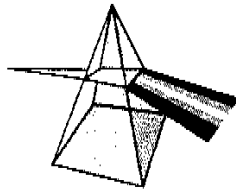


【技術報告】



# 擬似ランダム信号印加による 「もんじゅ」プラント動特性の同定

宇田川一幸 友部 勝眞 上田 雅司  
大草 享一 森 薫満 寺内 誠

もんじゅ建設所 技術開発部

資料番号：106-2

Identification of Plant Dynamics by Means of Pseudo Random  
Signal Injection in Monju

Kazuyuki UDAGAWA Katsuma TOMOBE Masashi UEDA  
Kyoichi OKUSA Shigemichi MORI Makoto TERAUCHI  
Technology Development Division, Monju

「もんじゅ」性能試験の一環としてプラントの動特性同定試験を実施した。試験では制御棒位置、1次主冷却系流量、2次主冷却系流量の各制御系の指令値に擬似ランダム信号を重畳印加し、それらに対するプラント各部の応答に多変数自己回帰モデルを適合させて動特性を同定した。同定したモデルを用いたプラントのふるまいの予測結果は、実測値とほぼ一致した。また、このモデルを用いて同定された信号伝達経路は、設計時に想定されたものと一致することが確認できた。さらに、炉心及び炉容器出口温度の変化などのステップ応答の予測結果は実測値とよく一致し、プラント動特性の同定の妥当性が示された。

*Identification testing of plant dynamics was performed as a part of the Monju performance testing program. In this testing, pseudo random signals were superposed onto the control rod position, primary coolant flow rate, and secondary coolant flow rate demands in the form of M-sequence signals. Identify the plant dynamics, the responses were fitted by a multi-variable auto-regressive model.*

*The predicted plant behavior agreed fairly well with the measured results. Signal transmission paths identified by using the model coincided with those predicted based on Monju's design description. Moreover, responses of the R/V outlet temperature and fuel subassembly outlet temperature to a step change in the reactor power were predicted with high accuracy by the identified dynamic model.*

キーワード

高速増殖原型炉、「もんじゅ」、性能試験、動特性、異常診断、M系列信号、自己回帰型モデル、伝達経路解析

*Prototype FBR, Monju, System Start-up Test, Dynamics, Abnormality Diagnosis, M-sequence Signal, Autoregressive Model, Signal Transmission Path Analysis*

## 1. はじめに

原子力プラントでは、安全性確保、設備保護の観点から異常兆候の早期発見が切望されている。観測された振動の発振源を特定するため、また、予測値と実測値との比較により異常兆候を検知するためなど、高度な診断システムの開発にはプラントの数式モデルの使用が必須のものとなっている。さらには、制御システムの改善のために制御理論を適用する際においても、プラントの数式モデルが必要とされる。

このような数式モデルをプラントの入出力応答データから求めることは、動特性（あるいはシス

テム）を同定すると呼ばれている。この動特性同定試験として、高速増殖原型炉「もんじゅ」（以下「もんじゅ」とする）の性能試験において、擬似ランダム信号をプラントに印加して広い周波数帯域でのプラントの応答を得るための試験を実施した。

この試験は、M系列信号（Maximum-length Linear Shift Register Sequence Signal）と呼ばれる微小な擬似ランダム信号を主要制御信号へ重畳させ、それに対するプラントの応答を観察することにより、対象とする動特性を同定するものである<sup>1)</sup>。

すべての周波数成分を一様に含んでいる白色雑音を印加できれば、その応答を観測することでプラントの周波数特性が求められる。しかし、実際にはこれは不可能なので、プラントが応答できる周波数の範囲をあらかじめ推定し、その範囲の周波数帯域で白色雑音を模擬した擬似ランダム信号を印加することになる。擬似ランダム信号としては、1と0の2値のいずれかの値をとり、それらの各々の値の発生確率が等しくなるように設定したM系列信号を用いる。

このような信号に基づく動特性同定試験は、過去に、JPDR、「常陽」、原子力船「むつ」等においても実施されている<sup>2)</sup>。今回の試験は、これまでの試験と比較し、信号の印加箇所、プラント運転モードの種類の点から見て多様なものとなっている。

観測データから実験的に構築する動特性モデルとしては、これまで多くの提案がある。本稿では多変数自己回帰(MAR: Multivariable Autoregressive)モデル—以降単に自己回帰(AR: Autoregressive)モデルと呼ぶ—を採用した<sup>3)</sup>。この手法は、適用できる対象範囲が広く、応答特性、信号伝達特性等の対象の動特性に関する情報が比較的容易に抽出できること、モデルの構築及び予測計算における所要計算量が少ないこと、等の利点を有している。

なお、本試験は各種出力運転状況において実施する予定であったが、平成7年12月に発生した2次主冷却系におけるナトリウム漏洩事故により、40%を越える出力状態での試験は未実施である。そのため、本稿では40%出力運転状態における試験及び試験結果に基づく解析について報告するものである。

## 2. ARモデルに基づく解析方法

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、 $X(k)$ は $\{X_i(k); k=1, 2, \dots, R\}$ を要素とする次数Rの時刻kにおける観測値ベクトルであり、 $A(m)$ は $\{A_{ij}(m); i=1, 2, \dots, R, j=1, 2, \dots, R\}$ を要素とするAR係数行列、 $E(k)$ は $\{E_j(k); j=1, 2, \dots, R\}$ を要素とする次数Rのガウス過程に基づく雑音源ベクトルである。また、Nは観測時系列の長さ、MはARモデル次数である。

ARモデルを推定するという事は、与えられた $\{X(k)\}$ に対して、モデルが最も良好に適合す

るようなAR係数を求めることである。推定された最適ARモデルは、種々の雑音(ゆらぎ)特性の集約表現を容易に導くことができる。

重要な量として、各変数 $X_i(k)$ のゆらぎが雑音源 $\{E_j(k); j=1, 2, \dots, R\}$ のどれに主として起因するかを指示する雑音寄与率(NCR: Noise Contribution Ratio)という特性量があげられる。このNCRは、 $X_i$ の自己パワースペクトル密度(APS: Auto-Power Spectral Density)を各 $E_j$ からの相対寄与率に分解して周波数成分ごとに示すものである。j番目の信号からi番目の信号への雑音寄与率は、係数マトリクス $A_{ij}(m)$ のフーリエ変換を用いて与えられる。

さらに、信号間にフィードバック関係があるときには、偏コヒーレンス(Partial Coherence)、偏雑音寄与率(PNCR: Partial Noise Contribution Ratio)を用いた信号伝達経路解析の手法が提案されており<sup>4)</sup>、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)の偏コヒーレンスが、信号Aから信号Bへの偏雑音寄与率と一致し、かつ信号BからAへの偏雑音寄与率が零の場合には、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。この手法によれば、注目する信号の偏コヒーレンス、偏雑音寄与率の推定結果を用いて、この雑音信号の伝達経路を知ることができる。

以上説明したARモデルを用いて、本報告ではゆらぎの伝達経路、プラント動特性パラメータ等「もんじゅ」の主要特性を評価した結果について述べる。

## 3. 試験方法及び結果

### 3.1 試験方法

試験時のM系列信号の印加箇所及び試験で収録した信号計測箇所を図1に示す。

「もんじゅ」のプラント制御系は、出力指令装置、原子炉制御装置、1次主冷却流量制御装置、2次主冷却流量制御装置、蒸発器出口温度制御装置から構成されている。図1に示したプラント制御系において、破線は自動制御時におけるフィードバック信号を意味している。自動制御状態ではフィードバック信号に基づく制御演算が実行され、下位制御装置もしくは駆動機構に対する指令が与えられる。手動制御状態ではそのような制御演算は行われず、基本的には一定指令値が与えられる。さらに、プラント制御系以外の制御系とし

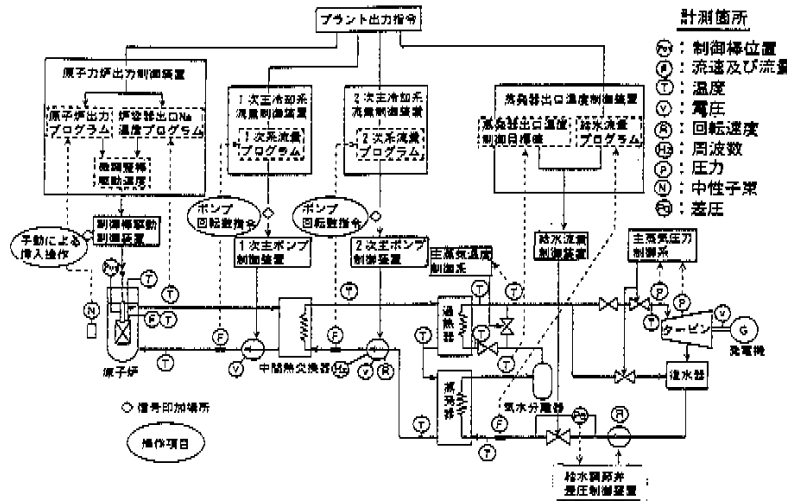


図1 M系列信号印加箇所及び試験時の計測点

て、水蒸気系の各種制御系である給水流速制御装置、給水調節弁差圧制御装置、主蒸気温度制御装置、及び主蒸気圧力制御装置が設けられているが、本試験においてこれらの制御装置はいずれも自動制御状態に設定されていた。

M系列信号は、「もんじゅ」における代表的な制御変量である原子炉出力、1次主冷却系流量、2次主冷却系流量の制御指令（図1に◇で示す）に重畳させて印加した。このとき、信号を印加した制御系は手動モードに設定している。

図1には、計測箇所も併せて示した。図には1ループしか示されていないが、1次主冷却系、2次主冷却系はそれぞれ3ループから構成されており、図示されている温度、流量等の計測器についても各ループに設置されている。複数設置されている炉心出口温度計、中性子計測系等についても同様に、各ループにおける代表点のみを示した。

今回実施した試験ケースの詳細を表1に示す。本試験では、M系列信号の印加箇所、プラント制御系の手動/自動モードの相違により、6ケース実施した。

表1 試験ケース（制御モード）

	原子炉系		1次主冷却系		2次主冷却系	
	信号印加場所	制御棒位置	ポンプ回転数	ポンプ回転数	ポンプ回転数	ポンプ回転数
信号印加方法	運転員操作	信号発生器	信号発生器	信号発生器	信号発生器	信号発生器
試験ケース	1A	1B	2A	2B	3A	3B
原子炉出力制御	手動	手動	手動	自動	手動	自動
1次系流量制御	手動	自動	手動	手動	手動	自動
2次系流量制御	手動	自動	手動	自動	手動	手動

手動：一定指令値が与えられる（制御演算を行わない）  
 自動：フィードバック信号に基づく制御演算を実行する

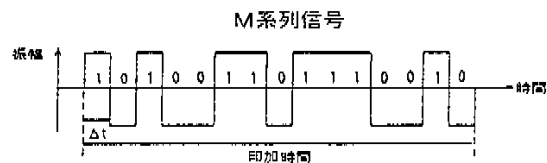
試験ケース1A、1Bにおいては、印加すべきM系列信号のタイミングを計算機で表示させ、このガイドに従って運転員が制御棒を手動で操作した。また、1次、2次主冷却系循環ポンプへの回転数指令値（試験ケース2A、2B、3A、3B）については、印加すべきM系列信号を計算機（信号発生器）にプログラムし、この信号発生器からプラント制御系制御盤へ印加した。

印加したM系列信号の仕様を、試験ごとにまとめて表2に示す。M系列信号の仕様としては、印加信号の振幅、最小時間間隔 $\Delta t$ 、印加時間等を決定する必要がある。

このM系列信号の振幅仕様を決定するにあたっては、動特性解析コードを用いてM系列信号印加による主要パラメータの変動を予測し、安全上重要なプラントパラメータの変動がプラントの運転に影響を与えないよう十分に小さく、かつ、定常状態におけるゆらぎに対しては十分大きな変化と

表2 M系列信号仕様

No.	印加する場所	振幅	最小時間間隔 ( $\Delta t$ )	印加時間	白色周波数帯域(Hz)	
					下限	上限
1	制御棒（微調整棒）位置指令	$\pm 3\text{mm}$ 反応度 $\pm 3\text{e}$	15秒	450秒	0.0044	0.022
2	1次主循環ポンプ回転数指令	$\pm 2\%$	1秒	2,046秒	0.00098	0.33
3	2次主循環ポンプ回転数指令	$\pm 5\%$	3秒	1,530秒	0.0014	0.11



なるべく、最適化を図った。また、最小時間間隔  $\Delta t$  については、短いほど高い周波数の応答が測定できるが、機器の特性として、制御棒駆動系の最大変化速度の制約、ポンプ特性上応答可能な速度の限界などを考慮して決定した。さらに、印加時間については、長ければ低い周波数の応答が測定でき、同定の精度が向上することになるが、熱輸送系の最大応答遅れ時間、試験工程等を考慮して決定した。

M系列信号がほぼ白色である(減衰が3dB以下)周波数帯域は、上記の仕様から算出できる。これを参考として、表2に示した。

### 3.2 試験結果

本試験は、原子炉出力約40%の安定した運転状態において実施した。試験時のプラント状態を代表する主要な計測信号の指示値を表3に示す。

また、試験結果の例として制御棒操作時(ケース1A)の応答を図2に示す。さらに、前記した高速増殖炉動特性解析コードによる予測結果を、同図に示す。制御棒(微調整棒)の位置変化に対応して、反応度が変化し、出力領域中性子束信号の変化に現れる。前頁での検討結果に基づいて設定した制御棒の振幅 $\pm 9\text{mm}$ に対し、反応度変化及び出力変化の動特性解析コードによる解析結果は

表3 試験時のプラント状態

計測信号名	試験時	定標値(計画値)	単位
原子炉出力	48	100	%
原子炉容器出口Na温度	485	529	$^{\circ}\text{C}$
原子炉容器入口Na温度	360	397	$^{\circ}\text{C}$
IHX 2次側出口Na温度	485	505	$^{\circ}\text{C}$
IHX 2次側入口Na温度	285	325	$^{\circ}\text{C}$
主蒸気温度	483	483	$^{\circ}\text{C}$
1次系流量	3,000	6,000	m <sup>3</sup> /h
2次系流量	1,800	4,240	m <sup>3</sup> /h
主蒸気圧力	124	127	kg/cm <sup>2</sup>
電気出力	130	280	MW

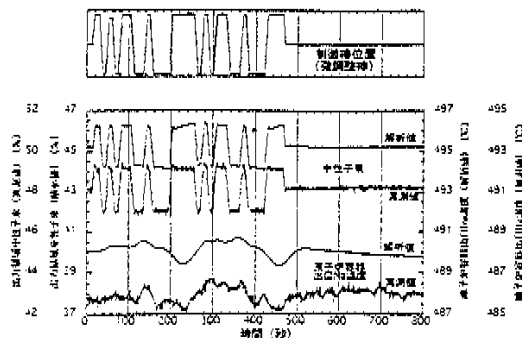


図2 M系列印加試験結果及び解析結果の例(制御棒操作時)

3 $\delta$ 及び2%であり、測定値と解析結果はほぼ一致している。また、1次主冷却系配管の炉容器に近い点で計測されている原子炉容器出口温度は、原子炉出力変化に対し、燃料棒、冷却材での熱伝達遅れ、炉容器上部プレナムでの混合、冷却材の輸送遅れ等の反応遅れを持ち、変動幅は、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ と解析値とほぼ同等のふるまいを示すことを確認した。「もんじゅ」として始めて実施した試験項目ではあったが、試験を中断するような警報は発生せず、主要変数の応答としてもほぼ予定していた試験結果が得られた。

また、試験時の主要パラメータのパワースペクトル密度をFFT(高速フーリエ変換)解析により推定した。この推定結果の例を、M系列信号を印加しないときに自然に存在する定常ゆらぎ信号の解析結果と比較して図3に示す。本試験の結果、定常ゆらぎに対して20dBを越える強度の応答が得られたことがわかる。また、一様な特性を示す周波数帯域についても、表2に示された白色周波数帯域と対応しており、仕様通りの信号が印加できていることを確認できた。

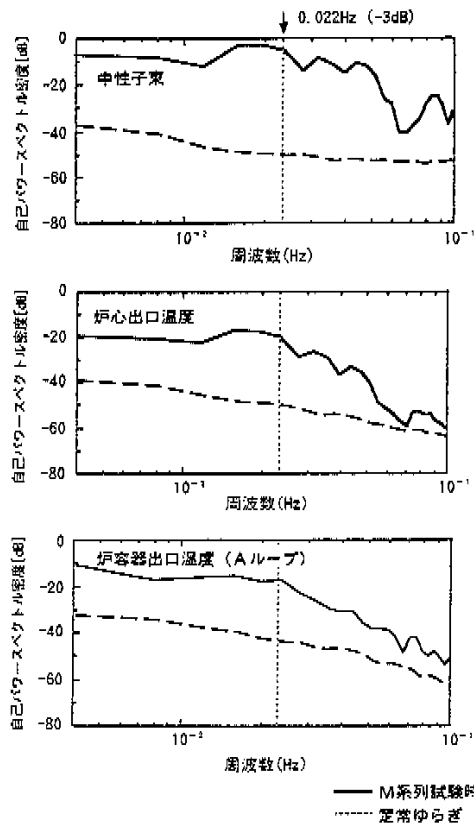


図3 主要パラメータの自己パワースペクトル密度

4. 解析結果

4.1 ARモデルの推定結果

「もんじゅ」プラント動特性の同定結果として、制御棒操作時（ケース1A）の試験結果に基づいて、外部入力型自己回帰モデル（ARXモデル：Auto-regressive exogenous）で同定した結果の例を図4に示す。使用した時系列データのサンプリング周期は2Hzで、モデルの次数は12次であった。

図4では、中性子束変化に対する炉心出口温度の変化の予測結果と、該当する実測値を比較した。図からわかるように、誤差は最大でも0.2℃程度であり、ARモデルによる予測値と実測値は非常に一致しているといえる。

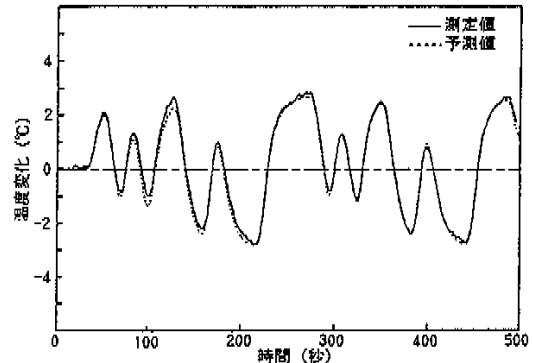


図4 ARモデルによる予測結果の例 (炉心出口温度信号の予測)

4.2 原子炉系における解析結果

制御棒操作時（ケース1A）の試験結果から、3信号（中性子束、炉心出口温度、炉容器出口温度）について、多変数ARモデルを作成し、偏コヒーレンス、偏雑音寄与率を推定した。モデル化した3信号相互の推定値として、3種類の偏コヒーレンス、6種類の偏雑音寄与率の推定値が算出できる。このうち、中性子束と炉心出口温度についての推定値を図5に示す。さらに、M系列信号印加試験による効果を比較するため、定常のゆらぎ信号を用いて同様な解析を実施し、その結果を同図に示した。

図5から、中性子束信号と炉心出口温度信号の偏コヒーレンスが0.1Hz以下の低周波数域で大きいこと、及び該当する周波数帯において中性子束信号から炉心出口温度信号への偏雑音寄与率も大きいことがわかる。このことから、中性子束信号に加わった雑音（この場合は制御棒操作が雑音源）が、炉心出口温度変化として現れていることがわかる。一方、炉心出口温度信号から中性子束信号への偏雑音寄与率は小さいので、この方向の信号伝播経路は存在しないことが示されている。また、定常のゆらぎ信号の解析結果は、M系列信号を印加した場合と比較し、該当する周波数帯での偏コヒーレンスが小さく、相互方向の偏雑音寄与率も小さいことから、M系列信号印加により存在が確認できた経路は、通常ゆらぎの観測では同定できないことがわかった。

さらに、他の信号の組み合わせについても、同様な解析を行い、下記の結果が得られた。

- ①中性子束から炉心出口温度への偏雑音寄与が低周波数域で大きく、これに対応した信号伝播経路が存在する。
- ②中性子束から炉容器出口温度への偏雑音寄与は

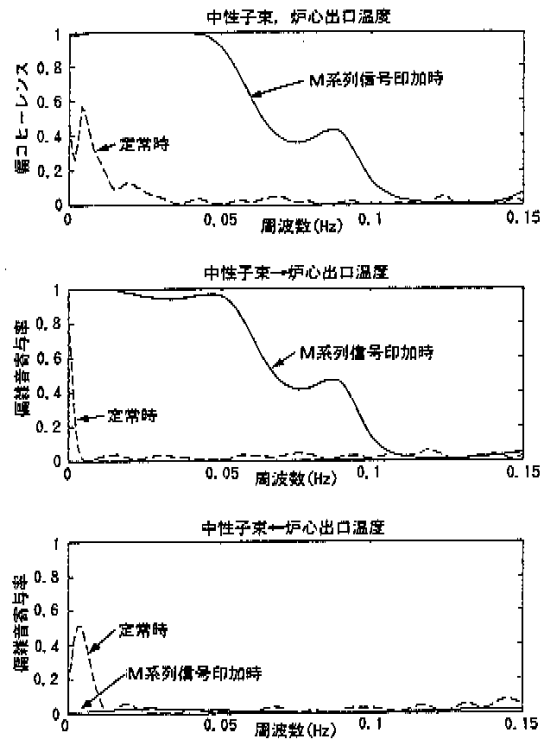


図5 信号伝達経路解析結果の例（原子炉系）

低周波数域で大きく、これに対応する信号伝播経路が存在する。

- ③炉心出口温度と炉容器出口温度の相互の偏雑音寄与は小さい。

この結果により、制御棒操作が仮想的な雑音源となり炉出力変動を生じさせ、中性子束信号の雑音源となりその変動が炉心出口温度信号及び炉容器出口温度信号それぞれの変動へと伝播している

ことが確認できた。一方、炉心出口温度信号から炉容器出口温度信号への寄与はみられない。これは、炉容器出口温度変動の本来の振動源が、中性子束信号の変動(炉出力の変動)にあり、炉心出口温度信号が雑音源となっていないことを意味している。

4.3 1次主冷却系における解析結果

1次主冷却系流量操作時(ケース2A)の試験結果から、4信号(1次主冷却系流量、炉容器入口温度、炉容器出口温度、中間熱交換器2次側温度)について、多変数ARモデルを作成し、偏コヒーレンス、偏雑音寄与率を推定した。

モデル化した4信号相互の推定値として、4種類の偏コヒーレンス、24種類の偏雑音寄与率の推定値が算出できる。このうち、1次主冷却系流量と炉容器入口温度についての推定値を図6に示す。さらに、M系列信号印加試験による効果を比較するため、定常のゆらぎ信号を用いて同様な解析を実施し、その結果を同図に示した。

図6から、炉容器入口温度と1次主冷却系流量の偏コヒーレンスが0.04Hz以下の低周波数域で大きいこと、及び該当する周波数帯において1次主冷却系流量から炉容器入口温度信号への偏雑音寄与率も大きいことがわかる。このことから、1次

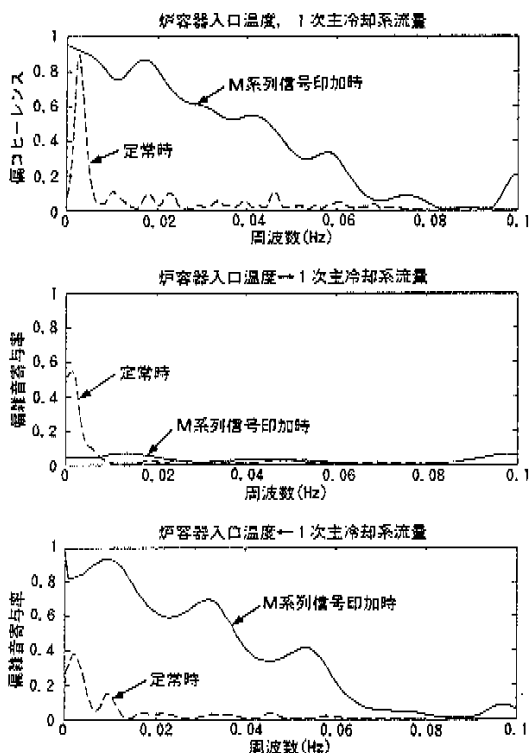


図6 信号伝達経路解析結果の例(1次主冷却系)

主冷却系流量信号に加わった雑音(この場合は1次主冷却系流量操作が雑音源)が、炉容器入口温度変化として現れていることがわかる。一方、炉容器入口温度信号から1次主冷却系流量信号への偏雑音寄与率は小さいので、この方向の信号伝達経路は存在しないといえる。また、定常ゆらぎ信号による解析結果と比較してみると、該当の周波数帯での定常ゆらぎの偏コヒーレンスは小さく、相互方向の偏雑音寄与率も小さいことがわかる。このことは、定常ゆらぎの観測では認知できない現実に存在する信号伝達経路が、M系列信号の印加によりはじめて確認できることを示している。

さらに、他の信号の組み合わせについても、同様な解析を行い、下記の結果が得られた。

- ① 1次系冷却流量から炉容器入口温度への雑音寄与は低周波数域で大きく、これに対応した信号伝達経路が存在する。
- ② 炉容器出口温度から中間熱交換器2次側出口温度への雑音寄与は低周波数域で大きく、これに対応した信号伝達経路が存在する。
- ③ 炉容器出口温度から炉容器入口温度への雑音寄与は低周波数域で大きく、これに対応した信号伝達経路が存在する。

②及び③の結果については、定常ゆらぎ信号の解析結果にも現れており、1次系冷却流量変動に起因するものではない。これらは、それぞれの温度変動が熱交換器での伝熱プロセスを介し、伝播していることを示している。

4.4 2次主冷却系における解析結果

2次主冷却系流量操作時(ケース3A)の試験結果から4信号(2次主冷却系流量、中間熱交換器2次出口ナトリウム温度、蒸発器出口蒸気温度、過熱器出口蒸気温度)について、偏コヒーレンス、偏雑音寄与率を推定した。上記4信号の中の2信号の組み合わせのうち、2次主冷却系流量と過熱器出口蒸気温度の偏コヒーレンス関数、偏雑音寄与率を図7に示す。定常ゆらぎ信号による解析結果も併せて、図7に示した。図から、0.008Hz近傍で2次主冷却系流量から過熱器出口蒸気温度への信号伝達経路が存在することがわかる。一方、自然に存在する定常ゆらぎの解析では、この経路についての偏雑音寄与率が小さく、この信号伝達経路の動特性を同定することが困難なことが示された。

これらの他に実施した解析の結果から、2次主冷却系の流量の変動は、下流側の蒸気温度の変動を引き起こすが、上流側の1次、2次ナトリウム

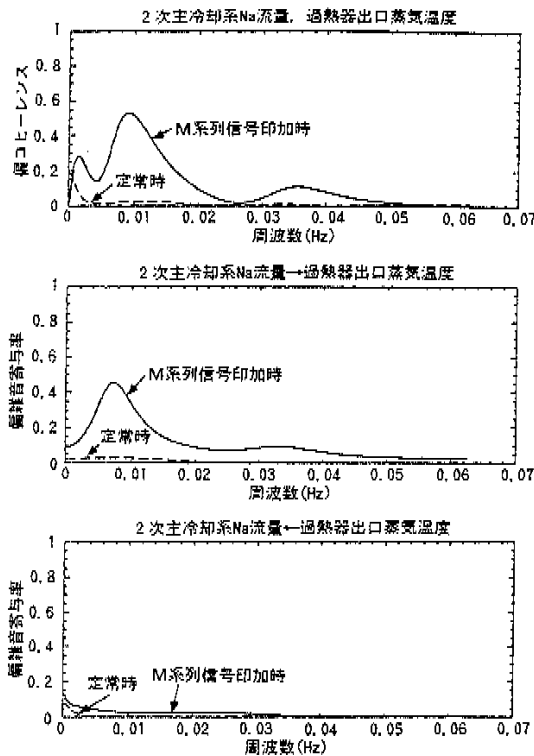


図7 信号伝達経路解析結果の例(2次主冷却系)

温度へは顕著な影響を及ぼさないことが確認されている。

#### 4.5 ステップ応答の推定

制御棒操作時(ケース1A)の時系列データに基づいて同定したARモデルを用いてステップ応答を推定した。

中性子束信号をステップ状に変化させたときの炉心出口温度信号の応答、同様に中性子束信号から炉容器出口温度信号に対するステップ応答の推定結果を図8に示す。

これらの入出力信号の組み合わせは、前記した偏雑音寄与率が大きく、その信号伝達経路が確認されたものであり、動特性同定が可能と思われる組み合わせである。

ステップ状信号の入力に対して、63%の大きさまで立ち上がるのに要する時間(ここで応答時間と呼ぶ)は、前記2組の応答についてみると、それぞれ17秒及び98秒であった。これらの値は、冷却材の流れによる輸送遅れ、炉容器上部プレナム部での混合による時定数、熱電対の時定数を考慮すると、設計値とほぼ一致している。

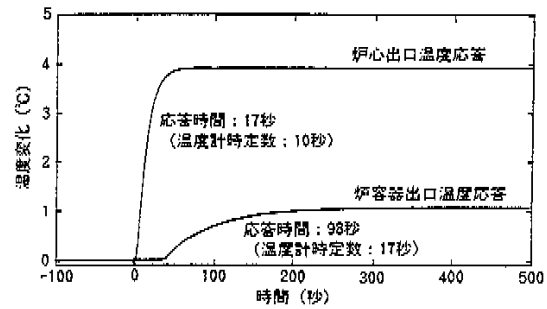


図8 同定したARモデルによるステップ応答推定例(中性子束変化に対する応答)

#### 5. おわりに

高速増殖原型炉「もんじゅ」プラントにおいて、M系列信号印加試験を実施した。この試験において収録したデータから多変数自己同帰モデルを作成し、信号伝達経路解析を実施した結果、「もんじゅ」の代表的な伝達経路が推定できた。これらの信号伝達経路は、設計時にFBRプラントの特徴として考えられた信号伝達経路と一致している。また、同定したARモデルによるステップ応答も、設計で想定した結果とほぼ対応することがわかった。

以上の結果から、「もんじゅ」プラントの動特性同定に対するARモデルの適用性を実証し、実プラントの動特性が設計で想定した動特性とよく一致することを確認した。現在、プラント安定性の評価などを実施しており、今後も「もんじゅ」のプラント動特性評価や制御技術の高度化に取り組む所存である。

#### 6. 謝辞

本試験の実施にあたって、三菱重工株式会社殿には事前解析及び実験の実施にご協力いただいた。また、試験計画立案、運転操作、試験向けの設備変更などについてももんじゅ建設所・技術課、プラント1課、プラント2課の方々には多大な協力を得た。御協力いただいた各位に深謝を申し上げたい。

#### 参考文献

- 1) 森下義, 小畑秀文: "信号処理", 計測自動制御学会編, p208-214 (1982).
- 2) K.Matsubara et al: "A Multivariable Autoregressive Model of the Dynamics of a Boiling Water Reactor", *Nuclear Science and Engineering*, vol. 65, No. 1 p1-16 (1978).
- 3) 相良節夫, 秋月影雄, 他: "システム同定", 計測自動制御学会編, p31-32 (1982).
- 4) R.Oguma and E.Turkcan: "Application of an Improved Multivariable Noise Analysis Method to Investigation of PWR Noise: Signal Transmission Path Analysis", *Progress in Nuclear Energy*, vol. 15, p863-373 (1985).