

## ファインマン- $\alpha$ 法による実効増倍率測定(3)

1998年6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。

〒311-1393 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

Inquires about copywrite and reproduction should be addressed to : Technology Management Section. System Engineering Division. O-arai Engineering Center Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi. O-arai-machi, Higashi-Ibaraki-gun, Ibaraki-Ken, 311-1393 , Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation ) 1998

### ファインマンー $\alpha$ 法による実効増倍率測定（3）

毛利智聰<sup>\*</sup>、大谷暢夫<sup>\*\*</sup>

#### 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）を測定対象として、ファインマンー  $\alpha$  法による重水減速体系の未臨界度測定研究が実施され、核燃料施設で問題となる低い実効増倍率体系の未臨界度を検知できることが確認されている。ここでは、核燃料施設において一般的な軽水減速体系に対しても、未臨界度の検知が可能であることを確認するため、DCA の未臨界度測定試験炉心にウラン燃料および MOX 燃料を装荷した軽水減速体系を対象として未臨界度測定実験を実施した。

測定の結果、中性子計数率の低い軽水減速体系においても、実効増倍率が 0.623～0.870 の範囲で、未臨界度を示す  $\alpha$  値の検出が可能であることが確認された。また、実効増倍率の 0.05～0.10 程度の差異を検知できることも確認された。

輸送計算コード TWODANT およびモンテカルロ計算コード KENO V.a を用いて試験体系の  $\alpha$  値を計算し測定データと比較した。 $\alpha$  値から評価した実効増倍率の計算値と測定値の差は 13% 以下であり、未臨界度モニターとしては十分な精度で  $\alpha$  値が求まることが確認された。

ファインマンー  $\alpha$  法が、低い実効増倍率の軽水減速体系でも未臨界度測定手法として有効であることが明らかとなった。

<sup>\*</sup>) 動力炉・核燃料開発事業団、大洗工学センター、実験炉部臨界工学試験室

<sup>\*\*</sup>) (現) 動力炉・核燃料開発事業団、高速増殖炉もんじゅ建設所、技術開発部

## Effective Multiplication Factor Measurement by Feynman- $\alpha$ Method (3)

Tomoaki MOURI\*, Nobuo OHTANI\*\*

### Abstract

The sub-criticality monitoring system has been developed for criticality safety control in nuclear fuel handling plants. In the past experiments performed with the Deuterium Critical Assembly(DCA), it was confirmed that the detection of sub-criticality was possible to  $k_{\text{eff}}=0.3$ . To investigate the applicability of the method to more generalized system, experiments were performed in the light-water-moderated system of the modified DCA core.

From these experiments, it was confirmed that the prompt decay constant( $\alpha$ ), which was a index of the sub-criticality, was detected between  $k_{\text{eff}}=0.623$  and  $k_{\text{eff}}=0.870$  and the difference of  $0.05 \sim 0.1 \Delta k$  could be distinguished.

The  $\alpha$  values were numerically calculated with 2D transport code TWODANT and monte carlo code KENO V.a , and the results were compared with the measured values. The differences between calculated and measured values were proved to be less than 13%, which was sufficient accuracy in the sub-criticality monitoring system .

It was confirmed that Feynman- $\alpha$  method was applicable to sub-critical measurement of the light-water-moderated system.

---

\*) Criticality Engineering Section, Experimental Reactor Division,  
O-Arai Engineering Center, PNC

\*\*) Technology Development Division, Monju Construction Office, PNC

## 目次

要旨	... I
Abstract	... II
目次	... III
図表一覧	... IV
 1. 緒言	... 1
 2. 測定内容	... 2
2.1 概要	... 2
2.2 測定体系	... 2
2.3 測定体系の実効増倍率評価	... 3
2.4 即発中性子減衰定数の測定方法	... 3
2.5 ゲート時間幅と積算時間幅	... 5
 3. 測定結果とその評価	... 6
3.1 S-1炉心	... 6
3.2 S-2炉心	... 7
3.3 S4-2炉心	... 8
3.4 S4-4炉心	... 10
3.5 中性子線源挿入の影響	... 11
3.6 検出器の設定位置の影響	... 12
3.7 計算結果との比較	... 13
 4. まとめと今後の予定	... 19
 謝辞	... 20
参考文献	... 20

## 図表一覧

(図)

図1	D C A炉心構造図	… 35
図2	試験体断面図	… 36
図3	ファインマン-アルファ法測定システム	… 37
図4	ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S-1炉心、試験体水位500mm)	… 38
図5	最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S-1炉心、試験体水位500mm)	… 38
図6	ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S-1炉心、試験体水位1000mm)	… 39
図7	最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S-1炉心、試験体水位1000mm)	… 39
図8	実効増倍率と $\alpha$ 値の関係(S-1炉心)	… 40
図9	スイープ数と $\alpha$ 値の関係(S-1炉心: $\Delta t=10 \mu sec$ )	… 40
図10	ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S-2炉心、試験体水位300mm)	… 41
図11	最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S-2炉心、試験体水位300mm)	… 41
図12	ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S-2炉心、試験体水位500mm)	… 42
図13	最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S-2炉心、試験体水位500mm)	… 42
図14	ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S-2炉心、試験体水位2000mm)	… 43
図15	最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S-2炉心、試験体水位2000mm)	… 43
図16	実効増倍率と $\alpha$ 値の関係(S-2炉心)	… 44
図17	スイープ数と $\alpha$ 値の関係(S-2炉心: $\Delta t=10 \mu sec$ )	… 44
図18	ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S4-2炉心、試験体水位300mm)	… 45
図19	最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-2炉心、試験体水位300mm)	… 45
図20	ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S4-2炉心、試験体水位500mm)	… 46
図21	最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-2炉心、試験体水位500mm)	… 46
図22	ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S4-2炉心、試験体水位1000mm)	… 47
図23	最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-2炉心、試験体水位1000mm)	… 47
図24	ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S4-2炉心、試験体水位2000mm)	… 48
図25	最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-2炉心、試験体水位2000mm)	… 48
図26	実効増倍率と $\alpha$ 値の関係(S4-2炉心)	… 49
図27	スイープ数と $\alpha$ 値の関係(S4-2炉心: $\Delta t=20 \mu sec$ )	… 49
図28	ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S4-4炉心、試験体水位300mm)	… 50
図29	最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-4炉心、試験体水位300mm)	… 50
図30	ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S4-4炉心、試験体水位500mm)	… 51
図31	最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-4炉心、試験体水位500mm)	… 51
図32	ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S4-4炉心、試験体水位1000mm)	… 52

図33 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-4炉心、試験体水位1000mm)	… 52
図34 フайнマン- $\alpha$ 法のY値(S4-4炉心、試験体水位2000mm)	… 53
図35 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-4炉心、試験体水位2000mm)	… 53
図36 実効増倍率と $\alpha$ 値の関係(S4-4炉心)	… 54
図37 スイープ数と $\alpha$ 値の関係(S4-4炉心: $\Delta t=10 \mu sec$ )	… 54
図38 フайнマン- $\alpha$ 法のY値 (S-1炉心、試験体水位500mm、中性子線源挿入)	… 55
図39 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (S-1炉心、試験体水位500mm、中性子線源挿入)	… 55
図40 フайнマン- $\alpha$ 法のY値 (S-1炉心、試験体水位1000mm、中性子線源挿入)	… 56
図41 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (S-1炉心、試験体水位1000mm、中性子線源挿入)	… 56
図42 外部中性子線源挿入の効果	… 57
図43 スイープ数と $\alpha$ 値の関係(S-1炉心: 試験体水位500mm)	… 57
図44 フайнマン- $\alpha$ 法のY値 (S-2炉心、試験体水位2000mm、検出器位置効果)	… 58
図45 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係 (S-2炉心、試験体水位2000mm、検出器位置効果)	… 58
図46 炉心間の $\alpha$ 値の比較(計算値: TWODANT)	… 59
図47 実効増倍率の比較	… 60
図48 実効遅発中性子割合の比較	… 60
図49 即発中性子寿命の比較(TWODANT)	… 61
図50 中性子生成時間の比較(TWODANT)	… 61
図51 即発中性子寿命の比較(S-1炉心)	… 62
図52 中性子生成時間の比較(S-1炉心)	… 62
図53 即発中性子寿命の比較(S-2炉心)	… 63
図54 中性子生成時間の比較(S-2炉心)	… 63
図55 即発中性子寿命の比較(S4-2炉心)	… 64
図56 中性子生成時間の比較(S4-2炉心)	… 64
図57 即発中性子寿命の比較(S4-4炉心)	… 65
図58 中性子生成時間の比較(S4-4炉心)	… 65
図59 炉心間の $\alpha$ 値の比較(計算値: KENO 4)	… 66
図60 即発中性子寿命及び中性子生成時間の比較 (TWODANT手法とKENO手法4、S-1炉心)	… 67

図61 即発中性子寿命及び中性子生成時間の比較 (TWODANT手法とKENO手法4、S-2炉心)	... 67
図62 即発中性子寿命及び中性子生成時間の比較 (TWODANT手法とKENO手法4、S4-2炉心)	... 68
図63 即発中性子寿命及び中性子生成時間の比較 (TWODANT手法とKENO手法4、S4-4炉心)	... 68
図64 測定値と計算値の比較(S-1炉心)	... 69
図65 C/E値の比較(S-1炉心)	... 69
図66 測定値と計算値の比較(S-2炉心)	... 70
図67 C/E値の比較(S-2炉心)	... 70
図68 測定値と計算値の比較(S4-2炉心)	... 71
図69 C/E値の比較(S4-2炉心)	... 71
図70 測定値と計算値の比較(S4-4炉心)	... 72
図71 C/E値の比較(S4-4炉心)	... 72

## (表)

表1 測定炉心構成	... 21
表2 測定ケースと測定条件	... 21
表3 $\alpha$ の測定結果(S-1炉心)	... 22
表4 $\alpha$ の測定結果(S-2炉心)	... 22
表5 $\alpha$ の測定結果(S4-2炉心)	... 23
表6 $\alpha$ の測定結果(S4-4炉心)	... 23
表7 軽水減速体系と重水減速体系の比較	... 24
表8 中性子線源挿入の影響評価の検討ケース	... 25
表9 中性子線源挿入の影響	... 25
表10 検出器の設定位置の影響	... 25
表11 $\alpha$ の計算結果(TWODANT手法)	... 26
表12 $\alpha$ の計算結果(KENO手法1)	... 27
表13 $\alpha$ の計算結果(KENO手法2)	... 28
表14 $\alpha$ の計算結果(KENO手法3)	... 29
表15 TWODANT手法とKENO手法の比較	... 30
表16 $\alpha$ の計算結果(KENO手法4)	... 31
表17 TWODANT手法とKENO手法4の比較	... 32
表18 $\alpha$ の測定値と計算値の比較	... 33
表19 実効増倍率の測定値と計算値の比較	... 34

## 1. 緒言

臨界工学試験室では、低い実効増倍率体系の未臨界度測定技術開発を目的として、重水臨界実験装置（以下、DCAと略す。）を用いて、ウラン燃料およびプルトニウム燃料を装荷した重水減速体系を対象にファインマンー $\alpha$ 法による未臨界度測定研究を進めてきた。これまでの実験研究によって、ウラン燃料装荷炉心については、実効増倍率0.3から0.998の実効増倍率の変化を検出できることが確認され、ファインマンー $\alpha$ 法による未臨界度測定手法が、核燃料施設の未臨界度モニターとして十分適用可能であることが示された<sup>1)2)</sup>。プルトニウム燃料装荷炉心については、中性子バックグラウンドが高いため、検出器の不感時間の影響によって、ウラン炉心で得られたような炉物理的に定義された即発中性子減衰定数（以下、 $\alpha$ 値と略す。）は得られなかつたが、実効増倍率0.45から0.85の範囲で実効増倍率の検知が可能であることが確認されている<sup>3)</sup>。また、測定に用いるマルチチャンネルスケーラーの制御とデータの取得をLAN回線によって行い、測定結果をワークステーションの画面に表示するシステムを試作し、短い測定時間で未臨界度のモニターが可能であることを確認した<sup>4)</sup>。以上の一連の実験研究は即発中性子寿命の長い重水減速体系で行われており、一般的な核燃料施設で問題となる軽水減速体系とは炉物理状況が異なるため、軽水減速体系での測定技術の実証が課題としてあげられていた。本報告では、平成8年度からDCAで利用が可能となった軽水減速材供給設備を有する試験体領域に、ウラン燃料およびMOX燃料を装荷した軽水減速体系に対してファインマンー $\alpha$ 法の測定を適用し、軽水減速の低実効増倍率体系においても、反応度が十分精度良く検知されることを確認する。また、軽水減速体系の基礎的な知見を得て、重水減速体系との差異を明らかにする。

## 2. 測定内容

### 2.1 概要

本実験では、重水減速体系と比較して減衰定数が大きく中性子計数率の低い軽水減速体系において、未臨界度測定にファインマンー $\alpha$ 法を適用し、 $\alpha$ 値が精度良く求まるこことを確認する。また、軽水減速体系における未臨界度測定に関する知見を得て、重水減速体系との差異を明らかにする。さらに、中性子線源を挿入して中性子束レベルが変化した場合の測定の可能性、検出器の設定位置の依存性を評価する。

測定対象としたDCAの4種類の炉心について、輸送計算コードTWODANTとモンテカルロ法計算コードKENO V.aによって $\alpha$ 値を計算し、測定値との比較から計算手法の妥当性を評価する。

本実験で使用する軽水減速体系は、DCAの炉心中心部に作られた試験体領域にウラン燃料およびMOX燃料を装荷し、減速材に軽水を供給した炉心である。なお、今回の実験では、試験体領域の周囲のドライバー領域には重水減速材を供給していない。試験体領域は従来実験を行ってきた重水減速体系に比較して小さい体系であり、また、軽水減速体系であるため、軽水による熱中性子の吸収が多く中性子計数率が少ない。その結果、重水減速体系における未臨界度測定とは異なる課題が生じる。

### 2.2 測定体系

DCAの炉心構造を図1に、未臨界度測定の対象とした炉心の構成を表1に示す。表1に示されているように、炉心中央部の試験体領域の燃料の種類および本数とドライバー領域の燃料体の有無が異なる4種類の炉心で測定した。ドライバー領域に燃料体が装荷されている場合でも、重水減速材は供給されておらず、炉心の反応度は炉心中央部の試験体領域の軽水減速材の高さによって変化させた。

ドライバー領域に燃料体の存在しない試験体領域のみの炉心として、UO<sub>2</sub>燃料棒を72本装荷した炉心（以下、S-1炉心と略す。）と、同じUO<sub>2</sub>燃料棒を140本装荷した炉心（以下、S-2炉心と略す。）の2種類について測定を行なった。ドライバー領域に燃料体を装荷した炉心は、試験体領域に装荷する燃料棒の本数(140本)が共通で、燃料の種類がUO<sub>2</sub>燃料の炉心（以下、S4-3炉心と略す。）とMOX(0.79wt%Pu-fissile)燃料の炉心（以下、S4-4炉心と略す。）の2種類である。燃料棒本数の異なる試験体領域の断面を図2に示す。

試験体領域が共通で、ドライバー領域に燃料体を装荷した場合と装荷しない場合の比較によって、熱中性子体系では影響がないと思われる重水減速材が供給されない場合のドライバー領域の燃料体の影響を確認した。また、試験体領域の燃料棒の本数（ピッチ）を変えることによって、より広い範囲の実効増倍率の測定を試みた。

検出器は、直径2インチ、有効長500mmのHe-3検出器1本を使用した。検出器は、

軸方向は検出器の中心と炉心の試験体水位の中心が一致する様に(試験体水位 300mm の場合は下端が一致する様に) 設置し、径方向位置は試験体容器に隣接する外側とした。

未臨界度測定の測定条件を表 2 に示す。各炉心について、試験体領域の軽水減速材水位（以下、試験体水位と略す。）を 300mm, 500mm, 1000mm, 2000mm として測定を行った。0mm から 300mm の範囲の試験体水位では、中性子計数率が 10cps 以下と非常に小さくなり、現実的な測定時間内に精度良いデータを得ることが困難であるため、ここでは試験体水位 300mm 以上で測定を行った。

### 2.3 測定体系の実効増倍率評価

各炉心、各試験体水位ごとの実効増倍率は SCALE4.2 コードシステムのモンテカルロ法コード KENO V.a により計算した。計算結果を表 2 に示す。表 2 に示されているよう、実効増倍率の範囲は、S-1 炉心で約 0.693～0.728、S-2 炉心で約 0.711～0.834、S4-2 炉心で約 0.724～0.870、S4-4 炉心で約 0.623～0.753 である。今回の実験に用いた試験体では、試験体水位を満水(2000mm)にしても実効増倍率は最大で約 0.870 である。また、試験体水位が 300mm 以下の水位が低い段階で、実効増倍率は水位の増加に対して急激に増加し、300mm 以上ではなだらかに変化するため、試験体水位 300mm 以上の今回の測定では、実効増倍率の最小値は約 0.623 となっている。即ち、今回の実験の軽水減速体系の測定範囲は 0.623～0.870 であり、重水減速体系での測定範囲 0.3～0.998 に比べて実効増倍率の範囲が狭くなっている。

### 2.4 即発中性子減衰定数の測定方法

ファインマンー  $\alpha$  法の測定システムを図 3 に示す。このシステムは  $\alpha$  値の実時間測定を実現するために試作されたモニターシステムである。He-3 検出器からの信号を前置増幅器および主増幅器により増幅し、Single Channel Analyzer (以下、SCA と略す。) によりノイズ成分を除去している。Engineering Work Station(以下、EWS と略す。) と Multi Channel Scaler (以下、MCS と略す。) は計算機用の LAN 回線で接続されており、EWS の制御により、測定開始のパルスが送られた後、MCS で信号が計数される。MCS の 1 スイープのチャンネル数は 8192 で、1 スイープ終了後、測定データは MCS から EWS に転送され、EWS で統計計算処理される。ただし、今回の測定では、軽水減速体系における  $\alpha$  値の評価が主目的であるため、統計計算にはモニターシステム内蔵の処理プログラムを使用せず、データの処理についての検討が容易なプログラムを別途準備した。

MCS によって得られるゲート時間幅  $t$  当たりの計数データから、 $2t$ 、 $3t$ 、… の計数を積算する。各積算時間幅に対して、次式にしたがって Y 値を求める。

$$Y = \frac{\overline{C^2} - (\overline{C})^2}{\overline{C}} - 1$$

ここで、

$\overline{C}$  :  $t$ における平均計数

$\overline{C^2}$  :  $t$ における計数の自乗平均

$(\overline{C})^2$  :  $t$ における計数の平均の自乗

$Y$ に関する1点炉近似に基づくファインマン- $\alpha$ 法の基礎式は以下のとおりである。

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

$$Y = Y_{sat} \left\{ 1 - \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha t} \right\} \quad \cdots (2.1)$$

ここで、

$t$  : 積算時間幅

$\varepsilon$  : 検出器感度

$\nu$  : 核分裂当たりの中性子発生数

$\tau$  : 中性子発生平均時間

$\alpha$  : 即発中性子減衰定数

遅発中性子の影響を時間の1次関数で考慮すると上式は以下のようになる<sup>5)</sup>。

$$Y = Y_{sat} \left\{ 1 - \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha t} \right\} + Bt \quad \cdots (2.2)$$

また、検出器の不感時間を考慮すると次式を得る<sup>5)</sup>。

$$Y = Y_{sat} D(t_d) \left\{ 1 - \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha t} \right\} + Bt - 2\bar{n}t_d \quad (t_d \ll t, \alpha t_d \ll 1) \quad \cdots (2.3)$$

ここで、

$t_d$  : 不感時間

$D(t_d)$  : 中性子が検出器に吸収されたときに検出のパルス信号を出す確率

積算時間幅に対して $Y$ を計算し、最小自乗法により $\alpha$ 値を求める。最小自乗フィッティングは下記の3種類の式で行った。

① 2パラメータの式 ((2.1)の基礎式)

②検出器の不感時間の影響を考慮した3パラメータの式

(2.1)式に不感時間の補正項を加えた式

③検出器の不感時間と遅発中性子の影響を考慮した4パラメータの式 ((2.3)式)

①および②の不感時間を考慮した式は、 $t_d \ll t$ 、 $\alpha t_d \ll 1$  の条件を満たす場合の近似式であるため、測定の条件によっては適用性に問題のある場合があるが、ここでは影響を把握するのには有効と考え使用した。

## 2.5 ゲート時間幅と積算時間幅

遅発中性子の影響がない場合のY値は、積算時間幅の増加とともに急激に上昇した後、一定値に漸近する。本実験の評価では、Y値がほぼ一定値になるまでのデータを、3種類の式にフィッティングさせて $\alpha$ 値を算出した。最大積算時間幅は、MCSの設定ゲート時間幅と積算チャンネル数の積により決定される。ゲート時間幅は、Y値の立ち上がり部分が細かい時間幅で分割され、精度良く計算されるように選択する。今回の実験では、実効倍率が0.623～0.870の範囲に対して、これまでの実験経験から、ゲート時間幅を $10\mu\text{sec} \sim 50\mu\text{sec}$ の間に設定した。 $\alpha$ 値は積算チャンネル数（即ち、最大積算時間幅）の選び方によって大きく変化するため、最大積算時間幅を、Y値の上昇部分から $0.0005\text{sec}(0.5\text{msec})$ または $0.001\text{sec}(1.0\text{msec})$ の間隔で増加させて $\alpha$ 値を求め、最大積算時間幅 $0.0005\text{sec}(0.5\text{msec})$ または $0.001\text{sec}(1.0\text{msec})$ の変化量に対して、 $\alpha$ 値の変化量が最小となる場合の $\alpha$ の値を最終的な $\alpha$ の評価値とした。

### 3. 測定結果とその評価

各測定炉心について、試験体水位に対する積算時間幅とY値との関係および最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係を図4～図7、図10～図15、図18～図25、図28～図35に示す。前述のように、最大積算時間幅の変化に対する $\alpha$ 値の変化量が最小となる場合の値を $\alpha$ 値の評価結果とした。各測定炉心の $\alpha$ 値の評価結果を表3～表6に、実効増倍率と $\alpha$ 値の関係およびスイープ数と $\alpha$ 値の関係を図8～図9、図16～図17、図26～図27、図36～図37に示す。

#### 3.1 S-1 炉心

S-1 炉心は、炉心中央部の試験体領域だけで構成され、2.7wt%UO<sub>2</sub>燃料棒がピッチ3.111cmの間隔で72本装荷されている体系である。

図4～図7（偶数番）にS-1炉心の積算時間幅とY値の関係を示している。S-1炉心では、いずれの試験体水位についても、積算時間幅0.002sec(2msec)でY値の立ち上がり部分が終了し、ほぼ一定値に漸近する。

図4～図7（奇数番）は最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係を示しており、最大積算時間を0.0015sec(1.5msec)から0.005sec(5msec)の範囲で、0.0005sec(0.5msec)の間隔で変化させて $\alpha$ 値を求めてプロットした図である。最大積算時間幅0.0015sec(1.5sec)から0.003sec(3.0msec)の範囲で、最大積算時間幅の変化に対して比較的安定した $\alpha$ 値が得られている。

表3にS-1炉心の $\alpha$ 値の評価結果を示す。表に示されているように、2パラメータ評価と3パラメータ評価の結果では、13%～19%程度の差が生じている。実験で使用する測定システム全体の不感時間は10 $\mu$ sec程度と評価されており<sup>3)</sup>、中性子計数率が10cpsであれば不感時間の影響は0.01%程度となり無視できる。そのため、中性子計数率が20cps以下の今回の測定では、不感時間の影響はほとんどないと推定され、2パラメータ評価と3パラメータ評価の結果の差は、測定データまたはY値のばらつきによる最小自乗フィッティングの誤差に起因すると考えられる。

S-1炉心では、不感時間の影響がほとんどないことから、2パラメータ評価の結果を標準的な値として検討に用いる。図8に実効増倍率と $\alpha$ 値の関係を示している。図から分かるように、実効増倍率が0.693（試験体水位500mm）から0.723（試験体水位1000mm）に変化するのに対して、2パラメータ評価の $\alpha$ 値は減少しており、物理的に予想される傾向を示している。実効増倍率0.693（試験体水位500mm）と実効増倍率0.723（試験体水位1000mm）の $\alpha$ 値の差異、即ち、実効増倍率0.05程度の $\alpha$ 値の差異を把握、分離できることがわかる。

S-1炉心の測定ではゲート時間幅を10 $\mu$ sec、1スイープのチャンネル数を8192と設定しており、1スイープ当たりの測定時間は約0.082secである。本測定システムでは、1スイープ当たりデータの転送・制御等に約2.3secを必要とするので、1スイープ当た

りの測定時間は約 2.4sec(=0.082sec+2.3sec)となる。図 9 のスイープ数と  $\alpha$  値の関係から、実効増倍率 0.693 (試験体水位 500mm) と実効増倍率 0.728 (試験体水位 1000mm) の両方の  $\alpha$  値が安定し、明確に分離されるのに必要なスイープ数は約 1500 である。その場合の全測定時間は約 3600sec (=2.4sec × 1500 = 60min) と評価される。なお、測定時間はデータの転送・制御時間によって決まるため、データの制御・転送等の時間を短縮すれば、大幅に測定時間を短縮できることが期待できる。

S-1 炉心における測定条件および  $\alpha$  値を、軽水減速の各炉心体系を重水減速体系と比較して表 7 にまとめて示した。ただし、軽水減速体系は、DCA の改造によって炉心中央部に作られた試験体領域 (直径 350mm) を利用した体系であり、DCA 改造前の炉心 (直径 3005mm) を用いた重水減速体系に比較して小さい体系であり、厳密な比較評価は困難であるので、定性的な比較を行う。

表 7 に示すように、軽水減速体系である S-1 炉心では、実効増倍率 0.693 の場合の  $\alpha$  値は約 6600 であり、重水減速体系に比べて中性子の吸収が多く即発中性子寿命が短いため、重水減速体系の実効増倍率 0.7 の  $\alpha$  値が約 1400 であるのに比較して、約 5 倍の大きさとなる。その結果、軽水減速体系の測定では、 $\alpha$  値 (ゲート時間幅に対する Y 値の立上がり部分) を精度良く評価するために、ゲート時間幅を短く設定する必要がある。今回実施した軽水減速体系の測定ではゲート時間幅を  $10 \mu\text{sec}$  としており、重水減速体系における  $200 \mu\text{sec}$  の約  $1/20$  となっている。したがって、今回の測定よりも深い未臨界度の軽水減速体系の測定では、ゲート時間幅の設定を更に小さくする必要があり、計測機器の性能に測定が制約を受けることとなる。

### 3.2 S-2 炉心

S-2 炉心は、炉心中央部の試験体領域だけで構成され、2.7wt%UO<sub>2</sub> 燃料棒がピッチ 2.2cm で 140 本装荷されている体系である。

図 10～図 15 (偶数番) に、S-2 炉心の積算時間幅と Y 値の関係を示す。S-2 炉心では、いずれの試験体水位についても、積算時間幅が 0.002sec(2.0msec) で Y 値の立ち上がり部分が終了し、ほぼ一定値に漸近する。

図 10～図 15 (奇数番) には、S-2 炉心の最大積算時間幅と  $\alpha$  値の関係が示されており、最大積算時間幅 0.0015sec(1.5msec) から 0.005sec(5.0msec) の範囲で、0.0005sec (0.5msec) の間隔毎に  $\alpha$  値がプロットされている。最大積算時間幅の変化に対して、試験体水位 300mm の 4 パラメータ評価の  $\alpha$  値は、最大積算時間幅 0.0015sec(1.5msec) から 0.004sec(4.0msec) の範囲で、試験体水位 2000mm の 4 パラメータ評価の  $\alpha$  値は、最大積算時間幅 0.0025sec(2.5msec) 以上で安定した値となっている。他のケースの  $\alpha$  値は全体的に安定している。

表 4 に  $\alpha$  値の評価結果を示す。表に示すように、S-2 炉心の 2 パラメータ評価と 3 パラメータ評価の  $\alpha$  値の差は 2%～11% である。S-1 炉心と同様に、S-2 炉心においても

中性子計数率が少なく、不感時間の影響は無視できるので、この差はデータのばらつきによる最小自乗フィッティングの誤差によるものと考えられる。

表4の3パラメータ評価と4パラメータ評価の差は、遅発中性子の効果を示している。ファインマン- $\alpha$ 法で測定される $\alpha$ 値は、実効増倍率が高くなるにしたがって小さくなり、中性子計数を評価する時間幅を長くとることが必要となる。また、重水減速体系は即発中性子寿命が長いため、軽水減速体系と比較して $\alpha$ 値は小さくなる。その結果、重水減速の高実効増倍率体系では、即発中性子によって決まる因子が飽和する前に遅発中性子の影響が現れ、Y値が一定値に漸近しなくなる。DCAにおける実験では、実効増倍率0.9以上で遅発中性子の影響が顕著になると報告されている<sup>3)</sup>。重水減速体系の測定では、実効増倍率0.990～0.998の範囲で、最大積算時間幅が1.5sec～2.5secと設定されているのに対して、今回の測定での最大積算時間幅は0.003sec(3msec)程度であり、遅発中性子の影響はほとんどない。表4に示されるように、3パラメータ評価と4パラメータ評価の $\alpha$ 値の差は、試験体水位300mmの結果を除けば11%～18%であり、2パラメータ評価と3パラメータ評価の $\alpha$ 値の差と同程度である。したがって、前述のように、この差はデータのばらつきによる最小自乗フィッティングの誤差によるものと考えられる。

S-2炉心でも、不感時間および遅発中性子の影響が小さいので、2パラメータ評価の結果を標準的な結果として検討に用いる。図16にS-2炉心の実効増倍率と $\alpha$ 値の関係を示す。図16の2パラメータ評価の結果では、実効増倍率(試験体水位)の上昇に対して $\alpha$ 値は明確に減少しており、合理的な結果となっている。実効増倍率が0.711(試験体水位300mm)と0.777(試験体水位500mm)および0.777(試験体水位500mm)と0.834(試験体水位2000mm)の $\alpha$ 値の差異、即ち、実効増倍率が0.711～0.834の範囲で0.05程度の差異を検出し明確に分離できることが確認できる。なお、参考として示した3パラメータ評価および4パラメータ評価でも、実効増倍率(試験体水位)の上昇に対して $\alpha$ 値は明確に減少しており、妥当な結果が得られている。

図17はスイープ数と $\alpha$ 値の関係を示している。図から、実効増倍率0.711～0.834(試験体水位300mm～2000mm)の $\alpha$ 値が安定し、明確に分離されるのに必要なスイープ数は約1200スイープである。その場合の全測定時間は、測定条件がS-1炉心と同一であるため、約2900sec( $\approx 2.4\text{sec} \times 1200 \approx 50\text{min}$ )である。

表7に示されているように、軽水減速体系であるS-2炉心では、実効増倍率0.711の $\alpha$ 値は約5600であり、重水減速体系の実効増倍率0.7の $\alpha$ 値が約1400であるのに比較して約4倍の大きさとなる。なお、測定に用いたゲート時間幅をS-2体系では $10\mu\text{sec}$ としており、重水減速体系における $200\mu\text{sec}$ の約1/20の大きさである。

### 3.3 S4-2炉心

S4-2炉心は、炉心中心部の試験体領域とその周囲のドライバー領域で構成されている。

試験体領域は S-2 炉心と同一の燃料構成で、ドライバー領域には 1.2wt%UO<sub>2</sub> 燃料クラスター 132 体が装荷されている。

図 18～図 25（偶数番）に S4-2 炉心の積算時間幅と Y 値の関係を示す。S4-2 炉心では、いずれの試験体水位についても積算時間幅 0.002sec(2msec)から 0.004sec(4msec) の間で、Y 値の立ち上がり部分は終了し、ほぼ一定値に漸近する。

図 18～図 25（奇数番）に最大積算時間幅と  $\alpha$  値の関係を示す。最大積算時間幅が 0.002sec(2msec)から 0.0055sec(5.5msec) の範囲で、0.0005sec(0.5msec) の間隔で  $\alpha$  値がプロットされている（ただし、試験体水位 2000mm の場合は、最大積算時間幅が 0.003sec(3msec)から 0.01sec(10msec) の範囲で、0.001sec(1msec) の間隔で  $\alpha$  値がプロットされている）。最大積算時間幅の変化に対して、試験体水位 300mm および試験体水位 500mm の 4 パラメータ評価の  $\alpha$  値は 0.003sec(3msec)以上で、他のケースの  $\alpha$  値は全体的に安定した値となっている。

表 5 に  $\alpha$  値の評価結果を示す。表に示されているように、2 パラメータ評価と 3 パラメータ評価の  $\alpha$  値の差は 8%～13% であり、S-1 炉心および S-2 炉心の結果と同程度の差である。S4-2 炉心では中性子計数率が 50cps～250cps（表 2）であり、S-1 炉心および S-2 炉心の中性子計数率 10cps 程度（表 2）に比べて大きいが、測定システムの不感時間の影響は S-1 炉心および S-2 炉心と同様に小さいことがわかる。

表 5 に示すように、3 パラメータ評価と 4 パラメータ評価の差は 1%～19% であり、遅発中性子の影響も小さい。

S4-2 炉心では、不感時間および遅発中性子の影響が小さいので、2 パラメータ評価の結果を標準的な結果として検討に用いる。図 26 に実効増倍率（試験体水位）と  $\alpha$  値との関係を示す。実効増倍率が 0.724（試験体水位 300mm）から 0.794（試験体水位 500mm）に増大しても、実効増倍率の増加に対して減少が見られない。しかし、実効増倍率が 0.794（試験体水位 500mm）から 0.870（試験体水位 2000mm）に増大した場合には、実効増倍率の増加に対して  $\alpha$  値の減少が明確であり、 $\alpha$  値に明確な差異が見られる。即ち、実効増倍率が 0.794 から 0.870 の範囲で、実効増倍率の差が 0.08 程度であれば、 $\alpha$  値を分離検知できることがわかる。参考として示した 3 パラメータ評価および 4 パラメータ評価の結果でも、2 パラメータ評価と同様の結果が得られている。

S4-2 炉心の測定では、ゲート時間幅を 20  $\mu$  sec～50  $\mu$  sec に設定しており、1 スイープ当たりの測定時間は 2.5sec～2.7sec となる。他の測定炉心に比べて、ゲート時間幅が 2 倍以上の設定となっているが、データの制御・転送時間に差はないので、他の測定炉心との 1 スイープ当たりの測定時間の差は小さい。図 27 にスイープ数と  $\alpha$  値の関係を示しており、実効増倍率 0.794（試験体水位 500mm）と実効増倍率 0.870（試験体水位 2000mm）の  $\alpha$  値が安定し、明確に分離されるスイープ数は約 500 である。その場合の全測定時間は約 1300sec ( $\approx 2.5\text{sec} \times 500 \approx 20\text{min}$ ) となる。

表 7 に示した軽水減速体系と重水減速体系の比較より、軽水減速体系である S4-2 炉心

の実効増倍率 0.794 の  $\alpha$  値は約 3600、実効増倍率 0.870 の  $\alpha$  値は約 2600 であり、各々、重水減速体系の実効増倍率 0.8 の  $\alpha$  値が約 950、実効増倍率 0.89 の  $\alpha$  値が約 540 であるのに比較して約 4 倍～5 倍の大きさとなる。S4-2 炉心の測定ではゲート時間幅は  $20\mu\text{sec}$ ～ $50\mu\text{sec}$  であり、重水減速体系のゲート時間幅  $200\mu\text{sec}$  に比べて、約 1/10～1/4 の大きさとなる。

図 16 の S-2 炉心の 2 パラメータ評価と図 26 の S4-2 炉心の 2 パラメータ評価の結果を比較すると、実効増倍率 0.8 以上における  $\alpha$  値に大きな差は見られず、ドライバー領域の燃料体の影響は小さい。したがって、次項の ATR 規格の MOX 燃料を装荷する実験では、ドライバー領域に燃料体が存在する場合のみについて測定を行った。

### 3.4 S4-4 炉心

S4-4 炉心は、炉心中心部の試験体領域とその周囲のドライバー領域で構成されている。試験体領域には ATR 規格の MOX (0.79wt%Pu-fissile) 燃料棒がピッチ  $2.2\text{cm}$  で 140 本装荷され、ドライバー領域には 1.2wt%UO<sub>2</sub> 燃料クラスター 132 体が装荷されている。

図 28～図 35 (偶数番) に積算時間幅と Y 値の関係を示す。S4-3 炉心では、積算時間幅が約  $0.002\text{sec}$ (2msec) で Y 値の立ち上がり部分が終了し、一定値に漸近し始める。

図 28～図 35 (奇数番) に最大積算時間幅と  $\alpha$  値の関係を示す。最大積算時間幅が  $0.0015\text{sec}$ (1.5msec) から  $0.005\text{sec}$ (5msec) の範囲で、 $0.0005\text{sec}$ (0.5msec) の間隔で  $\alpha$  値がプロットされている。試験体水位  $300\text{mm}$  の 4 パラメータ評価と試験体水位  $500\text{mm}$  および試験体水位  $1000\text{mm}$  の 3 パラメータ評価では、最大積算時間幅  $0.002\text{sec}$ (2msec) 前後で、また、試験体水位  $2000\text{mm}$  の評価では最大積算時間幅  $0.0035\text{sec}$ (3.5msec) 以下で、最大積算時間幅の変化に対して比較的安定した  $\alpha$  値が得られている。その他のケースの  $\alpha$  値は、多少ばらつきはあるが、最大積算時間幅の変化に対して全体的に安定している。

図 28～図 35 (偶数番) では、積算時間幅 0 で Y 値が負になっている。この現象は、炉心に中性子源 (Am-Be 起動用線源) を挿入して中性子計数率を増やしたウラン体系の測定や、中性子束の高いプルトニウム体系の測定で観測されており、検出器の不感時間の影響であることが報告されている<sup>3)</sup>。S4-4 炉心の計数率は  $1200\text{cps}$ ～ $2800\text{cps}$  (表 2) であり、ウラン燃料装荷炉心 (S-1 炉心、S-2 炉心、S4-2 炉心) の計数率の  $8\text{cps}$ ～ $250\text{cps}$  (表 2) に比べて大きく、積算時間幅 0 で Y 値が負になるのは不感時間の影響と推測される。なお、S4-4 炉心で計数率が大きいのは、プルトニウムの自発核分裂と  $(\alpha, n)$  反応の影響であり、未臨界状態においても中性子束が高い。

以上のように S4-4 炉心では不感時間の影響が顕著であるので、不感時間の補正項のある 3 パラメータと 4 パラメータによる評価のみを行い、 $\alpha$  値の評価結果を表 6 に示した。表に示されているように、3 パラメータ評価と 4 パラメータ評価の  $\alpha$  値の差は 3%～10% 程度で、遅発中性子の影響は小さい。

図 36 に実効増倍率（試験体水位）と  $\alpha$  値の関係を示す。図に示されている様に 4 パラメータ評価の結果は、3 パラメータ評価の結果に比べて、実効増倍率（試験体水位）の増加に対して  $\alpha$  値のばらつきが小さく、良好な結果となっている。遅発中性子の影響が小さいのにもかかわらず、数値計算では遅発中性子の項を含めた方が、良い結果が得られている。その妥当性については、今後検討が必要である。ここでは、 $\alpha$  値のばらつきが小さい 4 パラメータ評価の結果を標準的な結果として検討に使用する。図 36 に示された 4 パラメータ評価においては、実効増倍率が 0.686（試験体水位 500mm）と 0.753（試験体水位 2000mm）の間の  $\alpha$  値の差が明確であり、実効増倍率 0.686 と 0.753 の間の 0.06 程度の  $\alpha$  値の差を検知し分離できることが確認された。

S4-4 炉心の測定では、ゲート時間幅は  $10 \mu \text{sec}$  でウラン装荷炉心の S-1 炉心、S-2 炉心と同一であるため、1 スイープ当たりの測定時間は  $2.4\text{sec}$  である。図 37 はスイープ数と  $\alpha$  値の関係を示している。図に示されるように、実効増倍率 0.686（試験体水位 500mm）と実効増倍率 0.753（試験体水位 2000mm）の  $\alpha$  値が比較的安定し明確に分離されるのに必要なスイープ数は 3800 である。その場合の全測定時間は約  $9100\text{sec}$  ( $\approx 2.4\text{sec} \times 3800 \approx 150\text{min}$ ) となる。

表 7 に示されているように、MOX 燃料を装荷した軽水減速体系である S4-4 炉心の実効増倍率 0.623、0.686、0.753 の  $\alpha$  値は、各々、約 5500、約 5600、約 4800 である。MOX 燃料を装荷した重水減速体系の実効増倍率 0.62、0.68、0.76 の  $\alpha$  値が、各々、1200、1000、760 であるのと比較して、約 5 倍～約 6 倍の大きさとなる。S4-4 炉心で設定したゲート時間幅は  $10 \mu \text{sec}$  であり、ウラン燃料装荷炉心と同様に、重水減速体系のゲート時間幅  $100 \mu \text{sec}$  に比べて小さい。

### 3.5 中性子線源挿入の影響

DCA の炉心中央部の試験体領域にウラン燃料を装荷した炉心は体系が小さく、また重水と比較して軽水の中性子吸収が大きいため、未臨界状態における中性子計数率が低くなる（8cps～250cps）。ここでは、外部中性子線源の挿入によって中性子計数率を増やし、 $\alpha$  値の測定値に対する影響を評価した。中性子線源には  $30\text{MBq}$  の Cf を使用し、軸方向は試験体水位の中心位置と同レベル、径方向は内側 1 列目（試験体中心より  $400\text{mm}$ ）のカランドリア管内に設置した。測定条件を表 8 に示す。積算時間幅等の条件は中性子線源を挿入しない場合と同一とした。

図 38～図 41 に積算時間幅と Y 値の関係および最大積算時間幅と  $\alpha$  値の関係を示す。試験体水位  $1000\text{mm}$  の場合は、積算時間幅が  $0.002\text{sec}$  で Y 値の立ち上がり部分が終了し、ほぼ一定値に漸近する。試験体水位  $500\text{mm}$  の場合の Y 値は一定値に漸近していない（測定系の異常かと思われる）。いずれの測定結果についても線源を挿入しない場合の結果と異なり、積算時間幅 0 で Y 値は負の値となっている。これは、前述のように中性子線源を挿入することにより、中性子計数率が 8cps～20cps から  $1000\text{cps}$  に増加し、

測定システムが有する不感時間の影響が現れたためである。なお、中性子線源を挿入した全ケースにおいて、不感時間の影響によって積算時間幅が 0 の近傍部分で Y 値が一度減少する部分が見られるため、その部分のデータを削除し最小の Y 値を 0.0 にシフトして  $\alpha$  値を評価した。

表 9 に中性子線源を挿入した場合の  $\alpha$  値の評価結果と、中性子線源を挿入しない場合の  $\alpha$  値の評価結果との比較を示す。図 42 および図 43 に、中性子源を挿入しない場合と挿入した場合の実効増倍率に対する  $\alpha$  値およびスイープ数に対する  $\alpha$  値を示す。表 9 および図 42 に示されるように、線源挿入時と線源未挿入時の  $\alpha$  値の差は 10%~15% となり、大きな差は発生しなかった。また、図 43 に示されるように、中性子線源を挿入する場合は、挿入しない場合よりも少ないスイープ数で安定した  $\alpha$  値が得られた。

以上の結果から、中性子線源等によって計数率が増加した状態で  $\alpha$  値を評価する場合にも、不感時間を補正することによって、中性子計数率が小さい場合と同程度の  $\alpha$  値が求まることが確認された。更に、中性子線源を挿入し計数効率を上げることによって、測定時間を短縮できることが確認された。

もともと中性子計数率が高い重水減速体系では、中性子線源を加えることによって、測定システムの不感時間の影響が増大し、良い結果が得られないことが示されており<sup>3)</sup>、上記の結果と併せると、測定に適した中性子束レベルが存在することがわかる。

### 3.6 検出器の設定位置の影響

S-2 炉心の減速材水位 2000mm の体系を対象として、検出器の設定位置の違いによって測定で得られる  $\alpha$  値が異なるかどうかを評価した。検出器(有効長 500mm)の有感中心を試験体水位 2000mm の中心の 1000mm に設定した場合を基準ケースとし、検出器の軸方向位置を基準ケースから 750mm 下方(検出器の有感中心を試験体水位の 250mm の位置)とした測定(検討ケース)を実施して比較した。

図 44 に積算時間幅と Y 値の関係を示す。積算時間幅 0.002sec(2msec) で Y 値の立ち上がり部分が終了している。図 45 は最大積算時間幅と  $\alpha$  値の関係を示している。最大積算時間幅に対する  $\alpha$  値の変動は小さく、安定した結果が得られている。表 10 に基準ケースと検討ケースの  $\alpha$  値の比較を示す。基準ケースと検討ケースの  $\alpha$  値には 22% 差があり、検出器の位置の効果が無視できないことがわかる。この結果のみから、検出器の位置の効果を判断するにはデータ量が不十分であり、更に詳細な測定によって検出器の位置の効果を確認する必要がある。

### 3.7 計算結果との比較

#### (1) 計算手法

ファインマン- $\alpha$  法で測定される  $\alpha$  値は次式で定義される。

$$\alpha = (\beta_{\text{eff}} - \rho) / \Lambda$$

$$\rho = 1 - 1 / k_{\text{eff}}$$

$$\Lambda = \ell / k_{\text{eff}}$$

ここで、

$\beta_{\text{eff}}$  : 実効遅発中性子割合

$\Lambda$  : 中性子生成時間(sec.)

$\ell$  : 即発中性子寿命(sec.)

ここでは、2次元輸送計算コード TWODANT を用いる手法と3次元モンテカルロ法コード KENO V.a を用いる手法の2種類の方法によって  $\alpha$  値を計算し、測定値との比較から計算手法の妥当性を検討した。TWODANT を用いる手法では、TWODANT で得られる中性子束を用いて、摂動論の定義式から  $\Lambda$  (中性子生成時間) および  $\beta_{\text{eff}}$  (実効遅発中性子割合) を求め  $\alpha$  値を計算した。KENO V.a を用いる手法では、SCALE4.2 コードシステム内蔵の KENO V.a を用いて  $\Lambda$  (中性子生成時間) を求め  $\alpha$  値を計算した。

TWODANT を用いる手法では、 $\Lambda$  と  $\beta_{\text{eff}}$  を以下の摂動論の定義式<sup>⑨</sup>に基づいて求め  $\alpha$  値を計算した。以下では、TWODANT を用いて  $\alpha$  値を評価する手法を TWODANT 手法と称する。

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{\int_{v, g, g'} \chi_d(g') \phi^+(g') \times \beta(g) v \Sigma_f(g) \phi(g) dg dg' dv}{\int_{v, g, g'} \chi_p(g') \phi^+(g') \times v \Sigma_f(g) \phi(g) dg dg' dv}$$

$$\Lambda = \frac{\int_{v, g} V(g)^{-1} \times \phi^+(g') \phi(g) dg dv}{\int_{v, g, g'} \chi_p(g') \phi^+(g') \times v \Sigma_f(g) \phi(g) dg dg' dv}$$

$$\ell = \Lambda \times k_{\text{eff}}$$

ここで、

$\phi, \phi^+$  : TWODANT コードで計算

$v \Sigma_f$  : SCALE4.2 コードシステムで計算

KENO V.a コードの内部では、下記の(3.1)式および(3.2)式に基づいて2種類の値が計算される<sup>⑩</sup>。(3.1)式で計算される値は、life time という名称で出力され、「発生した中性子が吸収または漏れによって消失するまでの時間」を意味する。(3.2)式で計算される値は、generation time という名称で出力され、「発生した中性子が核分裂を起こすまでの時間」を意味する。

$$\overline{t}_{loss} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{abs}} t_{abs,i} + \sum_{j=1}^{N_{leak}} t_{leak,j}}{N_{abs} + N_{leak}} \cdots (3.1)$$

ここで、

$\overline{t}_{loss}$  : 中性子が消滅するまでにかかった平均時間

$N_{abs}$  : 吸收された中性子の数

$N_{leak}$  : 漏れた中性子の数

$t_{abs,i}$  : i 番目の中性子が吸收されるまでにかかった時間

$t_{leak,j}$  : j 番目の中性子が漏れるまでにかかった時間

$$\overline{t}_{gen} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{fiss}} V_i t_{fiss,i}}{\sum_{i=1}^{N_{fiss}} V_i} \cdots (3.2)$$

ここで、

$\overline{t}_{gen}$  : 中性子を生成するまでの平均時間

$N_{fiss}$  : 核分裂数

$V_i$  : i 番目の核分裂で放出される中性子数

$t_{fiss,i}$  : i 番目の核分裂を起こすまでにかかった時間

KENO V.a を用いる手法では、下記の 3 種類の手法で  $\Lambda$  を求めた。

① (3.1)式で計算される値を  $\ell$  として、 $\Lambda = \ell / k_{eff}$  から  $\Lambda$  を求める。

② (3.2)式で計算される値を  $\Lambda$  として使用する。

③ (3.2)式で計算される値を  $\ell$  として、 $\Lambda = \ell / k_{eff}$  から  $\Lambda$  を求める。

以下では、①の手法を KENO 手法 1、②の手法を KENO 手法 2、③の手法を KENO 手法 3 と称する。

各手法で  $\alpha$  値を算出する際に必要である  $\beta_{eff}$  は TWODANT 手法で求めた値を、実効増倍率は KENO V.a で求めた値を共通に使用した。

## (2) 計算結果

各測定炉心の TWODANT 手法によって評価した  $\alpha$  値および  $\alpha$  値の評価に使用した実効増倍率、実効遅発中性子割合、即発中性子寿命、中性子生成時間を表 11 および図 46～図 50 に示す。各測定炉心の KENO 手法によって評価した  $\alpha$  値の結果を表 12～表 14 に示す。TWODANT 手法と KENO 手法の  $\alpha$  値の比較を表 15 に、即発中性子寿命および中性子生成時間の比較を測定炉心ごとに図 51～図 58 に示す。

### ①解析手法間の比較

表 15 に示すように、TWODANT 手法と KENO 手法 1 によって計算された  $\alpha$  値の差は 39%~59%、TWODANT 手法と KENO 手法 2 によって計算された  $\alpha$  値の差は 3%~35%、TWODANT 手法と KENO 手法 3 によって計算された  $\alpha$  値の差は 23%~45% である。実効増倍率と実効遅発中性子割合は同一の値を使用しているので、TWODANT 手法と KENO 手法間の  $\alpha$  値の差は、中性子生成時間（即発中性子寿命）の評価法の違いに起因する。KENO 手法 1 と KENO 手法 3 の中性子生成時間（即発中性子寿命）は、図 51~図 58 に示すように全ケースにおいて TWODANT 手法に比べて大きいため、 $\alpha$  値は全ケースで TWODANT 手法に比べて小さくなる。

両手法の即発中性子寿命（中性子生成時間）の差は、以下で述べるように、KENO 手法で選択した即発中性子寿命（中性子生成時間）と TWODANT 手法で用いる即発中性子寿命（中性子生成時間）の物理的意味の不整合から生じると考えられる。なお、結果に与える影響は小さいと考えられるが、TWODANT 手法と KENO 手法では、空間分布の取扱いが次のように異なる。TWODANT 手法では、空間分布を基本モードと仮定して計算しているため、未臨界状態における即発中性子寿命（中性子生成時間）は高次モードを含んだ実際の値より大きく評価される。一方、KENO 手法で評価される値は、空間の高次モードが考慮された値である。

一般に動特性方程式で用いられ、 $\alpha$  値の計算の際に使用される即発中性子寿命は(3-3)式で定義されており、物理的には「核分裂で発生した中性子が吸収されるまでの平均時間」を意味する。その場合の中性子生成時間は(3-4)式で表せられ、物理的には「現世代の中性子数を再生するのに必要な時間」を意味する。

$$\ell = \frac{1}{(v\Sigma_a)(1 + L^2 B_g^2)} \quad \cdots (3-3)$$

$$\Lambda = \ell / k = \frac{1}{v v \Sigma_f} \quad (k = \frac{v \Sigma_f / \Sigma_a}{1 + L^2 B_g^2}) \quad \cdots (3-4)$$

一方、KENO V.a の計算において、3.7(1)の(3-1)式を用いて得られる値は「核分裂で発生した中性子が吸収または漏れによって消滅するまでの平均時間」を意味し、3.7(1)の(3-2)式を用いて得られる値は「発生した中性子が核分裂を起こすまでの平均時間」を意味している。

KENO 手法 1 では、(3-1)式を用いて得られる値と定義式(3-3)から得られる即発中性子寿命を等しいと仮定している。前者には、漏れによって消滅するまでの平均時間が、計算式 ((3-1)式) の第 2 項に含まれている。後者は、吸収によって消

滅するまでの時間に、漏れを逃れる中性子数の割合を掛けることによって、漏れの効果を補正しているが、中性子数の割合を考慮するだけで、漏れによって消滅するまでの平均時間（(3-1)式の第2項に相当する部分）を考慮していない。そのため、両者の物理的意味は異なり値は一致しない。KENO 手法 2 では、(3-2)式を用いて得られる値と定義式(3-4)から得られる中性子生成時間を等しいと仮定している。前者は、「発生した中性子が核分裂をおこすまでの時間」であり、後者は、「現世代の中性子数を再生するのに必要な時間」であるため、実効増倍率が 1.0 の場合以外は両者は一致しない。KENO 手法 3 は、(3-2)式を用いて得られる値と定義式(3-3)から得られる即発中性子寿命を等しいと仮定している。前者は、「発生した中性子が核分裂をおこすまでの時間」、後者は、「発生した中性子が吸収されるまでの時間」という違いがあり、両者は物理的意味が異なる値である。

以上に示したように、3種類の KENO 手法のいずれも、即発中性子寿命（中性子生成時間）を求めるための妥当な手法とは言えない。最も妥当な KENO 手法は、KENO コードの内部で、(3-1)式の第2項を除いた計算式によって値を計算させ、その値を即発中性子寿命とする手法であると推測される。

上記の KENO コードの一部を改良して即発中性子寿命を計算する手法（以下では、KENO 手法 4 と称する。）によって  $\alpha$  値を計算した。KENO 手法 4 を用いて計算した  $\alpha$  値の結果を表 16 および図 59 に、TWODANT 手法との  $\alpha$  値の比較を表 17 に示す。即発中性子寿命および中性子生成時間の TWODANT 手法との比較を図 60～図 63 に示す。表 17 に示すように、TWODANT 手法と KENO 手法 4 によって計算された  $\alpha$  値の差は 2%～15% であり、表 15 に示している他の KENO 手法に比べて、TWODANT 手法との  $\alpha$  値の差は小さい。図 63～図 66 に示すように、TWODANT 手法と KENO 手法 4 の即発中性子寿命（または中性子生成時間）は、炉心の種類によらず同程度の値である。

以上の結果から、KENO 手法 4 は 4種類の KENO 手法の中では最も妥当な手法であると判断される。以降の検討では、TWODANT 手法と KENO 手法 4 の結果を用いる。

## ②炉心間の比較

表 11 および図 46 に示すように、TWODANT 手法による  $\alpha$  計算値の炉心間の比較では、S-1 炉心と S-2 炉心の結果を同一実効増倍率で比較した場合、 $\alpha$  値に明確な差が見られ、S-1 炉心の方が  $\alpha$  値は小さい。実効増倍率が比較的一致している S-1 炉心の試験体水位 1000mm（実効増倍率 0.728）と S-2 炉心の試験体水位 300mm（実効増倍率 0.711）を比較すると、S-1 炉心の  $\alpha$  値は S-2 炉心の  $\alpha$  値の約 0.6 倍である。表 11 および図 48～図 50 に示されているように、S-1 炉心と S-2 炉心の実効遅発中性子割合はほぼ一致しており、S-1 炉心の即発中性子寿命

(中性子生成時間) は S-2 炉心の約 1/0.6 倍である。即ち、 $\alpha$  値の差は即発中性子寿命 (中性子生成時間) の違いによって生じていることが判る。

S-1 炉心は S-2 炉心の燃料棒本数を 140 本から 72 本に減らし、燃料格子ピッチを 2.2cm から 3.111cm に変えた炉心である。S-1 炉心の  $\alpha$  値が、同程度の実効増倍率の S-2 炉心の  $\alpha$  値より小さくなるのは、燃料棒の減少によって核分裂によって発生する中性子の割合が減少し、即発中性子寿命 (中性子生成時間) が長くなるためと考えられる。

S4-4 炉心は、S4-2 炉心の炉心中心部の試験体領域に、ウラン燃料の代わりに MOX 燃料を装荷した炉心である。表 11 および図 46 に示すように、S4-2 炉心と比較して、同程度の実効増倍率の S4-4 炉心の  $\alpha$  値は小さく、試験体領域に装荷した燃料の種類の違いによって生じる差が明確に現れている。実効増倍率の差が小さい S4-2 炉心の試験体水位 300mm (実効増倍率 0.724) と S4-4 炉心の試験体水位 1000mm (実効増倍率 0.735) を比較すると、S4-4 炉心の  $\alpha$  値は S4-2 炉心の  $\alpha$  値の約 0.7 倍である。表 11 および図 48～図 50 に示されているように、S4-4 炉心の即発中性子寿命 (中性子生成時間) は S4-2 炉心の約 0.8 倍である。なお、装荷されている燃料の種類が異っているため、実効遅発中性子割合に差が見られるが、 $\alpha$  値の算出において実効遅発中性子割合の寄与は小さいので、その差は  $\alpha$  値にほとんど影響を与えない。したがって、S4-2 炉心と S4-4 炉心の  $\alpha$  値の差は、即発中性子寿命 (中性子生成時間) の違いによるものである。

### ③ ドライバー領域の寄与

S4-2 炉心は、炉心中央部の試験体領域にのみ燃料を装荷した S-2 炉心の周りのドライバー領域にクラスター燃料を装荷した炉心である。S4-2 炉心と S-2 炉心の  $\alpha$  値の差はドライバー領域に燃料体が存在する影響である。図 46 に示されているように、TWODANT 手法によって計算された S4-2 炉心と S-2 炉心の  $\alpha$  値には、ほとんど差が見られず、ドライバー領域に燃料体が存在する影響は現れない。一方、図 59 に示されている KENO 手法 4 による結果では、S4-2 炉心の  $\alpha$  値は S-2 炉心に比べて 35% 程度小さい。TWODANT 手法ではドライバー領域の燃料体を均質化して評価しているが、KENO 手法 4 では燃料体配列を詳細にモデル化して計算している。したがって、この TWODANT 手法と KENO 手法 4 の結果の違いは、ドライバー領域の燃料体のモデル化方法の相違に起因すると推測される。

### (3) 測定値と計算値の比較

$\alpha$  値の計算値と測定値の比較および C/E 値 (計算値/測定値) を表 18 および図 64 ～図 71 に示す。 $\alpha$  値の測定値は、S-1 炉心、S-2 炉心、S4-2 炉心では 2 パラメータ評価、S4-4 炉心では 4 パラメータ評価の結果を採用した。 $\alpha$  値から求めた実効増倍

率の計算値と測定値の比較を表 19 に示している。表の実効増倍率の測定値は、測定で得られた  $\alpha$  値と、計算で得られた即発中性子寿命（または中性子生成時間）と実効遅発中性子割合から求めている。実効増倍率の計算値は、計算で得られた  $\alpha$  値と即発中性子寿命（または中性子生成時間）と実効遅発中性子割合から求めている。表 18 および図 64～図 71 に示すように、S-1 炉心の試験体水位 500mm と S4-2 炉心の試験体水位 300mm の場合については、 $\alpha$  値の測定値と計算値の差が極端に大きいため、以下の検討から除外する。

表 18 および図 64～図 71 に示すように、S-1 炉心の場合を除けば、実効増倍率の上昇に対する  $\alpha$  値の変化の傾向について、TWODANT 手法と KENO 手法 4 の測定値と計算値は概ね一致している。TWODANT 手法の  $\alpha$  値の C/E 値は 0.82～1.33 の範囲、KENO 手法 4 の  $\alpha$  値の C/E 値は 0.77～1.34 の範囲であり、測定値と計算値の間に大きな差は生じていない。また、表 19 に示すように、 $\alpha$  値の測定値と計算値を実効増倍率に変換して比較した場合、TWODANT 手法の  $\alpha$  値から評価した実効増倍率の C/E 値は 0.93～1.06 の範囲、KENO 手法 4 の  $\alpha$  値から評価した実効増倍率の C/E 値は 0.93～1.13 の範囲となっている。

以上の結果から、両手法を用いて  $\alpha$  値を十分精度良く評価できることが確認された。

#### 4. まとめと今後の予定

核燃料施設において一般的な軽水減速体系に対して、ファインマン・ $\alpha$  法の測定手法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、D C A の未臨界度測定試験炉心の軽水減速体系を対象に未臨界度測定実験を実施した。測定結果から下記の結論が得られた。

- (1) ウラン燃料を装荷した軽水減速体系において、実効増倍率が 0.629～0.870 の範囲内で、現状の測定システムによって  $\alpha$  値の測定が可能であり、実効増倍率の約 0.05～0.1 程度の差を検知できる。
- (2) MOX 燃料を装荷した軽水減速体系については、実効増倍率が 0.686～0.753 の範囲内で、 $\alpha$  値の測定が可能であり、実効増倍率の約 0.06 程度の差を検知できる。
- (3) 今回測定した軽水減速体系の  $\alpha$  値は、実効増倍率が 0.629～0.870 の範囲内で重水減速体系の  $\alpha$  値に比べて、約 4 倍以上の大きさになる。
- (4) 外部中性子線源を挿入し中性子計数率を高くして  $\alpha$  値を測定すると、不感時間の影響を生じるが、不感時間を補正することによって、実効増倍率が 0.690～0.728 の範囲で外部中性子線源を挿入しない場合と同程度の  $\alpha$  値が求まる。中性子計数率が極端に低い場合には、外部中性子線源を挿入することによって計数効率が上がり、測定時間を短縮できる。
- (5) 輸送計算コード TWODANT を用いて評価した  $\alpha$  値から求めた実効増倍率の計算値と測定値の差は 7% 以下である。モンテカルロ計算コード KENO V.a を用いて評価した  $\alpha$  値から求めた実効増倍率の計算値と測定値の差は 13% 以下である。両手法を用いて  $\alpha$  値を精度良く評価できることが確認された。

今後は、高富化度の MOX 燃料を装荷した軽水減速体系を対象に、より広範囲の反応度（実効増倍率 0.5～0.8）における  $\alpha$  値の評価と、検出器の設定位置による影響の詳細な検討を行なう予定である。同時に、短い測定時間で精度の良い結果を得るために測定システムの改良を進める。

### 謝辞

本研究の実施においては、報告書執筆者の他、実験の実施、原子炉運転、データ処理、炉心計算等において、御協力を頂いた臨界工学試験室の相原永史 室長、八木昭 主査研究員、羽様平 研究員、上園洋一 研究員ならびに協力会社である原子力システム（株）の有賀正訓 氏、原子力技術（株）の柳沢真哉 氏、平賀勝志 氏、海外研修生の司勝義 氏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- $\alpha$ 法による実効増倍率測定」、日本原子力学会  
1993年春の年会 予稿集(1993) A15
- 2) 林津雄厚他、「ファインマン法による未臨界度測定の基礎検討」、日本原子力学会  
1993年春の年会 予稿集(1993) A16
- 3) 大谷暢夫、「ファインマン- $\alpha$ 法による実効増倍率測定(2) 中性子バックグラウンドの  
影響」、日本原子力学会 1993年秋の大会 予稿集(1993) E23
- 4) 大谷暢夫、「ファインマン- $\alpha$ 法による未臨界度モニターの開発」、日本原子力学会  
1994年秋の大会 予稿集(1994) G33
- 5) 受託研究「ファインマン- $\alpha$ 法による実効増倍率測定データの理論的検討（II）」  
報告書、京都大学原子炉実験所(1995.3)
- 6) 受託研究「ファインマン- $\alpha$ 法による実効増倍率測定データの理論的検討」  
報告書、京都大学原子炉実験所(1994.3)
- 7) 受託研究「ファインマン- $\alpha$ 法による実効増倍率測定データの理論的検討（III）」  
報告書、京都大学原子炉実験所(1996.3)

表1 測定炉心構成

炉心	構成
S-1	試験体領域 : 2.7wt%UO <sub>2</sub> 燃料棒 72 本 ドライバー領域 : 燃料無装荷
S-2	試験体領域 : 2.7wt%UO <sub>2</sub> 燃料棒 140 本 ドライバー領域 : 燃料無装荷
S4-2	試験体領域 : 2.7wt%UO <sub>2</sub> 燃料棒 140 本 ドライバー領域 : 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 ドライバー領域 : 1.2wt%UO <sub>2</sub> 燃料クラスター132 体

表2 測定ケースと測定条件

炉心	試験体減速材水位 (mm)	実効 増倍率 (計算値)	検出器の 径と本数	検出器軸中心 の水位下端か らの距離(mm)	計数 率 (cps)	ゲート時 間幅 (μ sec)	スイープ 数
S-1	500	0.693	2in φ × 1	250	10	10	2000
	1000	0.728	〃	500	20	10	2000
S-2	300	0.711	〃	250	10	10	2000
	500	0.777	〃	250	20	10	2000
	2000	0.834	〃	1000	25	10	2000
S4-2	300	0.724	2in φ × 1	250	50	20	2800
	500	0.794	〃	250	90	20	4000
	1000	0.845	〃	500	240	20	4000
	2000	0.870	〃	1000	250	50	300
S4-4	300	0.623	2in φ × 1	250	1200	10	5000
	500	0.686	〃	250	1800	10	4800
	1000	0.735	〃	250	2400	10	5000
	2000	0.753	〃	1000	2800	10	4000

表3  $\alpha$  の測定結果 (S-1 炉心)

試験体減速材水位 (mm)	実効増倍率 (計算値)	2パラメータ ((A):基本式)	3パラメータ ((B):不感時間補正)	4パラメータ ((C):不感時間補正と 遅発中性子補正)	(B)/(A)	(C)/(B)
500	0.693	6561±380	5290±535	—	0.81	—
1000	0.728	4533±285	5124±517	—	1.13	—

表4  $\alpha$  の測定結果 (S-2 炉心)

試験体減速材水位 (mm)	実効増倍率 (計算値)	2パラメータ ((A):基本式)	3パラメータ ((B):不感時間補正)	4パラメータ ((C):不感時間補正と 遅発中性子補正)	(B)/(A)	(C)/(B)
300	0.711	5622±311	4986±369	6451±797	0.89	1.29
500	0.777	4185±110	4114±175	3679±280	0.98	0.89
2000	0.834	3121±74	3029±109	2481±288	0.97	0.82

表 5  $\alpha$  の測定結果 (S 4 - 2 炉心)

試験体減速材水位 (mm)	実効増倍率 (計算値)	2パラメータ ((A):基本式)	3パラメータ ((B):不感時間補正)	4パラメータ ((C):不感時間補正と 遅発中性子補正)	(B)/(A)	(C)/(B)
300	0.724	3626±94	3781±163	3760±258	1.04	0.99
500	0.794	3628±73	3908±126	4639±236	1.08	1.19
1000	0.845	2747±24	2837±35	3304±62	1.03	1.16
2000	0.870	2617±85	2945±112	2988±177	1.13	1.01

表 6  $\alpha$  の測定結果 (S 4 - 4 炉心)

試験体減速材水位 (mm)	実効増倍率 (計算値)	3パラメータ ((A):不感時間補正)	4パラメータ ((B):不感時間補正と遅発 中性子補正)	(B)/(A)
300	0.623	5714±243	5520±365	0.97
500	0.686	5061±151	5579±307	1.10
1000	0.735	5779±182	5294±258	0.92
2000	0.753	4639±132	4777±221	1.03

表 7 軽水減速体系と重水減速体系の比較

体系		実効増倍率	検出器1本当たりの計数率 (cps)	ゲート時間幅 ( $\mu$ sec)	データ転送時間を除いた測定時間(min)	即発中性子減衰定数(sec <sup>-1</sup> )
軽水減速体系	ウラン燃料	S-1	0.693	10	10	2.7 6561±380
			0.728	20	10	2.7 4533±285
		S-2	0.711	10	10	2.7 (約 1.0) 5622±311 (6440±502)
			0.777	20	10	2.7 4185±110
			0.834	25	10	2.7 (約 1.0) 3121±74 (3965±138)
		S4-2	0.724	50	20	7.6 3626±94
			0.794	90	20	10.9 (約 1.0) 3628±73 (4591±290)
			0.845	240	20	10.9 2747±24
			0.870	250	50	2.0 (約 1.0) 2617±85 (2887±100)
	MOX燃料	S4-4	0.623	1200	10	6.8 5520±365
			0.686	1800	10	6.6 5579±307
			0.735	2400	10	6.8 5294±258
			0.753	2800	10	5.5 (約 1.0) 4777±221 (4061±427)
重水減速体系	ウラン燃料 <sup>1)</sup>	0.6	230	200	5.7	2090±55
		0.7	340	200	9.8	1411±14
		0.8	510	200	4.9	949±10
		0.89	1140	200	5.7	541±4
	MOX燃料 <sup>2)</sup>	0.62	15000	100	—	1189
		0.68	23000	100	—	1032
		0.72	27000	100	—	903
		0.76	32000	100	—	757

1) 参考文献 1) 参照

2) 参考文献 3) 参照

表 8 中性子線源挿入の影響評価の検討ケース

体系	試験体減速材水位 (mm)	実効 増倍率 (計算値)	検出器の 径と本数	検出器軸中心 の水位下端か らの距離(mm)	計数 率 (cps)	ゲート時 間幅 ( $\mu$ sec)	スイープ 数
S-1	500	0.693	2in. $\phi \times 1$	250	1000	10	2000
	1000	0.728	"	500	1500	10	2800

表 9 中性子線源挿入の影響

体系	試験体減速材 水位(mm)	実効増倍率 (計算値)	中性子源未挿入 (A)	中性子源挿入 (B)	(B)/(A)
S-1	500	0.693	6561±380	5598±736	0.85
	1000	0.728	5124±517	4613±278	0.90

表 10 検出器の設定位置の影響

体系	試験体減速材 水位(mm)	検出器中心位置 (水位下端からの距離 : mm)		(B)/(A)
		1000 ((A):基準ケース)	250 ((B):検討ケース)	
S-2	2000	3121±74	3813±87	1.22

表 11  $\alpha$  の計算結果(TWODANT 手法)

体系	試験体減速材水位 (cm)	実効増倍率 $K_{\text{eff}}$	実効遅発中性子割合 $\beta_{\text{eff}}$	中性子生成時間 $\Lambda(\text{sec})$	即発中性子寿命 $\ell(\text{sec})$	即発中性子減衰定数 $\alpha(\text{sec}^{-1})$
S-1	300	0.6293	0.009026	1.203E-4	7.570E-5	4970
	500	0.6929	0.008804	1.077E-4	7.429E-5	4257
	1000	0.7283	0.008650	1.023E-4	7.451E-5	3733
	2000	0.7409	0.008595	1.010E-4	7.488E-5	3539
S-2	300	0.7114	0.009173	6.193E-5	4.406E-5	6700
	500	0.7772	0.008940	5.471E-5	4.252E-5	5404
	1000	0.8204	0.008786	5.131E-5	4.209E-5	4437
	2000	0.8341	0.008729	5.059E-5	4.220E-5	4103
S4-2	300	0.7237	0.009094	6.161E-5	4.459E-5	6344
	500	0.7945	0.008831	5.540E-5	4.402E-5	4828
	1000	0.8448	0.008621	5.311E-5	4.487E-5	3621
	2000	0.8696	0.008513	5.334E-5	4.638E-5	2971
S4-4	300	0.6299	0.005465	9.115E-5	5.742E-5	6702
	500	0.6858	0.005288	8.278E-5	5.677E-5	5598
	1000	0.7347	0.005162	7.961E-5	5.849E-5	4601
	2000	0.7528	0.005104	7.972E-5	6.001E-5	4183

表 12  $\alpha$  の計算結果(KENO 手法 1)

体系	試験体減速材水位 (cm)	実効増倍率 $K_{\text{eff}}$	実効遅発中性子割合 $\beta_{\text{eff}}$	中性子生成時間 $\Lambda(\text{sec})$	即発中性子寿命 $\ell(\text{sec})$	即発中性子減衰定数 $\alpha(\text{sec}^{-1})$
S-1	300	0.6293	0.009023	2.444E-4	1.538E-4	2447
	500	0.6929	0.008804	2.276E-4	1.577E-4	1986
	1000	0.7283	0.008650	2.234E-4	1.627E-4	1709
	2000	0.7409	0.008595	2.259E-4	1.674E-4	1586
S-2	300	0.7114	0.009173	1.448E-4	1.030E-4	2865
	500	0.7772	0.008940	1.297E-4	1.008E-4	2279
	1000	0.8204	0.008786	1.240E-4	1.017E-4	1836
	2000	0.8341	0.008729	1.238E-4	1.033E-4	1677
S4-2	300	0.7237	0.009094	1.040E-4	7.526E-5	3759
	500	0.7945	0.008831	9.395E-5	7.464E-5	2847
	1000	0.8448	0.008621	9.023E-5	7.623E-5	2132
	2000	0.8696	0.008513	9.271E-5	8.062E-5	1709
S4-4	300	0.6229	0.005465	1.402E-4	8.731E-5	4357
	500	0.6858	0.005288	1.308E-4	8.968E-5	3543
	1000	0.7347	0.005162	1.266E-4	9.298E-5	2893
	2000	0.7528	0.005104	1.297E-4	9.761E-5	2571

表 13  $\alpha$  の計算結果(KENO 手法 2)

体系	試験体減速材水位 (cm)	実効増倍率 $K_{eff}$	実効遅発中性子割合 $\beta_{eff}$	中性子生成時間 $\Lambda(sec)$	即発中性子寿命 $\ell(sec)$	即発中性子減衰定数 $\alpha(sec^{-1})$
S-1	300	0.6293	0.009023	9.977E-5	6.279E-5	5994
	500	0.6929	0.008804	9.926E-5	6.879E-5	4553
	1000	0.7283	0.008650	9.841E-5	7.167E-5	3879
	2000	0.7409	0.008595	9.767E-5	7.236E-5	3669
S-2	300	0.7114	0.009173	5.910E-5	4.204E-5	7022
	500	0.7772	0.008940	5.754E-5	4.472E-5	5139
	1000	0.8204	0.008786	5.676E-5	4.657E-5	4011
	2000	0.8341	0.008729	5.615E-5	4.683E-5	3697
S4-2	300	0.7287	0.009094	7.845E-5	5.677E-5	4982
	500	0.7945	0.008831	7.830E-5	6.221E-5	3416
	1000	0.8448	0.008621	8.094E-5	6.838E-5	2377
	2000	0.8696	0.008513	8.220E-5	7.148E-5	1928
S4-4	300	0.6229	0.005465	9.784E-5	6.094E-5	6243
	500	0.6858	0.005288	9.978E-5	6.843E-5	4645
	1000	0.7347	0.005162	1.026E-4	7.538E-5	3570
	2000	0.7528	0.005104	1.051E-4	7.912E-5	3173

表 14  $\alpha$  の計算結果(KENO 手法 3)

体系	試験体減速材水位 (cm)	実効増倍率 $K_{\text{eff}}$	実効遅発中性子割合 $\beta_{\text{eff}}$	中性子生成時間 $\Lambda(\text{sec})$	即発中性子寿命 $\ell(\text{sec})$	即発中性子減衰定数 $\alpha(\text{sec}^{-1})$
S-1	300	0.6293	0.009023	1.585E-4	9.977E-5	3772
	500	0.6929	0.008804	1.433E-4	9.926E-5	3155
	1000	0.7283	0.008650	1.351E-4	9.841E-5	2825
	2000	0.7409	0.008595	1.318E-4	9.767E-5	2718
S-2	300	0.7114	0.009173	8.308E-5	5.910E-5	4995
	500	0.7772	0.008940	7.403E-5	5.754E-5	3994
	1000	0.8204	0.008786	6.918E-5	5.676E-5	3291
	2000	0.8341	0.008729	6.732E-5	5.615E-5	3084
S4-2	300	0.7237	0.009094	1.084E-4	7.845E-5	3605
	500	0.7945	0.008831	9.855E-5	7.830E-5	2714
	1000	0.8448	0.008621	9.581E-5	8.094E-5	2008
	2000	0.8696	0.008513	9.453E-5	8.220E-5	1677
S4-4	300	0.6229	0.005465	1.571E-4	9.784E-5	3889
	500	0.6858	0.005288	1.455E-4	9.978E-5	3185
	1000	0.7347	0.005162	1.397E-4	1.026E-4	2623
	2000	0.7528	0.005104	1.396E-4	1.051E-4	2389

表 15 TWODANT 手法と KENO 手法の比較

体系	試験体減速材水位(cm)	TWODANT 手法 (A)	KENO 手法 1 (B)	KENO 手法 2 (C)	KENO 手法 3 (D)	(B) / (A)	(C) / (A)	(D) / (A)
S-1	300	4970	2447	5994	3772	0.49	1.21	0.76
	500	4257	1986	4553	3155	0.47	1.07	0.74
	1000	3733	1709	3879	2825	0.46	1.04	0.76
	2000	3539	1586	3669	2718	0.45	1.04	0.77
S-2	300	6700	2865	7022	4995	0.43	1.05	0.75
	500	5404	2279	5139	3994	0.42	0.95	0.74
	1000	4437	1836	4011	3291	0.41	0.90	0.74
	2000	4103	1677	3697	3084	0.41	0.90	0.75
S4-2	300	6844	3759	4982	3605	0.59	0.79	0.57
	500	4828	2847	3416	2714	0.59	0.71	0.56
	1000	3621	2132	2377	2008	0.59	0.66	0.55
	2000	2971	1709	1928	1677	0.58	0.65	0.56
S4-4	300	6702	4357	6243	3889	0.65	0.93	0.58
	500	5598	3543	4645	3185	0.63	0.83	0.57
	1000	4601	2893	3570	2623	0.63	0.78	0.57
	2000	4183	2571	3173	2389	0.61	0.76	0.57

表 16  $\alpha$  の計算結果(KENO 手法 4)

体系	試験体減速材水位 (cm)	実効増倍率 $K_{\text{eff}}$	実効遅発中性子割合 $\beta_{\text{eff}}$	中性子生成時間 $\Lambda(\text{sec})$	即発中性子寿命 $\ell(\text{sec})$	即発中性子減衰定数 $\alpha(\text{sec}^{-1})$
S-1	300	0.6293	0.009023	1.242E-4	7.815E-5	4816
	500	0.6929	0.008804	1.148E-4	7.954E-5	3938
	1000	0.7283	0.008650	1.098E-4	7.999E-5	3475
	2000	0.7409	0.008595	1.069E-4	7.923E-5	3351
S-2	300	0.7114	0.009173	6.514E-5	4.634E-5	6369
	500	0.7772	0.008940	5.643E-5	4.386E-5	5238
	1000	0.8204	0.008786	5.166E-5	4.238E-5	4408
	2000	0.8341	0.008729	4.979E-5	4.153E-5	4170
S4-2	300	0.7237	0.009094	7.118E-5	5.151E-5	5492
	500	0.7945	0.008831	6.477E-5	5.146E-5	4130
	1000	0.8448	0.008621	6.281E-5	5.264E-5	3087
	2000	0.8696	0.008513	6.230E-5	5.418E-5	2543
S4-4	300	0.6229	0.005465	9.620E-5	5.992E-5	6350
	500	0.6858	0.005288	9.027E-5	6.191E-5	5134
	1000	0.7347	0.005162	8.738E-5	6.420E-5	4192
	2000	0.7528	0.005104	8.779E-5	6.609E-5	3799

表 17 TWODANT 手法と KENO 手法 4 の比較

体系	試験体減速材水位 (cm)	TWODANT 手法 (A)	KENO 手法 4 (B)	(B) / (A)
S-1	300	4970	4816	0.97
	500	4257	3938	0.93
	1000	3733	3475	0.93
	2000	3539	3351	0.95
S-2	300	6700	6369	0.95
	500	5404	5238	0.97
	1000	4437	4408	0.99
	2000	4103	4170	1.02
S4-2	300	6344	5492	0.87
	500	4828	4130	0.86
	1000	3621	3087	0.85
	2000	2971	2543	0.86
S4-4	300	6702	6350	0.95
	500	5598	5134	0.92
	1000	4601	4192	0.91
	2000	4183	3799	0.91

表 18  $\alpha$  の測定値と計算値の比較

体系	試験体減速 材水位(cm)	実効増倍率 $K_{eff}$	測定値* E	TWODANT 手法		KENO 手法 4	
				計算値 C	C/E	計算値 C	C/E
S-1	500	0.6929	6561	4257	0.65	3938	0.60
	1000	0.7283	4538	3733	0.82	3475	0.77
S-2	300	0.7114	5622	6700	1.19	6369	1.13
	500	0.7772	4185	5404	1.29	5283	1.26
	2000	0.8341	3121	4103	1.31	4170	1.34
S4-2	300	0.7287	3626	6344	1.75	5492	1.51
	500	0.7945	3628	4828	1.33	4130	1.14
	1000	0.8448	2747	3621	1.32	3087	1.12
	2000	0.8696	2617	2971	1.14	2543	0.97
S4-4	300	0.6229	5520	6702	1.21	6350	1.15
	500	0.6858	5579	5598	1.00	5134	0.92
	1000	0.7347	5294	4601	0.87	4192	0.79
	2000	0.7528	4777	4183	0.88	3799	0.80

\* S-1 炉心、S-2 炉心、S4-2 炉心 : 2 パラメータ評価結果  
 S4-4 炉心 : 4 パラメータ評価結果

表 19 実効増倍率の測定値と計算値の比較<sup>a)</sup>

体系	試験体減速 材水位(cm)	TWODANT 手法			KENO 手法 4		
		計算値 C	測定値 E	C/E	計算値 C	測定値 E	C/E
S-1	500	0.6929	0.5890	1.18	0.6929	0.4824	1.44
	1000	0.7283	0.6872	1.06	0.7283	0.6430	1.13
S-2	300	0.7114	0.7468	0.95	0.7114	0.7463	0.95
	500	0.7772	0.8197	0.95	0.7772	0.8238	0.94
	2000	0.8341	0.8702	0.96	0.8341	0.8780	0.95
S4-2	300	0.7237	0.8235	0.88	0.7237	0.8207	0.88
	500	0.7945	0.8888	0.95	0.7945	0.8205	0.97
	1000	0.8448	0.8793	0.96	0.8448	0.8628	0.98
	2000	0.8696	0.8841	0.98	0.8696	0.8656	1.00
S4-4	300	0.6229	0.6677	0.93	0.6229	0.6729	0.93
	500	0.6858	0.6866	1.00	0.6858	0.6581	1.04
	1000	0.7347	0.7061	1.04	0.7347	0.6636	1.11
	2000	0.7528	0.7269	1.04	0.7528	0.6878	1.09

<sup>a)</sup>  $\alpha$  値から実効増倍率の測定値を算出する際には、計算値の即発中性子寿命(KENO 手法 4 の場合)または中性子生成時間(TWODANT 手法の場合)と計算値の実効遅発中性子割合を使用。計算値は KENO V.a コードによる計算結果。

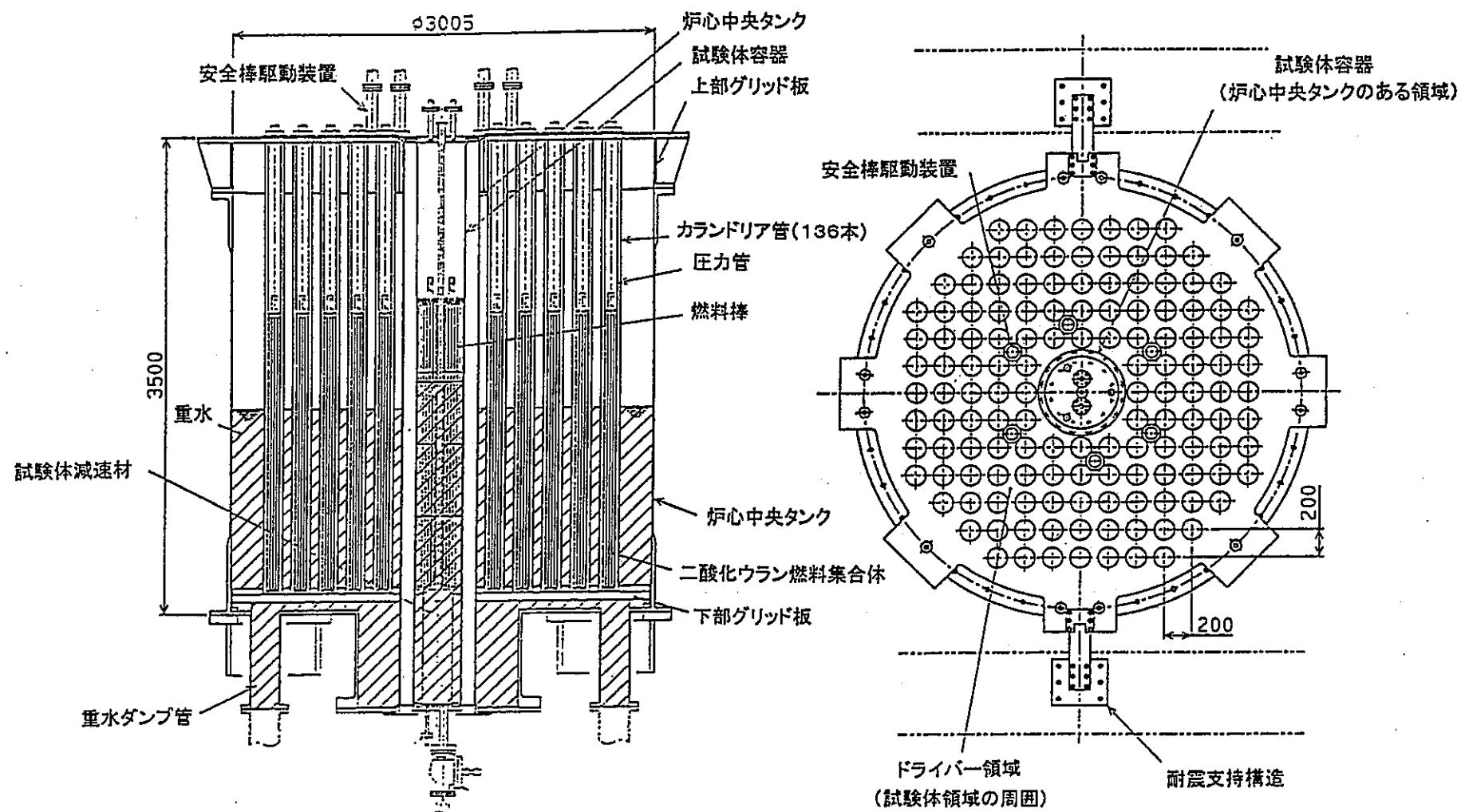
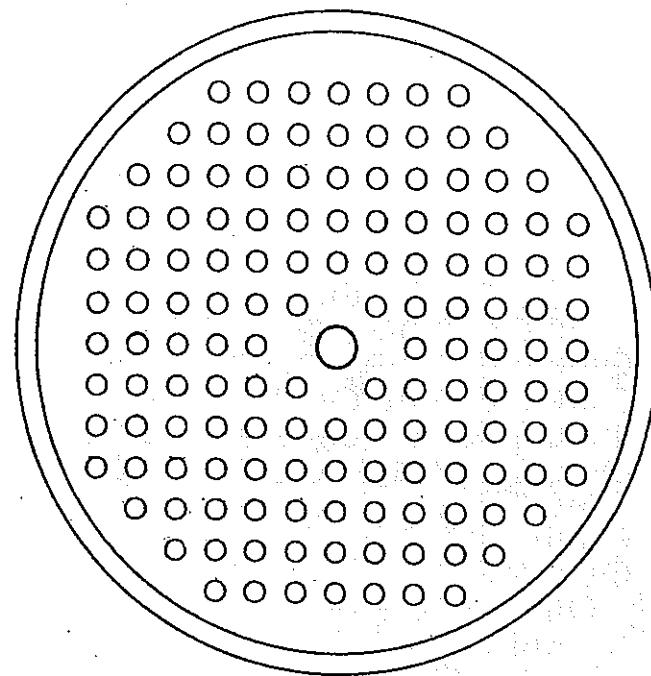
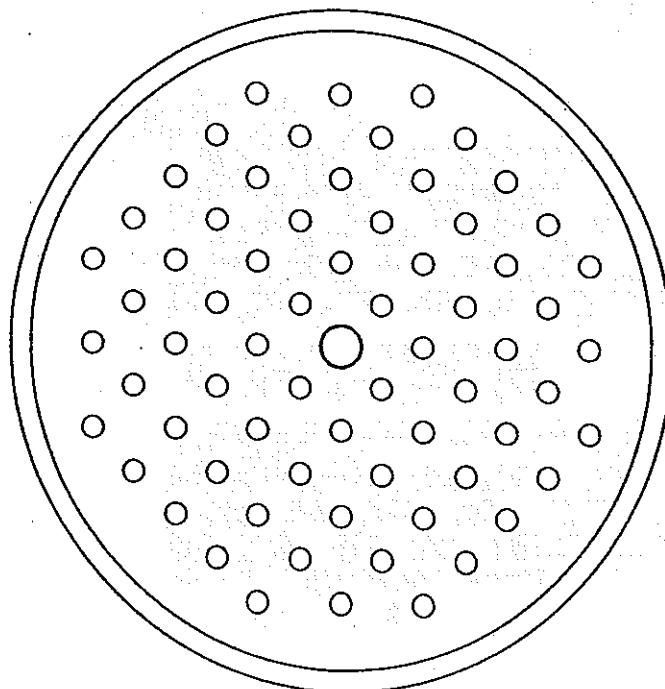


図1 DCA炉心構造図



S-2 炉心用試験体(2.7wt%UO<sub>2</sub>燃料 140 本 ピッチ2.2cm)



S-1 炉心用試験体(2.7wt%UO<sub>2</sub>燃料 68 本 ピッチ3.111cm)

図2 試験体断面図

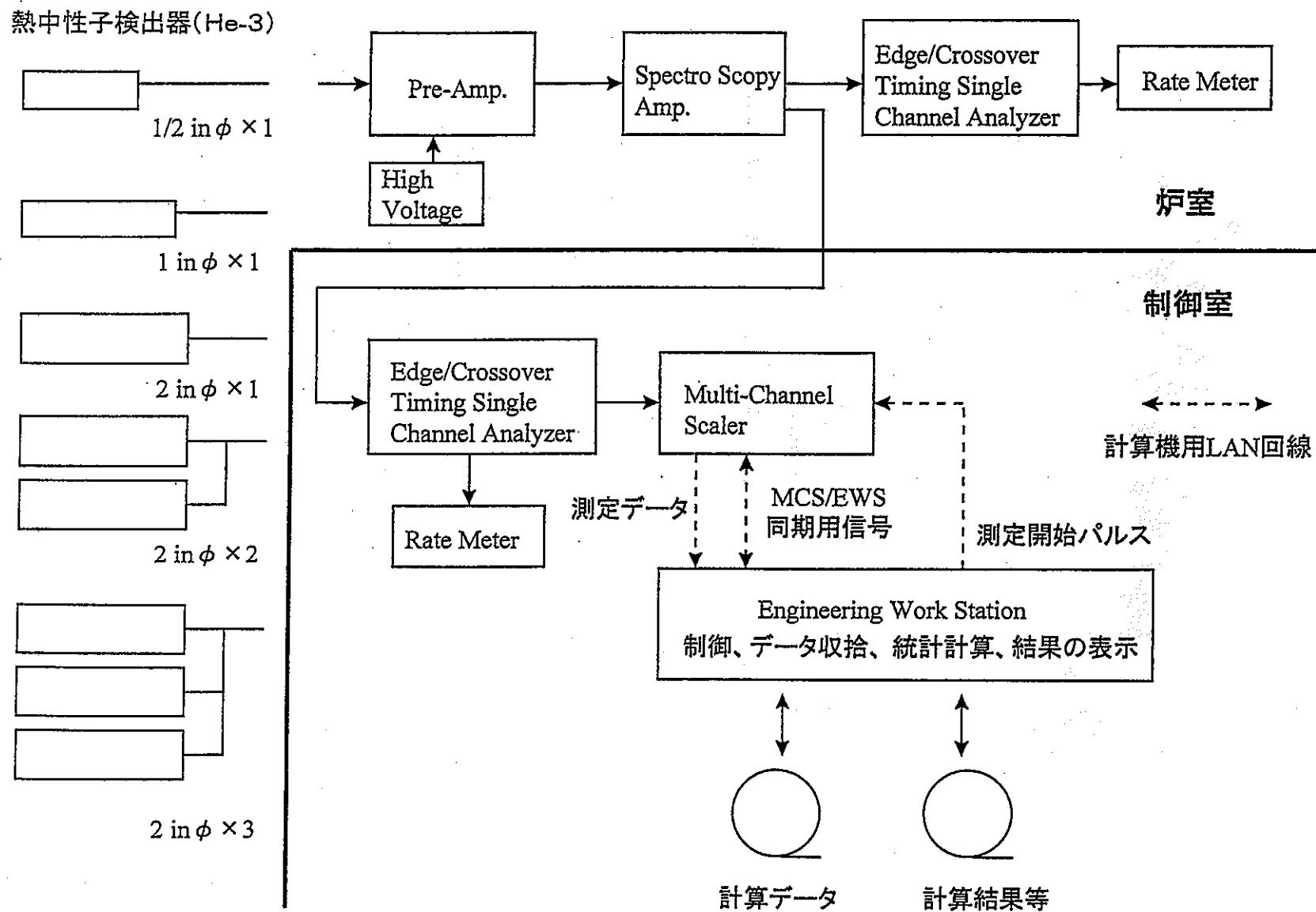


図3 フайнマンーアルファ法測定システム

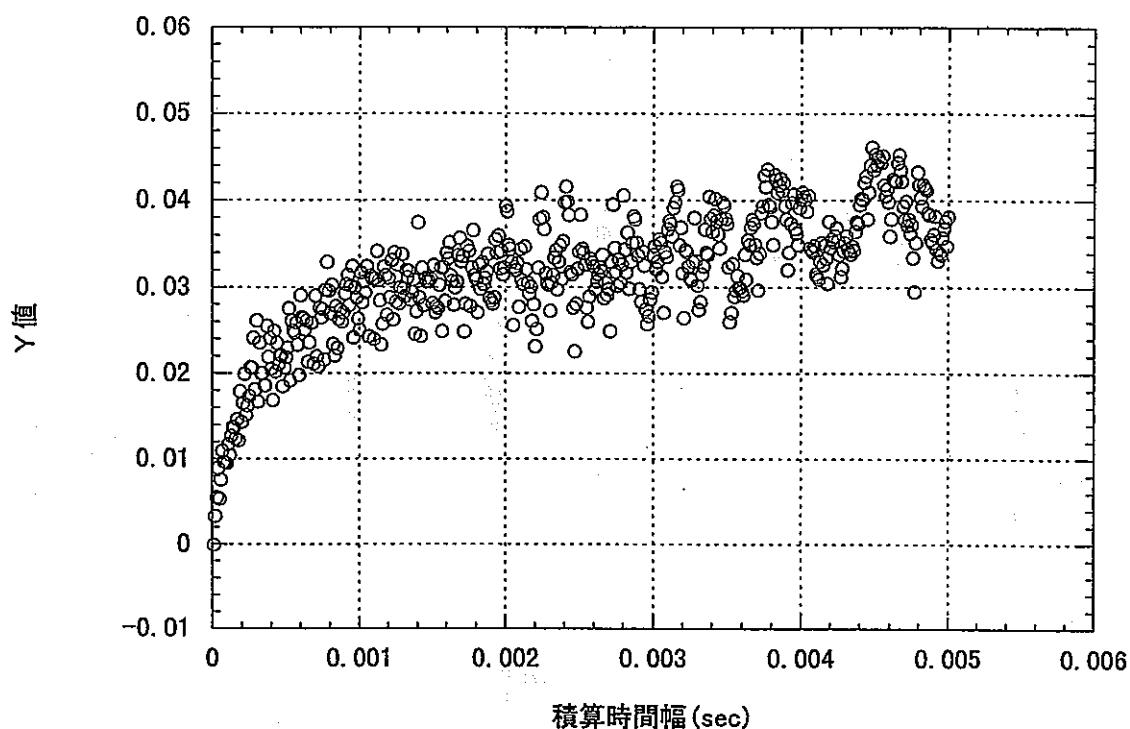


図4 フайнマン- $\alpha$ 法のY値(S-1炉心、試験体水位500mm)

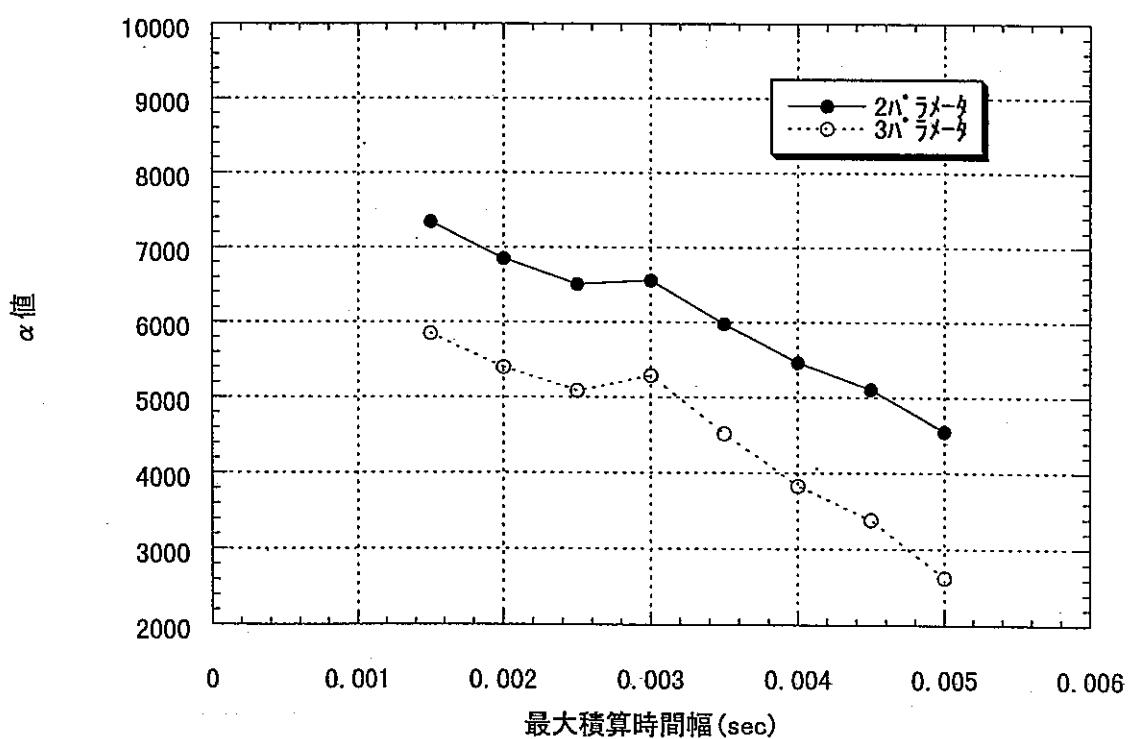


図5 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S-1炉心、試験体水位500mm)

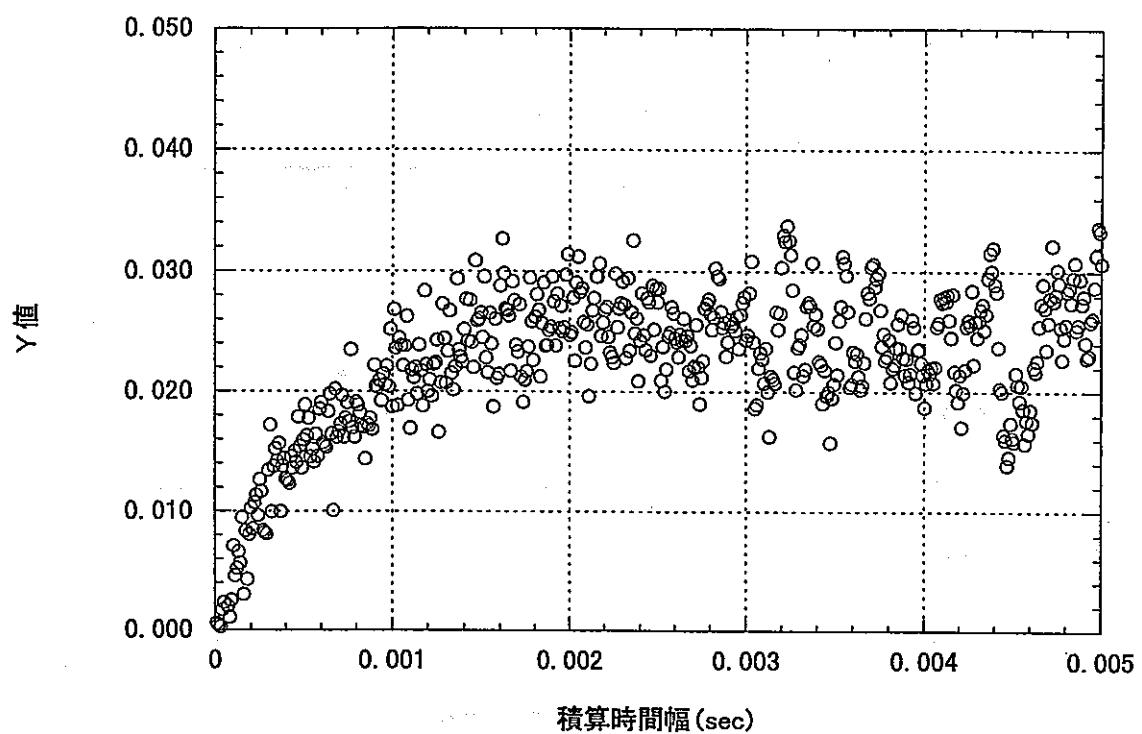


図6 フайнマン- $\alpha$ 法のY値(S-1炉心、試験体水位1000mm)

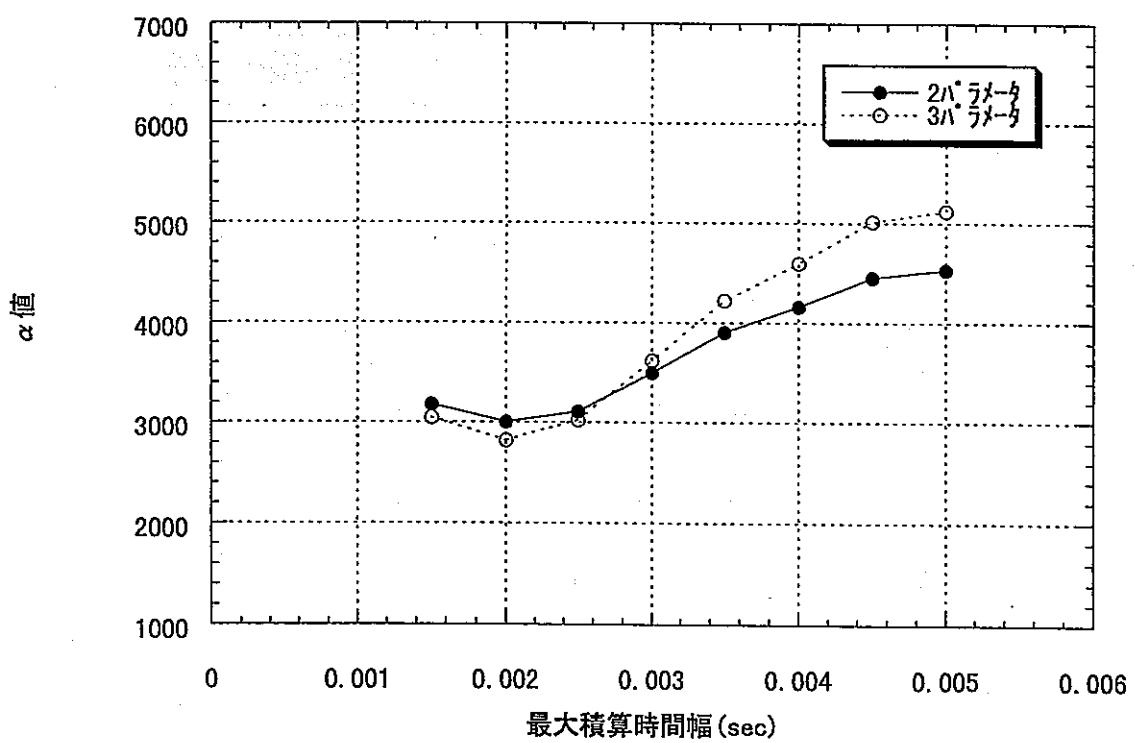
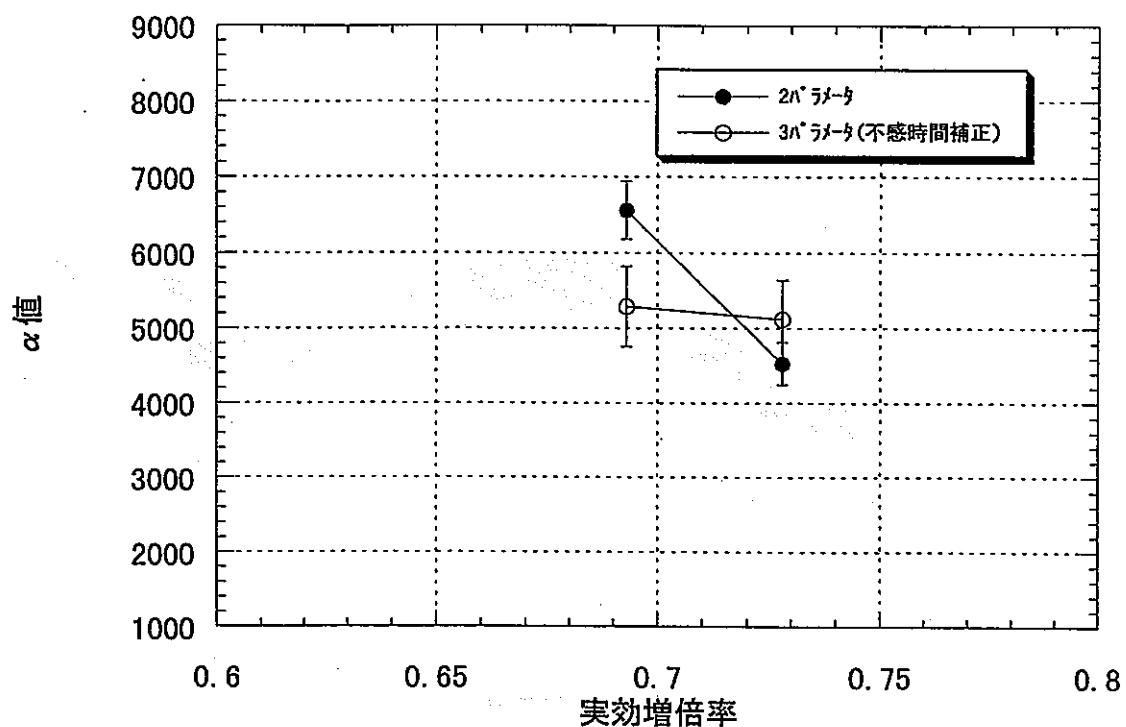
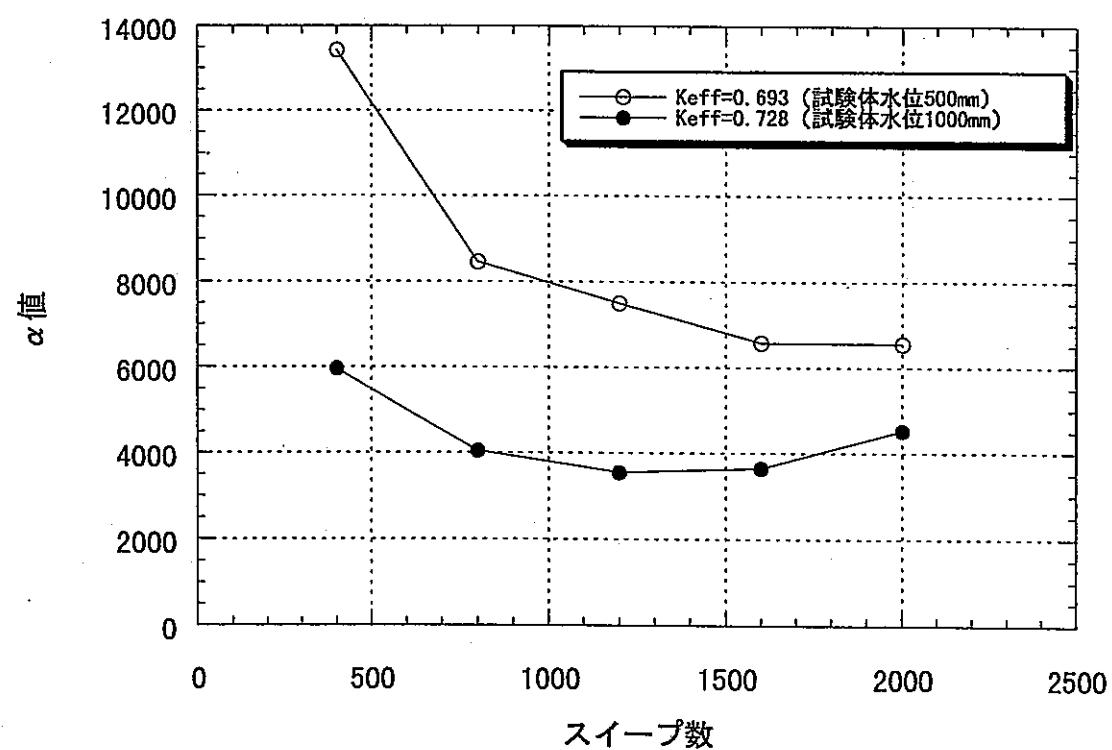
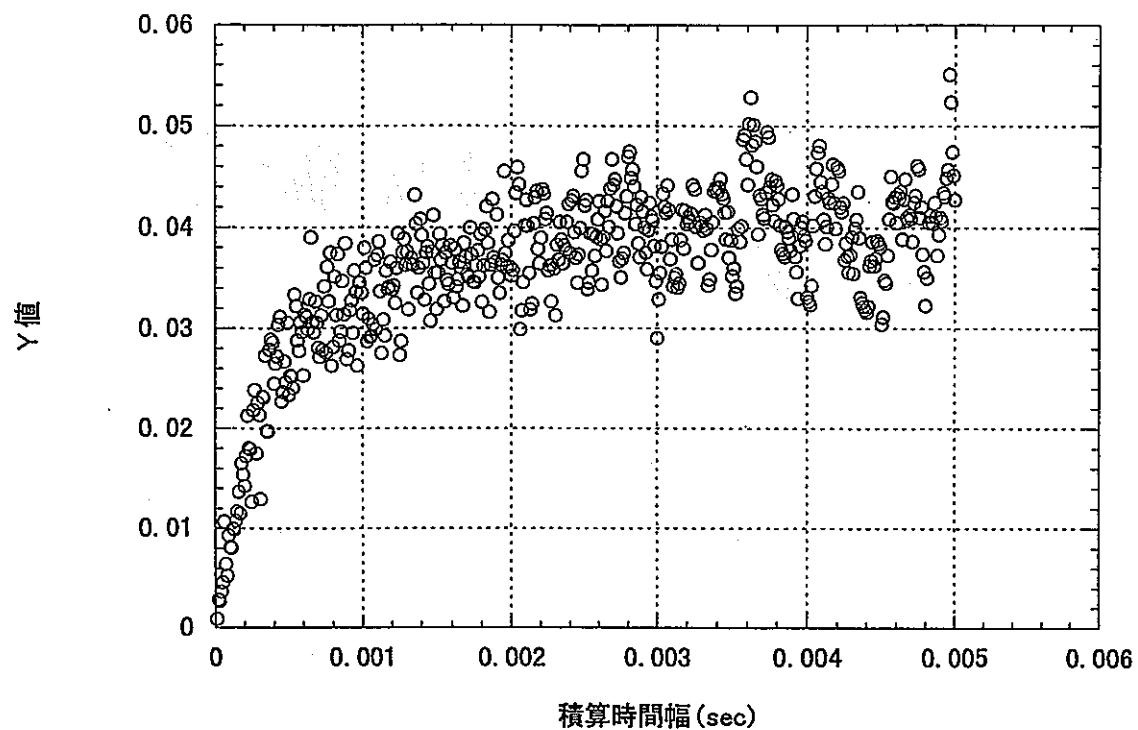
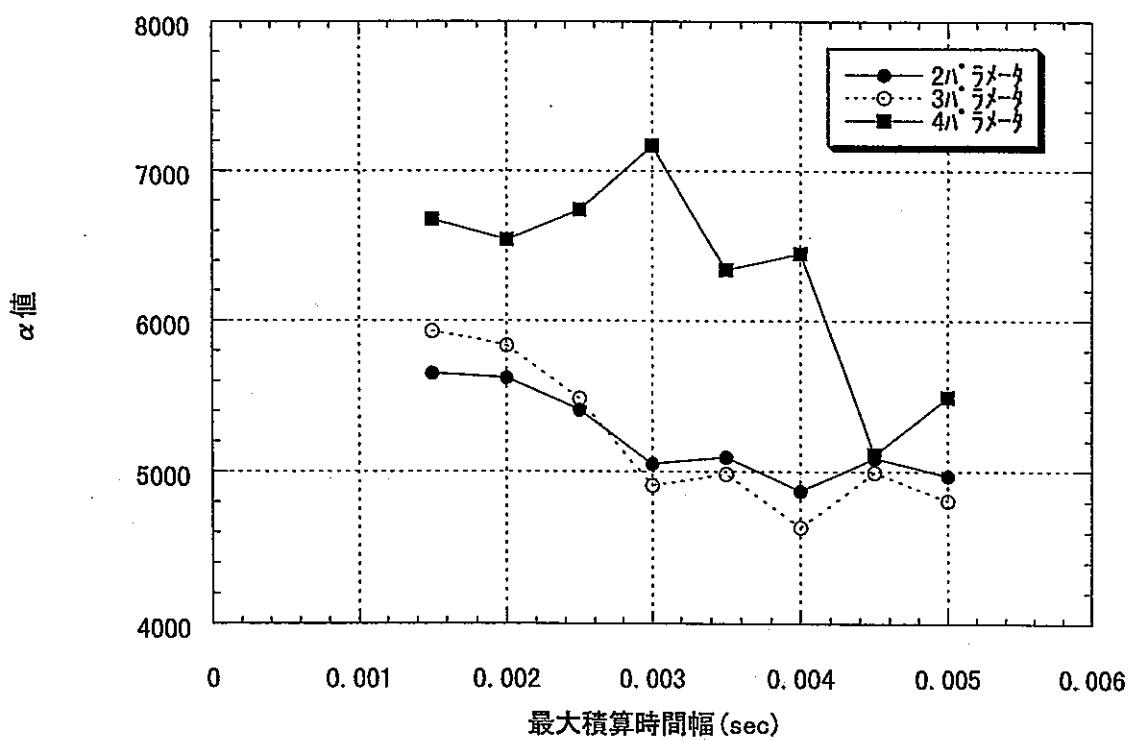


図7 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S-1炉心、試験体水位1000mm)

図8 実効増倍率と $\alpha$ 値の関係(S-1炉心)図9 スイープ数と $\alpha$ 値の関係(S-1炉心:  $\Delta t = 10 \mu\text{sec}$ )

図10 フайнマン- $\alpha$ 法のY値(S-2炉心、試験体水位300mm)図11 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S-2炉心、試験体水位300mm)

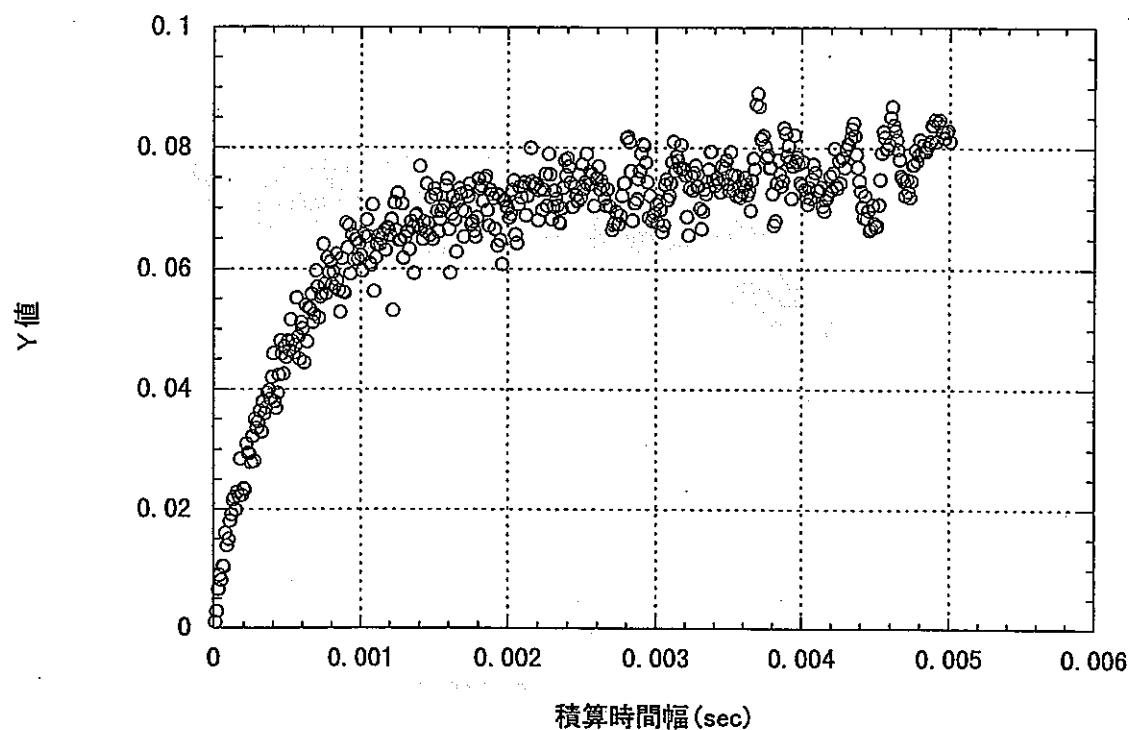


図12 ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S-2炉心、試験体水位500mm)

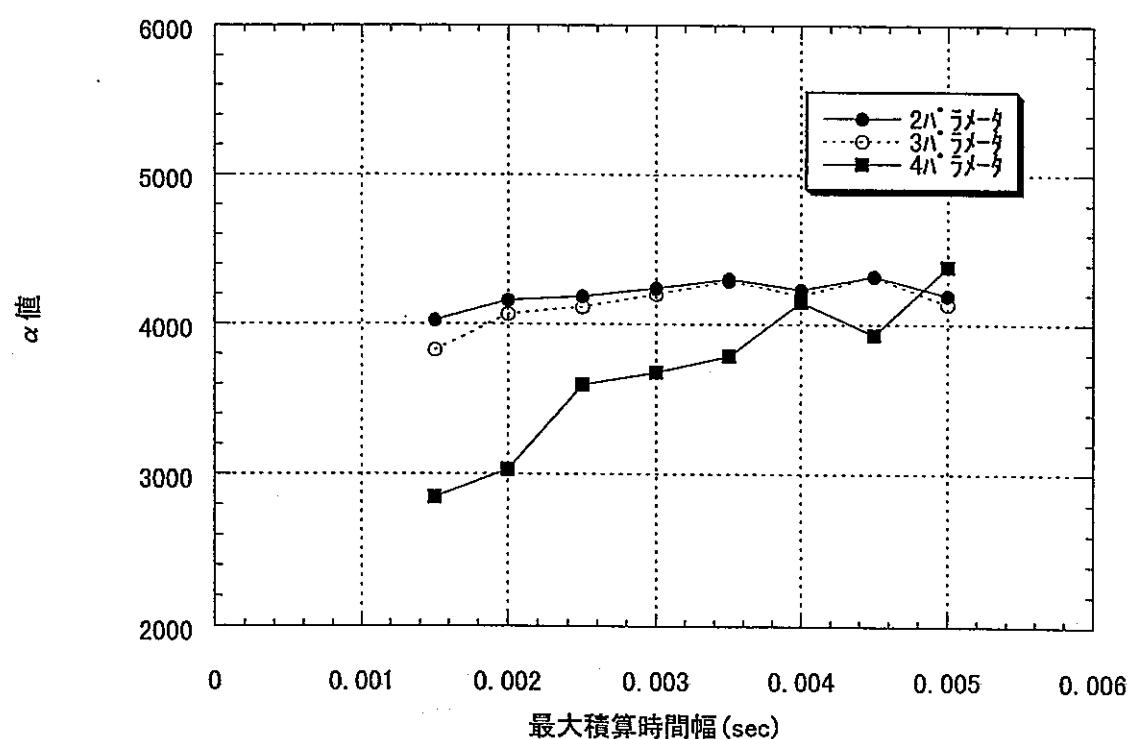
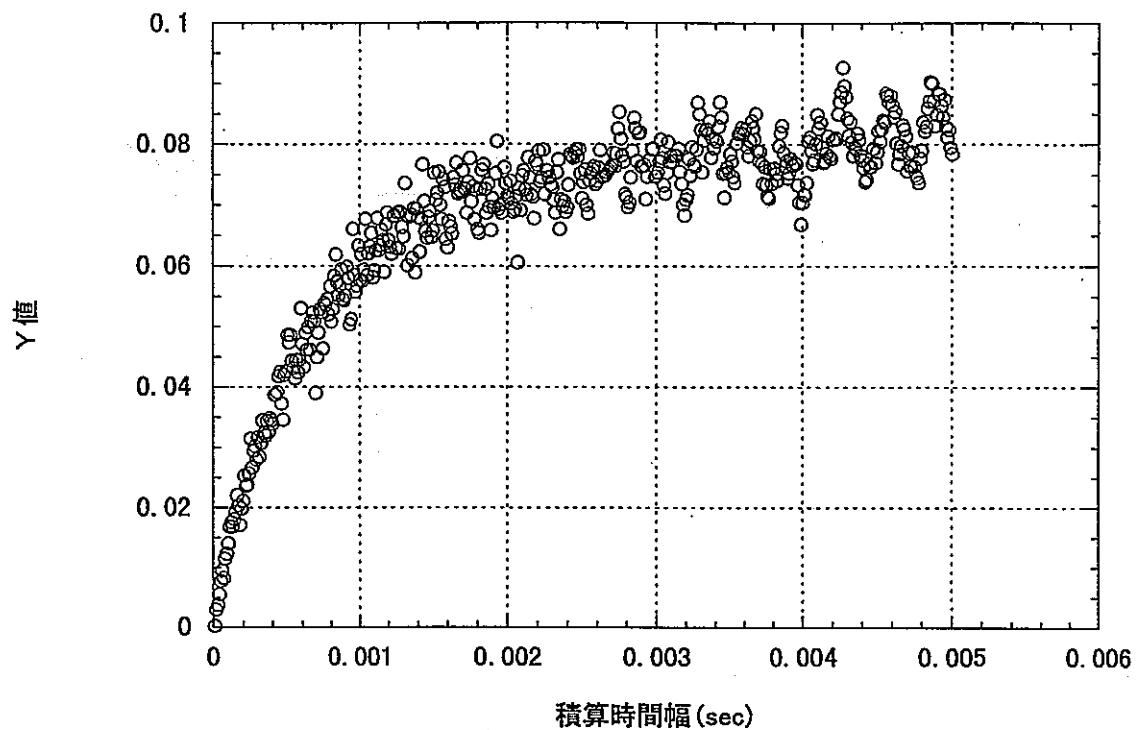
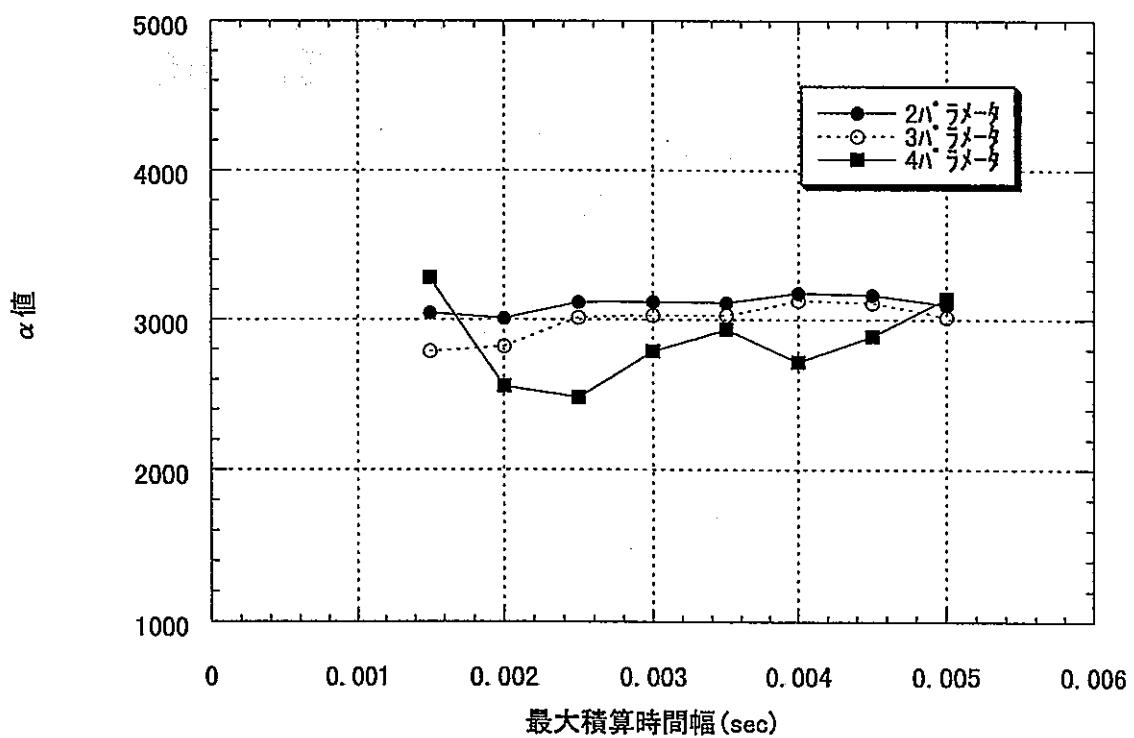
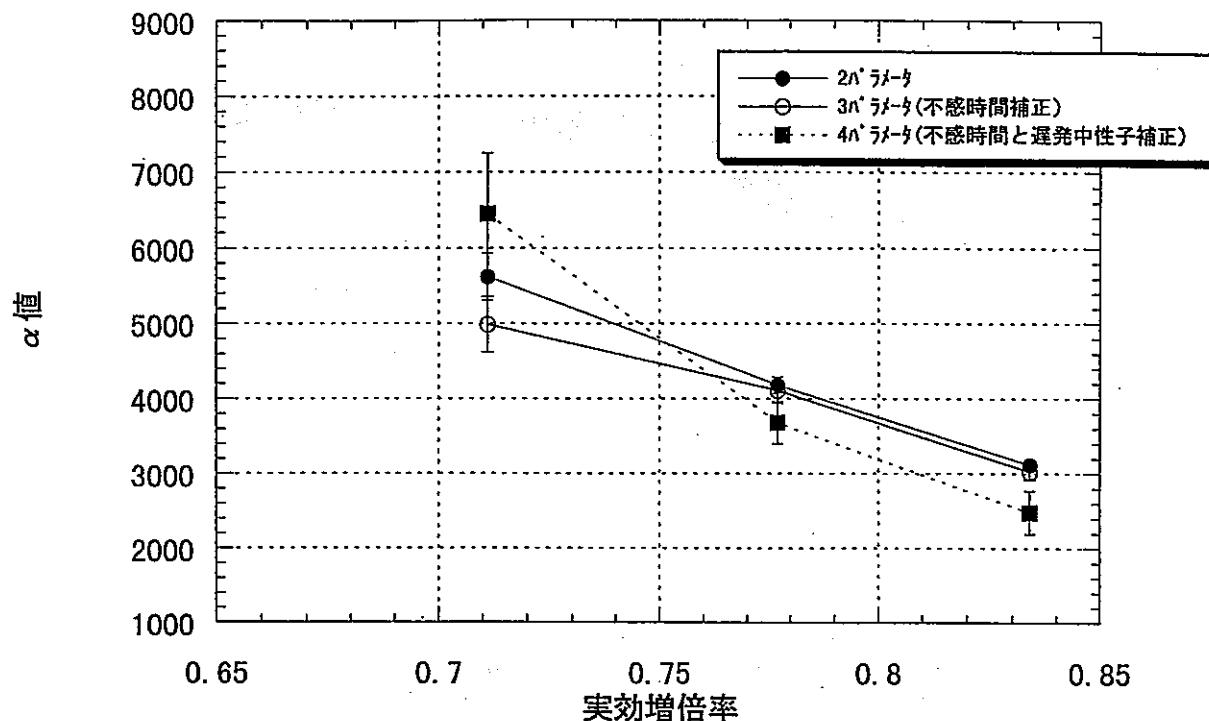
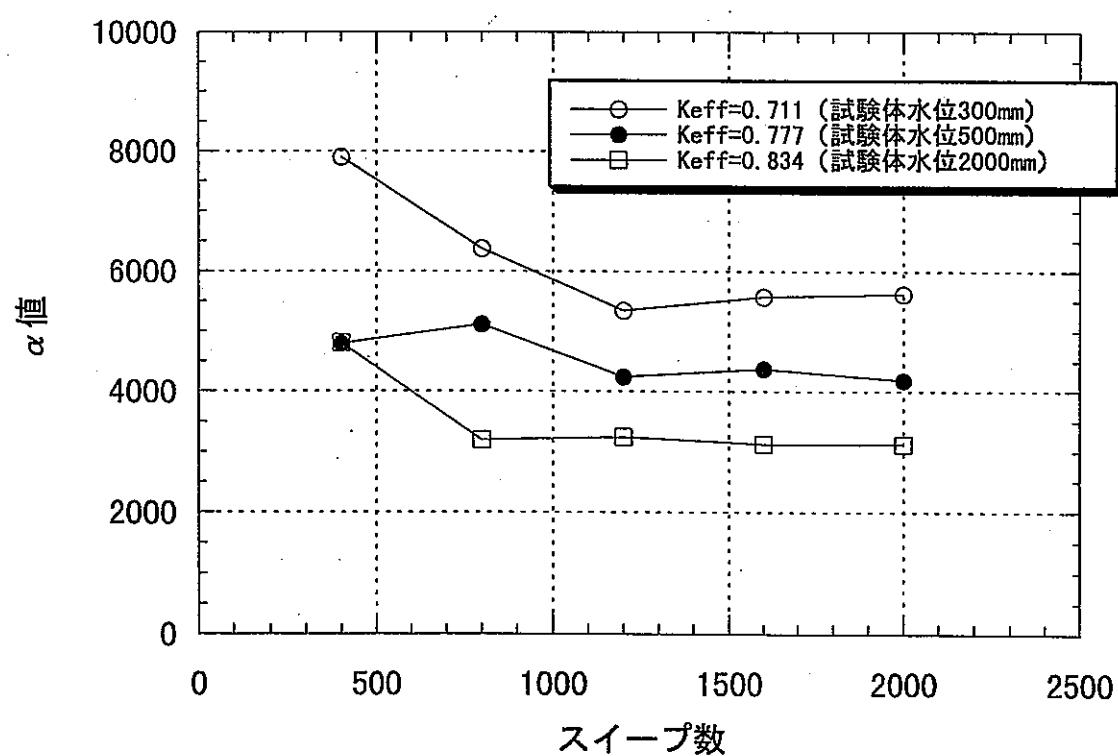


図13 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S-2炉心、試験体水位500mm)

図14 フайнマン- $\alpha$ 法のY値(S-2炉心、試験体水位2000mm)図15 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S-2炉心、試験体水位2000mm)

図16 実効増倍率と $\alpha$ 値の関係 (S-2炉心)図17 スイープ数と $\alpha$ 値の関係 (S-2炉心 :  $\Delta t = 10 \mu\text{sec}$ )

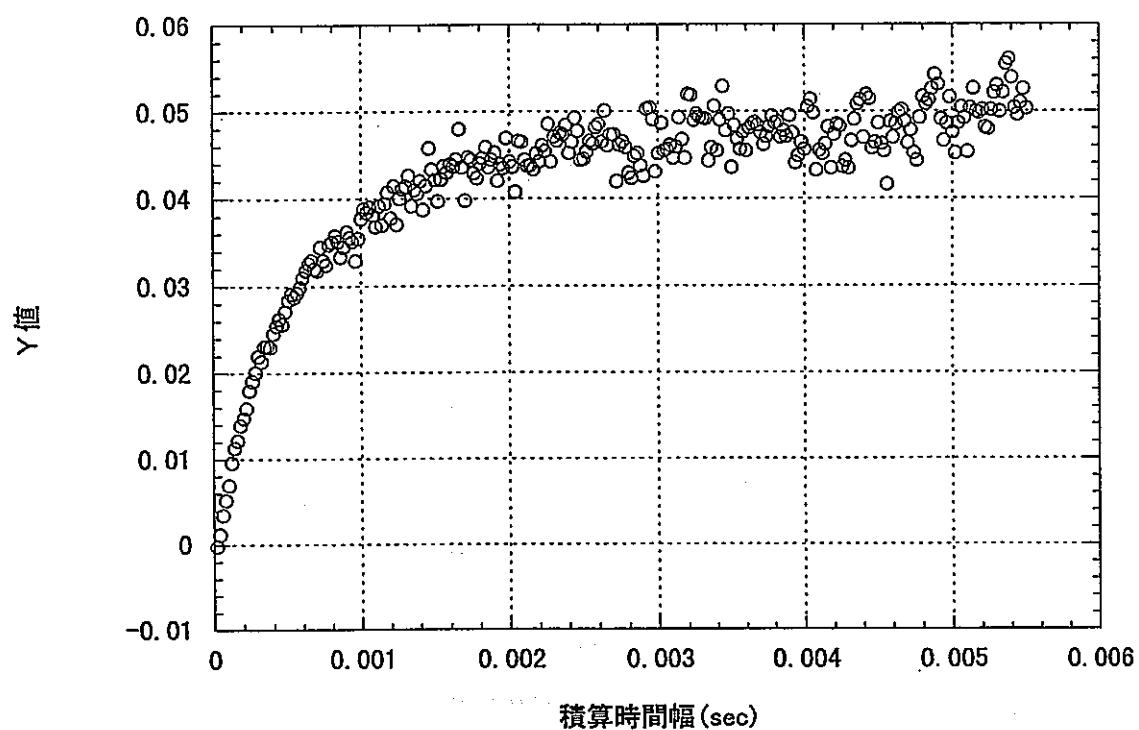


図18 フайнマン- $\alpha$ 法のY値(S4-2炉心、試験体水位300mm)

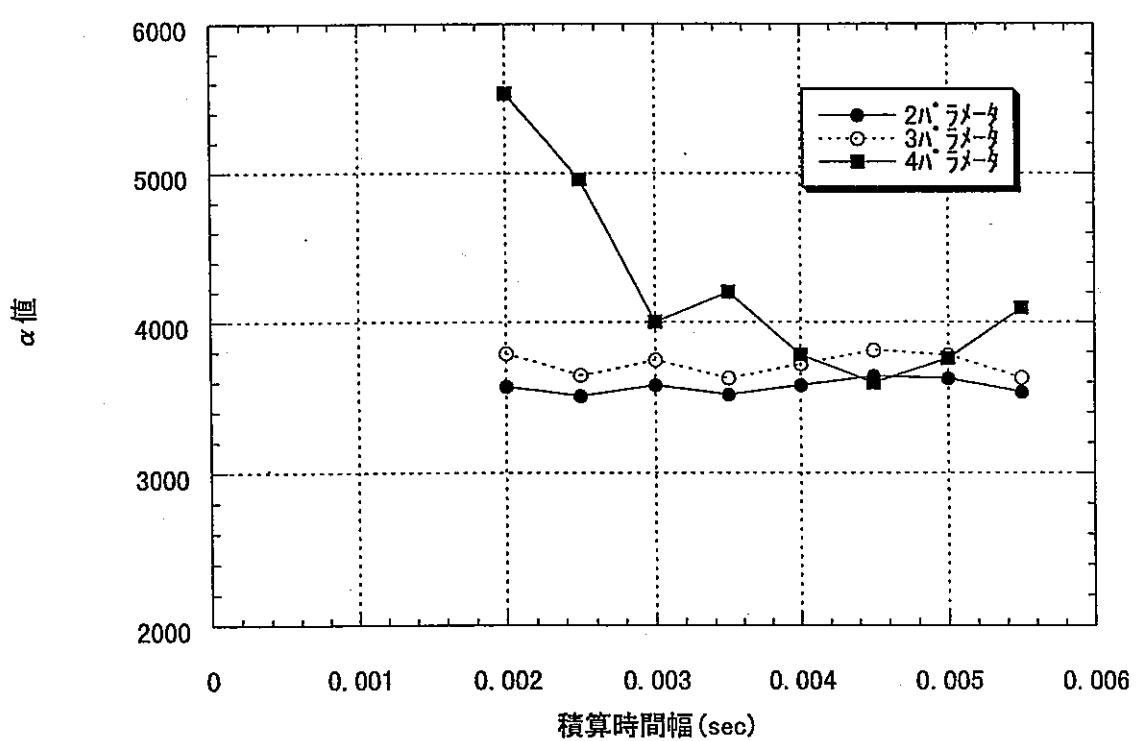


図19 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-2炉心、試験体水位300mm)

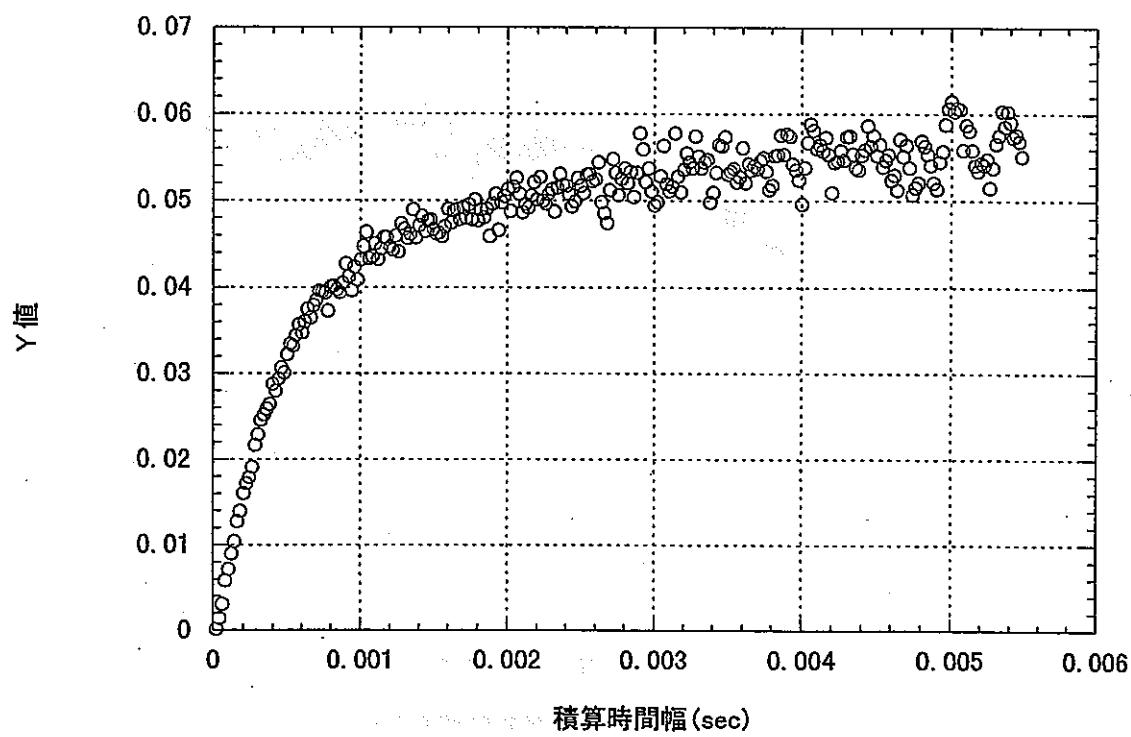


図20 ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S4-2炉心、試験体水位500mm)

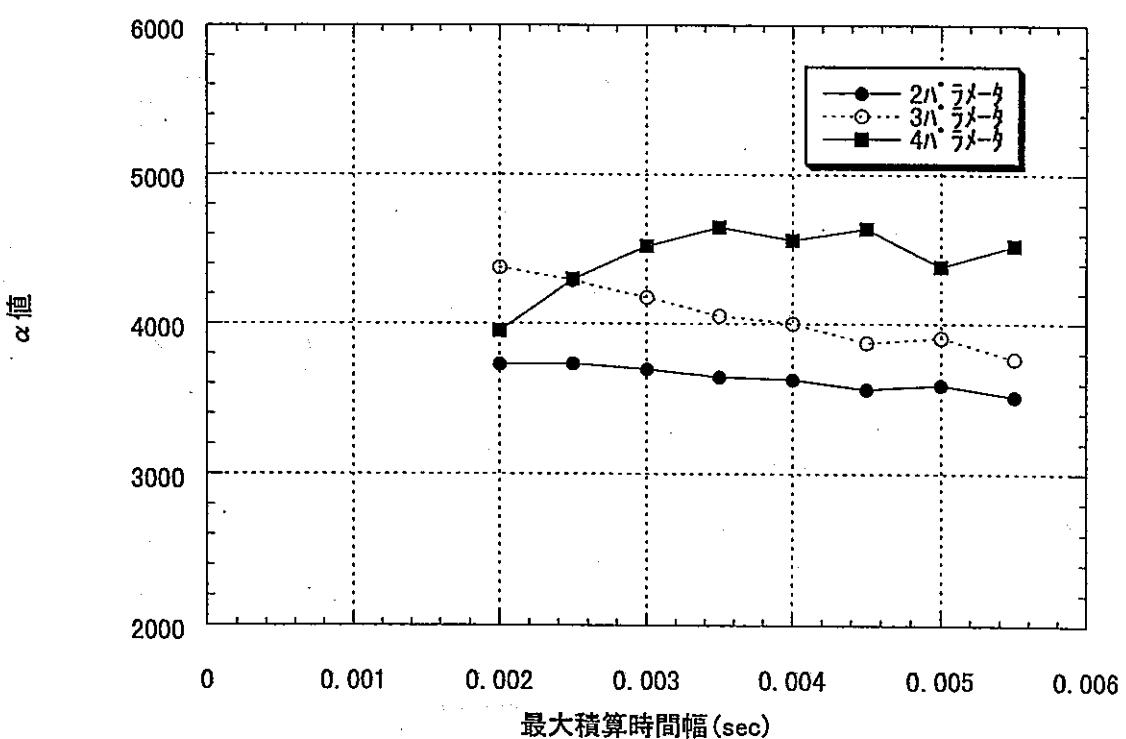
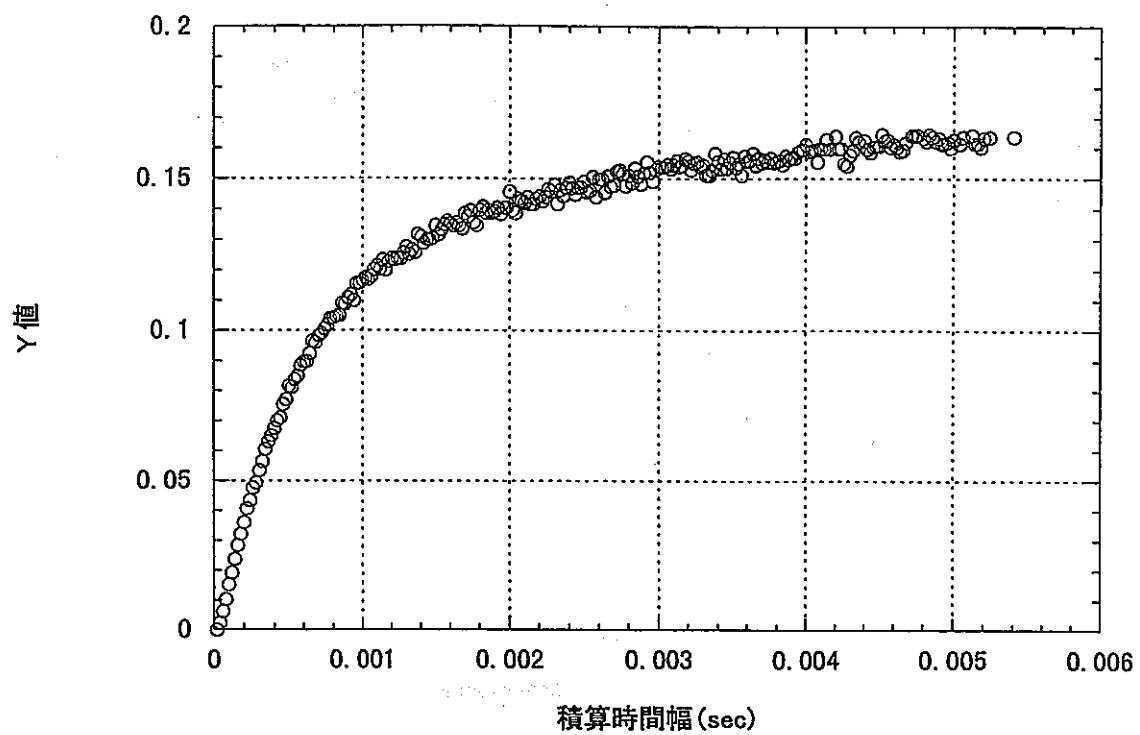
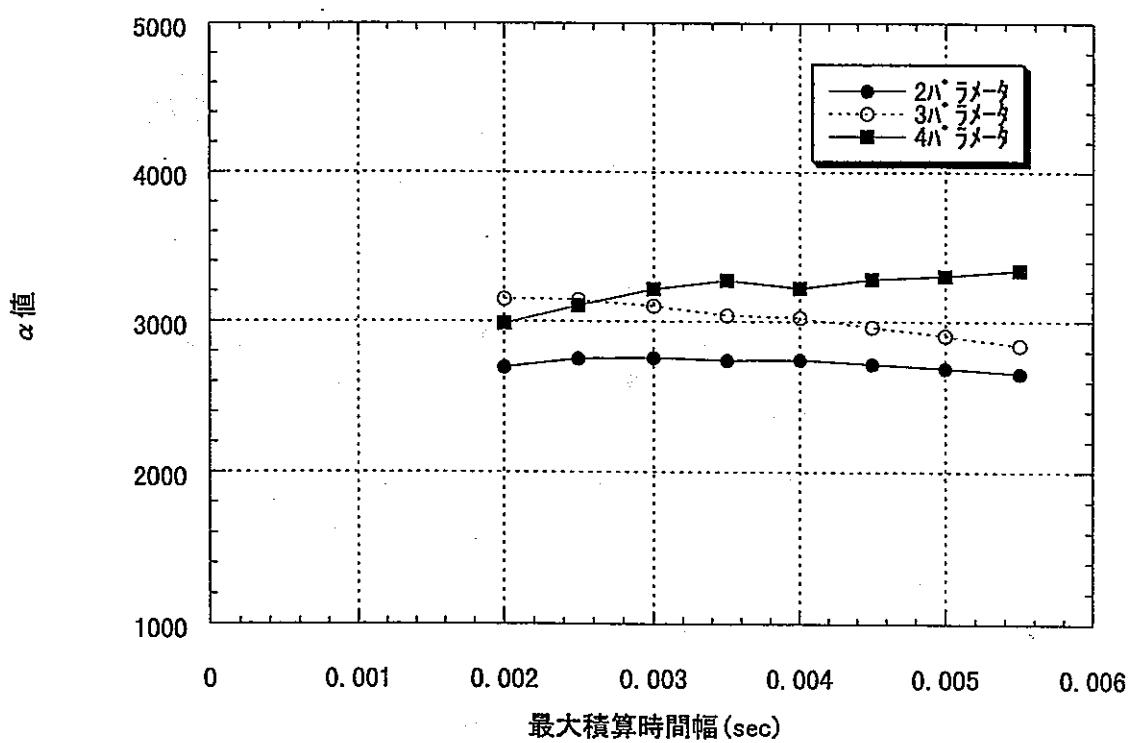


図21 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-2炉心、試験体水位500mm)

図22 ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S4-2炉心、試験体水位1000mm)図23 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-2炉心、試験体水位1000mm)

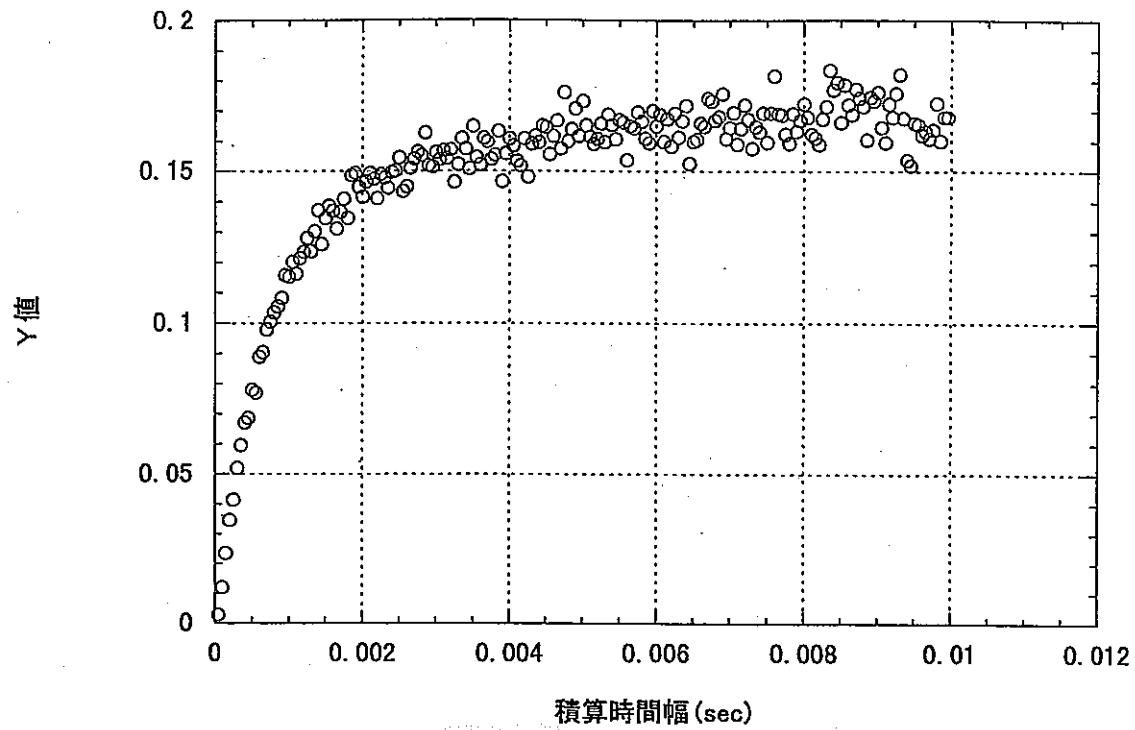


図24 ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S4-2炉心、試験体水位2000mm)

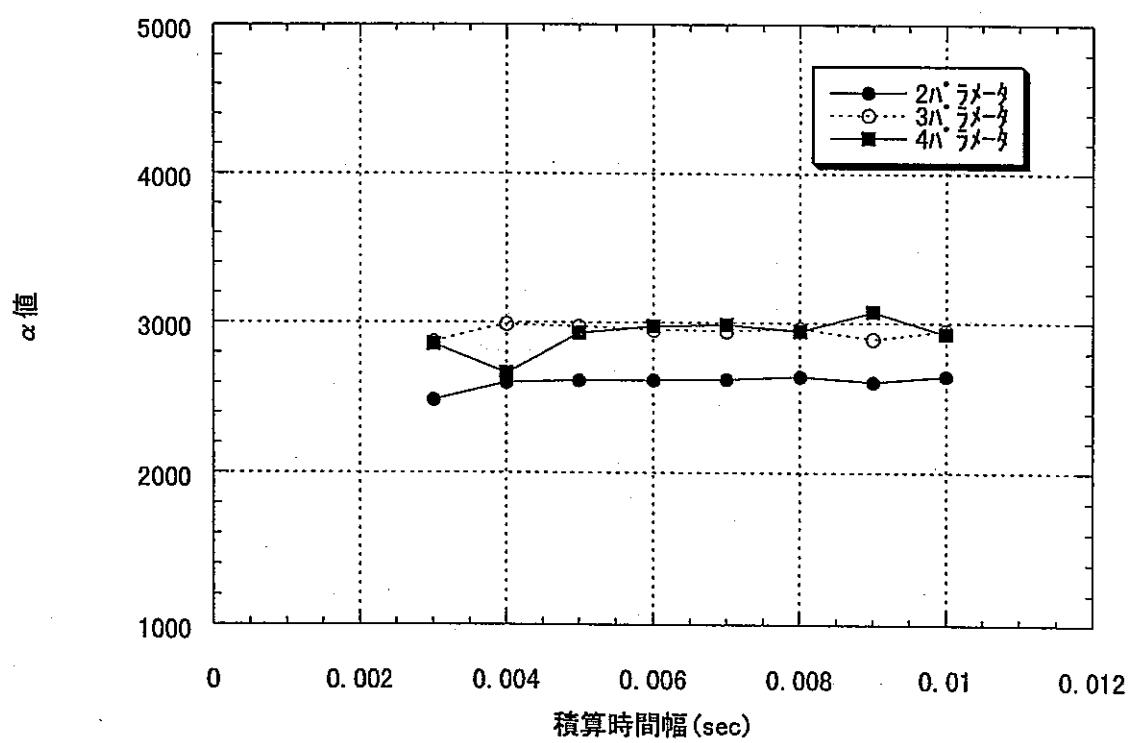
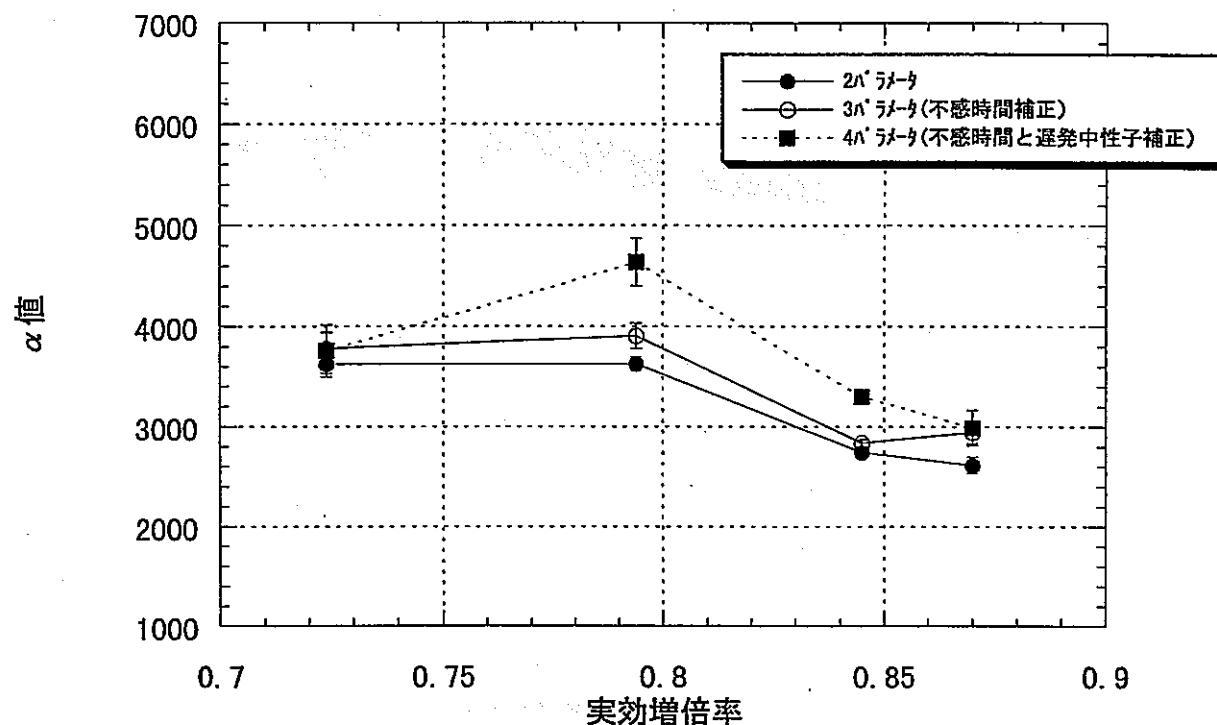
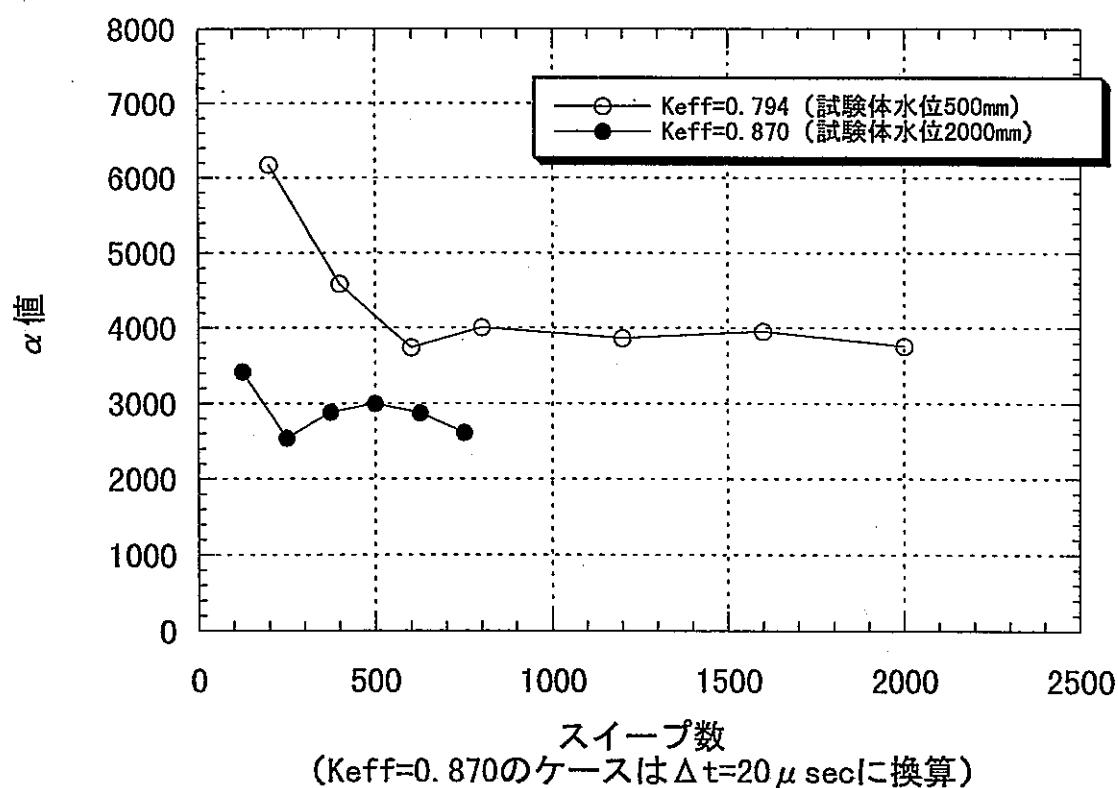


図25 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-2炉心、試験体水位2000mm)

図26 実効増倍率と  $\alpha$  値の関係 (S4-2炉心)図27 スイープ数と  $\alpha$  値の関係 (S 4 - 2炉心 :  $\Delta t=20 \mu\text{sec}$ )

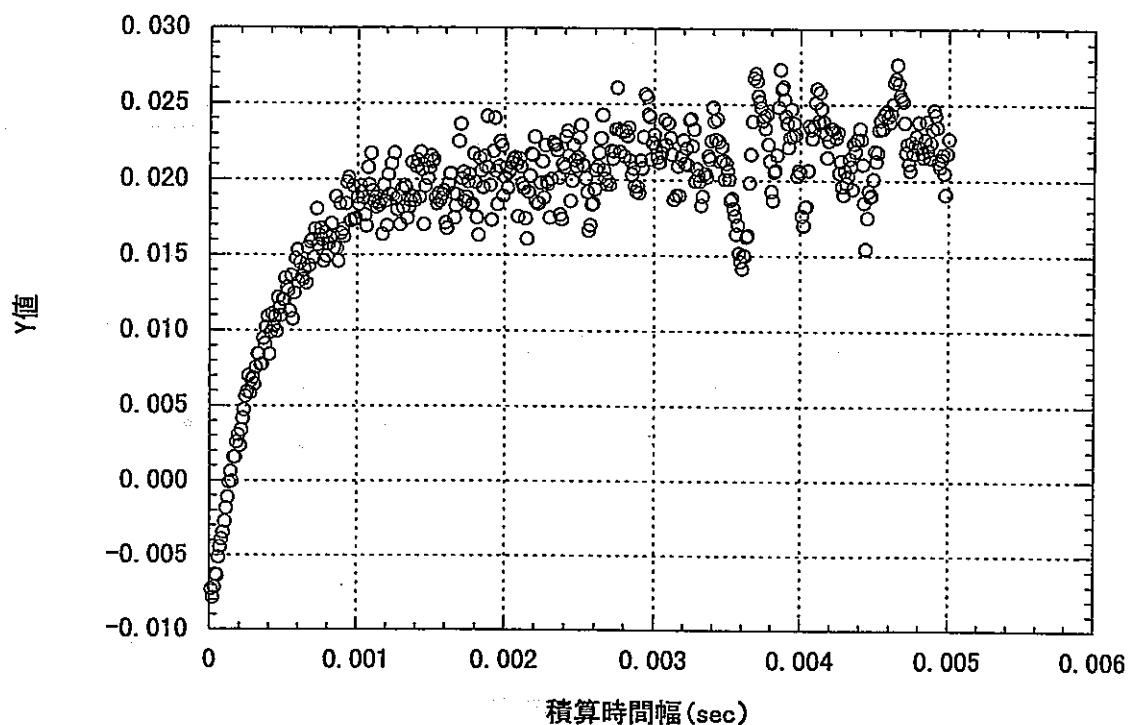


図28 フайнマン- $\alpha$ 法のY値(S4-4炉心、試験体水位300mm)

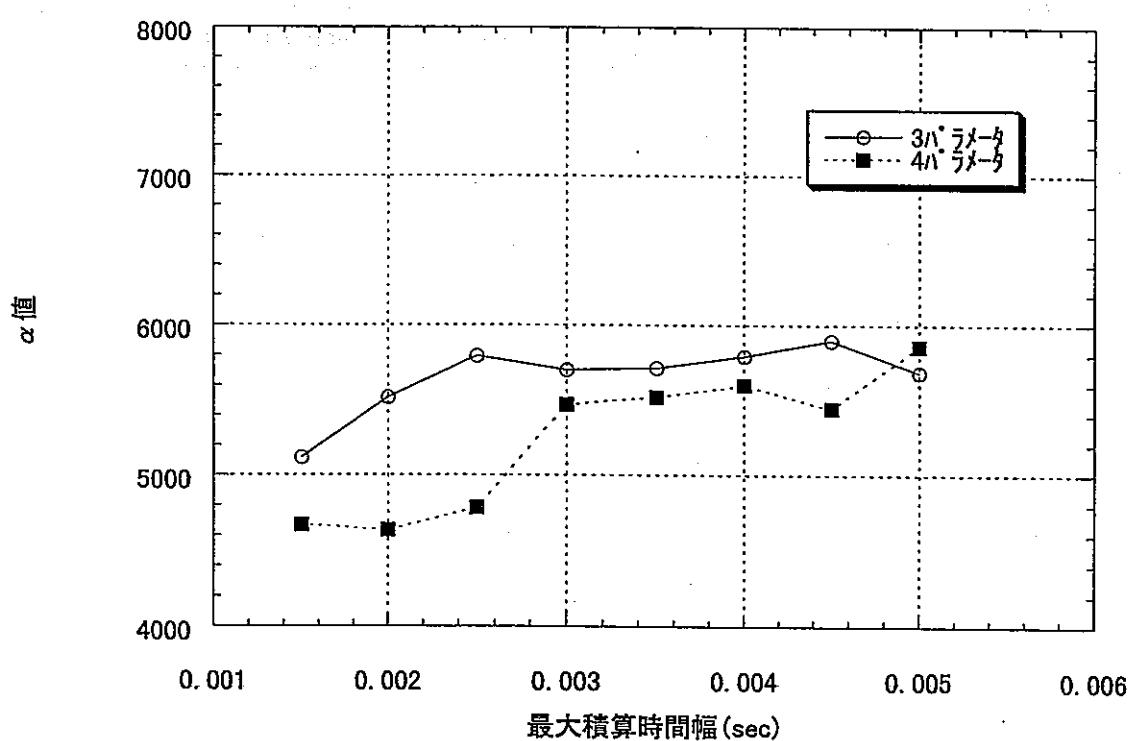


図29 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-4炉心、試験体水位300mm)

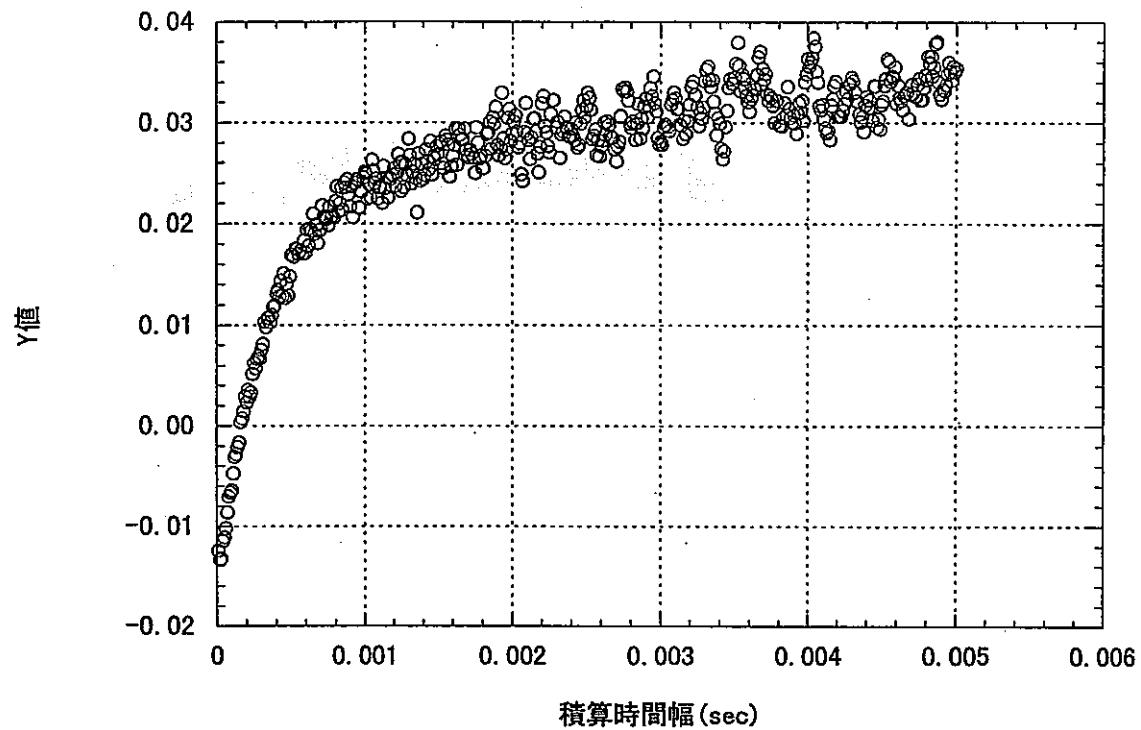


図30 ファインマン- $\alpha$ 法のY値(S4-4炉心、試験体水位500mm)

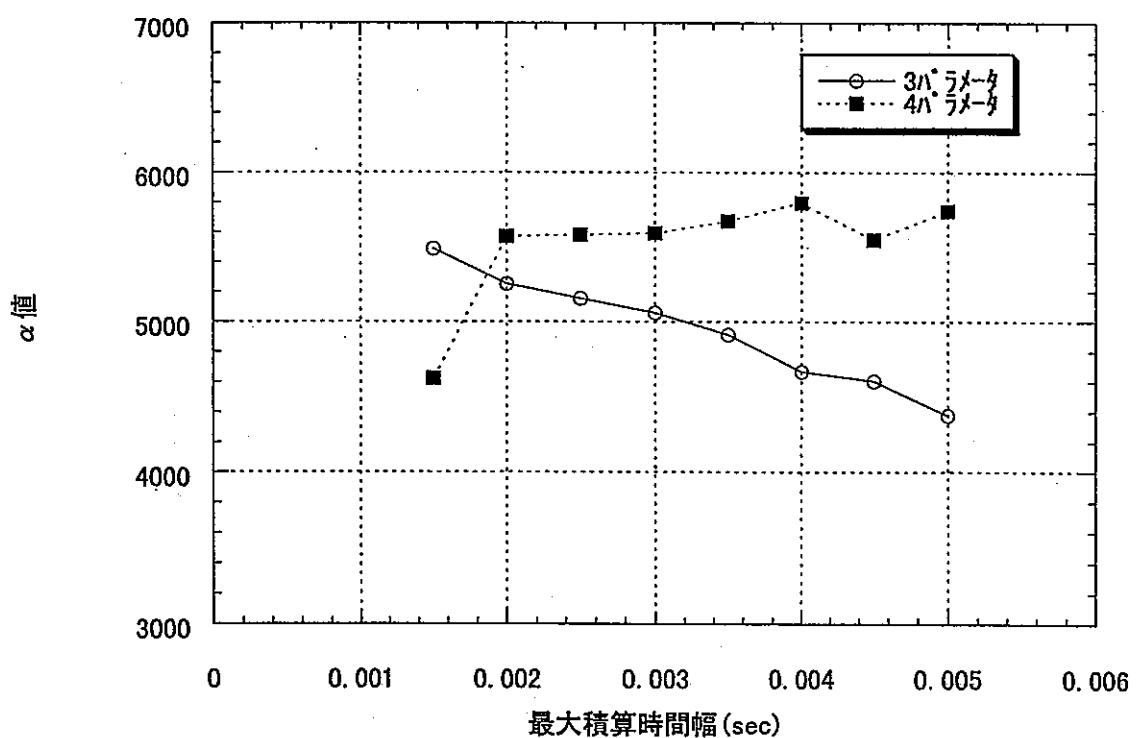


図31 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-4炉心、試験体水位500mm)

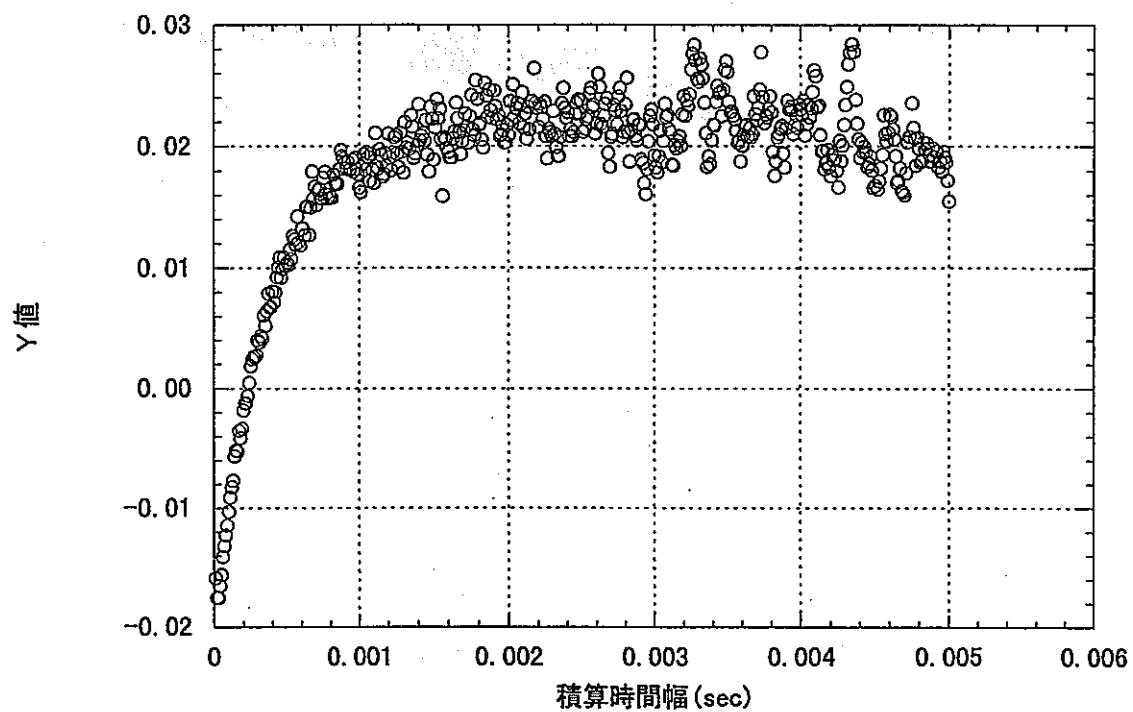


図32 フайнマン- $\alpha$ 法のY値(S4-4炉心、試験体水位1000mm)

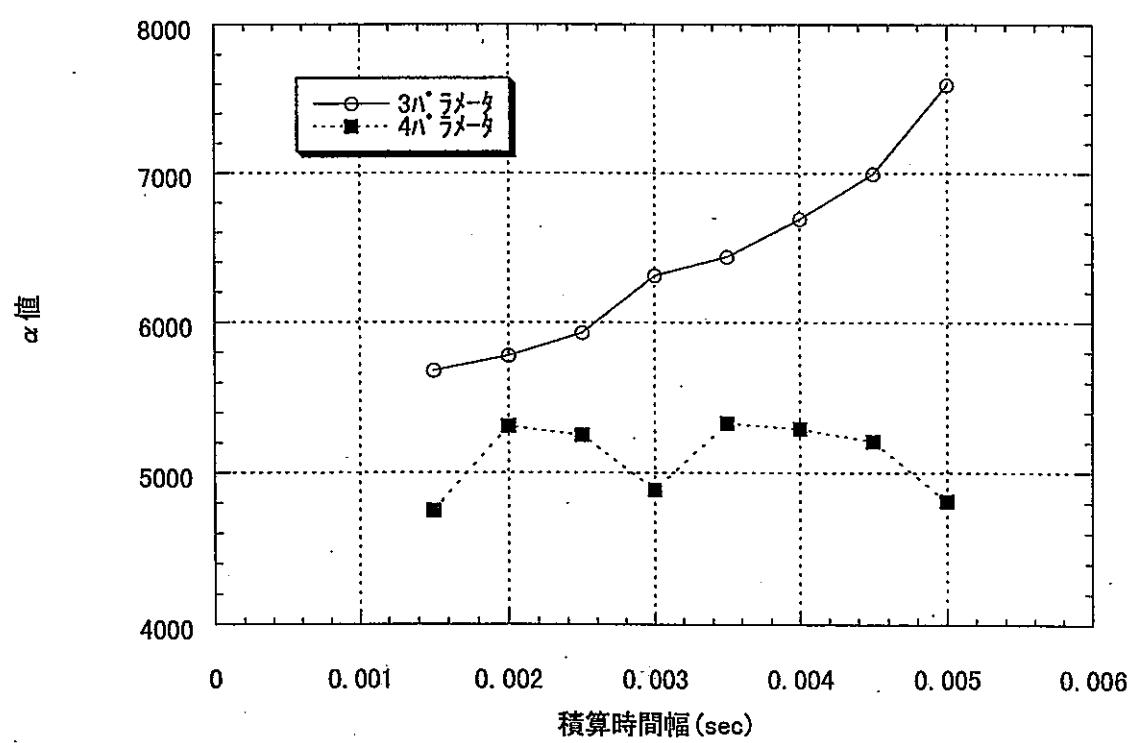


図33 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-4炉心、試験体水位1000mm)

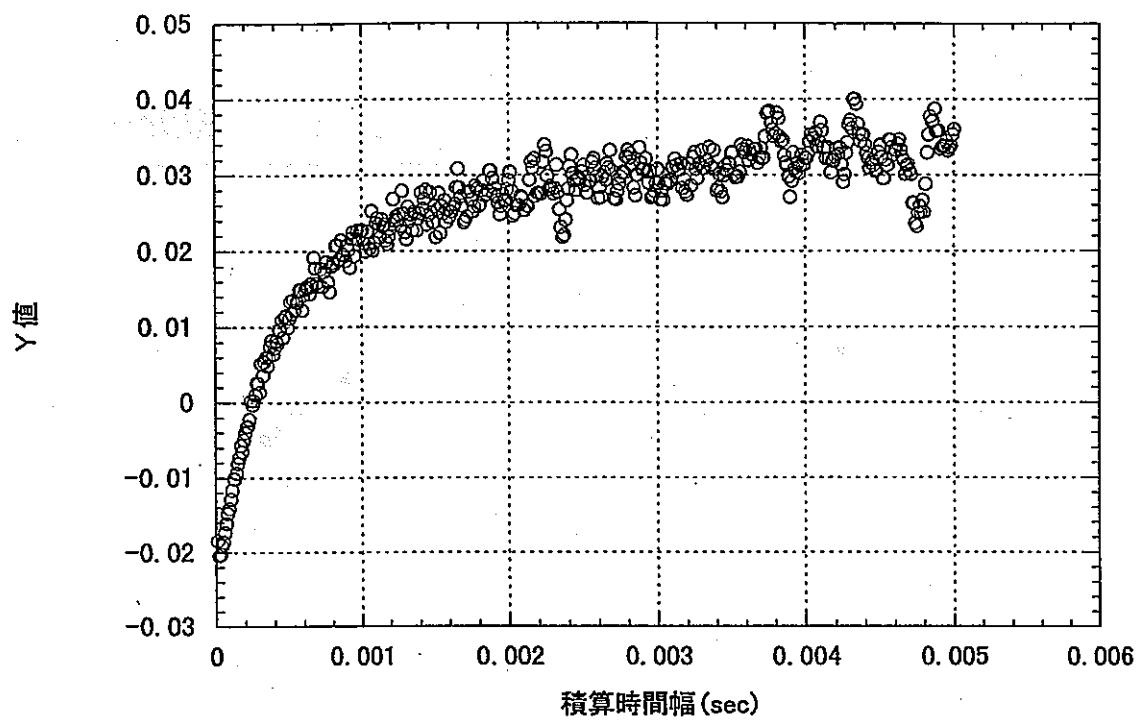


図34 フайнマン- $\alpha$ 法のY値(S4-4炉心、試験体水位2000mm)

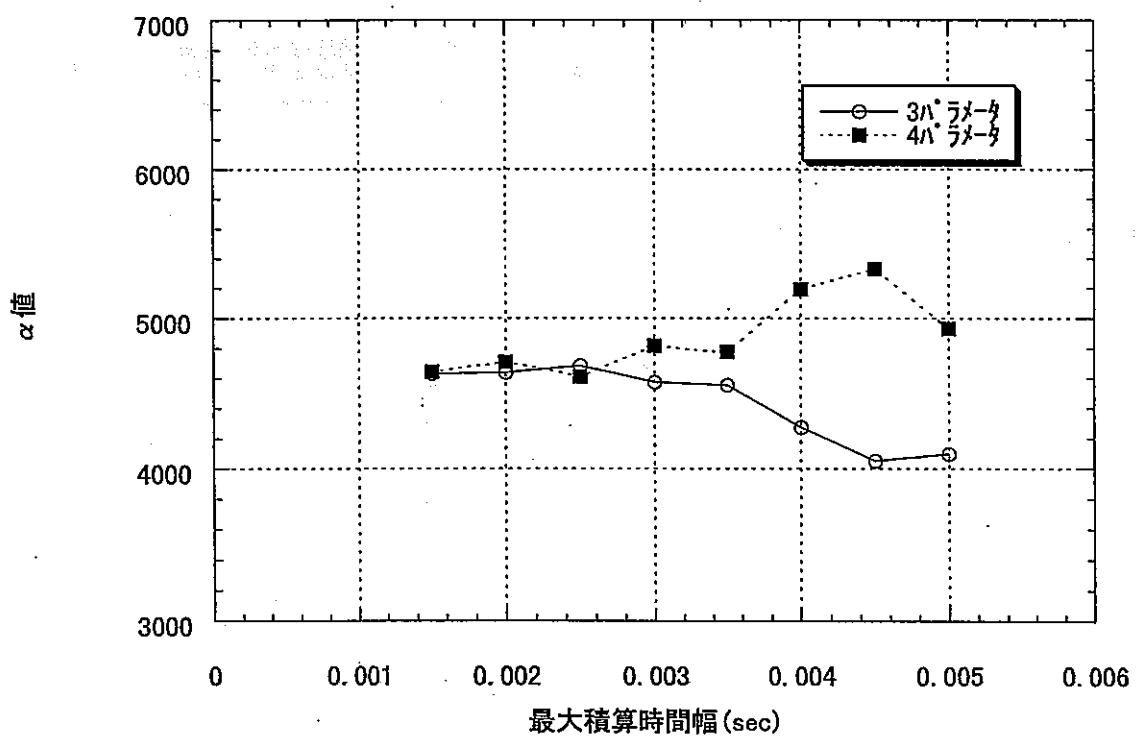
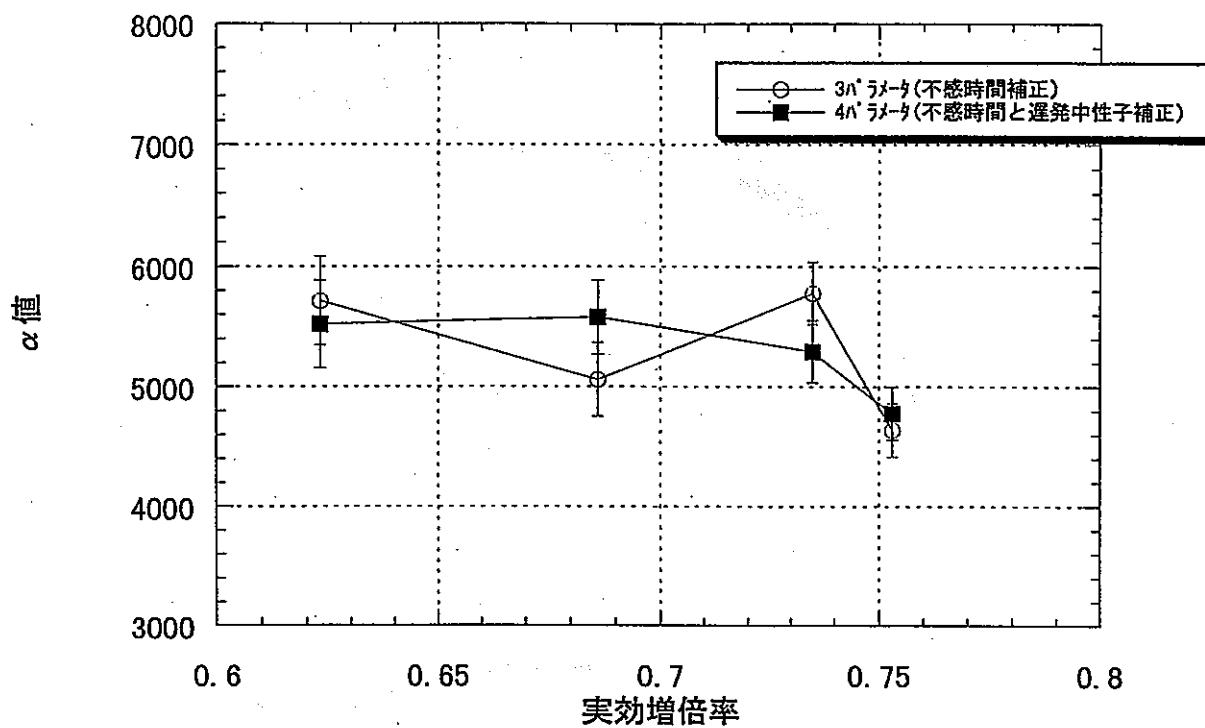
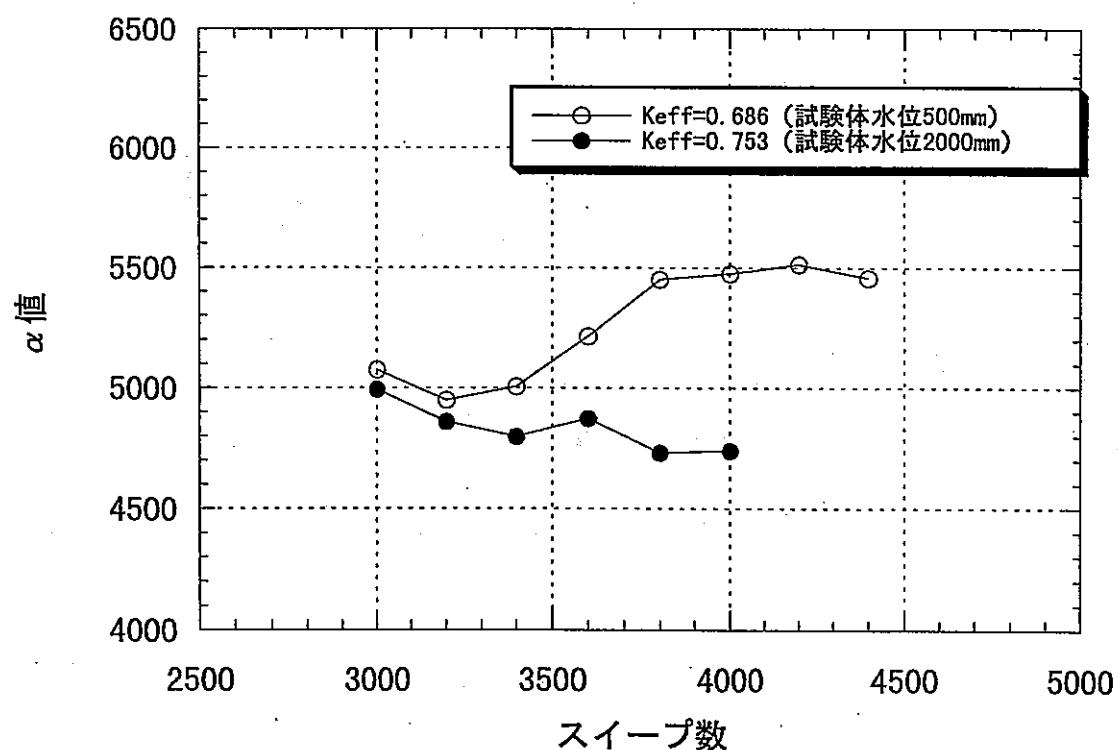


図35 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係(S4-4炉心、試験体水位2000mm)

図36 実効増倍率と  $\alpha$  値の関係 (S4-4炉心)図37 スイープ数と  $\alpha$  値の関係 (S 4-4 炉心 :  $\Delta t=10 \mu\text{sec}$ )

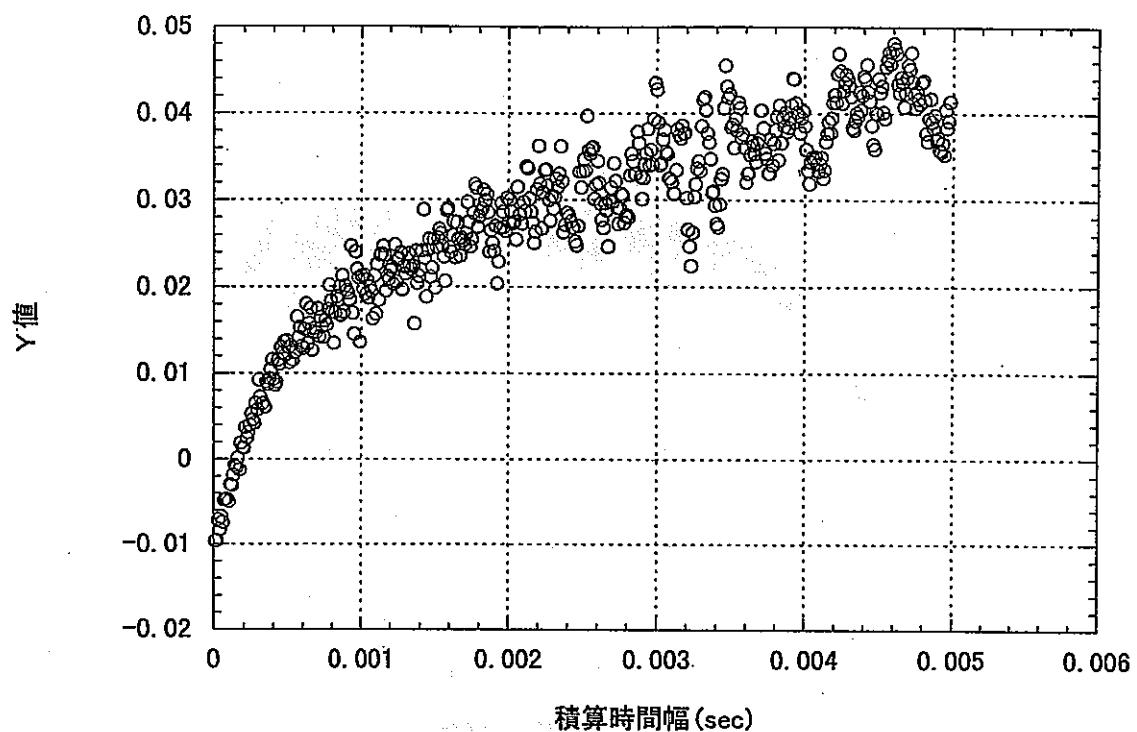


図38 ファインマン- $\alpha$ 法のY値  
(S-1炉心、試験体水位500mm、中性子線源挿入)

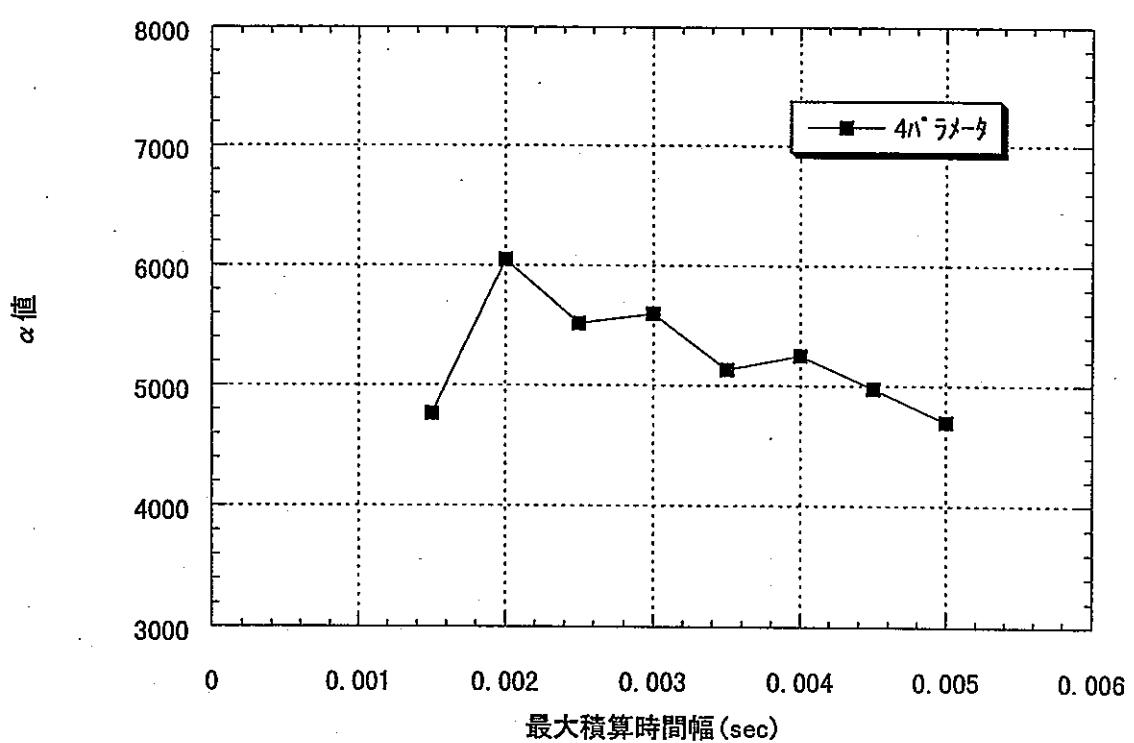


図39 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係  
(S-1炉心、試験体水位500mm、中性子線源挿入)

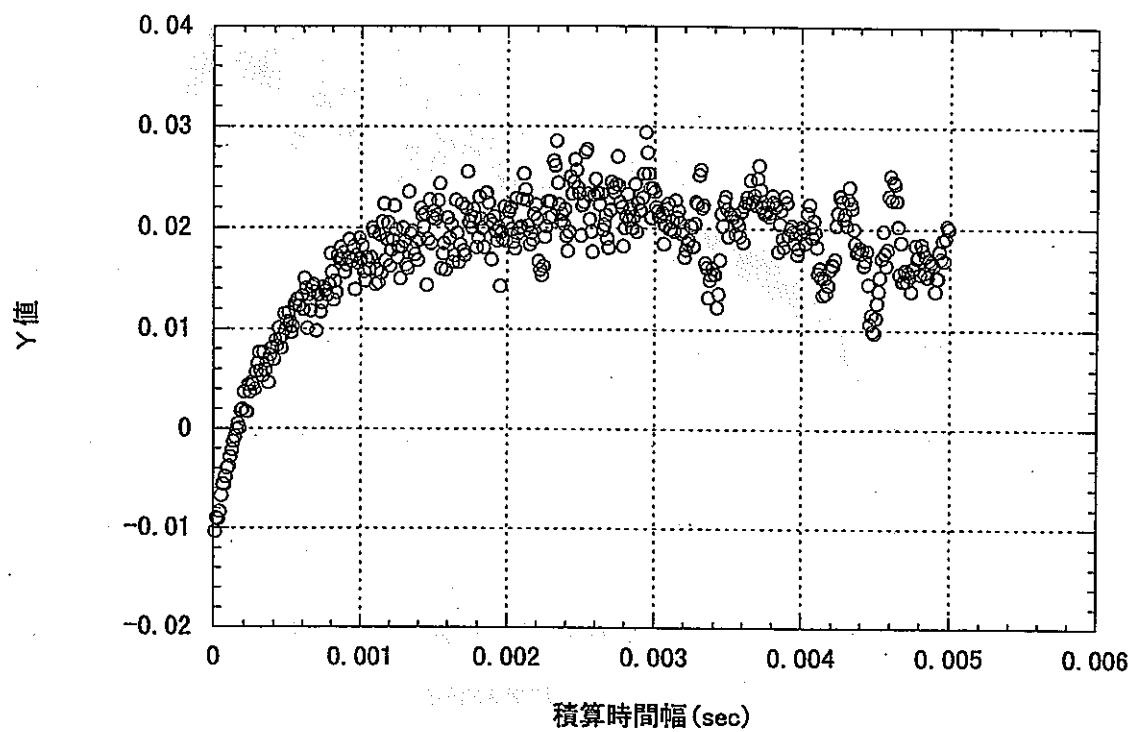


図40 フайнマン- $\alpha$ 法のY値  
(S-1炉心、試験体水位1000mm、中性子源挿入)

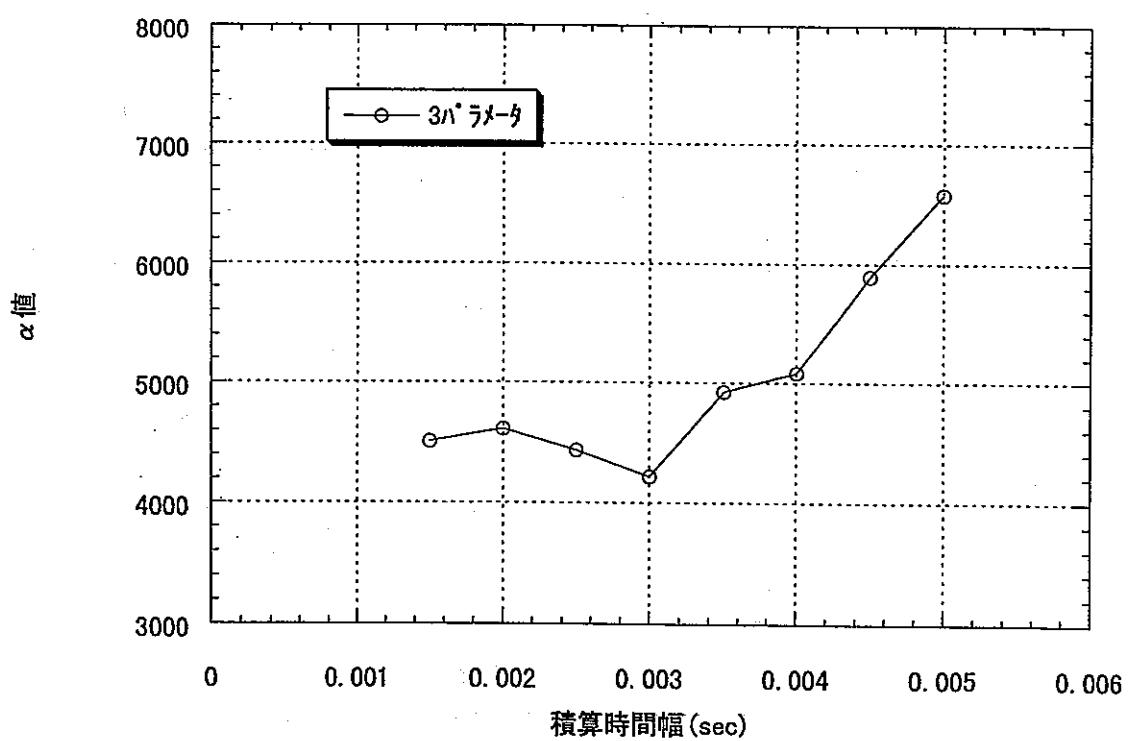


図41 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係  
(S-1炉心、試験体水位1000mm、中性子線源挿入)

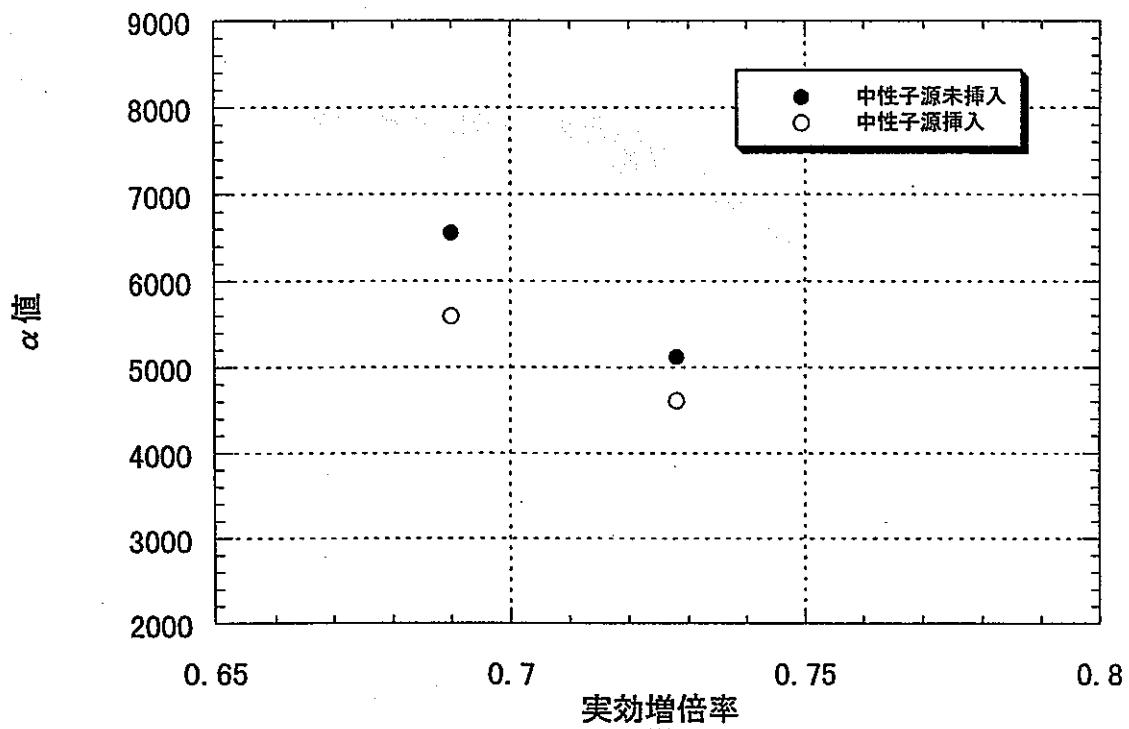


図42 外部中性子線源挿入の効果

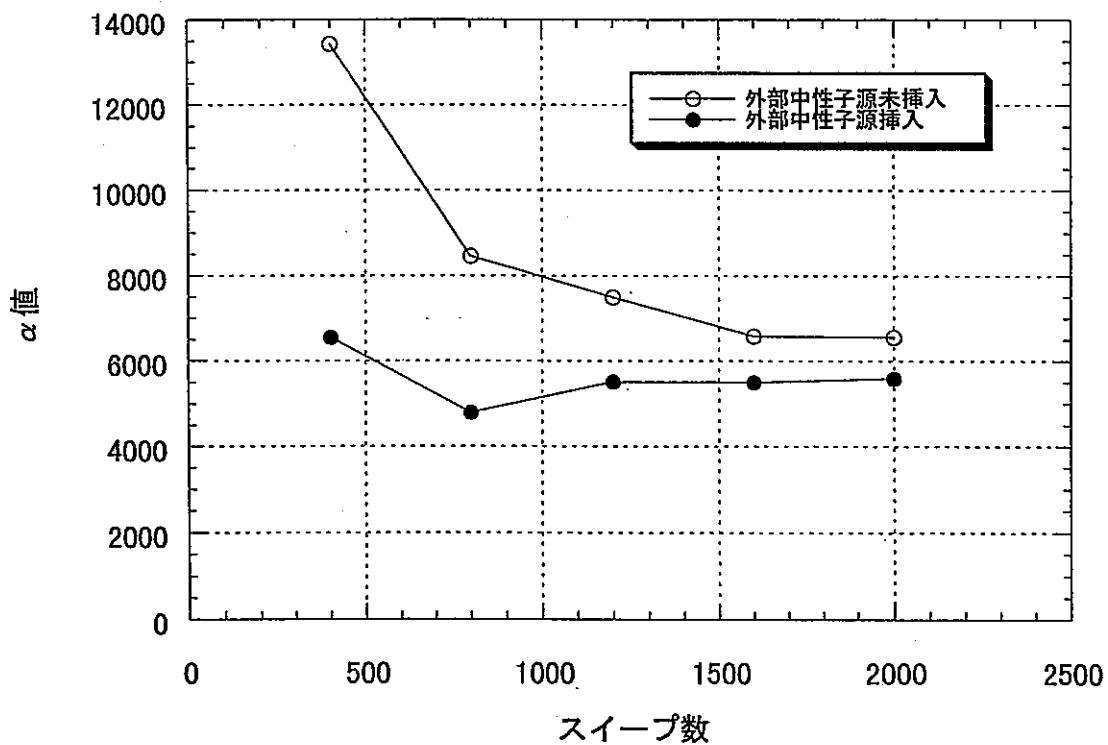


図43 スイープ数と  $\alpha$  値の関係 (S-1 炉心 : 試験体水位500mm)

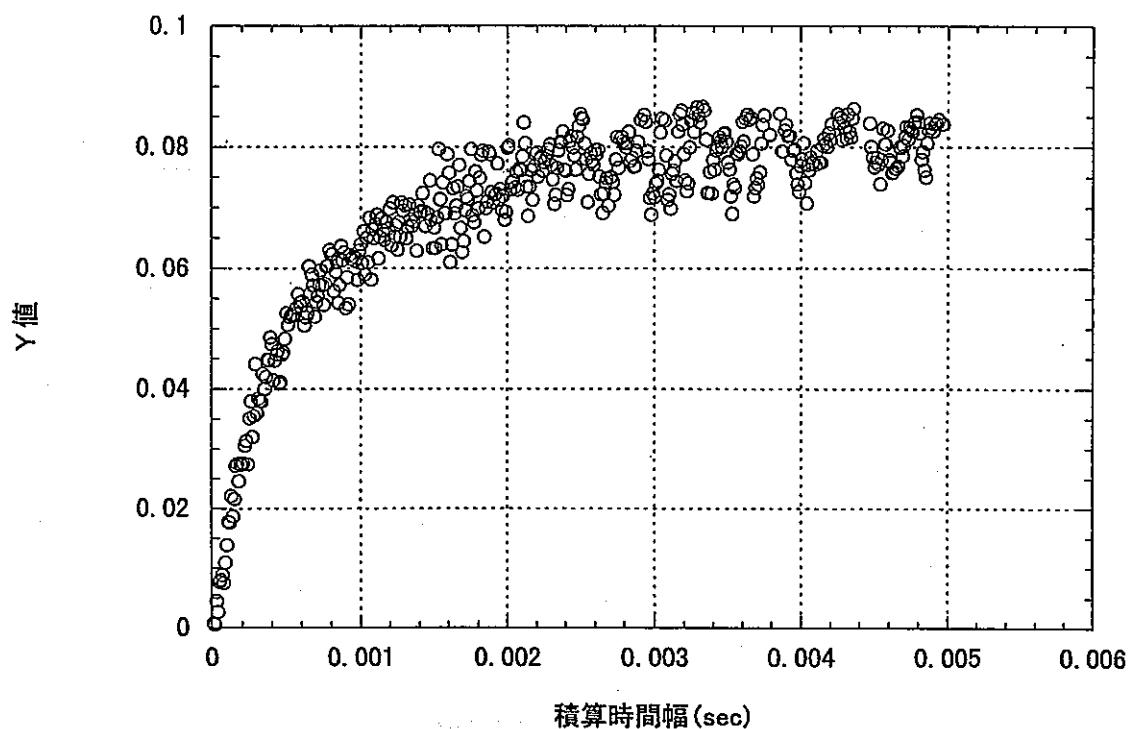


図44 ファインマン- $\alpha$ 法のY値  
(S-2炉心、試験体水位2000mm、検出器位置効果)

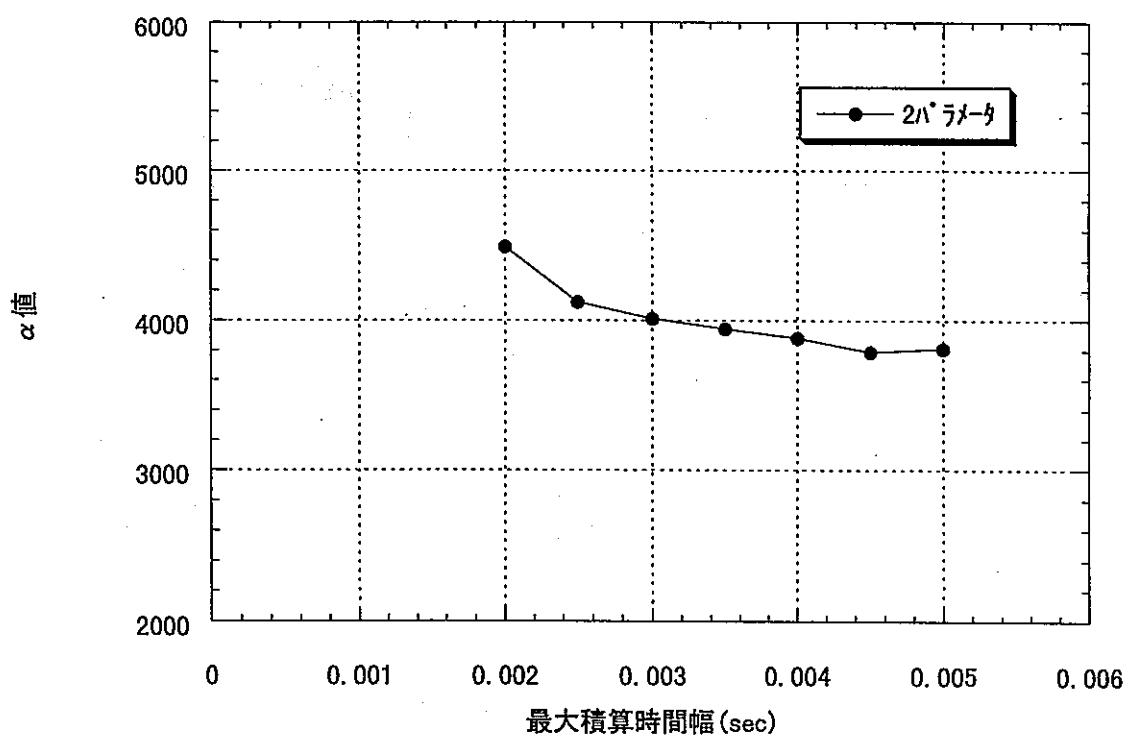
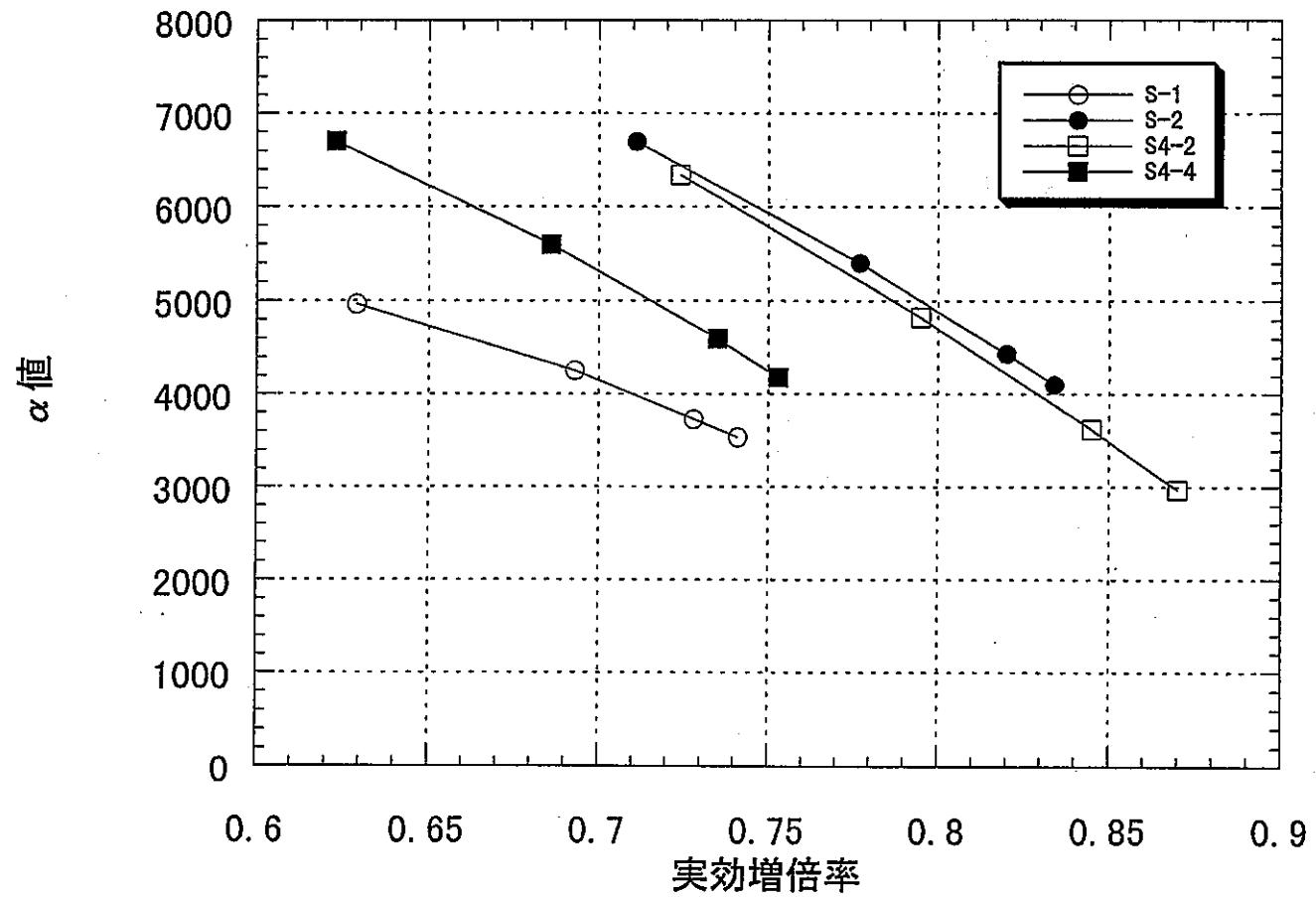


図45 最大積算時間幅と $\alpha$ 値の関係  
(S-2炉心、試験体水位2000mm、検出器位置効果)

図46 炉心間の  $\alpha$  値の比較（計算値：TWODANT）

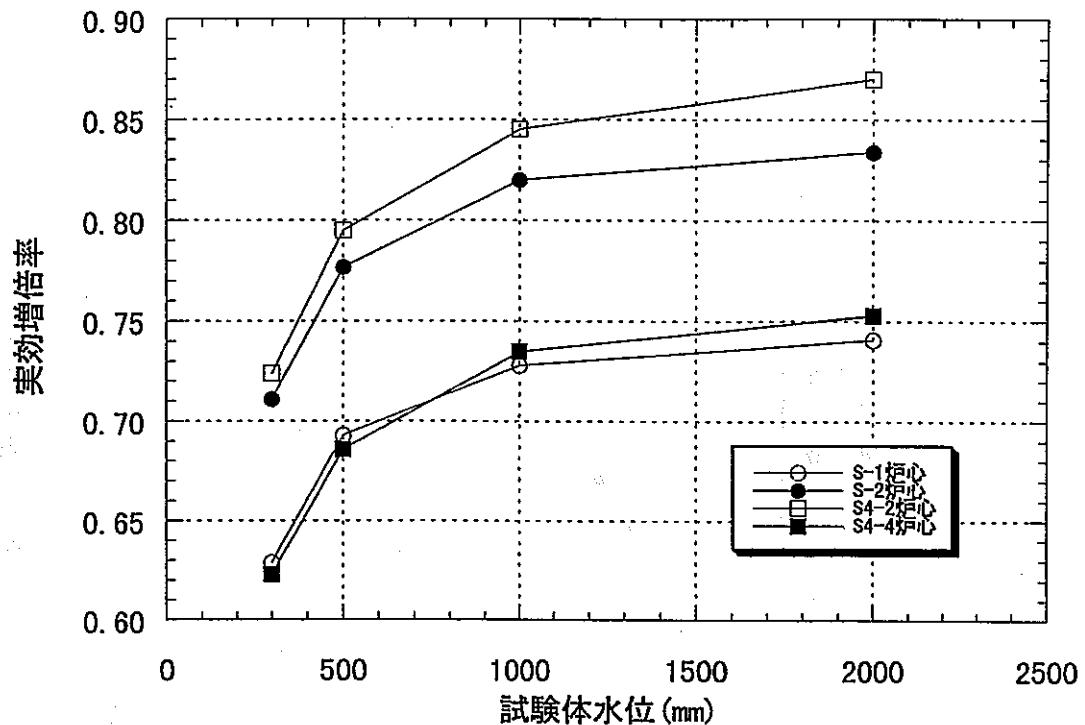


図47 実効増倍率の比較

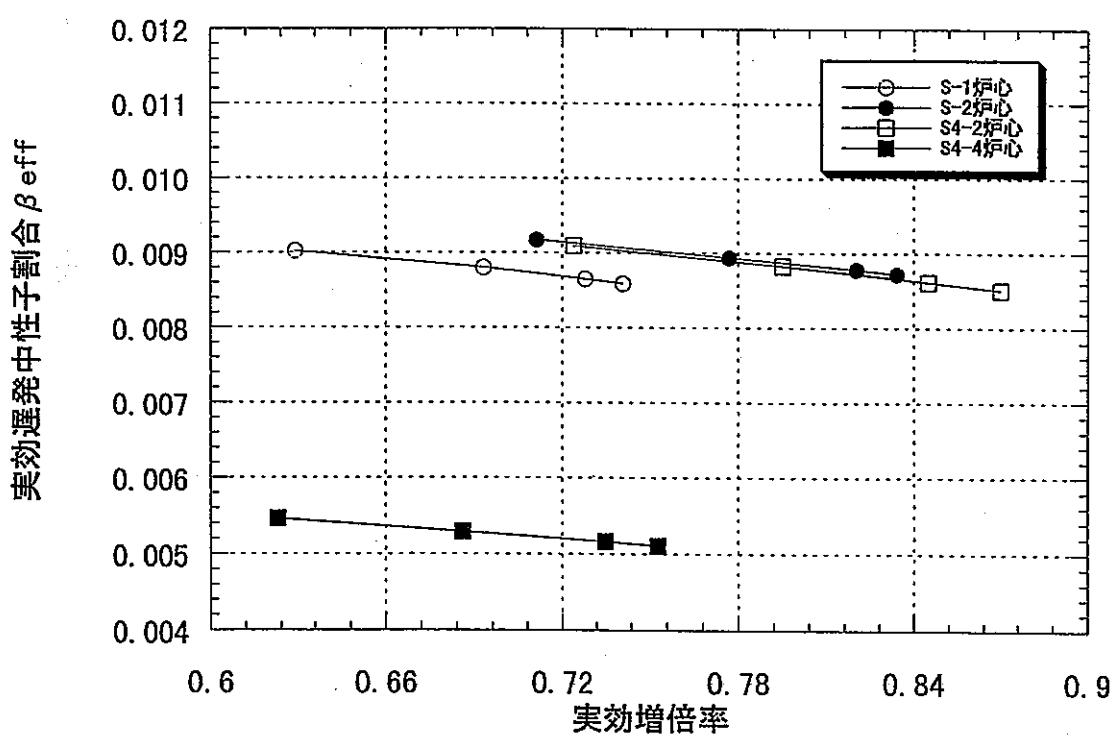


図48 実効遅発中性子割合の比較

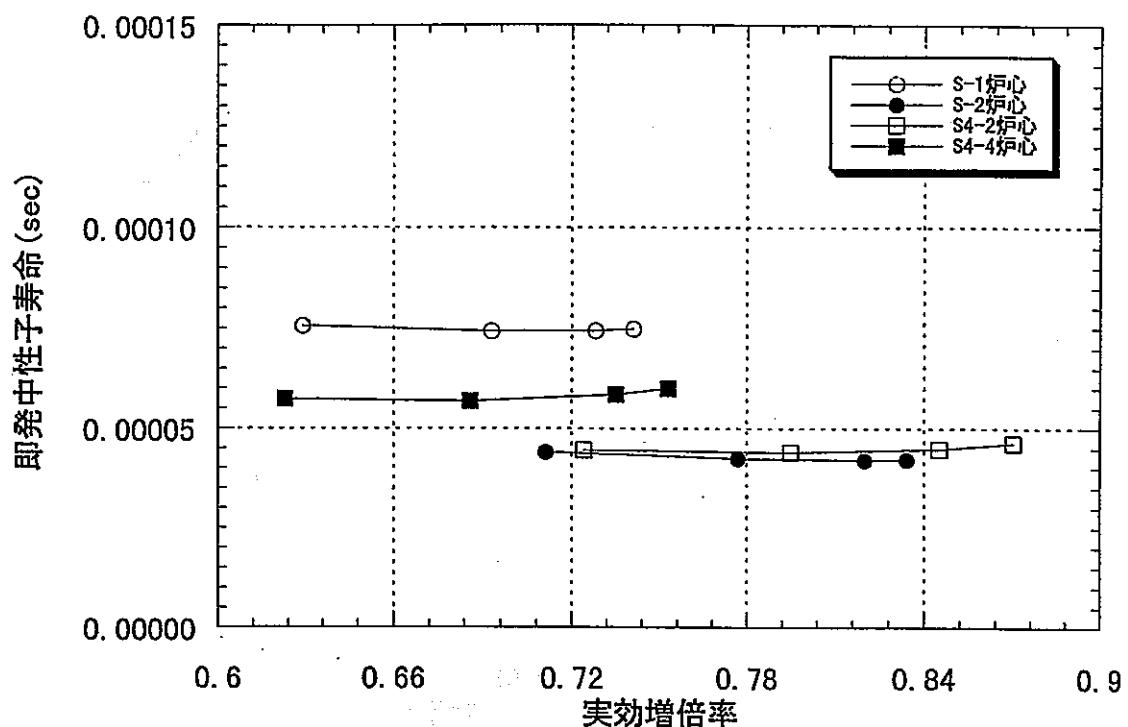


図49 即発中性子寿命の比較 (TWODANT)

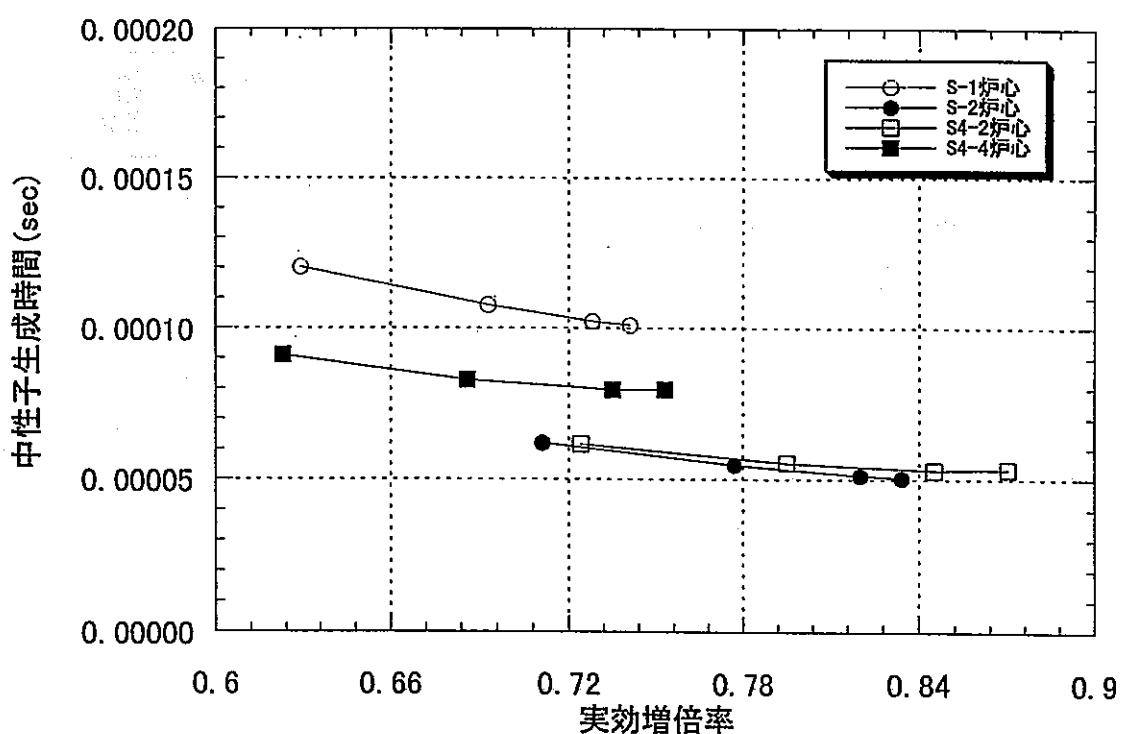


図50 中性子生成時間の比較 (TWODANT)

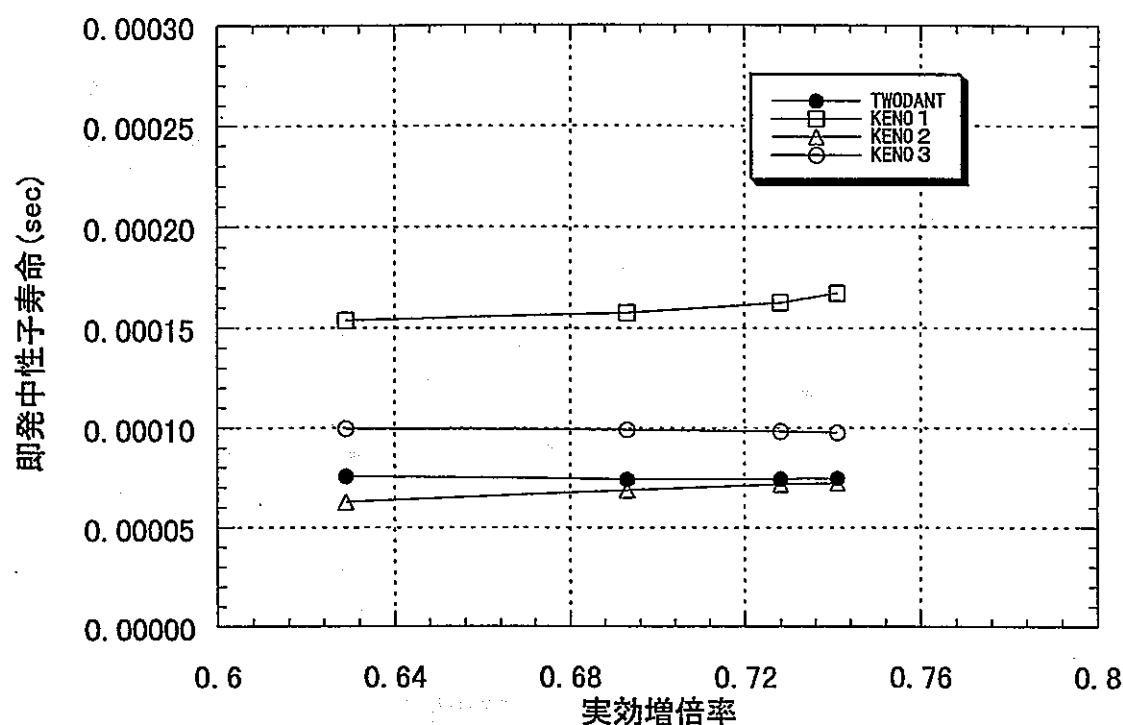


図51 即発中性子寿命の比較 (S-1炉心)

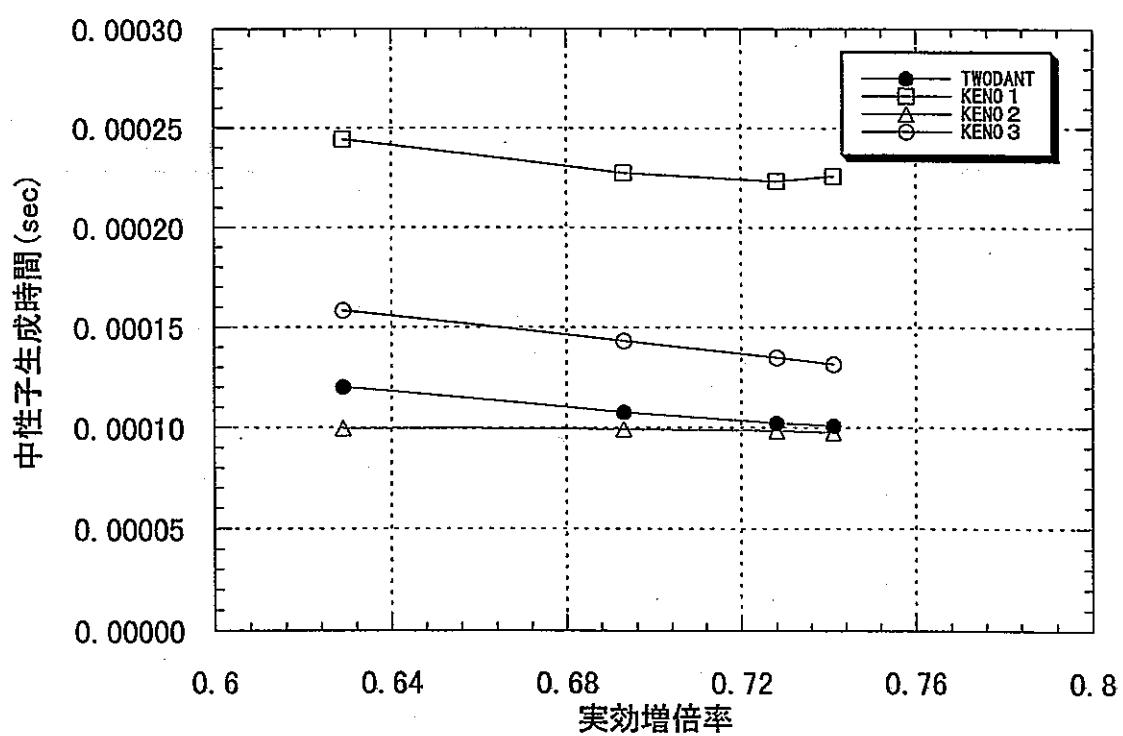


図52 中性子生成時間の比較 (S-1炉心)

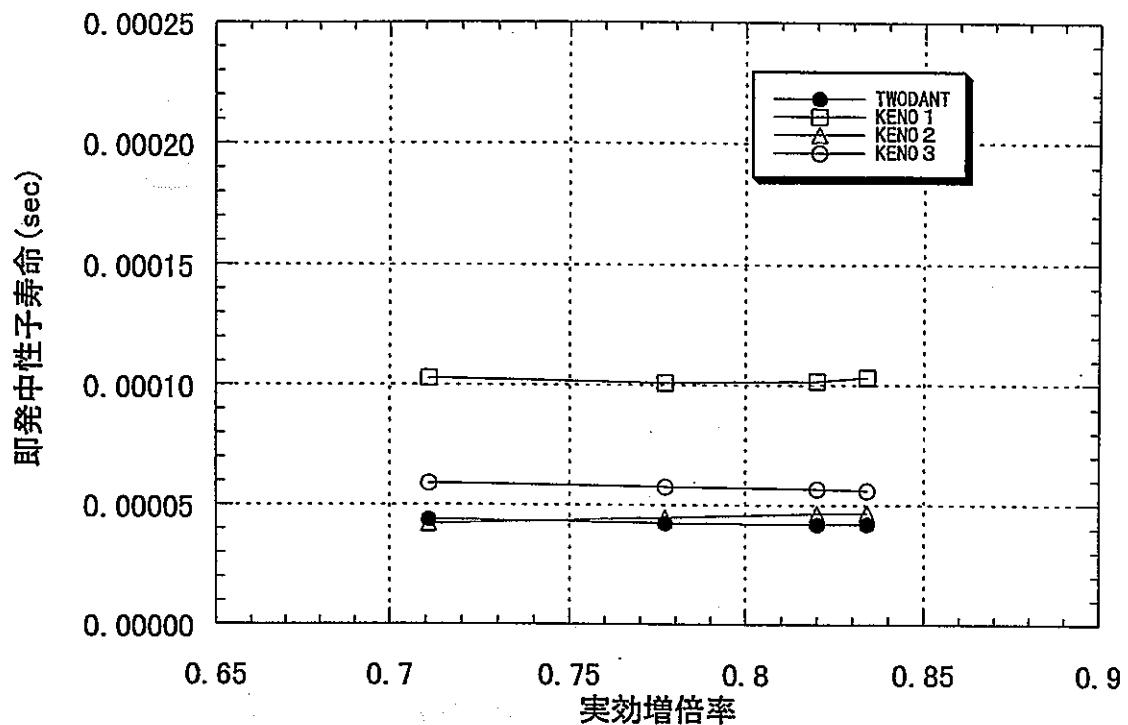


図53 即発中性子寿命の比較 (S-2炉心)

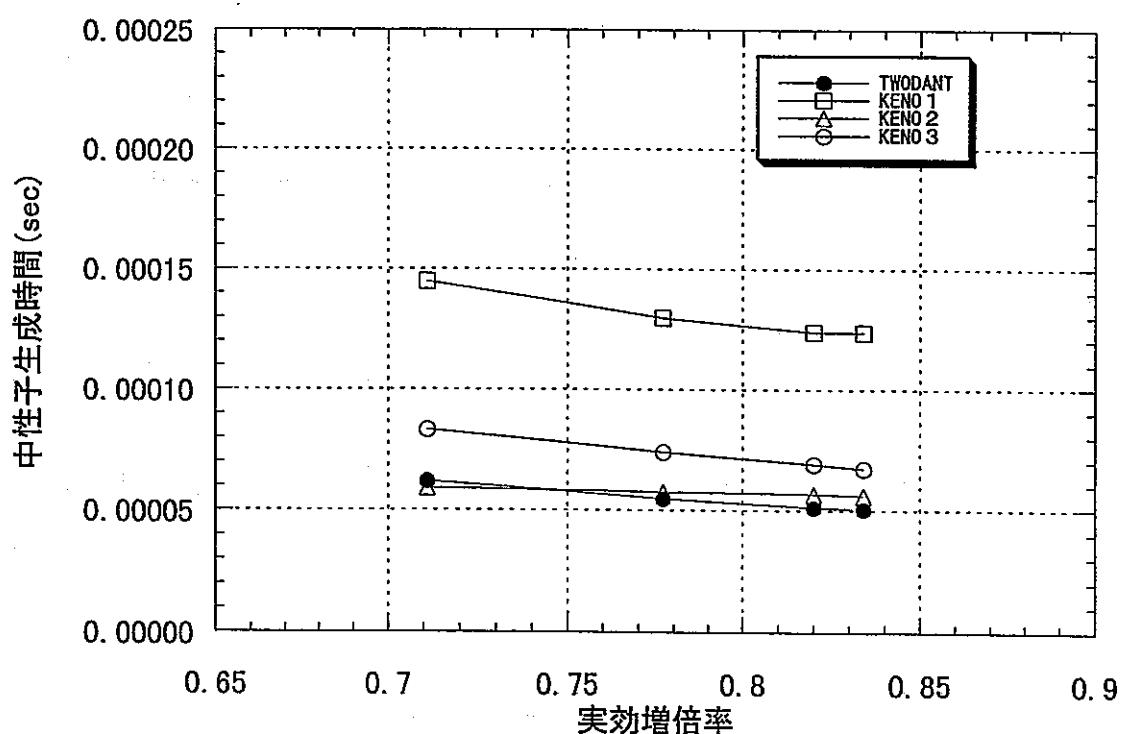


図54 中性子生成時間の比較 (S-2炉心)

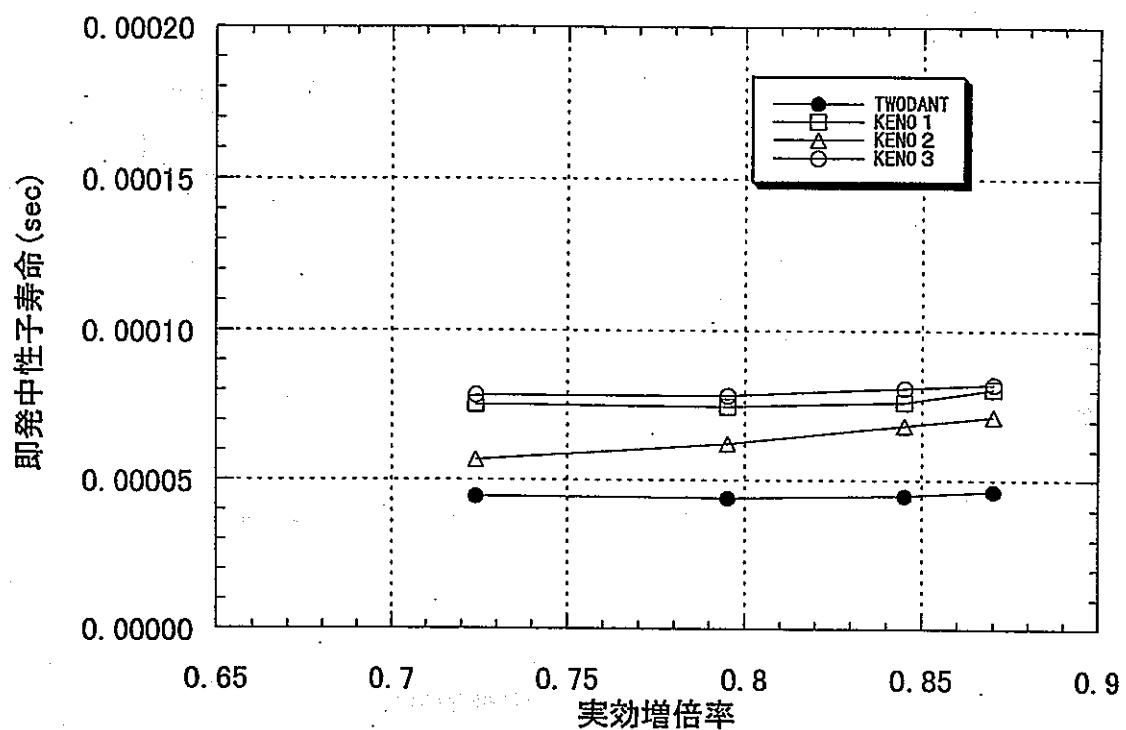


図55 即発中性子寿命の比較 (S4-2炉心)

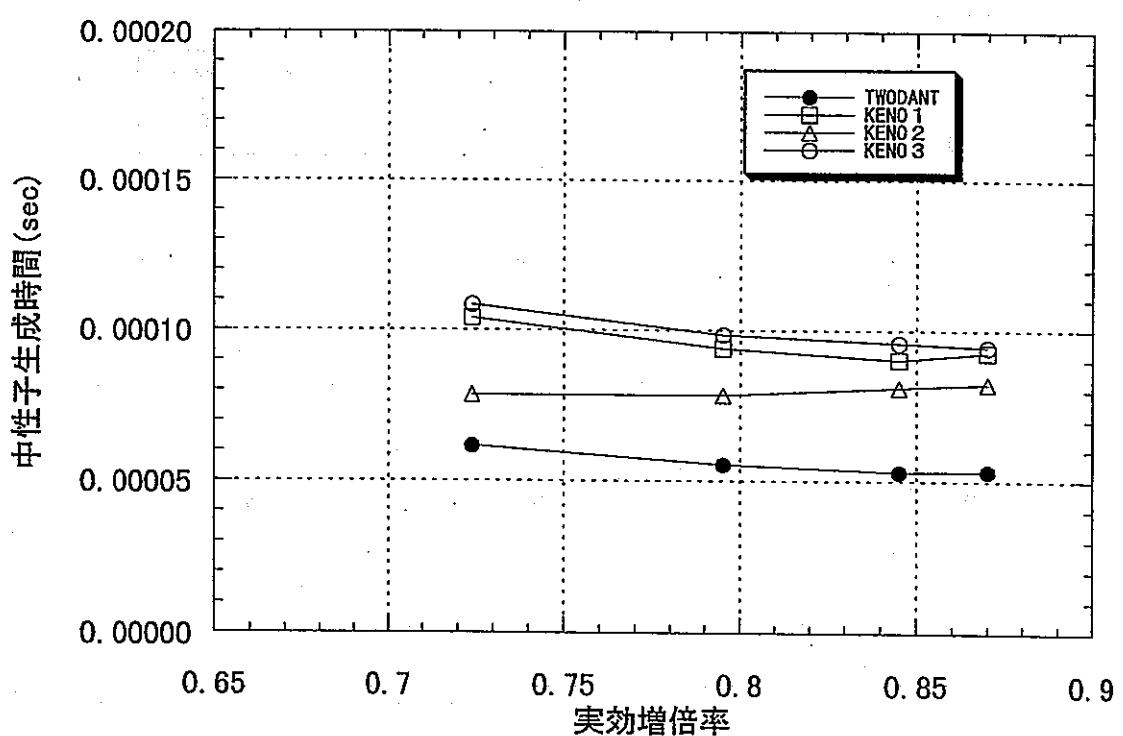


図56 中性子生成時間の比較 (S4-2炉心)

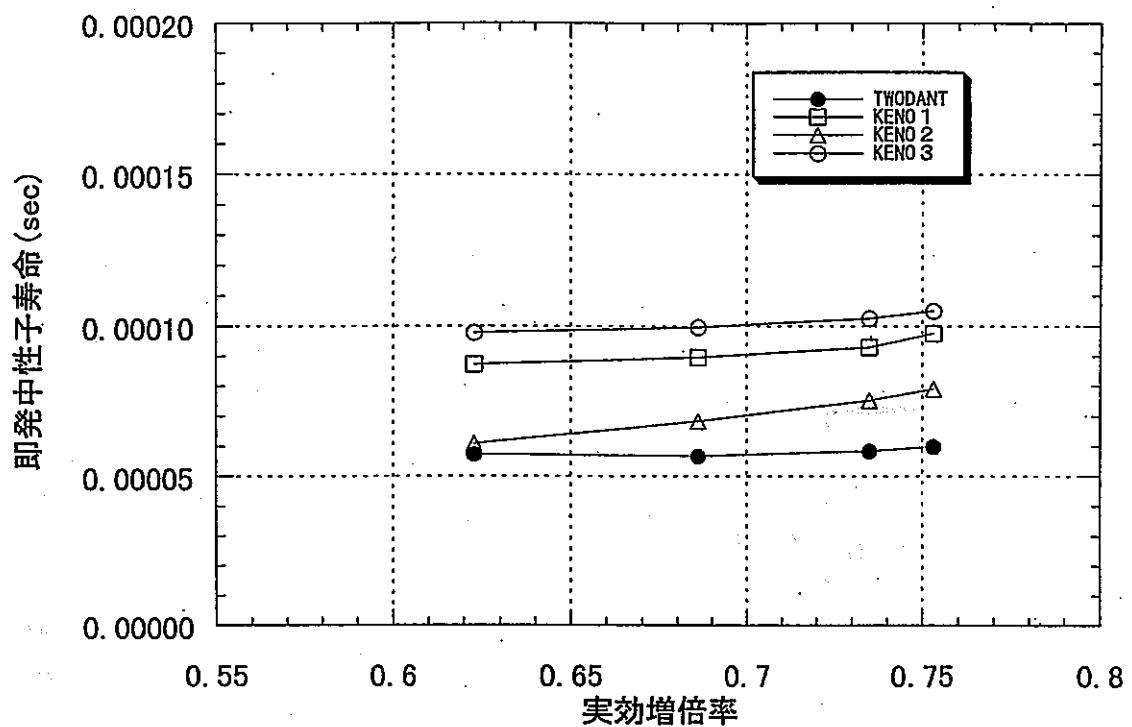


図57 即発中性子寿命の比較 (S4-4炉心)

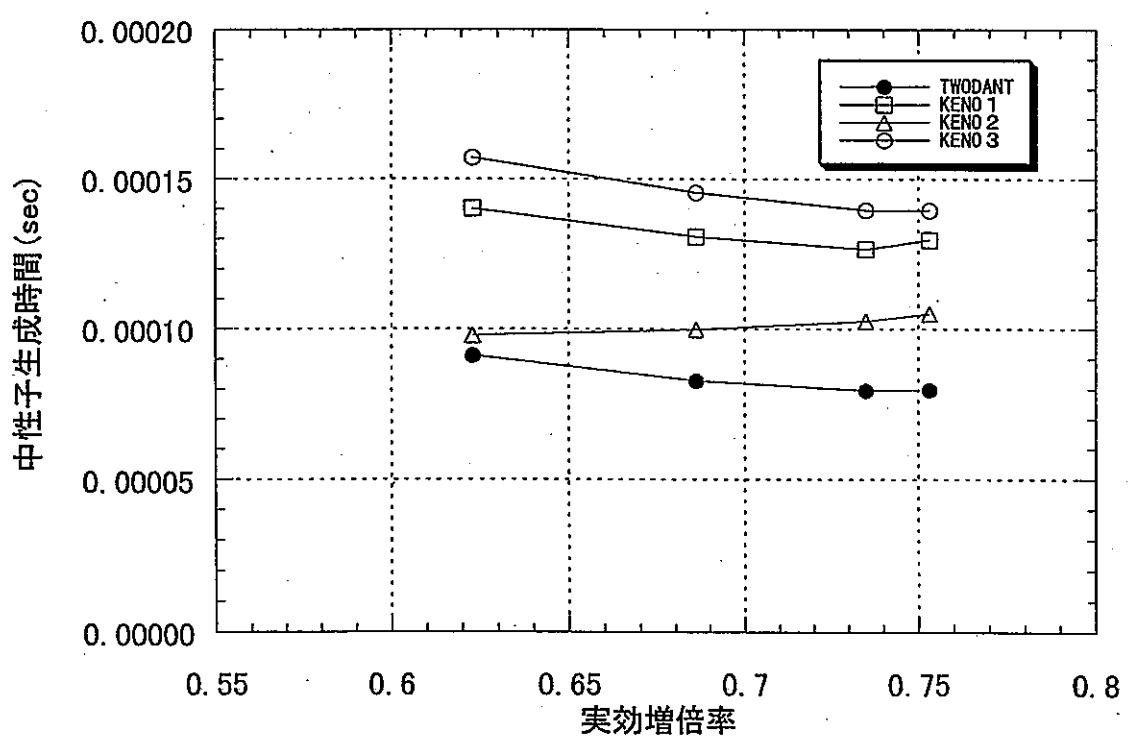


図58 中性子生成時間の比較 (S4-4炉心)

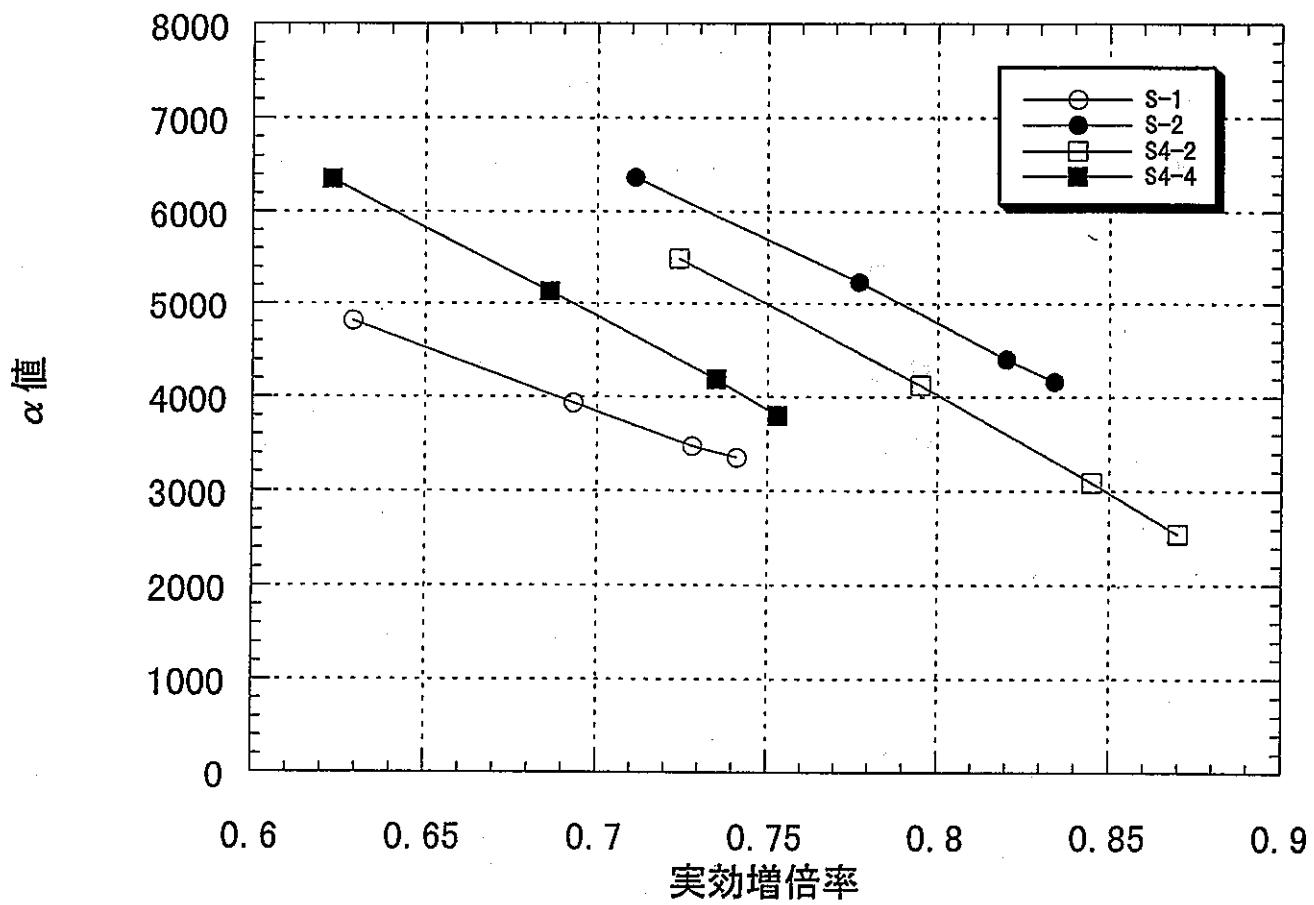
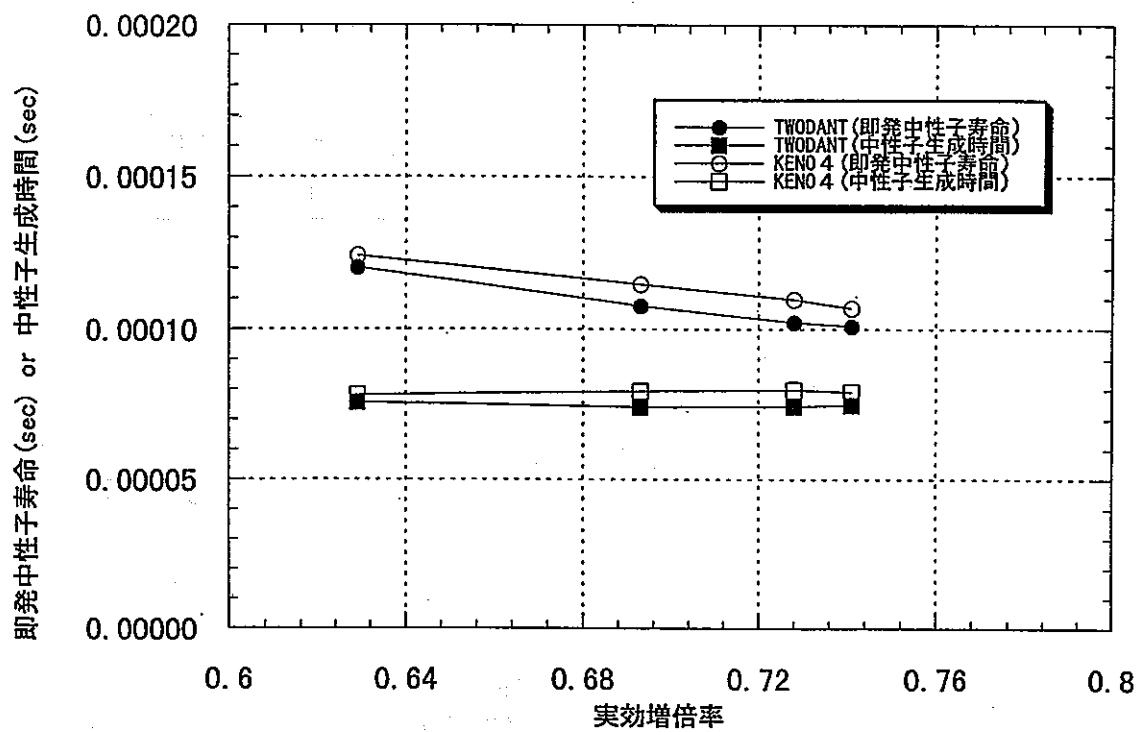
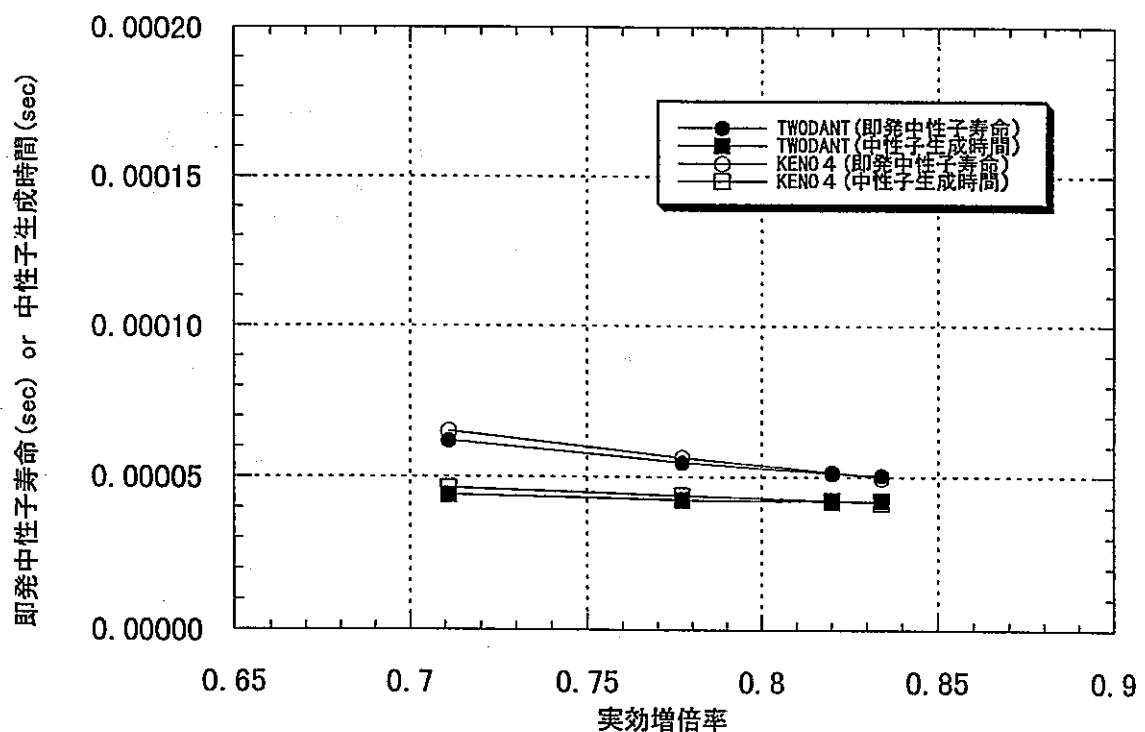


図59 炉心間の  $\alpha$  値の比較（計算値：KENO 4）

図60 即発中性子寿命及び中性子生成時間の比較  
(TWODANT手法とKENO手法4、S-1炉心)図61 即発中性子寿命及び中性子生成時間の比較  
(TWODANT手法とKENO手法4、S-2炉心)

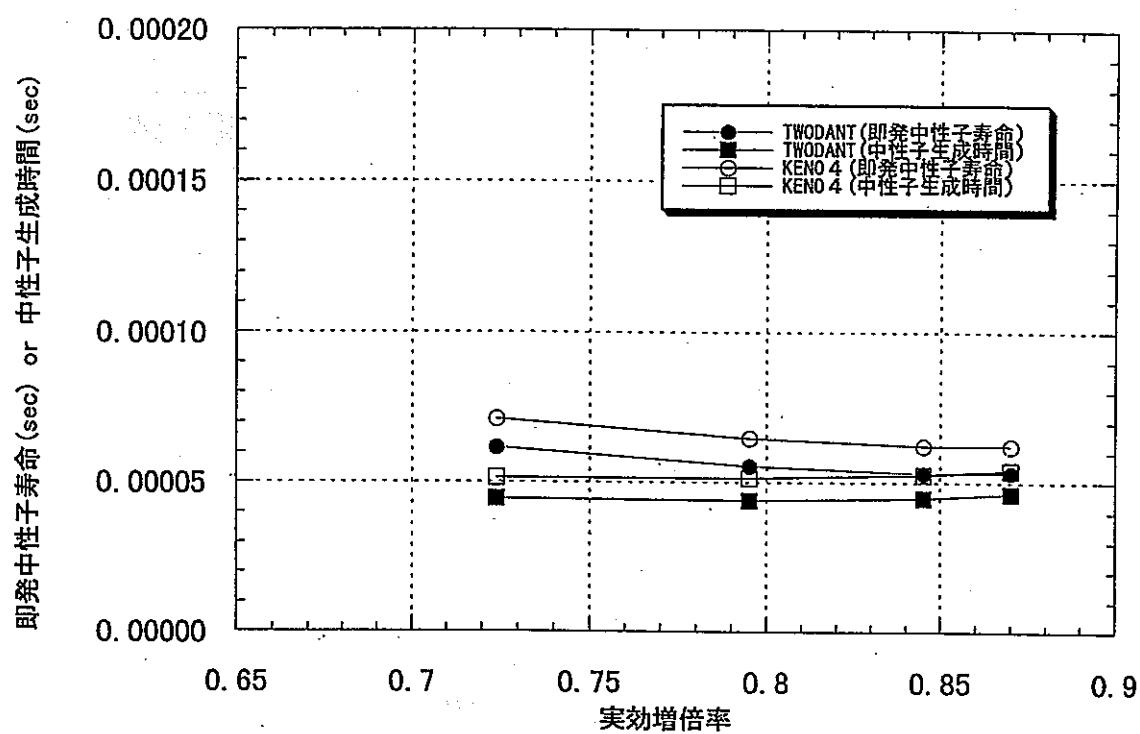


図62 即発中性子寿命及び中性子生成時間の比較  
(TWODANT手法とKENO手法4、S4-2炉心)

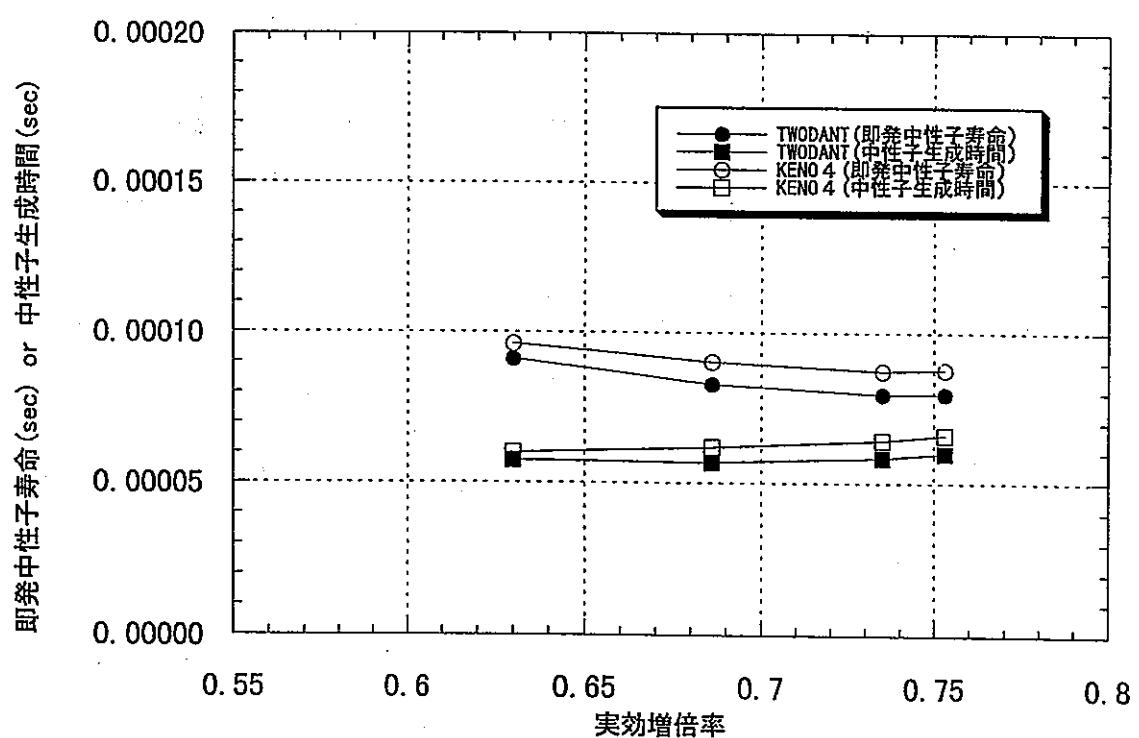


図63 即発中性子寿命及び中性子生成時間の比較  
(TWODANT手法とKENO手法4、S4-4炉心)

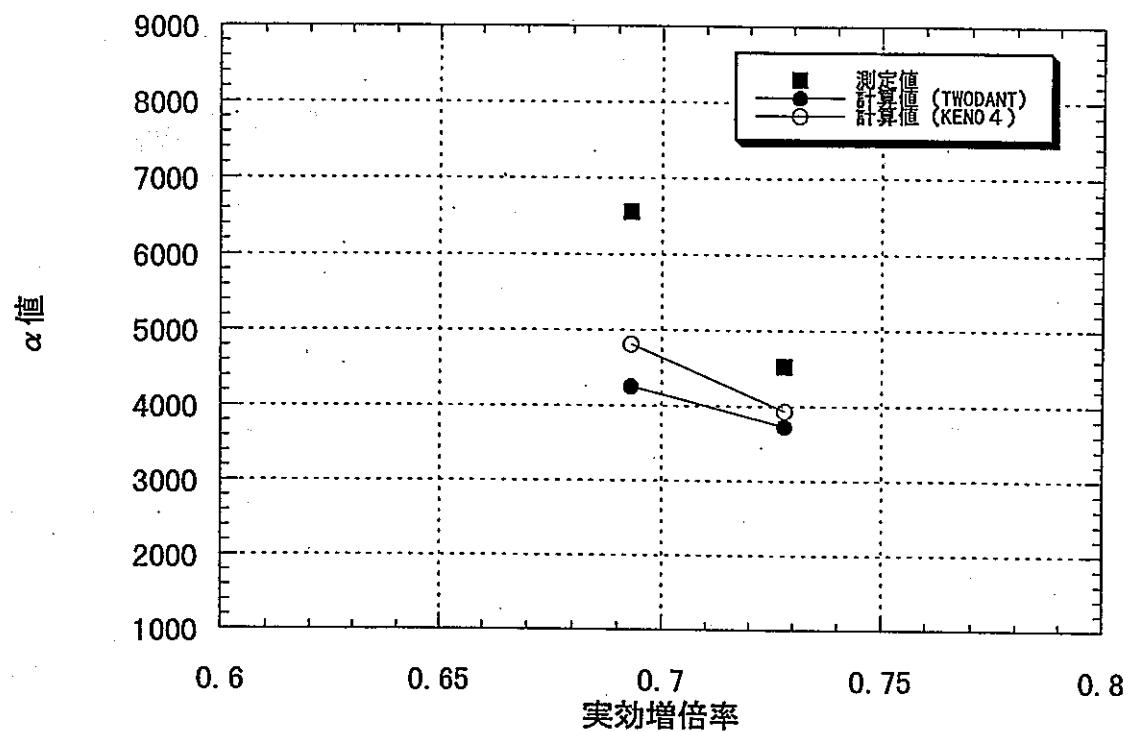


図64 測定値と計算値の比較 (S-1炉心)

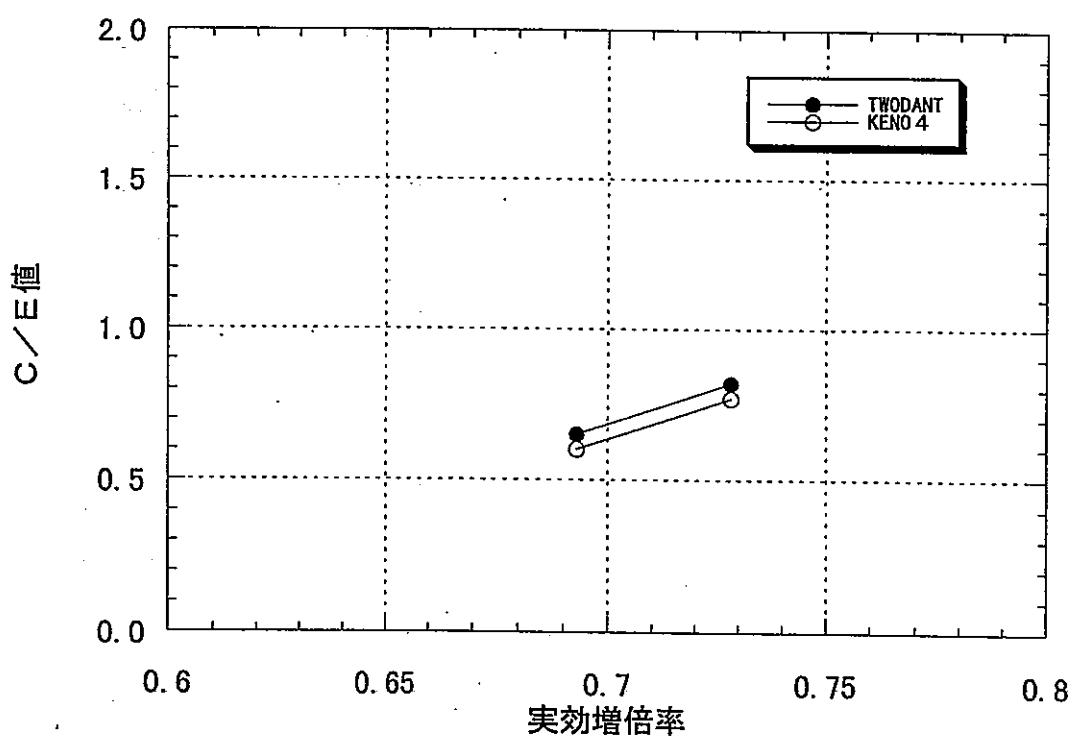


図65 C/E値の比較 (S-1炉心)

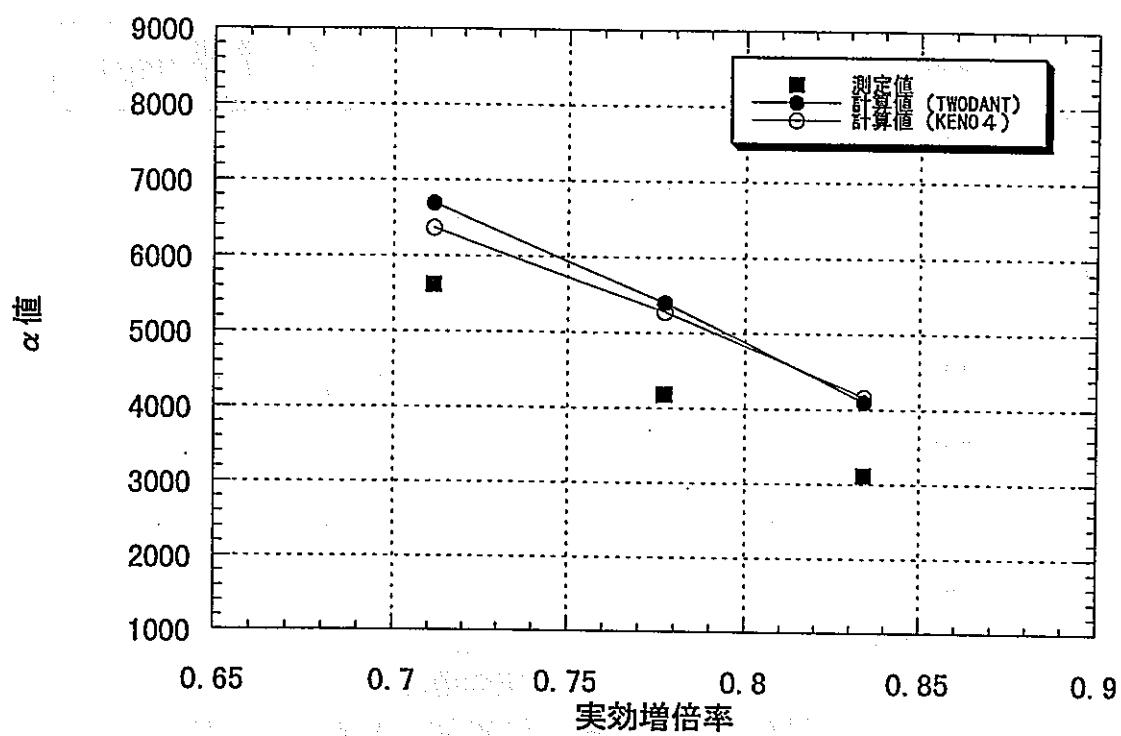


図66 測定値と計算値の比較 (S-2炉心)

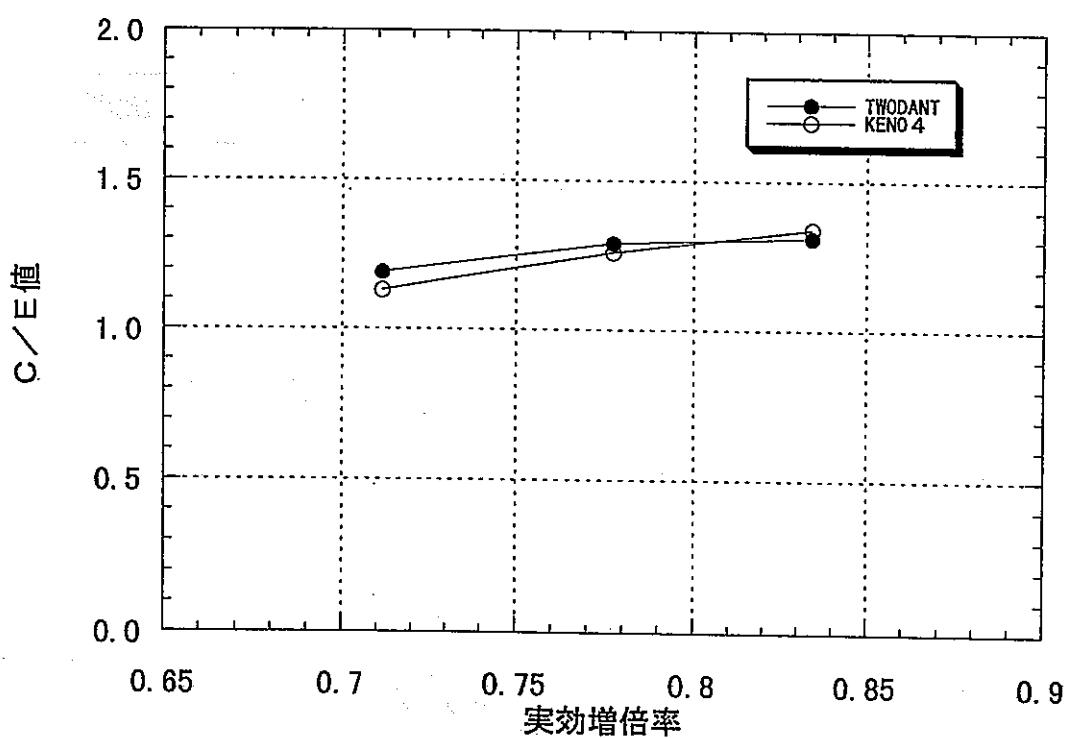


図67 C/E値の比較 (S-2炉心)

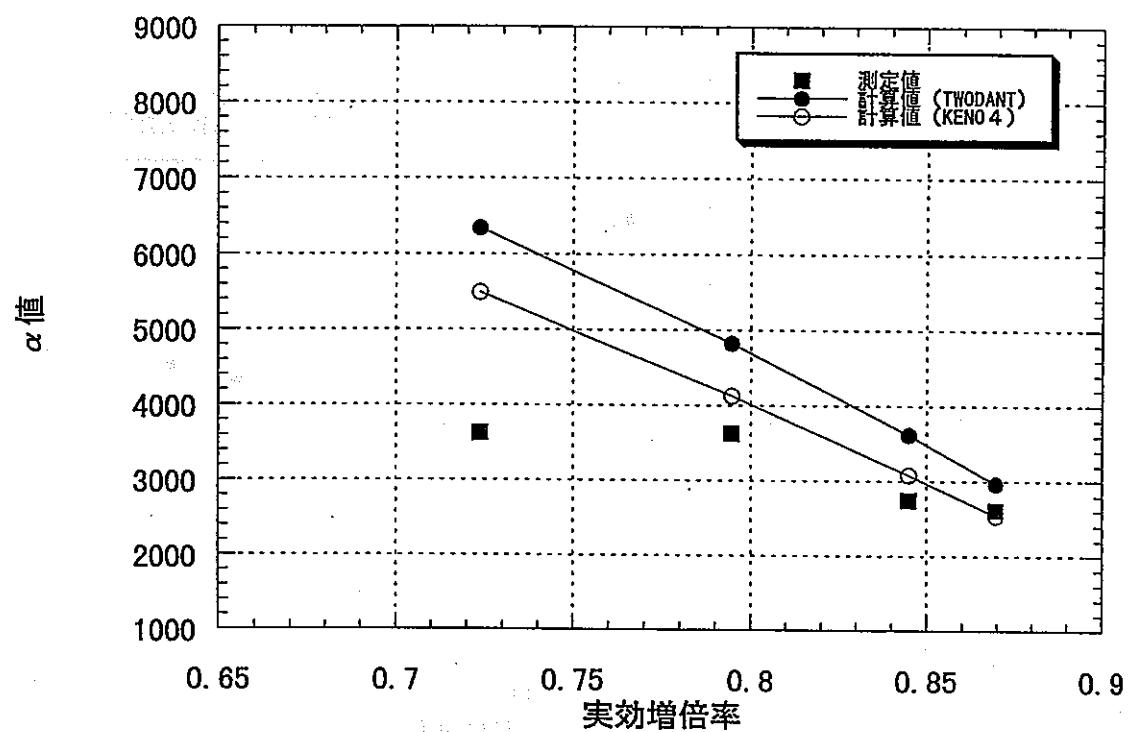


図68 測定値と計算値の比較 (S4-2炉心)

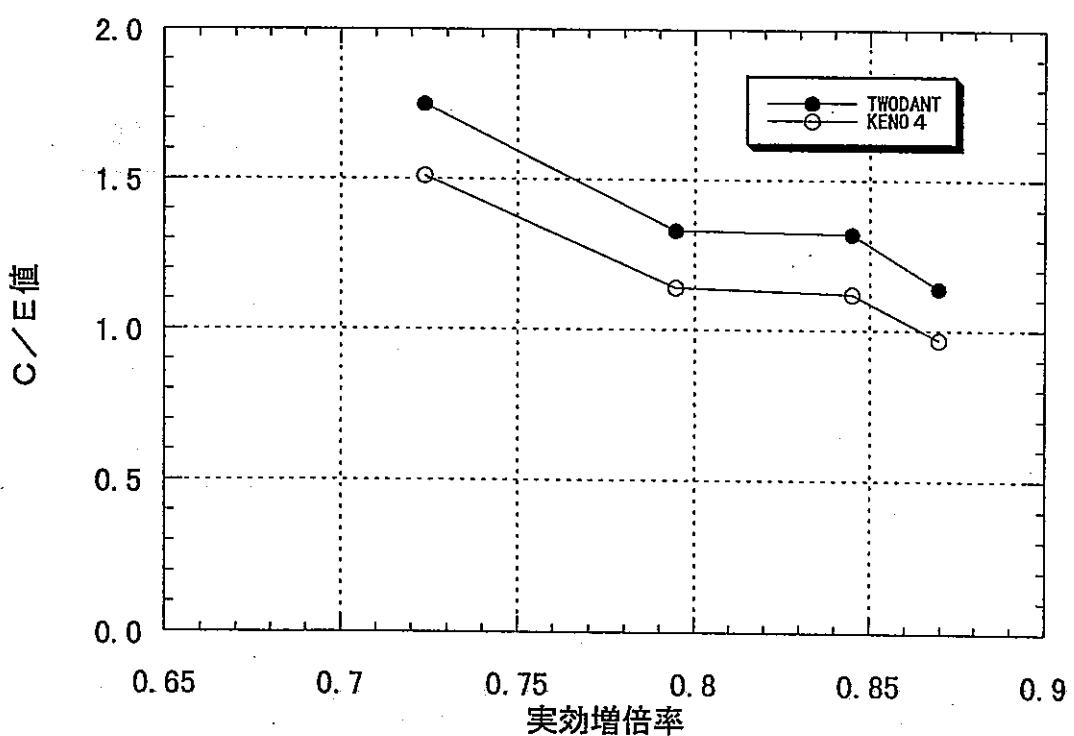


図69 C/E値の比較 (S4-2炉心)

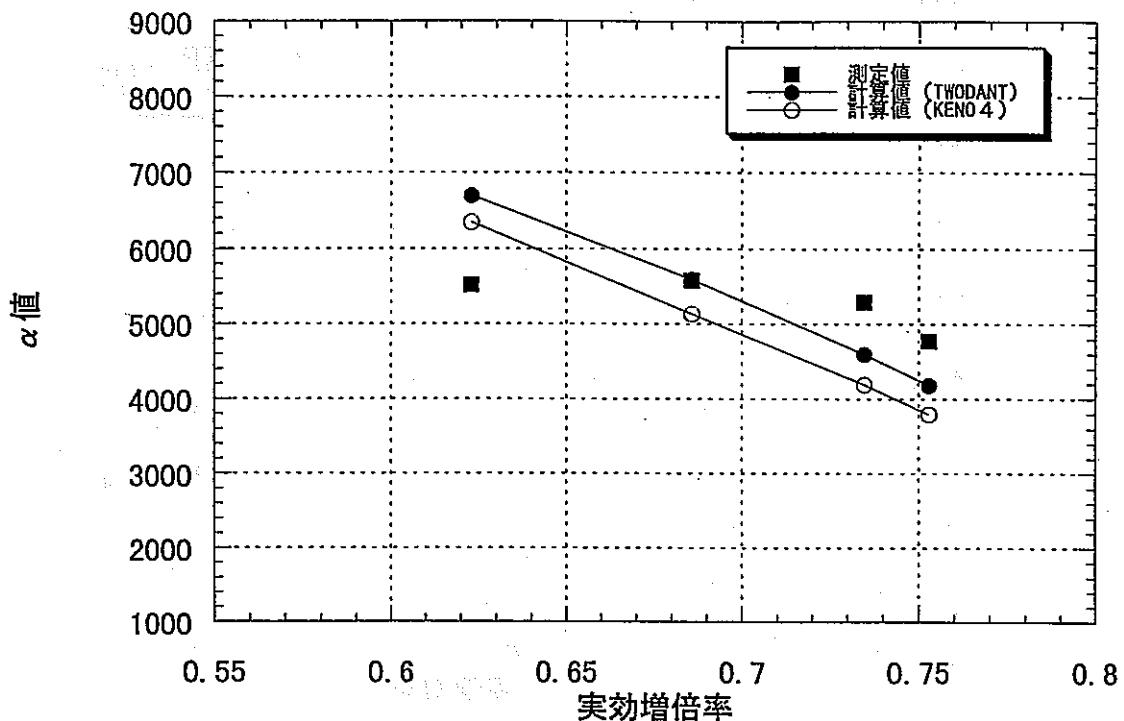


図70 測定値と計算値の比較 (S4-4炉心)

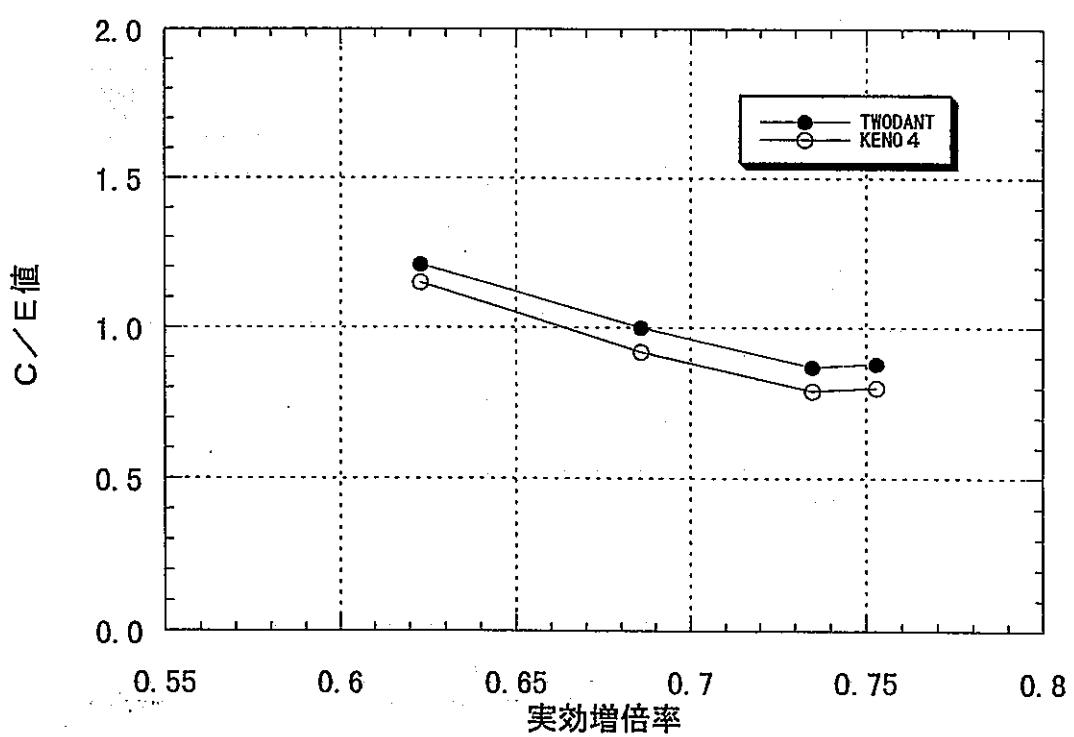


図71 C/E値の比較 (S4-4炉心)