

J A E R I - M  
91-021

船体動搖による原子炉出力への影響  
(出力上昇試験航海時の炉雑音解析)

1991年3月

田中 義美・京谷 正彦・徳永 貴元\*・森 拓也\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1991  
編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷株

船体動揺による原子炉出力への影響  
(出力上昇試験航海時の炉雑音解析)

日本原子力研究所むつ事業所原子力船技術部

田中 義美・京谷 正彦・徳永 貴元\*・森 拓也\*

(1991年2月1日受理)

本報告は、船体動揺（ローリング、ピッキング）が「むつ」の原子炉出力に与える影響について述べたものである。

出力上昇試験の航海中に、原子炉計装系によるプロセス量の測定に加えて、ジャイロ及び加速度計による船体動揺の測定を行った。これらのデータを用いて、ピッキング角度、ローリング角度、蒸気流量、中性子束及び一次冷却水温度の各信号間の相関を多変数自己回帰モデルを適用して解析した。その結果、原子炉の動特性に関しては、ピッキング及びローリングが一次冷却水温度及び中性子束へ及ぼす影響はなかった。また、負荷と原子炉出力が顕著な相関を示す周波数は、ピッキング及びローリングの周波数よりも低域に分離している。ピッキング、ローリングは主として船の大きさ、重量、重心位置に依存するが、一方負荷追従特性は負荷と一次系及び二次系の熱容量に依存する。これらの理由で、「むつ」の原子炉と船体の設計は良く調和しているものと考えられる。

Effects of Pitching and Rolling on Reactor Power  
(Reactor Noise Analysis on a Voyage for the N.S."MUTSU" Power-Up Tests)

Yoshimi TANAKA, Masahiko KYOYA, Takaharu TOKUNAGA\* and Takuya MORI\*

Department of Nuclear Ship Engineering  
Mutsu Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Mutsu-shi, Aomori-ken

(Received February 1, 1991)

Present report is described about the effect of pitching and rolling on "MUTSU" reactor power.

Using the vertical gyro and the acceleration detectors, we measured pitching and rolling in addition to physical quantities from the nuclear reactor instrumentations on a voyage for N.S."MUTSU" Power-Up Tests. This data was used to apply a multivariable autoregressive model to analyze the correlations between pitching-angle, rolling-angle, steam flow (load), neutron flux (power) and primary coolant temperature.

Concerning reactor kinetics, we got a result that the pitching and rolling have no effect on primary coolant temperature and neutron flux. It is found that the frequencies at high coherence between load and power is lower and separate from the frequencies at the pitching and rolling. The pitching and rolling mainly depend on the size, weight and position of center of gravity of the ship, on the other hand the load-follow characteristics depend on the load and heat capacities of primary loop and secondary loop of the reactor. For this reason we interprete that the design of reactor and ship of N.S."MUTSU" match well each other.

Keywords: MUTSU, Power-Up Tests, Reactor Noise Analysis, MAR Model, Pitching, Rolling, Reactor Power, Primary Coolant Temperature, Steam Flow, Heat Capacity

---

\* Sumisyo Electronics Co., Ltd.

## 目 次

1. 序 文 .....	1
2. 計 測 .....	2
2.1 検出器の概要 .....	2
2.1.1 圧力伝送器及び差圧伝送器 .....	2
2.1.2 中性子束検出器 .....	2
2.1.3 加速度計 .....	3
2.1.4 動搖計測装置 .....	3
2.2 データ収録装置 .....	3
2.3 プラント運転状態 .....	4
3. 時系列解析とその評価 .....	5
3.1 原子炉動特性解析 .....	7
3.1.1 中性子束 .....	7
3.1.2 一次冷却水温度と中性子束 .....	7
3.1.3 蒸気流量と中性子束 .....	8
3.2 船体動搖解析 .....	8
3.3 原子炉動特性と船体動搖に関する解析 .....	9
3.3.1 蒸気流量と船体動搖 .....	9
3.3.2 一次冷却水温度と船体動搖 .....	11
3.3.3 中性子束と船体動搖 .....	11
4. 結 論 .....	12
4.1 検出器出力 .....	12
4.2 原子炉動特性 .....	13
謝 辞 .....	14
参考文献 .....	14
付録 蒸気流量, 紙水流量, ローリング角度及びピッティング角度に関する解析 .....	55

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Measurements .....	2
2.1 Outline of Detectors .....	2
2.1.1 Pressure Transmitters and Differential Pressure Transmitters .....	2
2.1.2 Neutron Flux Detectors .....	2
2.1.3 Acceleration Detectors .....	3
2.1.4 Detectors of Pitching and Rolling .....	3
2.2 Data Recording Equipments .....	3
2.3 Plant Operating Condition .....	3
3. Time Series Analysis and Evaluation .....	5
3.1 Analysis of Reactor Kinetics .....	7
3.1.1 Neutron Flux .....	7
3.1.2 Primary Coolant Temperature and Neutron Flux .....	7
3.1.3 Steam Flow and Neutron Flux .....	8
3.2 Analysis of Pitching and Rolling .....	8
3.3 Analysis of Reactor Kinetics, Pitching and Rolling .....	9
3.3.1 Steam Flow, Pitching and Rolling .....	9
3.3.2 Primary Coolant Temperature, Pitching and Rolling .....	11
3.3.3 Neutron Flux, Pitching and Rolling .....	11
4. Conclusions .....	12
4.1 Detector Outputs .....	12
4.2 Reactor Kinetics .....	13
Acknowledgement .....	14
References .....	14
Appendix Analysis of Steam Flow, Feed Water Flow, Pitching Angle and Rolling Angle .....	55

## 1. 序 文

「むつ」の実験航海の目的のひとつは、「海洋環境下における動搖が原子炉に与える影響に関する知見を得る」ことである。実験航海に先立ち、出力上昇試験のデータを用いて、海洋環境下における動搖が原子炉に与える影響を評価することにより、計測及び解析上の問題点を摘出し、解決することができる。また、事前に総括的な解析評価を行うことによって、実験航海における目標をさらに具体的に設定し、より深い研究を行うことが可能となる。

本報告は、出力上昇試験における原子力航海中に収録した計装データを対象とした時系列（炉雑音）解析及びその評価を行い、船体動搖が原子炉出力にどのような影響を与えていているかについて述べたものである。

計測データは、原子炉プラントの制御・計装盤から取り出した信号と、船体動搖を計測するために設置した各種の検出器から得た信号とを、原子力船「むつ」に搭載したデータ処理装置の炉雑音及び異常診断用収録系統によって収録したものである。時系列解析は多変数自己回帰モデルによるものとし、陸上はもちろん「むつ」船上においても計算ができるよう、パーソナルコンピュータ上で作動する解析コードを本解析のために開発した。このコードを用いて、第一次航海中船上において炉外中性子束検出器の出力に関する特徴及び給水制御系の様相を把握することができ、以後の信号収録及び時系列解析に大きく寄与した。

時系列解析によって、海洋環境下における原子炉プラントの制御計装信号を仔細に調べると、船体動搖が機械的な作用によって検出器出力を影響に与えていることが明かとなった。この場合、本来の検出物理量に加えて、物理現象にまったく起因しない変動が検出器出力に混入する。この現象の解明は本報告の直接の目的ではないが、結論を導くためには、本当の物理量変動と機械的な作用によるみかけの検出器出力変動とを区別することが不可欠であるため、結果として多くの労力をこの作業に費やすこととなった。

以後、第2章では時系列データの計測、第3章で時系列解析とその評価について記述し、さらにこれらを総括的にまとめて、第4章で結論を述べる。

過去に行われた原子力船の炉雑音解析に関しては、次の報告がなされている。

サバンナ号では、原子炉出力（中性子電離箱からの電流値）について、パワースペクトル密度の海域静穩度による相違を測定し、初期の出力運転時における原子炉プラントの安定性を調査した。<sup>1)</sup>

オットハーン号では、FDR（自己加圧一体型原子炉）に対する波浪及び加速度の影響が種々の航路、出合波角度、海象条件において測定、研究された。<sup>2) 3)</sup>

## 2. 計測

時系列解析に用いるデータは、原子力船「むつ」に搭載したデータ処理装置の炉雑音及び異常診断用収録系統によって収録したものである。この系統には、合計64チャンネルの信号が入力されており、その内訳はTable 1に示すとおり、原子炉プラント内の主要な物理量を検出し、信号処理を行った制御・計装信号、格納容器内主要機器及び船体上甲板に設置した加速度信号、船体上甲板の曲げ歪信号、動揺計測装置（ジャイロ）による船体傾斜に係わる計測信号、船首と船尾に設置した波高計による波浪に係わる計測信号である。Table 1には以後用いる信号の略号について併せて記載した。

### 2.1 検出器の概要

#### 2.1.1 圧力伝送器及び差圧伝送器

「むつ」の原子炉プラント内で蒸気発生器圧力、加圧器圧力、蒸気発生器（SG）水位、加圧器水位、（蒸気発生器出口）蒸気流量、給水流量及び一次冷却水流量を検出するために使用されている圧力伝送器及び差圧伝送器は力平衡型である。<sup>4)</sup> このタイプはFig. 1にその検出原理を示すように、ベローズを受圧素子とする圧力検出器DF<sub>1</sub>、DF<sub>2</sub>は圧力に比例した力を十字バネを支点（F）とするビーム（B）に与える。差動変圧器（D）はビーム上に取り付けられた差動変圧器のコア（C）の変位を検出し、数KHzで変調された偏移信号が増幅整流されて直流信号となり、これが負荷抵抗（R<sub>L</sub>）を介して直流電圧出力として取り出される。同時に、この直流電流が復元コイル（C<sub>F</sub>）に流れ、電磁石Mとの間に電流に比例した電磁復原力を生じ、ビームを平衡位置に戻す。増幅器は十分大きなゲインをもっているので、わずかなオフセットで平衡になり、ベローズはほとんど変化せず、従って、直線性はきわめて良好で、ヒステリシスもほとんどない精度の高い圧力計である。反面、ビーム、コア等の可動部がもっている慣性のため、振動、動揺等の加速度影響を受けやすく、また、動的特性は他の形式に比べて劣る面がある。

圧力検出器を一つ使用するときはゲージ圧力を、二つ使用するときは差圧を測定することになる。

さらに、「むつ」の蒸気流量計は絞り部としてフローノズルを用い、その前後から検出配管により各々の圧力をコンデンシングポットに導き、コンデンシングポット間の差圧を差圧伝送器により電気信号に変換する（Fig. 2参照）。このため、船体動揺によって二つのコンデンシングポット間に生じた上下の位置差が水頭差となり、差圧伝送器のベローズに加わる。蒸気流量計の場合には、上記の差圧伝送器の特性に加えて、船体動揺による水頭差が信号出力変動の原因となっている。

#### 2.1.2 中性子束検出器

「むつ」の中性子束検出器（NI-7, NI-8, NI-9及びNI-10）はFig. 3に示すように、

圧力容器外周の一次遮蔽体内にある中性子束検出器保持装置案内管（以後案内管と略す）中を中性子束検出器保持装置（以後保持装置と略す）によって吊り下げられている。保持装置は圧力容器の頂部において、フランジで固定され、約4m下方に検出器本体を保持している。4体の炉外中性子検出器はFig. 3に示すように90°ずつずれた対角に配置されている。炉外中性子束検出器のうち、NI-7及びNI-8は非補償型電離箱（UIC）であり、NI-9及びNI-10は補償型電離箱（CIC）である。

### 2.1.3 加速度計

船体の加速度を測定するために、Fig. 4に示すように、船首から船尾にかけて上甲板上の6カ所に7個の歪みゲージ式加速度計を設置している。検出方向は、A3のみ左舷方向（を正の出力とする、以下同様）で、他は上方向である。格納容器内の圧力容器、No.2蒸気発生器、加圧器及び格納容器内壁には、3軸に組み合わせた加速度計をFig. 5（平面図）及びFig. 6（立面図）に示すように設置した。格納容器内の加速度計は容器表面及び周囲温度が高温となるため、歪ゲージ式に比べて動作温度が高いサーボ式を採用した。Fig. 5（平面図）に示すように、圧力容器、No.2蒸気発生器、加圧器については、加速度検出方向は各容器の上（Z）方向、中心（R）方向及び左回り周（θ）方向である。また、格納容器の加速度検出方向は高さ（Z）方向、船尾方向及び右舷方向である。なお、No.2蒸気発生器のθ方向及び加圧器のR方向は船尾方向に一致し、No.2蒸気発生器のR方向は左舷方向、加圧器のθ方向は右舷方向に一致している。

一次冷却水ポンプの上端に設置している静電容量器型の3軸加速度センサーは、一次冷却水ポンプの振動を監視するためのものである。制御室内の振動監視盤によって、振動の変位あるいは加速度をスイッチにより切り替えて読みとることができる。データ処理装置に導かれている信号はこの振動監視盤から分岐した両振幅変位である。

### 2.1.4 動揺計測装置

「むつ」の動揺計測装置は、パーティカルジャイロとレートジャイロ及びサーボ型2軸加速度計を組み合わせたものであり、これを制御室床下に設置している。パーティカルジャイロにより、船体の縦揺れ（ピッキング）角度及び横揺れ（ローリング）角度を計測する。また、レートジャイロは船体の回頭角速度を計測する。サーボ型2軸加速度計は、パーティカルジャイロの水平面上に据えられており、船体の傾斜に影響されない、正味の前後方向及び左右方向加速度を計測する。

## 2.2 データ収録装置

原子力船「むつ」データ処理装置の炉雑音及び異常診断用収録系統による信号の処理及び収録の概要をFig. 7に示す。計装信号は、制御室内の各種の制御・計装盤及びデータロガー端子台から分岐され、アイソレーション・アンプを経た後、信号前処理回路によって直流成分の除去及びゆらぎ成分の增幅を行い、エリアシングによる影響を除くためのアンチエリニアシング・フィルタを通過して、アナログ・ディジタル・コンバータによってAD変換が行われる。アンチエリニアシング・フィルターの減衰域特性は60dB/oct.であり、アナログ・ディジタル・コンバータの

分解能は 12 bits である。船体運動計測信号は直流成分がわずかであるため、アイソレーション・アンプを経た後、信号前処理回路を通らず、直接アンチエリニアシング・フィルタによって処理された後、アナログ・ディジタル・コンバータによって AD 変換が行われる。ディジタル値となったデータは、収録中にアナログ・ディジタル・コンバータからミニコンピュータのハードディスクに蓄えられ、収録終了後にハードディスクからさらに電磁テープに書き込まれ、記録される。磁気テープに収められた時系列データは信号の選定、時間範囲の選定等の編集を行った後、エミュレーション・プログラムを実行することにより、パーソナル・コンピュータへ MS-DOS ファイルの形式で出力することができる。

## 2.3 プラント運転状態

本解析に使用した時系列データは以下に示す、第 2 次航海中の平成 2 年 10 月 7 日における、原子力航海中のプラント状態が安定している時に収録したものである。収録した時系列データのプロットを Fig. 8 に示す。制御・計装信号については、信号前処理回路によって直流成分の除去及びゆらぎ成分の增幅を行っているため、縦軸のスケールを任意にとって示している。この時の主要なプラント状態は、以下に示すとおりであった。

- ・原子炉出力 : 約 99 %
- ・一次冷却系圧力 : 約 110 kg/cm<sup>2</sup>G
- ・一次冷却水平均温度 : 約 273°C
- ・加圧器水位 : 約 43 %
- ・蒸気発生器水位 : 約 70 %
- ・蒸気発生器内圧力 : 約 40 kg/cm<sup>2</sup>G
- ・制御棒位置 CR 1 : 655 mm (全挿入位置からの引抜距離)
- ・制御棒位置 CR 2 : 639 mm (全挿入位置からの引抜距離)
- ・制御棒位置 CR 3 : 653 mm (全挿入位置からの引抜距離)
- ・制御棒位置 CR 4 : 652 mm (全挿入位置からの引抜距離)
- ・制御棒位置 CR 5 ~ CR 12 : 全引抜

また、自動制御系の状況は、以下に示すとおりであった。

- ・原子炉出力自動制御系 : 自動 (但し、時系列データの収録中、制御棒の駆動は行われていない。)
- ・加圧器圧力制御系 : 自動 (但し、ヒータ出力を一定とし、スプレイによる圧力の制御を行った。)
- ・加圧器水位制御系 : 自動
- ・蒸気発生器給水制御系 : 自動

なお、Fig. 8 に示した信号の時系列データを観察すると、制御棒位置、一次冷却水ポンプ振動変位及び給水流量には時系列解析対象としての適合性に問題があると考えられる。

まず、制御棒位置はセルシンを使用した遠隔指示計によるものであるが、機構上の特徴 (精度)

と考えられる 0.2 mm 程度のステップ的な変動が存在する。なお、No. 3 制御棒位置にはこの収録時間内でこのようなステップ的な変動が観察されなかったため、縦軸のスケールが他の制御棒位置に較べて大きくなっている。

一次冷却水ポンプ振動変位は、信号が正方向には大きな振幅が存在する一方で、負方向には一定の限度があるよう見受けられる。これは、一次冷却水ポンプの支持固定のための機械的拘束が振動変位方向を制限しているためと考えられる。

給水流量は蒸気発生器水位、給水流量等の変動が給水流量制御系内で一定周期の繰り返し変動を生じたためと考えられる様相を呈し、スペクトルは単一のピークとなる。このため、時系列解析結果にはいわゆるクロストーク現象が生じ、正しい結果を得ることが困難となる。

### 3. 時系列解析とその評価

はじめに多変数自己回帰モデル (Multivariable Autoregressive Model, 以後 MAR モデルと略す) による時系列解析に用いられる用語について、簡略に記述する。<sup>5)</sup>

一定時間間隔毎に観測される信号データの系列  $[Y(k); k = 1, N]$  を考えることにする。但し、 $Y(k)$  は  $r$  種のプロセス変量を表すベクトル  $Y(k) = [Y_1(k), Y_2(k), \dots, Y_r(k)]'$  であり、 $k$  はデータのサンプリング間隔を単位とした時間を表している。 $'$  は転置を示す。この時、 $Y(k)$  の各成分が、それ自身または他の成分の過去の値に影響され、互いに線形な関係を持つものと仮定し、すなわち以下のように記述できるものとする。

$$Y(k) = \sum_{m=1}^p A(m)Y(k-m) + V(k) \quad (1)$$

ここで、 $A(m)$  は AR 係数行列であり、また、 $V(k)$  は数学的には残差であり、物理的には変数  $Y(k)$  のゆらぎの駆動源である。 $V(k)$  は次式を満たす。

$$E[V(k)] = 0 \quad (2)$$

$$E[V(j)V(k)] = Q \delta_{jk} \quad (3)$$

ここで  $Q$  は残差項  $V(k)$  の共分散行列の推定値である。なお、 $E[\cdot]$  は数学的な期待値を計算する操作を示す。

$p$  は AR 次数と呼ばれ、どのくらいまで過去にさかのぼるかを示すパラメータである。

時系列  $Y(k)$  のスペクトル行列表現は、次のように与えられる。

$$S_{YY}(f) = [A(f)^{-1}] Q [A(f)^{-1}]^* \quad (4)$$

ここで、 $*$  は複素共役を示す。また、 $A(f)$  は  $A(m)$  より以下のように求められる。

$$A(f) = \sum_{m=1}^p A(m) \exp(-j 2\pi f m \Delta t) \quad (5)$$

但し、 $\Delta t$  はサンプリング間隔であり、 $f$  は周波数 (Hz) である。 $S_{YY}(f)$  は  $(r, r)$  行列であり、その  $(i, i)$  要素  $s_{ii}(f)$  は変数  $y_i(k)$  の自己パワースペクトル密度 (以後 APDS と略す)、また  $(i, j)$  要素  $s_{ij}(f)$  は変数  $y_i(k)$  と  $y_j(k)$  の相互パワースペクトル

と考えられる 0.2 mm 程度のステップ的な変動が存在する。なお、No. 3 制御棒位置にはこの収録時間内でこのようなステップ的な変動が観察されなかったため、縦軸のスケールが他の制御棒位置に較べて大きくなっている。

一次冷却水ポンプ振動変位は、信号が正方向には大きな振幅が存在する一方で、負方向には一定の限度があるよう見受けられる。これは、一次冷却水ポンプの支持固定のための機械的拘束が振動変位方向を制限しているためと考えられる。

給水流量は蒸気発生器水位、給水流量等の変動が給水流量制御系内で一定周期の繰り返し変動を生じたためと考えられる様相を呈し、スペクトルは単一のピークとなる。このため、時系列解析結果にはいわゆるクロストーク現象が生じ、正しい結果を得ることが困難となる。

### 3. 時系列解析とその評価

はじめに多変数自己回帰モデル (Multivariable Autoregressive Model, 以後 MAR モデルと略す) による時系列解析に用いられる用語について、簡略に記述する。<sup>5)</sup>

一定時間間隔毎に観測される信号データの系列  $[Y(k); k = 1, N]$  を考えることにする。但し、 $Y(k)$  は  $r$  種のプロセス変量を表すベクトル  $Y(k) = [Y_1(k), Y_2(k), \dots, Y_r(k)]'$  であり、 $k$  はデータのサンプリング間隔を単位とした時間を表している。 $'$  は転置を示す。この時、 $Y(k)$  の各成分が、それ自身または他の成分の過去の値に影響され、互いに線形な関係を持つものと仮定し、すなわち以下のように記述できるものとする。

$$Y(k) = \sum_{m=1}^p A(m)Y(k-m) + V(k) \quad (1)$$

ここで、 $A(m)$  は AR 係数行列であり、また、 $V(k)$  は数学的には残差であり、物理的には変数  $Y(k)$  のゆらぎの駆動源である。 $V(k)$  は次式を満たす。

$$E[V(k)] = 0 \quad (2)$$

$$E[V(j)V(k)] = Q \delta_{jk} \quad (3)$$

ここで  $Q$  は残差項  $V(k)$  の共分散行列の推定値である。なお、 $E[\cdot]$  は数学的な期待値を計算する操作を示す。

$p$  は AR 次数と呼ばれ、どのくらいまで過去にさかのぼるかを示すパラメータである。

時系列  $Y(k)$  のスペクトル行列表現は、次のように与えられる。

$$S_{YY}(f) = [A(f)^{-1}] Q [A(f)^{-1}]^* \quad (4)$$

ここで、 $*$  は複素共役を示す。また、 $A(f)$  は  $A(m)$  より以下のように求められる。

$$A(f) = \sum_{m=1}^p A(m) \exp(-j 2\pi f m \Delta t) \quad (5)$$

但し、 $\Delta t$  はサンプリング間隔であり、 $f$  は周波数 (Hz) である。 $S_{YY}(f)$  は  $(r, r)$  行列であり、その  $(i, i)$  要素  $s_{ii}(f)$  は変数  $y_i(k)$  の自己パワースペクトル密度 (以後 APDS と略す)、また  $(i, j)$  要素  $s_{ij}(f)$  は変数  $y_i(k)$  と  $y_j(k)$  の相互パワースペクトル

密度（以後CPSDと略す）である。APSDは $y_i(k)$ の周波数 $f$ におけるゆらぎ成分の強度を示し、信号の統計的な性質を表す最も基本的で重要な特性量である。

CPSDは複素量であるため、その絶対値と位相に着目して次の二つの特性量が計算される。

$$r_{ij}^2(f) = \frac{|s_{ij}(f)|^2}{s_{ii}(f)s_{jj}(f)} \quad (6)$$

$$\phi(f) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[s_{ij}(f)]}{\text{Re}[s_{ij}(f)]} \quad (7)$$

$r_{ij}(f)$ はコヒーレンスと呼ばれ、 $y_i(k)$ と $y_j(k)$ の周波数 $f$ における変動の相關の度合いを示し、 $0 \leq r_{ij} \leq 1$ である。 $r_{ij}$ が1に近いほど信号間の変動の関連性が強いことを示している。 $\phi(f)$ は位相と呼ばれ、 $y_i(k)$ と $y_j(k)$ の間の時間的なズレを、各周波数 $f$ における位相差角度で表現したものである。

MARモデルの大きなメリットとして、着目するAPSDを様々な雑音源からの寄与の和の形に分解評価できることが挙げられる。

残差の共分散行列の推定値 $Q$ が次の形を持つものとする。

$$Q = \text{diag}[q_{11}, q_{22}, \dots, q_{rr}] \quad (8)$$

ここで $\text{diag}$ は行列の対角項を表している。(8)式を言い換えれば

$$q_{ij} = E[V_i(k)V_j(k)] = 0 \quad (\text{for all } i \neq j) \quad (9)$$

である。すると、スペクトル行列の $(i, i)$ 要素は次のように書き直せる。

$$s_{ii}(f) = \sum_{j=1}^r |\{A(f)^{-1}\}_{ij}|^2 q_{jj} \quad (i = 1, 2, \dots, r) \quad (10)$$

この表現は、信号 $y_i$ のAPSDが $r$ 個の雑音源 $q_{jj}$ からの寄与の和で表されることを意味している。ここで雑音寄与率（Noise Power Contribution、以後NPCと略す）を次式で定義する。

$$\Gamma_{ij}(f) = \frac{|\{A(f)^{-1}\}_{ij}|^2 q_{jj}}{s_{ii}(f)} \quad (i = 1, 2, \dots, r) \quad (11)$$

定義から明らかに $0 \leq \Gamma_{ij}(f) \leq 1$ である。 $\Gamma_{ij}(f)$ が1に近いとき、信号 $y_i$ のゆらぎの主要原因は駆動雑音源 $V_j$ であることになる。

解析の目的は船体動搖が原子炉出力に及ぼす影響について、収録した時系列データに含まれている情報を抽出することである。本報告では、具体的に原子炉への影響評価を行う際の対象とする物理量として、中性子束及び一次冷却水温度を選択し、負荷外乱を示す物理量として、SG出口の蒸気流量を選択する。そのため、まず上記の物理量に対応する「むつ」原子炉の制御・計装信号について時系列解析を行い、信号の自己パワースペクトル密度、信号間のコヒーレンス、位相等を求め、周波数成分の分布及び相関について解析結果を示し、「むつ」原子炉の負荷追従特性を把握する。次に、船体及び格納容器内主要機器の加速度とローリング角度、ピッティング角度を用いた時系列解析結果によって、航走中に原子炉がおかれた動搖状態について述べる。船体動搖と原子炉の主要な物理量間の相関は、ローリング角度、ピッティング角度と蒸気流量、中性子束

及び一次冷却水温度について時系列解析を行い、信号間のコヒーレンス、位相及び雑音寄与率の結果を用いて評価する。

時系列解析は多変数自己回帰モデルによるものとし、陸上はもちろん「むつ」船上においても計算ができるよう、パーソナルコンピュータ上で作動するコードを本解析のために開発した。このコードには、解析結果の評価が容易に行えるよう結果をデータベース・ファイルとして処理し、保存、読み出、比較表示、出力等の機能を附加した。

### 3.1 原子炉動特性解析

#### 3.1.1 中性子束

炉外中性子束検出器信号（以後特記する場合を除き、「検出器信号」を省略する。他の信号についても同様である）のAPSDをNI-7及びNI-8についてFig.9に示し、NI-9及びNI-10についてFig.10に示す。各々の信号のAPSDは互いに非常に良く似ており、最も低周波数域から約 $5 \times 10^{-3}$ Hzまではゆるやかに低下し、約 $5 \times 10^{-3}$ Hzから低下の勾配が増し、さらに高周波数になるにつれて、基本的には $1/f$ （周波数）形でAPSDは低下していくが、約 $8.5 \times 10^{-2}$ Hz及び約 $2 \times 10^{-1}$ Hzにおいてピークとなる凸形の成分をふくんでいる。

対角に位置する検出器信号間のコヒーレンスは、Fig.11（NI-7 VS. NI-8及びNI-9 VS. NI-10）に示すように、低周波数域及び高周波数域において約0.8以上の高い値となり、その間に $7 \times 10^{-2}$ Hz～ $8 \times 10^{-2}$ Hzをピークとするコヒーレンスの低下がある。

対角に位置する検出器信号間の位相は、Fig.12（NI-7 VS. NI-8及びNI-9 VS. NI-10）に示すように、コヒーレンスの高い周波数域では同位相である。

炉外中性子束が高い値のコヒーレンスを有するとともに、同位相である周波数領域は低域及び高域にあり、物理的には炉心平均中性子束の挙動が炉外中性子束検出器によって検出されたものと考えられる。APSDにおいて、約 $8.5 \times 10^{-2}$ Hz及び約 $2 \times 10^{-1}$ Hzにおいてピークとなる凸形の成分をなす領域は、コヒーレンスの低下及び位相が同位相でなくなることから、炉心平均中性子束の挙動とは異なるメカニズムによって、炉外中性子束検出器信号を変動させているものと考えられる。この現象については、3.3.3項において考察する。

#### 3.1.2 一次冷却水温度と中性子束

ここでは、一次冷却水温度を代表する信号としてNo.1ループのホットレグ温度（T-HOT 1）を選び、また、炉外中性子束を代表する信号としてNI-7を選択した。T-HOT 1とNI-7に関するAPSD及びコヒーレンスの計算結果をFig.13及びFig.14に示す。T-HOT 1のAPSDは基本的な $1/f$ 形に加えて、約 $2 \times 10^{-1}$ Hzにおいてピークとなる凸形の成分を含んでいる。両信号間のコヒーレンスは約 $1 \times 10^{-2}$ Hzより低周波数域において0.4を越えており、約 $3 \times 10^{-2}$ Hzより高周波数域においては、相関がないと考えられる値である。両信号間に有為な相関が存在する領域（約 $1 \times 10^{-2}$ Hzより低周波数域）において、位相は逆位相である。

出力上昇試験における減速材温度係数の測定結果は、一次冷却水温度が273°C近辺において $-56\text{PCM}/\text{°C}$  ( $10^{-5}\Delta k/k/\text{°C}$ )であった。この減速材温度係数は、一次冷却水中にボロン

をいれてケミカルシム制御を行っている陸上PWRの減速材温度係数と比較して、より絶対値が大きな負の値である。従って、この計算結果は物理的には炉内中性子束に対する水の減速材反応度フィードバック効果を示しているものと考えられる。一次冷却水温度が低下すると、一次冷却水の密度が増加するため、炉内中性子のスペクトルが軟化し、より多くの核分裂が発生する。原子炉動特性の観点では、一次冷却水温度が変化し、原子炉出力変動を惹起する周波数領域は、約  $1 \times 10^{-2}$  Hz より低周波数に限られていることが「むつ」の特性として挙げられる。

### 3.1.3 蒸気流量と中性子束

SG出口において検出されている、No. 1 ループ蒸気流量（STEAMFLOW 1）及び No. 2 ループ蒸気流量（STEAMFLOW 2）が直接に負荷を示す信号である。炉外中性子束を代表する信号として NI - 7 を選択し、No. 1 ループ蒸気流量及び No. 2 ループ蒸気流量の APSD とともに示した図が Fig.15 である。蒸気流量の APSD は No. 1 ループと No. 2 ループとでほとんど相違がなく、基本的な  $1/f$  形に加えて、約  $8 \times 10^{-2}$  Hz においてピークとなる凸形の成分並びに約  $1.5 \times 10^{-2}$  Hz においてピークとなる凸形の成分を含んでいる。Fig.16 に示すように、NI - 7 と No. 1 ループ蒸気流量の両信号間のコヒーレンスは約  $8 \times 10^{-2}$  Hz より低周波数域において 0.4 近傍である。約  $1 \times 10^{-2}$  Hz から約  $4 \times 10^{-2}$  Hz にかけてコヒーレンスは急激に減少してほぼ零となった後、再び急激に増加して約  $8 \times 10^{-2}$  Hz において極大値約 0.4 のピークを形成し、さらに高周波数域においては、相関がないと考えられる値にまで低下する。約  $1 \times 10^{-2}$  Hz より低周波数域の両信号間に有為な相関が存在する領域において、位相は同位相である。一方、約  $8 \times 10^{-2}$  Hz におけるコヒーレンスのピークは原子炉動特性とはまったく異なる、検出器の機械的なメカニズムによるものと考えられる。この現象は本報告の直接的なテーマではないが、結論を導くためには解明が不可欠であるため、3.3.3 項において考察する。

No. 2 ループ蒸気流量と NI - 7 の間の時系列解析結果は、先に述べた No. 1 ループ蒸気流量と NI - 7 の間のコヒーレンスと位相の解析結果とほとんど同じものである。

約  $1 \times 10^{-2}$  Hz より低周波数域におけるこの計算結果は、物理的には炉内中性子束すなわち原子炉出力の負荷追従性を示している。負荷すなわち蒸気流量の増加は、一次冷却水温度の低下をもたらし、減速材反応度フィールドバック効果によって、原子炉内外の中性子束を増加させることとなる。蒸気流量と中性子束に関するこの解釈は、一次冷却水温度と炉外中性子束に関するコヒーレンス及び位相の解析結果とも整合している。

## 3.2 船体動揺解析

航行中の船体運動はいずれの方向にも自由度をもっているため、実際にはローリングのないピッティングはありえず、また、ピッティングのないローリングもありえない。従って、動揺計測装置（パーティカルジャイロ）で計測されるローリング角度及びピッティング角度は、船体の傾斜をローリング方向とピッティング方向にベクトル分解したものとなっている。計測結果から船体動揺の独立なモードを抽出するためには、ローリング角度とピッティング角度の 2 信号の時系列解析結果を利用する。Fig.17 及び Fig.18 が APSD とコヒーレンスの結果であり、両者の比較から、

- ・ピッティングが主体となっている船体動揺周波数：約  $5 \times 10^{-2}$  Hz（基本モード）
  - ：約  $1.5 \times 10^{-1}$  Hz（高次モード）
  - ：約  $2.4 \times 10^{-1}$  Hz（高次モード）
- ・ローリングが主体となっている船体動揺周波数：約  $8 \times 10^{-2}$  Hz（基本モード）
  - ：約  $2.8 \times 10^{-1}$  Hz（高次モード）

と考えられる。上記の約  $5 \times 10^{-2}$  Hz～約  $2.8 \times 10^{-1}$  Hz の周波数帯を以後船体動揺周波数帯と呼ぶこととする。

ローリング角度と上甲板上の左右方向加速度 A 3 に関する APSD の解析結果を Fig.19 に、コヒーレンスの解析結果を Fig.20 に示す。約  $8 \times 10^{-2}$  Hzにおいてコヒーレンスが約 1.0 にも達しており、この解析結果からも、約  $8 \times 10^{-2}$  Hz がローリングの基本モードであると判断できる。約  $2 \times 10^{-1}$  Hz 及び約  $3 \times 10^{-1}$  Hz のピークは高次モードであると考えられる。

ピッティング角度と上甲板上の船首付近上下方向加速度 A 1 に関する APSD の解析結果を Fig.21 に、コヒーレンスの解析結果を Fig.22 に示す。解析結果から、約  $5 \times 10^{-2}$  Hzにおいてコヒーレンスが約 0.8 に達しており、これがピッティングの基本モードであると判断できる。より高い周波数における複数のピークからなると思われる幅広のピークは高次モードであると考えられる。

別途行った有限要素法による振動解析結果によれば、一次冷却系を構成する容器、配管、支持構造物及び格納容器の固有振動周波数は最も低いもので数十 Hz であり、先に述べたローリング、ピッティングの周波数域よりも十分に高い。従って、一次冷却系を構成する容器、配管、支持構造物及び格納容器は船体に対して剛体として結合されていると判断でき、ローリング、ピッティングの周波数域においては、原子炉を構成する機器が受ける加速度は、船体のその場所における加速度で表現できると考えられる。実際、例えばローリング角度と格納容器内壁船体左右方向加速度 (CV-WING) に関する APSD 及びコヒーレンスの解析結果は Fig.23 及び Fig.24 に示すように、ローリング角度と上甲板上の左右方向加速度 A 3 に関する解析結果 (Fig.19 及び Fig.20 参照) にはほぼ同等である。また、格納容器内にあり、同じく船体左右方向を検出方向とする加圧器円周方向加速度 (PZER-θ) とローリング角度に関する APSD 及びコヒーレンスの解析結果も Fig.25 及び Fig.26 に示すように、ローリング角度と上甲板上の左右方向加速度 A 3 に関する解析結果 (Fig.19 及び Fig.20 参照) にはほぼ同等である。

### 3.3 原子炉動特性と船体動揺に関する解析

#### 3.3.1 蒸気流量と船体動揺

船体動揺が蒸気流量に影響を与えるか否かを調べるために、No. 1 ループ蒸気流量とローリング角度及びピッティング角度について解析した結果を Fig.27 及び Fig.28 に示す。Fig.28 は No. 1 ループ蒸気流量対ローリング角度及び No. 1 ループ蒸気流量対ピッティング角度のコヒーレンスを示したものである。約  $8 \times 10^{-2}$  Hz で No. 1 ループ蒸気流量対ローリング角度のコヒーレンスは 0.74 に達し、この周波数で強い相関がある。一方 No. 1 ループ蒸気流量対ピッティング角度のコヒーレンスは約  $5 \times 10^{-2}$  Hz、約  $8 \times 10^{-2}$  Hz 及び約  $1.5 \times 10^{-2}$  Hz に、値は比較的小さいものの、ピークが認められる。これらのピークはいずれも前節で述べたローリング、ピッティ

グの船体動揺周波数に一致している。

次に No. 1 ループ蒸気流量、ローリング角度及びピッキング角度に関する雑音寄与率の解析結果を Fig.29 ~ Fig.31 に示す。雑音寄与率の図は、1番（下側）の線の高さが対象とする物理量の APSD に対する 1 番の物理量からの寄与割合を示し、1番と 2番（上側）の線の間が対象とする物理量 APSD に対する 2 番の物理量からの寄与割合を示す。残り（縦軸の 1.0 から 2 番の線の間）は、対象物理量自身のゆらぎによる寄与である。従って、Fig.29 は No. 1 ループ蒸気流量の船体動揺周波数域における変動が、主としてローリングによって引き起こされたものであることを示している。

Fig.30 は、約  $1.5 \times 10^{-1}$  Hz 及び約  $2.4 \times 10^{-1}$  Hz におけるローリングがピッキングによって駆動されていることを示しており、この周波数の船体動揺がピッキングを主体としたものであること（3.2 節参照）と整合している。Fig.31 は、約  $8 \times 10^{-2}$  Hz におけるピッキングがローリングを原因とするものであることを示しており、この周波数の船体動揺がローリングを主体としたものであること（3.2 節参照）と整合している。No. 1 ループ蒸気流量とローリング角度、ピッキング角度に関する船体動揺周波数における相関は、2.1.1 項で述べたように、船体動揺によって二つのコンデンシングポット間に水頭差が生じるため並びに差圧伝送器のビーム、コア等の可動部が動揺によって加速度、傾斜等の機械的な影響を受けるために、蒸気流量計の出力が変動したためであることが雑音寄与率の結果から裏付けることができた。

蒸気発生器への給水流量が、No. 1, No. 2 ともに約  $1.5 \times 10^{-1}$  Hz で周期的に変化しているため、主給水制御弁前後の差圧が一定となるよう主給水ポンプガバナ弁開度及び主給水ポンプターピンへ入る蒸気流量も周期的に変化しているものと考えられる。従って、SG 出口蒸気流量も約  $1.5 \times 10^{-1}$  Hz の周波数で実際に変動している可能性があるものの、原子炉出力約 100 %において収録したデータでは、先に述べた船体動揺周波数と重なり、蒸気流量計が受ける機械的な影響との区別ができない。また、この出力では給水流量があまりに規則的な変動を示したため、解析結果にクロストーク現象が生じた。原子炉出力約 50 %で航行中には、このような支障が生じなかつたので、この時のデータを使用して、蒸気流量、給水流量、ローリング角度及びピッキング角度に関する解析結果を付録にまとめた。

付録において、蒸気流量は明らかに給水流量、ローリング、ピッキングの 3 信号によって駆動されたことが示されている。船体動揺周波数域において、蒸気流量が給水流量による寄与を受けているという事実は、先に述べたように給水流量変動を原因として、主給水制御弁前後の差圧が一定となるよう、主給水ポンプターピンガバナ制御により、主給水ポンプターピンへ入る蒸気流量が制御されたためと考えられる。また、約  $10^{-2}$  Hz 以下の低周波数域においては、給水流量変動が蒸気流量の変動を原因とするものであることが示され、給水制御系の特徴である 3 要素（蒸気発生器水位、蒸気流量及び給水流量）制御のうち、蒸気流量に対する追随性が確認された。さらに、蒸気流量計、給水流量計に対するローリング、ピッキングによる機械的影響も付録の解析によって再確認されている。給水流量変動の主原因は、船体動揺による蒸気発生器水位の変動にあると考えられるが、給水制御系に関する検討については今後別途報告することとしたい。

蒸気流量変動は、原子炉プラントの制御機構に起因するものであるため、炉出力約 100 %の状態でも、給水流量が周期的に変動していた事実を勘案すると、船体動揺周波数域において蒸気流

量が給水流量による寄与を受けて実際に変動していたことは確実である。

しかしながら、一次冷却水温度と炉外中性子束に関する解析の結果から、一次冷却水温度が変化し、原子炉出力変動を惹起する周波数領域は約  $1 \times 10^{-2}$  Hz より低周波数域に限られているため、このように蒸気流量が約  $1.5 \times 10^{-1}$  Hz の周波数で変動していても、一次冷却水温度変動を通して中性子束に影響を与えていなかったことは明らかである。

### 3.3.2 一次冷却水温度と船体動揺

船体動揺が一次冷却水温度に影響を与えるか否かを調べるために、No. 1 ループのホットレグ温度 (T - HOT 1) とローリング角度及びピッキング角度について解析した結果を Fig.32 及び Fig.33 に示す。Fig.33 は No. 1 ループホットレグ温度対ローリング角度及び No. 1 ループホットレグ温度対ピッキング角度のコヒーレンスを示したものであり、有意な相関はない。従って、船体動揺は一次冷却水温度に影響を与えていない。

### 3.3.3 中性子束と船体動揆

炉外中性子束の代表として NI - 7 及び NI - 9 を選び、各々とローリング角度、ピッキング角度について解析した結果を Fig.34 ~ Fig.37 に示す。NI - 7 はローリング角度に対して、約  $8 \times 10^{-2}$  Hz (基本モード) に高いコヒーレンスのピークがあり、より高い周波数域にも低い値のコヒーレンスがある。NI - 9 もローリング角度に対して、約  $8 \times 10^{-2}$  Hz (基本モード) に高いコヒーレンスのピークがあり、さらに約  $1.5 \times 10^{-1}$  Hz にもコヒーレンスのピークがある。上記の結果は、NI - 7, NI - 9 ともにローリング角度に対して明らかな相関があることを示している。一方、NI - 7, NI - 9 ともにピッキング角度との間のコヒーレンスの値は低く、明確な相関はみられない。

船体動揆の周波数帯において、中性子束が一次冷却水温度の変化による影響を受けていないことは、3.1.2 項の一次冷却水温度と炉外中性子束の時系列解析結果より明らかである。

位相については、Fig.38 及び Fig.39 に示すように、NI - 7, NI - 9 は左舷上がりを正の方向とするローリング角度に対して、船体動揆の周波数帯においてほぼ逆位相であり、また、NI - 8, NI - 10 はローリング角度に対して同位相である。すなわちローリングにより炉心に対して位置が下方となった検出器の信号出力が減り、位置が上方となった検出器の信号出力が増えている。船体の傾斜と炉外中性子束検出器の出力の間の因果関係をもたらす経路としては次の二つが考えられる。

- 船体の傾斜に伴って、たとえば中性子束検出器（電離箱）を収めた中性子束検出器保持装置案内管が下部一次遮蔽タンクに設けられた中性子検出孔内でわずかな変位を生じるなどして、その結果炉外中性子束検出器付近の中性子束勾配に従って中性子束検出器出力電流が変動する。
- 船体の傾斜に伴って、炉内で制御棒（翼部の吸収体被覆管直径 8 mm）が上部炉心板及び下部炉心板の制御棒通過穴（翼部において幅 10 mm）の中を移動することが考えられる。この場合、炉心では隣あう燃料集合体の側板によって形成されるギャップ内を制御棒が傾斜方向に移動する。その結果炉内外の中性子束分布が変動し、炉外中性子束検出器の出力を変

動させる

しかし、b)の場合には、制御棒の揺れの固有振動数は約  $5 \times 10^{-2}$  Hz と計算されるので、制御棒が船体動搖によって揺られた場合、上部炉心板及び下部炉心板の制御棒通過穴の端に突き当たる。この場合、基本モードにおける炉外中性子束検出器信号とローリング角度の線形性は失われると同時に、さらに炉外中性子束検出器信号中にローリングの基本モード以外の高次モードも存在しなくなるはずである。しかし、NI-7 及び NI-9 とローリング角度に関する解析結果では約  $8 \times 10^{-2}$  Hz の基本モードより高い周波数域にもコヒーレンスがあり、炉外中性子束検出器信号にローリングの高次モードとの相関がある。この理由から、b)が炉外中性子束検出器出力のゆらぎの原因とは考え難く、検証はできないものの、a)あるいはこれに類する、船体動搖から検出器への機械的な作用が、炉外中性子束検出器出力のゆらぎの原因になっているものと推定される。

先に蒸気流量と炉外中性子束に関する解析について述べた 3.1.3 項において、船体動搖周波数域で 2 信号間にコヒーレンスのピークがある点について言及した。そこで、炉外中性子束、蒸気流量、ローリング角度及びピッキング角度の 4 信号について雑音寄与率を解析した結果を Fig. 40～Fig. 43 に示す。なお炉外中性子束を代表する信号としては NI-7 及び NI-9 を選定した。この結果から、船体動搖周波数域における炉外中性子束信号及び蒸気流量信号の変動は船体動搖を原因とするものであり、蒸気流量信号から炉外中性子束信号への寄与あるいは炉外中性子束信号から蒸気流量への寄与はないことが確認された。これは蒸気流量計、炉外中性子束検出器とともに、船体動搖から検出器への機械的な作用が検出器出力に影響を与えたことを裏付けている。従って、3.1.3 項において蒸気流量と炉外中性子束の間に表れたコヒーレンスのピーク (Fig. 16 参照) は、船体動搖が蒸気流量計及び炉外中性子束検出器の双方へ機械的な作用によって影響を与えた結果、あたかもこの 2 信号に物理的な相関が存在するかのような変動が加わったためであると推論できる。

## 4. 結論

### 4.1 検出器出力

いくつかの計装系に関わるトラブルは経験したもの、出力上昇試験を完遂したことから実証されるように、「むつ」原子炉の計装系は、原子炉を運転するために必要な機能が設計通りに備えられていることが確認されている。一方、船体動搖による計装系への影響を評価すると、船体動搖は機械的な作用によって、各種の検出器の出力に変動を与えている状況が確認できる。負荷を示す蒸気流量の検出器である蒸気流量計は、絞り部としてフローノズルを用い、その前後から検出配管により各々の圧力をコンデンシングポットに導き、コンデンシングポット間の差圧を力平衡型差圧伝送器により電気信号に変換する (Fig. 2 参照)。このため、船体動搖によって二つのコンデンシングポット間に生じた上下の位置差が水頭差となり、差圧伝送器のベローズに加わ

動させる

しかし、b)の場合には、制御棒の揺れの固有振動数は約  $5 \times 10^{-2}$  Hz と計算されるので、制御棒が船体動搖によって揺られた場合、上部炉心板及び下部炉心板の制御棒通過穴の端に突き当たる。この場合、基本モードにおける炉外中性子束検出器信号とローリング角度の線形性は失われると同時に、さらに炉外中性子束検出器信号中にローリングの基本モード以外の高次モードも存在しなくなるはずである。しかし、NI-7 及び NI-9 とローリング角度に関する解析結果では約  $8 \times 10^{-2}$  Hz の基本モードより高い周波数域にもコヒーレンスがあり、炉外中性子束検出器信号にローリングの高次モードとの相関がある。この理由から、b)が炉外中性子束検出器出力のゆらぎの原因とは考え難く、検証はできないものの、a)あるいはこれに類する、船体動搖から検出器への機械的な作用が、炉外中性子束検出器出力のゆらぎの原因になっているものと推定される。

先に蒸気流量と炉外中性子束に関する解析について述べた 3.1.3 項において、船体動搖周波数域で 2 信号間にコヒーレンスのピークがある点について言及した。そこで、炉外中性子束、蒸気流量、ローリング角度及びピッキング角度の 4 信号について雑音寄与率を解析した結果を Fig. 40 ~ Fig. 43 に示す。なお炉外中性子束を代表する信号としては NI-7 及び NI-9 を選定した。この結果から、船体動搖周波数域における炉外中性子束信号及び蒸気流量信号の変動は船体動搖を原因とするものであり、蒸気流量信号から炉外中性子束信号への寄与あるいは炉外中性子束信号から蒸気流量への寄与はないことが確認された。これは蒸気流量計、炉外中性子束検出器とともに、船体動搖から検出器への機械的な作用が検出器出力に影響を与えたことを裏付けている。従って、3.1.3 項において蒸気流量と炉外中性子束の間に表れたコヒーレンスのピーク (Fig. 16 参照) は、船体動搖が蒸気流量計及び炉外中性子束検出器の双方へ機械的な作用によって影響を与えた結果、あたかもこの 2 信号に物理的な相関が存在するかのような変動が加わったためであると推論できる。

## 4. 結 論

### 4.1 検出器出力

いくつかの計装系に関わるトラブルは経験したもの、出力上昇試験を完遂したことから実証されるように、「むつ」原子炉の計装系は、原子炉を運転するために必要な機能が設計通りに備えられていることが確認されている。一方、船体動搖による計装系への影響を評価すると、船体動搖は機械的な作用によって、各種の検出器の出力に変動を与えている状況が確認できる。負荷を示す蒸気流量の検出器である蒸気流量計は、絞り部としてフローノズルを用い、その前後から検出配管により各々の圧力をコンデンシングポットに導き、コンデンシングポット間の差圧を力平衡型差圧伝送器により電気信号に変換する (Fig. 2 参照)。このため、船体動搖によって二つのコンデンシングポット間に生じた上下の位置差が水頭差となり、差圧伝送器のベローズに加わ

る。蒸気流量計の場合には、ビーム、コア等の可動部がもっている慣性のため、動搖の影響を受けやすいという力平衡型差圧伝送器の特性に加えて、船体動搖による水頭差が信号出力変動の一因となっている。一方で主給水ポンプガバナ弁開度が周期的に変化していたため、蒸気流量は船体動搖周波数帯で実際に変動していたはずであるが、100%出力航行中のデータからは、蒸気流量計が受ける機械的な影響との区別はできなかった。しかし、50%出力航行中のデータから、船体動搖周波数域において上記の船体動搖による機械的な作用に加えて、給水流量からの寄与による実際の蒸気流量変動が確認された。

船体動搖は炉外中性子束検出器出力にも変動をもたらしている。その経路としては、船体の傾斜に伴って、たとえば中性子束検出器（電離箱）を収めた中性子束検出器保持装置案内管が下部一次遮蔽タンクに設けられた中性子検出孔内でわずかな変位を生じるなどの機械的作用により、炉外中性子束検出器付近の中性子勾配に従って中性子束検出器出力電流が変動するといった事象が考えられる。

#### 4.2 原子炉動特性

船体動搖が原子炉に及ぼす影響について、原子炉出力約100%で航行中に収録した時系列データの解析評価を行った。その結果は総括的に以下のようにまとめられる。

約 $1 \times 10^{-2}$ Hzより低周波数域において、負荷すなわち蒸気流量の変動は一次冷却水温度の変化をもたらし、減速材反応度フィードバック効果によって原子炉内外の中性子束を変化させていることが確認された。

船体動搖は基本モードのピッキング、ローリングの他にこれらの運動の高次モード含んでおり、それぞれ以下に示す周波数における動搖が認められた。

- ピッキングが主体となっている船体動搖周波数：約 $5 \times 10^{-2}$ Hz（基本モード）
  - 約 $1.5 \times 10^{-1}$ Hz（高次モード）
  - 約 $2.4 \times 10^{-1}$ Hz（高次モード）
- ローリングが主体となっている船体動搖周波数：約 $8 \times 10^{-2}$ Hz（基本モード）
  - 約 $2.8 \times 10^{-1}$ Hz（高次モード）

ここで、原子炉出力の負荷追従特性が示されている周波数域と船体動搖周波数帯を比較するため、熱水力的な現象に基づくと考えられる、A) NI-7とNo.1ループ蒸気流量の間のコヒーレンス、B) NI-7とNo.1ループホットレグ温度の間のコヒーレンス及びC) ローリング角度とピッキング角度の間のコヒーレンスをFig.44に示す。原子炉出力の負荷追従特性が顕著な領域は約 $1 \times 10^{-2}$ Hzより低周波数域であり、船体動搖周波数帯から低域側に分離している。このため、負荷が船体動搖によって変動していたが、その周波数は高すぎて、船体動搖は原子炉の主要な動特性である負荷から中性子束への物理的な因果関係（原子炉出力の減速材反応度フィードバック効果による負荷追従特性）に影響を与えることができなかった。船体動搖周波数は、船体の大きさ、重量、重心位置等の設計に強く依存するものであり、また、原子炉出力の負荷追従特性は、原子炉プラントの熱容量と負荷量に関連が深く、この意味で「むつ」は船体と原子炉のバランスが良く、船体動搖が原子炉に影響を与えていく設計となっているといえる。

謝 辞

本報告作成に際しては、東北大学工学部原子核工学科助教授、北村正晴氏のご指導を頂きました。また、日本原子力研究所「むつ」出力上昇試験プロジェクトメンバーの方々には、出力上昇試験の貴重なデータを得る機械を与えて頂きました。中でも原子力船技術部試験課長 落合政昭氏、同課長代理 石田紀久氏には、収録装置及び船体運動計測装置の設備段階から上司として御協力頂きました。

ここに皆様に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Batch M. L. and Ball R. M. "Use of Noise Analysis to Measure Reactor Stability on N. S .SAVANNAH," Trans. Am. Nuclear Soc., 5 : No.1,175 (June 1962).
- 2) Bendat J. S. and Piersol A. G. "Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis," Wiley, New York 1980.
- 3) Kolb M. "Rauschanalytische Identifikation des Systems See/ Schiff/ Reaktor am Beispiel der "OTTO HAHN'," Verlag Karl Thiemicg, Munchen 1983
- 4) 流体計測法 日本機械学会 昭和60年8月 P.14
- 5) Upadhyaya B. R., Kitamura M. and Kerlin T.W. "Multivariate Signal Analysis Algorithms for Process Monitoring and Parameter Estimation in Nuclear Reactors" Annals of Nuclear Energy, 7,1 (1980)

## 謝 辞

本報告作成に際しては、東北大学工学部原子核工学科助教授、北村正晴氏のご指導を頂きました。また、日本原子力研究所「むつ」出力上昇試験プロジェクトメンバーの方々には、出力上昇試験の貴重なデータを得る機械を与えて頂きました。中でも原子力船技術部試験課長 落合政昭氏、同課長代理 石田紀久氏には、収録装置及び船体運動計測装置の設備段階から上司として御協力頂きました。

ここに皆様に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) Batch M. L. and Ball R. M. "Use of Noise Analysis to Measure Reactor Stability on N. S .SAVANNAH," Trans. Am. Nuclear Soc., 5 : No.1,175 (June 1962).
- 2) Bendat J. S. and Piersol A. G. "Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis," Wiley, New York 1980.
- 3) Kolb M. "Rauschanalytische Identifikation des Systems See/Shiff/Reaktor am Beispiel der "OTTO HAHN'," Verlag Karl Thiemicg, Munchen 1983
- 4) 流体計測法 日本機械学会 昭和60年8月 P.14
- 5) Upadhyaya B. R., Kitamura M. and Kerlin T.W. "Multivariate Signal Analysis Algorithms for Process Monitoring and Parameter Estimation in Nuclear Reactors" Annals of Nuclear Energy, 7,1 (1980)

Table 1 データ処理装置の炉雑音及び異常診断用収録信号の一覧 (1 / 4)

No	信号略号	信号	センサ形式
1	HP1PRES	主機タービン高圧1段落圧力	静電容量型
2	T-COLD1	No.1ループコールドレグ温度	抵抗温度計
3	T-COLD2	No.2ループコールドレグ温度	抵抗温度計
4	T-HOT1	No.1ループホットレグ温度	抵抗温度計
5	T-HOT2	No.2ループホットレグ温度	抵抗温度計
6	NI-7	出力領域 炉外中性子束検出器出力 NI-7	U I C
7	NI-8	出力領域 炉外中性子束検出器出力 NI-8	U I C
8	NI-9	出力領域 炉外中性子束検出器出力 NI-9	C I C
9	NI-10	出力領域 炉外中性子束検出器出力 NI-10	C I C
10	CR-1	No.1 制御棒位置	セルシン発信器
11	CR-2	No.2 制御棒位置	セルシン発信器
12	CR-3	No.3 制御棒位置	セルシン発信器
13	CR-4	No.4 制御棒位置	セルシン発信器
14	SG1-PRES	No.1 蒸気発生器蒸気圧力	力平衡型
15	SG2-PRES	No.2 蒸気発生器蒸気圧力	力平衡型
16	MCP1-Z	No.1 一次冷却水ポンプ上下方向振動変位	静電容量型
17	MCP1-X	No.1 一次冷却水ポンプ吐出方向振動変位	静電容量型
18	MCP1-Y	No.1 一次冷却水ポンプ対吐出直角方向振動変位	静電容量型
19	MCP2-Z	No.2 一次冷却水ポンプ上下方向振動変位	静電容量型

Table 1 データ処理装置の炉雑音及び異常診断用収録信号の一覧 (2 / 4)

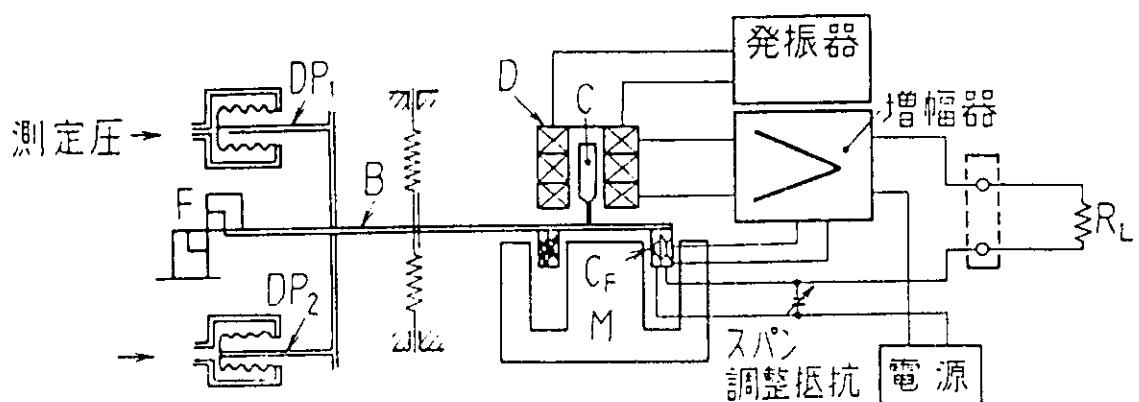
No	信号略号	信号	センサ形式
20	MCP2-X	No.2 一次冷却水ポンプ吐出方向振動変位	静電容量型
21	MCP2-Y	No.2 一次冷却水ポンプ対吐出直角方向振動変位	静電容量型
22	PZER-PRES	加圧器圧力	力平衡型
23	PZER-LEVL1	加圧器水位 MC-26	力平衡型
24	PZER-LEVL2	加圧器水位 MC-27	力平衡型
25	LOOP1-FLOW	No.1ループ一次冷却水流量	力平衡型
26	LOOP2-FLOW	No.2ループ一次冷却水流量	力平衡型
27	STEAMFLOW1	No.1ループ蒸気流量	力平衡型
28	STEAMFLOW2	No.2ループ蒸気流量	力平衡型
29	FW-FLOW1	No.1ループ給水流量	力平衡型
30	FW-FLOW2	No.2ループ給水流量	力平衡型
31	SG1-LEVEL	No.1蒸気発生器狭域水位	力平衡型
32	SG2-LEVEL	No.2蒸気発生器狭域水位	力平衡型
33	ROLL-ANGL	船体ローリング角度	ジャイロ
34	PITCH-ANGL	船体ピッティング角度	ジャイロ
35	YAW-RATE	船体ヨーイング角速度	ジャイロ
36	WING-ACC	ジャイロ水平面左右方向加速度	サーボ型
37	FORD-ACC	ジャイロ水平面前後方向加速度	サーボ型
38	RPV-Z	圧力容器上下方向加速度	サーボ型

Table 1 データ処理装置の炉雑音及び異常診断用収録信号の一覧（3／4）

No	信号略号	信号	センサ形式
39	RPV-R	圧力容器半径方向加速度 (船首方向に対し、左舷側に38.4度傾く)	サーボ型
40	RPV-θ	圧力容器円周方向加速度 (船尾方向に対し、左舷側に51.6度傾く)	サーボ型
41	SG2-Z	No.2蒸気発生器上下方向加速度	サーボ型
42	SG2-R	No.2蒸気発生器半径方向加速度(左舷方向)	サーボ型
43	SG2-θ	No.2蒸気発生器円周方向加速度(船尾方向)	サーボ型
44	PZER-Z	加圧器上下方向加速度	サーボ型
45	PZER-R	加圧器半径方向加速度(船尾方向)	サーボ型
46	PZER-θ	加圧器円周方向加速度(右舷方向)	サーボ型
47	CV-Z	格納容器上下方向加速度	サーボ型
48	CV-FORD	格納容器内壁 船体前後方向加速度	サーボ型
49	CV-WING	格納容器内壁 船体左右方向加速度	サーボ型
50	BOW-POS	船首上下変位	マイクロ波波高計
51	BOW-RADERW	船首レーダ波高	マイクロ波波高計
52	BOW-WAVE-H	船首実波高	マイクロ波波高計
53	ST-POS	船尾上下変位	マイクロ波波高計
54	ST-WAVE-H	船尾実波高	マイクロ波波高計
55	A1	上甲板上下加速度 A1	歪ゲージ型
56	A2	上甲板上下加速度 A2	歪ゲージ型
57	A3	上甲板左右加速度 A3	歪ゲージ型

Table 1 データ処理装置の炉雑音及び異常診断用収録信号の一覧 (4 / 4)

No	信号略号	信号	センサ形式
58	A4	上甲板上下加速度 A4	歪ゲージ型
59	A5	上甲板上下加速度 A5	歪ゲージ型
60	A6	上甲板上下加速度 A6	歪ゲージ型
61	A7	上甲板上下加速度 A7	歪ゲージ型
62	S1	上甲板曲げ歪 S1	歪ゲージ
63	S4	上甲板曲げ歪 S4	歪ゲージ
64	S8	上甲板曲げ歪 S8	歪ゲージ



DP <sub>1</sub> , DP <sub>2</sub> 圧力検出器	C コア
B ビーム	R <sub>L</sub> 負荷抵抗
F 支点	C <sub>F</sub> 復元コイル
D 差動変圧器	M 電磁石

Fig. 1 力平衡式圧力伝送器の原理

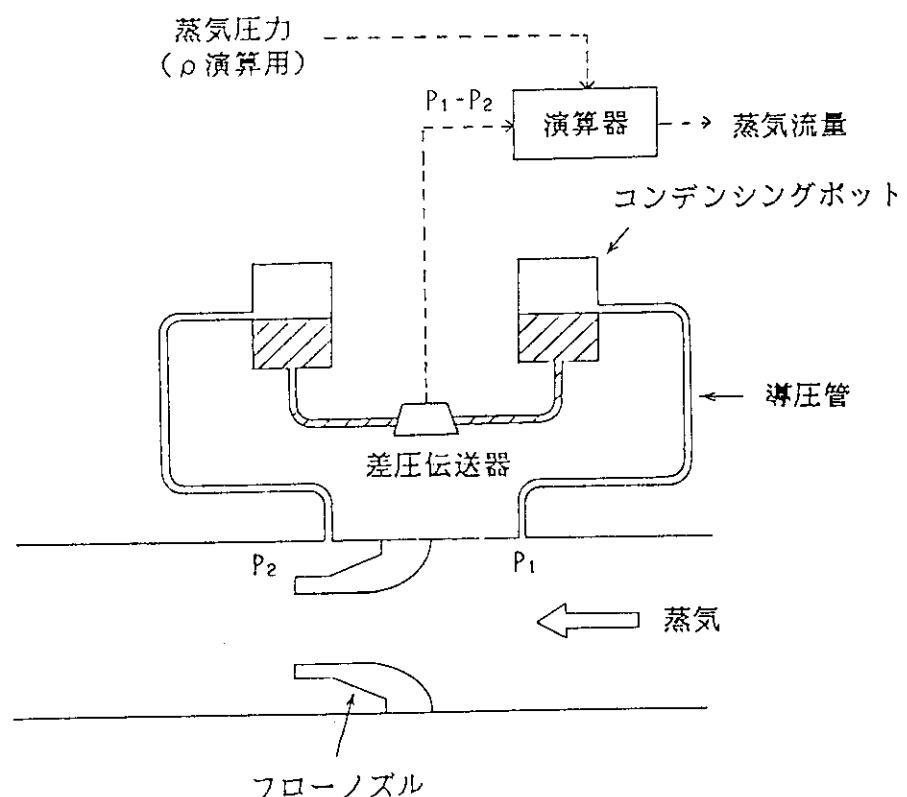


Fig. 2 蒸気流量測定系の構成

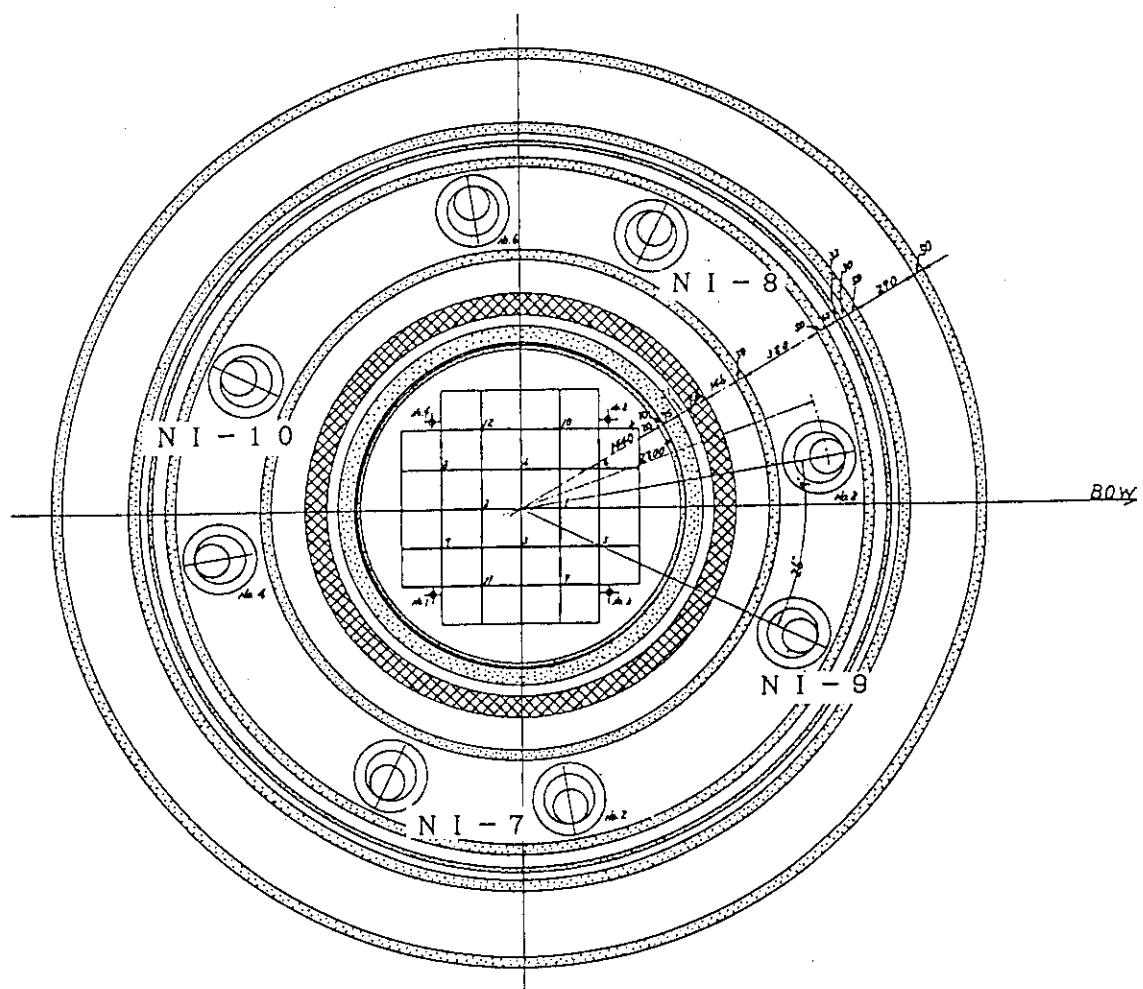
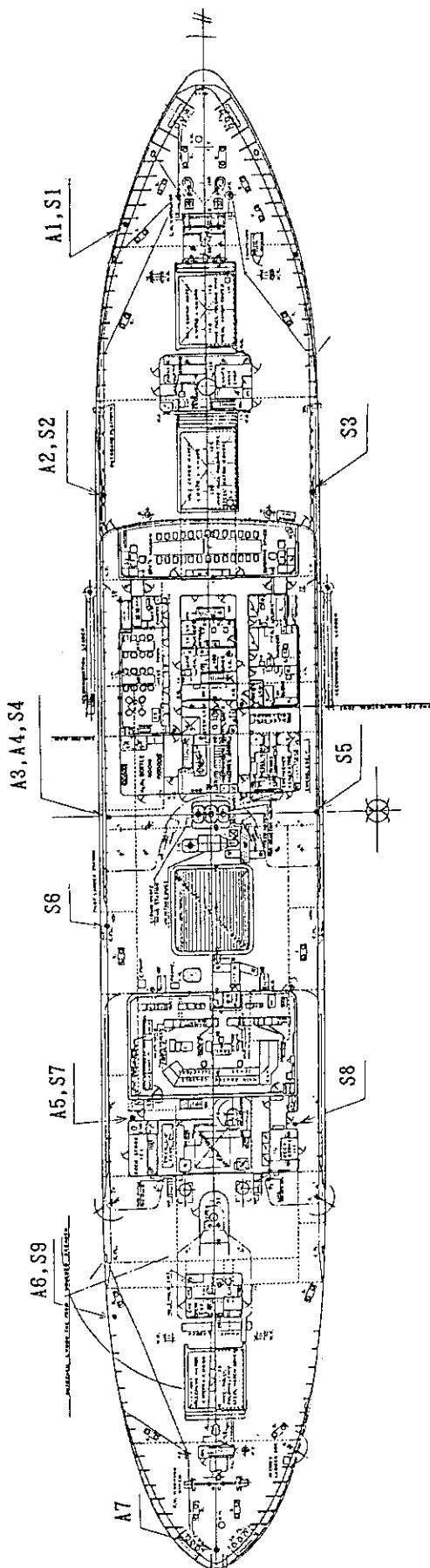


Fig. 3 炉外中性子束検出器の配置



A1～A7:上甲板加速度計  
S1～S9:上甲板曲げ歪ゲージ

Fig. 4 加速度計及び歪ゲージの船内配置

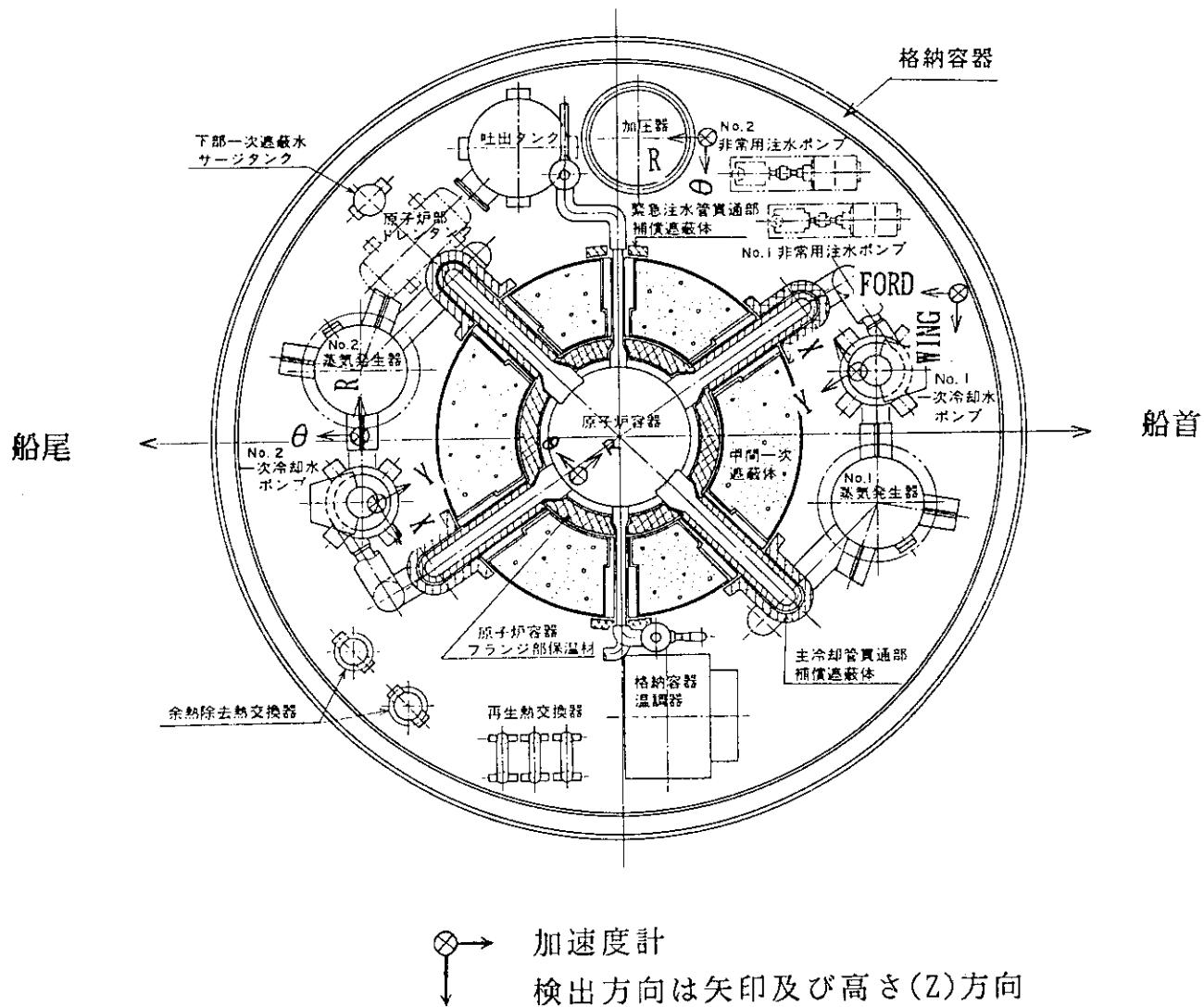


Fig. 5 格納容器内の加速度計配置 (平面図)

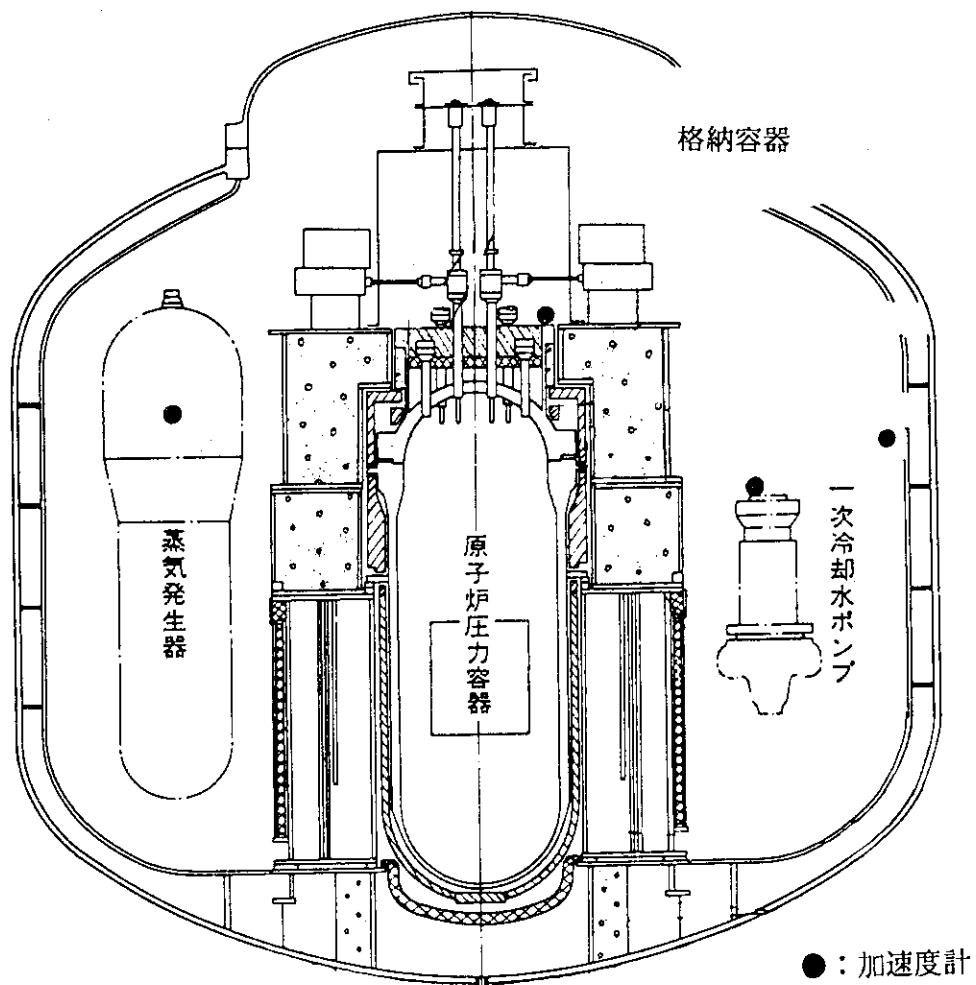


Fig. 6 格納容器内の加速度計配置（立面図）

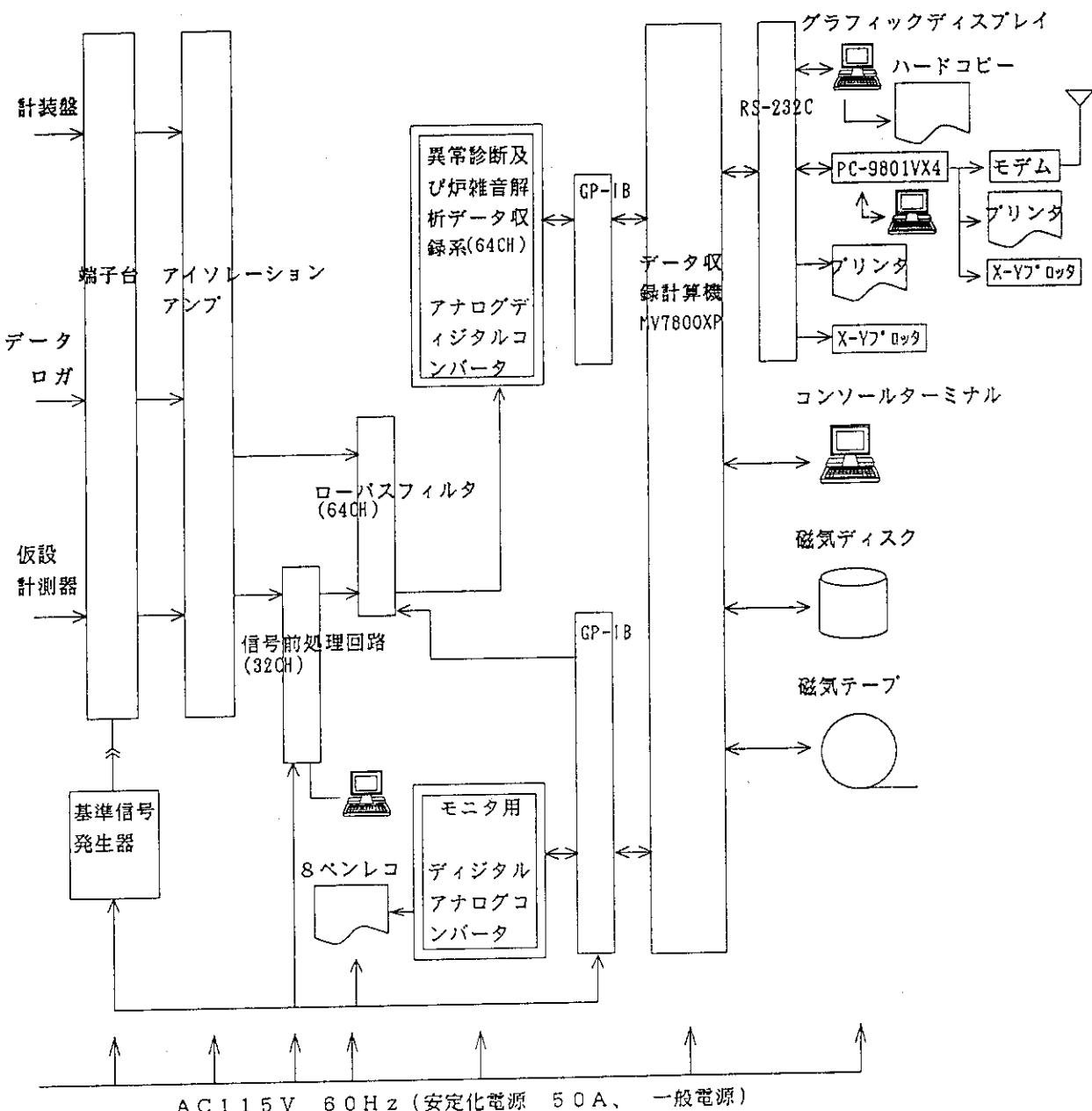


Fig. 7 原子力「むつ」データ処理装置の炉雑音及び異常診断用収録システムによる信号処理及び収録の概要

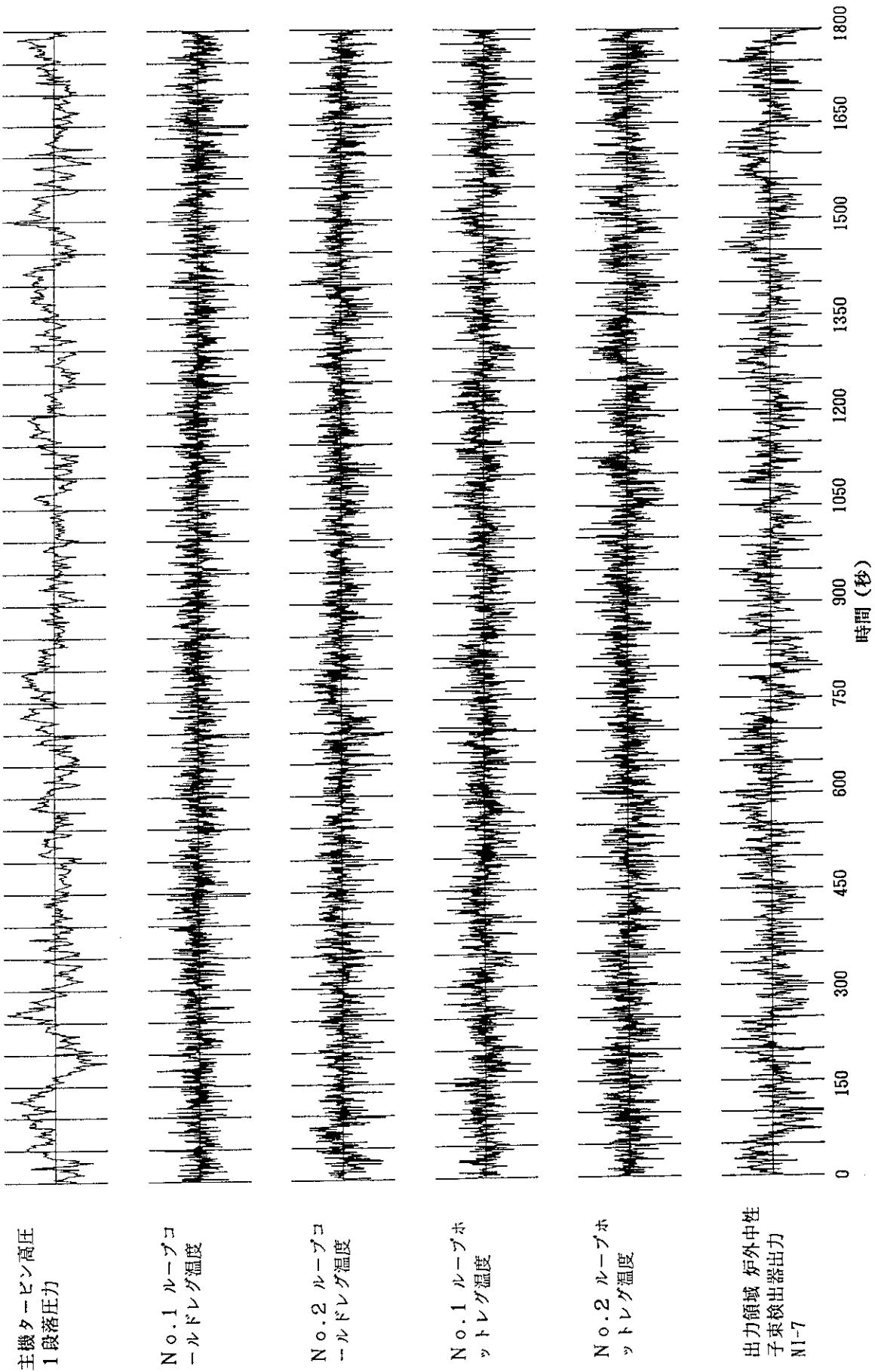


Fig. 8 収録時系列データのプロット (1/10)

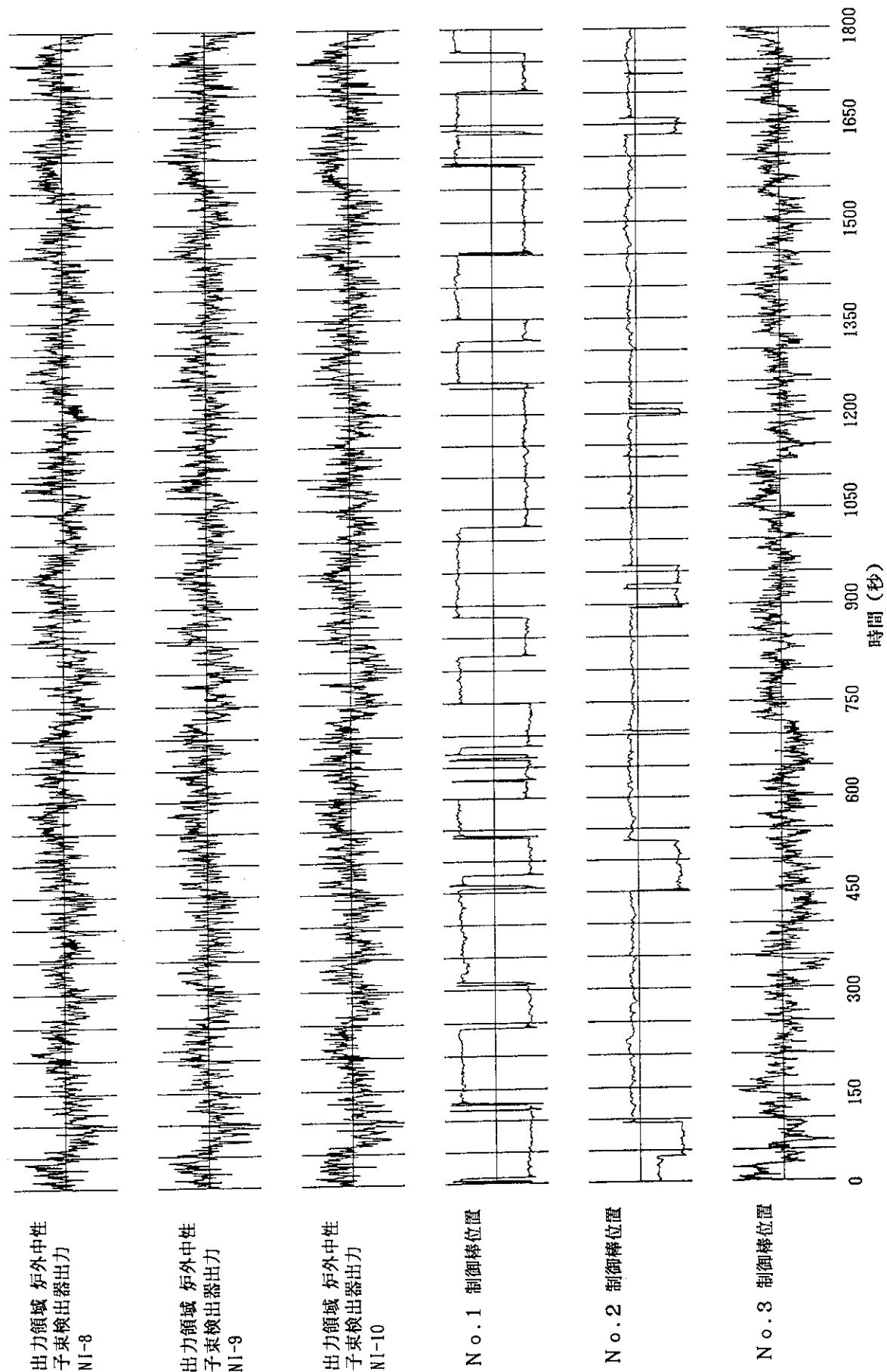


Fig. 8 収録時系列データのプロット (2 / 10)

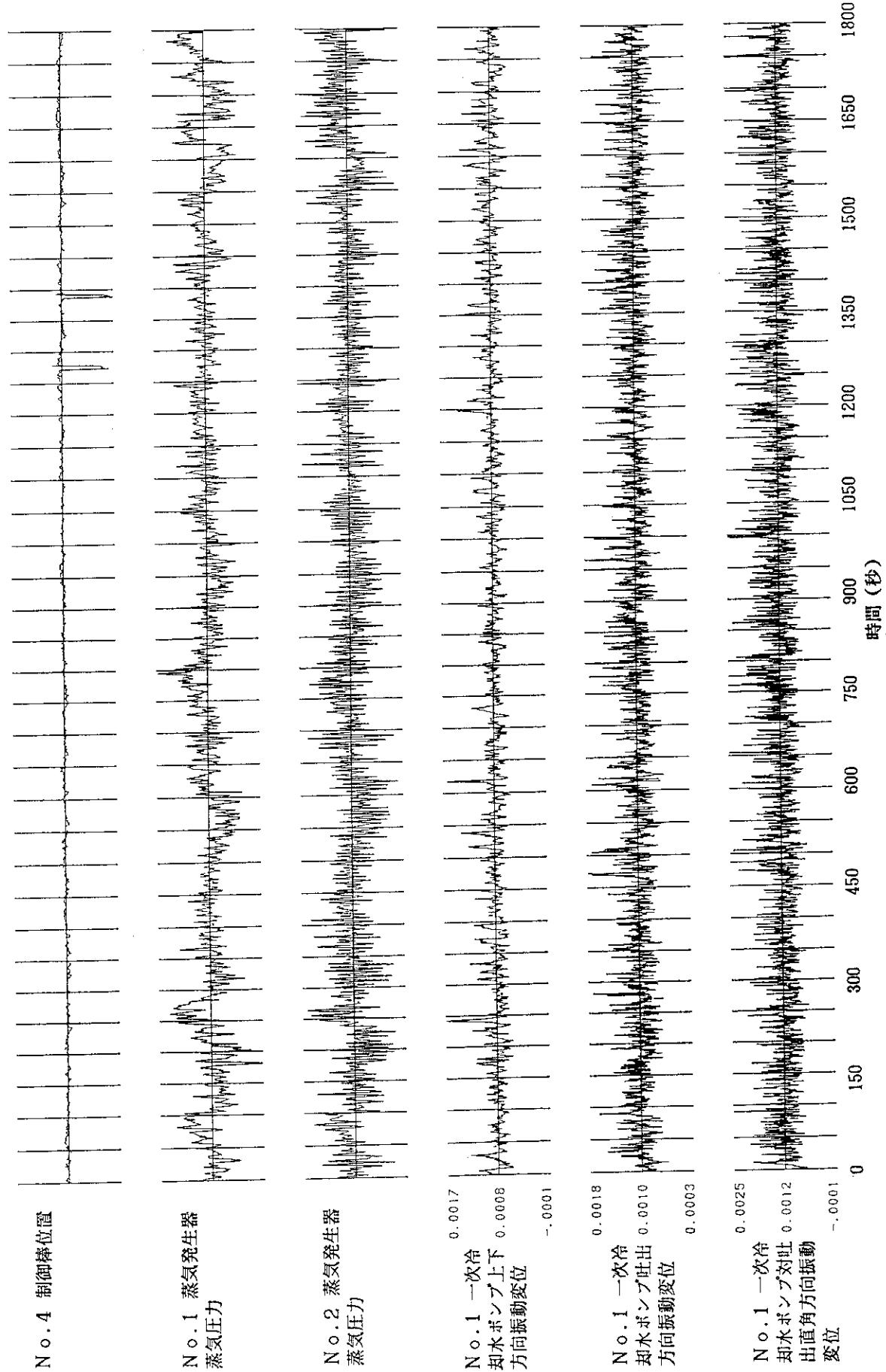


Fig. 8 収録時系列データのプロット (3/10)

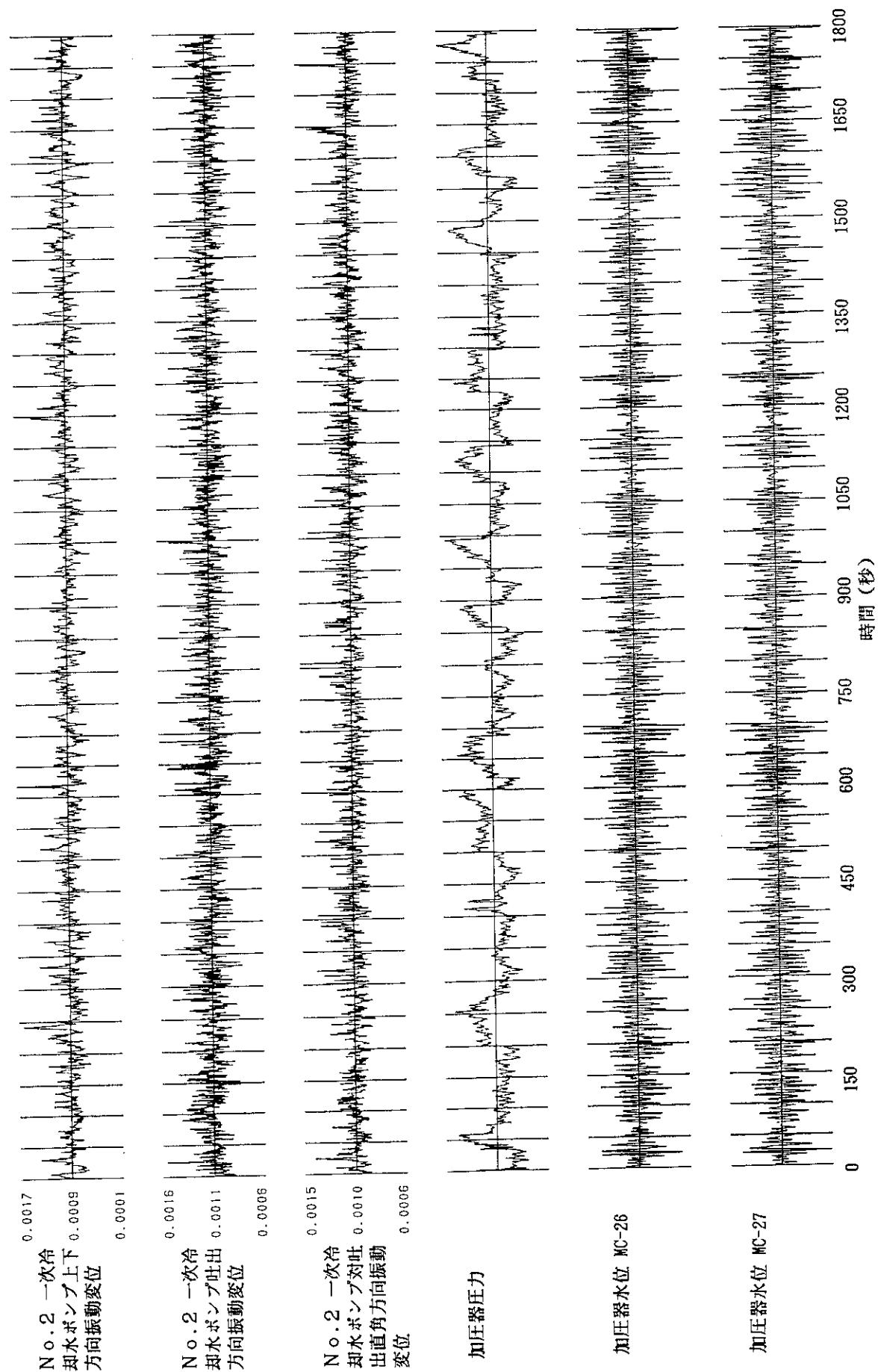


Fig. 8 収録時系列データのプロット (4 / 10)

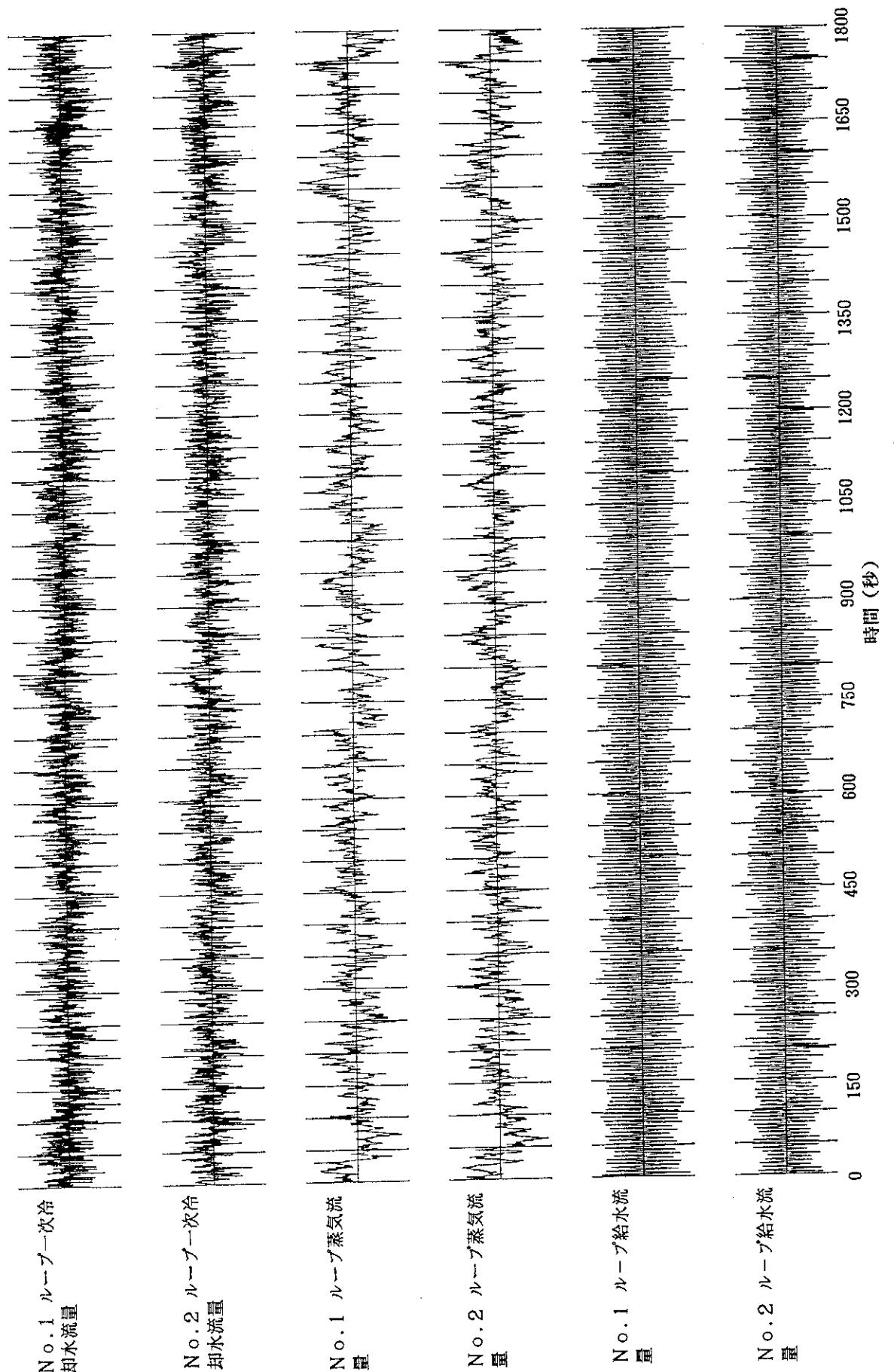


Fig. 8 収録時系列データのプロット (5 / 10)

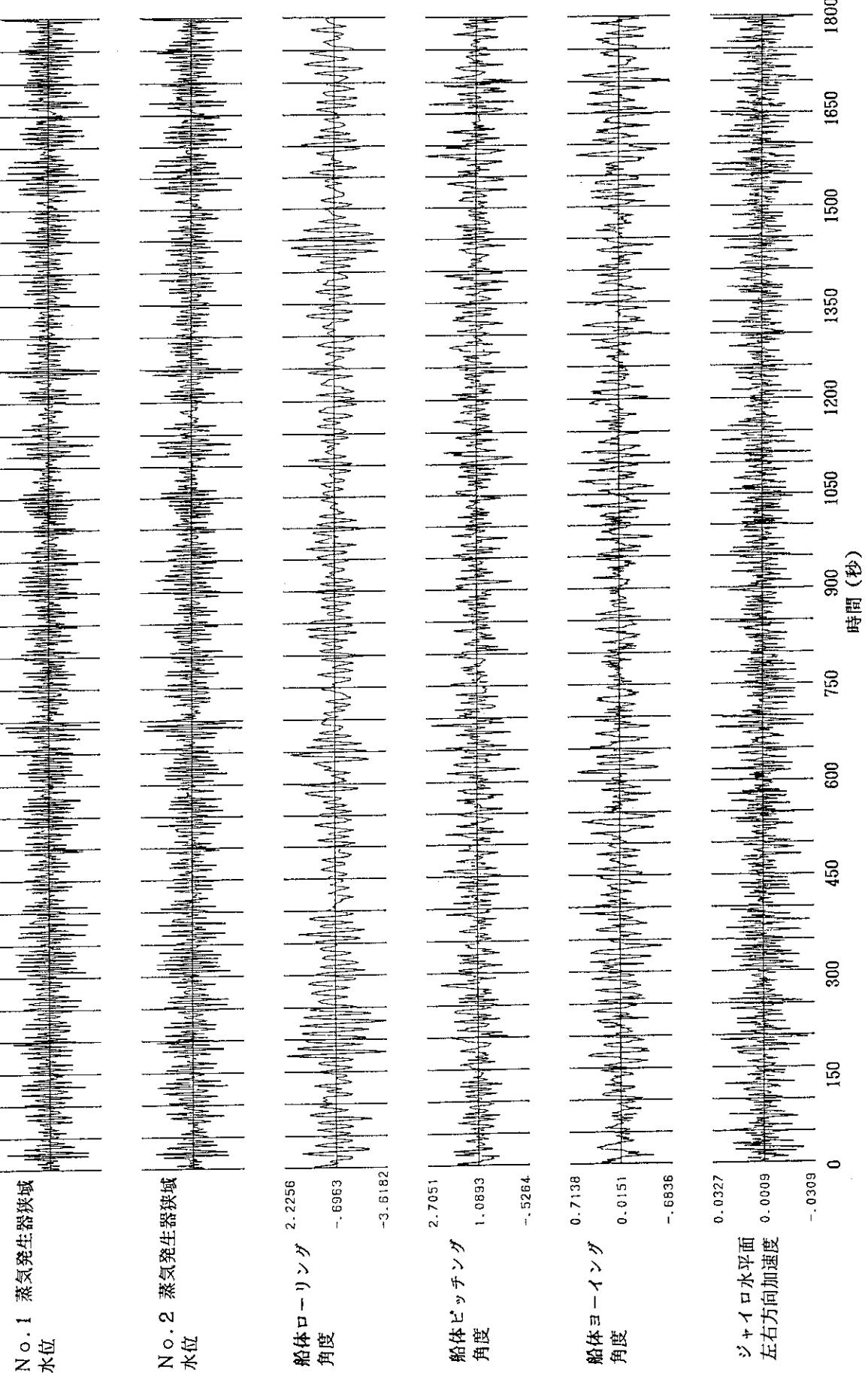


Fig. 8 収録時系列データのプロット (6 / 10)

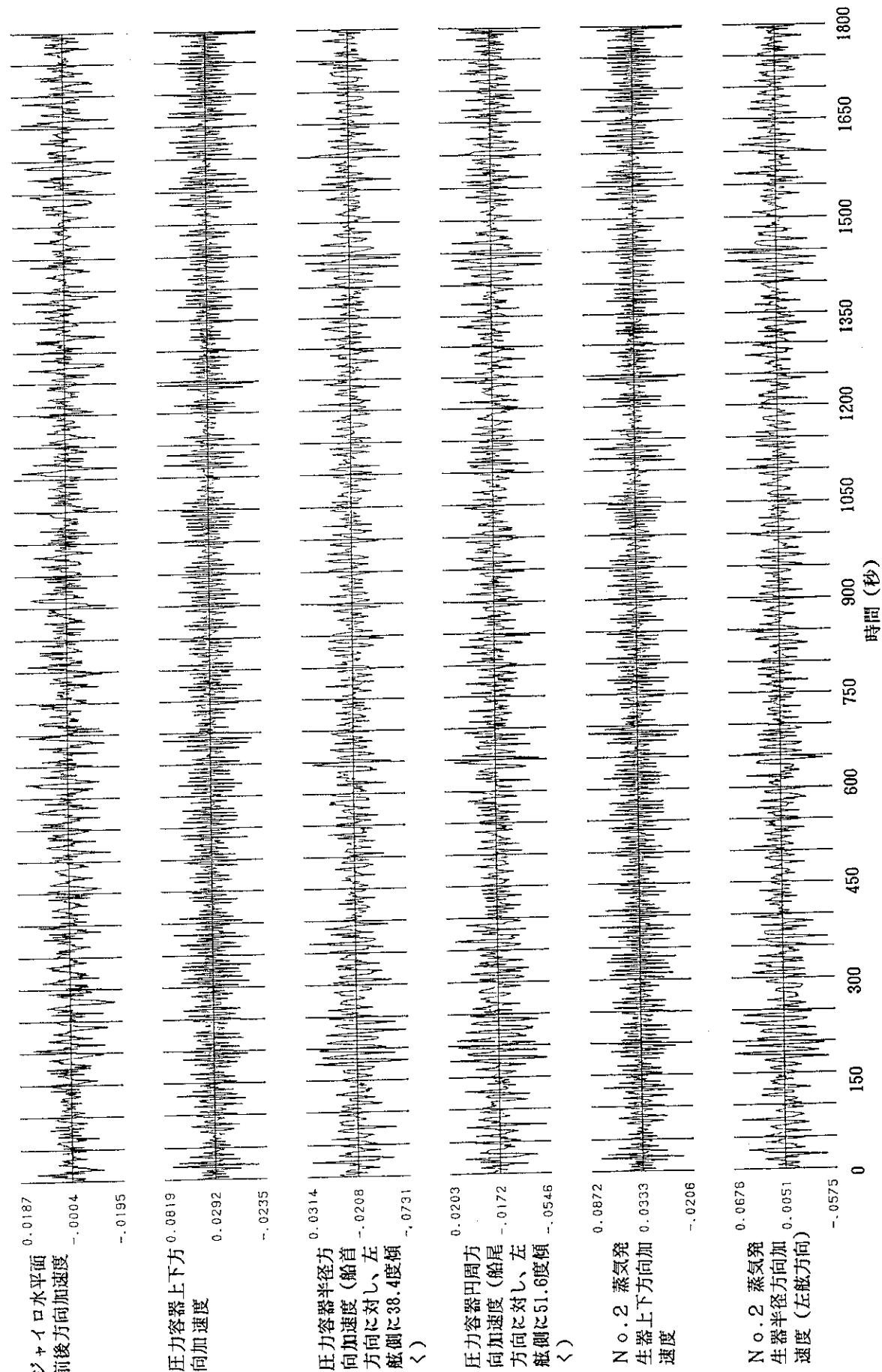


Fig. 8 収録時系列データのプロット (7 / 10)

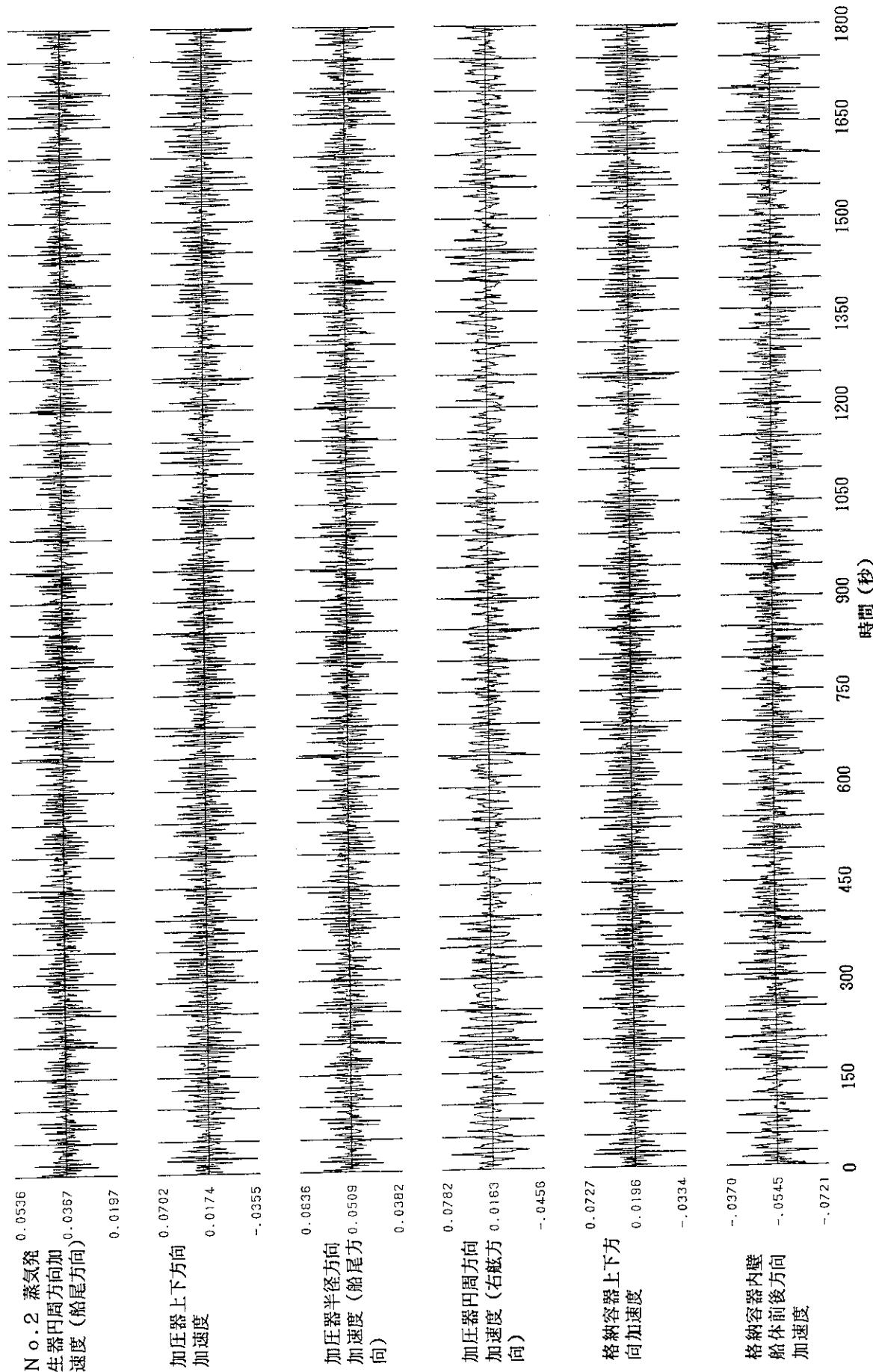


Fig. 8 収録時系列データのプロット (8/10)

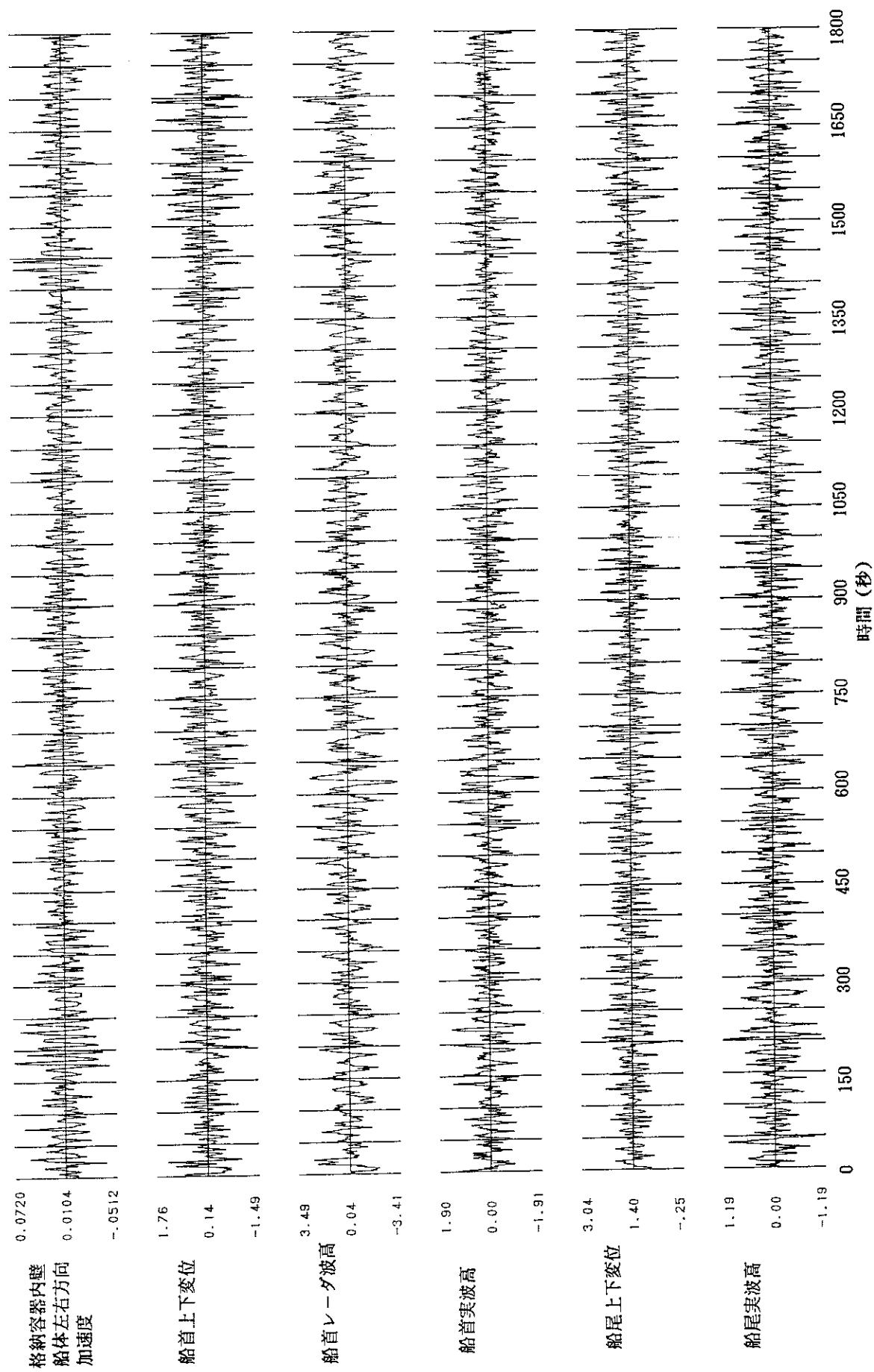


Fig. 8 収録時系列データのプロット (9 / 10)

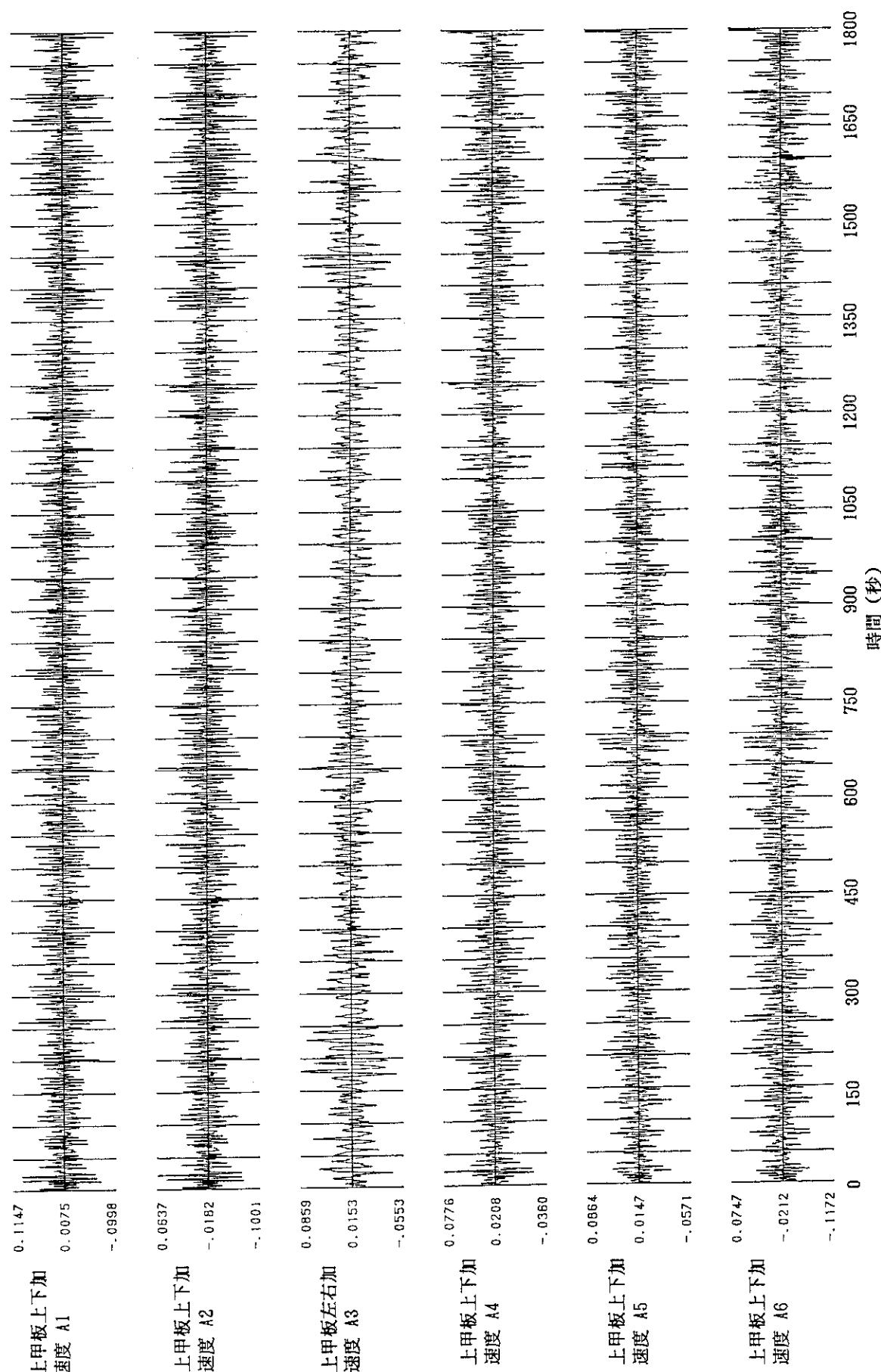


Fig. 8 収録時系列データのプロット (10/10)

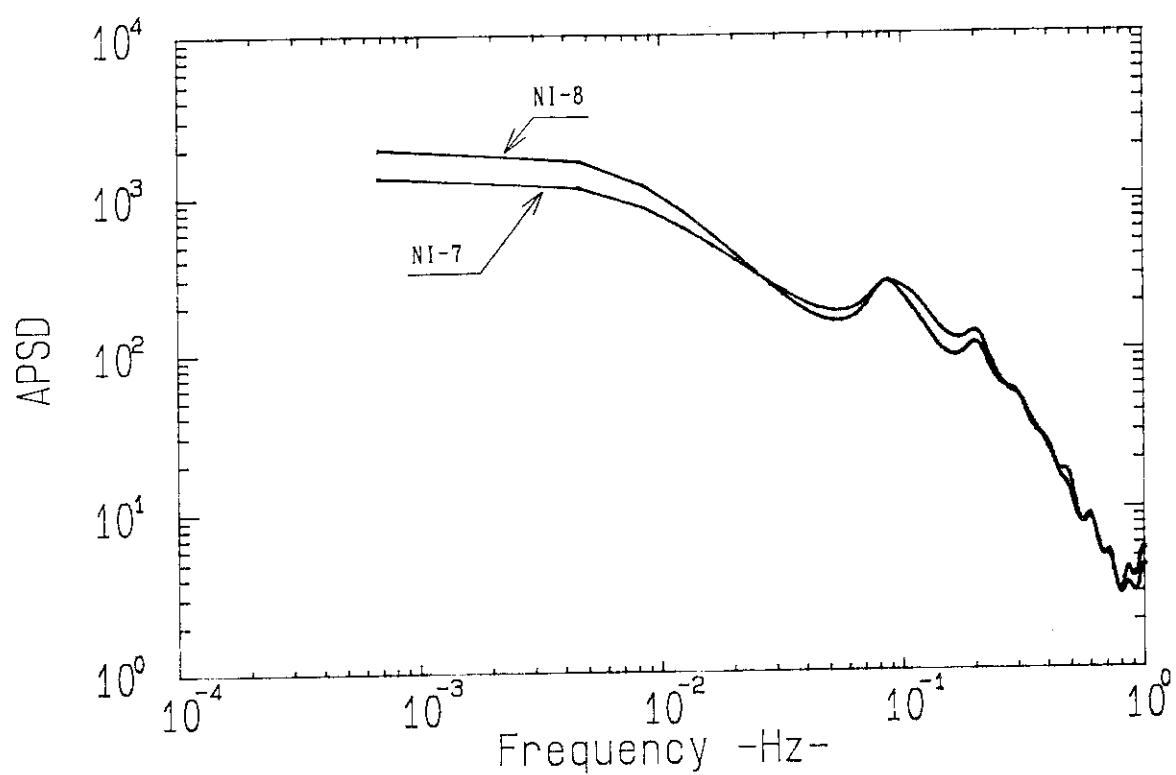


Fig. 9 炉外中性子束 NI-7 及び NI-8 の ASPD

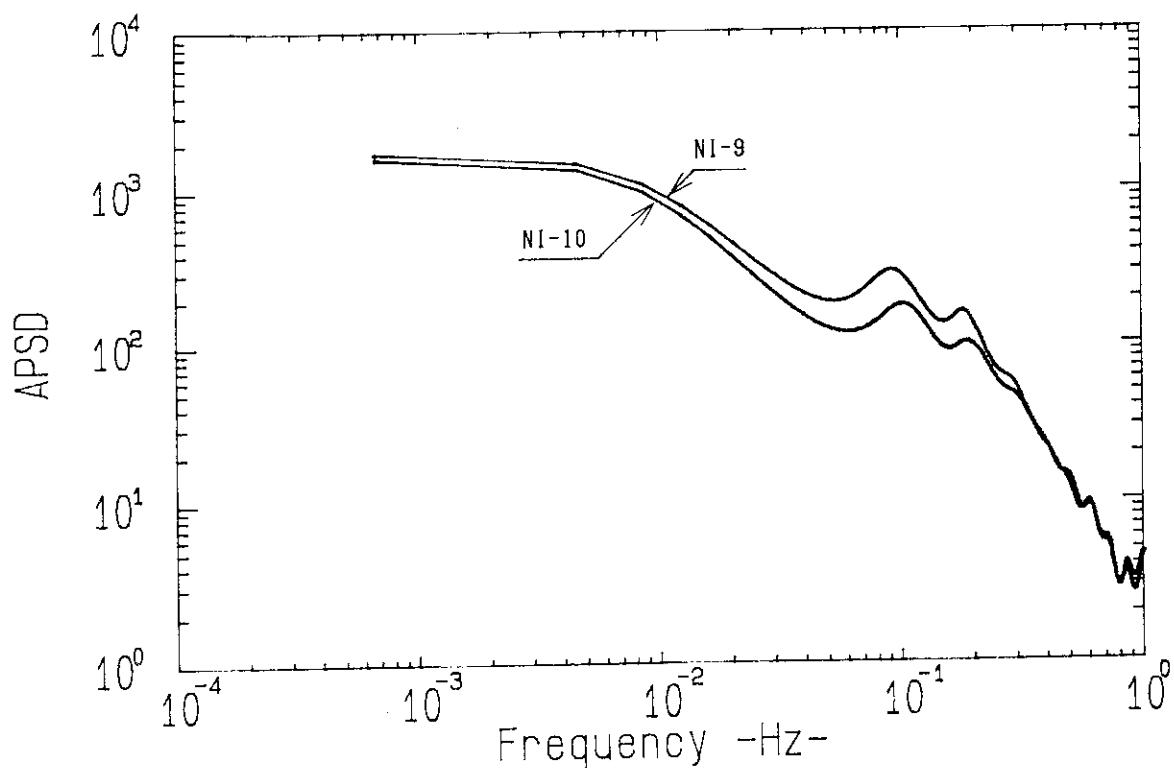


Fig. 10 炉外中性子束 NI-9 及び NI-10 の ASPD

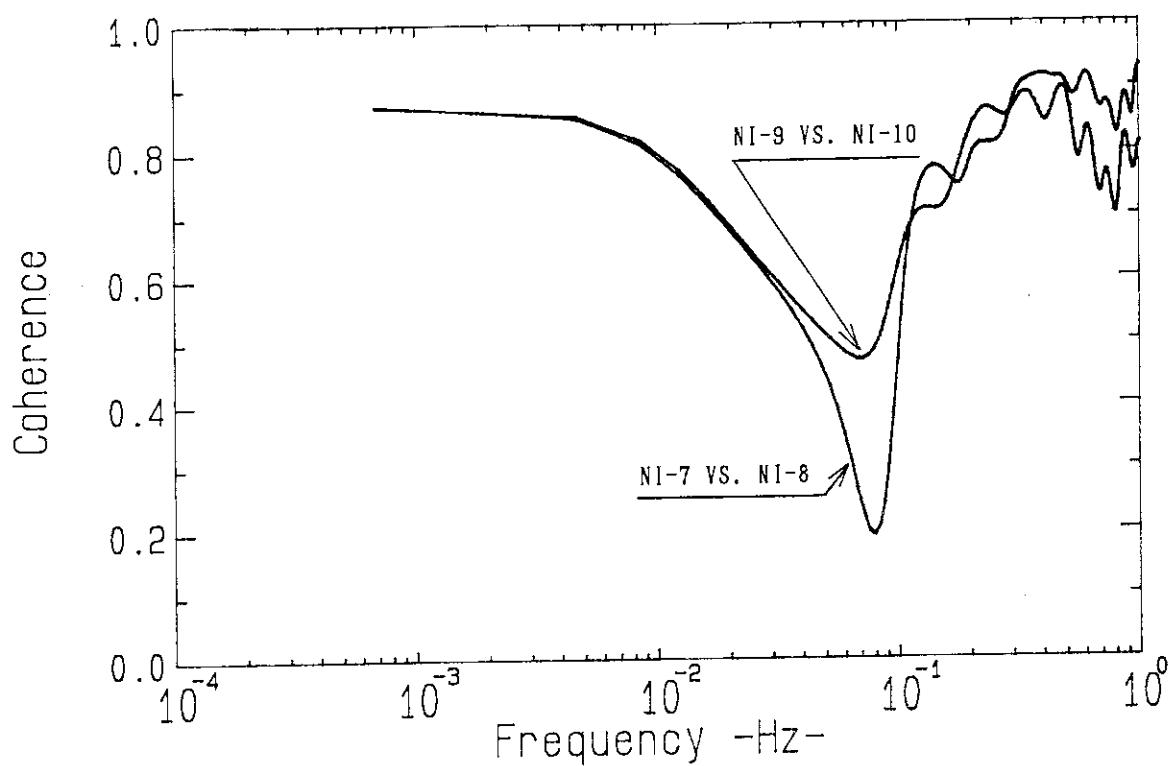


Fig.11 炉外中性子束のコヒーレンス (NI-7 VS. NI-8 及び NI-9 VS. NI-10)

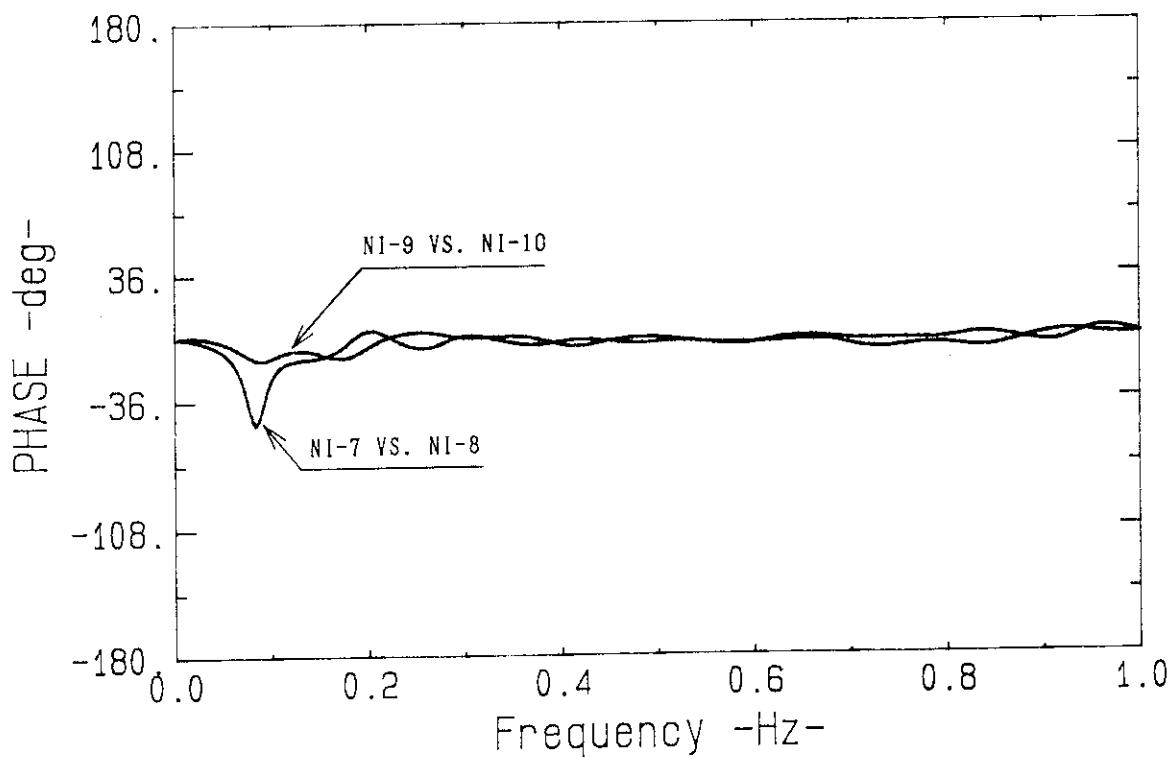


Fig.12 炉外中性子束間の位相 (NI-7 VS. NI-8 及び NI-9 VS. NI-10)

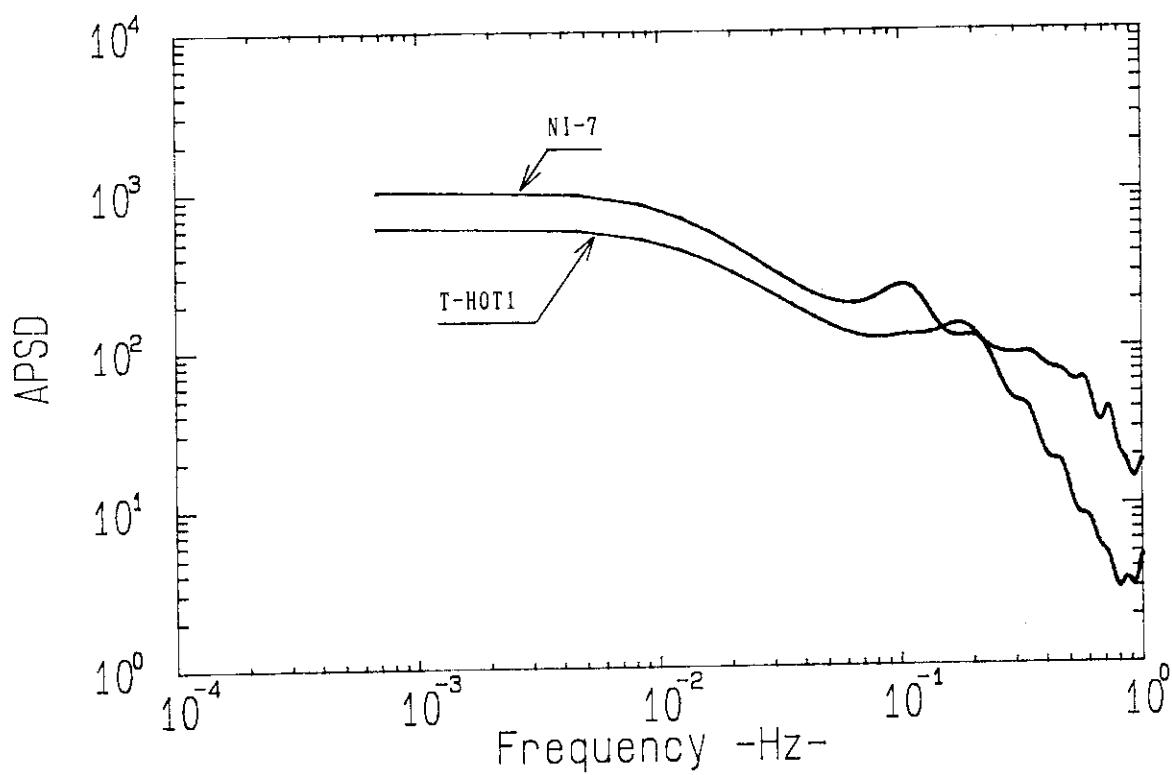


Fig.13 No. 1 ループホットレグ温度 (T - HOT 1) 及び炉外中性子束の APSD

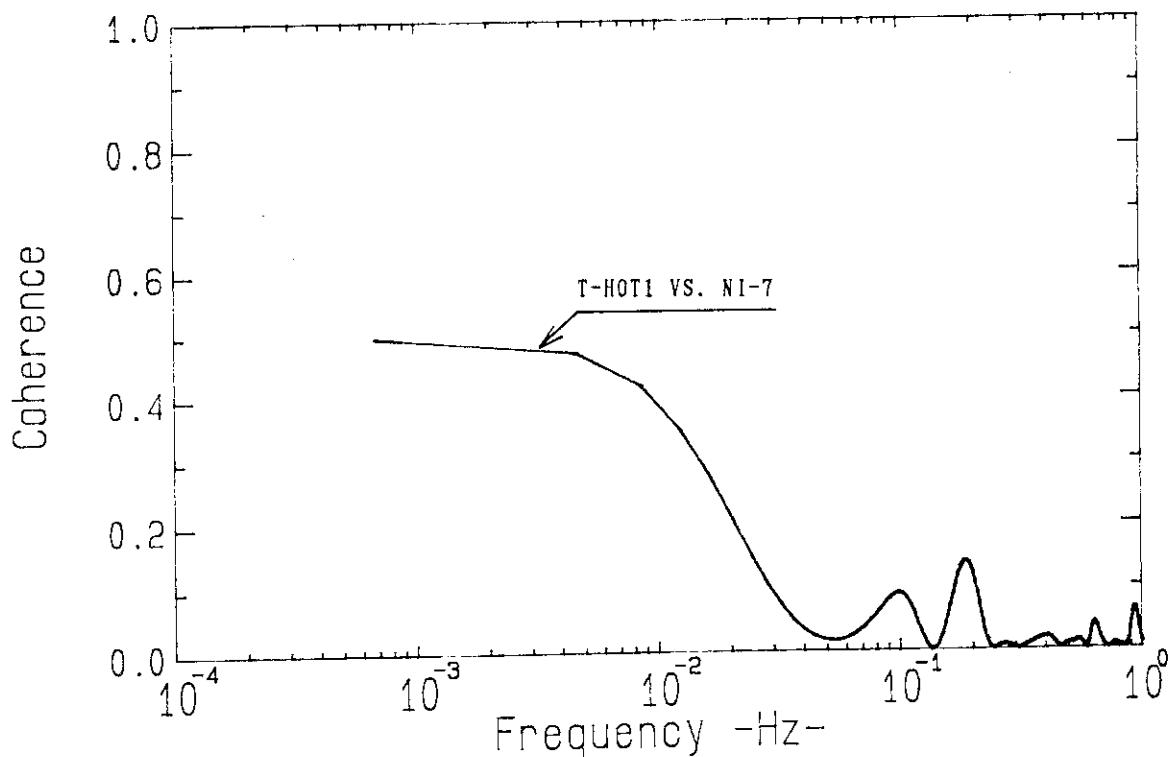


Fig.14 No. 1 ループホットレグ温度 (T - HOT 1) と炉外中性子束間のコヒーレンス

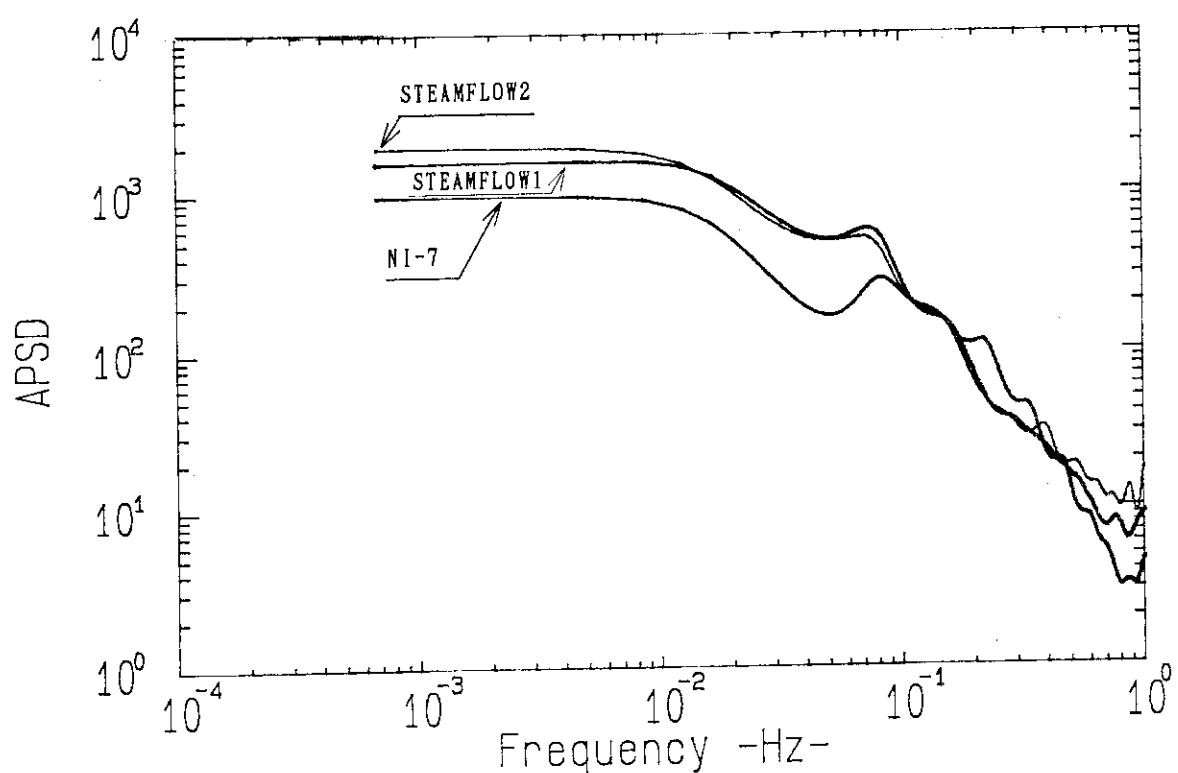


Fig.15 炉外中性子束, No. 1 ループ蒸気流量及びNo. 2 蒸気流量の APSD

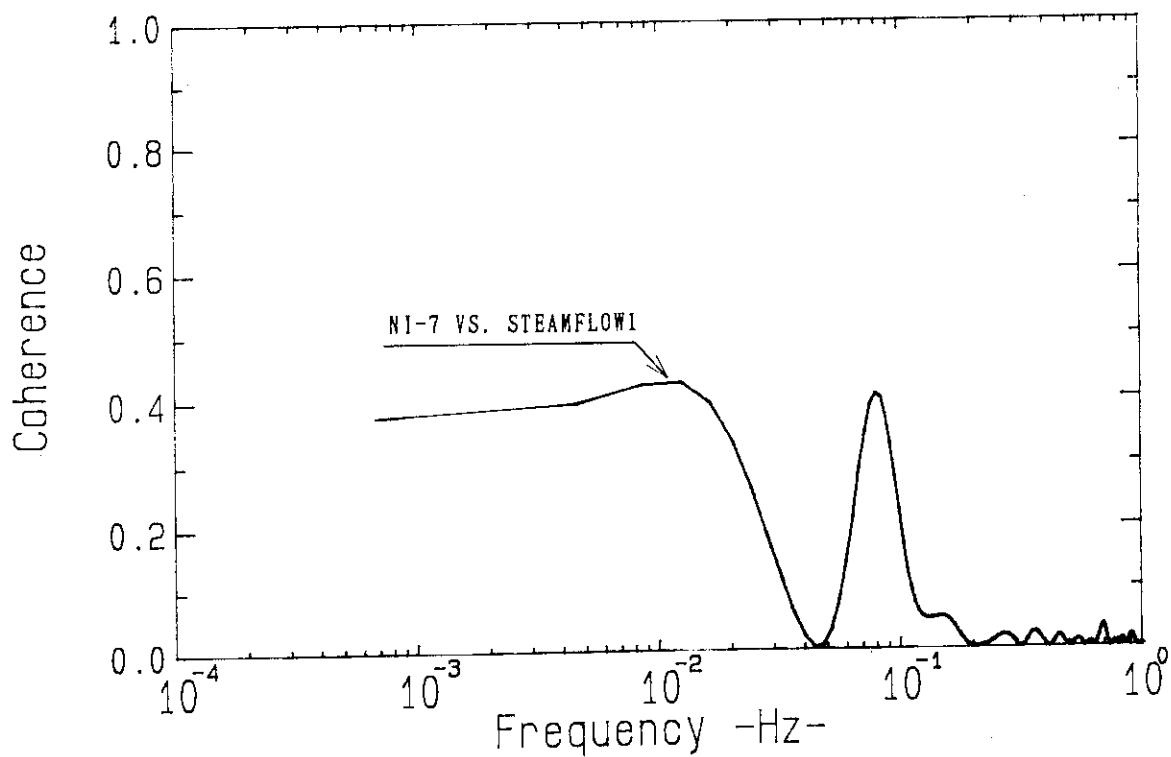


Fig.16 炉外中性子束とNo. 1 ループ蒸気流量間のコヒーレンス

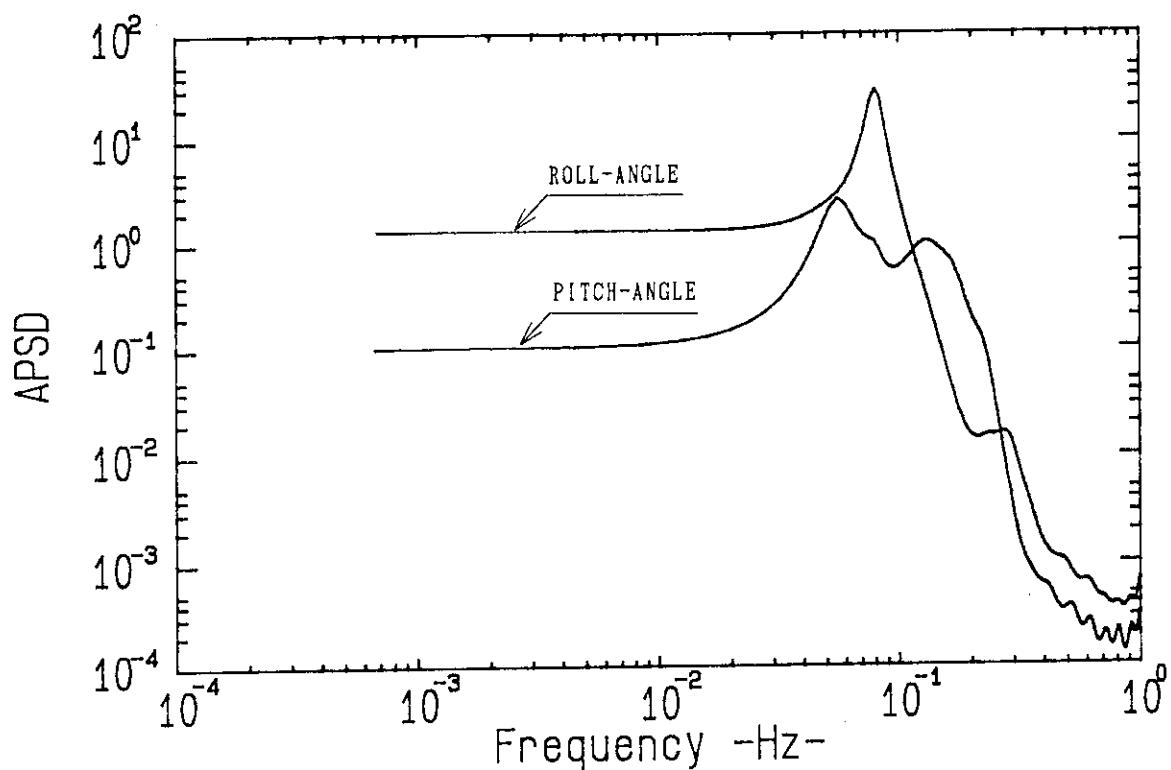


Fig.17 ローリング角度とピッキング角度の APSD

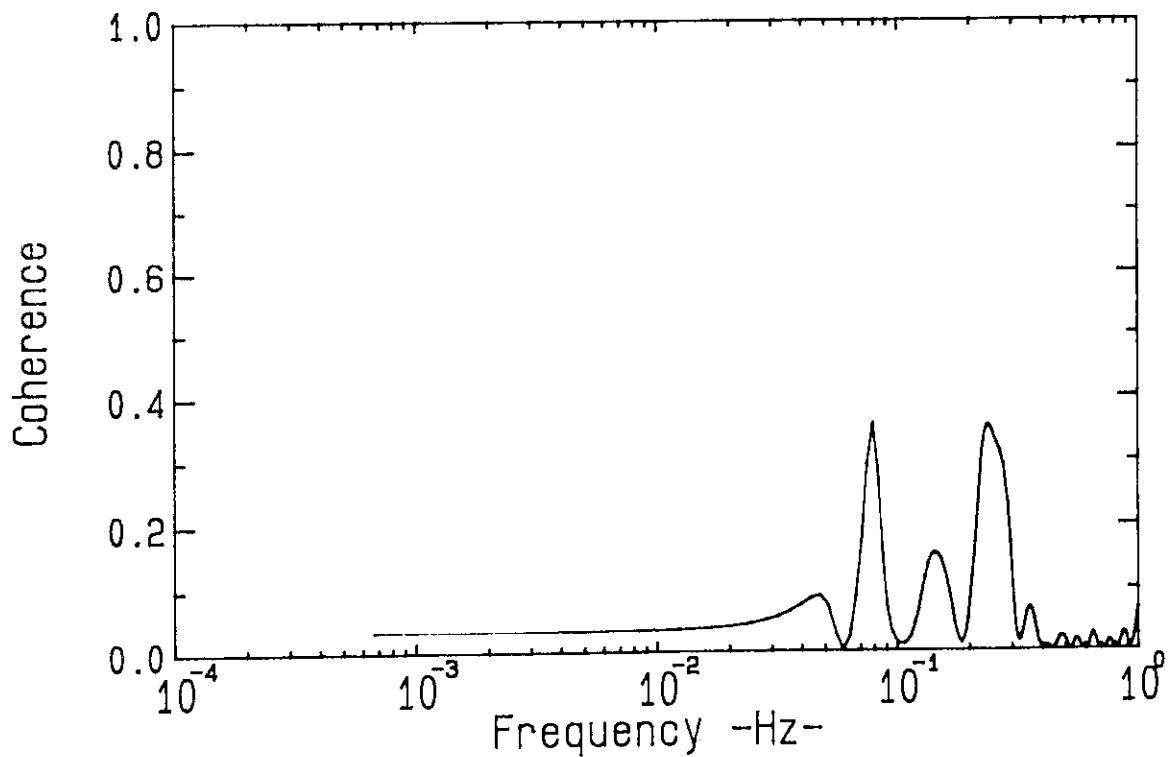


Fig.18 ローリング角度とピッキング角度間のコヒーレンス

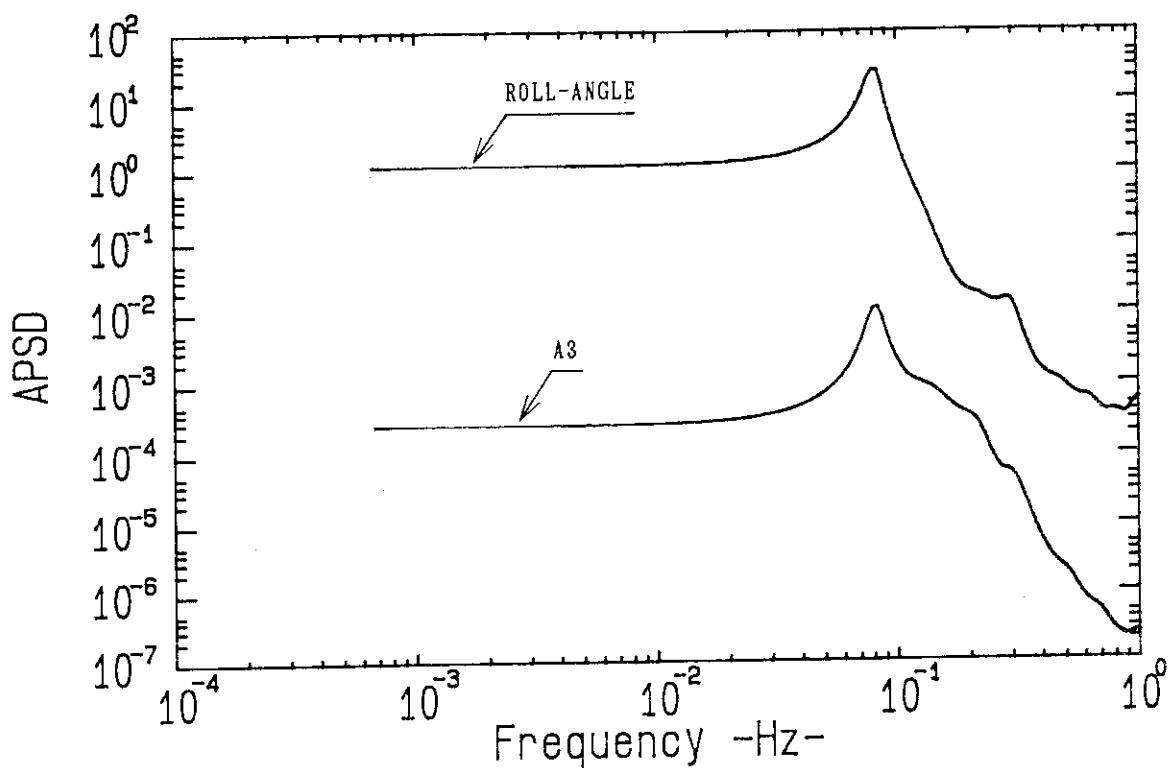


Fig.19 ローリング角度と上甲板上左右方向加速度A 3 のAPSD

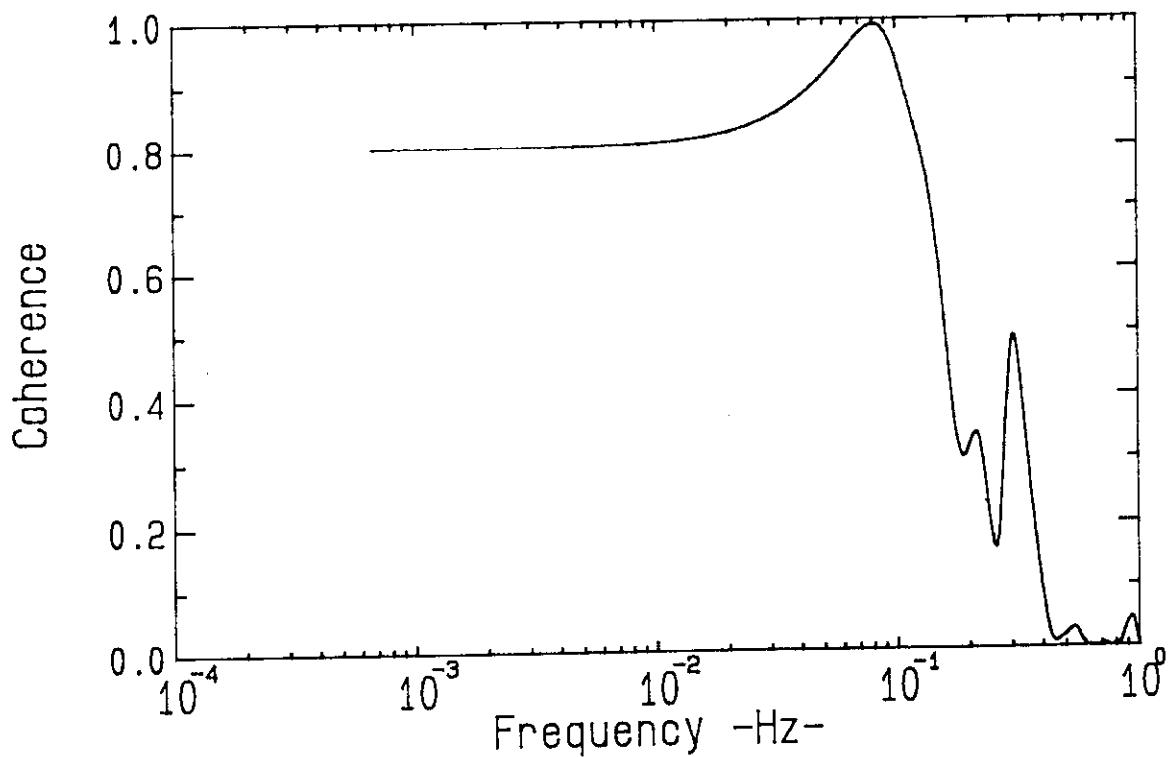


Fig.20 ローリング角度と上甲板上左右方向加速度A 3 間のコヒーレンス

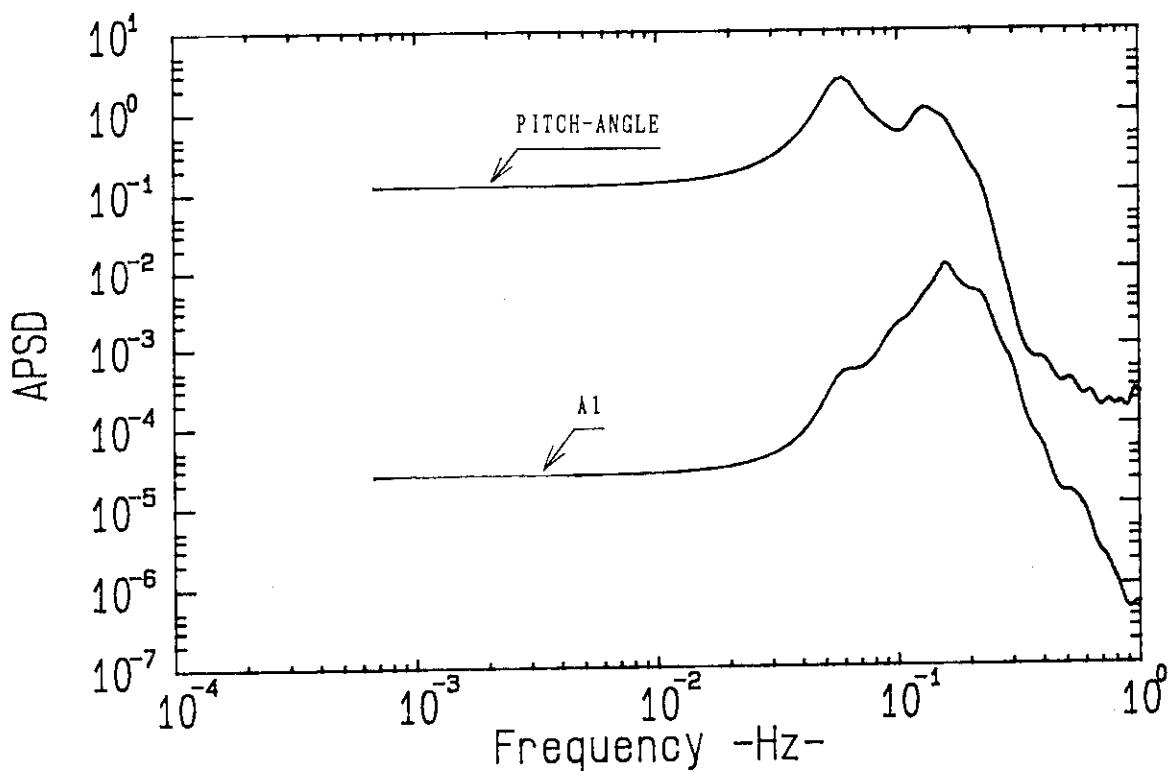


Fig.21 ピッキング角度と上甲板上の船首付近上下方向加速度A 1 のAPSD

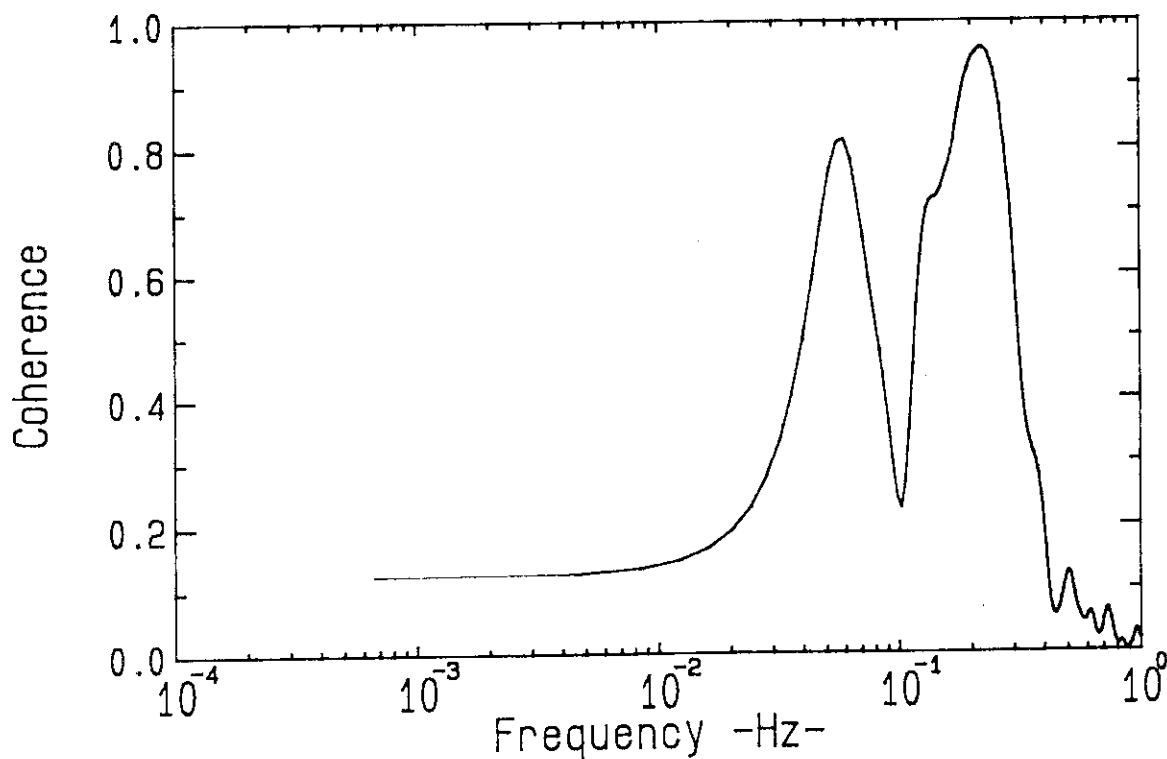


Fig.22 ピッキング角度と上甲板上の船首付近上下方向加速度A 1 間のコヒーレンス

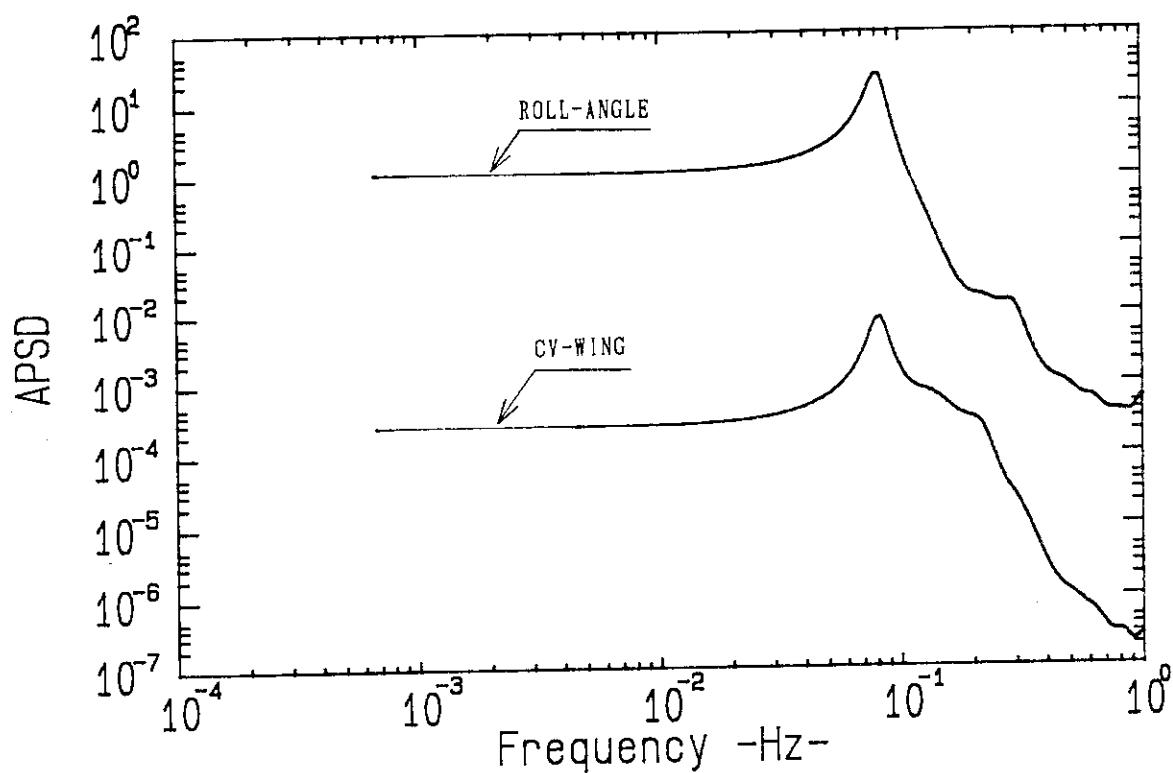


Fig.23 格納容器内壁船体左右方向加速度 (CV - WING) とローリング角度の APSD

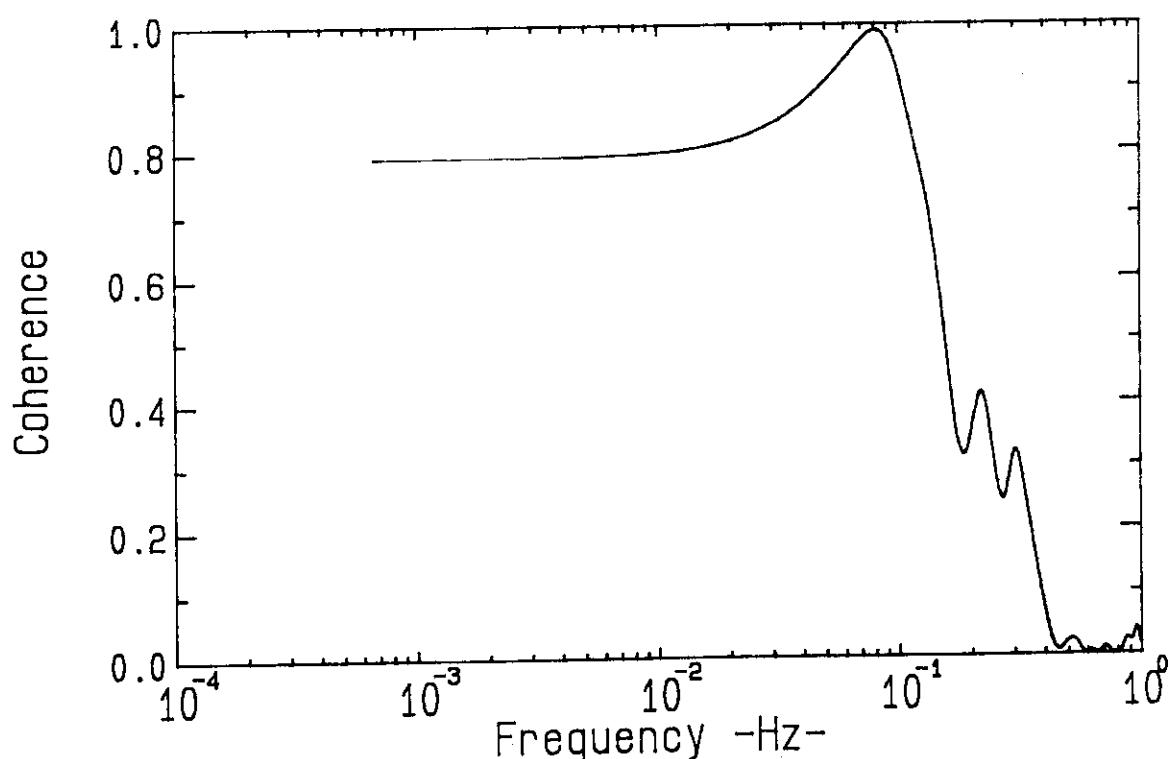


Fig.24 格納容器内壁船体左右方向加速度 (CV - WING) とローリング角度間の  
コヒーレンス

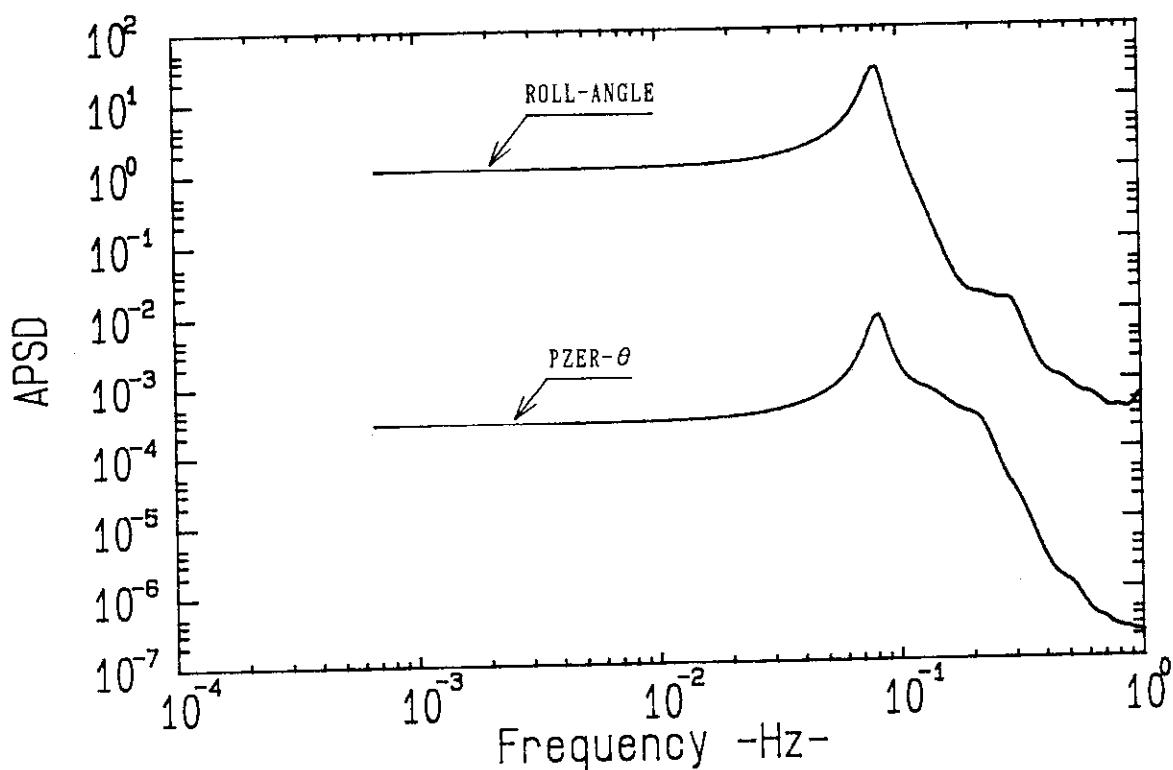


Fig.25 加圧器円周方向加速度 (PZER- $\theta$ ) とローリング角度の APSD

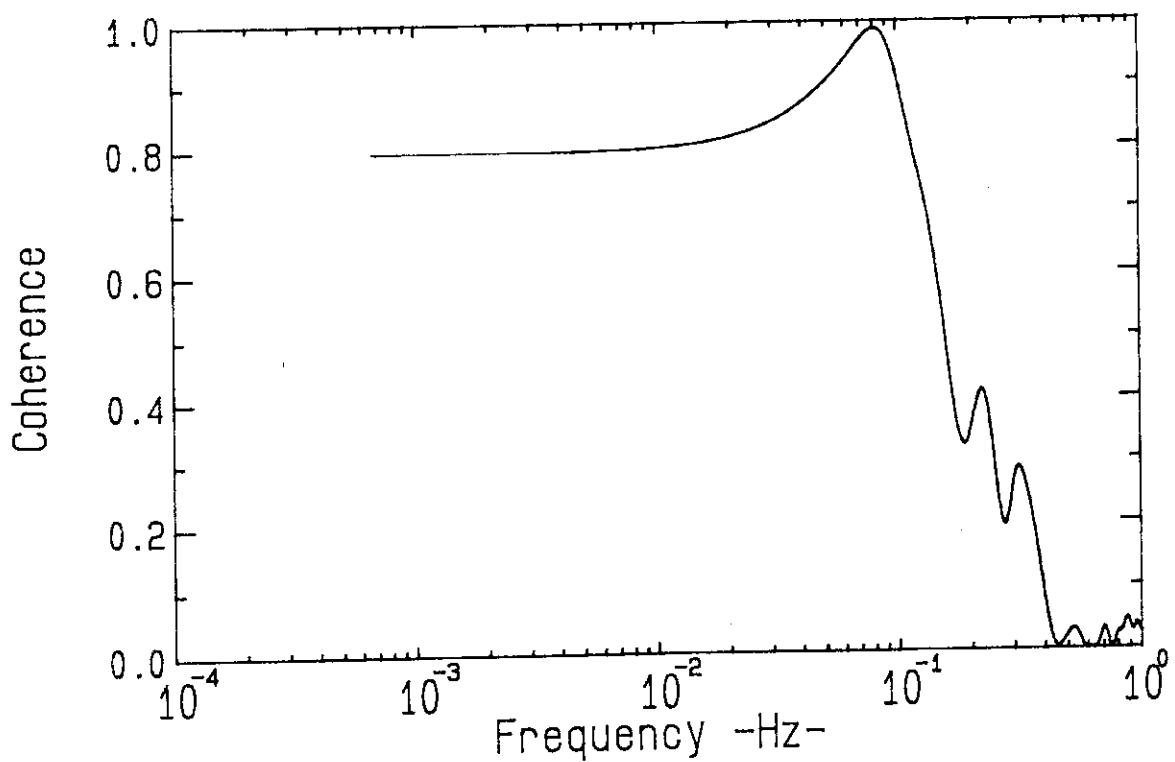


Fig.26 加圧器円周方向加速度 (PZER- $\theta$ ) とローリング角度間のコヒーレンス

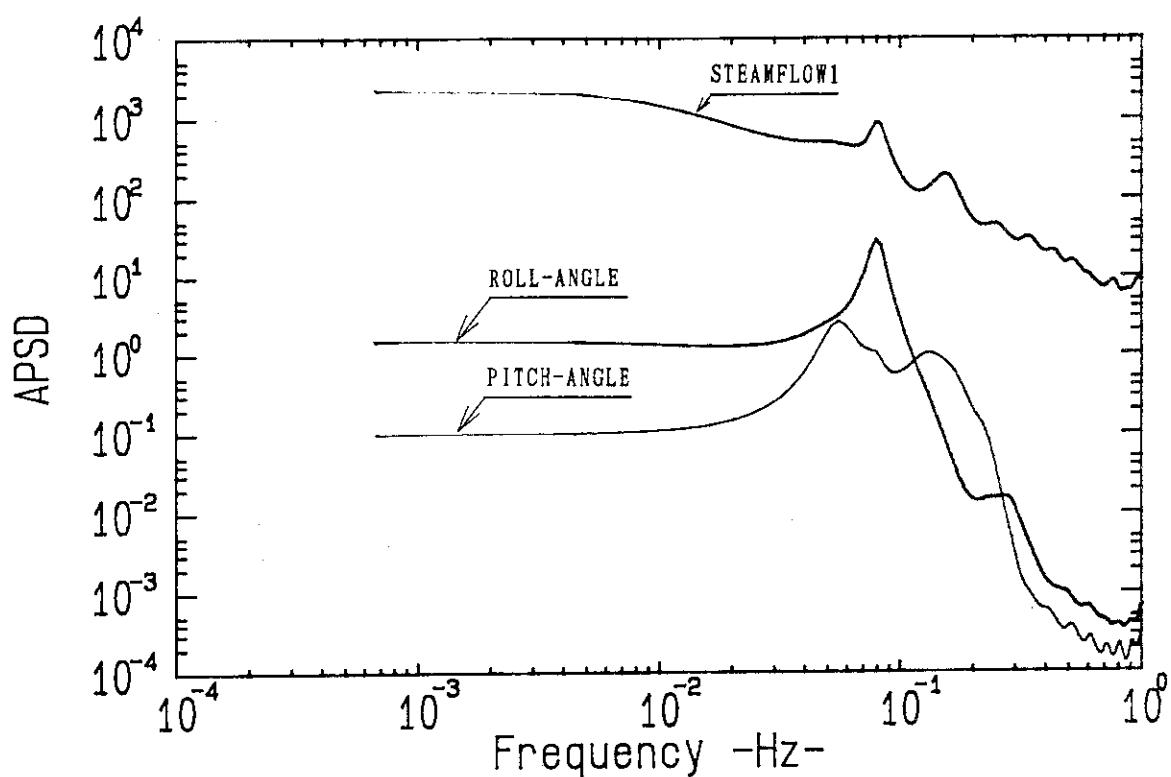


Fig.27 No. 1 ループ蒸気流量, ローリング角度及びピッキング角度の APSD

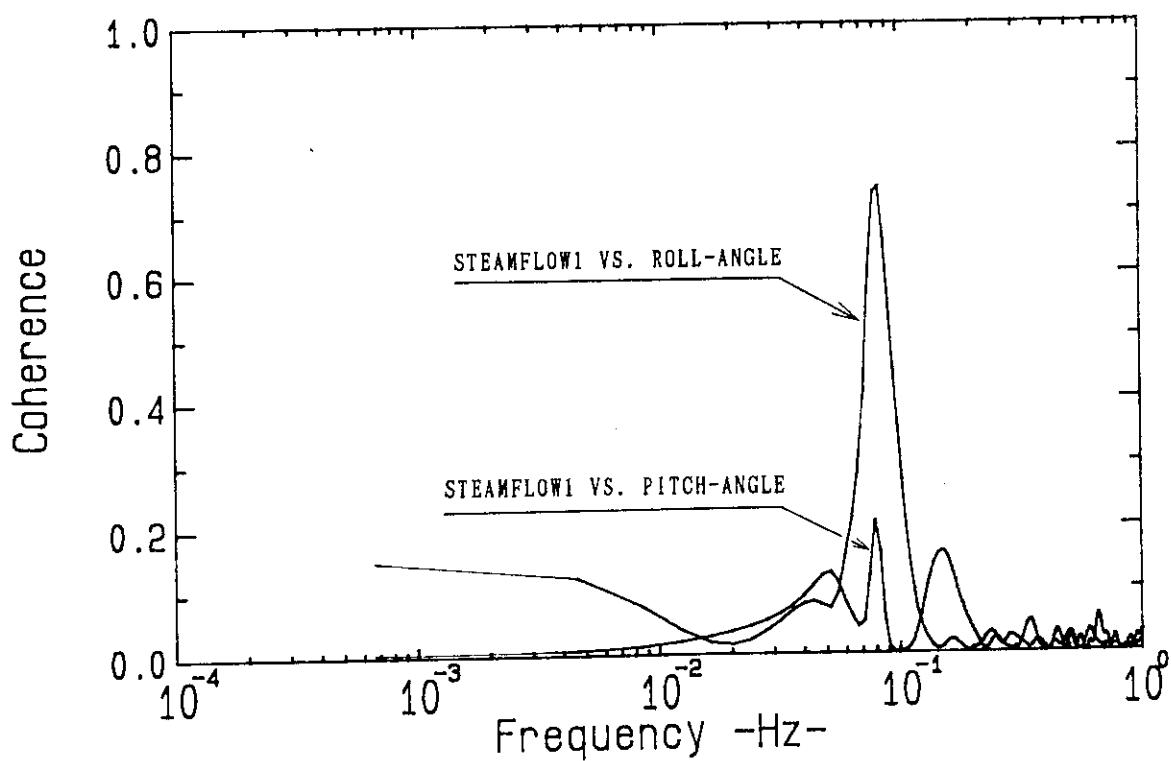


Fig.28 No. 1 ループ蒸気流量とローリング角度, ピッキング角度間のコヒーレンス

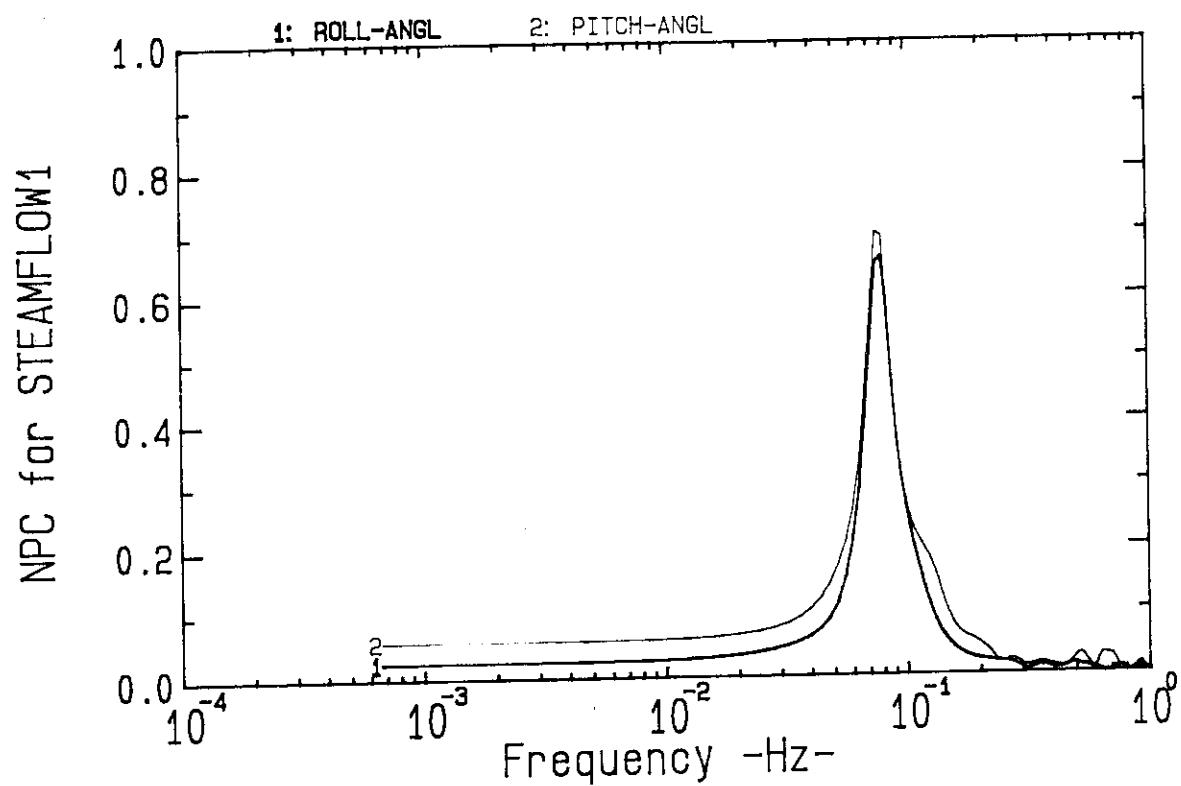


Fig.29 No. 1 ループ蒸気流量に対するローリング角度及びピッキング角度からの  
雑音寄与率

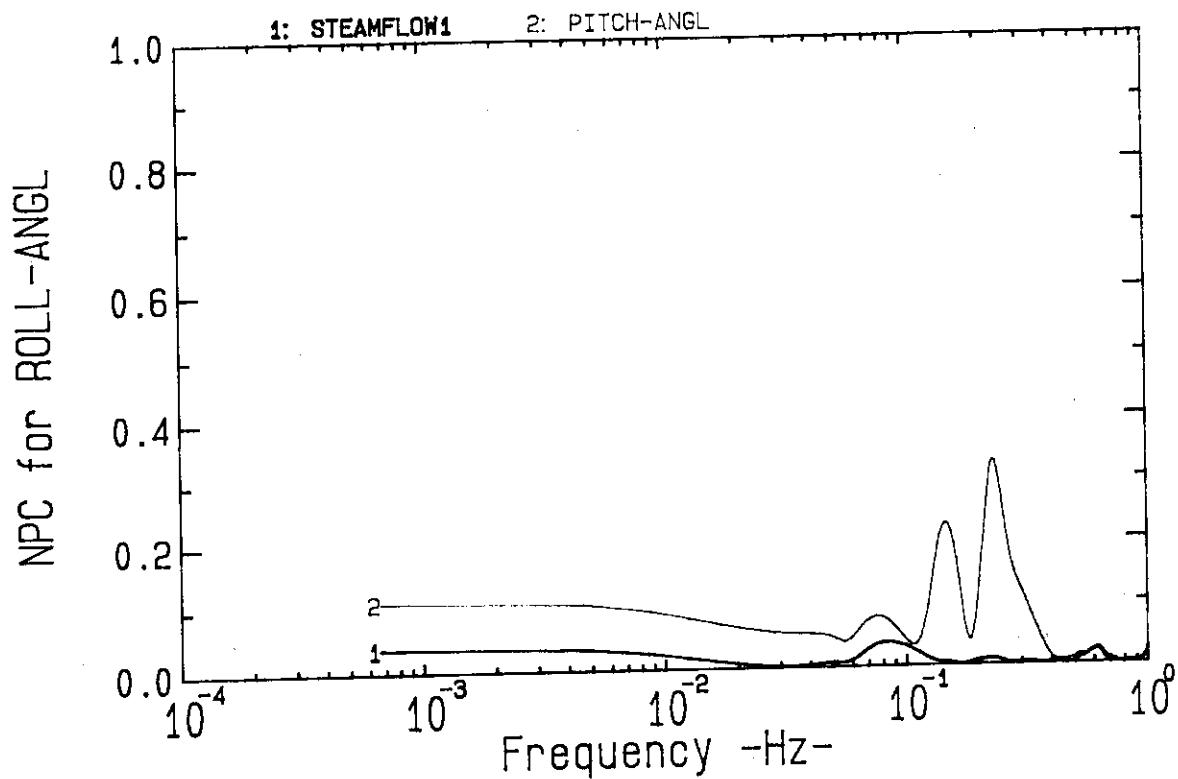


Fig.30 ローリング角度に対する No. 1 ループ蒸気流量及びピッキング角度からの  
雑音寄与率

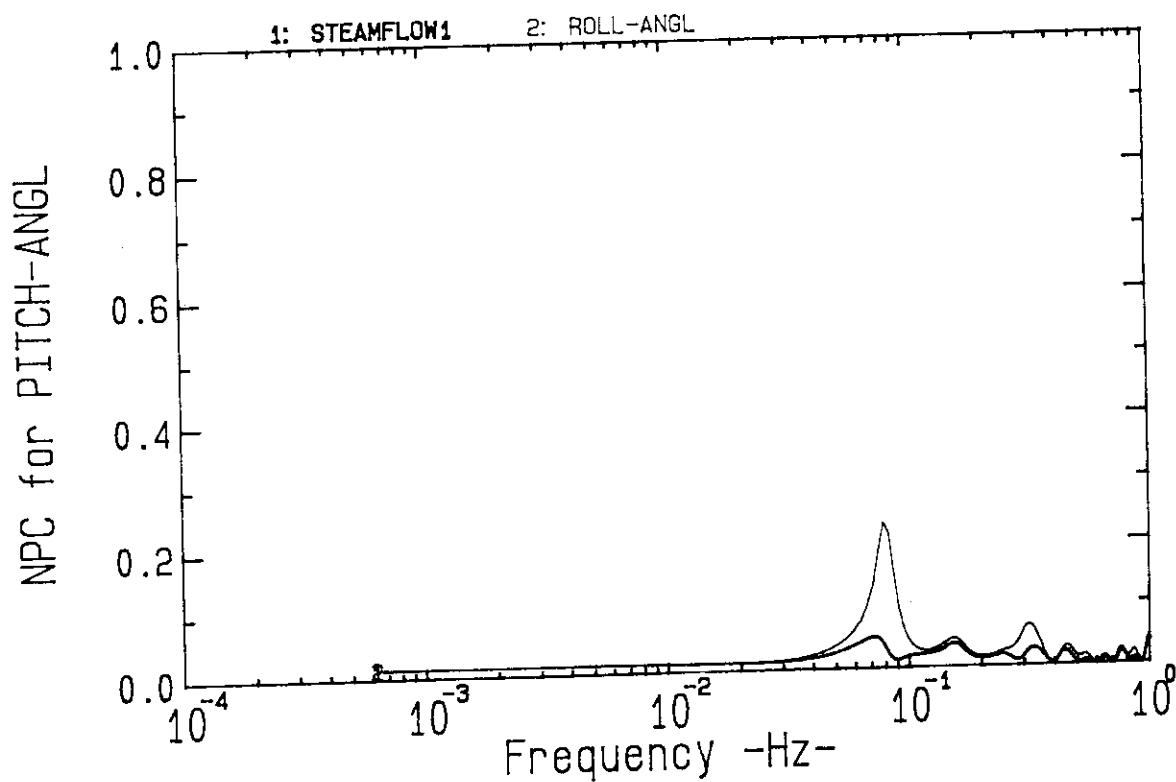


Fig.31 ピッキング角度に対する No. 1 ループ蒸気流量及びローリング角度からの  
雑音寄与率

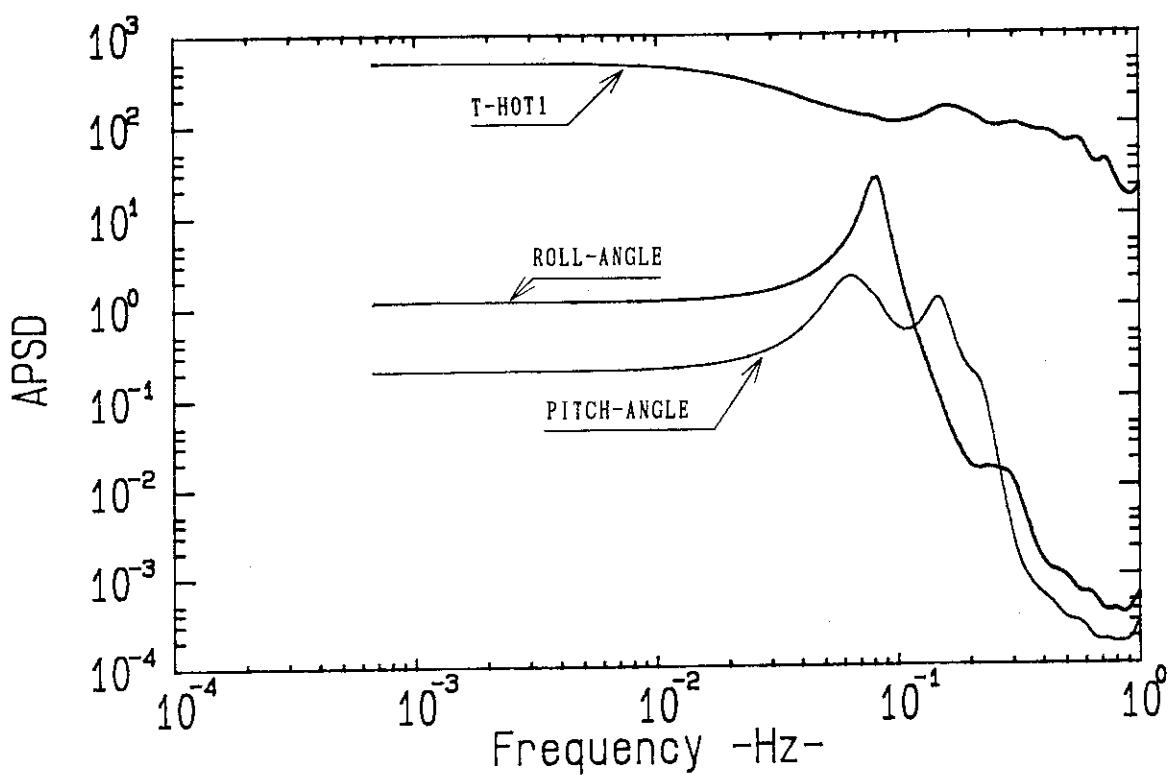


Fig.32 No. 1 ループホットレグ温度, ローリング角度及びピッキング角度の APSD

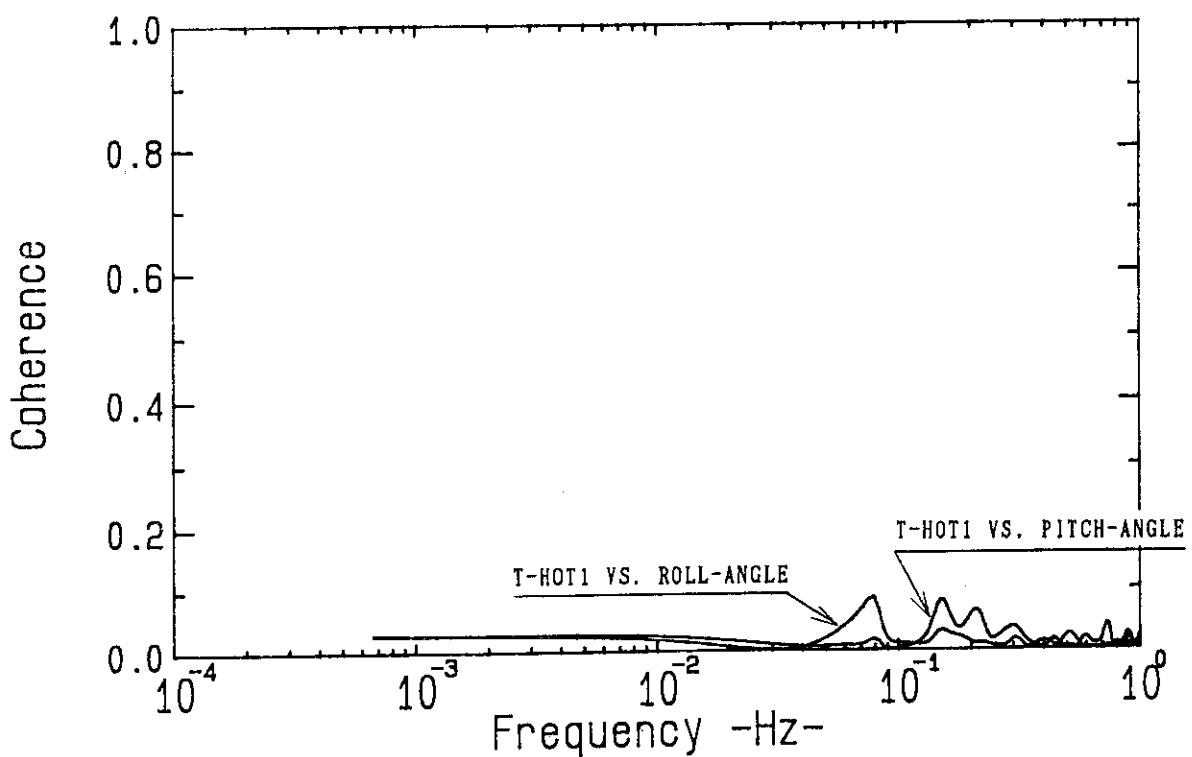


Fig.33 No. 1 ループホットレグ温度とローリング角度, ピッキング角度間のコヒーレンス

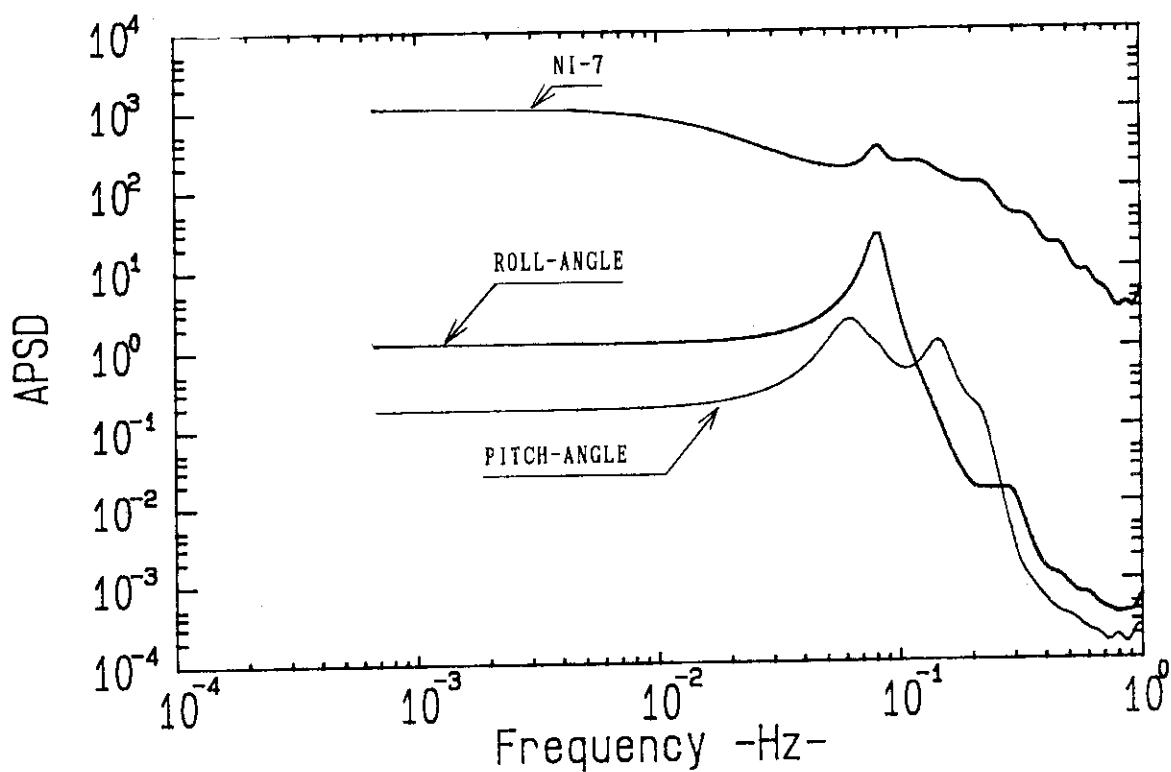


Fig.34 炉外中性子束 (NI - 7), ローリング角度及びピッティング角度の APSD

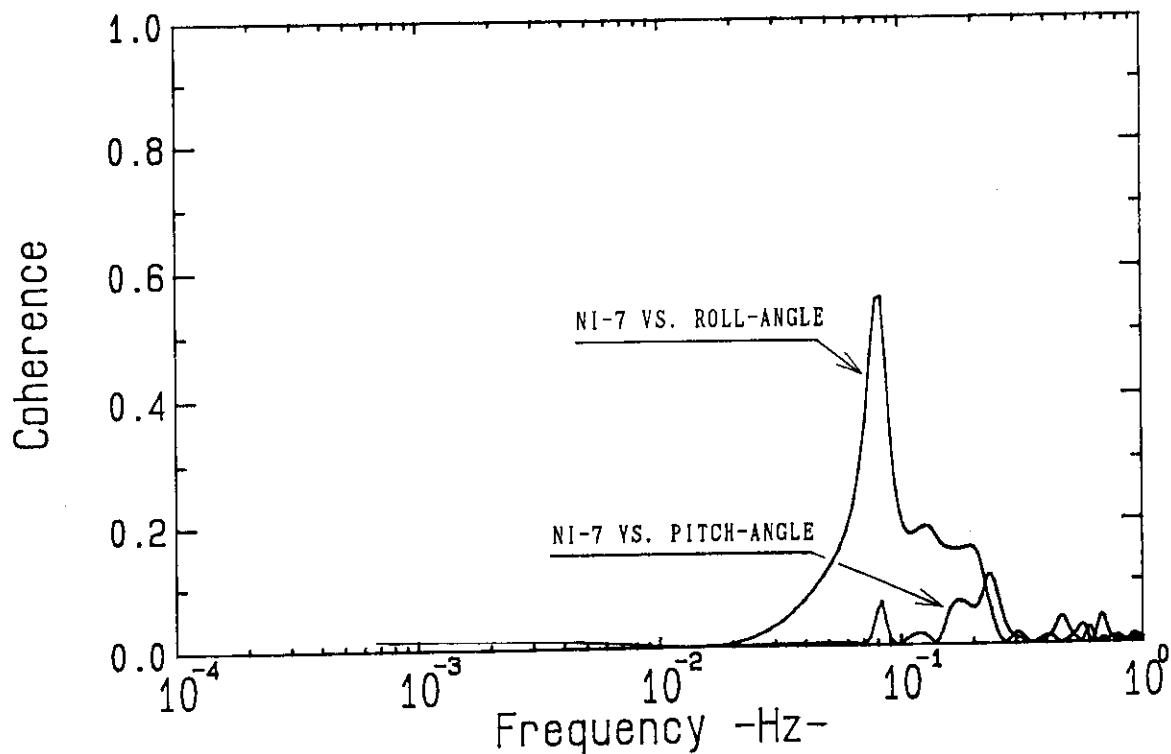


Fig.35 炉外中性子束 (NI - 7) とローリング角度, ピッティング角度間のコヒーレンス

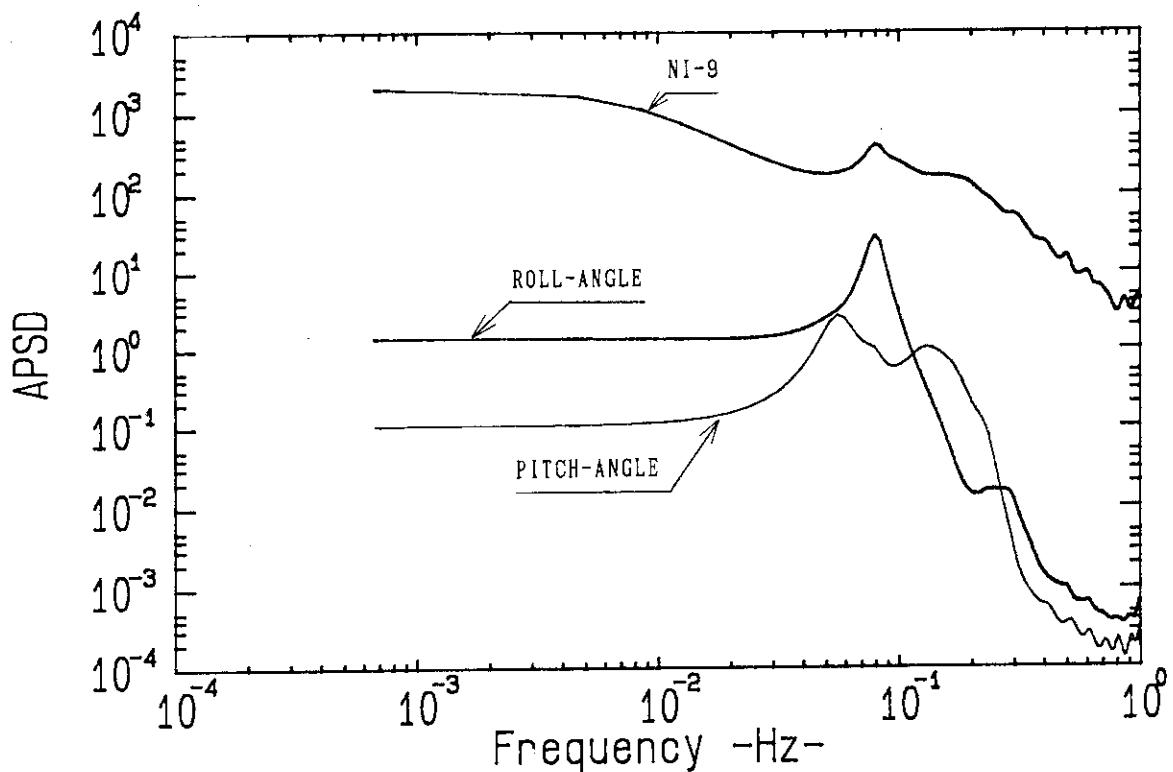


Fig.36 炉外中性子束 (NI - 9 ), ローリング角度及びピッティング角度の APSD

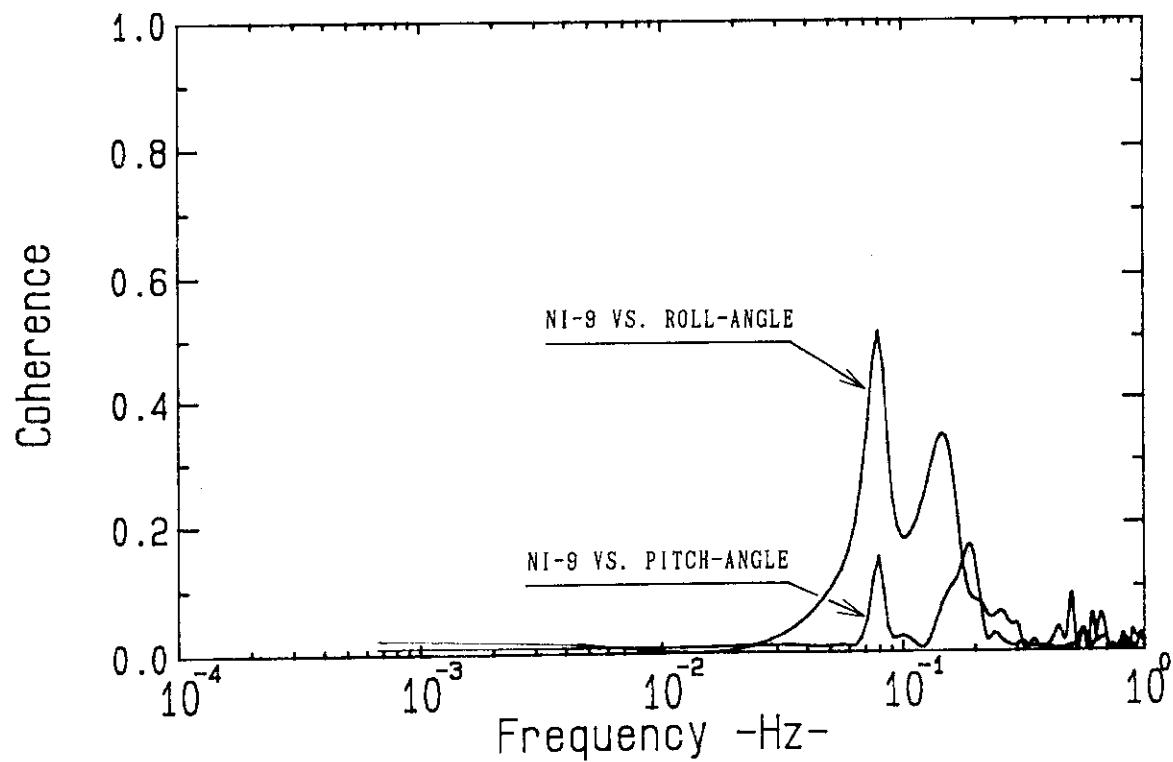


Fig.37 炉外中性子束 (NI - 9 ) とローリング角度, ピッティング角度間のコヒーレンス

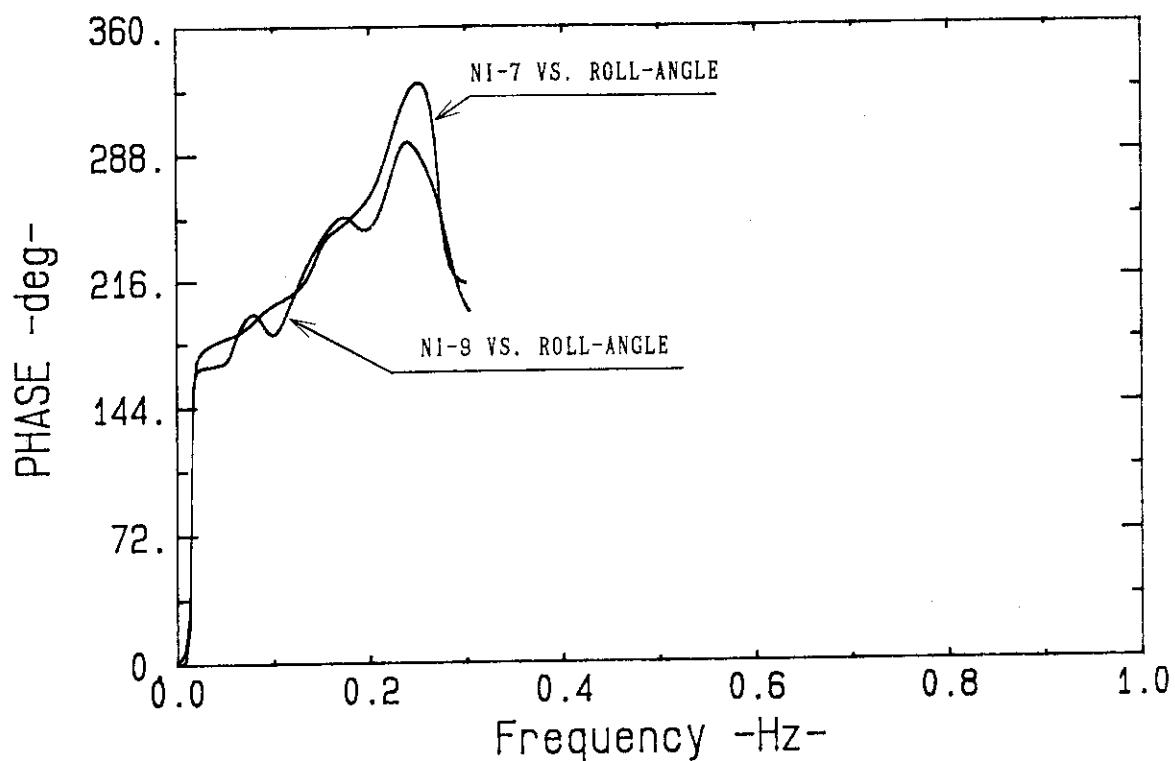


Fig.38 炉外中性子束 (NI-7 及び NI-9) とローリング角度間の位相

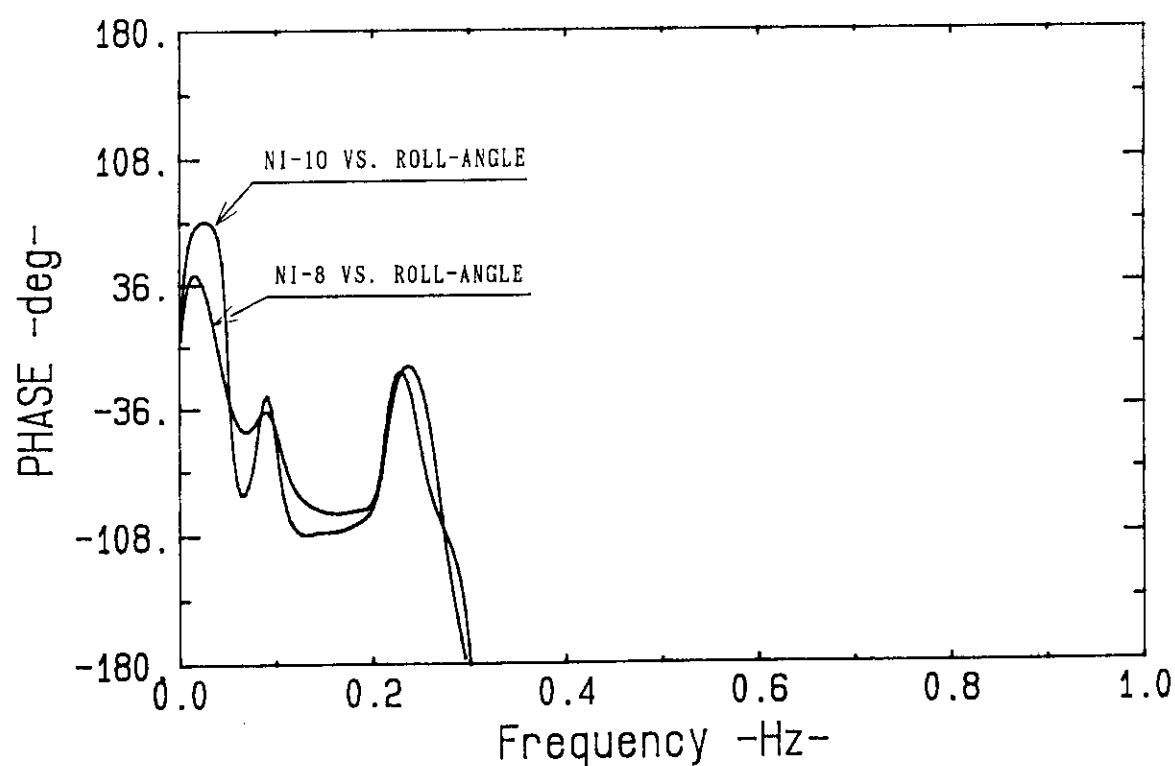


Fig.39 炉外中性子束 (NI-8 及び NI-10) とローリング角度間の位相

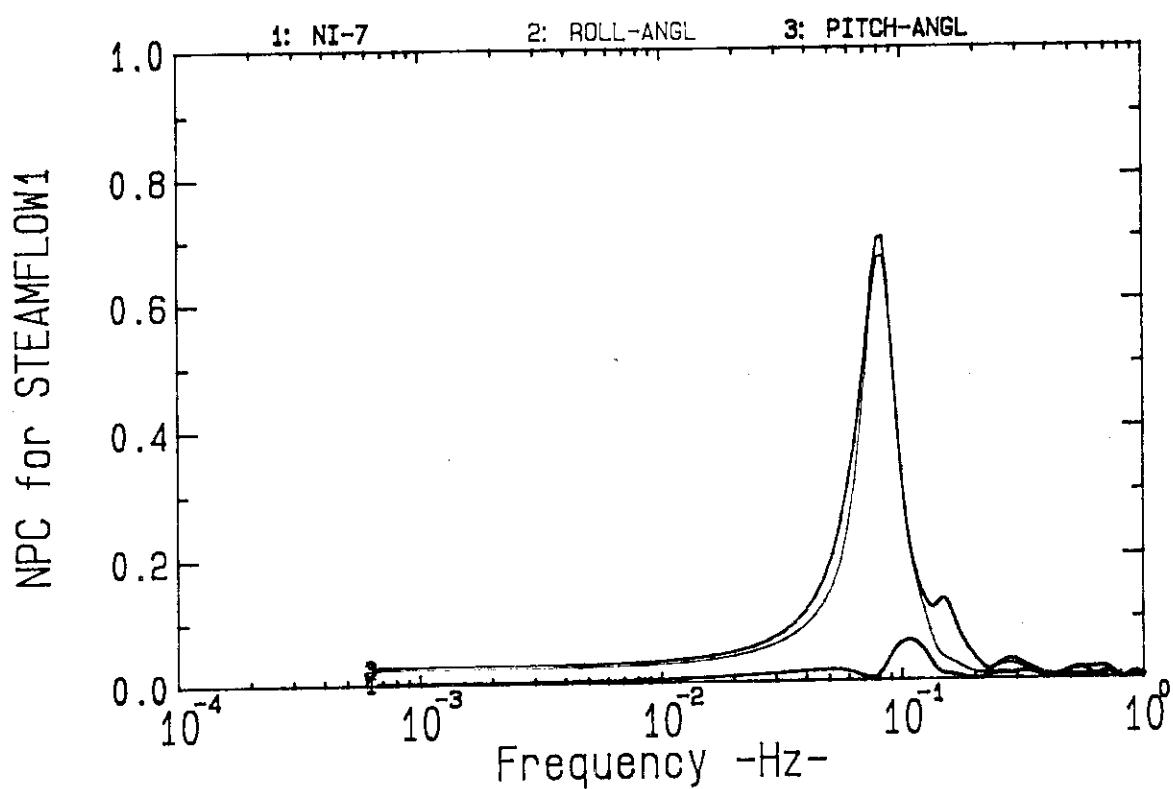


Fig. 40 No. 1 ループ蒸気流量に対する炉外中性子束 (NI - 7), ローリング角度及びピッチャング角度からの雑音寄与率

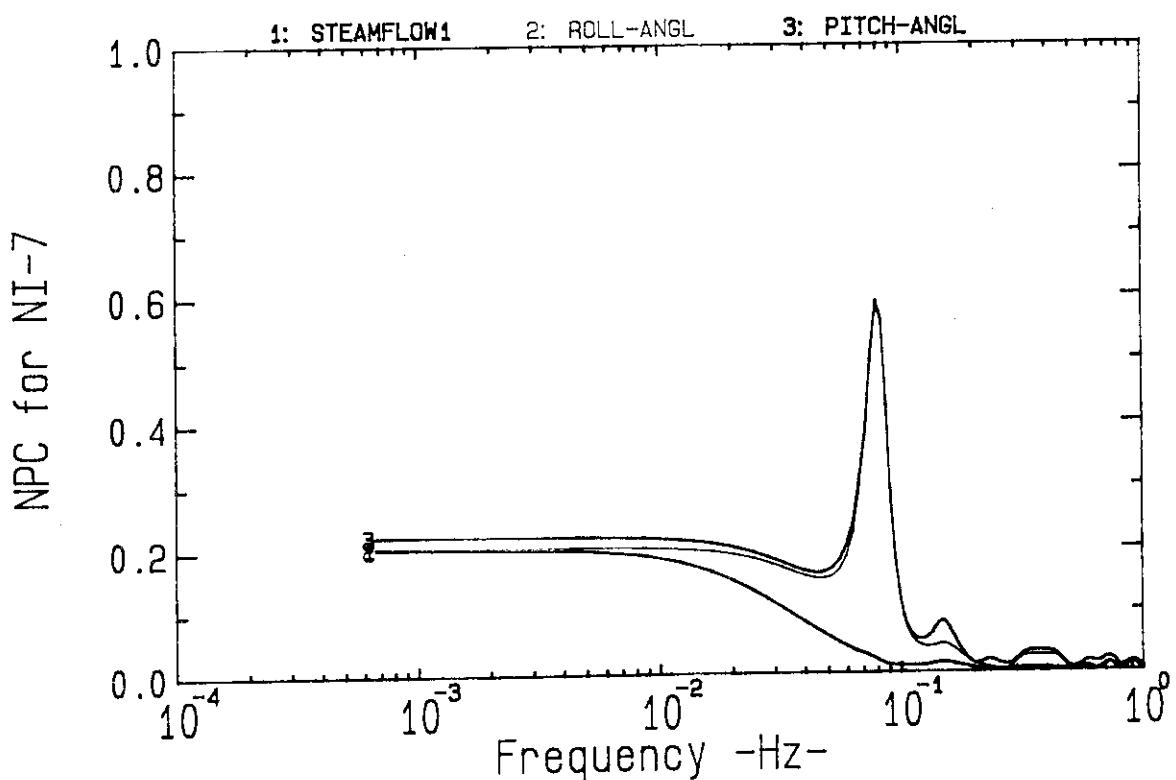


Fig. 41 炉外中性子束 (NI - 7) に対するNo. 1 ループ蒸気流量, ローリング角度及びピッチャング角度からの雑音寄与率

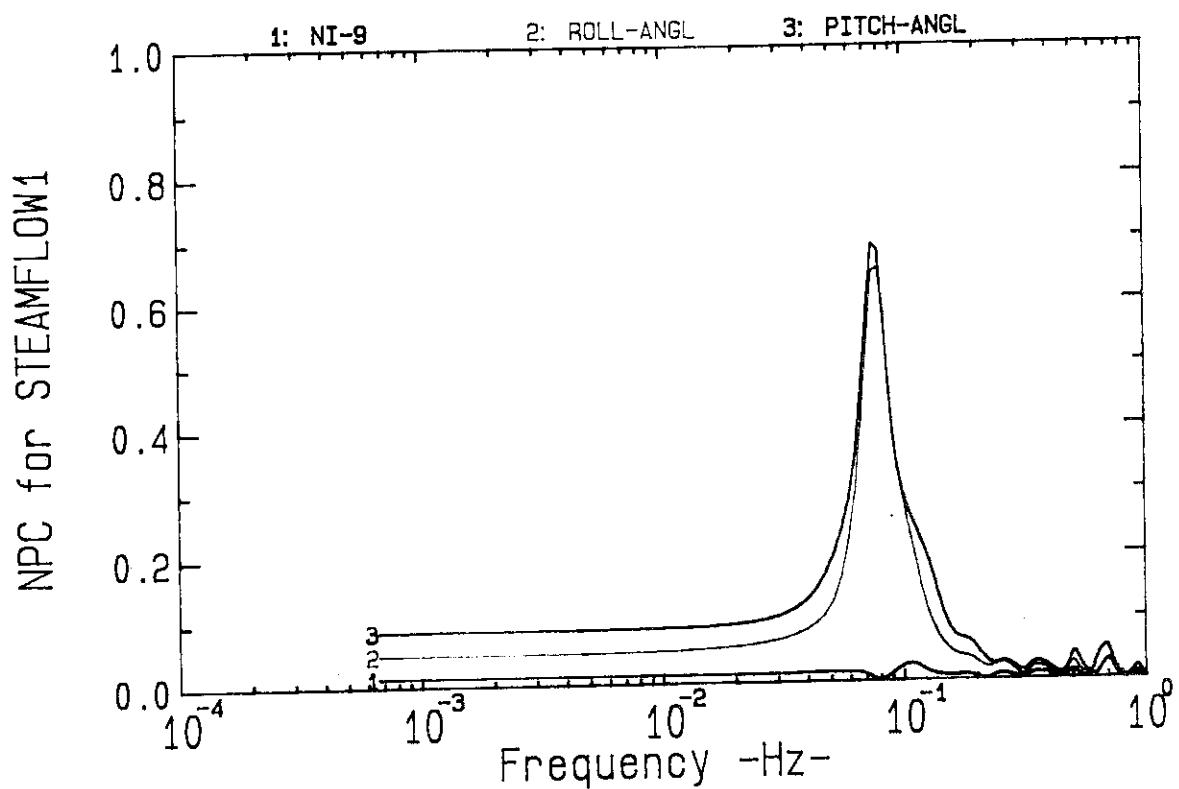


Fig.42 No. 1 ループ蒸気流量に対する炉外中性子束 (NI-9), ローリング角度及びピッチャン  
グ角度からの雑音寄与率

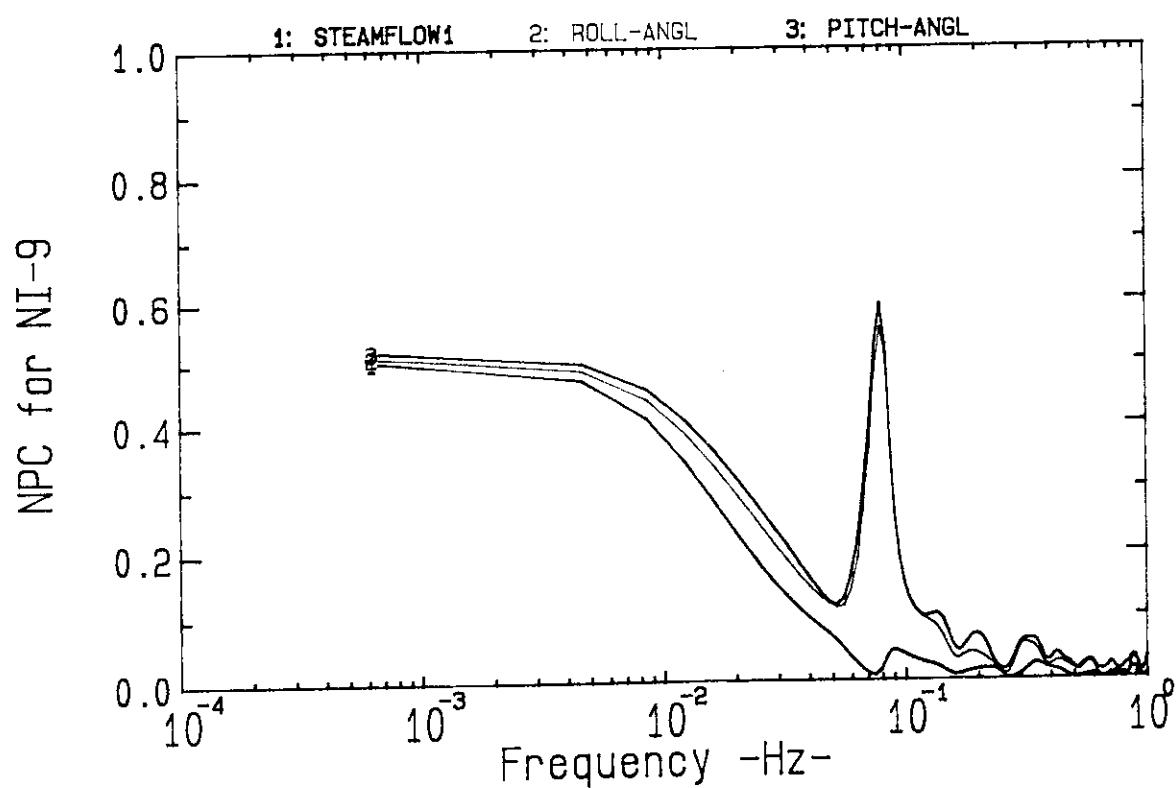


Fig.43 炉外中性子束 (NI-9) に対するNo. 1 ループ蒸気流量, ローリング角度及びピッチ  
ング角度からの雑音寄与率

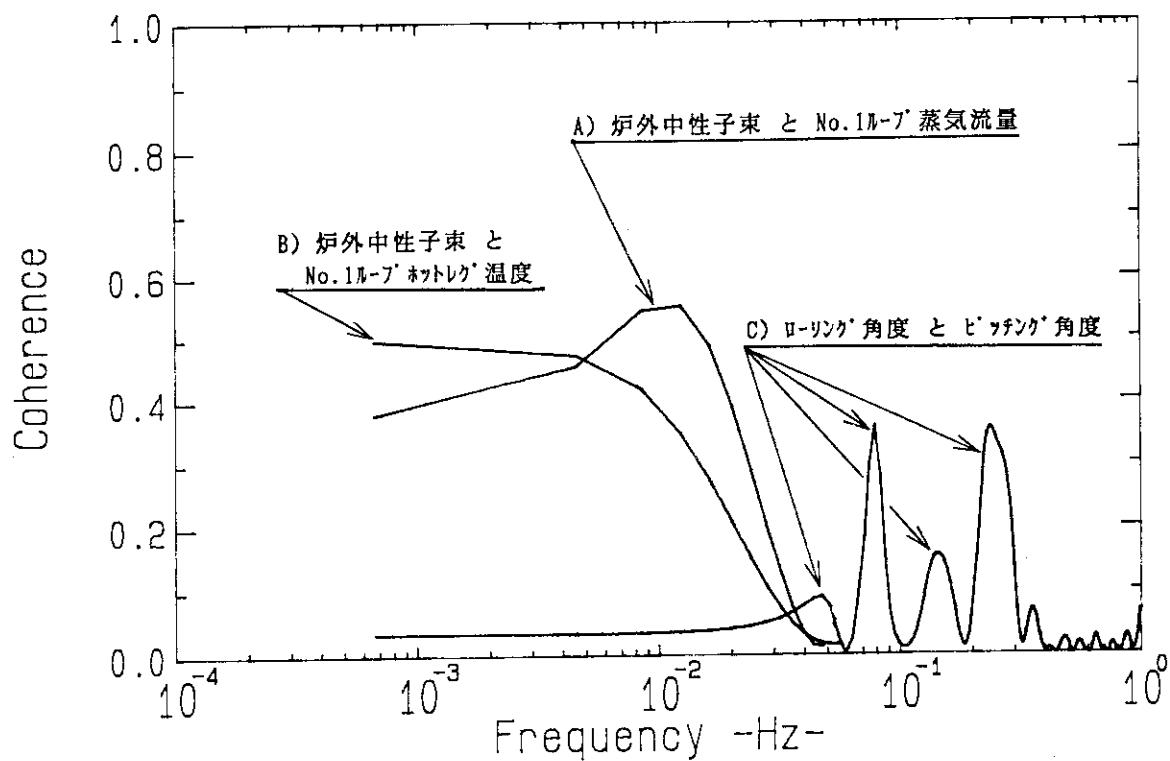


Fig.44 原子炉の負荷追従特性周波数域と船体運動周波数帯の比較（信号間のコヒーレンス）

## 付録 蒸気流量, 給水流量, ローリング角度及びピッティング角度に関する解析

本解析に使用した時系列データは以下に示す, 第1次航海中の平成2年7月15日における, 約50%出力で航海中のプラント状態が安定している時に収録したものである。この主要なプラント状態は以下に示すとおりであった。

原子炉出力	: 約 50%
一次冷却系圧力	: 約 $110 \text{ kg/cm}^2\text{G}$
一次冷却水平均温度	: 約 $273^\circ\text{C}$
加圧器水位	: 約 49%
蒸気発生器水位	: 約 70%
蒸気発生器内圧力	: 約 $47 \text{ kg/cm}^2\text{G}$

また, 自動制御系の状況は以下に示すとおりであった。

- 原子炉出力自動制御系 : 自動 (但し, 時系列データの収録中, 制御棒の駆動は行われていない。)
- 加圧器圧力制御系 : 自動 (但し, ヒータ出力を一定とし, スプレイによる圧力の制御を行った。)
- 加圧器水位制御系 : 自動
- 蒸気発生器給水制御系 : 自動

No. 1 ループ蒸気流量, No. 1 ループ給水流量, ローリング角度及びピッティング角度に関するAPSDの解析結果をFig.A.1に示す。船体は約 $8 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ の周波数におけるローリング及びピッティングによって揺られている。ピッティングについては, より高い周波数域に高次モードが存在している。No. 1 ループ蒸気流量, No. 1 ループ給水流量のAPSDには $8.3 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ ,  $1.5 \times 10^{-1} \text{ Hz}$ 及び $3.1 \times 10^{-1} \text{ Hz}$ にピークがある。

コヒーレンスの計算結果を下記の図に示す。

Fig.A.2 No. 1 ループ蒸気流量とNo. 1 ループ給水流量間のコヒーレンス

Fig.A.3 ローリング角度とピッティング角度間のコヒーレンス

Fig.A.4 No. 1 ループ蒸気流量とローリング角度, ピッティング角度間のコヒーレンス

Fig.A.5 No. 1 ループ給水流量とローリング角度, ピッティング角度間のコヒーレンス

No. 1 ループ蒸気流量とNo. 1 ループ給水流量間のコヒーレンスは, 低周波数域及び約 $8.3 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ ,  $1.5 \times 10^{-1} \text{ Hz}$ ,  $3.1 \times 10^{-1} \text{ Hz}$ で数値が高い。ローリング角度とピッティング角度間に $8.3 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ に強い相関があり,  $3 \times 10^{-1} \text{ Hz}$ より高周波数域のコヒーレンスの値も0.4程度である。No. 1 ループ蒸気流量とローリング角度, ピッティング角度間のコヒーレンスは, いずれも $8.3 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ に顕著なピークがある。No. 1 ループ給水流量とローリング角度, ピッティング角度間のコヒーレンスも同様に, いずれも $8.3 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ に顕著なピークが存在している。

No. 1 ループ蒸気流量に対する他の信号からの雑音寄与率をFig.A.6に示す。 $8.3 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ の周波数においては, ローリング角度によって蒸気流量信号が変動し, 一方 $1.5 \times 10^{-1} \text{ Hz}$ 及び

$3.1 \times 10^{-1}$  Hzにおいては、給水流量変動によって蒸気流量信号が変動している。 $8.3 \times 10^{-2}$  Hzにおいては、船体動搖によって二つのコンデンシングポット間に水頭差が生じるため並びに差圧伝送器のビーム、コア等の可動部が動搖によって加速度、傾斜等の機械的な影響を受けるために、蒸気流量計の出力が変動したためと考えられる。また $1.5 \times 10^{-1}$  Hz及び $3.1 \times 10^{-1}$  Hzにおいては、給水流量変動を原因として、主給水制御弁前後の差圧が一定となるよう、主給水ポンプタービンガバナ制御により、主給水ポンプタービンへ入る蒸気流量が制御されたためと考えられる。

No. 1 ループ給水流量に対する他の信号からの雑音寄与率を Fig.A.7 に示す。給水流量の低周波数域における変動は蒸気流量変動の寄与によるものであり、 $8.3 \times 10^{-2}$  Hz の周波数においては、ローリング角度によって給水流量が変動している。低周波数域は、(蒸気発生器水位、蒸気流量及び給水流量の 3 要素) 給水制御によってコントロールされた給水流量の、蒸気流量に対する追随性であると考えられる。 $8.3 \times 10^{-2}$  Hzにおいて、給水流量計はローリングによる加速度、傾斜等の機械的な影響を受けて変動している。

ローリング角度に対する他の信号からの雑音寄与率を Fig.A.8 に示し、ピッティング角度に対する他の信号からの雑音寄与率を Fig.A.9 に示す。ローリング角度は他の信号からの寄与をほとんど受けていない。また、ピッティング角度は $8.3 \times 10^{-2}$  Hz の周波数においてローリングによる寄与を受けており、この時の船体動搖はローリングを主体としたものであったことを示している。

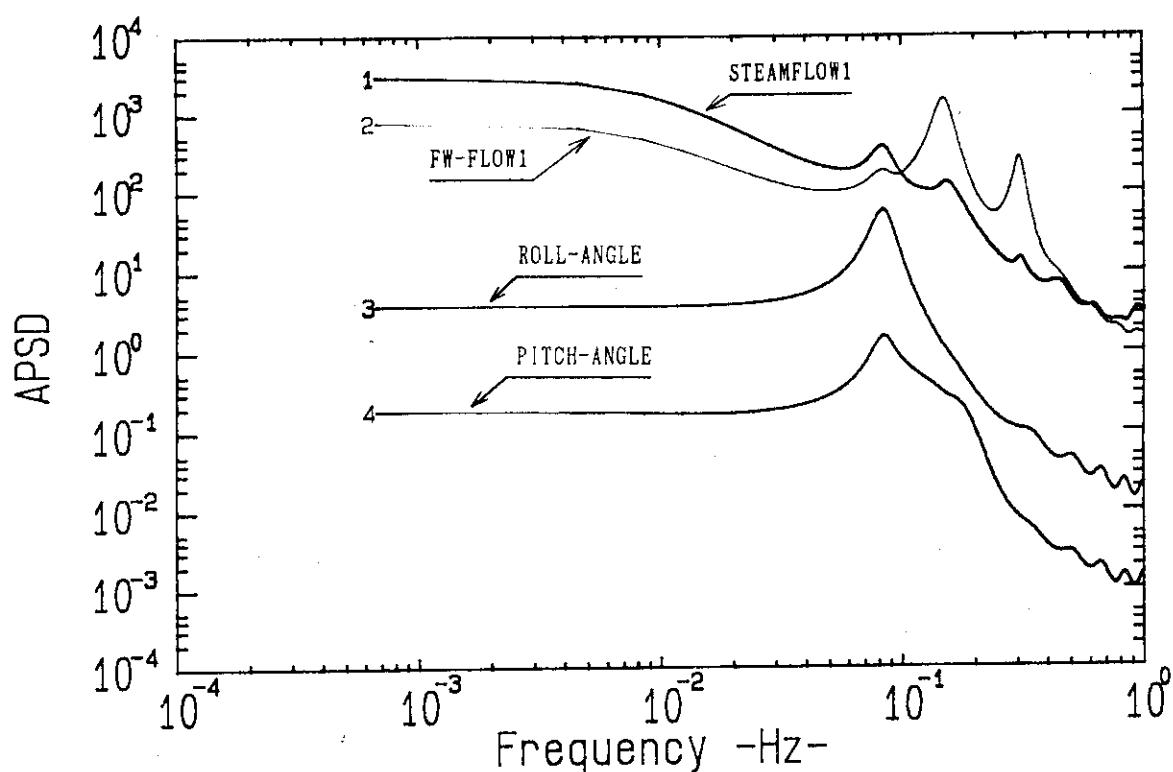


Fig. A.1 No. 1 ループ蒸気流量, No. 1 ループ給水流量, ローリング角度及びピッティング角度の APSD

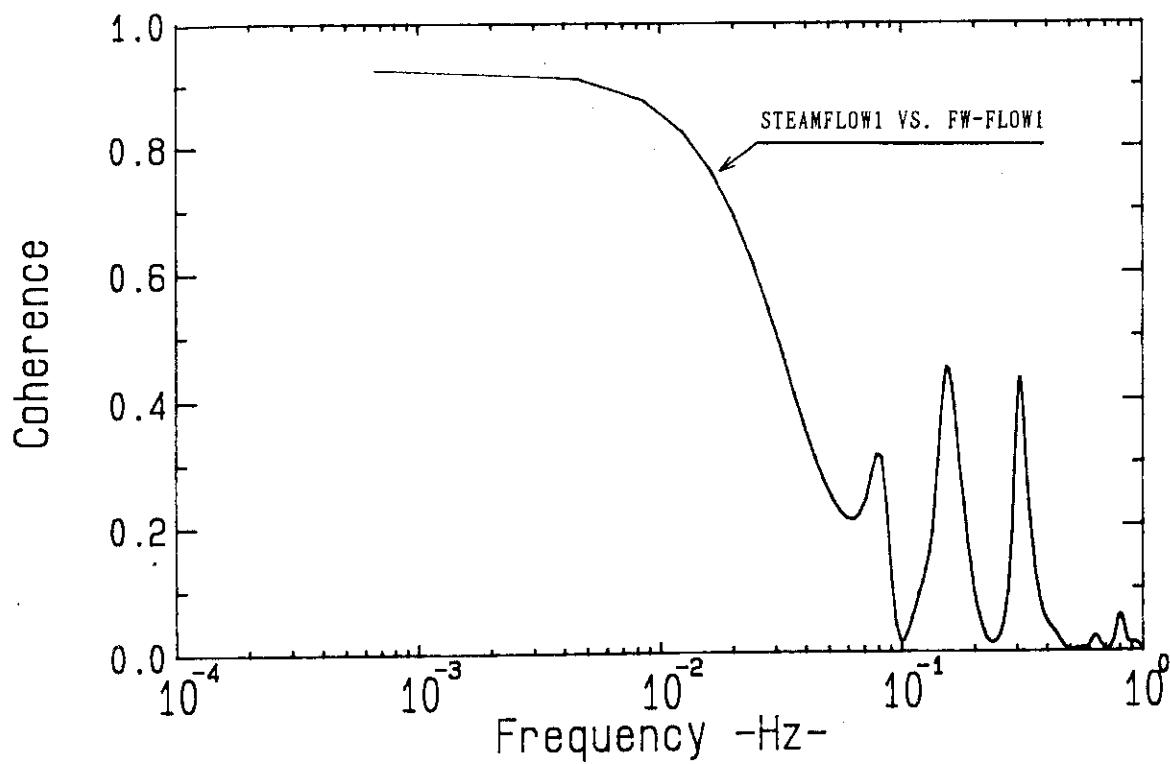


Fig. A.2 No. 1 ループ蒸気流量と No. 1 ループ給水流量間のコヒーレンス

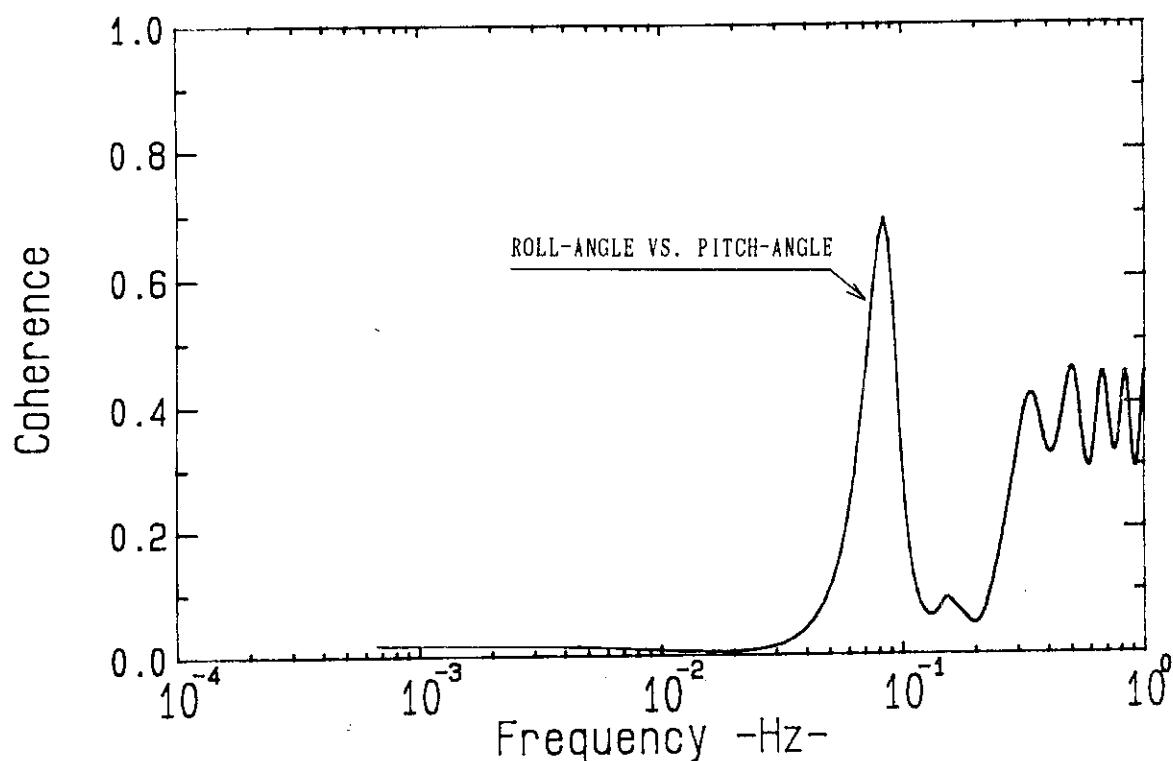


Fig. A.3 ローリング角度とピッキング角度間のコヒーレンス

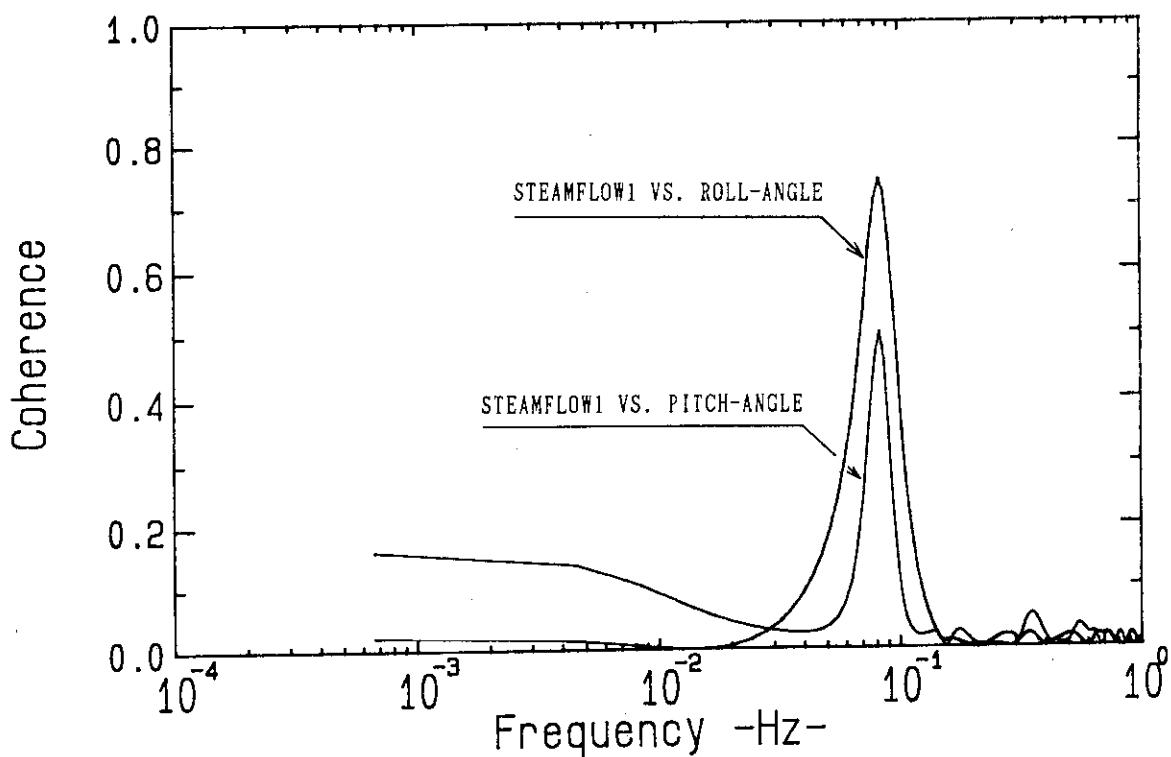


Fig. A.4 No. 1 ループ蒸気流量とローリング角度, ピッキング角度間のコヒーレンス

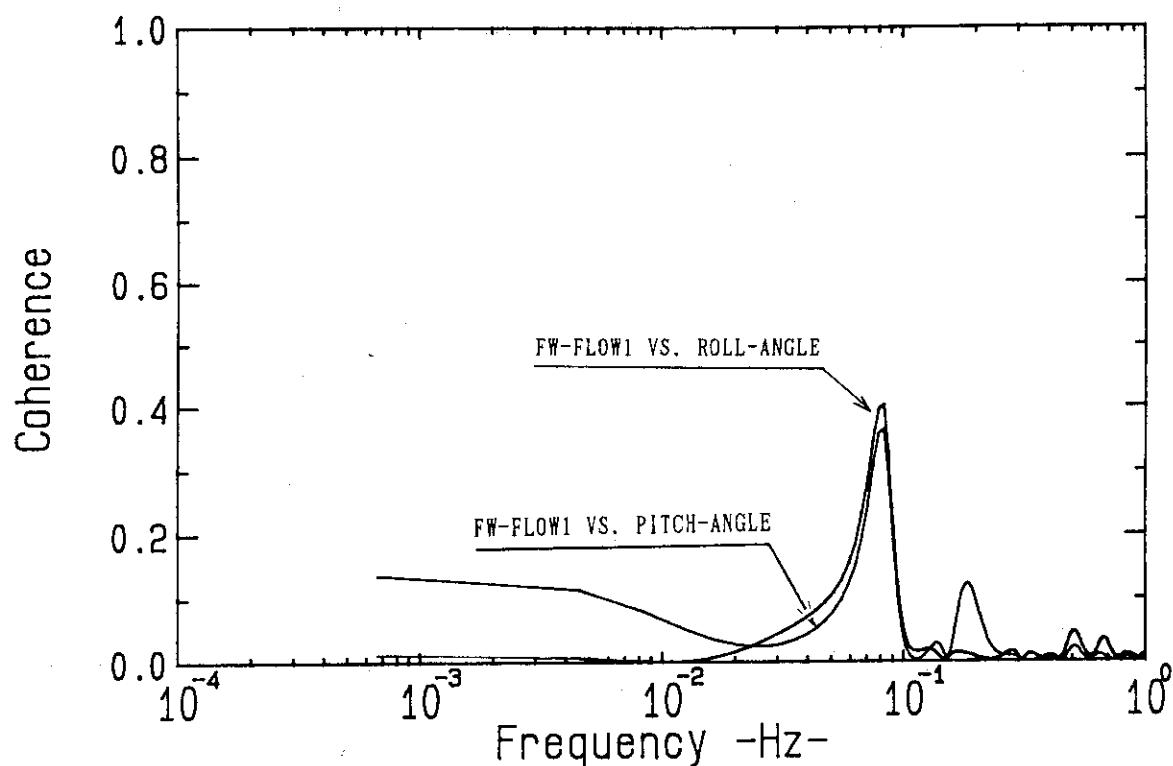


Fig.A.5 No. 1 ループ給水流量とローリング角度, ピッキング角度間のコヒーレンス

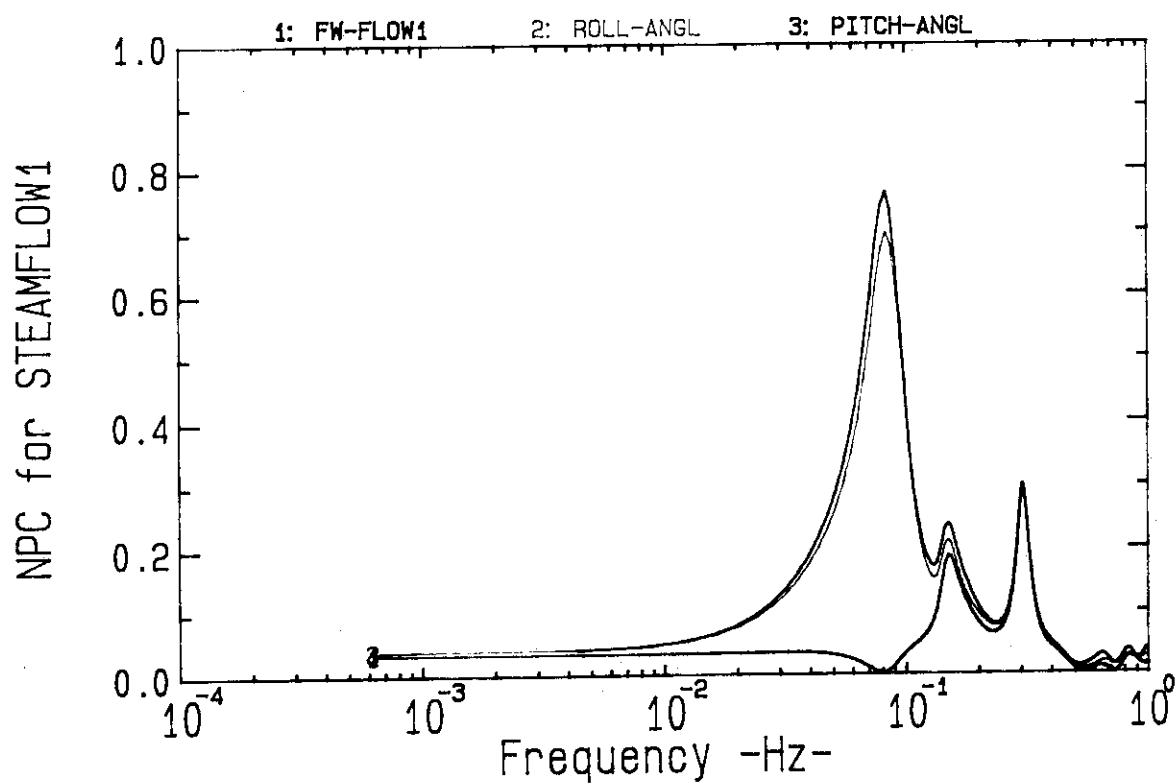


Fig.A.6 No. 1 ループ蒸気流量に対する No. 1 ループ給水流量, ローリング角度及びピッキング角度の雑音寄与率

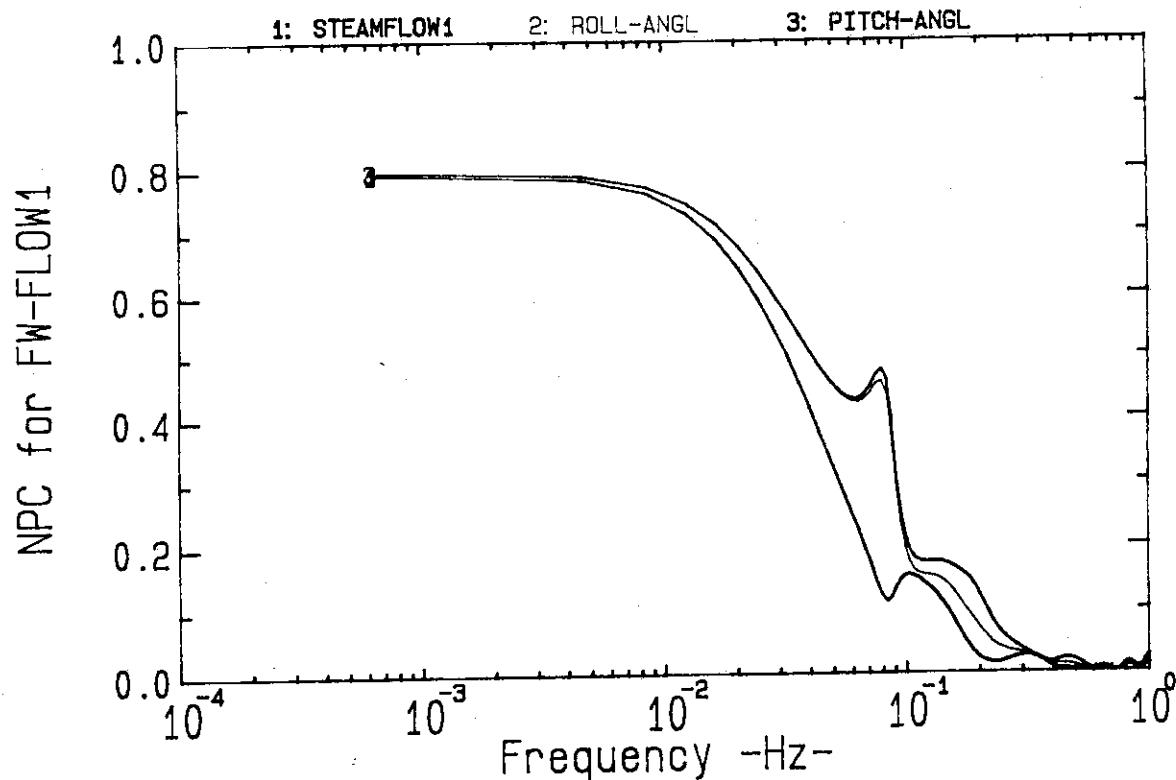


Fig. A.7 No. 1 ループ給水流量に対する No. 1 ループ蒸気流量, ローリング角度及びピッチャング角度の雑音寄与率

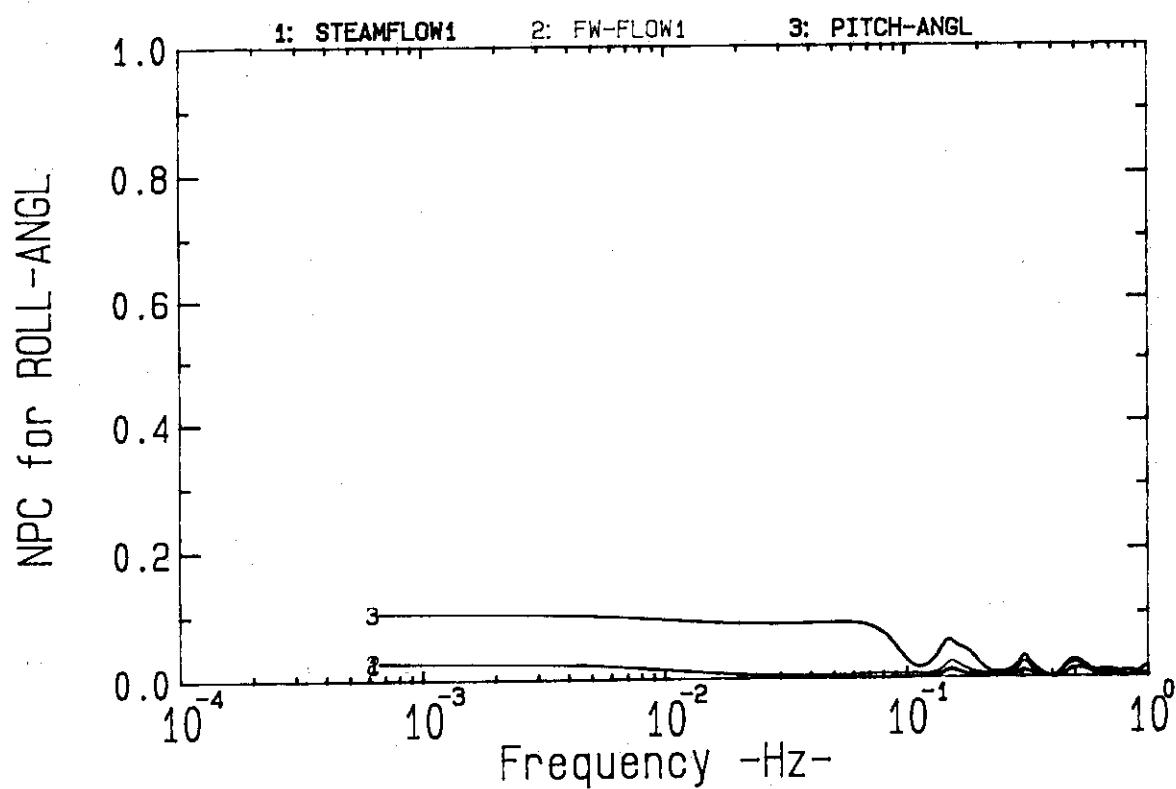


Fig. A.8 ローリング角度に対する No. 1 ループ蒸気流量, No. 1 ループ給水流量及びピッチャング角度の雑音寄与率

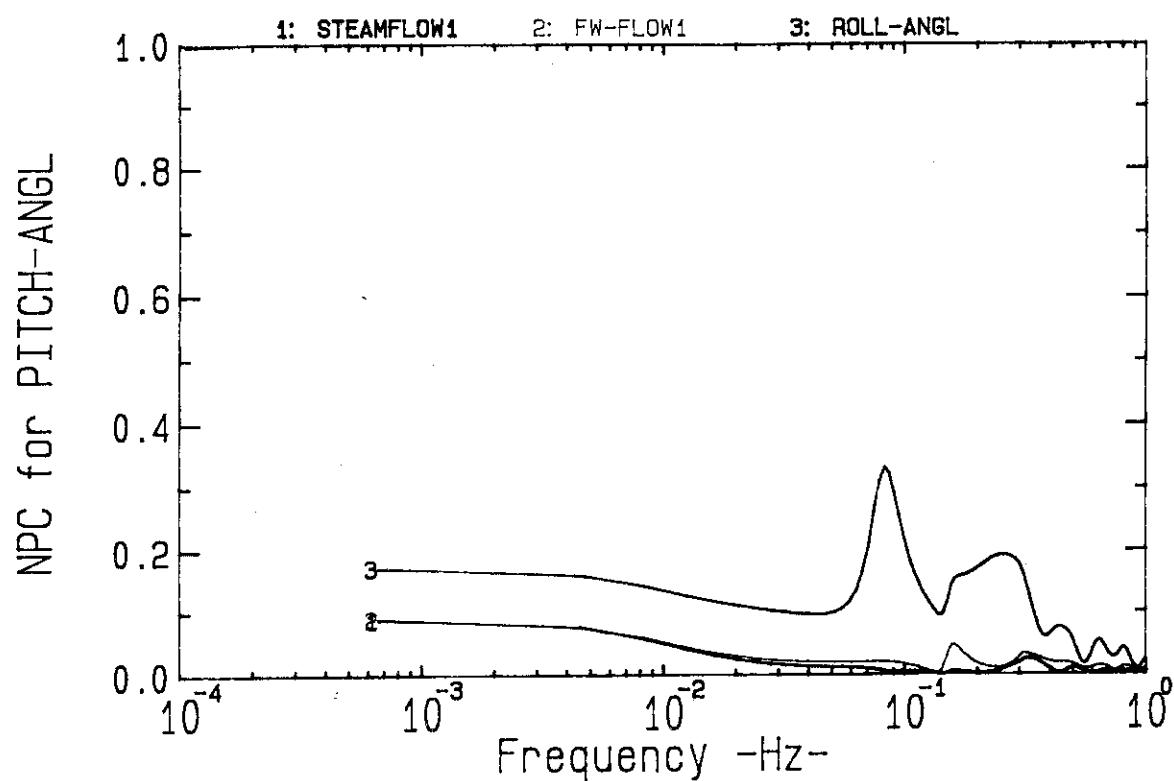


Fig. A.9 ピッキング角度に対する No. 1 ループ蒸気流量, No. 1 ループ給水流量及びローリング角度の雑音寄与率