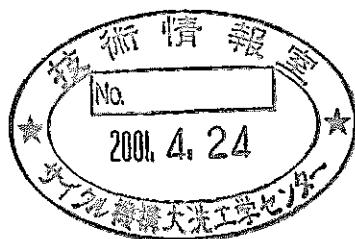


# 超音波による集合体頂部変位計測手法の開発

(研究報告書)

2000年3月



核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2000

## 超音波による集合体頂部変位計測手法の開発

(研究報告書)

小舞正文\*、

### 要　　旨

「常陽」では高速炉の固有安全性の実証を目的とした安全特性試験の実施に向けた研究を行っている。その一環としてフィードバック反応度の評価精度向上に関する検討を進めており、これまで高速炉炉心の過渡時のフィードバック反応度の一因となる炉心湾曲反応度を3次元体系で解析するシステムを整備した。本システムの解析精度向上のためには、湾曲量を実機で計測する必要があるが、現状では照射後試験(PIE)による静的な残留湾曲変位量しか計測できず、運転中における動的な湾曲量の計測手法の開発が望まれていた。

そこで、炉心湾曲の量を原子炉運転中にオンラインで計測する手段として、超音波センサを用いた集合体頂部変位計測が考えられる。本報告書は、超音波による集合体頂部変位計測手法の開発について以下の項目をまとめたものである。

- ・高温用超音波センサの特性試験
- ・超音波センサの駆動部の検討
- ・温度ゆらぎの影響等を確認するための炉外水中試験

---

\*核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター  
照射施設運転管理センター 実験炉部 技術課

**Development of measurement of displacement of the top of sub-assembly  
using super sonic sensor**

Masafumi KOMAI\*

**ABSTRACT**

It has been studied for safety plant test to demonstrate inherent safety of FBR core in JOYO. As a part of this study investigation of feedback reactivity was studied. And analysis code which can estimate the reactivity of core-bowing has been prepared.

In post irradiation examination, remain bowing displacement of sub-assembly can only be measured, so development of measuring system of displacement of sub-assembly under operation is expected to improve estimation of core-bowing reactivity.

It is supposed that an on-line measurement system of displacement of the top of sub-assembly using super sonic sensor under operation is an effective means. In this report, development of measurement of displacement of the top of sub-assembly using super sonic sensor was settled as follows.

Characteristic test of heat-resistant super sonic sensor

Design of adjustment device of super sonic sensor

Examination of in-water test for estimation of temperature fluctuation

---

\*Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center,  
Oarai Engineering Center, JNC

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.計測部の開発 .....	2
2.1 計測の原理 .....	2
2.2 超音波センサの要求条件 .....	3
2.3 高温用超音波センサの特性試験 .....	4
2.4 駆動装置・信号ケーブルの適用性の検討 .....	8
2.5 計測部の開発課題の整理 .....	11
3.炉外水中試験装置の検討 .....	43
3.1 炉外水中試験の概要 .....	43
3.2 炉外水中試験装置の検討条件 .....	44
3.3 炉外水中試験装置の検討 .....	45
3.4 水流動試験 .....	46
4.まとめ .....	52
謝辞 .....	53
参考文献 .....	54

## 表リスト

表 2.3-1 高温用超音波センサの仕様	13
表 2.3-2 No.1 センサの試験結果	14
表 2.3-3 No.2 センサの試験結果	14
表 2.5-1 計測部の開発課題の整理	15

## 図リスト

図 2.1-1 超音波センサによる炉心湾曲変位計測の概念図	16
図 2.2-1 CRD 予備孔を利用する場合の炉内観察・検査可能領域（炉心第 3 列）	17
図 2.2-2 CRD 予備孔を利用する場合の炉内観察・検査可能領域（炉心第 5 列）	18
図 2.3-1 センサ設計寸法及び寸法計測結果	19
図 2.3-2 超音波特性試験概略図	20
図 2.3-3 温度による感度変化	21
図 2.3-4 RF 波形(No1 センサ,常温) (感度:40dB,アッテネータ無)	22
図 2.3-5 RF 波形(No1 センサ,250°C) (感度:40dB,アッテネータ無)	22
図 2.3-6 RF 波形(No1 センサ,350°C) (感度:40dB,アッテネータ無)	23
図 2.3-7 RF 波形(No1 センサ,500°C) (感度:40dB,アッテネータ無)	23
図 2.3-8 周波数分析(No1 センサ,常温) (感度:40dB,アッテネータ無)	24
図 2.3-9 周波数分析(No1 センサ,250°C) (感度:40dB,アッテネータ無)	24
図 2.3-10 周波数分析(No1 センサ,350°C) (感度:40dB,アッテネータ無)	25
図 2.3-11 周波数分析(No1 センサ,500°C) (感度:40dB,アッテネータ無)	25
図 2.3-12 RF 波形(No2 センサ,常温) (感度:30dB,アッテネータ 8dB)	26
図 2.3-13 RF 波形(No2 センサ,250°C) (感度:30dB,アッテネータ 8dB)	26
図 2.3-14 RF 波形(No2 センサ,350°C) (感度:30dB,アッテネータ 6dB)	27
図 2.3-15 RF 波形(No2 センサ,500°C) (感度:40dB,アッテネータ 2dB)	27
図 2.3-16 周波数分析(No2 センサ,常温) (感度:40dB,アッテネータ無)	28
図 2.3-17 周波数分析(No2 センサ,250°C) (感度:40dB,アッテネータ無)	28
図 2.3-18 周波数分析(No2 センサ,350°C) (感度:40dB,アッテネータ無)	29
図 2.3-19 周波数分析(No2 センサ,500°C) (感度:40dB,アッテネータ無)	29
図 2.4-1 単眼型超音波炉内検査装置外形図	36
図 2.4-2 炉内検査装置取扱図	37
図 2.4-3 CRD 予備孔取合図	38
図 2.4-4 単眼型超音波炉内検査動作原理図	39
図 2.4-5 単眼型超音波炉内検査装置 計測部構造図案(1)	40
図 2.4-6 単眼型超音波炉内検査装置 計測部構造図案(2)	41
図 2.4-7 単眼型超音波炉内検査装置 駆動部構造図	42
図 3.1-1 炉外水中試験装置及び水試験ループの系統図	47
図 3.2-1 温度と音速の関係（水中・Na 中）	48
図 3.3-1 炉外水中試験装置の構造概念図	49
図 3.3-2 集合体頂部模擬構造の概念図	50
図 3.4-1 燃料集合体の変位模擬機構の概念	51

写真リスト

写真 2.3-1 センサ外観.....	30
写真 2.3-2 A スコープ写真(No1 センサ, 常温) .....	31
写真 2.3-3 A スコープ写真(No1 センサ, 250°C) .....	31
写真 2.3-4 A スコープ写真(No1 センサ, 350°C) .....	32
写真 2.3-5 A スコープ写真(No1 センサ, 500°C) .....	32
写真 2.3-6 A スコープ写真(No2 センサ, 常温) .....	33
写真 2.3-7 A スコープ写真(No2 センサ, 250°C) .....	33
写真 2.3-8 A スコープ写真(No2 センサ, 350°C) .....	34
写真 2.3-9 A スコープ写真(No2 センサ, 500°C) .....	34
写真 2.3-10 UM731 印加電圧.....	35
写真 2.3-11 PR002 印加電圧.....	35

## 1. はじめに

「常陽」では高速炉の固有安全性の実証を目的とした安全特性試験の実施に向けた研究を行っている。その一環としてフィードバック反応度の評価精度向上に関する検討を進めており、これまで高速炉炉心の過渡時のフィードバック反応度の一因となる炉心湾曲反応度を3次元体系で解析するシステムを整備した。本システムの解析精度向上のためには、湾曲量を実機で計測する必要があるが、現状では照射後試験(PIE)による静的な残留湾曲変位量しか計測できず、運転中における動的な湾曲量の計測手法の開発が望まれていた。(参考文献(1), (2), (3), (4))

そこで、炉心湾曲の量を原子炉運転中にオンラインで計測する手段として、超音波センサを用いた集合体頂部変位計測が考えられる。本報告書は、超音波による集合体頂部変位計測手法の開発の以下の項目をまとめたものである。

- ・高温用超音波センサの特性試験
- ・超音波センサの駆動部の検討
- ・温度ゆらぎの影響等を確認するための炉外水中試験

超音波による変位計測手法において重要なのは、耐熱・耐放射線性を持つ超音波センサの開発と、超音波が媒質の温度ゆらぎによって散乱・屈折することによる計測精度への影響の確認が重要となる。本報告書では、上記観点から開発の現状をまとめた。

## 2. 計測部の開発

## 2.1 計測の原理

超音波による炉心頂部計測の概念図を図 2.1-1 に示す。燃料集合体頂部の水平方向の変位を計測する方法は、炉心上部機構に設置した超音波センサから超音波を発信し、超音波の伝播時間の変化（遅れ時間:  $\Delta t$ ）を計測する。超音波センサと垂直方向とのなす角度を  $\theta$  とし、Na 中の音速を  $V$  とすると、図 2.1-1 の中の幾何学的関係から、式(a)より超音波センサと燃料集合体頂部との位置の変化を算出し、頂部変位 ( $\Delta d$ ) を計測することができる。

また、垂直方向の変位については同様に、音速と超音波の伝播時間より計測することができる。

## 2.2 超音波センサの要求条件

本研究で開発する炉内検査装置に対する要求条件を以下に示す。

### (1) プラント条件

- ・温 度 : 250~600°C
- ・冷却材流量 : 定格運転 100% (流速約 4~5m/sec)
- ・照射条件 :  $1.2 \times 10^{13} n/cm^2\text{sec}$   
 $0.1\text{MeV}$  以上高速中性子  $3.2 \times 10^{12} n/cm^2\text{sec}$   
(MK-III炉心中央、炉心上部機構下端付近)

### (2) 要求機能

炉心構成要素頂部の傾き、水平・垂直方向変位を検出する。

### (3) 装置設置位置

炉心上部機構内の制御棒駆動機構予備孔に炉内検査装置を設置することにより、炉心第3列(3B3)、(3E3)及び第5列(5E2)、(5B2)の直下の燃料及びこれに隣接する炉心構成要素の一部を観察する。図2.2-1及び図2.2-2に原子炉運転中に観察可能な領域を示す。また、停止中に回転プラグを駆動することによりアクセスが可能な領域もあわせて示す。

### 2.3. 高温用超音波センサの特性試験

#### (1) 目的

超音波による変位計測手法の開発においては、耐熱・耐放射線性を持つ超音波センサの開発が重要となる。超音波センサの中性子・ $\gamma$ 線照射の影響を確認するためには照射試験の実施が必要となるが、まず高温に耐える超音波センサを試作し、その高温での超音波の音響上の特性を調べた。

#### (2) 設計・製作

照射試験用の超音波センサは、まず高温に耐える必要があるため振動子としてニオブ酸リチウム（キュリー点:1200°C）を使用した。また遅延材（超音波の振動を超音波センサ外部に伝達するために超音波素子に接合された材料）は高温に耐え且つ振動子とのろう付け性を考慮してチタン材とした。また、ろう材はアルミ系のものを使用した。電極およびリード線は、高温で安定した特性を有する白金を使用した。超音波センサの試作体の寸法は、照射カプセルの大きさを考慮して遅延材の長さ（L）を25mm、直径（φ）を15mmとした。超音波センサの試作体の外形、寸法を図2.3-1に示し、センサの仕様を表2.3-1に示す。超音波センサの試作体は2個（No.1、No.2）製作した。センサ供試体の外観を写真2.3-1に示す。

#### (3) 試験・検査

照射試験用に製作した超音波センサ試作体基本特性を調べるために電気炉を用いて、常温及び高温下において、超音波エコー、チタン製の遅延材中を伝播する超音波を計測し、エコー高さ、周波数特性等のデータを採取した。超音波特性試験の概略図を図2.3-2に示す。

##### a. No.1 センサ試験・検査結果

###### (a) 反射エコー振幅

常温における遅延材底面からの反射エコーを測定した結果を、写真2.3-2にA-scope表示（センサからの信号と超音波伝播時間を直角座標であらわしたもの）で示す。この時の感度は47dB(80%)であった（使用した探傷器はUM731（トキメック社製））。同様な方法で250°C、350°C、500°Cで計測を行なった。その結果、写真2.3-3、2.3-4、2.3-5に示すように温度が変わることにより感度が48dB(250°C)、49dB(350°C)、52dB(500°C)と変化する。その変化量をまとめると図2.3-3に示すように5dB以下（製造の誤差範囲）であり、500°Cで24時間保持しても感度変化は認められなかった。その後常温に戻したときの感度は初期の常温感度と同じであった。センサの感度変化は、5dB以内であり、500°Cまで使用できることが確認できた。

###### (b) パルス幅（ $\mu$ sec ピークレベルの25%の位置の時間幅）

常温における遅延材底面からの反射エコーのパルス幅を測定した結果を、図2.3-4

に RF 波形 (受信超音波による高周波電圧をそのまま増幅して表示した波形) で示す。この時のパルス幅は  $0.64 \mu\text{sec}$  であった (使用したパルサーレシーバーは P R 0 0 2 (J S R I n c. 製))。同様な方法で  $250^\circ\text{C}$ 、 $350^\circ\text{C}$ 、 $500^\circ\text{C}$  で計測を行った。測定した結果を図 2.3-5, 図 2.3-6, 図 2.3-7 に示す。各温度に対してパルス幅は  $0.68 \mu\text{sec}$  ( $250^\circ\text{C}$ ),  $0.68 \mu\text{sec}$  ( $350^\circ\text{C}$ ),  $0.73 \mu\text{sec}$  ( $500^\circ\text{C}$ ) とほぼ一定であり  $500^\circ\text{C}$  で 24 時間保持してもパルス幅には変化が認められなかった。その後常温に戻したときのパルス幅は初期の常温パルス幅と同じであった。

#### (c) 周波数特性

常温における遅延材底面からの反射エコーの周波数分析結果を、図 2.3-8 に示す。この時の中周波数は  $6.1\text{MHz}$  であった (使用したパルサーレシーバーは(b)と同じ)。同様な方法で  $250^\circ\text{C}$ 、 $350^\circ\text{C}$ 、 $500^\circ\text{C}$  で計測を行った。測定した結果を図 2.3-9, 2.3-10, 2.3-11 に示す。各温度に対して中心周波数は  $5.9\text{MHz}$  ( $250^\circ\text{C}$ )、 $5.9\text{MHz}$  ( $350^\circ\text{C}$ )、 $5.9\text{MHz}$  ( $500^\circ\text{C}$ ) と一定であり高温時においても変化は無く、かつ  $500^\circ\text{C}$  で 24 時間保持しても中心周波数には変化が認められなかった。その後常温に戻したときの中心周波数は初期の中心周波数と同じであった。また、常温から  $500^\circ\text{C}$  まで周波数特性の変化を調べても図 2.3-8~11 が示す様に際立った変化は認められず、その後常温に戻したときの周波数特性も初期の周波数特性と同じであった。

#### (d) 圧電素子の電気抵抗

常温におけるセンサのリード線間の抵抗値をテスターで計測した。抵抗値は  $2\text{M}\Omega$  あり、電気的絶縁性は問題がないことが確認できた。

#### (e) 探傷器の印加電圧

(a) で使用した探傷器 (UM 7 3 1:トキメック社製))の印加電圧をオシロスコープで計測した。結果を写真 2.3-10 に示す。印加電圧は  $88\text{V}$  であった。また同様に(b)(c)で使用したパルサーレシーバーの印加電圧を計測した結果、印加電圧は  $314\text{V}$  であった。(写真 2.3-11) このことから、探傷器・パルサーレシーバー共に正常に動作していることを確認した。

#### (f) センサの寸法計測

完成後のセンサの寸法計測を行った。全長 (L) が約  $27\text{mm}$  (無機接着剤・遅延材を含むセンサ部)、直径 ( $\phi$ ) が約  $15\text{mm}$  であり、照射試験を行うために収納するカプセルは、約  $20\text{mm}$  程度の大きさであり収納上問題ないことを確認した。

試験結果の一覧を表 2.3-2 に示す。

### b. No.2 センサ試験・検査結果

#### (a) 反射エコー振幅

常温における遅延材底面からの反射エコーを測定した結果を、写真 2.3-8 に A-scope 表示で示す。この時の感度は  $49\text{dB}(80\%)$  であった (使用した探傷器は UM 7

3.1(トキメック社製)。同様な方法で 250°C、350°C、500°Cで計測を行なった。その結果、写真 2.3-9, 2.3-10, 2.3-11 に示すように温度が変わることにより感度が 50dB (250°C)、51dB (350°C), 54dB (500°C) と変化するが、その変化の割合は図 2.3-3 より 5dB 以下 (製造誤差範囲) であり、500°Cで 24 時間保持しても感度変化は認められなかった。その後常温に戻したときの感度は初期の常温感度と同じであった。センサの感度変化は、5dB 以内であり、500°Cまで使用できることが確認できた。

(b) パルス幅 ( $\mu\text{sec}$  ピークレベルの 25% の位置の時間幅)

常温における遅延材底面からの反射エコーのパルス幅を測定した結果を、RF 波形で図 2.3-12 に示す。この時のパルス幅は  $0.37\ \mu\text{sec}$  であった (使用したパルサーレシーバーは PR 002 (J S R I n c. 製))。同様な方法で 250°C、350°C、500°C で計測を行なった。測定した結果を図 2.3-13, 2.3-14, 2.3-15 に示す。パルス幅が  $0.37\ \mu\text{sec}$  (250°C),  $0.37\ \mu\text{sec}$  (350°C),  $0.29\ \mu\text{sec}$  (500°C) とほぼ一定であり 500°Cで 24 時間保持してもパルス幅には変化が認められなかった。その後常温に戻したときのパルス幅は初期の常温パルス幅と同じであった。

(c) 周波数特性

常温における遅延材底面からの反射エコーの周波数分析結果を、図 2.3-16 に示す。この時の中心周波数は 3.7MHz であった (使用したパルサーレシーバーは(b) と同じ)。同様な方法で 250°C、350°C、500°C で計測を行なった。測定した結果を図 2.3-17, 2.3-18, 2.3-19 に示す。中心周波数が 3.7MHz (250°C), 3.7MHz (350°C), 4.8MHz (500°C) とほぼ一定であり高温時においても変化は無く、かつ 500°Cで 24 時間保持しても中心周波数には変化が認められなかった。その後常温に戻したときの中心周波数は初期の中心周波数と同じであった。また、周波数特性を常温から 500°Cまで変化を調べても 図 2.3-17~20 が示す様に際立った変化は認められず、その後常温に戻したときの周波数特性も初期の周波数特性と同じであった。

(d) 圧電素子の電気抵抗

常温におけるセンサのリード線間の抵抗値をテスターで計測した。抵抗値は  $2\ M\Omega$  あり、電気的絶縁性は問題がないことが確認できた。

(e) 探傷器の印加電圧

印加電圧は、No1 センサの測定の時と同じであり、探傷器・パルサーレシーバー共に正常に動作していることを確認した。

(f) センサの寸法計測

完成後のセンサの寸法計測を行なった。全長 (L) が約 27mm (無機接着材、遅延材を含むセンサ部)、直径 ( $\phi$ ) が約 15mm であり、照射カプセルは径約 20mm であり収納上問題ないことを確認した。

試験結果の一覧を表 2.3-3 に示す。

c. No1 センサ No2 センサの基本性能のまとめ

2つのセンサ共に、反射エコーの感度、パルス幅、周波数特性等は250～500°Cまで温度を変化させたときの変化は小さく、この温度範囲では影響がないことを確認できた。また、試作した超音波センサは、照射カプセルに納まり、センサのサイズ上問題ないことを確認できた。

## 2.4 駆動装置・信号ケーブルの適用性の検討

単眼型超音波トランステューサ（センサー）を用いた炉内検査装置の駆動機構構造について検討し、駆動構造部について基本設計を行った。駆動部は、炉心頂部の変位を測定する際に、頂部の超音波の反射エコーが強くなるところを微調整しサーチすることが必要であり、計測精度に影響を与える重要な部分と考えられる。

### (1) 全体構成

検出部の駆動機構は、炉内部分の保持部と炉外部の駆動部分からなる。駆動機構は炉心上部機構上面(CRD据付面 GL-3130)に据え付けられ、保持部は据付面から下方に約6.3m、駆動部は据付面から上方に約1.28mの長さを有している。全体外形図を図2.4-1に示す。

保持部は、検出部を保持し、昇降動作、旋回動作をする延長管部とこの延長管部を内包、ガイドする上部案内管部とから構成されている。上部案内管部には生体遮蔽を内蔵している。

炉内への装荷・撤去は上部案内管取扱機により行うことを想定し、駆動機構の長さを上部案内管取扱機の許容取り扱い長さ以下におさえることとした。このため駆動部を分割構造とし、上部を切り離し、撤去できる構造とした。また、駆動部は、隣接する制御棒駆動機構ハウジングとの取り合い上、外径を対辺長190mmの六角形状内に収まるようしている。上部案内管取扱機による取り扱いを図2.4-2に、設置穴の取り合いを図2.4-3に示す。

### (2) 駆動原理

検出部を保持する延長管部分は、ポールネジ機構により上部案内管内を昇降させる構造とした。また、延長管部は昇降駆動機構と一体で歯車駆動機構により旋回させる構造とした。昇降駆動、旋回駆動ともステップモータを使用し、シンクロ発信器により位置制御を行う。駆動原理図を図2.4-4に示す。

### (3) バウンダリの形成

延長管部分は、不活性ガスを内包した気密構造であり、下部はナトリウムとのバウンダリを、上部は炉内カバーガスとのバウンダリを形成する。延長管上部には上下動作、旋回動作に伴う摺動部シールとして、上部案内管との間にオーリングシール機構を設けている。同様に、上部案内管部にはCRD予備穴との間にオーリングシール機構を設けている。

### (4) センサーの取り付けとケーブルの引き回し

#### a) センサーと信号ケーブル

延長管は気密構造であり、内部には不活性ガスが充填してある。センサーは延長管下部に設けた平板部に溶接により取り付け、ナトリウムとの境界を形成する。センサーには、炉心構成要素頂部を斜め上方から見るセンサーA、炉心構成要素頂部を真上

から見るセンサーB、ガタに起因して発生する検査装置のズレを補正し誤差修正を行うための補正センサーの3種類があり、それぞれ6個配置してある。これらの18個のセンサーから出た信号ケーブルは、センサー上部で一旦コネクタにより中継し、延長管上部まで引き回す。保持部先端（計測部）の構造詳細を図2.4-5および図2.4-6に示す。コネクタの構造により2案を検討した。（(5)c項を参照）

延長管上部には、内部不活性ガスを大気から隔離するための2次シールとしてケーブルペネを設けている。信号ケーブルはこのケーブルペネを通り、駆動部外面へ引き回す。この部分には、延長管の上下動作、旋回動作により生じる相対移動を吸収するためのU字形引き回し部を設けている。外部ケーブルとは駆動部上面に設けたコネクタにより取り合う。駆動部構造を図2.4-7に示す。

#### b) 駆動部内ケーブル

駆動部内に設置された電気部品のケーブルは、駆動部内を引き回し、駆動部上面に設けたコネクタにより外部ケーブルと取り合う。上下動作用の電気部品は、旋回動作時に±30°の回転移動をすることになるが、これは引き回しケーブルの可撓性により吸収する。

### (5) 構成部品の検討

駆動装置を構成する部品の適用性について検討し、汎用品で製作できる部分と開発要素を含む部分を明確化した。

#### a) 駆動装置

駆動装置部は常温・大気圧に近い雰囲気条件であり、使用する機械部品（ボールねジ、玉軸受、歯車、締結部品等）、電気部品（モータ、シンクロ発信器、リミットスイッチ等）共、メーカー標準品を使用可能である。

#### b) 超音波センサーの信号ケーブル

機器内での引き回し性、温度条件を考慮し、高温用ソフトケーブルを採用する。本ケーブルは500°Cでの使用実績はあるが、高放射線下での性能は未確認であり開発要素を有する。尚、M1ケーブルは駆動装置組立上の引き回し性に難点がある。

#### c) ケーブルコネクタ

駆動装置組立上およびセンサーのメンテナンス上からセンサー上部にケーブルコネクタを配置した。本コネクタは高温・高放射線下で使用されることになる。コネクタ構造として2タイプが挙げられる。いずれも耐熱性、耐放射線性に優れると考えられるが、使用実績は無く開発要素を有する。

- ① 信号ケーブルの芯線同士を1本づつ直接接合し、その上を圧着スリーブで保護する。この部分をさらに絶縁性の高いセラッミックホルダーに収納する。構造図を図2.4-5に示す。

② セラミックス絶縁のハーメチックシールタイプのピンコネクタと信号ケーブルを接続したソケットコンタクトを組み合わせて用いる。構造図を図 2.4-6 に示す。

d) その他

上下動作、旋回動作時の摺動部分に用いる摺動材には、コバルトフリーの高温ナトリウム中摺動材を選定する必要がある。

(6) 駆動装置・信号ケーブル適用性検討のまとめ

炉内検査装置の全体構成、駆動原理、バウンダリの形成、センサの取り付け部について検討・具体化を行った。また、駆動装置の構成部品の検討を行い、信号ケーブル・コネクタ等の開発の必要性のある部分の開発要素を抽出した。

## 2.5 計測部の開発課題の整理

炉心頂部変位計測手法の開発のうち、計測部についての課題を整理した結果を表 2.5-1 に示す。

### (1) 超音波センサ

超音波センサは、本開発において最も重要な要素技術であり、現在開発されている高温用センサの耐熱性は約 550°C である。

これは、圧電振動子であるニオブ酸リチウムとセンサのケースを接合するろう材の融点が 600°C 程度であるためである。また、ニオブ酸リチウム自体は、キュリー温度が約 1200°C であり温度特性上は問題ないが、600°C 程度の高温になると結晶中の酸素分子が遊離しやすくなり条件によっては特性が劣化する傾向がある。600°C の炉内ナトリウム中で使用できる超音波トランスデューサを開発するためには、以上に示した課題を解決することが必要である。

### (2) 計測システム

計測対象である燃料集合体のハンドリングヘッド部からの反射エコーを捕らえやすくするための最適形状の評価、炉心頂部における温度ゆらぎの影響評価、及び影響低減のための信号処理手法の最適化等の課題を解決することが必要である。

ハンドリングヘッド部の最適化検討には、音響伝播シミュレーションによる解析評価が有効であると考えられる。同解析では、時系列信号の空間的な伝播を直接シミュレーションすることができるため、解析結果として受信波形を直接扱うことが可能である。このため、シミュレーション結果で得られた信号を直接処理して計測精度の評価を行い、ハンドリングヘッド部の反射板の形状の最適化検討を行うことができる。

但し、シミュレーションでは、センサ特性や媒体による減衰が考慮されていないため、シミュレーションで得られたいいくつかのケースについて、水試験を行い計測システムとしての性能検証を行うことが必要である。

音響伝播シミュレーションは、温度ゆらぎの影響評価を行うことも可能であるため、燃料集合体の頂部の温度分布をモデル化し、超音波の伝播状況を評価するとともに、温度ゆらぎによって影響された受信波形に統計的な処理を与え、どの程度改善可能か評価することが考えられる。

温度ゆらぎ対策としては、発信信号を M 系列信号等の連続波として受信波形との時間相関処理を行う方法が考えられるが、シミュレーションの入力波形に M 系列信号を与え、解析結果で得られた反射エコー信号との相関処理を行うことによりその有効性を評価することが可能である。

また、シミュレーションによる評価の後に実機を用いた試験を行い、時間相関処理が実際の炉内で発生するゆらぎに対してどの程度有効であるかを評価し、実機への適用性を確認する。

(3) 駆動部

単眼型トランステューサによる検査装置の駆動部は、基本的に駆動部を炉外に設置する方式であるため、延長管等の構造物を運転中の炉内で駆動する必要があることから 600°C 程度の温度耐久性を有し、温度変化による変形等が少なく良好な位置決め精度を有する構造及び材料等の検討が必要である。

表 2.3-1 高温用超音波センサの仕様

前長 (L)	27±2mm
直径 (φ)	15±1mm
圧電振動子	ニオブ酸リチウム
振動子公称周波数	5MHz
振動子直径	10mm
電極材質	白金
リード線材質	白金
遅延材	純チタン
耐熱性	550°C
ろう材	アルミ系合金

表 2.3-2 №.1 センサの試験結果

試験検査項目	試験温度	試験結果	判定結果
(a)反射エコー振幅	常温	47dB(写真 2.3-2 を参照)	感度差 5dB (図 2.3-3 を参照)以内 であり製造誤差内 であることを確認
	250°C	47dB(写真 2.3-3 を参照)	
	350°C	49dB(写真 2.3-4 を参照)	
	500°C	52dB(写真 2.3-5 を参照)	
(b)パルス幅	常温	0.64 μ sec(図 2.3-4 を参照)	ほぼ一定であるこ とを確認
	250°C	0.68 μ sec(図 2.3-5 を参照)	
	350°C	0.68 μ sec(図 2.3-6 を参照)	
	500°C	0.73 μ sec(図 2.3-7 を参照)	
(c)周波数特性	常温	6.1MHz(図 2.3-8 を参照)	ほぼ一定であるこ とを確認
	250°C	5.9MHz(図 2.3-9 を参照)	
	350°C	5.9MHz(図 2.3-10 を参照)	
	500°C	5.9MHz(図 2.3-11 を参照)	
(d)抵抗値	常温	2MΩ	
(e)探傷器の印可電圧	常温	+88V(UM731)(写真 2.3-10 を参照) -314V(PR002)(写真 2.3-11 を参照)	_____
(f)寸法測定値	常温	L=27 mm, φ = 14.95 mm (図 2.3-1 を参照)	規定値以内であるこ とを確認

表 2.3-3 №.2 センサの試験結果

試験検査項目	試験温度	試験結果	判定結果
(a)反射エコー振幅	常温	49dB(写真 2.3-6 を参照)	感度差 5dB (図 2.3-3 を参照)以内 であり製造誤差内 であることを確認
	250°C	50dB(写真 2.3-7 を参照)	
	350°C	51dB(写真 2.3-8 を参照)	
	500°C	54dB(写真 2.3-9 を参照)	
(b)パルス幅	常温	0.37 μ sec(図 2.3-12 を参照)	ほぼ一定であるこ とを確認
	250°C	0.37 μ sec(図 2.3-13 を参照)	
	350°C	0.37 μ sec(図 2.3-14 を参照)	
	500°C	0.29 μ sec(図 2.3-15 を参照)	
(c)周波数特性	常温	3.7MHz(図 2.3-16 を参照)	ほぼ一定であるこ とを確認
	250°C	3.7MHz(図 2.3-17 を参照)	
	350°C	3.7MHz(図 2.3-18 を参照)	
	500°C	4.3MHz(図 2.3-19 を参照)	
(d)抵抗値	常温	2MΩ	
(e)探傷器の印可電圧	常温	+88V(UM731)(写真 2.3-10 を参照) -314V(PR002)(写真 2.3-11 を参照)	_____
(f)寸法測定値	常温	L=27 mm, φ = 14.95 mm (図 2.3-1 を参照)	規定値以内であるこ とを確認

表 2.5-1 計測部の開発課題の整理

項目	要求仕様	開発課題及び方策	開発内容
1.超音波センサ	<ul style="list-style-type: none"> <li>●環境条件 使用温度 : 600°C 照射条件 : <math>5.2 \times 10^{12} \text{ nV}</math> 冷却材流量 : 100%</li> <li>●音響性能 周波数 : 5~10MHz S/N : 20dB 以上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●耐熱性向上 現状の高温用センサの耐熱性は、550°C(1ヶ月間)であり、600°Cでは使用できないため耐熱性の良好なろう材及び振動子の脱酸防止技術を開発する必要がある。</li> <li>●耐放射線性向上 通常のニオブ酸リチウムは、Li<sub>6</sub>が一定の割合で含まれているが、これがどの程度影響するか中性子照射試験を行い確認する必要がある。</li> <li>●製作性 センサのケース材(チタン)と駆動部(SUS材)の接合構造を確立する必要がある。</li> </ul>	1.オフライン照射試験 市販のニオブ酸リチウムを使用した高温用超音波センサ要素試作体を試作し、耐熱性及びオフラインで「常陽」の運転中炉内で高温照射試験を行う。 2.耐熱性向上評価 素子と前面板を接合するろう材の耐熱性を向上させた高温用超音波センサの要素試作体を製作し、耐熱性向上のための評価を行う。 3.オンライン照射試験 1.及び2.項の開発成果に基づき、改良型の高温用超音波センサを製作し、「常陽」の運転中の炉内で高温・照射試験をオンラインで行い、炉内での基本性能を評価する。 4.集積化開発 運転中の炉心頂部の画像化を行うための集積化マトリックスセンサを試作し、ナトリウム中で画像化を行う。 5.実機体系での製作性検討 実機体におけるセンサと駆動部の取り合い構造の適用性を確認する。
2.計測システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>●炉心頂部変位 計測精度 : 0.1mm 目標 但し、炉心上部での温度ゆらぎに対する対策が必要。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●検出性能評価 「常陽」の炉心構成要素の変形計測の性能評価と炉心構成要素のハンドリングヘッド部の最適形状を決定する必要がある。</li> <li>●温度ゆらぎ対策 時間相関処理による統計処理により炉心頂部位置の計測精度に対する温度ゆらぎの影響をどの程度低減できるか確認する必要がある。</li> <li>●シミュレーション 計測及び画像化性能については、超音波シミュレーションにより机上で行う。</li> </ul>	1.音響シミュレーションによる評価 ハンドリングヘッド部の形状及びセンサ配置等をパラメータとして超音波の伝播特性をシミュレーションすることにより超音波センサの最適配置及びハンドリングヘッド部の最適形状を評価する。シミュレーションで得られた時系列データにより計測精度の評価を行う。 2.水中試験 1.項の結果に基づき、燃料集合体のハンドリングヘッド部の形状を模擬した試験体を製作し、水中用超音波センサを用いて性能評価を行う。 3.温度ゆらぎの影響評価 燃料頂部の温度分布データに基づき温度ゆらぎ場での超音波の伝播シミュレーションを行い、ゆらぎによる影響を評価する。シミュレーションで得られた時系列データを統計的な手法により処理し、精度改善の効果がどの程度達成できるか確認する。 4.オンライン照射試験 ナトリウム中でのオンライン試験で得られた反射エコーを統計的手法で信号処理して温度ゆらぎの影響低減の効果及び計測精度の評価を行う。
3.駆動部	<ul style="list-style-type: none"> <li>●環境条件 使用温度 : 600°C 照射条件 : <math>5.2 \times 10^{12} \text{ nV}</math> 冷却材流量 : 100%</li> <li>●炉心構成要素頂部検査 【単眼トランステューザ】 旋回機構 : 外部駆動 昇降機構 : 外部駆動 【集積化トランステューザ】 走査機構 : 内部駆動 (精度 0.1mm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●耐熱摺動機構 (原子炉運転中の摺動部)</li> <li>●流路確保</li> <li>●製作性・交換性</li> <li>●耐熱・耐放射線走査機構 MIケーブル等の材料を巻線に使用した 600°C の耐熱性</li> </ul>	1.材料選定等の設計検討を行う。 燃料出口からの冷却材の流れを阻止しない構造を流动解析により検討する。 検出部/駆動機構組立時のケーブル取扱作業性の向上及びセンサー交換可能な構造を検討する。 2.高温用コネクタの調査を行う。 3.巻線材料の選定 運転中炉内で使用可能な材料選定を行い、巻線材料を試作・評価する。 4.走査機構試作 上記の試作評価結果に基づき、トランステューザの走査機構部を製作し高温評価を行う。 5.実機設計を行い、実機を製作する。

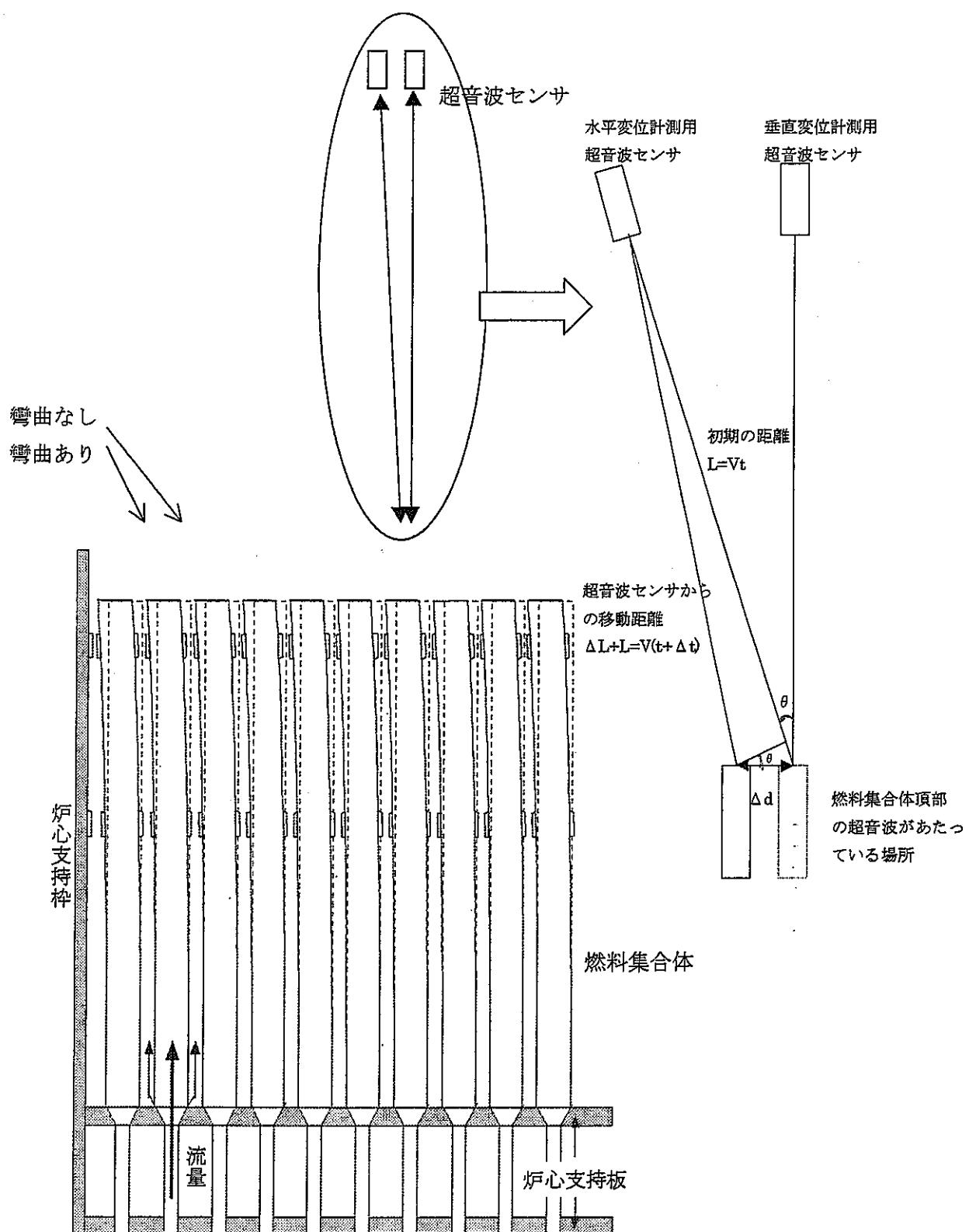


図 2.1-1 超音波センサによる炉心湾曲変位計測の概念図

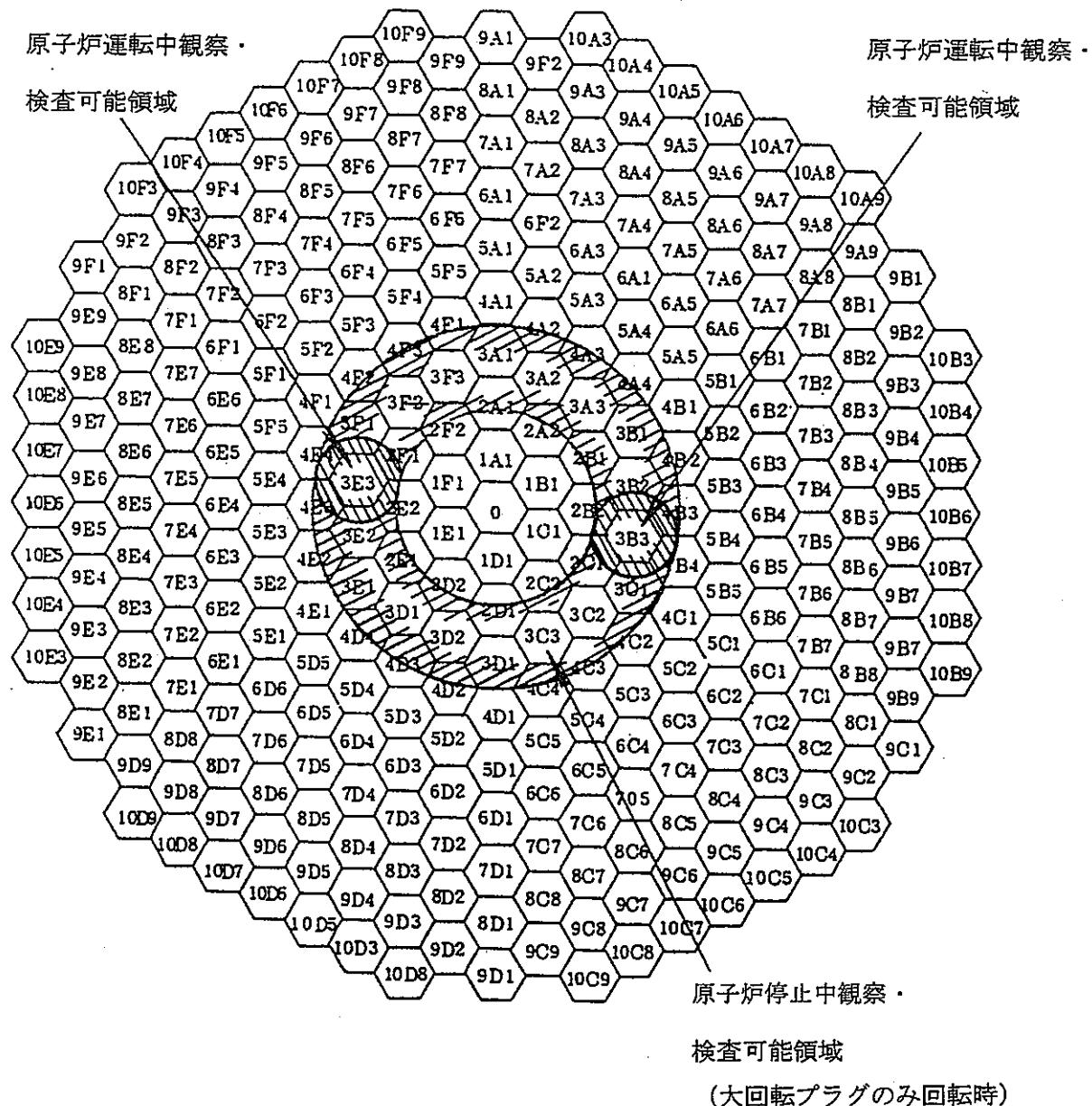


図 2.2-1 CRD 予備孔を利用する場合の炉内観察・検査可能領域（炉心第 3 列）

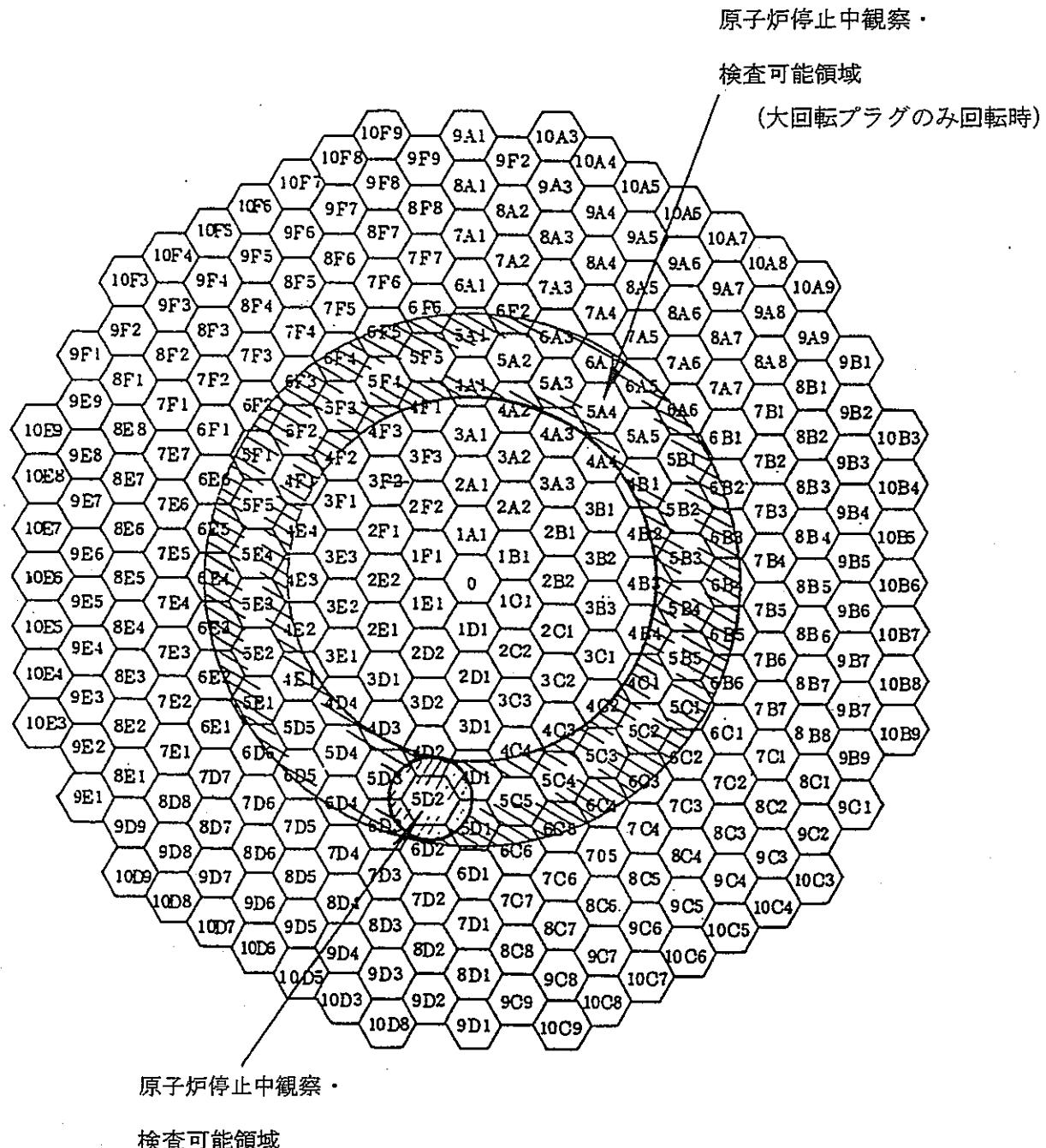
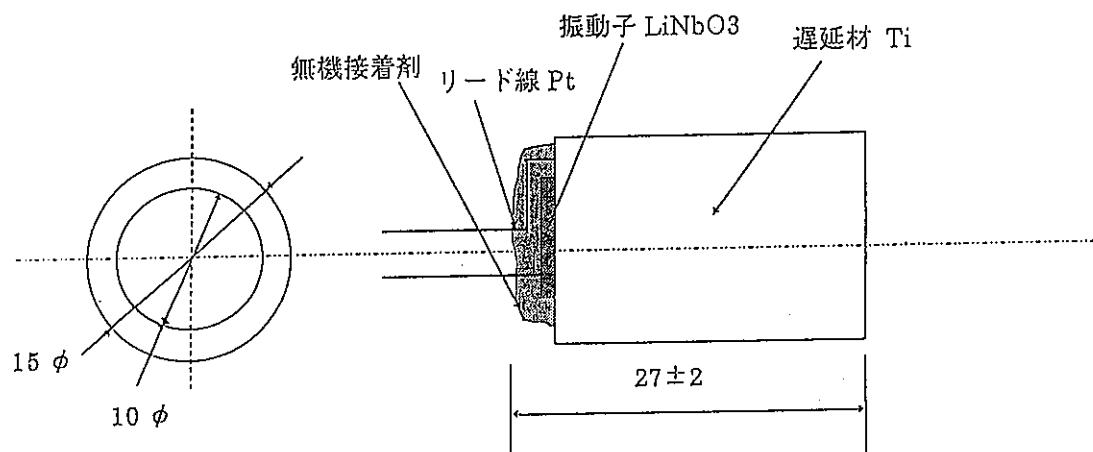
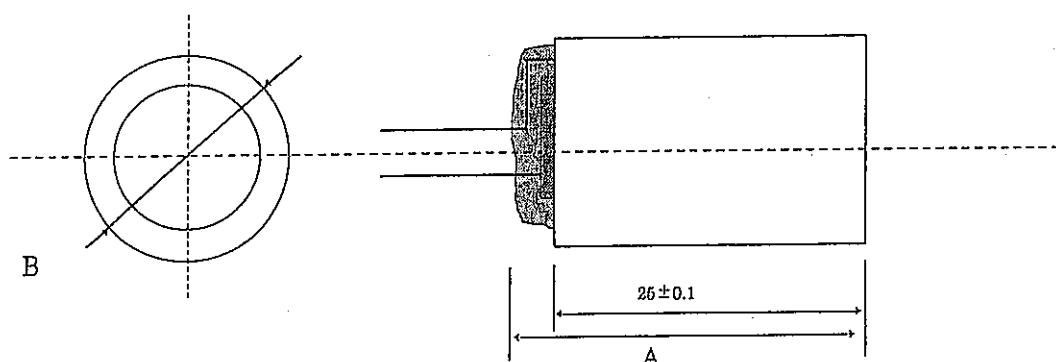


図 2.2-2 CRD 予備孔を利用する場合の炉内観察・検査可能領域（炉心第 5 列）



センサ設計寸法



寸法計測結果

計測箇所	No 1	判定	No 2	判定	設計寸法
A	27	良	27	良	27 ± 2
B	14.95	良	14.95	良	15 ± 1

図 2.3-1 センサ設計寸法及び寸法計測結果

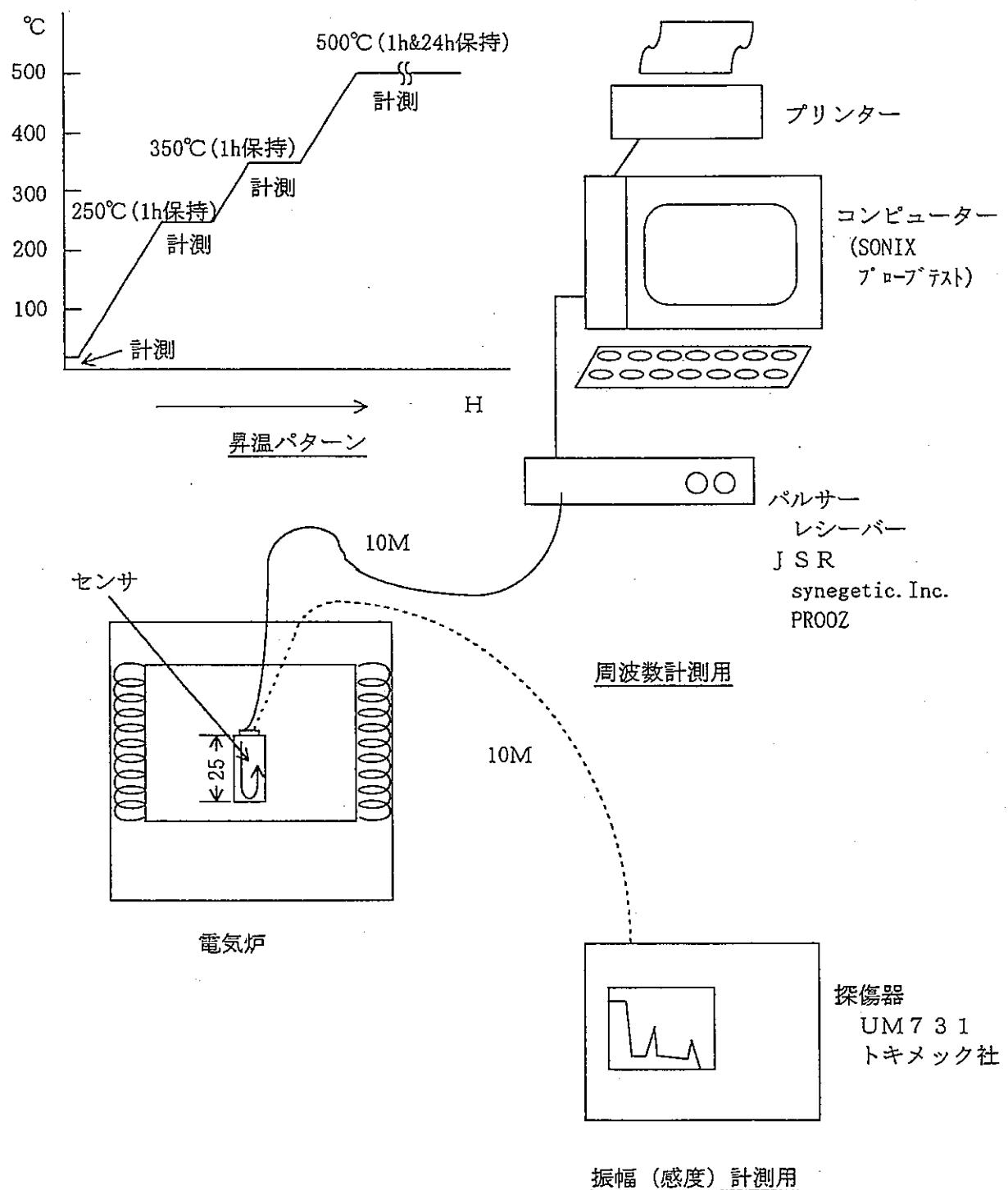


図 2.3-2 超音波特性試験概略図

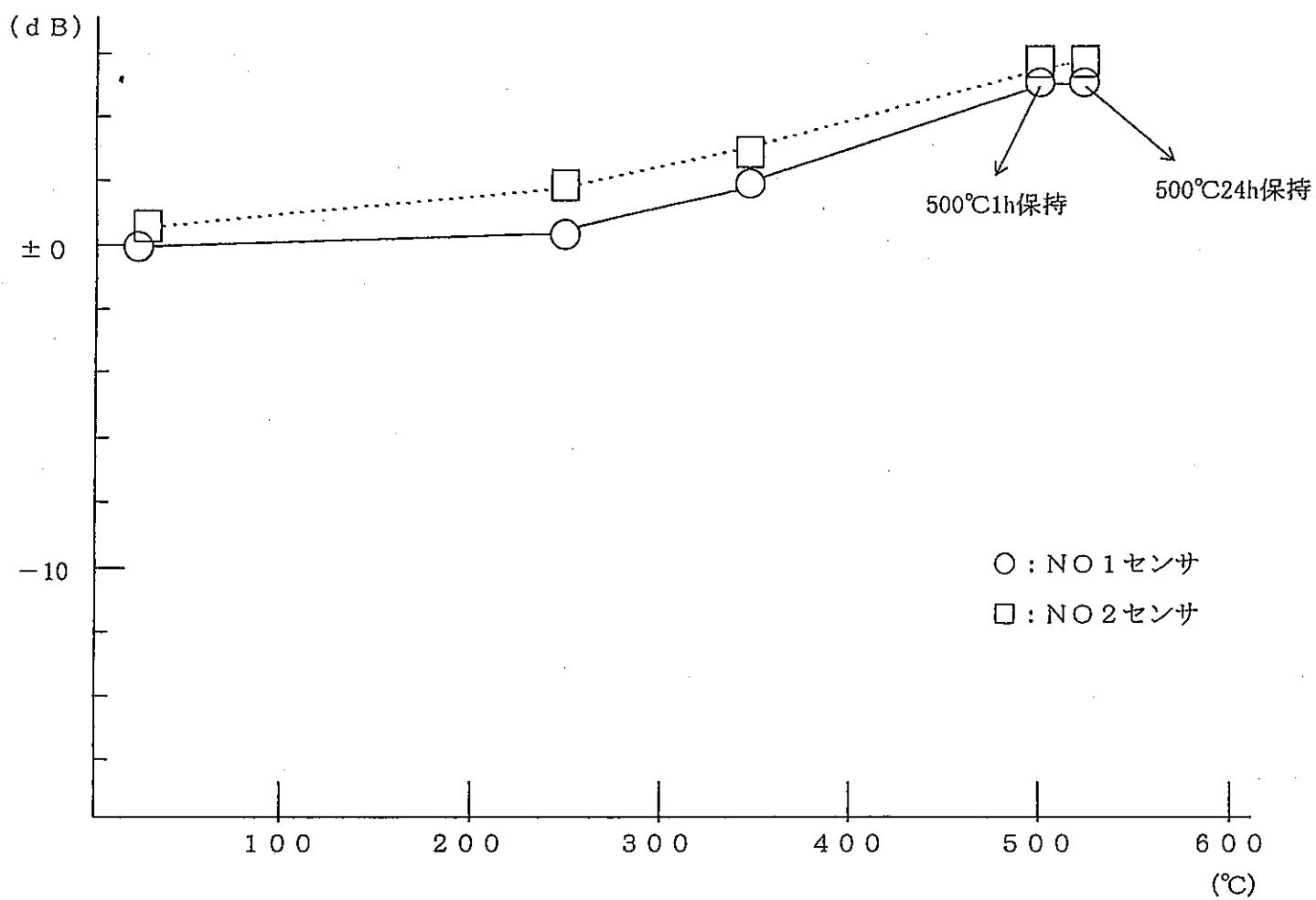


図 2.3-3 溫度による感度変化

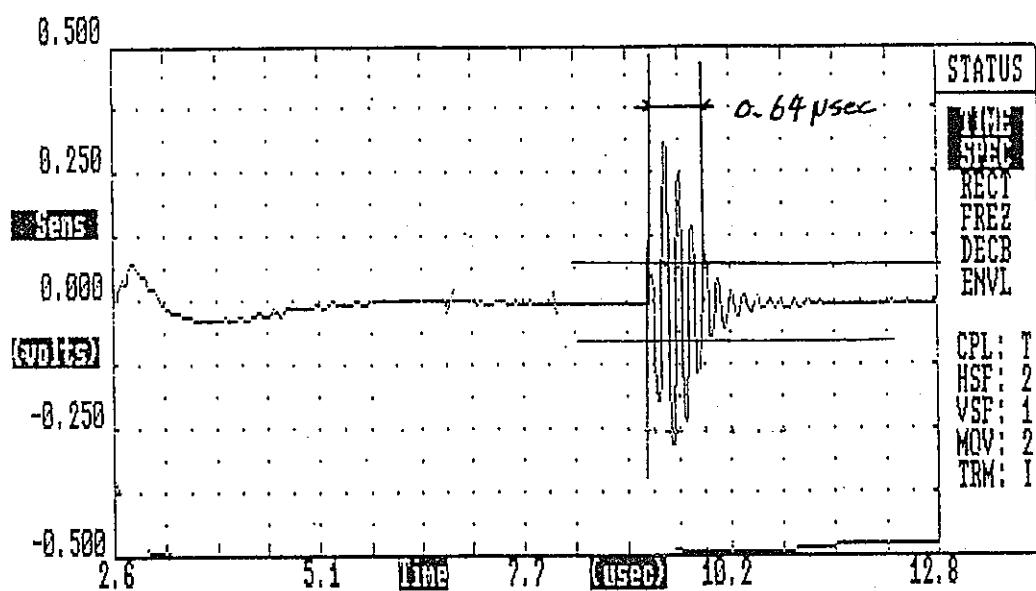


図 2.3-4 RF 波形(No1 センサ,常温) (感度:40dB,アッテネータ無)

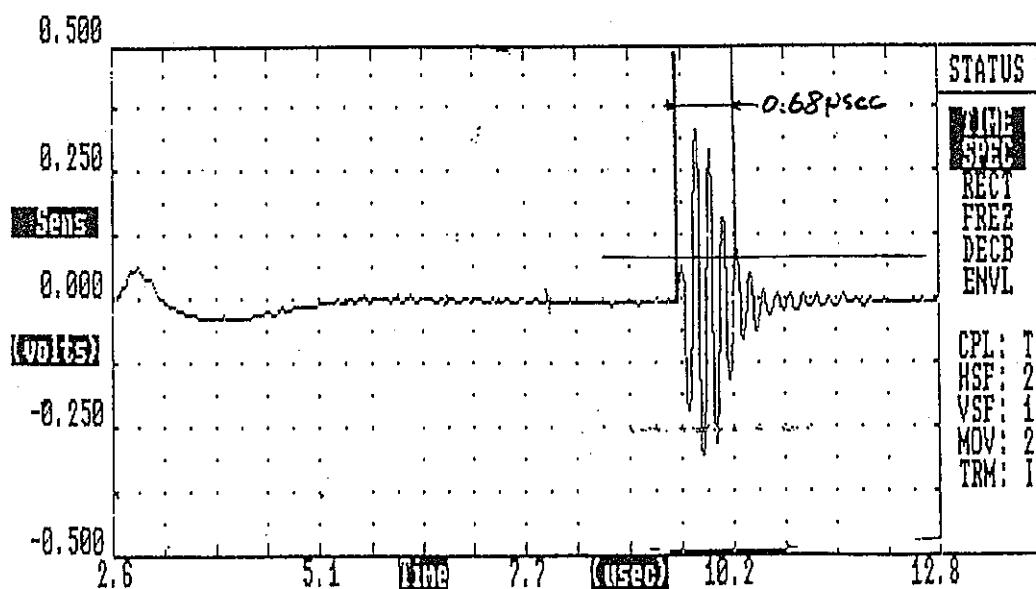


図 2.3-5 RF 波形(No1 センサ,250°C) (感度:40dB,アッテネータ無)

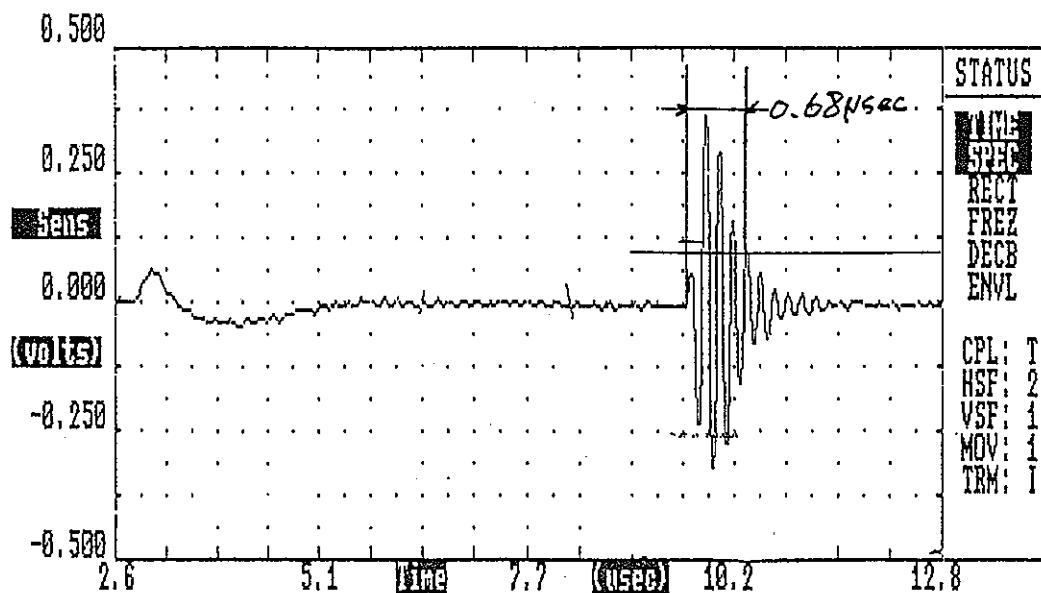


図 2.3-6 RF 波形(No1 センサ, 350°C) (感度:40dB, アッテネータ無)

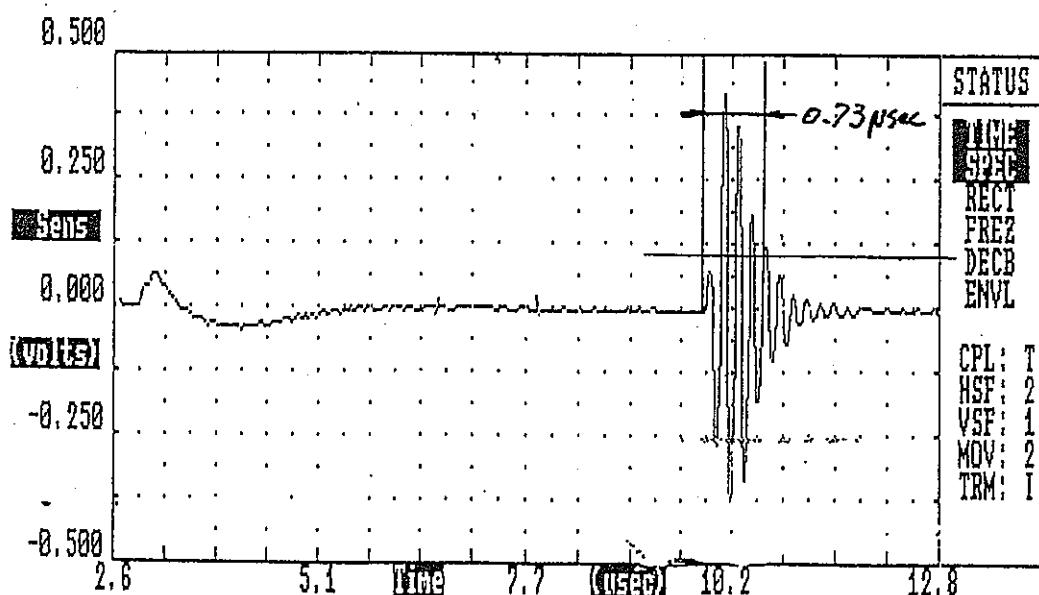


図 2.3-7 RF 波形(No1 センサ, 500°C) (感度:40dB, アッテネータ無)

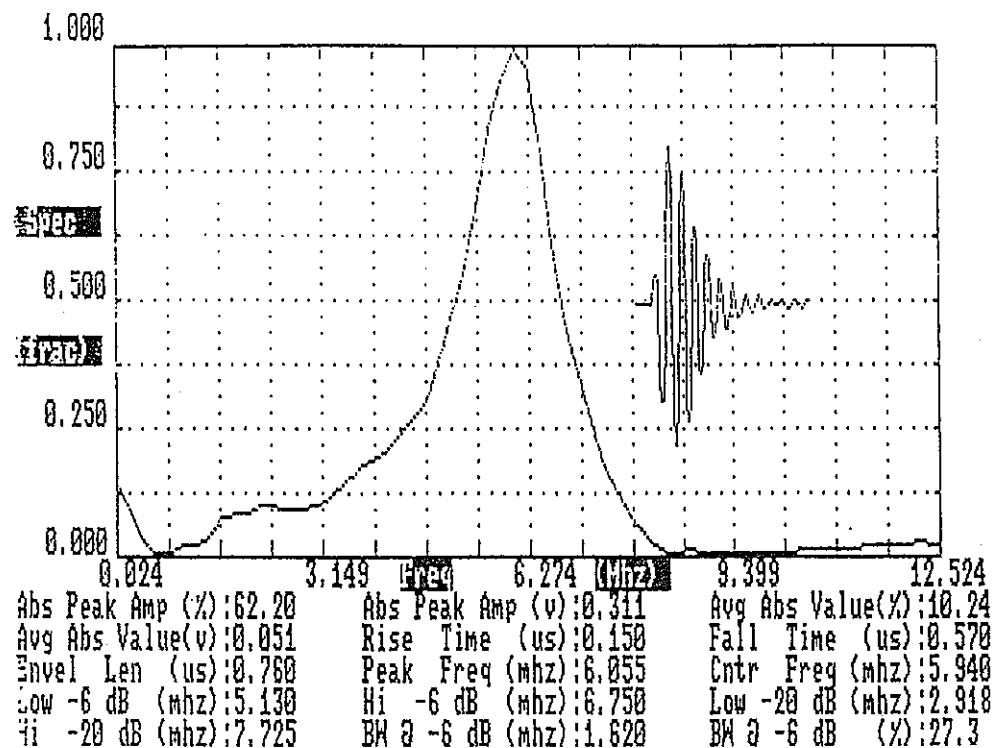


図 2.3-8 周波数分析(No1 センサ,常温) (感度:40dB,アッテネータ無)

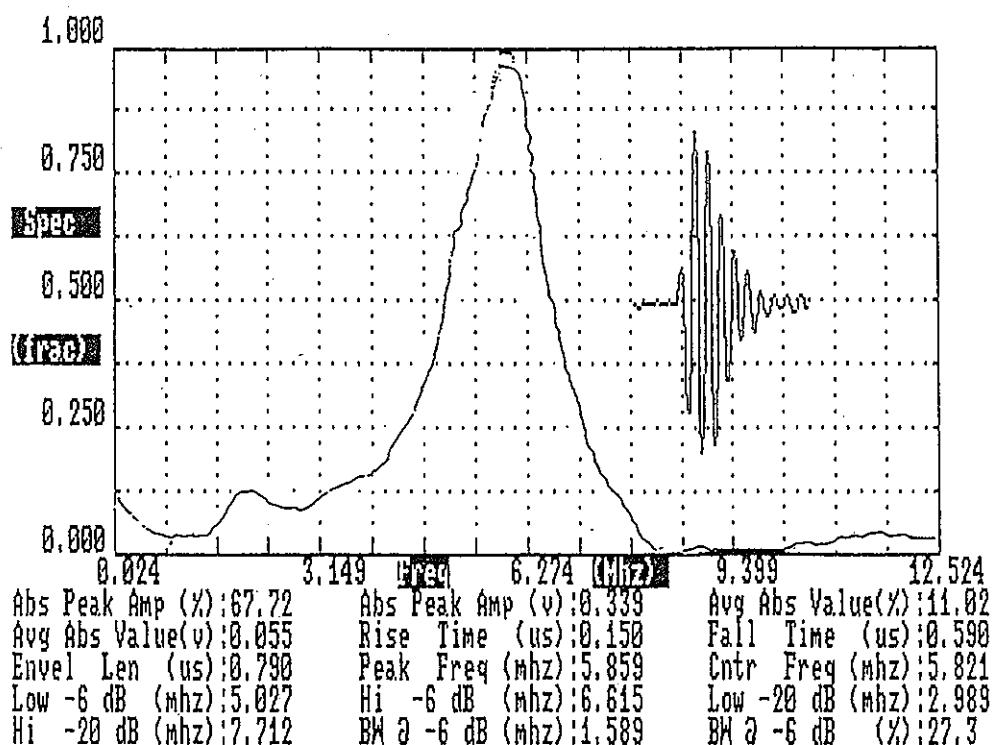


図 2.3-9 周波数分析(No1 センサ,250°C) (感度:40dB,アッテネータ無)

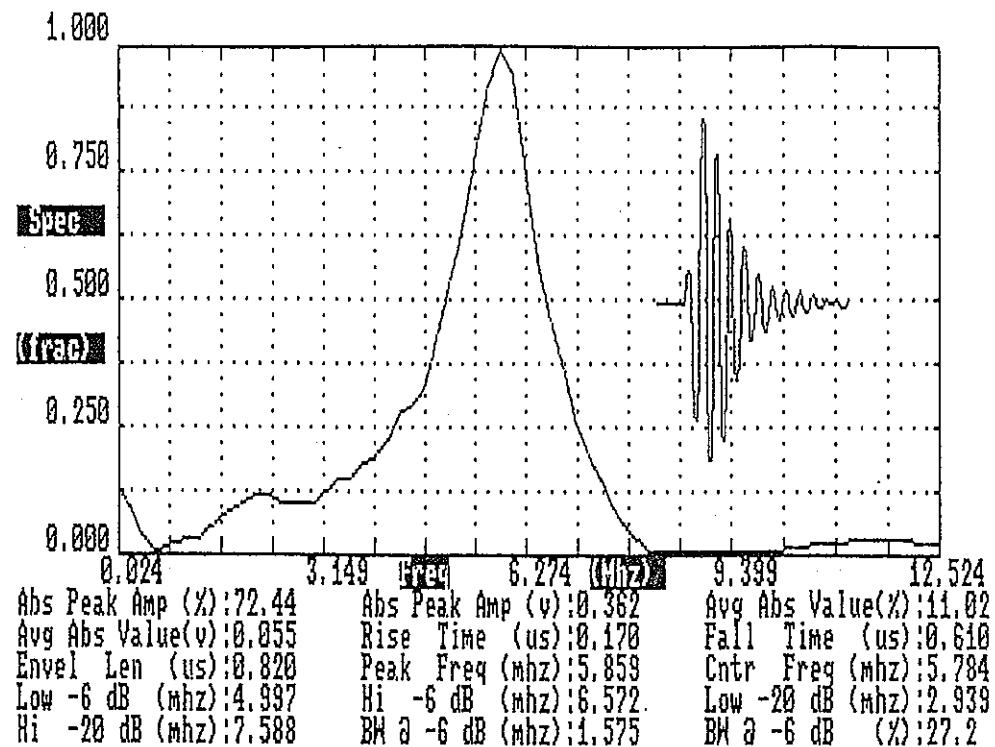


図 2.3-10 周波数分析(No1 センサ,350°C) (感度:40dB,アッテネータ無)

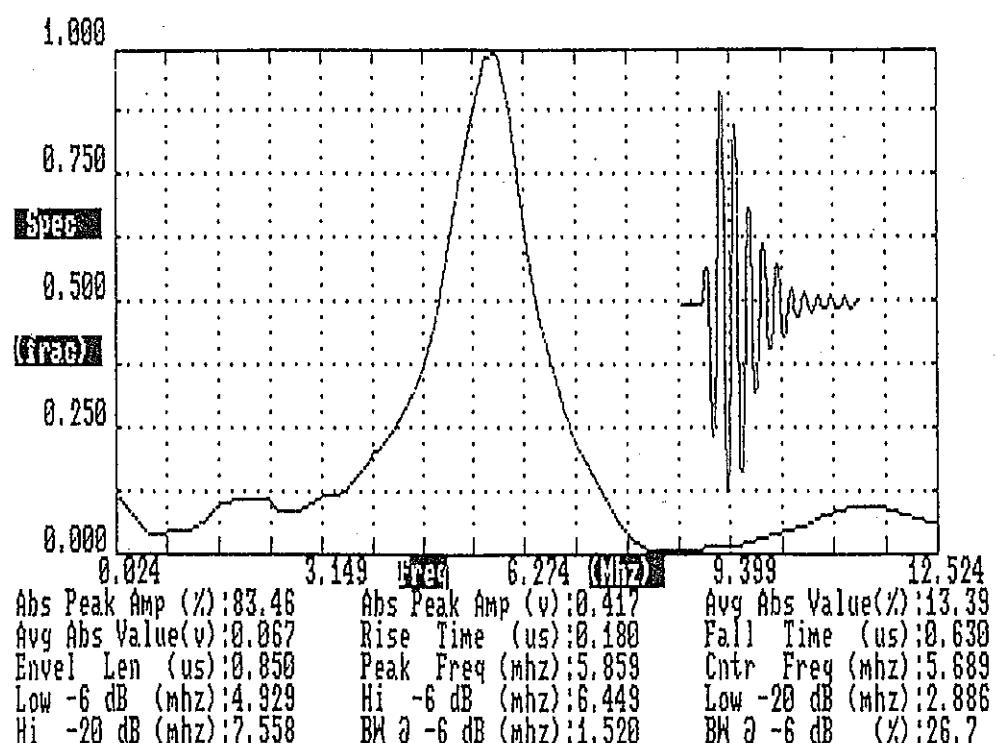


図 2.3-11 周波数分析(No1 センサ, 500°C) (感度:40dB, アッテネータ無)

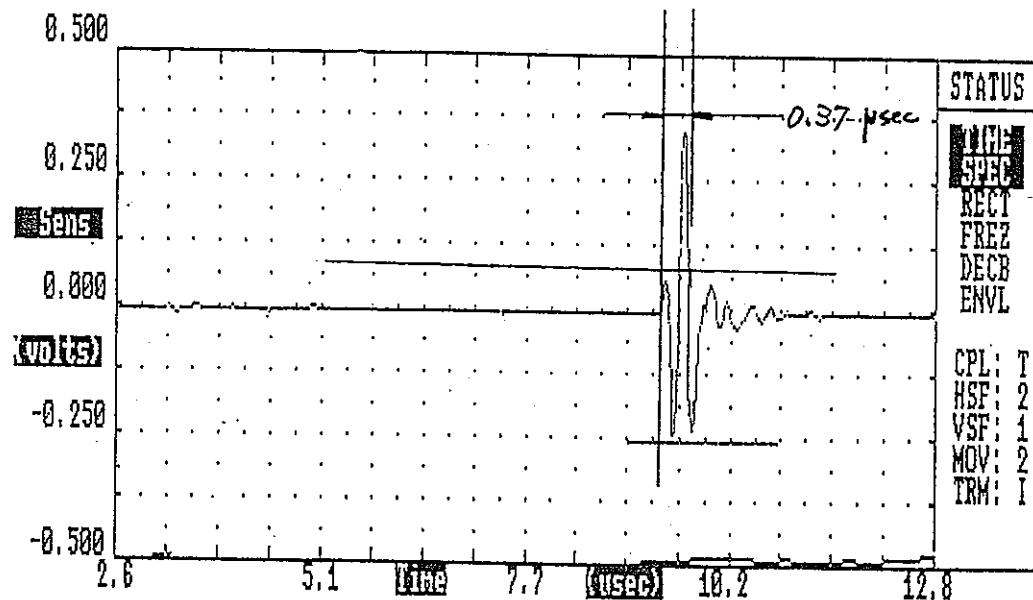


図 2.3-12 RF 波形(No2 センサ,常温) (感度:30dB,アッテネータ 8dB)

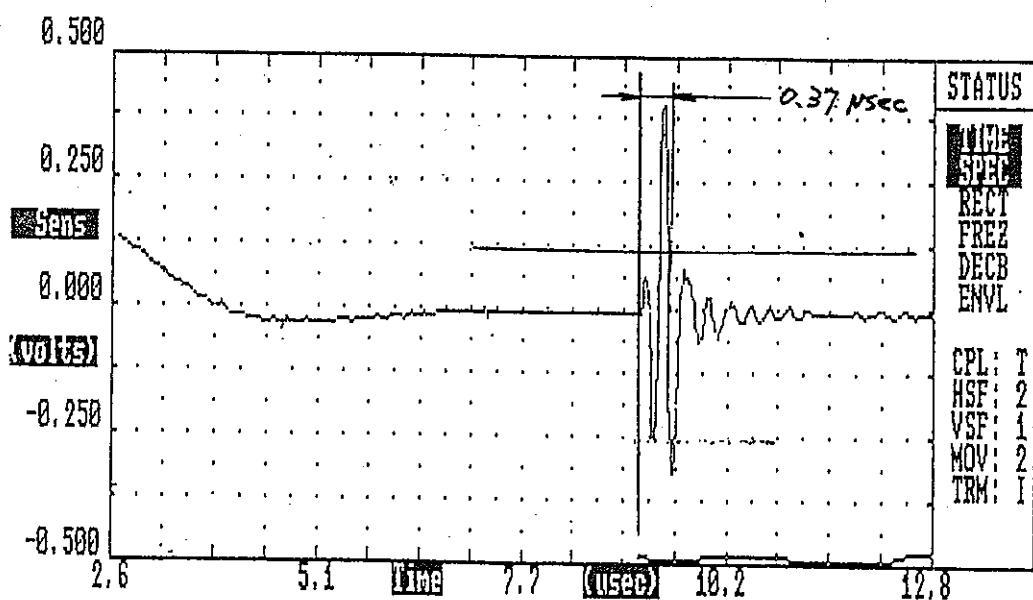


図 2.3-13 RF 波形(No2 センサ,250°C) (感度:30dB,アッテネータ 8dB)

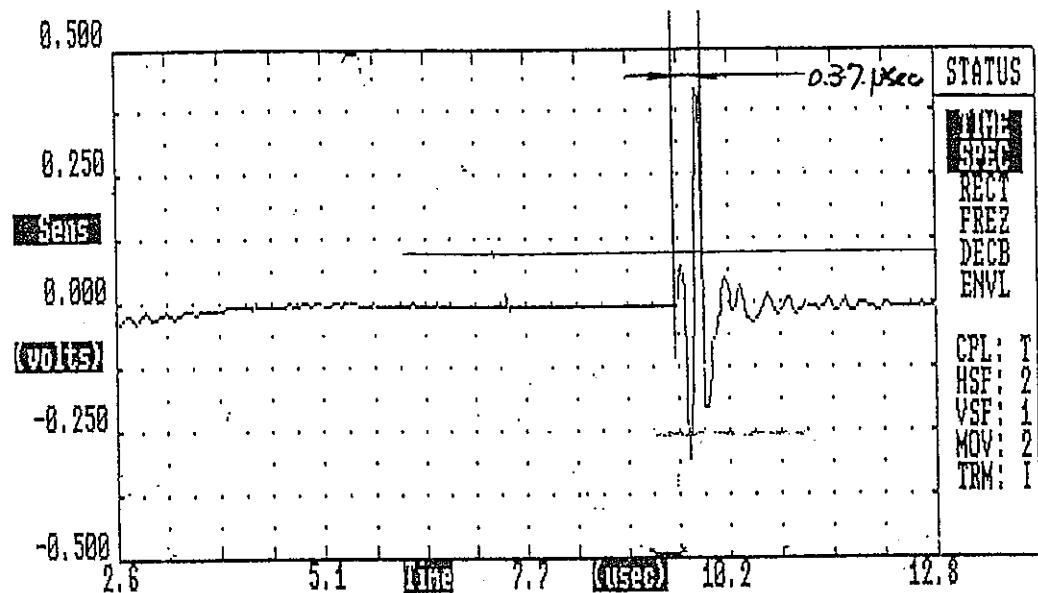


図 2.3-14 RF 波形(No2 センサ,350°C) (感度:30dB,アッテネータ 6dB)

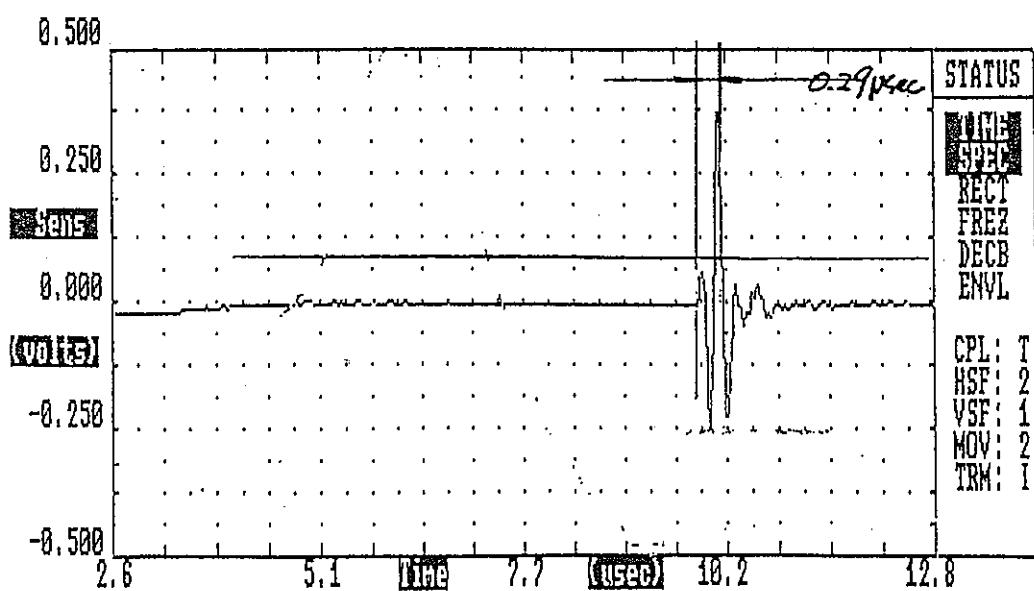


図 2.3-15 RF 波形(No2 センサ,500°C) (感度:40dB,アッテネータ 2dB)

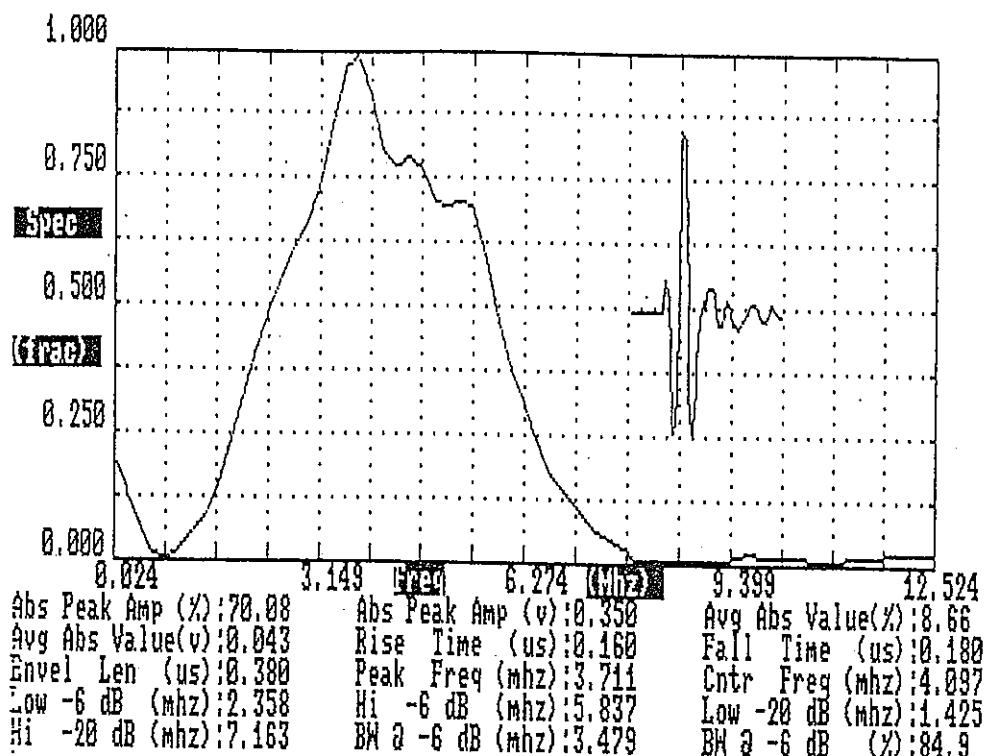


図 2.3-16 周波数分析(No2 センサ,常温) (感度:40dB,アッテネータ無)

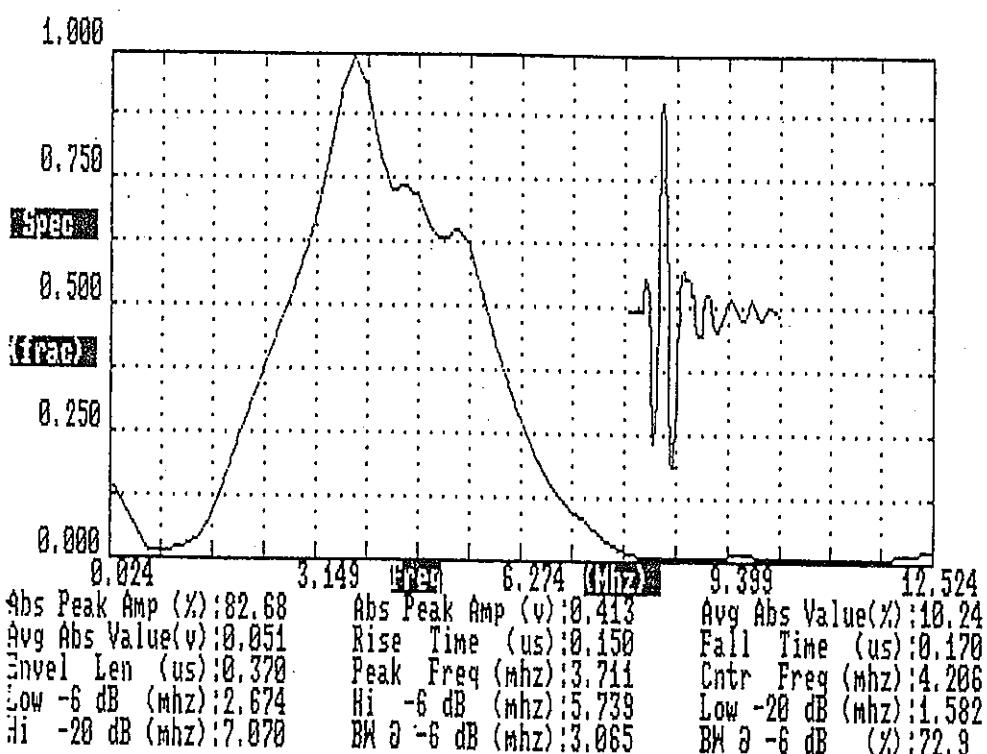


図 2.3-17 周波数分析(No2 センサ,250°C) (感度:40dB,アッテネータ無)

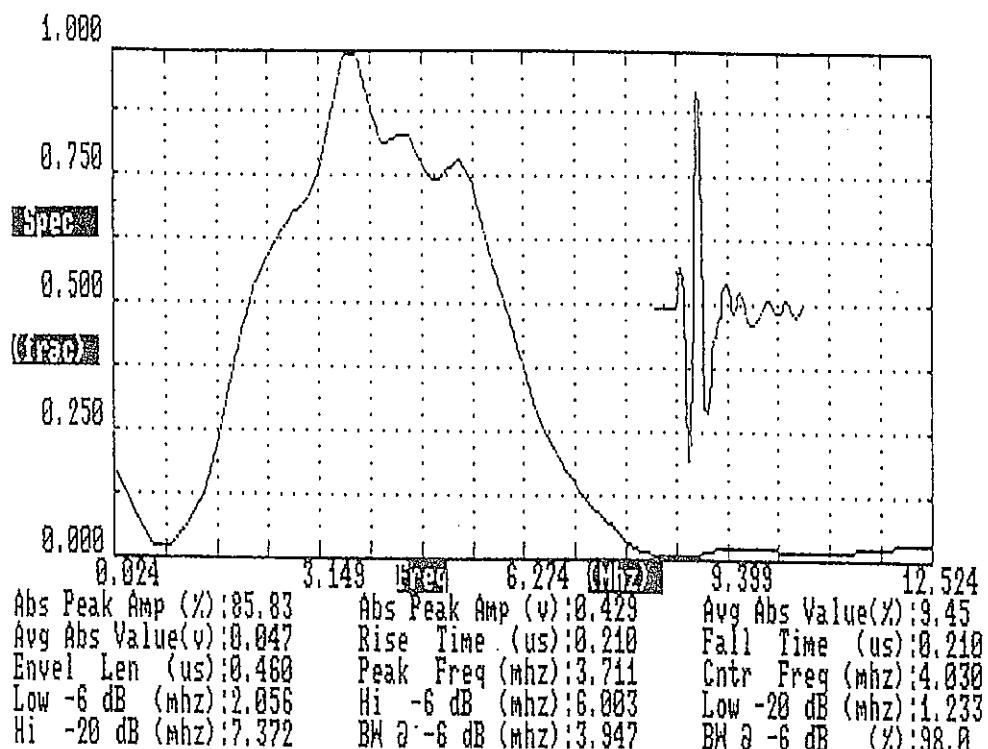


図 2.3-18 周波数分析(No2 センサ,350°C) (感度:40dB,アッテネータ無)

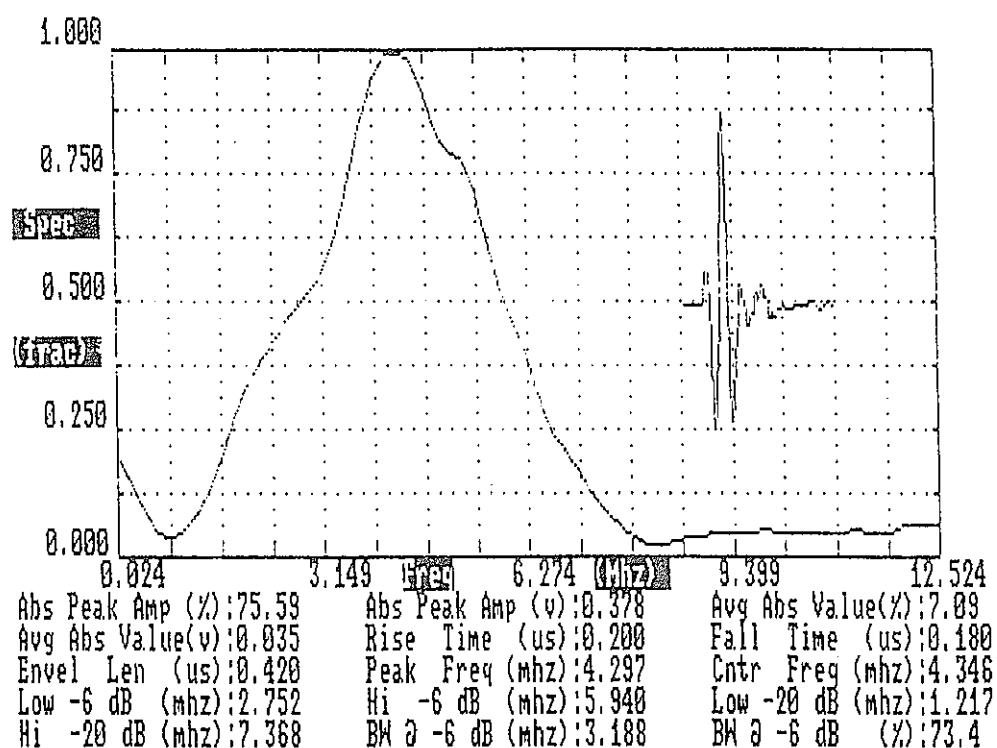
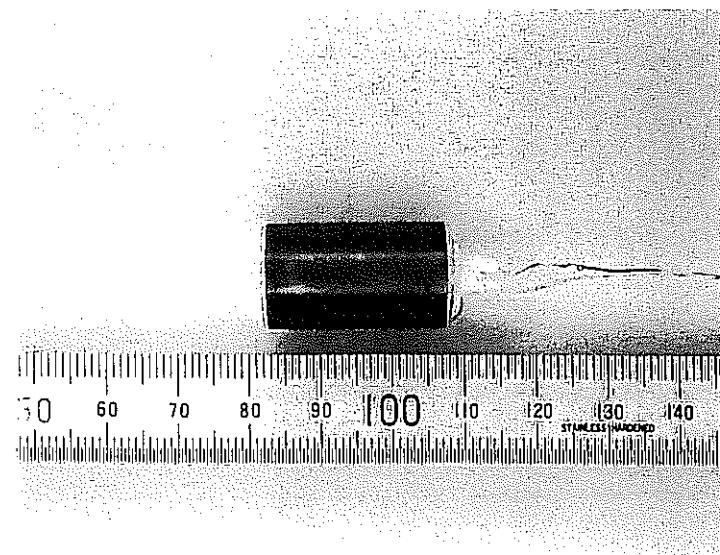
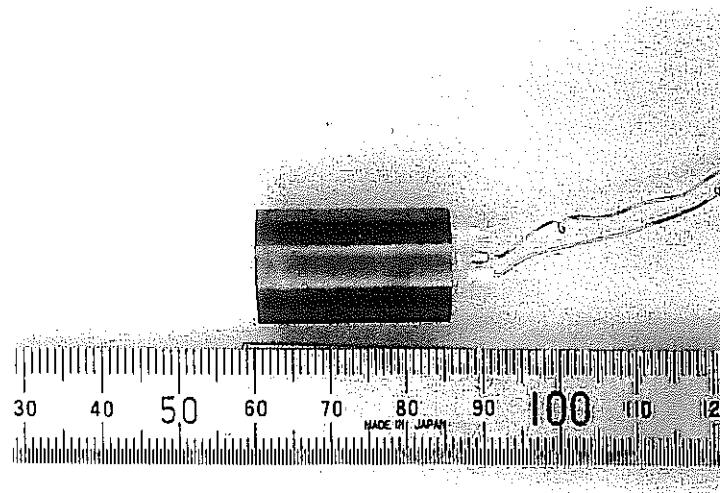


図 2.3-19 周波数分析(No2 センサ,500°C) (感度:40dB,アッテネータ無)

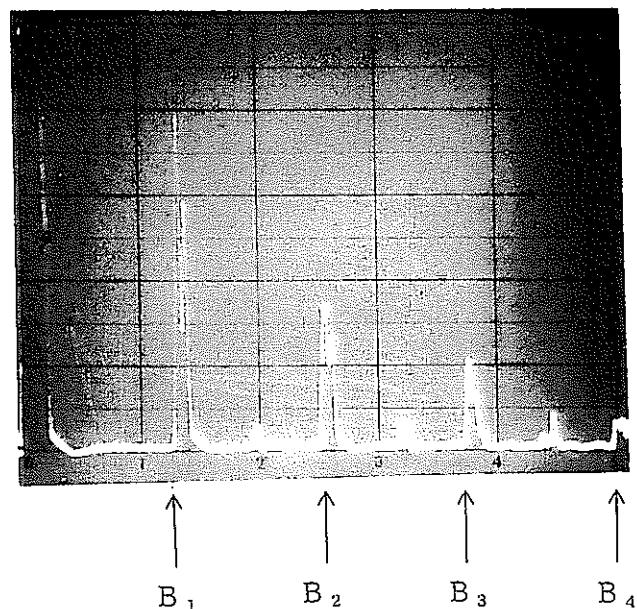


a ) N O 1 センサ外観



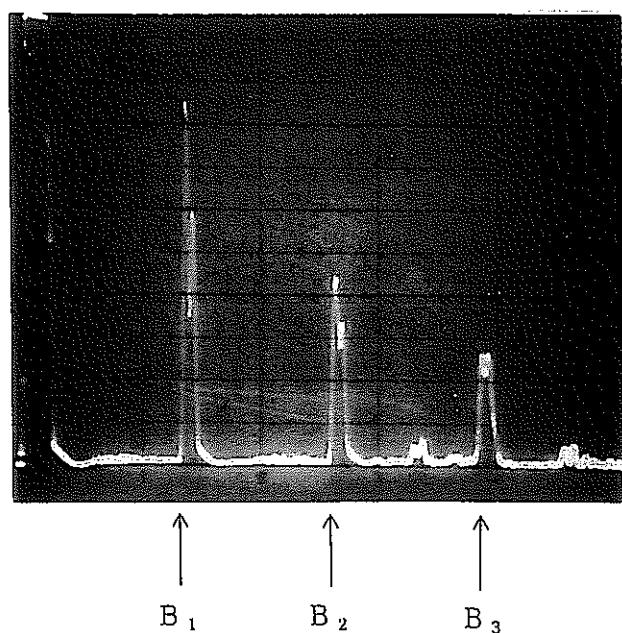
b ) N O 2 センサ外観

写真 2.3-1 センサ外観



フルスケール100mm  
(鋼中)  
感度47dB  
(トキメック UM731)

写真 2.3-2 A スコープ写真(No1 センサ, 常温)



フルスケール100mm  
(鋼中)  
感度48dB  
(トキメック UM731)

写真 2.3-3 A スコープ写真(No1 センサ, 250°C)

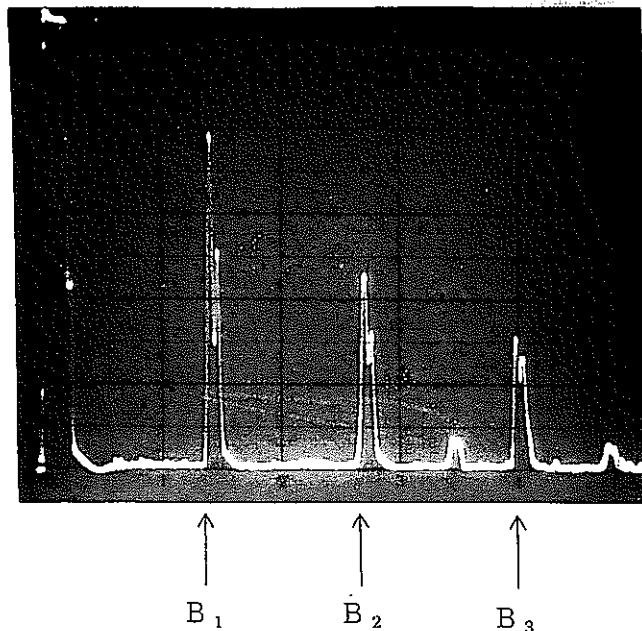


写真 2.3-4 A スコープ写真(No1 センサ, 350°C)

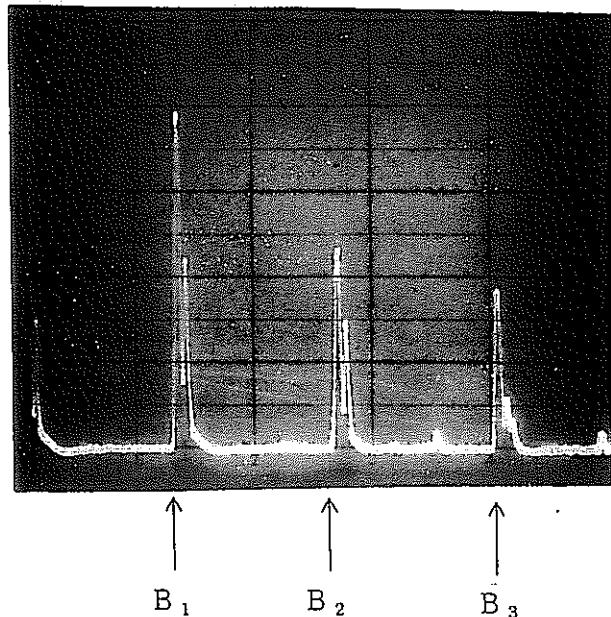
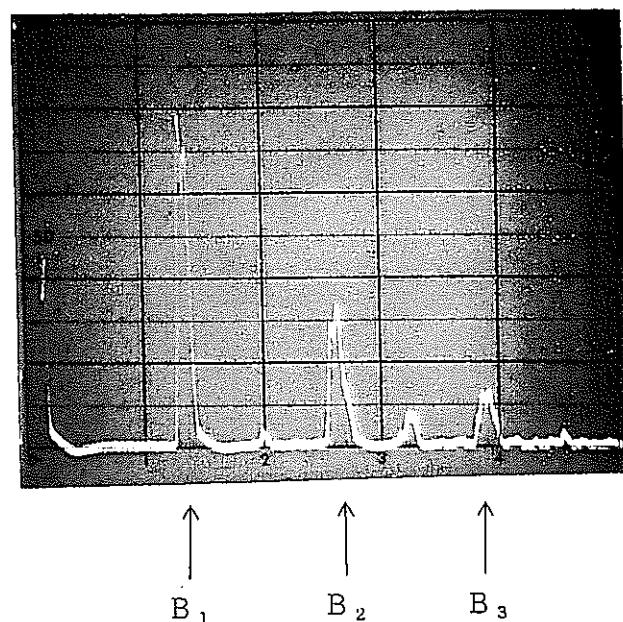
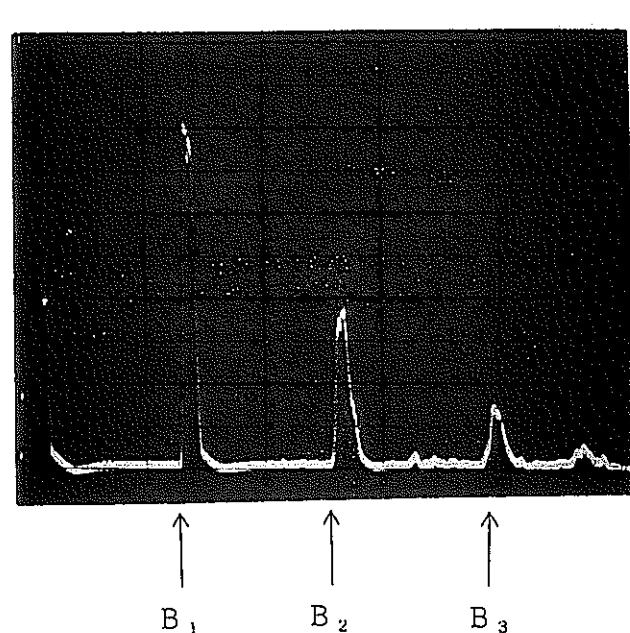


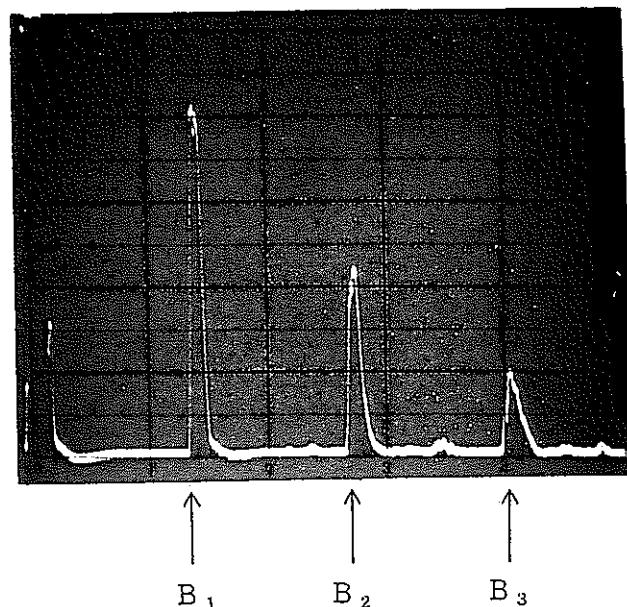
写真 2.3-5 A スコープ写真(No1 センサ, 500°C)



フルスケール100mm  
(鋼中)  
感度49dB  
(トキメック UM731)

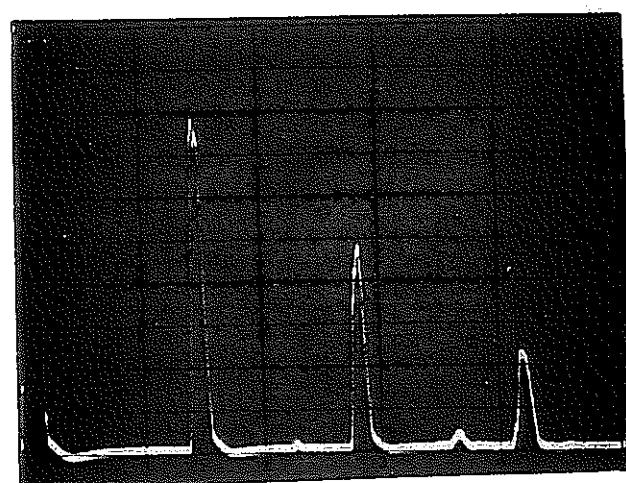


フルスケール100mm  
(鋼中)  
感度50dB  
(トキメック UM731)



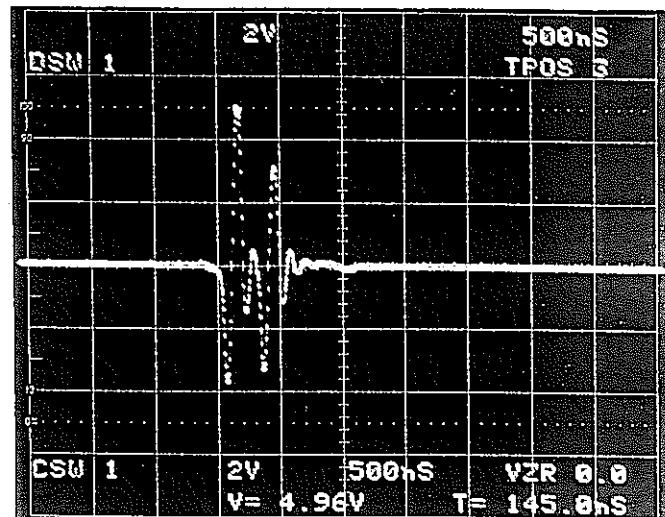
フルスケール100mm  
(鋼中)  
感度51dB  
(トキメック UM731)

写真 2.3-8 A スコープ写真(No2 センサ, 350°C)



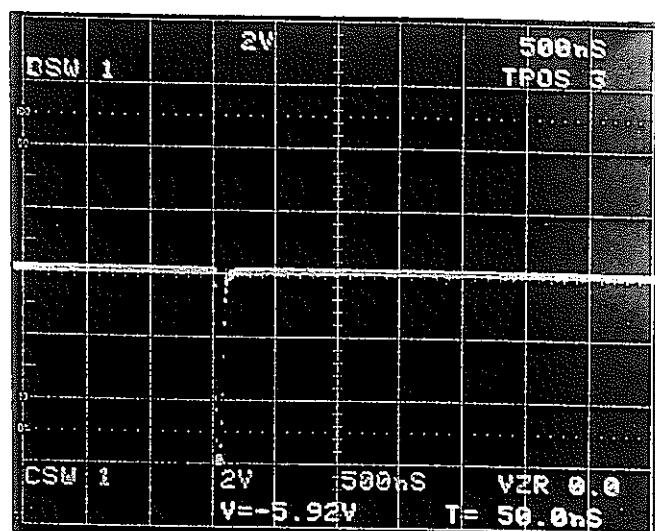
フルスケール100mm  
(鋼中)  
感度54dB  
(トキメック UM731)

写真 2.3-9 A スコープ写真(No2 センサ, 500°C)



$$* +4.96V \times 17.7 = +88V$$

写真 2.3-10 UM731 印加電圧



$$* -5.92V \times 53 = -314V$$

写真 2.3-11 PR002 印加電圧

(\*注: 計測値×倍率=実際の電圧)

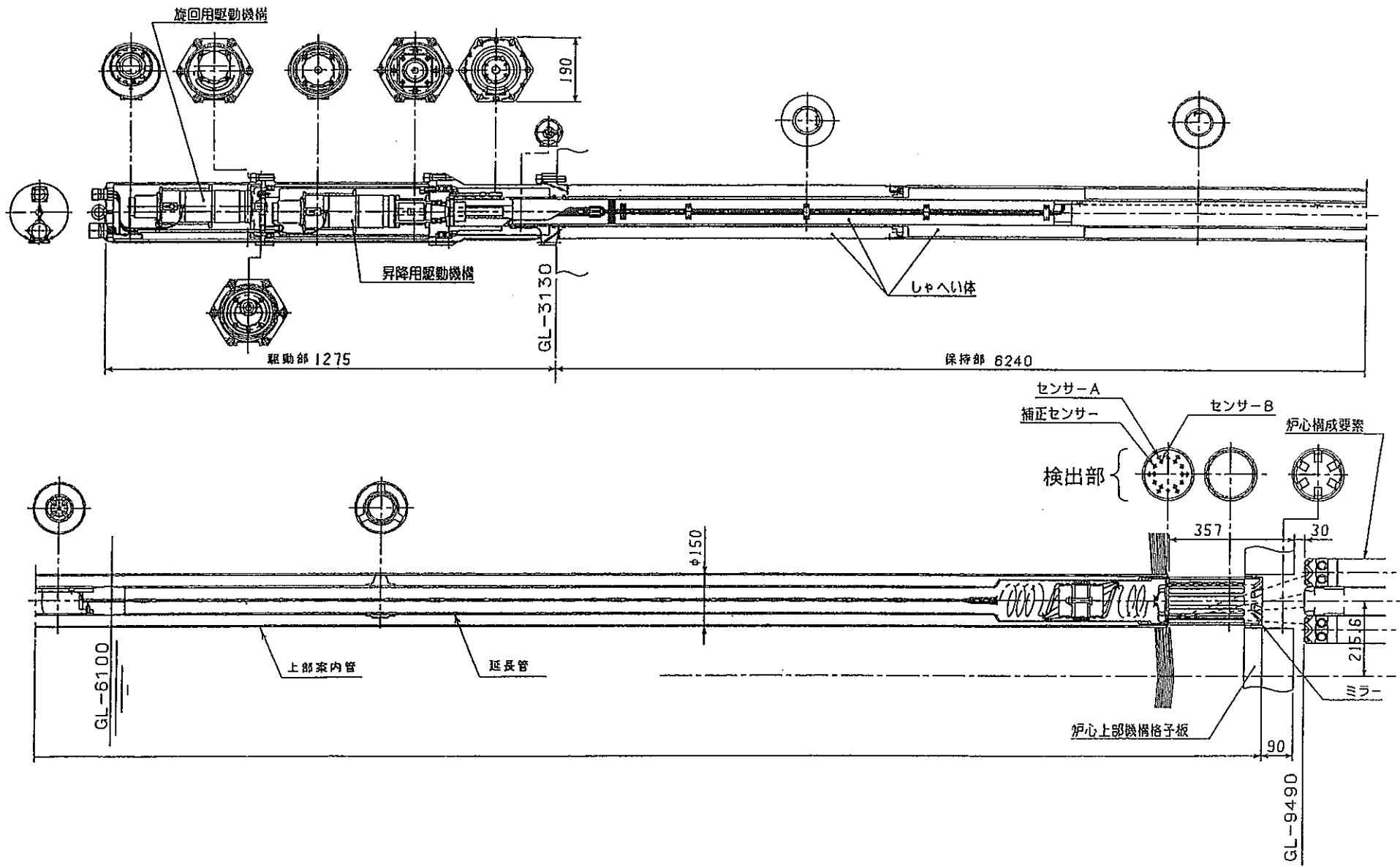


図 2.4-1 単眼型超音波炉内検査装置外形図

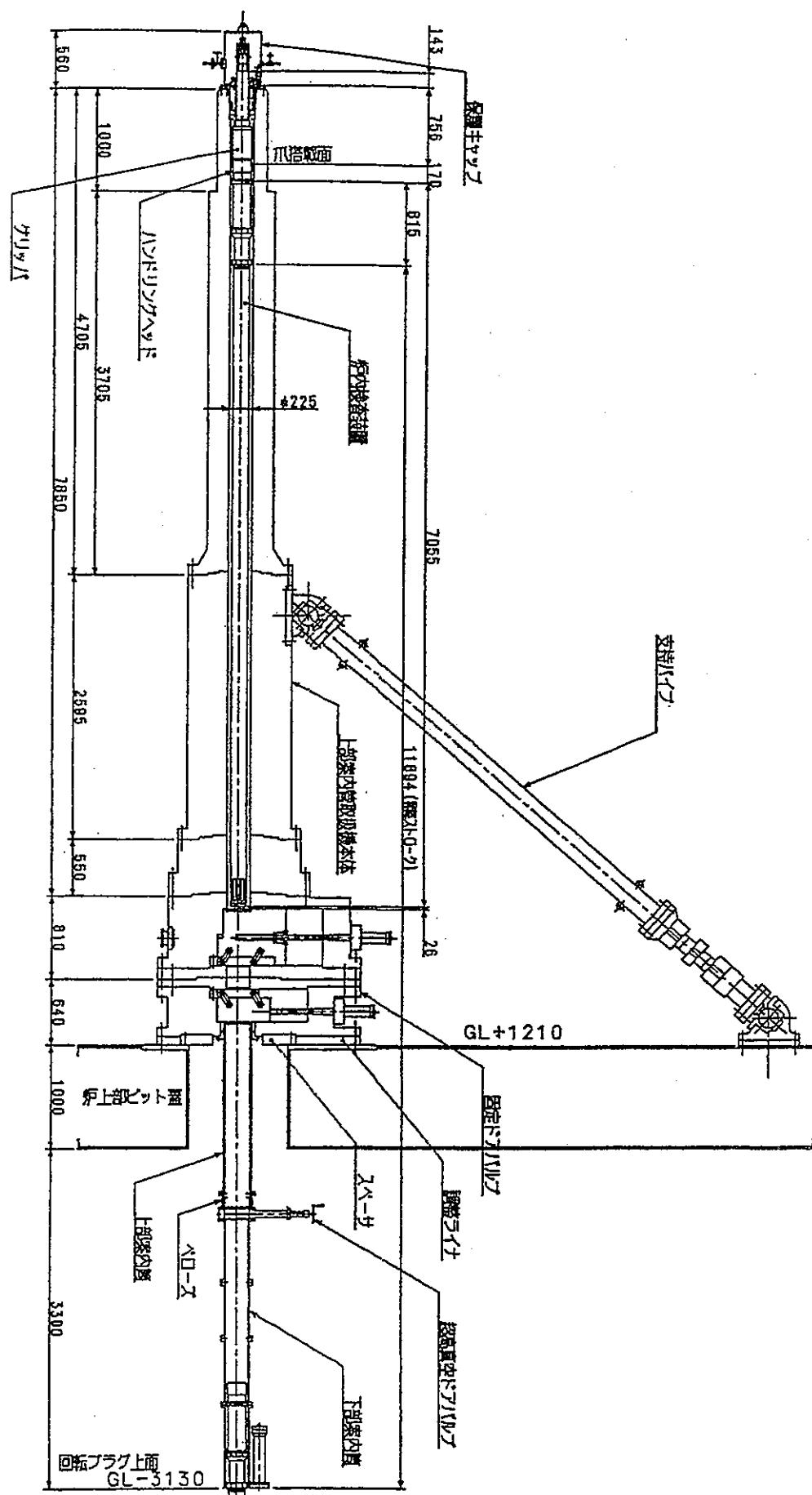


図 2.4-2 炉内検査装置取扱図

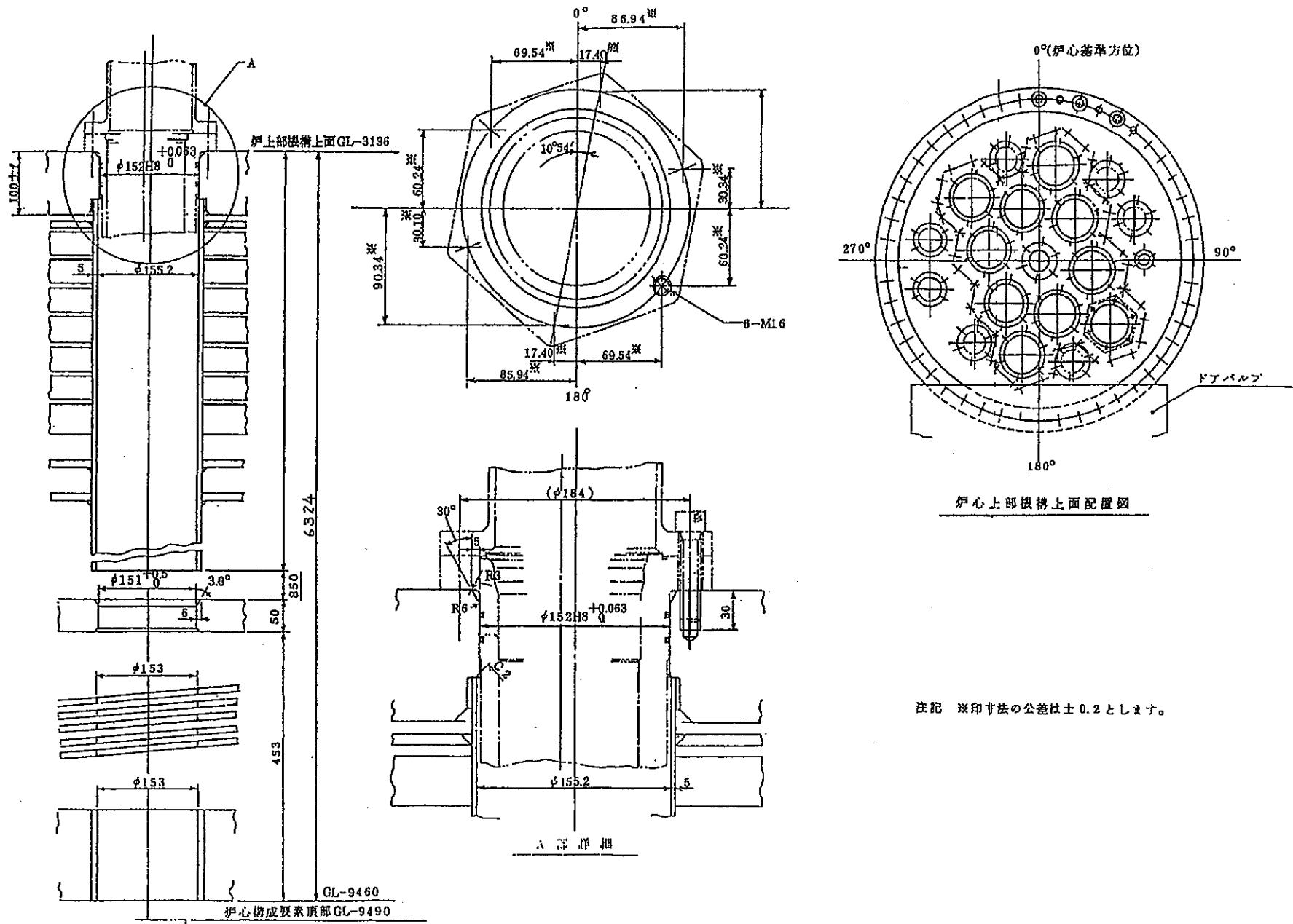


図 2.4-3 CRD 予備孔取合図

注記 ※印寸法の公差は±0.2 とします。

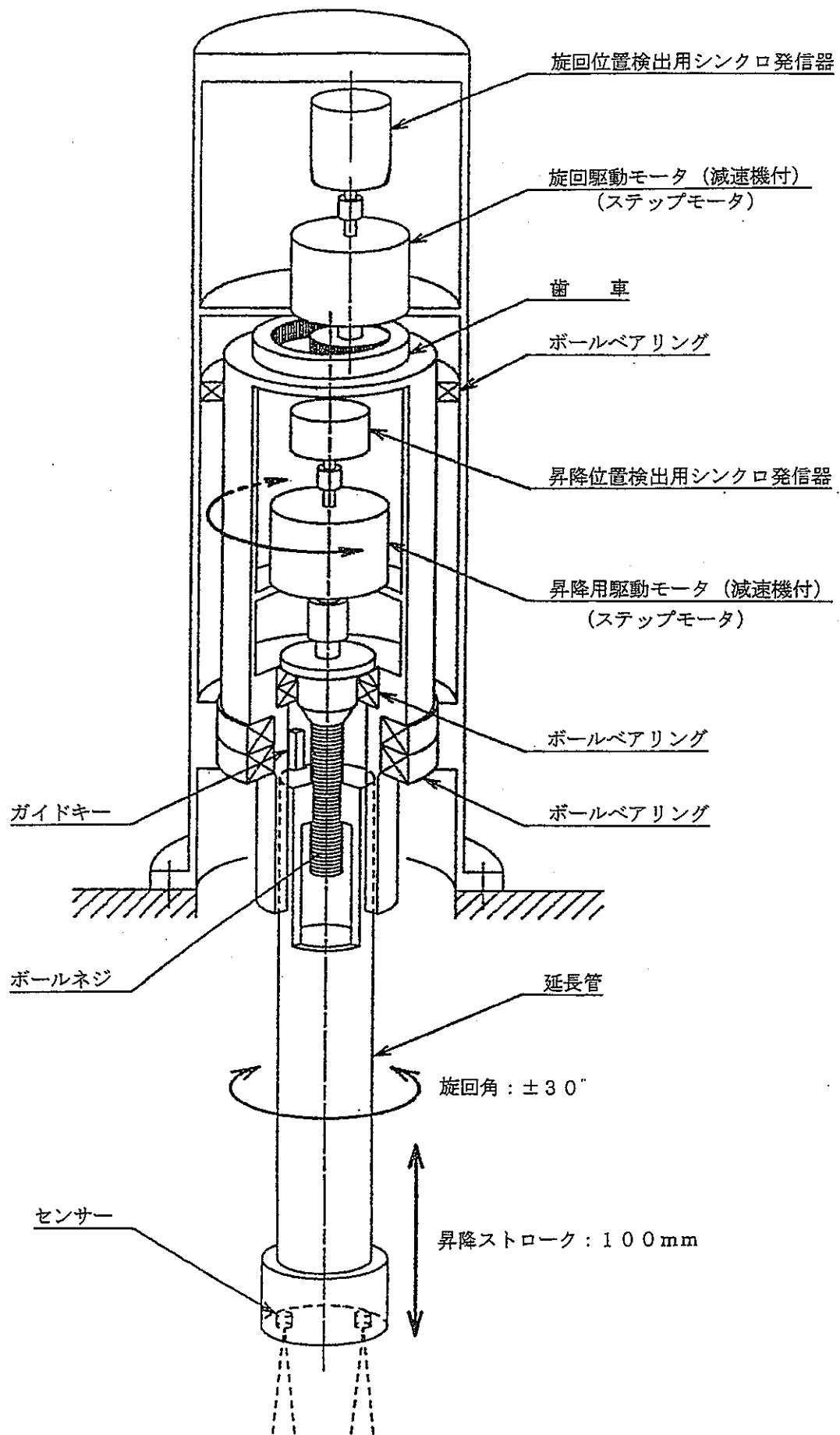


図 2.4-4 単眼型超音波炉内検査動作原理図

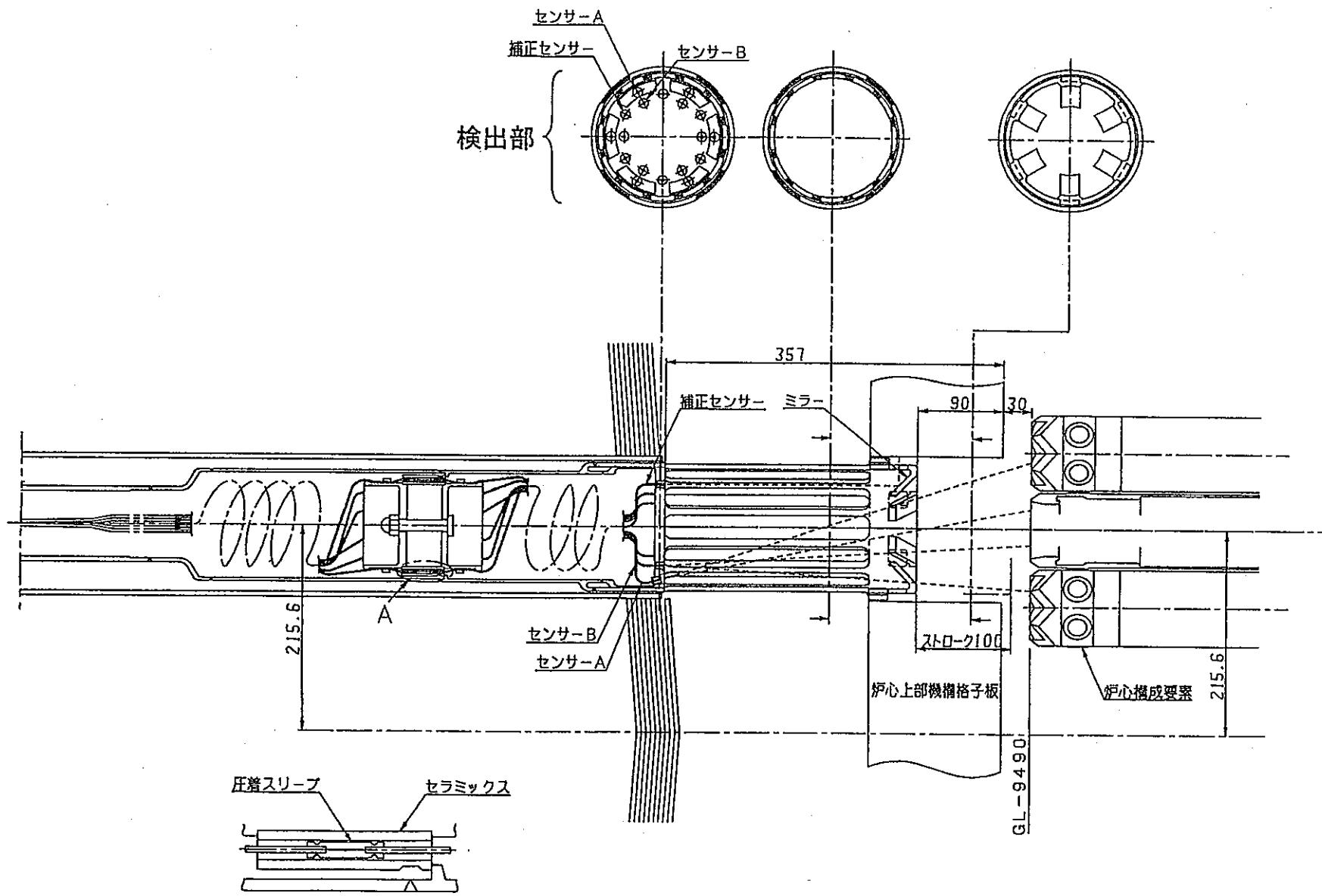
A部詳細

図 2.4-5 単眼型超音波炉内検査装置 計測部構造図案(1)

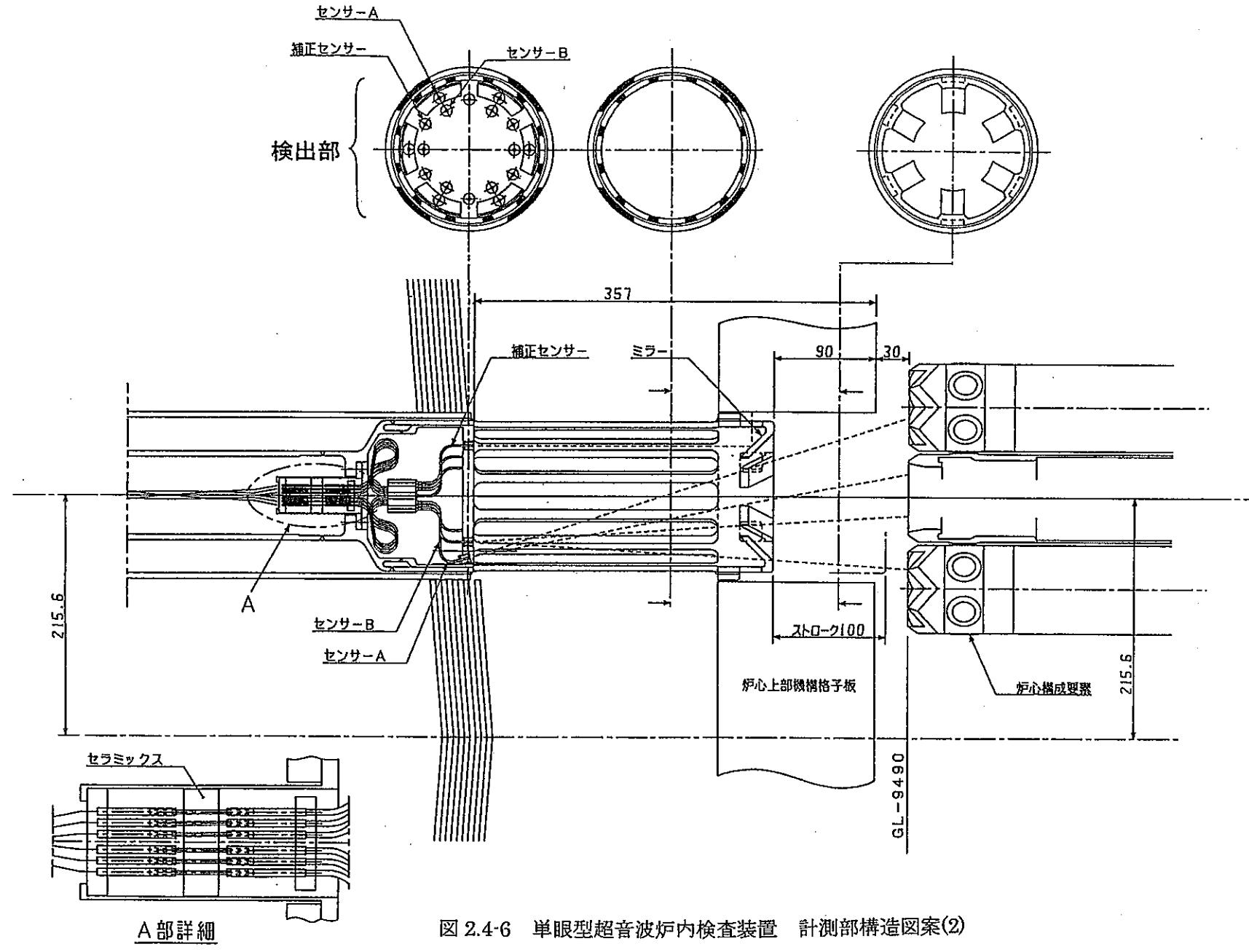


図 2.4-6 単眼型超音波炉内検査装置 計測部構造図案(2)

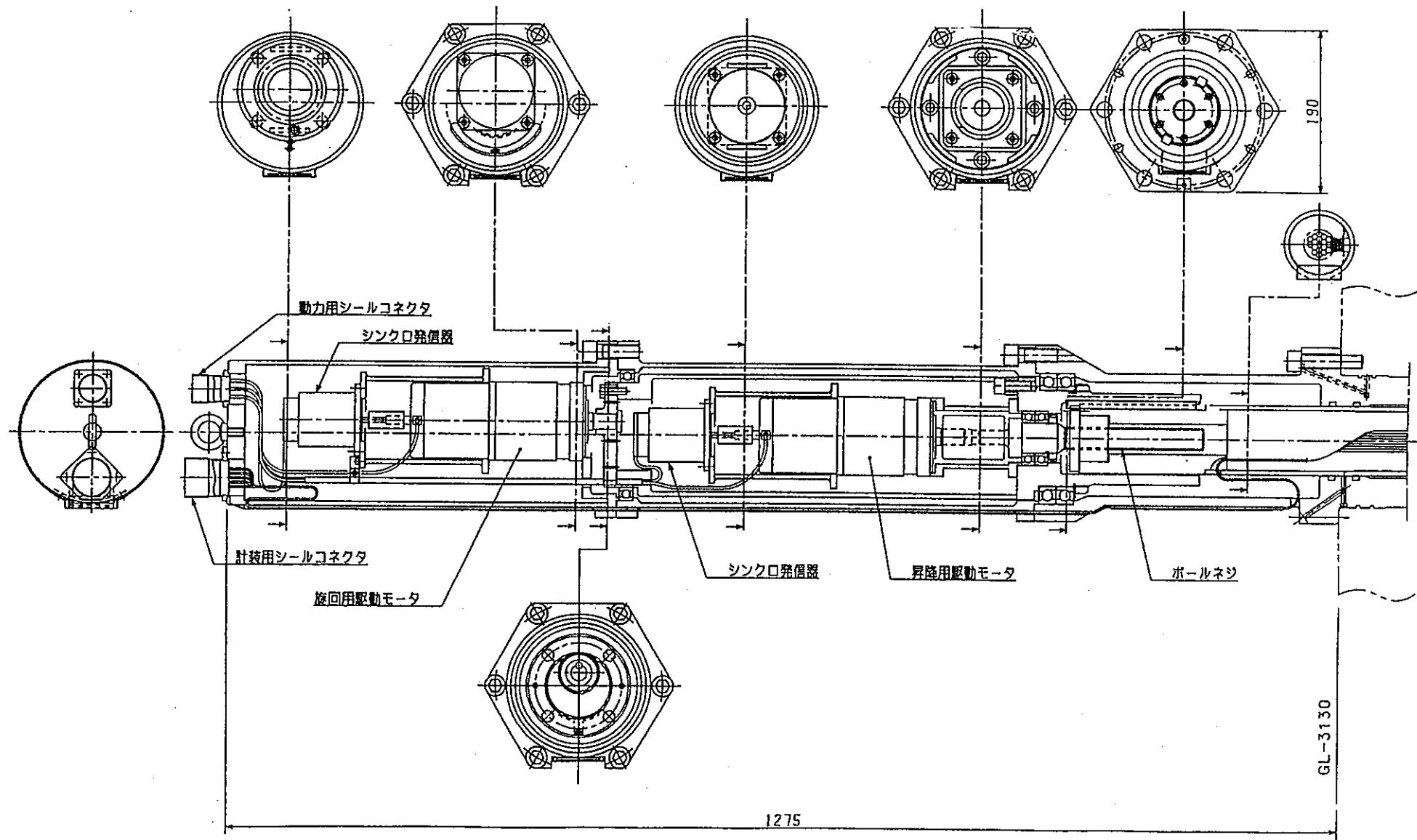


図 2.4-7 単眼型超音波炉内検査装置 駆動部構造図

### 3. 炉外水中試験装置の検討

#### 3.1 炉外水中試験の概要

超音波による集合体頂部変位を計測する上で、温度ゆらぎによる計測精度へ与える影響を確認するためには水中試験を行う必要がある。そこで、実機体系と同ースケールで水中試験実施方法を検討する。水中試験実施の際には、温度ゆらぎの影響が確認できるように熱電対を配し、超音波信号と同時に温度測定も可能とするように考慮するものとする。水中試験装置の概略系統図を図 3.1-1 に示す。水試験ループは、温水タンクと冷水タンクにより温度差のついた水を流すことができる構成とし、流量は適宜調整可能とする。

### 3.2 炉外水中試験装置の検討条件

#### (1)集合体出口温度差

温度ゆらぎの影響をもっとも受けるのは、温度境界層における超音波の散乱・反射が考えられる。炉外水中試験において、この散乱・反射の影響を確認するためには、炉外水中試験装置で集合体に与える温度差を与えた試験を実施する必要がある。この温度差は、Na中の音速の式(a)と、水中における音速の式(b)から算出して設定することができる。式中でVは音速(m/sec)、Tは温度(°C)を表す。

Na 中の音速

$$V = a_0 + a_1 T \quad \dots \dots (a)$$

$$a_0 = 2577.25$$

$$a_1 = -0.525$$

水中の音速

$$V = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 + b_3 T^3 + b_4 T^4 + b_5 T^5 \quad \dots \dots (b)$$

$$b_0 = 1402.736$$

$$b_1 = 5.03358$$

$$b_2 = -0.05795$$

$$b_3 = 3.316 \times 10^{-4}$$

$$b_4 = -1.453 \times 10^{-6}$$

$$b_5 = 3.050 \times 10^{-9}$$

図 3.2-1 に水中・Na 中における音速の温度特性を示す。水中と Na 中では、温度による音速の変化率が異なり、水中の方が Na 中より温度の変化に対して音速の変化率が大きく、温度変化に対する音速変化率の 1 次係数の正負が逆である。水中では、20°C付近での温度に対する音速変化率は(b)式より 3m/sec/°C、ナトリウム中では音速変化率は-0.524 m/sec/°C であるため、6 倍程度水中の方が大きい。よって、Na 中での温度ゆらぎがもたらす影響を水中試験で模擬する場合は、音速比を考慮すると、燃料集合体出口温度差は約 1/6 で良いことになる。また、集合体出口温度差は、数 10°C以下であるため、炉外水中試験装置においては、温度差は最大約 10°C程度つけることができれば十分と考えられる。

#### (2)集合体出口流量

実機における燃料集合体出口の流れは乱流の範囲であると考えられ、温度ゆらぎがもたらす超音波散乱の影響は、水中と Na 中では差がないと考えられるため、流量は実機と同一程度 (Na : 8kg/sec 流速約 4m/sec) に合わせるように設計するものとする。

### 3.3 炉外水中試験装置の検討

3.2 で示した条件を考慮し、炉外水中試験装置の検討を行った。

#### (1)燃料集合体出口模擬部

燃料集合体は 7 本の集合体で 1/1 の部分モデルとする。試験体構造図案を図 3.3-1 に示す。集合体出口模擬部は、超音波の反射性を考え実機と同じステンレス製とする。また模擬集合体の中心位置の集合体には、温水（冷水）、その周囲の 6 体には同じ温度の冷水（温水）を流すことができる構成とする。

##### a)集合体出口模擬部構造の仕様

###### ①寸法・形状

集合体出口模擬部の口径は、実機の設計寸法と合わせ内径 56mm とし、外部形状についても実機と同一構造とする。また、衆院に配置する 6 体の集合体出口模擬部のうち、1 つを変位を模擬する集合体とし、集合体頂部のコーナー部にコーナーリフレクタ（超音波反射部）を放電加工にて形成し、集合体出口模擬部を 120 度或いは 180 度回転させることによりリフレクタ有り・無しを切替え可能とする。集合体出口部模擬構造の概念図を図 3.3-2 に示す。

###### ②変位機構

変位を模擬する燃料集合体出口模擬部は、図 3.3-3 に示すように 0.1mm の精度で歯車により水平方向への変位が可能となる構成とし、変位距離を水中試験装置水槽の外から確認可能できるものとする。また集合体の垂直変位方向の変位については、集合体模擬部の取り付け部にシューを取り付けることにより変更が可能となる構成とする。

###### (2)超音波センサ取り付け部

超音波センサ取り付け部は、燃料集合体出口の流路確保を考慮した構造とする。また、垂直位置検出用超音波センサ 1 個と隣接する集合体との水平変位検出用の超音波センサ 2 個は最低限装着できるように構成するものとする。また、超音波センサと集合体出口模擬部との相対位置を調整できるように、超音波センサ昇降調節及び回転調節が可能な構造とする。

###### (3)炉外水中試験容器

試験容器は、超音波センサの方向調整等の状況を確認できるように透明アクリル製とする。また、試験容器の出口部からの流動が燃料集合体模擬部出口部分の流動に影響を与えないようにするために内筒で隔てて無液面とする。また試験容器の寸法は、試験体系（超音波センサ部、燃料集合体模擬部等）から、外径約 1m 深さ 1.5m 以上の大きさを確保するものとする。

### 3.4 水流動試験

#### (1) 試験方法

試験では、冷水を周囲の燃料集合体模擬部に所定量流している状態で、中心燃料集合体模擬部の入口エア作動バルブを開くことにより、所定流量の温水を注入するものとする。

また、流动場において集合体出口部等に熱電対を取り付け、温度データを採取しデータを確認しながら超音波センサによる変位検出性能を評価する。

#### (2) 集合体頂部変位の検出

図 3.4-1において、中心の燃料集合体模擬部を水平方向に変位させ、超音波センサで頂部変位を計測する。水平変位量はアクリル板の外から 0.1mm 程度の精度で位置決めする。超音波による変位測定結果と水平変位量を比較検討を行い、温度条件を考慮した上で、超音波による計測精度を評価する。

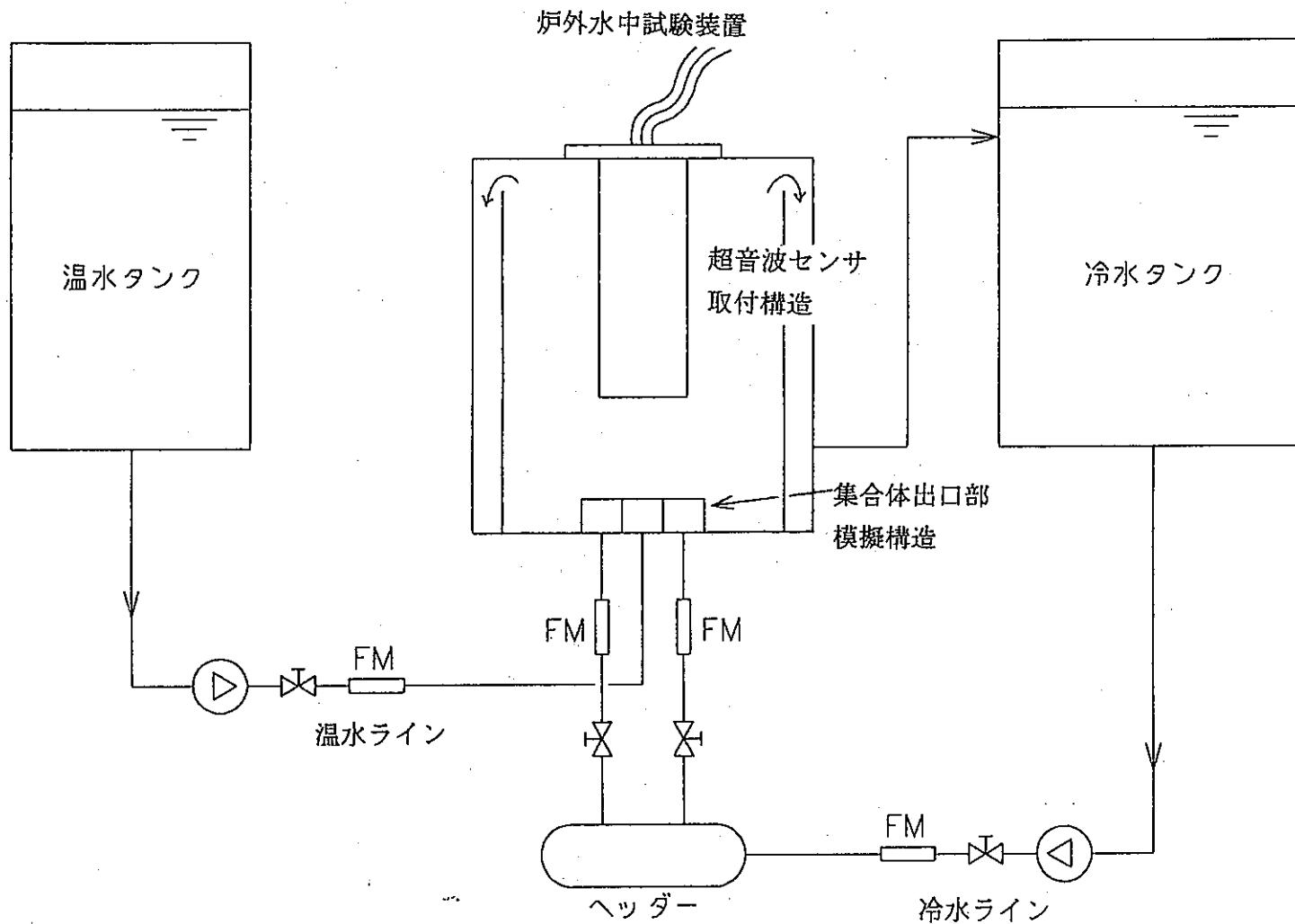


図 3.1-1 炉外水中試験装置及び水試験ループの系統図

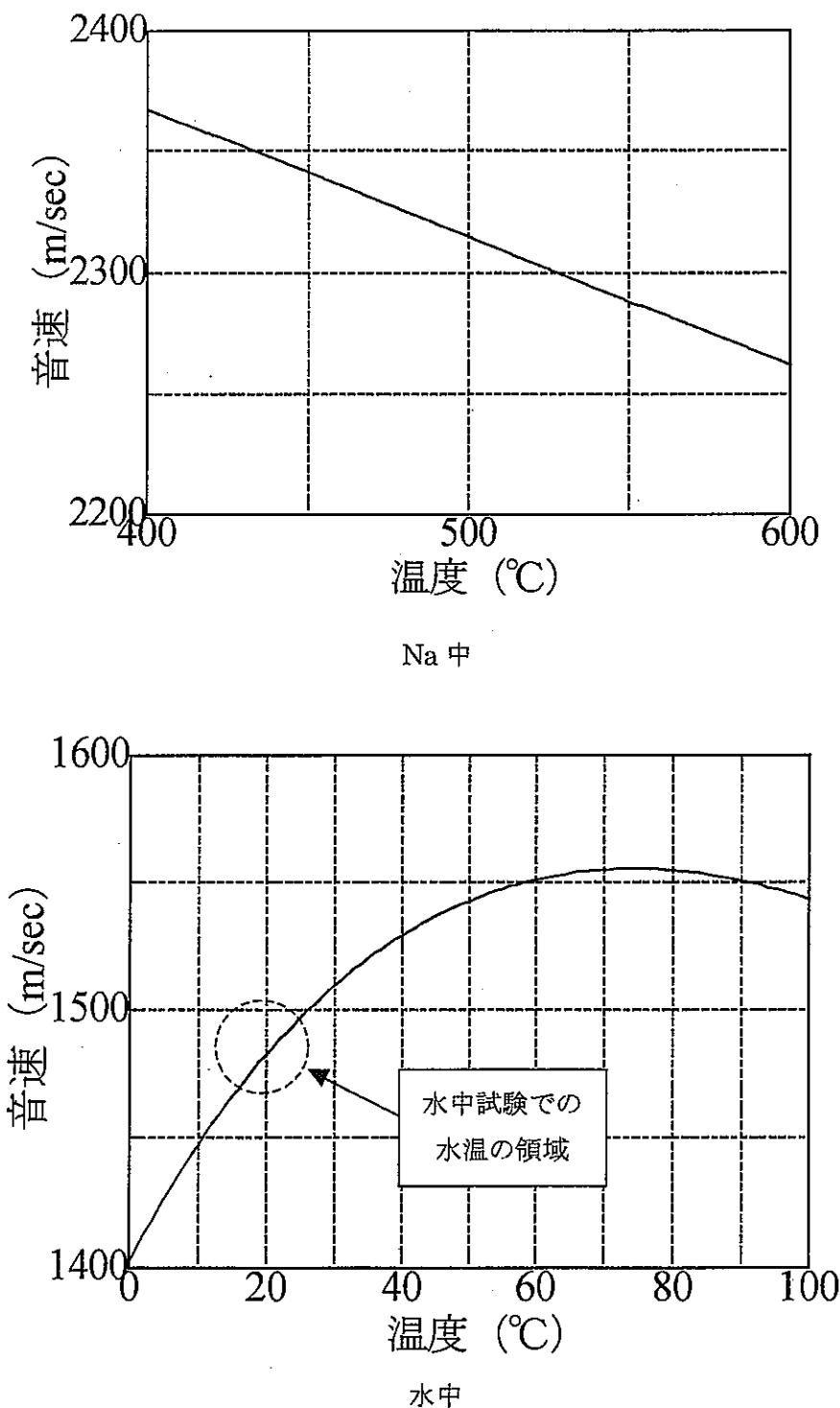


図 3.2-1 溫度と音速の関係（水中・Na 中）

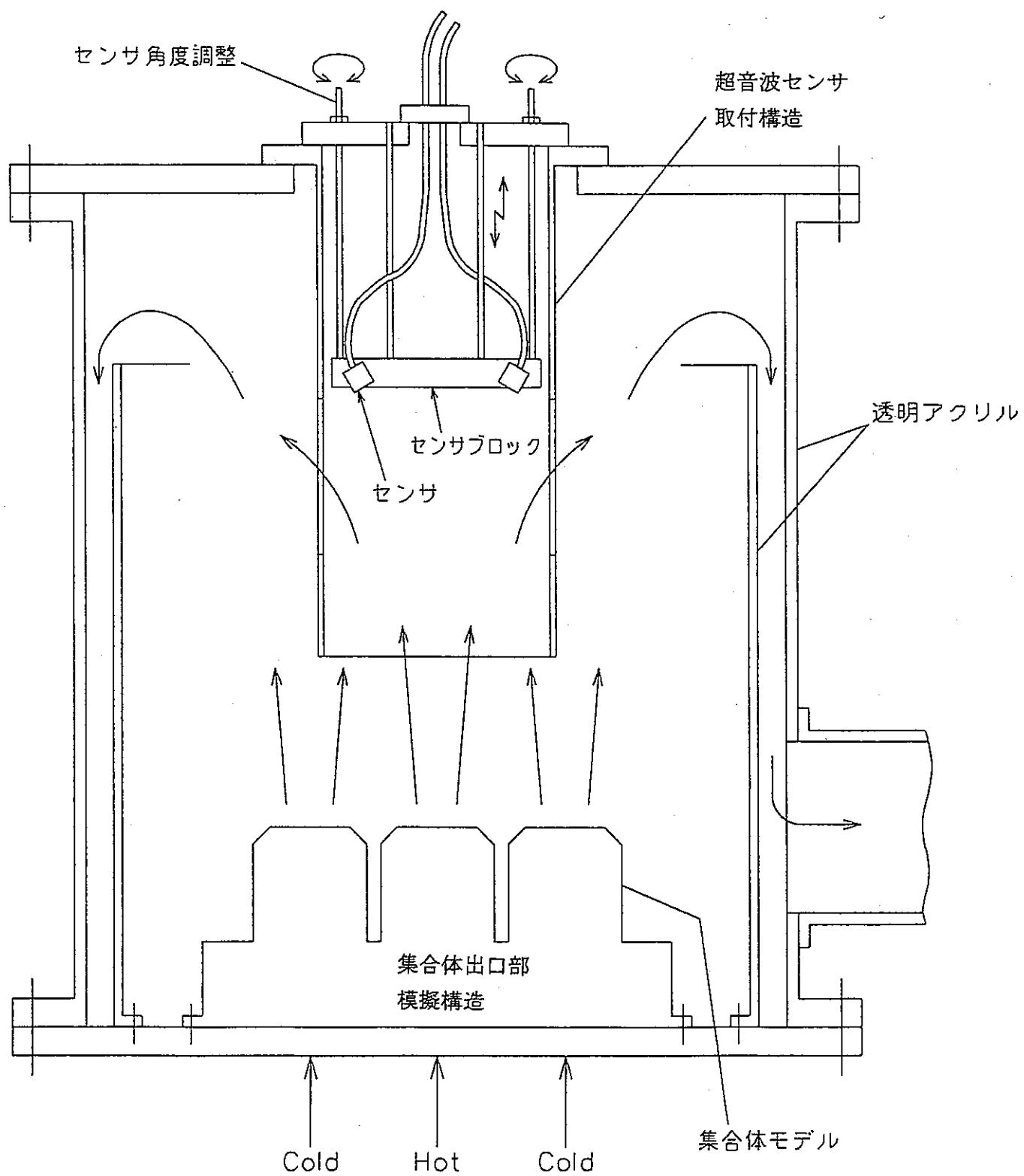


図 3.3-1 炉外水中試験装置の構造概念図

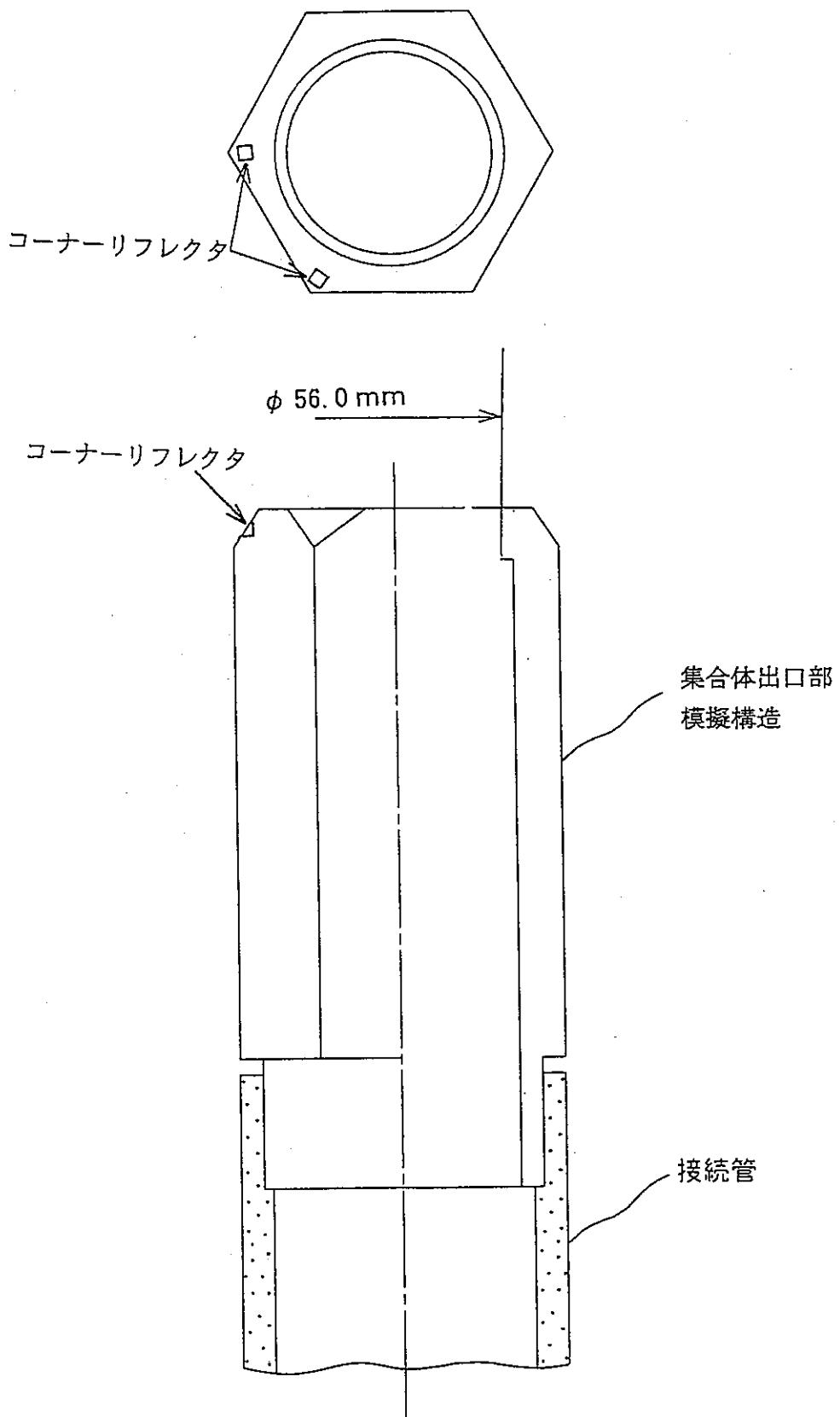


図 3.3-2 集合体頂部模擬構造の概念図

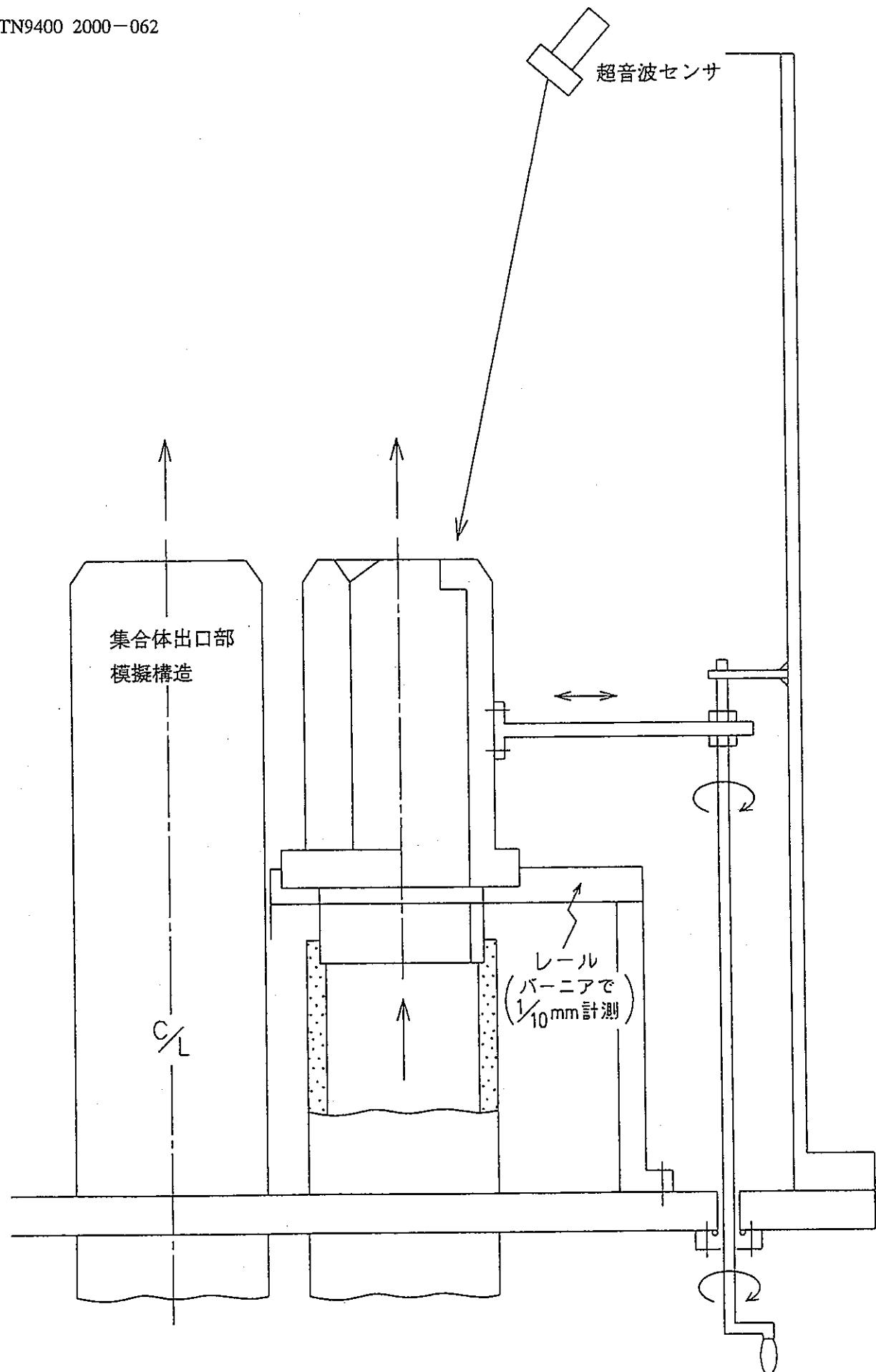


図 3.4-1 燃料集合体の変位模擬機構の概念

#### 4.まとめ

高速炉の炉内ナトリウム中検査に関する技術開発の一環として、炉心に装荷されている炉心構成要素の変形挙動を超音波により目視観察するための集合体頂部変位計測装置について以下に示す検討を実施した。

- ・ 照射試験用の高温用超音波センサの設計・製作を行い、照射試験前準備として超音波センサ単体の常温及び高温特性試験を実施し、その超音波センサ単体基本性能を確認した。
- ・ 炉内検査装置の駆動部、ケーブル、コネクタ等の収納構造等の仕様を検討し、駆動部の構造概念を明らかにした。
- ・ 計測精度確認のための炉外水中装置及び炉外水中試験方法の検討を行い、試験方法の具体化を図った。

謝辞

本報告書をまとめるにあたっては、実験炉部 技術課 副主任研究員 吉田 昌宏氏、副主任技術員 田渕 士郎氏に多大な協力と貴重なご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 高速増殖炉の「炉心変形検討会」 平成7年度活動報告 PNC TN9410 96-300(1996)
- (2) 動燃技報 特集「常陽」20周年 No.104 (1997)
- (3) 田渕他、「常陽」Mk-II炉心湾曲反応度解析コードの開発 JNC TN9410 99-018 (1999)
- (4) 田渕他、「常陽」Mk-II炉心湾曲反応度解析コードの開発 原子力学会 1999年秋の大会