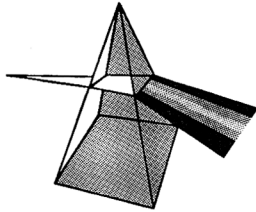


【技術報告】

「もんじゅ」定常ゆらぎ特性の評価



宇田川一幸 友部 勝真* 上田 雅司
 玉山 清志

敦賀本部 国際技術センター
 *敦賀本部 高速増殖炉もんじゅ建設所

資料番号：9-1

Evaluation of Fluctuation Signals on Steady State in Monju

Kazuyuki UDAGAWA Katsuma TOMOBE* Masashi UEDA
 Kiyoshi TAMAYAMA

International Cooperation and Technology Development
 Center, Tsuruga Head Office

*Monju Construction Office, Tsuruga Head Office

40%出力運転状態において、プラント機器、システム特性の把握に資することを目的として、定常ゆらぎ評価試験を実施した。本試験では、炉心まわり及びプラント各部の中性子束、温度、流量等を測定し、得られた時系列データを整理して、周波数特性を解析した。

パワースペクトル解析の結果、種々のプロセス量に、アラームレベル以下での微少な振動が見られた。さらに、コヒーレンス解析と呼ばれる信号解析手法によりプロセス量間の相関を調査し、物理的なメカニズムを考察した結果、振動の起因事象として1次主冷却系流量振動など4事象に集約できた。また、観測されたゆらぎの大きさは、設計で考慮された範囲内であった。

We carried out the Temperature Fluctuations Evaluation Test during steady state conditions at start-up and at forty percent of electrical power output with the aim of acquiring a better understanding of the Monju plant dynamics. We obtained time series data and measured fluctuations in the process variables (that is, neutron flux, temperatures and flow rates). We analyzed our findings.

An auto-power spectrum analysis revealed periodic components in the measured fluctuations. The amplitudes of the fluctuations are small and do not affect the alarm set point. We deduced the causes of the fluctuations by investigating the results of coherence analysis of the time series data and by considering possible mechanisms for the strong correlation between the variables. The causes include factors such as flow rate fluctuations in the primary heat transfer system.

キーワード

「もんじゅ」、高速増殖原型炉、性能試験、振動、周波数解析、パワースペクトル、コヒーレンス、ノイズ寄与率、ARモデル

Monju, FBR, Start-up Test, Fluctuation, Frequency Analysis, Power Spectrum, Coherence, Noise Contribution Ratio, AR model



宇田川一幸



友部 勝真



上田 雅司



玉山 清志

1. はじめに

原子力プラントでは、一定出力運転状態においても、核分裂反応のゆらぎ、部材の流力振動、ポンプなど回転機器の運転や制御動作などに起因してプロセス量に定常ゆらぎが発生している。このようなゆらぎは、設備機器の健全性を評価する上で重要な情報を持っており、原子炉雑音解析と称し、古くからその評価が行われてきた^{1) 5)}。

高速増殖炉プラントについても、種々の原子炉雑音解析や、これに基づく異常監視システムの研究が行われてきた^{6) 11)}。

高速増殖原型炉「もんじゅ」(以下、「もんじゅ」)においても、初期の段階で雑音源の特性や伝播特性を評価し、それらがプラントの健全性評価にどのように活用できるかを明らかにしておく必要がある。

このため、「もんじゅ」性能試験の一環として、定常ゆらぎデータ評価試験を実施した。本試験では、炉心まわり及びプラント各部の中性子束、温度、流量等のゆらぎを測定し、プラント機器特性及びシステム特性を把握した。

把握すべき特性の代表値として、観測されたゆらぎデータについて統計的解析を実施し、ゆらぎ幅、周波数スペクトルを求めた。また、観測されたゆらぎには、流動伝熱メカニズム、制御系のフィードバック特性等により、従属的にゆらぎ源から伝播しているだけのものがあるので、観測されたゆらぎの伝播特性を評価し、ゆらぎ源を特定した。本報告では、まず試験方法、評価方法について述べ、次いで、1995年度に実施した40%出力で

の試験で得られたデータの評価結果について述べる。

なお、40%を超える出力運転状態での試験は、1995年12月に発生したナトリウム漏えい事故により中断している。

2. 試験方法

2.1 試験条件

本試験では、起動試験中の安定した定常状態で、プラントのゆらぎ信号を測定する。

過熱器からの蒸気でタービンが駆動され、約40%のプラント出力で運転している定常状態において、主要なプラント変数の信号を収録する。収録信号の計測位置の概要を図1に示す。1次主冷却系等A～Cループの3ループ構成となっている系については、各ループにおける計測信号を収録した。

また、中性子束信号については、図2に示すように、原子炉容器の周囲に配置された5体の出力領域中性子束検出器(PRM: Power Range Monitor)からの信号を収録した。炉心部の燃料集集体出口には、温度計が設置されている。本試験では、34体分の燃料集集体について、その出口温度信号を収録した。

本試験は、基本的には一定出力運転状態で実施した。しかし、試験が長時間(最長で14時間)に及んだため、燃焼補償を目的とした制御棒操作によりプラント状態の変化も一部生じた。

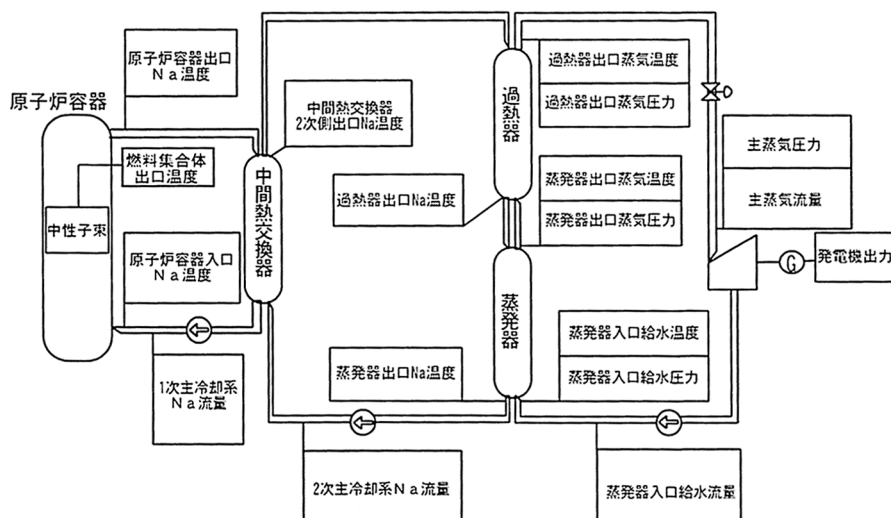


図1 収録した主要プラント変数の計測位置概要

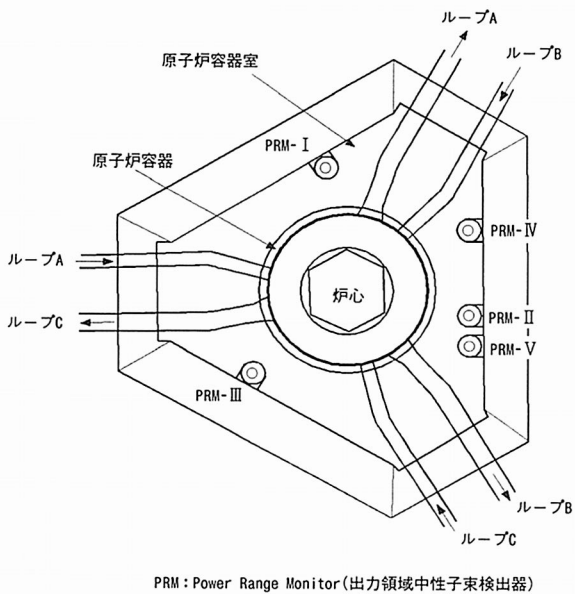


図2 中性子束検出器の配置

2.2 プラント過渡データの収録方法

今回の試験に用いたプラント過渡データ収録システムについて、その概要を図3に示す。

現場計測器からの信号は、中央計算機室の端子盤を経由して、MIDAS(プロセスデータ収録システム)及び μ -MIDAS(異常診断用収録システム)に接続されている。

MIDASは、「もんじゅ」性能試験における過渡データ収録用に設けられた装置である。約500信号のプラント変数を最高10Hzのサンプリング周波数で収録し、電子ファイルとして保存することができる。

一方、 μ -MIDASは、本試験のような異常診断技術開発用に製作したデータ収録装置であり、微小変動をデジタル情報として精度よく(量子化誤差を小さく)収録すべく信号増幅器を設けている。サンプリング周波数の2倍よりも高い周波数成分

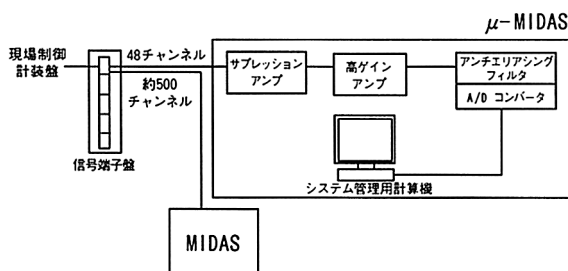


図3 プラントデータ収録システム

が収録されていると、これがサンプリング周波数で折り返され、低い周波数域に重畳されてしまう現象が起こる。本収録装置では、エイリアシングと呼ばれるこの現象を除去するため、低域通過型のフィルタ(アンチエイリアシングフィルタ)を設けている。

AD変換器によりデジタル化された信号情報は、専用イーサネットにより μ -MIDASシステム管理用計算機に転送される。

本報告では、高周波数帯域に注目した解析については μ -MIDASから、低周波数帯域に注目した解析についてはMIDASからのデータを使用した。

3. 評価方法

不規則変動をする定常時系列データの一般的な解析においては、観測されたデータを確率分布に従う確率変数であるとみなし、統計的処理でその分布を推定する手法がとられる。定常な不規則変動を示す現象の解析には、この現象を周期的な変動成分に分解して考察することが有効となる場合が多い。

ここでは、フーリエ解析により周波数特性を推定する方法とAR(自己回帰: Auto-Regressive)モデルを用いて、信号伝達経路を評価する方法とを検討する。

前者のフーリエ解析による方法では、その解析結果と物理的考察から特徴的なゆらぎ及びその振動源を推定する。

一方、後者のARモデルを用いる方法は、詳細なゆらぎ信号解析手法として実施されている手法であり、物理的考察への依存が小さく、信号伝達経路が推定できる。

以下、それぞれの評価方法について述べる。

3.1 フーリエ解析による方法

時刻 t における観測値を $x(t)$ と表すとき、一定の時間間隔 t ごとに採取されたデータは $\{x(s-t): s=1,2,\dots,N\}$ のようになる。本報告書では、 t を省略した表記法として、 $\{x(s): s=1,2,\dots,N\}$ の表記を用いる。

一般的に観測値 $x(s)$ は過去の値 $x(s-1)$, $x(s-2)$,...から影響を受けている場合が多い。この過去の値との相関を、自己共分散関数 $R_{xx}(\tau)$ ($\tau=0, \pm 1, \pm 2, \dots$)として次式で定義する。

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N (x(s+\tau) - m_x)(x(s) - m_x)$$

ただし、 m_x は下記で定義される平均値である。

$$m_x = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N x(s)$$

ゆらぎ信号における周波数成分の強度として、オートパワースペクトル密度関数(APSDF: Auto-Power Spectral Density) $P_{xx}(f)$ という指標が、上記の自己共分散関数 $R_{xx}(l)$ のフーリエ変換として次式で定義されている。

$$P_{xx}(f) = \Delta t \sum_{l=-\infty}^{\infty} \{e^{-i2\pi fl\Delta t}\} R_{xx}(l) \\ -1/(2\Delta t) \leq f \leq 1/(2\Delta t)$$

自己共分散関数 $R_{xx}(l)$ の計算に当たっては、高速フーリエ変換(FFT: Fast Fourier Transform)アルゴリズムを用い^{12), 13)}、その結果から上式に従いオートパワースペクトル密度 $P_{xx}(f)$ を算出する。

また、2信号の時系列 $x(t), y(t)$ において、次式で定義される相互共分散行列 $R_{xy}(l)$ 、相互パワースペクトル密度関数 $P_{xy}(f)$ を高速フーリエ変換により算出し、2信号間のコヒーレンス $r^2(f)$ を求める。

$$R_{xy}(l) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N (y(s+l) - m_y)(x(s) - m_x)$$

$$P_{xy}(f) = \Delta t \sum_{l=-\infty}^{\infty} \{e^{-i2\pi fl\Delta t}\} R_{xy}(l)$$

ここで、

$$m_x = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N x(s) \quad , \quad m_y = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N y(s) \\ -1/(2\Delta t) \leq f \leq 1/(2\Delta t)$$

$$r^2(f) = P_{xy}(f) / P_{xx}(f)$$

このコヒーレンスの推定により、2信号間における線形従属関係の強さが分かる^{12), 14)}。すなわち、コヒーレンスが1に近いほど2信号のゆらぎ挙動間には、物理的因果関係があるか、影響を受けている原因が共通である可能性が高いと言える。

本報告では、第一ステップとして、オートパワースペクトル密度により特徴的な振動特性を抽出する。次に、抽出された振動特性のうち、物理メカニズムの考察に基づき、ゆらぎの伝達経路を推定する。推定された伝達経路に対応する2信号間のコヒーレンスを推定し、相関の強度を調べる。ゆらぎ源ならば強い相関を示すことが必要条件であるので、その条件が満足されているかどうかを評価する。

3.2 ARモデルを用いる方法

動的システムにおいて、システム外部からの雑音が印加され、その雑音がシステム変数の変動として観測されている場合、周波数 f におけるシステム変数の変動のパワーに対して、雑音のパワーが寄与している割合 (f) を雑音寄与率として定義する。

SISO (1入力1出力)システムについては、この雑音寄与率 (f) は容易に求められるが、フィードバックシステム及びMIMO (多入力多出力)システムについては容易でなく、ARモデルを導入する必要が生じる。

以下、このARモデルを用いた雑音寄与率の推定方法について述べる。

着目するプロセス量の観測時系列ベクトル $\{X(k): k=1,2,\dots,N\}$ は、AR表現と呼ばれる次式で表わせる。

$$X(k) = \sum_{m=1}^M A(m)X(k-m) + E(k)$$

ここで、

$X(k) : \{x_i(k) : k=1,2,\dots,N\}$ を要素とする次数 R の時刻 k における観測値ベクトル

$A(m) : \{A_{ij}(k) : i=1,2,\dots,R, j=1,2,\dots,R\}$ を要素とするAR係数行列

$E(k) : \{E_j(k) : j=1,2,\dots,R\}$ を要素とする次数 R の雑音源ベクトル

また、

N : 観測時系列の長さ

M : ARモデル次数

AR係数行列は観測されたプラント応答を再現するように決定する。

ARモデルを用いて、周波数 f において $x_i(t)$ のパワースペクトルの中で雑音 $u_j(t)$ からの雑音寄与率 $r_{ij}(f)$ が下記のように与えられる。

$$r_{ij}(f) = \frac{|b_j(f)|^2 P_{u_i}(f)}{\sum_{j=1}^k |b_j(f)|^2 P_{u_i}(f)}$$

ここで、雑音源 $u_j(t)$ から $x_i(t)$ への閉ループ周波数応答関数 $b_j(f)$ 及び雑音 $u_j(t)$ のパワースペクトル $P_{u_i}(f)$ は、ARモデル係数 $A_{ij}(k)$ より算出できる。

以上のようにして算出できるコヒーレンス、雑音寄与率を用いた信号伝達経路解析の手法が提案されており¹⁵⁾、本報告ではこの手法に従って解析を実施した。

すなわち、「ある周波数において2信号間(信号Aと信号Bとする)のコヒーレンスが、信号Aから信号Bへの雑音寄与率と一致し、かつ信号BからAへの雑音寄与率が零となる場合には、その周

波数において信号Aへ印加されている雑音信号が、信号Bへ伝達され、信号Bのゆらぎとして観測されている」というものである。

一方、信号寄与率 π_{ij} は下記で表される。

$$\pi_{ij}(f) = \frac{|a_{ij}(f)|^2 P_{ij}(f)}{P_{uj}(f)}$$

ここで、 $a_{ij}(f)$ は信号*i*から信号*j*への閉ループ周波数応答関数 $P_{ui}(f)$ 、 $P_{uj}(f)$ はそれぞれ信号*i*、*j*のパワースペクトルであり、いずれもARモデル係数 $A_{ij}(k)$ から算出できる。

信号から信号への信号寄与率には、信号への固有ノイズ以外に信号から信号へ伝達した寄与分などがすべて含まれている。

この手法によれば、注目する信号のコヒーレンス、雑音寄与率の推定結果を用いて、雑音信号の伝達経路を知ることができる。

4. 解析結果

4.1 中性子束ゆらぎ特性

図2に示した5体の検出器信号すべてに、原子炉の制御に影響しない微少なゆらぎが観測された。この信号のうちPRM-Iの信号について、オートパワースペクトル密度を推定した結果を図4に示す。他の検出器信号においても、周波数0.3Hzに顕著なピークが見られている。

また、計測系の高周波雑音及び後述する冷却材温度ゆらぎの低周波雑音を除去するために、0.1Hz～10Hzを通過させるバンドパスフィルタを用いて処理し、このデータについて標準偏差を算出した。この結果から、注目周波数帯におけるゆらぎの標準偏差(RMS)としては、どの検出器信号についても同レベルであり、0.03%程度であることが分かった。

なお、中性子束信号のゆらぎについては、安全保護系及び原子炉出力制御系の設定値における設

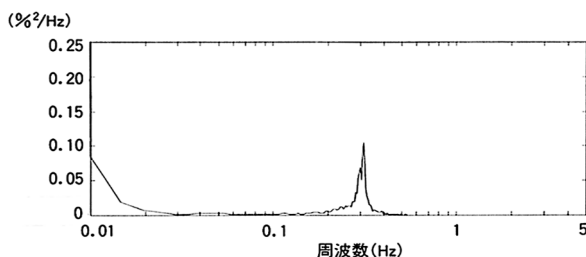


図4 中性子束信号(PRM-I)のオートパワースペクトル密度

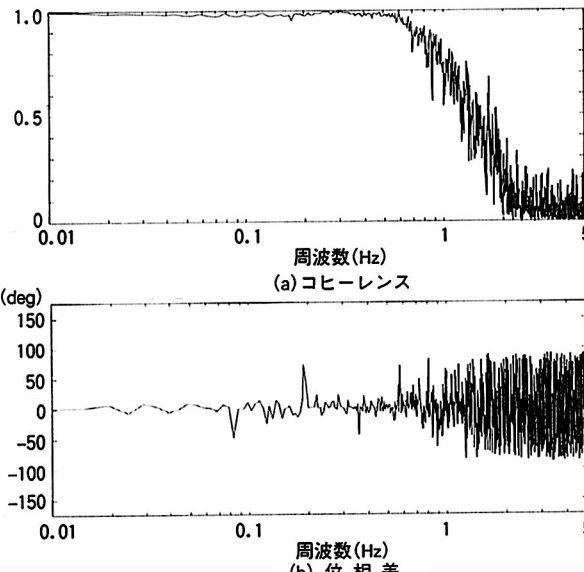


図5 中性子束信号(PRM-I)とPRM-I間の相関

計の中で考慮されているが、観測されたゆらぎ幅は、これらの設計での値を十分下回っていた。

5体の中性子束検出器信号について、相互のコヒーレンス及び位相差を推定した。その一例として、チャンネルIとIIについての推定結果を図5に示す。同図によると、1 Hz以下の低周波数帯でコヒーレンスがほぼ1.0であり、2信号ゆらぎの間に強い相関があることを示している。一方、位相差については、低周波数帯ではほとんど0度であるが、1 Hzより高い周波数帯では分散が大きいものの、その分散の中心値はほぼ0度である。

着目している周波数0.3Hzにおいては、コヒーレンスはほぼ1.0でかつ、位相差は小さいことが分かる。すなわち、2体の検出器の信号は同じ振動を示している。他の検出器に関しても同様な結果が得られ、すべての検出器の信号は同じ振動を示していることが分かった。

「常陽」で制御棒流力振動に起因する炉出力振動が観測されている¹⁰⁾。「もんじゅ」の制御棒には、この振動を防ぐための機構が施されている¹⁶⁾が、この防振機構によっても微小振幅の振動は残されており、これが中性子束振動の振動源となっている可能性もある。

4.2 原子炉容器まわりのゆらぎ特性

中性子束、燃料集合体出口温度、原子炉容器入口温度、原子炉容器出口温度、1次主冷却系流量信号に着目し、原子炉容器まわりのゆらぎ特性を評価した。

上記の信号のうち、中性子束についてはPRM-I、

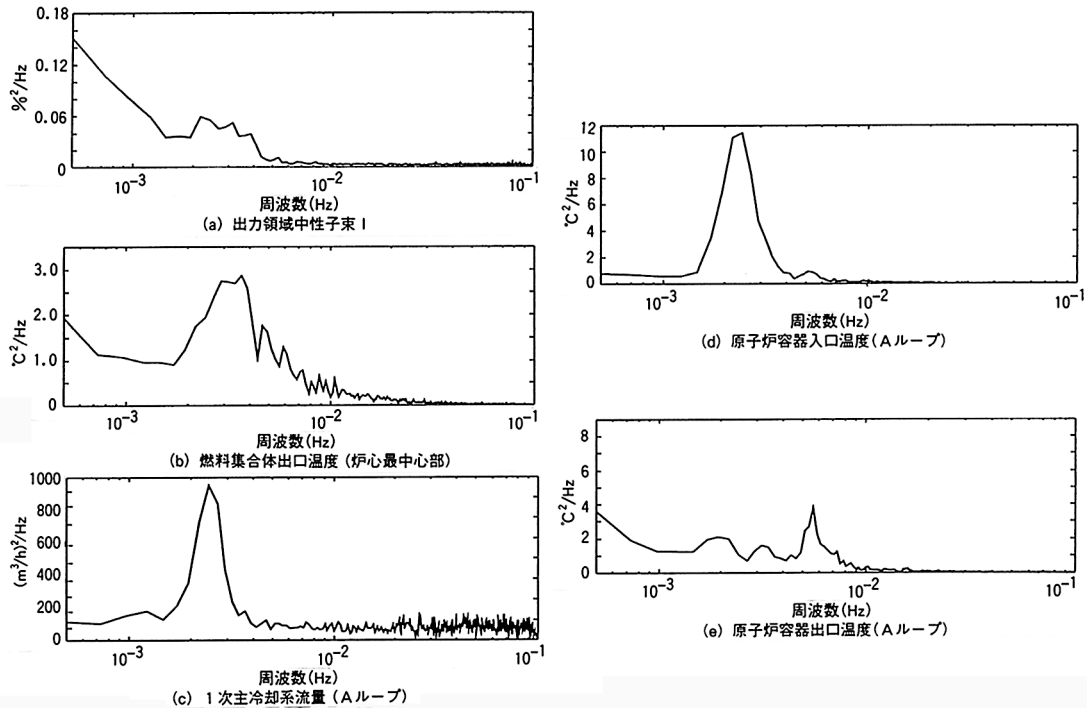


図6 原子炉容器まわりにおける信号のオートパワースペクトル密度推定例

燃料集合体出口温度については炉心最中心部の温度を、1次主冷却系流量、原子炉容器出入口温度についてはAループの信号について、オートパワースペクトル密度の推定結果を例として図6に示す。

同図において、中性子束、燃料集合体出口温度、1次主冷却系流量、原子炉容器入口温度について、特徴的な振動が、周波数0.003Hz近傍に見られた。

1次主冷却系流量については、1次主冷却系ポンプ速度制御系における自動振動が存在しており、これに起因してループ流量が変動していることが分かっている。

これに対して、中性子束、燃料集合体出口温度の振動原因としては、1次主冷却系流量の振動が下記のメカニズムで伝播しているという仮説を立てた。

(a) 炉心流量変化により燃料集合体中の冷却材への熱除去量に変化し、冷却材温度が振動する。この振動が、燃料集合体出口に到達し、温度の振動として観測される。

(b) 原子炉容器入口温度の振動が燃料集合体出口に波及し、温度の振動として観測される。なお、後述するように、原子炉容器入口温度の振動は、1次主冷却系流量の振動に起因して中間熱交換器での伝熱量が変化した結果によるものと考えられる。

(c) 上記(a)における冷却材への熱除去量変化及び(b)の原子炉容器入口温度振動に起因して、冷

却材温度が振動し、これにより生じた反応度変化が中性子束信号の振動として観測される。

上記の仮説の成立性を確認するため、因果関係

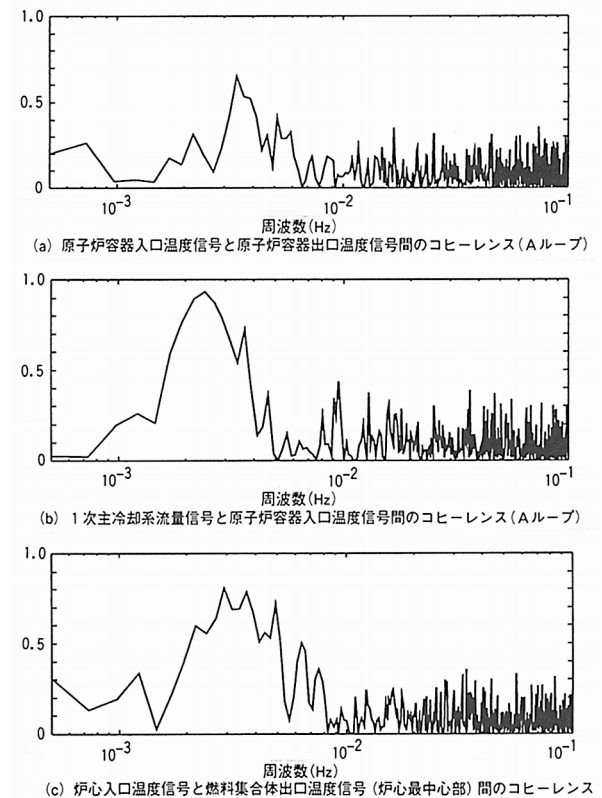


図7 原子炉容器まわりにおける信号のコヒーレンス推定例

があると思われる 2 信号間のコヒーレンスを推定し、その結果を図 7 に示した。

ここで、図 7 における炉心入口温度とは、原子炉容器入口温度 T_A 、 T_B 、 T_C 、1 次主冷却系流量 F_A 、 F_B 、 F_C から次式で計算される推定値 T_{in} を炉心入口における温度変化信号の代替信号として用いて、コヒーレンス解析を行ったものである。

$$T_{in} = \frac{T_A F_A + T_B F_B + T_C F_C}{F_A + F_B + F_C}$$

原子炉容器入口温度～1 次主冷却系流量、炉心入口温度～燃料集合体出口温度については、それぞれ強い相関が見られた。

このことから、前記(a)～(c)のメカニズムにより、ゆらぎが伝達している可能性がいえる。

図 7 では、燃料集合体出口温度とのコヒーレンスにおいて見られたほど顕著ではないものの、原子炉容器出口温度信号と原子炉容器入口温度との相関が、0.003Hz 近傍で見られた。しかし、原子炉容器出口温度のゆらぎ成分として主たる要素であった 0.005Hz 近傍では(図 6)、弱い相関しか示されなかった。

すなわち、原子炉容器出口温度ゆらぎの一部は原子炉容器入口温度のゆらぎに起因するものと考えられるが、残りの部分については、これまでの解析結果から推定できていない、固有のゆらぎ成分に起因しているように見える。

前記したように、原子炉容器入口温度と集合体出口温度との相関が示されていることから、原子炉容器入口での温度変化、流量変化は、燃料集合体出口までは伝達しているといえる。燃料集合体出口計装から原子炉容器出口温度計取り付け位置までの間に、例えば原子炉上部プレナムでの流動特性に起因して、振動要素が存在していると考えられる。

4.3 中間熱交換器・蒸気発生器まわりのゆらぎ特性

前節と同様の手法で、中間熱交換器まわり、蒸気発生器まわりのゆらぎ特性を評価した。

蒸気発生器まわりのゆらぎ信号の解析結果からは、複数の信号が 0.005Hz で振動していることが分かった。給水流量制御系に自動振動が観測されており、この給水流量信号と前記の振動信号との間に強い相関が見られることから、観測された振動はこの給水系の振動に起因していると考えられた。

また、中間熱交換器まわりのゆらぎ信号の解析結果からは、固有の振動特性は見られず、観測されたすべての振動は、原子炉容器出口温度ゆらぎ、1 次主冷却系流量ゆらぎ、給水流量ゆらぎというように、これまで既知のゆらぎが振動源と考えられるものであった。

4.4 振動源推定のまとめ

以上、「もんじゅ」定常ゆらぎ信号データの個々の解析結果について述べた。「もんじゅ」定常ゆらぎ信号データの一連の解析の結果、いくつかのプロセス信号について微小幅の振動が観測された。観測された振動を周波数解析し、物理メカニズムを考察すると、それらの振動は下記の 4 振動源から伝達したものであると推定できた。

振動周波数	振動幅(RMS)
中性子束振動	0.3Hz 0.03%
原子炉容器出口温度振動	0.005～0.006Hz 0.2
1 次主冷却系流量振動	0.002～0.003Hz 0.1%
蒸発器入口給水流量振動	0.005Hz 0.3%

上記の振動は、それぞれ下記の原因で発生していることが考えられる。

(1) 中性子束振動

出力領域中性子束信号について、制御棒集合体の流力振動に起因する可能性がある振動が見られた。

(2) 原子炉容器出口温度振動

原子炉容器出口温度に振動が観測された。この振動は、炉心上部プレナム部での流動特性などに起因していると考えられる。当初、上記の 1 次主冷却系流量の振動に起因していると推測したが、両信号間のコヒーレンスは小さく相関が見られなかった。

(3) 1 次主冷却系流量振動

1 次主冷却系流量制御系における速度制御系に自動振動が発生しており、この自動振動に起因すると考えられる流量、温度振動が 1 次主冷却系で観測された。

(4) 蒸発器入口給水流量振動

給水制御系の自動振動に起因すると考えられる流量、温度の振動が水・蒸気系に観測された。

なお、中性子束、主冷却系流量、温度等のゆらぎについては、安全保護系設定値等の設計において考慮されており、観測されたゆらぎ幅は、これらの設計での値を十分下回っていた。

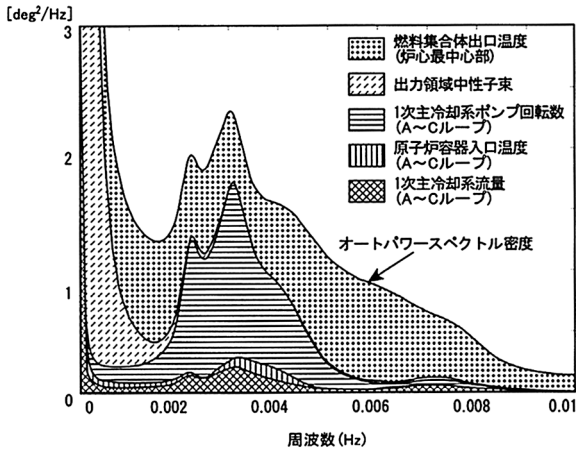


図8 燃料集合体出口温度(炉心最中心部)へのノイズ寄与率

5. 信号伝達経路解析

ARモデルを用いて時系列信号を解析すれば、多変数干渉系における雑音寄与率、信号寄与率が推定でき、ゆらぎ信号の伝達経路が解析できるようになる。

この解析においては、干渉系を構成すると考えられるプラント信号を選択し、3.2で述べたARモデルを同定する必要がある。

ここでは、原子炉容器まわりの以下の11信号を選択してARモデルを作成し、そのモデルに基づいて解析した例について述べる。

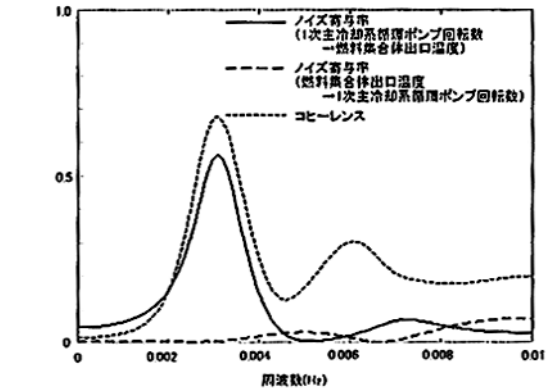
- | | |
|----------------|----------|
| 燃料集合体出口温度 | (炉心中心部) |
| 中性子束 | (チャンネルI) |
| 原子炉容器入口温度 | Aループ |
| 原子炉容器入口温度 | Bループ |
| 原子炉容器入口温度 | Cループ |
| 1次主冷却系流量 | Aループ |
| 1次主冷却系流量 | Bループ |
| 1次主冷却系流量 | Cループ |
| 1次主冷却系循環ポンプ回転数 | Aループ |
| 1次主冷却系循環ポンプ回転数 | Bループ |
| 1次主冷却系循環ポンプ回転数 | Cループ |

上記の11信号について、雑音寄与率を推定した例を図8に示す。図8では、燃料集合体出口温度信号について、オートパワースペクトルが示されており、さらに、各信号の固有のゆらぎから伝達したゆらぎが、燃料集合体出口温度信号オートパワースペクトルにおいて占める成分が示されている。

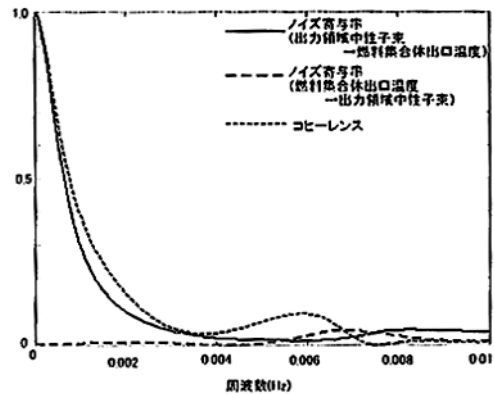
同図によれば、次の2信号からの寄与が明らかにされている。

(1) 炉出力ゆらぎからの寄与

0.001Hz以下の低周波数において、出力領域中



(a) 燃料集合体出口温度信号と1次主冷却系循環ポンプ回転数信号間の伝達



(b) 燃料集合体出口温度信号と出力領域中性子束信号間の伝達

図9 信号伝達経路の推定例

性子束信号からの寄与が支配的となっていることが分かる。

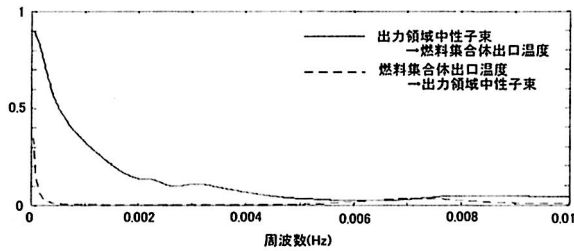
(2) ポンプ回転数ゆらぎからの寄与

周波数0.002~0.003Hzにおいて、1次主冷却系循環ポンプ回転数からの寄与が大きいことが分かる。

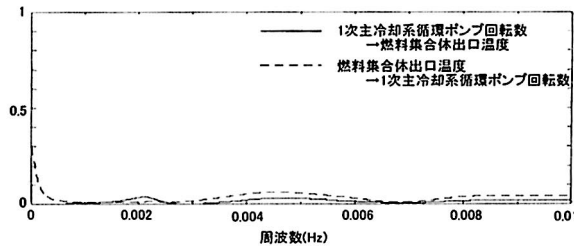
また、大きい寄与を示している周波数が、冷却ループにより若干異なっており、各冷却ループにおけるポンプ回転数信号の振動周波数に対応していることが分かる。

なお、図8において、燃料集合体出口温度からの寄与も示されているが、これは、当該信号における計測雑音、他の燃料集合体出口温度のゆらぎ及びARモデル化の誤差に起因する成分である。該当パワースペクトルにおいて、広い周波数帯に分布しており、モデル化の前提となっていた雑音の白色性が示されていることから、モデル化が妥当であるといえる。

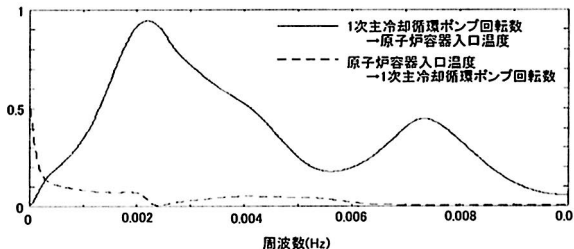
図9に、2信号間のコヒーレンスと各信号における固有雑音から他信号への雑音寄与率を示した。同図により、その雑音信号の伝達方向を確認できる。



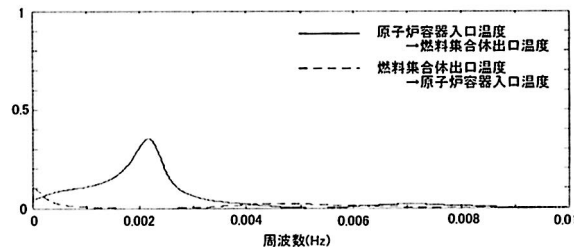
(a) 出力領域中性子束信号と燃料集合体出口温度信号間の伝達



(b) 1次主冷却系循環ポンプ回転数信号と燃料集合体出口温度信号間の伝達



(c) 1次主冷却系循環ポンプ回転数信号と原子炉容器入口温度信号間の伝達



(d) 原子炉容器入口温度信号と燃料集合体出口温度信号間の伝達

図10 信号寄与率の推定例

すなわち、出力領域中性子束信号から燃料集合体出口温度信号へ、また、1次主冷却系主循環ポンプ回転数信号から燃料集合体出口温度信号へ雑音の伝達があるが、逆方向の伝達はないということが分かる。

さらに、信号寄与率の解析結果を図10に示した。

図10(a)では、前記該当周波数0.001Hz以下において、出力領域中性子束信号から燃料集合体出口温度への信号寄与率が大きく、その経路での伝達特性が示されている。

上記の信号伝達経路に対応しては、炉心での熱

出力変化が冷却材に伝わり、これが燃料集合体出口温度変化に波及しているというメカニズムが考えられる。なお、このような低周波域での炉心の熱出力変化を引き起こしている要因は、炉心の燃焼の進捗に伴う反応度の低下だと考えられる。

一方、図10(b)では、1次主冷却系主循環ポンプ回転数から燃料集合体出口温度信号への信号寄与率が小さく、直接の伝達経路が存在しないことを示している。そのかわりに、図10(c)及び図10(d)において、1次主冷却系主循環ポンプ回転数から原子炉容器入口温度、原子炉容器入口温度から燃料集合体出口温度という信号寄与率が大きく、1次主冷却系主循環ポンプ回転数から燃料集合体出口温度への間接的な伝達経路が存在することが示されている。

上記の信号伝達経路に対応しては、次のような物理的メカニズムが考えられる。1次主冷却系流量制御系において自励振動が観測されており、この振動に起因して主循環ポンプ回転数が変動している。このポンプ回転数のゆらぎが中間熱交換器を通過する流量ゆらぎを引き起こし、中間熱交換器での伝熱量の変化になり、原子炉容器へ戻る1次主冷却材温度のゆらぎとなって現れる。さらに、この原子炉容器入口温度のゆらぎが炉心内を輸送され、燃料集合体出口温度のゆらぎとなる。

前記したコヒーレンス解析において、2信号間の関連の強さは分かっていたが、その信号の伝達経路については、上記の解析によって検証することができた。

6. おわりに

「もんじゅ」40%出力運転状態における定常ゆらぎ信号データの解析の結果、幾つかのプロセス信号について微小幅の振動が観測された。

観測された振動を周波数解析し、物理メカニズムとの考察から、それらの振動が中性子束振動、原子炉容器出口温度振動、1次主冷却系流量振動、蒸発器入口給水流量振動という4種類の振動源から伝達したものであると推定できた。

さらに、原子炉容器まわりの信号について、多変数ARモデルを適用した伝達経路解析を実施し、1次主冷却系流量制御系における振動及び原子炉出力変化が、燃料集合体出口温度のゆらぎに寄与していることが分かった。

今後、「もんじゅ」の安定運転をより確実なものとするべく、このような診断技術のシステム化検討、オンライン監視技術の検討、動特性解析コードを用いた制御系の自励振動にかかわる解析等を

進め、異常兆候を早期に発見する診断技術を確立させていきたい。

謝 辞

本研究をまとめるに当たって、特に試験データの整理に関して、原子カシステム株式会社・岡本久彦氏、光元里香氏にご協力いただいた。ご協力いただいた両氏に深謝を申し上げる。

参考文献

- 1) 須田信英：“原子炉雑音解析”，計測と制御，Vol.18, No.4, p.312 (1979).
- 2) R. M. Ball, J. M. Huzdovich：“Light -Water-Reactor Diagnostic Experience Using Noise Analysis”，Nuclear Safty, Vol.22, No.1, (1981).
- 3) 弘田実弥，他：“原子炉雑音解析の安全関連応用における最近の進歩”，日本原子力学会誌，Vol.24, No.3, p.188 (1982).
- 4) 須田信英，他：“原子炉雑音解析，異常診断技術の最近の動向”，日本原子力学会誌，Vol.27, No.8, p.649 (1985).
- 5) 北村正晴，他：“進化する診断技術”，日本原子力学会誌，Vol.40, No.9, p.652 (1998).
- 6) J. Gordon, R. Casejuane：“Off -Line and On -Line Noise Analysis for Core Surveillance in French LMFBR”，SMORN -III, Prog. Nucl. Energy, Vol.9, p.365 (1982).
- 7) J. A. Mullens, J. A. Thie：“On - line Noise Monitoring at the Fast Flux Test Facility”，SMORN -IV, Prog. Nucl. Energy, (1985).
- 8) D. J. Lord, D. S. Crowe：“Reactivity Noise on the United Kingdom Prototype Fast Reactor”，SMORN -IV, Prog. Nucl. Energy, p.15 (1985).
- 9) S. Tamura, et al.：“Reactor Noise Analysis of the Experimental Fast Reactor JOYO”，SMORN -III, Prog. Nucl. Energy, Vol.9, p.399 (1982).
- 10) A. Shono, et al.：“Control Rods Vibration Analysis in JOYO MARK -II Core”，SMORN -IV, Prog. Nucl. Energy, Vol.15, p.293 (1985).
- 11) 小舞正文，大山幸男：“核計装による炉内異常検知技術の開発”，JNC TN9400 2000-001, (1999).
- 12) 森下 巖，小畑秀文：“信号処理”，計測自動制御学会編 (1982).
- 13) 木村英紀：“デジタル信号処理と制御”，昭晃堂 (1982).
- 14) 赤池弘次，中川東一郎：“ダイナミックシステムの統計的解析と制御”，サイエンス社 (1972).
- 15) R. Oguma：“Method to Evaluate Signal Transmission Paths in Dynamic Systems and Its Application to Reactor Noise Analysis”，J. Nucl. Sci. Technol., Vol.18, No.11, p.835 (1981).
- 16) 熊岡祥雄，他3名：“高速炉用制御棒および制御棒駆動機構の開発”，東芝レビュー，34巻，10号，p.849 (1979).