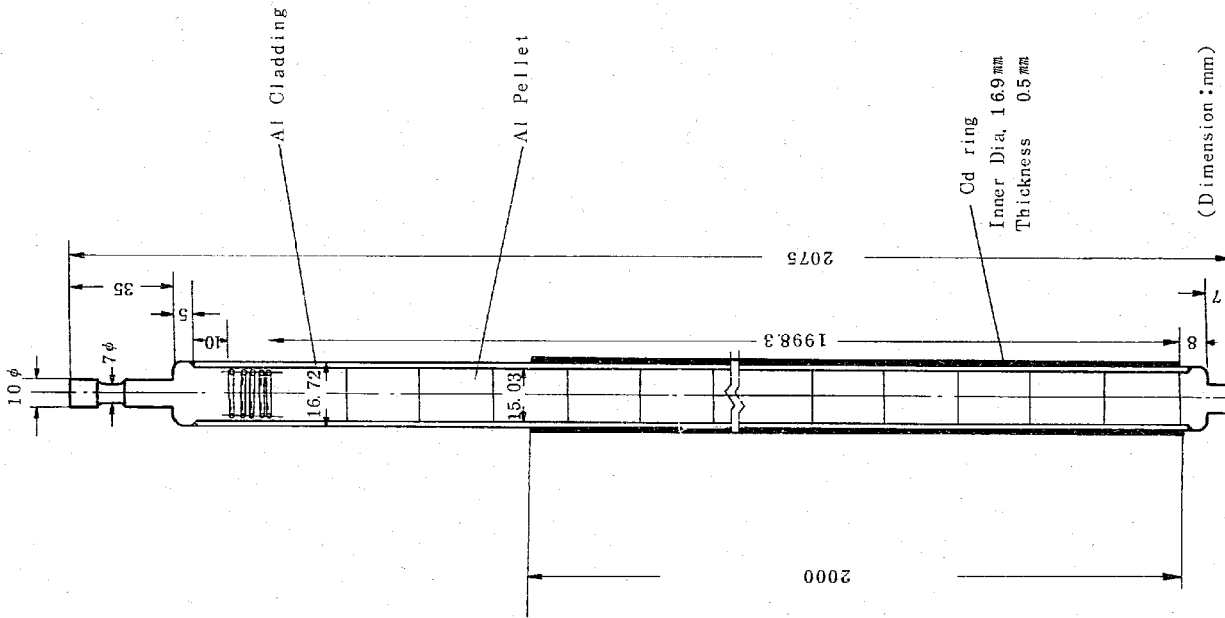


Fig. 2-15 Cd-absorber Rod (Type-1)

3. 実験方法

第3章 実験方法

今回の実験における冷却材喪失時(0%ポイント→100%ポイント)の冷却材ポイント反応度、燃料領域及び、減速材領域の熱中性子束分布、燃料領域のスベクトルインデックス、また局所出力カーキング係数の測定方法について以下に示す。

3.1 冷却材ポイント反応度の測定

冷却材ポイント装を変えて、各種燃料集合体をDCAに装荷した時の臨界水位より燃料集合体の反応度を測定した。

重水位と水位反応度の関係は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial H} = \frac{\alpha}{(H + \delta H)^3} \dots\dots\dots (3-1)$$

ここで

H: 臨界水位 (cm)

δH : 外挿距離 (cm)

この値は、中心チャンネル燃料集合体中心に挿入した Cuワイヤーによる軸方向中性子束分布の測定値を、コサイン関数にフィッティングして求める。

$\frac{\partial \rho}{\partial H}$: 重水位反応度 (β/cm)

正の炉周期法により求める。

$$\alpha = \frac{2\pi M^2}{\beta_{eff} \cdot K_{\infty}}$$

$\frac{\partial \rho}{\partial H}$ 及び $(H + \delta H)$ より求める。

今回の実験では、54本クラスターの0%ポイントにおける軸方向分布の測定値より求めた外挿距離を、すべての実験ケースに共通に用いた。共通に使用したことによる外挿距離の誤差は、約5%である。

冷却材ポイント反応度は、次式より求められる。

$$\rho = \int_{h_1}^{h_2} \frac{\alpha}{(H + \delta H)^3} dH \dots\dots\dots (3-2)$$

ここで、 h_1 : 0% ポイントにおける臨界水位 (cm)

h_2 : 100% ポイントにおける臨界水位 (cm)

3.2 熱中性子束分布の測定

燃料領域、冷却材領域、圧力管外側表面、減速材領域の熱中性子束分布は、Dy-AI合金箱を用いた箱放射法により求めた。

燃料中の熱中性子束分布測定には、Table 3-1 に示した直径1.48mmφ、厚さ0.1mmのDy-AI合金箱を、Fig. 3-1 に示した様に0.02mmのAl箱で包み、カセット箱として用いた。カセット箱は図の(A)の位置に配置し、また、カドミウム比を測定するため、上方300.0mmの(B)の位置にカドミウムディスク、カドミウム比を測定したカセット箱を配置した。カセット箱のAl被覆管中への配置は、上部端栓を取りはずして燃料ペレットを取り出し、カセット箱を測定する位置に配置し燃料ペレットとともに挿入した。照射したカセット箱を取り出す場合は、この逆の手順で取り出した。

冷却材中の熱中性子束分布の測定は、Dy-AIシートを幅2mm、長さ200mmのテープ状に切断し、燃料棒と燃料棒の間に挿入しておこなった。圧力管外側でのDy放射量の測定には、7mmφのDy-AI箱を、スコッチテープで圧力管外側にはりつけておこなった。

減速材中の分布は、7mmφのDy箱をAlホルダーに1cm間隔で取り付け、Fig. 3-2 に示した様にカランドリア管とカランドリア管の間に、炉心上部よりナイロン系で0°方向に吊り下げて測定をおこなった。

熱中性子束分布測定における箱の全体の配置図をFig. 3-3 に示した。炉心内に配置した箱は100Wで30分間照射し、照射後、Dy-AI箱の放射量をCaF₂(Eu)シンチレーションカウンタで測定した。

燃料中で照射された1.48mmφの箱は、全体の放射量の測定後、燃料中の微細な分布を測定するため、Fig. 3-4 の箱打ち抜き装置でFig. 3-5 の様に切断し、切断した箱の放射量を測定した。

炉心全体の軸方向及び半径方向の中性子束分布の測定は、3mmφのCuワイヤを用いて行った。その炉心内配置はFig. 3-6 に示した。

3.3 スペクトルインデックスの測定

燃料中におけるスペクトルインデックスとしては、次式で定義される。

$$\text{スペクトルインデックス} = \frac{(\text{K箱の放射量}) / \text{j層の燃料棒}}{(\text{K箱の放射量}) / \text{標準スペクトル箱}} \dots (3-3)$$

今回のスペクトルインデックスの測定は、Dy-AI合金箱、Au箱、Cu箱、Lu-AI合金箱、Eu-AI合金箱、濃縮U-AI箱、天然U箱、の7種類の箱を用いておこなった。Table 3-1

に各種箱の特性を示した。濃縮U箱、天然U箱はそれぞれ別々のカセットに包み、また、Dy、Au、Cu箱は積重ねて1つのAlカセットに包み、Fig. 3-1のBare Irradiationの位置(A)と、Cd-Covered Irradiationの位置(B)に配置した。またLu箱、Eu箱は1つのカセットにして、Bare Irradiation (C)の位置に配置した。照射は500Wで30分間おこない、照射後のそれぞれ箱の放射量は、Table 3-1 に示した放出粒子及びエネルギーについて、CaF₂(Eu)シンチレーションカウンタまたは、NaI(Tl)シンチレーションカウンタで測定をおこなった。

標準のスペクトル場における上記箱の照射は、立教大学原子炉の黒鉛サーマルコラムで50KWで75分間おこなった。

サーマルコラムにおけるAuのカドミウム比は1400、Dyのカドミウム比は2600であった。

3.4 局所ピーキング係数

局所出力ピーキング係数は濃縮U箱、天然U箱の放射量より求めた。

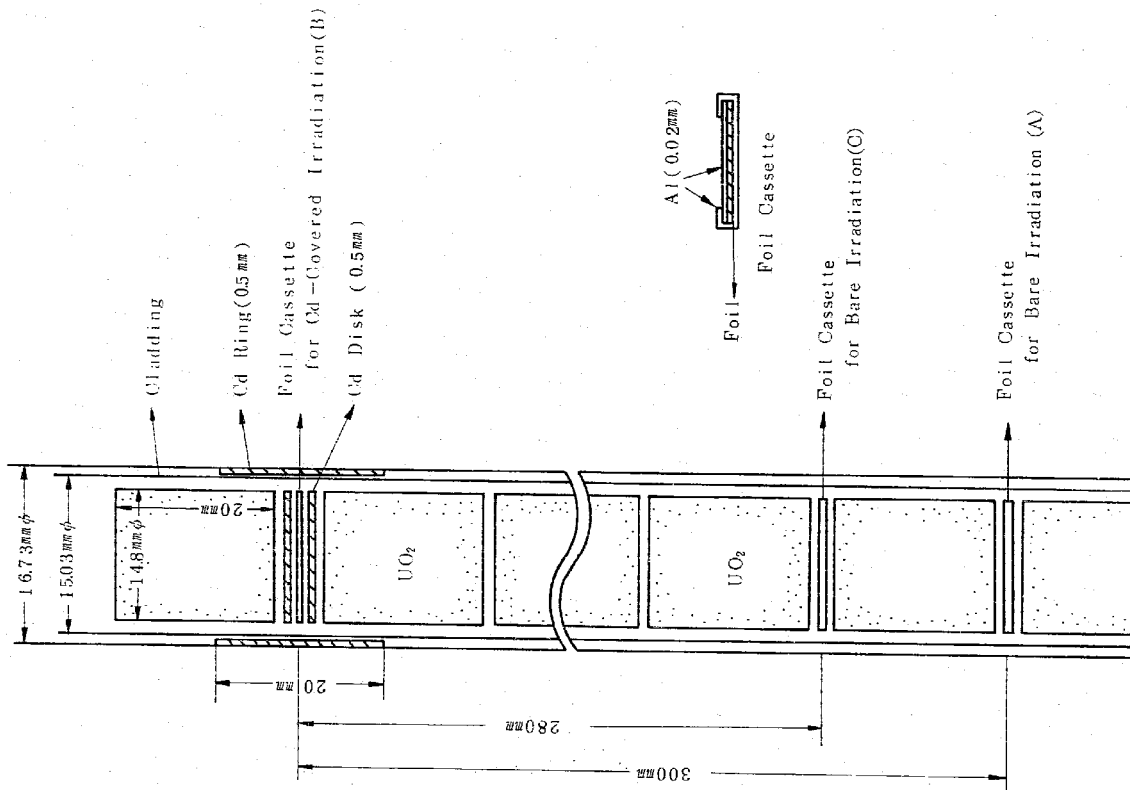


Fig 3-1 Foil Arrangement in the UO₂ Fuel Pin

Detector	Activity	Measured Particle and Energy (MeV)	Half-Life	Resonance Energy (eV)	Composition of Material	Diameter (mm)	Thickness (mm)
¹⁶⁴ Dy	¹⁶⁵ Dy	β-ray and γ-ray	139 min	Close to 1/v	4% Dy-Al Alloy	1.48	0.1
¹⁹⁷ Au	¹⁹⁸ Au	γ-ray	27 day	491	100% Metal	1.48	0.02
⁶³ Cu	⁶⁴ Cu	γ-ray	128 hr	1/v	99.99% Metal	1.48	0.1
¹⁷⁶ Tu	^{177m} Tu	γ-ray	67 day	0142	4% Lu-Al Alloy	1.48	0.1
¹⁵¹ Bu	^{152m} Bu	γ-ray	93 hr	0461	01% Eu-Al Alloy	1.48	0.1
²³⁵ U	Fission Product	Integral Counting	-	Close to 1/v	10% U-Al (b) Alloy	1.48	0.1
Natural U	Fission Product	Product T-ray	-	Close to 1/v	100% Metal	1.48	0.1

Table 3-1 Characteristics of Detector Foils

a) Discrimination Threshold
 b) The uranium was enriched to 93% in ²³⁵U

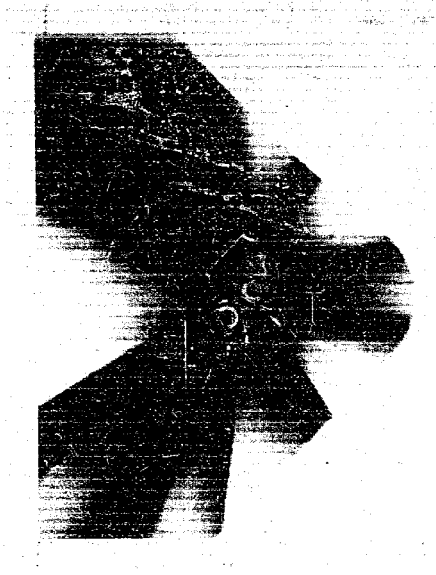


Fig. 3-2 Arrangement of Al Holder in D₂O Moderator

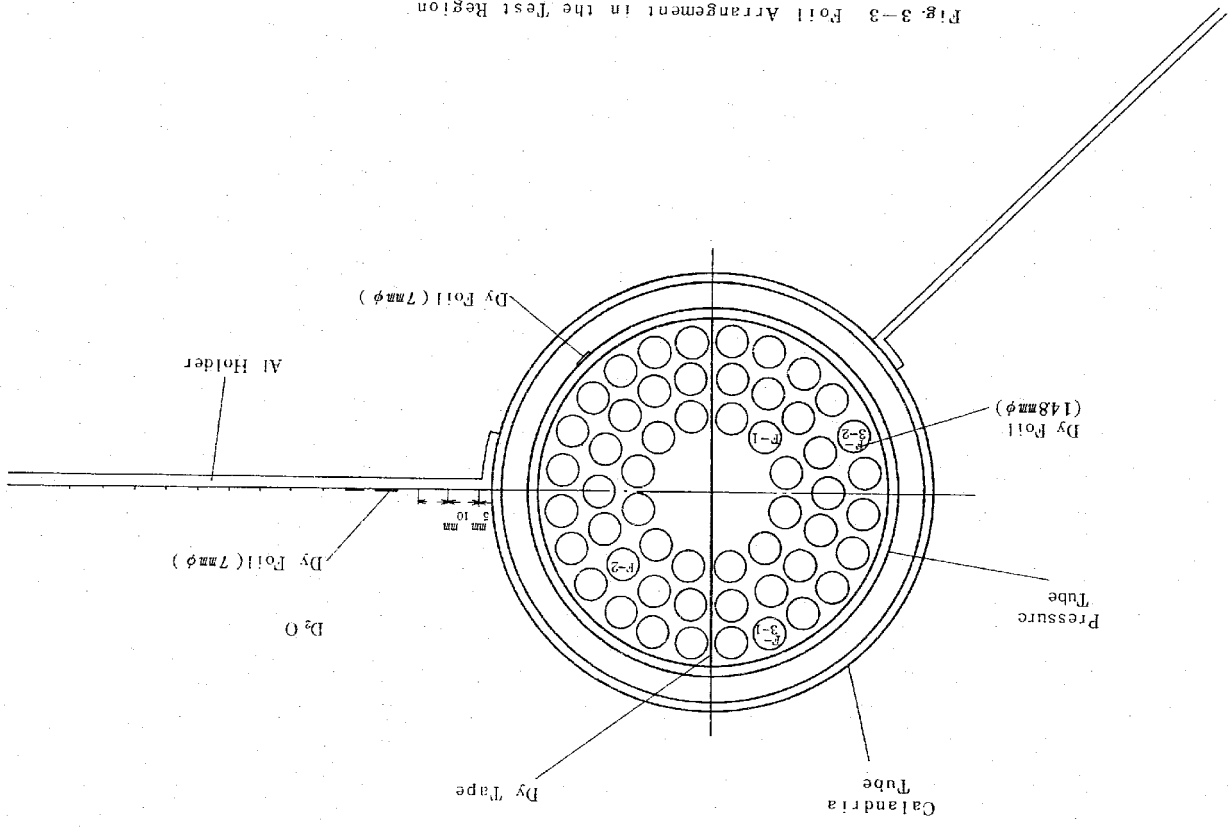


Fig. 3-3 Foil Arrangement in the Test Region

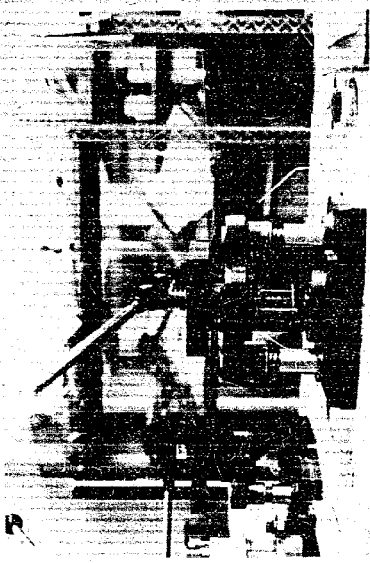


Fig. 3-4 Foil Outter for Measurement of Fine Distribution

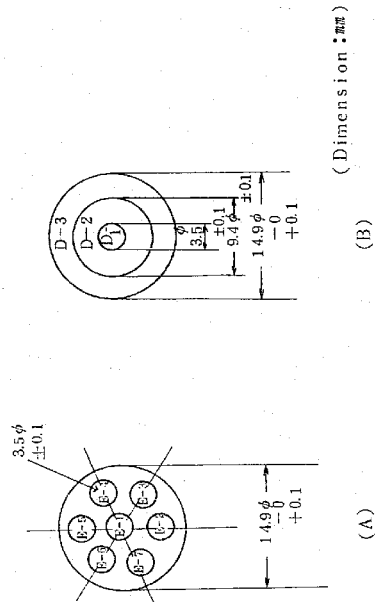


Fig. 3-5 Divided Foils for Measurement of Fine Distribution in Fuel

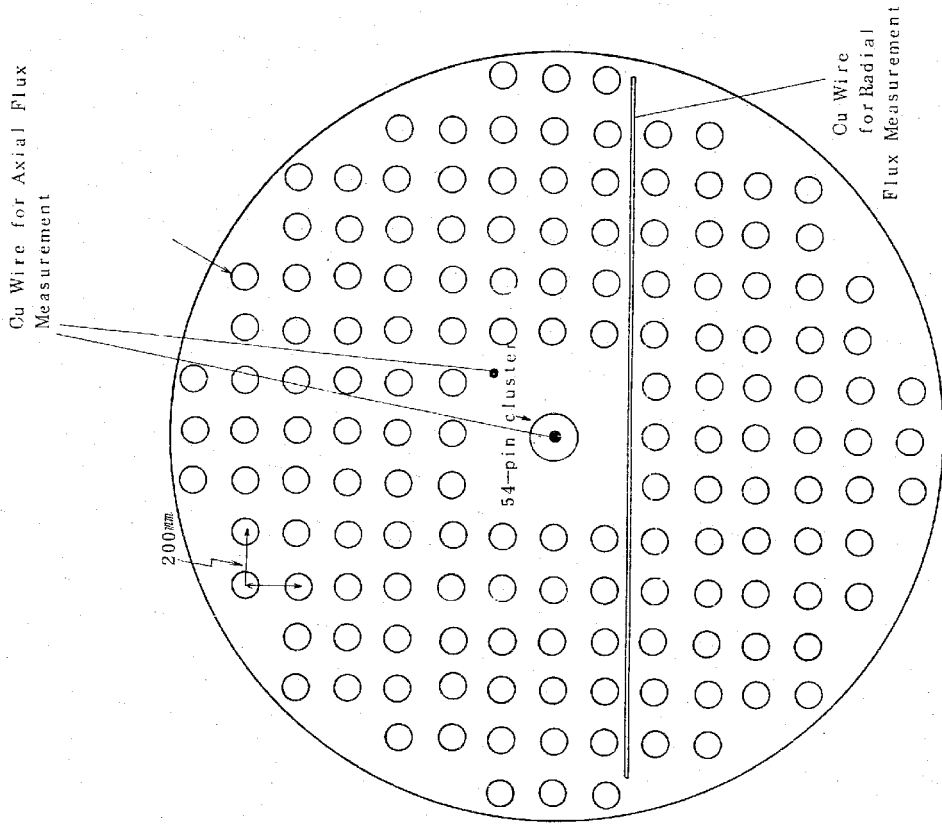


Fig. 3-6 Cu-wire Arrangement for Measurement of Axial and Radial Flux Distribution

4. 実験結果と検討

4 実験結果と検討

4.1 冷却材ポイド反応度

冷却材ポイド反応度は、各種燃料集合体中の冷却材ポイド率を、0%及び100%にした場合の臨界水位の差より式3-2を用いて求めた。Table 4-1に臨界水位、冷却材ポイド反応度、60本燃料集合体の冷却材ポイド反応度を1に規格化した場合の、他の燃料集合体の冷却材ポイド反応度の割合を示した。

冷却材ポイド反応度を、式3-2より求める場合の各定数としては次の値を用いた。

α : 重水位反応度より求め、0%ポイドと100%ポイドにおける値の平均値を使用した。

54本燃料集合体	$(80.98 \pm 3.2) \times 10^6$
60本燃料集合体	$(81.81 \pm 3.2) \times 10^6$

OH: 外挿距離はFig. 4-16, Fig. 4-17に示した様に54本燃料集合体0%ポイドに軸方向中性子束分布を求め、最小乗法によるユサイン曲線のフィッティングより求めた。(外挿距離: $(1.44 \pm 1.5) \text{cm}$)

冷却材ポイド反応度の測定誤差については、次の様に評価した。

臨界水位の誤差	$\pm 0.02\%$ ($\pm 0.2 \text{mm}$)
α の値の誤差	$\pm 4\%$
外挿距離の誤差	$\pm 10\%$
合計	$\pm 4\%$

各種燃料集合体を装荷した場合の炉心の冷却材ポイド反応度はすべて正の値になっている。これは、装荷領域の V_m/V_f (54本で31.6、60本で35.2)が非常に大きいことが原因している。

燃料集合体どうしの冷却材ポイド反応度を60本燃料集合体を基準にしてみると、54本燃料集合体では、多少冷却材ポイド反応度が小さくなっている。また、中心部に空気を満たしたAL管を入れた54本燃料集合体との比較では、逆に冷却材ポイド反応度は大きくなっている。このことより、54本燃料集合体の中心部の取り扱いとしては、空気を満たしておくのではなく、軽水を満たし、冷却喪失時にはそれがぬける構造が冷却材ポイド反応度低減に有効であることがわかった。さらに、今回の新しい燃料集合体として中心に吸収棒を入れた構造については、冷却材ポイド反応度を大きく (Gd_2O_3 吸収棒で13%、cd吸収棒で23%) 負側に移行させることがわかった。今回の大型燃料集合体の実験における冷却材ポイド反応度の結果は、計算値との比較により、大型燃料集合体体系の計算精度の評価ができ、燃料集合体の設計に有効であると思われる。

4.2 熱中性子束分布

測定されたDy箔の放射化量はバックランド、不感時間、冷却および測定時間中の減衰、箔の取出感度、箔の燃料棒内の位置の相違、カドミウム比等の補正がなされた。この様な各補正がなされたDy反応率、ならびに圧力管外側で規格化した値をTable 4-2～Table 4-7に示した。また、Fig. 4-3～Fig. 4-8には圧力管外側で規格化したDy反応率分布を示した。

実験上又はデータ処理上に生じた実験誤差は、冷却材中で $\pm 3\%$ 、圧力管の外側、燃料中、重水中の分布では $\pm 1.5\%$ であった。

燃料中における微細反応率分布の測定結果は、Table 4-8～Table 4-12に示した。60本燃料集合体の第4層、及び54本燃料集合体の第3層のそれぞれ1本の燃料棒内のDyを除いて、すべてFig. 3-5に示した(B)方式箔打ち抜き装置でリング状に分割し、測定した結果である。60本燃料集合体の第4層、54本燃料集合体の第3層については、(A)方式箔打ち抜き装置で分割し測定した結果も示した。

Fig. 4-9～Fig. 4-13に燃料棒内微細反応率分布を示した。黒線は(B)方式箔打ち抜き装置で切断した結果である。破線は(A)方式箔打ち抜き装置で切断した結果のうち、中心の分割層E-1の幅と、分割層E-2からE-7までの値の内、最大値を外側に最小値を内側に示した。(A)方式で切断する場合、切断した箔の位置が燃料棒中のどの位置で照射されたものかわからない。しかし、燃料集合体内におかれた燃料棒中の熱中性子束分布は燃料集合体の熱中性子束分布結果により、燃料集合体の外側を向いている部分の方が中心を向いている部分より熱中性子束分布が高くなる。このことは、被覆管にDyテープをまき、被覆管における熱中性子束を測定した時の実験結果より推察できる。このため、今回の(A)方式で切断した箔の燃料棒内での照射時の位置は、反応率の大きい場合は燃料集合体の外側を向いており、小さい場合は燃料集合体の中心を向いていると考えられる。

燃料中内微細反応率分布の測定誤差は $\pm 2.0\%$ であった。冷却材ポイド率における燃料中のDy反応率分布をみると、60本燃料集合体、54本燃料集合体、Cd吸収棒入り54本燃料集合体とも、最外層におけるDyの反応率は誤差の範囲で一致している。

また、重水中のDy反応率分布は 0° 方向もカランドリッド管より約10cmはなれた場所から同じ分布を示している。このことより、0%ポイドにおいては、各種燃料集合体の中心部の構造の相違による熱中性子束分布への影響は、燃料集合体中心層付近だけにとどまり、重水中分布へは影響しないことが認められた。

60本燃料集合体の中心第1層、第2層の反応率は54本燃料集合体第1層にくらべて小さくなっている。これは60本の燃料集合体では中心層に燃料があることにより、自己遮蔽効果が大き

いのに対し、54本燃料集合体では中心層が散乱物質として働き、中心層付近の熱中性子束を増加させていることで説明できる。Gd入り54本燃料集合体においては、中心層水層の真中に吸収棒があるのかかわらず、54本燃料集合体を比較して最外層、中間層の反応率が低下しているだけである。これは重水中から中心に流れこんでくる熱中性子に対し、吸収棒の周囲の重水は熱中性子遮蔽効果として働き、吸収棒への吸収をさまたげているためと考えられる。

100%ポイドにおいては、60本燃料集合体及び54本燃料集合体の燃料中及び重水中のDy反応率分布は、誤差の範囲内でよく一致している。これは、冷却材による熱中性子の散乱効果及び遮蔽効果がなくなり、燃料そのものの吸収による熱中性子束分布がつけられるからであり、また吸収による燃料の自己遮蔽効果は、60本燃料集合体の最内層では飽和してしまつたためであると考えられる。

これに対してGd吸収棒入り54本燃料集合体においては、54本燃料集合体に比べてDy反応率分布は大きく低下している。これは0%ポイドの場合に、中心Gd吸収効果が水の遮蔽効果によりさまたげられていたのが、冷却材がなくなることにより、Gd吸収棒の熱中性子の吸収が増大したことよると考えられる。

以上、0%及び100%ポイドにおける各種燃料集合体のDy反応率分布の測定結果を考察してきたが、この結果より、4.1で示した54本燃料集合体では60本燃料集合体よりも冷却材ポイド反応度が小さくなっていること、及びGd吸収棒の挿入で冷却材ポイド反応度がより負側に移行することの理由についても考察することができる。

すなわち、60本、54本燃料集合体内の熱中性子束分布は、0%ポイドで多少差があるが、100%ポイドであまり差がなく、0%ポイドから100%ポイドに変わった時の熱中性子束分布の回復が多少60本の方が大きいことがわかる。このため、54本燃料集合体が60本燃料集合体より多少冷却材ポイド反応度を良くしていると考えられる。

さらに、Gd吸収棒入り54本燃料集合体については、Fig. 4-9に見られるように吸収棒のない54本燃料集合体に比べて、100%ポイドにおける熱中性子束分布は大きく低下し、熱中性子束分布の回復が小さくなっている。Cd吸収棒が冷却材ポイド反応度を負側に移行させている原因はこのことによると思われる。

燃料中の微細Dy反応率分布の測定結果より、燃料棒内の熱中性子遮蔽効果及び燃料集合体の自己遮蔽効果が、燃料棒内分布に与える影響を調べることができた。すなわちDy箔をリング状に3つに分割したもの(Fig. 3.5 (B)参照)の測定結果より燃料棒内の自己遮蔽効果を、14.8mmφのDy箔を7つに分割したもの(Fig. 3-5 (A)参照)からは燃料集合体の自己遮蔽効果の影響を調べることができた。

燃料棒内自己遮蔽効果については、60本、54本燃料集合体(Gd入りも含む)とも、最外層燃料棒を除いて同じ程度であり、自己遮蔽効果も小さいことが認められた。最外層の燃料棒については、

他の層の燃料棒に比べて自己遮蔽効果が強く表われている。これは燃料集合体内における自己遮蔽効果の一番きつい場所に当り、燃料棒内の自己遮蔽効果よりも燃料集合体の自己遮蔽効果の影響が強く表われており、それによる影響であると思われる。

燃料集合体の自己遮蔽効果の影響は、最外層に強く表われてくる。0%ポイドと100%ポイドとは、100%の方が燃料集合体の自己遮蔽効果による影響が大きく出ている。0%ポイドの場合には、軽水による遮蔽効果があり、燃料自体による燃料集合体の自己遮蔽効果の影響が強く表れないかと思われ。

今回の微細分布測定ではウラン燃料であり、濃縮度が1.5wt%と低いため、今回の粗い分割方法でも十分であると思われるが、今後濃縮度の高い燃料、表面吸収の大きなPu燃料等では、表面のかくでの分割をより細かくおこない、燃料内自己遮蔽効果を調べることが必要であると思

炉心全体の軸方向及び半径方向のCuフイヤー反応率分布の測定結果はFig. 4-16~Fig. 4-18に示した。軸方向分布の測定結果は外挿距離決定にも使用された。

4.3 スペクトルインデックス

スペクトルインデックスは式(3-3)より求められる。各箱の燃料中及びサーマルコラムでの放射化量はTable 4-13~Table 4-18に示した。またFig. 4-14, Fig. 4-15には ^{152m}Eu , ^{171}Lu , ^{176}Lu のNaI(Tl)のシンチレーションカウンターのγ線スペクトルを、そしてFig. 4-16には濃縮ウラン箱のF.P.のγ線スペクトルを参考のために示した。

各種箱の放射化量より今回は、スペクトルインデックスとして

$$\frac{^{151}\text{Eu}}{^{63}\text{Cu}} \cdot \frac{^{151}\text{Eu}}{^{176}\text{Lu}} \cdot \frac{^{151}\text{Eu}}{^{235}\text{U}} \cdot \frac{^{151}\text{Eu}}{^{107}\text{Au}} \cdot \frac{^{176}\text{Lu}}{^{63}\text{Cu}} \cdot \frac{^{176}\text{Lu}}{^{197}\text{Au}} \cdot \frac{^{176}\text{Lu}}{^{235}\text{U}} \cdot \frac{^{176}\text{Lu}}{^{164}\text{Dy}}$$

$$\frac{^{235}\text{U}}{^{164}\text{Dy}} \cdot \frac{^{63}\text{Cu}}{^{164}\text{Dy}} \cdot \frac{^{107}\text{Au}}{^{235}\text{U}} \text{の11種類を求めた。}$$

スペクトルインデックスの測定誤差は、

$$\frac{^{151}\text{Eu}}{^{235}\text{U}} \cdot \frac{^{176}\text{Lu}}{^{235}\text{U}} \text{については}\pm 4.0\%, \text{その他のスペクトルインデックスについ}$$

ては $\pm 3.0\%$ であった。

スペクトルインデックスについての検討は計算値との比較とともに次の報告書においておこないい今回はその実験結果のみ示した。

4.4 局所ピーキング係数(LPF)

濃縮U箱及び天然U箱のF.P.の値より求めた局所出力ピーキング係数は、Table 4-25に示した。

60本及び54本燃料集合体、Gd中心吸収棒入り54本燃料集合体のLPFの実験結果より次の事が認められた。

- 1) LPFは60本燃料集合体が一番悪く、次いでGd中心吸収棒入り燃料集合体、一番良いのは54本燃料集合体である。
- 2) 0%ポイドと100%ポイドのLPFの比較では、100%ポイドの方がLPFは小さくなっている。0%ポイドでは、水の自己遮蔽効果によりLPFを悪くしていると考えられる。
- 3) Gd吸収棒入り54本燃料集合体は、54本燃料集合体と比べて、LPFは4%程度しか大きくならない。これは、Gd吸収棒周囲の軽水遮蔽効果により吸収棒への吸収をふせぎ、かつ、軽水の散乱効果により最内層の反応率を上げていたためである。

Table 4-1 Critical Level and Coolant Void Reactivity

Case Number	Fuel Cluster	Coolant Void Fraction (%)	Critical Level (cm)	Coolant Void Reactivity (0%-100%) (β_{eff})	Void Reactivity (other)	
					Void Reactivity (60)	Void Reactivity (other)
1	60-pin Cluster	0	136.7	+0.494	1.0	
2		100	133.9			
3	54-pin Cluster	0	137.0	+0.485	0.98	
4		100	134.2			
5	54-pin Cluster with Central Air-filled Al Can	0	137.2	+0.519	1.05	
6		100	134.2			
7	54-pin Cluster with Central Al Tube	0	137.1	+0.503	1.02	
8		100	134.2			
9	54-pin Cluster with Central Gd Absorber	0	139.0	+0.432	0.87	
10		100	136.4			
11	54-pin Cluster with Central Cd Absorber	0	139.0	+0.381	0.77	
12		100	136.7			

* $\beta_{eff} = 0.723$

Table 4-2 Dysprosium Reaction Rate Distribution in 60-pin Cluster (0% Void)

Poil Position	Distance from Center (mm)	Dy Bare	Cd-Ratio	C.R-1 C.R	Dysub-Cd	Normalized Value
Fuel	P-1	19.2	4.69	0.979	1.104	0.196
	P-2	38.4	5.23	0.981	1.252	0.222
	P-3	57.6	1.715	0.983	1.686	0.299
	P-4-1	76.8	2.898	0.990	2.869	0.509
	P-4-2	76.8	2.989	0.990	2.962	0.525
Pressure Tube	96.0	5.640		1.00	5.640	1.000
Galandria Tube	106.0	5.954		1.00	5.954	1.056
D ₂ O 0°	1	110.0	6.035	1.950*	6.035	1.070
	2	120.0	6.666		6.666	1.182
	3	130.0	7.088		7.088	1.257
	4	140.0	7.490		7.490	1.328
	5	150.0	7.686		7.686	1.362
	6	160.0	7.799	251.5*	7.799	1.382
	7	170.0	7.994		7.994	1.417
	8	180.0	8.245		8.245	1.462
	9	190.0	8.162		8.162	1.446
	10	200.0	8.380		8.380	1.486
	11	210.0	8.023	229.5*	8.023	1.423
	12	230.0	8.019		8.019	1.422
	13	250.0	7.612	212.0*	7.612	1.350
	14	270.0	6.758		6.758	1.198
	15	290.0	6.097		6.097	1.081
	16	310.0	5.101		5.101	0.904

* Measured the Value at 0% Void of the 54-pin Cluster

Table 4 - 2 Dysprosium Reaction Rate Distribution in 60-pin Cluster (0% Void) (continued)

Foil Position	Distance from Center (mm)	Dy Bare	Cd-Ratio	C. R.-I C. R.	Dysub-Cd	Normalized Value
1	1100	6359		1.00	6359	1.128
2	1200	7083		1.00	7083	1.260
3	1300	7193		1.00	7193	1.275
4	1400	7289		1.00	7289	1.292
5	1500	7728		1.00	7728	1.370
6	1600	8087		1.00	8087	1.434
7	1700	8203		1.00	8203	1.454
8	1800	8219		1.00	8219	1.457
9	1900	8236		1.00	8236	1.460
10	2000	8201		1.00	8201	1.454
11	2100	8633		1.00	8633	1.531
12	2200	8415		1.00	8415	1.492
13	2300	8622		1.00	8622	1.510
14	2400	8353		1.00	8353	1.481
15	2500	8216		1.00	8216	1.457
16	2600	8355		1.00	8355	1.481
17	2700	8075		1.00	8075	1.432
18	2800	7776		1.00	7776	1.379
19	2900	7637		1.00	7639	1.354
20	3000	7562		1.00	7562	1.341
21	3200	6586		1.00	6586	1.168
22	3400	6345		1.00	6345	1.125
23	3600	5976		1.00	5976	1.060
24	3800	5255		1.00	5255	0.932
25	4000	5008		1.00	5008	0.888
26	4200	4447		1.00	4447	0.789
27	4400	3714		1.00	3714	0.659
28	4600	3215		1.00	3215	0.570
29	4800	2647		1.00	2647	0.469

D₂O
45°

Table 4 - 3 Dysprosium Reaction Rate Distribution in 60-pin Cluster (100% Void)

Foil Position	Distance from Center (mm)	Dy Bare	Cd-Ratio	C. R.-I C. R.	Dysub-Cd	Normalized Value
F-1	192	1188	44.3	0.977	1161	0.366
F-2	384	1311	52.2	0.981	1286	0.405
F-3	576	1713	61.0	0.984	1686	0.532
F-4-1	768	2449	79.8	0.987	2417	0.762
F-4-2	768	2403	77.3	0.987	2372	0.748
Pressure Tube	960	3172		1.0	3172	1.000
Calandria Tube	1060	3379		1.0	3379	1.065
1	1100	3831	195.0*	1.0	3831	1.208
2	1200	4618		1.0	4618	1.456
3	1300	5370		1.0	5370	1.693
4	1400	5895		1.0	5895	1.858
5	1500	6362		1.0	6362	2.006
6	1600	6745	251.5*	1.0	6745	2.126
7	1700	6994		1.0	6994	2.205
8	1800	7131		1.0	7131	2.248
9	1900	7403		1.0	7403	2.334
10	2000	7420		1.0	7420	2.339
11	2100	7486	229.5*	1.0	7486	2.360
12	2300	7599		1.0	7599	2.396
13	2500	7209	212.0*	1.0	7209	2.273
14	2700	6790		1.0	6790	2.141
15	2900	5864		1.0	5864	1.849
16	3100	4824		1.0	4824	1.521

* Measured the Value at 0% Void of the 54-pin Cluster

Table 4-3 Dysprosium Reaction Rate Distribution in 60-pin Cluster (100% Void)

Foil Position	Distance from Center (mm)	Dy Bare	Cd-Ratio	C. R-1 C. R	Dysub-Cd	Normalized Value
1	110.0	3965		1.00	3965	1.250
2	120.0	4684		1.00	4684	1.477
3	130.0	5348		1.00	5348	1.686
4	140.0	5956		1.00	5956	1.878
5	150.0	6439		1.00	6439	2.030
6	160.0	6662		1.00	6662	2.100
7	170.0	7142		1.00	7142	2.251
8	180.0	7358		1.00	7358	2.320
9	190.0	7647		1.00	7647	2.419
10	200.0	7669		1.00	7669	2.418
11	210.0	7935		1.00	7935	2.502
12	220.0	7808		1.00	7808	2.462
13	230.0	8359		1.00	8359	2.635
14	240.0	8027		1.00	8027	2.531
15	250.0	8044		1.00	8044	2.536
16	260.0	7760		1.00	7760	2.446
17	270.0	7640		1.00	7640	2.409
18	280.0	7801		1.00	7801	2.459
19	290.0	7439		1.00	7439	2.345
20	300.0	7272		1.00	7272	2.293
21	320.0	6819		1.00	6819	2.150
22	340.0	6374		1.00	6374	2.010
23	360.0	6025		1.00	6025	1.899
24	380.0	5330		1.00	5330	1.680
25	400.0	4644		1.00	4644	1.464
26	420.0	4233		1.00	4233	1.335
27	440.0	3874		1.00	3874	1.221
28	460.0	3324		1.00	3324	1.048
29	480.0	2688		1.00	2688	0.847

D₂O
45°

Table 4-4 Dysprosium Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster (0% Void)

Foil Position	Distance from Center (mm)	Dy Bare	Cd-Ratio	C. R-1 C. R	Dysub-Cd	Normalized Value
F-1	38.4	1365	65.5	0.985	1.346	0.284
F-2	57.6	1560	75.3	0.987	1.540	0.325
F-3-1	76.8	2518	116.1	0.991	2495	0.527
F-3-2	76.8	2416	109.0	0.991	2424	0.512
C-1	0.0	4156		1.00	4156	0.878
C-2	10.0	3993		1.00	3993	0.844
C-3	20.0	3239		1.00	3239	0.684
C-4	30.0	2061		1.00	2061	0.435
C-5	40.0	1511		1.00	1511	0.319
C-6	50.0	1561		1.00	1561	0.330
C-7	60.0	1590		1.00	1590	0.336
C-8	70.0	2116		1.00	2116	0.447
C-9	80.0	2654		1.00	2654	0.561
C-10						
C-11						
C-12						
C-13						
C-14						
C-15						
C-16						
C-17						
C-18						
C-19						
C-20						
C-21						
Pressure Tube	96.0	4733		1.00	4733	1.000
Calandria Tube	106.0	4916		1.00	4916	1.039
1	110.0	5257	195.0	1.00	5257	1.111
2	120.0	5670		1.00	5670	1.198
3	130.0	5980		1.00	5980	1.264
4	140.0	6207		1.00	6207	1.311
5	150.0	6465		1.00	6465	1.366
6	160.0	6636	251.5	1.00	6636	1.402
7	170.0	6855		1.00	6855	1.448
8	180.0	6695		1.00	6695	1.415
9	190.0	6839		1.00	6839	1.445
10	200.0	6966		1.00	6966	1.472
11	210.0	6956	229.5	1.00	6956	1.470
12	230.0	6618		1.00	6618	1.398
13	250.0	6360	212.0	1.00	6360	1.344
14	270.0	5924		1.00	5924	1.252
15	290.0	5240		1.00	5240	1.107
16	310.0	4147		1.00	4147	0.876

D₂O
0°

Table 4-4 Dysprosium Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster (0% Void)

Foil Position	Distance from Center (mm)	Dy Bare	Cd-Ratio	C. R-1 C. R.	Dysub-Cd	Normalized Value
1	1100	5354		1.00	5354	1.131
2	1200	5771		1.00	5771	1.219
3	1300	5881		1.00	5881	1.242
4	1400	6192		1.00	6192	1.308
5	1500	6335		1.00	6335	1.339
6	1600	6538		1.00	6538	1.381
7	1700	6813		1.00	6813	1.440
8	1800	7126		1.00	7126	1.506
9	1900	6812		1.00	6812	1.439
10	2000	6736		1.00	6736	1.423
11	2100	7232		1.00	7232	1.528
12	2200	7040		1.00	7040	1.487
13	2300	7123		1.00	7123	1.505
14	2400	6911		1.00	6911	1.460
15	2500	6964		1.00	6964	1.471
16	2600	6938		1.00	6938	1.466
17	2700	6662		1.00	6662	1.408
18	2800	6336		1.00	6336	1.339
19	2900	6395		1.00	6395	1.351
20	3000	6433		1.00	6433	1.359
21	3200	6053		1.00	6053	1.279
22	3400	5490		1.00	5490	1.160
23	3600	5055		1.00	5055	1.068
24	3800	4562		1.00	4562	0.964
25	4000	4198		1.00	4198	0.887
26	4200	3804		1.00	3804	0.804
27	4400	3238		1.00	3238	0.684
28	4600	2793		1.00	2793	0.590
29	4800	2314		1.00	2314	0.489

D₂O
45°

Table 4-5 Dysprosium Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster (100% Void)

Foil Position	Distance from Center (mm)	Dy Bare	Cd-Ratio	C. R-1		Normalized Value
				C. R.	Dysub-Cd	
F-1	384	1265	49.3	0.980	1240	0.396
F-2	576	1716	62.6	0.984	1689	0.540
F-3-1	768	2084	68.7	0.986	2053	0.656
F-3-2						
C-1						
C-2						
C-3						
C-4						
C-5						
C-6						
C-7						
C-8						
C-9						
C-10						
C-11						
C-12						
C-13						
C-14						
C-15						
C-16						
C-17						
C-18						
C-19						
C-20						
C-21						
Pressure Tube	960	3131		1.00	3131	1.000
Galandria Tube	1060	3260		1.00	3260	1.041
1	1100	3739		1.00	3739	1.194
2	1200	4598		1.00	4598	1.469
3	1300	5212		1.00	5212	1.665
4	1400	5677		1.00	5677	1.813
5	1500	6075		1.00	6075	1.940
6	1600	6491		1.00	6491	2.073
7	1700	6717		1.00	6717	2.145
8	1800	7029		1.00	7029	2.245
9	1900	7149		1.00	7149	2.283
10	2000	7236		1.00	7236	2.311
11	2100	7277		1.00	7277	2.324
12	2300	7326		1.00	7326	2.340
13	2500	7110		1.00	7110	2.271
14	2700	6618		1.00	6618	2.114
15	2900	5774		1.00	5774	1.844
16	3100	4764		1.00	4764	1.522

D₂O
0°

Table 4-5 Dysprosium Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster (100% Void) (Continued)

Foil Position	Distance from Center	Dy Bare	Cd-Ratio	C.R-1 / C.R	Dysub-Cd	Normalized Value
1	110.0	3.838		1.00	3.838	1.226
2	120.0	4.451		1.00	4.451	1.422
3	130.0	5.144		1.00	5.144	1.643
4	140.0	5.646		1.00	5.646	1.803
5	150.0	6.288		1.00	6.288	2.008
6	160.0	6.515		1.00	6.515	2.081
7	170.0	6.882		1.00	6.882	2.198
8	180.0	7.002		1.00	7.002	2.236
9	190.0	7.169		1.00	7.169	2.290
10	200.0	7.428		1.00	7.428	2.372
11	210.0	7.420		1.00	7.420	2.370
12	220.0	7.659		1.00	7.659	2.446
13	230.0	7.714		1.00	7.714	2.464
14	240.0	7.523		1.00	7.523	2.403
15	250.0	7.509		1.00	7.509	2.398
16	260.0	7.716		1.00	7.716	2.464
17	270.0	7.839		1.00	7.839	2.504
18	280.0	7.343		1.00	7.343	2.345
19	290.0	7.159		1.00	7.159	2.287
20	300.0	7.191		1.00	7.191	2.297
21	320.0	6.595		1.00	6.595	2.106
22	340.0	6.224		1.00	6.224	1.988
23	360.0	5.679		1.00	5.679	1.814
24	380.0	5.218		1.00	5.218	1.667
25	400.0	4.603		1.00	4.603	1.470
26	420.0	4.207		1.00	4.207	1.344
27	440.0	3.680		1.00	3.680	1.175
28	460.0	3.174		1.00	3.174	1.014
29	480.0	2.574		1.00	2.574	0.822

Table 4-6 Dysprosium Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster with a Central Cd-absorber (0% Void)

Foil Position	Distance from Center	Dy Bare	Cd-Ratio	C.R-1 / C.R	Dysub-Cd	Normalized Value
F-1	3.84	1.203		0.985*	1.185	0.250
F-2	5.76	1.517		0.987*	1.497	0.316
F-3-1	7.68	2.502		0.991*	2.479	0.524
F-3-2	7.68	2.574		0.991*	2.551	0.539
C-1	1.00	1.545		1.00	1.545	0.326
C-2	1.50	2.049		1.00	2.049	0.433
C-3	2.00	2.269		1.00	2.269	0.479
C-4	2.50	2.291		1.00	2.291	0.484
C-5	3.00	2.062		1.00	2.062	0.436
C-6	3.50	1.762		1.00	1.762	0.372
C-7	4.00	1.529		1.00	1.529	0.323
C-8	4.50	1.553		1.00	1.553	0.328
C-9	5.00	1.691		1.00	1.691	0.357
C-10	5.50	1.782		1.00	1.782	0.377
C-11	6.00	1.778		1.00	1.778	0.376
C-12	6.50	1.659		1.00	1.659	0.351
C-13	7.00	1.840		1.00	1.840	0.389
C-14	7.50	2.175		1.00	2.175	0.460
C-15	8.00	2.520		1.00	2.520	0.532
C-16	8.50	2.582		1.00	2.582	0.546
C-17						
C-18						
C-19						
C-20						
C-21						
Pressure Tube	96.0	4.733		1.00	4.733	1.000
Calandria Tube	106.0	5.114		1.00	5.114	1.080
1	110.0	5.400		1.00	5.400	1.141
2	120.0	5.697		1.00	5.697	1.204
3	130.0	5.938		1.00	5.938	1.255
4	140.0	6.256		1.00	6.256	1.322
5	150.0	6.443		1.00	6.443	1.361
6	160.0	6.728		1.00	6.728	1.422
7	170.0	6.919		1.00	6.919	1.462
8	180.0	6.919		1.00	6.919	1.462
9	190.0	7.100		1.00	7.100	1.500
10	200.0	7.069		1.00	7.069	1.494
11	210.0	7.145		1.00	7.145	1.510
12	230.0	7.054		1.00	7.054	1.490
13	250.0	6.650		1.00	6.650	1.405
14	270.0	6.033		1.00	6.033	1.275
15	290.0	5.265		1.00	5.265	1.112
16	310.0	4.435		1.00	4.435	0.937

* Measured the Value at 0% Void of 54-pin Cluster

Table 4-7 Dysprosium Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber (100% Void)

Foil Position	Distance from Center	Dy Bare	Cd Ratio	C.R-1 C.B.	Dysub-Cd	Normalized Value
Fuel	F-1	38.4	1.000	0.980*	0.980	0.357
	F-2	57.6	1.253	0.984*	1.233	0.449
	F-3-1	76.8	1.825	0.986*	1.798	0.655
	F-3-2	76.8	1.828	0.986*	1.804	0.657
	G-1	10.0	1.042	1.00	1.042	0.333
	G-2	14.0	1.228	1.00	1.228	0.392
	G-3	18.0	1.143	1.00	1.143	0.365
	G-4	22.0	1.246	1.00	1.246	0.398
	G-5	26.0	1.233	1.00	1.233	0.394
	G-6	30.0	1.186	1.00	1.186	0.379
	G-7	34.0	1.187	1.00	1.187	0.379
	G-8	38.0	1.314	1.00	1.314	0.420
	G-9	42.0	1.254	1.00	1.254	0.401
	G-10	46.0	1.352	1.00	1.352	0.432
	G-11	50.0	1.347	1.00	1.347	0.430
	G-12	54.0	1.407	1.00	1.407	0.449
	G-13	58.0	1.514	1.00	1.514	0.484
	G-14	62.0	1.644	1.00	1.644	0.525
	G-15	66.0	1.700	1.00	1.700	0.543
	G-16	70.0	1.811	1.00	1.811	0.578
	G-17	74.0	1.944	1.00	1.944	0.621
G-18	78.0	2.187	1.00	2.187	0.699	
G-19	82.0	2.438	1.00	2.438	0.779	
G-20	86.0	2.531	1.00	2.531	0.808	
G-21						
Pressure Tube	96.0	2746	1.00	1.00	2746	1.000
Calandria Tube	106.0	2859	1.00	1.00	2859	1.041
D ₂ O 0°	1	110.0	3287	1.00	3287	1.197
	2	120.0	4048	1.00	4048	1.474
	3	130.0	4613	1.00	4613	1.680
	4	140.0	5028	1.00	5028	1.831
	5	150.0	5327	1.00	5327	1.940
	6	160.0	5632	1.00	5632	2.051
	7	170.0	6027	1.00	6027	2.195
	8	180.0	6266	1.00	6266	2.282
	9	190.0	6376	1.00	6376	2.322
	10	200.0	6508	1.00	6508	2.370
	11	210.0	6390	1.00	6390	2.327
	12	230.0	6571	1.00	6571	2.393
	13	250.0	6266	1.00	6266	2.282
	14	270.0	5736	1.00	5736	2.089
	15	290.0	5171	1.00	5171	1.883
	16	310.0	4317	1.00	4317	1.572

* Measured the Value at 100% Void of 54-pin Cluster

Table 4-8 Fine Structure of Dysprosium Reaction Rate Distribution in the Fuel Region of the 60-pin Cluster (0% Void)

Foil Position	Divided Region	Dy sub-Cd	Normalized Value
F-1	D-1	1.060	0.188
	D-2	1.089	0.193
	D-3	1.105	0.196
F-2	D-1	1.156	0.205
	D-2	1.235	0.219
	D-3	1.246	0.221
F-3	D-1	1.613	0.286
	D-2	1.686	0.299
	D-3	1.692	0.300
F-4-1	D-1	2.769	0.491
	D-2	2.831	0.502
	D-3	2.916	0.517
F-4-2	E-1	2.820	0.500
	E-2	3.141	0.557
	E-3	3.271	0.580
	E-4	3.012	0.534
	E-5	2.577	0.457
	E-6	2.549	0.452
	E-7	2.764	0.490

Table 4-9 Fine Structure of Dysprosium Reaction Rate Distribution in the Fuel Region of the 54-pin Cluster (0% Void)

Foil Position	Divided Region	Dy _{sub-Cd}	Normalized Value
F--1	D--1	1.292	0.273
	D--2	1.297	0.274
	D--3	1.339	0.283
F--2	D--1	1.477	0.312
	D--2	1.515	0.320
	D--3	1.538	0.325
F--3--1	D--1	2.291	0.484
	D--2	2.442	0.516
	D--3	2.518	0.532
F--3--2	E--1	1.157	0.491
	E--2	1.331	0.565
	E--3	1.326	0.563
	E--4	1.136	0.482
	E--5	1.020	0.433
	E--6	1.055	0.448
	E--7	1.147	0.487

Table 4-10 Fine Structure of Reaction Rate Distribution in the Fuel Region of the 54-pin Cluster (100% Void)

Foil Position	Divided Region	Dy _{sub-Cd}	Normalized Value
F--1	D--1	1.190	0.380
	D--2	1.218	0.389
	D--3	1.240	0.396
F--2	D--1	1.644	0.525
	D--2	1.678	0.536
	D--3	1.691	0.540
F--3--1	D--1	1.882	0.601
	D--2	2.048	0.654
	D--3	2.101	0.671
F--3--2	E--1	1.841	0.588
	E--2	1.691	0.540
	E--3	1.572	0.502
	E--4	1.747	0.558
	E--5	2.113	0.675
	E--6	2.239	0.715
	E--7	2.019	0.645

Table 4-11 Fine Structure of Dysprosium Reaction Rate Distribution in the Fuel Region of the 54-pin Cluster with Gd-absorber at the Center Part (0% Void)

Foil Position	Divided Region	Dy _{sub-Cd}	Normalized Value
F-1	D-1	1.150	0.243
	D-2	1.164	0.246
	D-3	1.193	0.252
F-2	D-1	1.434	0.303
	D-2	1.462	0.309
	D-3	1.496	0.316
F-3-1	D-1	2.347	0.496
	D-2	2.400	0.507
	D-3	2.499	0.528
F-3-2	E-1	2.314	0.489
	E-2	2.494	0.527
	E-3	2.239	0.473
	E-4	2.248	0.475
	E-5	2.385	0.504
	E-6	2.684	0.567
	E-7	2.811	0.594

Table 4-12 Fine Structure of Dysprosium Reaction Rate Distribution in the Fuel Region of the 54-pin Cluster with Gd-absorber at the Center part (100% Void)

Foil Position	Divided Region	Dy _{sub-Cd}	Normalized Value
F-1	D-1	0.975	0.355
	D-2	0.975	0.355
	D-3	0.980	0.357
F-2	D-1	1.219	0.444
	D-2	1.241	0.452
	D-3	1.241	0.452
F-3-1	D-1	1.664	0.606
	D-2	1.757	0.640
	D-3	1.777	0.647
F-3-2	E-1	1.724	0.628
	E-2	1.656	0.603
	E-3	1.483	0.540
	E-4	1.615	0.588
	E-5	1.895	0.690
	E-6	2.073	0.755
	E-7	1.823	0.664

Table 4-13 Foil Activities in the Fuel Pins of 60-pin Cluster at 0% Void Fraction

Foil Position	Activity (counts/sec)						
	¹⁵⁵ Dy	¹⁹⁸ Au	⁶⁴ Cu	¹⁷⁷ Lu	^{152m} Eu	Fission Products of Enriched Uranium	Fission Products of Natural Uranium
F - 1	11280 ± 328	6413 ± 266	4310 ± 057	229 ± 006	7506 ± 165	1965 ± 841	
	2404 ± 144	3460 ± 074	791 ± 018			1947 ± 064	
F - 2	12760 ± 454	6768 ± 284	4672 ± 062	236 ± 005	8592 ± 125	2228 ± 878	
	2464 ± 89	3386 ± 154	717 ± 029			1955 ± 044	
F - 3	17150 ± 1362	7639 ± 126	6121 ± 038	316 ± 008	10724 ± 126	2900 ± 109	
	2868 ± 92	3390 ± 20	720 ± 046			1901 ± 134	
F-4-1	28980 ± 1387	1075 ± 244	9552 ± 124	455 ± 011	17092 ± 116	4741 ± 1843	
	2978 ± 178	3473 ± 262	702 ± 086			1898 ± 100	
F-4-2	29890 ± 1703	1095 ± 361	9932 ± 047	470 ± 012	1837 ± 158	4944 ± 1926	
	3011 ± 213	3533 ± 101	725 ± 028			1974 ± 125	
Thermal Column	91440 ± 321	2873 ± 74	352 ± 25	2328 ± 046	6905 ± 30	2392 ± 1090	1875 ± 19
	351 ± 21	207 ± 012					

* Upper values are bare reaction rates.
Lower values are epi-Cd reaction rates.

Table 4-14 Foil Activities in the Fuel Pins of 60-pin Cluster at 100% Void Fraction

Foil Position	Activity (counts/sec)						
	¹⁵⁵ Dy	¹⁹⁸ Au	⁶⁴ Cu	¹⁷⁷ Lu	^{152m} Eu	Fission Products of Enriched Uranium	Fission Products of Natural Uranium
F - 1	11882 ± 630	5486 ± 147	4525 ± 061	234 ± 006	6113 ± 074	2001 ± 936	
	2684 ± 168	2457 ± 055	827 ± 025			186 ± 141	
F - 2	13110 ± 1164	5846 ± 210	4937 ± 068	306 ± 008	6875 ± 140	2253 ± 108	
	2507 ± 57	2535 ± 146	835 ± 023			186 ± 091	
F - 3	17130 ± 1124	7128 ± 251	6211 ± 068	330 ± 008	9126 ± 116	2878 ± 1395	
	2812 ± 175	2830 ± 112	888 ± 044			1957 ± 068	
F-4-1	24490 ± 897	9374 ± 363	8526 ± 063	418 ± 010	12596 ± 185	4082 ± 1897	
	3071 ± 121	3221 ± 156	879 ± 044			2101 ± 144	
F-4-2	24030 ± 1311	9305 ± 183	8445 ± 122		1303 ± 141	4086 ± 1856	
	3107 ± 128	3211 ± 156	901 ± 026			2109 ± 133	
Thermal Column	91440 ± 321	2873 ± 74	352 ± 25	2328 ± 046	6905 ± 30	2392 ± 1090	1875 ± 19
	351 ± 21	207 ± 012					

* Upper values are bare reaction rates.
Lower values are epi-Cd reaction rates.

Table 4-15 Foil Activities in the Fuel Pins of 54-pin Cluster at 0% Void Fraction

Foil Position	Activity (counts/sec)						
	¹⁶⁵ Dy	¹⁹⁸ Au	⁶⁴ Cu	¹⁷⁷ Lu	^{152m} Eu	Fission Products of Enriched Uranium	Fission Products of Natural Uranium
F - 1	13650 ± 482	7061 ± 463	5696 ± 0.51	264 ± 0.07	1011 ± 1.89	2730 ± 8.72	
	2084 ± 30	2879 ± 0.49	60 ± 0.15			1574 ± 0.81	
F - 2	15600 ± 673	6868 ± 4.4	5525 ± 0.79	274 ± 0.07	1008 ± 1.69	2663 ± 9.69	
	2072 ± 3.0	2852 ± 1.3	606 ± 0.22			1582 ± 0.66	
F - 3 - 1	25180 ± 490	1145 ± 3.9	8579 ± 0.91	4.47 ± 0.11	1521 ± 2.04	4336 ± 15.05	
	2169 ± 6.3	3626 ± 2.4	6.07 ± 0.18			1646 ± 1.25	
F - 3 - 2	24440 ± 760	9166 ± 5.09	8298 ± 1.35	3.96 ± 0.10	1509 ± 3.81	4213 ± 13.64	3734 ± 1.0
	2244 ± 4.6	2512 ± 0.86	6.02 ± 0.35			1679 ± 0.95	4.8 ± 0.64
Thermal Column	91440 ± 321 35.1 ± 2.1	2873 ± 7.4 2.07 ± 0.12	352 ± 2.5	2328 ± 0.46	6905 ± 3.0	2392 ± 10.90	1875 ± 1.9

* Upper values are bare reaction rates.
Lower values are epi-Cd reaction rates.

Table 4-16 Foil Activities in the Fuel Pins of 54-pin Cluster at 100% Void Fraction

Foil Position	Activity (counts/sec)						
	¹⁶⁵ Dy	¹⁹⁸ Au	⁶⁴ Cu	¹⁷⁷ Lu	^{152m} Eu	Fission Products of Enriched Uranium	Fission Products of Natural Uranium
F - 1	126546 ± 57.1	6344 ± 3.26	5311 ± 1.18	3.10 ± 0.08	8888 ± 3.41	2413 ± 6.0	
	2566 ± 4.4	2643 ± 1.6	8.25 ± 0.22			1837 ± 0.91	
F - 2	17160 ± 93.7	7163 ± 2.30	6306 ± 0.82	3.82 ± 0.09	1055 ± 1.44	2858 ± 8.57	
	2741 ± 5.8	2794 ± 1.54	8.24 ± 0.42			1854 ± 0.65	
F - 3 - 1	20840 ± 66.5	9303 ± 3.25	8517 ± 0.86	4.33 ± 0.11	1508 ± 1.05	4005 ± 12.02	
	3032 ± 11.9	3182 ± 1.80	8.60 ± 0.52			2019 ± 0.81	
F - 3 - 2	24160 ± 47.7	9341 ± 1.97	8558 ± 0.63	4.37 ± 0.11	1476 ± 1.13	3969 ± 11.91	3595 ± 10.8
	3042 ± 13.3	3186 ± 1.76	8.60 ± 0.33			1984 ± 0.80	5456 ± 1.94
Thermal Column	91440 ± 321 35.1 ± 2.1	2873 ± 7.4 2.07 ± 0.12	352 ± 2.5	2328 ± 0.46	6905 ± 3.0	2392 ± 10.90	1875 ± 1.9

* Upper values are bare reaction rates.
Lower values are epi-Cd reaction rates.

Table 4-17 Foil Activities in the Fuel Pins of 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber at 0 % Void Fraction

Foil Position	Activity (counts/sec)						
	¹⁶⁵ Dy	¹⁹⁸ Au	⁶⁴ Cu	¹⁷⁷ Lu	^{152m} Eu	Fission Products of Enriched Uranium	Fission Products of Natural Uranium
F - 1	12050 ± 531	6403 ± 255	4818 ± 016	266 ± 007	9424 ± 138	2411 ± 1145	
F - 2	15210 ± 1089	7146 ± 74	5203 ± 140	288 ± 007	1025 ± 102	2653 ± 1239	
F - 3 - 1	25210 ± 459	9206 ± 92	8302 ± 140	430 ± 011	1663 ± 156	4291 ± 1866	
F - 3 - 2	25950 ± 1472	9323 ± 845	8496 ± 082	447 ± 011	1651 ± 171	4492 ± 1957	3943 ± 13
Thermal Column	91440 ± 321 351 ± 21	2873 ± 74 207 ± 012	352 ± 25	2328 ± 046	6905 ± 30	2392 ± 1090	1875 ± 19

* Upper values are bare reaction rates.
Lower values are epi-Cd reaction rates.

Table 4-18 Foil Activities in the Fuel Pins of 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber at 100% Void Fraction

Foil Position	Activity (counts/sec)						
	¹⁶⁵ Dy	¹⁹⁸ Au	⁶⁴ Cu	¹⁷⁷ Lu	^{152m} Eu	Fission Products of Enriched Uranium	Fission Products of Natural Uranium
F - 1	10050 ± 1102	5231 ± 489	4254 ± 032	324 ± 008	7429 ± 132	2016 ± 491	
F - 2	12620 ± 983	6088 ± 099	5072 ± 090	383 ± 010	9120 ± 114	2483 ± 490	
F - 3 - 1	18470 ± 1224	8042 ± 242	7210 ± 066	464 ± 012	1366 ± 094	3631 ± 729	
F - 3 - 2	18500 ± 714	7996 ± 274	7228 ± 080	495 ± 012	1358 ± 113	3593 ± 805	332 ± 06
Thermal Column	91440 ± 321 351 ± 21	2873 ± 74 207 ± 012	352 ± 25	2328 ± 046	6905 ± 30	2392 ± 1090	1875 ± 19

* Upper values are bare reaction rates.
Lower values are epi-Cd reaction rates.

Table 4-19 Spectral Indices Measured in 60-pin Cluster at 0 % Void Fraction

Foil Position	Index										
	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	²³⁵ U	⁶³ Cu	¹⁹⁷ Au
	⁶³ Cu	¹⁷⁶ Lu	²³⁵ U	¹⁹⁷ Au	⁶³ Cu	¹⁹⁷ Au	²³⁵ U	¹⁶⁴ Dy	¹⁶⁴ Dy	¹⁶⁴ Dy	²³⁵ U
F - 1	0.888	1.105	1.322	0.488	0.8033	0.4407	1.2010	0.80	0.654	1.0	2.718
F - 2	0.937	1.227	1.336	0.529	0.764	0.4309	1.0884	0.73	0.654	1.0	2.530
F - 3	0.893	1.144	1.280	0.583	0.7806	0.5111	1.1202	0.72	0.654	1.0	2.193
F-4-1	0.912	1.267	1.249	0.663	0.7201	0.5222	0.9866	0.62	0.615	0.75	1.888
F-4-2	0.943	1.318	1.284	0.700	0.7159	0.5296	0.9774	0.62	0.654	0.75	1.845

-60-

PNC TN94178-84

Table 4-20 Spectral Indices Measured in 60-pin Cluster at 100% Void Fraction

Foil Position	Index										
	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	²³⁵ U	⁶³ Cu	¹⁹⁷ Au
	⁶³ Cu	¹⁷⁶ Lu	²³⁵ U	¹⁹⁷ Au	⁶³ Cu	¹⁹⁷ Au	²³⁵ U	¹⁶⁴ Dy	¹⁶⁴ Dy	¹⁶⁴ Dy	²³⁵ U
F - 1	0.689	0.881	1.055	0.463	0.782	0.527	1.201	0.773	0.654	1.0	2.283
F - 2	0.710	0.757	1.055	0.483	0.939	0.646	1.396	0.917	0.654	1.0	2.161
F - 3	0.749	0.932	1.097	0.533	0.803	0.572	1.179	0.756	0.654	1.0	2.062
F-4-1	0.753	1.016	1.069	0.558	0.741	0.558	1.053	0.670	0.654	0.750	1.912
F-4-2	0.786		1.104	0.583					0.654	1.0	1.896

-61-

PNC TN94178-84

Table 4-21 Spectral Indices Measured in 54-pin Cluster at 0% Void Fraction

PNC TN94178-84

Foil Position	Index										
	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	²³⁵ U	⁶³ Cu	¹⁹⁷ Au
	⁶³ Cu	¹⁷⁶ Lu	²³⁵ U	¹⁹⁷ Au	⁶³ Cu	¹⁹⁷ Au	²³⁵ U	¹⁶⁴ Dy	¹⁶⁴ Dy	¹⁶⁴ Dy	²³⁵ U
F - 1	0.905	1.291	1.280	0.596	0.701	0.462	0.994	0.760	0.769	1.0	5.815
F - 2	0.930	1.240	1.311	0.613	0.750	0.493	1.058	0.690	0.654	1.0	2.147
F-3-1	0.904	1.147	1.215	0.554	0.788	0.481	1.060	0.697	0.654	0.750	2.199
F-3-2	0.927	1.285	1.239	0.688	0.721	0.533	0.966	0.636	0.654	0.750	1.812

-62-

Table 4-22 Spectral Indices Measured in 54-pin Cluster at 100% Void Fraction

PNC TN94178-84

Foil Position	Index										
	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	²³⁵ U	⁶³ Cu	¹⁹⁷ Au
	⁶³ Cu	¹⁷⁶ Lu	²³⁵ U	¹⁹⁷ Au	⁶³ Cu	¹⁹⁷ Au	²³⁵ U	¹⁶⁴ Dy	¹⁶⁴ Dy	¹⁶⁴ Dy	²³⁵ U
F - 1	0.853	0.967	1.273	0.583	0.883	0.604	1.321	0.962	0.73	1.0	2.189
F - 2	0.853	1.001	1.277	0.613	0.916	0.658	1.374	0.874	0.65	1.0	2.087
F-3-1	0.903	1.174	1.304	0.675	0.769	0.574	1.111	0.816	0.73	1.0	1.934
F-3-2	0.879	1.139	1.287	0.658	0.772	0.578	1.132	0.711	0.62	1.0	1.959

-63-

Table 4-23 Spectral Indices Measured in 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber at 0% Void Fraction

Foil Position	Index										
	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	²³⁵ U	⁶³ Cu	¹⁹⁷ Au
	⁶³ Cu	¹⁷⁶ Lu	²³⁵ U	¹⁹⁷ Au	⁶³ Cu	¹⁹⁷ Au	²³⁵ U	¹⁶⁴ Dy	¹⁶⁴ Dy	¹⁶⁴ Dy	²³⁵ U
F - 1	0.997	1.194	1.353	0.613	0.835	0.512	1.134	0.867	0.769	1.0	2.212
F - 2	1.004	1.200	1.336	0.596	0.837	0.498	1.116	0.744	0.654	0.5	2.243
F-3-1	1.021	1.236	1.343	0.754	0.783	0.577	1.030	0.670	0.654	0.75	1.786
F-3-2	0.990	1.245	1.273	0.738	0.795	0.593	1.023	0.677	0.654	0.75	1.728

-64-

PNC TN94178-84

Table 4-24 Spectral Indices Measured in 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber at 100% Void Fraction

Foil Position	Index										
	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁵¹ Eu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Lu	²³⁵ U	⁶³ Cu	¹⁹⁷ Au
	⁶³ Cu	¹⁷⁶ Lu	²³⁵ U	¹⁹⁷ Au	⁶³ Cu	¹⁹⁷ Au	²³⁵ U	¹⁶⁴ Dy	¹⁶⁴ Dy	¹⁶⁴ Dy	²³⁵ U
F - 1	0.890	0.773	1.277	0.592	1.151	0.764	1.652	1.256	0.769	1.0	2.161
F - 2	0.916	0.803	1.270	0.625	1.142	0.777	1.586	1.192	0.769	1.0	2.042
F-3-1	0.966	0.993	1.301	0.708	0.973	0.712	1.313	0.937	0.769	1.0	1.844
F-3-2	0.958	0.925	1.308	0.708	1.035	0.764	1.416	1.051	0.731	1.0	1.853

-65-

PNC TN94178-84

Table 4-25 Local Power Distributions

PNC 941 78-84

Fuel Type	Void Fraction (%)	1st Layer	2nd Layer	3rd Layer	4th Layer
60-pin Cluster	0	0.570 ± 0.017	0.656 ± 0.020	0.841 ± 0.025	1.404 ± 0.042
	100	0.636 ± 0.022	0.716 ± 0.025	0.914 ± 0.020	1.297 ± 0.033
54-pin Cluster	0	0.805 ± 0.023	0.785 ± 0.023	1.260 ± 0.025	
	100	0.740 ± 0.022	0.876 ± 0.026	1.223 ± 0.031	
54-pin Cluster with Gd-absorber	0	0.715 ± 0.021	0.787 ± 0.024	1.303 ± 0.033	
	100	0.700 ± 0.021	0.862 ± 0.026	1.254 ± 0.032	

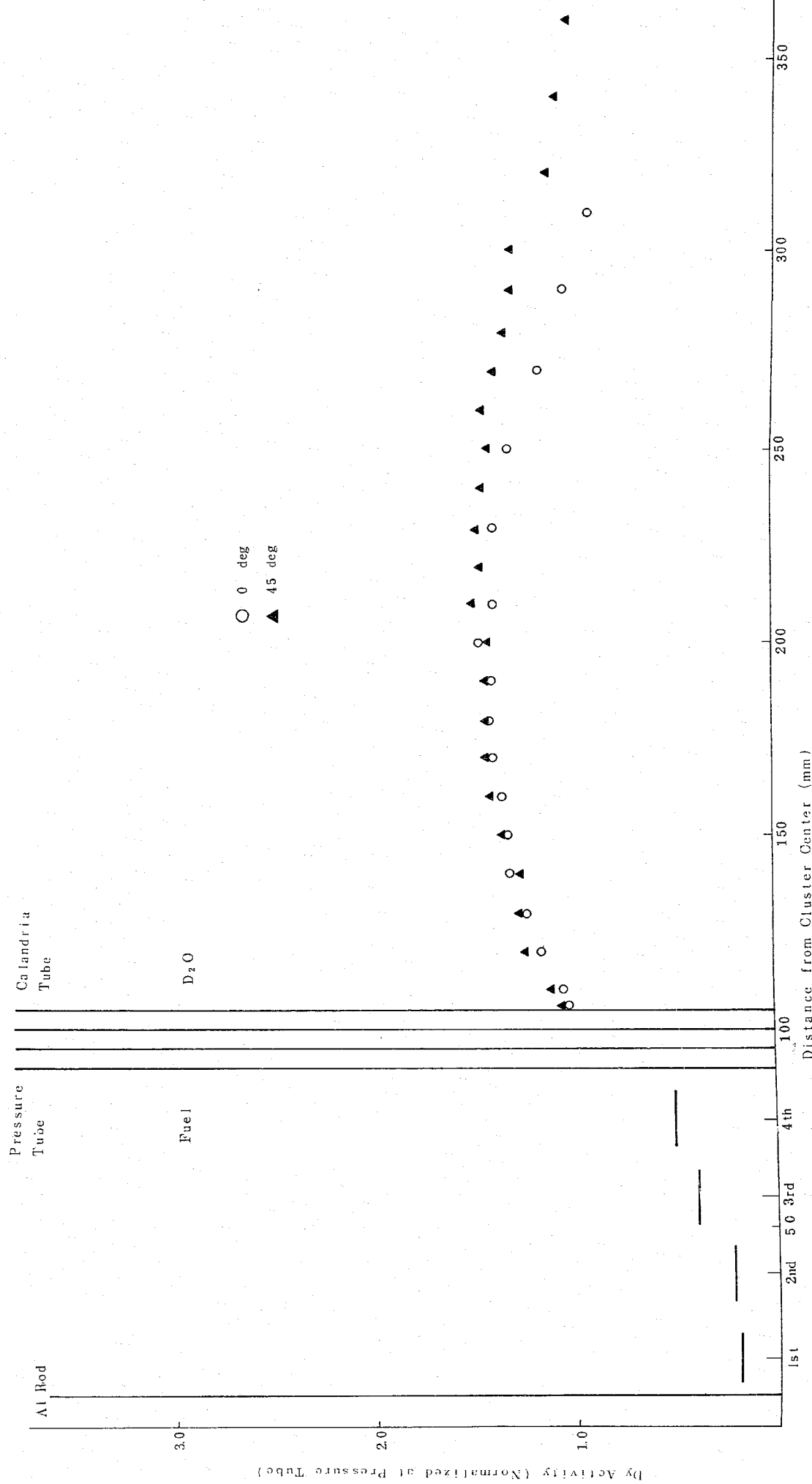
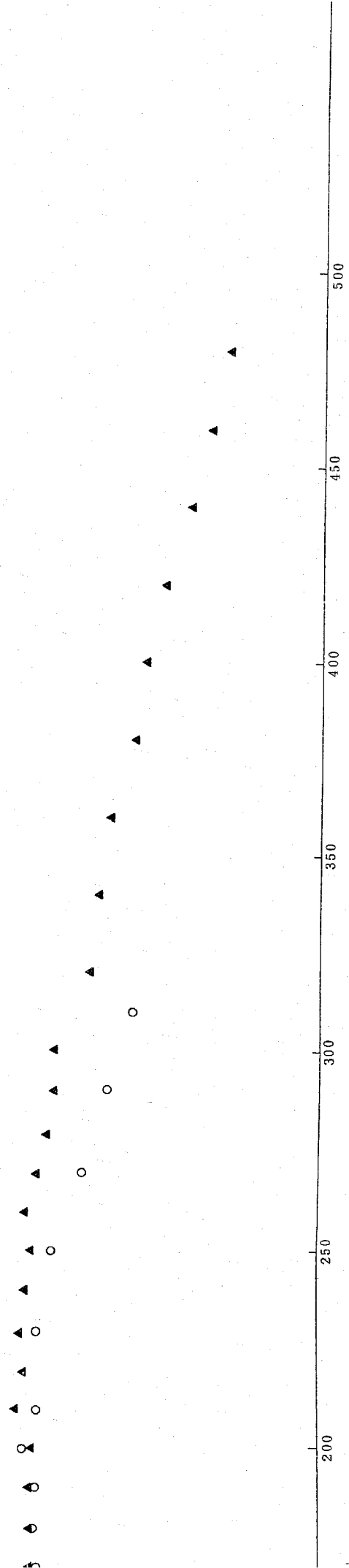


Fig. 4-1 Dy Reaction Rate Distribution in 60-pin Cluster (0% Void)

○ 0 deg
▲ 45 deg



er (0% Void)

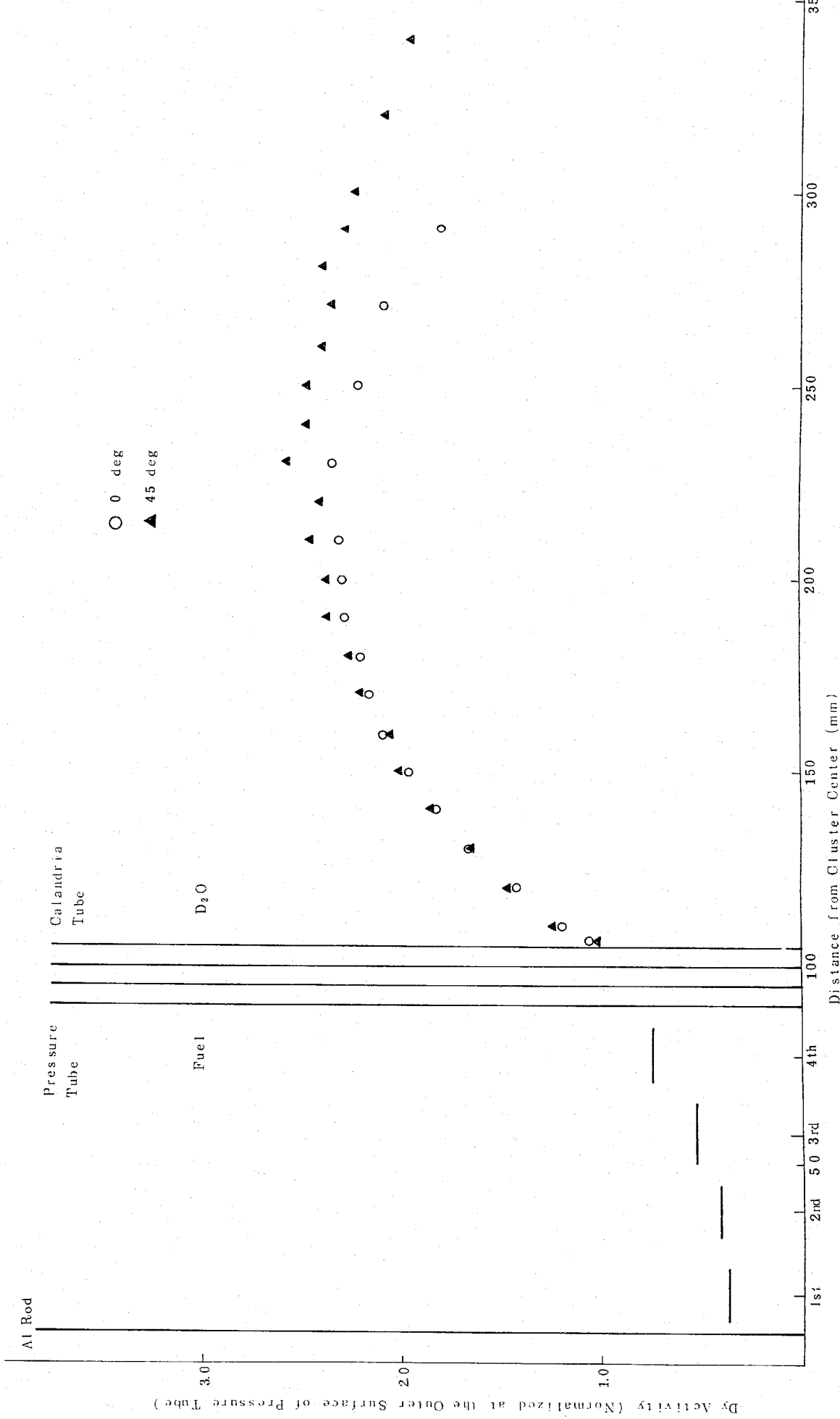
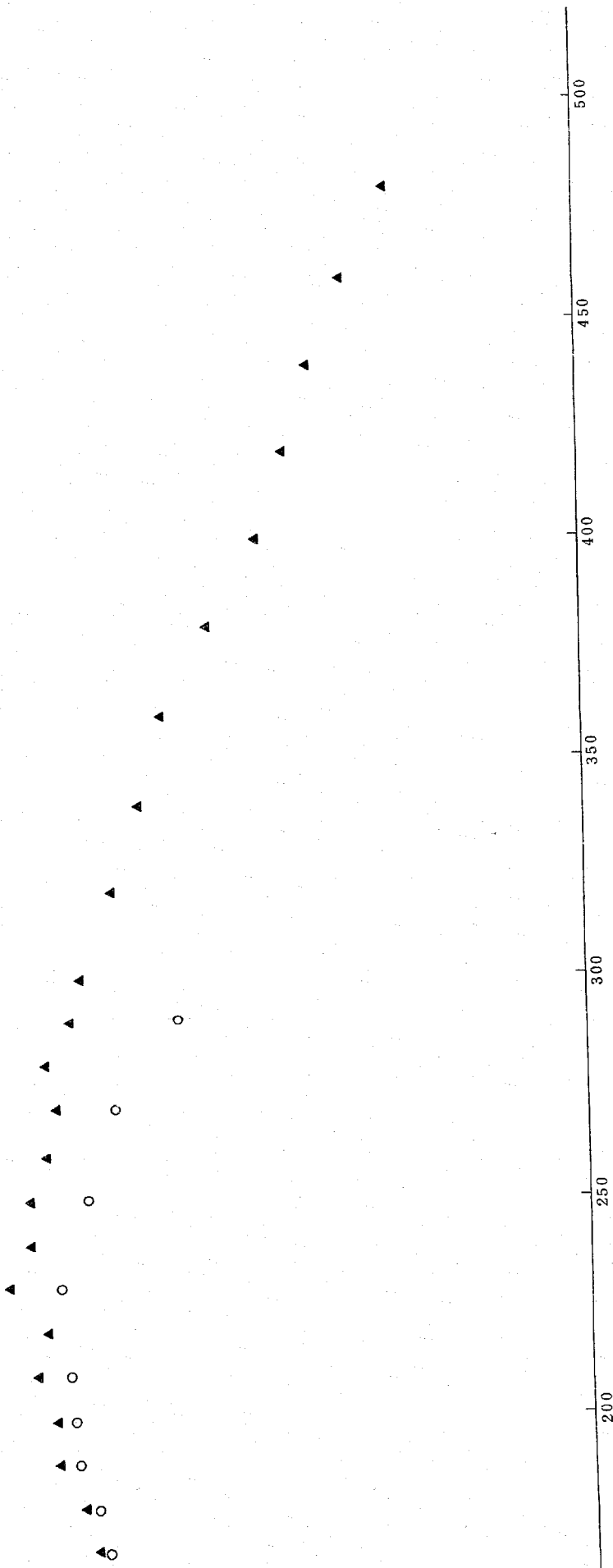


Fig. 4-2 Dy Reaction Rate Distribution in 60-pin Cluster (100% Void)

○ 0 deg

▲ 45 deg



(mm)
100% Void

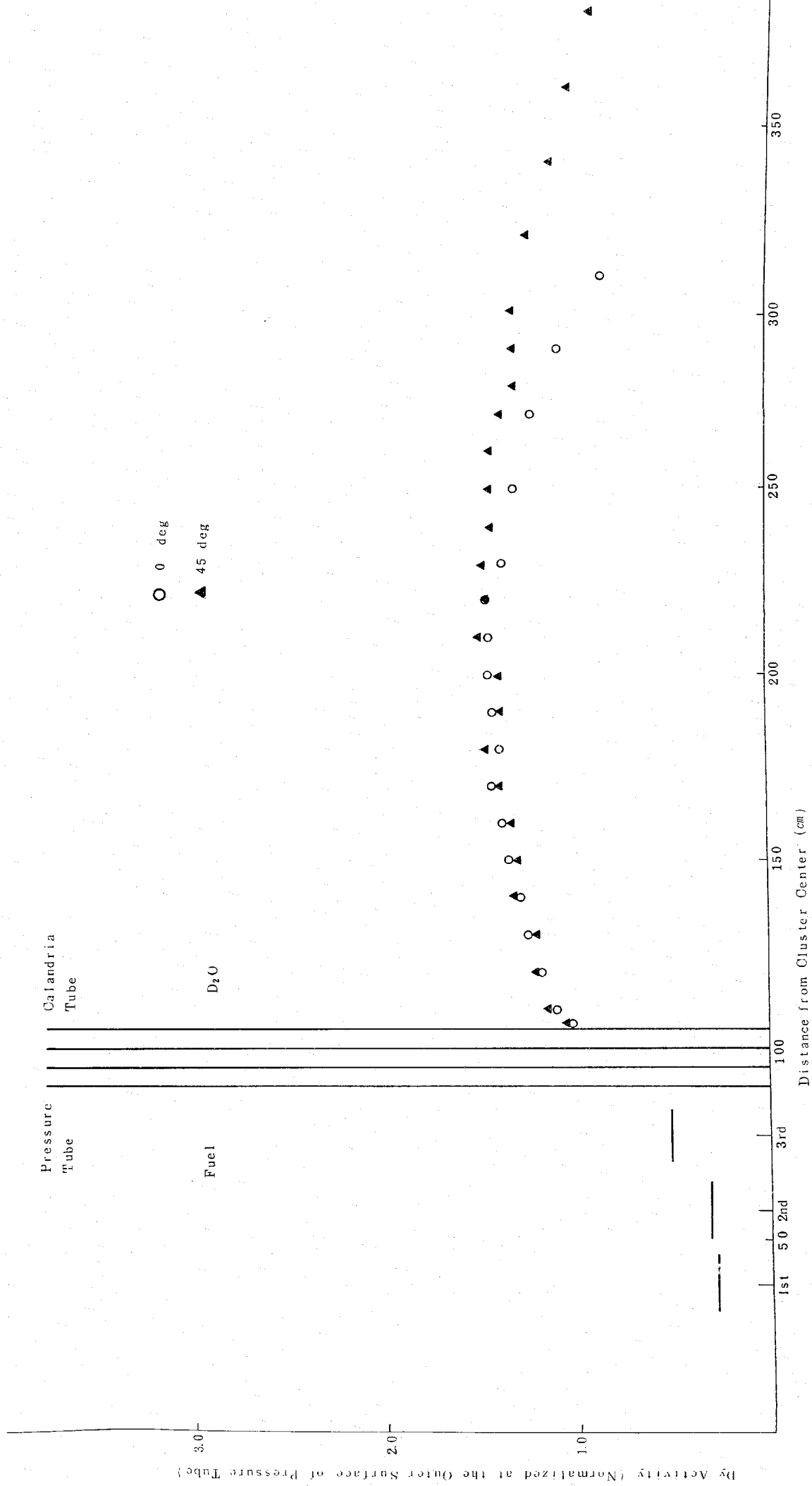
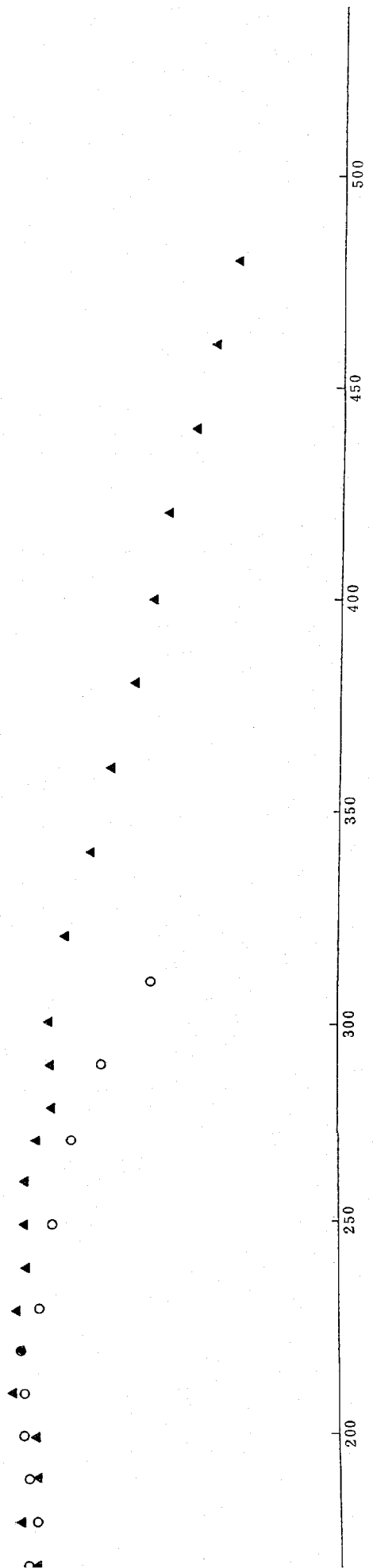


Fig. 4--3 Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster (0% Void)

○ 0 deg
▲ 45 deg



uster (0% Void)

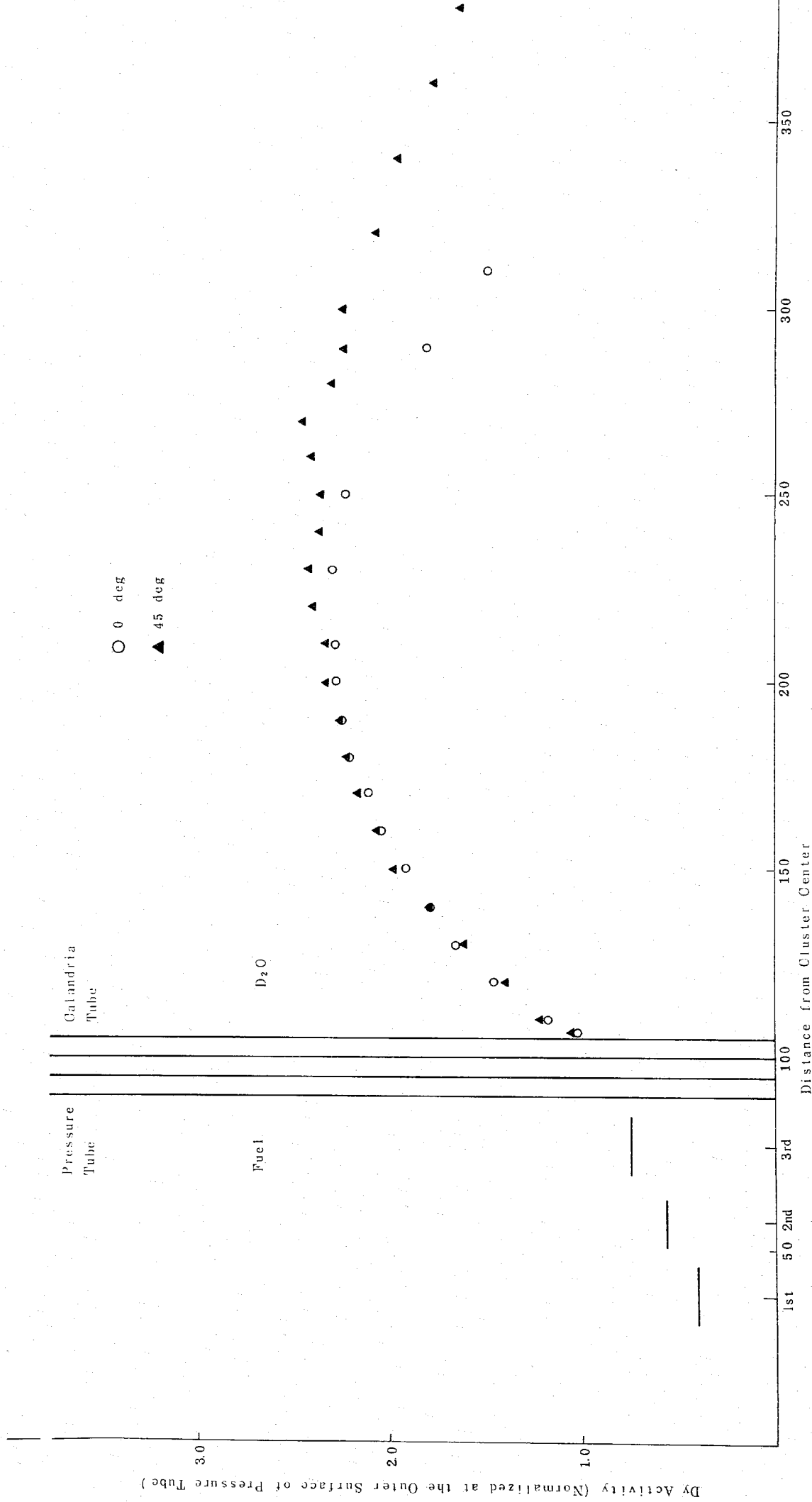
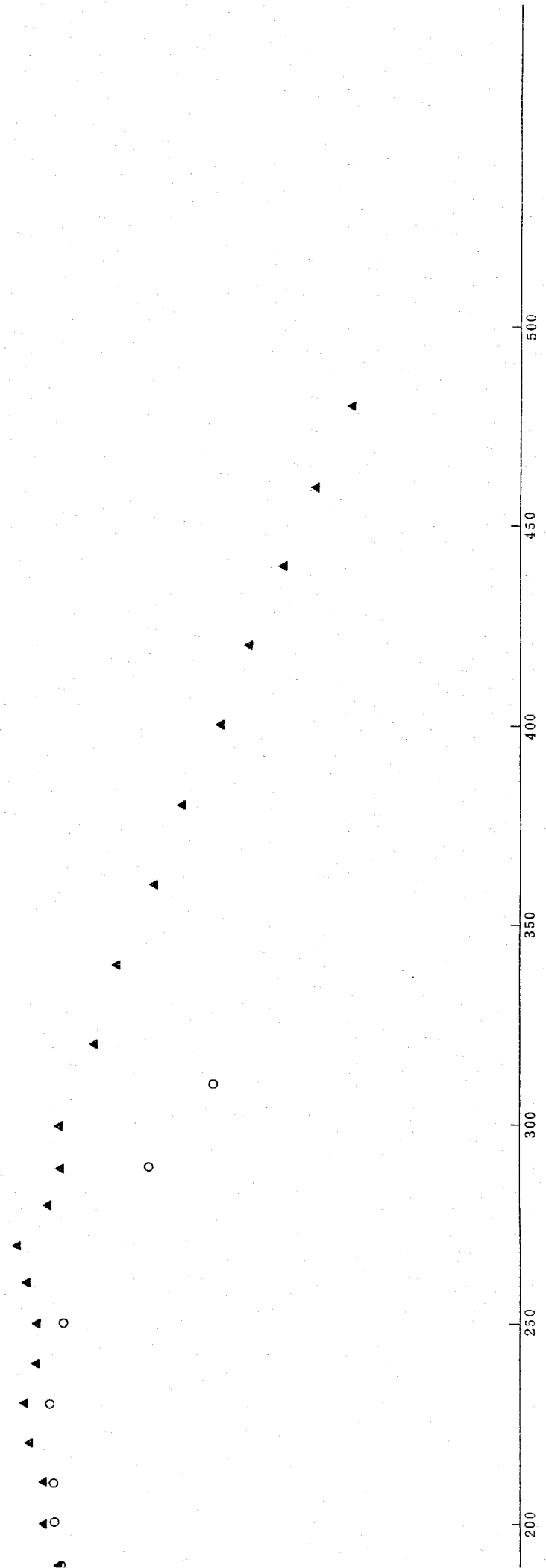


Fig. 4-4 Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster (100% Void)

○ 0 deg

▲ 45 deg



(Void)

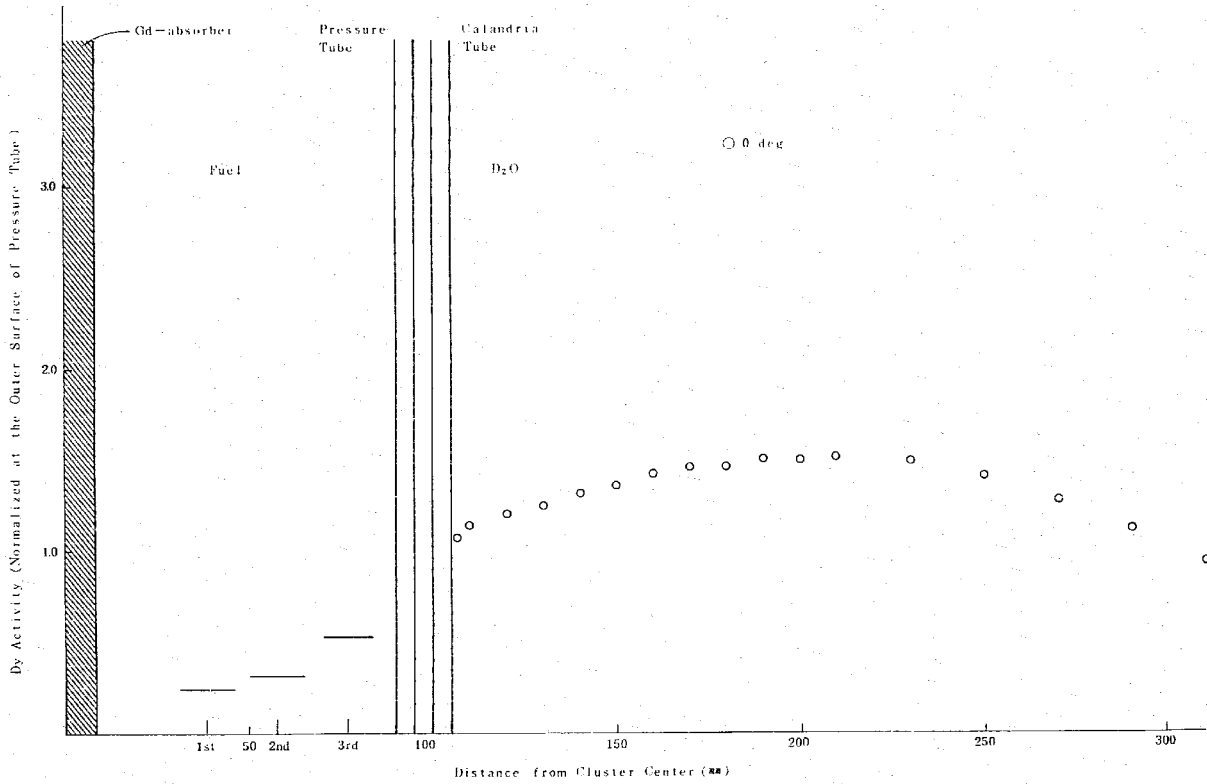


Fig. 4-5 Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber(0% Void)

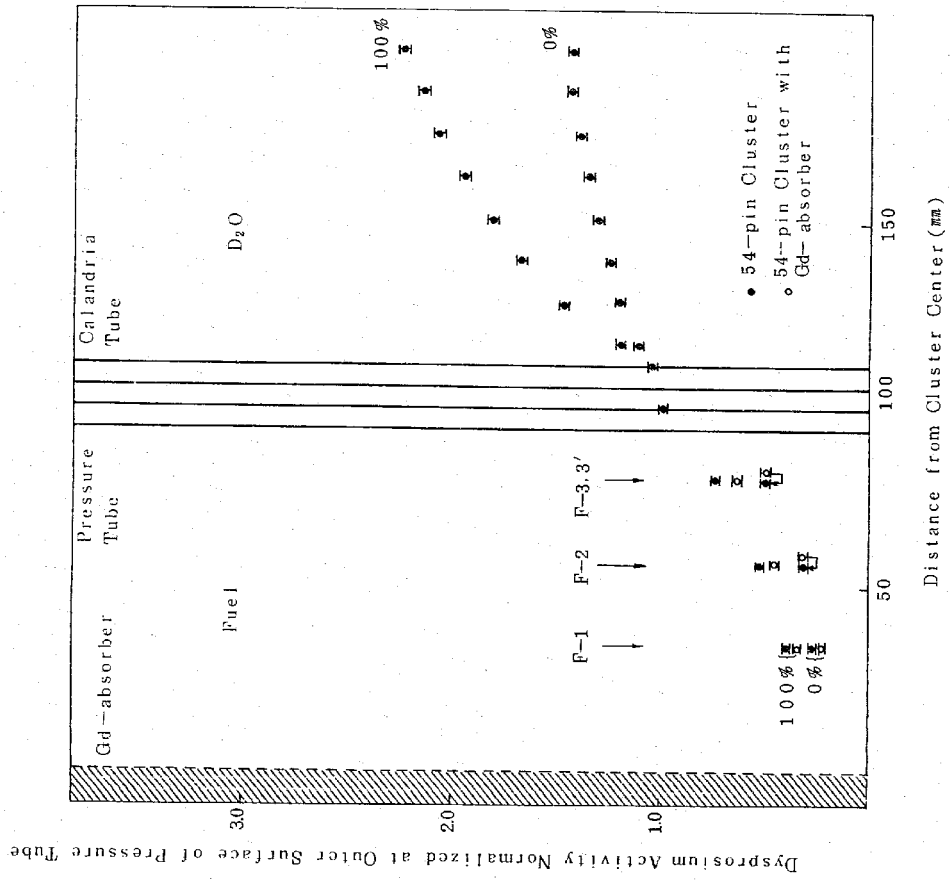
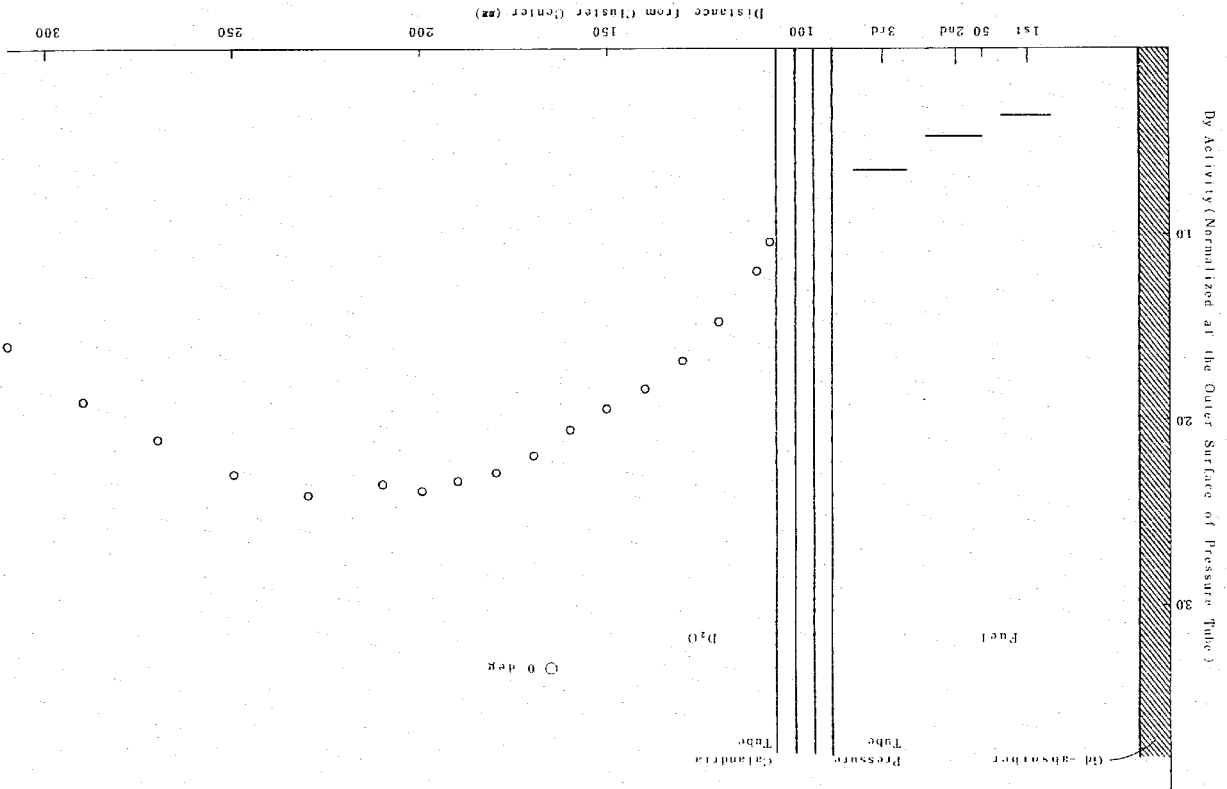


Fig. 4-7 Dy Reaction Rates Distribution in 54-pin Cluster and 54-pin Cluster with Gd-absorber

Fig. 4-6 Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber (100% Void)



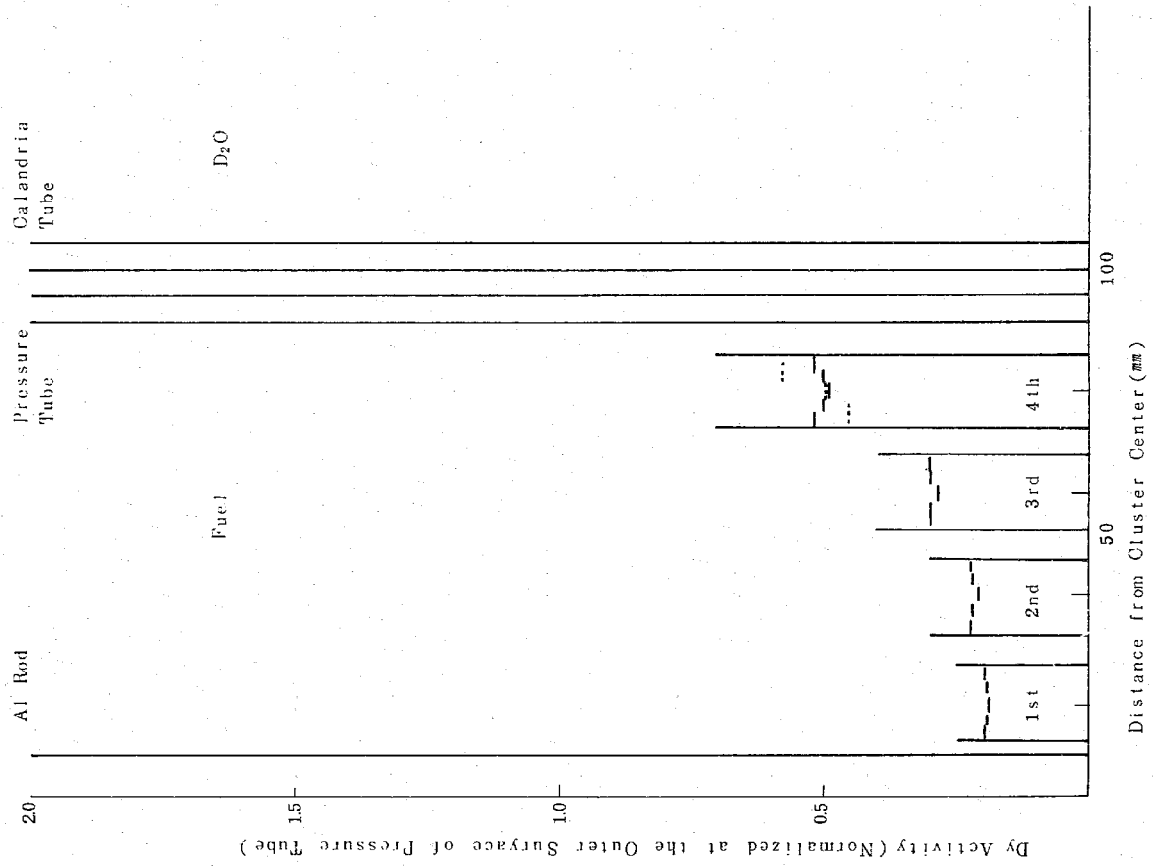


Fig. 4-8 Fine Structure of Dy Reaction Rate Distribution in 60-pin Cluster (0% Void)

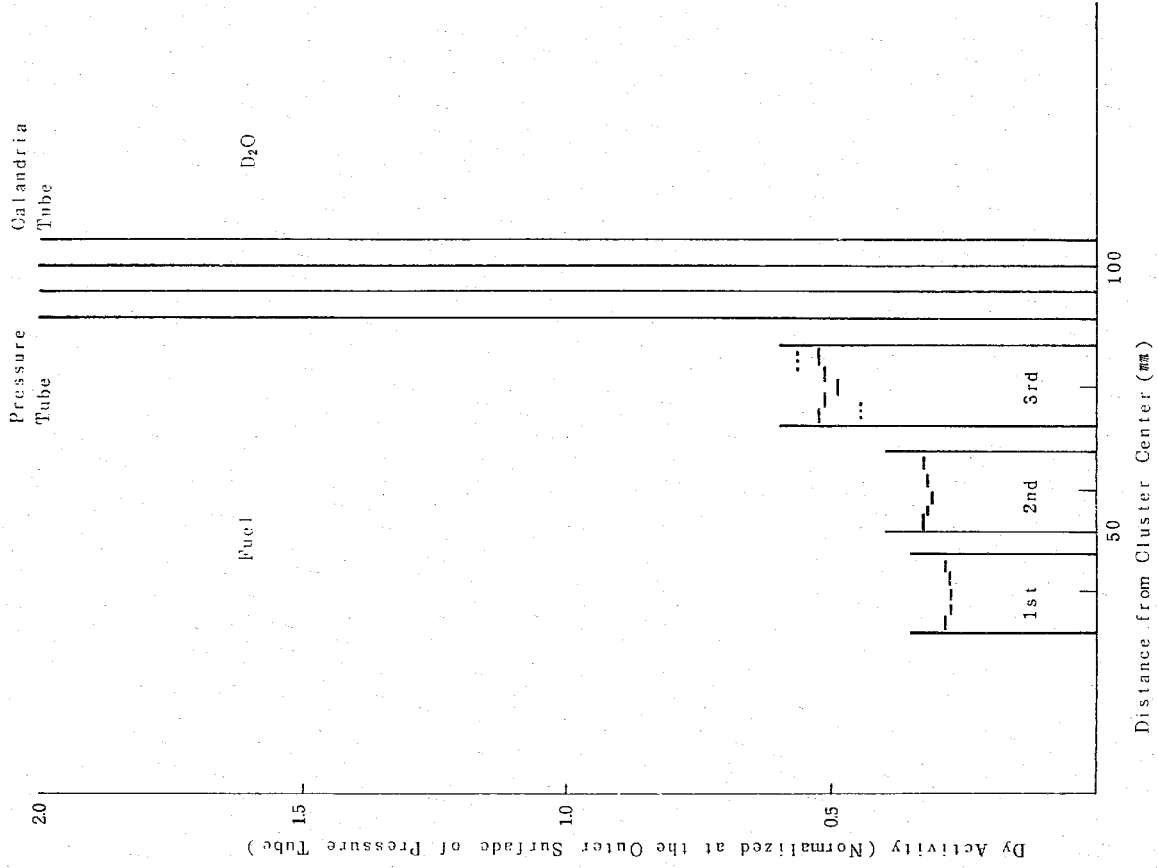


Fig. 4-9 Fine Structure of Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster (0% Void)

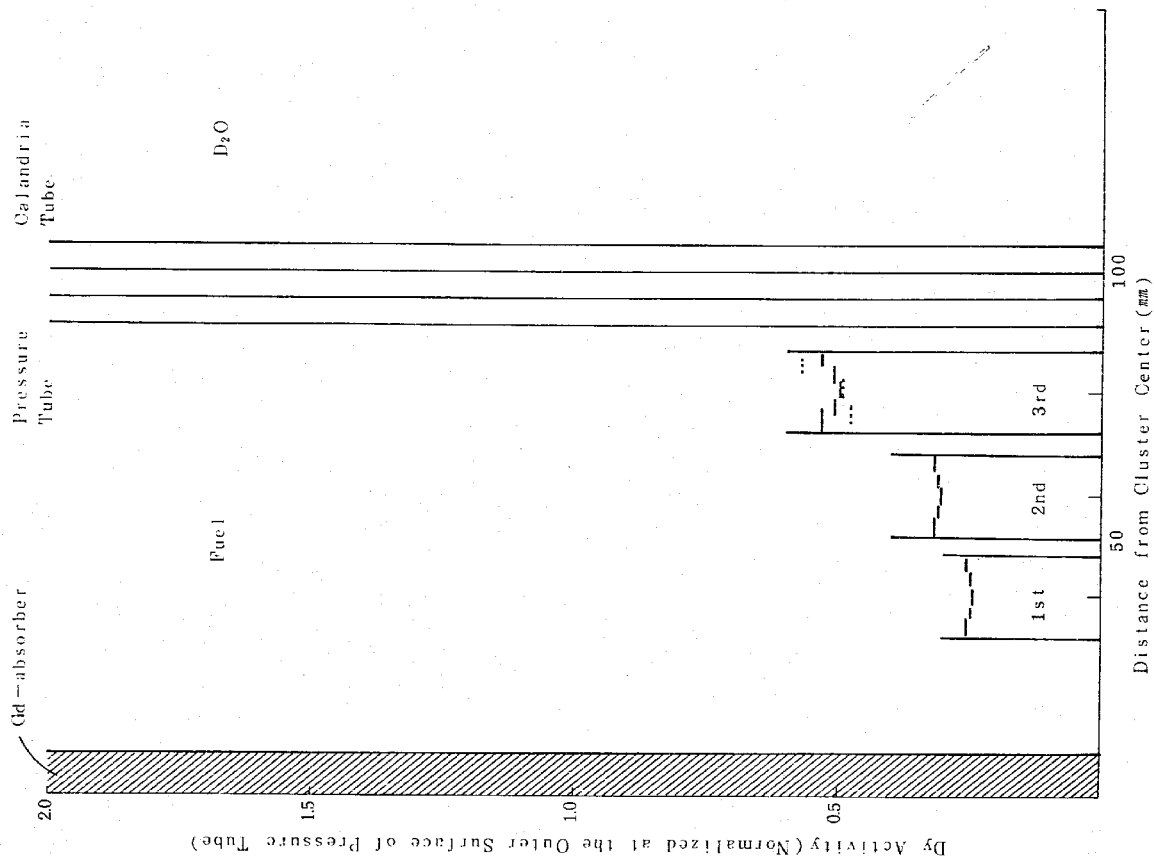


Fig. 4-11 Fine Structure of Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber (0% Void)

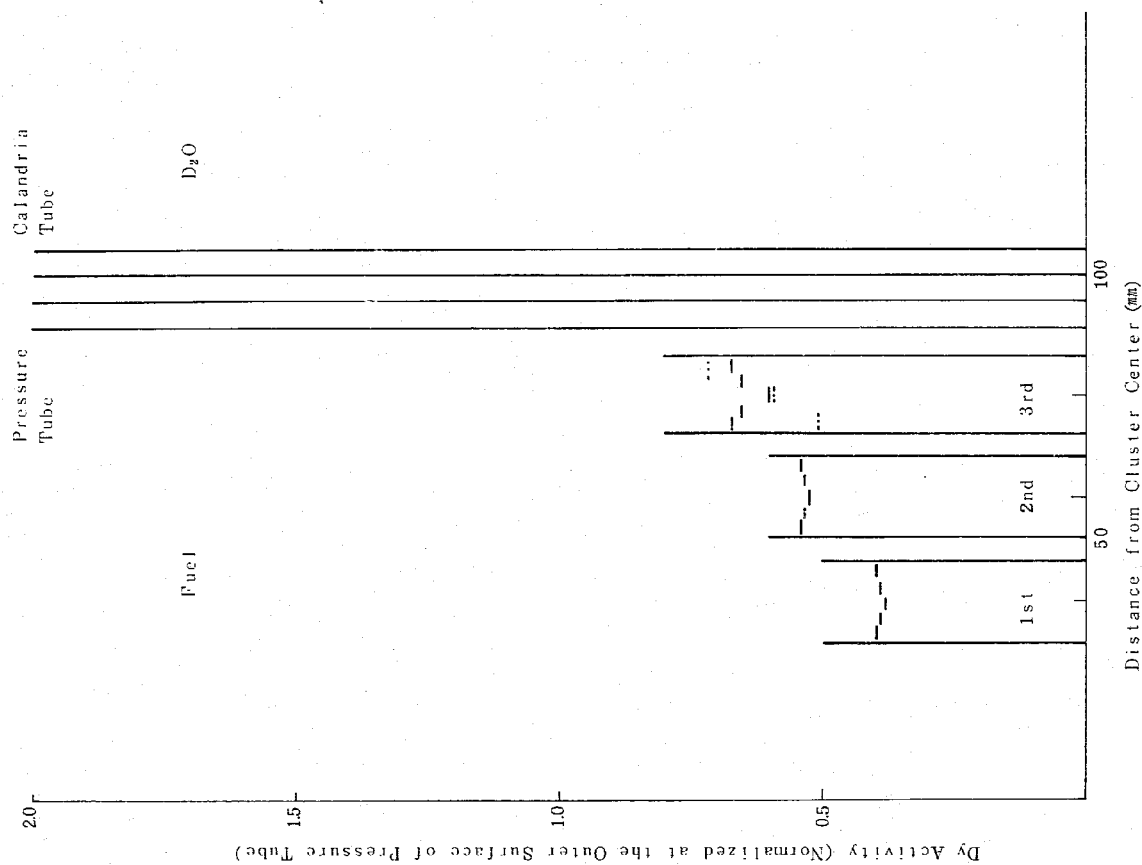


Fig. 4-10 Fine Structure of Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster (100% Void)

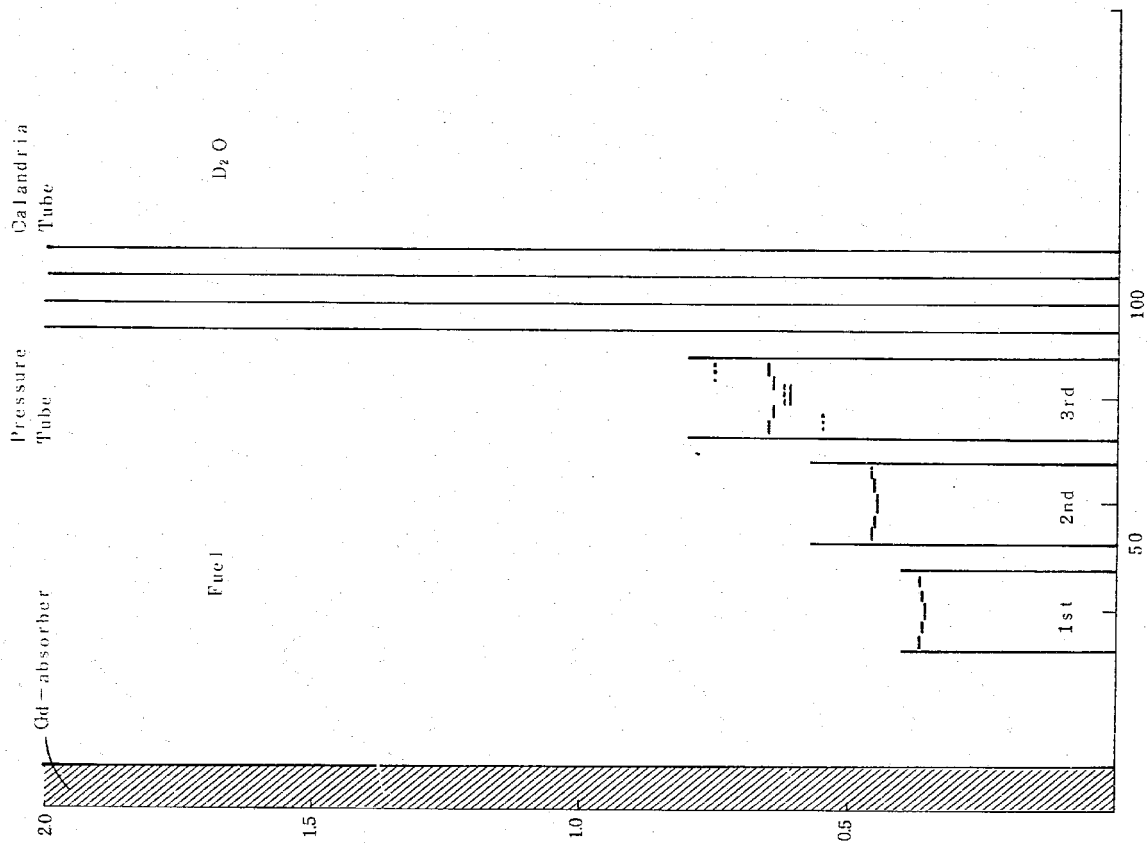
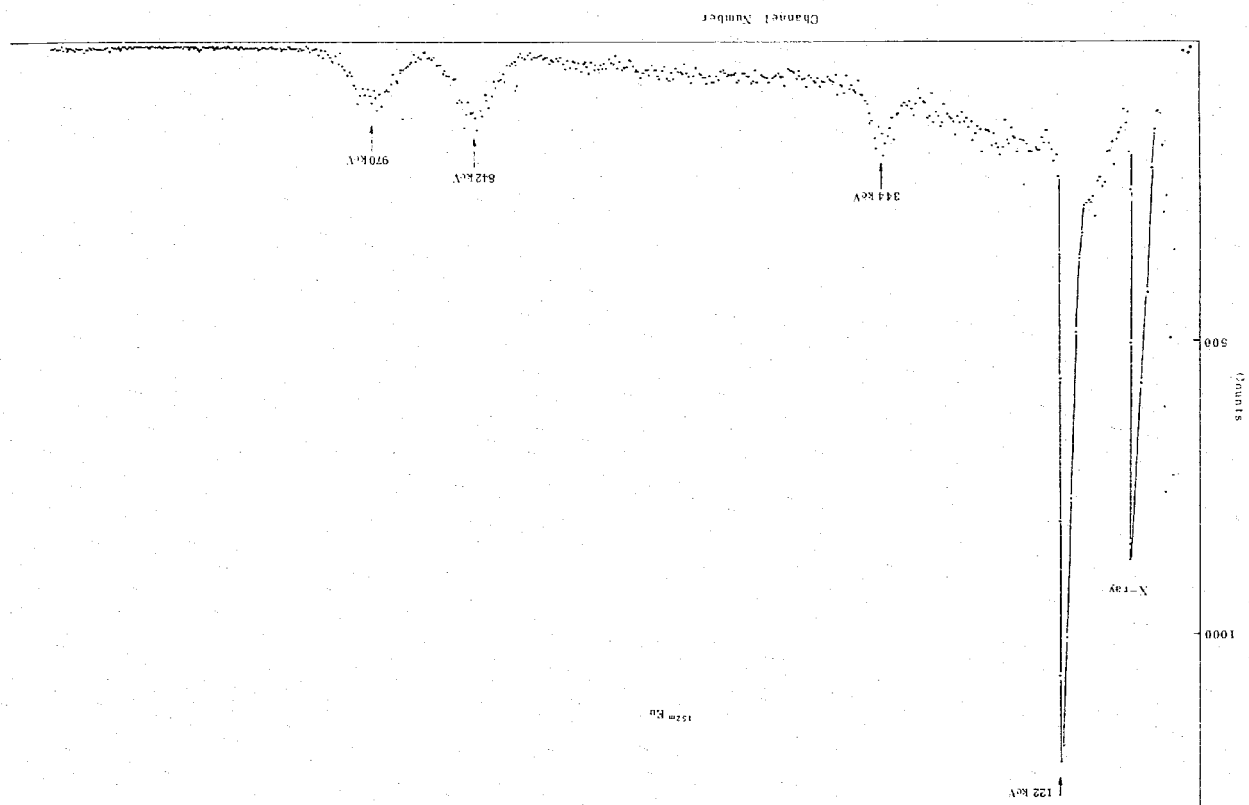


Fig. 4-12 Fine Structure Dy Reaction Rate Distribution in 54-pin Cluster with a Central Gd-absorber (100% Void)

Fig. 4-13 T-ray Energy Spectrum of ¹⁵²m Eu



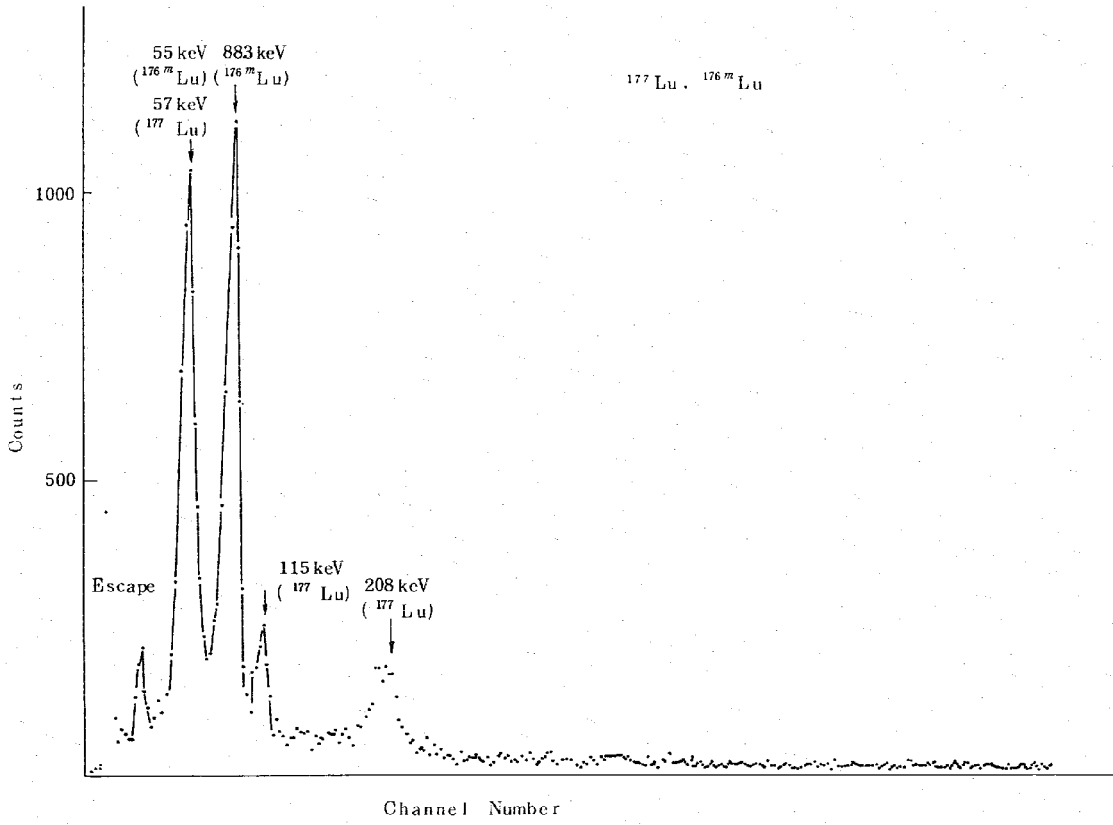


Fig. 4-14 γ -ray Energy Spectrum of ^{177}Lu and ^{176m}Lu

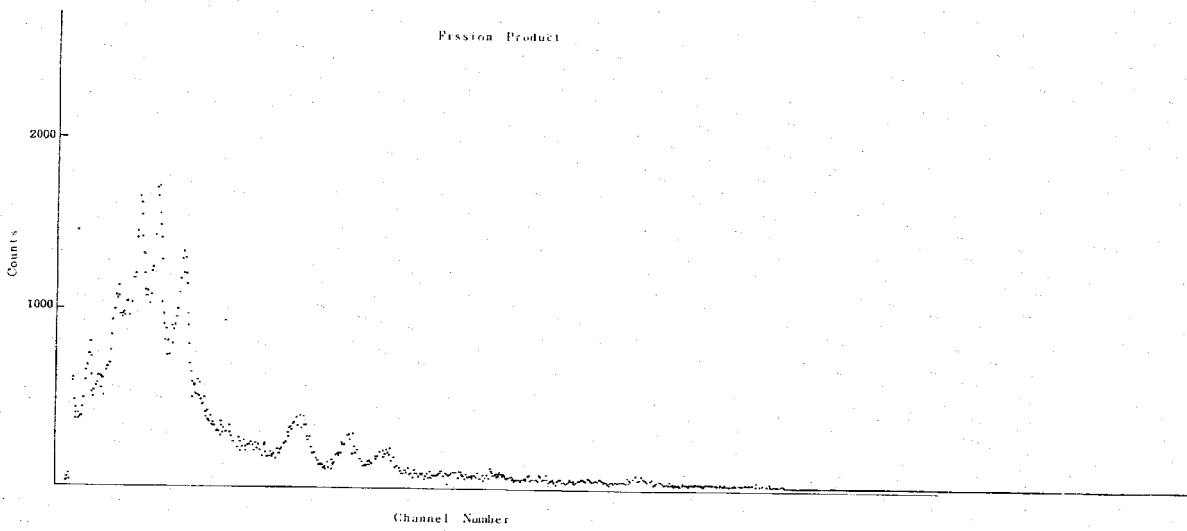


Fig. 4-15 γ -ray Energy Spectrum of Fission Product of ^{235}U

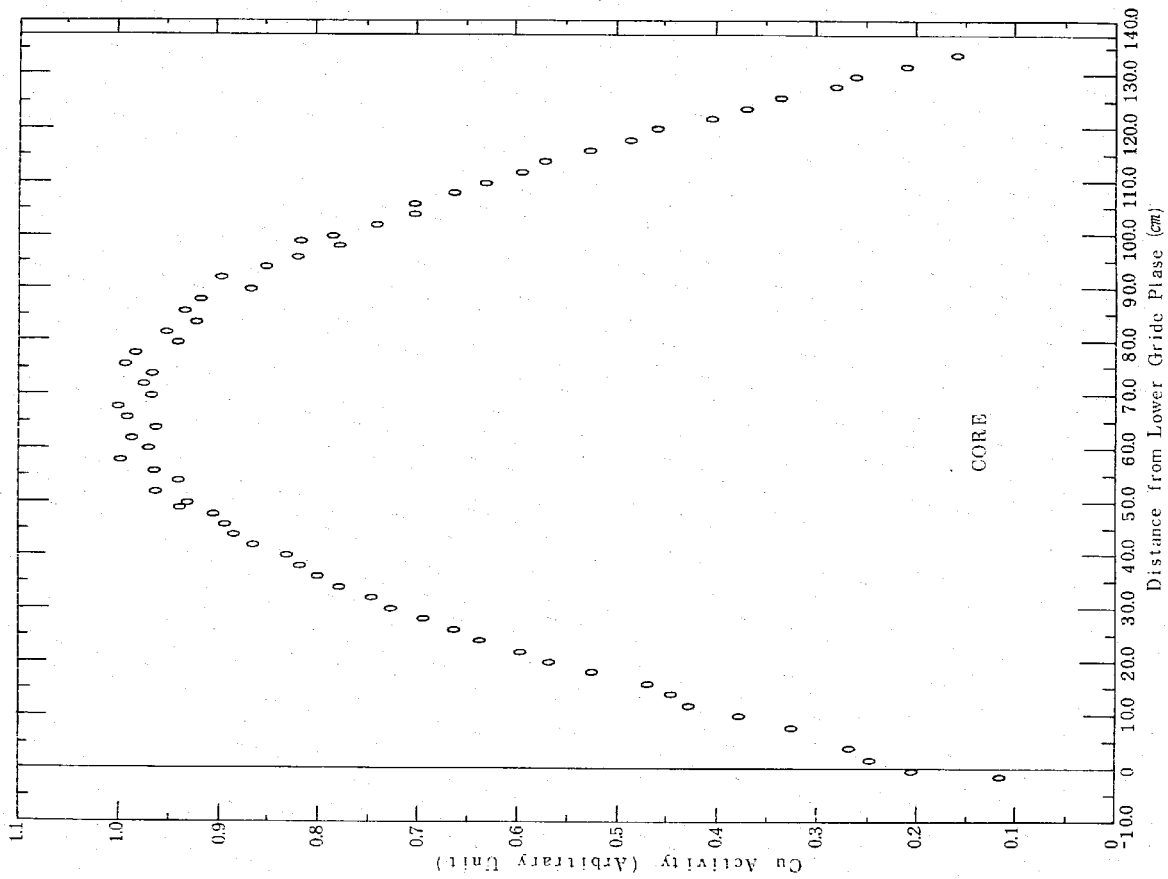


Fig. 4--16 Axial Reaction Rate Distribution in Fuel of 54-pin Cluster (0% Void)

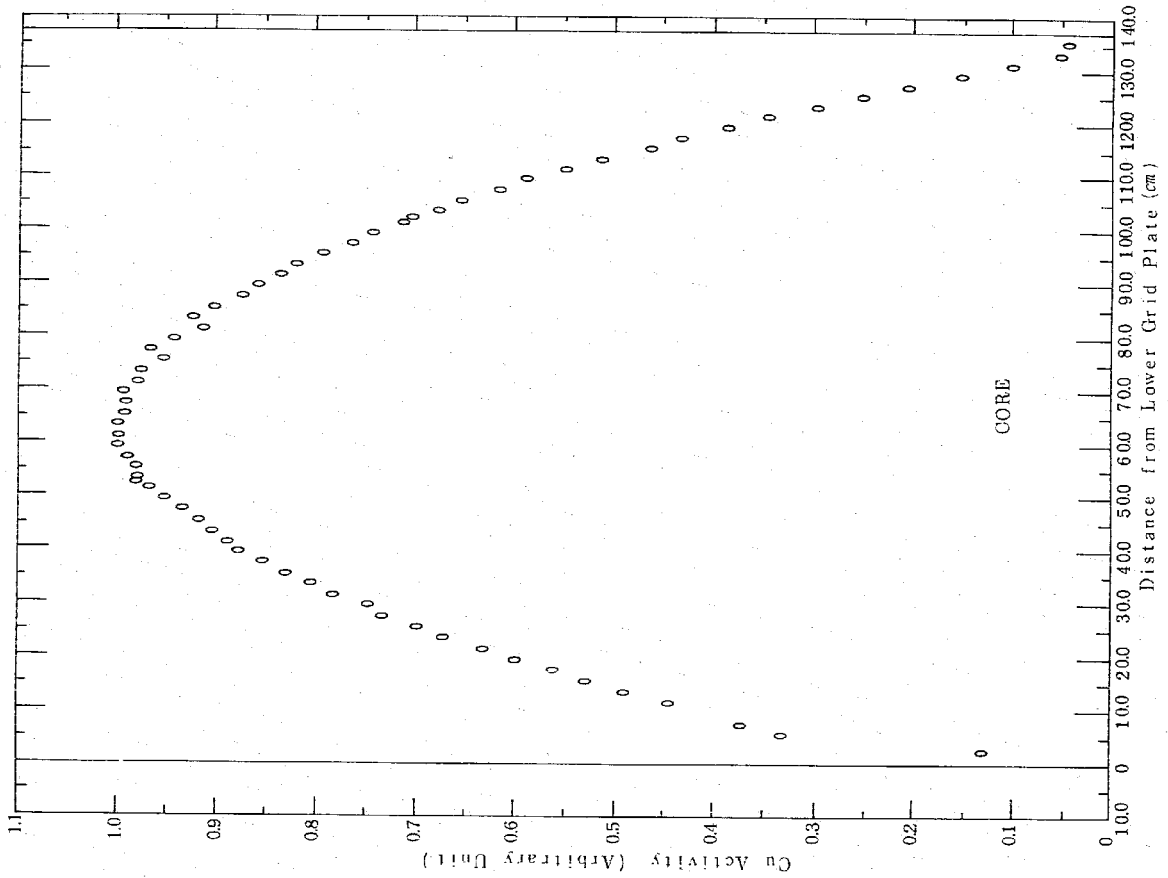
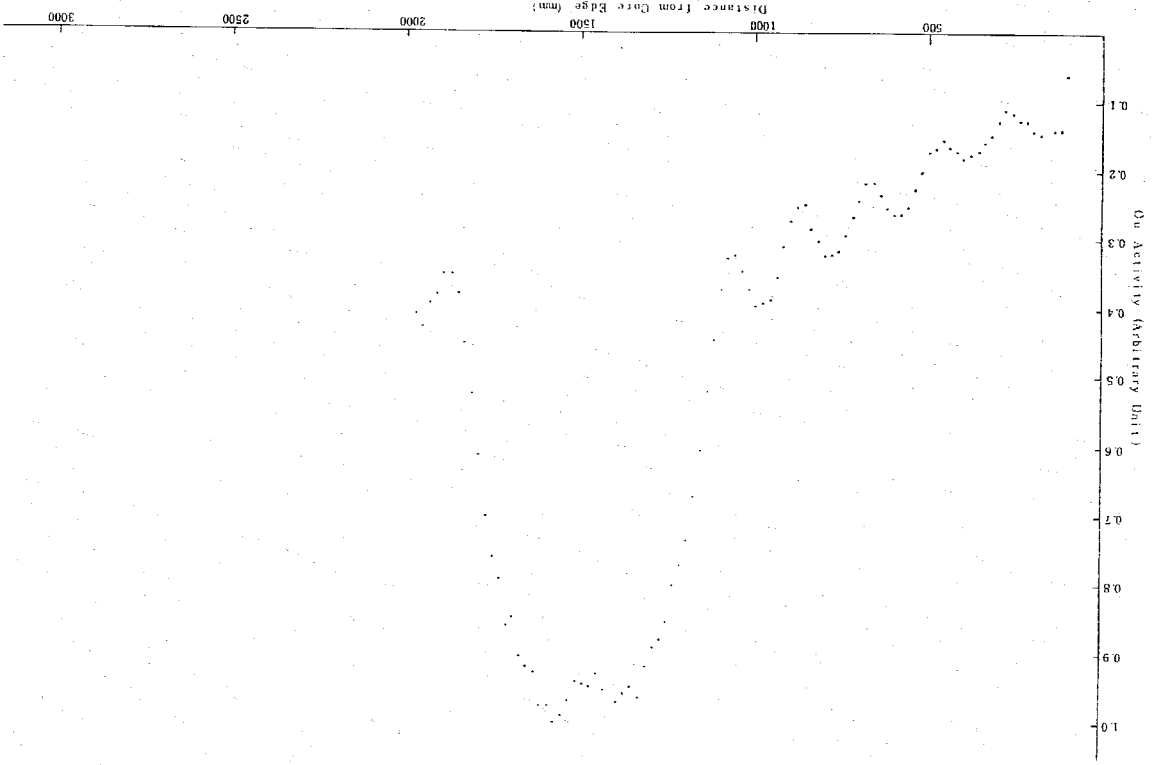


Fig. 4--17 Axial Reaction Rate Distribution in D₂O of 54-pin Cluster (0% Void)

Fig. 4-18 Radial Reaction Rate Distribution of Core (0% Void)



5. 結論

論

5 結 論

5 4本又は6 0本の大型燃料集合体1体を用いた臨界実験により、大型燃料集合体の核特性のうち冷却材ポイド反応度、熱中性子束分布、中性子スペクトル、局所ビークニング係数について次の事が明らかになった。

- (1) 5 4本燃料集合体の冷却材ポイド反応度は、集合体中心部に軽水を満たし、1 0 0%ポイド時にその軽水がぬける構造にした場合がより負側になる。
- (2) さらに、5 4本燃料集合体中心部の軽水層にGd、Cd等の吸収棒を入れた新しい構造の燃料集合体は、冷却材ポイド反応度を(1)の場合より負側にする。
- (3) 5 4本燃料集合体及びGd入5 4本燃料集合体の燃料棒内のDy反応率の測定結果を用いて、燃料集合体の自己遮蔽効果を考察することにより、(1)、(2)の冷却材ポイド反応度を負側にするメカニズムが理解できる。Gd棒入り燃料集合体では、軽水がぬけた時の自己遮蔽効果の回復が通常の5 4本燃料集合体の場合より小さいことが、冷却材ポイド反応度を大きく負側にしていく。
- (4) 燃料棒内の微細Dy反応率分布の測定結果は、燃料棒内の自己遮蔽効果を考察することによりよく説明できる。
- (5) 燃料棒内微細分布測定において、燃料棒の燃料集合体中心を向いている部分と、外側を向いている部分の反応率の差は、最外層部が一番大きくなっている。
- また、0%ポイドと1 0 0%ポイドは、1 0 0%ポイドの方が大きく、5 4本燃料集合体と6 0本燃料集合体では、6 0本燃料集合体の方が大きくなっている。
- (6) 燃料中のスペクトル情報を示すスペクトルインデックスは、各種箔により±3%の精度で求めることができ、計算コードのチエックが可能となった。
- (7) 局所出力ビークニング係数は、4層構造の6 0本燃料集合体が一番悪く、3層構造5 4本燃料集合体が一番良くなっている。また、Gd吸収棒が入った場合は、5 4本燃料集合体より4%程度しか大きくなっていない。

謝 辭

參 考 文 獻

謝 辞

本実験を進めるに当り、いろいろ御協力いただきました仁柴明人氏に深く感謝いたします。
また、新型転換炉の開発および研究の一環として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。八谷雄吉室長、宮脇良夫前室長、ならびに室員の皆様には深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 若林, 他「新型転換炉評価研究, 大型炉炉心特性の検討⑩, 実証炉用核燃料の検討」, PNC SN941 78-13.
- 2) 電発, 「新型転換炉プラント特性の評価検討」, SJ 330 72-05.
- 3) Y. HACHIYA et al., J. Nucl. Sci. Technol., 13, 618 (1976).
- 4) T. WAKABAYASHI and Y. HACHIYA, Nucl. Sci. Eng., 63, 292 (1977).
- 5) K. SHIBA, Nucl. Sci. Eng., 65, 492 (1978).
- 6) A. J. BRIGGS et al., J. Brit. Nucl. Energy Soc., 7, 61 (1968).
- 7) M. H. M. ROSHD et al., Trans. Am. Nucl. Soc., 27, 603 (1977).

PNC TN94178-84

付 録

付録 I. D.C.A 物理定数

1 Fuel

(1) 1.5% Enriched UO₂ Fuel pellet

	Specification		Averaged value	Standard deviation	Remarks
	w/o				
²³⁵ U enrichment	1.5±0.02		1.499		analytical result
U content	87.7		87.88		"
O/A	—		~201		"
Stack weight of UO ₂ pellets	μ/rod	3580±70	3551.4		W
Stack length of UO ₂ pellets	cm/rod	200.0 ⁺⁰ _{-0.5}	199.85		L
Pellet diameter	cm	1.48±0.01	1.477	0.004	D
Density	g/cm ³		10.38	0.06	$\rho = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 L$
			10.40	0.04	

(2) 1.5w/o Enriched UO₂ Fuel

	Inner dia (cm)	Outer dia (cm)	Material	Density (g/cm ³)
Fuel pellet	—	1.477	1.499w/o enriched UO ₂	1.038
Cap	1.477	1.503	Helium	—
Fuel sheath	1.503	1.673	Aluminum alloy	2.674

Composition	w/o in fuel pellet		w/o in sheath	Atomic % density (1.024/cm)
	²³⁵ U	²³⁸ U		
pellet	1.317	8.6563		0.0003503
		1.2120		0.02273
				0.04735
Sheath			96.98	0.05788
			2.60	0.00172

2 Fuel Channel

	Inner Dia(cm)	Outer Dia(cm)	Material	Density(g/cm ³)
Pressure tube	11.68	12.08	Aluminum alloy	2.674
Air gap	12.08	13.25	Air	0.001205
Calandria tube	13.25	13.65	Aluminum alloy	2.674

Composition	w/o in Al	w/o in Air	Atomic % density
Al	96.98		0.05788
Mg	2.60		0.00172
Air		23.5204	0.00001067
		76.4796	0.00003962

3 Moderator

(I) Density of D₂O (99.50 mol/o) 1.1045

Material	w/o in Moderator	Density (g/cm ³)
D ₂ O	99.55	1.10504
H ₂ O	0.45	0.99777

Composition	w/o in D ₂ O	Atomic % density (cm ³ × 10 ²⁴)
H	0.05036	0.0003323
D	2.00223	0.06613
O	79.9283	0.03323

4. Coolant

Simulated void fraction (%)	w/o in Coolant				Density (g/cm ³)
	H ₂ O	D ₂ O	H ₂ BO ₃	Air	
0	100	—	—	—	0.99777
30	63.17	36.82	0.00921	—	1.0348
70	18.07	81.91	0.0215	—	1.0840
86.7	0.45	99.55	—	—	1.1045
100	—	—	—	100	0.000001
Density (g/cm ³)	0.99777	1.10504	1.435	0.001205	—

Composition	w/o in Coolant				100% void
	0% void	30% void	70% void	86.7% void	
H	11.1901	70.693	2.0231	0.05036	
D		7.4055	16.4744	20.0223	
O	88.8099	85.5231	81.5001	79.9283	23.5204
¹⁰ B		0.0003158	0.000737		
B(Natural)		0.001611	0.003760		
N					76.4796

Composition	Atomic % density (10 ²⁴ /cm ³)			
	0% void	30% void	70% void	86.7% void
H	0.06671	0.04371	0.01310	0.0003323
D		0.02291	0.05340	0.06613
O	0.03335	0.03331	0.03325	0.03313
B(Natural)		0.0000009	0.0000023	
N				0.00003962

5. Others

- (i) Temperature : 22°C ~ 295 °K
- (ii) Square lattice pitch : 22.5 cm or 25.0 cm
- (iii) Diameter of core tank : 300.5 cm

付録2 大型燃料集集体実験用炉心構造

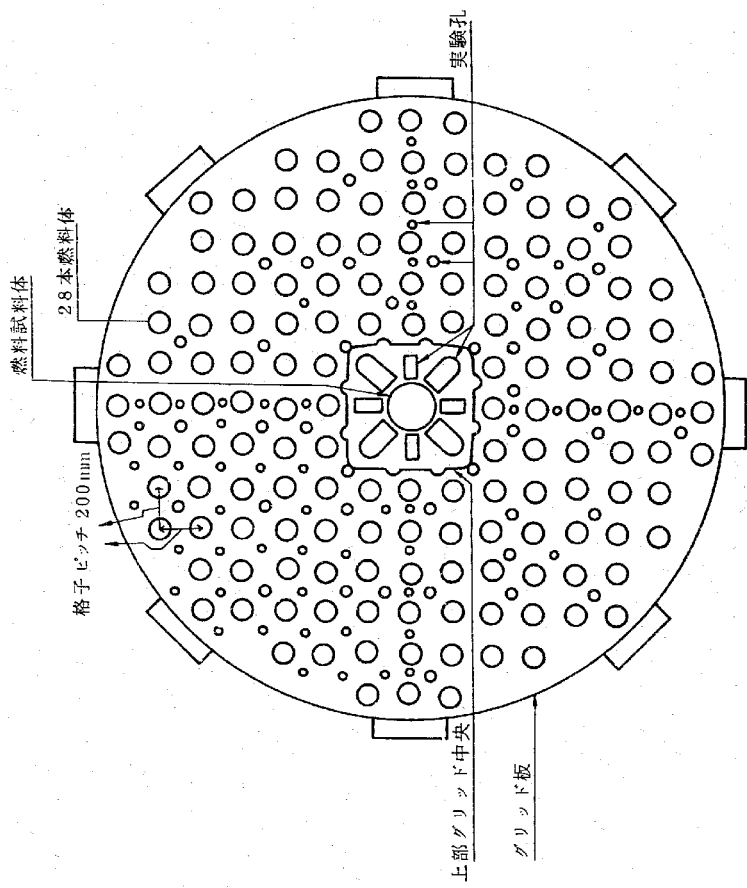


図1 燃料試料集集体装荷炉心図 (格子間隔20 cm)

品番	品名	材質	備考
1	上部グリッド中央	A5052	
2	グリッド板	ステンレス	
①	燃料体	SUS304	
②	燃料体	SUS304	
③	燃料体	SUS304	
④	六角穴付ボルト	SUS304	

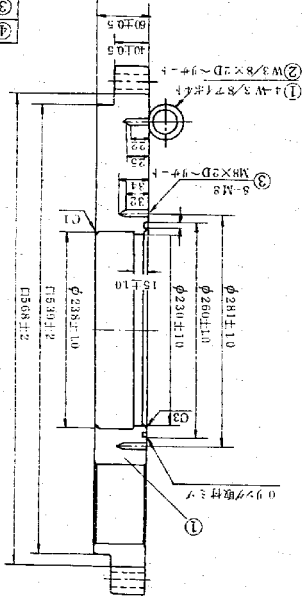
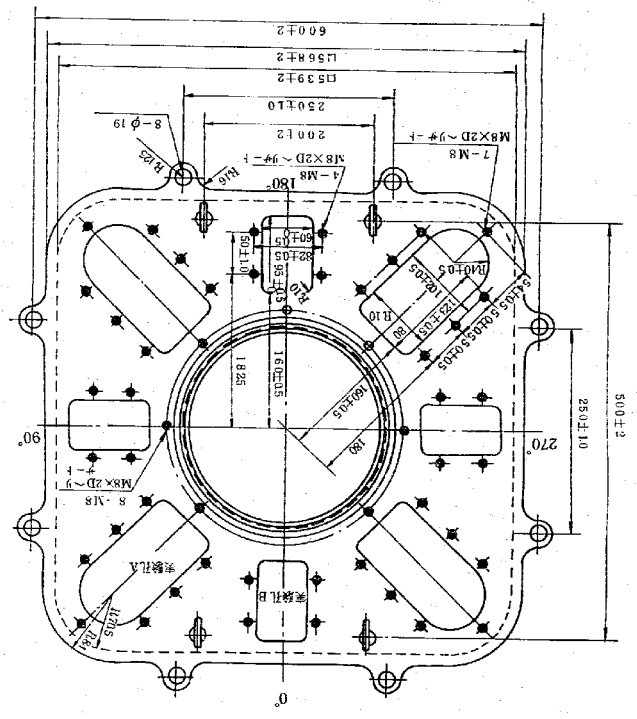


図2 上部グリッド中央外形図



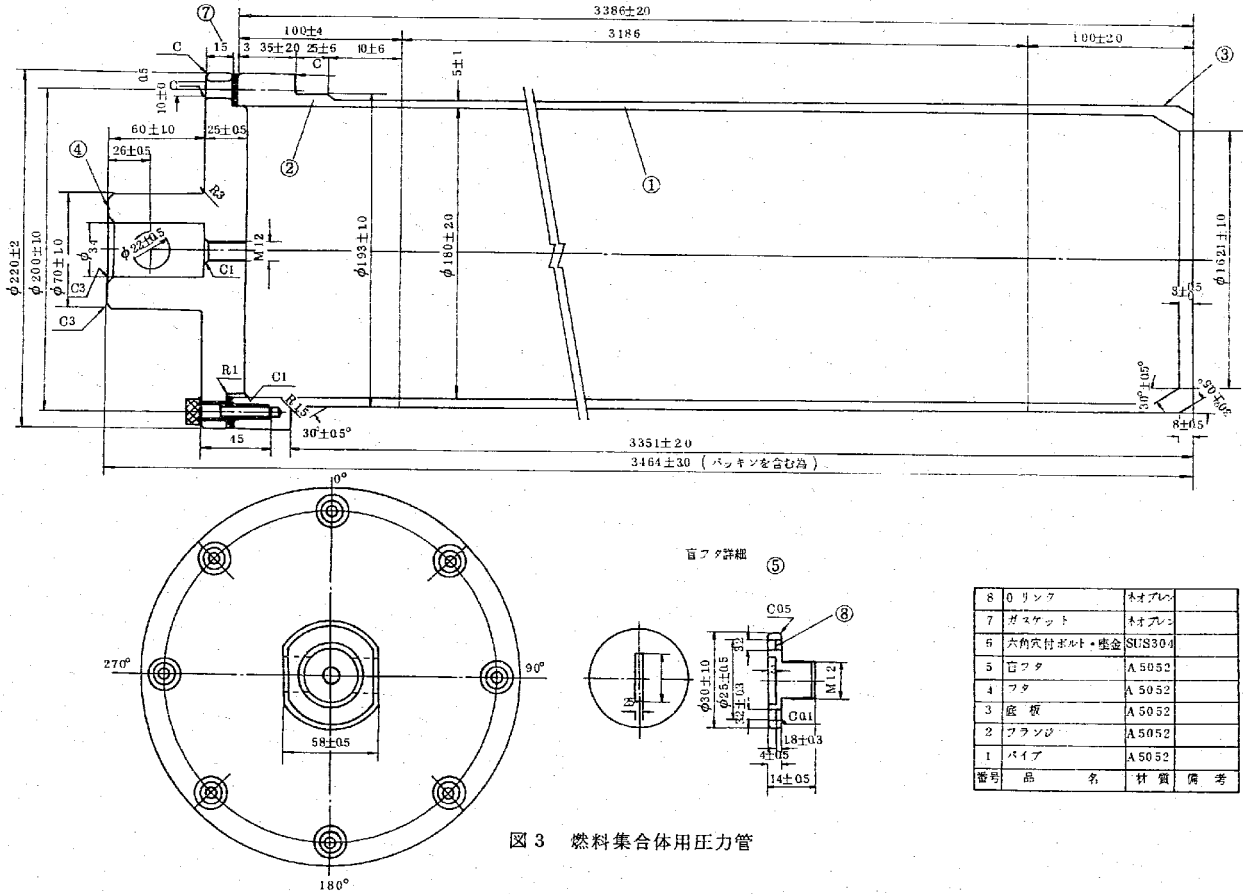


図3 燃料集合体用圧力管

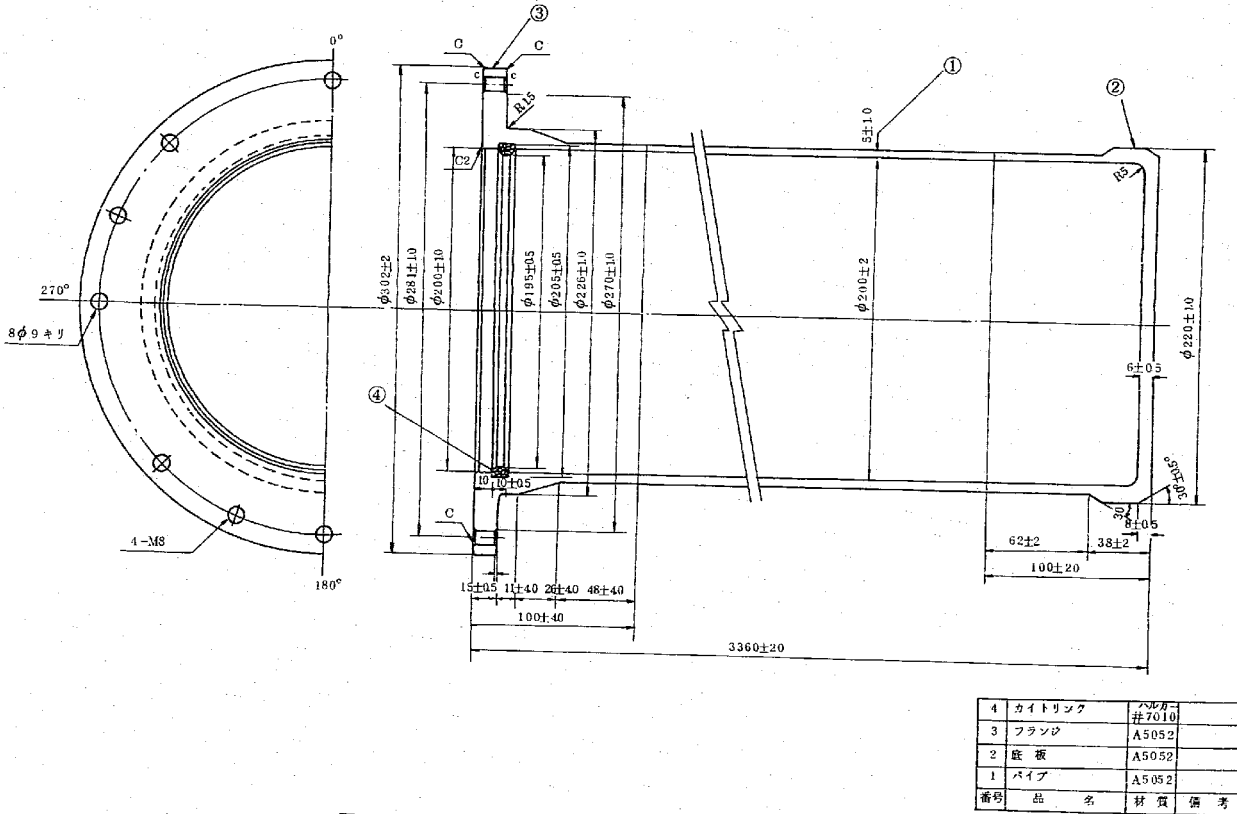


図4 燃料集合体用カランドリア管