

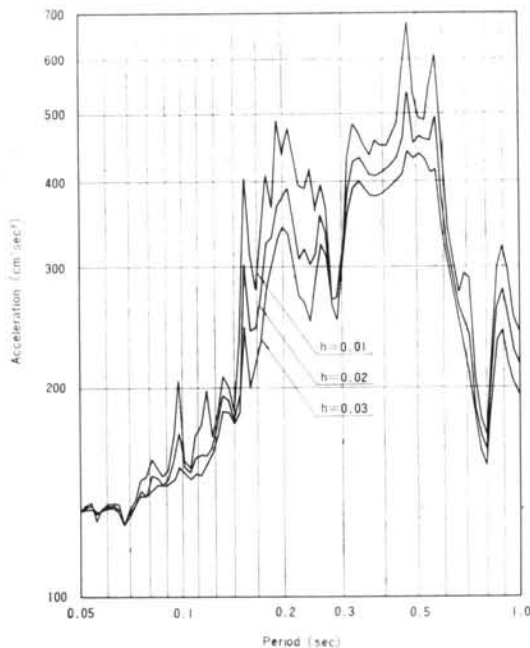
## 改良型ガス冷却炉炉心体の振動実験

山原 浩  
市之瀬 紘一  
久 富 洋

## § 1. 実験の意義

原子力構造物は、他の一般の建築物よりはるかに高い安全性が要求される。世界有数の地震国であるわが国において、なかでも地震に対する安全性の確保が極めて重要な課題になる。より高い安全性をより確実に保証せんがために、原子力に関する重要構造物はすべて動的解析をもとに設計される。

構造物を動的解析する場合の一般的手法として、構造物はそれを支持する地盤をも含めて、等価の数学的モデルに置きかえることから始まる。つづいて、与えられたさまざまな条件に対して、構造物の応答を計算する解析の方法が開発されなくてはならない。しかし今日、工学的目的に対して、上記の2段階はすでに達成され、さ



図一 炉心体支持部における床応答スペクトル計算例(エルセントロ1940 S.N. 最大加速度を0.1gに標準化)

まざまな仮定値にもとづく原子力発電所の動的解析は、一般に広く行なわれるようになった。

動的解析をより完全なものにするためには、次の段階として、構造物の動的挙動に影響するさまざまな振動要素の振動特性が明らかにされなくてはならない。原子力構造物は、従来の建築構造物とはかなり異なった素材や構造形式から成っているため、建築構造物から得られた経験的判断をそのまま適用するわけにはいかない。原子力構造物特有の各素材や構造形式については、それぞれ実験的立場から動的特性を調べていかなくてはならない。

清水建設において、昨年来 AGR (Advanced Gas-Cooled Reactor) 型原子力発電所の地震応答解析を行ってきた。その結果、炉心体で仮定した減衰定数値が、炉心体の地震応答に著しく影響することがわかった。炉心体は原子力発電所における最も重要な部分であり、その部分の応答がその部分の減衰特性に大きく支配されることがわかった。すなわち、炉心体の設計は、仮定する減衰定数値に決定的に依存することになる。(注)

しかるに、グラフィトを主材とした炉心構造の減衰特性に関する研究資料は、今日のところ残念ながら皆無に近い。そこで炉心体が一応鋼構造によって支持されているという理由と、不明なるがゆえに安全を期すという理由から、実際の炉心体の設計には、通常1%からせいぜい2%と小さな減衰値を仮定するように勧められている。もし、設計上の仮定値が実際より過小であったならば、経済設計上それだけ無駄をしていることになる。逆

注) 図一はエルセントロ1940 S.N地震を想定したとき、炉心体の支持面におけるフロー・レスポンス・スペクトル (Floor Response Spectrum) を示したものである。同図では入力地震の最大加速度を0.1gに標準化してある。炉心体の基本周期は通常0.2sec前後の値をとるであろうから、その周期領域においては減衰定数を0.01および0.03に仮定した場合、両者の最大加速度応答値に約30%の差異を生ずることになる。

に、もし減衰を実際より過大に評価していたならば、それだけ危険になる。

このような事情から、最近に至って炉心体のより正確な減衰特性の把握が要求され、またこれに対する一般の関心も大いに高まってきた。今回の実験の直接の動機もこのような社会的要求に源を発するものである。

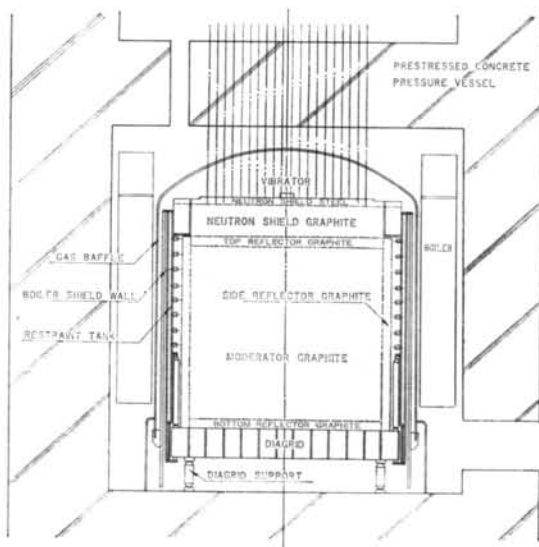
## § 2. 炉心体の概要

今回実験を行なった炉心体は改良型ガス冷却炉(Advanced Gas-Cooled Reactor)で、現在英国のハンターストン(Hunterston)に建設中のものである。実験当時、炉心体は構造的にはほぼ完成し、ガイド・チューブ取付直前という実験を行なうには最適の短い期間にあった。

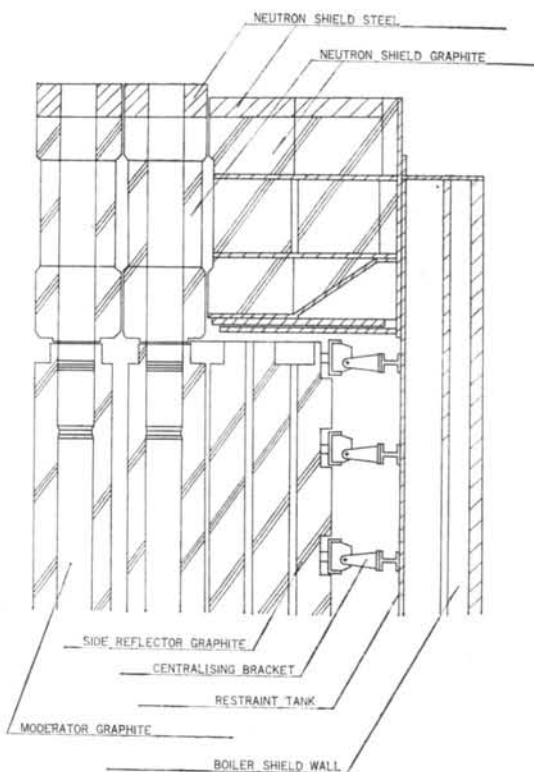
図一2は、炉心体の立面を示したものである。炉心体はコンクリートプレッシャーベッセル(PCPV)の中に位置している。直径約12m、厚さ約1.5mの鋼製のダイヤグリッドの上に12段の減速用黒鉛ブロックが積み重ねられ、これらの黒鉛ブロックはそれぞれキーで結合されている。減速用黒鉛ブロックの上にさらに3段の中性子しゃへい用黒鉛ブロックが積み重ねられている。中性子しゃへい用黒鉛ブロックの上には、厚さ15.2cmの鋼製の中性子しゃへいブロックが1段積み重ねられている。これら4段の中性子しゃへい用ブロックは4柱列を一組としてそれぞれ内側にもたれかかる構造になり、隣合うブロック間にキーはなく約2.5cmの間隙をもって自立している。炉心体の外周は鋼製のシリンダー状のレストレンタンクに囲まれ、内部の反射黒鉛ブロックとの間を図一3に示すように機械的に結合されている。また同図に示すように、外周の中性子しゃへいブロックはレストレンタンクから突出した柵の上に乗せ、内部の黒鉛ブロックとは構造的に縁が切れている。

ダイヤグリッドは、合計8のダイヤグリッドサポートによって支持されている。レストレンタンクの外側には鋼製のボイラーしゃへい体があり、さらにその外側を鋼製ドーム状のガスバップルによってつまれている。ガスバップルの外側にはボイラーが取付けられる予定になっているが、実験当時はボイラーは未だ取付けられていなかった。炉心体の直径は、レストレンタンクの部分で約12m、高さはダイヤグリッドの上の部分で約12mになっている。

実験当時黒鉛ブロックのリークテストが行なわれ、ところどころの中性子しゃへいブロックが取出されていた。そこで中性子しゃへいブロックが完全に充てんされ



図一2 炉心体立面図



図一3 炉心体周辺部構造の詳細

ている列を選ぶため、起振機を、炉心体の中心から4列だけ偏心した位置に設置した。起振機はベースプレートにボルトで取付けられ、ベースプレートは鋼製の中性子しゃへいブロックの上にボルトでアンカーされている。

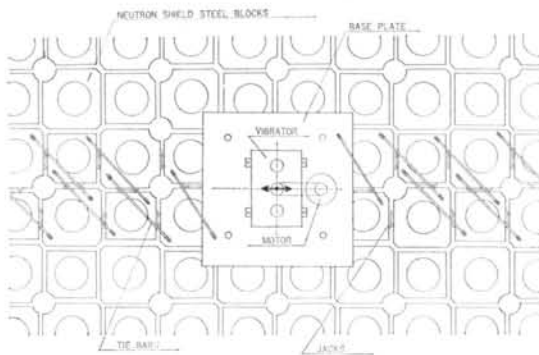


図-4 起振機の設置と中性子しゃへい鋼製ブロックの結合詳細  
起振力を効果的に炉心体全体に伝えるため、起振力の方向に沿った2列の鋼製中性子しゃへいブロックを、鋼製のくさびとタイバーを用いて機械的に結合することにした。鋼製中性子しゃへいブロックの結合の詳細を図-4に示した。

### § 3. 実験装置

#### 3.1 振動測定器

本実験を実施するのに必要な計測器はすべて日本から空輸された。抵抗線加速度計と動線輪型変位計の2系列を用意し、予備実験の結果を見ていずれか適当な系列を選ぶことにした。また起振機による炉心体の応答振幅がノイズレベルに比べて十分大きくならない場合を考慮し、起振力と応答振幅間の相互相関をとるため、起振機軸にポテンシオメータを直結し回転周期を1周期とする調和波形の電圧変化を取出すようになっている。

予備実験として人力加振による炉心体の応答を計測したところ、炉心体の基本振動数が2.5Hz 近辺にあり、さらにノイズレベルに比べて十分大きな振幅で炉心体の応答が記録されることがわかった。そこで本実験は動線輪型変位計による系列だけをを用い、すべて変位信号で記録することにした。

換振器は動線輪型で、振子の固有振動数は1.5Hz、減衰定数は0.7として設計されている。したがって約2Hzを越える振動領域において、振動速度に比例した電気信号が検出される。この電気信号は積分器によって振動変位に比例した信号に変換され、さらに増幅器によって電圧増幅される。増幅器の出力はすべてデータレコーダの磁気テープに収録される。データレコーダに対する入力信号が全振幅1V以内におさまるよう、増幅器のアッテ

ネータで調整する。

データレコーダに信号が正しく収録されていることを確認するため、また炉心体の安全管理上の要求から最大振幅を70マイクロン以内におさえることの確認のため、データレコーダに収録される信号のうち1成分を常時モニターとしてペン書きオシログラフに記録した。このほか1成分の万能フィルターを用意し、現地で常時微動波形に含まれる高振動数ノイズの除去などに用いた。

振動測定は、相対的な振幅比や位相差を求める必要性から、常時2台の換振器を用いた2系列の電気回路による同時測定記録を行なった。また換振器を除くすべての計測器はガスバフルの上に組立てられた仮設台の上に置かれ、集中計測が行なわれた。

#### 3.2 起振機

本実験に用いた起振機は不平衡質量による機械式のもので、1対の不平衡質量が互いに逆方向に回転することによって、水平の1方向の加振力を得る構造になっている。この起振機も、本実験のため日本から空輸された。

この起振機は軸に直流タコメータが直結され、その出力電圧と制御盤に設定された基準電圧が常に等しくなるようフィードバック回路を備えている。そのため、起振機の回転速度が負荷の変動にかかわらず常に一定になるよう自動的に制御される。これは、とくに共振曲線から構造物の減衰特性を求める場合に、最も重要な条件になる。この起振機の加振モーメントは、0から最大100kg・cmまで連続的に変えられるようになっている。しかし起振機自体の構造的強度から、最大加振力を1tonに制限されている。したがって、最大加振モーメント100kg・cmによって振動数約16Hzまで用いることができる。

起振機本体は、炉心体の中性子しゃへい鋼製ブロックの上に、ベースプレートを通じてアンカーされた。また起振機の制御盤は、振動計測との連携動作が円滑に行なわれるよう、ガスバフルの上の計測スペース上に置き、炉心体に設置された起振機を遠隔操作することにした。

加振モーメントは、炉心頂部の最大応答振幅が50マイクロンを越えないよう最大100kg・cm、最小10kg・cmの間を段階的に変化させて実験を行なった。

### § 4. 実験方法

#### 4.1 常時微動測定 (Test 1)

炉心体のおよその振動特性を調べるため、予備実験と

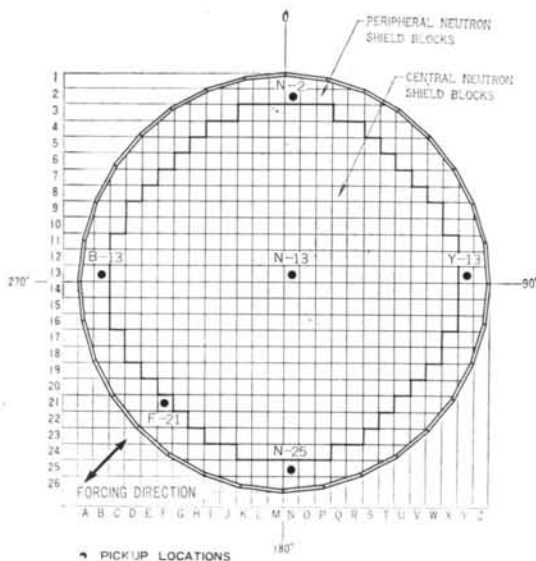


図-5 常時微動および人力加振による測定位置  
 して常時微動による振動測定を8月2日に行なった。測定位置は図-5に示すように、炉心体周辺の4点、炉心体中心の1点、それにガスパッフルの上の1点と合計6点とした。炉心体の測定位置は、頂部の中性子しゃへいブロックを横軸にAからZまで、縦軸に1から26までの座標をとり、両座標の交点の記号によって表わすことにした。

常時微動の測定は、各測定点における測定継続時間を5分から10分とし、いずれも適当な電圧に増幅した後、磁気テープに集録した。常時微動の測定に邪魔になる外乱は少なく、いずれも比較的単調な波形として十分な振幅で測定記録された。

#### 4.2 人力加振による強制振動実験 (Test 2)

常時微動の測定に続いて、人力加振による強制振動実験を同じ日に行なった。人力加振とは、測定者の1人がガスパッフル上に乗る、炉心体の固有振動数に合せて体を前後に運動し、その慣性力によって炉心体に強制力を与えようとするものである。たまたま人体の運動周期が炉心体の固有周期に近くなると、共振現象によって炉心体の応答が急に成長する。ペン書きオッシログラフに記録される波形を観察しながら、振幅がある程度大きくなった時点で運動を急停止する。

その後、派生する自由減衰振動を測定記録することによって、炉心体の固有周期と減衰特性を読取ることができる。

加振方向は図-5に示すように、炉心体について225°-45°の方向で、振動測定位置は炉心体周辺部のN-25

とF-22の2点、炉心体中心の1点およびガスパッフル中心部の1点の合計4点とした。各測定点についてそれぞれ数回ずつ試し、比較的うまくタイミングが合っけきれいな波形が得られたものについて波形の読取りを行なうことにした。

#### 4.3 起振機による強制振動実験 (Test 3)

今回計画した実験の本実験として起振機による強制振動実験を8月4日に行なった。起振機による振動実験は、外力となる起振力の振動数や大きさが非常に正確に制御されるため、先の2つの実験に比べてより高い精度のデータが得られる。本実験は中性子しゃへい鋼製ブロックの結合条件を3段階に変え、同様な方法で実験を繰返し行なった。

##### Test 3.1 40個の中性子しゃへいブロックを結合

図-6に示すように、炉心体頂部の中性子しゃへい鋼製ブロックを、中心から4列目と5列目に沿って合計40個を機械的に結合し、その中央に起振機を設置した。中性子しゃへいブロックは詳細を図-3に示すように、周辺部は中央部よりやや低く段がついている。中央部の中性子しゃへいブロックは直接減速用黒鉛ブロックの上に乗っているが、周辺部はレストレンタンクの棚の上に乗る、両者間の支持構造に大きな差異がある。そこで、まず両者間が構造的に縁が切れている状態で実験を行なった。

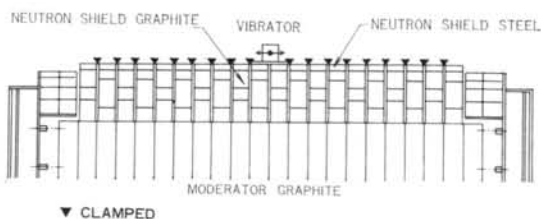


図-6 Test 3.1 における中性子しゃへい鋼製ブロックの結合状態

実験の方法は、まず周辺部の点としてB-13、中央部の点としてJ-17を選び、それぞれ換振器を配置した。起振機の加振モーメントを最大の100kg・cmとして比較的低い振動数領域における振動数-振幅特性を調べ、つづいて加振モーメントを25kg・cmに減らして比較的高い振動数領域について同様な測定を行なった。この結果約2.5Hz付近に顕著な共振現象があることがわかったので、起振機の回転数を共振振動数に正しく保持しながら基準点に対する炉心体頂部各点の振幅を2点ずつ同時測定を行なった。

### Test 3.2 44個のしゃへいブロックを結合

図-7に示すように、中性子しゃへいブロックの結合を両側ともさらに1段延長し、合計44個を機械的に結合した。この結果、中央部と周辺部の中性子しゃへいブロックは一応結合された格好になっている。

実験方法は Test 3.1 の場合とほぼ同じである。

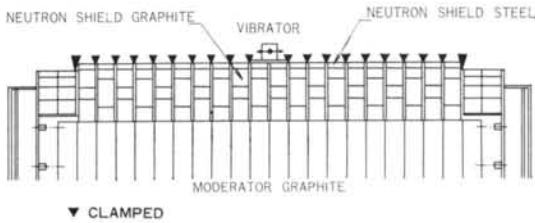


図-7 Test 3.2における中性子しゃへい鋼製ブロックの結合状態

### Test 3.3 12個の中性子しゃへいブロックを結合

中性子しゃへいブロックの結合による影響を調べるため、図-8に示すように結合列の2箇所を切離し、起振機を中心とした12ブロックによる強制振動実験を追加した。

加振モーメントを  $10\text{kg} \cdot \text{cm}$  とし、Test 3.1 の場合とほぼ同じ要領で実験を行なった。

なお、本実験における測定位置を図-9に示した。

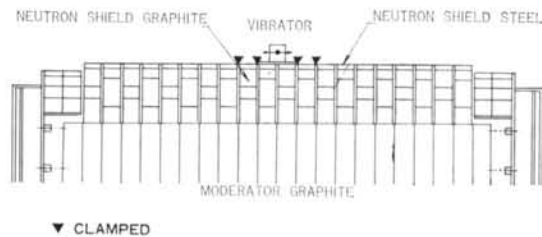


図-8 Test 3.3における中性子しゃへい鋼製ブロックの結合状態

## § 5. データの解析

### 5.1 常時微動波形の解析

磁気テープに集録された常時微動の観測波形は、鼎国後電子計算機による波形処理にかけられた。まず集録された常時微動波形を、すべて時間間隔  $0.01\text{sec}$  にて振幅の読取りを行なった。各測定波形について読取総数は  $2048$  とし、したがって読取時間幅を  $20.48\text{sec}$  とした。

周波数分析の方法として、まず自己相関係数を求め、その結果を用いてパワースペクトルを計算した。いま常

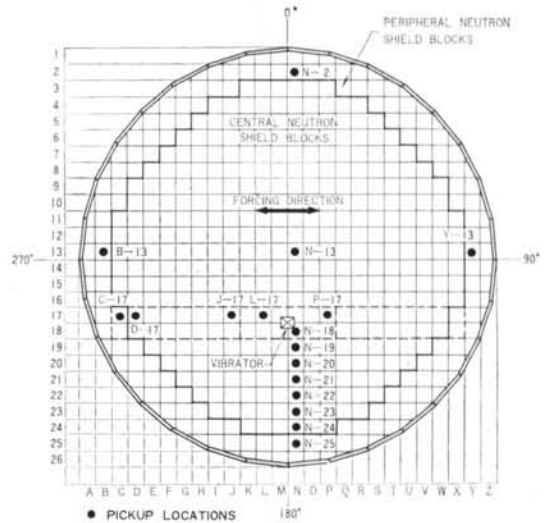


図-9 起振機による強制振動実験測定位置

時微動波形を  $f(t)$  とすると、自己相関係数  $R(\tau)$  は、

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t)f(t+\tau) dt \quad \dots(1)$$

から計算される。一方、 $R(\tau)$  とパワースペクトル  $P(\omega)$  とはフーリエ変換の対をなすという性格があるから、

$$P(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R(\tau) \cos \omega \tau d\tau \quad \dots(2)$$

$$R(\tau) = \int_0^{\infty} P(\omega) \cos \omega \tau d\omega \quad \dots(3)$$

となる。ここで  $\tau=0$  としたとき、すなわち、

$$R(0) = \int_0^{\infty} P(\omega) d\omega \quad \dots(4)$$

は、現象  $f(t)$  の平均パワーにほかならない。したがって  $R(\tau)$  を  $R(0)$  で規準化してパワースペクトルを計算すれば、

$$\frac{P(\omega)}{R(0)} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{R(\tau)}{R(0)} \cos \omega \tau d\tau \quad \dots(5)$$

となる。本論文におけるパワースペクトルは、すべて式(5)に示すように平均パワーで規準化して表わしてある。

このような方法でパワースペクトルを表わせば、

$$\int_0^{\infty} \frac{P(\omega)}{R(0)} d\omega = 1 \quad \dots(6)$$

となるから、スペクトルに囲まれる面積がいつでも1になり都合が良い。

いま、 $\Phi(\omega)$  なるパワースペクトルをもつ外乱が、1質点振動系に入力として与えられたとする。この場合の質点の応答のパワースペクトルは、

$$P(\omega) = \frac{K}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4h^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \Phi(\omega) \quad K: \text{定数} \quad \dots(7)$$

となる。いま  $\Phi(\omega)=1$  (白色雑音) とし、式(4)から質点の応答の自己定数関数  $R(\tau)$  を求めると、

$$R(\tau) = K\omega_0^4 \int_0^\infty \frac{\cos \omega\tau}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4h^2 \omega_0^2 \omega^2} d\omega \quad \dots(8)$$

となる。これを計算すると、

$$R(\tau) = \frac{K\pi\omega_0}{4h} e^{-h\omega_0\tau} \left[ \cos(\sqrt{1-h^2}\omega_0\tau) + \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \sin(\sqrt{1-h^2}\omega_0\tau) \right] \quad \dots(9)$$

となり、1 質点系の自由減衰波形と同じ形になる。したがって、もし外乱が白色雑音に近いと見なされる場合には、構造物の応答波形から近似的に構造物の減衰定数を算定することができる。

さて、実際のスペクトル解析は、ある有限の区間について行なうことになる。本実験では、スペクトル解析の周波数帯域を 1Hz から 10Hz までとした。スペクトルは横軸に振動数をとリ、振動数は対数目盛上で均等間隔になるように等比級数に分割した。また縦軸はパワースペクトルを平均パワーで規準化した量、すなわち  $P(\omega)/R(0)$  で表わしてある。

## 5.2 人力加振による自由振動波形の解析

人力加速によって得られた炉心体の応答を、近似的に炉心体の自由減衰特性を表わすものとみることが出来る。いま 1 質点系の自由振動波形は、次式によって表わされる。

$$x = \frac{x_0}{\sqrt{1-h^2}} e^{-h\omega_0\tau} \cos \sqrt{1-h^2} \omega_0 t \quad \dots(10)$$

記録された自由振動波形の全振幅を順次読取り、 $x_1, x_2, \dots, x_n$  とすると、振幅減衰比  $v$  は、

$$v = \frac{x_2}{x_1} = \frac{x_3}{x_2} + \dots + \frac{x_{n+1}}{x_n} = \dots \quad \dots(11)$$

として定義される。

$$x_n = x_1 v^{-(n-1)} \quad \dots(12)$$

であるから、両辺の対数をとって、

$$\log_{10} x_n = (\log_{10} x_1 + \log_{10} v) - n \log_{10} v \quad \dots(13)$$

となる。したがって、 $n$  と  $\log_{10} x_n$  を片対数グラフに表わすと直線関係が得られる。この場合の直線勾配を  $G$  とすれば、対数減衰率は、

$$\log_e v = -2.30G \quad \dots(14)$$

として定義される。かくして減衰定数  $h$  は、

$$h = \frac{\log_e v}{\sqrt{\pi^2 + (\log_e v)^2}} \quad \dots(15)$$

より計算される。もし  $\log_e v \ll 1$  なる場合には、

$$h \doteq \frac{\log_e v}{\pi} \quad \dots(16)$$

となる。

## 5.3 起振機による強制振動波形の解析

起振機による強制振動試験における炉心体の応答振幅を読取り、振動数との関係を作図すれば、共振曲線が得られる。実際の構造物は多くの自由度をもち、その数だけの固有振動を有するのであるが、モーダルアナリシスの原理によって、それぞれの固有振動を 1 質点系モデルに分解して考えることができる。

いま 1 質点系の強制振動の運動方程式は、

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = m r \omega^2 e^{i\omega t} \quad \dots(17)$$

に表わされる。式(18)の解は、

$$x = \frac{mr}{M} \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right\}^2 + 4h^2\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} e^{i(\omega t - \phi)} \quad \dots(18)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2h \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad \dots(19)$$

となる。

系の固有振動数  $\omega_0$  は、減衰が小さい範囲では共振曲線において振幅が極大になる振動数  $\omega_r$  (共振振動数) に等しいとして問題ない。また系の減衰定数は、共振時の振幅  $x_r$  が式(19)から  $\omega = \omega_r = \omega_0$  として、

$$x_r = \frac{mr}{M} \frac{1}{2h} \quad \dots(20)$$

となるから、系の質量さえわかっているならば簡単に計算することができる。しかし実際の炉心体の場合、1質点系に置きかえたときの等価質量を知ることは容易ではない。そこで実験で得られた共振曲線上に  $x_r/\sqrt{2}$  のところに横線を引き、共振曲線との交点を  $\omega_1, \omega_2$  とし、 $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$  とすれば、

$$h = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \quad \dots(21)$$

として減衰定数  $h$  が算定される。

## § 6. 炉心体の固有振動数と振動モード

まず、磁気テープに測定記録された常時微動の波形を 0.01sec 間隔で読取り、それらを復元し1例を図-10に示した。このような図から、周辺部の中性子しゃへいブロック上の4点(N-2, Y-13, N-25, B-13)は、ほぼ同じ周期、同じ位相、同じ振幅で動いていることが

わかる。またガスバップル上の動きも、炉心体中性子しゃへいブロック上の点とほぼ同じ周期、位相、振幅を示している。炉心体中央部(N-13)は、炉心体周辺部に比べて振幅値は2~3倍になっているが、振動周期と位相はほぼ同じになっている。

つぎに、これらの読取数値を使って自己相関関数を求め、さらにパワースペクトルを計算し1例を図-11に示

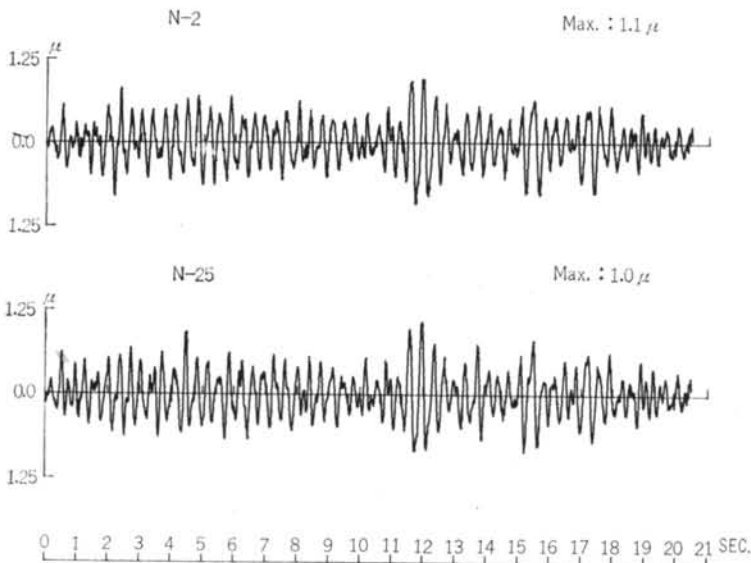


図-10 常時微動読取復元波形

した。

周辺部の中性子しゃへいブロック上の4点(N-2, Y-13, N-25, B-13)のパワースペクトルは、いずれも2.82Hzに著しく高いパワースペクトル密度を示し、他に顕著なピークは存在しない。また中央部の中性子しゃへいブロック上の点(N-13)にも、周辺部と同様に2.82Hzに著しく鋭いピークが存在する。これらの結果から、常時微動における炉心体の基本振動数は2.82Hzであり、常時微動にはその他の固有振動はほとんど含まれないことがわかる。

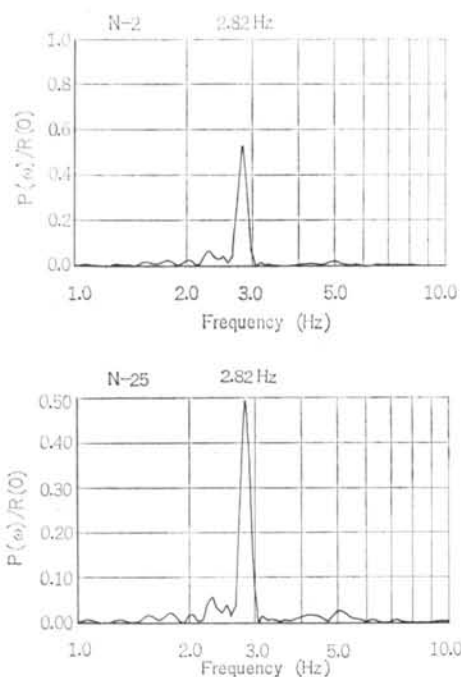


図-11 常時微動のパワースペクトル

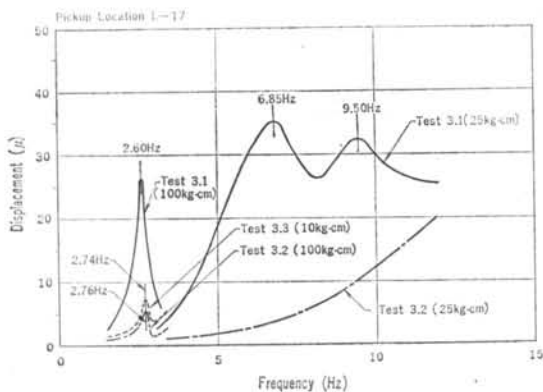


図-12 炉心体の振動数一変位振幅特性

つぎに、起振機による強制振動試験における振動数一変位振幅特性を巨視的に図-12に示した。各共振振動数付近についての詳細は§7.に示してあるから参照されたい。Test 3.1とTest 3.2は約3.5Hzを境にして低振動数領域を100kg・cm、高振動数領域は25kg・cmと加振モーメントを変化させているので、その部分で不連続な曲線になっている。

起振機による強制振動試験の結果では、炉心体の基本振動数はTest 3.1の場合は2.60Hz、Test 3.2の場合は2.76Hz、Test 3.3の場合は2.74Hzとなり、中性子しゃへいブロックの拘束による境界条件の差が、微妙に影響しているとも見れる。常時微動における2.82Hzよりいずれも低いのは、応答振幅が常時微動時に比べて著しく大きくなり炉心構造体の剛性の非線形効果が現われていると考えられる。Test 3.1の場合だけが他の2つの場合より基本振動数がやや低いのも、振動値が約5倍もあるところから、やはりそのような非線形効果によって説明できるかもしれない。なお、炉心体の基本振動数に関する実験結果を要約すると表-1のようになる。

実験番号	実験方法	測定位置	最大振幅 $\mu$	基本振動数 Hz
Test 1	常時微動測定	N-2	1.0	2.82
		N-25	1.1	2.82
		B-13	0.9	2.82
		Y-13	1.1	2.82
		N-13	2.6	2.82
Test 3.1	起振機による 強制振動試験	L-17	26.3	2.60
Test 3.2		L-17	5.6	2.76
Test 3.3		L-17	7.3	2.74

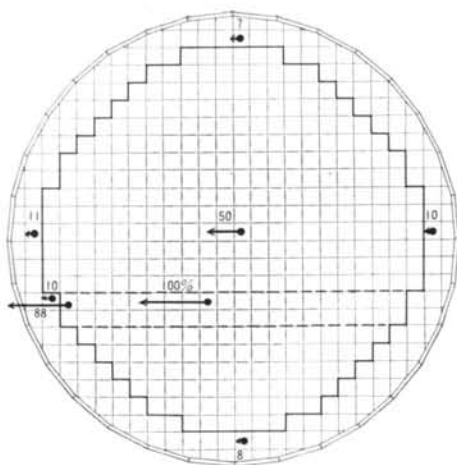
表-1 炉心体の基本振動数

つぎに、共振時の炉心体頂部の振動モードを調べてみた。起振機の回転数をそれぞれの共振振動数に保持し、起振機の近くの点(L-17)を基準点とし、各点との同時測定を行なった。各点の動きはほぼ完全に同位相になっているが、振幅値にはかなり差異がある。

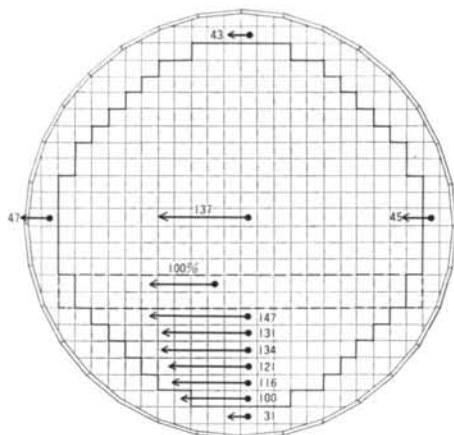
図-13はTest 3.1について基準点の振幅を100%とし、各点の振幅分布を矢印の長さによって表わしたものである。加振点付近が最も大きく、結合された中性子ブロック列の端部で80%、炉心体中央部で50%になっている。周辺部中性子しゃへいブロックは、本実験では中央部のしゃへいブロックに結合されていないので、振幅値は7~11%とかなり小さくなっている。

図-14はTest 3.2の共振時の振幅分布を示したものである。Test 3.1の場合との違いは、起振機を設置し

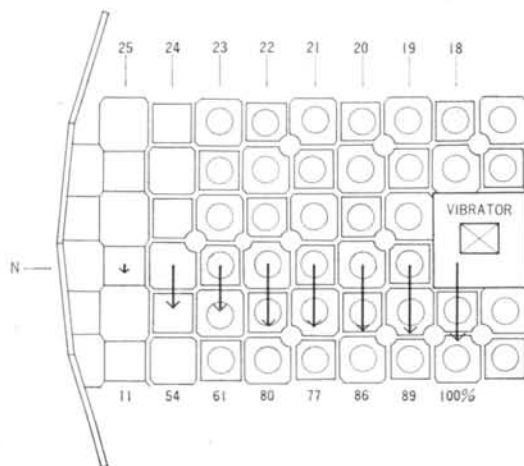




図一13 共振時における炉心体頂部の振幅分布 (Test 3.1)



図一14 共振時における炉心体頂部の振幅分布 (Test 3.2)



図一15 共振時における炉心体頂部の振幅分布 (Test 3.3)

た2列に沿って周辺部と中央部の中性子しゃへいブロックを結合しただけであるが、共振時の振動モードはかなり変わっていることがわかる。まずその結合によって、当然予想されることではあるが、周辺部のしゃへいブロックの振幅が基準点に対し31~47%とかなり大きくなっている。また、結合されない中央部しゃへいブロックの各点の振幅は、いずれも基準点より大きくなっている。起振機の位置が中心線に沿った半径方向の振幅分布をみると、加振点から離れるにつれて振幅が次第に小さくなる傾向がある。

図一15は Test 3.3 における共振時の振幅分布を示したものである。同図から、加振点から半径方向に離れるにつれて振幅が次第に小さくなっていく傾向がわかる。同図の断面図でもわかるように、周辺部の中性子しゃへいブロック上の点(N-25)は中央部と支持方式が異なるので、その境界において振幅が急激に小さくなっている。

## § 7. 炉心体の減衰特性

### 7.1 常時微動のスペクトル解析による推定

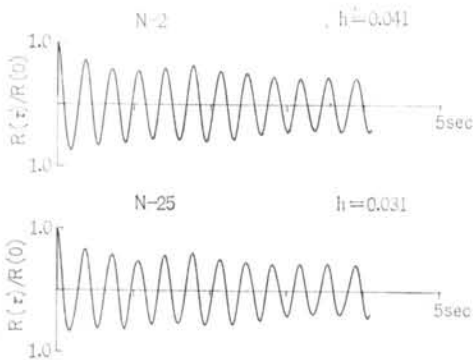
各点で測定記録された常時微動波形から式(1)により自己相関関数を求め、最初の数波について全振幅値をプロットした相関直線の勾配から式(4)によって減衰定数を求めると表一2のようになる。

同表に示すように、減衰定数値の大部分は、0.026~0.041範囲に分布している。ただN-25において0.068というたびぬけて大きな値が観測されているが、同地点において別の時刻に測った値が0.031であり、前者は観測時に何か異常があったものと判断される。したがって、N-25における0.068の値を除いて他の6点の平均値を求めると0.032になる。

このように、常時微動観測から推定される炉心体の基

測定位置	減衰定数	備 考
N-2	0.041	周 辺 部
N-25	0.031	同 上
B-13	0.037	同 上
Y-13	0.028	同 上
N-25	0.068	同 上
F-21	0.028	同 上
N-13	0.026	炉心の中心部
平均	0.032	N-25の0.068を除く

表一2 常時微動のスペクトル解析から求めた減衰定数



図—16 常時微動の自己相関関数

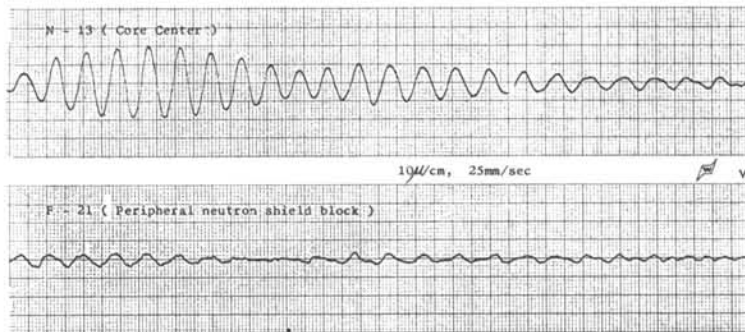
本周期における減衰定数は  $h=0.032$  ということになる。しかし、常時微動観測から得られる減衰定数値は表—3からもわかるようにばらつきも大きく、もともと信ぴょう性が低いものであるから、一応の参考値として理解していただきたい。なお、常時微動の自己相関関数の1例を図—16に示した。

### 7.2 人力加振による自由振動波形から得られる減衰定数

各点で測定記録された人力加振による強制・自由振動波形のうち、1例を図—17に示す。自由振動部分の全振幅を読み取り、相関直線の勾配から減衰定数を算定すると表—3のようになる。

測定位置	減衰定数	備考
N-13	0.030 0.032	炉心体中心部
平均	0.031	
ガスバップル	0.037 0.039	ガスバップルの中心部
平均	0.038	

表—3 人力加振による自由振動波形から求めた減衰定数



図—17 人力加振による炉心体の応答波形の記録例

同表に示すように、炉心体の基本周期における減衰定数値は、炉心体中心部で平均値0.031、ガスバップル上で平均値0.038となり、後者の方がやや大きくなっている。なお人力加振による炉心体の最大応答振幅は、約10  $\mu$ であった。

一般に減衰定数の評価は、常時微動観測によるよりもこの種的人力加振による場合の方が信ぴょう性が高い。

### 7.3 起振機の強制振動試験から得られる減衰定数

まず、起振機による強制振動試験から得られた振動数—振幅特性を図—18～図—20に示した。これらの振動数—振幅特性から炉心体の基本周期における減衰定数を式(1)によって算定すると表—4のようになる。同表に示すように、測定された減衰定数値は、Test 3.1の場合には0.035とやや大きく、Test 3.2とTest 3.3の場合にはいずれも0.031となっている。これは拘束条件（中性子しゃへいブロックの結合条件）の違いによる影響よりも振幅値の違いに起因すると考えた方がよさそうである。炉心体も通常の建築物と同じように、振幅値が大きくなるにつれて共振振動数が低下し、同時に減衰定数が増加する傾向をもっていると考えられる。

今回行った3方法の実験のうち、減衰値の評価に関しては本実験結果が最も信ぴょう性が高い。これらの値が他の2方法の実験結果とほぼ一致していることを考え合せても、本実験結果をもって炉心体の基本周期における減衰定数値と判断してよい。

実験番号	測定位置	共振振動数	最大振幅	減衰定数
Test 3.1	L-17	2.60Hz	26.2 $\mu$	0.035
Test 3.2	L-17	2.76Hz	5.6 $\mu$	0.031
Test 3.3	N-18	2.74Hz	7.3 $\mu$	0.031

表—4 起振機による強制振動試験から求めた減衰定数

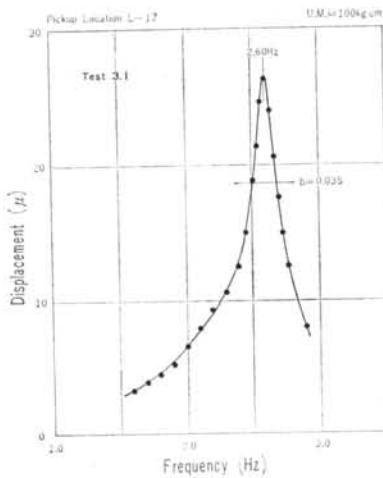


図-18 Test 3.1における振動数-振幅特性

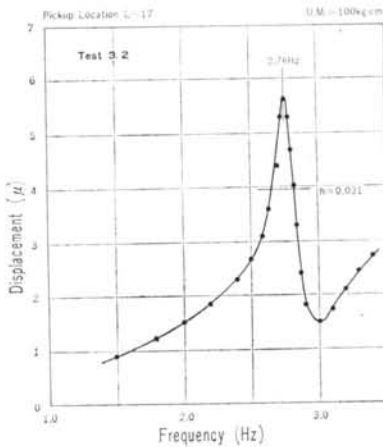


図-19 Test 3.2における振動数-振幅特性

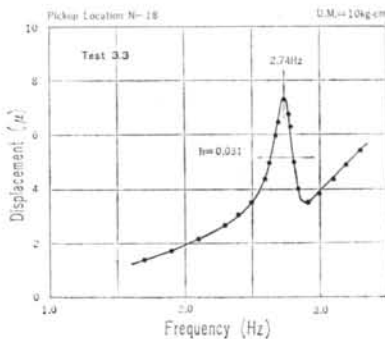


図-20 Test 3.3における振動数-振幅特性

## § 8. 結論

本実験の究極の目的は、Hunterston B に建設中の炉心体の減衰定数を知ることであった。念のため3種の方法を試み、いずれも目的をほぼ達成することができた。炉心体の基本振動数と減衰定数について、実験結果を表-5に要約した。

実験番号	実験方法	測定位置	基本振動数(Hz)	最大振幅(μ)	減衰定数
Test 1	常時微動の測定	N-2	2.82	1.0	0.041
		N-25	2.82	1.1	0.031
		B-13	2.82	0.9	0.068
		Y-13	2.82	1.1	0.037
		F-21	2.82	1.0	0.028
		N-13	2.82	2.6	0.026
Test 2	人力加振による自由振動	N-13		10	0.030
		カスバツフル		6	0.032
					0.037
Test 3.1	起振機による強制振動	L-17	2.60	26.2	0.035
Test 3.2		L-17	2.76	5.6	0.031
Test 3.3		N-18	2.74	7.3	0.031

表-5 実験結果の要約

本実験を通じて明かにされた事項を要約するとつぎのようになる。

(1) 炉心体の基本振動数は、炉心体の変位振幅に依存する傾向があり、

最大振幅 約  $1\mu$  (常時微動) のとき  $f_n = 2.82\text{Hz}$

最大振幅 約  $26\mu$  (強制振動) のとき  $f_n = 2.62\text{Hz}$

になる。

(2) 炉心体の基本振動数における減衰定数も変位振幅に依存する傾向があり、

最大振幅  $5.6 \sim 7.3\mu$  のとき  $h = 0.031$

最大振幅  $26.2\mu$  のとき  $h = 0.035$

となる。

(3) 中性子しゃへいブロックの結合条件の違いによる効果は、炉心体の振動モードや高い振動数領域における挙動にはかなり影響を与えるが、炉心体の基本振動における振動数や減衰定数に関する限りほとんど影響しない。

以上の結果より、Hunterston B 炉心体に関する限り、炉心体の基本振動における減衰定数は最小値で0.031であり、変位振幅の増大にともなって減衰定数値も増加す

る傾向にあるといえる。

#### 謝 辞

本実験は英国 TNPG 社と富士電機の協力によって行なわれました。

本実験の計画および運営全般にわたり、J. V. Parker (TNPG) の努力がありました。現地における実験には、E. G. Willis (TNPG), W. Blairs (TNPG), D. Taylor (TNPG), R. Duncan (TNPG) の積極的な協力があり

ました。また現地測定には早川均氏（富士電機）の協力がありました。

さらに、R. W. Taylor (SSEB) の理解と好意により、所期の目的以上の成果を得ることができました。本実験を実施するに至るまでには、J. O. Joss (TNPG) をはじめ富士電機の多くの方々の努力がありました。

本実験が一応の成果を挙げることができたのも、ひとえに上記諸氏の努力と協力のお陰であり、謹んで謝意を表す次第であります。