

JAERI-Data/Code
98-012



FCA XVIII集合体における特性試験及び臨界性解析

1998年3月

安藤真樹・大杉俊隆・辻本和文

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

F C A X V III集合体における特性試験及び臨界性解析

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

安藤 真樹・大杉 俊隆・辻本 和文⁺

(1998年2月3日受理)

減速材装荷金属燃料炉心に対する解析精度を評価することを目的として、F C Aを用い一連のZrH装荷金属燃料高速炉の模擬実験を行った。実験体系の選定と臨界特性試験の測定結果について述べた。高速炉標準解析手法を用いて実験体系の臨界性に関して解析を行った。臨界性解析では、実効増倍率の解析精度は、M O X燃料高速炉体系に較べて過小評価する傾向にあることが分かった。

Critical Experiment and Analysis on FCA XVIII Assembly

Masaki ANDOH, Toshitaka OSUGI and Kazufumi TSUJIMOTO*

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

(Received February 3, 1998)

A series of experiments for zirconium-hydride added metallic fuel fast reactor was carried out at FCA to estimate calculation accuracy for a moderator added metallic fuel fast reactor. The selection of the experimental cores and the results of critical characteristics measurements are described. The criticality of the experimental cores was analyzed using standard analysis method for FBR. It was found that the calculated effective multiplication factors for the present cores underestimated the experiments in comparison with the MOX FBR core.

Keywords: Zirconium-hydride, Metallic Fuel, Fast Reactor, Moderator Added Metallic Fuel,
Criticality Analysis

* Neutron Science Research Center

目 次

1. 序 文	1
2. 実験体系	1
2.1 実験体系の選定	1
2.2 臨界近接及び臨界体系	3
3. 特性試験	6
3.1 制御棒較正	6
3.1.1 基準反応度法による制御棒較正曲線の測定	6
3.1.2 未臨界法による制御・安全棒の反応度値の測定	7
3.2 温度補正係数の測定	13
3.3 密着面間隙補正係数の測定	15
3.4 基準反応度 $1 \rho_0$ の測定	16
3.5 出力較正	19
4. 臨界性に関する解析	20
4.1 解析手法	20
4.2 臨界性の解析結果及び考察	20
5. まとめ	22
謝 辞	22
参考文献	23
付 録	34

Contents

1. Introduction	1
2. Core Configuration	1
2.1 Selection of Experimental Core	1
2.2 Critical Approach and Critical Core Configuration	3
3. Critical Experiments	6
3.1 Control Rod Calibration	6
3.1.1 Calibration Curve	6
3.1.2 Measurement by Sub-critical Method	7
3.2 Measurement of Temperature Coefficient	13
3.3 Measurement of Gap Coefficient	15
3.4 Measurement of $1/\rho_0$	16
3.5 Power Calibration	19
4. Analysis on Criticality	20
4.1 Calculation Methods	20
4.2 Results and Discussions	20
5. Summary	22
Acknowledgments	22
References	23
Appendix	34

1. 序 文

金属燃料高速炉では、MOX燃料高速炉と比べて中性子スペクトルが硬いため、ドップラー反応度効果による負の反応度フィードバックが小さく正のナトリウムボイド反応度効果が大きくなる。そこで、金属燃料高速炉の安全裕度の向上を目的として、燃料中に少量の水素を混入し反応度係数の改善を目指した減速材装荷金属燃料高速炉の概念検討が進められている。¹⁾²⁾水素混入によるこれら反応度係数の変化を調べるとともに、水素装荷金属燃料炉心に対する解析精度を評価することを目的として、高速炉臨界実験装置（FCA）を用い一連のZrH装荷金属燃料高速炉の模擬実験を行った。本報告書では、実験体系の選定と臨界特性試験結果及び臨界性に関する解析結果について報告する。

以下、第2章では、各実験体系の炉心について述べる。第3章では、特性試験の方法及び結果について述べる。第4章では、臨界性について解析する。

2. 実験体系

2.1 実験体系の選定

本実験体系は、燃料板保有量の制限からゾーン型の多領域炉心とした。炉心中心部に水素化ジルコニウム(ZrH)装荷金属燃料を模擬したテスト領域を設けた。テスト領域の大きさは7行×7列格子とし、39cm×39cm×91cm（1/2集合体当たり）である。テスト領域の大きさを選定するに当たり、Naボイド反応度値やサンプル反応度値の測定を念頭に入れ、炉心中心部3行×3列格子においてもテスト領域燃料組成の基本モード中性子スペクトルが形成されることを考慮した。テスト領域の燃料組成の決定には、金属燃料高速炉模擬体系であるFCA XVI-2集合体のテスト領域燃料セル（ICAセル）を参考にした。プルトニウム富化度をICAセルと同一の約9.6%(Pu-fissile/HM)とし、ジルコニウム板（Zr板）とポリスチレン板（CH板）を用いZrH装荷金属燃料の組成を模擬した。ZrH装荷金属燃料高速炉を模擬した本実験体系の総称はFCA XVIII集合体である。

テスト領域燃料セルに用いるCH板のボイド率を45%、80%、95%に変化させ、水素対燃料核種原子数比（H/HM比）を変化させた3つの実験体系を選定した。使用するCH板のボイド率に対応して、各実験体系の名称をXVIII(45V)、XVIII(80V)、及びXVIII(95V)とした。各実験体系のテスト領域燃料セルの名称及びH/HM比は以下の通りである。核データJENDL-3.2³⁾を用いて計算した各テスト領域燃料セルの無限増倍率（ k_{∞} ）を併せて記した。

実験体系	テスト領域燃料セル	H/HM比	k_{∞}
XVIII(45V)	TCH45	0.130	1.169
XVIII(80V)	TCH80	0.052	1.202
XVIII(95V)	TCH95	0.022	1.230

テスト領域燃料セル9セルと8インチ長さの天然ウランブロックをステンレス製燃料装填用引出に装填し、テスト領域用燃料引出（TCH引出）を作成した。

テスト領域とドライバー領域の間に中性子スペクトルの緩衝領域としてバッファ領域を設けた。バッファ領域の燃料セル（BCH80セル）では、プルトニウム富化度をテスト領域と同じとし、各実験体系ともCH板のボイド率を80%とした。一部Zr板の代わりにステンレス板を用いた。臨界性維持のためのドライバー燃料として、プルトニウム金属及び濃縮ウラン金属を燃料とするプルトニウムドライバーセル（PDセル）と、濃縮ウラン金属を燃料とするウランドライバーセル（UDセル）を用いた。テスト領域用燃料引出と同様に、これらBCH80、PD及びUDセルをそれぞれ9セルに8インチ長さの天然ウランブロックを合わせて燃料装填用引出に装填し、バッファ領域燃料引出（BCH引出）、プルトニウムドライバー引出（PD引出）及びウランドライバー引出（UD引出）を作成した。

このほか、ドライバー領域内には、濃縮ウラン金属で構成される制御・安全棒（SCRセル）が装荷される。さらに炉心の周囲には、軸方向ブランケット及び径方向ブランケットを配置している。軸方向ブランケットについては、テスト領域、バッファ領域及びドライバー領域の軸方向には天然ウラン金属ブロックのみからなるブランケット（NUB）を設けた。一方、径方向には劣化ウラン金属ブロックのみからなるブランケット（DUB）を設けた。なお、PD、UD、及び径方向ブランケットDUBの各セルは、FCA XVII-1集合体（MOX燃料模擬炉心）に使用したものと同一組成である。

各セルの単位セルの配列をFig. 2-1に示す。実験体系を構成する各燃料引出の装填パターンをFig. 2-2に示す。均質化した各セルの原子個数密度をTable 2-1に示す。

2.2 臨界近接及び臨界体系

第1炉心であるXVIII(45V)集合体についてのみ臨界近接実験を行った。他の2体系については、予備計算により臨界量がXVIII(45V)集合体より多いことが分かっていたため、XVIII(45V)集合体の臨界時での濃縮ウランドライバー（以下、UD）引出本数で未臨界となることを確認した後、UD引出の本数を調整し臨界調整を行った。

臨界近接実験では、Fig. 2-3 に示されている装荷図のUD燃料領域に径方向ブランケットDUBを装荷しておき、各装荷ステップ毎に Fig. 2-3 に示した番号順にDUBをUD引出に置き換えていくという方法で行なった。その際、テスト領域、バッファ領域、プルトニウムドライバー（PD）の各引出本数は変化させず一定とした。

臨界近接時の計数測定（出力測定）は、起動系（Ch1、Ch2）及び線型出力系（Ch5、Ch6）各2系統の計4チャンネルを用い、測定パターンB、C、Dにおいてそれぞれ行なった。ここで、Bパターンは両1/2集合体密着で制御棒2本を完全引抜状態、Cパターンは制御棒1本のみを完全挿入、Dパターンは制御棒2本完全挿入の状態をいう。全ての体系において全安全棒は完全挿入の状態である。中性子源はプルトニウムの自発核分裂中性子のみを利用し、外部中性子源は用いていない。各体系における各計数チャンネルの読取值及び増倍率の逆数をTable 2-2 に示す。起動系Ch1、Ch2の計数率の値は各々3回づつ測定したものの平均であり、かつ、測定系の不感時間を3.5 μ sとして補正した値である。パターンB、C、Dにおける装荷ステップ毎の計数の逆数をプロットした臨界近接曲線をCh1とCh5について、それぞれFig. 2-4 及びFig. 2-5 に示す。

集合体は第3ステップ（固定・移動両集合体の合計：UD引出96本）にて臨界を確認した。さらに固定側集合体のUD引出を1本減らし固定側47本（移動側48本）とし余剰反応度を調整した。XVIII(80V)及びXVIII(95V)集合体では、UD引出の本数は固定側・移動側ともに48本で臨界となった。

また、XVIII集合体の燃料（核分裂性のウラン及びプルトニウム）の装荷量は以下の通りである。ただし、ドライバー領域の燃料本数は、UD引出合計96本とした。

	²³⁵ U (kg)	²³⁹ Pu+ ²⁴¹ Pu (kg)
テスト領域	-	56.8
バッファ領域	-	83.5
ドライバー領域	194.7	69.6
計	194.7	209.9

片側集合体のUD引出48本時のXY断面図を Fig. 2-6 に、RZモデルを Fig. 2-7 に示す。

Table 2-1 Atomic number density of each cell used for XVIII assemblies (unit= $\times 10^{24}/\text{cm}^3$)

Code	Nuclide	TCH45	TCH80	TCH95	BCH80	PD	UD	SCR	NUB	DUB	MTX**
925	U-235	7.0716E-05*	7.0716E-05	7.0716E-05	7.0716E-05	1.3133E-02	3.7305E-02	5.6514E-03	2.8968E-04	8.4422E-05	
928	U-238	9.7531E-03	9.7531E-03	9.7531E-03	9.7531E-03	1.4701E-03	6.0049E-03	4.2724E-04	3.9888E-02	4.0174E-02	
949	Pu-239	1.0455E-03	1.0455E-03	1.0455E-03	1.0455E-03						
940	Pu-240	9.1348E-05	9.1348E-05	9.1348E-05	9.1348E-05						
941	Pu-241	3.0404E-06	3.0039E-06	2.9442E-06	3.0039E-06	3.0282E-06					
942	Pu-242	8.0368E-07	8.0368E-07	8.0368E-07	8.0368E-07	8.0368E-07					
951	Am-241	5.6109E-06	5.6474E-06	5.7071E-06	5.6474E-06	5.6231E-06					
1	H	1.4310E-03	5.7948E-04	2.3748E-04	5.7948E-04	5.8348E-03	1.4821E-04	1.4695E-04			
6	C	1.4143E-03	5.6292E-04	2.2104E-04	5.6292E-04	7.6564E-03	1.2439E-04	1.2335E-04			
8	O	6.0474E-05	6.0474E-05	6.0474E-05	5.2498E-05	5.9707E-05	1.3427E-02	6.3652E-05			
11	Na	7.6564E-03	7.6564E-03	7.6564E-03	7.6564E-03	7.1148E-05	7.6564E-03				
13	Al	1.4997E-04	1.4997E-04	1.4997E-04	1.4997E-04	8.8251E-03	8.8785E-03	1.6951E-02			
14	Si	1.9671E-05	1.9671E-05	1.9671E-05	1.9671E-05	1.9671E-05					
24	Cr	3.3850E-03	3.3850E-03	3.3850E-03	4.2490E-03	3.3850E-03	3.1174E-03	3.3593E-03	1.0021E-03	1.0021E-03	1.2290E-03
25	Mn	2.5007E-04	2.5007E-04	2.5007E-04	3.1602E-04	2.5007E-04	2.2939E-04	2.3263E-04	6.6637E-05	6.6637E-05	8.2000E-05
26	Fe	1.2230E-02	1.2230E-02	1.2230E-02	1.5299E-02	1.2226E-02	1.1217E-02	1.2046E-02	3.5830E-03	3.5830E-03	4.3930E-03
28	Ni	1.5471E-03	1.5471E-03	1.5471E-03	1.9129E-03	1.5471E-03	1.4131E-03	1.4606E-03	4.3697E-04	4.3697E-04	5.3600E-04
40	Zr	4.1812E-03	4.1812E-03	4.1812E-03	2.0906E-03						

* Read as 7.0716×10^{-5} .

** MTX means empty matrix.

Table 2-2 Data of critical approach method for FCA XVIII(45V)assembly

Step No.	UD F/M	Pattern	Ch 1		Ch 2		Ch 5		Ch 6	
			(cps)	n_p/n	(cps)	n_p/n	(A)	n_p/n	(A)	n_p/n
1	36/36	B	912.5	1.00	843.9	1.00	3.695-10*	1.00	3.474-10	1.00
		C	1094	1.00	1001	1.00	4.362-10	1.00	4.155-10	1.00
		D	1338	1.00	1214	1.00	5.306-10	1.00	5.064-10	1.00
2	44/44	B	1993	0.458	1818	0.464	7.979-10	0.463	7.703-10	0.451
		C	2996	0.365	2762	0.362	1.202-9	0.363	1.172-9	0.355
		D	5846	0.229	5366	0.226	2.346-9	0.226	2.301-9	0.220
3	48/48	B	4942	0.185	4568	0.185	1.959-9	0.189	1.919-9	0.181
		C	29502	0.037	27016	0.045	1.172-8	0.037	1.145-8	0.036
		D	Critical							

* Read as 3.695×10^{-10}

3. 特性試験

臨界を確認した後、FCA-XVIII 各集合体の特性試験として以下の特性量の測定を行った。

- 1) 制御棒較正
- 2) 温度補正係数
- 3) 密着面間隙補正係数
- 4) 基準反応度 $1\rho_0$
- 5) 出力較正

制御棒較正を基準反応度法（臨界法）により行う場合、体系に印加した基準反応度に密着面間隙及び温度の変化による反応度補正を行う。他方、密着面間隙補正係数の測定では、密着面間隙距離の変化に伴う反応度変化を制御棒較正曲線を用い測定し、温度効果の補正を施す。また、温度補正係数の測定では、同様に制御棒較正曲線を用い炉心温度変化に伴う反応度変化を測定し、密着面間隙の補正を施す。したがってこれら測定項目は、相互に関与し合ったものであり、単独には決定され得ない。そこで本実験では、制御棒較正、温度補正係数及び密着面間隙補正係数を反復操作により求めた。すなわち、最初に、密着面間隙・温度の変化を考慮せず制御棒較正曲線を求め、この較正曲線を用いて密着面間隙・温度補正係数を求める。次に、この密着面間隙・温度補正係数により補正をほどこした較正曲線を新たに求める。以下、各測定値の測定誤差より一桁小さい値を収束条件とし、収束するまでこの操作を繰り返した。

XVIII(80V)及びXVIII(95V)集合体では、炉心の燃料の量がXVIII(45V)集合体とほぼ同じであることから、密着面間隙補正係数はXVIII(45V)集合体と同じであると仮定し、XVIII(45V)集合体での測定結果を用いた。

以下では、上記 1) ~ 5) の各測定項目について、測定方法と結果について述べる。なお、制御棒較正、温度補正係数及び密着面間隙補正係数の測定については、収束値についてのみ述べる。

3.1 制御棒較正

3.1.1 基準反応度法による制御棒較正曲線の測定

XVIII 集合体の制御・安全棒の反応度較正を以下に示す基準反応度法（臨界法）により実施し、制御棒No.1（CR#1）、No.2（CR#2）の反応度曲線を求めた。

安全棒 No.4（SR#4）の 50.07mm 引抜と完全挿入（0.07 mm）とに対応する反応度印加 $1\rho_0$ （後述）に対して、臨界を保つように CR#1 の引抜及び CR#2 の挿入を行う。これらの置き換えの各ステップ

での炉心温度及び密着面間隙の変化による反応度変化については、各補正係数を用いて補正する。

これらの置き換えの各ステップにおける制御棒の臨界位置をTable 3-1 (a)～(c)に示す。各制御棒の位置とそれに対応する反応度の値4点を用い、制御棒の全挿入状態を原点とした以下の3次曲線を得る。ただし、変数 x の値には、制御棒位置(mm)/100とした値を用いる。

実験体系名称	制御棒	制御棒位置(mm)	制御棒較正曲線(ρ_0)
XVIII(45V)	CR#1	0-70	$y=-0.07749x^3+0.1299x^2+1.971x-0.00099$
		70-120	$y=-0.04862x^3+0.04338x^2+2.049x-0.02240$
		120-210	$y=-0.05297x^3+0.06091x^2+2.026x-0.01246$
	CR#2	0-80	$y=-0.09892x^3+0.1414x^2+1.981x-0.00178$
		80-130	$y=-0.06944x^3+0.09613x^2+1.997x-0.00206$
		130-210	$y=-0.04330x^3+0.01639x^2+2.072x-0.02268$
XVIII(80V)	CR#1	0-130	$y=-0.08421x^3+0.1420x^2+1.979x-0.00119$
		130-150	$y=-0.08760x^3+0.1521x^2+1.970x-0.00129$
		150-205	$y=0.02974x^3-0.3158x^2+2.581x-0.2591$
	CR#2	0-100	$y=-0.06103x^3+0.08502x^2+2.028x-0.00142$
		100-205	$y=-0.05946x^3+0.08038x^2+2.032x-0.00255$
	XVIII(95V)	CR#1	0-70
70-185			$y=-0.04487x^3+0.02680x^2+2.092x-0.02616$
185-230			$y=-0.03451x^3-0.02012x^2+2.159x-0.05729$
CR#2		0-40	$y=-0.06856x^3+0.1021x^2+2.036x-0.00143$
		40-90	$y=-0.06974x^3+0.1046x^2+2.035x-0.00124$
		90-205	$y=-0.04047x^3+0.00093x^2+2.150x-0.04054$

得られた各体系の制御棒較正曲線をFig. 3-1に示す。また、各体系の制御棒較正曲線の3次式の係数(m_3, m_2, m_1 and m_0)をTable 3-2 (a)～(c)に示す。

3. 1. 2 未臨界法による制御・安全棒の反応度値の測定

次に、制御・安全棒の反応度値を未臨界法により測定した。未臨界法では、未臨界度 ρ_{sub} が各出力計の計数 C に反比例し、出力と未臨界度との間に以下の関係式⁴⁾が成り立つと仮定する。すなわち。

$$C = B / \rho_{sub} \quad (1)$$

ここで、 B ：比例定数

未臨界法による測定では、まず、未臨界度を得るための比例定数Bを求める（ケース1）。次に、制御棒及び安全棒の挿入位置を以下に示す2ケース（ケース2及び3）に変化させ出力計の読み取り値を測定し未臨界度を得る。

- ・ケース2：CR#1及びCR#2を全引抜とした場合
- ・ケース3：CR#1, CR#2, 及び全安全棒を全引抜とした場合

これら各ケースで測定した未臨界度に真の臨界点における余剰反応度を加算し、ケース2より制御棒（CR#1, CR#2）の反応度値を、ケース3より全制御安全棒の反応度値を求める。

出力計として、起動系No. 1 (Ch 1), No. 2 (Ch 2), 線形出力計No. 5 (Ch 5), No. 6 (Ch 6) の4検出器をそれぞれ独立に用い、得られたそれぞれの未臨界度の平均を取った。Ch 1, Ch 2 の計数率には、3.5 (msec)の不感時間補正をほどこした。

(1) ケース1：各出力計に対する比例定数の決定

各集合体とも、CR#1及びCR#2により、未臨界度を約 $-4\rho_0$ に設定した。未臨界度 ρ_{sub} は、出力レベル無限大に対応する臨界点（以下、真の臨界点とする）での制御棒位置からの変化量から反応度差を求め、温度及び密着面間隙の変化に対し補正を施した。ケース1での制御棒の挿入位置、各出力計の読取値及び未臨界度をTable 3-3に示す。なお、安全棒（SR#3～#8）は全挿入状態である。未臨界度の誤差は、余剰反応度の差をとる際の誤差（ $\pm 0.0049\rho_0$ ）とした。

Table 3-3 の測定結果及び出力と未臨界度との関係式(1)より、各出力計に対する比例定数Bは以下のように求められた。

検出器	比例定数 B		
	XVIII(45V)	XVIII(80V)	XVIII(95V)
Ch 1	42592	42236	42843
Ch 2	38864	39312	39046
Ch 5	1.63804×10^{-8}	1.6941×10^{-8}	1.6975×10^{-8}
Ch 6	1.60538×10^{-8}	1.6672×10^{-8}	1.6698×10^{-8}

(2) ケース2：CR#1及びCR#2を全引抜とした場合

ケース2での制御・安全棒の挿入位置、各出力計の読取値及び未臨界度をTable 3-4に示す。

ケース2での測定で得られた未臨界度に真の臨界点における余剰反応度を加算し、制御棒（CR#1, CR#2）の反応度値を得た。

XVIII(45V):	$10.01 \rho_0 + 3.8958 \rho_0 = 13.91 \pm 0.03 (\pm 0.2 \%) \rho_0$
XVIII(80V):	$10.22 \rho_0 + 4.0498 \rho_0 = 14.27 \pm 0.05 (\pm 0.4 \%) \rho_0$
XVIII(95V):	$8.86 \rho_0 + 5.2706 \rho_0 = 14.13 \pm 0.02 (\pm 0.1 \%) \rho_0$

(3) ケース3：制御棒No. 1 (CR#1), No. 2 (CR#2), 及び全安全棒を全引抜とした場合

ケース3での制御・安全棒の挿入位置、各出力計の読取値及び未臨界度をTable 3-5に示す。

ケース3での測定で得られた未臨界度に真の臨界点における余剰反応度を加算し、全制御安全棒の反応度値は、以下のように求められた。なお、XVIII(80V)では、ケース3についての測定は行わなかった。

XVIII(45V):	$54.03 \rho_0 + 3.8958 \rho_0 = 57.93 \pm 0.28 (\pm 0.5 \%) \rho_0$
XVIII(95V):	$53.68 \rho_0 + 5.2706 \rho_0 = 58.95 \pm 0.33 (\pm 0.6 \%) \rho_0$

Table 3-1(a) Reactivity calibration of safety/control rods by substitution method at FCA XVIII(45V)assembly

Step No.	Rod position (mm)			Core temperature (°C)	Gap (10 ⁻² mm)
	SR # 4	CR # 1	CR # 2		
1	0.08	0.05	212.23	20.16	-6.367
2	50.08	0.05	153.24	20.14	-6.311
3	0.07	49.65	153.24	20.14	-6.301
4	50.07	49.65	100.69	20.12	-6.283
5	0.07	98.96	100.69	20.11	-6.339
6	50.08	98.96	51.13	20.12	-6.346
7	0.07	150.93	51.13	20.10	-6.356
8	50.07	150.93	1.84	20.09	-6.261
9	50.07	152.78	0.09	20.08	-6.255
10	0.07	209.02	1.83	20.05	-6.286

Table 3-1(b) Reactivity calibration of safety/control rods by substitution method at FCA XVIII(80V)assembly

Step No.	Rod position (mm)			Core temperature (°C)	Gap (10 ⁻² mm)
	SR # 4	CR # 1	CR # 2		
1	0.08	0.06	206.31	23.12	-5.480
2	50.08	0.06	149.14	23.12	-5.480
3	0.07	49.39	149.14	23.11	-5.479
4	50.07	49.39	98.00	23.10	-5.487
5	0.07	98.31	98.00	23.09	-5.500
6	50.07	98.31	49.20	23.09	-5.463
7	0.07	150.00	49.20	23.08	-5.490
8	50.07	150.48	0.07	23.09	-5.482
9	0.07	208.13	0.07	23.06	-5.485

Table 3-1(c) Reactivity calibration of safety/control rods by substitution method at FCA XVIII(95V)assembly

Step No.	Rod position (mm)			Core temperature (°C)	Gap (10 ⁻² mm)
	SR # 4	CR # 1	CR # 2		
1	0.07	0.05	304.07	20.22	-6.331
2	50.06	0.05	229.39	20.19	-6.301
3	0.07	49.09	229.39	20.17	-6.375
4	50.07	49.09	169.40	20.16	-6.324
5	0.07	97.79	169.40	20.15	-6.387
6	50.07	97.79	116.79	20.12	-6.228
7	0.07	149.13	116.79	20.11	-6.272
8	50.07	149.13	67.87	20.10	-6.275
9	0.07	206.04	67.87	20.08	-6.257
10	50.07	206.04	19.87	20.07	-6.271
11	0.07	274.53	19.87	20.06	-6.282
12	50.07	231.97	0.07	20.05	-6.326

Table 3-2 (a) Calibration curve of control rods at FCA XVIII(45V) assembly

	CR # 1 position (mm)			CR # 2 position (mm)		
	0-70	70-120	120-210	0-80	80-130	130-210
m3	-0.07749	-0.04862	-0.05297	-0.09892	-0.06944	-0.04330
m2	0.1299	0.04338	0.06091	0.1414	0.09613	0.01639
m1	1.971	2.049	2.026	1.981	1.997	2.072
m0	-0.00099	-0.02240	-0.01246	-0.00178	-0.00206	-0.02268

Table 3-2 (b) Calibration curve of control rods at FCA XVIII(80V) assembly

	CR # 1 position (mm)			CR # 2 position (mm)	
	0-130	130-150	150-205	0-100	100-205
m3	-0.08421	-0.08760	0.02974	-0.06103	-0.05946
m2	0.1420	0.1521	-0.3158	0.08502	0.08038
m1	1.979	1.970	2.581	2.028	2.032
m0	-0.00119	0.00129	-0.2591	-0.00142	-0.00255

Table 3-2 (c) Calibration curve of control rods at FCA XVIII(95V) assembly

	CR # 1 position (mm)			CR # 2 position (mm)		
	0-70	70-185	185-230	0-40	40-90	90-205
m3	-0.08001	-0.04487	-0.03451	-0.06856	-0.06974	-0.04047
m2	0.1308	0.02680	-0.02012	0.1021	0.1046	0.00093
m1	1.998	2.092	2.159	2.036	2.035	2.150
m0	-0.00100	-0.02616	-0.05729	-0.00143	-0.00124	-0.04054

Table 3-3 Data of safety/control rod reactivity worth measurement by sub-critical method for Case 1

Assembly	Power				Rod Position		ρ_{sub} ($-\rho_0$)
	Ch 1* (cps)	Ch 2* (cps)	Ch 5 (A)	Ch 6 (A)	CR# 1 (mm)	CR# 2 (mm)	
XVIII(45V)	11383.0	10386.6	4.3778×10^9	4.3778×10^9	200.00	200.00	3.7417 ± 0.0049
XVIII(80V)	10954.1	9767.4	4.3937×10^9	4.3240×10^8	200.00	200.00	3.8557 ± 0.0049
XVIII(95V)	10564.1	9627.6	4.1856×10^9	4.1172×10^8	250.00	250.00	4.1171 ± 0.0049

* dead time correction (3.5 μ sec) is performed.

Table 3-4 Data of safety/control rod reactivity worth measurement by sub-critical method for Case 2

Assembly	Power				Rod Position			ρ_{sub} (- ρ_0)
	Ch 1* (cps)	Ch 2* (cps)	Ch 5 (A)	Ch 6 (A)	CR# 1 (mm)	CR# 2 (mm)	SR#3~#8 (mm)	
XVIII(45V)	4259.7	3886.0	1.6403×10^{-9}	1.5968×10^{-9}	full out	full out	full in	10.01 ± 0.03
XVIII(80V)	4147.8	3843.2	1.6616×10^{-9}	1.6199×10^{-9}	full out	full out	full in	10.22 ± 0.05
XVIII(95V)	4827.8	4407.7	1.9236×10^{-9}	1.8804×10^{-9}	full out	full out	full in	8.86 ± 0.02

* dead time correction (3.5 μ sec) is performed.

Table 3-5 Data of safety/control rod reactivity worth measurement by sub-critical method for Case 3

Assembly	Power				Rod Position			ρ_{sub} (- ρ_0)
	Ch 1* (cps)	Ch 2* (cps)	Ch 5 (A)	Ch 6 (A)	CR# 1 (mm)	CR# 2 (mm)	SR#3~#8 (mm)	
XVIII(45V)	786.5	715.1	3.0456×10^{-10}	2.9828×10^{-10}	full out	full out	full out	54.03 ± 0.27
XVIII(80V)	791.4	727.1	3.1766×10^{-10}	3.1237×10^{-10}	full out	full out	full out	53.68 ± 0.33

* dead time correction (3.5 μ sec) is performed.

3.2 温度補正係数の測定

ある基準状態から2日間（XVIII(95V)集合体では3日間）かけて炉心温度を約5℃上昇させたときの反応度変化から温度補正係数 $f_T(\rho_0/^\circ\text{C})$ を求めた。反応度変化は、各温度点での余剰反応度を求め、それら余剰反応度の変化分として算出した。余剰反応度は、CR#1及びCR#2の位置から制御棒較正曲線を用いて求めた。密着面間隙の変化に対しては、密着面間隙補正係数によって反応度変化に及ぼす影響を補正した。なお、各1/2集合体の炉心中央部の異なる3点にて温度を測定し、計6点の温度の平均値を炉心温度として採用した。温度上昇前後における制御棒の臨界位置をTable 3-6 (a)~(c)に示す。

以上の測定の結果、各体系の温度補正係数は以下のように求められた。

Assembly	$f_T(\rho_0/^\circ\text{C})$
XVIII(45V)	$-0.0650 \pm 0.0030 (\pm 4.5 \%)$
XVIII(80V)	$-0.0576 \pm 0.0031 (\pm 5.4 \%)$
XVIII(95V)	$-0.0519 \pm 0.0027 (\pm 5.2 \%)$

上記の測定誤差は、温度の測定誤差を測定毎に $\pm 0.05^\circ\text{C}$ とし、温度変化に $\pm 0.07^\circ\text{C}$ を、温度変化に伴う反応度変化に $\pm 0.016 \rho_0$ をそれぞれ仮定して算出した。

Table 3-6 (a) Criticality data for temperature effect measurement at FCA XVIII(45V)assembly

Date of measurement	Core temperature (°C)	Position of CR#1 (mm)	Position of CR#2 (mm)	Gap (10 ⁻² mm)	Reactivity excess* (ρ ₀)
10/12	20.04	99.84	100.00	-6.283	3.9784
10/14	25.67	80.45	100.00	-3.923	3.6123

* Gap is corrected to 0.0 mm. Error of each measurements is ± 0.011 ρ₀.

Table 3-6 (b) Criticality data for temperature effect measurement at FCA XVIII(80V)assembly

Date of measurement	Core temperature (°C)	Position of CR#1 (mm)	Position of CR#2 (mm)	Gap (10 ⁻² mm)	Reactivity excess* (ρ ₀)
1/11	23.06	96.39	100.00	-5.486	3.9585
1/13	28.36	81.71	100.00	-6.223	3.6530

* Gap is corrected to 0.0 mm. Error of each measurements is ± 0.011 ρ₀.

Table 3-6 (c) Criticality data for temperature effect measurement at FCA XVIII(95V)assembly

Date of measurement	Core temperature (°C)	Position of CR#1 (mm)	Position of CR#2 (mm)	Gap (10 ⁻² mm)	Reactivity excess* (ρ ₀)
5/12	20.11	149.13	116.79	-6.272	5.3486
5/15	26.19	118.01	130.00	-3.990	5.0328

* Gap is corrected to 0.0 mm. Error of each measurements is ± 0.011 ρ₀.

3.3 密着面間隙補正係数の測定

1/2 集合体の密着状態は系の反応度に影響を与えるので、臨界時の反応度測定に際し密着度の補正が必要となる。そこで、1/2集合体間の間隔を近づけたときの系の余剰反応度の変化を測定し、密着面間隙補正係数 f_G を求めた。制御盤上の表示値を目安にし、間隙距離を2.0mm, 1.5mm, 1.0mm, 0.5mm, 0.0mm と変化させた。間隙距離の測定値には、密着面の四隅に設置してある間隙メータの指示値を平均したものを採用した。各測定点の余剰反応度は、制御棒 CR#1 及び CR#2の較正曲線を用いて算出し、さらに温度補正を施した。得られた各間隔に対する余剰反応度の測定点を直線フィッティングし、傾きを補正係数 f_G とした。ただし、密着面間隙の補正は通常1mm以下の間隙変化に対して行うものであるため、5点の測定点のうち 0.0mm, 0.5mm, 1.0mm の3点のみをフィッティングに採用した。測定結果を Table 3-7 及び Fig. 3-2 に示す。なお、密着面間隙補正係数の測定は、前述の通り XVIII(45V)集合体についてのみ行った。

$$\text{XVIII(45V): } f_G = -0.989 \pm 0.024 (\pm 2.4\%) \rho_0 / \text{mm}$$

測定誤差は、間隙メータの指示値の誤差として測定毎に $\pm 0.01 \text{ mm}$ を、余剰反応度の測定誤差として測定毎に $\pm 0.011 \rho_0$ を仮定した。間隙を 0.0mm から 1.0mm に変化させた時の密着面間隙の変化量 0.88278 mm に対して $\pm 0.014 \text{ mm}$ (1.6%)、反応度変化 0.8723 ρ_0 に対しては $\pm 0.016 \rho_0$ (1.8%) となり、密着面間隙補正係数の誤差を $\pm 0.024 \rho_0$ (2.4%) と算出した。

Table 3-7 Criticality data for gap effect measurement at FCA XVIII(45V)assembly

Item*	Gap (mm)	Control rod position		Core temperature (°C)	Reactivity excess** (ρ_0)
		CR # 1 (mm)	CR # 2 (mm)		
2.01	1.76169	38.65	50.01	25.71	2.1591
1.48	1.26450	65.46	50.01	25.72	2.7071
1.03	0.84660	86.87	50.01	25.71	3.1424
0.52	0.36021	111.51	50.00	25.70	3.6322
0.02	-0.03618	131.37	50.00	25.66	4.0147

* Gap indicated by position indicator on the control panel (unit=mm).

** Temperature is corrected to 20.00 °C. Error of each measurements is $\pm 0.011 \rho_0$.

3.4 基準反応度 $1\rho_0$ の測定

固定側の安全棒 No.4 (SR#4) の 50.07 mm から完全挿入 (0.07 mm) まで移動した際の反応度変化である基準反応度 $1\rho_0$ を以下の方法により測定した。

出力レベル無限大に対応する真の臨界点における制御棒 CR#1 位置を 2 つの出力レベルでの臨界時の CR#1 の値より外挿により求めておく。各体系の真の臨界点を求める際に使用した臨界データを Table 3-8 に示す。次に炉出力を十分下げた後、CR#1 を真の臨界点まで挿入し、かつ、SR#4 を 50.07 mm から完全挿入して系に $1\rho_0$ の反応度を印加する。このときの出力倍増時間 T_D を測定し、逆時間方程式を用いて $1\rho_0$ を求める。

外挿により真の臨界点を求める際の炉出力の測定には、線形出力計 Ch 5, Ch 6 を用いた。出力倍増時間 T_D の測定は、線形出力計の指示値 $0.1 \times 10^7 \text{ A} \sim 0.8 \times 10^5 \text{ A}$ の範囲においてストップウォッチを用いて行った。出力倍増時間は、線形出力計 No.6 (Ch 6) の出力レベルで 10^7 A から 10^5 A まで順次測定したが、出力レベル 10^7 A 及び 10^6 A のデータは、Pu 燃料の自発核分裂による系の反応度への影響が残っているため不採用とし、 10^5 A 出力レベルにて測定されたデータを平均して求めた。

出力倍増時間の測定結果を Table 3-9 に示す。

以上の測定で求められた各集合体の出力倍増時間 T_D を逆時間方程式に代入して基準反応度 $1\rho_0$ を得た。

Assembly	$1\rho_0 (\times 10^{-4} \Delta k/k)$
XVIII(45V)	5.82 ± 0.08
XVIII(80V)	5.95 ± 0.08
XVIII(95V)	6.05 ± 0.08

測定誤差は、ストップウォッチによる T_D の測定に $\pm 0.5 \text{ sec}$ を、投入反応度 $1\rho_0$ に対して 1.0% を仮定して算出した。すなわち、 $T_D = 47.9 \pm 0.5 \text{ sec}$ の場合、 $1\rho_0 = 5.822 \pm 0.045 (\pm 0.77\%) (\times 10^{-4} \Delta k/k)$ となり、これに投入反応度 $1\rho_0$ に対する誤差 1.0% を加え、 $1\rho_0 = 5.82 \pm 0.08 (\pm 1.3\%) (\times 10^{-4} \Delta k/k)$ となる。

逆時間方程式に用いられる遅発中性子割合は、Tomlinson⁵⁾により評価されたデータ (放出中性子数と半減期) 及び Saphier⁶⁾ の評価した遅発中性子スペクトルデータ (高速中性子による核分裂) を用い、拡散理論に基づく摂動計算コード PERKY により計算した。中性子束と随伴中性子束は、2次元 RZ 体系でエネルギー70群拡散計算により求めた。計算の結果得られた即発中性子生成時間 Λ と実効遅発中性子割合 β_{eff} は以下の通りである。

	XVIII(45V)	XVIII(80V)	XVIII(95V)
即発中性子生成時間 Λ (sec)	2.6×10^{-7}	2.7×10^{-7}	2.3×10^{-7}
実効遅発中性子割合 β_{eff}	5.16×10^{-3}	5.20×10^{-3}	5.21×10^{-3}

実効増倍率の算出

全制御・安全棒が完全挿入状態での体系の余剰反応度 ρ_{ex} を臨界時の制御棒位置から制御棒校正曲線を用いて求め、実効増倍率 (k_{eff}) を求める。ただし、この時の制御棒の位置は、出力無限大に相当する真の臨界点での制御棒位置である。

1/2 集合体が密着した状態では、固定側、移動側の引出前端間には 0.23 mm の間隙があり、また、引出端面の不銹鋼の厚さは 0.771 mm である。したがって、両1/2集合体が密着状態にあるとき、両側の燃料板の間には、 $Gap=1.772$ mm の間隙があることになる。これに対し、決定論的手法を用いた高速炉標準解析手法では、両1/2集合体の燃料板の間に間隙のない体系について計算を行う。そこで、実効増倍率について実験値と計算値と比較するためには、実験値に密着面での燃料板間隙をゼロにした反応度補正を加える必要がある。すなわち、密着面間隙補正係数 f_g を用いて Gap を0.0mmにした際に印加される反応度効果 ρ_{contact} を求め、これを出力無限大での余剰反応度 ρ_{ex} に加える。

$$\begin{aligned}\rho_{\text{contact}} &= Gap \times f_g \\ &= 1.772 \text{ (mm)} \times 0.989 (\rho_o/\text{mm}) \\ &= 1.753 (\rho_o)\end{aligned}$$

また、各実験体系ともに、3次元計算における対称性を考慮してUD引出の本数は、固定側及び移動側ともに48本ずつとした。全制御・安全棒が完全挿入状態での各体系の k_{eff} の値をTable 3-10に示す。余剰反応度の測定誤差の算出方法については付録に示す。

Table 3-8 Criticality data of FCA XVIII assembly

Assembly No.	Power Level Ch. 5 & 6 (A)	Rod position			Core temperature (°C)	Gap (10 ⁻² mm)
		SR # 4 (mm)	CR # 1 (mm)	CR # 2 (mm)		
XVIII(45V)	0.2×10 ⁻⁶	0.07	99.84	100.00	20.04	-0.06283
	0.2×10 ⁻⁵	0.07	95.97	100.00	20.04	-0.06242
	∞*	0.07	95.54	100.00	20.04	-0.06242
XVIII(80V)	0.2×10 ⁻⁶	50.06	96.39	51.27	23.06	-0.05474
	0.2×10 ⁻⁵	50.06	92.49	51.27	23.07	-0.05491
	∞	50.06	92.06	51.27	23.07	-0.05491
XVIII(95V)	0.2×10 ⁻⁶	50.06	85.20	130.00	20.04	-0.06269
	0.2×10 ⁻⁵	50.06	81.45	130.00	20.05	-0.06171
	∞	50.06	81.03	130.00	20.05	-0.06171

* ∞ means that the power was extrapolated to infinite power using two power levels; 0.2×10⁻⁶(A) and 0.2×10⁻⁵(A). The values of core temperature and gap are assumed to be same with 0.2×10⁻⁵(A) level.

Table 3-9 Measured data of T_D for each assembly

Power level of Ch 6	T _D (sec)		
	XVIII(45V)	XVIII(80V)	XVIII(95V)
0.3×10 ⁻⁵ ~ 0.6×10 ⁻⁵ A	47.6	46.8	46.0
	—	47.0	—
0.4×10 ⁻⁵ ~ 0.8×10 ⁻⁵ A	48.0	47.2	46.2
	48.2	47.2	46.2
Average	47.9	47.1	46.2

Table 3-10 Experimental results of k_{eff}

Assembly No.	Excess reactivity*		k _{eff}
	(ρ ₀)	(10 ⁻³ Δk/k)	
XVIII(45V)	7.2512±0.0035	4.220±0.058	1.00424±0.00006
XVIII(80V)	5.8566±0.0035	3.485±0.047	1.00350±0.00005
XVIII(95V)	7.0841±0.0035	4.286±0.057	1.00430±0.00006

* ρ_{contact} is corrected and temperature is corrected to 20.00 °C.

3.5 出力較正

線形出力計 No.6 (Ch 6) の出力レベルが 5.0×10^{-6} A の際の炉出力 P (Watt) を以下の式より求める。

$$P = \frac{F}{\gamma} \quad (\text{Watt})$$

$$F = \frac{S}{\nu} = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{S_0}{\rho_{\text{sub}}} \quad (2)$$

- ここで、
- F : 系全体の核分裂の数 ($\text{fiss} \cdot \text{sec}^{-1}$)
 - γ : 出力換算係数 (1 Watt のエネルギーを発生させる核分裂の数) ($\text{fiss} \cdot \text{Watt}^{-1}$)
 - S : 系全体の核分裂により発生する中性子の数 ($\text{n} \cdot \text{sec}^{-1}$)
 - ν : 1 核分裂当たり発生する中性子の数 ($\text{n} \cdot \text{fiss}^{-1}$)
 - S_0 : Pu の自発核分裂により発生する中性子の数 ($\text{n} \cdot \text{sec}^{-1}$)

上式で、出力換算係数 γ を 3.1×10^{10} ($\text{fiss} \cdot \text{Watt}^{-1}$) とし、 ν は体系計算により 2.67 ($\text{n} \cdot \text{fiss}^{-1}$) と算出された。系の未臨界度は、 $\rho_{\text{sub}} = 0.0854 \pm 0.0035$ $\rho_0 = (4.97 \pm 0.21) \times 10^{-5}$ $\Delta k/k$ である。FCA XVIII 集合体の ^{240}Pu の装荷量 18.36 kg であり、 ^{240}Pu の 1 g 当たりの中性子発生数は $(9.0 \pm 0.9) \times 10^2$ ($\text{n} \cdot \text{sec}^{-1}$) であるから、 $S_0 = (1.65 \pm 0.17) \times 10^7$ $\text{n} \cdot \text{sec}^{-1}$ となる。これらを(2)式に代入して、

$$F = \frac{(1.65 \pm 0.17) \times 10^7}{2.67 \times (4.97 \pm 0.21) \times 10^{-5}} = (1.24 \pm 0.14) \times 10^{11} \quad \text{fiss} \cdot \text{sec}^{-1}$$

$$P = \frac{(1.24 \pm 0.14) \times 10^{11}}{3.1 \times 10^{10}} = (4.01 \pm 0.44) \quad \text{Watt}$$

以上の検討より、FCA XVIII 集合体の炉出力を、線形出力計 No.6 の出力読み取り値が 5.0×10^{-6} A の時、 4.01 ± 0.44 Watt とした。

4. 臨界性に関する解析

本章では、FCA実験解析で標準的に用いられている高速炉標準解析手法を用いて実効増倍率について解析を行う。以下では、まず解析手法について述べ、次に解析結果について議論する。

4.1 解析手法

高速炉標準解析手法は、均質化実効断面積を求める格子計算と体系の実効増倍率や中性子束分布等を求める体系計算からなる。3次元XYZ25群の体系計算により実効増倍率 k_{eff} を求め、輸送補正及びエネルギー群縮約補正を加える。

衝突確率計算コードSLAROM⁷⁾を用い、1次元無限平板モデルにより燃料・模擬物質板の非均質性を考慮して各セルの均質化巨視的実効断面積を求めた。群定数セットに最新の核データセットであるJENDL-3.2に基づく高速炉計算用70群定数セットJFS-3-J3.2を用いた。ただし、ブランケット部のウランブロック、ブランケット外周の空のFCA格子管については均質モデルとした。拡散係数にはBenoistのモデルによる異方性拡散係数⁸⁾を用いた。

格子計算により得た70群実効断面積を用い、拡散計算コードCITATION-FBR⁹⁾を用いて2次元RZ70群拡散計算を行った。計算の結果得られた領域平均の70群中性子スペクトルを用いて断面積のエネルギー群数を70群から25群へ縮約した。CITATION-FBRコードを用い3次元XYZ25群拡散計算を行い、体系の実効増倍率 k_{eff} を求めた。なお、核分裂スペクトルについては、各領域毎に燃料組成を重み付けとして平均化した値を使用した。

輸送補正を求めるために、輸送計算コードTWOTRAN-II¹⁰⁾を用い25群2次元RZ輸送計算を行った。全断面積 Σ_t の代わりに輸送断面積 Σ_{tr} を使った。輸送計算の近似の次数は S_0P_0 である。テスト領域燃料組成の核分裂スペクトルを全燃料領域に使用した。CITATION-FBRコードにおいても25群2次元RZ拡散計算を行った。ただし、輸送計算と計算条件を同条件とするため、異方性拡散係数を用いずに $D=1/(3\Sigma_{tr})$ を全方向に使用した。輸送補正は、これら25群2次元RZ体系でのTWOTRAN-IIコードとCITATION-FBRコードの k_{eff} の比とした。

70群から25群へのエネルギー群縮約補正は、CITATION-FBRコードによる70群2次元RZ拡散計算と25群2次元RZ拡散計算の k_{eff} の比とした。エネルギー群数以外の計算条件は同じである。

メッシュ間隔は、いずれの体系計算においても一メッシュ当たり約2.5cmとした。メッシュ補正量は他の補正量に対し十分小さいと仮定し無視した。

4.2 臨界性の解析結果及び考察

各体系の k_{eff} の解析結果を実験値と共にTable 4-1に示す。比較のため原型炉級MOX燃料高速炉を模

擬した体系であるFCA XVII-1集合体の解析結果¹¹⁾も載せた。XVIII集合体では、いずれの体系についても1.2%程度の過小評価していることが分かる。XVII-1集合体に較べて約1%小さいC/E値となった。今後、種々のサンプルワースや反応率比等を通してさらに詳細に解析精度評価を行っていく必要がある。

Table 4-1 Comparison of k_{eff} of each core.

H/HM ratio	XVIII(45V)	XVIII(80V)	XVIII(95V)	XVII-1
	0.130	0.052	0.022	-
XYZ 25group calculation	0.98770	0.98679	0.98740	0.99993
Transport effect ^{a)}	1.0050	1.0051	1.0051	1.0053
Energy collapsing effect ^{b)}	1.0001	1.0001	1.0001	1.0001
Calculated k_{eff} ^{c)}	0.9927	0.9919	0.9926	1.0053
Measured k_{eff}	1.00424 ±0.00006	1.00350 ±0.00005	1.00430 ±0.00006	1.00737 ±0.00010
C/E	0.9885	0.9884	0.9883	0.9979

a) Ratio between k_{eff} 's calculated by TWOTRAN-II and CITATION-FBR with RZ 25group with isotropic diffusion coefficients.

b) Ratio between k_{eff} 's calculated by CITATION-FBR RZ 70group and RZ 25group with anisotropic diffusion coefficients.

c) XYZ 25group calculation corrected with the transport and energy group collapsing effect.

5. まとめ

水素装荷金属燃料炉心に対する解析精度を評価することを目的として、FCAを用い一連のZrH装荷金属燃料高速炉の模擬実験を行った。本報告書では、実験体系XVIII集合体の選定と臨界特性試験の測定結果について述べるとともに臨界性に関して解析を行った。臨界性解析では、本実験体系の実効増倍率の解析精度はMOX燃料高速炉体系に較べて過小評価する傾向にあることが分かった。

謝 辞

本実験体系の選定に当たり東北大学工学部の平川直弘教授、岩崎智彦助手、そして炉物理研究室前室長である向山武彦氏を始めとする研究室員から有益な助言を頂いた。特性試験においては、FCA管理機関員にFCAの運転を担当して頂いた。これらの方々に感謝します。

参考文献

- 1) Takano H., et al. : "A CONCEPT OF ADVANCED FAST BREEDER REACTOR WITH INSTANTANEOUS NEGATIVE TEMPERATURE COEFFICIENT," in Proc. of International Conference on Fast Reactor and Related Fuel Cycles, October 28-November 1, 1991, Kyoto, Japan, p. 16.1(1991)., JAERI-M 83-211(1983).
- 2) Tsujimoto K., et al. : "IMPROVEMENT OF REACTIVITY COEFFICIENT OF METALLIC FUEL LMFBR," in Proc. of International Conference on Reactor Physics and Reactor Computations, Jan. 23 - 26, 1994, Tel-Aviv, Israel, p. 397(1994).
- 3) Nakagawa T., et al: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version-3 Revision-2: JENDL-3.2," *J. Nucl. Sci. and Technol.*, **32**, 1259(1995).
- 4) 大杉俊隆 他: 「FCA XI-1 集合体の選定と特性試験」, JAERI-M 83-211(1983).
- 5) Tomlinson L. : "Delayed Neutron from Fission," AERE-R 6993(1972).
- 6) Saphier D., et al: "Evaluated Delayed Neutron Spectra and Their Importance in Reactor Calculations," *Nucl. Sci. Eng.*, **62**, 660(1987).
- 7) Nakagawa M. and Tsuchihashi K.: "SLAROM: A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor," JAERI 1294(1984).
- 8) Benoist P. : CEA-R-2278(1964).
- 9) 飯島 進: "EXPARAM," (公刊予定).
- 10) Lathlop K. D. and Brinkly F. W. : "TWOTRAN-II: An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-dimensional Transport", LA-4848-MS(1973).
- 11) Iijima S., et al. : "Mock-up Experiments of MOX-fueled LMFBR in FCA assembly XVII-1", JAERI-Review 94-009(Reactor Engineering Department Annual Report), p.80.3-1(1994).

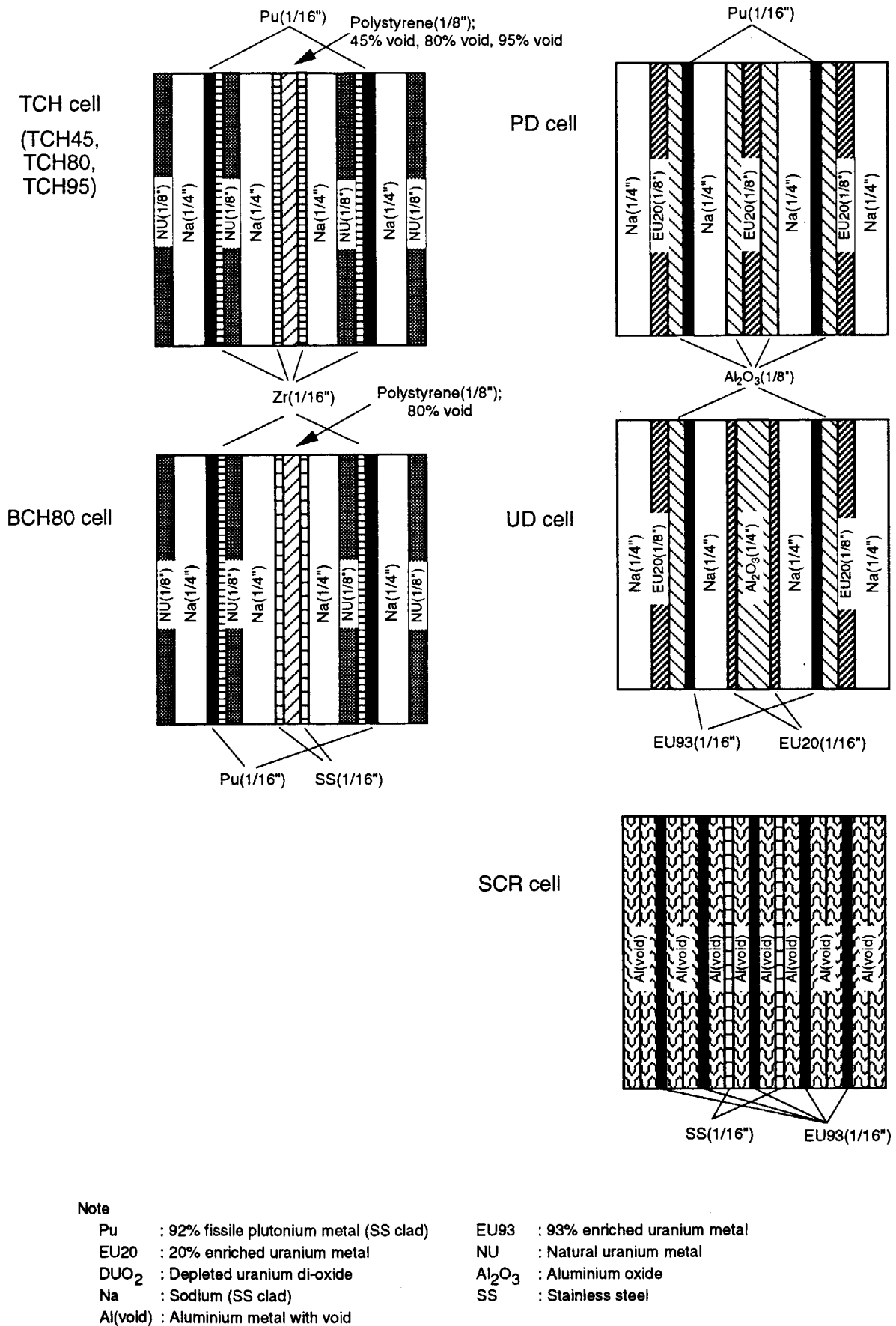
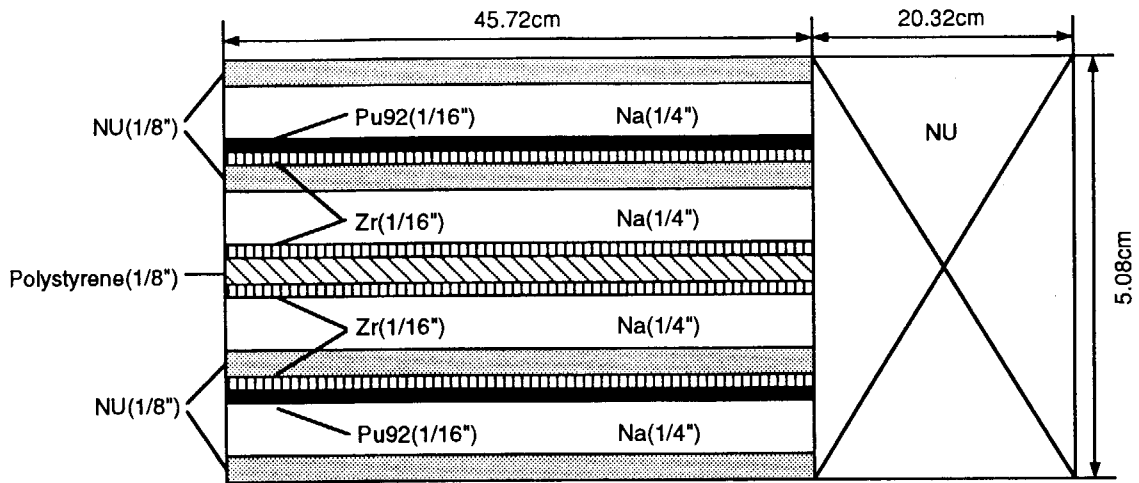
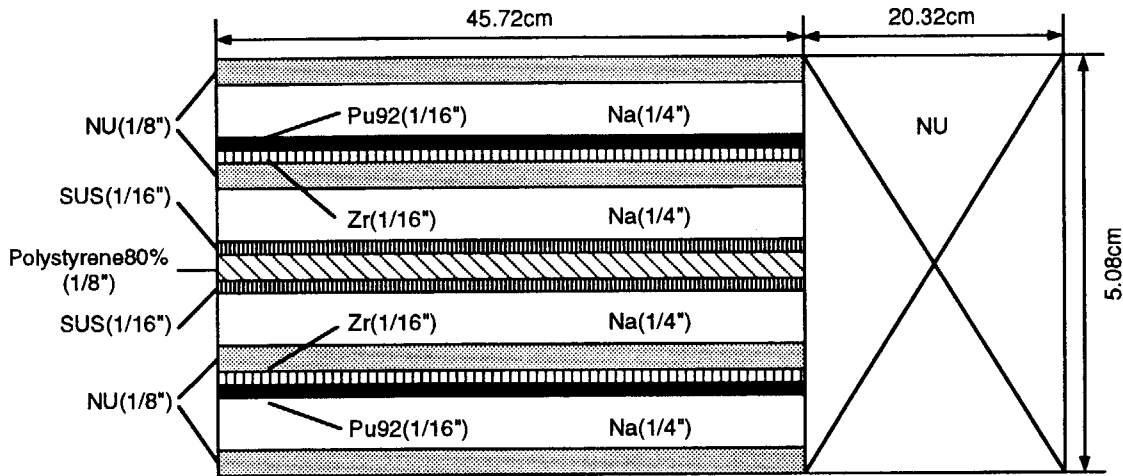


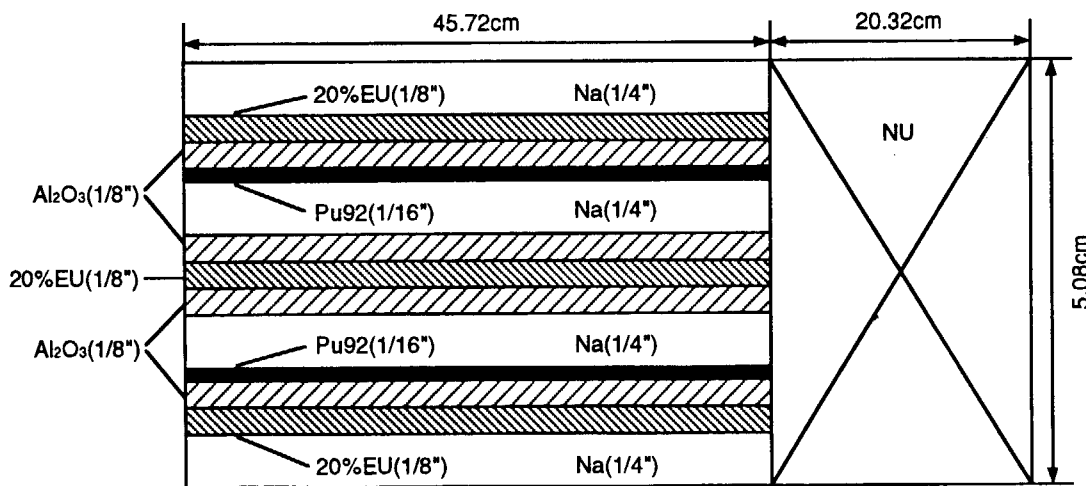
Fig. 2-1 Cell patterns of FCA XVIII assembly



(a) TCH drawer

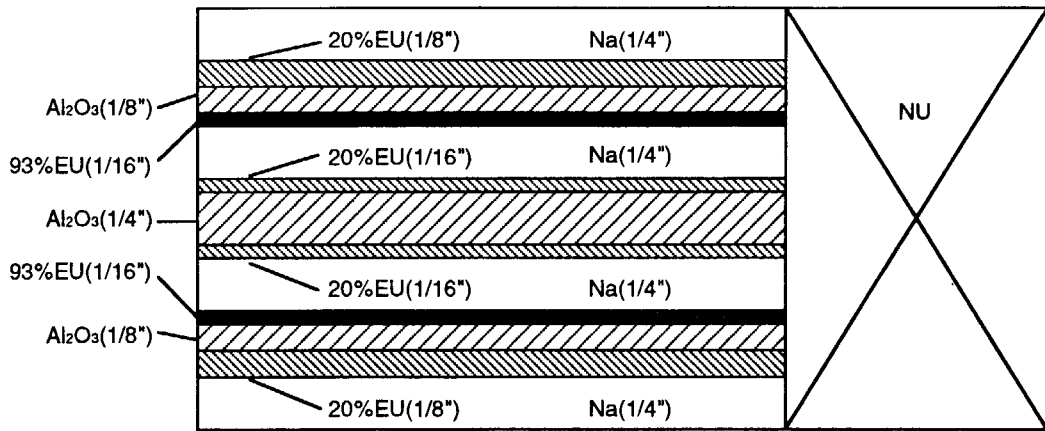


(b) BCH drawer

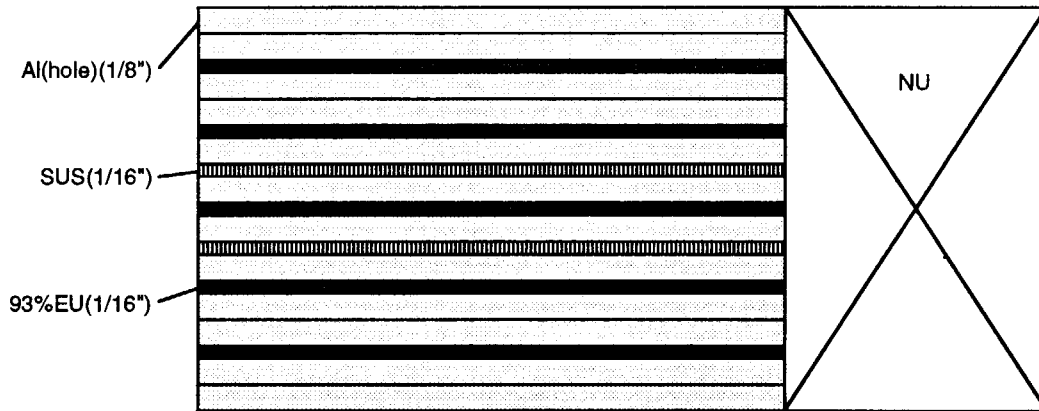


(c) PD drawer

Fig. 2-2 Plate configurations of the fuel drawers used for FCA XVIII assembly



(d) UD drawer



(e) SCR drawer

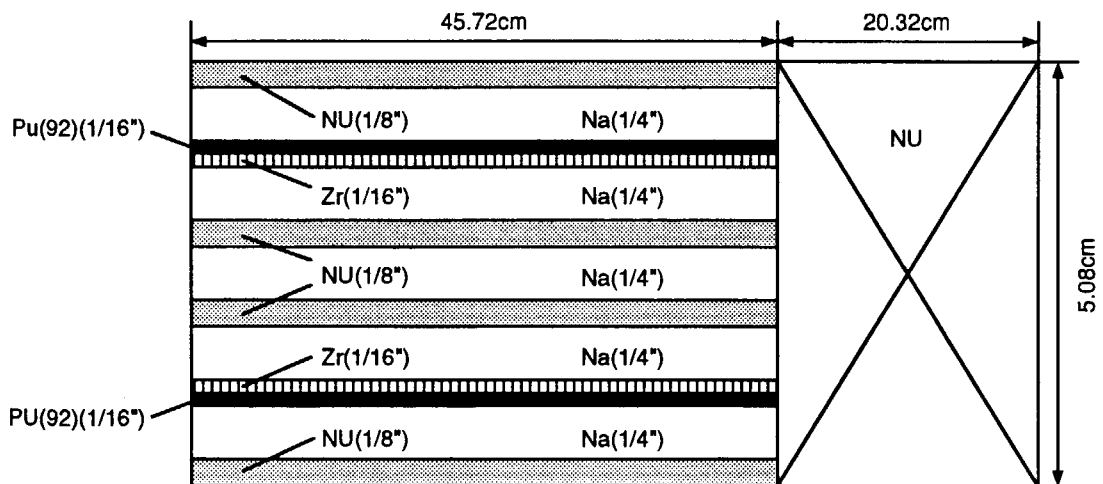
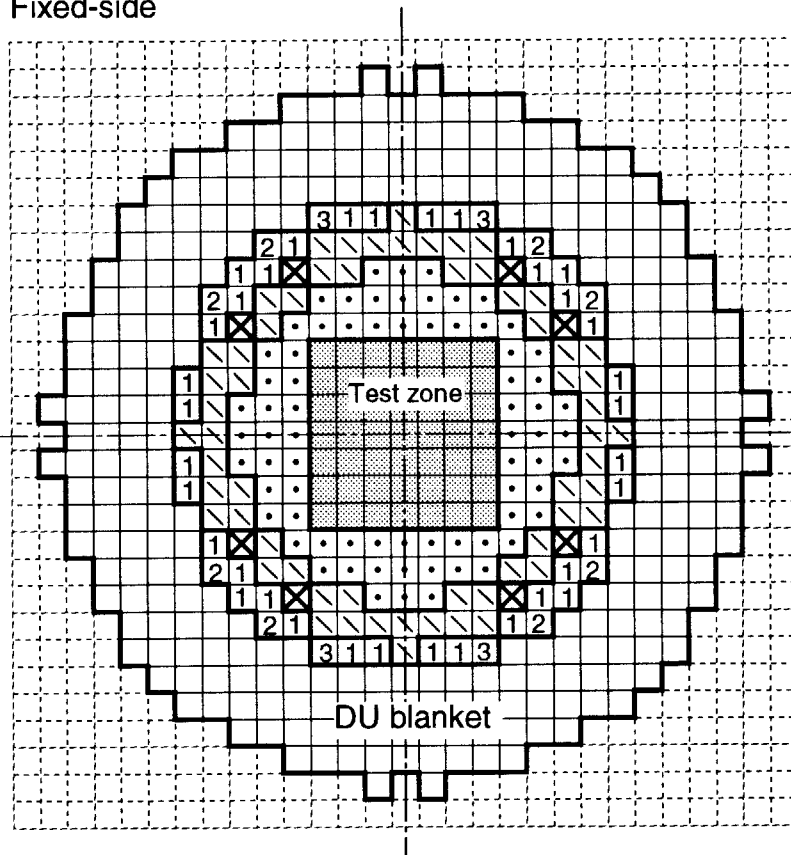


Fig. 2-2 Plate configurations of the fuel drawers used for FCA XVIII assembly (Continued)

Fixed-side



- TCH drawer (49 / 49)
- BCH drawer (72 / 72)
- ▧ PD drawer (60 / 60)
- ▣ UD drawer (Loaded at step n of critical approach)
- ⊗ Safty/Control rod (8 / 8)
- DUB drawer (288 / 288)
- Empty matrix

Fig. 2-3 Loading pattern of FCA XVIII assembly for the critical approach

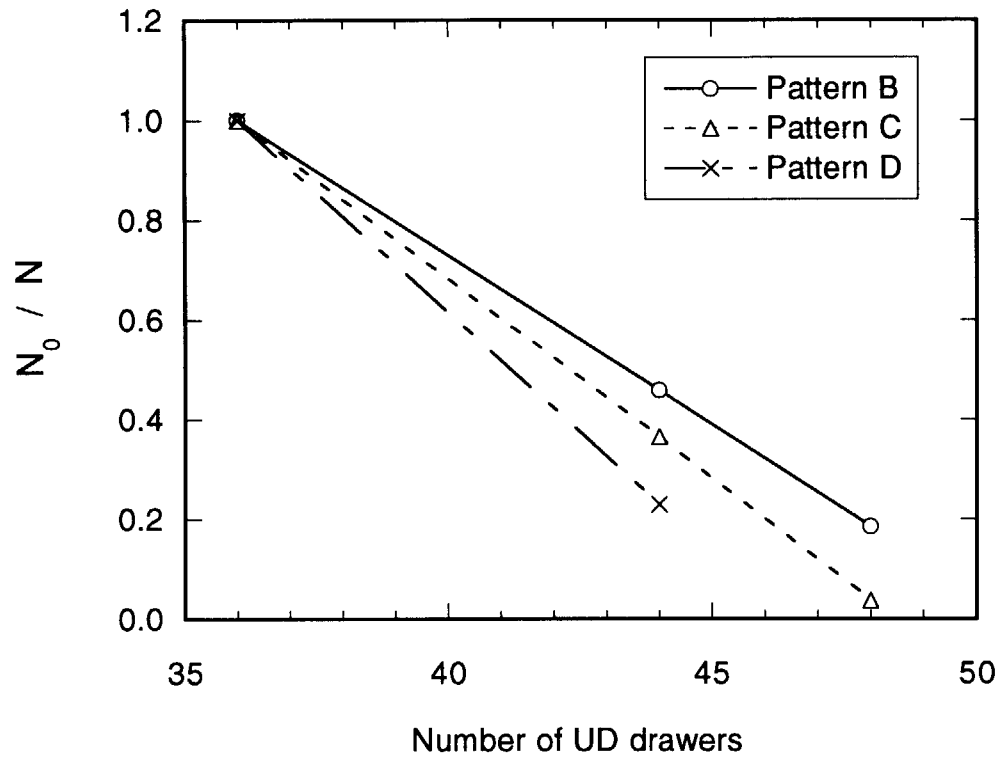


Fig. 2-4 Inverse multiplication curve for Ch1

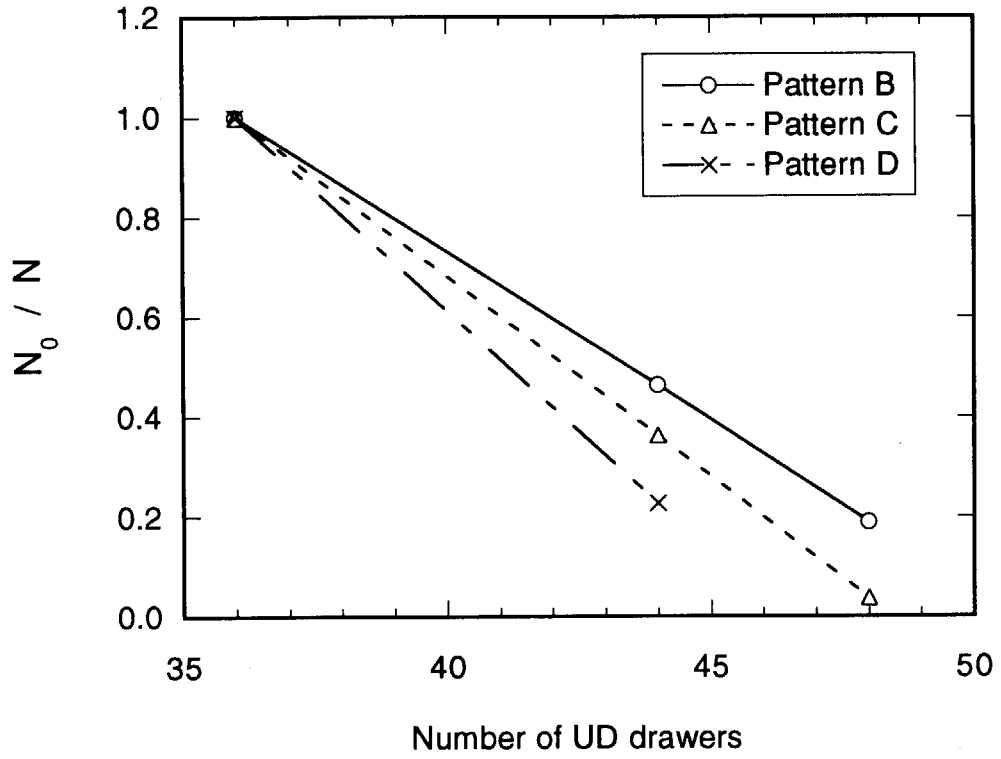
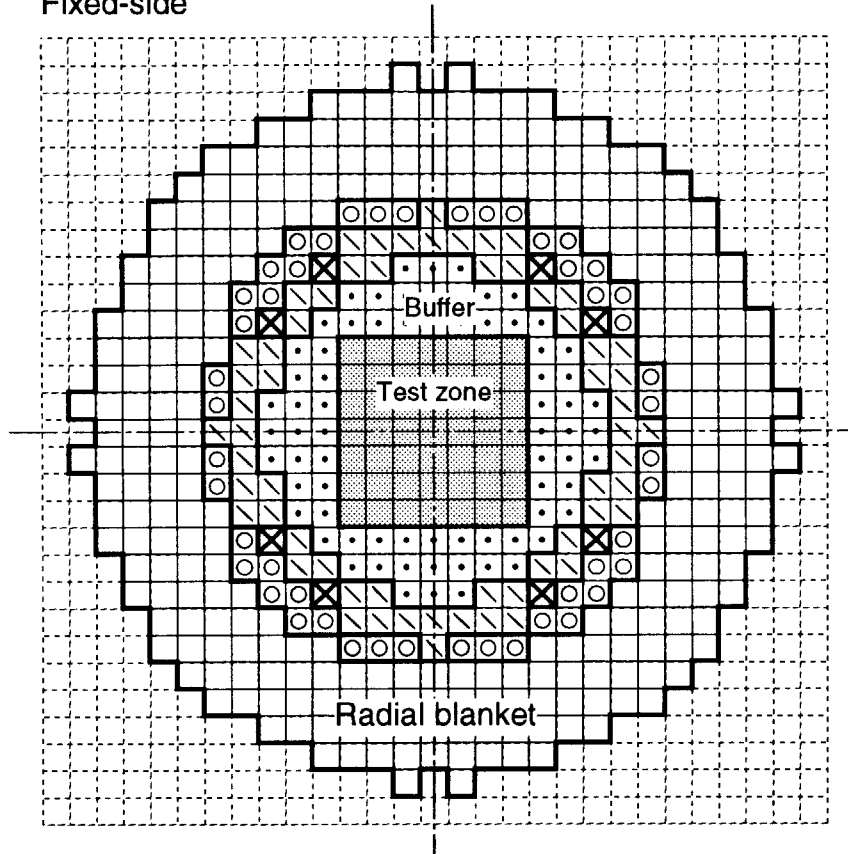


Fig. 2-5 Inverse multiplication curve for Ch5

Fixed-side



- TCH drawer (49 / 49)
- ◻ BCH drawer (72 / 72)
- ◻ PD drawer (60 / 60)
- ◻ UD drawer (48 / 48)
- ⊗ Safty/Control rod (8 / 8)
- DUB drawer (288 / 288)
- ⋯ Empty matrix

Fig. 2-6 View of horizontal cross section of FCA XVIII(45V) assembly

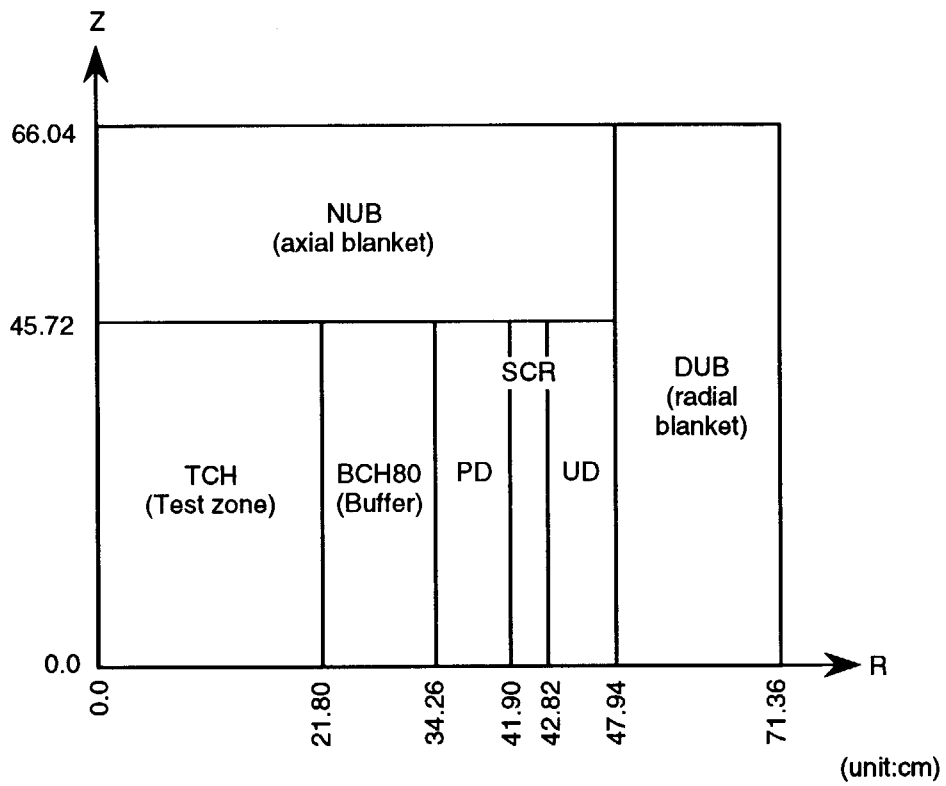


Fig. 2-7 RZ-model of FCA XVIII(45V) assembly

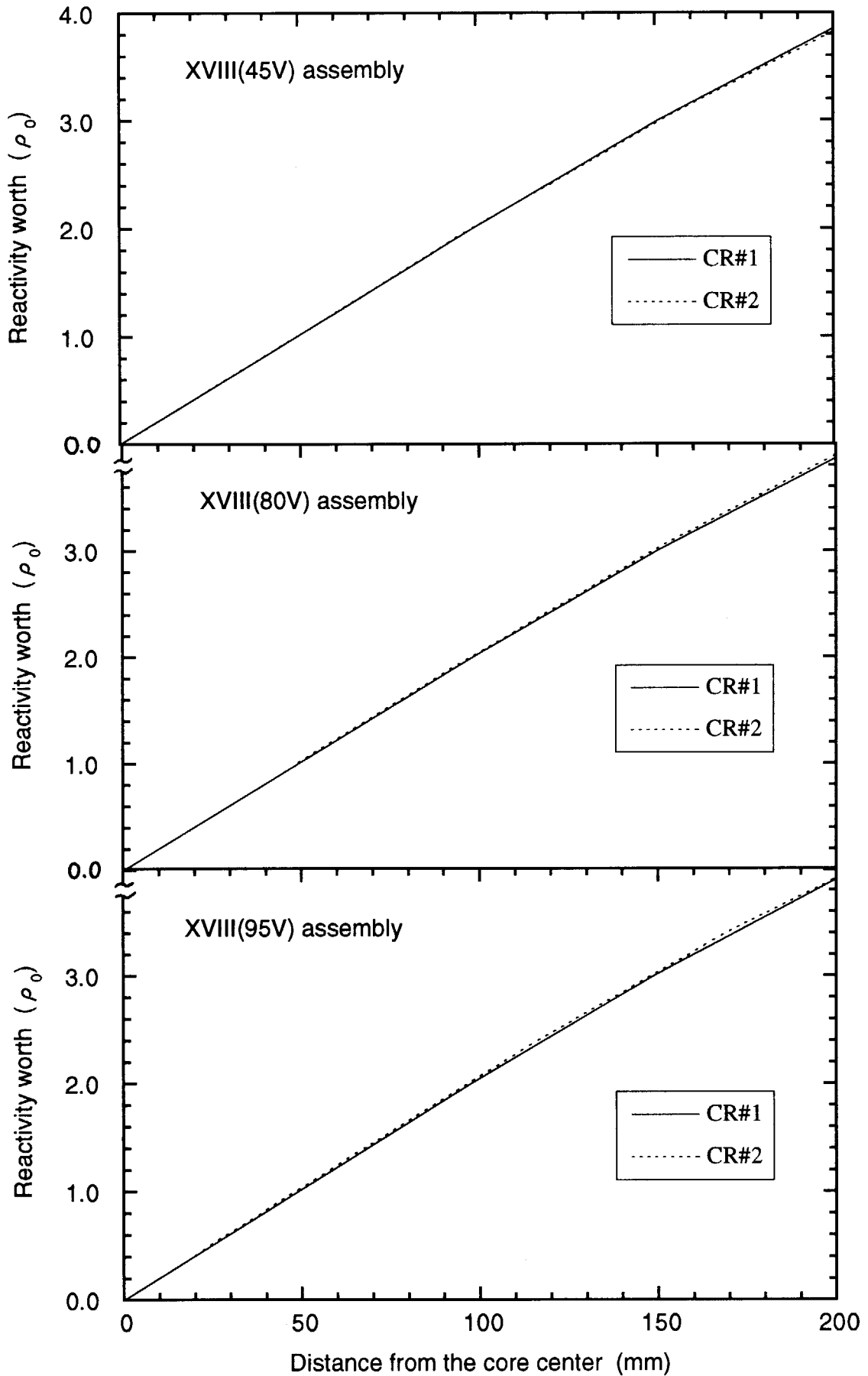


Fig. 3-1 Calibration curve of control rods of FCA XVIII assembly

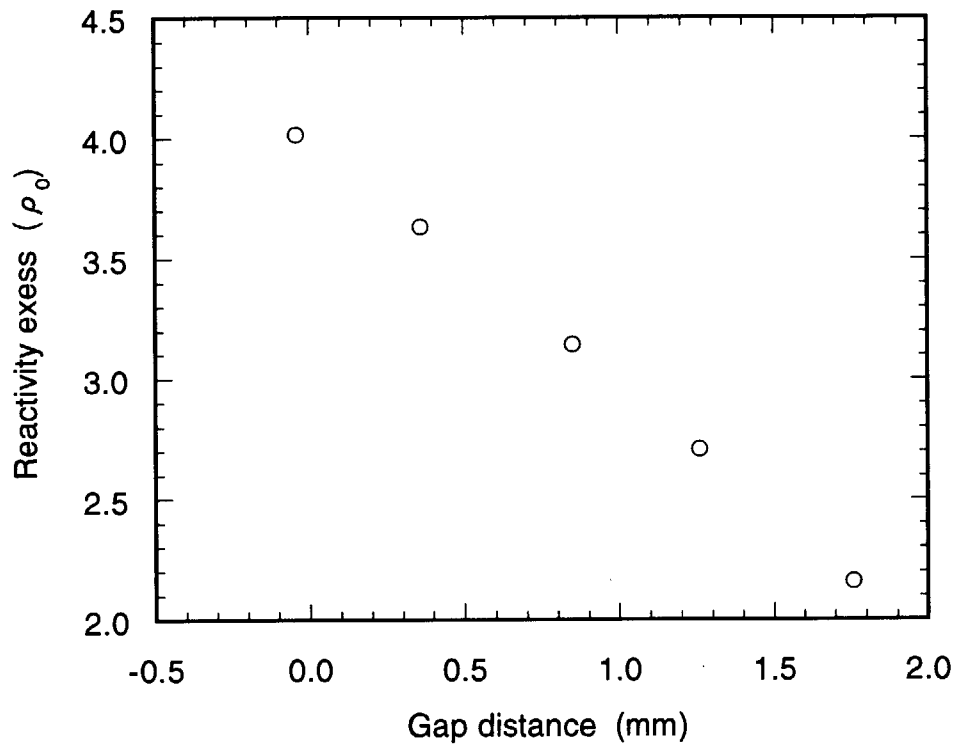


Fig. 3-2 Reactivity excess versus gap distance of FCA XVIII(45V) assembly

付録 余剰反応度の誤差評価

余剰反応度 (ρ_{ex}) は、制御・安全棒挿入位置から制御棒較正曲線を用いて求め、温度効果と密着面間隙の変化に対して補正を加える。従って余剰反応度の測定誤差 ($\delta\rho_{ex}$) には、これら測定量に起因する誤差をすべて考慮する必要がある。

1) 制御・安全棒の位置表示値に起因する誤差

■ 密着状態のまま測定する場合

密着状態のまま余剰反応度を測定する場合、安全棒 No.3 (SR#3) ~ No.8 (SR#8) は常に全挿入状態である。このときの安全棒挿入位置の誤差は、安全棒 1 組につき $\pm 0.01\text{mm}$ を仮定する。他方、制御棒 No.1 (CR#1)、No.2 (CR#2) については、臨界点測定毎に挿入位置を変えるため、制御棒挿入位置の誤差は制御棒 1 組につき $\pm 0.05\text{mm}$ を仮定する。したがって、全安全棒 (6 組) 及び全制御棒 (2 組) では、制御安全棒の位置表示値の誤差は以下のようになる。

$$\sqrt{0.01^2 \times 6 + 0.05^2 \times 2} = \pm 0.07\text{mm}$$

制御・安全棒の反応度値を $1\rho_0 / 50\text{mm}$ とし、制御・安全棒位置に起因する誤差 ($\delta\rho_{Rod}$) は以下のように求められる。

$$\delta\rho_{Rod} = 0.07\text{mm} \times 1\rho_0 / 50\text{mm} = \pm 0.0014\rho_0$$

■ 分離密着を繰り返して測定を行う場合

分離密着を繰り返して測定を行う場合には、安全棒挿入位置の誤差は、安全棒 1 組につき $\pm 0.02\text{mm}$ を仮定する。制御棒 No.1 (CR#1)、No.2 (CR#2) については、制御棒 1 組につき $\pm 0.10\text{mm}$ を仮定する。したがって、全安全棒 (6 組) 及び全制御棒 (2 組) では、制御安全棒の位置表示値の誤差は以下のようになる。

$$\sqrt{0.02^2 \times 6 + 0.10^2 \times 2} = \pm 0.15\text{mm}$$

制御・安全棒の反応度値を $1\rho_0 / 50\text{mm}$ とし、制御・安全棒位置に起因する誤差 ($\delta\rho_{Rod}$) は以下のように求められる。

$$\delta\rho_{Rod} = 0.15\text{mm} \times 1\rho_0 / 50\text{mm} = \pm 0.0030\rho_0$$

2) 温度効果に起因する誤差

温度効果に起因する誤差 ($\delta\rho_T$) については、測定毎に $\pm 0.05\text{ }^\circ\text{C}$ を仮定する。温度補正係数 (f_T) を XVIII(45V)集合体の $f_T = -0.0650\rho_0 / ^\circ\text{C}$ とした場合、温度効果に起因する誤差 $\delta\rho_T$ は以下のように求められる。

$$\delta\rho_T = 0.05 \text{ }^\circ\text{C} \times 0.0650 \rho_0 / ^\circ\text{C} = \pm 0.003 \rho_0$$

なお、他のXVIII集合体（XVIII(80V)及びXVIII(95V)）の f_T を用いても $\delta\rho_T$ は $\pm 0.003 \rho_0$ となる。

3) 密着面間隙補正に起因する誤差

■ 密着状態のまま測定する場合

密着状態のまま測定した密着面間隙の変化分に対する誤差を $\pm 0.001 \text{ mm}$ と仮定する。この場合、密着面間隙補正に起因する誤差 $\delta\rho_G$ は、密着面間隙補正係数(f_G)を $f_G = -0.989 \rho_0 / \text{mm}$ として、以下のように求められる。

$$\delta\rho_G = 0.001 \text{ mm} \times 0.989 \rho_0 / \text{mm} = \pm 0.001 \rho_0$$

■ 分離密着を繰り返して測定を行う場合

分離密着を繰り返して測定を行う場合や密着面間隙を大きく変化させた場合には、分離密着に伴う密着面間隙の誤差として $\pm 0.01 \text{ mm}$ を仮定する。この場合、密着面間隙補正に起因する誤差 $\delta\rho_G$ は、密着面間隙補正係数(f_G)を $f_G = -0.989 \rho_0 / \text{mm}$ として、以下のように求められる。

$$\delta\rho_G = 0.01 \text{ mm} \times 0.989 \rho_0 / \text{mm} = \pm 0.01 \rho_0$$

4) まとめ

以上より、余剰反応度の測定誤差は、密着状態のまま測定する場合、一回の余剰反応度測定につき

$$\begin{aligned} \delta\rho_{ex} &= \sqrt{(0.0014)^2 + (0.003)^2 + (0.001)^2} \\ &= \pm 0.0035\rho_0 \end{aligned}$$

とする。

また、分離密着を繰り返して測定を行う場合には、一回の余剰反応度測定につき

$$\begin{aligned} \delta\rho_{ex} &= \sqrt{(0.003)^2 + (0.003)^2 + (0.01)^2} \\ &= \pm 0.011\rho_0 \end{aligned}$$

とする。

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J
1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m
1 b=100fm²=10⁻²⁸m²
1 bar=0.1MPa=10⁵Pa
1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²
1 Ci=3.7×10¹⁰Bq
1 R=2.58×10⁻⁴C/kg
1 rad=1cGy=10⁻²Gy
1 rem=1cSv=10⁻²Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局1985年刊行による。ただし, 1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²)=10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 ⁻⁴	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²
	6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻²	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹
	3.6×10 ⁸	3.67098×10 ⁵	1	8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸
	1.60218×10 ⁻¹⁹	1.63377×10 ⁻²⁰	4.45050×10 ⁻²⁶	3.82743×10 ⁻²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ⁻¹⁹	1

1 cal= 4.18605J (計量法)
= 4.184J (熱化学)
= 4.1855J (15°C)
= 4.1868J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS(仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10 ⁻¹¹
	3.7×10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

