

プルトニウム炉心における単位格子内
熱中性子束分布の測定

22.5cm格子ピッチのまとめ

1975年12月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

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

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

プルトニウム炉心における単位格子内熱中性子束分布の測定

22.5 cm 格子ピッチのまとめ

報告者 若林利男[※]
 仁紫明人[※]
 福村信男[※]
 八谷雄喜[※]

期間 1972年8月～1975年12月

目的 22.5 cm格子ピッチのプルトニウム燃料を装荷した炉心における単位格子内熱中性子束分布の測定をおこない、核計算コードによる計算値との比較をおこなう。

要旨 プルトニウム燃料を装荷した22.5 cm格子ピッチにおける単位格子内熱中性子束分布の測定を、Dy-A1合金箔を用いた箔放射化法によっておこなった。使用したプルトニウム燃料は0.54 w/o PuO₂-UO₂、0.87 w/o PuO₂-UO₂ (スタンダードグレード)、0.87 w/o PuO₂-UO₂ (リアクターグレード)の3種類の燃料であった。又、冷却材ボイド率は0.54 w/o PuO₂-UO₂ 燃料の場合が、0%、30%、70%、100%の4種類で、その他の2つの燃料では、0%と100%だけであった。実験結果はNOAH-IIコードとLAMP-DCAコードによる計算値と比較、検討された。

熱中性子束分布の測定点は、燃料中、冷却材中、圧力管とカランドリア管の内側と外側、重水中であり、それぞれの測定誤差は冷却材中が±3%、圧力管とカランドリア管が±2%、その他は±1.5%であった。これら詳細な部分の測定により、熱中性子束分布の様子がはっきりし、計算との比較もより精密におこなえるようになった。

NOAH-IIとLAMP-DCAによる計算値との比較では、LAMP-DCAによる計算値の方がNOAH-IIの計算値より、実験値との一致が良いことが認められた。

※大洗工学センター重水臨界実験室

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

Dec. 1975

Measurement of Intra-cell Thermal Neutron Flux
Distributions for Plutonium fuel Lattices

Experiments on 22.5cm pitch lattice

Toshio Wakabayashi
Akito Nishi
Nobuo Fukumura
Yuuki Hachiya

Abstract

Intra-cell thermal neutron flux distributions have been measured in plutonium fuels loaded in 22.5cm pitch lattice by means of dysprosium foil activation method. Coolant void fractions used in the experiment were 0%, 30%, 70% and 100% for the plutonium fuel lattice of 0.54w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$. And 0% and 100% void fractions were used in 0.87w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ fuel (standard grade) and 0.87w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ fuel (reactor grade). Experimental results were compared with the values calculated by NOAH-II code and LAMP-DCA code.

Measurement positions were in the plutonium fuel pins, in the coolant, on both inside and outside surfaces of pressure tube and calandria tube, and in the D_2O moderator. Experimental errors for the resultant Dy activities were estimated as $\pm 2.0\%$.

On the base of this accurate measurement, thermal neutron flux distributions became to be comparable in detail in each regions with results calculated by various codes.

The experimental values agree with the calculated values by LAMP-DCA code better than the results by NOAH-II code.

目 次

1.	概 要	1
2.	実験体系	1
3.	実験方法	5
4.	実験結果	14
5.	実験結果の考察	34
5.1	冷却材ボイド率変化の影響	34
5.2	プルトニウムの富化度，組成比の影響	35
6.	NOAH-IIコードによる計算値との比較	43
7.	LAMP-DCAコードによる計算値との比較	53
8.	結 論	66
9.	謝 辞	67
	参考文献	68
	付録1 DCA物理定数	69
	付録2 NOAH-II計算用入力	76
	付録3 LAMP-DCAコードで計算した熱中性子スペクトル	79

1 概 要

2.2.5 cm格子ピッチにおいて各種プルトニウム燃料を装荷した炉心の単位格子内熱中性子束分布が測定されてきた。本報告書は今までおこなわれた 0.54 w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料と 0.87 w/o (スタンダードグレード) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ (以後 0.87 w/o (S) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ と略す) 燃料の実験結果^{1), 2), 3)}と, 0.87 w/o (リアクターグレード) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ (以後 0.87 w/o (R) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ と略す) 燃料の実験結果とをまとめたものである。計算値との比較は, クラスター型燃料格子の核設計計算コードとして用いられている NOAH-II コード⁴⁾と 2次元の衝突確率法に基づいてより詳細に計算するコードシステム LAMP-DCA⁵⁾を用いて計算した結果とおこなった。

2 実験体系

各種燃料における炉心構成ならびに臨界水位，冷却材水位については Table 1 にまとめて示した。また炉心構成図は Fig.1, 2 に示した。

Table 1 Experimental condition

Fuel enrichment	Void fraction (%)	Number of cluster		Critical height (cm)	Coolant height (cm)
		U clusters	Pu clusters		
0.54w/o PuO ₂ -UO ₂	0	96	25	85.0	85.0
	30	96	25	86.7	87.0
	70	96	25	93.0	93.0
	100	96	25	103.4	0.0
0.87w/o(S) PuO ₂ -UO ₂	0	112	9	83.4	83.5
	100	96	25	93.8	0.0
0.87w/o(R) PuO ₂ -UO ₂	0	96	25	83.5	83.1
	100	96	25	103.8	0.0

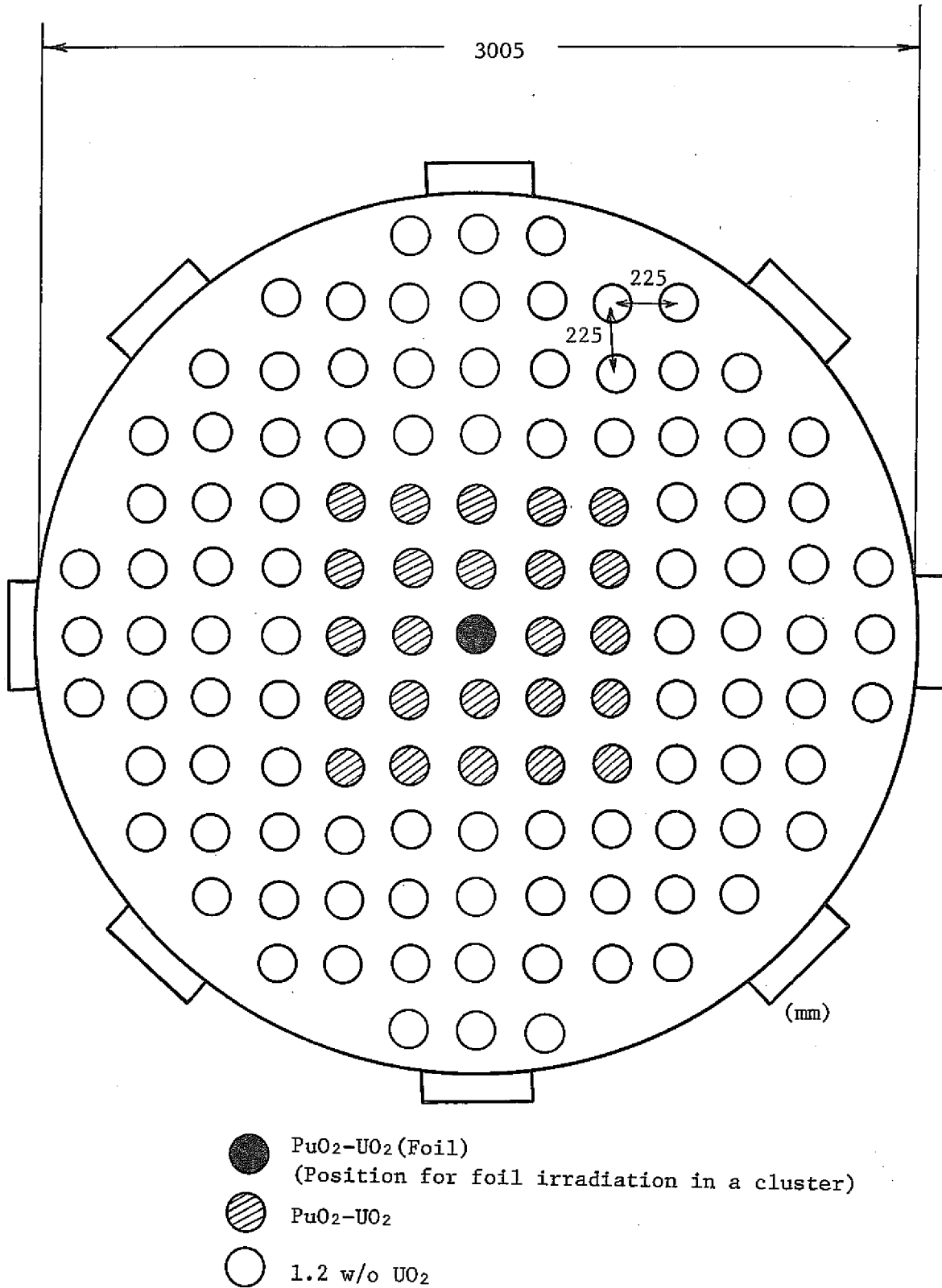


Fig. 1 DCA core configuration

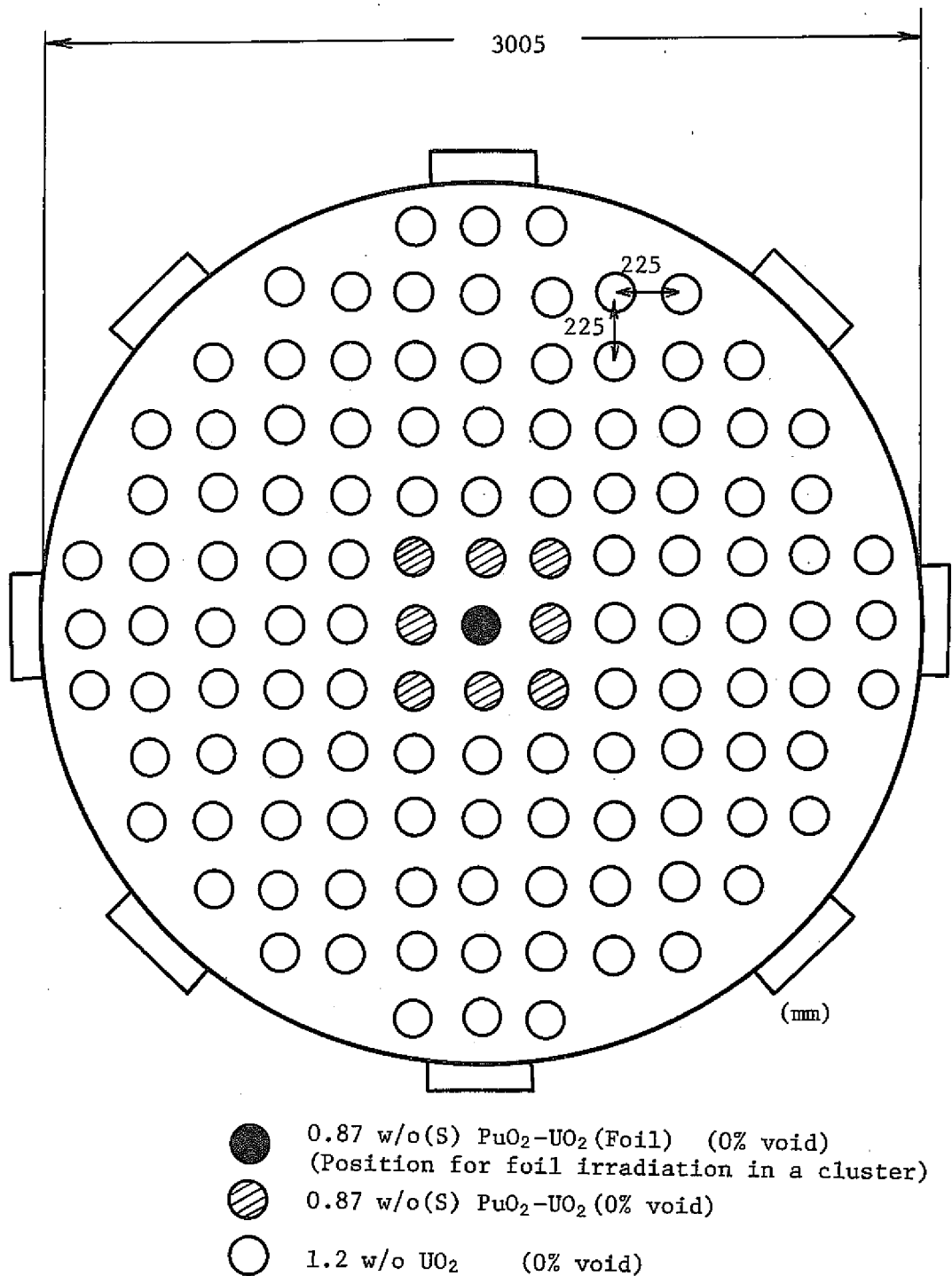


Fig. 2 DCA core configuration

3 実験方法

実験方法については前の報告書^{1), 2)}で詳しく説明しているので、ここでは簡単に述べる。

単位格子内の分布の測定は、Dy-Al合金箔を用いた箔放射化法によりおこなった。Table 2 に使用した箔の各仕様を示した。燃料中の測定には14.8mmφのDy箔を用い、燃料以外(冷却材中、圧力管、カランドリア管、重水中)の分布の測定には7.0mmφのDy箔を用いた。燃料中の測定と燃料以外の測定は別々照射し、規格化は圧力管、カランドリア管にはった箔でおこなった。Fig.3に箔の全体の配置図を示した。燃料中の箔の配置図はFig.4に示し、Photo. 1にはDCAの燃料の切断グローブボックスと洗浄グローブボックスの写真を、そしてPhoto. 2には切断グローブボックス内の切断機の写真を示した。冷却材中の分布の測定はFig.5, 6に示したセクター箔を用い、照射後各冷却材領域ごとにセクター箔を切断して計測した。

圧力管、カランドリア管の内側の箔の配置はFig.7に示した用具を用いておこなった。

重水中の分布の測定にはFig.8に示したAlホルダーを用い中性子束の歪を最小にし、0°方向と45°方向で測定した。又、Photo.3に実際にこのホルダーを配置した時の写真を示した。両カランドリア管にAlホルダーのひれがぴったりはまり、0°方向と45°方向の位置の固定が確実におこなわれているのが認められる。

Dy-Al箔の放射化量はCaF₂(Eu)シンチレーションカウンタで測定した。又、単位格子内熱中性子束分布を求めるには、炉心全体のクロスな中性子束分布の補正が必要である。半径方向のクロスな中性子束分布はDy-Al箔をFig.9に示したように配置し求めた。クロス分布の測定方法の詳しい説明は報告書「クラスター型炉心における材料バックリングの測定」⁶⁾に述べられている。

Table 2 Specification of Dy-Al foil sheet

Dimensions	14.8φ × 0.1mm 7.0φ × 0.1mm
Physical property	Dy-Al alloy
Dy contents	4%
Purity	99.697%
Maker	Research Chemical Inc.

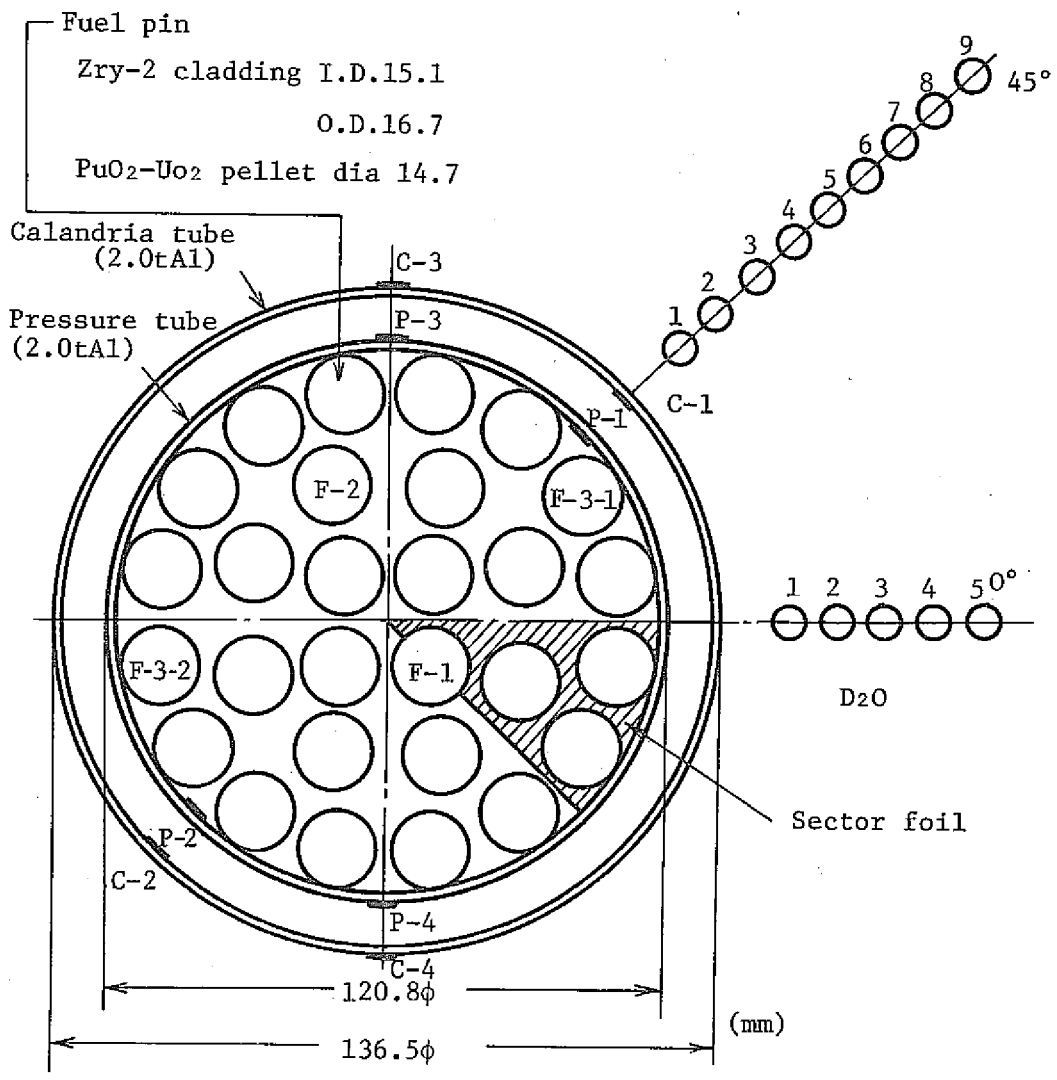


Fig. 3 Foil arrangement in unit cell

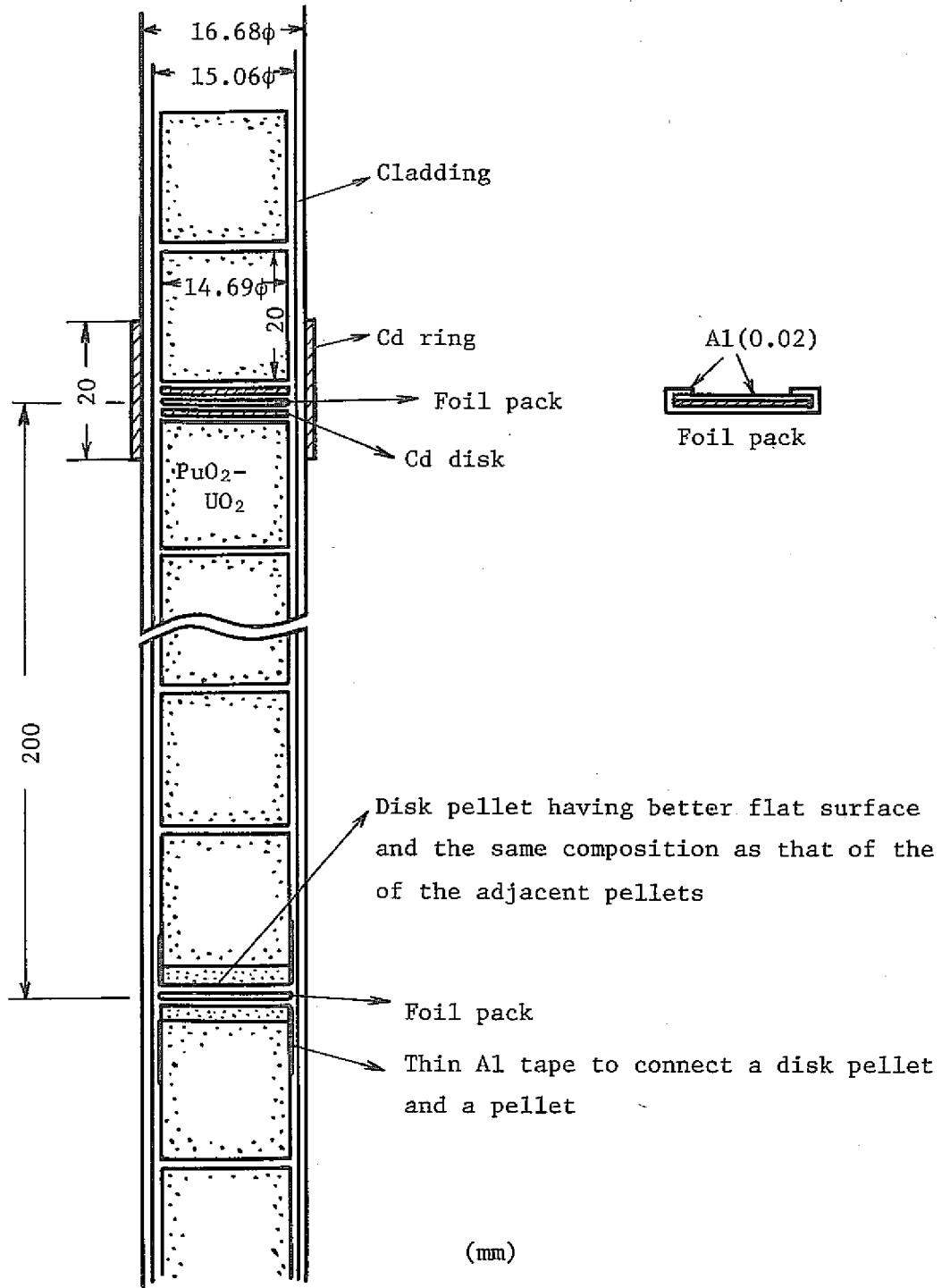


Fig. 4 Foil arrangement in PuO₂-UO₂ fuel

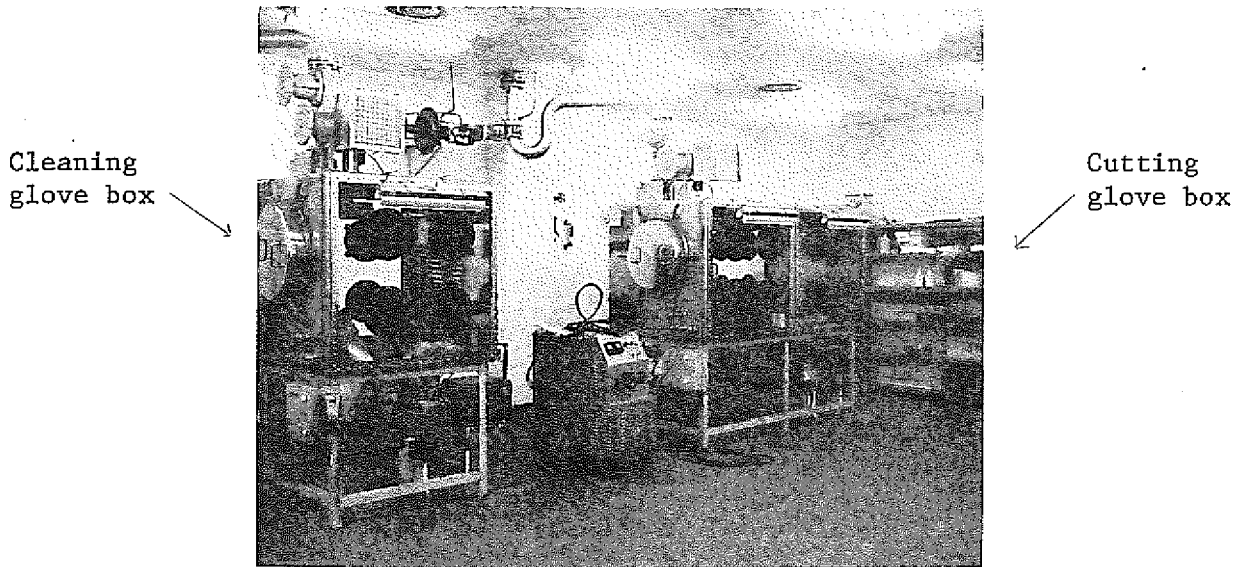


Photo. 1 Photograph of plutonium handling room of DCA

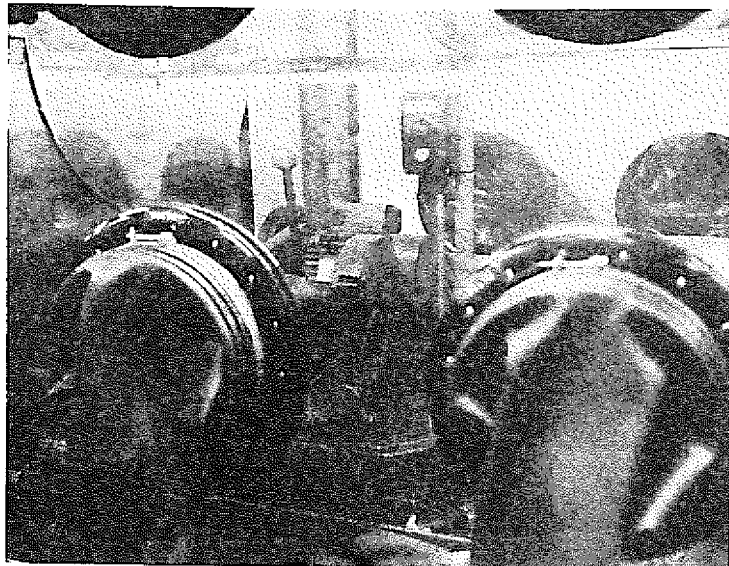


Photo. 2 Photograph of silicon-carbide cutter in Cutting grobe box

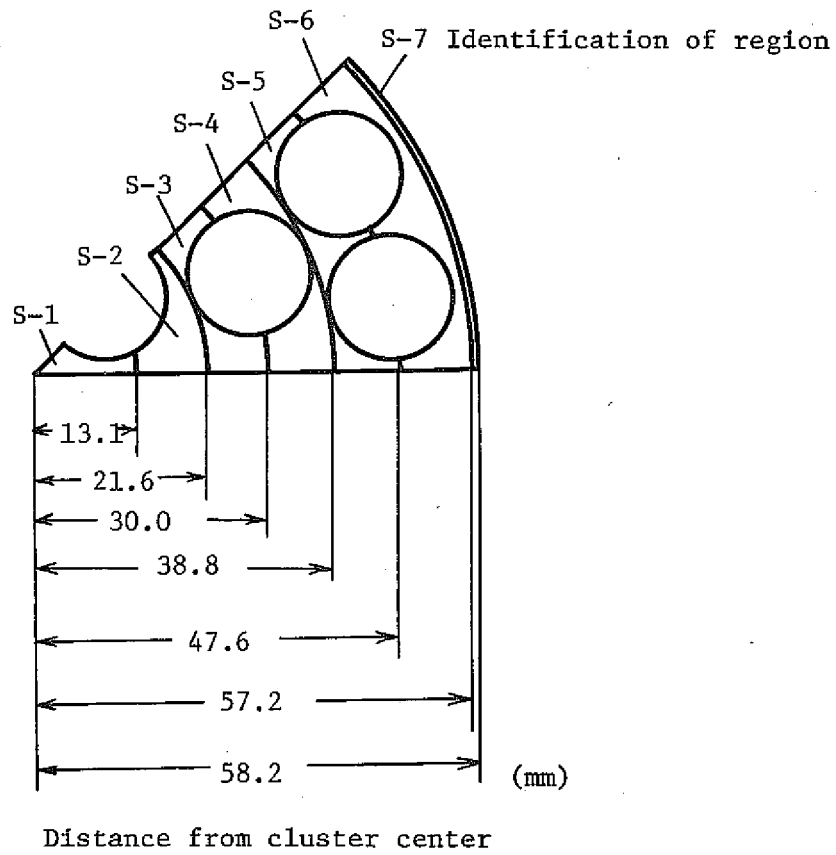


Fig. 5 Sector foil for measurement of Dy reaction rate in coolant region

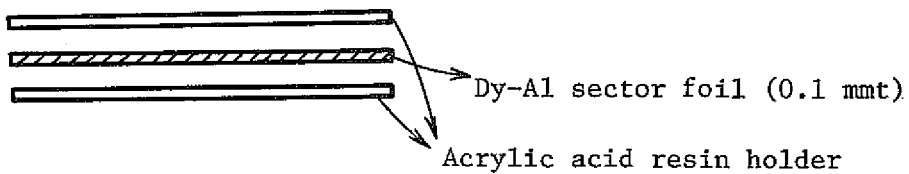


Fig. 6 Sector foil and its holder arrangement in coolant region

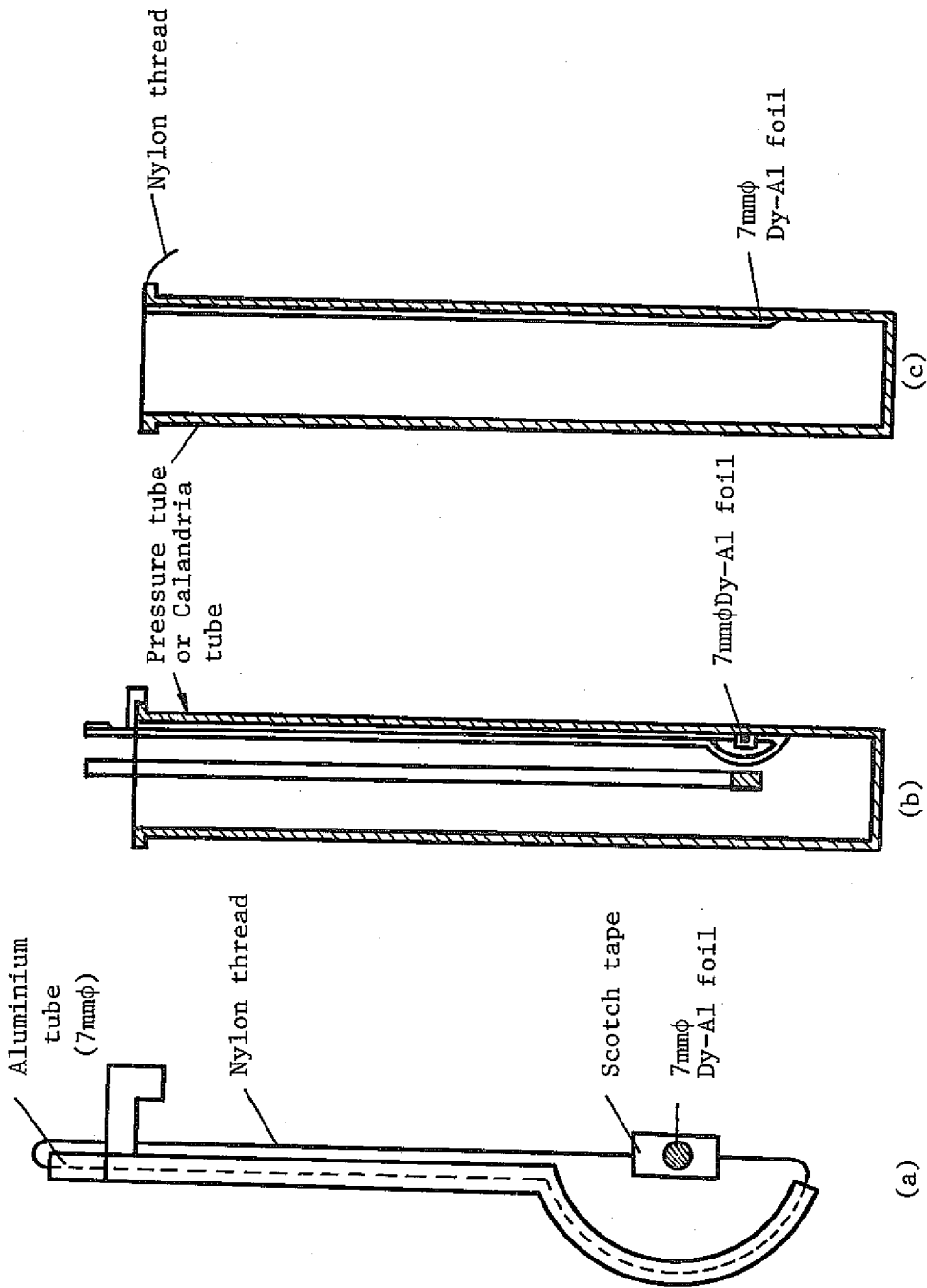


Fig. 7 Experimental technique for measurement on the inside of pressure and calandria tube

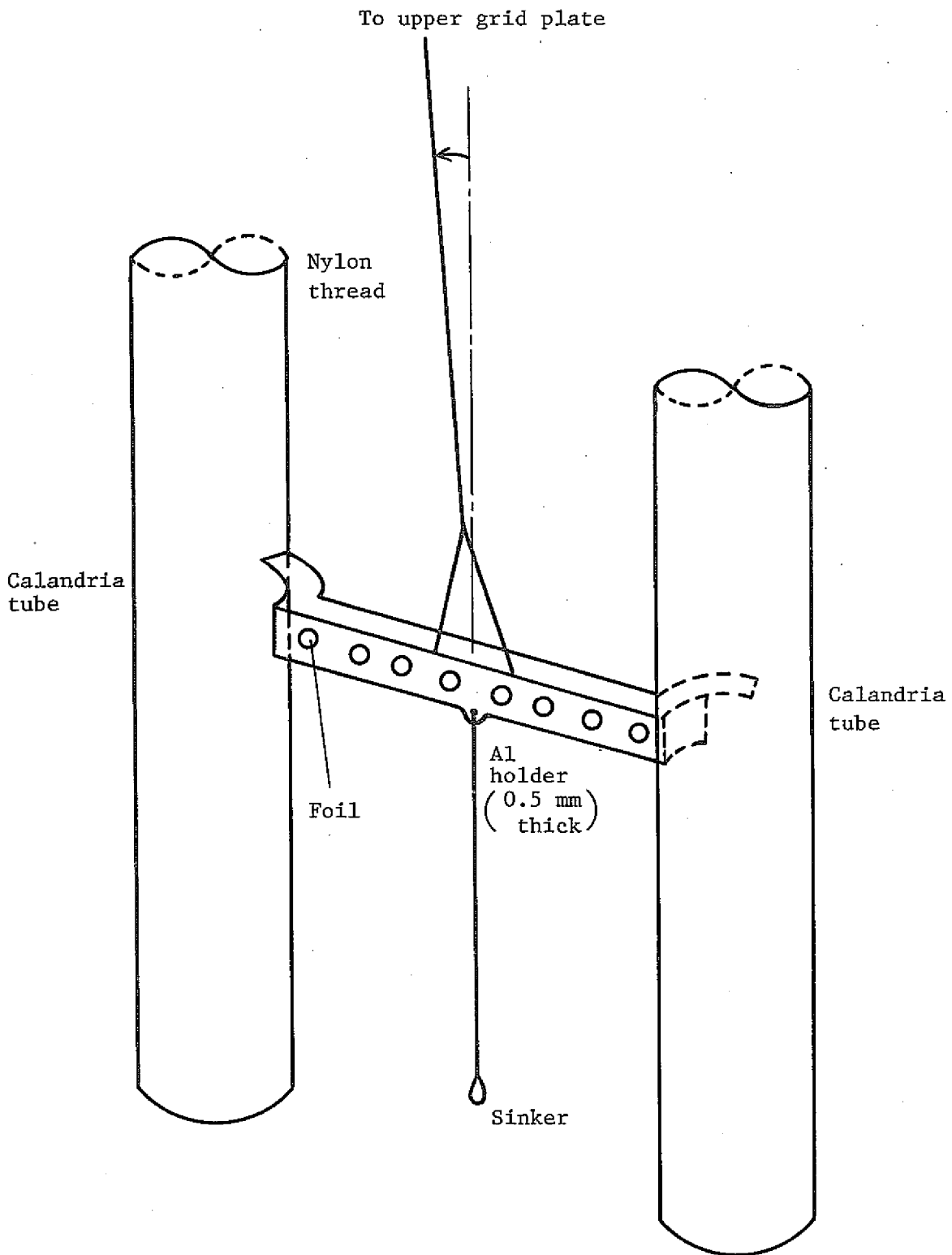
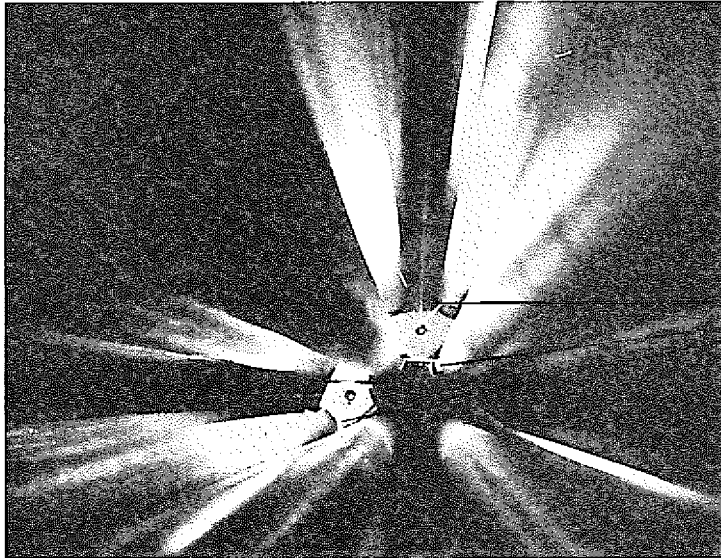


Fig. 8 Holder arrangement for measurement in the D₂O moderator



Al holder

Photo. 3 Photograph of Al holder in D₂O moderator

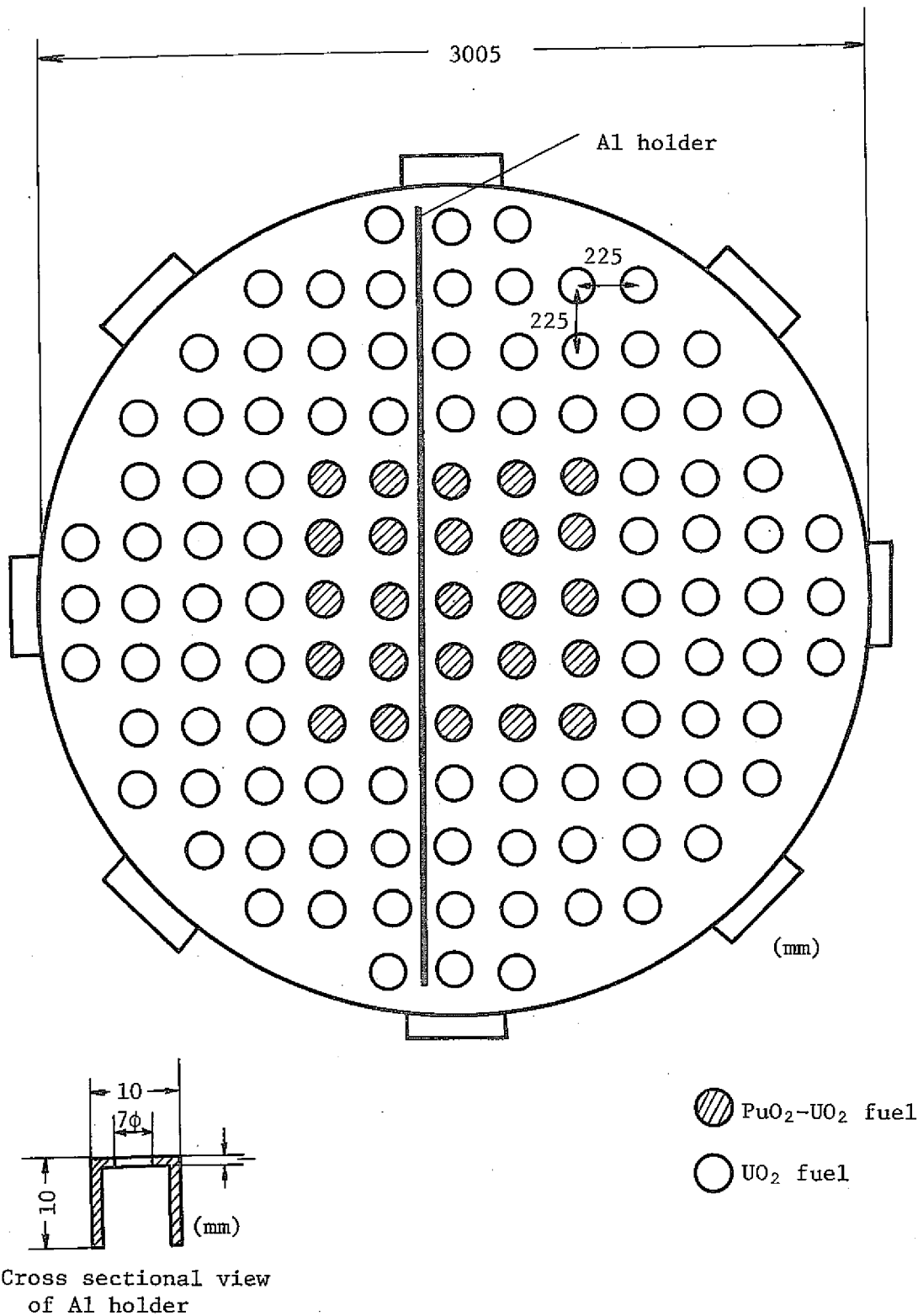


Fig. 9 Al holder arrangement for measurement of gross distribution

4 実 験 結 果

測定された放射化量にはバックグラウンド，不感時間，冷却および測定時間中の減衰，箔の検出感度，カドミ比，炉心半径方向のグロスな中性子束分布等の補正がなされた。Table 3 に各燃料体系におけるカドミ比，Table 4 にグロスな中性子束分布の補正のための補正係数 B_r を示した。また，Fig.10 にはグロス分布の補正のために測定された半径方向のグロスな中性子束分布の一測定例を示した。ここで曲線 A, B, C, D, E, F は，炉心のグロスな中性子束分布を示すが，これより補正係数 B_r を導出する詳細な説明は報告書「クラスター型炉心における材料バックリングの測定」⁶⁾ に示されている。

このような各補正がなされた放射化量，ならびに圧力管外側で測定した放射化量で規格化した値を Table 6 から Table 13 に示した。また，Fig.11 から Fig.18 には圧力管外側で規格化した単位格子内の熱中性子束分布を示した。クラスター内の分布において，白丸は燃料中，黒丸は冷却材中での実験値を示す。

実験上又はデータ処理上に生じた実験誤差は Table 5 に示した。22.5cm格子における実験誤差は冷却材中で±3%，圧力管とカランドリア管の内側で±2%，その以外の燃料中，圧力管とカランドリア管の外側，重水中の分布では±1.5%であった。

Table 3 Cd-ratio of Dy-reaction rate in each fuel pin and D₂O moderator region

Fuel	Coolant void fraction (%)	Region				
		F-1	F-2	F-3-1	F-3-2	D ₂ O
0.54w/o PuO ₂ -UO ₂	0	42.6 ± 1.9	54.8 ± 1.1	74.2 ± 1.1	74.2 ± 1.4	110.2 ± 5.0
	30	40.7 ± 1.2	51.6 ± 2.3	68.1 ± 2.5	66.7 ± 2.2	105.3 ± 4.2
	70	32.5 ± 1.5	36.7 ± 0.6	51.9 ± 1.4	52.7 ± 1.1	104.2 ± 4.3
	100	30.8 ± 0.5	36.0 ± 0.8	41.5 ± 0.6	44.8 ± 0.9	86.4 ± 3.0
0.87w/o(S) PuO ₂ -UO ₂	0	32.0 ± 0.8	40.4 ± 0.6	60.3 ± 1.8	58.6 ± 1.5	104.0 ± 3.0
	100	25.6 ± 0.7	28.1 ± 0.6	36.9 ± 1.7	37.8 ± 1.9	78.2 ± 2.3
0.87w/o(R) PuO ₂ -UO ₂	0	36.1 ± 0.9	48.4 ± 2.2	67.8 ± 1.1	64.6 ± 2.2	106.2 ± 2.4
	100	29.1 ± 1.0	31.5 ± 1.9	39.9 ± 1.7	41.0 ± 1.7	82.3 ± 2.1

Table 4 Arguments of Jo function for correcting gross neutron flux distribution

Fuel enrichment	Coolant void fraction (%)	Argument (Br)
0.54w/o PuO ₂ -UO ₂	0	0.0194
	30	0.0191
	70	0.0189
	100	0.0186
0.87w/o(S) PuO ₂ -UO ₂	0	0.0286
	100	0.0191
0.87w/o(R) PuO ₂ -UO ₂	0	0.0203
	100	0.0188

Table 5 Summary of experimental errors

Error	Source of error	Magnitude (%)					Remarks
		Fuel	Coolant	C.T,P.T inside	C.T,P.T outside	D ₂ O	
Random		±1	±1	±1	±1	±1	
Systematic	Counter dead time correction, Decay constant uncertainty	±0.6	±0.6	±0.6	±0.6	±0.6	ref. (1)
	Counting efficiency Cd ratio correction	±0.6	±0.1	±1.0	±0.6	±0.6	
	Thermal neutron flux Perturbation by Dy foil	-0.5	/	-0.1	-0.1	-0.1	
	Thermal neutron flux perturbation by Dy sector foil	/	-2.5	/	/	/	
	Thermal neutron flux perturbation by Al holder	/	/	/	/	-0.2	
	Position uncertainty	±0.3	±0.3	±1.0	±0.3	±0.3	
Total		±1.5	±3.0	±2.0	±1.5	±1.5	

Table 6 Intra-cell thermal neutron flux distribution

22.5cm lattice pitch, 0.54w/o PuO₂-UO₂, 0% Void

Foil position		Distance from center (cm)	Dy bare	Cd ratio (C.R)	C.R-1	Dy sub-Cd	Jo(Br)	Corrected value	Normali- zed value
					C.R				
Fuel	F-1	1.313	0.840	42.6	0.977	0.821	1.000	0.821	0.278
	F-2	3.0	1.095	54.8	0.982	1.075	0.999	1.076	0.364
	F-3-1	4.758	1.594	74.2	0.987	1.573	0.998	1.576	0.534
	F-3-2	4.758	1.573	72.2	0.986	1.551	0.998	1.554	0.526
Coolant	S-1	0.66	0.921		0.977	0.900	1.000	0.900	0.305
	S-2	1.78	1.021			0.998	1.000	0.998	0.338
	S-3	2.58	1.106		0.982	1.086	0.999	1.087	0.368
	S-4	3.44	1.339			1.315	0.998	1.318	0.446
	S-5	4.32	1.457			1.438	0.997	1.442	0.488
	S-6	5.24	2.202		0.987	2.173	0.997	2.179	0.738
	S-7	5.77							
Pressure tube	P.T inside	5.840	2.912		0.991	2.886	0.997	2.895	0.980
	P.T outside	6.040	2.972			2.945	0.997	2.954	1.000
Calandria tube	C.T inside	6.625	3.001		0.991	2.974	0.996	2.986	1.011
	C.T outside	6.825	3.006			2.979	0.996	2.991	1.013
D ₂ O	0°-1	7.8	3.250		0.991	3.221	0.993	3.244	1.098
	-2	8.8	3.336			3.306	0.992	3.333	1.128
	-3	9.8	3.452			3.421	0.991	3.452	1.169
	-4	10.8	3.494			3.463	0.988	3.505	1.187
	-5	11.8	3.550			3.518	0.986	3.568	1.208
	45°-1	7.9	3.258		0.991	3.229	0.993	3.252	1.101
	-2	8.9	3.402			3.371	0.992	3.398	1.150
	-3	9.9	3.560			3.528	0.991	3.560	1.205
	-4	10.9	3.722			3.689	0.988	3.734	1.264
	-5	11.9	3.768			3.734	0.986	3.787	1.282
	-6	12.9	3.790			3.756	0.984	3.817	1.292
	-7	13.9	3.838			3.803	0.982	3.873	1.311
	-8	14.9	3.910			3.875	0.979	3.958	1.340
	-9	15.9	3.906			110.2	3.871	0.976	3.966

Table 7 Intra-cell thermal neutron flux distribution

22.5cm lattice pitch, 0.54w/o PuO₂-UO₂, 30% Void

Foil position		Distance from center (cm)	Dy bare	Cd ratio (C.R)	C.R-1	Dy sub-Cd	Jo(Br)	Corrected value	Normali- zed value
					C.R				
Fuel	F-1	1.313	0.887	40.7	0.975	0.865	1.000	0.865	0.286
	F-2	3.0	1.142	51.6	0.981	1.120	0.999	1.121	0.371
	F-3-1	4.758	1.649	68.1	0.985	1.624	0.998	1.627	0.539
	F-3-2	4.758	1.666	66.7	0.985	1.641	0.998	1.644	0.545
Coolant	S-1	0.66	0.986		0.975	0.961	1.000	0.961	0.138
	S-2	1.78	1.193			1.163	1.000	1.163	0.385
	S-3	2.58	1.346		0.981	1.320	0.999	1.321	0.438
	S-4	3.44	1.570			1.540	0.999	1.542	0.511
	S-5	4.32	1.774		0.985	1.747	0.997	1.752	0.580
	S-6	5.24	2.331			2.296	0.997	2.303	0.763
	S-7	5.77	2.763			2.722	0.997	2.730	0.904
Pressure tube	P.T inside	5.840	2.912		0.991	2.886	0.997	2.895	0.959
	P.T outside	6.040	3.037			3.010	0.997	3.019	1.0001
Calandria tube	C.T inside	6.625	3.057		0.991	3.029	0.996	3.041	1.007
	C.T outside	6.825	3.117			3.089	0.996	3.101	1.027
D ₂ O	0°-1	8.0	3.396		0.991	3.365	0.994	3.385	1.121
	-2	9.0	3.573			3.541	0.992	3.570	1.183
	-3	10.0	3.743			3.709	0.991	3.743	1.240
	-4	11.0	3.733			3.699	0.989	3.740	1.239
	-5	12.0	3.706			3.673	0.986	3.725	1.234
	45°-1	8.0	3.407		0.991	3.376	0.994	3.396	1.125
	-2	9.0	3.600			3.568	0.992	3.597	1.191
	-3	10.0	3.792			3.758	0.991	3.792	1.256
	-4	11.0	3.895			3.860	0.989	3.903	1.293
	-5	12.0	4.021			3.985	0.986	4.042	1.339
	-6	13.0	4.010			3.974	0.984	4.039	1.338
	-7	14.0	4.124			4.087	0.982	4.162	1.379
	-8	15.0	4.076			4.039	0.979	4.126	1.367
	-9	16.0	4.035	105.3		3.999	0.976	4.097	1.357

Table 8 Intra-cell thermal neutron flux distribution

22.5cm lattice pitch, 0.54w/o PuO₂-UO₂, 70% Void

Foil position		Distance from center (cm)	Dy bare	Cd ratio (C.R)	C.R-1		Dy sub-Cd	Jo(Br)	Corrected value	Normali- zed value
					C.R					
Fuel	F-1	1.313	0.987	32.5	0.969		0.956	1.000	0.956	0.328
	F-2	3.0	1.248	36.7	0.972		1.213	0.999	1.214	0.416
	F-3-1	4.758	1.850	51.9	0.981		1.815	0.998	1.819	0.624
	F-3-2	4.758	1.912	52.7	0.981		1.876	0.998	1.880	0.644
Coolant	S-1	0.66	1.112		0.969		1.078	1.000	1.078	0.370
	S-2	1.78	1.132				1.097	1.000	1.097	0.377
	S-3	2.58	1.419		0.972		1.379	0.999	1.380	0.473
	S-4	3.44	1.628				1.582	0.999	1.584	0.544
	S-5	4.32	1.848		0.981		1.813	0.997	1.818	0.623
	S-6	5.24	2.541				2.493	0.997	2.501	0.857
	S-7	5.77	2.837				2.783	0.997	2.791	0.957
Pressure tube	P.T inside	5.840	2.909		0.990		2.880	0.997	2.889	0.990
	P.T outside	6.040	2.937				2.908	0.997	2.917	1.000
Calandria tube	C.T inside	6.625	3.028		0.990		2.998	0.996	3.010	1.032
	C.T outside	6.825	3.080				3.049	0.996	3.061	1.049
D ₂ O	0°-1	8.0	3.430		0.990		3.396	0.994	3.417	1.171
	-2	9.0	3.737				3.700	0.992	3.730	1.279
	-3	10.0	3.953				3.913	0.991	3.949	1.354
	-4	11.0	3.960				3.920	0.989	3.964	1.359
	-5	12.0	3.861				3.822	0.986	3.876	1.329
	45°-1	8.0	3.608		0.990		3.572	0.994	3.594	1.232
	-2	9.0	3.816				3.778	0.992	3.808	1.305
	-3	10.0	4.125				4.084	0.991	4.121	1.413
	-4	11.0	4.270				4.227	0.989	4.274	1.465
	-5	12.0	4.470				4.425	0.986	4.488	1.539
	-6	13.0	4.389				4.345	0.984	4.416	1.514
	-7	14.0	4.444				4.489	0.981	4.576	1.569
	-8	15.0	4.651				4.604	0.979	4.703	1.612
	-9	16.0	4.485	104.2			4.440	0.976	4.549	1.559

Table 9 Intra-cell thermal neutron flux distribution

22.5cm lattice pitch, 0.54w/o PuO₂-UO₂, 100% Void

Foil position		Distance from center (cm)	Dy bare	Cd ratio (C.R)	C.R-1	Dy sub-Cd	Jo(Br)	Corrected value	Normali- zed value
					C.R				
Fuel	F-1	1.313	1.318	30.8	0.968	1.276	1.000	1.276	0.480
	F-2	3.0	1.539	36.0	0.972	1.496	0.999	1.497	0.563
	F-3-1	4.758	1.985	41.5	0.976	1.937	0.998	1.941	0.730
	F-3-2	4.758	2.089	44.8	0.978	2.043	0.998	2.047	0.770
Coolant	S-1	0.66							
	S-2	1.78							
	S-3	2.58							
	S-4	3.44							
	S-5	4.32							
	S-6	5.24							
	S-7	5.77							
Pressure tube	P.T inside	5.840	2.632		0.988	2.600	0.997	2.608	0.980
	P.T outside	6.040	2.683			2.651	0.997	2.659	1.000
Calandria tube	C.T inside	6.625	2.728		0.988	2.695	0.997	2.704	1.017
	C.T outside	6.825	2.813			2.780	0.996	2.791	1.050
D ₂ O	0°-1	7.8	3.355		0.988	3.315	0.994	3.335	1.254
	-2	8.8	3.714			3.669	0.993	3.695	1.390
	-3	9.8	3.888			3.841	0.991	3.876	1.458
	-4	10.8	3.996			3.948	0.990	3.988	1.500
	-5	11.8	4.044			3.995	0.987	4.048	1.522
	45°-1	7.9	3.425		0.988	3.384	0.994	3.406	1.280
	-2	8.9	3.976			3.928	0.993	3.956	1.488
	-3	9.9	4.325			4.273	0.991	4.321	1.622
	-4	10.9	4.492			4.438	0.989	4.487	1.687
	-5	11.9	4.774			4.717	0.987	4.779	1.797
	-6	12.9	4.895			4.836	0.984	4.915	1.848
	-7	13.9	5.063			5.002	0.982	5.094	1.916
	-8	14.9	5.121			5.060	0.979	5.169	1.944
	-9	15.9	5.035	86.4		4.974	0.976	5.096	1.917

Table 10 Intra-cell thermal neutron flux distribution

22.5cm lattice pitch, 0.87w/o (s) PuO₂-UO₂,0% Void

Foil position		Distance from center (cm)	Dy bare	Cd ratio (C.R)	C.R-1	Dy sub-Cd	Jo(Br)	Corrected value	Normali- zed value
					C.R				
Fuel	F-1	1.313	0.551	32.0	0.969	0.534	1.000	0.534	0.223
	F-2	3.0	0.746	40.4	0.975	0.727	0.998	0.729	0.304
	F-3-1	4.758	1.175	60.3	0.983	1.155	0.996	1.160	0.482
	F-3-2	4.758	1.117	58.6	0.983	1.098	0.996	1.102	0.460
Coolant	S-1	0.66	0.630		0.969	0.610	1.000	0.610	0.254
	S-2	1.78	0.737			0.714	0.999	0.715	0.298
	S-3	2.58	0.785		0.975	0.765	0.999	0.766	0.319
	S-4	3.44	0.980			0.956	0.998	0.958	0.399
	S-5	4.32	1.074			1.056	0.995	1.061	0.442
	S-6	5.24	1.763		0.983	1.733	0.994	1.743	0.727
	S-7	5.77	2.203			2.166	0.994	2.179	0.909
Pressure tube	P.T inside	5.840	2.384		0.990	2.360	0.994	2.374	0.990
	P.T outside	6.040	2.408			2.384	0.994	2.398	1.000
Calandria tube	C.T inside	6.625	2.482		0.990	2.457	0.992	2.477	1.033
	C.T outside	6.825	2.502			2.477	0.992	2.497	1.041
D ₂ O	0°-1	7.8	2.658		0.990	2.631	0.989	2.660	1.109
	-2	8.8	2.839			2.811	0.986	2.851	1.189
	-3	9.8	2.918			2.889	0.983	2.939	1.226
	-4	10.8	2.991			2.961	0.980	3.021	1.260
	-5	11.8	2.973			2.943	0.976	3.015	1.257
	45°-1	7.9	2.729		0.990	2.702	0.989	2.732	1.139
	-2	8.9	2.970			2.940	0.986	2.982	1.244
	-3	9.9	3.066			3.035	0.983	3.087	1.287
	-4	10.9	3.228			3.196	0.979	3.265	1.362
	-5	11.9	3.313		0.990	3.280	0.975	3.364	1.402
	-6	12.9	3.336			3.303	0.971	3.402	1.418
	-7	13.9	3.341			3.308	0.966	3.424	1.428
	-8	14.9	3.339			3.306	0.962	3.437	1.433
	-9	15.9	3.265	104.0		3.232	0.956	3.381	1.410

Table 11 Intra-cell thermal neutron flux distribution

22.5cm lattice pitch, 0.87w/o (s) PuO₂-UO₂100% Void

Foil position		Distance from center (cm)	Dy bare	Cd ratio (C.R)	C.R-1	Dy sub-Cd	Jo(Br)	Corrected value	Normali- zed value
					C.R				
Fuel	F-1	1.313	0.775	25.6	0.961	0.745	1.000	0.745	0.390
	F-2	3.0	0.868	28.1	0.964	0.837	0.999	0.838	0.439
	F-3-1	4.758	1.256	36.9	0.973	1.222	0.998	1.224	0.641
	F-3-2	4.758	1.288	37.8	0.974	1.255	0.998	1.258	0.659
Coolant	S-1	0.66	0.826		0.961	0.794	1.000	0.794	0.416
	S-2	1.74	0.836			0.803	1.000	0.803	0.420
	S-3	2.58	0.890		0.964	0.858	0.999	0.859	0.450
	S-4	3.44	1.002			0.966	0.999	0.967	0.506
	S-5	4.32	1.135		0.974	1.105	0.997	1.108	0.580
	S-6	5.24	1.780			1.734	0.997	1.739	0.910
	S-7	5.77	1.844			1.796	0.997	1.801	0.943
Pressure tube	P.T inside	5.840	1.900		0.987	1.875	0.997	1.880	0.984
	P.T outside	6.040	1.929			1.904	0.997	1.910	1.000
Calandria tube	C.T inside	6.625	1.980		0.987	1.954	0.996	1.962	1.027
	C.T outside	6.825	2.015			1.989	0.996	1.997	1.046
D ₂ O	0°-1	7.8	2.458		0.987	2.426	0.994	2.441	1.278
	-2	8.8	2.752			2.716	0.993	2.735	1.433
	-3	9.8	2.906			2.868	0.991	2.874	1.515
	-4	10.8	2.980			2.941	0.989	2.974	1.558
	-5	11.8	2.945			2.907	0.987	2.945	1.543
	45°-1	7.9	2.553		0.987	2.520	0.994	2.535	1.327
	-2	8.9	2.935			2.897	0.992	2.920	1.528
	-3	9.9	3.208			3.166	0.991	3.195	1.673
	-4	10.9	3.358			3.314	0.989	3.351	1.756
	-5	11.9	3.523			3.477	0.986	3.526	1.845
	-6	12.9	3.686			3.638	0.984	3.697	1.936
	-7	13.9	3.738			3.689	0.982	3.757	1.968
	-8	14.9	3.790			3.741	0.979	3.821	2.001
	-9	15.9	3.812			3.762	0.976	3.854	2.019
						78.2			

Table 12 Intra-cell thermal neutron flux distribution

22.5cm lattice pitch, 0.87w/o (R) PuO₂-UO₂,0% Void

Foil position		Distance from center (cm)	Dy bare	Cd ratio (C.R)	C.R-1	Dy sub-Cd	Jo(Br)	Corrected value	Normali- zed value
					C.R				
Fuel	F-1	1.313	0.617	36.1	0.972	0.600	1.000	0.600	0.236
	F-2	3.0	0.826	48.4	0.979	0.809	0.999	0.810	0.319
	F-3-1	4.758	1.262	67.8	0.985	1.243	0.998	1.245	0.490
	F-3-2	4.758	1.224	64.6	0.985	1.206	0.998	1.208	0.475
Coolant	S-1	0.66	0.679		0.972	0.660	1.000	0.660	0.260
	S-2	1.74	0.776			0.754	1.000	0.754	0.297
	S-3	2.58	0.875		0.979	0.857	0.999	0.858	0.338
	S-4	3.44	1.080			1.057	0.999	1.058	0.416
	S-5	4.32	1.183		0.985	1.165	0.998	1.167	0.459
	S-6	5.24	1.935			1.906	0.997	1.912	0.752
	S-7	5.77	2.223			2.190	0.997	2.197	0.864
Pressure tube	P.T inside	5.840	2.503		0.991	2.480	0.996	2.490	0.980
	P.T outside	6.040	2.555			2.532	0.996	2.542	1.000
Calandria tube	C.T inside	6.625	2.602		0.991	2.579	0.995	2.592	1.020
	C.T outside	6.825	2.606			2.583	0.995	2.596	1.021
D ₂ O	0°-1	7.8	2.758		0.991	2.733	0.994	2.749	1.081
	-2	8.8	2.854			2.828	0.992	2.851	1.122
	-3	9.8	2.900			2.874	0.990	2.903	1.142
	-4	10.8	3.026			2.999	0.988	3.035	1.194
	-5	11.8	3.071			3.043	0.986	3.086	1.214
	45°-1	7.9	2.824		0.991	2.799	0.994	2.816	1.108
	-2	8.9	3.061			3.033	0.992	3.057	1.202
	-3	9.9	3.177			3.148	0.990	3.180	1.251
	-4	10.9	3.234			3.205	0.988	3.244	1.276
	-5	11.9	3.317			3.287	0.986	3.334	1.312
	-6	12.9	3.442			3.411	0.983	3.470	1.365
	-7	13.9	3.508			3.476	0.980	3.547	1.395
	-8	14.9	3.516			3.484	0.977	3.566	1.403
	-9	15.9	3.511	106.2		3.749	0.974	3.572	1.405

Table 13 Intra-cell thermal neutron flux distribution

22.5cm lattice pitch, 0.87w/o (R) PuO₂-UO₂, 100% Viod

Foil position		Distance from center (cm)	Dy bare	Cd ratio (C.R)	C.R-1	Dy sub-Cd	Jo(Br)	Corrected value	Normali - zed value
					C.R				
Fuel	F-1	1.313	0.721	29.1	0.966	0.696	1.000	0.696	0.400
	F-2	3.0	0.838	31.5	0.968	0.811	0.999	0.812	0.467
	F-3-1	4.758	1.162	39.9	0.975	1.133	0.998	1.135	0.652
	F-3-2	4.758	1.181	41.0	0.976	1.153	0.998	1.155	0.664
Coolant	S-1	0.66	0.736		0.966	0.711	1.000	0.711	0.409
	S-2	1.74	0.758			0.732	1.000	0.732	0.421
	S-3	2.58	0.809		0.968	0.783	0.999	0.784	0.451
	S-4	3.44	0.910			0.881	0.999	0.882	0.507
	S-5	4.32	1.012		0.976	0.988	0.998	0.990	0.569
	S-6	5.24	1.575			1.537	0.998	1.540	0.885
	S-7	5.77	1.700			1.659	0.997	1.664	0.956
Pressure tube	P.T inside	5.840	1.738		0.988	1.717	0.997	1.722	0.990
	P.T outside	6.040	1.756			1.735	0.997	1.740	1.000
Calandria tube	C.T inside	6.625	1.787		0.988	1.766	0.996	1.773	1.019
	C.T outside	6.825	1.843			1.821	0.996	1.828	1.051
D ₂ O	0°-1	7.8	2.192		0.988	2.166	0.994	2.179	1.252
	-2	8.8	2.492			2.462	0.993	2.479	1.425
	-3	9.8	2.705			2.673	0.991	2.697	1.550
	-4	10.8	2.723			2.690	0.990	2.717	1.561
	-5	11.8	2.707			2.675	0.988	2.707	1.556
	45°-1	7.9	2.307		0.988	2.279	0.994	2.293	1.318
	-2	8.9	2.627			2.595	0.993	2.613	1.502
	-3	9.9	2.912			2.877	0.991	2.903	1.668
	-4	10.9	3.032			2.996	0.990	3.026	1.739
	-5	11.9	3.166			3.128	0.988	3.166	1.820
	-6	12.9	3.248			3.209	0.985	3.258	1.872
	-7	13.9	3.353			3.313	0.983	3.370	1.937
	-8	14.9	3.423			3.382	0.980	3.451	1.983
	-9	15.9	3.361	82.3		3.321	0.978	3.396	1.952

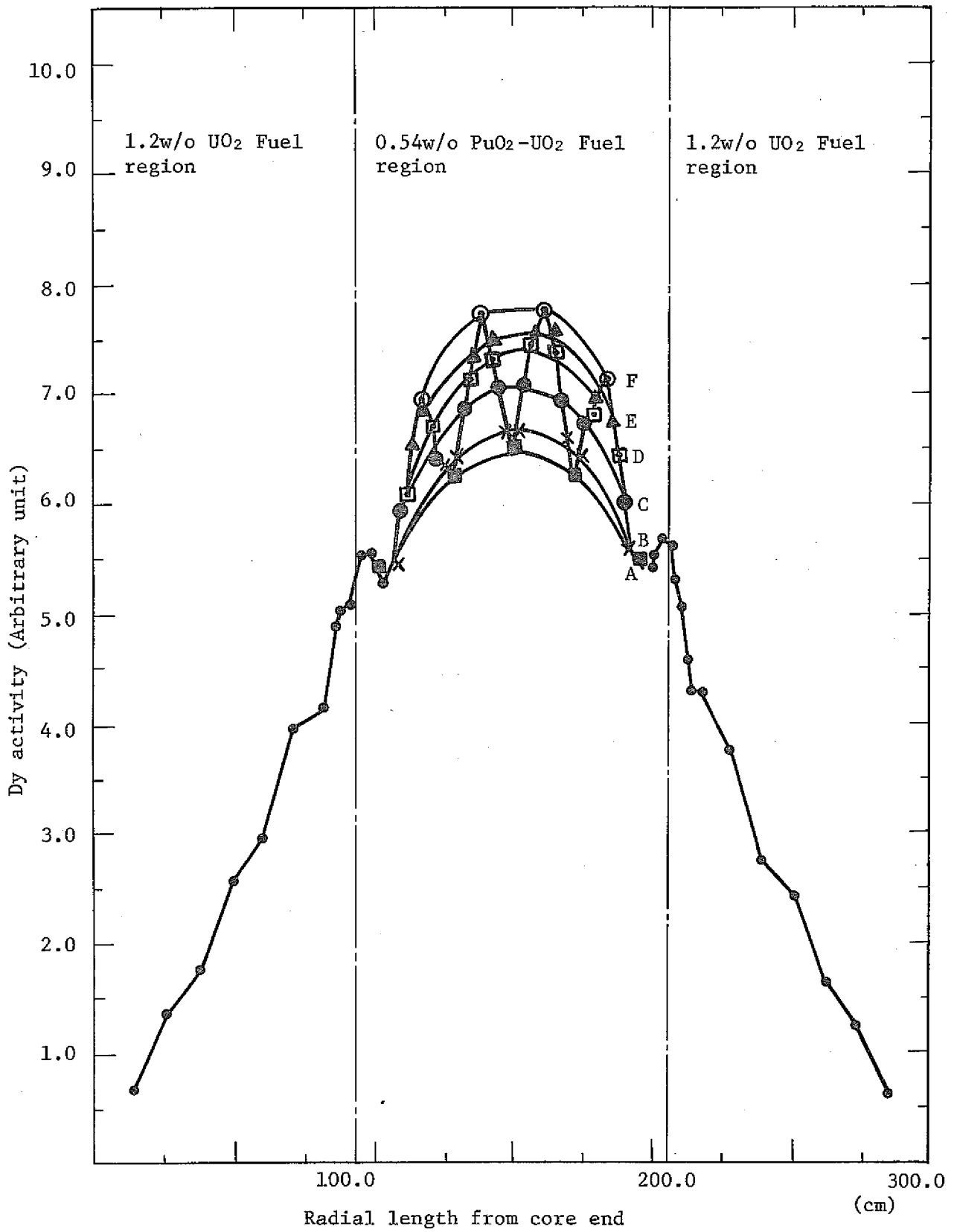


Fig. 10 Radial flux distribution (0.54w/o PuO₂-UO₂, 0% void)

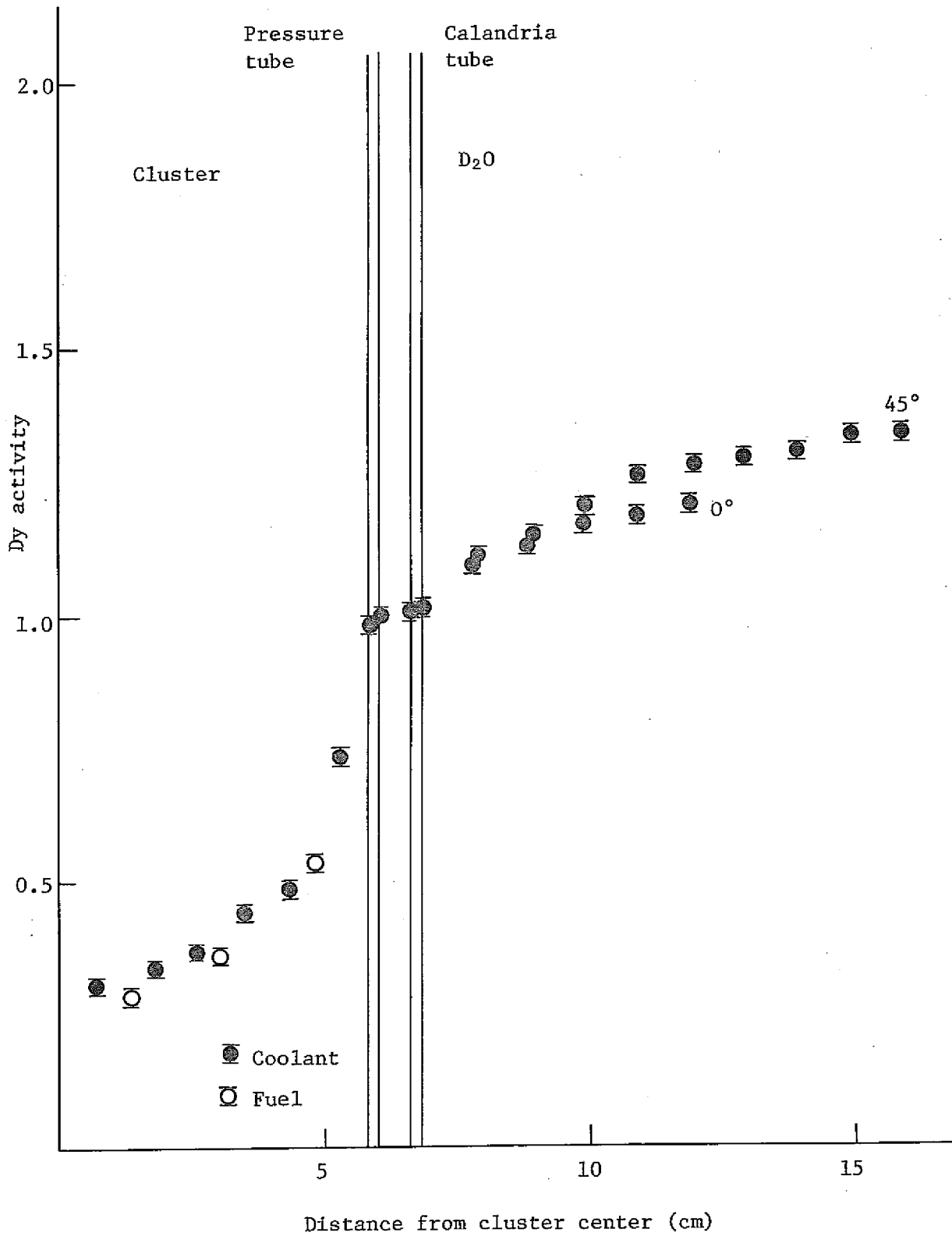


Fig. 11 Intra-cell thermal neutron flux distribution (0.54w/o PuO₂-UO₂, 0% void)

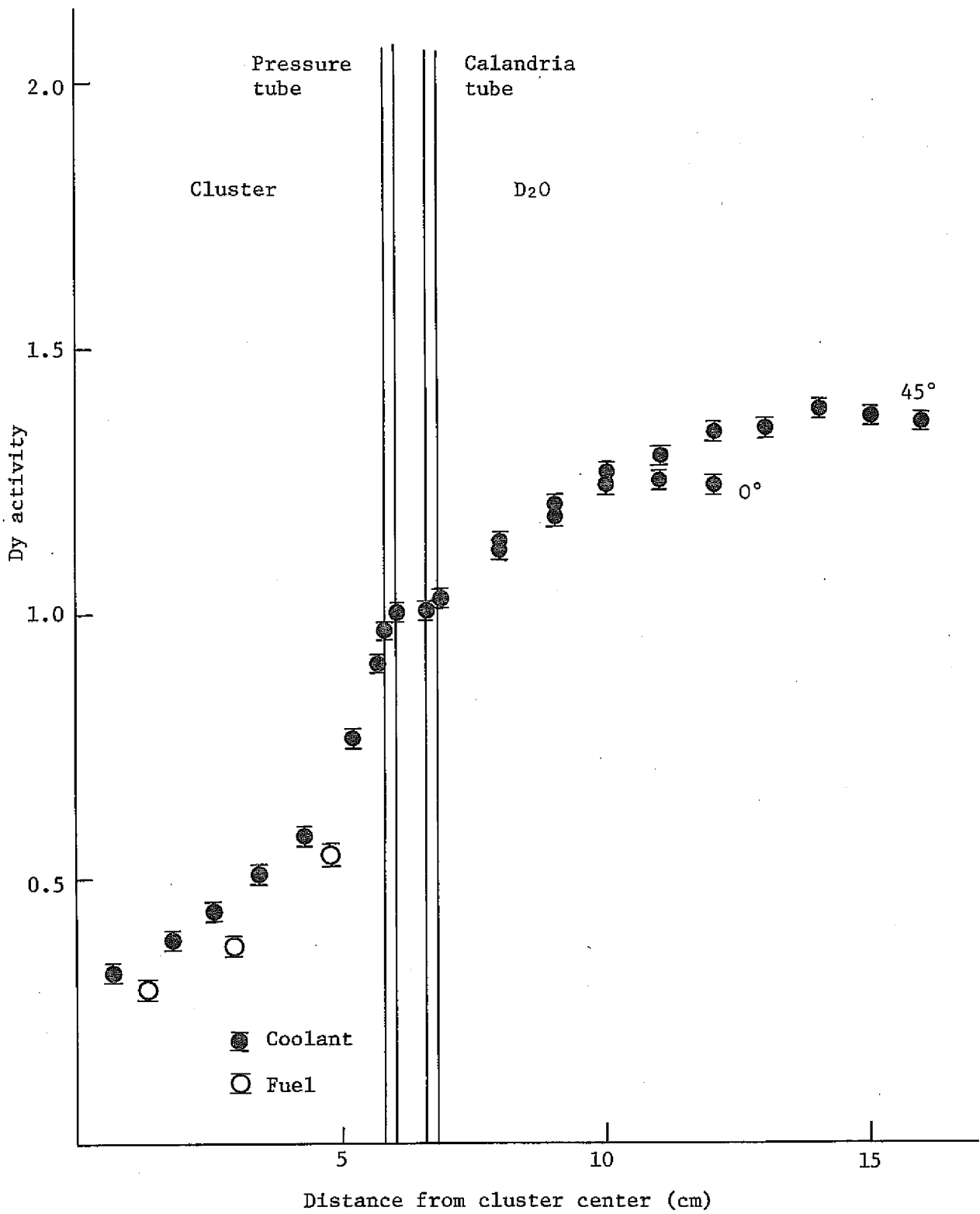


Fig. 12 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.54w/o PuO₂-UO₂, 30% void)

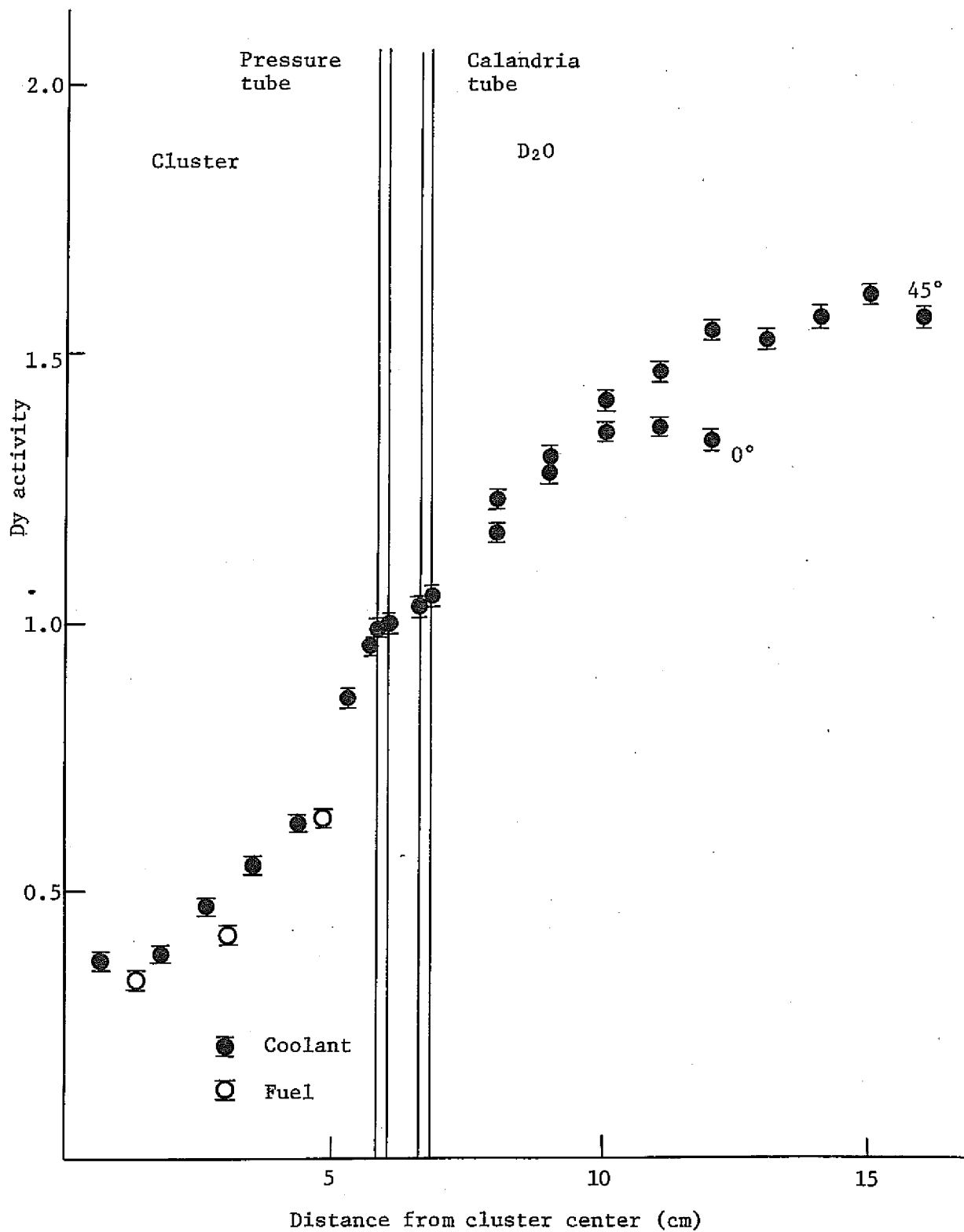


Fig. 13 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.54w/o PuO₂-UO₂, 70% void)

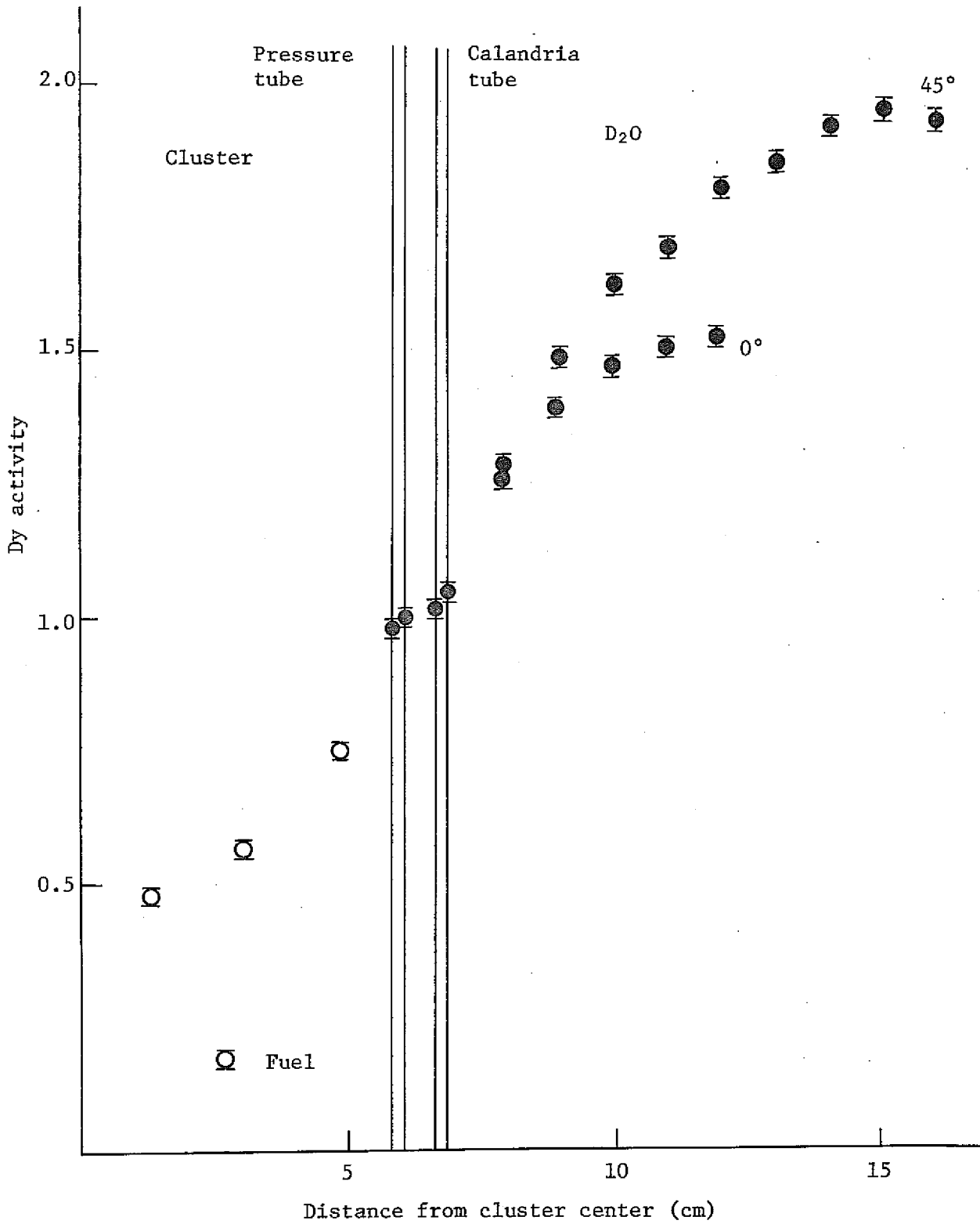


Fig. 14 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.54w/o PuO₂-UO₂, 100% void)

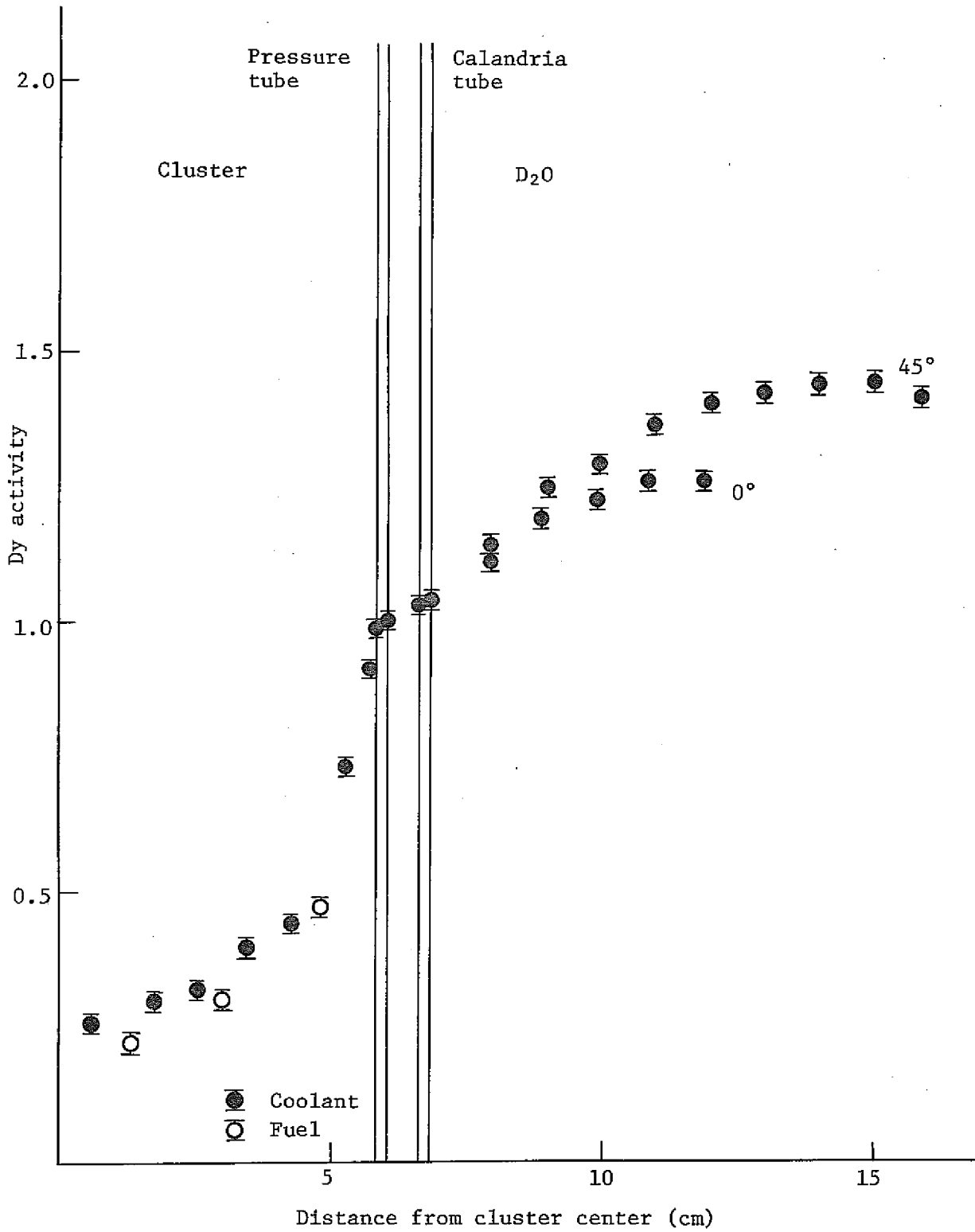


Fig. 15 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.87w/o (S) PuO₂-UO₂, 0% void)

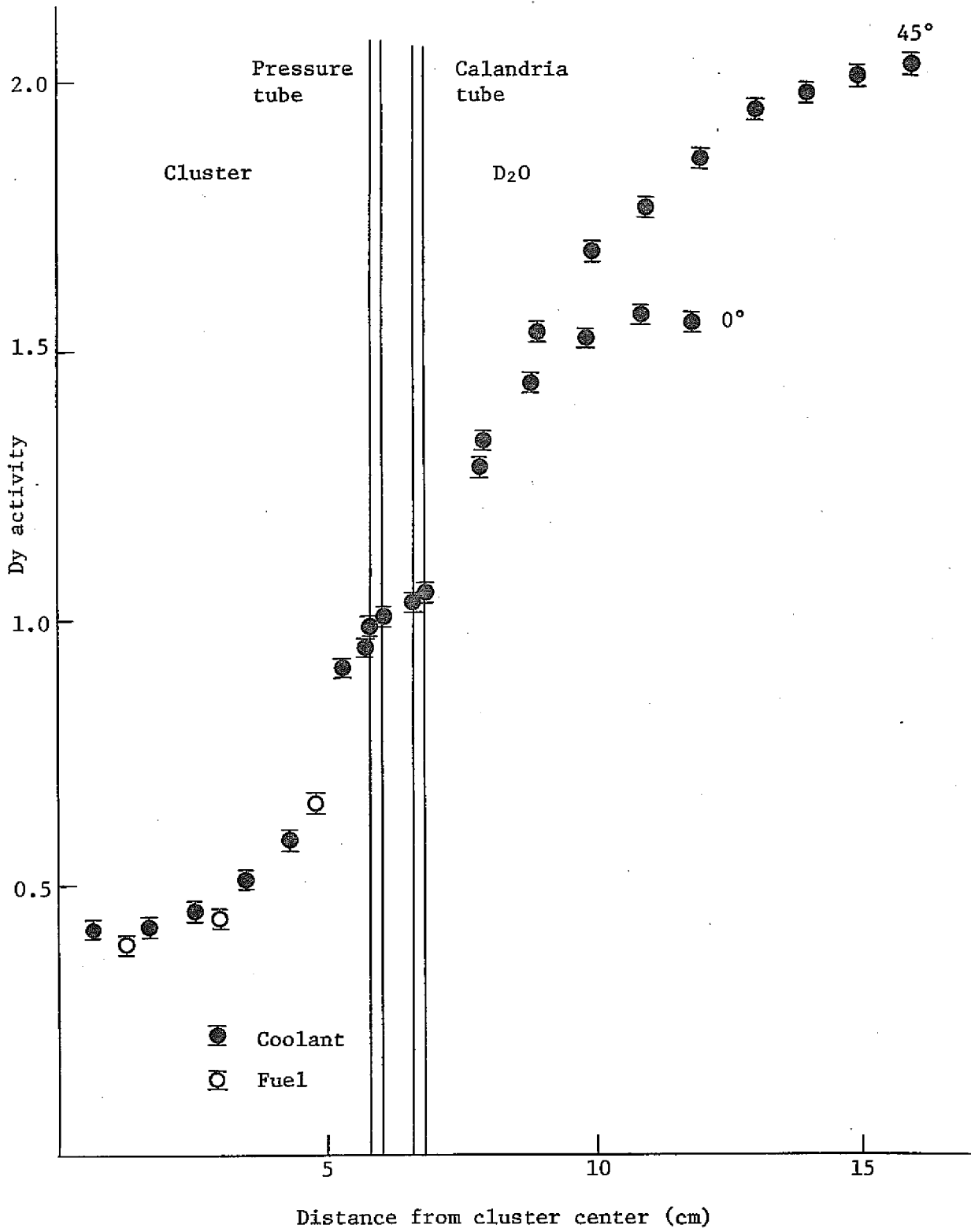


Fig. 16 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.87w/o (S) PuO₂-UO₂, 100% void)

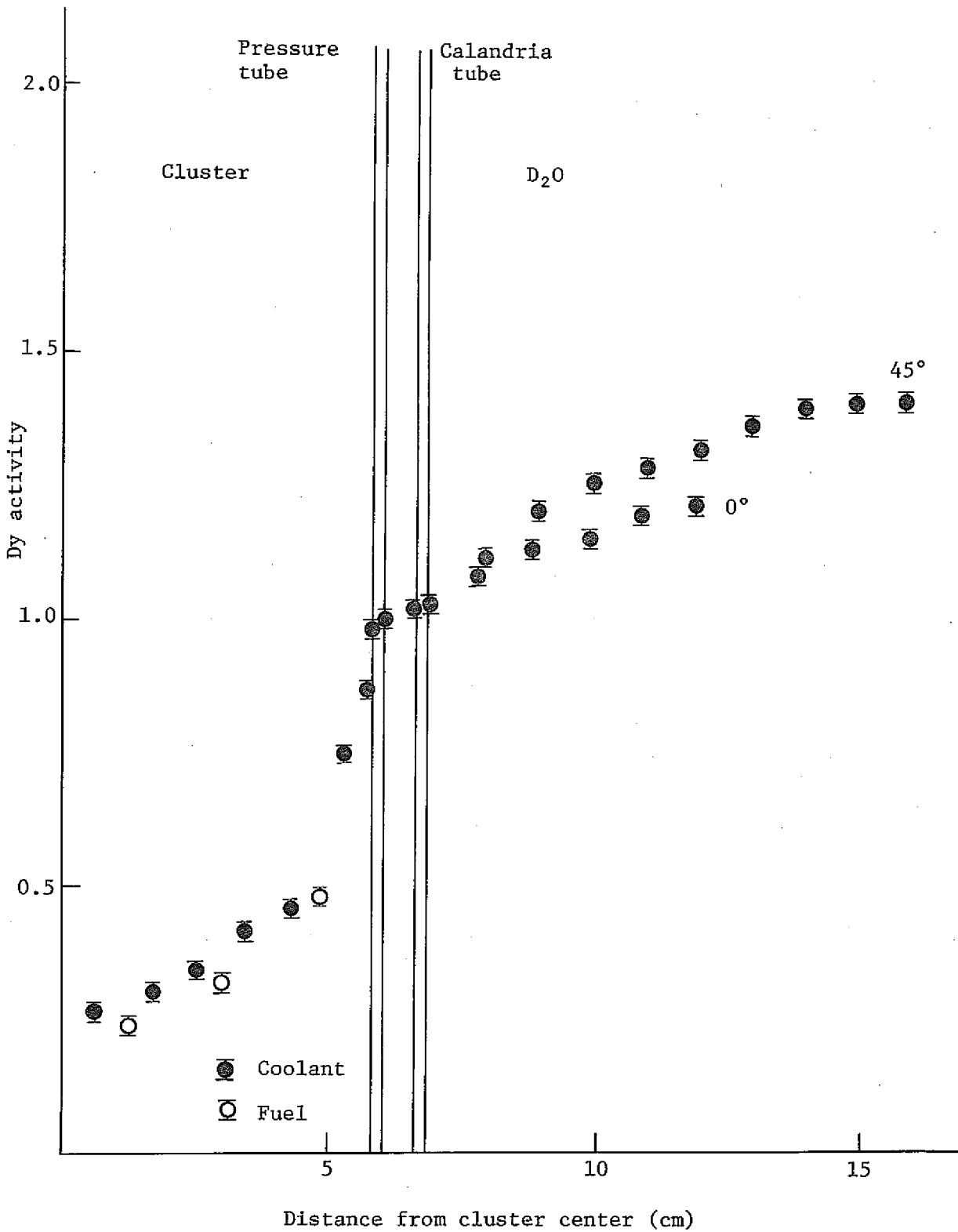


Fig. 17 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.87w/o (R) PuO₂-UO₂, 0% void)

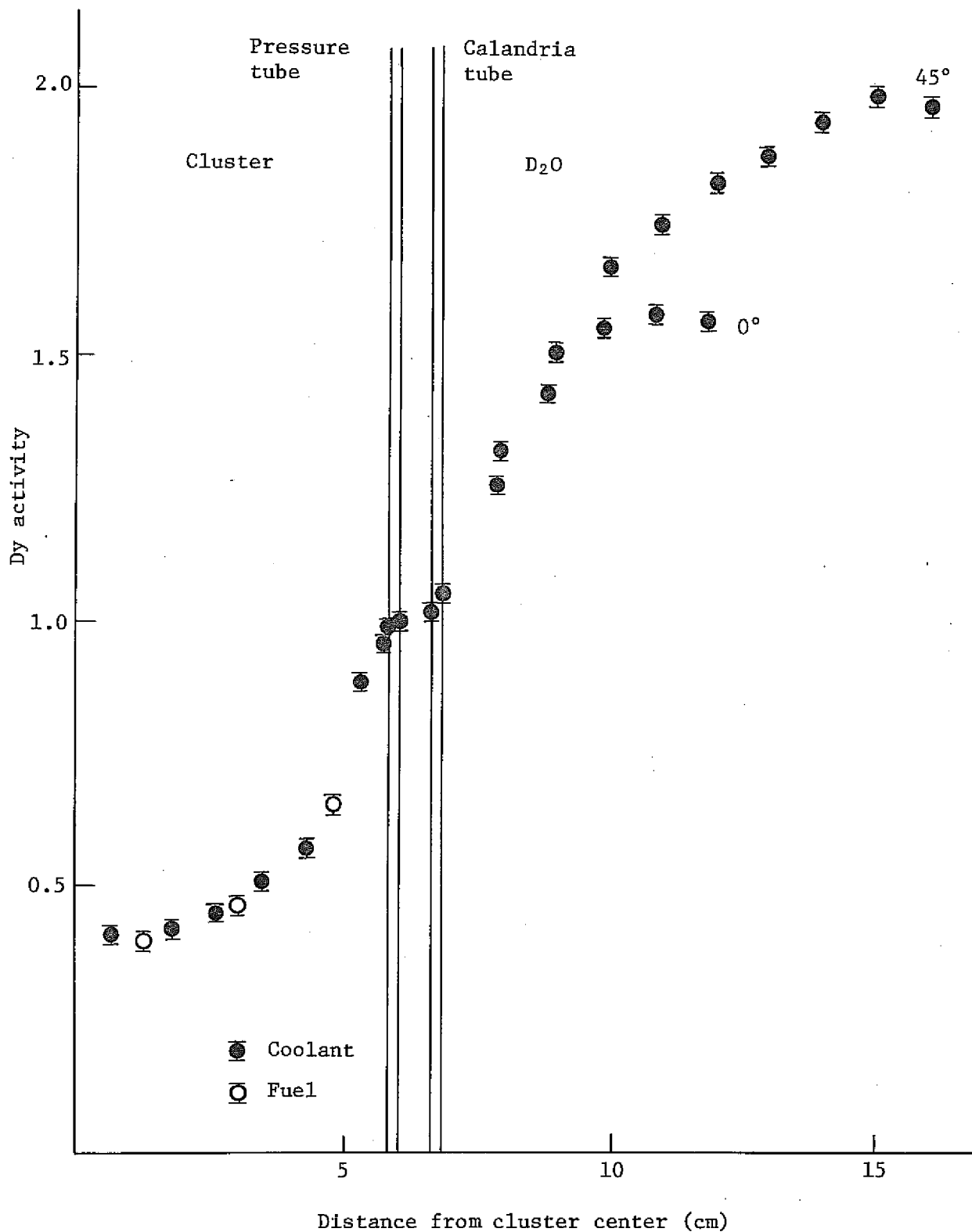


Fig. 18 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.87w/o (R) PuO₂-UO₂, 100% void)

5 実験結果の考察

22.5 cm格子ピッチにおいて、0.54 w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 、0.87 w/o (S) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 、0.87 w/o (R) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ の3種類の燃料を用い、冷却材ボイド率が0%、30%、70%、100%の場合について、単位格子内熱中性子束分布の測定をおこなった。

これらの実験結果について、(1)冷却材ボイド率の変化が熱中性子束分布に与える影響、(2)プルトニウムの富化度、組成比の相違が熱中性子束分布に与える影響についてそれぞれ考察して見る。

5.1 冷却材ボイド率変化の影響

Fig.19に0.54 w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料の0%、30%、70%、100%における熱中性子束分布を示した。ここで、○は0%ボイド、▲は30%ボイド、□は70%ボイド、●は100%ボイドのそれぞれの測定点を表わす。又、45°方向で測定された重水中の分布については、縦軸のスケールを変えてプロットしてある。Fig.20には0.87 w/o (S) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料、Fig.21には0.87 w/o (R) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料のそれぞれ0%、100%ボイドにおける熱中性子束分布を示した。

これら冷却材ボイド率が増加した場合の熱中性子束分布の実験結果より次の事が認められた。

- (1) 0.54 w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料において、0%、30%、70%、100%とボイド率が増加するにしたがって燃料中の値は増加する。その増加の割合は、0%、30%、70%、100%とボイド率の増加にしたがって比例的に大きくなり、0%から30%の間の増加の割合が一番小さく、70%から100%の間の増加の割合が一番大きくなっている。
- (2) 重水中の分布については、ボイド率が増加するにしたがってその値は増加する。しかし、その増加の仕方は燃料中の増加の仕方と同様に比例的でなく、0%と30%の間の増加の割合が小さく、70%と100%の間の増加の割合が一番大きくなっている。この傾向は0°方向の実験値も45°方向の実験値も同様であることが示される。
- (3) 0.87 w/o (S) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料と0.87 w/o (R) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料の場合は0%ボイドと100%ボイドの実験値だけである。これら燃料の0%ボイドと100%ボイドの間の差は両燃料の場合ともほとんど同じである。これは0.54 w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料の場合の0%ボイドと100%ボイドの間の差とほとんど同じである。

これら実験で認められたことにより、冷却材ボイド率の変化にしたがって熱中性子束分布が変化する原因としては燃料中と重水中に分けて次の様に考えることができる。

燃料中の熱中性子束分布は、100%、70%、30%、0%と冷却材である水が増加する

にしたがって低下してくる。これは水によって燃料集合体内の熱中性子拡散距離が減少し、燃料集合体内の遮蔽効果を増大させていることが原因であると思われる。Table 1 4 に LAMP-D C A で計算した各燃料体系の燃料集合体内の拡散距離 (L) の変化を示した。又水が存在することは熱中性子拡散距離を減少させる効果の他に、直接、熱中性子を生産する効果も考えられる。この効果は燃料集合体内での熱中性子束分布 (特に第 1 リング付近) をもち上げる役割を示す。しかし、各燃料体系における 0 % ボイドの実験値を見てみると第 1 リング付近での分布のもち上りはあまり顕著に現われていない。これより、この効果は小さいと思われる。

重水中の熱中性子束分布は水の増加によって平坦になってくる。これは、水が入ることにより燃料集合体内の散乱物質が増え、重水中より入ってくる熱中性子を反射させ、圧力管付近で熱中性子束をもち上げているためと思われる。

5.2 プルトニウムの富化度，組成比の影響

Fig. 2 2 に 0.5 4 w/o $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$, 0.8 7 w/o (S) $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$, 0.8 7 w/o (R) $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$, 各燃料の 0 % ボイドにおける実験結果を示した。ここで、○は 0.5 4 w/o $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料、●は 0.8 7 w/o (S) $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料、□は 0.8 7 w/o (R) $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料のそれぞれの測定点を表わす。又、 45° 方向で測定された重水中の分布については縦軸のスケールを変えてプロットしてある。又 Fig. 2 3 には各燃料の 1 0 0 % ボイドにおける実験結果を示した。これらプルトニウムの富化度，組成比が変わった場合の熱中性子束分布の実験結果より次の事が認められた。

- (1) 燃料中の分布は 0.8 7 w/o (S) $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料が一番低下しており、0.8 7 w/o (R) $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料、0.5 4 w/o $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料の順に大きくなっている。この傾向は 0 % ボイドでも 1 0 0 % ボイドでも同様である。
- (2) 燃料中の分布で、0.8 7 w/o (R) $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料の値は 0.8 7 w/o (S) $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料の値に近ずいている。これは 0 % ボイドでも 1 0 0 % ボイドでも同様の傾向が見られる。
- (3) 重水中の分布は、 0° 方向の測定値も、 45° 方向の測定値も、0.5 4 w/o $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料、0.8 7 w/o (R) $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料、0.8 7 w/o (S) $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料の順に大きくなっていく。この傾向は 0 % ボイドでも 1 0 0 % ボイドでも同様である。

以上、実験で認められたことから、プルトニウムの富化度，組成比の相違が熱中性子束分布にどのように影響するかを考えてみる。

富化度の増加が燃料中の分布に与える影響は、0.5 4 w/o $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料と 0.8 7 w/o (S) $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料の比較より次の様に考えることができる。

Table 1 4 を見ると、0.5 4 w/o $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料と 0.8 7 w/o (S) $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料の Σa は 0 % ボイドでは 2 3 % ， 1 0 0 % ボイドでは 2 4 % ， 0.8 7 w/o (S) $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ 燃料の方が大きくなっている。又 Σ_{tr} については、0 % ボイドでは 0. 2 % ， 1 0 0 % ボイドでは 8 % ， 0.8 7

w/o (S) PuO₂-UO₂燃料の方が大きくなっている。これより、富化度の増加は Σ_{tr} より Σ_a の方をより増加させ、拡散距離を短かくしていることが認められる。すなわち、富化度の増加が燃料中における熱中性子束分布を低下させている原因としては燃料の吸収(Σ_a)の増加にともなう熱中性子遮蔽効果の増加と考えることができる。

次に同一富化度における組成比の相違(0.87w/o (S) PuO₂-UO₂燃料と0.87w/o (R) PuO₂-UO₂燃料の相違)が熱中性子束分布にどのように影響するか考えてみる。

Table 14に示された0.87w/o (S) PuO₂-UO₂燃料と0.87w/o (R) PuO₂-UO₂燃料の Σ_a 、 Σ_{tr} を比較してみると、 Σ_a については0%ボイドでは5%、100%ボイドでは4%、0.87w/o (S) PuO₂-UO₂燃料の方が0.87w/o (R) PuO₂-UO₂燃料より大きくなっている。又 Σ_{tr} は0%ボイドでは0.87w/o (R) PuO₂-UO₂燃料の方が0.87w/o (S) PuO₂-UO₂燃料のより0.2%大きく、100%ボイドでは、0.87w/o (S) PuO₂-UO₂燃料より1.2%大きくなっている。拡散距離については0%ボイドも100%ボイドも0.87w/o (S) PuO₂-UO₂燃料の方が0.87w/o (R) PuO₂-UO₂燃料より短かくなっている。

これらのことより組成比の相違は、富化度の相違の場合と同様に Σ_{tr} より Σ_a の方を主に変えていることが認められる。すなわち同一富化度におけるプルトニウムの各同位体の影響は Σ_a に主に現われていると考えられる。0.87w/o (S) PuO₂-UO₂燃料と0.87w/o (R) PuO₂-UO₂燃料の中で吸収断面積の大きい核種はPu²³⁹とPu²⁴⁰である。これら2つの同位体の含有重量の和は0.87w/o (S) PuO₂-UO₂燃料の方が0.87w/o (R) PuO₂-UO₂燃料より多いことが付録1より認められる。このことより、0.87w/o (S) PuO₂-UO₂燃料の燃料中分布が0.87w/o (R) PuO₂-UO₂燃料の燃料中分布より低下している原因としては、0.87w/o (S) PuO₂-UO₂燃料中のPu²³⁹とPu²⁴⁰の含有重量が0.87w/o (R) PuO₂-UO₂燃料より多く、燃料中の吸収を大きくしているためと考えることができる。

重水中の分布については次の様に考えることができる。

燃料集合体中の吸収が増大すると重水中からの燃料への中性子の流れが増大することが考えられる。これは分布のカーブをより急にする。これに対して水の散乱による反射は同一ボイド率では共通である。これより、0%ボイドも100%ボイドも燃料集合体内の吸収が大きくなる順に、すなわち0.54w/o PuO₂-UO₂燃料、0.87w/o (R) PuO₂-UO₂燃料、0.87w/o (S) PuO₂-UO₂燃料の順に、分布のカーブが急になると考えられる。

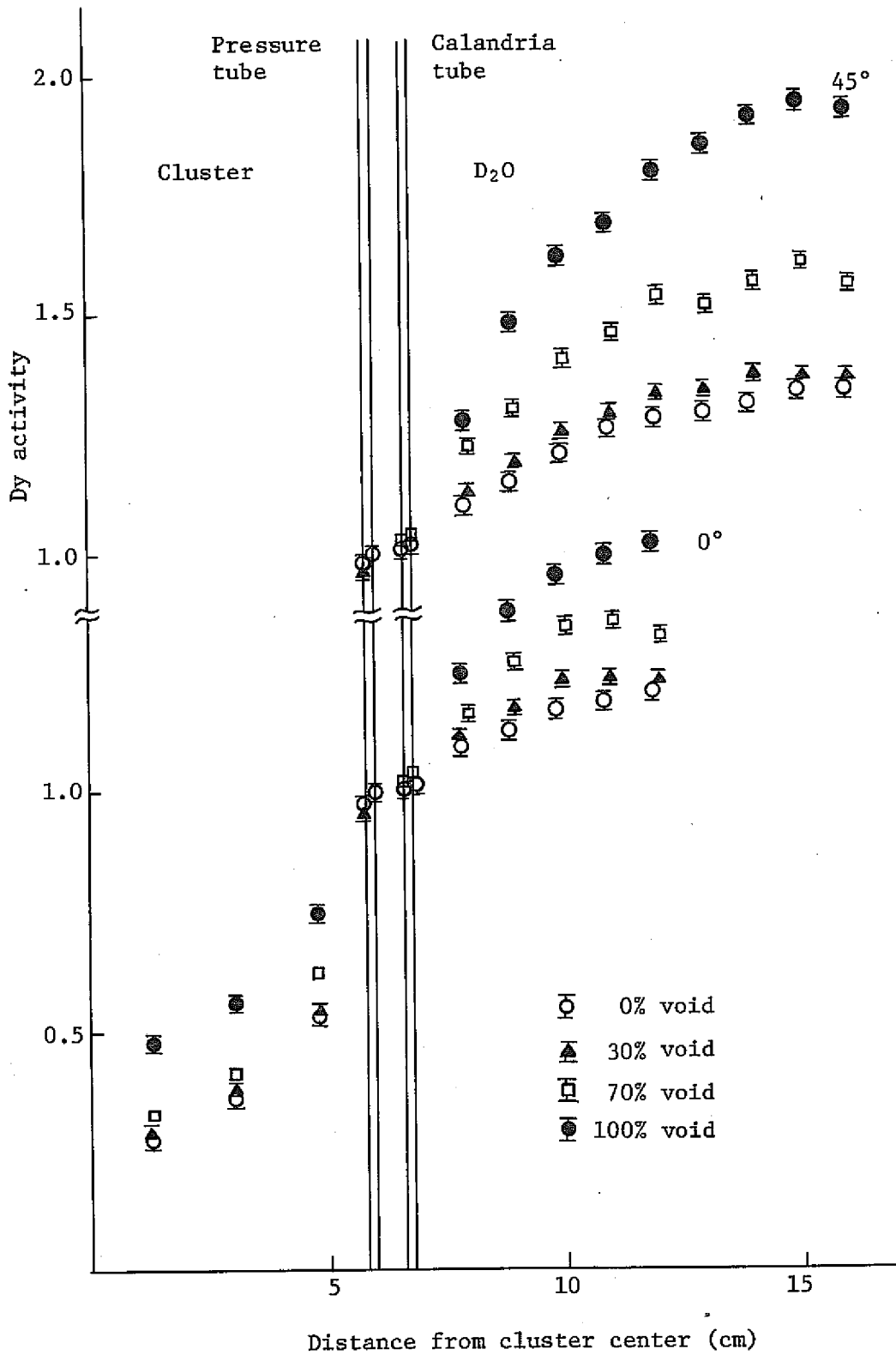


Fig. 19 Intra-cell thermal neutron flux distribution (0.54w/o PuO₂-UO₂, 0%,30%,70% and 100%)

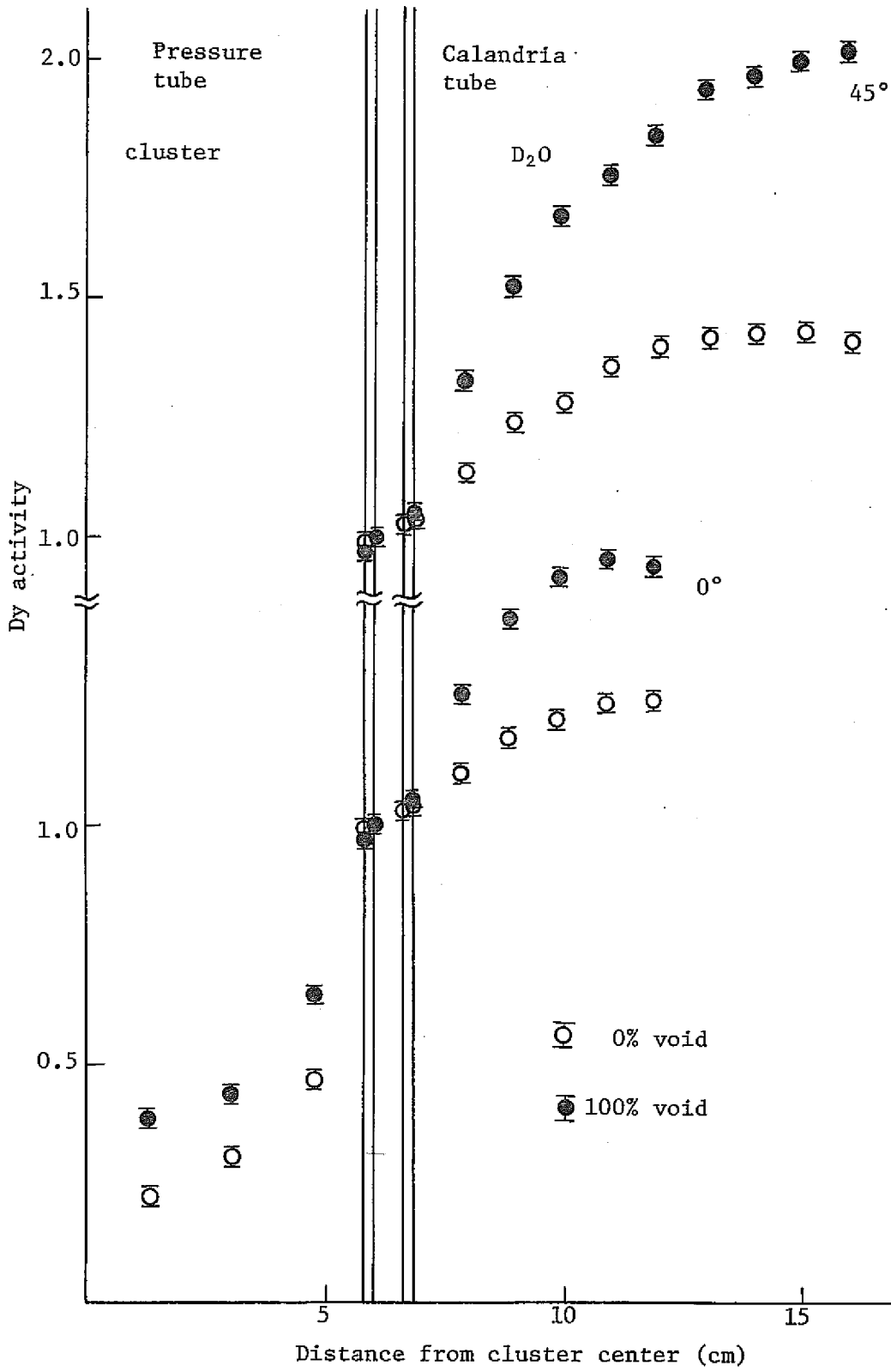


Fig. 20 Intra-cell thermal neutron flux distribution (0.87w/o (S) PuO_2-UO_2 , 0% and 100% void)

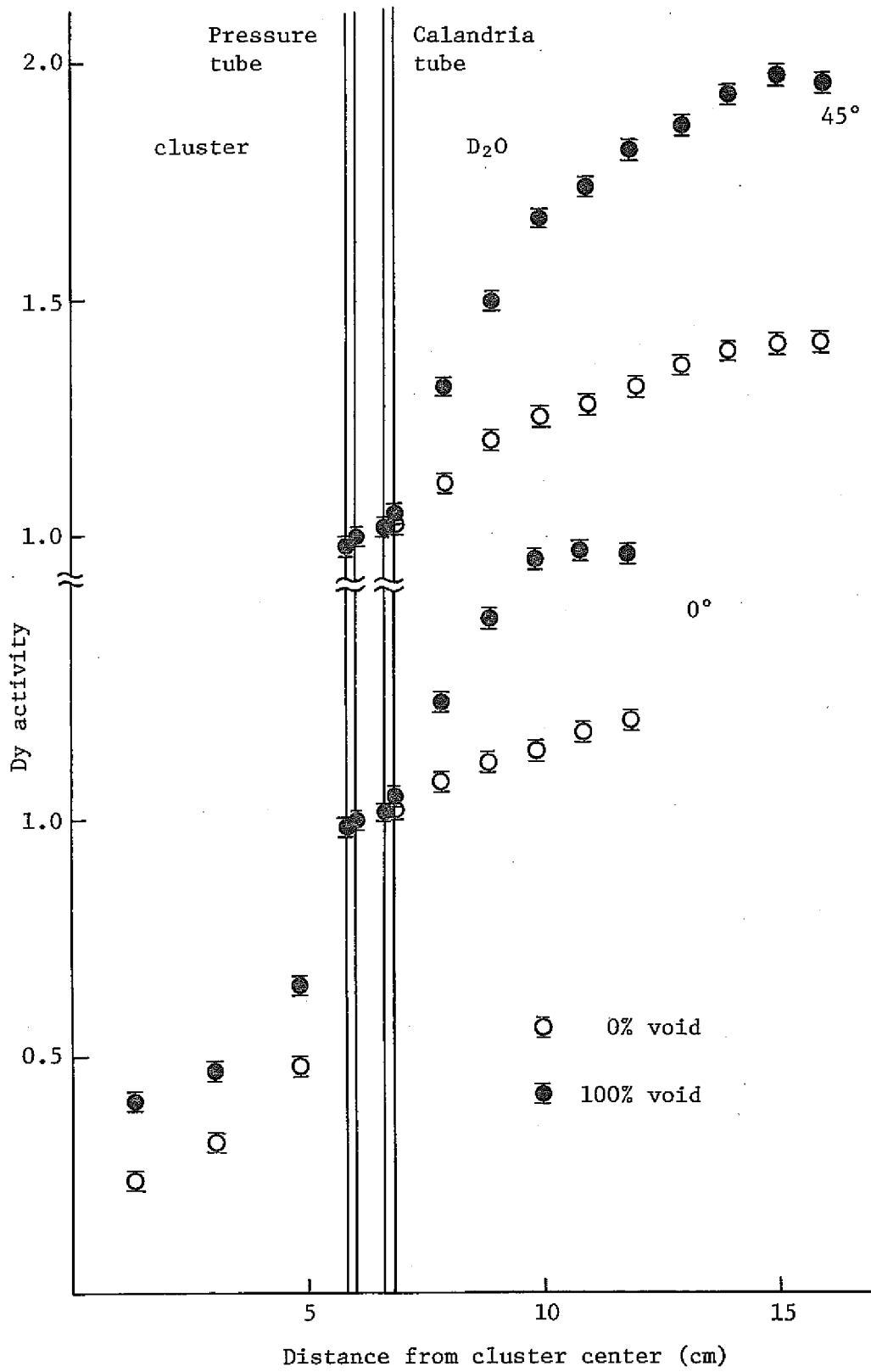


Fig. 21 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.87w/o (R) PuO₂-UO₂, 0% and 100% void)

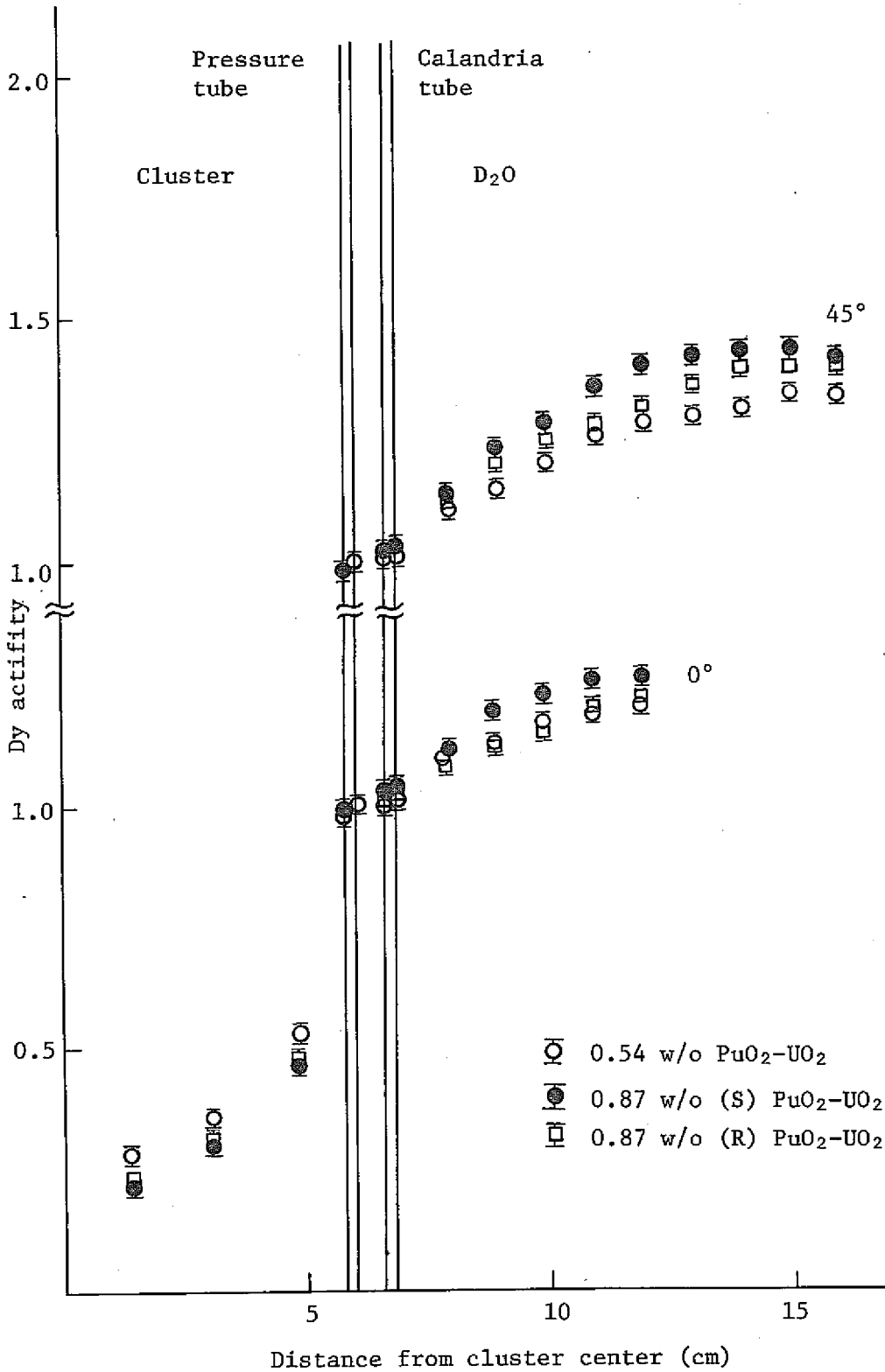


Fig. 22 Intra-cell thermal neutron flux distribution
 (0.54w/o, 0.87w/o(S) and 0.87w/o(R) PuO₂-UO₂, 0% void)

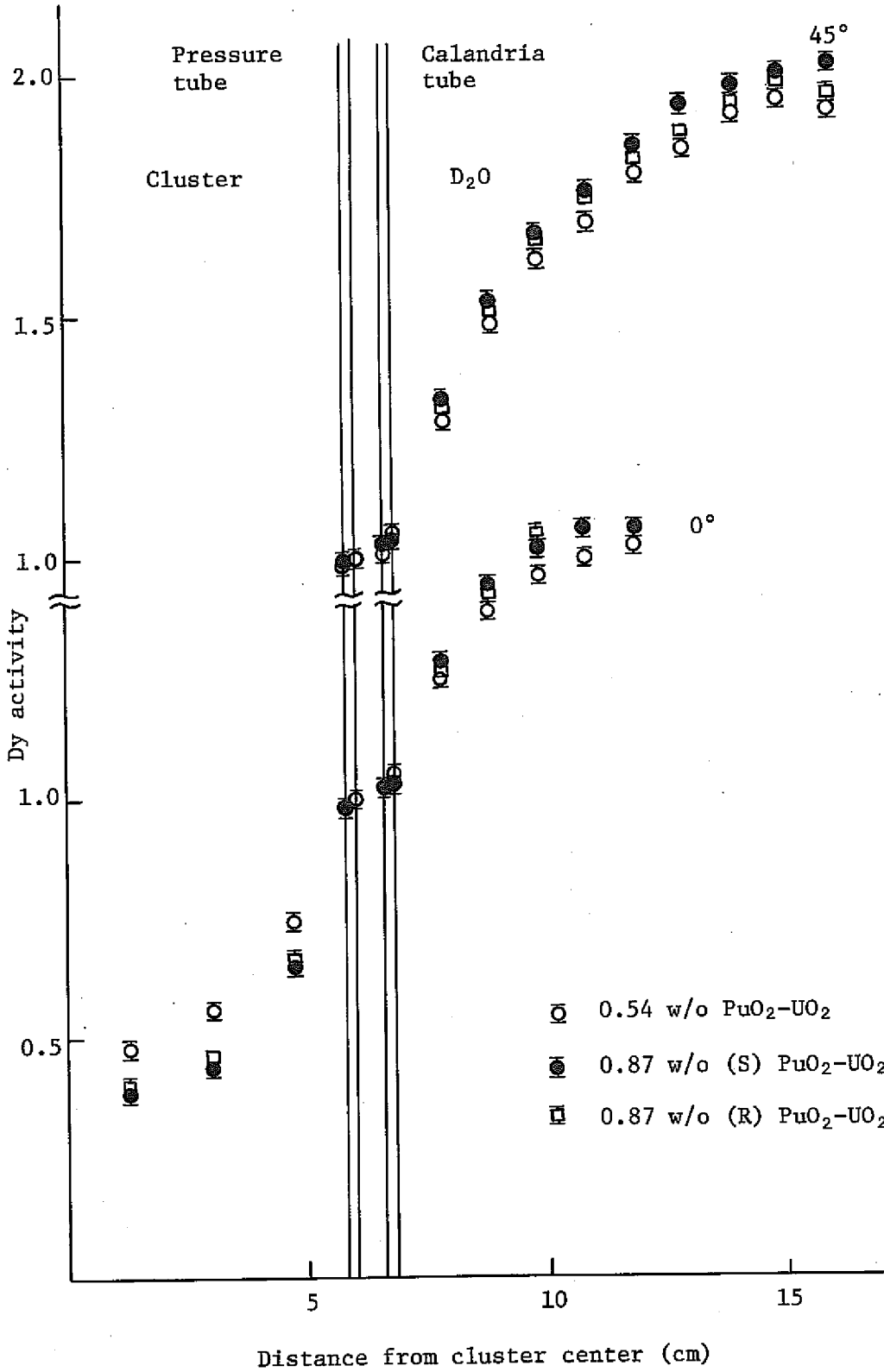


Fig. 23 Intra-cell thermal neutron flux distribution (0.54w/o, 0.87w/o(S) and 0.87w/o(R) PuO₂-UO₂, 100% void)

Table 14 Diffusion length for various fuel lattices calculated by LAMP-DCA

	Void fraction(%)	Σa	Σtr	$L^2 = \frac{1}{3\Sigma a \Sigma tr}$	L
0.54w/o PuO ₂ -UO ₂	0	0.103	1.255	2.579	1.606
	30	0.101	0.976	3.381	1.839
	70	0.096	0.608	5.711	2.390
	100	0.088	0.303	12.419	3.524
0.87w/o(R) PuO ₂ -UO ₂	0	0.121	1.260	2.186	1.479
	100	0.105	0.322	9.859	3.140
0.87w/o(S) PuO ₂ -UO ₂	0	0.127	1.257	2.088	1.445
	100	0.109	0.326	9.381	3.063

6 NOAH-IIによる計算値との比較

NOAH-IIコードを用いて今までおこなったすべての燃料体系の実験について計算し、実験値と比較した。付録1にDCAにおける燃料、構造材、冷却材等の物理定数を示し、又付録2にはNOAH-II計算のための入力フォーマットを示した。

NOAH-IIコードではDyの反応率の計算はおこなえないため、計算値としてはDyの反応率のかわりにNOAH-IIで計算ができ、 $1/\sqrt{V}$ 吸収物質であるMnの反応率を用いた。ここでDyの反応率のかわりにMnの反応率を用いたことによる問題点としては次のことがあげられる。

- (1) Mnの断面積は $1/\sqrt{V}$ 法則にしたがうが、Dyはエネルギーの高い所で $1/\sqrt{V}$ 法則よりずれている。
- (2) このため、クラスター中、重水中とスペクトルの異なる場所での断面積は、DyとMnとではまた変わってくる。これについては7章で述べるLAMP-DCAコードでDyの反応率とMnの反応率を求めることができ、これを利用してDyの反応率とMnの反応率の各領域でのずれを調べてみると、最大で0.2%の差が認められた。

また計算におけるMnのカットオフエネルギーは0.625 eVであり、実験でのカドミカットオフエネルギー0.46 eVと若干異なる。これについては「DCA実験データに基づく“ふげん”炉心特性評価(1)」⁷⁾より小さいことPNC TN941 75-112

以上のようなMnの反応率とDyの反応率の差と、実験値と計算値のカットオフエネルギーの相違による誤差は1%以内であると思われる。

NOAH-IIによる各燃料体系における計算値と実験値の比較はFig.24からFig.31に示した。これらの図で実線で示している曲線が計算値である。Fig.24からFig.27は0.54 w/o PuO₂-UO₂燃料の0%、30%、70%、100%ポイドについての比較であり、Fig.28, 29は0.87 w/o (S) PuO₂-UO₂燃料の0%と100%ポイド、Fig.30, 31は0.87 w/o (R) PuO₂-UO₂燃料の0%と100%ポイドについての比較である。

これら22.5 cm格子ピッチにおけるプルトニウム燃料のNOAH-IIの計算値と実験値の比較より次のことが認められた。

- (1) 燃料中の分布について見ると、0.54 w/o PuO₂-UO₂燃料100%ポイドの分布を除いて、あまり良い一致はみられない。全体的には計算値の方が実験値より大きい値を示している。又冷却材ポイド率が低い時、特に0%ポイドの場合には、中心に近いほど計算値の方が大きい値を示している。
- (2) 重水中の分布について見ると、0.54 w/o PuO₂-UO₂燃料の0%と30%、0.87 w/o (R) PuO₂-UO₂燃料の0%では計算値が少し大きめの値をしめている。しかし、その他の体系で

は、 0° 方向の実験値と 45° 方向の実験値の中間に位置し、実験値と計算値はよい一致を示している。

全体的にみると、燃料集合体内の計算より重水中の計算の方が実験値とよい一致を示している。実験値と計算値の偏差により、全体の実験値と計算値の相違を求めると15%以内であることが認められた。このように各体系の実験値と計算値は15%以内で一致しているが、その一致の度合は各体系でまちまちで、規則性は認められない。

このため、NOAH-IIコードをプルトニウム燃料体系に使用する場合、各体系で実験データによる精度のチェックが必要であると思われる。

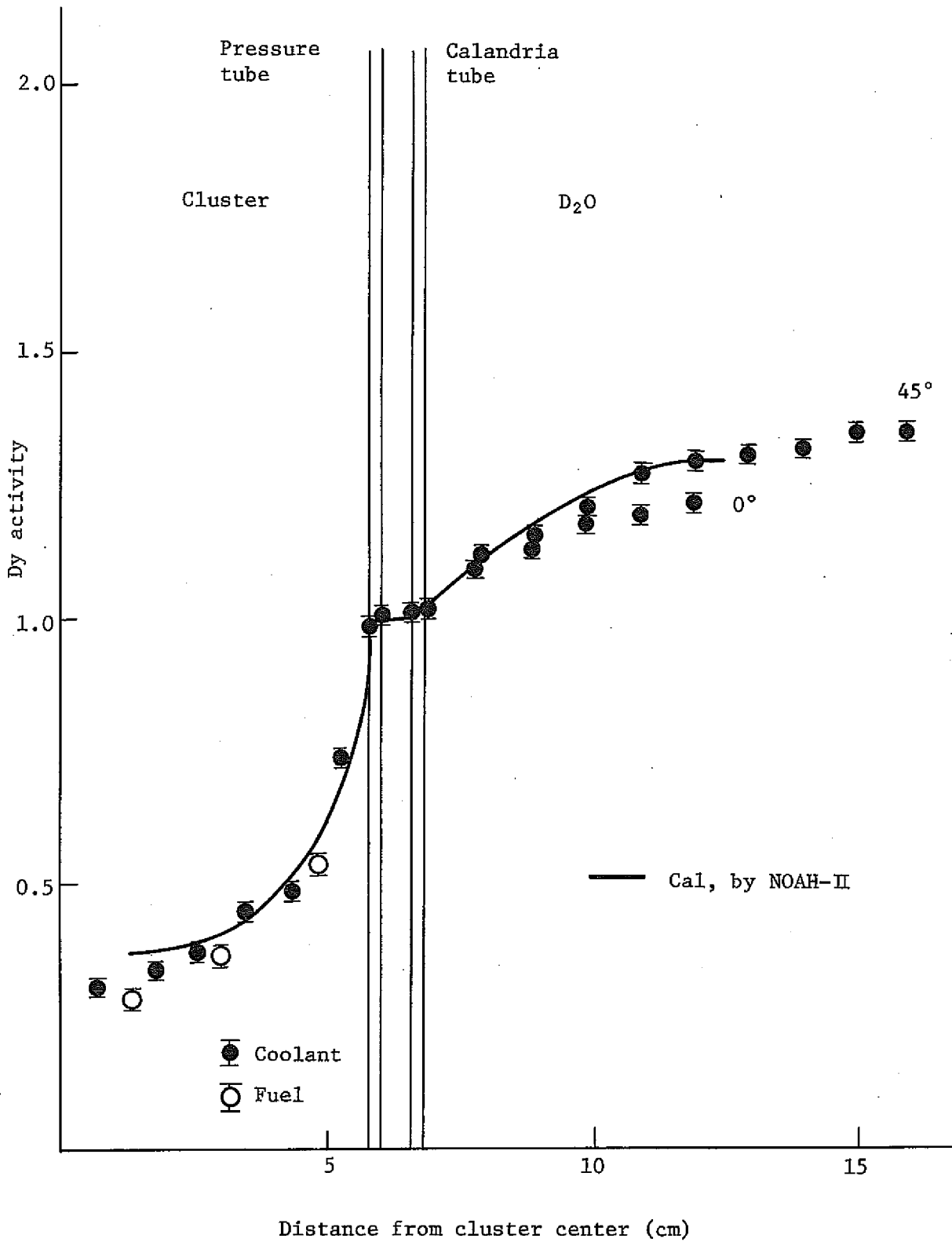


Fig. 24 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.54w/o PuO₂-UO₂, 0% void)

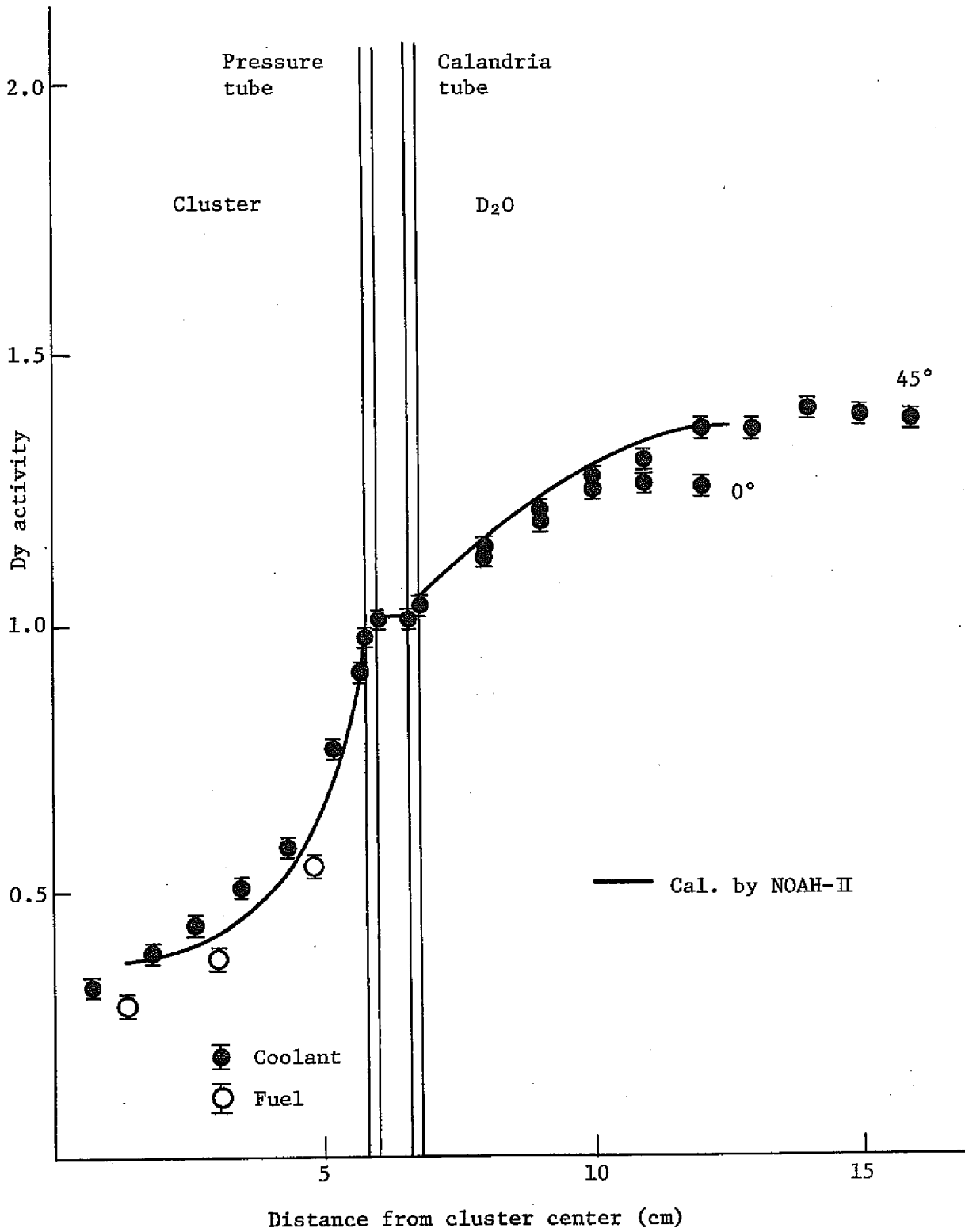


Fig. 25 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.54w/o PuO₂-UO₂, 30% void)

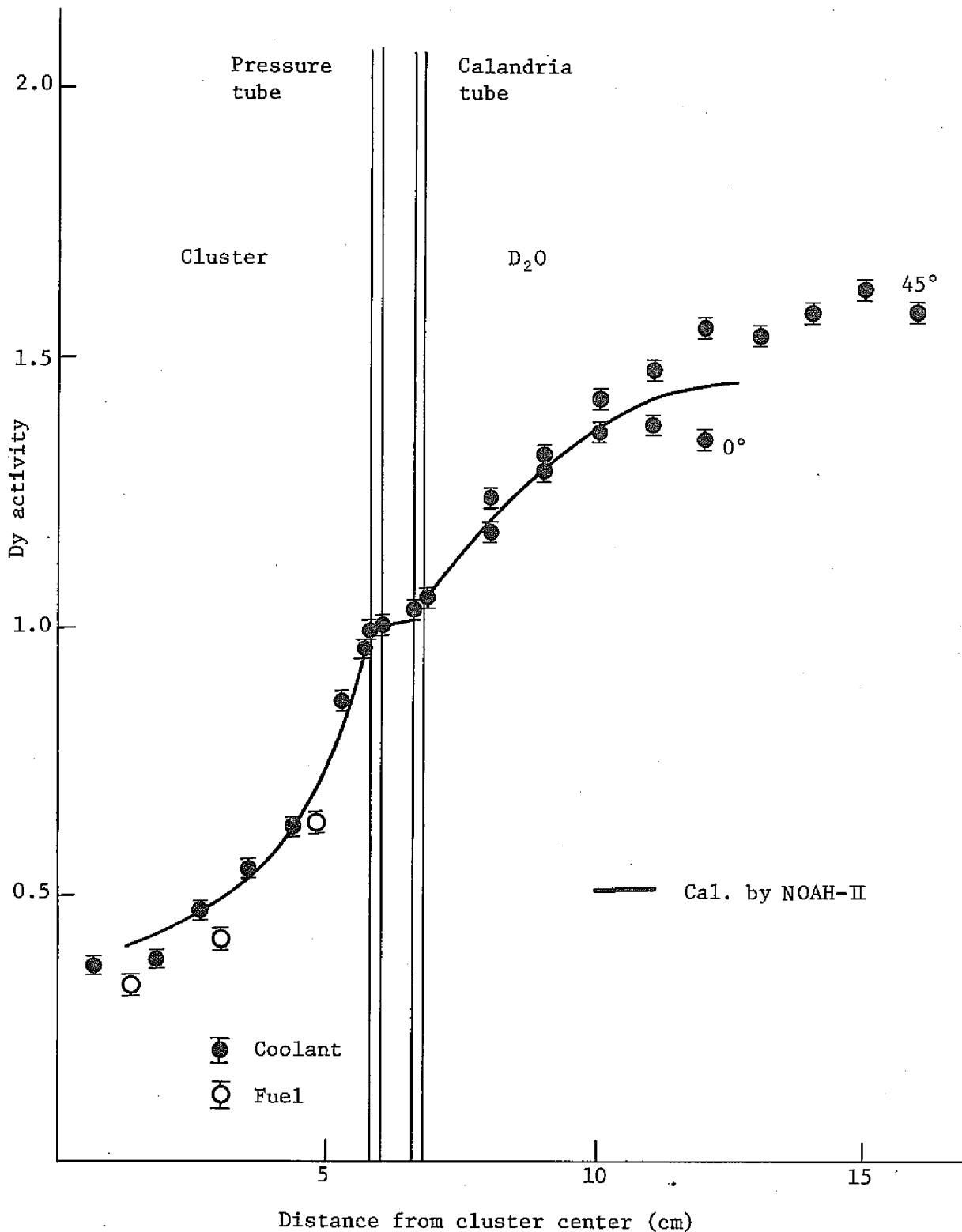


Fig. 26 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.54w/o PuO₂-UO₂, 70% cold)

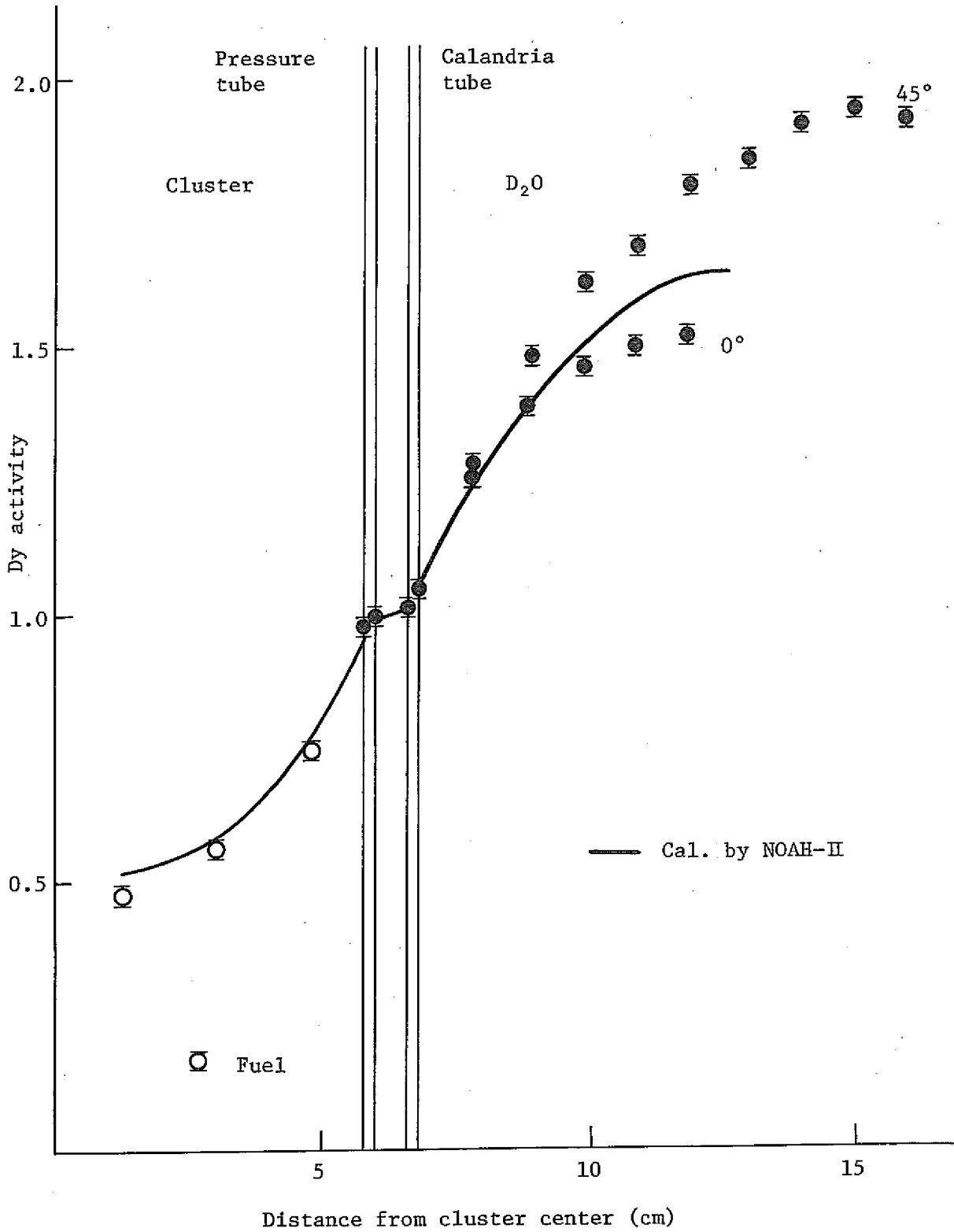


Fig. 27 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.54w/o PuO₂-UO₂, 100% void)

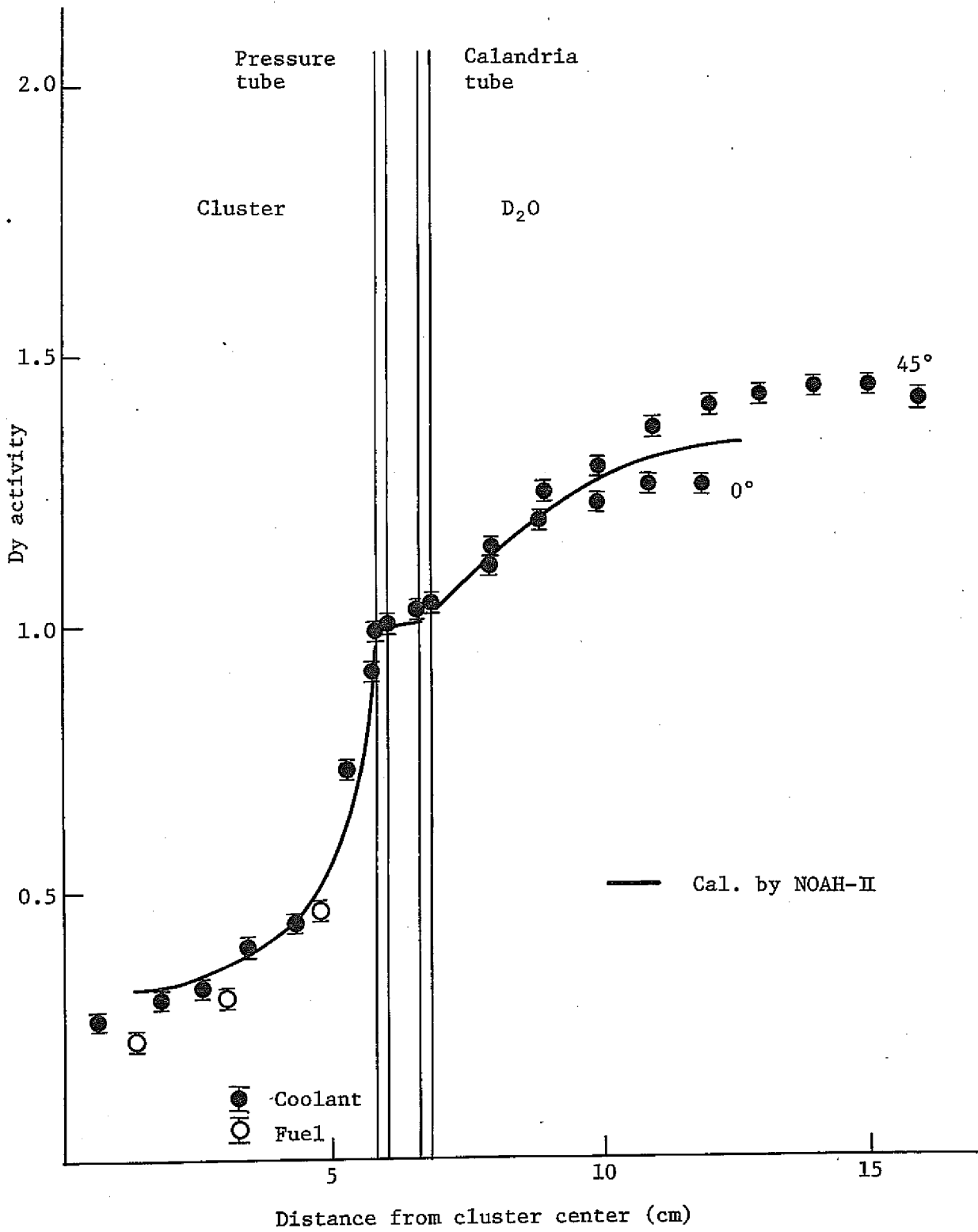


Fig. 28 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.87w/o (S) PuO₂-UO₂, 0% void)

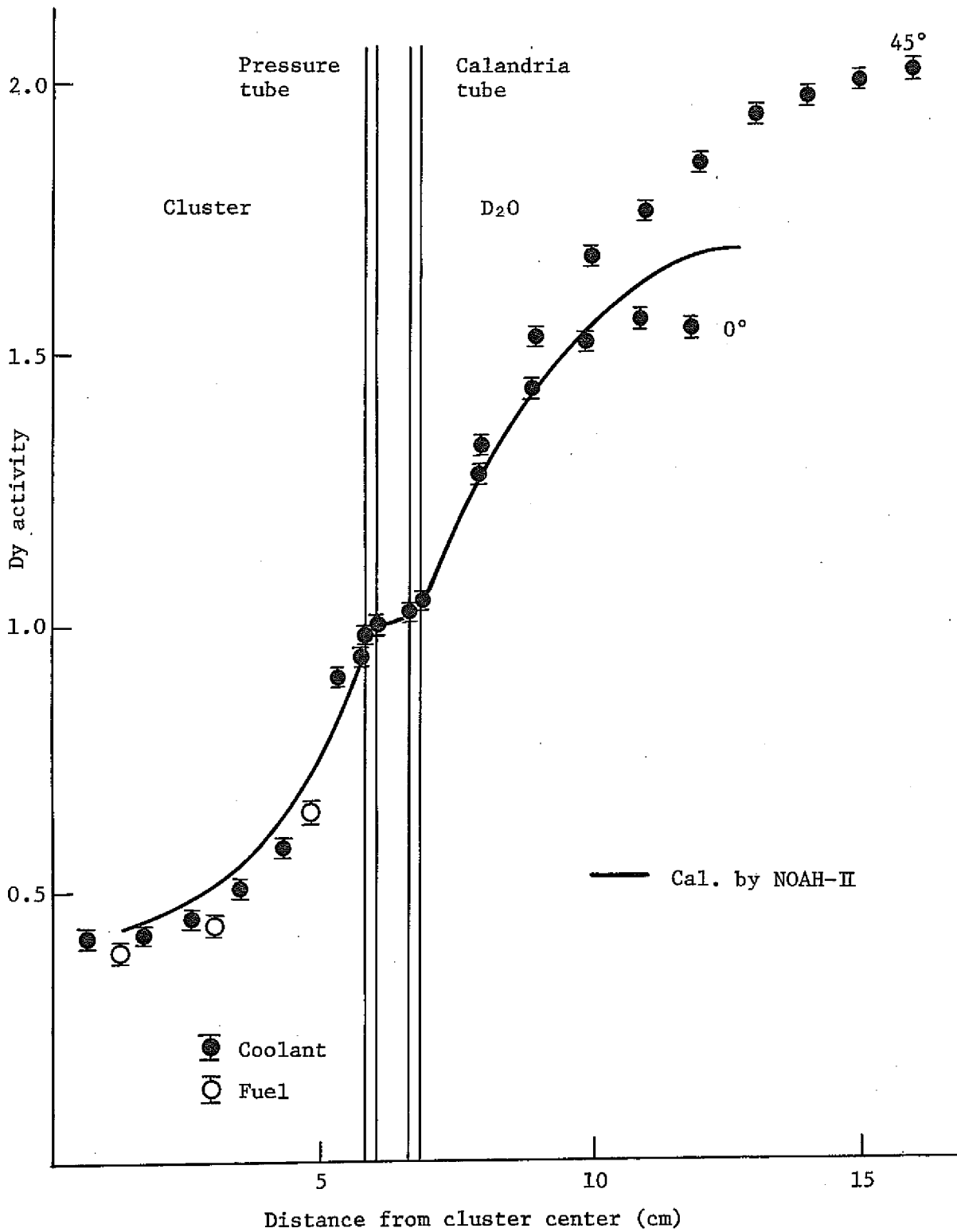


Fig. 29 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.87w/o (S) PuO₂-UO₂, 100% void)

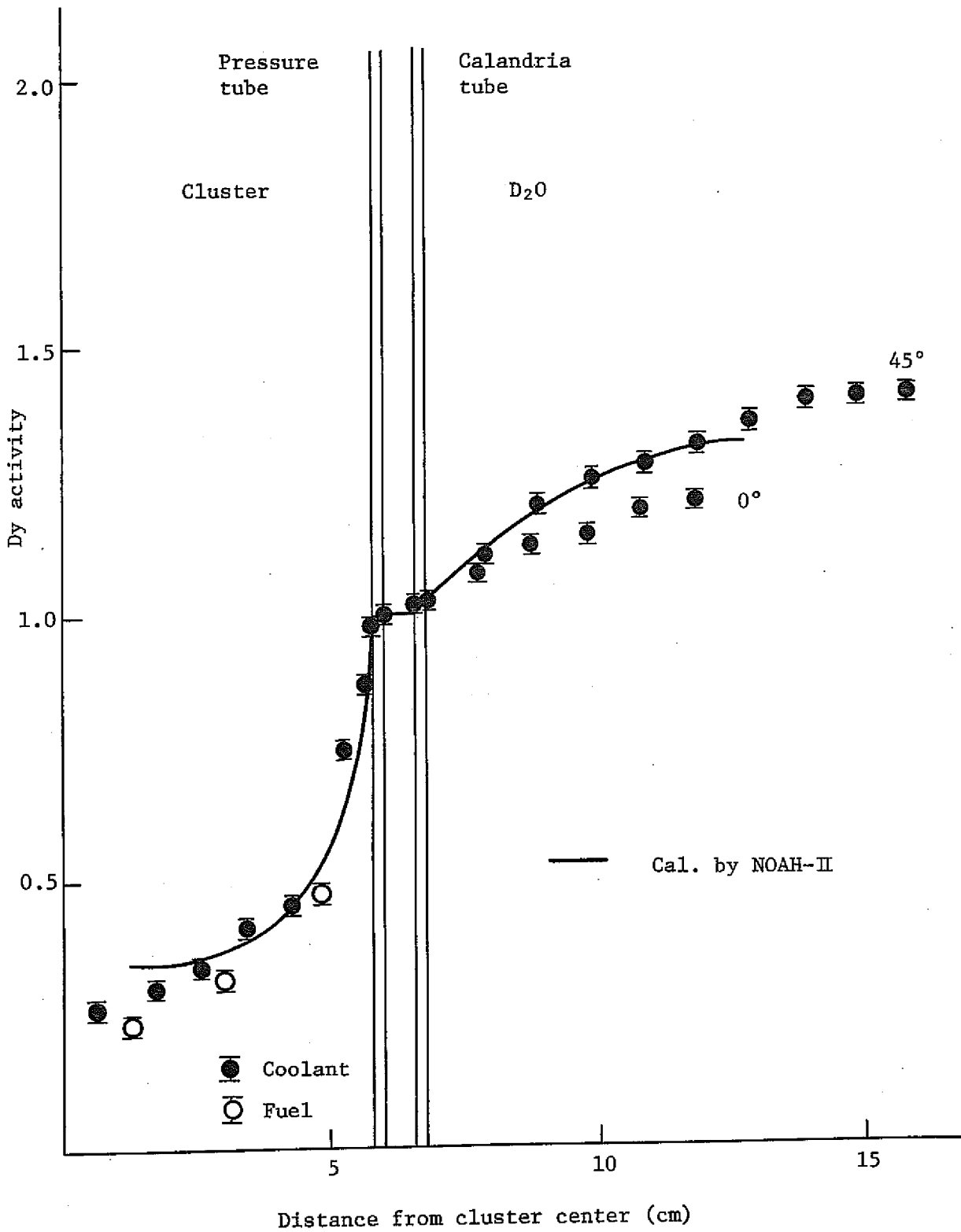


Fig. 30 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.87w/o (R) PuO₂-UO₂, 0% void)

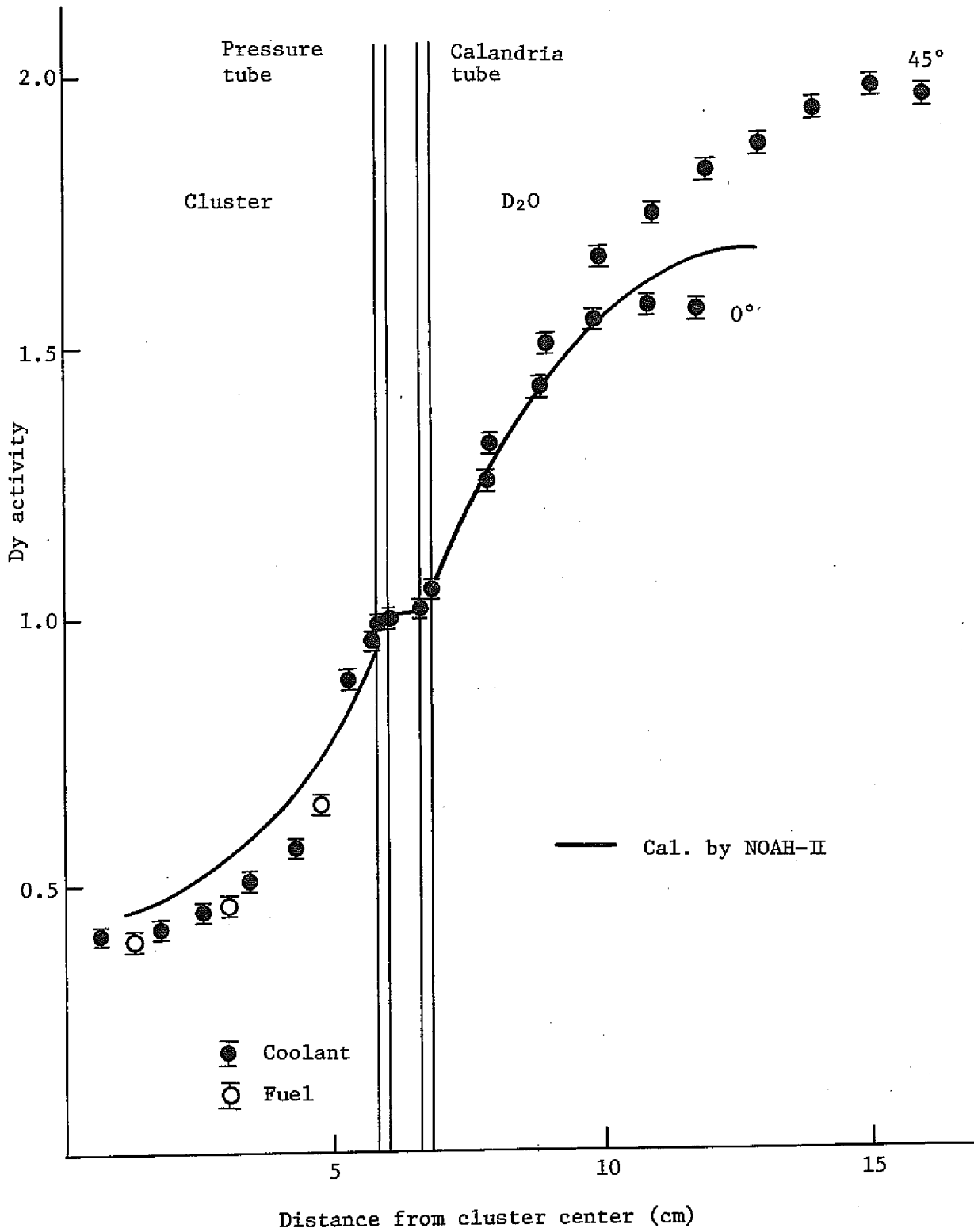


Fig. 31 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.87w/o (R) PuO₂-UO₂, 100% void)

7 LAMP-DCAコードによる計算値との比較

クラスター型格子に対する格子計算を行なうコードシステムとしてLAMP-A^{8), 9)}がある。DCAではこのコードシステムの入出力核定数ライブラリを整備し、又適用可能な幾何学的形状の拡張を行なったLAMP-DCA^{5), 10), 11)}を開発した。LAMP-DCAはいくつかのプログラムを組合わせたものである。すなわち、速中性子領域、共鳴中性子領域、熱中性子領域の夫々について、エネルギーを多群に分割して、積分型のエネルギー遷移を扱い、格子内の空間的な中性子輸送については、多領域間の衝突確率を用いて中性子束分布を求めるものである。特にクラスター型格子に対する衝突確率は、数値積分による精度の高いものを使用しているのが特長である。本実験値との比較は熱中性子領域について計算した中性子束分布よりDy箔の反応率を求めておこなった。Fig.32にLAMP-DCAを構成しているプログラムと入出力データの流れを示した。個々のプログラムについては参考文献(5)にくわしく述べられているのでここでは簡単に述べる。

- 1) 「PI2」は内蔵しているいろいろの核種の熱中性子エネルギー領域の微視的断面積(ENDF/B-III)を、入力で指定したスペクトル $\phi(E)$ を重みとして平均し、熱中性子領域多群の断面積を出力する。
- 2) 「PIXSE」は入力した散乱則 $S(\alpha, \beta)$ に基づいて、必要な核種のエネルギー遷移断面積を入力で指定したスペクトルを重みとして平均し、ライブラリーテープに貯える。次にライブラリーテープに収められた $\sigma_a^g, \nu\sigma_f^g$ を用いて巨視的断面積を合成し、衝突確率プログラム「CLUP」のための輸送断面積(Σ_{tr})や、中性子束分布を計算するプログラム「PIJF」のための $\Sigma^{g \rightarrow g'}$ 等を出力する。
- 3) 「CLUP」はクラスター格子の多群多領域の衝突確率(P_{ij}^g)を数値積分で求めるプログラムである。
- 4) 「PIJF」は入力された $\Sigma^{g \rightarrow g'}$, P_{ij}^g , 中性子源分布を用いて、多群多領域の中性子束分布を求めるプログラムである。また、これを用いて1群に縮約した平均断面積、拡散係数等を出力する。
- 5) 「FLUX」は、実験で使用した箔の放射化断面積を入力し、「PIJF」で計算した中性子束分布を用いて放射化率分布を求める。又各領域のスペクトルも計算する。

今回のLAMP-DCAの計算は、熱中性子領域のエネルギー範囲(10^{-4} eV ~ 1,97541 eV)を50群に分割し、又、物質領域を20に分割しておこなった。Fig.33は物質領域の分割の様子を示したものである。「FLUX」によるDy箔の放射化率の計算は、カドミカットオフエ

エネルギーとして 0.46 eV を用いておこなった。

Fig. 34 から Fig. 41 に実験した各体系について実験値と LAMP-DCA の計算結果をあわせて示した。比較は燃料中，圧力管，Air gap，カランドリア管，重水中でおこなった。又，LAMP-DCA はエネルギーを多群に分割しているので各領域のスペクトルも計算できる。付録 3 に各領域の熱中性子スペクトルを参考のため示した。

これら実験値と計算値の比較より次のことが認められた。

- 1) 0.54 w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料においては，0%ボイドの第1リングの値をのぞいて，0%ボイドの第2，第3リングの値，30%，70%，100%の第1，第2，第3リングの値は3%以内で実験値と一致している。0%ボイドの第1リングにおいては，計算値が6%ほど大きい値を示している。
- 2) 0.87 w/o (S) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料においても，0%ボイドの第1リングの値をのぞいて，0%ボイドの第2，第3リングの値，100%ボイドの第1，第2，第3リングの値は3%以内で一致している。0%ボイドの第1リングにおいては，計算値が7%大きい値を示している。
- 3) 0.87 w/o (R) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料においても，0.54 w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料，0.87 w/o (S) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料と同様に0%ボイドの第1リングの値をのぞいて，0%ボイドの第2，第3リングの値，100%の第1，第2，第3リングの値は2%以内一致している。0%ボイドの第1リングにおいては，計算値が8%大きい値を示している。
- 4) 0.54 w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料の重水中分布は0%，30%ボイドでは計算値の方が多少大きめになっている。又70%と100%ボイドにおける分布では計算値が 0° 方向の実験値と 45° 方向の実験値の中間にあり良く一致していると思われる。
- 5) 0.87 w/o (S) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料と0.87 w/o (R) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料の重水中の分布においては，計算値は 0° と 45° の実験値の中間に位置し良く一致していると思われる。

以上，実験値と LAMP-DCA による計算値の比較により，燃料中において LAMP-DCA は，0%ボイドの第1リングでの計算をのぞいて，2%～3%以内の精度で計算することが示された。又重水中の分布の計算値はすべての燃料体系において 0° 方向と 45° 方向の実験値のほぼ中間にあり計算はよく実験値を再現していると思われる。

各燃料で，0%ボイドの燃料中第1リングにおける計算値が実験値より6%～8%大きくなっているが，この差は実験誤差より大きいものである。これについて，0.54 w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料の0%ボイドにおいて冷却材，燃料中の領域の分割を細かくした場合について計算した。その結果，第1リングにおける計算値と実験値とを比較すると計算値が3%大きくなっていることが認められた。このことより，その他の燃料についても水が入った場合における冷却

材中，燃料中（特に第1リング）の領域の分割を細かくすれば，より精度よく求まることと思われる。全体的に見てLAMP-DCAでの計算は，領域の切り方を注意しておこなえば，特に，0%ボイドにおける燃料中，冷却材中の領域の分割を細かくすれば，プルトニウム燃料の単位格子内熱中性子空間分布の計算は非常に精度よくおこなうことが認められた。

LAMP-DCA (Thermal Flux)

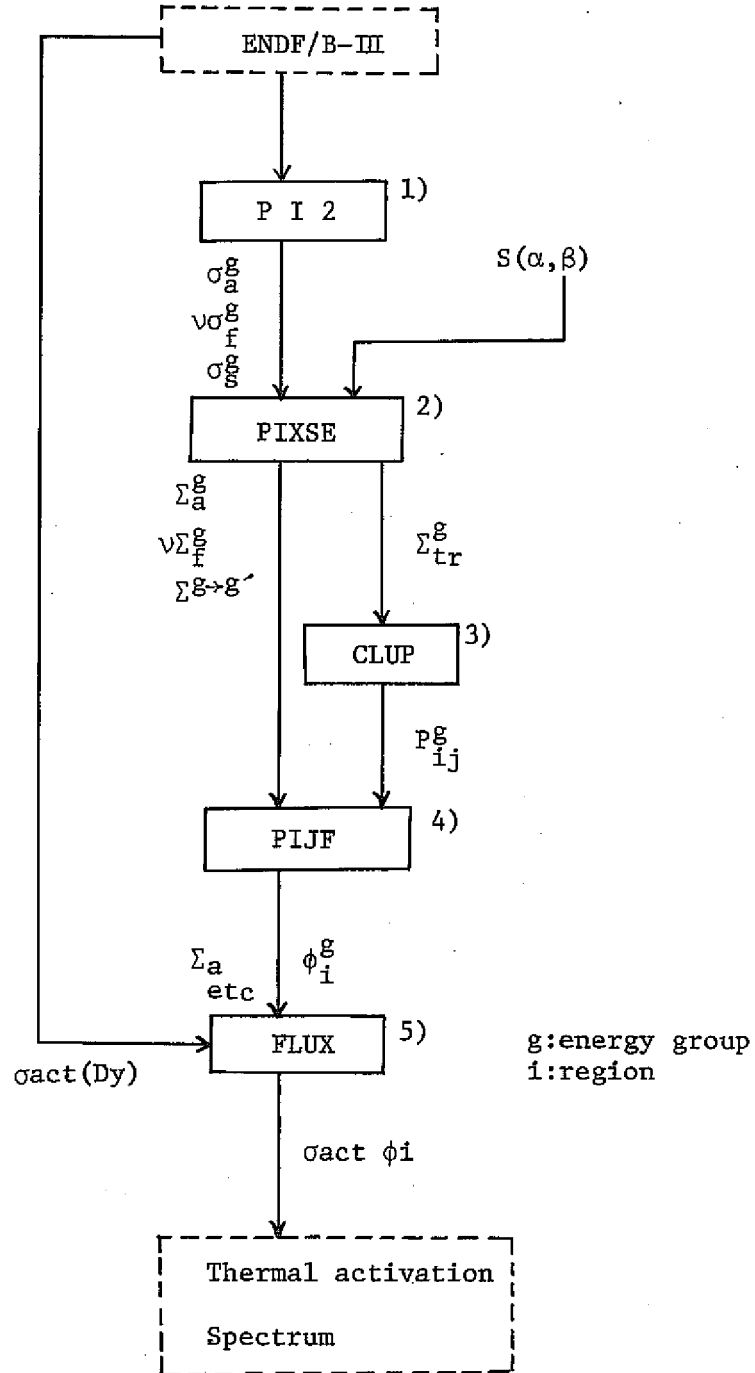


Fig. 32 Flow diagram of LAMP-DCA code

Region number	Symbol	Distance (cm)
1	F-1	1.313
2	S-1	3.000
3	F-2	
4	S-2	
5	F-3	
6	S-3	
7	C-1	
8	C-2	
9	C-3	
10	C-4	
11	C-5	
12	P.T	6.04
13	Air gap	6.625
14	C.T	6.825
15	D-1	6.984
16	D-2	7.301
17	D-3	7.935
18	D-4	8.887
19	D-5	10.793
20	D-6	12.693

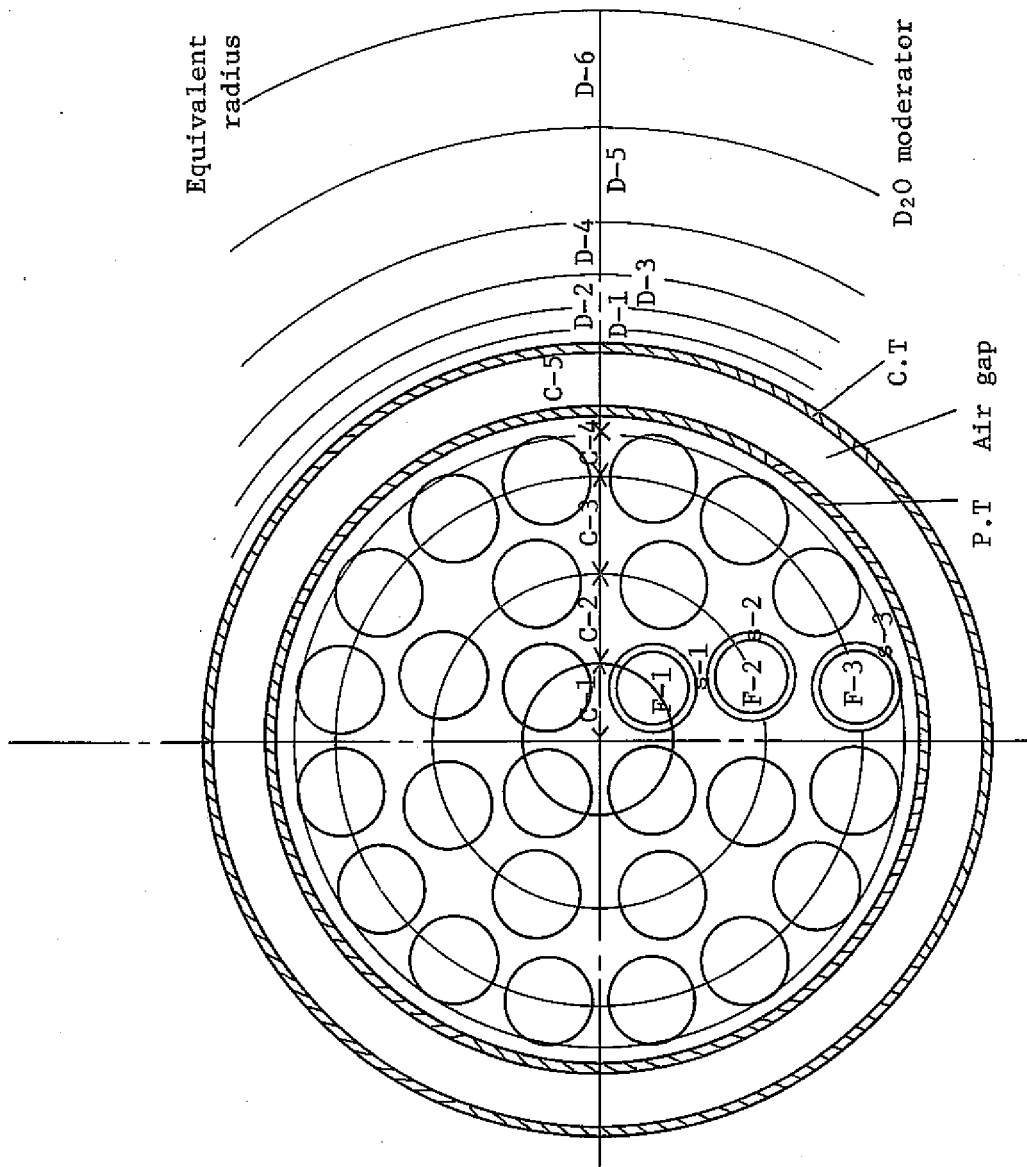


Fig. 33 Mesh arrangement on DCA lattice

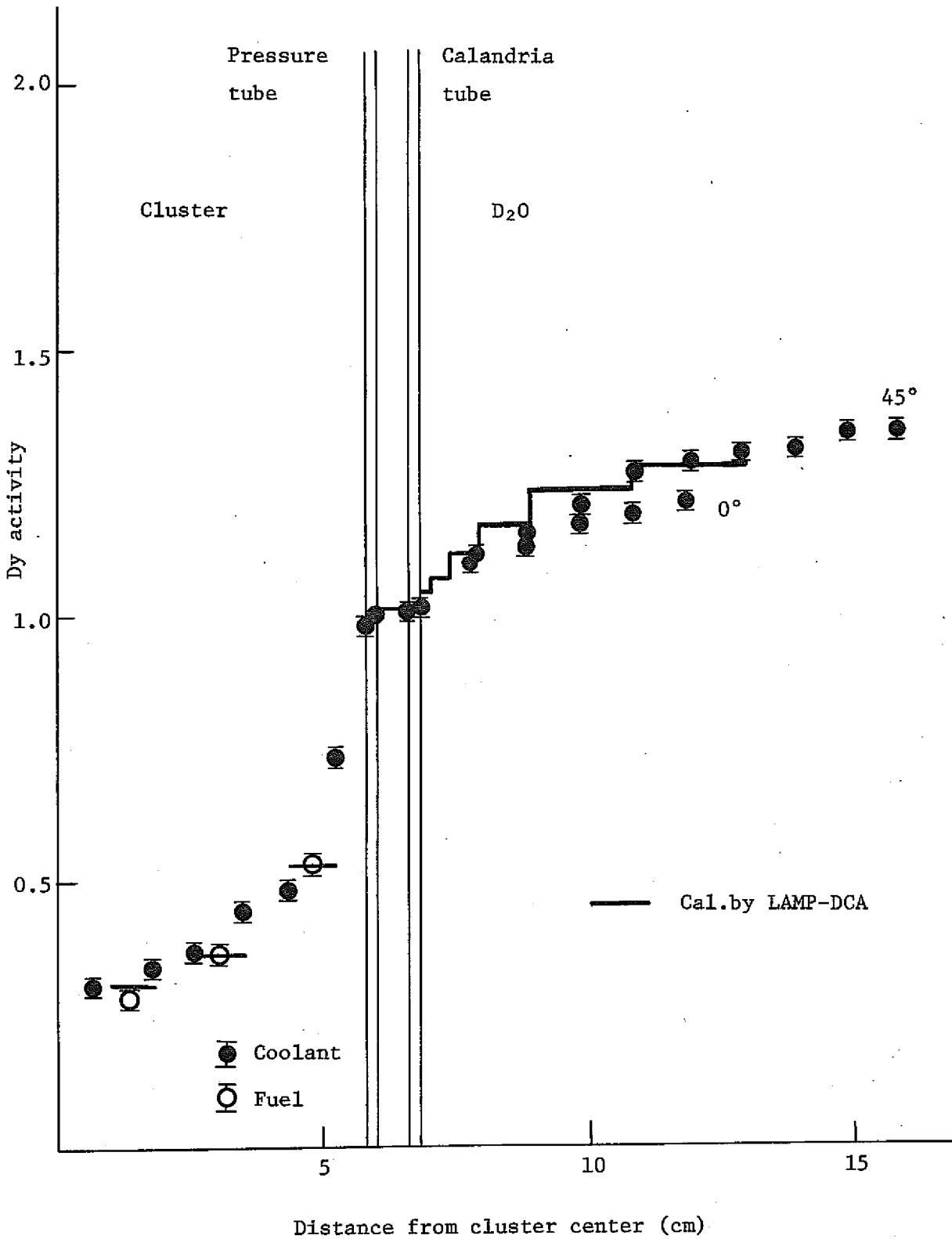


Fig. 34 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.54w/o PuO₂-UO₂, 0% void)

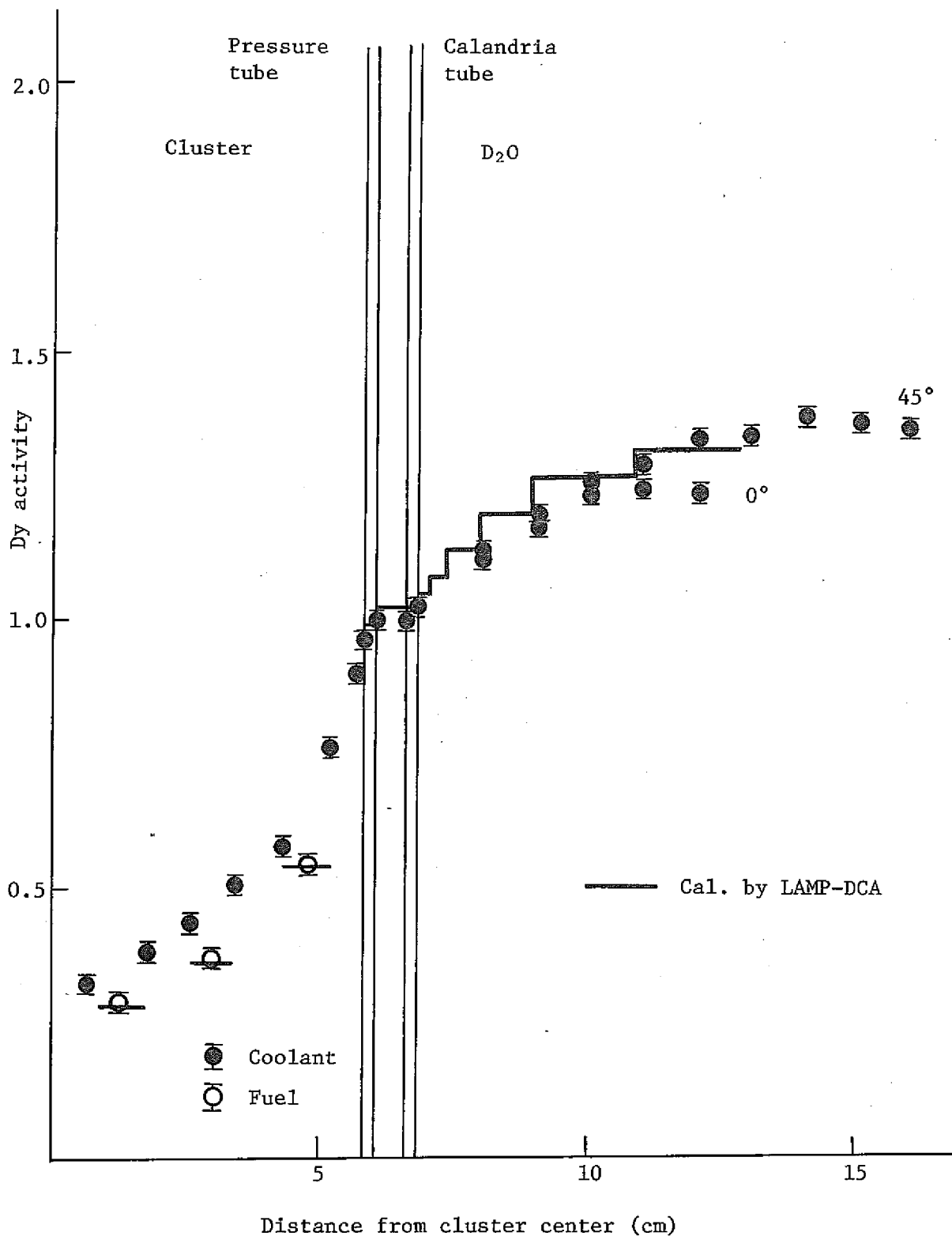


Fig. 35 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.54w/o PuO₂-UO₂, 30% void)

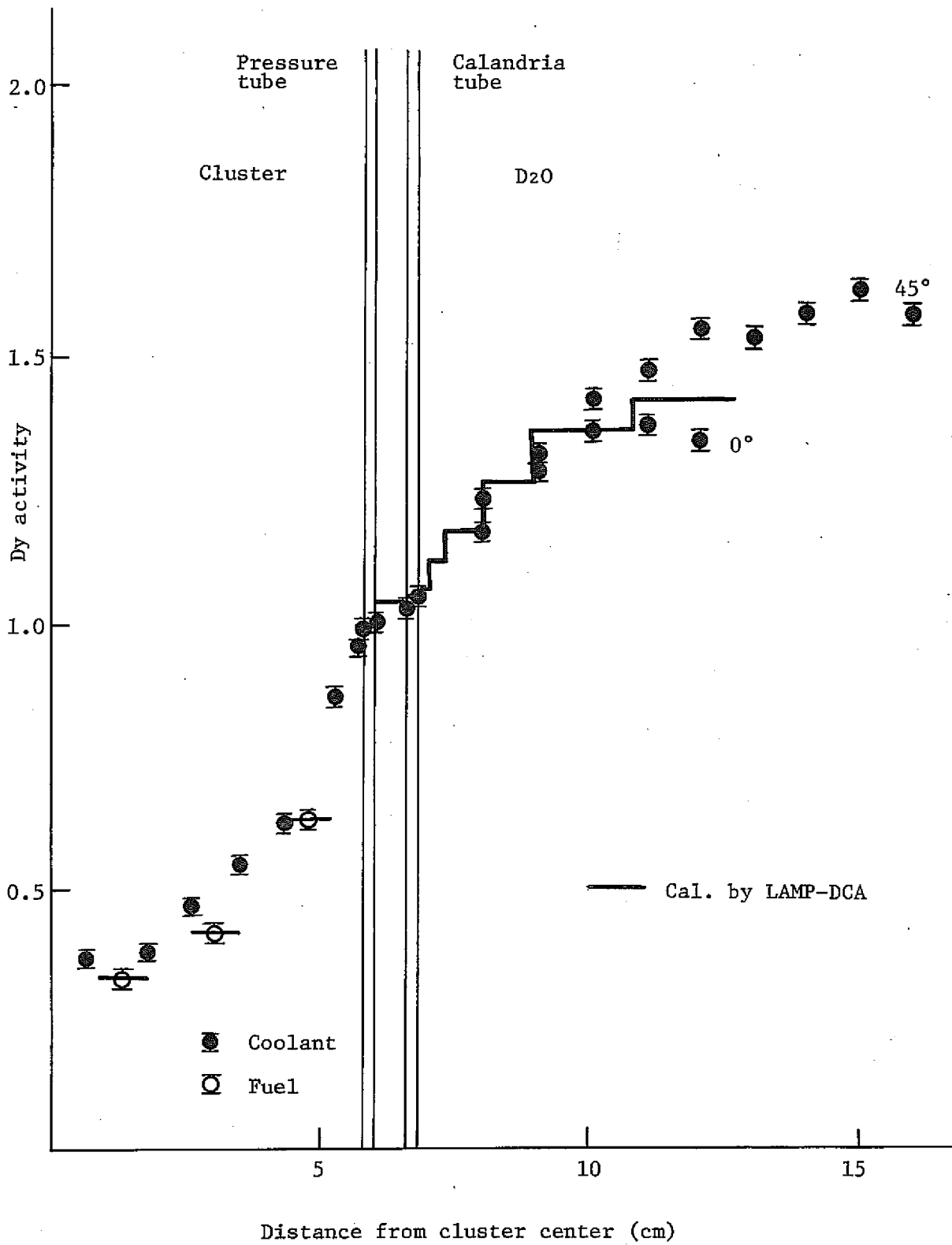


Fig. 36 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.54w/o PuO₂-UO₂, 70% void)

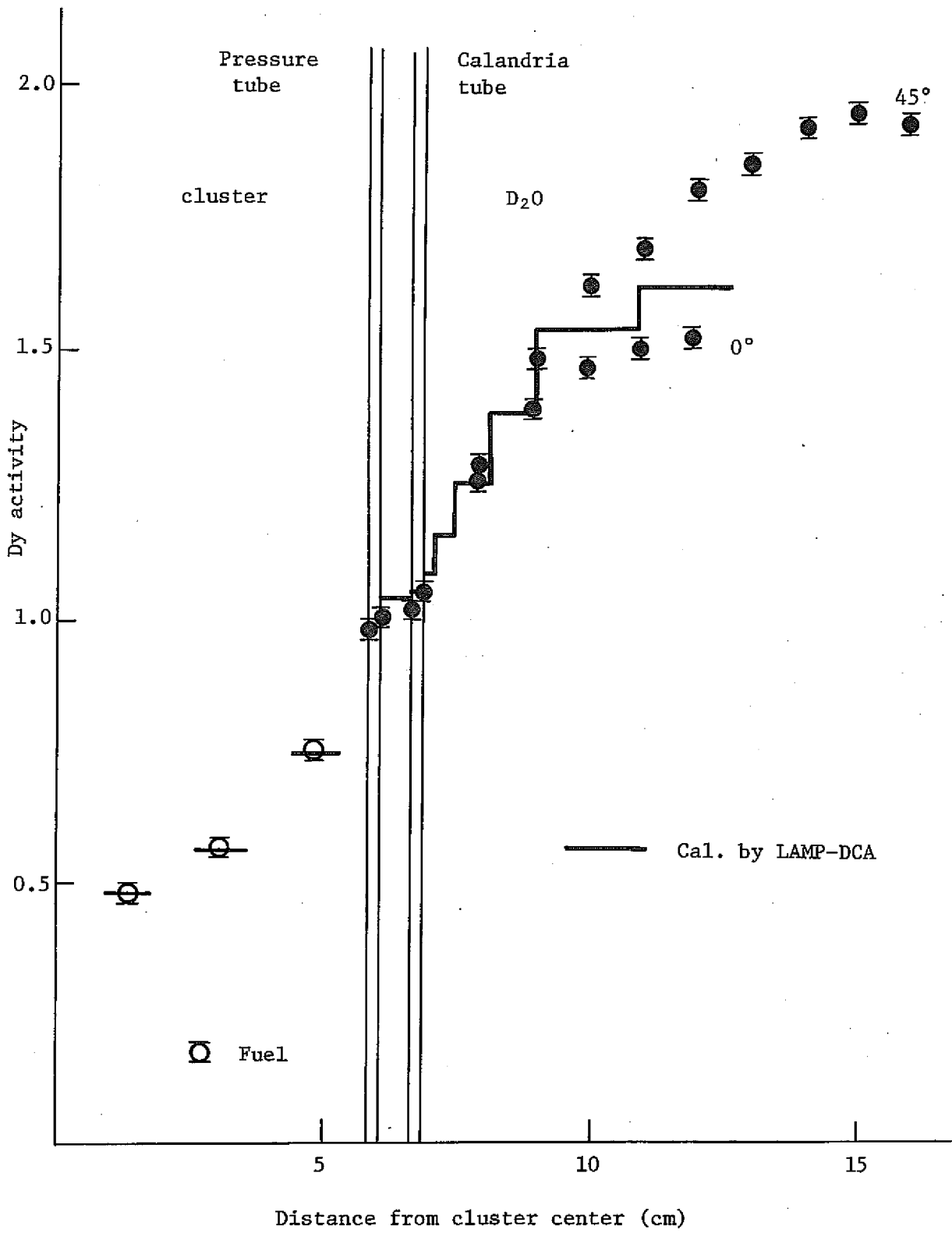


Fig. 37 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.54w/o PuO₂-UO₂, 100% void)

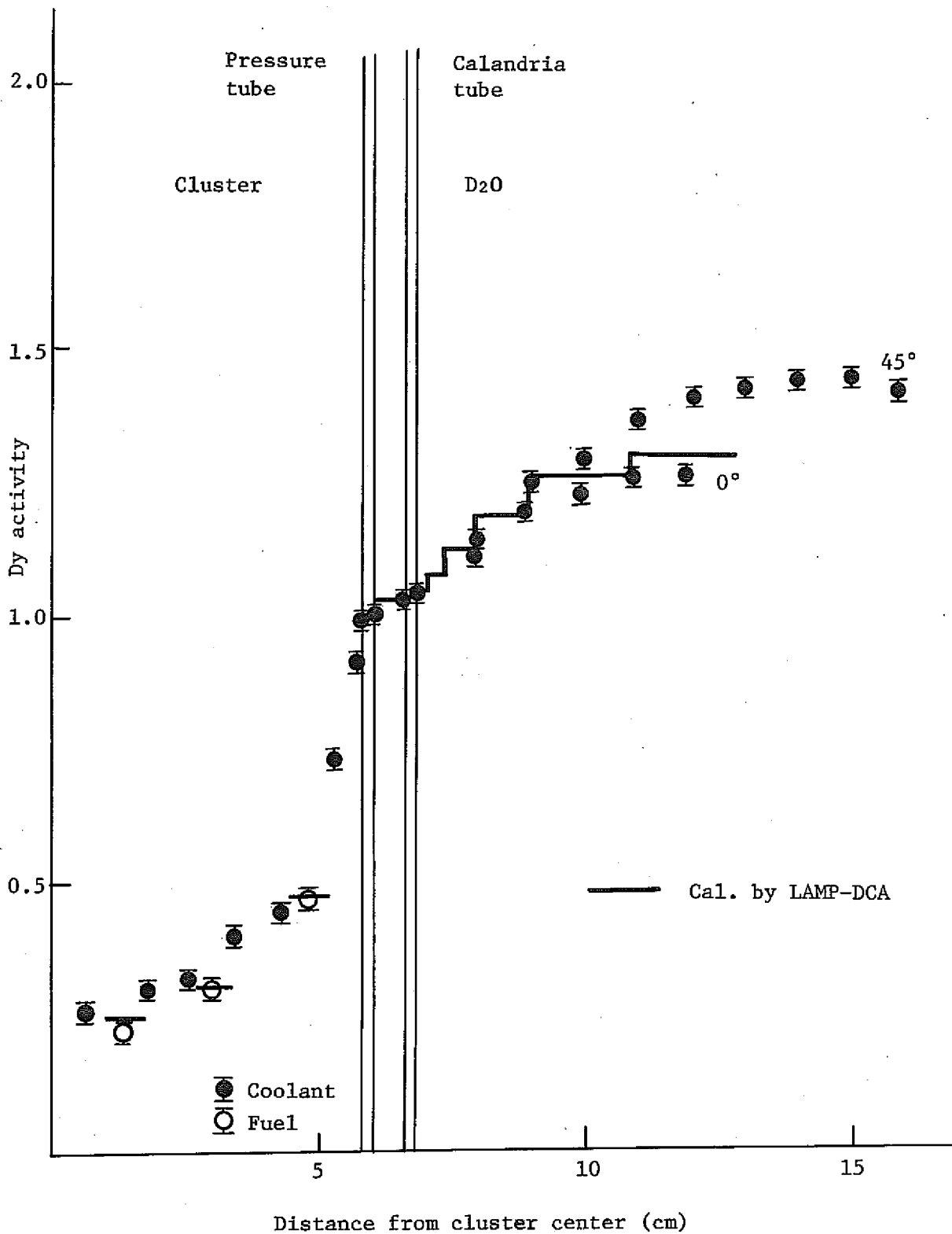


Fig. 38 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.87w/o (S) PuO₂-UO₂, 0% void)

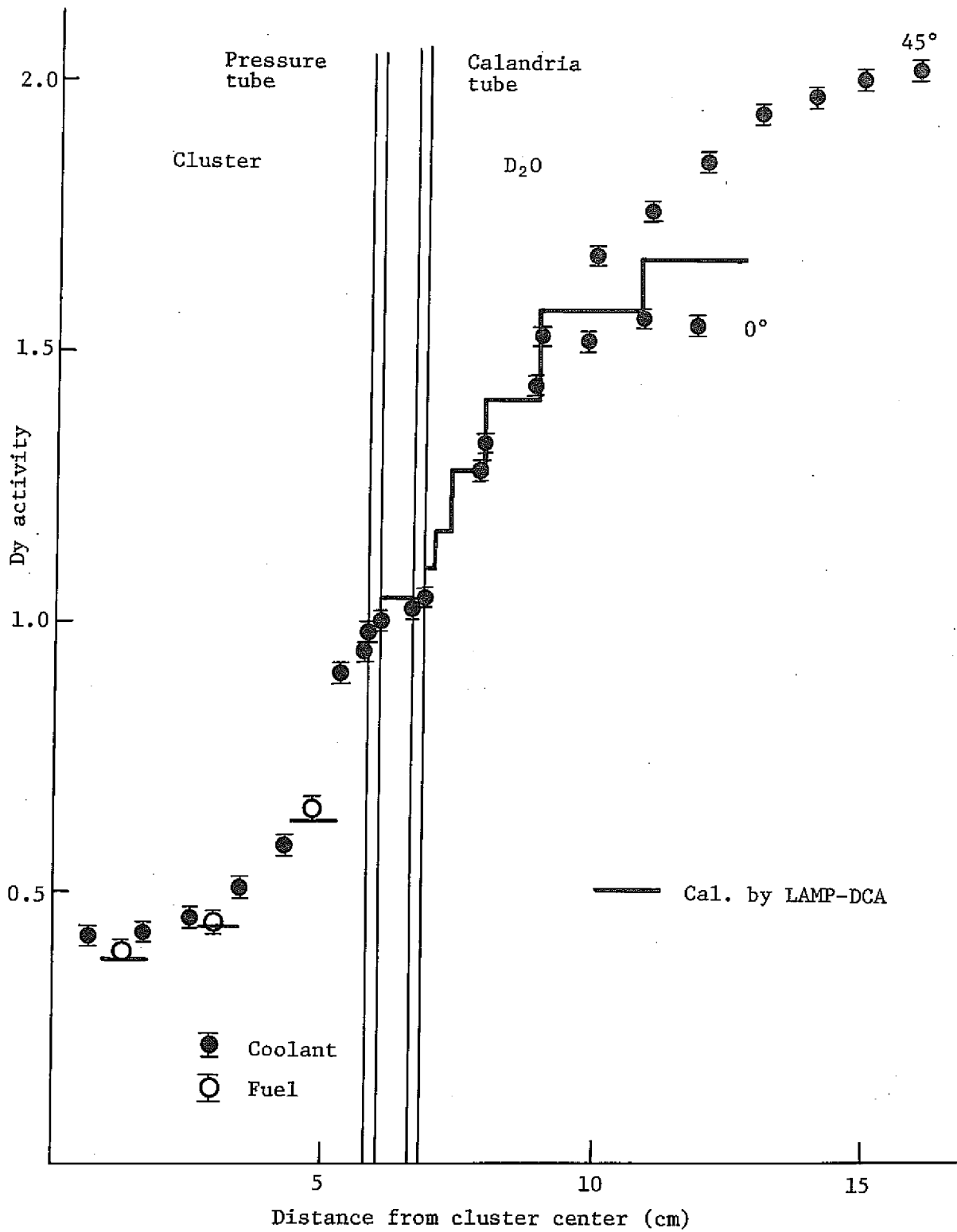


Fig. 39 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.87w/o (S) PuO₂-UO₂, 100% void)

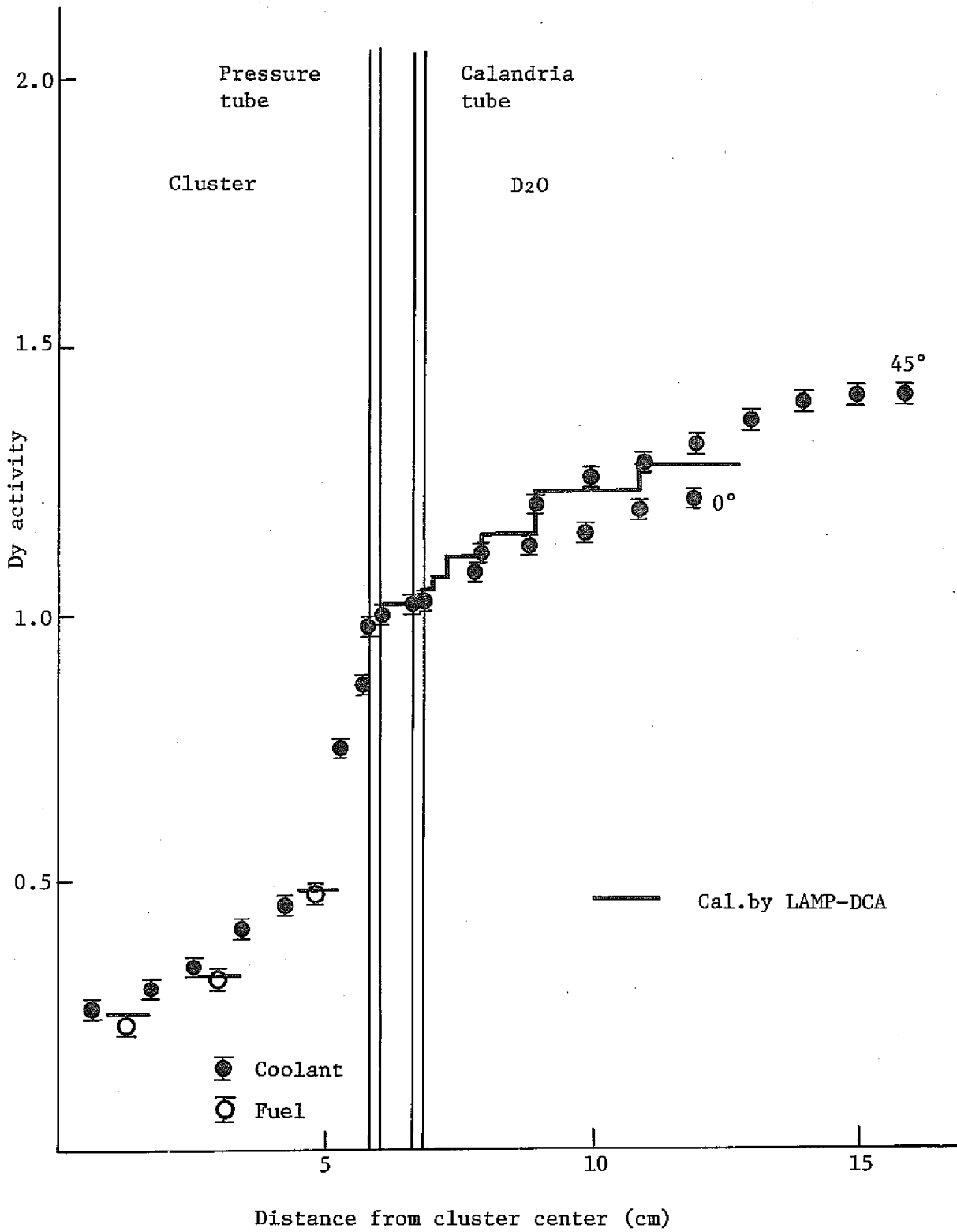


Fig. 40 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.87w/o (R) PuO₂-UO₂, 0% void)

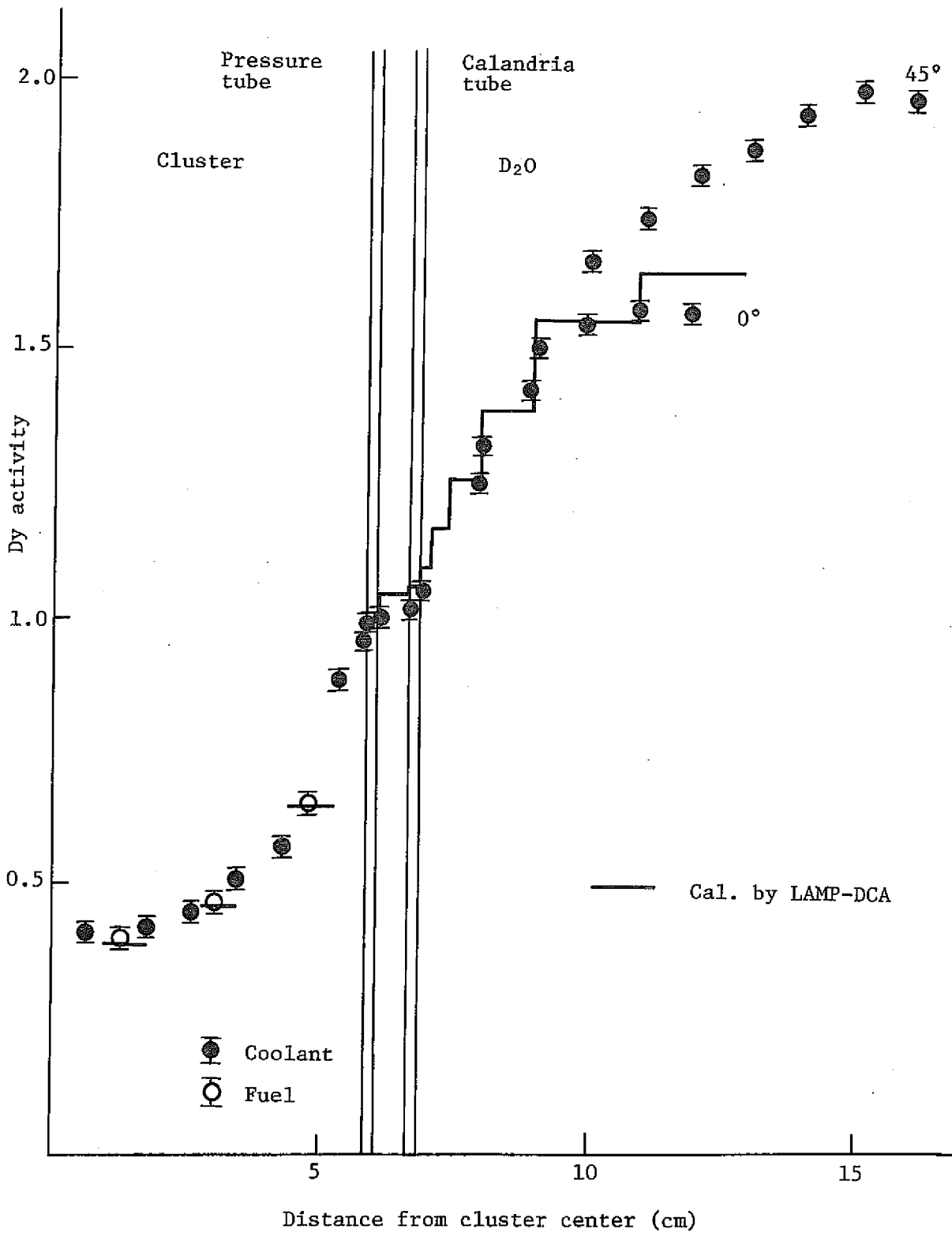


Fig. 41 Intra-cell thermal neutron flux distribution
(0.87w/o (R) PuO₂-UO₂, 100% void)

8 結 論

2.25cm格子ピッチにおけるプルトニウム燃料を装荷した炉心の単位格子内熱中性子束分布の実験結果，ならびにNOAH-II，LAMP-DCAによる計算結果との比較により次のことが認められた。

- (1) 3種類のプルトニウム燃料を用い，冷却材ボイド率を0%，30%，70%，100%と変えて，単位格子内熱中性子束分布の測定をおこなったが，すべての実験において測定誤差は燃料中で±1.5%，冷却材中で±3%，圧力管とカランドリア管の内側，外側で±2%，重水中で±1.5%であった。これより，プルトニウム燃料炉心における単位格子内熱中性子束分布の精密測定方法が確立した。
- (2) 冷却材が増加する（ボイド率が100%，70%，30%，0%と変化する）場合，燃料中の分布は低下してくる。この主な原因は，水の増加によって燃料集合体内の熱中性子拡散距離が減少し，遮蔽効果を増大させるためと思われる。又重水中の分布は水の増加によって平坦になってくる。これは，水が増加することによって燃料集合体内の散乱物質が増え，重水中より入ってくる熱中性子を反射させ，圧力管付近の熱中性子束を増加させるためと思われる。
- (3) プルトニウムの富化度が増加すると，燃料中の分布を低下させるが，この主な原因としては，燃料の吸収の増加にともない熱中性子遮蔽効果が増加するためと思われる。又重水中の分布については，富化度の増加により分布の傾きは急になってくる。この原因は重水中から燃料への熱中性子の流れが増加すると考えられる。
- (4) NOAH-IIコードによる計算値と，実験値の比較において，一致の度合に規則性が認められない。このため，NOAH-IIコードをプルトニウム燃料体系の計算に使用する場合，その精度については各体系について実験データによるチェックが必要であると思われる。
- (5) LAMP-DCAコードによる計算値との比較では，全体的に見ると3%～5%の範囲内で一致していると考えられる。又今後LAMP-DCAの計算では，領域の切り方を注意すれば，プルトニウム燃料体系においてより精度よく熱中性子空間分布が求まるとと思われる。

9 謝 辞

本実験に使用した照射箔入り下部燃料の製作にあたっては、動力炉・核燃料開発事業団東海事業所プルトニウム燃料部の安久津部長，川島課長，鈴木係長，横沢班長，肥田野氏，その他大勢の方々に多大な御協力をいただきました。ここに深く感謝いたします。また，LAMP-DCAの計算に関しては飯島氏，CRCの角谷氏に御協力いただき深く感謝いたします。なお，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宮脇良夫室長，ならびに室員の皆様に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 若 林 他 : SN941 74-26
「プルトニウム炉心における単位格子内熱中性子束分布の測定(I)」
- (2) 若 林 他 : ZN941 74-77
「プルトニウム炉心における単位格子内熱中性子束分布の測定(II)」
- (3) T.Wakabayashi and Y.Hachiya:
"Heavy-Water Critical Experiments for FUGEN (II) Cell Flux Distributions
in Plutonium Lattice"
Trans.Am.Nucl.Soc., 18, 466 (1975)
- (4) K.C.Kendall et al:
AEEW-M756
- (5) 坂田, 飯島, 八谷, 角谷:
「クラスター型燃料格子詳細解析コードシステム LAMP - DCA取扱マニュアル」
- (6) 若 林 他 : ZN941 74-82
「クラスター型炉心における材料バックリングの測定」
- (7) ZJ302 74-12
「DCA実験データに基づく“ふげん”炉心特性評価(I)」
- (8) 土 橋 他 :
「LAMP - AによるDCA炉心の格子計算」
JAERI-memo 3834 (1969)
- (9) 土 橋 他 :
「LAMP - AによるSG3格子解析」
46年原子力学会予稿集 p. 306 (1971)
- (10) 飯 島 他 :
「クラスター型燃料格子における単位格子内熱中性子反応率分布の実験解析」
48年原子力学会予稿集 p. 66 (1973)
- (11) 飯 島 他 :
「クラスター型燃料格子詳細解析コードシステムの整備」
49年秋原子力学会予稿集 p. 6, (1974)

付録1 DCA物理定数

1. Fuel Assembly

(i) 28 elements/assembly in 3 circular rings

Ring	No. of elements	Pitch circle dia of elements centers (cm)
1	4	2.625
2	8	6.000
3	16	9.515

(ii) Fuel Element

(1) 1.2 w/o Enriched UO₂ Fuel

	Inner dia (cm)	Outer dia (cm)	Material	Density (g/cm ³)
Fuel pellet		1.480	1.203 w/o enriched UO ₂	10.36
Gap	1.480	1.503	Helium	-
Fuel sheath	1.503	1.673	Aluminum alloy	2.674

Composition		w/o in fuel pellet	w/o in sheath	Atomic No. density (10 ²⁴ /cm ³)
pellet	²³⁵ U	1.057		0.0002806
	²³⁸ U	86.793		0.02275
	0	12.150		0.04738
Sheath	Al		96.98	0.05788
	Mg		2.60	0.00172

(2) 0.54 w/o Enriched PuO₂-UO₂ Fuel (Standard Grade)

	Inner dia (cm)	Outer dia (cm)	Material	Density (g/cm ³)
Fuel pellet	-	1.469	0.542 w/o enriched PuO ₂ -UO ₂	10.17
Gap	1.469	1.506	Helium	-
Fuel sheath	1.506	1.668	Zry-2	6.523

Composition		w/o in Pu	w/o in fuel pellet	W/o in sheath	Atomic No. density (10 ²⁴ /cm ³)
Pellet	²³⁵ U		0.6214		0.0001620
	²³⁸ U		86.782		0.02233
	²³⁸ Pu	0.021	0.000102		0.000000026
	²³⁹ Pu	90.360	0.4304		0.0001103
	²⁴⁰ Pu	8.640	0.04115		0.00001050
	²⁴¹ Pu	0.915	0.004359		0.000001108
	²⁴² Pu	0.064	0.000303		0.0000000767
	O		12.12		0.04640
Sheath	Zr			98.22	0.04218
	Sn			1.48	0.0004897
	Fe			0.14	0.0000985
	Cr			0.10	0.0000756
	Ni			0.06	0.0000401

Date of Analysis ; 23 August 1971

(3) 0.87 w/o Enriched PuO₂-UO₂ Fuel (Standard Grade)

	Inner dia (cm)	Outer dia (cm)	Material	Density (g/cm ³)
Fuel pellet		1.472	0.862 w/o enriched PuO ₂ -UO ₂	10.17
Gap	1.472	1.506	Helium	-
Fuel sheath	1.506	1.668	Zry-2	6.523

Composition		w/o in Pu	w/o in fuel pellet	w/o in sheath	Atomic No. density (10 ²⁴ /cm ³)
Pellet	²³⁵ U		0.6194		0.0001615
	²³⁸ U		86.503		0.02226
	²³⁸ Pu	0.019	0.000145		0.000000037
	²³⁹ Pu	90.314	0.6849		0.0001755
	²⁴⁰ Pu	8.682	0.06584		0.00001680
	²⁴¹ Pu	0.918	0.006960		0.000001769
	²⁴² Pu	0.067	0.000510		0.0000001291
	O		12.12		0.04641
Sheath	Zr			98.22	0.04218
	Sn			1.48	0.0004897
	Fe			0.14	0.0000985
	Cr			0.10	0.0000756
	Ni			0.06	0.0000401

Date of Analysis ; 23 August 1971

(4) 0.87 w/o Enriched PuO₂-UO₂ Fuel (Reactor Grade)

	Inner dia (cm)	Outer dia (cm)	Material	Density (g/cm ³)
Fuel pellet	-	1.468	0.874 w/o enriched PuO ₂ -UO ₂	10.25
Gap	1.468	1.506	Helium	-
Fuel sheath	1.506	1.668	Zry-2	6.523

Composition		w/o in Pu	w/o in fuel pellet	w/o in sheath	Atomic No. density (10 ²⁴ /cm ³)
Pellet	²³⁵ U		0.6194		0.00001627
	²³⁸ U		86.493		0.02243
	²³⁸ Pu	0.84	0.00641		0.00000166
	²³⁹ Pu	64.92	0.4953		0.0001279
	²⁴⁰ Pu	21.77	0.1661		0.00004272
	²⁴¹ Pu	3.01	0.07217		0.0000184
	²⁴² Pu		0.02296		0.000005856
	O		12.13		0.04680
Sheath	Zr			98.22	0.04218
	Sn			1.48	0.0004897
	Fe			0.14	0.0000985
	Cr			0.10	0.0000756
	Ni			0.06	0.0000401

Date of Analysis ; 16 June 1973

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 No. density
Al		96.98		0.05788
Mg		2.60		0.00172
Air	O		23.5204	0.00001067
	N		76.4796	0.00003962

3. Moderator

(i) Density of D₂O (99.50 mol/o) 1.1078

Material	w/o in Moderator	Density (g/cm ³)
D ₂ O	99.55	1.10834
H ₂ O	0.45	0.99777

Composition	w/o in D ₂ O	Atomic No. density (/cm ³ 10 ²⁴)
H	0.05036	0.0003333
D	20.0223	0.06632
O	79.9283	0.03333

(ii) Hanger Wire

No. in assembly	Pitch circle dia of hanger wire center (cm)	Outer dia (cm)	Material	Density (g/cm ³)
4	10.60	0.20	Aluminum alloy	2.674

Composition	w/o in wire	Atomic No. density (10 ²⁴ /cm ³)
Al	96.98	0.05788
Mg	2.60	0.00172

(iii) Spacer

No. in assembly	Outer dia (cm)	Thickness (cm)	Material	Density (g/cm ³)
2 *1	11.44	0.30	Aluminum alloy	2.674

Composition	w/o in Spacer	Atomic No. density (10 ²⁴ /cm ³)
Al	96.98	0.05788
Mg	2.60	0.00172

*1 The Positions are 70 cm and 140 cm from the lowest end of fuel.

4. Coolant

Simulated void fraction (%)	w/o in Coolant				Density (g/cm ³)
	H ₂ O	D ₂ O	H ₃ BO ₃	Air	
0	100	-	-	-	0.99777
30	63.17	36.82	0.00921	-	1.0359
70	18.07	81.91	0.0215	-	1.0866
86.7	0.45	99.55	-	-	1.1078
100	-	-	-	100	0.000001
Density (g/cm ³)	0.99777	1.10834	1.435	0.001205	-

Composition	w/o in Coolant				
	0% void	30% void	70% void	86.7% void	100% void
H	11.1901	7.0693	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 No. density (10 ²⁴ /cm)				
	0% void	30% void	70% void	86.7% void	100% void
H	0.06671	0.04375	0.01313	0.0003333	
D		0.02294	0.05353	0.06632	
O	0.03335	0.03335	0.03334	0.03333	0.00001067
B(Natural)		0.0000009	0.0000023		
N					0.00003962

5. Others

- (i) Temperature : 22°C ≈ 295°K
- (ii) Square lattice pitch : 22.5cm or 25.0cm
- (iii) Diameter of core tank : 300.5 cm
- (iv) No. of fuel channel (Standard core) : 121 for 22.5cm lattice pitch
: 97 for 25.0cm lattice pitch

付録2 NOAH-II計算用入力

INPUT DATA FOR NOAH-2 CALCULATION

N	*	*	*	*	*	*	*
1	*NOAH-2	22.5LP	0.54%	PUO2+UO2	0%	VOID	
2	POLYGON(1.00)	0					*FUEL1
3	DIAMET(1.00)	11.28					*
4	TEMPER(1.00)	22.0					*
5	DIAMET(1.11)	1.469					*PELLET
6	TEMPER(1.11)	22.					*
7	DENSIT(1.11)	10.171					*
8	INGRED(1.11)	7,18,0.6214,	20,86.7823,	21,0.4304,	22,0.04115,	¥	*
9		23,0.004359,	34,0.000303,	2,12.120			*
10	DIAMET(1.12)	1.668					*
11	DENSIT(1.12)	5.3728					*
12	INGRED(1.12)	5,3,98.22,	10,1.48,	6,0.14,	11,0.10,	7,0.06	*
13	TEMPER(1.12)	22.0					*
14	DENSIT(1.10)	0.99777		*			*
15	INGRED(1.10)	2,1,11.1901,	2,88.8099		*		*
16	LAYER	2=1					*
17	LAYER	3=1					*
18	POLYGON(2.00)	0					*W.G
19	DIAMET(2.00)	11.68					*
20	DENSIT(2.00)	0.99777		*			*
21	INGRED(2.00)	2,1,11.1901,	2,88.8099				*
22	TEMPER(2.00)	22.0					*
23	RARE REGION(2.00)		*				*
24	POLYGON(3.00)	0					*P.T
25	DIAMET(3.00)	12.08					*
26	DENSIT(3.00)	2.674					*
27	INGRED(3.00)	1,9,100.0					*
28	TEMPER(3.00)	22.0					*
29	RARE REGION(3.00)		*				*
30	POLYGON(4.00)	0					*
31	DIAMET(4.00)	13.25					*AIR.G
32	AIRGAP(4.00)						*
33	POLYGON(5.00)	0					*C.T
34	DIAMET(5.00)	13.65					*
35	DENSIT(5.00)	2.674					*
36	INGRED(5.00)	1,9,100.0					*
37	TEMPER(5.00)	22.0					*
38	RARE REGION(5.00)		*				*
39	POLYGON(6.00)	0					*MOD
40	DIAMET(6.00)	25.39					*
41	DENSIT(6.00)	1.1078					*
42	INGRED(6.00)	3,1,0.05036,	38,20.0223,	2,79.9283			*
43	TEMPER(6.00)	22.0					*
44	BUCKLING	0.001473183*					*
45	ARRAY TYPE	4,3,1.3125,	3.00,4.7575,	4,8,16			*
46	RESONANCE	6,18,20,	21,22,23,34				*
47	FIVE GROUP						*
48	DG LAYER	1,0,2					*
49	SPECTRUM	4,2,1.00,	2.00				*
50	SPECTRUM	5,4,3.00,	4.00,5.00,	6.00			*
N	*	*	*	*	*	*	*

INPUT DATA FOR NOAH-2 CALCULATION

```

N          *          *          *          *          *          *          *
51 EPSILON 0.0001
52 GEOMETRY 10,10,10,5,5,5,5,20
53 RECORD 36,2,20,0.58830,4,20,1.45646,5,20,0.53940,20,18,2.43,¥
54          20,21,2.87099,20.23,2.96899,108,2,1.0004,108,3,0.98434,¥
55          108,5,0.99258,108,11,2.42680,108,12,2.88799,108,13,3.10404*
56 FINAL OUTPUT 3,64,69,94,96,171,171
57 ITERATE 5 *
58 BEGIN CALCULATION
59 *NOAH-2 22.5LP 0.54% PUO2+UO2 30% VOID
60 DENSIT(1.10)1.0359
61 INGRED(1.10)4,1,7.0693,38,7.4055,2,85.5231,29,0.0003158
62 DENSIT(2.00)1.0359
63 INGRED(2.00)4,1,7.0693,38,7.4055,2,85.5231,29,0.0003158
64 BUCKLING 0.001421
65 BEGIN CALCULATION *
66 *NOAH-2 22.5LP 0.54% PUO2+UO2 70% VOID
67 DENSIT(1.10)1.0866
68 INGRED(1.10)4,1,2.0231,38,16.4744,2,81.5001,29,0.000737
69 DENSIT(2.00)1.0866
70 INGRED(2.00)4,1,2.0231,38,16.4744,2,81.5001,29,0.000737
71 BUCKLING 0.0012610
72 BEGIN CALCULATION *
73 *NOAH-2 22.5LP 0.54% PUO2+UO2 100% VOID
74 DENSIT(1.10) 0.000455
75 INGRED(1.10)2,1,11.1901,2,88.8099
76 DENSIT(2.00) 0.000455
77 INGRED(2.00)2,1,11.1901,2,88.8099
78 BUCKLING 0.001063377*
79 BEGIN CALCULATION *
80 *NOAH-2 22.5LP 0.87% PUO2+UO2 STANDARD GRADE 0% VOID
81 POLYGON(1.00) 0
82 DIAMET(1.00)11.28
83 TEMPER(1.00)22.0
84 DIAMET(1.11)1.472
85 DENSIT(1.11)10.17
86 INGRED(1.11)7,18,0.6194,20,86.5031,21,0.6849,22,0.06584.¥
87          23,0.006960,34,0.000510,2,12.119
88 TEMPER(1.11)22.0
89 DIAMET(1.12)1.668
90 DENSIT(1.12)5,3477
91 INGRED(1.12)5,3,98.22,10,1.48,6,0.14,11,0.10,7,0.06
92 TEMPER(1.12)22.0
93 DENSIT(1.10)0.99777
94 INGRED(1.10)2,1,11.1901,2,88.8099
95 DENSIT(2.00)0.99777
96 INGRED(2.00)2,1,11.1901,2,88.8099
97 BUCKLING 0.001918991*
98 BEGIN CALCULATION *
99 *NOAH-2 22.5LP 0.87% PUO2+UO2 STANDARD GRADE 100 % VOID
100 DENSIT(1.10) 0.000455
N          *          *          *          *          *          *          *

```

INPUT DATA FOR NOAH-2 CALCULATION

N	*	*	*	*	*	*	*
101	INGRED(1.10)	2,1,11.1901,2,88.8099		*			
102	DENSIT(2.00)	0.000455				*	
103	INGRED(2.00)	2,1,11.1901,2,88,8099				*	
104	BUCKLING	0.001286842*					
105	BEGIN CALCULATION	*					
106	*NOAH-2	22.5LP 0.87% PUO2+UO2 REACTOR GRADE	0 % VOID				
107	POLYGON(1.00)	0				*FUFL1	
108	DIAMET(1.00)	11.28				*	
109	TEMPER(1.00)	22.0				*	
110	DIAMET(1.11)	1.468				*PELLET	
111	DENSIT(1.11)	10.251				*	
112	INGRED(1.11)	7,18,0.6194,20,86.4930,21,0.4953,22,0.1661,23,0.072170,34,0.02297,2,12.13				*	
113						*	
114	TEMPER(1.11)	22.0				*	
115	DIAMET(1.12)	1.668				*	
116	DENSIT(1.12)	5.3477				*	
117	INGRED(1.12)	5,3,98.22,10,1.48,6,0.14,11,0.10,7,0.06				*	
118	TEMPER(1.12)	22.0				*	
119	DENSIT(1.10)	0.99777				*COOLANT	
120	INGRED(1.10)	2,1,11.1901,2,88.8099		*			
121	DENSIT(2.00)	0.99777				*	
122	INGRED(2.00)	2,1,11.1901,2,88.8099				*	
123	BUCKLING	0.001571152*					
124	BEGIN CALCULATION	*					
125	*NOAH-2	22.5LP 0.87% PUO2+UO2 REACTOR GRADE	100 % VOID				
126	DENSIT(1.10)	0.000455				*	
127	INGRED(1.10)	2,1,11.1901,2,88.8099		*			
128	DENSIT(2.00)	0.000455				*	
129	INGRED(2.00)	2,1,11.1901,2,88.8099				*	
130	BUCKLING	0.001069191*					
131	BEGIN CALCULATION	*					

付録3 LAMP-DCA コードで計算した熱中性子スペクトル

LAMP-DCA で計算した各種燃料における各領域の熱中性子スペクトルの変化を Fig.1 から Fig.41 に示した。スペクトルは比較のためいくつかの重ね合わせで示しており、それぞれの説明は図の前ページに示している。

これら LAMP-DCA により計算された熱中性子スペクトルより次の事が考えられる。

- (1) 各燃料体系の燃料中のスペクトルにおいて 0.3 eV 近傍と 1eV 近傍にスペクトルの急激な低下が認められる。これは 0.3 eV 近傍については Pu^{239} の共鳴の影響であり、1eV 近傍については Pu^{240} の共鳴の影響であると考えられる。これらの共鳴の影響は Pu^{239} 、 Pu^{240} の含有重量が多くなると大きくなっている。すなわち、 Pu^{239} の含有重量は、0.54 w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料、0.87 w/o (R) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料、0.87 w/o (S) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料の順に多くなっており、0.3 eV の共鳴の影響もこの順にしたがって大きくなっている。又 1eV の共鳴の影響は 0.87 w/o (R) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料が一番大きく、0.87 w/o (S) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料も 0.54 w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料もほぼ同じ程度である。これは Pu^{240} の含有重量が 0.87 w/o (R) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料では他の 2 つの燃料の 3 ~ 4 倍あるためと思われる。
- (2) 燃料中の第 1 リングと第 3 リングのスペクトルを比較すると、第 3 リングのスペクトルが第 1 リングに比べて低いエネルギーの方にずれているのが認められる。これは第 3 リングのスペクトルが第 1 リングのスペクトルよりソフトになっていると考えられる。また、第 1 リングと第 3 リングのスペクトルの変化は冷却材のボイド率が 0%、30%、70%、100% と大きくなるにしたがって、その変化の割合が大きくなっているのが認められる。(Fig.1 から Fig.8 参照)
- (3) 燃料中と冷却材中のスペクトルについて考えてみると、ボイド率が 0%、30%、70% の場合については、燃料中より冷却材中の方がよりソフトになっているのが認められる。又冷却材の一番外側の層のスペクトルには、0.3 eV、1eV の共鳴の影響が大きく現われなくなっている。しかし、100% ボイドにおいては当然のことながら冷却材の部分でのスペクトルの変化はなく燃料中のスペクトルと冷却材中のスペクトルはほとんど同じ形をしていることが認められる。(Fig.9 から Fig.16 参照)
- (4) 圧力管、Air gap、カランドリア管のスペクトルは Fig.17, 18 から判るようにほとんど同じ形をしているのが認められる。
- (5) 同一燃料において冷却材のボイド率が変化することにより、スペクトルがどのように影響するかを考えてみる。(Fig.19 から Fig.27 参照) 燃料中のスペクトルについて見れば、第 1 リング、第 3 リングの両方の場合とも、ボイド率が大きくなるにしたがってス

ベクトルのピークが中性子エネルギーの高い方にずれているのが認められる。このことは、ボイド率が高くなるとスペクトルがハードになっていくと考えられる。これは3種類の燃料とも同様の傾向が見られている。又、重水中のスペクトルについても同様にボイド率が大きくなるとよりハードになる傾向がみとめられる。

- (6) プルトニウムの富化度，組成比が変化することによるスペクトルへの影響はFig.28からFig.33より次のことが認められる。

燃料中の第1リング，第3リングのスペクトルともプルトニウムの富化度が増加するとハードになる傾向がある。しかし，富化度の増加にともなうスペクトルのハード化はあまり大きくない。0.87w/o (S) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料と0.87w/o (R) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料ではマックスウェルパートはほとんど同じ形をしており，0.3eV，1.0eV近傍の共鳴の影響が Pu^{239} Pu^{240} の組成比の相違より現われている。また，これらプルトニウムの富化度，組成比の相違によるスペクトルの変化は，(5)で述べたボイド率の違いが与えるスペクトルの変化より小さいと思われる。重水中のスペクトルについては各燃料体系ともほとんど同じ形をしている。

- (7) Fig.34からFig.41には各燃料体系のすべての領域スペクトルが示されているが，スペクトルの変化はボイド率が増加するにしたがって大きくなっていることが認められる。又，プルトニウムの富化度が大きくなると変化が大きくなると認められる。

Fig.1 ~ Fig.8

燃料中第1リング(F-1, 実線), 第3リング(F-3, 短い破線), 重水中(D-6, 長い破線)の各燃料体系の熱中性子スペクトルの図

Fig.1	0.54 w/o PuO ₂ -UO ₂ 燃料	0% ボイド
Fig.2	同 上	30% "
Fig.3	同 上	70% "
Fig.4	同 上	100% "
Fig.5	0.87 w/o (S) PuO ₂ -UO ₂ 燃料	0% "
Fig.6	同 上	100% "
Fig.7	0.87 w/o (R) PuO ₂ -UO ₂ 燃料	0% "
Fig.8	同 上	100% "

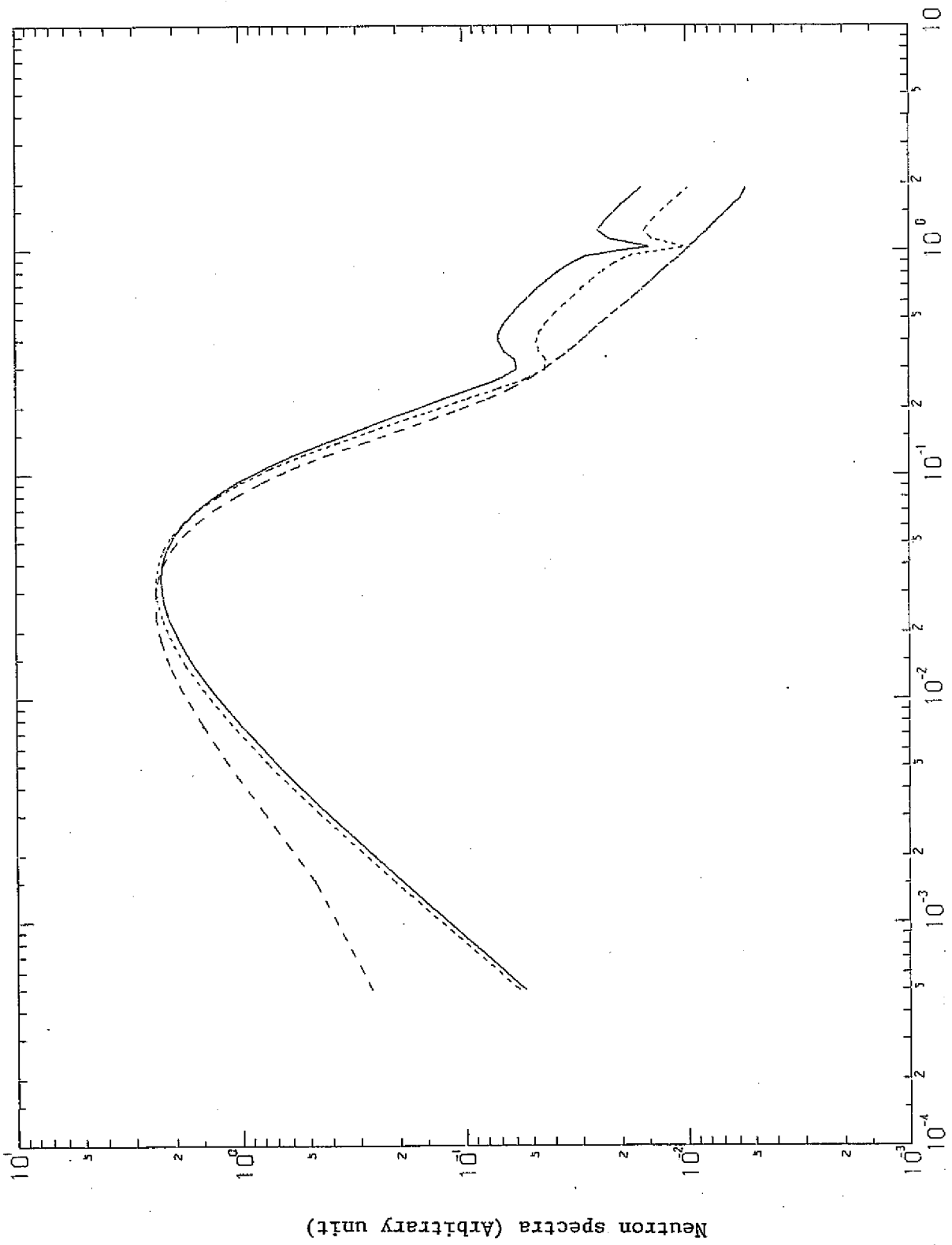


FIG. 1 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S PU, 0%, F-1, F-3, D20)

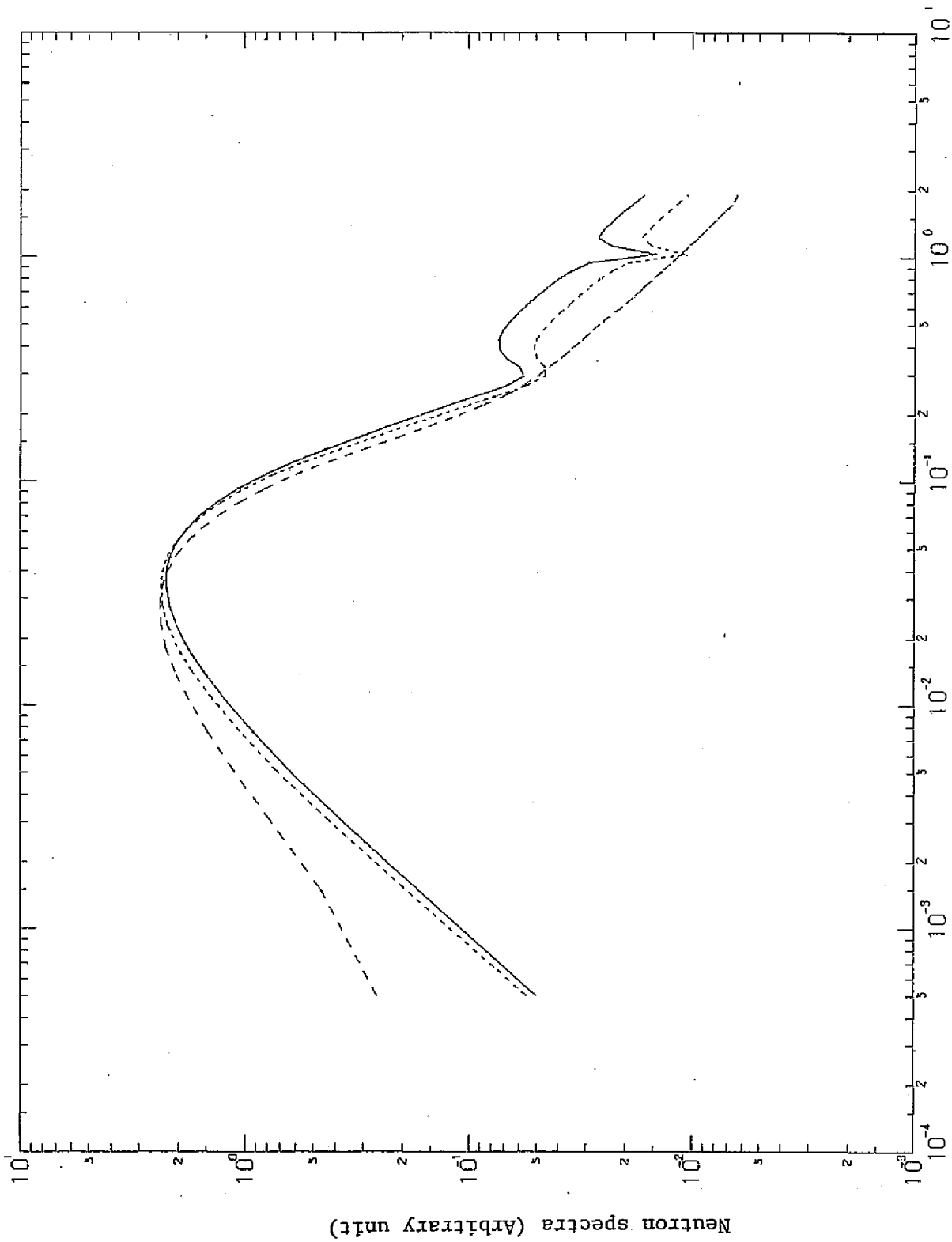


Fig. 2 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S PU, 30%, F-1, F-3, D20)

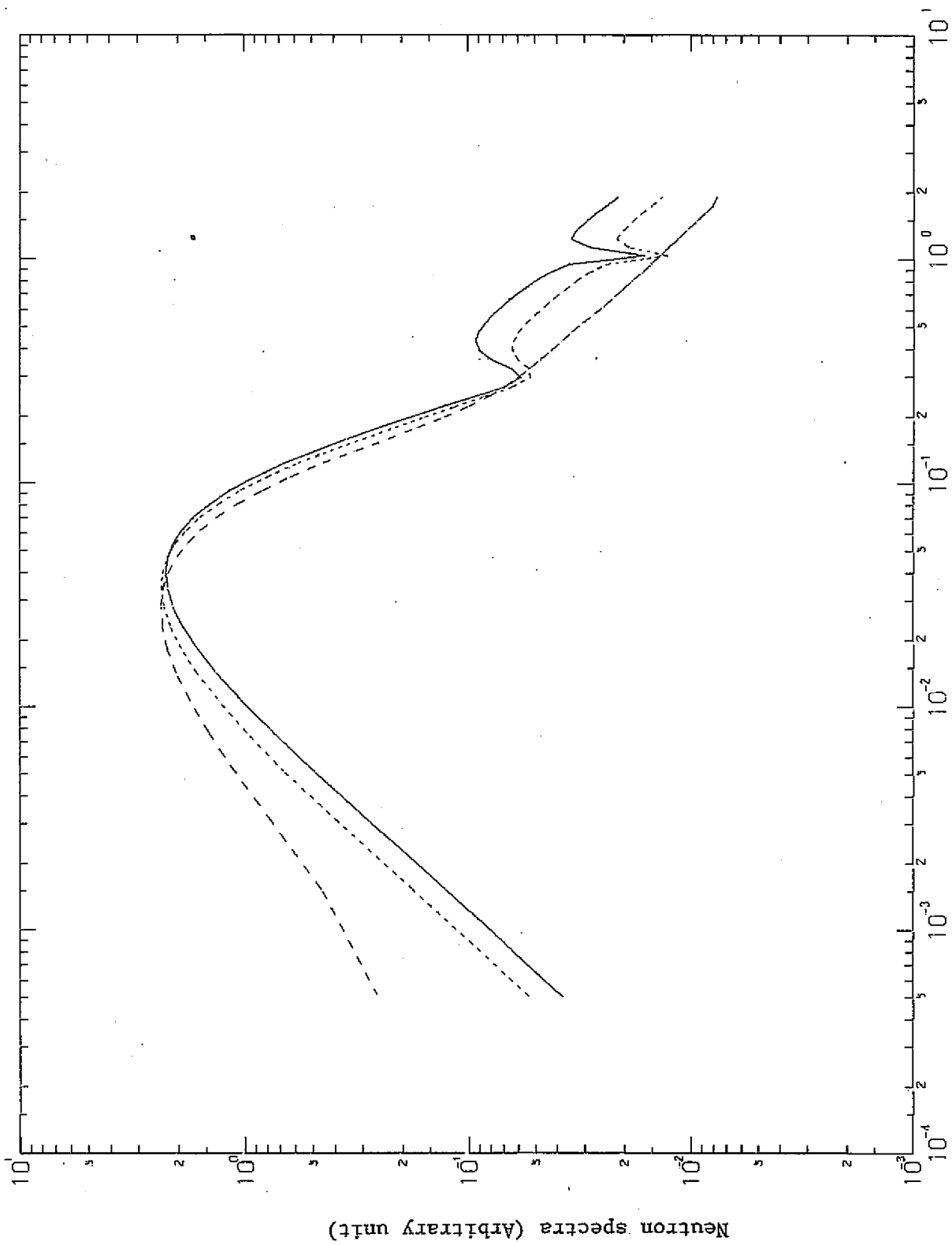


Fig. 3 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S PU, 70%, F-1,F-3,020)

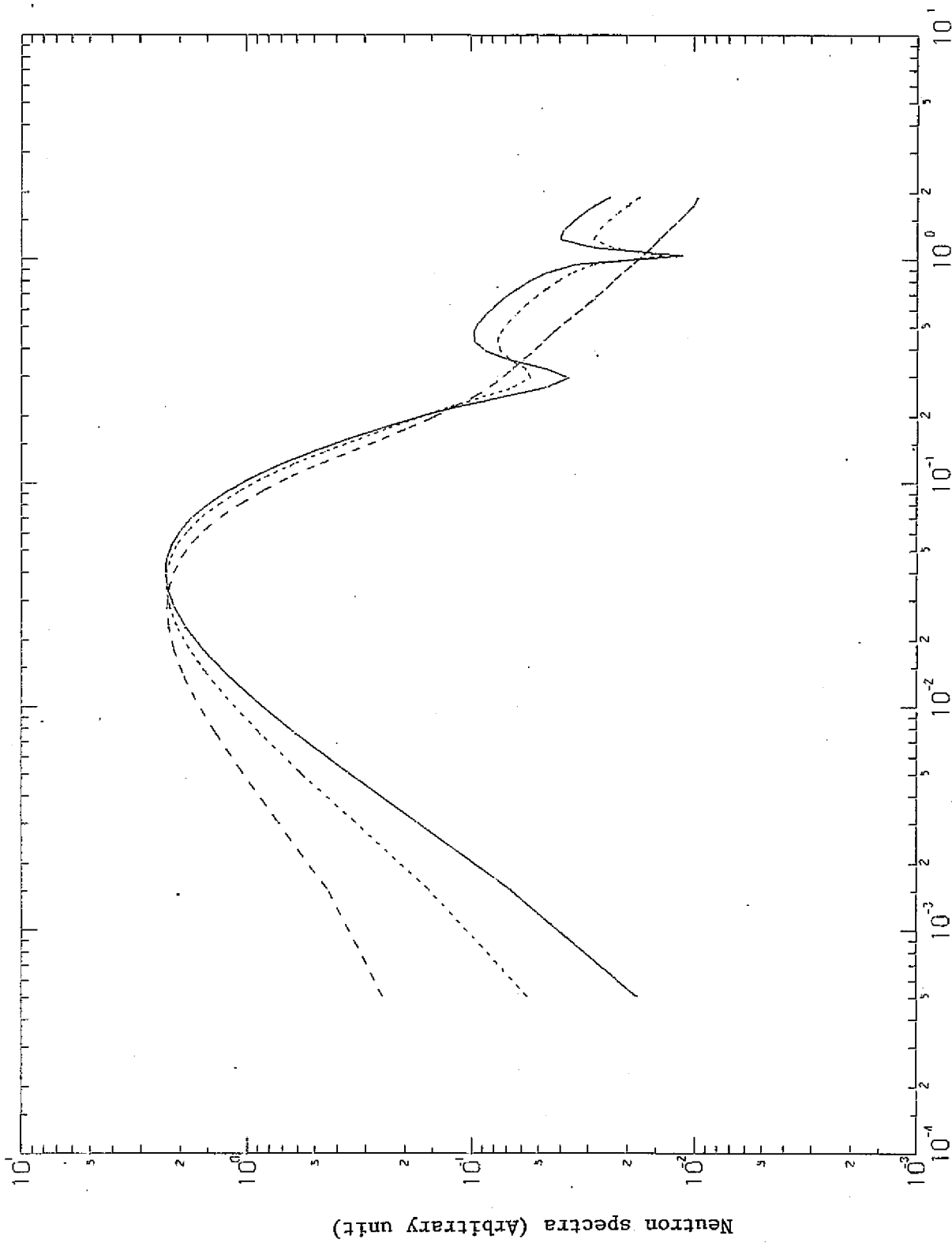


Fig. 4 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S PU, 100%, F-1, F-3, D20)

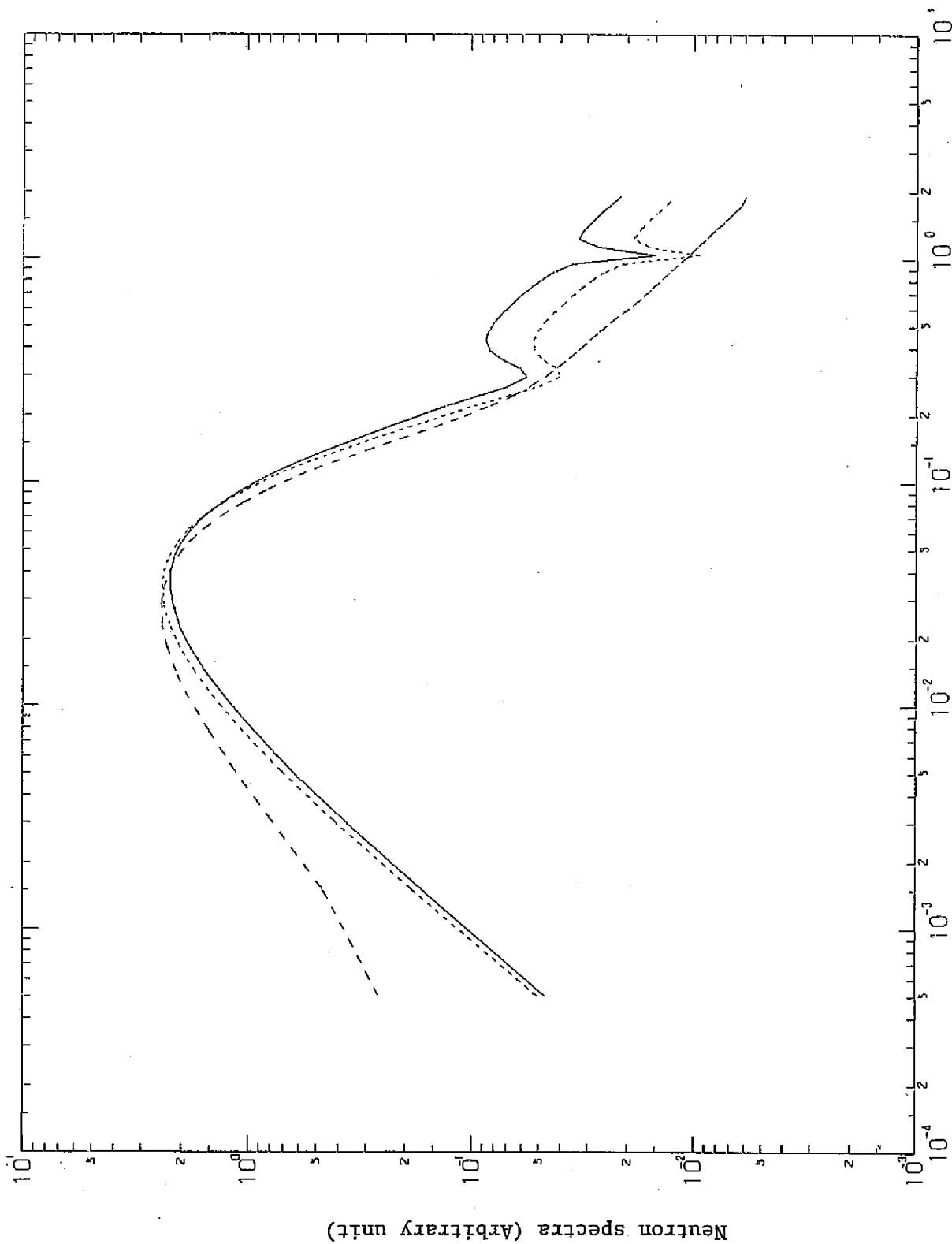


Fig. 5 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (8S PU, 0%, F-1, F-3, D20)

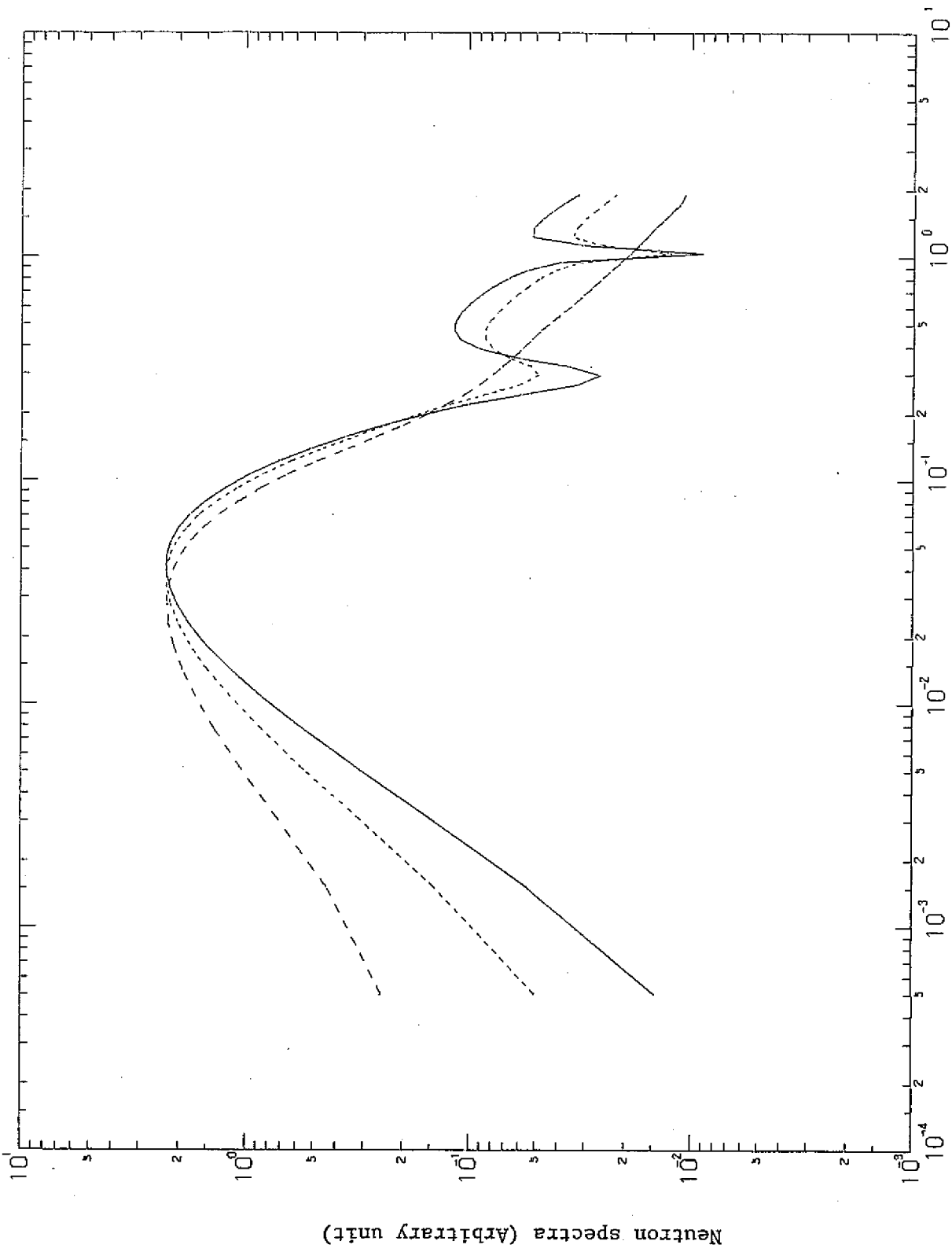


Fig. 6 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (8S PU, 100%, F-1, F-3, D20)

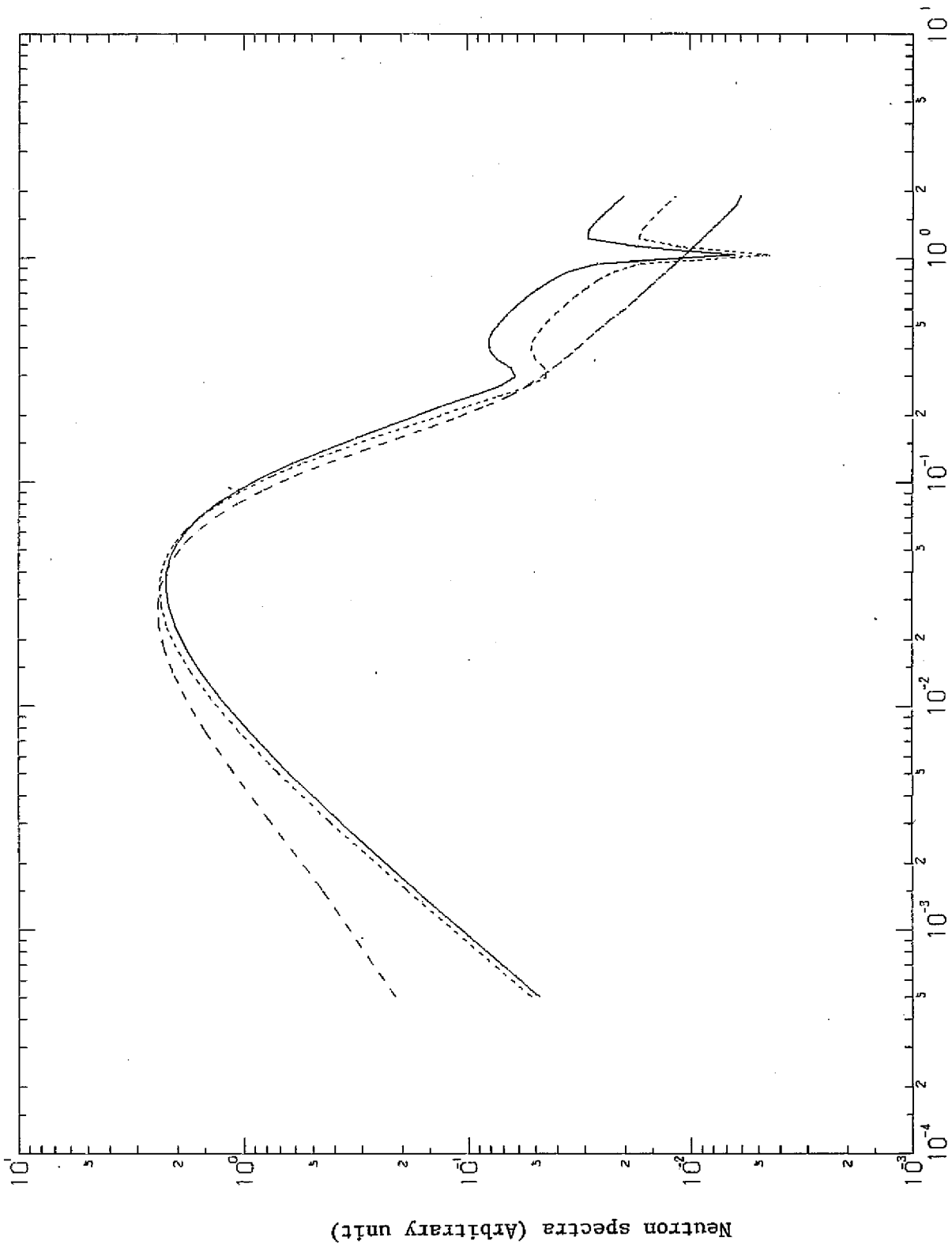


Fig. 7 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (8R PU, 0%, F-1, F-3, D20)

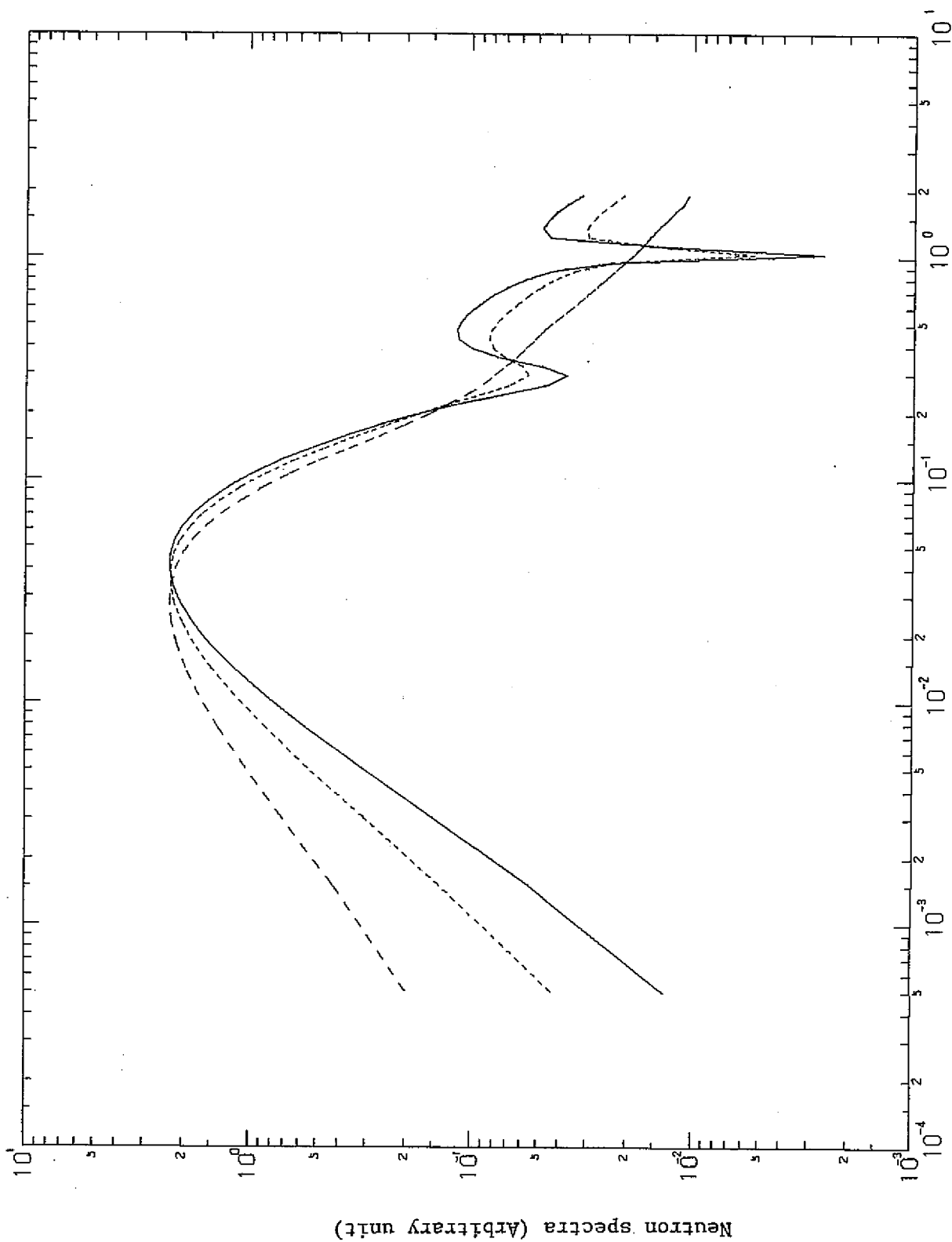


Fig. 8 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (8R PU, 100%, F-1, F-3, D20)

Fig.9 ~ Fig.16

燃料中第1リング (F-1, 実線), 冷却材中最内層 (C-1, 短い破線), 冷却材中最外層 (C-5, 長い破線) の各燃料体系の熱中性子スペクトルの図

Fig. 9	0.54 w/o PuO ₂ -UO ₂ 燃料	0% ボイド
Fig.10	同 上	30 "
Fig.11	同 上	70 "
Fig.12	同 上	100 "
Fig.13	0.87 w/o (S) PuO ₂ -UO ₂ 燃料	0 "
Fig.14	同 上	100 "
Fig.15	0.87 w/o (R) PuO ₂ -UO ₂ 燃料	0 "
Fig.16	同 上	100 "

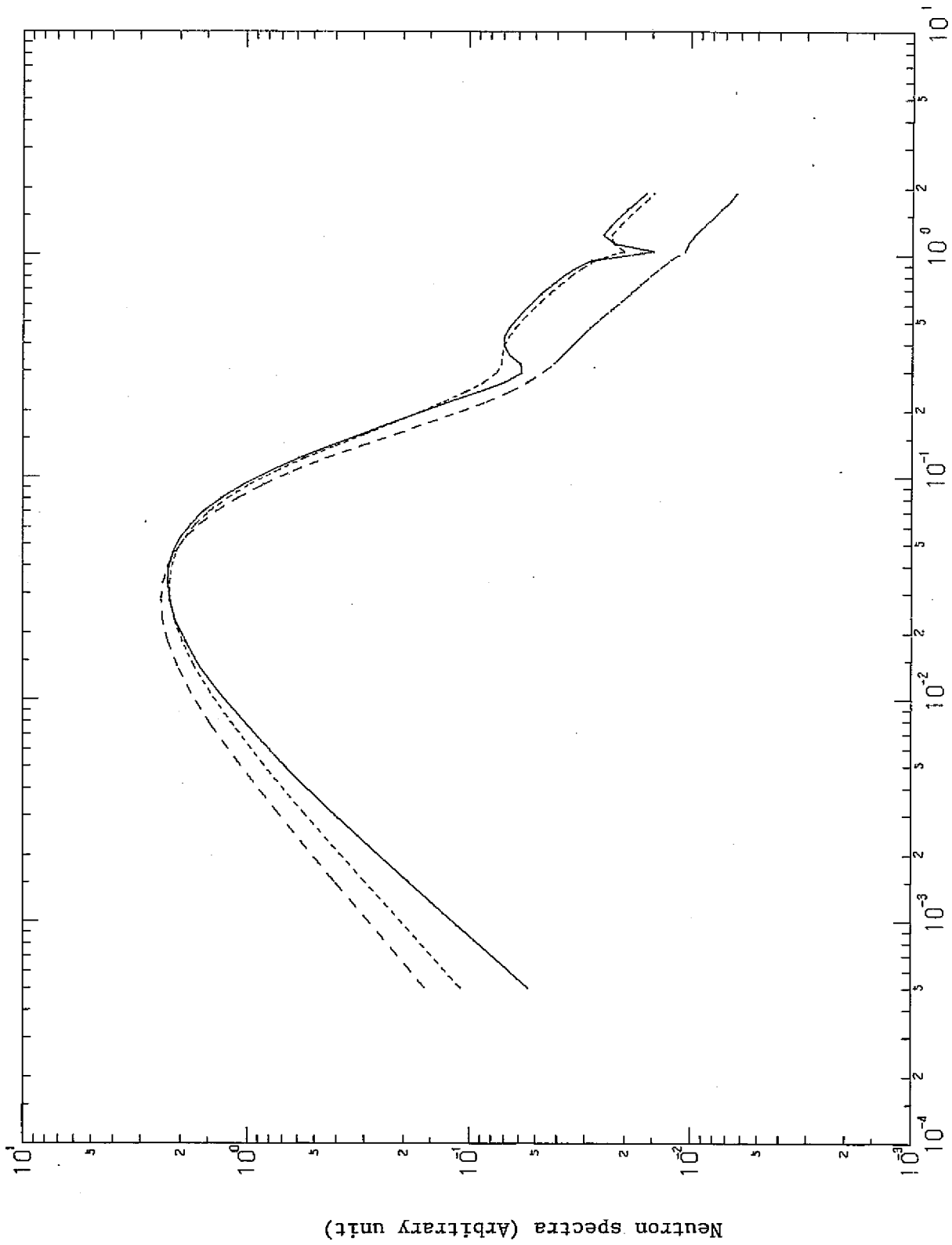


Fig. 9 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S PU, 0%, F-1,C-1,C-5)

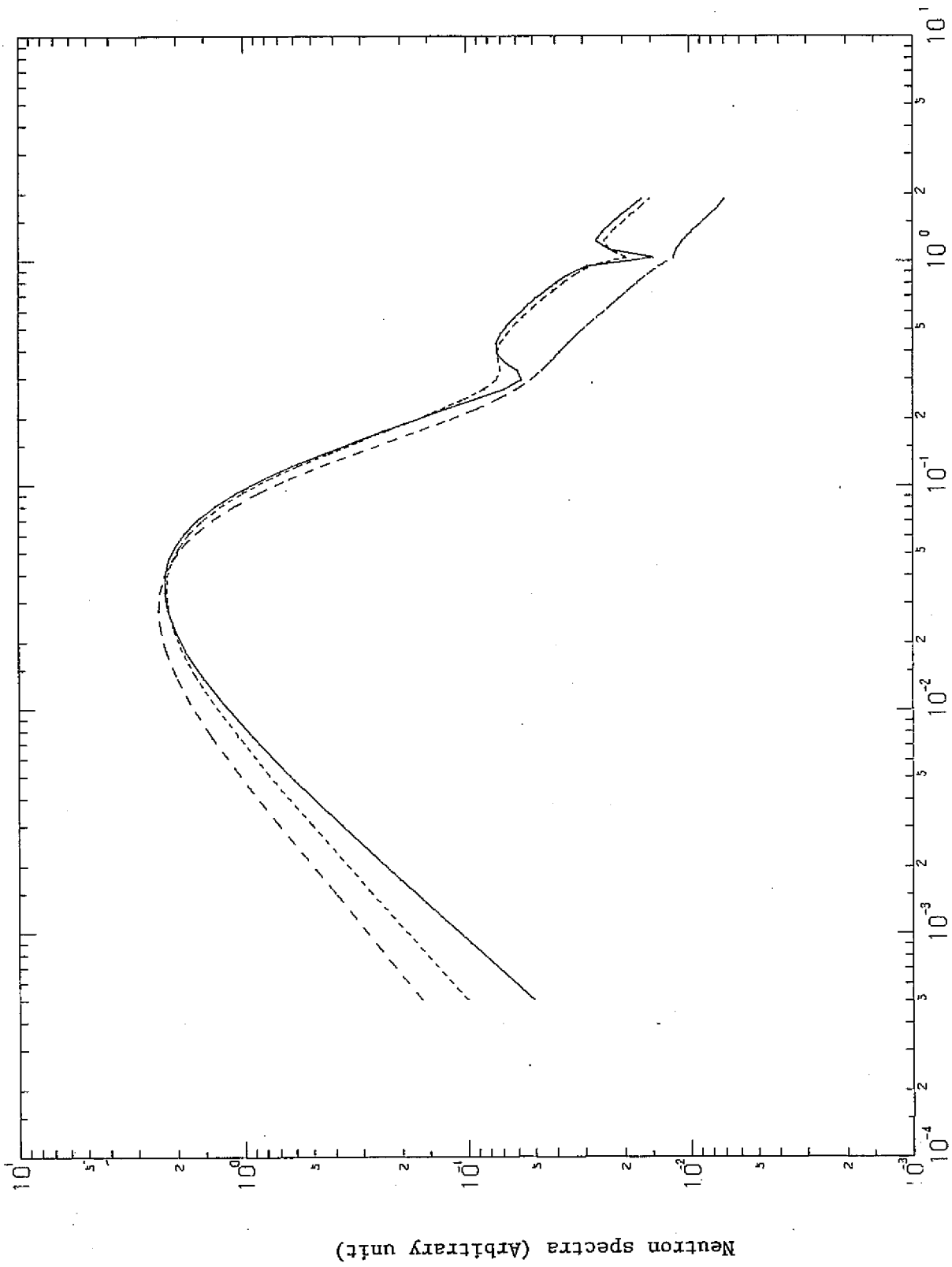


Fig. 10 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S PU, 30%, F-1, C-1, C-5)

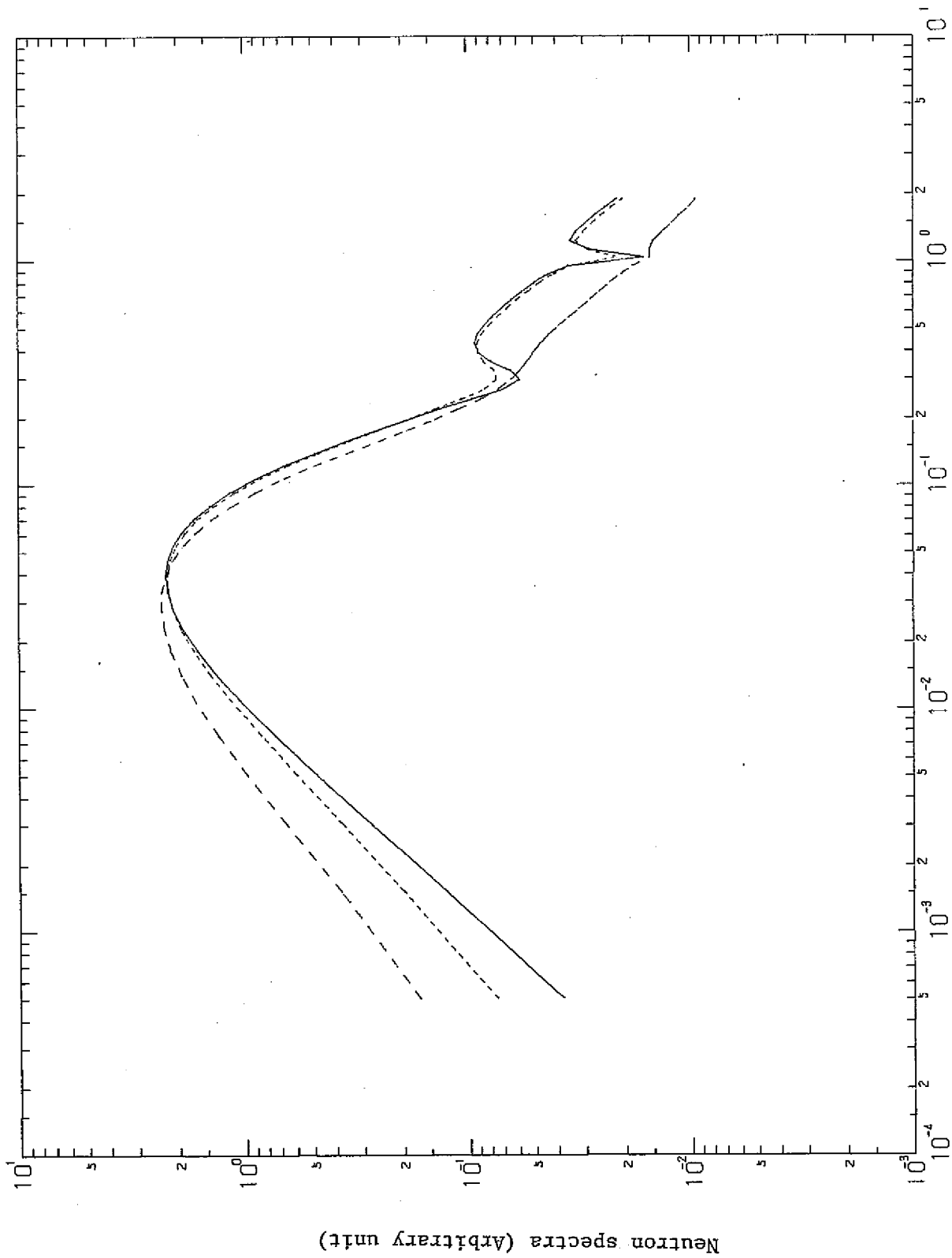


Fig. 11 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S PU, 70%, F-1, C-1, C-5)

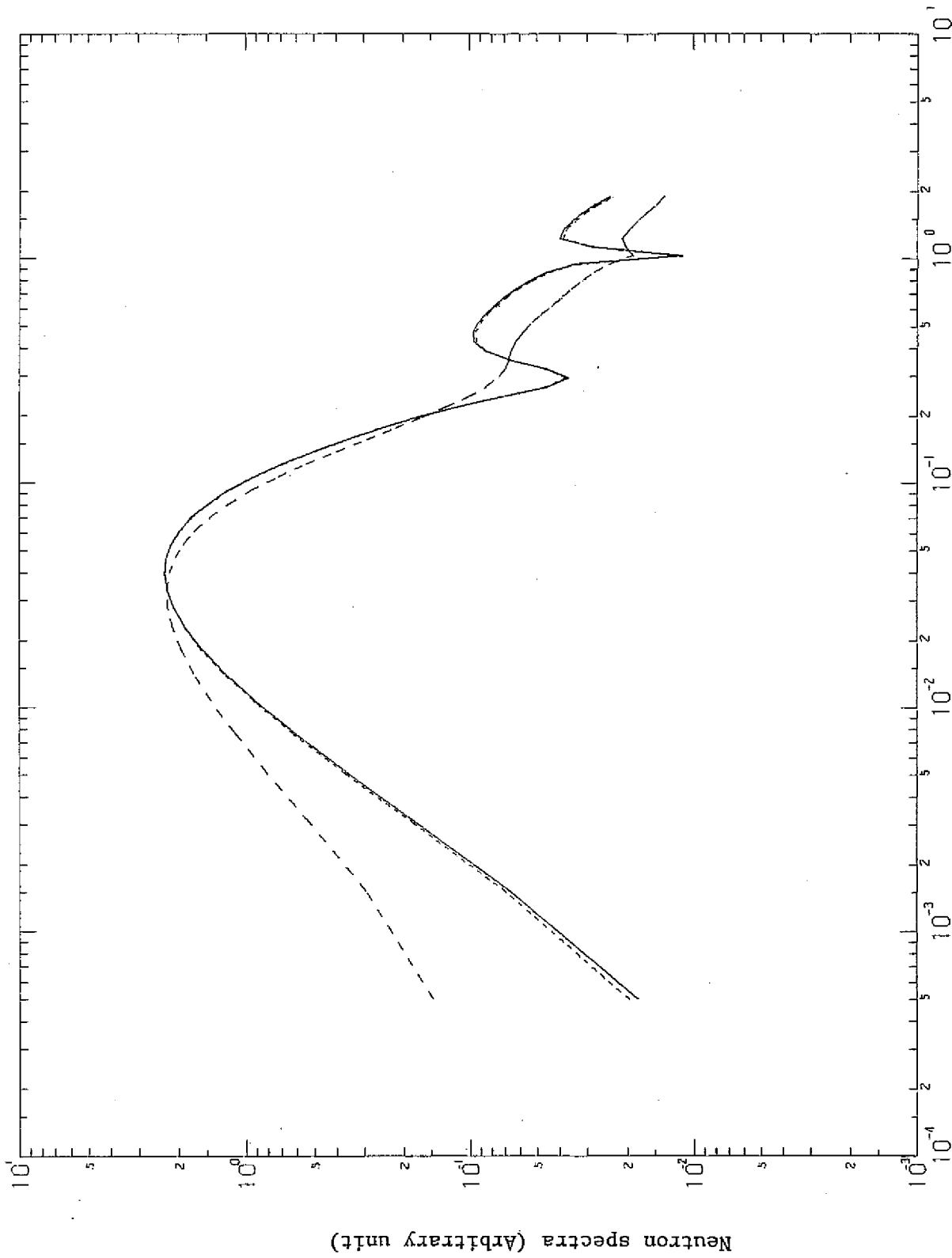


Fig. 12 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S PU, 100%, F-1, C-1, C-5)

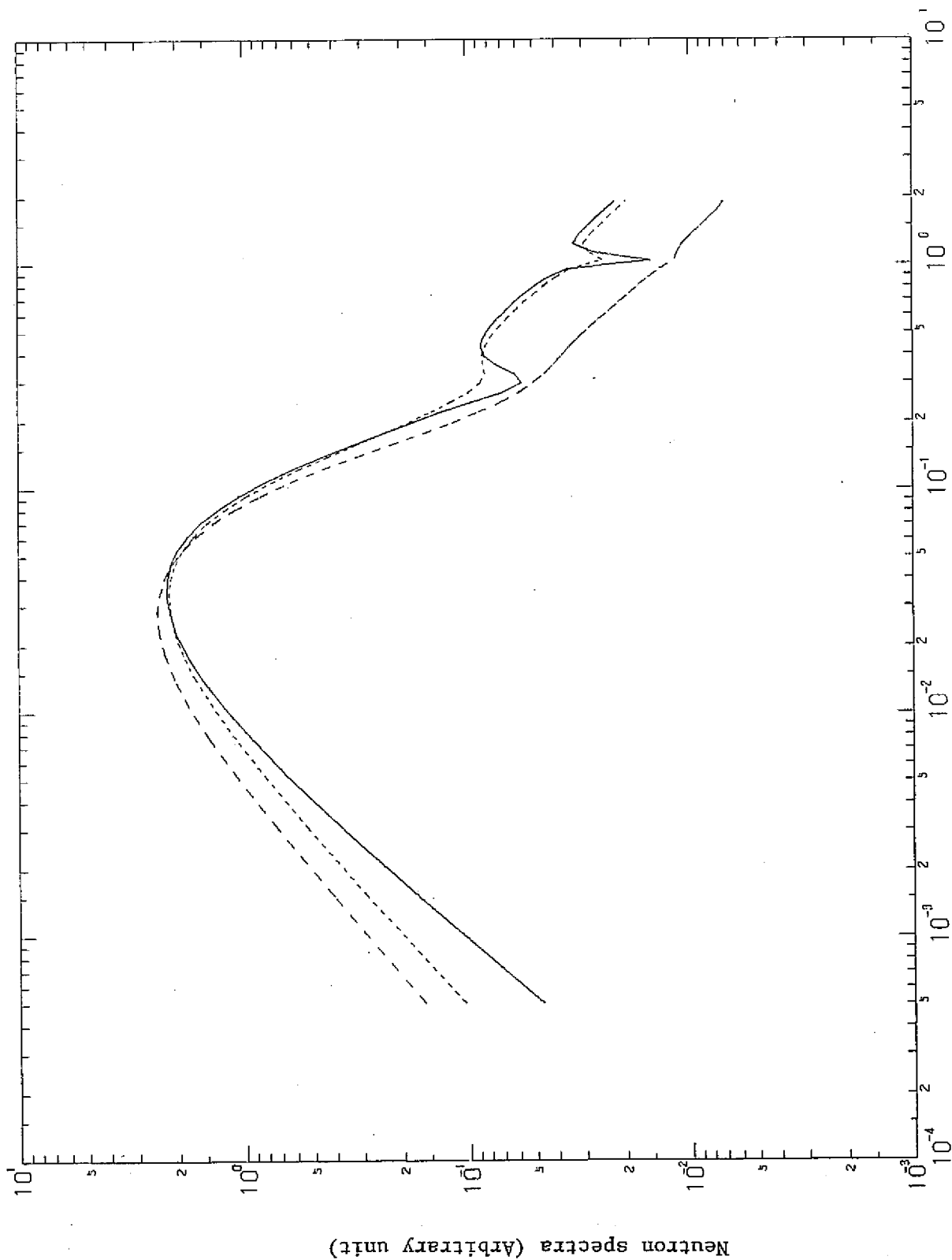


Fig. 13 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (8S PU, 0%, F-1, C-1, C-5)

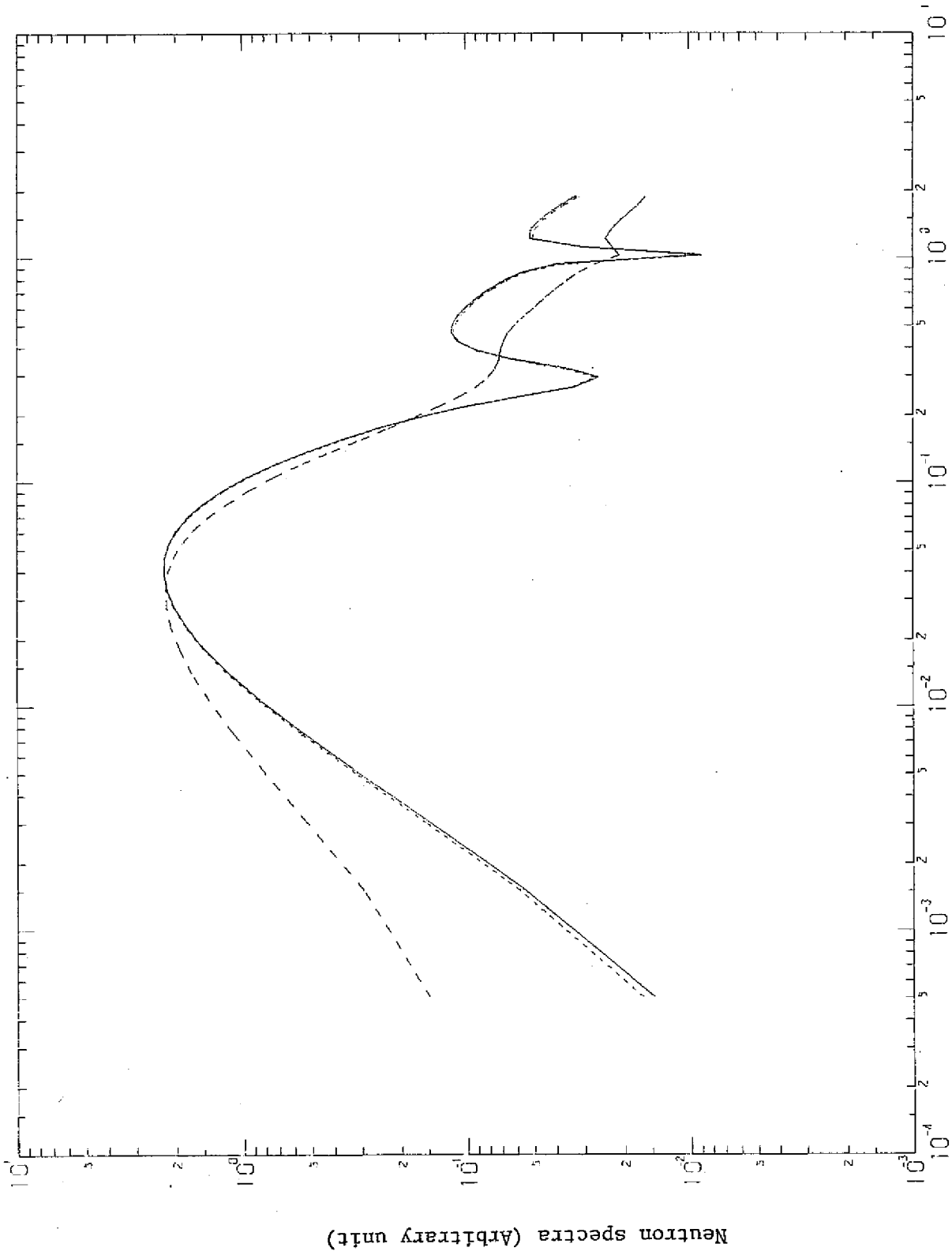


Fig. 14 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (8S PU, 100%, F-1, C-1, C-5)

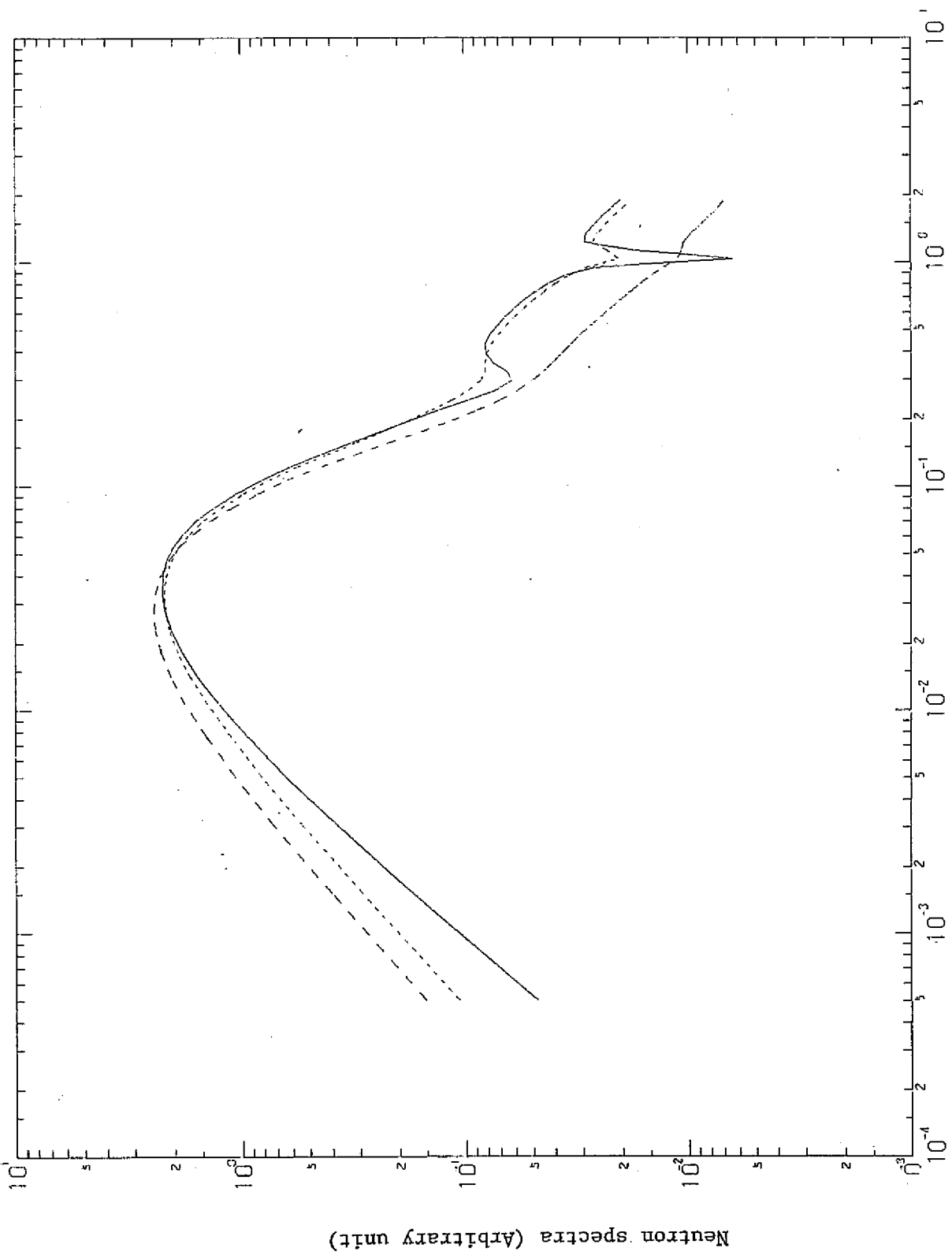


Fig. 15 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (8R PU, 0%, F-1,C-1,C-5)

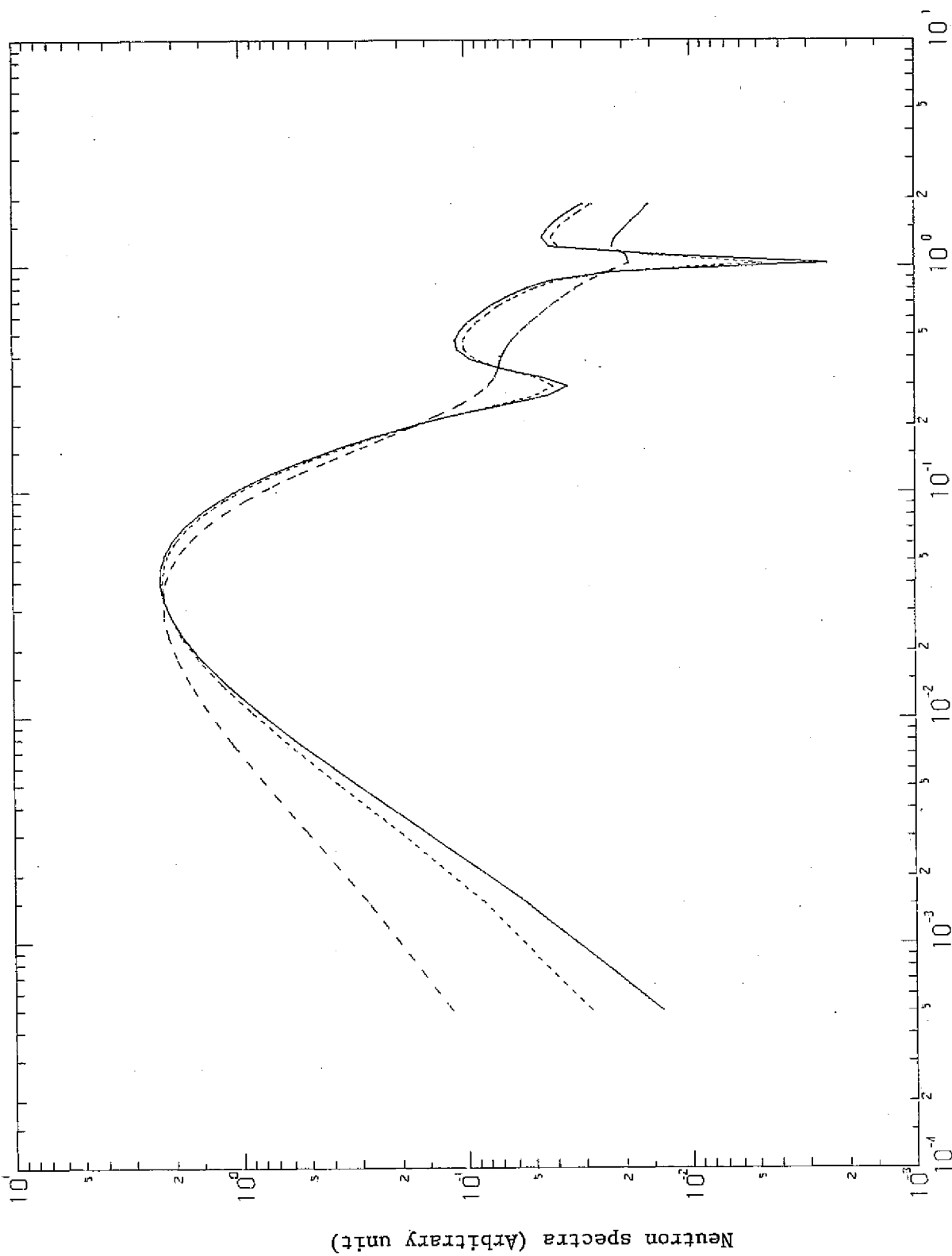


Fig. 16 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (8R PU, 100%, F-1, C-1, C-5)

Fig.17, 18

圧力管 (P.T, 実線), Air gap (短い破線), カランドリア管 (C.T, 長い破線) の熱中性子スペクトルの図

Fig.17	0.54 w/o PuO ₂ -UO ₂ 燃料	0% ボイド
Fig.18	"	100% "

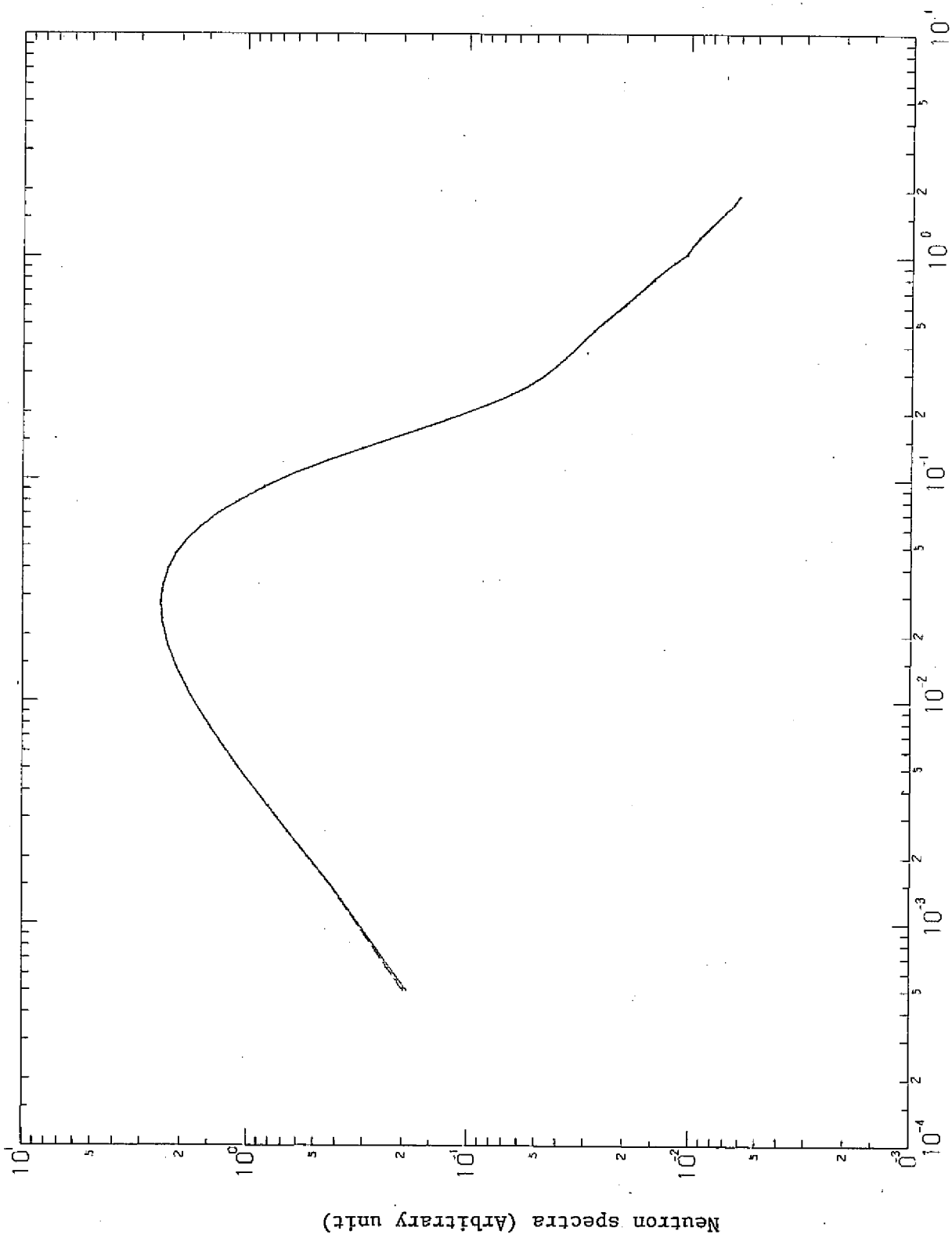


Fig. 17 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S PU, 0%, P.T., AIR GAP, C.T.)

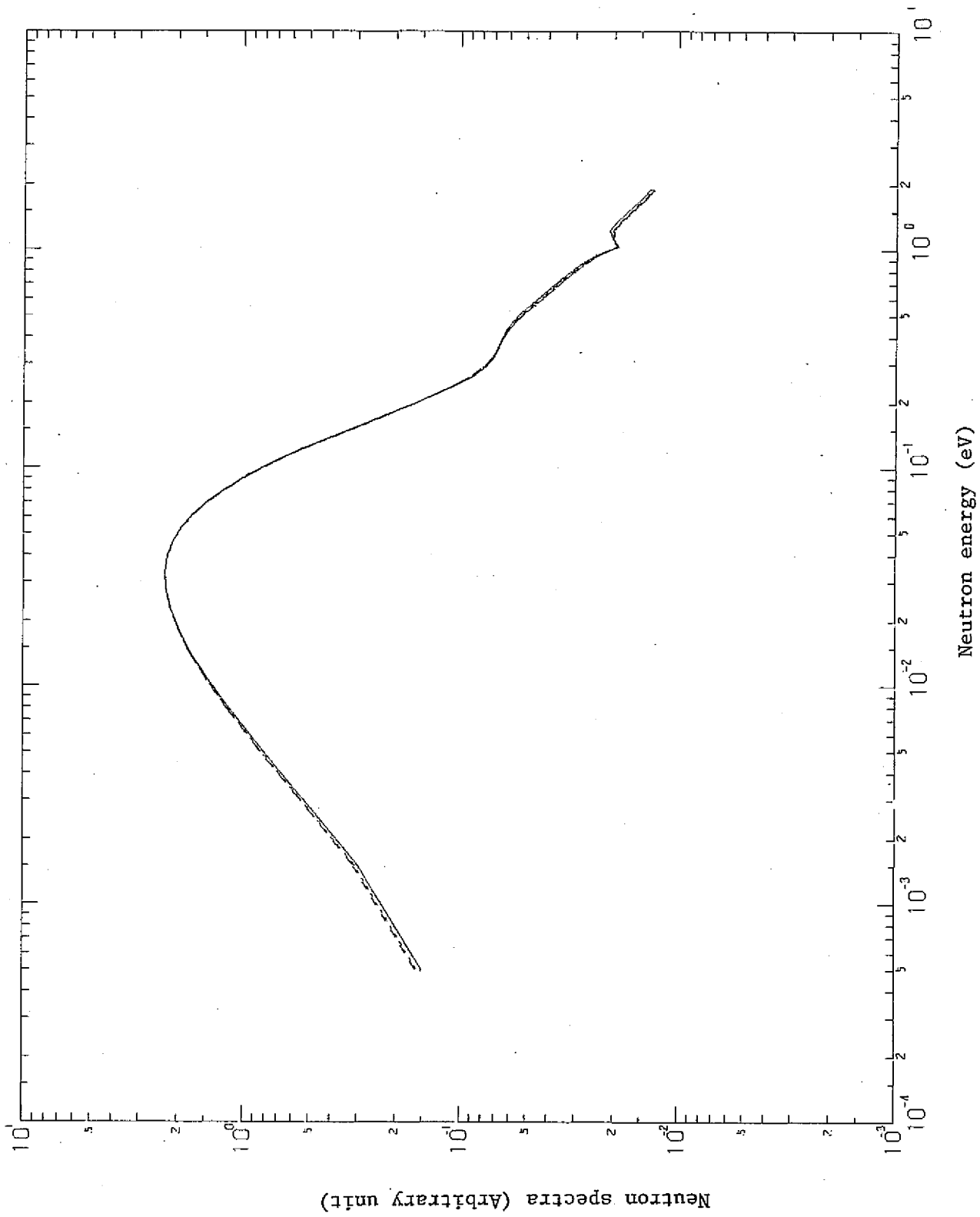


Fig. 18 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (55 PU, 100%, P.T, AIR GAP, C.T)

Fig.19 ~ Fig.27

同一燃料においてボイド率が変化することによるスペクトルの変化の図

- Fig.19 0.54 w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料 (燃料第1リング, F-1)
- (0%ボイド…実線 30%ボイド…短い破線)
- (70%ボイド…長い破線 100%ボイド…一点鎖線)
- Fig.20 同 上 (燃料第3リング, F-3)
- Fig.21 同 上 (重水中, D-6)
- Fig.22 0.87 w/o (S) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料 (燃料第1リング, F-1)
- (0%ボイド…実線, 100%ボイド…短い破線)
- Fig.23 同 上 (燃料第3リング, F-3)
- Fig.24 同 上 (重水中, D-6)
- Fig.25 0.87 w/o (R) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料 (燃料第1リング, F-1)
- Fig.26 同 上 (燃料第3リング, F-3)
- Fig.27 同 上 (重水中, D-6)

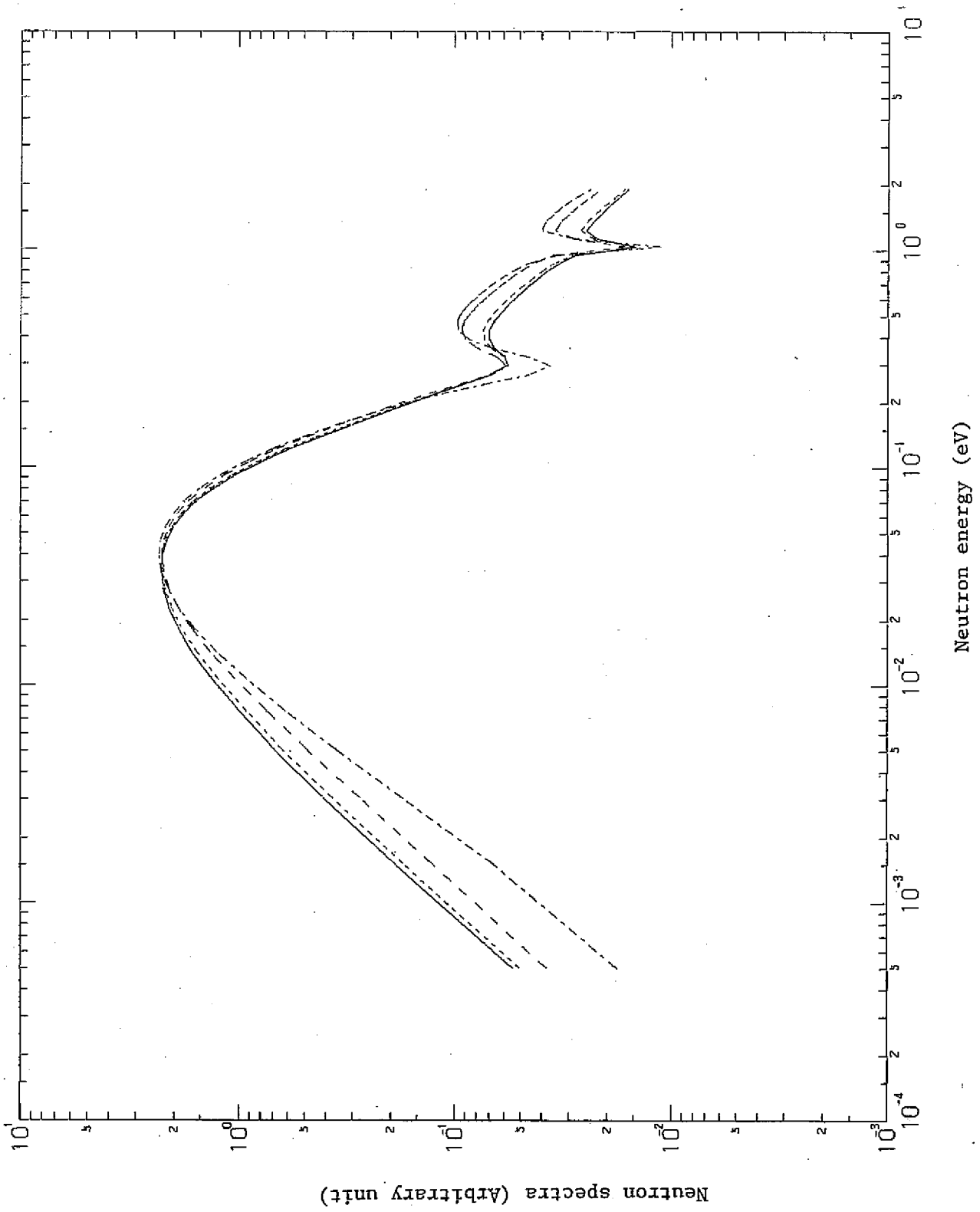


Fig. 19 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S PU, 0.30, 0.70 AND 1.00 μ s, F-1)

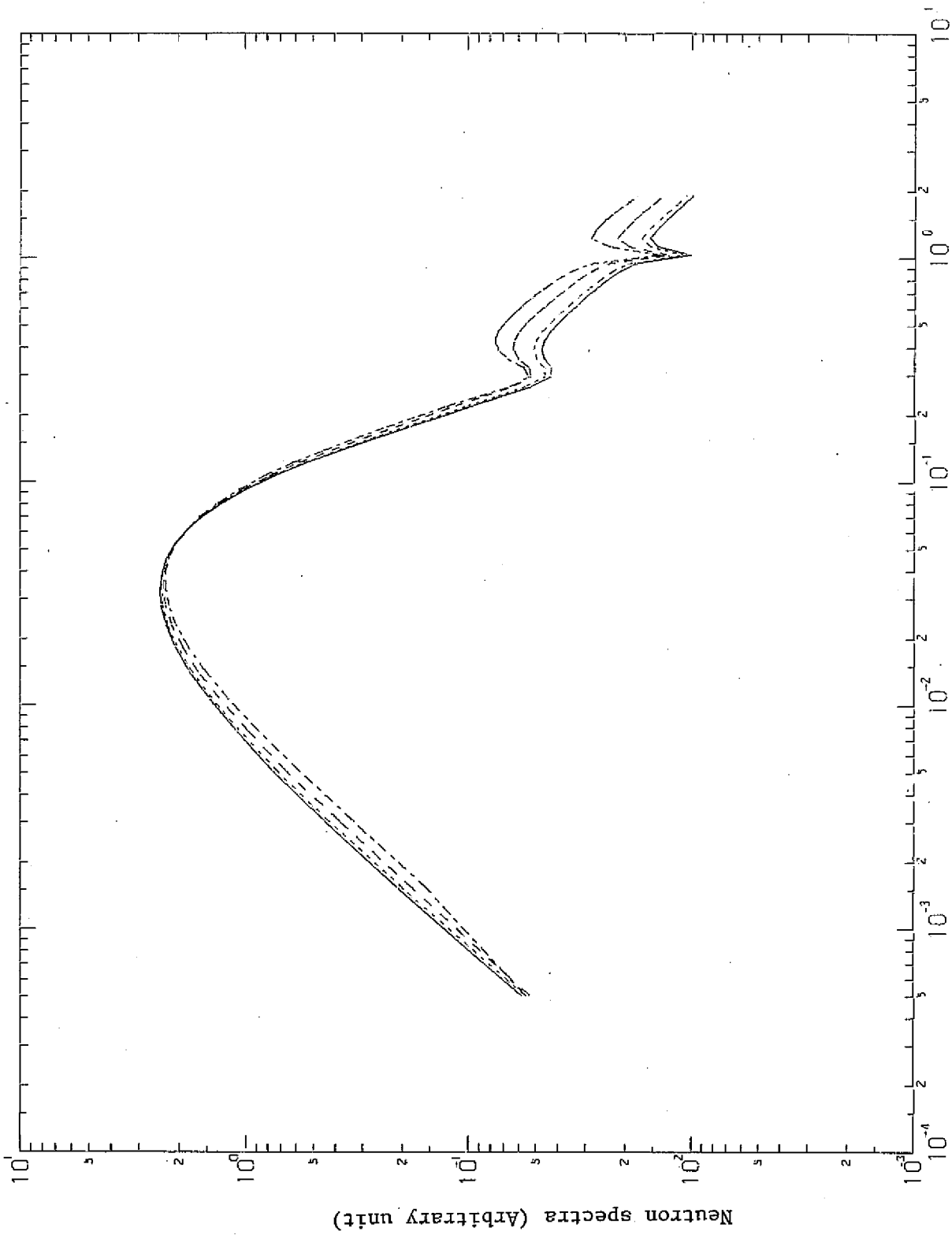


Fig. 20 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S PU, 0.30, 70 AND 100%, F-3)

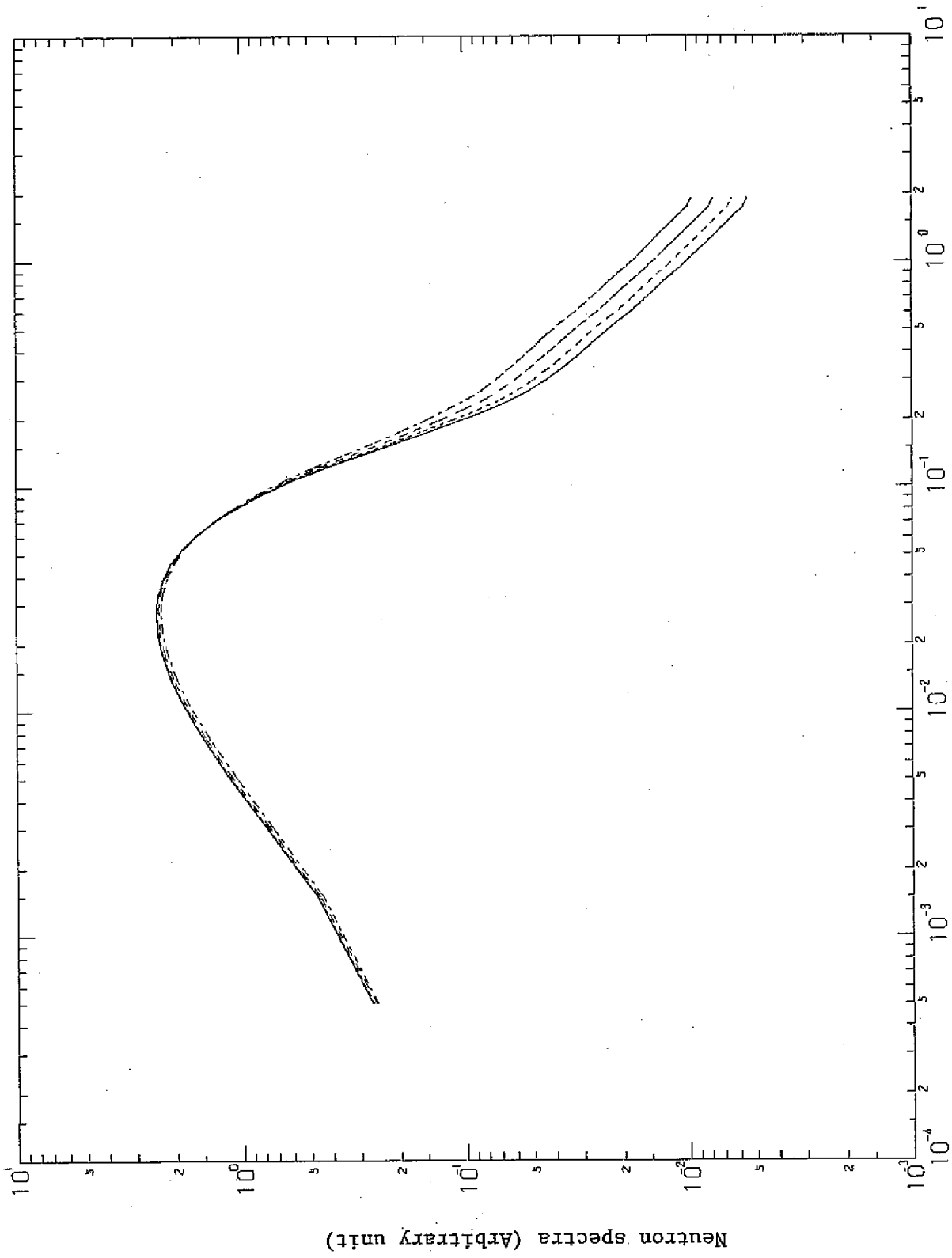


Fig. 21 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S PU, 0.30, 70 AND 100%, D20)

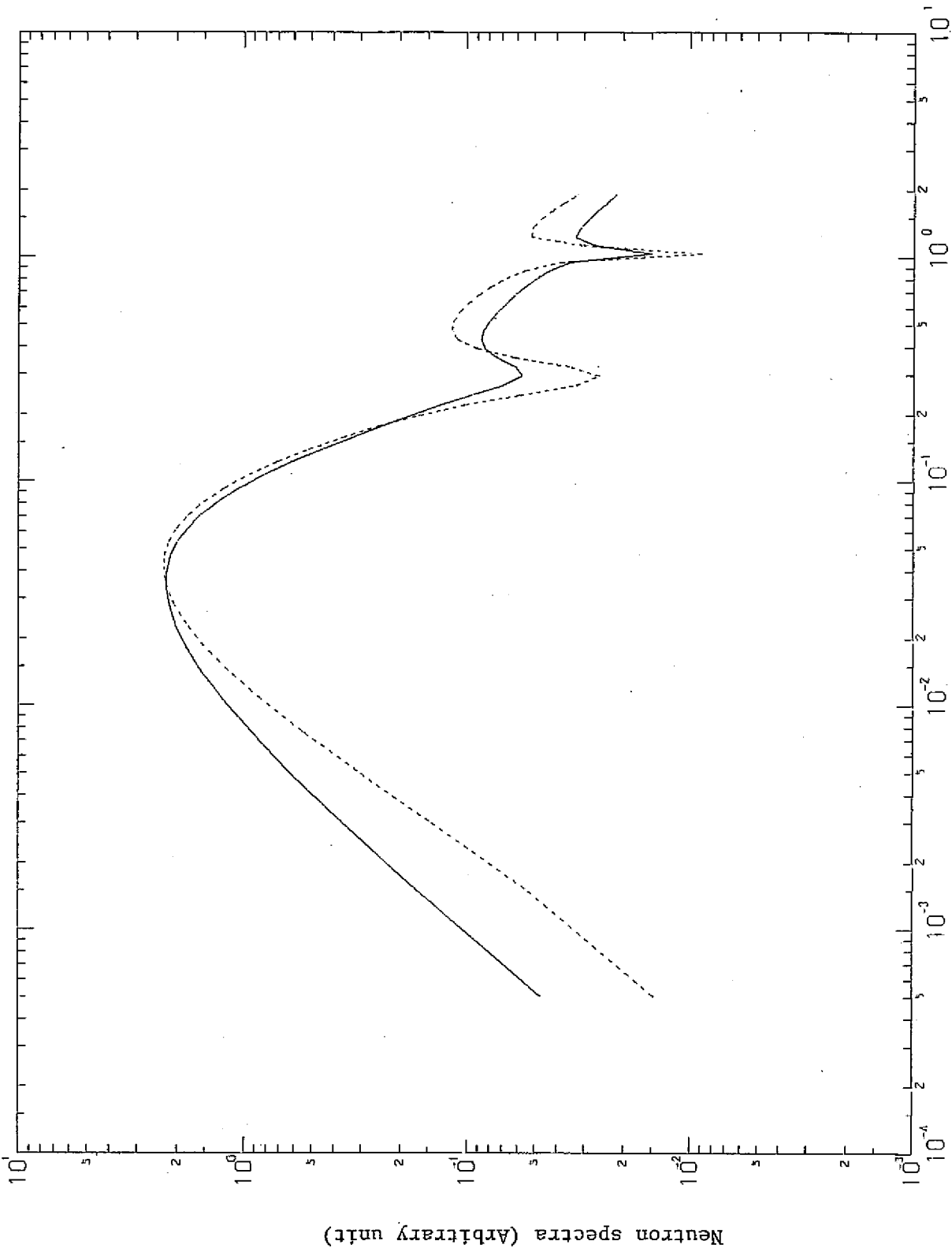


Fig. 22 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (85 PU,0 AND 100%, F-1)

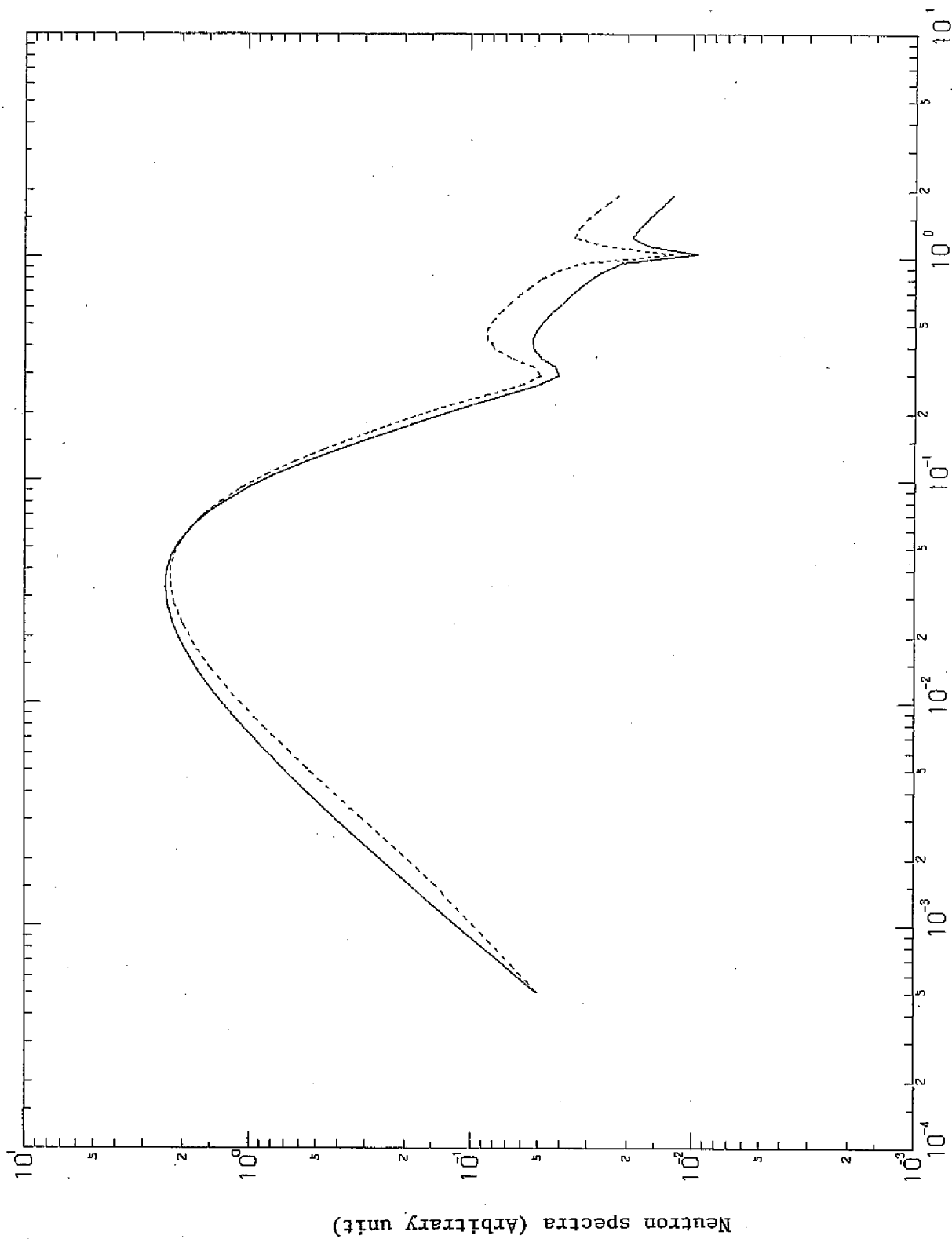


Fig. 23 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (85 PU,0 AND 100%, F-3)

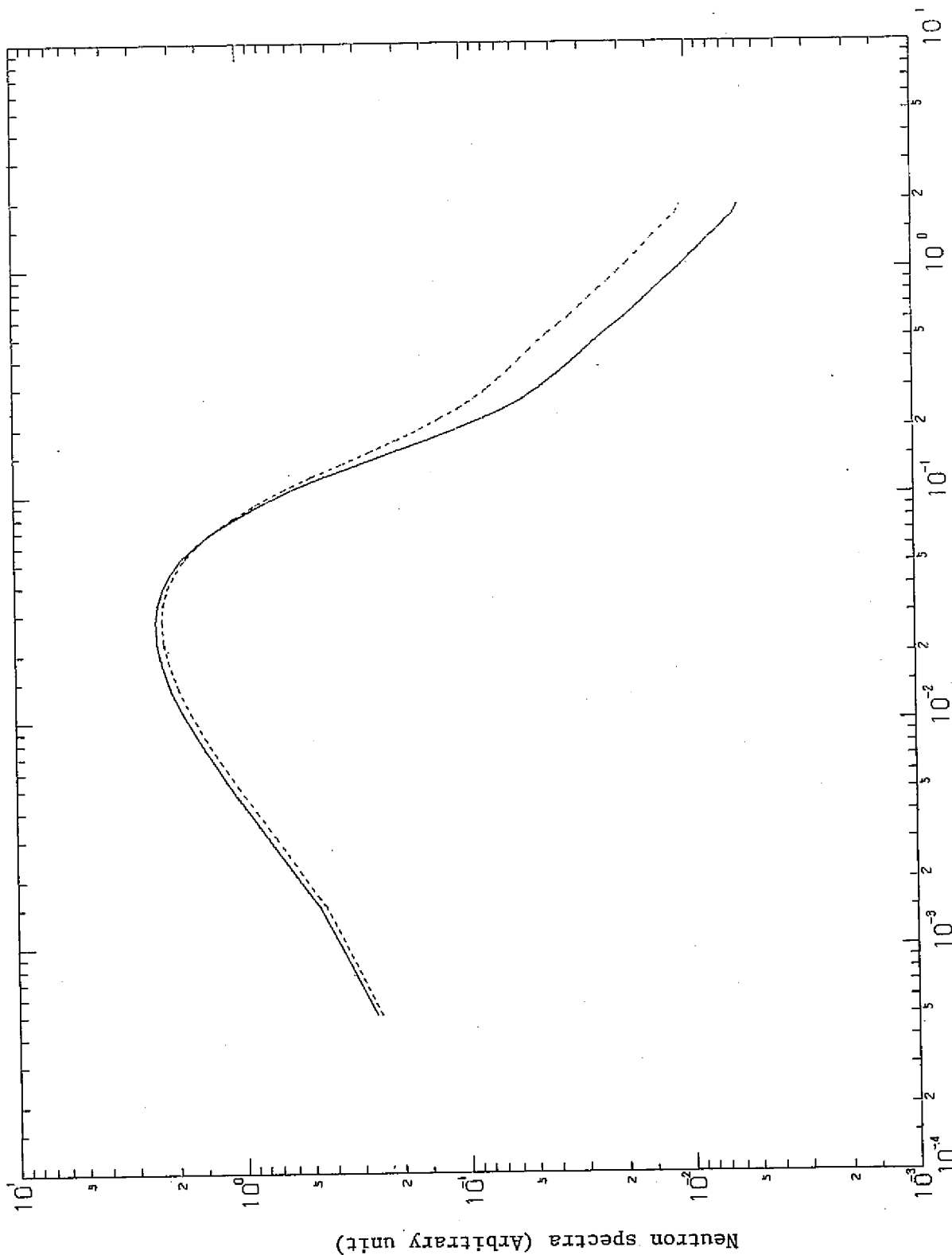


fig. 24 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (85 PU.0 AND 100%, D20)

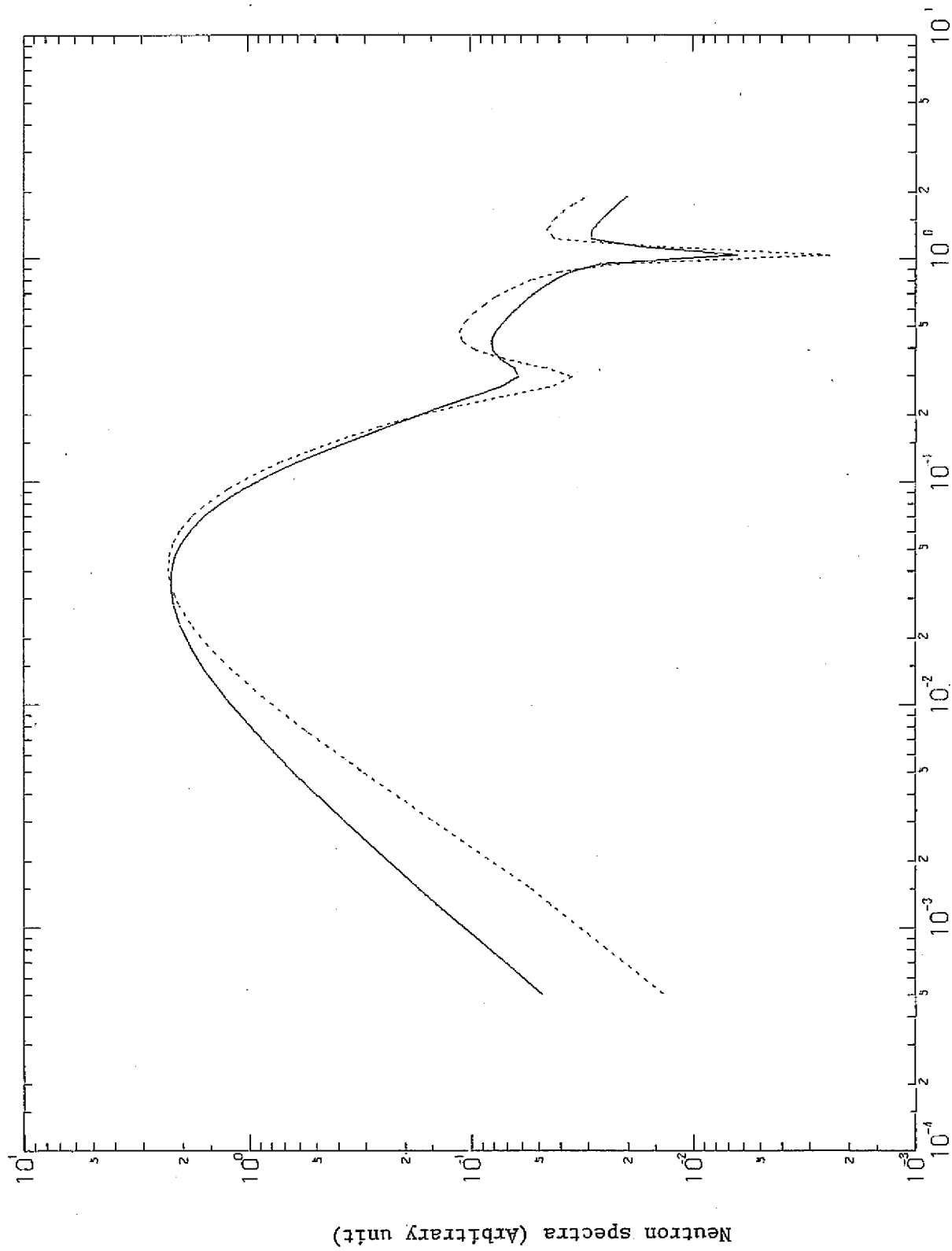


Fig. 25 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (8R PU,0 AND 100%, F-1)

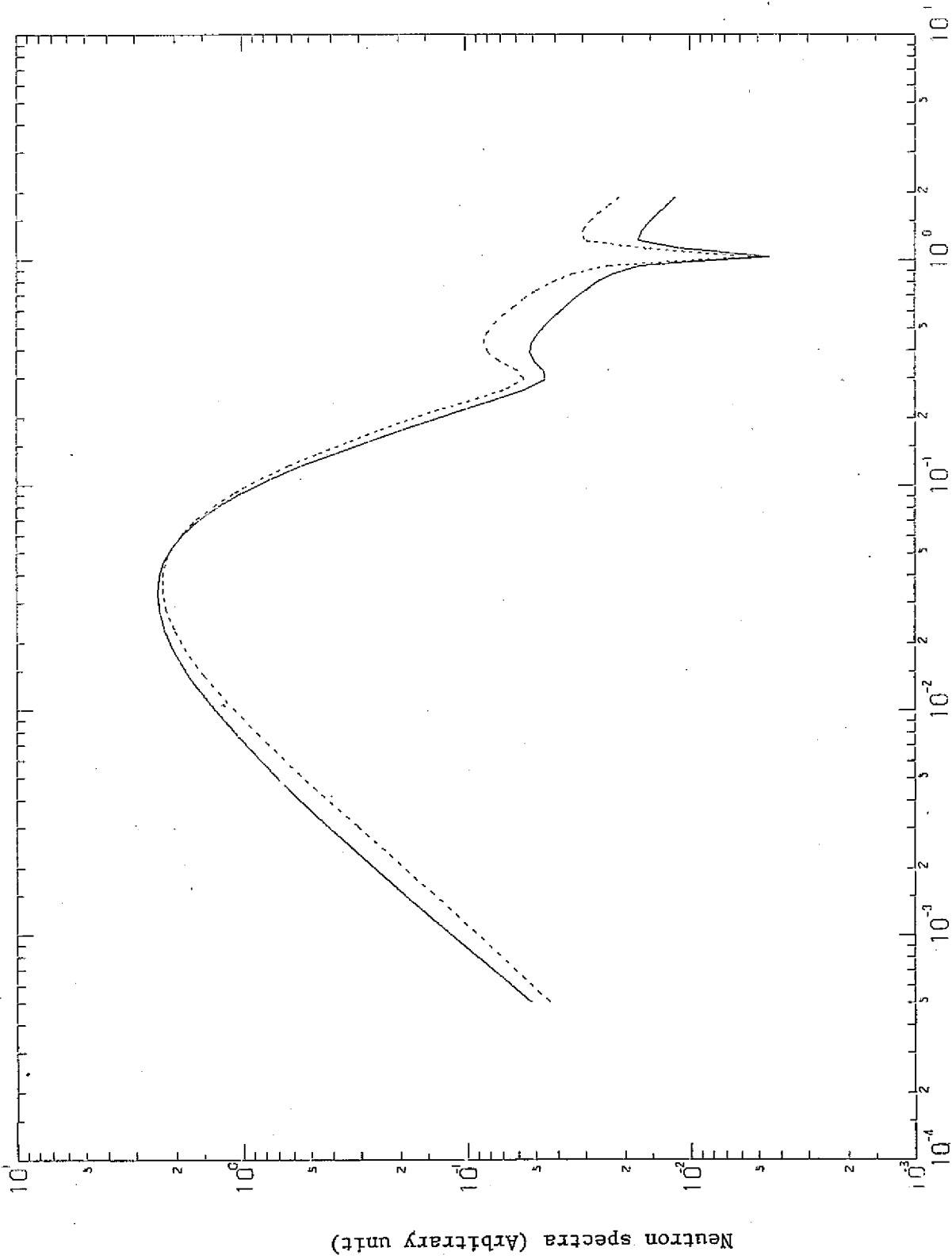


Fig. 26 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (8R PU,0 AND 100%, F-3)

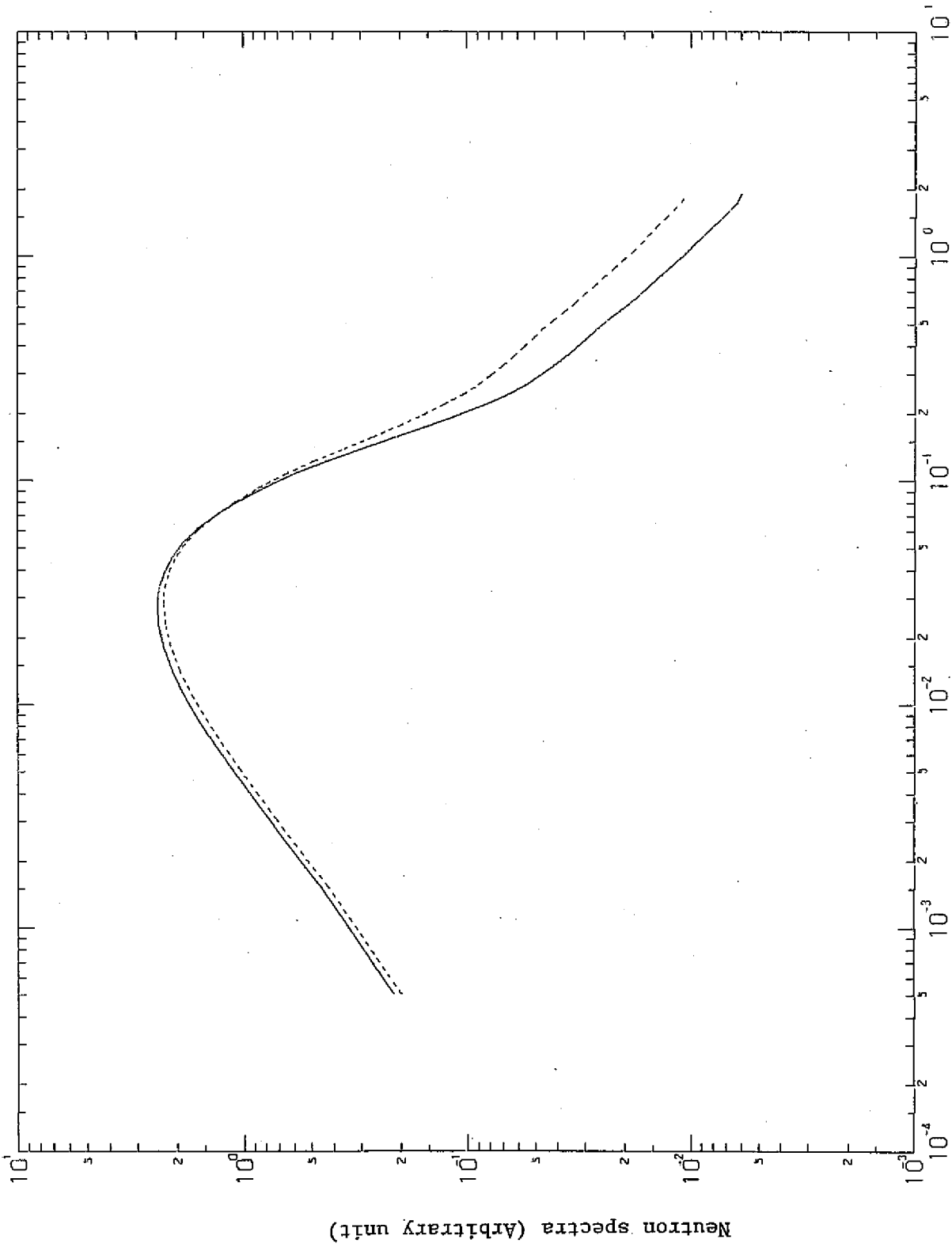


Fig. 27 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (8R PU,0 AND 100%, D20)

Fig.28 ~ Fig.33

同一ボイド率，同一領域における燃料富化度，組成の相違が熱中性子スペクトルに与える変化の図。0.54 w/o $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料は実線，0.87 w/o (S) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料は短い破線，0.87 w/o (R) $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料は長い破線で示す。

- | | | |
|--------|-------------|----------------|
| Fig.28 | 各燃料の0%ボイド | (燃料第1リング, F-1) |
| Fig.29 | 同上 | (燃料第3リング, F-3) |
| Fig.30 | 同上 | (重水中, D-6) |
| Fig.31 | 各燃料の100%ボイド | (燃料第1リング, F-1) |
| Fig.32 | 同上 | (燃料第3リング, F-3) |
| Fig.33 | 同上 | (重水中, D-6) |

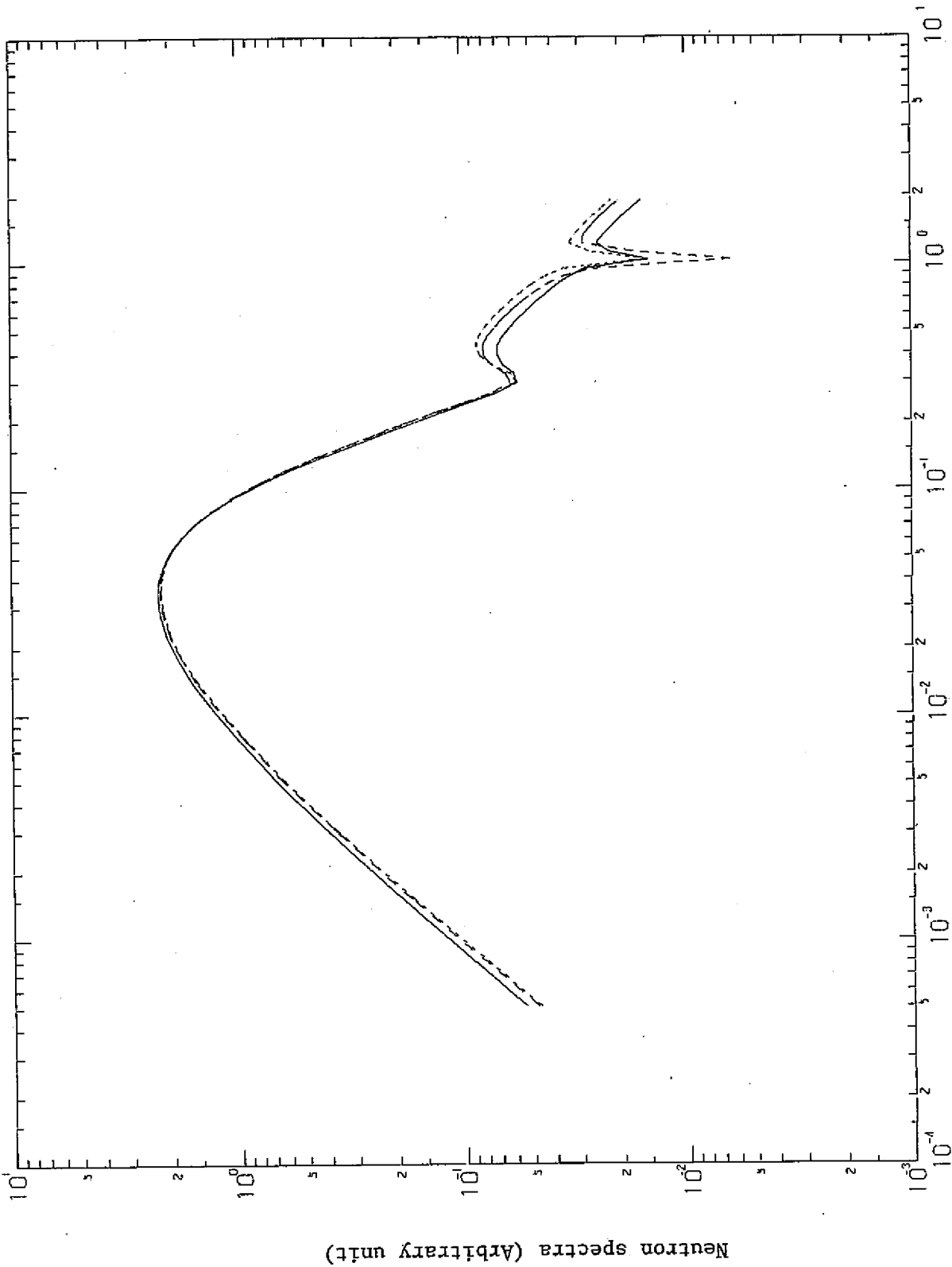


Fig. 28 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S,8S AND 8R PU, 0%, F-1)

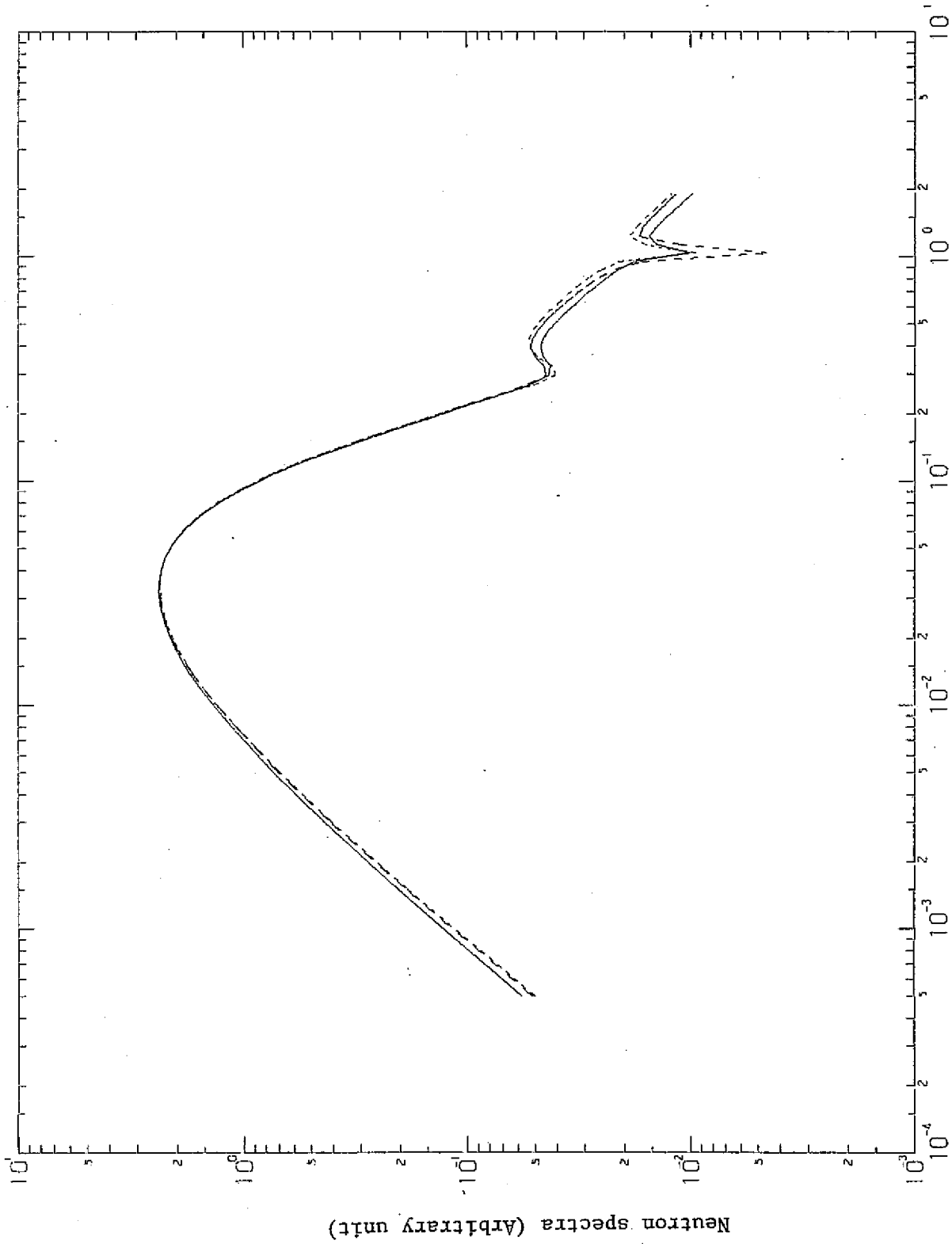


Fig. 29 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S,8S AND 8R PU, 0%, F-3)

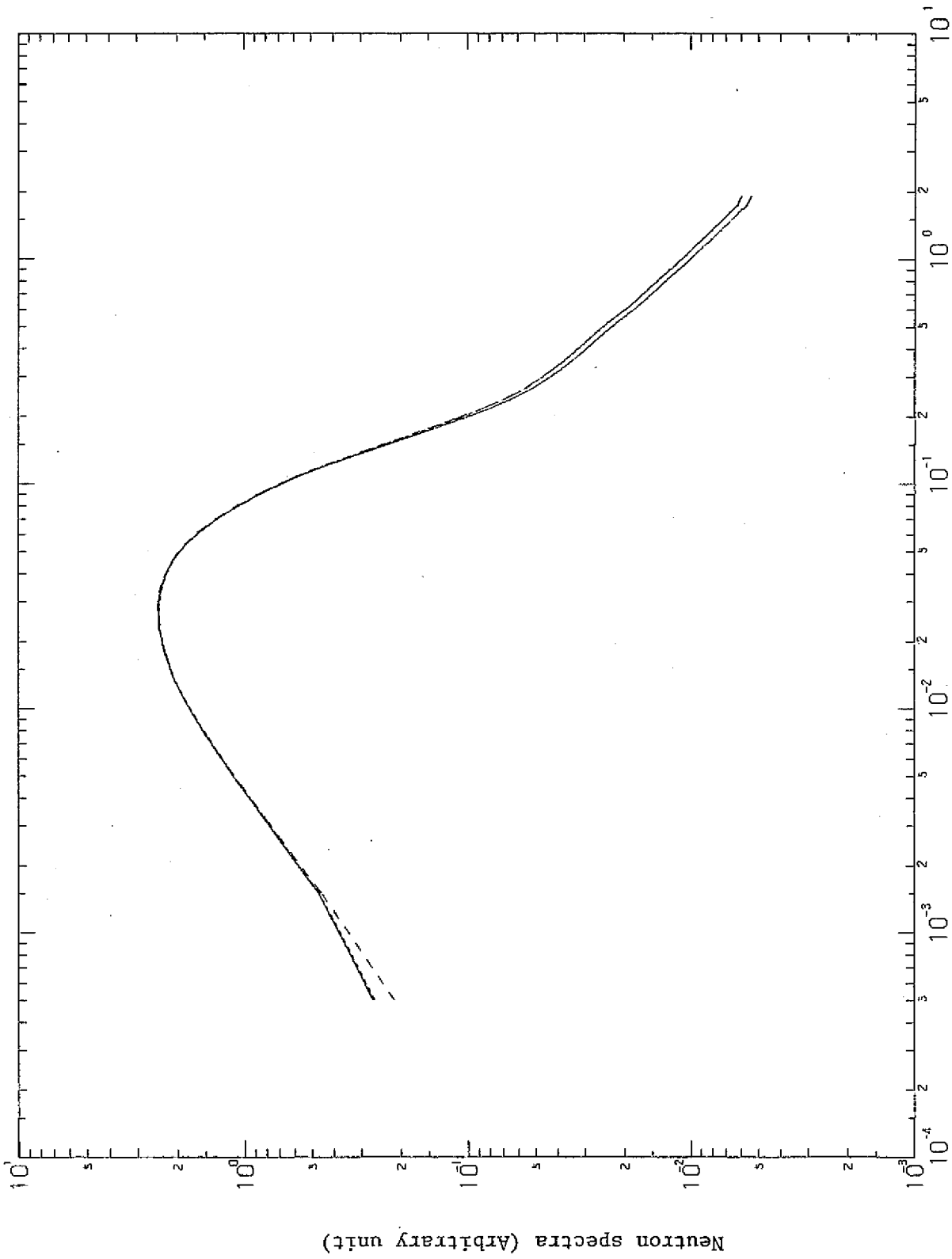


Fig. 30 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S,8S AND 8R PU, 0%, D20)

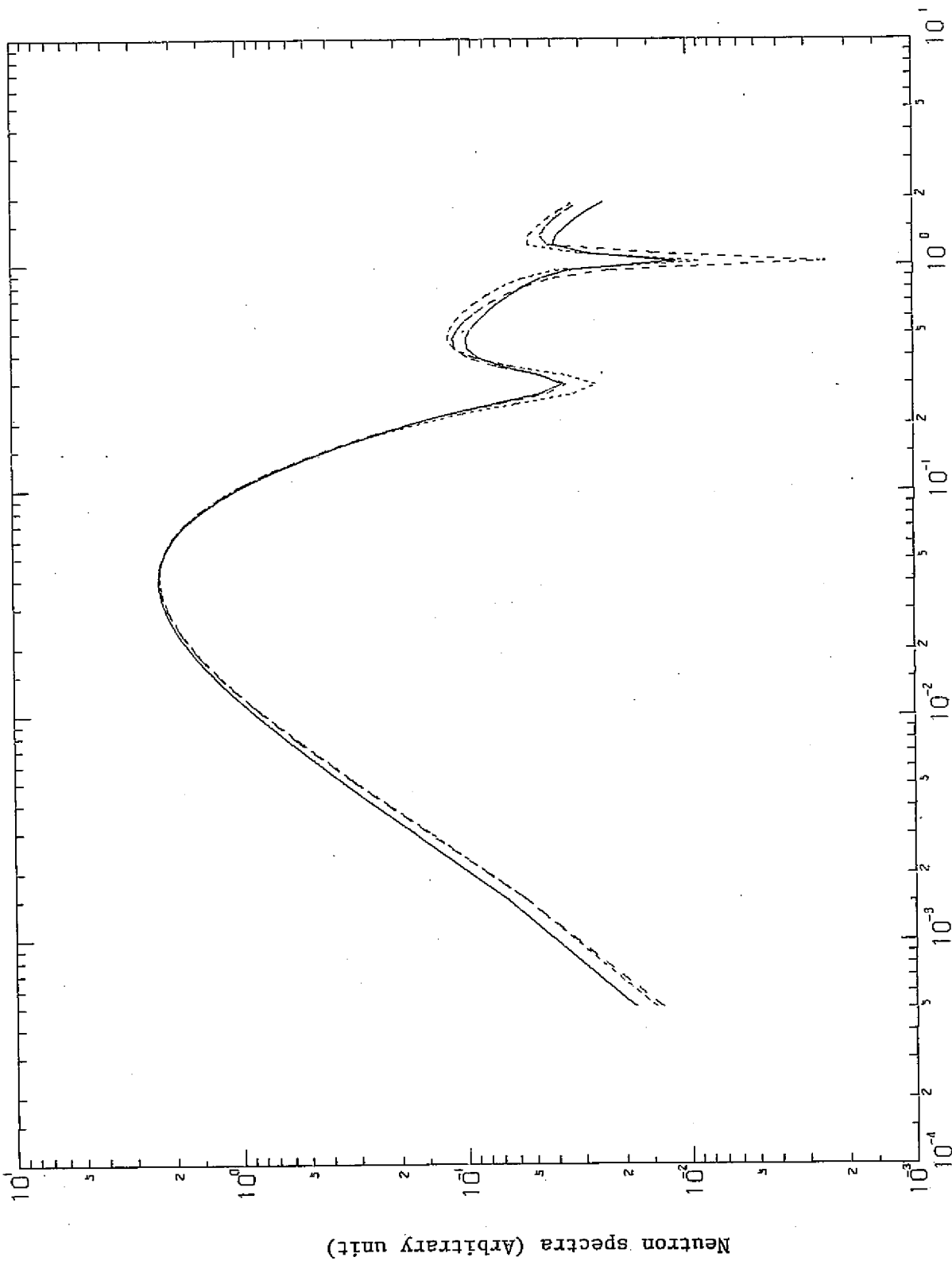


Fig. 31 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S,8S AND 8R PU,100%, F-1)

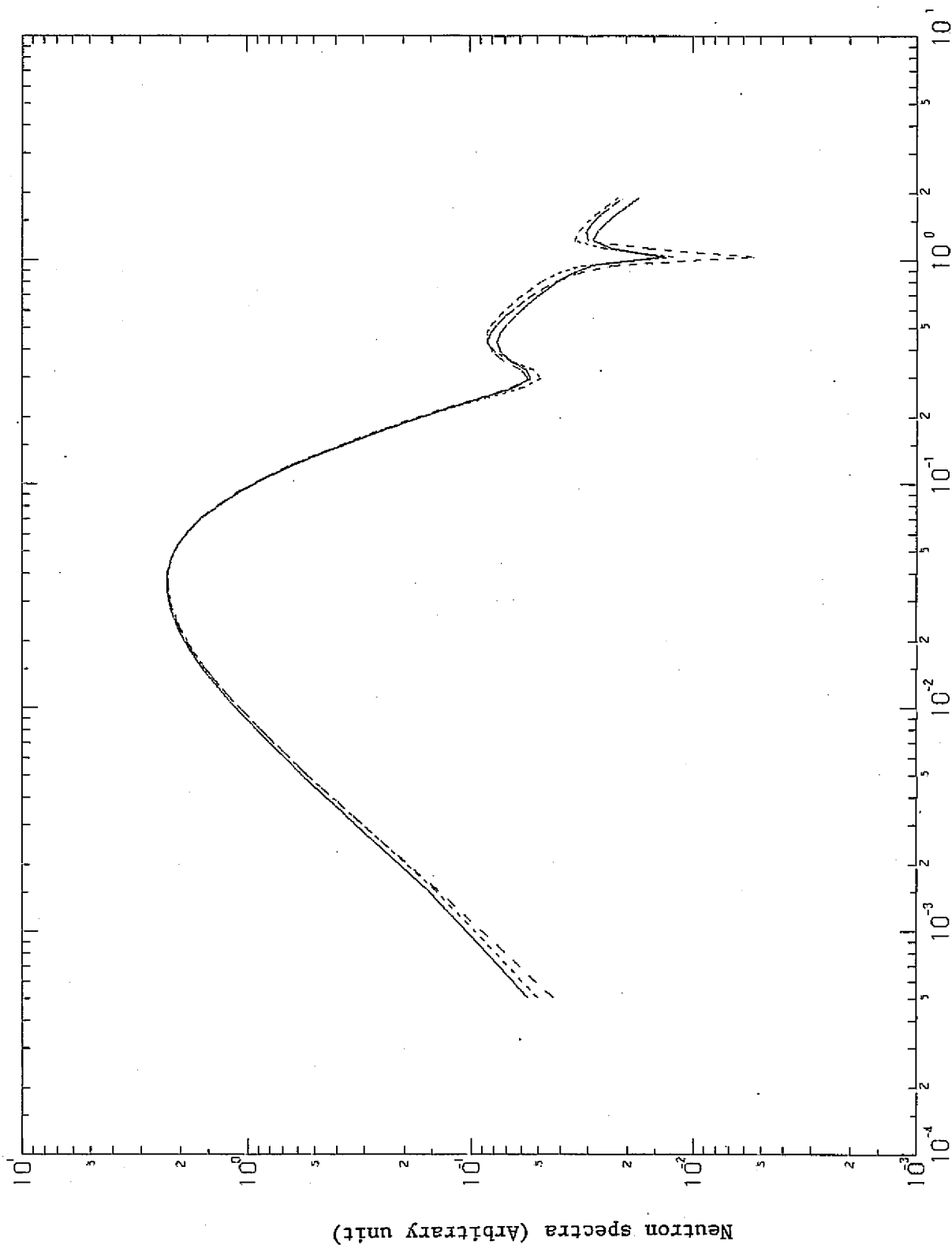


Fig. 32 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (55.8S AND 8R PU, 100%, F-3)

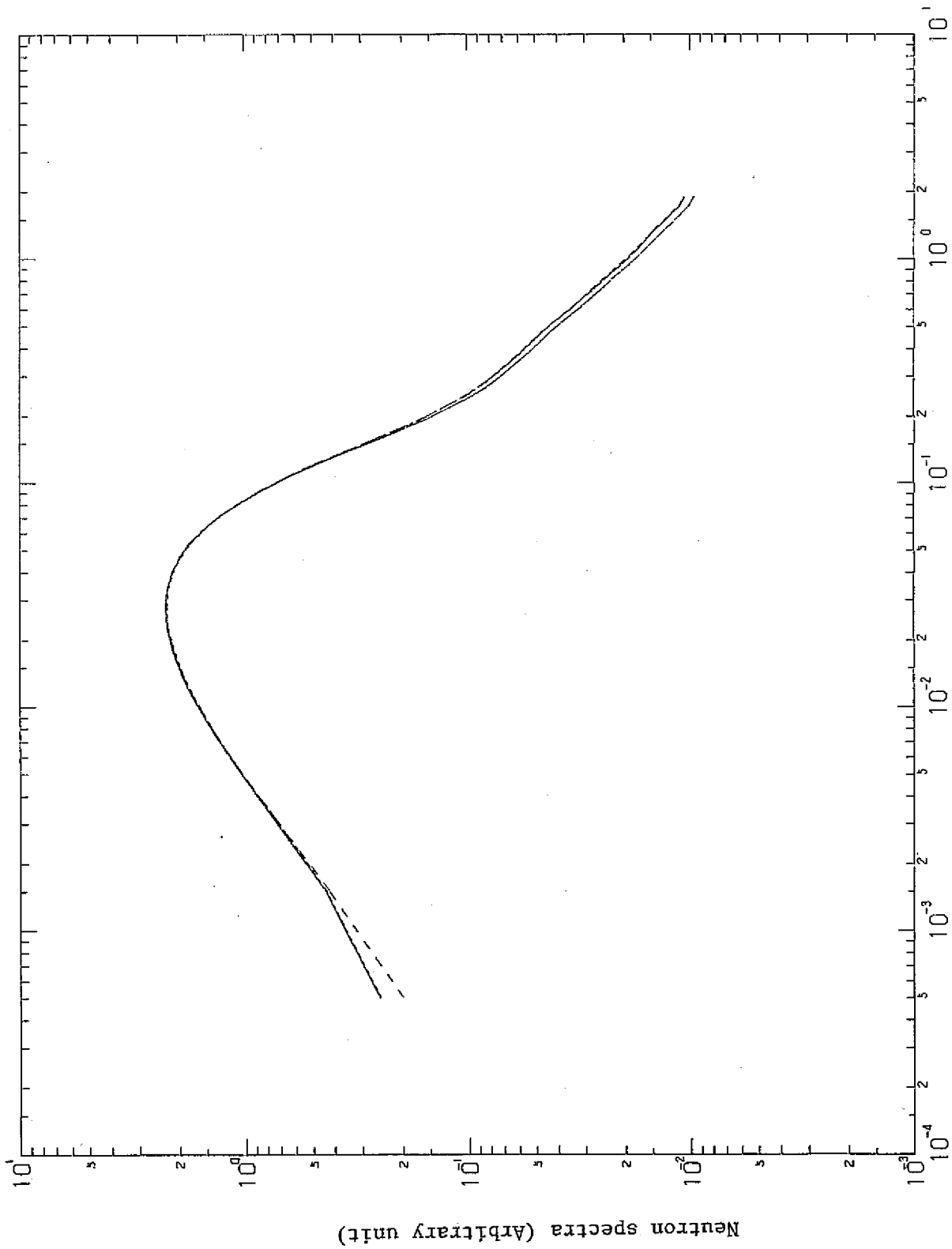


Fig. 33 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S,8S AND 8R PU, 100%, D20)

Fig.34 ~ Fig.41

各燃料体系におけるすべての領域の熱中性子スペクトルを示した図。ここで実線は燃料中 (F-1, 2, 3), 短い破線は被覆管 (S-1, 2, 3), 長い破線は冷却材中 (C-1, 2, 3, 4, 5), 一点鎖線は圧力管, Air gap, カランドリア管, 重水中 (D-1, 2, 3, 4, 5, 6)を示す。

Fig.34	0.54 w/o PuO ₂ -UO ₂ 燃料	0% ボイド
Fig.35	同上	30% "
Fig.36	同上	70% "
Fig.37	同上	100% "
Fig.38	0.87 w/o (S) PuO ₂ -UO ₂ 燃料	0% "
Fig.39	同上	100% "
Fig.40	0.87 w/o (R) PuO ₂ -UO ₂ 燃料	0% "
Fig.41	同上	100% "

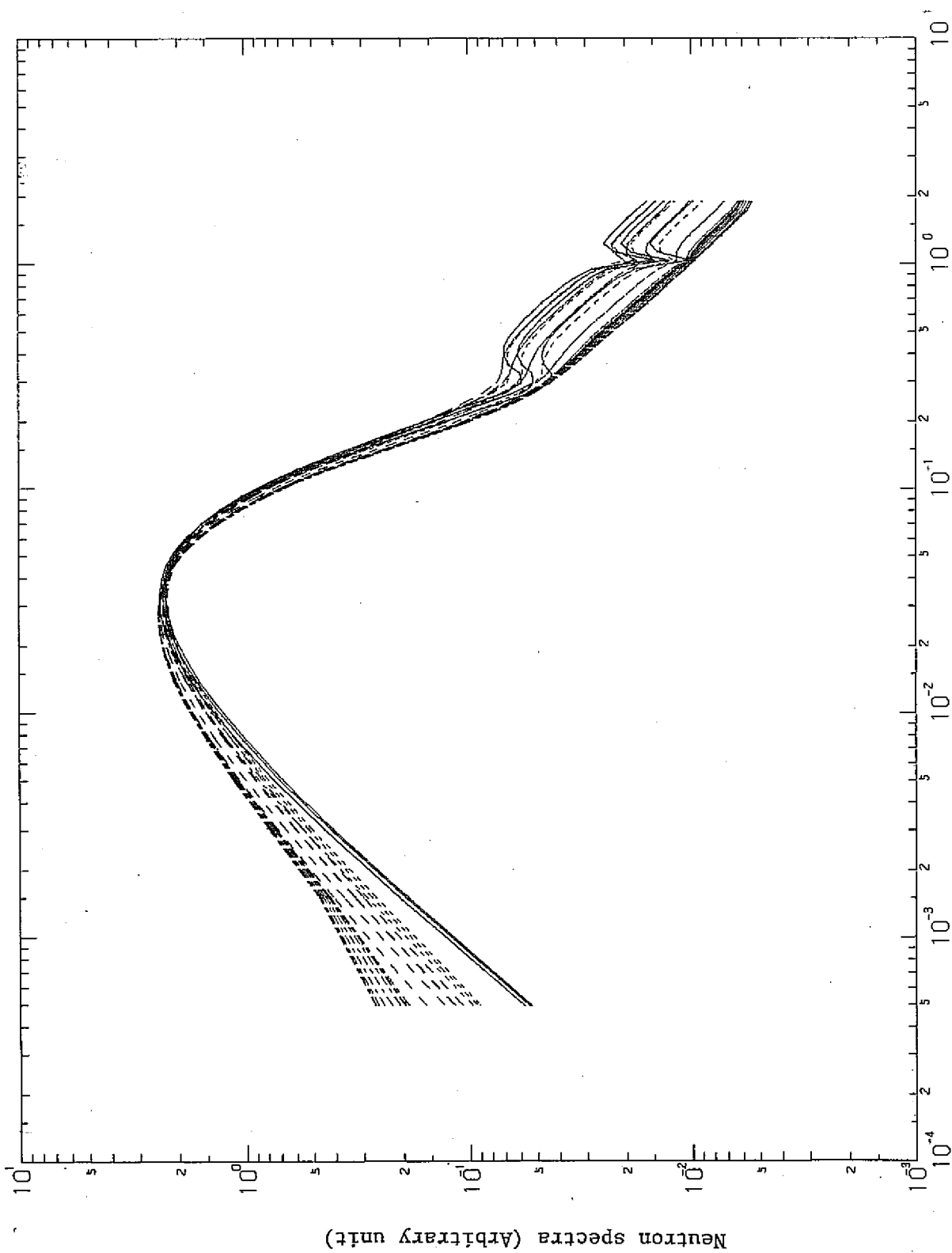


Fig. 34 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S PU, 0%)

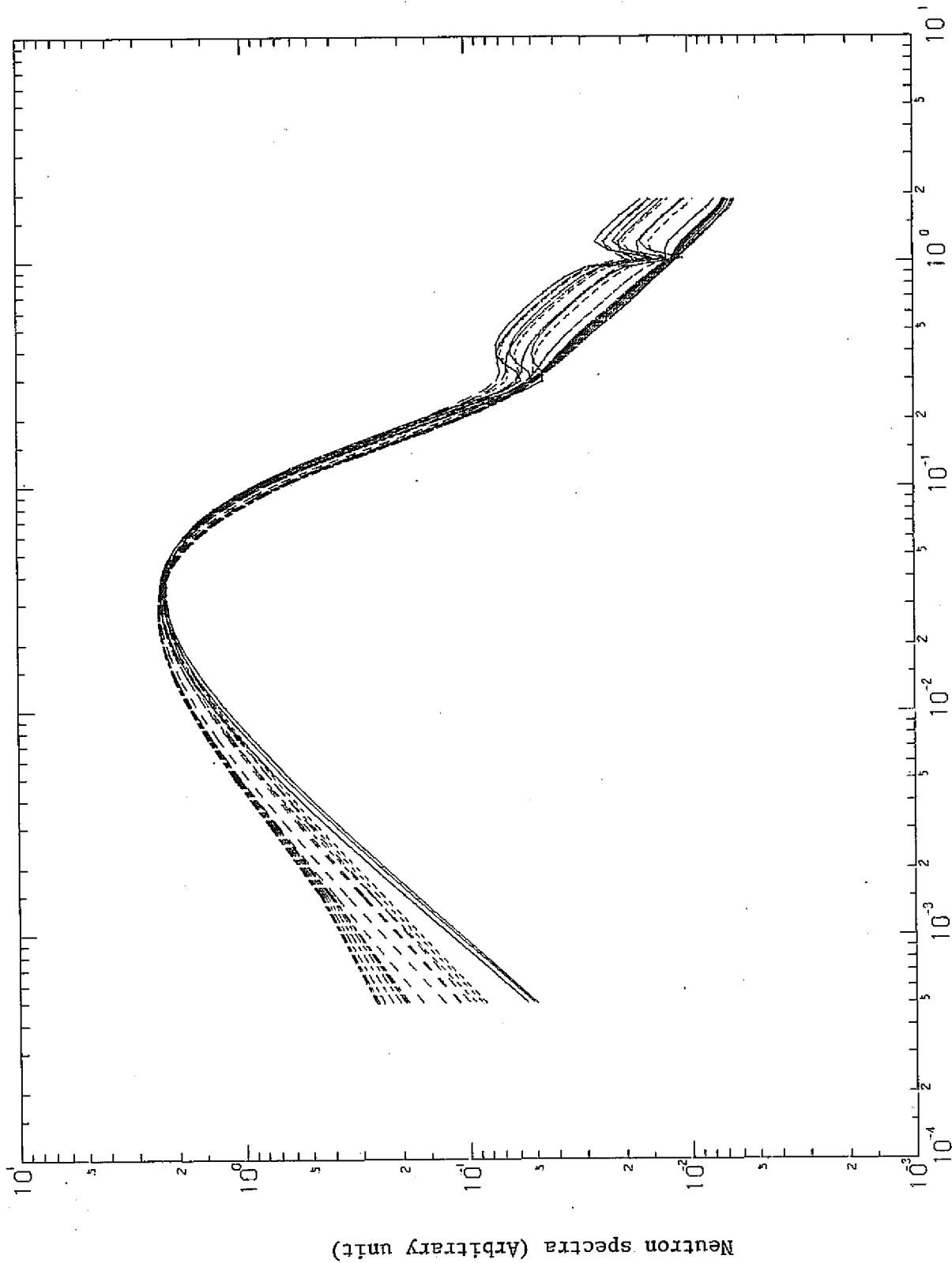


FIG. 35 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S PU, 30%)

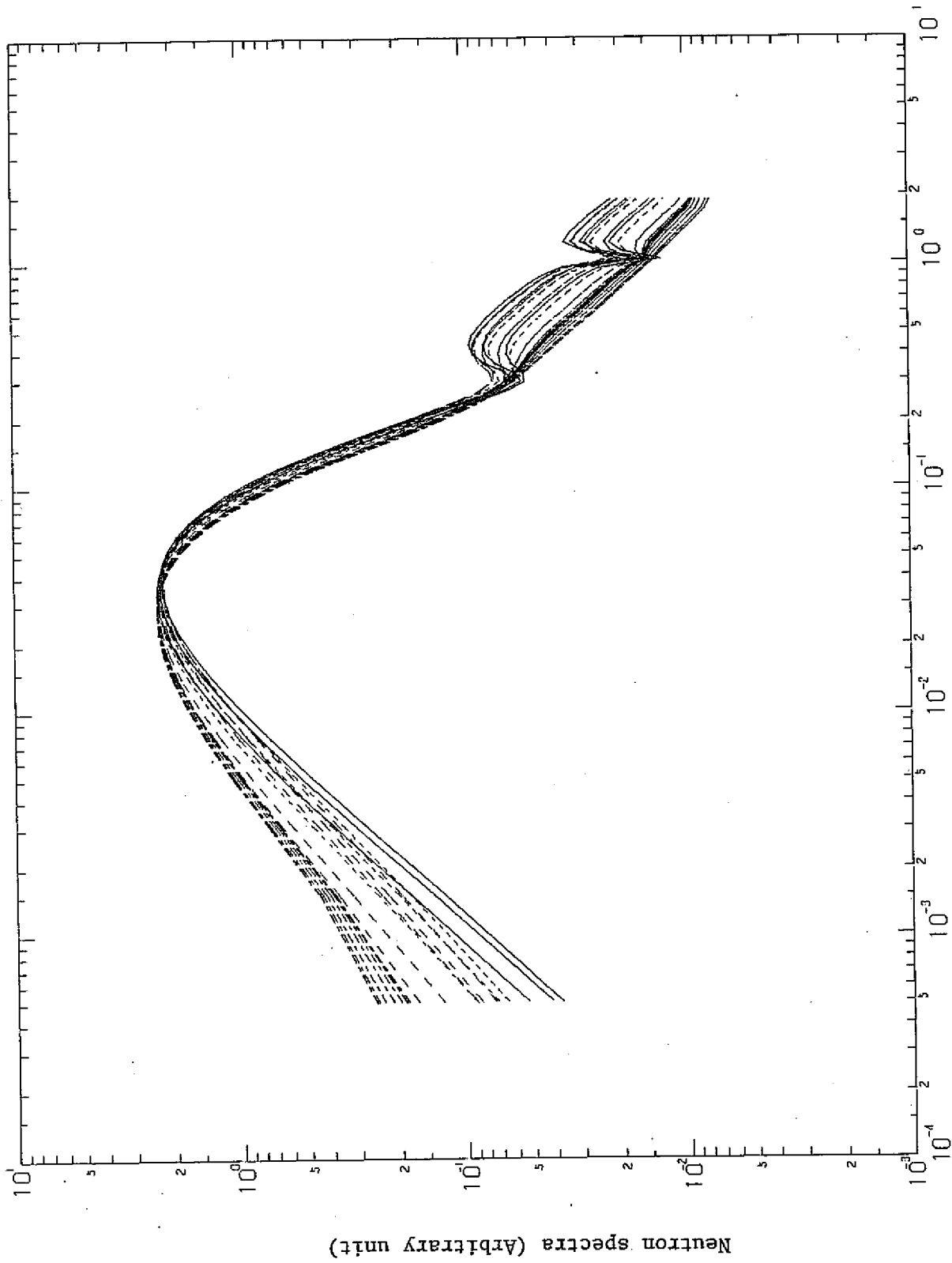


Fig. 36 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (55 PU, 70%)

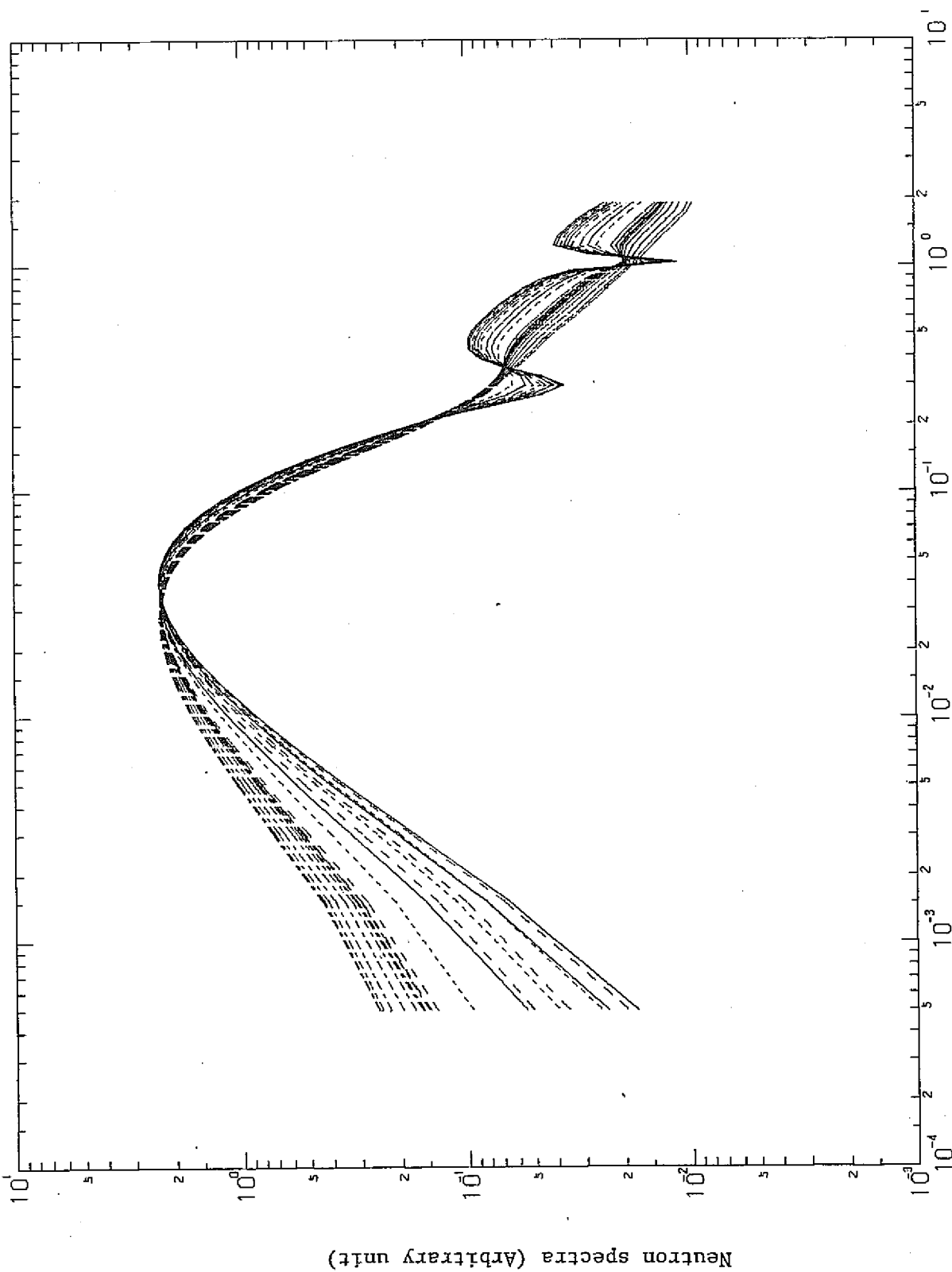


Fig. 37 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (5S PU, 100%)

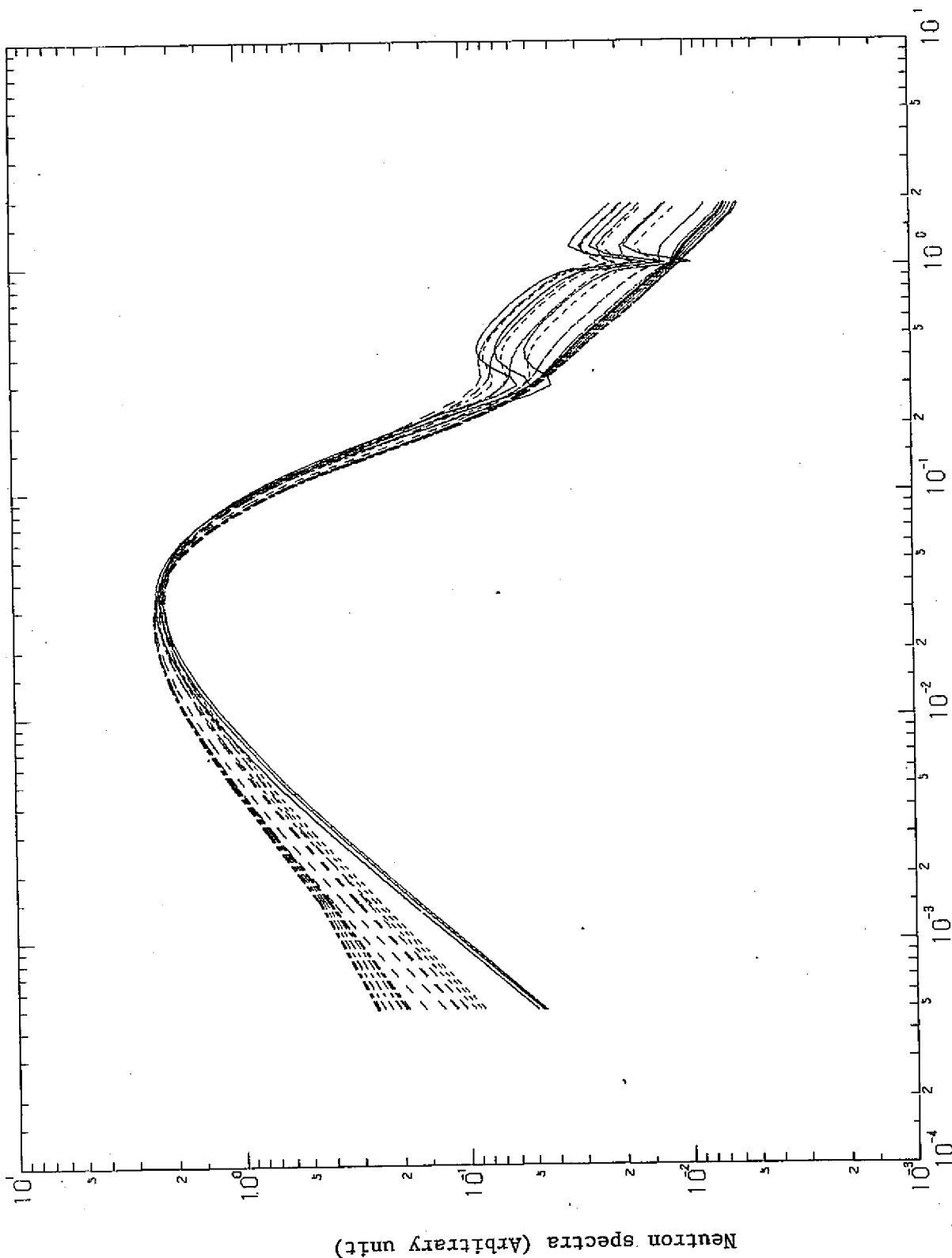


Fig. 38 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (85 PU, 0%)

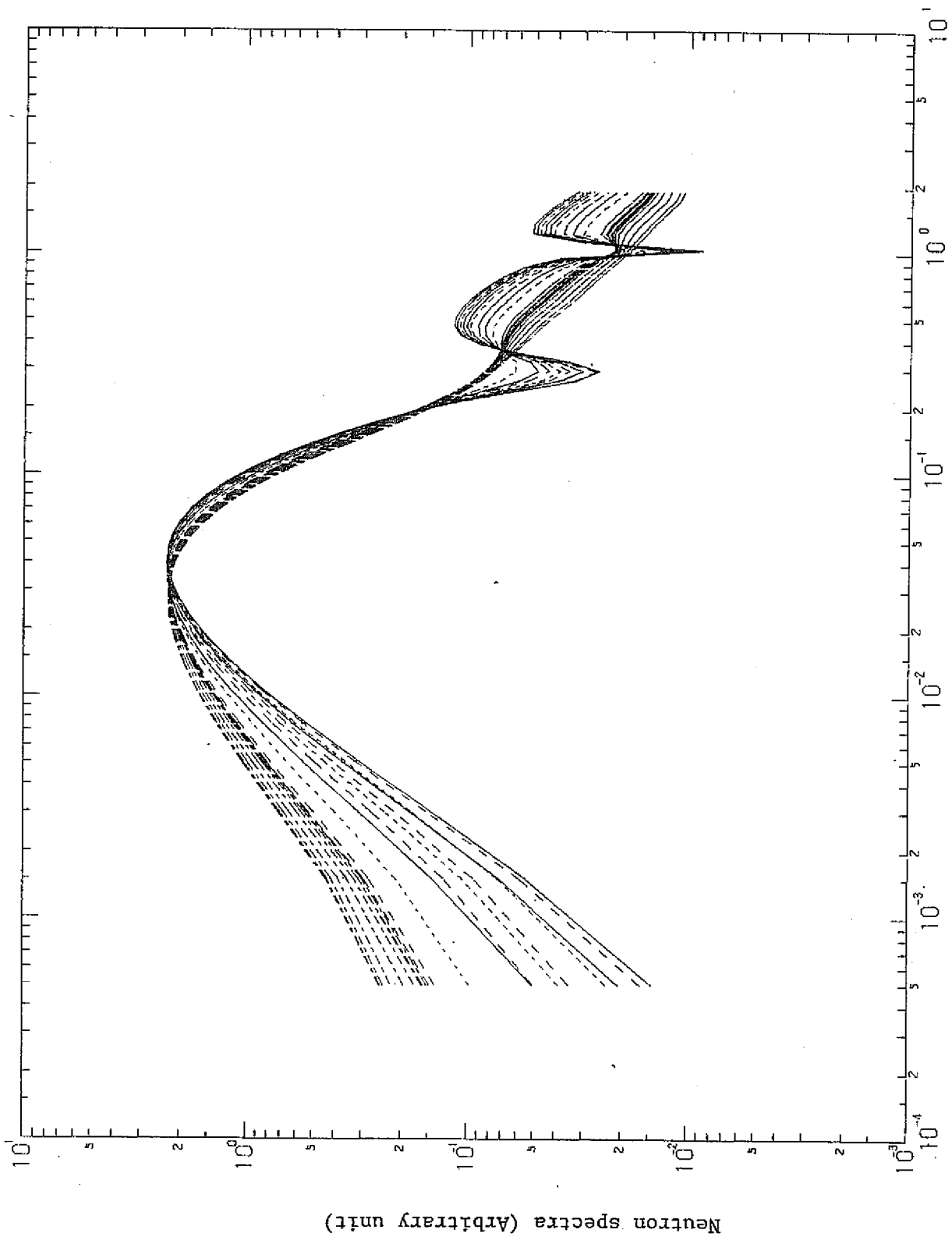


Fig. 39 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (85 PU, 100%)

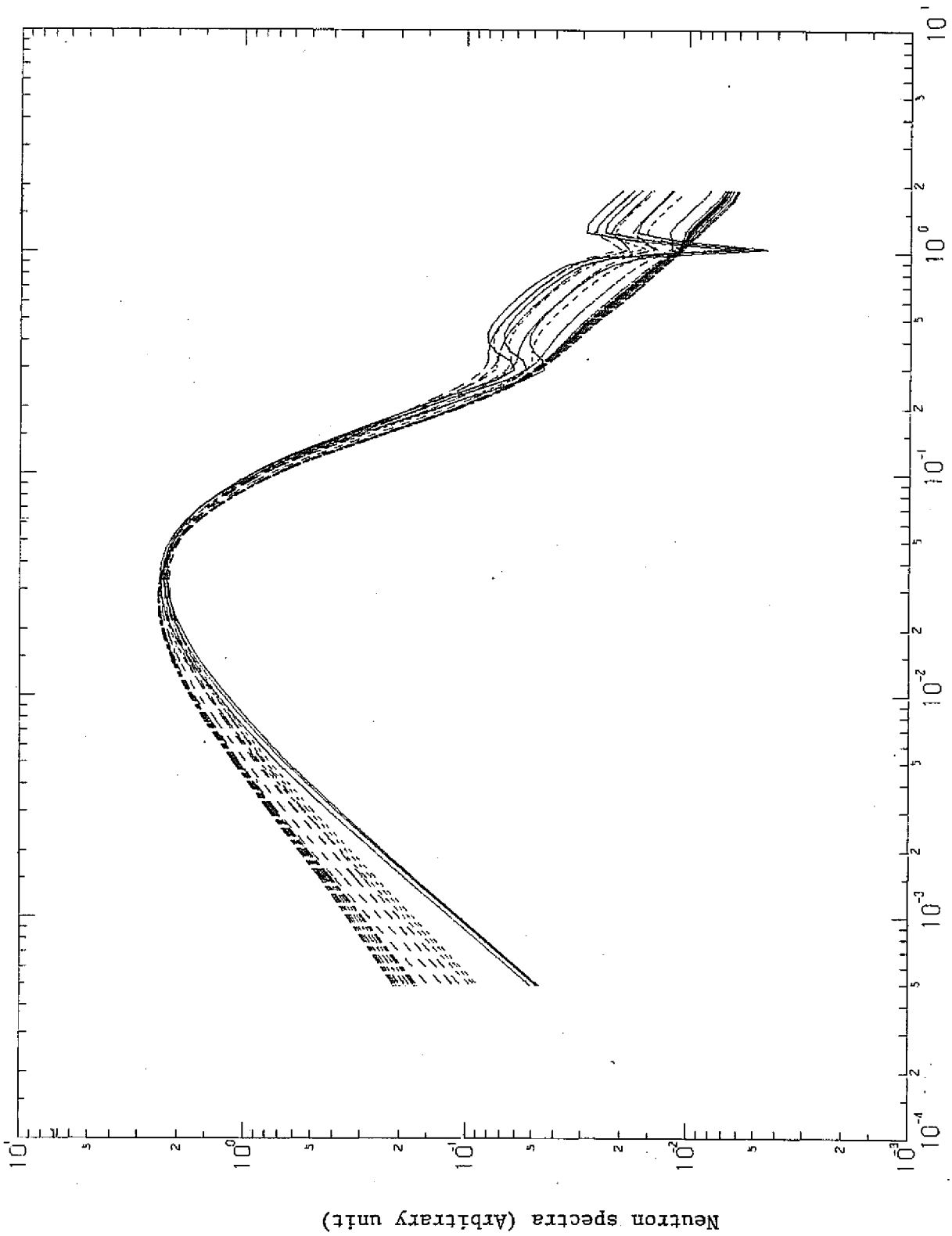


Fig. 40 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (8R PU, 0%)

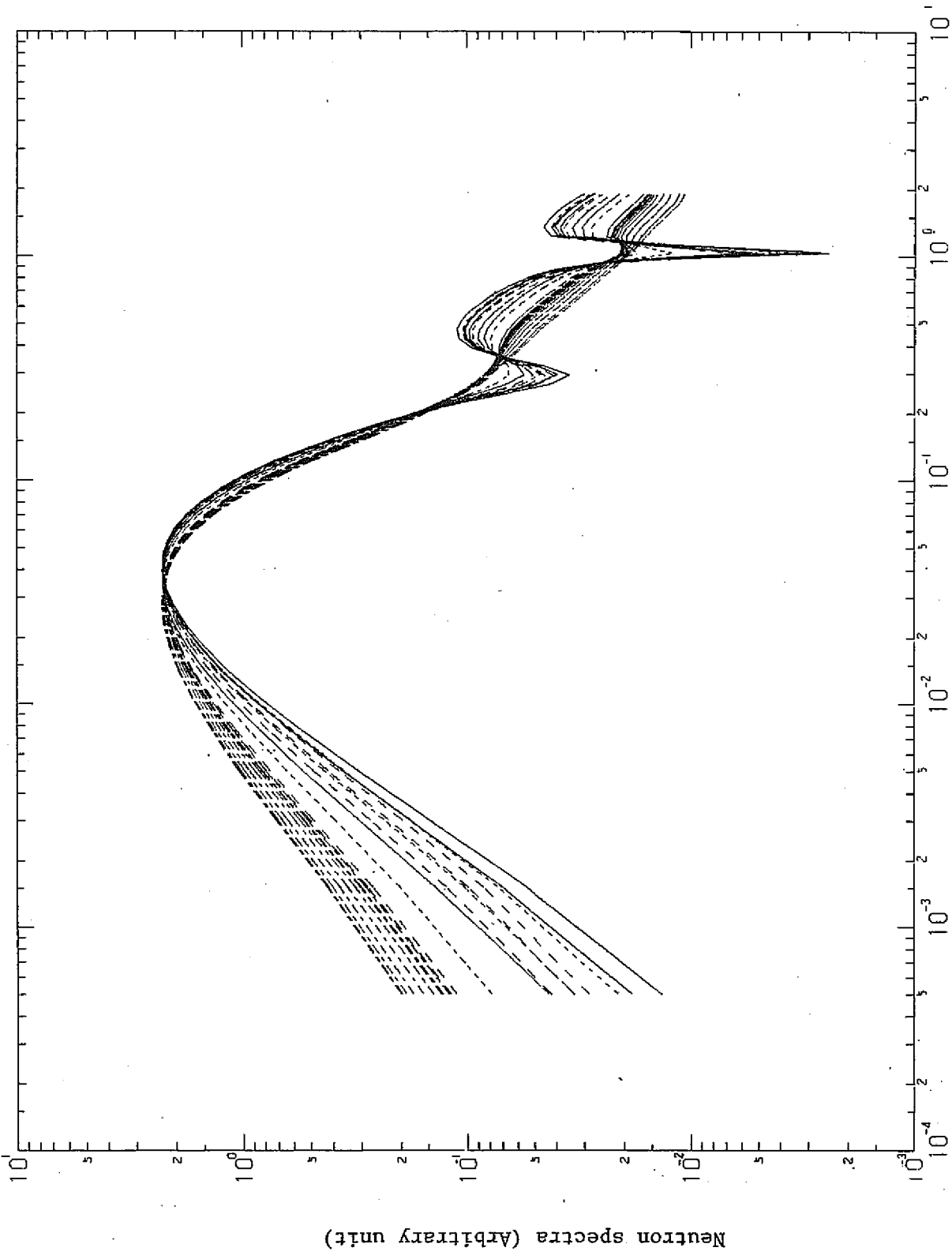


Fig. 41 NEUTRON SPECTRA BY LAMP (8R PU, 100%)