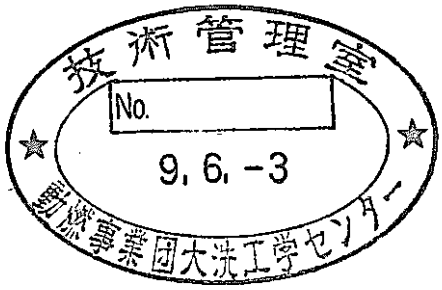
「常陽」炉内検査装置用超音波センサの炉外水中試験

― 試験装置の概念検討 ―

（動力炉・核燃料開発事業団　契約業務報告書）



１９９７年３月

株式会社　東　芝

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）

PNC-TJ9164 97-004
１９９７年 ３月

「常陽」炉内検査装置用超音波センサの炉外水中試験
—試験装置の概念検討—

小舞正文[*1]、若松光夫[*2]
佐藤孝男[*3]、小川不二雄[*1]
唐沢博一[*1]

要　　旨

高速炉の供用期間中検査に関する技術開発の一環として、原子炉運転中の炉心の挙動を超音波技術によって観測する炉内検査装置について、以下の検討を行った。

・集合体上部の温度ゆらぎの影響を考慮し、炉内検査装置の超音波センサによる集合体頂部の変位計測方法を検討し、超音波センサ配置の最適化検討を行った。
・集合体上部の温度ゆらぎの影響及び集合体の頂部の変位計測性能を評価するための炉外水中試験装置の基本構成及び試験条件の検討を行った。
・炉内検査装置の超音波センサの配置検討結果に基づき、超音波センサの炉内照射試験の照射条件の見直しを行い、必要な照射量や照射位置の検討を行った。

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　：　０８Ｃ３１９７

事業団担当部課室および担当者：大洗工学センター　実験炉部技術課　鳥丸 忠彦

*1：　株式会社　東芝　原子力事業部　動力炉開発部
*2：　株式会社　東芝　原子力研究所　システム機械技術担当
*3：　株式会社　東芝　京浜事業所 原子炉機器部

PNC-TJ9164 97-004

MARCH 1997

In-water test of ultrasonic sensors for the in-vessel structure inspection equipment under sodium in JOYO
Investigation for the concept of experimental equipment

Masafumi Komai(*1), Mitsuo Wakamatsu(*2), Takao Sato(*3)
Fujio Ogawa(*1), Hirokazu Karasawa(*1)

Abstract

As a part of the development of ISI(In-Service Inspection), the investigations regarding the inspect ion equipment which can observe the distortion of core assemblies under operating condition with ultr asonic measuring technique were performed as follows.

- The method in order to measure distortion of core assemblies under turbulent outlet sodium flow of the core assemblies was investigated. An improved arrangement of ultrasonic sensors on the equi pment was also investigated in this study.

- A conceptual design of a test rig and conditions of the in-water test, in which performance of the measuring system of core assemblies distortions will be evaluated, were investigated.

- The conditions of irradiation test of the heat-proof ultrasonic sensors were revised according to the result regarding the ultrasonic sensor's arrangement. The neutron flux condition and the arrangeme nt of the test elements in a test rig were also revised. So it was confirmed that the irradiation test conditions can be realized in the severance-rig within a fuel rack.

Work performed Toshiba Corporation under a contract with PNC
(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)
Contract No. :08C3197
PNC Liaison : Tadahiko Torimaru, Reactor Technology Section, Experimental Fast Reactor Division.
(*1) Advanced Reactor Engineering Department, Toshiba Corporation
(*2) System analysis and mechanical engineering Group, Toshiba Corporation
(*3) Nuclear Energy Equipment Manufacturing, Toshiba Corporation

目　　次

1. まえがき ---------- 1

2. 検討条件 ---------- 2

3. 検討結果 ---------- 8
3.1 炉内検査装置検出部の検討 ---------- 8
3.2 炉外水中試験装置の検討 ---------- 21
3.3 照射条件の見直し ---------- 31

4. 開発計画 ---------- 37

5. まとめ ---------- 37

謝辞 ---------- 41

1. まえがき

本研究では、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、原子炉運転中の炉心挙動を超音波技術を用いて観察するための炉内検査装置の開発を行っている。

本年度は、平成７年度までに実施した炉内検査装置用の超音波センサの検討及び駆動装置の構造等の検討に引き続き、炉内ナトリウム中の温度ゆらぎ対策及び集合体頂部変位の検出性能評価のための炉外水中試験の準備作業として、水中試験装置の基本検討ならびに超音波センサ配置の最適化検討を行った。

2. 検討条件

本研究で開発する炉内検査装置に対する検討条件を以下に示す。

(1) プラント条件

- 温　　度　：　250～600℃
- 冷却材流量　：　100%
- 照射条件　：　1.2×10^{13} n/cm^2sec

　　0.1Mev以上の高速中性子　3.2×10^{12} n/cm^2sec

　　（MK-Ⅲ　炉心中心、炉心上部機構下部下端付近）

(2) 要求機能

炉心構成要素頂部の傾き、水平、垂直方向の変位を検出する。

(3) 装置設置位置

炉心上部機構内のＣＲＤ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（５Ｄ２）の真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2-1及び図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。

(4) 検査装置全体概念

検査装置は、駆動部と上部案内管部とからなり、上部案内管部は、上部案内管とその内側にあって検出部を下部に有する延長管部からなる。検出部には、センサが取り付けられ、センサから出た信号ケーブルは駆動機構内を通り、炉上部から信号処理装置に接続されている。

炉内検査装置の設置概念を図2-3に示す。また、平成７年度に検討した検査装置の全体構造図を図2-4、超音波センサ取付部を図2-5に示す。

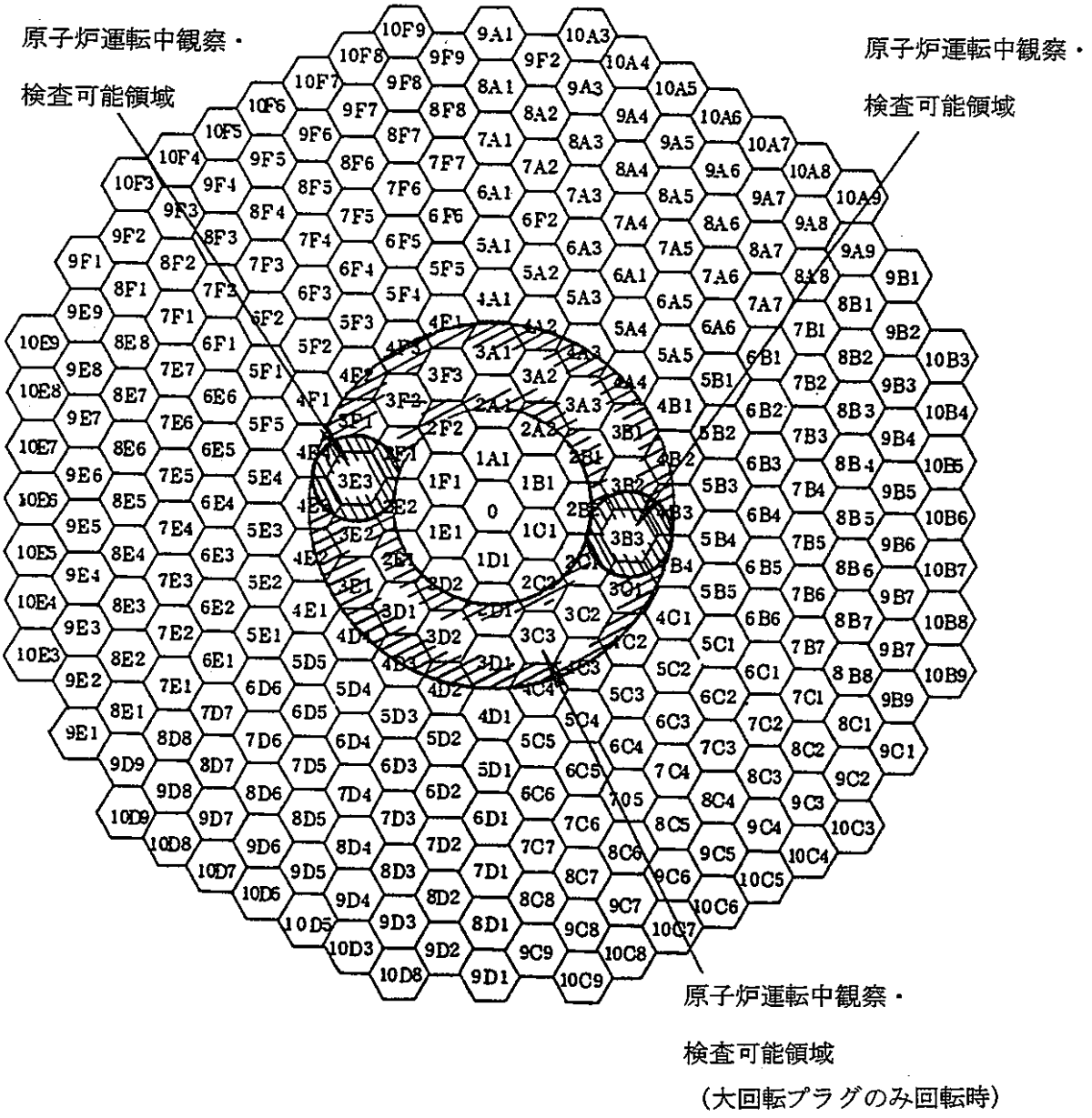


図2-1　ＣＲＤ予備孔を利用する場合の炉内観察・検査可能領域（炉心第３列）

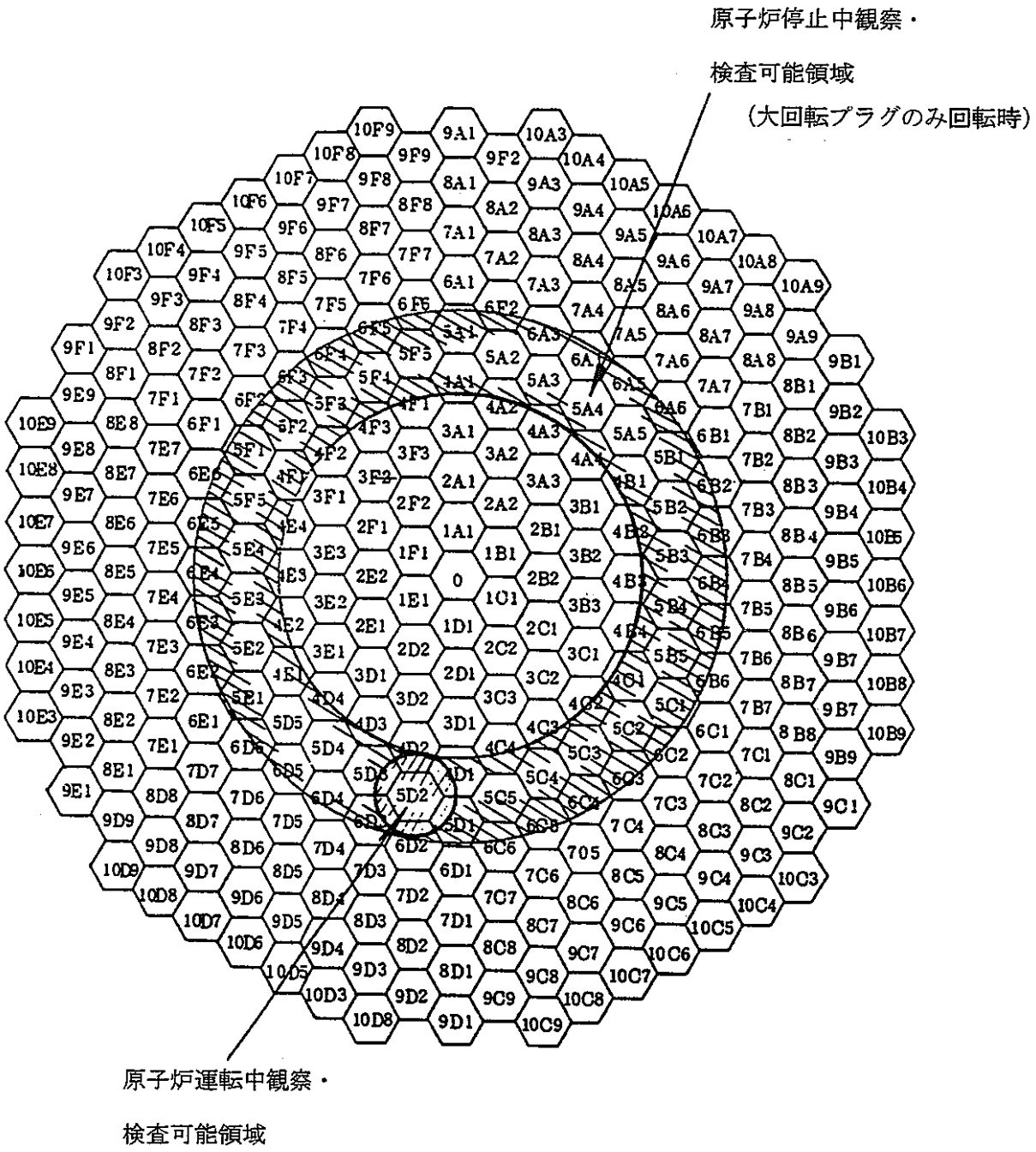
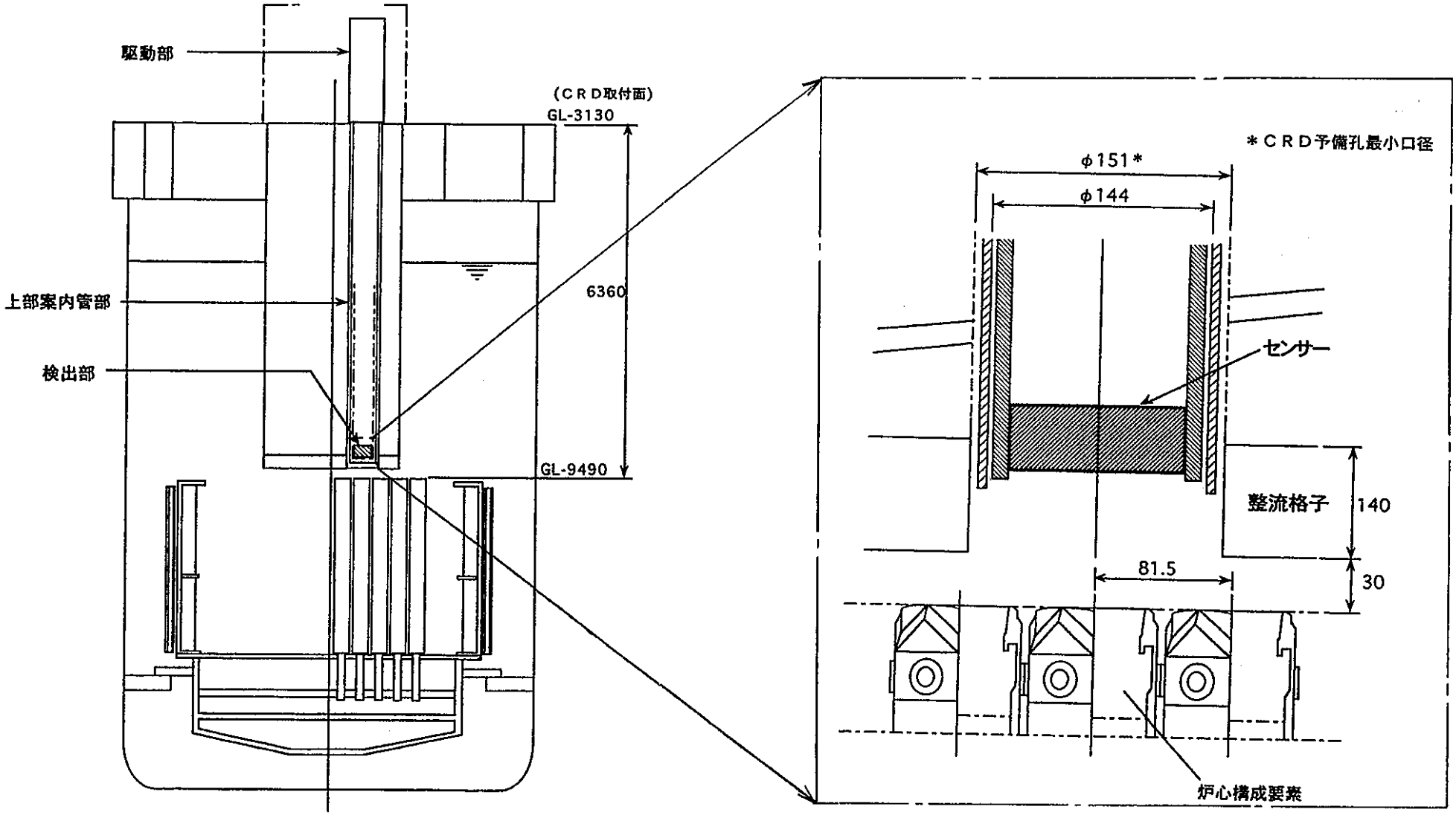


図2-2　ＣＲＤ予備孔を利用する場合の炉内観察・検査可能領域（炉心第５列）



a. 全体検査概念　　b. センサー部

図2-3　炉内検査装置の検査概念

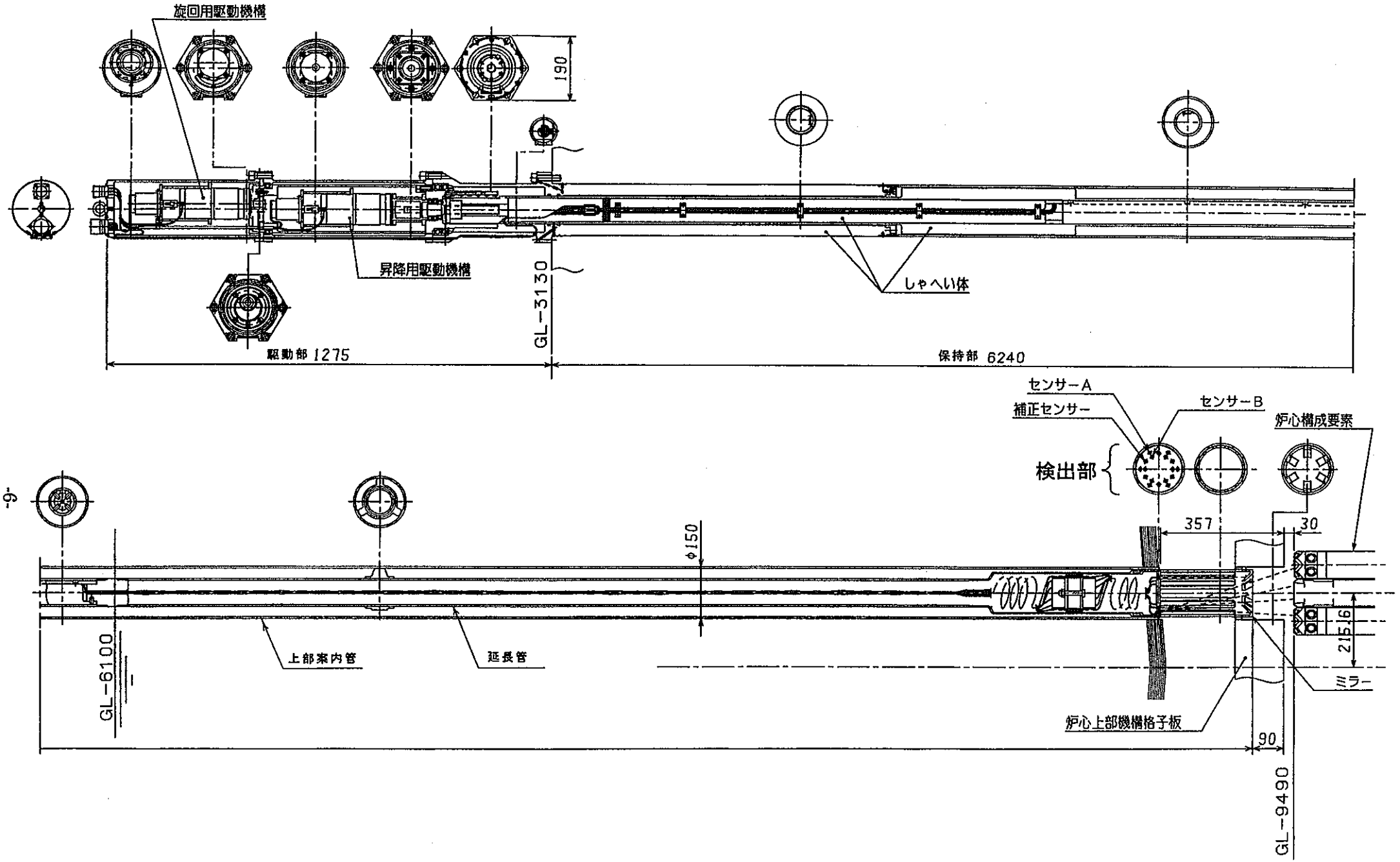


図 2-4　　単眼型超音波炉内検査装置外形図

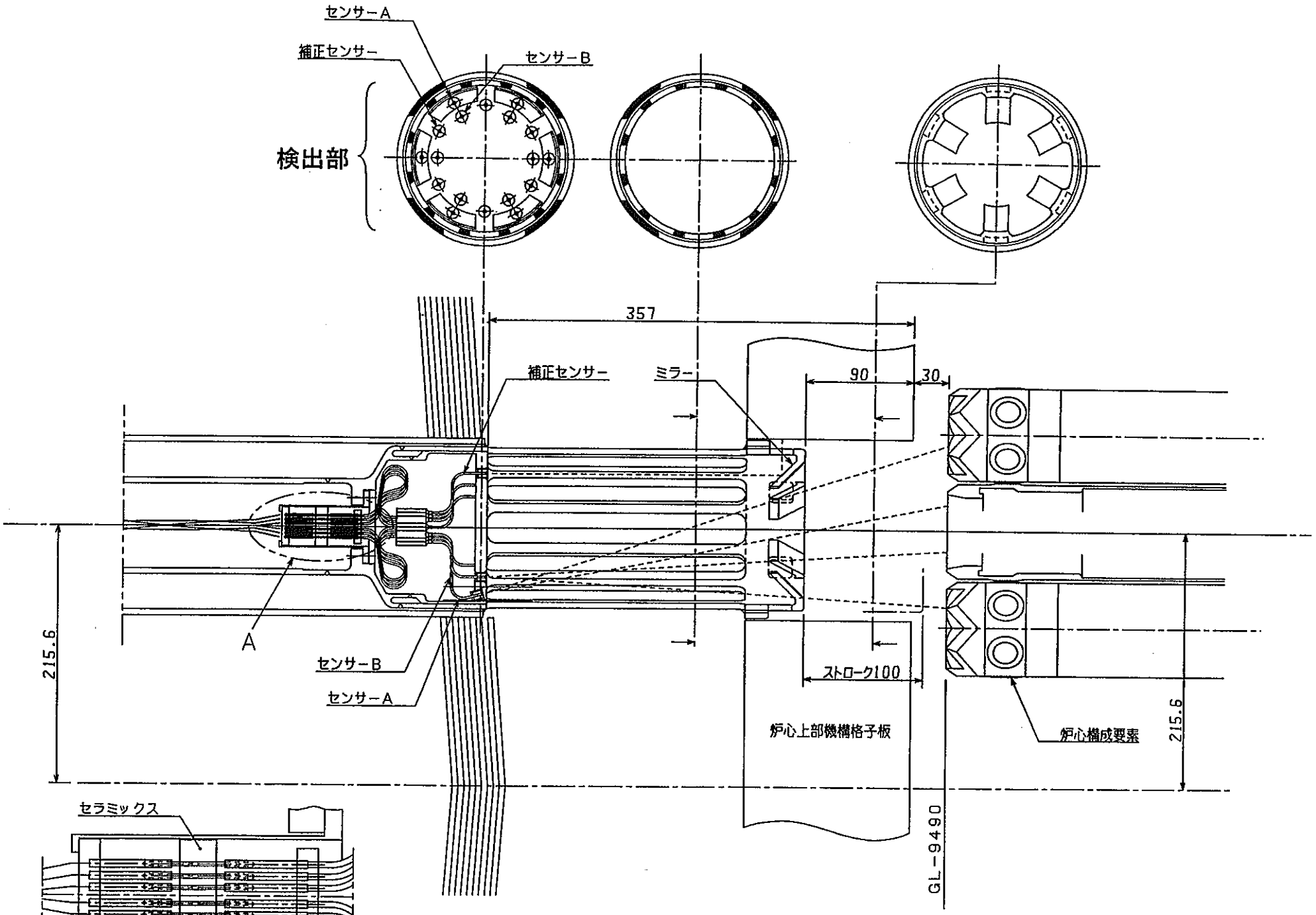


図 2-5　単眼型超音波炉内検査装置
計測部構造図

3. 検討結果

3.1 炉内検査装置検出部の検討

(1) 概 要

本年度は、ＭＫ－III燃料集合体の構造を考慮し、燃料集合体の頂部変位の計測を確実に行うために、超音波センサの最適配置を検討し、炉内検査装置の検出部の構造を見直した。検討では、ＭＫ－III燃料集合体の構造、温度ゆらぎの影響及び炉心出口流路の確保等を考慮した。

本検査装置は、燃料集合体に新たに反射板を加工しない方法を正案として検討を行ったが、超音波信号の感度改善、集合体の変位による超音波エコーの反射特性の安定性向上及び超音波センサ配置変更が可能な反射板方式も可能な構成とした。これらの結果は、炉内検査装置の性能評価のために今後実施予定の炉外水中試験の装置設計に反映するものとする。

(2) 検討結果

a. 超音波センサ配置の検討

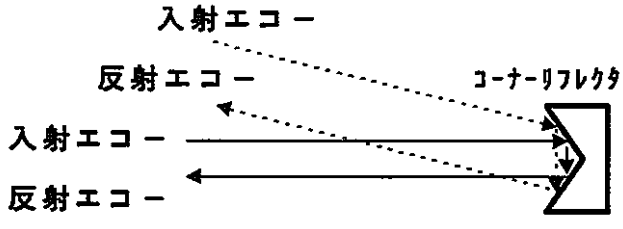
以下に炉内検査装置の超音波センサ配置の検討結果を示す。

(a) 超音波の反射部

図3.1-1にＭＫ－III集合体ハンドリングヘッドの構造図を示す。超音波の反射部は、燃料集合体に特殊な加工を施さないことを前提とし、図3.1-1の○印で囲った部分（水平と４５°の角度をなす曲面）及び頂部のリング状の平面とした。なお、水試験結果で反射エコーの感度が低いことが確認された場合または、超音波センサの配置の変更が必要となった場合には、図3.1-1の◎部に示すように反射部にコーナーリフレクタ型（＊）の反射板を追加加工した構造を採用するものする。

注＊：コーナーリフレクタ

サイコロの角を押しつけた形状の直角溝型の形状の反射板で、入射角に応じて反射エコーが入射角と同じ方向に反射される特性を持つ。また、反射板面全面で超音波が反射されるため、反射効エコーの強度を増大することが可能。



(b) 超音波センサの配置検討

図3.1-1に示すように燃料集合体のハンドリングヘッド部で超音波を反射できる面構造をしている部分は、水平と４５° の角

度をなした反射面（図3.1-1中の反射面の部分）しかない。これは、燃料集合体の構造が「常陽」と同様のＰｈｅｎｉｘ炉で用いている燃料集合体変位計測装置（Sonar Phenix）の計測概念(図3.1-2)からも明かである。Sonar Phenix は、図3.1-2(b)に示すように、３列の燃料集合体をはさんだ２箇所の集合体変位計測を行う構成としている。このため、超音波センサは燃料集合体頂部から約１９０ｍｍ上部に配置されている。

図3.1-3に「常陽」の炉内検査装置の超音波センサの配置案を示す。「常陽」の炉内は、炉心上部機構格子板が燃料集合体の頂部より３０ｍｍ上に配置されているため、検査装置の真下及び隣接燃料集合体のみ観察が可能である。流路確保の観点から超音波センサ数が制限されることを考慮し、検査対象を６体の隣接燃料集合体のうち１２０° 毎に配置された３体の集合体を対象とすることとした。この結果、燃料集合体の変位検出用の超音波センサとして、水平方向の変位計測用の超音波センサＡを６個、垂直方向の変位計測用の超音波センサＢを３個並びに補正用の超音波センサＣ１個の計１０個配置する構成とした。図3.1-3に示す超音波センサ配置では、超音波の経路が燃料集合体の境界部の上部を伝播することとなり、温度場の影響を比較的受けにくいことから計測上有利となることが予想される。

図3.1-4に超音波センサＡによる計測概念を示す。同図に示すように、反射面が水平と45°の角度をなしているため、超音波センサも45° の方向に向けることが必要であり、燃料集合体頂部から約６０ｍｍ上部に配置されることになる。次に、超音波センサＢの計測概念を、図3.1-5に示す。検査対象３体の燃料集合体の頂部のリング状の平面部の真上に超音波センサＢを配置することにより、集合体の垂直位置を計測できる構成とした。また、超音波センサＣを用い、超音波センサＡ，Ｂの位置補正を行うことのできる構成とした。

超音波センサＡと超音波センサＢの両者の計測結果を基に、三角法により燃料集合体の水平方向変位を計測することが可能となる。以上の他に図2-5に示すようにセンサ位置の補正用の超音波センサＣを１個を配置し、合計１０個の超音波センサとすることにより、超音波センサ個数を削減し、流路確保上から有利な構造とした。補正用の超音波センサＣは、図3.1-5に示すように段差をつけた形状の反射板を用いることにより１２０° ごとの３方向の方位を１個の超音波センサで計測することができるように工夫した。

b. 検査装置の検出部の構造検討

以上に示すセンサ配置の検討結果に基づき、センサ部の構造検討を行った。検討結果としてセンサ部の断面構造を図3.1-6、平断面図を図3.1-7に示す。これらの図に示すように、超音波

センサの配置スペースを極力削減し、燃料集合体出口流路の確保等を考慮し、構造の最適化を図るものとした。図3.1-8に、今回検討した超音波センサ配置案を反映した炉内検査装置の全体構造図を示す。

c. 超音波センサの仕様及び計測性能の検討

以上に示した超音波センサの構成に基づき、超音波センサの仕様及び性能を評価した結果を以下に示す。

(a) 超音波センサA

超音波センサAは、配置上の制限から直径を１５mm程度と小型化を図るものとする。このため、超音波振動子（ニオブ酸リチウム）の直径は１０mm程度とする。燃料集合体からの反射エコーが、集合体が変位した状態で受信できるためには、超音波の指向角をある程度広くする必要がある。そこで、燃料集合体の水平変位を最大±１０mmでも計測が可能であることを考慮すると、４５°で入射する超音波のビーム幅（距離８５mmでの片側の半径）は、１０／√２＝７．１mmとなるため、要求される超音波の指向角θは以下に示す通りになる。

指向角θ＝ Tan^{-1}（７．１／８５）

＝ ４．８ °

つぎに、超音波センサの構造から求められる指向角θの式は、以下で表すことができる。

指向角θ＝ Tan^{-1}（０．７１λ／ｄ）

（λ：波長[mm]、ｄ：振動子径[mm]）

ここで、振動子径は、配置上の条件から１０mmと決めたため、４．８°の指向角（±１０mmのビーム幅）を確保するための超音波の波長λは以下の値となる。

波 長λ＝ ｄ・（７．１／８５）／０．７１

＝ １０・（７．１／８５）／０．７１

＝ １．１８ mm

周波数ｆは、ナトリウム中の音速Ｖが２５７７．２５－０．５２４Ｔ m／ｓｅｃ（Ｔ：温度［℃］）であるので、５００℃のナトリウム中と想定すると、音速Ｖ＝２３１５．２５m／ｓｅｃとなるため、

周波数ｆ＝ Ｖ／λ

＝　（２３１５．２５／１．１８）　[ＫＨｚ]

＝　１９６２　[ＫＨｚ]

となり、約２．０　ＭＨｚの周波数となる。

集合体の水平方向の検出精度としては、０．２ｍｍ程度（波長の１／１０の約０．１ｍｍの距離計測精度を想定し、４５°の斜め入射による分解能の低下分を考慮して、λ／COS45°×０．１＝０．１７ｍｍとして計算）が期待できる。

(b)　超音波センサＢ

超音波センサＢについても、直径を１５ｍｍ程度と小型化を図ることとする。このため、超音波センサＡと同様の計算をした結果を以下に示す。

燃料集合体の水平変位を最大±１０ｍｍと想定すると、垂直に入射する超音波のビーム幅（距離６０ｍｍでの片側の半径）の要求値は、１０ｍｍとなるため、要求される超音波の指向角θは以下に示すとおりになる。

指向角θ＝　Tan^{-1}（１０／６０）

＝　９．５　°

つぎに、超音波センサの構造から求められる指向角θの式は、以下の式で表せる。

指向角θ＝　Tan^{-1}（０．７１λ／ｄ）

（λ：波長[ｍｍ]、ｄ：振動子径[ｍｍ]）

ここで、振動子径は、配置上の条件から１０ｍｍと決まるため、９．５°の指向角（±１０ｍｍのビーム幅）を確保するための超音波の波長λは以下の値となる。

波　長λ＝　ｄ・（１０／６０）／０．７１

＝　１０・（１０／６０）／０．７１

＝　２．３　ｍｍ

周波数ｆは、超音波センサＡと同様に５００℃のナトリウム中と想定すると、音速Ｖ＝２３１５．２５ｍ／ｓｅｃとなるため、

周波数ｆ＝　Ｖ／λ

＝　２３１５．２５／２．３　[ＫＨｚ]

＝　１００７　[ＫＨｚ]

となり、１．０　ＭＨｚ程度の周波数とすることが必要となる。

集合体の垂直方向の分解能としては、０．２ｍｍ程度（λ×０．１＝０．２３ｍｍとして

計算）が期待できる。

(c) 超音波センサC

超音波センサCについては、検査対象の動きに影響されないため、周波数が高く精度的に有利な５ＭＨｚとする。

水平方向の位置補正精度としては、０．０５ｍｍ程度（波長λが約０．５ｍｍの１０％）が期待できる。）が期待できる。

表3.1-1 超音波センサの仕様及び計測性能の検討結果

センサ種類	用　途	センサ周波数	予測精度
超音波センサA	水平方向の変位計測に使用。	約２ ＭＨｚ	約０．２ ｍｍ
超音波センサB	垂直方向の変位計測に使用。	約１ ＭＨｚ	約０．２ ｍｍ
超音波センサC	水平方向の変位の補正用として使用。	約５ ＭＨｚ	約０．０５ ｍｍ

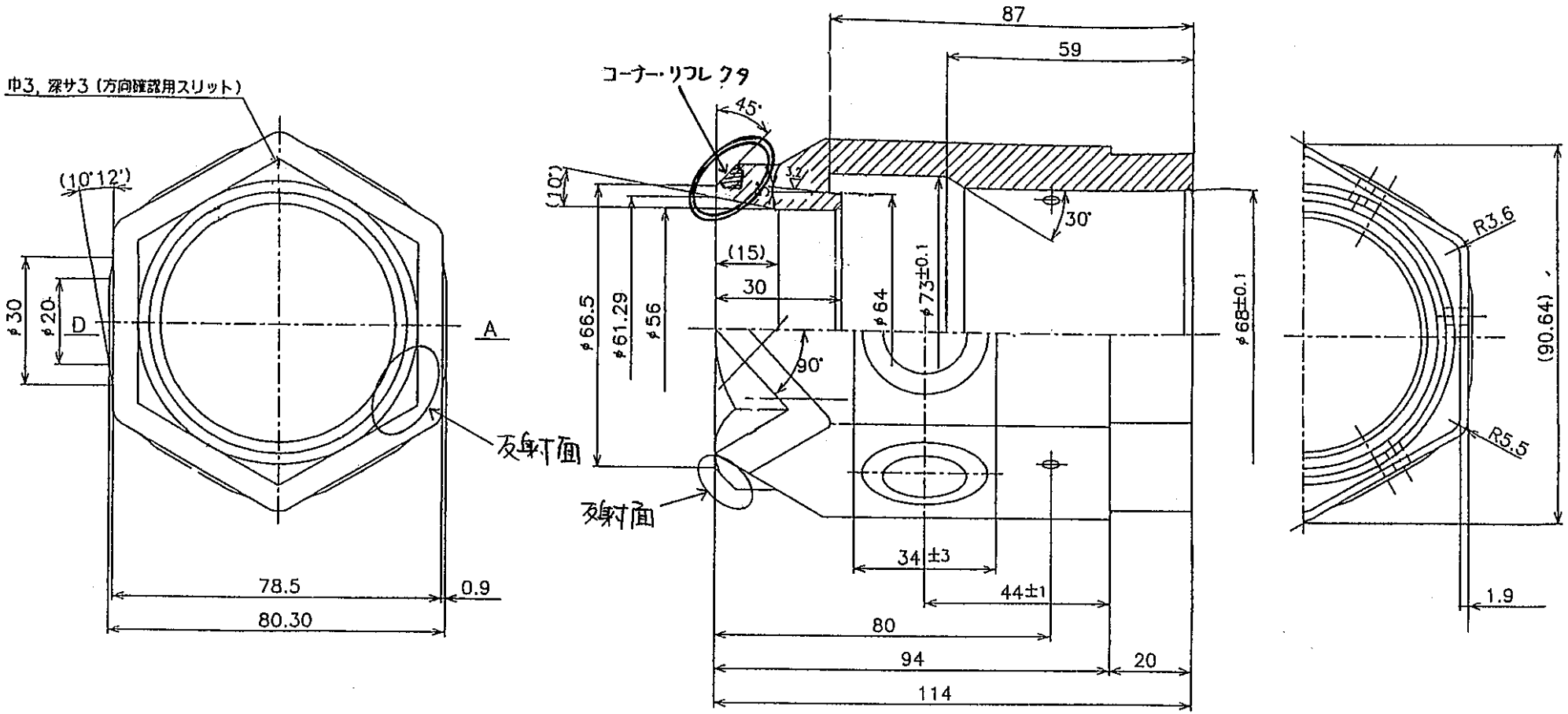


図 3.1-1　MK－III 燃料集合体のハンドリングヘッド部の構造

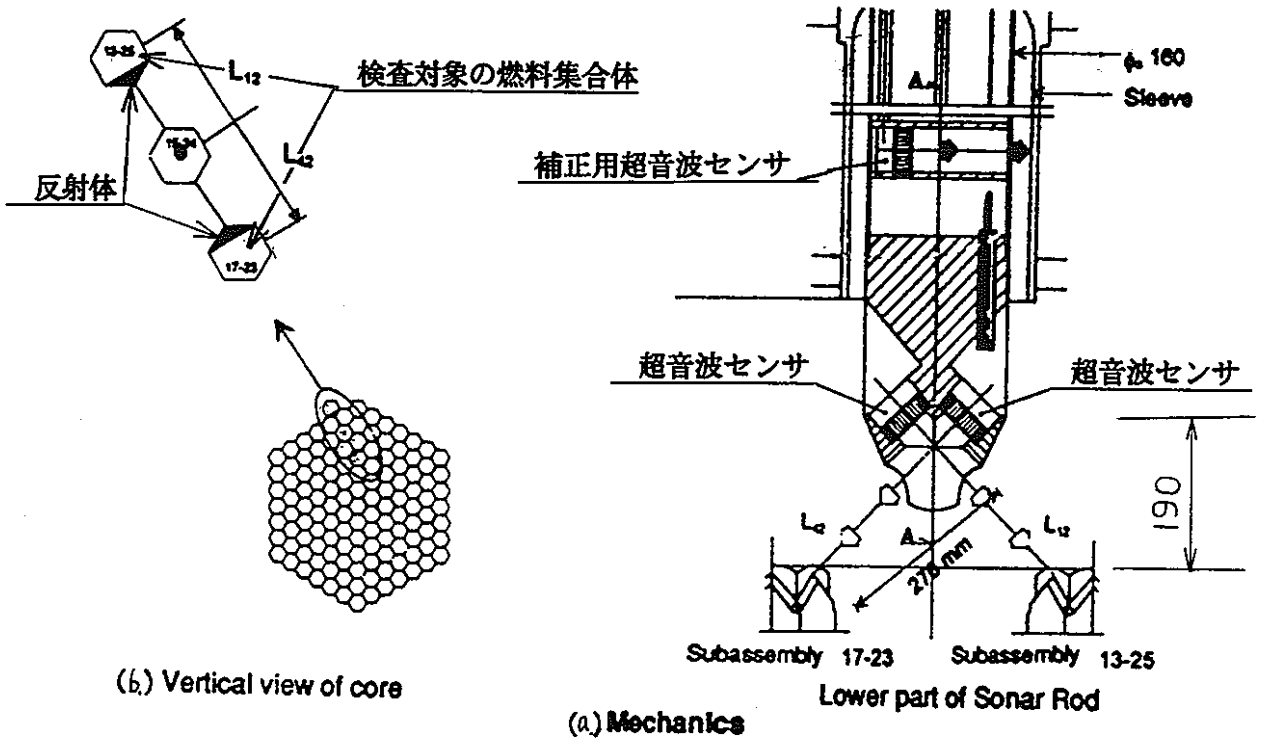


図3.1-2　Ｐｈｅｎｉｘの炉内検査装置（Ｓｏｎａｒ　Ｐｈｅｎｉｘ）の構造

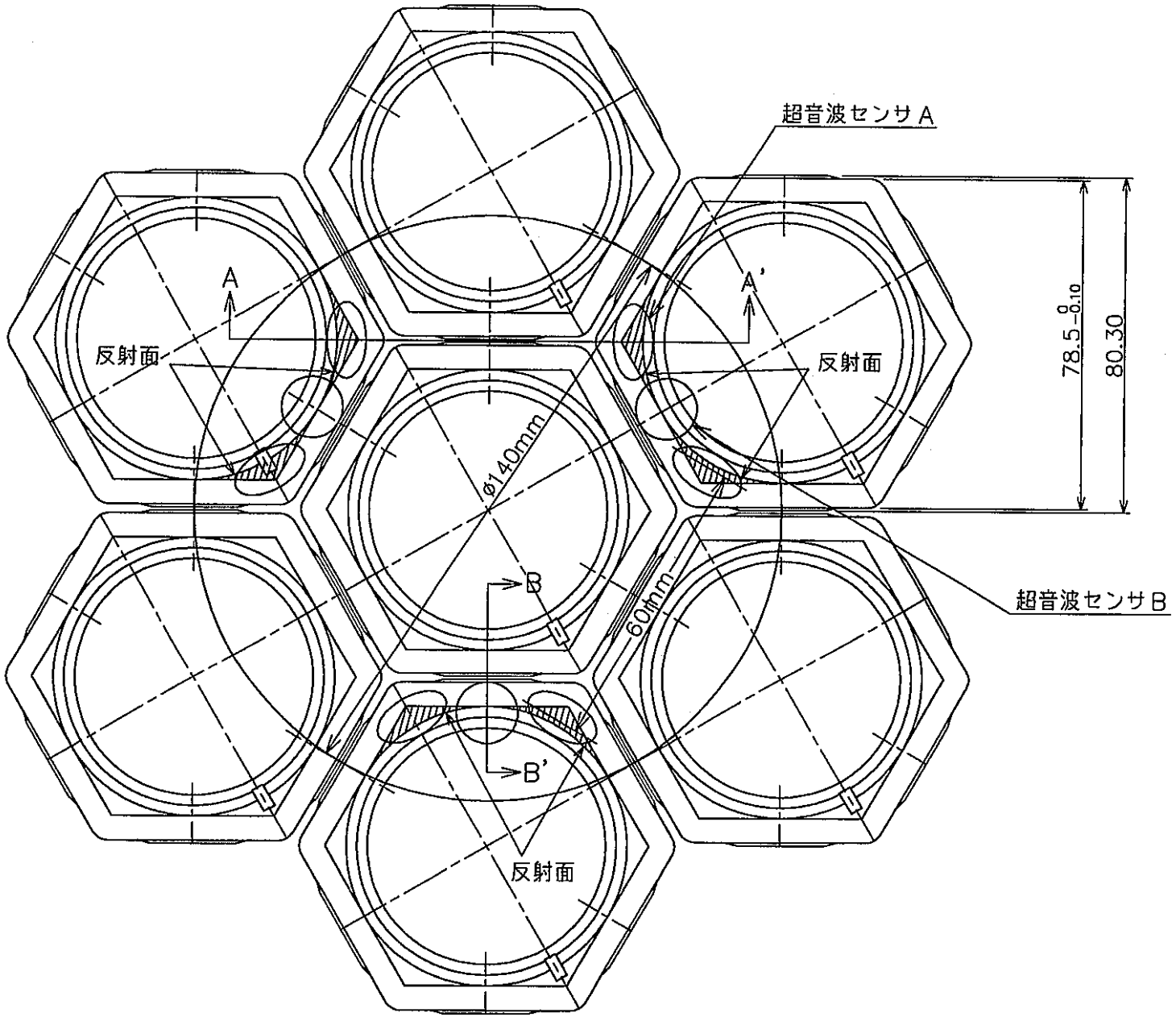


図3.1−3　常陽　炉内検査装置の超音波センサの平面配置

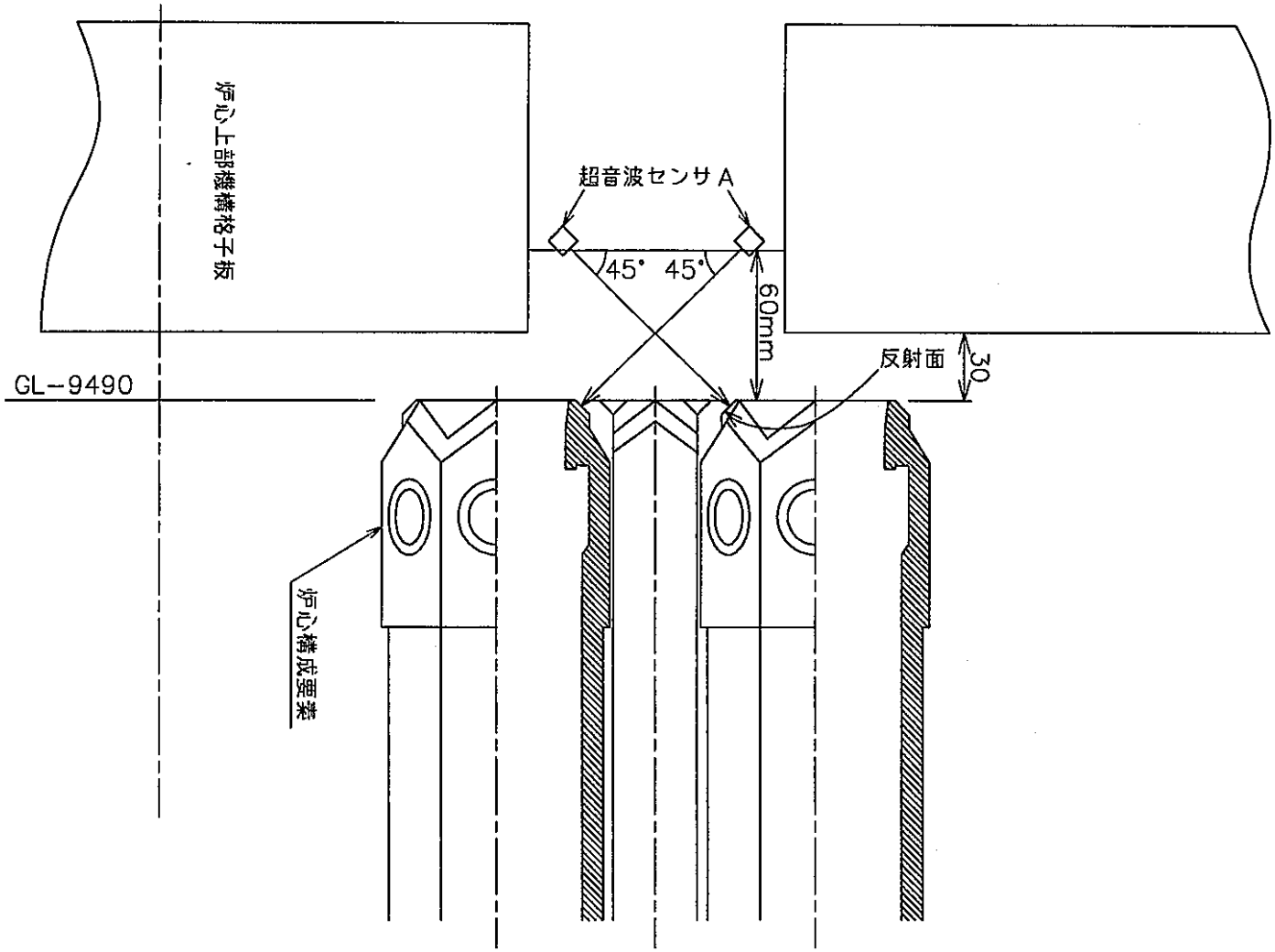


図 3.1−4　超音波センサ A による計測概念

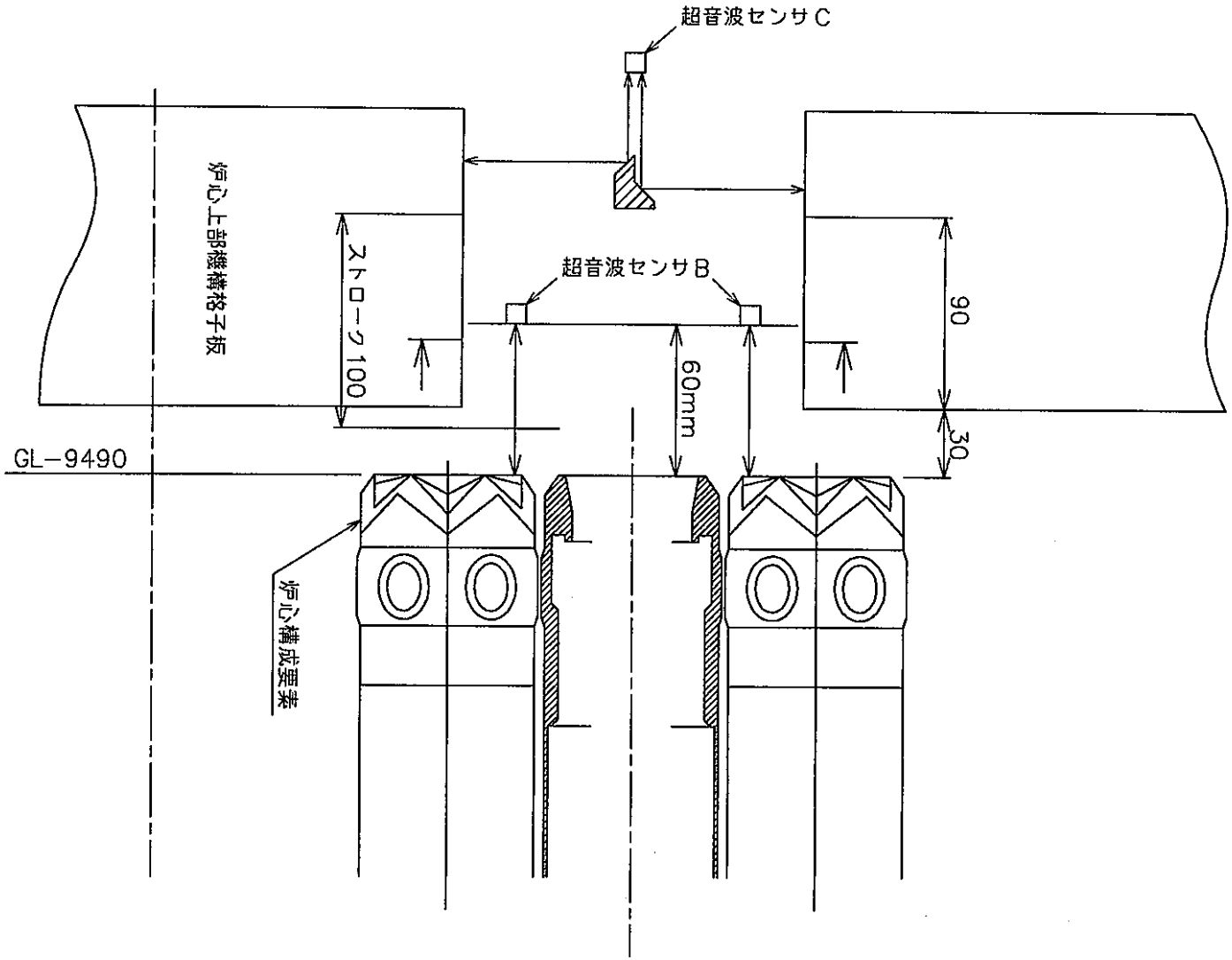


図3.1−5　超音波センサB及び超音波センサCによる計測概念

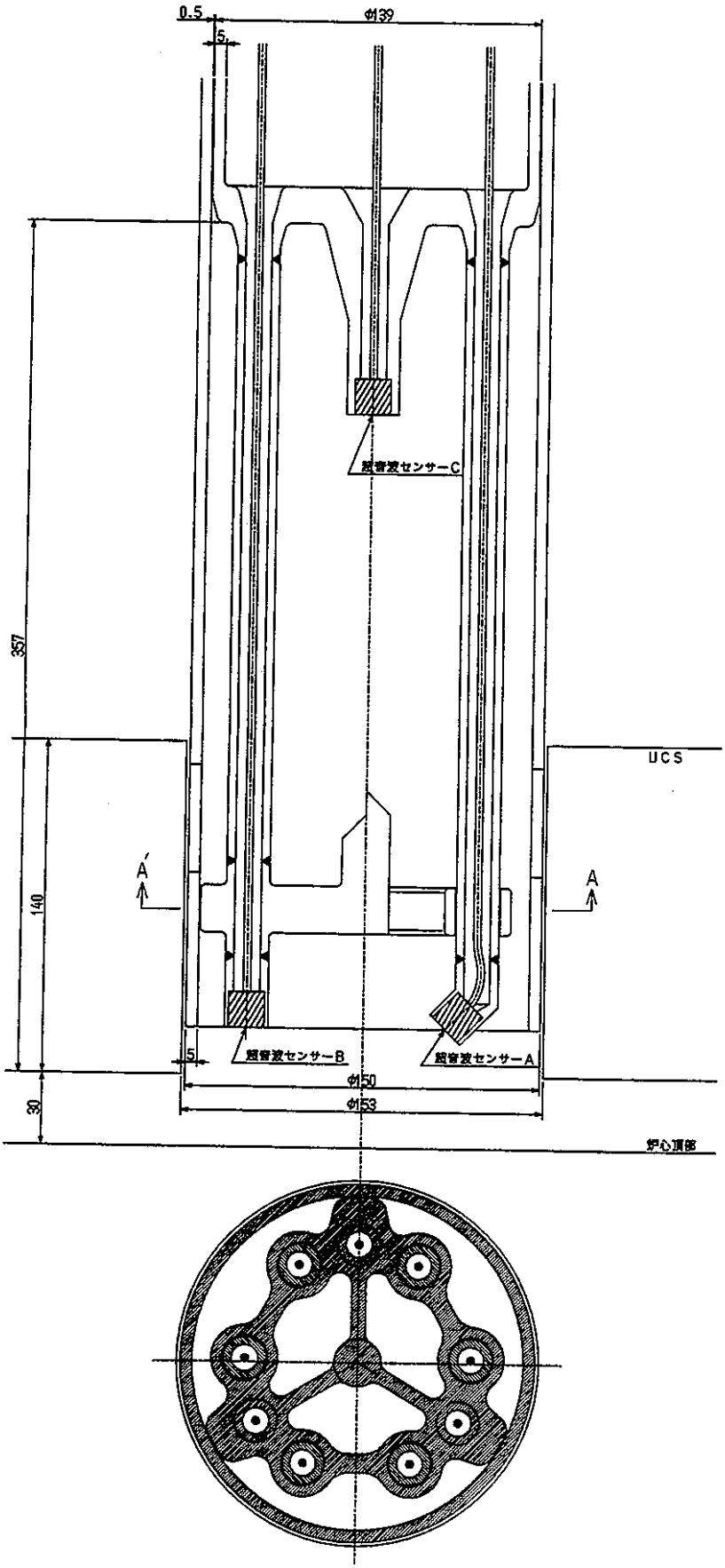


図 3.1-6　炉内検査装置のセンサ部の断面構造

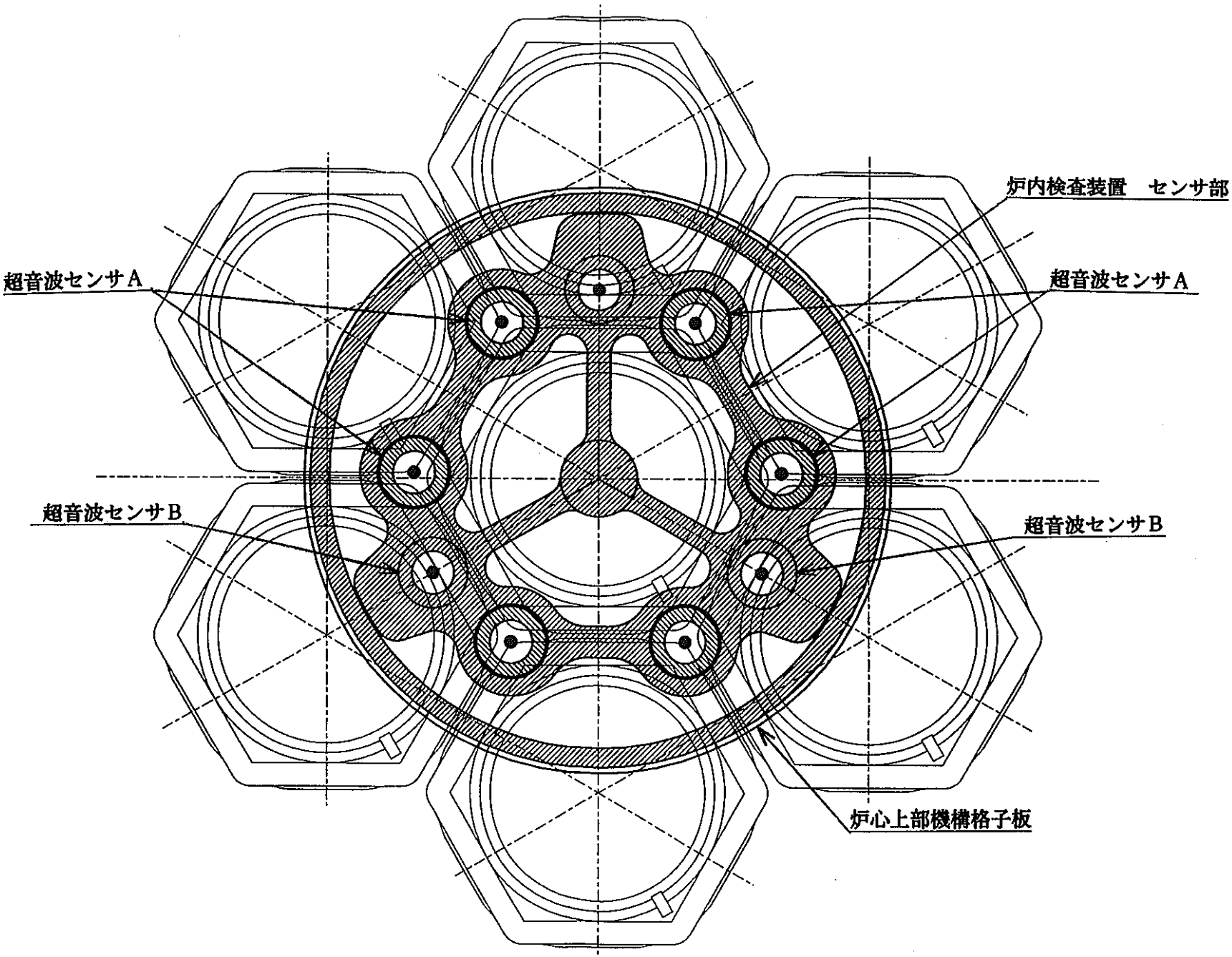


図 3.1-7　炉内検査装置のセンサ部の平断面構造

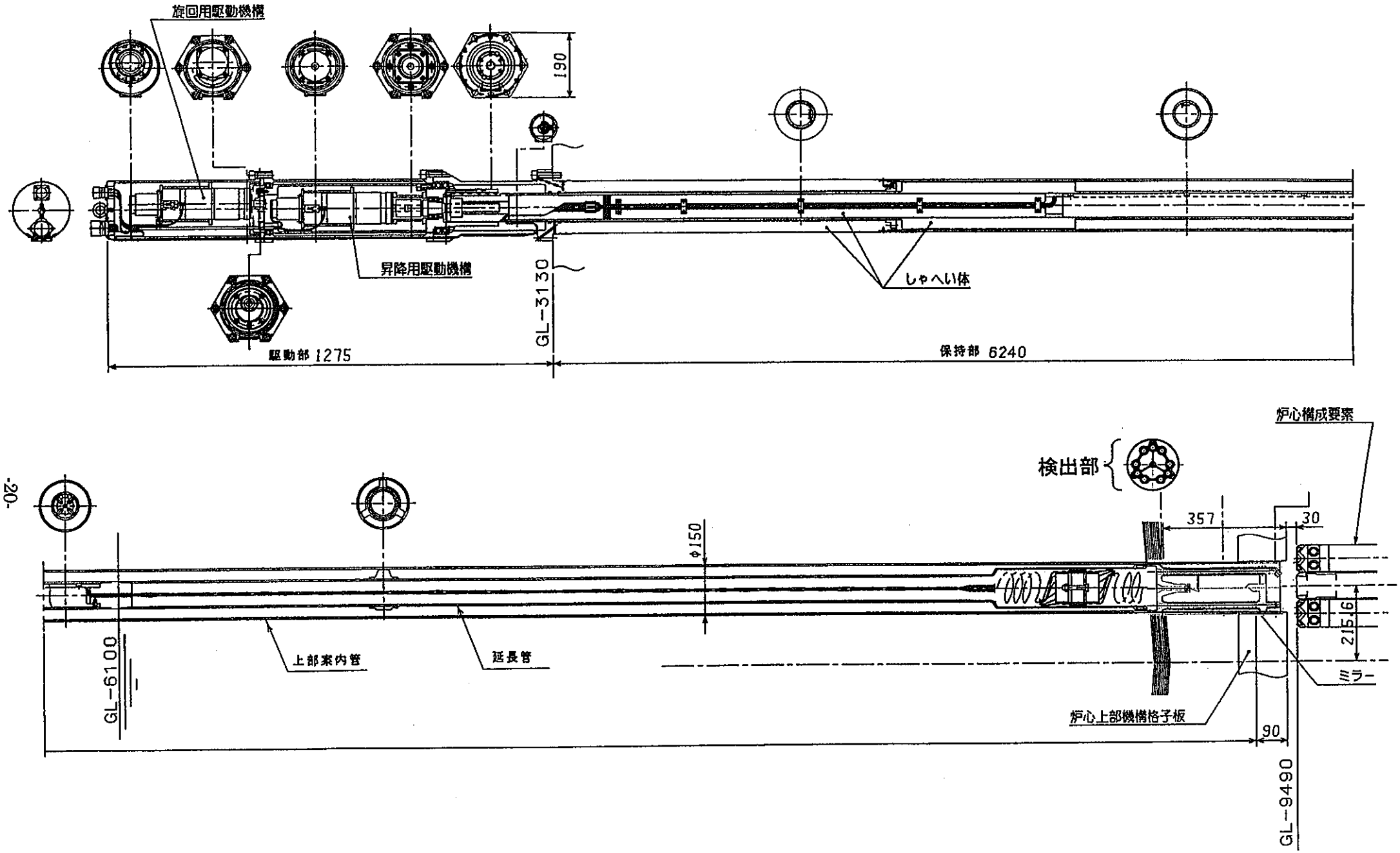


図 3.1-8　炉内検査装置の全体構造図

3.2 炉外水中試験装置の検討

(1) 概　要

ＭＫ-Ⅲ炉心燃料集合体の頂部変位を検出する炉内検査装置の基本性能評価を行うことを目的とし、炉外水中試験装置に関する検討を実施した。

水中試験装置は７体の１／１スケールの集合体出口部模擬構造と集合体の上部に位置する超音波センサ取付構造を含む試験容器、中心燃料集合体への温水ライン、周囲の燃料集合体への冷水ラインとそれらの温水と冷水用のポンプ、また温水タンクと冷水タンクとから構成する。集合体出口部模擬構造の出口部には、各々熱電対を取り付け、温度ゆらぎの測定が可能な構成とする。また、超音波センサ取付部にも同様にΦ0.5㎜の熱電対を数点取り付け、温度測定を行えるものとする。さらに各集合体出口部模擬構造の入り口には弁を設け、ポンプの回転数制御と合わせて流量の変更ができる構造とする。入口配管を含む試験体系統図を図3.2-1に示す。

(2) 検討条件

炉内検査装置の検査対象である「常陽」ＭＫ－III炉心の第３列［３Ｂ３］、［３Ｅ３］及び第５列の［５Ｄ２］の集合体とその周囲の集合体についての集合体出口温度条件を以下に示す。

a. 集合体出口温度差

炉心の第３列［３Ｂ３］、［３Ｅ３］及びその周囲の６体の集合体には、炉心燃料または照射リグが装荷される。また、［５Ｄ２］の集合体とその周囲６体の集合体には、炉心燃料、照射リグまたは内側燃料集合体が装荷されるため、各ケースに分けて集合体出口温度の検討を行った。

① 炉心燃料同士が隣接する場合

サブチャンネル解析コード：ＭＩＸ－ＭａｒｋIIによるＭＫ－II標準平衡炉心の各列ホット集合体出口の冷却材温度の解析結果から、集合体出口温度差は、第３列内側と第４列で最大となる。これに、高燃焼度燃料と新燃料が隣接する場合を想定し、設計で用いた燃焼補正係数（1.08～1.09）に基づき、±１０％の幅を考慮すると、集合体出口温度差は、59.3℃となる。

② 炉心燃料と照射リグが隣接する場合

サーマルストライピング防止の観点から、集合体間の出口温度差が１００℃以内になるように照射リグが設計されているため、１００℃を集合体出口温度差として想定する。

③ 炉心燃料と内側反射体が隣接する場合

ＭＫ－III第５列ドライバー燃料、第６列内側反射体の除熱特性がＭＫ－IIと同程度と見なし、ＭＫ－II炉心の集合体出口温度実測値からを概算した結果、集合体出口温度３４．２℃が得られる。

以上の結果をまとめたものを表3.2-1に示す。

表3.2-1　ＭＫ－III炉心集合体出口温度差の評価結果

集合体の隣接パターン	集合体出口温度差	水中試験装置での温度差
ドライバー／ドライバー	約　　６０　℃	約　　１０　　℃
ドライバー／照射リグ	最高　１００　℃	最高　１６．７℃
ドライバー／内側反射体	約　　４０　℃	約　　６．７℃

以上の結果から、炉外水中試験では、集合体出口温度差を４０℃、６０℃及び１００℃の３ケースについて試験を行うものとする。

炉外水中試験で実際に与える温度差は、ナトリウム中の音速特性を表す(1)式と水中の音速の温度特性をあらわす(２)式から算出して設定することができる。

(2)式を表すグラフを図3.2-2に示す。同図に示すように、２０℃程度の水温での温度に対する音速の変化率は３m/sec／℃程度であり、ナトリウムの値－０．５２４m/sec／℃に比べて６倍程度となり、変化率の極性が逆となっている。このため、水温が２０℃の場合、ナトリウム中で６０℃の温度差は、表3.2-1に示すように水中の約１０℃に相当する。

また、水中とナトリウム中の温度に対する音速の変化は極性が逆であるため、水中試験では温度分布の高低の関係をナトリウム中と逆転させることも可能なように考慮するものとする。なお、温度分布を逆的させた場合には、浮力が逆に作用することになるが１００%流量程度の高流速の場合には、慣性支配の流れとなるため、浮力の影響は無視できると考えられる。

＜ナトリウム中の音速＞

$$V(T) = 2577.25 - 0.525T \qquad (1)$$

V：音　速　［m／sec］

T：温　度　　［℃］

＜水中の音速＞

$$V(T) = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \alpha_3 T^3 + \alpha_4 T^4 + \alpha_5 T^5 \qquad (2)$$

V：音　速　［m／sec］

T：温　度　［℃］

$\alpha_0 =$ 1402.736

$\alpha_1 =$ 5.03358

$\alpha_2 = -0.0579536$

$\alpha_3 = 3.31636 \times 10^{-4}$

$\alpha_4 = -1.45262 \times 10^{-6}$

$\alpha_5 = 3.0449 \times 10^{-9}$

b.　集合体出口流量

集合体の出口流量は、１００％流量一定値とする。流速は、第３列［３Ｂ３］、［３Ｅ３］で８．１５ｋｇ／sec（流速は、４．０ｍ／sec：8150g／比重／集合体出口断面積=8150/0.832/24.6=282cm/sec）であり、第５列［５Ｄ２］では、６．７６ｋｇ／ｓ（流速は、３．３ｍ／sec：6760g／比重／集合体出口断面積=6760/0.832/24.6=234cm/sec）となる。このため、集合体のレイノルズ数を考えると、乱流範囲であり、水とナトリウムの相似性が成り立つことが考えられることから、水中試験における集合体出口模擬部の流速を実機に合わせるものとする。（ただし、温度分布を逆転させた場合は、試験設備の能力の範囲で流速を実機に極力近づける。）

(3)　炉外水中試験装置の検討

(2)項に示した条件を考慮し、炉外水中試験装置の試験体の検討を行った。

a.　燃料集合体出口模擬部

燃料集合体は７本集合体で１／１の部分モデルとした。試験体構造図案を図3.2-3に示す。また、試験装置のスペース上の制約から、集合体出口部模擬構造は図3.2-4に示すように、ステンレス製の７本の集合体からなる構成とし、その中心集合体１体に温水（冷水）を注水することとした。なお、周囲の６本集合体は冷水（温水）を循環させることができる構成とする。

集合体出口部模擬構造の仕様を以下に示す。

①　寸法・形状

出口部口径は、実機ＭＫ－III燃料集合体の設計寸法に合わせ内径５６㎜とし、外部形状についても頂部近傍を実機と同一構造とする。

また、周囲に配置する６本の集合体出口部模擬構造のうち変位を模擬する集合体出口部模擬構造（１体）については、六角のコーナー部の４５° の傾斜曲面部のうち隣接する2ヶ所にコーナリフレクタ型の反射板を放電加工で形成し、集合体出口部模擬構造を１２０° または、１８０° 回転することにより反射板の有り・無しが切り替えられる構造とする。

集合体出口模擬部のピッチは、ＭＫ－III炉心の集合体の設計寸法に合わせるものとする。

② 変位機構

変位を模擬する燃料集合体の出口部模擬構造は、図3.2-5に示すように、1/10㎜の精度で歯車により水平方向へ変位が可能な構成とし、移動距離をアクリル板の外から確認できるものとする。また、集合体の垂直方向の変位については、集合体出口部模擬構造の取付部にシューをかませる構造とすることにより変更ができる構成とする。

b. 超音波センサ取付部

超音波センサ取付部は、燃料集合体出口の流路確保を考慮した実機炉内検査装置の超音波センサ取付部の構造（図3.1-6）を反映した構造とする。ただし、実機は、１０個の超音波センサが配置される構造としているが、水中炉外試験では、垂直位置検出用の超音波センサが１個と隣接する水平位置検出用の超音波センサ２個の計３個の超音波センサを配置するものとする。超音波センサと集合体出口部模擬部との相対位置を調整できるように、超音波センサの昇降位置及び回転位置調整が行える構造とする。昇降位置調整範囲は、集合体出口模擬部の頂部から６０mm±３０mm程度とし、旋回位置調整範囲は、±３０° 程度とする。

c. 試験容器

試験容器は外部から観察できるように透明アクリル型とする。試験容器の出口部からの流動が燃料集合体からの出口部での流動に影響を与えない様、出口とは内筒で隔て、無液面とする。

・試験容器の寸法：約Φ1100㎜×約1500㎜

(3) 水流動試験

a. 試験方法

試験では、冷水を集合体番号１～６に所定流量流している状態で中心集合体の入口エア作動

バルブを開くことにより、所定流量の温水を所定時間注入する。

流動場において集合体出口部バルブ及び模擬プラグに取り付けた熱電対の応答をモニター及びデータ収録し、この温度ゆらぎ場での超音波センサによる変位検出性能を評価する。

b. 頂部変位の検出

図3.2-5において、中心の模擬燃料集合体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。超音波による頂部変位計測結果と水平変位量を比較・評価することにより、超音波による計測精度を評価する。また、中心の模擬燃料集合体へ注入する温水の温度を変化させることにより、流動場での頂部変位計測性能を評価する。

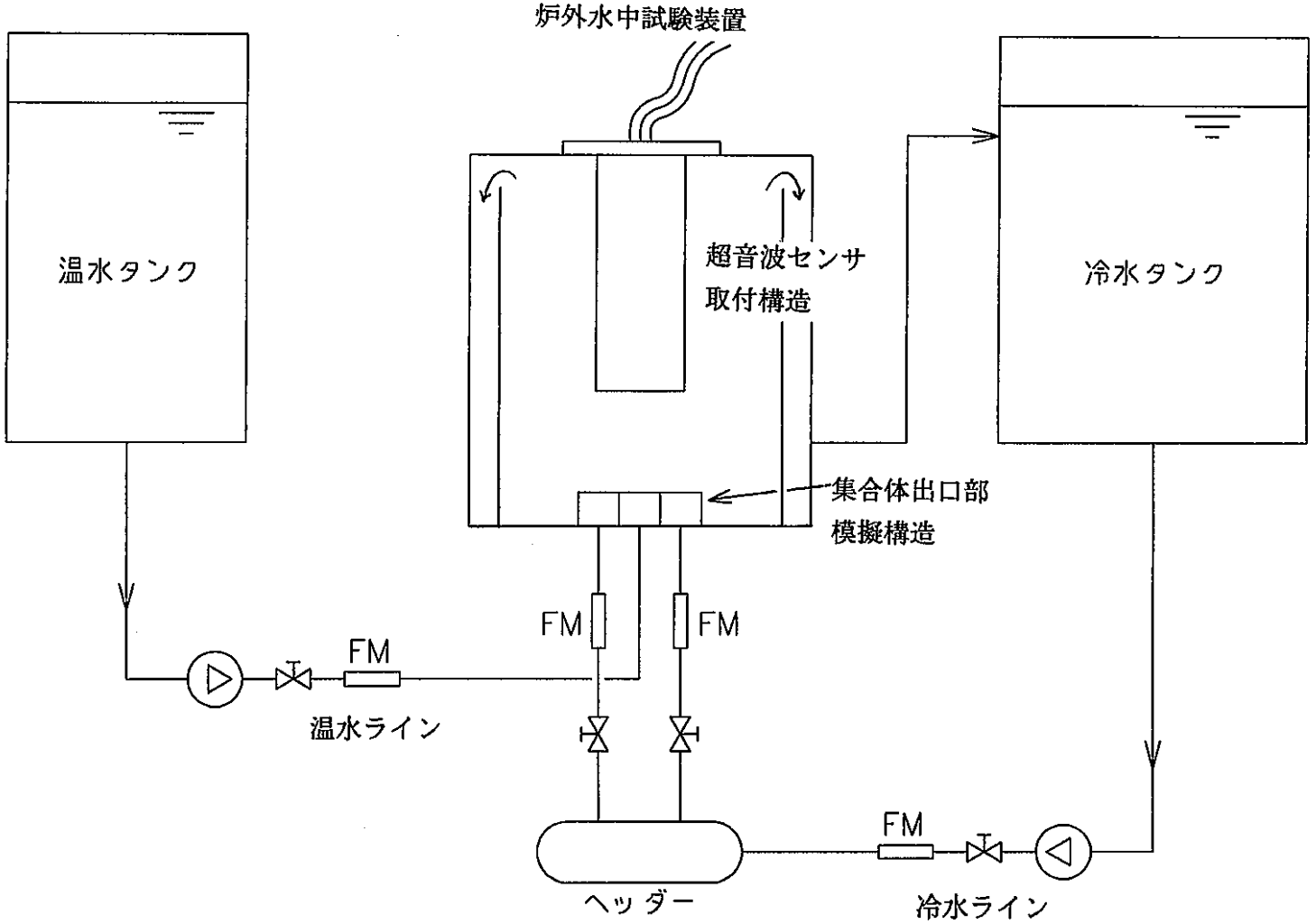


図 3.2-1　炉外水中試験装置及び水試験ループの系統図

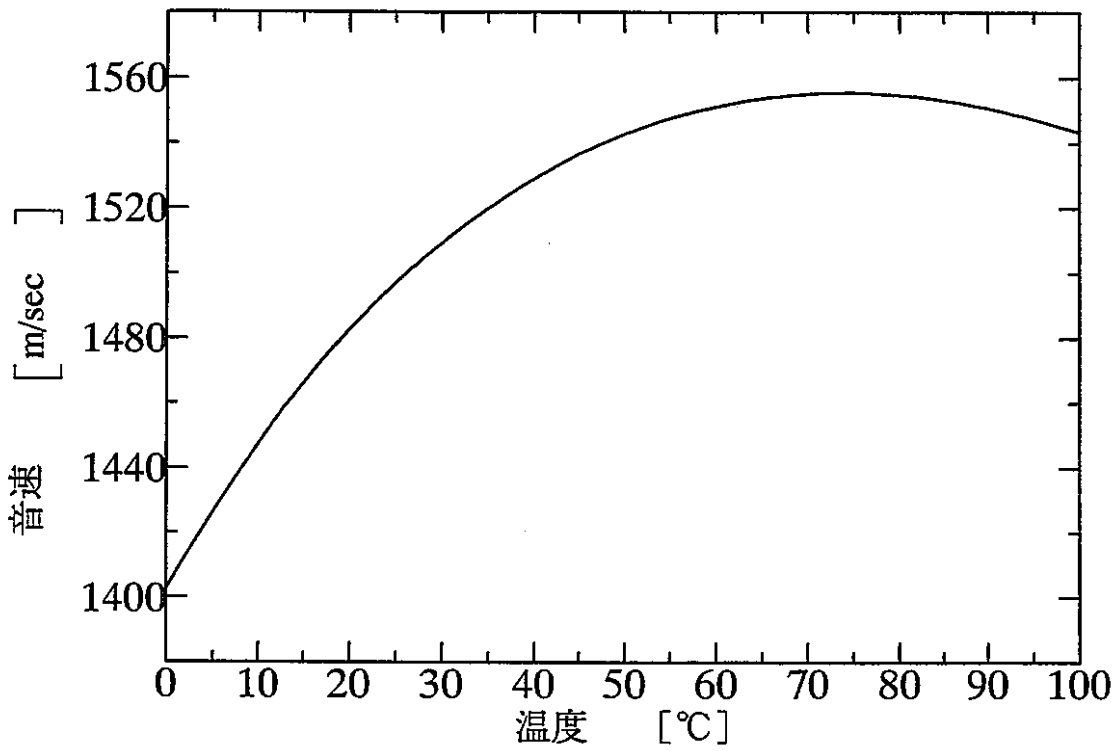


図3.2-2　水中での音速の温度特性

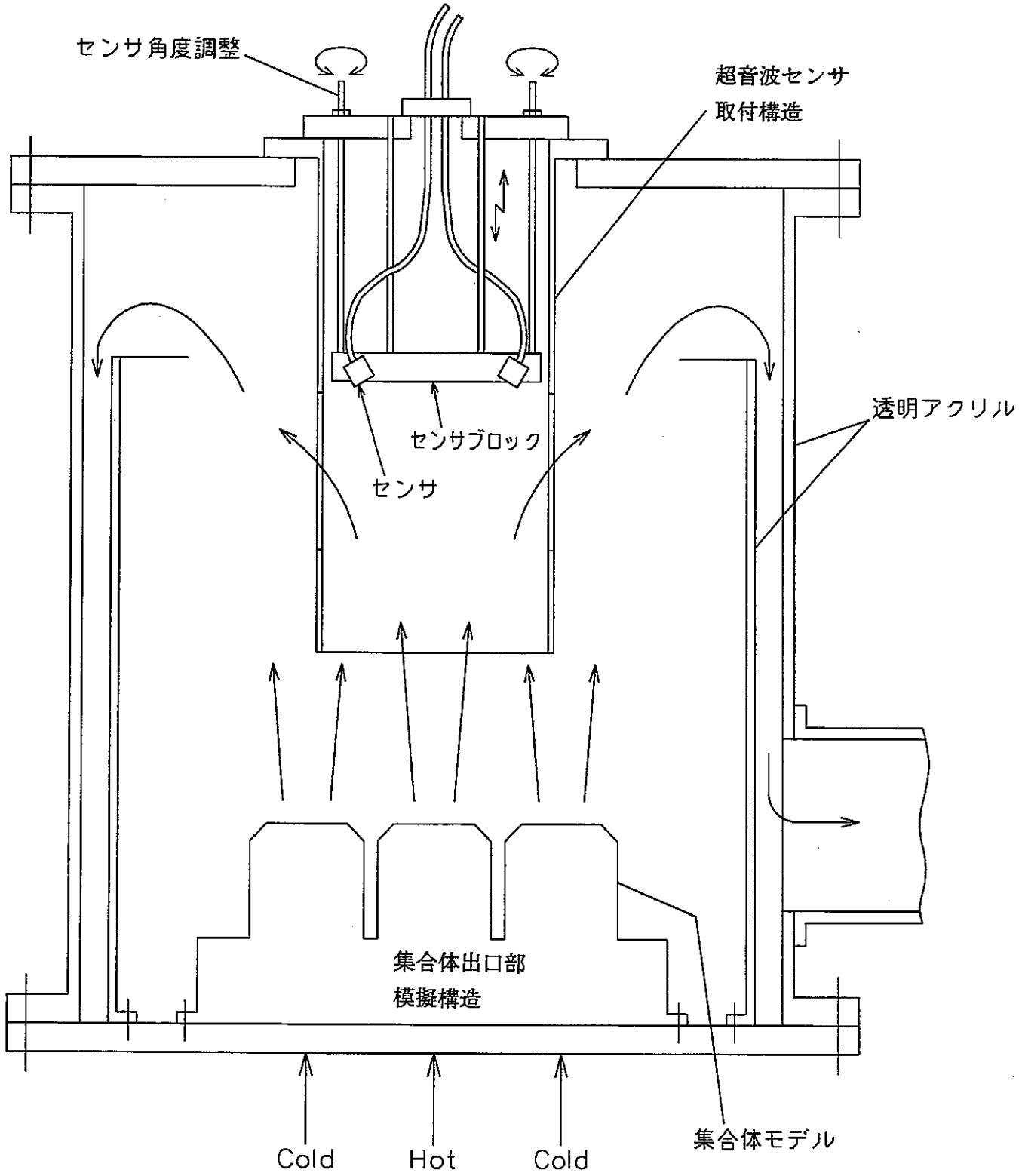


図 3.2-3　炉外水中試験装置の構造概念図

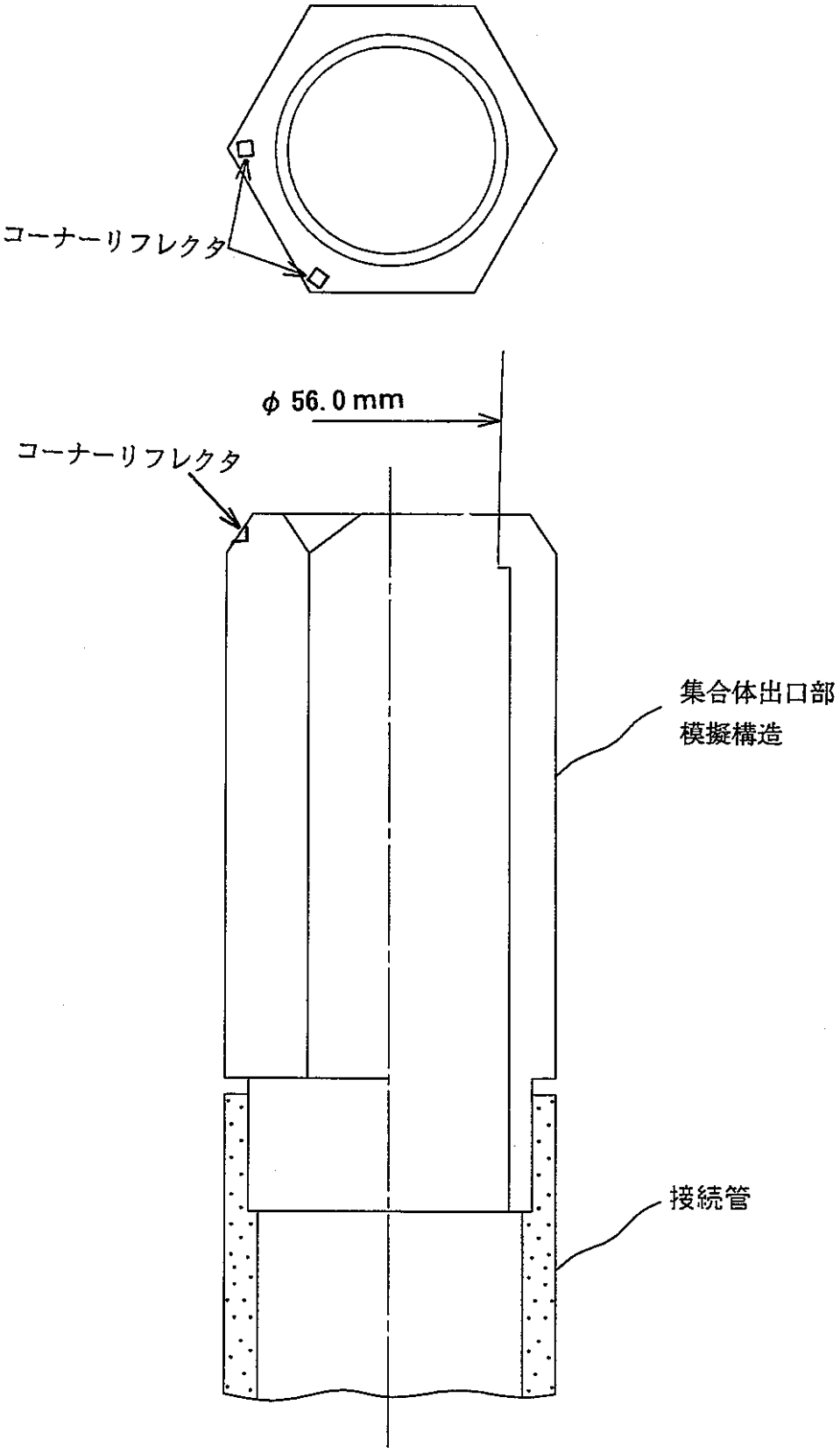


図 3.2-4　集合体出口部模擬構造の概念図

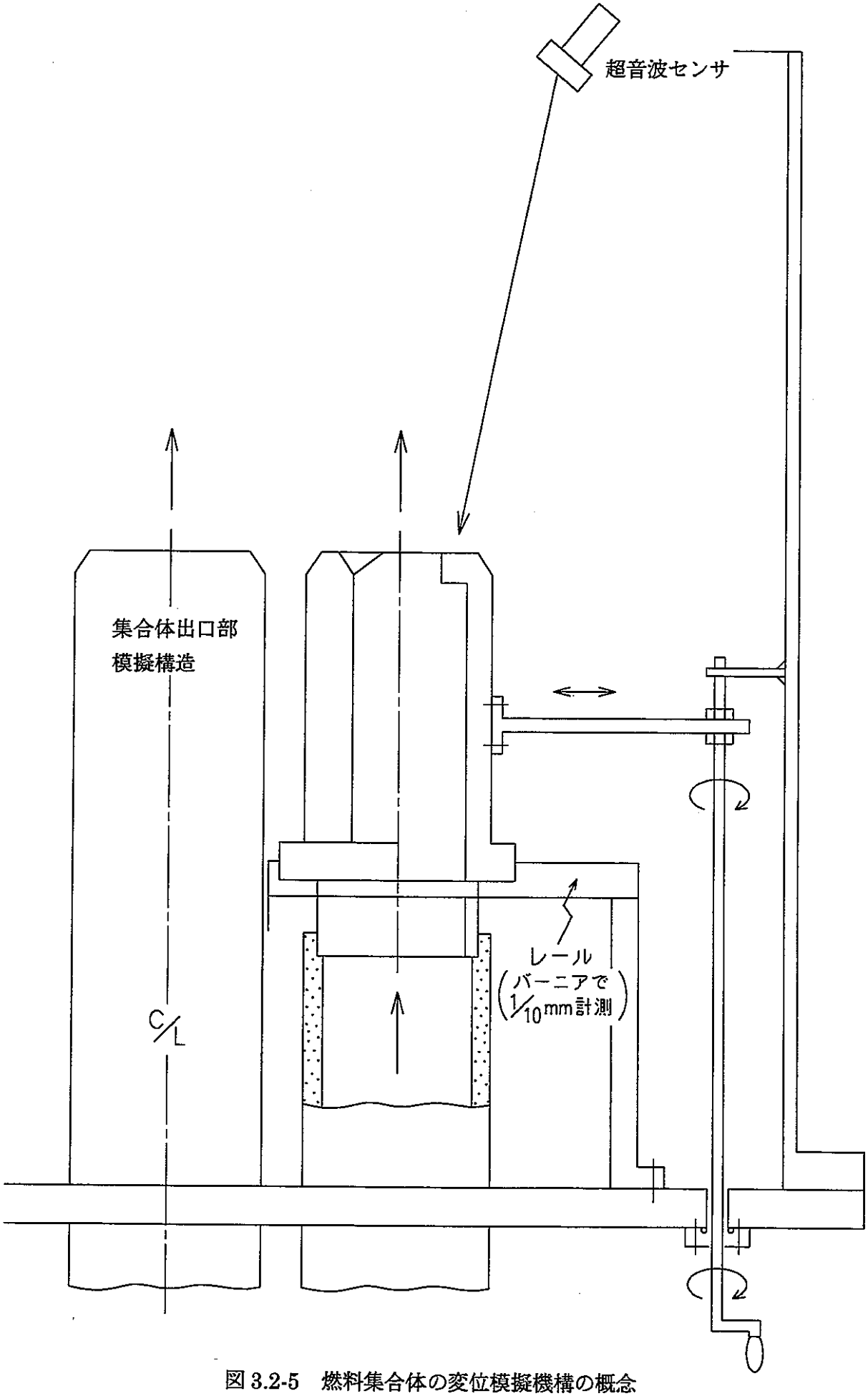


図 3.2-5　燃料集合体の変位模擬機構の概念

3.3 照射条件の見直し

(1) 実施概要

平成７年度に、超音波センサの試作体の照射条件を、ＭＫ-Ⅲ炉心（第３列、第５列）での中性子束データに基づき検討し、照射試験時の燃料貯蔵ポットでの最適な照射位置を設定したが、今年度の検討で超音波センサの配置が変更されたため、照射条件の見直しを行った。

検討にあたっては、実機での連続使用日数が６０日と３００日の２ケースにおける中性子の積算照射量｛全中性子、高速中性子（１～９群の総和）及び熱中性子（２１群）｝が６０日間の照射試験での積算照射量に最も近くなるように照射条件を設定した。

(2) 実機条件の見直し

実機の炉内検査装置は、図2-1と図2-2に示した炉心第３列（３Ｅ３と３Ｂ３）と第５列（５Ｄ２）の上部にあるＣＤＲ予備孔に設置することを想定している。平成７年度の検討では、図2-5の炉内検査装置のセンサ部の構造図に基づき、燃料頂部から134.75㎜の位置を超音波センサの下限とし、照射データ（ＭＫ-Ⅲ）を用いた。しかしながら、今年度の検討では、図3.1-4に示す超音波センサの配置検討結果より、燃料頂部から約60㎜付近（61.1㎜）の照射データ（ＭＫ-Ⅲ炉心）への見直しを行った。

表3.3-1に、以上の条件を基に選定した中性子照射条件を示す。

(3) 照射条件及び照射位置の見直し

照射試験の期間は、６０日である。このため、照射条件は、炉内での試験期間に照射される積算照射量に実機燃料貯蔵ポットでの積算照射量が合うように検討を行った。

炉心第３列と炉心第５列に炉内検査装置を設置した場合の６０日連続使用と３００日連続使用の各ケースに対応した中性子束の必要照射量（実機での積算中性子束を試験日数６０日で割ったデータ）を表3.3-2に示す。

同表によると全般的に炉心第３列の方が炉心第５列に比べて中性子照射条件が厳しい。このため、炉心第３列のデータを照射条件決定のための比較値として採用することとした。

照射カプセル位置（照射試験体の収納可能な位置）と照射データの取得位置との関係を図3.3-1に示す。同図に示すように、照射カプセルの位置は、炉心第０列及び炉心第９列に設置した場合で炉心中心から-845㎜～1012㎜の範囲であり、燃料貯蔵ポットに収納した場合では更に80㎜低くなり炉心中心から-925㎜～932㎜の範囲となる。

このため、これらの位置に対応した範囲で最適な照射条件を検討を行った。

検討結果を表3.3-3に示す。炉心第０列及び炉心第９列では、全中性子束、高速中性子束及び

熱中性子束の比率が実機の照射条件からかけ離れていることがわかる。例えば、炉心第０列では、最も照射量の低い照射カプセル最上部でも全中性子束、高速中性子束のレベルが高く、熱中性子束のレベルが低すぎるし、炉心第９列では、高速中性子束のレベルが高すぎることがわかる。

これに対して、燃料貯蔵ポットでは全中性子束、高速中性子束及び熱中性子束の比率が実機の照射条件に比較的近い。

以上の結果から、燃料貯蔵ポットでの照射データから実機照射条件（連続使用日数が６０日と３００日の２ケース）に最も近い位置を以下の通り見直した。（表3.3-3の黒枠の部分）

① 炉心第３列　照射日数が６０日に対応した照射位置及び照射条件

照射位置　：燃料貯蔵ポット（照射ｷｬﾌﾟｾﾙ上端より-79.1mm）

照射条件　：全中性子束　＝9.25E12　（実機条件＝9.91E12）

：高速中性子束＝1.90E12　（実機条件＝2.16E12）

：熱中性子束　＝6.48E10　（実機条件＝1.13E10）

② 炉心第３列　照射日数が３００日に対応した照射位置及び照射条件

照射位置　：燃料貯蔵ポット（照射ｷｬﾌﾟｾﾙ上端より-547.5mm）

照射条件　：全中性子束　＝4.90E13　（実機条件＝4.95E13）

：高速中性子束＝1.24E13　（実機条件＝1.08E13）

：熱中性子束　＝3.84E10　（実機条件＝5.64E10）

表3.3-1　　実機での中性束照射条件（単位：ｎｖ）

炉内位置	炉心第３列 炉心中心から+1431.1mm （燃料頂部より+61.1mm）	炉心第５列 炉心中心から+1431.1mm （燃料頂部より+61.1mm）
1群	1.54707E+08	9.27156E+07
2群	5.29224E+08	3.29285E+08
3群	2.56338E+09	1.63072E+09
4群	1.24016E+10	7.89534E+09
5群	3.04331E+10	1.97764E+10
6群	1.02183E+11	6.65902E+10
7群	3.18537E+11	2.11000E+11
8群	4.58514E+11	3.09392E+11
9群	1.23742E+12	8.51458E+11
10群	1.36645E+12	9.58310E+11
11群	1.08958E+12	7.72752E+11
12群	5.51342E+11	3.96270E+11
13群	6.91352E+11	4.94167E+11
14群	1.15408E+12	8.43186E+11
15群	8.44205E+11	6.25472E+11
16群	8.69393E+11	6.59487E+11
17群	5.62655E+11	4.36774E+11
18群	3.62689E+11	2.88665E+11
19群	1.86517E+11	1.52183E+11
20群	5.72313E+10	4.78782E+10
21群	1.12763E+10	9.68809E+09
全中性子束	9.90951E+12	7.15300E+12
高速中性子束	2.16274E+12	1.46816E+12
熱中性子束	1.12763E+10	9.68809E+09

表3.3-2　　照射試験において必要な照射線量（単位：ｎｖ）

炉内位置	炉心第 ３列 炉心中心から +1431.1mm （燃料頂部より +61.1mm）	
	実機照射日数が６０日の場合	実機照射日数が３００日の場合
全中性子束	9.90951E+12	4.95475E+13
高速中性子束	2.16274E+12	1.08137E+13
熱中性子束	1.12763E+10	5.63815E+10

炉内位置	炉心第 ５列 炉心中心から +1504.75mm （燃料頂部より +134.75mm）	
	実機照射日数が６０日の場合	実機照射日数が３００日の場合
全中性子束	7.15300E+12	3.57650E+13
高速中性子束	1.46816E+12	7.34082E+12
熱中性子束	9.68809E+09	4.84405E+10

表3.3-3　照射試験での中性束照射条件（単位：ｎｖ）

炉内位置	炉心第０列 炉心中心から+994.1mm 照射ｷｬﾌﾟｾﾙ上端-17.5mm	炉心第９列 炉心中心から+994.1mm 照射ｷｬﾌﾟｾﾙ上端-17.5mm	燃料貯蔵ポット 炉心中心から+852.9mm 照射ｷｬﾌﾟｾﾙ上端-79.1mm	燃料貯蔵ポット 炉心中心から+641.6mm 照射ｷｬﾌﾟｾﾙ上端-290.4mm	燃料貯蔵ポット 炉心中心から+384.5mm 照射ｷｬﾌﾟｾﾙ上端-547.5mm
1群	6.38646E+09	1.46532E+07	6.21654E+06	3.33433E+07	1.80252E+08
2群	2.24254E+10	5.88410E+07	2.20485E+07	1.19503E+08	6.45448E+08
3群	9.40003E+10	4.37842E+08	1.65897E+08	8.21828E+08	4.02464E+09
4群	3.29990E+11	3.04021E+09	1.27559E+09	5.47810E+09	2.32972E+10
5群	6.92779E+11	1.71697E+10	8.12304E+09	3.05330E+10	1.11994E+11
6群	1.94665E+12	1.24896E+11	6.33567E+10	2.03512E+11	6.31355E+11
7群	4.22980E+12	4.44584E+11	2.63698E+11	7.43001E+11	2.01770E+12
8群	4.76297E+12	5.32141E+11	3.50564E+11	9.45953E+11	2.45110E+12
9群	1.02530E+13	1.71852E+12	1.20957E+12	2.99699E+12	7.13185E+12
10群	8.20463E+12	1.83562E+12	1.37328E+12	3.29417E+12	7.55420E+12
11群	4.86693E+12	1.26650E+12	9.36662E+11	2.19967E+12	4.92907E+12
12群	2.17984E+12	7.18031E+11	5.64958E+11	1.31964E+12	2.93945E+12
13群	2.03412E+12	9.12007E+11	7.16808E+11	1.66098E+12	3.66408E+12
14群	1.60914E+12	1.20214E+12	8.62854E+11	1.97116E+12	4.27836E+12
15群	6.79148E+11	8.61882E+11	6.15015E+11	1.39216E+12	2.99276E+12
16群	3.70516E+11	1.06143E+12	8.14213E+11	1.80589E+12	3.79991E+12
17群	1.36957E+11	8.31951E+11	6.77641E+11	1.47517E+12	3.04444E+12
18群	5.27710E+10	5.58238E+11	4.76032E+11	1.01927E+12	2.06771E+12
19群	1.74168E+10	2.81439E+11	2.41004E+11	5.09250E+11	1.01904E+12
20群	3.73630E+09	7.74857E+10	6.48400E+10	1.35820E+11	2.69376E+11
21群	5.54657E+08	1.18808E+10	9.31878E+09	1.94483E+10	3.84263E+10
全中性子束	4.24938E+13	1.24595E+13	9.24941E+12	2.17291E+13	4.89690E+13
高速中性子束	2.23380E+13	2.84086E+12	1.89678E+12	4.92644E+12	1.23721E+13
熱中性子束	5.54657E+08	1.18808E+10	6.48400E+10	1.94483E+10	3.84263E+10

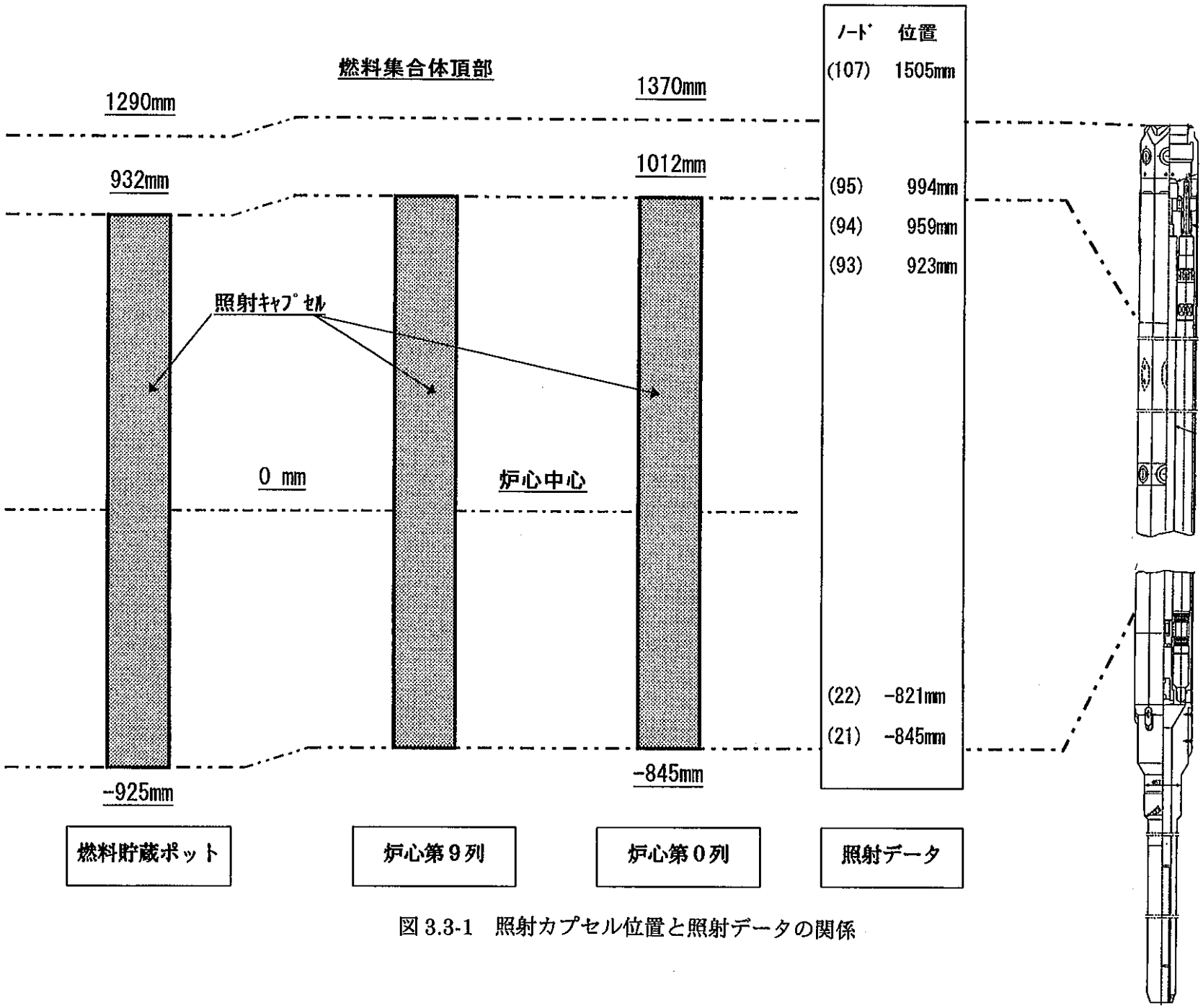


図 3.3-1　照射カプセル位置と照射データの関係

4. 開発課題及び開発内容

今年度までの検討結果を踏まえ、「常陽」の炉内検査技術についての課題を表4.1-1に示す。

5. 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炉内検査装置について以下に示す検討を実施した。

- 集合体上部の温度ゆらぎの影響を考慮し、炉内検査装置の超音波センサによる集合体頂部の変位計測方法を検討し、超音波センサ配置の最適化検討を行った。
- 集合体上部の温度ゆらぎの影響及び集合体頂部の変位計測性能を評価するための水中試験装置の基本構成及び試験条件の検討を行った。
- 超音波センサの配置検討結果に基づき、超音波センサの炉内照射試験の照射条件の見直しを行い、必要な照射量や照射位置の検討を行った。

表4-1　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	開発内容
1.超音波 ﾄﾗﾝｽﾃﾞｭｰｻ	●環境条件 使用温度　：600℃ 照射条件　：5.2×10^{12}nv 冷却材流量：100％ ●音響性能 周波数　　：1～5MHz S／N　　：20dB以上	●耐熱性向上 現状の高温用センサの耐熱性は、600℃（１月間）であり、600℃での耐久性の向上と高温時の振動子の脱酸防止技術を開発する必要がある。 ●耐放射線性向上 通常のニオブ酸リチウムは、Li^{6}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。 ●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。	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、耐久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、ナトリウム中で計測を行う。 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。

表4-1　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	開発内容
2.計測 システム	●炉心頂部変位 計測精度：0.2㎜目標 但し、炉心上部での温度ゆらぎに対する対策が必要。	●検出性能評価 常陽の炉心構成要素の変位計測性能を評価する必要がある。尚、炉心構成要素の絶対位置の変化を計測結果から評価する手法の検討が必要である。 ●温度ゆらぎ対策 超音波センサ配置の最適化により、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。必要に応じて、信号処理による対策を検討する。 ●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る解析評価を行う。	1.　計測システム設計の具体化を行う。 2.　炉内機器の運転時における熱膨張量を解析評価し、計測データに基づいて炉心構成要素の変位量を評価する方法を検討する。 3.　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。 4.　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。 5.　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。

表4-1　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	開発内容
3.駆動部	●環境条件 使用温度　：600℃ 照射条件　：5.2×10^{12}nv 冷却材流量：100% ●炉心構成要素頂部検査 【単眼ﾄﾗﾝｽﾃﾞｭｰｻ】 旋回機構　：外部駆動 昇降機構　：外部駆動 【集積化ﾄﾗﾝｽﾃﾞｭｰｻ】 走査機構　：内部駆動 （精度0.1mm）	●耐熱摺動機構 （原子炉運転中の摺動部） ●流路確保 ●製作性・交換性 ●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。	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検討し、流動解析により評価する。 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.　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。 5.　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。 6.　実機設計を行い、実機を製作する。

謝　辞

本検討にあたり、適切な御指導をいただいた実験炉部・技術課　鳥丸忠彦氏に感謝の意を表します。