

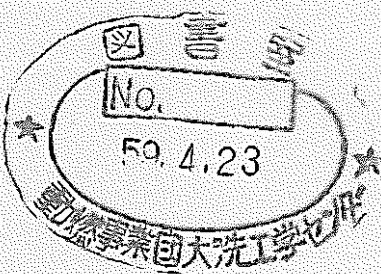
ナトリウム沸騰音検出試験

| 技術資料コード | |
|---------|------------|
| 開示区分 | レポートNo. |
| T | N941 84-59 |

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

1984年3月



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)

1984年3月

ナトリウム沸騰音検出試験

荒木 等^{*}, 大山 信美^{*}, 荒 邦章^{*}
 羽賀 一男^{**}, 中本香一郎^{*}, 山本 研^{*}

要 旨

高速増殖炉炉心内におけるナトリウム沸騰の音響検出法を確立するために、炉外ナトリウム試験装置においてナトリウム沸騰試験を行なった。そしてナトリウム沸騰音の性質、信号処理法、音響検出器の性能変化等について、ナトリウム沸騰検出システムの設計に有効な以下のような結果が得られた。

- 1) 沸騰音圧は沸騰が激しくなるにつれて上昇するが、沸騰周期は逆に長くなる。これまで実施した最大音圧は約 1000 Pascal に達し、発生周期は 0.7 秒まで長くなった。
- 2) 沸騰時の音響スペクトルは数 kHz から数 10 kHz まで拡がっているが、ラッパ管壁とナトリウム中とでは異り、ナトリウム中では低周波の成分が、ラッパ管壁では高周波の成分が多く、またラッパ管壁ではナトリウム中でみられない波形が観測された。
- 3) 複数の検出器間の時間差を求めるための相互相関法では、あらかじめ波形を整流・平滑化するスムージング処理が必要である。
- 4) 圧電型音響検出器 (LiNbO_3) のナトリウム中長期使用において感度の低下は 20 dB から最終的には 5 dB 以内に回復しているが、電極間抵抗は徐々に減少し続けている。
- 5) 初期沸騰段階における検出のためには流動ノイズと区別するために、沸騰の周期性や複数の検出器間の相関性等に着目した検出方法が必要と考えられる。

今後は実機流動ノイズ規模の中での初期沸騰検出法や位置決め法の確立、酸素供給が不要な磁歪型検出器などの開発に関する研究が必要と考えられる。

*: 高速炉機器開発部機器開発室

**: 高速炉安全工学部炉心安全工学室

Sodium Boiling Detection by Acoustic Method

Hitoshi ARAKI*, Nobumi OYAMA,
Kuniaki ARA*, Kazuo HAGA,
Koichiro NAKAMOTO* and Ken YAMAMOTO*

Abstract

Sodium boiling experiments were conducted with the out-of-core sodium loop in order to establish the acoustic detection method of sodium boiling in FBR reactor core. The following results, which are informative to the design of the sodium boiling acoustic detection system were obtained concerned about the characteristic of sodium boiling sound, the method of signal processing and the change of acoustic sensor performance.

- 1) Acoustic pressure by sodium boiling increases according to the boiling grade, but boiling period becomes longer conversely. The maximum acoustic pressure reached about 1000 Pascal, and the period decreased until about 0.7 second.
- 2) Acoustic spectrum extends from a few kHz to a few tens kHz, but by in-sodium sensor, lower frequency components and by on-wraper tube sensor, higher frequency components were obtained mainly. And the latter sensor had peculiar acoustic signals which didn't appear in the former sensor.
- 3) Smooting processing of acoustic signals was found to be necessary for the cross correlation method in order to obtain the time lag between the signals of two sensors.
- 4) Detecting sensitivity of piezo electric acoustic sensors (LiNbO_3) decreased about 20 dB and recovered to 5 dB after used in sodium for long time. But the resistance between electrodes of sensors continued to decrease with the operation time in sodium due to lack of oxygen.
- 5) On the detection of early stage sodium boiling, some methods which utilizes the boiling periodicity and cross-correlation between two sensors would be

* Components Development Section, FBR Systems and Components Division

** Reactor Safety Section, FBR Safety Engineering Division

necessary in order to distinguish that was caused by boiling from the flow noise.

Some studies are still necessary in future for the establishment of the detection method of early stage boiling under the real level of flow noise, and the localization method of boiling source. Besides these efforts, the development of magnetic distortion probe which doesn't need oxygen is also expected.

目 次

| | |
|-------------------------------|----|
| 1. 序 論 | 1 |
| 2. 試験装置及び方法 | 2 |
| 2.1 試験装置 | 2 |
| 2.2 検出システム | 2 |
| 2.3 試験方法 | 3 |
| 3. 試験結果及び検討 | 4 |
| 3.1 沸騰音響信号の測定 | 4 |
| 3.2 沸騰音響発生頻度の測定 | 5 |
| 3.3 沸騰音響スペクトルの測定 | 6 |
| 3.4 音響検出器間時間差の測定 | 7 |
| 3.5 沸騰音響音圧の測定 | 8 |
| 3.6 ボイド効果の測定 | 9 |
| 3.7 音響検出器検出感度の測定 | 10 |
| 3.8 原子炉でのナトリウム沸騰検出可能性評価 | 11 |
| 4. 結 論 | 12 |
| 5. 謝 辞 | 13 |
| 6. 参考文献 | 13 |

List of Figures

| | | |
|--------|---|----|
| Fig.1 | ナトリウム過渡沸騰燃料破損伝熱試験装置 Flow Diagram of Sodium Boiling Test Loop & Fuel Failure Propagation (SIENA) | 14 |
| Fig.2 | 局所閉塞 91 ピンバンドルテストセクション (91A) Local Blockage 91-Pin Bundle Test Section (91A) | 15 |
| Fig.3 | 検出器の 91A テストセクション囲りへの設置状況 Instrument Sensor Locations around 91 A Test Section | 16 |
| Fig.4 | 音響検出器の 91A テストセクションバンドル部への設置状況 Schematic Diagram of Acoustic Sensor Installation at the Bundle Section of 91 A | 17 |
| Fig.5 | ナトリウム沸騰音測定系ブロックダイアグラム Block Diagram of Sodium Boiling Acoustic Detection System | 18 |
| Fig.6 | ナトリウム沸騰模擬音送受波系ブロックダイアグラム Block Diagram of Transmitting and Receiving System of Sodium Boiling Imitation Sound | 19 |
| Fig.7 | 信号処理系ブロックダイアグラム Block Diagram of Signal Processing | 20 |
| Fig.8 | ナトリウム沸騰試験 (91LB107) 音響信号 Sodium Boiling Test (91LB107) Acoustic Signals | 21 |
| Fig.9 | 音響信号レベルの過飽和温度依存性(1) Dependence of Acoustic Signal Level on Theoretical Excess Temperature(1) | 22 |
| Fig.10 | 音響信号レベルの過飽和温度依存性(2) Dependence of Acoustic Signal Level on Theoretical Excess Temperature(2) | 23 |
| Fig.11 | 音響信号レベルの過飽和温度依存性(3) Dependence of Acoustic Signal Level on Theoretical Excess Temperature(3) | 24 |
| Fig.12 | ナトリウム沸騰試験 (91 LB 106) 音響信号(1) Sodium Boiling Test (91 LB 106) Acoustic Signals(1) | 25 |
| Fig.13 | ナトリウム沸騰試験 (91 LB 106) 音響信号(2) Sodium Boiling Test (91 LB 106) Acoustic Signals(2) | 26 |

| | | |
|--------|---|----|
| Fig.14 | ナトリウム沸騰試験(91 LB 106)音響信号(3) | 27 |
| | Sodium Boiling Test (91 LB 106) Acoustic Signals(3) | |
| Fig.15 | ナトリウム沸騰試験(91 LB 106)音響信号(4) | 28 |
| | Sodium Boiling Test (91 LB 106) Acoustic Signals(4) | |
| Fig.16 | 音響検出器AS-3による沸騰音響信号波高分布(91 LB 106) | |
| | Acoustic Signal Pulse Height Distribution with Sensor AS-3 | |
| | (91 LB 106) | 29 |
| Fig.17 | 音響検出器AE-2による沸騰音響信号波高分布(91 LB 106) | |
| | Acoustic Signal Pulse Height Distribution with Sensor AE-2 | |
| | (91 LB 106) | 30 |
| Fig.18 | 音響検出器AS-3による沸騰音響信号時間分布(91 LB 106) | |
| | Acoustic Signal Time Interval Distribution with Sensor AS-3 | |
| | (91 LB 106) | 31 |
| Fig.19 | 音響検出器AE-2による沸騰音響信号時間分布(91 LB 106) | |
| | Acoustic Signal Time Interval Distribution with Sensor AE-2 | |
| | (91 LB 106) | 32 |
| Fig.20 | 検出器AS-3による沸騰音響パルス信号特性(91 LB 106) | |
| | Characteristic of Acoustic Pulse Signals with Sensor AS-3 | |
| | (91 LB 106) | 33 |
| Fig.21 | 検出器AE-2による沸騰音響パルス信号特性(91 LB 106) | |
| | Characteristic of Acoustic Pulse Signals with Sensor AE-2 | |
| | (91 LB 106) | 34 |
| Fig.22 | ナトリウム沸騰試験(91 LB 104)における音響信号周波数スペクトル(1) | |
| | Acoustic Signal Frequency Spectrum on Sodium Boiling Test | |
| | (91 LB 104) (1) | 35 |
| Fig.23 | ナトリウム沸騰試験(91 LB 104)における音響信号周波数スペクトル(2) | |
| | Acoustic Signal Frequency Spectrum on Sodium Boiling Test | |
| | (91 LB 104) (2) | 36 |
| Fig.24 | ナトリウム沸騰試験(91 LB 104)における音響信号相互相関(1) | |
| | Acoustic Signals Cross Correlation on Sodium Boiling Test | |
| | (91 LB 104) (1) | 37 |
| Fig.25 | ナトリウム沸騰試験(91 LB 104)における音響信号相互相関(2) | |
| | Acoustic Signals Cross Correlation on Sodium Boiling Test | |
| | (91 LB 104) (2) | 38 |

| | | |
|--------|---|----|
| Fig.26 | ポイド注入による音響信号への影響(1) | |
| | Effect of Void Injection to Acoustic Signals (1) | 39 |
| Fig.27 | ポイド注入による音響信号への影響(2) | |
| | Effect of Void Injection to Acoustic Signals (2) | 40 |
| Fig.28 | 音響検出器送受波感度の周波数依存性 | |
| | Frequency Dependence of Acoustic Sensor Transmission and Reception Sensitivity | 41 |
| Fig.29 | 音響検出器受信感度の時間・温度依存性 | |
| | Time and Temperature Dependence of Acoustic Sensor Reception Sensitivity | 42 |
| Fig.30 | 音響検出器電極間抵抗の時間・温度依存性 | |
| | Time and Temperature Dependence of Resistance between Acoustic Sensor Electrodes | 43 |
| Fig.31 | 音響検出器電極間容量の時間・温度依存性 | |
| | Time and Temperature Dependence of Capacitance between Acoustic Sensor Electrodes | 44 |
| Fig.32 | 音響検出器電極間インピーダンスの時間・温度依存性 | |
| | Time and Temperature Dependence of Impedance between Acoustic Sensor Electrodes | 45 |

List of Tables

| | | |
|---------|---|----|
| Table 1 | 音響検出器の特性及び設置状況 | |
| | Characteristic and Settling Condition of Acoustic Sensors | 46 |
| Table 2 | 音響検出試験用計器一覧表 | |
| | List of Instruments for Acoustic Detection Tests | 47 |
| Table 3 | ナトリウム沸騰試験パラメータ | |
| | Sodium Boiling Tests' Parameters | 48 |
| Table 4 | データレコーダ周波数特性表 | |
| | Frequency Characteristic of Data Recorders | 49 |

1. 序 論

高速増殖炉においては、炉心における出力密度が軽水炉にくらべて高く、燃料ピン間の冷却材流路も細いため、流路閉塞等によって冷却材の温度が上昇し、ナトリウム沸騰が起ることが考えられる。

そこで沸騰によって生ずる沸騰音響を早期に検出し、燃料ピンの破損等を防止する処置をとることが必要となる。このため、これまで各国においてもナトリウム沸騰音検出のための研究が精力的に実施されてきている⁽¹⁾。

この沸騰音検出法を確立するためには、種々の問題点を解決することが必要となる。まずナトリウムの沸騰音そのものの特性を調べること、即ち沸騰エネルギー、周波数スペクトル、沸騰モードを知ることである。

次に沸騰音源から検出器の位置までの伝播の途中での減衰量、伝播時間を明らかにすること、また高温高放射線雰囲気で長期にわたって使用出来る音響検出器の開発、更には流動音や電気ノイズなどを分解するための信号処理法の確立などが必要である。

一方炉心のどの位置で沸騰音が発生しているかを確認出来れば後の対策上からも非常に有益であるため、複数の検出器の信号の到達時間差等から位置決めを行うなどの信号処理法の確立が望まれる。

これらの課題のうち、ナトリウム沸騰音そのものの特性把握や信号処理法の確立、音響検出器の性能評価などを主な目的として、ナトリウム沸騰試験ループを用いたナトリウム沸騰音響検出試験を実施した。

そしてナトリウムの沸騰音圧、周波数スペクトル、沸騰音発生頻度、位置決めのための信号処理法、音響検出器の特性変化等についての知見を得たのでその結果を報告する。

2. 試験装置及び方法

2.1 試験装置

ナトリウム沸騰音の検出試験に用いたナトリウム過渡沸騰燃料破損伝熱試験装置(SIENA)はFig. 1に示すようにいくつかのテストセクションが組込まれており、本沸騰試験はこのうち91本ピンバンドルテストセクション(図中T-3)において行われた。

91Aと名付けられたこのテストセクションの詳細をFig.2に示す。対面間距離77.8mmの六角ラッパ管の中に91本の模擬燃料ピンがラッピングワイヤをスペーサとして組み込まれている。ピンは全ピン発熱し、各々12kW(200w/cm²)の電気ヒータを内蔵し、有効発熱長が300mmで発熱開始上流端から15mm～20mmの間に片測50%の閉塞板(ステンレス板5mmt、図中B-B Section黒塗り部)が設置されている。

ナトリウムの沸騰はこの閉塞板の下流の最もナトリウム温度が上昇する場所で起り、そこで発生した沸騰音響が各場所に設置された音響検出器に向って伝播してゆくことになる。

この試験装置にはFig.3に示すように次節で説明する音響検出器の他に、ラッパ管の出入口にナトリウム流量計(F)、バンドル内流路中や燃料ピンの表面の各所に温度計(T)やボイド計などの計装設備が設置されており、沸騰現象を多角的にモニターするようになっている。

またボイドによる音響信号の影響を調べるために、アルゴンガスを注入するための注入孔がラッパ管の入口部に設置されている。なお音響検出器の感度変化の測定は「常陽総合モックアップ試験装置」において行われ、これは別に東京工業大学に委託された炉内音響伝播試験⁽²⁾に引続いて実施したものである。

2.2 検出システム

ナトリウムの沸騰音を検出するための音響検出器はFig.3に示すようにテストセクションから膨張タンクまでの各場所に複数設置した(AC, AE, AS)。これは出来るだけ多くの音響検出器により確実に沸騰音をとらえ、その特性そのものを解析すること、また各検出器までの音響信号の伝播の減衰及び相関時間を測定して、信号処理法の確立のための基礎資料を得ることを目的としたものである。

Fig.4はこれらの音響検出器のうち沸騰音源に最も近いナトリウム中に直浸されているAS-3, AS-2, AS-102などの設置状況を示したものである。他の音響検出器は膨張タンク内に直浸したAS-1を除いてすべてガイド棒を介して大気中に設置されている。これらの検出器の特性、設置場所、設置方法等をTable 1にまとめて示す。

またFig.5に各検出器と音響信号を集録するデータレコーダとの間に用いられている増幅器等の電気回路のブロックダイアグラムを示す。Table 2にはそれらの型名などを一覧表にしてまとめた。

一方ナトリウムの沸騰音圧を算出するためには沸騰位置から検出器までの音響伝播の減衰量を評価する必要があり、Fig.6にこのための模擬音送受波系のブロックダイアグラムを示す。また音響

検出器の感度変化の測定における測定系も Fig. 6 と同様である。

2.3 試験方法

ナトリウムの沸騰は 2 つの方法で行った。1 つはナトリウム流量は一定に保ったままで模擬燃料ピンのヒータ出力を段階的に上昇してゆく方法、他の 1 つはヒータ出力を一定にしてナトリウム流量を段階的に下げてゆく方法である。この 2 つの方法について各々の段階における沸騰音の特性を測定し、沸騰音発生頻度、周波数スペクトル等が各段階でどのように変化してゆくかを調べた。なお、ある段階から新しい段階に移る過程ではヒータピン出力上昇の場合毎分約 $2\sim 3 \text{ W/cm}^2$ ずつ増加させ、流量減少の場合は毎秒約 $1 \ell/\text{min}$ ずつ低下させていった。ナトリウム流量、熱流束などの試験パラメータを Table 3 に示す。

なお燃料ピン破損による FP ガス放出音の検出の可能性やボイドによる沸騰音の受信電圧の変化を調べるために、沸騰試験とは別にアルゴンガスを Fig. 2 におけるテストセクション下部のガスインゼクションラインから注入し、流動バックグランドノイズの変化等を測定した。注入したガスボイド率は 0.1 ~ 2.4 % である。

また沸騰音源から検出器までの減衰量を評価するために Fig. 6 に示したように送信感度のわかっている検出器を送信子として用いて沸騰模擬音を発信し、他の受信子で受信してその減衰量を求めた。送信子としては AS-3 を、受信子としては AE-2, AC-104, AS-102 を用いた。

一方ナトリウム直浸圧電型音響検出器 (Kamman 社製, LiNbO_3 , AS-3 と同一タイプ) の高温ナトリウム中での検出感度の時間変化を評価するために、「常陽総合モックアップ試験装置」において Fig. 6 と同じ送受信装置を用いて感度校正試験を行った。方法は 3 個の検出器を送受信子に用いる「相互校正法」⁽²⁾ で行った。

沸騰音データは一旦データレコーダ M 96 に集録した後、Fig. 7 に示すようにデータレコーダ R 510 に移し替え、ミニコン NOVA 300 で A/D 変換して MT テープに記録し、大型計算機 M 200 で信号解析を行った。ミニコン NOVA 300 はサンプリング時間が 1 msec と遅いためデータレコーダの再生速度を遅くした。Table 4 にデータレコーダの周波数特性及び使用した記録再生速度の一覧表を示す。大型計算機 M 200 を使ったスペクトル解析や相関計算は実験炉所有の NOISA コード⁽³⁾を使用した。

3. 試験結果及び検討

3.1 沸騰音響信号の測定

Fig. 8 に沸騰開始から終了までに各音響検出器により観測された音響信号の一例を示す。横軸は経過時間であり、縦軸は受信電圧である。信号は Fig. 7 に示すようにデータレコーダ M 96 により再生し、増幅器により整流し、9 ペンレコーダにかけたものである。試験番号は 91 LB 107 であり、ヒータ出力を一定 (100 W/cm^2) にして、ナトリウム流量を徐々に減少させていった場合の沸騰の様子を示している。流量領域 (I) で $137 \rightarrow 110 \text{ l/min}$ に変化させる途中で沸騰開始し、流量領域 (II) の一定流量 (110 l/min) でコンスタントに沸騰が持続した。図では更に $110 \rightarrow 92 \text{ l/min}$, $92 \rightarrow 76 \text{ l/min}$ と流量を減少させていった場合の沸騰音レベルの変化を示している。全体的に流量を減少してゆくと沸騰レベルは激しくなってゆく傾向があることがわかる。なお検出器によるちがいは Fig. 3 にその位置を示したようにラッパ管の近くの検出器 AC104, AS-3, AE-2 及び膨張タンクまでの配管上の検出器 AC-103, AE-3 は良く沸騰音をとらえているが、膨張タンク上の検出器 AC-105, AC-101, AE-1 ではバックグラウンドが大きく、沸騰が激しくなるとやや信号が大きくなっているが S/N 比 (ノイズに対する沸騰信号比) はあまりよくない。

Fig. 9 はラッパ管壁に設置した音響検出器 AE-2 について、各試験条件における受信信号レベルの過飽和温度依存性を示している。過飽和温度は次の式で表わされ⁽⁴⁾、沸騰温度以上に加えた熱主流束による仮想的な温度上昇を意味する。

$$\Delta T_{ex} = \Delta T_{sb} \times \frac{\Phi/Q - (\Phi/Q)_{bi}}{(\Phi/Q)_{bi}}$$

ここで ΔT_{ex} : 過飽和温度 ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT_{sb} : サブクール温度 (沸騰温度 - 入口ナトリウム温度)

Φ/Q : 沸騰時の熱流束 / 流量

$(\Phi/Q)_{bi}$: 沸騰開始時の熱流束 / 流量

受信信号レベルは沸騰パルスのピーク値ではなく、時間平均値を表わしている。

試験条件によって音響レベルは大きなばらつきがあり、この原因については更に詳しい検討が必要である。ただ、沸騰開始時は約 0.03 パスカル程度であり、沸騰が激しくなると音響レベルは増大し、約 0.5 パスカル程度で飽和する傾向がみられる。

Fig. 10 は検出器 AS-3, AE-2, AE-3, AE-1 について、全ての試験条件にわたって平均した音響レベルの過飽和温度依存性を示したものである。いずれも過飽和温度の上昇と共に音響レベルは増大し、ある所で飽和ないし減少の傾向がみられる。絶対音圧レベルとしてはナトリウム直浸型の AS-3 では約 80 パスカルとなっているが、ラッパ管壁に設置した AE-2 では AS-3 にくらべて非常に小さく約 0.4 パスカル、膨張タンクへの途中配管上の AE-3 で約 0.08 パスカル、膨張タンクの

AE-1で約0.003 パスカル程度と非常に小さくなっている。これは AE 検出器の検出感度の周波数依存性が 100 kHz で急激に小さくなっていることと、配管壁からガイド棒への伝播による減衰のためと考えられる。また配管途中の AE-3 にくらべて膨張タンク架台上の AE-1 の信号の減衰が大きいのは膨張タンクが設置されている架台等への音響エネルギーの拡散によるものと考えられる。

一方加速度計についての同様な平均音響レベルと過飽和温度との関係を Fig. 11 に示している。ラッパ管上の AC-104 では約 0.6 G, 膨張タンクへの途中配管上の AC-103 では約 0.02 G である。この間の減衰は AE 検出器にくらべて大きくなっている。

これらのことから、沸騰音圧の時間平均値としては、検出感度の周波数特性が比較的低周波領域までのびている。AS-3 の値約 80 パスカルがより現実に近い値を示していると考えられる。なお沸騰音響パルスのピーク値による音圧評価については 3.5 節で更に詳しく検討する。

3.2 沸騰音響発生頻度の測定

Fig. 12, 13 は最も沸騰の激しかった実験番号 91 LB 106 における検出器 AS-3, AE-2 の音響信号の時間変化を更に時間軸を拡大してみたものである。Fig. 12 は沸騰初期（ステップ 1），Fig. 13 は更に激しくなった沸騰後期（ステップ 6）のものである。両方に共通しているものは沸騰がある周期をもって発生しているということであり、特に沸騰が進むと周期が長くなる傾向を示している。また沸騰初期では両信号ともほぼ同期して発生しているように見えるが沸騰後期になると交互に信号が発生している。

Fig. 14, 15 は Fig. 12, 13 の時間軸を更に拡大して示したものであるが、これからよくわかるように Fig. 14 の沸騰初期（ステップ 1）ではあまり顕著な差はないが、Fig. 15 の沸騰後期（ステップ 6）では検出器 AE-2 と検出器 AS-3 では明らかな差がみられる。

すなわちラッパ管壁に設置した AE-2 では沸騰音パルスが発生する前に連續した記号がみられるが、ラッパ管からナトリウムパイプを介してナトリウム中に直浸している AS-3 ではこの連續波はみられない。ただ沸騰パルスについては両検出器とも同時に検出しているのがわかる。

この連續波は何か、また AE-2 で検出されて、AS-3 で検出されないのは何故かという理由は不明であるが、管壁で検出されて、ナトリウム中で検出されないことから、沸騰というよりも沸騰前に管壁で発生する音すなわち温度上昇によるラッパ管の熱膨張、特に片側閉塞によるラッパ管の曲りなどによるラッパ管壁内での AE の発生などが考えられる。

Fig. 16, 17 は実験番号 91 LB 106 の場合の波高分布を各沸騰段階についてプロットしたものである。Fig. 16 は検出器 AS-3, Fig. 17 は検出器 AE-2 の場合であり、横軸は波高でその単位は 0.05 volt/UNIT(10) であり、縦軸は音響信号の個数で測定時間約 10 秒の総数である。Fig. 16 から AS-3 による波高分布は沸騰段階が進むにつれて次第に高い方にずれてゆき、全体的に個数は減少していくことがわかる。Fig. 17 における AE-2 についても同様に波高分布が高い方へずれてゆくのがみられる。

Fig. 18, 19 は沸騰信号の発生間隔の分布をプロットしたもので横軸は 7.5 msec/UNIT(30) である。AS-3, AE-2 共に沸騰が進むにつれて沸騰の発生する時間間隔は長くなっている、これらのことから沸騰が激しくなると 1 回 1 回の沸騰エネルギーは大きくなるが、発生する頻度は少なくなってくることがわかる。

Fig. 20, 21 は Fig. 18, 19 を用いて沸騰音響パルス信号の波高分布から平均音圧を、パルス発生時間間隔分布から毎秒の平均音響信号数を、また Fig. 12, 13 等から沸騰のブロックとしての発生周期を、各ステップについてまとめたものである。音響信号数はある電圧レベル以上（設定値 0.15 volt）のものについて行った。

Fig. 20 における AS-3, Fig. 21 における AE-2 共に平均音圧は沸騰段階の進展と共に上昇するが、音響信号数はある段階以上では逆に減少し、沸騰周期については完全に沸騰規模の増大につれて長くなっていることがわかる。Fig. 10, 11 においてはある沸騰規模以上では時間平均出力が減少する傾向がみられたが、これは音響信号数が少くなり、かつ沸騰周期が長くなるために時間平均出力が小さくなるためである。また Fig. 9 の時間平均出力より高めになっているのは沸騰パルス信号のみについての評価であるためであり、AS-3 で約 250 パスカル、AE-2 で約 0.5 パスカルに達している。

これらのことから沸騰検出法としては、沸騰パルス信号の波高分布が高めにずれてきたか、またある周期でもって発生しているかなどに注目した観測法が有効な手段になると考えられる。

3.3 沸騰音響スペクトルの測定

Fig. 22 に実験番号 91 LB 104 (沸騰ステップ 3) における音響信号の周波数スペクトル解析結果を示す。使用解析コードは前述したように NOISA コードであり、解析範囲は 1 個の沸騰音パルス信号をカバーする約 8 msec である。

ラッパ管壁に設置された検出器 AE-2 の場合には、バックグラウンドノイズでは周波数の増加につれて減少しているが、沸騰音では 50 kHz 付近まで周波数成分がのびており、低周波での差があまりなく、高周波での差が大きくなる傾向を示している。

一方ラッパ管から導波管を介して設置された検出器 AS-3 ではバックグラウンドノイズにくらべて沸騰音の方が全体的に大きくなっているが、特に高周波より低周波での差が大きく、AE-2 とは異った傾向を示している。

Fig. 23 は膨張タンクへの途中の配管壁に設置された加速度計 AC-103 及びラッパ管壁に設置された AC-104 による音響信号の周波数スペクトルである。AC-103 についていえば沸騰開始前のバックグラウンド (波高 ± 0.13 volt) にくらべて沸騰開始直後 (波高 ± 0.44 volt) では低周波側で大きくなり、更に沸騰が激しいステップ 2 (波高 ± 1.13 volt) では高周波域での増加が大きい。また AC-104 でも同様に 60 kHz ぐらいまでの高周波まで周波数分布がのびている。

以上のことから、周波数スペクトルに関しては、検出器によっては沸騰初期には 20 kHz 以下の低

周波側で差が現われ、更に沸騰が進むと 20 kHz 以上での増加も著しくなるため、沸騰検出においては比較的低い数 kHz の周波数帯域にも注目して監視する必要がある。

3.4 音響検出器間時間差の測定

2つの検出器の信号間の到達時間差を正確に求めることができれば途中の音速とパスが既知として沸騰音源の位置の同定が可能となる。このための方法としては、パルス信号の到達時間差を直接時間測定器により測定するパルス時間差法と相互相関法により求める方法がある。前者は信号がパルス状でパルス発生間隔が遅れ時間より長い即ち発生頻度が少い場合に適しており、後者の場合は連続的な脈動信号の解析に適している。

ナトリウム沸騰信号の場合は Fig. 8 からみると連続信号のように見えるが、時間軸を拡大した Fig. 15 からわかるようにパルス状になっている。従ってある程度沸騰が大きくなればパルス時間差法によって時間遅れを求めるのが最も適していると考えられる。しかし、沸騰初期の波高が低い場合にはバックグラウンドと区別して時間差測定回路の駆動信号を作るディスクリレベル（ある波高以上の信号のみを取り出すための弁別基準レベル）の設定が困難な場合がある。このような場合には相互相関法による方法が適していると考えられる。

Fig. 24, 25 は相互相関法による時間差測定の一例を示したものである。Fig. 24 は実験番号 91 LB104 のステップ 1 についてのもので検出器 AE-2 と AS-3 についての相互相関をとっている。同図左側のスマージング前の場合には時間遅れを示すクロス分散のピークの同定が困難となっている。一方同図右側のスマージングした場合（スマージング幅 2.5 msec）には、遅れ時間 0.95 msec のところに明らかなピークがみられる。このように、音響信号のように短時間内で高周波で振動しているような信号の場合には、整流してある程度平滑化処理した後でないと相互相関法による時間遅れの算定が難しいことがわかる。

Fig. 25 は同様に沸騰段階ステップ 3 についての解析結果であり、スマージング後の相関による時間遅れは 1.68 msec であり、ステップ 1 の時にくらべてかなり伸びている。この差についての原因を調べるために、まず AE-2 と AS-3 との時間遅れについて距離 (114 cm) とナトリウム中音速 (2320 m/sec, 480°C) から求めてみると、0.49 msec となる。これは相関法による値よりも更に小さい。

一方音響パルスの時間軸上の位置が明瞭である 91 LB106 ステップ 6 (Fig. 15) の場合について両検出器に対応するピーク同志の時間遅れを比較すると約 0.43 msec であり、これは先程の計算値に近い。従って相関法による時間遅れの値は 1つ1つのパルス同志の時間遅れではなく、前節で説明した沸騰プロック間の時間のずれを示すものと考えられる。従って沸騰段階が進むにつれて Fig. 15 の AE-2 におけるような沸騰前の信号の発生が入りこんできたためではないかと考えられる。

以上のことから沸騰初期にはスマージング処理後の相関法による時間差測定が考えられるが、どういう信号がきているかその信号の種類等にも注意して実施する必要がある。

3.5 沸騰音響音圧の測定

ナトリウム沸騰による音響エネルギーの測定については、これまで各節でふれてきたが、ここでは音源から検出器までの減衰補正をした絶対量の評価を行う。

まず検出器 AS-3 から模擬信号を送信した場合の検出器 AS-102 による受信電圧を R_1 、同様に検出器 AC104 による受信電圧を R_2 、ナトリウム沸騰の場合の AS-102 による受信電圧を R'_1 、AC-104 による受信電圧を R'_2 とすれば、沸騰音圧 P_B は次式で与えられる。

$$P_B = P_s \times \sqrt{\frac{R'_1 R'_2}{R_1 R_2}} \quad (2)$$

ここで $P_s = K_s \times E_{so}$

P_s : 送信音圧

K_s : AS-3 の送信感度

E_{so} : 送信電圧

送信試験による各変数の値は次の通りである。

K_s : -18.6 dB ($0 \text{ dB} = 1 \text{ Pa/volt}$, $20 \sim 80 \text{ kHz}$ 平均)

E_{so} : 24.5 volt

R_1 : 1.64 volt

R_2 : 0.0386 volt

最も沸騰音圧が大きかった実験番号 91LB106 (ステップ 6) の場合のパルスピーク値は次の通りである。

R'_1 : 106.5 volt

R'_2 : 50.0 volt

これらの値を代入して沸騰音圧 P_B を求めると $P_B = 920 \text{ パスカル}$ となる。

一方検出器 AS-3 による受信電圧 R'_3 から検出器までの減衰がないとして沸騰音圧 P'_B を次のように求める。

$$P'_B = \frac{R'_3}{G \times K_R} \quad (3)$$

ここで G : アンプゲイン

K_R : 受信感度

実験番号 91LB106 (ステップ 6) の場合の各パラメータは次の通り。

R'_3 : 3 volt

G : 500

K_R : -105 dB ($0 \text{ dB} = 1 \text{ volt/Pascal}$, $20 \sim 80 \text{ kHz}$ 平均)

これらの値を代入すると $P_B' = 1054$ パスカルとなる。 P_B と P_B' を比較すると伝播による減衰を考慮しなかった P_B の方が逆に P_B より大きくなってしまっており、このちがいは各パラメータの誤差によるものと考えられるが、逆に音源から検出器までの減衰はあまり大きくないことを意味していると思われる。いずれにしても沸騰音圧のピーク値としては約 1000 パスカル程度が発生するものと推定される。

3.6 ボイド効果の測定

燃料ピンが破損して FP ガスが放出された場合に、その放出音を検出出来ないかという問題がある。このためラッパ管下部に設けたガス注入ラインからアルゴンガスを注入し、音響信号レベルを測定した。

Fig.26, 27 は検出器 AE-2 と AS-3 による信号レベルの注入ボイド率依存性を示す。定常的にガスを注入した Fig.26 ではナトリウム流量は沸騰試験の時にくらべて多く 370 l/min, ナトリウム温度は約 300°C である。Fig.27 は過渡的に注入した場合で、ナトリウム流量は 370 l/min と 13 l/min, ナトリウム温度は約 300°C, ガス注入圧力は 59 kg/cm²G と 29.5 kg/cm²G である。

Fig.26 で特徴的なことはラッパ管壁に設置した AE-2 ではまず流動によるバックグラウンドが非常に増大していること、またボイド率を増加させてゆくと逆に流動ノイズによる信号が減少していくことである。

一方案内管を介して設置した AS-3 では流動によるバックグラウンドの変化は殆んどなく、またボイド注入によって音響レベルは増大してゆく。

Fig.27 の過渡変化時も同様な傾向を示しており、AS-3 ではボイド注入と同時に音響レベルは立上がり、ボイドの減少につれてバックグラウンドレベルに戻っているが、AE-2 ではボイド注入によって一旦音響レベルは逆に減少し、ボイドの減少につれてまた元の流動ノイズレベルまで上昇してきている。同図右に示した流量 13 l/min では流動ノイズが小さいため AE-2 については AS-3 と同様にボイド注入と共に音響レベルは増大している。このことから、AE-2 ではボイドが注入されると流動ノイズによる信号レベルの減少とボイド注入音そのものによる増大とが同時に起っており、減少効果の方がより大きいことを示している。

従ってラッパ管壁全体に伝わる流動音をより多く測定している AE-2 ではボイド注入によって流動音の伝播が妨げられ、一方、流動音が小さい AS-3 ではボイド注入音そのものをより効率的に検出出来たものと考えられる。従って検出器の設置状況によってはガス注入に対して音響レベルの上昇または下降という逆の効果があることに注意する必要がある。

AS-3 によるボイド注入（最大 2.5 %）による出力電圧から音圧レベル換算するとボイド注入音圧は約 5 パスカルとなり沸騰音にくらべると非常に小さい。

3.7 音響検出器検出感度の測定

ナトリウム沸騰試験に用いたものと同じタイプのナトリウム直浸型音響検出器 (KAMAN社製, LiNbO₃) の送受波感度がナトリウム温度及び経過時間と共にどのように変化するかを測定した。この検出器は直径 $\phi 22\text{ mm}$, 9.6 mm厚の圧電素子 (LiNbO₃) の他に常陽総合モックアップ試験装置炉容器内炉心中に挿入出来るように 10 m の MI ケーブル信号線 ($\phi 3.2\text{ mm}$) と、同じく 10 m の酸素供給ライン ($\phi 1.6\text{ mm}$) 及び酸素ポンベから成っている。この酸素ポンベは LiNbO₃ の高温中での脱酸素効果を防止するためのものである。

測定方法は 3 個の検出器による相互校正法であり、Fig.28 に送受波感度の周波数依存性の測定結果の 1 例を示す。ナトリウム温度は 200°C, ナトリウム中で使用を始めて 1650 時間後のデータであり、3 台の検出器の平均値をプロットしている。

Fig.29 はナトリウム中使用開始後約 1000 時間から 1650 時間までの受信感度の平均値の時間変化を示す。これは周波数 50 ~ 150 kHz の平均値である。ナトリウム使用前の水中での校正結果にくらべると最初は約 20 dB 程度下がっているが、その後徐々に回復しつつある傾向を示している。ただ 1200 時間付近でのナトリウム温度 500°C においては受信感度の低下がやや大きい。

これらの原因を調べるために電極間の直流抵抗と容量の時間・温度変化を測定した。結果を Fig. 30, 31 に示す。抵抗に関しては温度上昇と共に急激に低下し、また同じ温度について比較すると時間の経過と共に徐々に減少している。一方 Fig. 31 に示すように容量に関しては温度上昇と共に急激に増加し、時間経過と共にわずかづつ増加する傾向がみられる。

これらの抵抗と容量からインピーダンスを計算したのが Fig. 32 である。Fig. 29 における 500°C 付近での感度減少と Fig. 32 におけるインピーダンス減少とが同じ傾向を示しているため、このインピーダンスの変化が感度変化に影響を及ぼしている 1 つの要因と考えられる。しかし Fig. 29 での感度変化は時間と共に徐々に向上しているが、この原因についてはインピーダンス変化とは一致しておらず、ナトリウムとセンサー面との間の濡れなど別の原因も考えられる。

いずれにしても抵抗値は時間と共に徐々に減少しており、これは酸素ポンベが接続されているとはいえ連結が 10 m の細いパイプであるため酸素供給不足となり、圧電結晶体 (LiNbO₃) の脱酸素現象によるものとも考えられる。従ってこのタイプの検出器を実用化するためには酸素供給法を確立する必要があるが、原子炉内に酸素供給ラインを持込むのは望ましいことではないので、別のタイプの音響検出器例えば磁歪型検出器などの開発が望まれる。

3.8 原子炉でのナトリウム沸騰検出可能性評価

ナトリウム沸騰音を検出出来るかどうかの一番の問題点は流動バックグランドノイズである。この流動音の測定に関しては「もんじゅ」1/2 スケール炉容器水モデルでの測定結果⁽⁵⁾があり、それによると炉上部構造物内で流量 1650 m³/h のとき約 2 パスカル, 3580 m³/h のとき約 120 パスカルであった。沸騰音源から炉上部構造物内の検出器までの音響伝播の減衰率は同文献から約 40 dB (10

kHz 以下で) 程度であるので、今回測定された沸騰音圧約 1000 パスカルは 10 パスカルに減衰し、流動音を 120 パスカルとすると検出不可能となり、 2 パスカルとすると検出可能ということになる。流動音を測定した時の状況から流量 $3580 \text{ m}^3/\text{h}$ の時は $1650 \text{ m}^3/\text{h}$ の時とちがってボイドの混入が激しく実際の炉内の状況とは異っていると思われる所以 2 パスカルの方がより実際に近いと考えられる。ただし、この場合流速は実機の 1/4 であるため実機流速に換算すると流動によるバックグラウンドは約 8 パスカルになる可能性があり、これまで実施した最も激しい沸騰段階の沸騰音圧 10 パスカル（伝播減衰を考慮）とくらべてかろうじて沸騰の検出が可能ということになる。従って音圧レベルの比較だけでなく、沸騰の周期性の測定、複数の検出器による相関信号の検出など複数の信号処理手段による検出法が必要になると思われる。

4. 結 論

ナトリウム沸騰音検出に関する試験結果及び検討から以下のような結論が得られた。

- 1) 過飽和温度 250°C 程度までは過飽和温度の上昇につれて沸騰音圧も増大する。
- 2) 沸騰音響パルスの単位時間内発生数は過飽和温度 150°C 程度までは増加するが、それ以後は逆に減少する。
- 3) 沸騰はある周期をもって発生し、その周期は過飽和温度上昇と共に長くなり、過飽和温度約 300 °C で 0.7 秒となる。
- 4) ナトリウム沸騰による音響スペクトルは数 kHz から数 10kHz にわたっており、バックグラウンドに比較してラッパ管壁に設置した検出器では高周波側に、ナトリウムに直浸した検出器では低周波側により顕著な増加傾向がみられる。
- 5) 2 つの検出器間の信号の到達時間差を求めるための相互相関法では前もってスムージング処理することが必要である。
- 6) ラッパ管壁に設置した検出器にはナトリウム中検出器とちがってラッパ管の熱変形によるエクステンションとも考えられる別の音響信号が沸騰に先立って見られるため到達時間差を求める時には注意を要する。
- 7) 過飽和温度約 300°Cまでの試験において、最大沸騰音圧は約 1000 パスカルである。
- 8) ボイド率 2.5%までのアルゴンガス注入によって得られる音圧は約 5 パスカルであり、ラッパ管に伝わる流動ノイズはボイドによって逆に減少する。
- 9) ナトリウム直浸圧電型音響検出器 (LiNbO_3) の検出感度はナトリウム温度や使用時間によって約 20 dB 程度変化するが使用開始後約 1700 時間経過してほぼ 5 dB 程度の減少で安定している。しかし、導通抵抗は徐々に減少し続けており、酸素供給法 (LiNbO_3 の高温中の脱酸素現象防止のため) に問題が残っている。
- 10) 過飽和温度 250°C 程度の沸騰が激しくなった段階では、ナトリウム沸騰音レベルと流動ノイズレベルとのレベル比較によって沸騰検出が可能と考えられるが、沸騰初期においては沸騰の周期性や複数の検出器間の相關性等も合わせた方法が必要になると思われる。

5. 謝 辞

本試験を実施するにあたり、FBR開発本部機器ブロックリーダ深田富啓主任研究員、宇野修研究員、高速炉機器開発部厚母栄夫部長、高荷智部長代理、高速炉安全工学部三本保秀部長、高速炉工学室井口達郎室長その他多くの方々に御指導御助言をいただきました。

また試験ループの準備、運転等において現高速炉工学室の山口勝久副主任研究員、磯崎正氏、東興機械(株)、常陽産業(株)の方々に、データの解析・評価において東京工業大学の小林健二氏、高速実験炉技術課庄野彰研究員、その他検査開発(株)や大洗計算センターの方々には多大の御助言、御協力をいただきました。

ここにあらためて感謝の意を表します。

6. 参 考 文 献

- 1) E. J. Burton et al: Summary Report of Specialists' Meeting on Sodium Boiling Noise Detection, IWGFR/40 (1981)
- 2) 安田 力他：高速炉異常検出系の設計評価に関する研究—炉内音響伝播解析(Ⅳ)—, SJ 261 82-01
- 3) 吉川栄和：異常診断のための雑音解析ソフトウェアシステム NOISA, N 241 75-20
- 4) 羽賀一男他：高速炉炉心局所事故実験結果の総合評価(2)—局所閉塞炉外実験の解析と実機への適用—, SN 941 83-151
- 5) 安田 力他：高速炉異常検出系の設計評価に関する研究—炉内音響伝播解析(Ⅲ) —, SJ 261 81-01

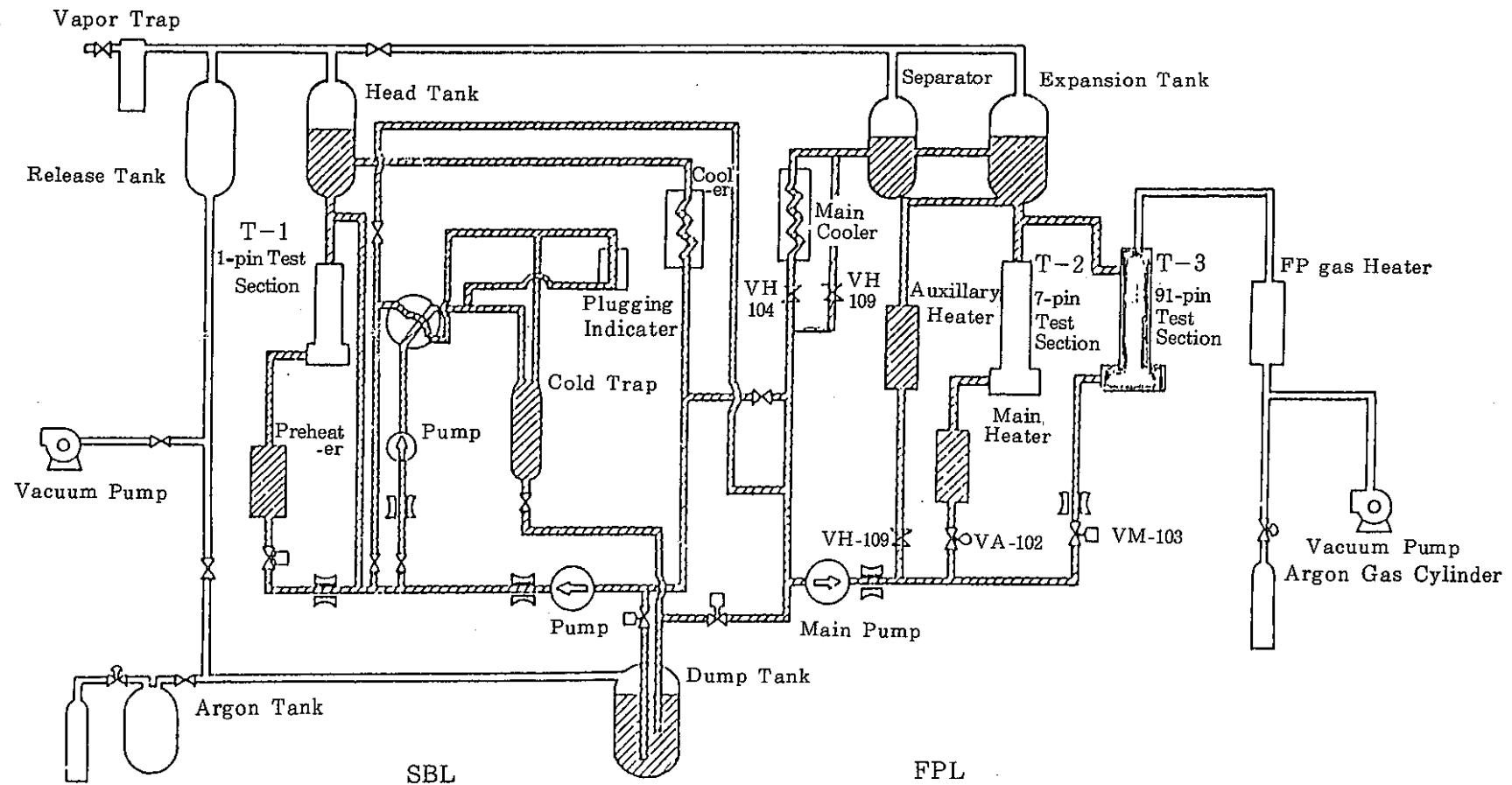


Fig. 1 ナトリウム過渡沸騰燃料破損伝熱試験装置

Flow Diagram of Sodium Boiling Test Loop & Fuel Failure
Propagation (SIENA)

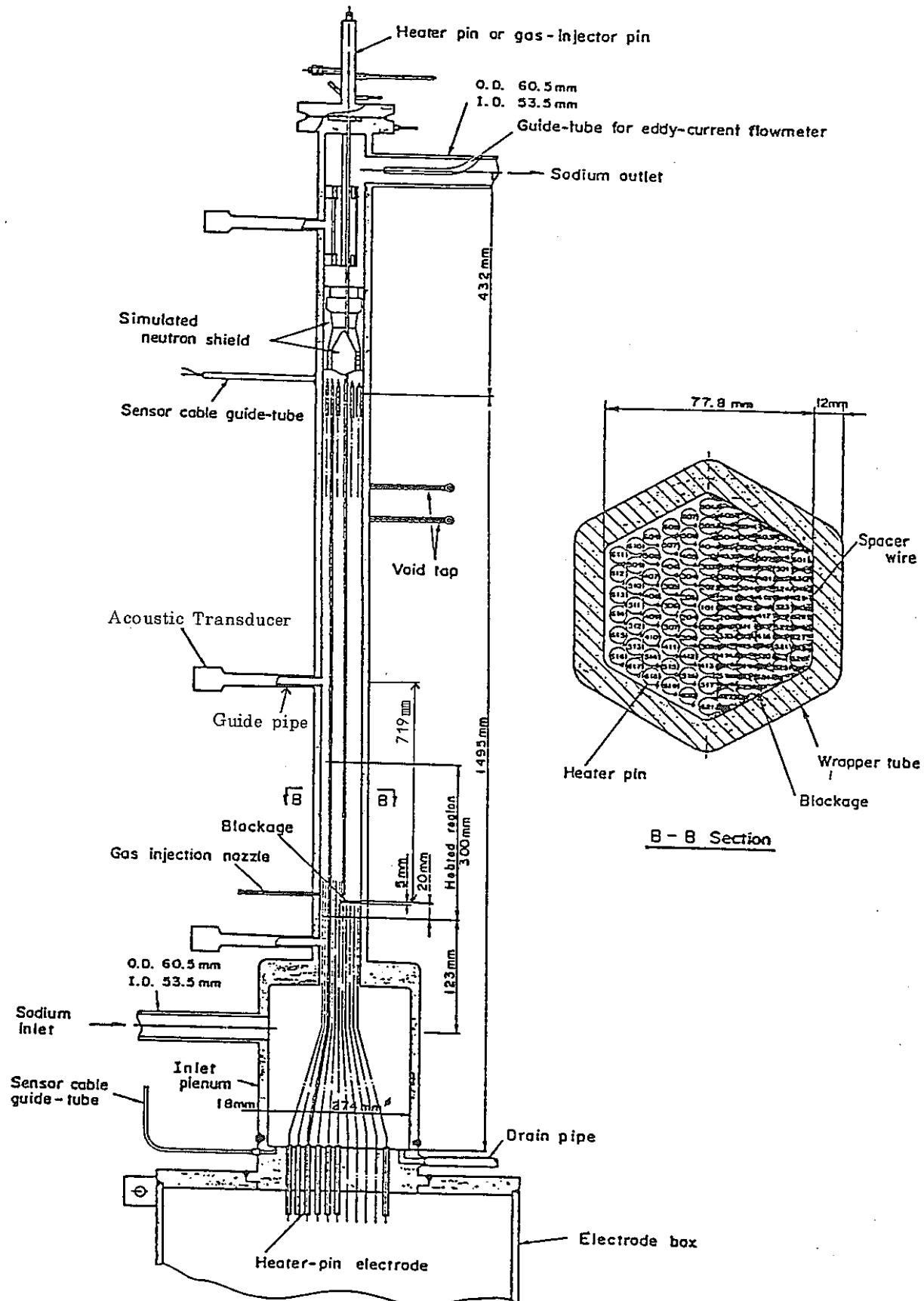


Fig. 2 局所閉塞 91 ピンバンドルテストセクション (91A)

Local Blockage 91-Pin Bundle Test Section (91A)

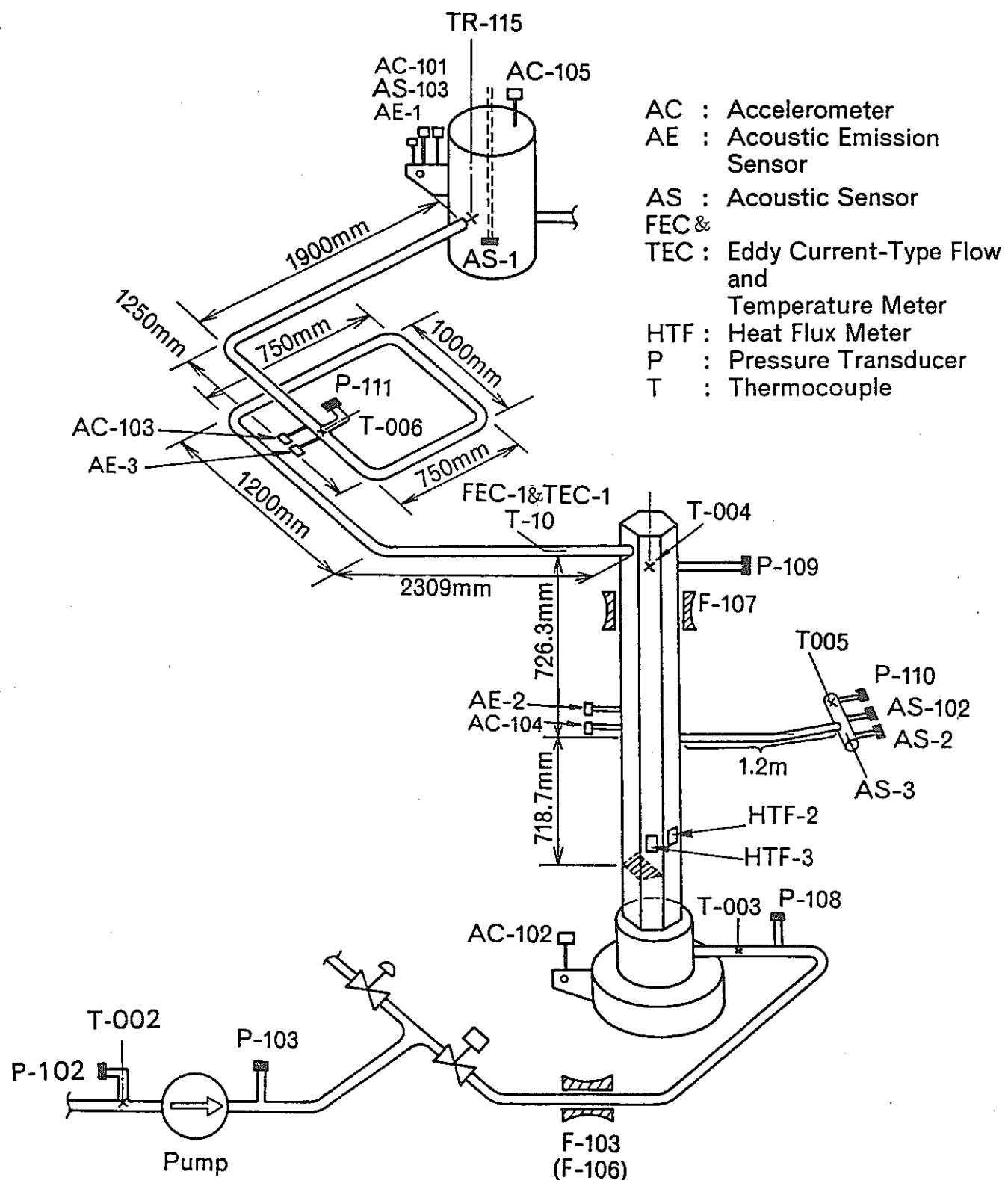


Fig.3 検出器の 91 テストセクション囲りへの設置状況

Instrument Sensor Locations around 91 A Test Section

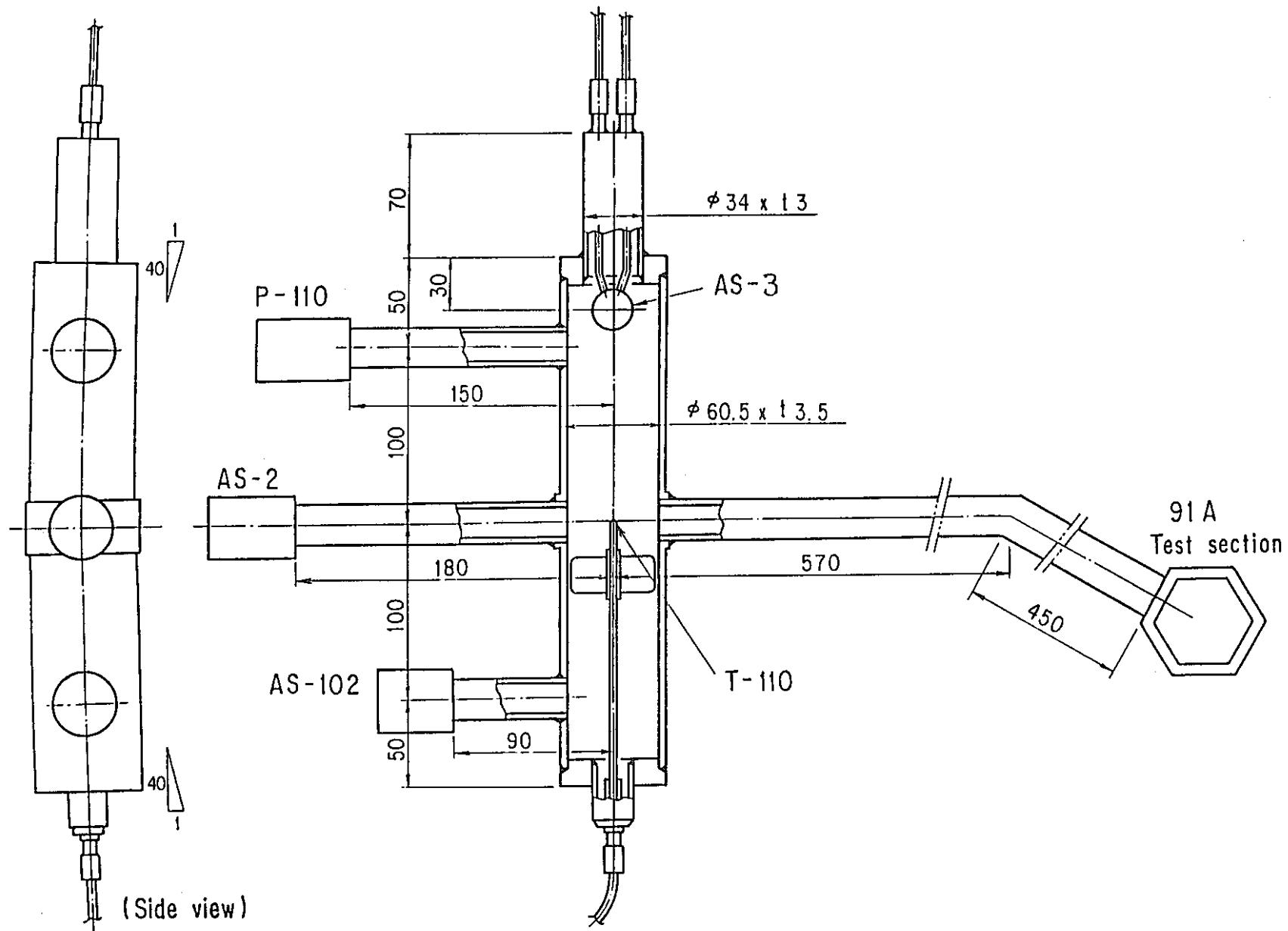


Fig. 4 音響検出器の91A テストセクションバンドル部への設置状況

Schematic Diagram of Acoustic Sensor Installation at the Bundle Section of 91 A

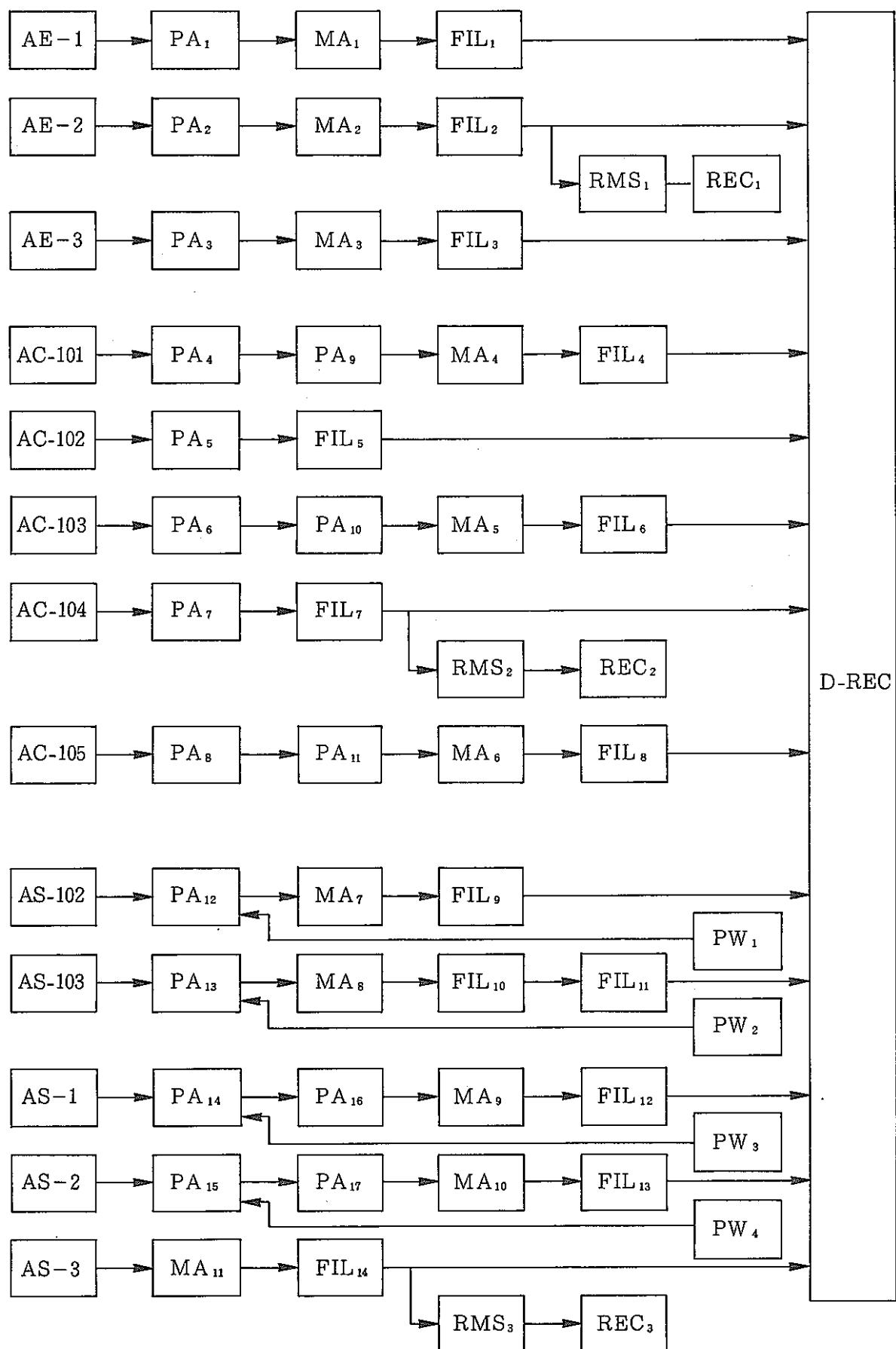


Fig. 5

ナトリウム沸騰音測定系ブロックダイアグラム

Block Diagram of Sodium Boiling Acoustic Detection System

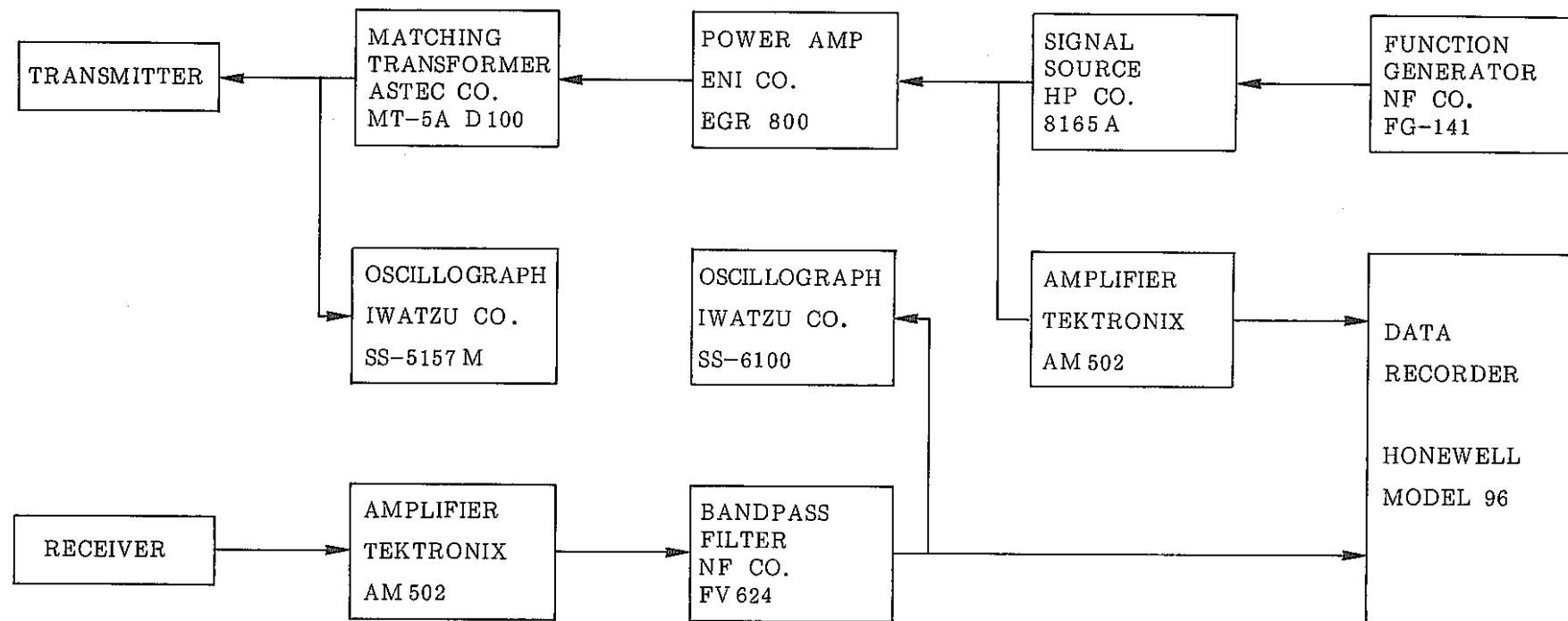


Fig. 6 ナトリウム沸騰模擬音送受波系ブロックダイアグラム

Block Diagram of Transmitting and Receiving System of Sodium
Boiling Imitation Sound

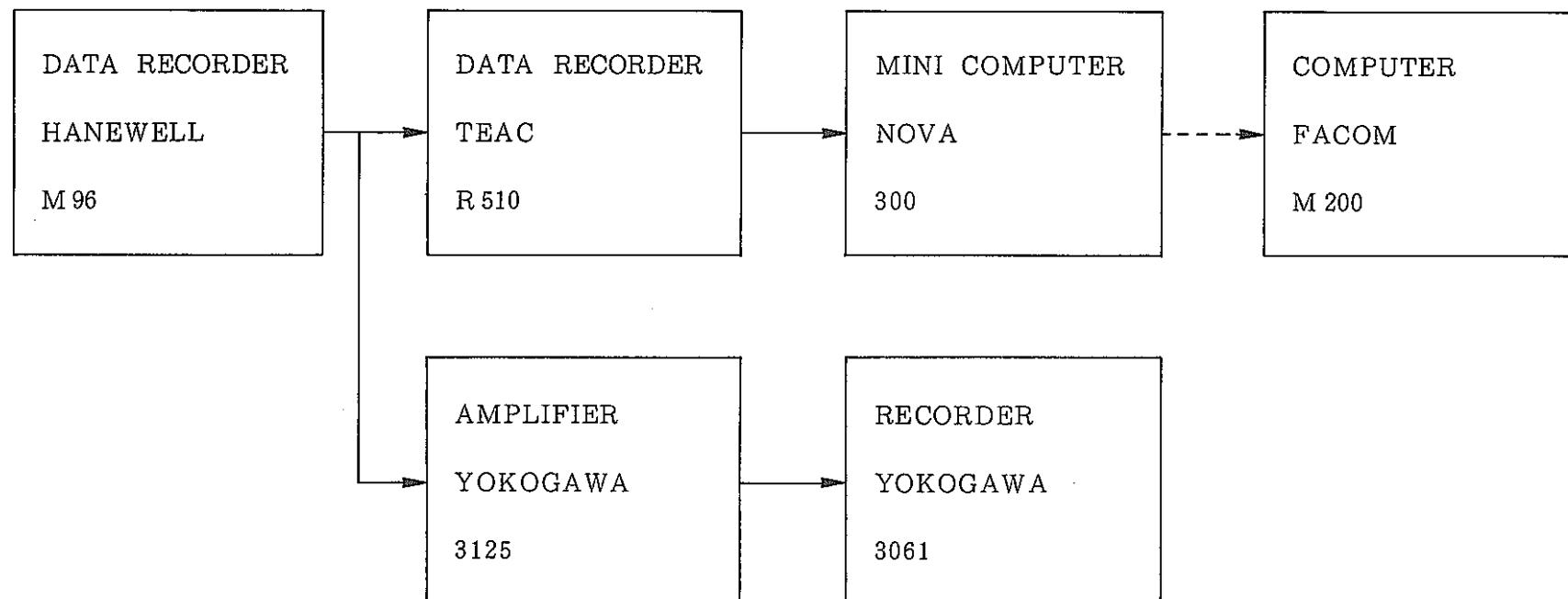


Fig.7 信号処理系ブロックダイアグラム

Block Diagram of Signal Processing

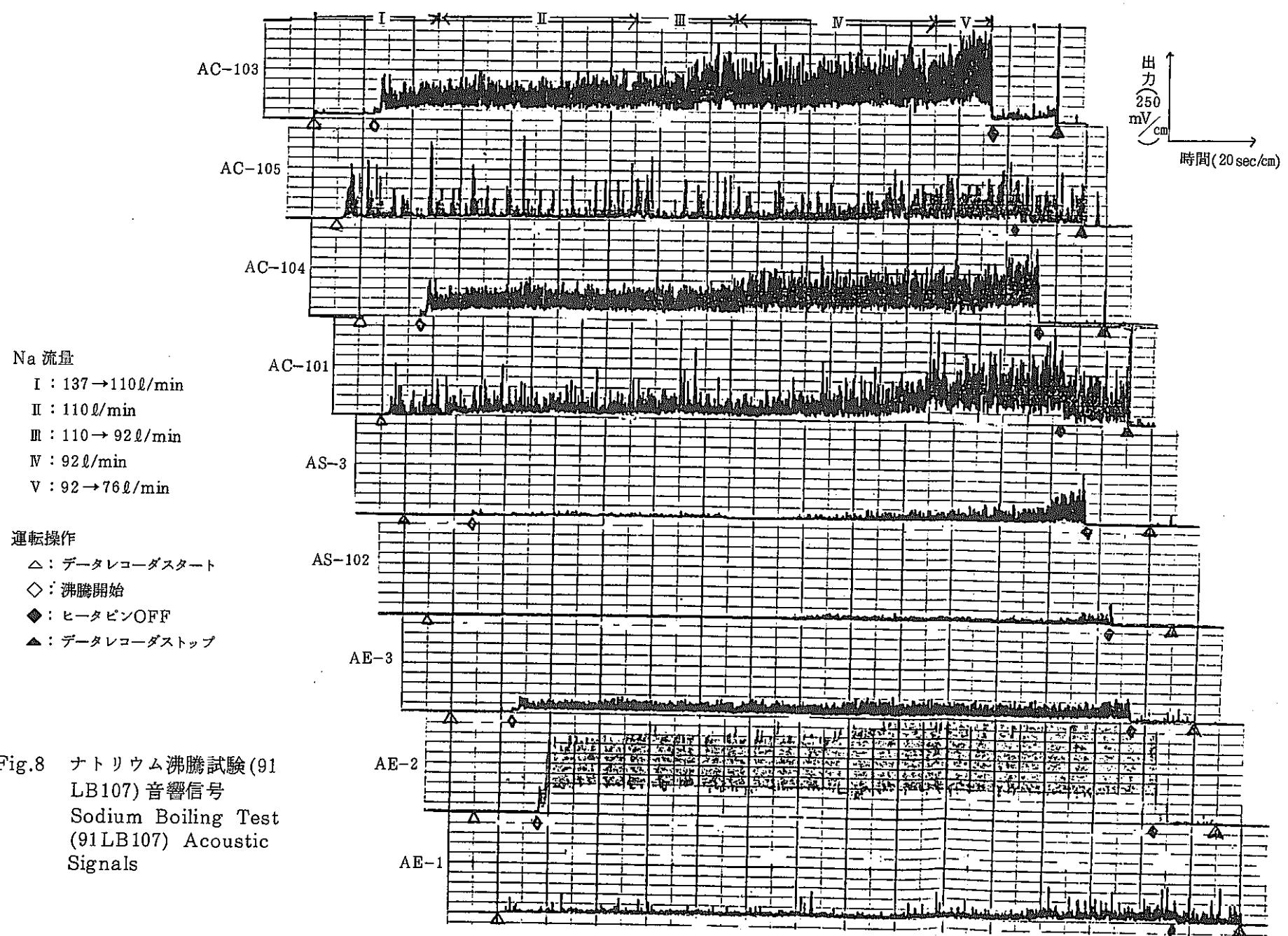


Fig.8 ナトリウム沸騰試験(91 LB107) 音響信号
Sodium Boiling Test (91LB107) Acoustic Signals

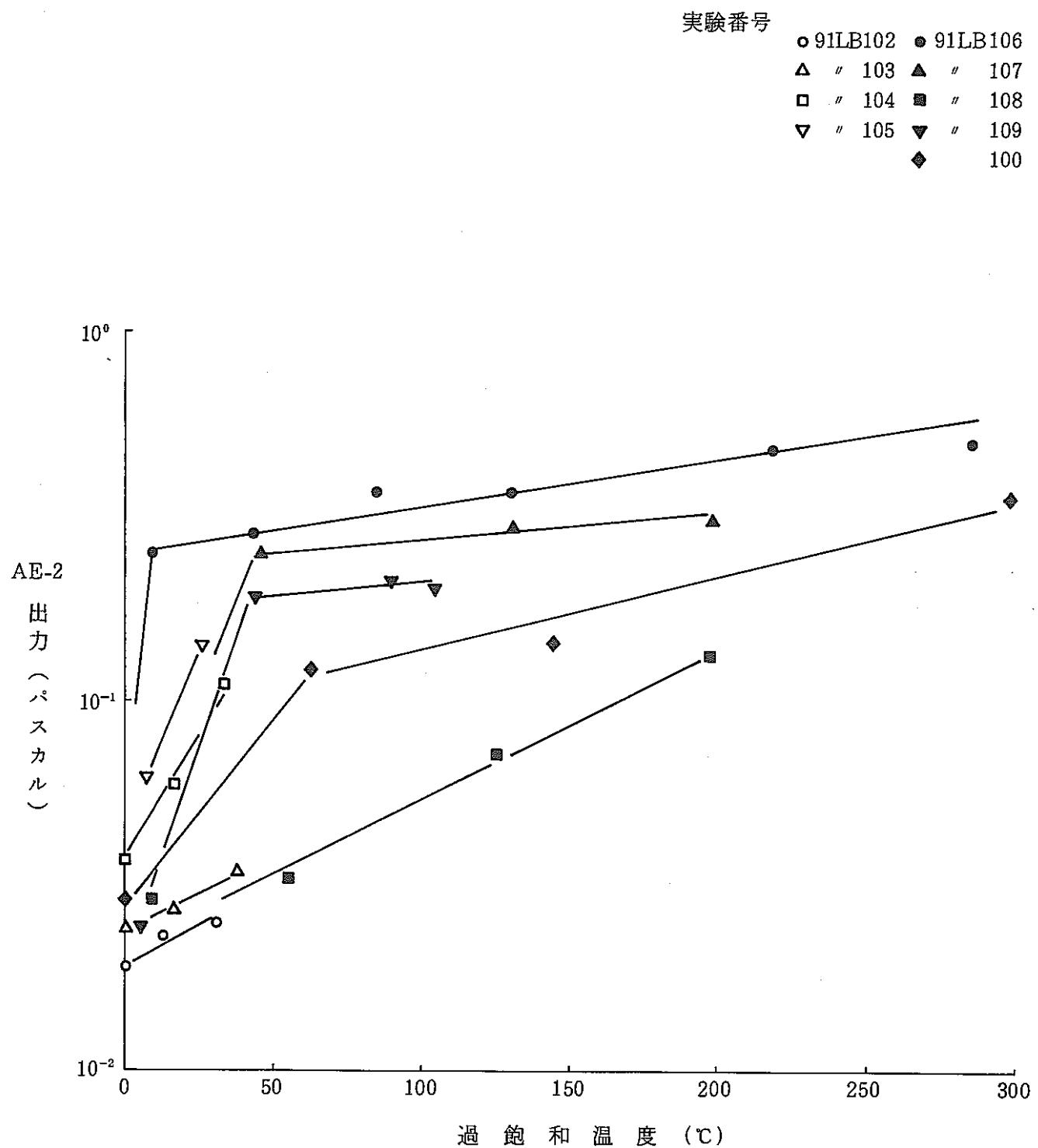


Fig. 9 音響信号レベルの過飽和温度依存性(1)

Dependence of Acoustic Signal Level on Theoretical Excess Temperature(1)

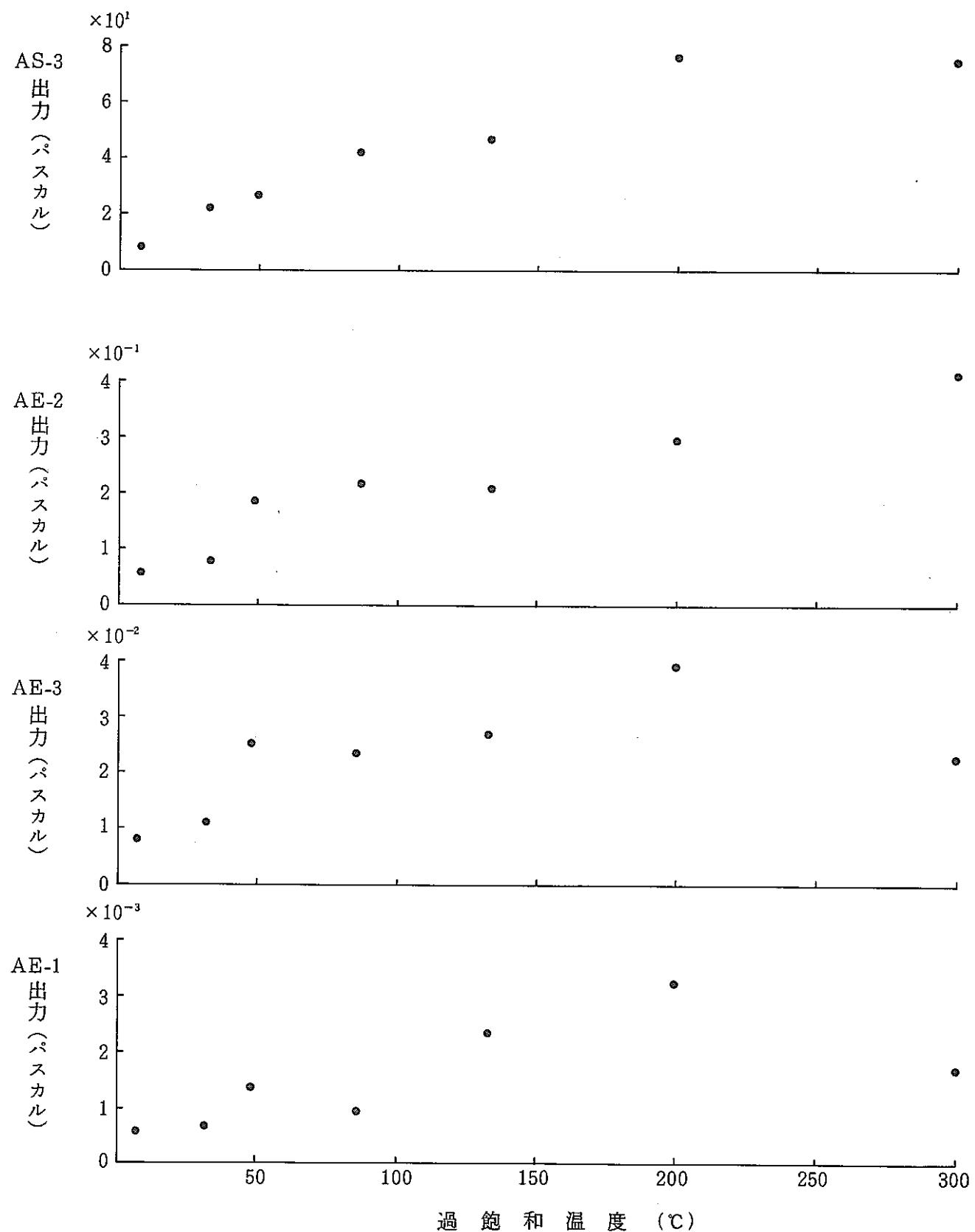


Fig.10 音響信号レベルの過飽和温度依存性(2)

Dependence of Acoustic Signal Level on Theoretical Excess Temperature(2)

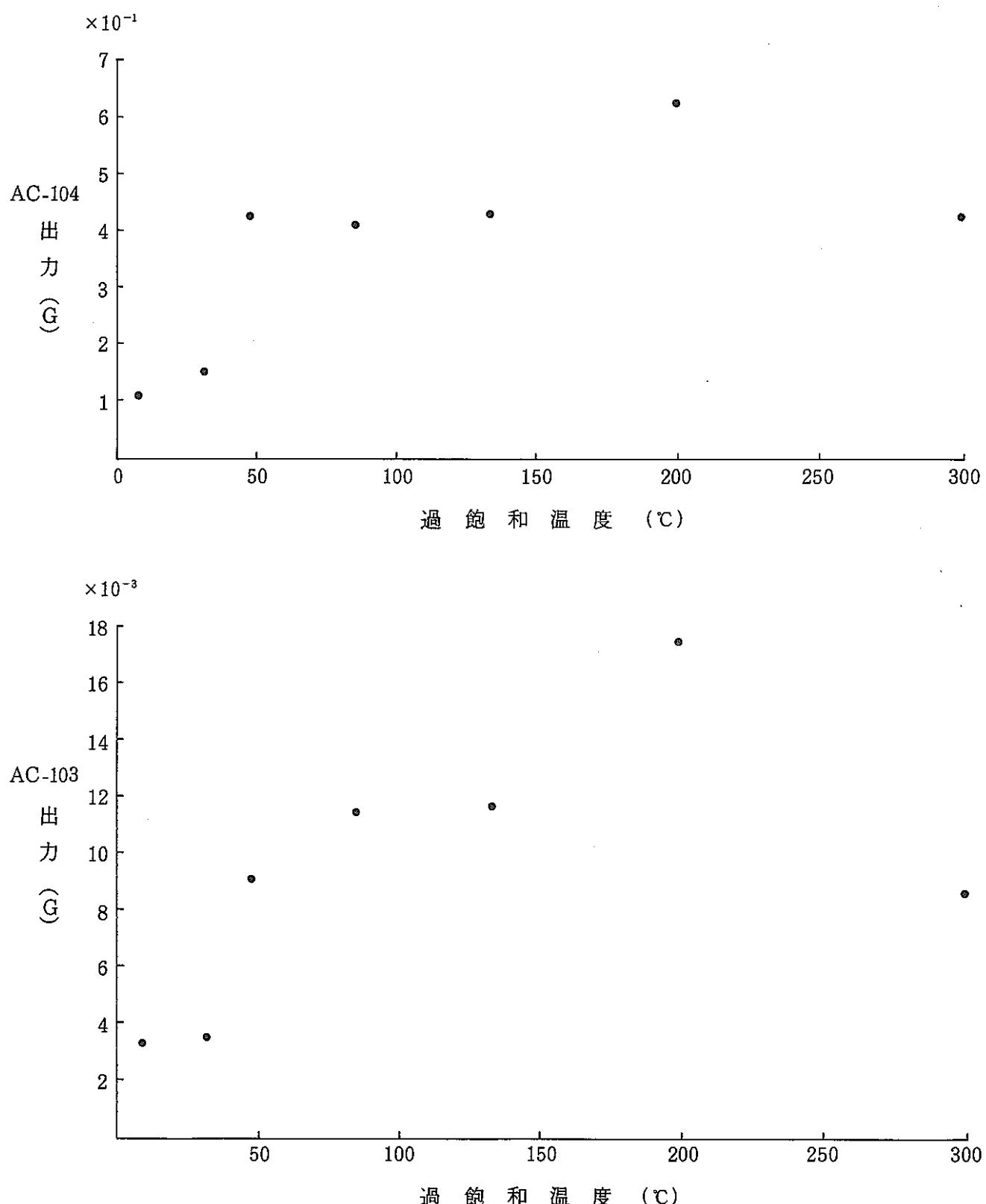


Fig.11 音響信号レベルの過飽和温度依存性(3)

Dependence of Acoustic Signal Level on Theoretical Excess Temperature (3)

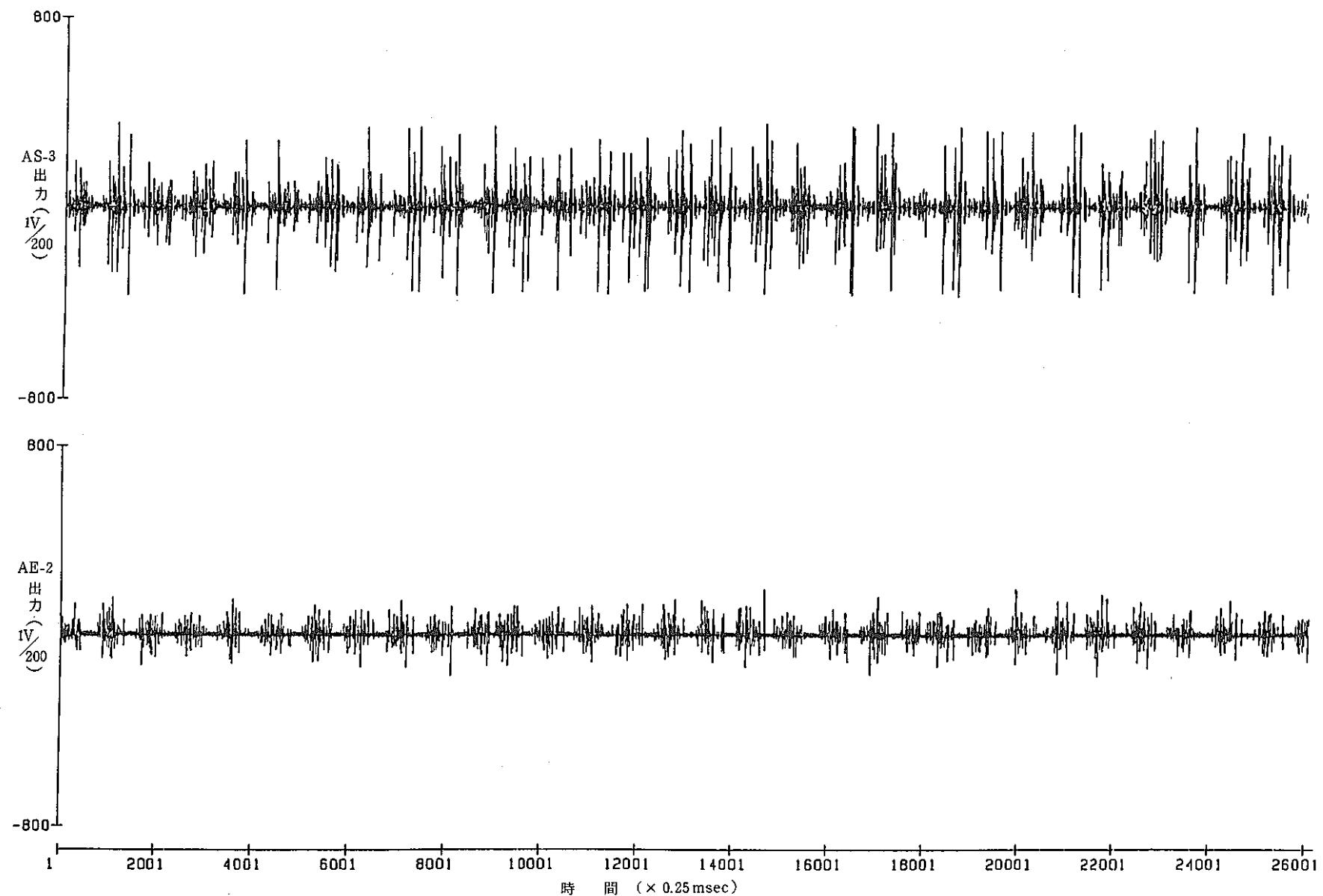


Fig. 12 ナトリウム沸騰試験 (91 LB 106) 音響信号(1)

Sodium Boiling Test (91 LB 106) Acoustic Signals(1)

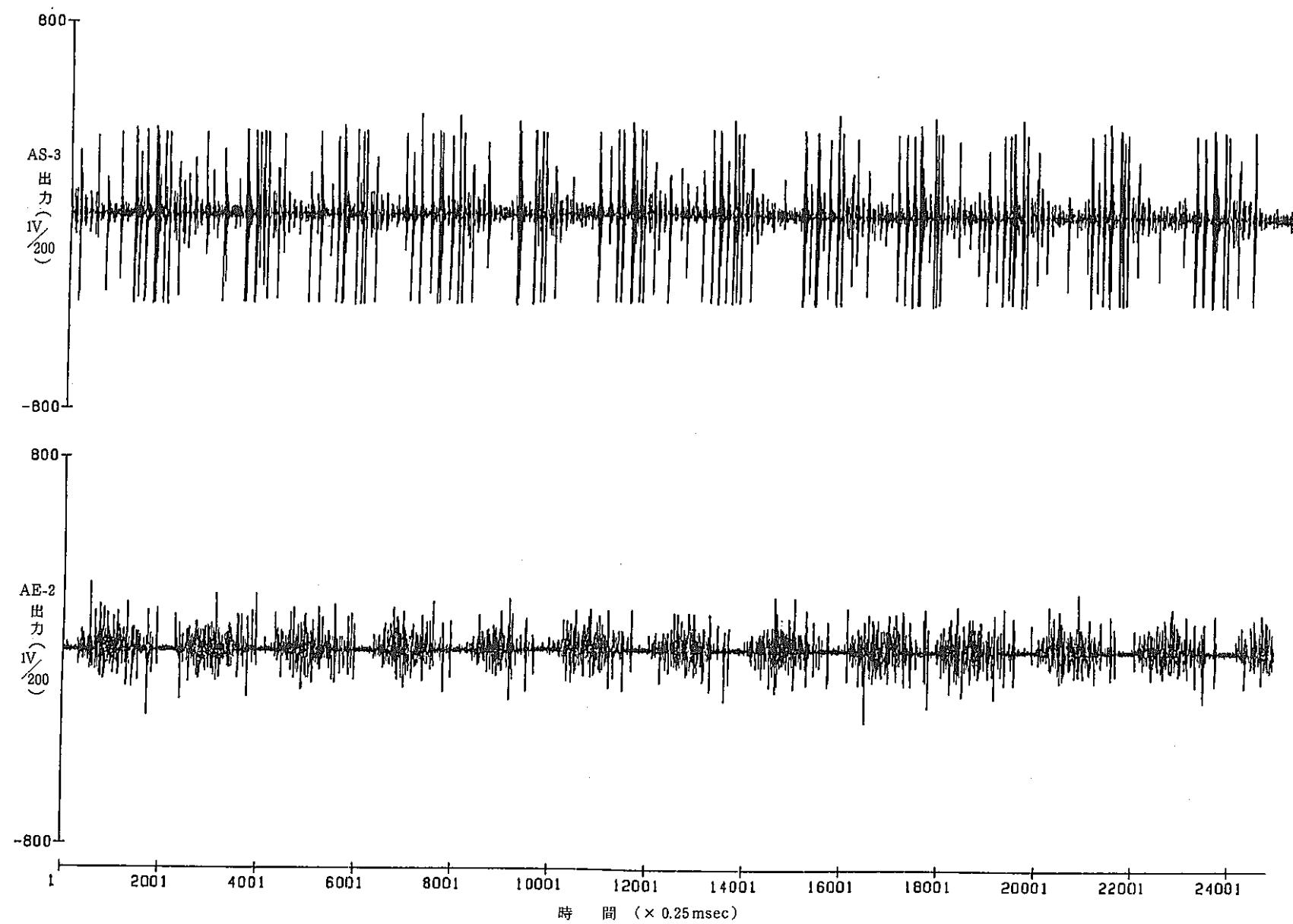


Fig.13 ナトリウム沸騰試験 (91 LB 106) 音響信号(2)
Sodium Boiling Test (91 LB 106) Acoustic Signals(2)

沸騰ステップ1

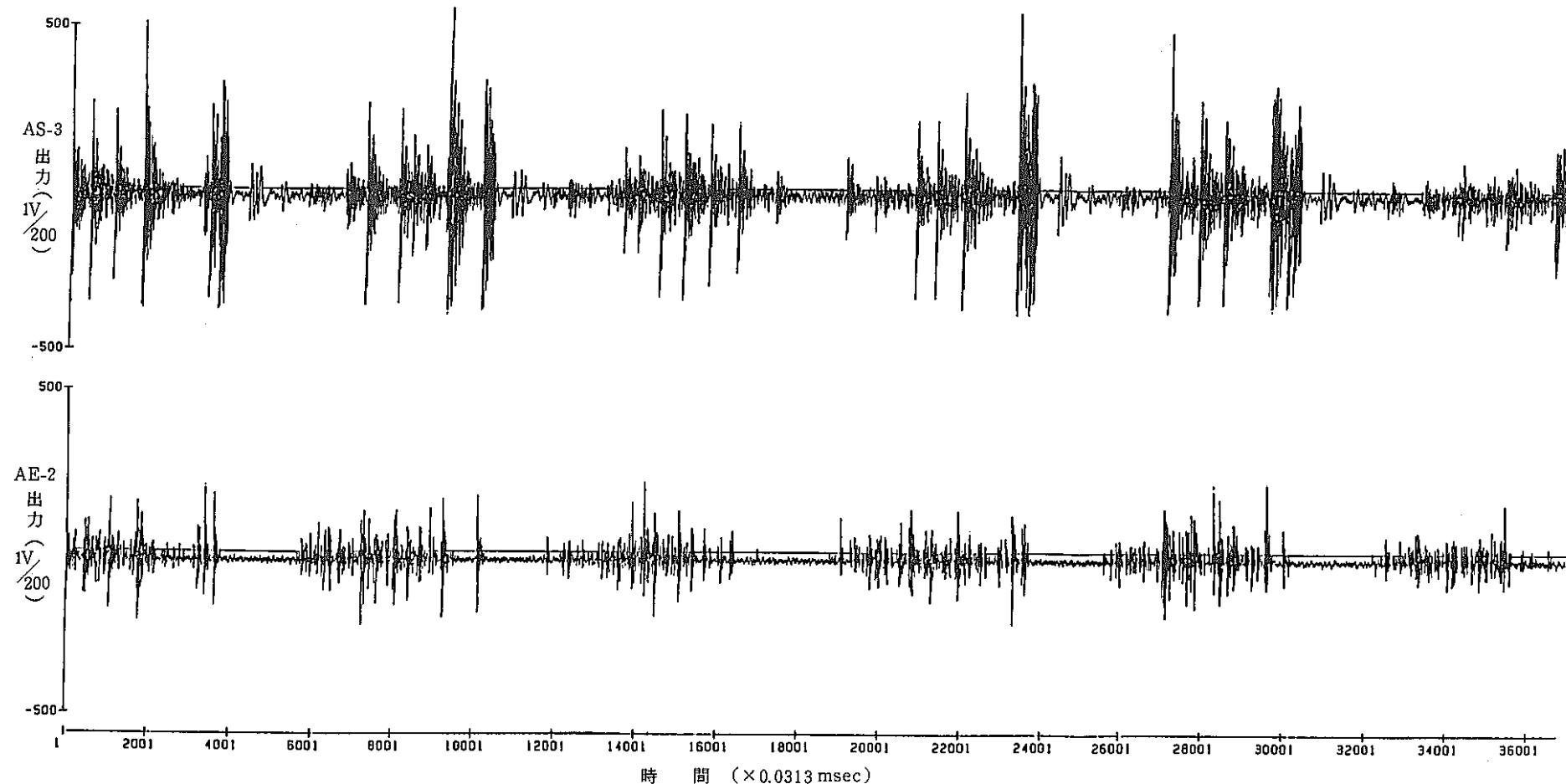


Fig.14 ナトリウム沸騰試験(91 LB 106) 音響信号(3)

Sodium Boiling Test (91 LB 106) Acoustic Signals(3)

沸騰ステップ 6

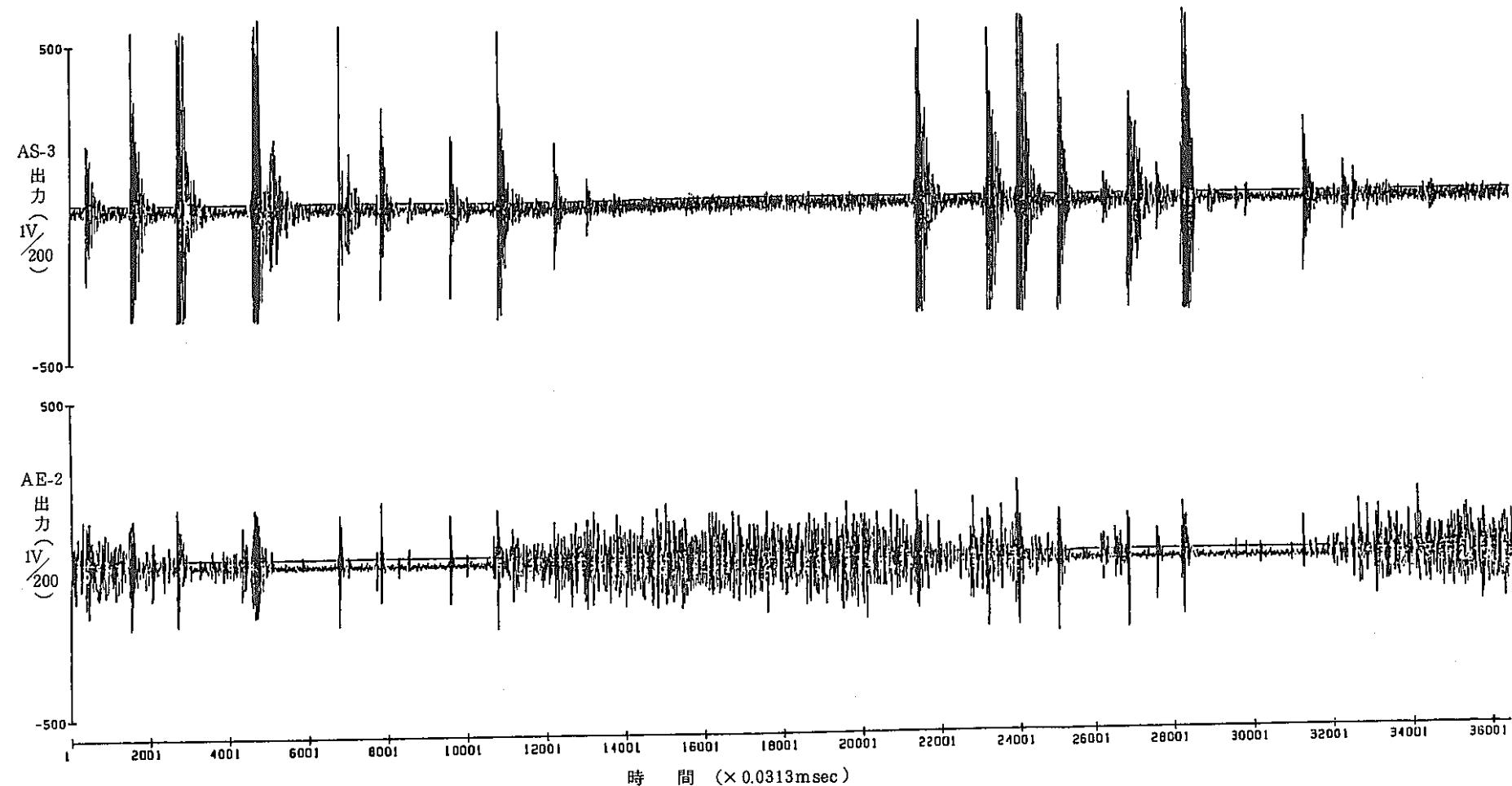


Fig.15 ナトリウム沸騰試験 (91 LB 106) 音響信号(4)

Sodium Boiling Test (91 LB 106) Acoustic Signals(4)

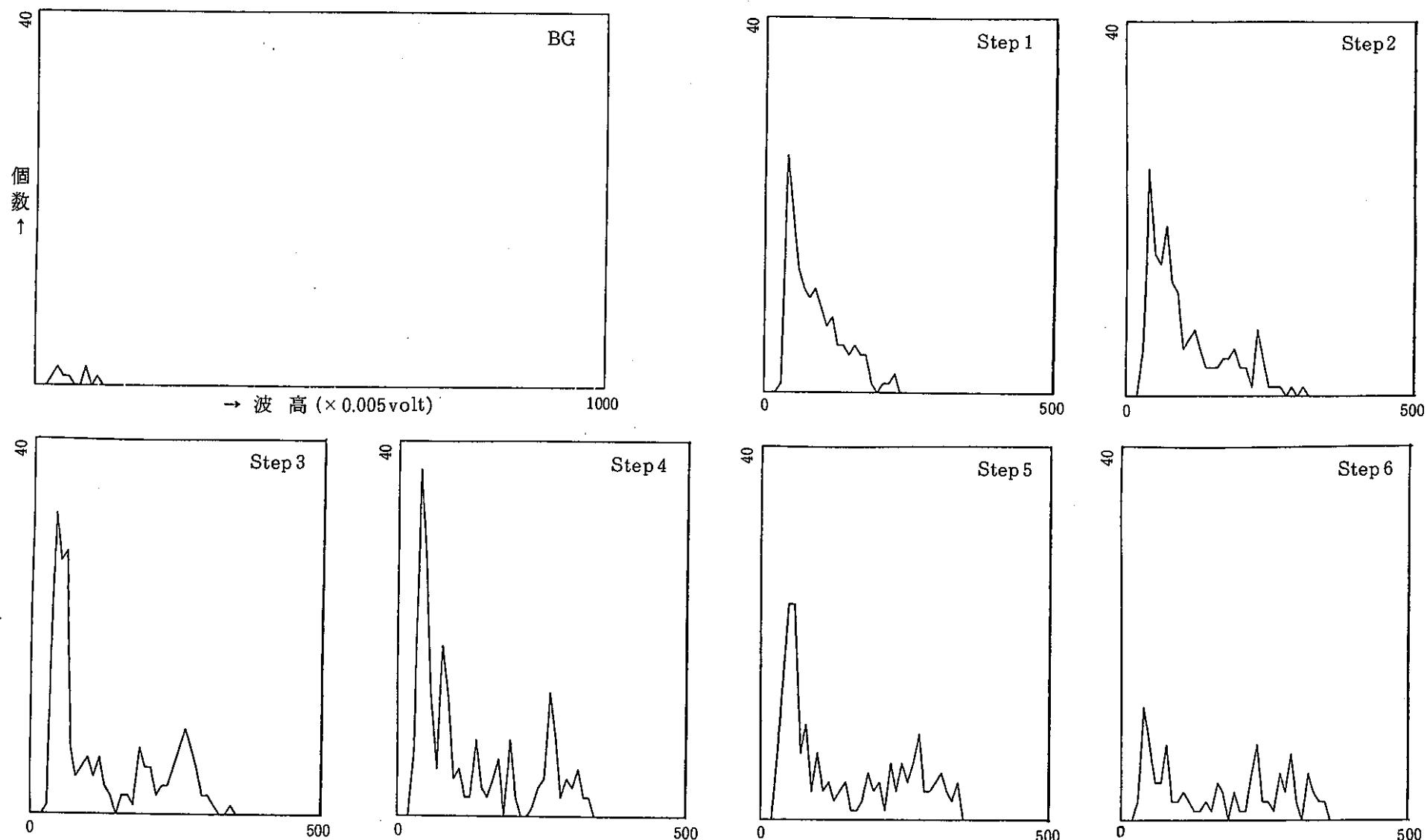


Fig.16 音響検出器 AS-3 による沸騰音響信号波高分布 (91 LB 106)

Acoustic Signal Pulse Height Distribution with Sensor AS-3 (91 LB 106)

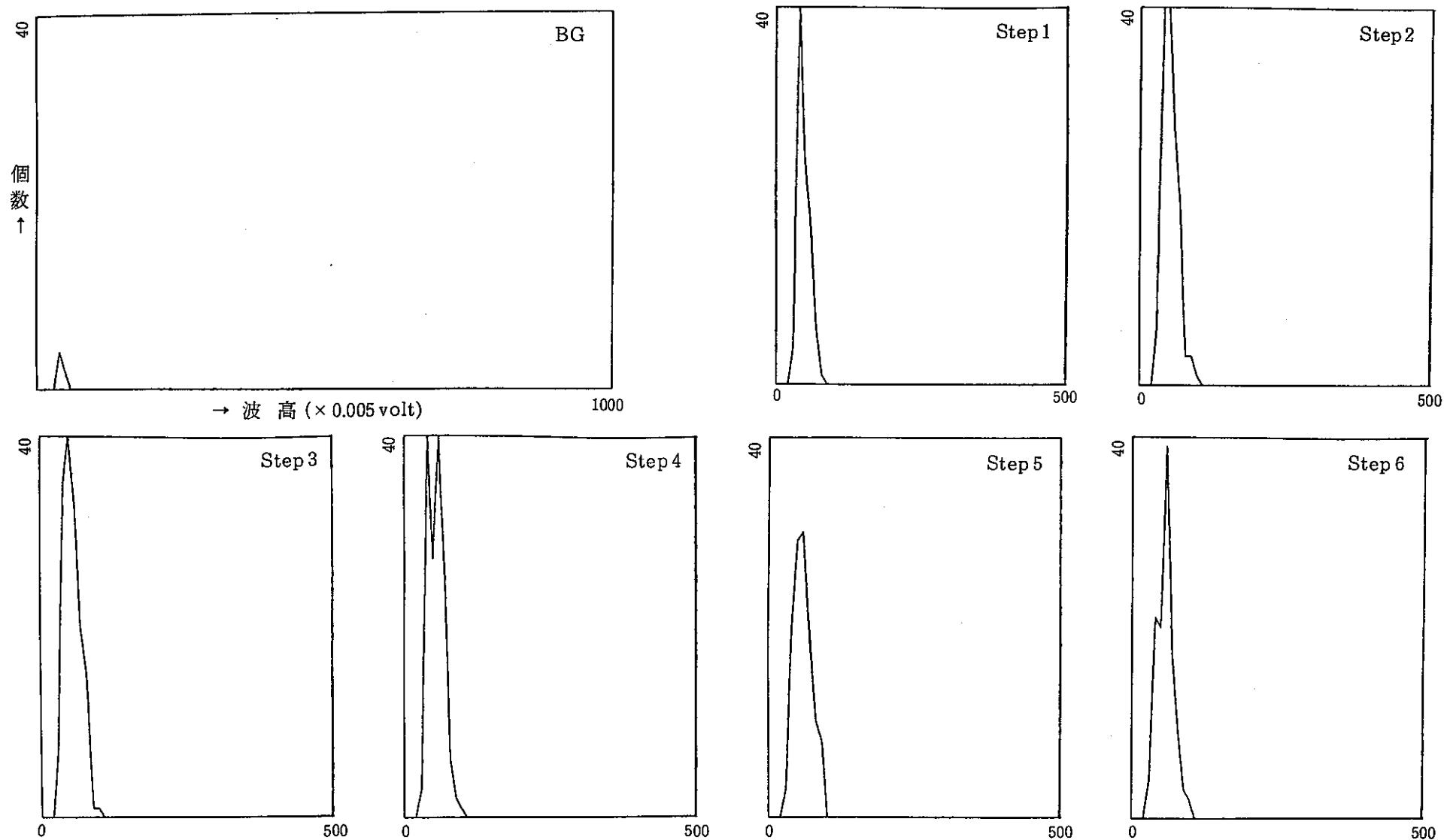


Fig.17 音響検出器 AE-2 による沸騰音響信号波高分布 (91 LB 106)

Acoustic Signal Pulse Height Distribution with Sensor AE-2 (91 LB 106)

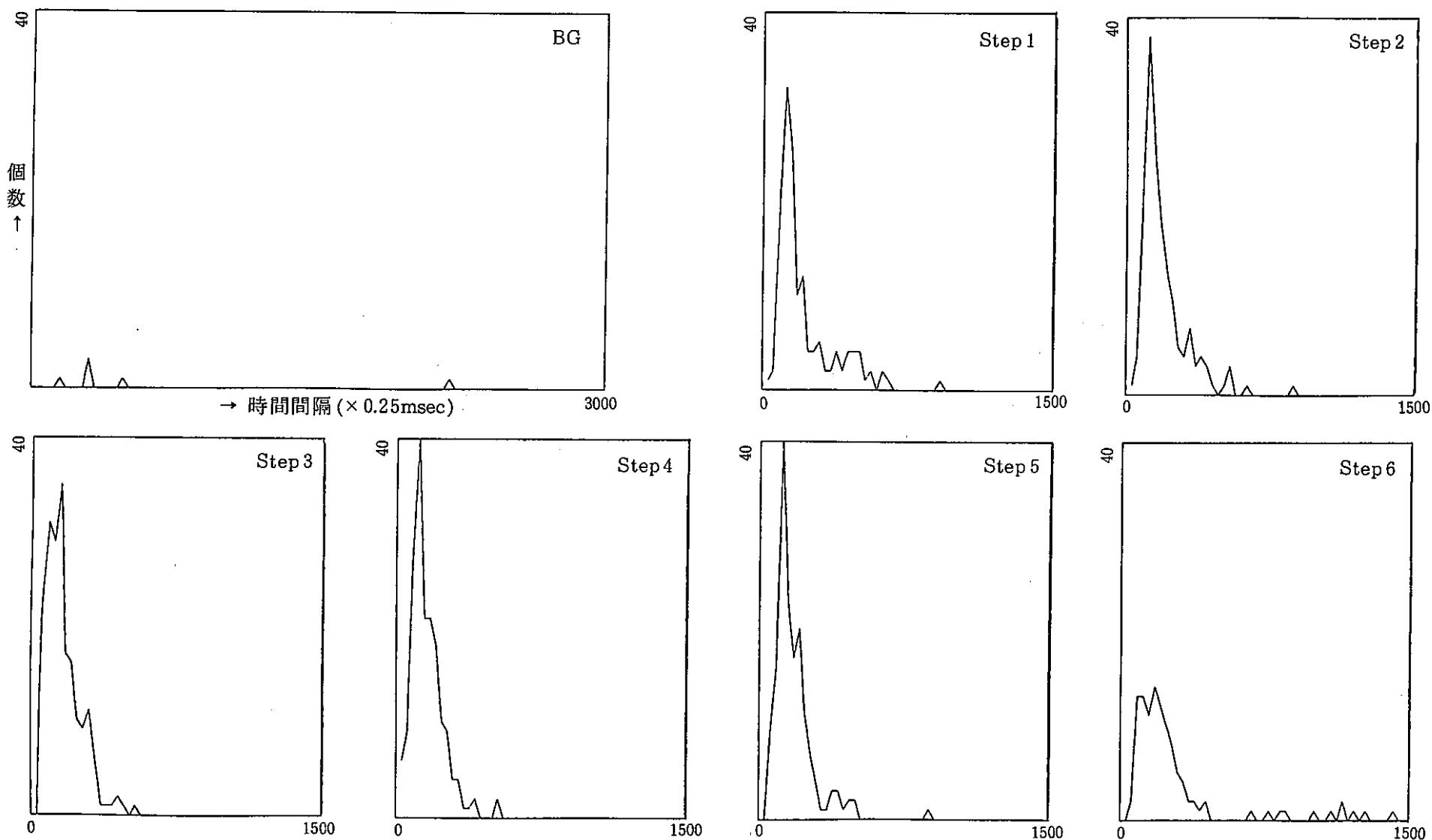


Fig. 18 音響検出器 AS-3 による沸騰音響信号時間分布 (91 LB 106)

Acoustic Signal Time Interval Distribution with Sensor AS-3 (91LB 106)

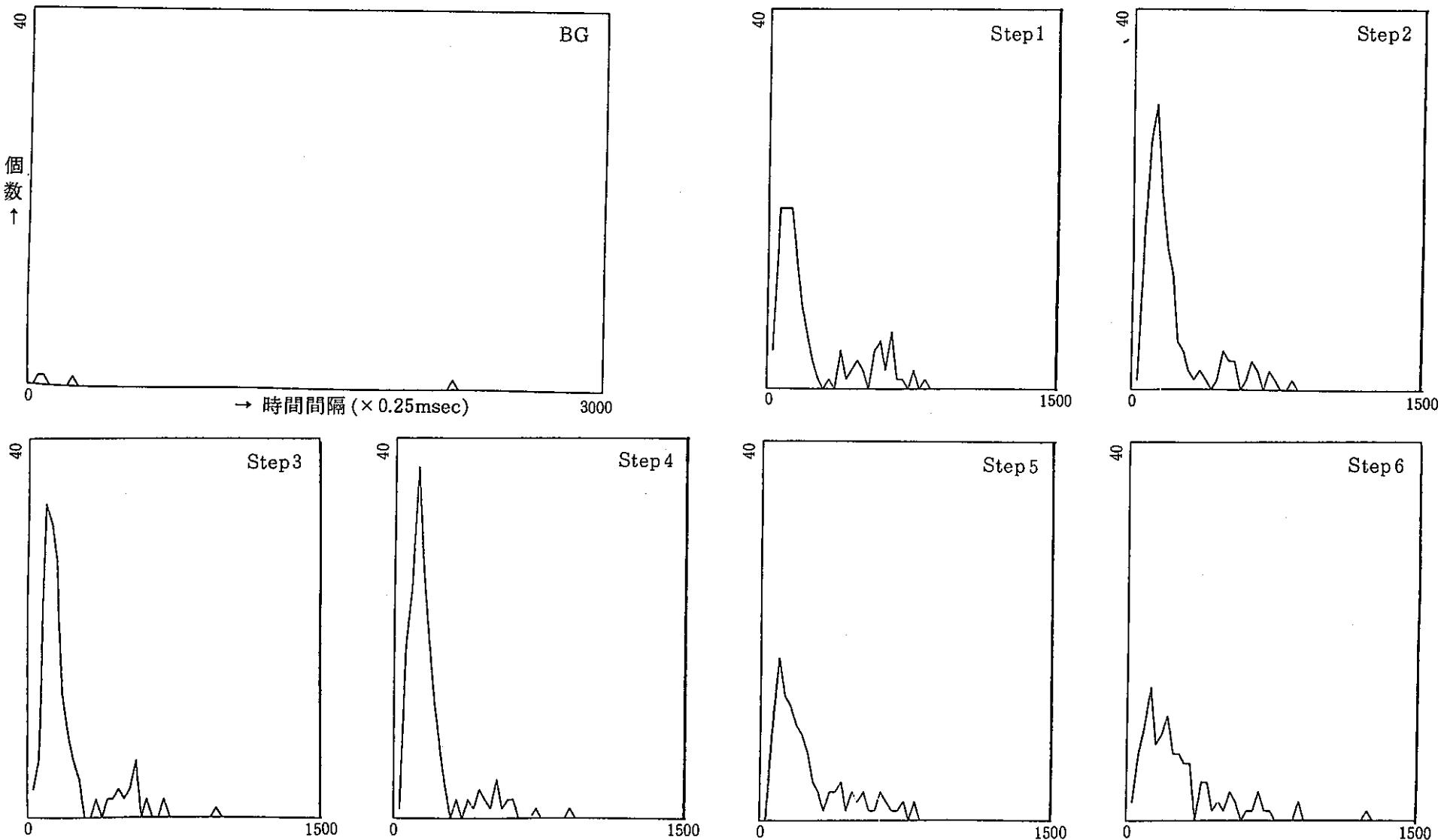


Fig.19 音響検出器 AE-2による沸騰音響信号時間分布 (91 LB 106)

Acoustic Signal Time Interval Distribution with Sensor AE-2 (91 LB 106)

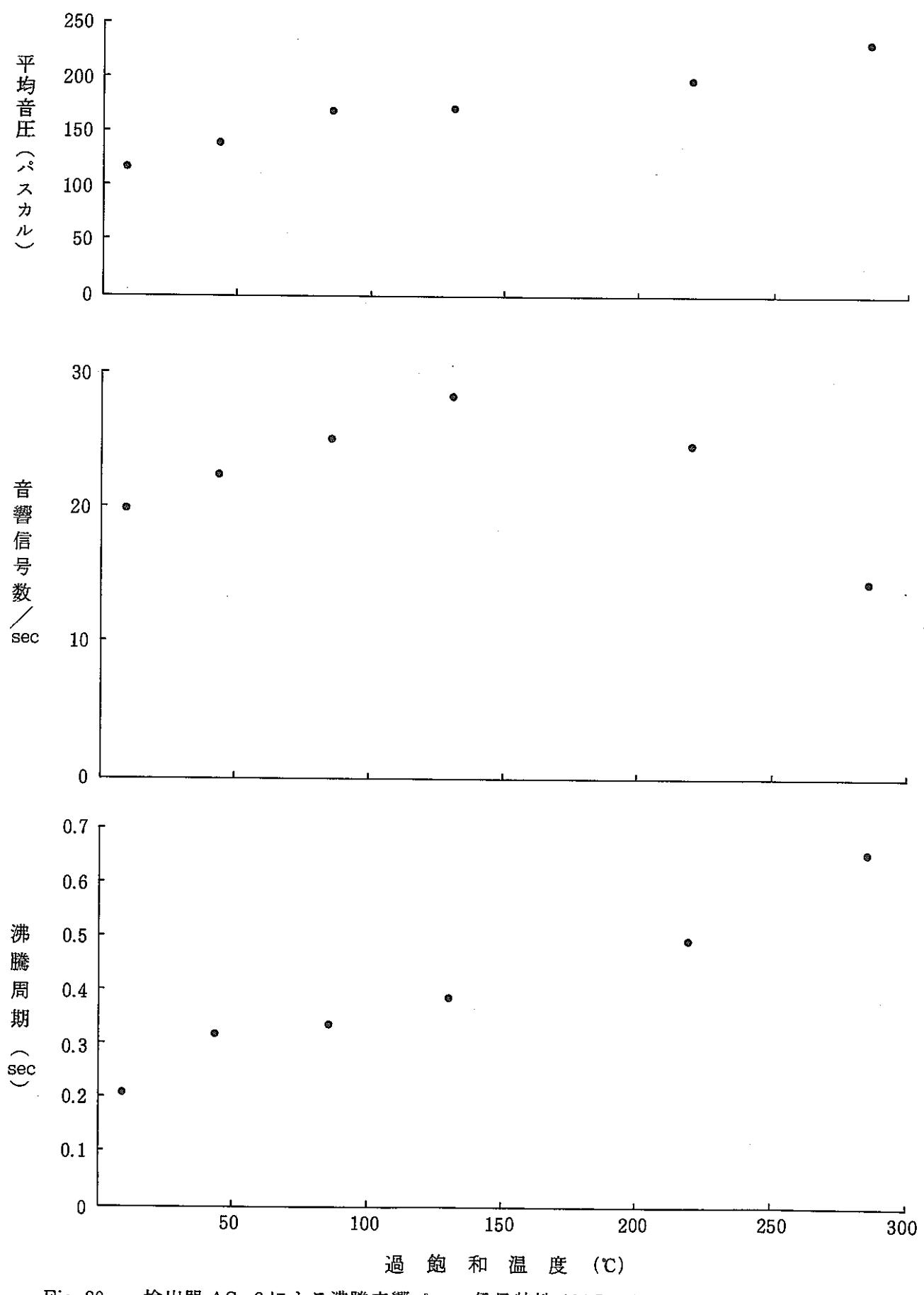


Fig. 20 検出器 AS-3による沸騰音響パルス信号特性 (91 LB 106)

Characteristic of Acoustic Pulse Signals with Sensor AS-3 (91 LB 106)

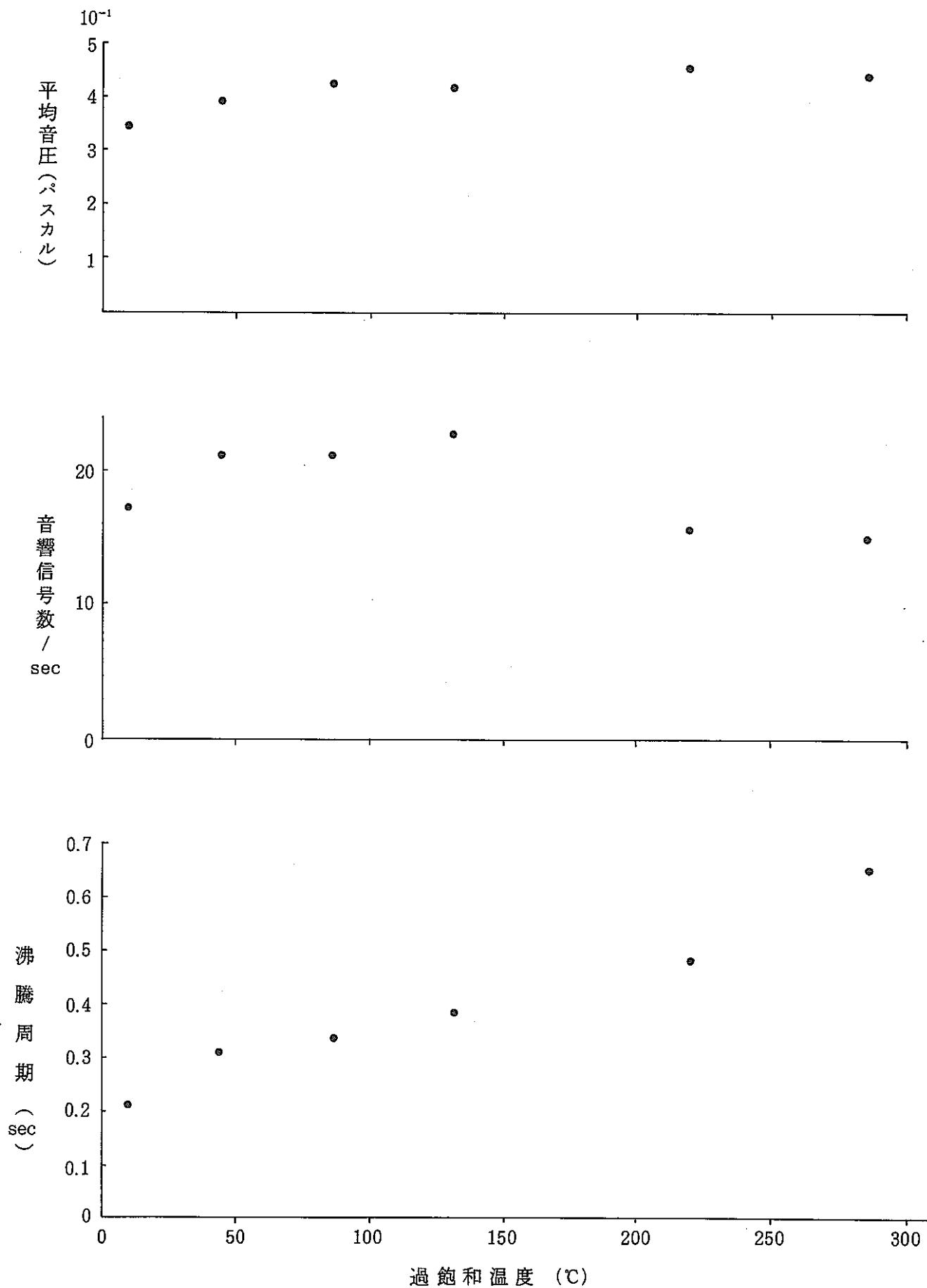


Fig. 21 検出器 AE-2による沸騰音響パルス信号特性 (91 LB 106)

Characteristic of Acoustic Pulse Signals with Sensor AE-2 (91 LB 106)

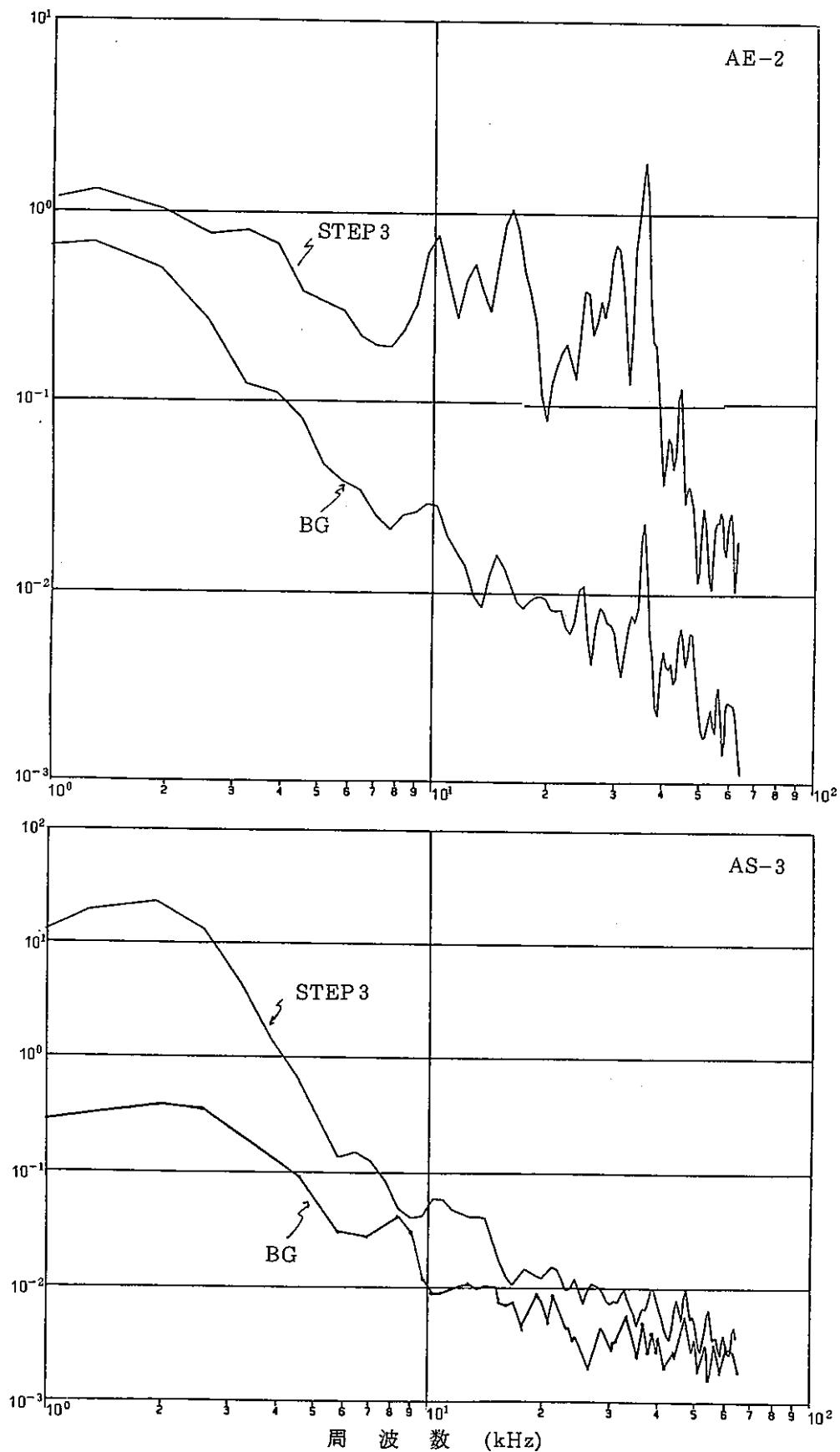


Fig. 22 ナトリウム沸騰試験(91 LB 104)における音響信号周波数スペクトル(1)
Acoustic Signal Frequency Spectrum on Sodium Boiling Test(91 LB 104) (1)

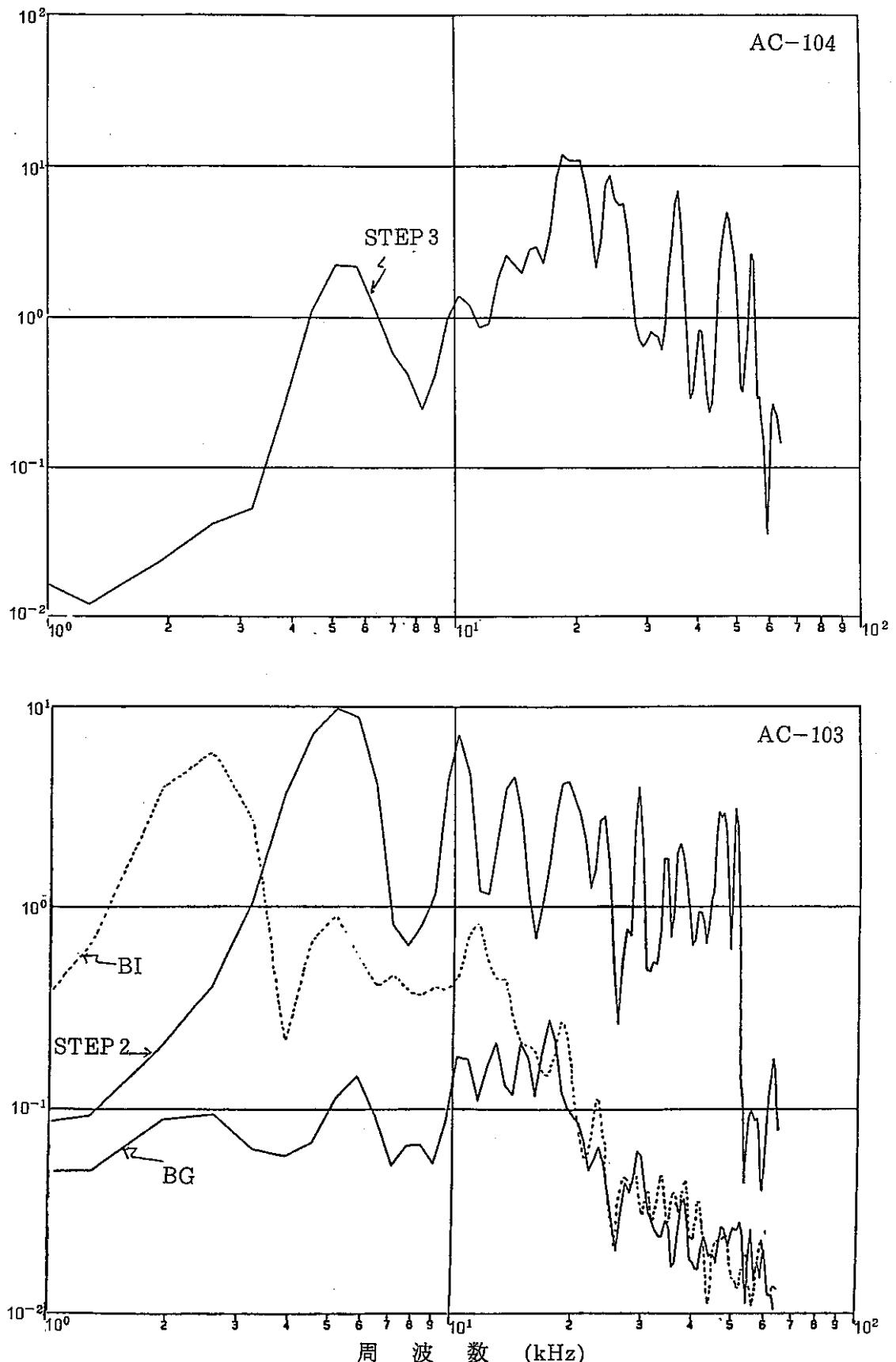


Fig.23 ナトリウム沸騰試験(91 LB 104)における音響信号周波数スペクトル(2)
Acoustic Signal Frequency Spectrum on Sodium Boiling Test (91 LB 104) (2)

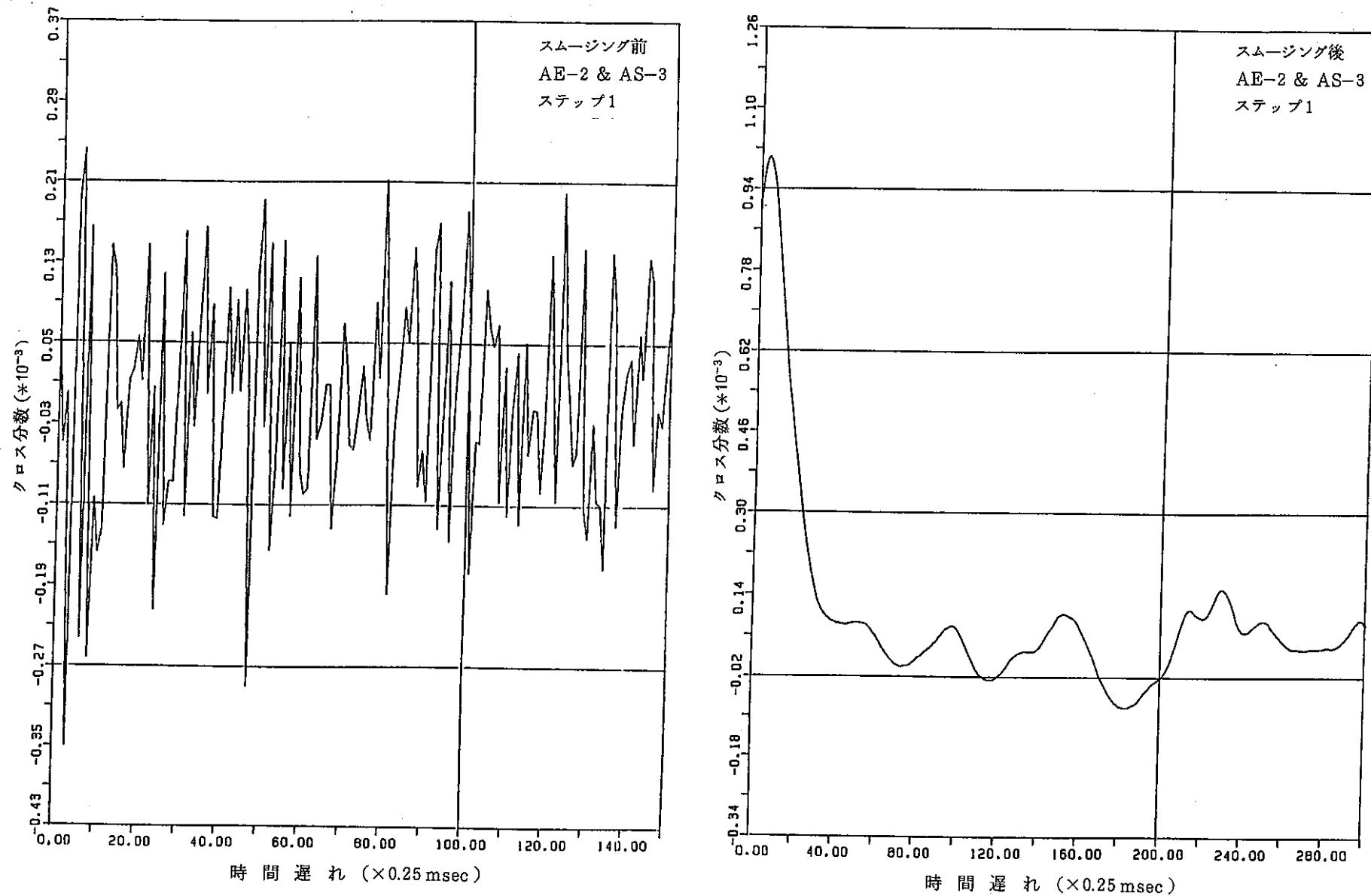


Fig.24 ナトリウム沸騰試験 (91 LB 104) における音響信号相互相関 (1)
Acoustic Signals Cross Correlation on Sodium Boiling Test (91 LB 104) (1)

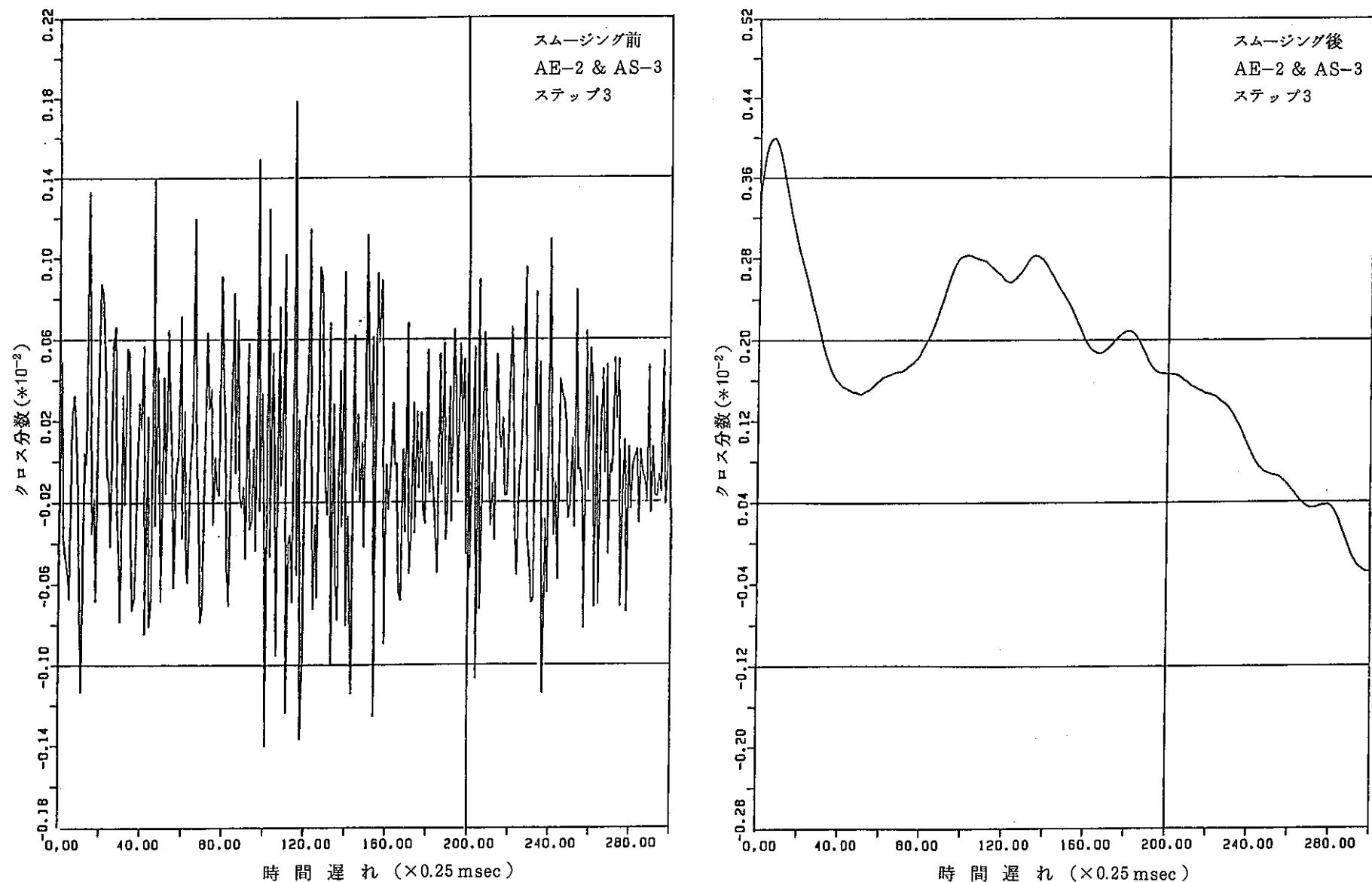


Fig. 25 ナトリウム沸騰試験 (91 LB 104) における音響信号相互相関 (2)
Acoustic Signals Cross Correlation on Sodium Boiling Test (91 LB 104) (2)

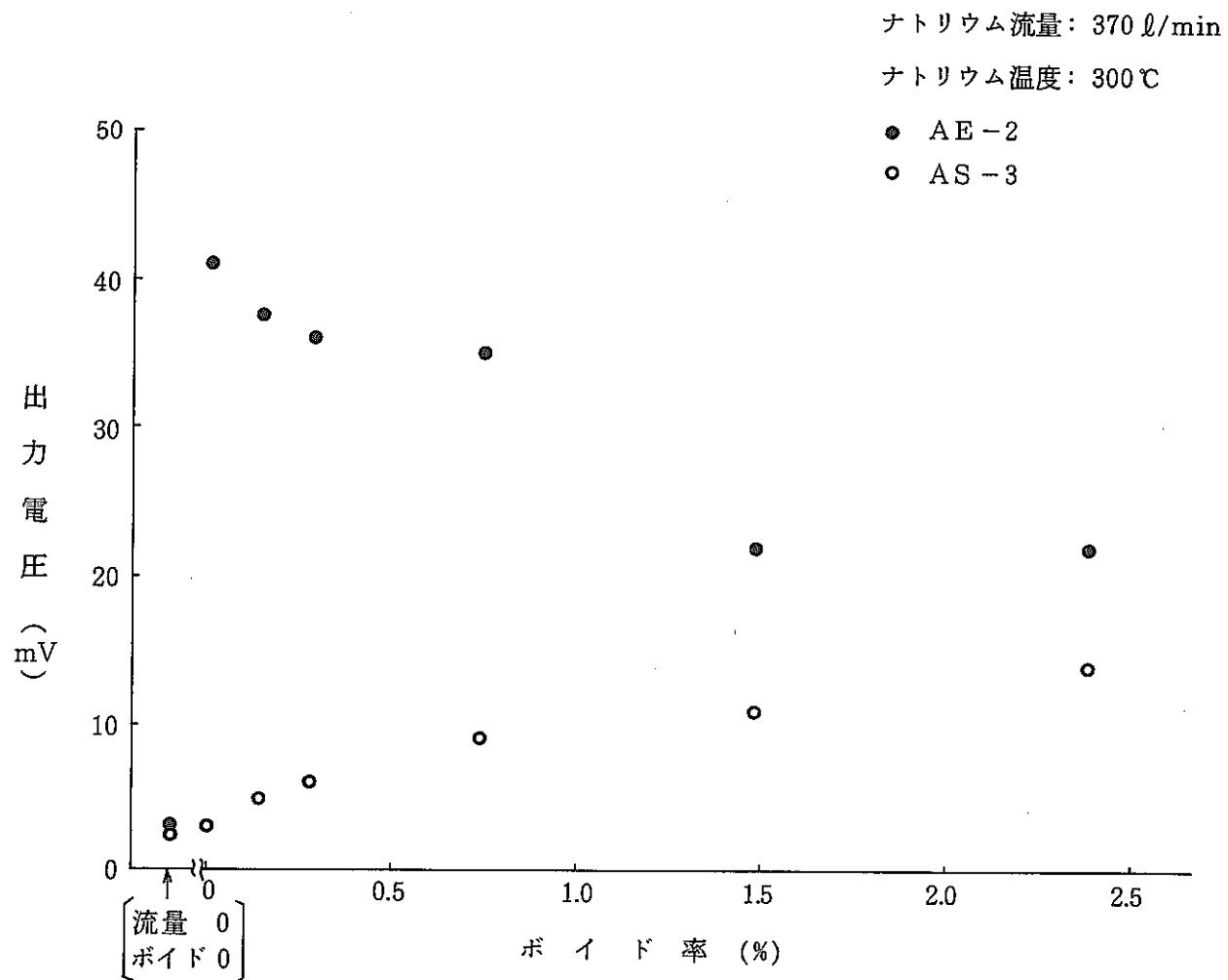


Fig. 26 ボイド注入による音響信号への影響(1)

Effect of Void Injection to Acoustic Signals (1)

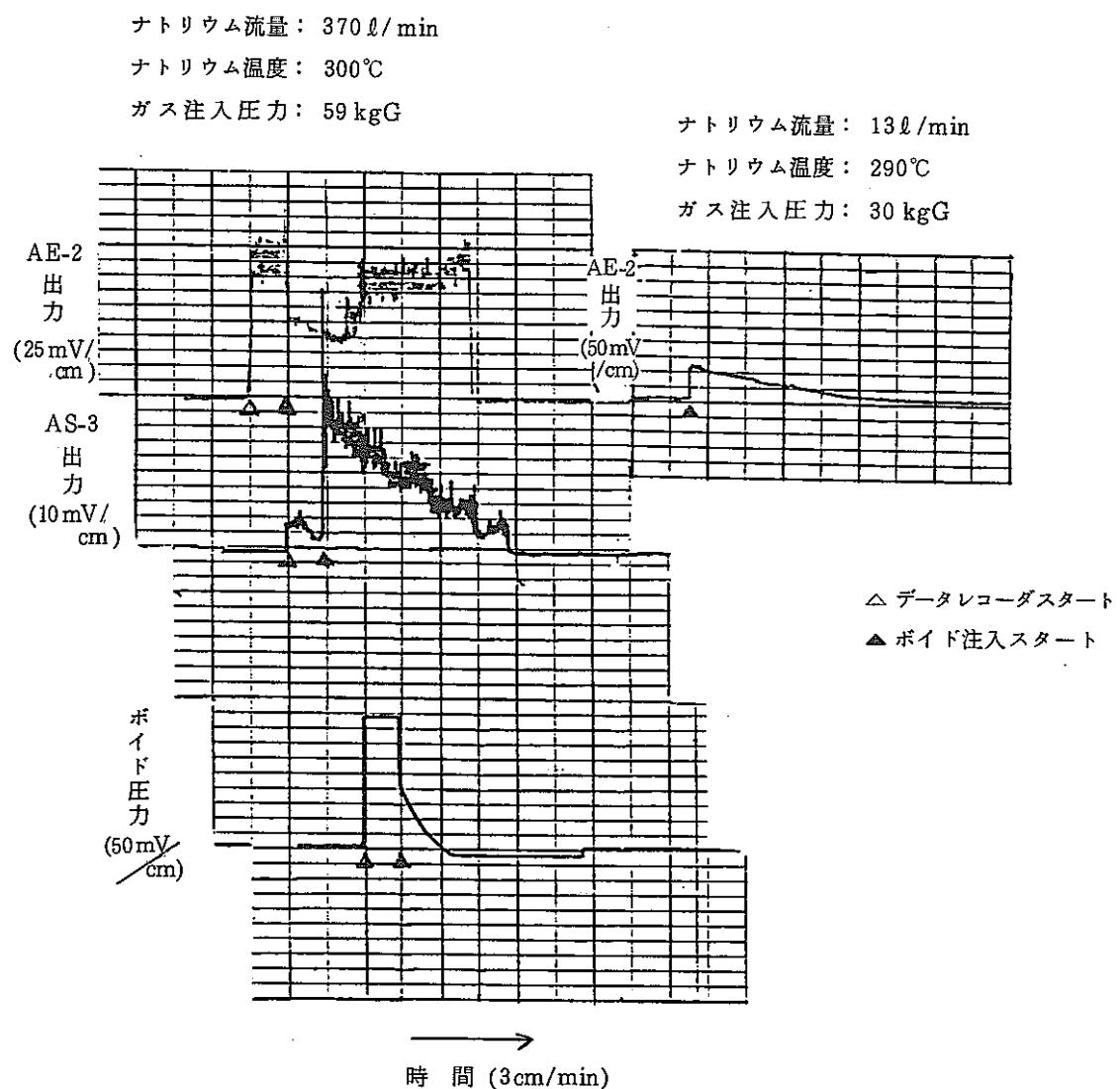


Fig. 27 ボイド注入による音響信号への影響 (2)

Effect of Void Injection to Acoustic Signals (2)

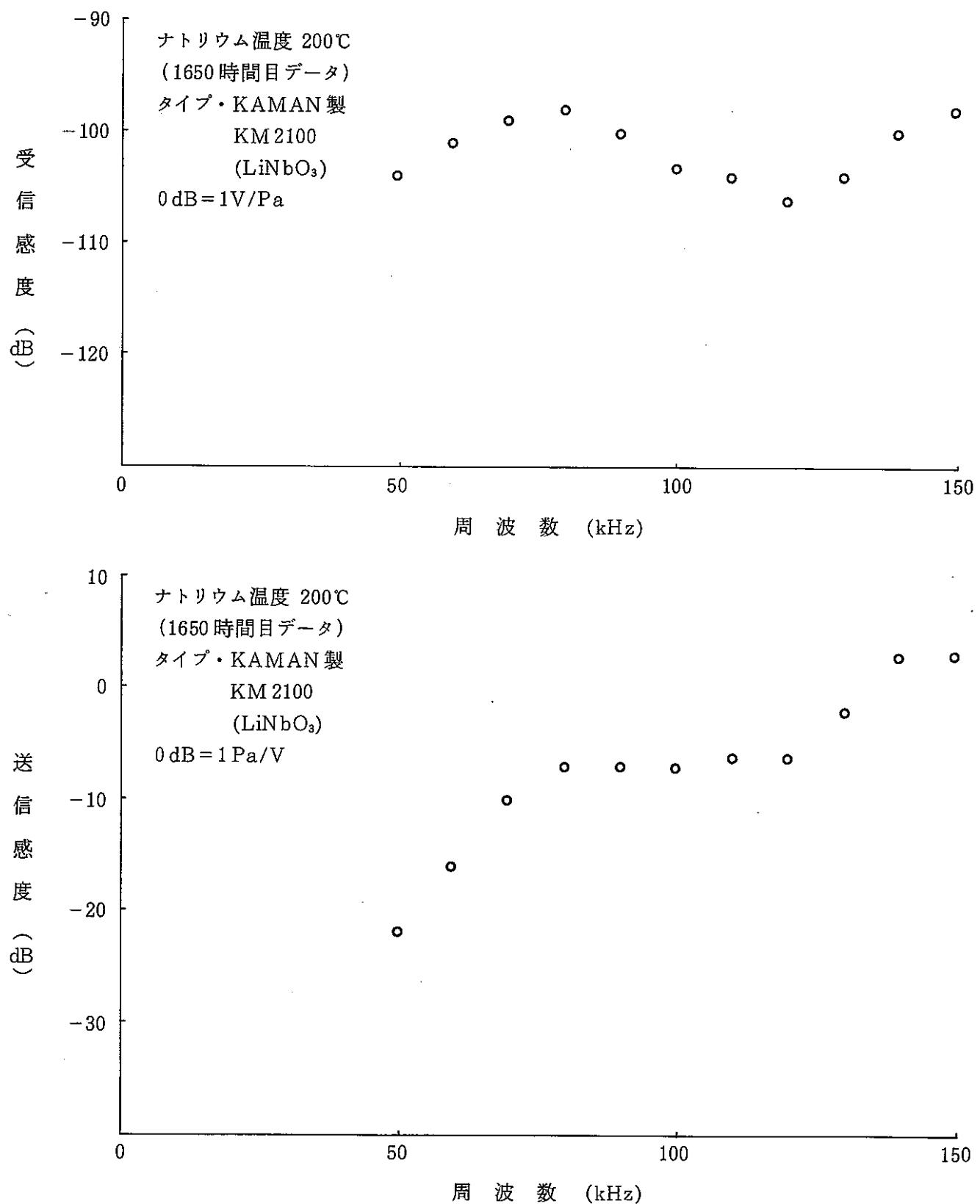


Fig. 28 音響検出器送受波感度の周波数依存性

Frequency Dependence of Acoustic Sensor Transmission and Reception Sensitivity

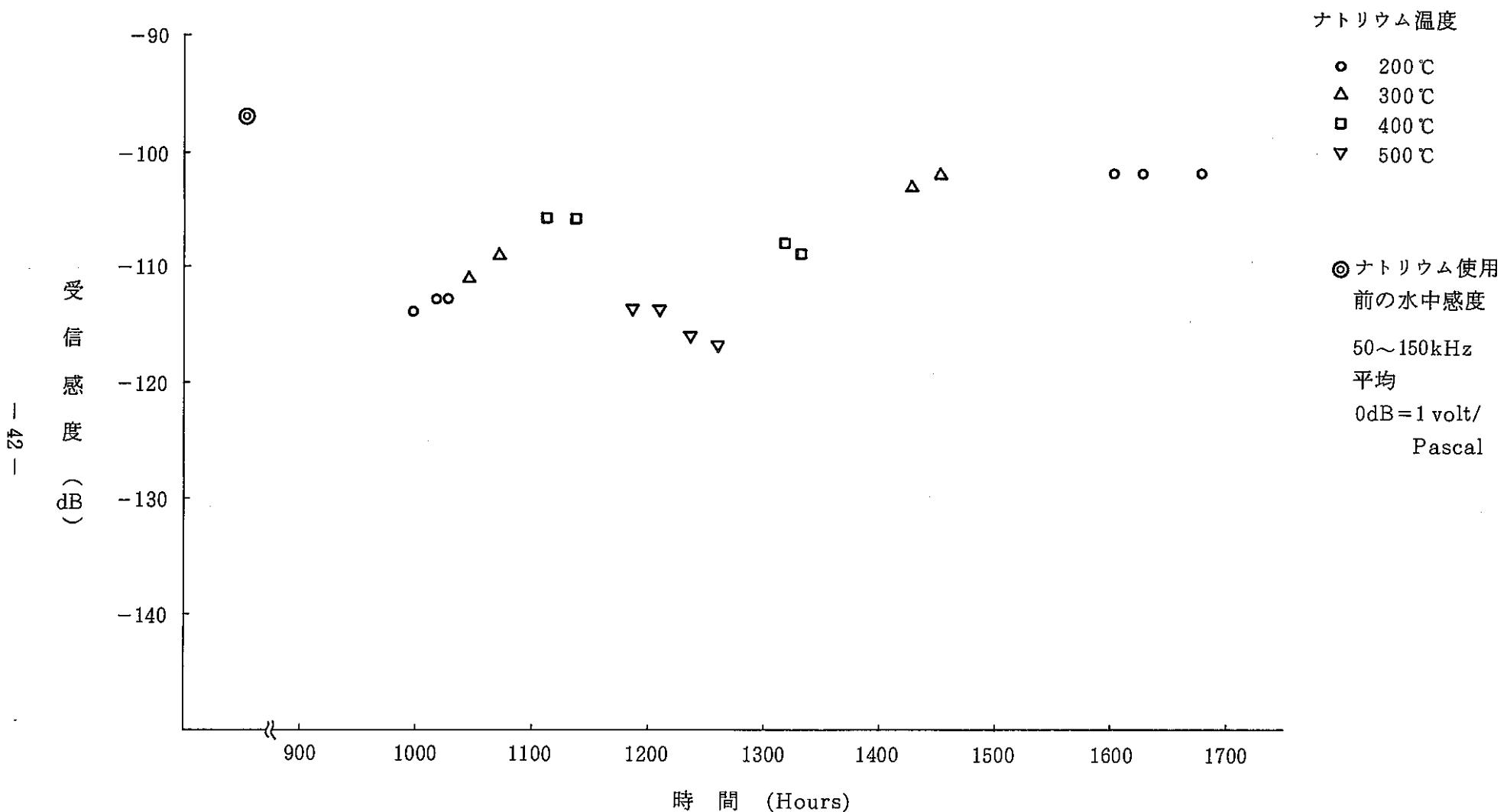


Fig. 29 音響検出器受信感度の時間・温度依存性

Time and Temperature Dependence of Acoustic Sensor Reception Sensitivity

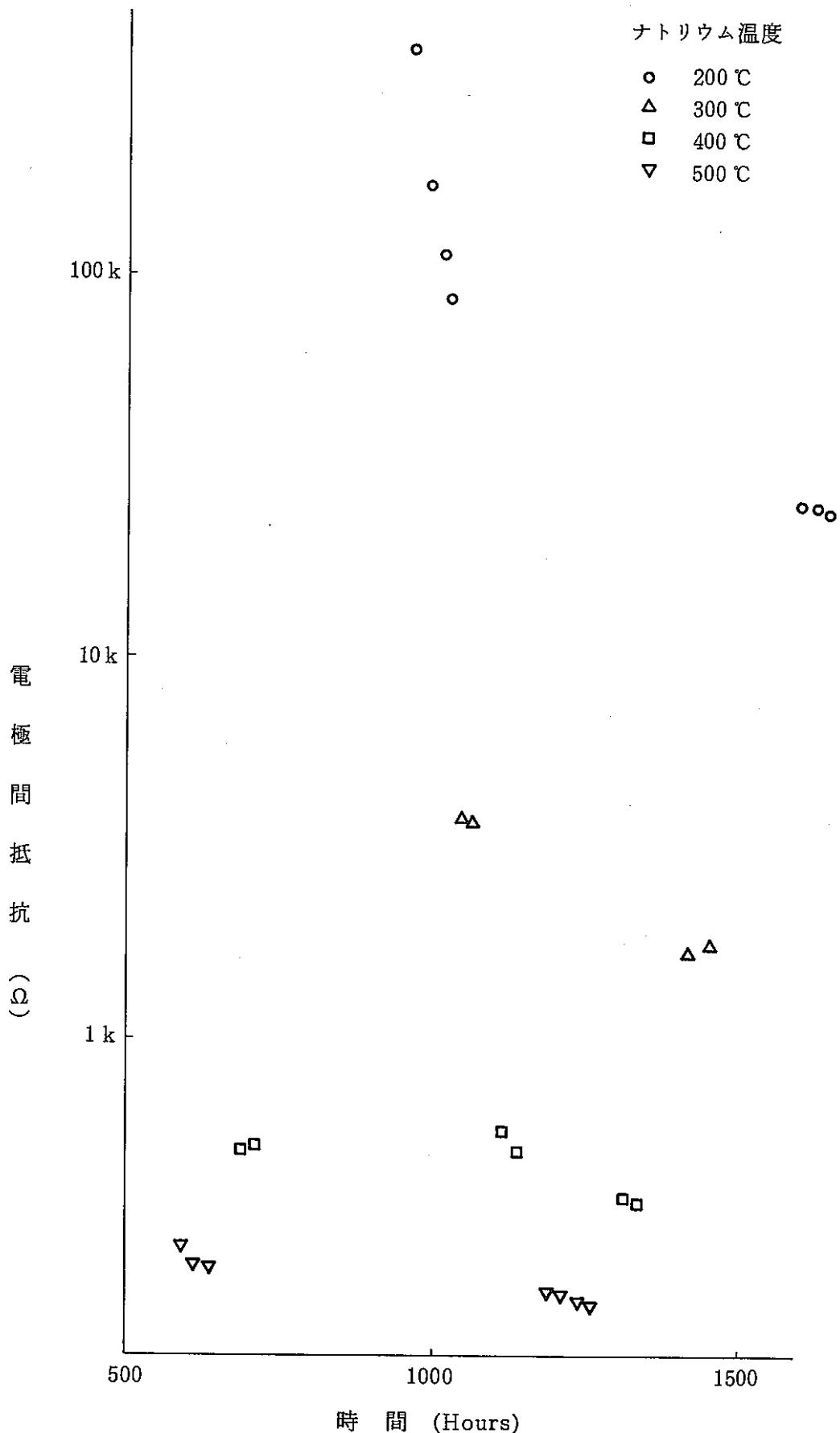


Fig.30 音響検出器電極間抵抗の時間・温度依存性

Time and Temperature Dependence of Resistance between Acoustic Sensor Electrodes

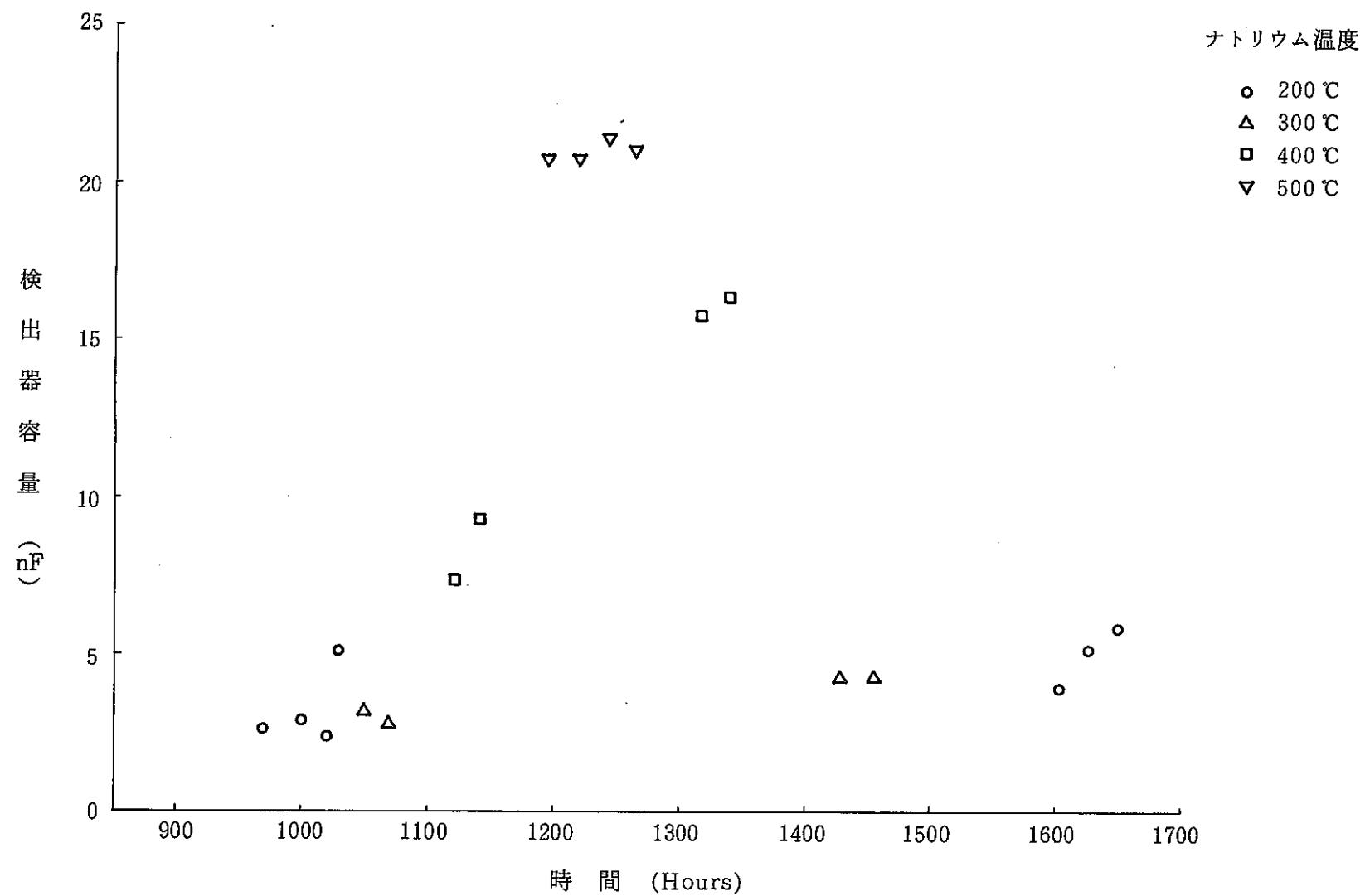


Fig. 31 音響検出器電極間容量の時間・温度依存性

Time and Temperature Dependence of Capacitance between Acoustic Sensor Electrodes

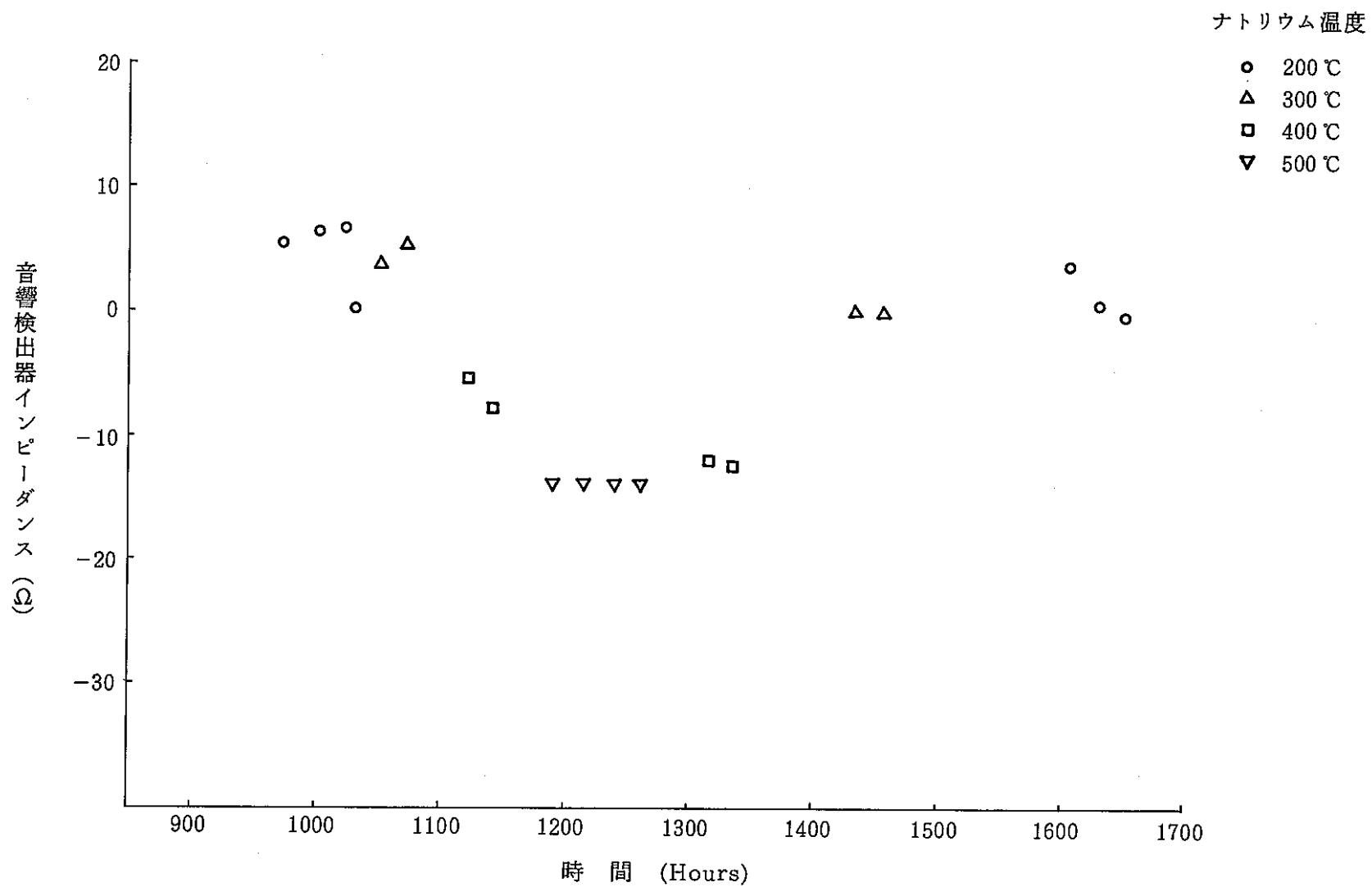


Fig.32 音響検出器電極間インピーダンスの時間・温度依存性

Time and Temperature Dependence of Impedance between Acoustic Sensor Electrodes

Table 1 音響検出器の特性及び設置状況

Characteristic and Settling Condition of Acoustic Sensors

| 記号 | 種類 | 型名 | メーカー | 周波数kHz 感度dB | 使用温度°C | 取付位置 | 取付方法 |
|--------|-------|---------|--------------------|---|--------|--------|---|
| AE-1 | AEセンサ | D9203 | DUNEGAN ENDEVCO | 100~300 kHz -76 dB (0dB=1V/μbar) | 120 | 膨張タンク台 | ガイド棒 5mmφ×200mmL SUS304 |
| AE-2 | AEセンサ | D9203 | DUNEGAN ENDEVCO | 100~300 kHz -76 dB (0dB=1V/μbar) | 120 | ラッパ管壁 | ガイド棒 5mmφ×200mmL SUS304 |
| AE-3 | AEセンサ | D9201 | DUNEGAN ENDEVCO | 100~1000 kHz -89 dB (0dB=1V/μbar) | 120 | 配管壁 | ガイド棒 5mmφ×200mmL SUS304 |
| AC-101 | 加速度計 | 815A-5 | KISTLER | 1Hz~30kHz 50mV/G | 120 | 膨張タンク台 | ガイド棒 16mmφ×300mmL SUS304 |
| AC-102 | 加速度計 | 815A-5 | KISTLER | 1Hz~30kHz 50mV/G | 120 | ラッパ管台 | ガイド棒 16mmφ×85mmL SUS304 |
| AC-103 | 加速度計 | 308B04 | PCB | 2Hz~25 kHz 100mV/G | 120 | 配管壁 | ガイド棒 16mmφ×165mmL SUS304 |
| AC-104 | 加速度計 | 815A-5 | KISTLER | 1Hz~30kHz 50mV/G | 120 | ラッパ管壁 | ガイド棒 16mmφ×165mmL SUS304 |
| AC-105 | 加速度計 | 815A-5 | KISTLER | 1Hz~30kHz 50mV/G | 120 | 膨張タンク台 | ガイド棒 16mmφ×300mmL SUS304 |
| AS-102 | 音響計 | TYPE B | TOSHIBA | 10~1000 kHz -127 dB (0dB=1V/μbar) | 550 | ラッパ管 | Na直浸 |
| AS-103 | 音響計 | TYPE C | TOSHIBA | 10~1000 kHz -135 dB (0dB=1V/μbar) | 550 | 膨張タンク台 | ガイド棒 40mmφ×150mmL 13mmφ×150mm SUS |
| AS-1 | 音響計 | KM-1910 | KAMAN | 0~10 kHz -131 dB (0dB=1V/μbar) | 540 | 膨張タンク内 | Na直浸 |
| AS-2 | 音響計 | KM-1910 | KAMAN | 0~10 kHz -131 dB (0dB=1V/μbar) | 540 | ラッパ管 | Na直浸 |
| AS-3 | 音響計 | KM2100 | KAMAN | 20~100 kHz -123 dB (0dB=1V/μbar) | 650 | ラッパ管 | Na直浸 |

Table 2 音響検出試験用計器一覧表

List of Instruments for Acoustic Detection Tests

| 記号 | 種類 | 型番 | メーク | 備考 |
|--------------------------|---------|------------------------------|-----------------|---|
| PA _{1~3} | 前置増幅器 | 1801-316B | DUNEGAN ENDEVCO | |
| MA _{1~3} | 主増幅器 | 302A | DUNEGAN ENDEVCO | GAIN(dB) MA ₁ (40) MA _{2,3} (30) |
| FIL _{1~3,9} | フィルター | FV-625A | NF回路ブロック | HIGH PASS(Hz) FIL _{1~3} (200), FIL ₉ (300) |
| RMS _{1~3} | RMSメータ | M170 | NF回路ブロック | |
| REC _{1~3} | 記録計 | SR6102 | 渡辺インストルメント | |
| PA _{4,5} | 前置増幅器 | 504D | KISTLER | |
| PA ₆ | 前置増幅器 | 480A | PCB | |
| PA _{7,8} | 前置増幅器 | 504E | KISTLER | |
| PA _{9~11,16,17} | 前置増幅器 | AE911 | NF回路ブロック | GAIN(dB) PA _{9,10,16,17} (40), PA ₁₁ (20) |
| MA _{4~6,9,10} | 主増幅器 | 7740A | 計測器センター | GAIN(dB) MA _{4,5,6,9,10} (20) |
| FIL _{4,5,7,8} | フィルター | HP-3 | NF回路ブロック | HIGH PASS(Hz) FIL _{4,5,8} (200), FIL ₇ (500) |
| FIL _{6,10} | フィルター | AF220 | COMSTRON | HIGH PASS(Hz) FIL ₆ (400), FIL ₁₀ (200) |
| PA _{12,13} | 前置増幅器 | SS-1B | 大阪電波 | |
| PW _{1,2} | 電源 | PS-5D | 大阪電波 | |
| MA _{7,8,11} | 主増幅器 | AM502 | TEKTRONIX | GAIN MA _{7,8} (50), MA ₁₁ (5000) BAND PASS 0.1k~1MHz |
| FIL _{11,14} | フィルター | FV624 | NF回路ブロック | FIL ₁₁ (LOW PASS 160kHz) FIL ₁₄ (HIGH PASS 300Hz) |
| PA _{14,15} | 前置増幅器 | KM1911-A50P-132 191DB-SPL | KAMAN | |
| PW _{3,4} | 電源 | 6227B | HEWLETT PACKARD | |
| FIL _{12,13} | フィルター | AF120 | COMSTRON | LOW PASS 100kHz |
| D-REC | データレコーダ | M96 | 山武ハネウェル | |

Table 3 ナトリウム沸騰試験パラメータ

Sodium Boiling Tests' Parameters

(a) Na 流量一定

| 試験名 | Na 温度 (°C) | | Na流量 (ℓ/min) | 熱流束 (w/cm²) | | | | | | |
|-----------|------------|------|-----------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 入口初期 | 出口最大 | | 沸騰開始 | Step 1 | Step 2 | Step 3 | Step 4 | Step 5 | Step 7 |
| 91 LB 102 | 400 | 705 | 81 | 81~84 | 84 | 86 | 89 | | | |
| 91 LB 103 | 400 | 686 | 100 | 97~99 | 99 | 101 | 97 | 94 | | |
| 91 LB 104 | 500 | 657 | 127 | 93~96 | 96 | 100 | 104 | | | |
| 91 LB 105 | 500 | 723 | 100 | 85.5 | 87 | 91 | | | | |

(b) 热流束一定

| 試験名 | Na 温度 (°C) | | 熱流束 (w/cm²) | Na 流量 (ℓ/min) | | | | | | |
|-----------|------------|------|----------------|---------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| | 入口初期 | 出口最大 | | 沸騰開始 | Step 1 | Step 2 | Step 3 | Step 4 | Step 5 | Step 7 |
| 91 LB 106 | 499 | | 100 | 136~127 | 127 | 117 | 107 | 98 | 84 | 76 |
| 91 LB 107 | 499 | | 100 | 137~110 | 110 | 92 | 92~76 | | | |
| 91 LB 108 | 497 | | 80 | 102~91 | 91 | 82 | 71 | 71~61 | | |
| 91 LB 109 | 550 | | 100 | 168~151 | 151 | 136 | 122 | 122~107 | | |
| 91 LB 110 | 547 | | 80 | 122~107 | | | 91 | 76 | 58 | 45 |
| | | | | | | | | | | 45~30 |

Table 4 データレコーダ周波数特性表

Frequency Characteristic of Data Recorders

| | 方 式 | テープ速度 (ips) | 周波数特性 (kHz) | S/N 比 (dB) | 使 用 速 度 | |
|-------------------|-----|----------------|----------------|---------------|---------|-----|
| | | | | | 録 音 | 再 生 |
| HONEYWELL M 96 | D R | 120 | 0.4 ~ 1500 | 30 | ○ | |
| | | 30 | 0.4 ~ 375 | 29 | ○ | ○ |
| | | 15/16 | 0.4 ~ 11.5 | 22 | | |
| | F M | 120 | DC ~ 80 | 47 | ○ | |
| | | 30 | DC ~ 20 | 47 | ○ | ○ |
| | | 15/16 | DC ~ 0.625 | 43 | | |
| TEAC R 510 | D R | 60 | 0.3 ~ 300 | 30 | | |
| | | 30 | 0.2 ~ 150 | 30 | | |
| | | 15 | 0.1 ~ 75 | 30 | | |
| | | 7 1/2 | 0.1 ~ 37 | 28 | | |
| | | 3 3/4 | 0.1 ~ 18 | 28 | | |
| | | 1 7/8 | 0.1 ~ 9 | 28 | | |
| | F M | 60 | DC ~ 20 | 47 | ○ | ○ |
| | | 30 | DC ~ 10 | 47 | | |
| | | 15 | DC ~ 5 | 46 | | ○ |
| | | 7 1/2 | DC ~ 2.5 | 45 | | |
| | | 3 3/4 | DC ~ 1.25 | 43 | | |
| | | 1 7/8 | DC ~ 0.63 | 40 | | ○ |