

分置

「常陽」制御棒移設炉心の制御棒価値と 反応度係数の詳細測定

〔制御棒価値詳細測定試験（その2）〕

1993年11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ください。

〒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

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, 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)

「常陽」制御棒移設炉心の制御棒価値と反応度係数の詳細測定

〔制御棒価値詳細測定試験（その2）〕

大村明子*、吉田昌宏**、島川佳郎**、
鈴木惣十**、金城勝哉***

要旨

高速実験炉「常陽」では、FBRの燃料・材料開発のための照射ベットとしての性能向上計画（MK-III計画）の一環として、初臨界以来炉心第3列に対称に配置されていた6体の制御棒のうち1体を第9回定期検査において炉心第5列に移設した。そして、制御棒移設後の炉心管理及び現在計画中のMK-III移行炉心およびMK-III炉心の検討に反映させる目的で、移設前後の炉心における制御棒価値を始めとする一連の炉心特性の測定試験（制御棒価値詳細測定試験）を実施した。

今回の試験を通じて得られた結果は以下の通りである。

- ロッドドロップ法では前回の経験を踏まえて試験を実施したことにより、精度上問題となっていた中性子源効果の低減化が図られた。
- 移設制御棒の反応度価値が従来の約1/3に下がった。移設を含む炉心構成の変更に伴う炉内中性子束分布の変動等により、個々の制御棒価値が若干変動したこと以外、反応度係数等の炉心諸特性は制御棒移設前後で変化していないことが確認された。
- 等温温度係数測定結果は約 $-4 \times 10^{-3} \% \Delta k/k$ であり、過去の測定結果と一致した。また、過去の測定で見られた系統温度上昇時と降下時の測定結果の違い等の諸傾向の再現性も確認された。
- 流量係数については、可逆的に反応度変化をもたらすものと、非可逆的なものの2つ以上の要因が関与していることが再確認され、非可逆的な変化が生じる流量レベルがサイクルによって異なることが新たに確認された。

* 大洗工学センター 実験炉部技術課（現、技術開発部先進技術開発室）

** 大洗工学センター 実験炉部技術課

*** 大洗工学センター 実験炉部技術課（現、本社総務部訴訟対策室）

The Detailed Measurements of Control Rod Worth and the Reactivity Coefficients in the Asymmetrical Control Rods Arrangement Core of "JOYO"

The Detailed Control Rod Worth Measurement (II)

A. Omura¹⁾, A. Yoshida²⁾, Y. Shimakawa²⁾,
S. Suzuki²⁾ and K. Kinjo³⁾

The "JOYO" modification program, named the MK-III program is now under investigation. The objective of this program is to make "JOYO" more efficient irradiation facility which serve as an irradiation bed for the development of FBR fuels and materials. During the 9th annual inspection, one of six control rods has been relocated from the 3rd row to the 5th row to improve the irradiation capacity. The control rod worth and several reactivity coefficients have been measured before and after the change of the control rod arrangement in detail.

The principal results of the measurements are as follows;

- In the rod drop measurements, the effect of the relative direction of the ex-vessel neutron instrumentation system and neutron source ,which affects the accuracy of the measurements, was decreased by operating the measurements based on the experience that has obtained through the last Detailed Control Rod Worth Measurement.
- The worth of the relocated control rod has decreased to ~1/3 .
- The other core neutronics characteristics were not changed by the change of the control rod arrangement.
- The isothermal temperature reactivity coefficient for the core is $-4 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/^\circ C$, which is almost same at every duty cycle.
- It was confirmed that the flow rate reactivity coefficient consists of two independent factors, one may causes a reversible reactivity change and the other causes an irreversible reactivity change. Furthermore it is supposed that the threshold flow rate level that occurs an irreversible reactivity change is not the same throughout every duty cycle operation.

-
- 1) Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, OEC.(Present Address; Frontier Technology Development Section, Technology Development Division, OEC).
 - 2) Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, OEC.
 - 3) Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, OEC.(Present Address; Litigation Support Office, Administration Division, Head Office).

目 次

1. まえがき	1
2. 試験概要	2
2. 1 測定系	2
2. 2 炉心構成	2
2. 3 試験工程	2
3. 制御棒価値の測定	8
3. 1 試験の方法と手順	8
3. 2 データ処理	10
3. 3 試験結果	11
3. 4 考 察	12
4. 等温温度係数の測定	26
4. 1 試験の方法と手順	26
4. 2 データ処理	26
4. 3 試験結果	27
4. 4 考 察	27
5. 流量反応度係数の測定	31
5. 1 試験の方法と手順	31
5. 2 データ処理	32
5. 3 試験結果	32
5. 4 考 察	34
6. 結 言	48
謝 辞	49
参考文献	50
APPENDIX I 詳細試験工程	51
APPENDIX II 第24サイクルにおけるJOYDAS用動特性パラメータ	59
APPENDIX III 制御棒干渉効果補正係数の算出	62
APPENDIX IV ロッドドロップ法測定結果プロット図	67

表 リ ス ト

表2. 1 制御棒価値詳細測定試験実施項目	3
表3. 1 ロッドドロップ法測定結果	15
表3. 2 中性子源増倍法測定結果（基準制御棒：CR 1）	15
表3. 3 中性子源増倍法測定結果（基準制御棒：CR 5）	15
表3. 4 差換法及びペリオド法による制御棒較正曲線	16
表3. 5 ロッドドロップ法と中性子源増倍法の測定結果の比較	16
表3. 6 ロッドドロップ法とペリオド法の測定結果の比較	16
表3. 7 計算コード"CITATION"による他5本制御棒配置が異なる 場合のCR 5全反応度価値計算結果	17
表3. 8 ロッドドロップ法第23", 24サイクルの比較 (CR 2)	17
表3. 9 中性子源増倍法第23", 24サイクルの比較	17
表4. 1 第24サイクル等温温度係数測定試験各ステップの過剰反応度測定結果	28
表4. 2 第24サイクル等温温度係数測定結果	28
表4. 3 各サイクル等温温度係数測定結果	28
表5. 1 起動系核計装応答変化と投入反応度との関係	36
表5. 2 過剰反応度測定結果	36
表5. 3 第24サイクルB O C過剰反応度測定結果	36

図 リ ス ト

図2.1 「常陽」核計裝配置図	4
図2.2 「常陽」核計裝測定領域関係図	5
図2.3 MK-II炉心第24サイクル炉心構成図	6
図2.4 MK-II炉心第23" サイクル炉心構成図	7
図3.1 ロッドドロップ法の測定時の制御棒パターン	18
図3.2 制御棒較正曲線近似式の算出手順	19
図3.3 差換法による制御棒較正曲線 (CR 1)	20
図3.4 差換法による制御棒較正曲線 (CR 2)	21
図3.5 差換法による制御棒較正曲線 (CR 3)	22
図3.6 差換法による制御棒較正曲線 (CR 4)	23
図3.7 差換法による制御棒較正曲線 (CR 5)	24
図3.8 差換法による制御棒較正曲線 (CR 6)	25
図4.1 第24サイクル等温温度係数測定試験工程概略	29
図4.2 第24サイクル等温温度係数測定試験における過剰反応度測定結果	30
図5.1 流量反応度係数測定時の一次系冷却材流量の変更パターン	37
図5.2 サイクルの流量係数測定結果	38
図5.3 一次系冷却材流量と余剰反応度 (第14サイクルB O C)	39
図5.4 試験中のJOYDASトレンドグラフ (100%flow~ 65%flow)	40
図5.5 試験中のJOYDASトレンドグラフ (65%flow安定状態①)	41
図5.6 試験中のJOYDASトレンドグラフ (65%flow安定状態②)	42
図5.7 試験中のJOYDASトレンドグラフ (100%flow安定状態)	43
図5.8 試験中のJOYDASトレンドグラフ (100%flow~ 65%flow)	44
図5.9 試験中のJOYDASトレンドグラフ (65%flow安定状態③)	45
図5.10 試験中のJOYDASトレンドグラフ (65%flow安定状態④)	46
図5.11 試験中のJOYDASトレンドグラフ (65%flow安定状態⑤)	47

1. まえがき

高速実験炉「常陽」では、FBRの燃料・材料開発のための照射ベッドとしての性能向上計画（MK-III計画）の一環として、初臨界以来炉心第3列に対称に配置されていた6体の制御棒のうち1体を第9回定期検査において炉心第5列に移設した。制御棒移設に際し、制御棒移設後の炉心管理及びMK-III移行炉心、MK-III炉心の設計検討作業に反映させるため、移設前後の炉心における制御棒価値を始めとする各種反応度係数の測定を実施した。

本報告書では、制御棒を移設した最初の炉心であるMK-II第24サイクル炉心において同様の試験を実施し、その結果をまとめた。

本試験結果は、別途実施する制御棒価値の詳細計算結果と比較することにより、制御棒の反応度価値予測精度を評価する予定である。

2. 試験概要

本章ではMK-II第24サイクル炉心において実施した制御棒価値詳細測定試験の概要について述べる。なお、本書は『「常陽」制御棒対象炉心の詳細制御棒価値と反応度係数の測定：制御棒価値詳細測定試験〔その1〕』¹⁾の続報であり、「常陽」の設備概要、データ処理システム等の詳細に関してはこの報告書を参照されたい。

2.1 測定系

「常陽」プラント断面図及び核計装配置図を図2.1に示す。「常陽」は起動系核計装(ch.1, ch.2)、中間系核計装(ch.3, ch.4, ch.5)及び出力系核計装(ch.6, ch.7, ch.8)の計8つの核計装を配置しており、それらにより未臨界～定格出力までの領域の出力範囲をカバーしている。それぞれのチャンネルの測定領域関係図を図2.2に示す。制御棒価値詳細測定試験では、主に起動系核計装(ch.1, ch.2)と出力系核計装(ch.6, ch.7, ch.8)を用いて、反応度測定を実施している。

2.2 炉心構成

MK-II炉心第24サイクルの炉心構成図を図2.3に示す。また、参考としてMK-II炉心第23サイクルの炉心構成図を図2.4に示す。

MK-II炉心における制御棒はこれまで[3A3]、[3B3]、[3C3]、[3D3]、[3E3]及び[3F3]に制御棒No.1～No.6(以下、CR1～CR6)の6体が炉心中心に対し対称に配置されていたが、第24サイクルでは[3E3]に装荷していた制御棒CR5を[5F2]に移設した。なお、移設後の[3E3]にはC型特殊燃料集合体：C6Dを装荷している。

2.3 試験工程

本試験は平成4年3月14日から3月19日にかけて実施された。表2.1に制御棒価値詳細測定試験の実施項目一覧を示す。また、APPENDIX Iに詳細な工程を示す。

表 2.1 制御棒価値詳細測定試験実施項目

日時	試験項目	運転モード	1次冷却材温度	1次冷却材流量	使用核計装
3/14	差換法	低出力	250°C	100%flow	ch. 6, 7, 8 約15~85kW
	未臨界法	起動	250°C	100%flow	ch. 1, 2 5×10^4 cps
	ロッド・ドロップ法	起動	250°C	100%flow	ch. 1, 2 5×10^4 cps
3/15	ペリオド法	低出力	250°C	100%flow	ch. 6, 7, 8 約15~85kW
	ロッド・ドロップ法	起動	250°C	100%flow	ch. 1, 2 5×10^4 cps
3/16	ペリオド法	低出力	250°C	100%flow	ch. 6, 7, 8 約15~85kW
	ロッド・ドロップ法	起動	250°C	100%flow	ch. 1, 2 5×10^4 cps
3/17	流量反応度係数測定	起動	250°C	100~65%flow	ch. 1, 2 3×10^3 cps*)
3/18 ↓ 3/19	等温温度係数測定	起動 ----- 起動 ----- 低出力	170~ 250°C ----- 250°C ↓ 370°C	100%flow ----- ----- -----	ch. 1, 2 5×10^4 cps ----- ch. 1, 2 5×10^4 cps ----- ch. 6, 7, 8 約 2 kW

*) 流量反応度係数測定試験では、未臨界状態 (ch. 1 : 3×10^3 cps) にて試験を実施した。
 ただし、過剰反応度の再現性確認のため、試験前後に臨界点確認試験 (ch. 1 : 5×10^4 cps) を実施している。

(注): ch1, 2 起動系
ch3, 4, 5 中間系
ch6, 7, 8 山力系

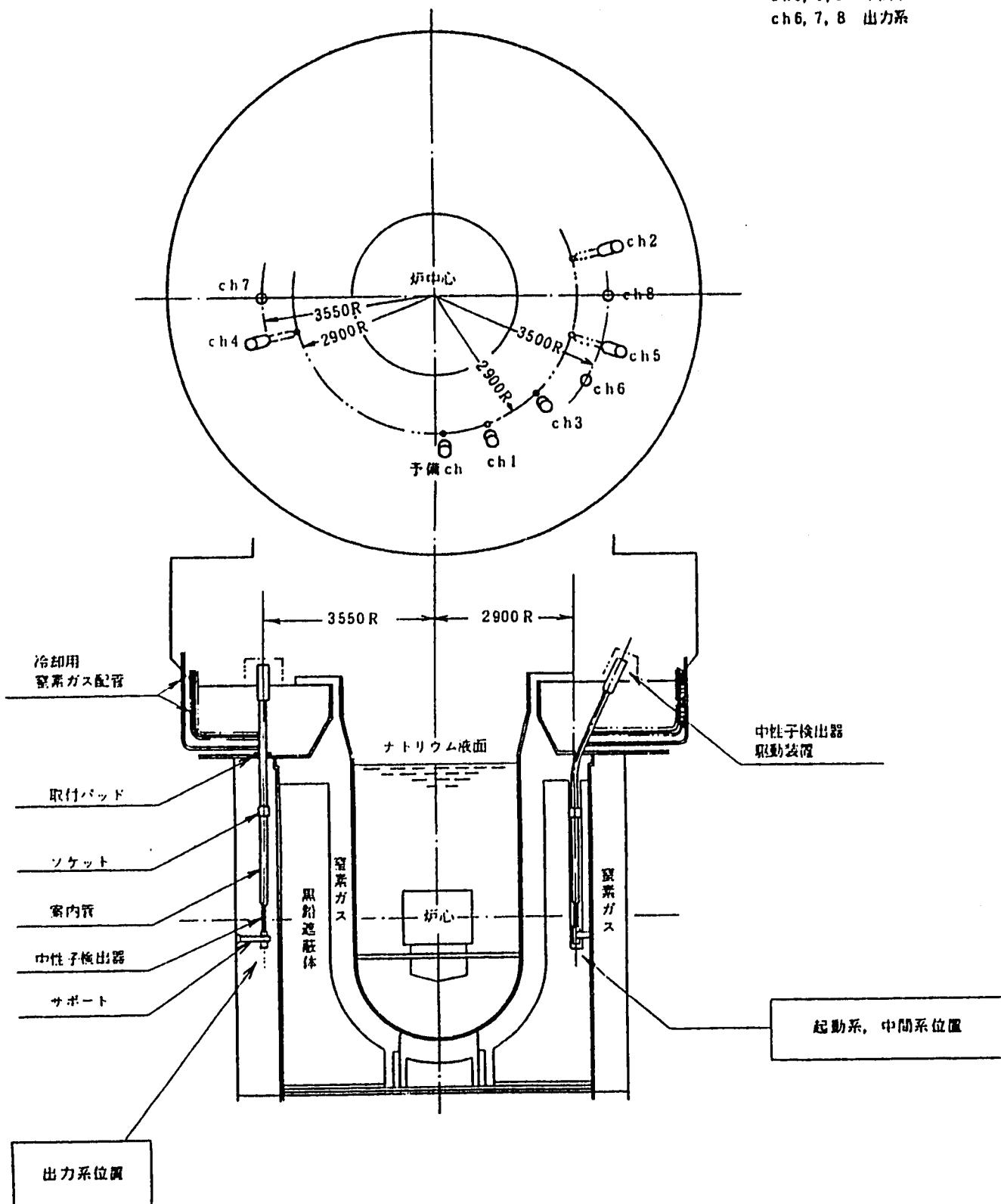


図2.1 「常陽」核計装配置図

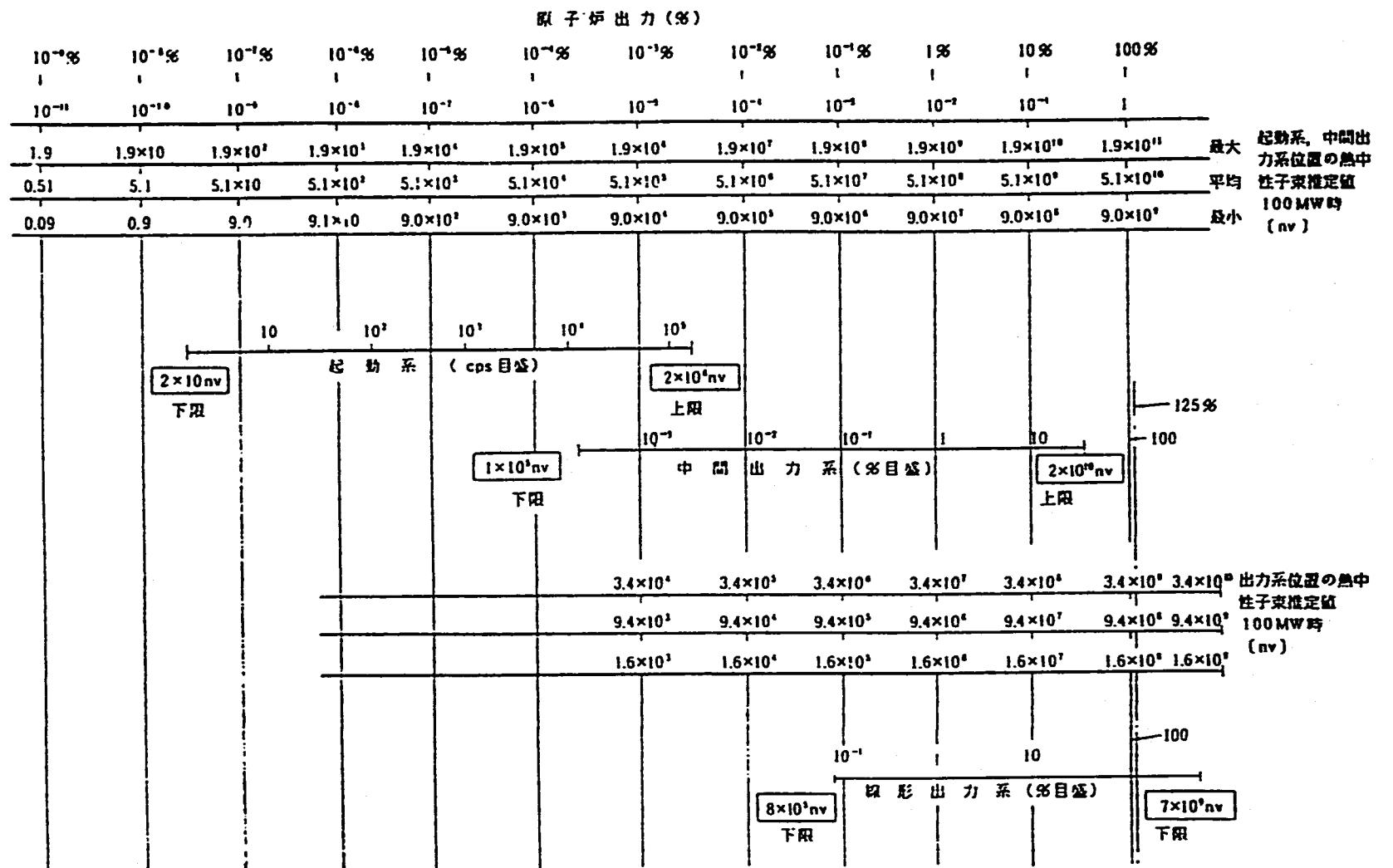
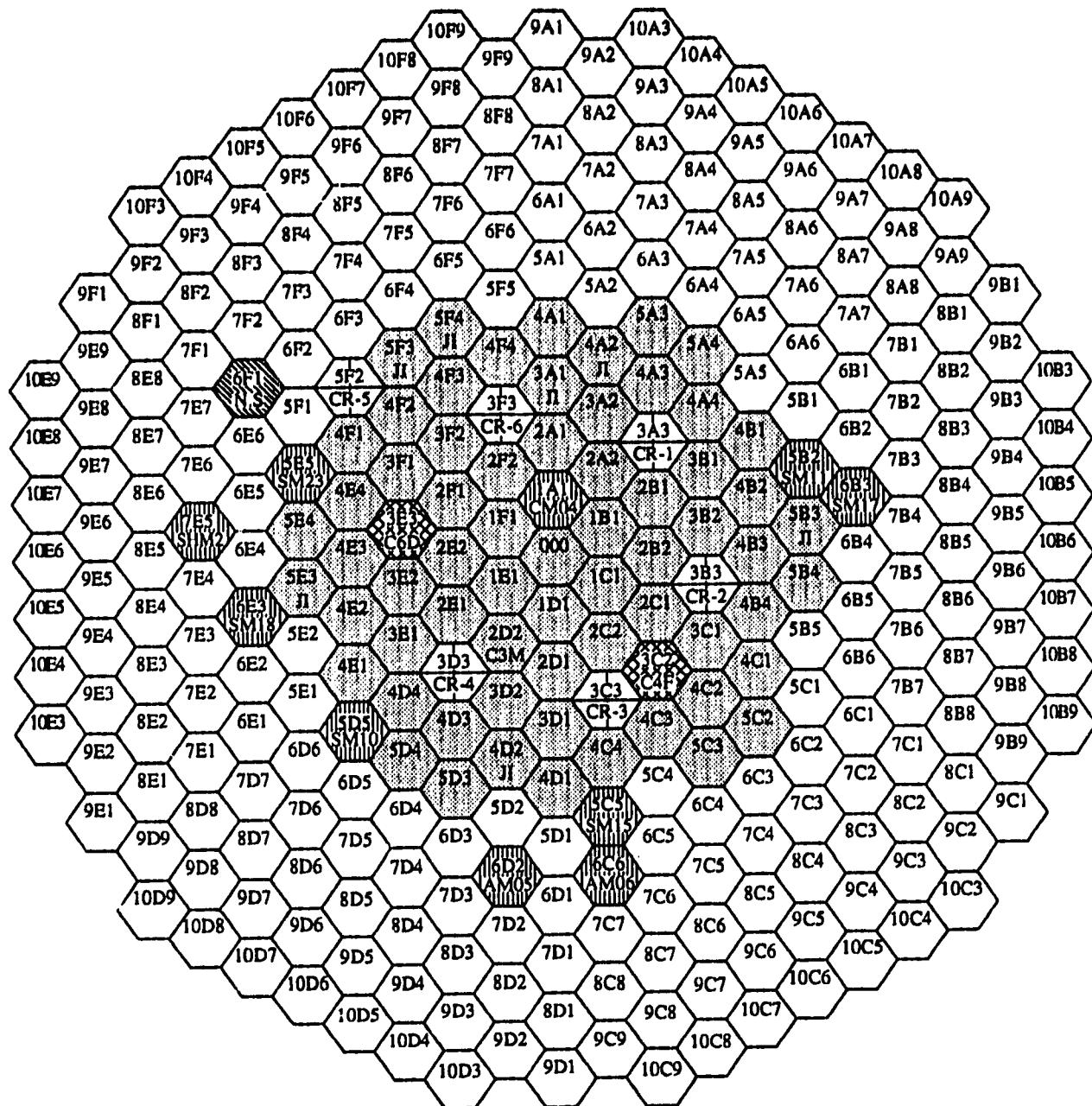
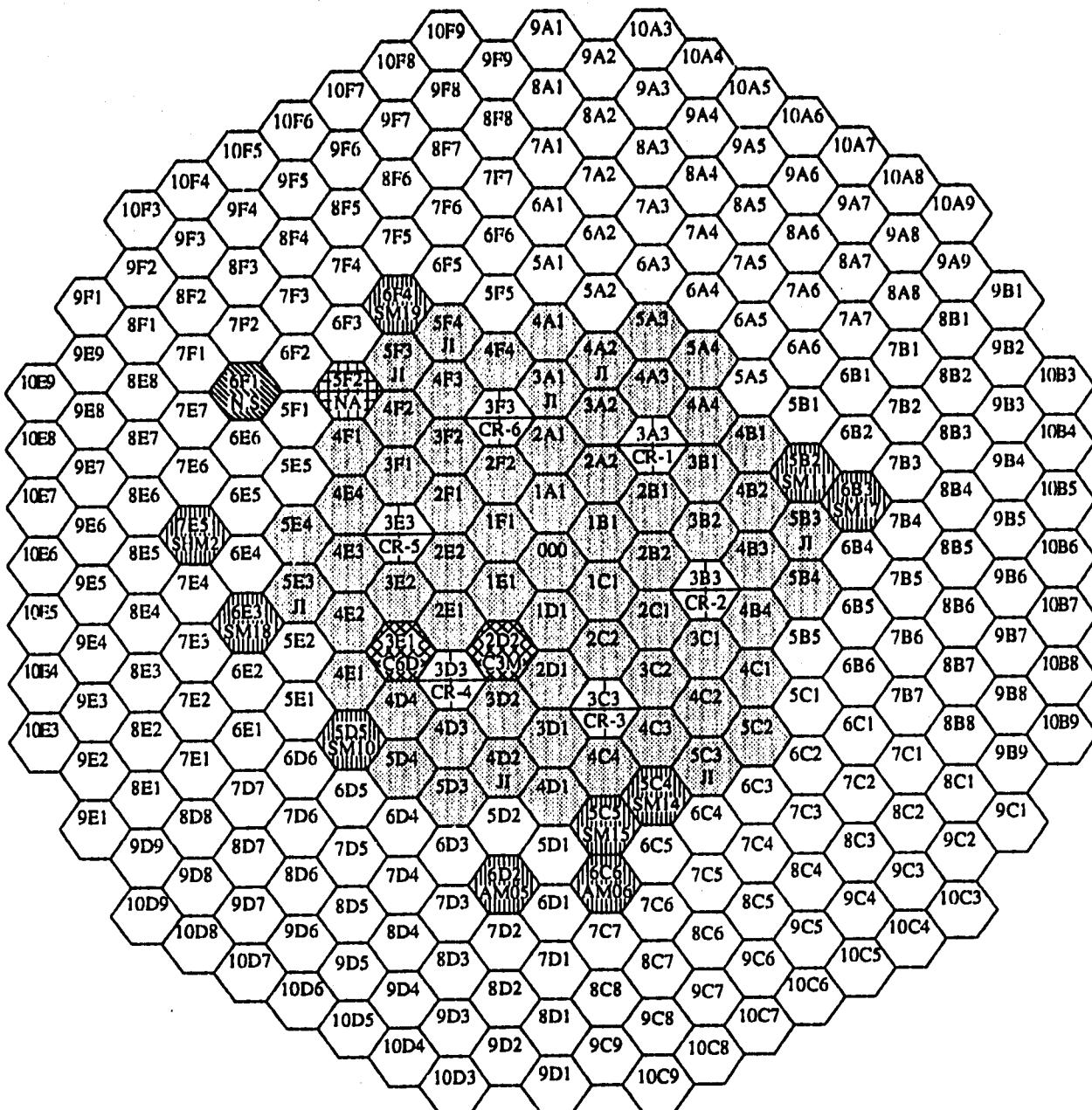


図2.2 「常陽」核計装測定領域関係図



- | | | | | | |
|--|---------|-----|--|----------|------|
| | 炉心燃料 | 65体 | | 材料照射用反射体 | 10体 |
| | 特殊燃料集合体 | 2体 | | 制御棒 | 6体 |
| | 中性子源 | 1体 | | 反射体 | 229体 |

図 2.3 MK-II 炉心第24サイクル炉心構成図



	炉心燃料	65体		材料照射用反射体	10体
	特殊燃料集合体	2体		制御棒	6体
	Naチャネル	1体		反射体	228体
	中性子源	1体			

図2.4 MK-II炉心第23"サイクル炉心構成図

3. 制御棒価値の測定

詳細解析との比較に用いる制御棒価値の測定は、ロッドドロップ法により行った。さらに、各運転サイクルで実施してきた中性子源増倍法、差換法及びペリオド法についても測定を行い、このうちの差換法に関しては、制御棒移設に伴う運用の変更を検討した。

3.1 試験の方法と手順

(1) ロッドドロップ法

ロッドドロップ法は、臨界状態において測定対象制御棒の保持電磁石を励磁断することにより制御棒を落下させ、落下前後の数秒間の30 msec毎の原子炉起動系核計装(ch. 1, ch. 2) の計数率をマルチチャンネルスケーラ(以下、MCS)で記録し、その推移から逆時間方程式を用いて投入反応度を算出するものである。

試験は以下の2パターンで実施した。

パターンA (A-n) :	測定対象制御棒 (n)	.....	全引抜
	その他の5本	.....	均等引抜き
パターンB (B-n-m) :	測定対象制御棒 (n)	.....	全引抜
	測定対象以外の1本 (m)	.....	全挿入
	その他の4本	.....	均等引抜き

制御棒パターン例を図3.1に示す。測定対象制御棒は、5列に移設したCR5と3列のCR2の2本とした。パターンBは、制御棒干渉効果による制御棒価値の違いが最も大きく現れるよう、測定対称制御棒に最も近い制御棒を全挿入したケースと最も遠い制御棒を全挿入したケースとした。

なお、パターンAの結果は試験時の制御棒配置がほぼ同じであり、同程度の制御棒干渉効果を有すると考えられる中性子源増倍法の結果と比較する。さらに今回、ペリオド法の測定においてCR5のみ、上端位置から下端位置まで測定を実施し、全反応度価値を測定したが、この測定における制御棒配置もパターンAとほぼ同じであったため、両手法の比較を行うこととした。

(2) 中性子源増倍法

中性子源増倍法は、炉心の未臨界度と核計装の応答の関係を利用し、制御棒操作前後の核計装応答の変化から投入反応度求める方法である。測定では、起動系ch. 1, ch. 2の計数

率を用いて、制御棒 6 本均等引抜き状態より測定対象制御棒を全挿入したパターンで未臨界度を測定した。

(3) 差換法及びペリオド法

従来の制御棒較正では、6 本同時差換法により各制御棒 1 本毎の較正曲線を作成してきた。しかし、移設により CR 5 の制御棒価値が低下したため、従来の 6 本同時差換法では、以下の問題が生じることがわかった。

- 6 本同時差換法では 16 クロス毎の測定を実施するため、CR 5 については一回の操作におけるストローク間隔が大きくなり、十分な数のデータが得られない。このため、少ないデータ数で制御棒較正曲線のフィッティングを行なければならなくなり、較正曲線の精度が低下する。
- 試験を通じての制御棒配置の対称性が崩れ、干渉効果補正が複雑になる。

このため、今サイクルより制御棒較正試験を 6 本同時差換法から以下の方法に変更することとした。

- CR 2、CR 5 については、1 本毎にペリオド法を実施する。
- CR 1、CR 3、CR 4、CR 6 については、測定中の制御棒パターンが単純となる 4 本同時差換法を実施する。

(a) 制御棒 4 本同時差換法

測定対象外の CR 2 と CR 5 は、試験を通じて 6 本均等引抜き位置で固定し、CR 1 と CR 4 は均等引抜き位置、CR 3 と CR 6 は全引抜きで低出力臨界状態とし、CR 1、CR 4、CR 3、CR 6 の順に交互に引抜き／挿入しながら出力系 ch. 6, ch. 7, ch. 8 の変化を記録し、ペリオド法に基づき各ステップでの投入反応度求める。

一連のデータ記録・処理は "JOYDAS" 制御棒較正システムにより行い、出力系 ch. 6, ch. 7, ch. 8 の信号をオンラインで 1 秒間隔でサンプリングし、逆時間方程式を用いて投入反応度を計算する。

試験時のプラント状態を以下に示す。

- 原子炉モード : 低出力モード
- 原子炉出力 : 低出力臨界状態 (15kW～85kW)
- 1 次冷却材流量 : 100 %
- 原子炉入口温度 : 約 250 °C

(b) ペリオド法

測定対象制御棒（CR 2 または CR 5）全引抜き、他 5 本均等引抜きで出力系 ch. 6, ch. 7, ch. 8 の最大のものが約 85kW 臨界状態とし、その状態より対象制御棒を約 -8¢ 插入する。引抜き後、核出力が十分に安定した時に、他 5 本の制御棒のうち 1 本を引抜き、初期安定状態にもどし、さらに対象制御棒を挿入する。なお、試験を通じて他 5 本の制御棒は、極力均等状態を維持するよう調整する。この一連の操作を測定範囲にわたって繰り返す。データ記録・処理は 4 本同時差換法と同じく "JOYDAS" 制御棒較正システムによりオンラインで行う。試験時のプラント状態を以下に示す。

- 原子炉モード : 低出力モード
- 原子炉出力 : 低出力臨界状態 (15kW~85kW)
- 1 次冷却材流量 : 100%
- 原子炉入口温度 : 約 250°C

3.2 データ処理

(1) ロッドドロップ法

MCS で記録した ch. 1, ch. 2 の応答をそれぞれ測定系の数え落し率の補正および 7 ポイント平滑法に基づく平滑処理を行った後、逆時間方程式に基づいて差分化し、制御棒価値に換算する。

データの統計精度向上及び中性子源影響排除の観点から落下前の核計装の計数率は高い方が望ましいが、その反面、数え落し効果が大きくなる。今回の試験では、23" サイクル試験の経験を踏まえ、落下前の計数率を約 5×10^4 cps (ch. 1) に設定した。しかし、この計数率では未臨界度を算出する上で重要な落下後のデータのばらつきが大きいため、EOD (End of Drop) の瞬間ににおける未臨界度の最確値の決定には Carpenter²⁾ の方法を使用した。Carpenter の方法により求められる係数 C は以下の式で定義される。

$$C = 1 / (\rho - 1) \quad \rho : \$ \text{ 単位で表した未臨界度}$$

(2) 中性子源増倍法

一点炉近似を用い、炉心状態の変化を通じて検出効率が一定とみなせる場合、未臨界状態において炉心の未臨界度 (ρ) とその時の計数率 (C) の間には以下の関係が成立する。

$$\rho_k = \frac{C_x}{C_k} \rho_x$$

ここで、添字 x、k は特定の炉心状態を示す。本手法は基地の炉心状態 (x) における計数率と未臨界度の関係を評価し、それを基に未知の炉心状態 (k) における未臨界度を評価するものである。「常陽」では制御棒 6 本均等引抜き臨界状態 (ch. 1 の計数率約 5×10^4 cps) より制御棒 1 本を全挿入し、その時の反応度変化より制御棒 1 本毎の全反応度価値を測定している。

この測定より CR j の 0 mm～臨界位置までの反応度価値 : $\rho_0(j)$ を求め、これに差換法及びペリオド法に基づく制御棒較正曲線をによる臨界位置～ 650 mmまでの反応度価値 : $\rho_c(j)$ を加えることにより CR j の全反応度価値 : $\rho_t(j)$ ($= \rho_c(j) + \rho_0(j)$) を評価する。

試験では、基準制御棒を選択し、制御棒 6 本均等引抜き臨界状態より基準制御棒を 3 段階に分けて挿入し、各挿入状態での未臨界度を求め、その平均値より定数 A を評価する。今回の試験では基準制御棒を第 3 列の CR 1 及び第 5 列に移設した CR 5 の 2 種類とし、それぞれ -50 mm, -75 mm, -85 mm 挿入時の ch. 1, ch. 2 の計数率を測定した。

(3) 差換法及びペリオド法

4 本同時差換法及びペリオド法の測定結果は、“JOYDAS”の制御棒較正システムにおいて逆時間方程式によりデータ処理を行う。このシステムに用いた動特性パラメータを APPENDIX II に示す。

差換法及びペリオド法で求めたデータは、較正範囲を 300 mm～ 650 mm とし、制御棒 6 本均等引抜き状態を基準とした制御棒干渉効果補正を行った上で制御棒較正曲線に変換している。較正曲線作成のフローを図 3.2 に示す。なお、干渉効果補正の詳細を APPENDIX III に示す。

3.3 試験結果

(1) ロッドドロップ法

各測定パターンの測定結果を表 3.1 に示す。なお、各ケースの計数率測定結果、係数 C の評価結果及びそれに基づき評価した投入反応度の時間変化を APPENDIX IV に示す。パターン B では、測定対象制御棒に隣接した制御棒を全挿入したケースと最も遠い制御棒を全挿入したケースの制御棒価値の差が CR 2 で約 3 %、CR 5 で約 20 % であり、有意な干渉効果が測定できた。

(2) 中性子源増倍法

中性子源増倍法により測定し、CR 1 を基準制御棒としてデータ処理した結果を表 3. 2 に、また、CR 5 を基準制御棒とした結果を表 3. 3 に示す。

CR 1 を基準制御棒とした場合の測定結果は、6 本とも全て CR 5 を基準とした時より 7 ~ 8 % 大きかった。これは第 3 列と第 5 列で制御棒較正曲線のカーブ形状が異なるためであり、各列毎に基準制御棒を設定し、測定・データ処理を行うことが必要であることを確認した。

(3) 差換法及びペリオド法

差換法及びペリオド法により評価した CR 1 ~ CR 6 の較正曲線の近似式と係数を表 3. 4 に、また、較正曲線図を図 3. 3 に示す。今回行った各種反応度係数測定試験での制御棒位置からの過剰反応度の算出にはこの結果を用いた。

3.4 考 察

(1) 中性子源効果について

ロッドドロップ法の測定結果において、ch. 1 の信号を処理した測定結果と ch. 2 の信号を処理した結果の差は、CR 2 では 2 % 以下、CR 5 ではパターン A - 5 で約 10 % と大きかったものの、他パターンでは 5 % 以下で一致した。中性子源増倍法の結果も ch. 1 と ch. 2 の結果は 5 % 以内で一致しており、前回の第 23" サイクルでの試験結果と比較して ch. 1 と ch. 2 の結果が良く一致した。この原因には以下の 2 つが考えられる。

- ロッドドロップ法では、落下前の起動系核計装の計数率を高くしたことにより、中性子源効果の影響が小さくなった。
- 中性子源の近傍に制御棒 (CR 5) が移設されたため、中性子源が炉心核特性に与える影響が小さくなった。

これらにより前回の測定で問題となった中性子源効果の影響が緩和されたものと考えられる。そこで、(2)、(3)における他手法との比較では、ロッドドロップ法、中性子源増倍法とも ch. 1 と ch. 2 の測定結果の平均値を使用することとした。

なお、A - 5 で ch. 1 と ch. 2 の結果の差が大きかった原因については検討する必要があるが、

- 中性子源増倍法では、ch. 1 と ch. 2 の結果は良く一致した。
- A - 5 では ch. 1 の結果が、ch. 2 より 10 % 小さかったのに対し、それ以外は 全て

ch. 1の結果がch. 2と同じかあるいは大きい傾向を示している。

ことより、A - 5 の測定において、何らかの問題、例えば測定系にノイズがあった等の可能性が考えられる。

(2) ロッドドロップ法と中性子源増倍法との比較

表3. 5 にロッドドロップ法と中性子源増倍法の測定結果の比較を示す。

CR 2 は同じ第 3 列の CR 1 を基準としてデータ処理を行った方が、異なる列の制御棒を基準とした場合よりも良い一致を示した。しかし、CR 5 は第 3 列と第 5 列を基準とした場合の差は、(1)で述べた ch. 1 と ch. 2 の違いと同程度であり、どちらが適切とは言えなかった。この点からも、A - 5 の測定に何らかの問題があったのではないかと考えられる。それを考慮しても、中性子源増倍法とロッドドロップ法の測定結果は 6 % 以内で一致しており、第 23" サイクルで見られた 12% の差¹⁰⁾ は大幅に改善された。この理由としては、前述の中性子源効果の低減が考えられる。

(3) ロッドドロップ法とペリオド法との比較

ペリオド法とロッドドロップ法の CR 5 の全反応度価値測定結果の比較を表 3. 6 に示す。

両者の差は 10.5% と大きいが、この原因として、測定時の制御棒干渉効果の違いと測定誤差が考えられる。

ロッドドロップ法 A - 5 において、他 5 本の制御棒は約 410mm 均等引抜き位置にあったが、ペリオド法では他 5 本制御棒は 410 ~ 440mm 位置まで変化しており、試験を通じて平均的に 20mm 程度の違いがあった。制御棒配置の違いによる CR 5 の全反応度価値の変化を評価するため、計算コード "CITATION" により、他 5 本制御棒 400 及び 450mm 均等引抜き状態での CR 5 の全反応度価値を計算した。結果を表 3. 7 に示す。これより、他 5 本の引抜き位置が 50mm 異なる場合の全反応度価値の差は、約 2 % であり、20mm 程度では、全反応度価値の差は高々 1 % 程度と予想される。

また、ペリオド法の測定では、CR 5 を上端から下端位置まで挿入し、操作毎の投入反応度測定結果を合計して全反応度価値を評価したため、この結果に制御棒位置読み取り誤差は含まれない。誤差として考えられるものは、測定時の系統温度変動、"JOYDAS" 制御棒較正システム誤差及び制御棒駆動機構延長管の熱変位等であるが、これらは 2 % 程度と評価されている³⁾。

以上 2 点を考慮しても測定結果の 10.5% の差は説明しきれず、前述の A - 5 の測定に問

題があった可能性が高い。

(4) 制御棒移設前後の制御棒価値の比較

ロッドドロップ法と中性子源増倍法による制御棒価値測定結果の制御棒移設前後の比較をそれぞれ表3.8、表3.9にまとめた。

移設前の解析通りCR5の制御棒価値は移設により約1/3に低下し、他の制御棒については移設前後で大きな変化がなかったことが確認できた。

表 3.1 ロッドドロップ法測定結果

測定対象 制御棒	測定ケース	係数C		制御棒価値 (% $\Delta k/kk'$)		
		ch. 1	ch. 2	ch. 1	ch. 2	平均
CR 2	A - 2	0.175	0.177	2.05	2.03	2.04
	B - 2 - 5	0.177	0.180	2.03	2.00	2.02
	B - 2 - 1	0.181	0.184	1.97	1.94	1.96
CR 5	A - 5	0.378	0.357	0.72	0.79	0.76
	B - 5 - 2	0.353	0.353	0.80	0.80	0.80
	B - 5 - 6	0.417	0.428	0.61	0.58	0.60

表 3.2 中性子源増倍法測定結果（基準制御棒：CR 1）

測定対象制御棒 起動計核計装		CR 1	CR 2	CR 3	CR 4	CR 5	CR 6
制御棒 価値 (% $\Delta k/kk'$)	ch. 1	2.04	2.00	1.95	2.17	0.78	2.14
	ch. 2	1.94	1.99	2.01	2.26	0.78	2.06
	平均	1.99	1.99	1.98	2.21	0.78	2.10

表 3.3 中性子源増倍法測定結果（基準制御棒：CR 5）

測定対象制御棒 起動計核計装		CR 1	CR 2	CR 3	CR 4	CR 5	CR 6
制御棒 価値 (% $\Delta k/kk'$)	ch. 1	1.90	1.86	1.82	2.02	0.72	1.99
	ch. 2	1.79	1.83	1.85	2.08	0.72	1.89
	平均	1.85	1.85	1.83	2.05	0.72	1.94
基準制御棒を替えた時の平均 値同士の比 (基準=CR 5 / 基準=CR 1)		0.93	0.93	0.92	0.93	0.92	0.92

表3.4 差換方及びペリオド法による制御棒較正曲線

CR 1		CR 2		CR 3	
C(1, 0)	6.6798519E+00	C(2, 0)	-8.7857648E-01	C(3, 0)	7.9657908E-01
C(1, 1)	-9.4886756E-02	C(2, 1)	-1.3298731E-02	C(3, 1)	-3.2345723E-02
C(1, 2)	4.1747287E-04	C(2, 2)	7.119336 E-05	C(3, 2)	1.5631778E-04
C(1, 3)	-8.4982563E-07	C(2, 3)	-1.2646730E-07	C(3, 3)	-3.1262149E-07
C(1, 4)	8.4278362E-10	C(2, 4)	9.8195877E-11	C(3, 4)	2.9749990E-10
C(1, 5)	-3.3133534E-13	C(2, 5)	-2.8906033E-14	C(3, 5)	-1.1262727E-13
CR 4		CR 5		CR 6	
C(4, 0)	5.1850894E-01	C(5, 0)	1.5045606E-01	C(6, 0)	-9.3730179E-01
C(4, 1)	-3.3048043E-02	C(5, 1)	-9.3664764E-03	C(6, 1)	-1.3784231E-02
C(4, 2)	1.6425172E-04	C(5, 2)	4.5628644E-05	C(6, 2)	7.5976485E-05
C(4, 3)	-3.3134157E-07	C(5, 3)	-9.0192162E-08	C(6, 3)	-1.4002946E-07
C(4, 4)	3.1675669E-10	C(5, 4)	8.4795442E-11	C(6, 4)	1.1475145E-10
C(4, 5)	-1.2050434E-13	C(5, 5)	-3.1956155E-14	C(6, 5)	-3.6467369E-14

$$\rho = \sum_{i=0}^5 C(i, j) \times X^i \quad \rho : \text{制御棒価値} (\% \Delta k / kk')$$

j : 制御棒番号 (CR j)

X : 制御棒引抜き位置 (mm)

表3.5 ロッドドロップ法と中性子源増倍法の測定結果の比較

測定方法	ロッドドロップ法		中性子源増倍法			
	バーン A-2	バーン A-5	基準制御棒: CR 1	基準制御棒: CR 5	CR 2	CR 5
測定対象制御棒	CR 2	CR 5	CR 2	CR 5	CR 2	CR 5
制御棒価値 (% $\Delta k / kk'$)	2.05	0.76	2.00	0.78	1.85	0.72
ロッドドロップ法との差(%)	—	—	2.4	2.6	9.8	5.3

表3.6 ロッドドロップ法とペリオド法の測定結果の比較

測定方法	ロッドドロップ法	ペリオド法測定結果
CR 5 全制御棒価値(% $\Delta k / kk'$)	0.76	0.68
両手法の測定結果の差 (%)	10.5	

表3.7 計算コード"CITATION"による他5本制御棒配置が異なる場合のCR5全反応度価値計算結果

		他5本制御棒引抜き位置	
		400mm均等	450mm均等
CR 5	全引抜き keff	0.996019	1.006386
	全挿入 keff	0.989881	1.000245
	反応度価値(%Δk/kk')	0.623	0.610

表3.8 ロッドドロップ法第23", 24サイクルの比較 (CR 2)

運転サイクル	第23" サイクル			第24サイクル			
	起動系各計装	ch. 1	ch. 2	平均	ch. 1	ch. 2	平均
反応度価値(%Δk/kk')	2.19	1.92	2.06	2.05	2.03	2.04	

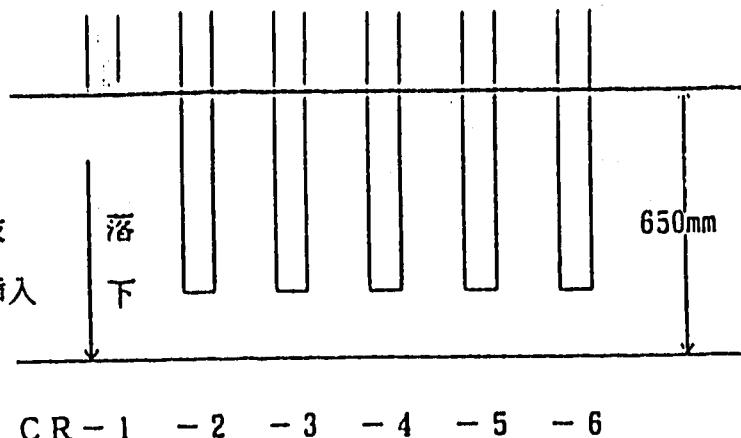
表3.9 中性子源増倍法第23", 24サイクルの比較

測定対象制御棒 運転サイクル	CR 1	CR 2	CR 3	CR 4	CR 5	CR 6
第23" サイクル	2.12	2.05	1.85	1.85	2.01	2.20
第24サイクル	1.99	1.99	1.98	2.21	0.72	2.10
第24/第23" サイクル	0.94	0.97	1.07	1.19	0.36	0.95

※ データはch. 1とch. 2の平均を用い、第24サイクルではCR 5のみ基準制御棒をCR 5とし、他はみなCR 1を基準制御棒としたものである。

制御棒パターンA

測定対象の制御棒 全引抜
その他の5本 均等挿入



制御棒パターンB

測定対象の制御棒 全引抜
測定対象外の1本 全挿入
その他の4本 均等挿入

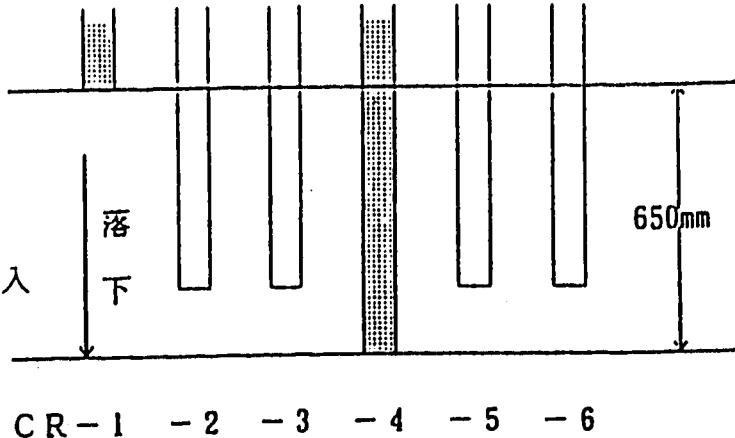


図3.1 ロッドドロップ法の測定時の制御棒パターン

(例としてCR-1を測定対象にした場合を示す。)

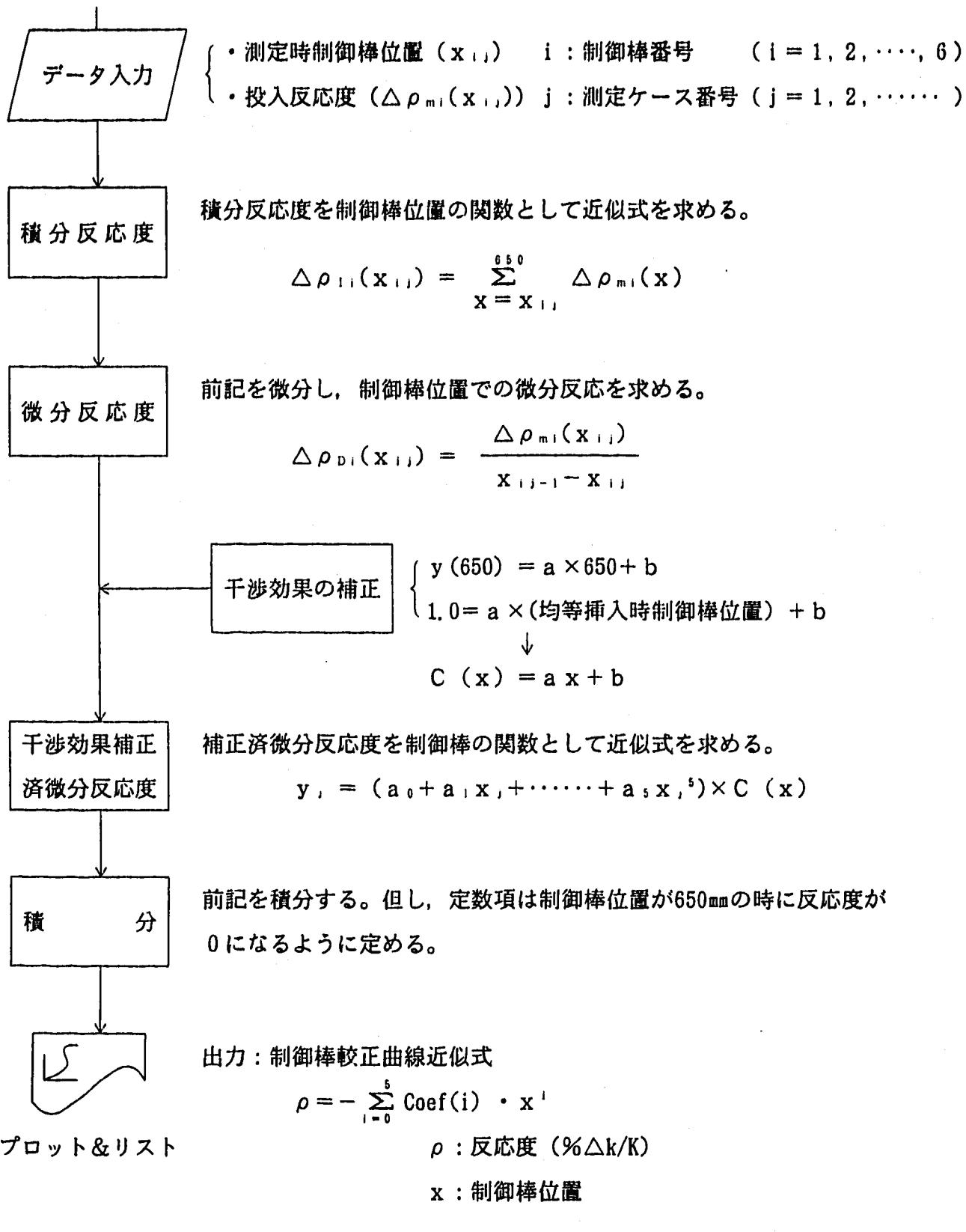


図3.2 制御棒較正曲線近似式の算出手順

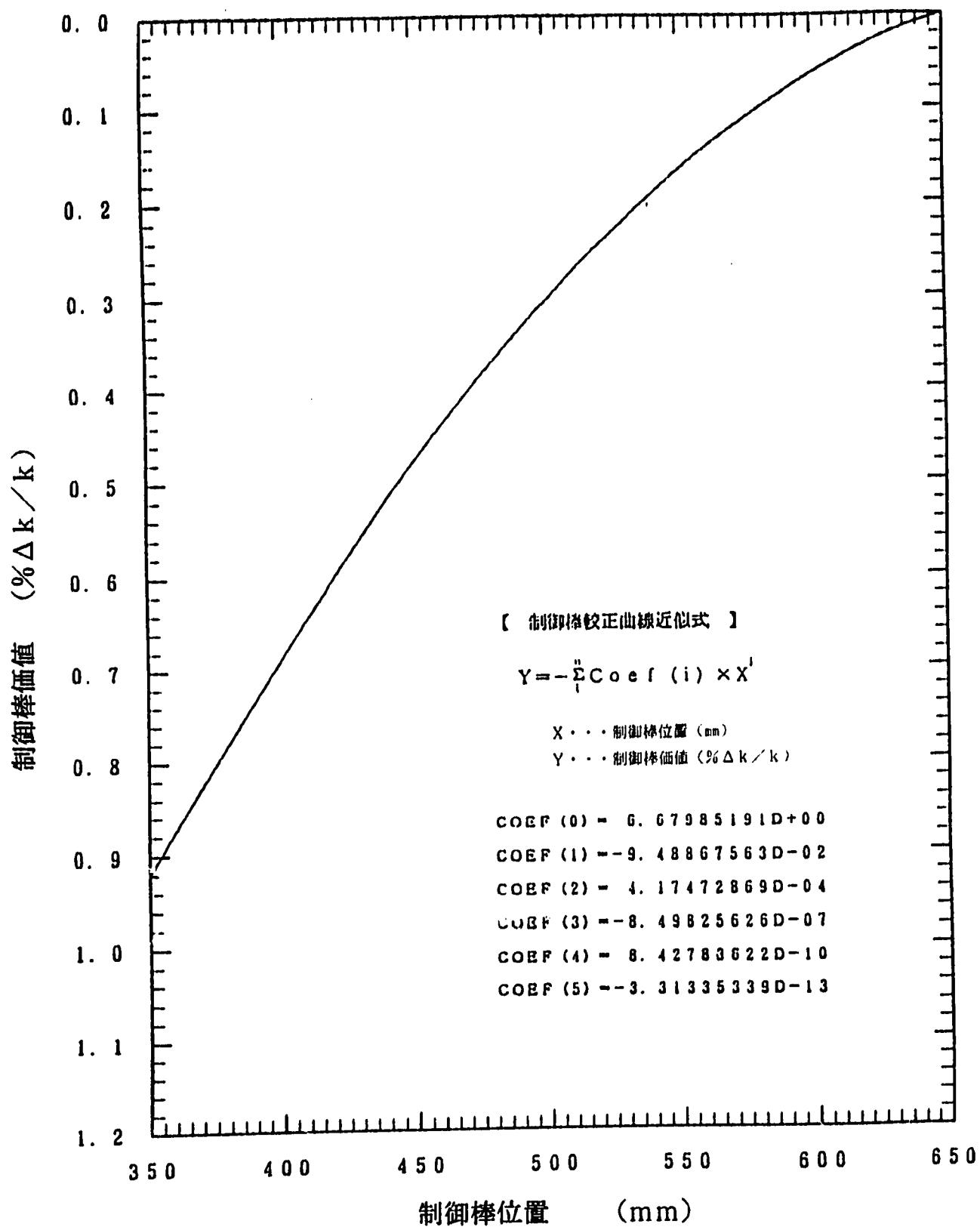


図3.3 差換法による制御棒校正曲線 (CR 1)

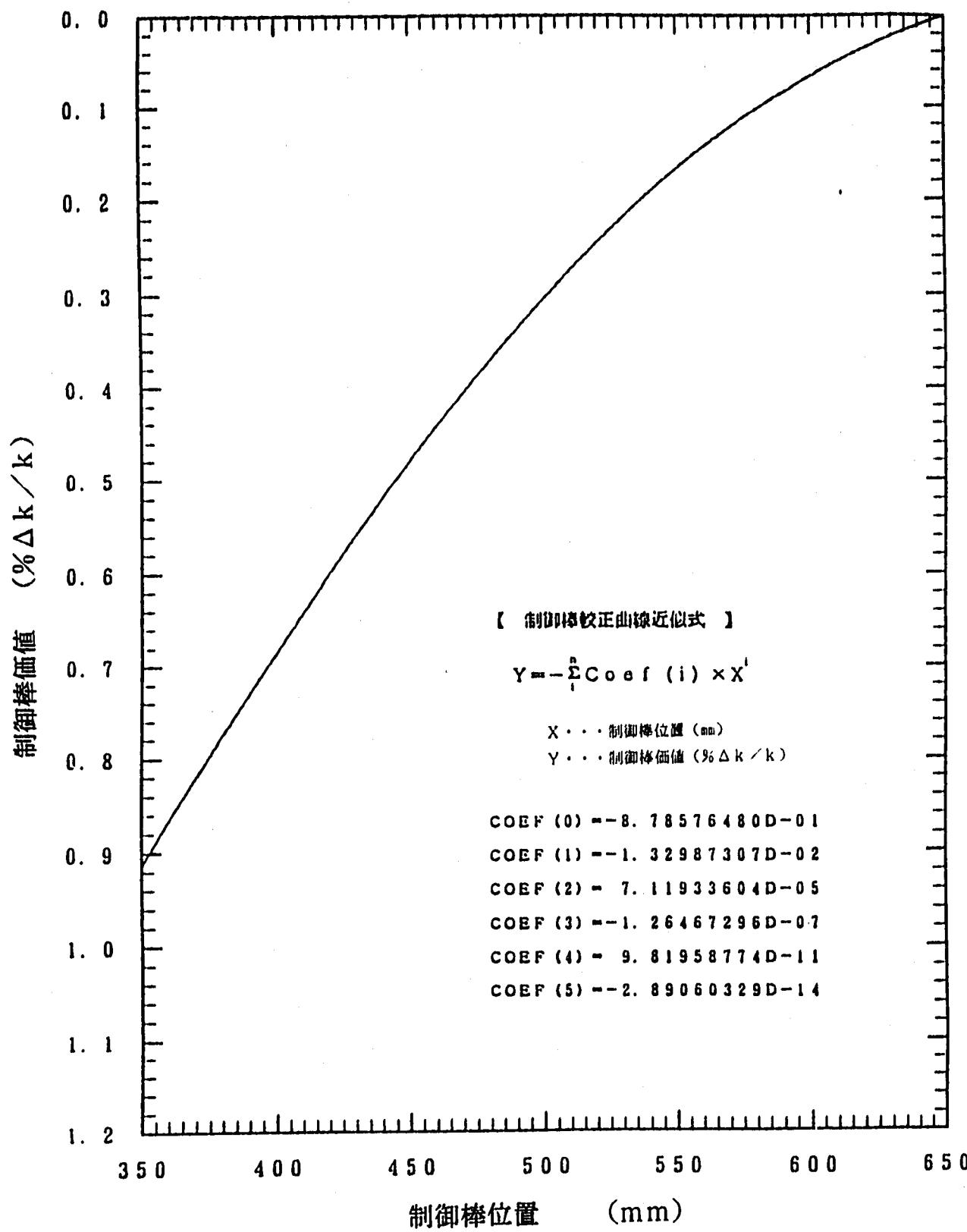


図3.4 差換法による制御棒較正曲線 (CR 2)

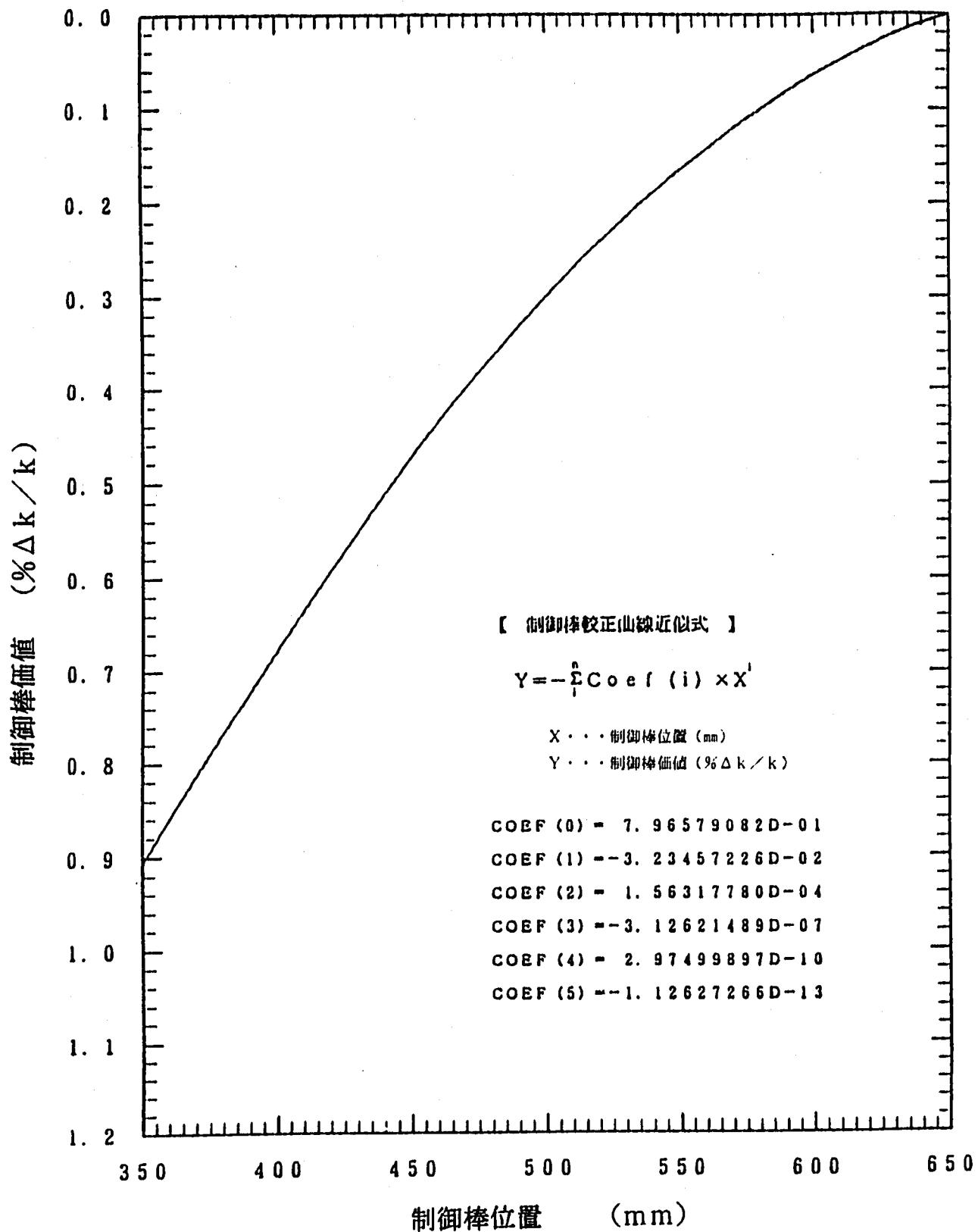


図3.5 差換法による制御棒較正曲線 (CR 3)

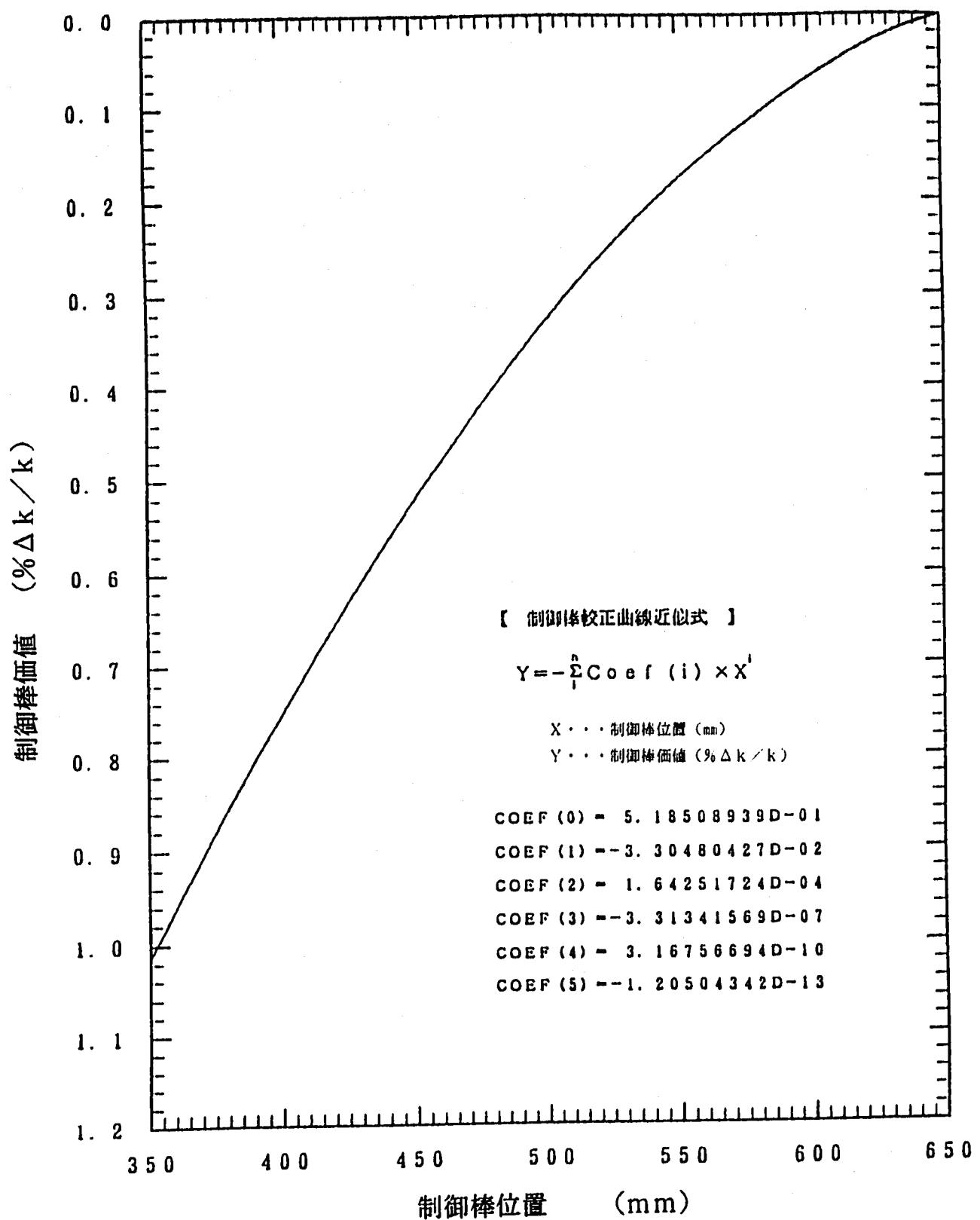


図 3.6 差換法による制御棒較正曲線 (CR 4)

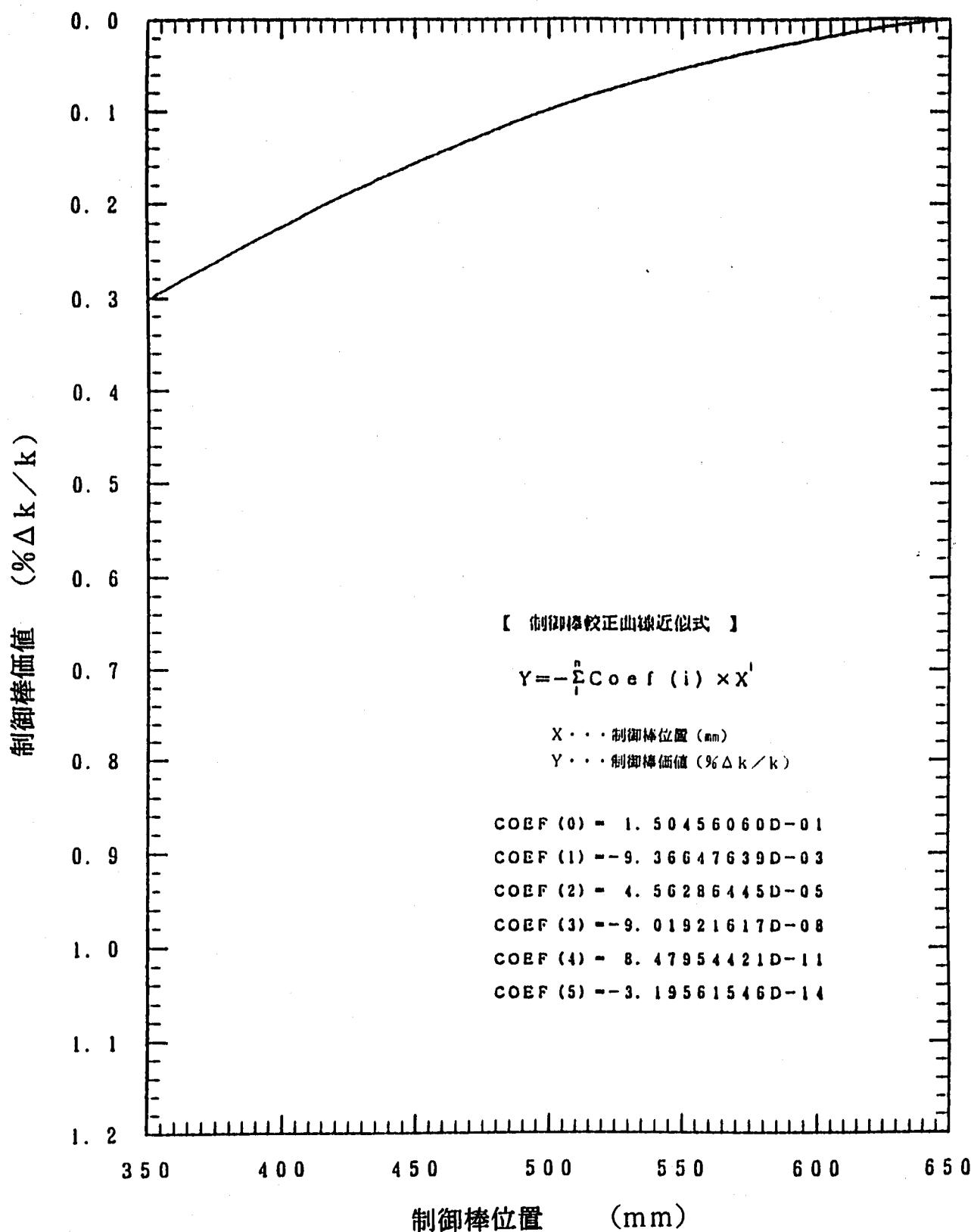


図3.7 差換法による制御棒較正曲線 (CR 5)

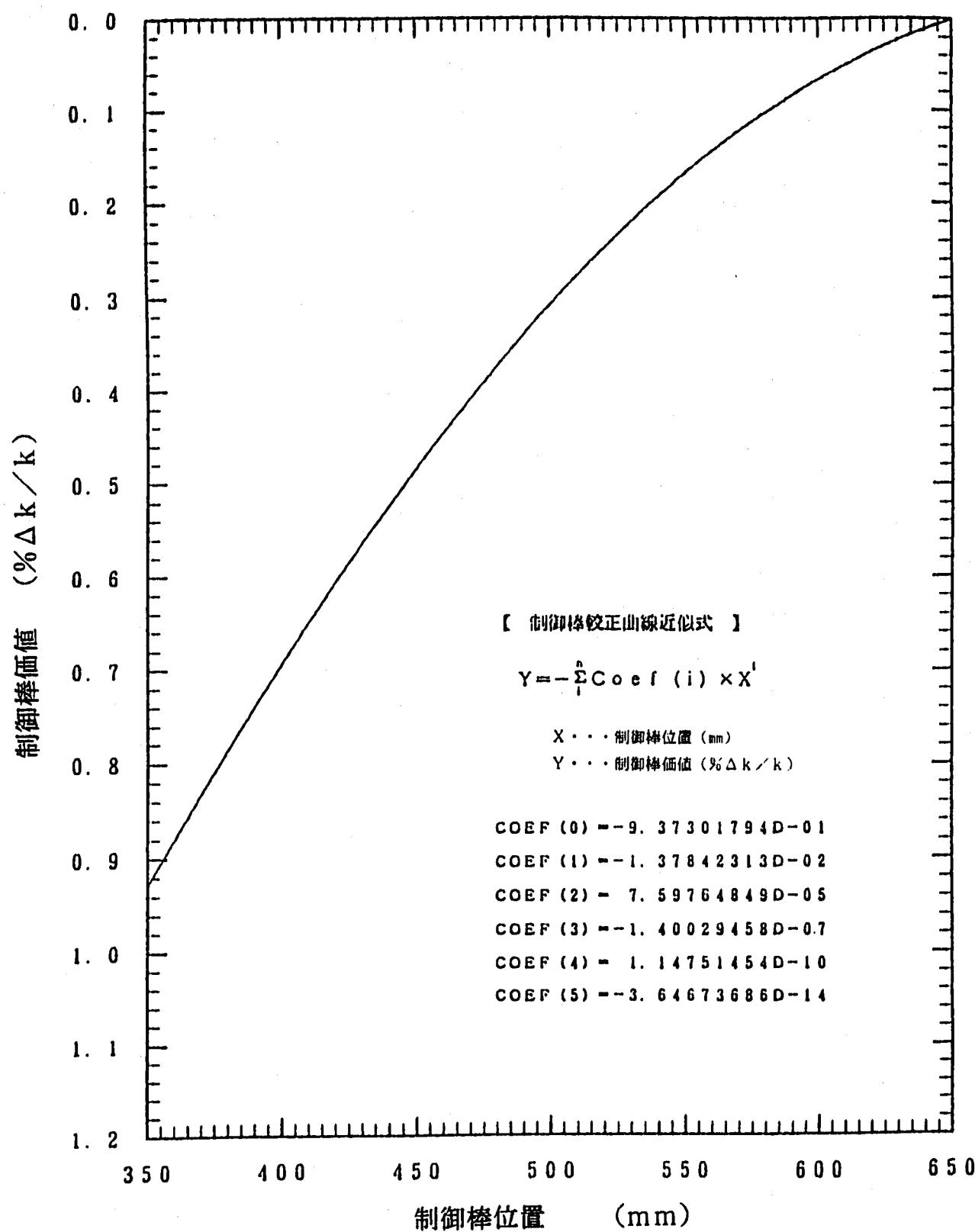


図3.8 差換法による制御棒較正曲線 (CR 6)

4. 等温温度係数の測定

等温温度係数は、炉心の均一な温度変化に対する過剰反応度の変化率として定義される量である。等温温度係数は、原子炉の自己制御性の観点から安全上重要な核特性であり、負の値（原子炉温度の上昇に対し炉心の過剰反応度が減少する）であることを確認する必要がある。

「常陽」では、MK-II炉心第12サイクル以降、等温温度係数の測定が全定格サイクルにおいて実施され、 $-4 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/\text{°C}$ 程度のほぼ一定の測定値が得られている。今回、MK-II炉心第24サイクルにおいても測定し、その結果を制御棒移設前の結果と比較・評価した。

4.1 試験の方法と手順

MK-II炉心第24サイクルの等温温度係数の測定は、平成4年3月18日から3月19日にかけて実施された。本試験における試験工程の概略は次の通りである（図4.1参照）。等温温度係数は、1次冷却材温度を変化させ、炉心を等温状態に保持し、炉心温度の変化に対する過剰反応度の変化から測定した。

(1) 温度降下 ($250\text{°C} \rightarrow 170\text{°C}$) : 温度変化率、約 -6.5°C/h

1次冷却材温度を 250°C から約 10°C 毎に 170°C まで降下させ、各ステップで1次冷却材温度及び過剰反応度を測定した。降温操作は、2次系予熱ヒータの制御及び主冷却器のベーン開度操作による空気流量の制御により行った。

(2) 温度上昇 ($170\text{°C} \rightarrow 250\text{°C}$) : 温度変化率、約 $+8.5\text{°C/h}$

2次系予熱ヒータの制御及び一部核加熱により昇温操作を行い、1次冷却材温度 250°C 復帰時の過剰反応度を測定した。

(3) 温度上昇 ($250\text{°C} \rightarrow 370\text{°C}$) : 温度変化率、約 -19.4°C/h

さらに、核加熱による 370°C への系統昇温後、1次冷却材温度及び過剰反応度の測定を行った。

4.2 データ処理

等温温度係数 : C ($\% \Delta k/k/\text{°C}$) は、過剰反応度 : ρ ($\% \Delta k/k$) と1次冷却材温度 : T (°C) の測定データを、最小二乗法を用いて次の1次式にフィッティングして求めた。ここで、 ρ_0 は定数である。

$$\rho(T) = C \times T + \rho_0 \quad \dots \dots \dots \quad (4.1)$$

1次冷却材温度は、1次冷却系の温度が安定した後、Aループ、Bループの原子炉容器入口冷却材温度及び原子炉容器出口冷却材温度を測定し、それらを平均して求めた。また、過剰反応度は、起動系核計装ch. 1の計数率が約 5×10^4 cpsで安定した状態で測定を行った。このため、過剰反応度の出力補正は不要であり、1次冷却材流量、燃焼度の違いに対する反応度補正も無視できる。

ただし、250°C～370 °C間の測定については、MK-II炉心第24サイクルのBOCで測定した出力係数の約20MW付近の値 (-4.03×10^{-3} % $\Delta k/kk' / MW$) による過剰反応度の補正を行った。

4.3 試験結果

各測定ステップにおける1次冷却材温度に依存した過剰反応度変化の測定結果を、表4.1と図4.2に示す。また、これらの結果を基に求めた等温温度係数を、表4.2に示す。これより、MK-II炉心第24サイクルの等温温度係数は170～250°C間の詳細測定結果が -4.12×10^{-3} % $\Delta k/k/^\circ C$ 、250～370 °C間の従来手法による測定結果が -4.06×10^{-3} % $\Delta k/k/^\circ C$ と制御棒移設前と同様の値となった。

4.4 考 察

170°C～250 °C間の測定では、温度降下時と温度上昇時の等温温度係数に差が見られるが、これは250°Cにおける過剰反応度の再現性誤差（表4.1の測定ステップNo.1及びNo.10の過剰反応度の差）によるものであり、過去の測定でも同様の傾向が見られている。第24サイクルの250°Cでの再現性誤差は0.006% $\Delta k/k$ であり、第23"サイクルの評価結果(0.007% $\Delta k/k$)とほぼ一致した。また、170°C～250 °C間の測定における等温温度係数は、250°C～370 °C間の測定における等温温度係数よりも絶対値がやや大きいが、この傾向も過去の測定結果と一致するものであった。

250°C～370°C間の測定結果を、過去の測定結果と比較して表4.3に示す。MK-II炉心第12サイクル以降、等温温度係数の測定値は、 -4×10^{-3} % $\Delta k/k/^\circ C$ 程度で大きな変化はなく、今回の第24サイクルの測定値もほぼ同程度の値となり、制御棒の移設前後で等温温度係数の変化は認められなかった。

表4.1 第24サイクル等温温度係数測定試験各ステップ過剰反応度測定結果

No.	冷却材入口温度 (°C)			過剰反応度(%Δk/k)					工 程
	A loop	B loop	平均	補正前	ラチ 補正	CRD 補正	出力補正	補正後	
1	250.7	250.6	250.7	3.261	0.000	0.000	0.000	3.261	系統 温度 降下 ↓ 上昇
2	241.6	241.6	241.6	3.297	0.000	0.000	0.000	3.297	
3	230.5	230.3	230.4	3.349	0.000	0.000	0.000	3.349	
4	221.6	220.9	221.3	3.385	0.000	0.000	0.000	3.437	
5	208.7	208.8	208.8	3.437	0.000	0.000	0.000	3.475	
6	199.2	199.2	199.2	3.475	0.000	0.000	0.000	3.516	
7	189.3	189.2	189.3	3.516	0.000	0.000	0.000	3.555	
8	179.6	179.6	179.6	3.555	0.000	0.000	0.000	3.587	
9	171.2	171.2	171.2	3.587	0.000	0.000	0.000	3.267	
10	249.4	249.3	249.4	3.267	0.000	0.000	0.000	3.257	
11	251.3	250.7	251.0	3.257	-0.001	0.000	0.000	3.257	
12	370.3	369.8	370.1	2.761	-0.001	0.000	0.013	2.773	

※ 一次系冷却材流量の変動、燃焼による反応度変化は微小であったため無視した。
 また、No.12では出力補正を実施したが、この時の出力係数は第24サイクル出力上昇時の
 約20MW付近の測定結果($-4.03 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/MW$)を用いた。

表4.2 第24サイクル等温温度係数測定結果

(%Δk/k/°C)

測定範囲 等温温度係数	170～250°C		250～370°C
	下降時	上昇時	上昇時
各パターン平均	-4.11×10^{-3}	-4.09×10^{-3}	
標準偏差 (1σ)	0.002(%Δk/k)		-4.06×10^{-3}
温度範囲平均		-4.12×10^{-3}	
標準偏差 (1σ)		0.002(%Δk/k)	

表4.3 各サイクル等温温度係数測定結果

(250、370°C間 : $\times 10^{-3} \% \Delta k/k/^\circ C$)

サイクル	19	20	21	22	23	23"	24
等温温度係数	-4.06	-4.15	-3.87	-3.88	-4.03	-4.19	-4.06

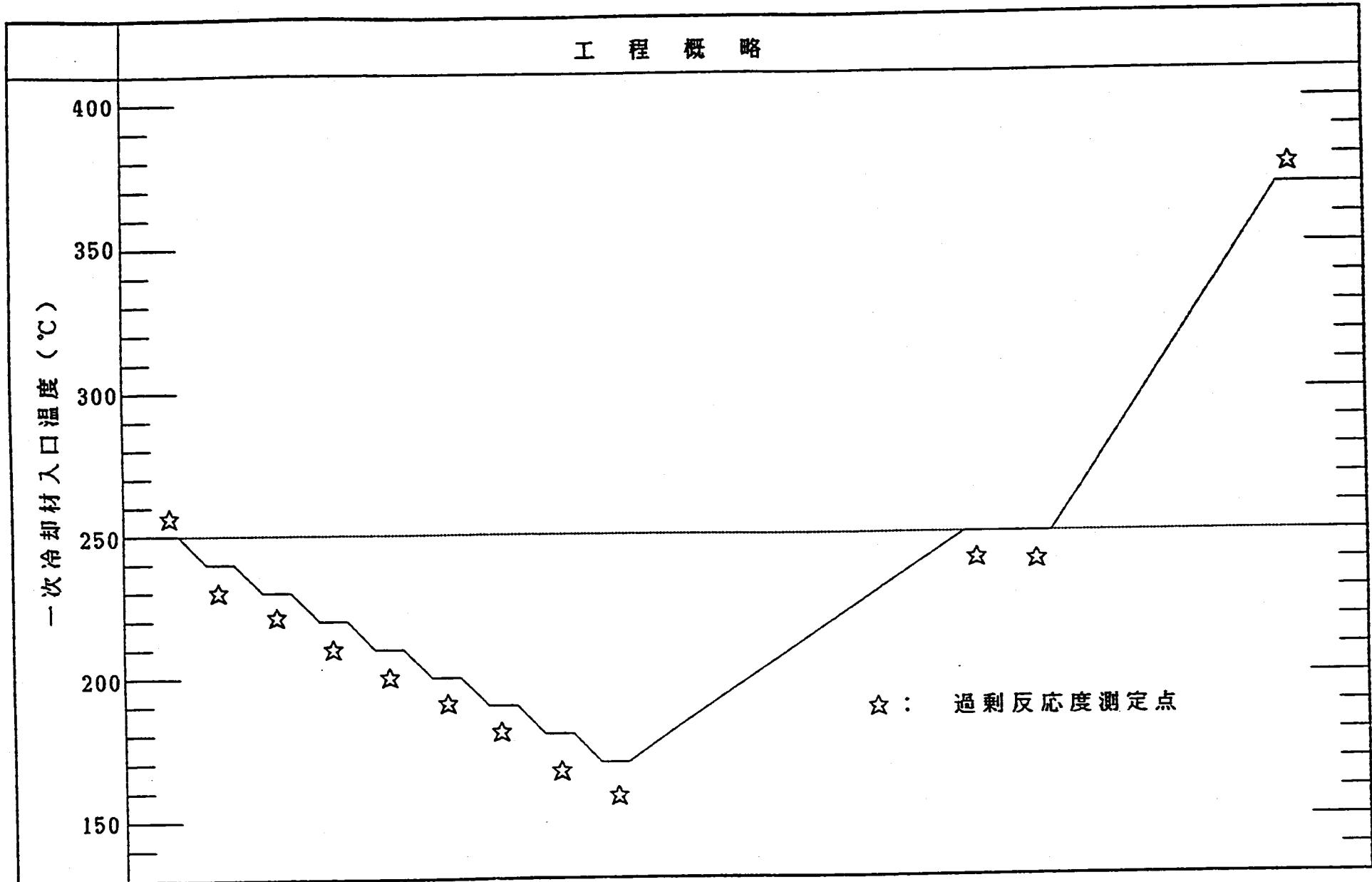


図4.1 第24サイクル等温温度係数測定試験工程概略

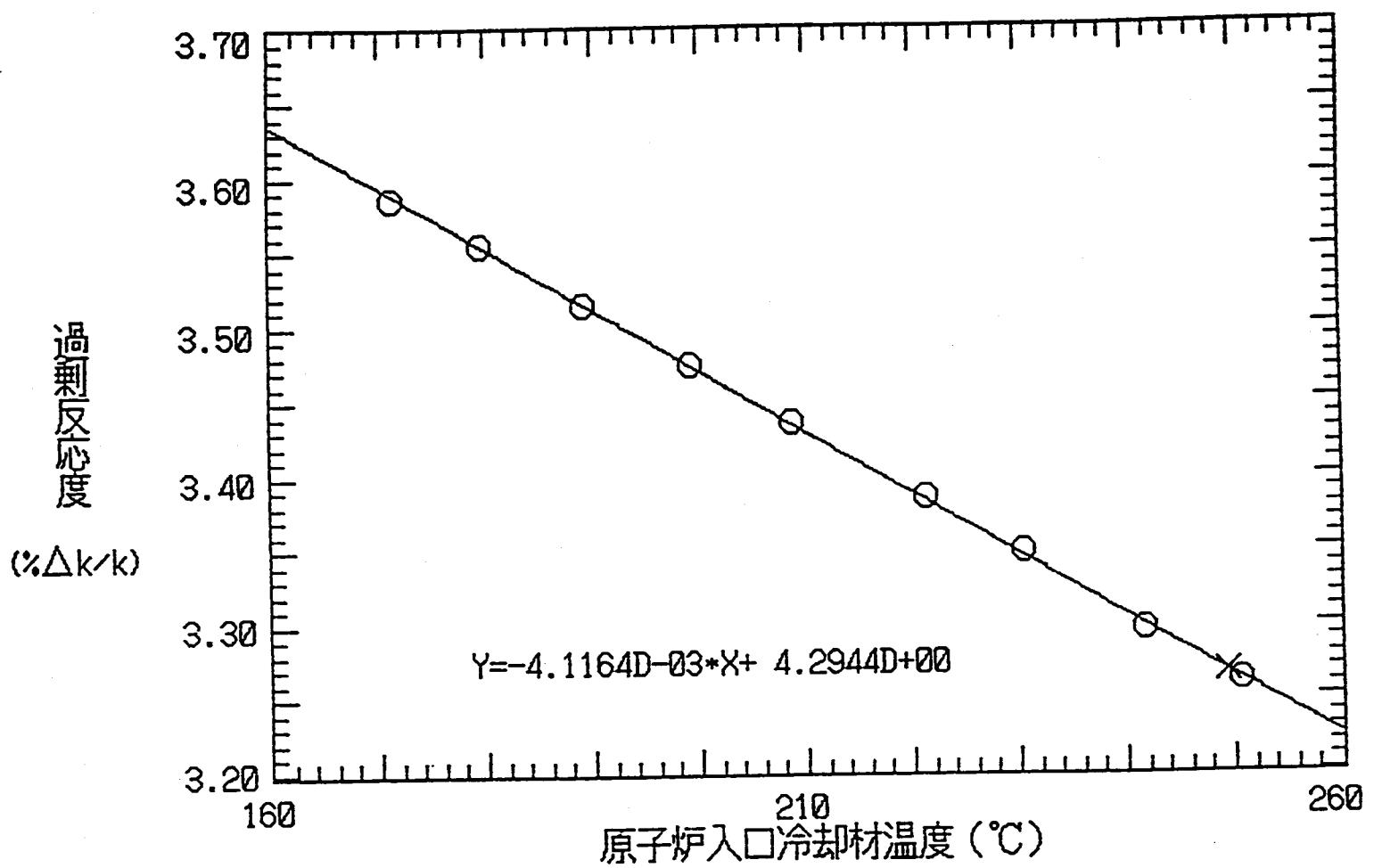


図4.2 第24サイクル等温温度係数測定試験における
過剰反応度測定結果 (170~250°C, 測定No.1~10)

5. 流量反応度係数の測定

「常陽」では、一次冷却材流量の変化に対して、過剰反応度が変化する現象が観測されている。この時の単位流量変化当りの過剰反応度変化量を流量反応度係数として定義し、これまで数回の測定試験を実施してきた。これまでの測定試験より得られた知見を以下に示す³⁾。

- ① 流量反応度係数の絶対値は、試験時の制御棒位置に依存する傾向が見られる。定格流量(100%flow)から30%flowに変化させた時の反応度変化を試験時の制御棒引抜位置と制御棒校正曲線より制御棒の軸方向位置変化に換算すると、どのサイクルにおいても約1mmで一致している³⁾。これらより、流量反応度係数の原因の一つとして燃料と制御棒の相対的な軸方向位置の変化が考えられる。
- ② 定格流量状態より流量を低下させ、再度定格状態に流量を戻した時に過剰反応度が増加する。

第23"サイクルにおいて、動的手法による流量反応度係数測定試験を実施したところ、流量降下時には全流量領域で流量変化に追従した反応度変化が見られたが、上昇時には約45%flow以下の流量領域では流量を変化させても反応度変化が見られなかった。これより、流量係数には、上昇時に不感領域があると考えられる。

第24サイクルでは、流量係数の原因解明の一環として、主に②の傾向に着目し、以下の目的で試験を実施した。

- ・ 不感領域の再現性の確認とその定量的な把握
- ・ 流量変化後に増加した過剰反応度の時間変化の把握

5.1 試験の方法と手順

図5.1に第24サイクルの流量反応度係数測定試験工程の概略図を示す。試験は未臨界状態において制御棒操作を行うことなく、流量のみを操作し、核計装応答の変化を監視する動的手法により行った。これにより、不感領域を正確に把握し、さらに不感領域の存在により過剰反応度が増加した場合は、その時間変化も制御棒操作を行うことなく、長時間にわたって詳細に監視することとした。

以下に試験方法を示す。

- ① 定格流量状態において制御棒を引抜き、浅い未臨界状態(ch.1の計数率: 約 3×10^3 (cp s))とする。

- ② 一次冷却材流量を65%flowまで低下させ、その時のch. 1の応答の変化を観測する。なお、この時、制御棒操作は一切行わないものとする。
- ③ 図5. 1に示すように流量を65→100→65→30→65→100%flowと変化させた状態について②の操作を繰り返す。なお、試験中、流量反応度係数に不感領域が見られた場合は、流量を100%flow状態に戻し、ch. 1の応答の変化を監視する。

5. 2 データ処理

上記方法による測定に先立ち、制御棒6本均等引抜臨界状態(ch. 1の計数率：約 5×10^4 (cps))より制御棒を1本ずつ2~3mm挿入し、その時のch. 1の計数率を測定することにより、ch. 1の計数率変化からの反応度変化量を評価した。結果を表5. 1に示す。

ここで、制御棒操作量からの反応度投入量の換算には、第24サイクルで実施した4本同時差換法とペリオド法で作成した制御棒較正曲線を用いた。

データ処理は初期状態からのch. 1の応答の変化を表5. 1に基づいて反応度変化に換算し、それを以下の式に代入することにより流量反応度係数：Cflowを求めた。

$$C_{\text{flow}} = \Delta \rho / \Delta F (\% \Delta k/k / \% \text{flow})$$

ここで、 $\Delta \rho$ ：流量変更前後の反応度変化 ($\% \Delta k/k$)

ΔF ：流量変更前後の流量変化 (%flow)

である。

5. 3 試験結果

(1) 不感領域の検出

試験時的一次系冷却材流量と起動系核計装の応答のJOYDAS記録を図5. 4~5. 11に示す。

5. 1節に示した動的手法により試験を実施したところ、ステップ1からステップ2の65%flowへ流量を低下させた段階で炉が臨界となり、ch. 1の計数率の上昇が止まらなかった(図5. 4~5. 5参照)。そこで、動的手法による試験は中止し、静的手法による測定に変更することとした(図5. 6参照)。

まず、制御棒操作により炉を未臨界とし、その後、65%flowにおいてch. 1の計数率が 3×10^3 (cps)一定になるように制御棒操作を行い、その時の制御棒位置と一次冷却材流量・温度を測定した。なお、制御棒位置からの過剰反応度の算出には第24サイクルで実施した4本同時差換法とペリオド法より作成した制御棒較正曲線を用いた。なお、未臨界状態に

おいて測定を行うことによる精度低下を考慮し、 3×10^3 (cps)一定状態の判断は、 3×10^4 countsの計数測定を3度繰り返すことにより行った。

第24サイクル起動は長期炉停止期間の後であったため、起動時の外部中性子源の強度は通常のサイクルの約1/10しかなかった。そのため、中性子源効果が小さく、通常と比較して計数率の低い状態で臨界に達したものと考えられる。

65%flowからステップ3の100%flowに流量を戻した状態において過剰反応度の測定結果がステップ1の結果より大きくなつたため、当初計画通り、その後の流量変更操作は中止し、100%flow状態において制御棒操作を行い、ch. 1：約 3×10^3 (cps)一定状態を維持することにより反応度変化を監視することとした。

これより、第24サイクルにおいては、100～65%flow間に不感領域が存在したと考えられる。これは第23"サイクルにおける不感領域(約45%flow以下1))と異なるものであった。また、第14サイクルEOCに行った試験では、一度に30%flowまで流量を降下させ、流量を段階的に上昇したところ、30～100%flow間で反応度変化が見られなかった(参考として、第14サイクルEOCの測定結果を図5.3に示す)。これより、流量反応度係数の不感領域はサイクルによって異なるものと考えられる。

(2) 流量反応度係数の算出

表5.2に本試験における流量と過剰反応度の測定結果を示す。これより、ch. 1：約 3×10^3 (cps)一定状態において評価した流量反応度係数を以下に示す。

流量降下時($100\% \text{flow} \rightarrow 65\% \text{flow}$)： $-6.0 \times 10^{-4} (\% \Delta k/k / \% \text{flow})$

流量上昇時($65\% \text{flow} \rightarrow 100\% \text{flow}$)： $-3.7 \times 10^{-4} (\% \Delta k/k / \% \text{flow})$

図5.2にMK-II炉心で実施した流量係数測定結果を示す。24サイクル炉心における降下時の流量反応度係数はこれまでの測定結果の中で絶対値が最も大きかった。ただし、通常運転時の一次冷却材流量の変動により顕著な反応度変化を起こす程大きな量ではないため、運転や安全性の面から問題となるものではない。

なお、流量上昇時の流量反応度係数から、30～100%flow間の反応度変化を外挿すると $0.026\% \Delta k/k$ となる。試験時の制御棒位置(約420mm均等)と制御棒較正曲線よりこの反応度変化量を制御棒6本の軸方向位置変化に換算すると 1.1mm となり、過去のサイクルでの結果と一致している。

(3) 過剰反応度の時間変化について

65%flowから3ステップ目の100%flowに流量を戻した後、約8時間にわたってch. 1：

約 3×10^3 (cps)一定状態を維持した。今回の試験では、原子炉入口温度が不安定であり、臨界を維持している間に起動系核計装の応答に変化が見られた（図5.7～5.11参照）。しかし、起動系核計装の応答が一致するように制御棒操作を行い、入口温度の変化による反応度のずれを補正したところ、過剰反応度はこの間を通じて $3.285 \pm 0.001 (\% \Delta k/k)$ であった。ここで、誤差幅は 1 σとした。

表5.3に24サイクル起動時に実施したch.1：約 5×10^4 (cps)一定状態における全ての過剰反応度測定結果を示す。これより、流量変更前（3/14～3/17実施）の過剰反応度は $3.251 \pm 0.001 (\% \Delta k/k)$ で一致しており、一方、流量変更後（3/18～3/19実施）の過剰反応度は $3.264 \pm 0.002 (\% \Delta k/k)$ で一致している。ここで、誤差幅は 1 σである。これより、明らかに流量変更前後において約 $0.01 (\% \Delta k/k)$ の反応度差が見られる。

過去の測定におけるこの反応度上昇量は、約 $0.005 \sim 0.01 (\% \Delta k/k)$ であり、直近の第23”サイクルでも $0.01 (\% \Delta k/k)$ と今回の結果と良く一致している。また、流量変更後、原子炉の起動・停止や等温温度係数測定試験に係る一連のプラント操作を行なながら約2日間監視を行ったが、過剰反応度に変化は見られなかった。

なお、 3×10^3 (cps) 状態で測定した流量変化前後の反応度差は $0.010 (\% \Delta k/k)$ と 5×10^4 (cps) 状態の測定結果と一致しており、これより、 3×10^3 (cps) 状態での測定精度は通常行っている 5×10^4 (cps) 状態と同程度であり、未臨界状態での測定精度に問題はなかったと考えられる。

5.4 考 察

(1) 流量反応度係数の原因について

流量上昇時ののみの不感領域の存在、反応度変化量の制御棒位置依存性及び流量変更前後の過剰反応度の上昇を考慮すると、流量反応度係数には少なくとも二つ以上の原因があると考えられ、その特徴は以下のように分類できる。

① 第1の原因の特徴

- ・ しきい流量を持ち、それ以下の流量では作用しない。なお、しきい流量はサイクルによって異なる。
- ・ 流量降下時、上昇時とも可逆的に作用する。
- ・ 制御棒位置依存性がある。

② 第2の原因の特徴

- 反応度変化量は小さく、 $0.005 \sim 0.010 (\% \Delta k/k)$ 程度である。
- 非可逆的にはたらく（流量降下時に作用し、上昇時には作用しない）。

第1の原因としては制御棒と燃料の軸方向の相対位置変化とオーバーフローカラムからのガス巻込み量の変化の二つが考えられている。しきい流量の存在は、それぞれ、軸方向位置変化の限界量、ガス巻込み液位下限の面から説明が可能であるが、しきい流量がサイクルによって変化する現象を説明できない。なお、反応度変化量が制御棒位置依存性を持つことから、前者の可能性が高いと考えられる。

第2の原因としては、例えば、流量変化に伴い、それまで何等かの原因で炉内に蓄積していた気泡が抜けてしまうようなメカニズムが考えられる。

以上の仮説では、流量反応度係数の有する全ての特性を説明するには不十分である。

今後、原因解明のためには、さらに定量的な検討が必要と考えられる。

(2) 制御棒移設前後の流量反応度係数

第24サイクルの流量降下時の流量反応度係数は、 $-6.0 \times 10^{-4} (\% \Delta k/k / \% \text{flow})$ と絶対値がこれまでの最大の値となった。以下にその原因を示す。

まず、流量上昇時の流量反応度係数は、 $-3.7 \times 10^{-4} (\% \Delta k/k / \% \text{flow})$ であり、これは制御棒位置依存性を持つ第1の原因によるものと考えられる。これより、 $100 \sim 30\% \text{flow}$ 流量変化に相当する反応度変化は $0.0238\% \Delta k/k$ となり、これを試験時の6本の制御棒の軸方向位置変化に換算すると約 1.1 mm となる。これは過去の試験結果と一致している。

一方、流量変化前後の反応度変化も、 $0.01\% \Delta k/k$ と過去のサイクルと一致している。

しかし、過去の試験は全て、 $20 \sim 100\% \text{flow}$ 間、または $30 \sim 100\% \text{flow}$ 間で流量を変化させていたのに対し、24サイクルでは $100 \sim 65\% \text{flow}$ 間でしか測定を行なかった。流量依存性のない第2の原因が流量反応度係数に占める量を近似的に求めると、過去の試験と24サイクルでそれぞれ以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} \text{過去の試験: } & -0.005 \sim 0.010 / (100-20) \sim (100-30) \\ & = -0.6 \sim -1.4 \times 10^{-4} (\% \Delta k/k / \% \text{flow}) \end{aligned}$$

$$\text{第24サイクル: } -0.010 / (100-65) = -2.9 \times 10^{-4} (\% \Delta k/k / \% \text{flow})$$

これより、第24サイクルでは、第2の原因が流量反応度係数に占める量が過去の2倍程度になり、流量降下時の流量反応度係数の絶対値が大きくなったものと考えられる。

以上より、棒移設前後で流量反応度係数には変化がなかったと考えられる。

表 5.1 起動系核計装応答変化と投入反応度の関係

	ch. 1計数率(cps)	ch. 2計数率(cps)	制御棒操作による反応度変化(%Δk/k)
0	4.96×10^4	3.55×10^4	0
1	9.23×10^3	6.60×10^3	-0.01046
2	3.66×10^3	2.60×10^3	-0.02652
3	2.25×10^3	1.59×10^3	-0.03943
4	1.63×10^3	1.16×10^3	-0.05177
5	1.23×10^3	8.70×10^2	-0.06780

表 5.2 過剰反応度測定結果

	流 量(%flow)		
	100	65	100
ラッチ点補正過剰反応度後(%Δk/k)	3.270	3.306	3.281
ラッチ点、温度補正過剰反応度後(%Δk/k)	3.276	3.300	3.286
A, B ループ平均流量(%flow)	102.6	64.5	102.5

表 5.3 24サイクル BOC 過剰反応度測定結果

(250°C、ch. 1 : 5×10^4 cps)

日 時	過剰反応度 (%Δk/k)			備 考
	測定結果	平均値	1 σ	
1 3/14 11:01	3.251			
2 3/15 10:47	3.250	3.251	0.001	
3 3/17 16:00	3.252			流量係数測定試験：流量変更前
4 3/18 5:36	3.264			流量係数測定試験：流量変更後
5 3/18 9:07	3.262			流量係数測定試験後、再起動
6 3/18 9:41	3.265	3.264	0.002	等温係数測定試験：温度変更前
7 3/19 7:22	3.267			等温係数測定試験：温度変更後
8 3/19 17:12	3.261			

※ 制御棒位置からの過剰反応度算出には制御棒較正試験で作成した制御棒較正曲線（3章参照）を使用した。また、過剰反応度は、等温温度係数（4章参照）を用いて、250°Cの値に補正している。

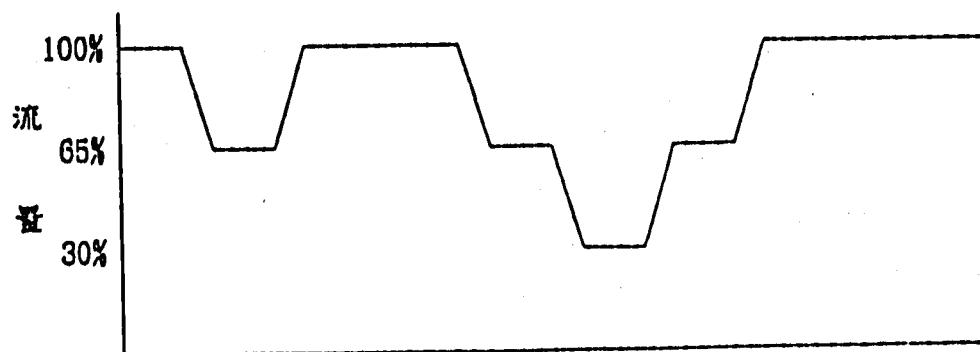


図 5.1 流量反応度係数測定時の一次系冷却材流量の変更パターン

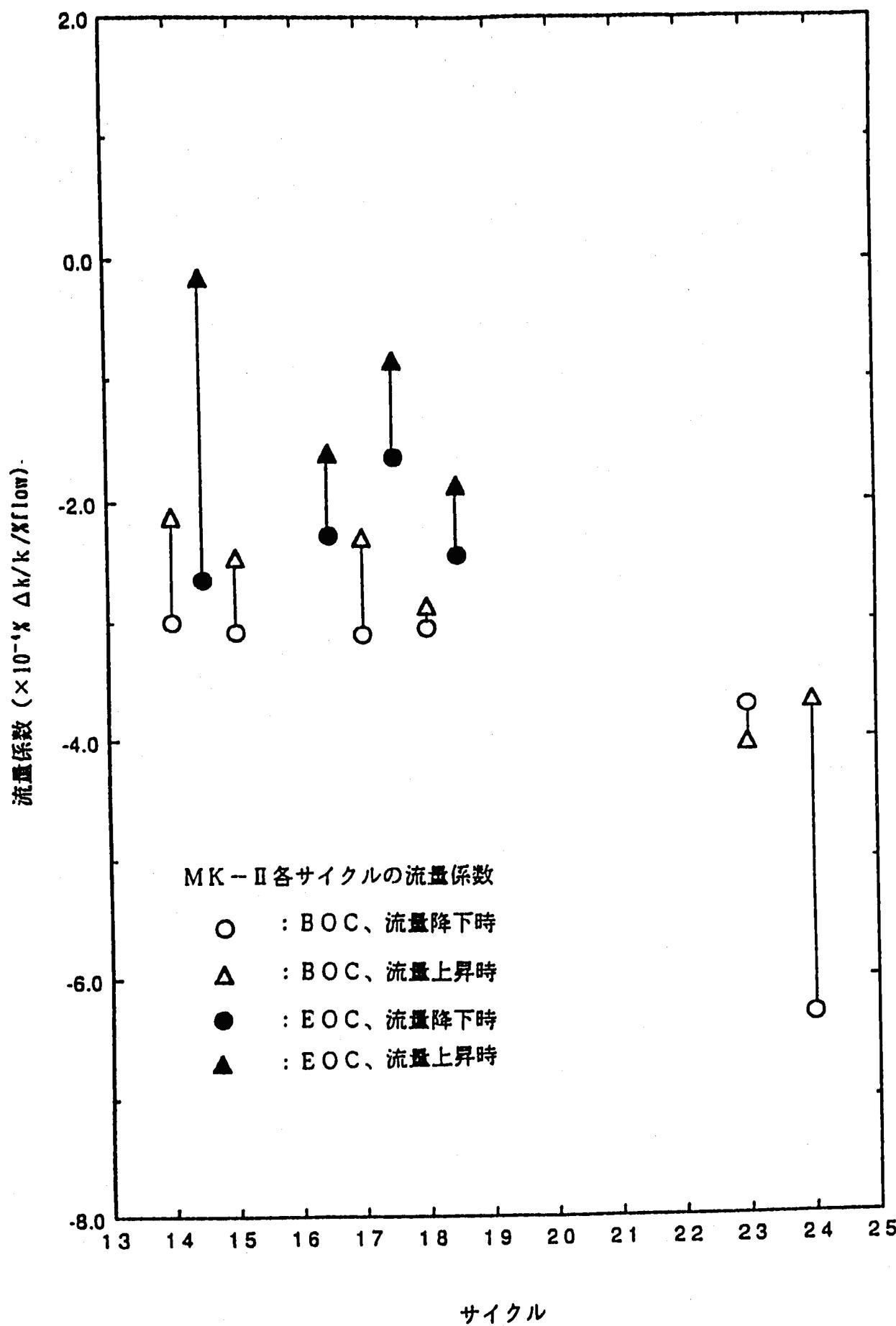


図 5.2 サイクルの流量係数測定結果

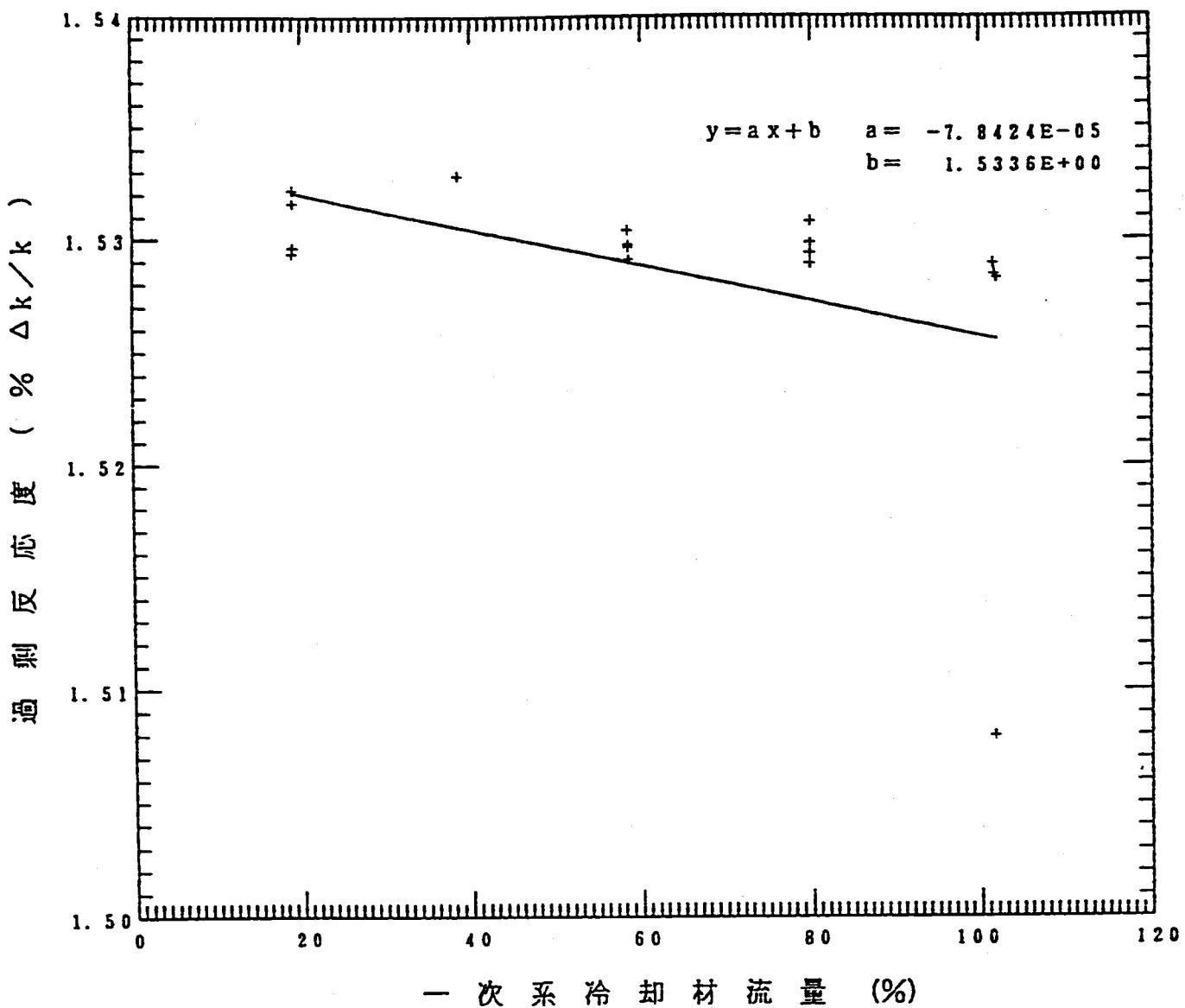


図 5.3 一次系冷却材流量と余剰反応度（第14サイクルB.O.C）

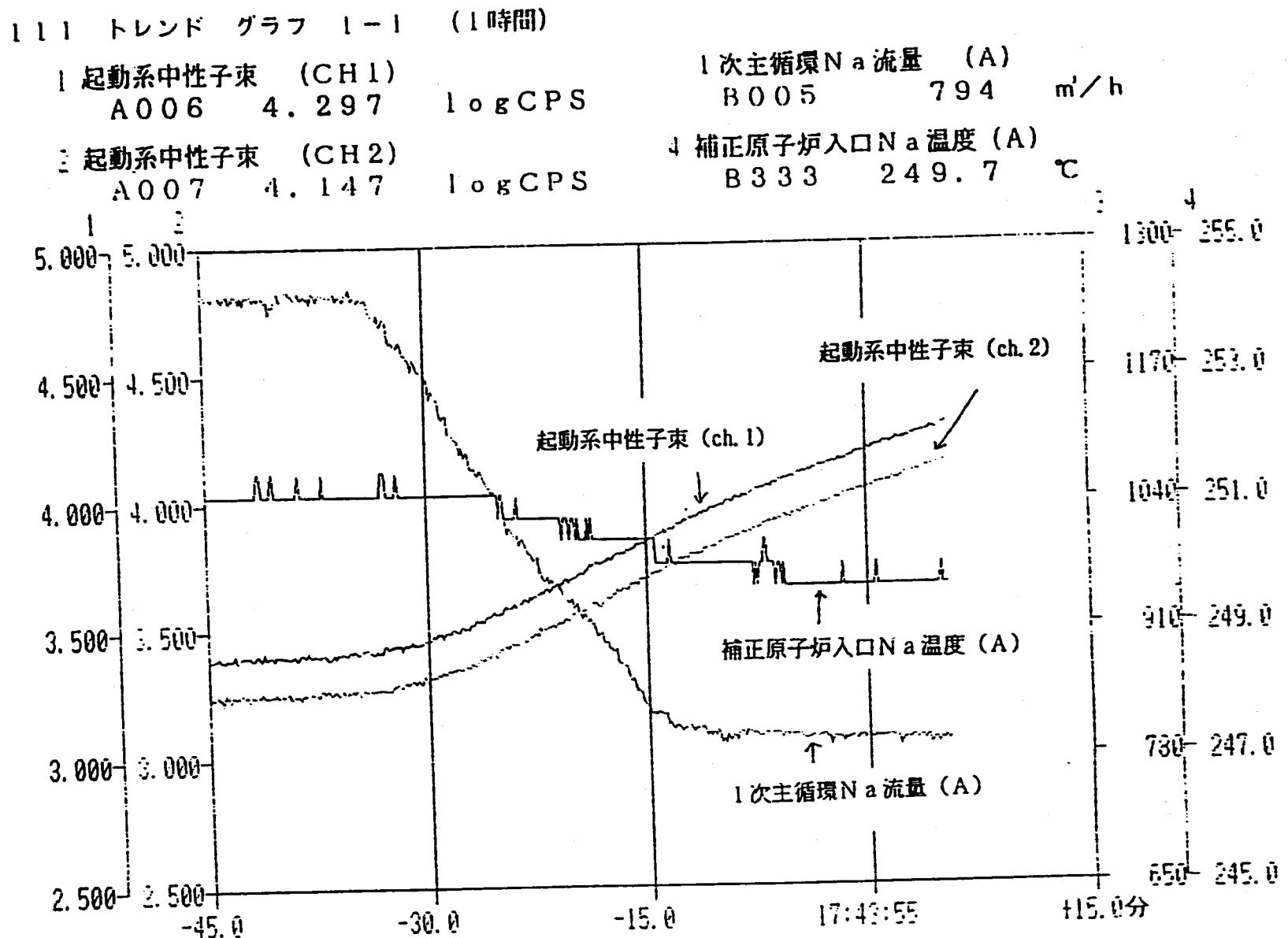


図5.4 試験中のJOYDASトレンドグラフ (100%flow~ 65%flow)

111 トレンド グラフ 1-1 (1時間)

1 起動系中性子束 (CH 1)

A 006 4.710

log CPS

1 次主循環Na流量 (A)

B 005 803 m³/h

2 起動系中性子束 (CH 2)

A 007 4.552

log CPS

4 補正原子炉入口Na温度 (A)

B 333 249.3 °C

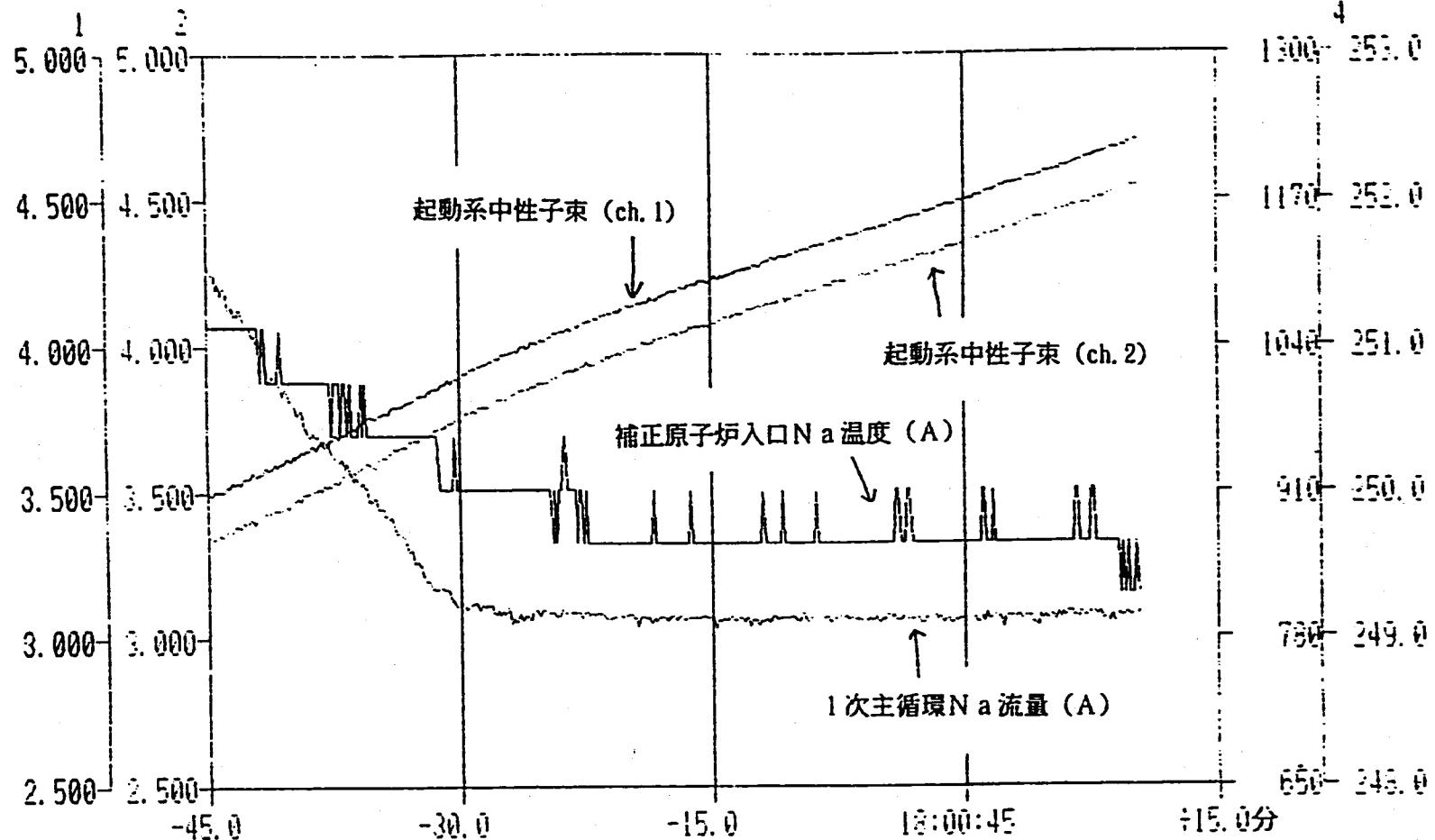


図5.5 試験中のJOYDASトレンドグラフ (65%flow安定状態①)

111 トレンド グラフ 1-1 (1時間)

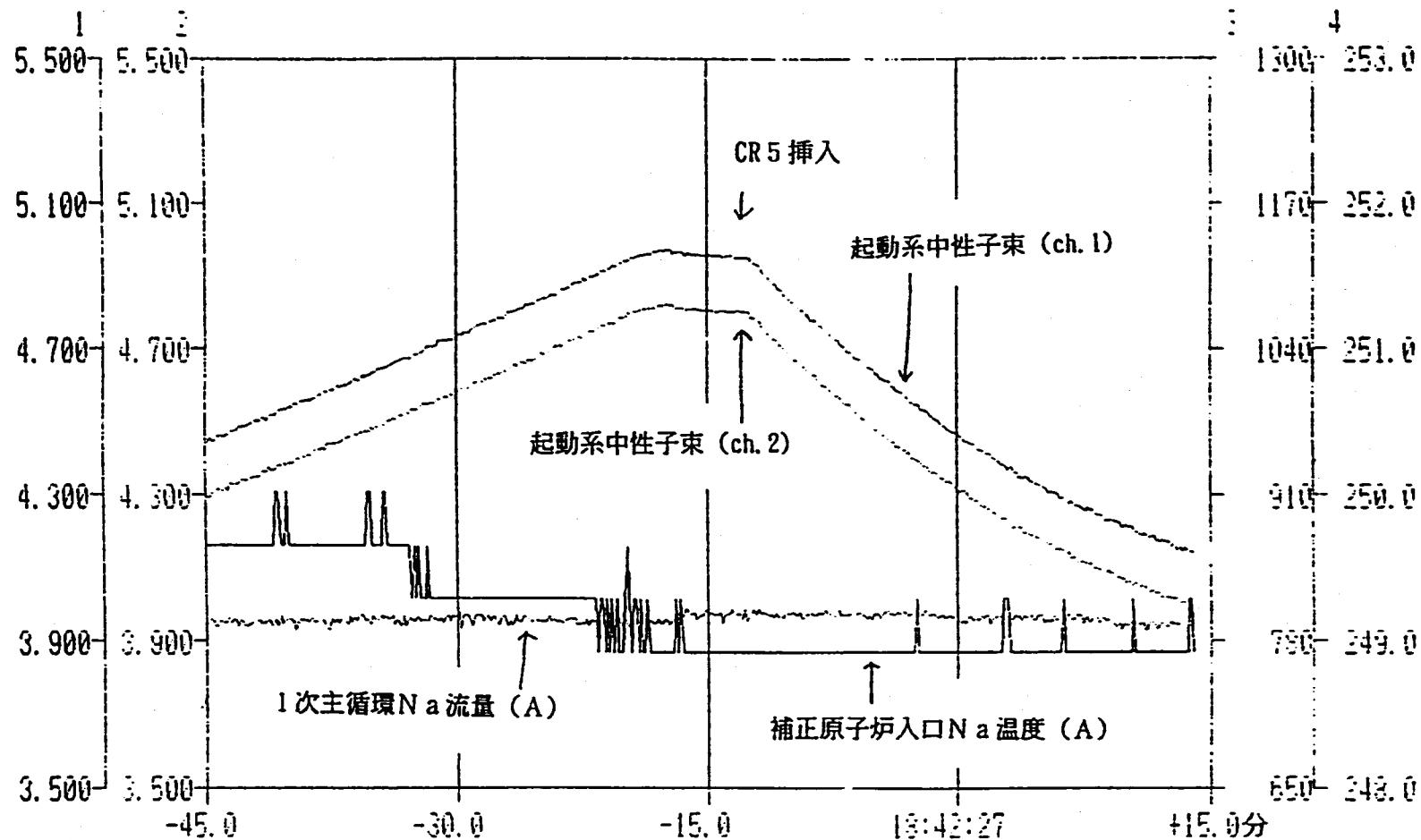
1 起動系中性子束 (CH1)
A 006 4.151 Log CPS: 1次主循環Na流量 (A)
B 005 786 m³/h2 起動系中性子束 (CH2)
A 007 3.997 Log CPS: 補正原子炉入口Na温度 (A)
B 333 248.9 °C

図5.6 試験中のJOYDASトレンドグラフ (65%flow安定状態②)

111 トレンド グラフ 1-1 (1時間)

1 起動系中性子束 (CH 1)

A 006 3. 315 log CPS

1 次主循環Na流量 (A)

B 005 1252 m'/h

2 起動系中性子束 (CH 2)

A 007 3. 157 log CPS

4 準正原子炉入口Na温度 (A)

B 333 250. 8 °C

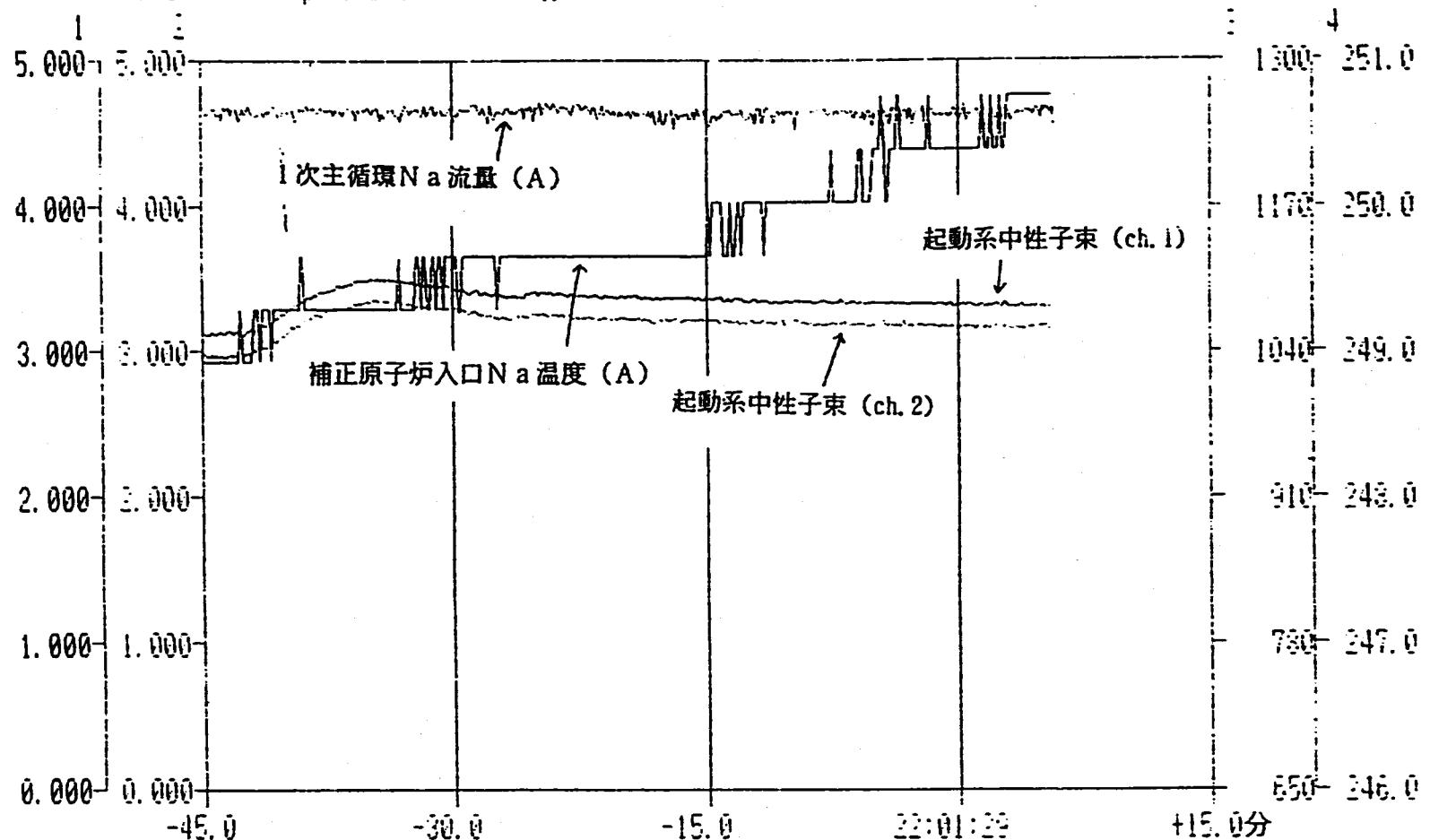


図5.7 試験中のJOYDASトレンドグラフ (100%flow安定状態)

111 トレンド グラフ 1-2 (1時間)

1 1次主循環Na流量 (A)
B005 795 m³/h

：補正原子炉入口Na温度 (A)
B333 250.0 °C

2 1次主循環Na流量 (B)
B006 811 m³/h

：外気温
S004 5.3 °C

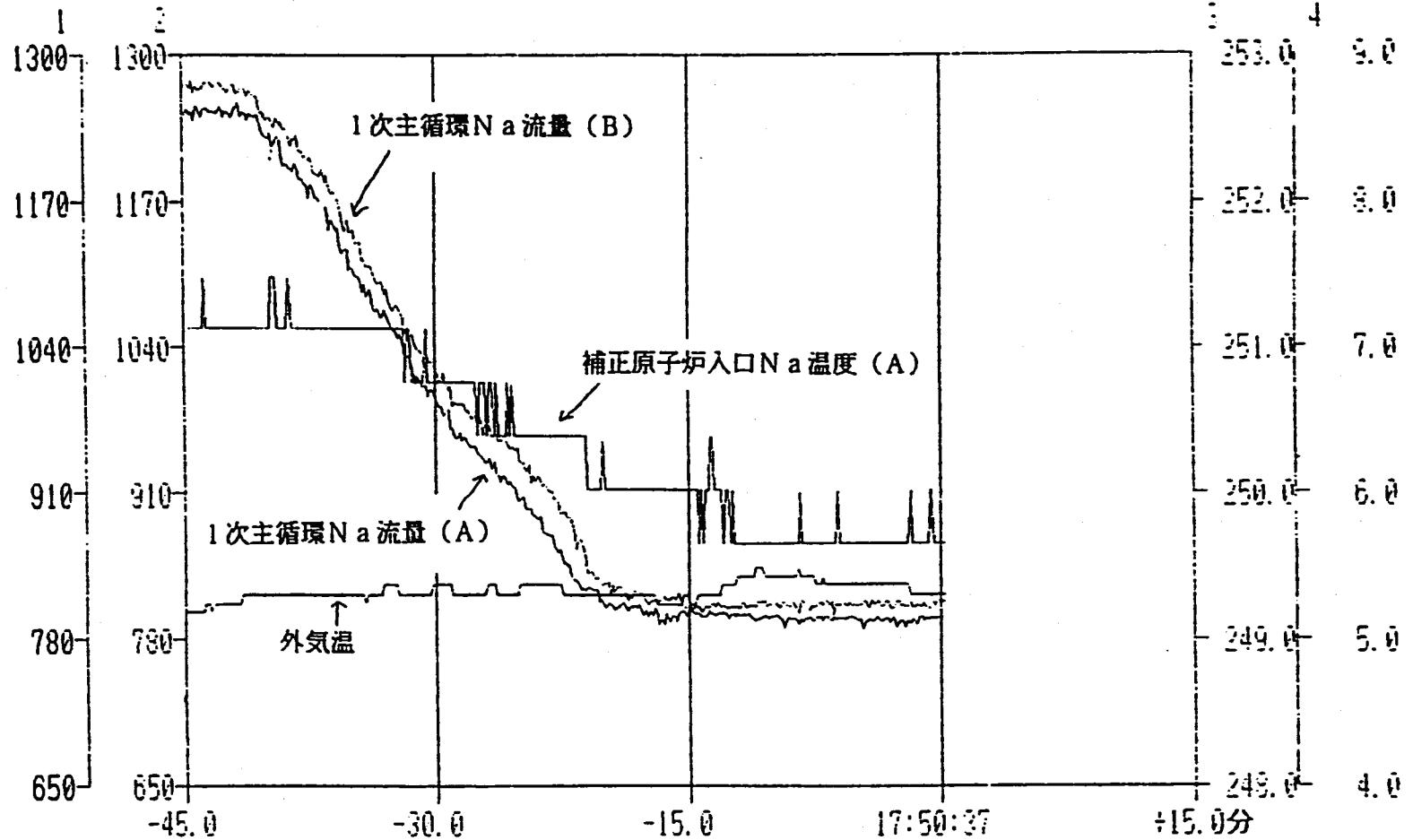


図5.8 試験中のJOYDASトレンドグラフ (100%flow~ 65%flow)

111 トレンド グラフ 1-2 (1時間)

1 1次主循環Na流量 (A)
B 0 0 5 7 9 8 m³/h

：補正原子炉入口Na温度 (A)
B 3 3 3 2 4 9. 7 °C

2 1次主循環Na流量 (B)
B 0 0 6 8 0 4 m³/h

4 外気温
S 0 0 4 5. 4 °C

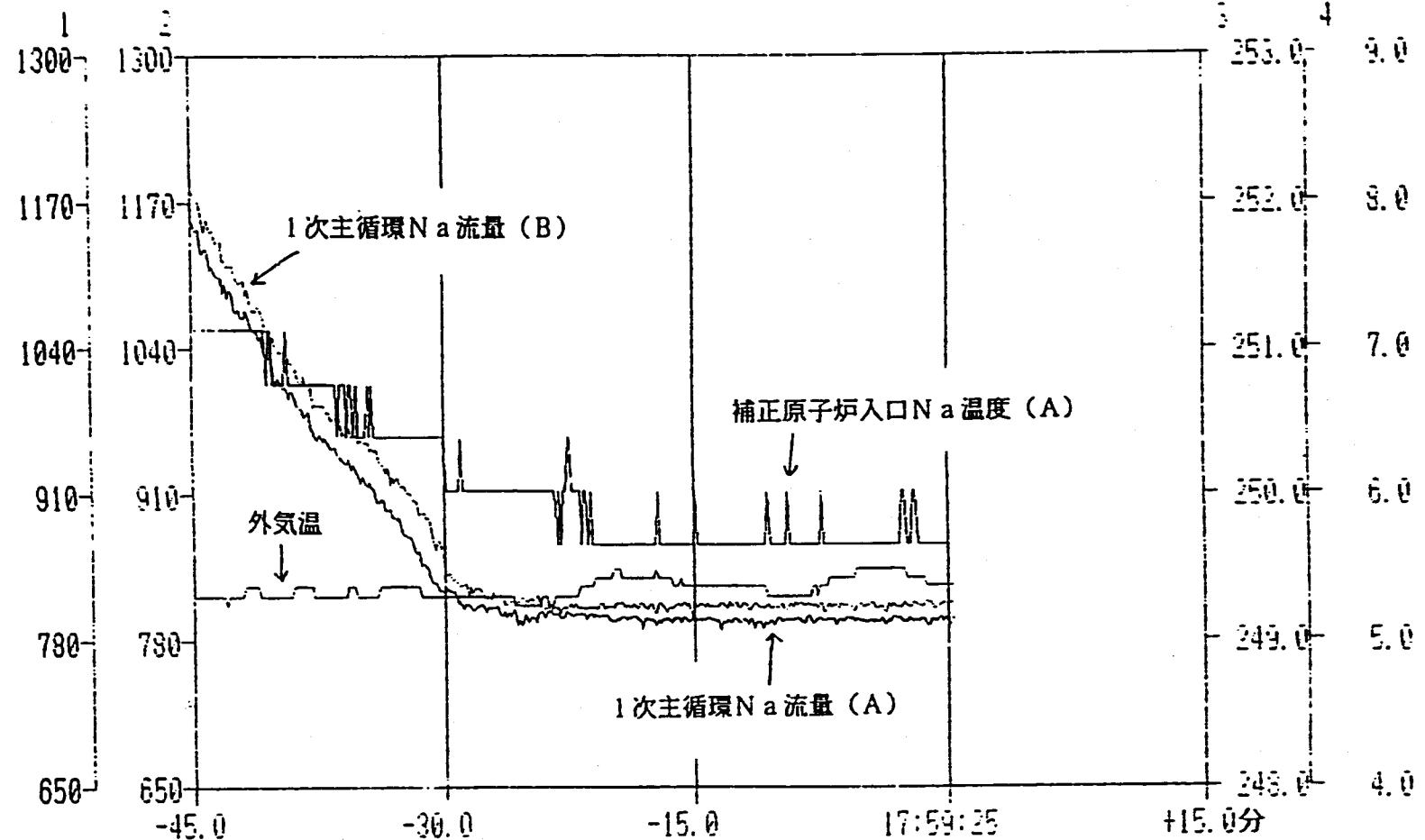


図 5.9 試験中のJOYDASトレンドグラフ (65%flow安定状態③)

111 トレンド グラフ 1-2 (1時間)

1 1次主循環Na流量 (A)
B 005 803 m³/h

：補正原子炉入口Na温度 (A)
B 333 249.3 °C

2 1次主循環Na流量 (B)
B 006 808 m³/h

：外気温
S 004 5.4 °C

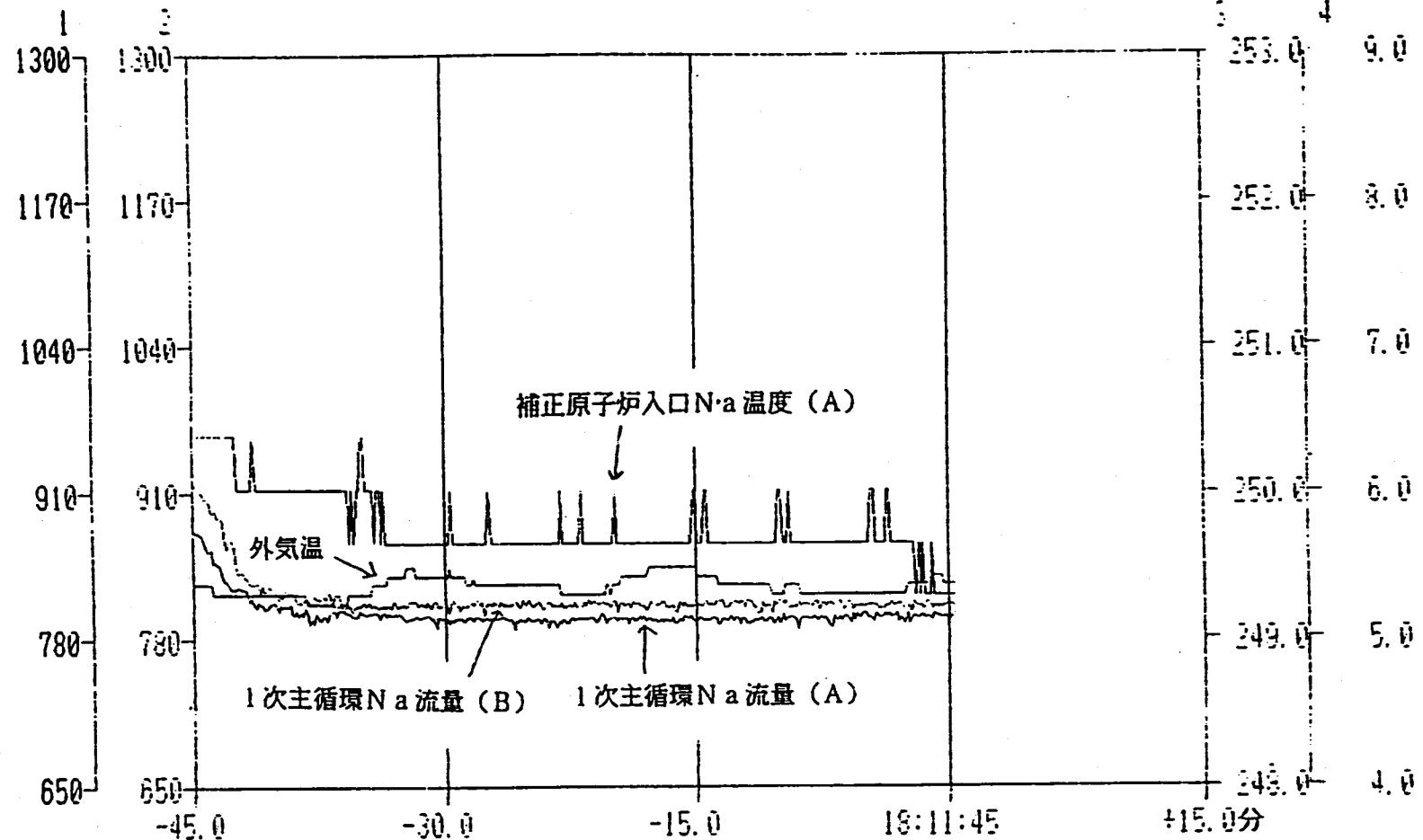


図5.10 試験中のJOYDASトレンドグラフ (65%flow安定状態④)

111 トレンド グラフ 1-2 (1時間)

1 1次主循環Na流量 (A)
B005 807 m³/h

：補正原子炉入口Na温度 (A)
B333 248.9 °C

2 1次主循環Na流量 (B)
B006 810 m³/h

4 外気温
S004 5.4 °C

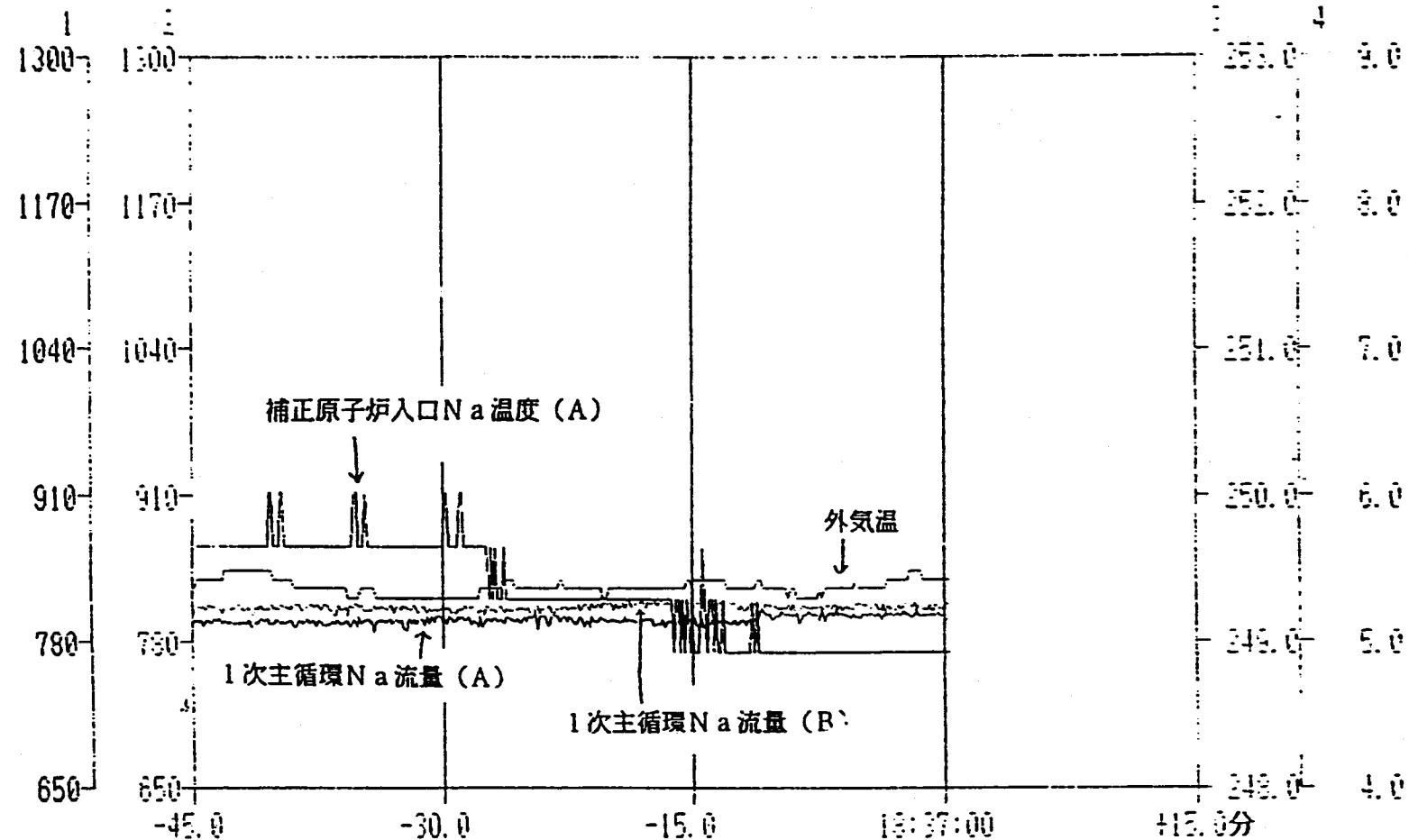


図5.11 試験中のJOYDASトレンドグラフ (65%flow安定状態⑤)

6. 結 言

今回の試験を通じて得られた結果を以下にまとめる。

- ロッドドロップ法では、前回の経験を踏まえて試験を実施したことにより、精度上問題となっていた中性子源効果の低減化が図られた。また、ロッドドロップ法の結果は、中性子源増倍法による結果と良い一致を示したが、ペリオド法とは差が大きかった。この原因に関しては今後も検討を行う必要がある。
- 移設制御棒については、反応度価値が従来の約 $1/3$ に下がり、また、移設に伴う炉内中性子束分布の変化等により、個々の制御棒価値が若干変動したこと以外、反応度係数等の炉心諸特性に制御棒移設前後で変化がないことが確認された。
- 等温温度係数の測定結果は、 $-4 \times 10^{-3} \% \Delta k/k$ であり、過去の測定結果とはほぼ同じであった。また、過去の測定で見られた系統温度上昇時と効果時の測定結果の違い等の傾向の再現性も確認された。
- 流量係数については、可逆的に反応度変化をもたらすものと、非可逆的なものの 2つ以上の要因が関与していることが再確認され、非可逆的な変化が生じる流量レベルがサイクルによって異なることが新たに確認された。流量係数の原因に関しては今後とも検討を行う必要がある。

謝 詞

本研究の各種炉心特性測定試験の実施とデータ処理については、原子力システム株式会社 長崎英明氏、曾我 彰氏に、また、計算による制御棒干渉効果補正係数の算出については株式会社アイ・ティ・ジェイ 永谷睦典氏にご協力を得ましたことを付記し、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大村, 他 「常陽」制御棒対象炉心の詳細制御棒価値と反応度係数の測定
1992年3月 PNC ZN9410 92-101
- 2) S. G. Carpenter et al., "Measurement of Control Rod Worths Using ZPPR",
Proceedings of A Specialists' Meeting on Control Rod Measurement Techniques:
Reactivity Worth and Power Distribution, Cadarache (France), April 21 and 22,
1976.
- 3) 沖元, 他 制御棒反応度価値の測定精度に関する検討
1991年8月 PNC ZN9410 91-287

A P P E N D I X I

詳細試驗工程

第24サイクル詳細工程

第24サイクルB O Cにおいて実施した各種試験の詳細工程を図 I (1/6~ 6/6) に示す。

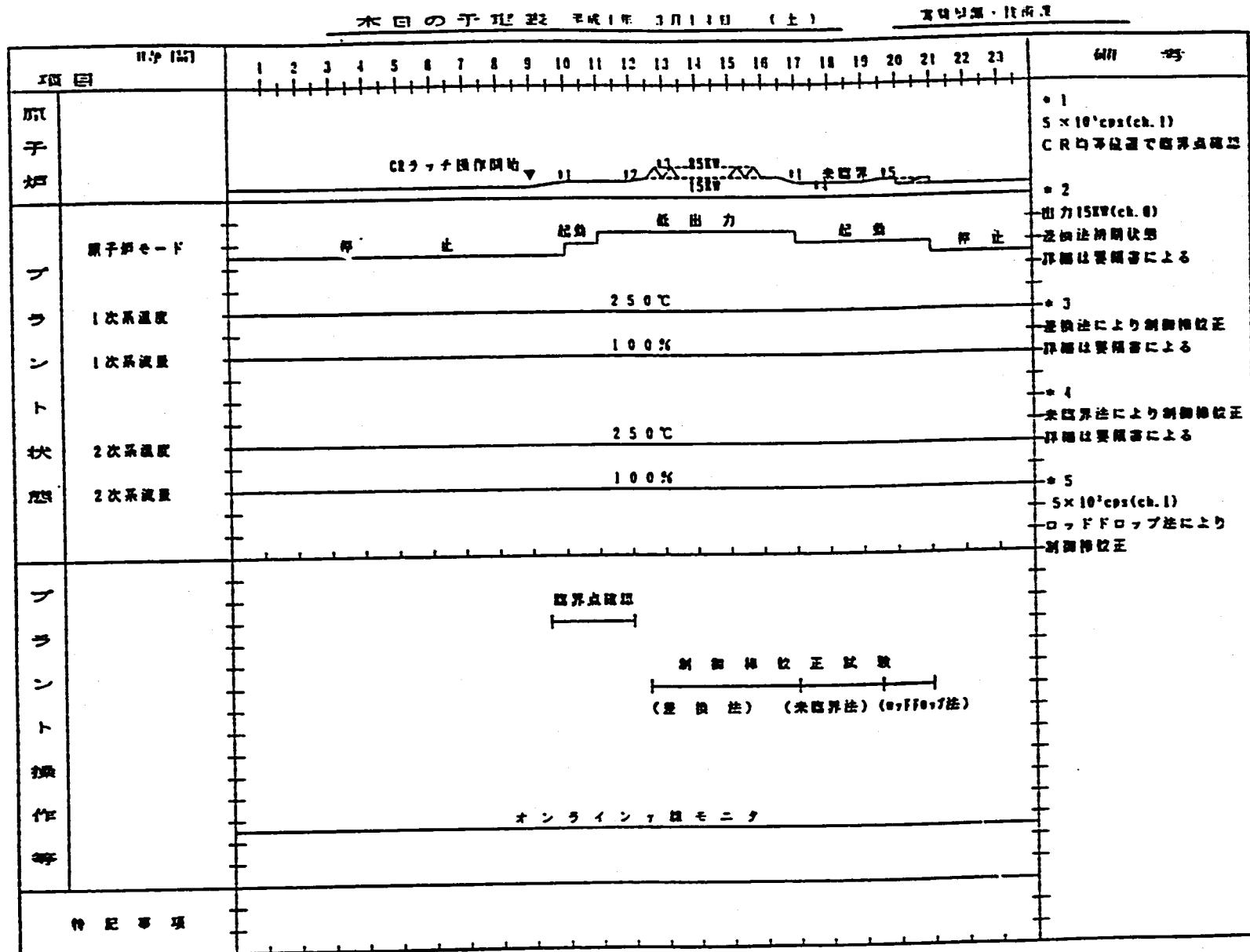
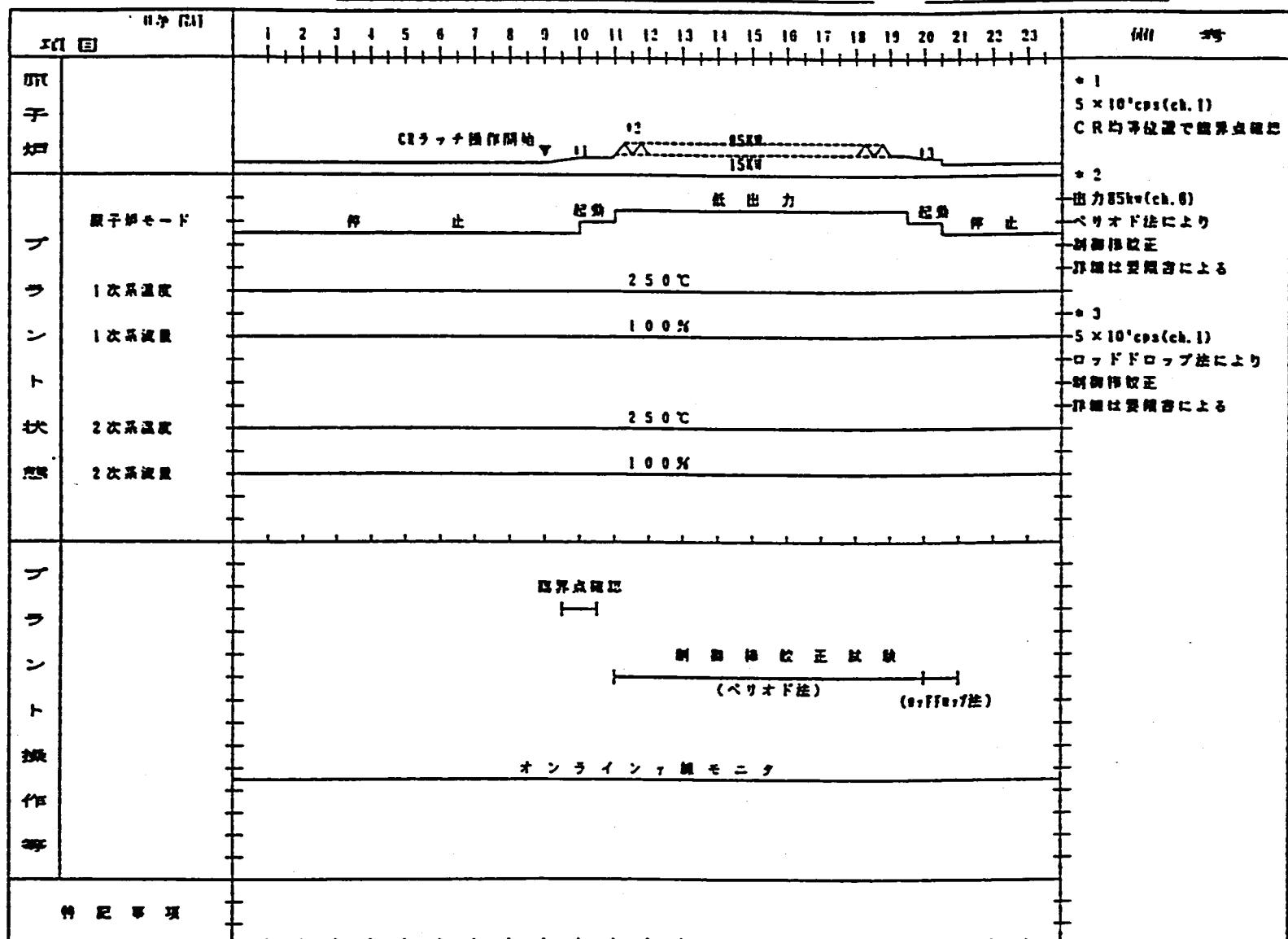


図 I 試験詳細工程 (1 / 6)

木日の予定表 平成1年 3月15日 (日)

実験部・技術部



図I 試験詳細工程 (2 / 6)

項目		時間 (分)																				実験概要・特徴																														
原子炉	操作	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	結果																											
																						* 1 $5 \times 10^3 \text{ cps} (\text{ch. } 1)$ CR 均等位置で電界点確認																														
プラント状況	原子炉モード	停	止	起	動	低	出	力	低	出	力	起	動	停	止	* 2 出力 15kW (ch. 6) CR 6 本均等位置 ペリオド法初期状態																																				
	1次系温度	250°C																							* 3 ペリオド法により 制御棒校正 算算は要領書による																											
	1次系流量	100%																							* 4 $5 \times 10^3 \text{ cps} (\text{ch. } 1)$ ロッドドロップ法により 制御棒校正 算算は要領書による																											
	2次系温度	250°C																																																		
	2次系流量	100%																																																		
トランク操作等																										スクラム試験 (照射率)																										
																										制御棒校正試験 (ペリオド法) (0, 110, 7法)																										
																										オンラインモニタ																										
特記事項																																																				

図 I 試験詳細工程 (3 / 6)

木日の予定表 平成1年 3月17日 (火)

実験用紙・技術書

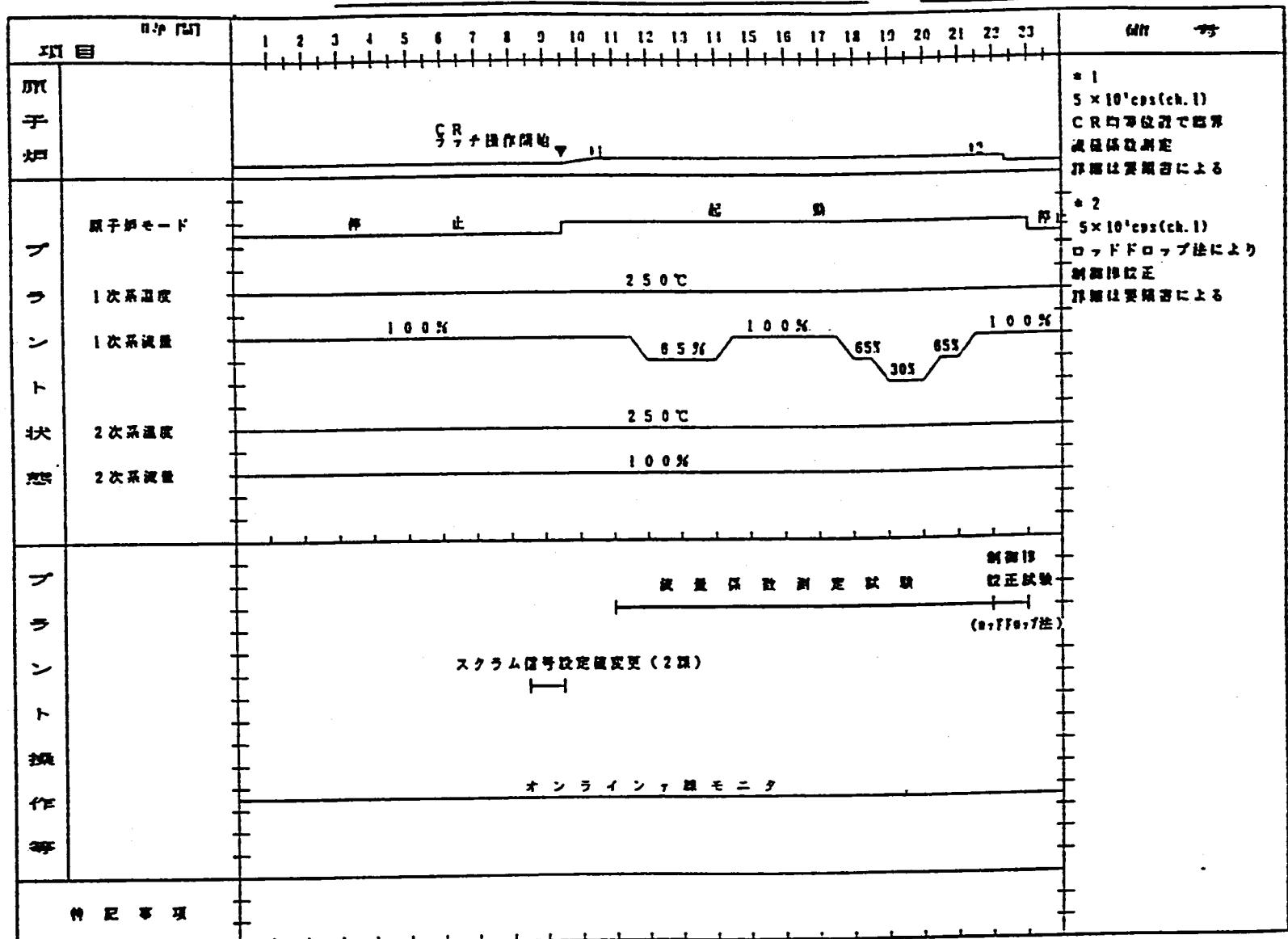


図 I 試験詳細工程 (4 / 6)

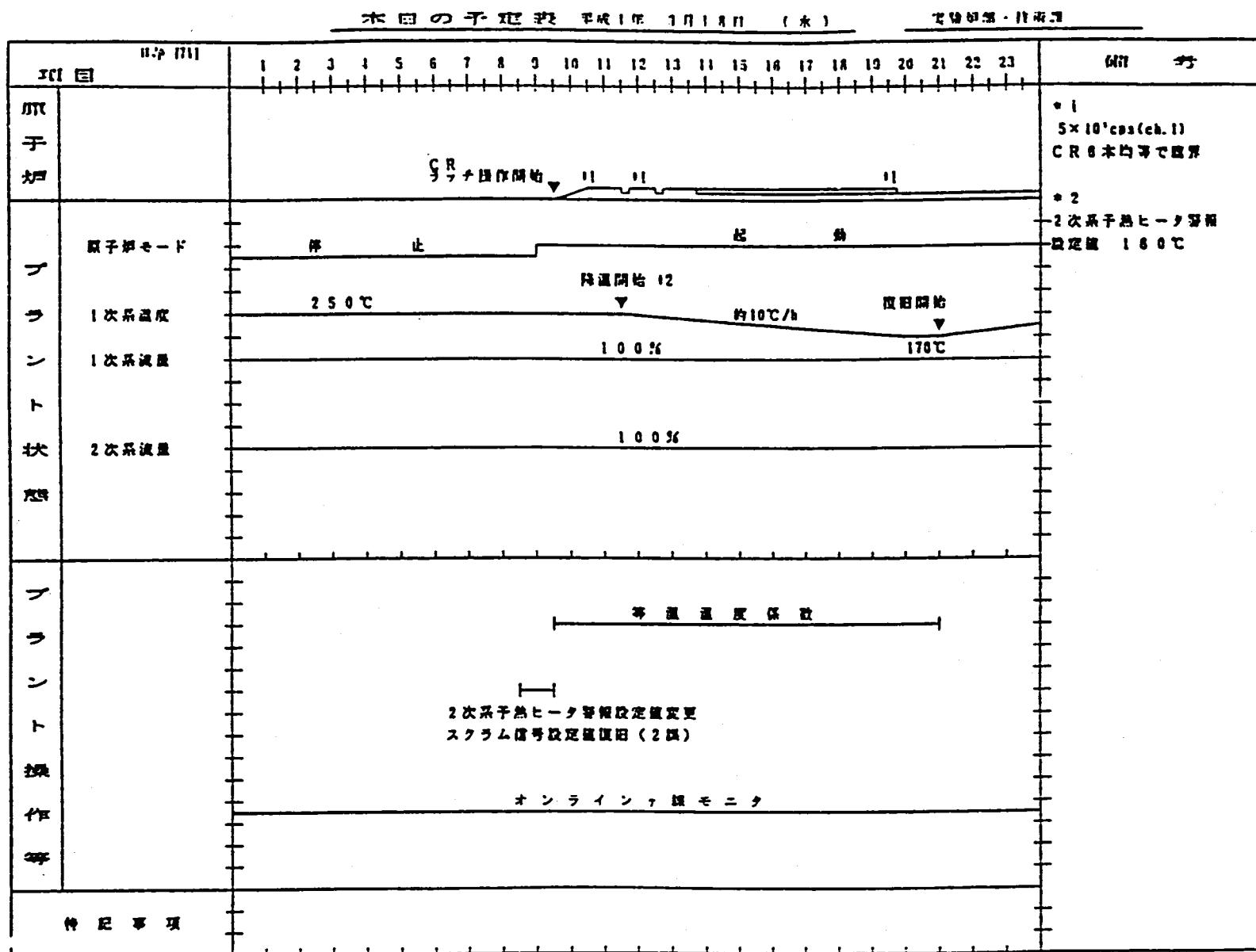


図 I 試験詳細工程 (5 / 6)

木日の予定表 111年 3月19日 (木)

実験部・技術課

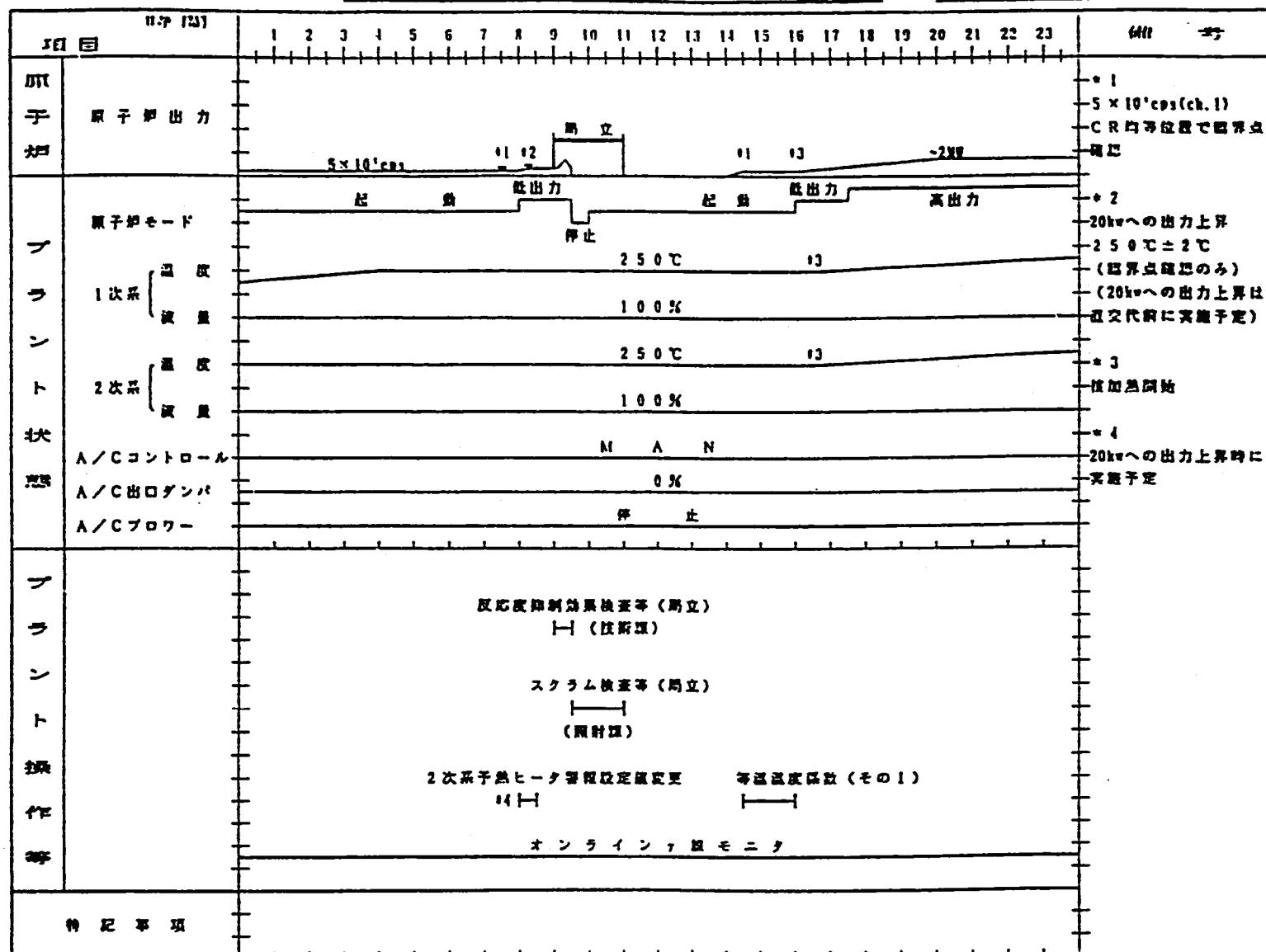


図 I 試験詳細工程 (6 / 6)

APPENDIX II

第24サイクルにおけるJOYDAS用動特性パラメータ

第24サイクルにおけるJOYDAS用動特性パラメータ

"JOYDAS"に入力している動特性パラメータには、運転監視コードシステム "MAG I"による予測計算結果を使用している。下表に第24サイクルにおいてJOYDASに入力した動特性パラメータ (β , λ) を示す。

	実行遅発中性子生成率
β_1	1.292×10^{-4}
β_2	9.375×10^{-4}
β_3	8.190×10^{-4}
β_4	1.660×10^{-3}
β_5	6.504×10^{-4}
β_6	1.706×10^{-4}
β_{eff}	4.367×10^{-3}

	先行核崩壊定数
λ_1	1.282×10^{-2}
λ_2	3.141×10^{-2}
λ_3	1.265×10^{-1}
λ_4	3.303×10^{-1}
λ_5	1.398×10^{-0}
λ_6	3.789×10^{-0}

以下に "MAG I" コードでの動特性パラメータ (β , λ) の計算式を示す。

$$\beta_{eff} = \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^6 \beta_{n,m}^{(m)} \quad (1) \quad m : \text{遅発中性子先行核のfamily} \\ n : \text{親核種 } ({}^{239}\text{Pu}, {}^{235}\text{U} \text{ etc})$$

$$\beta_{n,m}^{(m)} = \frac{\int_{\text{全炉心}} d\gamma \sum_{s'} \chi_s^{(m)s'} \phi^{ss'} \sum_s \nu \sum_{t,s} \beta_{n,t}^{(m)} \phi^{ts}}{\int_{\text{全炉心}} d\gamma \sum_{s'} \chi_s^{(m)s'} \phi^{ss'} \sum_s \nu \sum_{t,s} \phi^{ts}}$$

$$\lambda_{n,m}^{(m)} = \frac{\int_{\text{全炉心}} d\gamma \sum_{n=1}^6 \lambda_n^{(m)} \beta_{n,m}^{(m)} \sum_s \nu \sum_{t,n} \phi^{ts}}{\int_{\text{全炉心}} d\gamma \sum_{n=1}^6 \beta_{n,m}^{(m)} \sum_s \nu \sum_{t,n} \phi^{ts}}$$

ただし、

- ϕ^* : g 群の中性子束
 ϕ^{**} : g 群の隨伴中性子束
 $\beta_n^{(m)}$: 親核種 n, 先行核 m 群遅発中性子割合
 χ_p : 即発中性子の核分裂スペクトル
 $\chi_d^{(m)}$: 先行核 m 群の遅発中性子の核分裂スペクトル
 Σ : 核分裂マクロ断面積
 ν : 1 核分裂あたりの中性子発生個数

とする。

APPENDIX III

制御棒干渉効果補正係数の算出

差換法、ペリオド法における制御棒干渉効果補正について

ペリオド法に基づく制御棒較正試験は臨界状態を基準とするため、試験時の制御棒パターンは限定される。そのため、「常陽」で実施している差換法、ペリオド法では全ストローク範囲にわたって6本均等状態で測定を行うことはできない。一方、「常陽」の各種反応度係数測定試験は全て制御棒6本均等状態で行われるため、そのデータ処理に用いる制御棒較正曲線は6本均等状態の干渉効果を有することが望ましい。そこで、各運転サイクルにおいて計算により較正曲線が制御棒6本均等時の干渉効果を有するよう差換法等の試験結果に補正を施している。

(1) 補正概念

制御棒CR j を $x \sim x'$ mmまで引抜いた時の反応度変化測定値 ($\Delta \rho B_{real}(j, x)$) の補正概念式を以下に示す。

$$\Delta \rho B_{image}(j, x) = \frac{\Delta \rho C_{image}(j, x)}{\Delta \rho C_{real}(j, x)} \times \Delta \rho B_{real}(j, x) \quad \dots \quad (A-1)$$

ここで、 $\Delta \rho B_{image}(j, x)$: 均等引抜き状態に補正された反応度変化

$\Delta \rho C_{real}(j, x)$: 試験時と同じ制御棒引抜き状態においてCR j が $x \sim x'$ mmまで引抜かれた時の反応度変化計算結果

$\Delta \rho C_{image}(j, x)$: 6本均等引抜き状態においてCR j が $x \sim x'$ mmまで引抜かれた時の反応度変化計算結果

参考として補正対象制御棒を4本同時差換法で測定したCR 1 及びペリオド法で測定したCR 2とした時の計算パターン例を図III(a)に示す。

まず、試験時に補正対象制御棒が上端にあった時の制御棒配置において、補正対象制御棒を 600~650mmの間で50mm操作した時の操作前後のkeffを計算し、2つのkeffの逆数の差から $\Delta \rho C_{real}(j, x)$ を評価する。同様に補正対象制御棒を制御棒6本 600mm均等状態から50mm引抜く操作前後のkeffを求め、 $\Delta \rho C_{image}(j, x)$ を評価する。この比を補正対象制御棒の平均引抜き位置 625mmにおける補正係数とする。

次に、試験において6本の制御棒が均等となった時(410mm引抜き位置)の測定結果の補正係数を1.0とし、直線近似することにより、各制御棒毎に以下の式で表せられる補正式を作成する。

$$\Delta \rho B_{image}(j, x) = [a(j) \cdot x + b(j)] \times \Delta \rho B_{real}(j, x) \quad \dots \quad (A-2)$$

ここで、 $a(j)$ 、 $b(j)$ は定数である。この補正式を制御棒較正試験の微分反応度測定結果に乗

じ、補正を行う。

(2) 計 算

計算の詳細を以下に示す。なお、計算フローを図III(b)に示す。

① 計算コード："CITATION" 3次元Hex-Z

② 組 成： 第24サイクル炉心における各燃料集合体、制御棒の組成に関しては運転直前の第23" サイクルの" MAGI" 記録計算結果の組成ファイルに新燃料を登録し、集合体毎に組成を対応させて使用した。

③ 断面積： 断面積の計算には" JFS-2" 70群炉定数セットを使用し" EXPANDA-G" コードで70群実効断面積と中性子束を計算して、" MICLIB" コードで 7群に縮約した。縮約に使用した中性子束は1次元Cylinder体系の拡散計算で算出した。また、計算ケースに関しては、制御棒領域にB, Cを入れた場合と入れない場合（制御棒全挿入と全引抜きに相当）の1次元拡散計算を2ケース行った。

(3) 算出結果

第24サイクル炉心における各制御棒の干渉効果補正係数を以下に示す。なお、Xは制御棒位置 (mm) である。

$$CR1 : 6.2079 \times 10^{-4} \cdot X + 0.73927$$

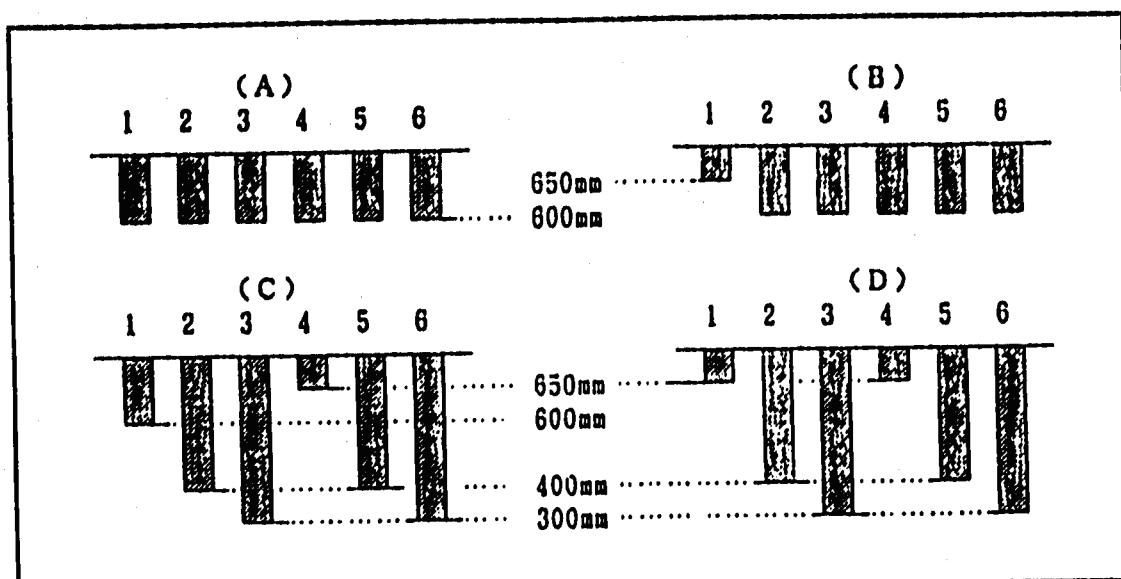
$$CR2 : 5.0033 \times 10^{-4} \cdot X + 0.78986$$

$$CR3 : 5.5911 \times 10^{-4} \cdot X + 0.76517$$

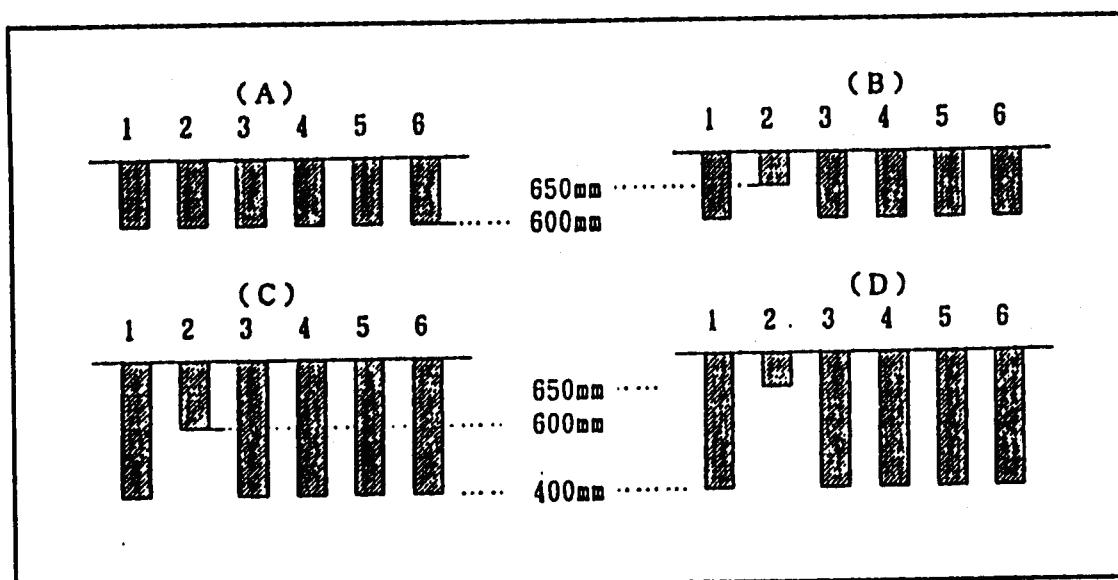
$$CR4 : 1.4528 \times 10^{-4} \cdot X + 0.93898$$

$$CR5 : 3.9273 \times 10^{-4} \cdot X + 0.83505$$

$$CR6 : 4.2524 \times 10^{-4} \cdot X + 0.82140$$



(1) CR 1 の補正係数を算出する場合 (4 本同時差換法)



(2) CR 2 の補正係数を算出する場合 (ペリオド法)

650mmから 600mmまでの位置での干渉効果は

$$Y(X) = (k_{err}^{-1}(B) - k_{err}^{-1}(A)) / (k_{err}^{-1}(D) - k_{err}^{-1}(C))$$

で求まり、6本均等挿入時の制御棒位置での干渉効果を1.0として一次式で干渉効果補正係数a及びbを求める。

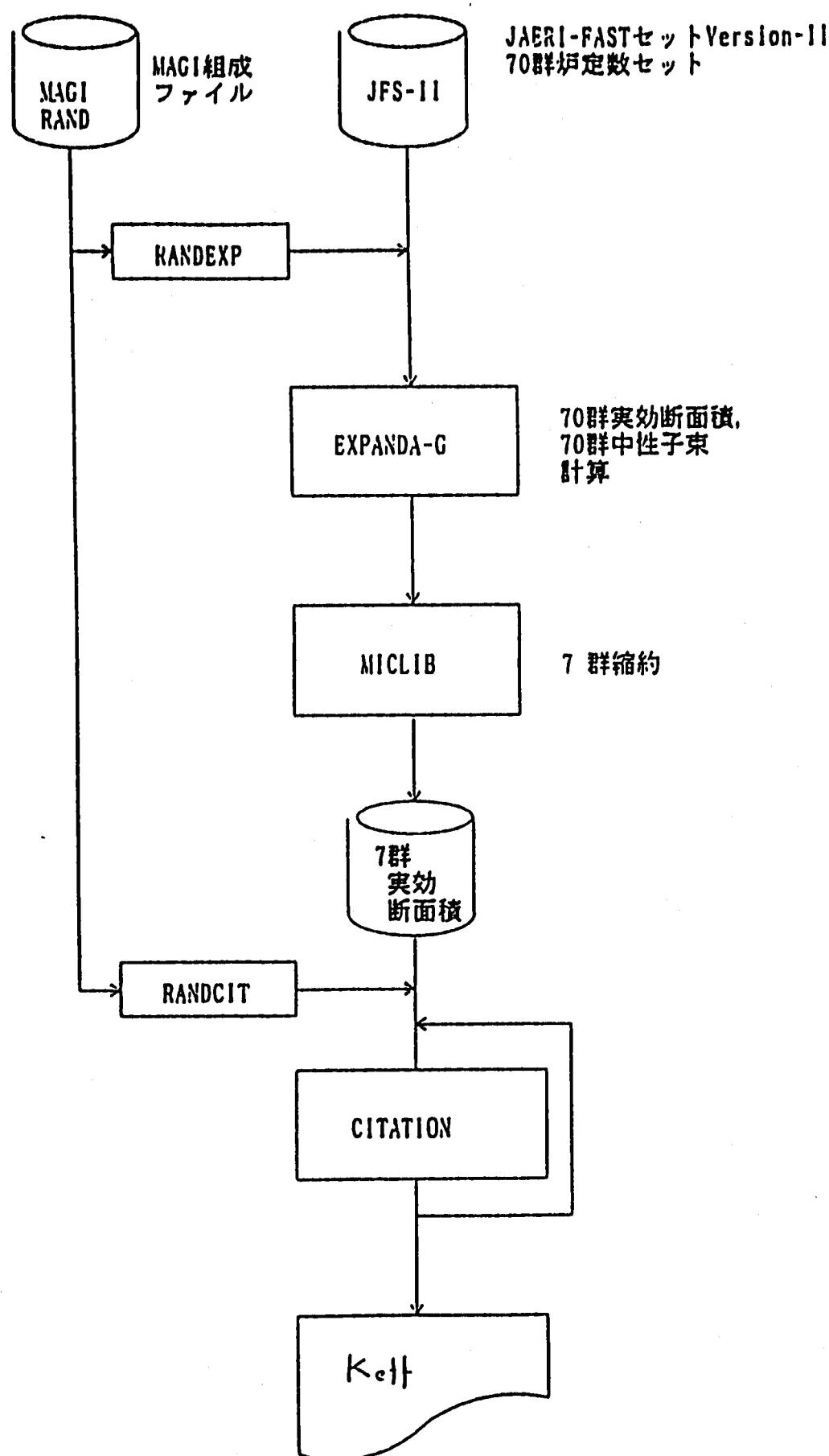
つまり、

$$Y(X) = a \times (650 \sim 600) + b$$

$$1.0 = a \times (\text{均等挿入制御棒位置}) + b$$

の連立方程式を解き、aとbを求めれば良い。

図III(a) 補正係数算出時の制御棒パターン



図III(b) "CITATION"による計算フロー図

APPENDIX IV

ロッドドロップ法試験結果プロット図

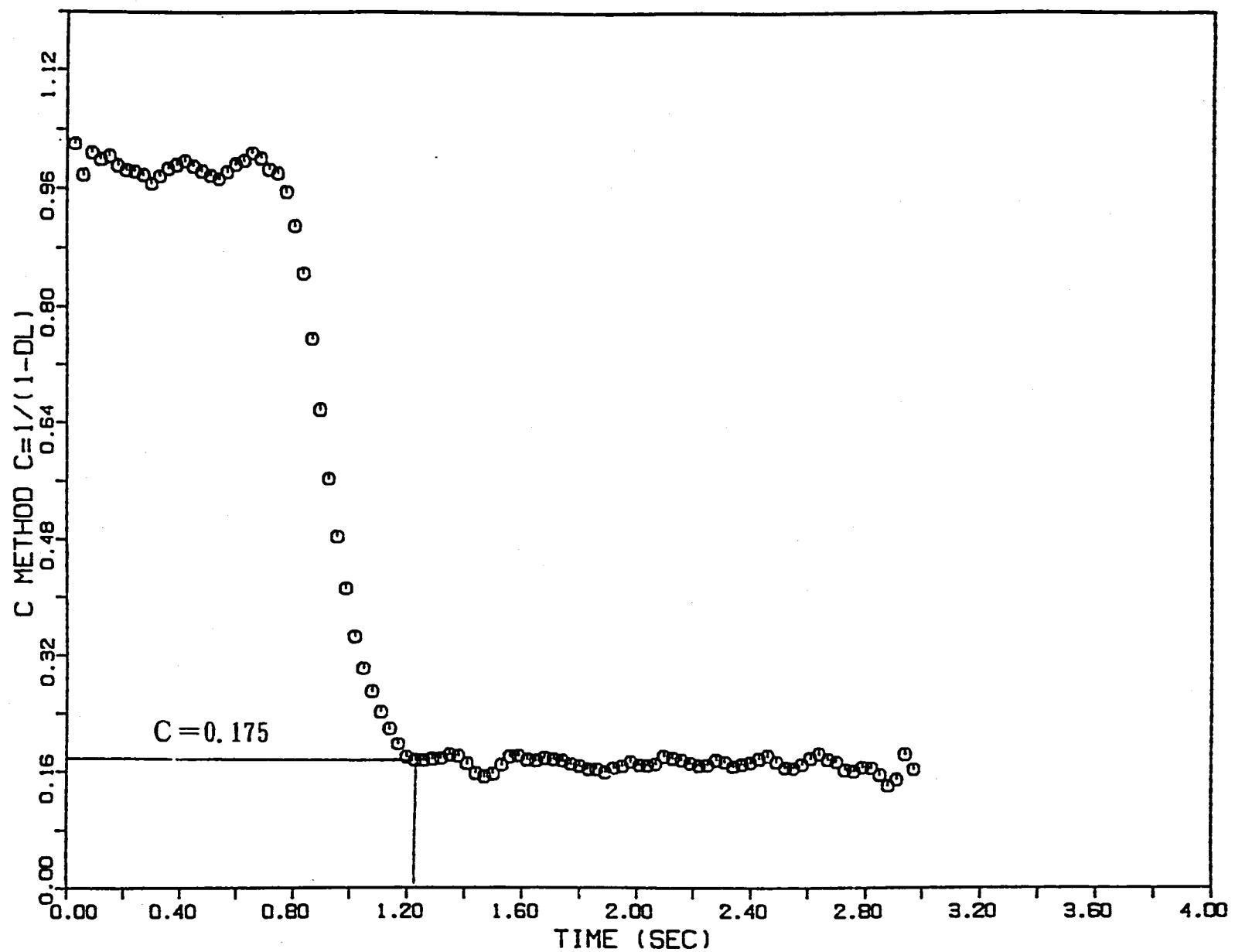
ロッドドロップ法試験結果プロット図

第24サイクルにおけるロッドドロップ法試験における

- (1) MCSで測定した計数率時間変化
- (2) (1)を基に評価した係数Cの時間変化
- (3) (2)を基に評価した投入反応度時間変化

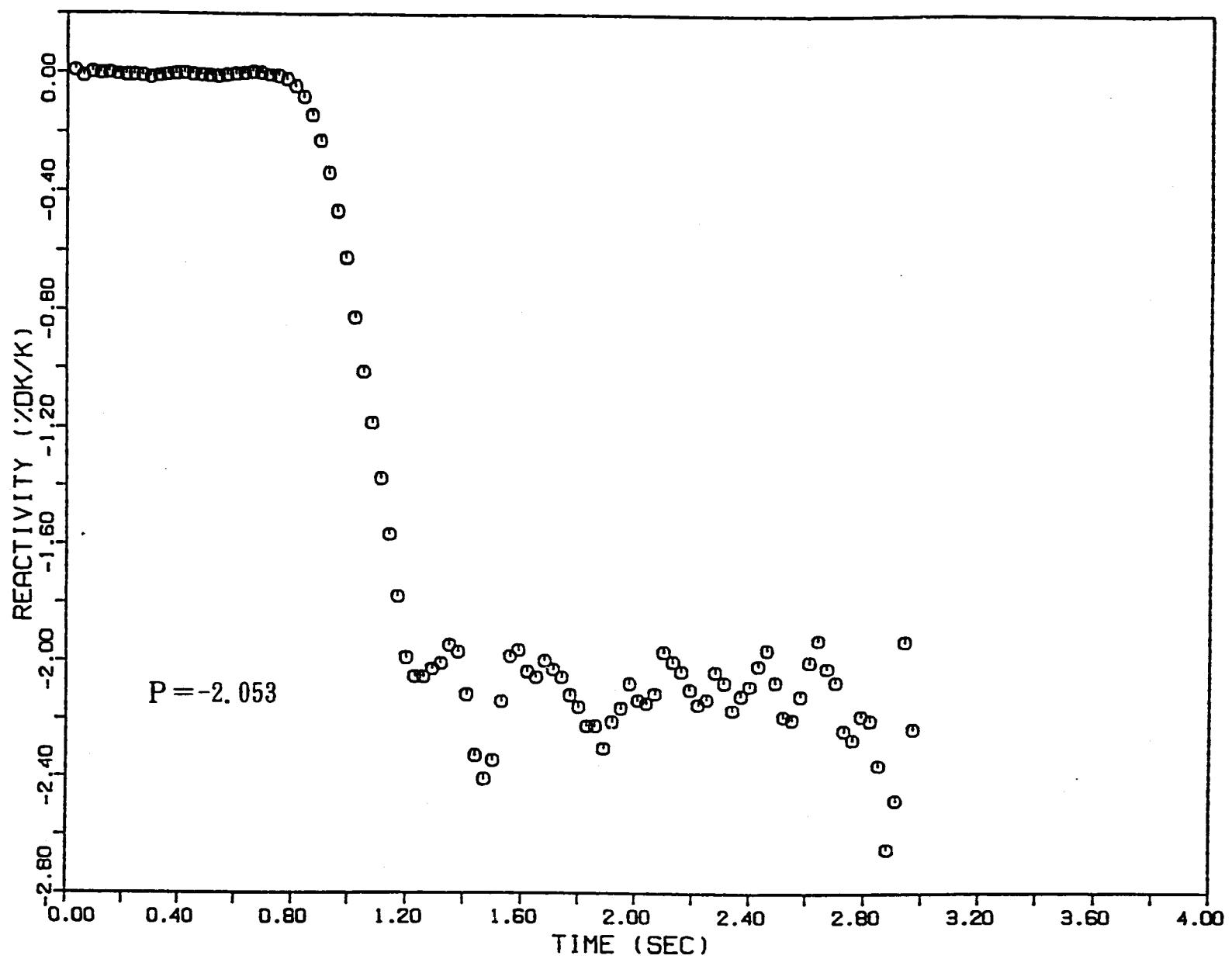
の各ケースにおけるプロットを図IV (1/36~ 36/36) に示す。

番号	パターン	核計装	プロット内容	番号	パターン	核計装	プロット内容
1	A-2	ch. 1	計数率時間変化	19	A-5	ch. 1	計数率時間変化
2	"	"	係数C時間変化	20	"	"	係数C時間変化
3	"	"	投入反応度時間変化	21	"	"	投入反応度時間変化
4	"	ch. 2	計数率時間変化	22	"	ch. 2	計数率時間変化
5	"	"	係数C時間変化	23	"	"	係数C時間変化
6	"	"	投入反応度時間変化	24	"	"	投入反応度時間変化
7	B-2-1	ch. 1	計数率時間変化	25	B-5-2	ch. 1	計数率時間変化
8	"	"	係数C時間変化	26	"	"	係数C時間変化
9	"	"	投入反応度時間変化	27	"	"	投入反応度時間変化
10	"	ch. 2	計数率時間変化	28	"	ch. 2	計数率時間変化
11	"	"	係数C時間変化	29	"	"	係数C時間変化
12	"	"	投入反応度時間変化	30	"	"	投入反応度時間変化
13	B-2-5	ch. 1	計数率時間変化	31	B-5-6	ch. 1	計数率時間変化
14	"	"	係数C時間変化	32	"	"	係数C時間変化
15	"	"	投入反応度時間変化	33	"	"	投入反応度時間変化
16	"	ch. 2	計数率時間変化	34	"	ch. 2	計数率時間変化
17	"	"	係数C時間変化	35	"	"	係数C時間変化
18	"	"	投入反応度時間変化	36	"	"	投入反応度時間変化

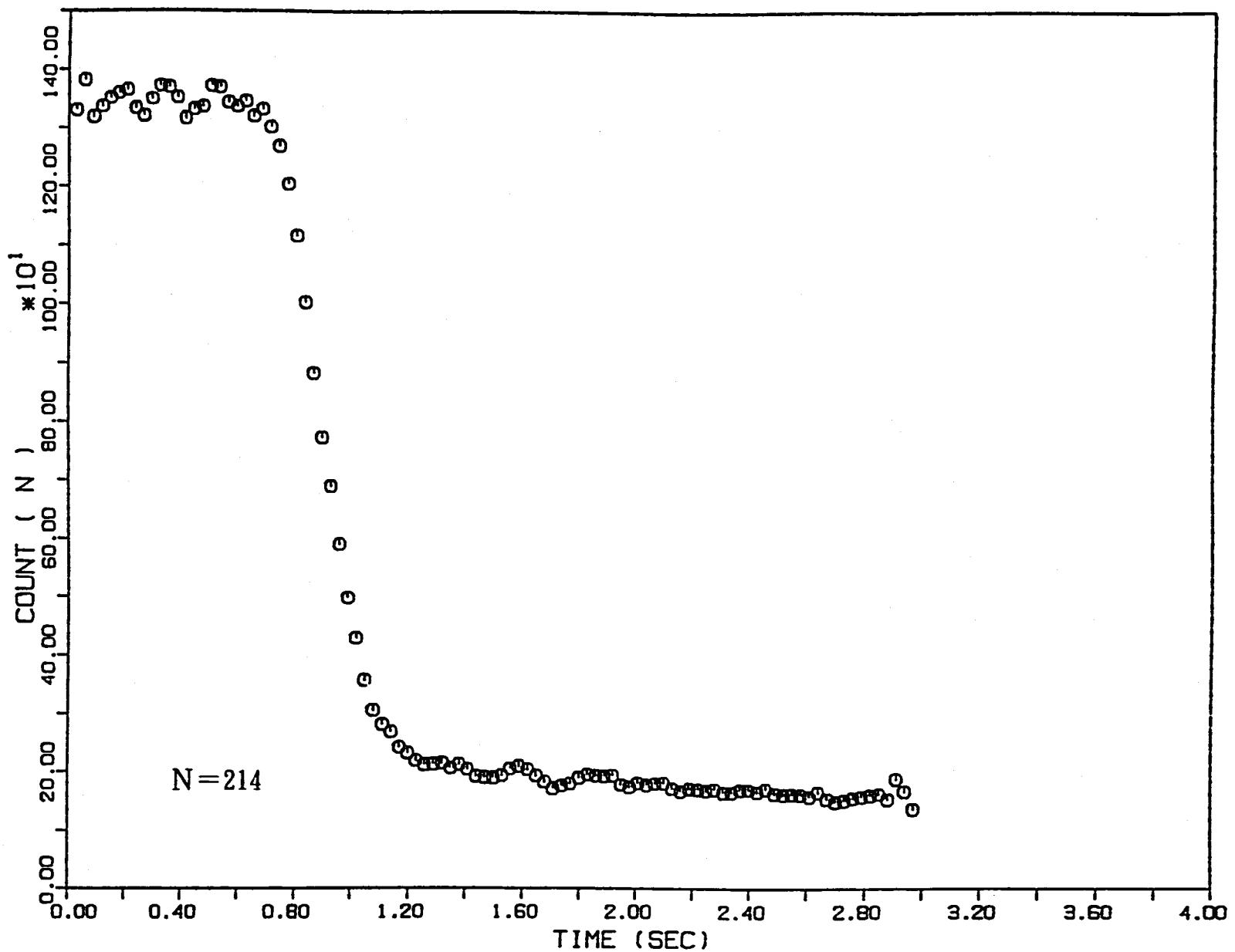


図IV ロッドドロップ法測定結果 (A-2 ch.1) : (1/34)

- 0 L -

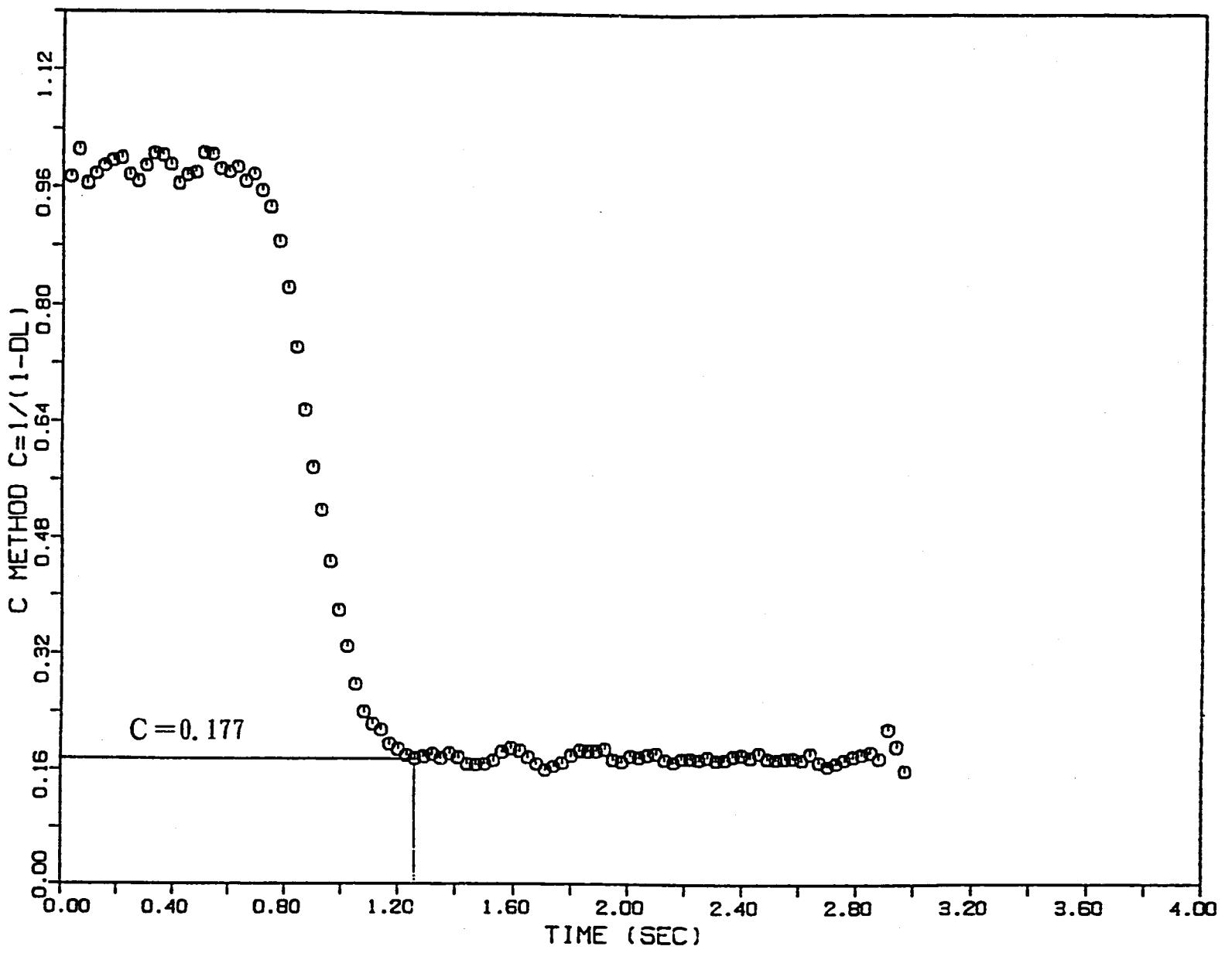


図IV ロッドドロップ法測定結果 (A-2 ch.1) : (2 / 34)

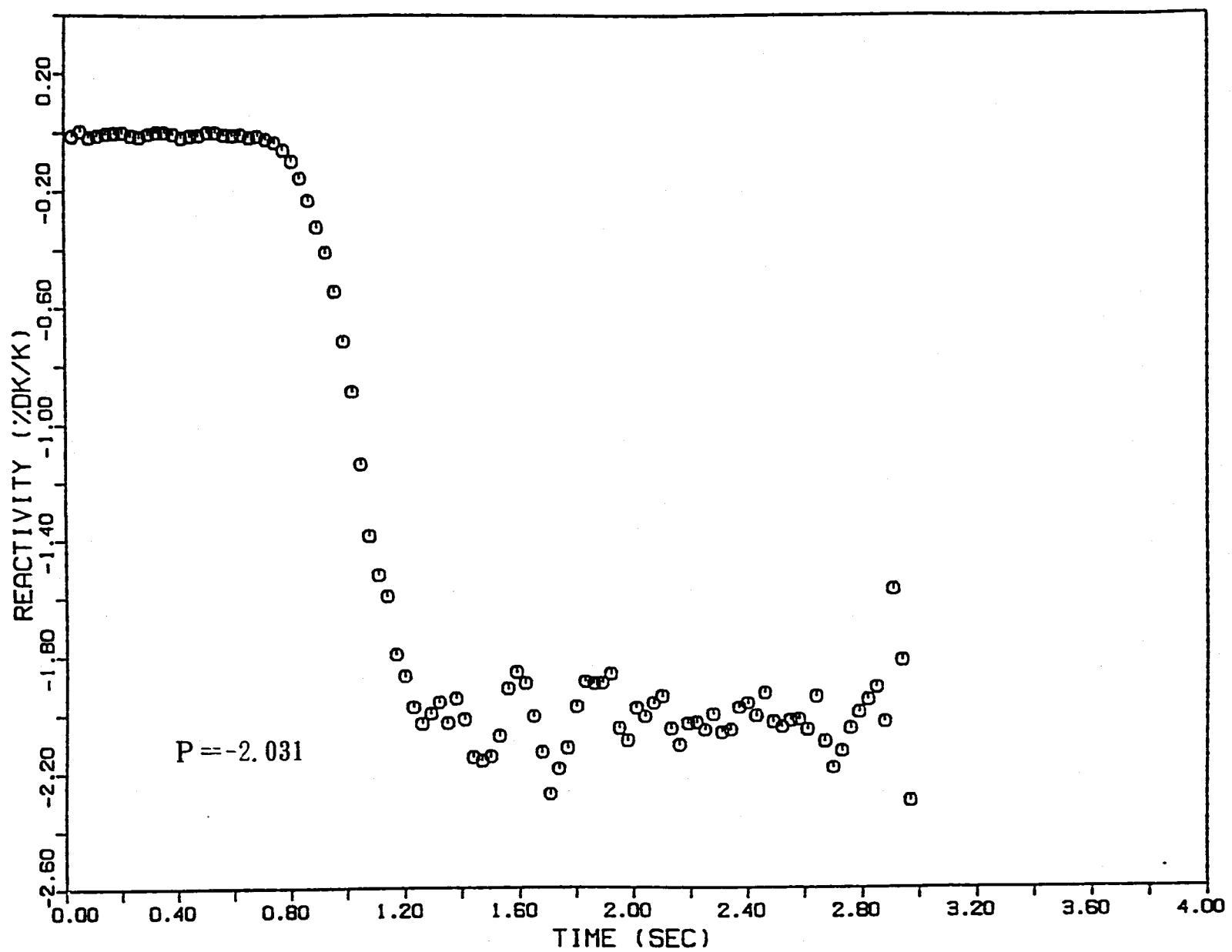


図IV ロッドドロップ法測定結果 (A-2 ch.2) : (3 / 34)

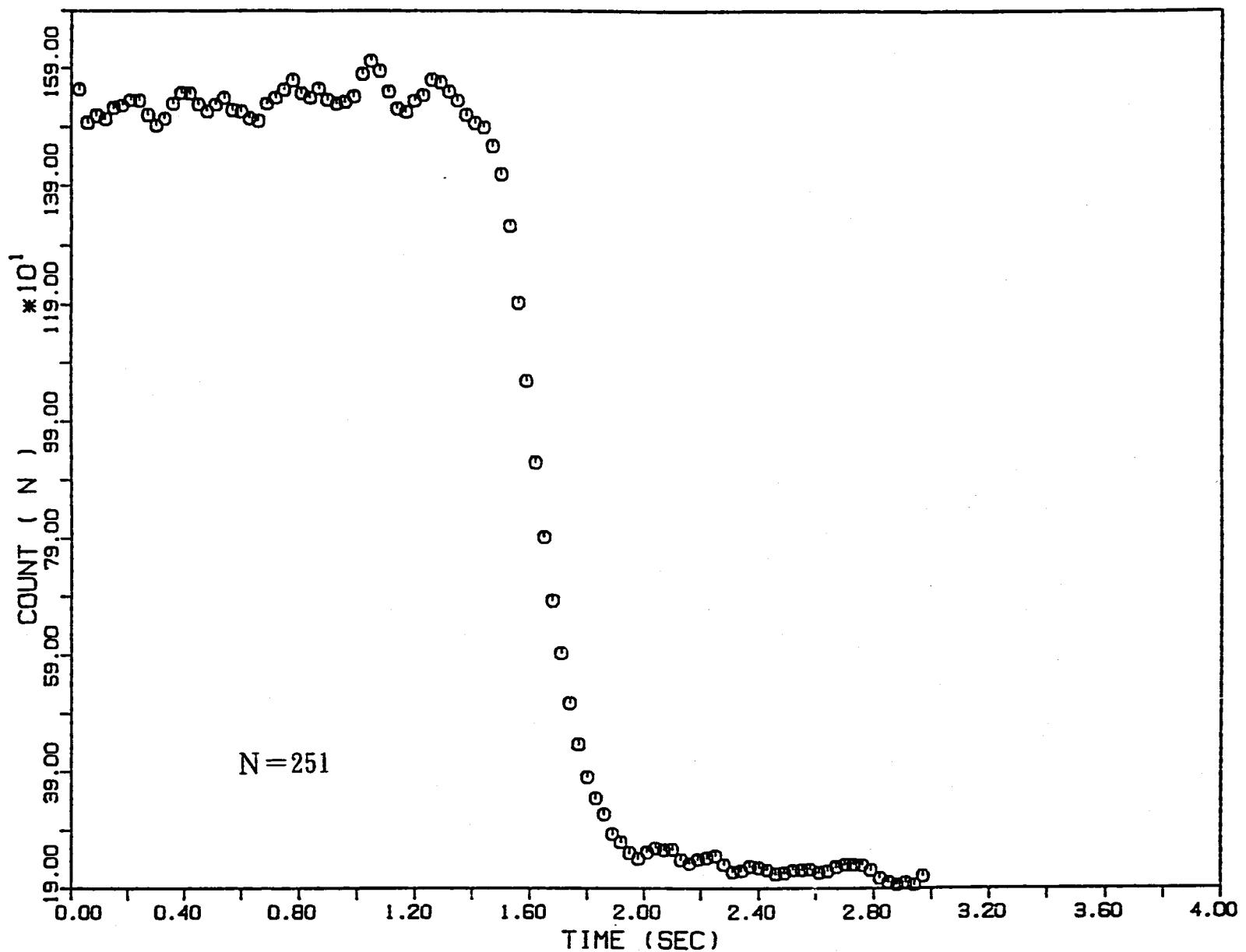
- 72 -



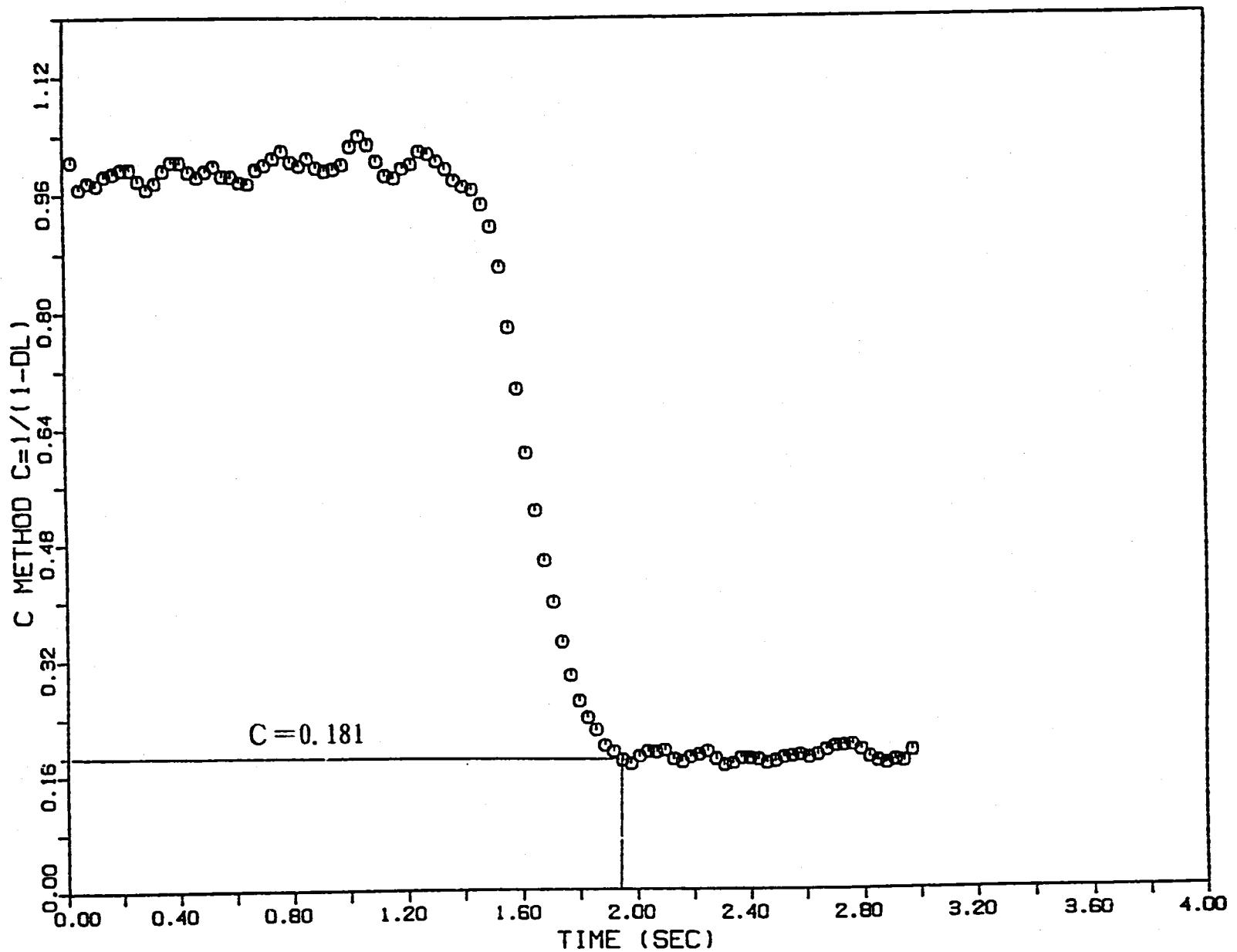
図IV ロッドドロップ法測定結果 (A-2 ch. 2) : (4 / 34)



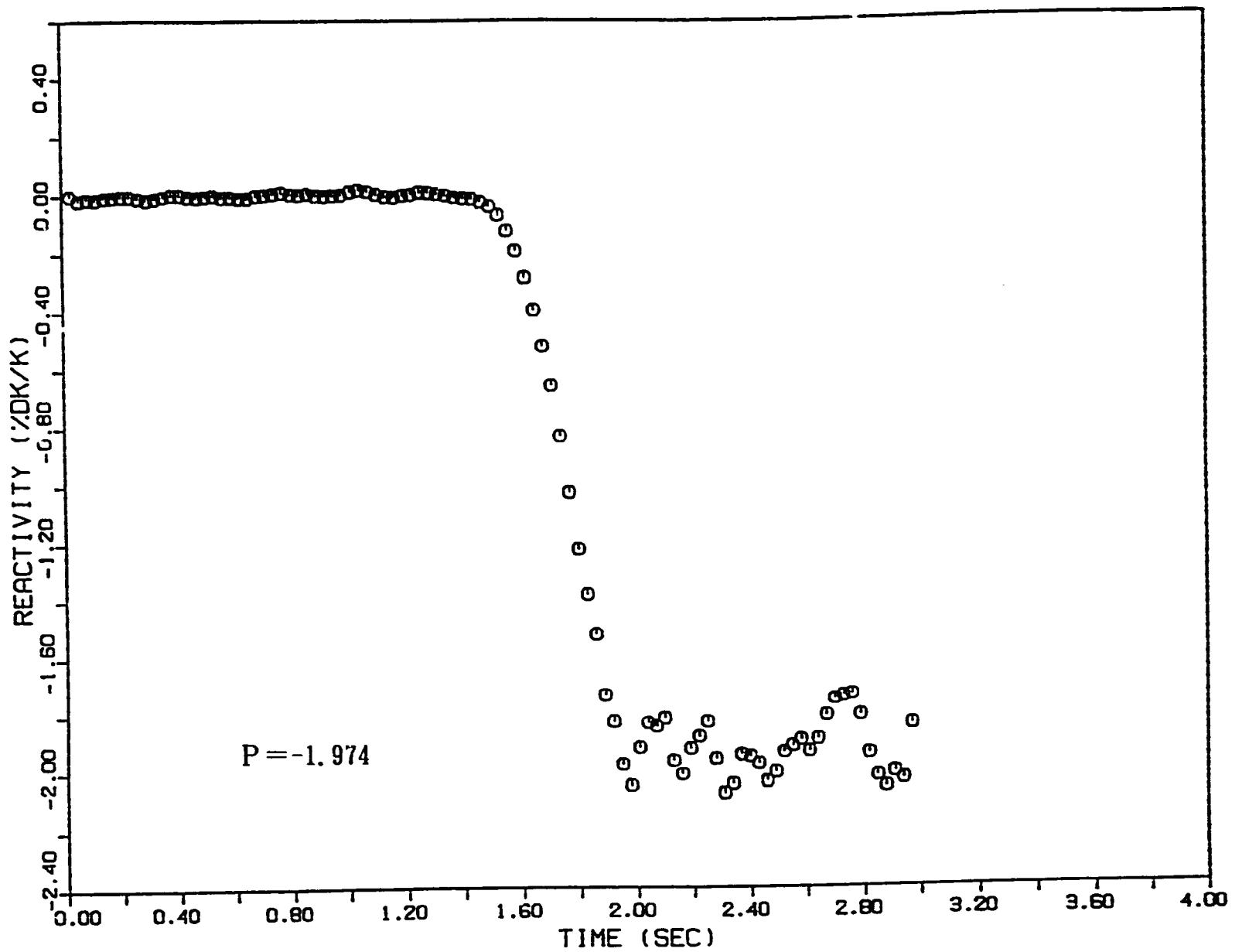
図IV ロッドドロップ法測定結果 (A-2 ch. 2) : (5 / 34)



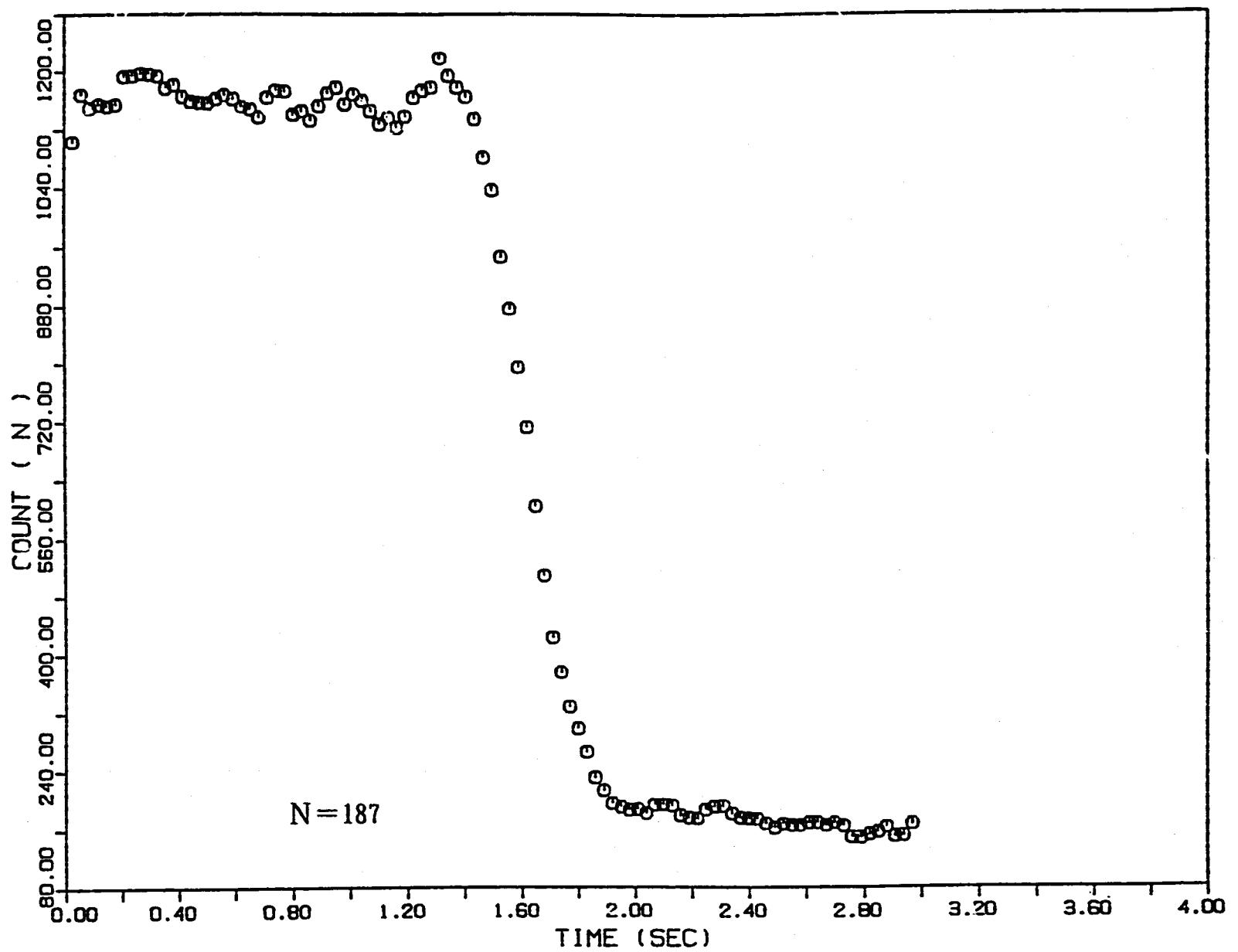
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-2-1 ch.1) : (6 / 34)



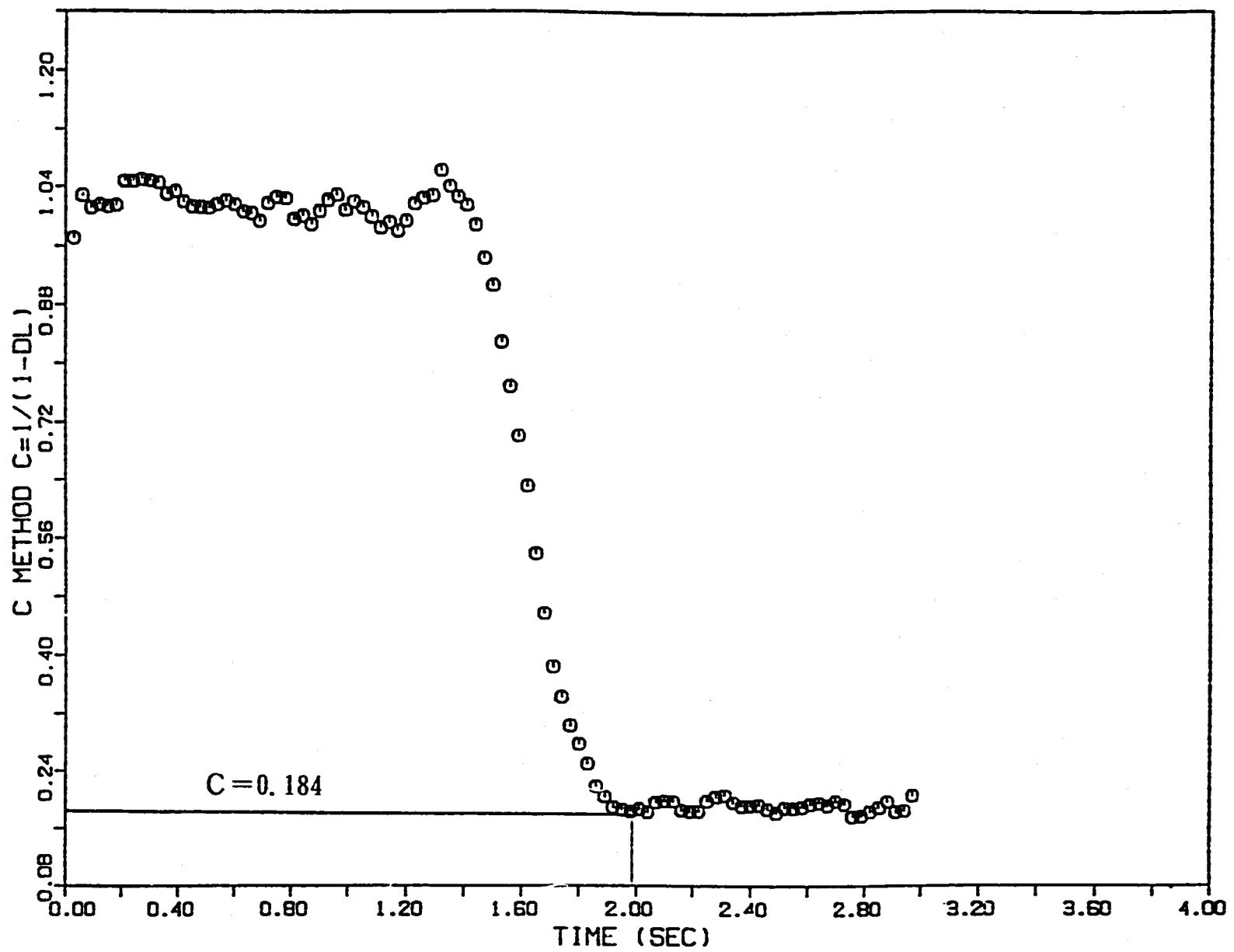
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-2-1 ch.1) : (7/34)



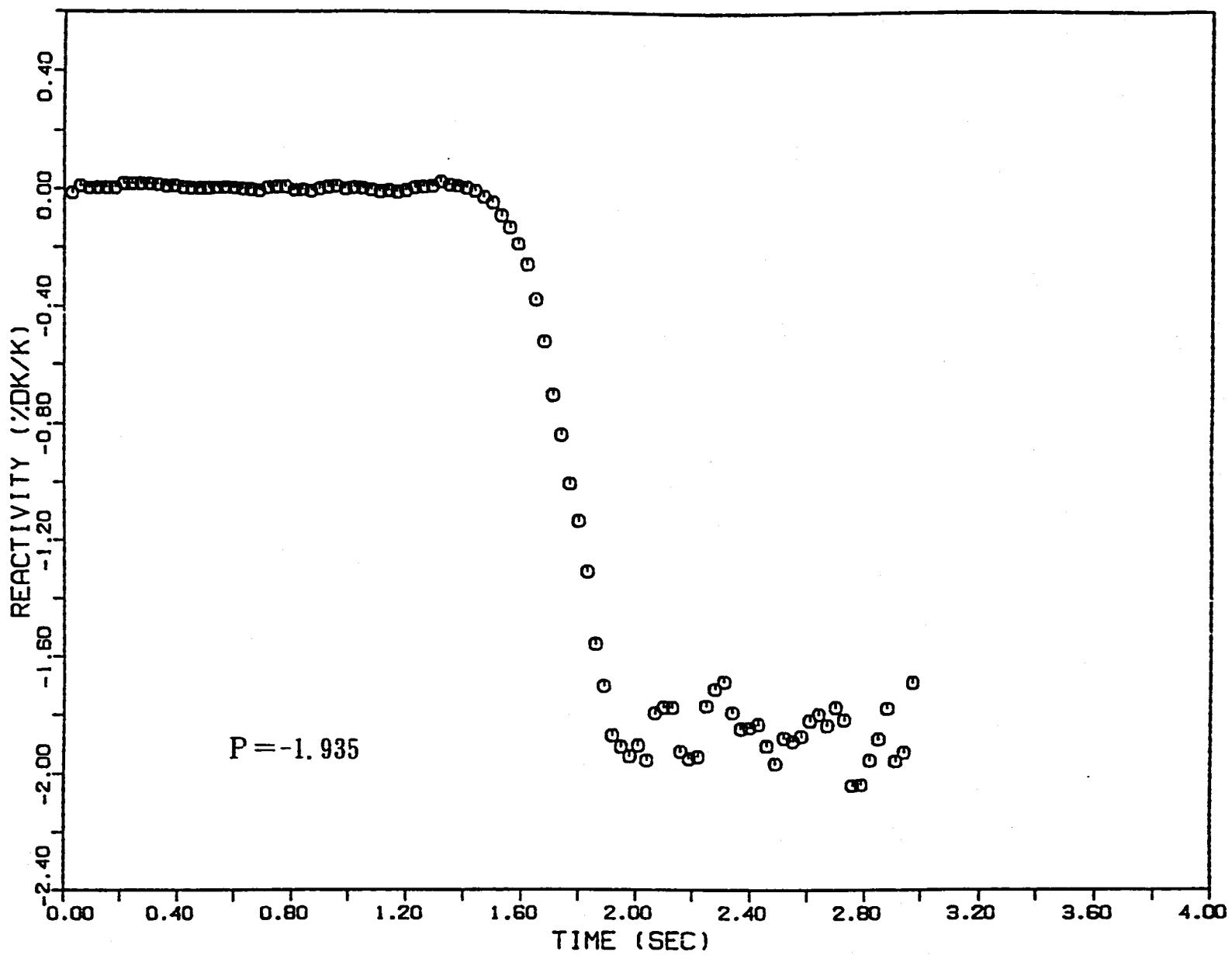
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-2-1 ch.1) : (8/34)



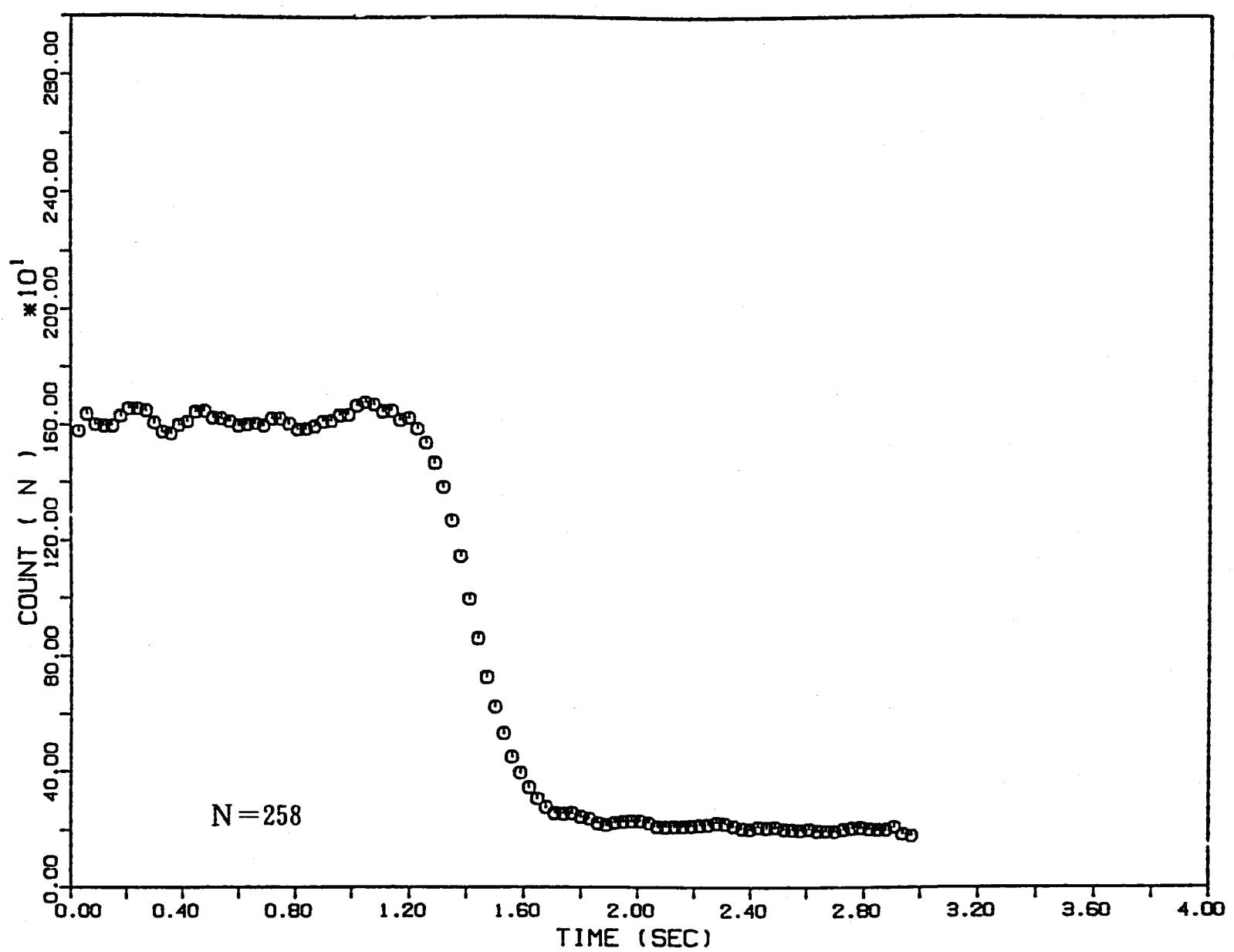
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-2-1 ch.2) : (9 / 34)



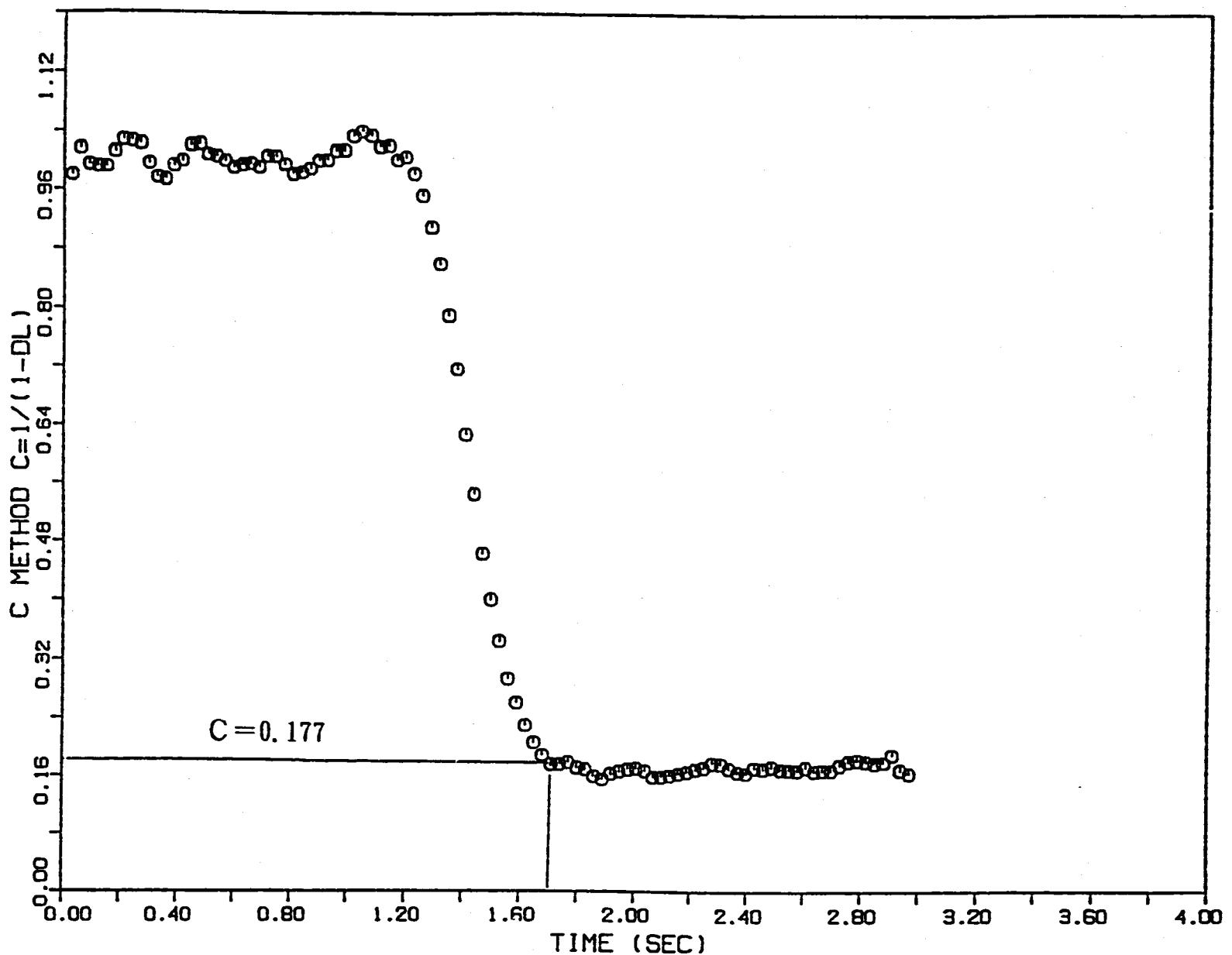
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-2-1 ch.2) : (10/34)



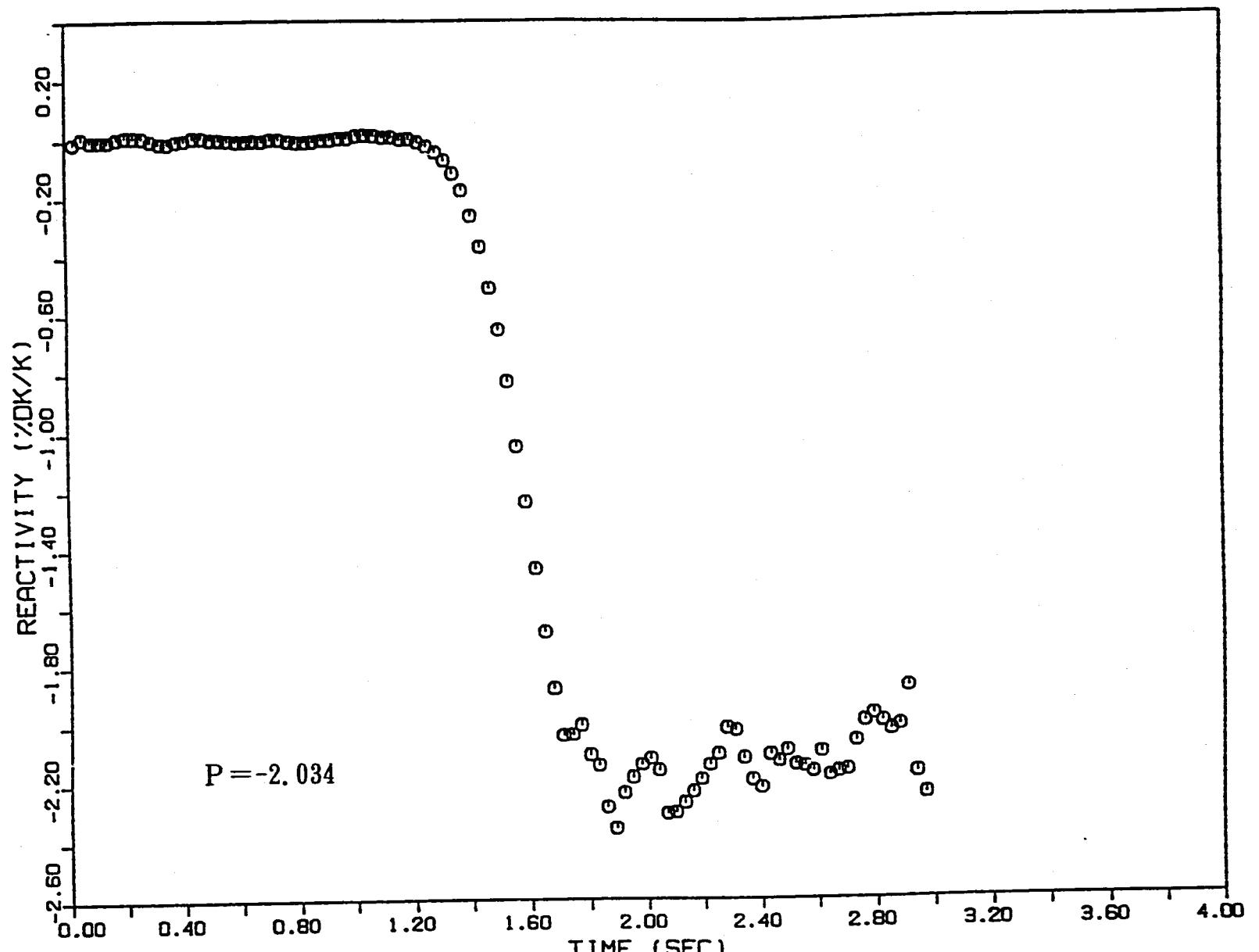
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-2-1 ch.2) : (11/34)



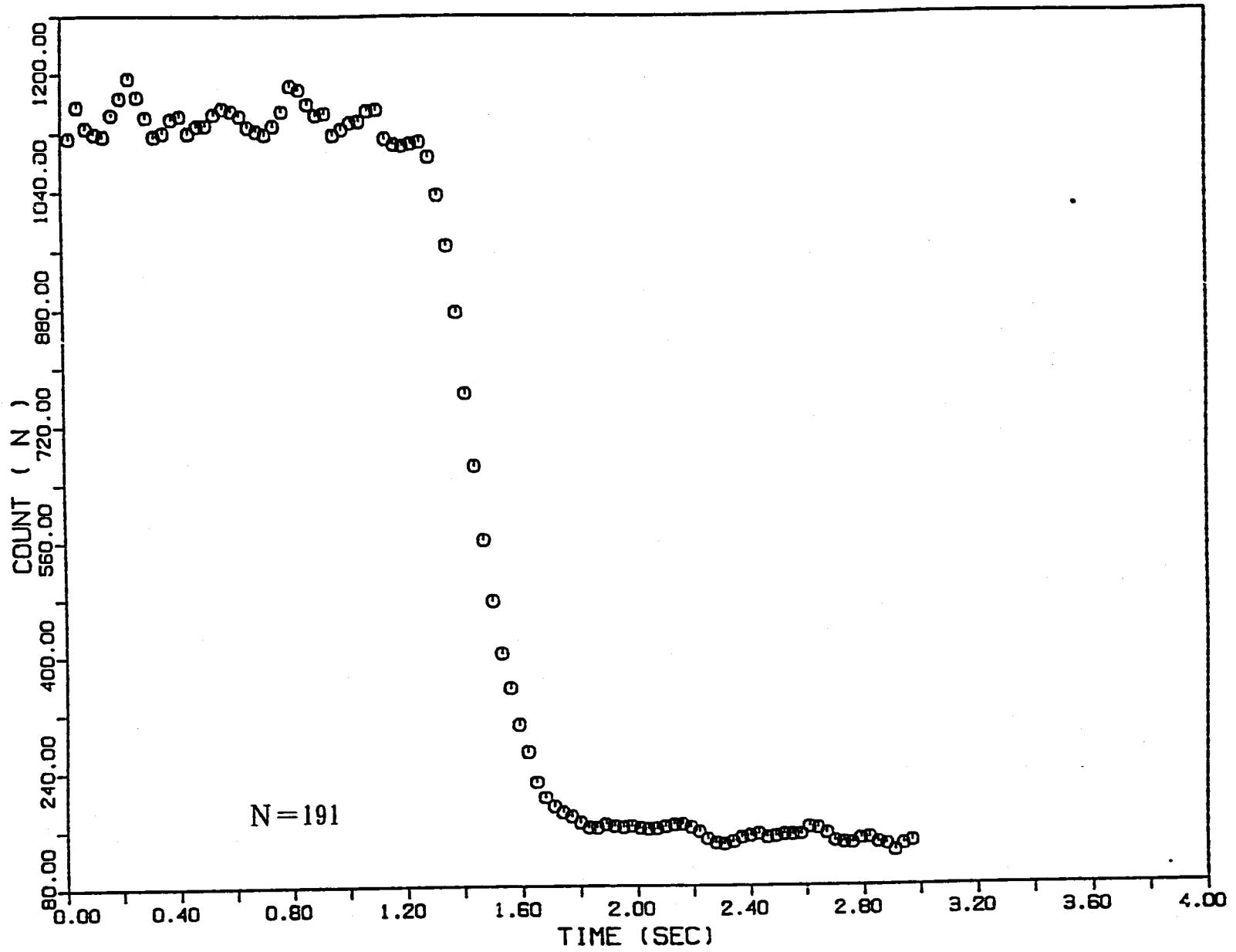
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-2-5 ch.1) : (12/34)



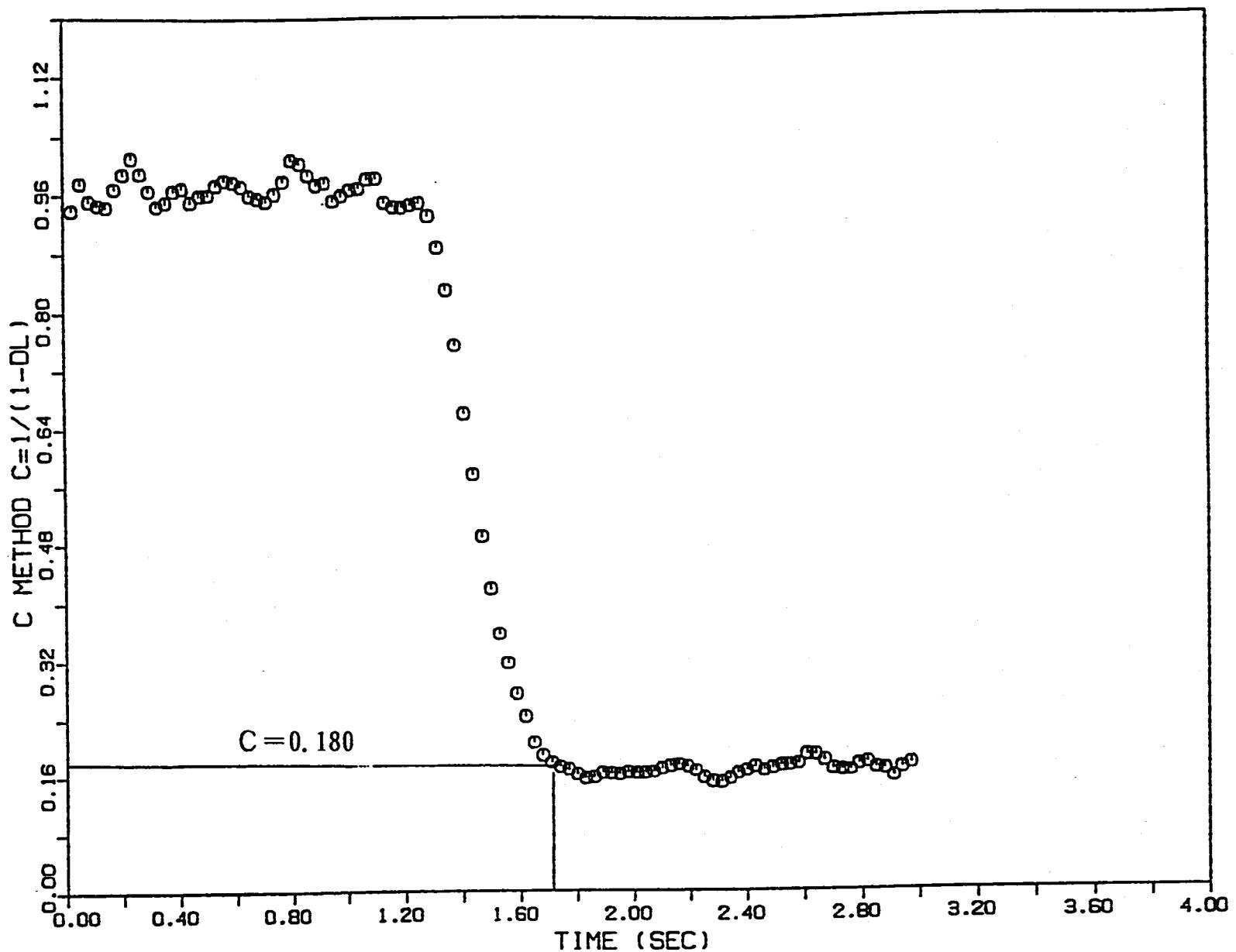
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-2-5 ch.1) : (13/34)



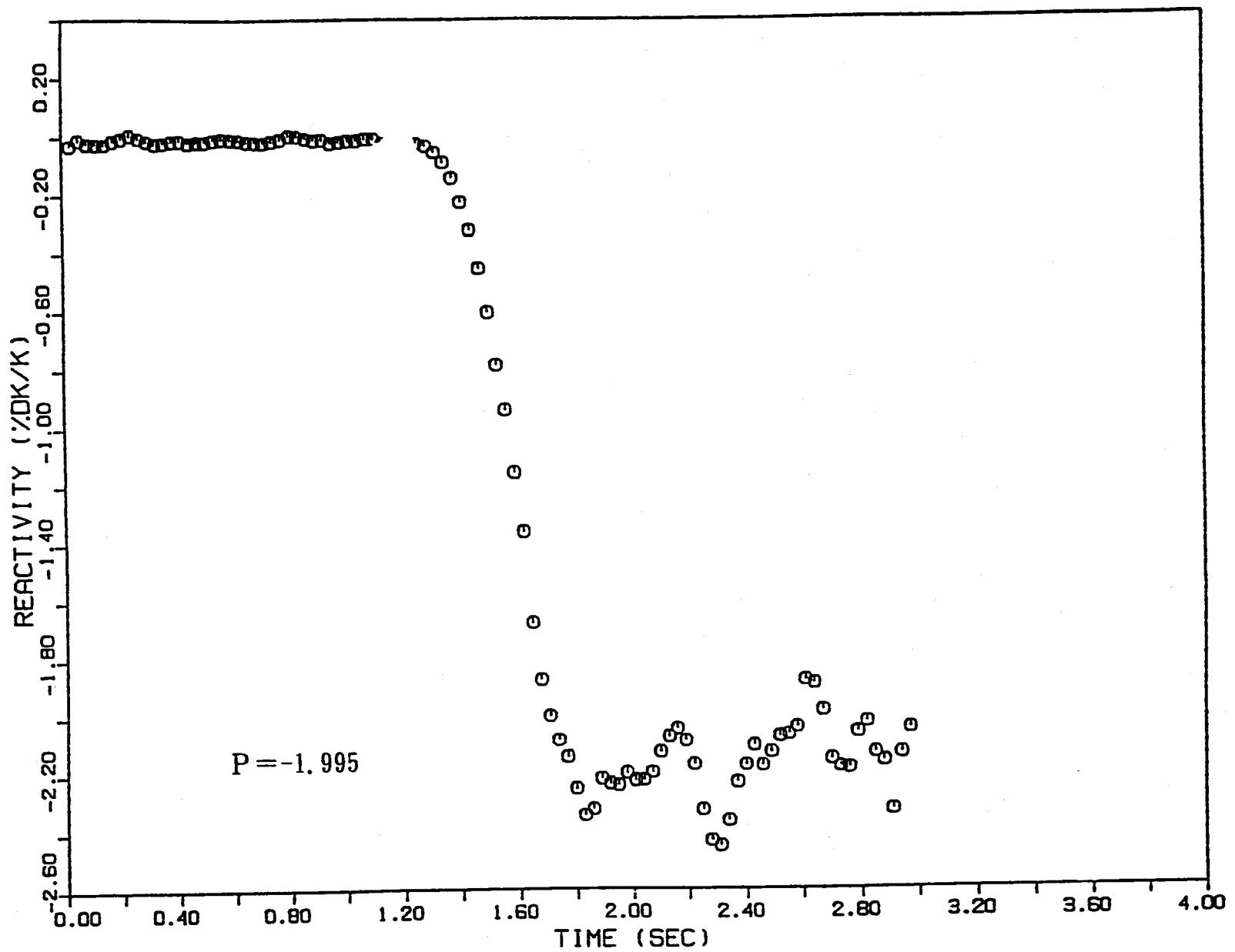
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-2-5 ch. 1) : (14/34)



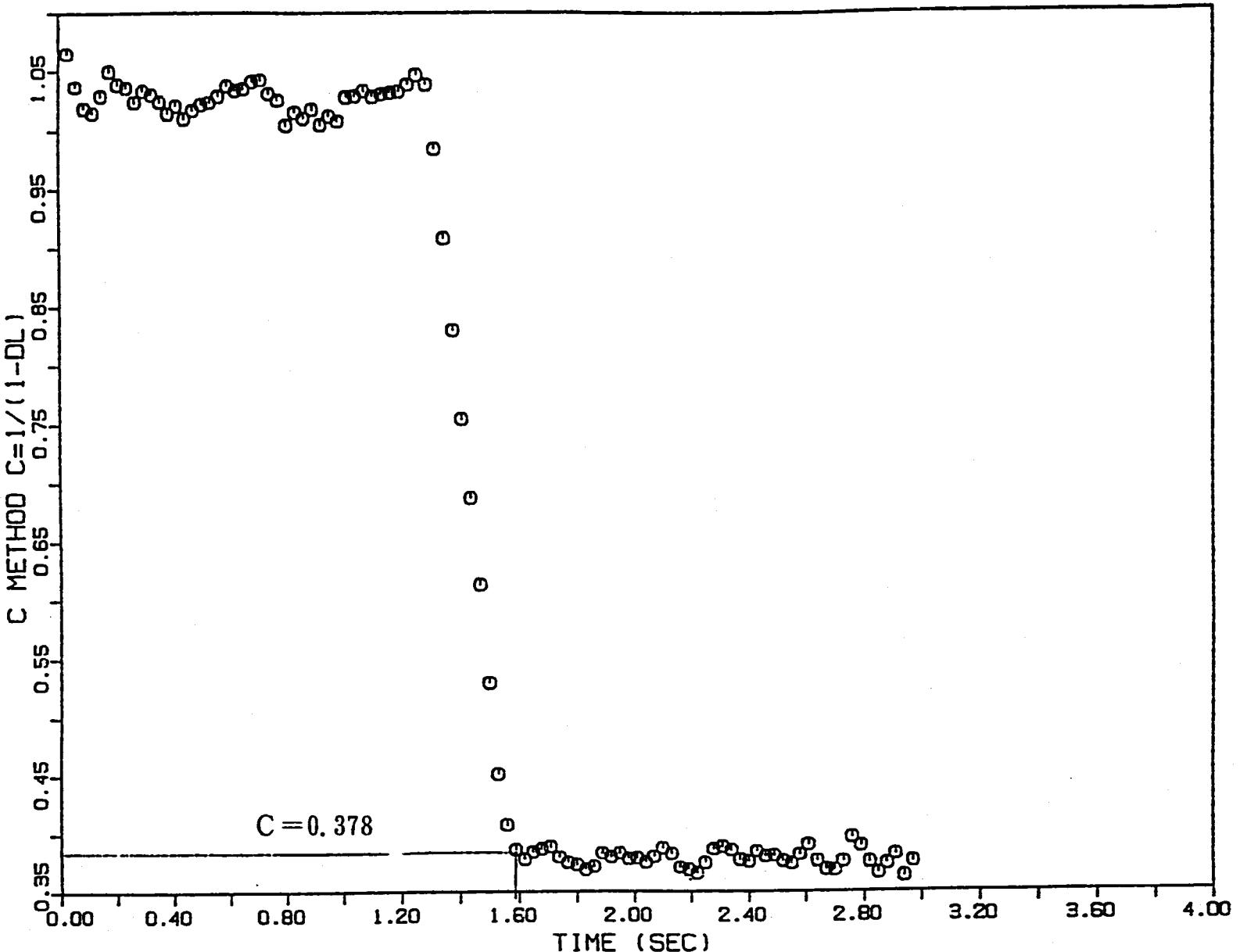
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-2-5 ch.2) : (15/34)



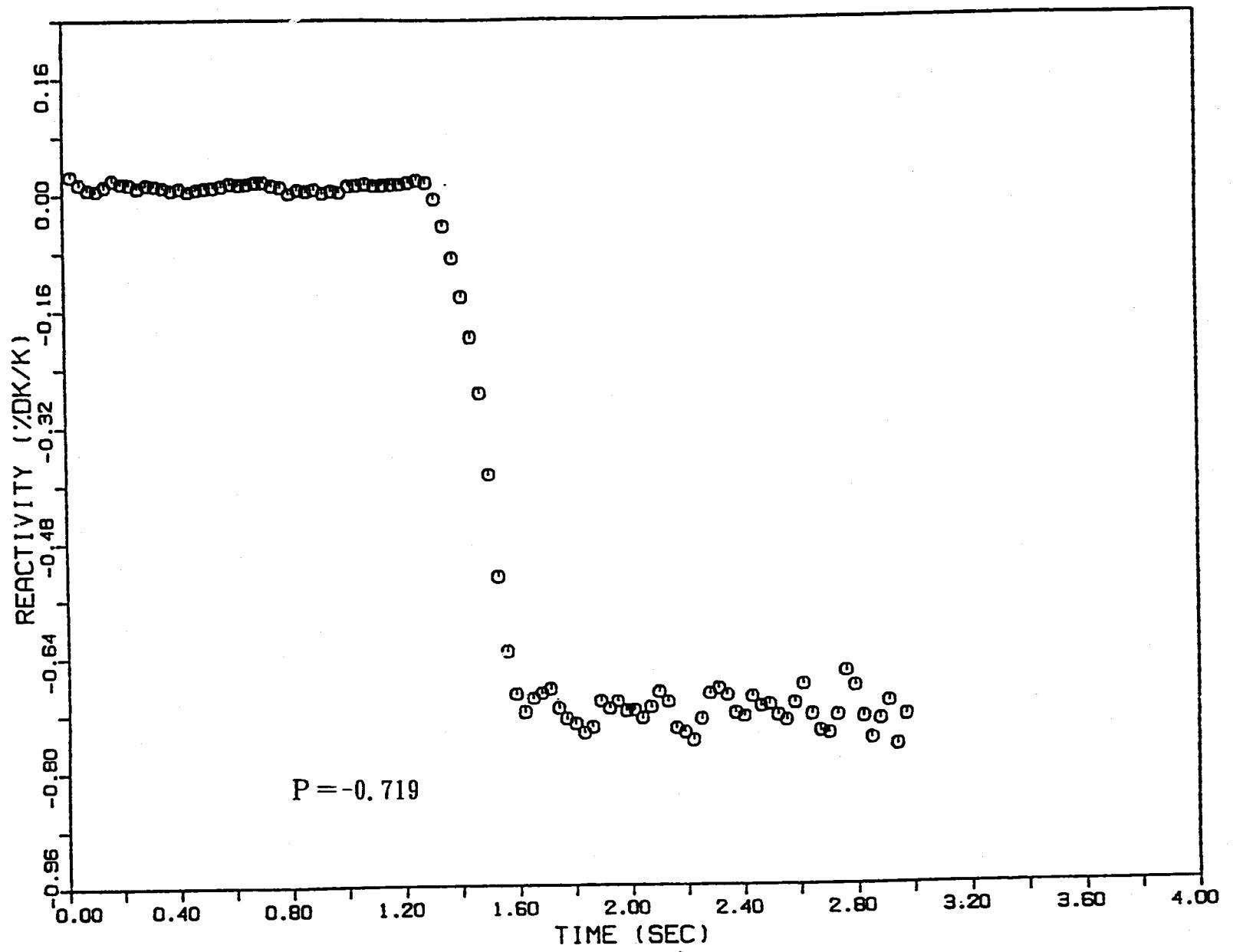
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-2-5 ch. 2) : (16/34)



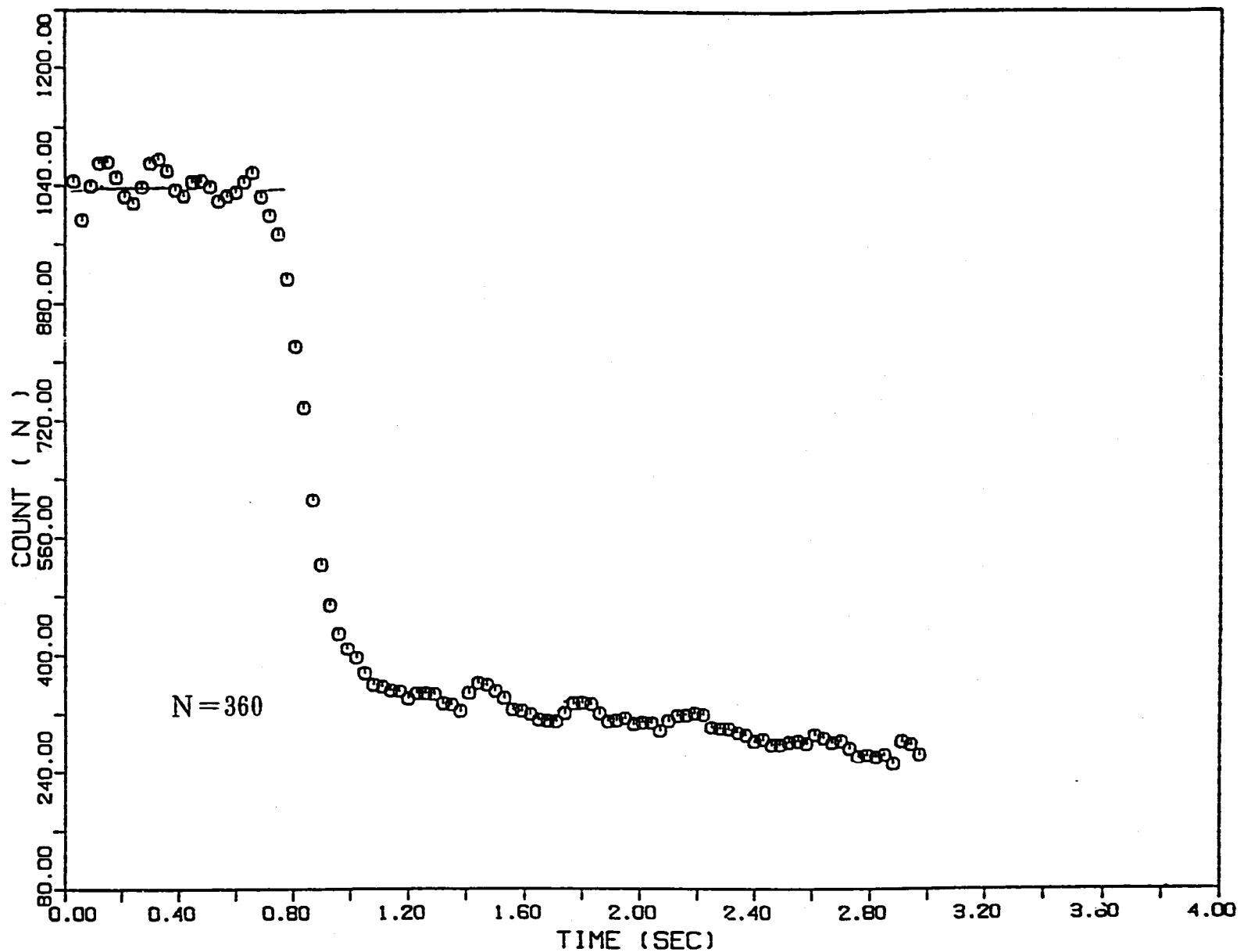
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-2-5 ch.2) : (17/34)



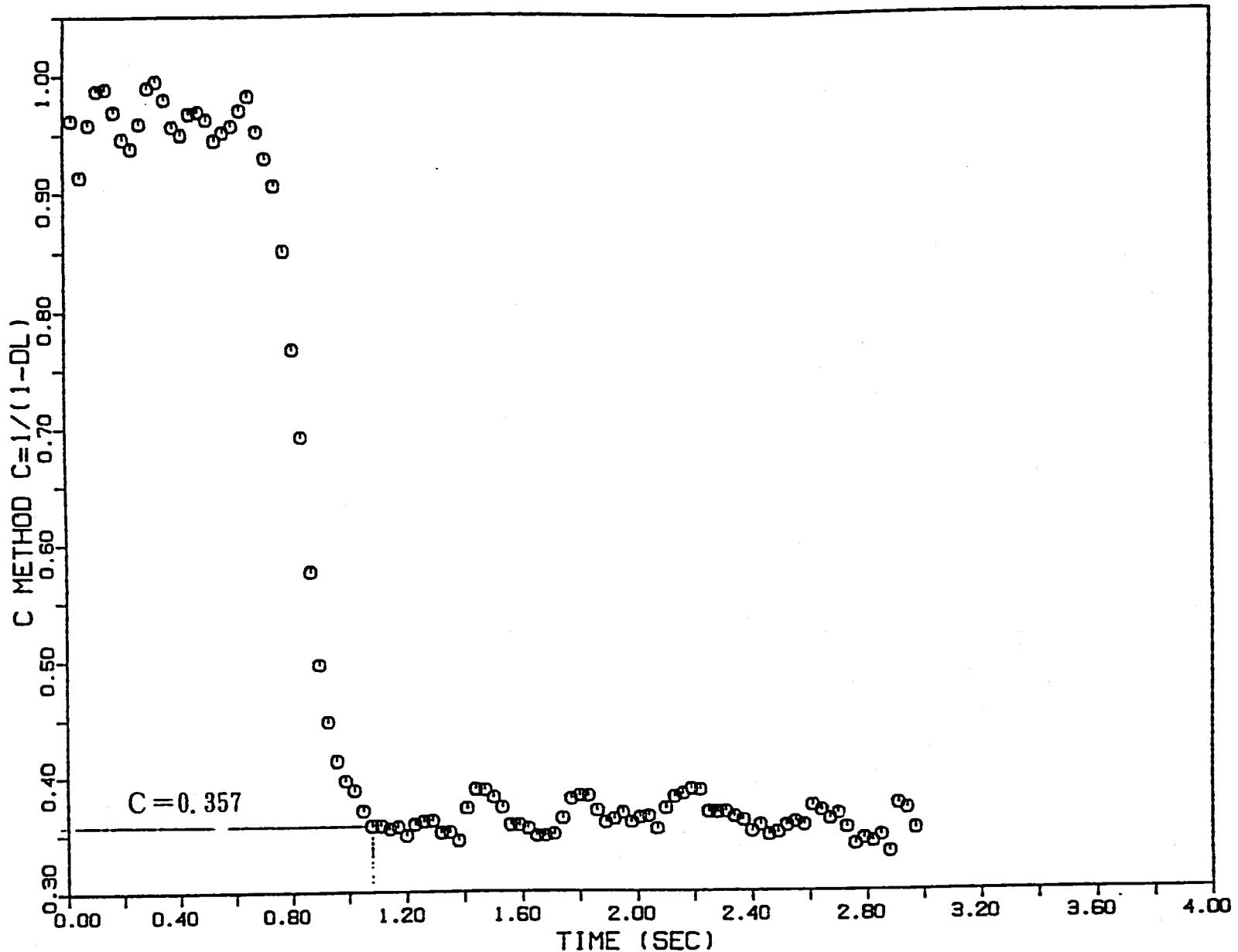
図IV ロッドドロップ法測定結果 (A-5 ch.1) : (18/34)



図IV ロッドドロップ法測定結果 (A-5 ch.1) : (19/34)

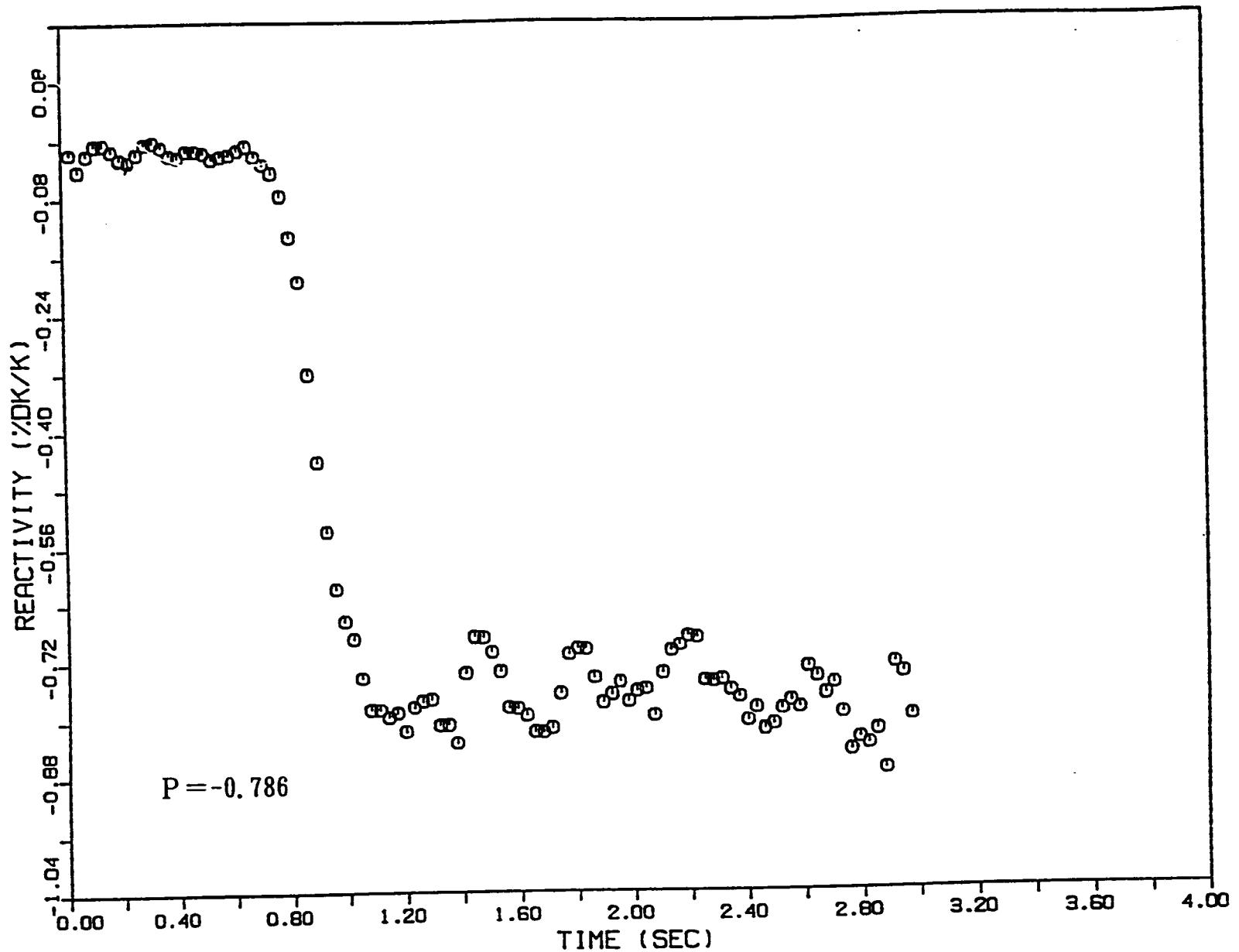


図IV ロッドドロップ法測定結果 (A-5 ch.2) : (20/34)

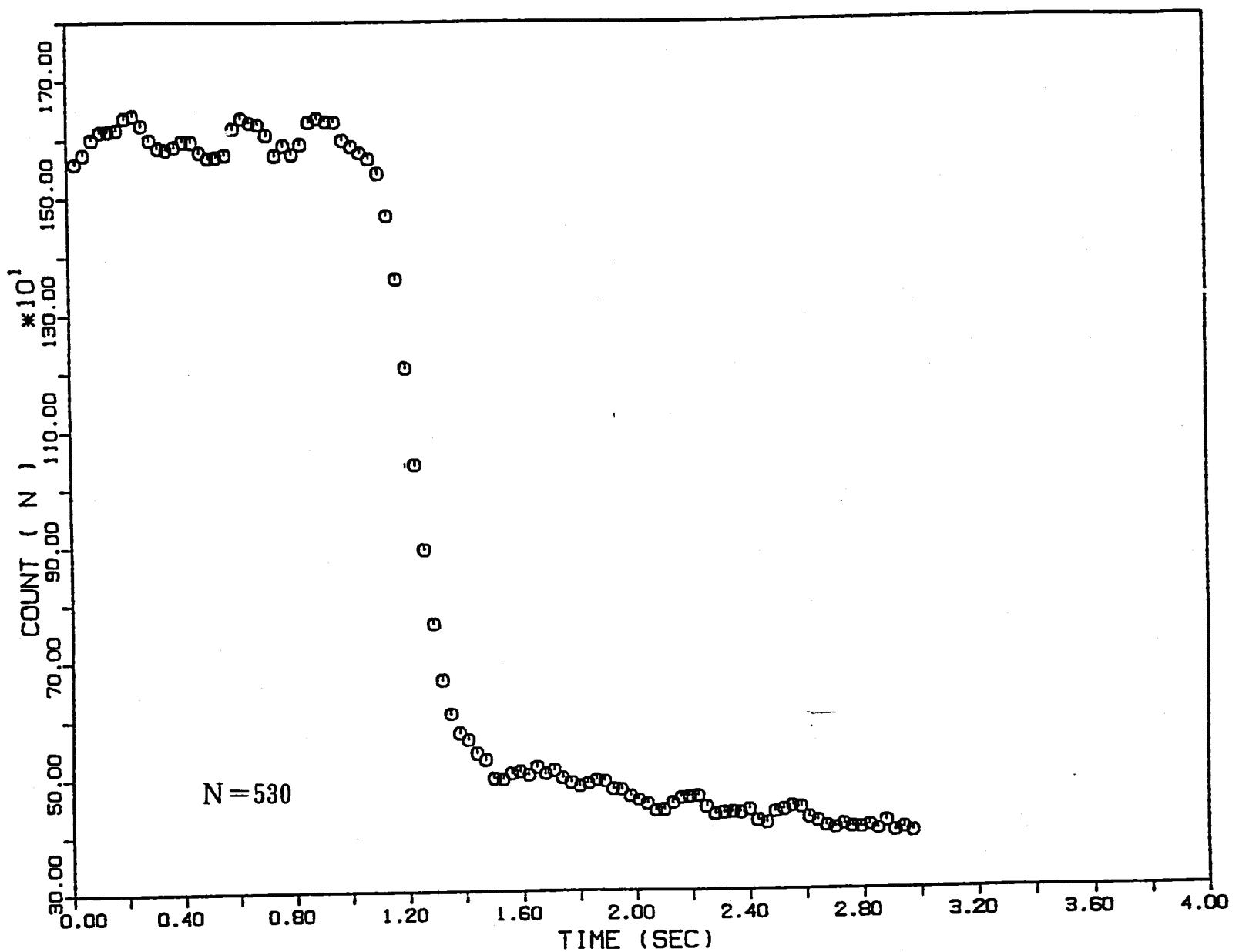


図IV ロッドドロップ法測定結果 (A-5 ch.2) : (21/34)

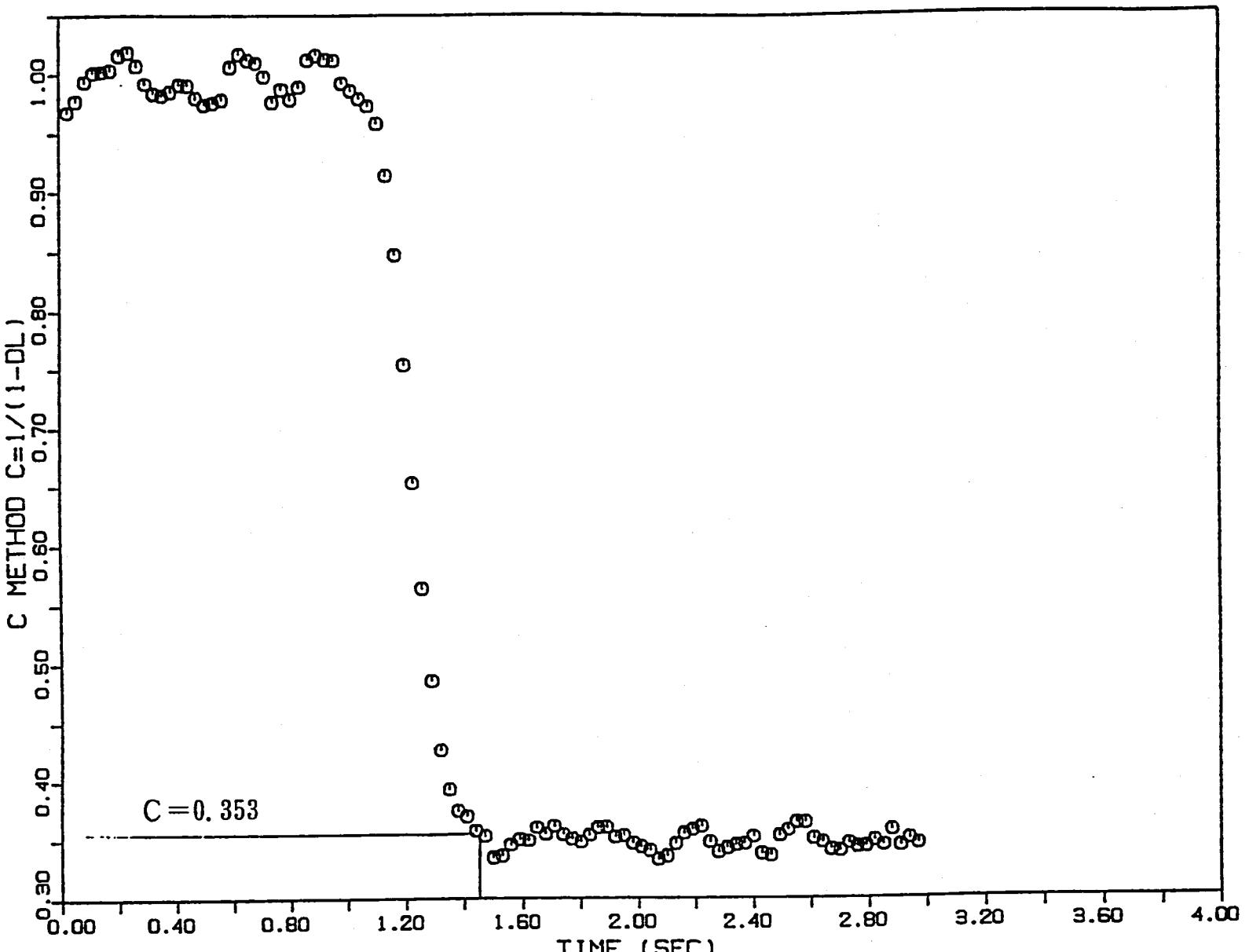
- 0 6 -



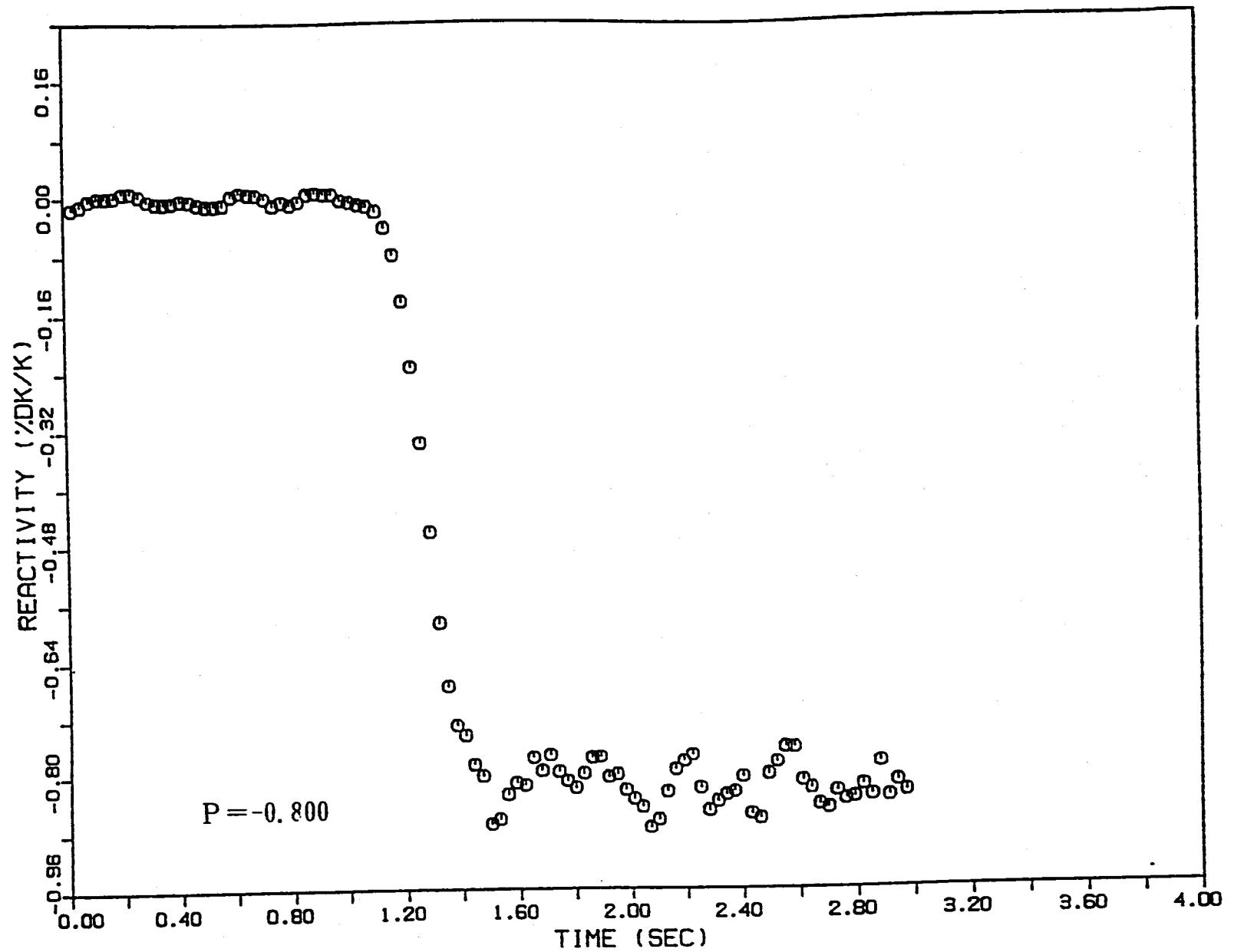
図IV ロッドドロップ法測定結果 (A-5 ch. 2) : (22/34)



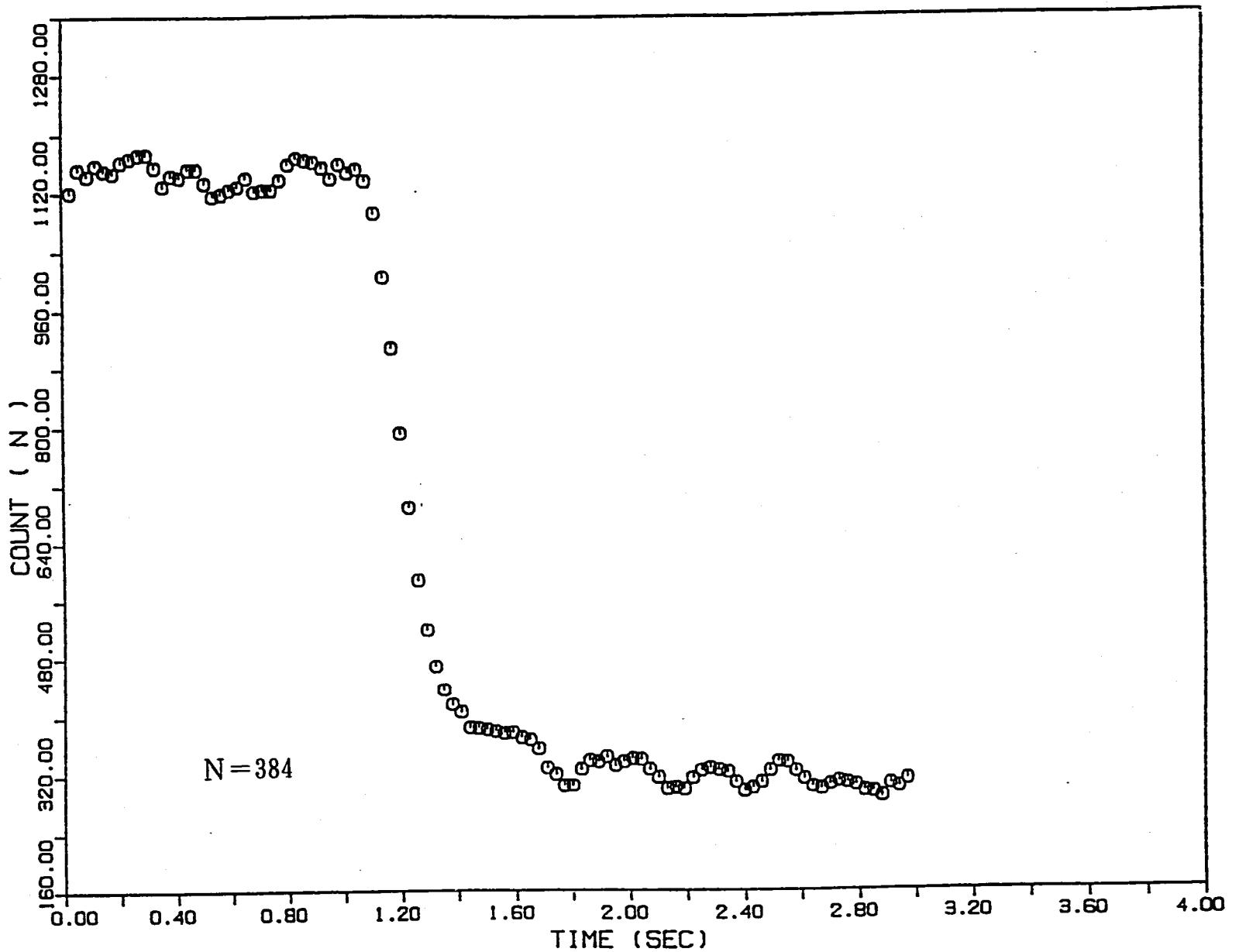
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-5-2 ch.1) : (23/34)



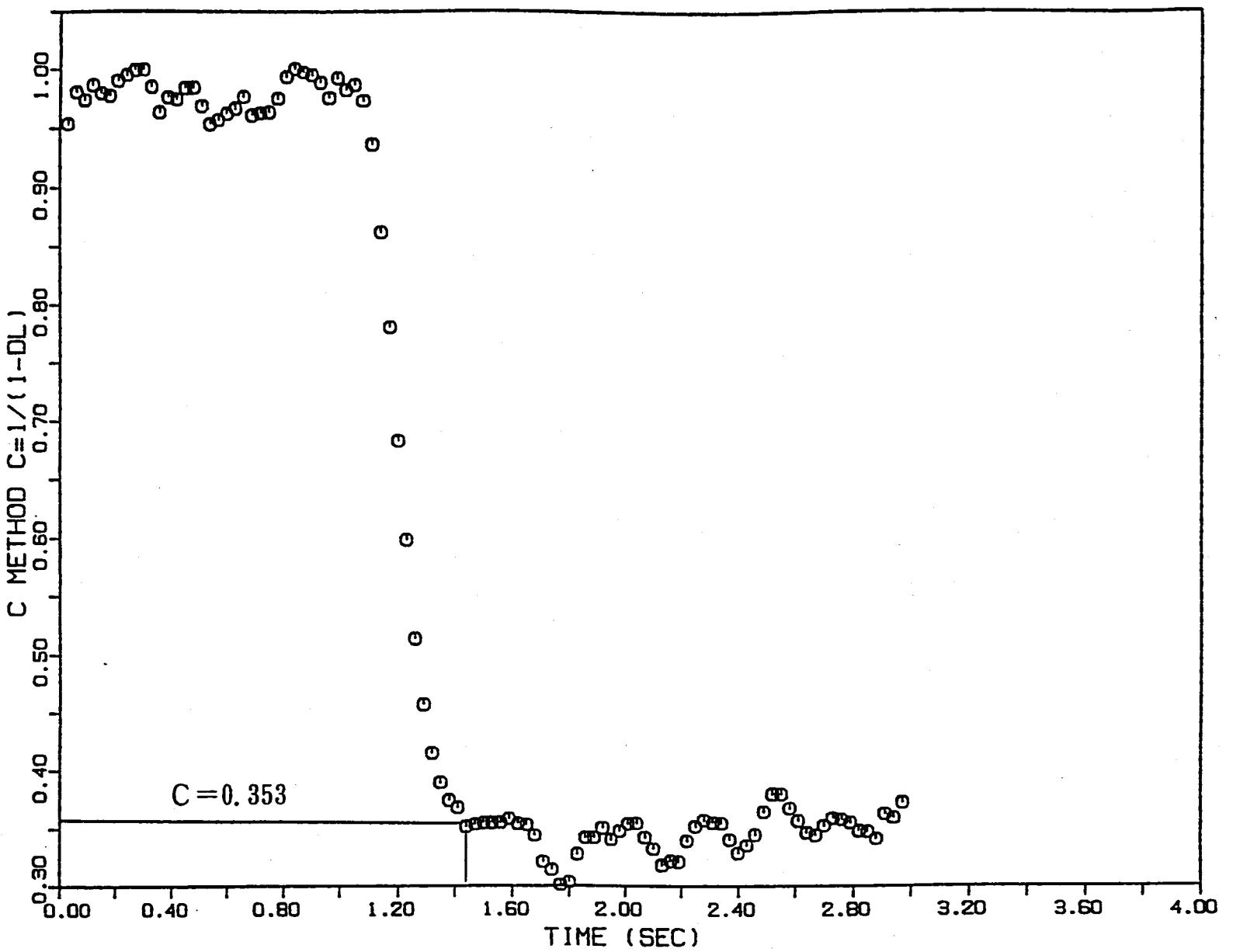
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-5-2 ch.1) : (24/34)



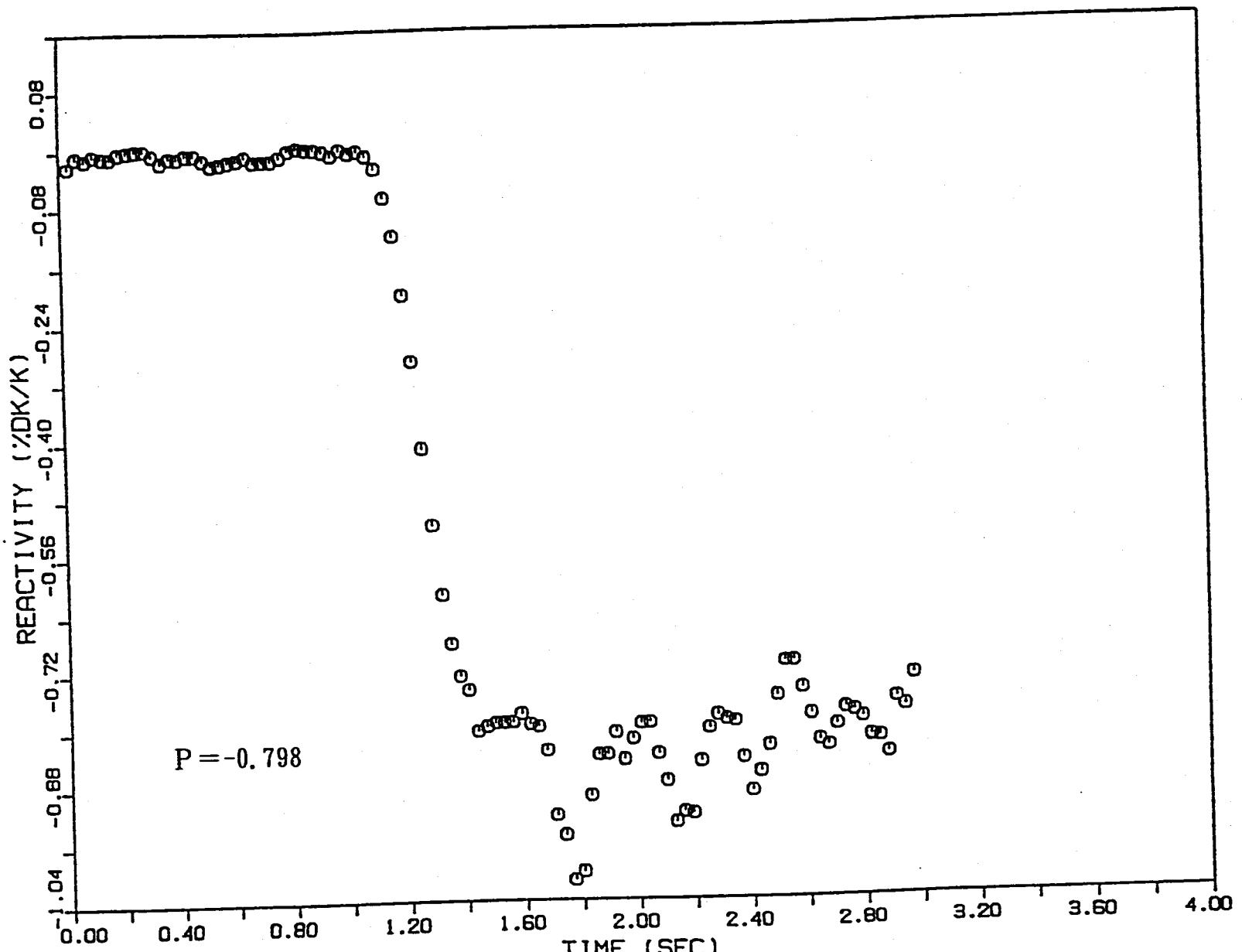
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-5-2 ch.1) : (25/34)



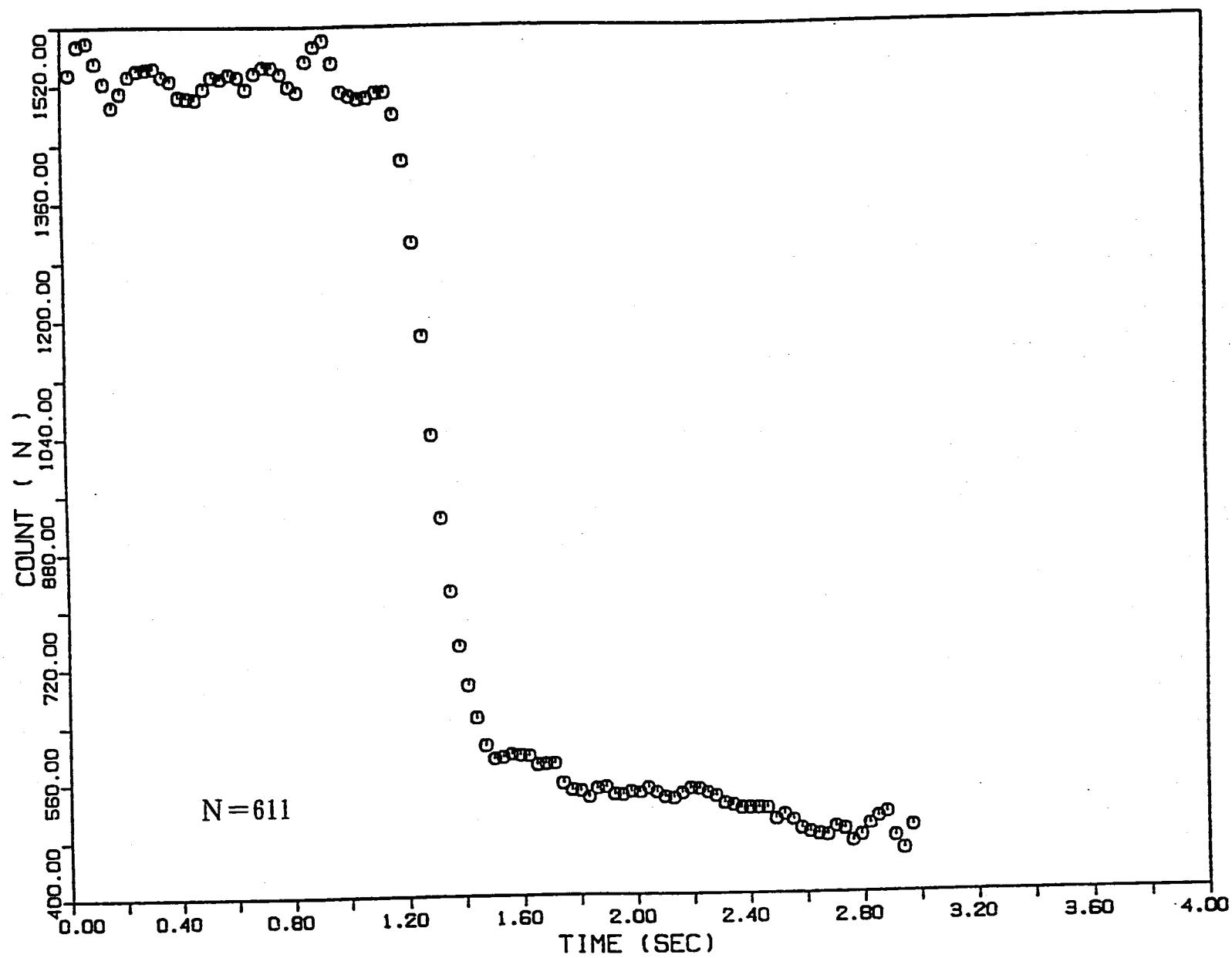
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-5-2 ch. 2) : (26/34)



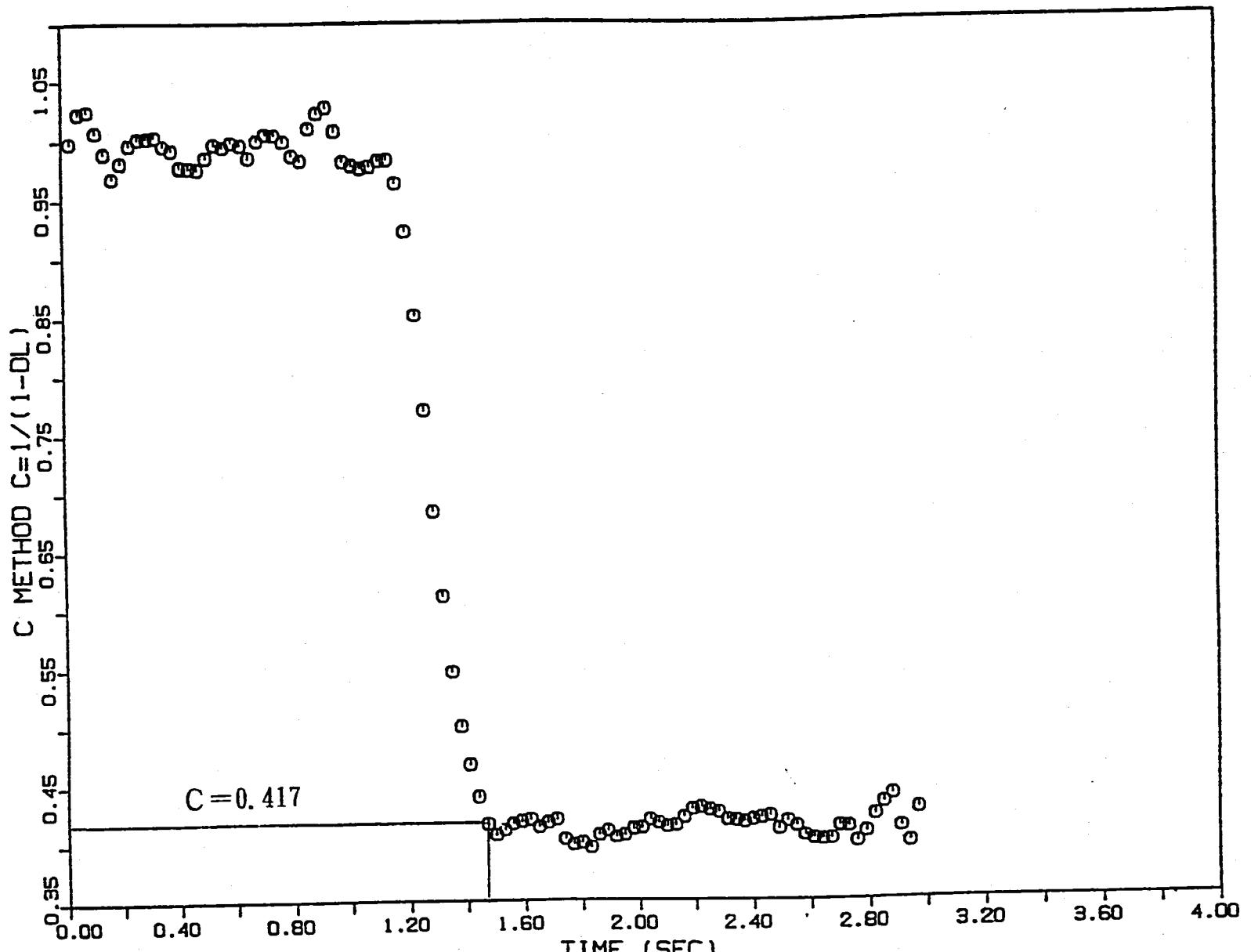
図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-5-2 ch.2) : (27/34)



図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-5-2 ch.2) : (28/34)

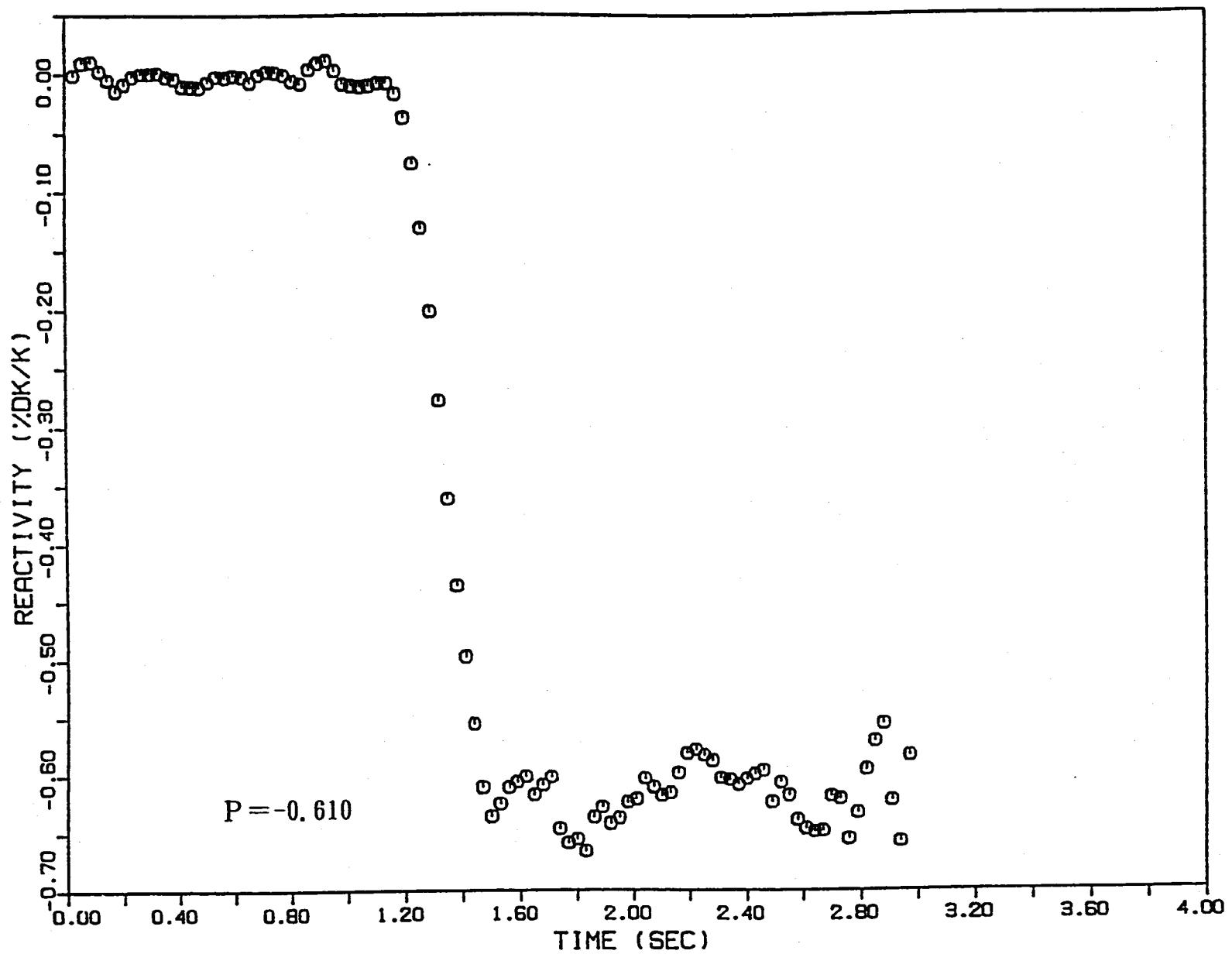


図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-5-6 ch.1) : (29/34)

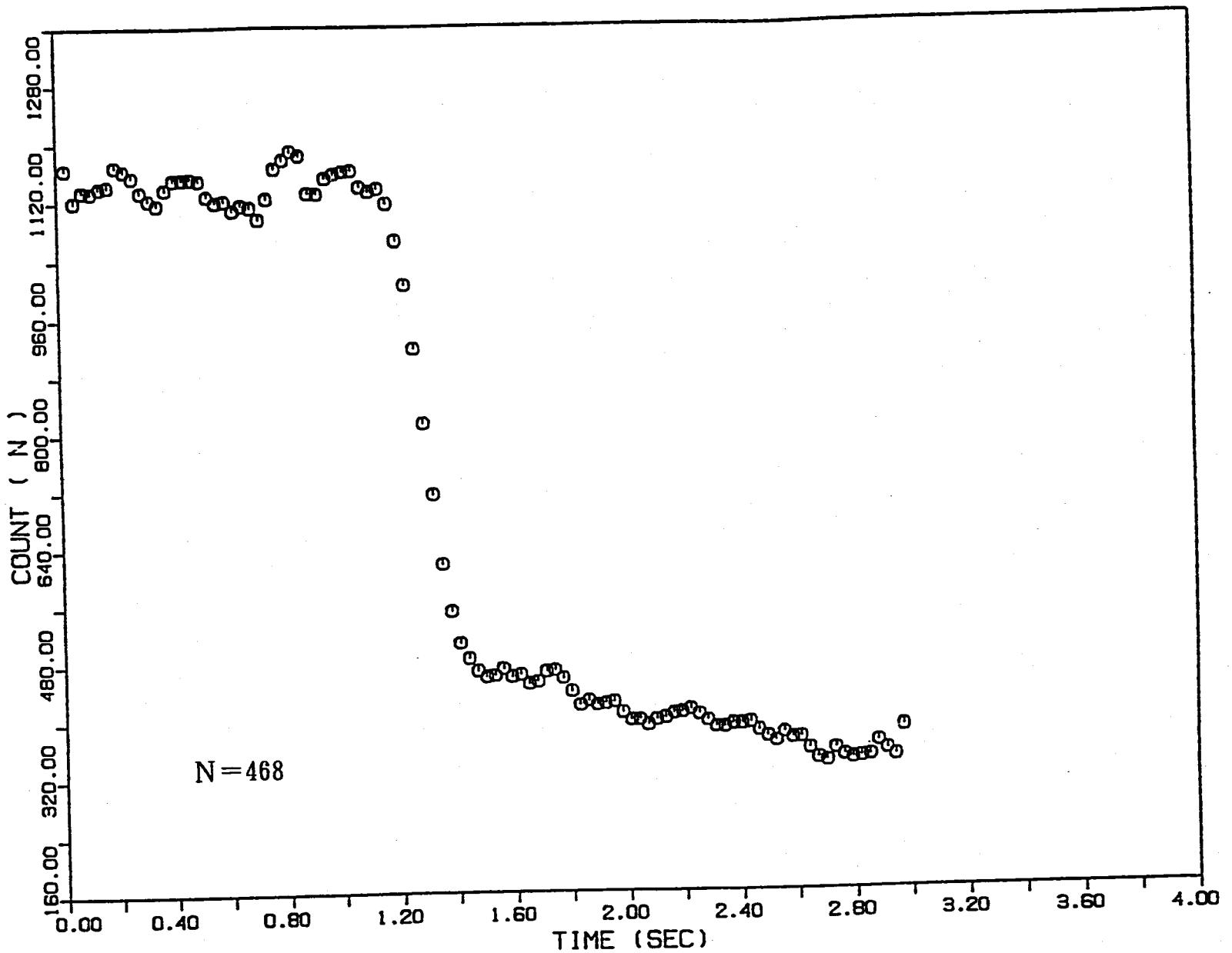


図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-5-6 ch.1) : (30/34)

- 66 -

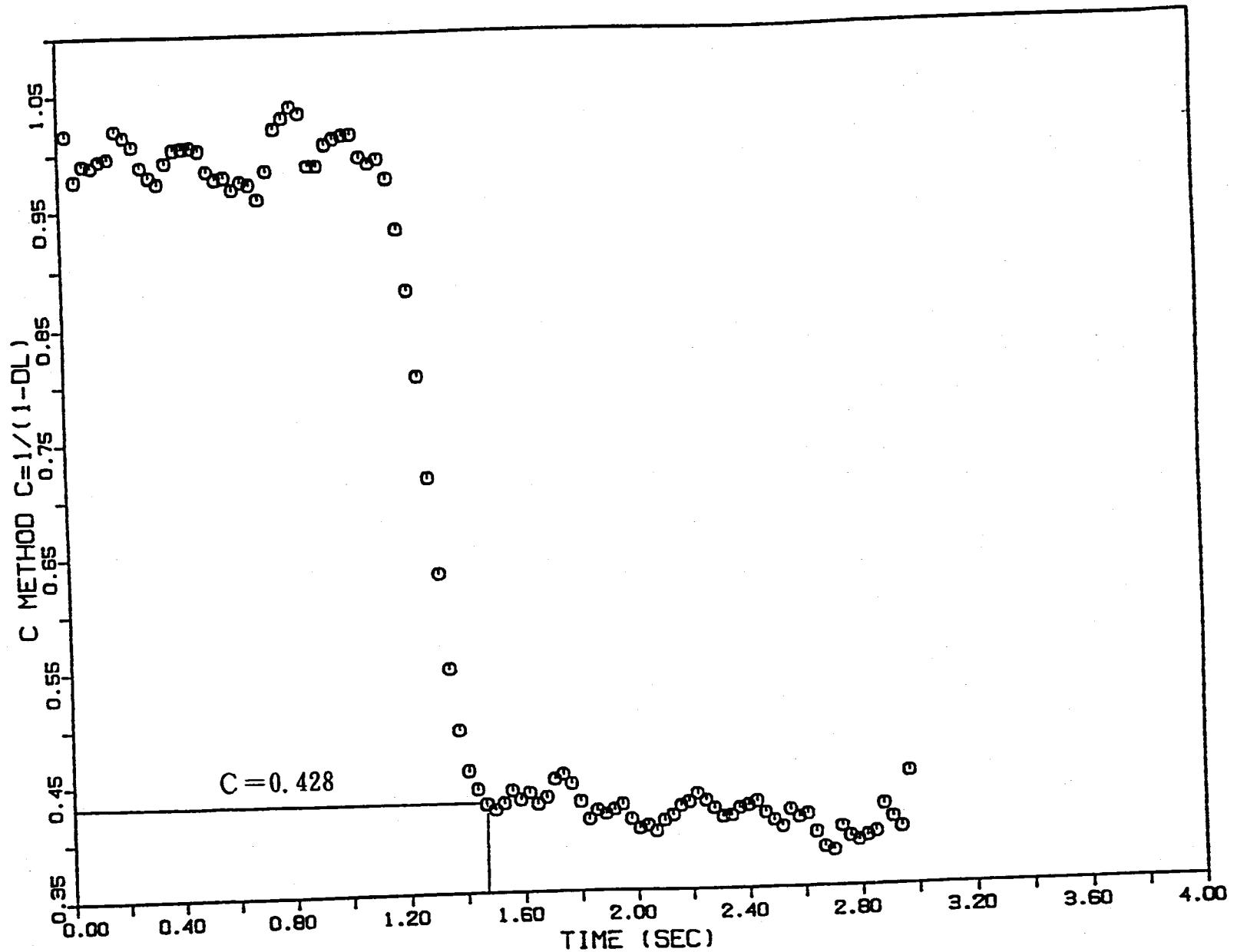


図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-5-6 ch.1) : (31/34)

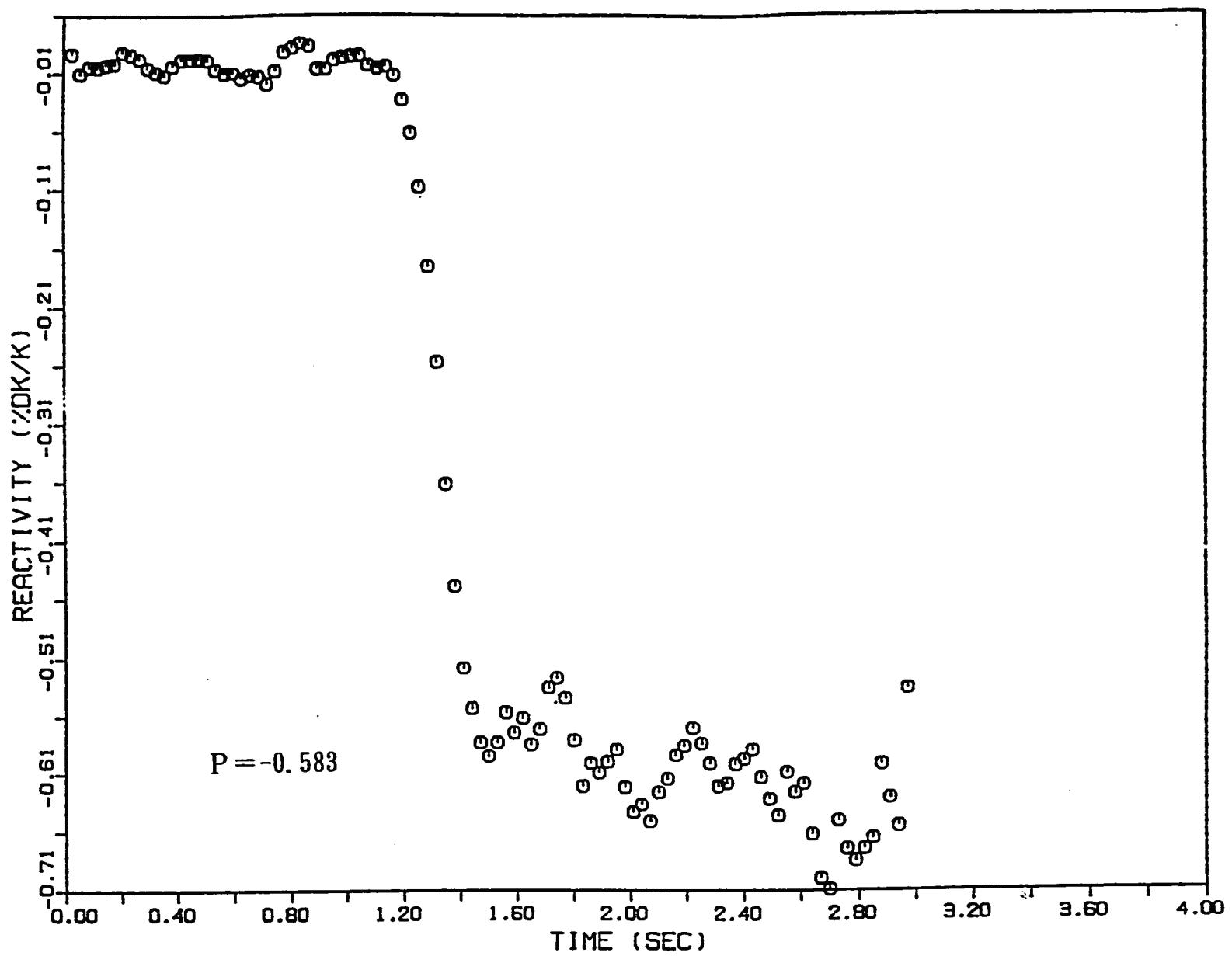


図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-5-6 ch.2) : (32/34)

- 101 -



図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-2-1 ch. 2) : (33/34)



図IV ロッドドロップ法測定結果 (B-2-1 ch.1) : (34/E)