

# ウェーブレット解析による 臨界近接の検知法の開発

1997年1月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

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

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1996

## ウェーブレット解析による

### 臨界近接の検知法の開発

大谷暢夫<sup>\*)</sup>

#### 要旨

核燃料施設の臨界安全管理の信頼性の向上と臨界安全設計の合理化を目的として、核燃料を含む体系の実効増倍率(未臨界度)を直接モニターする未臨界度モニターの開発研究を進めている。未臨界度モニターに適用する測定・解析手法としてウェーブレット解析を検討した。

本研究では、未臨界度を検出する為の測定データである中性子雑音データを、ウェーブレット解析を適用して処理する事によって、体系が臨界に近接していることを検知する手法を開発した。

ウェーブレット解析は信号の時間変化を評価する解析手法であり、短時間の間の信号の処理を集積することによって情報を得る。その結果、これまで未臨界度モニター手法として適用されてきた炉雑音解析手法であるファインマン—アルファ法やミハルソ法と比較して、体系が定常であることが要求される時間間隔が短く、応答の速い未臨界度モニター手法として適用が期待できる。

ウェーブレット解析では、適用するウェーブレット関数に多様な選択が可能であるが、ここではファインマン—アルファ法等の測定に採用してきたマルチチャンネルスケラー(MCS)による測定データを処理することを想定して、カーディナルスプライン関数を用いる離散変換を選択した。又、臨界への近接を数値的に表現する為に、模擬的に作成された非増倍系の計数との比較によって評価を行う手法を考案した。

2階及び4階のカーディナルスプライン関数によるウェーブレット解析の計算式の導出と計算プログラムの作成を行い、重水臨界実験装置(DCA)における測定データを処理して、体系が臨界に近接したことを検知できることを確認した。

---

<sup>\*)</sup> 大洗工学センター実験炉部臨界工学試験室

# Wavelet Analysis for Sub-Criticality Monitoring

Nobuo OHTANI<sup>\*)</sup>

## Abstract

In the study for the development of the sub-criticality monitoring system for the nuclear fuel facilities, wavelet analysis was applied to detect the neutron multiplication system is approaching to critical.

Neutron noise signal is the measured data for the monitoring, and the data was accumulated in the multi-channel scaler of the neutron detection system. From the point of view of the simplicity of numerical calculations of the MCS data, discrete wavelet transform by using the Cardinal spline functions was selected in the variety of wavelet functions.

Simulated noise data of the system without neutron multiplication was numerically produced and also transformed by the wavelet analysis procedure to be compared to the results from the neutron multiplication system. The approach to the critical can be detected by checking the difference of the two kinds of transformed results, with and without neutron multiplications.

The method was applied to the neutron noise signal obtained at the Deuterium Critical Assembly(DCA), and it was confirmed that approaching to critical can be detected by the present method.

---

<sup>\*)</sup> Criticality Engineering Section, Experimental Reactor Division,  
O-Arai Engineering Center, PNC

## 目次

|                        |       |     |
|------------------------|-------|-----|
| 要旨                     | ..... | I   |
| Abstract               | ..... | II  |
| 目次                     | ..... | III |
| 図表一覧                   | ..... | IV  |
| 1. 緒言                  | ..... | 1   |
| 2. 離散ウェーブレット変換と臨界近接の検出 | ..... | 3   |
| 2.1 2階B-スプライン関数による計算式  | ..... | 3   |
| 2.2 4階B-スプライン関数による計算式  | ..... | 10  |
| 2.3 臨界近接の検出            | ..... | 12  |
| 3. 測定評価                | ..... | 14  |
| 3.1 測定体系と測定システム        | ..... | 14  |
| 3.2 計算手順               | ..... | 15  |
| 3.3 模擬計数データの作成         | ..... | 17  |
| 3.4 Cf線源の測定と評価         | ..... | 18  |
| 3.5 中性子増倍体系の測定と評価      | ..... | 20  |
| 4. まとめと今後の計画           | ..... | 43  |
| 謝辞                     | ..... | 45  |
| 参考文献                   | ..... | 45  |

## 図表一覧

|         |                                                                                |    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 図 3-1-1 | 重水臨界実験装置未臨界度測定試験体系                                                             | 24 |
| 図 3-1-2 | 炉心配置                                                                           | 25 |
| 図 3-1-3 | ドライバ燃料クラスター断面図                                                                 | 26 |
| 図 3-1-4 | 炉雑音測定システムの構成                                                                   | 27 |
| 図 3-1-5 | Cf線源検出器                                                                        | 28 |
| 図 3-2-1 | 炉雑音データのウェーブレット変換                                                               | 29 |
| 図 3-2-2 | 臨界近接の検知の手順                                                                     | 30 |
| 図 3-4-1 | Cf線源の測定結果<br>測定データの集積による収束(4 階 B-Spline、330cps)                                | 31 |
| 図 3-4-2 | Cf線源の測定結果<br>測定データの集積による収束(4 階 B-Spline、660cps)                                | 32 |
| 図 3-4-3 | Cf線源の測定結果<br>測定データの集積による収束(4 階 B-Spline、4200cps)                               | 33 |
| 図 3-4-4 | Cf線源の測定結果<br>1 スイープのデータの統計的変動(4 階 B-Spline、660cps)                             | 34 |
| 図 3-4-5 | Cf線源の測定結果<br>模擬データの相違による統計的変動(4 階 B-Spline、660cps)                             | 35 |
| 図 3-4-6 | Cf線源の測定結果<br>測定データの集積による収束(2 階 B-Spline、330cps)                                | 36 |
| 図 3-5-1 | 臨界近接の検知(4 階 B-Spline, $\Delta t=20\text{msec.}$ )                              | 37 |
| 図 3-5-2 | MCS チャンネル時間幅依存性(4 階 B-Spline)                                                  | 38 |
| 図 3-5-3 | 1 スイープの測定による臨界近接の検知<br>(4 階 B-Spline, $20\text{msec.} \times 8192\text{ch.}$ ) | 39 |
| 図 3-5-4 | 臨界近接の検知(2 階 B-Spline, $\Delta t=20\text{msec.}$ )                              | 40 |
| 図 3-5-5 | スプライン関数の階数依存性( $\Delta t=40\text{msec.}$ )                                     | 41 |
| 図 3-5-6 | 1 スイープの測定による臨界近接の検知<br>(2 階 B-Spline, $20\text{msec.} \times 8192\text{ch.}$ ) | 42 |

## 1. 緒言

大洗工学センター実験炉部臨界工学試験室では、高速炉燃料再処理施設等の核燃料施設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、未臨界度すなわち実効増倍率のモニター技術の開発を実施している。未臨界度モニターは、核燃料物質を含む体系の時間変化(核燃料物質の濃度変化、燃料溶液の液位の時間変化、等)に対して、体系の実効増倍率の変化を測定によって検知する。従来の数値評価のみによる核燃料施設の臨界安全の確保を、未臨界を直接測定によって監視するシステムに変更することを目標とする。

実効増倍率測定または未臨界度モニターに用いる物理的な手法としては、ファインマンローアルファ法<sup>(1),(2),(3)</sup>、ミハルゾ法<sup>(4)</sup>等の炉雑音解析法が有力である。臨界工学試験室においては、ミハルゾ法の為のカリフォルニウム線源検出器<sup>(5)</sup>及び炉雑音測定のための中性子検出システムを開発・整備し、重水臨界実験装置(DCA)を測定対象として未臨界度測定実験を実施してきた。炉雑音測定は、臨界近傍の体系については臨界集合体における古典的な実験手法として確立しているが、核燃料施設で問題となるような低い実効増倍率( $k_{\text{eff}} \sim 0.9$ )の測定については経験が少なく、測定の可能性の確認が必要であった。DCAのATR型のクラスター燃料重水減速炉心に、ファインマンローアルファ法を適用した測定では、臨界近傍( $K_{\text{eff}} \sim 0.98$ )から非常に低い $K_{\text{eff}} \sim 0.3$ 程度の実効増倍率までの検出(厳密には実効増倍率の関数である $\alpha$ 値の検出)が可能であることが確認された。

核燃料施設に適用される未臨界度モニターにおいては、未臨界度の実時間測定が必要である。低い実効増倍率の測定の可能性を確認した後、計算機用のLAN回線をデータ転送に用いるマルチチャンネルスケーラーと高速のCPUを持つワークステーションで構成されたファインマンローアルファ法によるモニターシステムを試作し、上記と同様にDCAのATR炉心体系において、体系の実効増倍率が0.9になったことが1分程度で検知できることを確認した。<sup>(6),(7)</sup>

これまで検討されてきた炉雑音解析法では、未臨界度の評価に要求される統計精度を持つ炉雑音データを取得する間は、体系が定常であることが原理的に必要である。即ち、ファインマンローアルファ法の統計評価やミハルゾ法に用いられる周波数解析(高速フーリエ変換)では、長時間にわたる雑音データを一括して評価する為、例えば、体系の平均中性子束がゆるやかに上昇または下降していると、ゆるやかな変化が統計的な変動(雑音)の評価に含まれてしまい、正しい評価を得ることができない。

本研究では、これまでの炉雑音解析の持つ原理的な困難を緩和できる可能性を持つ解析法として、炉雑音データのウェーブレット解析<sup>(8)</sup>を試みた。ウェーブレット解析は近年発達した信号解析手法であり、短い時間間隔の信号データの評価を積み重ねることによって、信号に含まれる時間情報を得る。FFT等の評価結果には時間情報が残らないが、ウェーブレット解析では短い時間間隔のデータが処理されているので、信号に含まれる時間情報を抽出することができる。

中性子増倍体系の炉雑音データにおいて、体系の未臨界度を示す情報は、雑音に含まれる即発中性子寿命に対応する中性子束の減衰の情報であり、相当する周波数または減

衰時間の近傍に、非増倍系のデータとは異なったふるまいを示す部分があると考えた。即発中性子寿命に対応する中性子束の減衰の時間は、炉雑音データを取得する全体の時間間隔と比較して十分短く、短時間間隔のデータの積算によって増倍の情報が得られると思われる。

ウェーブレット解析には、大別して連続変換と離散変換があり、信号に含まれる有意な情報を可視化することを目的とした連続変換の例が多く報告されている。炉雑音のウェーブレット解析についても連続変換を試み、炉雑音データがウェーブレット解析に感度を持つことを確認したが、信号に含まれる有意な成分を可視化することはうまくいかなかった。本研究では、ファインマン $\alpha$ 法等の実験に用いてきたマルチチャンネルスケーラーによって測定を行うことを想定し、解析計算そのものには近似の少ない離散変換を採用した。

ウェーブレット解析で得られる評価は、例えばフーリエ解析と比較して、解析で得られた数値の数学的または物理的意味が不明確である。ここでは、ウェーブレット解析でえられる結果の数値を十分な統計精度となるまで蓄積し、非増倍系の模擬測定データとの比較によって臨界への近接を検知する方法を検討した。

以下の章で、ウェーブレット関数にカーディナルスプライン関数を用いた離散変換の計算式と臨界近接の検知の方法について示し、続いて重水臨界実験装置における測定とその評価結果を示す。



## 2. 離散ウェーブレット変換と臨界近接の検出

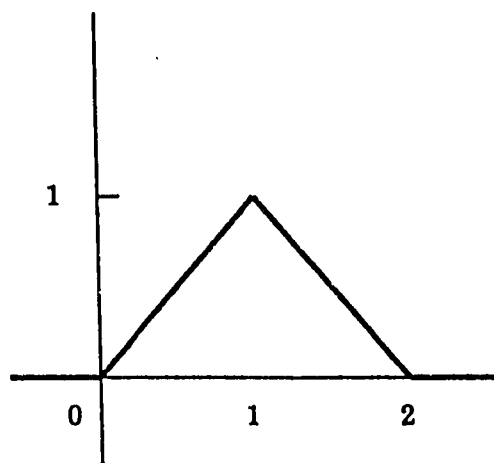
本研究におけるウェーブレット解析にはスプライン関数による離散変換を採用した。計算式は文献(8)によって導出したが、同書にも整理された形でまとめられているとは言い難いので、筆者の理解の範囲で計算式を整理しておく。

### 2.1 2階B-スプライン関数による計算式

離散ウェーブレット変換は、解析すべき信号の値が離散的に与えられている場合に適用される。現実的な想定としてデータは連続する整数値に対して与えられているとし、接点が連続する整数であるカーディナルスプラインを解析に使用する。

$m$ 階( $m-1$ 次)のスプライン関数とは、節点間が( $m-1$ )次曲線、節点で( $m-2$ )階微分係数までが連続な曲線である。一般的な $m$ に対する定義は、切片ベキ関数を用いた定義式が文献(x)p.137に示されている。2階( $m=2$ )の場合は以下の通りである。

$$N_2(x) = \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq 1 \\ 2-x, & 1 \leq x \leq 2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.1.1)$$



Scaling Function, Spline 2

カーディナルBスプライン $N_m(x)$ は次のトゥースケール関係を満たす。

$$N_m(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} p_k N_m(2x - k) \quad (2.1.2)$$

$$p_m = \frac{1}{2^{m-1}} \binom{m}{k}, \quad k=0,1,\dots,m \quad (2.1.3)$$

$m=2$ の場合は、

$$p_0=1/2, p_1=1, p_2=1/2$$

となる。

離散ウェーブレット変換の適用に際しては、連続的な関数(信号)  $f(x)$  に対して離散データ  $f(n)$  が与えられているとする。与えられた離散データを用いて、 $f(x)$  の近似関数  $f_0(x)$  を補間によって求める。

$$f_0(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_k^{(0)} N_2(x-k) \quad (2.1.4)$$

$$c_k^{(0)} = f(k+1) \quad (2.1.5)$$

分解と再構成は一連の次式による。

$$f_j(x) = f_{j-1}(x) + g_{j-1}(x) \quad (2.1.6)$$

$$f_j(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_k^{(j)} \phi(2^j x - k) \quad (2.1.7)$$

$$g_j(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_k^{(j)} \psi(2^j x - k) \quad (2.1.8)$$

$\phi$  はスケーリング関数で、今の場合は  $\phi = N_2$ 、 $\psi$  はマザーウェーブレットであり、次式で現わされる。

$$\phi(x) = N_2(x) \quad (2.1.9)$$

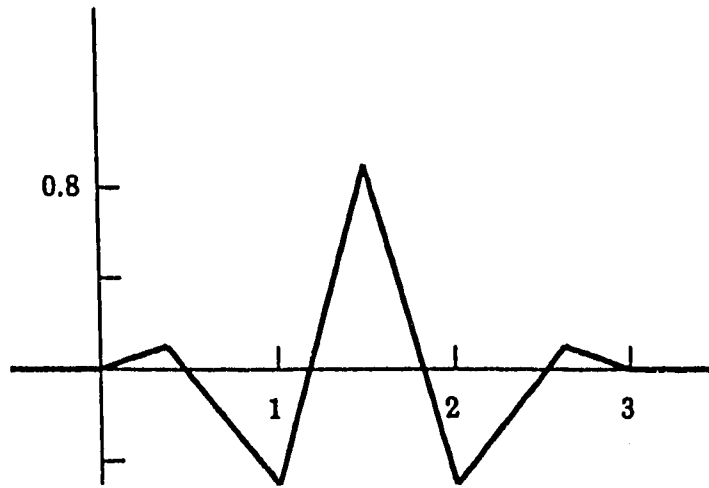
$$\psi(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} q_k \phi(2x - k) \quad (2.1.10)$$

$\phi = N_2$  の場合は、

$$q_0=1/12, q_1=-1/2, q_2=5/6, q_3=-1/2, q_4=1/12$$

となる。

マザーウェーブレットの概略(厳密ではない)は下図のとおり。



Mother Wavelet  $\psi$ , Spline 2

ウェーブレット解析によって分解された各レベルの"大きさ"を示す指標としては、式(2.1.8)の $d_k^{(j)}$ を用いればよい。分解の状況を図示すると以下の様になる。

$$\begin{aligned}
 f_0(x) &= g_{-1}(x) + f_1(x) \\
 &\downarrow \\
 &g_{-2}(x) + f_2(x) \\
 &\downarrow \\
 &g_{-3}(x) + f_3(x)
 \end{aligned}$$

式(2.1.7)、(2.1.8)における $c_k^{(j)}$ 、 $d_k^{(j)}$ は分解数列 $g_{2k-l}$ 、 $h_{2k-l}$ を用いて以下の式で計算される。

$$c_k^{(j-1)} = \frac{1}{2} \sum_l g_{2k-l} c_l^{(j)} \quad (2.1.11)$$

$$d_k^{(j-1)} = \frac{1}{2} \sum_l h_{2k-l} c_l^{(j)} \quad (2.1.12)$$

分解数列は、 $\psi$ が直交ウェーブレットの場合にはトウスケール数列 $\{p_k\}$ から直接求めることができるが、スプラインウェーブレットの場合は近似的な計算となる。分解数列は文献(8,p.99)より、多項式の比較によって計算する。(文献(8)による計算手法であるが、本文献の当該部分は完全に論理的には追認できない。)

トウスケール数列 $\{p_k\}$ 及び $\{q_k\}$ の多項式と分解数列 $\{g_k\}$ 及び $\{h_k\}$ の多項式を次の様に定義する。

$$P(z) = \frac{1}{2} \sum_k p_k z^k \quad (2.1.13)$$

$$Q(z) = \frac{1}{2} \sum_k q_k z^k \quad (2.1.14)$$

$$G(z) = \frac{1}{2} \sum_k g_k z^k \quad (2.1.15)$$

$$H(z) = \frac{1}{2} \sum_k h_k z^k \quad (2.1.16)$$

$g_k$ についていえば、式(2.1.15)の $G(z)$ が次式で与えられる $G(z)$ と等しくなる様に $g_k$ を定める。

$$G(z) = \frac{E_\phi(z)}{E_\phi(z^2)} \overline{P(z)} \quad (2.1.17)$$

$\phi$ はスケーリング関数であり、今の場合、

$$\phi = N_2$$

である。 $E_\phi$ は一般化Euler-Frobenius級数であり、 $\phi = N_m$ の場合は、

$$E_{N_m}(z) = \frac{1}{(2m-1)! z^{m-1}} E_{2m-1}(z) \quad (2.1.18)$$

となる。 $E_n(z)$ はEuler-Frobenius多項式であり、

$$E_{2m-1}(z) = (2m-1)! \sum_{k=0}^{2m-2} N_{2m}(k+1) z^k \quad (2.1.19)$$

となる。 $m=2$ の場合には、

$$E_{N_2}(z) = \frac{1}{3!} \frac{1}{z} E_3(z) \quad (2.1.20)$$

$$E_3(z) = (z - a_1)(z - a_1^{-1}), \quad a_1 = \sqrt{3} - 2 \quad (2.1.21)$$

従って、

$$E_{N_2}(z) = \frac{1}{6z} (z - a_1)(z - a_1^{-1}) \quad (2.1.22)$$

トゥー・スケール数列の多項式  $P(z)$  は、

$$\begin{aligned} P(z) &= \frac{1}{2} (p_0 z^0 + p_1 z^1 + p_2 z^2) \\ &= \frac{1}{4} + \frac{1}{2} z + \frac{1}{4} z^2 \end{aligned} \quad (2.1.23)$$

上式を

$$z = \exp(-i\omega/2)$$

として変形すると、

$$\overline{P(z)} = \left( \frac{z+1}{2z} \right)^2 \quad (2.1.24)$$

式(2.1.20)より

$$\begin{aligned} \left( \frac{1}{E_{N_2}(z)} \right) &= 3! z \frac{1}{(z - a_1)(z - a_1^{-1})} \\ &= 6C_1 \left[ \frac{1}{1 - a_1 z} + \frac{a_1 z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1}} \right] \\ &= 6C_1 \sum_j a_1^{|j|} z^j \end{aligned} \quad (2.1.24)$$

但し、

$$C_1 = \frac{1}{a_1 - a_1^{-1}} \quad (2.1.25)$$

$$\alpha_j = C_1 a_1^{|j|} \text{ とおくと、}$$

$$\frac{1}{E_{N_2(z)}} = 6 \sum_j \alpha_j z^j \quad (2.1.26)$$

従って、

$$\begin{aligned} G(z) &= \frac{1}{2} \sum_k g_k z^k \\ &= \frac{E_{N_2(z)}}{E_{N_2(z^2)}} \overline{P(z)} \\ &= \left\{ \frac{1}{6z} \left( z - a_1 \right) \left( z - a_1^{-1} \right) \right\} \left\{ 6 \sum_j \alpha_j z^j \right\} \left( \frac{z+1}{2z} \right)^2 \\ &= \frac{1}{4z^3} (z+1)^2 (z - a_1) (z - a_1^{-1}) \sum_j \alpha_j z^{2j} \end{aligned} \quad (2.1.27)$$

上式最後の $\alpha_j$ の和は無限級数となるが、近似的に有限項をとり $-n \leq j \leq n$ とする。その結果、 $G(z)$ に含まれる $z$ の最大次数は、

$$-3 + 2 + 2 + 2n = 2n + 1$$

となり、 $z$ の最小次数は、

$$-3 + 0 + 0 + (-2n) = -2n - 3$$

となる。

$$a_1 + a_1^{-1} = A$$

とおいて整理すると、

$$\begin{aligned} G(z) &= \frac{1}{2} \sum_k g_k z^k \\ &= \frac{1}{2} \left[ \frac{z}{2} + \frac{1}{2} (2-A) + \frac{1}{z} (1-A) + \frac{1}{2z^2} (2-A) + \frac{1}{2z^3} \right] \\ &\quad \times [\alpha_0 z^0 + \alpha_{-1} z^{-2} + \alpha_{-2} z^{-4} + \dots \\ &\quad + \alpha_1 z^2 + \alpha_2 z^4 + \dots] \end{aligned} \quad (2.1.28)$$

例えば、 $g_0$ は $z^0 = z^0 \times z^0$ 及び $z^{-2} \times z^2$ の係数であり、

$$\alpha_0 (2-A)/2 + \alpha_1 (2-A)/2$$

となる。 $g_k$ の $k$ について、正の偶数と奇数、負の偶数と奇数の合計4種類に分けて式を整理することができる。

同様に数列 $\{h_k\}$ については、

$$\begin{aligned} H(z) &= \frac{1}{2} \sum_k h_k z^k \\ &= -z^{-2m+1} \frac{P(-z)}{E_{N_2}(z^2)} \end{aligned} \quad (2.1.29)$$

から計算する。(2.1.23)及び(2.1.26)より、

$$\begin{aligned} H(z) &= \frac{1}{2} \sum_k h_k z^k \\ &= \frac{1}{2} \left\{ -z^{-1} + 2z^{-2} - z^{-3} \right\} \sum_k \alpha_k z^{2k} \end{aligned} \quad (2.1.30)$$

となる。例えば、 $h_0$ は $z^0 = z^{-2} \times z^2$ の係数で

$$2\alpha_1$$

$h_1$ は $z^1 = z^{-1} \times z^2$ 及び $z^{-3} \times z^4$ の係数で

$$-\alpha_1 - \alpha_2$$

となる。 $g_k$ の場合と同様、正の偶数と奇数、負の偶数と奇数の4種類に分けて計算できる。

## 2.2 4階B-スプライン関数による計算式

4階のスプライン関数を使用する場合は、計算式がかなり複雑になる。前節に記した2階のスプライン関数の式と対応する様に計算式を整理する。

4階のスプライン関数の具体的な関数形は再帰的定義又は切断ベキ関数による定義(文献8,p.136,p.137)から求めることができる。ここでは基本的な数値のみを示す。

$$\text{supp. } N_4 = [0, 4]$$

$$N_4(0) = N_4(4) = 0$$

$$N_4(1) = N_4(3) = 1/6$$

$$N_4(2) = 2/3$$

トウスケール数列 $\{p_k\}$ は、

$$p_0 = p_4 = 1/8, \quad p_1 = p_3 = 1/2, \quad p_2 = 3/4$$

であり、マザーウェーブレットを与える数列 $\{q_k\}$ は、

$$\begin{aligned} q_0 = q_{10} &= 1/40320, \quad q_1 = q_9 = -31/10080, \quad q_2 = q_8 = 559/13440, \\ q_3 = q_7 &= -247/1260, \quad q_4 = q_6 = 9241/20160, \quad q_5 = -337/560 \end{aligned}$$

となる。

$f(x)$ の近似関数 $f_0(x)$ は次式の通りである。

$$f_0(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_k^{(0)} N_4(x-k) \quad (2.2.1)$$

$c_k^{(0)}$ は $m=4$ の場合の固有の値として求められる。

$$c_k^{(0)} = \sum_l \beta_{k+2-l}^{(4)} f(l) \quad (2.2.2)$$

$$\beta_k^{(4)} = \sqrt{3} \left( \sqrt{3} - 2 \right)^{|k|} \quad (2.2.3)$$

但し、 $l$ についての和は有限で近似する事とし、文献(8,p.153)によれば $|k| \geq 5$ で $\beta_k^{(4)} = 0$ としてよい。即ち、

$$\beta_{-4}^{(4)}, \beta_{-3}^{(4)}, \beta_{-2}^{(4)}, \dots, \beta_0^{(4)}, \dots, \beta_2^{(4)}, \beta_3^{(4)}, \beta_4^{(4)}$$



のみ値があるとする。

分解数列 $\{g_k\}$ は(2.1.17)で $\phi=N_4$ として求める。

$$\begin{aligned}
 G(z) &= \frac{1}{2} \sum g_k z^k \\
 &= \frac{E_{N_4}(z)}{E_{N_4}(z^2)} \overline{P(z)} \\
 &= \frac{E_7(z)}{z^3} \frac{z^6}{E_7(z^2)} \overline{P(z)} \quad (2.2.4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_7(z) &= 7! \sum_{k=0}^6 N_8(k+1) z^k \\
 &= z^6 + 120z^5 + 1191z^4 + 2416z^3 + 1191z^2 + 120z + 1 \quad (2.2.5)
 \end{aligned}$$

$$\overline{P(z)} = \frac{1}{16} \frac{(1+z)^4}{z^4} \quad (2.2.6)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{z^6}{E_7(z^2)} &= \prod_{i=1}^3 \frac{1}{a_i - a_i^{-1}} \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_i^{|k|} z^{2k} \right\} \\
 &= \sum_k \alpha_k z^{2k} \quad (2.2.7)
 \end{aligned}$$

$a_i (i=1,2,3)$ の計算式は文献(8,p.153)に示されており、

$$a_1 = -0.00914869$$

$$a_2 = -0.12255462$$

$$a_3 = -0.53528049$$

となる。同書には $z^{2k}$ の無限級数を $k=-9 \sim +9$ で近似すれば十分な精度が得られると記されている。今回の計算では、多項式の係数を求めるプログラムを作成し、まず $\alpha_k$ を数値計算によって求め、同様に多項式の係数を求める数値計算によって $\{g_k\}$ を求めた。

数列 $\{h_k\}$ については(2.1.29)より、

$$\begin{aligned}
 H(z) &= -z^{-2m+1} \frac{P(-z)}{E_7(z^2)} \\
 &= -\frac{7!}{z^7} \left( \frac{1-z}{2} \right)^4 \frac{1}{E_7(z^2)} \\
 &= -\frac{7!}{z^7} \left( \frac{1-z}{2} \right)^4 \sum_k \alpha^k z^{2k} \\
 &= \frac{1}{2} \sum_k h_k z^k
 \end{aligned}$$

となる。 $\{g_k\}$ と同様に多項式の係数を求めるプログラムによって $h_k$ を数値計算した。

### 2.3 臨界近接の検出

本節では、炉雑音データのウェーブレット解析によって中性子増倍系が臨界に近づいた事を検知する手順について検討した結果をまとめる。

ウェーブレット解析は、1980年代から発達してきた信号解析の新しい手法である。厳密な数学的・理論的研究も近年急速に進んでいるが、物理的な応用としては、信号に含まれる有意な成分を時間軸上で可視化した例が典型的である。状況を目に見える形で示すことによって説得力のある説明とすることは、現代的な方向ではあるが、やや否定的に換言すると、ウェーブレット解析は得られた結果の物理的意味が不明確であり、物理的定義の明確な情報をウェーブレット解析によって算定する事は困難である。ウェーブレット解析による各レベルの信号成分は、中心となるフーリエ成分のまわりに広がった複数の周波数成分を含んでおり、物理的なパラメーターに直結したフーリエ解析とは様子が異なっている。ウェーブレット解析で得られる情報を、炉物理現象又は炉物理定数に関連づける理論の開発は今後の課題である。

本研究でウェーブレット解析を適用した炉雑音データについても、当初は、中性子の核分裂連鎖に伴う特徴的な雑音成分を、目に見える形で抽出できるのではないかと考えて解析を試みた。しかしながら、機械的な振動とは無縁な臨界集合体である重水臨界実験装置(DCA)で得られた純粋の炉物理データでは、明解な形で特定の信号成分を取り出す事はできなかった。今回はウェーブレット変換として、2階及び4階のスプライン関数をスケーリング関数として使用した離散変換のみを検討したが、連続変換を含めて、より広い範囲でスケーリング関数について評価し、有意な信号を取り出す検討も可能であると考えている。これまでに報告されている適用例に近い、制御棒振動等の機械振動や冷却材の流力振動等の影響を受ける、原子炉プラントの中性子雑音の評価も試みる価値があると思われる。

ここでは、これまで炉雑音解析の手法として検討してきたファインマン- $\alpha$ 法や周波数解析法からの類推として、中性子検出信号の時間的なゆらぎが、増倍系と非増倍系で異なることを利用して、体系が増倍系であることを検出する手法を考えた。

中性子増倍系における中性子の検出信号の時間分布を、同一の平均計数率を持つ非増倍系における中性子の検出信号の時間分布と比較する。非増倍系における中性子検出の時間分布は、例えばカリフォルニウム(CF)線源から放出される中性子を計数することによって得られるが、ここでは、計数率を厳密に一致させた模擬データを、乱数を用いた数値計算によって作成し所定のデータとする。評価の対象とする体系の測定で得られた中性子計数データと、非増倍系の中性子計数データをウェーブレット解析し、各レベルの信号の大きさを比較することによって、対象とする体系のデータが非増倍系のデータと異なっていること、即ち、体系が増倍系であることを検知する。具体的には、両方の測定データについて(2.1.8)の $d_k^0$ を求め、適当な時間間隔の $d_k^0$ の標準偏差を計算する。双方のデータの標準偏差の比を、非増倍系からのへだたり、即ち、臨界近接の指標とする。

上記の方法は、ウェーブレット解析の結果を統計処理しており、一定時間間隔のデータを蓄えた後に評価が得られるという点では、従来の周波数解析法やファインマン- $\alpha$ 法と同等である。このままでは、臨界近接の検知の時間を飛躍的に短くすることは困難であると思われるが、ウェーブレット解析による各レベルの抽出は、高周波フィルターとして機能しており、フィルターを通すことによってこれまでの雑音解析法では対応できない、平均計数率が時間とともに変化している様な条件での臨界近接の検出が可能になるのではないかと考えている。

### 3. 測定評価

本章ではウェーブレット解析による臨界近接の検出を測定データによって検証する。重水臨界実験装置(DCA)の未臨界度測定試験体系に熱中性子検出器を設置し、マルチチャンネルスケーラーを用いた炉雑音測定を行い、得られたデータをウェーブレット解析した。重水水位によって実効増倍率を0.995とした炉心におけるデータと、非増倍系における測定を模擬したデータとを比較して、臨界近接の検知が可能であることを確認した。

尚、本章では標準として4階のスプライン関数によるウェーブレット変換を採用し、2階スプライン関数を用いる場合には特記することとする。

#### 3.1 測定体系と測定システム

測定対象としたDCAの未臨界度測定試験体系の炉心構造を図3-1-1に示す。図に示されている様に、未臨界度測定試験体系は中央に試験体領域があり、周辺の領域をドライバー領域と称する。試験体領域には正方格子に配列された燃料ピンと減速材である軽水で構成される未臨界試験体が装荷され、ドライバー領域にはATR規格のクラスター燃料が装荷され、重水が充填されて臨界となる。今回の測定では試験体領域には減速材を給水せず、ドライバー領域のみが中性子増倍系となっている。図3-1-2は炉心内のクラスター燃料の装荷状態(炉心配置)を示す。燃料は炉心中央の試験体領域の周辺にのみ装荷されており、炉心タンク壁面近傍の外側は重水の反射体領域になっている。その結果、測定体系は重水反射体領域に囲まれた円環状の重水減速体系という、やや特異な形状となっている。図3-1-3は装荷されているクラスター燃料の燃料ピン配列を示す。ドライバー領域の重水の水位を調整することによって、実効増倍率を0.995に調整した。炉心構成及び炉心特性の概要は以下の通りである。

|                  |                                      |
|------------------|--------------------------------------|
| 燃料種類             | 1.2%U                                |
|                  | 28本クラスター                             |
| 装荷クラスター本数        | 44体                                  |
| 圧力管内軽水           | 200cm                                |
| 試験体領域            | 2.7%U、140本、減速材なし                     |
| 臨界重水水位           | 167.4cm                              |
| 重水水位反応度          | 0.012% $\Delta k/k/cm$ (試験体減速材200cm) |
| 測定重水水位           | 164.0cm                              |
| 測定重水水位に対応する実効増倍率 | 0.995                                |

上記の炉心の中央(ドライバー領域中心近傍の燃料クラスターが装荷されていないカランドリア管中)に熱中性子検出器(He-3計数管、1/2"φ)を装荷し、中性子検出の時間分布をマルチチャンネルスケラーで記録した。測定システムはこれまで実験を行ってきたファインマン- $\alpha$ 法の測定システムと同一であるが、マルチチャンネルスケラーの時間間隔の設定については、測定手法の検証を目的としていくつかの種類の設定で測定を実施した。測定システムの構成を図3-1-4に示す。

中性子増倍系における測定データとの比較の対象とする非増倍系のデータとして、未臨界度測定手法のひとつとして開発されているミハルゾ法に用いるカリフォルニウム線源検出器の出力を利用することとした。。カリフォルニウム線源検出器は、電離箱の中に非密封のカリフォルニウム線源を封入したものであり、カリフォルニウムの自発核分裂で発生する核分裂片を検出して電気信号を出力する。カリフォルニウムの自発核分裂においては、中性子増倍体系の連鎖反応による中性子発生又は核分裂の場合と異なり、各核分裂はその核分裂以前の核分裂とは独立な事象である。即ち、カリフォルニウム線源検出器からは、時間的に独立したランダムな信号系列が得られる。今回の試験では、測定系に接続されたシングルチャンネルアナライザーの波高弁別レベルを調整することによって、所定の計数率の信号を得た。図3-1-5にカリフォルニウム線源検出器の構造を示す。

### 3.2 計算手順

第2章に示した計算式による具体的なデータ処理手順を整理する。実験に使用したマルチチャンネルスケラーは8192チャンネルであり、1スweep 8192チャンネルの測定データは、LAN回線を通じて、ワークステーションのディスクに1ファイルとして保存される。今回の実験では、未臨界の定常状態の炉心で、評価に十分な統計精度が得られると思われる時間について繰り返し測定を行い、複数のファイルのデータを収集保存した。尚、ここで扱われる測定データの形式は、これまで実験を行ってきたファインマン- $\alpha$ 法による未臨界度測定のデータと全く同一である。

各々の8192個のデータについて、ウェーブレット解析(変換)を実行し、各レベルの振幅を求める。マルチチャンネルスケラーで採られた炉雑音データのウェーブレット変換の例を図3-2-1に示す。図は4階B-スプライン関数による変換の例である。前述の様に、相関のある成分が視覚的に認識できる形で現れることを期待したが、純粹の炉物理雑音である今回の解析対象では、残念ながら特徴的な波形分布は得られなかった。変換の結果として得られる各レベルの値は、それ自身が雑音データと呼べる形をしている。各レベルの値には正負の値があり、各レベルの成分の大きさを示す量として、測定時間内の全データの標準偏差をとることとする。

尚、振幅変換結果の今回採用した離散変換では、レベルが-1、-2、-3と進むに従って、得られる振幅データの個数は1/2ずつに減少する。即ち、得られる振幅の個数はレベルが進むに従って急速に減少し、次の様になる。

| J  | レベルの数 | J   | レベルの数 | J  | レベルの数 | J  | レベルの数 |
|----|-------|-----|-------|----|-------|----|-------|
| 0  | 8192  |     |       |    |       |    |       |
| -1 | 4096  | -2  | 2048  | -3 | 1024  | -4 | 512   |
| -5 | 256   | -6  | 128   | -7 | 64    | -8 | 32    |
| -9 | 16    | -10 | 8     |    |       |    |       |

評価の統計精度を確保する為には多数のファイル进行处理すれば良い事になるが、現在採用している計算式では、8192個のデータの外側のデータはすべて"0"であるとして式が作成されており、レベルが下がるに従ってデータの最初と最後に境界条件の影響が現れる。特に根拠はないが、現状では $j=-6$ 又は $j=-7$ 程度までが評価に採用できる限界である。

次に相関成分を持たない雑音データを準備する。相関を持たないデータでは、データを決定するパラメーターは計数率のみであるが、離散ウェーブレット変換において計数率に変換結果にどの様に反映されるかが明らかでないので、ここでは安易な方法として、解析された炉雑音データと同一の計数率を持つデータを用いる事とする。相関成分を持たない中性子(放射線)計数データとしては、例えば、中性子源から放出される中性子を中性子計数管で検出したデータ等が考えられるが、実際の測定によって所定の計数率を得るのは容易ではないので、計算によって作成された模擬データを利用する。アナログの雑音信号を模擬的に作成することと比較すると、離散変換を前提としたマルチチャンネルスケラーのデータと同等のデータを、計算機による模擬で作成することは容易であり、離散変換を採用するメリットとなっている。模擬データの具体的な計算法を次節に示す。模擬データについてもウェーブレット変換を行い、同様に各レベルのデータの標準偏差を計算する。

同一の計数率を持つ増倍系のデータの標準偏差と非増倍系のデータの標準偏差は、信号の相関成分の有無によって大きさが異なり、体系が増倍系である事を標準偏差の比較によって検知する。図3-2-2に評価の手順を示す。

上記の手順による評価の為の計算プログラムを作成し測定データに適用した。現状のシステムはウェーブレット解析による臨界近接の検知が可能である事を確認する為のものであり、各ステップはデータファイルによって接続され順次実行される。本格的な未臨界度モニターにウェーブレット解析を適用する場合には、計算システムとともに評価手法についても更に検討が必要である。

### 3.3 模擬計数データの作成

相関を持たない計数データを計算機による模擬によって作成する。計数率を $r$  (cps)、即ち、単位時間に計数する確率を $r$ とする。



基準となる時刻 $t=0$ で計数し、続く $t$ の間は計数せず、時刻 $t$ で計数する確率は

$$f(t) = r \cdot \exp[-rt]$$

となる。 $f(t)$ に対して、

$$\begin{aligned} y &= F(t) \\ &= \int_0^t f(t) dt \\ &= [-\exp(-rt)]_0^t \\ &= 1 - \exp(-rt) \end{aligned}$$

となり、

$$0 \leq y \leq 1$$

であるから、0~1の一樣乱数 $y_i$ から $t_i$ を求めれば、 $t_i$ は確率分布 $r \cdot \exp[-rt]$ に従う。即ち、

$$y_i = 1 - \exp[-r \cdot t_i]$$

より、

$$t_i = -[\ln(1-y_i)] / r$$

を計算すればよい。尚、得られた時間 $t_i$ に対して、計数システムの不感時間を考慮し、実際に計数されたか否かを分けることも可能である。

### 3.4 Cf線源の測定と評価

今回検討したウェーブレット解析による臨界近接の検知の手法では、増倍系の炉雑音データを非増倍系のデータと比較する。前述の様に、非増倍系のデータとしては計算機によって発生させた模擬雑音データを用いるが、ここでは計算機による模擬データの特徴が、実際に測定された非増倍系の雑音データの特徴と一致することを確認する。

非増倍系の測定データには、カリフォルニウム線源検出器の出力を使用する。カリフォルニウム線源検出器の出力は、カリフォルニウムの自発核分裂で発生する核分裂片の計数であり、中性子の計数ではないが、雑音データとして増倍系の核分裂連鎖による様な相関成分を持たず、非増倍系における中性子検出データと同等と考えることができる。又、カリフォルニウム線源検出器の出力パルスは、増倍系の測定で用いる中性子検出器の出力パルスと同様に扱うことができる為、共通の信号処理でデータを得ることができる。中性子計測の場合と同様、マルチチャンネルスケラーを用いて雑音データを収集した。今回使用したカリフォルニウム線源検出器の線源強度は1種類であるが、出力パルスを波高弁別器で選別することによって、計数率を変化させる事が可能である。

カリフォルニウム線源検出器の出力パルス測定においては、後述の増倍系のデータの測定との整合をとる為、マルチチャンネルスケラーの1チャンネルの時間幅を20msec.とし、3種類の計数率330cps、660cps、4200cpsについて測定・評価を行った。マルチチャンネルスケラーは1スイープ(sweep)が8192ch.であり、20msec./ch.より163.84sec./sweepとなる。下表に1チャンネル当たりの平均計数等を整理する。

| Case No.                            | 1      | 2       | 3       |
|-------------------------------------|--------|---------|---------|
| 計数率                                 | 330    | 660     | 4200    |
| $\Delta t/\text{ch.}(\text{msec.})$ | 20     | 20      | 20      |
| $T/\text{sweep}(\text{sec.})$       | 163.84 | 163.84  | 163.84  |
| 全計数/sweep                           | 54,000 | 110,000 | 690,000 |
| 平均計数/ch.                            | 6.6    | 13.     | 84.     |

各計数率について20スイープの測定を行い、各々20スイープの同じ計数率の模擬データを作成した。各データをウェーブレット変換し、処理するファイル数(スイープ数)の増加に伴う各レベルの標準偏差の比を求めた。前述の様に、標準として4階B-スプライン関数によるウェーブレット変換を採用し、2階B-スプライン関数による変換を1ケースだけ評価する。

図3-4-1にCase 1(330cps)の場合の計算結果を示す。横軸は通常-1,-2,...,-6と記される離散ウェーブレット変換におけるレベルであり、縦軸は各レベルのデータの標準偏差の比、即ち、カリフォルニウム線源検出器のデータと数値模擬データの標準偏差の比である。1スイープ当たりの各レベルのデータの数、第6レベル(レベル-6)では第1レベルの



1/26-1であり、第6レベルの比が第1レベルの比に比較して1からの変位が大きいのは、統計的変動によるものである。

ここまでの議論では、標準偏差の比の絶対値の大小の妥当性は評価できないが、処理するデータの数(スイープ数)の増加に伴って標準偏差の比の値が1に収束していく事が確認できる。十分なデータ数を処理すれば、比はすべて1.0に収束する筈である。

図3-4-2はCase 2(660cps)、図3-4-3はCase 3(4200cps)の結果である。処理するデータの数の増加に伴って比の値が1に収束していく事はいずれの場合も同様であるが、1ファイル(1 sweep)だけのデータを処理した結果を比較すると、計数率の高い方、即ち、全計数の多い方が収束が早いことが示されている。

Case 2(660cps)を例として、1スイープ毎の(統計的)変動の様子を示す。図3-4-4は同一の数値模擬データを比較の対象として、異なるスイープのデータを処理した結果である。模擬データについても1スイープ毎に統計的変動があり、各レベルの分布の中央値には意味はないが、660cpsで1スイープ-8192ch.のデータを処理した場合、レベル6までの範囲であれば臨界近接検知のデータのばらつきは20%程度(±10%)に収まると思われる。図3-4-5は、2スイープの測定データと2スイープの模擬データの組み合わせをかねて処理した結果である。レベル2とレベル6については測定値と模擬データに同程度のスイープ間の変動があり、レベル4については測定値のスイープ間の変動の方が模擬データのスイープ間の変動より大きい事を示している。今回検討した解析法では、未臨界度モニターとしての適用を考えている為、平均的な計数率がスイープ毎に変化しても対応できる様に、1スイープの測定値に対して1スイープの模擬データを対応させている。通常の実験における測定の様に、平均的な中性子計数率が一定であると仮定すれば、模擬データの各レベルの標準偏差については、多数のスイープの平均を比較対象として用いる事が可能であり、臨界近接検知の為のデータのばらつきを小さくする事ができると思われる。

図3-4-6は2階Bースプライン関数によるウェーブレット変換をCase 1に適用した例である。1ファイル及び20ファイルのデータを処理した結果を示しているが、20ファイルを処理した結果では、4階Bースプライン関数による結果よりも収束が悪い様である。定量的な評価には至っていないが、本節の評価において所定のファイル数の処理で十分な収束が得られることは、評価結果の統計的変動が必要な範囲に収まっていることを示しており、増倍系の検知においても少ない測定スイープ数で結果が得られることを示している。

### 3.5 中性子増倍体系の測定と評価

#### 3.5.1 臨界近接の検出

ウェーブレット変換を含む中性子雑音データの統計処理によって、中性子増倍系の臨界近接を検知できる事を測定データによって確認する。

測定体系は3.1に示した重水臨界体系であり、重水水位反応度係数を用いて測定された実効増倍率は0.995である。尚、本体系の即発中性子減衰定数 $\alpha$ は40程度であり、ファインマン $\alpha$ 法によって $\alpha$ を測定する場合のマルチチャンネルスケーラー(MCS)のチャンネル時間幅は20msec.程度である。実効増倍率0.995は、本研究の最終目的である核燃料施設の臨界近接警報としては臨界に近すぎるが、手法の可能性の確認を目的として、検出が容易であると考えられる臨界に近い体系を対象とした。

測定はMCSのチャンネル時間幅を20msec./ch.として8192ch./sweepで13スイープのデータが採られており、

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| 計数率                   | ~730cps    |
| $\Delta t/\text{ch.}$ | 20msec.    |
| T/sweep               | 163.84sec. |
| 全計数/sweep             | ~120,000   |
| 平均計数/ch.              | ~15.       |

である。前述の様に同じ計数率で中性子増倍による相関成分を持たない模擬データを計算機で発生させ比較する。

図3-5-1に4階B-スプライン関数を用いたウェーブレット変換によって得られた各レベルのデータの標準偏差の比を示す。比較の為、3.4で述べたカリフォルニウム線源の結果の内、類似の計数率である660cpsのデータを13スイープ処理した結果を記載してある。相関成分を持たないカリフォルニウム線源の結果とは明らかな差異があり、ウェーブレット変換で得られた各レベルのデータの標準偏差を、模擬計算によって得られた非増倍系のデータの標準偏差と比較する事によって、体系が増倍系である事を検知できる。

#### 3.5.2 MCSチャンネル時間幅の検討

今回の検討では、炉雑音データはマルチチャンネルスケーラーを用いて測定した。使用したマルチチャンネルスケーラーは8192チャンネルであり、各チャンネルの時間幅を測定対象とする体系の実効増倍率に応じて適切な時間に設定して測定を行う。上述の3.5.1の検討では、このチャンネル幅を20msec.として測定したデータを評価した。ファインマン $\alpha$ 法やロッシェ $\alpha$ 法の炉雑音測定、パルス中性子源法による測定等、即発中性子による中性子束の変化・変動を測定する場合には、体系が臨界に近づくとともに即発中性子減衰定数が小さくなり、減衰が遅くなるので、この時間幅を長く設定する。又、今回実験を実施したDCAは、重水減速体系である為に中性子寿命が長く、軽

水減速体系と比較して相対的に即発中性子減衰定数が小さい。即ち、今回評価した測定データは、未臨界度測定としては非常に長い時間幅で測定されたデータであると言える。

図3-5-2にマルチチャンネルスケーラーのチャンネル時間幅を20msec.、100msec.、500msec.の3種類で測定したデータを処理した結果を示す。20msec.の結果は13スイープのデータの集積であり、100msec.、500msec.の結果はそれぞれ1スイープの測定データを処理した結果である。計数率はいずれも730~750cps.程度である。参考値として20msec.のチャンネル幅で採られたカリフォルニウムの測定データによる結果が示されている。前述の様に、横軸にとられたレベルが1増加する毎に評価される時間幅は2倍、周波数は1/2となるので、チャンネル時間幅を長くすると図のピークは左の方向へ移動していく。又、20msec.と500msec.とでは、レベルが4~5移動する事となるが、図の結果ではレベルの移動は3である。レベルの移動については、定性的には正しい結果となっているが、定量的には統計精度の影響等、更に検討が必要である。

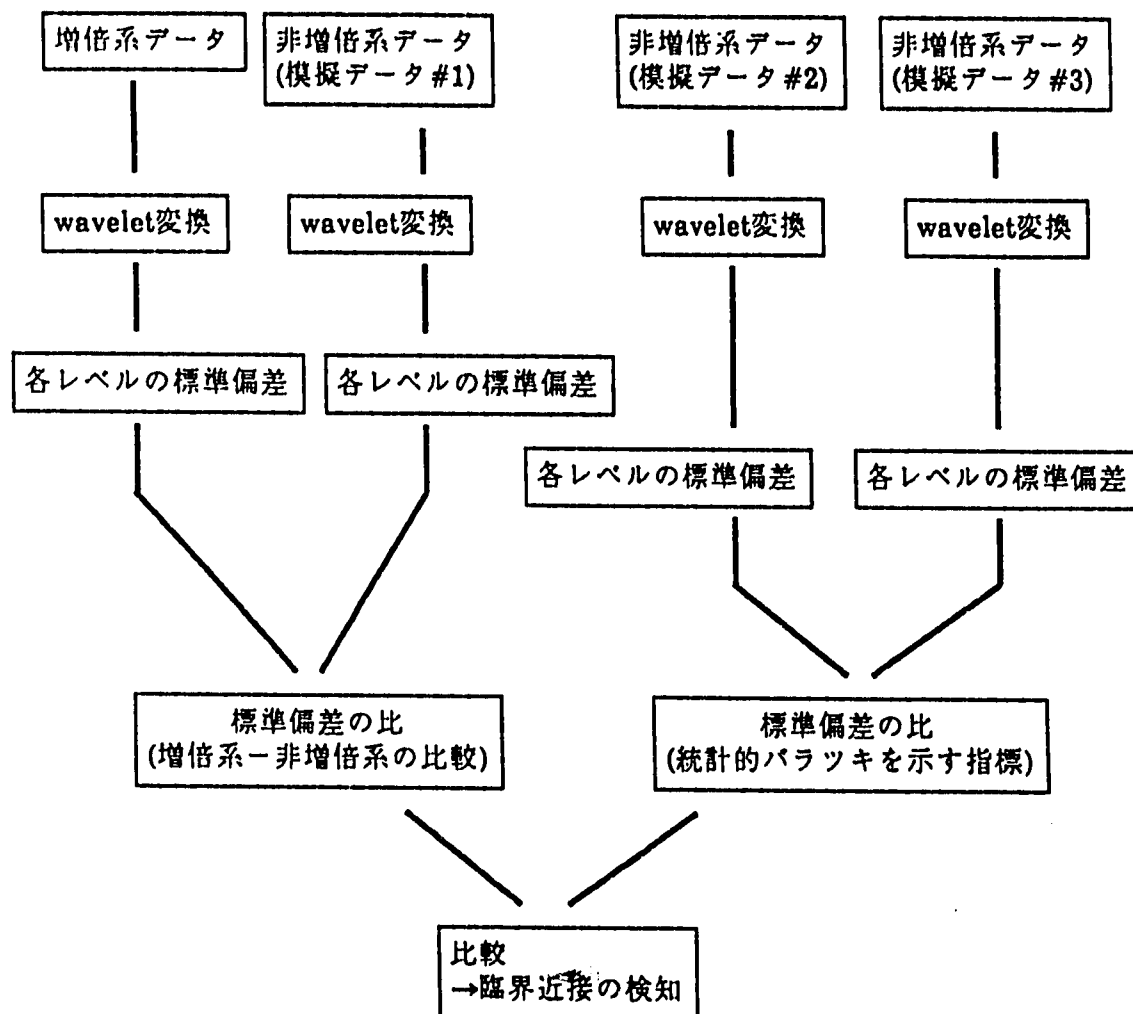
チャンネル幅100msec.のレベル6は50msec.のレベル7、25msec.のレベル8に相当するので、図3-5-2において、ピークが評価するレベルの範囲の中央に現れ、両端が1.0に近い値となり、更に、境界条件の影響を受けない十分な統計精度を持つデータを得るには、4倍のチャンネル数、即ち、8192\*4ch.のマルチチャンネルスケーラーが必要である。チャンネル数の多いスケーラーは既に製品として市販されており利用可能であるが、チャンネル数が多くなると1スイープの時間が長くなり、応答時間は遅くなる。

### 3.5.3 臨界近接モニターの検討

統計的データを用いて2つの状況を識別するには、データの差が統計的なバラツキ以上であることを判断する必要がある。前述のカリフォルニウム線源の測定においては、測定スイープ数の増加に伴って統計的バラツキが減少していく事が示されているが、増倍系の測定データの1.0からの変位が、増倍によるものか統計的バラツキによるものかの判断には基準となるデータが必要である。本項では、同じ計数率の増倍系と非増倍系のデータが持つ統計的変動が同程度であるとして、統計的なバラツキを示す増倍系のデータから臨界近接を判断する手法を検討した。

データが滑らかな変化を示し、十分な統計精度が得られている事が定性的に識別できれば、指標となる標準偏差の比が1.0と異なることを判断して臨界近接を検知することが出来る。又は、同じ程度の統計精度と計数率を持つ非増倍系の測定データがあり、増倍系であると考えられる体系の測定データから得られた標準偏差の比が、1.0のまわりに分布する非増倍系の測定データの標準偏差の比と、明らかに異なることを確認する事によっても臨界近接の検知が可能である。現実の測定において、増倍体系から得られる計数率と同一の計数率を持つカリフォルニウム線源等からの非増倍系の計数信号を得ることは不可能であるが、ここでは非増倍系の計数信号を再度シミュレーションによって求める事とする。即ち、非増倍系で得られるデータの特性は既に判っており、非増倍系の各データの違いは統計的な変動のみであるとすれば、データを数値計算によって模擬的

に作成することが可能である。結果的には臨界近接を検知する為に、独立した乱数による3種類の模擬的な非増倍系のデータを使用することになる。計算のフローは以下の通りである。



上述の考え方に従って、チャンネル時間幅20msec.で収集されたデータを1スイープづつ、5スイープ処理した結果が図3-5-3である。前述の様に計数率が約730cps.であるので、1スイープ毎の全中性子計数は約120,000である。図中の実線で示されたデータが増倍系と非増倍系との比較であり、破線で示されたデータが統計的バラツキを示す為に異なる2つの模擬データの標準偏差の比を示したものである。図に示されている様に、計数が少ない為に統計的なバラツキが大きく、各スイープ間の値に変動があるが、レベル3、4及び5については増倍系と非増倍系の相違が、2種類の非増倍系のデータの比較で得られる統計的なバラツキの大きさを越えており、1スイープのデータによって臨界に近接していることの検知が可能であることが判る。ここで検討したデータは8192ch.のマルチチャンネルスケーラーによる測定データであり、1スイープの測定時間は20msec.×8192ch.=163.84sec.~2.7min.である。即ち、本ケースについては、測定時間3分弱で臨界近接の検知が可能である事が確認された。

### 3.5.4 2階B-スプライン関数による評価結果

本報告書におけるこれまでの検討では、主として4階B-スプライン関数を用いたウェーブレット変換を適用してきた。これは参考とした文献に4階B-スプライン関数を用いた離散変換の周波数分離性能が優れており、各種の適用に有望であると記されていた為であるが、3.4に示した相関成分を持たないカリフォルニウム線源の測定結果の評価では、2階と4階のスプライン関数による結果に顕著な差が見られなかった。本節では、改めて簡単な計算で処理できる2階のスプライン関数の適用を試みる。

3.5.1に示した実効増倍率0.995の体系で、MCSのチャンネル時間幅を20msec./ch.として8192ch./sweepで13スイープの測定を行ったデータと、660cpsのカリフォルニウムの測定データの13スイープを、2階B-スプライン関数を用いたウェーブレット変換によって処理した結果を図3-5-4に示す。結果は4階B-スプライン関数による図3-5-1とほぼ同等である。本ケースの様な定常状態の中性子雑音から臨界近接を検出する場合については、単純な2階B-スプライン関数による解析で十分であることが判る。

2種類のスプライン関数による変換で有意な差の生じる例として、チャンネル時間幅40msec.で12スイープのデータを処理した結果を図3-5-5に示す。計数率は他のデータと同様730cpsであり、これまでの計算例からほぼ十分な統計的な収束が得られていると考えられる。図に示されている様にレベル5及び6に差があり、4階のスプライン関数を用いた方がピークが鋭く現れる。この例では4階のスプライン関数を用いることのメリットがある。

最後に3.5.3と同様、1チャンネル20msec.の1スイープのデータで臨界近接の検知が可能であることを、2階のスプライン関数を用いて確認した。図3-5-6に結果を示す。計算に用いられたデータは相関成分を持たない模擬データを含めて完全に同一である。個々のスイープの結果には若干の相違があるが、レベル3から5までの間のデータによって臨界近接の検知が可能であることは4階のスプライン関数による結果と同様であり、相関を持たないデータとの分離についても、4階と2階で大きな差は見られない。

本節における評価の結果では、臨界近接を検知するという観点からは2階のスプライン関数でも4階のスプライン関数でも大きな差が無いことが明らかとなった。評価したケース数が限られており、一般的な結論を得るには更に検討が必要であるが、2階のスプライン関数による計算は4階の場合と比較してかなり簡単であり計算時間も短い。2階のスプライン関数を有力なウェーブレット関数の候補として検討を進める。

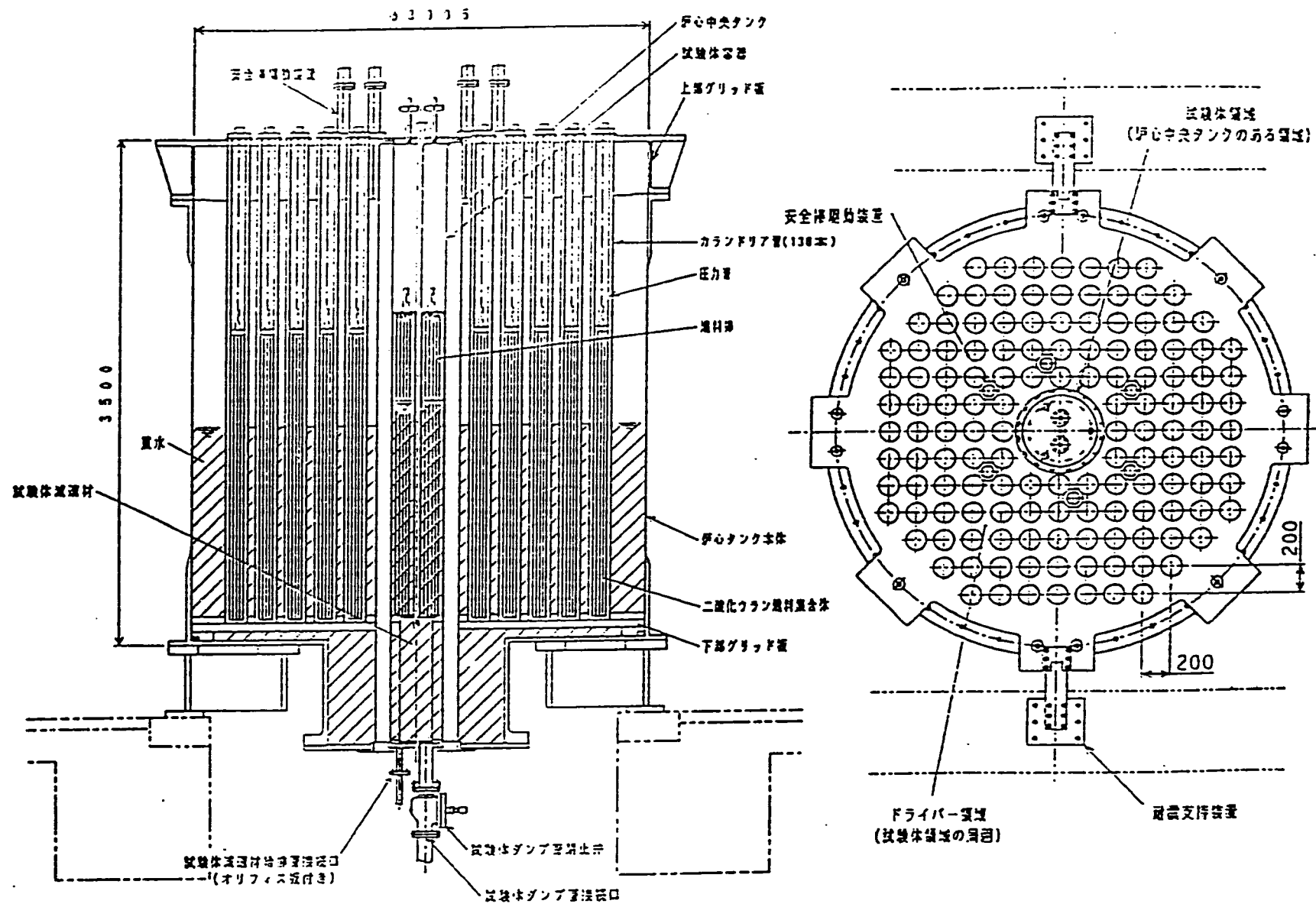


図3-1-1 重水臨界実験装置未臨界度測定試験体系

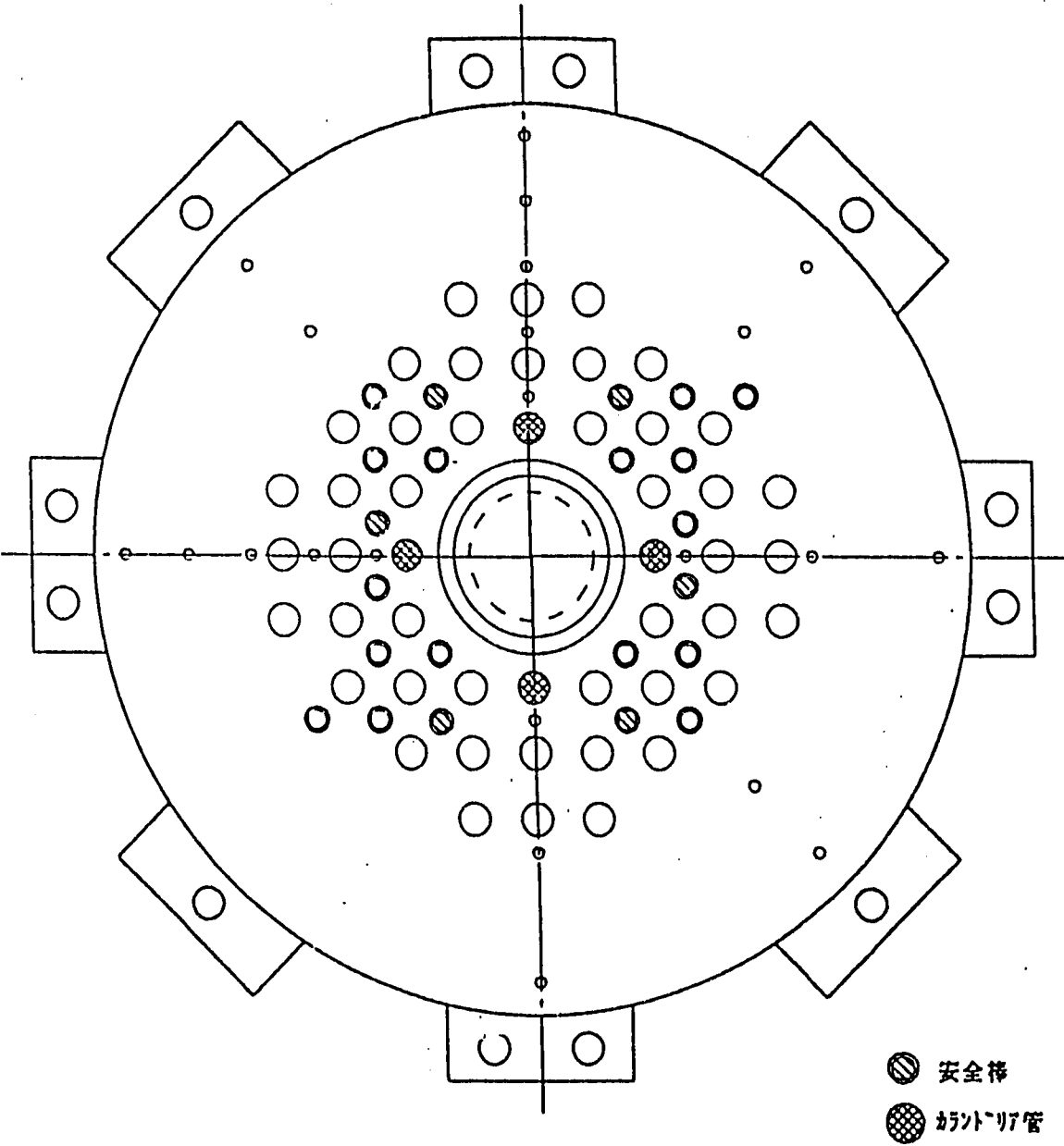


図3-1-2 炉心配置

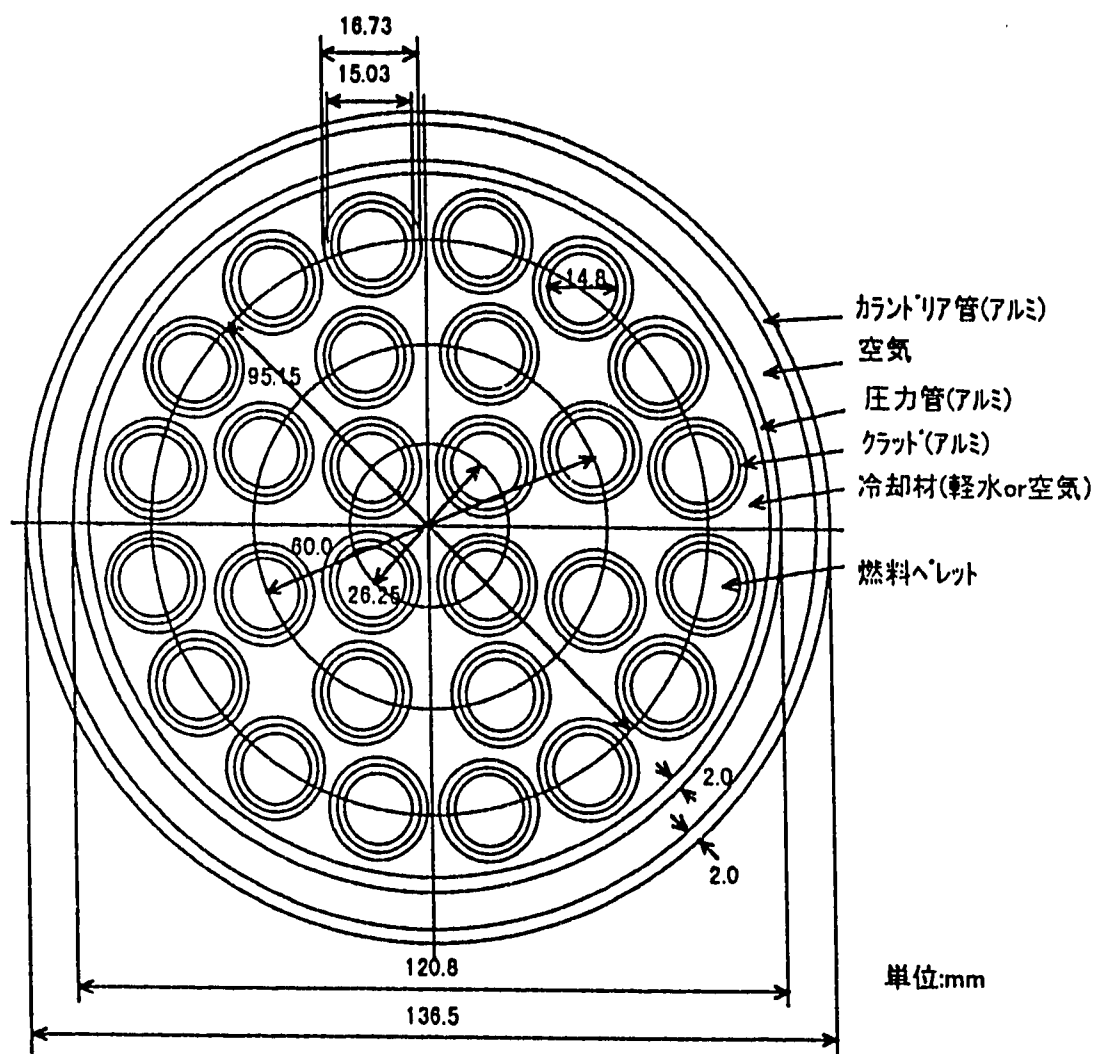


図3-1-3 ドライバー燃料クラスター断面図



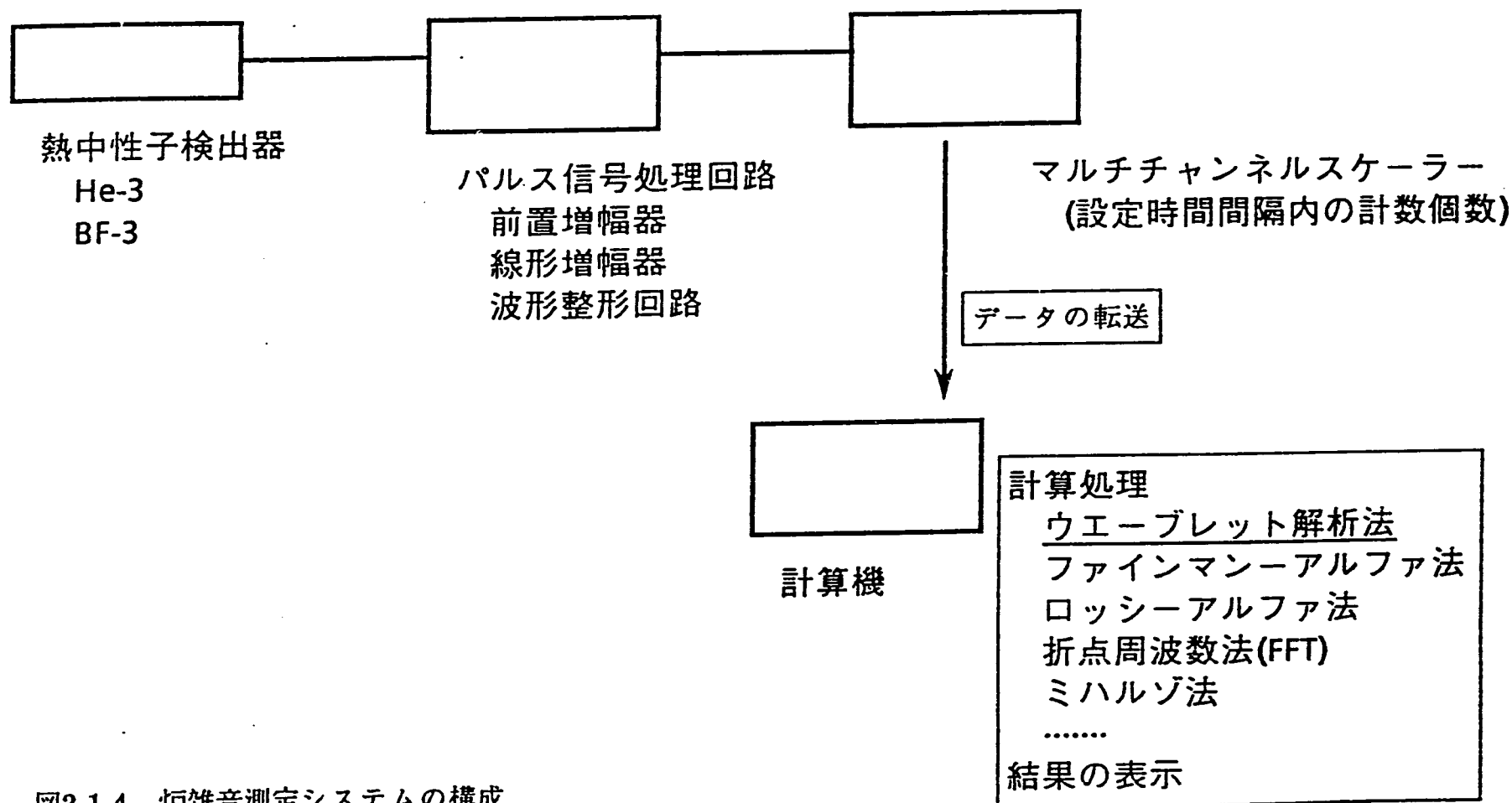
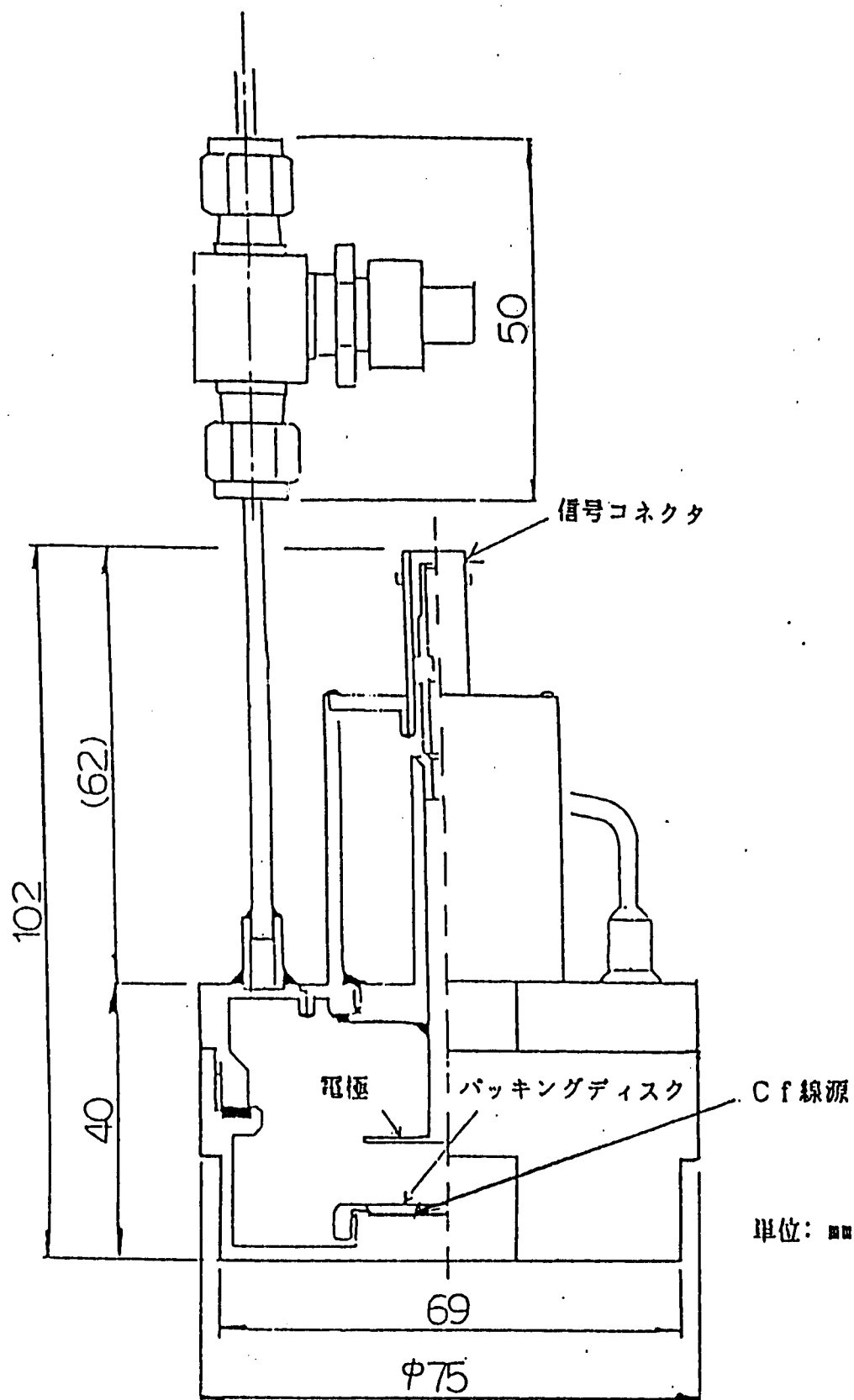


図3-1-4 炉雑音測定システムの構成



材質はSUS316

図3-1-5 Cf線源検出器

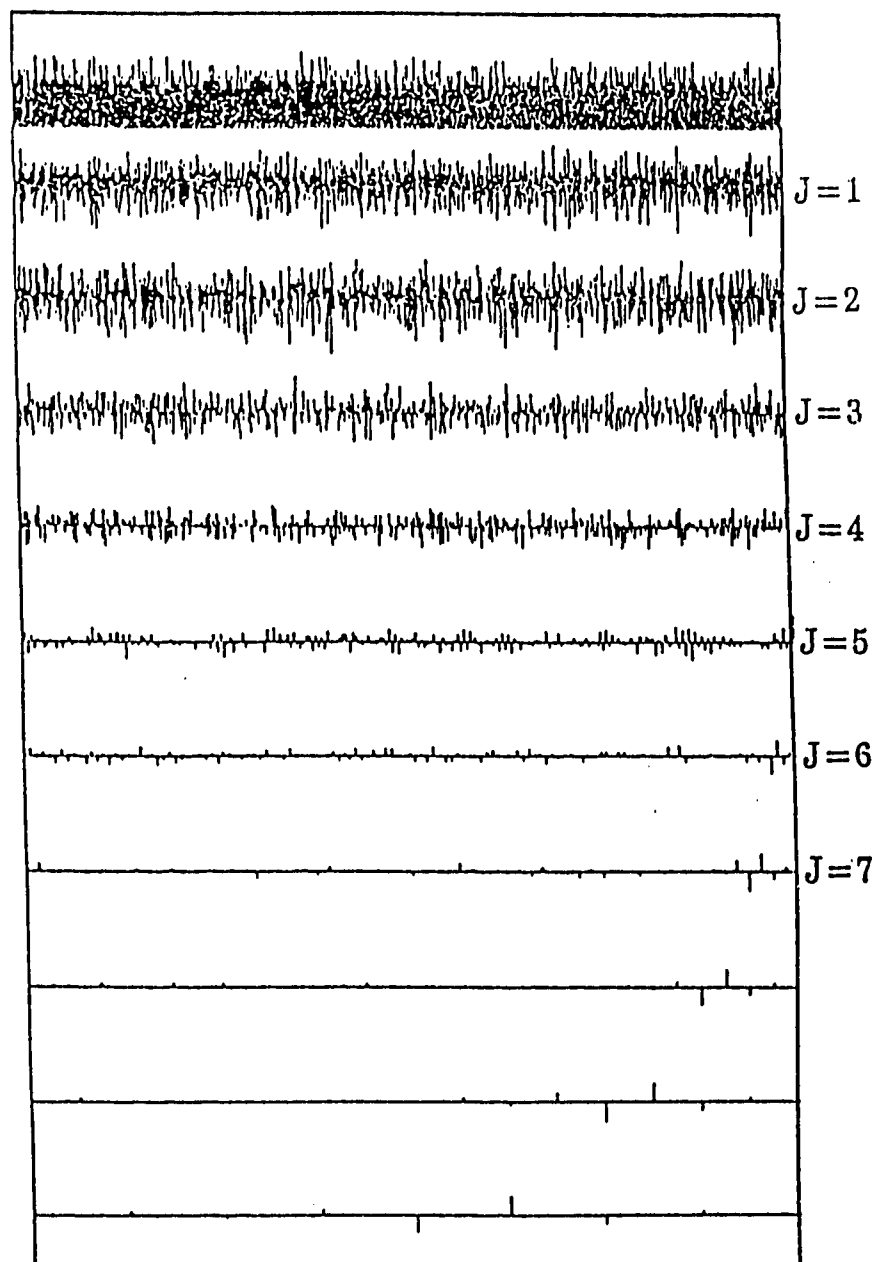


図3-2-1 炉雑音データのウェーブレット変換

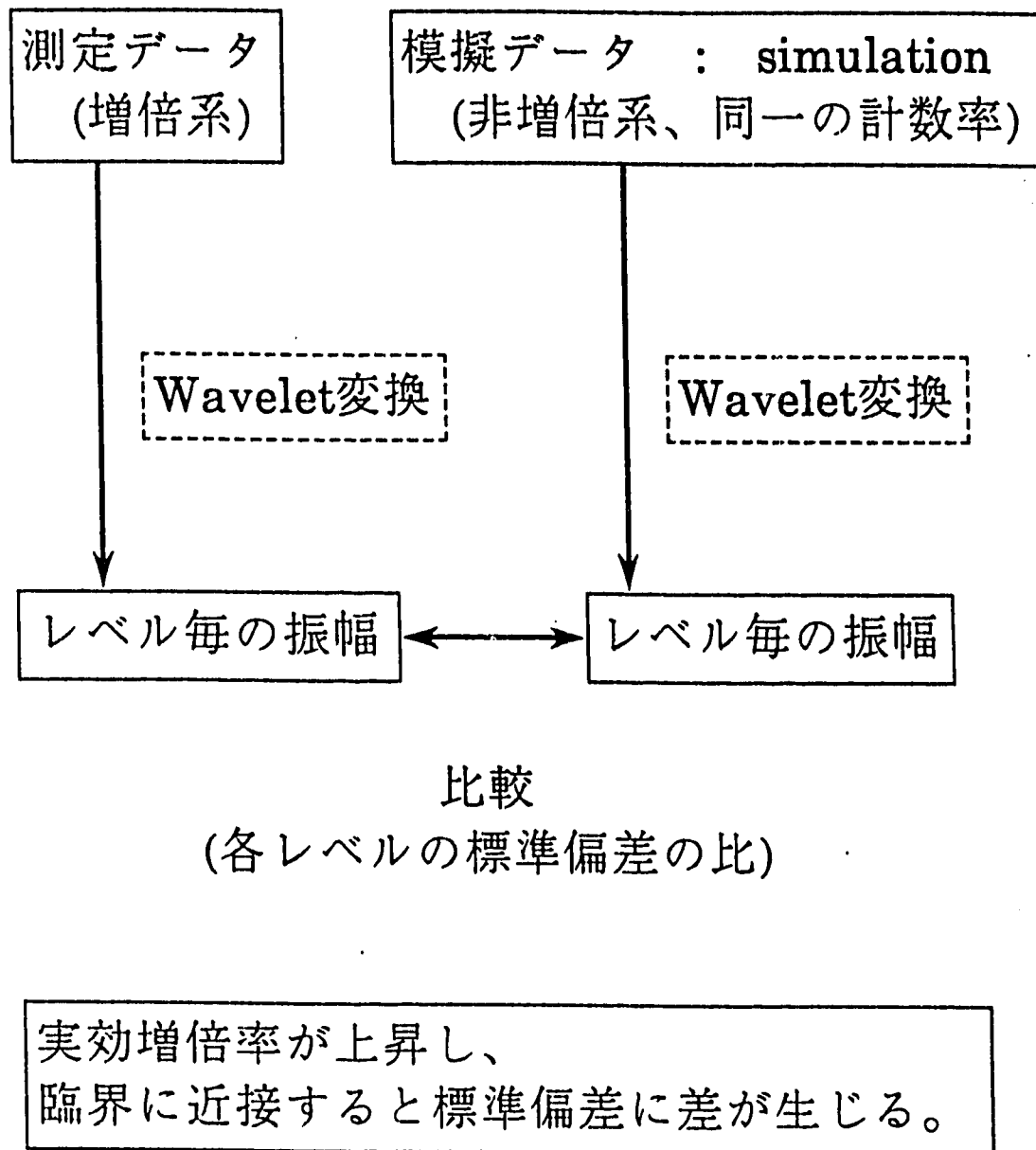


図3-2-2 臨界近接の検知の手順

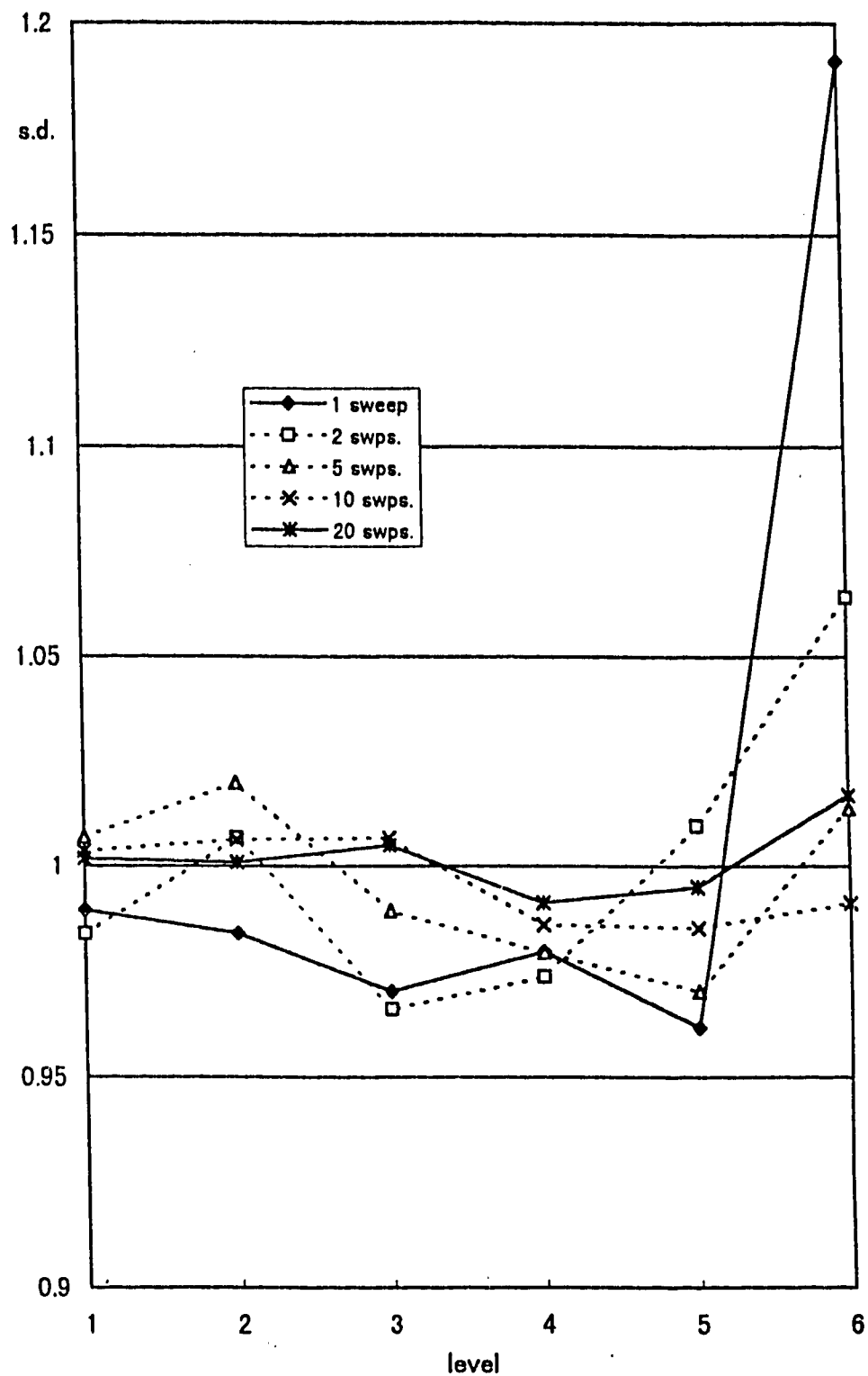


図3-4-1 Cf線源の測定結果  
測定データの集積による収束(4階B-Spline、330cps)

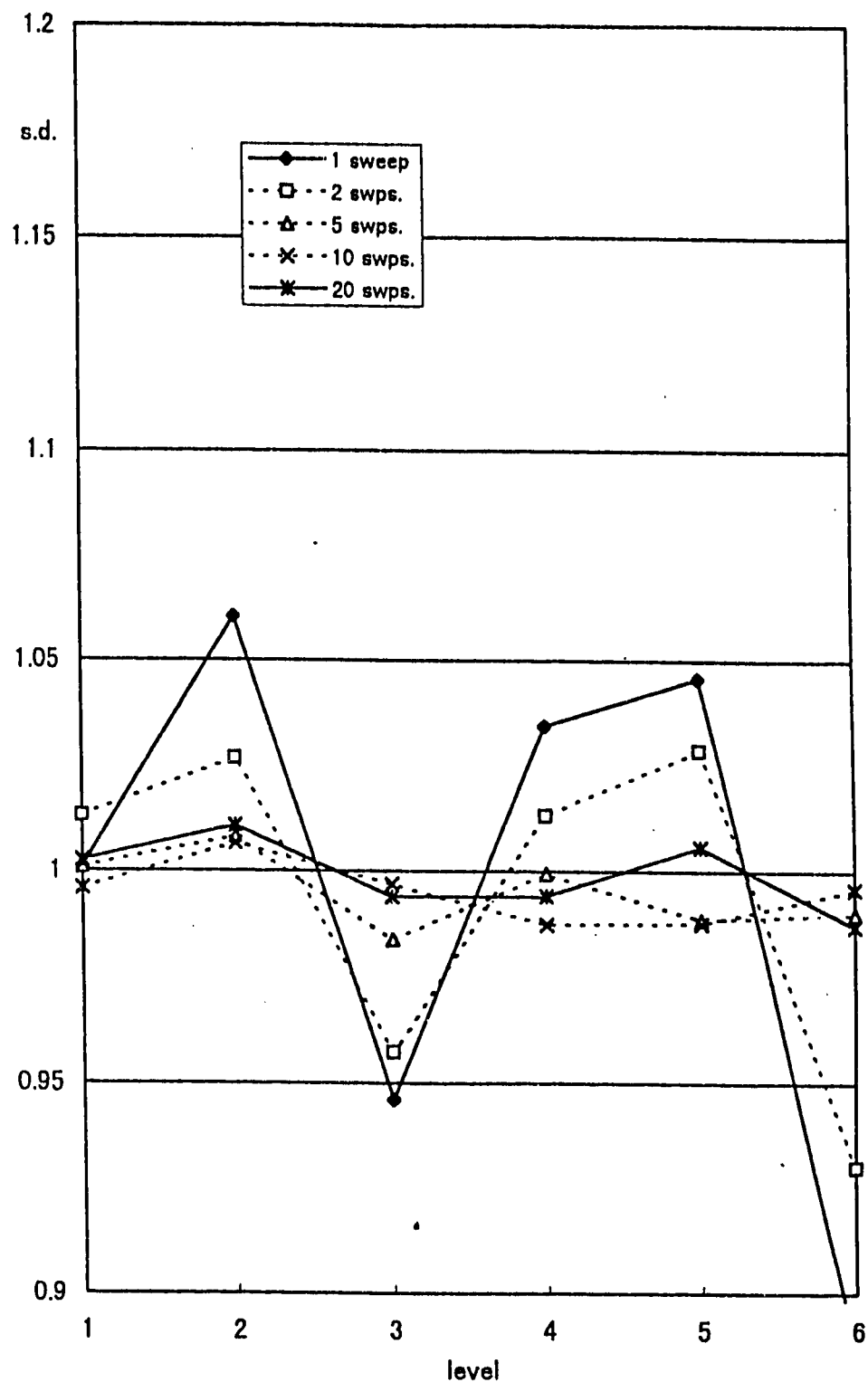


図3-4-2 Cf線源の測定結果  
測定データの集積による収束(4階B-Spline、660cps)

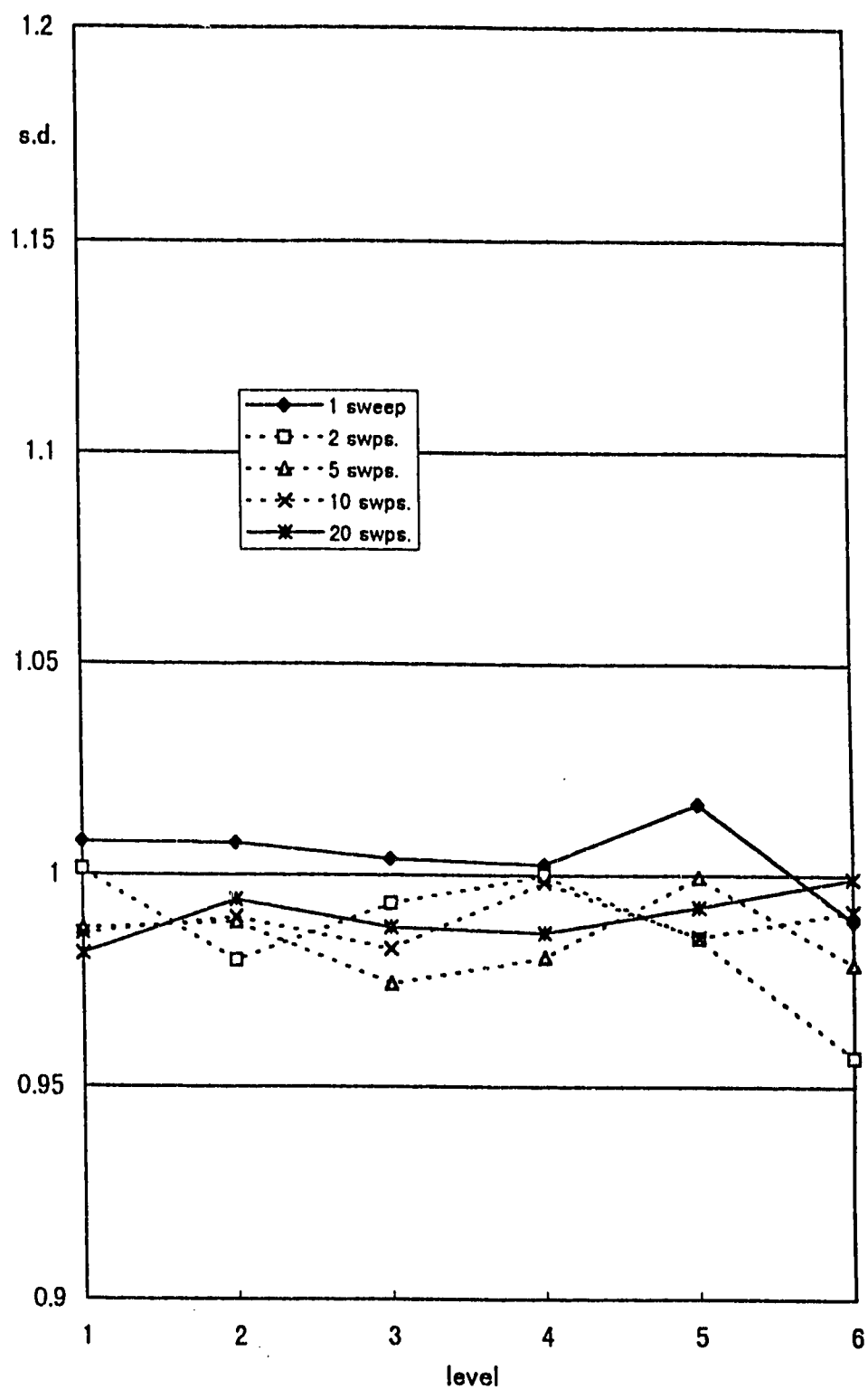


図3-4-3 Cf線源の測定結果  
測定データの集積による収束(4階B-Spline、4200cps)

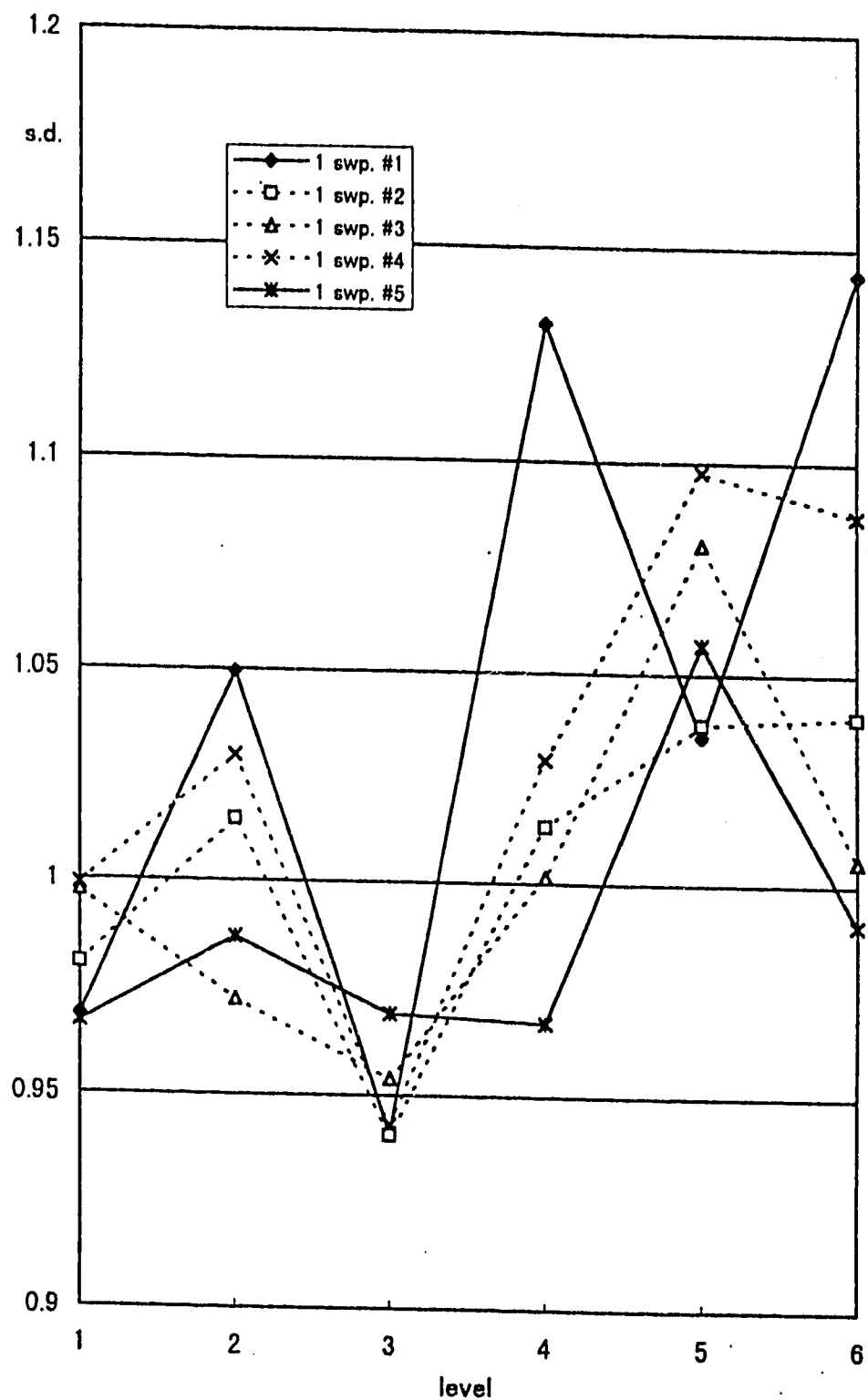


図3-4-4 Cf線源の測定結果  
1スイープのデータの統計的変動(4階B-Spline、660cps)



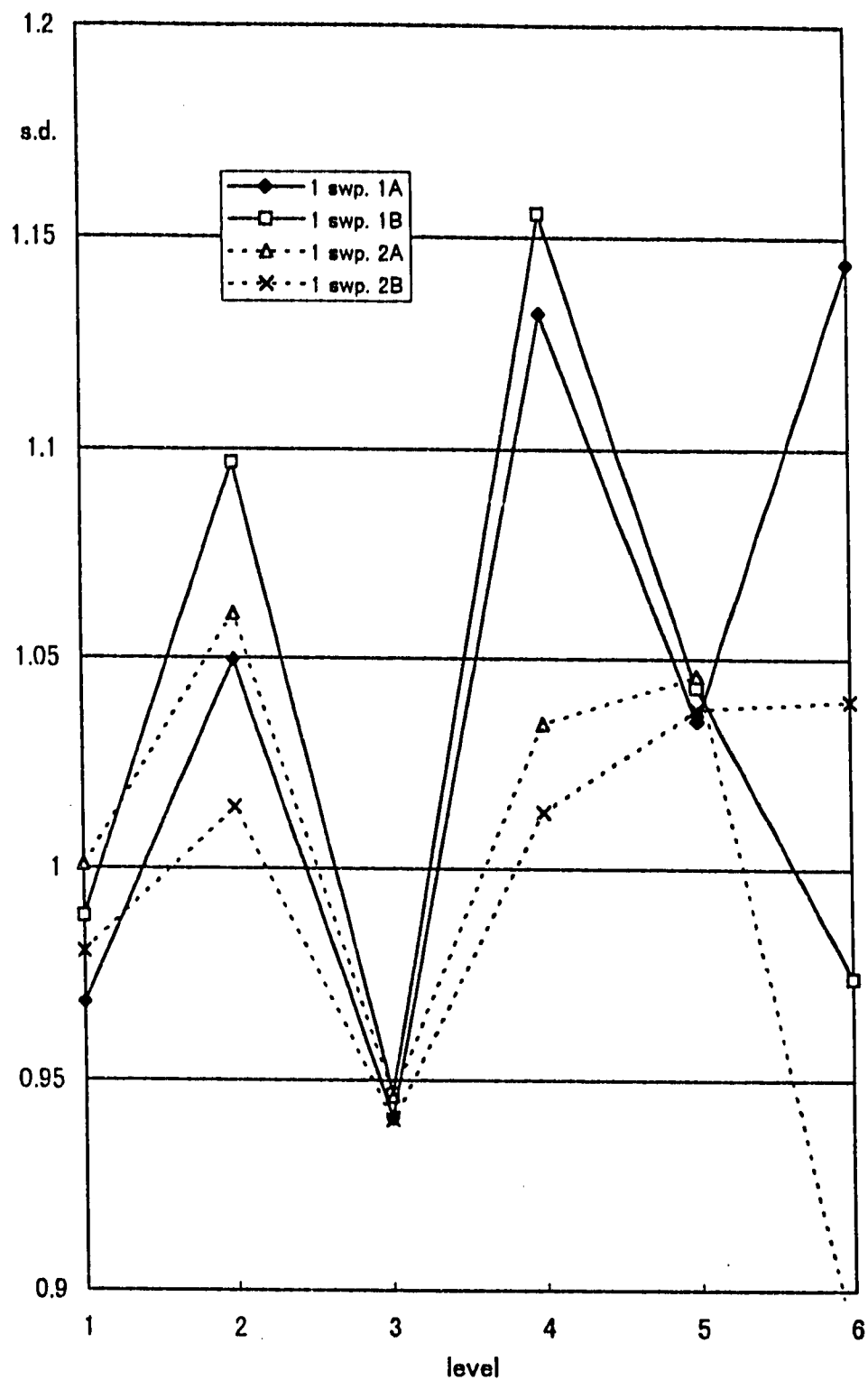


図3-4-5 CI線源の測定結果  
 模擬データの相違による統計的変動(4階B-Spline、660cps)

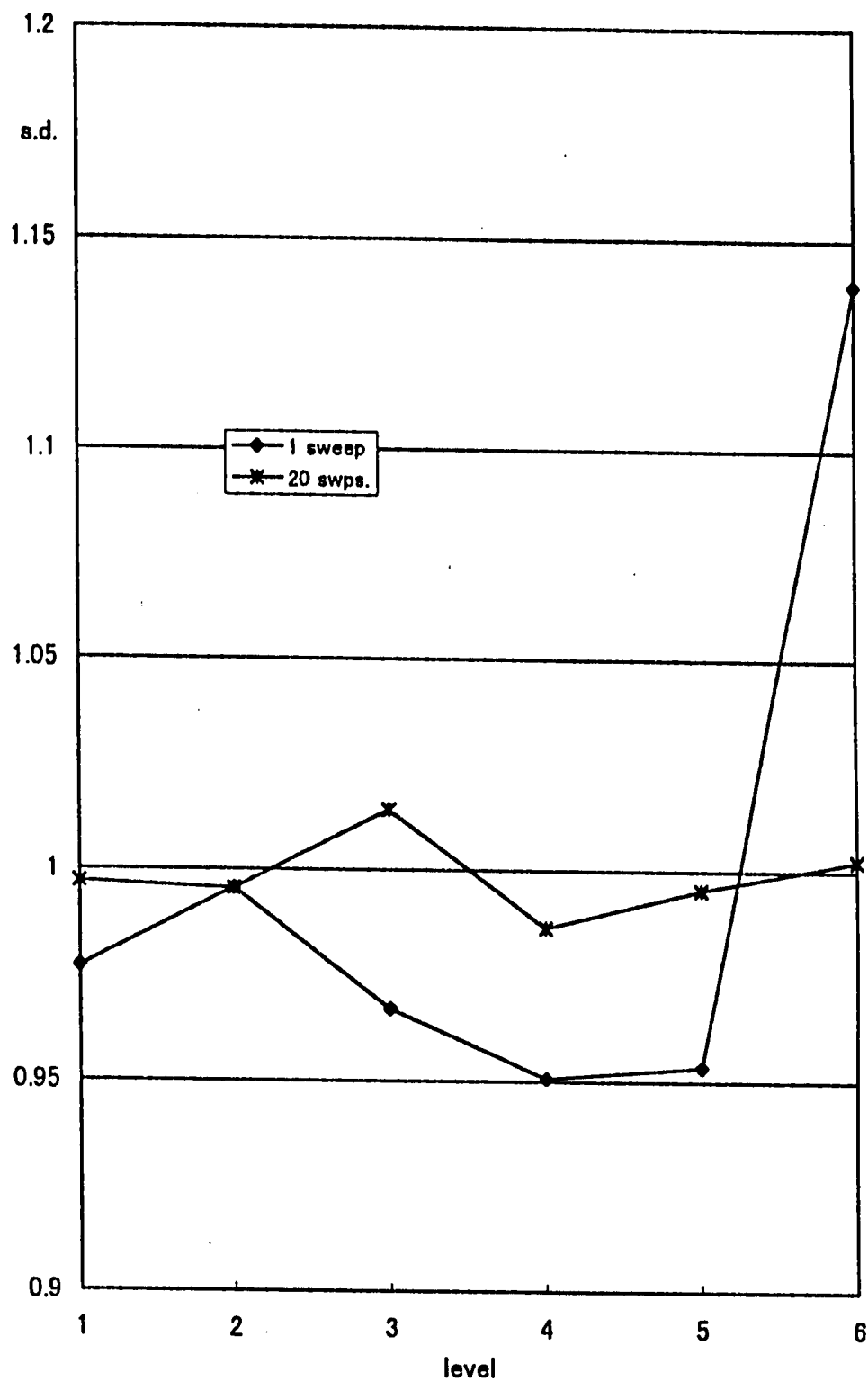


図3-4-6 Cf線源の測定結果  
測定データの集積による収束(2階B-Spline、330cps)

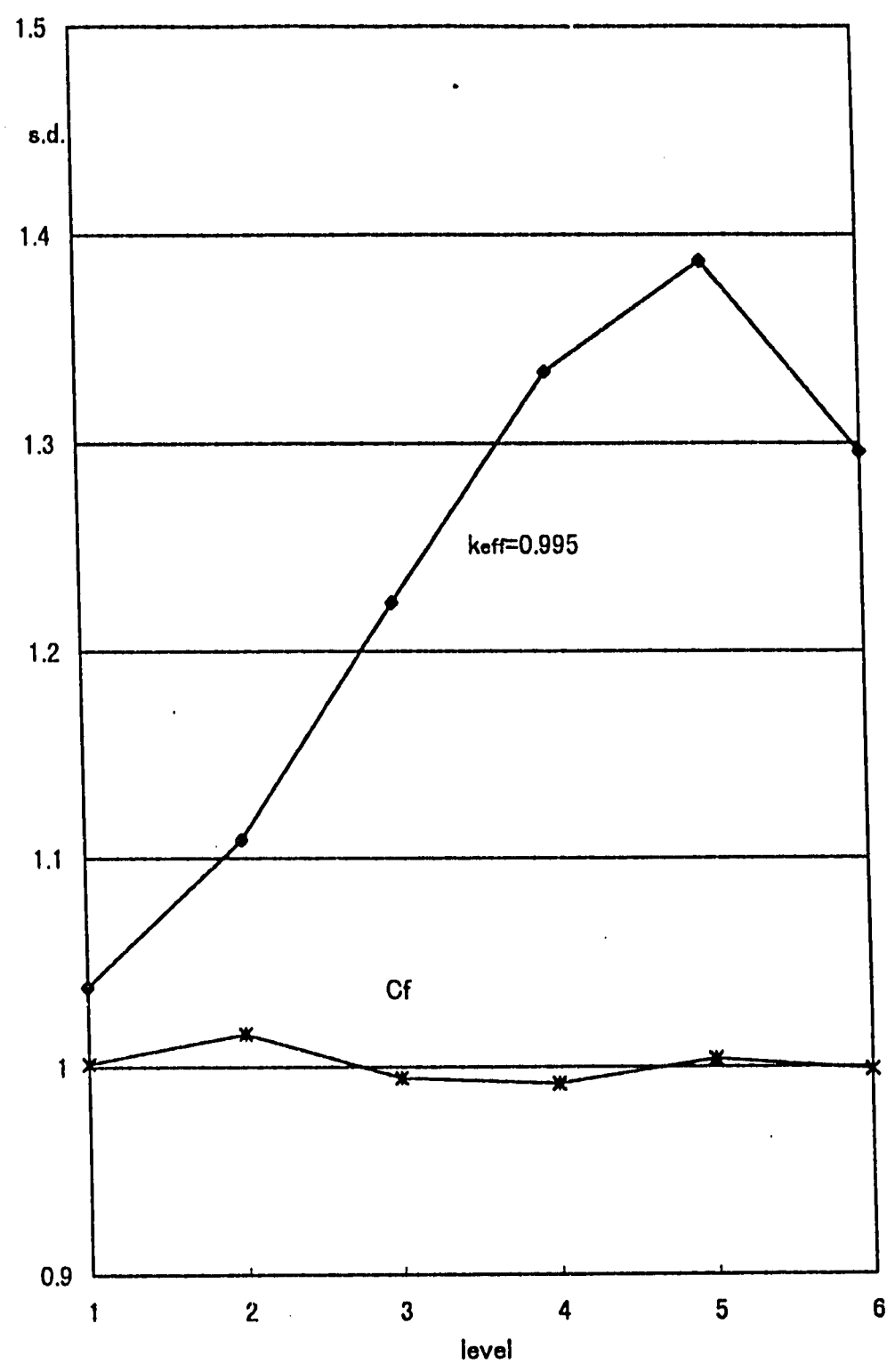


図3-5-1 臨界近接の検知(4階B-Spline,  $\Delta t = 20\text{msec.}$ )

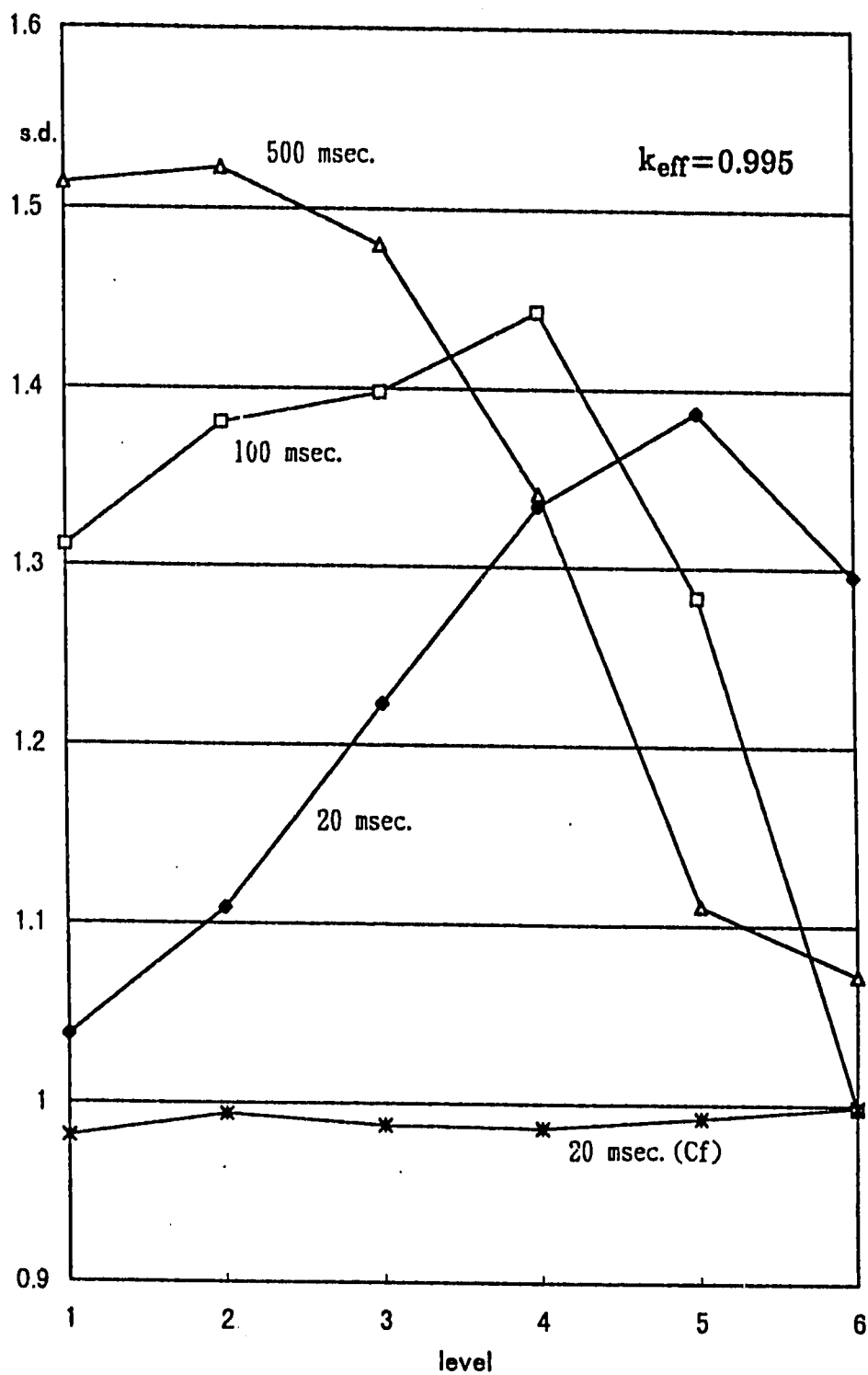


図3-5-2 MCSチャンネル時間幅依存性(4階B-Spline)

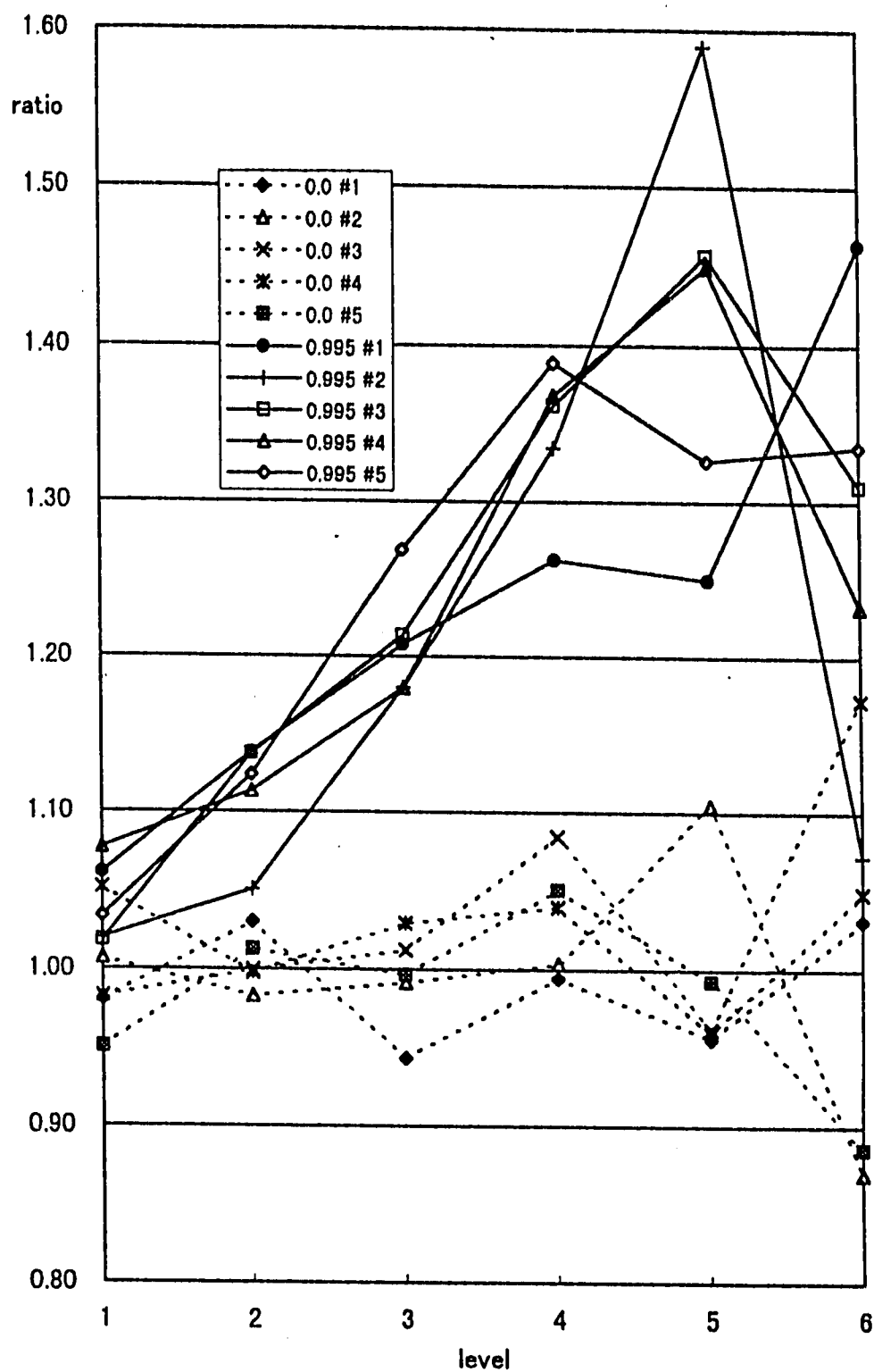
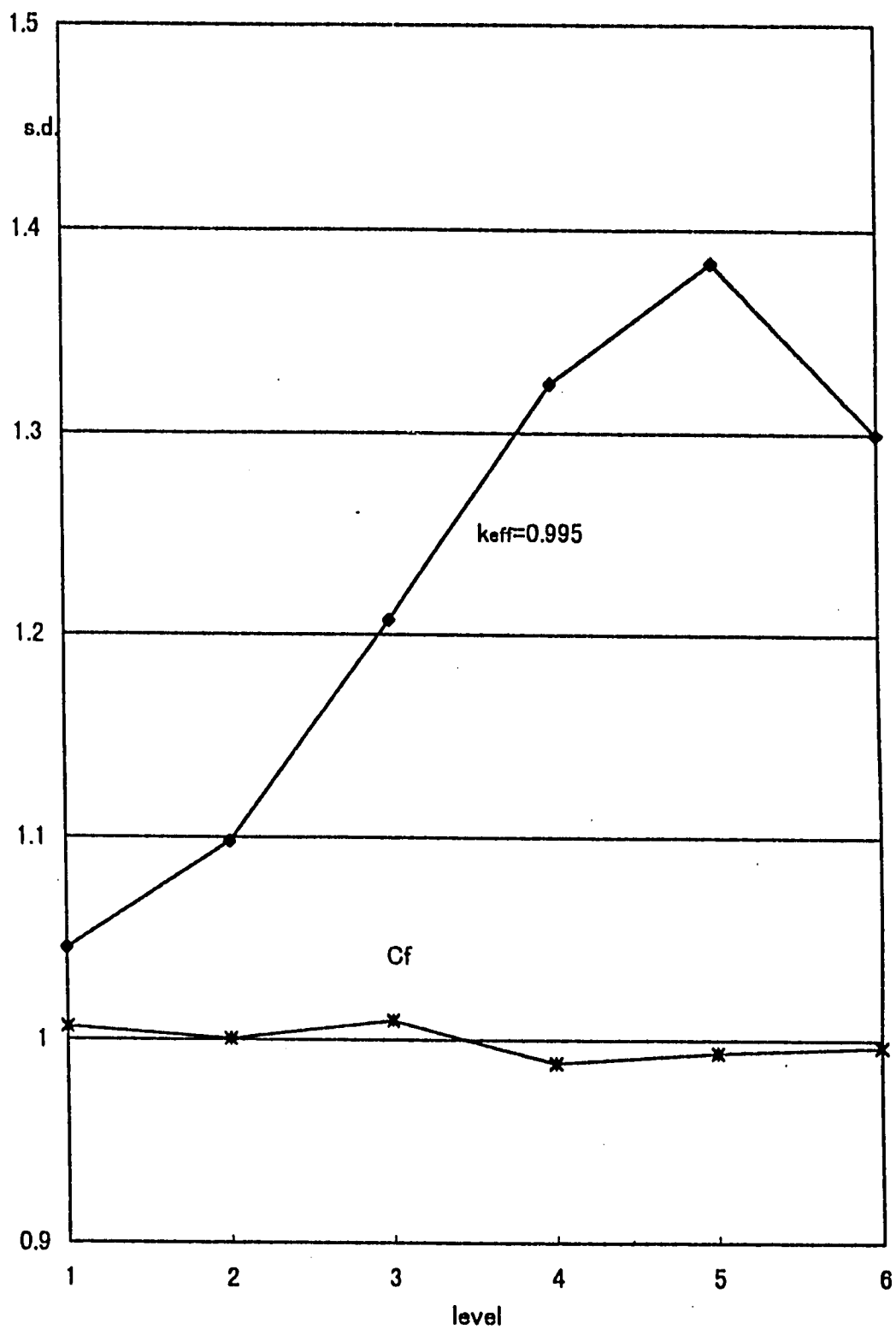
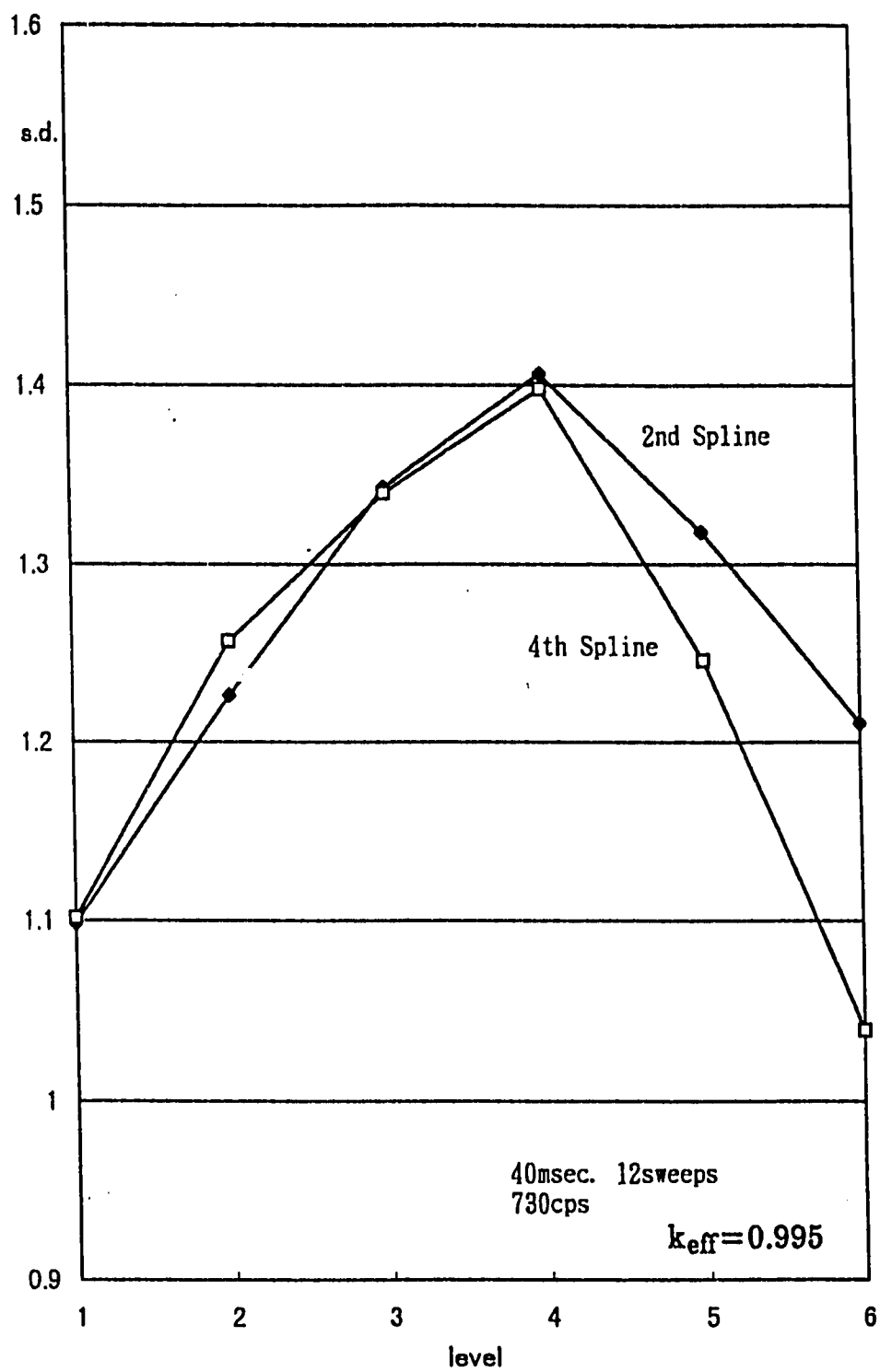


図3-5-3 1スイープの測定による臨界近接の検知  
(4階B-Spline, 20msec. × 8192ch.)

図3-5-4 臨界近接の検知(2階B-Spline,  $\Delta t=20\text{msec.}$ )

図3-5-5 スプライン関数の階数依存性( $\Delta t=40\text{msec.}$ )

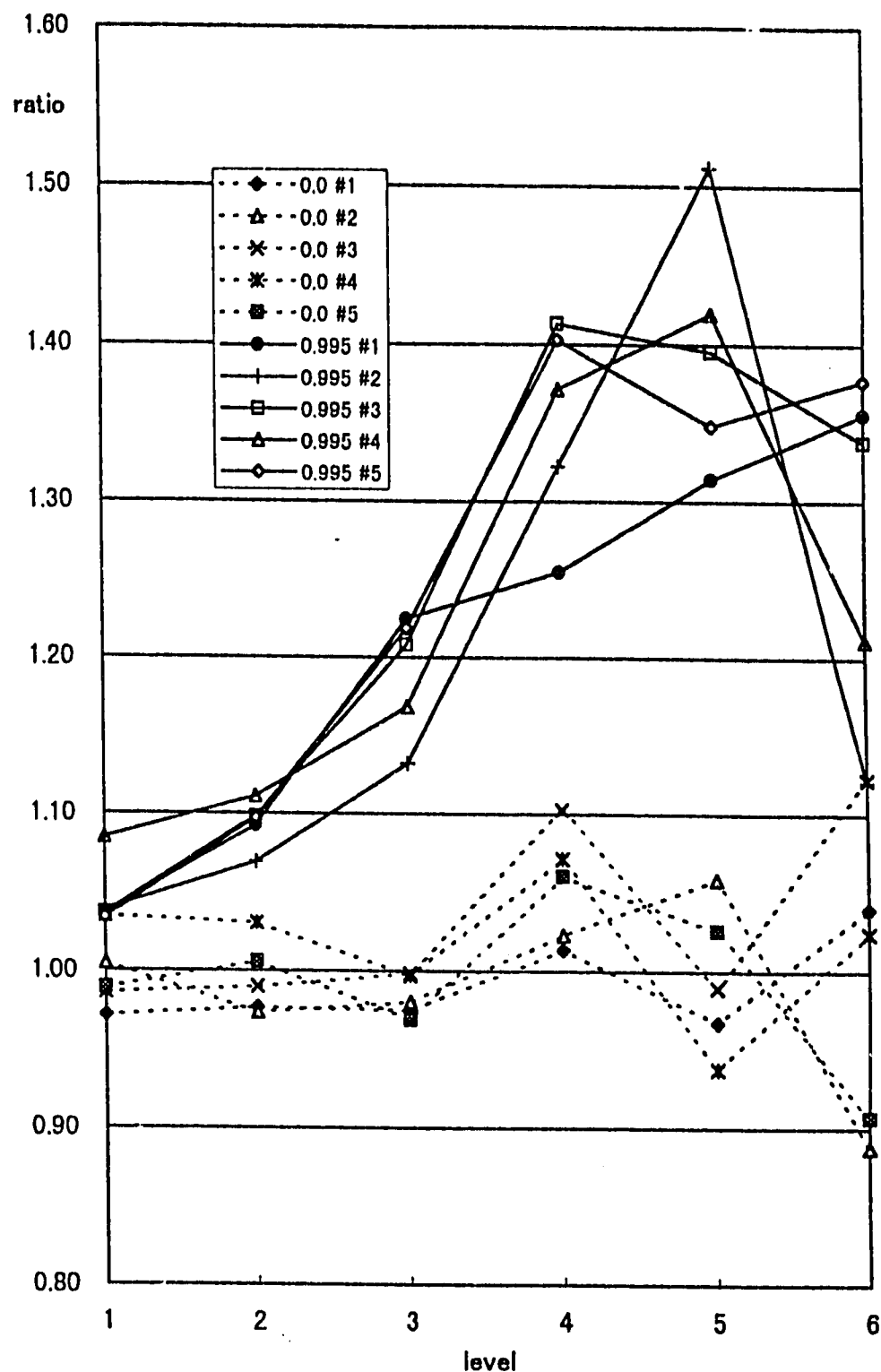


図3-5-6 1スイープの測定による臨界近接の検知  
(2階B-Spline, 20msec. × 8192ch.)



## 5. まとめと今後の計画

核燃料施設、特に高速炉燃料再処理施設や燃料貯蔵施設、核燃料輸送容器の臨界安全設計の合理化に資することを目的とした未臨界度モニターの開発研究の一環として、炉雑音データをウェーブレット解析することによって臨界近接を検知する手法を開発した。ウェーブレット解析は信号に含まれる成分の時間変化を明らかにする手法であり、音声や電波、流体振動の解析に適用され成果をあげているが、炉雑音データ、特に機械的な振動とは無関係な中性子雑音データに適用した例はなく(少なくとも著者の知る範囲では)、炉雑音解析としては新しい試みである。

これまで未臨界度測定の為の炉雑音解析として検討してきたファインマン-アルファ法や周波数解析法では、必要な統計精度を達成するのに必要な時間間隔のデータを一括して計算処理する。一方、ウェーブレット解析による本報告の手法では、短い時間間隔のデータを処理した結果を集積して統計精度を得ている。その結果、体系の実効増倍率の変化を、より短い応答時間で検知できる事が期待できる。

ウェーブレット解析(変換)は各種の振動現象の時間変化の評価に適用され成果を得ており、理論的数学的にも確立されつつあるが、結果として得られるデータの数学的定義が複雑であり、従来の手法の様に体系の実効増倍率等の定義の明確な炉物理量を測定データから求めるには至っていない。

ウェーブレット解析によって実効増倍率の様な炉物理量を直接求める事が出来ない為、ここでは解析で得られた数値(各レベルの振幅の標準偏差の値)を非増倍系のデータと比較する事によって、体系が臨界に近接している事を検知する手法を考案した。即ち、2つの体系のデータの差異が統計的バラツキによるものか、中性子の相関によるものかを判断する為に、カリフォルニウム線源の様な中性子の増倍の無い体系のデータを用いる。この様な非増倍系のデータは、実際に測定しなくても数値的な模擬データを作成することが容易であり、測定データの一連の計算処理の中に組み入れることが可能である。

本研究では、マルチチャンネルスケーラーによるデジタルデータを処理する事として、スプライン関数を用いた離散ウェーブレット変換を検討した。必要な計算式を整理した後、プログラムを作成し臨界集合体において得られた測定データによって検証した。動燃事業団大洗工学センターの重水臨界実験装置(DCA)において炉雑音測定を行い、得られたデータを処理して臨界近接の検知を試みた。今回は手法の妥当性の確認を目的とした為、中性子の相関成分が多く検出が容易であると考えられる臨界近傍(0.995)で測定を行い解析した。

ウェーブレット関数として2階及び4階のカーディナルB-スプライン関数を検討し、どちらの関数を用いてもほぼ同等の性能で臨界近接の検知が可能であることを確認した。

前述の通り、本報告はウェーブレット変換による臨界近接検知の第一報であり、今後以下の項目について検討を行う。

### 1) ウェーブレット解析に関わる基礎的理論的検討項目

- 1-1) ウェーブレット変換による炉物理量評価の検討
- 1-2) 炉雑音データの処理に適したウェーブレット関数の選定
- 2) 臨界近接検知
  - 2-1) 検知可能な実効増倍率の下限値の確認
  - 2-2) 多様な条件での臨界近接検知
  - 2-3) 臨界近接検知に必要な時間の確認
- 3) モニターシステムの開発

以上の項目について、今後検討を進める計画である。

## 謝辞

本研究の実施において、測定に使用したマルチチャンネルスケーラーの整備、マルチチャンネルスケーラーによる測定プログラムの作成、ワークステーションの整備、OPEN WINDOWS、XView等の計算機環境設定については、臨界工学試験室の室員である有賀正剛氏(NESI)が実施した。

臨界集合体DCAの運転は、臨界工学試験室の八木 昭氏をリーダーとする運転グループが行い、測定においては同室の羽様 平氏、柳沢真哉氏(原子力技術)、平賀勝志氏(同)の協力を得た。

## 参考文献

- (1) 大谷暢夫 : ファインマン- $\alpha$ 法による低実効増倍率測定、原子力学会「1993春の年会」要旨集、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、原子力学会「1993春の年会」要旨集、A16.
- (3) 大谷暢夫 : ファインマン- $\alpha$ 法による低実効増倍率測定(2)、原子力学会「1993秋の大会」要旨集、E23.
- (4) 羽様 平、大谷暢夫 : ミハルソ法における検出器特性の影響評価、原子力学会「1995秋の年会」要旨集、A30.
- (5) 羽様 平、他 : カリフォルニウム線源検出器の開発、原子力学会「1994秋の大会」要旨集、E34.
- (6) 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、原子力学会「1994秋の大会」要旨集、G33.
- (7) OHTANI, N., HAZAMA, T. : Subcriticality Monitoring by Feynman- $\alpha$  Method, Proc. 5th Int. Conf. on Nuclear Criticality Safety, ICNC95, (1995).
- (8) 榊原 進 : "ウェーブレットビギナーズガイド"、(1995)、東京電機大学出版局.