

原子炉燃料集合体の振動挙動

横村武宣*・岡島正彦**・林 清純***・吉村富雄*

Vibration Characteristics and Seismic Analysis of the Reactor Fuel Assembly

By

Takeyoshi YOKOMURA, Masahiko OKAZIMA,
Kiyozumi HAYASHI and Tomio YOSHIMURA

Abstract

The vibration characteristics of the fuel assembly for the advanced thermal reactor FUGEN are presented. They are obtained through fundamental vibration test, forced vibration test and the seismic vibration test simulating EL-CENTRO and TAFT earthquake.

An electro-magnetic type vibration testing machine is used for experiments. The fuel assembly unit consists of the pressure tube, the collecting mechanism and the fuel assembly of 28 fuel rods incorporated with dummy fuel pellets. The fuel assembly is supported axially on the shield plug at bottom connecting by collet mechanism, and laterally contacted to the pressure tube through piston ring springs of the upper and lower fuel tie plates.

A seismic simulation code is developed for seismic analysis based on the time history method. Calculated values are compared with those observed in experiments.

Main results are summarized as follows.

- (1) The fundamental vibration test indicates that the rigidity and the damping ratio of the fuel assembly are not constant but depend on the deflection of the fuel assembly, and that the spring constant and the coefficient of spacer are also not constant but depend on the impact force due to the relative motion to the pressure tube.
- (2) The agreement is good enough between calculated response curves of the relative displacement and velocity of the fuel and those observed in experiments. The calculated maximum value of acceleration agrees well with the measured value. As a result, the seismic simulation calculation is found to be accurate enough to the practical usage for the fuel safety analysis.
- (3) In the calculation in which the non-linear form based on the measured value is adopted for damping ratio of the fuel assembly and spring constants of spacers, we have found that calculated response curves become close to experiments.

目 次

1. まえがき	3.2 振動計測器類
2. 燃料集合体	3.3 地震波再現システム
3. 実験装置	4. 燃料集合体の振動特性
3.1 振動試験機	4.1 端末支持条件
	4.2 自由振動特性
	4.3 強制振動特性
	4.4 燃料棒の振動特性
	4.5 スペーサの振動特性
	5. 振動実験

* 東海支所

** Carnegie-Mellon Univ. Department of Mechanical Engineering, Pittsburgh, Pennsylvania 15213 U.S.A.

*** 動力炉・核燃料開発事業団

原稿受付: 昭和57年12月27日

- 5.1 正弦波による振動実験
- 5.2 地震波による振動実験
- 6. 動的応答解析
 - 6.1 モデルおよび基礎式
 - 6.2 数値解法
 - 6.3 数値計算
- 7. 検 討
 - 7.1 実験値と計算値の比較
 - 7.2 地震波のパワー・スペクトラム密度

- 7.3 振動定数の再検討
- 8. あとがき
- 9. 謝 辞

- 付録—1 新型転換炉原型炉「ふげん」の概要
- 付録—2 弾性支持された棒の固有振動数および歪と変位の関係
- 付録—3 スペーサの粘性減衰係数
- 参 考 文 献

1. ま え が き

原子炉燃料の振動挙動、耐振強度の評価は、原子炉の安全性並びに燃料棒の健全性の面から重要な課題の一つとされている。原子炉施設の耐震設計の考え方およびその計算技術はかなり高度化されてきている。その上、原型炉等の建設に際しては実規模に近いモデルによる確認実験を行うなど、慎重な対応の仕方が一般化してきている。

炉心を構成する燃料集合体が個々に、圧力管に収められる形の原子炉では、燃料集合体が炉心の下部グリッド板に支持固定される場合と異なり、その振動挙動は複雑になる。新型転換炉原型炉「ふげん」の燃料集合体は燃料交換等に関連して、圧力管の内面との間に、ある程度の隙間を有する設計となっている。そのため、壁との衝突を伴う非線型振動系についての、かなり厳密な地震応答解析を行い、燃料体の挙動が原子炉の核・熱的安全性を損うようなことがないかどうか、圧力管との衝突により、燃料集合体の健全性を損うようなことがないかどうかの確認を行う必要がある。

以上のような観点から、実寸法の燃料集合体を用い、その振動系要素の定量並びに振動実験を行い、ふげん燃料集合体の地震時の挙動並びに耐震性を明らかにした。また、燃料集合体の耐震計算コードを開発し、地震波の再現実験との比較検討を行い、同計算コードによる応答の解析計算値が実用上十分な精度を有するものであることを明らかにした。

本耐震計算コードは、「ふげん」の炉心を対象として開発したものであるが、入力データの取り方により、船用炉にも適用できるよう配慮しており、船体振動に対する燃料集合体の挙動の把握あるいは衝突事故時の燃料集合体の健全性並びに原子炉の核・熱的安全性の評価等に活用できる。

当研究所は、原子力船研究開発の第1の課題として、振動動揺対策の問題を採り上げ、昭和33年からその研究を実施してきている。昭和39～40年には原子力第1船「むつ」用燃料集合体の振動実験を実施し、その成果を燃料保持機構の改良、燃料集合体固有振動数を船体振動領域外へずらすように改善することなどに反映させた。

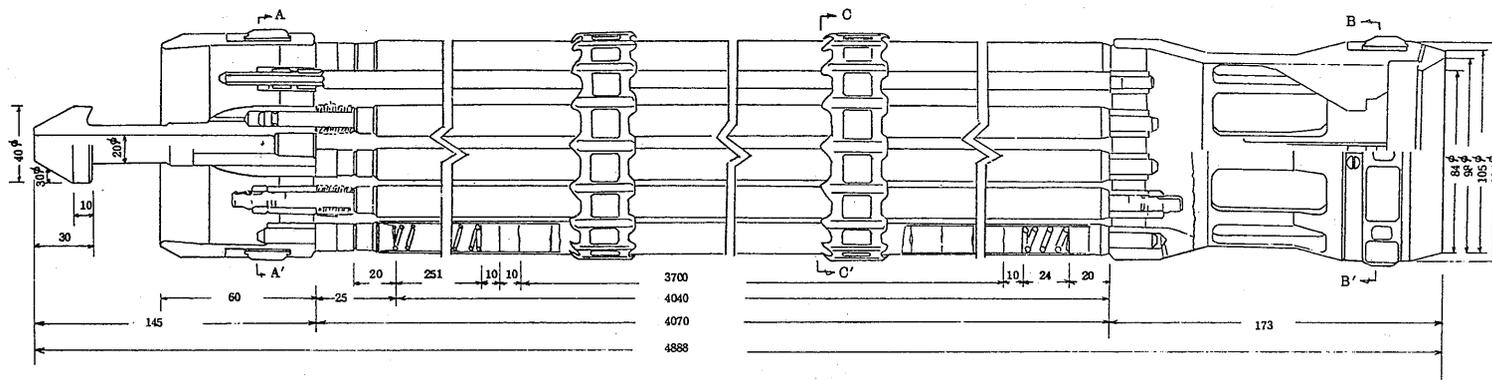
動力炉・核燃料開発事業団がナショナル・プロジェクトとして実施している新型転換炉の開発に当たり、前記のような原子力船の振動動揺対策に関する研究の実績が評価され、当研究所が燃料集合体の振動挙動に関する炉外評価試験の部分を担当することとなった。この試験研究は昭和43年から53年まで実施した。その成果^{1)~5)}は、その都度、次のステップの開発研究にフィードバックされるとともに、原子炉の安全性審査、ふげん燃料集合体の工事認可申請等における基礎資料として採用された。

本報告は、そのうち最も重要なテーマである耐震挙動に関する部分を整理し、その後、再度検討を加え、研究報告としてまとめたものである。

耐震性評価の手法には、実規模モデルにより実験的に証明する方法と信頼性の立証された耐震計算コードによる解析評価の方法とがある。

試験研究の第1のねらいが原型炉ふげん燃料体の健全性の評価にあることから、本報告では実規模振動試験の結果を、第4章 燃料集合体の振動特性および第5章 振動実験の2章にまとめ、健全性の評価に直接利用できるよう、各章節の末尾に主な結果を要約した。

本報告の主目的である解析計算コードの開発は、試験研究としては、ふげん燃料の健全性の再確認にとどまり第2義的である。しかし、ふげん燃料の変更時あるいは次のステップで建設が予定されている実証炉燃料の評価時には不可欠の耐震計算コードとして利用で



縮尺圖

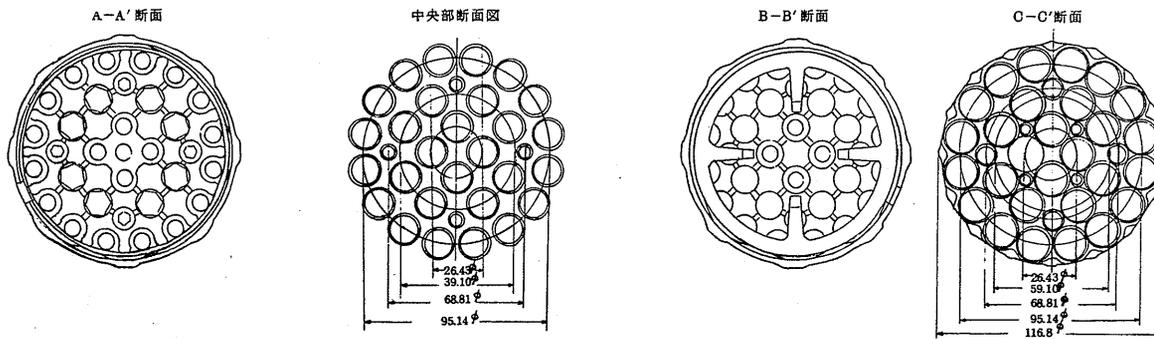
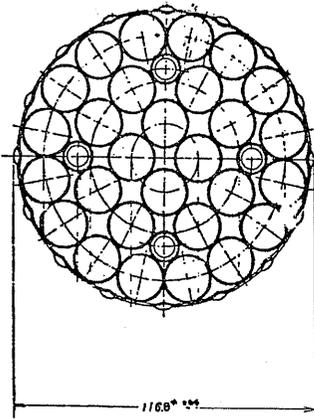


圖-2.1(1) 5F型燃料集合体組立圖



スパーサ組立図

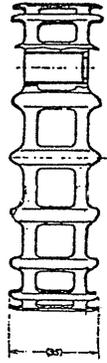
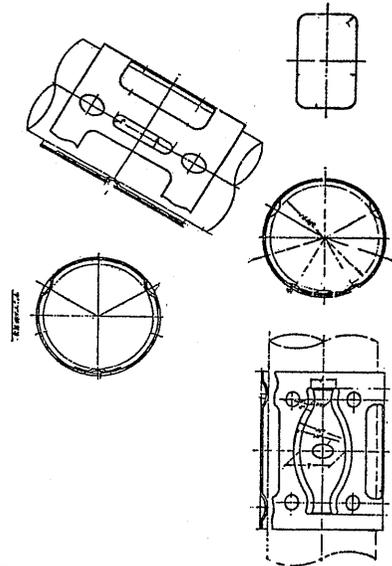


図-2.1(2) 5F型スパーサ



リング素子詳細図

きる。そこで、第6章の動的応答解析では、第4章で得られた振動特性を基本とした解析モデルを設定して動的応答の解析計算を行い、第7章の検討において、解析計算コードによる計算値が実用上十分な精度を有することを実験値との比較により立証した。

2. 燃料集合体

新型転換炉原型炉「ふげん」は、電気出力 165,000 kW の重水減速沸騰軽水冷却型の原子炉で、その概要は付録-1 に示すとおりである。

燃料集合体は 28 本の燃料棒を束（バンドル）にしたもので、内層、中間層および外層に各々、4 本、8 本、16 本の燃料棒が同心円状に配列されている。各層の燃料棒は上・下タイプレートおよびスパーサで燃料棒相互の間隔が保たれ、中間層の 8 本の燃料棒（タイロッド燃料棒）で上・下タイプレートに固定し、組立てられている。

スパーサは中性子経済と除熱能力の観点から最適化された間隔（上・下部で粗、中央部で密）で軸方向に 12 個配列され、4 本のスパーサ・タイロッドで所定の間隔に保たれている。圧力管内での燃料集合体の重量はコレット機構で下部遮蔽プラグ上に支持され、横方向の位置決めおよび支持は上・下タイプレートの側面円周に設けられたピストン型案内ばねで行われている。

燃料集合体の全体組立図を 図-2.1 に、振動特性に関連する要目を 表-2.1 に示す。

表-2.1 5F型燃料集合体の主要目

1) ペレット		
材 質	W-Cu 合金 (模擬材料)	
外 径	14.39 mm	
高 さ	20 mm	
密 度	10.41 g/cm ³	
2) 燃料被覆管		
材 質	Zry-2	
内 径	14.70 mm	
肉 厚	0.86 mm	
外 径	16.46 mm	
長 さ	4,050 mm	
3) 燃 料 棒		
全 長	タイロッド燃料棒	4,151 mm
	フリーロッド燃料棒	4,125 mm
	有 効 長	3,730 mm
	ペレット被覆管間ギャップ	0.29 mm
	プレナム長さ	280 mm
4) 燃料集合体		
燃料棒本数		28 本
全 長		4,388 mm
燃料要素ギャップ		1.7 mm 以上
燃料要素と圧力管の間隔		2.28 mm
重 量		230 kg

燃料棒は、外径 16.46mm、肉厚 0.86mm、長さ 4,050mm の Zry-2 製被覆管の両端に端栓を溶接した構造のものである。燃料の UO_2 ペレットは 14.44mm ϕ ×18mmH の両端面ディッシュ・チャンファ付きペレットで、燃料被覆管には炉心の有効長 3,700mm に相当する約 200 個のペレットが詰められている。

燃料棒相互の間隔を一定に保つスペーサはリング素子 28 個、タイロッドガイドリング 4 個、外リング等からなり、TIG 溶接により所定の配列に組立てられている。燃料棒を所定の位置に位置決め保持するリング素子は、Inconel-718 製のリングに燃料棒保持用の突起（固定ディンプル 2 個、ばねディンプル 1 個）を 3 方向に打ち出し、これら突起間の部分に窓およびスリットを打抜いたものである。組立てられたスペーサは、リング素子のばね特性を向上させるため、アルゴン雰囲気中で時効熱処理されている。

スペーサの外観を 写真-2.1 に示す。

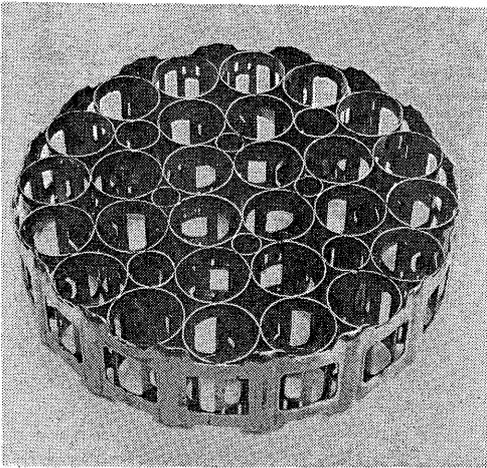


写真-2.1 5F型用スペーサ

本研究に供した燃料集合体は前述の標準燃料集合体の試作品である。燃料集合体の試作は 1 次から 5 次にかけて実施され、その都度、振動特性を調べたが、本報告では、5 次試作品（ふげん燃料として炉心に装荷されたもの）を 5F 型と略称し、その特性を主体にしてまとめることにする。

また、「ふげん」には原子炉材料の中性子照射による脆化の状況を把握するため、先行照射試験用材料小試験片の組込まれた燃料集合体が装荷される。これを特殊燃料集合体と呼ぶ。特殊燃料集合体の中心部には

照射試験片入りキャプセルを挿入するための案内管があり、その外周に直径の異なる燃料棒、各 18 本が 2 層に配列されている。

外層燃料棒は直径 12.5mm の燃料ペレットを外径 14.72mm ϕ 、内径 13.04mm ϕ の Zry-2 製被覆管に収めたもので、その全長および有効長は 4,046mm および 3,540mm である。内層燃料棒は直径 8.0mm ϕ の燃料ペレットを外径 9.70mm ϕ 、内径 8.46mm ϕ の Zry-2 製被覆管に収めたもので、その全長および有効長は外層燃料棒と同一値である。

スペーサ相互の間隔は、標準燃料集合体と同一であって、案内管に設けられた止め板とスペーサの最内周にある案内管保持リングで所定のピッチに保たれる。

特殊燃料集合体の全体組立図を 図-2.2 に示す。

本報告では、特殊燃料集合体の最終試作品を 4 特型と略称し、その特性を補足データとして使用することにする。

3. 実験装置

3.1 振動試験機

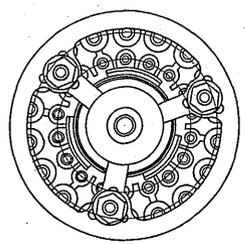
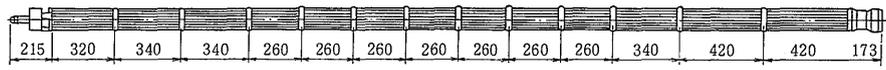
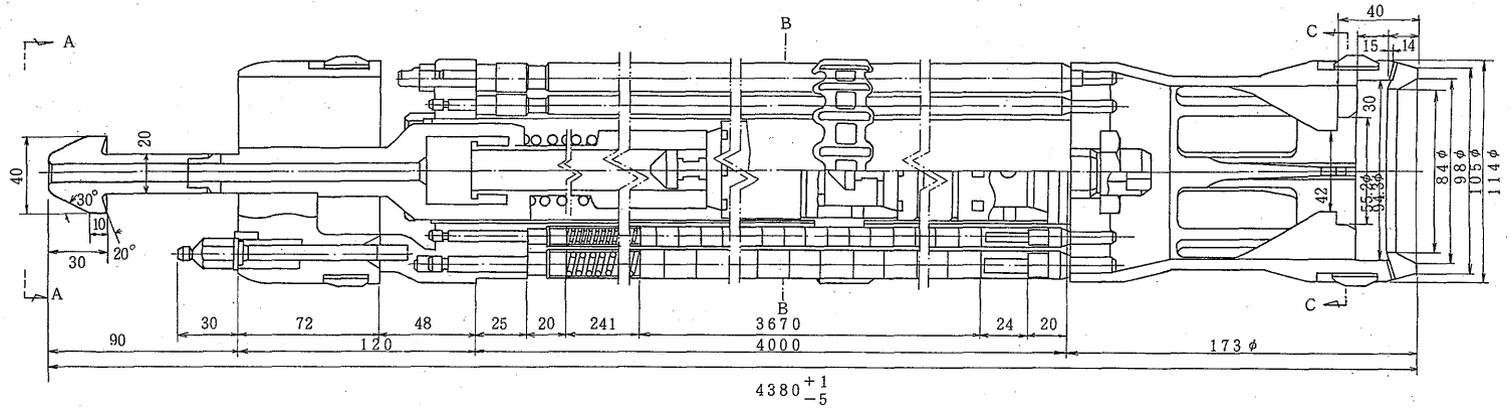
振動試験機は燃料集合体に強制的な振動外力を加え、供試体の振動特性を調べるために設置した動電型の振動試験機である。試験機は筐体（ラック）に収められた電子回路、コンクリート基礎上に固定された 3 台の振動子、油圧浮上式の水平テーブルおよび各種の加振治具類よりなる。その主要目、全景および振動試験計測システムのブロック線図を 表-3.1、写真-3.1、および 図-3.1 に示す。

電子回路は 0.5~500Hz の超低周波を発生する掃引発振器、その出力を増幅し、上・下 2 台の振動子を加振する 2 組の電力増幅器、その出力を加速度一定または振幅一定に制御する振動制御器、振動子を励磁するための励磁電源よりなる。

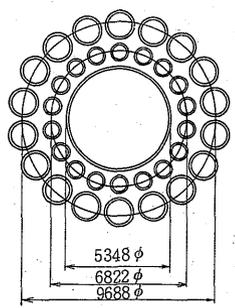
振動子はムービング・コイルを有する動電型で、電子回路からの電氣的振動を機械的振動に変換する部分である。試験機には 3 台の振動子が 2m の間隔で垂直に配置されており、そのうちの 1 台または 2 台を選んで加振させることができる。

加振治具は燃料集合体を各種の支持状態で加振するための治具で、スペーサ加振治具、圧力管加振治具およびタイプレート加振治具からなる。

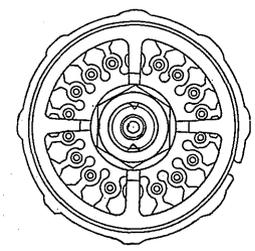
スペーサ加振治具は、燃料集合体の全スペーサ部およびタイプレート部を固定し、同一振幅、同一位相で加振するための治具である。スペーサ加振治具により



A-A 矢视图



B-B 断面图



C-C 断面图

图-2.2 4 特型燃料集合体组立图

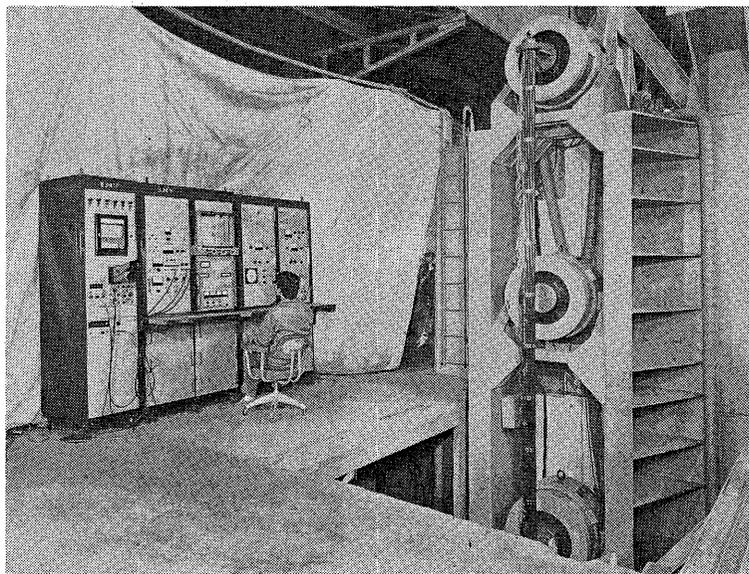


写真-3.1 振動試験機

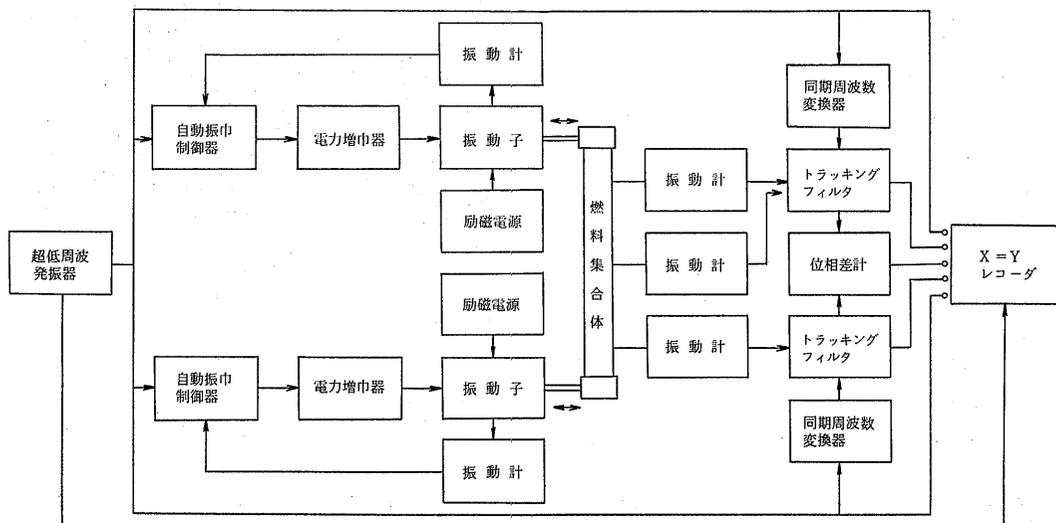


図-3.1 振動実験・計測システムのブロック線図

表-3.1 振動試験機の主要目

総合仕様	
最大加振力	200 kg×2 計 400 kg
最大加速度	試料負荷時 1 G (試料+加振治具) 400 kg
最大振幅	40 mm (P-P)
可動部重量	25 kg×2 計 50 kg 以下 (加振治具含む)
使用周波数範囲	0.5~200 Hz
振動子寸法	150 mm 幅 (加振治具取付部)
定 格	24 時間連続 (但し、周囲温度 0~40°C)
電 源	3 相 220 V 50 Hz
消費電力	約 8 kVA
振動子冷却方式	強制空冷
制御部冷却方式	強制空冷
外形寸法および重量	
振 動 子	重量 約 1,100 kg 寸法 約 幅 900 mm 高さ 760 奥行 700
制御筐体	重量 約 600 kg 寸法 約 幅 1,024 mm 高さ 1,900 奥行 600
構 成	
電子回路部	数量
超低周波掃引発振器	1 台
振動制御増幅器	2 台
電力増幅器	2 台
電力増幅器電源	2 台
振動計測器	2 式
励磁電源	2 台
電源制御器	1 台
加 振 部	
振 動 子	3 台
ブロー	3 台
油圧浮上式水平テーブル	1 台

燃料集合体を振動試験機に取付けた状態を写真-3.2に示す。スペーサを固定した状態での燃料棒の固有振動数が高いため、梁に相当する部分には軽量で、かつ、極めて高い剛性が要求される。燃料集合体および治具の重量は油圧浮上式の水平テーブルで支持し、加振力は、上・下2台の振動子により加える。写真-3.3参照。

圧力管加振治具は燃料集合体が原子炉の圧力管内に装荷された状態を再現し、それを加振するための治具である。燃料集合体を収める圧力管は「ふげん」の圧力管と同一寸法・精度のステンレス鋼製で、燃料集合体はその下部に内装されているコレット機構で支持さ

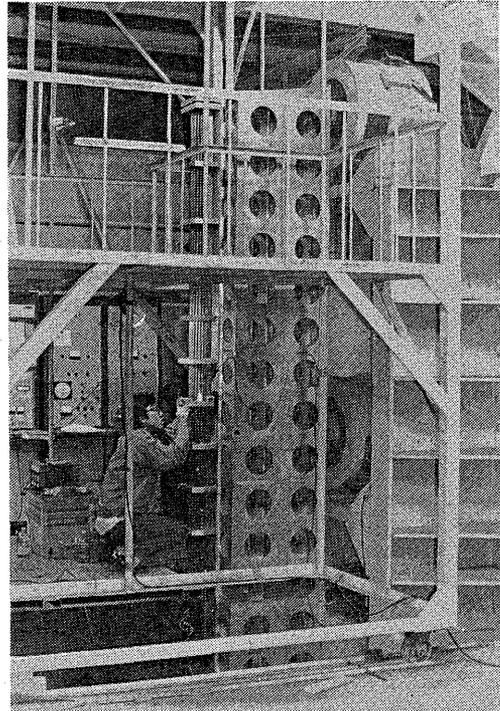


写真-3.2 スペーサ加振治具による振動実験

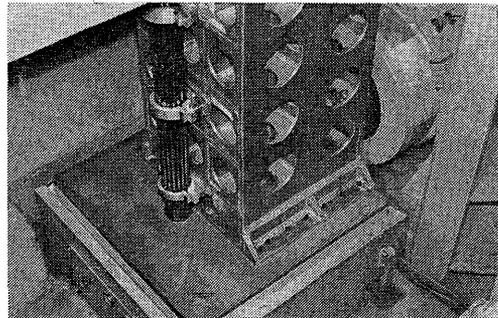


写真-3.3 油圧浮上式水平テーブルによるスペーサ加振治具の支持

れる。燃料集合体を収めた圧力管加振治具の重量は、十分に長く細いピアノ線で懸架し、支持する。加振力は振動子に取付けた上・下2本の腕を介して圧力管に伝えられる。圧力管には計測用の孔が設けられており、燃料集合体の加速度、変位等が外部から計測できる(写真-3.7参照)。圧力管加振治具による振動実験の概念および写真を図-3.2および写真-3.4に示す。

タイププレート加振治具は燃料集合体全体の振動特性を調べるための治具である。燃料集合体の上・下タイププレート部を2本の腕でつかみ、振動子の加振力を直

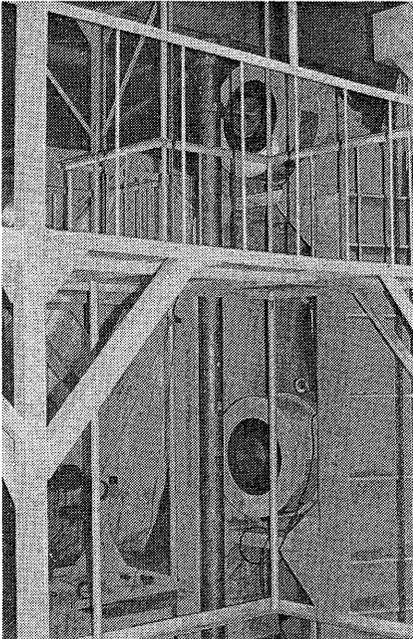


写真-3.4 圧力管加振治具による振動実験

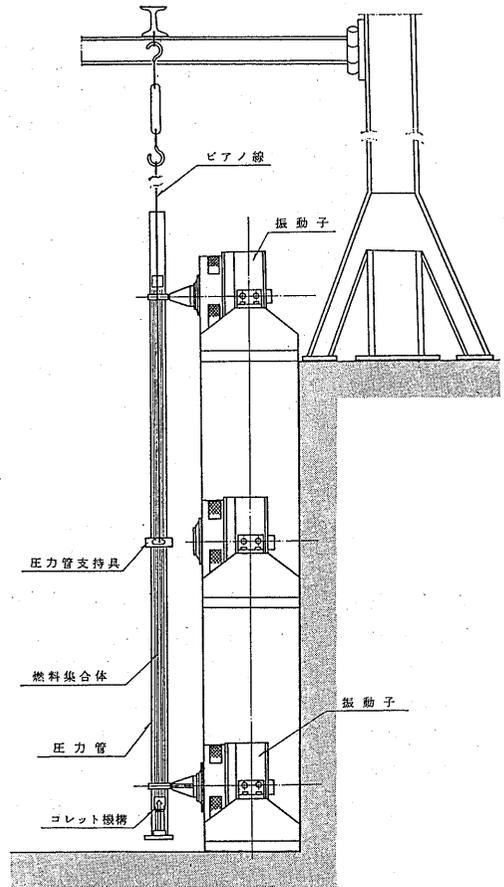


図-3.2 圧力管加振治具による振動実験

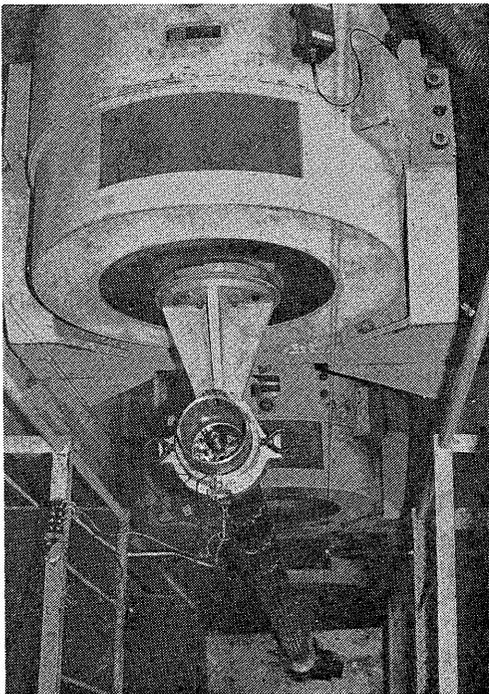


写真-3.5 タイプレート加振治具による振動実験
(上から見た状態)

接タイプレート部に伝える。燃料集合体の重量は上部タイプレート部をピアノ線で懸架して支持する。タイプレート加振治具による振動実験の様子を写真-3.5に示す。

3.2 振動計測器類

3.2.1 振動計測装置

振動計測装置は、振動計、トラッキング・フィルタ、位相差計、X-Y レコーダ、シンクロスコープ、デジタル電圧計、周波数カウンタなどからなり、筐体に収められている。この振動計測装置は燃料集合体の振動特性の計測に供するため、特に低域での計測ができるように配慮されている。各機器の性能等は以下のとおりである。

(1) 特殊低域型振動計および振動計

特殊低域型振動計は、振動検出器、前置増幅器および振動計よりなる。振動検出器は、チタン酸ジルコニ

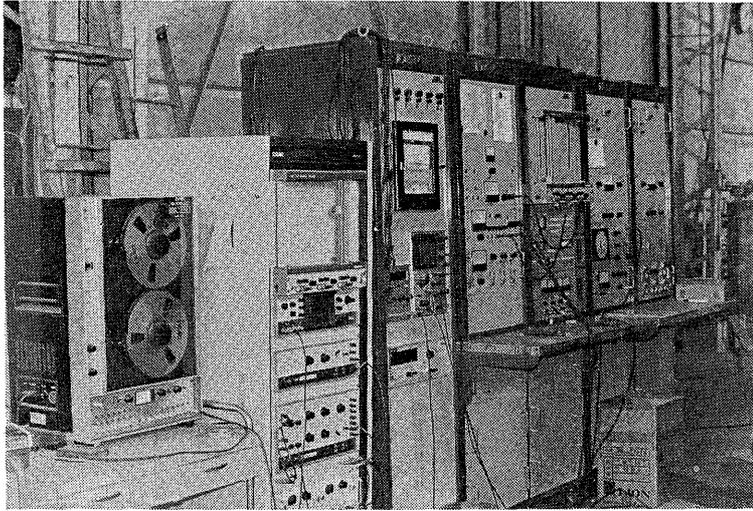


写真-3.6 振動計測装置

ュームの圧電効果を利用した加速度計であって重量 5 g, 寸法 9mm×9mm×15mm の小型軽量のものである。写真-3.7 参照。検出器の付加による燃料棒などの振動特性の変化は無視し得る。前置増幅器および振動計は最低 0.5 Hz までの加速度, 最低 1 Hz までの振動変位が計測できるような低域型であり, 本実験のために特に開発したものである。主要目を以下に示す。

1) 構成

振動計	IMV社製(国際機械振動研究所(株))
	3チャンネル, 1台
前置増幅器	9ケ
検出器	IMV VP-4803, 9ケ

2) 振動計性能

加速度測定範囲 0~3 G (0.5~500 Hz)

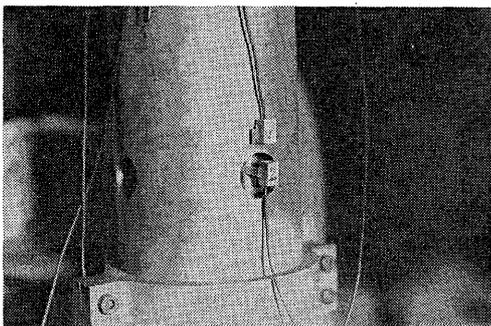


写真-3.7 圧力管および燃料集合体の加速度検出

変位測定範囲	5段切換 0~30 mm (1~10 Hz) から 0~0.03 mm (30~200 Hz)
出力 High	7段切換 出力インピーダンス 10 kΩ 出力電圧 10 V P-P
Low	出力インピーダンス 20 Ω 出力電流 0~5 mA (可変)

3) 検出器

検出方式	圧電効果方式
感度	約 50 mV/G
共振周波数	約 1 kHz
許容最大加速度	3 G
寸法	9 mmH×9 mmW×15 mmD
重量	5 g

振動計は振動加速度を検出する圧電型の加速度検出器と入力部にチャージアンプを用いた振動計からなる汎用の振動計であって, 特殊低域型振動計では計測できない高い周波数成分の計測に用いる。その主要目は, 以下のとおりである。

1) 検出器

型式	IMV VP-4200 型
方式	圧電素子
感度	50 mV/G
共振周波数	25 kHz
許容加速度	100 G 以上
使用ケーブル	ローノイズ・ケーブル 10 m