

分類

「常陽」MK-II炉心の 燃焼反応度測定・評価

1997年2月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

「常陽」MK-II炉心の燃焼反応度測定・評価

吉田 昌宏*、長沖 吉弘*

要 目

「常陽」では、これまで、出力運転中の過剰反応度変化から燃焼係数(積算出力あたりの燃焼欠損反応度)を求め、解析結果との比較によりその予測精度を評価してきた。しかし、燃焼欠損反応度と核データあるいは中性子束計算精度との関係を詳細に評価するためには、上記方法で得られる炉心全体の特性ではなく、燃料集合体個々の燃焼反応度値を測定・解析し、その予測精度と集合体の燃焼度や装荷位置の関係を明らかにする必要がある。このため、MK-II炉心を用いて燃焼反応度値詳細測定試験を行い、個々の集合体の燃焼に伴う反応度の低下を測定した。

試験では、燃焼度の異なる燃料集合体の置換反応度を測定することにより、集合体1体毎の燃焼反応度値を評価した。燃料置換は燃焼初期(集合体平均燃焼度約1GWd/t)と寿命中期(約37GWd/t)及び燃焼初期と寿命末期(約62GWd/t)の2パターンとし、測定位置は炉中心(第0列)、燃料領域中間(第2列)及び燃料/反射体境界(第4列)の3箇所とした。本試験により、集合体単位の燃焼反応度値の燃焼度及び測定位置依存性を明らかにするとともに、運転監視コードシステム"MA GI"による計算結果との比較を行い、炉心管理上の燃焼係数予測精度を詳細に把握した。

主な結果を以下に示す。

- (1) 第0列の燃焼反応度測定結果は、燃焼初期から寿命中期までの燃焼で-0.19(%Δk/kk')、燃焼末期までの燃焼で-0.28(%Δk/kk')であった。
- (2) 燃焼反応度値の径方向分布は、2つの燃焼パターンでほぼ一致し、第0列で規格化した時、第2列は0.67、第4列は0.28となった。
- (3) 第0列と第2列の燃焼反応度値の"MA GI"によるC/E値は良く一致し、燃焼初期から寿命中期までの燃焼で1.03~1.05、燃焼末期までの燃焼で0.94~0.95であった。また、反射体と隣接する第4列のC/E値は他2箇所と比較して5~7%高くなる傾向が見られた。

C/E値の燃焼度依存性に関しては、現在、測定に用いた燃料集合体のPIEを実施中であり、その結果に基づき詳細な評価を行う予定である。

* 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 実験炉部 技術課

Burn-up Reactivity Measurements of the Joyo MK-II Core

YOSHIDA Akihiro*, NAGAOKI Yoshihiro*

ABSTRACT

The core averaged burn-up reactivity has been measured and calculated for the Joyo MK-II core. In order to evaluate the relationship between the calculational error of burn-up reactivity and the nuclear data or calculated neutron flux, the burn-up reactivity for an individual fuel subassembly(S/A) must be measured. So the burn-up reactivity measurement test was conducted on the MK-II core.

The burn-up reactivity for a driver fuel S/A was measured as a substitution reactivity worth between two S/As at different burn-ups. In the test a fuel S/A with a burn-up of 1GWd/t was substituted by two S/As with 37 and 62GWd/t, respectively. The substitutions were carried out at the core center(row 0), middle of the fuel region(row 2) and the border region of the fuel and reflector(row 4). The calculated burn-up reactivity worth performed by the core management code system "MAGI" was compared with the measured value.

The results obtained were as follows:

- (1) Measured substitution reactivity worth(at row 0) between 1 and 37GWd/t fuel S/A was $-0.19\% \Delta k/kk'$ and that between 1 and 62GWd/t was $-0.28\% \Delta k/kk'$.
- (2) Relative distribution of the reactivity worth between 1 and 37GWd/t agreed with that between 1 and 62GWd/t. The relative value normalized at core center was 0.67 for the row 2 and 0.28 for the row 4.
- (3) The C/E value was 1.03~1.05 for the substitution between 1 and 37GWd/t and 0.94~0.95 between 1 and 62GWd/t at the row 0 and 2. It was clear that the C/E values at the row 4 are higher than those at the row 0 and 2 by 5~7%.

An analysis of the burn-up dependency on the C/E value of the burn-up reactivity worth is being performed in detail. Presents, the PIE of the fuel S/A used for the measurement is under way.

* Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, O-arai Engineering Center, PNC

目 次

1. 緒 言	1
2. 実 驗	2
2.1 試験装置、試験条件	2
2.2 方法	3
2.3 結果	5
3. 解 析	14
3.1 方法	14
3.2 結果	14
4. 実験値と解析値の比較	18
5. 結 言	27
参考文献	28

表リスト

表 2.1.1 検定対象集合体の燃焼度	.....	6
表 2.1.2 置換反応度検定パターン	.....	6
表 2.1.3 試験時炉心構成	.....	6
表 2.2.1 制御棒微分反応度値	.....	7
表 2.2.2 過剰反応度検定結果	.....	7
表 2.2.3 過剰反応度検定誤差	.....	8
表 2.3.1 各ケース過剰反応度検定結果	.....	9
表 2.3.2 燃焼反応度検定結果	.....	9
 表 3.2.1 各検定ケースの実効増倍率計算結果	.....	15
表 3.2.2 置換反応度解析結果	.....	15
 表 4.1.1 パターンによる燃焼反応度値検定結果の比較	.....	20
表 4.1.2 燃焼反応度値検定結果相対値	.....	20
表 4.2.1 MK-II炉心の燃料密度係数分布	.....	31
表 4.2.2 MK-II炉心燃焼係数の実測値と" MAGI" 計算値の比較	.....	22

図リスト

図 2.1.1 置換反応度測定試験炉心構成	.....	10
図 2.2.1 CR5制御棒反応度価値	.....	11
図 2.2.2 Pu-241崩壊による過剰反応度変化	.....	12
図 2.3.1 置換反応度測定結果	.....	13
図 3.1.1 運転監視コードシステムの概念図	.....	16
図 3.2.1 置換反応度実測と解析結果の比較	.....	17
図 4.1.1 燃焼反応度測定結果の燃焼度依存性	.....	23
図 4.1.2 燃焼反応度測定結果径方向分布	.....	24
図 4.2.1 燃焼反応度C/E値の測定位置依存性	.....	25
図 4.2.2 燃焼反応度C/E値の燃焼度依存性	.....	26

1. はじめに

「常陽」では、これまで、出力運転中の過剰反応度変化から燃焼係数（積算出力あたりの燃焼欠損反応度）を測定してきた。燃焼係数測定結果は $[-1.67 \pm 0.05] \times 10^{-4} (\% \Delta k / kk' / MWd/t)$ であり、サイクル依存性は見られていない。また、「常陽」炉心管理に使用している運転監視コードシステム"MAGI"¹⁾による計算値と実測値の比（C/E値）は 1.03 ± 0.03 であり、よく一致している。

しかし、燃焼欠損反応度と核データあるいは中性子束計算精度との関係を詳細に評価するためには、上記方法で得られる炉心全体の特性ではなく、燃料集合体個々の燃焼反応度価値を測定・解析し、その予測精度と集合体の燃焼度や装荷位置の関係を明らかにする必要がある。このため、MK-II炉心を用いて燃焼反応度価値測定試験を行い、個々の集合体の燃焼に伴う反応度の低下を測定した。

2. 実験

2.1 試験装置、条件

1) 炉心構成

燃焼反応度測定試験は「常陽」MK-II定格第29サイクル炉心の運転終了後に構成した「各種試験炉心」を用いて実施した。各種試験炉心の構成を図2.1.1に示す。本炉心は67体の炉心燃料集合体、1体のNaチャネル（オンライン照射装置用下部案内管を含む）及び6体の制御棒からなり、"MAGI"による炉心燃料平均燃焼度は39.9(GWd/t)である。

2) 測定装置

試験では、下記の条件で原子炉を臨界にし、その時の制御棒位置（原子炉制御盤#423指示値）と制御棒反応度価値曲線より過剰反応度を求めた。

- ・ 原子炉出力： 約1kW（起動系核計装ch.1の計数率約 5×10^4 cps）
- ・ 一次冷却材温度： 約250°C
- ・ 一次冷却材流量： 約100%

ここで、起動系核計装ch.1の計数率約 5×10^4 cpsは外部中性子源の影響が十分無視できる臨界レベルである。

臨界位置のプラント状態測定は熱出力測定システムで行った。本システムは原子炉制御盤から一次冷却材温度、流量等の信号を取り込み、その平均値（30回のサンプリング）を出力するものである。

3) 置換反応度測定ケース設定

測定対象集合体は燃焼初期、寿命末期及び寿命の約1/2（寿命中期）の燃焼度を有する3種類のMK-II炉心燃料集合体とした。使用した集合体の燃焼度を表2.1.1に示す。置換反応度測定は以下の2パターンについて行った。

パターンA：燃焼初期集合体を寿命中期集合体に置換

パターンB：燃焼初期集合体を寿命末期集合体に置換

測定位置は炉心中心である[000]、[2C1]及びステンレス反射体と隣接する[4C1]の3箇所とした（図2.1.1参照）。置換反応度測定パターンのまとめを表2.1.2に示す。これに基づき設定した炉心構成を表2.1.3に示す。なお、ケース6、7では²⁴¹Puの崩壊による反応度損失量評価のため、ケース1と同一の炉心を構成し、過剰反応度を測定した（2.3節参照）。

2.2 方法

1) 過剰反応度測定

今回の試験では、全ケースを通じ5体の制御棒位置を固定とし（455mm）、1体の制御棒により臨界操作を行った。臨界操作を行う制御棒は、反応度値が小さく、炉内中性子束分布に大きな擾動を与えない第5列のCR5とした。

CR5の制御棒較正はケース1の炉心でペリオド法により行った。CR5の制御棒反応度値曲線を図2.2.1に示す。ペリオド法測定は、置換反応度測定と同じく、他5体制御棒を均等引抜状態（445～485mm）で行ったため、較正結果に干渉効果補正は行わないこととした。

2) 反応度補正

過剰反応度測定結果には以下の補正を行った。

- ・ 制御棒ラッチ位置補正
- ・ 冷却材温度補正
- ・ ²⁴¹Pu崩壊による反応度損失補正

なお、一次冷却材流量・原子炉熱出力のずれ、制御棒引抜操作に伴う制御棒駆動機構延長管の熱収縮及び試験期間中の燃焼による反応度差は微小であるため無視した。

・ 制御棒ラッチ位置補正

過剰反応度測定時の制御棒ラッチ位置がデータ処理に用いる制御棒反応度値曲線作成時とずれた場合は下式によりラッチ位置の違いによる反応度補正量： $\Delta \rho_R$ （%Δk/kk'）を求める。

$$\Delta \rho_R = \sum_{i=1}^6 \left\{ (\rho_X)_i \times (R_{(i)}^{meas.} - R_{(i)}^{calib.}) \right\} \quad \dots \dots (2-3-1)$$

ここで、

$(\rho /X)_i$: 制御棒CR*i* (*i*=1, 2, …, 6) の引抜き位置 (455mm) での微分反応度係数 (表2.2.1)

R(*i*) : ラッチ時に下端リミットスイッチがONとなる制御棒位置(mm)。
なお、添字measは測定時、calibは制御棒較正試験時を示す。

- 冷却材温度補正

炉内冷却材温度が変化した場合、主に炉心支持板の熱変位により炉心反応度が変化する。そこで、等温係数を用いて、炉内冷却材温度の違いによる炉心反応度のずれ： $\Delta \rho_T$ (% $\Delta k/kk'$)を補正する。なお、補正是下式に示すように過剰反応度を出入口平均温度250°Cの値に規格化するよう行った。

$$\Delta \rho_T = \alpha_t \times (T_{AV} - 250) \quad \dots \dots (2-3-2)$$

ここで、

α_t : 等温係数 = $[-4.0 \pm 0.1] \times 10^{-3}$ (% $\Delta k/kk'/^{\circ}\text{C}$)
(MK-II炉心での測定結果平均値¹⁾)

T_{AV} : A,Bループ炉容器出入口温度平均値 (°C)

である。

- 241Pu崩壊による反応度損失補正

241Puの崩壊による反応度損失量： $\Delta \rho_d$ (% $\Delta k/kk'$)を評価するため、同一炉心構成での過剰反応度測定を行った（測定ケース1, 6, 7）。過剰反応度測定結果を表2.2.2、図2.2.2に示す。最小二乗法により測定値を下記に示す一次式にフィッティングした結果、補正係数： α_d は -5.4×10^{-4} (% $\Delta k/kk'/d$)となった。

$$\Delta \rho_d = \alpha_d \times \Delta d \quad \dots \dots (2-3-3)$$

ここで、

Δd : 最初の測定（94年11月15日）からの経過日数(d)
である。

3) 測定誤差

今回、過剰反応度測定誤差として以下を考慮した。

- ・ 系統温度補正誤差
- ・ 制御棒位置からの反応度算出誤差
 - 制御棒位置読取誤差
 - 制御棒位置指示計誤差
 - ペリオド法測定誤差 (JOYDASデータサンプリング誤差)
 - 制御棒較正曲線フィッティング誤差

評価結果を表2.2.3に示す。これより、過剰反応度測定誤差は約0.003(% $\Delta k/kk'$)となった。また、置換反応度は2ケースの過剰反応度の差として算出されるため、その測定誤差は約0.004(% $\Delta k/kk'$)となる。

2.3 結果

各測定ケースの過剰反応度測定結果を表2.3.1に、これより評価した6パターンの置換反応度を表2.3.2、図2.3.1に示す。

表 2.1.1 測定対象集合体の燃焼度

	集合体名	集合体平均 燃焼度* (GWd/t)
燃焼初期	PFD543	1.2
寿命中期	PFD512	37.0
	PFD513	37.3
	PFD516	37.5
寿命末期	PFD406	62.1

*) "MAGI"計算結果

表 2.1.2 置換反応度測定パターン

パターン	置換集合体		測定位置
燃焼初期 ↓ 寿命中期	A-1	PFD543⇒PFD512	[000]
	A-2	PFD543⇒PFD516	[2C1]
	A-3	PFD543⇒PFD513	[4C1]
燃焼初期 ↓ 寿命末期	B-1	PFD543 ↓ PFD406	[000]
	B-2		[2C1]
	B-3		[4C1]

表 2.1.3 試験時炉心構成

測定 ケース	実施日	装荷集合体			備 考
		[000]	[2C1]	[4C1]	
1	94/11/15	PFD512		PFD513	
2	94/11/17	PFD543			
3	94/11/21	PFD512		PFD543	
4	94/11/24			PFD406	
5	94/11/28	PFD406			
6	94/12/01				ケース1と同じ
7	95/03/15	PFD512		PFD513	ケース1と同じ
8	95/03/20		PFD406		
9	95/03/30		PFD543		

表2.2.1 制御棒微分反応度値 (455mm引抜き位置)

制御棒	微分反応度値 (%Δk/kk'/mm)
CR1	4.3E-03
CR2	3.7E-03
CR3	3.5E-03
CR4	3.7E-03
CR5	1.5E-03
CR6	4.4E-03

表2.2.2 過剰反応度測定結果

ケース	測定日	経過 日数 (d)	CR5* 引抜位置 (mm)	炉容器 系統温度* (°C)	過剰反応度(%Δk/kk')			
					未補正	補正量		補正後
						ラッチ位置	系統温度	
1	94/11/15	0	412.9	252.2	2.612	0.002	0.009	2.623 ± 0.003
6	94/12/1	16	418.0	252.0	2.605	0.000	0.008	2.613 ± 0.003
7	95/3/15	120	455.6	252.1	2.553	0.000	0.008	2.562 ± 0.003
			461.1	251.8	2.547	0.000	0.007	2.554 ± 0.003

*) 臨界調整に用いた制御棒

**) A, Bループ平均値

表2.2.3 過剰反応度測定誤差

項目	算出根拠	評価結果
系統温度 補正誤差	熱出力システム測定誤差 : $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ \times 等温係数 : $[-4.0 \pm 0.1] \times 10^{-3} (\% \Delta k / kk' / ^{\circ}\text{C})$	2.9E-03 (% $\Delta k / kk'$)
制御棒位置 読み取り誤差	制御盤#423の最小目盛り (1mm). の1/10	0.1 (mm) 反応度換算* 8.9E-04 (% $\Delta k / kk'$)
制御棒位置指示計 の誤差	ずれ測定結果最大値 \times 試験期間 0.2(mm/y) \times 試験期間 (4.5m)	0.075 (mm) 反応度換算* 6.7E-04 (% $\Delta k / kk'$)
ペリオド法測定誤差	JOYDASデータサンプリング誤差 = $\pm 1.4(\text{s})$	2.5E-04 (% $\Delta k / kk'$)
制御棒較正曲線 フィッティング誤差	ペリオド法測定値とフィッティング値のずれ CR5調整範囲 (291.3~247.0mm) の最大値	1.0E-03 (% $\Delta k / kk'$)
合 計		3.2E-03 (% $\Delta k / kk'$)

*) 表2.2.1より算出

表2.3.1 各ケース過剰反応度測定結果

測定 ケース	測定日	CR5* 引抜位置 (mm)	系統 温度** (°C)	過剰反応度(%Δk/kk')				
				未補正	補正量			補正後
					ラッチ位置	系統温度		
1	94/11/15	412.9	252.2	2.612	0.002	0.009	0.000	2.623 ± 0.003
2	94/11/17	291.3	252.1	2.803	0.000	0.008	0.001	2.812 ± 0.003
3	94/11/21	380.8	253.0	2.660	0.001	0.012	0.003	2.676 ± 0.003
4	94/11/24	432.2	252.6	2.585	0.000	0.010	0.005	2.600 ± 0.003
5	94/11/28	482.7	252.2	2.521	0.000	0.009	0.007	2.537 ± 0.003
6	94/12/1	418.0	252.0	2.605	0.000	0.008	0.009	2.622 ± 0.003
7	95/3/15	461.1	251.8	2.547	0.000	0.007	0.064	2.619 ± 0.003
8	95/3/20	547.0	257.3	2.460	0.002	0.029	0.067	2.557 ± 0.003
9	95/3/30	392.0	257.7	2.643	0.000	0.031	0.072	2.746 ± 0.003

*) 臨界調整に用いた制御棒

**) A, Bループ出入口冷却材温度平均値

表 2.3.2 燃焼反応度測定結果

パターン	測定ケース		燃焼反応度 (%Δk/kk')
	置換前	置換後	
A-1	2	1***	-0.191 ± 0.004
A-2	9	1***	-0.125 ± 0.004
A-3	3	1***	-0.055 ± 0.004
B-1	2	5	-0.275 ± 0.004
B-2	9	8	-0.189 ± 0.004
B-3	3	4	-0.077 ± 0.004

***）ケース1, 6及び7の過剰反応度平均値： 2.621 (%Δk/kk') を使用。

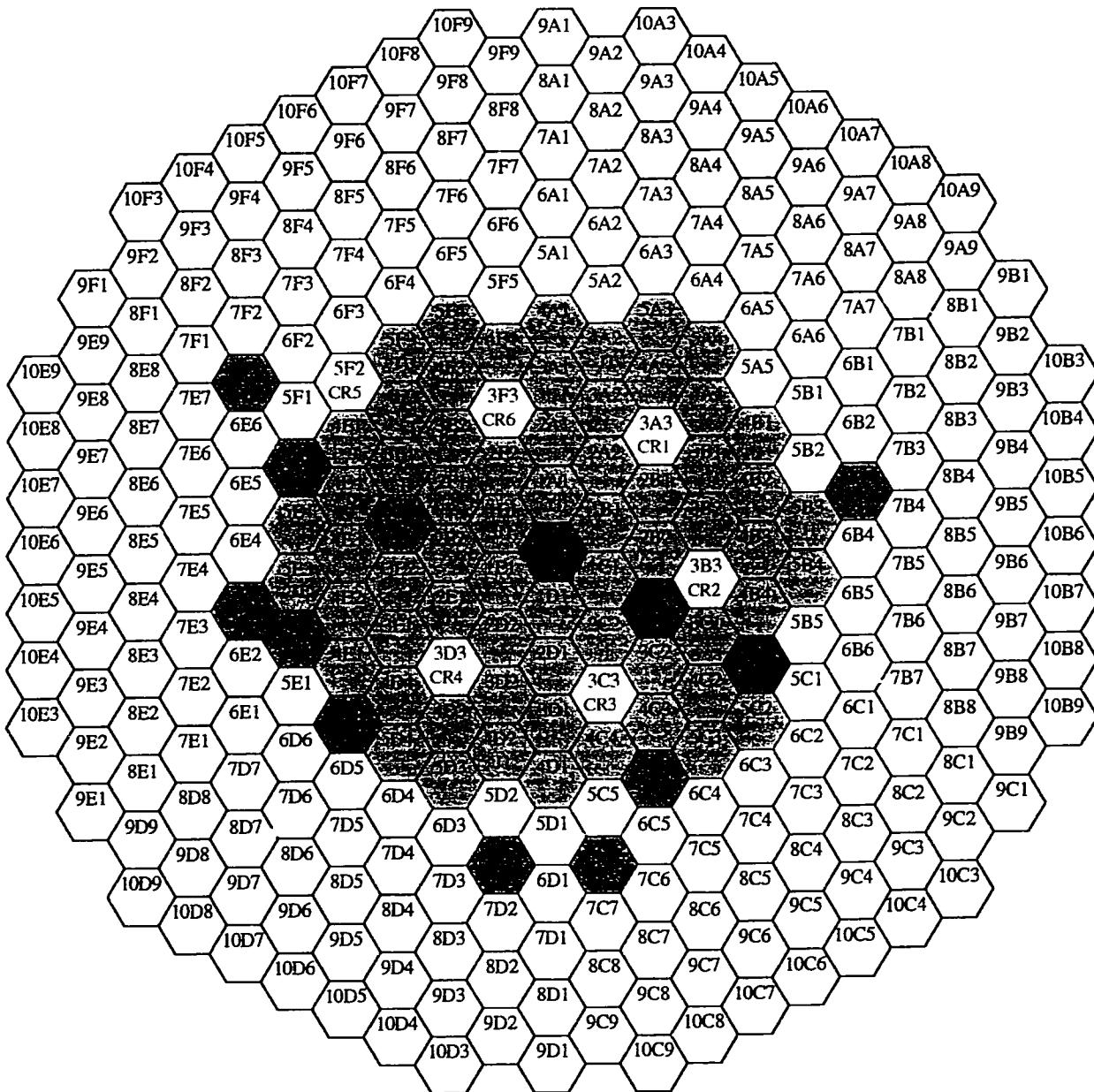
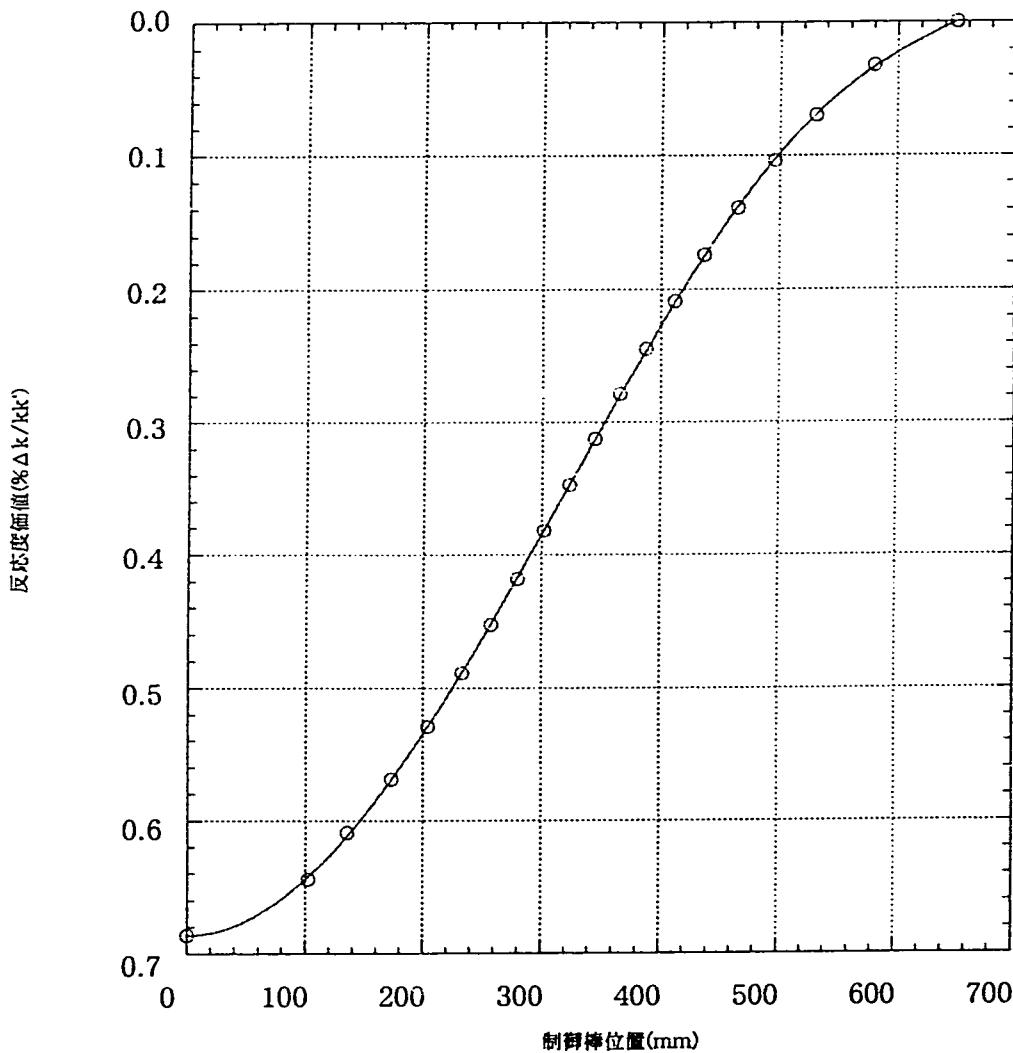


図2.1.1 置換反応度測定試験炉心構成

- 炉心燃料集合体
 - 炉心燃料集合体
(置換反応度測定位置)
 - 反射体 (230体)
 - 制御棒 (6体)
 - 中性子源 (1体)
 - Naチャネル (1体)
 - 材料照射用反射体 (8体)
- 67体
(J1燃料8体)



Y = M0*x^0 + M1*x^1 + ... + M6*x^6	
M0	0.68595
M1	2.4473e-05
M2	-5.0995e-06
M3	8.2583e-09
M4	-1.7349e-11
M5	3.5274e-14
M6	-2.4019e-17
R	0.99999

図2.2.1 CR5制御棒反応度価値

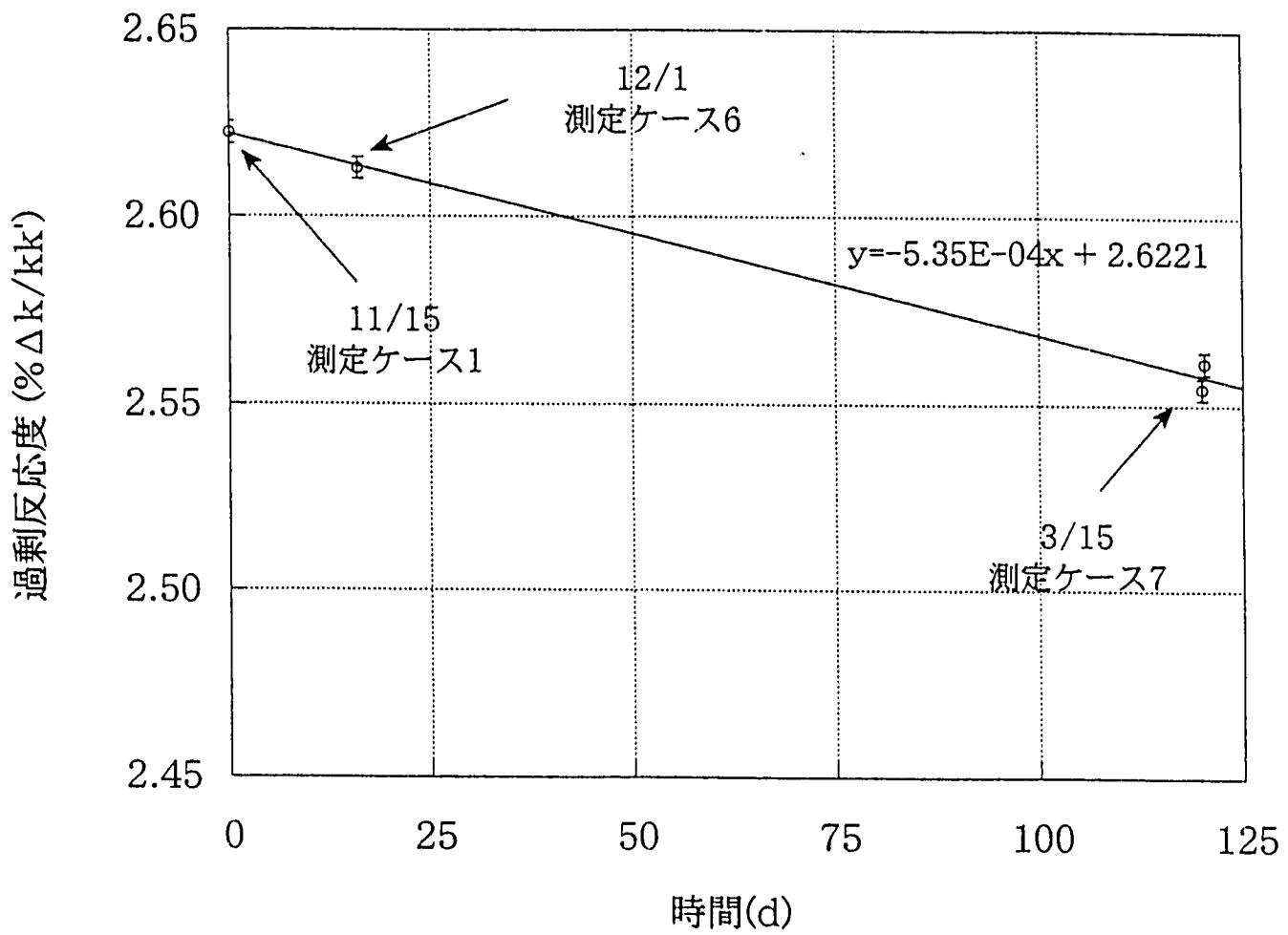


図2.2.2 Pu-241崩壊による過剰反応度変化

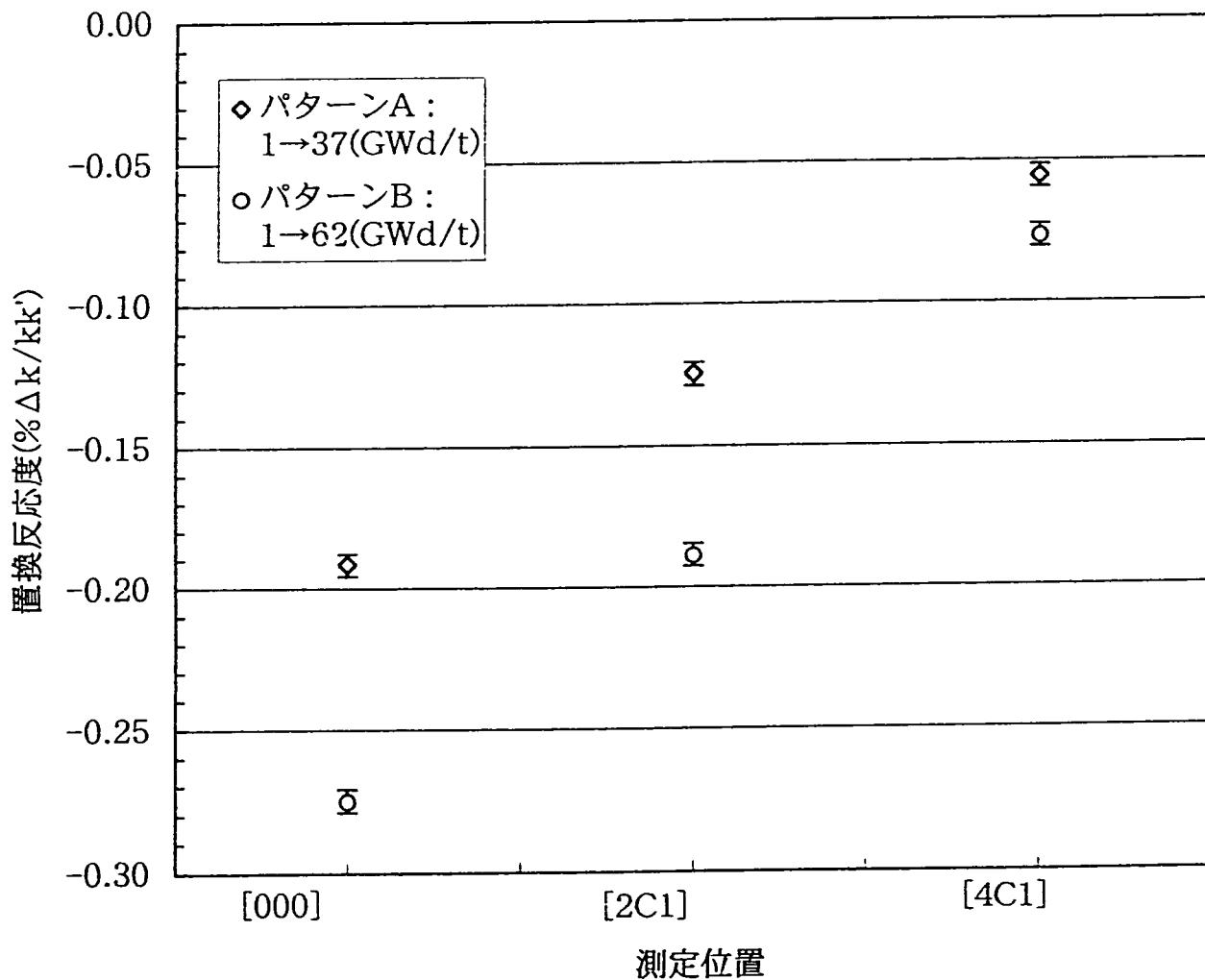


図2.3.1 置換反応度測定結果

3. 解 析

燃焼反応度価値測定試験結果をMK-II炉心「常陽」運転監視コードシステム" MAGI"で解析し、炉心管理ベースの燃焼反応度の予測精度を評価した。

3.1 方法

"MAGI"は「常陽」MK-II炉心の核熱特性を総合的に解析するために開発・整備されたシステムである。"MAGI"の概略計算フローを図3.1.1に示す。

- 実効断面積作成

Abagyan型中性子25群の炉定数セット：Jaeri Fast Set Version II (JFS-2)^②を用いて2次元RZモデル（測定ケース1の炉心構成を使用）による70群拡散計算を行う。これより得られた領域毎の中性子スペクトルを用いて25群断面積を7群に縮約することにより中性子実効断面積を作成した。

- 原子数密度燃焼度管理

炉心管理では、製造データに基づく原子数密度を入力として" MAGI"の燃焼計算を行い、燃料集合体毎の原子数密度を計算・管理している。今回の計算にもMK-II第0サイクルから継続して" MAGI"で管理している原子数密度を使用した。

- 3次元Hex-Z計算

"MAGI"核計算部は3次元Hex-Zモデルを用いた中性子7群拡散計算に基づいている。XY平面は集合体ピッチ (8.15cm) を対面間距離とした六角メッシュからなり、全炉心 (313体) を包括する。軸方向にはスタック長50cmの燃料とその上下反射体部を含む140cm領域を計算範囲としている。燃料領域の軸方向メッシュは幅5cmである。

3.2 結果

各ケースの実効増倍率を表3.2.1に示す。これを基に評価した各パターンの置換反応度と実測値との比較を表3.2.2、図3.2.1に示す。なお、計算では制御棒位置を全ケース同じとした。実際には臨界操作に用いたCR5の引抜位置がケース毎に異なるが（表2.3.1参照）、測定位置の中性子束、インポータンスに与える影響が小さいため、置換反応度計算結果への影響は無視できる。

表 3.2.1 各測定ケースの実効増倍率計算結果

ケース	実効増倍率	備 考
1	1.00230	
2	1.00433	
3	1.00291	
4	1.00214	
5	1.00169	
6	-	ケース1に同じ
7	-	ケース1に同じ
8	1.00181	
9	1.00359	

表 3.2.2 置換反応度解析結果

パターン	燃焼反応度(%Δk/kk')		
	"MAGI"	実測値	C/E
A-1	-0.202	-0.191	1.054
A-2	-0.128	-0.125	1.027
A-3	-0.061	-0.055	1.099
B-1	-0.262	-0.275	0.953
B-2	-0.177	-0.189	0.938
B-3	-0.077	-0.077	1.000

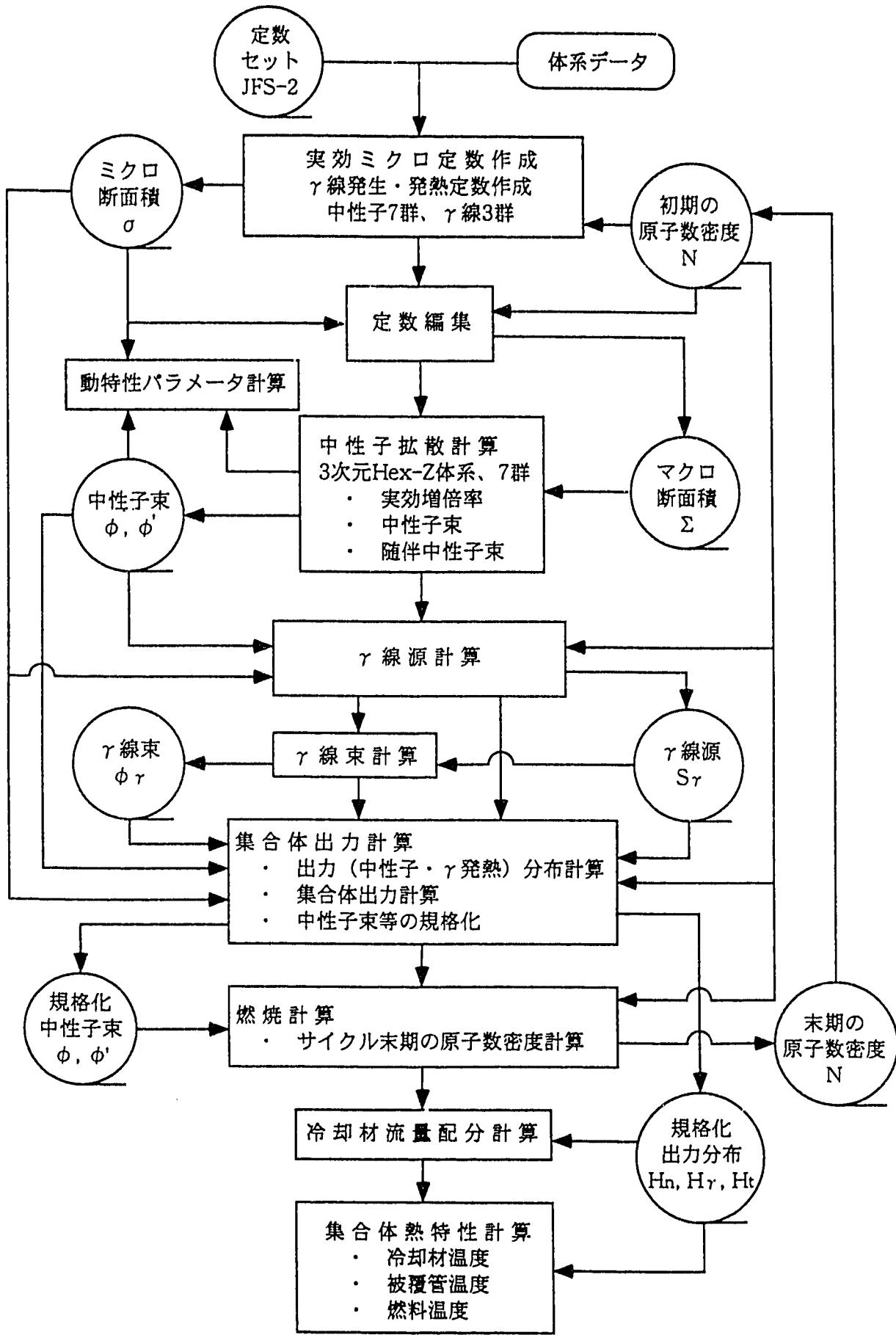


図3.1.1 運転監視コードシステムの概念図

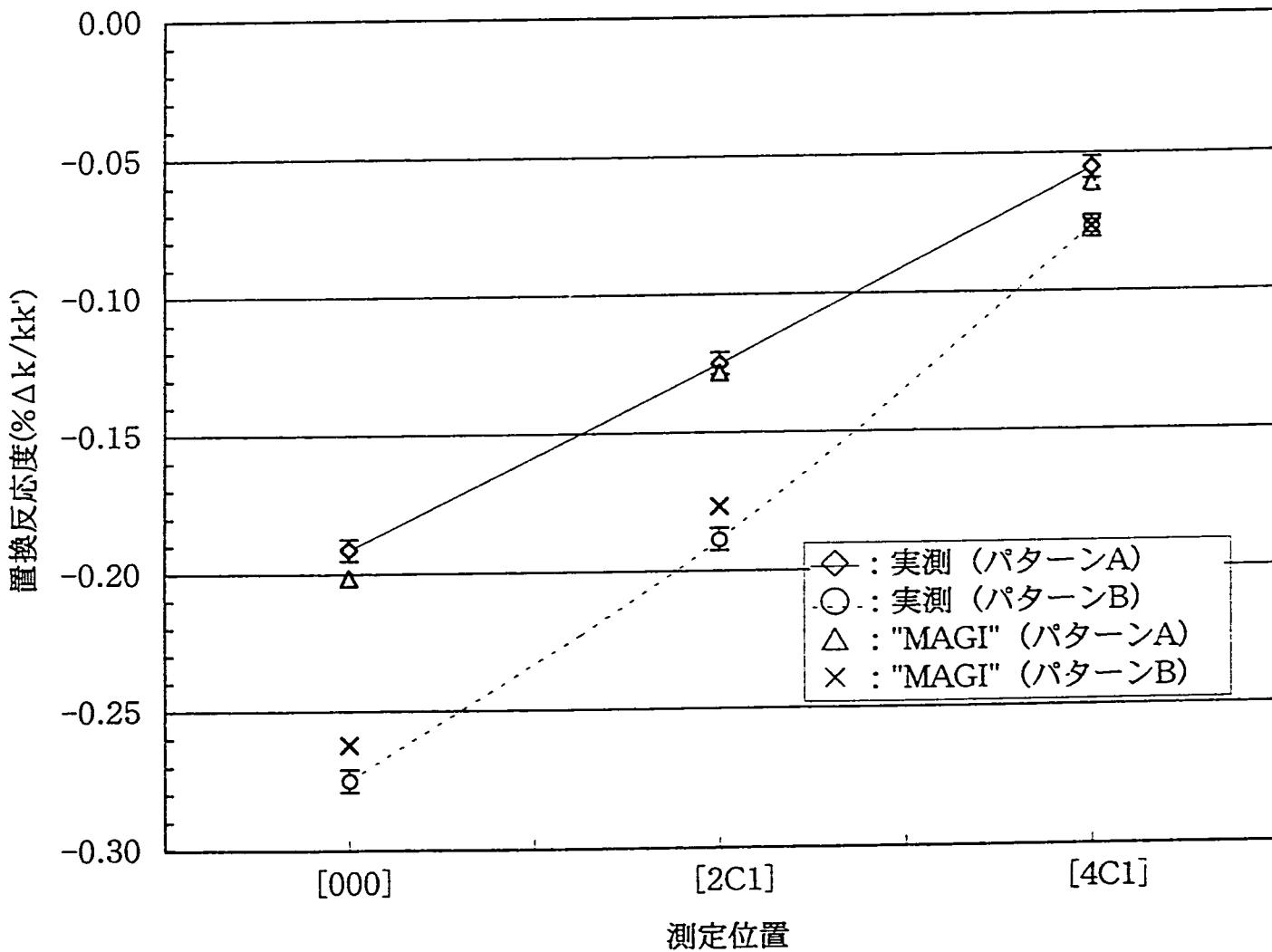


図3.2.1 置換反応度実測と解析結果の比較

4. 実験値と解析値の比較

燃焼反応度価値は絶対値が最も大きい炉心中心でパターンA（燃焼初期から寿命末期までの燃焼）が $-0.28(\% \Delta k/kk')$ 、パターンB（燃焼初期から寿命中期までの燃焼）が約 $-0.19(\% \Delta k/kk')$ であり、測定誤差は1~2%であった。また、試験を通じての最小値は $-0.06(\% \Delta k/kk')$ であり、この時の測定誤差は7%であった。

4.1 燃焼度・測定位置依存性

燃焼反応度と燃焼度の関係を表4.1.1及び図4.1.1に示す。これより、すべての測定位置でパターンBの燃焼反応度価値はパターンAの約0.7倍となった。

次に[000]の値を1.0として規格化した燃焼反応度価値の径方向分布を表4.1.1と図4.1.2に示す。これより、二つの燃焼パターンの径方向相対分布はほぼ一致し、第0列の値を1.00とした時、第2列の値は0.67、第4列の値は0.28となった。

4.2 実測値と" MAGI" 計算値の比較

計算値と実測値の比（C/E値）を図4.2.1～4.2.2に示す。

- C/E値の燃焼度・測定位置依存性

図4.2.1よりパターンAの燃焼反応度C/E値はすべての測定位置でパターンBより約10%大きい結果であった。この原因としては、燃焼計算誤差と核定数の不確かさが考えられる。

これまでの" MAGI"による燃焼度計算結果はPIE結果と $\pm 5\%$ で一致している¹⁾。ここで、表4.2.1に一次摂動計算により求めたMK-II炉心の燃料密度係数を示す。これを用いて第4列燃料1体の燃料核種を一律5%変化させた時の反応度価値を計算すると約 $0.03(\% \Delta k/kk')$ となり、" MAGI"と実測の差（ $\pm 0.01(\% \Delta k/kk')$ ）を説明しうる量となる。本件に関しては、現在、測定に用いた寿命末期燃料集合体（PFD406）のPIE

を実施中であるため、その結果を踏まえて詳細評価を行う予定である。また、図4.2.1よりパターンA, Bとも[000]と[2C1]のC/E値は2%で一致するが、[4C1]は他の2箇所より5~7%高くなる傾向が見られた。この原因としては、反射体隣接位置での中性子束計算誤差が考えられる。

- 全炉心の燃焼反応度との比較

MK-II炉心における燃焼係数の実測値と" MAGI" 計算値の比較を表4.2.2に示す。サイクルを通じ、燃焼係数実測値は $[-1.67 \pm 0.05] \times 10^{-4} (\% \Delta k / kk' / MWd/t)$ 、C/E値は 1.03 ± 0.03 (1σ) である。

今回の試験で得られた第0、2及び4列のC/E値を体数を重みとして平均すると、パターンAが1.07、Bが0.98である。ここで、表4.2.1に示したサイクルは、ほぼ平衡に達しており、燃焼初期～燃焼中期と中期～寿命末期の燃料集合体は、ほぼ同数と考えられる。そこで、パターンAとBのC/E値を平均すると約1.03となり、燃焼係数のC/E値とほぼ一致する。これより、全炉心の燃焼反応度値のC/E値は、燃焼度依存性及び装荷位置依存性等により、0.94～1.10の範囲にある集合体単位のC/E値が相殺された値であることが確認できた。

表 4.1.1 燃焼パターンによる燃焼反応度価値測定結果の比較

測定位置	反応度(% $\Delta k/kk'$)		比	
	燃焼パターン			
	A(1~37GWd/t)	B(1~62GWd/t)		
[000]	-0.19	-0.28	0.70	
[2C1]	-0.12	-0.19	0.66	
[4C1]	-0.06	-0.08	0.72	

表 4.1.2 燃焼反応度価値測定結果相対値

測定位置	パターンA		パターンB		平均 (相対値)
	反応度 (% $\Delta k/kk'$)	相対値	反応度 (% $\Delta k/kk'$)	相対値	
[000]	-0.19	1.00	-0.28	1.00	-
[2C1]	-0.12	0.65	-0.19	0.69	0.67
[4C1]	-0.06	0.29	-0.08	0.28	0.28

表 4.2.1 MK-II炉心の燃料密度係数分布

[($\Delta k / kk'$) / ($\Delta \rho / \rho$)]

	第 0 列	第 1 列	TYPE-I	第 2 列	第 3 列	第 4 列	TYPE-II	第 5 列
J/I	1	2	3	4	5	6	7	8
上部 インシュー レーター	1 | 3.749E-05 | 1.061E-04 | 1.129E-04 | 3.572E-04 | 2.510E-04 | 2.884E-04 | 0.0 | 7.023E-05							
*	2 | 3.124E-03 | 8.708E-03 | 7.269E-03 | 2.919E-02 | 2.155E-02 | 2.788E-02 | 0.0 | 1.101E-02							
炉 心 部	3 | 4.746E-03 | 1.326E-02 | 1.128E-02 | 4.447E-02 | 3.298E-02 | 4.306E-02 | 0.0 | 1.722E-02							
	4 | 4.747E-03 | 1.327E-02 | 1.129E-02 | 4.453E-02 | 3.308E-02 | 4.330E-02 | 0.0 | 1.737E-02							
	5 | 3.115E-03 | 8.692E-03 | 7.275E-03 | 2.911E-02 | 2.159E-02 | 2.819E-02 | 0.0 | 1.128E-02							
下部 インシュー レーター	6 | 4.352E-05 | 1.170E-04 | 1.277E-04 | 3.330E-04 | 1.759E-04 | 1.757E-04 | 0.0 | 2.980E-06							

* 炉心高さ方向を 4 等分割

※ 第4列 (24体) 密度係数合計 : 1.42E+01 (% $\Delta k / kk'$)

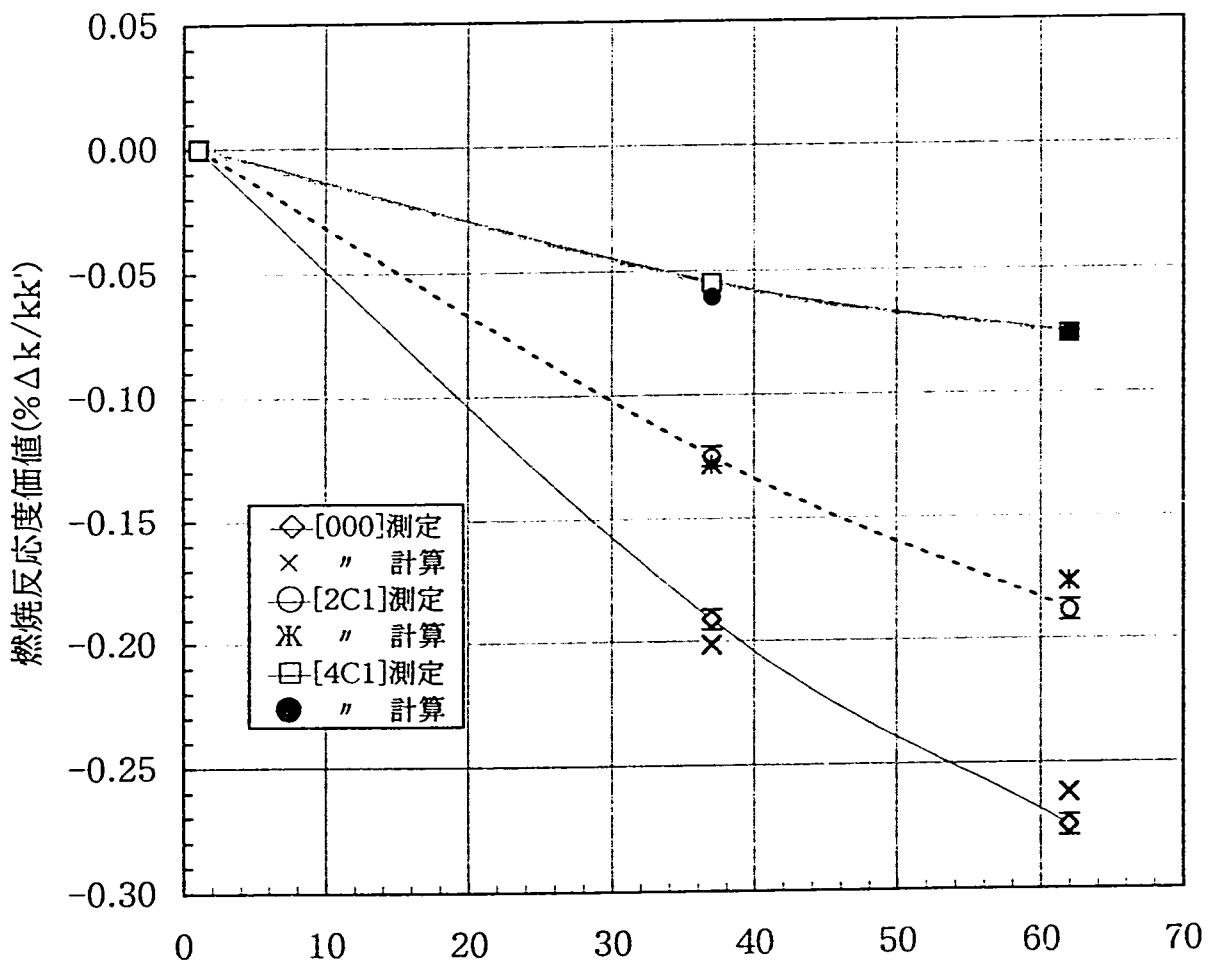
1.42E+01 × 0.05 = 0.71 (% $\Delta k / kk'$)

1集合体あたり : 0.71/24 = 0.03 (% $\Delta k / kk'$)

表 4.2.2 MK-II炉心燃焼係数の実測値と" MAGI" 計算値の比較

サイ クル	運転日数* (d)	炉心燃料平均燃焼度 (GWd/t)		燃焼係数 (%Δk/kk'/MWd/t)		
		初期	末期	実測値	"MAGI"	C/E
15	69.4	19.8	29.2	-1.72E-04	-1.72E-04	1.00
16	31.6	24.7	29.0	-1.69E-04	-1.65E-04	0.98
17	68.4	22.4	31.7	-1.70E-04	-1.75E-04	1.03
18	68.4	24.3	33.5	-1.76E-04	-1.76E-04	1.00
19	68.7	25.7	35.0	-1.73E-04	-1.73E-04	1.00
20	40.0	31.2	36.7	-1.67E-04	-1.73E-04	1.03
21	68.8	26.3	35.7	-1.68E-04	-1.70E-04	1.01
22	68.7	26.0	35.4	-1.63E-04	-1.70E-04	1.04
23	52.8	27.6	34.9	-1.62E-04	-1.73E-04	1.07
24	41.5	31.7	37.4	-1.62E-04	-1.69E-04	1.04
25	64.8	27.9	36.7	-1.60E-04	-1.70E-04	1.07
26	39.5	31.5	36.9	-1.64E-04	-1.72E-04	1.05
27	30.1	33.1	37.2	-1.68E-04	-1.72E-04	1.02
平均	—	27.1	34.6	-1.67E-04	-1.72E-04	1.03
1σ	—	—	—	0.05E-04	0.03E-04	0.03

*) EFPD



集合体平均燃焼度 (GWd/t)

図4.1.1 燃焼反応度価値の燃焼度依存性

[000]の値を1.0として規格化

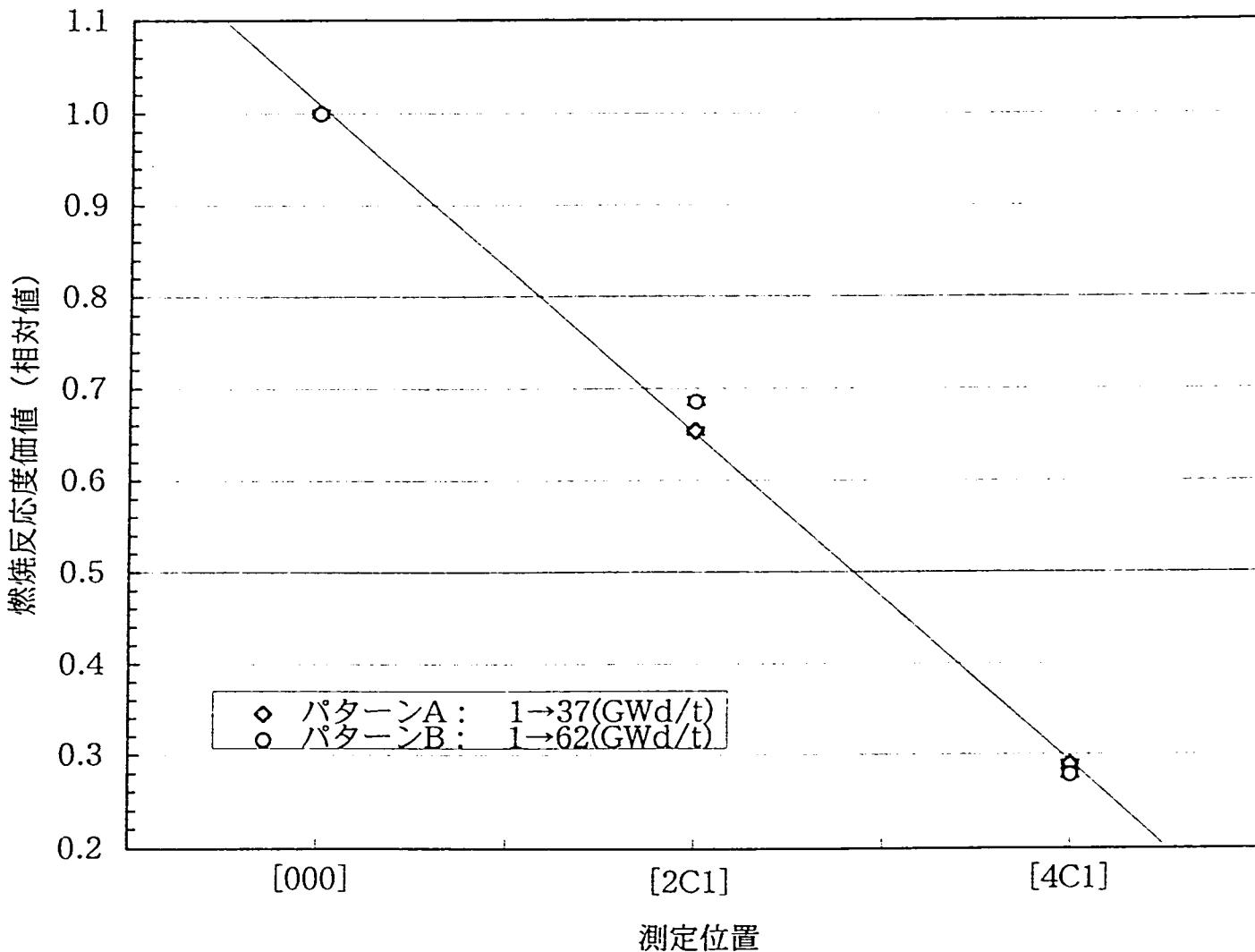


図4.1.2 燃焼反応度測定結果径方向分布（相対値）

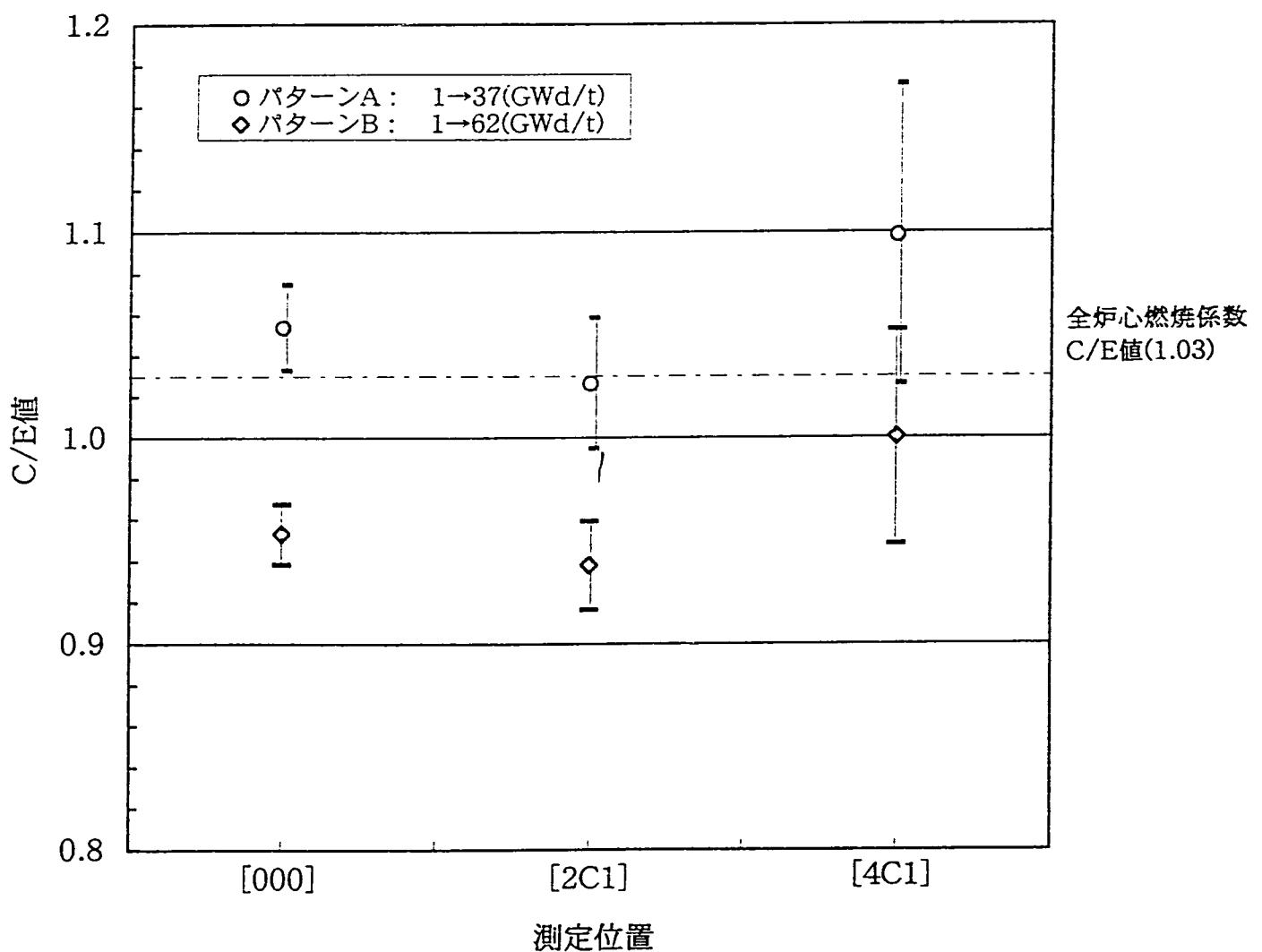


図4.2.1 燃焼反応度C/E値の測定位置依存性

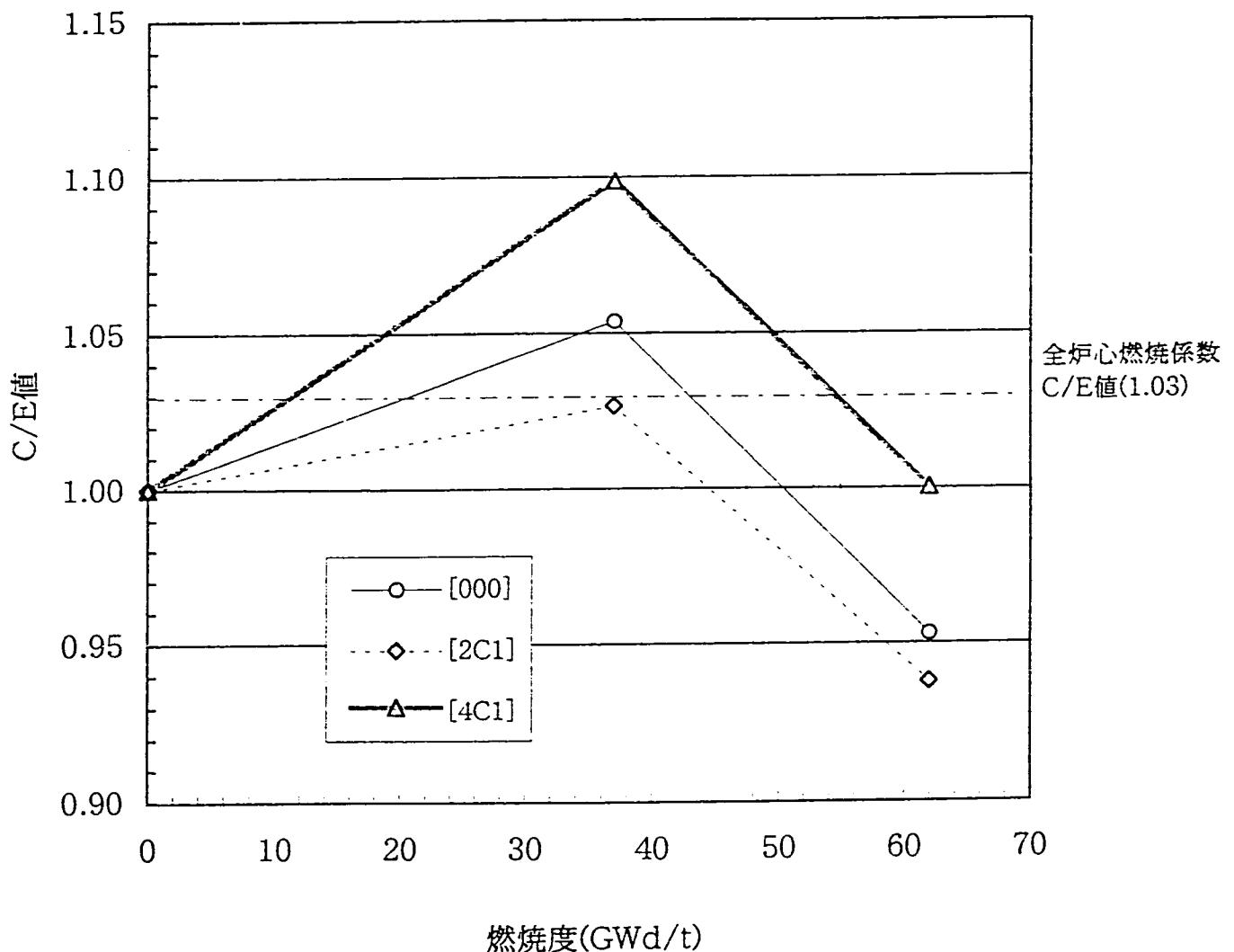


図4.2.2 燃焼反応度C/E値の燃焼度依存性

5. 結 言

本試験を通じて得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 第0列の燃焼反応度価値は、燃焼初期（約1GWd/t）から寿命末期（約62GWd/t）までの値が-0.28(% $\Delta k/kk'$)、寿命中期（約37GWd/t）までの値が-0.19(% $\Delta k/kk'$)であり、測定誤差は1～2%であった。
- (2) 上記二つの燃焼パターンの燃焼反応度価値の比は、測定位置に依らず約0.7で一定であった。また、燃焼反応度価値の測定位置依存性は燃焼パターンに依らず、第0列の値を1.00とした時、第2列は0.67、第4列は0.28であった。
- (3) 炉心管理ベースの解析を行い、測定結果と比較した結果、第0列と第2列の燃焼反応度価値のC/E値は比較的良く一致し、燃焼初期から寿命末期までの燃焼で1.03～1.05、寿命中期までの燃焼で0.94～0.95であった。C/E値の燃焼パターンによる違い（燃焼度依存性）に関しては、後日測定に用いた燃料集合体のPIE結果を踏まえて評価する予定である。また、反射体と隣接する第4列のC/E値は他2箇所と比較して5～7%高くなる傾向が見られた。
- (4) 集合体単位の燃焼反応度価値C/E値を基に全炉心の燃焼反応度価値のC/E値を概算し、炉心管理で評価しているMK-II炉心の燃焼係数のC/E値と比較した。その結果、炉心管理ベースの燃焼係数予測精度（1.03±0.03）は集合体ごとのC/E値（約0.94～1.10）が相殺された値であることが確認できた。
- (5) 燃焼反応度価値を集合体単位で求め、その燃焼度依存性や測定位置依存性を明らかにすることにより、炉心管理ベースの燃焼係数予測精度を詳細に把握するとともに、炉定数や炉心設計手法の妥当性の検証に資するデータを得ることができた。

参考文献

- 1) A. Yoshida, et al., "Core and Fuel Management Experiences of "JOYO" and its upgrading program", in PHYSOR '96, Mito, JAPAN(1996), pI-28
- 2) H. TAKANO, et al., "JAERI Fast Reactor Group Constant Set Version II", JAERI 1255, 1989