

# 原子炉異常診断装置の開発 —ルースパーツモニタ—

## Development of Loose Parts Diagnostic System for Reactor Pressure Vessel —Loose Parts Monitor—

原子炉内の金属異物は炉内構造物と衝突し、機器に損傷を与える可能性がある。USNRCは、金属異物の監視装置の設置を勧告している。各国ではこの勧告を受け、装置の開発を行なってきたが、金属異物の衝突位置を精度よく標定するには至っていない。そこで原子炉などの複雑な形状の構造物での未知音源位置を精度よく標定する手法を開発した。その手法は、RPV表面に格子状に設置した複数の参照点にあらかじめ衝撃を与え、このときの音響信号と未知音源からの音響信号とを比較し、その類似性から未知音源位置を標定する。この手法は確性試験の結果、参照点間距離(確性試験では1m間隔で実施)の $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}$ の精度で位置標定できることを確認した。本開発は、通商産業省補助事業「原子力発電支援システム開発」の一環として行なったものである。

中野 裕\* *Yutaka Nakano*  
 出海 滋\*\* *Shigeru Izumi*  
 山元逸男\*\*\* *Itsuo Yamamoto*  
 佐々木正祥\* *Masayoshi Sasaki*

### 1 緒 言

発電用原子炉冷却系内に金属異物が存在すると、それが冷却水の流動により移動し、各種構造物に接触して損傷を与える可能性があり、そのような例が報告されている<sup>1)</sup>。プラントの信頼性確保には、異物の有無をプラント運転中に常時監視することが望ましく、USNRC(米国原子力規制委員会)は異物を監視するためのLPM(Loose Parts Monitor: 原子炉異常診断装置)の設置を勧告している<sup>2)</sup>。この勧告に沿って、米国、西ドイツ、フランスのほか国内でも開発が進行している<sup>3)~5)</sup>。

冷却系内の金属異物は、流れに伴って移動し圧力容器壁などと衝突して発生する衝撃音により検知できる。LPMは圧力容器や配管などの外壁に音響検出器を取り付けて、異物の衝突音をモニタする方法を採る。しかし、原子炉では異物の衝突以外に冷却水の流動、制御棒などの動作、ポンプの回転など種々の原因で音が発生する。これらの音と異物の衝突音を、どのようにして確実に区別し誤検出をなくすかがLPM開発の課題である。また、衝撃音を検知した場合の位置標定は、異物の存在位置を知る上で重要であると同時に、機器動作時の衝撃音と異物の衝撃音を区別するためにも必要である。原子炉圧力容器外から衝撃音源位置を標定する方法に関しては、国内外で開発が進められているが、炉内構造物を含む複雑な形状の系に対し、高精度で標定することは極めて難しく実用化されていない。これに対し日立グループは、実用炉での各種音響雑音や電気雑音、及び衝撃音の伝搬特性のデータを採取・解析し、雑音除去法や音源位置標定法を開発した。以下、衝撃音の検出法、位置標定法及びそれを適用したLPMの構成と確性試験結果について報告する。

### 2 衝撃音の検出法と位置標定法<sup>6)~8)</sup>

原子炉内で金属同士の衝突による衝撃音は一過性の音であり、音響検出器で検出した出力信号は、数十ミリ秒から100ミリ秒程度継続するバースト状の波形となる。したがって、出力信号レベルが設定レベルを超えるか否かを監視すれば衝撃音を検知できる。課題は設定レベルを下げてどのように検出

感度を上げ、しかも誤検出を防止するかである。原子炉が通常の運転状態で発生する雑音には、(1)冷却材の流動、ポンプ回転などの連続雑音、(2)機器動作時の一過性の衝撃音、更に(3)電気的なスパイク雑音、などがある。このうち(1)の連続雑音は、沸騰水型原子炉では原子炉出力あるいは再循環流量の増加とともにレベルが上昇し、定格運転時には最も高レベルな状態で監視することになる。しかし、連続雑音と衝撃音とは周波数スペクトルに顕著な違いがあり、フィルタによる周波数弁別で識別可能である。(2)の機器動作音は、異物衝撃音とほぼ同一の発生機構に基づくため、その発生位置を標定して区別する以外に方法はない。(3)の電気雑音は、衝撃音と同様に一過性の信号であるが、周波数が高いので周波数弁別が有効である。しかしこれだけでは不十分で、電気雑音による誤検出は極めて多い。LPMは6~12個の音響検出器を圧力容器など外壁に設置するが、電気雑音は、それらの複数の信号線に同時に発生する。これに対し衝撃音は、音源から各検出器までの距離が異なるため同時には検出されず、通常数ミリ秒の時間差をもつ。したがって、複数の信号線に0.5ms以内に検出された信号は、電気雑音とみなして排除することで誤検出を防止できる。以上に述べた連続雑音及び電気雑音のフィルタによる周波数弁別と電気雑音の同時性判定により、異物の検出感度に関するUSNRCの要求値<sup>\*)</sup>より5倍以上高い感度で監視できることを、BWR(Boiling Water Reactor)実機の音響データにより確認している。次に原子炉圧力容器上の衝撃位置標定法について述べる。従来アコースティックエミッションの分野に三角法と呼ばれる位置標定法があり、LPMにも三角法を適用する試みがある。三角法は、媒体の音速が一定であることと音の伝搬経路が明確に分かることを前提とし

※) USNRCのRegulatory Guide 1,133では、「0.68Jの運動エネルギーをもった異物が衝突して発生する衝撃音を、1m離れた点でSN比を5以上で検出せよ」としている<sup>2)</sup>。

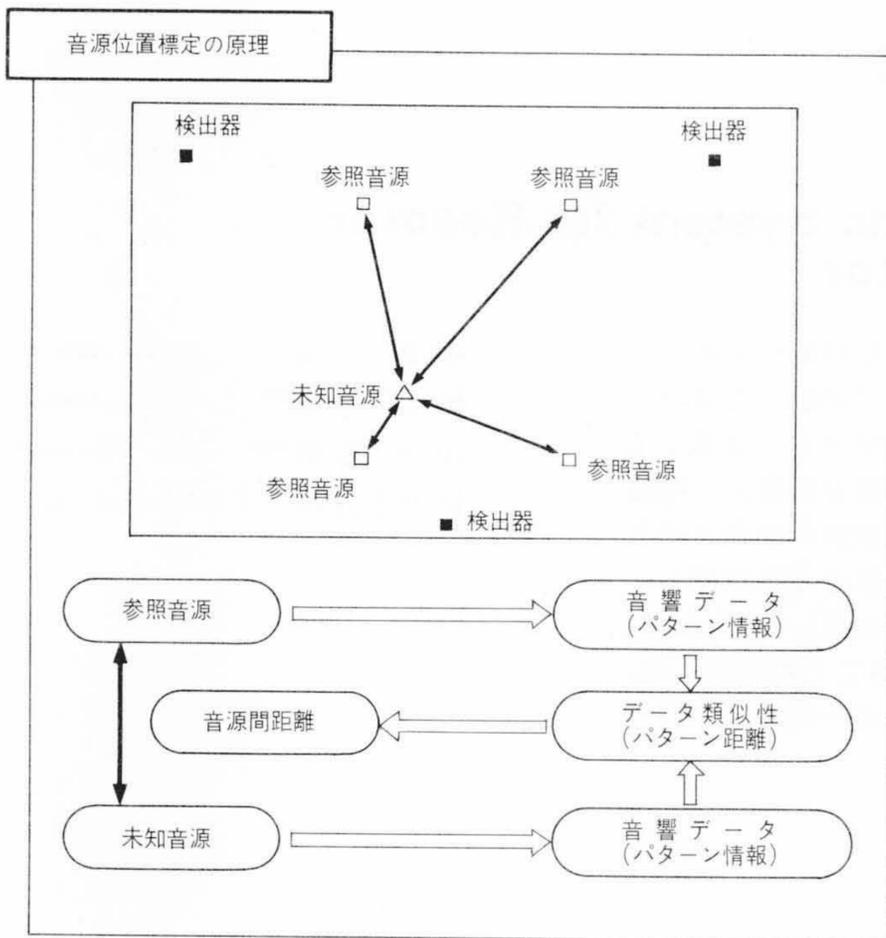


図1 参照音源を用いた音源位置標定法の原理 未知音源は、参照音源との位置関係から求められる。

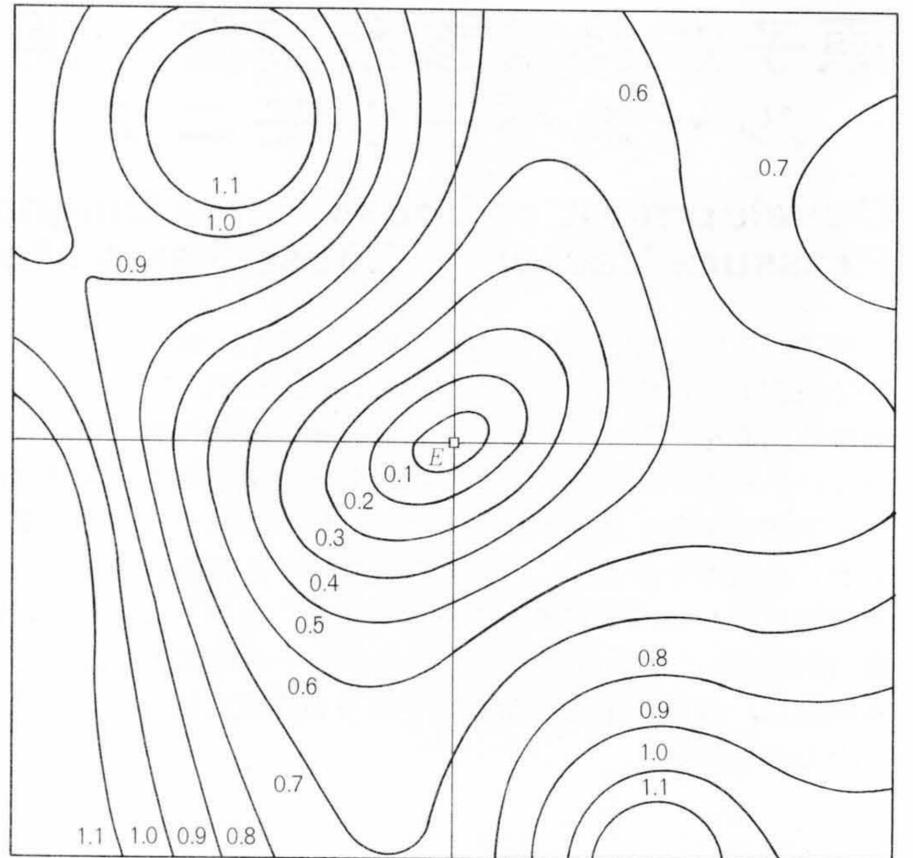


図2 参照点とその周囲の任意の位置との間の音響データの類似度マップ このマップを計算機に記憶しておき、例えば、参照点Eと未知音源の間の音響データの類似度が0.6であったとすれば、未知音源は、図の0.6の等高線上のいずれかの位置に存在することになる。

ている。しかし、原子炉圧力容器は形状が複雑なため、音速が場所によって異なり、伝搬経路も明確でない。このことはBWR実機で当事者などにより確認されており<sup>7)</sup>、米国でも三角法による原子炉圧力容器の音源位置標定は不可能と結論した報告がある<sup>8)</sup>。このため今回、参照音源を利用する方法を開発した。この方法は図1に示すように、対象構造物に音響検出器を3個以上設置する。参照音源は格子状に設定し、その場所にハンマなどで打撃を与え、各検出器で得られる音響到達時刻のデータを記録する。未知音を検出した場合、未知音データと参照音データより参照音源から未知音源までの距離を求め未知音源位置を標定する。未知音源と参照音源との距離は、それぞれの音響データの類似性から求める。類似性が強ければ未知音源は参照音源に近く、類似性が乏しければ参照音源と未知音源は離れていることになる。データの類似度を定量的に示す指標を定義すれば、参照音源と任意位置とのデータの類似度の対応関係が事前に求められる。図2はその

対応関係の例で、参照音源Eとのデータの類似度が一定となる点の軌跡を等高線として表わしたもので、同図中の数値が類似度を表わす。この等高線マップは検出器と参照点の位置関係から求められるものである。LPMにより未知音が検知され、そのデータと参照音源Eのデータの類似度が例えば0.6であったとき、未知音源は同図の0.6の等高線上に存在する。このようなマップを各参照音ごとに事前に用意することで、等高線の交点として音源位置を標定できる。この方法は、音速や伝搬経路に関係なく音源位置を標定できることが大きな特徴である。またデータの類似度が零に近ければ、その音は参照点と同一の音源であり、機器動作時の音を参照音源に組み込むことで、衝撃音と機器動作音の識別が可能となる。

### 3 ルースパーツモニタの構成

今回開発したLPMの構成を図3に、外観を図4に示す。本装置は異常検出部、位置標定部、入出力装置から構成される。

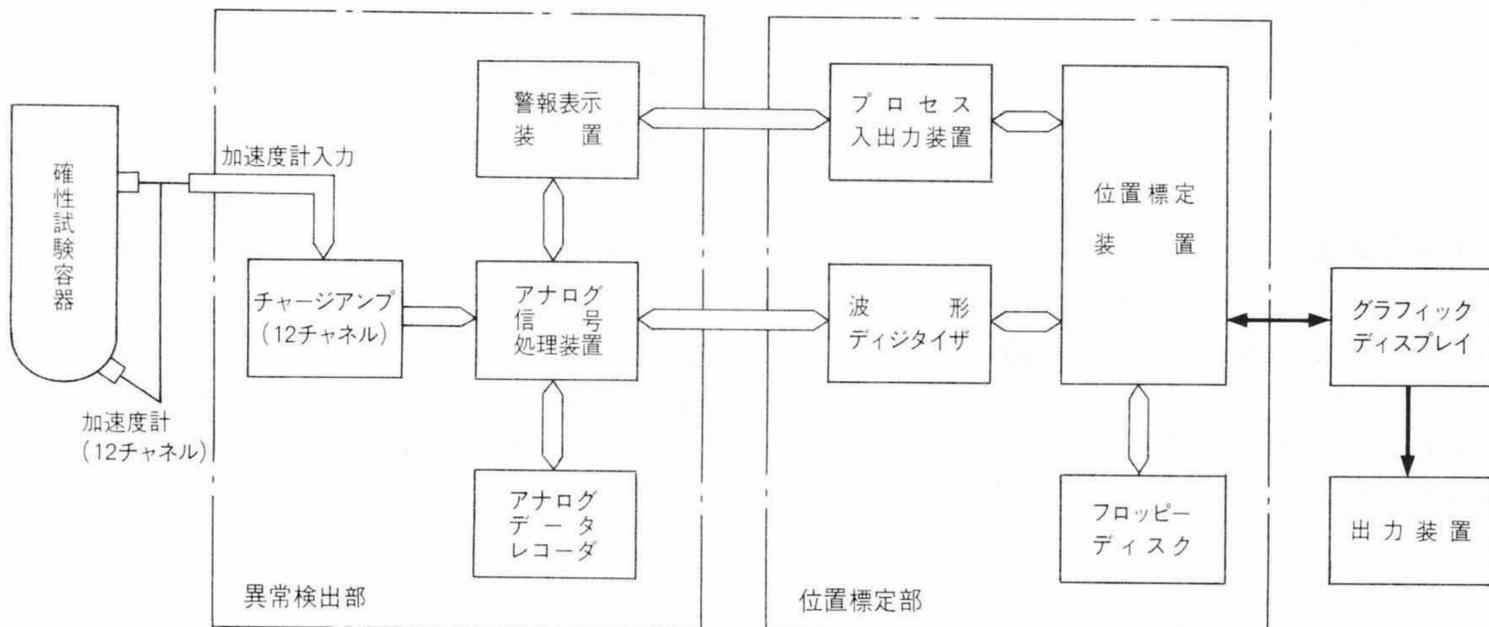


図3 原子炉異常診断装置のハードウェア構成 原子炉異常診断装置は、異常検出部、位置標定部及び周辺機器から構成される。

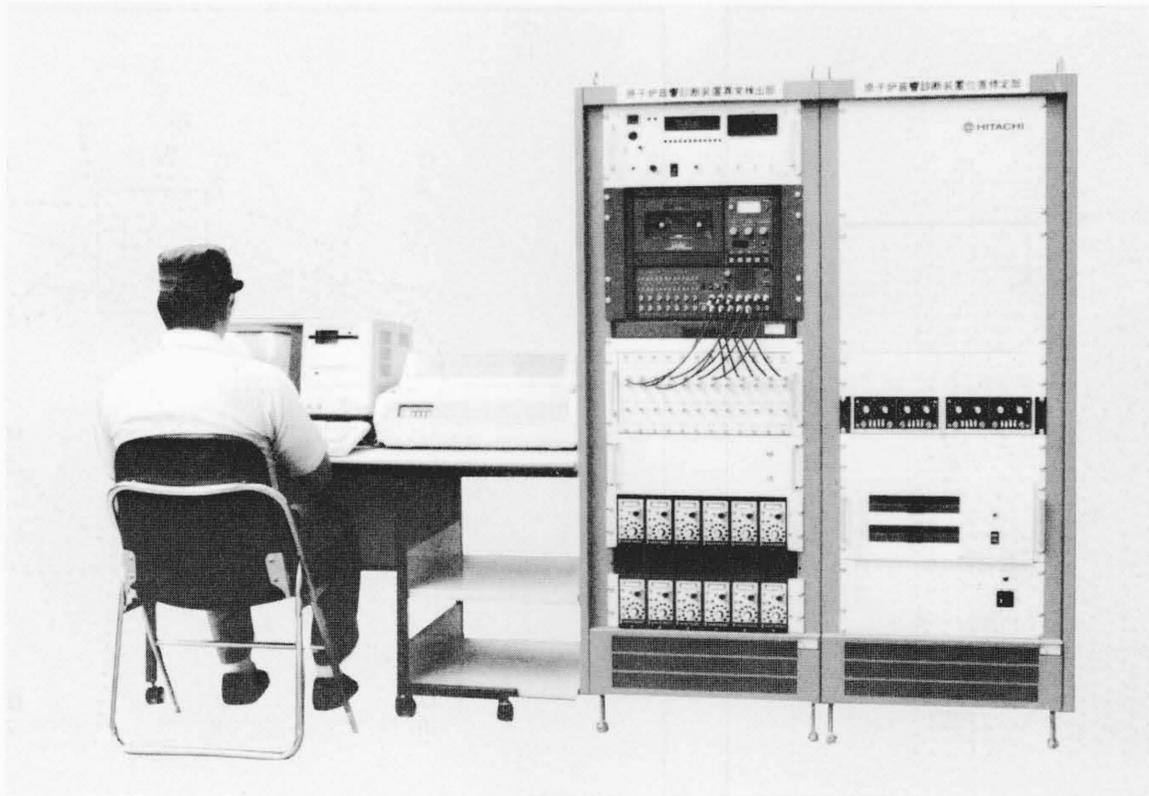


図4 原子炉異常診断装置の外観  
今回完成した原子炉異常診断装置の外観で、左からマイクロコンピュータ、プリンタ、異常検出装置、位置標定装置を示す。

異常検出部は、RPV(原子炉圧力容器)外壁に取り付けた加速度計で得られた音響信号が、衝撃音か雑音かを判定し、衝撃音と判定された場合は、音響信号を自動的に記録し、同時に警報を発する。次に、衝撃音と判定された信号は、位置標定部でデジタル化され、計算機により未知音源位置の標定が行われ、その情報はすべて記憶装置に記録される。

#### 4 確性試験

今回開発した未知音源位置標定アルゴリズム、及び試作したLPMの確性試験を $\frac{1}{3}$ RPVモデルを用いて実施した。以下に $\frac{1}{3}$ RPVモデルの概要と試験結果を示す。

##### 4.1 確性試験装置の概要

確性試験用 $\frac{1}{3}$ RPVモデルは、電気出力1,100MW級沸騰水型原子炉RPVの相似縮小モデルで、その概要を図5に示す。確性試験としての検証性を考慮し、 $\frac{1}{3}$ RPVモデルには、 $\frac{1}{3}$ ジェットポンプ及びその駆動ループ、CRD(制御棒駆動機構)案内管、シュラウドが取り付けられ、更に $\frac{1}{3}$ ジェットポンプ駆動時の炉心流量は実機と相似である。また、 $\frac{1}{3}$ RPVモデルの胴体部、下鏡部、再循環水出入口ノズル部、CRD案内管の外壁に合計12個の加速度計が検出器として取り付けられている。

##### 4.2 確性試験結果

確性試験では $\frac{1}{3}$ RPVモデル外壁に衝撃を与え、その標定精度の確認を行なった。図6に確性試験での等高線マップの一例を示す。図7は $\frac{1}{3}$ RPVモデル胴体部外壁に衝撃を与えたときの位置標定結果のCRT(Cathode Ray Tube)表示例である。同図中\*印が標定された未知音源位置であり、▲印は実際に衝撃を与えた位置を記入したものである。同図の例は未知音源に近いと判定された参照点1~9(□印、約1m間隔で設定)それぞれの等高線マップ(図6)から未知音源の音響データに等しいものを抽出し、各参照点ごとに1本ずつ表示している。理想的にはこれらの等高線はすべて1点で交わるが、実際は誤差のため図7のように1点には交わらない。しかし、各等高線の密集度の高い領域に未知音源の存在が予想できる。そこで図7の長方形部分(カーソルで指定)について各等高線に最も近い点を計算し、その点を未知音源位置として標定する。図8は標定結果を $\frac{1}{3}$ RPVモデルの展開図上に表示した例である。本試験の結果では、 $\frac{1}{3}$ RPVモデルの胴体部、下鏡部

各部に衝撃を与えたときの平均標定誤差は0.2m以下であり、USNRCの要求を十分満足することが確認された。本装置を実機に適用する場合、参照点データはRPV外壁にハンマなどで衝撃を与えて採取するので、参照点は少ないほうが効率的である。そこで、参照点数を約半数とした場合についても同様の試験を行なった。この結果、位置標定精度は0.25m以下であり、実機適用時は高さ方向3m、円周方向60度の間隔で約30点の参照点を設定することにより、0.6~0.75mの誤差範囲で十分位置標定できる見通しを得た。

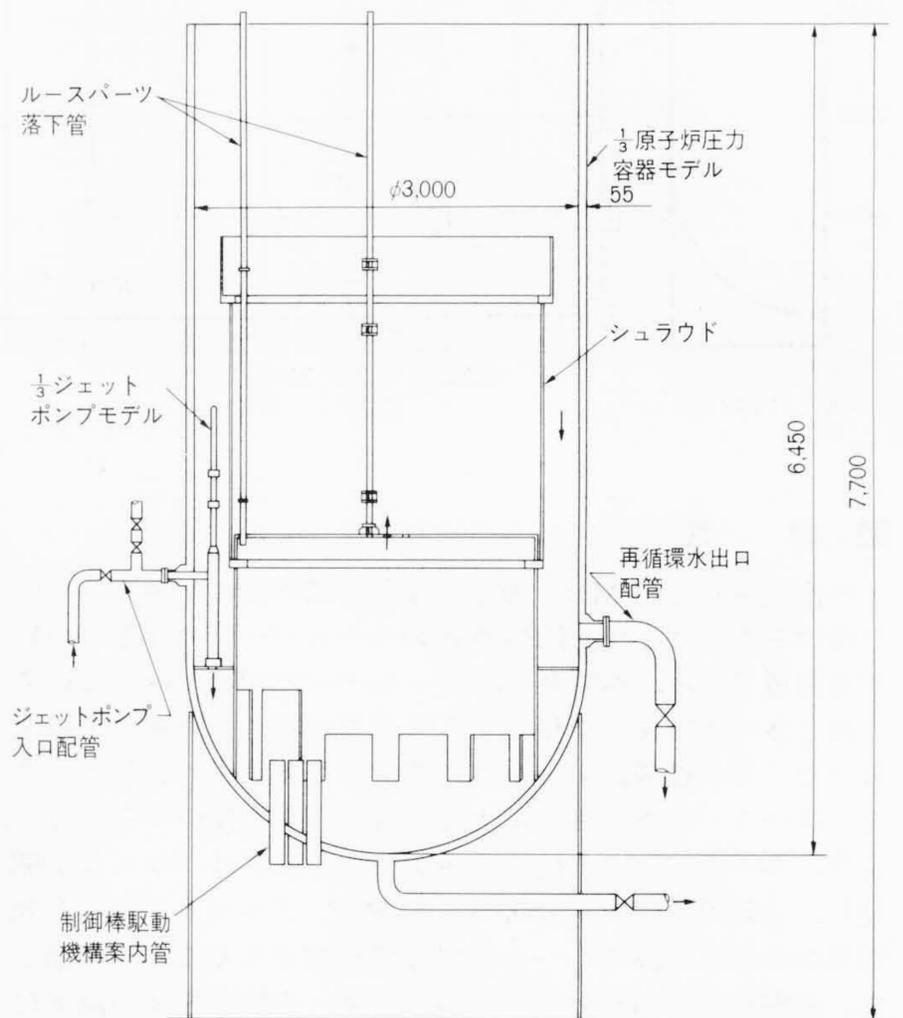


図5 確性試験用 $\frac{1}{3}$ 原子炉圧力容器モデル  $\frac{1}{3}$ 原子炉圧力容器モデルは、実機電気出力1,100MW級原子炉と極力相似になるようにした縮小モデルで、 $\frac{1}{3}$ ジェットポンプモデル、シュラウド、制御棒駆動機構案内管などを含む。

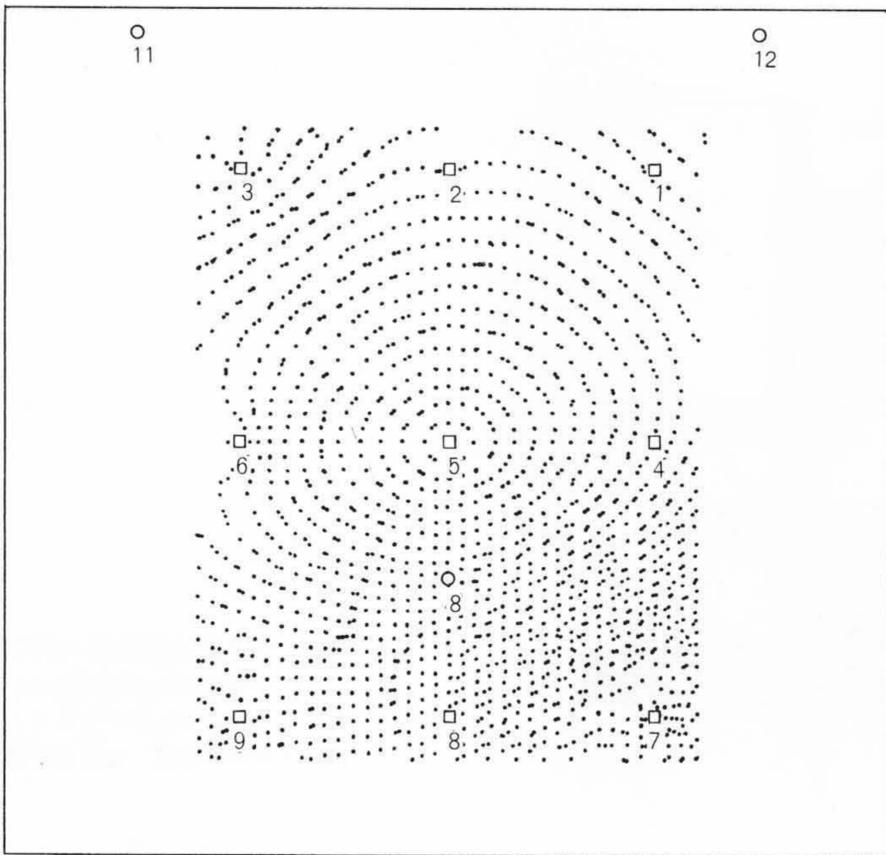


図6 参照点周りの音響データ等高線図 参照点5に対する音響データ等高線で、各参照点についてのデータが計算機に記憶してある。

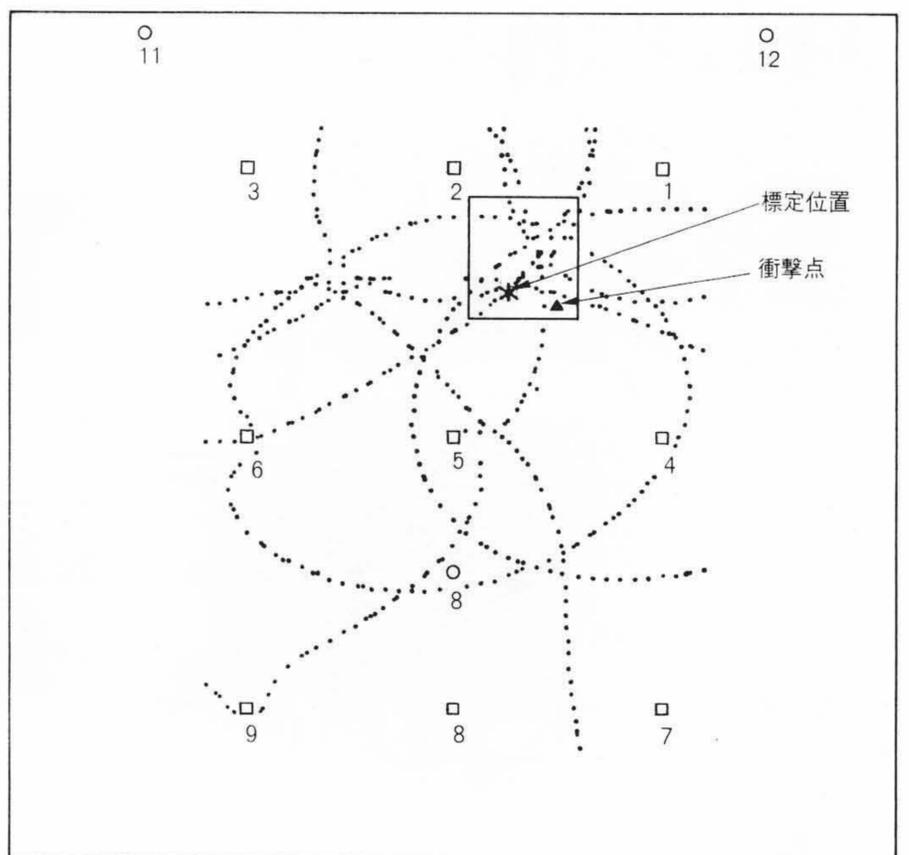


図7 未知音源位置標定結果(1) 未知音源位置標定結果のCRT表示例で、本例での実際の衝撃点との誤差は0.2m程度である。

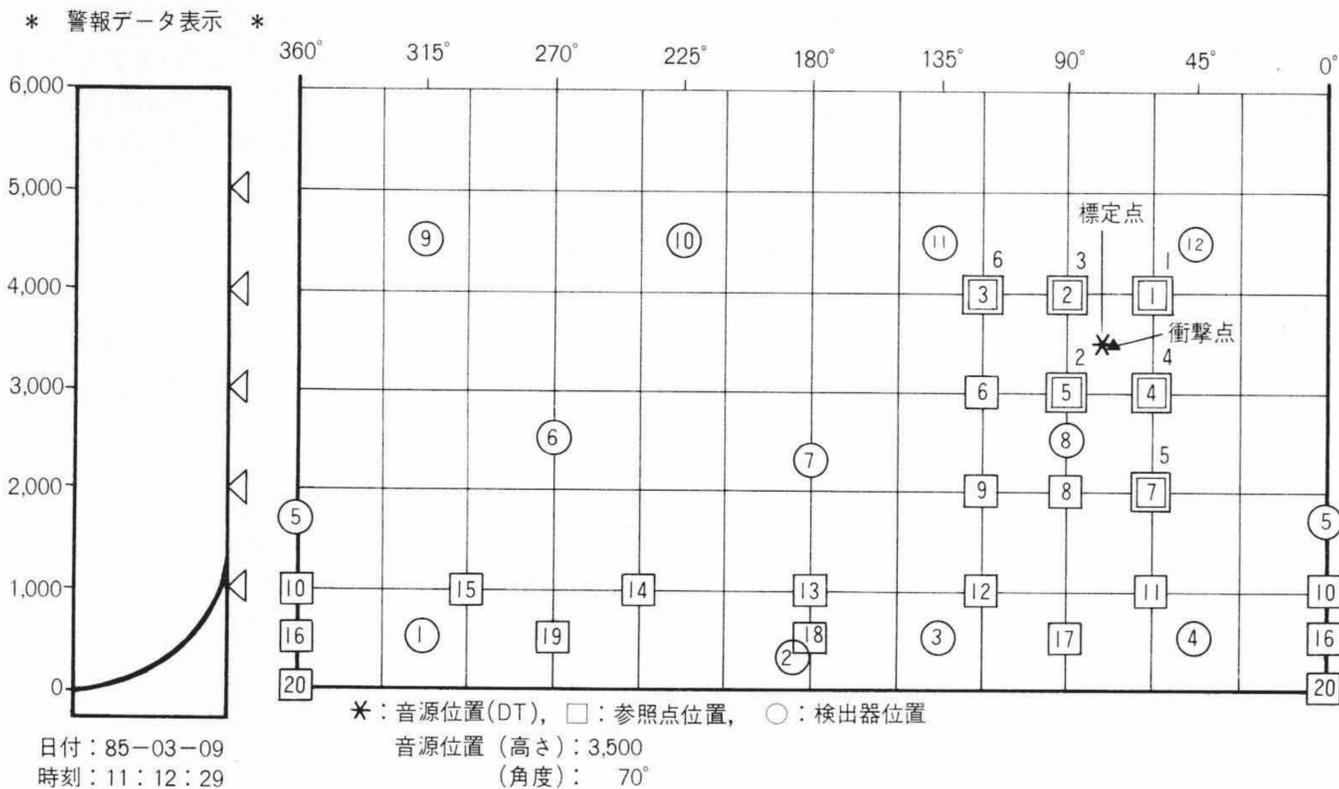


図8 未知音源位置標定結果(2) 未知音源位置標定結果を、原子炉压力容器の展開図上に示したCRT表示例である。

### 5 結 言

今回開発したLPMは、原子炉压力容器外壁に加速度計を取り付けることにより、RPV内部のルースパーツの存在を検知する装置である。本開発ではルースパーツがRPV内部で衝突したときの衝突位置を標定するアルゴリズムの開発に主眼をおいた。その結果、あらかじめ設定した参照点の音響データと、ルースパーツの衝突による音響データを比較することにより、ルースパーツの衝突位置を標定するアルゴリズムを開発し、 $\frac{1}{3}$ RPVモデルによる確性試験で、アルゴリズムの有効性及び参照点間隔の $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}$ の精度で標定できることを確認した。実機適用に当たっては、参照点データ採取作業の能率化に関する検討が必要である。最後に、原子炉異常診断装置の開発に当たり、多大の御指導をいただいた通商産業省殿に対し深く感謝の意を表わす次第である。

### 参考文献

- 1) Marini J., et al. : Progress in Nuclear Energy, **9**, 519(1981)
- 2) U. S. NRC : Regulatory Guide 1.133(July 1980)
- 3) Kryter, R. C., et al. : ORNL-TM 7967(1981)
- 4) Dio W. H. et al. : Progress in Nuclear Energy, **1**, 747(1977)
- 5) Fujita K., et al. : ibid., **9**, 531(1981)
- 6) Izumi S., et al. : J. Nucl. Sci. Technol. **21**[2], 94~102(1984)
- 7) 出海, 外 : 原子力学会誌, **26**[10], 890~896(1984)
- 8) Izumi S., et al. : Progress in Nuclear Energy, **15**, 553~560(1985)