

JAERI - M
91-185

NSRRにおける合成パルス運転時に見られる
トランジェント棒によるシャドウイング効果の解析(I)

1991年11月

中村 武彦・細山田龍二*・谷内 茂康・石島 清見

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

NSRRにおける合成パルス運転時に見られるトランジェント棒による
シャドウイング効果の解析 (I)

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

中村 武彦・細山田龍二*・谷内 茂康

石島 清見

(1991年10月9日受理)

NSRRでは、トランジェント棒と呼ばれる中性子吸収体を低出力あるいは高出力の臨界状態にある炉心から高速で引抜くことによって炉出力を急上昇させるパルス運転が可能である。このようなパルス運転様式の一つである合成パルス運転モードでは、調整棒のバンク操作により10MWまで高出力を数秒間達成（高出力運転）した後、トランジェント棒によるパルス運転を行う。この際、高出力運転部では、3本のトランジェント棒は最後に行うパルス運転での投入反応度に応じて、不均一な挿入状態となっている。このため、炉心の周辺に配置された一部の中性子検出器が、トランジェント棒の影響により通常よりも低い指示を示す、いわゆるシャドウイング効果が現れる。トランジェント棒位置による中性子場の変化を3次元中性子拡散計算により求め、各検出器に対するシャドウイング効果の程度を解析的に評価した。

Analysis of Shadowing Effect Produced by Irregularly Positioned
Transient Rods during Combined Pulse Operation in NSRR (I)

Takehiko NAKAMURA, Ryuji HOSOYAMADA , Shigeyasu YACHI
and Kiyomi ISHIJIMA

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 9, 1991)

In NSRR, pulse operation is performed by rapid withdrawals of three transient control rods at low power or high power critical. Under combined pulse operation mode, the pulse operation follows a high power operation up to 10 MW (for several seconds) which is controlled by a bank operation of regulating control rods. During the high power operation, the transient control rods are irregularly inserted into the core to prepare for the pulse operation at the end of the run. Partial or full insertion of the transient rod causes so called shadowing effect, that is, neutronic instruments located closer to the deeply inserted rod indicates lower reactor power than the others. The shadowing effects on the neutronic instruments are evaluated by three-dimensional neutron diffusion calculations of NSRR.

Keywords: Shadowing Effect, Control Rod, NSRR Citation

目 次

1. 概 要	1
2. 評価方法	7
2.1 炉心のモデル化	7
2.2 炉出力計装	7
3. 結 果	16
3.1 六角柱体系スコーピング計算	16
3.2 三角柱体系詳細計算	30
3.3 調整棒位置の効果	41
3.4 実験カプセルの効果	54
4. 考 察	68
5. 結 論	82
謝 辞	83
参考文献	83
付録A NSRR炉心モデルの原子数密度	85

Contents

1. Introduction	1
2. Methods	7
2.1 NSRR Core Modeling	7
2.2 Reactor Power Monitors	7
3. Results	16
3.1 Hexagonal Channel Geometry Scoping Calculation	16
3.2 Triangular Channel Geometry Detailed Calculation	30
3.3 Effect of Regulating Rod Position	41
3.4 Effect of Experimental Capsule	54
4. Discussion	68
5. Conclusions	82
Acknowledgments	83
References	83
Appendix A Atomic Densities of NSRR Core Model	85

1. 概 要

原研のNuclear Safety Research Reactor(NSRR)では反応度事故を模擬した非常に速いパルス運転を行い、軽水炉及び高速炉仕様の実験燃料の破損挙動を調べる実験を行っている。同パルス運転では、ゼロ出力の状態からトランジェント棒と呼ばれる3本の制御棒を圧縮空気によって急速に引き抜き、出力パルス半値幅10ms程度の急激な炉出力の上昇運転を行う。

NSRRの炉心燃料棒は、水素化ジルコニウムのマトリックス中に金属ウランの微粒子が分散した特殊な合金(U-ZrH_{1.6})をステンレス鋼で被覆したものであり、燃料中の水素が減速材として働いているために、燃料温度が上昇すると燃料中の中性子スペクトラムが硬くなるなどの効果により炉心の反応度に対して非常に大きな負のフィードバックをもたらす。このため、パルス運転においても燃料温度が上昇する事によって、受動的かつ安全に原子炉出力が制御される。Fig.1にNSRRの炉心の見取り図、Fig.2に燃料棒及び各種制御棒の配置を示す。炉心構造および特性の主要な点をTable1にまとめる。

NSRRでは、昭和50年の初臨界以来、上述の速いパルス運転（以後、単一パルス運転、Natural Pulse Operation、と呼ぶ）と300kWまでの定出力運転(Steady State Operation)を行ってきた。昭和63年度に原子炉の制御系を改造することにより¹⁾、上述の2つの運転に加え、ゆるやかなパルス運転である台形パルス運転(Shaped Pulse Operation)、さらに単一パルスを組合せた合成パルス運転(Combined Pulse Operation)が可能となった。Fig.3にこれらの運転パターンを模式的に示す。

台形パルス運転は、Fig.2に示す6本の調整棒(Regulating rod)を電気駆動によりバンク操作し運転を行う。調整棒は最大75mm/sの比較的高速で操作され、最高炉出力10MW、最大積分出力110・MWsの範囲内で、任意の形状の出力運転を行うことが出来る。この台形パルス運転では、異常過渡等の緩やかな出力上昇を模擬した条件での実験を行っている。合成パルス運転は上述の台形パルス運転にトランジェント棒による速いパルス（単一パルス）運転を組合せた運転である。つまり、調整棒による制御により10MWまでの高出力運転を行い、これに続いてトランジェント棒による速いパルス運転を行う運転あるいは、トランジェント棒の急速引き抜きによる速いパルス運転後に調整棒による10MWまでの高出力運転を継続する運転が行われる。合成パルス運転では、一定出力運転条件からの過出力事故を模擬した実験（Fig.3合成パルス運転上段）や過出力事故後に比較的高い炉出力が尾を引く条件を模擬した実験（Fig.3合成パルス運転下段）等が行われる。

高出力（10MWまで）を保持した後速いパルス運転を行う合成パルス運転においては、高出力運転時にトランジェント棒が部分的に挿入されている。合成パルス運転開始時には、トランジェント棒は最後に行う速いパルス運転での投入反応度に対応する位置まで挿入されており、調整棒により制御される高出力運転時には、これらのトランジェント棒は炉心に挿入されたままである。合成パルス運転(Combined Pulse Operation)における制御棒位置の例を単一パルス運転(Natural Pulse Operation)および台形パルス運転(Shaped Pulse Operation)と比較してFig.4に示した。単一パルス運転および台形パルス運転時には、Fig.4ABに示されている様にトランジェント棒（図中白抜き）は全て引抜かれており、炉心には対称形に調整棒（図中黒塗）が挿入されているのみである。ところが、合成パルス運転

の場合、高出力運転を行う間、トランジェント棒が炉心に非対称形に挿入されている (Fig. 4C)。この結果、この高出力運転時においてはNSRRの炉心出力分布に歪が生じる。また、NSRRの炉出力をモニタする中性子計装はFig. 2に示されるとおり、炉心中心からみてトランジェント棒の延長線上に位置する。このため、炉心深く挿入されたトランジェント棒の延長線方向にある検出器 (Fig. 4Cの場合トランジェント棒Bが深く挿入されており、その延長線上にある検出器D2とC2) 位置では、トランジェント棒の影響により中性子束が低下する。この、いわゆる、シャドウイング効果によりこれらの検出器は実際よりも小さい炉出力を示す。

ここで、NSRRにおける単一パルス運転の投入反応度の調整方法を説明する。Fig. 4中のAおよびDに示すパルス運転での投入反応度は、反応度値が1本当たり約1.5ドルのトランジェント棒3本のうち、トランジェント棒BおよびCを全挿入の位置から引抜くこと、およびAを投入反応度に応じた任意の位置から引抜く事により与えている。つまり、トランジェント棒B、Cの2本がいずれも全挿入の状態から急速引抜きを行う事によって約\$3.0、Bのみ全挿入の場合約\$1.5のパルス反応度が投入される。さらに、トランジェント棒Aの位置を調整する事によって上記以外の反応度が得られている。例えば、\$2.0の反応度を投入する場合、トランジェント棒Aは約650ユニット、Bは全挿入、Cは全引抜きの状態から急速引抜きを行う。ここで、NSRRにおける制御棒位置は全挿入を100、全引抜きを900ユニットとする800ユニットで示されている。仮に3本のトランジェント棒が同一位置まで挿入されていれば、それぞれの延長線方向にある全ての検出器が同程度のシャドウイング効果を受けると考えられる。しかし、前述のとおり、トランジェント棒BおよびCは全挿入あるいは全引抜きのいずれかの状態であり、トランジェント棒Aのみ任意を位置とるため、合成パルス運転の高出力運転時にはトランジェント棒3本は、投入反応度に応じて挿入位置が異なる設計となっている。

本報告書では、以上説明したNSRRの特徴を踏えてNSRRの炉心中性子場の解析計算を行い、トランジェント棒の挿入状態と各検出器に対するシャドウイング効果の程度を求め定量化した。また、実際の運転で得られた各検出器の指示値との比較を行った。計算には、3次元中性子拡散コードCITATION²⁾を用いた。NSRR炉心体系各部での群定数の縮約化はSRAC³⁾コードを用いて行った。

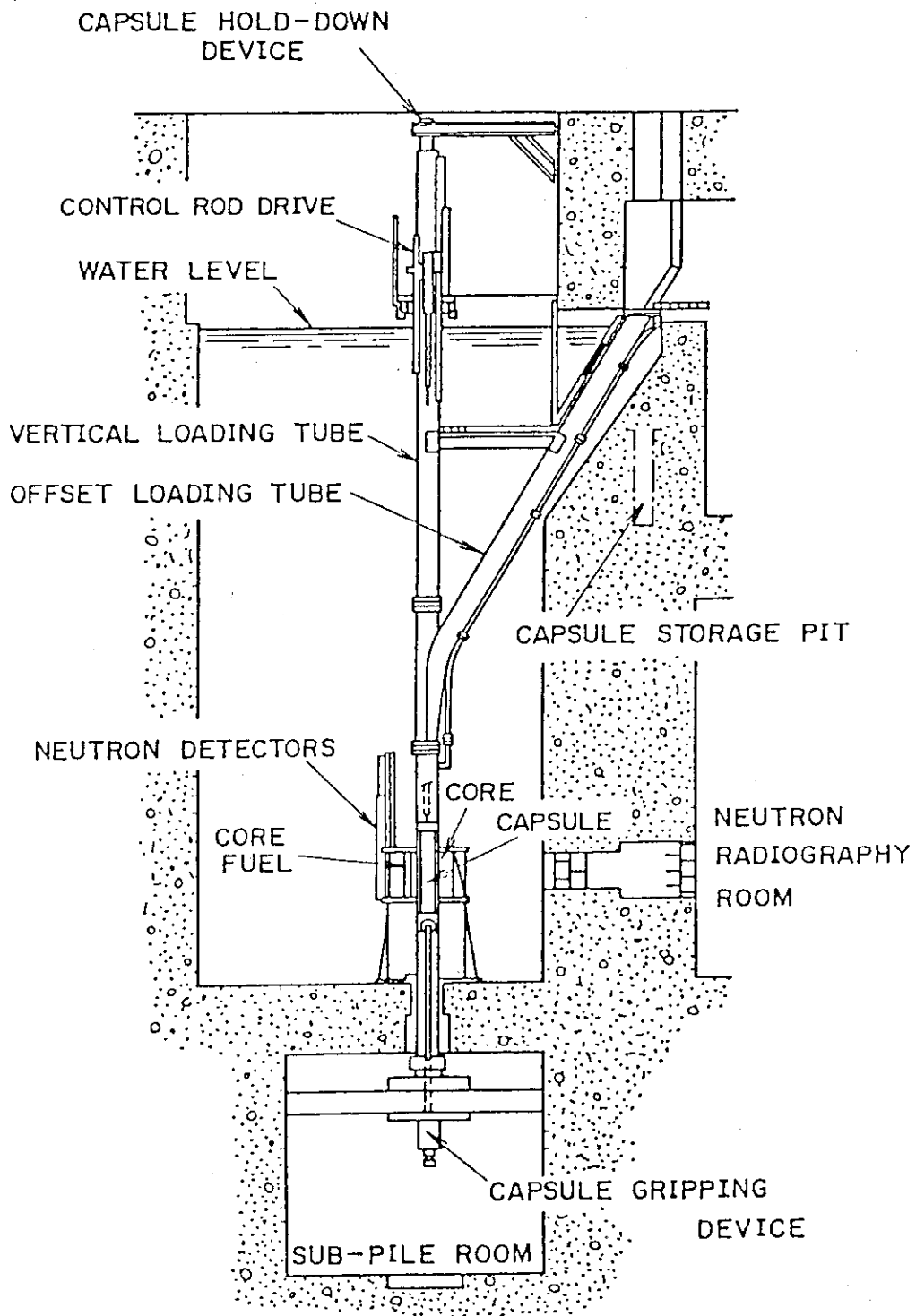
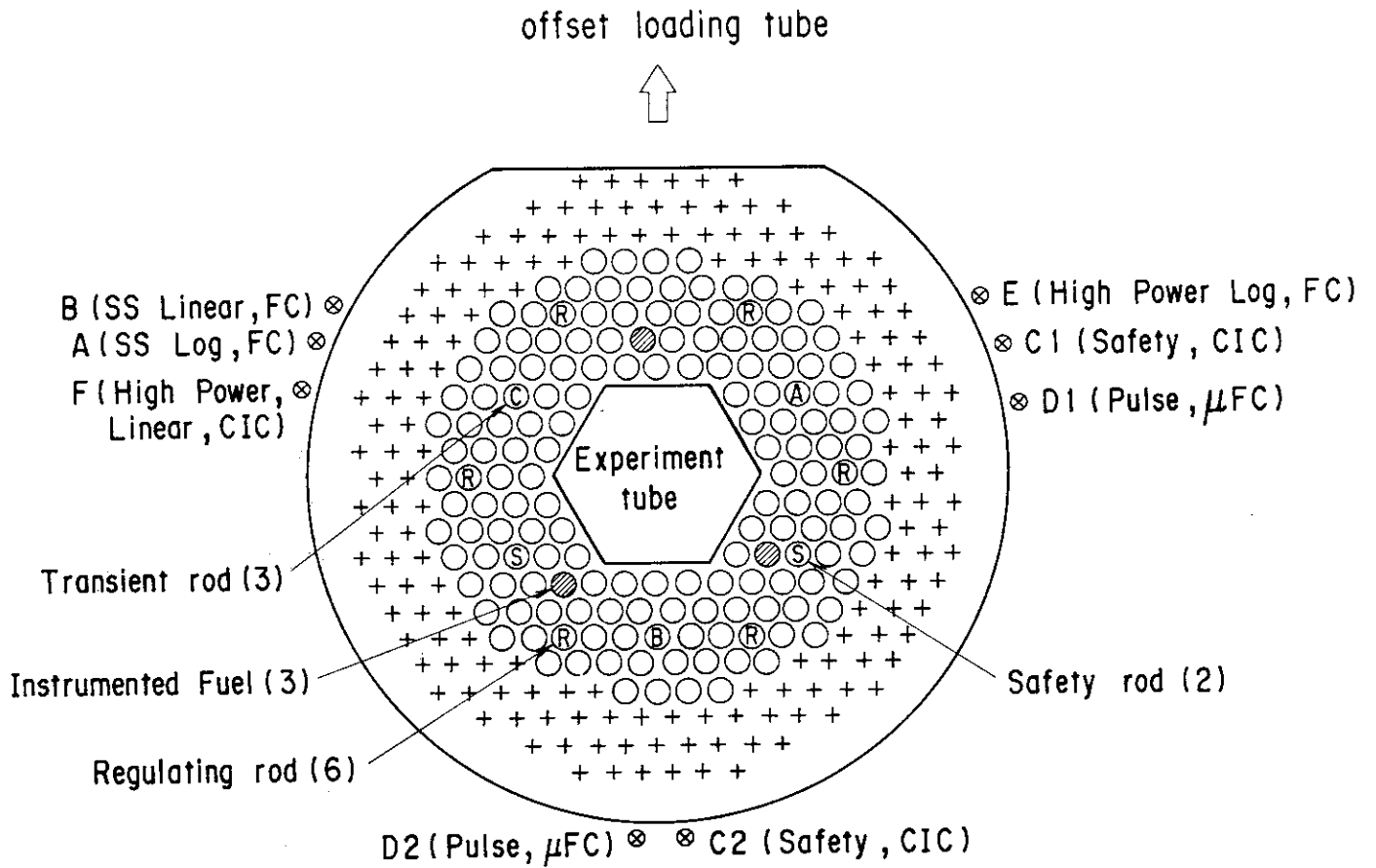


Fig. 1 NSRR core configuration.



SS : Steady state operation (≤ 300 KW)

High Power : High power operation during shaped pulse and combined pulse operations (≤ 10 MW)

A, B, C : Transient Rod A, B, C

Fig. 2 NSRR rod arrangement.

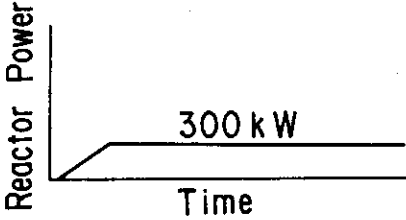
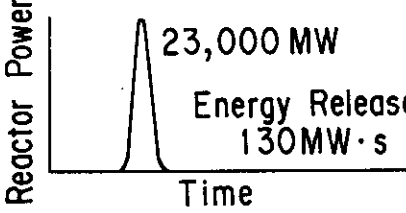
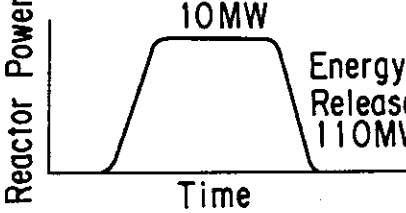
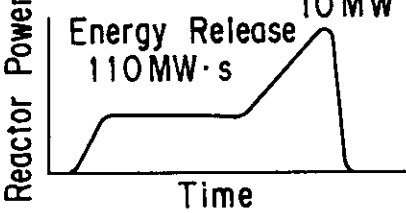
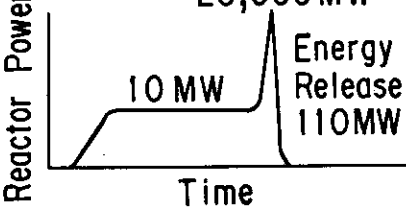
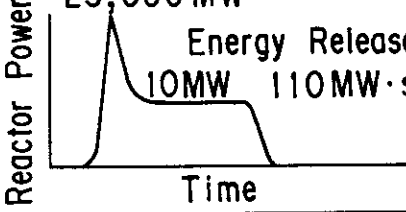
Operation Modes	Operational Limits and ExampIs of Power History	Research Items
Steady State Operation	 <p>Reactor Power vs Time graph showing a steady state at 300 kW.</p>	Decay Heat Simulation etc.
Natural Pulse Operation	 <p>Reactor Power vs Time graph showing a natural pulse peak of 23,000 MW and Energy Release of 130 MW·s.</p>	Cold Start-up RIA
Shaped Pulse Operation	 <p>Reactor Power vs Time graph showing a shaped pulse peak of 10 MW and Energy Release of 110 MW·s.</p>	Fuel Relocation Coolability
	 <p>Reactor Power vs Time graph showing a shaped pulse peak of 10 MW and Energy Release of 110 MW·s.</p>	Power Ramping
Combined Pulse Operation	 <p>Reactor Power vs Time graph showing a combined pulse peak of 23,000 MW and Energy Release of 110 MW·s.</p>	RIA from Rated Power
	 <p>Reactor Power vs Time graph showing a combined pulse peak of 23,000 MW and Energy Release of 110 MW·s.</p>	High Runout Power

Fig. 3 Examples of power histories of NSRR at various operational modes.

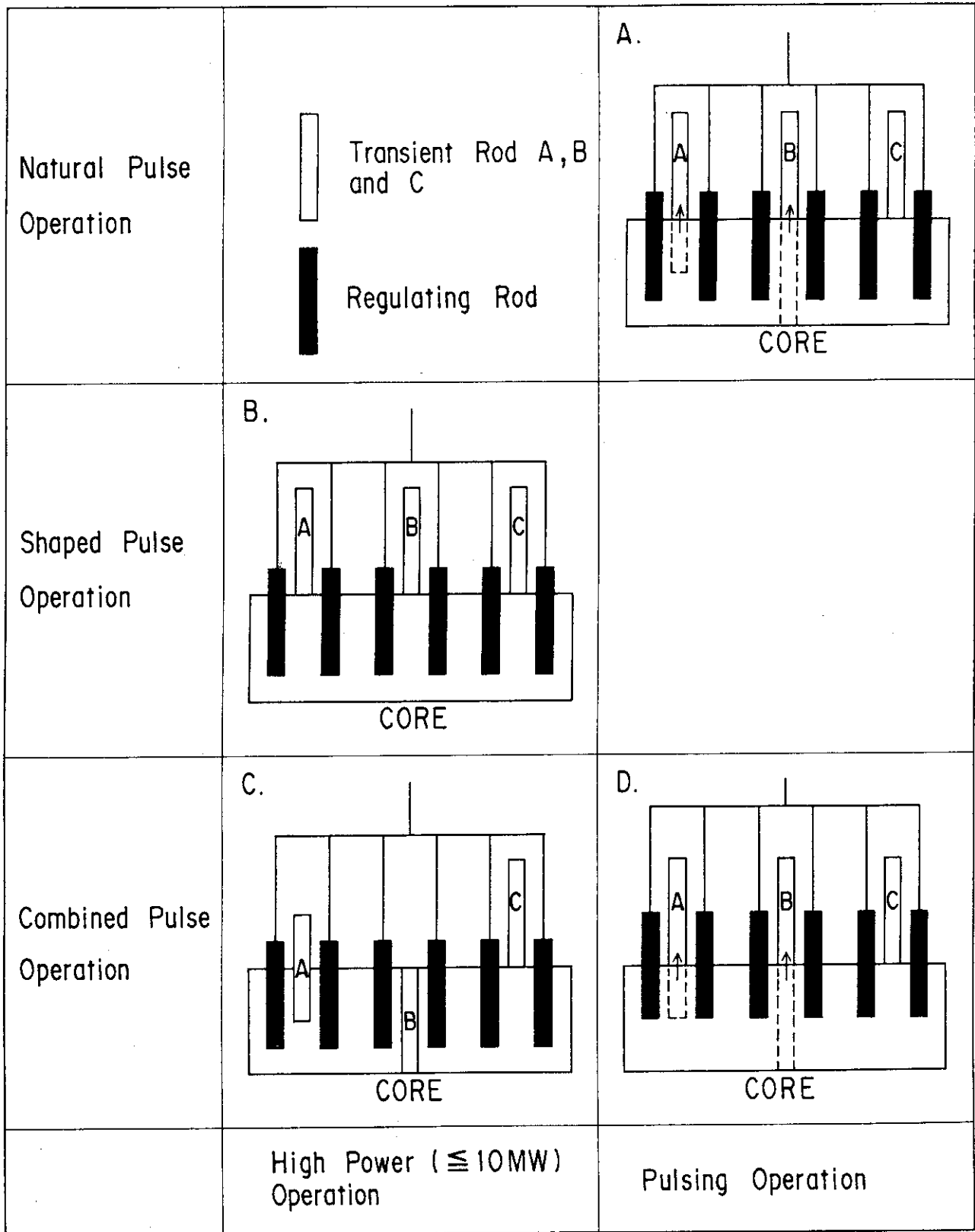


Fig. 4 Control rod positions in various NSRR operation modes.

2. 評価方法

2.1 炉心のモデル化

NSRRの炉心は、Table 1に示した様に157本のU-ZrH燃料棒が内径約22cmの実験孔を六角稠密配列で取り囲む配列となっている。炉心高さは38cm、等価直径は約62cmである。制御棒は、2本の安全棒と6本の調整棒（いずれも燃料フォロー付）に加え、3本のトランジェント棒により構成されている。燃料棒および制御棒は4.17cmのピッチで配列されている。これらの燃料および制御棒を等価セルに分割すると、1つは1辺2.71cmの正六角形となる。これを組合わせて炉心を構成するとFig.5に示す体系となる。中心のセルを基準として、0~3列が実験孔、4~8列が炉心燃料、8列以後（8列目は燃料セルの部分もある）が水領域である。中性子検出器は、図中に示した同心円上に位置する。また、前章で示した様にトランジェント棒Aは任意の位置に設定出来るため、中性子検出器E、C1、D1の3系統はトランジェント棒Aの位置に応じた強さのシャドウイング効果を受ける。したがって、トランジェント棒Aの位置に応じたシャドウイング効果を適正に評価するために、炉心を高さ方向にも分割した3次元体系で、中性子場の評価を行った。Fig.6に燃料、各種制御棒等の炉心を構成するチャンネル（単位セル）毎に高さ方向の構成および3次元炉心計算時のメッシュ数等を示した。各領域の構造、原子数密度等については付録Aにまとめた。

各領域の群定数の作成は、SRACコードシステム³⁾のパブリックライブラリであるJENDL-2版あるいはENDF/B-IV版マイクロ断面積（高速70群熱37群）を基に、まず燃料部については衝突確率法で単位セル毎の61群（高速24群、熱37群）の群定数を求めた。これを用いて、ANISNコードにより炉心半径方向および垂直方向の1次元中性子輸送計算を行った。得られた中性子スペクトルを用いてさらに群定数を9群（高速4群、熱5群）まで縮約した。縮約時における中性子のエネルギー群構造をTable 2に示す。また、群定数作成のための1次元輸送計算の体系をFig.7に示す。半径方向は円柱体系とし、図中のANISN(R)と記した領域について行った。軸方向は無限平板体系を使い、図中のANISN(Z)で示した領域について行った。これらの2つの計算に含まれない領域についてはSRACコードの内蔵スペクトルを用いて群定数の縮約を行った。群定数の縮約と炉心中性子計算の流れをFig.8に示す。また、使用したSRACコード内蔵スペクトルは高速域は $1/E$ 則、熱中性子域はMaxwell分布(300K)を仮定したスペクトルである。

2.2 炉出力計装

NSRR炉心の炉出力は8系統の中性子検出器によってモニタされている。中性子検出器はガンマ線補償型電離箱(Compensated Ionization Chamber, CIC)あるいは核分裂電離箱(Fission Chamber, FC)である。炉出力計装は、測定レンジあるいは目的に応じて大きく、定出力系、高出力系、パルス出力系および安全出力系に分類される。各検出器の測定範囲等をFig.9に示す。

チャンネルA、Bは、定出力用のFCであり線型のBチャンネルが300kWまでの運転モニタとして使われている。チャンネルE、Fは高出力系と呼ばれ、台形パルス運転や合成パルス運転の高出力部の炉出力モニタとして使われている。線型のFチャンネル出力は自動制御運転中には炉出力として制御系へフィードバックされている。EチャンネルはFC、FチャンネルはCICである。トランジェント棒の引抜きによるパルス運転時の炉出力は、パルス出力系と呼ばれるチャンネルD

1, D 2 で測定される。この 2 系統は、いずれも小型核分裂箱 (μ FC) である。この他に安全出力系と呼ばれるチャンネル C 1, C 2 があり、定出力および高出運転時の異常検出用として原子炉停止回路と接続されている。

これら 8 系統の炉出力計装は Fig. 5 に示す半径 592.8mm の円周上の 3 方向に位置している。隣接する検出器の間隔は、143.8mm である。各検出器は Fig. 9 に示すように 25~224mm 長の有効感部を持つ、有効感部中心は、炉心中心高さにある。これらの炉出力計装で実際に測定しているのは、その位置における熱中性子束であり原子炉出力そのものではない。つまり、実際には検出器の出力には、検出感度係数 (nv/A) に加え各検出器位置での中性子束と炉出力の比 (MW/nv) が乗ぜられて出力されている。炉心の中性子場計算においては、各検出器位置での熱中性子束を、検出器中心軸における有効感部全体の平均値として求めた。実験値と比較する場合には制御棒全引抜きの場合の熱中性子束を基準に、炉出力を実験値にあわせて規格化して求めた。

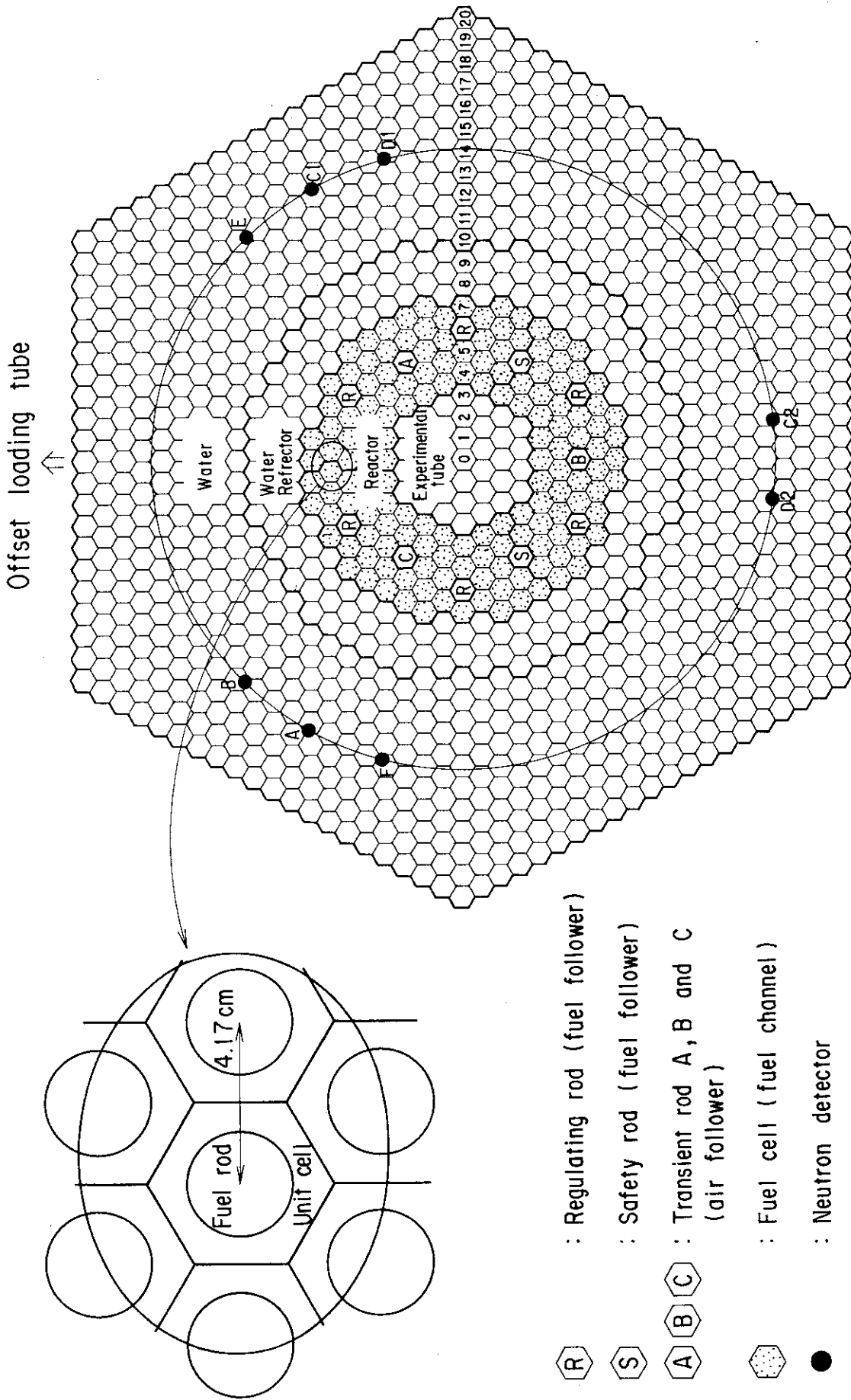
Table 1 Characteristics of NSRR.

(1)	<u>Reactor Type;</u>	Modified TRIGA-ACPR (Annular Core Pulse Reactor)
(2)	<u>Reactor Vessel;</u>	3.6 ^m (wide) × 4.5 ^m (long) × 9 ^m (deep) open pool
(3)	<u>Fuel;</u>	
	Fuel type	12 wt% U-ZrH fuel
	Fuel enrichment	20 wt% U-235
	Clad material	Stainless steel
	Fuel diameter	3.56 cm
	Clad diameter	3.76 cm O.D.
	Length of fuel section	38 cm
	Number of fuel rods	157 (including 8 fuel-followered control rods)
	Equivalent core diameter	62 cm
(4)	<u>Control Rods;</u>	
	Number	8 (including 2 safety rods)
	Type	Fuel followed type
	Poison material	Natural B ₄ C
	Rod drive	Rack and pinion drive
(5)	<u>Transient Rods;</u>	
	Number	2 fast transient rods and 1 adjustable transient rod
	Type	Air followed type
	Poison material	92% enriched B ₄ C
	Rod drive	Fast : Pneumatic Adjustable: Rack and pinion & Pneumatic
(6)	<u>Core Performance;</u>	
	a) Steady state operation	
	Steady state power	300 KW
	b) Pulse operation	
	Max. peak power	21,100 MW
	Max. burst energy	117 MW-sec
	Max. reactivity insertion	3.4% Δk (\$4.67)
	Min. period	1.17 msec
	Pulse width	4.4 msec (1/2 peak power)
	Neutron life time	30 μsec
(7)	<u>Experiment Tube;</u>	
	Inside diameter	22 cm

Table 2 Neutron energy group structure for cell and core calculations.

107G Library		61G	9G	107G Library		61G	9G
Group	Upper energy (eV)	Cell	Core	Group	Upper energy (eV)	Cell ¹	Core
1	1.000×10^7	1	1	56	1.0677×10^1	20	4
2	7.7880×10^6			2			
3	6.0653						
4	4.7237	3					
5	3.6788			21			
6	2.8650						
7	2.2313	22					
8	1.7377			23			
9	1.3534	24					
10	1.0540			25			
11	8.2085×10^5	26					
12	6.3928			27			
13	4.9787	28					
14	3.8774			29			
15	3.0197	30					
16	2.3518			31			
17	1.8316	32					
18	1.4264			33			
19	1.1109	34					
20	8.6517×10^4		35				
21	6.7379	36					
22	5.2475		37				
23	4.0868	38					
24	3.1828		39				
25	2.4788	40					
26	1.9305		41				
27	1.5034	42					
28	1.1709		43				
29	9.1188×10^3	44					
30	7.1017		45				
31	5.5308	46					
32	4.3074		47				
33	3.3546	48					
34	2.6126		49				
35	2.0347	50					
36	1.5846		51				
37	1.2341	52					
38	9.6112×10^2		53				
39	7.4852	54					
40	5.8295		55				
41	4.5400	56					
42	3.5358		57				
43	2.7536	58					
44	2.1445		59				
45	1.6702	60					
46	1.3007		61				
47	1.0130	62					
48	7.8893×10^1		63				
49	6.1442	64					
50	4.7851		65				
51	3.7267	66					
52	2.9023		67				
53	2.2603	68					
54	1.7603		69				
55	1.3710	70					
			71				
		72					
			73				
		74					
			75				
		76					
			77				
		78					
			79				
		80					
			81				
		82					
			83				
		84					
			85				
		86					
			87				
		88					
			89				
		90					
			91				
		92					
			93				
		94					
			95				
		96					
			97				
		98					
			99				
		100					
			101				
		102					
			103				
		104					
			105				
		106					
			107				

Fast
Thermal



- R : Regulating rod (fuel follower)
- S : Safety rod (fuel follower)
- A B C : Transient rod A, B and C (air follower)
- : Fuel cell (fuel channel)
- : Neutron detector

Fig. 5 NSRR core arrangement consisted of hexagonal unit cells for neutronic calculations.

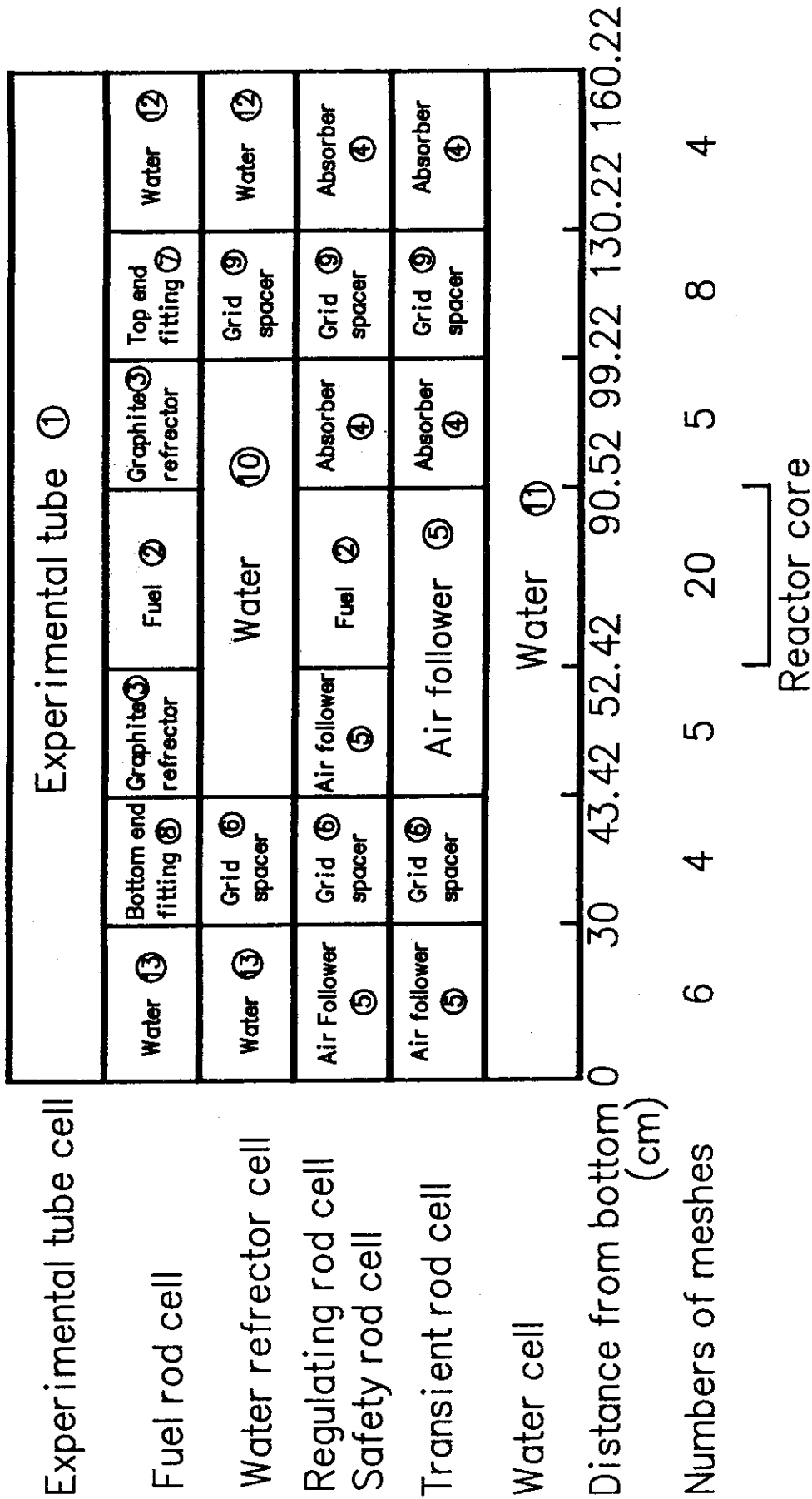


Fig. 6 Axial configuration of cells consisting NSRR core.

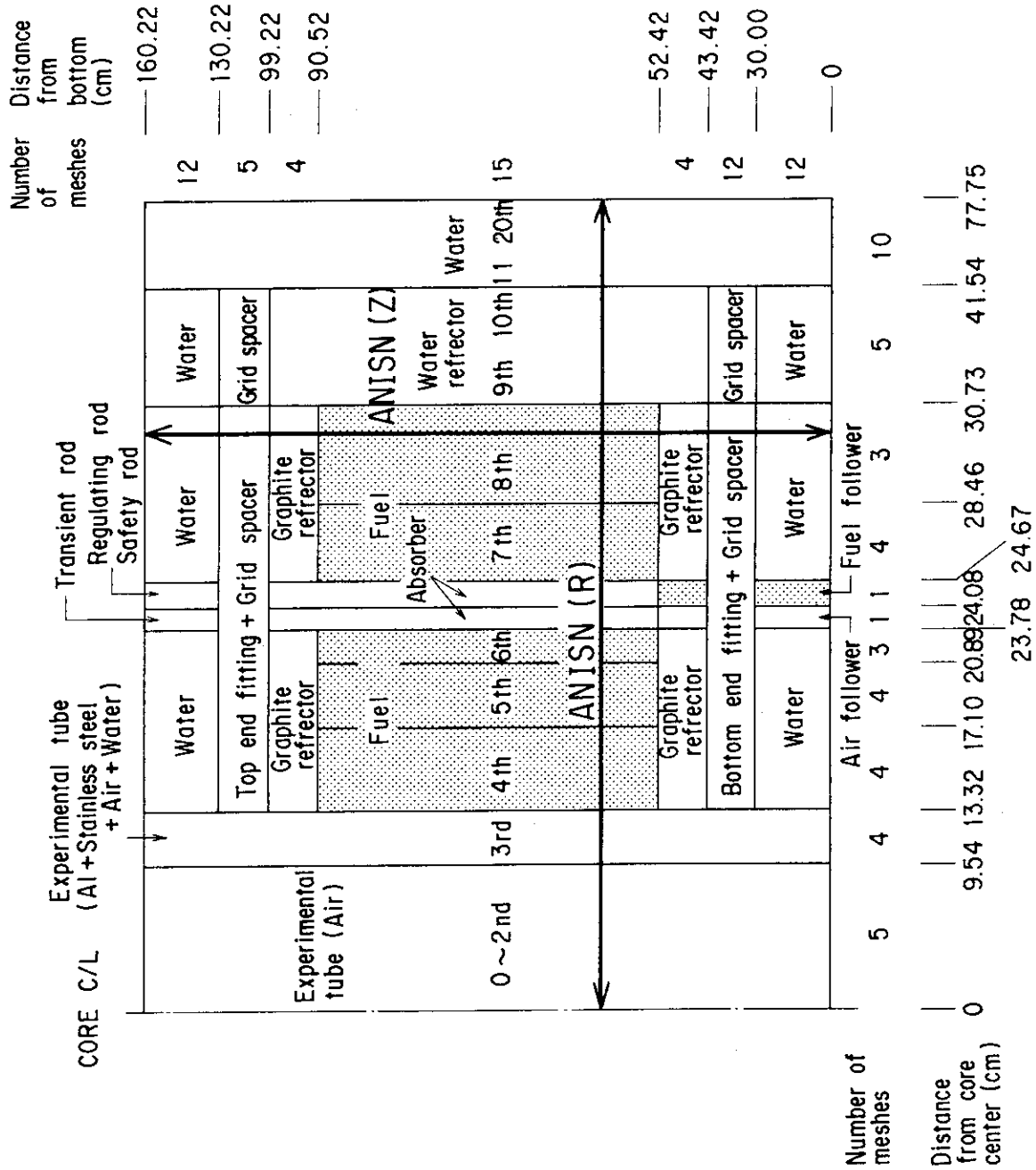


Fig. 7 One dimensional ANISN calculation geometry for condensing group constants.

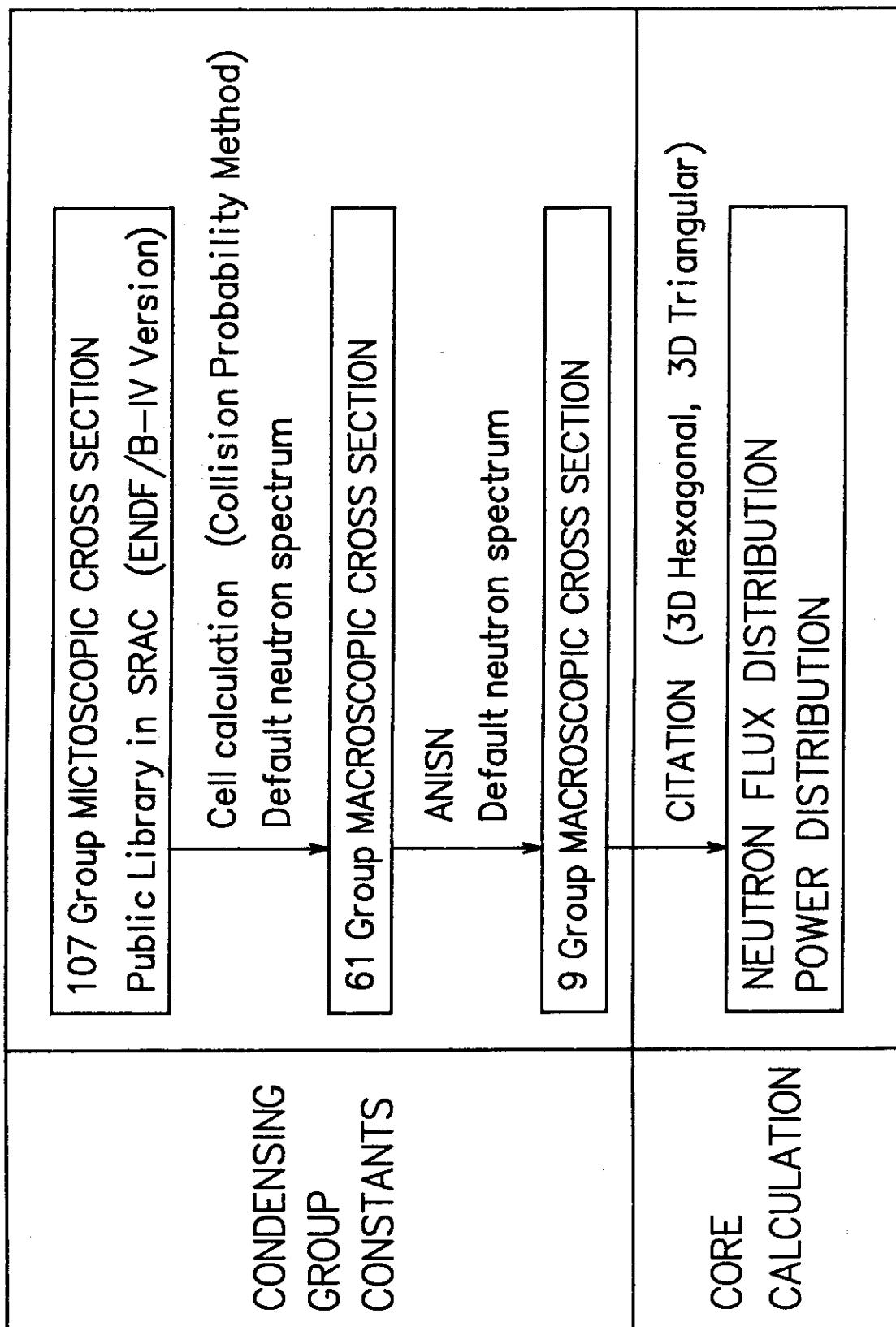


Fig. 8 Calculational flow for condensing group constants and

Monitor				Reactor Power		
Channel	Range	Type	Sensitive Length (mm)	Diameter (mm)	Steady State (SS)	Pulse
A	SS	Log	224	38	0.03mW	30000MW
		Linear			0.03mW	450kW
B	SS	FC (KSA-51, Toshiba)	224	38	0.03mW	330kW
		CIC (WL-23197, Westinghouse)			0.03mW	330kW
C1 C2	SS High Power	Linear	59	76	3kW	15MW
		Linear			3kW	15MW
D1 D2	Pulse	Linear	~60	5.8	3MW	30,000MW
		Linear			3MW	30,000MW
E	High Power	Log	25.4	6.7	3 W	30MW
		Linear			3 W	30MW
F	High Power	Linear	59	76	5kW	15MW
		Linear			5kW	15MW

Fig. 9 NSRR power monitors and their covering ranges.

3. 結 果

NSRR炉心の中性子場の解析計算は、前章で説明した六角柱を組合せた体系でまずスコーピング計算を行い、六角柱をさらに細く6つの三角柱に分割して、詳細計算を行った。(Fig.10参照)六角柱体系スコーピング計算での分割数は1261(チャンネル)×52(軸方向メッシュ)、三角柱体系詳細計算では、7566(チャンネル)×52(軸方向メッシュ)であった。六角柱体系の炉心計算に使用したコードはスカラー版のCITATIONをベクトル計算機用にコンパイルしたものである。(J0002, CITATION, FORT77)三角柱体系詳細計算は、ベクトル化されたロードモジュール⁴⁾(J0002, CITVP, LOAD)を用いて計算を行った。スコーピング計算および詳細計算に要したCPU時間は1計算当たりそれぞれ12分および24分であった。(計算機は富士通VP2600)。また、要した記憶容量はそれぞれ39Mバイト、174Mバイト、I/O回数はそれぞれ6,500、53,000回であった。以下にスコーピング計算、詳細計算のそれぞれについて結果をまとめる。

3.1 六角柱体系スコーピング計算

スコーピング計算では、8系統の各検出器に対するシャドウイング効果の概略を知るために、トランジェント棒Aの位置を100ユニット(全挿入)から900ユニット(全引抜き)まで、100,300,500,700,900ユニットの5ヶ所に設定し、トランジェント棒BおよびCをそれぞれ全挿入あるいは、全引抜きとした場合の中性子場の計算を行った。スコーピング計算を行ったトランジェント棒の位置と対応するパルス反応度をTable 3に示した。スコーピング計算では、調整棒および安全棒は全引抜きとした。また、実験孔内は空気、つまり、実験カプセルは無いものとした。

3.1.1 炉心出力分布

計算の結果得られた炉心の出力分布をFig.11に示す。縦軸は炉心を構成する各燃棒の高さ方向に平均した出力密度(W/cc)である。図中TA, TBおよびTCで示した部分がトランジェント棒A, BおよびCの位置である。トランジェント棒が挿入される事によってドーナツ状の出力分布が各トランジェント棒位置でくびれてゆく様子が分かる。この様子を別の切口からFig.12に示す。同図は方位角方向の出力分布を示したもので、オフセット装填管(Fig.2, 5参照)方向を0°としている。トランジェント棒A, BおよびCはそれぞれ、60°, -60°, 180°(-180°)方向に位置する。Fig.5に示される様に炉心燃料は中心を0とした場合4列目から8列目の六角柱によって構成される。図中の凡例は燃料棒位置を示す列番号である。トランジェント棒全引抜きの場合はFig.12の左上の図が示す様に方位角方向には平坦な出力分布であるが、トランジェント棒が挿入される事により、対応する方位の出力が減少し、逆にトランジェント棒の無い部分の出力が上昇している。なお、この図を含めて、計算結果は特にことわりがない限り炉出力を1MWに規格化してある。この時の平均出力密度は11.1W/ccである。

トランジェント棒の挿入に伴う炉心力の歪具合を示す目安として、炉心を3本のトランジェント棒を中心とした3つの領域(TA領域:0°~120°, TB領域:120°~180°~-120°, TC領域:0°~-120°)に分けて、それぞれの領域の平均出力密度を考えた。各領域は燃料チャンネル単位で、Fig.5に示す太線で分割した。トランジェント棒位置に応じた3領域の出力密度をTable 4にまとめた。各領域の出力密度は、高さ方向平均値である。トランジェント棒が全引抜きの場合には3領

域の出力密度に差はほとんど無いが、トランジェント棒Aを挿入してゆくと、領域Aの出力密度が減少し、領域BおよびCの出力密度が上昇している。最終的にトランジェント棒Aを全挿入した状態では、A領域の出力密度は約10%減少し、BおよびC領域の出力密度はそれぞれ4%および8%増加している。トランジェント棒2本が全挿入の場合には、それらの領域で出力密度は約5%下がり、残りのトランジェント棒が全引抜きの場合には出力密度が約13%上昇している。また、ピークチャンネルの出力密度の領域毎の平均出力密度に対する比をピーキング係数と定義し、トランジェント棒の引抜き状態に応じたピーキング係数を求めた。結果をTable 4に示した。ピーキング係数はトランジェント棒2本が全挿入の時に最も大きい値(1.3)を示した。なお、ピーキング係数はトランジェント棒が全引抜きで、出力分布が最も平坦な場合で1.16であった。

以上まとめると、出力分布はトランジェント棒が不均一に挿入される事によって、部分的にくびれる様に歪む。しかし、歪の程度は最大でも13%程度でありさ程大きくはない。

3.1.2 中性子束分布

トランジェント棒の不均一挿入の効果として、実験孔内や、炉出力測定用中性子検出器位置で中性子束の分布がどうなっているかという問題は、実験を行う上で、また炉の運転上非常に重要である。この2点に注目して計算結果を整理して以下に示す。

実験孔を含む炉心領域の中性子束をチャンネル毎の平均値としてFig. 13に示した。同図には代表的な場合として、トランジェント棒全挿入あるいは全引抜きの場合のみを示した。実験孔内の熱中性子束は、トランジェント棒の位置によらず、中央部の3列のチャンネル内(直径約20cmの範囲)でほぼ一定値である事が分る。これを、さらに分り易くするために、トランジェント棒3本を全引抜きとした場合の熱中性子束を基準として、各種のトランジェント棒配置時での相対値をTable 5にまとめて示す。同表より、実験孔中央部の熱中性子束はトランジェント棒位置によらず±2%の範囲で一定値を示している。この結果は、NSRRの炉出力を一定に保てば実験孔中心での熱中性子束はトランジェント棒位置によらず一定である事を示している。つまり、実験燃料を実験孔内に挿入して照射する場合には、原子炉出力と実験燃料出力との関係(いわゆる、カップリング係数)は、トランジェント棒位置によらず一定となるものと予想される。

NSRRの炉出力は、熱出力そのもので測定する訳ではなく、炉心近傍での熱中性子束が炉出力に比例するものとして、熱中性子束を測定することによって得られている。そこで、原子炉出力モニタである中性子検出器位置での熱中性子束と、炉出力の関係について計算結果をまとめてみる。

NSRRの炉出力を一定(1MW)とした時の、E, C1, D1, C2, D2, B, A, Fの8系統の中性子検出器の有効感部での熱中性子束をTable 6にまとめる。チャンネルE, C1およびD1は、炉心中心から見てトランジェント棒Aの裏側に位置している。(Fig. 2, 5参照)また、チャンネルC2, D2は、トランジェント棒Bの裏側に、チャンネルB, A, Fはトランジェント棒Cの裏側にそれぞれ位置している。Table 6をトランジェント棒全引抜きの場合を基準に規格化して、Table 7にまとめ直した。同表より、炉出力は一定であってもトランジェント棒位置に応じて検出器位置での中性子束は+14%~-20%異なる結果となった。トランジェント棒の不均一挿入が問題となる合成パルス運転では、チャンネルFが運転モニタとして用いられているが、同中性子測定系の出力は、ト

ランジェント棒 A および B が全挿入、C が全引抜きの場合に 14% 炉出力を過大評価し、逆に、ランジェント棒 A が全引抜きで、B および C が全挿入の場合に、14% 過小評価となると考えられる。ランジェント棒位置による各検出器位置での熱中性子束を Fig. 14 にまとめた。縦軸はランジェント棒を全引抜きとした時を基準とした相対値である。また、ランジェント棒 A、B および C の裏側に位置する 3 つの炉出力モニタのグループは、それぞれ非常に似た傾向を示すので、グループ毎にまとめて図示した。

Table 3 Transient rod positions for various pulsing operations.

Transient Rod Position			Pulsing Reactivity (ρ) ¹⁾	Calculation Geometyory
A (unit)	B	C		
900 (Up)	Up	Up	0	H, T, TC
700			< 1	H
500			1.0	H, T, TC
300			1.4	H
100 (Down)			1.54	H, T, TC, TR
900 (Up)			Down	Up
700	1.9	H		
500	2.24	H		
300	2.9	H		
100 (Down)	3.08	H, T		
900 (Up)	Down	Down		
700			3.56	H
500			2.26	H
300			4.9 ²⁾	H
100 (Down)			5.05 ²⁾	H

1) Nominal reactivity, no experimental capsule in the experimental tube.

2) Hypothetical transient rod pattern. Reactivity insertion over $\rho_{4.7}$ is prohibited at the NSRR.

H : Hexagonal channel geometyory.

T : Triangular channel geometyory.

TR : Triangular channel geometyory with regulating rods inserted.

TC : Triangular channel geometyory with experimental capsule inserted.

Table 4 Calculated power densities in three regions surrounding transient rods (Hexagonal geometry calculation results).

Transient Rod Position			Region Average Power Density (W/cc)				Peaking Factor						
T A (UNIT)	T B	T C	A	B	C	Whole Core	A	B	C	Whole Core			
Up 700 500 300 Down	Up	Up	11.1	11.0	11.2	11.1	1.16	1.18	1.14	1.16			
			10.7	11.1	11.4	11.1	1.19	1.15	1.15	1.18			
			10.2	11.3	11.7	11.1	1.22	1.17	1.16	1.23			
			9.9	11.5	11.9	11.1	1.25	1.19	1.17	1.26			
Down			9.8	11.5	12.0	11.1	1.26	1.19	1.17	1.26			
			Up	Down	Up	11.6	9.9	11.8	11.1	1.16	1.29	1.15	1.22
						11.3	10.0	12.0	11.1	1.20	1.26	1.14	1.23
						10.8	10.1	12.4	11.1	1.25	1.27	1.13	1.26
10.4	10.2	12.7				11.1	1.30	1.30	1.14	1.30			
Down			10.3	10.3	12.7	11.1	1.31	1.29	1.14	1.30			
			Up	Down	Down	12.5	10.5	10.4	11.1	1.16	1.35	1.26	1.30
						12.2	10.6	10.5	11.1	1.17	1.33	1.25	1.29
						11.6	10.8	10.9	11.1	1.21	1.29	1.21	1.27
11.2	11.0	11.1				11.1	1.24	1.26	1.21	1.25			
Down			11.1	11.1	11.2	11.1	1.25	1.25	1.21	1.25			

Table 5 Relative thermal neutron flux at the experimental tube center with various transient rod positions.

TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Up	TB:Down TC:Down
900	1.00	1.02	1.01
700	1.00	1.01	0.98
500	0.99	1.02	0.99
300	1.00	1.02	1.01
100	1.01	1.01	0.98

Table 6 Thermal neutron flux at location of NSRR power monitors with various transient rod positions.
(Reactor power is 1 MW, Hexagonal geometry calculation results)

Channel E				Channel C2				Channel B			
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down	TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down	TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down
900	5.70E+10 5.41E+10	5.94E+10 5.73E+10	6.46E+10 6.40E+10	900	5.84E+10 5.93E+10	4.84E+10 4.91E+10	5.26E+10 5.41E+10	900	5.65E+10 5.72E+10	5.91E+10 6.08E+10	5.00E+10 5.19E+10
700	5.06E+10 4.76E+10	5.32E+10 5.01E+10	5.91E+10 5.46E+10	700	6.10E+10 6.16E+10	5.00E+10 5.00E+10	5.55E+10 5.60E+10	700	5.91E+10 6.01E+10	6.23E+10 6.41E+10	5.32E+10 5.32E+10
500	4.67E+10	5.02E+10	5.54E+10	500	6.18E+10	5.11E+10	5.73E+10	500	5.96E+10	6.42E+10	5.50E+10
300				300				300			
100				100				100			

Channel C1				Channel D2				Channel A			
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down	TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down	TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down
900	5.80E+10 5.47E+10	5.98E+10 5.74E+10	6.60E+10 6.51E+10	900	5.45E+10 5.55E+10	4.51E+10 4.59E+10	4.81E+10 4.95E+10	900	5.61E+10 5.69E+10	5.82E+10 5.99E+10	4.78E+10 4.98E+10
700	5.08E+10 4.75E+10	5.28E+10 4.92E+10	5.98E+10 5.50E+10	700	5.74E+10 5.82E+10	4.71E+10 4.76E+10	5.12E+10 5.19E+10	700	5.91E+10 6.03E+10	6.18E+10 6.38E+10	5.15E+10 5.20E+10
500	4.66E+10	4.94E+10	5.57E+10	500	5.84E+10	4.84E+10	5.32E+10	500	5.98E+10	6.39E+10	5.37E+10
300				300				300			
100				100				100			

Channel D1				Channel F			
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down	TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down
900	5.68E+10 5.39E+10	5.80E+10 5.57E+10	6.45E+10 6.39E+10	900	5.75E+10 5.85E+10	5.90E+10 6.09E+10	4.92E+10 5.13E+10
700	5.05E+10 4.75E+10	5.17E+10 4.83E+10	5.93E+10 5.50E+10	700	6.10E+10 6.24E+10	6.31E+10 6.53E+10	5.35E+10 5.44E+10
500	4.67E+10	4.86E+10	5.58E+10	500	6.19E+10	6.54E+10	5.61E+10
300				300			
100				100			

(Behind TA)

(Behind TB)

(Behind TC)

(unit: cm⁻²)

(unit: cm⁻²)

Table 7 Thermal neutron flux at location of NSRR power monitors with various transient rod positions.
(Relative flux to those with all three transient rods up, Hexagonal geometry calculation results)

Channel E				Channel C2				Channel B			
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down	TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down	TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down
900	1.00	1.04	1.13	900	1.00	0.83	0.90	900	1.00	1.05	0.88
700	0.95	1.01	1.12	700	1.02	0.84	0.93	700	1.01	1.08	0.92
500	0.89	0.93	1.04	500	1.04	0.86	0.95	500	1.05	1.10	0.94
300	0.84	0.88	0.96	300	1.05	0.86	0.96	300	1.06	1.13	0.94
100	0.82	0.88	0.97	100	1.06	0.88	0.98	100	1.05	1.14	0.97

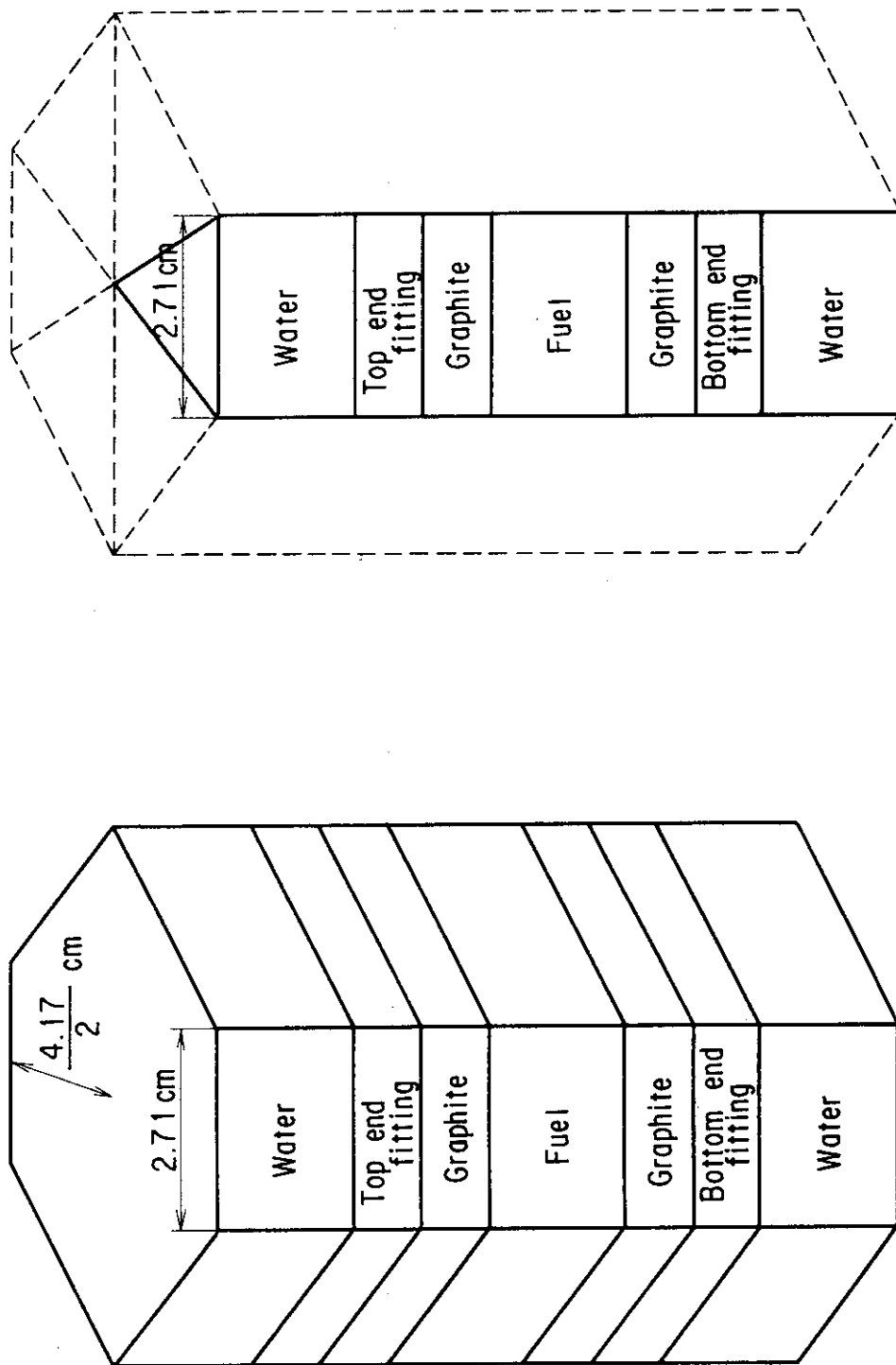
Channel C1				Channel D2				Channel A			
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down	TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down	TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down
900	1.00	1.03	1.14	900	1.00	0.83	0.88	900	1.00	1.04	0.85
700	0.94	0.99	1.12	700	1.02	0.84	0.91	700	1.01	1.07	0.89
500	0.88	0.91	1.03	500	1.05	0.86	0.94	500	1.05	1.10	0.92
300	0.82	0.85	0.95	300	1.07	0.87	0.95	300	1.07	1.14	0.93
100	0.80	0.85	0.96	100	1.07	0.89	0.98	100	1.07	1.14	0.96

Channel D1				Channel F			
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down	TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Down TC:Down
900	1.00	1.02	1.14	900	1.00	1.03	0.86
700	0.95	0.98	1.13	700	1.02	1.06	0.89
500	0.89	0.91	1.04	500	1.06	1.10	0.93
300	0.84	0.85	0.97	300	1.09	1.14	0.95
100	0.82	0.86	0.98	100	1.08	1.14	0.98

(Behind TA)

(Behind TB)

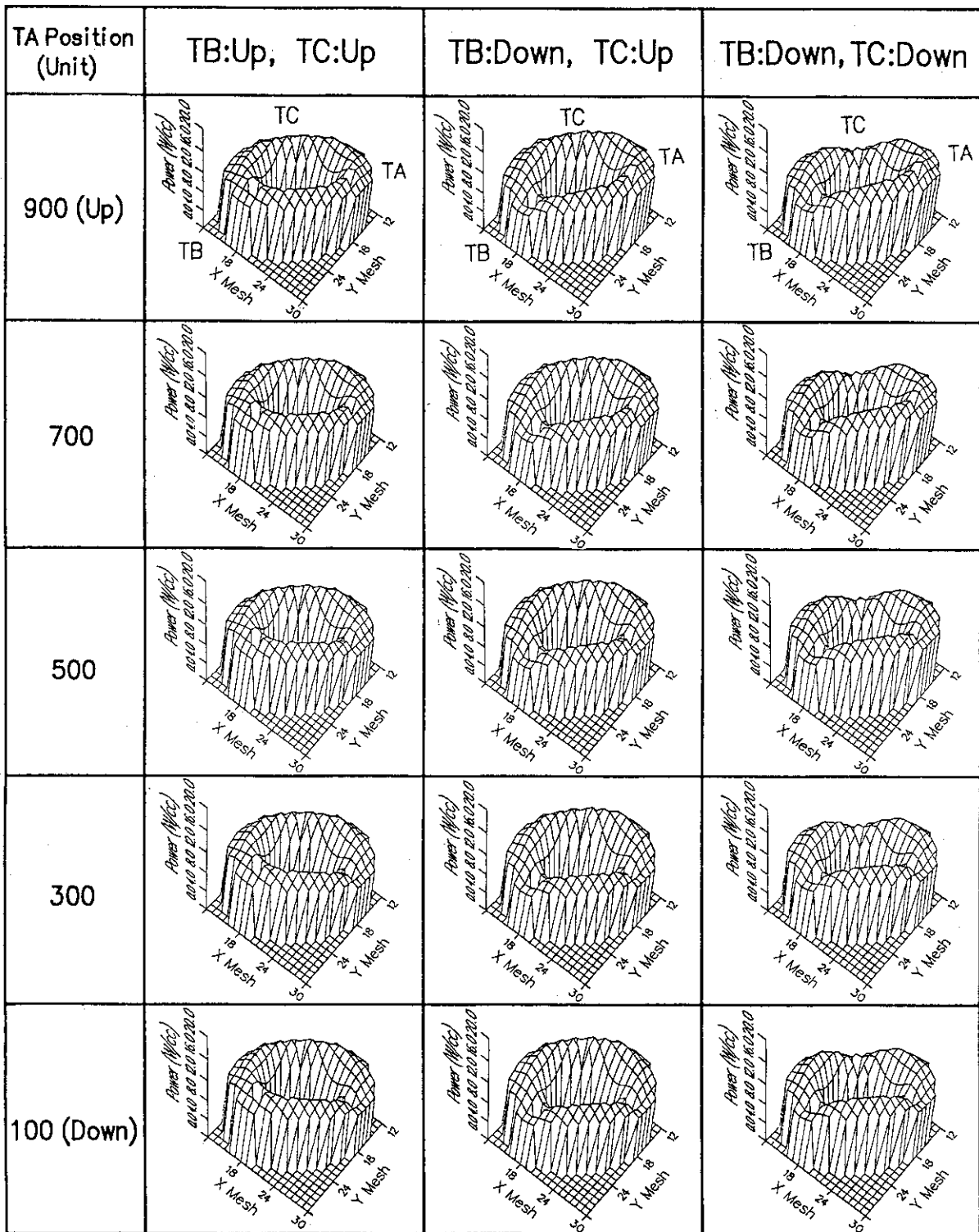
(Behind TC)



Triangular Channel Geometry
(Detailed Calculation)

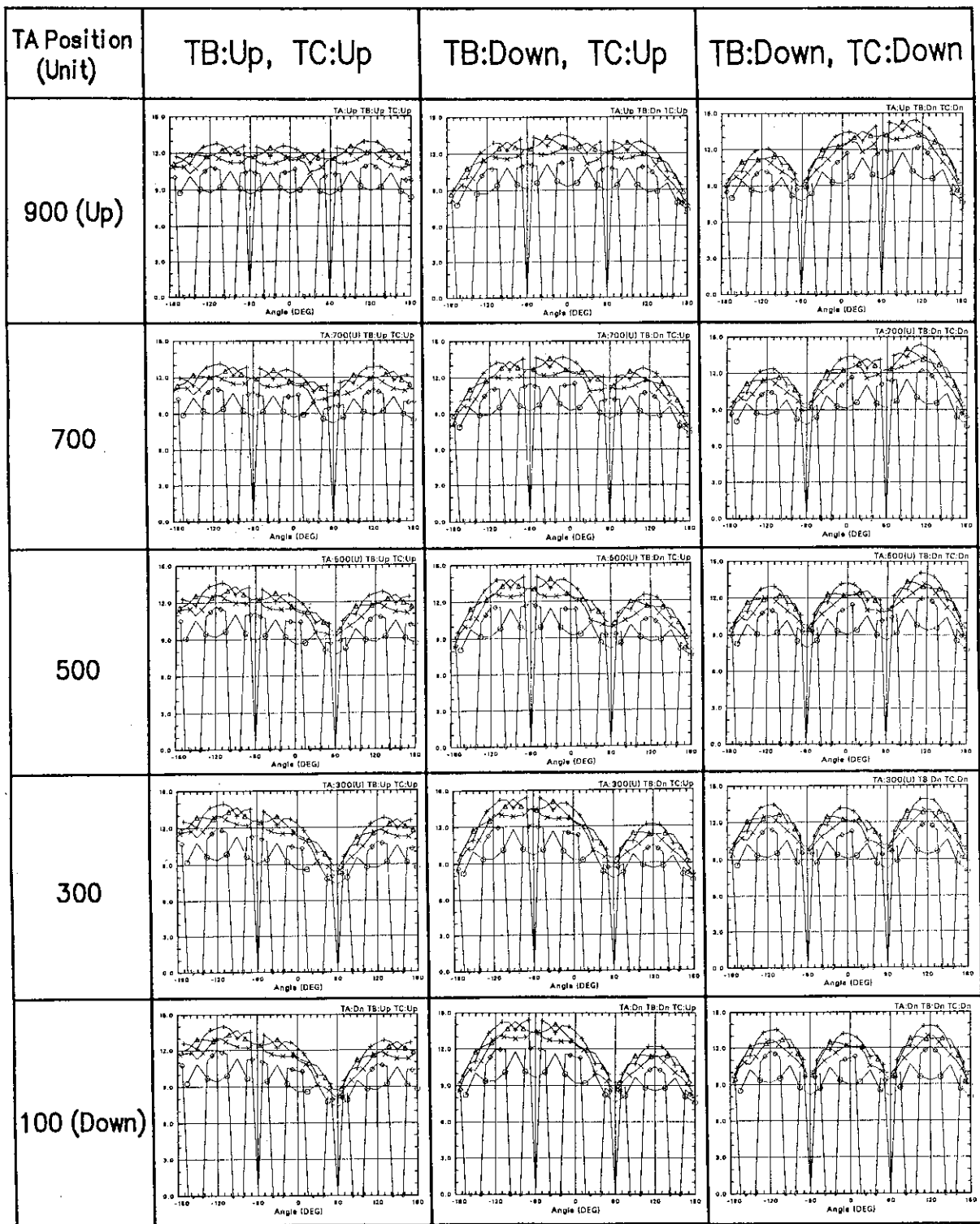
Hexagonal Channel Geometry
(Scoping Calculation)

Fig. 10 Channel geometries for NSRR core calculations.



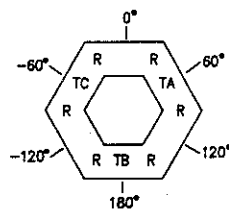
TA,TB,TC: Transient rod A, B and C

Fig. 11 Power profiles of NSRR with irregularly inserted transient control rods. (Hexagonal geometry calculation results)



TB TC TA TB

Fig. 12 Azimuthal power profiles of NSRR with irregularly inserted transient control rods. (Hexagonal geometry calculation results)



Y axes are power density (W/cc) in all the figures.

- 4 layer
- △ 5 layer
- ⊥ 6 layer
- × 7 layer
- ◇ 8 layer

(unit: cm⁻²)

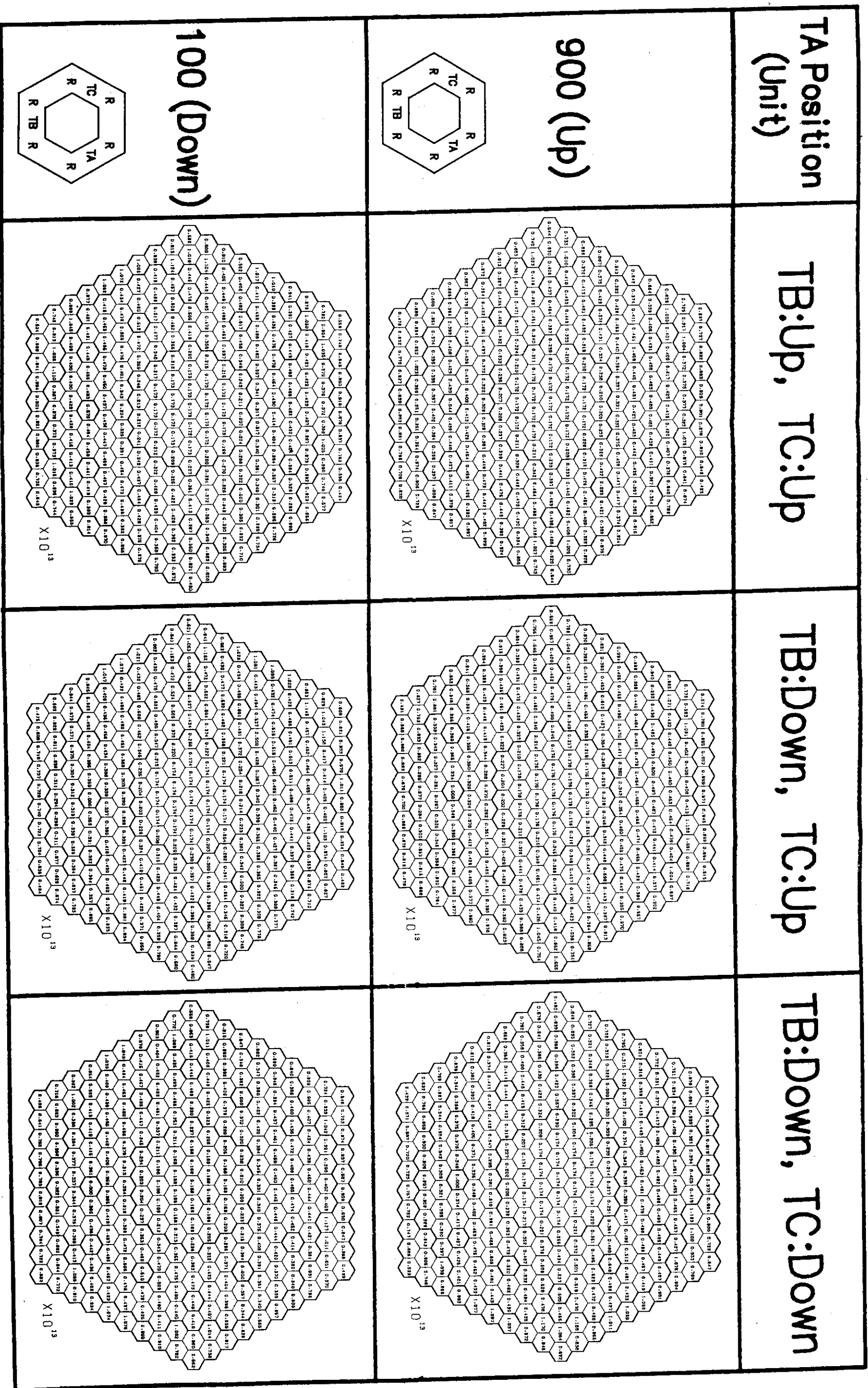


Fig. 13 Channel average thermal neutron flux profiles in NSRR core.
(Hexagonal geometry calculation results)

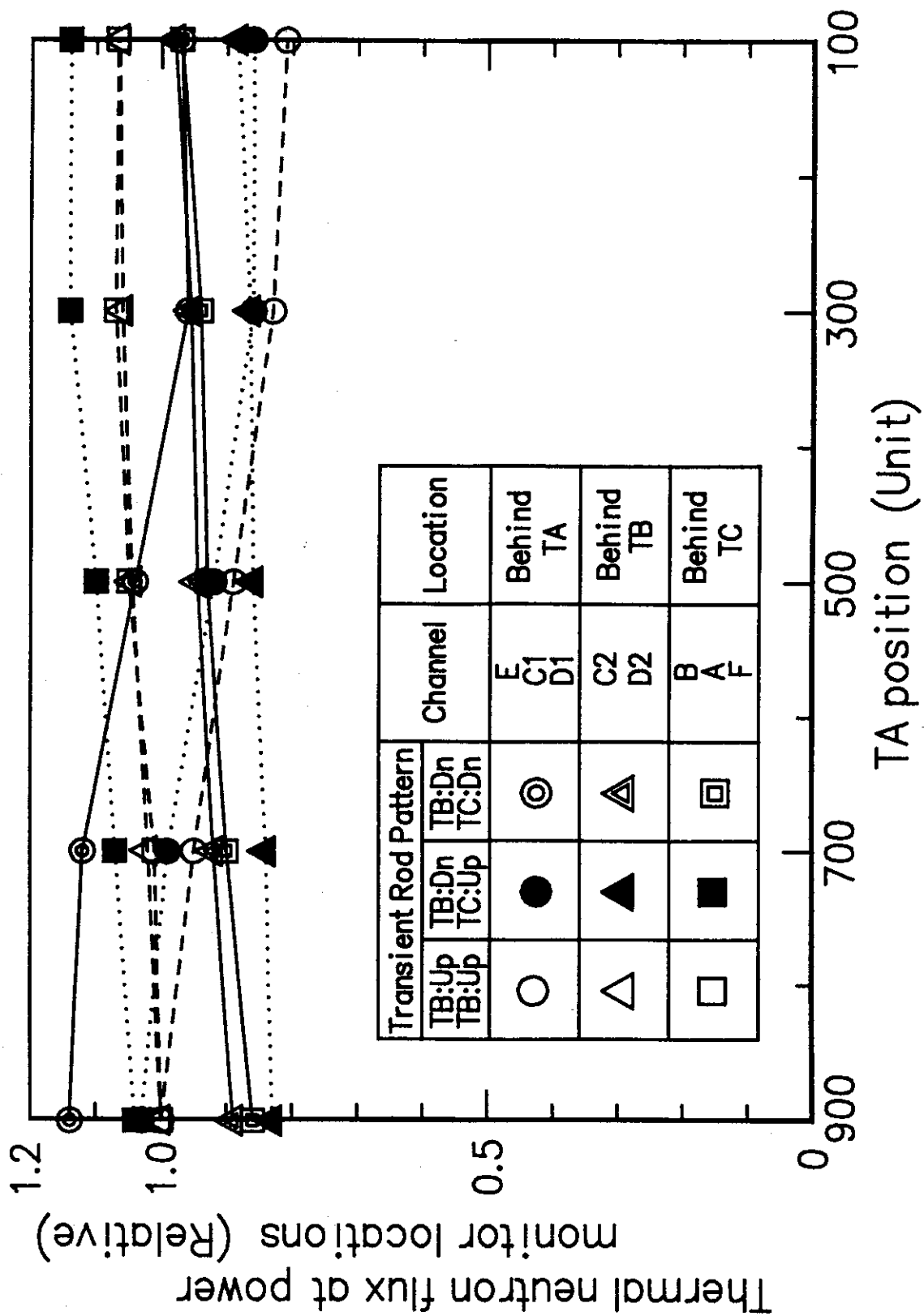


Fig. 14 Thermal neutron flux at NSRR power monitor locations as a function of TA position.
(Hexagonal geometry calculation results)

3.2 3角柱体系詳細計算

6角柱モデルによる全体傾向を把むためのスコーピング計算では、各チャンネル（単位セル）のピッチは4.17cmである。本計算における代表的物質である水中における熱中性子の巨視的断面積の逆数は約0.2cmであり、チャンネルのピッチはこれに比べてかなり大きく、水平面方向のメッシュ分割が不十分である可能性が高い。そこで、6角柱を6等分して、メッシュを細かくして、3角柱体系で詳細計算を行った。3角柱体系での計算は、Table 3に示す様に代表的な6つのトランジェント棒位置について行った。実験カプセルおよび調整棒は挿入していない。結果を以下にまとめる。

3.2.1 炉心出力分布

3角柱体系での計算によって得られた出力密度分布をFig. 15および16に示す。縦軸はいずれの図も、高さ方向に平均した各燃料の出力密度である。TA, TBおよびTCと図示した付近の出力のくぼみがトランジェント棒位置である。Fig. 16はFig. 15を燃料チャンネル毎に平均して示したもので、Fig. 11の6角柱体系のスコーピング計算結果と直接比較できる。両図を比べると、全体的な傾向は同じであるが、炉心外周部の出力密度が3角柱体系の計算結果(Fig. 16)において、6角柱体系の結果(Fig. 11)に比べてやや盛り上がりしており、このため全体的に平坦な分布となっている事が分かる。ただし、トランジェント棒挿入時のくびれの大きさについては、両図からは定量的な比較は出来ない。3角柱体系の計算において原子炉出力密度が外周部で高くなっている点は、6角柱体系の計算に比べてメッシュが細かくなった事により周辺部の水反射体の効果がより強く現われているためと考えられる。

炉心を同心円筒で4列から8列目までを切った場合の、方位角方向の出力分布をFig. 17に示す。6角柱体系の計算結果であるFig. 12と比較すると、3角柱体系の計算結果は、より滑らかな方位角方向の出力密度分布を示しており、列間の出力密度差も小さく半径方向に均一な出力分布となっている事が分かる。しかし、トランジェント棒挿入位置での出力密度は、6角柱体系の計算結果では最小値が約8.8W/ccであるのに対し、3角柱体系では約7.5W/ccと小さくなっている。トランジェント棒挿入により炉出力がくびれる様に歪む傾向は、3角柱体系での計算結果においてより顕著に現れている。炉心をトランジェント棒を中心とした3つの領域に分けて、それぞれの領域平均の出力密度を求めた。結果をTable 8にまとめた。同表においても、3角中体系において()内に示した6角中体系の結果と比べて、トランジェント棒を挿入した場合の炉出力の歪の程度がより強く評価されている事が分かる。各領域の平均出力密度は全体の平均出力密度に比べ、トランジェント棒位置に応じ最大で+22%、最小で-17%の変動を示している。

3.2.2 中性子束分布

実験孔および炉心部での熱中性子束をチャンネル毎にFig. 18に示す。6角柱体系で行った計算の結果と同じく実験孔中心部では、トランジェント棒の位置にかかわらず熱中性子束は一定値となっている。Table 9にトランジェント棒を全引抜きとした場合を基準にした熱中性子束の相対値を示す。トランジェント棒位置の違いによる熱中性子束の変化は最大0.4%と非常に小さい。この結果から、トランジェント棒の不均一挿入による原子炉出力の歪は実験孔中心までは及んではい

ないこと、つまり、炉出力が一定であれば、トランジェント棒位置によらず、実験孔内の熱中性子束は一定であることが、3角柱体系の結果からも分かる。

次に、炉出力モニタ用中性子検出器位置を含む広い範囲の熱中性子束分布を等高線形式でFig. 19に示す。図中Fは燃料を表し、TA, TB, TCはそれぞれトランジェント棒A, BおよびCを表わす。熱中性子束分布は炉心部分では炉出力分布に対応しており、トランジェント棒挿入位置で大きくくびれている。炉心外側の中性子束は同心円を描きつつ、炉心から離れるにつれ小さくなっている。トランジェント棒BおよびCが全引抜き(Up)で、トランジェント棒A位置を900(Up), 500, 100 (Down)ユニットと変化させた場合、Fig. 19左端の3つの図に見られ様に、トランジェント棒Aの背後にある、チャンネルE, C1, D1の3つの炉出力モニタ部の中性子束が若干低下しているのが分かる。Table 10および11に値を示すが、トランジェント棒Aを全挿入した場合、これら3系統の炉出力モニタ部での熱中性子束は、全引抜きの場合に比べて約25%小さい値となっている(原子炉出力を一定とした場合)。6角柱体系で行ったスコーピング計算では、同じ場合の熱中性子束の減少幅は約20%であったので、3角柱体系による詳細計算の方がシャドウイング効果がより強く現われていると言える。3本のトランジェント棒A, BおよびCの背後に位置とする3つのグループの炉出力モニタ位置での熱中性子束の変化とトランジェント棒位置の関係をFig. 20にまとめた。縦軸は、トランジェント棒全引抜きの場合の各検出器位置での熱中性子束を1とした相対熱中性子束である。原子炉出力は一定であるとした。この図とFig. 14を比較しても3角柱体系による計算結果において、6角柱体系に比べてシャドウイングの効果がより強く現われている事が分る。

Table 8 Calculated power densities in three regions surrounding transient rods. (Triangular geometry calculation results)

Transient Rod Position			Region Average Power Density (W/cc)				Peaking Factor			
T A (UNIT)	T B	T C	A	B	C	Whole Core	A	B	C	Whole Core
Up 500 Down	Up	Up	11.1 (11.1)	11.0 (11.0)	11.2 (11.2)	11.1 (11.1)	1.13 (1.16)	1.13 (1.18)	1.12 (1.14)	1.13 (1.16)
			9.9 (10.2)	11.5 (11.3)	11.9 (11.7)	11.1 (11.1)	1.20 (1.22)	1.14 (1.17)	1.16 (1.16)	1.24 (1.23)
			9.2 (9.8)	11.8 (11.5)	12.3 (12.0)	11.1 (11.1)	1.27 (1.26)	1.16 (1.19)	1.17 (1.17)	1.30 (1.26)
			12.0 (11.6)	9.3 (9.9)	12.1 (11.8)	11.1 (11.1)	1.14 (1.16)	1.30 (1.29)	1.16 (1.15)	1.27 (1.22)
Down	Down	Up	9.4 (10.3)	4.8 (10.3)	13.5 (12.7)	11.1 (11.1)	1.37 (1.31)	1.34 (1.29)	1.15 (1.14)	1.41 (1.30)
			13.4 (12.5)	10.1 (10.5)	9.9 (10.4)	11.1 (11.1)	1.17 (1.16)	1.41 (1.35)	1.30 (1.26)	1.41 (1.30)
Up	Down	Down								

Results of Hexagonal calculations are presented in parentheses.

Table 9 Relative thermal neutron flux at the experimental tube center with various transient rod positions. (Triangular geometry calculation results)

TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Up	TB:Down TC:Down
900	1.000	1.000	1.004
500	1.004		
100	1.004	1.004	

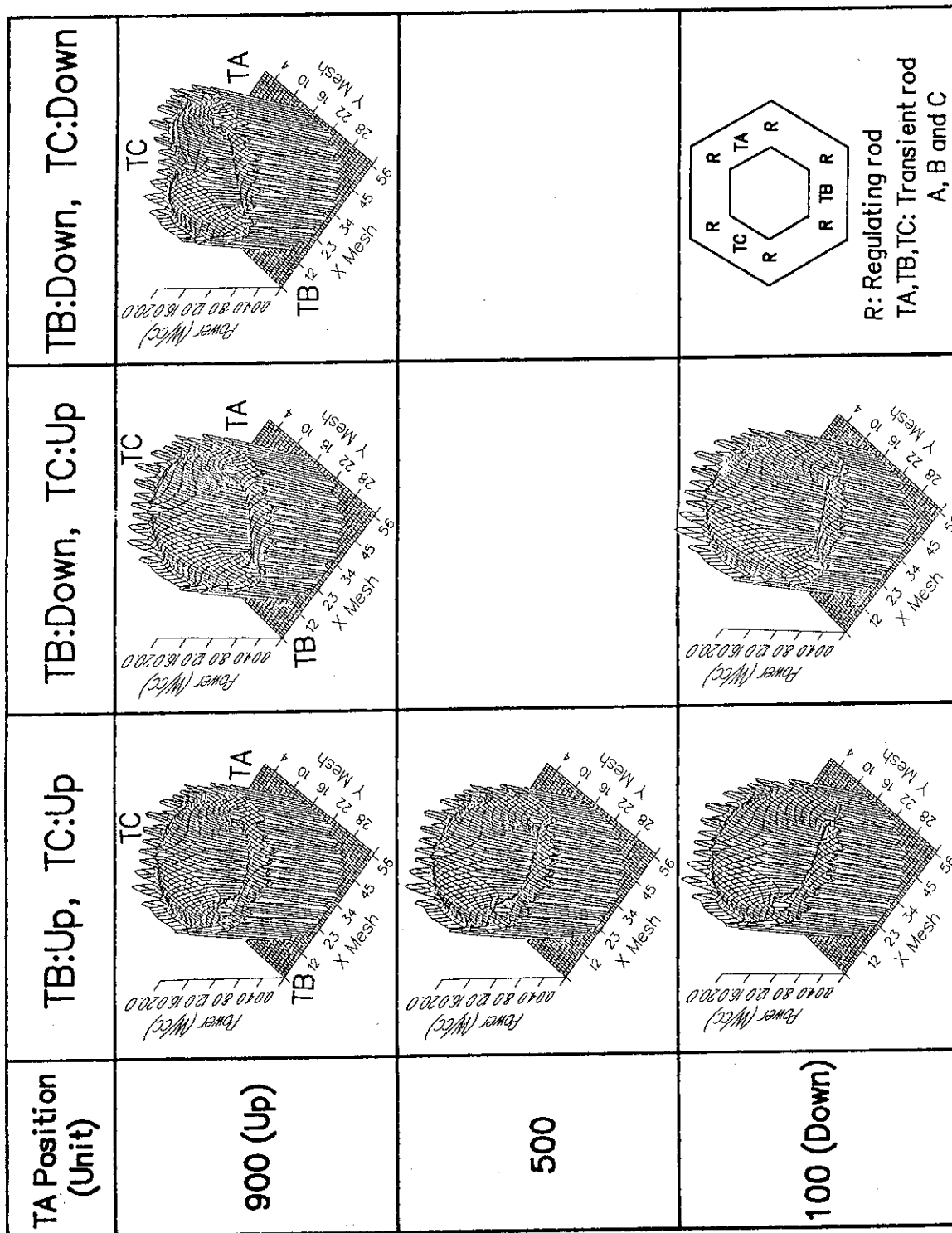


Fig. 15 Power profiles of NSRR with irregularly inserted transient control rods. (Triangular geometry calculation results)

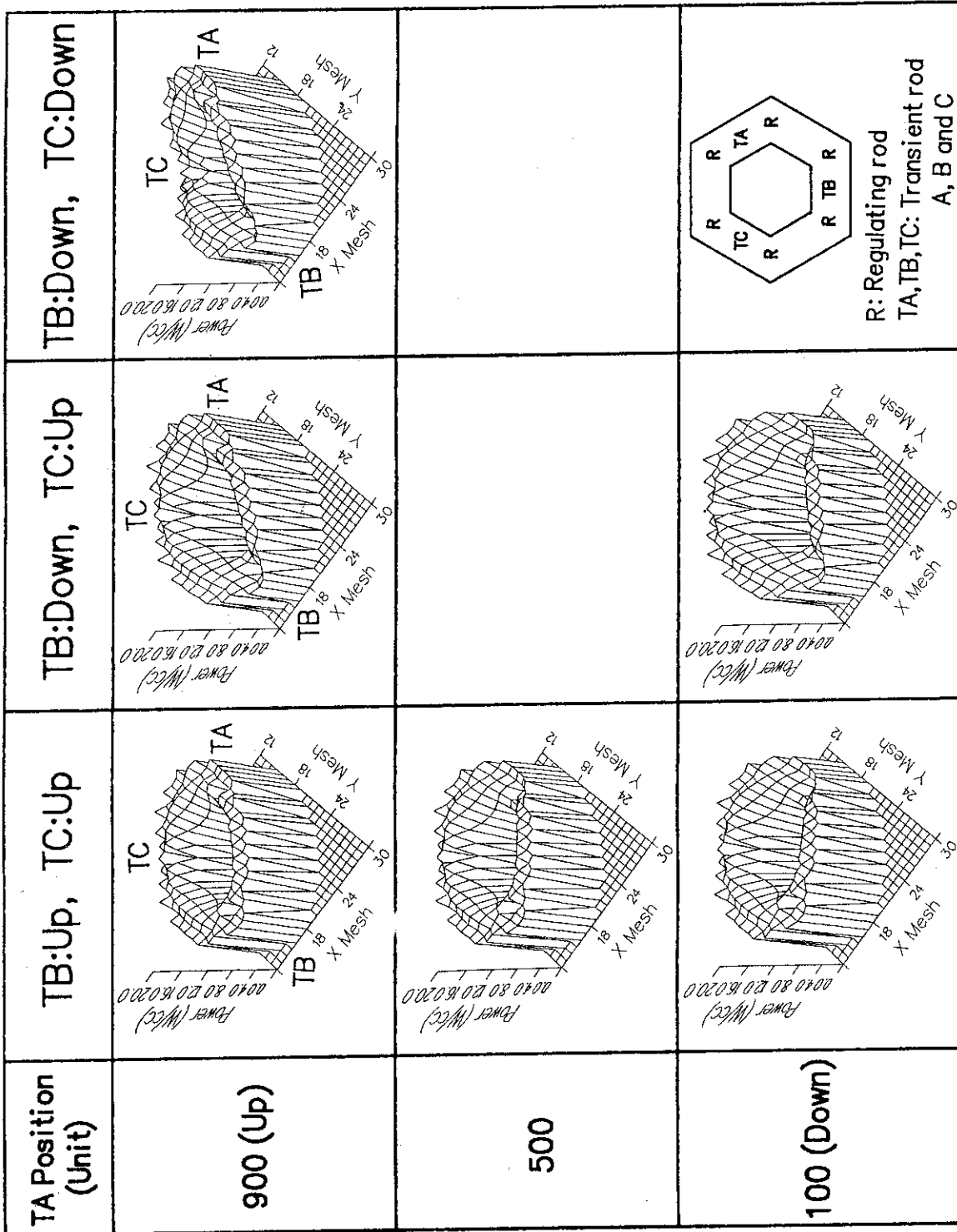


Fig. 16 Channel averaged power profiles of NSRR with irregularly inserted transient control rods.
(Triangular geometry calculation results)

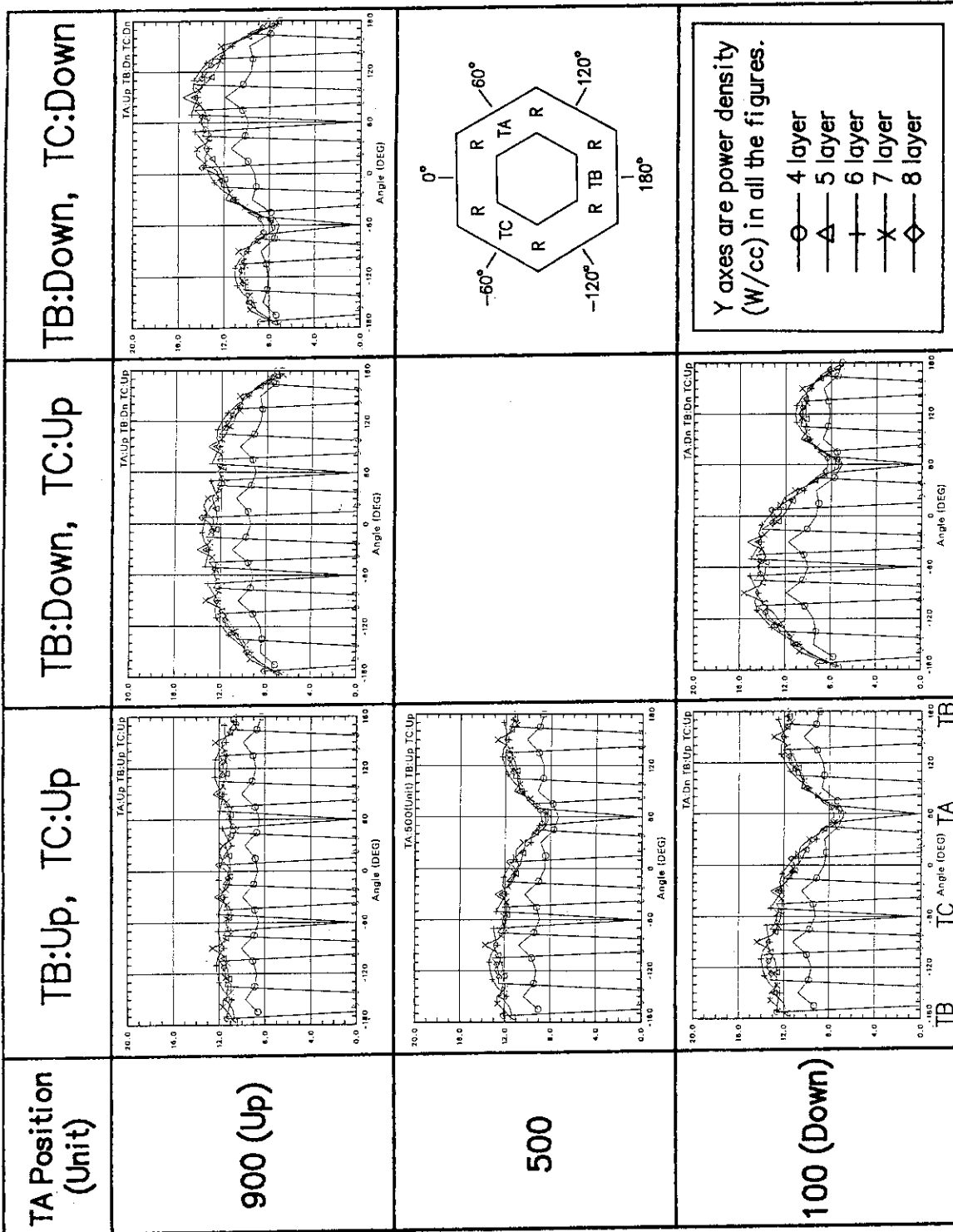


Fig. 17 Azimuthal power profiles of NSRR with irregularly inserted transient control rods.
(Triangular geometry calculation results)

(unit: cm⁻²)

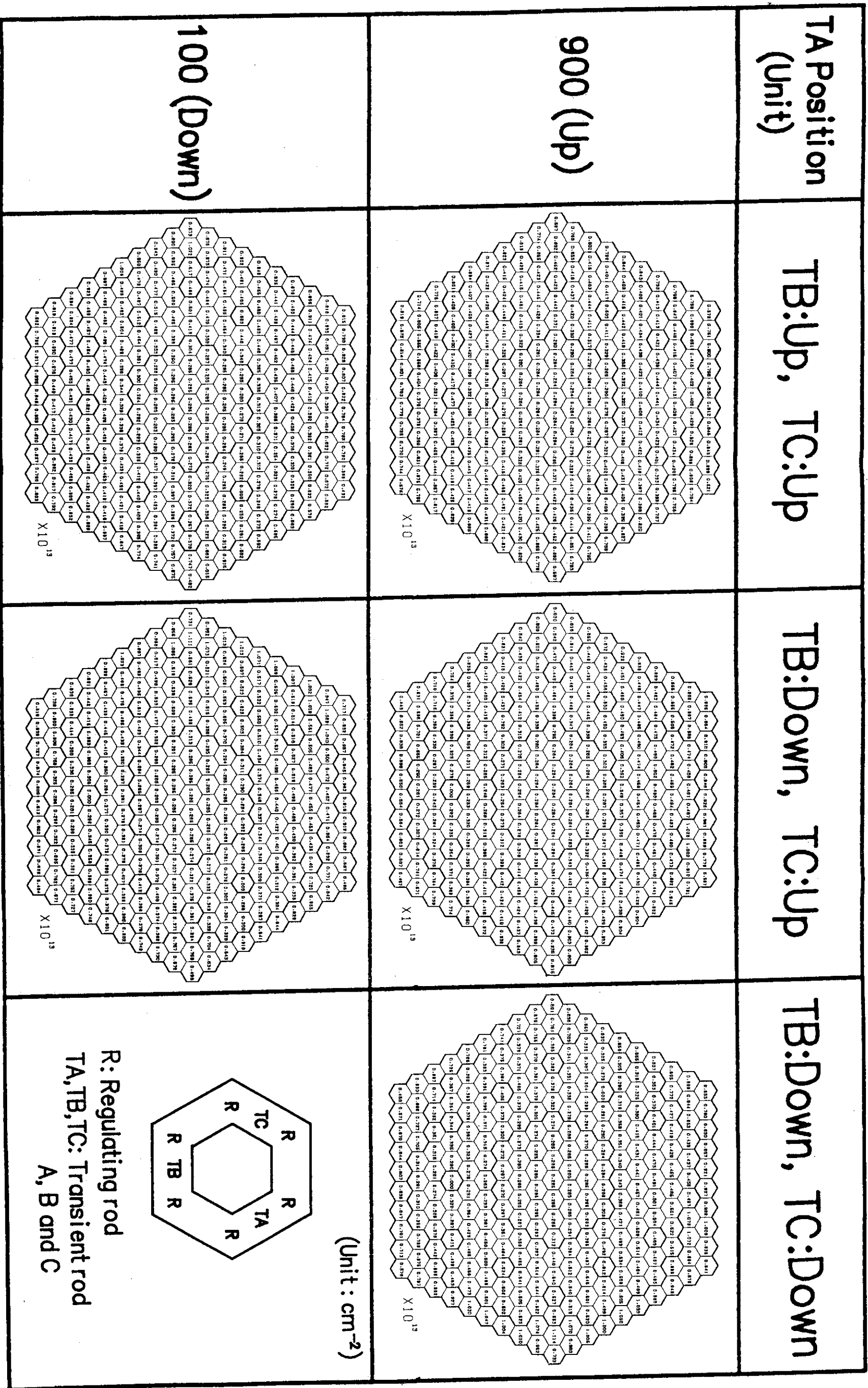


Fig. 18 Channel average thermal neutron flux profiles in NSRR core (Triangular geometry calculation results)

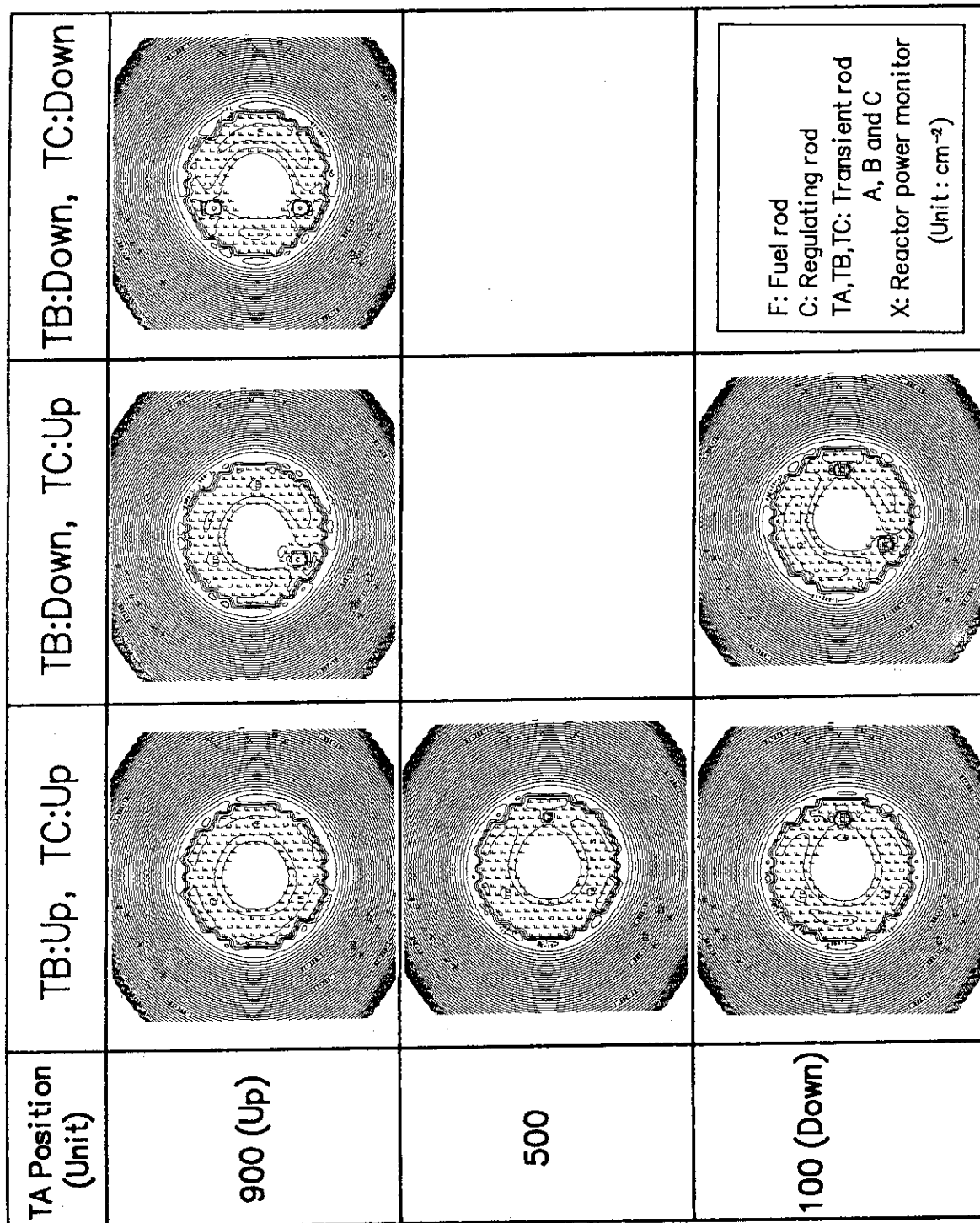


Fig. 19 Contour maps of thermal neutron flux at NSRR with various transient rod positions. (Triangular geometry calculation results)

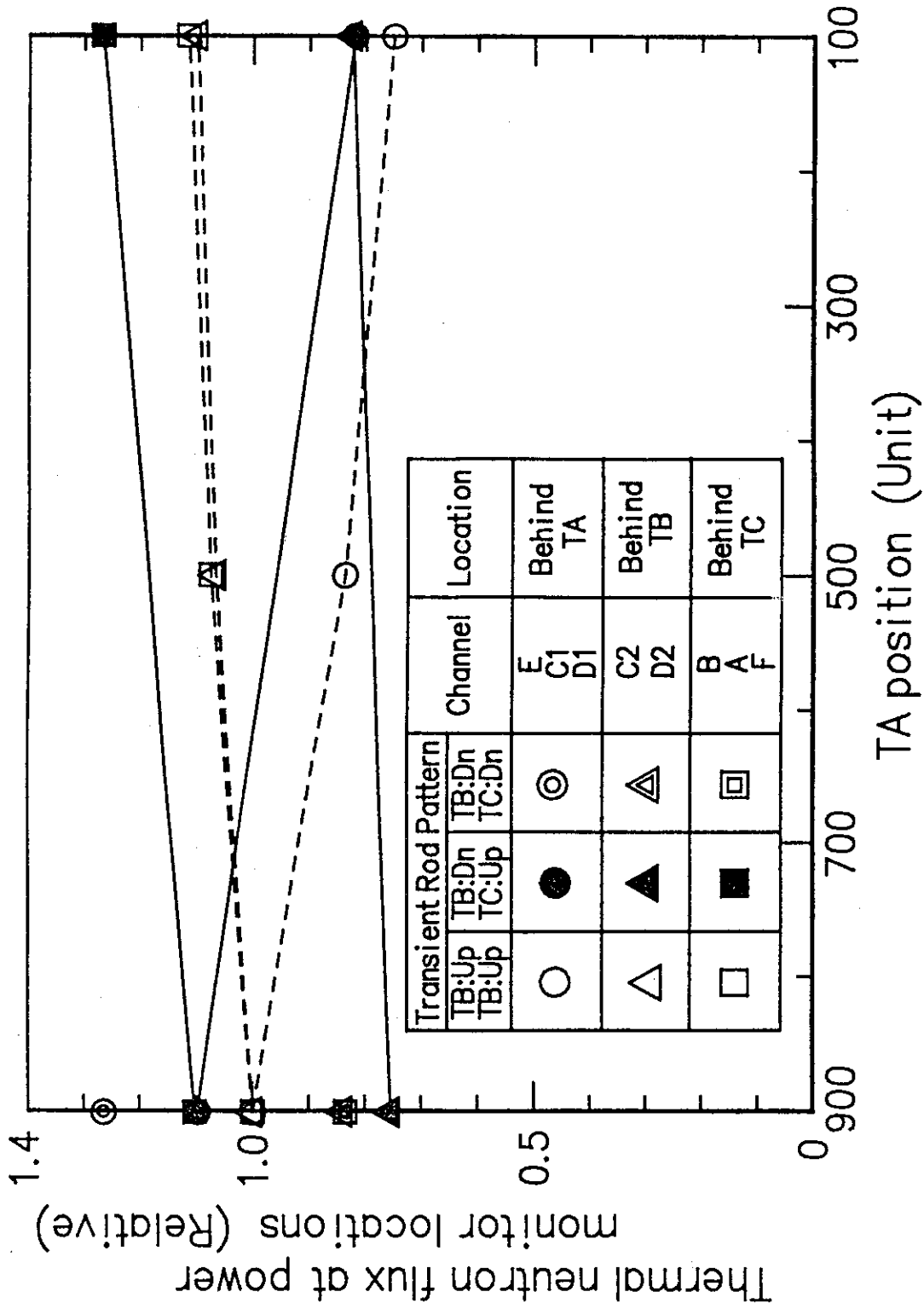


Fig. 20 Thermal neutron flux at NSRR power monitor locations as a function of TA position. (Triangular geometry calculation results)

3.3 調整棒位置の効果

これまでの全ての計算では調整棒は全引抜きとして、中性子場の計算を行って来た。しかし、実際には、例えば、300kW定出力運転の場合には、調整棒は約570ユニットまで挿入されている（実験カプセル無し、トランジェント棒全引抜き時）。また、合成パルス運転における高出力運転時には、炉心燃料の温度上昇による負の反応度効果を補償するため、調整棒の連続引抜きが行われ、刻々と調整棒位置は変化する。こうした調整棒位置が、炉出力の歪やシャドウイング効果に与える影響を知るために、トランジェント棒A、BおよびCがそれぞれ全挿入(Down)、全引抜き(Up)、全引抜き(Up)の場合と、全引抜き(Up)、全挿入(Down)、全挿入(Down)の場合の2ケースについて調整棒位置を900(Up)、700、500、300ユニットと変化させて炉出力および中性子束を求めた。

3.3.1 炉心出力分布

調整棒はFig. 2および5に示される様に、炉心中心から数えた第6列目に60°毎に6本配置されている。従って3本配置されているトランジェント棒の間に2本ずつ位置する構成となっている。トランジェント棒Aが全挿入、BおよびCが全引抜きとして、調整棒を徐々に挿入していった場合の炉出力分布をFig. 21の左方に示す。調整棒全引抜き時には、トランジェント棒Aの部分でのみ炉出力が低く、くびれている。調整棒を挿入するに従い、対応する6ヶ所に炉出力のくぼみが発生し、徐々に大きくなってゆく様子が分かる。同図右方に示したトランジェント棒A全引抜き、BおよびC全挿入の場合も同様の事が言える。ここで縦軸は、軸方向に平均した出力密度(W/cc)である。Fig. 22には、この図を燃料チャンネル毎に平均して、157本のチャンネル平均の出力密度の分布を示す。同図では、調整棒位置での炉出力のくぼみがさらに明確に認識できる。

原子炉の出力分布を示すもう1つの切口として、炉心の方位角方向の出力分布をFig. 23に示す。左行に示したトランジェント棒Aのみ全挿入、BおよびCを全引抜きとした場合を見る。調整棒を全引抜きとした時には、トランジェント棒Aが全挿入となっている60°方向に出力の最小点があり、逆に-120°方向に最大点がある。調整棒を徐々に挿入すると、調整棒位置に対応する±30°、±90°、±150°方向に出力のくぼみが発生し、徐々にくぼみが大きくなっている。その結果-120°方向の出力ピーク部分では、やや出力が増加する傾向が分かる。同様の傾向は右行に示したトランジェント棒A全引抜き、BおよびC全挿入の場合にも見られる。また、炉心をトランジェント棒A、BおよびCを中心とした3つの領域に分割した場合の、調整棒挿入に伴う各領域の平均出力密度の変化をTable 12に示す。調整棒は各領域に均等に2本ずつ位置しているために、調整棒位置によらず3領域の平均出力密度は変化しない。ただし、前述のとおり、出力分布は大きく変化し、ピーキング係数は若干大きくなる傾向を示している。

3.3.2 中性子束分布

調整棒位置の変化による、炉心領域の熱中性子束の変化の様子をFig. 24に示す。調整棒が挿入されると、調整棒周辺の出力量が低下する。このため、原子炉出力を一定とすると、調整棒のない領域の出力量が逆に上昇する。実験孔内の熱中性子束密度もそれにつれて上昇している。ただし、トランジェント棒の不均一挿入に伴う熱中性子束の方位角による歪は見られない。調整棒位

置による、実験孔中央での熱中性子束の変化を調整棒を全引抜きの場合を基準としてTable 13にまとめた。調整棒が300ユニットまで挿入された場合、熱中性子束は基準値に比べて24%増加している。この傾向は、トランジェント棒の挿入位置にはよらない。また、同表に示した熱中性子束は炉心の高さ方向の平均値であるが、炉心高さ中心位置における熱中性子束も、全く同じ結果であった。

原子炉出力モニタ部を含む炉心全体の熱中性子束分布をFig. 25に示した。等高線を見ると、調整棒位置での中性子束のくぼみの発生と成長の過程が分かる。調整棒全引抜きの900ユニットの図とかなり挿入した300ユニットの図を比べると、調整棒の挿入に伴い、炉心部での中性子束分布の凸凹が大きくなり、実験孔部での中性子束が上昇していることが分かる。図中×印で示した原子炉出力モニタ位置での熱中性子束には、ほとんど変化は見られない。

原子炉出力モニタ位置での熱中性子束をTable 14にまとめた。さらに、調整棒全引抜きの場合を基準に相対値としてTable 15に示した。これらの表に見られる様に、調整棒位置の違いによる、原子炉出力モニタ位置での熱中性子束の変化は比較的小さく最大でも+7%に留まっている。また、全挿入されているトランジェント棒の背後にある検出器位置の熱中性子束は変化が少なく最大でも+2%であるのに対し、トランジェント棒が引抜かれている方位角にあるモニタ位置での熱中性子束での変化が大きい（最大+7%）傾向がある。これは、実験孔内の熱中性子束が調整棒の挿入と共に増加した現象と同じく、制御棒の入っていない領域の出力が、調整棒挿入による部分的出力低下を補う分だけ上昇するために、その領域に近いモニタ位置での熱中性子束が上昇するものと考えられる。原子炉出力モニタ位置において、調整棒の効果が実験孔内程強くないのは、出力モニタが水中における熱中性子の平均自由行径（1cm以下）に比べて炉心から十分遠方にあるので局所的な出力密度の凸凹があまり効かなくなっているためと考えられる。他方、実験孔内は空気であり熱中性子の平均自由行径は数十mある。部分的に高い熱中性子束の影響を直接受けているため、調整棒位置の効果が、実験孔内の熱中性子束にかなり強く現われているものと考えられる。

Table 10 Thermal neutron fluxes at locations of NSRR power monitors with various transient rod positions. (Reactor power is 1 MW, Triangular geometry calculation results)

Channel E				Channel B			
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down
900	5.57E+10	6.20E+10	5.52E+10	6.18E+10	900	5.52E+10	6.18E+10
500	4.70E+10		5.86E+10		500	5.86E+10	
100	4.23E+10	4.75E+10	6.04E+10	6.97E+10	100	6.04E+10	6.97E+10

Channel C1				Channel A			
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down
900	5.66E+10	6.21E+10	5.47E+10	6.05E+10	900	5.47E+10	6.05E+10
500	4.70E+10		5.88E+10		500	5.88E+10	
100	4.18E+10	4.56E+10	6.11E+10	6.95E+10	100	6.11E+10	6.95E+10

Channel D1				Channel F			
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down
900	5.54E+10	5.96E+10	5.61E+10	6.08E+10	900	5.61E+10	6.08E+10
500	4.70E+10		6.09E+10		500	6.09E+10	
100	4.25E+10	4.48E+10	6.35E+10	7.10E+10	100	6.35E+10	7.10E+10

Channel C2				Channel D2			
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down	TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Down
900	5.81E+10	4.39E+10	5.81E+10	4.99E+10	900	5.40E+10	4.07E+10
500	6.16E+10		5.79E+10		500	5.79E+10	
100	6.35E+10	4.73E+10	6.00E+10	4.53E+10	100	6.00E+10	4.53E+10

↑

(Behind TA)

↑

(Behind TC)

↑

(Behind TB)

(unit: cm⁻²)

Table 11 Thermal neutron fluxes at locations of NSRR power monitors with various transient rod positions. (Relative flux to those with all three transient rods up, Triangular geometry calculation results)

Channel	TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Up	TB:Down TC:Down
Channel E	900	1.000	1.113	1.260
	500	0.844		
	100	0.759	0.853	
Channel C1	900	1.000	1.097	1.270
	500	0.830		
	100	0.739	0.806	
Channel D1	900	1.000	1.076	1.267
	500	0.848		
	100	0.767	0.809	
Channel C2	900	1.000	0.756	0.859
	500	1.060		
	100	1.093	0.814	
Channel D2	900	1.000	0.754	0.828
	500	1.072		
	100	1.111	0.839	
Channel B	900	1.000	1.120	0.861
	500	1.062		
	100	1.094	1.263	
Channel A	900	1.000	1.106	0.812
	500	1.075		
	100	1.117	1.271	
Channel F	900	1.000	1.084	0.811
	500	1.086		
	100	1.132	1.266	

Table 12 Calculated power densities in three regions surrounding transient rods. (Triangular geometry calculation results with regulating rods inserted)

Control Rod Position		Region Average Power Density (W/cc)				Peaking Factor			
Transient	Regulating (UNIT)	A	B	C	Whole Core	A	B	C	Whole Core
TA : Dn	9 0 0	9.2	11.8	12.3	11.1	1.27	1.16	1.17	1.30
TB : Up	7 0 0	9.2	11.9	12.3	11.1	1.29	1.71	1.16	1.28
TC : Up	5 0 0	9.2	11.9	12.3	11.1	1.33	1.19	1.19	1.31
	3 0 0	9.2	11.9	12.3	11.1	1.37	1.21	1.22	1.35
TA : Up	9 0 0	13.4	10.1	9.9	11.1	1.17	1.41	1.30	1.41
TB : Dn	7 0 0	13.4	10.1	9.9	11.1	1.13	1.44	1.32	1.36
TC : Dn	5 0 0	13.4	10.1	10.0	11.1	1.13	1.47	1.34	1.36

Table 13 Relative thermal neutron flux at the experimental tube center with various transient rod and regulating rod positions. (Triangular geometry calculation results)

Regulating Rod (Unit) Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Up TB:Down TC:Down
900	1.00	1.10
700	1.13	1.13
500	1.19	1.19
300	1.24	

Table 14 Thermal neutron flux at locations of NSRR power monitors with various transient and regulating rod positions. (Reactor power is 1 MW, Triangular geometry calculation results)

Channel E				Channel C2				Channel B			
Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Up TB:Down TC:Down	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Up TB:Down TC:Down	Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Up TB:Down TC:Down	Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Up TB:Down TC:Down	
900	4.23E+10	7.02E+10	900	6.35E+10	4.99E+10	900	6.04E+10	4.75E+10			
700	4.25E+10	7.12E+10	700	6.45E+10	5.04E+10	700	6.11E+10	4.77E+10			
500	4.24E+10	7.18E+10	500	6.54E+10	5.04E+10	500	6.18E+10	4.77E+10			
300	4.25E+10		300	6.70E+10		300	6.31E+10				

Channel C1				Channel D2				Channel A			
Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Up TB:Down TC:Down	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Up TB:Down TC:Down	Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Up TB:Down TC:Down	Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Up TB:Down TC:Down	
900	4.18E+10	7.19E+10	900	6.00E+10	4.47E+10	900	6.11E+10	4.44E+10			
700	4.22E+10	7.32E+10	700	6.10E+10	4.51E+10	700	6.21E+10	4.48E+10			
500	4.24E+10	7.46E+10	500	6.18E+10	4.52E+10	500	6.33E+10	4.52E+10			
300	4.28E+10		300	6.33E+10		300	6.52E+10				

Channel D1				Channel F			
Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Up TB:Down TC:Down	Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Up TB:Down TC:Down		
900	4.25E+10	7.02E+10	900	6.35E+10	4.55E+10		
700	4.27E+10	7.12E+10	700	6.44E+10	4.59E+10		
500	4.26E+10	7.17E+10	500	6.48E+10	4.59E+10		
300	4.28E+10		300	6.61E+10			

(unit: cm⁻²)

(Behind TA) (Behind TB) (Behind TC)

Table 15 Thermal neutron flux at locations of NSRR power monitors with various transient and regulating rod positions. (Relative fluxes to those with regulating rods up, Triangular geometry calculation results)

Channel E				Channel C2				Channel B			
Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Down TB:Down TC:Down	TA:Up TB:Down TC:Down	Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Down TB:Down TC:Down	TA:Up TB:Down TC:Down	Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Down TB:Down TC:Down	TA:Up TB:Down TC:Down
900	1.00	1.00	1.00	900	1.00	1.00	1.00	900	1.00	1.00	1.00
700	1.00	1.01	1.01	700	1.02	1.01	1.01	700	1.01	1.01	1.00
500	1.00	1.02	1.02	500	1.03	1.01	1.01	500	1.02	1.02	1.00
300	1.00			300	1.06			300	1.04		

Channel C1				Channel D2				Channel A			
Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Down TB:Down TC:Down	TA:Up TB:Down TC:Down	Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Down TB:Down TC:Down	TA:Up TB:Down TC:Down	Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Down TB:Down TC:Down	TA:Up TB:Down TC:Down
900	1.00	1.00	1.00	900	1.00	1.00	1.00	900	1.00	1.00	1.00
700	1.01	1.02	1.02	700	1.02	1.01	1.01	700	1.02	1.02	1.01
500	1.01	1.04	1.04	500	1.03	1.01	1.01	500	1.04	1.04	1.02
300	1.02			300	1.06			300	1.07		

Channel D1				Channel F			
Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Down TB:Down TC:Down	TA:Up TB:Down TC:Down	Regulating Rod Position	TA:Down TB:Up TC:Up	TA:Down TB:Down TC:Down	TA:Up TB:Down TC:Down
900	1.00	1.00	1.00	900	1.00	1.00	1.00
700	1.00	1.01	1.01	700	1.01	1.01	1.01
500	1.00	1.02	1.02	500	1.02	1.02	1.01
300	1.01			300	1.04	1.04	1.01

(Behind TA)

(Behind TB)

(Behind TC)

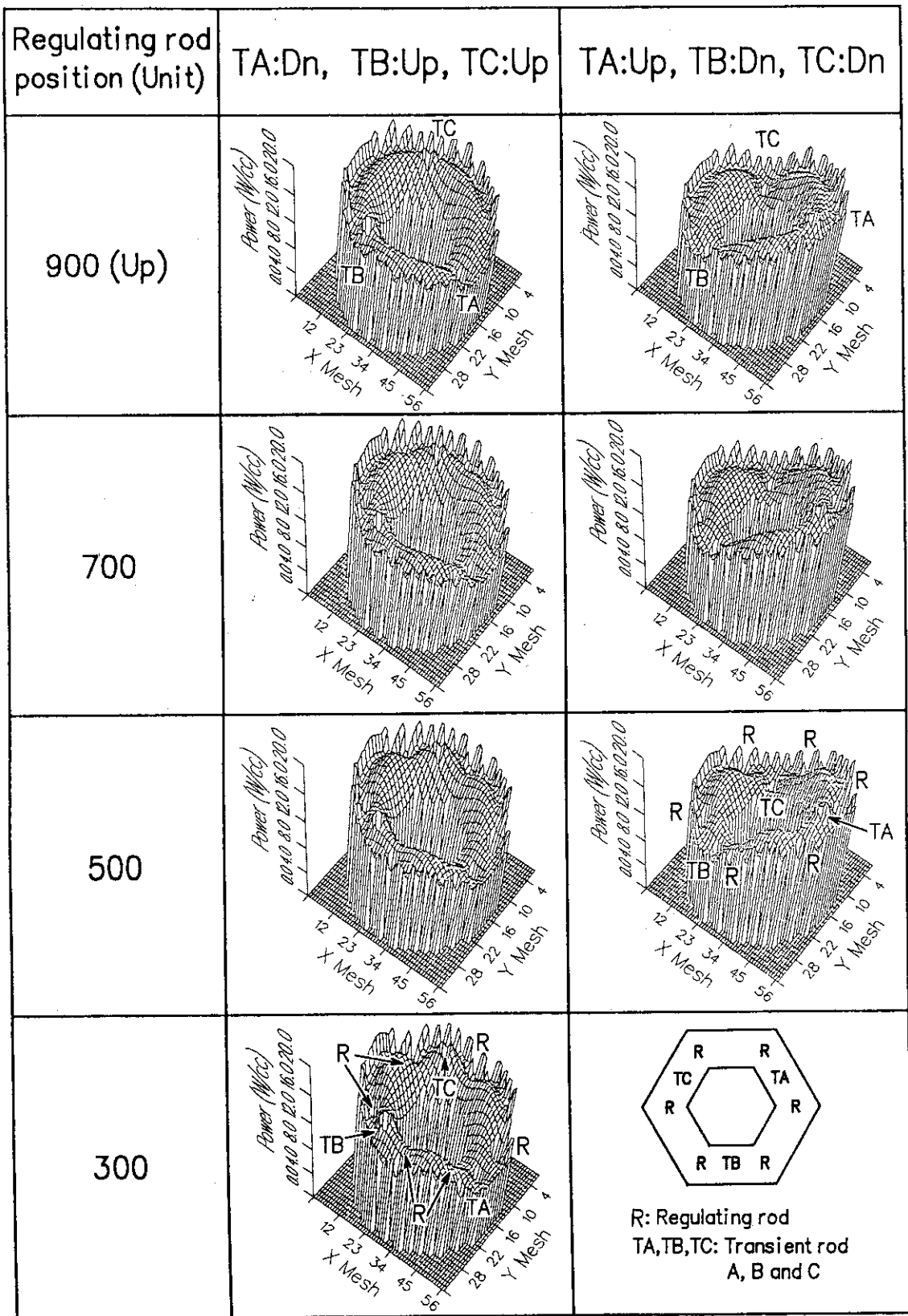


Fig. 21 Power profiles of NSRR with transient rods and regulating rods inserted. (Triangular geometry calculation results)

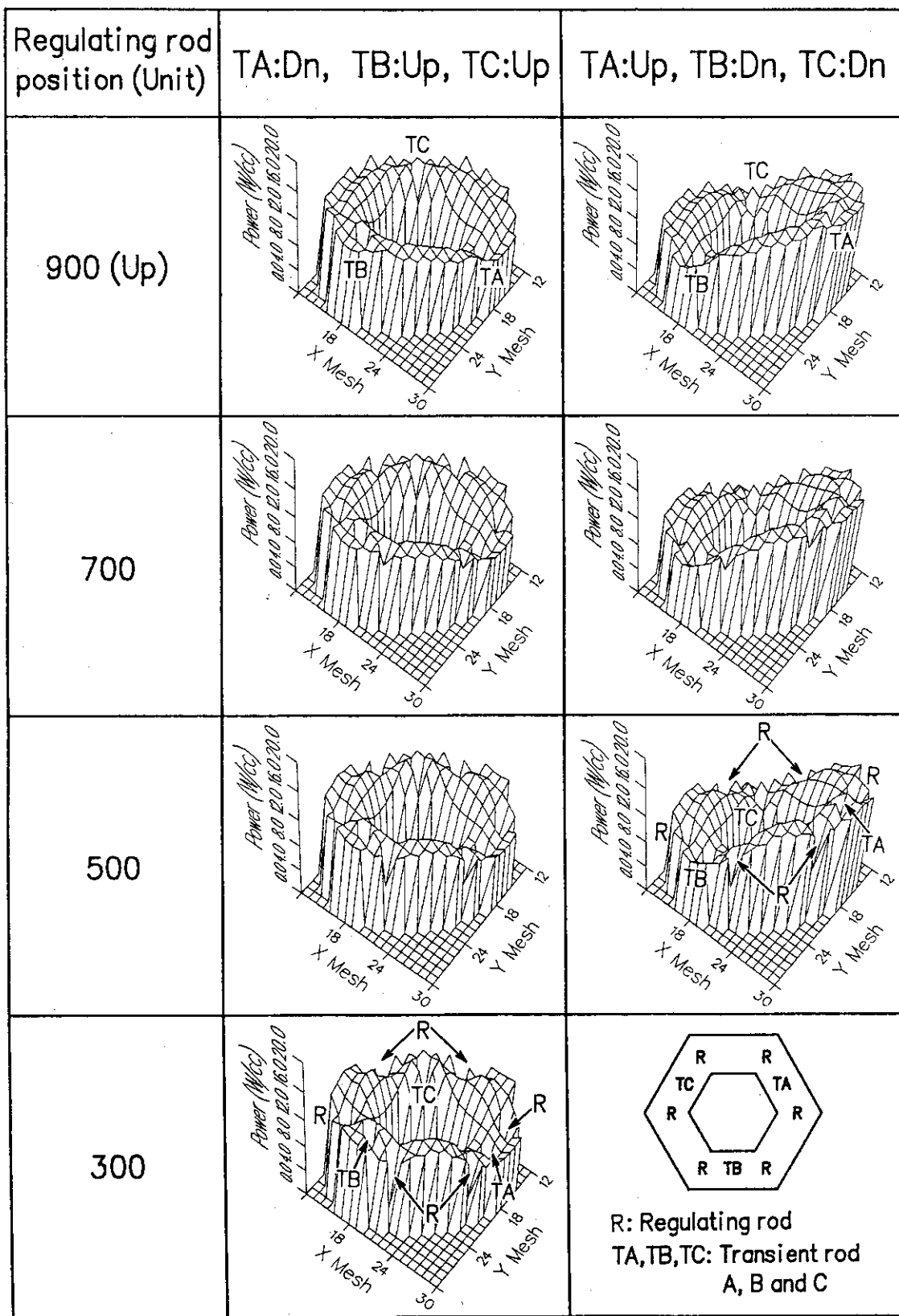


Fig. 22 Channel averaged power profiles of NSRR with transient rods and regulating rods inserted. (Triangular geometry calculation results)

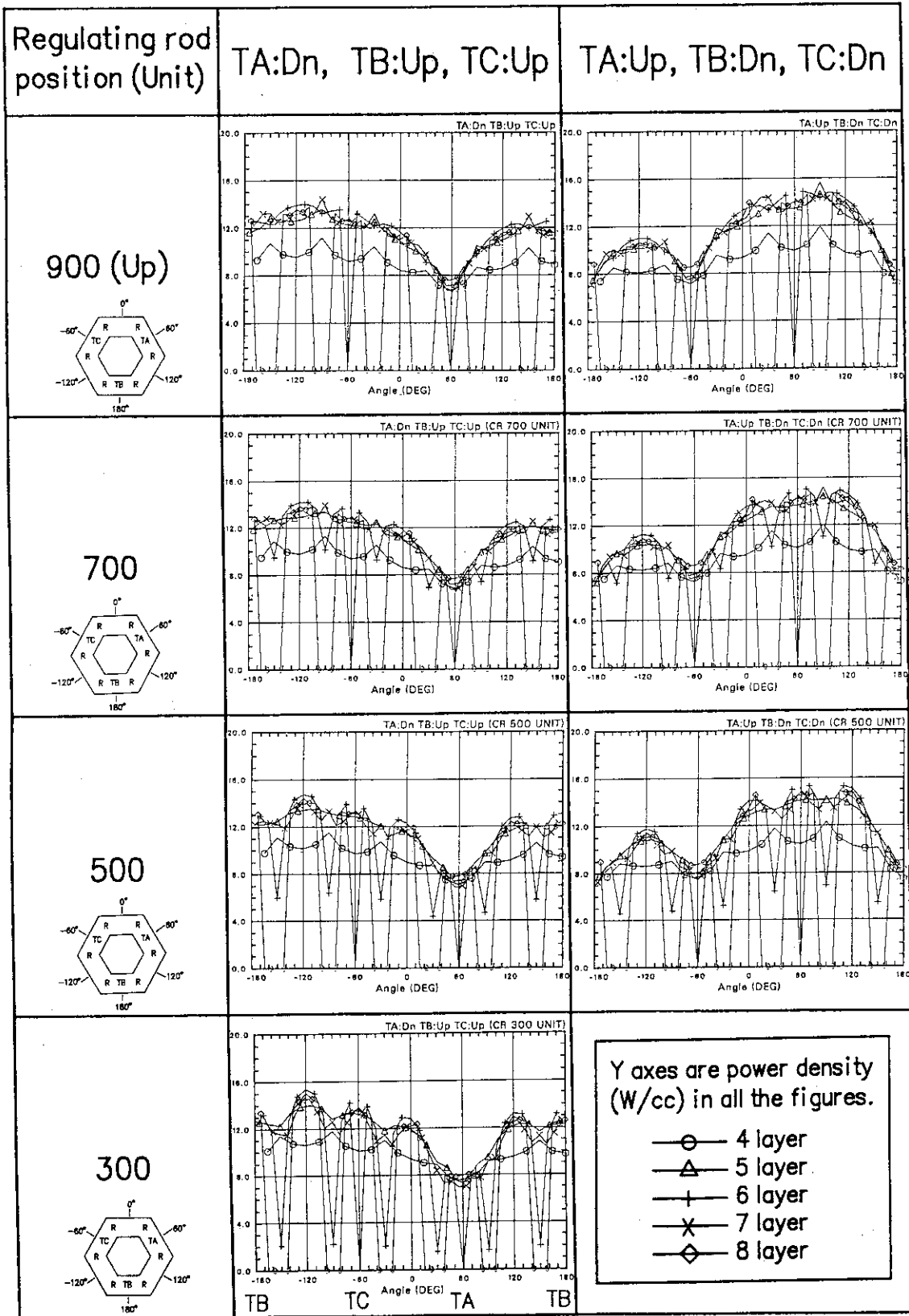


Fig. 23 Azimuthal power profiles of NSRR with transient rods and regulating rods inserted. (Triangular geometry calculation results)

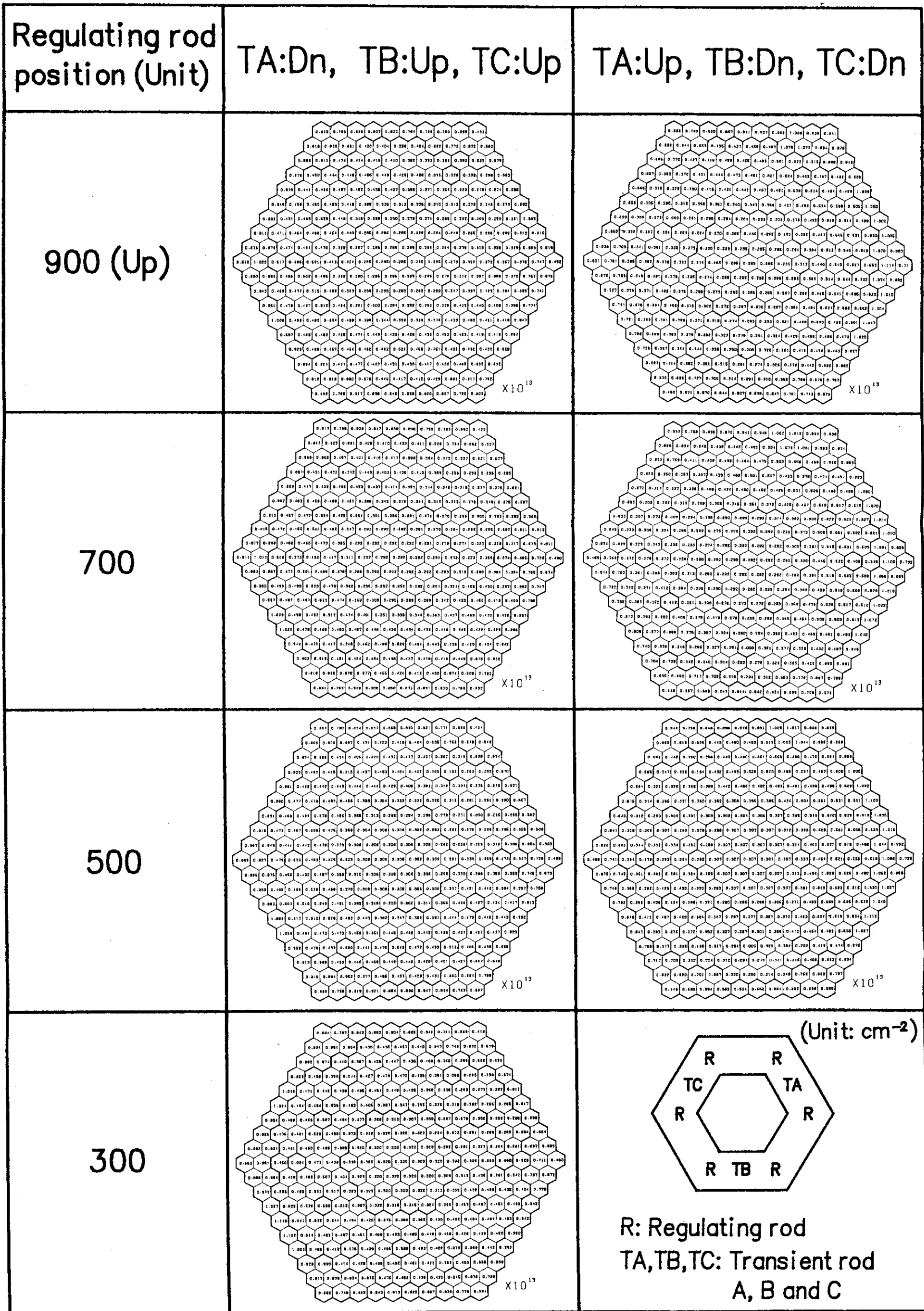


Fig. 24 Channel averaged thermal neutron flux profiles in NSRR core with various transient and regulating rod positions. (Triangular geometry calculation results)

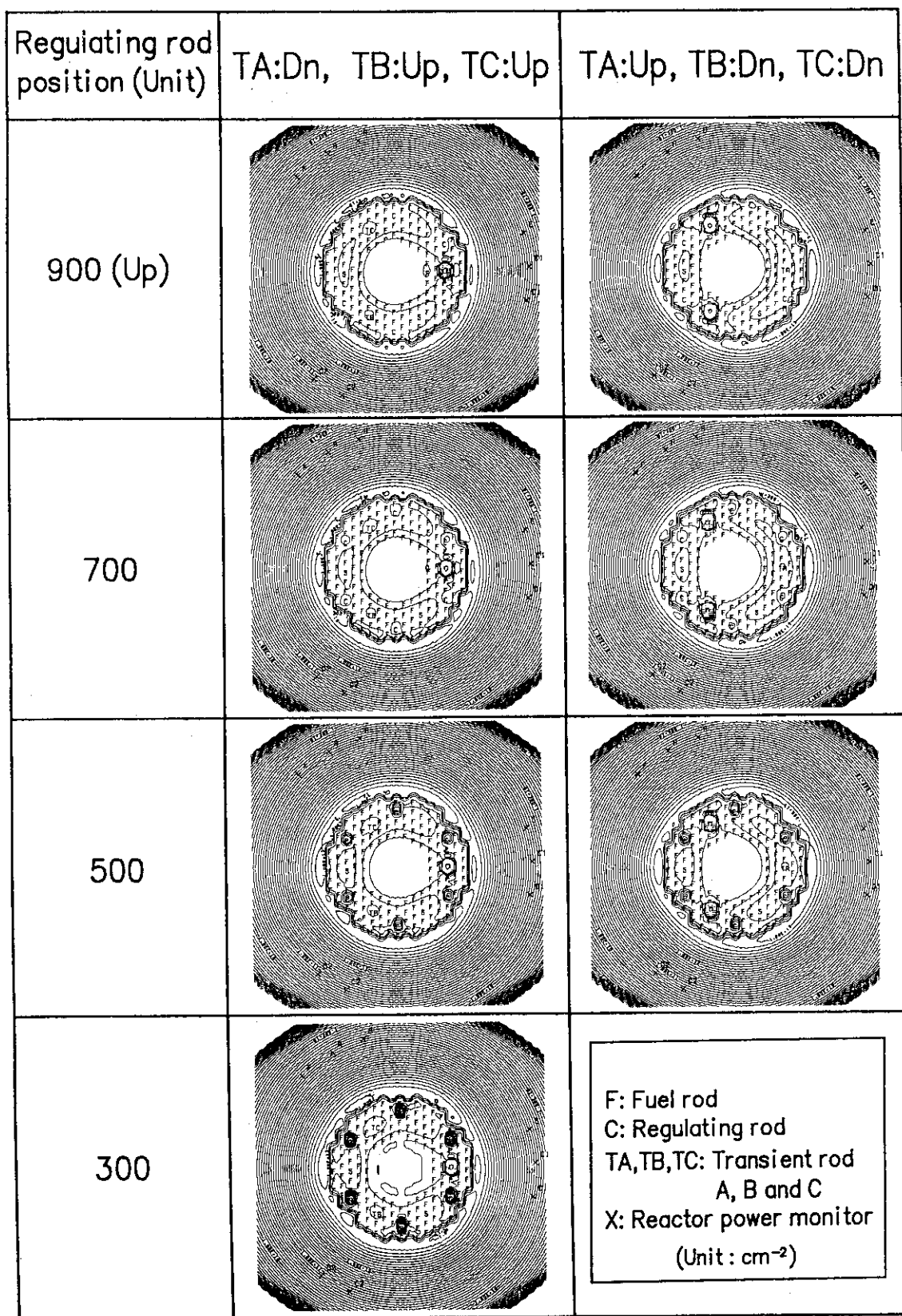


Fig. 25 Contour maps of thermal neutron flux at NSRR with various transient and regulating rod positions. (Triangular geometry calculation results)

3.4 実験カプセルの効果

実験孔が空の状態での中性子場と原子炉出力の分布について議論を進めてきたが、ここで実際に実験燃料を照射するための実験カプセルを実験孔に挿入した場合の影響を計算した。考慮したカプセルはI-N型大気圧水カプセルと呼ばれる標準型の実験カプセルであり、水を満たした状態とした。実験燃料は含まないものとした。Fig. 26にI-N型大気圧カプセルの概要を示す。また、このカプセルを実験孔内に挿入した場合の体系図、原子数密度等は付録Aに示す。

3.4.1 炉心出力分布

実験孔内に実験カプセルを挿入した状態と、実験孔内が空気の場合について、炉心の出力分布をFig. 27に比較して示す。縦軸は軸方向に平均した出力密度である。同じものを燃料チャンネル毎に平均したものをFig. 28に示す。これらの図から、実験孔内にカプセルがある場合に出力密度の凸凹が小さくなっている事が分る。特に炉心外周部での出力ピーキングの減少が、Fig. 28においてははっきりと分る。切口を変えて、方位角方向の出力分布をFig. 29に示す。この図においても、実験カプセルありの場合、出力密度がより平坦な分布になっている事が分かる。同図最上段の全トランジェント棒全引抜きの場合の出力密度分布を、カプセル有り無しの場合で比べると、燃料チャンネル最内層である第4列(図中○印)の出力密度が、カプセル有りの場合にはカプセル無しの場合に比べて上昇し各層間の出力密度差が減少している。トランジェント棒挿入位置付近の出力のへこみについて見ても、カプセル有りの場合の方が無しの場合と比べ小さくなっている事が分かる。この現象は、カプセル内の水が中性子の減速材あるいは反射材として働き実験孔への中性子の漏れを減少させたため、主に実験孔に隣接する内側の出力密度が上昇し出力密度分布が平坦化したものと考えられる。Fig. 30に6つの方位角方向に炉心を切った時の半径方向の出力分布を示す。同図においても、最内層での出力密度の上昇および最外層での出力ピーキングの低下が明らかに分かる。

炉心を3本のトランジェント棒を中心とした3領域に分けた場合の平均出力密度とピーキング係数をTable 16にまとめて示す。表中()内に示した値はカプセル無しの場合である。水の入った実験カプセルを実験孔に挿入する事によって、3領域間の出力差は小さくなり、ピーキング係数も小さくなっている事が分かる。

3.4.2 中性子束分布

実験孔内に大量の水を有する実験カプセルが存在する事によって、実験孔中心部での熱中性子束はカプセル無しの場合に比べて1ケタ近く大きくなる。Fig. 31にカプセル有りと無しの場合の炉心部での熱中性子束分布を左右に比較して示した。実験カプセルが無く、実験孔内が空気の場合には、実験孔内は場所によらず $2.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ のほぼ一定の熱中性子束である。他方、水入りの実験カプセルが存在する場合、実験孔内の熱中性子束は中心部に行く程高まり、約 $1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ に達している。トランジェント棒位置による、中心部の熱中性子束の変化をTable 17に示したが、カプセルの有無によらず変化は2%以下と非常に小さく、同様の傾向を示している。

より広い範囲での熱中性子束を、等高線でFig. 32に示す。実験カプセルが実験孔に挿入された場合に、炉心内側部分から実験孔中央に向かって熱中性子束が徐々に高くなっている事がこの図か

らも分かる。原子炉出力モニタ用の中性子検出器位置での熱中性子束の変化については、この図では見難いが、若干の違いが見える。

カプセルの有無による、炉出力モニタ部での熱中性子束の違いを計装チャンネル毎にTable 18にまとめて示した。表中の上段に示したのは熱中性子束、下段に示した値はカプセル無しの場合と比較した相対値である。同表よりカプセル有りの場合、出力モニタ部での熱中性子束が10~17%減少している事が分かる。この現象は、実験カプセルが実験孔内に存在する場合に、炉心内側の出力密度が上昇し、外側の出力ピーキングが低下した現象と同じと考える事が出来る。つまり、実験孔内に大量の水が存在する事によって、炉心部の出力密度が平坦化され、炉心外周部の出力が低下し、同時に熱中性子束も低下した。このため、炉心を外側から見ている炉出力モニタ部の熱中性子束も低下したものと考えられる。Table 18に示した熱中性子束のトランジェント棒位置による変化を見るために、3本のトランジェント棒を全引抜きとした時の値を1とした相対値をTable 19にまとめ直した。また、同表にはカプセル有りと無しの場合も比較して示している。トランジェント棒の不均一挿入による、炉出力モニタ部でのシャドウイング効果に関しては、カプセルの有無を問わず同様の傾向を示している。ただし、カプセル有りの場合は無しの場合と比べて最大で3%程度シャドウイング効果が弱まっている。

Table 16 Calculated power densities in three regions surrounding transient rods (Triangular geometry calculation results with or without a capsule)

Transient Rod Position			Region Average Power Density (W/cc)				Peaking Factor			
T A (UNIT)	T B	T C	A	B	C	Whole Core	A	B	C	Whole Core
Up 500 Down	Up	Up	11.1	11.0	11.2	11.1	1.12	1.13	1.11	1.12
			(11.1)	(11.0)	(11.2)	(11.1)	(1.13)	(1.13)	(1.12)	(1.13)
			10.1	11.5	11.7	11.1	1.20	1.14	1.13	1.19
			(9.9)	(11.5)	(11.9)	(11.1)	(1.20)	(1.14)	(1.16)	(1.24)
Down			9.5	11.8	12.0	11.1	1.25	1.16	1.14	1.24
			(9.2)	(11.8)	(12.3)	(11.1)	(1.27)	(1.16)	(1.17)	(1.30)
Up	Down	Down	13.0	10.3	10.1	11.1	1.11	1.33	1.30	1.30
			(13.4)	(10.1)	(9.9)	(11.1)	(1.17)	(1.41)	(1.30)	(1.41)

Results of calculations without a capsule are presented in parentheses.

Table 17 Relative thermal neutron flux at the experimental tube center with various transient rod positions. (Triangular geometry calculation results)

WITH CAPSULE

TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Up	TB:Down TC:Down
900	1.000		1.016
500	1.005		
100	1.007		

WITHOUT CAPSULE

TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up	TB:Down TC:Up	TB:Down TC:Down
900	1.000	1.000	1.004
500	1.004		
100	1.004	1.004	

Table 18 Thermal neutron fluxes at locations of NSRR power monitors with or without an experimental capsule. (Reactor power is 1 MW, Triangular geometry calculation results)

Channel E

TA Position (Unit)	TB: Up TC: Up		TB: Down TC: Down	
	With	Without	With	Without
900	4.85E+10 0.871	5.57E+10	5.88E+10 0.838	7.02E+10
500	4.21E+10 0.896	4.70E+10		
100	3.82E+10 0.903	4.23E+10		

Channel C1

TA Position (Unit)	TB: Up TC: Up		TB: Down TC: Down	
	With	Without	With	Without
900	4.91E+10 0.867	5.66E+10	5.98E+10 0.832	7.19E+10
500	4.19E+10 0.891	4.70E+10		
100	3.77E+10 0.902	4.18E+10		

Channel D1

TA Position (Unit)	TB: Up TC: Up		TB: Down TC: Down	
	With	Without	With	Without
900	4.77E+10 0.861	5.54E+10	5.80E+10 0.826	7.02E+10
500	4.16E+10 0.885	4.70E+10		
100	3.79E+10 0.892	4.25E+10		

(Behind TA)

Channel C2

TA Position (Unit)	TB: Up TC: Up		TB: Down TC: Down	
	With	Without	With	Without
900	5.08E+10 0.874	5.81E+10	4.39E+10 0.880	4.99E+10
500	5.35E+10 0.869	6.16E+10		
100	5.50E+10 0.866	6.35E+10		

Channel D2

TA Position (Unit)	TB: Up TC: Up		TB: Down TC: Down	
	With	Without	With	Without
900	4.76E+10 0.881	5.40E+10	4.01E+10 0.897	4.47E+10
500	5.04E+10 0.870	5.79E+10		
100	5.22E+10 0.870	6.00E+10		

(unit: cm⁻²)

Relative fluxes with a capsule to those without a capsule are presented in lower columns.

(Behind TB)

Table 18 (continued)

Channel B

TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up		TB:Down TC:Down	
	With	Without	With	Without
900	4.76E+10 0.862	5.52E+10	4.19E+10 0.882	4.75E+10
500	5.00E+10 0.853	5.86E+10		
100	5.14E+10 0.851	6.04E+10		

Channel A

TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up		TB:Down TC:Down	
	With	Without	With	Without
900	4.72E+10 0.863	5.47E+10	3.95E+10 0.890	4.44E+10
500	5.00E+10 0.850	5.88E+10		
100	5.18E+10 0.848	6.11E+10		

Channel F

TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up		TB:Down TC:Down	
	With	Without	With	Without
900	4.82E+10 0.859	5.61E+10	4.07E+10 0.895	4.55E+10
500	5.14E+10 0.844	6.09E+10		
100	5.35E+10 0.843	6.35E+10		

(unit: cm⁻²)

Relative fluxes with a capsule to those without a capsule are presented in lower columns.

(Behind TC)

Table 19 Thermal neutron fluxes at locations of NSRR power monitors with or without an experimental capsule. (Relative fluxes to those with all transient rods up)

Channel E				
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up		TB:Down TC:Down	
	With	Without	With	Without
900	1.000	1.000	1.212	1.260
500	0.868	0.844		
100	0.788	0.759		

Channel C1				
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up		TB:Down TC:Down	
	With	Without	With	Without
900	1.000	1.000	1.218	1.270
500	0.853	0.830		
100	0.768	0.739		

Channel D1				
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up		TB:Down TC:Down	
	With	Without	With	Without
900	1.000	1.000	1.216	1.267
500	0.872	0.848		
100	0.795	0.767		

Channel C2				
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up		TB:Down TC:Down	
	With	Without	With	Without
900	1.000	1.000	0.864	0.859
500	1.053	1.060		
100	1.083	1.093		

Channel D2				
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up		TB:Down TC:Down	
	With	Without	With	Without
900	1.000	1.000	0.842	0.828
500	1.059	1.072		
100	1.097	1.111		

Channel B				
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up		TB:Down TC:Down	
	With	Without	With	Without
900	1.000	1.000	0.880	0.861
500	1.050	1.062		
100	1.080	1.094		

Channel A				
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up		TB:Down TC:Down	
	With	Without	With	Without
900	1.000	1.000	0.837	0.812
500	1.059	1.075		
100	1.097	1.117		

Channel F				
TA Position (Unit)	TB:Up TC:Up		TB:Down TC:Down	
	With	Without	With	Without
900	1.000	1.000	0.844	0.811
500	1.066	1.086		
100	1.110	1.132		

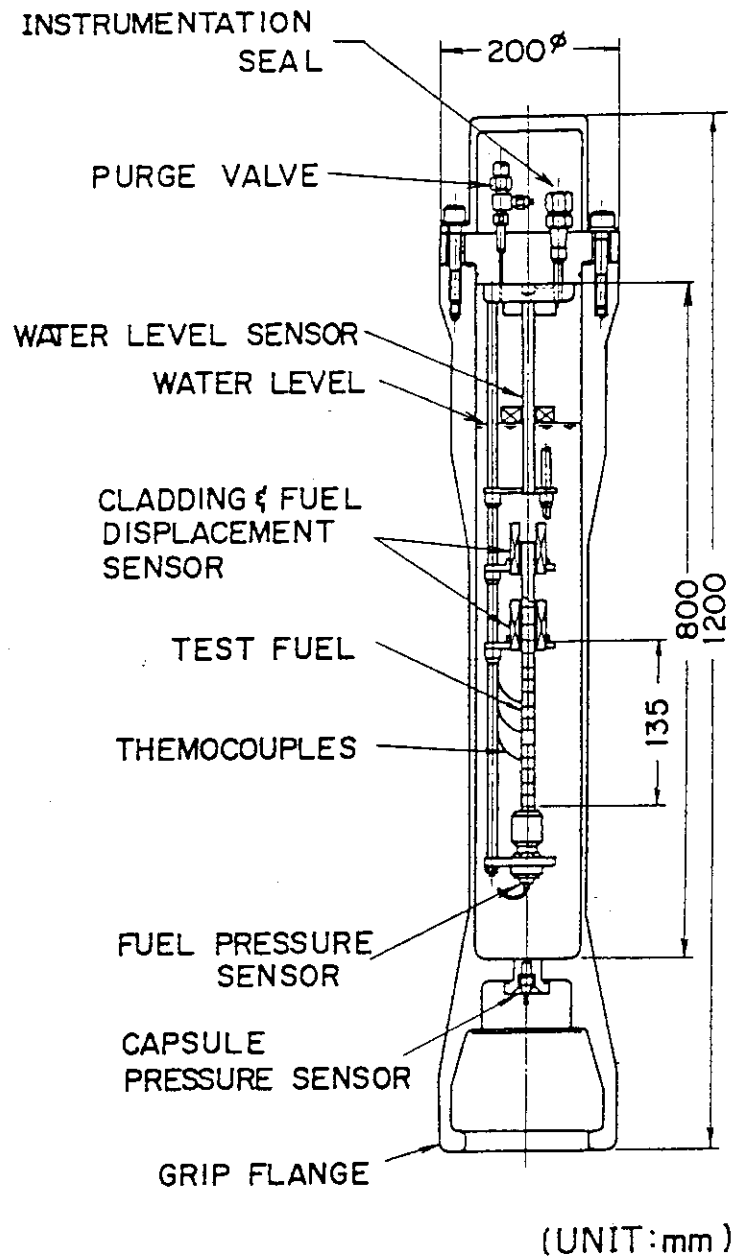


Fig. 26 Type I-N standard water capsule for NSRR experiment.

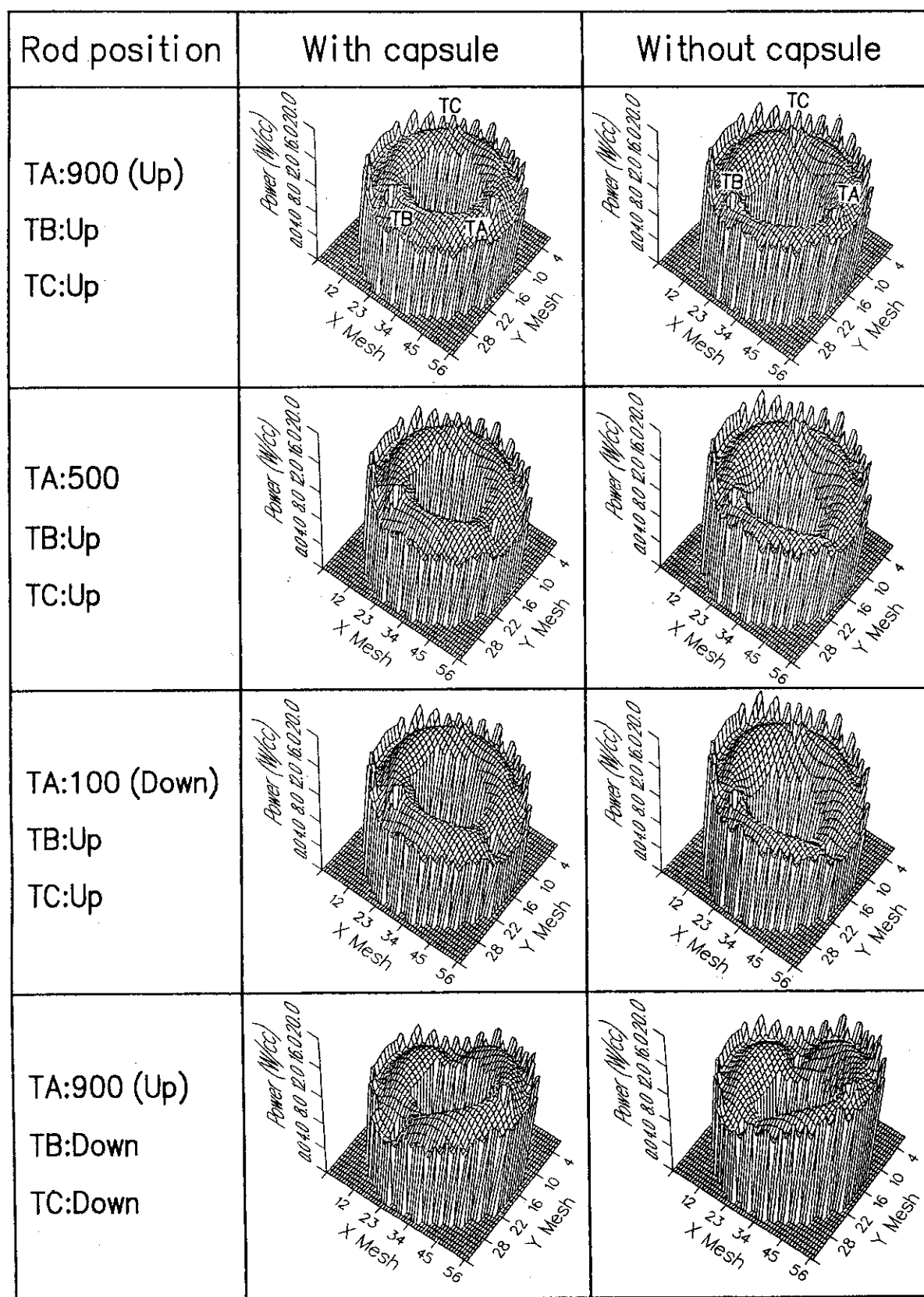


Fig. 27 Power profiles of NSRR with or without an experimental capsule. (Triangular geometry calculation results)

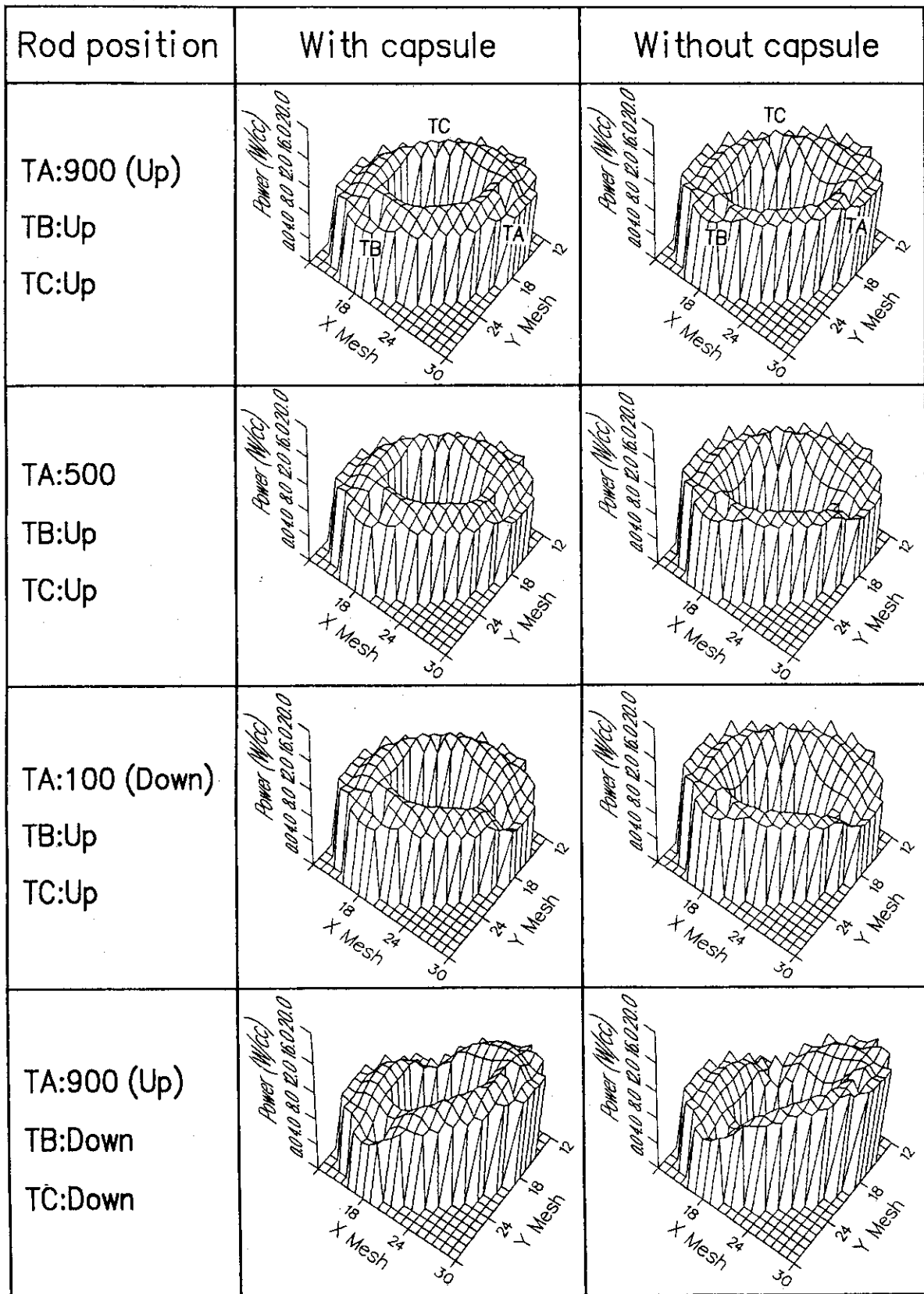


Fig. 28 Channel averaged power profiles of NSRR with or without an experimental capsule. (Triangular geometry calculation results)

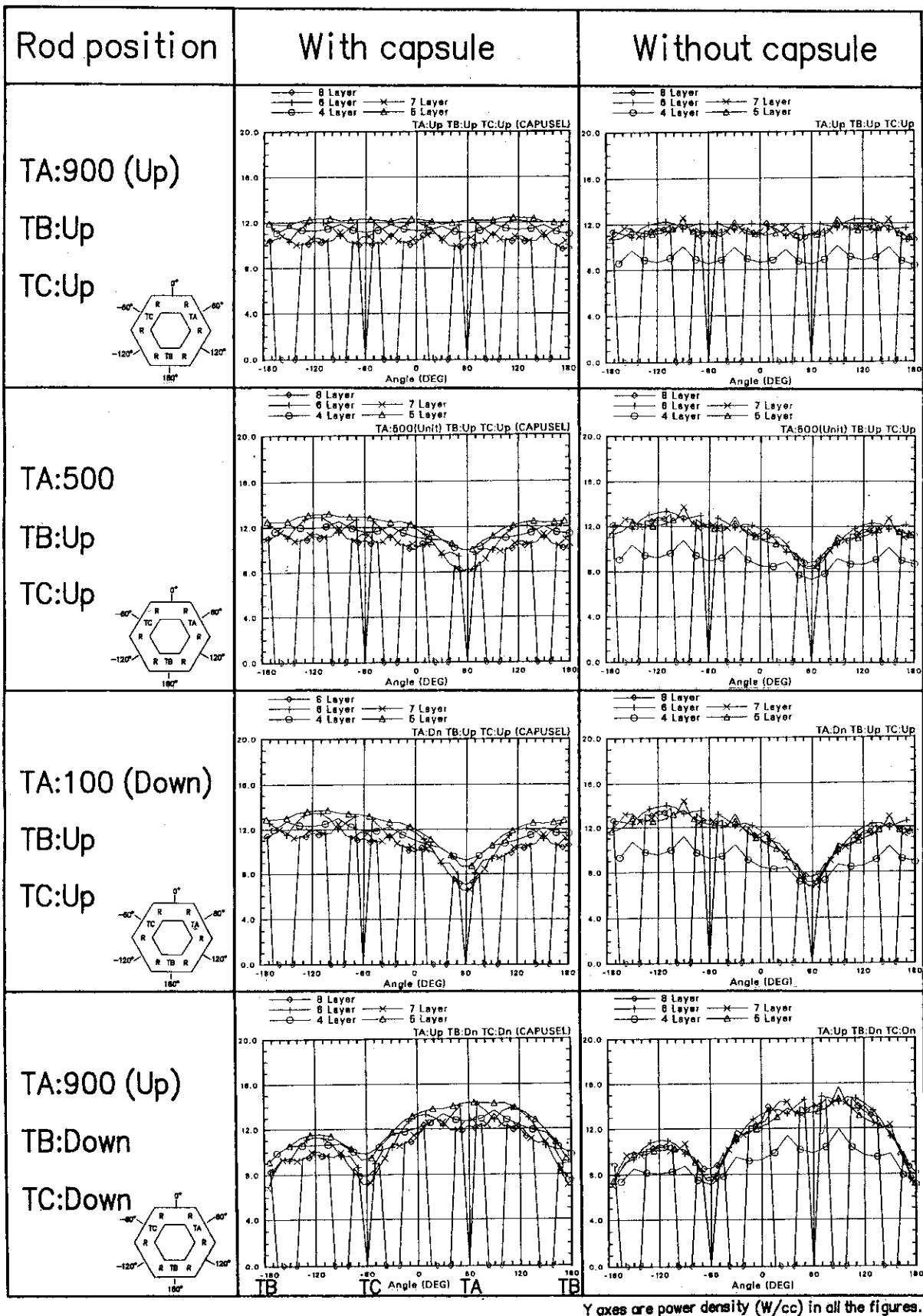
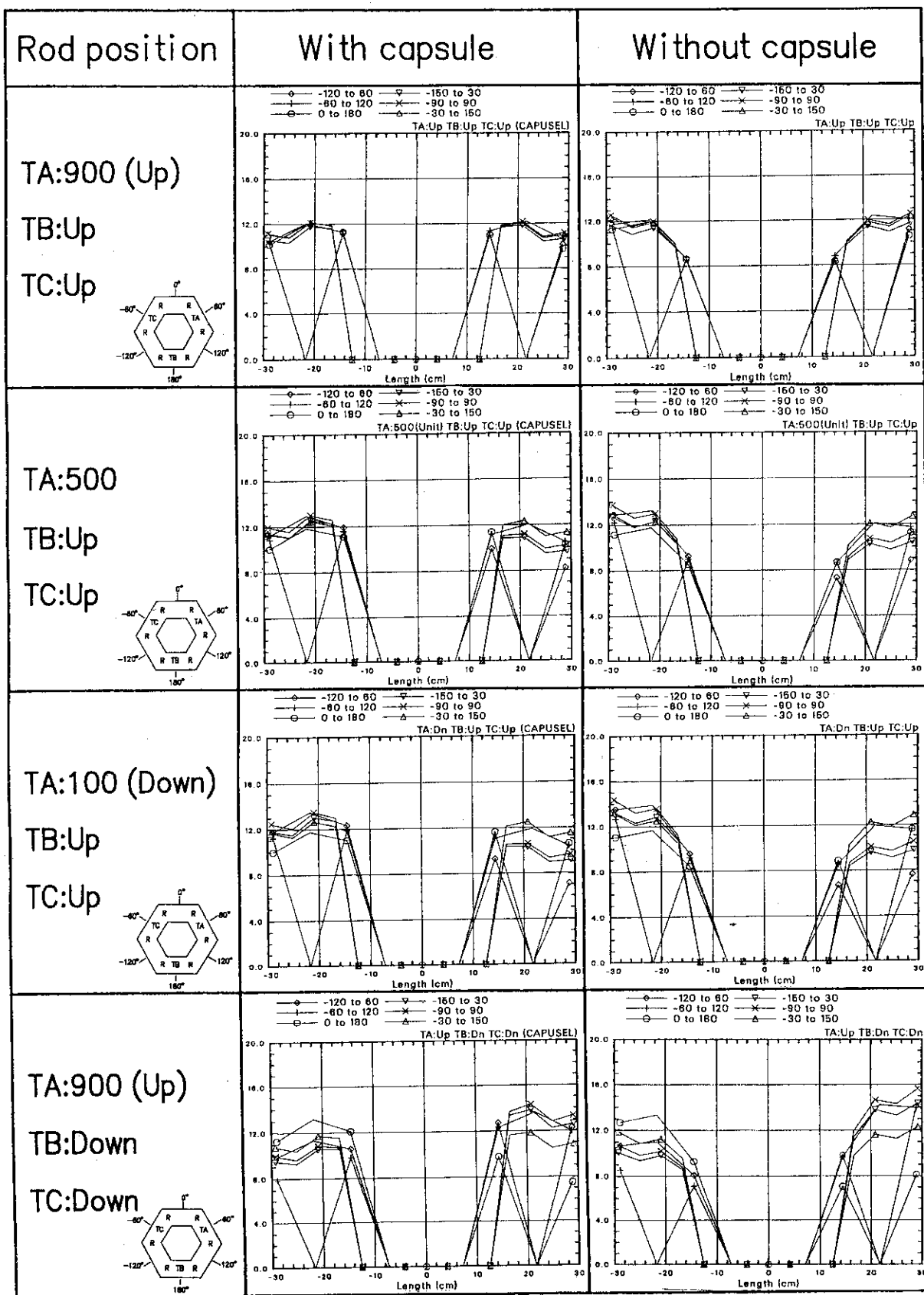
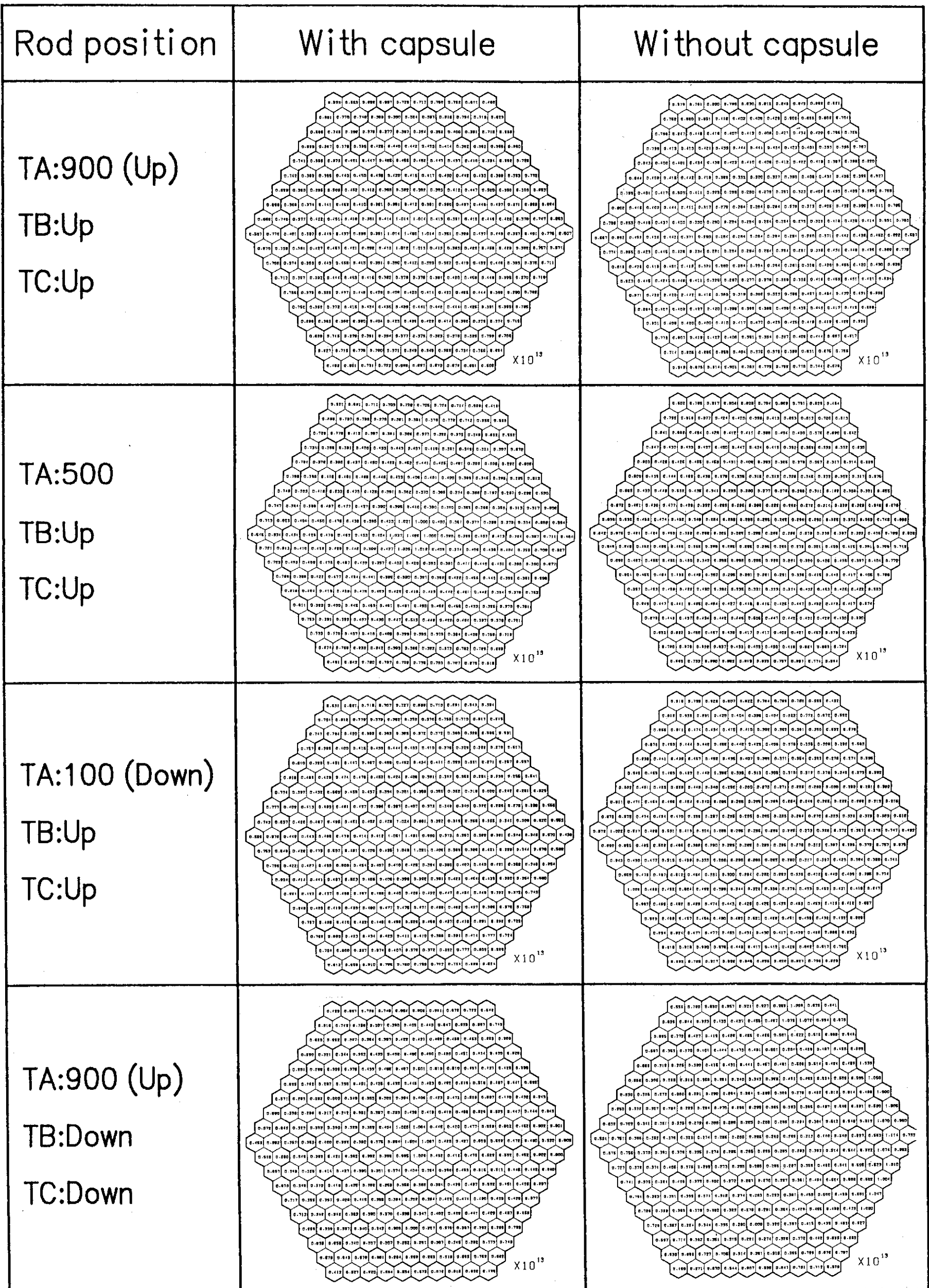


Fig. 29 Azimuthal power profiles of NSRR with or without an experimental capsule. (Triangular geometry calculation results)



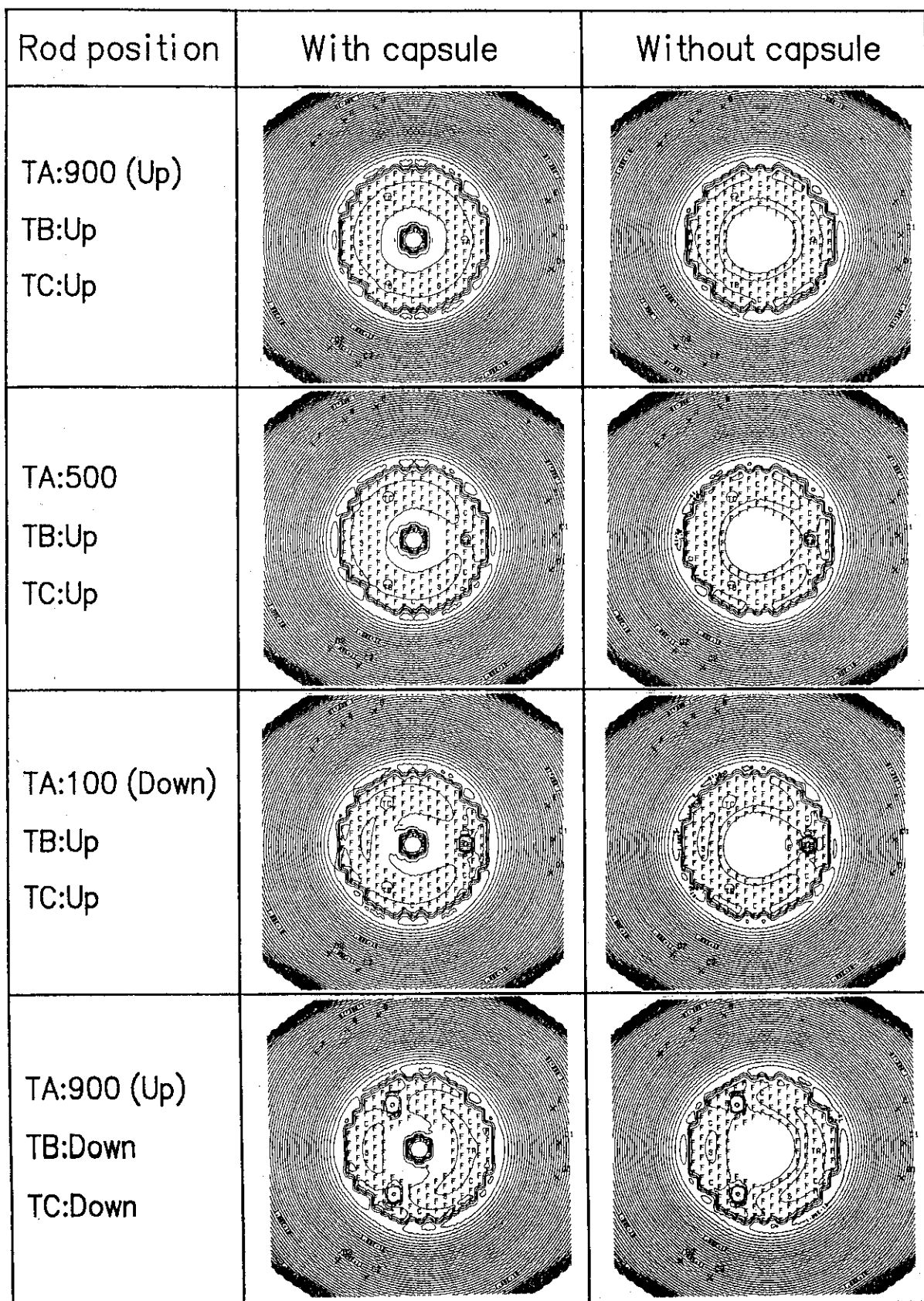
Y axes are power density (W/cc) in all the figures.

Fig. 30 Radial power profiles of NSRR with or without an experimental capsule. (Triangular geometry calculation results)



(Unit: cm⁻²)

Fig. 31 Channel averaged thermal neutron flux distributions in NSRR core with or without an experimental capsule. (Triangular geometry calculation results)



(Unit: cm⁻²)

Fig. 32 Contour maps of thermal neutron flux at NSRR with or without an experimental capsule.

4. 考 察

ここでは、前章の計算結果で得られた知見を整理してまとめ、実際の原子炉の運転で得られた結果との比較・検討を行う。

六角柱体系を用いたスコーピング計算、および三角柱体系を用いた詳細計算いずれの結果においても、トランジェント棒の不均一挿入による原子炉出力の歪の発生と、炉出力モニタ部へのシャドウイング効果が明らかに示された。ただし、六角柱体系に比べて三角柱体系において炉出力の歪の程度やシャドウイング効果がより大きく計算された。

シャドウイング効果によって炉出力モニタ位置での熱中性子束は原子炉出力が一定であっても、隣接するトランジェント棒が全挿入となった場合最大25%減少（三角柱体系での計算結果）する可能性がある。しかし、その場合でも実験孔内の熱中性子束はほとんど変化しない。ただし、実験孔内の熱中性子束は調整棒位置に応じて変化する事（最大24%）が計算結果により示されている。実際の運転では、調整棒位置はトランジェント棒挿入や、カプセル挿入あるいは炉心燃料の温度上昇による負の反応度を補償するため色々な位置を取っているため、計算結果と実験結果の比較に際しては注意が必要である。ただし、調整棒挿入の影響は、炉出力モニタ位置での熱中性子束にはさ程強く現われず最大でも7%である。

また、実験孔内に水を満たした実験カプセルを挿入した場合には、全体に出力が平坦化され、炉心外面での出力ピークが小さくなる事により炉出力モニタ部での熱中性子束も10%強小さくなる。ただし、シャドウイング効果自体は若干小さくなる(2~3%)ものの基本的には変わらずに存在する。

以上の結果を、実験を実施する視点あるいは原子炉を運転する視点から以下に見直す。

NSRRで実験燃料を照射する場合には、通常実験孔内に燃料を装着した実験カプセルを装填し、原子炉を運転することによって燃料の過渡挙動を調べている。この時、トランジェント棒が不均一に挿入されている条件では、炉心の出力分布が歪む事が示されたが、この出力の歪が実験燃料に不均一な発熱を与えるのではないかと心配がある。この点に関しては、カプセルの有無の効果を調べた結果を含めた全ての計算結果において、実験孔内の熱中性子束分布に有意な歪（方位角により異った分布）は得られていない。つまり、計算結果は、実験燃料の不均一発熱は発生しない事を予測している。

実験燃料の発熱分布もさる事ながら、発熱量そのもの、つまり、実験燃料の平均出力とNSRR炉心の出力の関係（カップリング係数）が、トランジェント棒の不均一挿入によって変化しないかという問題を次に考える。調整棒の効果を無視して、調整棒を全引抜きとした計算結果では、六角柱体系あるいは三角柱体系いずれの計算においても、炉出力を一定とすれば実験孔内の熱中性子束は一定であるとの結果を示した。つまり、炉出力を一定とすれば、実験燃料の出力は一定である事、いわゆる、カップリング係数はトランジェント棒位置によらず不変である事が示された。しかし、調整棒の効果を加えた計算では、調整棒位置に応じて、カップリング係数が変わる可能性があることが示された。具体的には、調整棒位置が300ユニットの場合に比べて900ユニット（全引抜き）の場合では、原子炉出力が一定であっても実験孔内の熱中性子束は24%近くも減少した。この事は、台形パルス運転および合成パルス運転のように調整棒位置が刻々と変わる条件下での実験では、カップリング係数が刻々と変化する可能性がある事を示している。調整棒が挿入されると調整棒の周囲の出力密度が低下するため、炉出力一定の条件では他の部分の出力密度

が相対的に上昇する。実験孔内の熱中性子束は、この出力密度の上昇に引っ張られて上昇しているものと考えられる。本研究においては、調整棒の効果はカプセル無しの体系でのみ計算したが、実験カプセル有りの場合にはカプセル中の水が存在する事によって実験孔を取り囲む高出力部の影響が低出力部により緩和され、調整棒の位置による実験孔内の熱中性子束の変化が小さくなる可能性がある。この問題は、台形および合成パルス運転のみならず、単一パルス運転にも関係する。トランジェント棒の不均一挿入による効果とは別の問題として認識して詳しい検討が必要である。

計算においては、炉出力一定の条件で中性子束分布や出力分布を求めたが、実際の運転では炉出力そのものを測定する事は非常に困難であり、炉心周辺部での熱中性子束を測定する事により炉出力を求めている。前章では、計算結果を基に炉出力一定の条件で、各原子炉出力モニタ位置での熱中性子束が、どう変化するかを示したが、実際には炉出力を一定とする運転は出来ない。実際の運転では、或る炉出力モニタを基準に運転を行い、その他の炉出力モニタを含め出力を記録する事になる。300kWまでの定出力運転ではBチャンネルが基準であり、10MWまでの高出力運転ではFチャンネルが基準である。これらの検出器はトランジェント棒Cの背後に位置している。これらのチャンネルの指示を一定として運転を行った場合、トランジェント棒Aの背後に位置するEチャンネル（高出力系）、C1チャンネル（安全出力系）や、トランジェント棒Bの背後に位置するC2チャンネル（安全出力系）の指示は、それぞれ対応するトランジェント棒の挿入状態に応じて変化する。ここでは実際の運転における、これらの炉出力モニタの指示と、計算結果を比較して計算結果の妥当性を探る。

定出力運転において、トランジェント棒位置を変化させながらBチャンネルの出力を300kWあるいは200kW一定に保つ運転を行った。その時の各出力モニタの指示をTable 20にまとめた。六角柱体系および三角柱体系での計算結果も同様にBチャンネルでの熱中性子束を基準に各チャンネルでの出力指示として整理してそれぞれ（）および[]内に示した。これらの運転における調整棒位置は560から640ユニットの間変化し、変動幅は約300ユニットであり、比較的小さいので、調整棒位置による変動は考慮せず、計算結果については、調整棒全引抜きの計算結果をそのまま用いた。また、パルス出力系であるチャンネルD1、D2については測定レンジが異なるので実測不能であり、同表からは省いた。同表に示した結果をトランジェント棒A、BおよびCの位置と、チャンネル毎の出力指示値の関係としてFig. 33~37にまとめた。全ての図の縦軸は、Bチャンネルの指示を300kWあるいは200kWとなる様に運転した場合の各チャンネルの出力指示値である。

トランジェント棒Aの背後に位置するチャンネルEおよびC1の出力指示値はよく似た挙動を示している。トランジェント棒Aが全引抜きの場合には、ほぼ300kWを示しているが、トランジェント棒Aを挿入してゆくに連れその指示値は低下してゆき、全挿入では約200kWになっている。六角柱体系による計算結果は、その時点で約230kWとシャドウイング効果を少なく計算しているが、三角柱体系では約205kWと実測値と非常によく一致している。

トランジェント棒Bの背後に位置するC2チャンネルの指示値は、トランジェント棒Aの位置にほとんど影響されていない。この傾向はいづれの計算結果も実測値をよく表現している。トランジェント棒Bを挿入した場合には、C2チャンネルの指示は約200kWに低下している。六角柱体系の計算結果は約230kWとシャドウイング効果を過少評価しているのに対し、三角柱体系の計算結

果は約200kWとなっており、実測値とよく一致している。

トランジェント棒Cの背後には、チャンネルA、BおよびFが存在する。Bチャンネル出力を基準として整理しているのが当然Bチャンネルの指示値は一定であるが、チャンネルAおよびFについても同様にトランジェント棒位置によらずほぼ一定の指示値を示している。計算結果もよく実測値を表現している。

以上の検討により計算結果、特に3角柱体系による計算結果は、実測されたシャドウイング効果をよく表現していると言える。ただしここで注意すべきは、結果の整理に用いたBチャンネル出力指示一定という条件は必ずしも原子炉出力一定という条件になっていない点である。Bチャンネル出力を一定とした場合の原子炉出力の変化をトランジェント棒位置の関数として3角柱体系の計算結果を基にFig. 38にまとめて示す。図中縦軸は、3本のトランジェント棒全引抜きの場合を1あるいは300kWとした場合の原子炉出力である。計算結果が正しいと仮定すると、Bチャンネル出力を一定に保った運転では、実際の炉出力は+16%(TA:UP, TB:DN, TC:DN)から-21%(TA:UP, TB:DN, TC:DN)の範囲でトランジェント棒位置に応じて変動している。つまり、Bチャンネル出力を300kWに保った場合、実際の炉出力はトランジェント棒位置に応じて350kWから240kWの範囲で変動している事になる。実際の運転において正確な炉出力を知るためには、トランジェント棒位置の影響を受け難い実験孔に中性子検出器を設定して、トランジェント棒位置と各チャンネル指示の関係を実験的に求め、計算結果を確認する方法が考えられる。ただし、計算結果によると実験孔内の熱中性子束は調整棒位置に応じて多少増減する(±約10%)のでその補正は必要と考えられる。

高出力運転時には、Fチャンネルの出力を運転モニタとして使用している。FチャンネルもBチャンネルと同じくトランジェント棒Cの背後に位置しており、シャドウイング効果に関して計算結果は類似の傾向を示している。Fチャンネルの指示を1あるいは10MWとした場合の、炉出力の計算結果をトランジェント棒位置に応じてFig. 39にまとめた。Bチャンネルを基準としたFig. 38に比べて若干シャドウイング効果が強く現われており、出力の変動幅は+23%~-21%となっている。

合成パルス運転においても、\$1.54から\$4.0に対応する4種類のトランジェント棒配置での運転が行われている。この時のチャンネルE、F、C1およびC2の指示の実測値をTable 21にまとめた。同表の左端に示したパルス反応度に対応するトランジェント棒位置で、Fチャンネルの指示を基準に1~10MWの運転が行われた。Fチャンネル指示を1に規格化した指示値の相対値を同表右側に併せて示した。この表より、運転した出力によらず、各チャンネルの相対的指示値はほぼ一定であることが分かる。Fチャンネルの指示値を基準として、チャンネルE、C1およびC2の指示値のトランジェント棒位置による変化を計算結果を基にFig. 40~42にそれぞれまとめ、実測値と併せて示した。また計算結果をFチャンネル位置での熱中性子束を基準に整理した結果については、数値をTable 22に示した。合成パルス運転での実測データは数が少なく、特にEチャンネルは対数出力系であるためばらつきが大きいのが、計算値は実測値と比較的よく一致している。

以上、定常運転および合成パルス運転におけるトランジェント棒位置と各種炉出力モニタ指示の関係について、実測値と計算値の比較を行ってみた結果、これら2つの運転モードにおいて計算結果はよく実測値を表現している事が分った。6角柱体系による計算結果は、シャドウイング

効果を小さ目に評価しているが、3角柱体系の計算はほぼ適正に評価している。合成パルス運転モードでの高出力運転時の実測データの種類は限られており、このモードでの結果の比較検討は今後も進めてゆく必要がある。

これまでNSRRではトランジェント棒を不均一に挿入した状態で運転を行う場合には、最も高い値を示す炉出力モニタが各モードでの炉出力の制限値を超えないように運転を行ってきている。今回の計算による解析の結果この運転方式により実際の炉出力は最高支持値の100~80%に抑えられており、安全上なんら問題の無いことが示された。NSRRの運転上の最高出力はピークスポットの出力を(炉出力) X (ピーキング係数)の形で表わし、このピークスポットで燃料温度が制限値を超えることがないように定めている。ここで用いられているピーキング係数はトランジェント棒の不均一挿入時も考慮して定められている値であるので、実際の炉出力を(最も高い値を示す炉出力モニタの指示値ではなく)を制限値まで高めても安全上はなんら問題はない。今回の解析の結果及び今後行われる詳細な特性試験の結果により実際の炉出力をより正確に評価できるようになれば、この実際の炉出力を用いて運転を行え、場合によっては現状よりも20%程度高い出力での運転が可能になる。前述のように、実験燃料の出力は実際の炉出力に比例するので、この面からも炉出力の正確な評価は避けて通れない問題である。見かけの炉出力から実際の炉出力を求める方法については、トランジェント棒位置に応じて中性子束と炉出力の換算係数をかえる、三方向にある炉出力モニタの平均値を取る、などが考えられる。この点に関しては、特性試験結果や運転上の安全性を考慮して更に検討を進める必要がある。

Table 20 Power monitor outputs at steady state operations with various transient rod positions.

TB : UP TC : UP	TA Position (Unit)	9 0 0	7 0 0	5 0 0	3 0 0	1 0 0
Power Monitor Output (kW)	Channel A	3 0 0 (3 0 0) [3 0 0]	3 0 0 (3 0 1)	3 0 0 (3 0 3) [3 0 4]	3 0 0 (3 0 4)	3 0 0 (3 0 4) [3 0 6]
	Channel B	3 0 0 (3 0 0) [3 0 0]	3 0 0 (3 0 0)	3 0 0 (3 0 0) [3 0 0]	3 0 0 (3 0 0)	3 0 0 (3 0 0) [3 0 0]
	Channel C1	2 9 8 (3 0 0) [3 0 0]	2 6 0 (2 8 0)	2 2 5 (2 5 2) [2 3 5]	2 0 7 (2 3 1)	2 0 7 (2 2 9) [2 0 3]
	Channel C2	2 9 8 (3 0 0) [3 0 0]	2 9 8 (3 0 1)	2 9 7 (3 0 0) [3 0 0]	2 9 7 (2 9 8)	2 9 7 (3 0 1) [2 9 9]
	Channel E	2 8 5 (3 0 0) [3 0 0]	2 4 7 (2 8 1)	2 1 7 (2 5 4) [2 3 9]	2 0 0 (2 3 6)	2 0 0 (2 3 3) [2 0 8]
	Channel F	2 9 4 (3 0 0) [3 0 0]	2 9 2 (3 0 2)	2 9 3 (3 0 5) [3 0 7]	2 9 4 (3 0 7)	2 9 4 (3 0 7) [3 1 1]
Regulating Rod Position (Unit)		5 5 6 (9 0 0) [9 0 0]	5 7 6 (9 0 0)	6 0 7 (9 0 0) [9 0 0]	6 3 4 (9 0 0)	6 3 9 (9 0 0) [9 0 0]

() : Hexagonal geometry
calculation results
{ } : Triangular geometry
calculation results
-- : Not recorded

Table 20 (continued)

TB : DN TC : UP	TA Position (Unit)	9 0 0	7 0 0	5 0 0	3 0 0	1 0 0
Power Monitor Output (kW)	Channel A	270 (298) [296]	270 (298)	270 (300)	270 (301)	270 (301) [302]
	Channel B	300 (300) [300]	300 (300)	300 (300)	300 (300)	300 (300) [300]
	Channel C1	295 (296) [294]	258 (276)	222 (248)	204 (225)	204 (225) [192]
	Channel C2	200 (238) [202]	200 (235)	200 (233)	200 (227)	200 (231) [193]
	Channel E	— (297) [298]	— (281)	— (254)	— (234)	— (232) [203]
	Channel F	— (294) [290]	— (294)	— (300)	— (303)	— (300) [301]
Regulating Rod Position (Unit)	634 (900) [900]	— (900)	— (900)	— (900)	— (900)	757 (900) [900]

() : Hexagonal geometry
calculation results
[] : Triangular geometry
calculation results
— : Not recorded

Table 20 (continued)

TB : DN TC : DN	TA Position (Unit)	9 0 0	8 0 0	7 0 0	6 6 0	5 0 0
Power Monitor Output (kW)	Channel A	1 9 0 (1 9 3) [1 8 8]	1 9 0	1 9 0 (1 9 3)	1 9 0	— (1 9 5)
	Channel B	2 0 0 (2 0 0) [2 0 0]	2 0 0	2 0 0 (2 0 0)	2 0 0	—
	Channel C1	3 1 2 (2 5 7) [2 9 5]	2 9 5	2 7 3 (2 4 5)	2 6 5	— (2 1 9)
	Channel C2	2 1 2 (2 0 4) [2 0 0]	2 1 2	2 1 2 (2 0 2)	2 1 2	— (2 0 2)
	Channel E	3 1 3 (2 5 6) [2 9 3]	2 8 9	2 7 1 (2 4 4)	2 6 2	— (2 2 0)
	Channel F	2 2 1 (1 9 3) [2 2 1]	2 2 2	2 2 6 (2 4 4)	2 2 7	— (1 9 8)
Regulating Rod Position (Unit)	7 7 4 (9 0 0) [9 0 0]	7 9 0	8 2 5 (9 0 0)	8 4 4	— (9 0 0)	

() : Hexagonal geometry
calculation results
[] : Triangular geometry
calculation results
— : Not recorded

Table 21 NSRR power monitor outputs measured in Combined Pulse operations during high power run with various transient rod positions.

Pulsing Reactivity (\$)	Transient Rod Position			Power Monitor Output (MW)						(Relative)							
				E		F		C1		C2		E		F		C1	
	TA	TB	TC	E	F	E	F	C1	C2	E	F	C1	C2	E	F	C1	C2
1.54	100	UP	UP	0.60	1.11	0.75	1.00	0.68	0.90	0.54	1.00	0.68	0.90	0.72	1.00	0.84	0.63
2.00	657	DN	UP	0.72	1.00	0.84	0.63	0.84	0.63	0.72	1.00	0.84	0.63	0.67	1.00	0.89	0.66
2.00	657	DN	UP	2.00	3.00	2.66	1.97	2.66	1.97	0.67	1.00	0.89	0.66	0.67	1.00	0.89	0.64
2.00	657	DN	UP	2.00	3.00	2.67	1.92	2.67	1.92	0.67	1.00	0.89	0.64	0.65	1.00	0.88	0.64
2.00	657	DN	UP	3.20	4.95	4.38	3.15	4.38	3.15	0.65	1.00	0.88	0.64	0.72	1.00	0.88	0.59
2.00	657	DN	UP	5.00	6.98	6.15	4.15	6.15	4.15	0.72	1.00	0.88	0.67	0.72	1.00	0.88	0.67
2.00	657	DN	UP	7.20	10.05	8.82	6.75	8.82	6.75	0.72	1.00	0.88	0.67	0.88	1.00	0.87	0.64
2.00	657	DN	UP	8.80	10.00	8.70	6.40	8.70	6.40	0.88	1.00	0.87	0.64	0.77	1.00	0.67	0.62
2.00	657	DN	UP	2.30	3.00	2.00	1.85	2.00	1.85	0.50	1.00	0.69	0.60	0.50	1.00	0.70	0.60
3.06	100	DN	UP	1.50	3.00	2.07	1.79	2.07	1.79	0.50	1.00	0.69	0.60	0.50	1.00	0.70	0.60
3.06	100	DN	UP	1.50	3.00	2.10	1.80	2.10	1.80	0.50	1.00	0.69	0.60	0.48	1.00	0.69	0.63
3.06	100	DN	UP	2.40	4.95	3.40	3.10	3.40	3.10	0.48	1.00	0.69	0.63	0.57	1.00	0.69	0.63
3.06	100	DN	UP	4.00	7.05	4.83	4.46	4.83	4.46	0.57	1.00	0.69	0.63	0.60	1.00	0.70	0.65
3.06	100	DN	UP	6.00	10.00	6.95	6.47	6.95	6.47	0.60	1.00	0.70	0.65	0.68	1.00	0.67	0.63
3.06	100	DN	UP	6.80	10.00	6.70	6.30	6.70	6.30	0.68	1.00	0.67	0.63	0.64	1.00	0.65	0.61
3.06	100	DN	UP	3.20	5.00	3.25	3.07	3.25	3.07	0.64	1.00	0.65	0.61	1.00	1.00	1.22	0.92
4.00	570	DN	DN	2.00	2.00	2.43	1.83	2.43	1.83	1.00	1.00	1.22	0.92	0.96	1.00	1.20	0.93
4.00	570	DN	DN	3.20	3.35	4.01	3.12	4.01	3.12	0.96	1.00	1.20	0.93	1.09	1.00	1.21	0.91
4.00	570	DN	DN	5.10	4.70	5.70	4.30	5.70	4.30	1.09	1.00	1.21	0.91	1.10	1.00	1.13	0.93
4.00	570	DN	DN	7.40	6.70	7.60	6.20	7.60	6.20	1.10	1.00	1.13	0.93	1.08	1.00	1.15	0.93
4.00	570	DN	DN	7.20	6.67	7.70	6.20	7.70	6.20	1.08	1.00	1.15	0.93				

Table 22 Calculated relative thermal fluxes at power monitor locations keeping the one of channel F constant (1.0).

Hexagonal calculation results (Channel F standard)															
TA Postion (Unit)	Channel E			Channel C1			Channel C2			Channel C2			Channel C2		
	TB:UP	TB:DN	TC:UP	TB:DN	TC:DN	TB:UP	TB:DN	TC:UP	TB:DN	TC:DN	TB:UP	TB:DN	TC:UP	TB:DN	TC:DN
900	0.991	1.007	1.313	1.009	1.014	1.341	1.016	0.820	1.069						
700	0.925	0.941	1.248	0.935	0.943	1.269	1.014	0.806	1.055						
500	0.830	0.843	1.105	0.833	0.837	1.118	1.000	0.792	1.037						
300	0.763	0.767	1.004	0.761	0.753	1.011	0.987	0.766	1.029						
100	0.754	0.768	0.988	0.753	0.755	0.993	0.998	0.781	1.021						

Triangular calculation results (Channel F standard)															
TA Postion (Unit)	Channel E			Channel C1			Channel C2			Channel C2			Channel C2		
	TB:UP	TB:DN	TC:UP	TB:DN	TC:DN	TB:UP	TB:DN	TC:UP	TB:DN	TC:DN	TB:UP	TB:DN	TC:UP	TB:DN	TC:DN
900	0.993	1.020	1.543	1.009	1.021	1.580	1.036	0.722	1.097						
500	0.772			0.772			1.011								
100	0.666	0.669		0.658	0.642		1.000	0.666							

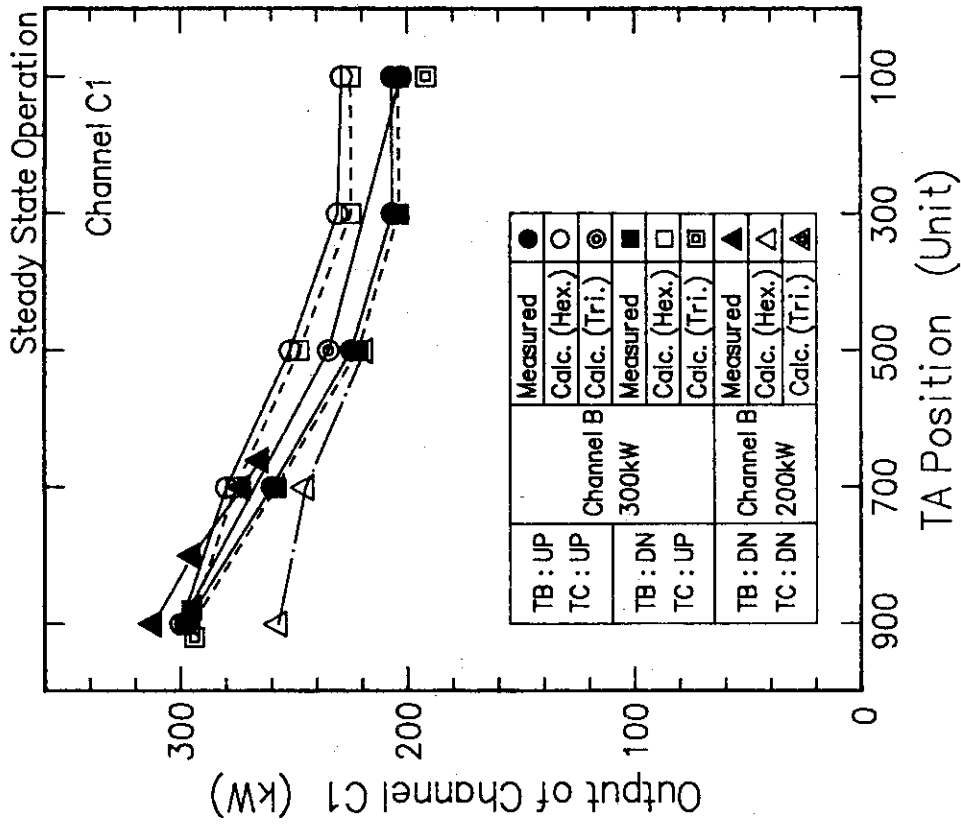


Fig. 34 Measured and calculated channel C1 outputs with various transient rod positions keeping channel B output constant.

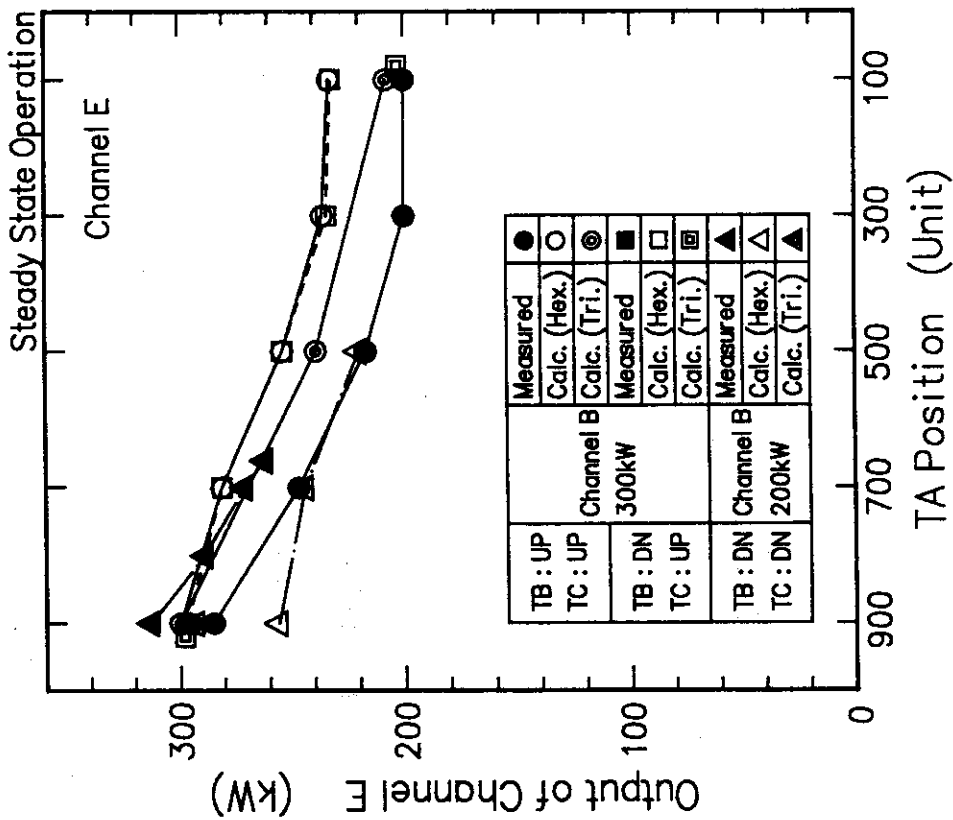


Fig. 33 Measured and calculated channel E outputs with various transient rod positions keeping channel B output constant.

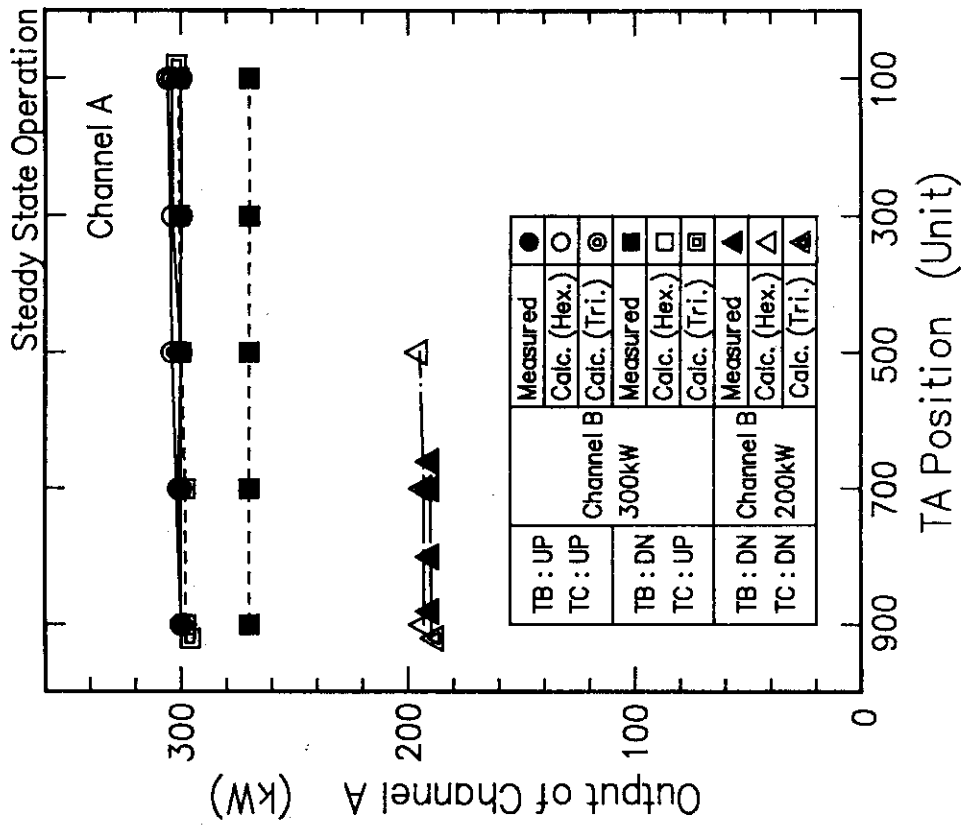


Fig. 36 Measured and calculated channel A outputs with various transient rod positions keeping channel B output constant.

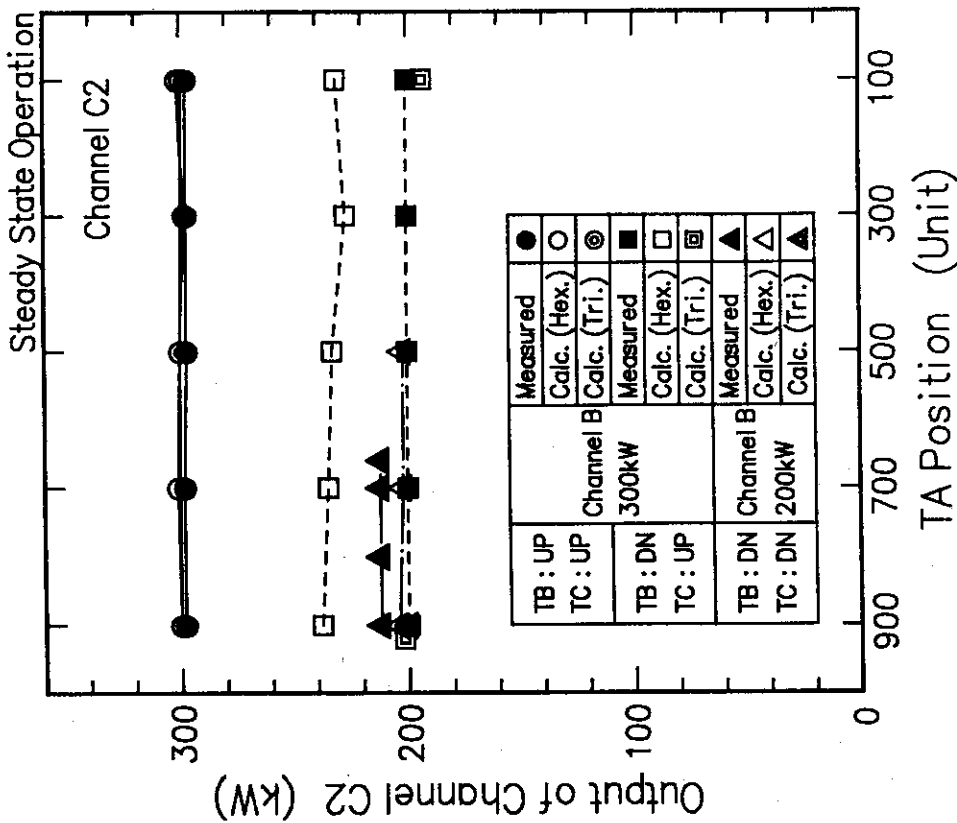


Fig. 35 Measured and calculated channel C2 outputs with various transient rod positions keeping channel B output constant.

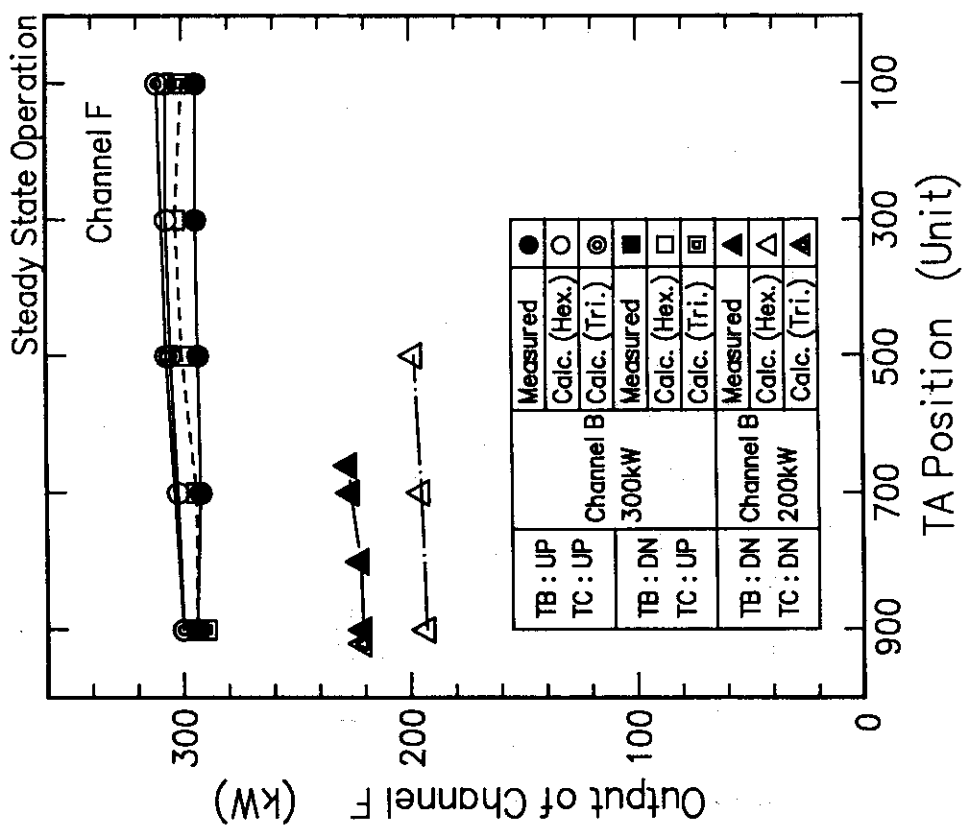


Fig. 37 Measured and calculated channel F outputs with various transient rod positions keeping channel B output constant.

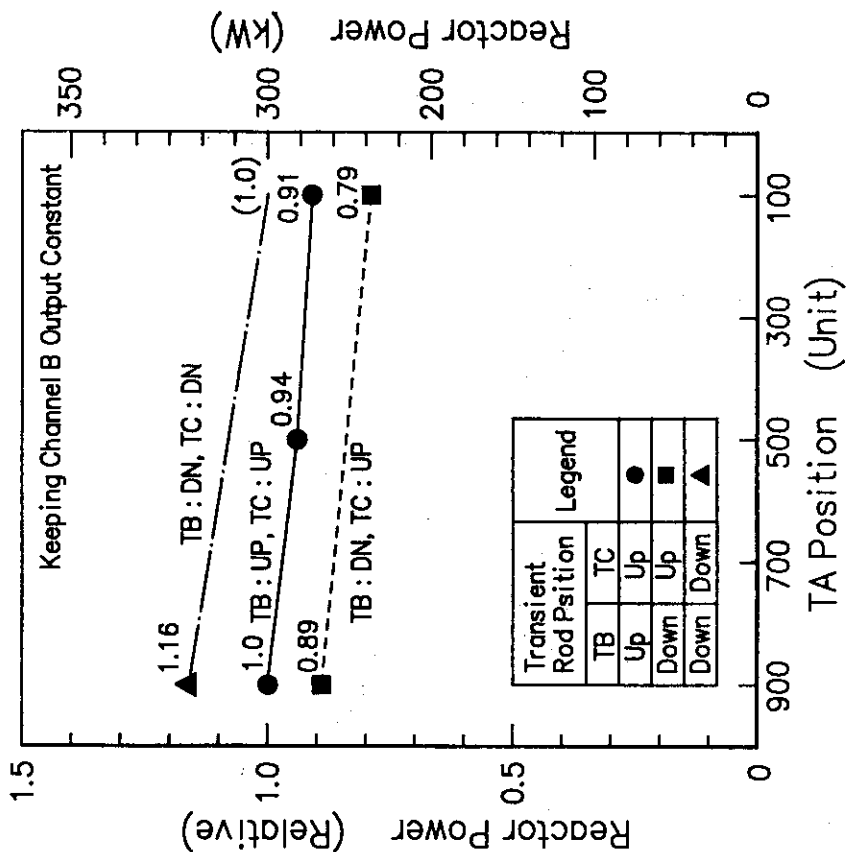


Fig. 38 Calculated reactor power while keeping channel B output constant at steady state operation with various transient rod positions.

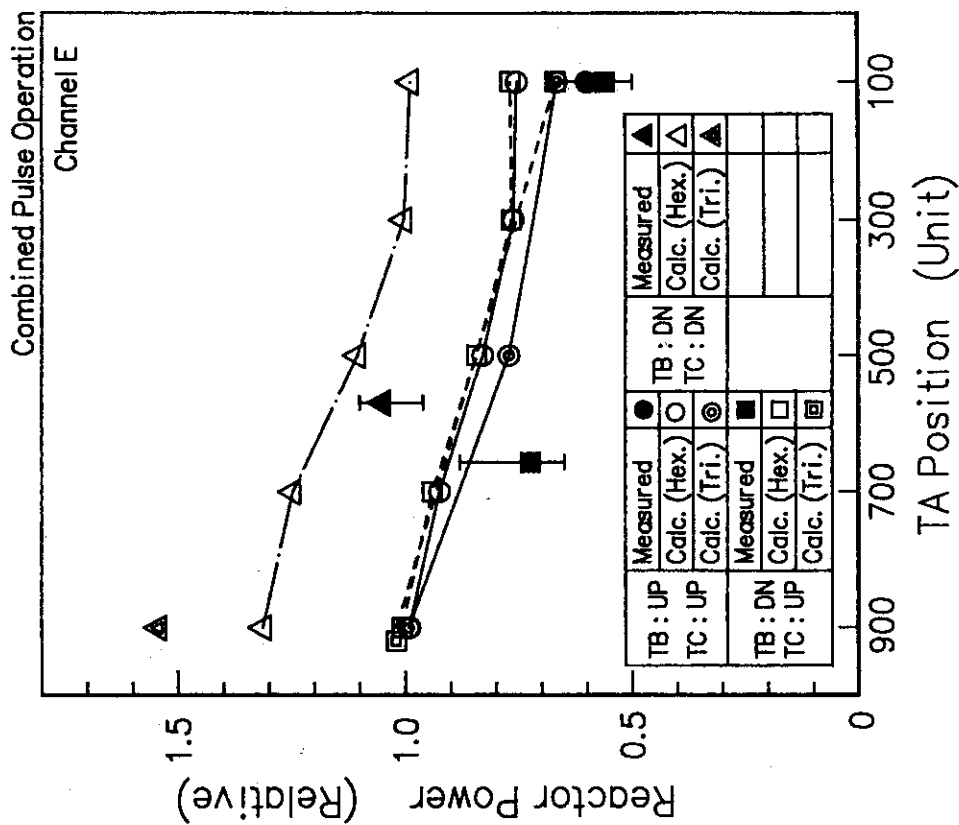


Fig. 40 Measured and calculated channel E outputs with various transient rod positions keeping channel F output constant (1.0).

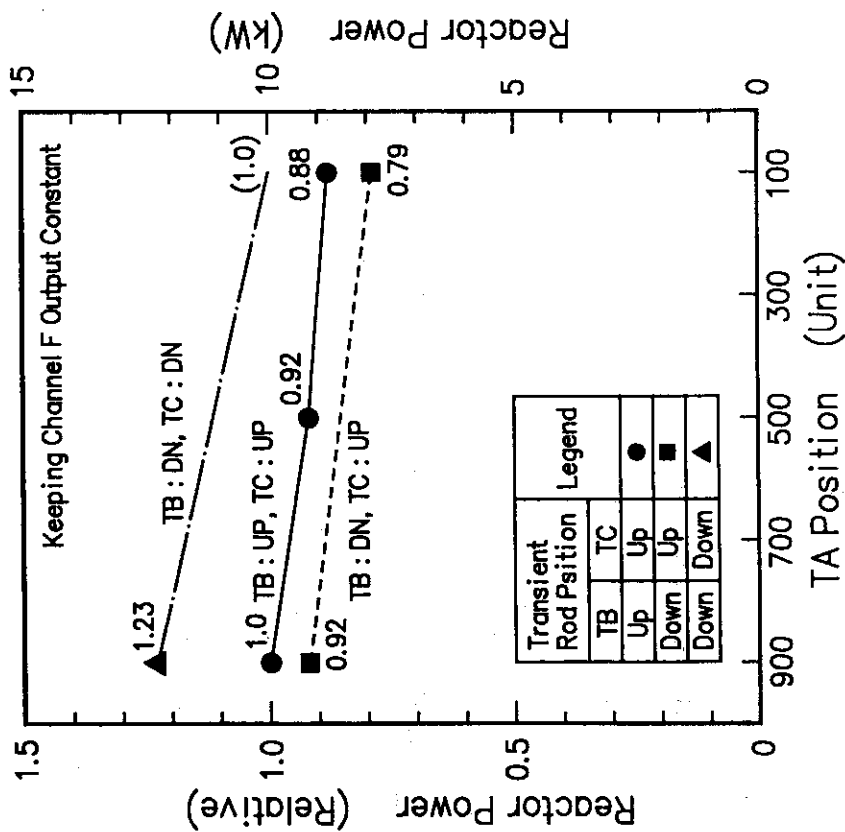


Fig. 39 Calculated reactor power while keeping channel F output constant at combined pulse operation with various transient rod positions.

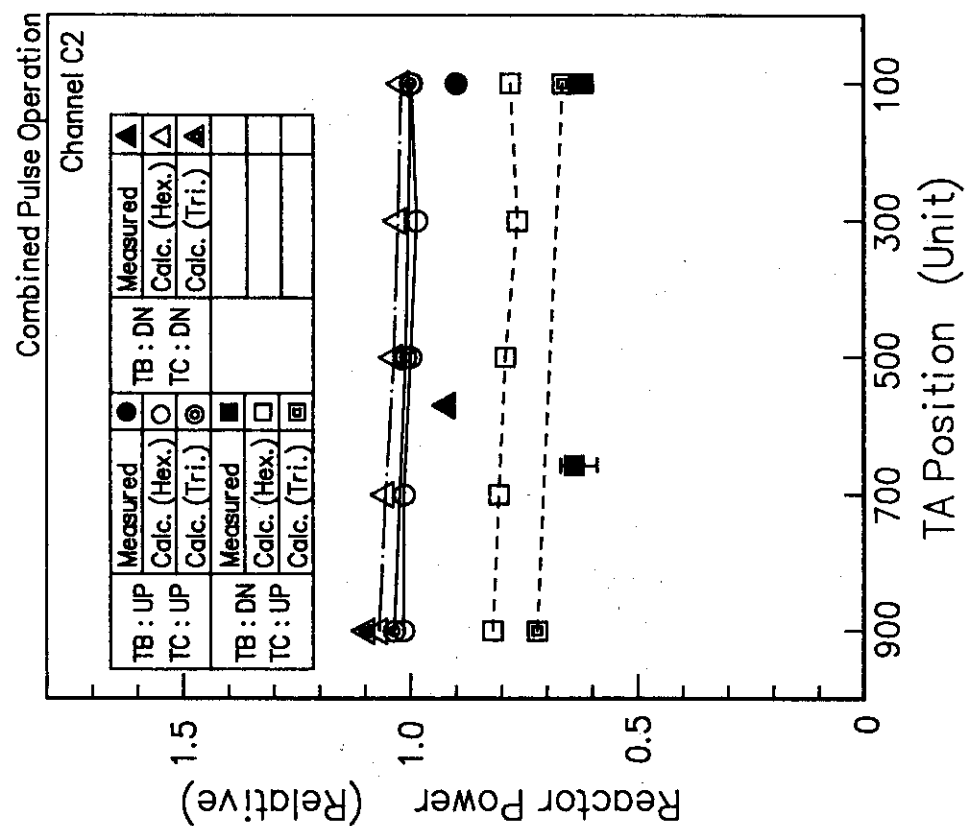


Fig. 42 Measured and calculated channel C2 outputs with various transient rod positions keeping channel F output constant (1.0).

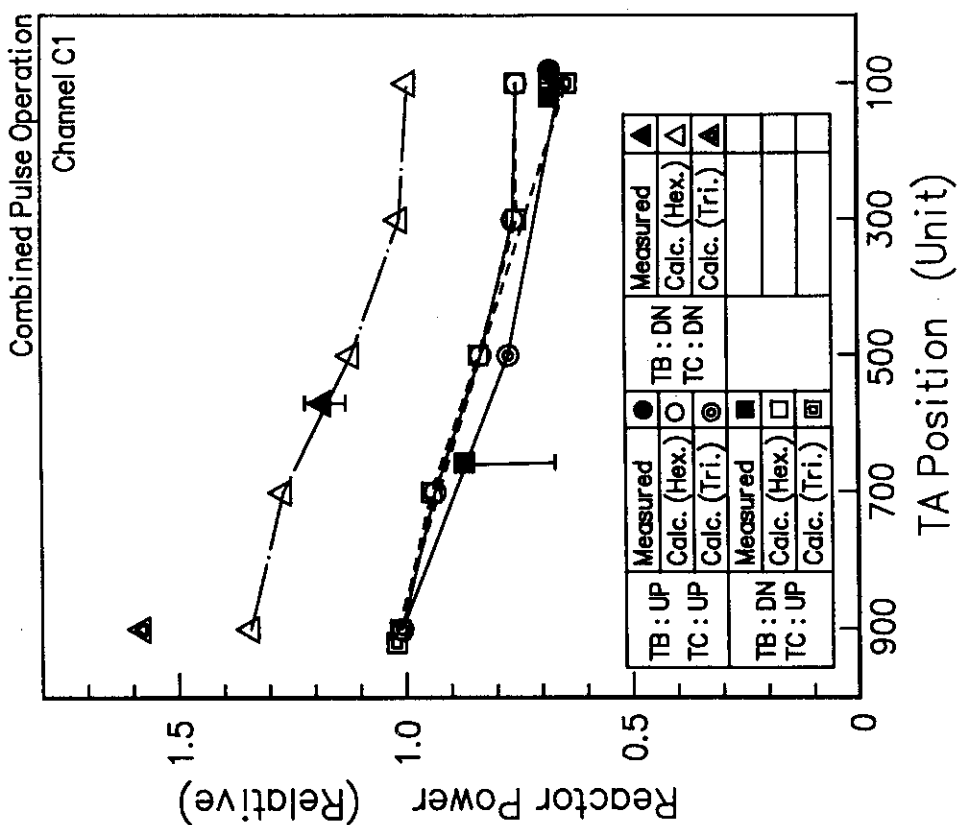


Fig. 41 Measured and calculated channel C1 outputs with various transient rod positions keeping channel F output constant (1.0).

5. 結 論

NSRRにおいて合成パルス運転時に、トランジェント棒を不均一に挿入する事によって生ずる炉心出力分布の歪と炉出力モニタへのシャドウイング効果について調べるためにNSRR炉心の中性子拡散計算を行った。その結果以下の知見を得た。

- (1) 計算の結果、三方向に置かれた炉出力モニタの指示値のうち最高値を制限値以下に抑えている現在の運転方式により、実際の炉出力は制限値に比べ小さく抑えられていることが明かとなった。トランジェント棒の位置によっては、実際の炉出力は炉出力モニタの最高指示値の100~80%に抑えられている。
- (2) 8系統の炉出力モニタ位置での熱中性子束と炉出力の関係を計算により明らかにした。炉出力モニタの指示値は炉出力が一定であってもトランジェント棒の挿入位置に応じて最大約25%変化した。また、トランジェント棒位置による各検出器の指示値の相対的变化について、計算結果を実験結果を比較したところ、3角柱体系による計算結果はよく実験結果を表現した。一方、6角柱体系による計算結果は実験値に表われたシャドウイング効果を過小評価した。
- (3) 計算により、調整棒位置および実験カプセルのシャドウイング効果に与える影響を調べた。その結果、シャドウイング効果は、上記の2つの影響をあまり受けず、ほとんど一定であった。
- (4) トランジェント棒が部分的に挿入される事により、NSRR炉心のドーナツ状の出力分布がくびれるように歪んでゆく様子を計算結果を基に視覚的に示した。炉心を3本のトランジェント棒を中心とする領域に分けて考えると、3領域の出力密度差はトランジェント棒未挿入の場合の0%から、トランジェント棒2本全挿入1本全引抜きの場合の±20%程度まで変動した。
- (5) 上記の出力の歪は、実験孔内の熱中性子には影響をほとんど与えない事が計算で示された。トランジェント棒位置によらず、炉出力が一定であれば実験孔中心位置の熱中性子束は±2%内で一定値を示した。また、隣接するセルの熱中性子束も方位角による有意な増減を示さなかった。ただし、実験孔内が空気の場合、炉出力が一定であっても調整棒が挿入されるにつれて実験孔内の熱中性子束が増加する傾向が見られた。
- (6) 水を満たした実験カプセルを実験孔に挿入する事によって、炉心の出力密度分布は平坦化された。炉心外側の出力ピーキングが減少し、同時に炉出力モニタ部の熱中性子も10~17%減少した。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、終始御指導いただいた反応度安全研究室の藤城俊夫室長に感謝の意を表します。計算結果の検証に用いた実験データは、運転係（運転係長：大友正一氏）をはじめとするNSRR管理室（室長：堀木欧一郎氏）により得られました。また、計算結果の整理・タイプ入力は千代田メンテナンス㈱の吉田敏幸氏、黒沢義明氏に協力願いました。ここに記して感謝します。

参 考 文 献

- 1) 稲辺輝雄ら, 「改良パルス運転のためのNSRR計装制御系統施設の安全設計」JAERI-M 88-113, 1988.
- 2) T. B. Fowler, D. R. Vondy and G. W. Conningham, "Nuclear Reactor Core Analysis Code :CITATION", ORNL-TM 2496, Rev.2, 1971.
- 3) K. Tsuchihashi, Y. Ishiguro, K. Kaneko and M. Ido, "Revised SRAC System", JAERI 1302, 1986.
- 4) 野々宮巖, 原田裕夫, 「原子力コードのベクトル化 88-1-SRAC, CITATION, TWOTRAN-II, COREBN-FBR-」, JAERI-M 89-030, 1989.

謝 辞

本研究の遂行にあたり、終始御指導いただいた反応度安全研究室の藤城俊夫室長に感謝の意を表します。計算結果の検証に用いた実験データは、運転係（運転係長：大友正一氏）をはじめとするNSRR管理室（室長：堀木欧一郎氏）により得られました。また、計算結果の整理・タイプ入力に千代田メンテナンス㈱の吉田敏幸氏、黒沢義明氏に協力願いました。ここに記して感謝します。

参 考 文 献

- 1) 稲辺輝雄ら, 「改良パルス運転のためのNSRR計装制御系統施設の安全設計」JAERI-M 88-113, 1988.
- 2) T. B. Fowler, D. R. Vondy and G. W. Conningham, "Nuclear Reactor Core Analysis Code :CITATION", ORNL-TM 2496, Rev.2, 1971.
- 3) K. Tsuchihashi, Y. Ishiguro, K. Kaneko and M. Ido, "Revised SRAC System", JAERI 1302, 1986.
- 4) 野々宮巖, 原田裕夫, 「原子力コードのベクトル化 88-1-SRAC, CITATION, TWOTRAN-II, COREBN-FBR-」, JAERI-M 89-030, 1989.

付録A NSRR炉心モデルの原子数密度

表 II-1 原子数密度

(単位: $\times 10^{21}$ コ/cc)

領域 核種	燃料要素	燃料要素 上部反射体 (黒鉛)	燃料要素 下部反射体 (黒鉛)	調整棒 (吸収体)	トラフット棒 (空気フット)	上部格子板 (水反射体)	下部格子板 (水反射体)	上部端栓 (炉心燃料)
U-235	3.57269×10^{-4}							
U-238	1.41102×10^{-3}							
H	5.30662×10^{-2}	1.77664×10^{-2}	1.77664×10^{-2}	1.77664×10^{-2}	1.61898×10^{-2}	5.28437×10^{-2}	5.53275×10^{-2}	4.19310×10^{-2}
O		8.88352×10^{-3}	8.88352×10^{-3}	8.88326×10^{-3}	8.10118×10^{-3}	2.64218×10^{-2}	2.76638×10^{-2}	2.09655×10^{-2}
Mn		5.78941×10^{-5}	5.78941×10^{-5}	5.78941×10^{-5}				2.45632×10^{-4}
Ni		2.86262×10^{-4}	2.86262×10^{-4}	2.86262×10^{-4}				1.21455×10^{-3}
Cr		6.64110×10^{-4}	6.64110×10^{-4}	6.64110×10^{-4}				2.81768×10^{-3}
Fe		2.27806×10^{-3}	2.27806×10^{-3}	2.27806×10^{-3}				9.66533×10^{-3}
Zr								
Mo								
Al					8.05584×10^{-3}	1.24787×10^{-2}	1.02327×10^{-2}	1.24787×10^{-2}
Zr	3.31664×10^{-2}							
N		1.28137×10^{-6}	1.28137×10^{-6}	2.87513×10^{-7}	2.36031×10^{-5}			
Na								
Ar								
B-10				1.40999×10^{-2}				
B-11				5.78018×10^{-2}				
C		5.53943×10^{-2}	5.53943×10^{-2}	1.79754×10^{-2}				

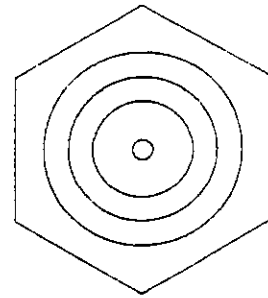
表II-1 (続き) 原子数密度

(単位: $\times 10^{24}$ コ/cc)

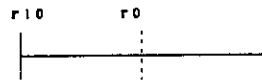
領域 核種	下部端栓 (炉心燃料)	実験孔	水 (20℃)	空気 (20℃) (1気圧)	カプセル体系 第1領域	カプセル体系 第2領域	
U-235							
U-238							
H	4.70412×10^{-2}	1.09707×10^{-2}	6.66440×10^{-2}				
O	2.35206×10^{-2}	5.49038×10^{-3}	3.33220×10^{-2}	1.01045×10^{-5}	8.54290×10^{-6}		
Mn	1.86514×10^{-4}	2.32446×10^{-4}			2.31837×10^{-4}	1.50008×10^{-3}	
Ni	9.22233×10^{-4}	1.14935×10^{-3}			1.14634×10^{-3}	7.41727×10^{-3}	
Cr	2.13952×10^{-3}	2.66642×10^{-3}			2.65943×10^{-3}	1.72076×10^{-3}	
Fe	7.33911×10^{-3}	2.27806×10^{-3}			9.12253×10^{-3}	5.90264×10^{-3}	
Zr							
Mo							
Al	1.02327×10^{-2}	1.11142×10^{-2}					
Zr							
N		1.87795×10^{-5}		3.78624×10^{-5}	3.20108×10^{-5}		
Na							
Ar							
B-10							
B-11							
C							

燃料要素均質化セル計算体系

	r (cm)	T-reg	R-reg	Material
r ₀	0.0	1	1	Zr
r ₁	0.23	2	2	U-ZrH
r ₂	0.756406	3	2	
r ₃	1.044700	4	2	
r ₄	1.266911	5	2	
r ₅	1.445942	6	2	
r ₆	1.67762	7	2	
r ₇	1.88	8	3	He
r ₈	2.08	9	3	SUS304
r ₉	2.27	10	4	H ₂ O
r ₁₀	2.5		5	



$B g^2 = 0.0144847 \text{ (cm}^{-2}\text{)}$



燃料セル計算用バックリング

燃料等価半径 r cm

$$r = (3^{1/2} / 2 \times 4.17^2 \times 157 / \pi)^{1/2} = 27.4332$$

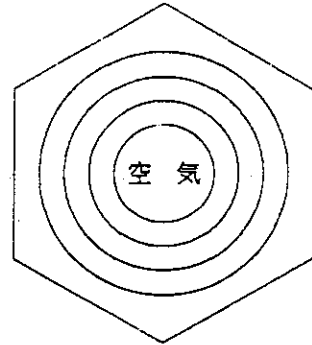
燃料高さ h cm

$$h = 38.1$$

$$B g^2 = (\pi / h)^2 + (2.405 / r)^2 = 0.0144847$$

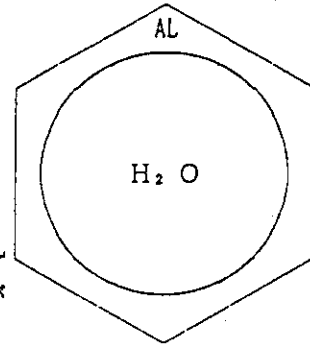
トランジェント棒 (空気フォロア) 領域

寸法 (cm)		材質	
空気フォロア-内径	3. 31	空気フォロア-	AL
空気フォロア-外径	3. 49	被覆管	AL
被覆管内径	3. 63		
被覆管外径	3. 81		
ピッチ	4. 17		

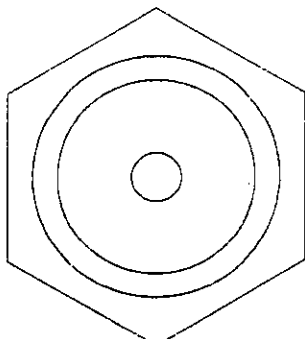


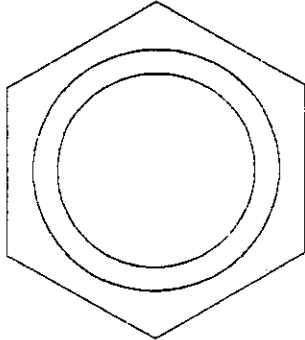
上下格子板領域 格

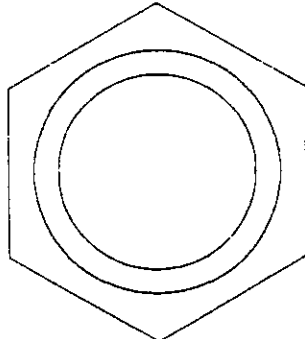
各部寸法 (cm)			材質	
燃料孔	上部	3. 8	格子板	AL
	下部	3. 2	内孔*	H ₂ O
制御棒孔		4. 1		
ピッチ		4. 17		
格子板厚さ			*燃料および制御棒領域について内孔には燃料, あるいは制御棒構造物が入る。	
上部		26. 0		
下部		5. 0		
中央孔		25. 0		



付録1 原子数密度

燃料要素領域				
各部寸法 (cm)		材質		
芯材直径	0.46	芯材	ジルコニウム	全領域とも温度は20°C
燃料直径	3.56	燃料	12w/o U-ZrH _{1.6} (Uは20%濃縮)	
ギャップ距離	0.045	ギャップ	空気 (大気圧)	
被覆材内径	3.65	被覆材	SUS304	
被覆材外径	3.75	冷却水	H ₂ O	
燃料間ピッチ	4.17	²³⁵ U量	約52g/本	

燃料要素上下部反射体領域				
各部寸法 (cm)		材質		
黒鉛反射体	3.56	黒鉛反射体	黒鉛	全領域とも温度は20°C
ギャップ	0.045	ギャップ	空気 (大気圧)	
被覆材内径	3.65	被覆材	SUS304	
被覆材外径	3.75			
ピッチ	4.17			

調整棒領域				
各部寸法 (cm)		材質		
吸収体直径	3.63	吸収体	天然 B ₄ C 密度 2.4g/cm ³	全領域とも温度は20°C
ギャップ	0.01	ギャップ	空気 (大気圧)	
被覆材内径	3.65	被覆材	SUS304	
被覆材外径	3.75			
ピッチ	4.17			

燃料要素領域

^{235}U 重量	: 52 g	$N_A =$	$6.022045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
^{235}U 濃縮度	: 20W/O	$M_{235} =$	235.04392
U / (ZrH + U)	: 12W/O	$M_{238} =$	238.05077
ZrH	: ZrH _{1.60}	$M_{Zr} =$	91.22374
		$M_H =$	1.00782519

$$^{235}\text{U} \text{密度} = \frac{52}{\pi \{ (3.56 \times 0.5)^2 - (0.46 \times 0.5)^2 \} \times 38.1} = 0.139444 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{U密度} = 0.139444 / 0.2 = 0.697220 \text{ g/cm}^3$$

$$^{238}\text{U} \text{密度} = 0.697220 \times 0.8 = 0.557776 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{U-ZrH密度} = 0.697220 / 0.12 = 5.81017 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{ZrH密度} = 5.81017 \times 0.88 = 5.11295 \text{ g/cm}^3$$

原子数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm³)

$$^{235}\text{U} = 0.139444 / M_{235} \times N_A \times 10^{-24} = 3.57269 \times 10^{-4}$$

$$^{238}\text{U} = 0.557776 / M_{238} \times N_A \times 10^{-24} = 1.41102 \times 10^{-3}$$

$$\text{Zr} = 5.11295 / \{ 91.22374 + 1.00782519 \times 1.6 \} \times N_A \times 10^{-24} = 3.31664 \times 10^{-2}$$

$$\text{H} = 3.31664 \times 10^{-2} \times 1.6 = 5.30662 \times 10^{-2}$$

燃料要素上下部反射体領域

① 全領域面積

$$\frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 = 15.0592 \text{ cm}^2$$

② 黒鉛部面積

$$(3.56/2)^2 \times \pi = \frac{9.95382}{(0.660979)} \text{ cm}^2$$

③ ギャップ部面積

$$\pi \times \{ (3.65/2)^2 - (3.56/2)^2 \} = \frac{0.509645}{(0.0338428)} \text{ cm}^2$$

④ SUS304部面積

$$\pi \times \{ (3.75/2)^2 - (3.65/2)^2 \} = \frac{0.581195}{(0.0385940)} \text{ cm}^2$$

⑤ H₂O部面積

$$\frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 - \pi \times \left\{ \frac{3.75}{2} \right\}^2 = \frac{4.01457}{(0.266586)}$$

原子数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm³)

$$\text{H} = 6.6644 \times 10^{-2} \times 0.266586 = 1.77664 \times 10^{-2}$$

$$\text{O} = 3.3322 \times 10^{-2} \times 0.266586 + 1.01045 \times 10^{-5} \times 0.0338428 = 8.88352 \times 10^{-3}$$

$$\text{N} = 3.78624 \times 10^{-5} \times 0.0338428 = 1.28137 \times 10^{-6}$$

$$\text{C} = 8.38068 \times 10^{-2} \times 0.660979 = 5.53943 \times 10^{-2}$$

$$M_A = 1.50008 \times 10^{-3} \times 0.0385940 = 5.78941 \times 10^{-5}$$

$$N_i = 7.41727 \times 10^{-3} \times 0.0385940 = 2.86262 \times 10^{-4}$$

$$\text{C}_r = 1.72076 \times 10^{-2} \times 0.0385940 = 6.64110 \times 10^{-4}$$

$$\text{F}_o = 5.90264 \times 10^{-2} \times 0.0385940 = 2.27806 \times 10^{-3}$$

下部端栓+下部格子板部領域

① 全領域体積

$$\frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 \times 13.72 = 206.613 \text{ cm}^3$$

② AL部体積

$$\left\{ \frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 - \pi \times \left\{ \frac{3.2}{2} \right\}^2 \right\} \times 5 = 35.0838 \text{ cm}^3$$

(0.169804)

③ SUS部体積

$$\pi \times \left\{ \frac{3.75}{2} \right\}^2 \times 0.9 + \pi \times \left\{ \frac{1.5}{2} \right\}^2 \times 5.8 + 3 \times 0.36 \times 1.125 \times 3.3 + \frac{3}{2} \times 0.36 \times 1.125 \times 1.5 + \pi \times 0.32^2 \times 1.8 = 25.6894 \text{ cm}^3$$

(0.124336)

④ H₂O部体積

$$\frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 \times 13.72 - 36.1711 - 25.6894 = 145.839 \text{ cm}^3$$

(0.705858)

原子数密度 ($\times 10^{-24}$ 個/cm³)

H = $6.6644 \times 10^{-2} \times 0.705858 = 4.70412 \times 10^{-2}$

O = $3.3322 \times 10^{-2} \times 0.705858 = 2.35206 \times 10^{-2}$

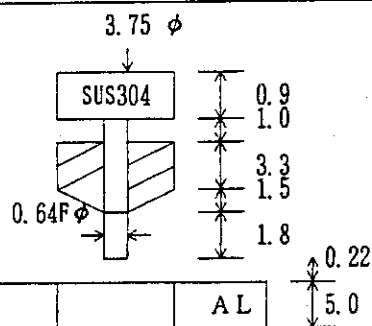
AL = $6.02617 \times 10^{-2} \times 0.169804 = 1.02327 \times 10^{-2}$

Mn = $1.50008 \times 10^{-3} \times 0.124336 = 1.86514 \times 10^{-4}$

Ni = $7.41727 \times 10^{-3} \times 0.124336 = 9.22233 \times 10^{-4}$

Cr = $1.72076 \times 10^{-2} \times 0.124336 = 2.13952 \times 10^{-3}$

Fe = $5.90264 \times 10^{-2} \times 0.124336 = 7.33911 \times 10^{-3}$



上部格子板+H₂O部領域

① 全領域体積

$$\frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 \times 31.0 = 466.836 \text{ cm}^3$$

② AL部体積

$$\left\{ \frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 - \pi \times (3.8/2)^2 \right\} \times 26 = 96.6701 \text{ cm}^3$$

(0.207075)

③ H₂O部体積

$$\frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 \times 5 + \pi \times (3.8/2)^2 \times 26 = 370.166 \text{ cm}^3$$

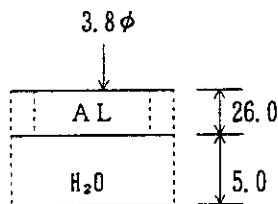
(0.792925)

原子数密度 ($\times 10^{-24}$ 個/cm³)

H = $6.6644 \times 10^{-2} \times 0.792925 = 5.28437 \times 10^{-2}$

O = $3.3322 \times 10^{-2} \times 0.792925 = 2.64218 \times 10^{-2}$

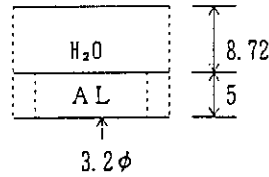
AL = $6.02617 \times 10^{-2} \times 0.207075 = 1.24787 \times 10^{-2}$



下部格子板+H₂O 部領域

① 全領域体積

$$\frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 \times 13.72 = 206.613$$



② AL 部体積

$$\left\{ \frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 - \pi \times \left\{ \frac{3.2}{2} \right\}^2 \right\} \times 5.0 = 35.0838 \text{ cm}^3 \text{ (0.169804)}$$

③ H₂O 部体積

$$\frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 \times 8.72 + \pi \times \left\{ \frac{3.2}{2} \right\}^2 \times 5.0 = 171.529 \text{ cm}^3 \text{ (0.830195)}$$

原子数密度 ($\times 10^{-24}$ 個/cm³)

$$H = 6.6644 \times 10^{-2} \times 0.830195 = 5.53275 \times 10^{-2}$$

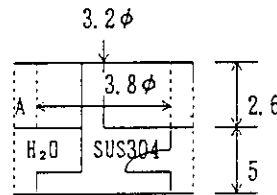
$$O = 3.3322 \times 10^{-2} \times 0.830195 = 2.76638 \times 10^{-2}$$

$$AL = 6.02617 \times 10^{-2} \times 0.169804 = 1.02327 \times 10^{-2}$$

上部端栓+上部格子板部領域

① 全領域体積

$$\frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 \times 31 = 466.836 \text{ cm}^3$$

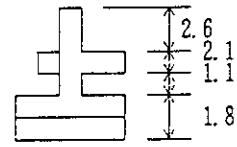


② AL 部体積

$$\left\{ \frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 - \pi (3.8/2)^2 \right\} \times 26 = 96.6701 \text{ cm}^3 \text{ (0.207075)}$$

③ SUS304 部体積

$$\pi \times \left\{ \frac{1.5}{2} \right\}^2 \times 26 + \pi \times \left\{ \frac{3.75}{2} \right\}^2 \times 1.8 + \pi \times \left\{ \frac{1.5}{2} \right\}^2 \times 1.1 + \pi \times \left\{ \frac{1.5}{2} \right\}^2 \times 2.1 + 0.7 \times 1.125 \times 2.1 \times 3 = 76.4423 \text{ cm}^3 \text{ (0.163746)}$$



④ H₂O 部

$$466.836 - 96.6701 - 76.4423 = 294.724 \text{ (0.629179)}$$

原子数密度 ($\times 10^{-24}$ 個/cm³)

$$H = 6.6644 \times 10^{-2} \times 0.629179 = 4.19310 \times 10^{-2}$$

$$O = 3.3322 \times 10^{-2} \times 0.629179 = 2.09655 \times 10^{-2}$$

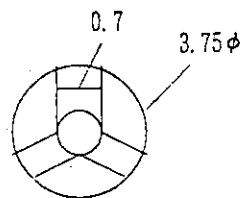
$$AL = 6.02617 \times 10^{-2} \times 0.207075 = 1.24787 \times 10^{-2}$$

$$Mn = 1.50008 \times 10^{-3} \times 0.163746 = 2.45632 \times 10^{-4}$$

$$Ni = 7.41727 \times 10^{-3} \times 0.163746 = 1.21455 \times 10^{-3}$$

$$Cr = 1.72076 \times 10^{-2} \times 0.163746 = 2.81768 \times 10^{-3}$$

$$Fe = 5.90264 \times 10^{-2} \times 0.163746 = 9.66533 \times 10^{-3}$$



調整棒領域

① 全領域面積

$$\frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 = 15.0592 \text{ cm}^2$$

原子数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm³)

② 天然B₁部面積

$$\pi \times (3.63/2)^2 = 10.3491 \text{ cm}^2$$

(0.687229)

$$B^{10} = 2.05171 \times 10^{-2} \times 0.687229 = 1.40999 \times 10^{-2}$$

$$B^{11} = 8.41085 \times 10^{-2} \times 0.687229 = 5.78018 \times 10^{-2}$$

③ ギャップ部面積

$$\pi \times \left\{ (3.65/2)^2 - (3.63/2)^2 \right\}$$

$= 0.114354 \text{ cm}^2$
(7.59363×10^{-3})

$$C = 2.61564 \times 10^{-2} \times 0.687229 = 1.79754 \times 10^{-2}$$

$$N = 3.78624 \times 10^{-5} \times 7.59363 \times 10^{-3} = 2.87513 \times 10^{-7}$$

$$H = 6.66440 \times 10^{-2} \times 0.266586 = 1.77664 \times 10^{-2}$$

④ SUS304部面積

$$\pi \times \left\{ (3.75/2)^2 - (3.65/2)^2 \right\}$$

$= 0.581195 \text{ cm}^2$
(0.0385940)

$$O = 3.33220 \times 10^{-2} \times 0.266586 + 1.01045 \times 10^{-5} \times 7.59363 \times 10^{-3} = 8.88326 \times 10^{-3}$$

$$M_n = 1.50008 \times 10^{-3} \times 0.0385940 = 5.78941 \times 10^{-5}$$

$$N_i = 7.41727 \times 10^{-3} \times 0.0385940 = 2.86262 \times 10^{-4}$$

⑤ H₂O部面積

$$\frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 - (3.75/2)^2 \times \pi$$

$= 4.01457 \text{ cm}^2$
(0.266586)

$$C_r = 1.72076 \times 10^{-2} \times 0.0385940 = 6.64110 \times 10^{-4}$$

$$F_n = 5.90264 \times 10^{-2} \times 0.0385940 = 2.27806 \times 10^{-3}$$

トランジェント棒 (空気フロー) 領域

① 全領域面積

$$\frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 = 15.0592 \text{ cm}^2$$

② AL部面積

$$\pi \left\{ \left\{ \frac{3.81}{2} \right\}^2 - \left\{ \frac{3.63}{2} \right\}^2 \right\} + \pi \left\{ \left\{ \frac{3.49}{2} \right\}^2 - \left\{ \frac{3.31}{2} \right\}^2 \right\} = 2.01313 \text{ cm}^2$$

(0.133681)

③ H₂O部面積

$$\frac{3^{1/2}}{2} \times 4.17^2 - \left\{ \frac{3.81}{2} \right\}^2 \times \pi = 3.65831 \text{ cm}^2$$

(0.242929)

④ 空気部面積

$$\pi \left\{ \left\{ \frac{3.63}{2} \right\}^2 - \left\{ \frac{3.49}{2} \right\}^2 \right\} + \left\{ \frac{3.31}{2} \right\}^2 \times \pi = 9.38779 \text{ cm}^2$$

(0.623392)

原子数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm³)

$$H = 6.6644 \times 10^{-2} \times 0.242929 = 1.61898 \times 10^{-2}$$

$$O = 3.3322 \times 10^{-2} \times 0.242929 + 1.01045 \times 10^{-5} \times 0.623392 = 8.10118 \times 10^{-3}$$

$$N = 3.78624 \times 10^{-5} \times 0.623392 = 2.36031 \times 10^{-5}$$

$$AL = 6.02617 \times 10^{-2} \times 0.133681 = 8.05584 \times 10^{-3}$$

SUS316の密度

SUS316の組成はANSIの規格によると以下のようにになっている。

C : ≤ 0.08 Si : ≤ 1.00 Mn : ≤ 2.00
 P : ≤ 0.04 S : ≤ 0.030 Ni : 10.00 ~ 14.00
 Cr : 16 ~ 18 Mo : 2.00 ~ 3.00 (W/O)

とりあえず以下の組成比を用いる。

		原子数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)
Mn : 1.75	Ni : 13.50	$Mn = 7.82 \times 0.0175 / M_{Mn} \times Na \times 10^{-24} = 1.50008 \times 10^{-3}$
Fe : 65.25	Cr : 2.5	$Ni = 7.82 \times 0.1350 / M_{Ni} \times Na \times 10^{-24} = 1.08252 \times 10^{-2}$
Mo : 2.5	(W/O)	$Cr = 7.82 \times 0.1700 / M_{Cr} \times Na \times 10^{-24} = 1.53963 \times 10^{-2}$
密度 : 7.82 g/cm ³		$Fe = 7.82 \times 0.6525 / M_{Fe} \times Na \times 10^{-24} = 5.50211 \times 10^{-2}$
$M_{Mo} = 95.889605$		$Mo = 7.82 \times 0.025 / M_{Mo} \times Na \times 10^{-24} = 1.22778 \times 10^{-3}$

空気密度

密度 0.001166 g/cm³ (20℃, 1気圧)

存在比 (W/O)

N₂ : 75.527 O₂ : 23.143 Ar : 1.282 (Arはライブラリーに無いので無視する)
 $Mn = 14.00673$ $Mo = 15.99950$

原子数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm³)

$M = 0.001160 \times 0.75527 / 14.00673 \times Na \times 10^{-24} = 3.78624 \times 10^{-5}$
 $O = 0.001160 \times 0.23143 / 15.99950 \times Na \times 10^{-24} = 1.01045 \times 10^{-5}$

黒鉛密度	
1.71~1.80 g/cm ³ であるがNSRR設工認で使用したデータ1.67/cm ³ として計算する。	
M _c = 12	原子数密度 (×10 ²⁴ 個/cm ³)
	$1.67/12 \times N_A \times 10^{-24} = 8.38068 \times 10^{-2}$
	*) 1.6/cm ³ のデータも有

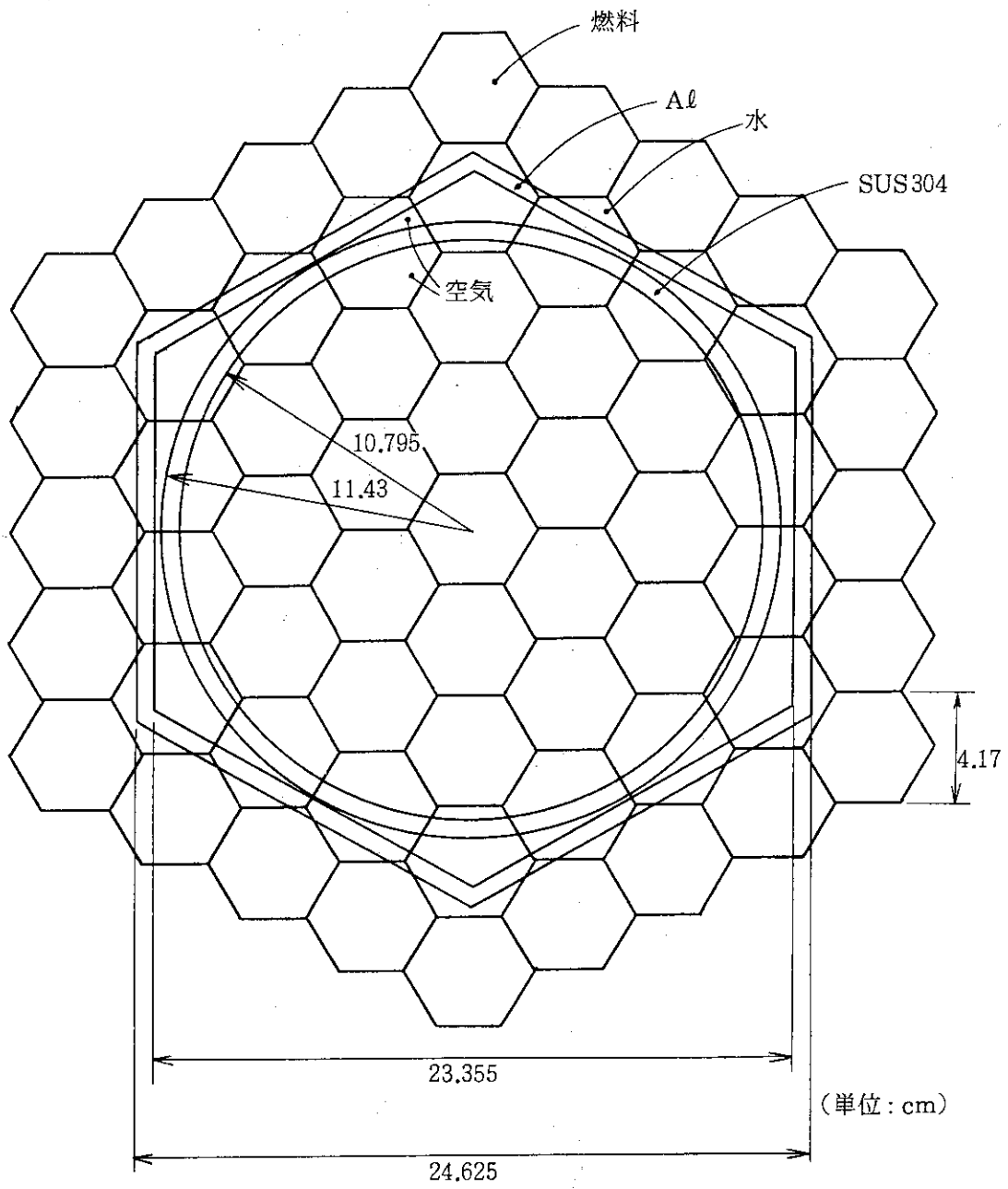
AL密度	
2.7 g/cm ³	
MAI = 26.981539	原子数密度 (×10 ²⁴ 個/cm ³)
	$2.7/26.981539 \times N_A \times 10^{-24} = 6.02617 \times 10^{-2}$

H₂O密度(300°K)	
0.996585 g/cm ³	
MH = 1.00782519	原子数密度 (×10 ²⁴ 個/cm ³)
MO = 15.9949150	H = $0.996585 / (1.00782519 \times 2 + 15.994915) \times N_A \times 10^{-24} \times 2 = 6.66440 \times 10^{-2}$
	O = H × 0.5 = 3.33220×10^{-2}

天然B₁C密度	
2.4 g/cm ³ として計算を行う。	
B ¹⁰ : B ¹¹ = 19.61 : 80.39	原子数密度 (×10 ²⁴ 個/cm ³)
MB ₁₀ = 10.0129389	C ¹² = $2.4 / (MB \times 4 + M_{C12}) \times N_A \times 10^{-24} = 2.61564 \times 10^{-2}$
MB ₁₁ = 11.0093053	B ¹⁰ = C ¹² × 4 × 0.1961 = 2.05171×10^{-2}
M _{C10} = 12	B ¹¹ = C ¹² × 4 × 0.8039 = 8.41085×10^{-2}
MB = 10.813918	

Zr密度	
6.5 g/cm ³	
Mzr = 91.22374	原子数密度 (×10 ²⁴ 個/cm ³)
	Zr = $6.5/Mzr \times N_A \times 10^{-24} = 4.29091 \times 10^{-2}$

SUS304の密度		
SUS304の組成はANSIの規格によると以下のようにになっている。		
C : ≤ 0.08	Si : ≤ 1.0	Mn : ≤ 2.0
P : ≤ 0.04	S : ≤ 0.03	Ni : ≤ 8.00~10.50
Cr : 18 ~ 20		
とりあえず以下の組成比を用いる。		
Mn : 1.75	Ni : 9.25	原子数密度 (×10 ²⁴ 個/cm ³)
Fe : 70.0	Cr : 19.0 (W/O)	Mn = $7.82 \times 0.0175 / M_{Mn} \times N_A \times 10^{-24} = 1.50008 \times 10^{-3}$
密度 : 7.82 g/cm ³		Ni = $7.82 \times 0.0925 / M_{Ni} \times N_A \times 10^{-24} = 7.41727 \times 10^{-3}$
M _{Mn} = 54.93805	M _{Ni} = 58.7284	Cr = $7.82 \times 0.1900 / M_{Cr} \times N_A \times 10^{-24} = 1.72076 \times 10^{-2}$
M _{Cr} = 51.9976	M _{Fe} = 55.8473	Fe = $7.82 \times 0.7000 / M_{Fe} \times N_A \times 10^{-24} = 5.90264 \times 10^{-2}$



実験孔

