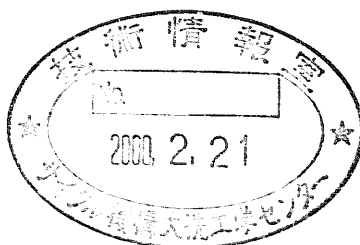




ファインマン- $\alpha$ 法による実効増倍率測定(4)  
— FBR燃料試験体体系 —  
(研究報告)

1999年12月



核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ  
してください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
1999

## ファインマン- $\alpha$ 法による実効増倍率測定 (4)

— FBR 燃料試験体系 —

(研究報告)

毛利智聡\* 羽様 平\*

### 要旨

臨界工学試験室では核燃料施設の臨界安全管理に有効な未臨界度モニターの開発を進めている。

これまで、重水臨界実験装置(DCA)の未臨界度測定実験炉心を測定対象として、ファインマン- $\alpha$ 法を用いて、ATRのウラン燃料および低富化度MOX燃料を装荷した軽水減速体系での未臨界度測定実験を実施してきた。本報告では、高富化度のMOX燃料(「常陽」MK-I燃料)を装荷した軽水減速体系での未臨界度測定実験を実施した結果について述べる。今回の測定では、実効増倍率を0.64~0.82の範囲に設定して未臨界度を示す $\alpha$ 値を検出し測定精度と測定時間を評価した。測定の結果、 $\alpha$ 値の検出が可能であること及び実効増倍率の0.08程度の差を検知できることが確認できた。

連続エネルギーモンテカルロ法計算コードMCNP4Aを用いて、ファインマン- $\alpha$ 法による測定の模擬計算を実施し測定結果と比較した。 $\alpha$ 値の計算値と測定値の差は5%以下となり、MCNP4Aコードによってファインマン- $\alpha$ 法による測定を十分な精度で模擬できることが確認できた。

また、中性子束が時間的に変動する体系にファインマン- $\alpha$ 法による測定を適用し、その追従性を評価した。測定の結果、中性子束の変動が緩やかな体系においては、 $\alpha$ 値の評価が可能であることが確認できた。一方、中性子束の変動が急激な体系においては、階差フィルターによるデータ処理方法を適用することによって $\alpha$ 値を評価できることが確認できた。

## Effective Multiplication Factor Measurement

by Feynman- $\alpha$  Method (4)

- Measurement of FBR Type Fuels -

Tomoaki Mouri\* Taira Hazama\*

### Abstract

The sub-criticality monitoring system has been developed for criticality safety management of nuclear fuel handling facilities. Low enriched MOX or uranium fuels have been used for sub-criticality measurements in the Deuterium Critical Assembly (DCA). This report describes the results of sub-criticality measurements for the core loaded with high enriched MOX fuels (JOYO MK-I fuels). The results of measurements showed that the prompt decay constant( $\alpha$ ), which was an index of the sub-criticality, was detected between  $K_{eff}=0.64$  and  $K_{eff}=0.82$  and the difference of about  $0.08 \Delta K_{eff}$  could be detected.

A simulation of sub-criticality measurements was performed with the Monte Carlo code MCNP4A and the results were compared with measured values. The differences of  $\alpha$  values between calculations and measurements were less than 5%. It was confirmed that the sub-criticality measurements by Feynman- $\alpha$  method could be simulated by MCNP4A code with enough accuracy.

Feynman- $\alpha$  method was applied to the DCA system as the neutron flux level was changed with time. It was confirmed that the common procedure of data processing had an enough ability to detect  $\alpha$  values for slow changes of neutron flux. On the other hand, the application of the differential filter was effective for fast changes of neutron flux.

---

\* Criticality Engineering Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center

## 目次

要旨	…	I
Abstract	…	II
目次	…	III
図表一覧	…	IV
I. 緒言	…	1
II. MK-I 燃料装荷炉心へのファインマン- $\alpha$ 法の適用	…	2
1. 概要	…	2
2. ファインマン- $\alpha$ 法の解析式	…	2
3. 測定体系	…	3
4. 測定方法	…	3
5. 測定結果と検討	…	4
6. 計算結果との比較	…	6
III. 中性子束が時間変動する体系へのファインマン- $\alpha$ 法の適用	…	45
1. 概要	…	45
2. 測定体系と測定方法	…	45
3. 測定結果	…	46
IV. まとめ	…	59
謝辞	…	60
参考文献	…	60
添付資料 I. ファインマン- $\alpha$ 法による実効増倍率測定(3)の追加検討	…	61
添付資料 II. ファインマン- $\alpha$ 法による測定の模擬計算の入力サンプル	…	65

## 図表一覧

(図)		
図 2-1	DCA炉心構造図	… 15
図 2-2	ファインマン- $\alpha$ 法による未臨界度測定システム	… 16
図 2-3	積算時間幅とY値の関係	… 17
図 2-4	ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位 200mm, 2万 cps)	… 18
図 2-5	積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位 200mm, 2万 cps)	… 18
図 2-6	ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位 300mm, 3万 cps)	… 19
図 2-7	積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位 300mm, 3万 cps)	… 19
図 2-8	ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位 400mm, 3万 cps)	… 20
図 2-9	積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位 400mm, 3万 cps)	… 20
図 2-10	ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位 600mm, 3万 cps)	… 21
図 2-11	積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位 600mm, 3万 cps)	… 21
図 2-12	実効倍増率と $\alpha$ 値の関係	… 22
図 2-13	ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位 200mm, 1万 cps)	… 23
図 2-14	積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位 200mm, 1万 cps)	… 23
図 2-15	ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位 300mm, 1万 cps)	… 24
図 2-16	積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位 300mm, 1万 cps)	… 24
図 2-17	ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位 300mm, 2万 cps)	… 25
図 2-18	積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位 300mm, 2万 cps)	… 25
図 2-19	ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位 400mm, 1万 cps)	… 26
図 2-20	積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位 400mm, 1万 cps)	… 26
図 2-21	ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位 400mm, 2万 cps)	… 27
図 2-22	積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位 400mm, 2万 cps)	… 27
図 2-23	ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位 600mm, 1万 cps)	… 28
図 2-24	積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位 600mm, 1万 cps)	… 28
図 2-25	ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位 600mm, 2万 cps)	… 29
図 2-26	積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位 600mm, 2万 cps)	… 29
図 2-27	スィープ数と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位 200mm)	… 30
図 2-28	スィープ数と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位 300mm)	… 31
図 2-29	スィープ数と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位 400mm)	… 32
図 2-30	スィープ数と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位 600mm)	… 33
図 2-31	$\alpha$ 値が基準値の10%以内となる最小測定時間	… 34
図 2-32	$\alpha$ 値が基準値の15%以内となる最小測定時間	… 35
図 2-33	$\alpha$ 値が基準値の20%以内となる最小測定時間	… 36

図 2-34	測定時間と $\alpha$ 値の関係(1 万 cps)	… 37
図 2-35	測定時間と $\alpha$ 値の関係(2 万 cps)	… 38
図 2-36	測定時間と $\alpha$ 値の関係(3 万 cps)	… 39
図 2-37	計算モデル (垂直方向断面)	… 40
図 2-38	Y 値の測定値と計算値の比較 (試験体水位 200mm)	… 41
図 2-39	Y 値の測定値と計算値の比較 (試験体水位 300mm)	… 41
図 2-40	Y 値の測定値と計算値の比較 (試験体水位 400mm)	… 42
図 2-41	Y 値の測定値と計算値の比較 (試験体水位 600mm)	… 42
図 2-42	パルス中性子源法の模擬計算結果 (試験体水位 200mm)	… 43
図 2-43	パルス中性子源法の模擬計算結果 (試験体水位 300mm)	… 43
図 2-44	パルス中性子源法の模擬計算結果 (試験体水位 400mm)	… 44
図 2-45	パルス中性子源法の模擬計算結果 (試験体水位 600mm)	… 44
図 3-1	重水水位変動時の $\alpha$ 値 (スィープ数 5)	… 49
図 3-2	重水水位変動時の $\alpha$ 値 (スィープ数 10)	… 50
図 3-3	重水水位変動時の $\alpha$ 値 (スィープ数 15)	… 51
図 3-4	重水水位変動時の $\alpha$ 値 (スィープ数 20)	… 52
図 3-5	外部中性子源挿入および引抜時の $\alpha$ 値 (スィープ数 5)	… 53
図 3-6	外部中性子源挿入および引抜時の $\alpha$ 値 (スィープ数 10)	… 54
図 3-7	外部中性子源挿入および引抜時の $\alpha$ 値 (スィープ数 15)	… 55
図 3-8	外部中性子源挿入および引抜時の $\alpha$ 値 (スィープ数 20)	… 56
図 3-9	外部中性子源挿入および引抜時の $\alpha$ 値 (1 次階差フィルター適用、スィープ数 15)	… 57
図 3-10	外部中性子源挿入および引抜時の $\alpha$ 値 (1 次階差フィルター適用、スィープ数 20)	… 58
付図 1-1	測定時間と $\alpha$ 値の関係(S4-2 炉心)	… 63
付図 1-2	測定時間と $\alpha$ 値の関係(S4-4 炉心)	… 64

(表)

表 2-1	ドライバー燃料の仕様	… 9
表 2-2	MK-I 燃料の仕様	… 9
表 2-3	測定ケースと測定条件	… 10
表 2-4	$\alpha$ 値の評価結果	… 10
表 2-5	$\alpha$ 値の評価に必要なスィープ数と測定時間	… 11
表 2-6	計算炉心構成	… 12
表 2-7	臨界計算結果	… 12
表 2-8	計算ケースと計算条件	… 13

表 2-9	$\alpha$ 値の計算値と測定値の比較	…	14
表 2-10	実効増倍率の計算値と測定値の比較	…	14
表 3-1	測定内容と測定条件（重水水位変動体系）	…	48
表 3-2	測定内容と測定条件（外部中性子源挿入体系）	…	48
付表 1-1	追加検討結果	…	62



## I. 緒言

臨界工学試験室では、核燃料取扱施設（特に高速炉燃料取扱施設等）の臨界安全管理の信頼性向上と臨界安全設計の合理化に資することを目的として、ファインマン- $\alpha$ 法を用いた未臨界度測定実験を実施し、未臨界度モニターへの適用性評価を進めている。

これまでの重水臨界実験装置（以下、DCA と称す。）の未臨界度測定実験炉心を用いた研究は、ATR のウラン燃料および低富化度 MOX 燃料を装荷した体系で行われており<sup>[1][2][3][4]</sup>、高速炉燃料の取扱い施設で問題となる高富化度 MOX 燃料の装荷炉心体系での測定技術の実証が課題としてあげられている。本報告では、平成9年度から DCA で利用が可能となった高富化度 MOX 燃料（常陽 MK-I 燃料、富化度 17.7wt%）を装荷した軽水減速体系の試験体を対象にファインマン- $\alpha$ 法による測定を実施し、未臨界度が精度良く検知されるかどうかを確認した。

未臨界度モニターを核燃料取扱施設等の実機に適用することを想定した場合、未臨界度モニターが十分に機能するためには、体系に応じた最適な測定条件（検出器の配置等）を事前に予測することが重要となる。連続モンテカルロ法コード MCNP4A を用いて、ファインマン- $\alpha$ 法による測定を模擬することによって、直接  $\alpha$  値を評価する方法が報告されており<sup>[5]</sup>、この手法を用いて測定を忠実に模擬できれば、適用体系における測定可能性および最適な測定条件を事前に予測できるようになる。本報告では、連続モンテカルロ法コード MCNP4A を用いて、ファインマン- $\alpha$ 法による測定を模擬する計算を実施し、測定結果との比較から、この計算手法が測定を精度良く模擬できるかどうかを確認した。

一般に、ファインマン- $\alpha$ 法は平均中性子束からの統計的なばらつきを評価する手法であるため、実機のように平均中性子束が時間的に変化する体系では正確な評価が困難になると考えられる。ファインマン- $\alpha$ 法のデータ解析法において、中性子束が時間的に変化する体系であっても妥当な実効増倍率（厳密には  $\alpha$  値）を得るための検討が行われている。その方法として、マルチチャンネルスケーラーで測定された中性子計数データに、階差フィルター<sup>[6][7]</sup>を適用する方法が提案されている。本報告では、中性子束が時間変動する体系を対象に、ファインマン- $\alpha$ 法による未臨界度測定に階差フィルターを適用しない場合および適用した場合について実施し、その有効性を確認した。

## II. MK-I 燃料装荷炉心へのファインマン- $\alpha$ 法の適用

### 1. 概要

DCA 炉心中央部の試験体領域に高富化度 MOX 燃料（常陽 MK-I 燃料）を装荷した軽水減速体系を対象として、ファインマン- $\alpha$ 法による未臨界度測定実験を実施し、未臨界度の検知が可能であることを確認した。軽水減速材水位（実効増倍率）、中性子計数率、スイープ数（データ取得数）を変えて測定を行い、これらの測定条件と測定精度との関係を調べた。

また、連続エネルギーモンテカルロコード MCNP4A を用いて、ファインマン- $\alpha$ 法による測定を模擬する計算を行い  $\alpha$  値を評価した。 $\alpha$  値の計算結果をファインマン- $\alpha$ 法による測定値と比較し、測定を精度良く模擬できることを確認した。参考として、パルス中性子源法の測定の模擬計算も行い、計算結果をファインマン- $\alpha$ 法による測定結果と比較した。なお、測定の模擬計算の前に、MCNP4A コードを用いて DCA 実験体系の臨界計算を行い、MCNP4A コードの精度を評価した。

### 2. ファインマン- $\alpha$ 法の解析式

ファインマン- $\alpha$ 法において、Y 値は以下の式で定義される。

$$Y(\Delta t) = \frac{\overline{n(\Delta t)^2} - \overline{n(\Delta t)}^2}{\overline{n(\Delta t)}} - 1 \quad \dots (1)$$

ここで、

$\overline{n(\Delta t)}$  : 時間幅  $\Delta t$  の中性子計数の平均

$\overline{n(\Delta t)^2}$  : 時間幅  $\Delta t$  の中性子計数の自乗平均

$Y(t)$  は通常 Y 値と呼ばれ、中性子計数のポワソン分布からのずれの程度を表している。非増倍系では、中性子計数はポワソン分布に従うため平均と分散の比は 1.0 となり、Y 値は 0.0 となる。

遅発中性子の効果を無視すると、一点炉近似の Y 値の理論式は次のように表せられる。

$$Y(\Delta t) = \frac{\varepsilon \nu (\nu - 1)}{\alpha^2 \tau^2} \left( 1 - \frac{1 - e^{-\alpha \Delta t}}{\alpha \Delta t} \right) \quad \dots (2)$$

ここで、

$\varepsilon$  : 検出器の計数効率

$\tau$  : 核分裂間の平均時間 (sec)

$\nu$  : 核分裂あたりに発生する中性子数

$\alpha$  : 即発中性子減衰定数 ( $\text{sec}^{-1}$ )

$\alpha$  値は次の方法で評価される。時間幅  $\Delta t$  に対する中性子計数を測定し、ある時間幅  $\Delta t$  と次の時間幅  $\Delta t$  の中性子計数を足し合わせることによって、時間幅  $2\Delta t$  の中性子計数を求める。同様の方法で、時間幅  $3\Delta t$ 、 $4\Delta t$  … の中性子計数を求め、(1)式から各時間幅の Y 値を計算する。各時間幅と Y 値の関係をプロットし、最小自乗法によって(2)式にフィッティングさせ  $\alpha$  値を求める。

$\alpha$  値と実効増倍率の関係は(3)式で表せられる。

$$\alpha = \{1 - k_{eff}(1 - \beta_{eff})\} / \ell \quad \dots (3)$$

ここで、

$k_{eff}$  : 実効増倍率

$\beta_{eff}$  : 実効遅発中性子割合

$\ell$  : 即発中性子寿命(sec)

### 3. 測定体系

図 2-1 に DCA 炉心構造図を示している。測定体系は、炉心中心部の試験体領域とその周囲のドライバー領域から構成されている。ドライバー領域には、燃料クラスターが 132 体装荷されている。燃料クラスターは同心円状に配置した 28 本の燃料棒 ( $1.2\text{wt}\%UO_2$ ) からなり、圧力管とカランドリア管で囲まれている。表 2-1 にドライバー燃料の仕様を示している。通常、重水減速材はドライバー領域の各カランドリア管の間に供給されるが、今回の実験ではドライバー領域の重水減速材を使用していない。試験体領域には MK-I 燃料 140 本 ( $17.7\text{wt}\%PuO_2$ ) が装荷されている。MK-I 燃料は下部ブランケット部 (400mm)、ミート部 (600mm)、上部ブランケット部 (400mm) から構成され、ミート部の下端は燃料クラスターの下端と一致している。表 2-2 に MK-I 燃料の仕様を示している。試験体領域の燃料ピン間には軽水減速材が供給され、この試験体領域の軽水減速材の水位 (以下、試験体水位と略す。) を変えることによって反応度を調整する。試験体水位の 0mm は MK-I 燃料のミート部の下端と一致している。

### 4. 測定方法

測定は試験体水位を 200mm、300mm、400mm、600mm とした反応度の異なる 4 種類の体系で行った。各体系で中性子計数率を 1 万 cps、2 万 cps、3 万 cps と変えて測定を行った。ただし、試験体水位 200mm の体系では中性子計数率が最大でも 2 万 cps であるため、3 万 cps の測定を行わなかった。

測定システムを図 2-2 に示している。検出器は 2in. He-3 検出器 (外径 5cm、有効長 50cm) 1 本を使用し、試験体領域の中央にある検出器挿入孔の中心に、検出器下端を試験体水位の 0mm に一致させて設置した。検出器で検出された信号は、前置増幅器および Single Channel Analyzer (以下、SCA と略す。) によって整形増幅され、Multi Channel Scaler

(以下、MCS と略す。) に送られ計数される。MCS の制御は Engineering Work Station (以下、EWS と略す。) で行われ、1 スイープ終了の度に計数データが EWS に転送される。本測定では、計数データの後処理はリアルタイムでは行わず測定終了後に行った。中性子計数率は SCA のディスクリレベルを変えることによって調整した。

1 スイープ当たりのチャンネル数を 65536 とし、スイープ数が 150 スイープ～200 スイープの測定を行った。時間幅  $\Delta T$  は、 $\alpha \Delta T$  が 0.04～0.06 になるように設定した。ここで、 $\alpha$  は計算から得られた推定値 2000～6000 を使用した。参考までに、図 2-3 に  $\alpha \Delta T$  を変数とした積算時間幅に対する Y 値の変化を示している。Y 値の立ち上がり部分から Y 値が一定値に漸近するまでの間、即ち積算時間幅が  $100 \Delta T \sim 500 \Delta T$  の間で、最小自乗フィッティングの誤差が最小になる場合の積算時間幅を選択し、その積算時間幅で得られる  $\alpha$  値を評価値とした。

測定ケースと測定条件を表 2-3 にまとめて示している。表に示されている各体系の実効増倍率は MCNP4A コードを用いて評価したもので、実効増倍率の範囲は 0.640～0.820 である。

## 5. 測定結果と検討

### 5.1 結果

図 2-4～図 2-11 に、試験体水位 200mm～600mm で中性子計数率が 3 万 cps (試験体水位 200cm では 2 万 cps) の場合の積算時間幅に対する Y 値の変化と、積算時間幅に対する  $\alpha$  値と最小自乗フィッティングの誤差を示している。表 2-4 に  $\alpha$  値の評価結果を示している。図 2-12 に実効増倍率と  $\alpha$  値の関係を示している。

図 2-4～図 2-11 の偶数番の図から判るように、Y 値は積算時間幅 0.003sec 程度で立ち上がり部分が終了し、それ以上では、ほぼ一定値に漸近している。図 2-4～図 2-11 の奇数番の図から判るように、積算時間幅に対する  $\alpha$  値の変動は小さく、すべてのケースで安定した結果が得られている。最小自乗フィッティングの誤差が最小となる積算時間幅は、すべてのケースで  $150 \Delta T \sim 250 \Delta T$  (試験体水位の低い順から積算時間幅は 0.0015sec、0.002sec、0.0025sec、0.00225sec) の間にある。また、その範囲内での  $\alpha$  値の変動は 5% 以下で十分に小さい。したがって、時間幅  $\Delta T$  を  $\alpha \Delta T$  が 0.04～0.06 になるように設定する場合は、積算時間幅  $150 \Delta T \sim 250 \Delta T$  の間で  $\alpha$  値を評価することが適当であると考えられる。

図 2-12 に示すように、 $\alpha$  値は実効増倍率の増加とともに減少しており、妥当な傾向を示している。また、実効増倍率が 0.64～0.72 の範囲で実効増倍率の 0.08 程度の差と、実効増倍率が 0.72～0.82 の範囲で実効増倍率の 0.05 程度の差が、明確に検知できることが確認できる。

## 5.2 中性子計数率とスイープ数の影響

図 2-13～図 2-26 に、試験体水位 200mm～600mm で中性子計数率を 2 万 cps（試験体水位 200mm を除く）および 1 万 cps とした場合の、積算時間幅に対する Y 値の変化と、積算時間幅に対する  $\alpha$  値と最小自乗フィッティングの誤差を示している。

図 2-13～図 2-26 の奇数番の図に示すように、Y 値は積算時間幅 0.003sec 程度で立ち上がり部分が終了し、それ以上では、ほぼ一定値に漸近している。前述の図 2-4～図 2-11 の偶数番の図と図 2-13～図 2-26 の偶数番の図から判るように、試験体水位 300mm の中性子計数率 3 万 cps のケース、試験体水位 400mm の中性子計数率 2 万 cps と 3 万 cps のケース、試験体水位 600mm の全ケースでは、積算時間幅に対して  $\alpha$  値は安定している。この結果から、中性子計数率が高いほど、即ち、検出効率が大きいほど（SCA のディスクリレベルを変えることによって中性子計数率を調整しているため、中性子計数率を変えれば検出効率も変化する） $\alpha$  値が安定すること、また、実効増倍率が高いほど非相関成分に対する相関成分の割合が大きくなり  $\alpha$  値が安定することが確認できる。なお、試験体水位 300mm で中性子計数率 1 万 cps の場合、最小自乗フィッティングの誤差は積算時間幅  $100 \Delta \sim 500 \Delta t$  の間で極小値を持たない（図 2-16）。そのため、試験体水位が同じで中性子計数率が異なる他のケース（図 2-7 と図 2-18）に合わせて、積算時間幅  $200 \Delta T$  (0.002sec) の  $\alpha$  値を採用している。

図 2-27～図 2-30 に各試験体水位のスイープ数に対する  $\alpha$  値の変化を示している。各試験体水位について、中性子計数率とスイープ数が最大で評価した  $\alpha$  値を基準値（表 2-4）として、その基準値に対して  $\alpha$  値の差が 10%、15%、20% 以内に収まる最小のスイープ数と測定時間を表 2-5 に示している。図 2-31～図 2-33 には中性子計数率と測定時間の関係を示している。表 2-5 に示すように、基準値に対して 10% の精度で  $\alpha$  値を評価するためには、中性子計数率が 3 万 cps では 60 スイープ、2 万 cps では 110 スイープ、1 万 cps では 150 スイープ必要であることがわかる（いずれも、試験体水位 400mm の場合の値である）。表 2-5 および図 2-31 から判るように、データ転送時間を考慮せずに MCS のスイープが終了したと同時に  $\alpha$  値が得られると仮定した場合の測定時間は、上記の場合について各々、約 39sec ( $\cong 65536$  (チャンネル数/1 スイープ)  $\times 60$  (スイープ数)  $\times 10^{-5}$  (設定時間/1 チャンネル))、約 72sec ( $\cong 65536 \times 110 \times 10^{-5}$ )、約 98sec ( $\cong 65536 \times 150 \times 10^{-5}$ ) 以上となる。

図 2-34～図 2-36 に、中性子計数率毎の測定時間に対する  $\alpha$  値の変化を示している。図中で測定時間 60sec の  $\alpha$  値に着目すると、中性子計数率 1 万 cps では実効増倍率 0.82 と 0.77 の差が、中性子計数率 2 万 cps では実効増倍率 0.72 と 0.64 の差が、また、中性子計数率 3 万 cps では実効増倍率 0.72 と 0.77 の差が明確に検知されている。したがって、測定時間が 60sec で中性子計数率が 3 万 cps 程度であれば、実効増倍率が 0.64～0.82 の範囲で 0.05～0.08 程度の実効増倍率の差異を検知できることが確認できる。

## 6. 計算結果との比較

### 6.1 DCA実験体系の臨界計算

MCNP4A コードを用いて DCA 実験体系の臨界計算を行った。計算対象とする炉心体系は、第 3 節に示した試験体領域に MK-I 燃料が装荷されている炉心(以下、S4-6 炉心と称す。)と、ドライバー領域は S4-6 炉心と共通で試験体領域に 2.7wt%UO<sub>2</sub> 燃料 140 本を装荷した炉心(以下、S4-2 炉心と称す。)および MOX 燃料(0.79wt%Pu-fissile)140 本を装荷した炉心(以下、S4-4 炉心と称す。)の 3 種類である。表 2-6 に計算を実施した炉心構成を示している。表 2-7 に各炉心の計算対象とした試験体水位と、それに対応する臨界重水水位を示している。全ケースで 50 万ヒストリー(1 サイクル当たりのヒストリー数を 5000 として 100 サイクル)の計算を行った。断面積ライブラリーは JENDL-3.2 ベースの FSXJ3R2A と FSXJ3R2B を使用した。

表 2-7 に臨界計算の結果を示している。いずれの体系についても、実効増倍率は約 0.4% ΔK 以内の高い精度で評価されており、MCNP4A コードを DCA 実験体系に適用できることが確認できた。

### 6.2 模擬計算体系

第 3 節に示した測定体系(S4-6 炉心)を対象に、ファインマン- $\alpha$ 法による測定の模擬計算を実施した。参考として、パルス中性子源法による測定の模擬計算も実施した。図 2-37 に計算モデルを示している。測定では検出器を試験体領域の中央の検出器案内管に挿入しており、検出器が反応度に大きな影響を与えられられるため、計算では検出器を含めてモデル化した。模擬計算のケースを表 2-8 に示している。表に示している実効増倍率の評価には MCNP4A コードを用いた。実効増倍率の計算条件は前項の臨界計算と同一である。

### 6.3 模擬計算方法

ファインマン- $\alpha$ 法による未臨界度測定を模擬するために、MCNP4A コードに以下の機能追加と入力設定を行った<sup>[5]</sup>。

核分裂によって発生する中性子数のゆらぎは原子炉雑音源の一つであり、正確に模擬する必要がある。MCNP4A コードでは、U-235 の核分裂中性子は、平均核分裂中性子発生数の約 2.4 がライブラリーから読み込まれ、平均核分裂発生数とその値になるように、核分裂発生の際に中性子 2 個が約 60%、中性子 3 個が約 40% の割合で発生する。他の核分裂核種についても同様である。しかし、実際には、核分裂発生数は 2 個や 3 個以外のこともあり、その期待値 $\langle \nu_0 \rangle$ の分布は(4)式の正規分布で非常に精度良く再現されることが分かっている<sup>[8]</sup>。そこで、核分裂中性子発生数がこの分布に従うように MCNP4A に機能を追加した。

$$\sum_{n=0}^{v_0} p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\{v_0 - \langle v_0 \rangle + 1/2 + b\} \sigma} e^{-t^2/2} dt \quad \dots (4)$$

ここで、

$v_0$  : 核分裂発生数

$\langle v_0 \rangle$  : 核分裂発生数の期待値

$\sigma$  : 1.08

$b$  :  $\langle 0.01$  ( $v_0$  が負にはならないことに対応した補正因子)

MCNP4A コードでは、即発中性子と遅発中性子の発生時刻を変えて分離して処理することができない。今回計算対象とする測定では、最大積算時間幅は 0.005sec 程度で、遅発中性子の効果が顕著となる最大積算時間幅 0.01sec 以上に比べて十分に小さいので、その効果は無視できる。そこで、即発中性子のみを考慮した核分裂発生数の期待値を使用した。

MCNP4A コードでは、捕獲 (capture) を扱う手法として implicit capture と analog capture の 2 種類の手法がある。implicit capture は計算時間を減らす分散低減法としてデフォルトで採用されている方法で、実際の物理現象における分散に比べて分散が小さく評価される。この手法では、捕獲が発生すると中性子数を減らさずに、中性子の持つ重みが吸収の発生する割合だけ減らされる。一方、analog capture は実際の物理現象を模擬しており、捕獲が発生すると吸収の発生する割合で中性子が消滅する。ファインマン- $\alpha$  法による測定は中性子数の揺らぎ (分散) を評価する手法であるため、実際の物理現象を模擬する analog capture 手法を入力で選択した。

MCNP4A コードでは、計算を開始するためにある領域からある分布をもった中性子を発生させる必要がある。ここでは、発生の時間分布をポワソン分布として、体系中の一点から中性子を発生させた。その中性子が体系内を移動し吸収や核分裂反応を起こしたり、体系から漏れ出ることによって中性子の連鎖反応が成立する。測定における MCS のチャンネルに相当する一定の時間間隔で分割された領域を用意しておき、検出器内で吸収反応が発生した時に検出時間を記録し、それに応じて中性子を該当する領域に入れて計数する。MCNP4A コードでは、元々、発生中性子の発生時間の設定、計数の時間設定を入力で行うことができる。ここでは、中性子をポワソン分布にしたがって発生させる機能と検出器内で吸収反応が発生した場合に計数する機能を MCNP4A コードに付加した。

中性子の発生位置は、径方向は試験体容器と炉心中央タンクの間、軸方向は試験体水位の 1/2 の位置とした。中性子発生数は試験体水位に応じて変更した。発生中性子のエネルギーは 14MeV とした。検出器は実際のファインマン- $\alpha$  法による測定で使用した検出器 (2in. He-3) と同形で同位置に設定した。

パルス中性子源法の模擬計算では、時間 0sec に中性子を発生させ、熱中性子 (エネ

ルギーが 1eV 以下) が検出器領域を外側から通過した場合に計数した。径方向の中性子発生位置は炉心中心とした。その他の条件はファインマン- $\alpha$ 法の模擬計算と同一とした。パルス発生からの経過時間と中性子計数の関係をプロットして、最小自乗法によって(5)式にフィッティングさせ $\alpha$ 値を求める。

$$n(t) = Ae^{-\alpha t} + C \quad \dots (5)$$

ここで、

$n(t)$  : 時間  $t$  における中性子計数

$\alpha$  : 即発中性子寿命(sec)

$t$  : 時間(sec)

$A, C$  : 定数

ファインマン- $\alpha$ 法とパルス中性子源法の模擬計算条件を表 2-8 に示している。

#### 6.4 計算結果

図 2-38～図 2-41 に、ファインマン- $\alpha$ 法の模擬計算から求めた積算時間幅に対する Y 値の変化を測定結果とともに示している。図では、測定値と計算値の Y 値の変化を比較するため、両者の Y 値の飽和値が同程度になるように、測定値を規格化している。図から判るように、測定値と計算値の積算時間幅に対する Y 値の変化は良く一致している。表 2-9 にファインマン- $\alpha$ 法による測定で求めた $\alpha$ 値と測定の模擬計算から求めた $\alpha$ 値の比較を示している。表 2-10 に実効増倍率の測定値と計算値の比較を示している。実効増倍率の測定値の算出に用いた $l$ は、(3)式を用いて模擬計算の $\alpha$ 値と実効増倍率の計算値を基に求めた。表 2-9 と表 2-10 に示すように、 $\alpha$ 値の測定値と計算値の差は 5% 以下で、実効増倍率の測定値と計算値の差は 3% 以下である。この結果から、MCNP4A コードを用いたファインマン- $\alpha$ 法による測定の模擬計算手法は妥当であり、 $\alpha$ 値および実効増倍率を精度良く求められることが確認できた。

図 2-42～図 2-45 にパルス中性子源法による測定の模擬計算から求めたパルス発生からの経過時間に対する中性子計数の変化を示している。表 2-9 にファインマン- $\alpha$ 法による測定で求めた $\alpha$ 値とパルス中性子源による測定の模擬計算から求めた $\alpha$ 値の比較を示している。表に示すように、 $\alpha$ 値の測定値と計算値の差は 3% 以下である。パルス中性子源法による測定の模擬計算によっても $\alpha$ 値を精度良く求められることが確認できた。



表 2-1 ドライバー燃料の仕様

項目	値
燃料ペレット	
種類	UO <sub>2</sub>
U-235 濃縮度 (wt%)	1.20
外径 (mm)	14.80
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	10.36
被覆管	
材質	Al
外径 (mm)	16.73
内径 (mm)	15.03

表 2-2 MK-I 燃料の仕様

項目	値
燃料ペレット	
種類	UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub>
PuO <sub>2</sub> 富化度 (wt%)	
PuO <sub>2</sub> /PuO <sub>2</sub> +UO <sub>2</sub>	17.7
Pu 組成 (wt%)	
Pu-239	76.6
Pu-240	19.0
Pu-241	3.7
Pu-242	0.7
U-235 濃縮度 (wt%)	23.0
外径 (mm)	5.4
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	10.33 (93.5%TD)
被覆管	
材質	SUS316
外径 (mm)	6.30
内径 (mm)	5.60
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	8.035
上部・下部ブランケット	
種類	UO <sub>2</sub>
U-235 濃縮度 (wt%)	0.2
燃料棒全長 (mm)	1910.0
燃料有効長 (mm)	600
上部・下部ブランケット長 (mm)	400

表 2-3 測定ケースと測定条件

試験体減速材水位 (mm)	実効増倍率	検出器の種類と本数	検出器下端と水位下端の高さの差 (mm)	中性子計数率 (cps)	時間幅 $\Delta T$ ( $\mu\text{sec}$ )	スレプ数
200	0.640	2in. He3×1	0.0	10000 20000	10	150 200
300	0.724	2in. He3×1	0.0	10000 20000 30000	10	200
400	0.773	2in. He3×1	0.0	10000 20000 30000	10	150
600	0.820	2in. He3×1	0.0	10000 20000 30000	15	150

表 2-4  $\alpha$  値の評価結果

試験体減速材水位 (mm)	実効増倍率	スレプ数	中性子計数率 10000 (cps)	中性子計数率 20000 (cps)	中性子計数率 30000 (cps)
200	0.640	150	5557±182 (400 $\Delta T$ )	5814±92 (150 $\Delta T$ )	
		200		5692±78 (150 $\Delta T$ )	
300	0.724	150	4526±160 (200 $\Delta T$ )	4471±64 (200 $\Delta T$ )	4655±54 (200 $\Delta T$ )
		200	4599±120 (200 $\Delta T$ )	4645±64 (200 $\Delta T$ )	4786±51 (200 $\Delta T$ )
400	0.773	150	4785±140 (200 $\Delta T$ )	4149±65 (250 $\Delta T$ )	4098±45 (250 $\Delta T$ )
600	0.820	150	3451±106 (150 $\Delta T$ )	3634±58 (200 $\Delta T$ )	3343±39 (150 $\Delta T$ )

カッコ内は  $\alpha$  値を評価した積算時間幅  
黒枠内は  $\alpha$  値の基準値

表 2-5  $\alpha$  値の評価に必要なスィーフ数と測定時間

試験体 減速材 水位 (mm)	実効増 倍率	$\alpha$ 値の 基準値	測定時 間 (sec)	計数率 (cps)	基準値に対して $\alpha$ 値 の差が 10%以内		基準値に対して $\alpha$ 値 の差が 15%以内		基準値に対して $\alpha$ 値 の差が 20%以内		測定時間 60sec の場 合の $\alpha$ 値
					最小スィ- フ数	測定時間 (sec)	最小スィ- フ数	測定時間 (sec)	最小スィ- フ数	測定時間 (sec)	
200	0.640	5692 $\pm$ 78 (20000cps, 200 スィ-フ)	131	10000	145	95(1740)	103	68(1236)	93	61(1116)	4511 $\pm$ 204
				20000	85	56(1020)	14	9(168)	14	9(168)	6233 $\pm$ 144
300	0.724	4786 $\pm$ 51 (30000cps, 200 スィ-フ)	131	10000	112	73(1344)	60	39(720)	56	37(672)	5384 $\pm$ 237
				20000	83	54(996)	64	42(768)	54	35(648)	5110 $\pm$ 106
				30000	14	9(168)	8	5(96)	8	5(96)	4364 $\pm$ 64
400	0.773	4098 $\pm$ 45 (30000cps, 150 スィ-フ)	98	10000	150 以上	98(1800) 以上	150 以上	98(1800) 以上	12	8(144)	4653 $\pm$ 188
				20000	110	72(1320)	94	62(1128)	87	57(1044)	4725 $\pm$ 101
				30000	60	39(720)	25	16(300)	4	3(48)	3983 $\pm$ 61
600	0.820	3343 $\pm$ 39 (30000cps, 150 スィ-フ)	147	10000	43	42(516)	41	40(492)	24	24(288)	3436 $\pm$ 154
				20000	39	38(468)	38	25(456)	30	29(360)	3239 $\pm$ 92
				30000	20	20(240)	7	7(84)	7	7(84)	3352 $\pm$ 57

測定時間のカッコ内はデータ転送時間等を含めた値

表 2-6 計算炉心構成

炉心	構成
S4-2	試験体領域：2.7wt%UO <sub>2</sub> 燃料棒 140 本 ドライバ-領域：1.2wt%UO <sub>2</sub> 燃料クラスター 132 体
S4-4	試験体領域：PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub> (0.79wt%Pu-fissile)燃料棒 140 本 ドライバ-領域：1.2wt%UO <sub>2</sub> 燃料クラスター 132 体
S4-6	試験体領域：常陽 MK-I (17.7wt%PuO <sub>2</sub> )燃料棒 140 本 ドライバ-領域：1.2wt%UO <sub>2</sub> 燃料クラスター 132 体

表 2-7 臨界計算結果

炉心	試験体減速材水位 (mm)	臨界重水水位 (mm)	実効増倍率
S4-2	0	1572.3	0.9975±0.0009
	200	1544.7	0.9990±0.0010
	600	1470.3	1.0007±0.0009
	1200	1352.5	1.0032±0.0009
	2000	1312.4	1.0041±0.0011
S4-4	0	1652.8	0.9986±0.0009
	200	1640.8	1.0006±0.0009
	400	1645.0	1.0009±0.0008
	600	1658.7	0.9999±0.0009
	1000	1705.7	1.0015±0.0009
	2000	1735.2	1.0004±0.0009
S4-6	0	1713.6	0.9990±0.0008
	200	1646.8	0.9982±0.0009
	500	1595.0	0.9960±0.0008
	600	1621.0	0.9991±0.0009
	2000	1806.3	1.0002±0.0009

5000 ヒストリ-/サイクル×100 サイクル

表 2-8 計算ケースと計算条件

評価方法	試験体減速材 水位(mm)	実効増倍率	$\Delta T$ ( $\mu$ sec)	$\Delta T$ 当たりの 発生中性子数	総チャンネル数	測定で相当す るスリプ数 (65536 チャンネル/ スリプ)	検出器の中性 子計数率 (cps)
ファインマン- $\alpha$ 法	200	0.640	10	20	30万 $\times$ 14	64	17000
	300	0.724	10	10	30万 $\times$ 7	32	16600
	400	0.773	10	10	30万 $\times$ 5	23	25500
	600	0.820	15	10	20万 $\times$ 4	12	26700
ハルス中性子源 法	200	0.640	1.5	4000	1000		
	300	0.724	2	2000	1000		
	400	0.773	2	1000	1000		
	600	0.820	2.5	1000	1000		

表 2-9  $\alpha$  値の計算値と測定値の比較

試験体減速材 水位(mm)	測定値 (A)	ファインマン- $\alpha$ 法の模擬 (B)	パルス中性子源法の模擬 (C)	(B) / (A)	(C) / (A)
200	5692 $\pm$ 78	5962 $\pm$ 95	5700 $\pm$ 30	1.05	1.00
300	4786 $\pm$ 51	4714 $\pm$ 46	4633 $\pm$ 15	0.98	0.97
400	4098 $\pm$ 45	4234 $\pm$ 35	3999 $\pm$ 18	1.03	0.98
600	3343 $\pm$ 39	3247 $\pm$ 29	3444 $\pm$ 10	0.97	1.03

表 2-10 実効増倍率の計算値と測定値の比較

試験体減速材 水位(mm)	$\alpha$ 値の測定値 ( $\alpha_{ex}$ )	即発中性子寿命 ( $l$ )	実効遅発中性子割 合 ( $\beta_{eff}$ )	実効増倍率の測定値 ( $K_{exp}$ )	実効増倍率の計算値 ( $K_{cal}$ )	( $K_{cal}$ ) / ( $K_{exp}$ )
200	5692	6.10e-5	0.0057	0.657	0.640	0.97
300	4786	5.94e-5	0.0055	0.720	0.724	1.01
400	4098	5.46e-5	0.0053	0.780	0.773	1.01
600	3343	5.68e-5	0.0053	0.814	0.820	0.99

$\beta_{eff}$  : TWODANT コードと SCALE4.2 システムコードを用いて計算。

$K_{cal}$  : MCNP4A コードを用いて計算。

$l$  :  $\{1 - K_{cal}(1 - \beta_{eff})\} / \alpha$  ( $\alpha$  : ファインマン- $\alpha$ 法の模擬計算結果)より計算。

$K_{exp}$  :  $(1 - l \alpha_{ex}) / (1 - \beta_{eff})$ より計算。

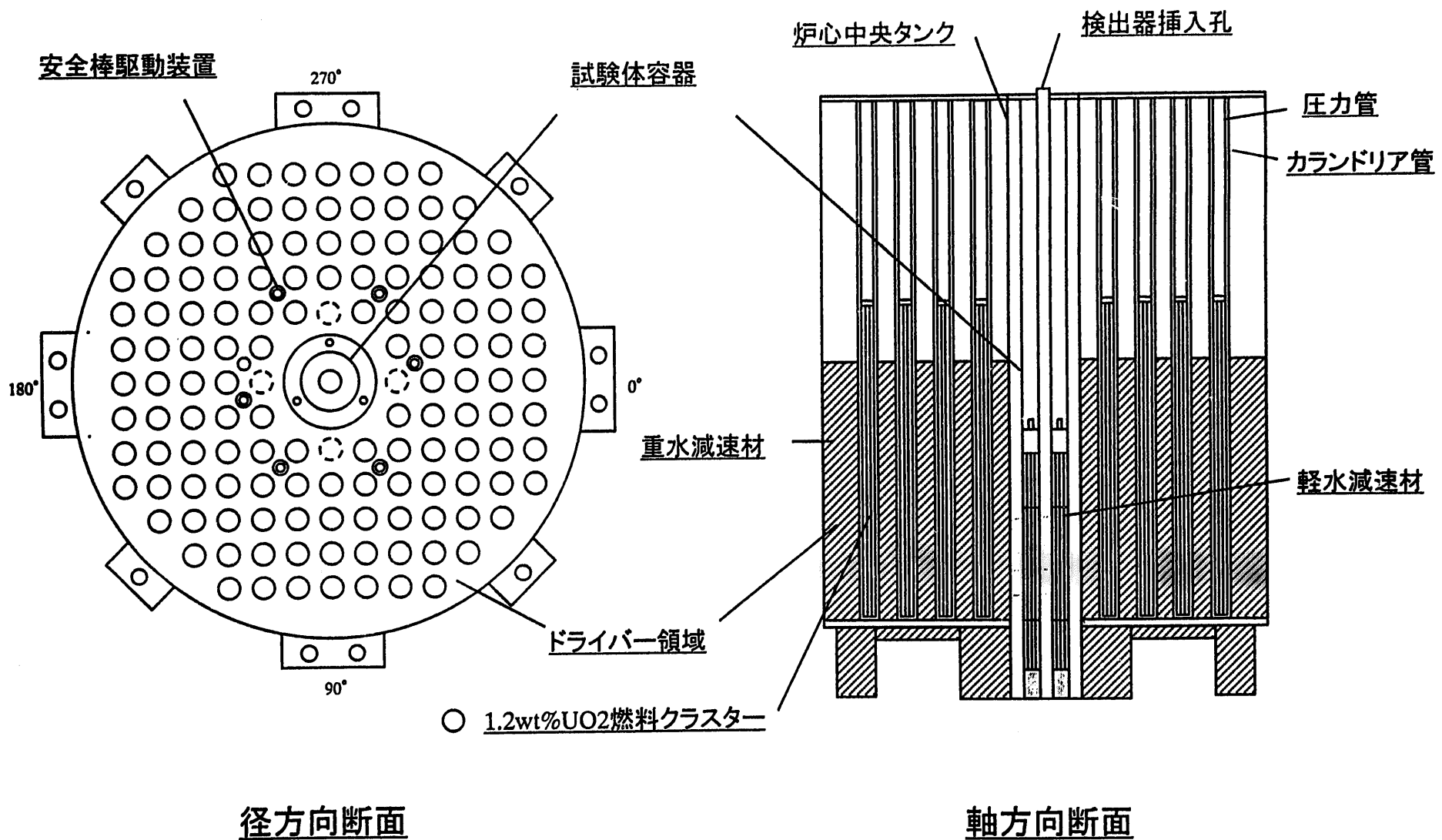


図2-1 DCA炉心構造図

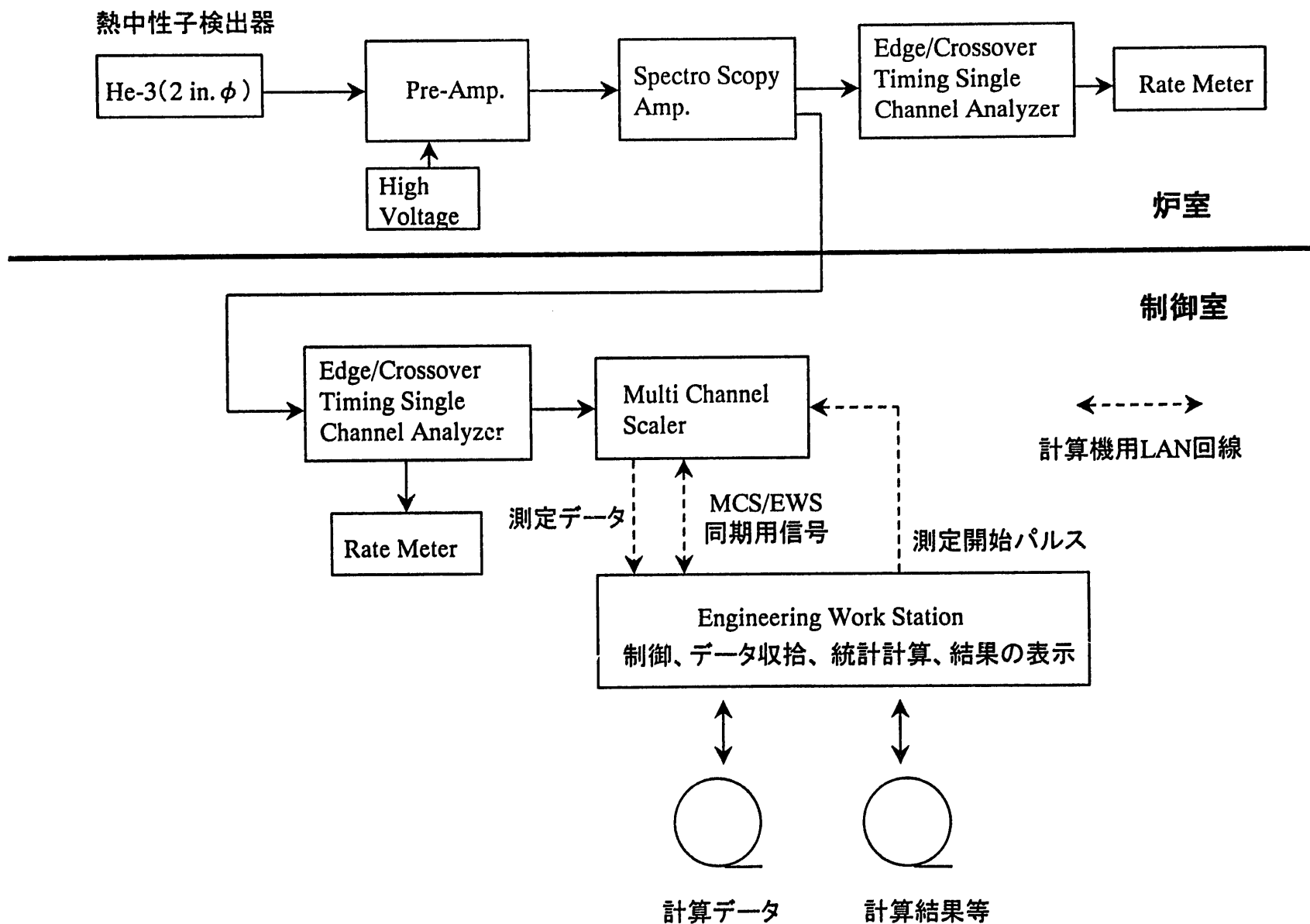


図2-2 ファインマン- $\alpha$ 法による未臨界度測定システム



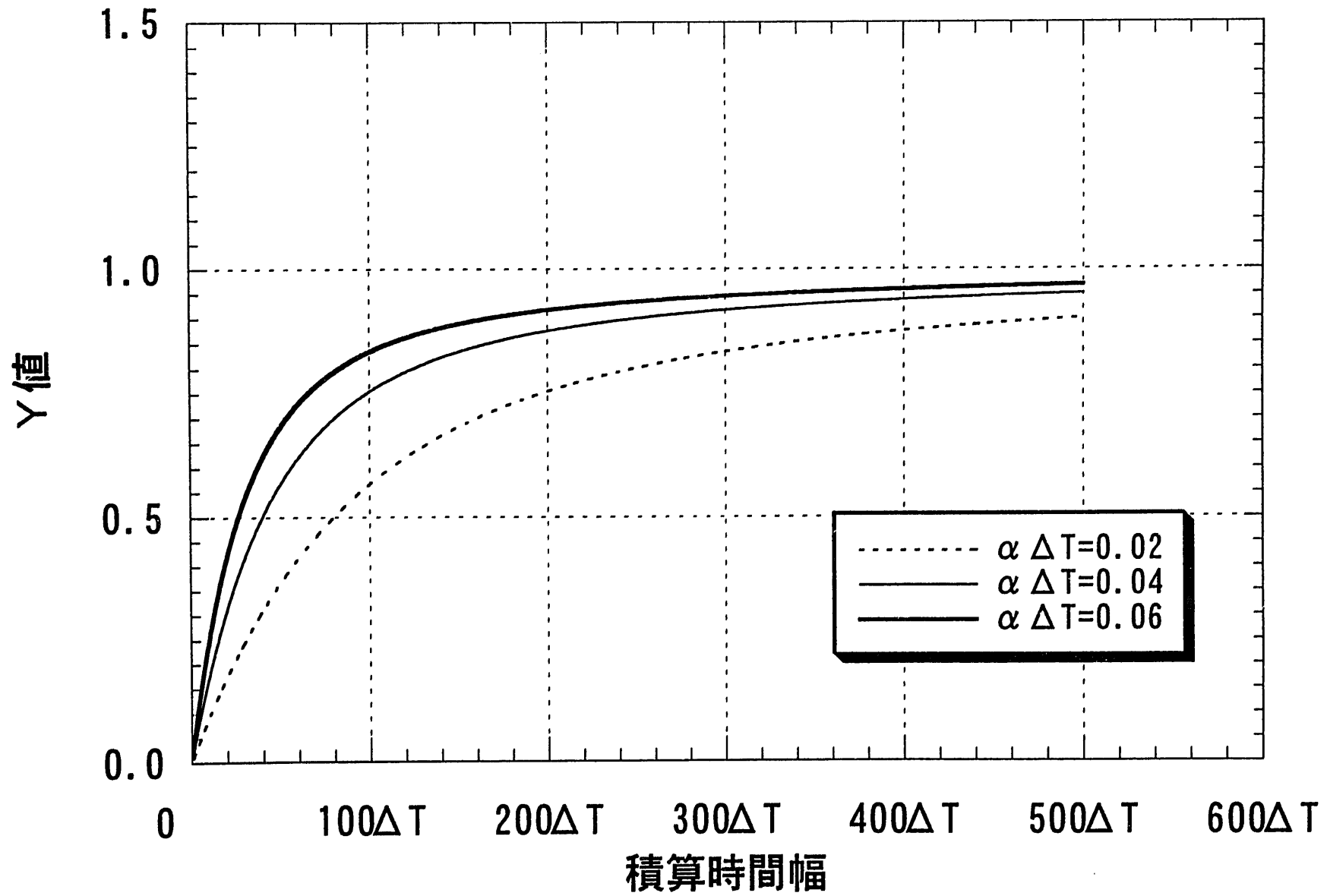


図2-3 積算時間幅とY値の関係

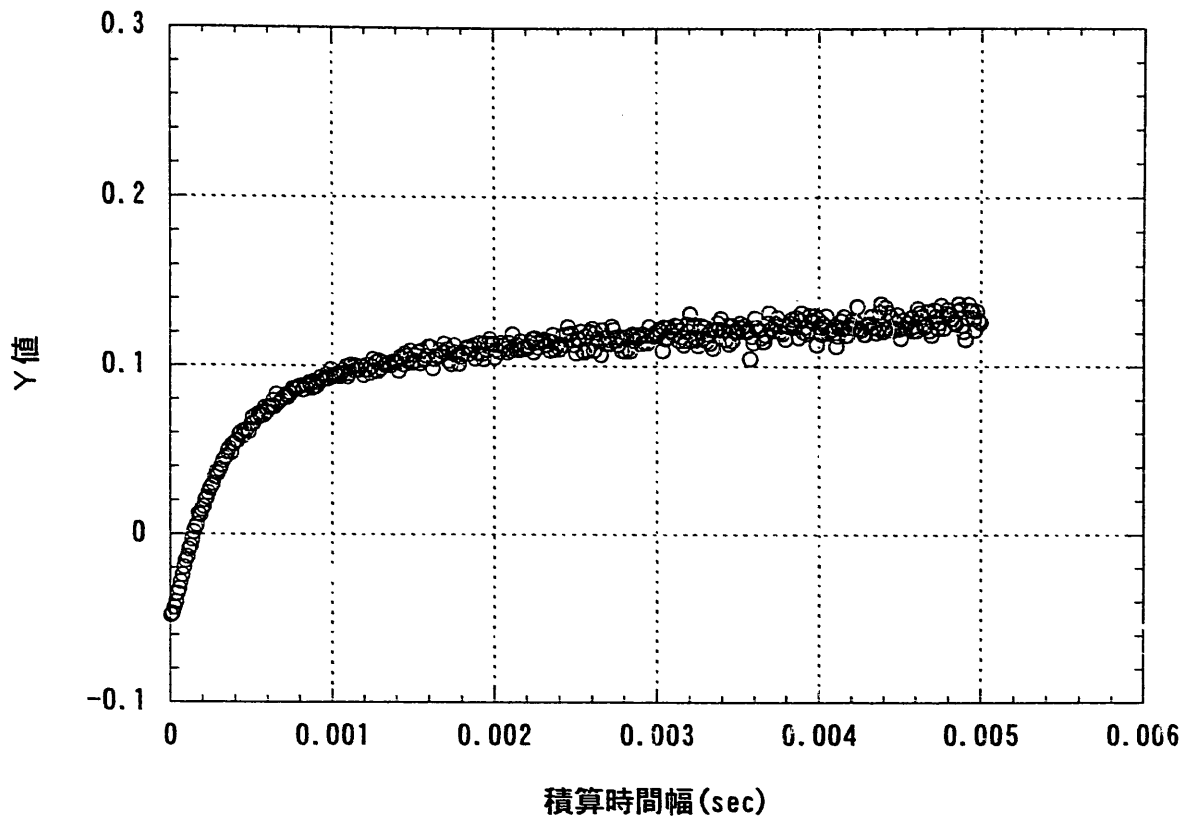


図2-4 ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位200mm, 2万cps)

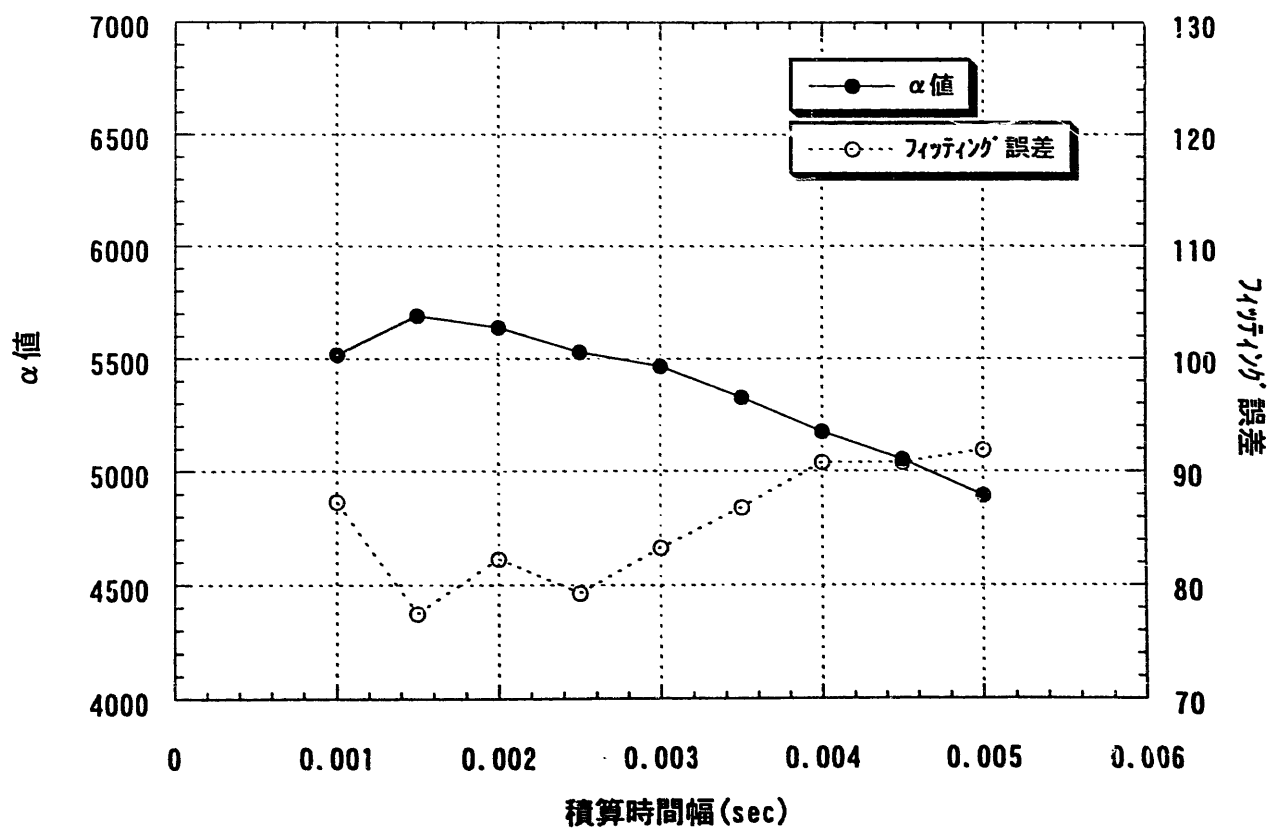


図2-5 積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位200mm, 2万cps)

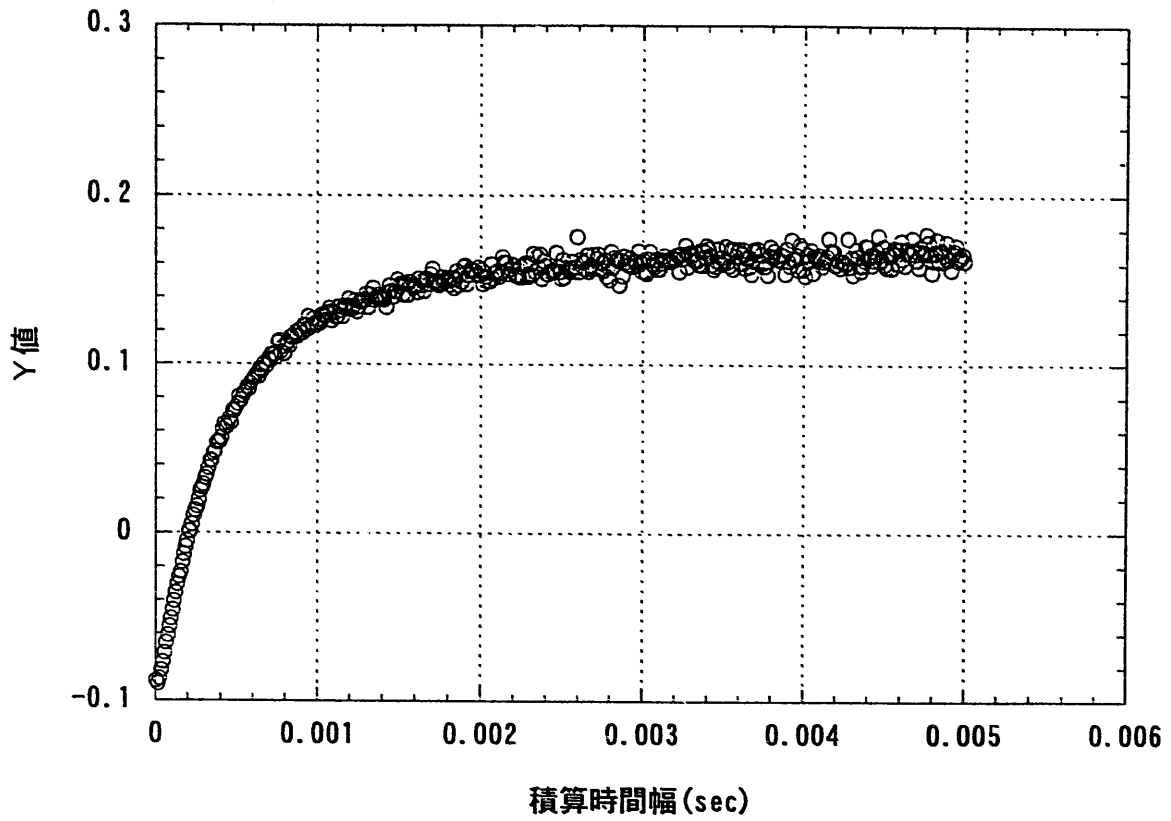


図2-6 ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位300mm, 3万cps)

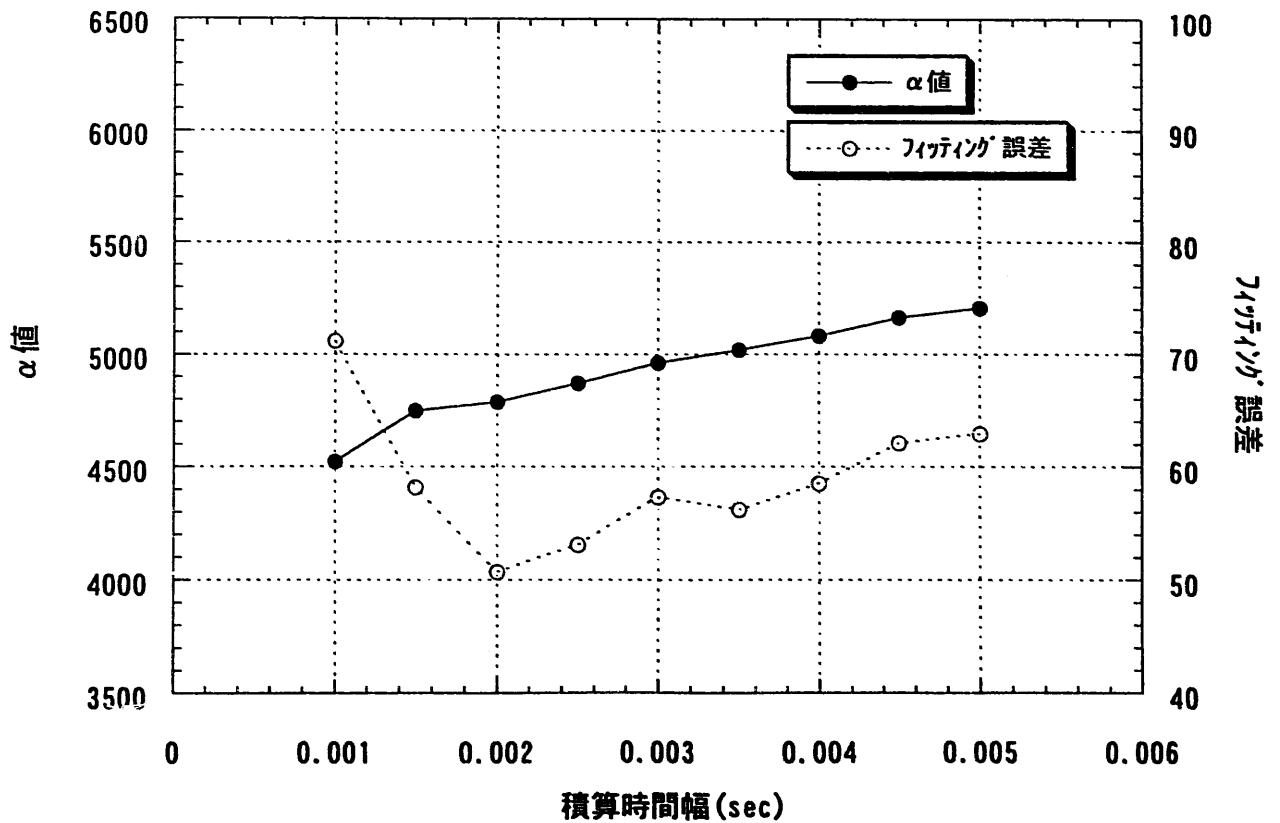


図2-7 積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位300mm, 3万cps)

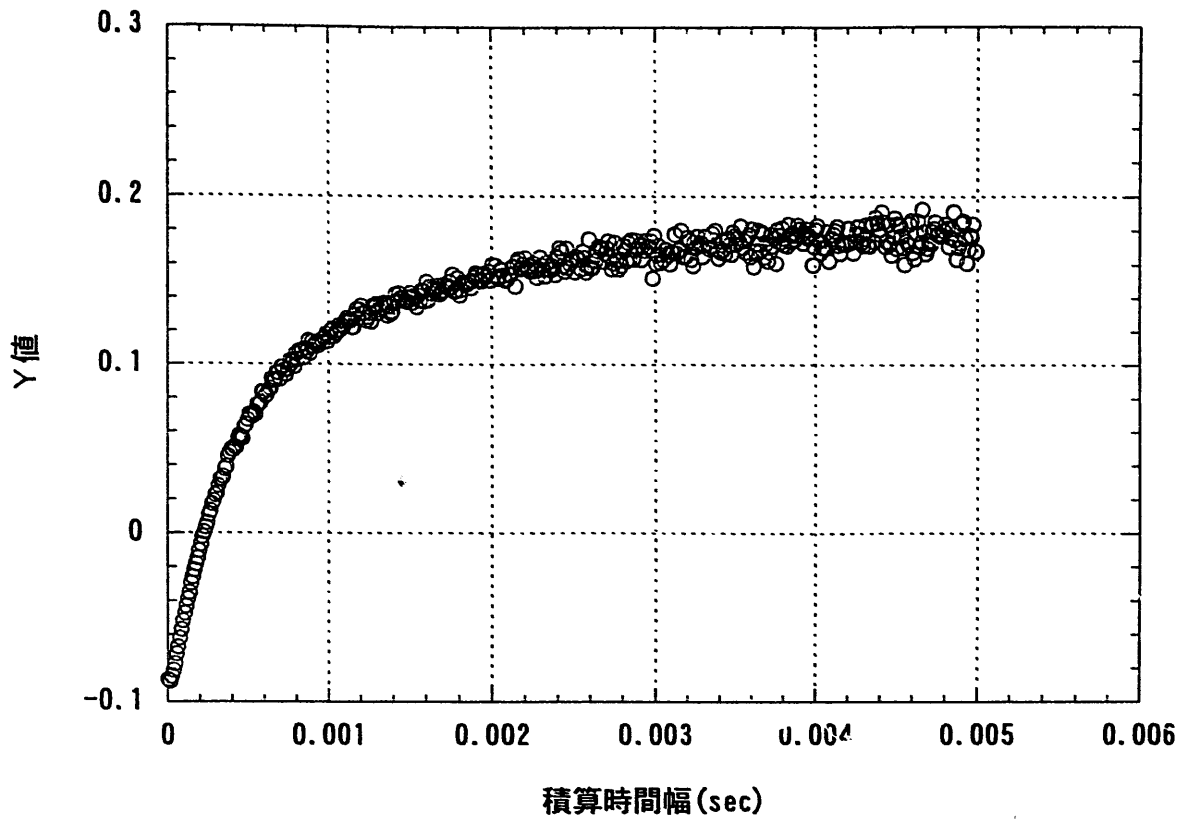


図2-8 ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位400mm, 3万cps)

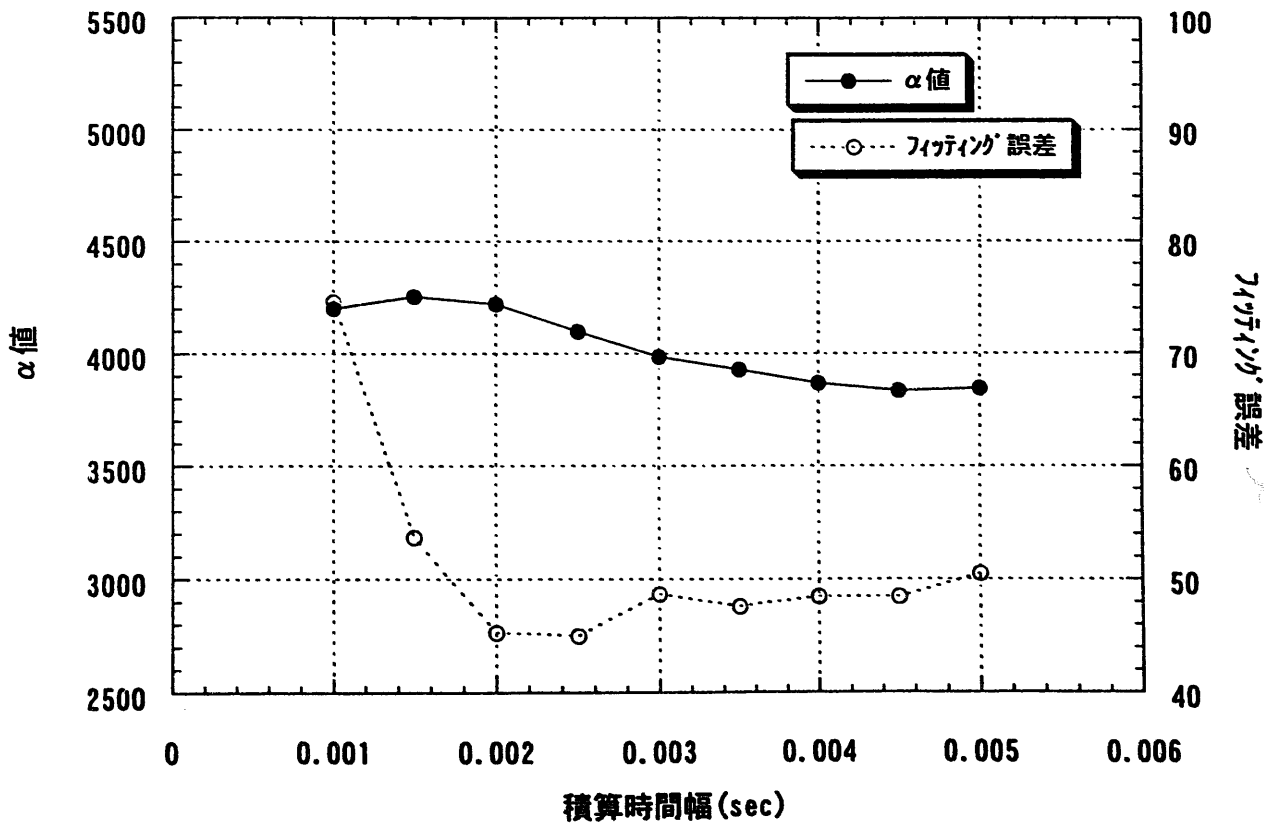


図2-9 積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位400mm, 3万cps)

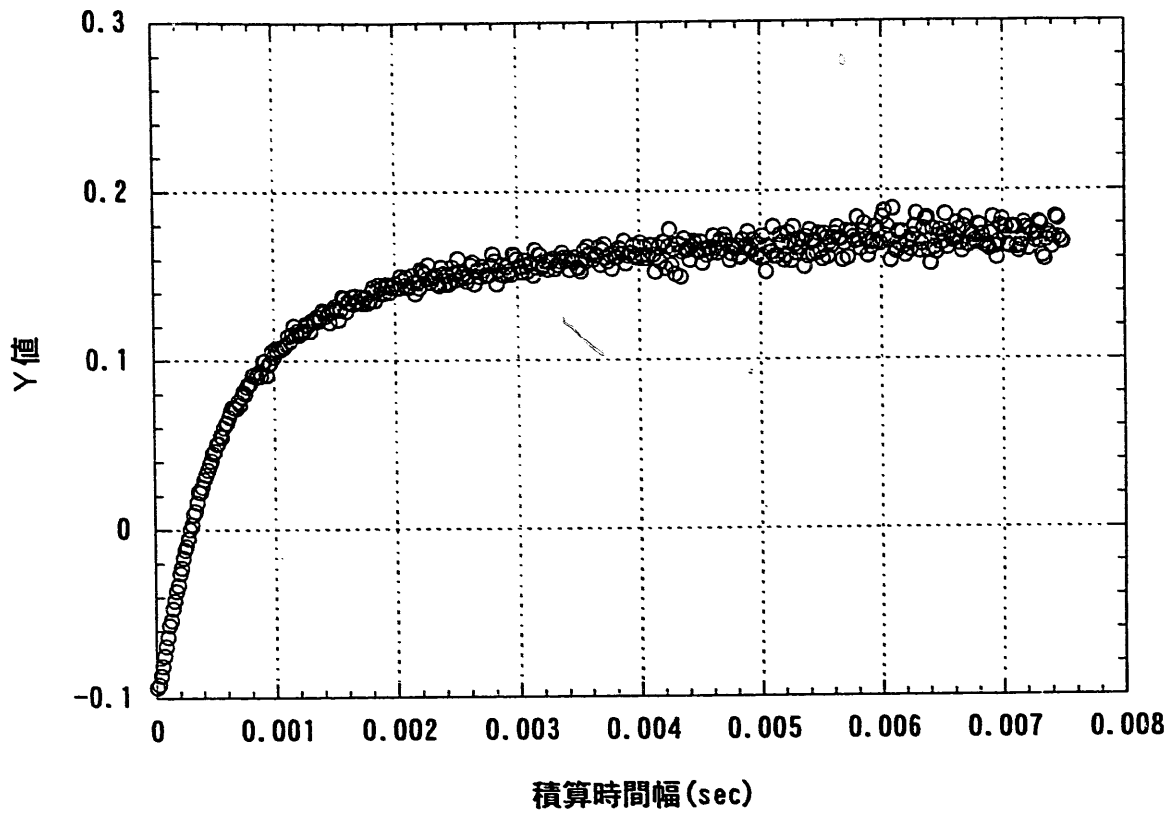


図2-10 ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位600mm, 3万cps)

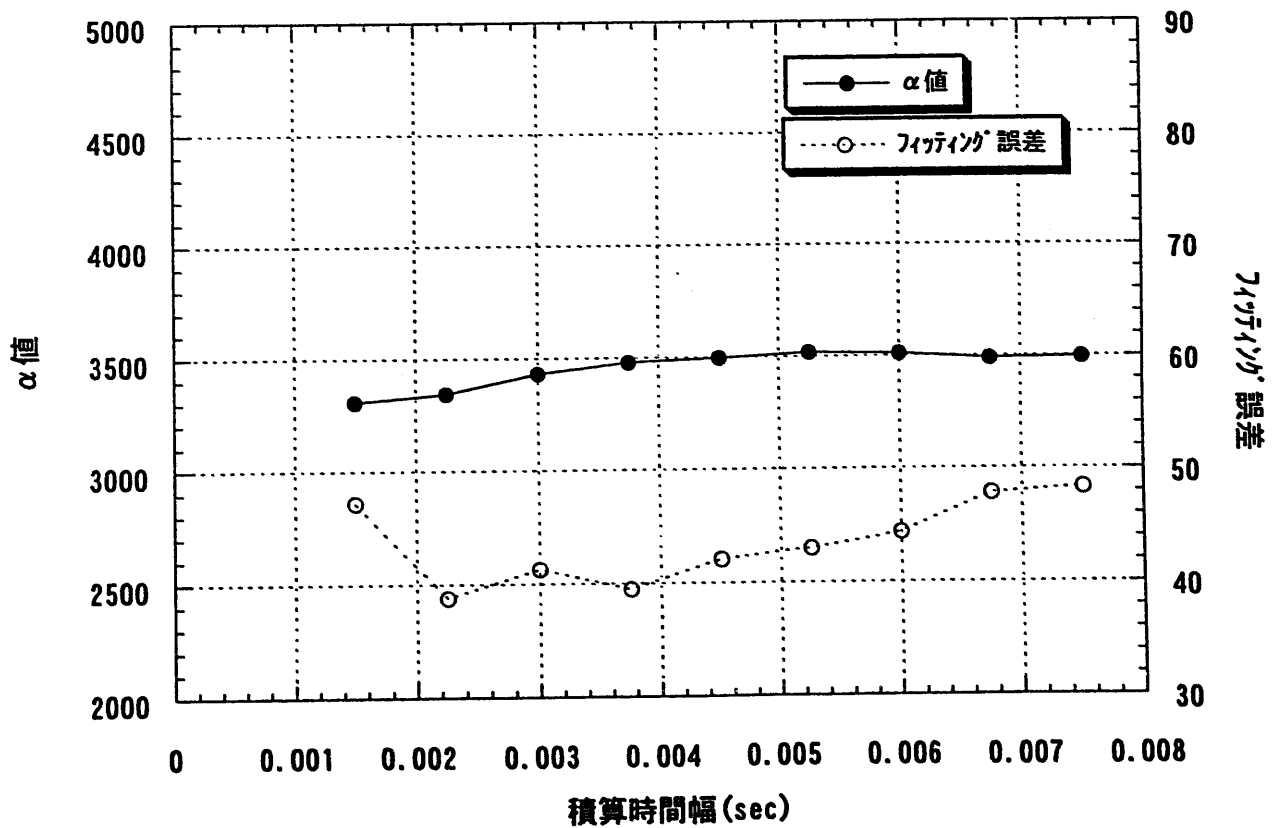
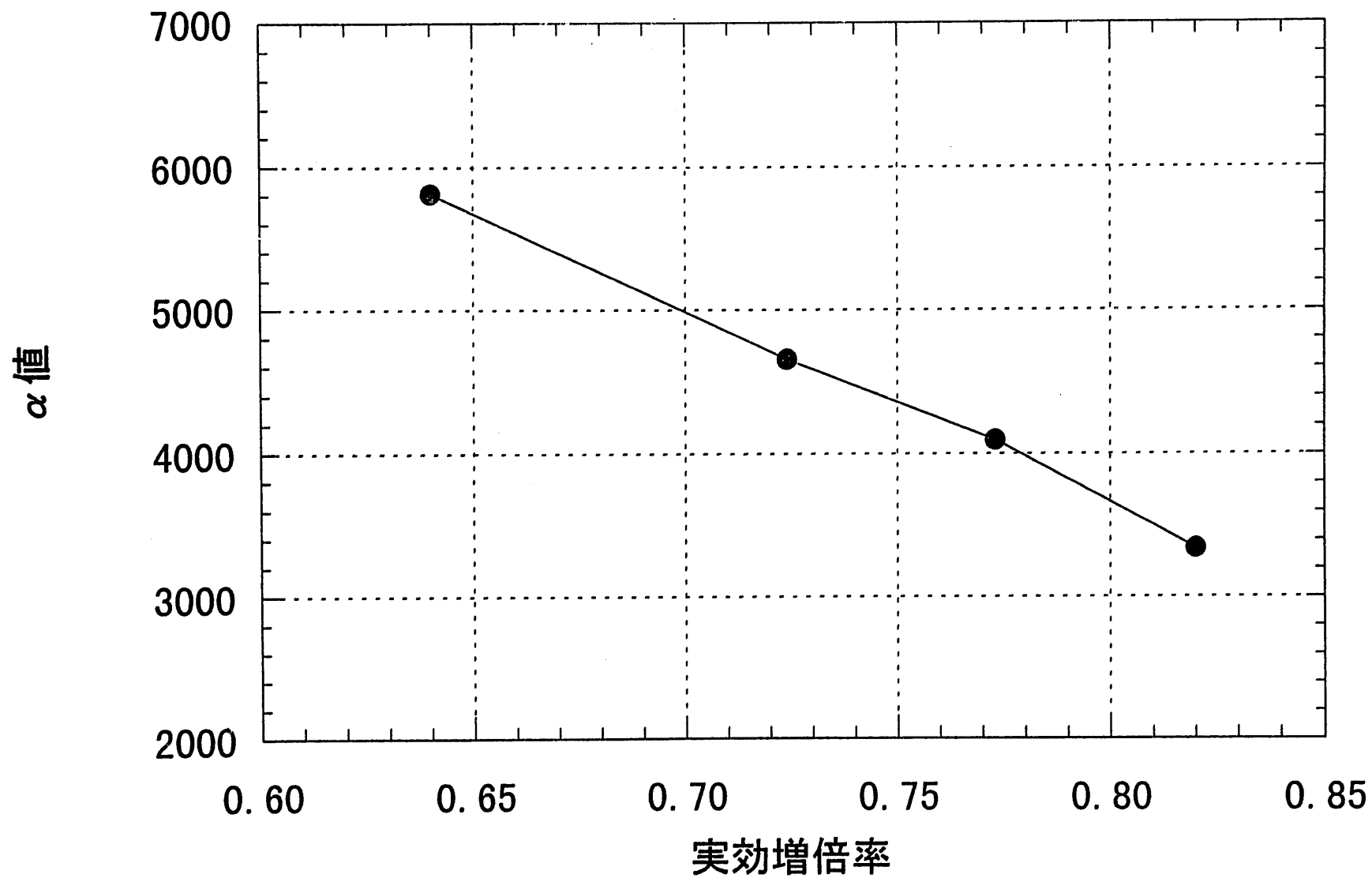


図2-11 積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位600mm, 3万cps)

図2-12 実効増倍率と $\alpha$ 値の関係

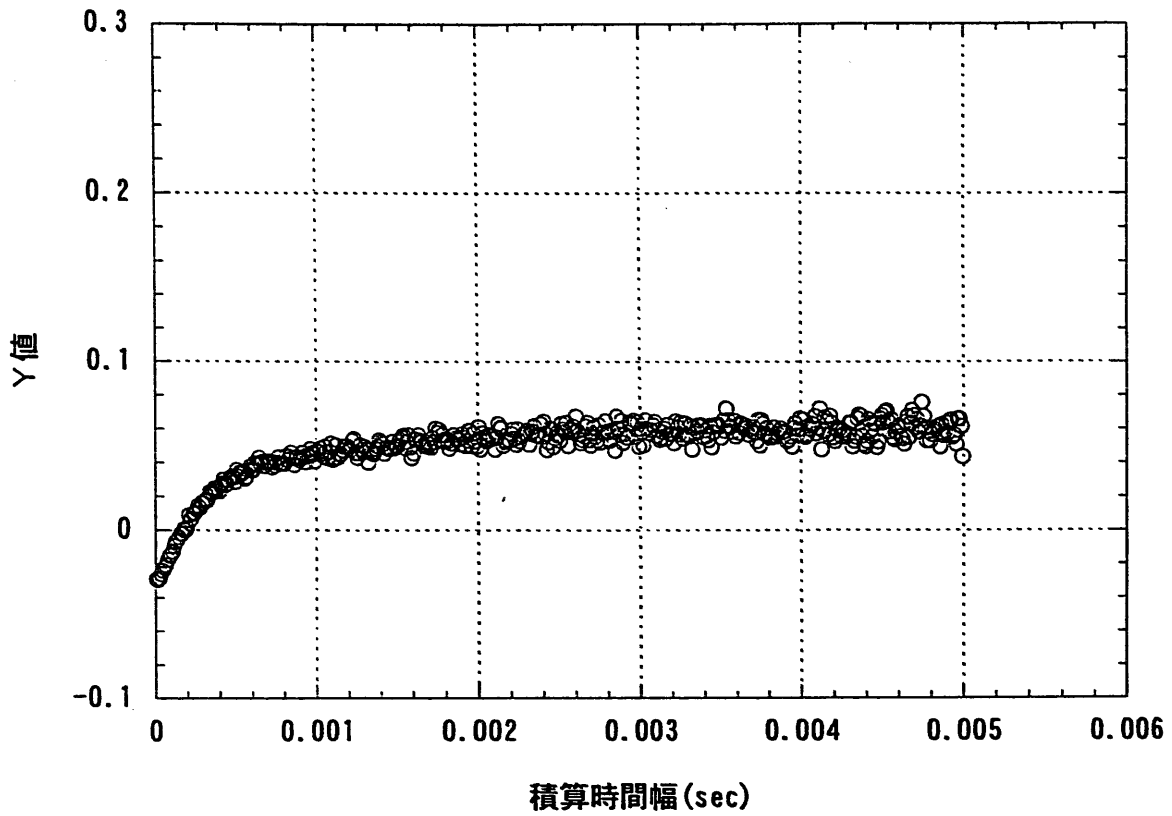


図2-13 ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位200mm, 1万cps)

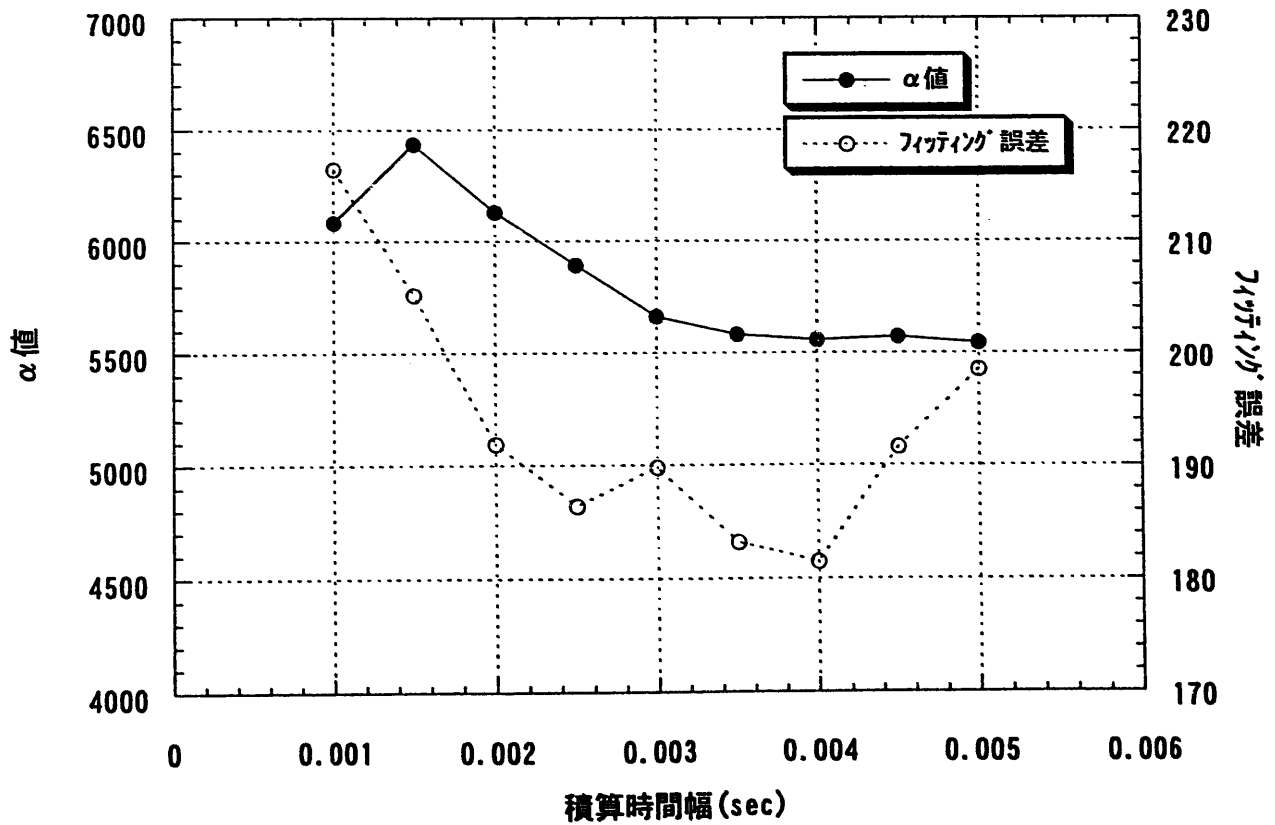


図2-14 積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位200mm, 1万cps)

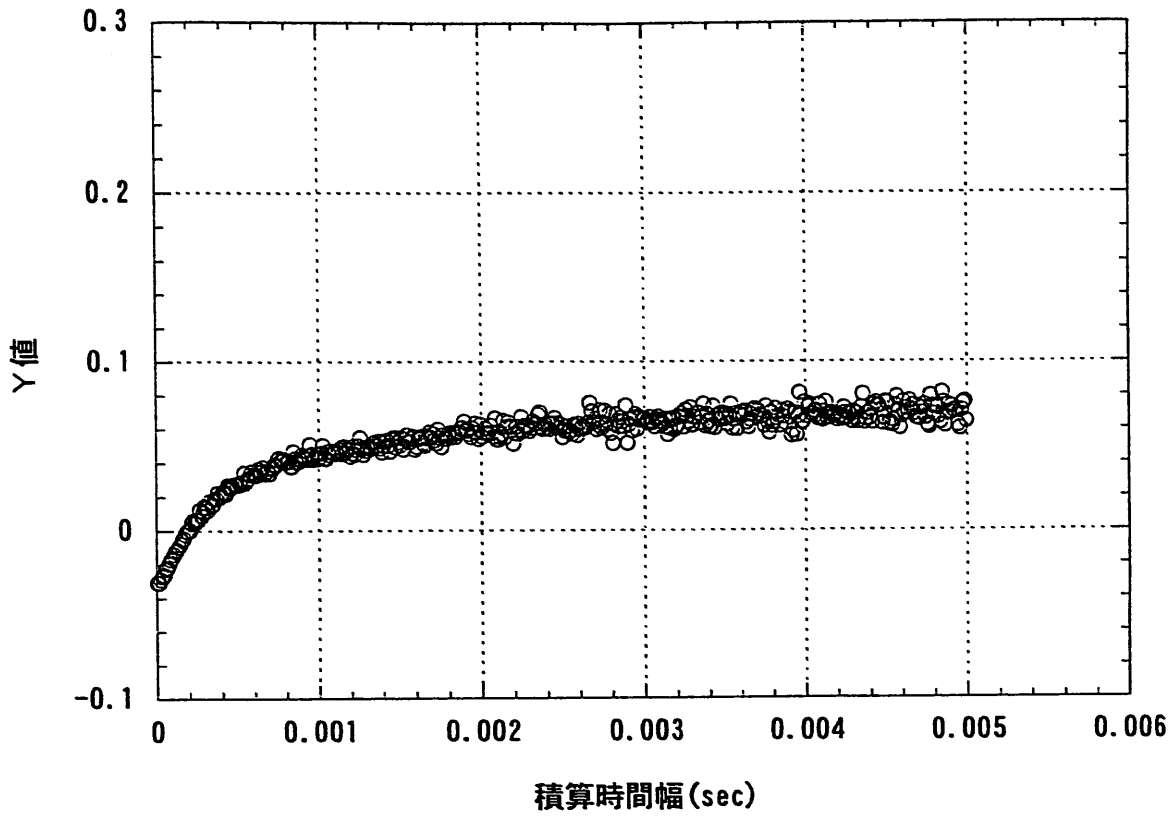


図2-15 ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位300mm, 1万cps)

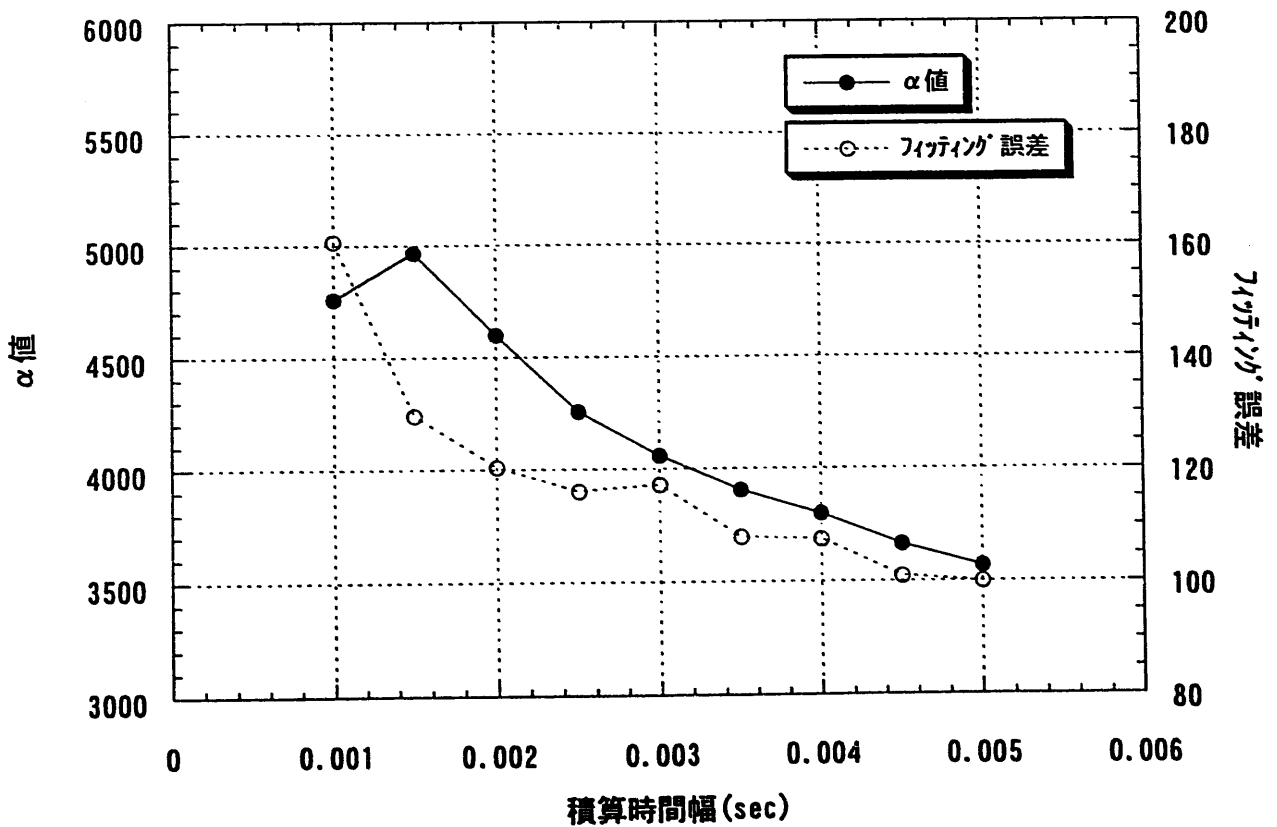


図2-16 積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位300mm, 1万cps)



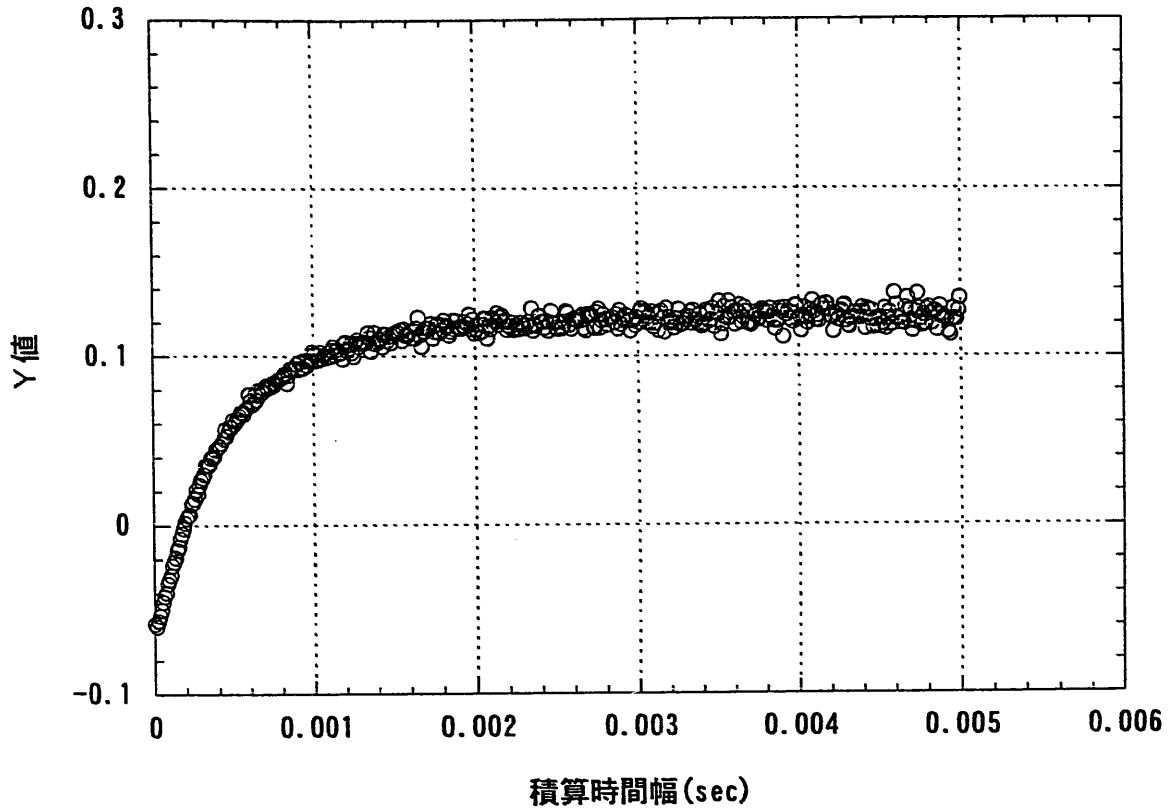


図2-17 ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位300mm, 2万cps)

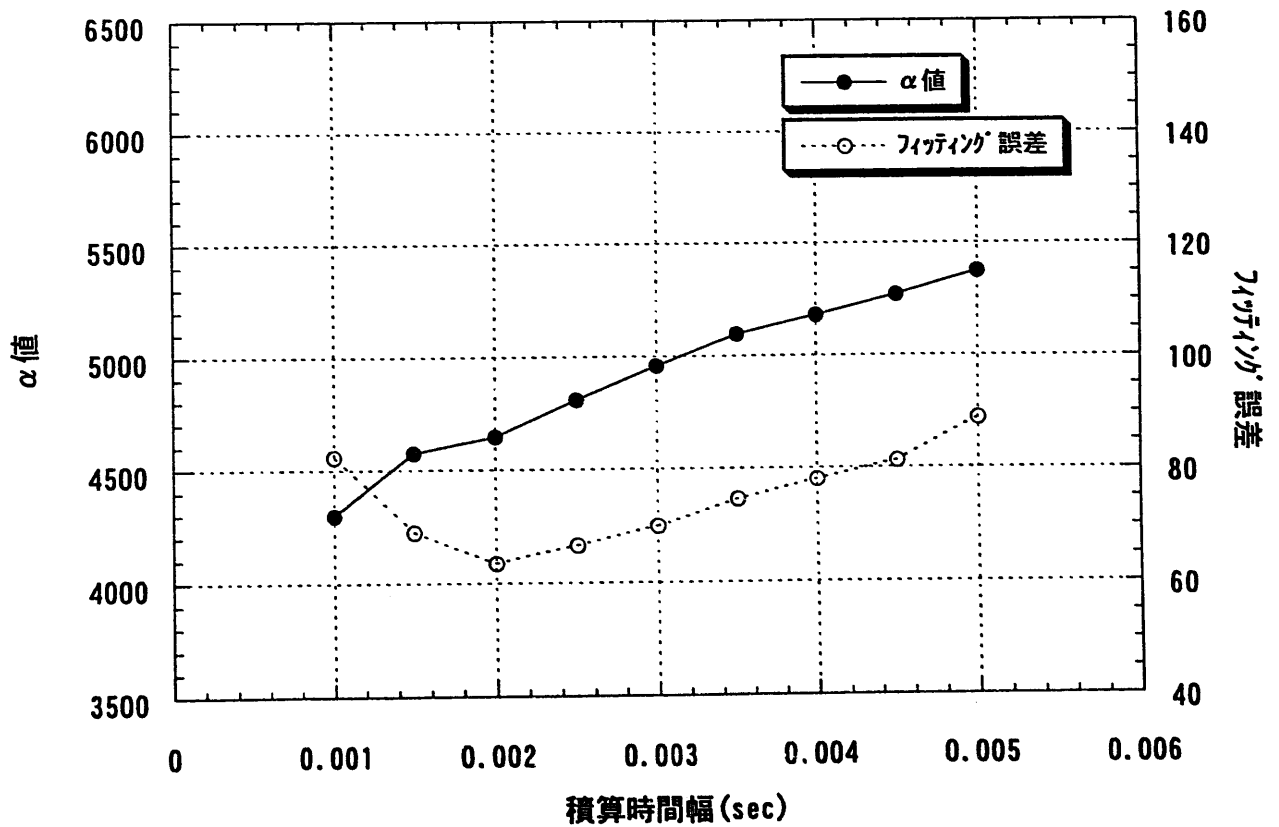


図2-18 積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位300mm, 2万cps)

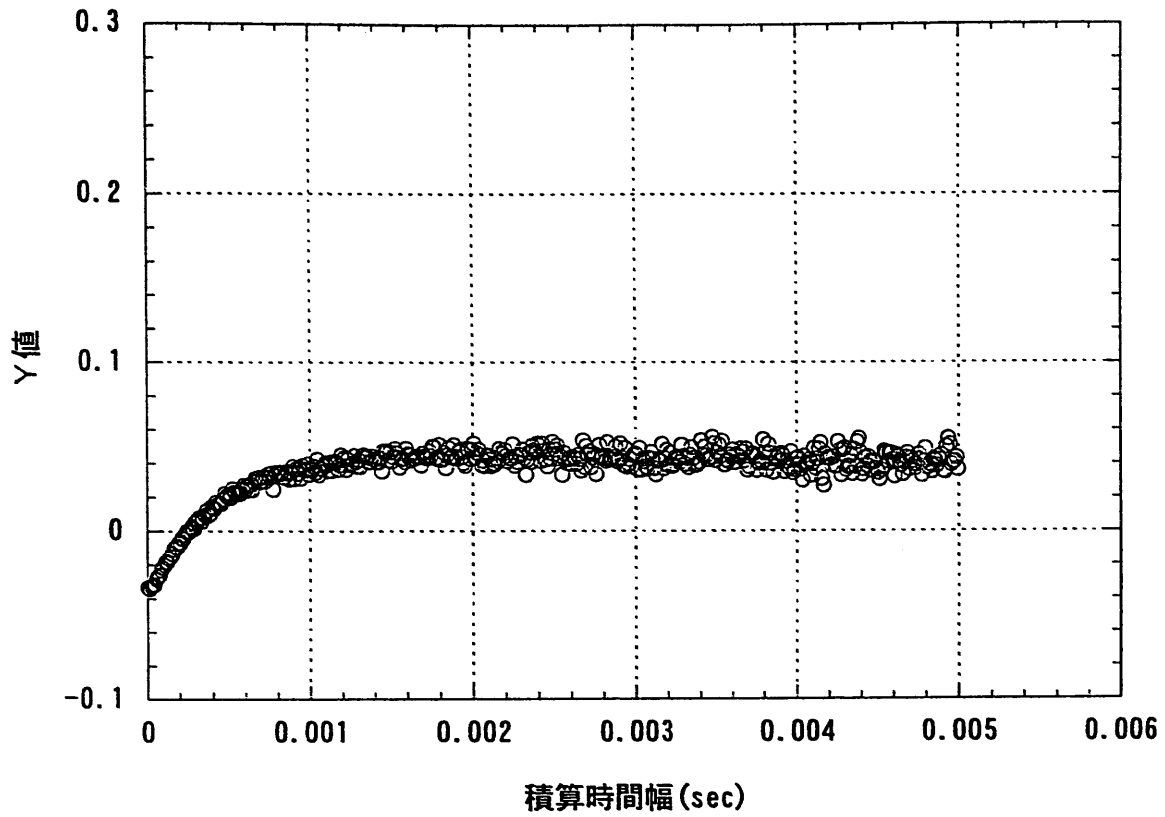


図2-19 ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位400mm, 1万cps)

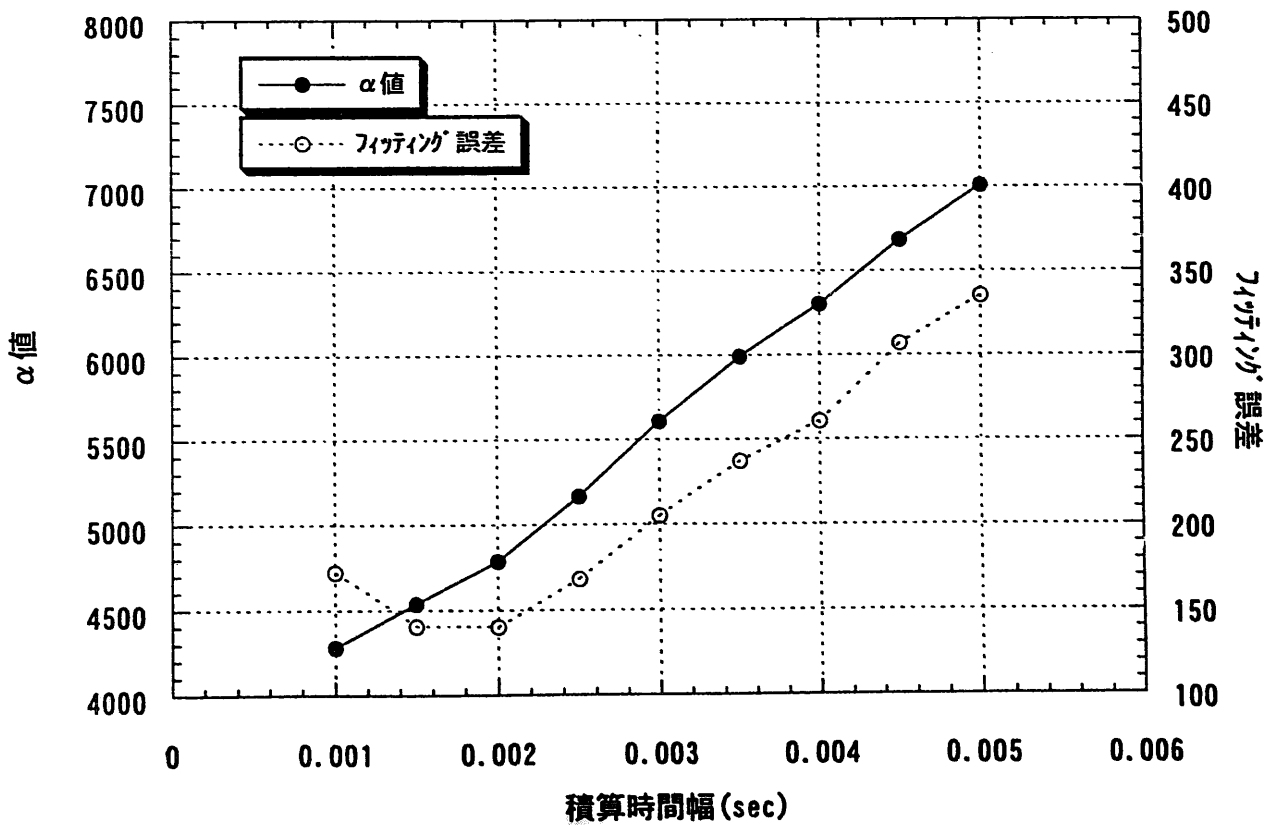


図2-20 積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位400mm, 1万cps)

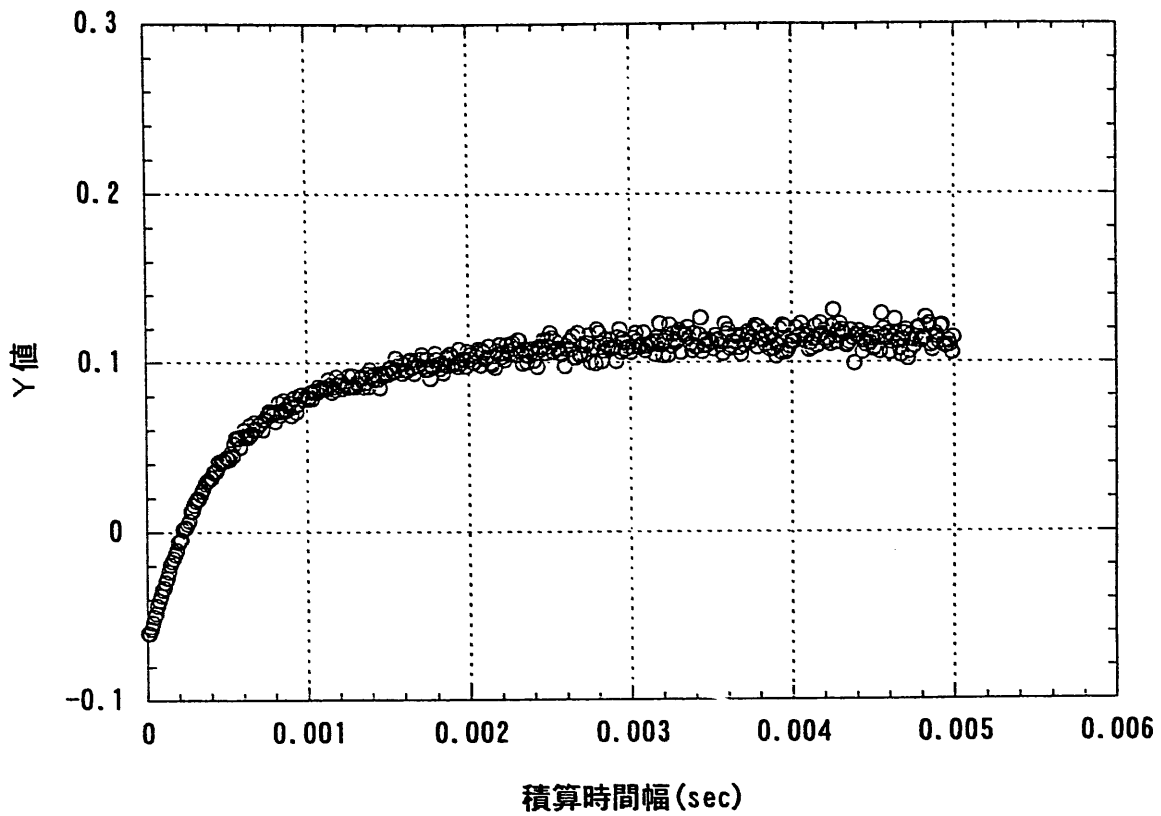


図2-21 ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位400mm, 2万cps)

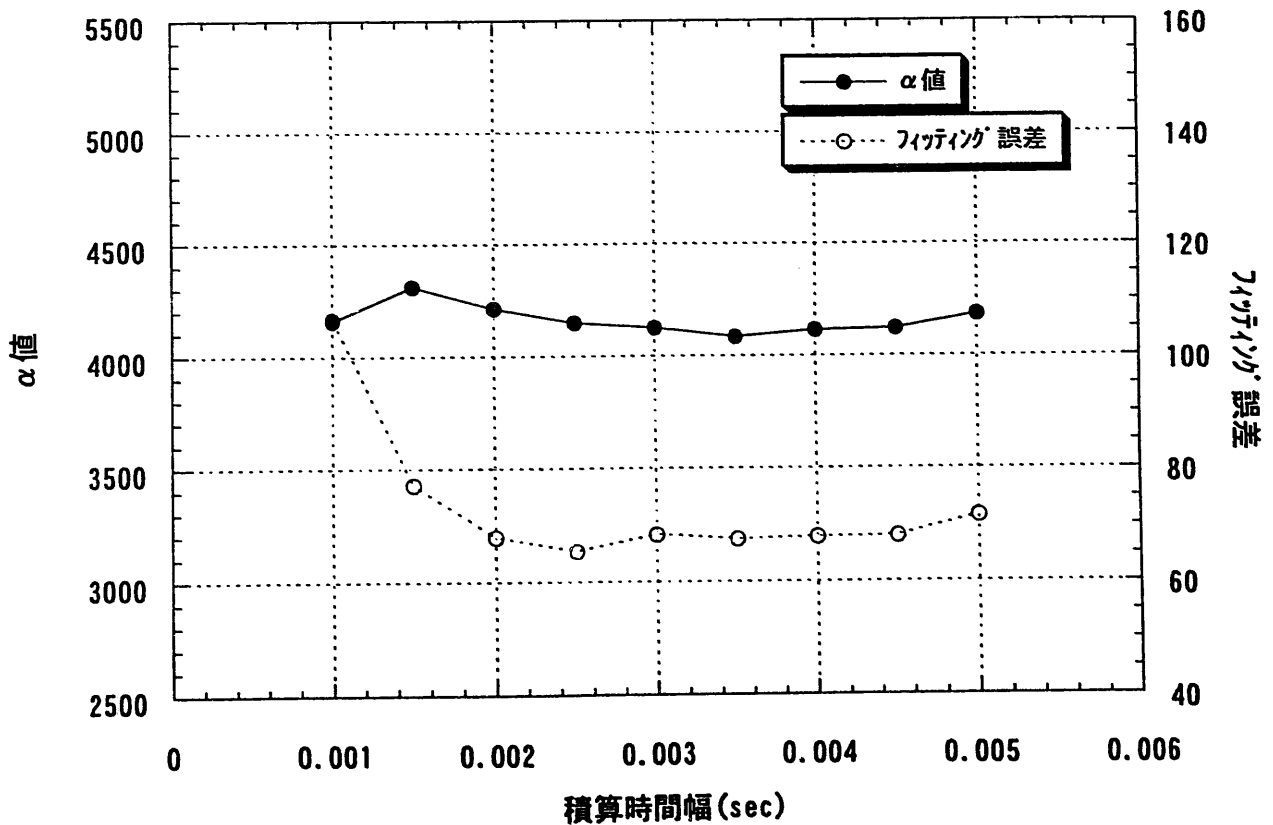


図2-22 積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位400mm, 2万cps)

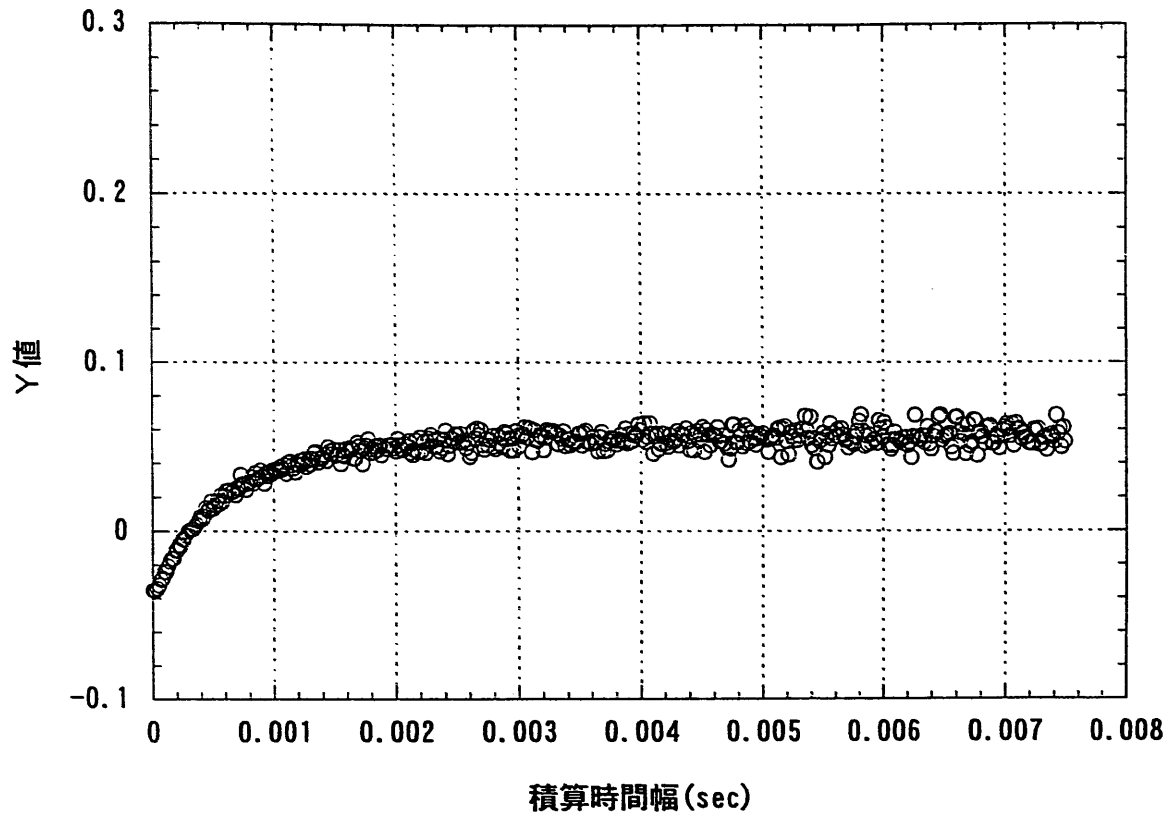


図2-23 ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位600mm, 1万cps)

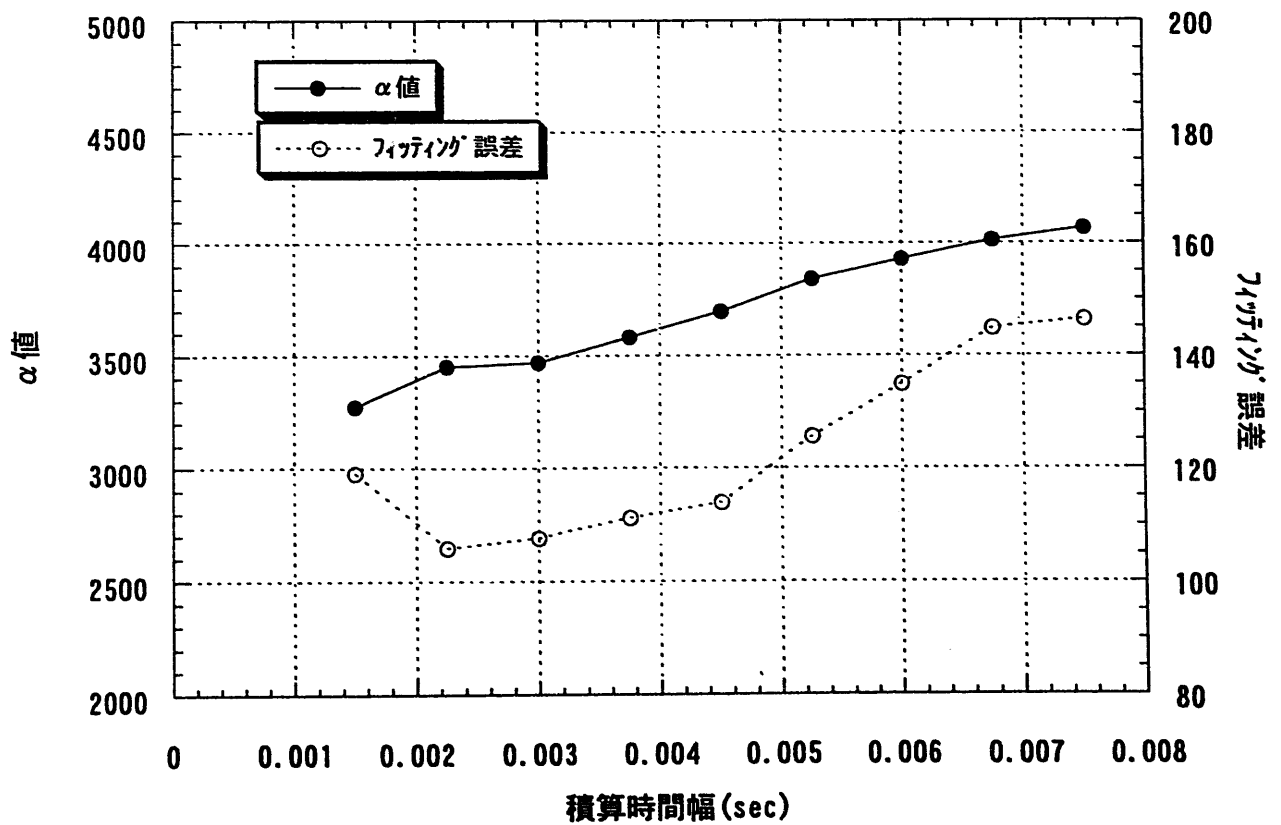


図2-24 積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位600mm, 1万cps)

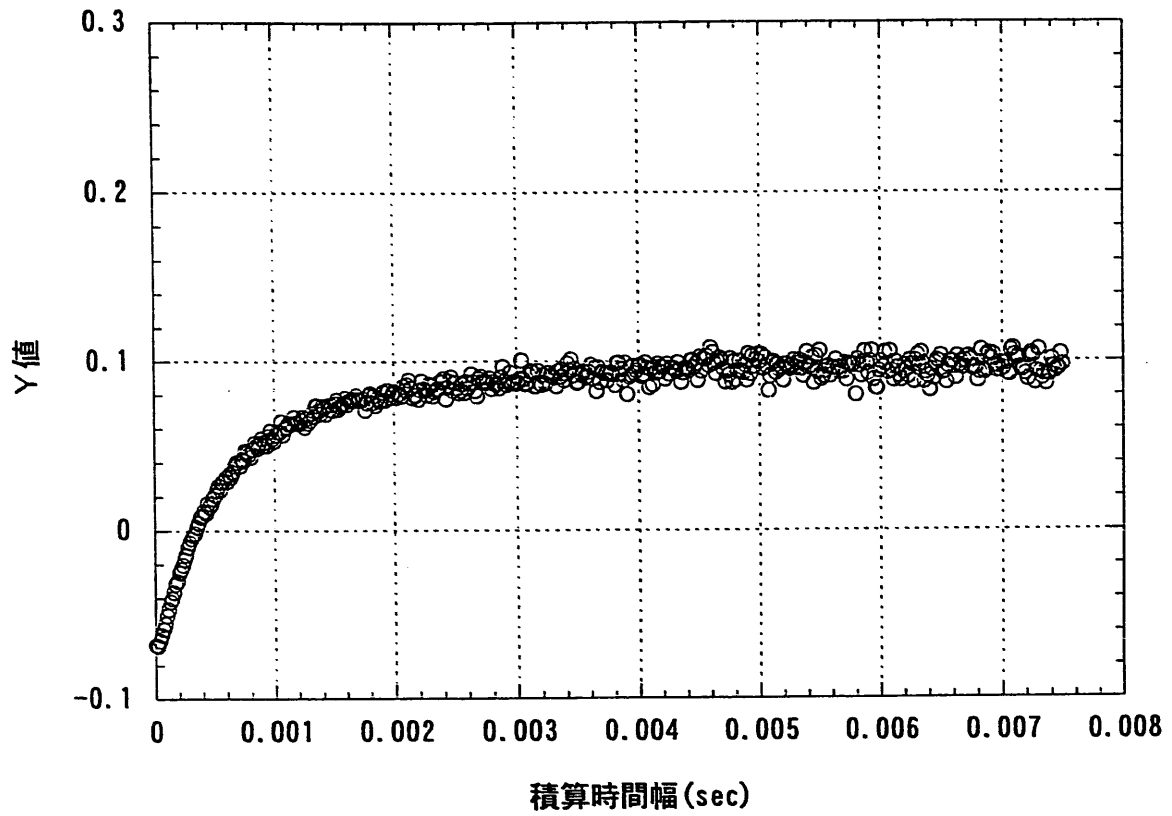


図2-25 ファインマン- $\alpha$ 法のY値 (試験体水位600mm, 2万cps)

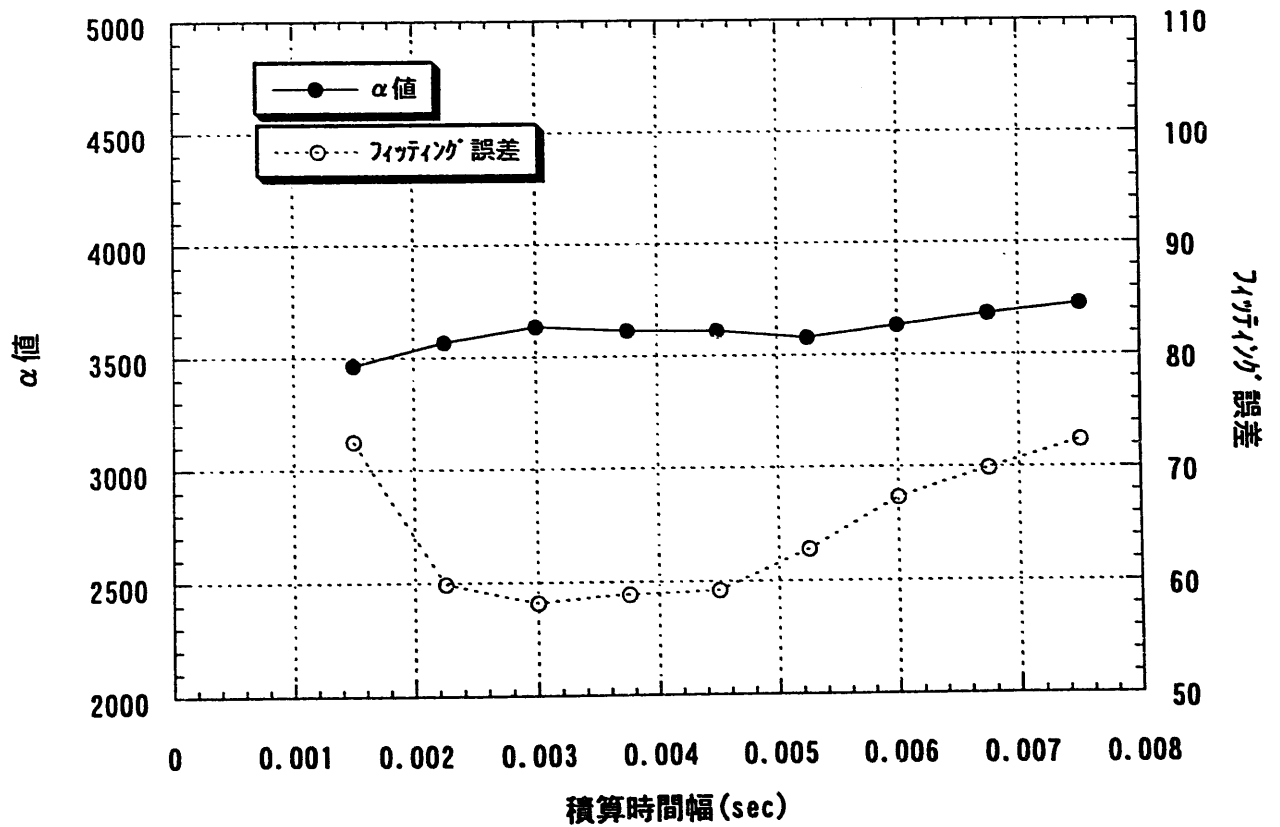


図2-26 積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位600mm, 2万cps)

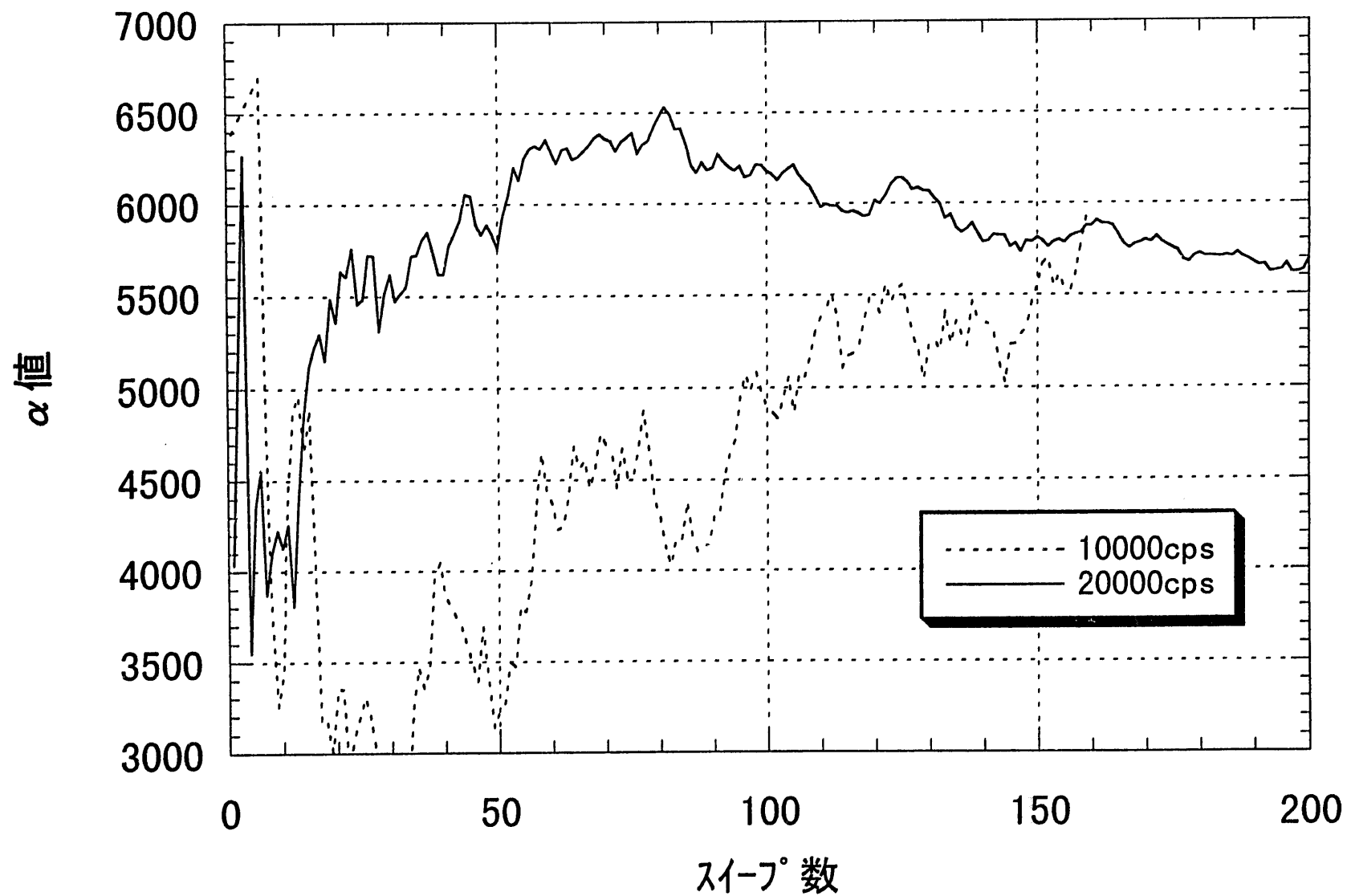


図2-27 スィープ数と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位200mm)

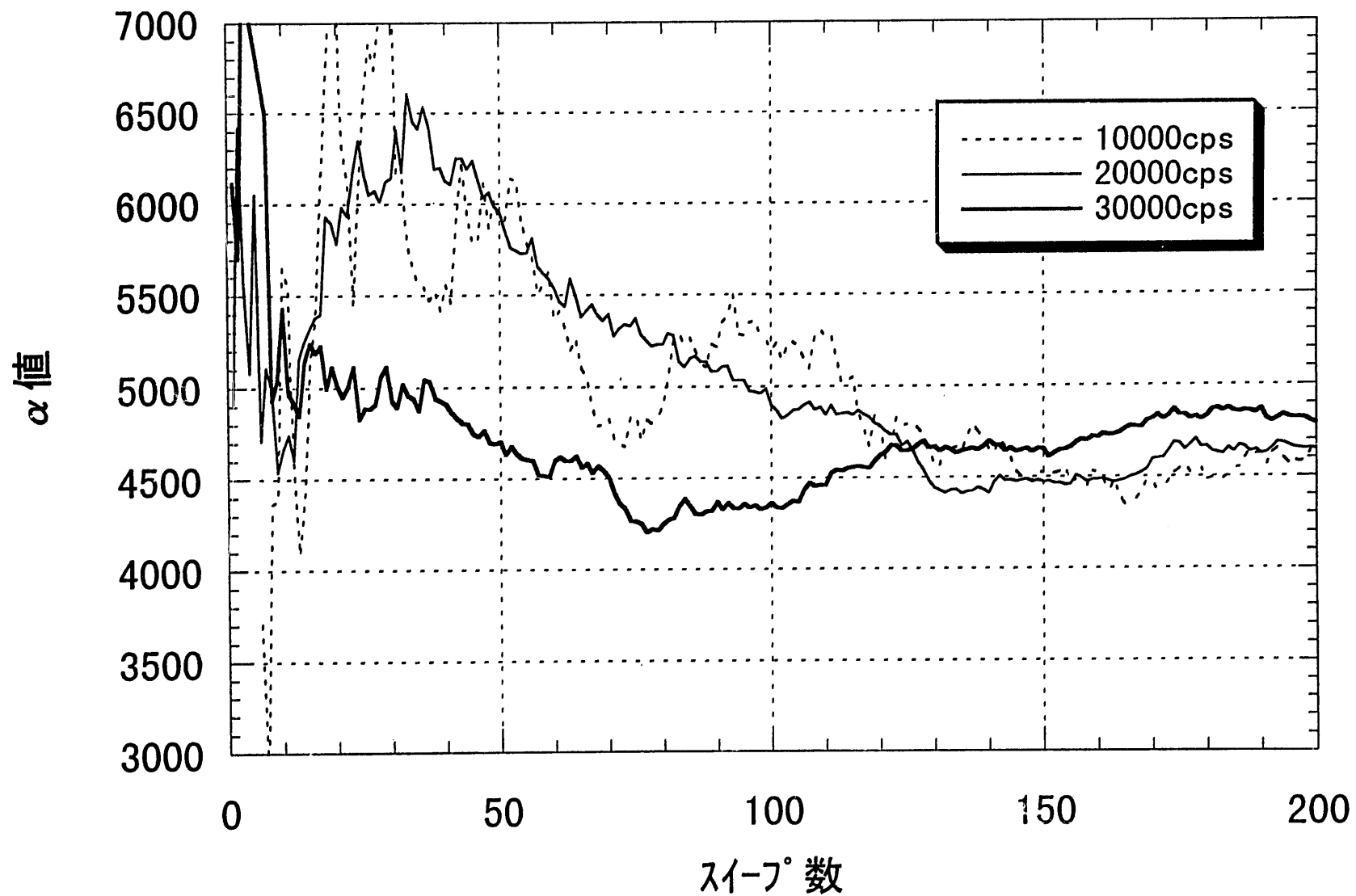


図2-28 スweep数と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位300mm)

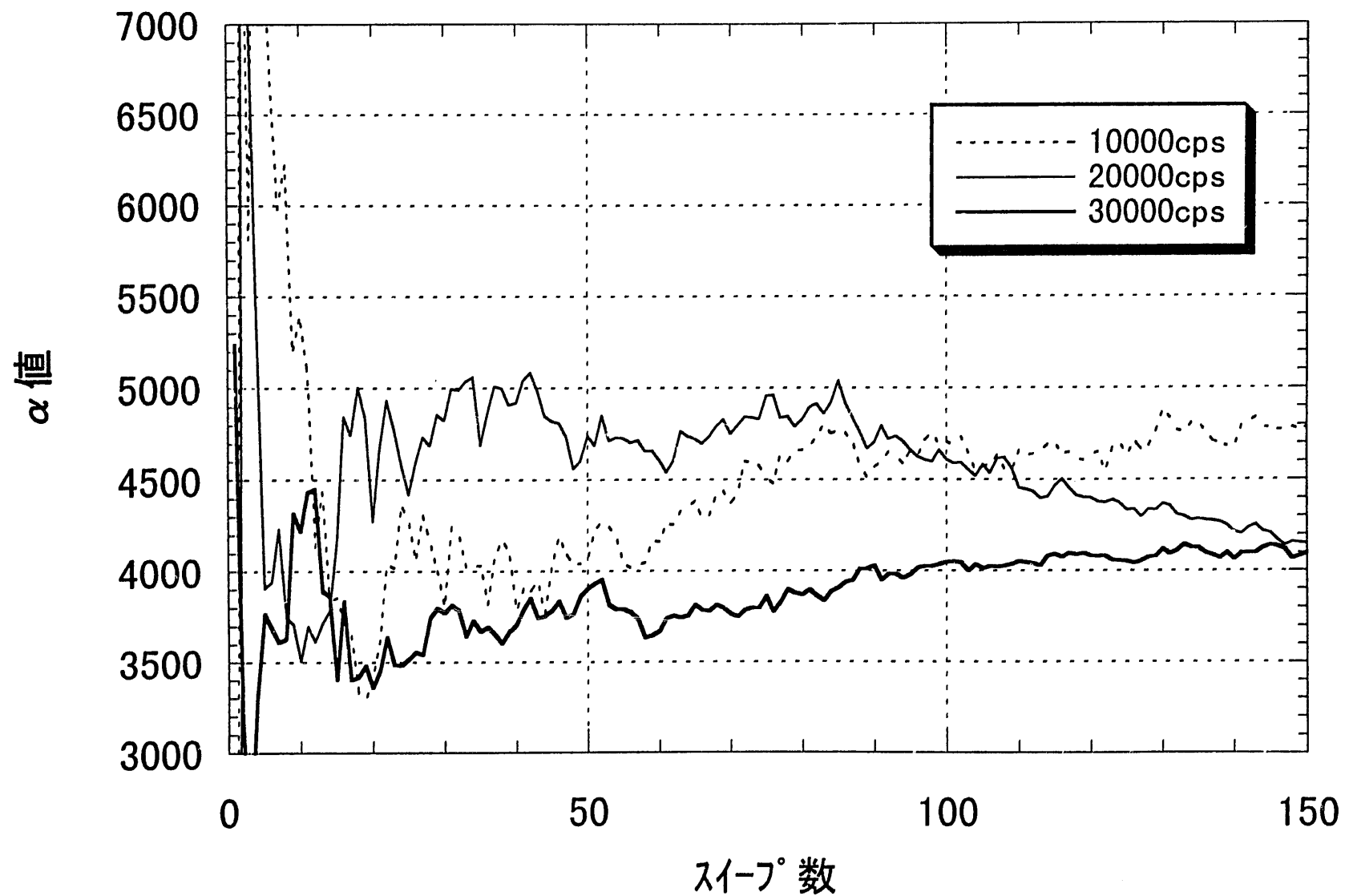


図2-29 スイフ°数とα値の関係 (試験体水位400mm)



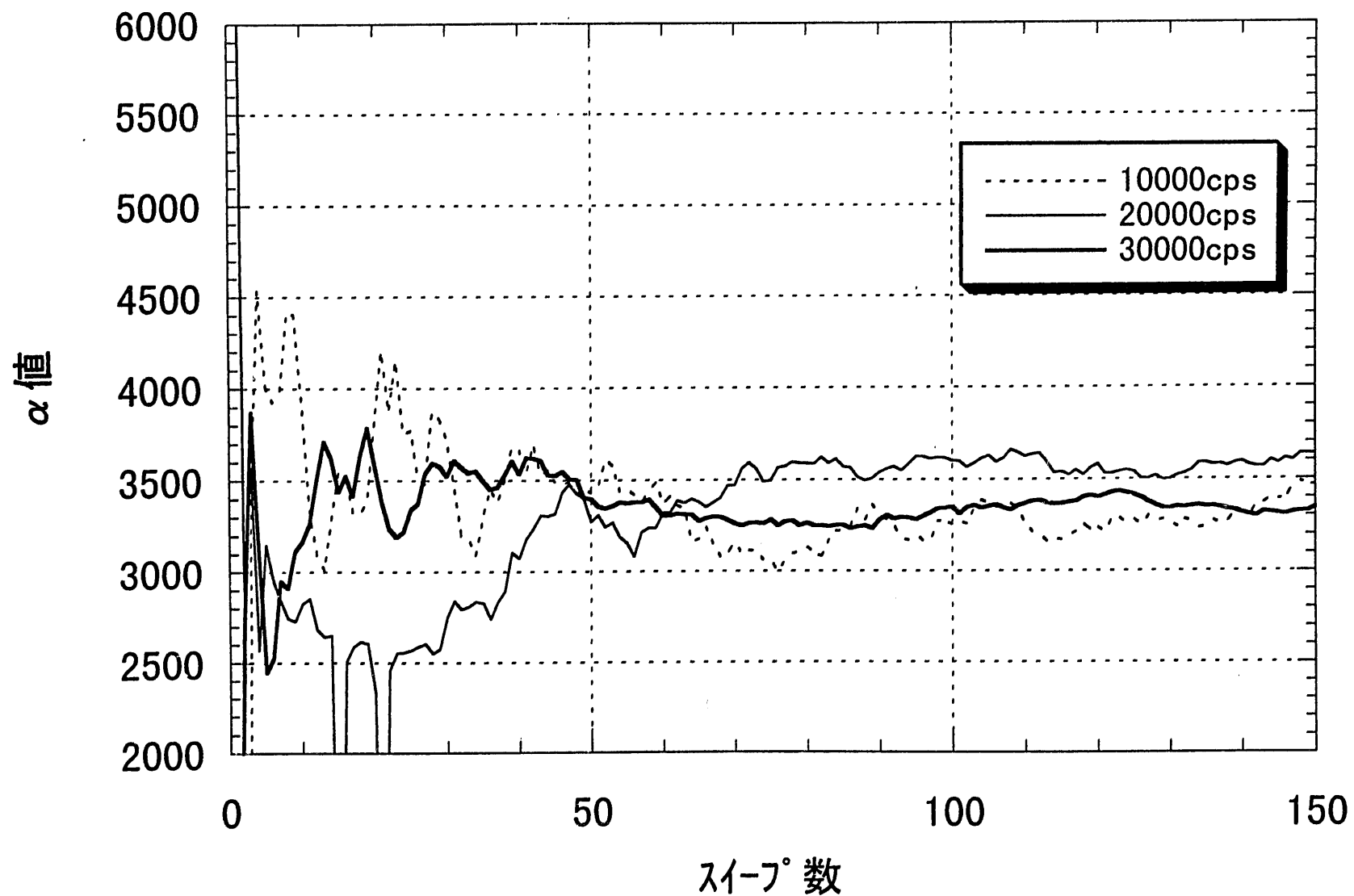
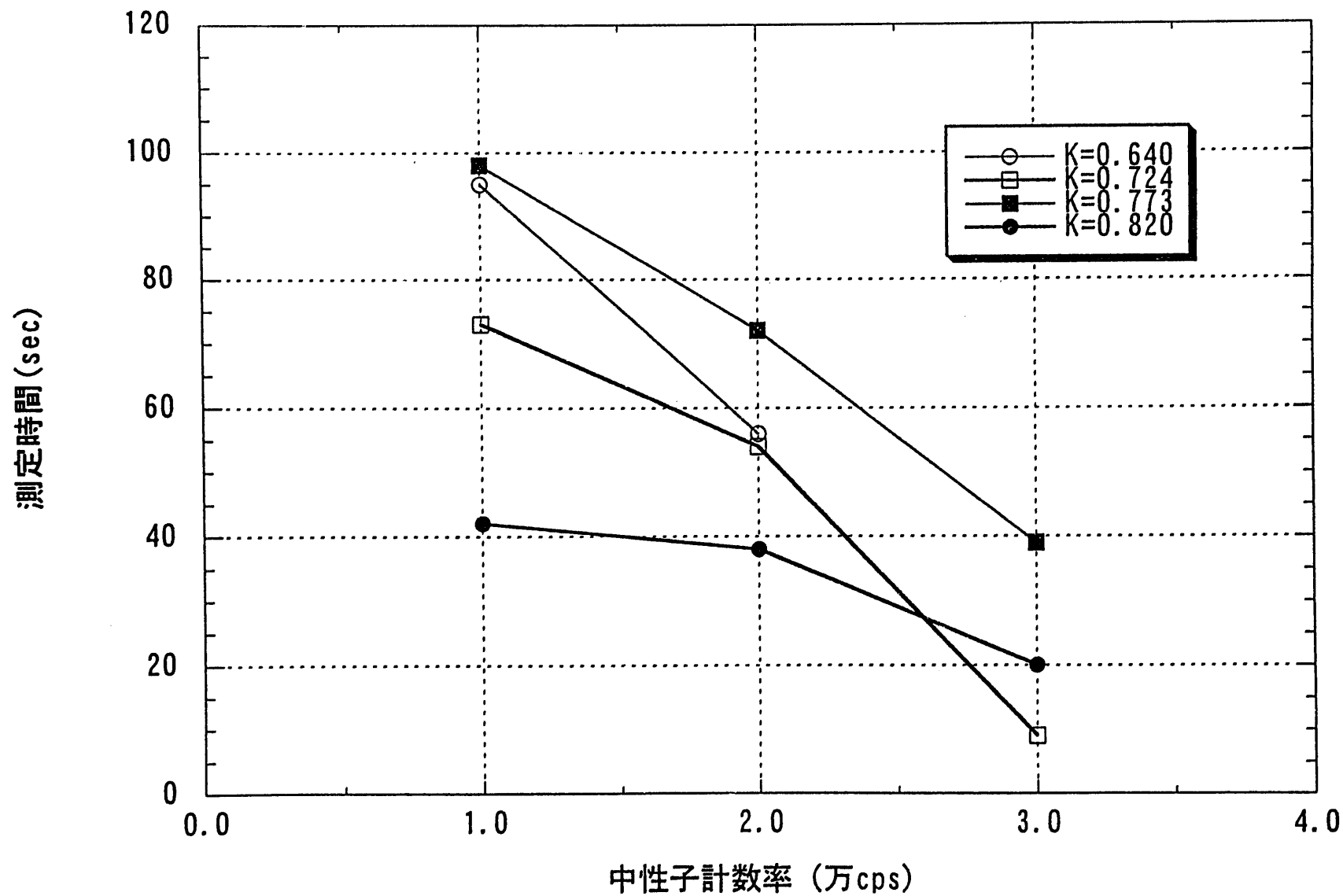


図2-30 スィーフ数と $\alpha$ 値の関係 (試験体水位600mm)

図2-31  $\alpha$  値が基準値の10%以内となる最小測定時間

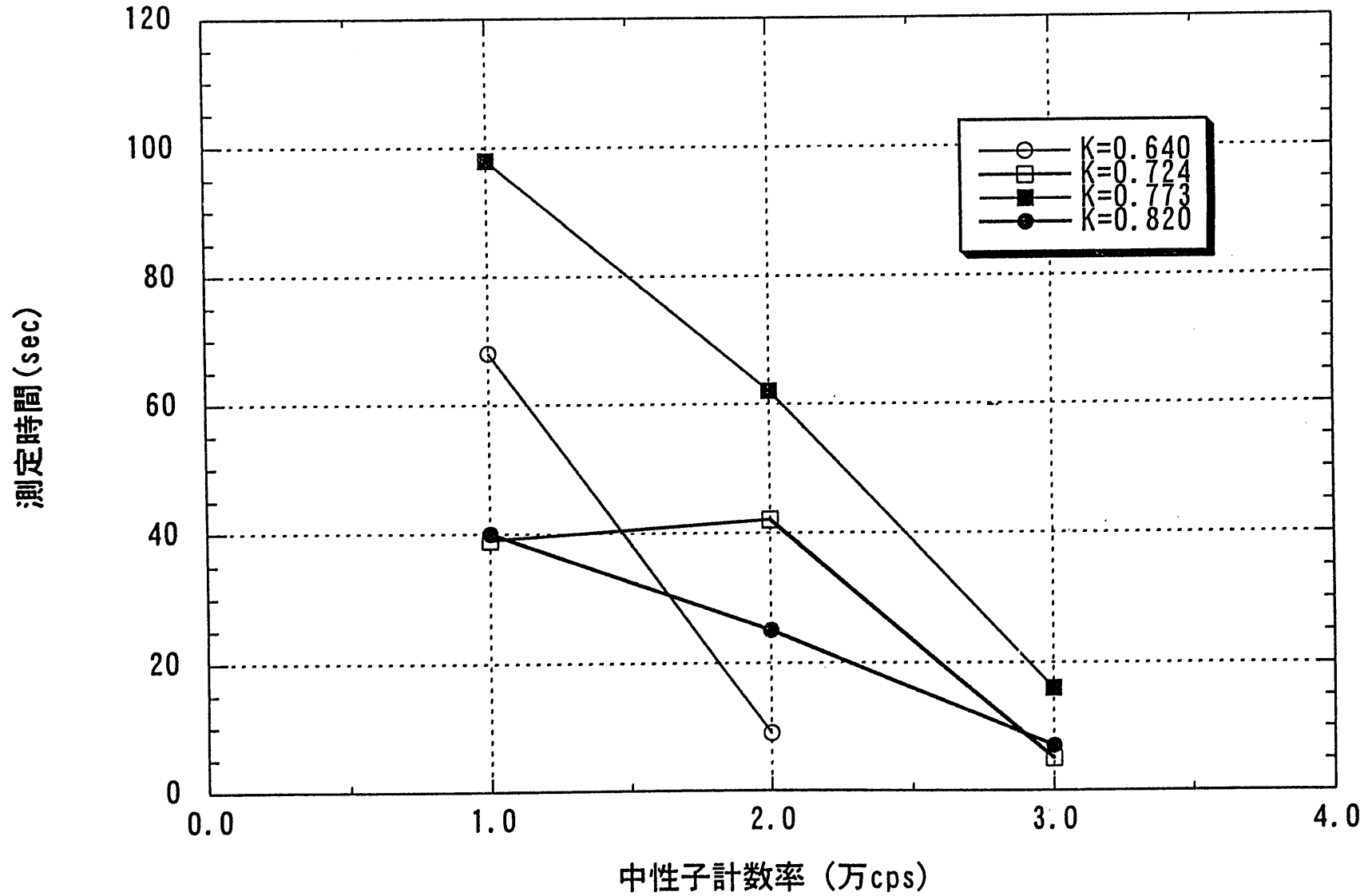


図2-32  $\alpha$  値が基準値の15%以内となる最小測定時間

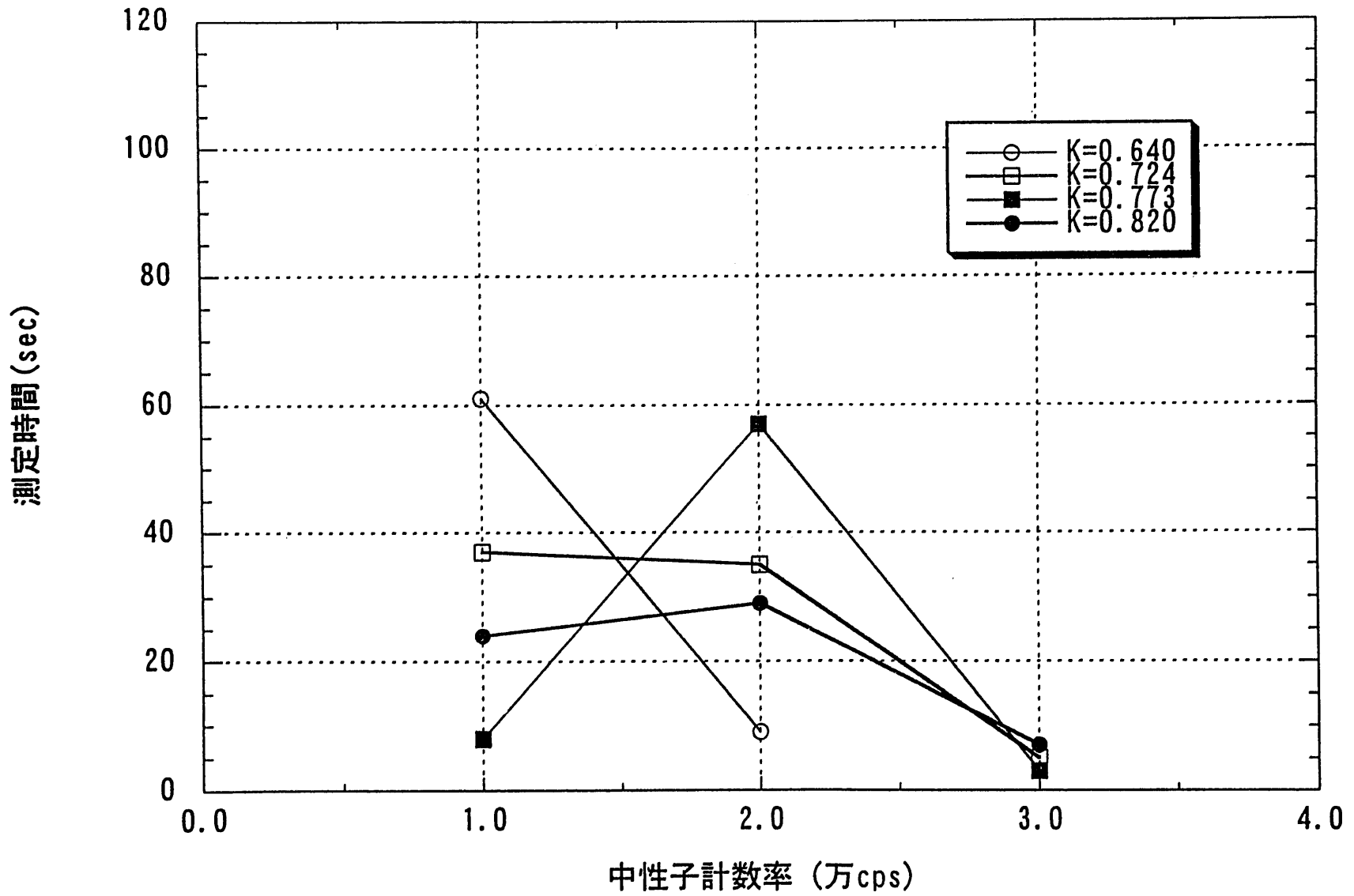


図2-33  $\alpha$  値が基準値の20%以内となる最小測定時間

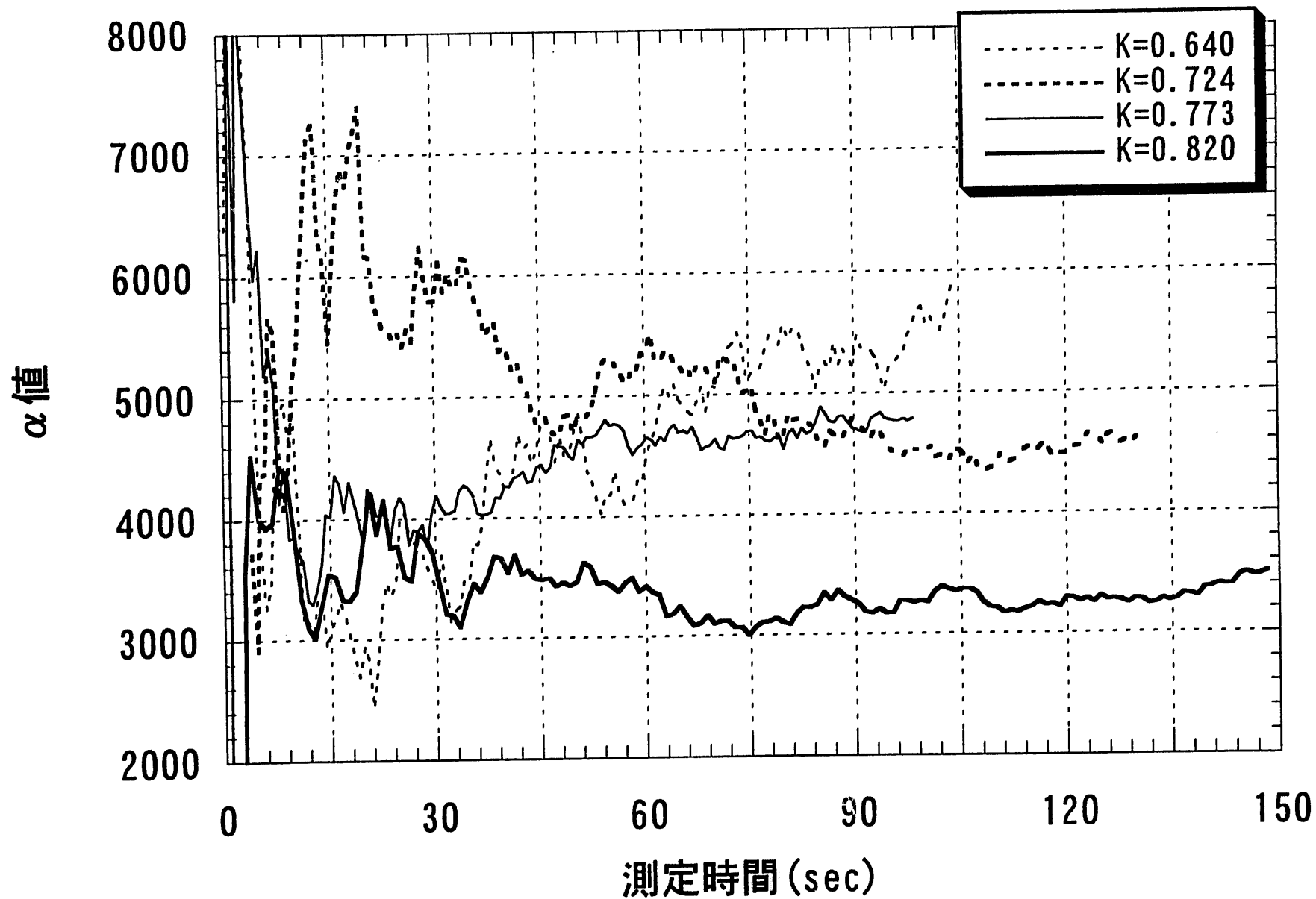


図2-34 測定時間と $\alpha$ 値の関係 (1万cps)

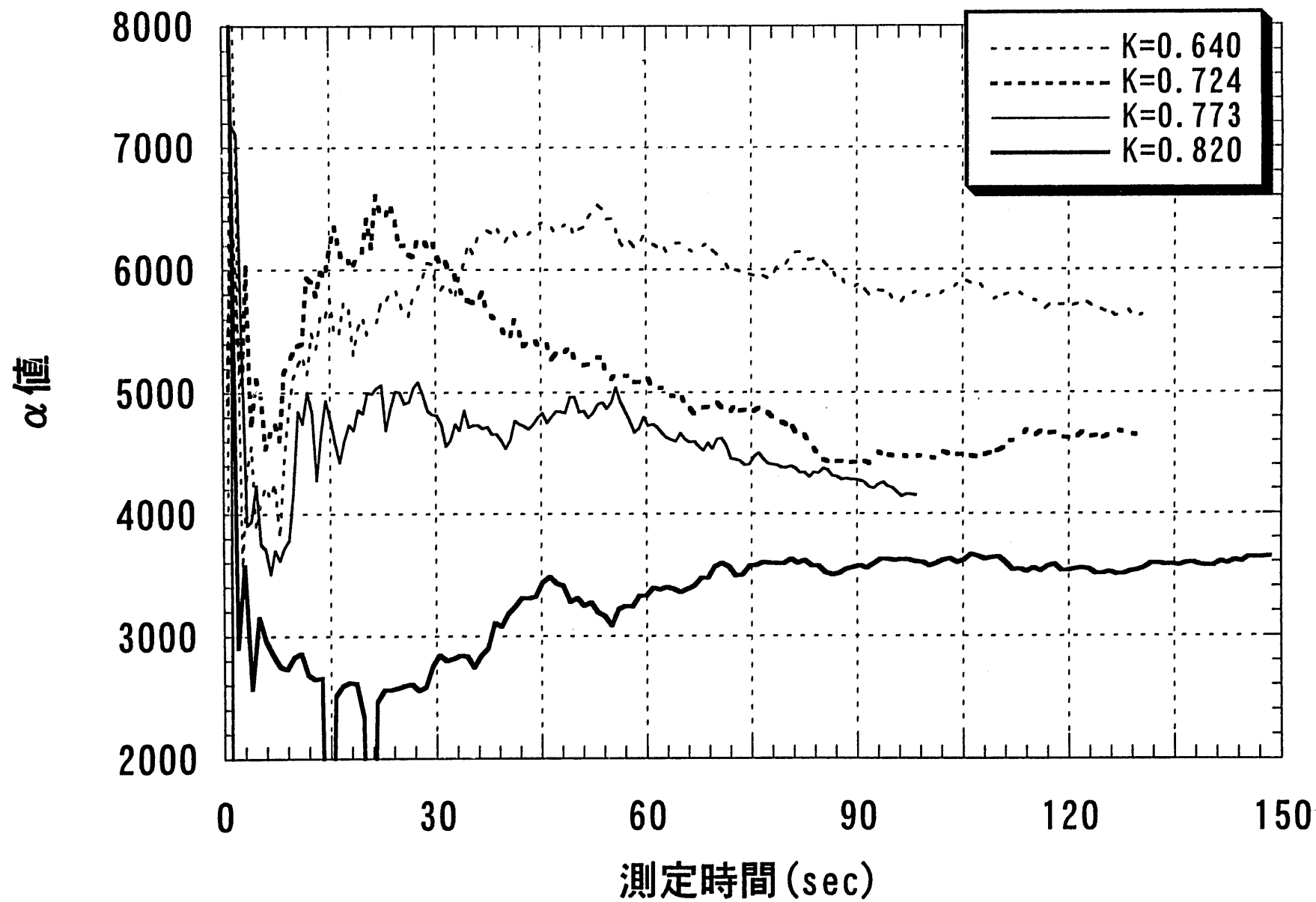


図2-35 測定時間とα値の関係 (2万cps)

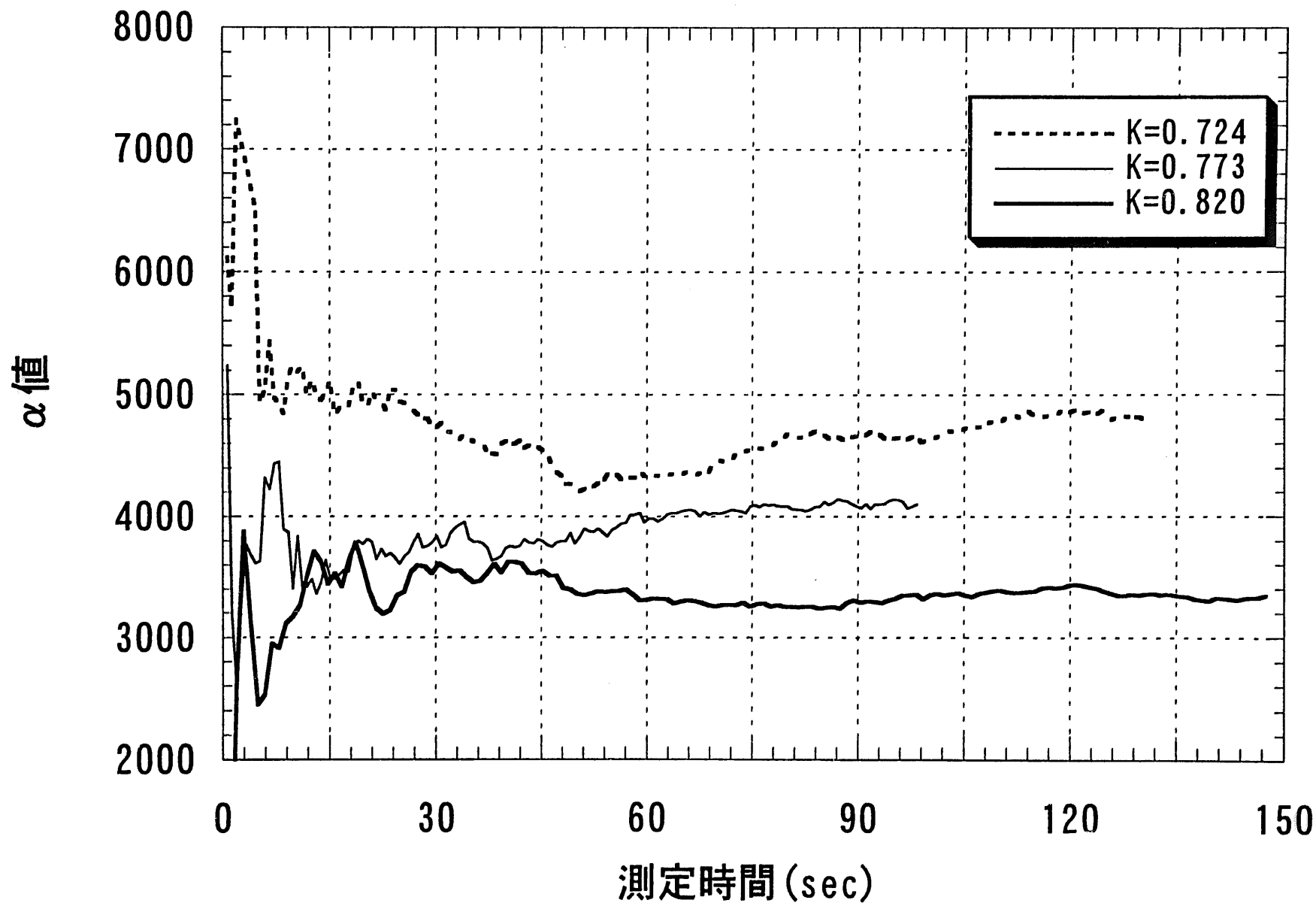


図2-36 測定時間とα値の関係 (3万cps)

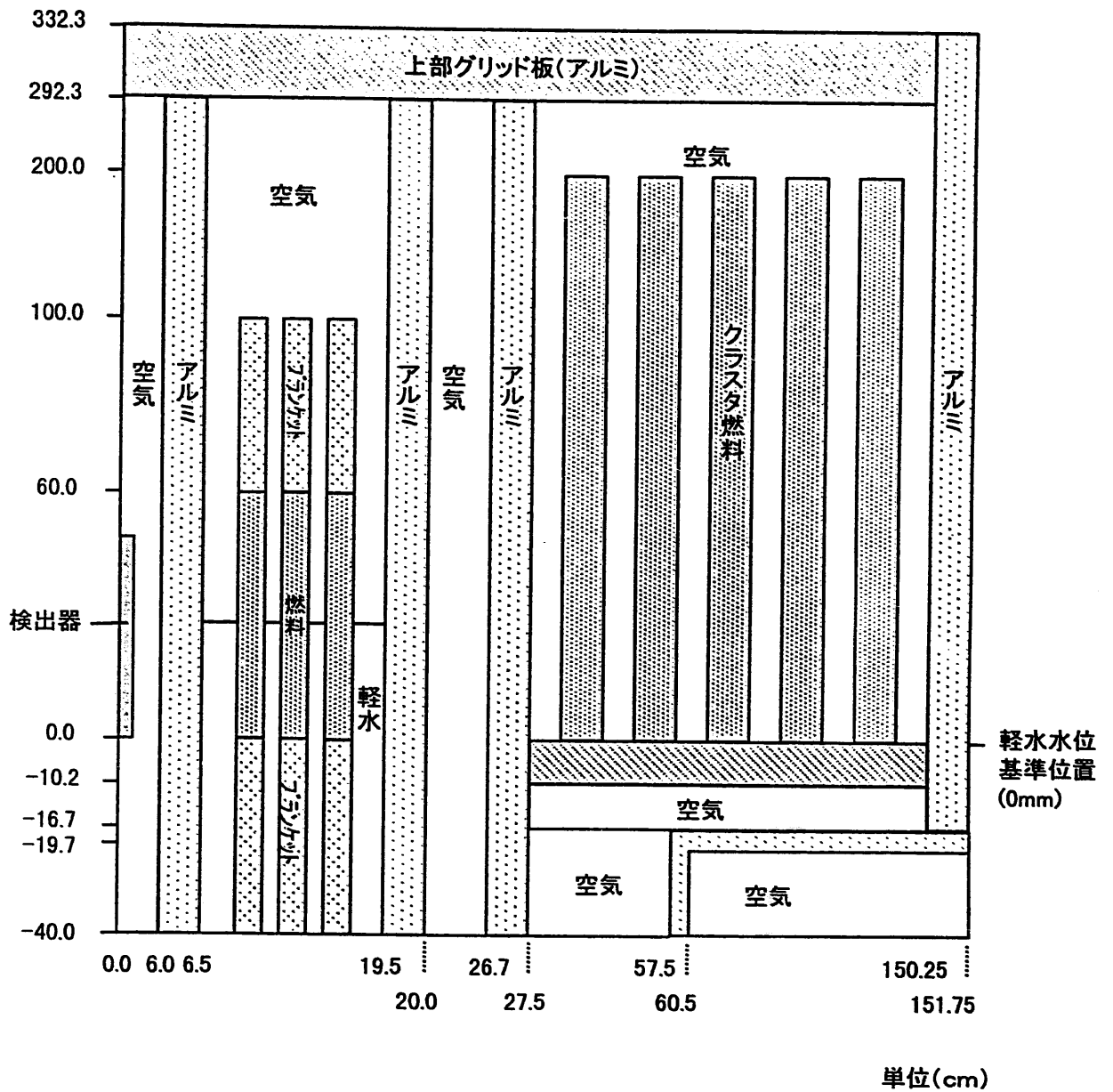


図2-37 計算モデル(垂直方向断面)



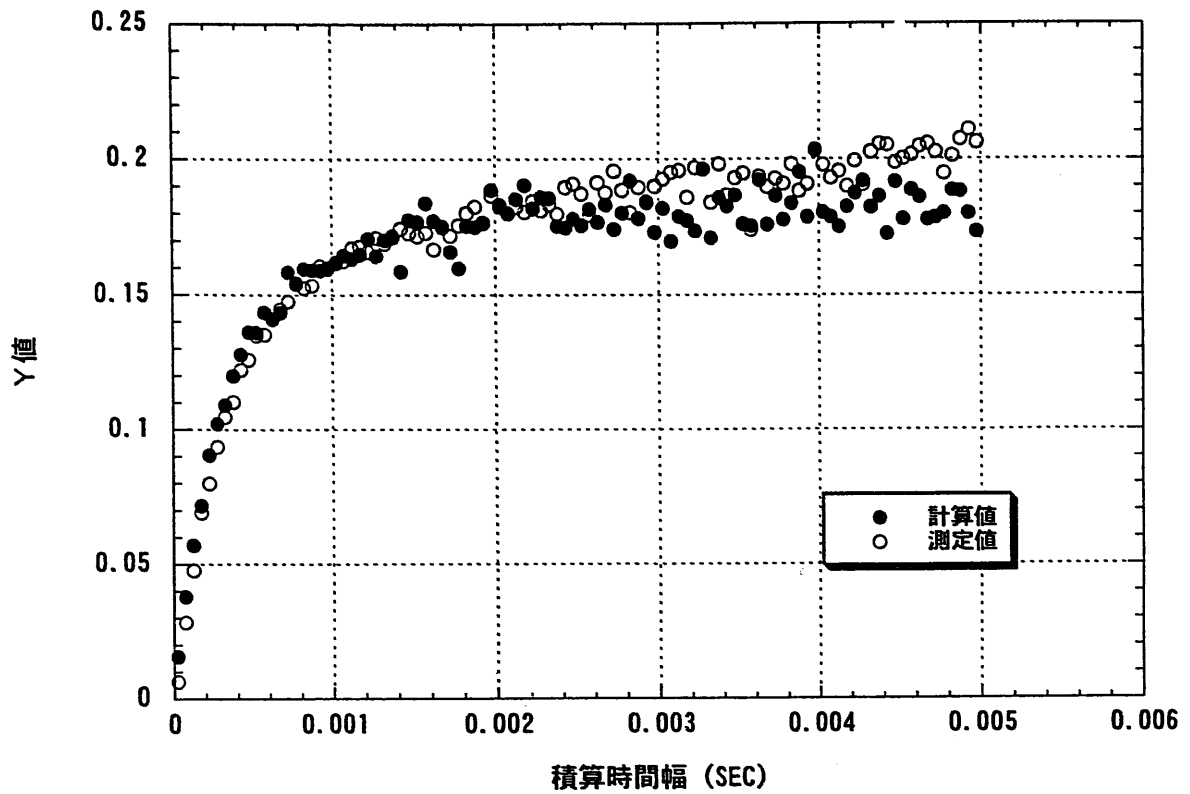


図2-38 Y値の測定値と計算値の比較 (試験体水位200mm)

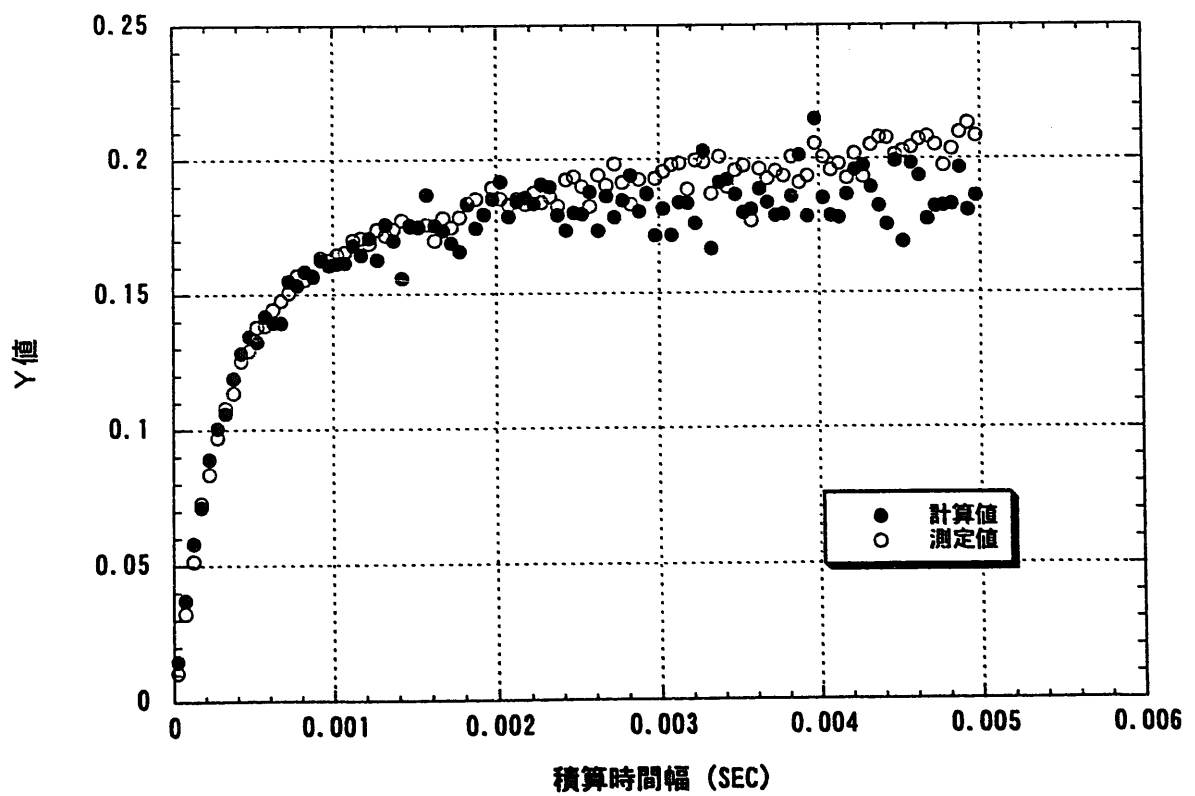


図2-39 Y値の測定値と計算値の比較 (試験体水位300mm)

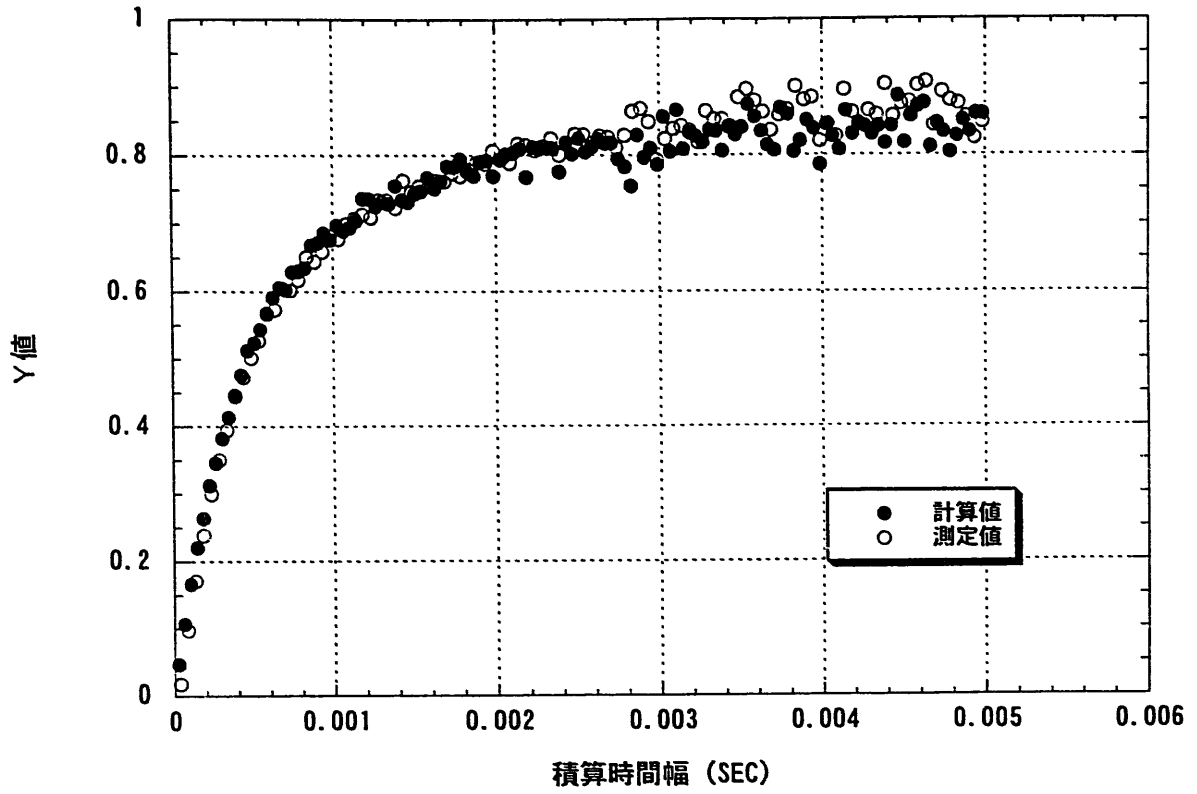


図2-40 Y値の測定値と計算値の比較 (試験体水位400mm)

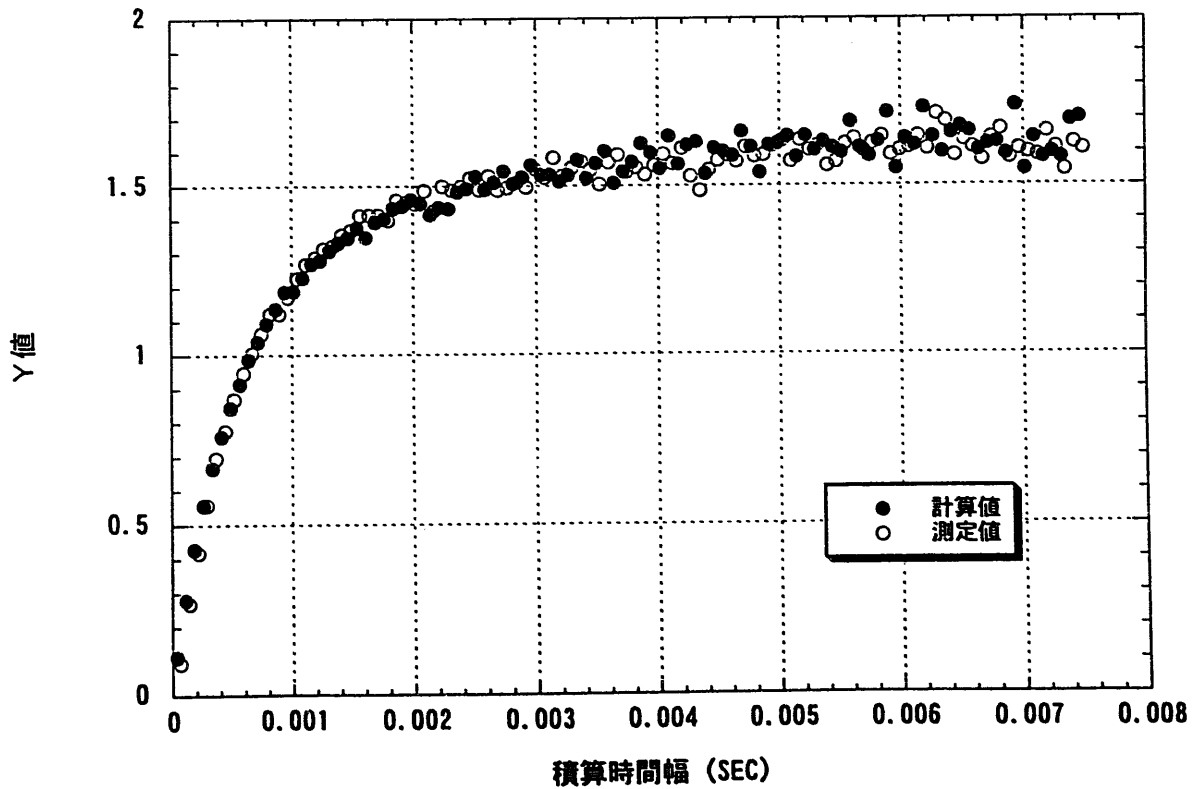


図2-41 Y値の測定値と計算値の比較 (試験体水位600mm)

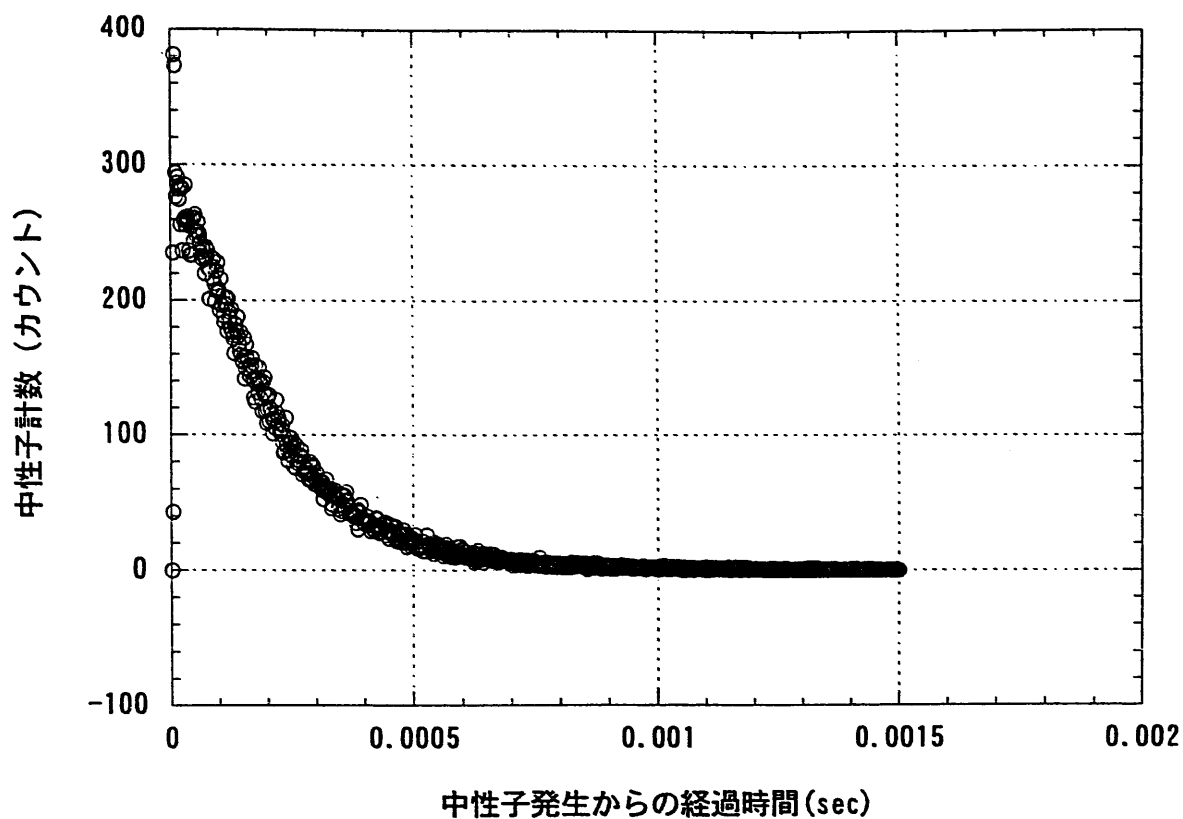


図2-42 パルス中性子源法の模擬計算結果 (試験体水位200mm)

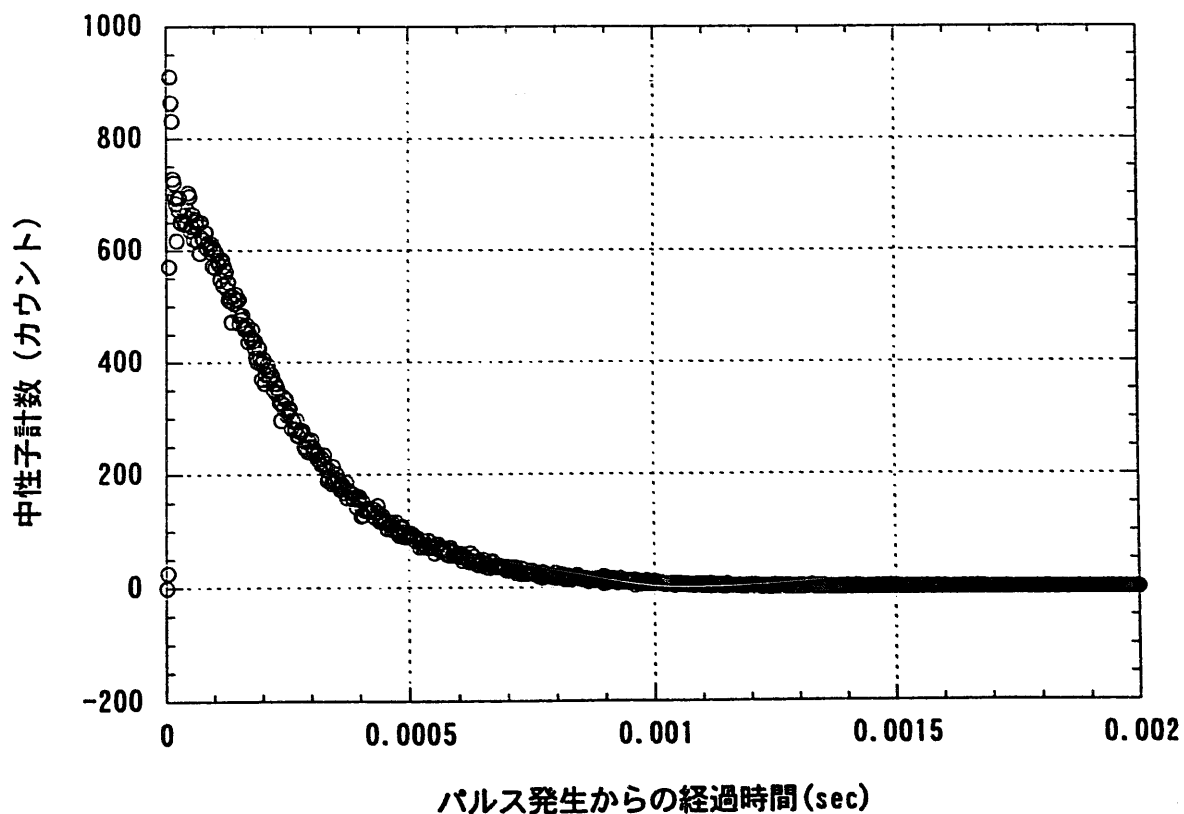


図2-43 パルス中性子源法の模擬計算結果 (試験体水位300mm)

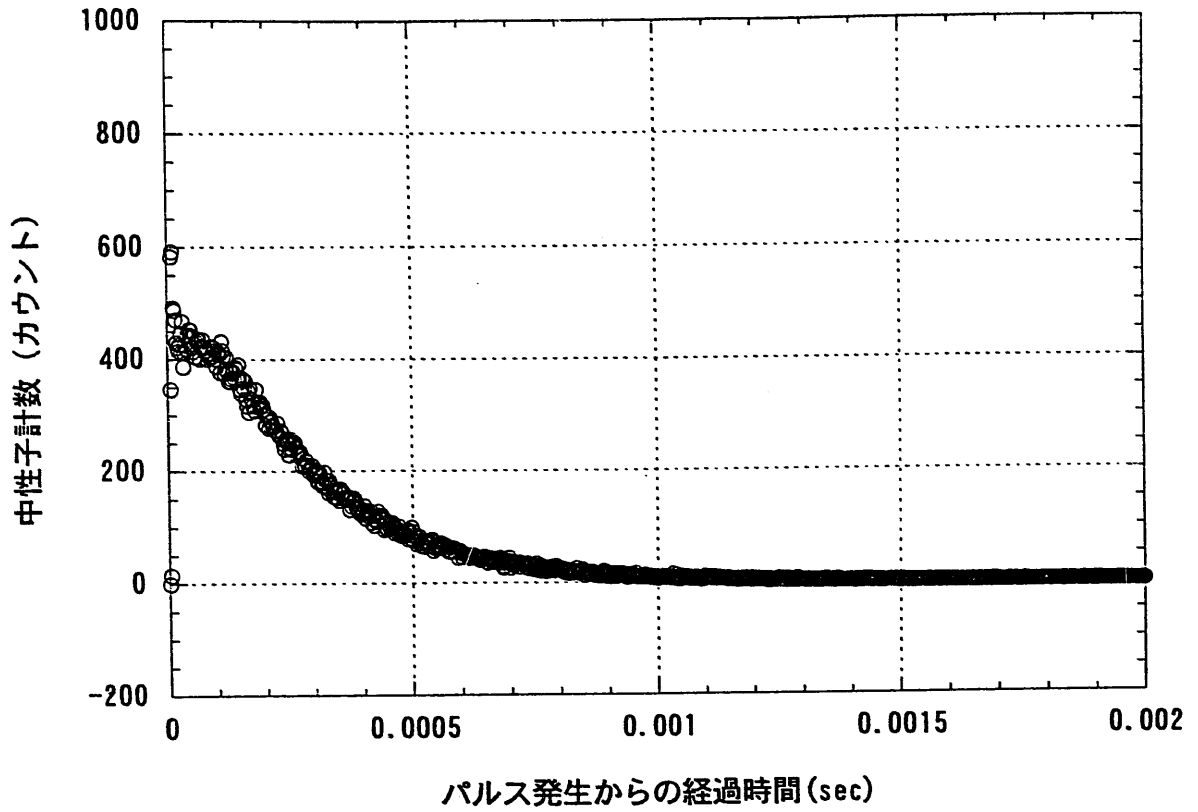


図2-44 パルス中性子源法の模擬計算結果 (試験体水位400mm)

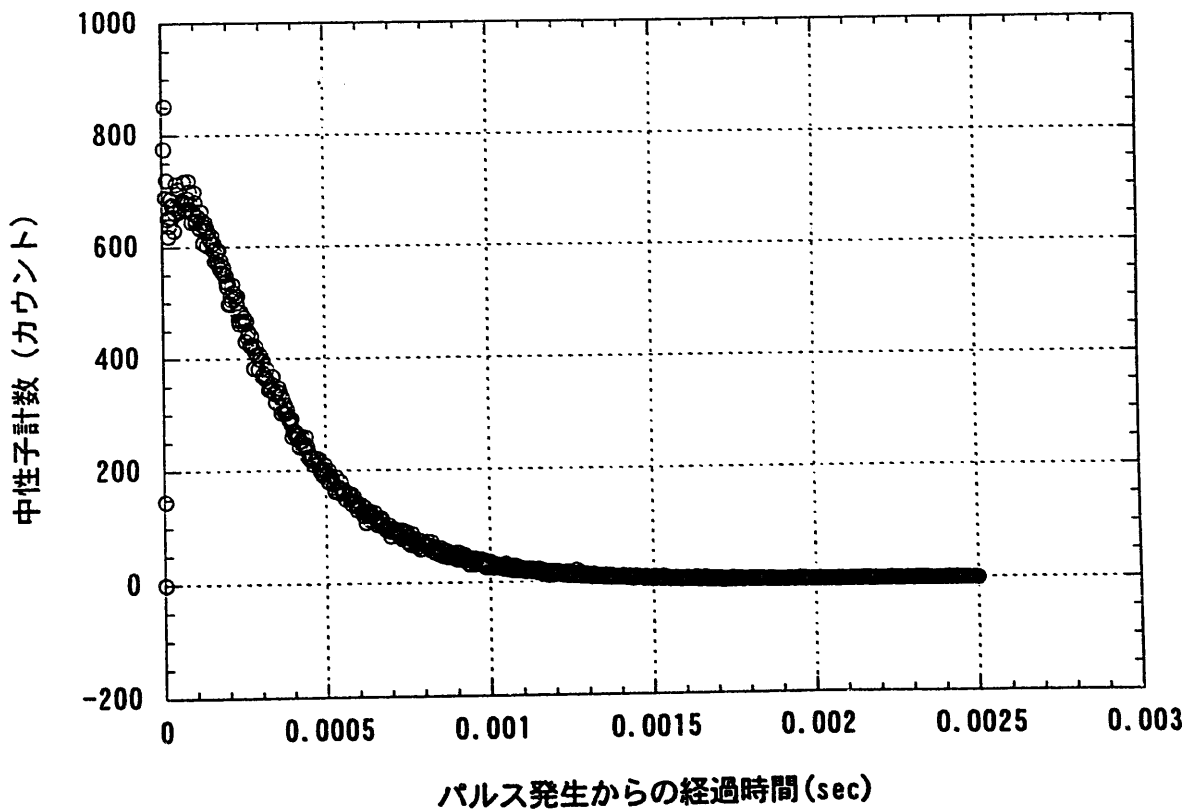


図2-45 パルス中性子源法の模擬計算結果 (試験体水位600mm)

### Ⅲ. 中性子束が時間変動する体系へのファインマン- $\alpha$ 法の適用

#### 1. 概要

実機を想定した中性子束が時間的に変動する体系に対して、ファインマン- $\alpha$ 法による未臨界度測定を実施し、 $\alpha$ 値が検出できるかどうかを確認した。測定対象とする中性子束が変動する体系として次の2体系を想定した。

①重水減速材水位の変化にともない実効増倍率と中性子束が変化する体系

②外部中性子源が加わることによって中性子束が変化する体系

②については、外部中性子源の挿入過程および引抜過程において、中性子束の変動が激しく $\alpha$ 値の検知が困難であったため、測定データの処理に階差フィルターを適用し、その有効性を確認した。

階差フィルター処理は、線形フィルター処理（時系列データを構成する各データに重み付けをして和をとること）の一種であり、時系列データに対して、ある決まった時間間隔を定めて実測値の差をとる（差分をとる）処理のことである。階差フィルター処理によって低周波の変動を低減させることができるため、中性子束の変動による測定値の乱れを安定させることが期待できる<sup>[9]</sup>。

#### 2. 測定体系と測定方法

測定体系は第Ⅱ章で示した S4-6 炉心で、炉心中央部の試験体領域には MK-I 燃料（17.7wt%PuO<sub>2</sub>）が140本装荷され、その周囲のドライバー領域には1.2wt%UO<sub>2</sub>の燃料クラスターが132本装荷されている。試験体領域には軽水減速材を供給せず、ドライバー領域の重水減速材の水位を変えることによって反応度を調整した。

重水減速材水位（以下、重水水位と略す。）の変化にともない実効増倍率と中性子束が変化する体系の測定では、重水水位が1500mm、1200mm、900mmでの一定の状態と、測定中に重水水位を減少させ重水水位が1500mmから1200mm、1200mmから900mmに変化する状態での測定を実施した。測定内容および測定条件を表3-1に示している。重水の排水には反応度制御ポンプ（排水速度は約13mm/min.）を使用した。

外部中性子源が加わることによって中性子束が変化する体系の測定では、重水水位は1500mmの一定の状態と測定中に外部中性子源（原子炉起動用中性子源50GBq）の挿入と引抜を行った。測定内容および測定条件を表3-2に示している。外部中性子源の挿入と引抜の所要時間は各々、約4～5分である。

測定システムは第Ⅱ章に示したものと同一である。時間幅 $\Delta T$ は重水水位が1500mmから1200mmの間では350 $\mu$ sec、重水水位が1200mmから900mmの間では200 $\mu$ secとした。 $\alpha$ 値を評価する積算時間幅は200 $\Delta T$ とした。積算時間幅に対するY値は1スイープ毎に評価して、スイープ数で平均して求めた。

### 3. 測定結果

#### 3.1 重水水位変動体系

図 3-1～図 3-4 に重水水位変化時の  $\alpha$  値の変化を、 $\alpha$  値の評価に使用したスイープ数毎に示している。図中のスイープ番号に対する  $\alpha$  値は、そのスイープ番号以前のデータから指定したスイープ数分のデータを用いて評価した値である。即ち、スイープ数 10 の評価でスイープ番号 20 の  $\alpha$  値は、スイープ番号 11～20 の 10 スイープ分のデータを用いて評価されている。重水水位が 1500mm から 1200mm の範囲での測定と重水水位が 1200mm から 900mm で設定を変えた直後（図 3-4 ではスイープ番号 150～165 の間）の  $\alpha$  値は評価されていない。図 3-1～図 3-4 に示すように、重水水位 1500mm の場合ではスイープ数が 5 で、重水水位 1200mm ではスイープ数が 10 で、重水水位 900mm ではスイープ数が 20 程度で、ほぼ安定した  $\alpha$  値が得られている。図 3-4 から判るように、重水水位が 1500mm から 1200mm に変化する過程および重水水位が 1200mm から 900mm に変化する過程で中性子束が変動している場合であっても、追従して  $\alpha$  値を評価できることが確認できる。

精度の良い  $\alpha$  値を得るための測定時間（データ転送時間を除く）は、重水水位が 1500mm ～900mm（実効増倍率は 0.98～0.87、中性子計数率は 6 万 cps～2 万 cps）の間では、約 115sec（ $\equiv 65536$ （チャンネル数/1 スイープ） $\times 5$ （スイープ数） $\times (350 \times 10^{-5})$ （設定時間/1 チャンネル））～約 260sec（ $\equiv 65536 \times 20 \times 200 \times 10^{-5}$ ）と評価される。中性子束の時間変動体系では測定値のばらつきが大きくなるため、第 II 章の実効増倍率 0.82、中性子計数率 2 万 cps のケース（表 2-5 より測定時間は約 38sec）と比較して長い測定時間を必要とする。

#### 3.2 外部中性子源挿入体系

図 3-5 から図 3-8 に、外部中性子源の挿入と引抜の前後および挿入途中と引抜途中の  $\alpha$  値の時間変化を、評価に使用したスイープ数毎に示している。図において、あるスイープ番号での  $\alpha$  値は、そのスイープ番号以前のデータから指定したスイープ数分のデータを用いて評価した値である。図から判るように、スイープ数 10 以下の結果では安定した  $\alpha$  値は得られていないが、スイープ数 15 以上の結果では  $\alpha$  値のばらつきは小さくなっている。しかし、外部中性子源の挿入途中および引抜途中においては、中性子束の変動が急激であるためスイープ数を増やしても  $\alpha$  値の評価が困難である。

測定データの処理に階差フィルターを適用することによって、この体系の  $\alpha$  値の評価を試みた。図 3-9 および図 3-10 に、階差フィルターを適用しスイープ数 15 およびスイープ数 20 で評価した結果を示している。図から判るように、階差フィルターを適用することによって、外部中性子源の挿入途中および引抜途中においても安定した  $\alpha$  値が得られている。階差フィルター処理は、このような中性子束が急激に変動する体系での  $\alpha$  値の評価には有効な手法であることが確認できた。

これらの体系において $\alpha$ 値を精度良く評価するのに必要なスイープ数は15以上であり、測定時間は約344sec ( $\approx 65536$  (チャンネル数/1 スイープ)  $\times 15$  (スイープ数)  $\times (350 \times 10^{-6})$  (設定時間/1 チャンネル)) と評価される。前項の同水位での測定 (測定時間は約115sec) と比べると、中性子束の変動が激しいために測定時間が大きくなっている。

表 3-1 測定内容と測定条件（重水水位変動体系）

	測定内容	実効増倍率	検出器の配置と種類	$\Delta T$ ( $\mu$ sec)	計数率	スレ-フ数
1	重水水位 1500mm	0.981	2in. He-3 カウンタ管内	350	56600	52
2	重水水位 1500mm から 1200mm に減少途中	0.981 ~0.941	"	350	56600 ~32800	41
3	重水水位 1200mm	0.941	"	350	32800	52
4	重水水位 1200mm	0.941	"	200	32800	49
5	重水水位 1200mm から 900mm に減少途中	0.941 ~0.870	"	200	32800 ~22400	61
6	重水水位 900mm	0.870	"	200	22400	50

表 3-2 測定内容と測定条件（外部中性子源挿入体系）

	測定内容	実効増倍率	検出器の配置と種類	$\Delta T$ ( $\mu$ sec)	計数率	スレ-フ数
1	外部中性子源なし 重水水位 1500mm	0.981	2in. He-3 カウンタ管内	350	3500	53
2	外部中性子源挿入途中 重水水位 1500mm	0.981	"	350	3500 ~67400	11
3	外部中性子源挿入状態 重水水位 1500mm	0.981	"	350	67400	56
4	外部中性子源引抜途中 重水水位 1500mm	0.981	"	350	67400 ~3500	13
5	外部中性子源なし 重水水位 1500mm	0.981	"	350	3500	48



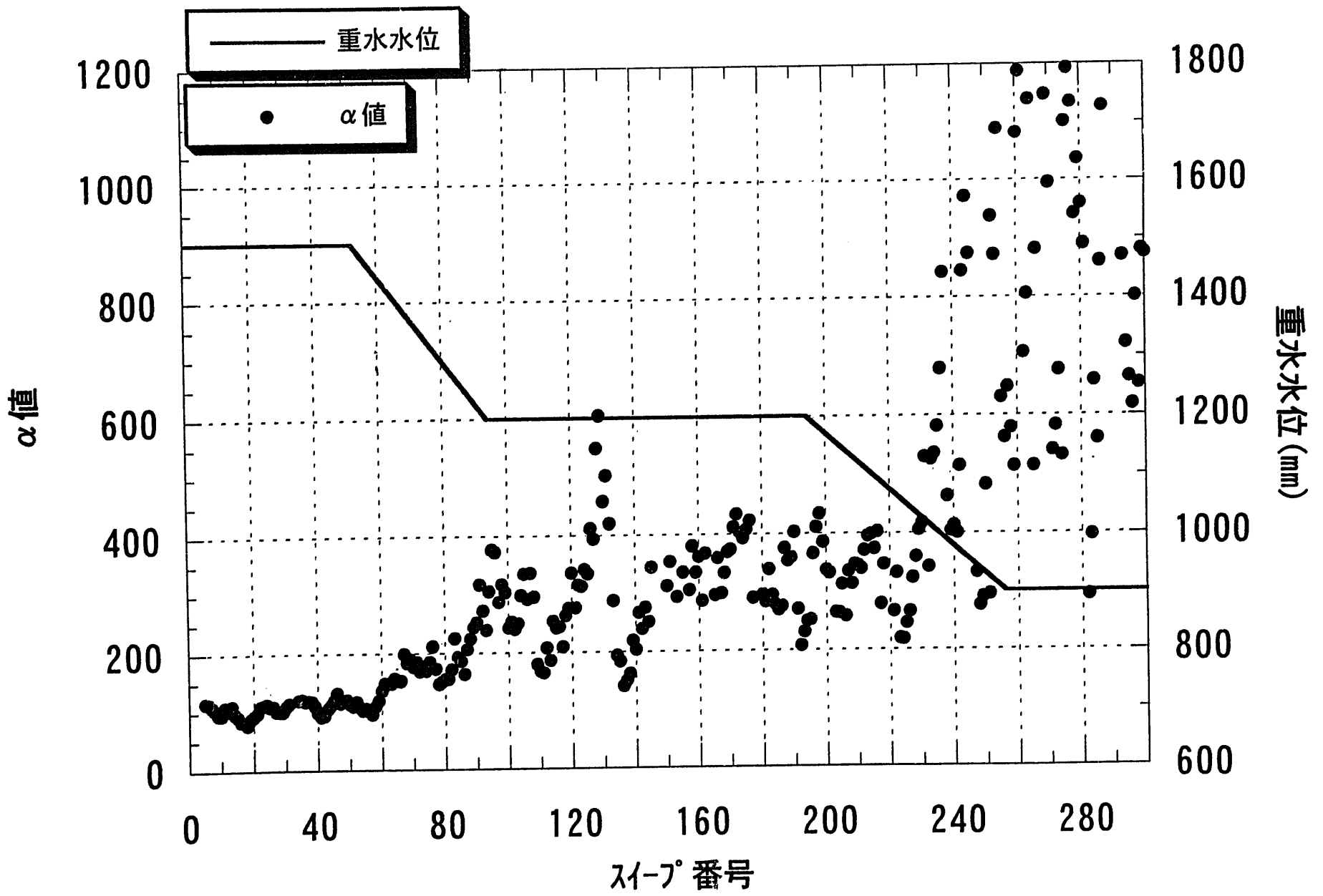


図3-1 重水水位変動時のα値(スィーフ数5)

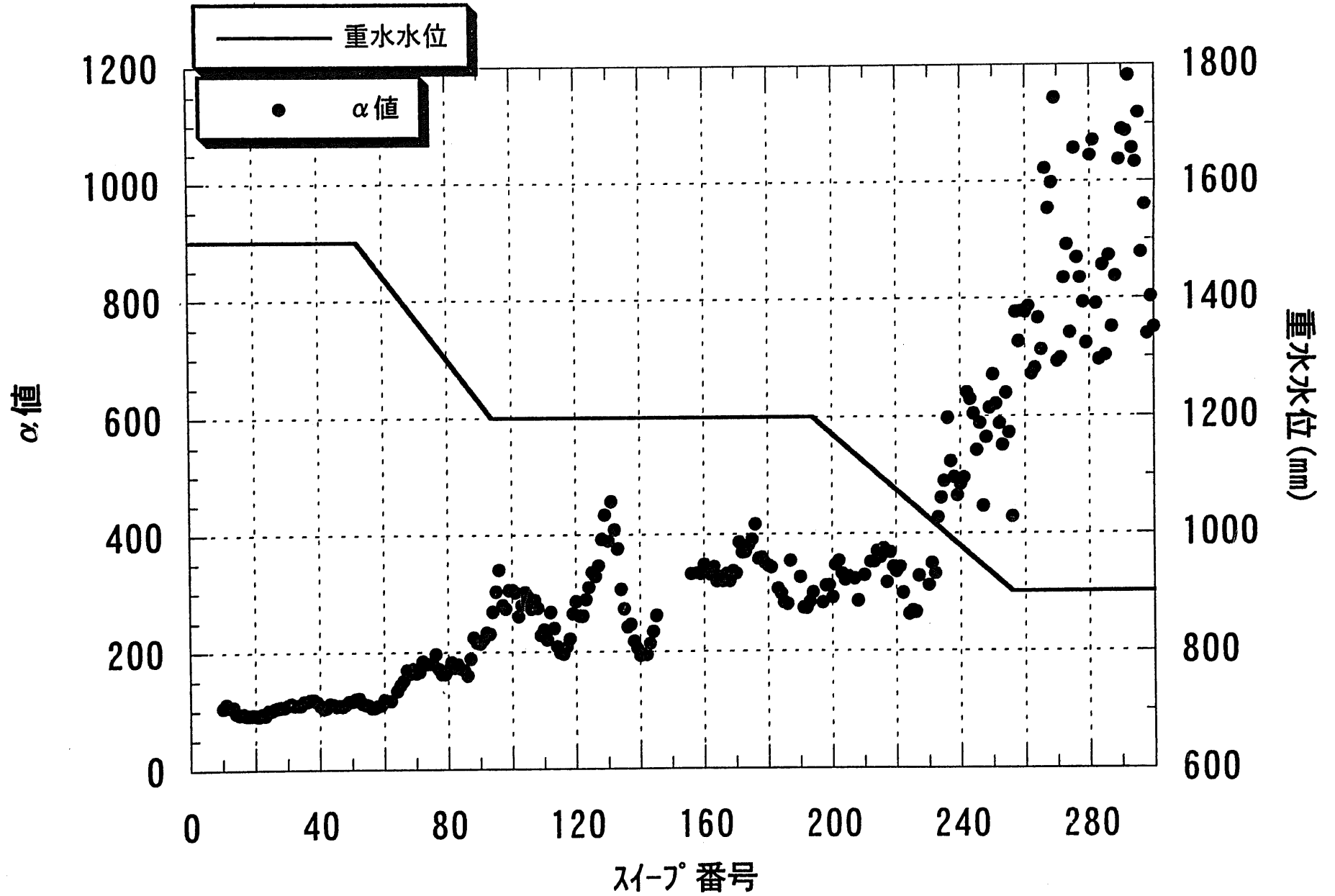


図3-2 重水水位変動時のα値(スィーフ数10)

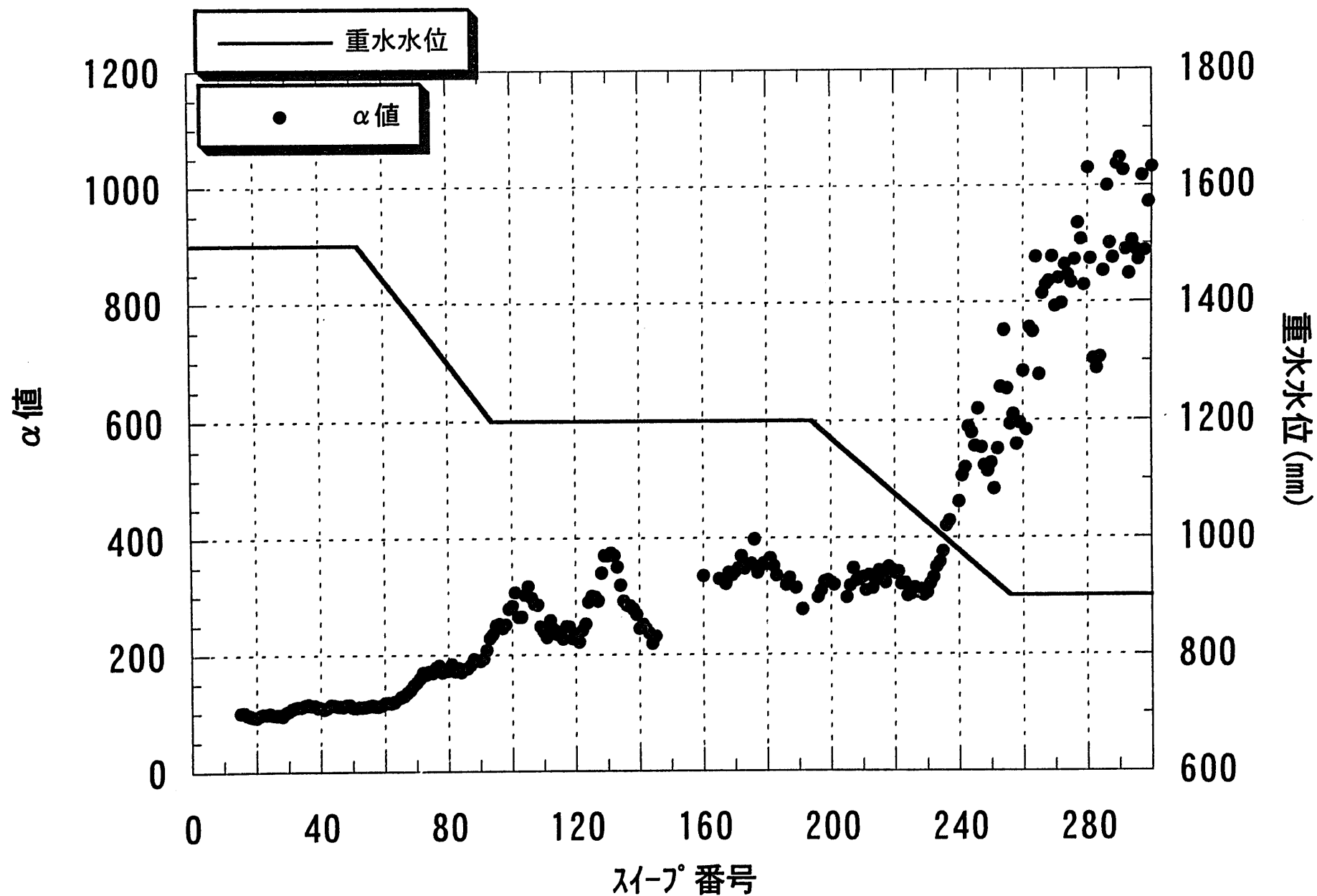


図3-3 重水水位変動時の $\alpha$ 値(スィーフ数15)

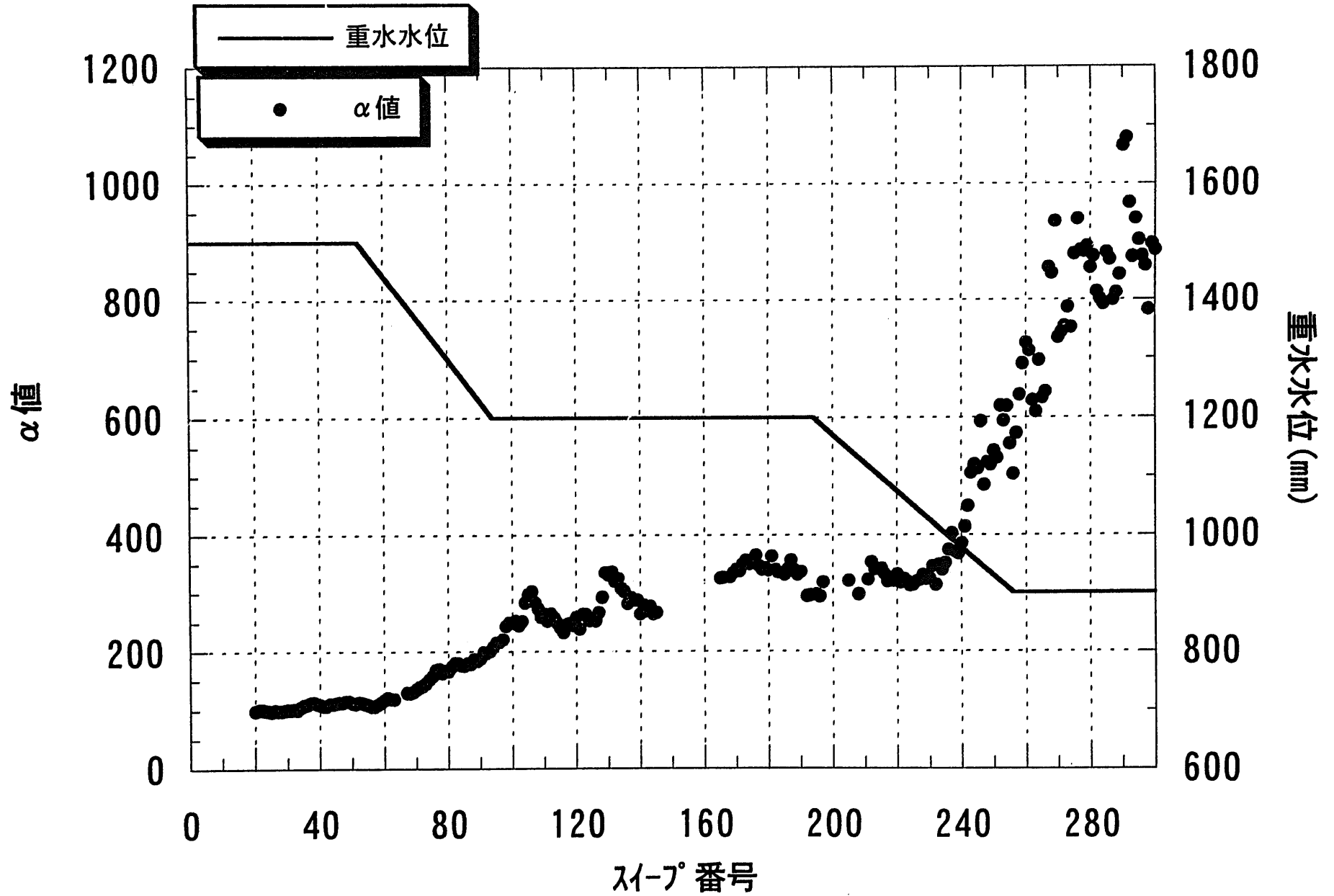


図3-4 重水水位変動時の $\alpha$ 値(スィーフ数20)

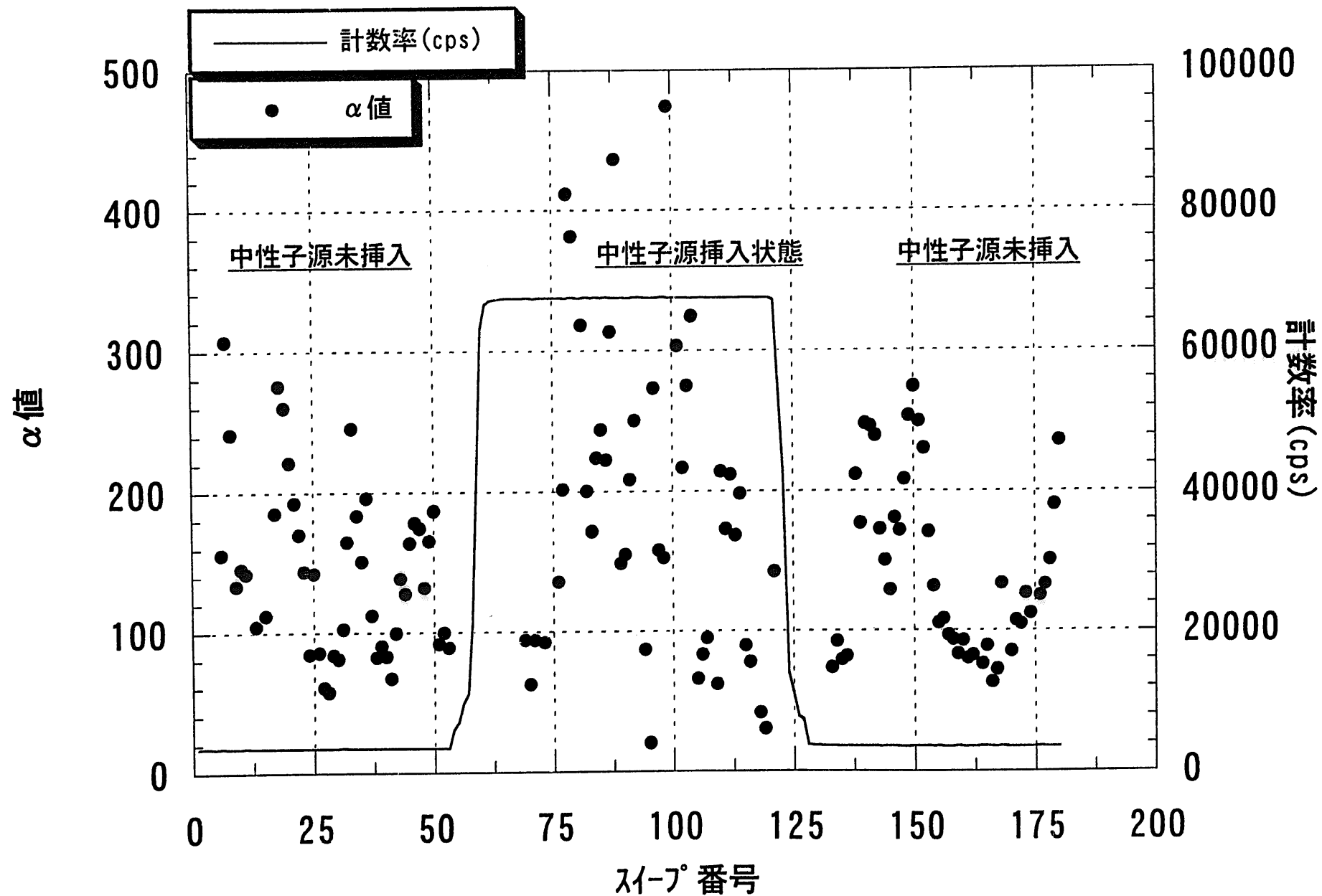


図3-5 外部中性子源挿入および引抜時の $\alpha$ 値(スイープ数5)

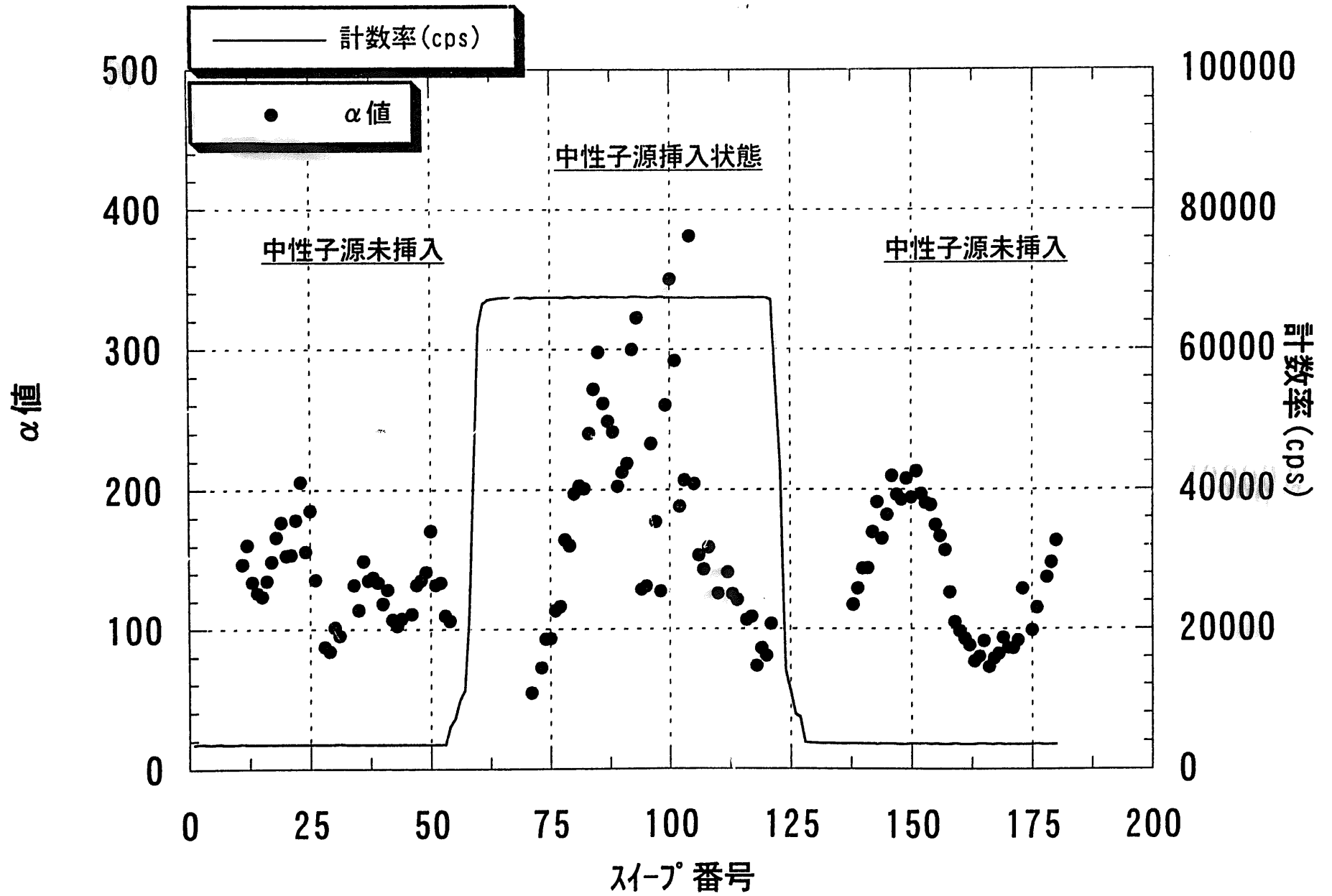


図3-6 外部中性子源挿入および引抜時の $\alpha$ 値(スリップ数10)

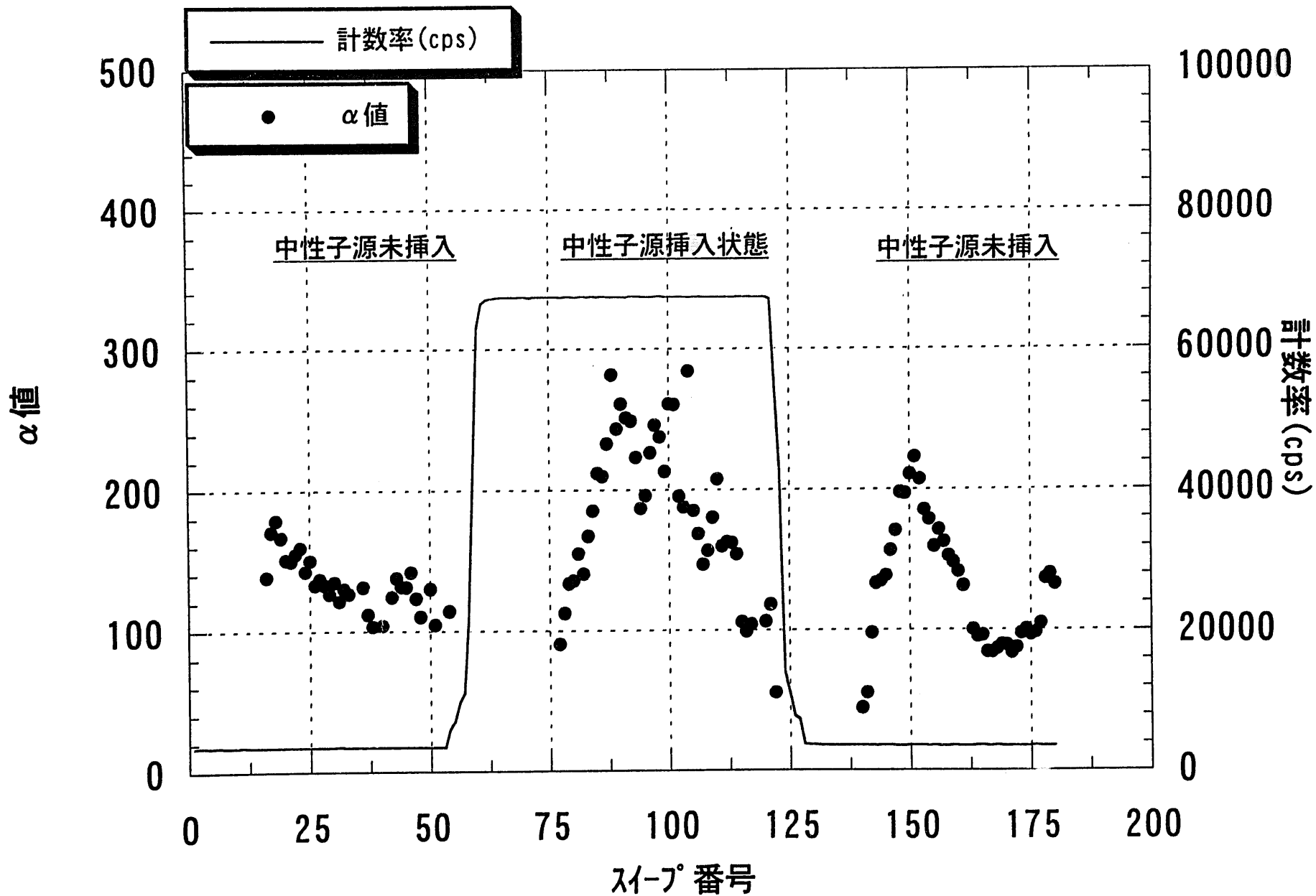


図3-7 外部中性子源挿入および引抜時のα値(スィープ数15)

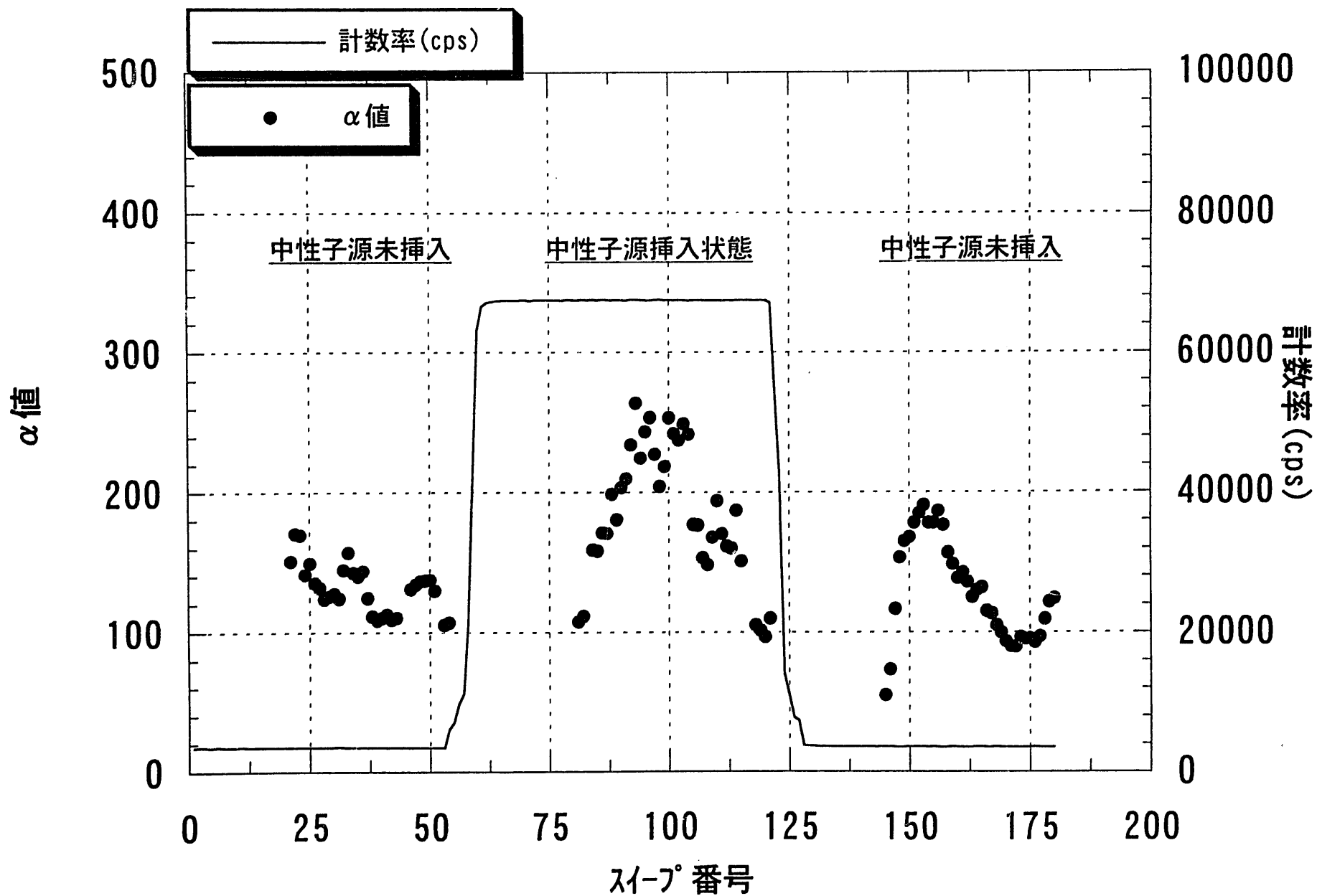


図3-8 外部中性子源挿入および引抜時の $\alpha$ 値(スィープ数20)



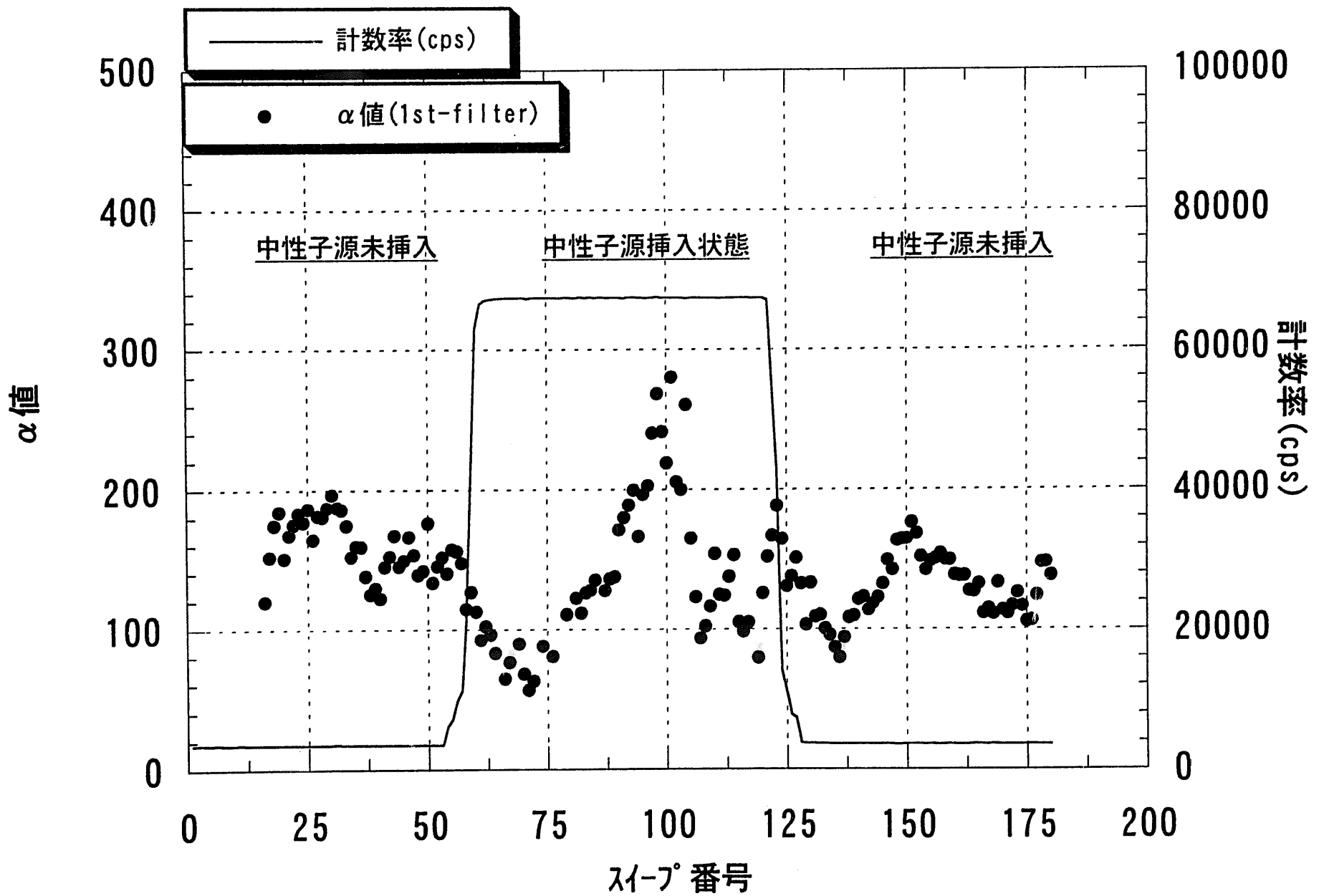


図3-9 外部中性子源挿入および引抜時の $\alpha$ 値  
(1次階差フィルター適用、スィーフ数15)

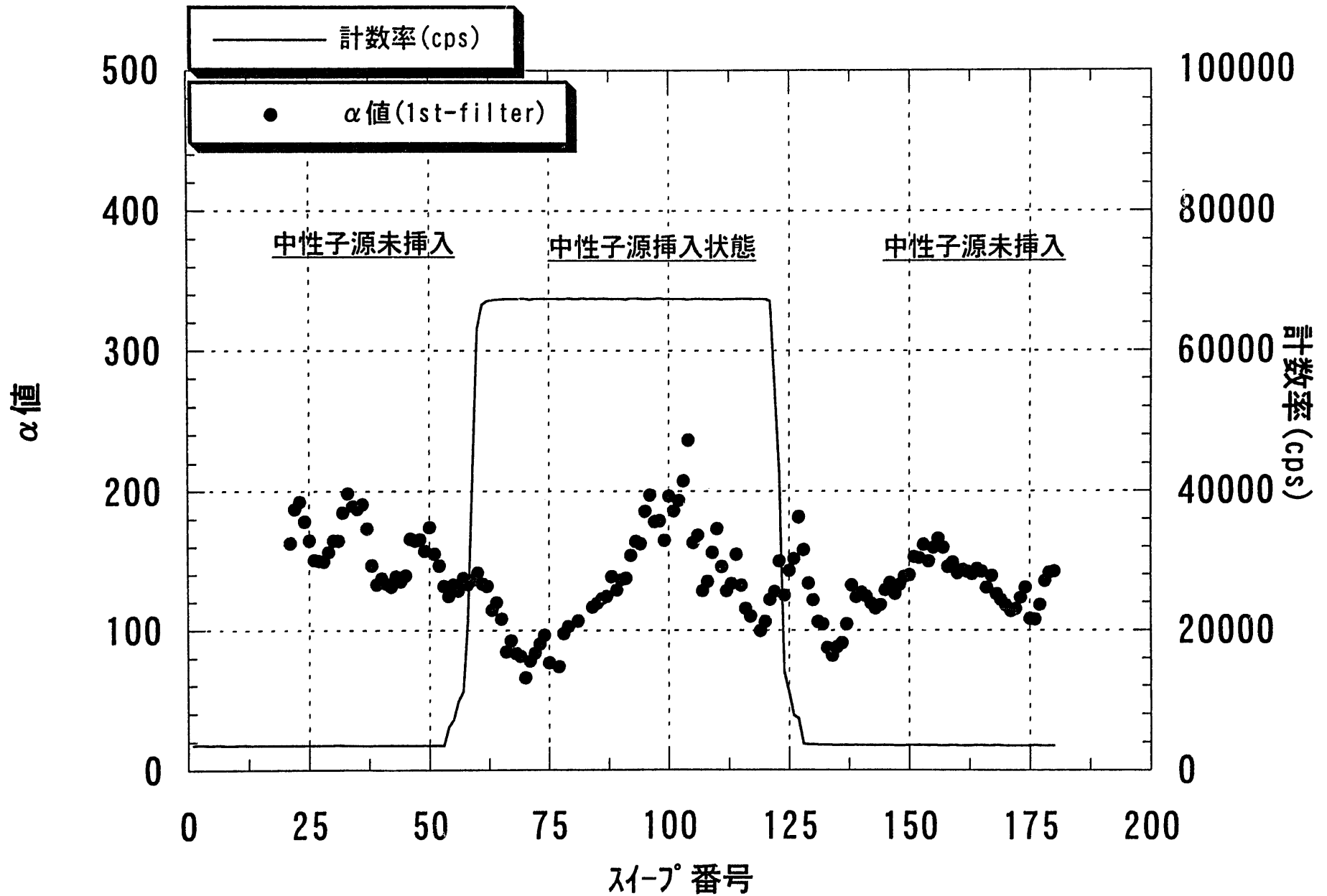


図3-10 外部中性子源挿入および引抜時の $\alpha$ 値  
(1次階差フィルター適用、スィープ数20)

## IV まとめ

DCAの未臨界度測定実験炉心を用いて、「常陽」MK-I燃料による高富化度のMOX燃料を装荷した軽水減速体系の試験体でのファインマン- $\alpha$ 法による未臨界度測定実験及びMCNP4Aコードを用いたファインマン- $\alpha$ 法測定の模擬計算を実施した。今回の測定では、実効増倍率を0.64~0.82の範囲に設定して未臨界度を示す $\alpha$ 値を検出し測定精度と測定時間を評価した。また、同じ試験体を用いて、中性子束が変動する体系においてファインマン- $\alpha$ 法による測定を適用することによって未臨界度の検知が可能であることを確認するため、未臨界度測定実験を実施した。これらの実験及び計算から下記の結論が得られた。

- (1) 高富化度のMOX燃料を装荷した軽水減速体系の試験体において、実効増倍率が0.64~0.82の範囲で実効増倍率0.08程度の差を検知できることが確認できた。中性子計数率1万cps~3万cpsの測定においては、測定時間が60secで上記の差を検知できることが確認できた。
- (2) 高富化度のMOX燃料を装荷した軽水減速体系の試験体において、実効増倍率が0.64~0.82の範囲で、測定時間が同じ場合には中性子計数率（検出効率）と実効増倍率が大きいほど安定した $\alpha$ 値が得られることが確認できた。また、10%の精度で $\alpha$ 値を評価するために必要な測定時間（データ転送時間を考慮しない）は、中性子計数率が3万cpsの場合は約39sec、2万cpsの場合は約72sec、1万cpsの場合は約98secとなった。
- (3) 連続エネルギーモンテカルロ法計算コードMCNP4Aを用いて、ファインマン- $\alpha$ 法の測定を模擬した計算を実施し測定結果と比較した。計算値と測定値の差は、 $\alpha$ 値については5%以下、実効増倍率については3%以下であり、MCNP4Aコードによってファインマン- $\alpha$ 法による測定を十分な精度で模擬できることが確認できた。
- (4) 重水水位を変化させることによって中性子束が緩やかに変動する体系においては、ファインマン- $\alpha$ 法の通常の方法でも十分に $\alpha$ 値の測定が可能であることが確認できた。外部中性子源の挿入あるいは引抜によって中性子束が急激に変動する体系においては、階差フィルターを適用することによって $\alpha$ 値の評価が可能であることが確認できた。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、実験の実施、原子炉運転、データ処理等において、臨界工学試験室の相原永史 室長を始めとして、八木昭 氏、上園洋一 氏、有賀正訓 氏、柳沢真哉 氏、平賀勝志 氏に御協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 大谷暢夫、「ファインマン-アルファ法による実効増倍率測定」  
PNC ZN9410 92-334、1992年10月
- [2] 大谷暢夫、「ファインマン-アルファ法による実効増倍率測定(2)」  
PNC ZN9410 93-195、1993年9月
- [3] 大谷暢夫、「ファインマン-アルファ法による未臨界度モニターの試作」  
PNC ZN9410 94-257、1994年9月
- [4] 毛利智聡 他、「ファインマン- $\alpha$ 法による実効増倍率測定(3)」  
PNC TN9410 98-056、1998年6月
- [5] 山本俊弘 他、「MCNP4AによるFeynman- $\alpha$ 法のシミュレーション」  
日本原子力学会 1997春の年会 E8
- [6] 毛利智聡 他、「ファインマン- $\alpha$ 法における階差フィルターの適用」  
PNC TN9410 97-095、1997年11月
- [7] Kengo HASHIMOTO et al. Reduction of Delayed-Neutron Contribution to Variance-to-Mean Ratio by Application of Difference Filter Technique  
J.Nucl.Sci.Technol., 36, 555 (1999)
- [8] 斉藤慶一、「炉雑音の理論(I)」 JAERI 1187、1970年3月
- [9] KENGO HASHIMOTO et al. (1998) VARIANCE-TO-MEAN METHOD GENERATED BY LINEAR DIFFERENCE FILTER TECHNIQUE. Ann.Nucl.Energy 25(9)

## 添付資料

I. ファインマン- $\alpha$ 法による実効増倍率測定(3)の追加検討

## 1. 概要

ファインマン- $\alpha$ 法による実効増倍率測定(3)<sup>[4]</sup>において実施した測定に対して、測定時間と $\alpha$ 値の関係の追加検討を行なった。試験体領域に2.7wt%UO<sub>2</sub>燃料140本を装荷した炉心(S4-2炉心)とMOX燃料(0.79wt%Pu-fissile)140本を装荷した炉心(S4-4炉心)を対象とした。

## 2. 結果

下記の図表に結果を示している。

付表 1-1 追加検討結果

付図 1-1 測定時間と $\alpha$ 値の関係 (S4-2 炉心)

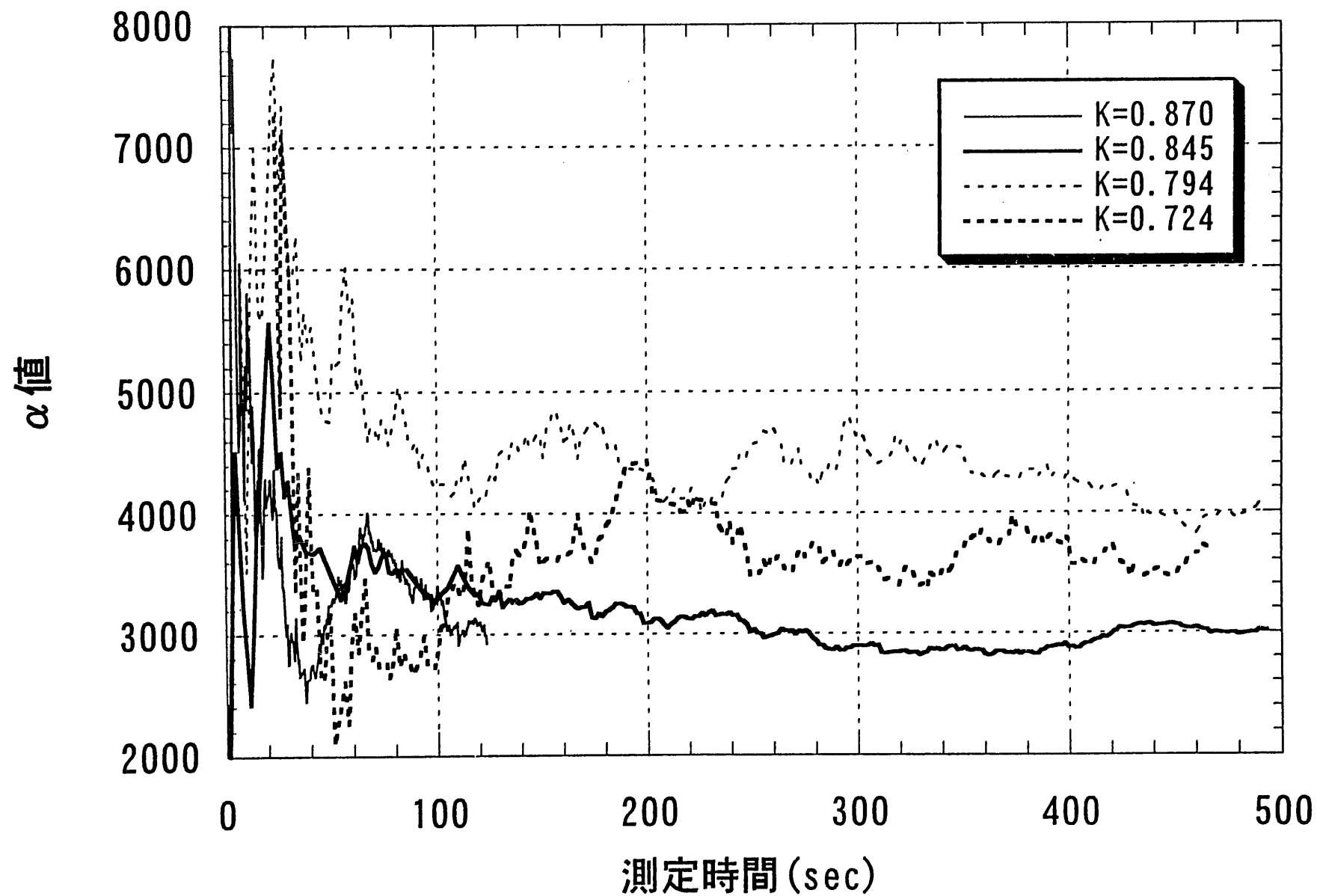
付図 1-2 測定時間と $\alpha$ 値の関係 (S4-4 炉心)

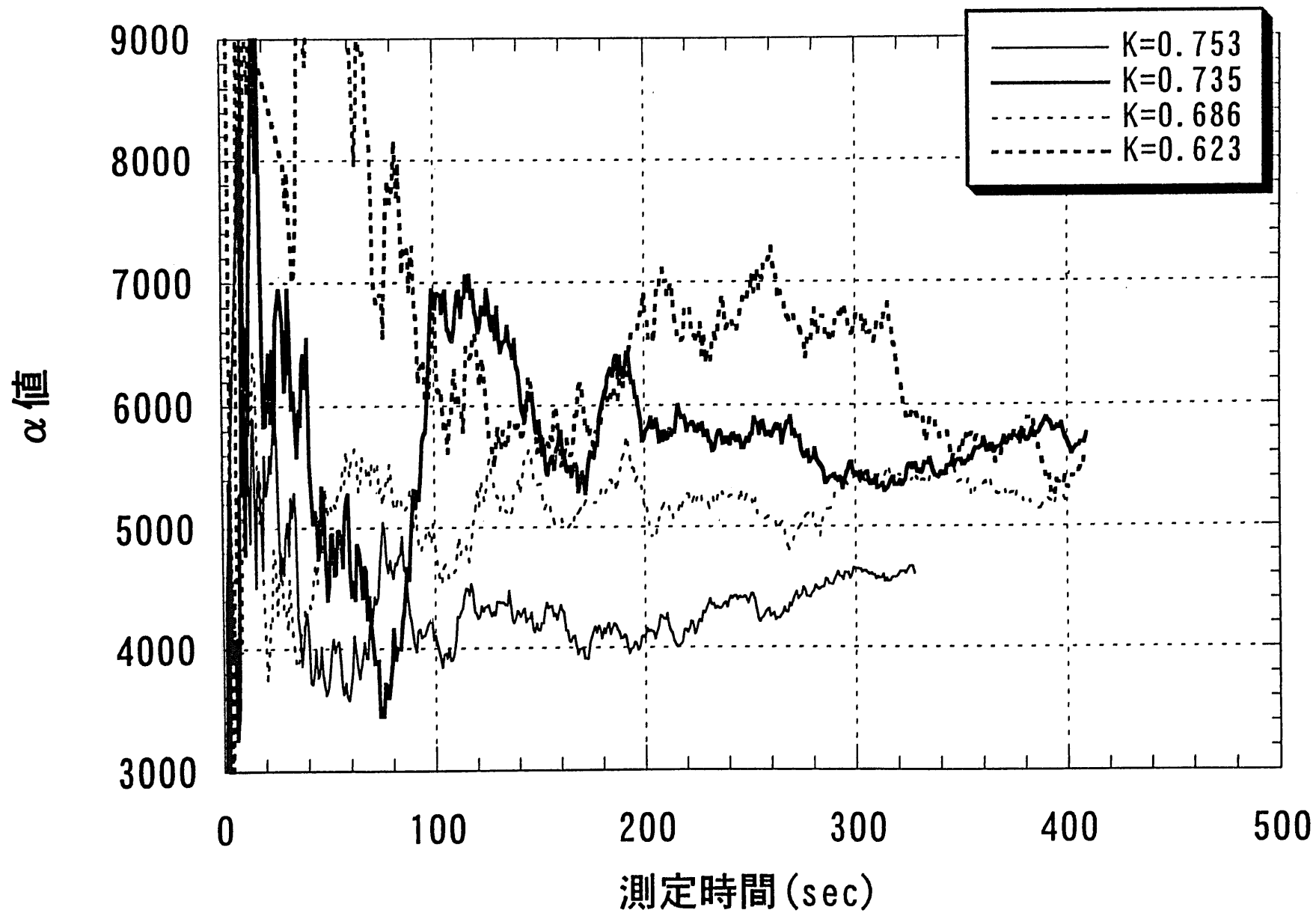
付表 1-1 の $\alpha$ 値の基準値は、積算時間幅が200 $\Delta$ T、最小自乗フィッティングの次数が3の場合の評価値である。表から判るように、基準値に対して $\alpha$ 値の差が10%以内となるために必要な最小測定時間は約100sec~約320sec、その差が20%あるいは30%以内の場合では、最小測定時間は約40sec~約320secとなっている。付図 1-1 から判るように、S4-2 炉心の場合は、測定時間120sec程度で実効増倍率0.845と0.724の差が明確に分離される。付図 1-2 から判るように、S4-4 炉心の場合は、測定時間120sec程度で実効増倍率0.753と0.623の差が明確に分離される。この結果から、測定時間120sec程度で実効増倍率0.623~0.845の範囲において0.13程度の実効増倍率の差異を検知できることが確認できる。

付表 1-1 追加検討結果

炉心	試験体減速材水位 (mm)	実効増倍率	計数率 (cps)	$\Delta T$ ( $\mu\text{sec}$ )	$\alpha$ 値の基準値 ( $200\Delta T$ 、 $3\text{パラメータ}$ )	測定時間 (sec)	基準値に対して $\alpha$ 値の差が 10%以内		基準値に対して $\alpha$ 値の差が 15%以内		基準値に対して $\alpha$ 値の差が 20%以内		測定時間 60sec での $\alpha$ 値	測定時間 120 sec での $\alpha$ 値
							最小スイープ数	測定時間 (sec)	最小スイープ数	測定時間 (sec)	最小スイープ数	測定時間 (sec)		
S4-2	300	0.724	50	20	$3704 \pm 149$ (2834 スイープ)	464	1420	233 (2840)	1420	233 (2840)	1420	233 (2840)	$3169 \pm 457$	$3243 \pm 243$
	500	0.794	90	20	$3986 \pm 124$ (3996 スイープ)	655	1820	298 (3640)	1140	187 (2280)	1100	180 (2200)	$6904 \pm 826$	$4336 \pm 276$
	1000	0.845	240	20	$3003 \pm 33$ (3996 スイープ)	655	980	161 (1960)	720	118 (1440)	720	118 (1440)	$3731 \pm 156$	$3339 \pm 92$
	2000	0.870	250	50	$2876 \pm 116$ (301 スイープ)	123	252	103 (504)	245	100 (490)	205	84 (410)	$3678 \pm 232$	$3041 \pm 127$
S4-4	300	0.623	1200	10	$5495 \pm 243$ (4995 スイープ)	409	3940	323 (7880)	3910	320 (7820)	3880	318 (7760)	$10254 \pm 1402$	$6468 \pm 511$
	500	0.686	1800	10	$5221 \pm 155$ (4873 スイープ)	400	1350	111 (2700)	520	43 (1040)	470	39 (940)	$5437 \pm 436$	$5329 \pm 296$
	1000	0.735	2400	10	$3760 \pm 179$ (4995 スイープ)	400	2360	193 (4720)	1660	136 (3320)	1460	120 (2920)	$4632 \pm 494$	$6721 \pm 563$
	2000	0.753	2800	10	$4608 \pm 130$ (3996 スイープ)	409	2750	225 (5500)	2120	174 (4240)	740	61 (1480)	$3677 \pm 221$	$4245 \pm 211$

測定時間のカッコ内はデータ転送時間等を含めた値

付図1-1 測定時間と $\alpha$ 値の関係 (S4-2炉心)



付図1-2 測定時間とα値の関係 (S4-4炉心)



## 添付資料

II. ファインマン- $\alpha$ 法による測定 of 模擬計算の入力サンプル

- S4-6炉心、試験体水位600mm -

```

PROB-1 DRIVER:1.2wt% $\alpha$  D=0.0cm, TEST:MK-1 H=60.0cm
c underside of driver region
1 8 5.0291e-5 15 -16 25 -26 imp:n=1
2 9 8.6252e-2 15 -16 26 -27 imp:n=1
c fuel+D2O in driver region
3 0 15 -16 27 -31 imp:n=1 fill=1
4 8 5.0291e-5 -6 7 -8 9 u=1 imp:n=1 lat=1 fill=-8:8 -8:8 0:0
    1 16r
    1 16r
    1 4r 2 6r 1 4r
    1 3r 2 8r 1 3r
    1 2r 2 10r 1 2r
    1 1r 2 12r 1 1r
    1 1r 2 5r 15 2 5r 1 1r
    1 1r 2 4r 1 2r 2 4r 1 1r
    1 1r 2 3r 15 1 2r 15 2 3r 1 1r
    1 1r 2 4r 1 2r 2 4r 1 1r
    1 1r 2 5r 15 2 5r 1 1r
    1 1r 2 12r 1 1r
    1 2r 2 10r 1 2r
    1 3r 2 8r 1 3r
    1 4r 2 6r 1 4r
    1 16r
    1 16r
5 0 -1 u=2 imp:n=1 fill=3
6 2 5.9603e-2 1 -2 u=2 imp:n=1
7 8 5.0291e-5 2 -3 u=2 imp:n=1
8 2 5.9603e-2 3 -4 u=2 imp:n=1
9 8 5.0291e-5 4 u=2 imp:n=1
c fuel+AIR in driver region
10 0 15 -16 31 -32 imp:n=1 fill=6
11 8 5.0291e-5 -6 7 -8 9 u=6 imp:n=1 lat=1 fill=-8:8 -8:8 0:0
    6 16r
    6 16r
    6 4r 7 6r 6 4r
    6 3r 7 8r 6 3r
    6 2r 7 10r 6 2r
    6 1r 7 12r 6 1r
    6 1r 7 5r 16 7 5r 6 1r
    6 1r 7 4r 6 2r 7 4r 6 1r
    6 1r 7 3r 16 6 2r 16 7 3r 6 1r
    6 1r 7 4r 6 2r 7 4r 6 1r
    6 1r 7 5r 16 7 5r 6 1r
    6 1r 7 12r 6 1r
    6 2r 7 10r 6 2r
    6 3r 7 8r 6 3r
    6 4r 7 6r 6 4r
    6 16r
    6 16r
12 0 -1 u=7 imp:n=1 fill=3
13 2 5.9603e-2 1 -2 u=7 imp:n=1
14 8 5.0291e-5 2 -3 u=7 imp:n=1
15 2 5.9603e-2 3 -4 u=7 imp:n=1
16 8 5.0291e-5 4 u=7 imp:n=1
c upside of driver region
17 8 5.0291e-5 15 -16 32 -33 imp:n=1
c inside of pressure tube
18 0 -37 u=3 trcl=(0.9281 0.9281 0.0) imp:n=1 fill=8
19 like 18 but trcl=(0.9281 -0.9281 0.0)
20 like 18 but trcl=(-0.9281 0.9281 0.0)
21 like 18 but trcl=(-0.9281 -0.9281 0.0)

```

```

22 like 18 but trcl=(2.7716 1.1481 0.0)
23 like 18 but trcl=(2.7716 -1.1481 0.0)
24 like 18 but trcl=(-2.7716 1.1481 0.0)
25 like 18 but trcl=(-2.7716 -1.1481 0.0)
26 like 18 but trcl=(1.1481 2.7716 0.0)
27 like 18 but trcl=(1.1481 -2.7716 0.0)
28 like 18 but trcl=(-1.1481 2.7716 0.0)
29 like 18 but trcl=(-1.1481 -2.7716 0.0)
30 like 18 but trcl=(4.6661 0.9281 0.0)
31 like 18 but trcl=(4.6661 -0.9281 0.0)
32 like 18 but trcl=(-4.6661 0.9281 0.0)
33 like 18 but trcl=(-4.6661 -0.9281 0.0)
34 like 18 but trcl=(0.9281 4.6661 0.0)
35 like 18 but trcl=(0.9281 -4.6661 0.0)
36 like 18 but trcl=(-0.9281 4.6661 0.0)
37 like 18 but trcl=(-0.9281 -4.6661 0.0)
38 like 18 but trcl=(3.9557 2.6431 0.0)
39 like 18 but trcl=(3.9557 -2.6431 0.0)
40 like 18 but trcl=(-3.9557 2.6431 0.0)
41 like 18 but trcl=(-3.9557 -2.6431 0.0)
42 like 18 but trcl=(2.6431 3.9557 0.0)
43 like 18 but trcl=(2.6431 -3.9557 0.0)
44 like 18 but trcl=(-2.6431 3.9557 0.0)
45 like 18 but trcl=(-2.6431 -3.9557 0.0)
46 8 5.0291e-5 -38 -39 #21 #25 #29 #33 #37 #41 #45
    u=3 imp:n=1
47 8 5.0291e-5 -38 39 #20 #24 #28 #32 #36 #40 #44
    u=3 imp:n=1
48 8 5.0291e-5 38 -39 #19 #23 #27 #31 #35 #39 #43
    u=3 imp:n=1
49 8 5.0291e-5 38 39 #18 #22 #26 #30 #34 #38 #42
    u=3 imp:n=1
50 1 7.0407e-2 -35 u=8 imp:n=1
51 8 5.0291e-5 35 -36 u=8 imp:n=1
52 2 5.9603e-2 36 u=8 imp:n=1
c outer test region
53 2 5.9603e-2 14 -15 41 -33 imp:n=1
54 8 5.0291e-5 13 -14 41 -33 imp:n=1
55 2 5.9603e-2 12 -13 41 -33 imp:n=1
c test region (blanket + h2o)
56 0 11 -12 41 -27 imp:n=1 fill=4
57 6 1.0024e-1 -18 19 -20 21 u=4 imp:n=1 lat=1 fill=-9:9 -9:9 0:0
    4 18r
    4 18r
    4 6r 5 4r 4 6r
    4 4r 5 8r 4 4r
    4 3r 5 10r 4 3r
    4 2r 5 12r 4 2r
    4 2r 5 4r 4 2r 5 4r 4 2r
    4 1r 5 4r 4 4r 5 4r 4 1r
    4 1r 5 3r 4 6r 5 3r 4 1r
    4 1r 5 3r 4 6r 5 3r 4 1r
    4 1r 5 4r 4 4r 5 4r 4 1r
    4 2r 5 4r 4 2r 5 4r 4 2r
    4 2r 5 12r 4 2r
    4 3r 5 10r 4 3r
    4 4r 5 8r 4 4r
    4 6r 5 4r 4 6r
    4 18r
58 5 6.9110e-2 -22 u=5 imp:n=1
59 8 5.0291e-5 22 -23 u=5 imp:n=1
60 4 8.6355e-2 23 -24 u=5 imp:n=1
61 6 1.0024e-1 24 u=5 imp:n=1
c test region (fuel + h2o)
62 0 11 -12 27 -28 imp:n=1 fill=9

```

```

63 6 1.0024e-1 -18 19 -20 21 u=9 imp:n=1 lat=1 fill=-9:9 -9:9 0:0
9 18r
9 18r
9 6r 10 4r 9 6r
9 4r 10 8r 9 4r
9 3r 10 10r 9 3r
9 2r 10 12r 9 2r
9 2r 10 4r 9 2r 10 4r 9 2r
9 1r 10 4r 9 4r 10 4r 9 1r
9 1r 10 3r 9 6r 10 3r 9 1r
9 1r 10 3r 9 6r 10 3r 9 1r
9 1r 10 3r 9 6r 10 3r 9 1r
9 1r 10 4r 9 4r 10 4r 9 1r
9 2r 10 4r 9 2r 10 4r 9 2r
9 2r 10 12r 9 2r
9 3r 10 10r 9 3r
9 4r 10 8r 9 4r
9 6r 10 4r 9 6r
9 18r
9 18r
64 3 6.9196e-2 -22 u=10 imp:n=1
65 8 5.0291e-5 22 -23 u=10 imp:n=1
66 4 8.6355e-2 23 -24 u=10 imp:n=1
67 6 1.0024e-1 24 u=10 imp:n=1
c test region (fuel + air)
68 0 11 -12 28 -29 imp:n=1 fill=11
69 6 1.0024e-1 -18 19 -20 21 u=11 imp:n=1 lat=1 fill=-9:9 -9:9 0:0
11 18r
11 18r
11 6r 12 4r 11 6r
11 4r 12 8r 11 4r
11 3r 12 10r 11 3r
11 2r 12 12r 11 2r
11 2r 12 4r 11 2r 12 4r 11 2r
11 1r 12 4r 11 4r 12 4r 11 1r
11 1r 12 3r 11 6r 12 3r 11 1r
11 1r 12 3r 11 6r 12 3r 11 1r
11 1r 12 3r 11 6r 12 3r 11 1r
11 1r 12 4r 11 4r 12 4r 11 1r
11 2r 12 4r 11 2r 12 4r 11 2r
11 2r 12 12r 11 2r
11 3r 12 10r 11 3r
11 4r 12 8r 11 4r
11 6r 12 4r 11 6r
11 18r
11 18r
70 3 6.9196e-2 -22 u=12 imp:n=1
71 8 5.0291e-5 22 -23 u=12 imp:n=1
72 4 8.6355e-2 23 -24 u=12 imp:n=1
73 6 1.0024e-1 24 u=12 imp:n=1
c test region (blanket + air)
74 0 11 -12 29 -30 imp:n=1 fill=13
75 8 5.0291e-5 -18 19 -20 21 u=13 imp:n=1 lat=1 fill=-9:9 -9:9 0:0
13 18r
13 18r
13 6r 14 4r 13 6r
13 4r 14 8r 13 4r
13 3r 14 10r 13 3r
13 2r 14 12r 13 2r
13 2r 14 4r 13 2r 14 4r 13 2r
13 1r 14 4r 13 4r 14 4r 13 1r
13 1r 14 3r 13 6r 14 3r 13 1r
13 1r 14 3r 13 6r 14 3r 13 1r
13 1r 14 3r 13 6r 14 3r 13 1r
13 1r 14 4r 13 4r 14 4r 13 1r
13 2r 14 4r 13 2r 14 4r 13 2r
13 2r 14 12r 13 2r

```

```

13 3r 14 10r 13 3r
13 4r 14 8r 13 4r
13 6r 14 4r 13 6r
13 18r
13 18r
76 5 6.9110e-2 -22 u=14 imp:n=1
77 8 5.0291e-5 22 -23 u=14 imp:n=1
78 4 8.6355e-2 23 -24 u=14 imp:n=1
79 8 5.0291e-5 24 u=14 imp:n=1
c test region (upper void)
80 8 5.0291e-5 11 -12 30 -33 imp:n=1
c inner test region
81 2 5.9603e-2 10 -11 41 -33 imp:n=1
82 8 5.0291e-5 -10 41 -33 #96 #97 imp:n=1
c upper grid plate
83 10 6.0238e-2 -16 33 -34 imp:n=1
c core tank
84 2 5.9603e-2 16 -17 25 -34 imp:n=1
c outside of core
85 0 (17:-41:34) imp:n=0
86 8 5.0291e-5 -3 u=15 imp:n=1
87 2 5.9603e-2 3 -4 u=15 imp:n=1
88 8 5.0291e-5 4 u=15 imp:n=1
89 8 5.0291e-5 -3 u=16 imp:n=1
90 2 5.9603e-2 3 -4 u=16 imp:n=1
91 8 5.0291e-5 4 u=16 imp:n=1
c bottom
92 2 5.9603e-2 42 -17 40 -25 imp:n=1
93 8 5.0291e-5 43 -17 41 -40 imp:n=1
94 2 5.9603e-2 42 -43 41 -40 imp:n=1
95 8 5.0291e-5 15 -42 41 -25 imp:n=1
c detector
96 11 9.7852e-5 44 -45 -47 imp:n=1
97 9 8.6252e-2 27 -46 -48 #96 imp:n=1

1 cz 5.84
2 cz 6.04
3 cz 6.625
4 cz 6.825
6 px 10.0
7 px -10.0
8 py 10.0
9 py -10.0
10 cz 6.0
11 cz 6.5
12 cz 19.5
13 cz 20.0
14 cz 26.7
15 cz 27.5
16 cz 150.25
17 cz 151.75
18 px 1.2
19 px -1.2
20 py 1.2
21 py -1.2
22 cz 0.27
23 cz 0.28
24 cz 0.315
25 pz -16.7
26 pz -10.2
27 pz 0.0
28 pz 40.0
29 pz 60.0
30 pz 100.0
31 pz 164.68
32 pz 200.0
33 pz 292.3

```

34 pz 332.3  
 35 cz 0.74  
 36 cz 0.7515  
 37 cz 0.8365  
 38 px 0.0  
 39 py 0.0  
 40 pz -19.7  
 41 pz -40.0  
 42 cz 57.5  
 43 cz 60.5  
 44 pz 2.54  
 45 pz 52.54  
 46 pz 55.08  
 47 cz 2.50  
 48 cz 2.551

c  
 sdef pos=0 23 30 tme=15201005961

c  
 m1 8016.37c 4.7379e-2 \$ uo2  
 92235.37c 2.8052e-4  
 92238.37c 2.2747e-2  
 m2 13027.37c 5.7880e-2 \$ al-clad/tube  
 12000.37c 1.7226e-3  
 m3 8016.37c 4.6130e-2 \$ mk-1  
 92235.37c 4.4147e-3  
 92238.37c 1.4593e-2  
 94239.37c 3.1122e-3  
 94240.37c 7.6872e-4  
 94241.37c 1.4903e-4  
 94242.37c 2.3087e-5  
 m4 24000.37c 1.5820e-2 \$ mk-1 clad (sus316)  
 25055.37c 1.7615e-3  
 26000.37c 5.7620e-2  
 28000.37c 9.8930e-3  
 42000.37c 1.2609e-3  
 m5 8016.37c 4.6073e-2 \$ blanket  
 92235.37c 4.6661e-5  
 92238.37c 2.2990e-2  
 m6 1001.37c 6.6827e-2 \$ h2o  
 8016.37c 3.3413e-2  
 m7 1001.37c 1.9937e-4 \$ d2o  
 1002.37c 6.6256e-2  
 8016.37c 3.3228e-2  
 m8 7014.37c 3.9623e-5 \$ air  
 8016.37c 1.0668e-5  
 m9 24000.37c 1.7428e-2 \$ lower grid (sus304)  
 25055.37c 1.7363e-3  
 26000.37c 5.9571e-2  
 28000.37c 7.5167e-3  
 m10 13027.37c 6.0238e-2 \$ upper grid (al)  
 m11 2003.37c 9.7852e-5 \$ detector (he3)

c  
 mt6 lwtr.01t  
 mt7 hwtr.01t

c  
 fc4 current across.  
 f4:n 96

c  
 nps 30000000  
 prdmp j 30000000 -1  
 cut:n j j 0.0