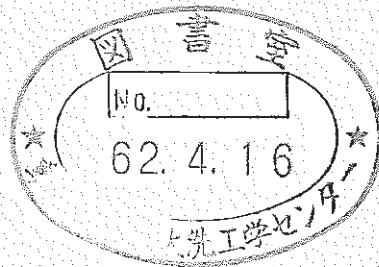


音響式水リーク検出系開発の基礎試験 (II)



1987年1月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N9410 87-014
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

音響式水リーク検出系開発の基礎試験 (Ⅱ)

下山一仁* 黒羽光男**
田辺裕美*

要 旨

高速増殖炉の蒸気発生器で伝熱管の水リークを早期に検出し、伝熱管の破損伝播規模を最小にする手段として、応答時間の速さから音響式水リーク検出系が有望視されている。本研究では、(1)単チャンネル信号で、バックグラウンドノイズと水リーク音の実効値を単純に比較する検出方法と、(2)多チャンネル信号で、相互相関法を使用しリーク検出/位置標定を行う方法の2つについて検討を行った。

(1)では、50 MW蒸気発生器試験施設での音響測定データを基に「もんじゅ」、実証炉SGのバックグラウンドノイズレベルを推定した結果、0.0093Gと0.012Gとなった。また、それらと同等なレベルの水リーク率は、それぞれ約0.7 g/sec、約7 g/secと推定した。

(2)では、まずオフ・ライン解析で検出手段を開発し、それをもとにオン・ラインで信号処理が可能な装置を試作してその性能を評価した。オン・ライン解析では、水平方向検出で内部構造物の影響を解析する方法と、下部プレナム部鏡壁にピックアップを設置して垂直方向からリークを検出する方法の2つについて実施した。いずれもノイズが有ると検出できず、ノイズが無い場合でもリーク位置によっては検出できない場合もあった。オン・ライン信号処理装置の開発では、下部プレナム空間で水平方向検出法の試験を実施したところ、オフ・ラインとほぼ同じ精度での検出が可能であった。

* 大洗工学センター安全工学部プラント安全工学室

** 現在 安全部安全研究課

Jan. 1987

Basic Experimental Study on the Development of Acoustic
Water Leak Detection System (II)

Kazuhito-Shimoyama*
Mitsuo-Kuroha**
Hiromi-Tanabe*

Abstract

Acoustic type water leak detectors have promising potentiality in short detection time for minimising the extent of tube failure propagation caused by water leakage from a heat transfer tube of an LMFBR steam generator.

Two different methods as follows were studied in this program:

1. The method to compare effective values between water leak sound and back ground noise using a single channel.
2. The method to detect and locate the leak using cross correlation signal processing of multi-channel.

In the former one, it was estimated from acoustic signals obtained in the 50 MW Steam Generator Test Facility that the back ground noise levels of the Prototype and the Demonstration reactor were 0.0093G and 0.012G (G=gravity), respectively. The water leak rates equivalent to those back ground levels were evaluated as approximately 0.7 and 7 g/sec.

In the latter one, first a detection and location software was developed in a off-line analysis, and secondly an on-line signal processing hardware was manufactured as a trial.

In the off-line analysis, the influence of the internals on detection performance was examined by horizontal and vertical measurement. As the result, it revealed that back ground noise interfered the leak detection and location and that the potential depended on the leak positions even without noise. In the on-line analysis, leaks in a lower plenum were detectable with the same accuracy as the off-line analysis.

* FBR Plant Safety Engineering Section, Safety Engineering Division, OEC, PNC.

** Present affiliation: Safety Management, Safety Division.

目 次

1. はじめに	1
2. 50MW蒸気発生器バックグラウンドノイズの評価	2
2.1 目 的	2
2.2 試験装置と測定方法	2
2.3 測定結果及び評価	3
2.3.1 バックグラウンドノイズの実効値とその変化	3
2.3.2 周波数特性	5
3. ナトリウム-水反応音, 模擬ナトリウム-水反応音の評価	22
3.1 試験容器, 内部構造物及び導波棒の構造	22
3.2 試験結果と評価	23
3.3 ナトリウム-水反応音, 模擬ナトリウム-水反応音の周波数特性	26
4. 多チャンネル法による高信頼性水リーク検出法の開発	38
4.1 試験装置	38
4.1.1 試験容器	38
4.1.2 模擬リーク音源	38
4.1.3 音響検出器及び導波棒	39
4.1.4 計測及びデータ処理	39
4.2 解析方法	40
4.3 オフ・ライン解析の結果と考察	41
4.3.1 前回の基礎試験結果	41
4.3.2 内部シュラウドの影響	41
4.3.3 模擬SG下部鏡壁で垂直方向音響信号による検出	43
4.4 オン・ライン信号処理装置の開発と性能評価試験	45
4.4.1 多チャンネル型音響水リーク検出システム	45
4.4.2 下部プレナム部水中ガス噴出試験	46
5. ま と め	64
5.1 水リーク音レベルによる検出	64
5.2 多チャンネル相互相関法によるリーク検出/位置標定	65
5.3 音響法によるリーク検出の可能性	65
謝 辞	69
参考文献	70

APPENDIX

A : on-line 処理装置 (試作品) の各部使用	7 1
1. デジタル遅延装置	7 1
2. デジタル相関計	7 2
3. ホスト・コンピュータ・システム	7 4
B : on-line 処理装置 (試作品) の工場内性能評価試験結果	8 1
1. 純音の模擬信号	8 1
2. ホワイトノイズの模擬信号	8 2

図 表 リ ス ト

表 2.1	計測機器使用	7
表 2.2-1	50MWSG 蒸発器バックグラウンドノイズ測定結果	8
~ 2.2-4		11
図 2.1	50MWSG 蒸発器の構造	12
図 2.2	導波棒の形状 (A型及びB型)	13
図 2.3	50MWSG 蒸発器のバックグラウンドノイズ測定時の計測機器構成	14
図 2.4	50MWSG 蒸発器の負荷変動による加速度実効値出力	15
図 2.5	50MWSG 蒸発器のナトリウム温度がバックグラウンドノイズに及ぼす影響	16
図 2.6	50MWSG 蒸発器のナトリウム流量変化に伴うナトリウム流動音と水/蒸気音	17
図 2.7	50MWSG 蒸発器におけるナトリウム流動音の相対バックグラウンドノイズと 絶対温度の逆数の関係	18
図 2.8	50MWSG 蒸発器・過熱器の液面変化及びナトリウムオーバーフロー時の 加速度変化	19
図 2.9	50MWSG 蒸発器の2つの負荷状態における周波数特性の比較	20
図 2.10	50MWSG 蒸発器のナトリウム流量による周波数特性の比較	21
表 3.1	各試験容器の主要寸法比較	28
図 3.1	小リーク・ナトリウム-水反応試験装置 (SWAT-2) の反応容器の構造と 導波棒取付け位置	29
図 3.2	大リーク・ナトリウム-水反応試験装置 (SWAT-1) の反応容器の構造と 導波棒を取り付ける指圧計用座の位置	30
図 3.3	蒸気発生器安全性総合試験装置 (SWAT-3) 反応容器内部構造と導波棒	31
図 3.4	50MWSG 蒸発器の構造及びアルゴンガス噴出ノズルと導波棒の設置位置	32
図 3.5	SWAT-3 での隣接伝熱管破損伝播試験時の容器胴の加速度出力の変化	33
図 3.6	ナトリウム-水反応音並びにガス噴出音と反応容器胴壁の加速度出力の関係	34
図 3.7	「もんじゅ」蒸発器 1/2 縮尺水中音響試験体・窒素ガス噴出時における 加速度出力のヘリカルコイル管束部による減衰効果	35
図 3.8	試験容器内吸音面積による加速度出力 (容器胴肉厚 1.4 mm 換算) 変化の 予想曲線とバックグラウンド音との比較	36
図 3.9	ナトリウム-水反応音, ガス噴出音とバックグラウンドノイズの周波数特性の比較	37
図 4.1	ガス噴出ノズルとして使用した静圧管の設置場所と構造及び寸法	49
図 4.2	垂直方向検出のピックアップ取付け位置	50
図 4.3	導波棒の形状 (C型及びB型)	51

図 4.4	加速度ピックアップの周波数特性と形状	5 2
図 4.5	試験装置の全体構成	5 3
図 4.6	模擬内部シュラウド及びピックアップ取付け位置	5 4
図 4.7	内部シュラウドがある場合のバックグラウンドノイズ有無の比較	5 5
図 4.8	垂直方向音響信号検出の考え方	5 6
図 4.9	下部プレナム鏡部の外周ピックアップを用いた解析結果	5 7
図 4.10	下部プレナム鏡部の内周ピックアップを用いた解析結果	5 8
図 4.11	WALDシステムの全体構成	5 9
図 4.12	リーク検出/位置標定設定画面	6 0
写真 4.1	音速を比較した位置標定画面	6 1
写真 4.2	周波数範囲の影響による位置標定画面	6 2
写真 4.3	積分回数の影響により変化する位置標定画面	6 3
表 5.1	音響試験の成果の概要(その1)	6 6
表 5.2	音響試験の成果の概要(その2)	6 7
図 5.1	検出方法の種類	6 8
付図A-1	デジタル遅延装置とデジタル相関計の外観	7 6
付図A-2	デジタル遅延装置のブロック図	7 7
付図A-3	デジタル相関計の動作フローチャート	7 8
付図A-4	デジタル相関計のブロック図	7 9
付図A-5	各作動のタイミング図	8 0
付図B-1	サイン波周波数によるリーク検出・位置標定性	8 4
付図B-2	使用チャンネル数によるリーク検出・位置標定性	8 5
付図B-3	S/N比が「2」の場合に積分回数がリーク検出・位置標定性に及ぼす影響	8 6
付図B-4	信号とバックグラウンドノイズの比によるリーク検出・位置標定性	8 7

1. はじめに

ナトリウム中水素計やカバーガス中水素計などの不純物モニター型リーク検出器は、高感度である反面水素の輸送時間が必要となるためにリーク検出に時間的な遅れが出る。このため、破損伝播が比較的速く進行する小～中リーク領域では、応答時間に遅れのない音響式検出器が有効で、海外でもその開発が進められている。（音響計では、応答性が良いことのほかにリーク位置標定性のポテンシャルがある。）

この音響式検出器の開発のためにこれまで、①バックグラウンドノイズの特性の把握、②ナトリウム-水反応音の特性とSG内の音響伝播特性等の把握、③リーク位置標定を目的とした音響信号処理技術の開発等を行ってきた。①については50MW蒸気発生器試験施設（以下50MW施設と略す）の蒸発器を対象にバックグラウンドノイズレベル、周波数特性等について評価し、②については、小リーク・ナトリウム-水反応試験装置（SWAT-2）での試験、小型容器での水を用いた試験、蒸気発生器安全性総合試験装置（SWAT-3）での破損伝播試験等の音響データの比較を行ってきた。また、③については音響の実効値レベルの比較だけでなく、感度と信頼性の向上を目的に多信号相互相関法を用いて、検出/位置標定を行った。この③に関する試験には、もんじゅSG 1/2縮尺水中音響試験体（SWAT-5）を使用して、窒素ガス噴出音と水中送波器からの音によってナトリウム-水反応音を模擬し、音響検出器は試験体の容器外壁上に設置した加速度ピックアップを使用した。また、得られた音響データを用いて多信号相互相関法の確立とオン・ラインでリアルタイム検出するハードウェアの開発を実施してきた。

本報告では、これらの試験成果についてそれぞれ第2、3及び4章で詳述する。

2. 50 MW蒸気発生器バックグラウンドノイズの評価

本章は、50 MW施設の蒸発器（以下50 MW SG蒸発器と略す）を用いて、昭和60年6月から7月までに実施したバックグラウンドノイズの測定とその解析の結果について述べる。

2.1 目 的

音響式水リーク検出システムの開発に当り、事前に評価しておくべき重要な項目の一つに、蒸気発生器（以下SGと略す）のバックグラウンドノイズ特性の把握がある。バックグラウンドノイズは、ナトリウム流動音、伝熱管内水／蒸気の流動沸騰音などがその音源となるが、音響検出システムでナトリウム－水反応音を検出する際のS/N比に大きな影響を与える。そこで、50 MW施設のSGを用いたバックグラウンドノイズの測定と解析を行い、次に示す諸特性を把握することによって「もんじゅ」SG及び実証炉SGのバックグラウンドノイズを評価する上での基礎データを得ることとした。

- ① バックグラウンドノイズ実効値とその各種音源の影響
- ② バックグラウンドノイズの周波数特性の把握

2.2 試験装置と測定方法

50 MW施設のSGは、国内唯一のナトリウム加熱式SG（ヘリカルコイル型）であり、伝熱面積比で「もんじゅ」SGの約1/5に相当する大型施設である。

測定に当っては、同施設の蒸発器を用い、その下部胴外壁の既に溶接固定されている導波棒を利用し、その先端に加速度ピックアップ（1個）を取りつけた。図2.1に50 MW SG蒸発器の構造と導波棒の位置を示す。

なお、導波棒の寸法は、長さ200mm、直径16mmφで、別途同様な目的で測定を行った小リーク・ナトリウム－水反応試験装置（SWAT-2）で使用したものと同一で、本報告書で言うA型である。導波棒については、この他に、ナトリウム中指圧計の座に指圧計用メクラナットを介してねじ込む構造のB型がある。両者の比較を図2.2に示す。加速度ピックアップについては、本報告書に述べる各種のナトリウム－水反応試験装置で使用したものと同型式である。

次に測定で得た加速度計の出力信号については、まずこれをTrue RMS計に入力して加速度 G （ $1G \doteq 9.8 \text{ m/sec}^2$ ）に変換しデータ記録を行った。また、周波数特性解析では、加速度計の出力信号をそのまま解析にかけた。図2.3に使用した計測機器の構成を、また表2.1に各計測機器の主仕様を示す。なお、使用した加速度ピックアップの周波数使用範囲上限は約7kHzであったが、周波数解析に当っては0～20kHzの範囲で解析を進めた。

試験では、50 MW施設のナトリウム流量、ナトリウム温度、負荷変動などを変化させ、またSGの液面制御時に生じるナトリウムのオーバーフロー音の有る場合と無い場合についても測定

を行い、その際にこの音が検出に与える影響を調べた。

2.3 測定結果及び評価

測定で得たバックグラウンドノイズと対応する50MW施設の運転状態を表2.2に示す。SGの運転状態変化に対するノイズレベルの変化及び周波数特性変化等は以下に述べる。

2.3.1 バックグラウンドノイズの実効値とその変化

(1) 蒸発器の負荷等による変化

最初に蒸発器を単独で負荷運転した場合について、蒸発器の0%出力付近から定格負荷の90%出力に相当する45MWt付近までの加速度計出力の実効値変化を図2.4に示す。図には、縦軸に実効値を指数で、横軸に負荷を示したが、実効値は負荷の増加に伴って片対数表上で直線的に上昇している。このような実効値の上昇は、蒸発器のナトリウム流量及び蒸気流量が負荷と共に増大するためである。蒸発器定格負荷運転時の実効値は、図から約0.009～0.01Gで、この時の蒸発器の運転状態は、蒸発器出口ナトリウム温度約315℃、蒸発器出口ナトリウム流量約750T/h、ナトリウムポンプ回転数約1350rpm、給水流量約80T/hである。

次に蒸発器の負荷運転に過熱器の負荷運転を加えた場合の測定結果を、蒸発器の34%負荷に相当する17MWt付近について測定した結果で、同図の黒塗三角印で示す。図から、過熱器の負荷運転を加えても実効値は蒸発器の単独負荷運転の場合と殆んど変わっていない。これより、過熱器の運転は蒸発器のバックグラウンドノイズには無視できる程度の影響しか与えていないことが判る。このことから、ここでは定格運転状態で過熱器と蒸発器を同時に運転しても、前者の運転による後者のバックグラウンドノイズ実効値への影響は無視できるものとする。

尚、このノイズレベルは蒸発器下部胴（ナトリウム液面から約6.5mで伝熱領域の最下部）の測定で得たもので、沸騰の盛んな蒸発器軸方向中央部やナトリウム温度の高い同上部への適用は難しい。

(2) ナトリウム温度による影響

ナトリウム温度のデータは、ナトリウム流量を800T/hの一定とし、水/蒸気系の流れを遮断し流動・沸騰音を除き、蒸発器内を流れるナトリウム温度が、260～350℃に変化した時に得たものである。また、ナトリウム温度を変化させるとピックアップの温度も導波棒を介した熱伝導によって変化するため、図2.5にはピックアップ温度も同時に示す。図に示した結果のうち、まず上段のピックアップの温度変化については、測定範囲内で約20℃の変化を生じている。この温度変化に起因する加速度計の出力変化は1%未満でしかなく、ここではこれを無視する。さて、加速度計の温度変化による出力変化が無視出来るとなると、図の下段がそのまま実効値のナトリウム温度依存性を示すことになる。この図では、ナトリウム

温度と共に実効値も増加し、50℃のナトリウム温度上昇に対して実効値は約 $8 \times 10^{-4} G$ 増加している。このようなナトリウム温度依存性は、音の反射及び吸収、構造材の熱膨張等が複雑にからみあって音の伝播特性を向上させたためと考える。

(3) ナトリウム流量による変化

ナトリウム温度を約240℃の一定とし、水/蒸気の流れを遮断してナトリウム流量のみを変化させた場合の測定結果を図2.6の①に△印で示す。測定期間中のノイズ源は主としてポンプの振動音とナトリウム流動音であると考えられる。前者については、測定期間中にポンプ回転数が600~1350rpmと変化したが、ノイズの実効値には殆んどその影響が現れてはおらず、その影響は無視でき、図中の変化はナトリウム流動音のみに起因する。すなわち、ナトリウム流量の増加と共に実効値が上昇する結果となっている。

(4) バックグラウンドノイズに関する実験式

ここでは、各種の音源がバックグラウンドノイズ実効値に及ぼす影響について、これまで述べてきた測定結果から実験式を導く。

まず、ナトリウム温度の影響については、図2.5の結果をバックグラウンドノイズ実効値とナトリウム絶対温度の逆数との関係に整理し直し、そこで得た図2.7から勾配を求めたところ1148であった。次に、ナトリウム流量については、図2.6から流量変化に対する同様な勾配を求めて(9.77×10^{-4})を得た。これらの値から、次の実験式を得た。

$$A_{RMS} F = \exp(-3.87 + 9.77 \times 10^{-4} \cdot F_{Na} - 1148/T_{Na}) \quad \dots\dots (2-1) \text{式}$$

ここで、

$A_{RMS} F$: SG運転時の水/蒸気流動沸騰音が無い場合の加速度実効値出力(G)

F_{Na} : 2次系ナトリウム流量(T/h)

T_{Na} : 蒸発器出口ナトリウム温度(K)

但し、適用範囲は、ナトリウム量：150~850T/h、ナトリウム温度：240~350℃である。

上の(2-1)式から、蒸発器下部の定格運転時(ナトリウム流量約750T/h、ナトリウム温度約315℃)のナトリウム流動音と水/蒸気による流動・沸騰音のバックグラウンドノイズの実効値を求めると次のようになる。

ナトリウム流動音 : 0.007G

ナトリウム流動音+水/蒸気の流動・沸騰音 : 0.01G

また、これらの値から水/蒸気の流動・沸騰音のみを求めると、次のようになる。¹⁾

$$\text{水/蒸気の流動・沸騰音} = \sqrt{(0.01)^2 - (0.007)^2} \approx 0.007(G) \quad \dots (2-2) \text{式}$$

ここに示した値によると、ナトリウム流動音と水/蒸気の流動・沸騰音はほぼ同じである。

参考までに、前項のナトリウム流動音を図 2.6 の②に、負荷変動のデータをナトリウム流量に置き換えたものを図 2.6 の③に示す。

(5) 蒸発器のナトリウム・オーバーフローによるノイズとその強度

蒸発器と過熱器では、液面を前者はオーバーフロー方式（図 2.1 のオーバーフローライン参照）で、また後者はカバーガス圧を一定に制御することで制御している。蒸発器については、ループの二次系のカバーガス圧が、 $0.2\text{m}^3/\text{sec}$ の一定流量で常に供給されているポンプのシールガスのために徐々に増加する（過熱器のガス系は独立）。また、二次系のガス圧力が $1.1\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ 近くなると、運転員が蒸発器側のカバーガスを手で大気に放出し圧力を元の $1.0\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ にまでもどす操作を行うが、その際に蒸発器と過熱器のカバーガス圧力に約 $0.1\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ の差圧が生じ、過熱器側が高い圧力になる。このため、蒸発器側にナトリウムが押し下げられて、蒸発器の急激なオーバーフローが発生する。

図 2.8 は、このような蒸発器のナトリウムがオーバーフローした時のバックグラウンドノイズの実効値の変化を示したものである。装置の運転条件は、ナトリウム側が流量 280T/h 、温度 265℃ で、水側が蒸発器単相流の状態である。

図 2.8 では約 1 分間かかって過熱器の液位が約 70mm 押し下げられ、蒸発器の液位は約 30mm 増加しているが（液位の増加は蒸発器の他にポンプにも分散される）、この時オーバーフローライン入口配管（内径 $104.3\text{mm}\phi$ ）の約 $1/3$ 付近までナトリウム液面が上昇し、カバーガスを巻き込みながら平均 $90\text{l}/\text{min}$ のオーバーフロー流量でストレージタンクへ垂直に落下し、この際に発生した音が容器壁にまで伝わる。この時の加速度実効値は、オーバーフローの起こる直前までの平均値が 0.0048G であったのに対して 0.0066G と約 1.4 倍に増加している。

このようなノイズ実効値の増加は、「もんじゅ」SG に於いても同様な液面制御方式が採用されていることから発生すると考えられる。このため、加速度計の出力からナトリウム-水反応音を検出する方法を採用する場合は、いかにしてこのノイズを区別するかが今後の大きな課題となる。

2.3.2 周波数特性

ここでは、蒸気運転時とナトリウム等温運転時の周波数特性について述べる。これらは、図 2.3 に示すようにピックアップの出力をチャージアップからスペクトラムアナライザーに入力し、周波数特性を $0\sim 20\text{kHz}$ の範囲で分析した結果である。

(1) 蒸発器の 2 つの異なる負荷運転状態におけるノイズの周波数特性の比較

蒸発器の熱負荷 4.4MWt と 2.9MWt の時のそれぞれの場合について、測定信号の解析で得た周波数特性を図 2.9 の(1)と(2)に示す。いずれの特性もホワイトノイズに近く、また負荷の違いによる有意な違いも見られない。両者とも周波数 6.6kHz と 14.0kHz 付近にピークが有るが、これらは使用した導波棒の縦の固有振動数の一次モード 6.3kHz に非常

に近いことから、導波棒の共振ピークと判断する。

(2) ナトリウム流量による周波数特性の変化

ナトリウム流量による周波数特性の変化の把握のため、ナトリウム温度を240℃の一定とし、水/蒸気の流れを遮断してナトリウム流量を350、580及び765 T/hと変化させた場合の結果を図2.10に示す。ここでも、導波棒に固有振動に相当する6.7 kHz と14.0 kHz 付近でピークが生じているだけで、流量に対する有意な特性変化は認められない。

(3) まとめ

上に示した結果から、蒸発器の負荷状態を変えた場合とナトリウム流量を変えた場合のいずれについても、周波数特性には有意な変化は認められず、またその特性も周波数0～20 kHz の範囲では特徴のないホワイトノイズ(ピンクノイズ)であることが明らかになった。

表 2.1 計測機器仕様

名 称	型 式	概 略 仕 様	備 考
加速度検出器	815A15 (Kistler)	検出感度 : 50mV/G 周波数範囲 : 1kHz~7kHz 測定範囲 : ±50G	No.1630 感度 48mVpc
チャージアンプ	504D (Kistler)	入力電圧 : 1~100mV/unit 周波数範囲 : DC~100kHz 出力電圧 : 10Vmax	
スペクトラム アナライザ	TR-9305 (タケダ理研)	周波数範囲 : 0.0025Hz~100kHz 入力レベル : +30dBV~1200dBV (30Vrms~1μrms) ダイナミックレンジ : 70dB以上	
ハンドパス フィルタ	MS-500シリーズ (NF回路)	遮断周波数 : 1~16000Hz チャンネル数 : 8ch	
RMS計	M170型 (NF回路)	入力電圧 : 1mV~300Vrms (12レンジ切換え) 周波数範囲 : 50Hz~2MHz(±2%)	
記録計・1	X-Yレコーダー TYPE3077 (YEW)	入力電圧 : 0.1mV/cm~10V/cm (X, Y軸) (16レンジ切換え)	
記録計・2	ペンレコーダー TYPE3056 (YEW)	入力電圧 : 0.1mV/cm~5V/cm (13レンジ切換え) チャートスピード : 2cm/h~60cm/min (8段)	
データレコーダ	M101 (ハネウエル)	収録スピード : 0.937~120IPS FM収録 入力電圧 : 最大±10V P-P	
温度計	デジタルサーモメータ TYPE2573 (YEW)	測定範囲 : -60~500℃ 使用可能T.C : C・Aタイプ	

表 2.2-1 50MWSG 蒸発器バックグラウンドノイズ測定結果 (No.1)

測定日時 (S.60)	実効値出力 (G)		熱出力 (MW)	ナトリウム系			水/蒸気系 (EV)		付近の騒 音 (dB)	導波棒温 度 (°C)	運 転 状 態	備 考
	×10 ⁻³	振れ幅×10 ⁻³		温度 (°C)	流量 (T/h)	Naポンプ 回転数rpm	入口温度 (°C)	入口流量 (T/h)				
6/20 14:25	2.9	2.5~3.8	-	237.0	310.0	-	-	-	69.5	73.0	2次NaP特性試験	
" 14:33	3.2	2.6~4.2	-	240.0	360.0	6000	-	-	70.0	74.0		
" 14:39	3.1	2.5~4.0	-		396.0	↓	-	-		73.0		
" 14:49	3.2	2.7~4.2	-		446.0	↓	-	-		73.0		
" 15:00	3.6	3.1~4.5	-		591.0	8000	-	-		74.0		
" 15:09	3.3	2.7~4.2	-		530.0	↓	-	-				
" 15:30	3.2	2.5~4.1	-		480.0	↓	-	-				
" 15:46	3.2	2.6~4.2	-		477.0	↓	-	-				
" 15:55	3.0	2.5~3.8	-		407.0	↓	-	-		73.0		
" 16:00	3.0	2.5~3.8	-		324.0	↓	-	-		72.0		
" 16:06	3.0	2.3~3.8	-		250.0	↓	-	-				
" 16:21	2.5	1.5~3.4	-		164.0	9500	-	-				
" 16:28	2.8	2.2~3.8	-		268.0	↓	-	-				
" 16:33	3.0	2.4~3.9	-		393.0	↓	-	-	69.0			
" 16:38	3.4	2.8~4.4	-		482.0	↓	-	-				
" 16:47	3.6	2.9~4.5	-		562.0	↓	-	-				
" 16:53	4.1	3.4~4.8	-		623.0	↓	-	-	70.0			
" 17:00	4.3	3.8~5.1	-		695.0	↓	-	-				
" 17:19	3.5	2.8~4.4	-		500.0	12000	-	-				
" 18:34	3.1	2.3~4.0	-	↓	340.0	12000	-	-	↓	↓	↓	

表 2.2-2 50MWSG 蒸発器バックグラウンドノイズ測定結果 (No.2)

測定日時 (S.60)	実効値出力 (G)		熱出力 (MW)	ナトリウム系			水/蒸気系 (EV)		付近の騒 音 (dB)	導波棒温 度 (°C)	運 転 状 態	備 考
	$\times 10^{-3}$	振幅 $\times 10^{-3}$		温度 (°C)	流量 (T/h)	Naポンプ 回転数 rpm	入口温度 (°C)	入口流量 (T/h)				
6/20 18:39	3.2	2.6~4.0	-	240.0	473.0	1200.0	-	-	70.0	72.0	2次NaP特性試験	
# 18:47	3.7	3.1~4.5	-	↓	595.0	↓	-	-	↓	↓	↓	
# 18:57	4.2	3.7~4.9	-	↓	693.0	↓	-	-	↓	↓	↓	
# 19:05	4.9	4.4~5.6	-	↓	765.0	↓	-	-	↓	↓	↓	
# 19:26	5.5	5.0~6.2	-	↓	820.0	1300.0	-	-	↓	↓	↓	
6/24 14:00	5.7	5.3~6.5	-	260.0	800.0	-	-	-	74.0	95.0	2次系Na昇温	
# 14:15	5.6	5.1~6.3	-	270.0	↓	-	-	-	↓	99.0	↓	
# 14:23	5.6	5.2~6.3	-	278.0	↓	-	-	-	↓	100.0	↓	
# 15:00	6.3	5.8~6.9	-	295.0	↓	-	-	-	↓	102.0	↓	
# 15:15	6.4	5.8~7.0	-	303.0	↓	-	-	-	↓	104.0	↓	
# 15:30	6.4	5.8~7.1	-	310.0	↓	-	-	-	↓	105.0	↓	
# 16:45	6.4	5.8~7.1	-	316.0	↓	-	-	-	↓	108.0	↓	
# 16:00	6.5	5.9~7.2	-	322.0	↓	-	-	-	↓	108.0	↓	
# 16:08	6.6	6.1~7.2	-	328.0	↓	-	-	-	↓	109.0	↓	
# 16:30	6.6	6.1~7.4	-	333.0	↓	-	-	-	↓	111.0	↓	
# 16:45	6.9	6.2~7.8	-	340.0	↓	-	-	-	↓	112.0	↓	
# 17:00	7.0	6.4~7.8	-	346.0	↓	-	-	-	↓	113.0	↓	
# 17:20	7.2	6.5~8.0	-	350.0	↓	-	-	-	↓	115.0	↓	
6/28 11:00	7.5	6.9~8.2	-	350.0	↓	-	-	-	↓	114.0	等温運転	
7/2 13:52	4.2	3.6~5.0	2.5	265.0	285.0	-	195.0	17.3	70.5	93.0	EV単体運転	

表 2.2-3 50MWSG蒸発器バックグラウンドノイズ測定結果 (No.3)

測定日時 (S.60)	実効値出力 (G)		熱出力 (MW)	ナトリウム系			水/蒸気系 (EV)		付近の騒 音 (dB)	導波棒温 度 (°C)	運 転 状 態	備 考
	$\times 10^{-3}$	振れ幅 $\times 10^{-3}$		温度 (°C)	流量 (T/h)	Naポンプ 回転数 rpm	入口温度 (°C)	入口流量 (T/h)				
7/2 14:14	4.4	3.7~5.2	1.7	264.0	-	-	196.0	13.1	70.5	93.0	EV単体運転	
" 14:35	4.2	3.7~5.0	1.4	265.0	-	-	↓	8.0	70.5	93.0	↓	
7/3 9:22	11.5	11.0~13.2	15.6	297.0	-	-	↓	22.6	85.0	106.0	↓	
" 15:25	4.8	4.5~5.5	17.0	292.0	-	-	↓	21.9	77.0	106.0	↓	
7/4 11:15	5.9	4.5~7.0	17.2	294.0	281.0	-	194.0	23.7	74.5	102.0	EV+SH結合運転	SH流量 18.0 T/h
" 13:30	4.6	4.0~5.6	17.1	↓	↓	-	↓	22.6	75.5	104.0	↓	" 14.0 "
" 14:35	4.8	4.0~6.0	17.0	↓	↓	-	↓	22.5	75.0	99.0	↓	" 15.0 "
7/8 9:00	9.5	8.9~10.2	43.8	315.0	753.0	-	221.0	76.4	77.0	106.0	EV単体運転	
" 10:10	9.0	8.3~9.7	45.4	↓	750.0	-	221.0	79.0	↓	100.0	↓	
" 10:40	9.0	8.3~9.8	45.0	↓	730.0	-	211.0	80.0	↓	100.0	↓	
" 13:52	7.5	6.7~8.5	34.4	308.0	576.0	-	220.0	60.0	74.0	101.0	↓	
" 14:30	7.2	6.5~8.1	34.2	309.0	573.0	-	221.0	↓	73.0	101.0	↓	
" 14:35	7.2	6.6~8.1	34.1	308.8	581.0	-	220.9	↓	72.0	100.0	↓	
" 14:40	7.3	6.5~8.1	34.2	308.0	574.0	-	221.5	↓	↓	100.0	↓	
" 14:45	7.0	6.4~7.9	34.4	306.0	572.0	-	218.0	↓	↓	101.0	↓	
" 14:50	7.1	6.4~8.0	34.0	302.0	562.5	-	214.0	59.5	71.0	100.0	↓	
" 14:55	6.9	6.2~8.1	33.3	300.0	554.0	-	216.0	59.8	↓	↓	↓	
" 15:00	6.9	6.1~8.0	33.0	302.0	551.0	-	218.0	59.7	↓	↓	↓	
" 15:05	6.8	6.1~7.8	32.0	304.0	551.0	-	220.0	57.6	↓	↓	↓	
" 15:10	6.8	6.0~7.6	31.1	305.0	533.0	-	222.0	54.4	↓	99.0	↓	

表 2.2-4 50MWSG 蒸発器バックグラウンドノイズ測定結果 (No.4)

測定日時 (S.60)	実効値出力 (G)		熱出力 (MW)	ナトリウム系			水/蒸気系 (EV)		付近の騒 音 (dB)	導波棒温 度 (°C)	運 転 状 態	備 考
	$\times 10^{-3}$	振れ幅 $\times 10^{-3}$		温度 (°C)	流量 (T/h)	Naポンプ 回転数 rpm	入口温度 (°C)	入口流量 (T/h)				
7/8 15:15	6.6	5.8~7.5	30.0	305.0	512.0	-	223.0	52.4	71.0	100.0	EV単体運転	
" 15:20	6.4	5.6~7.4	29.0	304.0	486.0	-	223.0	50.8	71.0	100.0	↓	
" 15:25	6.2	5.4~7.2	28.0	302.0	452.0	-	224.0	48.0	70.5	99.0		
" 15:30	6.0	5.3~6.9	26.5	301.0	436.0	-	223.0	46.4	↓	101.0		
" 15:35	5.8	5.2~6.7	25.0	300.0	409.0	-	224.0	43.7	↓	100.0		
" 15:40	5.6	5.0~6.6	24.2	300.0	399.0	-	224.0	42.2	71.0	101.0		
" 15:45	5.6	5.0~6.6	24.3	300.0	400.0	-	223.0	42.1	↓	101.0		(飽和水)
" 15:50	5.6	4.9~6.5	24.2	300.0	400.0	-	222.0	42.0	↓	101.0		"
7/9 8:52	4.9	4.2~5.8	14.8	278.0	360.0	-	198.0	27.5	69.5	100.0		"
" 9:30	4.9	4.3~5.8	13.3	278.0	270.0	-	198.0	23.0	↓	100.0		"
" 11:19	4.4	3.7~5.2	7.8	261.0	245.0	-	195.0	20.7	↓	95.0		"
" 11:40	4.2	3.6~5.0	6.7	257.0	242.0	-	196.0	20.6	70.0	95.0	"	
" 13:51	4.4	3.7~5.1	5.4	240.0	242.0	-	195.0	21.0	69.0	90.0	↓	"

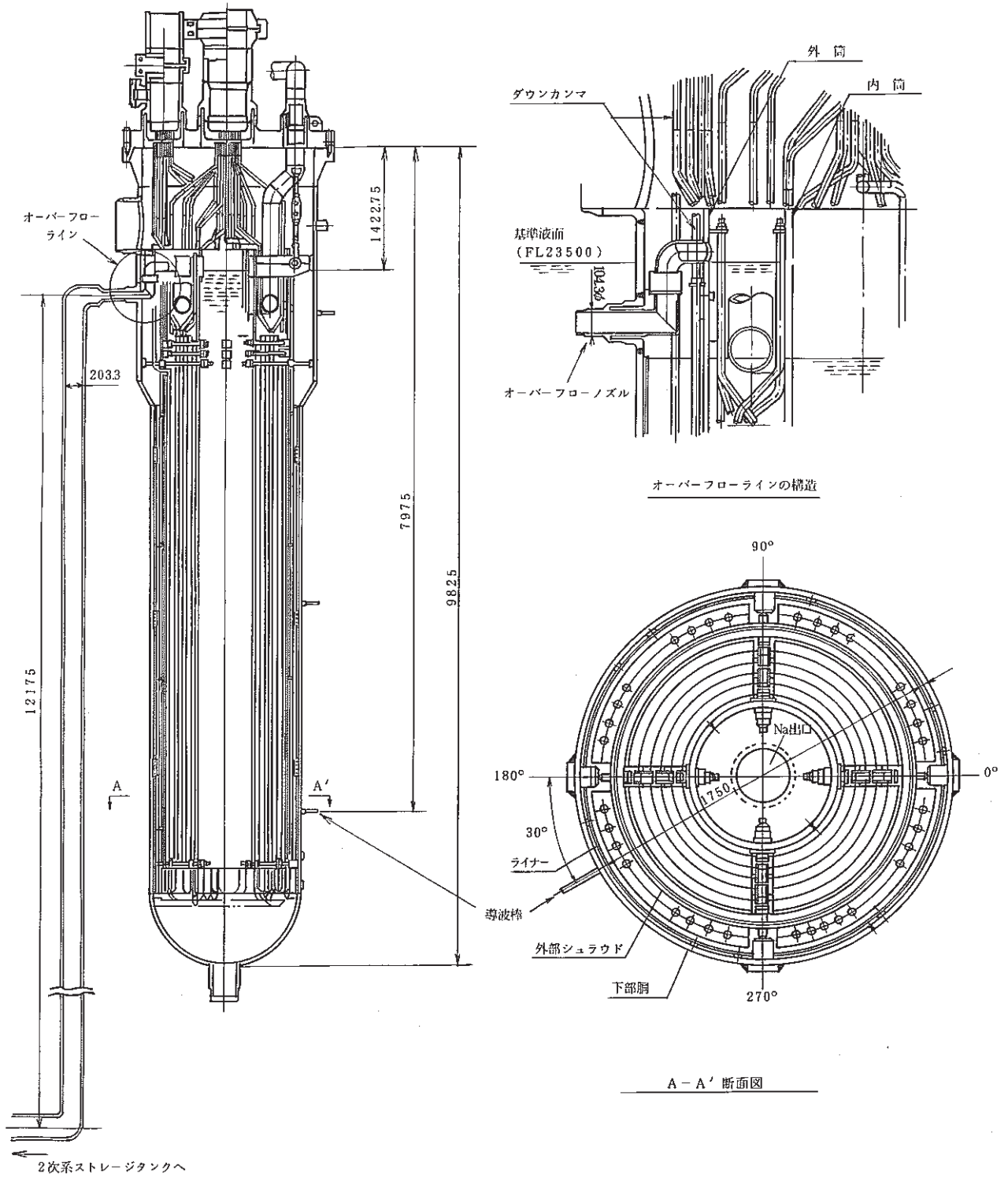
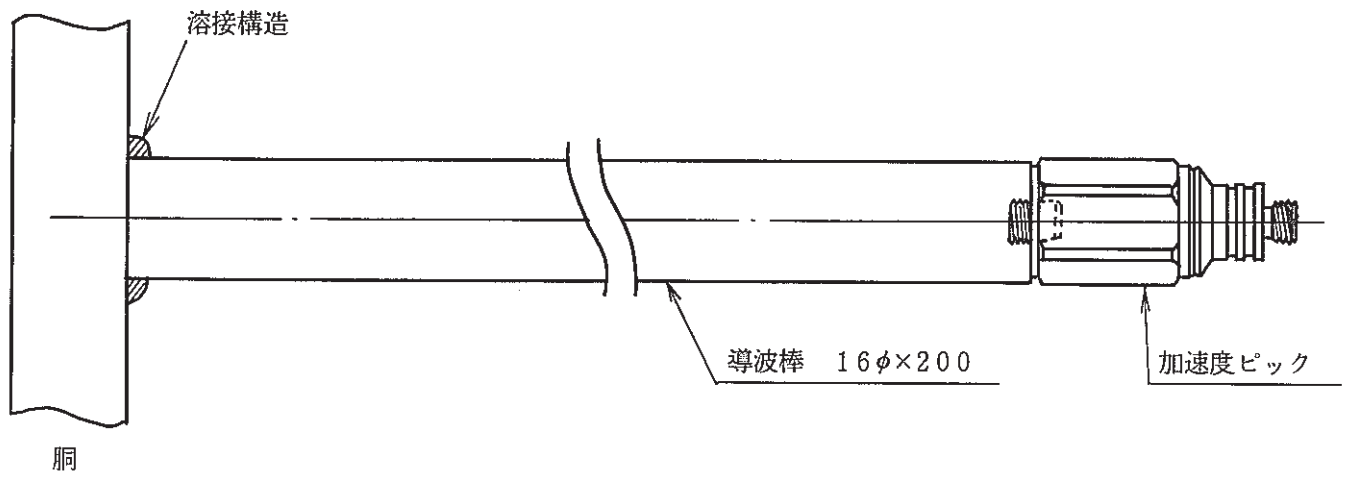
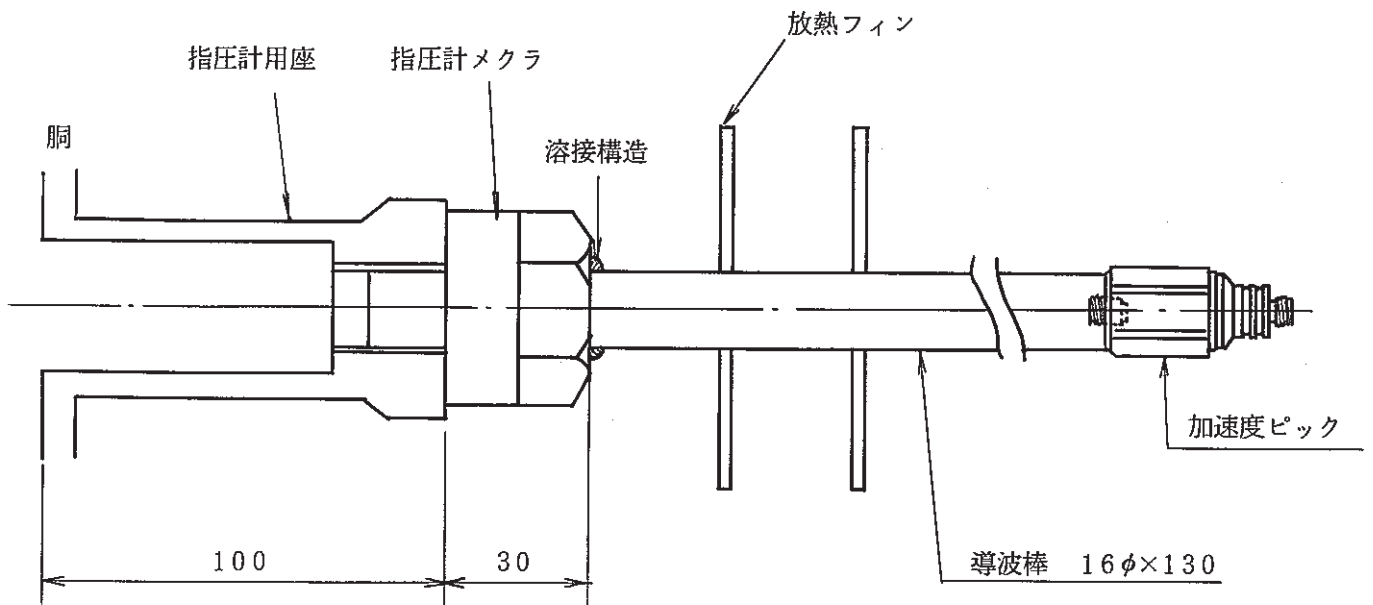


図2.1 50MW SG 蒸発器の構造

単位：mm



(a) A型導波棒



(b) B型導波棒

図 2.2 導波棒の形状 (A型及びB型)

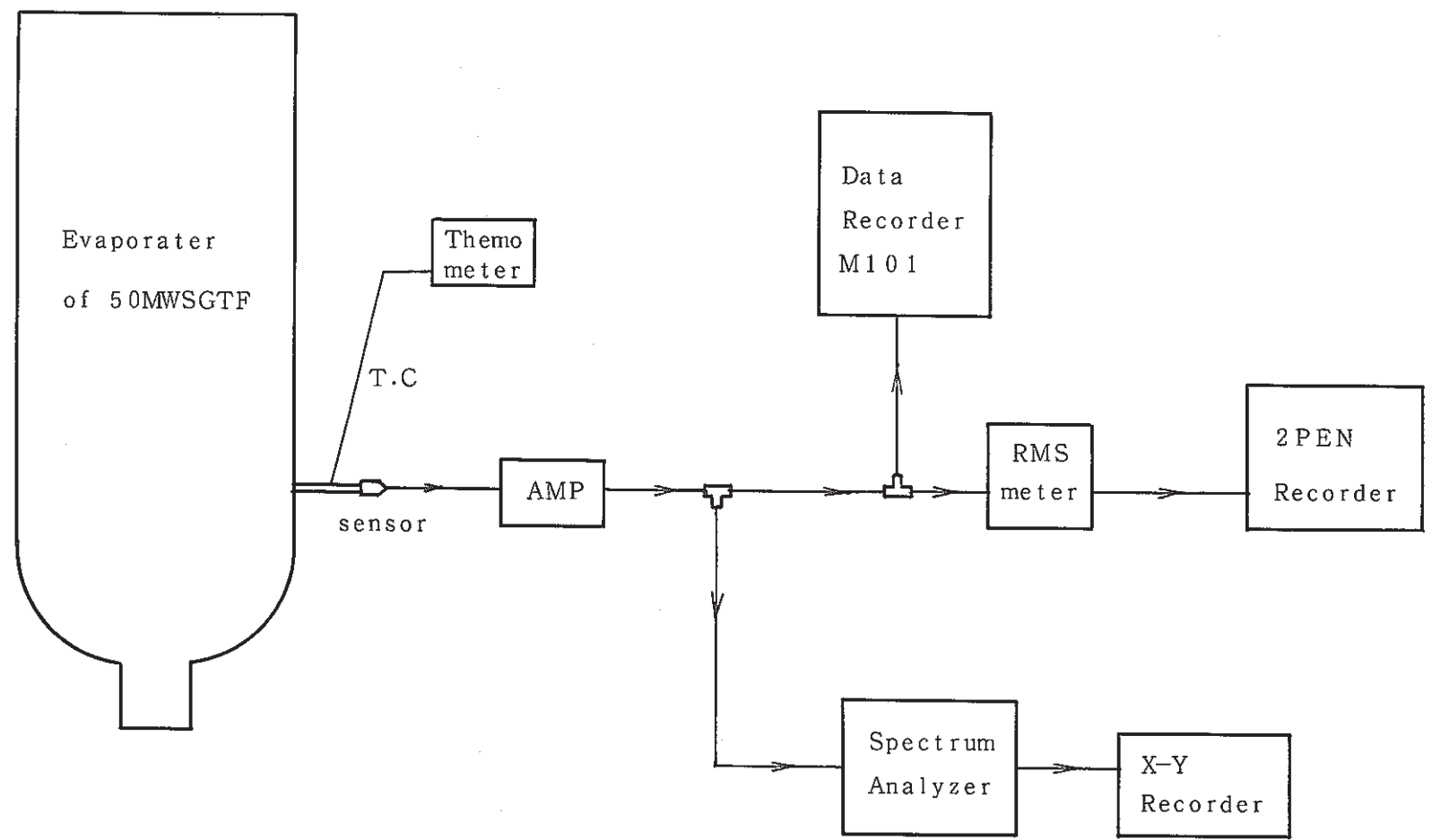


図 2.3 50MWSG 蒸発器のバックグラウンドノイズ測定時の計測機器構成

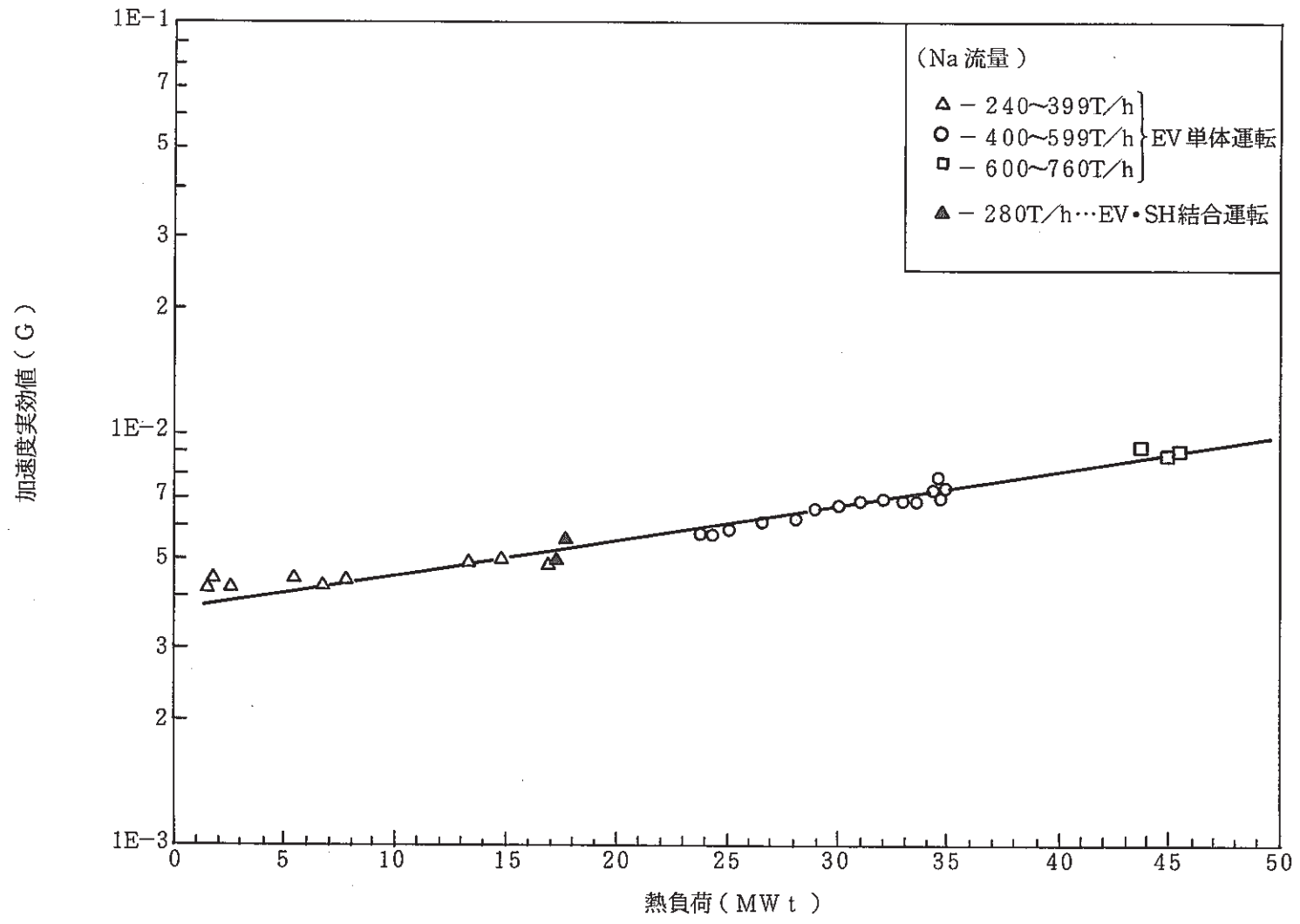


図 2.4 50MW SG 蒸発器の負荷変動による加速度実効値出力

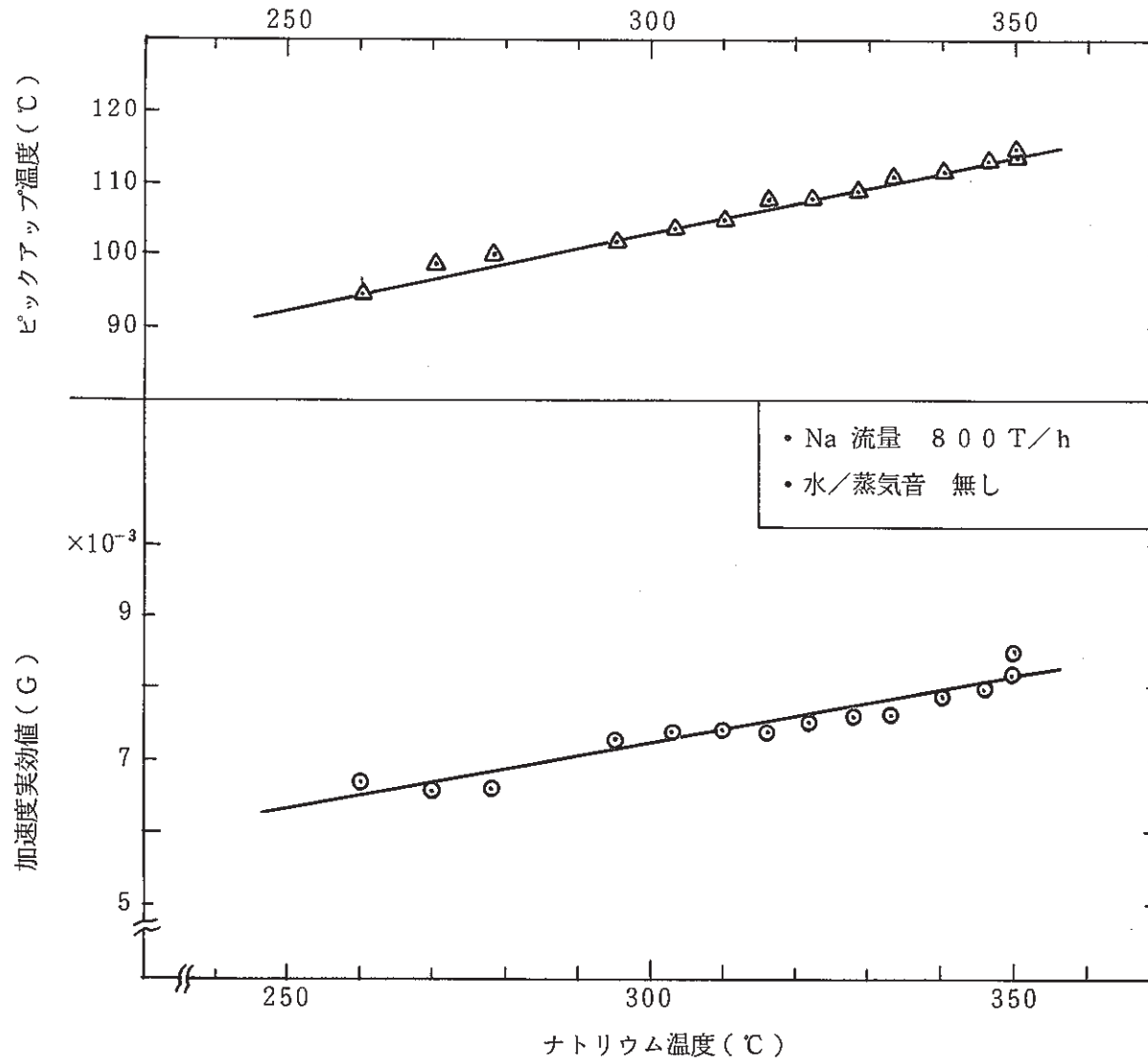


図 2.5 50MWSG 蒸発器のナトリウム温度がバックグラウンドノイズに及ぼす影響

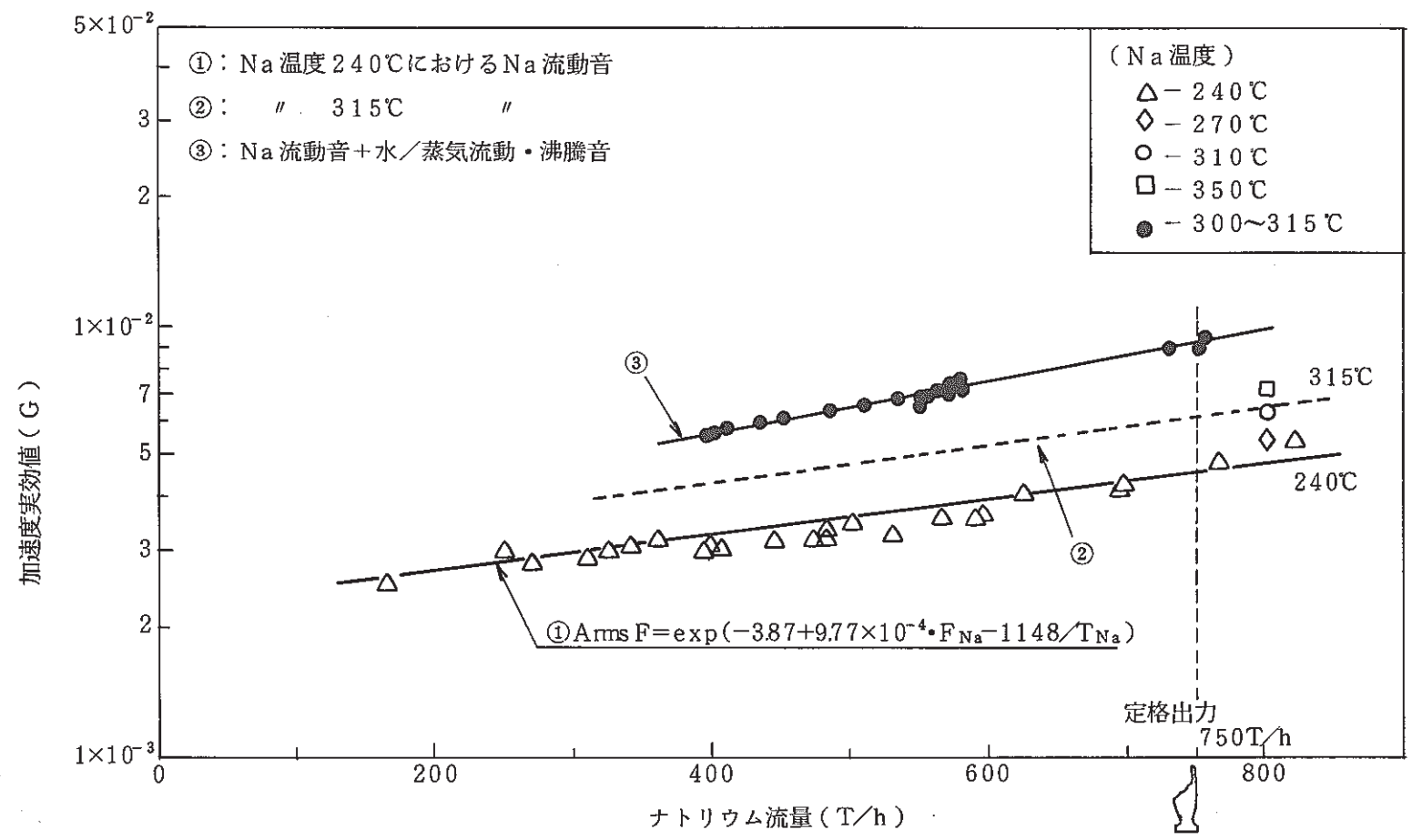


図 2.6 50 MW SG 蒸発器のナトリウム流量変化に伴うナトリウム流動音と水/蒸気音

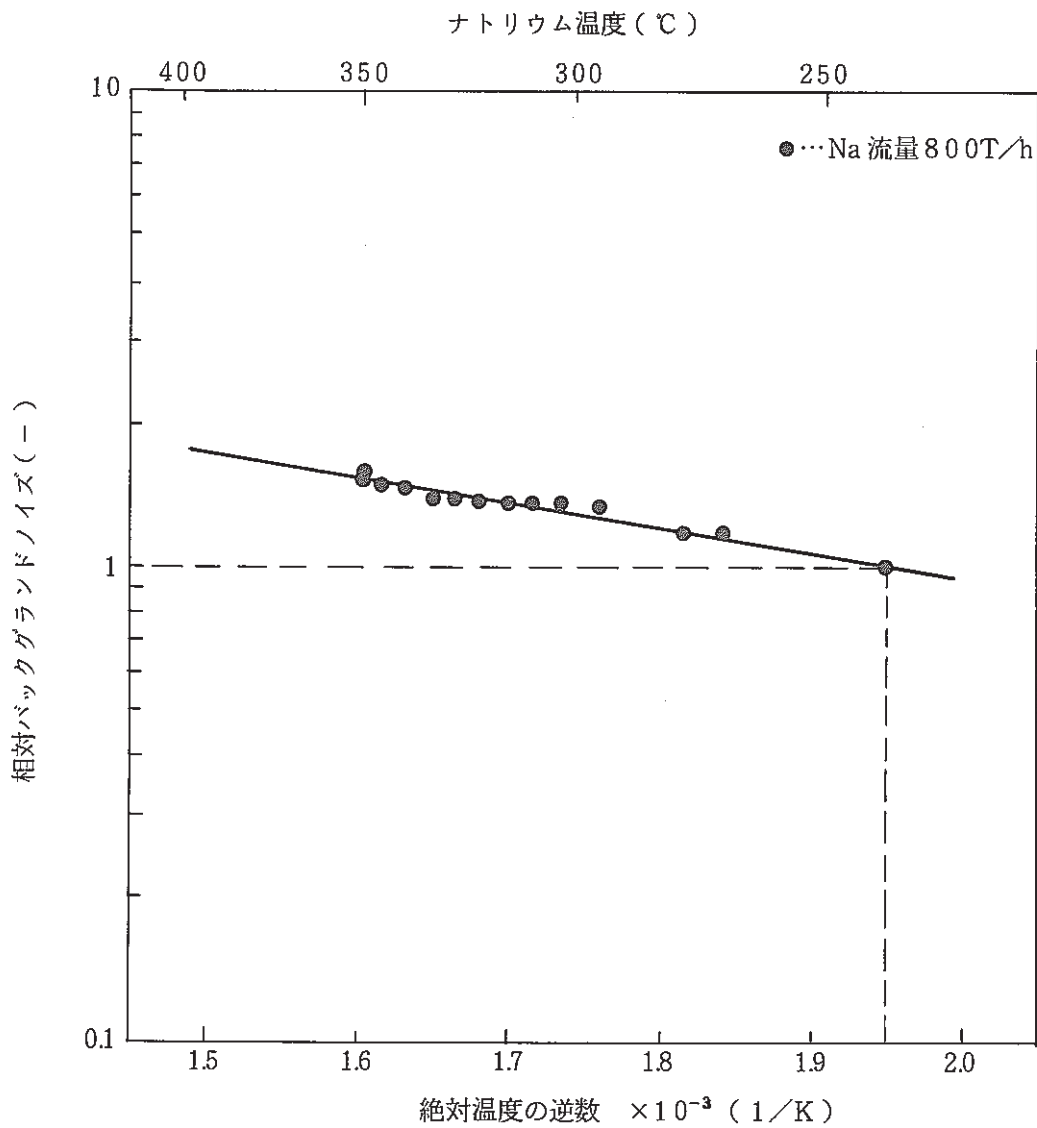
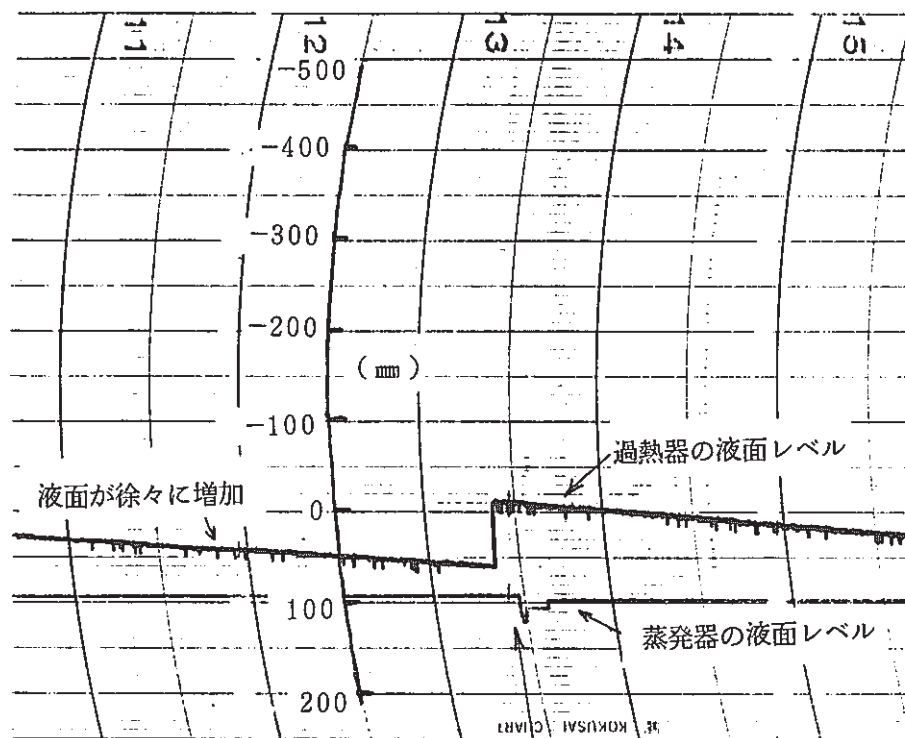


図2.7 50MWSG蒸発器におけるナトリウム流動音の
相対バックグラウンドノイズと絶対温度の逆数の関係



オーバーフローの急増加

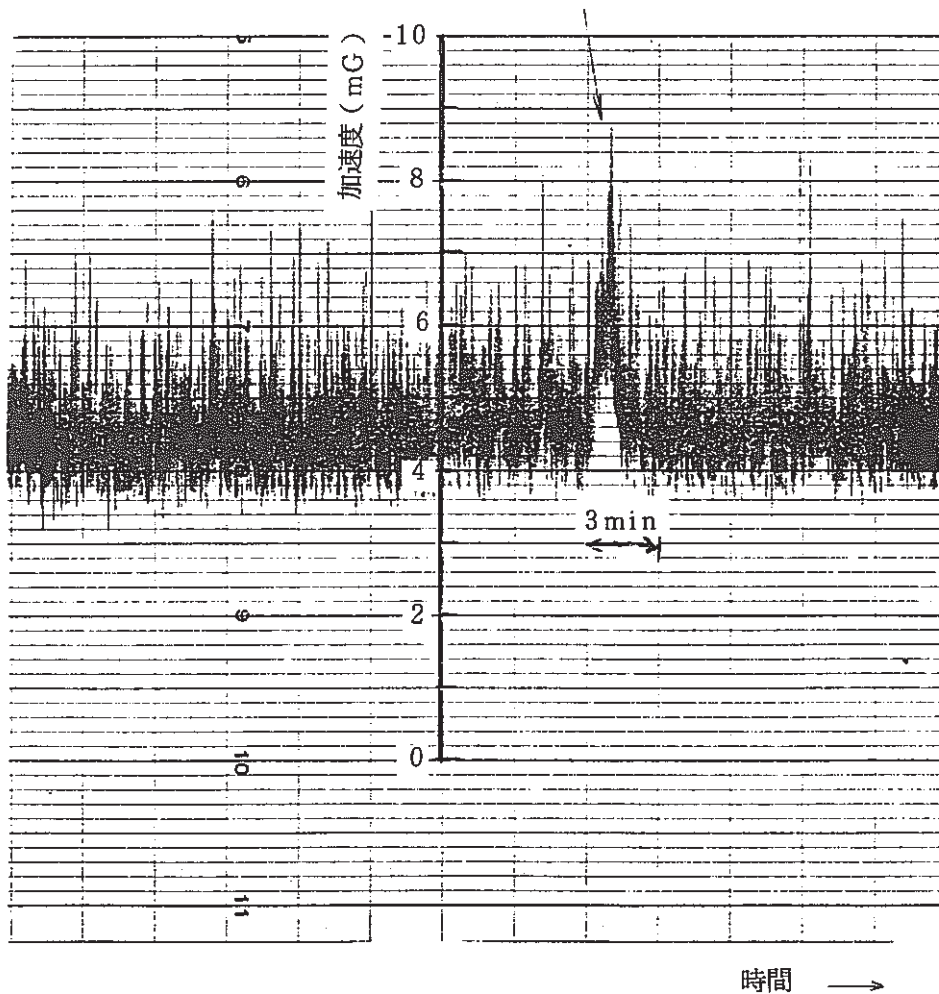


図 2.8 50MWSG 蒸発器・過熱器の液面変化及びナトリウムオーバーフロー時の加速度変化

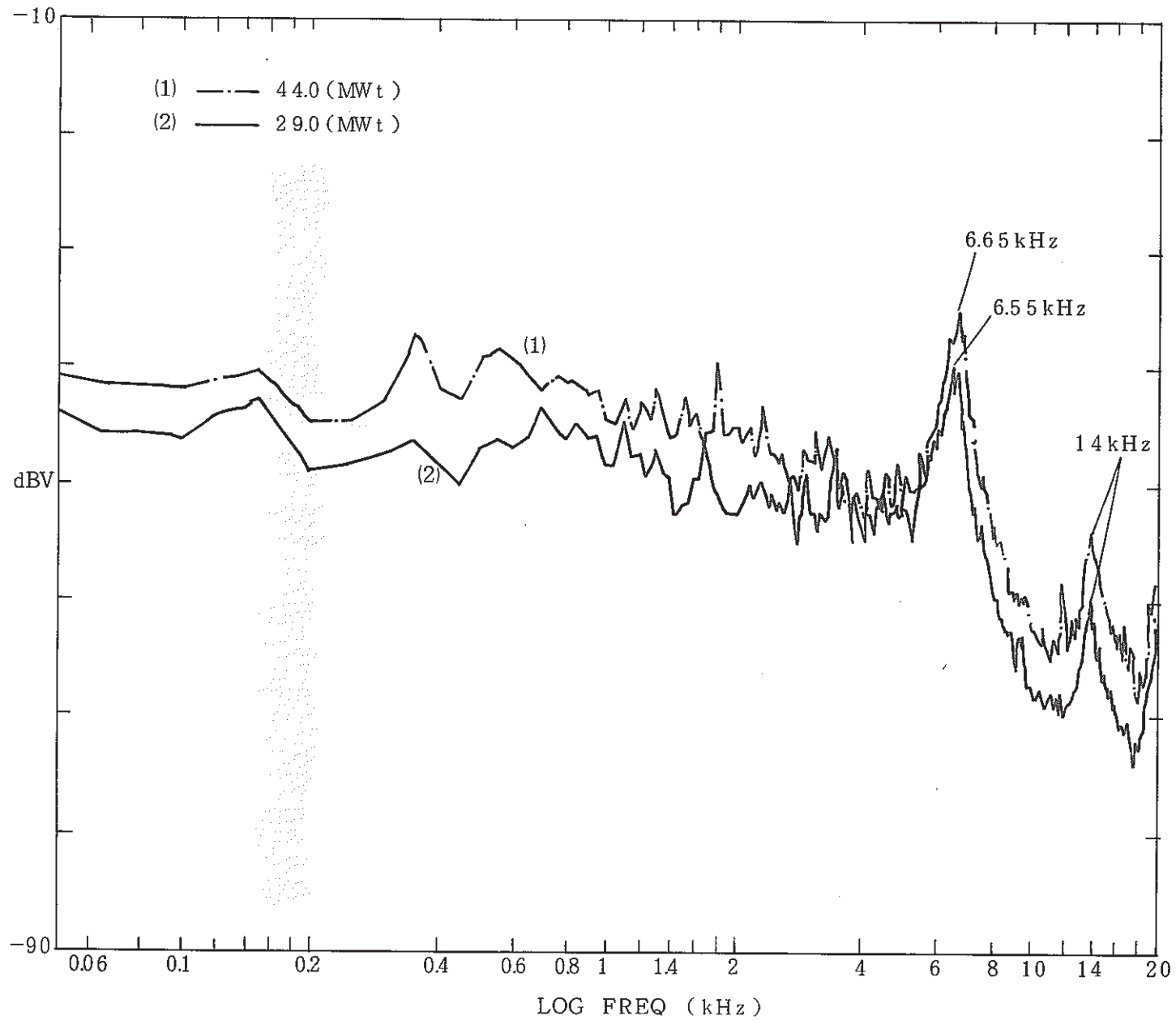


図 2.9 50 MWSG 蒸発器の 2 つの負荷状態における周波数特性の比較

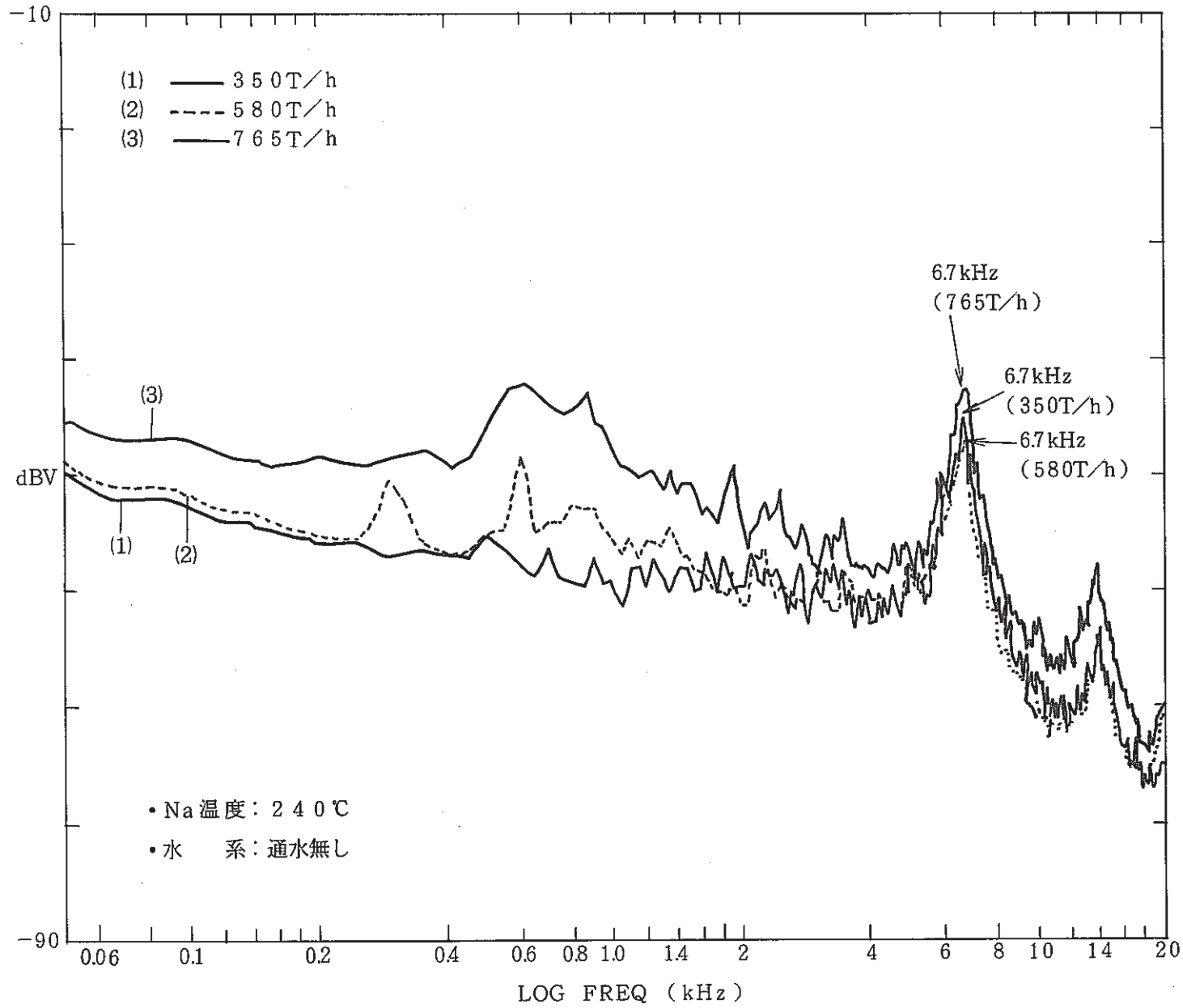


図2.10 50MWSG蒸発器のナトリウム流量による周波数特性の比較

3. ナトリウム-水反応音，模擬ナトリウム-水反応音の評価

ここでは，複数のナトリウム-水反応試験装置 SWAT-1，SWAT-2 及び SWAT-3 で測定したナトリウム-水反応音及び，50 MW 施設と「もんじゅ」1/2 縮尺水中音響試験体で測定したナトリウム中と水中のガス噴出音から，発生音強度のリーク率依存性と容器内吸音特性を得たので，その結果について述べる。使用した音響検出器は，第2章で紹介した加速度計と同一で，また計測システムも図2.3と同一である。

3.1 試験容器，内部構造物及び導波棒の構造

本試験に使用した SWAT-1，SWAT-2，SWAT-3 及び「もんじゅ」1/2 縮尺水中音響試験体と 50 MW SG 蒸発器の主要寸法を「もんじゅ」蒸発器及び実証炉 SG²⁾と共に表 3.1 に示す。

(1) 小リーク・ナトリウム-水反応試験装置 (SWAT-2)

図 3.1 に SWAT-2 試験容器 (ステンレス鋼製 内径 400 mm ϕ ，厚さ 14 mm) の構造とその容器胴に溶接した導波棒 (長さ 200 mm，外径 16 mm，50 MW SG 蒸発器と同一型の A 型) の取付け位置を示す。この容器では，主に小リーク領域 (注水率: 0.1~10 g/sec) のナトリウム-水反応試験を実施し，その際に発生するナトリウム-水反応音を測定した³⁾。なお反応領域の下方には，ナトリウム-水反応生成物の受皿として内装フィルタが 2 重に設置されているために，このフィルタが容器内の吸音材として作用する特徴がある。

(2) 大リーク・ナトリウム-水反応試験装置 (SWAT-1)

図 3.2 に SWAT-1 試験容器 (ステンレス鋼製 内径 400 mm ϕ ，厚さ 12 mm) の構造と，導波棒 (図 2.2 の B 型) の取付け位置である指圧計用座の位置を示す。この容器はほぼ SWAT-2 のものと同じ寸法である。但し，内部にフィルタが設置されていないので，容器内の吸音面積は SWAT-2 と比べると著しく少ない。また，導波棒の構造も大きく異なり，ナトリウム中指圧計の座に指圧計用盲ナットを介して導波棒をネジ込む構造をとっている。座と盲ナットの隙間からのナトリウム・リークを防止するため金属 O リングを使用してシール性を保持している。この容器では主に中リーク領域 (注水率: 30~150 g/sec) のナトリウム-水反応試験を実施し，SWAT-2 と同様にその際に発生する反応音を信号の一つとして測定した⁴⁾。

(3) 蒸気発生器安全性総合試験装置 (SWAT-3)

図 3.3 に SWAT-3 の試験容器 (ステンレス鋼製 内径 1300 mm ϕ ，厚さ 30 mm) の構造を示す。容器内には試験体である模擬伝熱管束 (高さ 700 mm，約 100 本) 3 組が設置されている。導波棒は，SWAT-1 で使用したものとほぼ同一構造 (B 型) で，設置場所は注水箇所近傍 (図中の Tag No. A1123，1124，1125) にある指圧計用座に設置した。この容器を使用して，伝熱管破損伝播試験 (注水率: 20~100 g/sec) を実施し，発生する

ナトリウム-水反応音を導波棒先端に取り付けた加速度ピックアップで測定した⁵⁾⁶⁾。

(4) 50MWSG蒸発器

図3.4に50MWSG蒸発器の構造(2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼製 内径1750mm ϕ , 厚さ25mm)及び導波棒とアルゴンガス噴出用ノズルの取付け位置を示す。導波棒は取付け部の構造と寸法がSWAT-2のものと同じA型(図2.2)で、ヘリカルコイル下部に相当する胴外壁上(210°の方向)に溶接されている。ガス噴出用のノズルは、ヘリカルコイル管束部の伝熱管第5層と第6層の間で180°方向の管支持構造物(H型鋼)の両側に一個ずつ設置されており、一方はアニュラス上部(ノズル口径3.5mm ϕ)に、他方はアニュラス下部(ノズル口径1.0mm ϕ)である。

3.2 試験結果と評価

(1) 反応音, ガス噴出音強度のリーク率依存性

図3.5はSWAT-3, Run 14⁷⁾の破損伝播試験でリーク率が18, 210, 470 g/secと順次拡大していった場合の容器胴での加速度出力の実効値を示したもので、実効値が順次増加していく様子がよくわかる。SWAT-1, SWAT-2及び50MW施設を使った試験でも同様なデータが得られており、これらのデータをもとにリーク率と加速度出力の実効値との関係をプロットすると図3.6のようになる。この図は、ナトリウム-水反応音並びにガス噴出音によって発生する胴外壁上の実効的加速度出力と等価水リーク率の関係を示していることになるが、ここでガス噴出率を等価水リークに換算する方法は、「音源近傍の温度・圧力条件下で単位時間当りに発生するガスあるいは蒸気の容積が等しい場合には同等の音圧が発生する」¹⁾と言う過去の実験事実に基づいて行っている。

図3.6によると、加速度出力の実効値が水リーク率の約1/3乗に比例しているのがA型導波棒を用いたSWAT-2と50MWSG蒸発器の測定結果で、約1/2乗に比例しているのがB型の導波棒を用いたSWAT-1とSWAT-3の測定結果である。また、同一の等価水リーク率でも加速度出力の実効値は試験容器と導波棒によって大きく異なる。今回の場合、最も実効値が大きいのがSWAT-2であり、SWAT-1, 50MWSG蒸発器, SWAT-3の順で小さくなっている。参考までに、A型の導波棒を用いた50MWSG蒸発器の最大バックグラウンドノイズレベル0.01Gと比較すると、S/N比が「1」となる水リーク率は、SWAT-2の場合で4 \times 10⁻³ g/sec, 50MWSG蒸発器で0.5 g/secとなる。但し、以上のことは使用する容器によって壁の肉厚、内部の構造物及び導波棒の構造・寸法の相異を無視して単純に比較したものであり、一般化を図るには今後より詳細な検討が必要であろう。

(2) 反応音, ガス噴出音の容器内吸音特性

図3.7(a)は「もんじゅ」蒸発器1/2縮尺水中音響試験体と、その導波棒及びガス噴出ノズルの取付け位置を示したもので、導波棒(SWAT-2, 50MWSG蒸発器と同じA型)は容器

の下部に、ノズルはヘリカル管束上部（BS-5）と、下部プレナム部（BS-2）にそれぞれ一個を配置した。

これらのノズルから流量5~50 Nℓ/minで窒素ガスを噴出した場合の加速度出力実効値レベルを同図の(b)に示す。BS-5ノズルからのガス噴出音を検出した場合の実効値は、BS-2ノズルからのそれを検出した場合の約1/4であり、上部から下部に伝わる間に内部構造物、特に259本の伝熱管（12.7mmφ×1.6mm t）による音の吸収で、拡散音場のエネルギー密度が低下することが判る。

一般に、ある閉じた空間の音のエネルギー密度「E」は次式で表わされる。

$$E = \frac{4W}{CA} \text{ (joul/m}^3\text{)} \dots\dots\dots \text{(式3-1)}$$

W：音響出力 (watt)

C：音速 (m/sec)

A：吸音力 (m²)

また、エネルギー密度と音圧「P」の関係は「 $E = P^2 / \rho C^2$ 」の関係があるため、音圧は次式で表わされる。

$$P = \left(\frac{4 \rho CW}{A} \right)^{1/2} \text{ (N/m}^2\text{)} \dots\dots\dots \text{(式3-2)}$$

ここで、同一ガス噴出率であればリーク点によらず「W：音響出力」、「ρ：密度」及び「C：音速」はほとんど変わらないので、音圧は吸音力によって決まる。一方、音圧は容器壁の質量に作用して「 $f = m \alpha$ 」で与えられる加速度を発生させる。このため、容器壁の加速度は容器内の吸音力の影響を受ける。吸音力は一般に表面状態が同一であるならば面積に比例する。このため、図3.7(b)において、ヘリカル管束上部におけるガス噴出音を下部プレナム部に設置する加速度ピックアップで検出した場合の吸音面積「S」は、伝熱管の総表面積と内外筒の面の和である302m²に等しくなり、下部プレナム部におけるガス噴出音を同加速度ピックアップで検出した場合の吸音面積「S」は、容器内表面積20m²に等しくなる。これらの比率を(式3-2)に代入すると、ヘリカル管束上部と下部プレナム部のそれぞれの場所でのガス噴出音を下部プレナム部の加速度ピックアップで検出した場合の加速度の比は「3.9」となり、図3.7(b)に示した結果とほぼ一致する。

図3.8は、以上の考え方に従って「もんじゅ」及び実証炉のSGに対する等価水リーク率がそれぞれ1, 10, 100 g/secの時の加速度出力実効値A_{RMS}を、各試験容器内に於ける吸音面積「S」を考慮して求めた減衰特性(A_{RMS}^{0.5})から外挿したものである。図中では容器胴肉厚による差を除くため肉厚は全て14mmに換算し、導波棒の種類もA型とB型で分けし

示してある。B型の導波棒による加速度出力実効値は、A型のその約1/3であるが、これはB型導波棒の容器取り付け構造がA型のように溶接でなくネジ込みで、更にシール性を良くするために接面部に2個の中空Oリングを介在させているため、音の伝播特性が悪くなることによる。

50MWSG蒸発器のバックグラウンドノイズは、A型の導波棒で測定しているので「もんじゅ」及び実証炉SGへの外挿曲線はA型のもので作成した。

50MWSG蒸発器のバックグラウンドノイズから実機SGのそれを外挿して求めると、次のようになる。すなわち、50MWSG蒸発器におけるバックグラウンドノイズの主な音源は、ナトリウム流動音と水/蒸気の流動・沸騰音であり、これらのノイズのほとんどはヘリカルコイル(伝熱領域)で発生すると推定する。一方、「もんじゅ」及び実証炉のSGもヘリカルコイル型であり、かつそれらの伝熱管の配列も50MWSG蒸発器とほぼ同じである。このため、これらのSGにおけるナトリウム流動音及び水/蒸気の流動・沸騰音は50MWSG蒸発器のそれとほぼ同様である。このような考察に基づくと、「もんじゅ」及び実証炉のバックグラウンドノイズの実効的加速度出力は、ナトリウム流動音に関しては伝播領域の占める体積に比例し、また、水/蒸気の流動・沸騰音は伝熱面積に比例すると考えられる。他方、吸音特性に関してはSG内の構造物表面積に反比例すると考えることができる。

上の議論に従って、「もんじゅ」及び実証炉のSGのバックグラウンド音 $A_{RMS,M}$ を数式で表すと次式のごとくなる。

$$A_{RMS,M}^2 = \left\{ \left(A_{RMS,50N} \times \frac{V_M}{V_{50}} \right)^2 + \left(A_{RMS,50W} \times \frac{S_M}{S_{50}} \right)^2 \right\} / (S_{V,M} / S_{V,50})^2$$

..... (式3-3)

ここで、

- $A_{RMS,50N}$: 50MWSGのナトリウム流量による実効的加速度出力
- $A_{RMS,50W}$: 50MWSGの水/蒸気の流動・沸騰による実効的加速度出力
- V_M : 「もんじゅ」あるいは実証炉SGの伝熱領域の体積
- V_{50} : 50MWSG蒸発器の伝熱領域の体積
- S_M : 「もんじゅ」あるいは実証炉SGの伝熱面積
- S_{50} : 50MWSG蒸発器の伝熱面積
- $S_{V,M}$: 「もんじゅ」あるいは実証炉SGの容器内構造物表面積
- $S_{V,50}$: 50MWSG蒸発器の容器内構造物表面積

前章の2.3.1項より明らかになった $A_{RMS,50N} = A_{RMS,50W} = 0.007G$ を(式3-3)に代入すると、「もんじゅ」SGのバックグラウンドノイズは $0.0093G$ 、実証炉SG²⁾のそれは $0.012G$ と見積ることが出来る。

(3) まとめ

上述の結果から、「もんじゅ」及び実証炉SGの水リーク率1, 10, 100 g/secのナトリウム-水反応音は、以下のように推定される。

水リーク率	もんじゅSG (蒸発器)	実証炉SG
1 g/sec	0.01 G	0.006 G
10 g/sec	0.024 G	0.014 G
100 g/sec	0.05 G	0.028 G

それらを(2)で見積もった「もんじゅ」及び実証炉SGのバックグラウンドノイズと比較すると、それぞれS/N比が「1」になるような水リーク率は、「もんじゅ」SGが約0.7 g/sec, 実証炉SGが約7 g/secと推定される。今後、本検出法を現実的なものにするためには、ピックアップ取付け位置や取付け個数の決定、リーク率検出下限値の決定、実ループを使った実証試験等が必要となる。更に、オーバーフロー音等の特別なノイズに対する対策も行う必要がある。また、検出感度が向上するよう導波棒構造やピックアップの開発も行う必要があるが、誤信号を避けることのできない本検出法では、検出できる最低水リーク率はS/N比「1」以上となり、実際に自動停止により水リークを検出することができる水リーク率は、誤信号を避け更に安全率を設けると“小～中リーク領域”と推定できる。

3.3 ナトリウム-水反応音、模擬ナトリウム-水反応音の周波数特性

前2.3.2項は50MWSG蒸発器のバックグラウンドノイズの周波数特性について述べたが、ここではそのバックグラウンドノイズとナトリウム-水反応音及び模擬ナトリウム-水反応の周波数特性の違いについて述べる。ナトリウム-水反応音及び模擬ナトリウム-水反応音の分析方法は、一旦データ収録装置で磁気テープに収録しその再生信号をスペクトラム・アナライザで分析を行っている。周波数範囲は0～20 kHzである。

(1) 周波数分析時の運転及び試験条件

ナトリウム-水反応音の周波数特性は、SWAT-2試験装置で実施した小リーク・ナトリウム-水反応試験から、模擬ナトリウム-水反応音の周波数特性は、50MWSG蒸発器でのガス噴出試験時に得たものである。又、バックグラウンドノイズの周波数特性は50MWSG蒸発器で測定したもので、前章で述べたものを使用した。以下に、それらの運転状態や導波棒等について比較した表を示す。

	SWAT-2	50MWSG(ガス)	50MWSG(ノイズ)
① 導波棒	A型(16φ×200mmℓ)	A型(16φ×200mmℓ)	A型(16φ×200mmℓ)
② 運転状態			
・Na温度	480℃	—	315℃
・Na流量	無	—	753T/h
・水/蒸気系	無	EV+SHの結合運転 (—)	EV+SHの結合運転 (43.8MW)
・リーク率	14g/sec	60g/sec	—
・加速度出力 実効値	0.072G	0.055G	0.010G

(2) 周波数特性比較結果

これらの周波数特性の違いを見るために図3.9に上記の3ケースを比較した。何れの周波数特性にもピークは見られず、ホワイトノイズと言える。またそれぞれのレベルの違いは、実効値出力の違いからくるものと思われる。

ここに示してある3ケース中、ナトリウム-水反応音とバックグラウンドノイズの周波数特性は非常に似ている特性を示しており、ガス噴出音だけは若干違う特性を示している。前者の場合、5~6kHzまではほぼフラットな傾向を示しており、それ以上の周波数になると徐々に下がってくる。しかし、後者の場合2kHz以下ではレベルが高く6kHz以上では、急激に下っている。3ケースの特性の中で、導波棒の固有振動数の影響を一番強く受けているのは、バックグラウンドノイズの周波数特性で、図中の6kHz付近では、他の特性より高い値を示している。

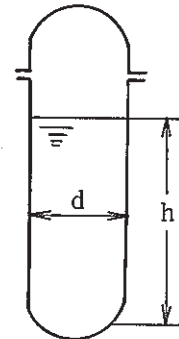
これらの結果から、ナトリウム-水反応音とガス噴出音の周波数特性には若干の違いがあることが判ったが、いずれもホワイトノイズで、固有のピークが無い。このことから、本方法で周波数特性を利用してナトリウム-水反応音を検出することは難しいと言える。

表 3.1 各試験容器の主要寸法の比較

容器名称	SWAT-2 (SWAT-1)	SWAT-3	SWAT-5	50MWSG 蒸発器	もんじゅ 蒸発器	実証炉SG ²⁾
胴の肉厚 (mm)	14 (12)	30	16	25	32	30以下
胴の内径 (m)	0.4	1.3	1.35	1.75	2.7	3.45
内筒外径 (m)	無	無	0.5175	0.7112	1.035	0.95
外筒内径 (m)	無	無	1.1475	1.49	2.295	3.05
伝熱面積 ⁽¹⁾ orターゲット 管面積 等 (m ²)	*1 *2 *3 (0.5)+(20)+(1)	(22)	278	237	1113	3270
容器内表面 積 ⁽²⁾ S (m ²)	2	19	20	46	79	231
液面と下部 鏡間の高さ (m)	1.5	4.3	4.3	7.9	8.6	無液面

- (1) *1 SWAT-2 ターゲット管の総外表面積
 *2 内装フィルタ(金網)の総外表面積
 (30メッシュ線径0.35mm, 0.1m²×200枚)
 *3 上記外の内部構造物の総外表面積

(2) Sの算出式 $S = \frac{\pi}{4} d^2 + \pi d h$



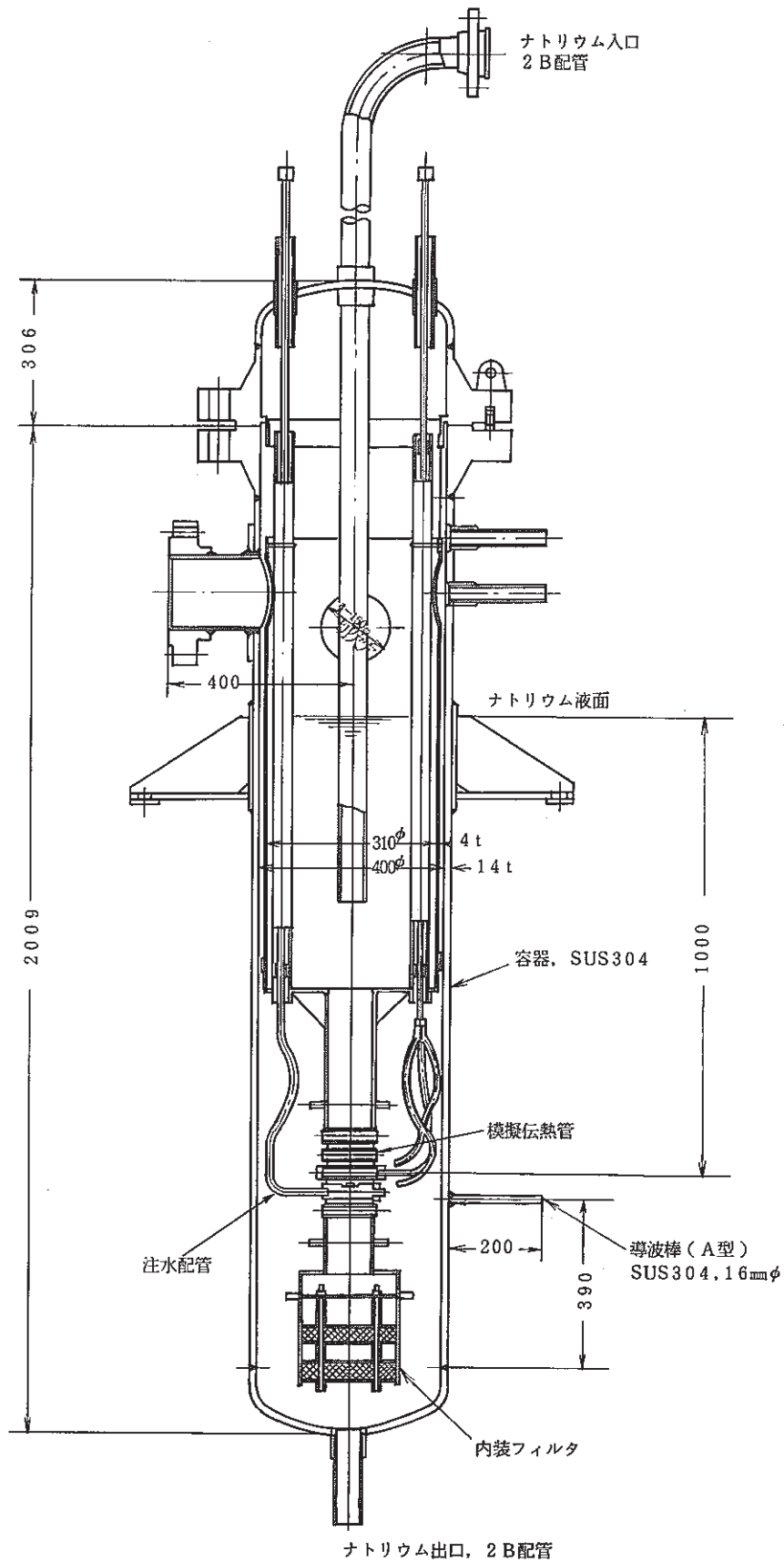


図3.1 小リーク・ナトリウム-水反応試験装置 (SWAT-2) の反応容器の構造と導波棒取付け位置

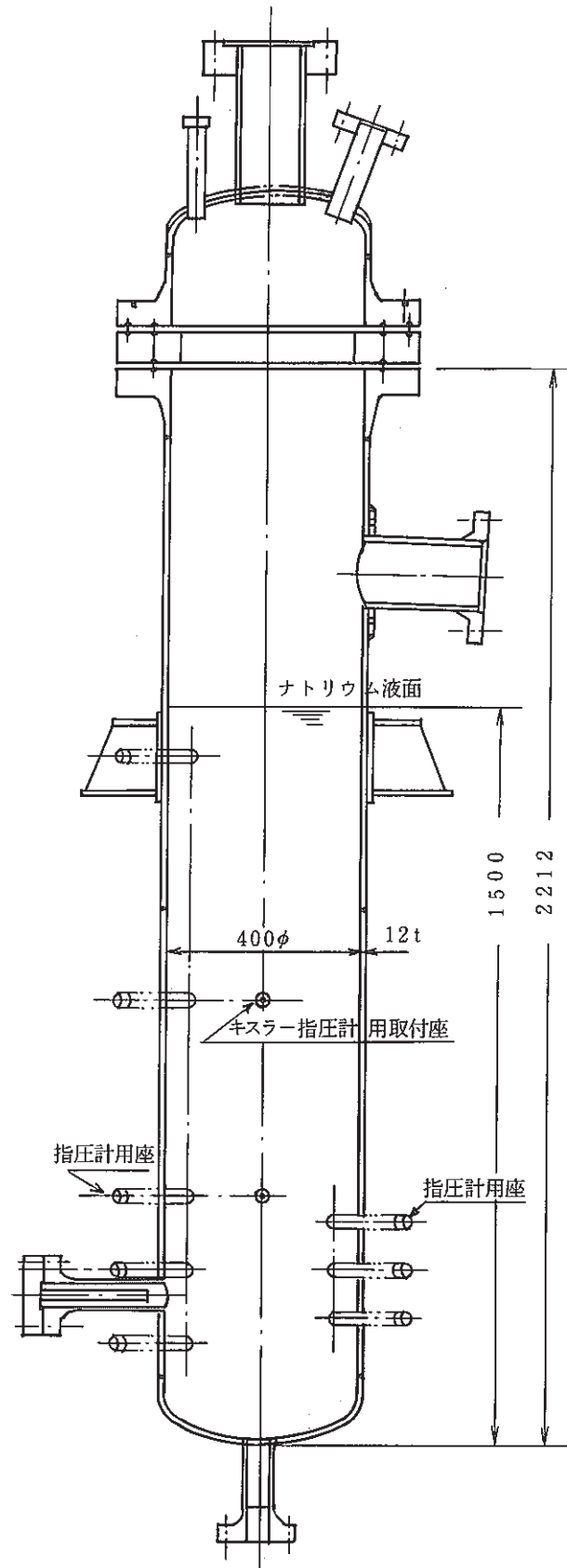
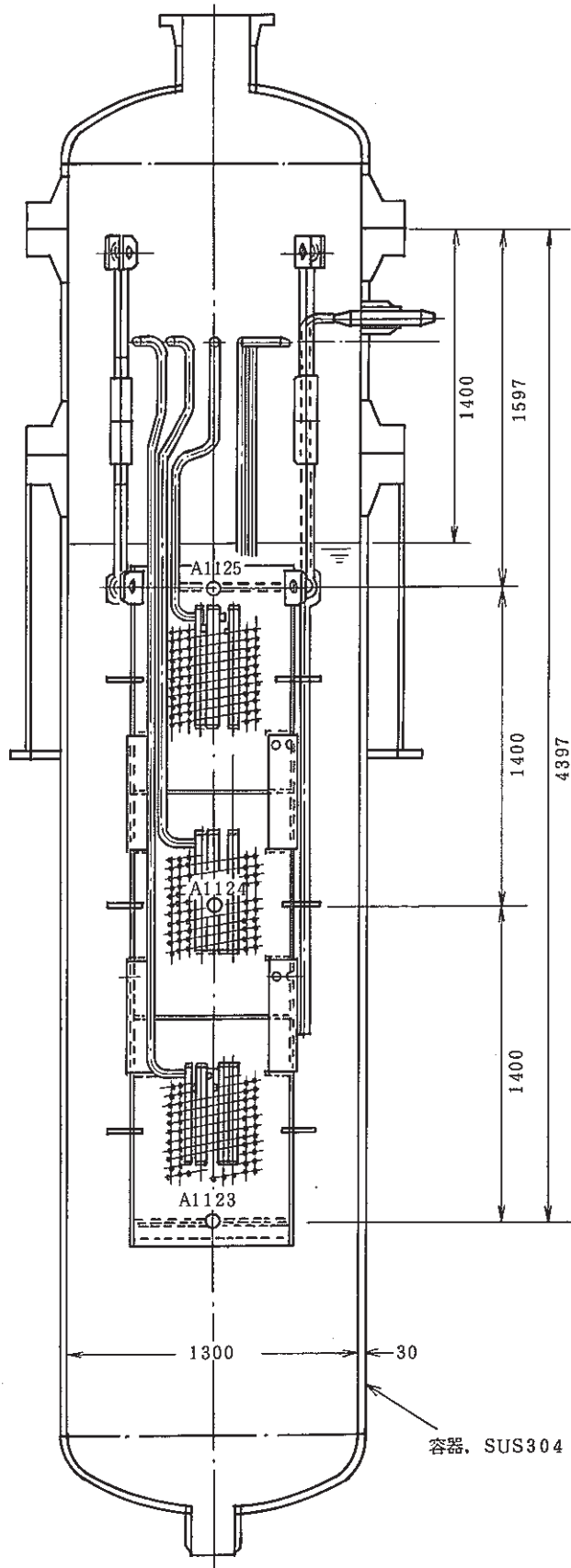
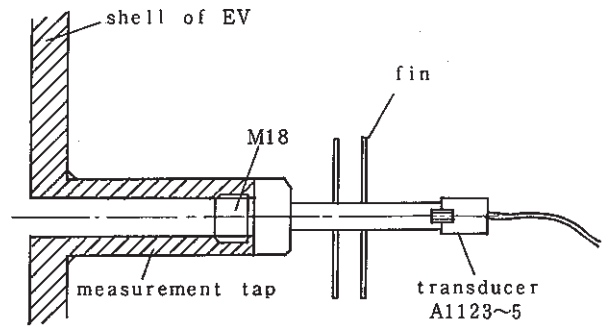
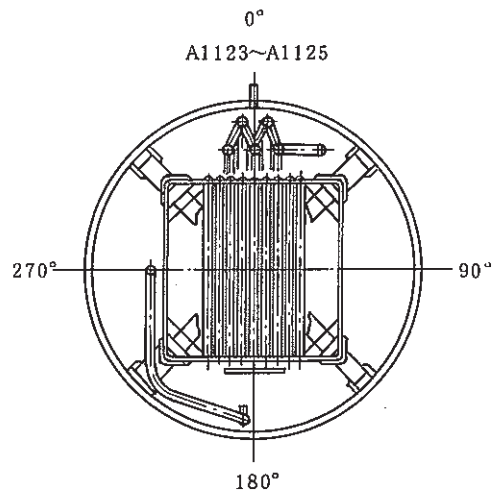


図 3.2 大リーク・ナトリウム-水反応試験装置 (SWAT-1) の反応容器の構造と導波棒を取付ける指圧計用座の位置



Tag.	Location	Direction	Hight
A1123	Pres. Tap	0°	FL3000
A1124			FL4400
A1125	Pres. Tap	0°	FL5800



導波棒構造 (B型)

図 3.3 蒸気発生器安全性総合試験装置 (SWAT-3) 反応
容器内部構造と導波棒

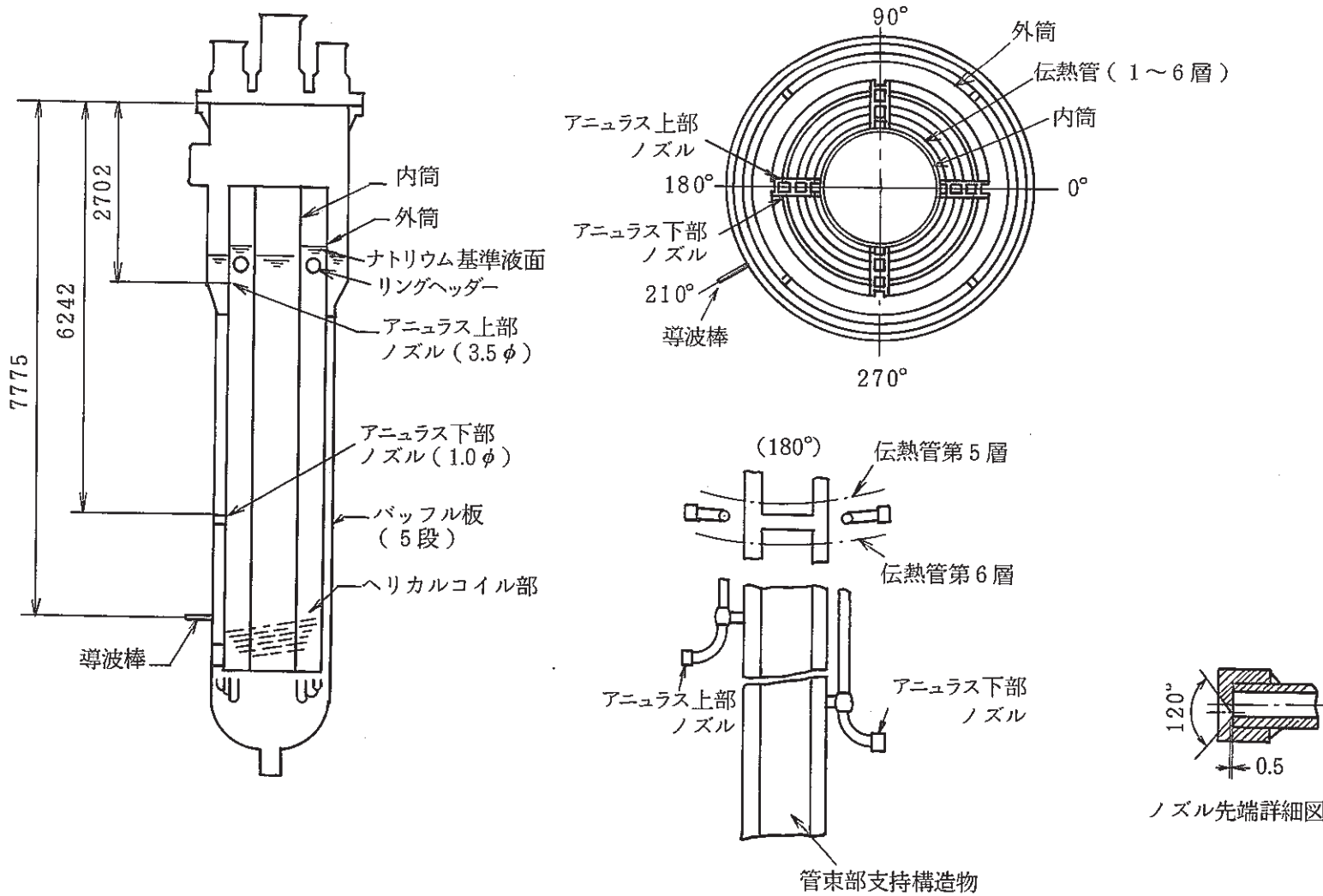


図 3.4 50MWSG 蒸発器の構造及びアルゴンガス噴出ノズルと導波棒の設置位置

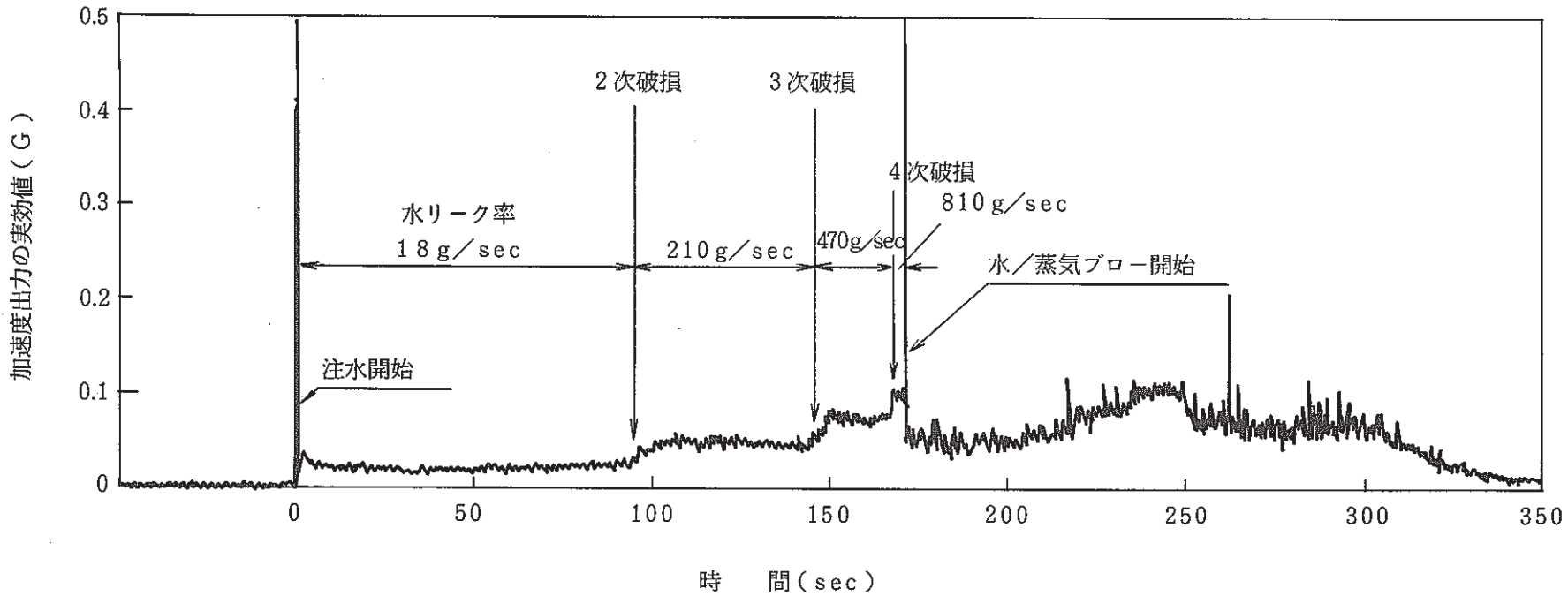


図 3.5 SWAT-3 での隣接伝熱管破損伝播試験時の容器胴の加速度出力の変化⁷⁾

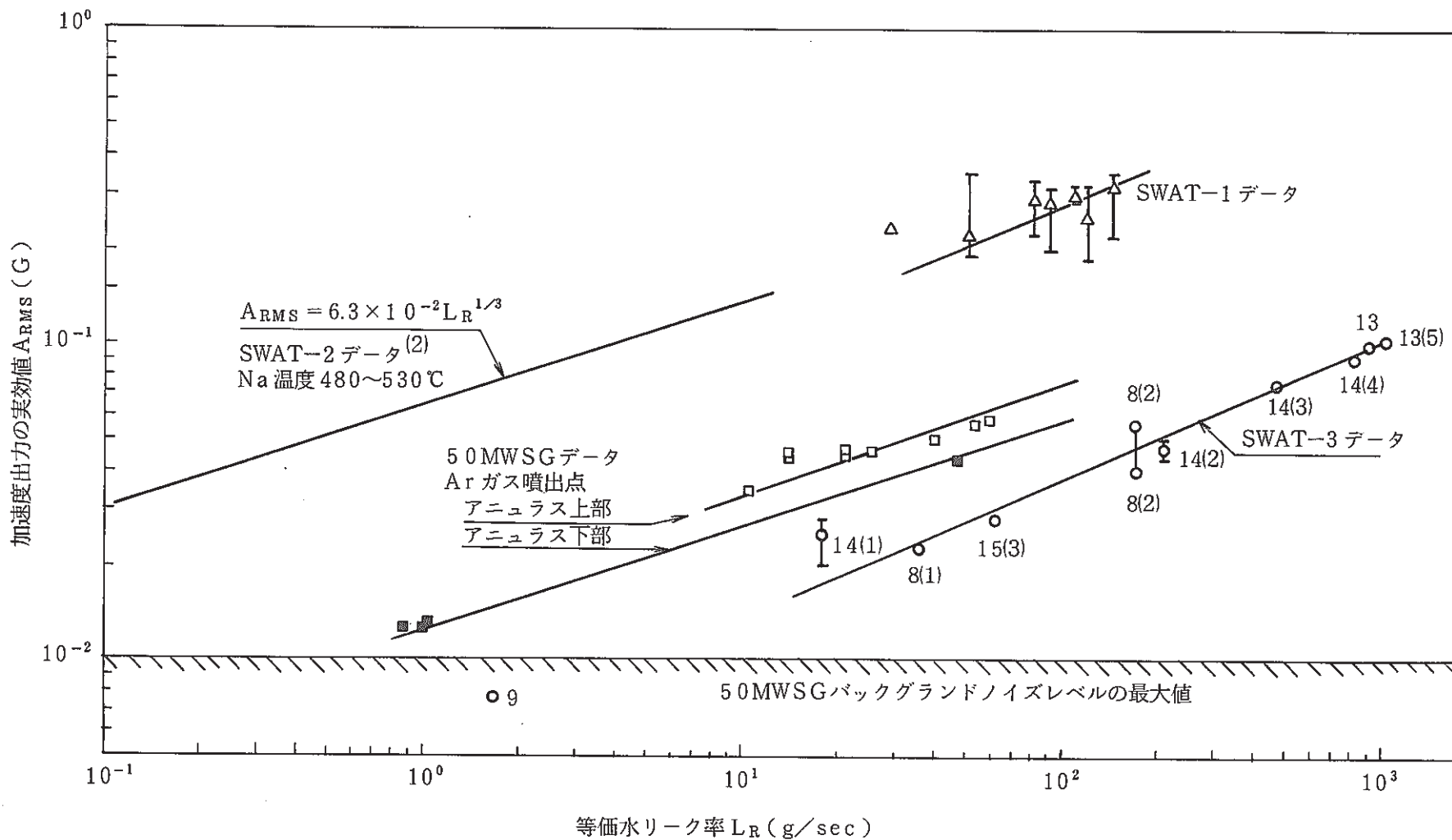
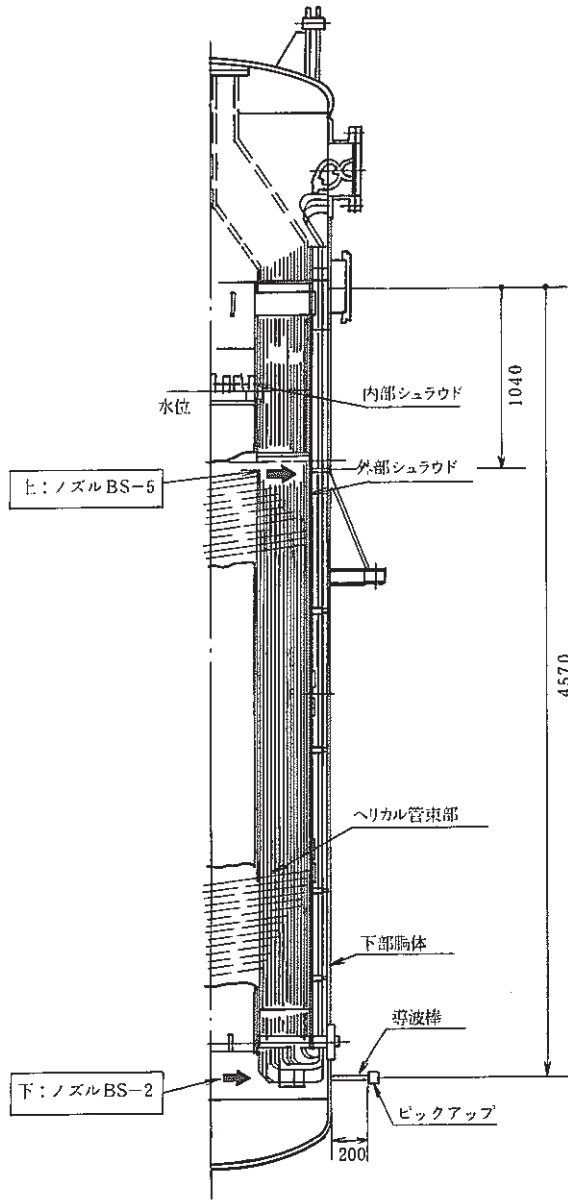
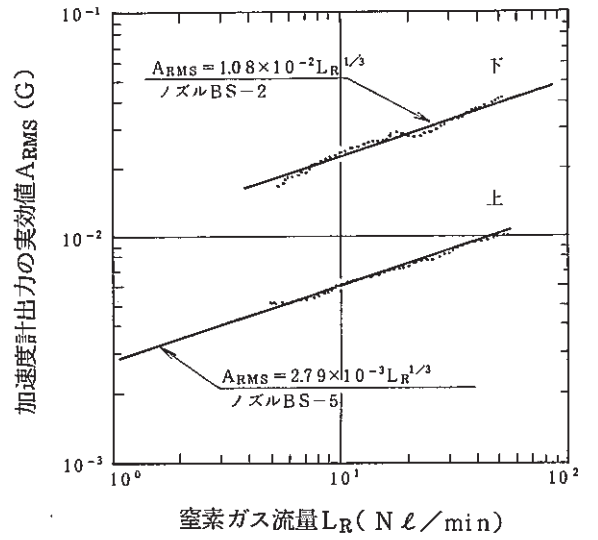


図 3.6 ナトリウム-水反応音並びにガス噴出音と反応容器胴壁の加速度出力の関係



(a) 「もんじゅ」蒸発器1/2縮尺試験体と
ガス噴出ノズル・導波棒の設置位置



(b) 窒素ガス噴出流量と加速度計出力の関係

図3.7 「もんじゅ」蒸発器1/2縮尺水中音響試験体・窒素ガス噴出
時における加速度出力のヘリカルコイル管束部による減衰効果

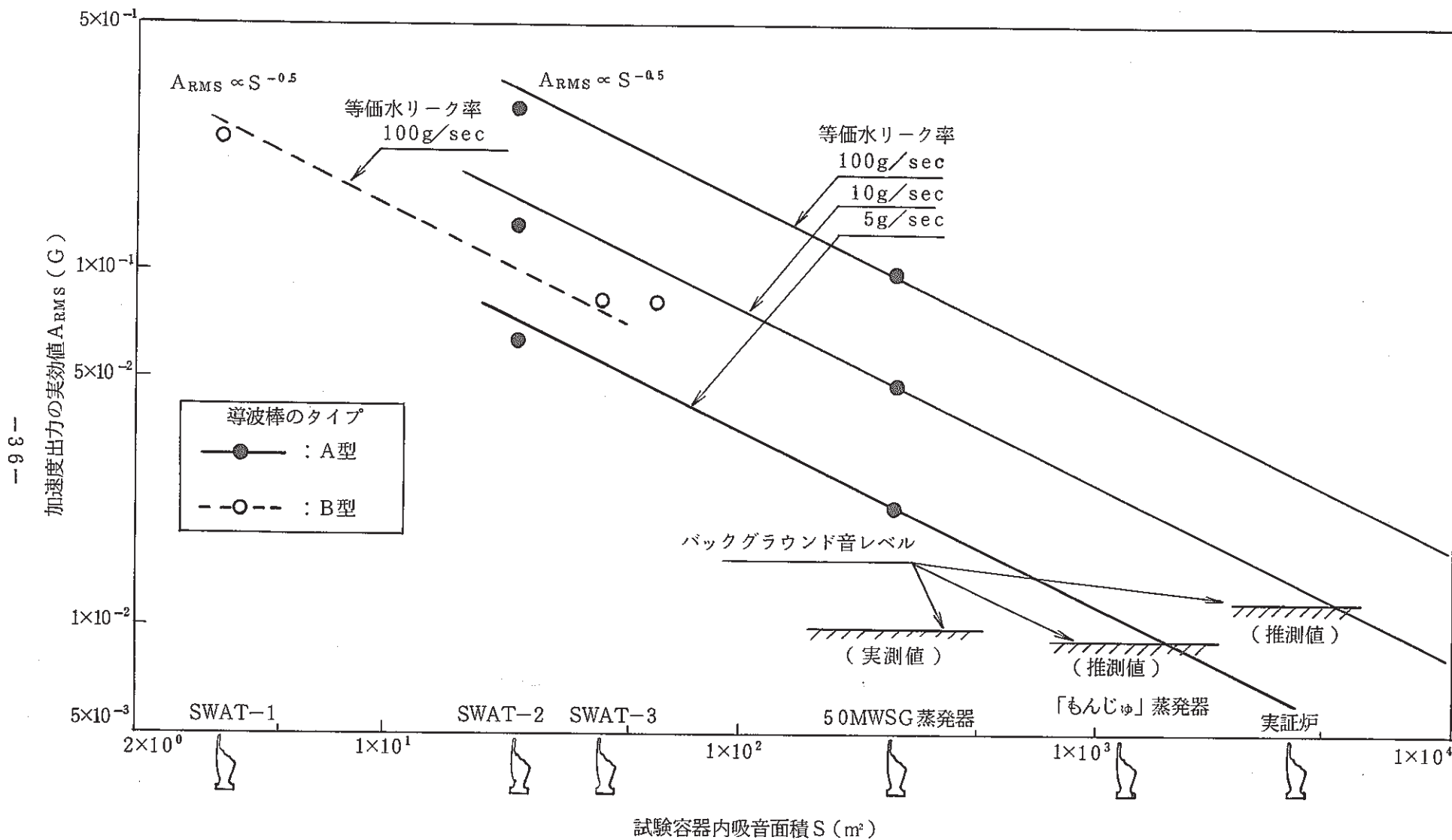


図 3.8 試験容器内吸音面積による加速度出力 (容器胴肉厚 1.4 mm 換算) 変化の予想曲線とバックグラウンド音との比較

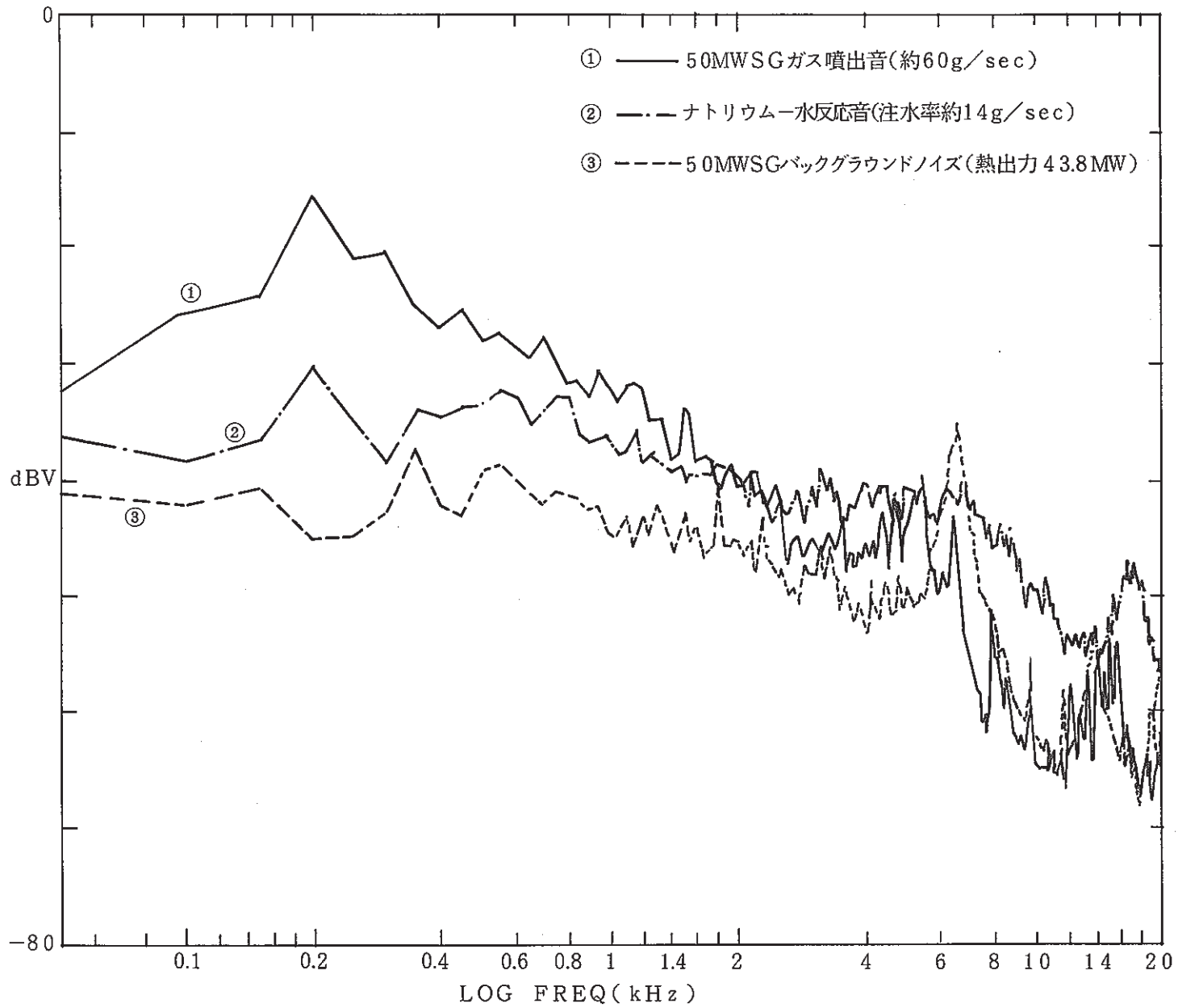


図3.9 ナトリウム-水反応音, ガス噴出音とバックグラウンドノイズの周波数特性の比較

4. 多チャンネル法による高信頼性水リーク検出法の開発

前章で述べたのは、1個の加速度ピックアップで得た単チャンネルの加速度信号についての結果であり、それらを基に「もんじゅ」SG及び実証炉SGについて実用可能な水リーク率検出範囲を推定することができた。それによると、プラント運転の際の水リークに対する誤判断を避ける目的で、加速度実効値出力のS/N比として最低「10」以上は必要であると仮定し、検出可能なリーク率を求めると約7 g/sec以上となる。ところがこのリーク率範囲であれば、中リーク検出計としての機能は期待できるが、本来の開発目的である小リーク検出器としての機能を音響検出器に期待することはできない。そこで、検出性能の向上によって実用性を高め、更にリーク位置標定器としての可能性も追求する目的で、多チャンネル相関法を利用した検出システムの開発を試みた。

このシステムでは、8～12個の加速度ピックアップを用いてそれぞれのピックアップからの検出信号をオフ・ラインの大型計算機で処理して2次元音場での相互相関を求め、これによって音源の発生の有無及び発生場所を特定するものである。ここでは、前報の基礎試験³⁾に引き続いて行ったオフ・ラインの多チャンネル相関法に関する解析結果について述べる。

また、オフ・ラインで開発された検出方法をもとに、リアルタイムで水リーク検出/位置標定を行う試作装置「WALD-100」についての性能評価試験の結果についても報告する。ここで行った性能評価試験は、本システムが実際にオン・ラインで使用することが可能かを調べるために行ったものであるが、オフ・ラインでまだ検出方法が決定していないため、そのなかの一例を選択して解析を実施し、両者を比較することによって評価した。

4.1 試験装置

4.1.1 試験容器

試験では、すでに説明した図3.7の「もんじゅ」蒸発器1/2縮尺水中音響試験体(SWAT-5)を使用する。

4.1.2 模擬リーク音源

水リーク音の模擬のため、ここでは窒素ガスの噴出音及び水中送波器からの発信音を利用する。前者は、ナトリウム-水反応音と本質的に類似であるとの報告³⁾に基づいており、後者は前者との比較でガス気泡がない場合の音源として使用する。

(1) ガス噴出ノズル

試験体には、18個のガス噴出ノズル(内径2mmφ)をヘリカルコイル管東部に設置しており、それらの設置場所は図4.1に示した内・外部シュラウドである。各ノズルの先端はいずれもヘリカルコイル管東部側に向けてあるため、ガス噴出によって伝熱管最内層と最外層からの水リークを模擬することができる。内部シュラウドだけがある場合(一体貫流SGに相当)については、その効果を調べるために、試験体の下部プレナム部にガス噴出ノズル(内径

0.3 mm φ) を追加設置している。

(2) 水中送波器

使用したのは圧電型水中送波器(沖電気製ST-8002型)で、送波器への入力信号は正弦波ランダム信号発生器で発生させ、フィルタで不要な周波数帯域をカットしたあと、パワーアンプとマッチングトランスを組合せて所定のパワーにまで増幅する。この送波器の取付け位置は、図4.2に示すよう下部プレナム部である。

4.1.3 音響検出器及び導波棒

(1) 導波棒

形状は、図4.3の(a)と(b)示した2種類で(各々「C型」、「D型」と称する)、ここでは導波棒の共振周波数の影響を避けるため主にC型(22 mm φ × 22 mm ℓ)を使用する。共振周波数は、「C型」で約5.7 kHz、「D型」(C型+16 mm φ × 178 mm ℓ)で約6 kHzである。

(2) 音響検出器

使用した音響検出器は、富士セラミックス製の圧電型加速度ピックアップ(AP51T型)で、圧電感度は周波数が10 kHz以下の場合、平均60 mV/G(1G=9.8 m/sec²)、共振周波数は35 kHz以上にある。ピックアップには雄ネジが付いてあり、これで導波棒に固定する。ピックアップの周波数特性の1例と形状を図4.4に示す。

4.1.4 計測及びデータ処理

計測システムの全体構成を図4.5に示す。

ピックアップからの出力電荷は、マイクロ・ケーブルを介してチャージ増幅器(国際機械振動研究所製VM-4146型)に入力し、交流電圧信号に変換後増幅する。この増幅器の加速度測定範囲は、0.005 Gから10 Gであり、周波数応答特性は15 kHzから30 kHzの範囲で±5%以内である。

チャージ増幅器で増幅後、音響信号はダビング及びA/D変換のために、データ・レコーダ(ハネウェル製M-101)に120 IPSのテープ・スピードで収録する。A/D変換に使用したミニコン(HP-1000)の処理速度は最大50 Hzであり、一方解析の対象となるデータの周波数範囲は、主に4~6 kHzである。このために、1/4096又は1/2048に再生スピードをおとしてのテープのダビング及びA/D変換を行う。

また、入力周波数は次の理由で4~6 kHzの範囲とする。

下限値

容器胴のサイズ(内径)が1.35 m、水中の音速が1,400 m/secとして容器内に1波長以上存在するためには $1400/1.35 \approx 1$ kHz以上が必要となる。

上限値

壁のコインシデンス効果を避けるためには一致周波数⁹⁾(coincidence frequency)以下とする必要がある。一致周波数は波の入射角が90度の場合：

$$f_0 \doteq \frac{C^2}{2\pi h} \sqrt{\frac{12\rho}{E}} \doteq \frac{C^2}{1.8 h C_s} \dots\dots\dots (式4-1)$$

ここで、 C = 流体中の音速 (約 1,400 m/sec)

C_s = 固体中の音速 (約 5,000 m/sec)

h = 板の厚さ (0.016 m)

この式から f₀ は 13 kHz である。

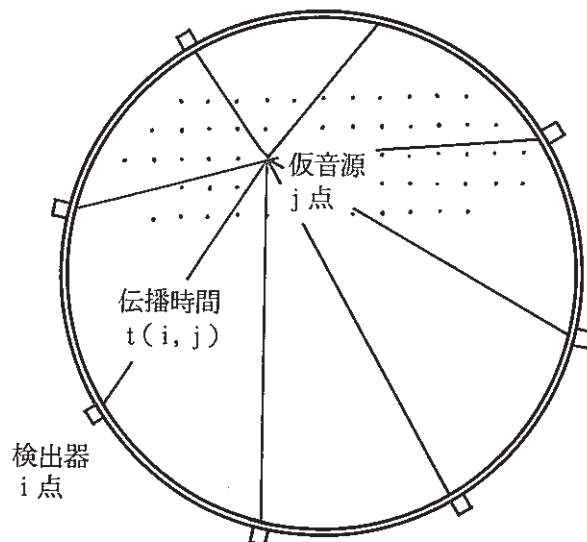
また、伝熱管群が存在する場合には、その径を「d」とすると、「6 d」以上¹⁰⁾の波長でないと均一な音場と見なせない。この時、1,400/(6×0.016)=14 kHz となる。

以上の検討値から更に保守的な値として 4～6 kHz を選択する。

4.2 解析方法

解析方法は、対象とする音場の任意の点(焦点(x, y))を音源と仮定し、複数の加速度ピックアップからの音響信号を、各チャンネル毎に仮定した音源と加速度ピックアップ間の伝播遅れを時間合わせし、全チャンネルの信号の積あるいは和の二乗を時間積分するものである。この仮定した音源を音場の全領域にあらかじめ多数設定しておき、これらの点について順次上述の計算を行い最も大きな値が算出された点(最も良く相関のとれた点)をリーク位置として標定する。

相関式としては、次式を使用した。



全信号の積

$$P(j) = \frac{1}{\sigma(1) \cdot \sigma(2) \cdots \sigma(8) \cdot N} \sum_{n=1}^N \{ D(1, n+t(1, j)) - M(1) \} \cdot \{ D(2, n+t(2, j)) - M(2) \} \cdots \{ D(8, n+t(8, j)) - M(8) \} \cdots \text{(式4-2)}$$

全信号の和の二乗

$$P(j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^8 \frac{D(i, n+t(i, j)) - M(i)}{\sigma(i)} \right\}^2 \cdots \text{(式4-3)}$$

ただし、

- P(j) : 仮音源 j 点における相互相関値（音響パワー）
- D(i, n+t(i, j)) : チャンネル i の n 番目から伝播時間 t(i, j) 後の信号の音響振幅
- t(i, j) : j 点から i 点までの音響伝播時間
- N : 積分回数
- M(i) : チャンネル i の n = 1 ~ N までのデータの平均値
- σ(i) : チャンネル i の n = 1 ~ N までのデータの標準偏差値

4.3 オフ・ライン解析の結果と考察

本解析上のソフト上のパラメータには、音速、サンプリング周期、相関時の演算手法、平均化回数等があり、すでに前回の解析⁸⁾で得た値を基準とする。ここでは主に各加速度ピックアップの取付け位置及び内部シュラウドが音響伝播に及ぼす影響について解析し、その結果を前回の解析結果と照らし合わせて報告する。

4.3.1 前回の基礎試験の結果⁸⁾

前回の実験解析結果によると、内・外部シュラウドの影響を受けない模擬SGの下部プレナム部では、容器胴の加速度ピックアップ8個による相関法で、S/N比が「1」以上であれば模擬リーク音を検出できるが、内部構造物の影響を受ける模擬SGのヘリカルコイル管東部では同条件でも模擬リーク音を検出できないことがわかっている。

考えられる主な原因には、容器胴に直接伝播する音が内部構造物（伝熱管及び内・外部シュラウド）によって減衰するためである。中でも外部シュラウドがリーク検出／位置標定に及ぼす悪影響は最大と考えられる。又、下部プレナム部に伝播した音が容器胴に伝わり本相関技術にとって、ノイズとして作用することも一つの原因と考えられている。

4.3.2 内部シュラウドの影響

現在、実証炉²⁾ではダウンカンマがなく外部シュラウドの不要なSG構造が設計で選択されている。ここでは内部シュラウドだけがリーク検出／位置標定に及ぼす影響について

解析し、実証炉SG用リーク検出系に対する有効性を評価する。

- (1) 図4.6に示すように、下部プレナム部に仮の内部シュラウドを設置し、ガス噴出ノズル(BS-2)で模擬リーク音を発生させ、このノズルと同一平面上に設置した加速度ピックアップでリーク音を検出した。また検出したリーク音には、リーク信号だけの場合と、ノイズを入れてS/N比=0.7~1.6に設定したものの両方を収録した。以下に、試験条件と信号の解析パラメータを示す。

(ハードパラメータ)

- ・模擬リーク音 : ガス噴出音(BS-2)
- ・導波棒の長さ : 22 mm
- ・ピックアップ数 : 8個
- ・バックグラウンド音 : S/N比=0.7~なし

(ソフトパラメータ)

- ・音速 : 1400 m/sec
- ・周波数 : 4 kHz ~ 6 kHz
- ・サンプリング周期 : 20 μ sec
- ・標定点間隔 : 32.6 mm
- ・相関演算方式 : 和の2乗(式4-3)
- ・積分回数 : 100 ~ 8000回

(2) 解析結果

まず図4.7の(a)にノイズのない場合の模擬リーク音解析結果を示す。図では、積分回数を150, 200, 1000, 5000回としたそれぞれの結果を上から順に示したが、積分回数200回以上で音源位置の半径約10cm以内にリーク検出/位置標定している。しかし、これに同図(b)のごとく模擬ノイズを入れ、S/N比=1.6とすると、積分回数5000回でも誤った位置にリーク標定している。また積分回数が多いと、内部シュラウド内にリーク信号が集まり、正しい位置にリークを検出することがより困難となる。なお、模擬ノイズの発生は、模擬ナトリウムの流動音や伝熱管内の水/蒸気の沸騰音の模擬のために複数のガス噴出ノズルからガスを噴出させることによって行い、これらのノズルの位置は、模擬リーク音発生用のガス噴出ノズルBS-2から垂直方向で、約2m以上上方である。

以上の結果から、内部シュラウドの影響を評価すると模擬ノイズがない場合検出が可能で、模擬ノイズがS/N比「1.6」以下では検出できないことが判った。この事から、内部シュラウドがあるとノイズに対して弱くなると言える。しかし、本実験解析による模擬ノイズが必ずしもナトリウム流動音や水/蒸気流動・沸騰音を模擬しているとは言い切れず、今後より現実的な実験により確認する必要がある。

4.3.3 模擬SG下部鏡壁での垂直方向音響信号による検出

これまでの試験・解析から、模擬リーク音を検出するうえでの最も大きな障害は、音響伝播を阻害するヘリカルコイル部と内部シュラウドなど内部構造物の存在である。そこで、これら内部構造物の影響を回避する目的で、次に模擬SG下部鏡壁で模擬リーク音の垂直方向音響信号による検出を試みた。

ヘリカルコイル管束部の模擬リーク音は、外部シュラウドから下降管部を経て胴に伝播する最短の音響伝播経路と、ヘリカル管束部を降下して下部プレナム部に達して直接下部胴に伝播する最長の音響伝播経路がある。これまでに述べてきた解析結果によると、後者の音響伝播経路が主要な経路と判断できる。この経路を利用して検出するのがこの検出方法である。

(1) 試験・解析方法

試験では、図4.2に示すように下部プレナム部に1周12個の加速度ピックアップを同心円状に上下の2段に付け、これらのピックアップからの音響信号を高さ方向の距離を補正して平面2次元について相互相関解析を行い検出を試みた。具体的には、ヘリカルコイル部に設置したガス噴出ノズル、及び水中送波器からの模擬リーク音を加速度ピックアップで受信し、データレコーダに収録する。模擬音源の発生位置は、すべて同一方向(図4.2の120度方向)に設置しており、ピックアップ位置からの高さ及び中心からの距離(半径)の影響を調べるため、高さ方向に3ケース、同平面状に2ケース設置した。

本来、この検出方法はリーク位置の高さも判るように、音源から直接ピックアップの位置まで伝播する最短の信号を補らえることが理想であるが、この場合、内・外部シュラウドなどに反射して信号が補えづらい。そのため本解析では、図4.8の(a)に示すような模擬リーク音からの音響信号は、伝熱管隙間を垂直に下部プレナム部方向に降りてきて、ヘリカル管束部を出た地点で円周状に広がり、下部プレナム部設置の各ピックアップに伝わるという考え方で解析した。この方法だとヘリカル管束部の最下部の水平面を対象にした解析となるため、模擬リーク音の高さ方向の位置標定は無理であるが、どの流路チャンネルで水リークが起きたかを知ることができる。

また、図4.8の(b)に示すような無液面SGではモニタする空間を上下プレナムの2室とすると、両室の演算結果が一致することをもって水リークを検出したと見做すことができ、1室だけの場合よりも信頼性が高くなる。また、同時に高さ方向の位置標定も可能になる。

ここでは、先ず本方法で検出することが可能か確認するため、下部プレナム部に設置したピックアップで解析を行った。主な確認項目は、ピックアップの取付け位置の影響、半径の違いによる影響、高さの違いによる影響の3つがあり、これらについて評価する。

以下に、解析上のパラメータを述べる。

(ハードパラメータ)

- ・模擬リーク音源 : 水中送波器(ST-8002), ガス噴出ノズル(PS-11, PS-17, PS-5)
- ・導波棒の長さ : 22 mm
- ・ピックアップ数 : 12個
- ・ピックアップ位置 : 下部プレナム部鏡壁の外周及び円周
- ・バックグラウンド音 : なし

(ソフトパラメータ)

- ・音速 : 1400 m/sec 前後
- ・周波数 : 4 kHz ~ 6 kHz
- ・サンプリング周期 : 20 μ sec
- ・標定点間隔 : 32.6 mm
- ・相関演算方式 : 和の2乗(式4-3)
- ・積分回数 : 100 ~ 15000回

(2) 解析結果

下部プレナム部で信号を解析した結果、有液面、無液面の違いは殆ど見られなかった。そこで、ここに述べる各確認項目の解析結果は、無液面SGの解析結果を述べる。

① 外周ピックアップを用いた場合

図4.9の(a)にある外周ピックアップの解析結果によると、容器の断面全体に標定点を設けた場合は4ケースとも音源位置に特定することができなかった。PS-11ノズルとST-8002送波器は、容器の中心にそれらの位置標定がなされ、またPS-5ノズルとPS-17ノズルについては容器の中心から音源位置の反対側に位置標定された。

これらの原因は、前者については内部シュラウド自体が振動したり、模擬リーク音響が上/下プレナムからセンタパイプに入ってセンタパイプが共鳴管の役目を果たしたためと考える。後者については、外部シュラウドで反射した音が反対側(対象点近傍)に集まって、擬似的な音源となっているためと考えるが、これは水と鋼の音響反射率¹¹⁾が約0.9で殆ど減衰せずに反射するためと推定する。

それらの結果から更に、内部シュラウドの内側に設定した標定点を取り除き、実際に水リークがあると考えられる位置だけで解析を実施した。その結果、図4.9の(b)に示すようにPS-5ノズル以外は全て音源位置に正しく検出できる。なかでも、内部シュラウドに近いPS-11ノズルとST-8002は、積分回数が3000回以上で検出できたことから、容器の中心に現れるような内部シュラウドに起因するノイズが最も大きな影響を与えていることが判る。PS-17ノズルは、積分回数8000回以上でなければ検出することができず、内部シュラウド共鳴効果より反射波の虚像効果が大きいと言える。また、PS-5ノズルはいずれの場合も検出できず下部プレナム部までの距離の遠さが検出に影響するこ

とが判る。これは、模擬リーク音が伝播する時の減衰や内部構造物の反射等による信号の乱れがノイズとして作用することが原因として考えられる。

② 内周ピックアップを用いた場合

図4.10に内周ピックアップを用いた場合の解析結果を示す。この場合も外周ピックアップを用いた場合と同じように、音源位置に検出することは出来なかった。また、同様に内部シュラウドの内側に設定してある標定点を削除してノイズの影響がどの程度か、水リーク音を検出できるかを解析したが、結果は外周ピックアップより悪く、ST-8002以外は音源位置に検出することが出来なかった。

③ まとめ

これらの結果：ピックアップ取付け位置は下部プレナム部鏡壁の内周よりも外周のほうが良いと結論できる。また、本検出方法ではピックアップ取付け位置とリーク位置が遠くなるほど検出が難しくなることが判る。

今後、検出に関する信頼性を向上させるには、バックグラウンドノイズ及び水リーク音が反射してできるノイズ等が、水リーク信号検出に与える影響をより小さくし、また、導波棒の構造や水リーク信号の受信方法の改良、また高精度な信号処理技術の開発等が必要と考えられる。

4.4 オン・ライン信号処理装置の開発と性能評価試験

大型計算器を使用し、オフ・ラインによる相互相関解析で開発されたソフトウェアをもとに、リアルタイムの水リーク検出/位置標定装置「WALD-100」を試作した。現段階では、まだ実際のSGにおける検出方法が決まっていないため、本装置の性能評価試験はオフ・ラインで今まで実施したなかの1つを選択して、オフ・ラインと同等な性能があるかを評価した。具体的には、下部プレナム空間の障害物が何もない構造で行った多チャンネル検出をオン・ライン実施しており、これと同じ方法のオフ・ライン解析の結果はS/N比「1.0」以上でリーク検出が可能であった。

4.4.1 多チャンネル型音響式水リーク検出システム

(システム構成)

本システムは、SGに発生する連続的水リークに対して、多チャンネル音響信号相互相関手法によりリアルタイムでリーク検出/位置標定できることを目的に試作したもので、リアルタイムで最大8チャンネルの計算を行うハードウェアと、これらを制御するソフトウェアで構成されている。ハードウェアは図5.1に示すように信号検出/増幅部、デジタル遅延装置、デジタル相関計及びホストコンピュータからなる。

各部の仕様と、工場内性能評価試験結果についてはそれぞれ「APPENDIX-A及びB」に記載する。

4.4.2 下部プレナム部水中ガス噴出試験

ここでは、WALDシステムをオン・ラインで接続して実際に水中ガス噴出試験に応用し、リアルタイムでリーク検出／位置標定解析を実施した結果について述べる。

(1) 実験・解析方法

WALDシステムで処理する音響信号は、SWAT-5装置を使用して水中ガス噴出により発生させたもので、これをデジタル遅延装置、デジタル相関計に入力し、リーク検出／位置標定解析を行った。

ガス噴出に使用したノズルは、図4.6に示すBS-1、BS-2ノズルで下部プレナム部に設置しており、ガス噴出率は両方とも加速度計実効値で約0.02Gとなるように設定した。

信号検出部では、加速度ピックアップはガス噴出ノズルと同平面上に合計8個設けており、受信した音響信号をチャージアンプ、フィルタを通してデジタル遅延装置に入力し、デジタル相関計での相互相関解析を行い検出を試みた。今回の試験では、装置の性能を評価すると同時にソフト上の各パラメータの最適値も求めて評価することを考えており、主なパラメータには、音速、周波数範囲、積分回数の3種類がある。以下に、各パラメータの設定値と最適値を求めるパラメータの設定範囲を示す。

(ハードパラメータ)

- ・ 模擬リーク音 : ガス噴出音 (BS-1, BS-2), (加速度計実効値で約0.02G)
- ・ 導波棒の長さ : 22 mm
- ・ ピックアップ数 : 8 個
- ・ バックグラウンド音 : な し

(ソフトパラメータ)

- ・ 音 速 : 600 ~ 1800 m/sec
- ・ 周波数範囲 : 2 ~ 6, 2 ~ 8, 4 ~ 6, 4 ~ 8 kHz
- ・ 積分回数 : $2^{10} \sim 2^{15}$ (1024 ~ 32768 回)
- ・ 相関演算方式 : 掛け算方式 (式4-2)
- ・ 標定点間隔 : 56.25, 112.5 mm
- ・ 標定点数 : 94 点

相関演算方式に掛け算方式 (式4-2) を使用する理由は、前回の報告⁸⁾で述べたようにパソコンで相互相関式の掛け算と和の二乗方式の比較を行った結果、掛け算方式の方が相対的にS/N比の改善性が優れていることが判ったためである。

また、標定点数は94点で容器断面の全体を模擬できるように設定しており標定点間隔は音源付近が56.25 mmでそれ以外がその2倍の112.5 mmである。また、音源付近の標定点間隔を半分にしたのは、最適値を求めるパラメータの傾向を細かく分析するためである。標定点数、標定点間隔を設定した画面のコピーを図4.12に添付する。

(2) リーク検出／位置標定条件

このシステムでは、相関の強い標定点ほど大きな口（正方形）で表され、最大点が実際の音源位置に標定された場合、リーク検出と判断する。今回の場合、図 4.1 2 の波線で囲まれた内側にその点が現れた時リーク検出されたものと考え、この波線は音源位置の半径 80 mm 以内を表わしている。

(3) 試験結果

① 音 速

音速は、容器内を伝播する音の速さで、遅延データ作成時に入力する。

一般に、無限媒体の水中音速は約 1450 m/sec であるが、内部構造物、容器壁などの影響により、正確な音速が得られないため、実際の音速をスペクトラム・アナライザを使用し下記の 3 方法で測定した。

(イ) 時間遅れ

(ロ) 相互相関関数

(ハ) インパルスレスポンス

その結果、(イ)～(ハ)とも下部プレナム部（フランジ合せ面下 4570 mm）では、約 1400～1500 m/sec、ヘリカル管束部（フランジ合せ面下 4120 mm）では、約 1300～1400 m/sec となった。

音速の最適値確認方法は、600～1800 m/sec 間を 100 m/sec 間隔で区切り、13 ケースに分けて解析した。その結果、予想どおり 1400, 1500 m/sec が最もリーク検出／位置標定率が良かった。また、1300, 1600 m/sec の場合でも、検出可能なことが判ったが、正規の模擬音源位置から 1 点（この場合 56.25 mm）のずれが生じ、1300 m/sec で中心方向に、1600 m/sec で容器外壁の方向へずれている。写真 4.1 に B S - 2 ノズルの場合の計算結果の一部を添付する。

このことから、音速は多少のずれは問題にならず、本当の正確な音速は必要ないと考えられる。この結果、音速の最適値は 1400, 1500 m/sec を使用する。

② 周波数範囲

周波数範囲とは、デジタル遅延装置に入力する音響信号の周波数範囲を現わし、ナマの音響信号をバンドパス・フィルタでカットしたものである。ここでは、2～6, 2～8, 4～6, 4～8 kHz の 4 ケースの範囲を解析した。

結果は、4～6 kHz の周波数範囲が最も良く、次いで 4～8 kHz, それ以外の 2 ケースは全くリークを検出することができなかった。写真 4.2 に上記の 4 ケースを比較した結果を添付する。

③ 積分回数

積分回数は、 $2^0 \sim 2^{15}$ （1～32768 回）まで設定することができ、オン・ラインリ

ーク検出装置の解析直前に入力する。

結果は、予想通り積分回数の多い方が標定率が良いことが判った。ここでは、 2^{10} ~ 2^{15} までの6ケースを実施した結果、 2^{13} ~ 2^{14} までは確実にリーク検出/位置標定した。しかし、 2^{11} 、 2^{12} になると、音源位置に検出される点の他にもう1つのリーク音源と誤標定される点が現われたり、又、音源位置がずれるなどの現象が出始め、正規の音源位置に標定されるケースも半分以下に下がった。 2^{10} になるとリーク検出/位置標定はあまりできなかった。写真 4.3 にこれらの6ケースを比較した写真を添付する。

上記の結果から、積分回数が多い方が確実に検出できることが判ったが、積分回数が多いほど処理時間が長いためここでは、確実に検出ができてなるべく積分回数が少ない 2^{13} (8192回)を選択するのがここでは良いと考えられる。

④ 総合評価

下部プレナム空間で音源をBS-1, BS-2 ノズルに設定した場合の各パラメータの最適値は以下ようになる。

- 音 速 : 1400, 1500 m/sec
- 周波数範囲 : 4 ~ 6 kHz
- 積分回数 : 2^{13} ~ 2^{15}

上記の各パラメータはオフ・ラインで解析した場合と殆ど同様で、積分回数が多くなったことが多少違う特徴として現れている。また、それ以外のパラメータのなかで、画面に設定する標定点を少なくしたこともオフ・ラインと違う点である。

この条件で連続処理を行った場合、積分回数： 2^{15} (32768回)で約37秒、 2^{14} (16384回)で約22秒、 2^{13} (8192回)で約14秒に1回のスピードで処理が可能であった。

以上の結果から、多チャンネル相関法をオン・ラインで実施することが可能という見解が得られた。また、現在のデータサンプリング間隔は10 μ secであるが、今後データ処理技術の進歩により1 μ secまで性能の向上が見込まれており、オフ・ラインで多チャンネル相関法が確立された時には、精度が高く処理スピードの速いオン・ライン処理装置ができるものと思われる。

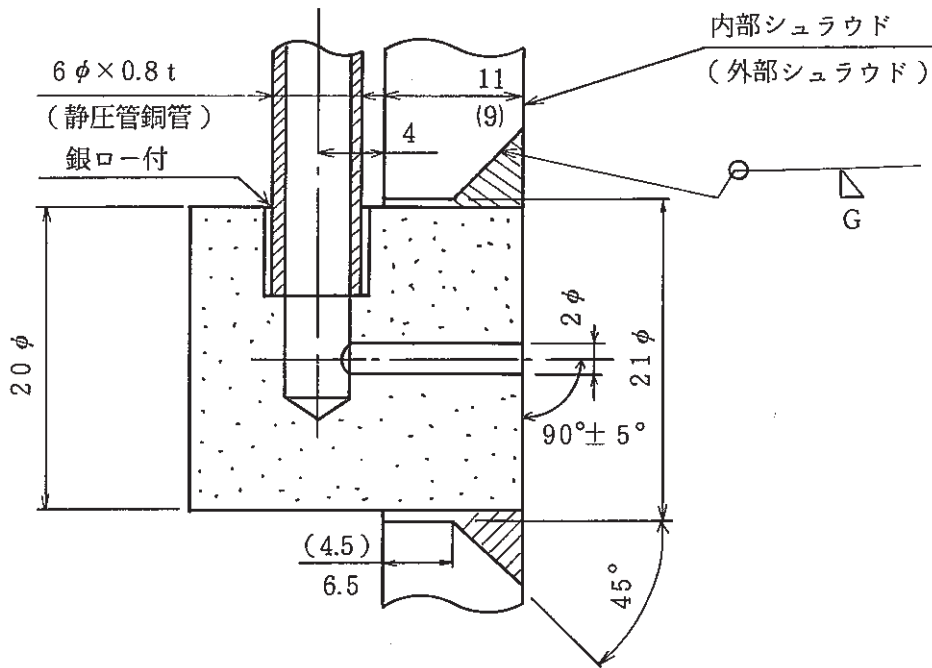
層目	レベル (胴フランジ取合部3)	角度	ノズルNo.	外部シュラウド 上端からの距離
内部シュラウド	1,040	0°	PS-1	
"		120°	# 2	
内部シュラウド		240°	# 3	
外部シュラウド		0°	# 13	1,288
"		120°	# 14	1,295
外部シュラウド		240°	# 15	1,302
内部シュラウド	2,040	0°	# 4	
"		120°	# 5	
"		240°	# 6	
"	3,140	0°	# 7	
"		120°	# 8	
"		240°	# 9	
"	4,120	0°	# 10	
"		120°	# 11	
内部シュラウド		240°	# 12	
外部シュラウド		0°	# 16	4,368
"		120°	# 17	4,375
外部シュラウド		240°	PS-18	4,382

←本試験で使用したノズル

←本試験で使用したノズル

←本試験で使用したノズル

(a) ガス噴出ノズル(静圧管)の設置場所



(b) ガス噴出ノズル(静圧管)の構造と寸法

図4.1 ガス噴出ノズルとして使用した静圧管の設置場所と構造及び寸法

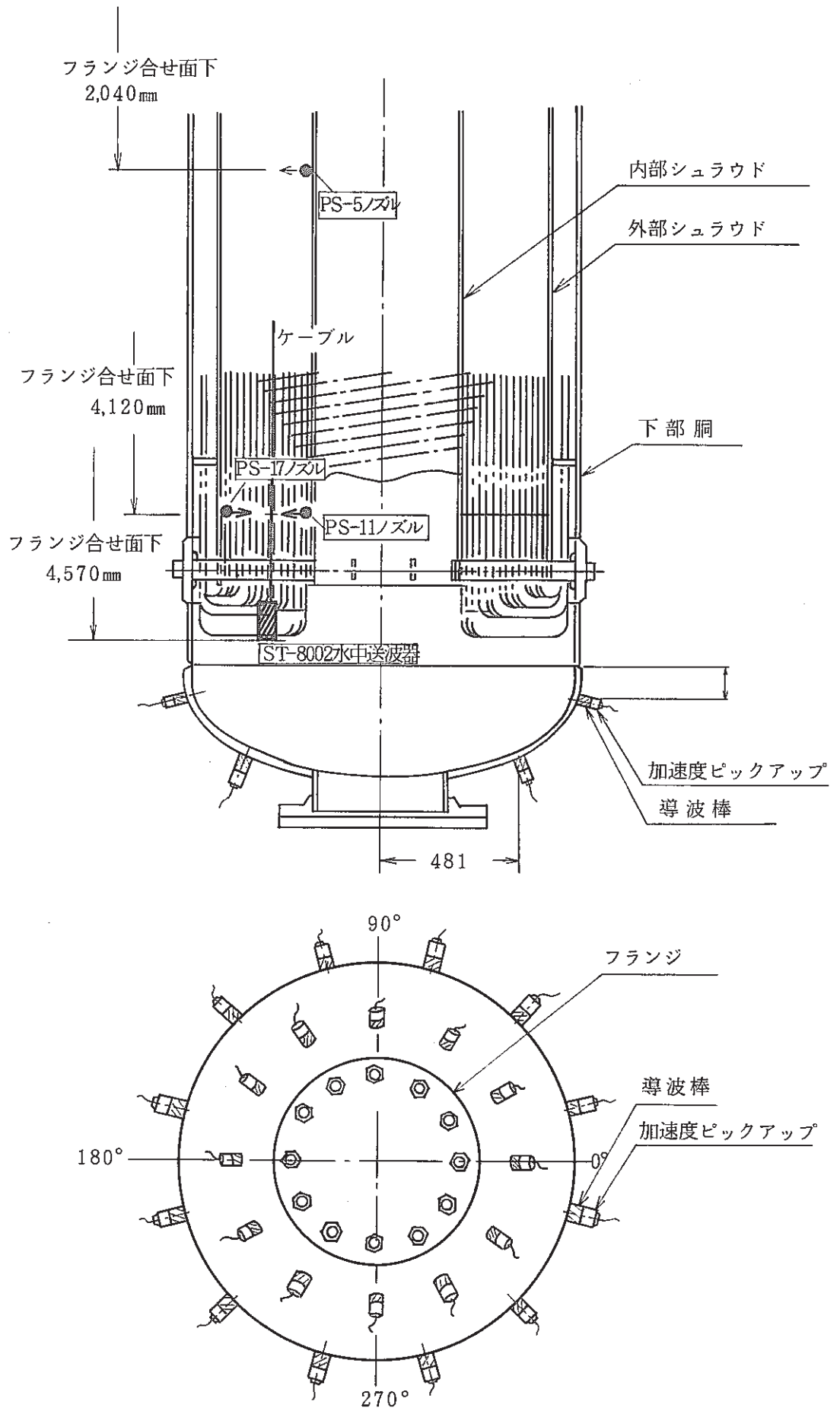
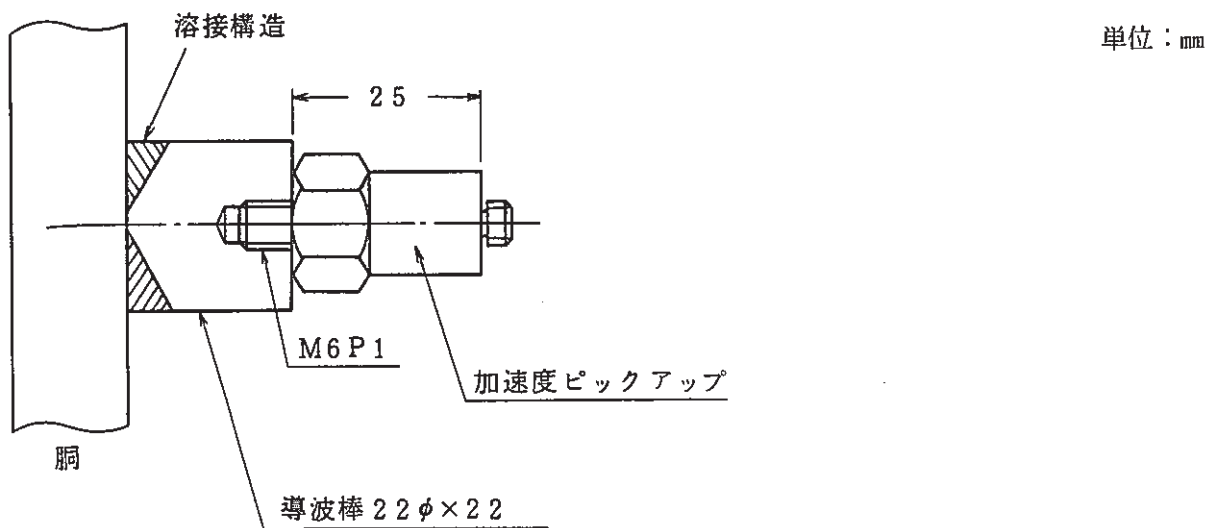
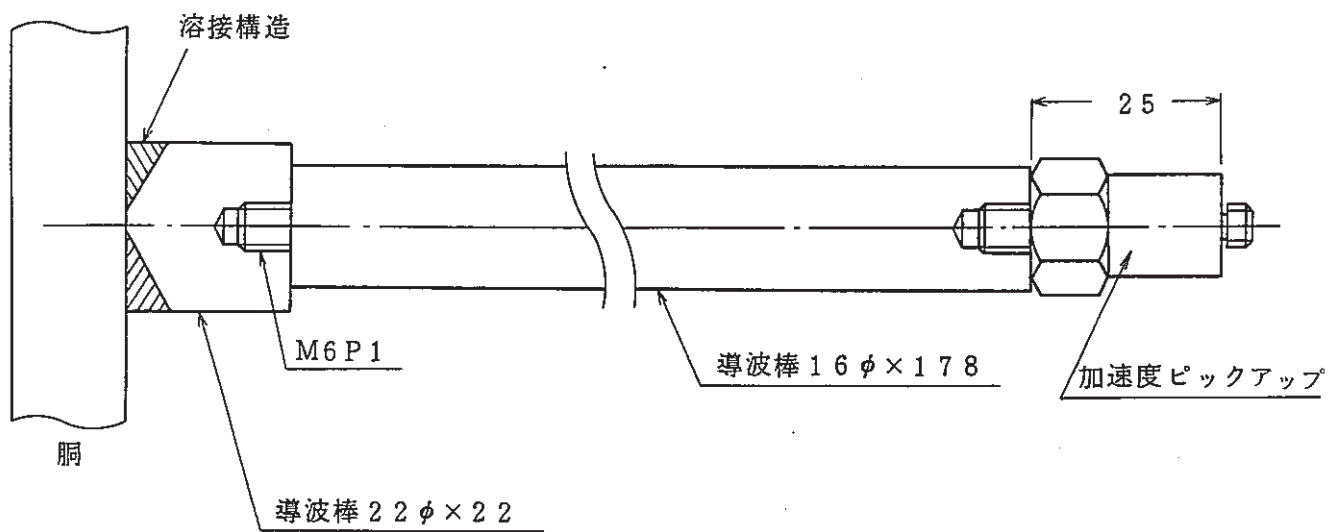


図 4.2 垂直方向検出のピックアップ取付け位置

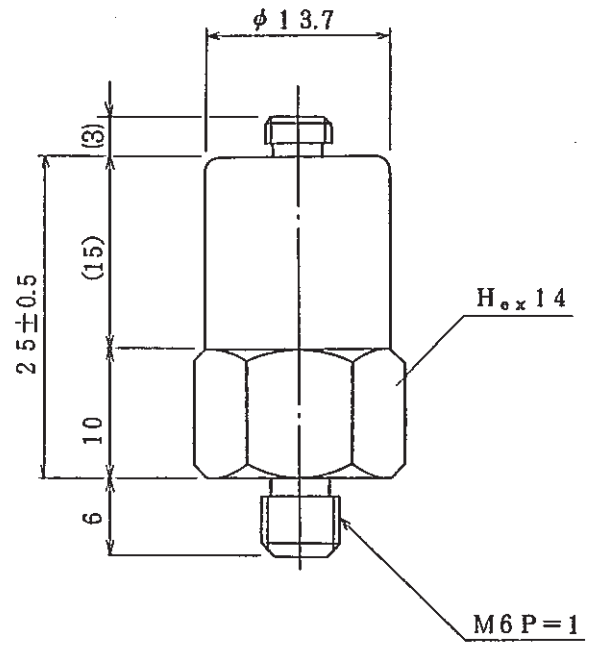
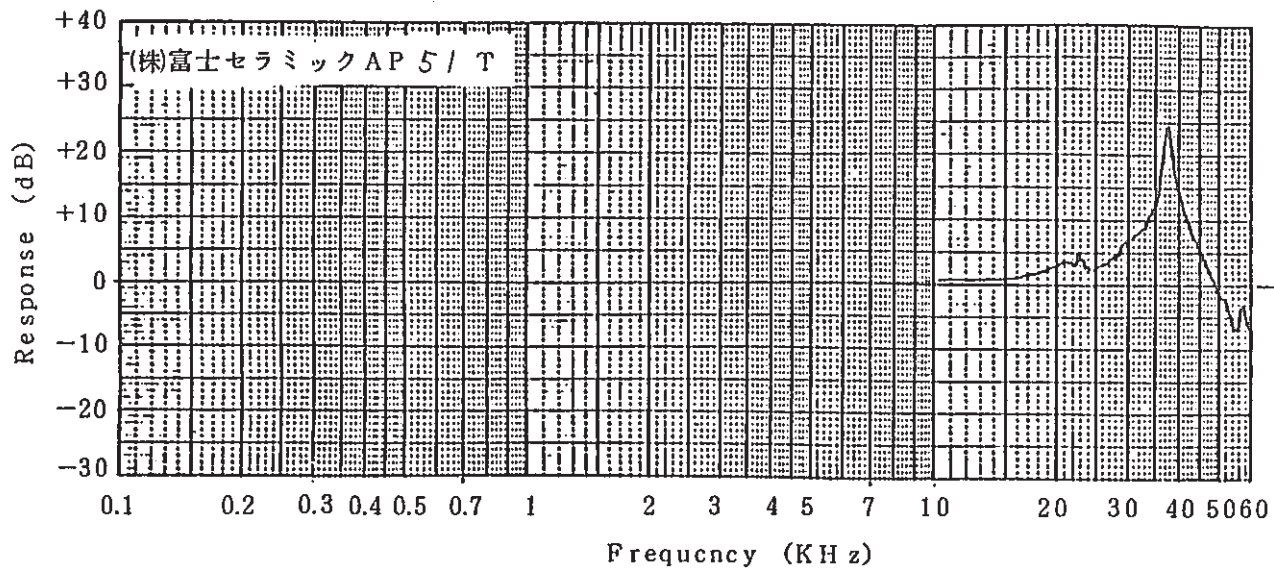


(a) C型導波棒



(b) C型+D型導波棒

図4.3 導波棒の形状 (C型及びD型)



電圧感度 S_v 100Hz, 59.3mV/G
電荷感度 S_q 100Hz, 51.6PC/G

図 4.4 加速度ピックアップの周波数特性と形状

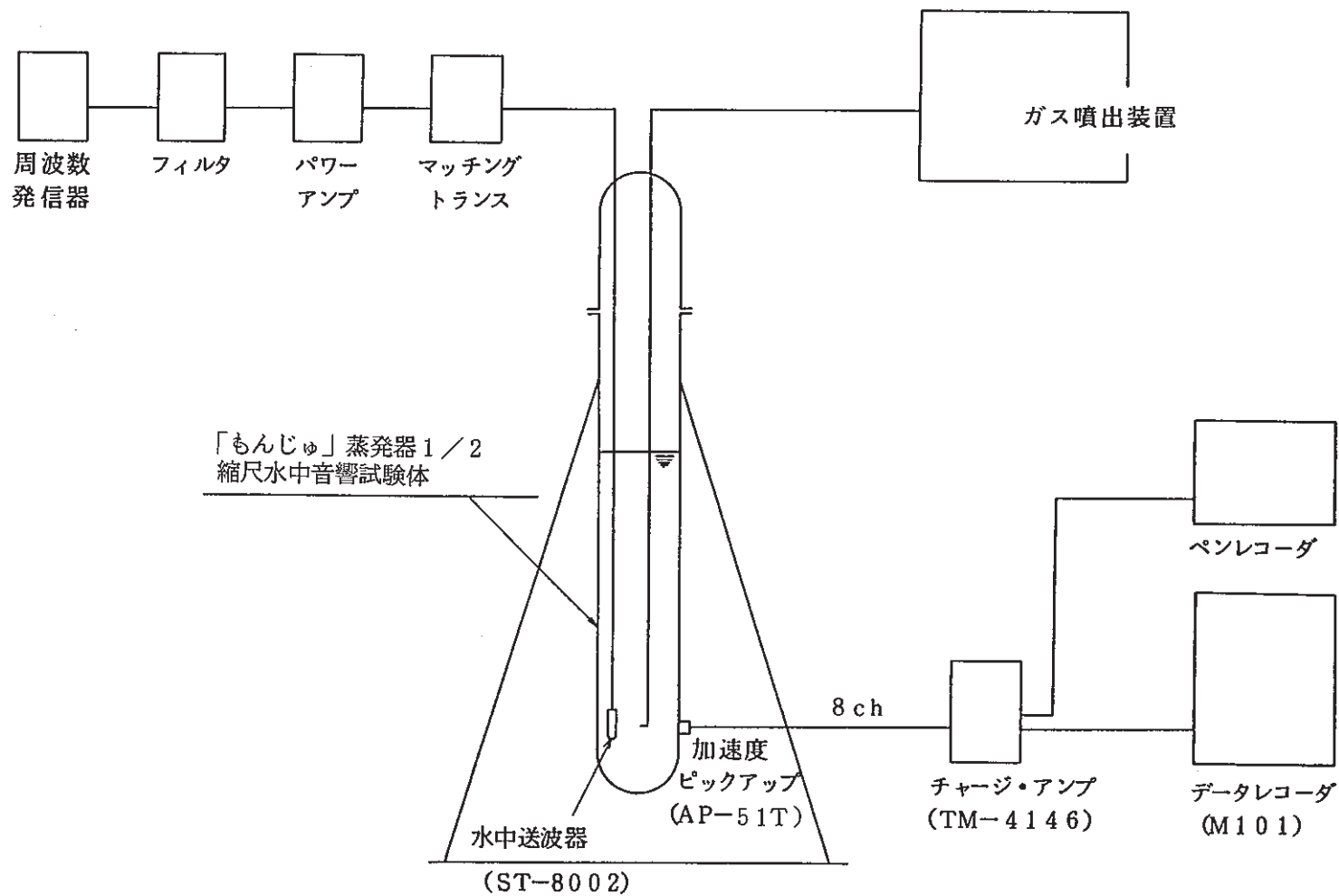
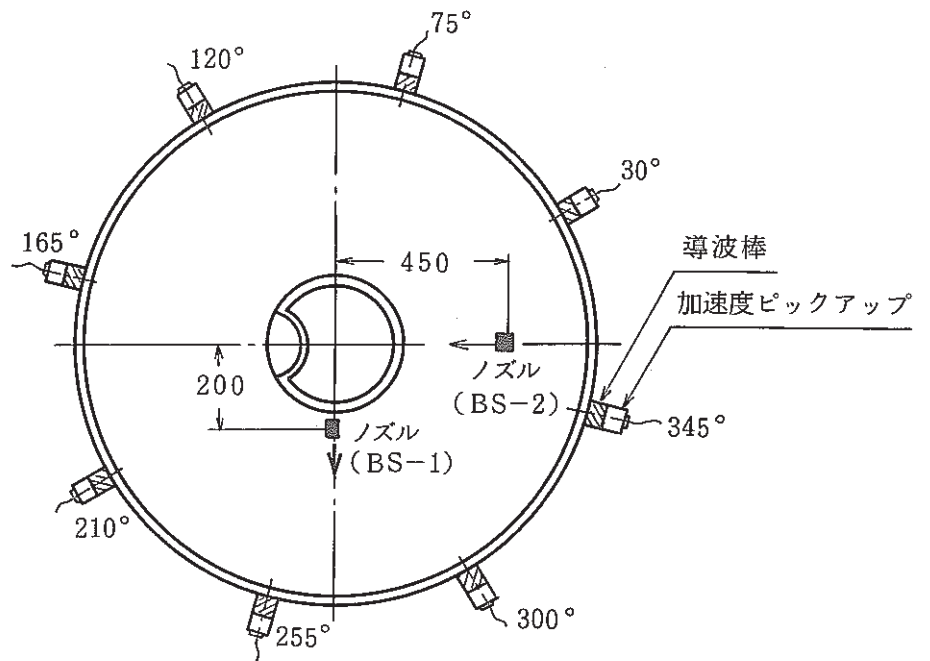
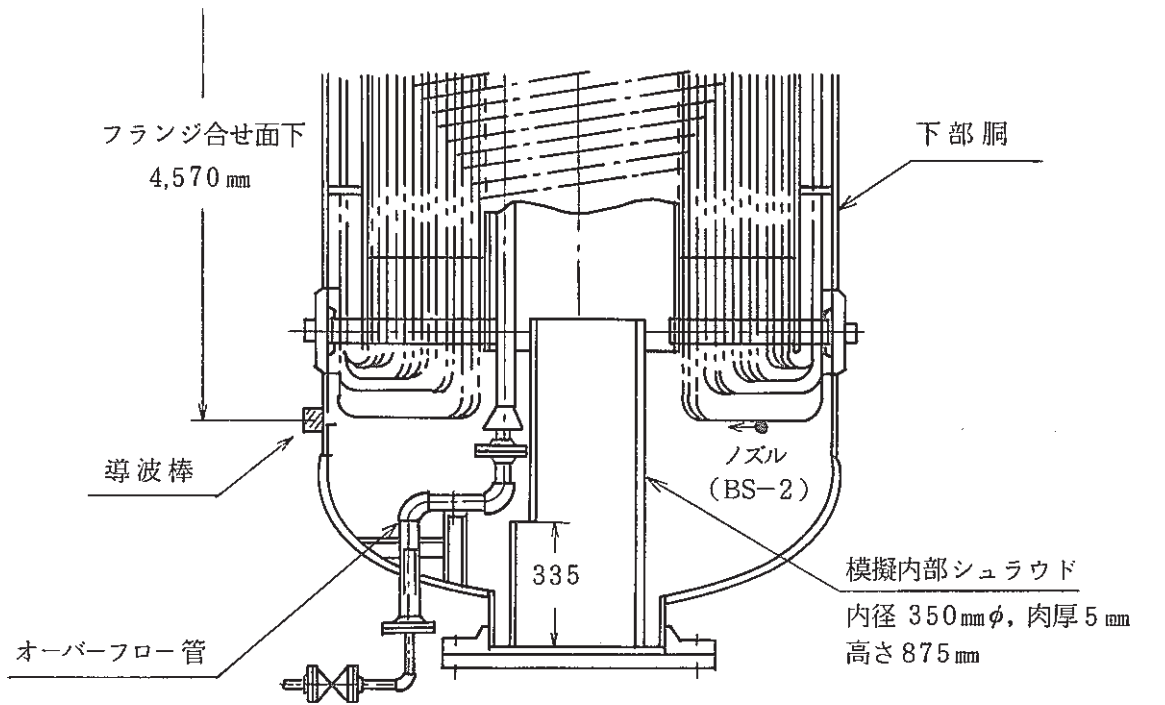
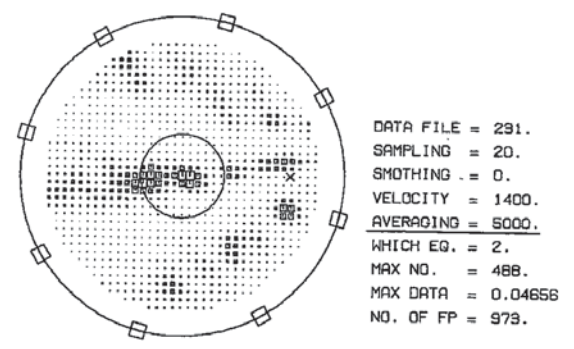
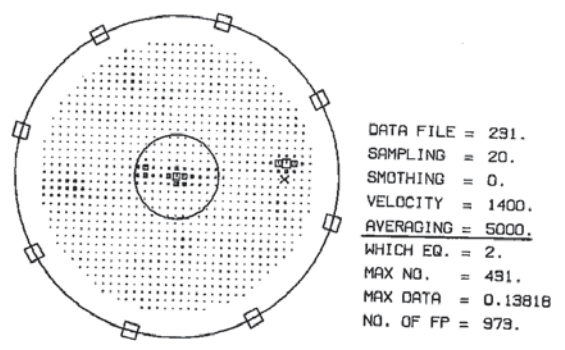
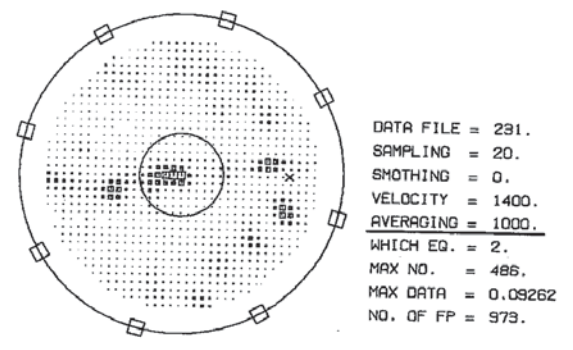
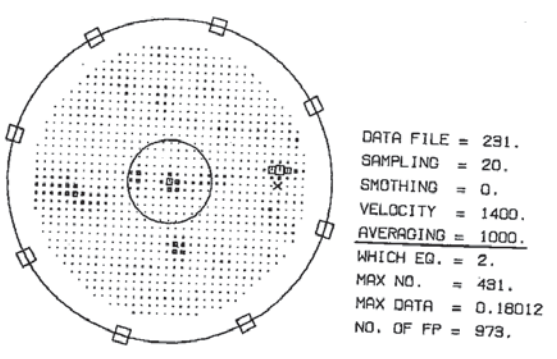
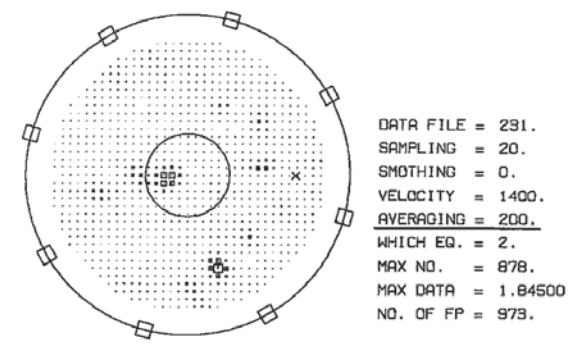
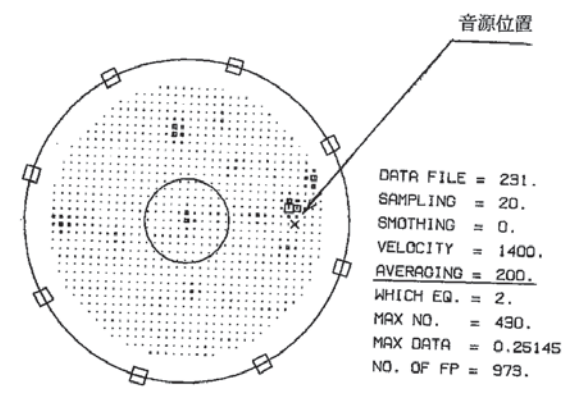
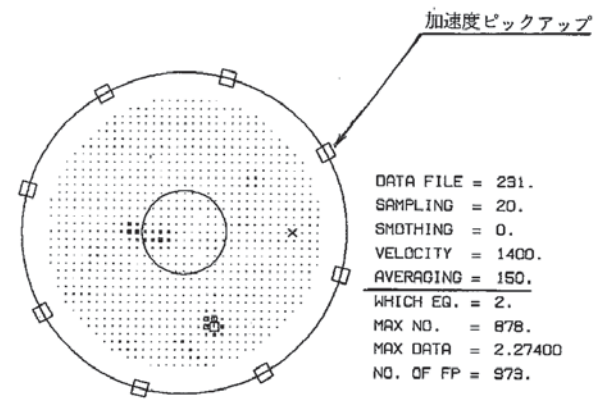
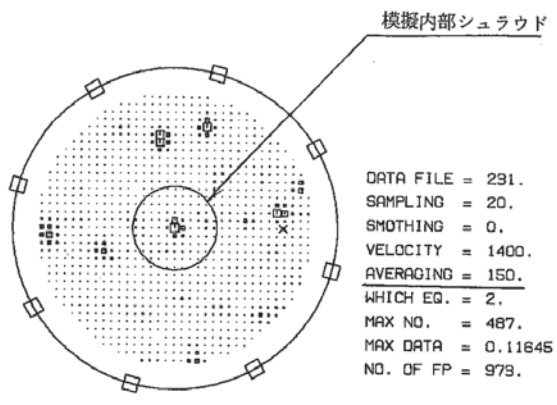


図 4.5 試験装置の全体構成



寸法(mm)

図4.6 模擬内部シュラウド及びピックアップ取付け位置



(a) バックグラウンド音なし

(b) S/N比 = 1.6

図4.7 内部シュラウドがある場合のバックグラウンドノイズ有無の比較
 (ガス噴水ノズル BS-2)

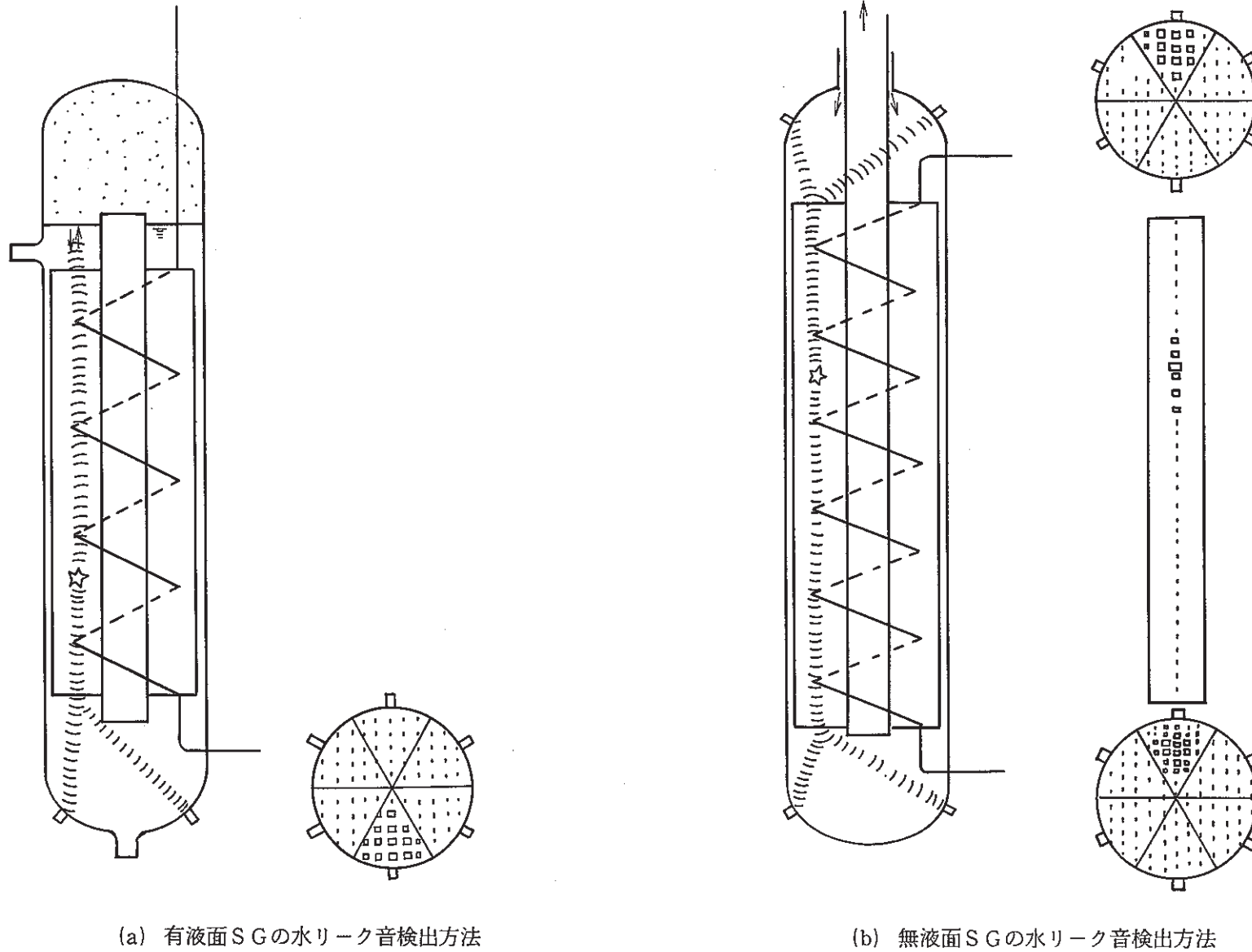
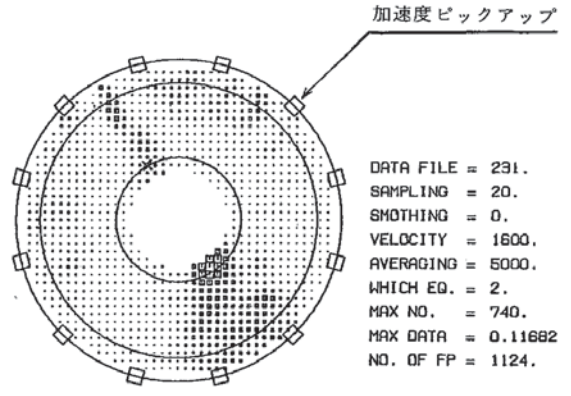
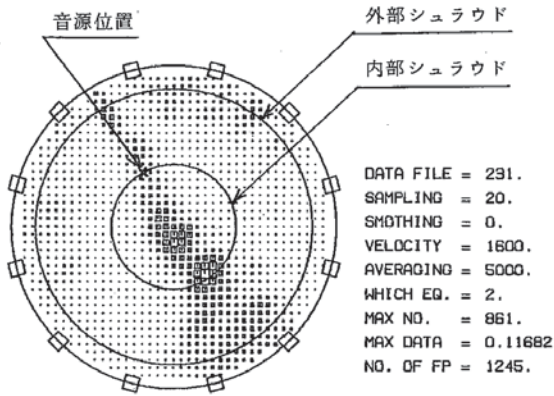
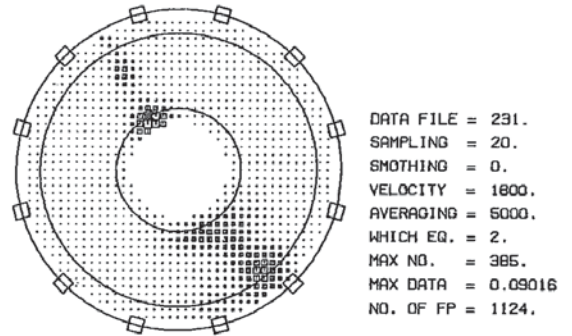
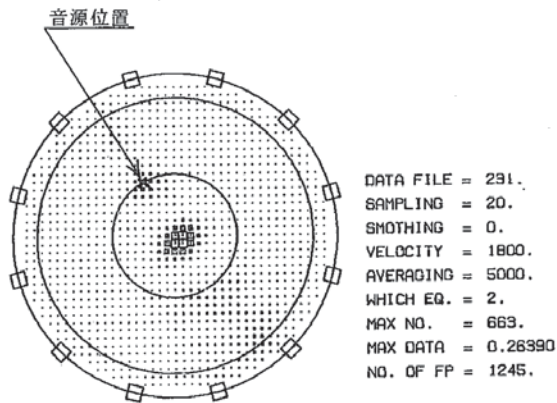


図4.8 垂直方向音響信号検出の考え方

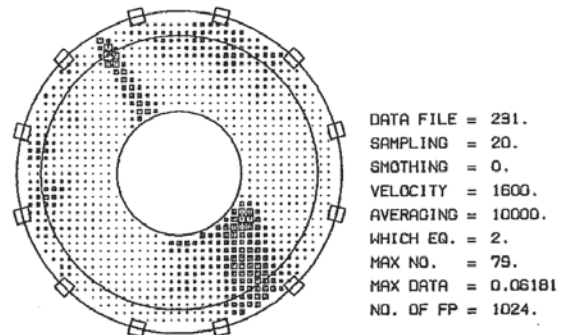
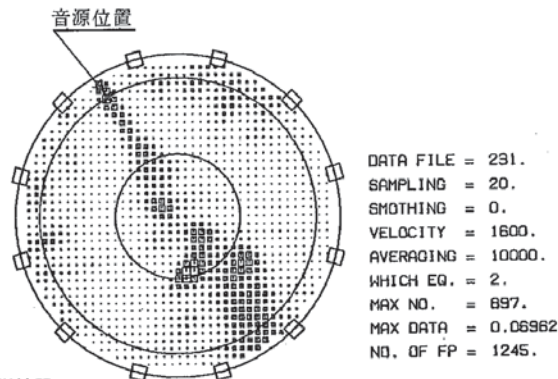
① PS-5ノズル



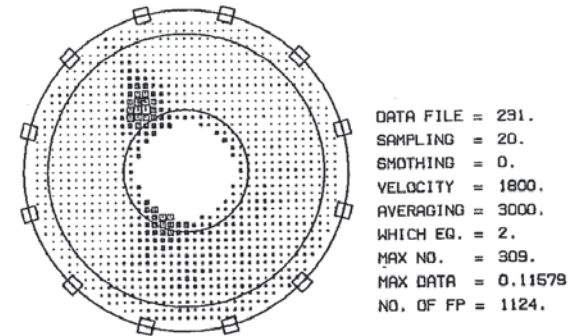
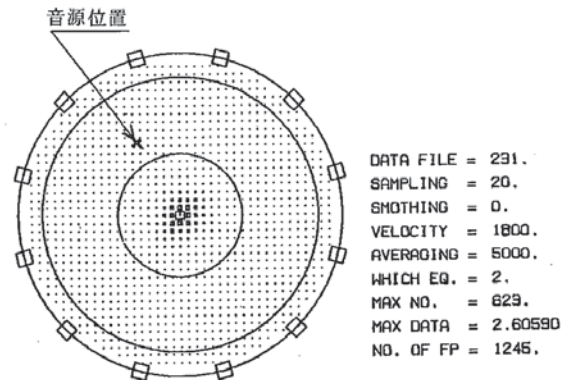
② PS-11ノズル



③ PS-17ノズル



④ 水中送波器
(ST-8002型)

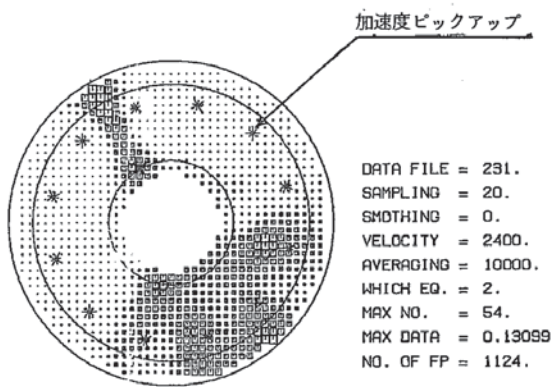
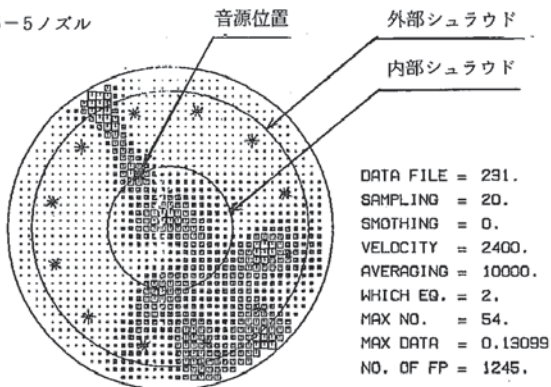


(a) 容器断面全体に標定点を設定

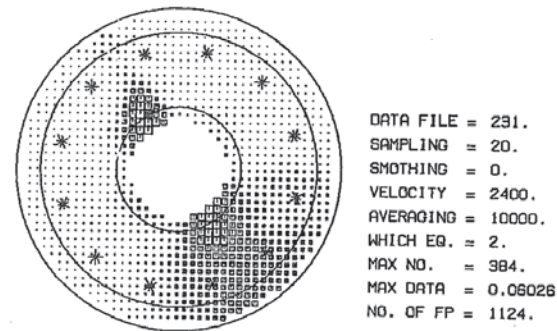
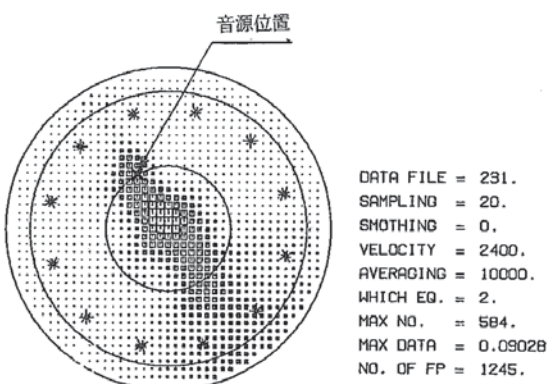
(b) 内筒内を除く容器断面に標定点を設定

図4.9 下部プレナム鏡部の外周ピックアップを用いた解析結果

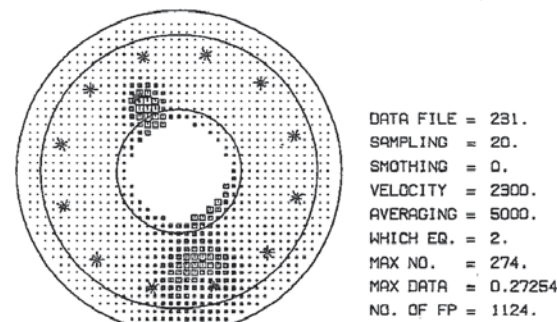
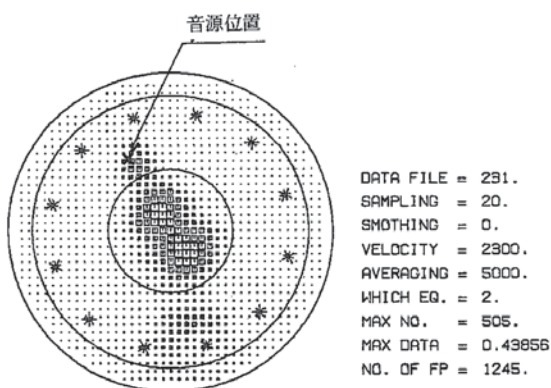
① PS-5ノズル



② PS-11ノズル



③ 水中送波器
(ST-8002型)



(a) 容器断面全体に標定点を設定

(b) 内筒内を除く容器断面に標定点を設定

図 4.10 下部プレナム鏡部の内周ピックアップを用いた解析結果

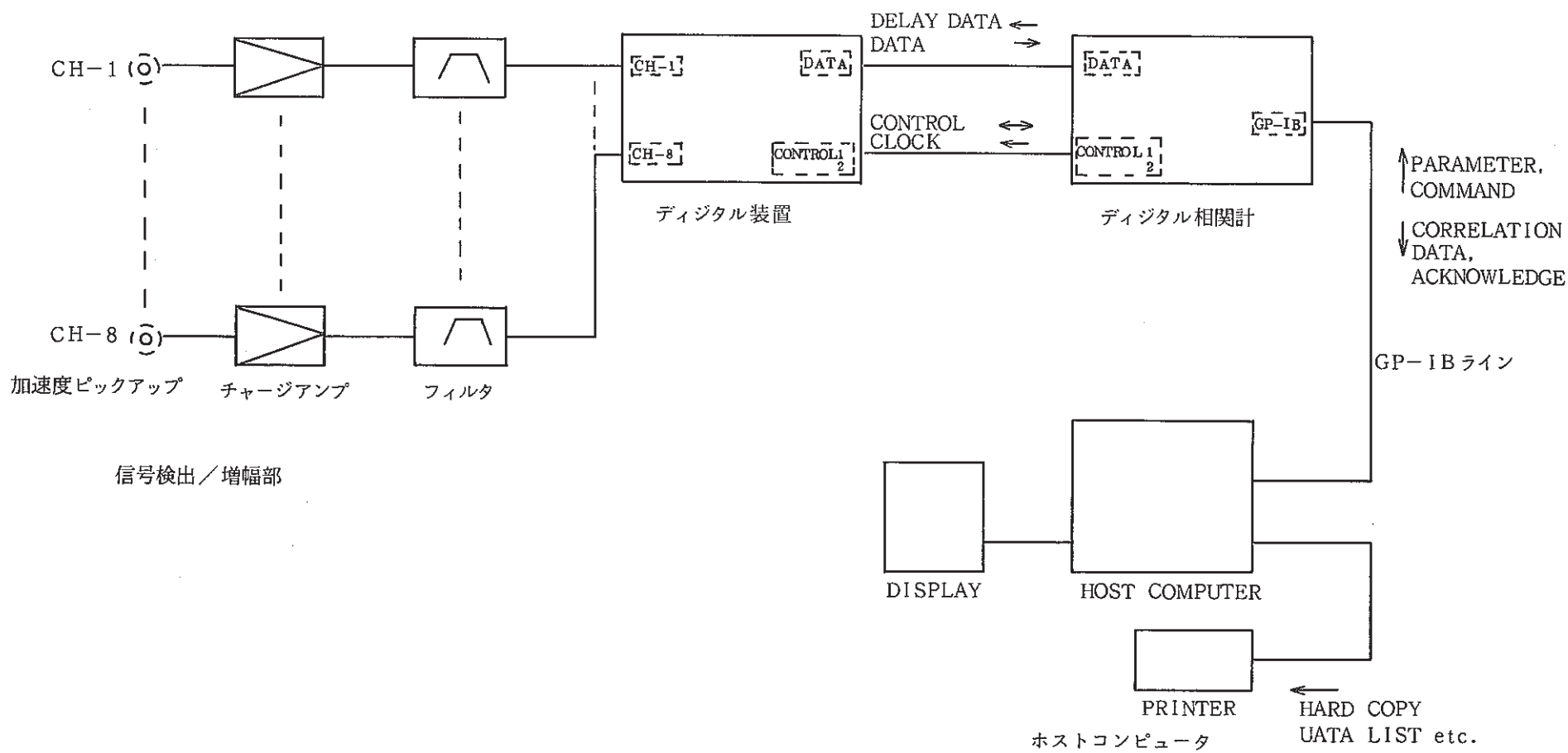


図 4.1 1 WALD システムの全体構成

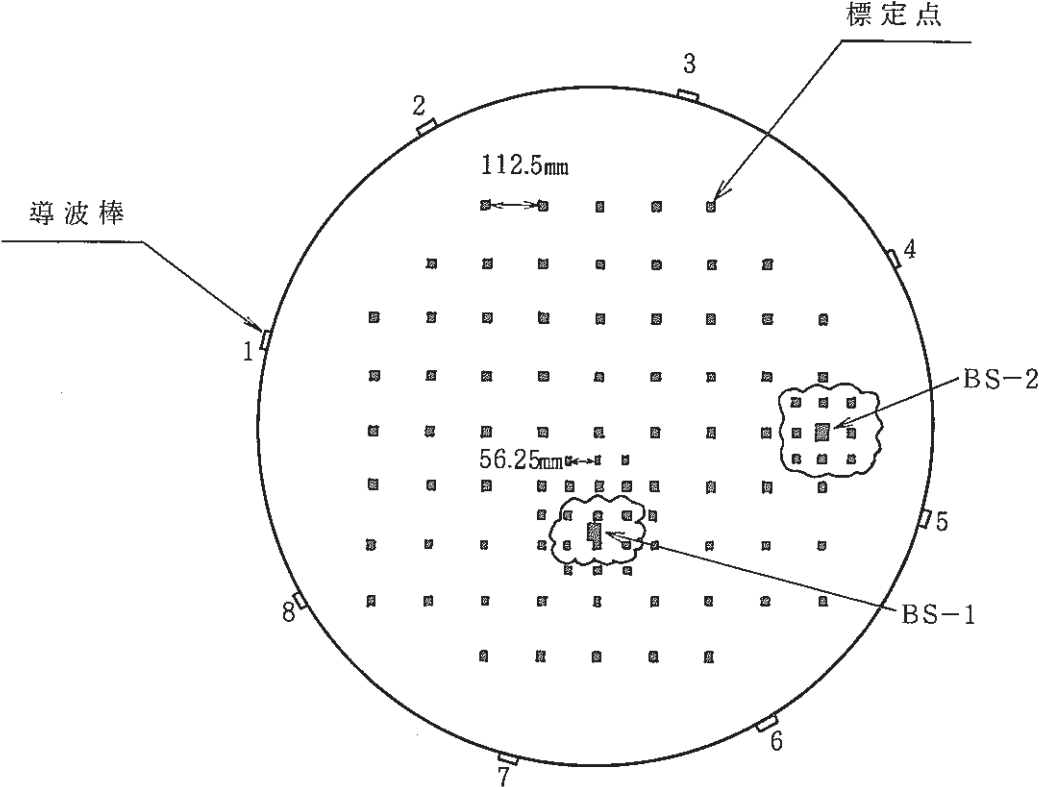
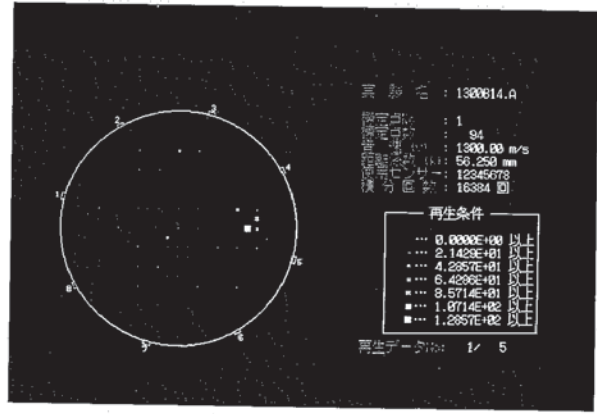
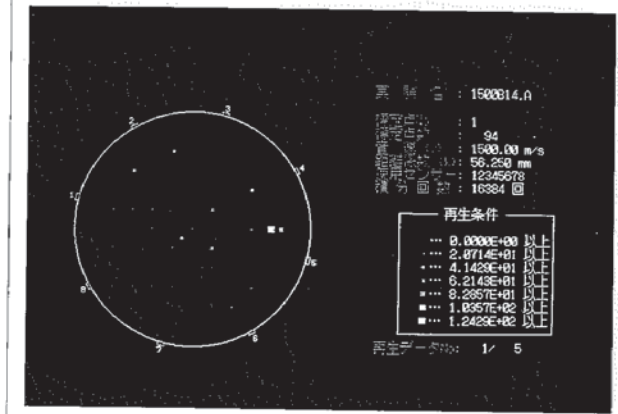


図 4.1 2 リーク検出/位置標定設定画面

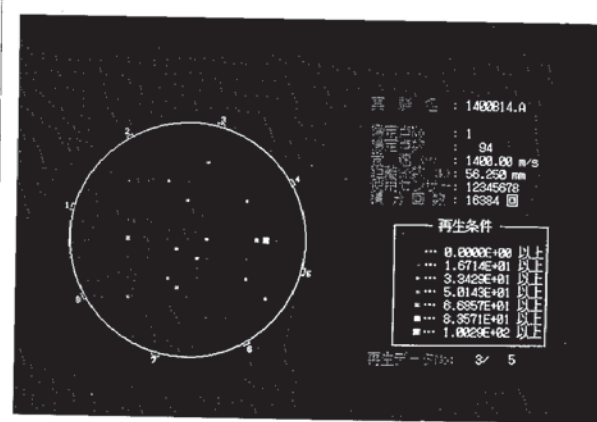
① 1300 m/sec



③ 1500 m/sec



② 1400 m/sec



④ 1600 m/sec

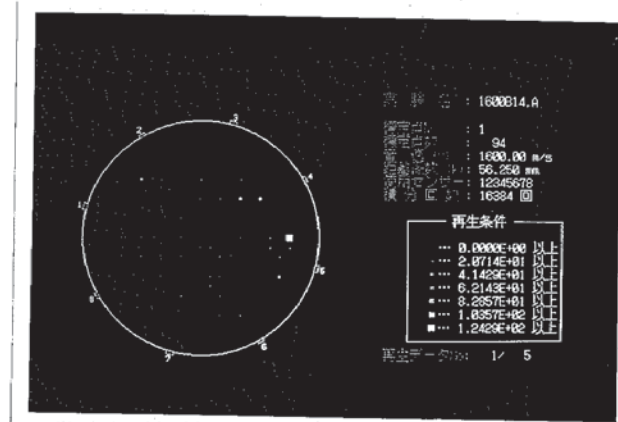
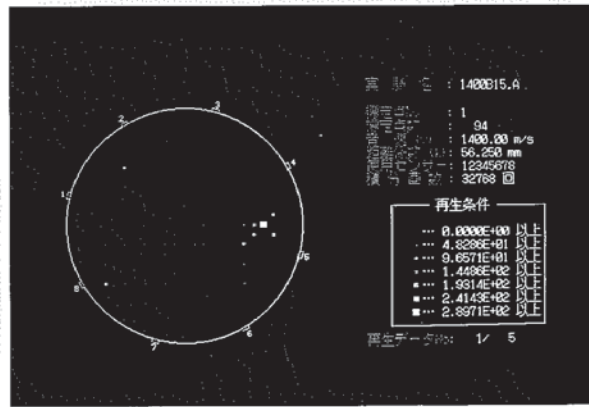
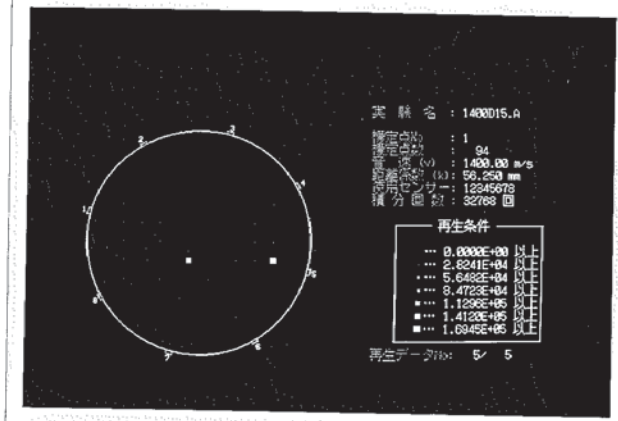


写真 4.1 音速を比較した位置標定画面

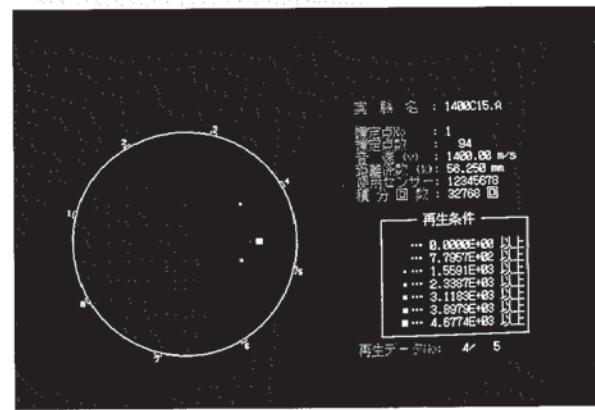
① 4~6 kHz



③ 2~6 kHz



② 4~8 kHz



④ 2~8 kHz

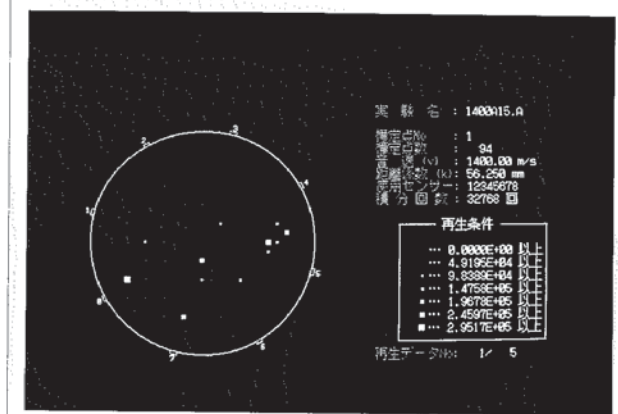
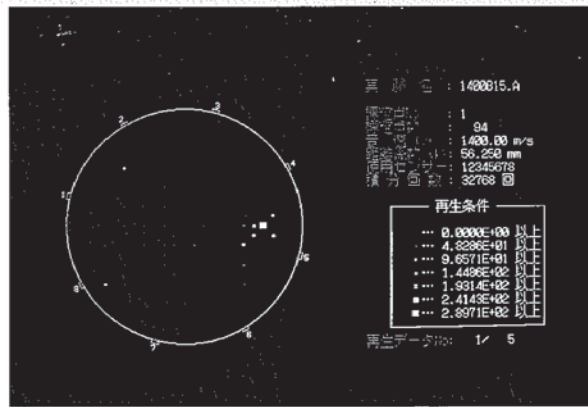
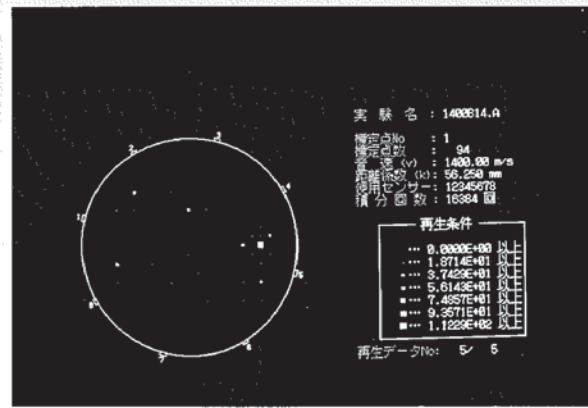


写真 4.2 周波数範囲の影響による位置標定画面

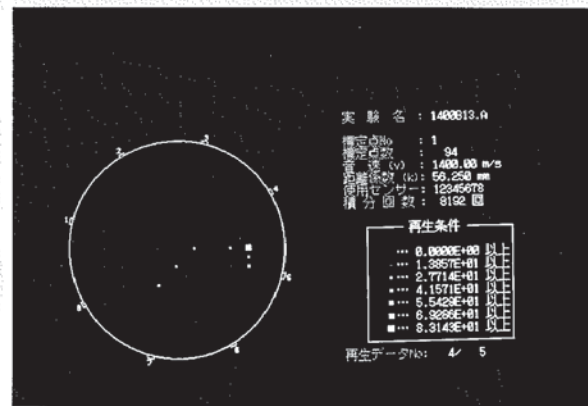
① 2^{15}
(32768回)



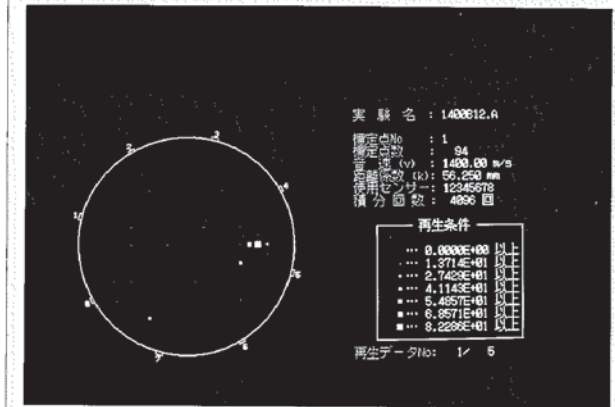
② 2^{14}
(16384回)



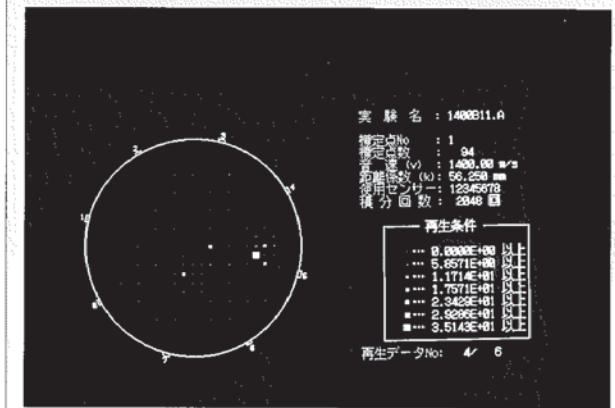
③ 2^{13}
(8192回)



④ 2^{12}
(4096回)



⑤ 2^{11}
(2048回)



⑥ 2^{10}
(1024回)

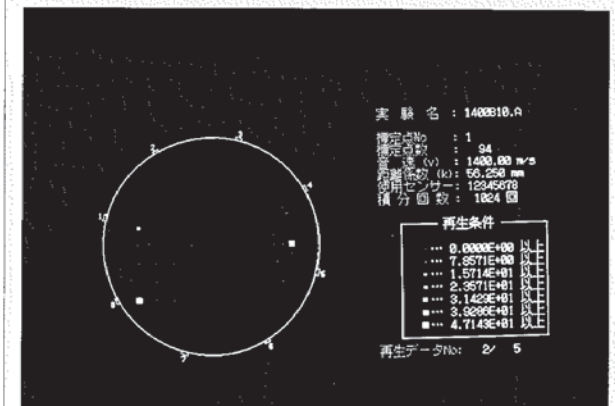


写真 4.3 積分回数の影響により変化する位置標定画面

5. ま と め

「もんじゅ」及び実証炉のSGの小・中リーク領域の水リークを音響によって検出するために、SGの大きさ・構造を考慮した音響検出器の実用性に関するフェジビリティスタディを行った。検出方法を大きく分けると、①バックグラウンドノイズに対する信号レベルの大きさにより検出する方法と、②多チャンネル相互相関法によるリーク検出/位置標定を行う方法である。これらの方法について行った試験と解析の結果を以下に述べる。

5.1 水リーク音レベルによる検出

水リーク音レベルから検出するのに、最も重要となるバックグラウンドノイズを50MWSG蒸発器で測定した結果と、ナトリウム-水反応音及び模擬音について評価の概要を表5.1に記載する。それらの結果を基に、「もんじゅ」SG及び実証炉SGのバックグラウンドノイズは、伝熱領域・伝熱面積・内表面積を50MW施設のそれから類推して、「もんじゅ」SG：約0.0093G、実証炉SG：約0.012Gと見積もった。これらは、ナトリウム流動に関しては伝熱領域の占める体積に比例し、また水/蒸气流に起因する音量は伝熱面積に比例すると考え見積もった。

水リーク発生時の実効的加速度出力(A_{RMS})は、同一ガス噴出率であれば吸音力によって変化し、吸音力は容器内表面積+内部構造物総表面積に比例することから50MW施設、SWAT-1、SWAT-2、SWAT-3で得たデータから「もんじゅ」SG、実証炉SGの水リーク発生音を次のように推定した。

水リーク率	もんじゅSG (蒸発器)	実証炉SG
1 g/sec	0.010G	0.006G
10 g/sec	0.024G	0.014G
100 g/sec	0.050G	0.028G

これから「もんじゅ」SG及び実証炉SGにおいてS/N比が「1」となる水リーク率は、それぞれ約0.7 g/sec、約7 g/secと推定できた。しかし、実際に水リークを検出できると推測されるリーク率は、誤信号をさけ更に安全率を設けてS/N比を「10」以上とすると、リーク率は約7 g/sec、約70 g/secとなる。今後、更に検出感度が向上するよう導波棒構造やセンサを開発して検出できるリーク率は下げられても、誤信号を避けることのできない本検出方法では自動停止を掛けられるリーク率は中リーク領域となってしまう。また、同時にオーバーフロー音等の特別なノイズに対する対策も行う必要がある。

5.2 多チャンネル相互相関法によるリーク検出／位置標定

前回までの試験結果と今回の試験結果をまとめたものを、表 5.2 と図 5.1 に記載する。

(1) オフ・ライン解析の結果

今回の試験では、内部シュラウドがリーク検出に及ぼす影響と、リーク音を下部プレナム部で垂直方向から検出する方法についてオフ・ラインで解析した。

その結果、前者はノイズが無い場合リーク検出／位置標定ができるが、S/N比「1.6」で検出できずノイズに弱いことが判った。内部シュラウドのない空間では、S/N比「1」以上で検出できるという前回の報告から考えると、内部シュラウドがリーク音の伝播経路を遮るため標定特性が悪くなるということが判った。

後者では、伝熱管群のリーク音は下部プレナム部での検出が最も有効であるという前回の報告に基づき、下部プレナム部に2組(1組は円周状12個)のピックアップを取りつけ外周と内周のどちらが有効かを解析した結果、外周の方が明らかに良かった。しかしながら、外周でもかなりのケース(ノイズ無し)で音源が中心に誤検出されリーク検出／位置標定が出来なかった。但し、解析上で容器の中心の標定点を削除した場合、下部プレナム部に近い位置のリーク音は位置標定が可能で、下部プレナム部から遠くなると検出が困難となることが判った。以上のことから、今後垂直方向でリーク検出／位置標定していくならば、ノイズ対策として検出方法の改善等ノイズに強い検出方法の検討を行っていく必要がある。

(2) オン・ライン解析(ハード・ウェアの開発)

多チャンネル相互相関をオン・ラインで現実化するために、ハード・ウェア(試作品)を開発し実用性について検討した。

オフ・ラインで今まで実施した中の下部プレナム部の内部構造物の無い水平方向から検出する方法と比較した結果、積分回数が多くなったことと標定点の設定点数を少なくしたことがオン・ラインの特徴で、その2つのパラメータの最適値を使用することによってオフ・ラインと同じ位の精度でリーク検出／位置標定ができた(但し、ノイズは無し)。また、この処理を連続して行った場合、積分回数設定によって違いはあるが、30秒前後で1回の処理が可能であった。

5.3 音響法によるリーク検出の可能性

以上の結果から、音響検出計に関する現段階の実用化の目処は、リーク音レベルによる検出では、中リーク検出計として有効である。また、多チャンネル相互相関法はヘリカルコイル型SGではまだ越えなければならない数多くの障害があり、現段階の実用化は難しいと思われる。しかしながら、本手法は応答速度、位置標定性等の面で従来型に比べ潜在的な優位性を有しており、今後ピックアップの種類、取付け位置を変えるなど、ハード面の開発や内部構造物による音響伝播特性をより正確に把握してノイズ挙動を解明し、より有効な検出方法を見つけないと必要である。

表 5.1 音響試験の成果の概要 (その1)

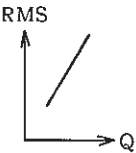
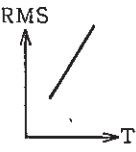
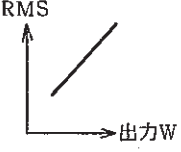
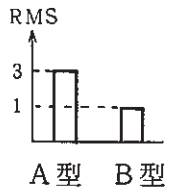
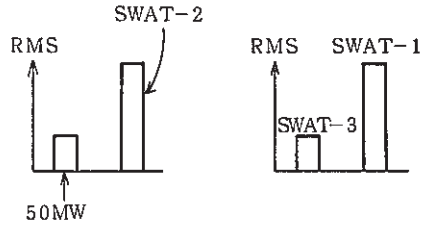
	I 50MWSGによるバックグラウンドノイズ測定	II Na/水反応音またはその模擬音の測定	
<p>信号のRMS値</p>	<p>1. Na流量Qの依存性</p>  <p>2. Na温度Tへの依存性</p>  <p>3. EVの熱負荷Wへの依存性</p>  <p>これより $RMS = f(Q, T, W)$ を導いた。 但し、オーバーフローノイズの影響大</p>	<p>1. 導波棒の違いによる → 大影響</p>  <p>2. 装置の違いによる影響 → 大</p> <p>右図より、内部構造が複雑化すると検出できる信号の強さも低下する。</p>  <p>A型導波棒での比較 B型導波棒での比較</p> <p>3. SG内軸方向の音の減衰 吸音面積に比例</p>	
	<p>周波数特性</p>	<p>1. ホワイトノイズ</p> <p>2. Na流量, 負荷などを変えてもスペクトルは変わらず。</p>	<p>1. Na水反応音, 模擬音ともホワイトノイズで両者のスペクトルはバックグラウンドノイズとよく似ている。</p>

表 5.2 音響試験の成果の概要(その2)

Ⅲ. 多チャンネル法による高信頼性水リーク検出法の開発 (相互相関方式：全信号の積，和の2乗)		
	1. オフ・ライン解析 (検出方法の検討)	2. オン・ライン解析 (試作品の性能評価)
前回の試験結果	<p>① 下部プレナム空間の水平断面検出</p> <ul style="list-style-type: none"> S/N比=1.0以上で検出可能。 <p>② ヘリカル管束部の水平断面検出</p> <ul style="list-style-type: none"> ノイズの有無にかかわらず検出不可能。 (リーク音が、反射等でノイズとして作用すると考えられる。) 	
今回の試験結果	<p>③ 下部プレナム部模擬内部シュラウドが検出に及ぼす影響(水平断面検出)</p> <ul style="list-style-type: none"> ノイズが無ければ検出可能。 S/N比1.6以下では不可能。 <p>④ 垂直方向から検出する方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ノイズ無しで標定点の設定をヘリカル部だけにし、ピックアップは下部プレナム部鏡壁の外周であれば検出可能。 下部プレナムからの距離が遠くなると検出は難しくなる。 リーク位置が内部シュラウド付近と外部シュラウド付近では、内部シュラウド付近の方が検出し易い。 	<p>下部プレナム空間の水平断面検出</p> <ul style="list-style-type: none"> ノイズ無し 周波数範囲：4～6 kHz 音 速：1400～1500m/sec 積分回数：$2^{13} \sim 2^{15}$ 回 標 定 点：100点前後 <p>上記の条件で、オフ・ラインと同じくらいの精度で検出が可能である。 また、連続して処理を実施した場合、$2^{13}=14\text{sec} \sim 2^{15}=37\text{sec}$ で一回の処理が可能である。</p>

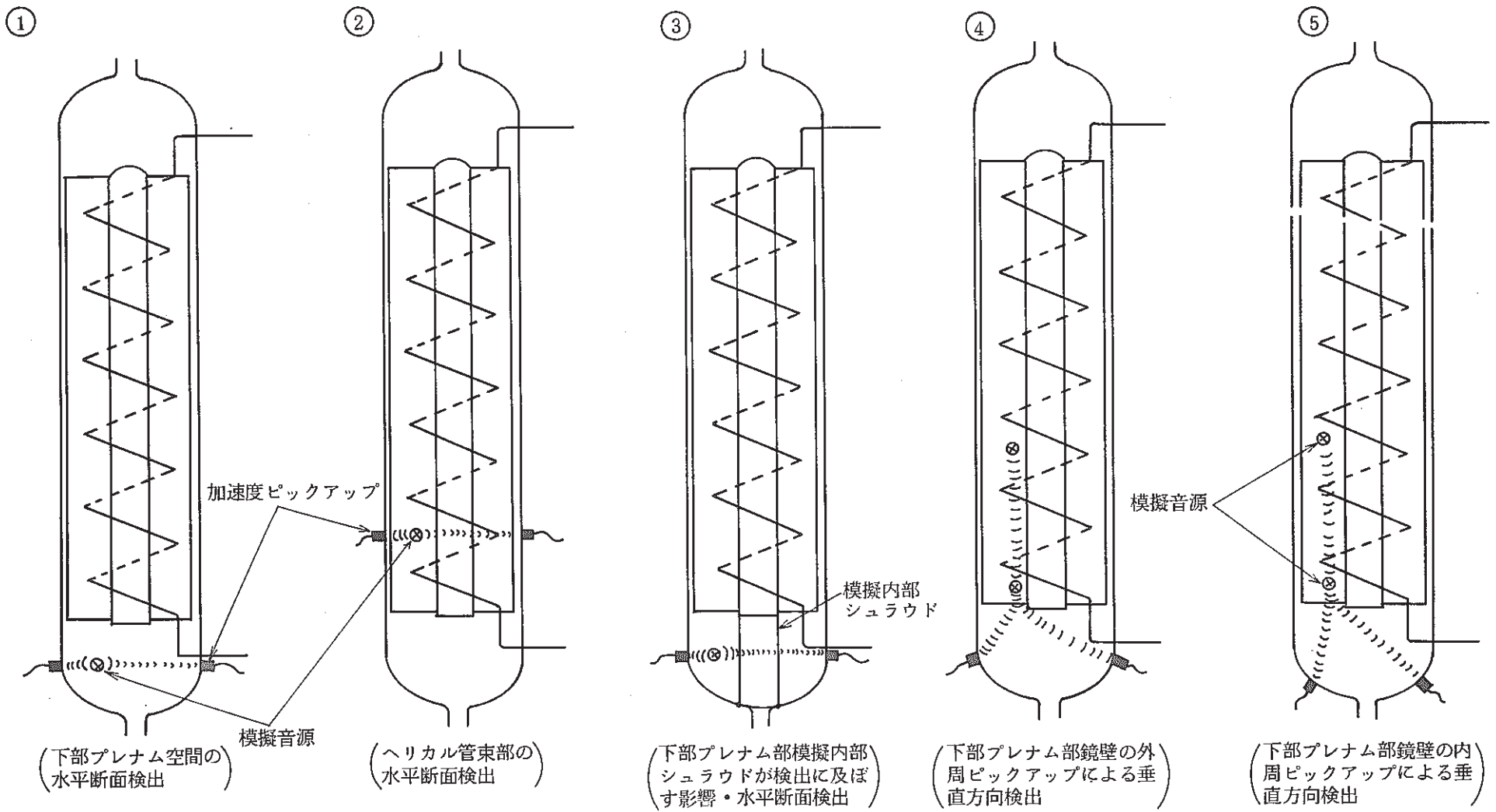


図 5.1 検出方法の種類

謝 辞

本報告書をまとめるにあたっては、プラント安全工学室の姫野嘉昭室長に有益な助言を、計算機関係についてはNDCの山崎洋嗣氏に、試験装置の製作、運転については東興機械工業株の皆様、また50MW施設のバックグラウンドノイズ測定にはFBR機器室亀井満室長をはじめ、錦見正和副主任研究員、50MWSG運転員の皆様に多大な御協力をいただいた。これら各位に厚く感謝を表します。

参 考 文 献

- 1) 池上, 中島, 岸上, 鐘ヶ江, 太田, 島津, “模擬Na-水反応音による音響伝播特性試験”
PNC SJ218 79-03(1979)
- 2) 要素技術設計研究(II)大型化に関する設計研究に伴う設備設計役務(2) - 2次熱輸送系設備等 -
(日立製作所) PNC SJ2124 86-009(1)
- 3) 根井, 氏原, 大内, 橋口, 大島, 井上, 堀, “小リーク・ナトリウム-水反応試験研究(第5報) -音響式検出器-” PNC N941 74-70(1974)
- 4) 藤井, 佐藤, 田辺, 大後, “高速炉蒸気発生器伝熱管の中リーク・ウェスージ破損伝播試験(II)”
PNC SN941 83-38(1983)
- 5) 田辺, 佐藤, 錦見, 大後, “蒸気発生器安全性総合試験(SWAT-3)による破損伝播試験I”
PNC SN941 81-05(1981)
- 6) 田辺, 佐藤, 大後, “蒸気発生器安全性総合試験(SWAT-3)による破損伝播試験II”
PNC SN941 82-42(1981)
- 7) 田辺, 佐藤, 藤井, 大後, “蒸気発生器安全性総合試験(SWAT-3)による破損伝播試験III”
PNC SN941 82-99(1982)
- 8) 黒羽, 下山, 宇佐美, 渡辺, “音響式水リーク検出系開発の基礎試験(I) -リーク位置評定技術の開発-” PNC SN941 85-52
- 9) 前川, “建築音響” 共立出版(株), 昭和57年発行
- 10) David A. Greene, Frederic F. Ahlgren, “AN ACOUSTIC PROTECTION SYSTEM FOR LIQUID METAL HEATED STEAM GENERATORS.”
- 11) 早坂, 吉川, “音響振動論” 丸善株式会社, 1974年発行

APPENDIX-A オン・ライン処理装置
(試作品)の各部仕様

APPENDIX-A オン・ライン処理装置（試作品）の各部仕様

ここでは、デジタル遅延装置（NF回路設計ブロック9522型）、デジタル相関計（NF回路設計ブロック8003型）及びホスト・コンピュータ・システム（NEC：PC-9800シリーズ）について記述する。付図A-1に前二者の外観・寸法を示す。

1. デジタル遅延装置

① 概要

本装置は、最大8チャンネルのアナログ信号をA/D変換して各々のチャンネルに対して独立に最大9.99msecの遅延を与えることができる。

A/D変換器入力部はサンプル/ホールド付で、分解能は10ビット、サンプリング間隔は10 μ secである。遅延時間は各チャンネル独立に外部（デジタル相関計）より10 μ secの分解能で設定される。本装置の遅延は付図A-2のブロック図に従って設定を変えた瞬間から正常に作動するので、各チャンネル設定終了後ただちに測定を行うことができる（例えば今まで遅延が0だったものを100に変えた場合、通常は100クロック分待たないと正しい値が出てこないが、本装置では但ちに正しい遅延が得られる）。

② 定格

(イ) A/D変換部（サンプル/ホールドを含む）

- ・ 入力電圧範囲 $\pm 10V$ フルスケール
- ・ 分解能 10ビット
- ・ 精 度 $\pm 1/2$ LSB
- ・ サンプリングピリオド 10 μ sec
- ・ 入力インピーダンス 20k Ω

(ロ) 遅延部

- ・ 遅延時間 10～9990 μ sec
10 μ secステップ
- ・ 設定方法 各チャンネル独立に設定可
- ・ デットタイム ナシ（0sec）。設定実行後、直ちに正しい遅延が得られる。但し、信号の入力を開始してから遅延時間だけは待たなければならない。

(ハ) チャンネル数 8チャンネル

(ニ) 表 示

- ・ “DELAY” 設定された遅延を全チャンネル同時に表示。
3桁 \times 8

(ホ) 入出力接栓

- INPUT BNC接栓×8
- DATA, CONTROL 57シリーズ50pマルチコネクター×3

(ヘ) その他

- 電 源 AC100V±10%, 48~62Hz
- 使用温度 0~40℃
- 外 形 480(W)×199(H)×526(D)mm

2. デジタル相関計

① 概 要

本装置の動作フローを付図A-3に示す。図のように本装置はホスト・コンピュータから受け取った最大1500組の遅延データを順次デジタル遅延装置に出力し、この遅延データを基にデジタル遅延装置が遅延操作した最大8チャンネルのデジタル信号 D_1, D_2, \dots, D_8 を入力して相互相関

$$R = \frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^N-1} D_{1i} \cdot D_{2i} \cdot D_{3i} \cdots D_{8i}$$

N; 積分回数 0~15

を付図A-4のブロック図に従って計算し、次々とメモリ(相関データメモリ)に記録するものである。相関データメモリは最大、1500点の相互相関値を記録しておくことができ、最終的には、ホストコンピュータにデータを出力して、1サイクル分の作業を完了する。各動作のタイミングを付図A-5に示す。

② 定 格

(イ) データメモリ

- 遅延データメモリ
 - 容 量 2バイト/DELAY
2バイト/8CH×1500点=24Kバイト
 - フォーマット BCD3桁
- 相関データメモリ
 - 容 量 4バイト/DATA
4バイト×1500点=6Kバイト
 - フォーマット フローティング形式
(仮数部: 3バイト, 指数部: 1バイト)

(ロ) 演算部

• 計算式 $\sum_{i=0}^{2N} D_{1i} \cdot D_{2i} \cdots D_{si}$

• 処理時間

上式を計算する時間	$2^N \times 10 \mu\text{sec} + 100 \mu\text{sec}$
遅延値を出力する時間	$500 \mu\text{sec}$
メモリへ記憶する時間	$500 \mu\text{sec}$ 以下

例：積分回数1024回，標定点数1500点の時

$$1500 \times \{ (1024 \times 10 + 100) + 500 + 500 \} = 17010 \times 10^3 \mu\text{sec} \approx 17 \text{sec}$$

- 演算精度 出力値の+0, -0.1%以内
(乗算切捨てによる誤差)

(ハ) 表示

"USED CH"	使用されているチャンネルを表わす。 LED×8
"INTEGRATION 2 ^N "	積分回数を表わす。N=0~15 7セグメント LED×2桁
"CORRELATION"	GP-IBに出力しようとしているデータを表わす。 7セグメント LED 仮数部 4桁，指数部 2桁
"RUN"	計算中であることを示す。LED
"HALT"	計算停止中であることを示す。LED

(ニ) チェック用スイッチ

"REMOTE/LOCAL"	GP-IB制御/マニュアル(チェック用)切換
"SINGLE/CONT"	シングル/コンティニュークス切換
"RUN/HALT & MEM CLR"	スタート/停止&データメモリ・クリアトリガ

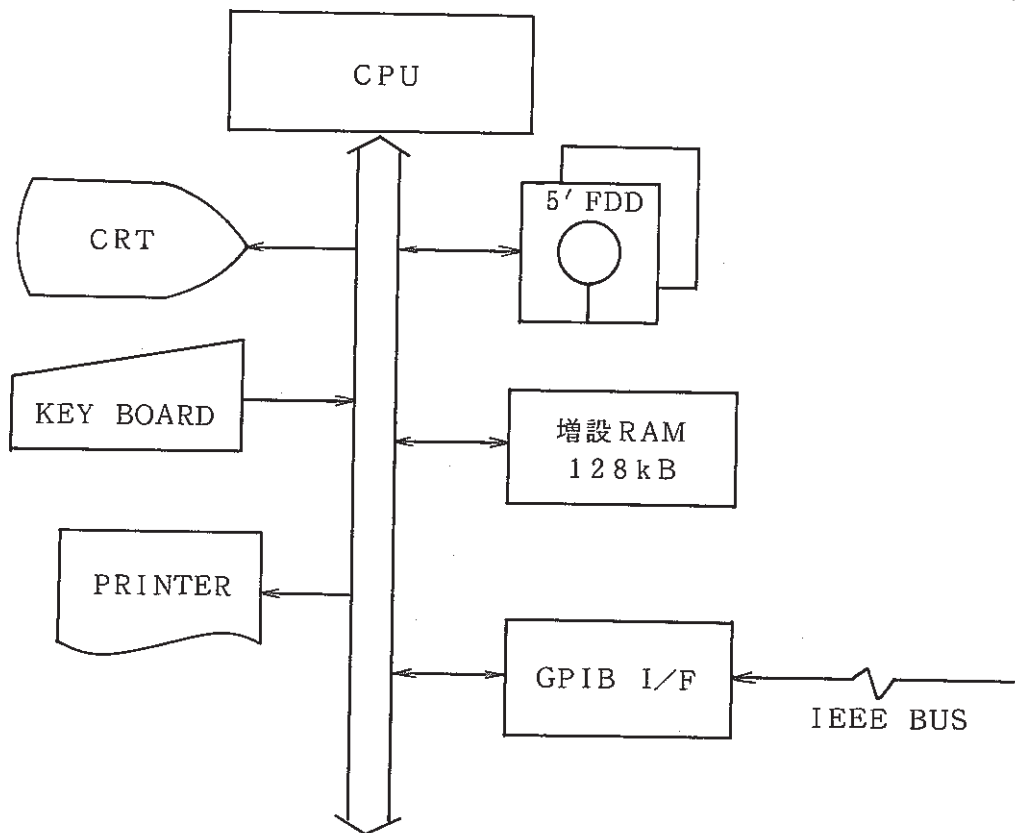
(ホ) 外部コンピュータよりのコントロール(GP-IB)

- 遅延データ BCD3桁×8CH×1500桁
- 使用チャンネル 使用しないチャンネルを指定する。デフォルトは全チャンネル使用。
- 積分回数 Nを設定
- スタートコマンド 計算開始
- リセットコマンド メモリをリセットし計算停止

<ul style="list-style-type: none"> • 標定点数コマンド — 他 — 	標定点数の指定
(ハ) 入出力接栓	
<ul style="list-style-type: none"> • DATA, CONTROL • GP-IB 	57シリーズ50pマルチコネクタ×3 GP-IB用24pコネクタ
(ト) その他	
<ul style="list-style-type: none"> • 電 源 • 使用温度 • 外 形 	AC100V±10% 48~62Hz 0~40℃ 480(W)×199(H)×526(D) mm

3. ホスト・コンピュータ・システム

本システムはハード上は下図に示すようにCPU(PC-9801F2), 高解像度カラーディスプレイ(PC-8853N), プリンタ(PC-8822)で構成されている。



また、ソフト上ではBASICで書かれたプログラムが以下に示すような業務機能を果たす。
各機能の概要は次の通りである。

- 標定点設定業務

具備されている標定点及びセンサー位置を変更する機能である。

- 遅延計算機能

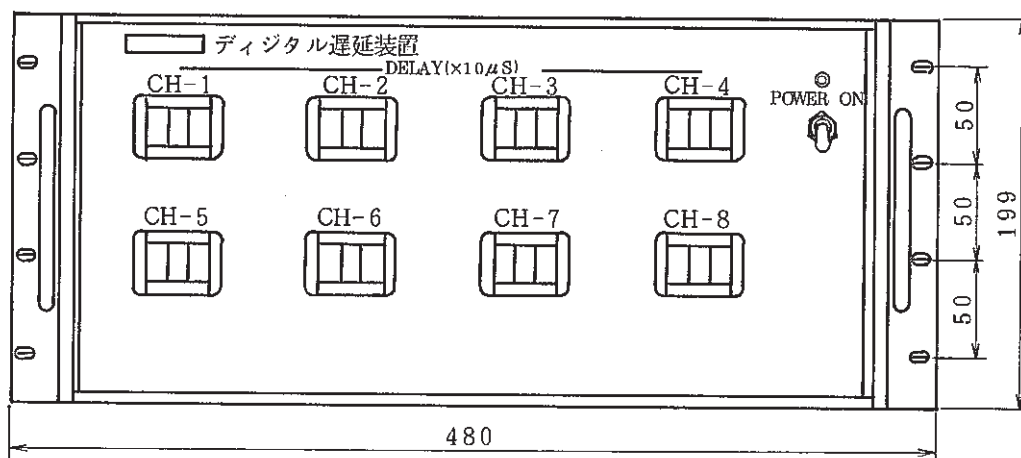
標準測定点及びセンサー位置より遅延時間算出に必要なデータである音速を入力し遅延時間を計算する機能である。

- 実行／表示機能

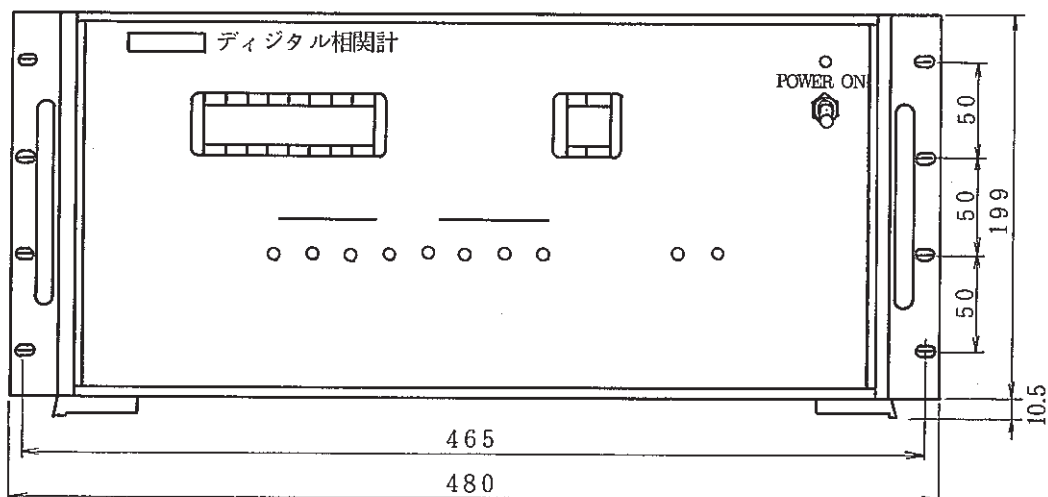
デジタル相関計に遅延値を出力し、計測処理された相関の結果を入力し、それを画面上に表示すると共にフロッピーディスクに保存する。

- 再生／表示機能

実行／表示機能によりフロッピーディスク上に保存された各測定データを画面上に表示すると共に必要に応じ記録出力する機能である。

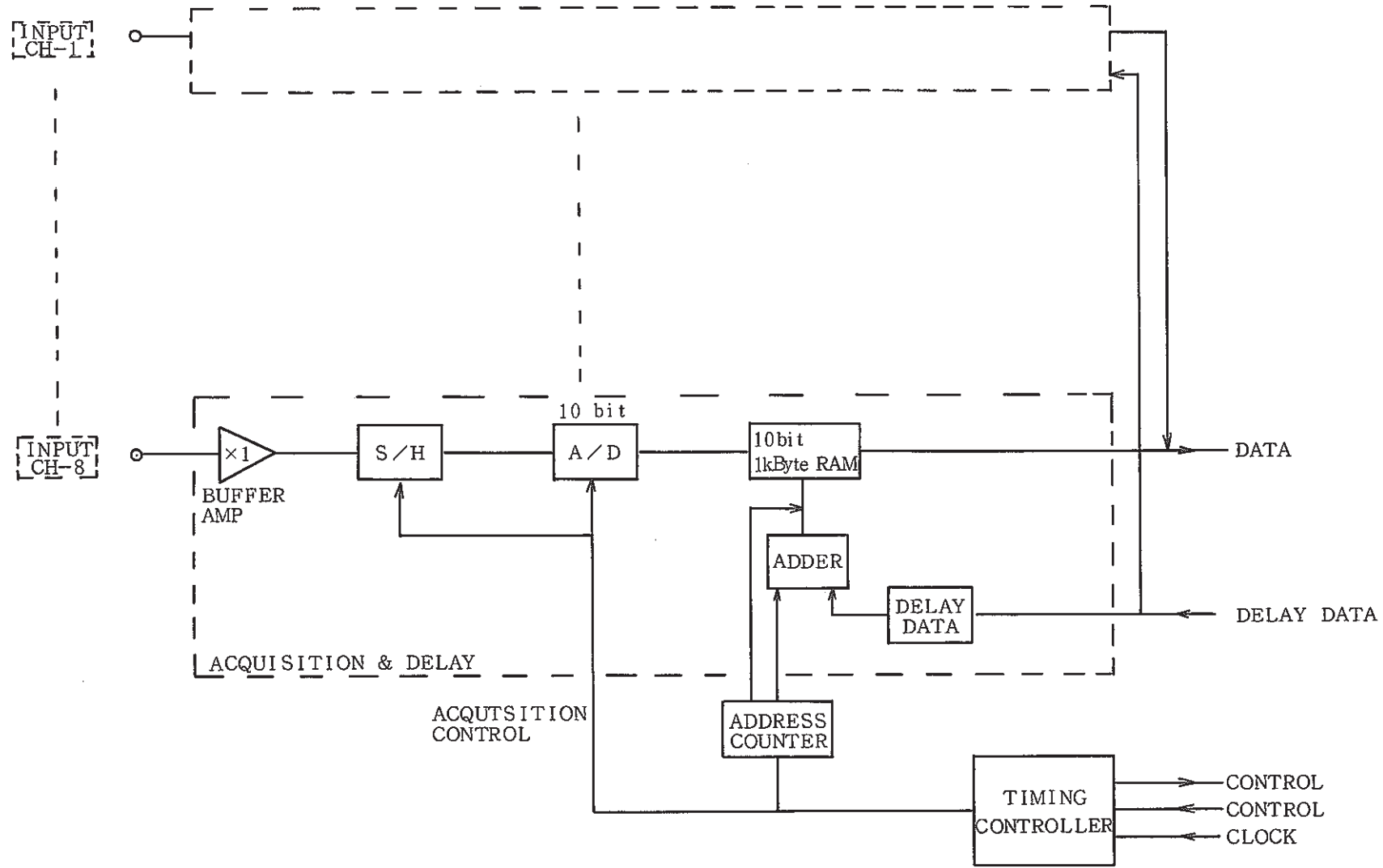


(a) デジタル遅延装置

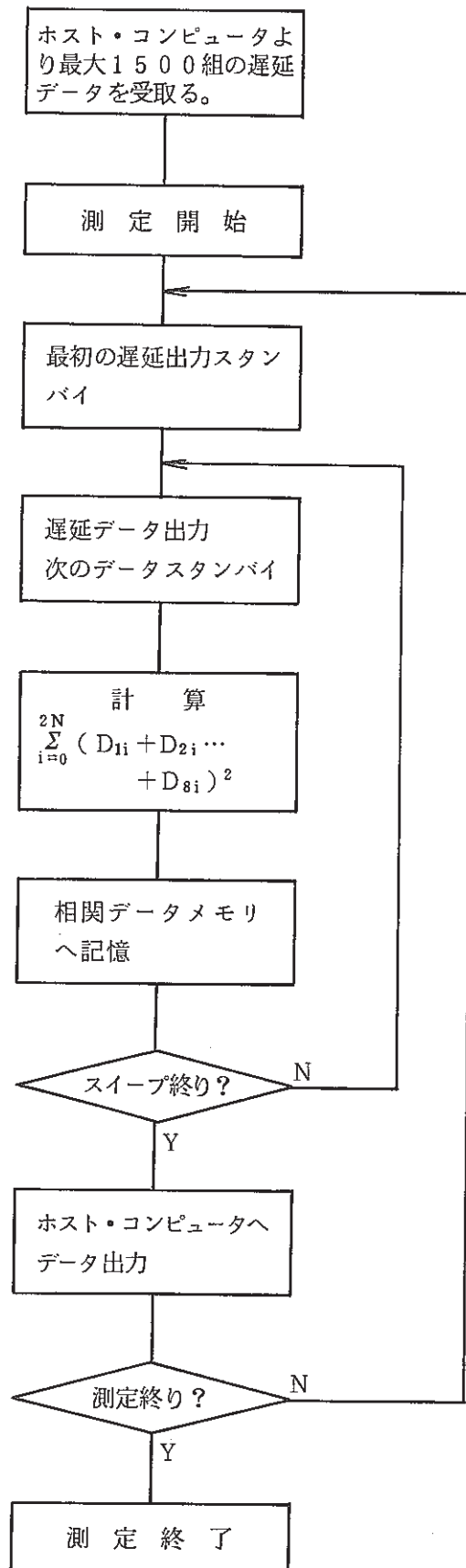


(b) デジタル相関計

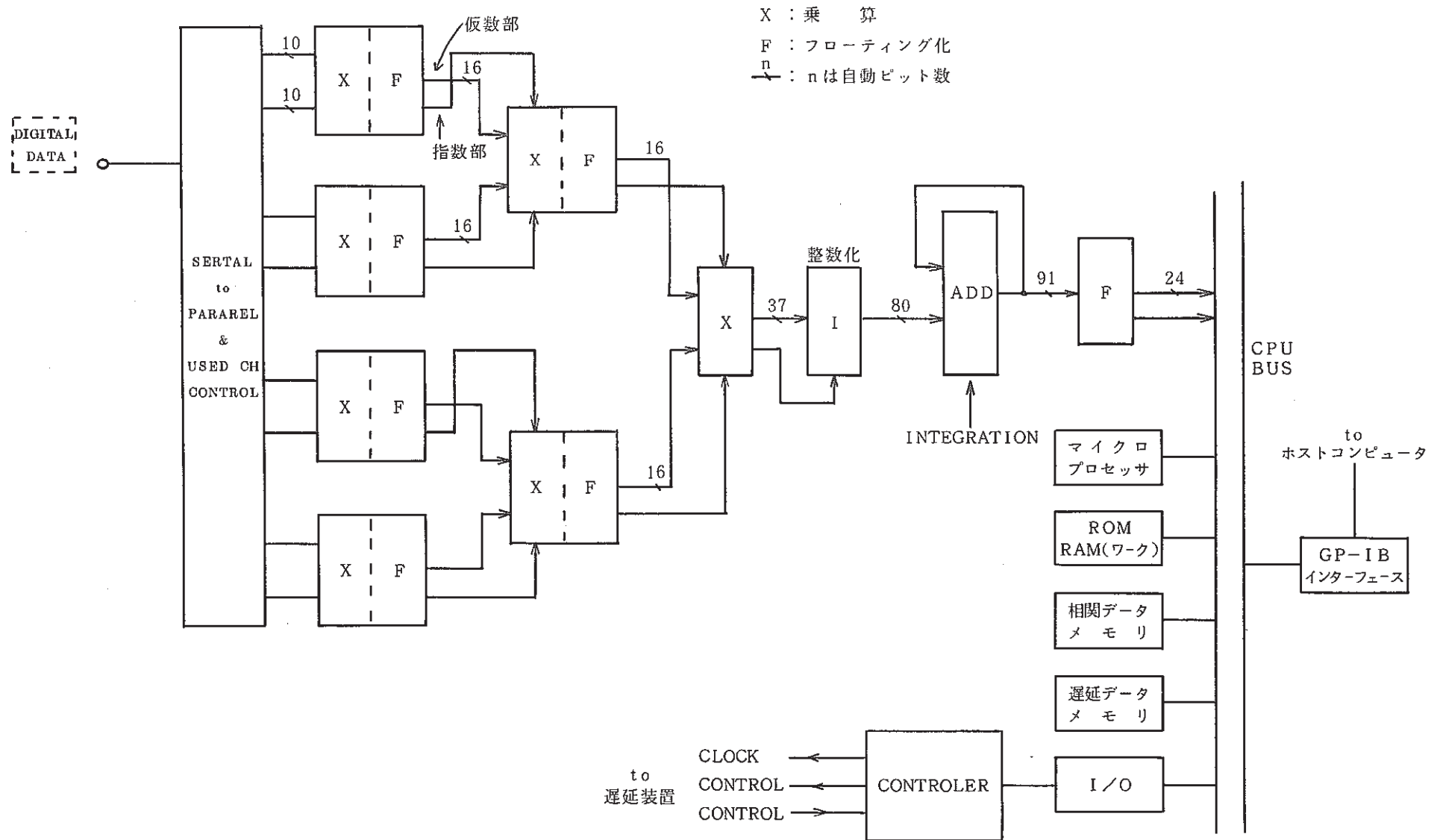
付図A-1 デジタル遅延装置とデジタル相関計の外観



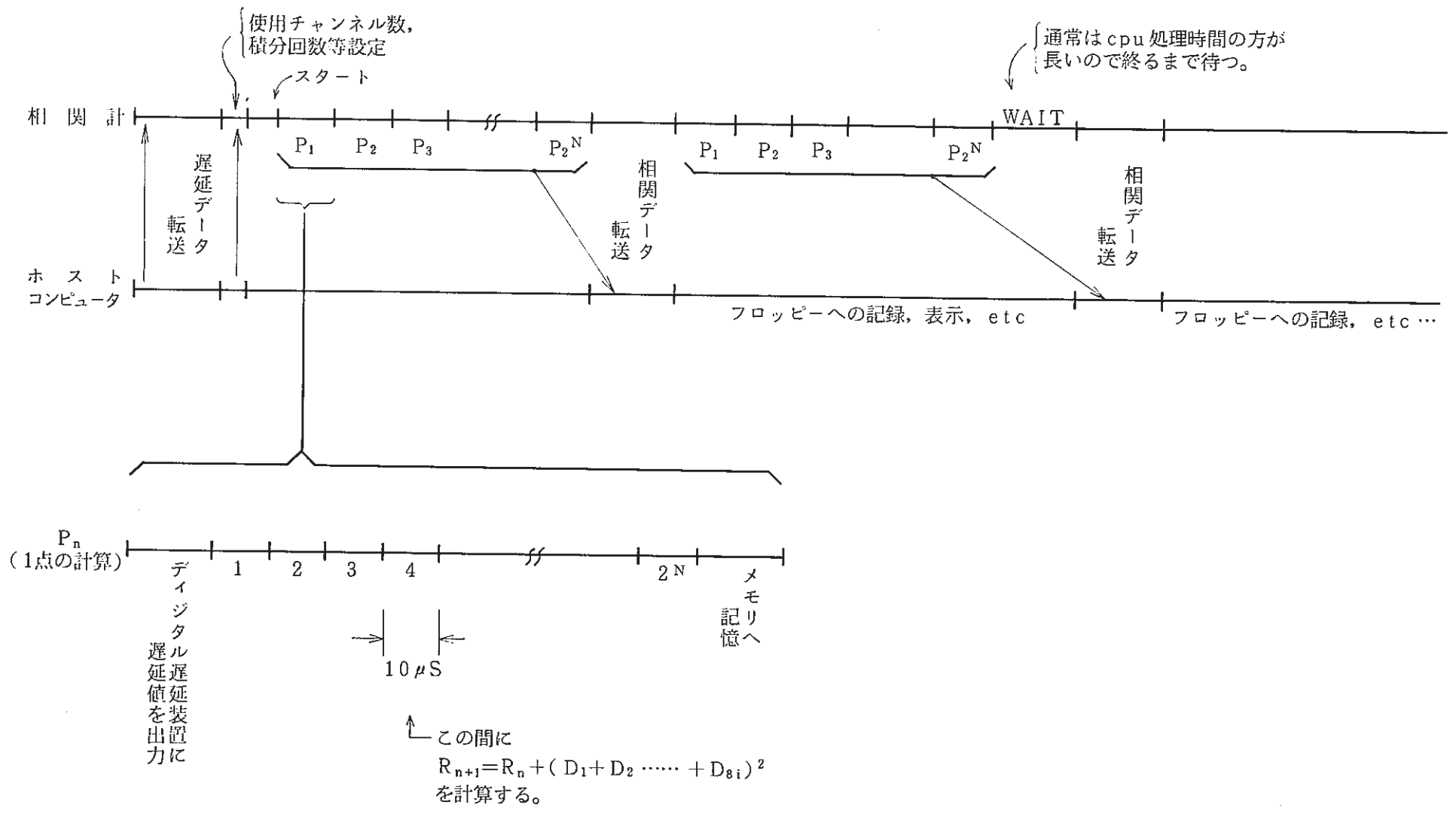
付図A-2 デジタル遅延装置のブロック図



付図A-3 デジタル相関計の動作フローチャート



付図A-4 デジタル相関計のブロック図



付図A-5 各動作のタイミング図

**APPENDIX-B オン・ライン処理装置（試作品）
の工場内性能評価試験結果**

APPENDIX-B オン・ライン処理装置（試作品）の工場内 性能評価試験結果

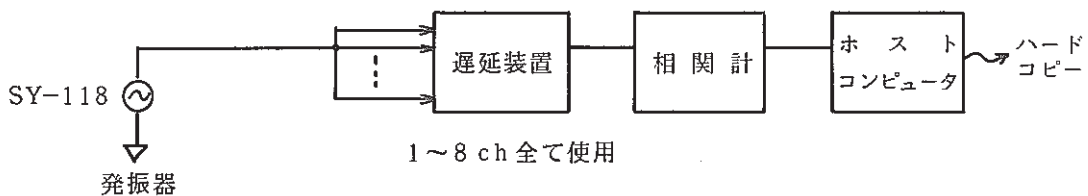
ここでは、単体検査後のデジタル遅延装置、デジタル相関計、ランダムノイズ・ジェネレータ、及びホストコンピュータを組み合わせた総合試験を、模擬信号として純音とホワイトノイズを使用したケースの結果を述べる。

1. 純音の模擬信号

① 周波数及び入力レベル

次の測定回路を用いて、入力信号（サイン波）の周波数とレベルがリーク検出位置標定に及ぼす結果を調査した。音源の位置はいずれも中央を想定している。

(イ) 測定回路



(ロ) 試験条件

- 周波数 50(0), 100(0), 200(0), 500(0)Hz
1(0), 2(0), 5(0), 10(0), 1(-20), 1(-30), 1(-40) kHz
* ()は入力レベル(dB)である。 (0 dB=2V^{P-P})
- 仮音源点 589点
- 使用センサ 8個固定
- 積分回数 2¹¹(2048個)固定
- 音速 340m/sec固定
- バックグラウンド音 無し

(ハ) 試験結果

付図B-1に代表的な結果として周波数を200Hz, 500Hz, 1kHz, 5kHzと変化した場合のリーク位置標定性を示す。これらは、いずれも音源として標定しているが、その標定範囲の絞り込みは周波数によって異なり、半波長を直径とする領域となっている。また、1kHz以上になるとモニター領域内に8チャンネルにも相互相関値の高い場所が点対象的に現われてくる。

入力レベルを0dB以外の-10, -30, -40dBとレベル低下させた場合でも位置標定

性に及ぼす影響はバックグラウンドノイズ音が無いために全く無かった。

② 積分回数及び使用チャンネル

上記①と同じ測定回路を用いて、積分回数と使用チャンネルが位置標定に及ぼす効果を調べた。音源の位置は、いずれも中央を想定している。

(イ) 試験条件

- ・ 積分回数 $2^4, 2^5, 2^6, 2^{11}$ (回)
- ・ 使用チャンネル数 8, 4(1, 3, 5, 7chと2, 4, 6, 8ch), 3(1, 4, 7ch)
(固定条件)
- ・ 音 速 340 m/sec
- ・ バックグラウンド音 無し
- ・ 入力レベル 定格 $2\text{ V}^{\text{P-P}}$
- ・ 周 波 数 1 kHz 純音

(ロ) 試験結果

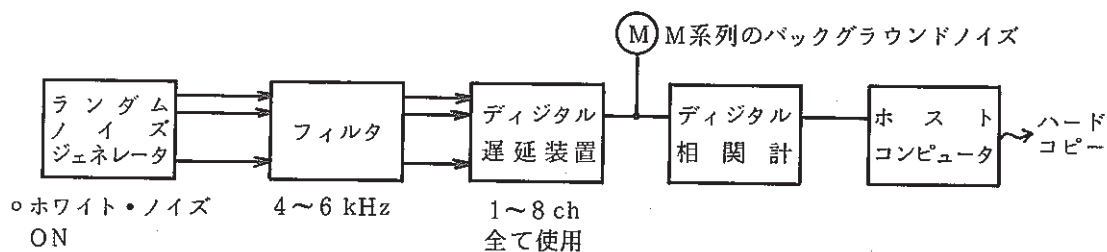
付図B-2に使用チャンネル数が位置標定性に及ぼす影響を示す。同図によると、使用チャンネル数が減少するほど位置標定点の虚像の数が増加し、8チャンネルの場合で8個だったものが、4チャンネルで12個、3チャンネルで19個となる。また、その相関値も真値と虚値とで差がなくなっており、いっそう位置標定が困難となっている。

積分回数については、信号にバックグラウンド音が全く含まれていないために、 2^4 以上の積分回数では位置標定性に何の影響も現われない。

2. ホワイトノイズの模擬信号

模擬信号として4~6 kHzの狭帯的ホワイトノイズを入力した場合の位置標定性を積分回数及びバックグラウンドノイズ・レベルをパラメータにとって調査した。

① 測定回路



上記のランダム・ノイズ・ジェネレータは、8チャンネルのホワイトノイズを水リーク模擬信号として発生させる他に、各チャンネルの位相を自由に調節することが可能である。

② 試験条件

- 積分回数 $2^6, 2^8, 2^9$ (S/N比=2一定, Signal= $0.25 V_{rms}$)
- S/N比 2, 1, 0.5, 0.75 (積分回数= 2^{10} (2048個)一定, Signal= $0.25 V_{rms}$)

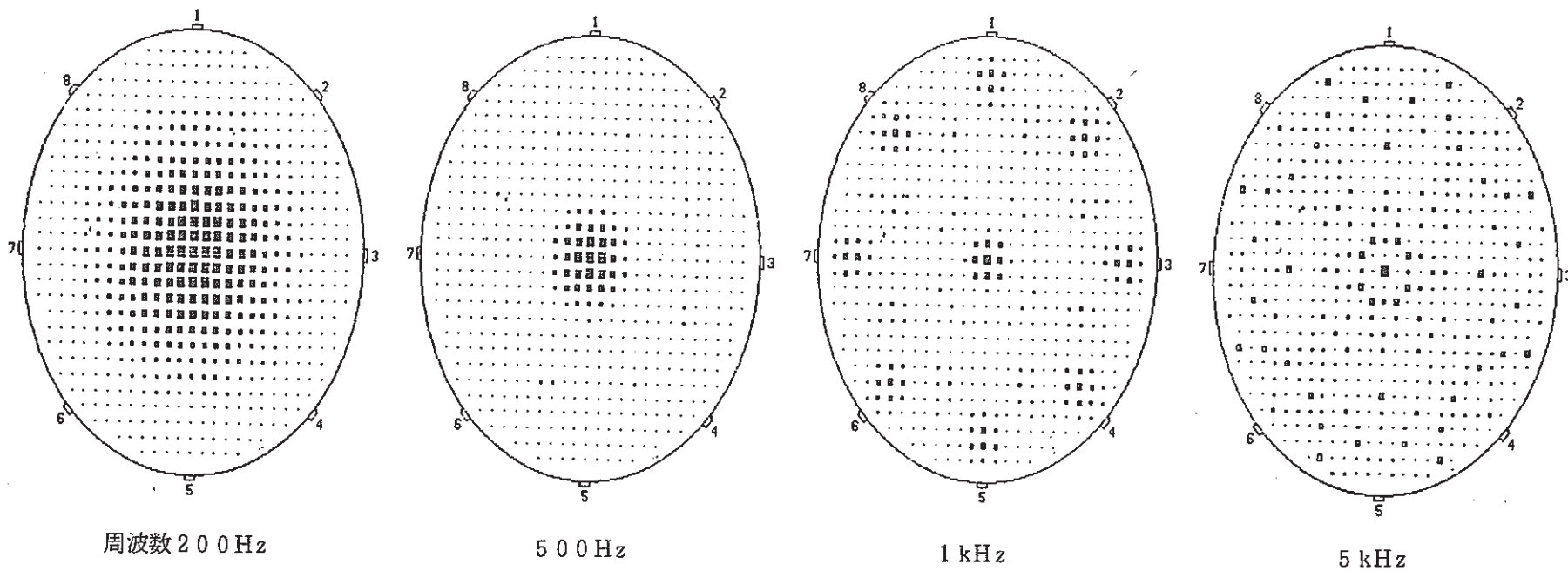
(固定条件)

- 音 速 1400m/sec
- 使用チャンネル 8個
- 仮音源点 943点

③ 試験結果

付図B-3に信号とバックグラウンドノイズの比(S/N比)が「2」の場合において積分回数がリーク検出・位置標定性に及ぼす影響を示す。同図から積分回数が 2^6 (64回)以下であるとリーク検出・位置標定性が相当悪化してくることが判る。しかしながら、模擬リーク信号が4~6 kHzのホワイトノイズであるため、付図B-3に示すような場合に発生する虚像的標定は起きない。

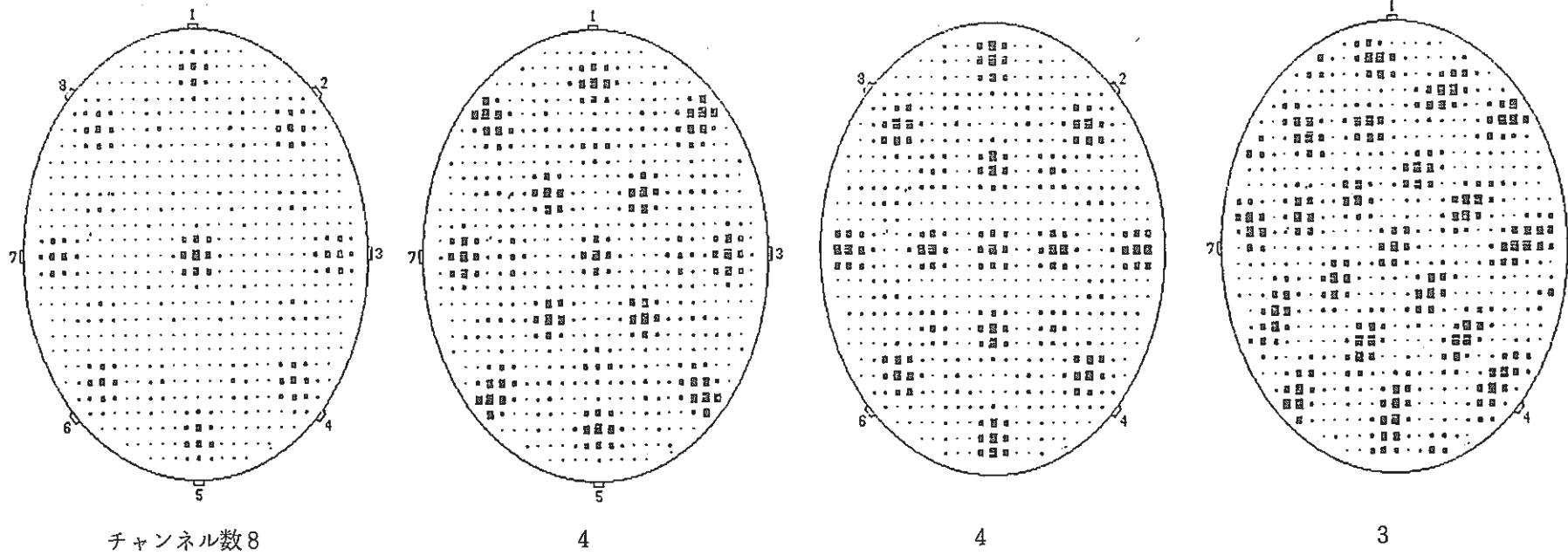
付図B-4はS/N比がリーク検出・位置標定性に及ぼす影響を調べたものである。同図によるとS/N比が0.75までは充分リーク位置・検出が可能であるが、S/N比が0.75以下になると相当困難となってくる。



固定条件

入力レベル	2 V _{P-P}
積分回数	2 ¹¹
音速	340 m/s
バックグラウンド音	無し
使用チャンネル数	8
仮音源点	589点

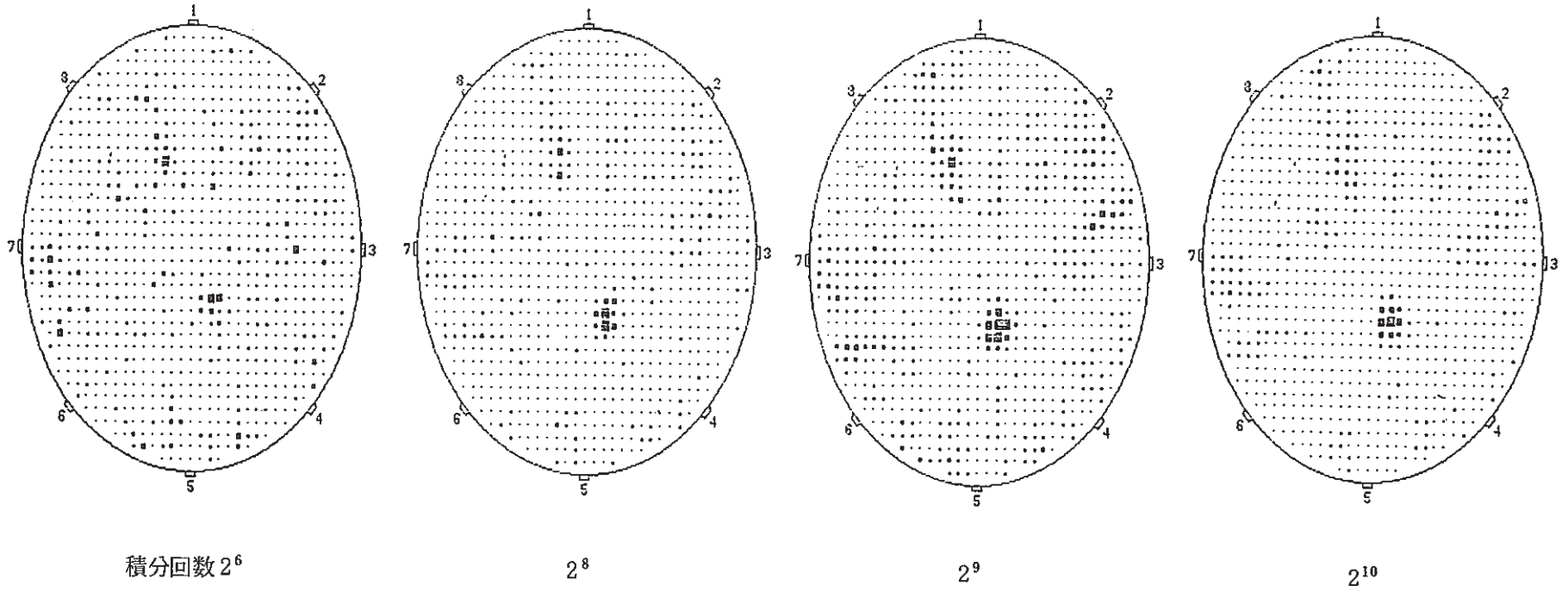
付図B-1 サイン波周波数によるリーク検出・位置標定性



固定条件

入力レベル	2 V _{P-P}
積分回数	2 ¹¹
音速	340 m/s
バックグラウンド音	無し
周波数	1 kHz 純音
仮音源点	589点

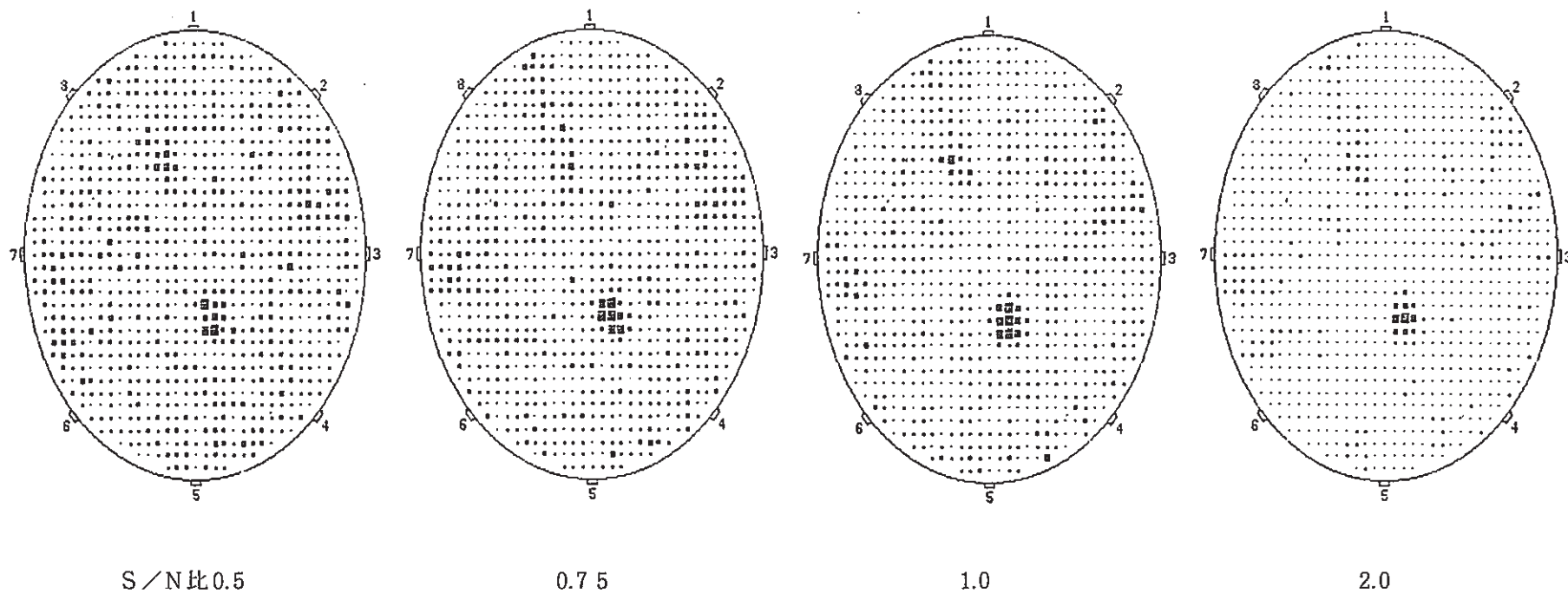
付図B-2 使用チャンネル数によるリーク検出・位置標定性



固定条件

音速	1400 m/s
使用チャンネル	8個
仮音源点	943点
S/N比	2

付図B-3 S/N比が「2」の場合に積分回数が増えるにつれてリーク検出・位置標定性に及ぼす影響



固定条件

音 速	1400m/s
使用チャンネル	8個
仮音源点	943点
積分回数	2 ¹⁰ 回

付図B-4 信号とバックグラウンドノイズの比によるリーク検出・位置標定性