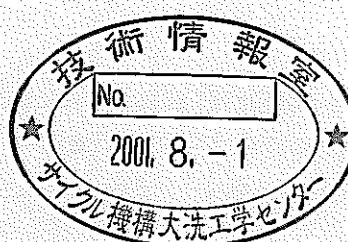


核計装を用いた早期炉内異常検知 システムの検討

— 「常陽」核計装ゆらぎのバックグラウンド特性に基づく検討 —

(研究報告)



2001年3月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

核計装を用いた早期炉内異常検知システムの検討

—「常陽」核計装ゆらぎのバックグラウンド特性に基づく検討— (研究報告)

小舞正文*、大山幸男**

要 旨

高速実験炉「常陽」(以下「常陽」)では、炉内異常事象を応答性の早い核計装信号を用いて検出し、炉内異常を早期に検知する早期炉内異常検知技術の開発を進めている。例えば炉内流路閉塞等により気泡が発生した場合、高周波の反応度ゆらぎが発生するが、その反応度ゆらぎを早期に検知するためには、核計装信号の微弱な変化をすばやく捉える必要がある。そのため通常時の核計装信号のバックグラウンド特性を予め把握することは重要である。

「常陽」では、これまでに炉雑音測定試験により核計装信号ゆらぎのバックグラウンドデータを採取してきた。核計装信号の周波数スペクトルの特徴は、高周波になるにつれてスペクトル強度が低下するピンクノイズ形状であることがあげられる。そのため、炉内早期異常検知システムは、計測上のダイナミックレンジを確保しつつ高分解能のサンプリングビット分解能で核計装信号の変化を捉え、通常時のバックグラウンド特性との比較演算を高速に行うことが重要となる。本報告書では、核計装信号ゆらぎの特性についてまとめ、その特性を基にした異常検知システムの検討結果をまとめた。

本報告書の内容には、原子力システム(株)が核燃料サイクル開発機構（機構担当部課室：実験炉部 技術課）との契約により実施した業務成果に関するものを含み、核燃料サイクル開発機構が取りまとめたものである。

*核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター

照射施設運転管理センター 実験炉部 技術課

**原子力システム(株)

Study on early core anomaly detection system using nuclear instrumentation

-Study on core anomaly detection system based on fluctuation characteristics of neutron flux monitors in JOYO-

Masafumi KOMAI*, Yukio OYAMA**

ABSTRACT

A neutron flux monitor can be effective for early detection of reactivity anomalies in a FBR core. For instance, when a local blockage causes a bubble, there is a slight reactivity change in the high frequency band.

It is important to understand the fluctuation characteristics of neutron flux monitors. Analysis of the JOYO reactor showed that flux-monitoring fluctuations are pink noise. These noise characteristics drive the requirements for the JOYO reactor anomaly detection system. The system requires fast time resolution and analog to digital resolution with sufficient dynamic range. A real time arithmetic unit is needed to compare the flux monitor signal with signals from normal conditions.

This report describes the characteristics of neutron flux monitor signals and the anomaly detection system designed to analyze them.

*Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center,
Oarai Engineering Center, JNC

**Nuclear Energy System Inc.

目 次

1. はじめに -----	1
2. 核計装ゆらぎバックグラウンド特性のまとめ -----	2
2.1 核計装信号の周波数帯域上の分類 -----	2
2.2 周波数特性のまとめ -----	4
3. 炉内異常検知システムの検討 -----	18
3.1 バックグラウンド特性とシステムへの要求条件 -----	18
3.2 異常検知システムとしての要求条件 -----	19
3.3 システム構成の検討 -----	20
4. まとめ -----	29
参考文献 -----	30

表リスト

表 2-1 核計装信号の周波数帯域における特徴 -----	5
表 3-1 システムへの要求項目と実現方法のまとめ -----	23
表 3-2 取り込む信号と 1 運転サイクルあたりのデータ処理量 -----	24

図リスト

図 2-1 出力系核計装信号ゆらぎ(第 33 サイクル) -----	6
図 2-2 原子炉入口温度ゆらぎ(第 33 サイクル) -----	7
図 2-3 出力系核計装信号のパワースペクトル(第 33 サイクル) -----	8
図 2-4 原子炉入口温度ゆらぎのパワースペクトル(第 33 サイクル) -----	9
図 2-5 原子炉入口温度計信号から核出力への伝達関数 -----	10
図 2-6(a) 核計装信号のシミュレーション(時系列信号) -----	11
図 2-6(b) 核計装信号のシミュレーション(伝達関数) -----	11
図 2-7 出力系核計装信号ゆらぎ(第 8 サイクル) -----	12
図 2-8 出力系核計装信号ゆらぎ(第 33 サイクル) -----	13
図 2-9 出力系核計装信号ゆらぎの周波数解析結果(第 8 サイクル) -----	14
図 2-10 出力系核計装信号ゆらぎの周波数解析結果(第 33 サイクル) -----	15
図 2-11 出力系核計装信号ゆらぎ(第 35 サイクル) -----	16
図 2-12 出力系核計装信号ゆらぎのパワースペクトル(第 35 サイクル) -----	17
図 3-1 データ前処理装置の信号処理内容の流れ -----	25
図 3-2 システム構成案 -----	26
図 3-3 ステップ応答試験のデータ処理例(第 35 サイクル) -----	27
図 3-4 安定性試験のデータ処理例(第 35 サイクル) -----	28

1.はじめに

高速実験炉「常陽」（以下「常陽」）では、炉心の局所流路閉塞等による気泡の発生等の炉内異常事象を、応答性の早い核計装信号の変化を捉えることによりリアルタイムに検知する炉内異常検知技術の確立を目指とした開発を進めている。

炉内異常検知システムは、核計装信号を主にしたプロセスデータを高速にサンプリングを行い、通常時の信号のバックグラウンド特性との比較演算を高速に行う計算機システムである。炉内局所沸騰による反応度ゆらぎは、周波数の高い領域において微弱なスペクトルエンベロープの変化をもたらすと考えられ、現状のプラント計装においては、応答性の早い核計装信号を用いることが最も有力である。しかし、周波数の高い領域における微弱な信号変化を検出するためには、高速な計算処理、充分なサンプリング周波数、サンプリング分解能が必要である。

このシステムの検討において、通常時のバックグラウンド特性の確認は、信号サンプリングにおけるダイナミックレンジ、サンプリングビット分解能、サンプリング周波数、FFT 解析処理の前のトレンド除去処理の最適化等の観点から非常に重要であり、システム構成を検討する上で重要である。例えば、「常陽」では、通常定格運転時には燃料の燃焼反応度補正の為、1日3回の出力調整を行っており、その際の出力変動は定格出力に比して3%程度である。また、原子炉入口温度のゆらぎにより低周波数のゆらぎ幅が1%程度常に存在する。このため、信号の大きな変動に対しても測定レンジを超えないようにするために、信号変動に対しても十分な測定レンジを保ちつつ、連続的に高分解能のデータサンプリングを行う必要がある。本報告書では、まず核計装信号バックグラウンドデータの特性について述べた後に、核計装信号のバックグラウンド特性を踏まえたシステムの検討について報告する。

2.核計装ゆらぎバックグラウンド特性のまとめ

2.1 核計装信号の周波数帯域上の分類

異常検知システムの構築において、その検知すべき信号のバックグラウンド特性を把握することは、信号サンプリングにおけるダイナミックレンジ、サンプリング分解能等を考慮する上で非常に重要である。核計装信号のゆらぎは、炉内の様々な時定数を持った動的なフィードバック反応度成分の重ねあわせによる原子炉出力のゆらぎを非常に早い応答性で直接的に表しており、炉内局所沸騰による反応度ゆらぎの検知等の異常検知には最適な信号ソースと言える。そこで、バックグラウンド特性について、物理的な要因から考えられるゆらぎ成分の周波数帯域の分類分けを行い、それぞれの信号の特性について整理した。ゆらぎをもたらす反応度変化ではっきりとしている要因としては、原子炉入口温度のゆらぎ、制御棒振動等の影響等があり、下記の3つの周波数帯域に分類して特性を整理することができる。なお、定格運転時における核計装信号指示値のゆらぎ幅としては±0.5%程度が常に存在する。

- ① 低周波数 0.01 Hz 以下
- ② 中間周波数 0.01~0.1Hz
- ③ 高周波数 0.1 Hz 以上

これらの各周波数帯域における核計装信号の特性を以下に述べる。

(1) 低周波数

出力系中性子検出器 ch.6,7,8 の信号のゆらぎを図 2-1 に示す。このゆらぎは、図 2-2 に示すような原子炉入口温度ゆらぎにより炉心支持板に熱膨張が発生し、これによる反応度変化の影響を受けることや、炉心の冷却材膨張、構造材膨張等による緩やかなフィードバック反応度の影響を受けることにより発生したものである。図 2-3 及び図 2-4 に示すこれらのゆらぎのパワースペクトルから、0.01Hz 以下程度の低周波数のゆらぎは、比較的ゆっくりとした変動であるため、先に述べた反応度効果のうち主に熱的な変動が核出力ゆらぎの要因になっていると考えられる。⁽¹⁾

このようなゆっくりとした低周波数帯域の核出力の変動(外乱)をもたらす要因の定量的な評価は、原子炉入口温度と核計装信号との関係を図 2-5 の伝達関数モデルによる解析により確認できている。核計装信号と原子炉入口温度 A,B の伝達関数は、図 2-5 に示す式のように、原子炉入口温度(A,B ループの平均値:T(s))、核計装信号(N(s))、原子炉入口温度計の時定数(Tt)、原子炉入口温度計の位置から原子炉支持板まで Na が流れるむだ時間(λ)、原子炉支持板の熱膨張 1 次遅れ時定数(Ta)を用いて現わした。温度係数及び原子炉支持板の熱膨張時定数、及び無駄時間の算出方法としては、実測の核計装信号に対する誤差を最小となるように値を決定した。^{(4),(5)}

伝達関数による定格時の核計装ゆらぎの計算結果を図 2-6 に示す。計算結果と低周波数の核計装の変動の時系列信号は比較的良好一致し、核計装信号の低周波ゆらぎが、

原子炉入口温度ゆらぎによる反応度ゆらぎによるものであることが確認できた。ただし、B ループの原子炉入口温度の変化によると思われる 0.001Hz 程度以下の非常に低周波（長周期）の成分が残っていることから、炉心支持板熱膨張時定数よりも数倍長い時定数の負のフィードバック反応度の影響があると考えられる。

低周波数成分は原子炉入口温度計信号を用いてむだ時間を含めた伝達関数により表現できるため、リアルタイムのスペクトル解析処理におけるトレンド除去計算の際に、予測処理計算等として活用できる。

(2) 中間周波数

MK-II 炉心第 8 サイクルと第 33 サイクルの出力系中性子検出器 ch.6～ch.8 信号のゆらぎを図 2-7 と図 2-8 に示す。図 2-9 と図 2-10 は、これら信号ゆらぎのパワースペクトル、検出器間のコヒーレンス、位相を求めたものである。これらの図から 0.01～0.1Hz の中間周波数帯域における出力系中性子検出器信号ゆらぎの特徴をまとめると、パワースペクトルは核計装のチャンネル(ch6,7,8)による違いが少なく同じ傾向を示している。しかし、炉心をはさんで反対側に配置された ch.6 と ch.7 検出器間のコヒーレンスは、隣接する ch.6 と ch.8 検出器間のそれより低下しており、線形結合性が弱いことが分かる。これは、ch.6 と ch.8 検出器間では、ほぼ同相を示しているのに対し、ch.6 と ch.7 検出器間の位相は約 180 度位相が反転していることからも推定でき、炉心の反対側どうしでは非線形性の強い物理現象を捕らえている可能性が高いと考えられる。

これらの現象は、MK-I、MK-II 及び移行炉心の全ての運転期間を通して確認されているため、定常的な物理現象を示した特徴と考えられているが原因については不明である。⁽¹⁾しかし本検討で想定される沸騰による反応度のゆらぎ特性の影響が見られるのは後で述べるように、高周波数帯域であり、中間周波数の信号特性は直接的には影響しない。

(3) 高周波数

図 2-11 に出力系中性子検出器 ch.6～ch.8 信号のゆらぎを示す。ゆらぎ幅は±0.4% 程度であるが、この値は、全制御棒を防振機構付制御棒に交換した MK-II 炉心第 22 サイクル以降の定常的なゆらぎ幅である。また、これらのゆらぎのパワースペクトルを図 2-12 に示す。2Hz 付近のパワースペクトルは、この付近の周波数に固有振動数を持つ制御棒振動に伴う反応度変化によって核出力がゆらぐため生じたものである。この制御棒振動の原因是、制御棒チャンネル(下部案内管)に隣接する炉心燃料チャンネルと制御棒チャンネルのそれぞれを流れる冷却材が、チャンネル出口上部において合流するときに発生する圧力変動によるものであることが明らかとなっている。⁽²⁾また、この周波数付近のパワースペクトルは、制御棒挿入量の多い運転サイクル初期に

比べて挿入量が少ない運転サイクル末期では低下する傾向を示す。

また、図 2-12 における 10Hz、40Hz 及び 80Hz のピークは、MK-II 炉心第 30～32 サイクルにおいても確認されていることから、このピークは定常的な物理現象の特徴を示しているものと考えられる。このうち、40Hz と 80Hz のピークについては、これに周波数の近い 50Hz の電源ノイズが計測装置のサンプリング周波数のずれによりみられた可能性もあり調査したが、サンプリング周波数は正確であり、これは電源ノイズ以外の原因によるものであることが分かった。この原因については不明であり、今度さらに検討することとしている。

2.2 周波数特性のまとめ

核出力ゆらぎを、それをもたらす反応度変化やノイズ等の影響により低、中間及び高周波数帯域に分類し、それぞれの周波数帯域の特徴をまとめた結果を表 2-1 に示す。核計装信号のゆらぎの全体的な特徴としては、ホワイトノイズではなく、低周波成分が強く周波数が高くなるにつれてスペクトル強度が低下するピンクノイズ型のスペクトル形状であることが挙げられる。炉心に気泡が発生した時の反応度ゆらぎが想定される高周波成分の自乗スペクトル強度比は、代表的な周波数として低周波:0.001Hz、高周波:10Hz でのパワースペクトルの強度比を考えると、図 2-3、図 2-12 より高周波成分は低周波数成分の約 10^{-6} 倍である。低周波成分によるゆらぎ成分が原子炉出力の 1%程度であるのに対して、振幅スペクトルはその平方根比の 10^{-3} %程度であるため、異常検知システムのサンプリング分解能としては約 10^{-3} %以上の分解能が必要である。また、核計装チャンネル間の信号の関係における特性としては、中間周波数帯域を除いて、線形結合性が高く位相も極めて良くそろっており、核計装チャンネル間同士で原子炉の核分裂反応の信号を位相遅れがなく捉えられている。このことは核計装信号を用いた炉内の微弱な反応度変化を捉える上で重要な特性である。

低周波数帯域は、原子炉入口温度ゆらぎによるものであるため、原子炉入口温度信号により定量的にその変化を除去することができる。沸騰による反応度ゆらぎは高周波帯域であり、高周波信号から見ると低周波数信号はゆっくりしたトレンド変化と見なせるため、原子炉入口温度信号から低周波信号を除去でき、周波数解析上非常に重要なトレンド除去が可能である。

表 2-1 核計装信号の周波数帯域における特徴

	周波数スペクトルの形状	検出器間の位相	検出器間のコヒーレンス	核出力ゆらぎの原因
低周波帯域 (0.01Hz 以下)	$1/f^2$	なし (同位相)	あり (1に近い)	原子炉入口温度ゆらぎによる反応度変化
中間周波帯域 (0.01~0.1Hz)	$1/f$	有り (ch6, ch8 と ch7 では逆位相)	なし (0に近い)	不明
高周波帯域 (0.1Hz 以上)	$1/f^3$ (ただし、10~100Hz ではホワイト分布を示す)	なし (同位相)	あり (1に近い)	・制御棒振動による反応度変化 ・原因は不明だがピ-ク有り

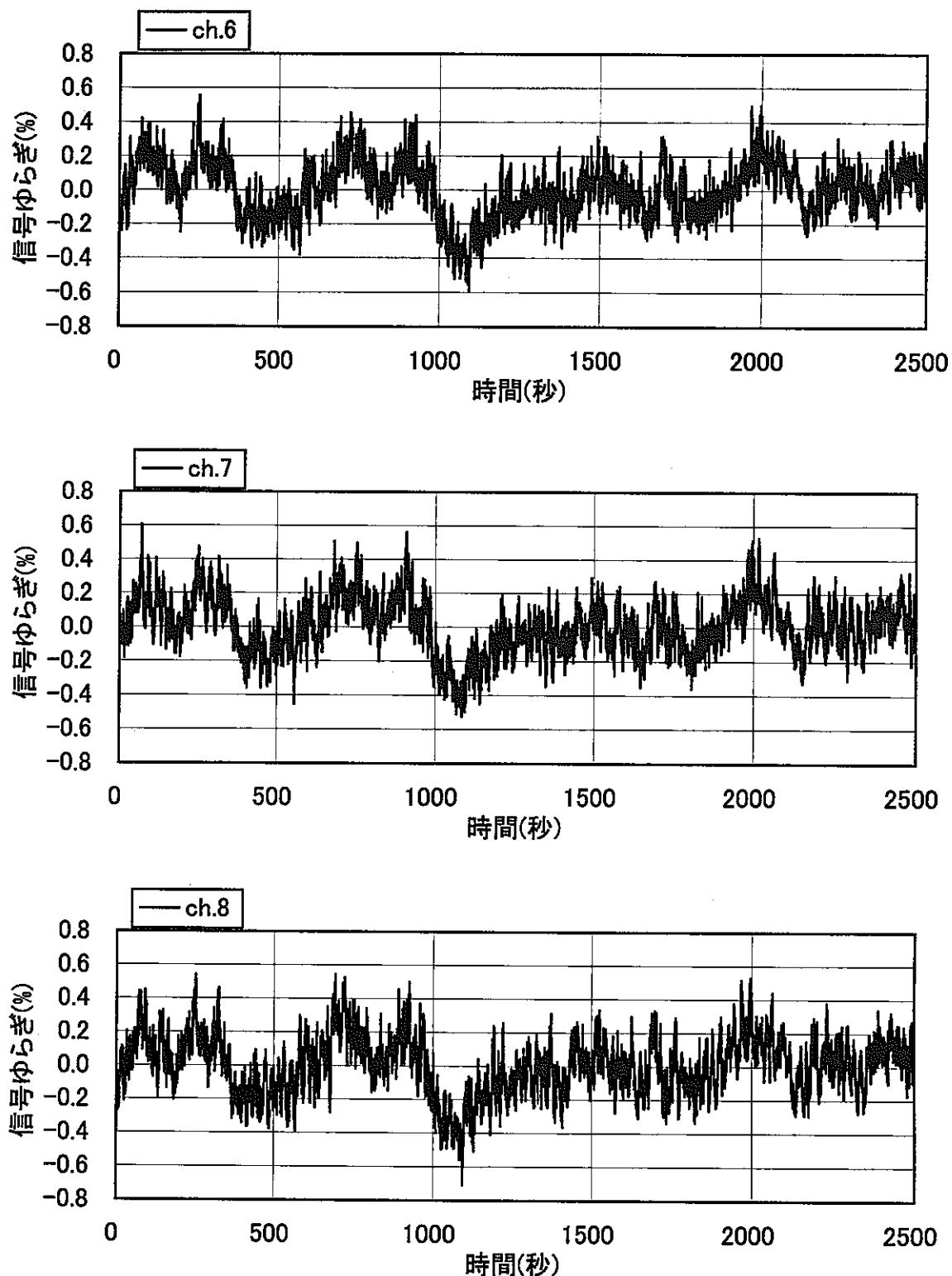


図2-1 出力系核計装器信号ゆらぎ(第33サイクル)

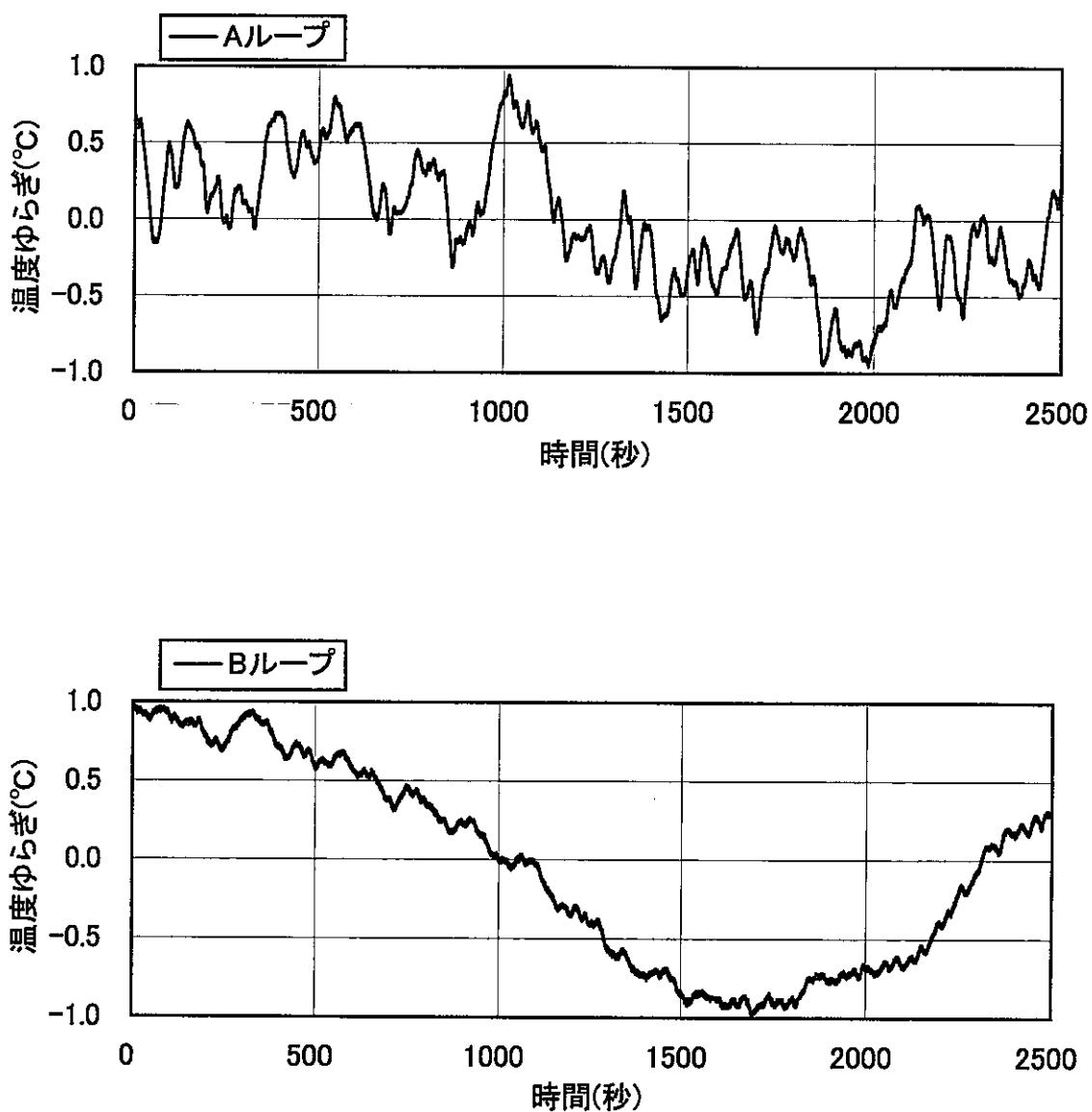


図2-2 原子炉入口温度ゆらぎ(第33サイクル)

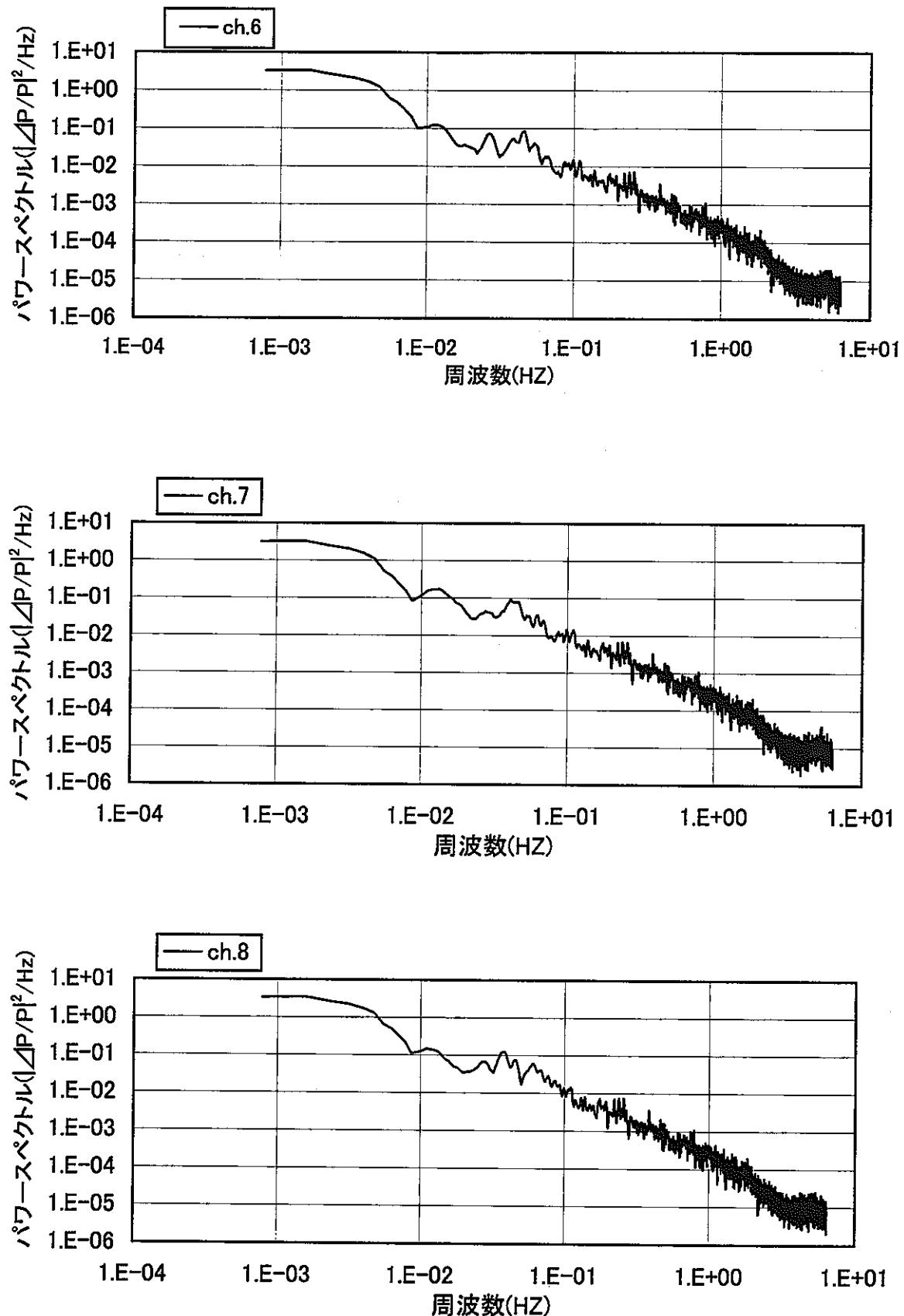


図2-3 出力系核計装信号のパワースペクトル(第33サイクル)

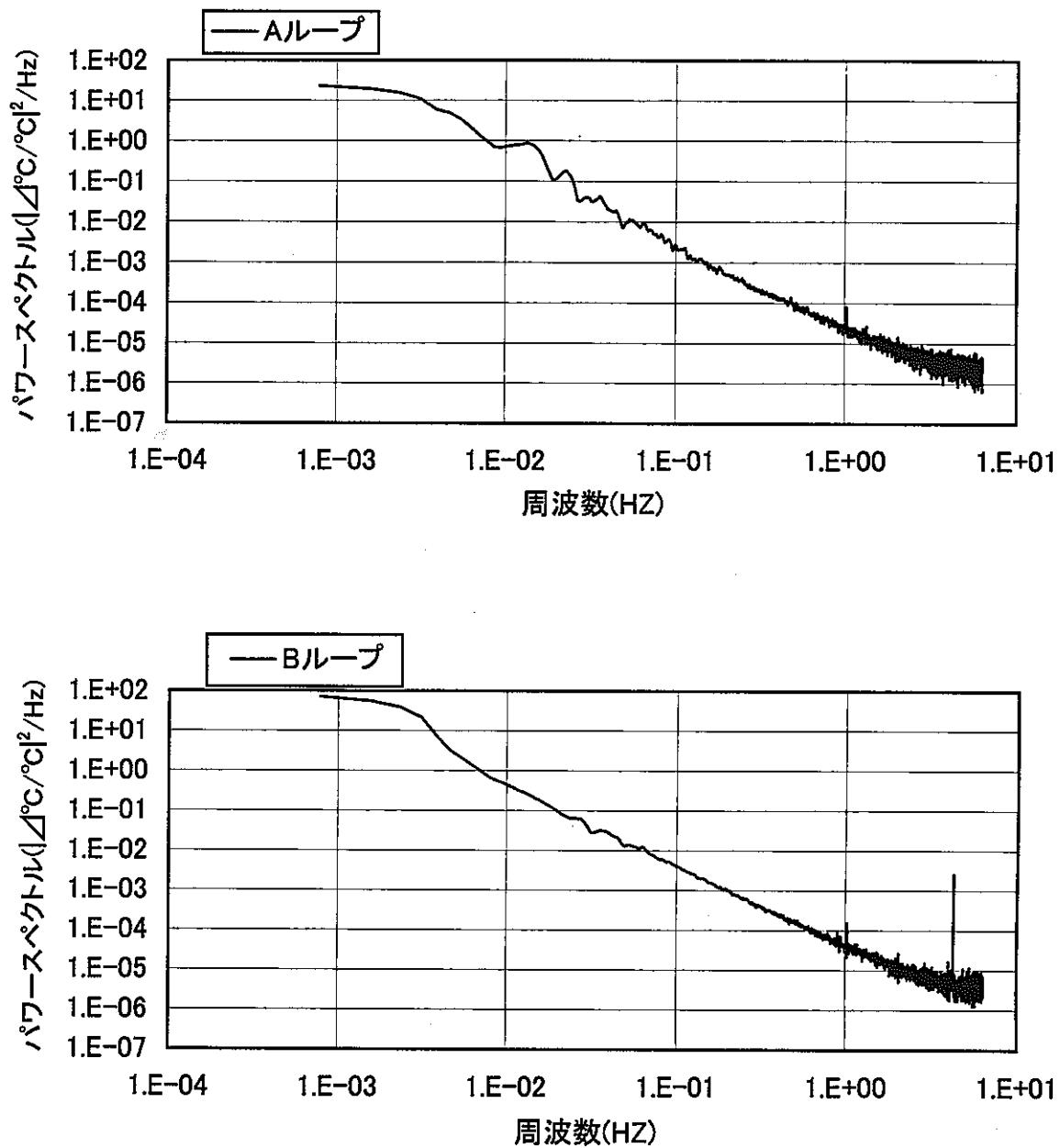
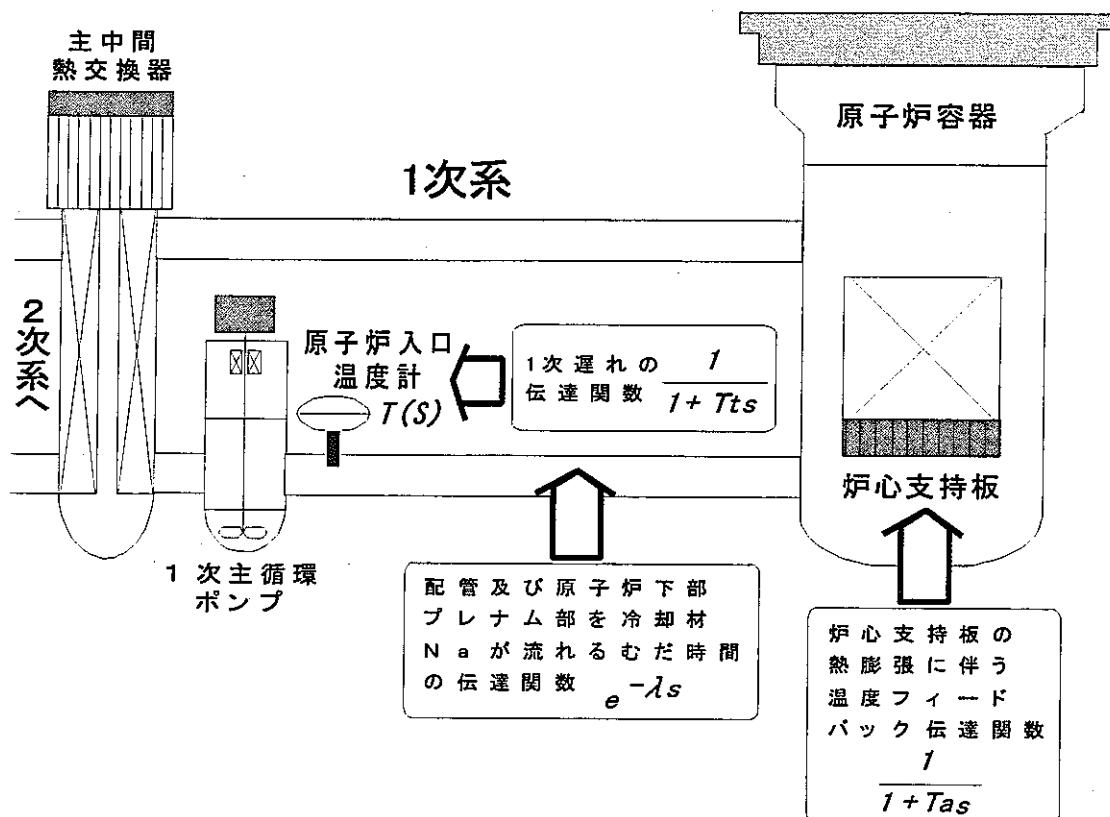


図2-4 原子炉入口温度ゆらぎのパワースペクトル(第33サイクル)



$$N(s) = \frac{k(1+T_{ts})e^{-\lambda s}}{1+T_{as}} T(s)$$

$T(s)$: 原子炉入口温度計信号(°C)

T_a : 炉心支持板の熱膨張時定数(秒)

T_t : 原子炉入口温度計の時定数(秒)

λ : 配管及び原子炉下部プレナム部を冷却材Naが流れるむだ時間(秒)

k : 温度係数(% / °C)

$N(s)$: 核出力(%)

図2-5 原子炉入口温度計信号から核出力への伝達関数

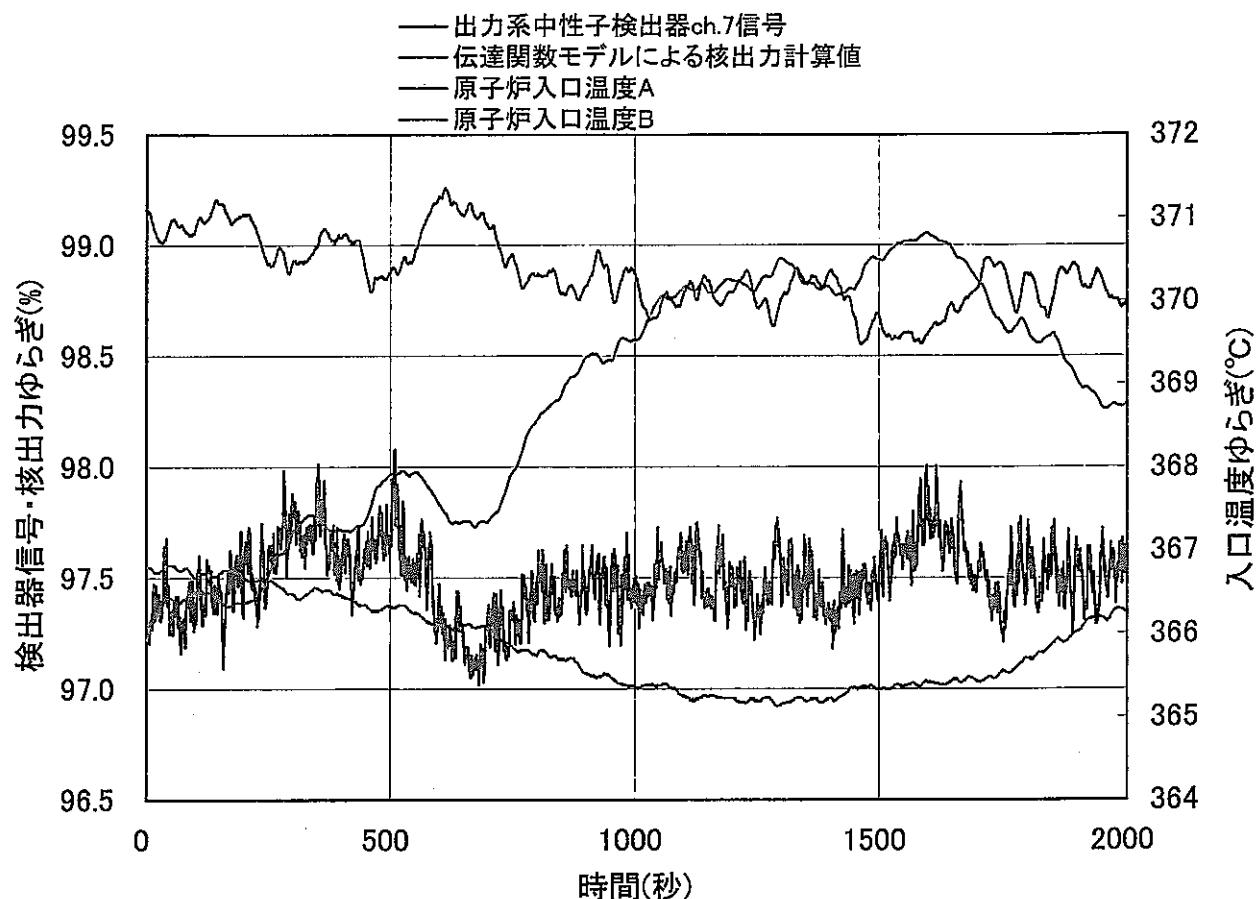


図2-6(a) 核計装信号のシミュレーション(時系列信号)

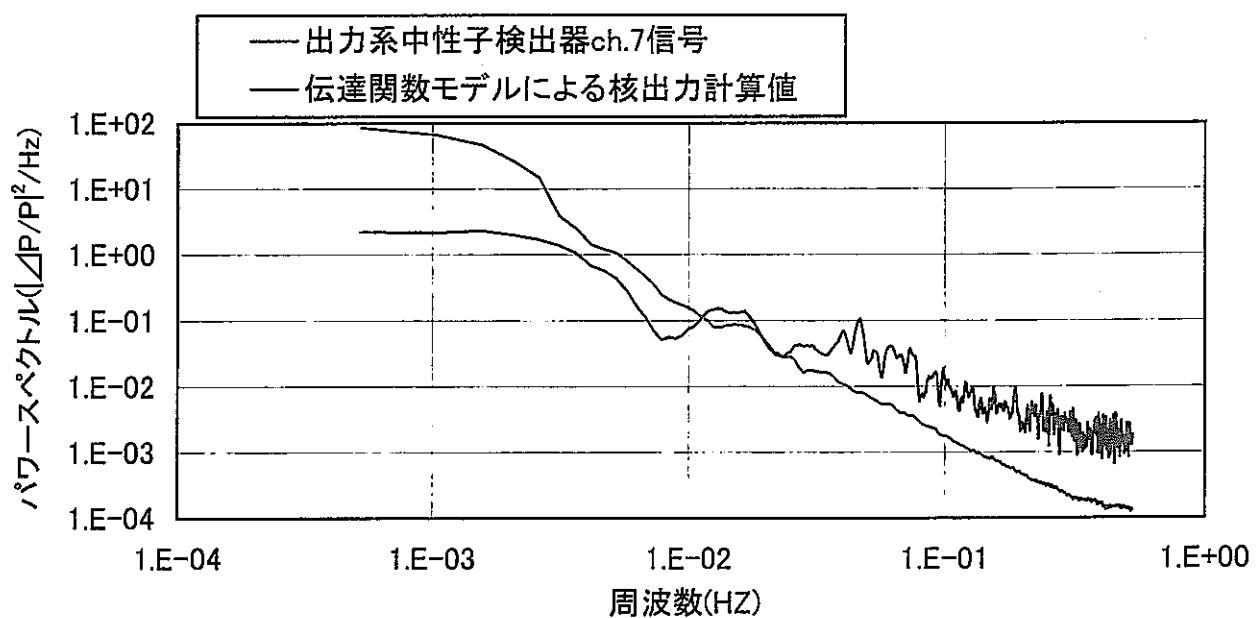


図2-6(b) 核計装信号のシミュレーション(伝達関数)

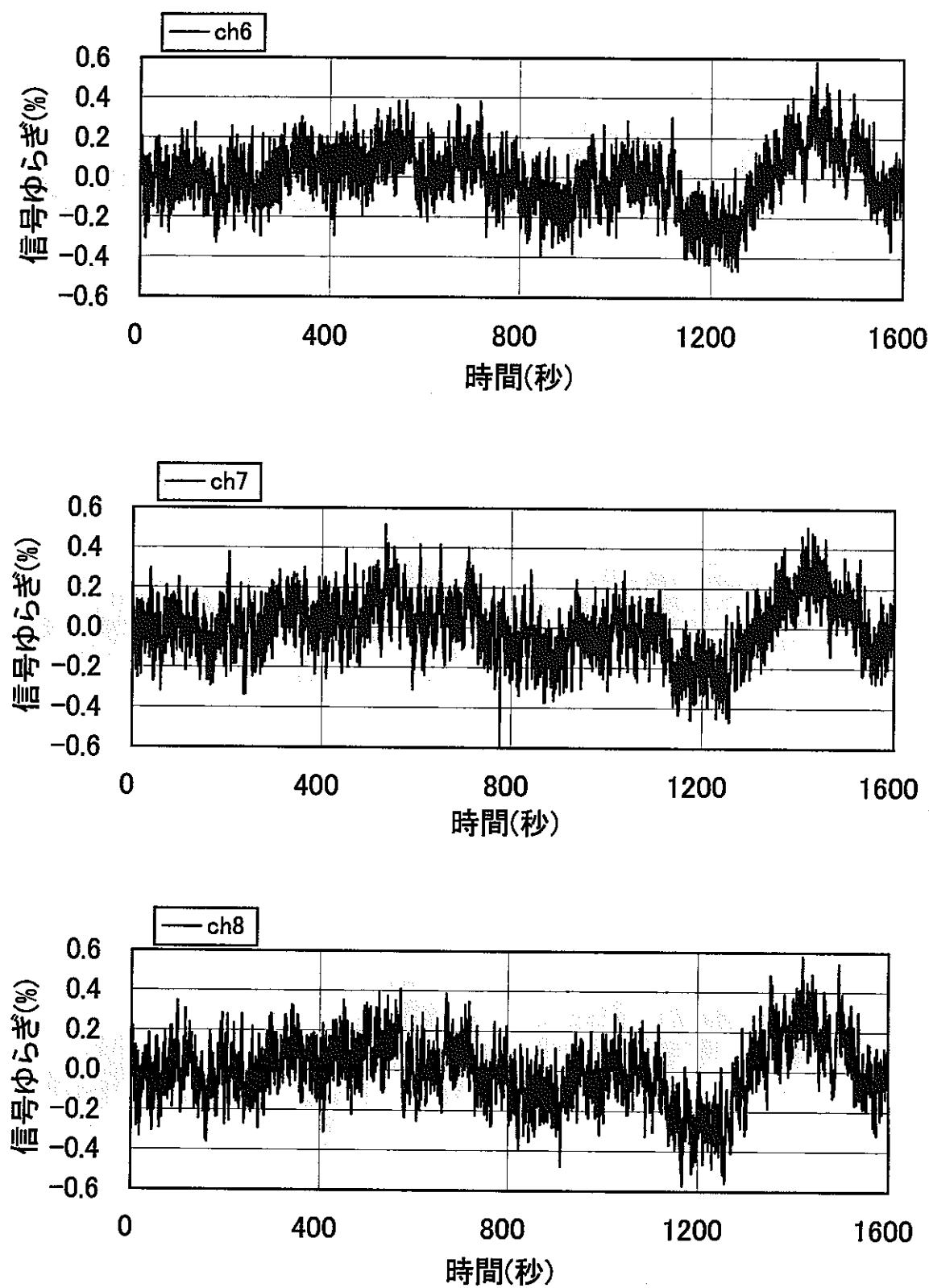


図2-7 出力系核計装信号ゆらぎ(第8サイクル)

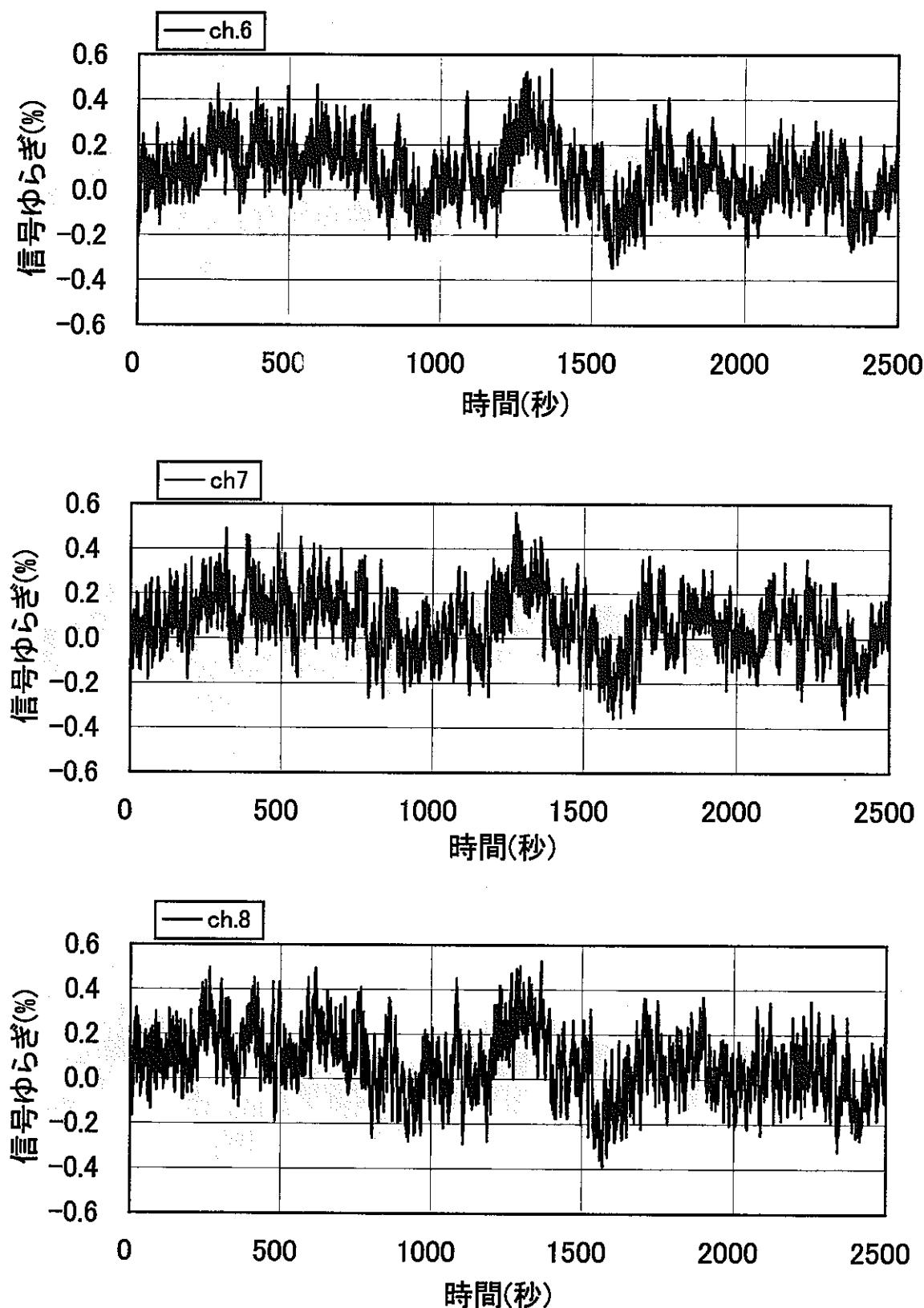


図2-8 出力系核計装信号ゆらぎ(第33サイクル)

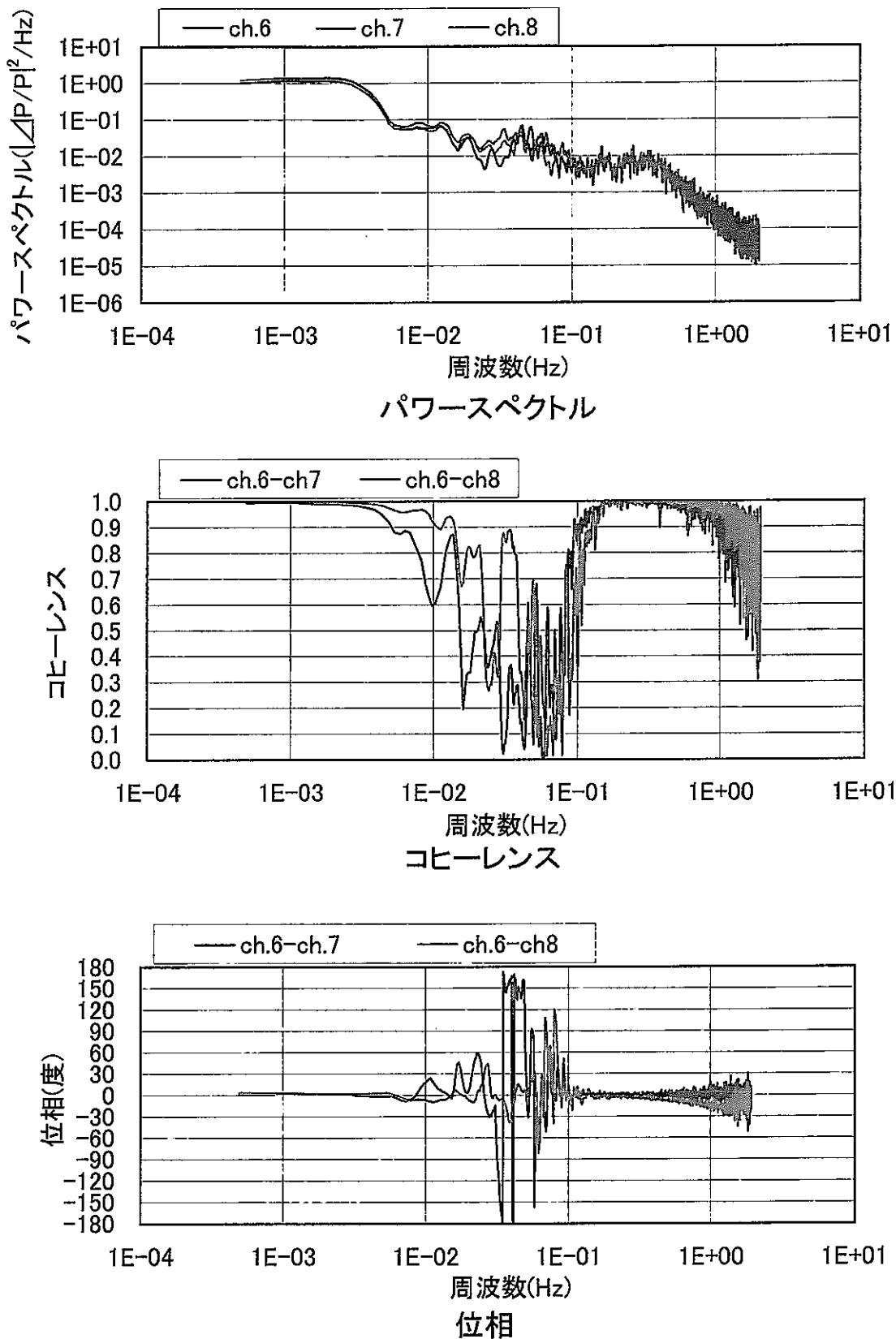


図2-9 出力系核計装信号ゆらぎの周波数解析結果
(第8サイクル)

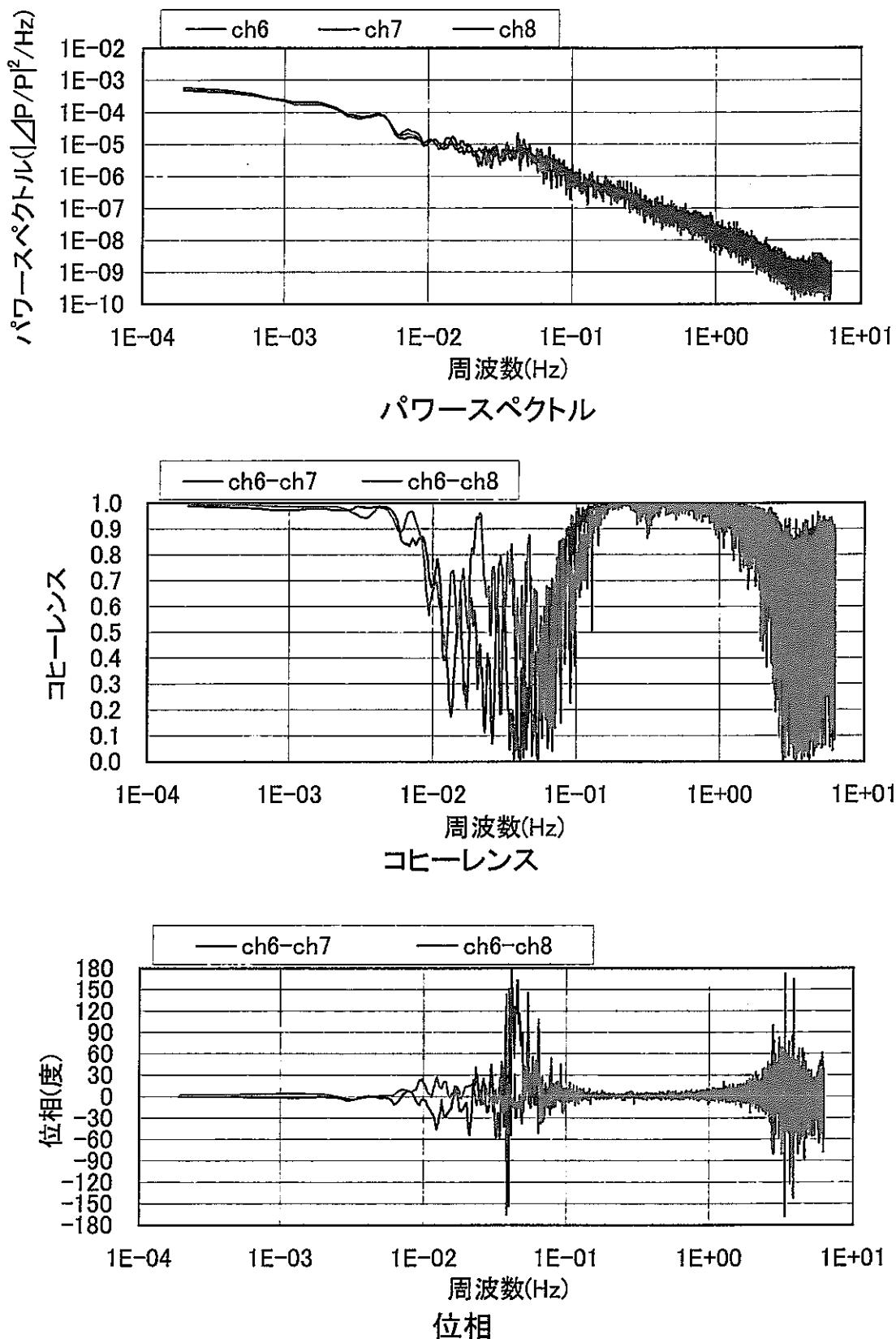


図2-10 出力系核計装信号ゆらぎの周波数解析結果
(第33サイクル)

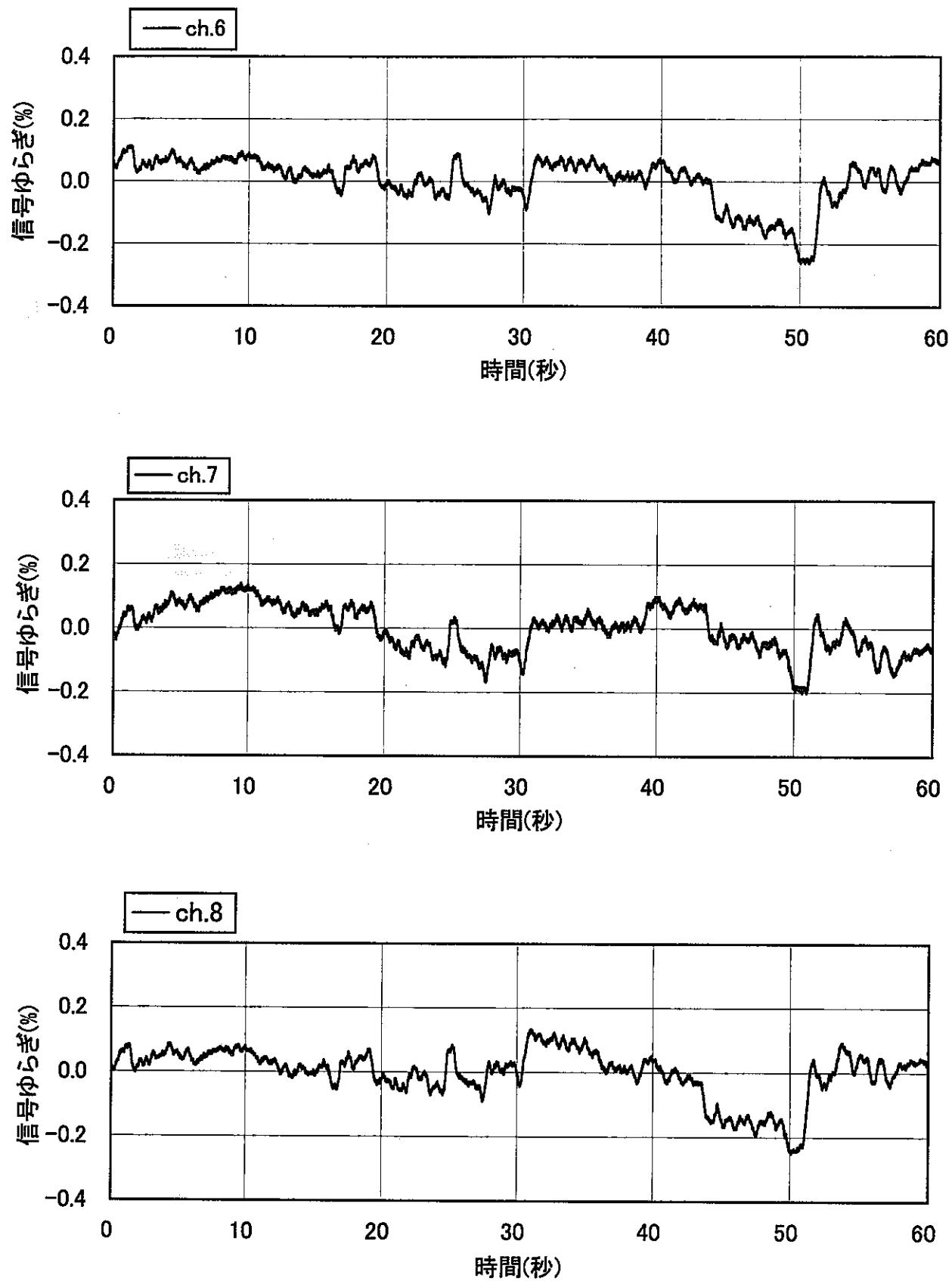


図2-11 出力系核計装信号ゆらぎ(第35サイクル)

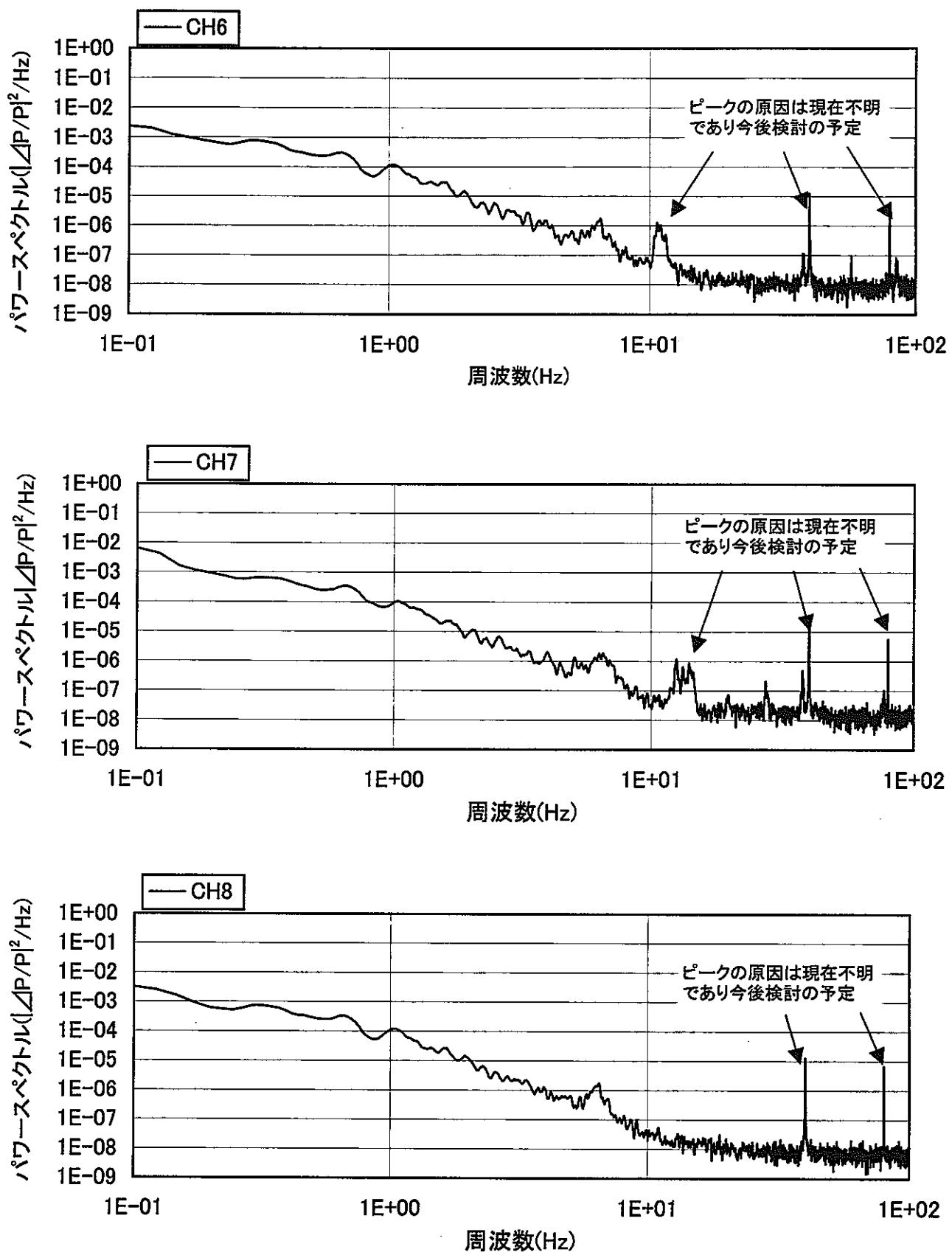


図2-12 出力系核計装信号ゆらぎのパワースペクトル(第35サイクル)

3.炉内異常検知システムの検討

2.章で記述したように、核計装の信号は、低周波成分に対して高周波成分のスペクトル強度が小さくなるピンクノイズの特性であり、低周波数成分に対して高周波成分はおよそ 10^3 程度の強度比である。周波数帯域毎の特徴としては、低周波成分は原子炉入口温度ゆらぎによるゆらぎ、高周波成分は制御棒振動によるゆらぎがあり、中間周波数(0.01~0.1Hz)の帯域を除いて核計装チャンネル間のコヒーレンスが高く、位相もよくそろっているという特徴がある。これらの特性を踏まえると、現状のサプレッションアンプを用いた炉雑音信号の採取方法では、信号のゆらぎ幅がダイナミックレンジを超えないよう常に手動でサプレッションアンプ及びゲイン倍率を調整する必要があるため、連続的に信号を採取し、かつリアルタイムの信号処理が可能なシステムの検討を行った。以下にバックグラウンド特性からシステムへ要求される項目、連続監視のための計算機システムとして要求される項目の整理、システム全体の構成の検討について順次示す。

3.1 バックグラウンド特性とシステムへの要求条件

(1)サンプリング分解能

2.章で述べたように、核計装信号の特性は、高周波成分のスペクトル強度が低周波成分に対して小さくなるピンクノイズのタイプのゆらぎ特性である。また、高周波成分のスペクトル振幅強度は 0.001%程度であり、サンプリングビット分解能としては、フルスケール 125%(炉出力)に対して 0.001%程度以上の分解能が必要となる。サプレッションアンプを用いない場合では 125000(125/0.001)段階の分解能が必要であり、A/D 変換器のサンプリングとして 17bit(=131072)以上の分解能が必要である。

従来実施してきた炉雑音測定では、原子炉出力は出力調整や、原子炉入口温度ゆらぎによる低周波ゆらぎがあるため、核計装信号の直流成分をサプレッションアンプで除去した後のゆらぎ信号をアンプで増幅を行い、オーバーレンジしないようサプレッションレベルを手動で調整し、14bit(=16384 段階)のデータのサンプリングを行っている。異常検知システムは、連続的にデータサンプリングを行うことから、サンプリング機能としては原子炉出力の変動を自動追尾し動的にサプレッションレベルを更新するか、或いは十分なサンプリングビット分解能によるサプレッションレベルの動的な変化が不要なシステムとする必要がある。

(2)サンプリング周波数及び計算処理速度

核計装信号のバックグラウンド特性では 10Hz 程度以上の高周波帯域で、何らかの原因によるスペクトルのピークが見られる。核計装信号による異常検知システムでは、このような通常時でのスペクトルのピークと気泡等による反応度ゆらぎによるスペクトルのピークを高速に見分ける必要がある。異常検知システムの計算処理速度を見

積もあるためには、信号のサンプリング速度を見積もる必要があり、その信号のサンプリング速度に対して十分な計算処理速度を持たねばならない。本検討でターゲットとするのは流路閉塞による冷却材Naの沸騰による反応度ゆらぎの検出であり、以下のように考えサンプリング速度を設定するものとする。

炉心中心の燃料集合体の燃料長は50cmであり、炉心における冷却材Naの流速は約5m/secであるため、1個の気泡がつぶれることなく燃料領域最下部から燃料領域最上部へ移動する時の反応度ゆらぎの周期は約0.1秒となる。実際には、燃料集合体内の燃料部の最下部と最上部の間で流路閉塞が生じそこから気泡が発生・消滅を繰り返すことから、この0.1秒よりも充分短い時間周期の反応度ゆらぎを捉える必要があり、0.1秒よりも十分短い時間サンプリング分解能である1kHz(0.1秒の1/100)の時間サンプリング分解能とする。また、採取する信号は、出力系核計装信号が3チャンネル(ch6,7,8)あり、信号の信頼性を挙げるためには、3チャンネル同時に信号の処理を行う必要がある。そのため1kHzの信号採取速度より十分上回る高速な計算処理速度を持ったCPU及びデータバスラインを持った計算機システムが必要となる。

3.2 異常検知システムとしての要求条件

異常検知システムは、通常時の信号との比較・演算処理を高速に行う計算機システムであり、その計算機システムとしての基本構成を検討する上で、システムとしての要求条件についてまとめた。システムへの要求項目と実現方法のまとめを表3-1に示す。

(1)蓄積データの保存機能

核計装3チャンネル分を1kHzでサンプリングした場合、そのままデータ保存すると下記のような大容量のデータとなる。ただし、温度等の計装系の時定数が数秒程度あるものについては、サンプリングが1秒程度(核計装信号のサンプリングの1/1000)と遅くても充分なため、核計装信号のみのデータ容量について計算した結果を以下に示す。また表3-2に低速・高速のサンプリング周波数によるデータ取り込み量の比較を示す。

【データ量】

1秒間 : $1k \times 2\text{word} \times 3 = 6k\text{word} = 12k\text{byte}$ (1サンプリング: 1wordとする)

1日 : $12k\text{byte} \times 60 \times 60 \times 24 = 1036800k\text{byte} \approx 1\text{Gbyte}$

1運転サイクル : $1\text{Gbyte} \times 60\text{日} = 60\text{Gbyte}$

原子炉の異常兆候の信号を記録しておくことを考える場合、できるだけ常時記録したデータを保存することが望ましいが、核計装信号3チャンネル分(ch6,7,8)をすべて保存しておくと上記のように約60Gbyteもの大量なデータとなり、データハンドリング性にも難があり現実的ではない。そこでデータの保存を行うのは、デジタルハイパスフィルター等で閾値を超えた信号のみを取り出す等の何らかのアルゴリズムに

より絞り込んだ信号のデータのみを保存するものとする。

(4)連続的なデータ採取機能

運転1サイクル（約60日）の間、停止することなく安定に動作すること。

(5)異常信号の検出アルゴリズムの変更

検出アルゴリズムは、そのアルゴリズムの機能の追加、パラメータの調整等の変更等が試験運用を通じて必要となると考えられるため、アルゴリズムの変更が容易な計算機システムであること。

(6)リアルタイムの計算処理

異常と考えられる信号を即座に検知する必要があることから、デジタルデータ処理はリアルタイムで計算処理できること。

(6)計算結果の表示機能

計算処理結果で異常と判断されたデータはリアルタイムに表示可能であること。

(7)オフラインによる詳細解析機能

計算処理結果で抽出されたデータはすべて保存可能で隨時そのデータは取り出し可能であることが重要である。複雑な計算処理を伴う計算処理には、計算処理時間がかかるため、信号波形をオフラインで詳細に解析可能とすることが考えられ、また詳細な解析の結果は、誤検知の低減等、検出アルゴリズムの改良等にフィードバックしていくことが重要となる。⁽⁶⁾

3.3 システム構成の検討

(1)システムの構成

3.1、3.2で抽出した異常検知システムの要求条件を満足するシステムの構成案を図3-1に示す。システムの構成としては、核計装信号等の信号を取り込み、デジタルフィルターにより簡単な前処理をリアルタイムで行うデータ前処理装置と、抽出された異常を表す信号のデータを基にさらに詳細に解析する詳細解析装置から構成するものとする。このように、前処理装置と詳細解析装置と機能を分けることにより、計算処理時間のかかるFFT解析等の負荷の大きな計算を常時行う必要がなくなり、システムの構成として柔軟性が増すことになる。以下に各コンポーネントの役割を示す。

【データ前処理装置】

前処理装置では、核計装信号等の高速サンプリングで採取した大容量のデータをバ

ツファメモリに高速に取り込む。また、CPU にて簡単なデジタルフィルター処理を行い、異常と考えられる信号の絞り込みを行う。ただし、デジタル入力の前段には、デジタル処理におけるサンプリング周波数より高い周波数の影響でサンプリング周波数よりも低周波数スペクトルへ適切でないスペクトルを与えてしまうエイリアシング防止のためのアナログ回路によるローパスフィルターが必要である。

前処理装置では、異常検出の閾値を設定しそれを超えた信号については、前処理装置のバッファに貯め込んである信号を詳細解析装置へ転送する。前処理装置における信号の流れを図 3-2 に示す。データ前処理装置における信号の絞り込みの計算処理については、核計装信号等の 1kHz という高速な信号を常時行うルーチンと、温度信号のように低速なサンプリングで済む計算処理を行うルーチンは基本的に別の計算処理プロセスで行うものとし、原子炉入口温度のゆらぎによる核出力の変化等の物理的に関連のある信号間における信号処理については、計算処理プロセス間の信号のやりとりにより閾値判定を行うものとする。

【詳細解析装置】

詳細解析装置は、データ前処理装置で簡単な前処理の後、異常と考えられるデータの転送を受け取り磁気ディスク等に記録すると共に、FFT 等の計算処理に時間がかかる処理の計算処理を行い、最終的な正常/異常の判定を行い、その計算結果について表示する。

(2) データ前処理装置における計算処理例

データ前処理装置での計算処理例として簡単なアルゴリズムで実現可能な移動平均を用いたフィルター処理について、制御棒を用いて反応度を与えるステップ応答試験、冷却材温度にランプ状の変化を与える安定性試験の場合の計算結果を図 3-3、図 3-4 に示す。この移動平均処理は 5 秒間の核計装信号の移動平均の処理を行った結果と、その移動平均法によって抽出された低周波信号と元の信号との差信号をとった高周波成分の信号を計算したものである。また、低周波成分の微分値のグラフも合わせて同じ図に示す。この計算の例では、サンプリング周波数が 1Hz と低い周波数であるが、データ前処理装置ではもっと早い計算処理をリアルタイムに行い、高周波成分、低周波数成分を取り出しその変化値をリアルタイム計算処理及び閾値判定することが考えられる。なお、実際の炉内異常検知システムでは、この 1000 倍の 1kHz 程度のサンプリング及び簡単な閾値判定を常時高速に行うため高速な CPU・メモリを搭載した計算機システムとなる。⁽³⁾

(3) 詳細解析装置における計算処理

データ前処理装置で閾値を超えたデータは、詳細解析装置で計算処理を行うが、その計算処理内容には以下に示す解析処理内容を採用する。特に周波数解析においては、データ数が大きければ統計的にスペクトル解析結果の信頼性が増すが、その分計算処理に負荷がかかることになり、データの連続的な処理が困難となるため、詳細な解析処理は詳細解析装置で行う。なお、試験運用を通じて詳細解析装置での信号データの解析から、誤検知の低減等の異常検知アルゴリズムの改良を図りデータ前処理装置に改良されたアルゴリズムを組み込めるようにする。以下に異常信号の検知方法の例を示す。

① 周波数解析

気泡の発生消滅による反応度ゆらぎによって「常陽」では負の反応度が入る。そのため、核計装信号も負のパルス状の変化信号が入る。そのため、FFT・DFT 解析等の周波数解析を行えば高周波(10Hz 以上)の帯域において 2 章で示した周波数スペクトルに変化が見られ、通常時の周波数スペクトルエンベロープを閾値曲線とし異常を検知する。

② パターンマッチング解析

気泡の発生消滅による反応度ゆらぎによって「常陽」では負の反応度が入る。そのため、核計装信号も負のパルス状の変化が入ることが考えられるため、そのパルス状の負の信号をパターンマッチング処理等によって取り出し異常を検知する。

③ 核計装信号チャンネル間の位相差解析

「常陽」では、出力系核計装は ch6,7,8 と 3 チャンネルあり、気泡等による反応度ゆらぎが発生した場合、各チャネルで同時に変化が検出される筈であり、チャネル間の位相差をモニタすることにより誤検知の低減等の異常信号検出の信頼性を上げることができる。

表 3-1 システムへの要求項目と実現方法のまとめ

要求項目	目的	システムにおける 実現方法・影響	備考
データ保存機能	微弱な信号波形の変化を詳細に解析する為	・大容量のデータ保存装置	随時取出しが可能であること
デジタル信号処理	データ解析方法、アルゴリズム・パラメータの変更の柔軟性	・A/D 変換装置が必要。 ・閾値判定処理等を高速に行う必要があることから高速な CPU が必要。	A/D 変換の前段にはエイリアス防止のための帯域通過フィルタが必要
連続的なデータ採取機能	常時異常監視	・信頼性の高い計算機システムとする必要有り(1 運転サイクル約 60 日間の連続稼動)	
アルゴリズムの変更	異常検知アルゴリズムの最適化、精度向上	・プログラム、設定パラメータ等の書き換え容易なシステムとする必要有り。	
リアルタイムの計算処理	早期の異常を検知	・高速な CPU が必要 ・周波数解析等を行う際はデータポイントを大きくとる必要がある。	・周波数解析ではデータポイント数が大きい程計算精度が向上する。
計算結果の表示機能	検知結果の表示	・表示装置	
オフラインによる詳細解析機能	微弱な異常信号の詳細な解析のため	・前処理部と詳細解析部とを分けて計算処理の負荷を分ける ・データを転送するデータ転送バスも大きくする必要がある。	詳細解析部で詳細に検討を行い、誤検知の低減等を目的に検知アルゴリズムの高度化を図り、前処理装置にフィードバックする。

表 3-2 取り込む信号と 1 運転サイクルあたりのデータ処理量

	信号の種類	信号数	MK・III 1 サイクル運転あたりのデータ量
高速サンプリング (1kHz)	出力系核計装信号	3	2byte(1word)×1k×24×60×60×60×3 ≒60Gbyte
低速サンプリング (1Hz)	原子炉入口温度	2(A,B ル-ブ°)	2byte(1word)×1×24×60×60×60×2 ≒345kbyte
	燃料集合体出口温度	115	2byte(1word)×1×24×60×60×60×115 ≒20Mbyte

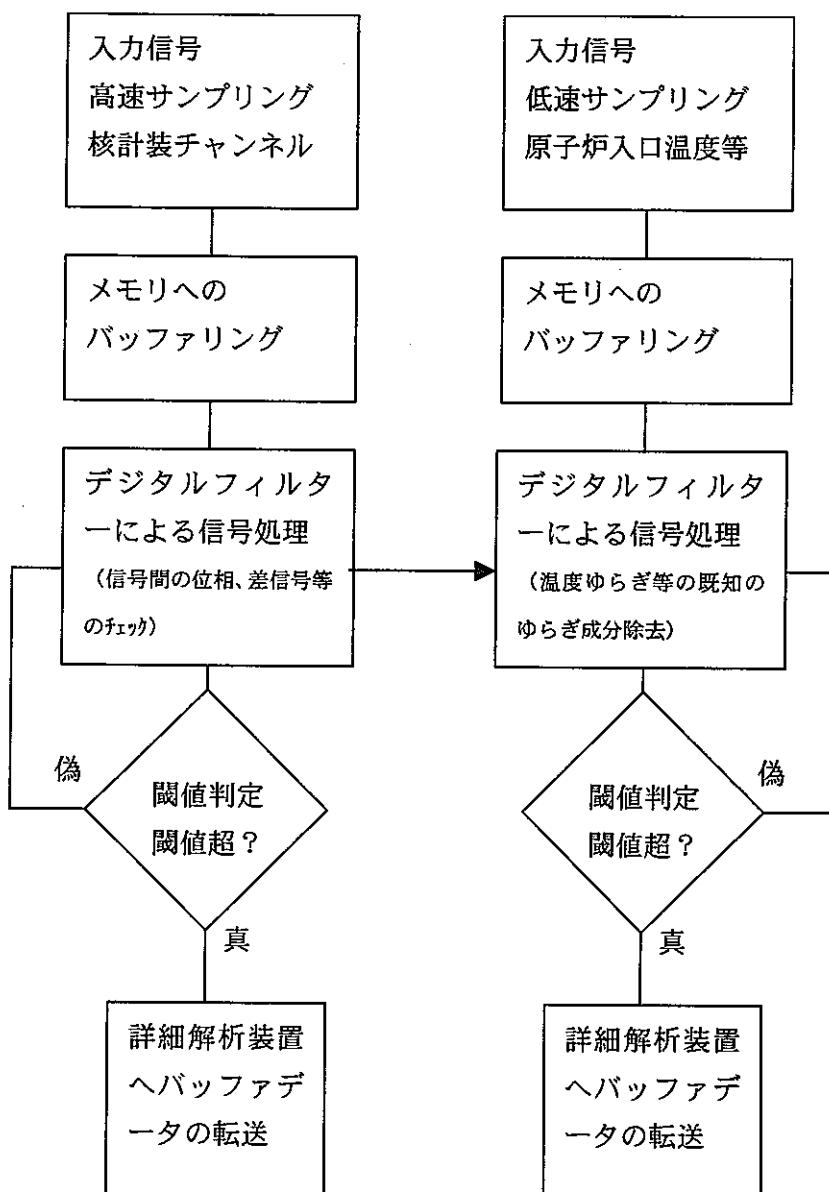
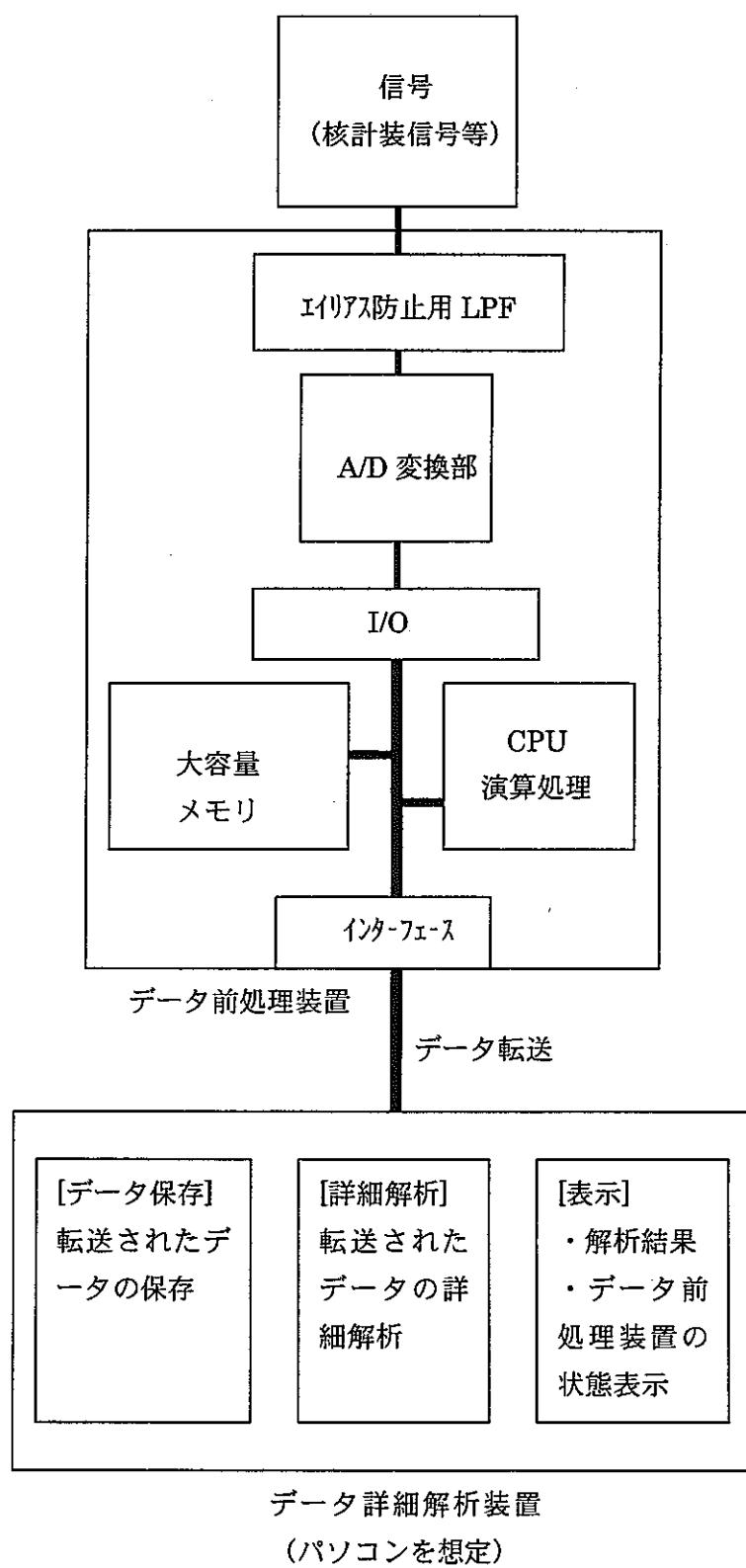


図 3-1 データ前処理装置の信号処理内容の流れ



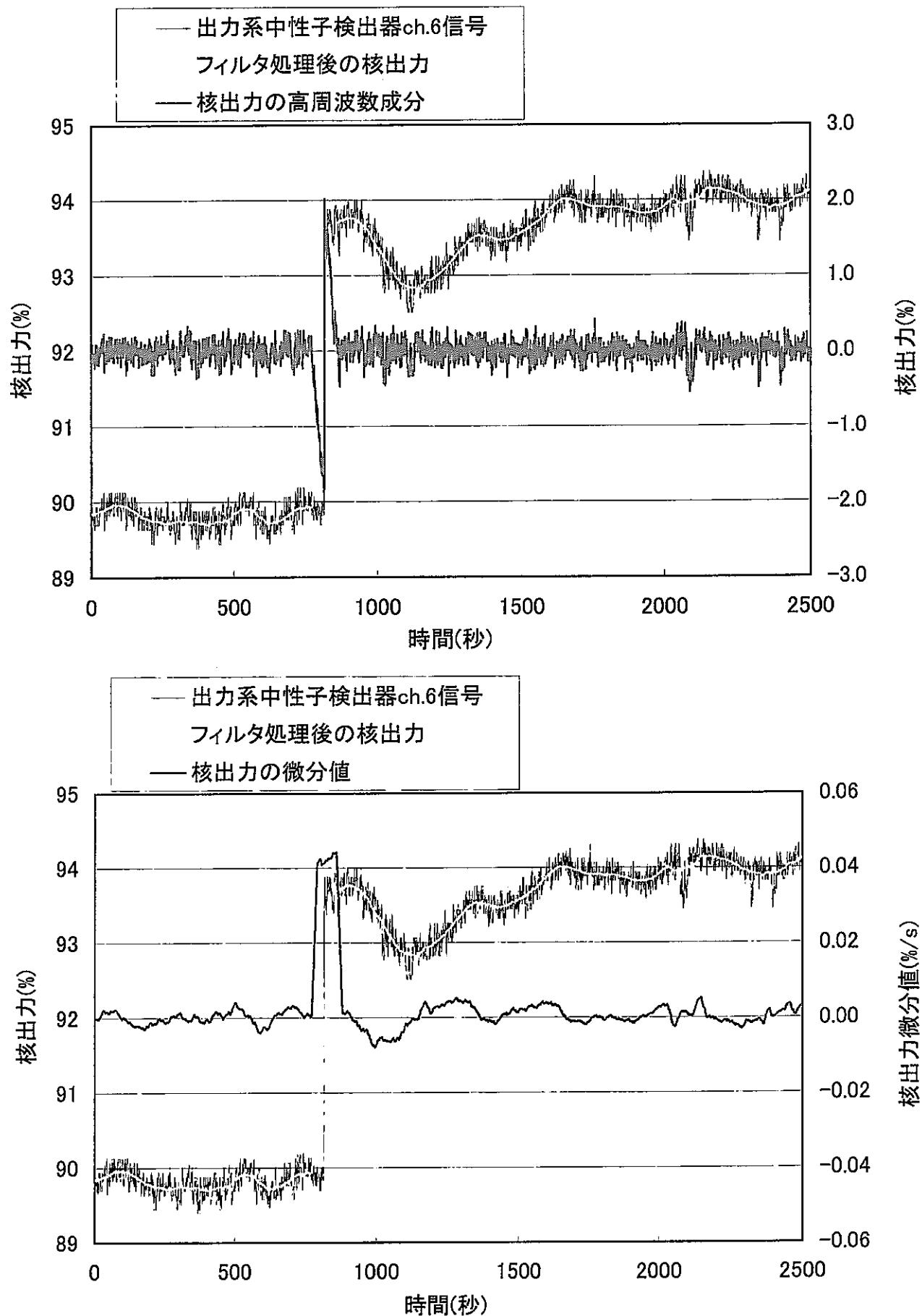


図3-3 ステップ応答試験のデータ処理例(第35サイクル)

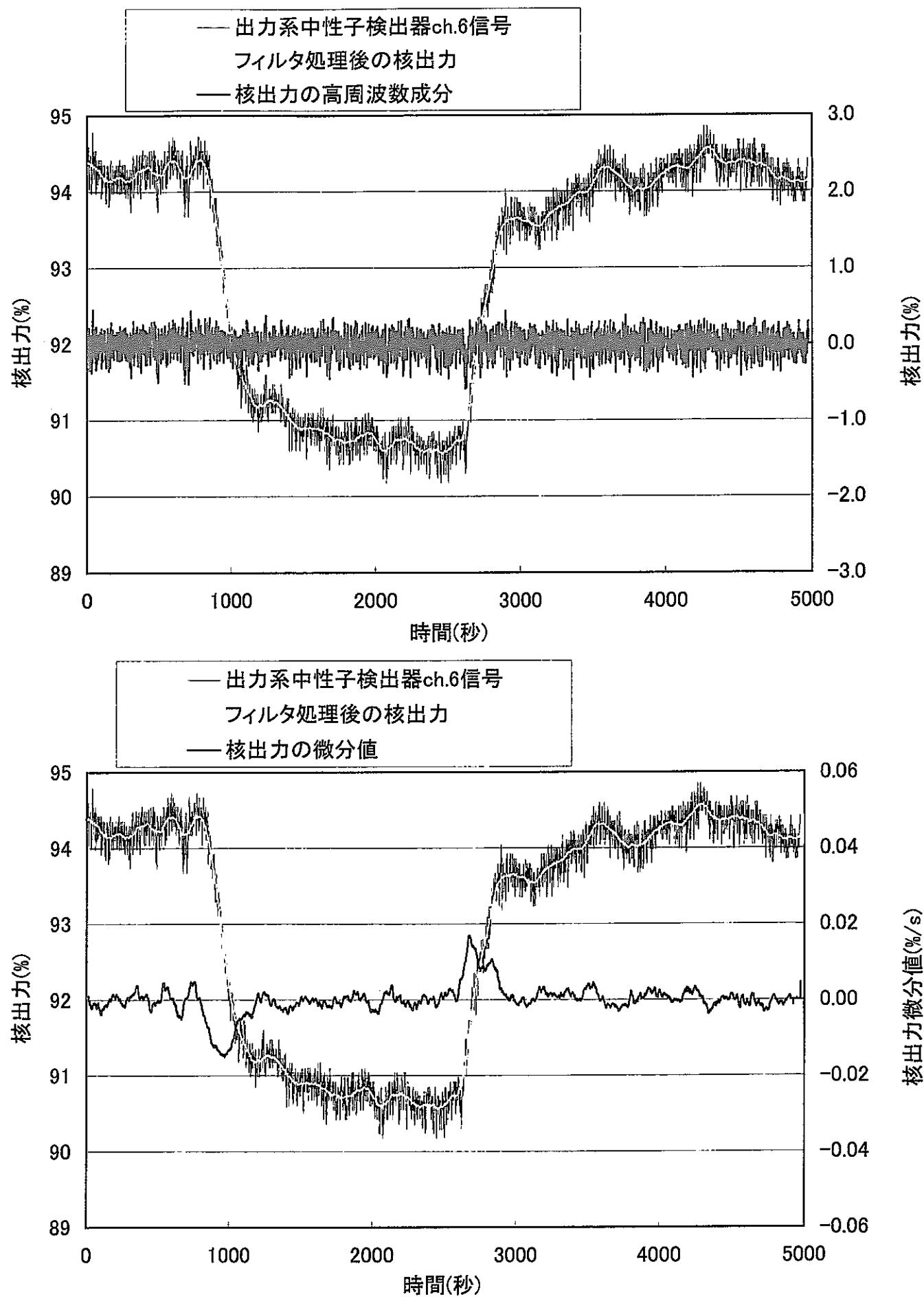


図3-4 安定性試験のデータ処理例(第35サイクル)

4.まとめ

応答性の早い核計装信号の微弱な変化を捉え、炉内の異常を早期に検出する早期炉内異常検知システムについて、まず重要となる核計装信号の特性(バックグラウンド特性)及びデータの処理内容等をふまえた炉内異常検知システムの検討を行った。

「常陽」の核計装信号の特性として、周波数スペクトルの形としては、低周波数スペクトル成分が大きく、高周波になるにつれて強度が弱くなる典型的なピンクノイズの形をしている。周波数帯域毎の特性としては、低周波帯域(0.01Hz以下)は原子炉入口温度による反応度ゆらぎによるものであり、中間周波帯域(0.01~0.1Hz)では原因は不明だがチャンネル間のコヒーレンスがなく、位相が逆相である等の特徴がある。また高周波帯域(0.1Hz~)では制御棒振動による反応度ゆらぎがチャンネル間の位相ずれがなく検出できていること等が挙げられる。また核計装信号の低周波数スペクトルは、原子炉入口温度計信号から算出できることから、高周波成分の解析を行う際のトレンド除去処理が可能である。

気泡等が発生した際の核計装信号は、高周波スペクトルに影響を及ぼす。また、高周波帯域は、低周波帯域に比べて非常に強度が低いため、高サンプリングビット分解能・高速のサンプリング(1kHz程度)及び高速の計算処理が必要である。高速な計算処理を常時行い、連続的な監視を行うためには、簡単な前処理を行うデータ前処理装置と、データ前処理装置で取り出した信号に対して詳細な解析を行う詳細解析装置と2つから構成することで、それぞれの計算負荷を上げること無く、常時連続監視可能な計算機システムを構築することができる。

参考文献

- (1) S.Tamura,et.al., "Reactor Noise Analysis of the Experimental Fast Reactor JOYO", Progress in Nuclear Energy. 1982, Vol.9, pp.399-410(SMORN III)
- (2) A.Shono,et.al., "Control Rods Vibration Analysis in JOYO Mark -II Core", Progress in Nuclear Energy.1985, Vol. 15, pp. 293-301(SMORN IV)
- (3) 林, 非定常炉雜音データ収録用前処理システムの開発, 原子力学会誌, 1992, Vol.34, No.10, pp.57-69
- (4) 小舞他, 核計装による炉内異常検知技術の開発, JNC TN9400 2000-001, 2000 年
- (5) 小舞他, 「常陽」における核計装を用いた早期炉内異常検知技術の開発, 第38回日本原子力学会春の年会 要旨集, 2000 年
- (6) 宇田川他, 「もんじゅ」定常ゆらぎ特性の評価, サイクル機構技報 No9, JNC TN 1340 2000-004, 2000 年