

日立製作所における原子力機器の耐震研究

Some Studies for Aseismatic Design of Atomic Power Equipment

落 合 兼 寛*
Kanehiro Ochiai

加 賀 万 亀 男**
Makio Kaga

志 賀 元 弘***
Motohiro Shiga

要 旨

近年、各分野において地震対策の必要性が強調されているが、安全性が重要視される原子力発電設備の耐震設計においては、特に慎重なそしてきびしい条件が課せられている。

地震応答解析の手法は電子計算機の発達によって、動的解析が可能となり著しく進歩してきた。しかしながら、対象とする構造物は一般に複雑であるので、より正確な解析を行なうため、あるいは理論の妥当性を実証するためには多くの実験的研究をも必要としている。日立製作所では、十数年以前より耐震解析に関する研究を重ねてきたが、特に最近行なわれた実験のうち沸騰水形原子炉の機器についてその概要を述べる。

1. 緒 言

沸騰水形原子力発電設備の耐震設計は大は原子炉建家から、小は制御装置の1部品に至るまで、多種多様な設備を対象としているが参考文献(1)に述べられたように、それぞれに適切な設計方法が採用され発電所全体の耐震性が確かめられている。従来の耐震設計が震度法による静的設計を主体としていたのに対し、原子力発電設備の耐震設計では、静的設計に加え動的応答解析も行なわれることに特色がある。

近年の大形電子計算機の発達によって、複雑な構造解析が可能となった。それに伴い耐震設計の分野でも構造物の固有振動数、振動モードを算出し、地震条件を考慮して動的な応答値を求め、設計条件とすることが行なわれるようになり、精度が飛躍的に向上した。一方、安全性が特に重要視される原子力発電所の建設に際しては、構築物はもちろんのこと機器・配管系についても動的応答解析が広く用いられるようになり、年々解析技術とその精度が向上し、現在では発電所全体が動的触析を中心にして、ひとつの思想のもとに耐震設計が行なわれている。

各種の機器・配管系の動的応答解析は、解析モデルの作成、応答解析および評価の要素からなっているが、図1に示すように、その妥当性を実証するための実験または実測が個々についてなされている。たとえば、応答解析を行なうためには、対象となる機器・配管系に最適の計算コードを各種開発せねばならないが、開発の都度、模型または実物による振動実験を行ない計算コードの妥当性を確認せねばならない。また、地震時にも機能を保持せねばならない機器については実験を行ない、動的応答解析結果を評価する必要がある。

このように、比較的新しい分野である機器・配管系の動的応答解析には、実験または実測による実証を必要としており、新しい計算コードの開発とともに、耐震設計技術の進歩に関する大きな柱となっている。次節以後に最近行なった実験の概要を紹介し参考に供することにする。

2. 原子炉内部構造物に関する実験

沸騰水形原子炉内部構造物は、それ自体の構造が複雑なことおよび狭い空間内の水中で振動することから、従来の構造物とは異なる解析手法が必要である。特に後者の水中振動については、新しい分野であるので、実験および理論的な検討に特に力を注いでいる。

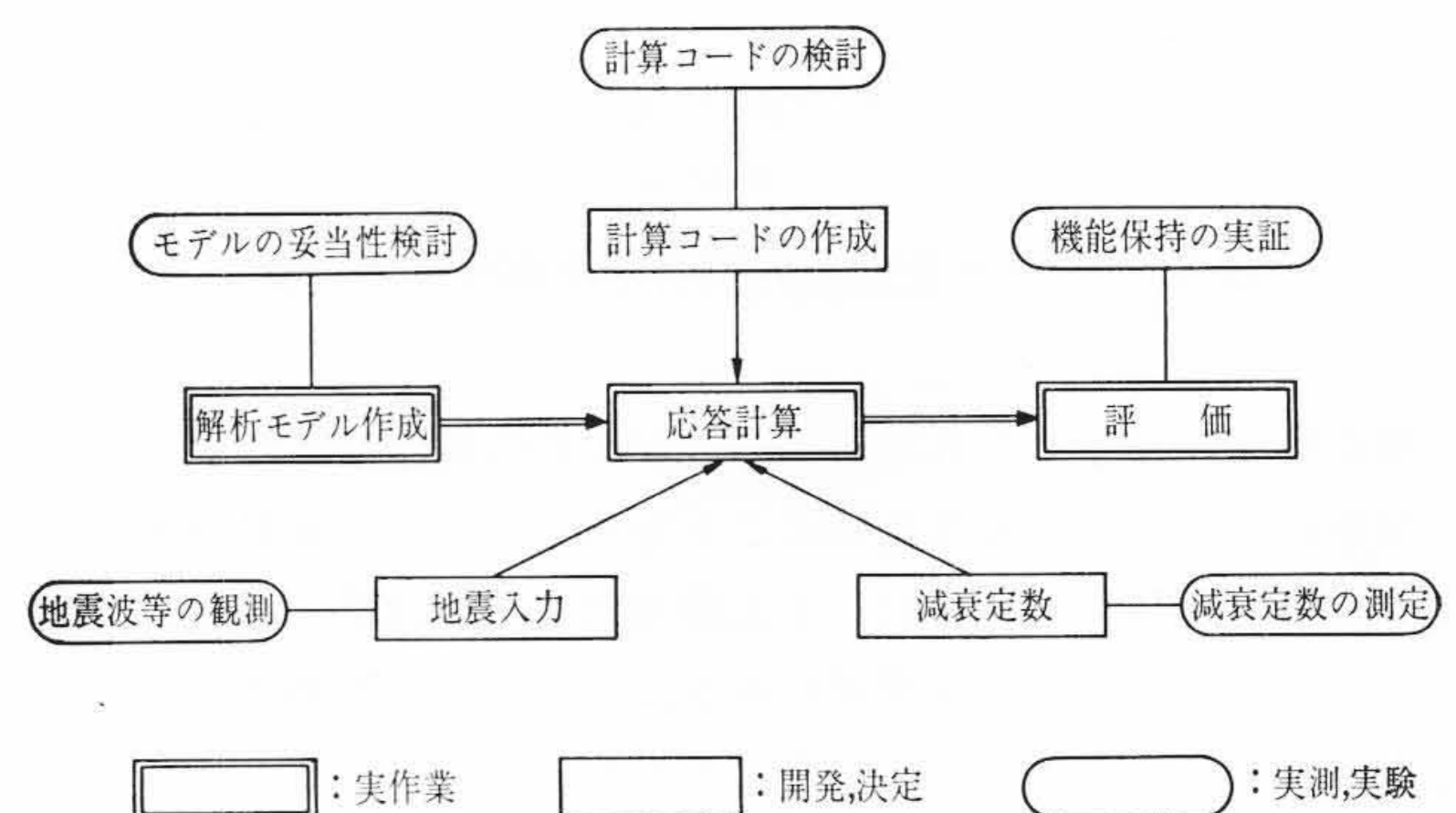


図1 動的応答解析概要

2.1 基礎的な水中振動実験

構造物が水中で振動するときには、空気中に比べて振動が抑制されるが、それは、固有振動数の低下および減衰定数の増大によって現われる。単純に考えれば、前者は構造物が水から受ける反力で説明できて、あたかも構造物の重量が増加したかのように取り扱うことが可能であり、見掛け重量(Virtual Weight)と呼ばれている。後者は、粘性抵抗のほか、渦(うず)や波動によるエネルギーの損失と理解されるが、理論的に減衰定数を推定することはいまだ困難である。構造物の水中振動に関しては船、橋脚あるいはダム等について古くから研究されているが、原子炉内部構造物は特殊な形状および境界条件を有しており、従来の理論または実験結果の適用が困難であるため、新しい設計法の開発が必要である。

水中振動の特性を把握(はあく)するために、比較的単純な形状の構造物を用いて実験を行なっている。そのうち、最も基本的なものとして、1本の丸棒を直径の異なる円筒容器に満たされた水の中で振動させたときの共振曲線を図2に示す。

この実験に用いた丸棒は、長さ約1.9 m、直径24 mmφで、上端は自由とし、下端は振動台上の容器内に固定されている。容器の直径は、3段階に変え、水の拘束状態を変化させている。図2の共振曲線から空気中に比べ、水中では固有振動数が低下し、応答倍率も低くなって振動が抑制される様子がわかる。この水の効果は容器の直径が小さくなり、水が強く拘束されるほど顕著となっている。実験による固有振動数の低下から見掛け重量の増加量を算出し、2次元完全流体の運動方程式を解いて得られた純理論式と比較した結果は図3となる。両者はよく一致しており、理論式が妥当であること

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所機械研究所

*** 日立製作所日立研究所

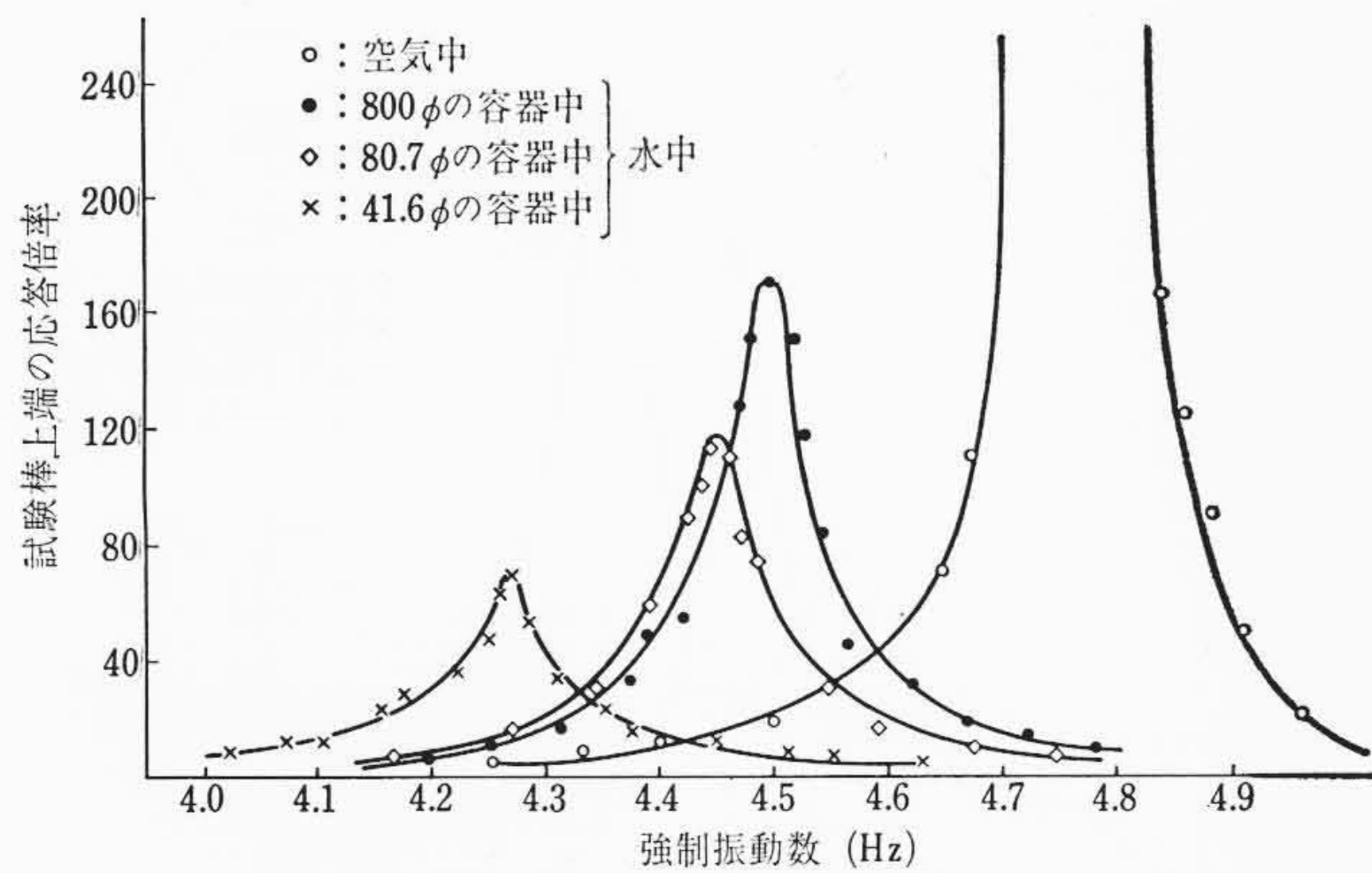


図2 丸棒強制振動実験結果

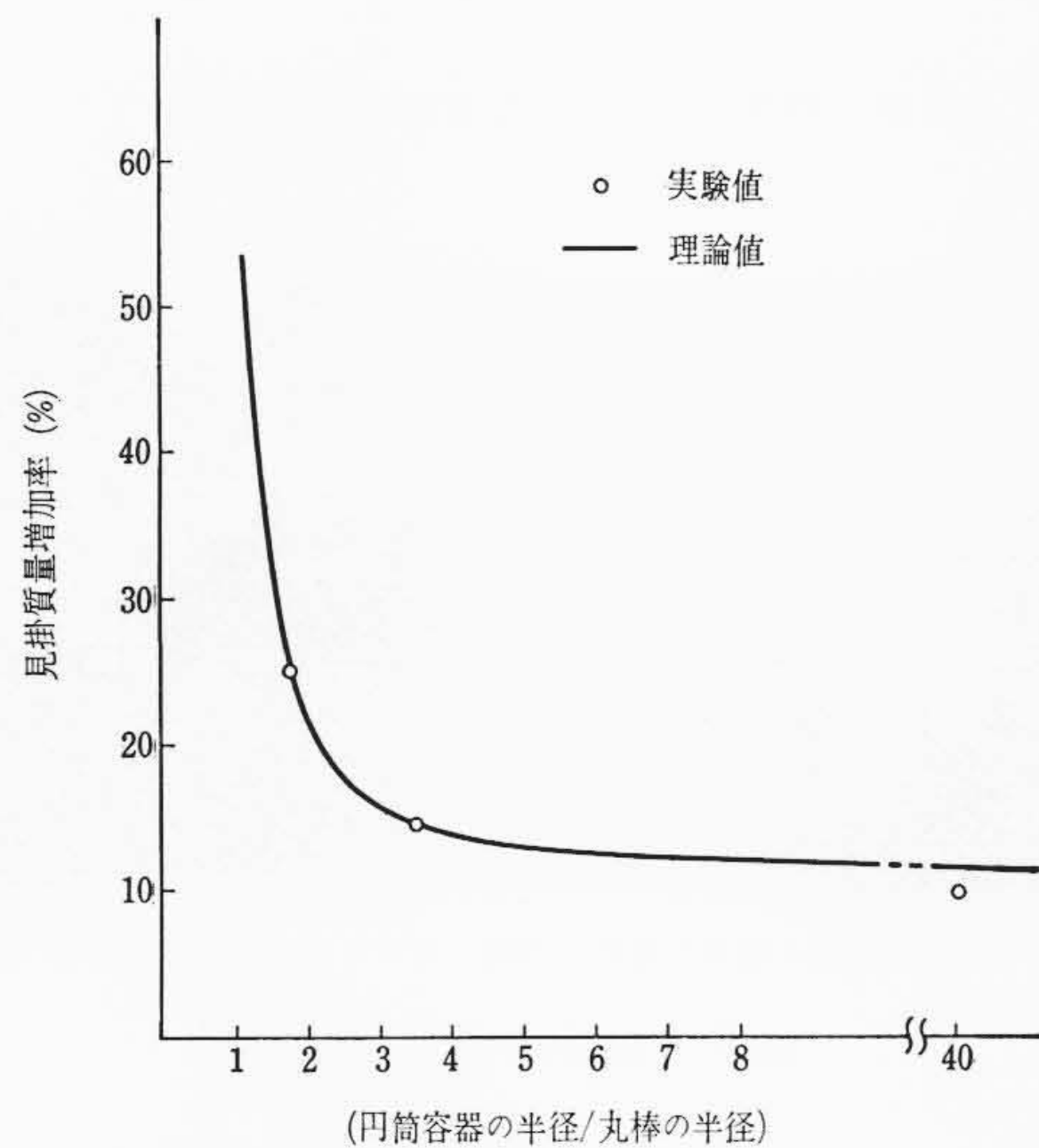


図3 実験値と理論値との比較

が確認された。

このほかに2重円筒状の構造物や、管群などについての基礎的な振動実験を系統的に行なって設計式の検討を行なっている。

2.2 シュラウド模型の振動実験

次に、実際の原子炉内部構造物に近い形状を有する模型について行なった振動実験について述べる。この種の実験では、実機の振動状態や減衰定数の推定を目的としている。

燃料や気水分離器をささえるシュラウドは炉内構造物の中で最大の構造物であり重要な役割を持っている。シュラウドは、ほとんどの部分が水中に没しているが、原子炉压力容器との間の空間は狭く、高さが低いので、空間内の水は3次的に流動して複雑な効果をシュラウドに与えている。そこで主要な形状を実機の約1/6とした模型を作成し、水中振動の効果を測定した。模型の概要を図4に示す。燃料および制御棒案内管は重錘として考慮し、さらにシュラウドの下端は、シュラウドのロッキング振動を模擬できる構造としている。

水中の共振曲線を図5に示す。減衰定数が、空気中で1.8%であるのに対し、水中では6.5%になることから、シュラウドのように狭い空間内の水中で振動する構造物は、水の影響が大きく作用して振動が抑制されることが確認された。

3. 燃料集合体および制御棒に関する実験

原子力発電設備の中でも、最も重要なものの一つである燃料集合体およびその間にそう入される制御棒については特に詳細な実験を行ない、解析の精度向上および耐震性の検討に力を注いでいる。次

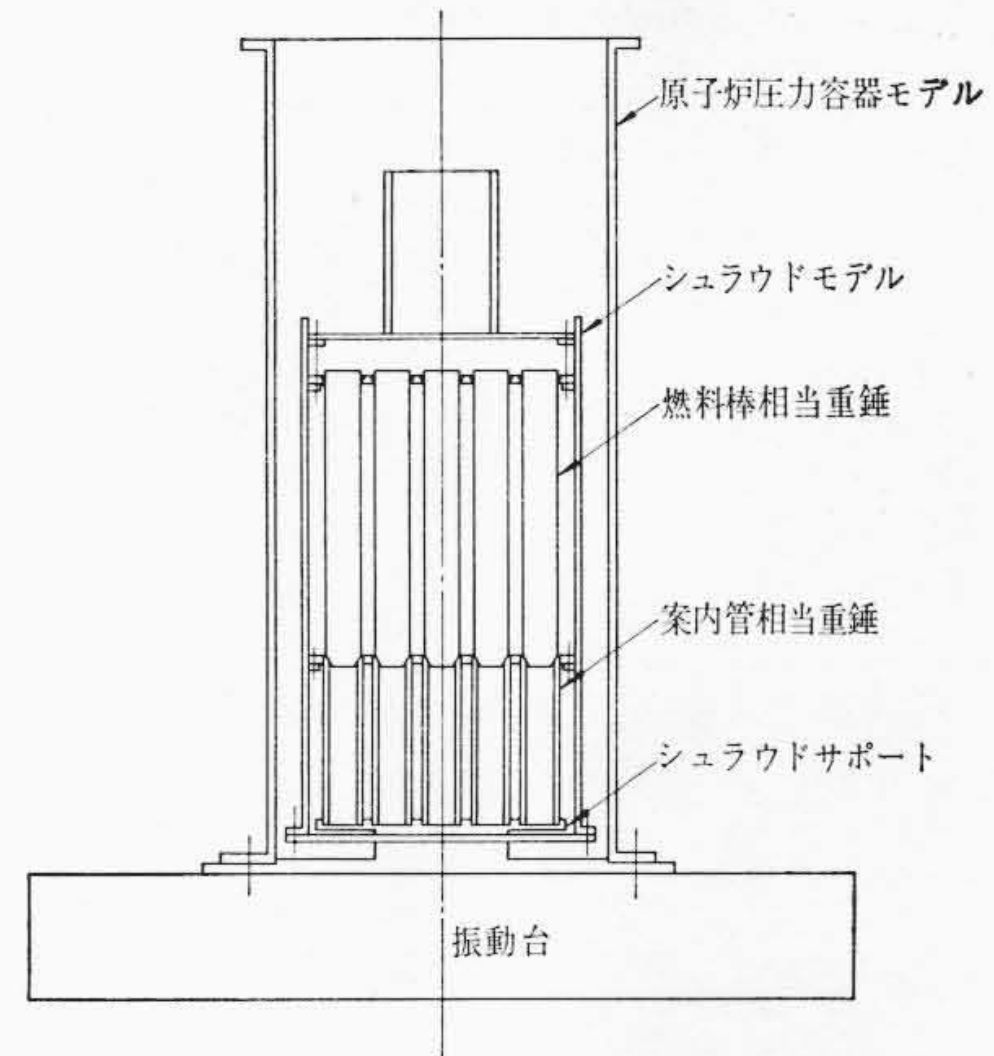


図4 シュラウドモデル実験装置

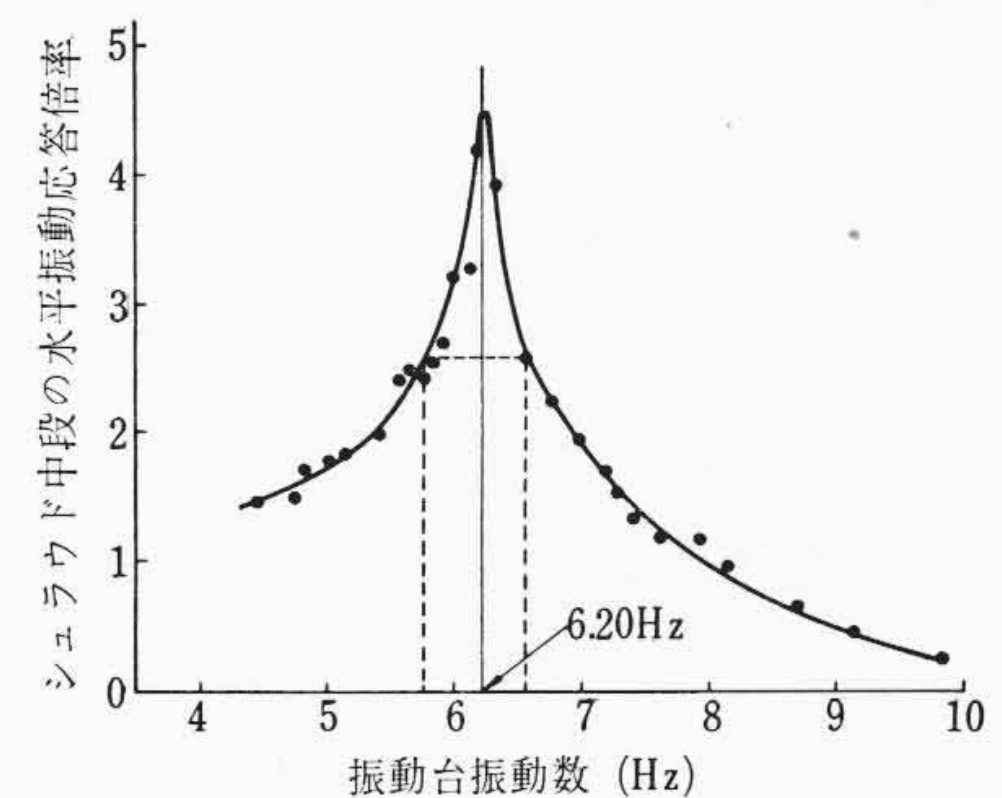


図5 シュラウドモデル水中振動実験結果

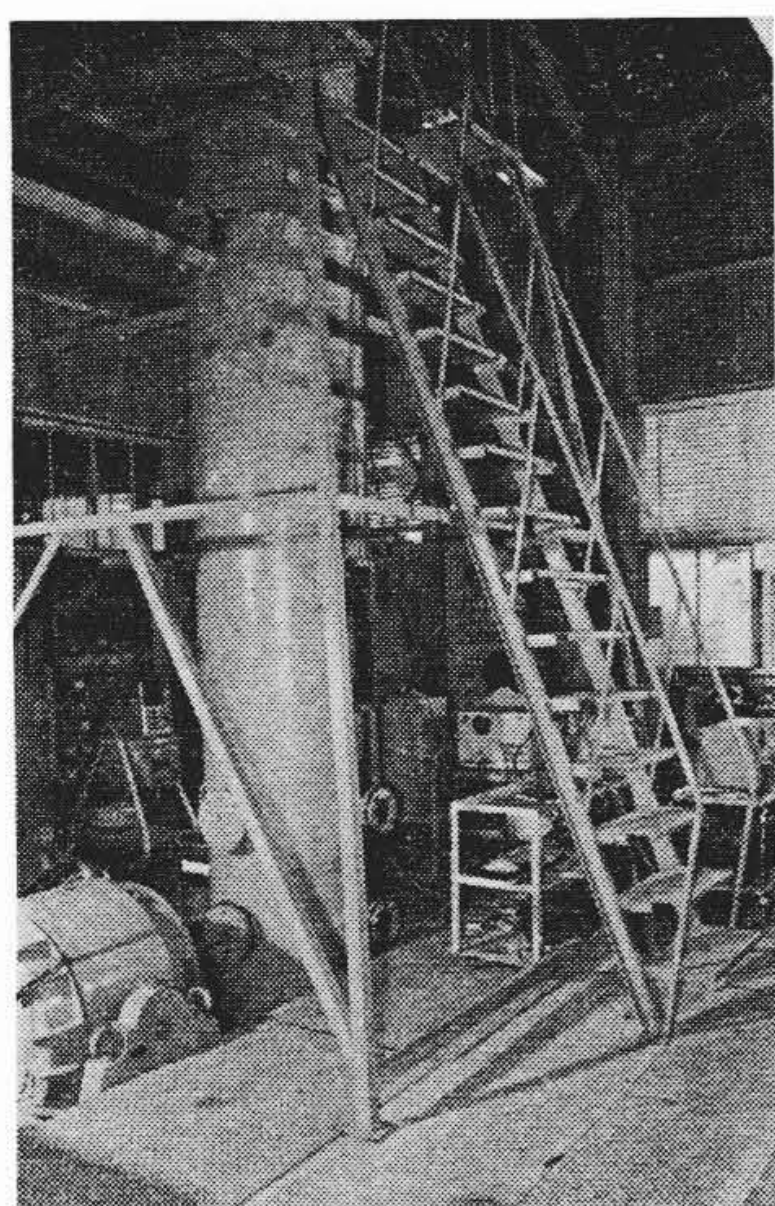
にその概要について述べる。

3.1 燃料集合体の振動実験

燃料集合体は、長さ約4 mのジルカイト製角形薄肉容器(チャンネルボックス)の中に、ジルカロイ製被覆管に UO_2 ペレットの入った燃料棒が49本そう入された構造となっている。燃料棒相互とチャンネルボックスは、7個所のスペーサによって相対的位置が保たれている。この燃料集合体が数百本集まって炉心を構成しており、下端は燃料サーポートによって受けられ、上端は、支持格子の中に4本が1組となって差し込まれ、互いにバネで押し合っている。このように、燃料集合体自体の構造および支持構造が複雑なうえに、炉心では数百本の集合体が水中で振動しているので、その振動性状は非常に複雑となっている。したがって、実機と同一構造の実物大模型の振動実験によって、燃料集合体自体の構造および支持構造の効果を実測し、水の影響については燃料集合体の小形模型の水中振動実験によって、構造的な効果と切り離して検討を加えている。

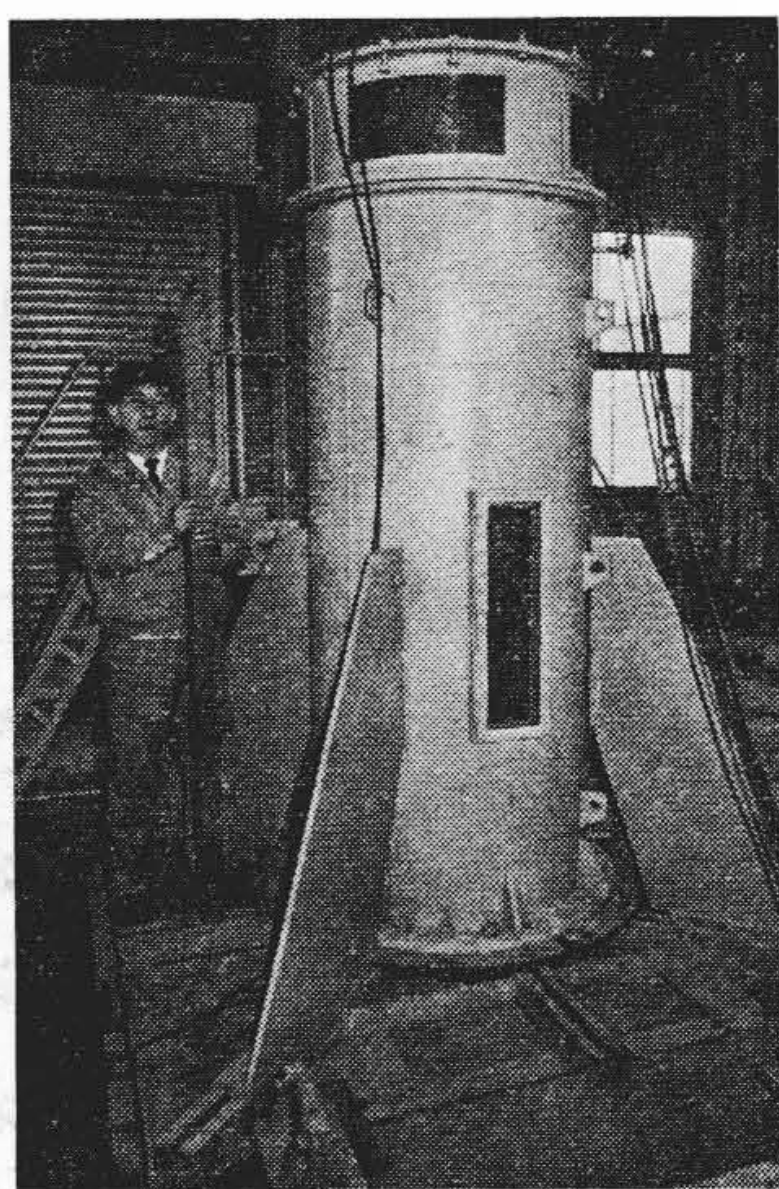
現在までにステンレス製およびジルカロイ製の2種の実物大燃料集合体を製作し、各種の測定を行なっている。図6に示す実験装置では、高さ約5 mの鋼製容器の中に燃料集合体を実機と同一構造に据え付け、燃料集合体の下端近くを加振機で加振している。測定はチャンネルボックスに張り付けた加速度計、変位計、ひずみ計で行ない、加振力と加振数動数をパラメータとして空気中および水中での共振曲線を測定している。この種の実験のほかに静的剛性測定、横置振動測定等を行なって、燃料集合体の振動特性を実測し設計資料を収集している。

実機では数百本の燃料集合体が炉心に密に配列され、水中で互いに連成して振動するため、上述した1本の燃料集合体の実験結果から、直ちに実機を推定することはできない。このため、群状の構造物の水中振動に関し、各種の実験を行なって実機の推定に努力している。ここではそれらのうちの一つとして、燃料集合体の約1/2.4



(中央の容器内に燃料集合体を据え付け)
(左下の加振機で加振している)

図6 燃料集合体実験装置



(振動台上に据付けられた容器と燃料集
合体のモデル(手に持っている)を示す)

図7 燃料モデルの実験装置

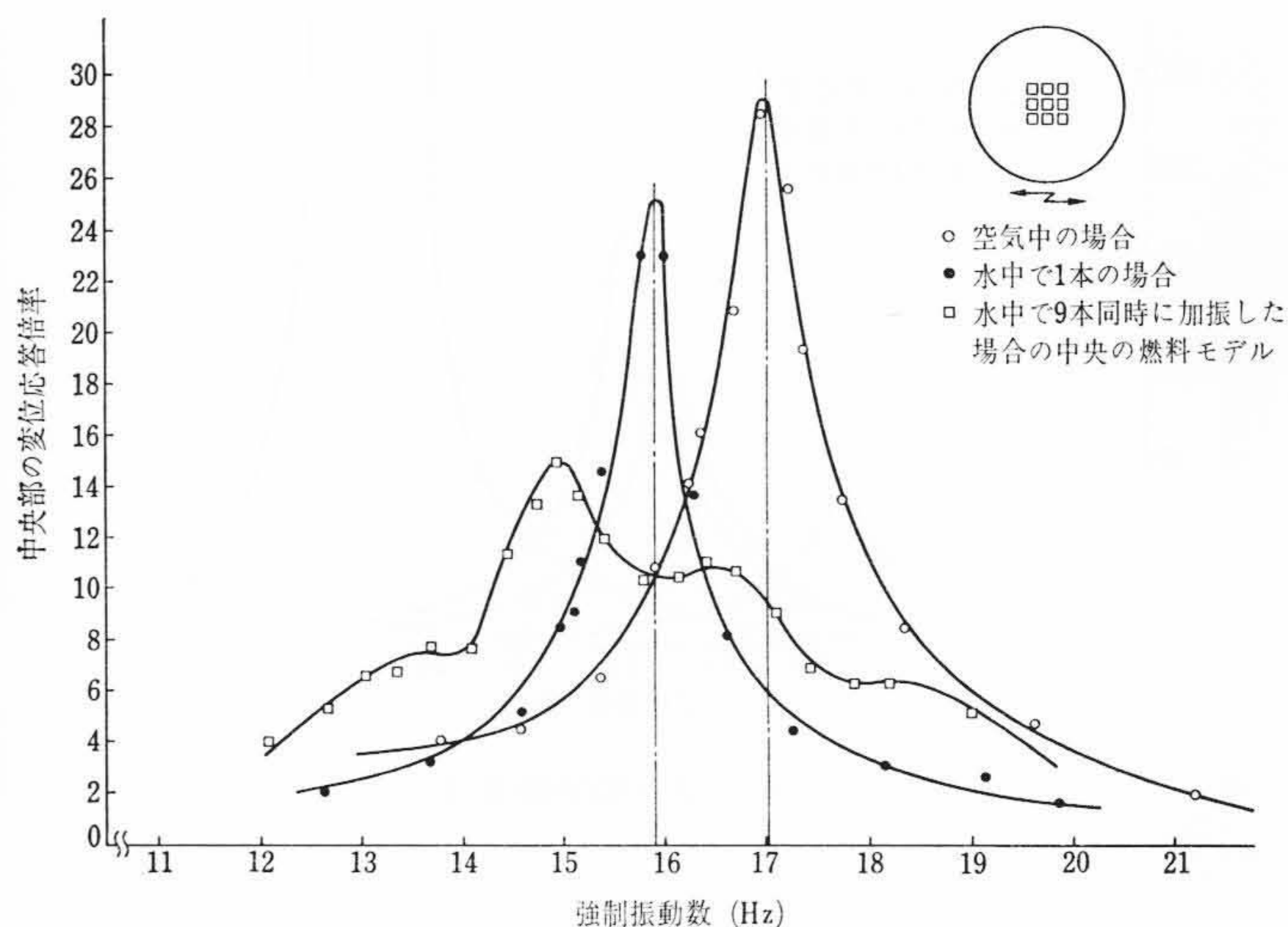


図8 燃料モデルの強制振動実験結果

の模型9本を用いて行なった実験について述べる。この実験では、燃料集合体の模型を振動台上の水のはいった容器内に1本を単独に、または9本を3×3の格子状に配列して振動させ共振曲線を測定した。共振曲線を図8に示す。図8より明らかなように、燃料集合体が群状となると、1本のみが水中にあるときに比べて、応答倍率がさらに低下している。群状の大きな一つの特徴として、共振曲線には複数の極大値が現われているが、以後単純なモデルを含む多くの実験を重ねた結果、その機構がおおよそ明らかとなり、さらに応答倍率が大きいときには群全体が同位相で振動して、燃料集合体間の衝突が生じないことなども判明してきたが、これらの詳細はさらに検討して別途報告することを予定している。

上述した一連の実験によって、燃料集合体の振動性状が明らかとなり、解析モデルの作成に役だっている。

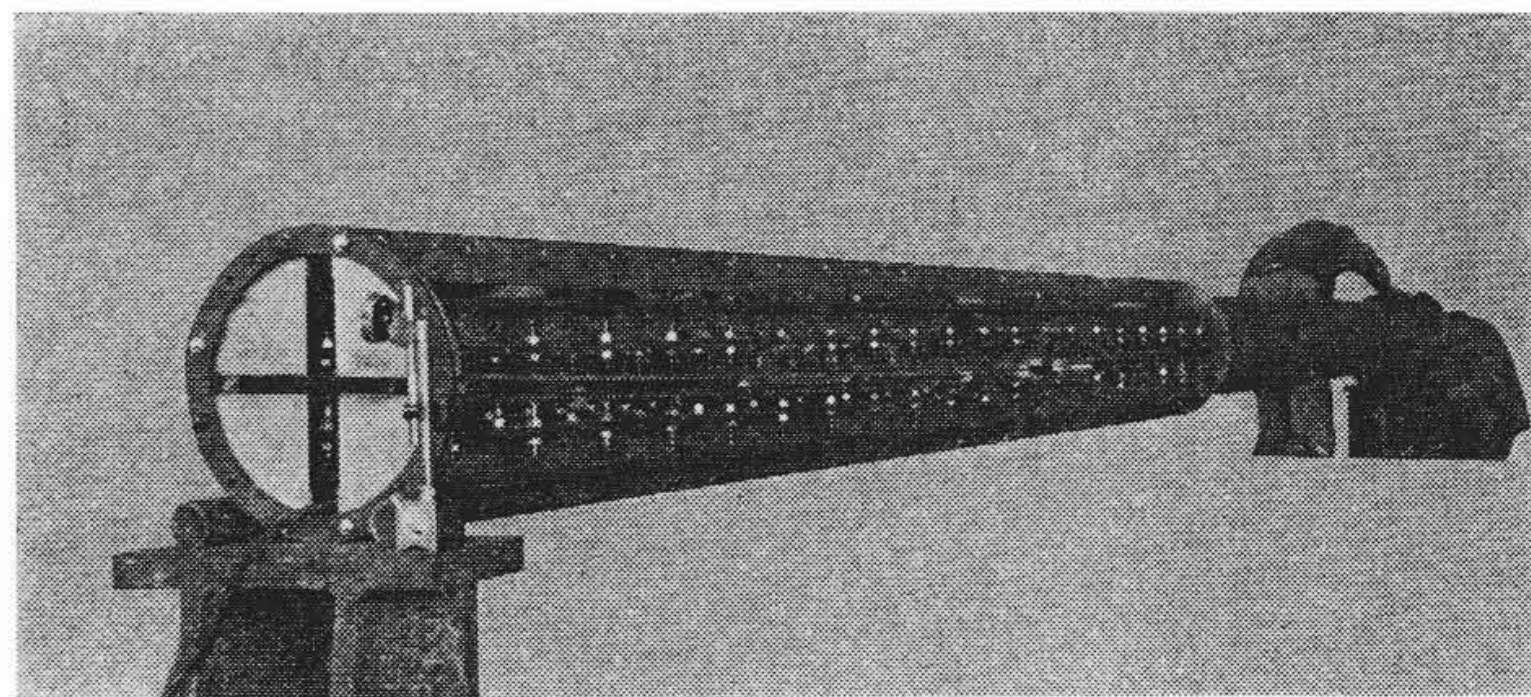
3.2 制御棒のそう入に関する実験

これまでは主として地震応答解析の精度向上を目的としてなされた実験について述べたが、図1に示すように、機器の機能が地震時にも正しく保持されることを実証するための実験も必要である。ここでは特に、地震時にも制御棒のそう入が可能であることを実証するために行なった実験について述べる。

地震時の制御棒そう入には、原子炉圧力容器下部鏡板に溶接されている制御棒駆動機構ハウジングの振動、炉内構造物をささえるシェラウドの曲がり、そして燃料の変形等が重要な因子である。制御棒そう入の可能性を実証するために実物の制御棒および制御棒駆動機構一式を組み立てて下記の実験を行なった。

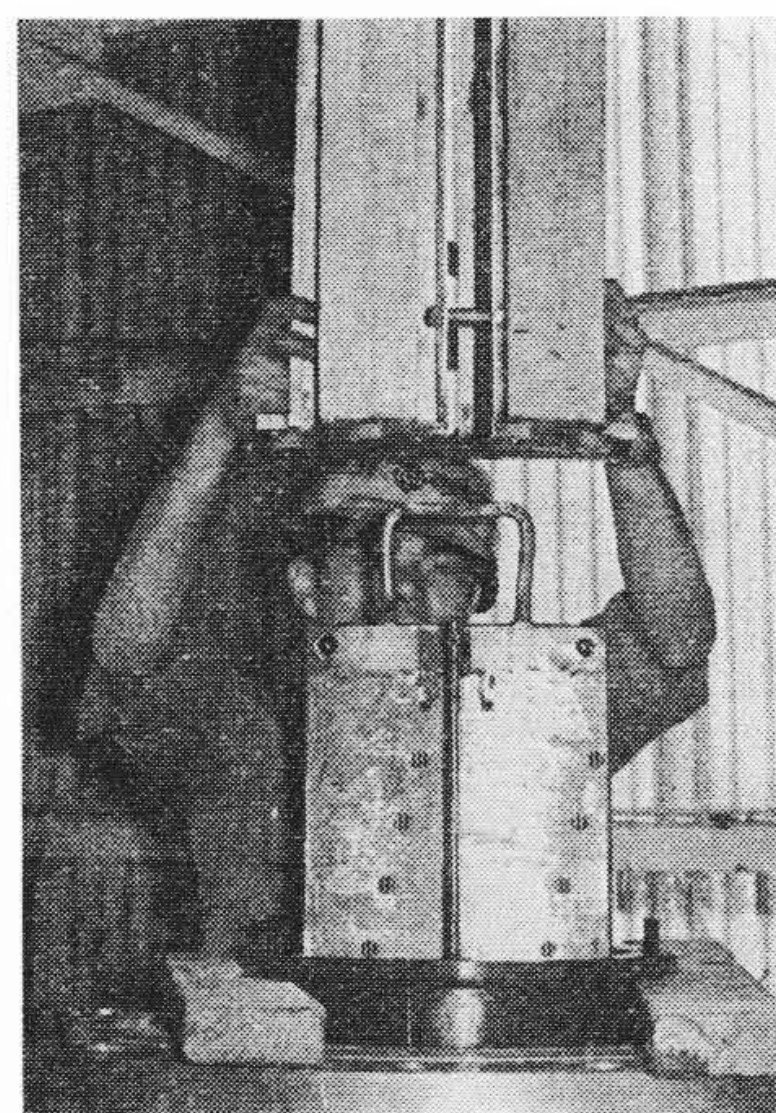
- (1) 加振機によって制御棒駆動機構ハウジングを振動させ、制御棒をそう入する。
- (2) 制御棒案内管および燃料集合体をシェラウドの変形に相当するだけ傾斜させた状態で制御棒をそう入する。
- (3) (2)の状態でも更に燃料集合体がたわんだ状態で制御棒をそう入する。燃料集合体のたわみは、主要な寸法、剛性を燃料集合体に似せた案内板を製作し、解析で得られた燃料集合体のたわみを静的に模擬している。図9、10に概略を示す。実際の燃料が振動的に変形しているのに対し、実験では静的に変形しているの、制御棒のそう入にとっては現実より非常にきびしい条件となっている。

最も過酷な(3)の実験で実測されたスクラム時間の例を図11に示す。この実験は中央点の変形量が約26mmの場合について制御棒をそう入した結果である。実測されたスクラム時間は原子炉の停



(燃料の変形を静的に模擬したガイドを示す)

図9 制御棒そう入実験



(燃料ガイドを制御棒駆動試験装置に組み立てているようすを示す)
中央に見えるのは制御棒

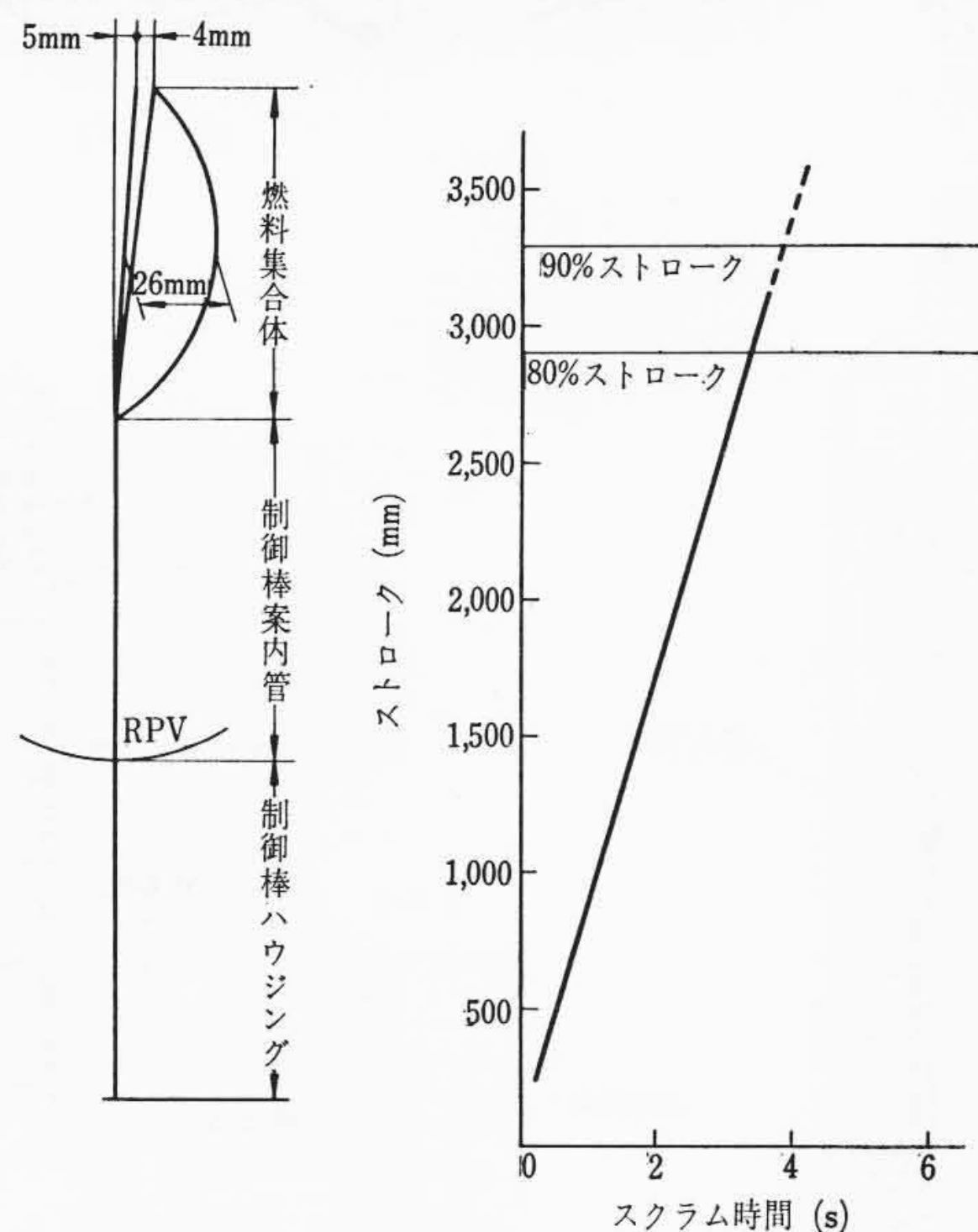
図10 制御棒そう入実験

止に対しじゅうぶんに余裕のあるもので、制御棒が完全にその機能を果たしていることがわかる。

上述のように、実際の地震時よりはるかにきびしい条件で行なわれた実験によって、制御棒のそう入が可能であることが確認され、地震時に原子炉を確実に停止できることが実証された。

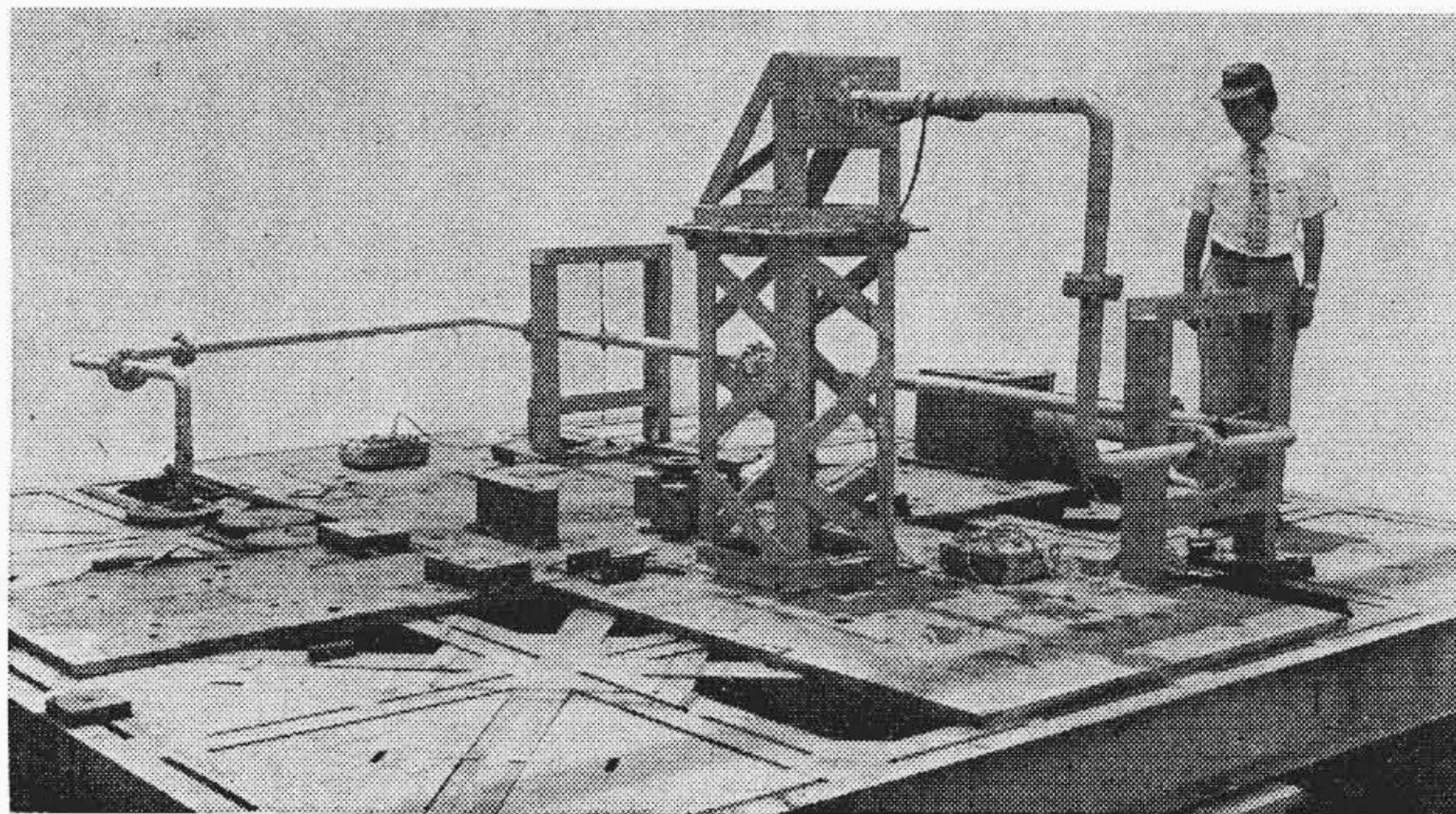
4. 配管系の応答解析に関する実験

配管系は3次的に曲がる梁(はり)にモデル化されて、動的応答解析がなされている。配管系はスナッパ、レストレント等の各種



(燃料集合体を静的にたわました場合のスクラム時間)

図 11 制御棒そう入実験



(配管モデルを振動台に据え付け、振動応答を測定している)

図 12 配管モデルの振動実験

支持機構や、バルブ等の集中重量、さらには容器、ポンプ等との接合点での弾性を含めて複雑な系として扱う必要があり、通常の機器とは異質の問題をかかえている。また、一つの原子力発電所に対し、数百ケースの配管系を解析せねばならないという特殊性がある。そこで理論的に裏付けられ、さらに代表的な形状の模型実験や実配管の実測によって妥当性が実証された計算コードを作成し、各種の形状の配管を解析して応答値の算出を行なっている。

4.1 小形模型の振動実験

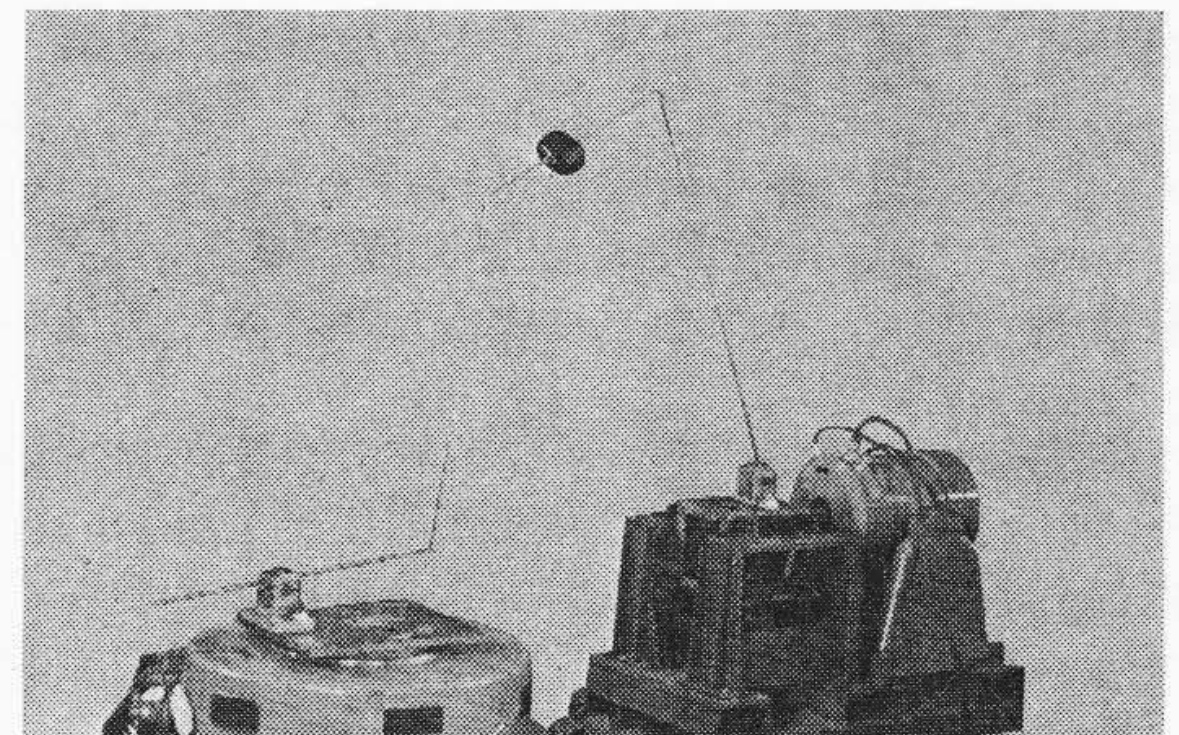
これまでに各種の小形模型による実験を行ない、計算結果との比較を行なってきた。その一例を図 12 に示す。この実験では 2 in の配管用炭素鋼鋼管 (全長 11 m) を振動台上に立体的に配置し加振している。配管の途中 2 箇所には支持点を設け、さらにバルブ等に相当する集中重量をも考慮して実機を模擬している。このモデルを振動台で加振し、測定された振動応答から固有振動数、振動モード、応力分布などをもとめ、計算値との比較を行なっている。たとえば固有振動数については表 1 のように、実測値と計算値がよく一致し計算コードの妥当性が確認された。

4.2 多入力励振を受ける梁の実験

建家の重量に比べ、はるかに軽量である通常の機器や配管の地震応答解析は、据付位置における建家の床応答スペクトル曲線を用いて解析することが普通である。ほとんどの機器や配管は、入力となる地震波形は単一であるが、建家の壁からサポートをとった機器や、

表 1 配管モデル実験固有振動数比較 (単位 Hz)

	1 次	2 次	3 次
実 測 値	10.3	11.7	13.6
計 算 値	10.0	11.4	12.7



(左右 2 台の加振機に固定されたはりを示す)
はりの中央には集中重量が付加されている

図 13 多入力励振を受けるはりの実験

2 種以上の床にまたがる配管は、各サポート点から異なった複数個の地震波形を受けて振動することになる。これは単一の地震入力を受ける応答解析に対して、多入力励振の応答解析と呼ばれている。従来の設計では安全側に考えて、複数の応答スペクトル曲線のうちから、大きな応答を示す一つの応答スペクトル曲線を用いて、通常の方法で解析し、別にサポート点の相対的移動量を安全側に考慮することが普通であるが、より正確な解析を行ない多入力励振を受ける振動系の応答を詳しく知ることが望ましいので、計算コードを作成し各種の実験による検討を行なっている。

実験例を図 13 に示す。この実験では集中的な付加重量の付いた曲がりくねった梁の両端を 2 台の加振機に固定し、両端にまったく性質の異なる 2 種の振動波形を作用させて、梁の応答を測定している。一方計算コードは、直接剛性法により剛性行列を作成し、それと慣性列から固有値を計算する手法を用いている。入力波形を微小時間刻みごとにデジタルし、時間歴の梁の応答を計算して実測値と比較した結果、両者は非常によく一致した。この計算コードを用いて、従来の解析法との比較を行ない実用的な解析法の研究を行なっている。

5. 結 言

以上、紙面の都合により深い討議をなし得なかったが、実験の数例について概要を述べた。これらの実験のほかには殻体の振動実験や制御盤の振動実験等も行ない、資料の収集に努力している。より詳細な実験の内容は、別の機会に発表することを予定している。

ここに述べたように、各種の実験的研究とそれに基づく計算コードによって、原子力発電設備の耐震設計は慎重になされている。一方、振動による破壊の形態、がたのある非線形系の扱い、各種の減衰機構のモデル化等に関しては、現在、じゅうぶんに安全側の設計となるように解析されてはいるが、より詳細な解析によってこれらを正確に解明することが望ましい。今後ますます盛んとなる原子力発電所の建設に対し、さらにいっそうの研究を続けてよりいっそうの安全性を高めるように努力していきたい。

これまでに述べたような研究の成果をあげ得たのは、監督官庁、電力会社、学界のかたがたのご指導に負うところが多く、ここに深甚の謝意を表するとともに、今後の研究の発展に対してよりいっそうのご指導をお願いするものである。

参 考 文 献

- (1) 落合, 長山: 日立評論 52, 887 (昭 45-10)