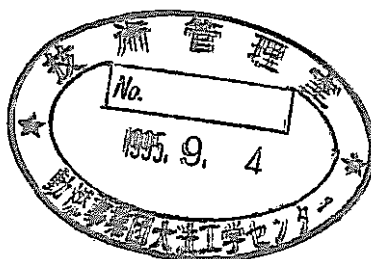


# 炉内検査装置に関する調査・検討 (II)

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1995年3月



株式会社 東 芝

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大字村松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)

開示  
開示  
用し

1995年3月

## 炉内検査装置に関する調査・検討（Ⅱ）

唐沢 博一(\*1) 関口 峰生(\*1)  
佐藤 孝男(\*2) 鈴木 健彦(\*3)  
長井 敏 (\*4)

### 要 旨

高速炉の供用中検査・補修（ISI&R）に関する技術開発の一環として、炉内構造物及び炉心に装荷されている炉心構成要素の健全性を目視によって確認するための炉内検査手法の調査・検討を行った。炉心構成要素頂部及び連結管部を対象に、検出精度向上を指向した検出器仕様・構成、信号処理装置システム構成・基本仕様、駆動機構構造概念を具体化し、課題及び開発項目を摘出、整理した。

---

本報告書は、株式会社東芝が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号：06C4179

事業団担当者：福家 賢（実験炉部技術課）

(\*1) 株式会社東芝 動力炉開発部

(\*2) 株式会社東芝 原子炉機器部

(\*3) 株式会社東芝 研究開発センター機械エネルギー研究所

(\*4) 株式会社東芝 重電技術研究所金属材料強度技術開発部

## Survey and Study on Examination Equipments for In-Vessel Components Inspection in JOYO(II)

Hirokazu Karasawa(\*1), Mineo Sekiguchi(\*1), Takao Sato(\*2)  
Takehiko Suzuki(\*3), Satoshi Nagai(\*4)

### Abstract

As a part of the development of the in-service inspection and repair(ISI & R) technology of FBR, study on examination equipments as visual method to verify in-vessel structures and assemblies was conducted.

The objects of the study were higher resolution equipments using ultrasonic transducer technology to examine top area of assemblies in core support structure and parts of the core support structure where entrance nozzles of assemblies were inserted and withdrawn when refueling in 'JOYO'.

As the result of the study, basic specifications and structures of transducers and signal processing units, and conceptual design of basic structure of drive mechanics for the transducers were derived.

The items and plan of the development of the equipments were made.

---

Work performed under the contract between Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation and Toshiba Corporation.

Contract No. : 06C4179

PNC Liaison : Masaru Fukuie, Reactor Technology Section, Experimental Fast Reactor Division.

(\*1) Advanced Reactor Engineering Department, Toshiba Corporation.

(\*2) Nuclear Energy Equipment Manufacturing Department, Toshiba Corporation.

(\*3) Energy and Mechanical Lab., Research and Development Center, Toshiba Corporation.

(\*4) Metals and Applied Mechanics Department, Heavy Apparatus Eng. Lab. Toshiba Corporation.

# 目 次

1. まえがき	-----	1
2. 炉心構成要素頂部の検査手法の調査・検討	-----	2
2.1 主要検討条件	-----	2
2.2 検査手法全体計画	-----	2
2.3 検出部	-----	1 0
2.4 駆動機構	-----	2 3
3. 連結管の検査手法の調査・検討	-----	3 0
3.1 主要検討条件	-----	3 0
3.2 検査手法全体計画	-----	3 0
3.3 検出部	-----	3 3
3.4 駆動機構	-----	4 2
4. 開発計画の検討	-----	4 4
5. まとめ	-----	4 9

謝 辞

## 1. まえがき

高速炉の供用中検査・補修（ISI&R）に関する技術開発の一環として、炉内構造物及び炉心に装荷されている炉心構成要素の健全性を目視によって確認するための炉内検査手法の調査・検討を行った。平成5年度に実施した炉内検査装置の開発状況の調査結果をもとに、「常陽」での使用様条件を考慮して炉内検査装置の適用性、その検査手法について検討した。検査対象として「常陽」炉心構成要素頂部変位、連結管部形状を中心に、検査装置の検出器仕様、構成、信号処理装置システム構成・基本仕様、駆動機構構造概念の検討、開発課題の抽出を行った。本報告書は、これらの結果をまとめたものである。

## 2. 炉心構成要素頂部の検査手法の調査・検討

### 2.1 主要検討条件

#### a) プラント条件

- ・ 温度 : 250～600℃
- ・ 冷却材流量 : 100%
- ・ 照射条件 :  $1.2 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{sec}$   
 $0.1 \text{ MeV}$ 以上高速中性子  $3.2 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2\text{sec}$   
(MK-Ⅲ炉心中心、炉心上部機構下端付近)

#### b) 機能

炉心構成要素頂部の傾き、水平・垂直方向変位を検査する。

### 2.2 検査手法全体計画

#### (1) 検査装置設定手順

検査部位を検査するために、検査装置の検出部を所定の位置に設定する。その手順として以下の2通りが考えられる。

- a) 原子炉停止中に装置の据付け・検出部位置の設定を行い、原子炉運転開始後は、静止状態に維持し、検出器からの出力を取得する（原子炉運転中の装置の駆動なし）。
- b) 原子炉停止中に装置を据付け、原子炉運転開始後検出部を上方から下降し、炉心頂部を観察できる位置に調整、設定する。

原子炉運転中に検査装置を操作することは、原子炉運転操作に外乱を与えること、炉内流動、温度の影響で検出部の設定のための微調整操作時に以下のような不確定要素があり、上記a)の手順に比べて操作上容易でないと推定されることから、装置の設定はできるだけ運転前に行うこととして、上記a)を本検討の条件とする。

- ・ 燃料出口から流出する冷却材流動による検出部の振動の影響
- ・ 熱膨張の影響
- ・ 温度分布の影響

原子炉運転前に検出部を設定した場合、出力上昇に伴って雰囲気温度が変化し、び熱膨張が出じる。検査装置に係わるもので予想される事象を以下に示す。

- ・ 出力上昇に伴って観察装置が受ける影響
  - ・ 軸方向熱膨張\*

- ・ 超音波センサーの温度特性上の出力変化
- ・ 原子炉構造への影響
  - ・ 炉心上部機構の径方向熱変位
  - ・ 炉容器熱膨張（炉心支持構造）の軸方向位置変化
  - ・ 炉心構成要素径方向位置変化
  - ・ 炉心構成要素軸方向熱膨張

\* 検出部の軸方向位置は、炉心上部機構内観察装置据付け面  
あるいはオペフロ表面等熱膨張の影響を受けない位置を基準と  
して考える。

上記の事象が総合されて、装置検出部から信号が出力されると予想される。この信号と検査対象の変化とを分離するための評価が必要となる。

## (2) 装置設置位置

「常陽」に検査装置を設置する場所として以下の2通りがある。

### a) 炉心上部機構内CRD予備孔

- ・ 原子炉運転中は、炉心第3列〔3B3〕、〔3E3〕及び第5列〔5D2〕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できる。
- ・ 原子炉停止中は、回転プラグをジャッキアップし、回転させることにより、図2.2-1～図2.1-5に示す範囲に検出部を移動できる。  
〔3B3〕〔3E3〕に設置した場合は、大回転プラグを回転させることにより図2.2-1に示す領域を、〔5D2〕の場合は図2.2-2に示す領域を観察できる。また、〔3B3〕〔3E3〕では小回転プラグのみを回転させるとそれぞれ図2.2-3、図2.2-4に示す領域（小回転プラグ中心を〔6D1〕上においた場合の例）を観察でき、大小回転プラグの回転を組み合わせると炉心全領域を観察できる。〔5D2〕では図2.2-5に示すように、大小回転プラグの回転を組み合わせても一部アクセスできない領域がある。

### b) 燃料交換孔

- ・ 原子炉運転中は、燃料交換孔は炉心から外れた位置にあるため、炉心燃料頂部にアクセスできない。
- ・ 原子炉停止中は、大小回転プラグを回転させることにより、すべての炉心アドレスにアクセスできる。



原子炉運転中に燃料頂部を検査することを考慮し、観察装置を炉心上部機構内のCRD予備孔に設置することを条件に検討する。

### (3) 検査方法

検査時に検出部を一定位置に維持する場合と動作させる場合について考える。

a) 検査時、検出部を一定位置に維持する。

b) 検出部を水平方向に走査しつつ（回転動作）反射波を受信、計測する。

上記a)、b)を比較すると、後者は、期待する検出部の位置に対して外乱（検査装置駆動機構部のガタ、垂直度公差等）が入り、炉心構成要素頂部変位計測の精度に影響する可能性が考えられる。本検討では、外乱の少ない、上記 a) を選択する。

### (4) 検査装置全体概念

検査装置は、センサーを内蔵する駆動機構とセンサーの出力信号を処理する信号処理装置とから構成されるものとする。全体の概念を図2.4-1に示す。

駆動機構は、炉上部に位置する駆動部と、その下方に接続され炉内に位置し検出部を保持する上部案内管部とからなる。駆動部は、検出部の位置を設定するために上下・回転動作させるメカニズムを有する。上部案内管部は、円筒形状の上部案内管と、その内側にあって駆動部と検出部をつなぐ延長管部からなる。検出部には、センサーが設けられ、センサーから出た信号ケーブルは、駆動機構内を通り、炉上部から処理装置につながる。

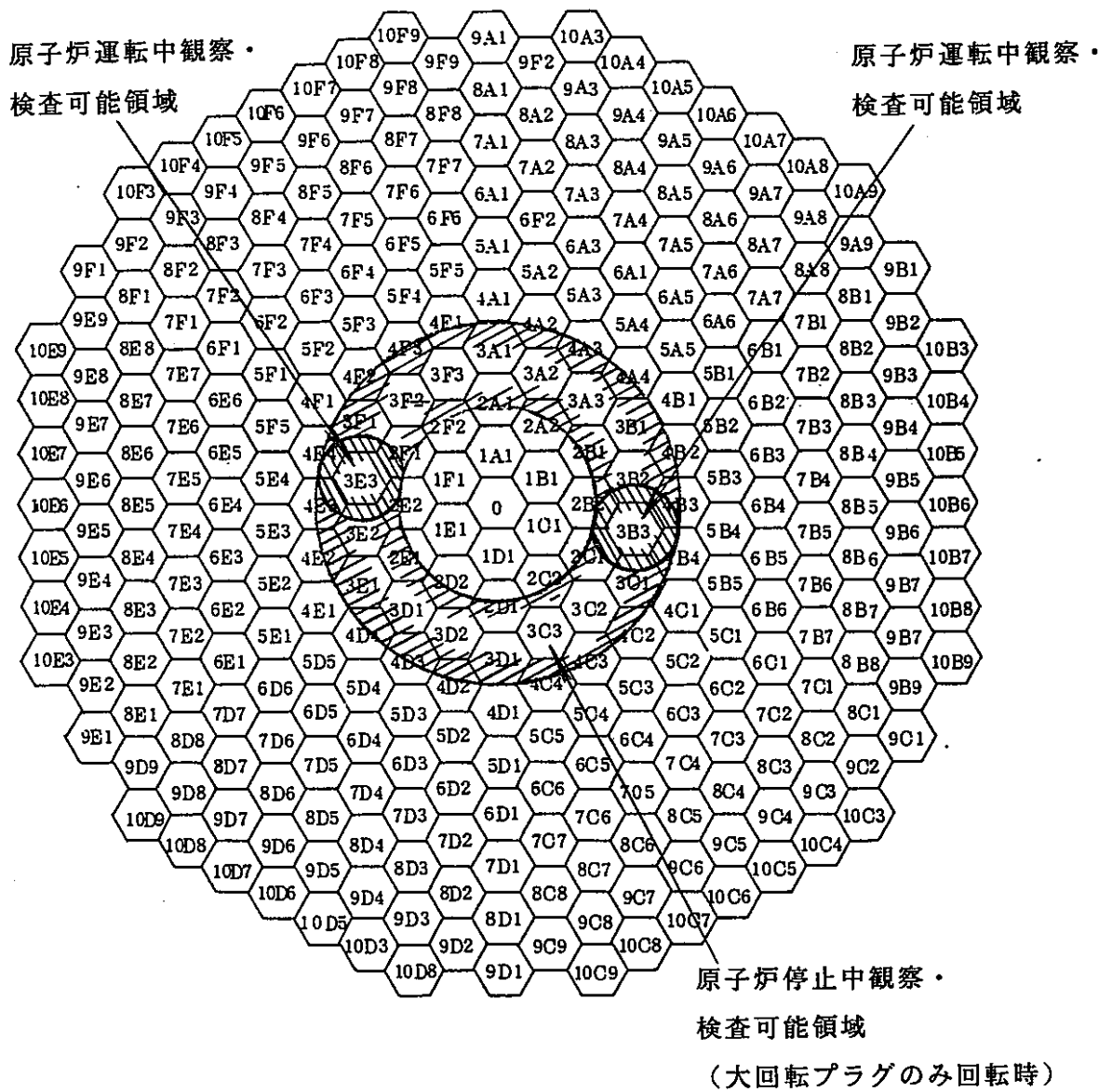


図 2. 2 - 1 CRD予備孔を利用する場合の炉内観察・検査可能領域

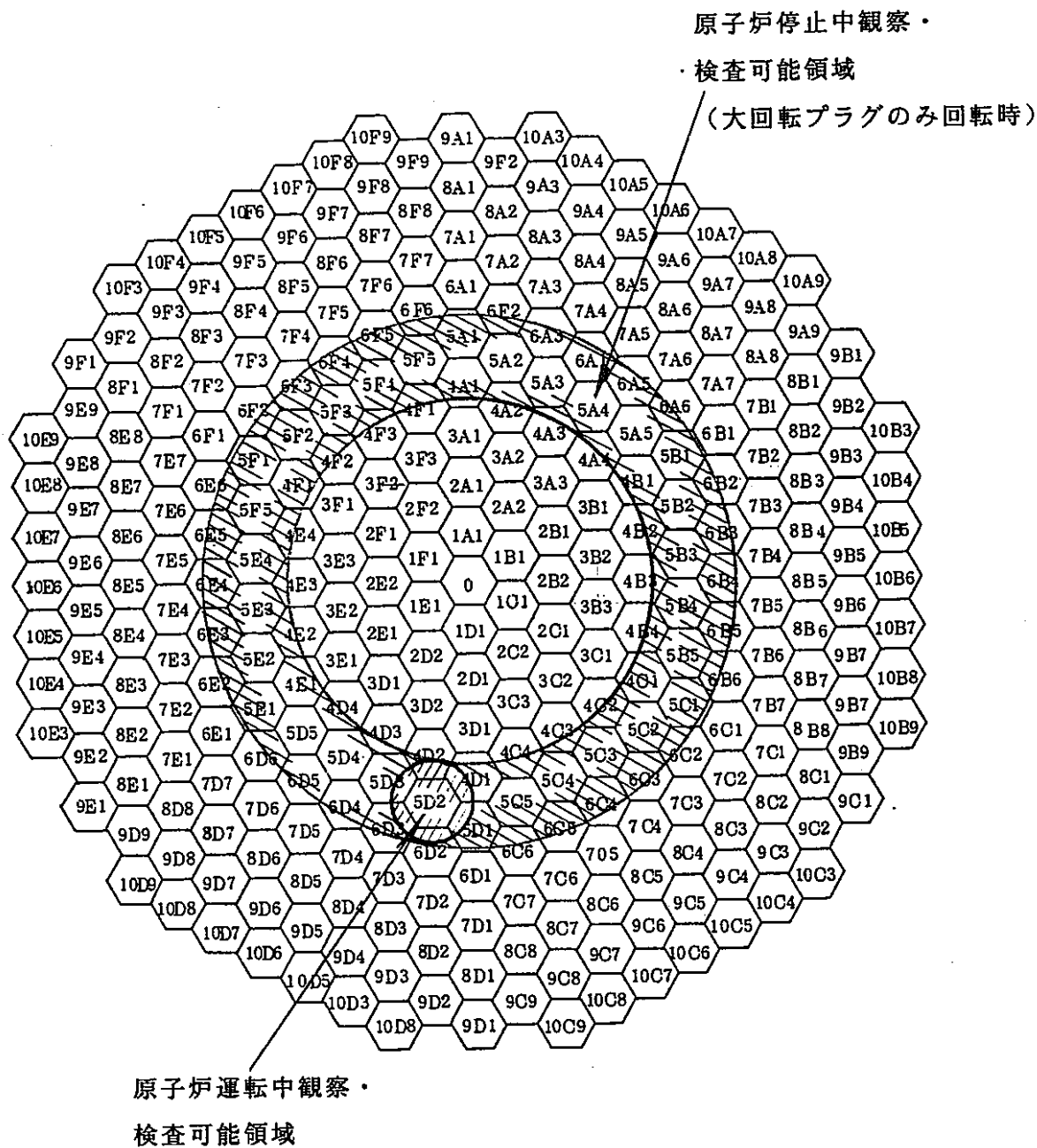
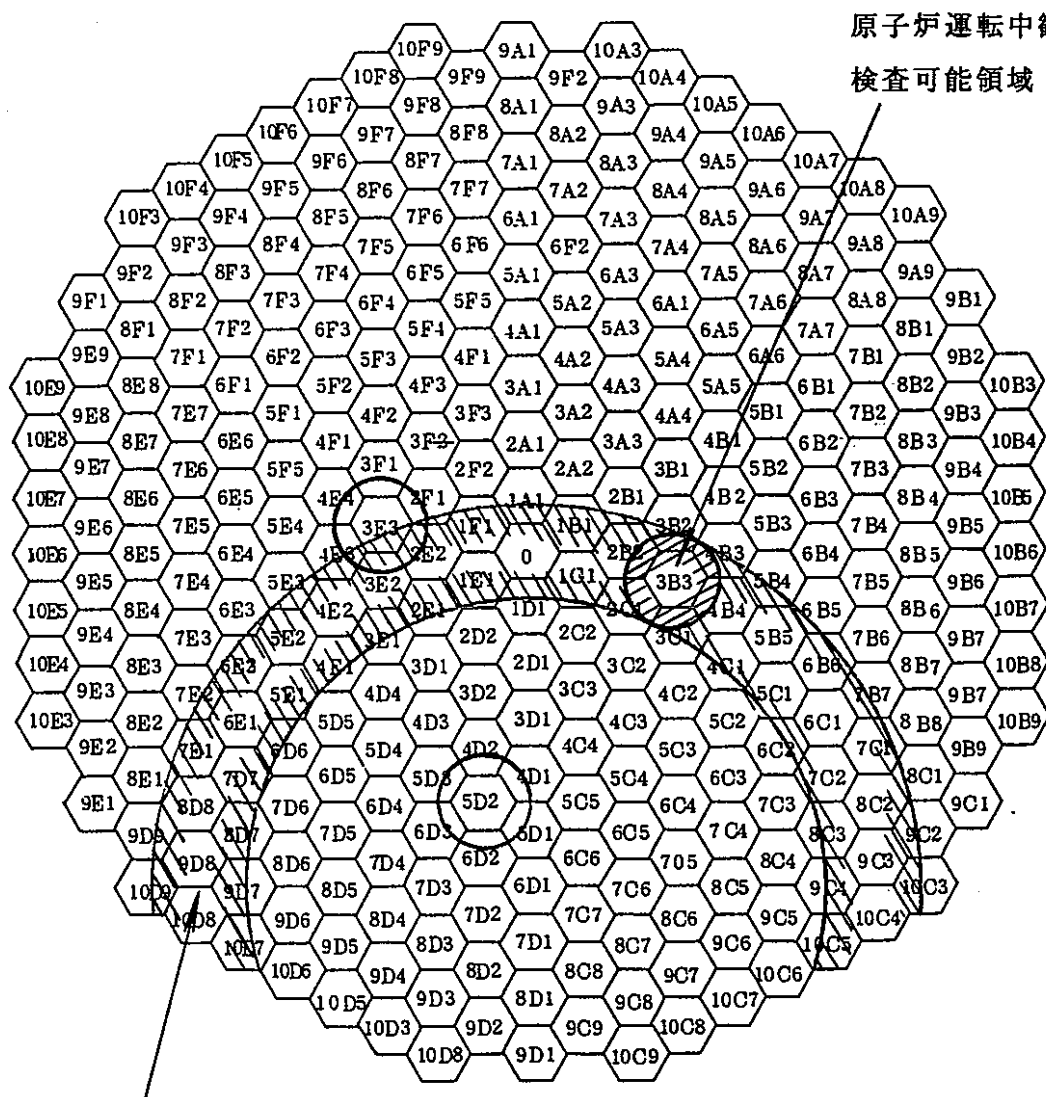


図 2. 2 - 2 C R D 予備孔を利用する場合の炉内観察・検査可能領域



原子炉停止中観察・

検査可能領域

(小回転プラグのみ回転時、小回転プラグ中心位置：6D1上)

図 2. 2-3 CRD予備孔 ([3B3] 上) を利用する場合の炉内観察・検査可能領域

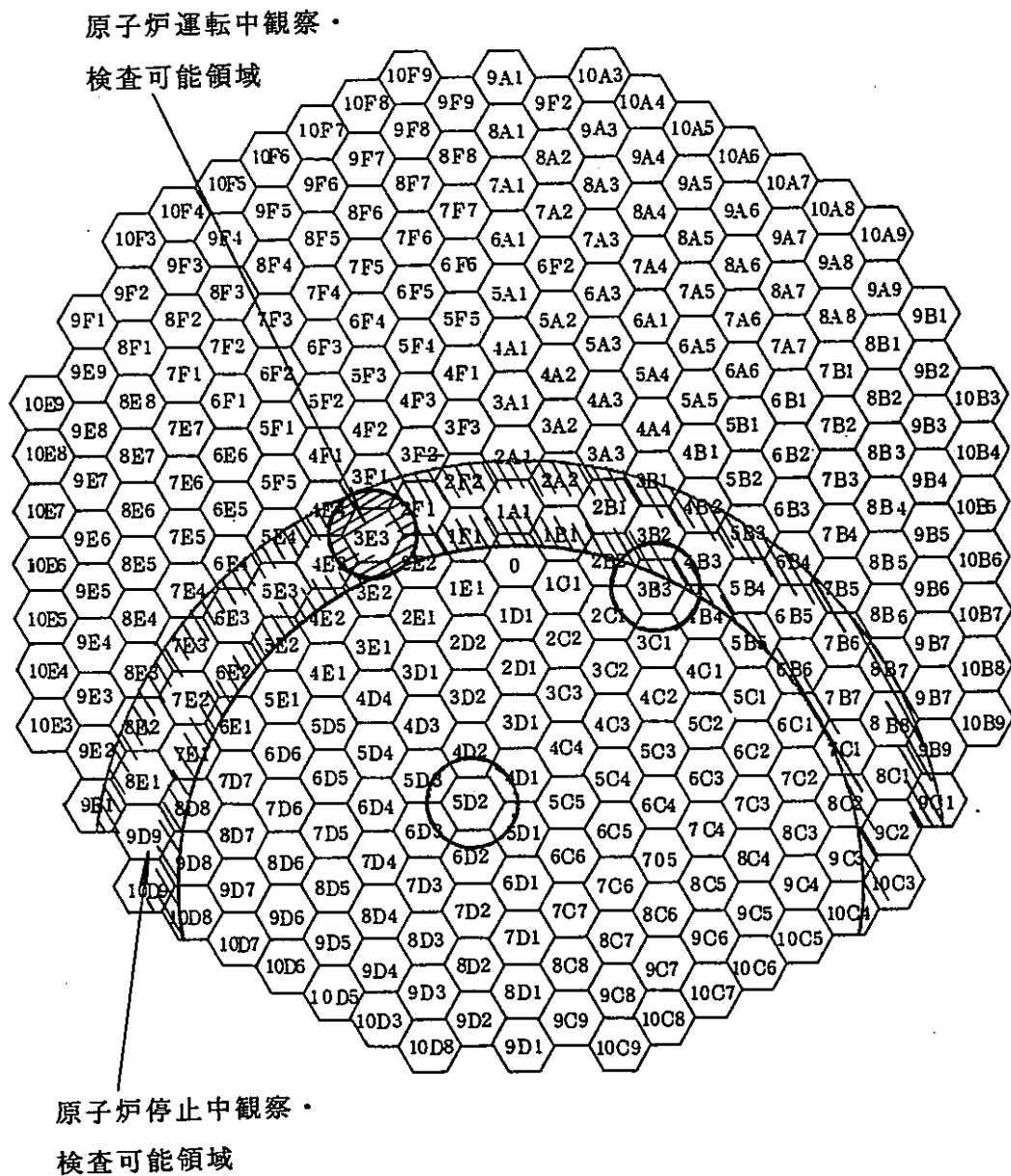


図 2. 2-4 CRD予備孔（[3 E 3] 上）を利用する場合の炉内観察・検査可能領域

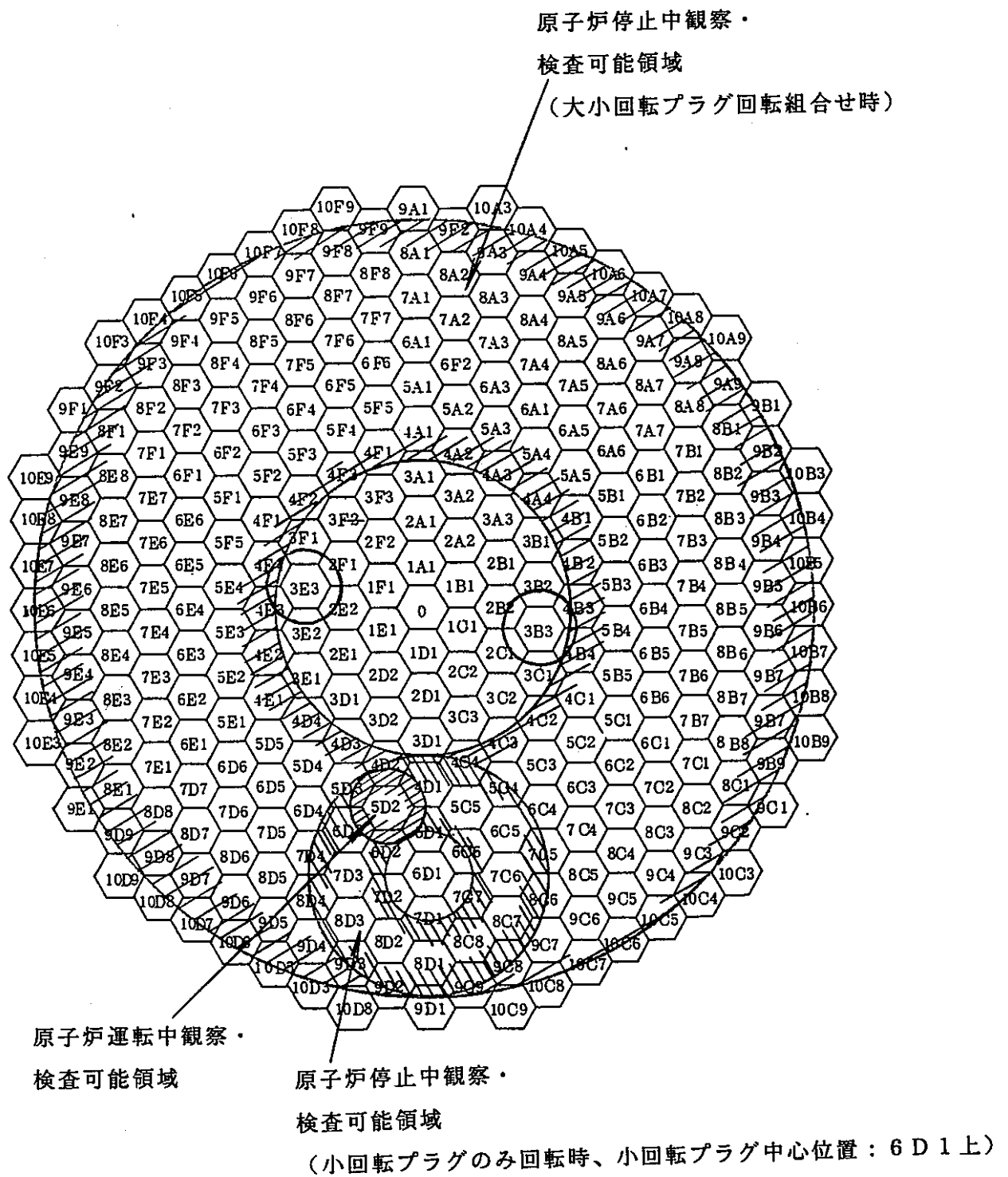


図 2. 2-5 CRD予備孔 ([5D2] 上) を利用する場合の炉内観察・検査可能領域

## 2.3 検出部

### (1) 設置位置周辺条件

炉心頂部まわりの構造寸法は図2.3-1の通りである。

上部案内管内径は既設CRD上部案内管と同一の144mm、検出部と上部案内管とのギャップを2mm（暫定値）として、検出部の外径は最大140mmとなる。

したがって超音波トランスデューサーが収納できる寸法は外径130mm程度である。

### (2) 検出器方式

超音波を利用した検出方式として以下の2通りがある。

#### a) 単眼型超音波トランスデューサーによる検出方式

比較的大型の超音波トランスデューサーを複数個配置し、燃料集合体のエッジ部からの反射エコー信号を直接検出することにより燃料集合体のエッジ部までの距離測定を行う方式。同方式の、原理説明を図2.3-2に示す。

図中の超音波トランスデューサーBは、燃料集合体の水平方向の位置を検出することを目的としたトランスデューサーであり燃料集合体の頂部エッジからの反射エコー信号を受信することにより真下と向こう隣の燃料集合体間の距離を同時に計測するものとする。このため、真下の燃料集合体と隣接する6体の集合体の計測をするために60°おきに均等に6個のトランスデューサーを配置する。また、燃料集合体の頂部エッジからの反射エコー信号を確実に受信できるように燃料集合体の頂部エッジにコーナリフレクタ（広い反射指向性を持つ反射板で水平型USVで用いられたものを小型化したもの）を追加加工により設けることが好ましい。

次に超音波トランスデューサーAは、燃料集合体の垂直方向の位置を検出することを目的としたものであり、燃料集合体の頂部エッジの水平面からの反射エコー信号を受信することにより検出器の真下と隣接する燃料集合体間の垂直距離を同時に計測するものとする。このため、真下と隣接する6個の集合体の計測を行うために超音波トランスデューサーAと同様に60°おきに均等に6個配置する。

また、計測精度を確保するために補正用超音波トランスデューサーと補正用反射板を60°おきに均等に6個配し、整流格子からの距離を計測することができ構成とした。

超音波トランスデューサー用のケーブルは、600℃の高温と中性子束等の放射線下にあるため、これに耐えるMIケーブルを用いる必要がある。

尚、燃料集合体の水平方向の変位は、超音波トランスデューサーAと超音波ト

ランスデューサBで得られた両方の信号を用いて三角法で計算できる。

b) 集積化マトリックス型超音波トランスデューサによる検出方式

単眼型は、トランスデューサの寸法が大きいため、計測精度は高くできるが配置できるトランスデューサの数が限られる。したがって燃料集合体の変位や形状を画像として確認することはできない。

一方、集積化マトリックス型は、振動子のピッチを細かくすることにより原理的に走査をすることなく画像化が可能であり、微小ストロークの走査機構を設ければ更に解像度を向上することができる。

図2.3-3 に集積化マトリックス型超音波トランスデューサによる燃料集合体の変位検出概念を示す。

図中の超音波トランスデューサAは、燃料集合体の水平方向の位置を検出することを目的としたトランスデューサであり燃料集合体の頂部エッジからの反射エコー信号を受信することにより真下と向こう隣の燃料集合体間の距離を計測することができる。（単眼型と同様のものを小型化したものであり、 $60^\circ$ おきに均等に6個配置する。）

次に超音波トランスデューサBは、燃料集合体の頂部（円形状の平面部）を画像化することを目的としたトランスデューサであり燃料集合体の頂部からの反射エコー信号を受信することにより開口合成法による画像合成を行い、3次元形状を表示することができる。

この燃料集合体の頂部画像は、全体形状及び相対変位の概略の把握を目的としたものであり、この画像の中に超音波トランスデューサAによる反射エコー信号を取り込むことにより、最終的に燃料集合体の水平方向の変位を0.1mm単位で計測することが可能となる。

超音波トランスデューサAは、少なくとも5~20mmおきに均等にマトリックス状に配置する。但し、画像合成により3次元形状を高成度で表示するために、駆動部は微小ストロークの走査機構を有する構成とする。また、昇降動作も可能な構成とする。

また、計測精度を確保するための超音波トランスデューサと補正用反射板を単眼型と同様に $60^\circ$ おきに均等に6個配置し、整流格子からの距離を計測することができる構成とした。

図2.3-4に集積化マトリックス型超音波トランスデューサにより燃料集合体の頂部を画像化（水中）した例を示す。同図は、2mm幅のリング状の燃料集合体頂部平面を画像化（3次元画像を真上から見たもの）したものであり、燃料集



合体の頂部平面の形状及び燃料集合体間相体間の距離を0.5mm程度の精度で表示することが可能であることがわかる。更に、距離方向の分解能は、0.1mm程度の解像度が得られることが確認されている。

### (3) 検出部軸方向設置位置（検査時）

検査時に検出部と炉心構成要素（検査対象）との距離が長い場合と短い場合、相対的に以下の特徴があげられる。

#### < 短い場合 >

- ・ 検出部に対する照射条件がより厳しくなる。
- ・ 炉心燃料出口直後に検出部が存在することによる冷却材流線の変化や集合体圧損の変化とその影響の有無が不明。
- ・ 炉心燃料出口からの冷却材温度分布にむらがないか。

温度分布にむらがある場合、検出部の部位・構造、使用期間によってサーマルストライピングの評価が必要。

#### < 検出部を炉心頂部から離れた場合 >

- ・ 温度分布がある程度平坦化することが期待される。
- ・ しかしながら、温度分布が大きいと超音波が散乱され、信号が返りにくくなる。

また、機械走査なしで画像化するためには、指向角を大きくする必要があり検査対象から数百mm程度離れた方がよい。

上記の点を考慮して、検出部の位置（下端部）を設定する必要がある。設置許容空間等の制約条件、精度向上の面から検討を進めていく。

### (4) 検出部の仕様

検出部の仕様は、検出方式により異なるためそれぞれの方式について検討結果を示す。

#### a) 単眼型超音波トランスデューサによる検出方式

以下に単眼型超音波トランスデューサの仕様及びその根拠を示す。

##### ① トランスデューサー配列

比較的大型の単眼超音波トランスデューサを60°おきに均等に計18個配置する。

##### ② トランスデューサー形状

使用するトランスデューサの数が少ないことから個々のトランスデューサ

の前面形状は10mm程度の平板とし、指向角をできるだけ大きくするために素子の径は2～3mm程度とする。

素子の径が2mmの場合の指向角は、ナトリウム中で約 $11^\circ$ 、素子の径が3mmの場合で約 $7^\circ$ である。

③ 周波数 : 5～10MHz

トランスデューサの周波数は、燃料集合体の水平方向及び垂直方向変位の目標検出精度0.1mmを確保するため、1波長が0.1mmの2～5倍程度となる5～10MHzとする。

(反射波のピーク位置を検出するため実質的に波長の1/2～1/5程度の精度で距離計測することが可能。)

④ 振動子材料 : ニオブ酸リチウム

600℃の耐熱性を有するニオブ酸リチウム(キューリ温度: 約1200℃)の単結晶を使用する。また、良好な波形特性を(短パルス幅)実現するためにY36カットの単結晶とする。(Y36カットは、Zカットに比べて感度が高く、減衰特性が良好なためパルス幅を小さくできる。)

⑤ 耐熱性 : 600℃

現状技術では、550℃が最高使用温度であるため振動子材料を接合するろう材の耐熱性向上のための開発を行う必要がある。

⑥ 耐放射線性

振動子材料であるニオブ酸リチウムは、通常Li<sup>+</sup>を一定の割合で含有しているため中性子照射により放射化されるためLi<sup>+</sup>フリーのニオブ酸リチウム単結晶を使用する必要がある。

⑦ 走査機構

超音波トランスデューサを最適な位置に位置決めするために旋回機構及び昇降機構が必要。

b) 集積化マトリックス型超音波トランスデューサによる検出方式

燃料頂部の変位を高精度で検出するために、超音波トランスデューサーの開口が大きいほど有利であるため、圧電振動子をできるだけ広い領域に配置する。

画像範囲は、制約された空間の範囲あるいはそれよりやや小さい範囲となる。また、画像の解像度の向上を図るために超音波受発信素子を極力小形化を図る必要がある。

以下に集積化マトリックス型超音波トランスデューサの仕様及びその根拠を示す。

### ① トランスデューサー配列

- ・ 燃料集合体の位置計測用の振動子

燃料集合体の位置計測用に小型の振動子を60°おきに均等に6個配置する。

- ・ 燃料集合体の3次元形状表示用の振動子

燃料集合体の3次元形状表示用に小型の振動子をマトリックス状に配置する。例えば、150mm程度の距離からの画像化をする場合は、振動子のピッチを2mm程度以下とするか2mm以下の走査ピッチで機械走査をする必要がある。

但し、振動子のピッチを2mmとしてトランスデューサの開口部(φ130mm)に均一に配列した場合必要となる振動子数は3000～4000個程度となり技術的及び経済的な観点から実現することが困難であるため振動子数を200個程度(振動子ピッチ10mm程度)とする。この場合、振動子間隔は10mm程度となるため機械走査を併用して画像化を行う必要がある。

尚、具体的なトランスデューサ配置及び走査方法は、音響シミュレーションによる画像評価により行うものとする。

### ② 振動子の寸法

- ・ 燃料集合体の位置計測用の振動子

単眼型超音波トランスデューサによる検出方式のトランスデューサに比べて小形化するため、振動子径を1mm程度とし、以下に示す燃料集合体の3次元形状表示用の振動子と一体の構造とする。

- ・ 燃料集合体の3次元形状表示用の振動子

振動子の径は、解像度を向上するうえでできるだけ小さくする必要がある。目標解像度である0.1mmを達成するための振動子径は、解像度 $\Delta X$ の計算式が以下のように表されるため、0.2mmとなる。

$$\Delta X = \lambda / (2 \cdot \sin \Theta)$$
$$= 1 / 2 \cdot d$$

$\Theta$ : 指向角	[°]
$\lambda$ : 波 長	0.5[mm] (at 5MHz)
	0.25[mm] (at 10MHz)
$d$ : 振動子径	1 [mm]

しかしながら、振動子径を0.2mm程度まで小さくすると振動子の静電容量がケーブルに比べて極端に小さくなってしまい、超音波信号の伝送効率が低下し、測定が不可能となることが予想されることから、本研究においては、振動子の静電容量がケーブルに比べて極端に小さくならない程度の振動子径として1mm程度を選定し、3次元形状表示の目標解像度を0.5mmとすることとした。

また、高温・高放射線条件下で使用可能な信号増幅器が開発された場合は、振動子のインピーダンス変換を行うことにより振動子を0.2mm程度まで小形化することも可能になると考えられる。

③ 周波数 : 5 ~ 10 MHz

・ 燃料集合体の位置計測用の振動子

周波数は、燃料集合体の水平方向の目標検出精度0.1mmを確保するため、1波長が0.1mmの2~5倍程度となる5~10MHzとする。

(反射波の立ち上がりを検出することからため実質的に波長の1/10程度の精度で計測が可能。)

・ 燃料集合体の3次元形状表示用の振動子

画像化を行うために必要な振動子のピッチ周波数に依存する。つまり、周波数が低いほどピッチを大きくすることが可能である。しかしながら、周波数を低くすると精度を確保するために必要となる検出部の開口(圧電素子の配列の幅)を大きくする必要がある。

このため、現状の炉内配置条件及び圧電素子の個数の条件等から5~10MHzの周波数が適当と考えられる。

尚、具体的な値は、音響シミュレーションによる画像評価により決定するものとする。

④ 振動子材料 : ニオブ酸リチウム  
(単眼型と同様)

⑤ 耐熱性 : 600℃  
(単眼型と同様)

⑥ 耐放射線性  
(単眼型と同様)

⑦ 走査機構

画像の解像度を向上するためにフルスケールを振動子の間隔とした2次元走査機構が必要。

#### (5) 信号処理部の仕様

信号処理部の仕様は、検出方式により異なるためそれぞれの方式について検討結果を示す。

##### a) 単眼型超音波トランスデューサによる検出方式

単眼型超音波トランスデューサによる検出方式の信号処理装置は、図2.3-5に示すように発信制御回路から電源アンプを介して発信用の電圧パルス（または、連続信号）をトランスデューサに印加する。

但し、発信制御回路と電源アンプは、各々1式ずつ設置するものとし、信号切り換え回路により18個の各トランスデューサに順次印加する。

各トランスデューサから発信され、燃料集合体から反射された超音波エコー信号は、信号アンプで増幅されA/D変換器に取り込まれる。

超音波エコー信号は、最終的にワークステーションに取り込まれ、ピーク検出処理の結果（遅れ時間）に音速を掛けることにより燃料集合体の頂部までの距離測定を行い、その結果をCRT上に表示する。

また、距離換算するための音速値は、熱電対にて測定された温度によりオンラインで補正するものとする。

##### b) 集積化マトリックス型超音波トランスデューサによる検出方式

集積化マトリックス型超音波トランスデューサによる検出方式の信号処理装置を図2.3-6に示す。

集積化マトリックス型超音波トランスデューサによる検出方式は、燃料集合体の位置計測用の振動子6個と燃料集合体の3次元形状表示用の振動子200個程度の全てを同じ装置で信号処理するために全ての超音波振動子と発・受信回路の間に信号切り換え器を設けることにより合理的な構成とした。

発信回路（発信制御回路及び電源アンプ）は、燃料集合体の位置計測用（回路A）と燃料集合体の3次元形状表示用（回路B）に各1式ずつ用意し、それぞれが個別に最適設定を行える構成とした。

受信回路（A/D変換器及び信号アンプ）は、信号の切り換え速度を10msec程度まで高速化することができるため20回路程度とすることにより1回の走査のデータ収集時間を1秒程度とすることができる。この場合、振動子の間隔が10mm程度であるため機械走査を2mmピッチとすると走査回数が25回となり全データの収集を25秒程度で行える。

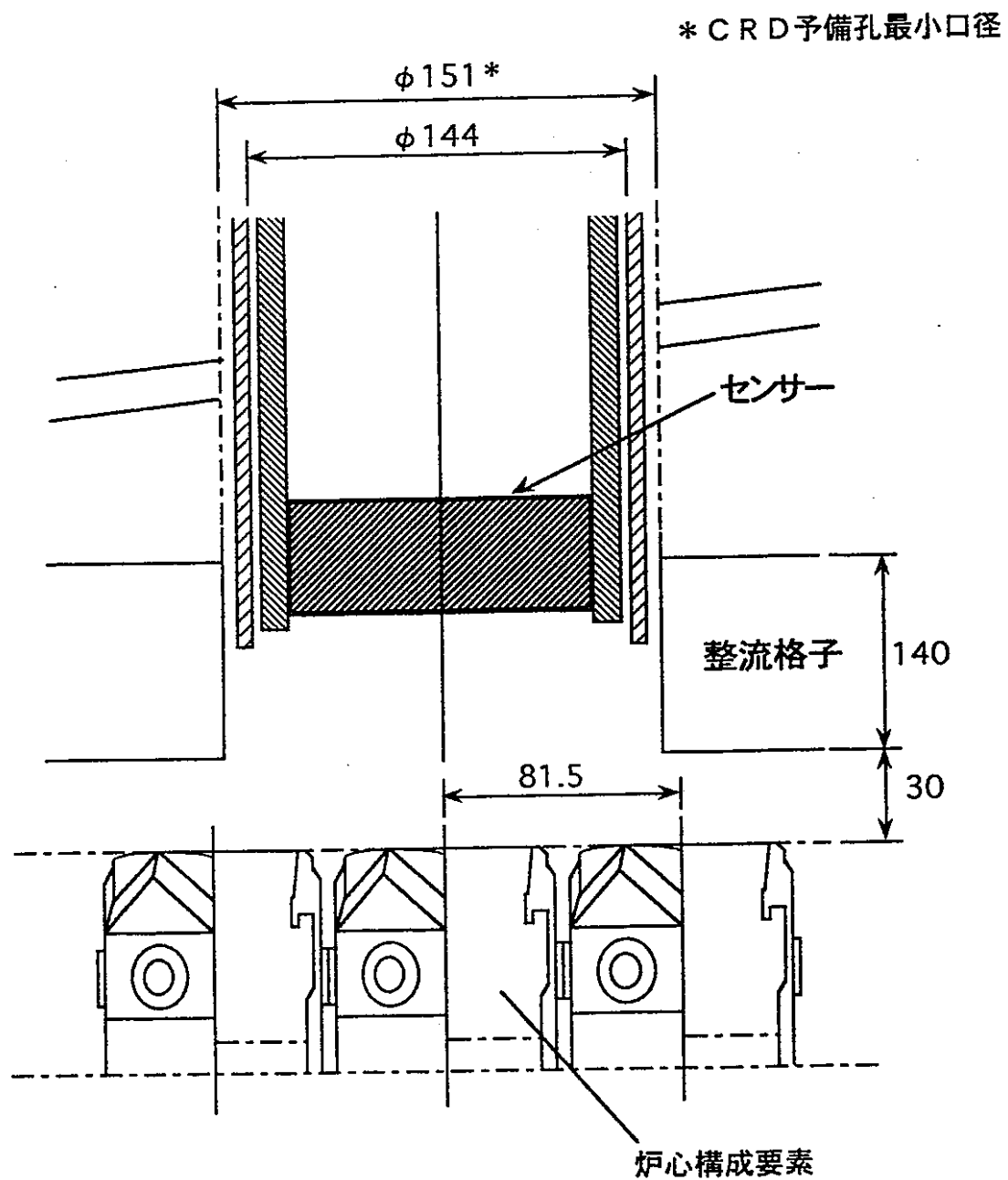


図 2. 3 - 1 炉心構成要素頂部検査装置の検討

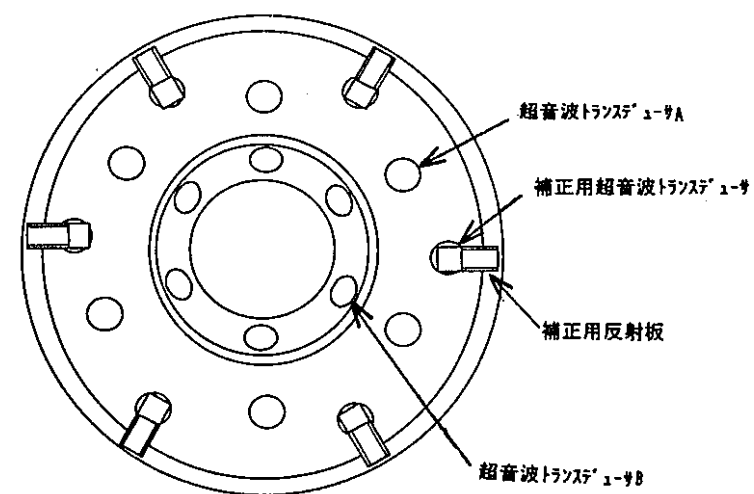
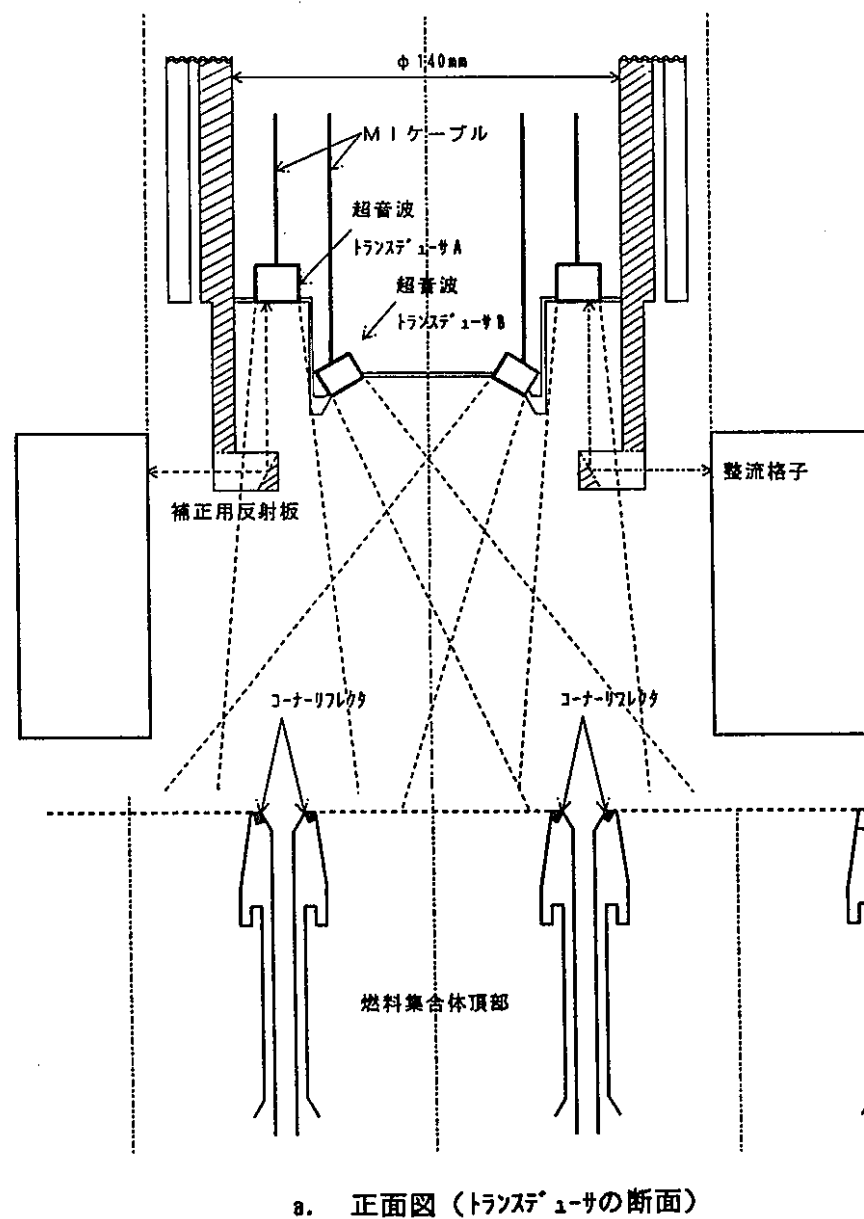
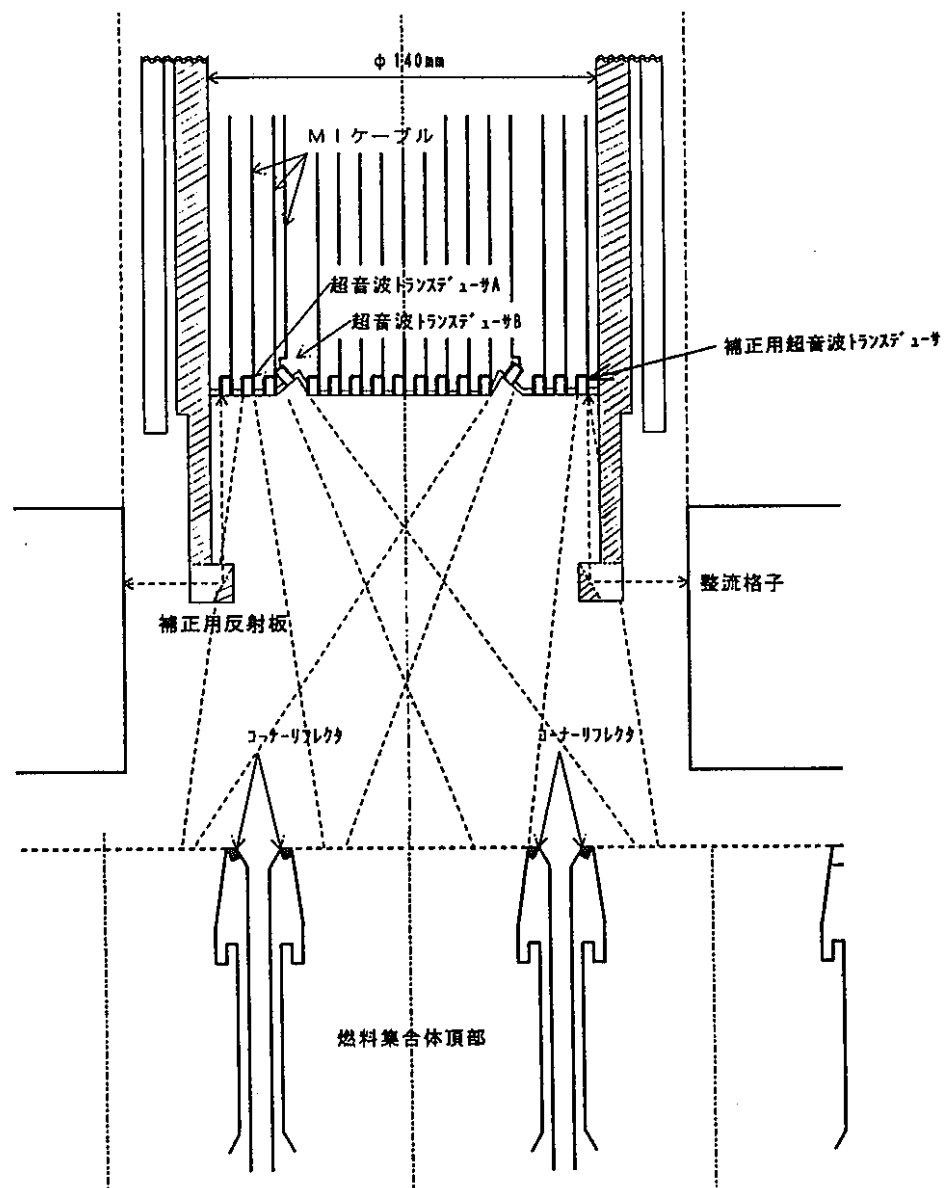
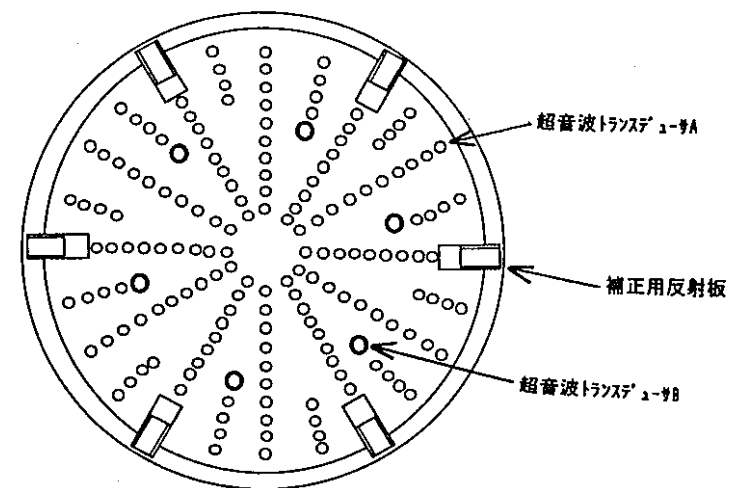


図 2. 3 - 2 単眼型超音波トランスデューサによる計測概念



a. 正面図 (トランスデューサの断面)



b. 平面図 (トランスデューサの前面)

図 2. 3 - 3 集積化マトリックス型超音波トランスデューサによる計測概念



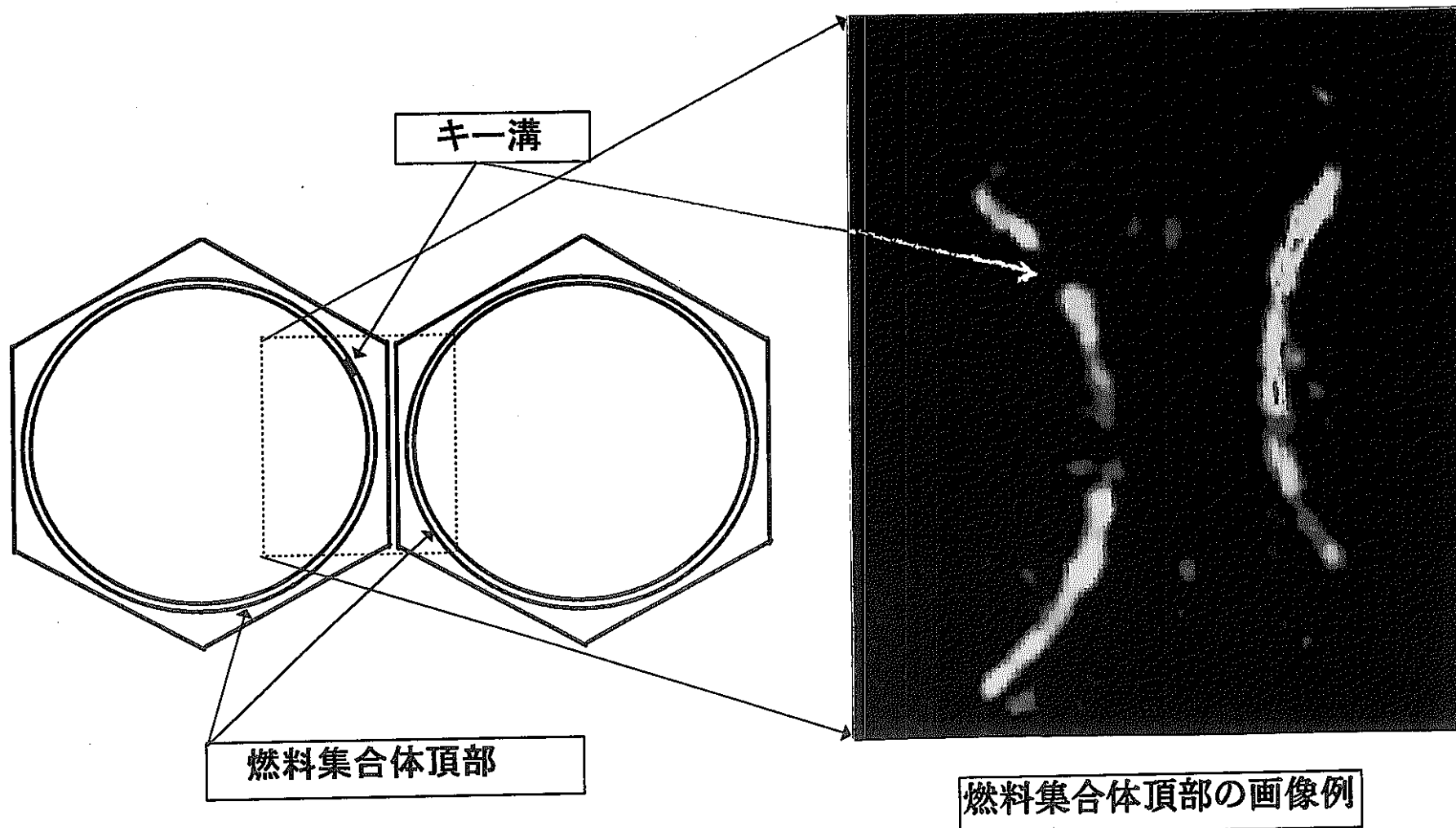


図 2. 3 - 4 集積化マトリックス型超音波トランスデューサによる燃料頂部の画像例

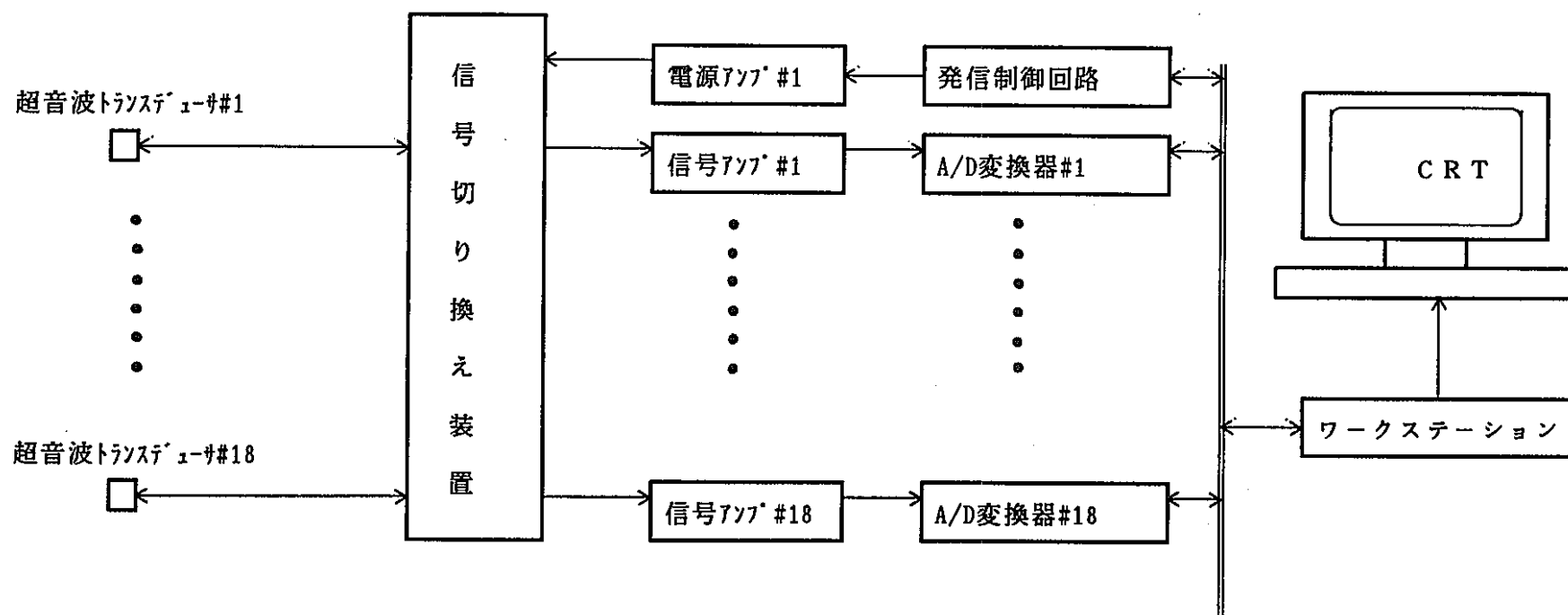


図 2. 3 - 5 単眼型超音波トランスデューサによる信号処理装置の構成

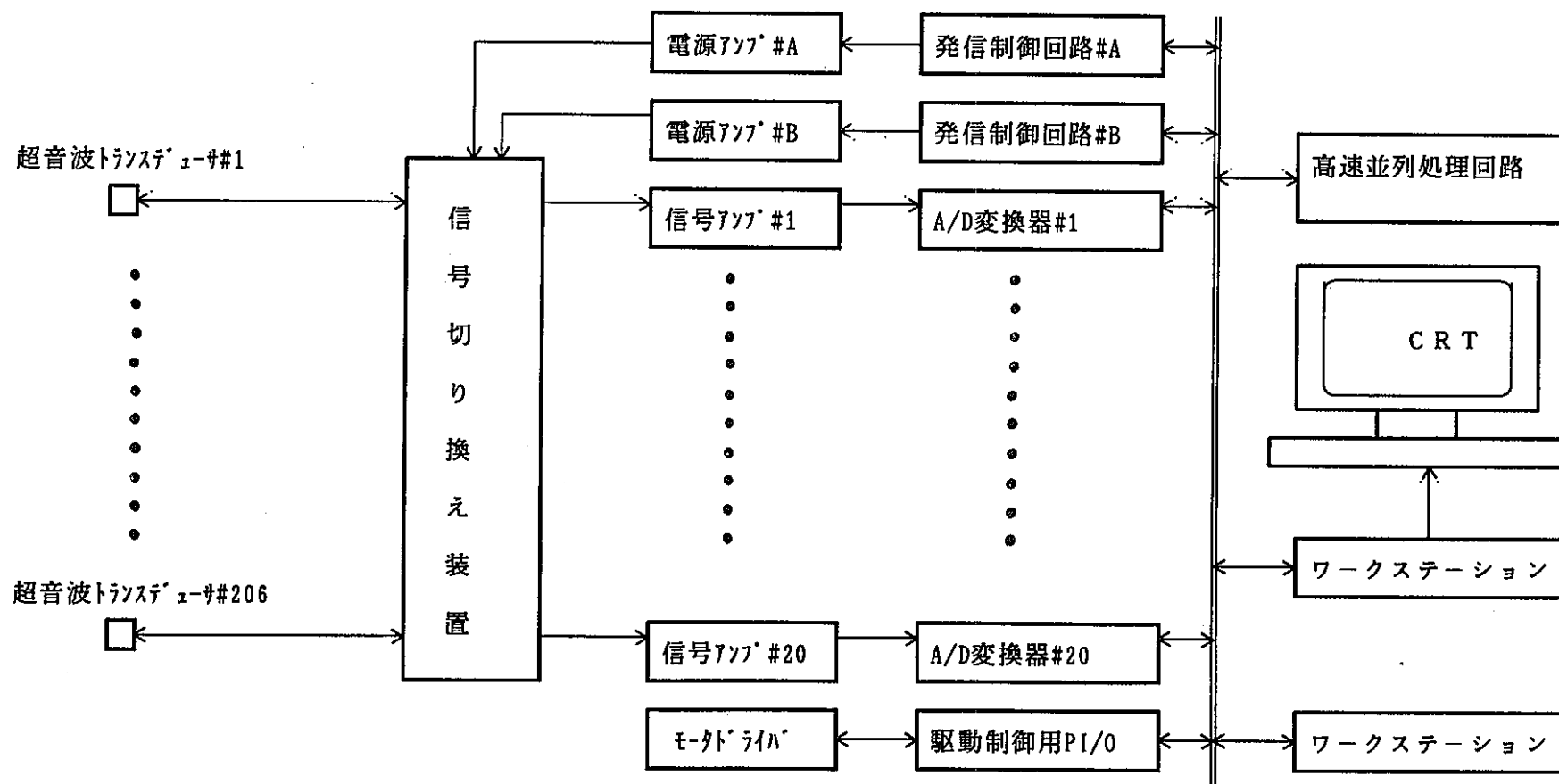


図 2. 3 - 6 集積化マトリックス超音波トランスデューサによる信号処理装置の構成

## 2.4 駆動機構

### 2.4.1 全体構成

検出部を駆動するための駆動機構は据え付け面から下約6.3mの軸長の炉内部分（上部案内管部）と据付部より上方の駆動部からなる（図2.4-1 参照）。

### 2.4.2 各部計画

検出部を保持する部分は、上部案内管内を上下動する構造とする。この上部案内管は、炉心上部機構のCRD予備孔内上下動のためのガイドの役目を果たす。また、必要量の生体遮蔽を内蔵する。

駆動部は、検出部を上下動させる機能を持たせるとともに、上部案内管と切り離せる構造とし、装荷・引抜き時に支障がないものとする。基本的には、CRD上部案内管取扱設備で取り扱えるものとする。

### 2.4.3 構造検討

単眼型超音波トランスデューサによる検出方法における駆動機構の構造を検討した。

炉心構成要素頂部の検出方法の検査装置を炉心第3列（[3B3]，[3E3]）に据付けることを想定した場合の装置全体概念図を図2.4-2に示す。センサー部の詳細を図2.4-3、駆動部廻りの詳細を図2.4-4にそれぞれ示す。

単眼型超音波トランスデューサによる検出方法には、炉心構成要素頂部を斜め方向から見るセンサーAと炉心構成要素頂部を真上から見るセンサーBが同じ半径方向に60°ずつずらして、各6個配置されている。また、これらのセンサーA、B間には、検査装置と炉心上部機構格子板とのガタによるズレの誤差修正を行うための補正センサーが、垂直方向に向くようにセンサーA、Bに対して30°ずらして周方向に6個設置されている。補正センサー先端には、炉心上部機構整流格子内面に発信波を反射させるミラーが設置されている。

センサーA、Bおよび補正センサーから出たMIケーブルは、バウンダリの延長管内を通り、上部の軸方向遮蔽体の周上をはわせて回転プラグ上まで引き出し、この部分でソフトケーブルにつなぎ変え、最終的には駆動部上部のシールコネクタから機外に取り出している。

単眼型超音波炉内検査装置を炉上部に据え付けた後、回転プラグ上に一体で据え付けられた駆動部により、センサー部の旋回及び昇降動作を行うようにしている。昇降動作は、減速機付きのステップモータの回転力を上記延長管上部に取り付けているボールネジに伝え、この部分で回転動作を昇降動作に変換している。

旋回動作は、昇降駆動機構を取付けているケース上部に内歯車を設け、モータの回転力を減速機を介して伝えるようにしている。これらのモータは、低速でしかも位置決めを厳しくするため、ハーモニック減速機付きのステップモータを用いている。

位置検出は、両軸モータの反出力軸から出たシャフトにシンクロ発信器を取付け、この回転数を取り出す方式としている。

駆動部ハウジングについては、隣接する制御棒駆動機構ハウジングとの取合い上、ハウジングの外径を190mmの六角形状以内に収まるようにしている。

検査装置の装荷・脱荷については、制御棒駆動機構上部案内管等の機器取付、取外しの時に現在用いられている簡易キャスク、上部案内管取扱機器を用いれば、寸法上問題なく取り扱えるようにしている。

図2.4-5 に単眼型超音波炉内検査装置の駆動動作原理図を示す。

#### 2.4.4 製造上の課題

単眼型超音波炉内検査装置を製作する上での課題を以下に示す。

- ① センサーは溶接による取付けを計画している。形状が $\phi 10$ mm程度と小型のセンサーであることから、溶接方法の確立を要する。
- ② 信号の感度を良好にするため、センサーとナトリウムの濡れ性をよくする必要がある。このため、センサー表面処理の方法を最適化する必要がある。
- ③ 不測の事態でセンサーを交換する必要がある場合を考慮し、センサーが設置されている先端部ごと取外して交換できる構造とするのが望ましい。これを実現するためには、耐熱・省スペース型コネクタの採用及び繰返し取付け・取外しができるセンサー溶接部構造の検討が必要である。
- ④ MIケーブルとソフトケーブルの接続部は、芯線同士を接続した上からスリーブをかぶせ、エポキシ等を充填することでMIケーブルシース内部への湿入防止を図る計画としている。この処置で増大する接続部を小径の本体内部へ収納する組立手順の確立を要する。
- ⑤ 本装置は、回転・昇降駆動機能を持たせる。そのため駆動部内部において可動変位を吸収できる各ケーブルの引回し方法の確立を要する。

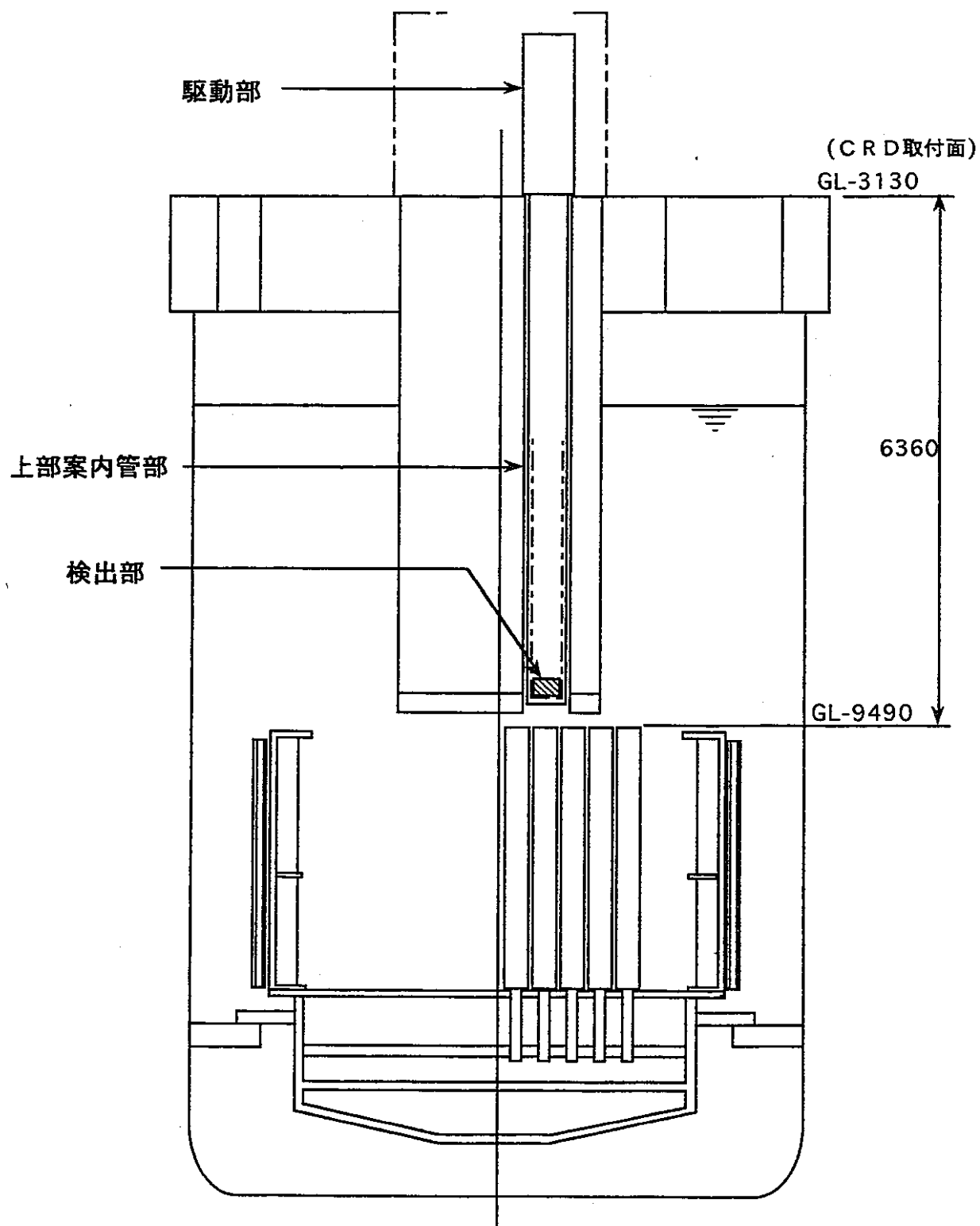


図 2. 4 - 1 炉心構成要素頂部検査装置全体概念

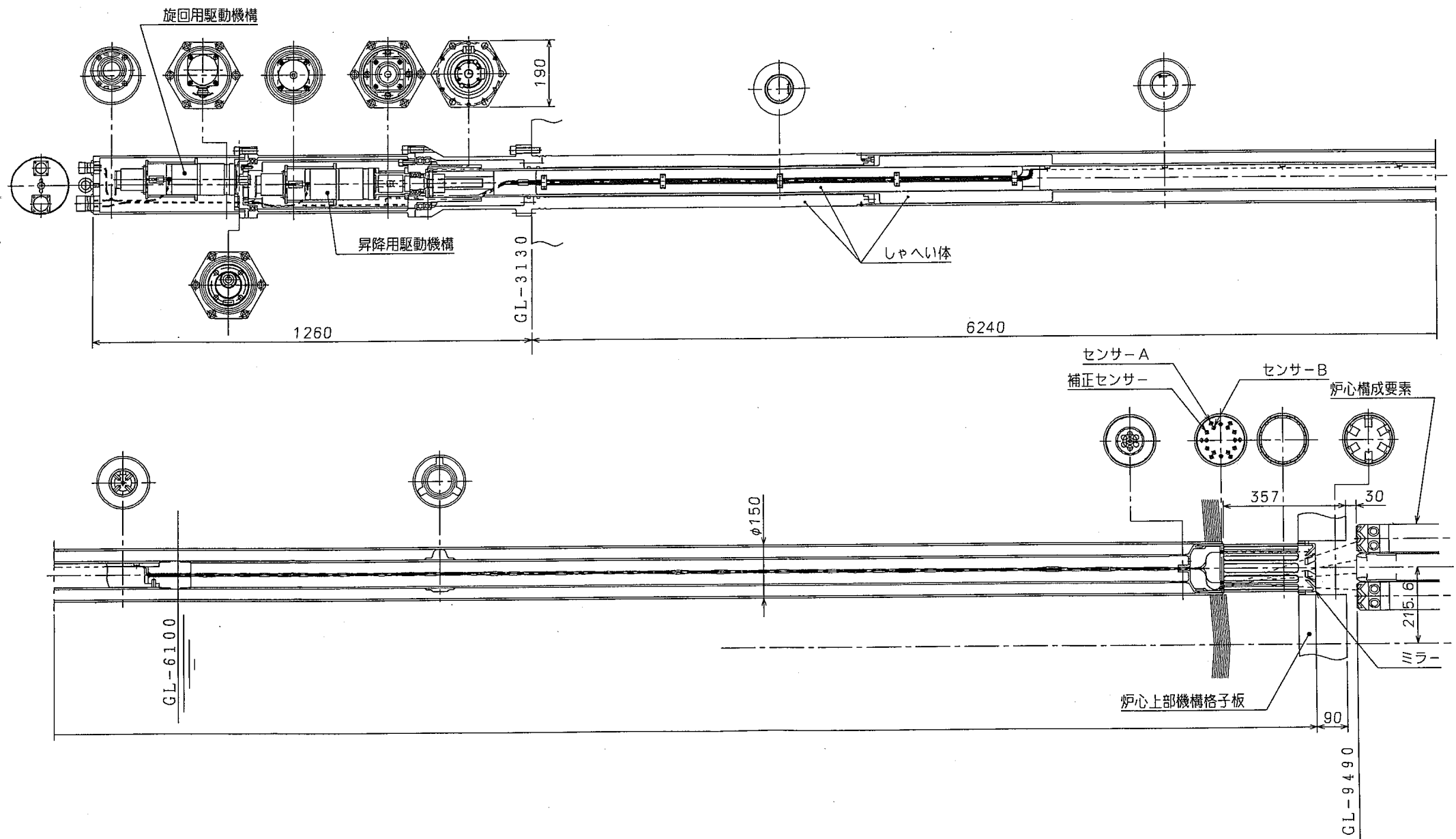


図 2. 4 - 2 単眼型超音波炉内検査装置外形図

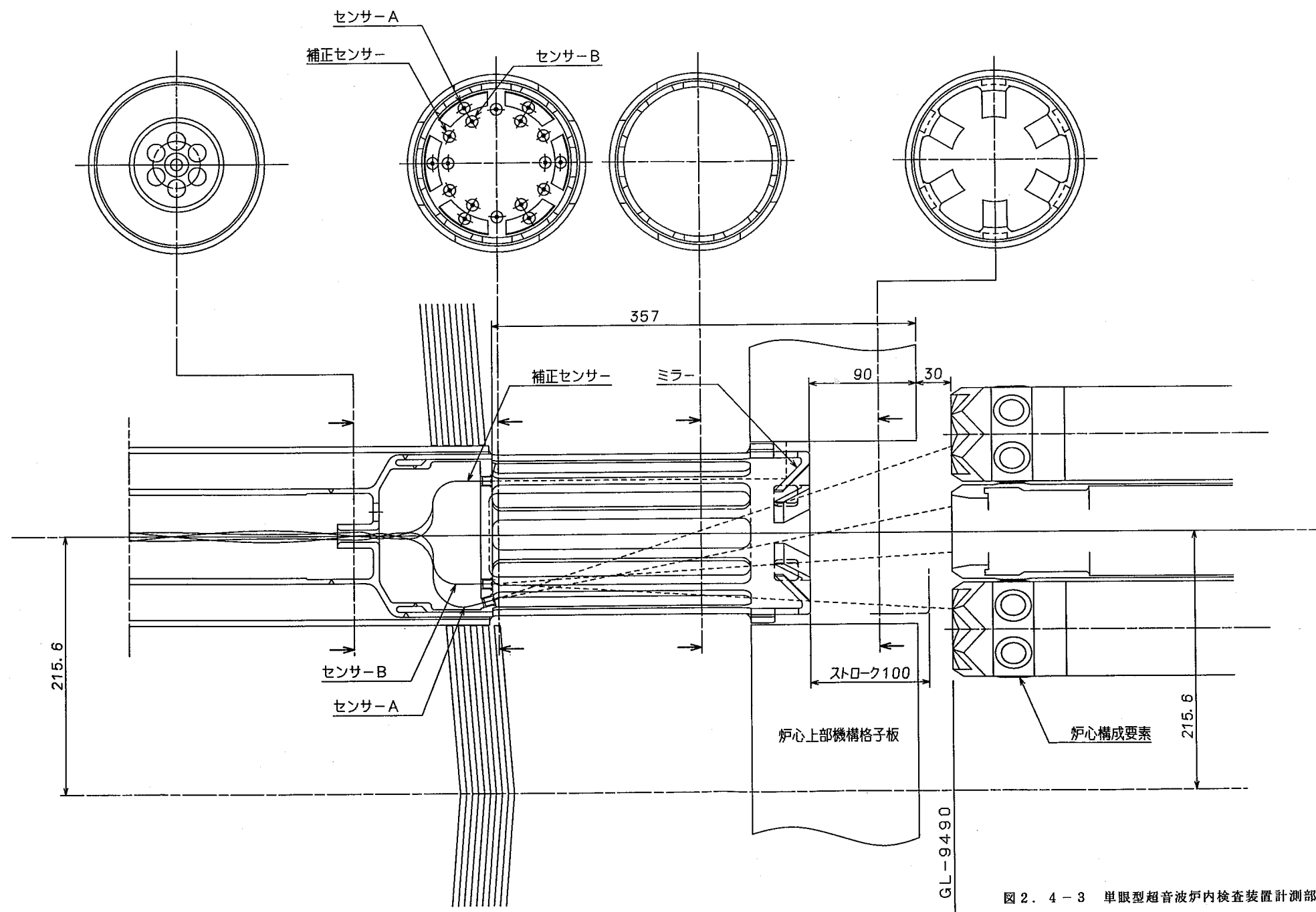


図 2. 4 - 3 単眼型超音波炉内検査装置計測部構造図



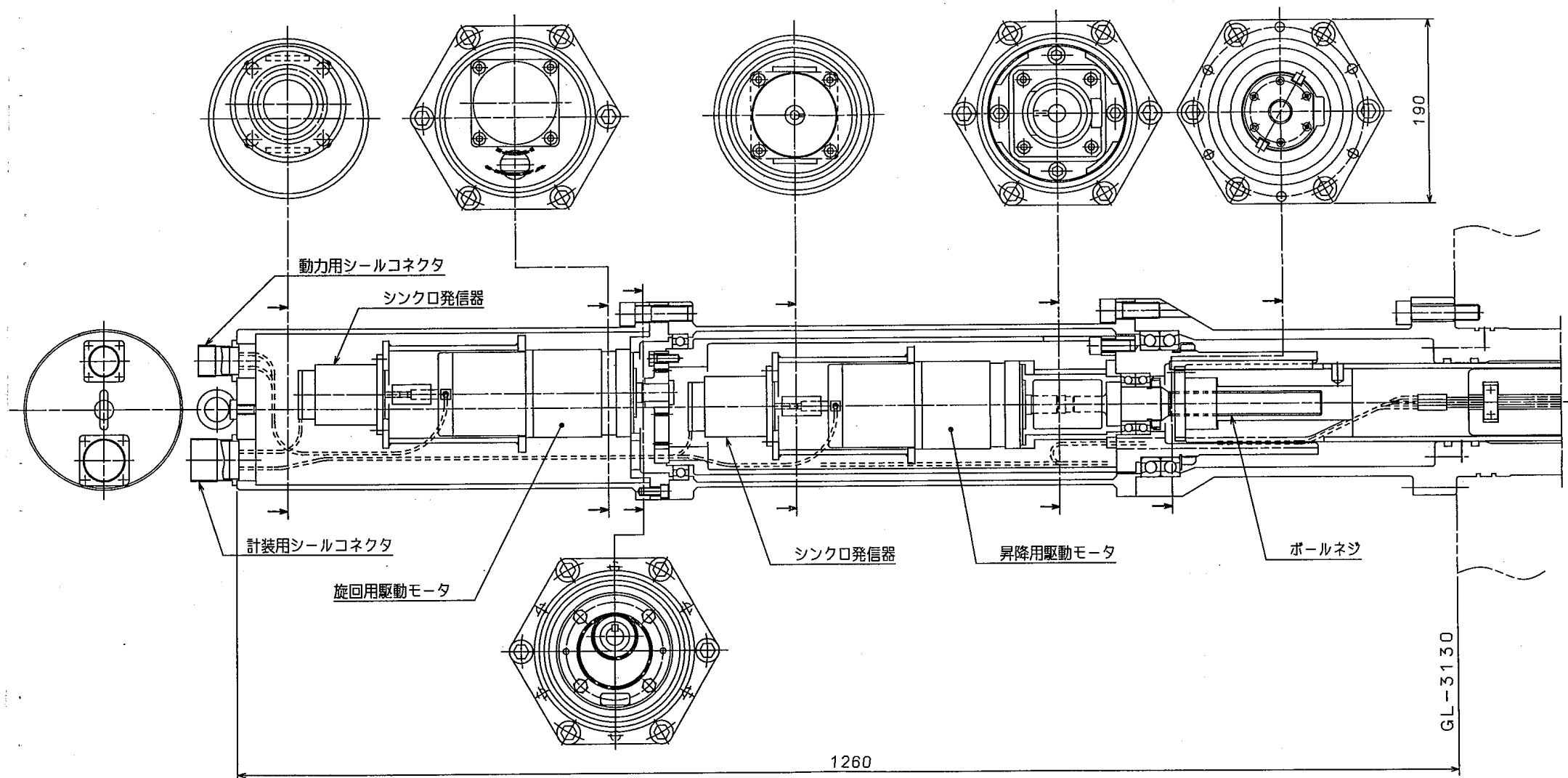


図 2. 4 - 4 単眼型超音波炉内検査駆動部構造図

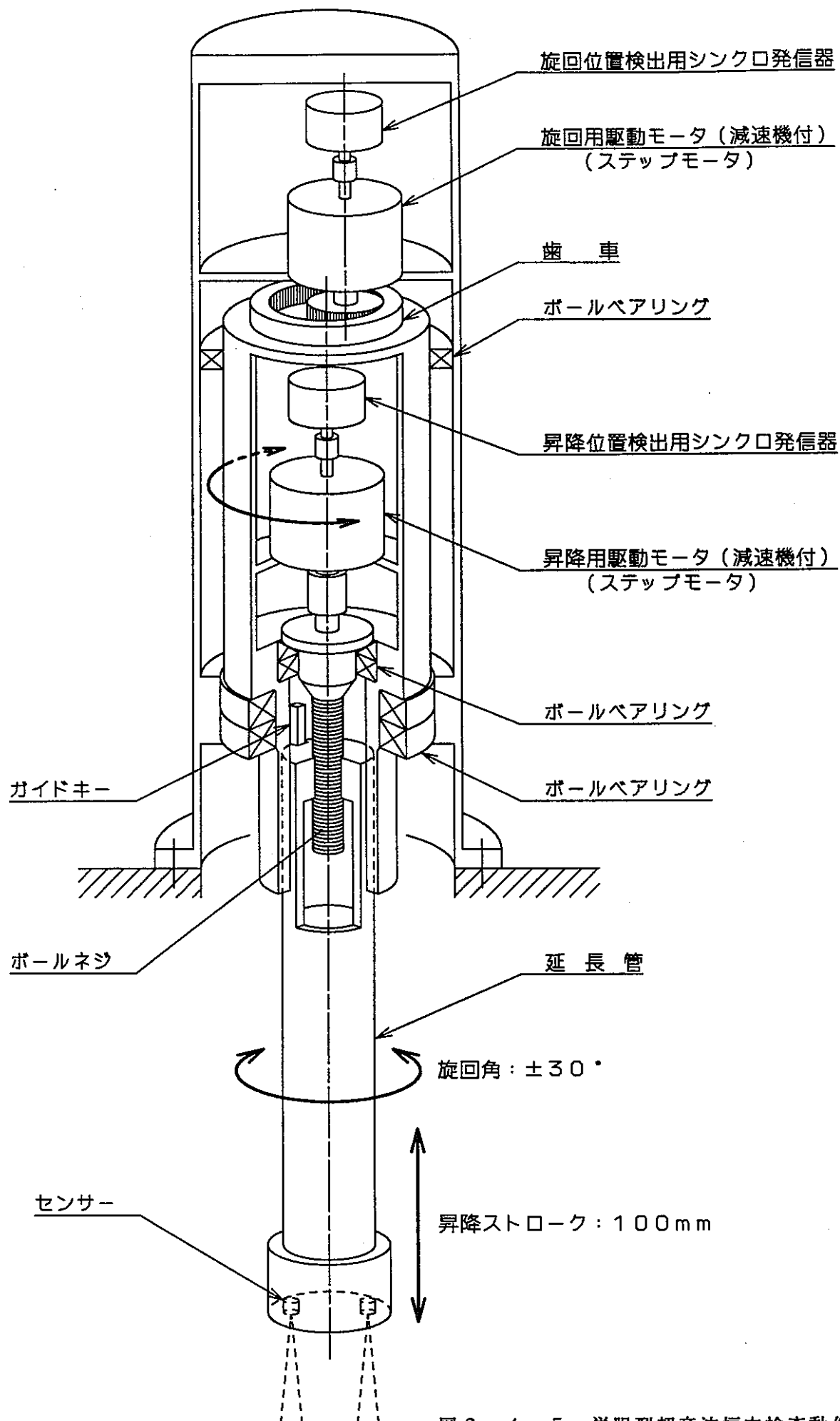


図 2. 4 - 5 単眼型超音波炉内検査動作原理図

### 3. 連結管の検査手法の調査・検討

#### 3.1 主要検討条件

##### a) プラント条件

- ・ 温 度 : 250℃～370℃
- ・ 冷却材流量 : 100%

##### b) 機 能

連結管部の連結管内面、オリフィス孔の変形を測定する。

#### 3.2 検査手法全体計画

##### (1) 検査装置設定手順

検査部位を検査するため査装置の検出部を連結管部に装荷し、設定するまでの手順として以下の通りとする。

- ・ 原子炉停止後、検出部を連結管部に装荷し、検出できるよう、設定する。計測対象を計測するため、必要に応じて、検出部を微調整する。検出部の取り出しは、原子炉運転再開前に行っておく。

手順として、前記2.2(1)項a)に示したようなやり方があるが、連結管部の計測のためには、計測対象の炉心構成要素を炉心から引き抜いておく必要がある。(図3.2-1 参照)この状態で原子炉起動はできないため、上記の手順を選択した。

##### (2) 装置設置位置

観察装置を設置する場所として以下の2通りがある。

##### a) 炉心上部機構内CRD予備孔

- ・ 原子炉停止後、大小回転プラグジャッキアップし、回転させることにより、前述の2.2(2)項に示す範囲に検出部を移動できる。

##### b) 燃料交換孔

- ・ 原子炉停止後、大小回転プラグをジャッキアップし、回転させることにより、すべての炉心アドレスにアクセスできる。

各アドレスへのアクセス性の上からは両方とも設置場所として利用できる。場所の選択にあたっては、燃料交換、制御棒駆動機構メンテナンス等炉上部作業時期を考慮する必要がある。

(3) 検査方法

検査時に検出部を一定位置に維持する場合と動作させる場合について考える。

- a) 検出部を一定位置に維持する。
- b) 検出部を垂直方向に移動し（上下動作、回転動作）、移動後に反射波を受信、検査する。

上記a)、b)を比較すると、後者は、期待する検出部の位置に対して外乱（検査装置駆動機構部のガタ、垂直度公差等）が入り、測定精度に影響する可能性が考えられる。本装置の計測対象部位は、軸方向に長いこと、オリフィス位置が周方向のある角度に設置されている。したがって、本検討では上記b)を選択する。

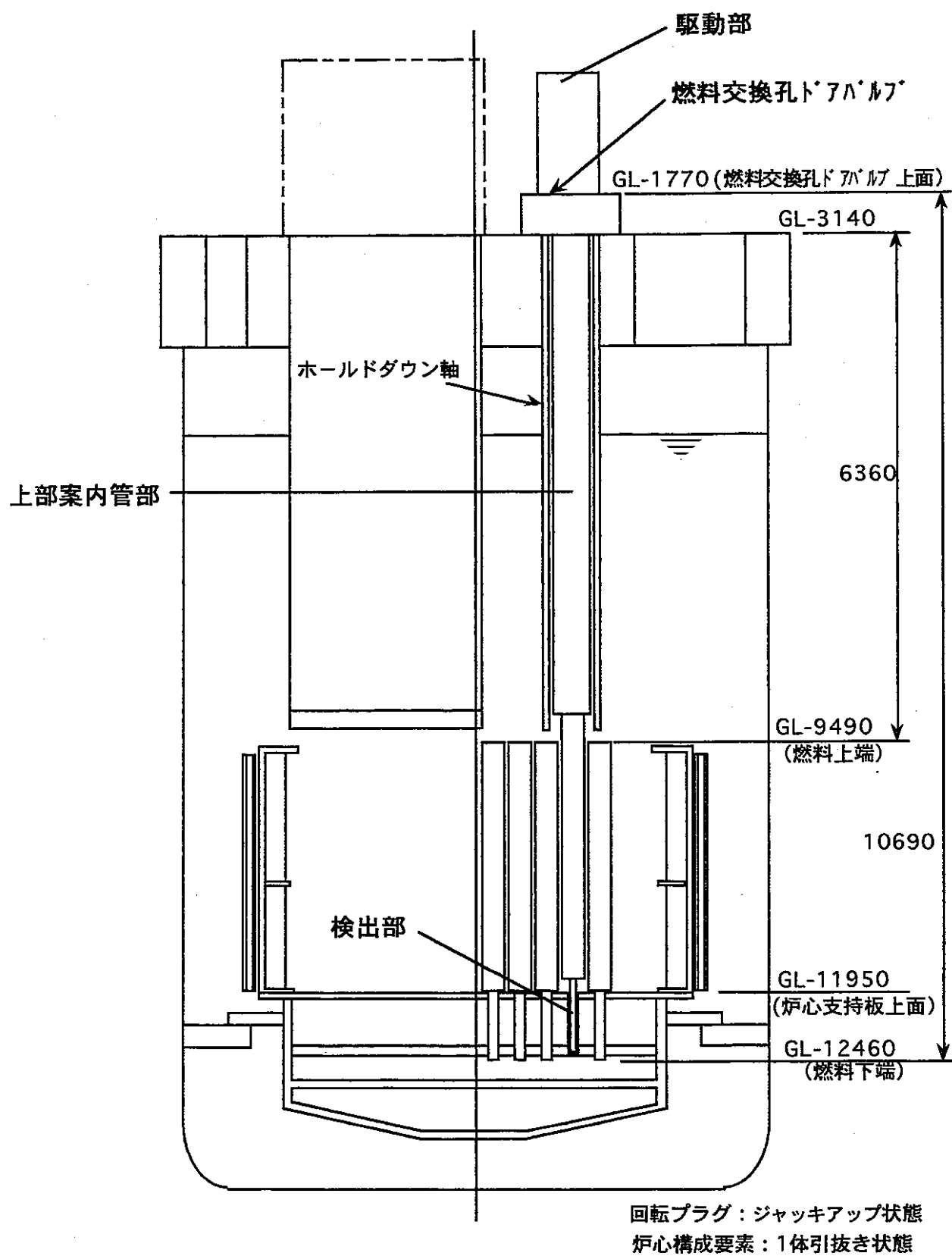


図 3. 2 - 1 連結管部検査装置全体概念

### 3.3 検出部

#### (1) 検出部設置位置周辺条件

「常陽」の連結管部まわりの構造寸法は図3.3-1（下方の図）の通り（一例）である。

連結管部内径最小値は45.2mmである。オリフィス径は、10～12mmで軸方向にmmにわたって複数個設けられている。

#### (2) 検出器方式

超音波を利用した検出方式として以下の2通りがある。

##### a) 単眼型超音波トランスデューサによる検出方式

比較的大型の超音波トランスデューサを複数個配置し、機械的な走査により連結管の内側からの反射エコー信号を直接検出する。これにより、連結管の内径及びオリフィスの位置測定を行う。

同方式の、原理説明を図3.3-2に示す。

図中の超音波トランスデューサの超音波発信面を凹型形状とすることで、連結管の内側に焦点を合わせることで、精細な超音波画像を得ることが出来る。

計測対象が160mmであるためφ10mmの単眼トランスデューサーを16mmおきに10個配置する構成とし、上下走査（トランスデューサーのピッチに相当する16mmのストローク）と旋回走査を行うことにより連結管の内側を画像化する構成とする。

超音波トランスデューサ用のケーブルは、370℃の高熱と中性子束等の放射線を考慮し、MIケーブルを用いるものとする。

尚、250℃以下で使用する場合であれば、ポリイミド系の有機系同軸ケーブルの適用も可能である。

##### b) 集積化アレイ型超音波トランスデューサによる検出方式

集積化アレイ型は、振動子のピッチを1mm程度に細かくすることにより上下方向の機械走査をすることなく旋回方向の機械走査のみで画像化が可能である。

図3.3-3 に集積化アレイ型超音波トランスデューサによる検出方式の概念を示す。

図中の超音波振動子は1mm幅の短冊状の形状をしており、この振動子を160個程度配置する構成とした。

#### (3) 検出部寸法

検出部の外径は、連結管最小内径φ45.2mm（挿入部）に対して、連結管部への挿入性を考慮するとφ44mm程度となる。

超音波トランスデューサーとしての寸法上の要求条件は、次の通りである。

a) オリフィス形状を観察するための超音波トランスデューサー表面と観察対象との距離は、約20mm必要である。

b) オリフィス形状を観察するために必要な超音波トランスデューサーの個数は走査なしの場合、

・単眼型超音波トランスデューサによる検出方式

機械走査可能の場合は、

$$\{ (\text{トランスデューサのピッチ}) / (\text{検査範囲}) \} + 1$$

$$= (16\text{mm} / 160\text{mm}) + 1$$

$$= 1.1 \text{ 個}$$

が必要個数となる。

・集積化マトリックス型超音波トランスデューサによる検出方式

$$(\text{検査範囲}) / 1\text{mm}$$

$$= 160\text{mm} / 1\text{mm}$$

$$= 160$$

が必要な振動子個数となる。

c) 上記トランスデューサーの奥行き寸法は約25mm必要である。

以上の条件から、連結管部の検査部の形状は、図3.3-1（上方）のようになる。

トランスデューサーからの信号ケーブルを収納する空間との関係等考慮し、トランスデューサー個数、配置等の設定を行っていくものとする。

また、

・検出部に取り付けられるトランスデューサーは、一方向のみ。

・したがって、オリフィス部を観察するために回転機能を有した駆動部が必要である。

#### (4) 検出部の仕様

検出部の仕様は、検出方式により異なるためそれぞれの方式について検討結果を示す。

a) 単眼型超音波トランスデューサによる検出方式

以下に単眼型超音波トランスデューサの仕様及びその根拠を示す。

##### ① トランスデューサー配列

比較的大型の単眼超音波トランスデューサを16mmおきに均等に11個配置する。

② トランスデューサー形状

使用するトランスデューサの数が少ないことから個々のトランスデューサの前面を10mm程度の凹型形状とし、連結管の内面に焦点を結ぶ形状とする。

③ 周波数 : 5 ~ 10 MHz

トランスデューサの周波数は、連結管の径方向の目標検出精度0.1mmを確保するため、1波長が0.1mmの2~5倍程度となる5~10MHzとする。

(反射波の立ち上がりを検出することからため実質的に波長の1/10程度の精度で計測が可能。)

④ 振動子材料 : ニオブ酸リチウム

370℃の耐熱性を有するニオブ酸リチウム(キュリー温度:約1200℃)の単結晶を使用する。また、良好な波形特性を(短パルス幅)実現するためにY36カットの単結晶とする。

尚、250℃以下で使用する場合には、より音響特性の優れたチタン酸鉛系のセラミック系の振動子を使用することも可能である。

⑥ 耐熱性 : 370℃

現状、ニオブ酸リチウムを使用した超音波トランスデューサが550℃まで対応可能であり、問題無い。

⑦ 耐放射線性

現状は:振動子材料であるニオブ酸リチウムは、 $Li^6$ を一定の割合で含有しているため中性子線により放射化されるため $Li^6$ フリーのニオブ酸リチウム単結晶を使用する必要がある。

⑧ 走査機構

超音波トランスデューサを最適な位置に位置決めするために旋回機構及び昇降機構が必要。

b) 集積化アレイ型超音波トランスデューサによる検出方式

以下に集積化マトリックス型超音波トランスデューサの仕様及びその根拠を示す。

① トランスデューサー配列

連結管の内面を高精度で画像化するために、1mm程度の短冊状の圧電振動子を160個1列に配置する。

③ トランスデューサー形状:平板



8ないし16個の振動子を同時に発信し、その際の発信位相を制御することにより焦点を連結管の内面に結んだ状態で電子走査を行い上下方向の断面像を画像化することができる。

- ④ 周波数 : 5 ~ 10 MHz

単眼型超音波トランスデューサによる検出方式と同様。

- ⑤ 振動子材料 : ニオブ酸リチウム

同上。

- ⑥ 耐熱性 : 370℃

- ⑦ 耐放射線性

単眼型超音波トランスデューサによる検出方式と同様。

- ⑧ 走査機構

連結管の内面を全て画像化するために旋回走査機構が必要。

#### (5) 信号処理部の仕様

信号処理部の仕様は、検出方式により異なるためそれぞれの方式について検討結果を示す。

##### a) 単眼型超音波トランスデューサによる検出方式

単眼型超音波トランスデューサによる検出方式の信号処理装置は、トランスデューサの数が11個になっただけで図2.3-5と同様である。

超音波エコー信号は、最終的にワークステーションに取り込まれ、ピーク検出処理の結果（遅れ時間とエコーレベル）に音速を掛けることにより連結管内部の距離測定を行い、トランスデューサ位置に応じて表示することにより連結管内面の形状をCRT上に表示することができる。

また、距離換算するための音速値は、熱電対にて測定された温度によりオンラインで補正するものとする。

##### b) 集積化アレイ型超音波トランスデューサによる検出方式

集積化アレイ型超音波トランスデューサによる検出方式の信号処理装置を図3.3-4に示す。

集積化アレイ型超音波トランスデューサによる検出方式は、連結管の内面及びオリフィスの画像化用の振動子160個程度を医用の超音波診断装置で行う電子走査方式で縦断面を画像化し、この断面像を旋回走査に応じて立体画像化して表示するものである。

超音波の発・受信は、160個の内8ないし16個の圧電振動子を同時に発信（16個の発信タイミングを遅延回路で制御して超音波をフォーカスする。）

し、A/D変換器で受信することにより行う。1回の走査は、この発・受信を信号切り換え装置により1振動子ずつ160回ずらすことにより行う。

これにより振動子の並びに沿った縦断面像が描かれ、高速並列処理装置がこの断面像を巡回走査に応じて立体画像化处理し、その結果を画像表示用のワークステーションのCRT上に表示することにより連結管の内面とオリフィス穴の形状の画像の確認を行うことができる。

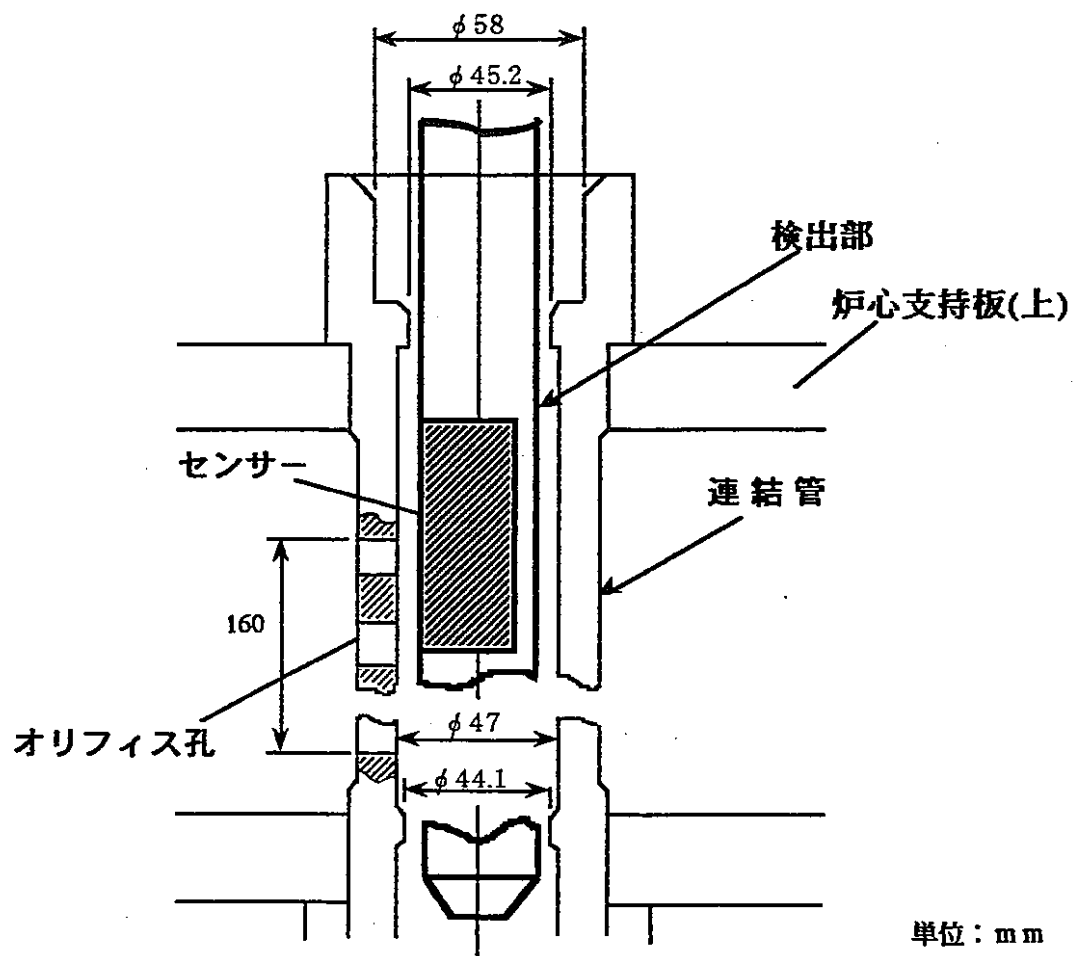
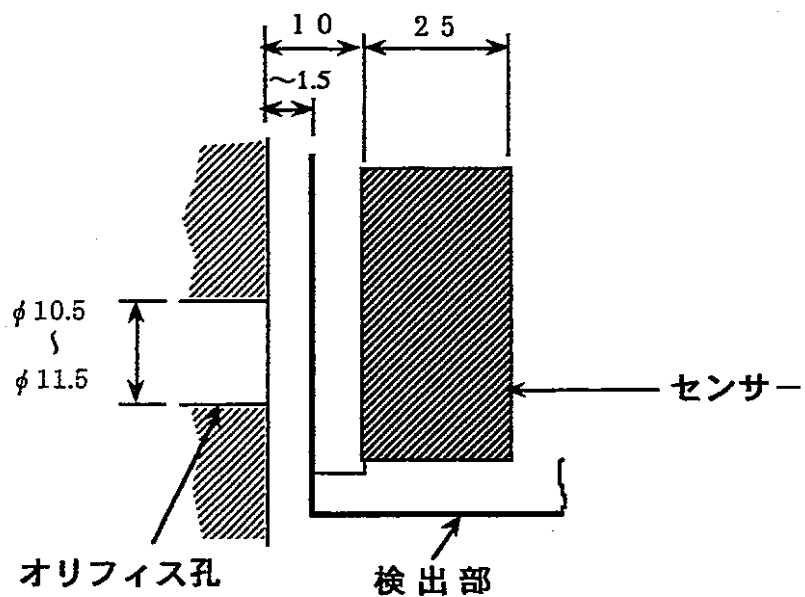


図 3. 3 - 1 連結管部検査装置

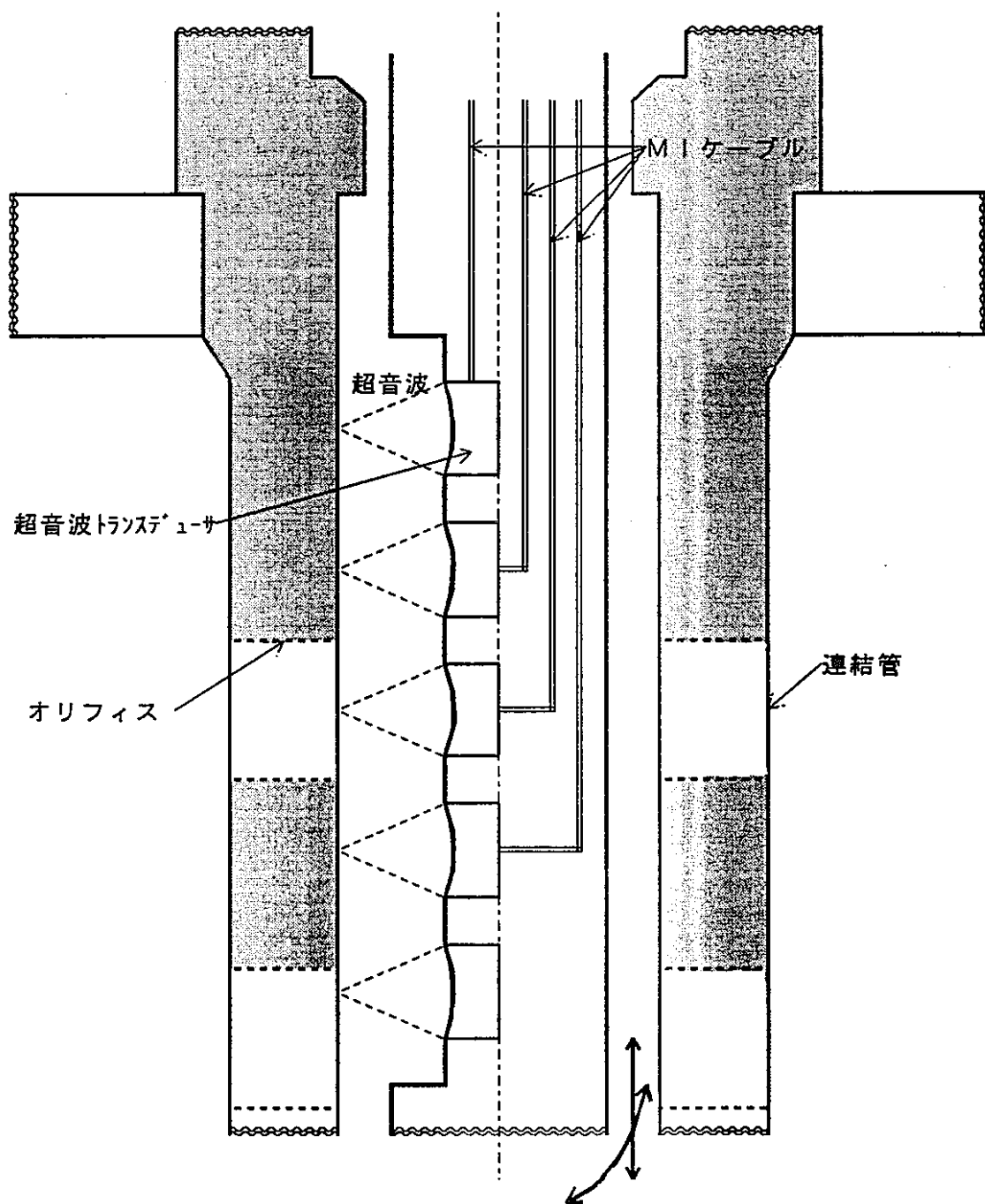


図 3. 3 - 2 単眼型超音波トランスデューサによる計測概念

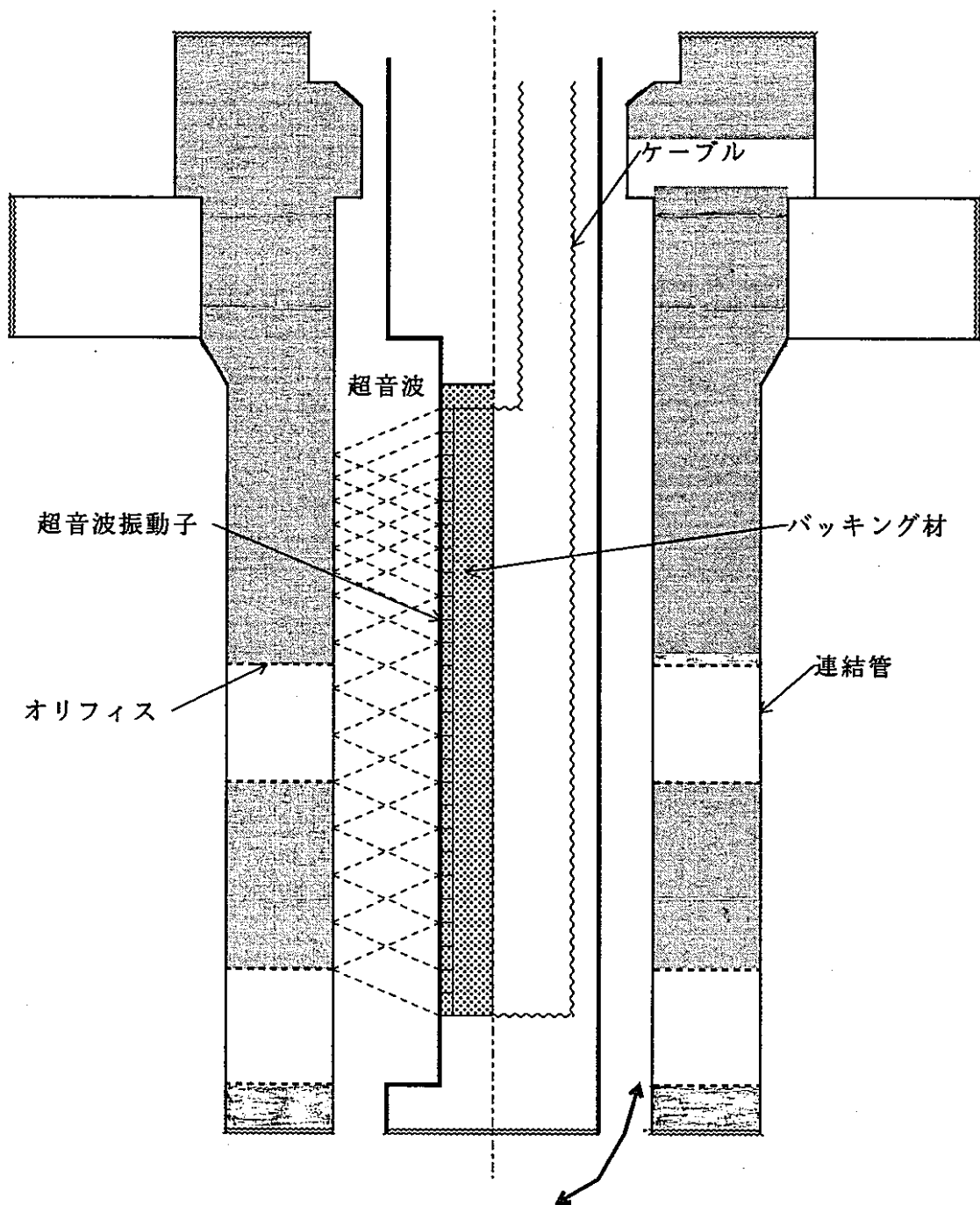


図 3. 3 - 3 集積化アレイ型超音波トランスデューサによる計測概念

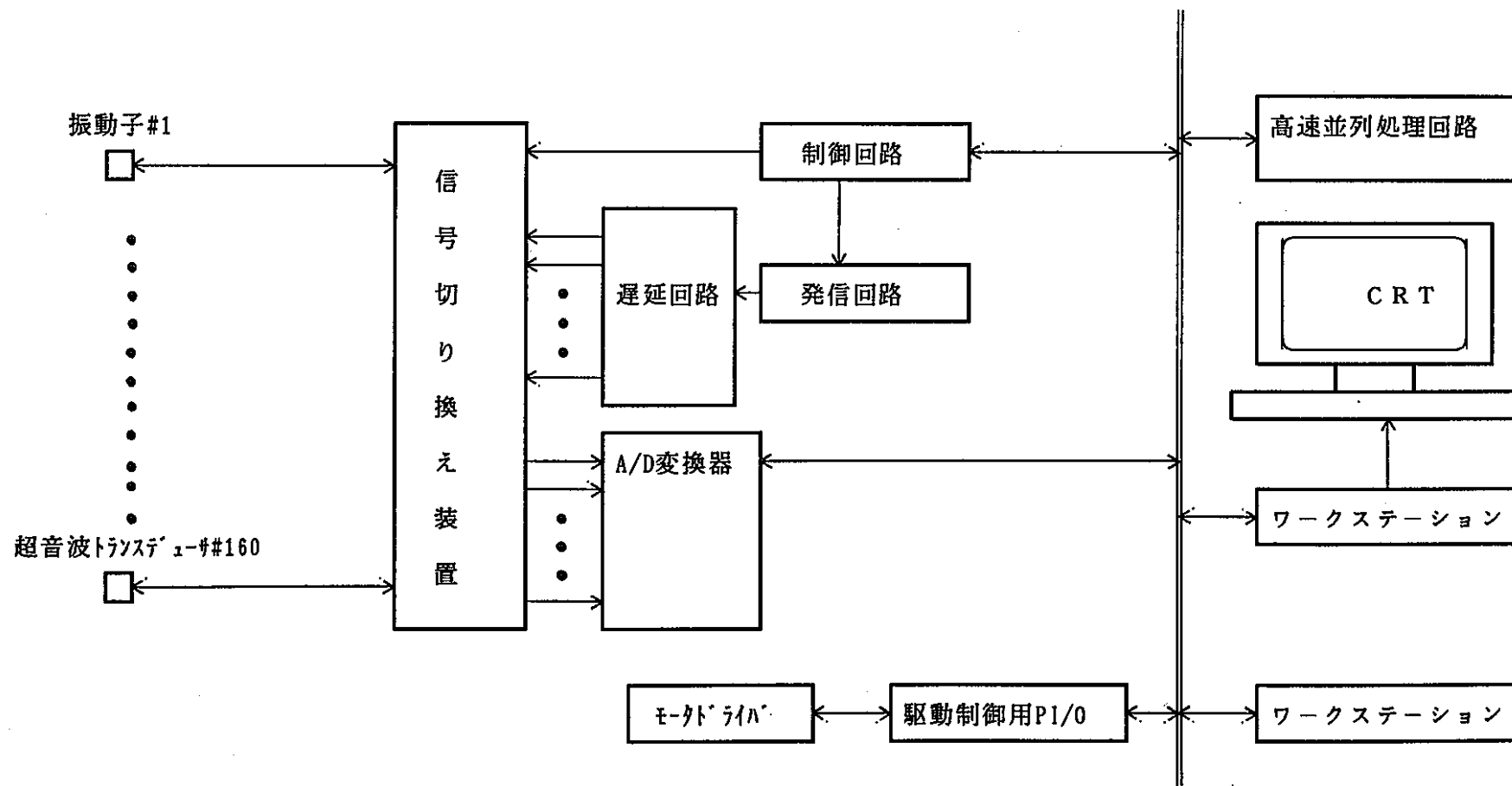


図 3. 3 - 4 集積化アレイ型超音波トランスデューサによる信号処理装置の構成

### 3.4 駆動機構

#### (1) 全体構成

検出部を駆動するための駆動機構は燃料交換孔に装置を据付ける場合、燃料交換孔ドアバルブ上面の据付け部から下方約10.7mの軸長の炉内部分（上部案内管部）と据付部より上方の駆動部からなる（図3.2-1 参照）。

上部案内管部は、既設ホールドダウン軸内に装荷される。上部案内管部の下部に検出部がつながっている。

#### (2) 各部計画

駆動部は、検出部を上下及び回転させる機能を持たせる。

検出部を保持する部分は、上部案内管内を上下、回転動作する構造とする。この上部案内管は、ホールドダウン軸内上下動のためのガイドの役目を果たす。

検出部先端構造（単眼型の例）を図3.4-1 に示す。

#### (3) 駆動機構の検討課題

連結管検査装置の駆動機構の課題は次の通りである。

##### ① 上下・回転させる構造

##### ② 炉内装荷・引抜きを行うための構造、設備対応

既設のCRD上部案内管取扱機に相当する設備が必要である。

全長が長いため、炉内装荷・引抜き手順は、取扱キャスク軸長制限を考慮すると、次のようになる。

- ・ 検査装置を装荷する場合、キャスクに収納できるようにあらかじめ検出部先端部を上部案内管内に引抜いた状態にしておき、キャスクに収納する。炉内に装荷後駆動部を据付ける。
- ・ 検査後装置を取外す場合、検出部先端部を炉心上部機構内に収納し、炉内部分を短くした上で、駆動部を取外し、炉内部分をキャスク内に収納する。

以上の手順に対応するためには、ストローク3000mmの上下駆動が可能で、駆動部のみ取り外せる構造とする必要がある。





#### 4. 開発計画の検討

##### 4.1 開発課題及び開発手順

常陽の炉内ナトリウム中での検査技術についての課題を整理した結果を表4.1-1に示す。

##### (1) 超音波トランスデューサ

超音波トランスデューサは、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トランスデューサの耐熱性は550℃である。

これは、圧電振動子であるニオブ酸リチウムとトランスデューサのケースを接合するろう材の融点が600℃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℃であり温度特性上は問題ないが、600℃程度の高温中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ことも克服すべき技術課題である。

600℃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の開発するためには、以上に示した課題を解決することが必要である。

このため、現状の技術をベースとしてニオブ酸リチウム（Y36カット）とナトリウムをシールする前面板とを接合した照射試験用の試作体を製作し、「常陽」の炉内で照射試験を行い、その結果に基づき耐熱性向上を図って実機への適用を図ることとした。

##### (2) 信号処理部

超音波信号により距離を計測し、画像を合成する技術は、現在までに開発済みの技術を応用することで基本的に問題はないと考えられる。

しかしながら、本開発に特有な炉心頂部の温度ゆらぎ対策については、本開発野中で対応する必要がある。

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ことにより統計処理を施す方式が有効と考えられるため、水中試験等でその有効性を評価することが必要と考えられる。

このため、主に温度ゆらぎ対策として有効と考えられる時間相関処理方法の検討を行い、信号処理装置の設計に反映することが必要と考えられる。

##### (3) 駆動部

単眼型トランスデ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、駆動部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℃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。

また、集積化マトリックス型トランスデューサによる検査装置の駆動部を開発す

るためには、リニアモータを内蔵した走査機構部の開発が必要となるため、機構部の他に600℃の耐熱性及び耐放射線性を有したリニアモータの開発が必要となる。

#### 4.2 開発計画

今後の開発にあたっては、運転中の炉心頂部の変位観察用の検査装置として単眼型超音波トランスデューサによる検出方式の実用化に焦点を絞ることとし、超音波トランスデューサの耐熱性・耐放射線性の向上を最優先として計画を具体化することとした。

表4.1-1 開発課題及び開発手順の整理結果 (1/3)

方法 項目	要求仕様	開発課題 及び方策	開発方法
1. 超音波 トランスデューサ	<p>●環境条件</p> <p>使用温度 : 600℃</p> <p>照射条件 :</p> <p>冷却材流量 : 100%</p> <p>●音響性能</p> <p>周波数 : 5~10MHz</p> <p>S/N : 20dB以上</p>	<p>●耐熱性向上</p> <p>現状の高温用センサの耐熱性は、550℃(1月間)であり600℃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。</p> <p>●耐放射線性向上</p> <p>通常のニオブ酸リチウムは、Li<sup>6</sup>が一定の割合で含まれており、これが放射化するため、Li<sup>7</sup>の単結晶を使用する。</p> <p>●製作性</p> <p>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。</p>	<p>●開発手順</p> <p>① 基礎評価</p> <p>素子と前面板を接合した複数の要素試作体により熱劣化の原因検討及び耐熱性向上のための評価を行う。</p> <p>② 要素試作・評価</p> <p>基礎評価の結果を受けて数種類の超音波センサ要素試作体を試作し、耐熱性及び高温性能を評価する。</p> <p>③ Na中照射試験</p> <p>要素試作・評価の結果から、Li<sup>6</sup>フリーのニオブ酸リチウムを使用した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う。</p> <p>④ 集積化開発</p> <p>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。</p> <p>⑤ 実機体系での製作性検討</p> <p>実機体におけるセンサと駆動部の取り付け構造の適用性を確認する。</p>

表4.1-1 開発課題及び開発手順の整理結果 (2/3)

方 法 項 目	要求仕様	開発課題 及び方策	開発方法
2. 信号処理部	<p>● 炉心頂部変位 計測精度：0.1mm目標</p> <p>但し、炉心上部での温度ゆらぎに対する対策が必要。</p>	<p>● 画像化技術 現有の信号処理技術をベースで実現可能。</p> <p>● 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低減する。</p> <p>● 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。</p>	<p>開発手順</p> <p>① 温度ゆらぎ対策処理 温度ゆらぎ対策として適用する時間相関処理の効果を水中試験等で評価し、最適条件を検討する。</p> <p>② 計測精度評価 温度ゆらぎによる超音波の伝播を音響シミュレーションコードを使用し、計測精度及び画像性能の評価を行う。</p> <p>③ 実機設計を行い、実機を製作する。</p>

表4.1-1 開発課題及び開発手順の整理結果 (3/3)

方法 項目	要求仕様	開発課題 及び方策	開発方法
3. 駆動部	<p>●環境条件            使用温度 : 600℃            照射条件 :            冷却材流量 : 100%</p> <p>●炉心構成要素頂部検査            【単眼トランスデューサ】            旋回機構 : 外部駆動            昇降機構 : 外部駆動            【集積化トランスデューサ】            走査機構 : 内部駆動            (精度0.1mm)</p>	<p>●耐熱摺動機構            (原子炉運転中の摺動部)</p> <p>●流路確保</p> <p>●製作性・交換性</p>	<p>材料選定等の設計検討を行う。</p> <p>燃料出口からの冷却材の流れを阻止しない構造を流動解析により検討する。</p> <p>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。            高温用コネクタの調査を行う。</p>
		<p>●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℃の耐熱性及び耐放射線性を有したリニアモータを開発する。</p>	<p>開発手順</p> <p>① 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。</p> <p>② 要素開発            高温・耐放射線リニアモータの要素試作を行い、高温での評価を行う。</p> <p>③ 走査機構試作            上記の試作評価結果に基づき、トランスデューサの走査機構部を製作し高温評価を行う。</p> <p>④ 実機設計を行い、実機を製作する。</p>

## 5. まとめ

高速炉の供用中検査・補修（ISI）に関する技術開発の一環として、炉内構造物及び炉心に装荷されている炉心構成要素の健全性を目視によって確認するための炉内検査手法の調査・検討を行った。「常陽」の炉心構成要素頂部及び連結管部を対象に、検出精度向上（目標0.1mm）を指向した下記検査装置概念を具体化し、課題の抽出及び開発項目を具体化した。

- ・ 炉心頂部を対象とする検査装置据付け位置は、原子炉出力運転中に検出することから、CRD予備孔を利用する。
- ・ 検出器方式として単眼型超音波トランスデューサによる方式と集積化マトリックス型超音波トランスデューサによる方式の検出部構成・仕様、信号処理装置システム構成・基本仕様を具体化した。
- ・ 駆動機構として検出部上下動作、回転動作機能を有する機構構造概念を具体化した。

## 謝 辞

本調査・検討にあたり、適切なご指導をいただいた実験炉部技術課福家賢氏に感謝の意を表します。

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)