U. D. C. 62-752 : [621. 311. 25 : 621. 039

原子力発電設備の耐震設計

Aseismatic Design of Equipments for Nuclear Power Station

落合兼寛* 長山勉*
Kanehiro Ochiai Tsutomu Nagayama

要　　旨

原子力発電設備の設計に際しては，安全性に対するじゅうぶんな考慮が払われねばならないが，各種の自然災害のうちでも，非常に大きなエネルギーを有する地震に対しては，特に慎重な設計態度が要求されている。この問題に関し，機器製作者の立場から，設計法の確立，計算コードの開発および，設計資料の収集に努力を重ねてきたが，本文では原子力発電設備の耐震設計の手順と，動的解析方法について概要を述べる。

1. 緒　　言

原子力発電の発達に伴い，大容量の原子力発電所が多数設置，計画されているが，万一の事故に際しても高放射性物質が漏れることのないように，安全性を確保できる設計が必要とされている。

原子力発電所において想定される自然災害のうちで地震は，環太平洋地震帯に属する日本の特殊性から考えて，地震発生の確率も高く，規模も大きいものが想定されるので，日本の原子力発電所では，耐震設計が重要であり，入念な設計，高度の解析技術が必要となっている。設計法も，大形電子計算機の発達によって，従来の静的設計法から，構造物の地震に対する応答を考慮する動的設計法に移行し，その技術は日進月歩の状態にある。日立製作所においても，早くからこの方面の研究を重ね，地震応答計算コードの開発，耐震設計法の確立に努力してきた。

ここでは，耐震設計法の概要と，現在広く行なわれている，動的地震応答解析手法について述べる。

2. 耐震設計概要

原子力発電所の耐震設計は，原子炉建物から，ポンプなどの小物機器，水を満たしたタンクまで，広い対象を有するが，全体の手順は図1のフローチャートに沿って行なわれる。

2.1　耐震設計の前提条件

原子力発電所の設置場所が決定すると，地震計を設置して弱震，強震の測定を行なうと同時に，地震歴の調査をし，設計地震波形，設計加速度を決定する。また地質調査，弾性波試験などを行ない，地盤定数を決定する。これらは原子力発電設備耐震設計の基本と

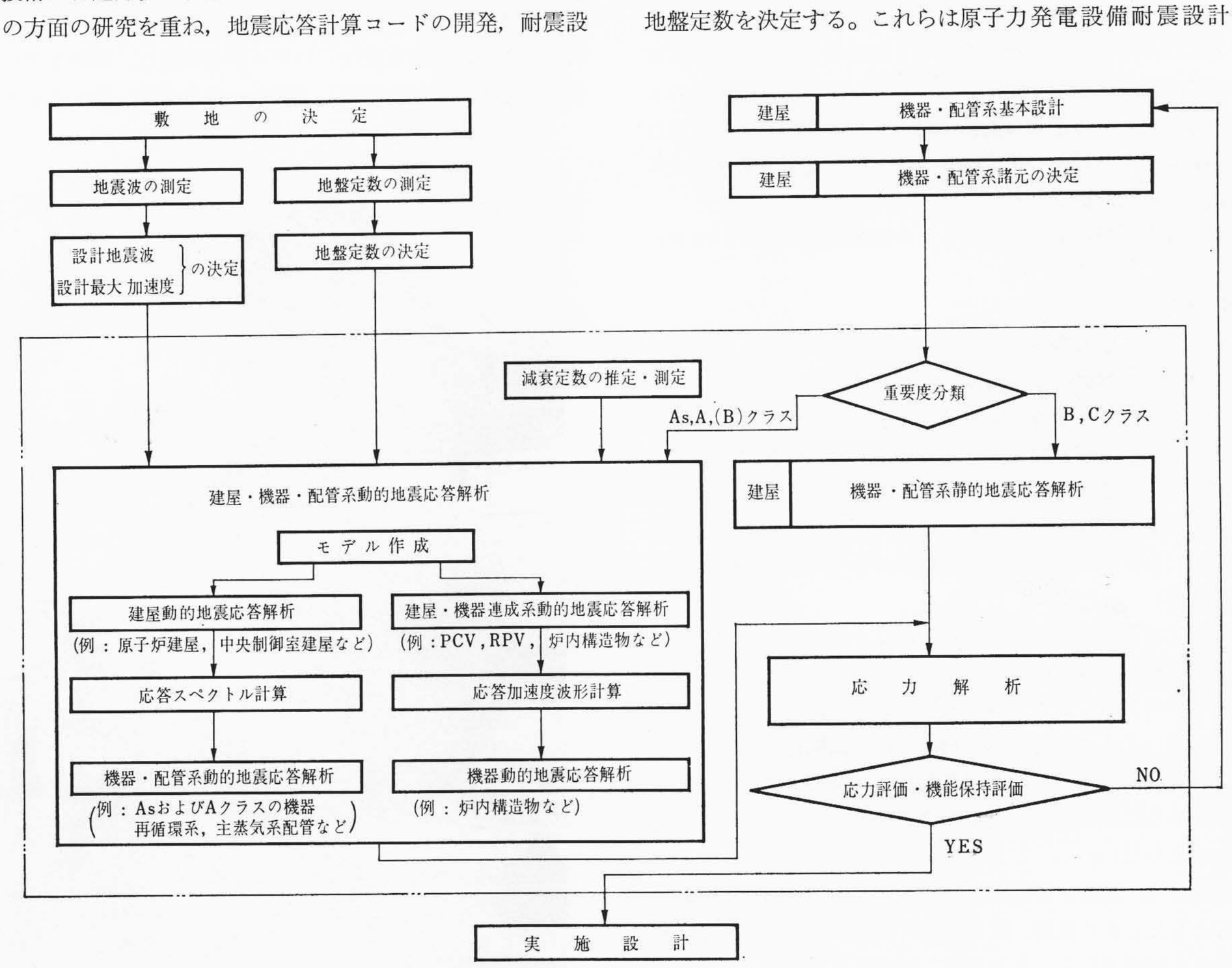

図1　耐震設計フローチャート

* 日立製作所日立工場

なるもので慎重に決定される。

一方，建物や機器は基本設計によって諸元が決定され，基本的な設計が行なわれる。動的解析を必要とするものは，調査，実測により減衰定数の決定を行ない，解析方法を検討する。これら一連の決定によって，各設備の耐震設計が行なわれ，詳細設計に反映される。

2.2　設計の方針と重要度分類

原子力発電設備の耐震設計では，地震動に対する経験的見地から，一次固有振動数が20 cps以上となることを一応の目安として設計するが，熱応力，そのほかの事情からこのように設計できないものは，できる限り共振領域を避け，詳細な解析を行なって，地震荷重を推定し，許容値以内に収まるように設計する。たとえば，原子炉内部構造物のように，地震波が地盤，原子炉建物，圧力容器など多くの支持構造物を通してはいってくるものは，すべての共振領域を避けることが，ほとんど不可能となるので，詳細な動的地震応答解析が必要となる。

しかしながら，すべての設備を詳細に解析して設計することは不経済であるので，重要度や内蔵する放射性物質の量によってAs, A, B, Cの4階級にクラス分けし，さらに各クラスに属する設備を機器と構築物に分け，それらに応じた設計震度と解析方法を用いて設計する方法が採られている。

Aクラスには，その機能の喪失が原子炉事故をひき起こす設備や，周辺公衆の災害を防止するために必要な設備が属し，詳細な動的解析を行ない，大きな震度で設計されるが，その中でも炉停止系や格納容器のように安全対策上特に緊要な施設は，Asクラスとして，Aクラスの施設を設計する震度の約1.5倍の震度に対しても機能を保持できることとし，仮りにAクラスの施設が破壊しても炉は確実に停止することができ，安全性をそこなわないように考慮されている。

Bクラスには，高放射性物質に関係する設備のうちで，その事故が周辺公衆に放射能災害を与えないものが属し，静的に設計されるが，共振のおそれのある重要な設備は動的にも考慮されて設計される。As, A, Bクラス以外の施設はCクラスに属し，建築基準法に定める方法によって設計される。

このようにして設備の重要度に応じた合理的な耐震設計がなされている。

2.3　静　的　設　計

地震に対する動的応答解析の手法が用いられる以前は，経験的に推定された応答加速度による，静的な地震荷重によって耐震設計が行なわれてきた。今日のように，動的応答解析が可能になっても，その容易さと経験に基づく確実さとから，静的設計が併用されている。また，すべての設備の動的応答解析を行なうことは，膨大な計算時間と費用を必要とするので，B, Cクラスに属すを施設で共振のおそれのないものについては動的応答解析を省略し，静的な震度で設計している。

構築物に対する震度について述べると，Cクラスの構築物は，建築基準法第88条で定める水平震度を用いて設計されるが，Aクラスの構築物はその約3倍，Bクラスの構築物はその約1.5倍の震度で設計される。さらにAクラスの構築物については据付位置の水平震度の約1/2の垂直震度も同時に考慮される。またAsクラスの構築物に対してはさらにAクラスの震度の約1.5倍の震度でもその機能を保持せねばならない。

機器，配管系は，通常，支持構築物のクラスを，機器，配管のクラスと同じとしたときの機器，配管の据付位置の設計震度（支持構築物が動的にも解析されているときは，大きいほうの値）の1,2倍の静的設計震度で設計されるが，機器に機器，配管も載せる場合や，共振領域に属する場合には，それらを考慮して設計震度が決定されている。

このようにして決定された設計震度と質量分布から静的な地震荷重条件を決定し構造解析を行なって，応力的に評価している。

2.4　動　的　設　計

大容量の電子計算機の発達により，従来は不可能であった構造物の動的地震応答解析が可能になり，種々の解析方法が提案され，設計に反映されている。動的解析とは，構造物の固有振動数や振動モードなどの振動性状を考慮し，発電所に想定される設計地震に対する動的な応答を解析することであるが，横置きのポンプのように1質点とバネの解析モデルを考えて固有振動数を求め，床応答スペクトル線図から応答加速度を求める簡単な解析から，原子炉内部構造物のように，複雑な多質点系または分布定数系の解析モデルを考え，時刻歴の応答値（加速度，速度，変位，部材内力，反力）を求める複雑な解析までを含んでいる。

応答値解析の手法は，解析モデルの作り方によって剛性の計算法，応答値の算出法などに種々と考えられているが，電子計算機の容量とも関係して一長一短である。たとえば，比較的小さな解析モデルで解析できる建物，機器の解析では，集中定数系の質点とはりからなるモデルを考え，変位法などを用いて剛性マトリクスを作成し，固有値問題を解いて振動性状を求め，時刻歴のモーダル・アナリシスや直接に連立常微分方程式を数値解する方法が用いられる。また，大規模な配管などの解析では，分布定数系のモデルを考え，動的な遷移行列法を用いて振動性状を求め，床応答スペクトル曲線から応答値を算出する方法が用いられている。

このほかに特殊な解析として，殻体の振動解析を行なう計算コードや，多入力の応答解析を行なう計算コードがある。

動的な応答解析では，対象となる設備のモデル化と減衰定数などのデータが解析の精度を決定する。日立製作所では，各種の振動実験を行ない，減衰定数などのデータを蓄積し，解析モデルの検討を行ない理論の精度を確認してきた。たとえば，図2に示す格納容器

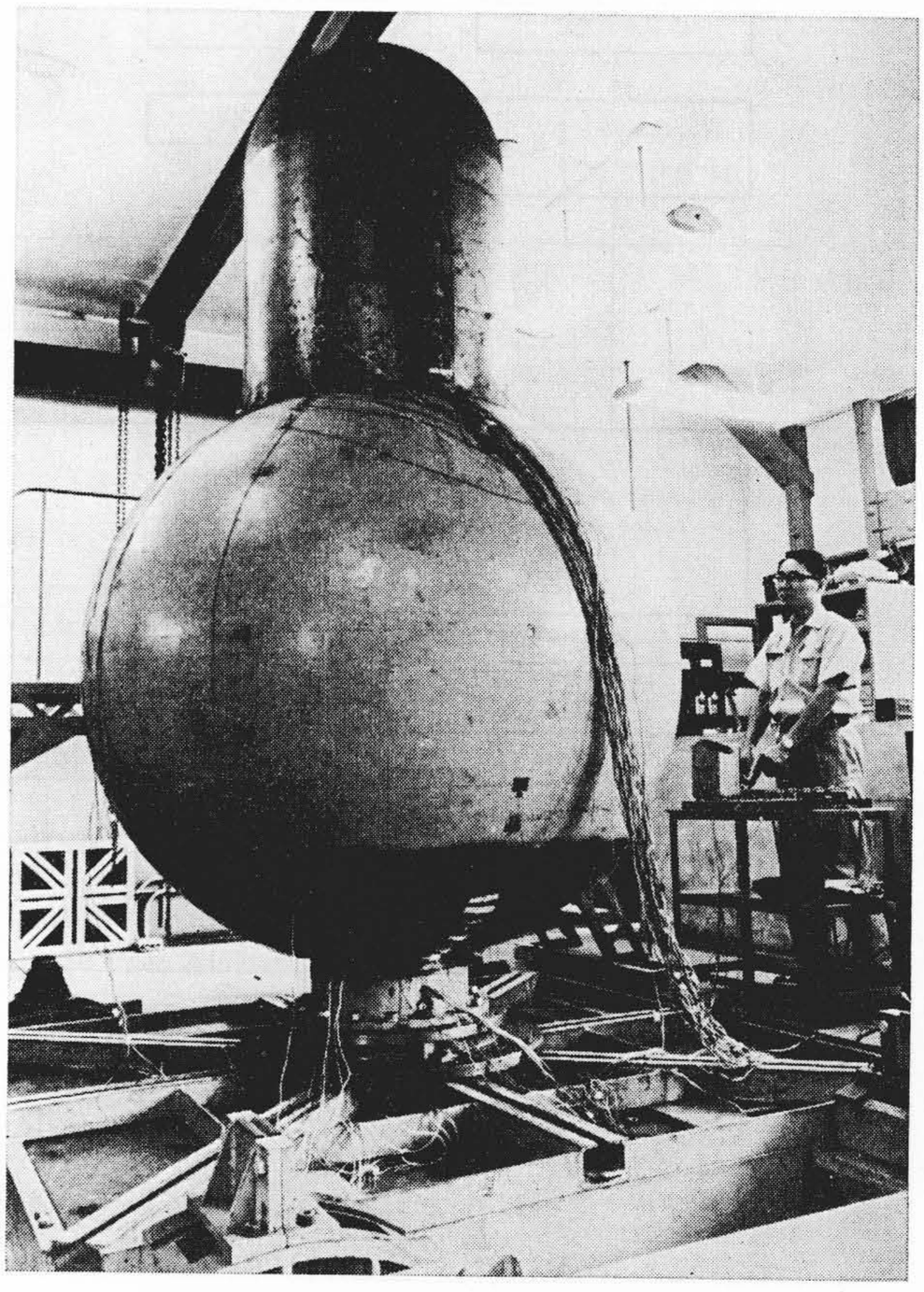

図2　殻体振動実験

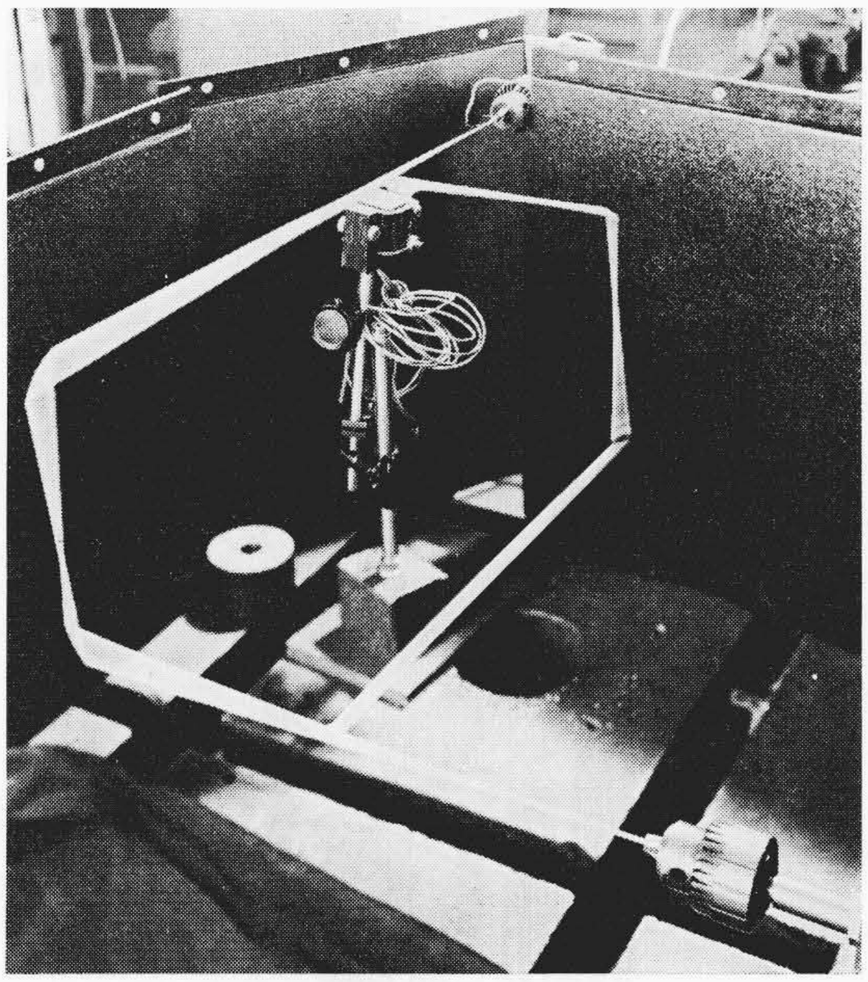

図3　配管振動実験

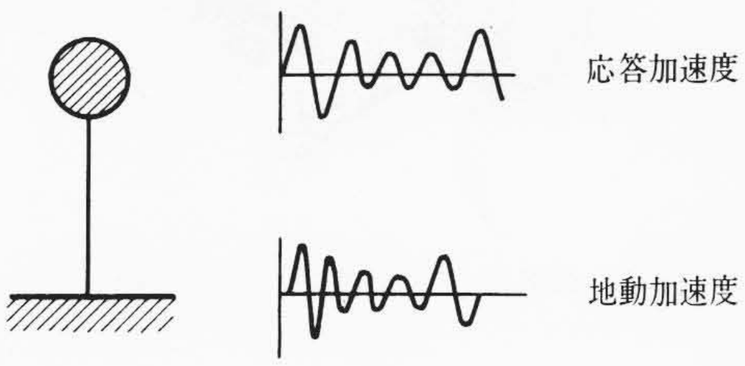

図4　1質点系モデル

の振動実験や，図3に示す小形配管モデルの振動実験によって，理論解析の妥当性を確認している。さらに水中で振動する構造物の解析や，容器内の液体の振動解析に対する手法を導入し，実験的にも検討を行なっている。

3. 動的地震応答解析の概要

この章では動的地震応答解析について，地震波形や計算コードの概要を述べ，実際の解析法を炉内構造物を例にして示すことにする。

3.1 地震波形の特性と応答スペクトル線図

図4に示す1質点のモデルが，加速度入力を受けるとき，振動方程式は(1)式で表わされる。

$$\ddot{y}+2hp\dot{y}+p^2y=-\ddot{y}_0 \quad \cdots\cdots(1)$$

ここにyは質点の相対変位，$\ddot{y}_0$は入力加速度，・は時間に関する1階微分を表わす。この式は1自由度の振動方程式であるが，n質点の振動方程式も振動モードの直交性を利用すると，n個のこれと同様の式に分解できるので，この式が地震応答値を求める基本となっていることがわかる。

設計用の地震波は通常ある地震継続時間の加速度変化を，微小な時間刻みごとに求めたディジタル量となっているが，これを$\ddot{y}_0$として(1)式を数値解すれば応答値が求まる。このようにして計算された時間で変化する応答加速度の最大値が，固有円振数p，減衰定数hの質点が地震によって受ける最大の応答加速度となる。pを変化させ，ある地震波に対する最大応答加速度を図にすると，図4のような線図が得られるが，この曲線を応答スペクトル曲線と言い，特

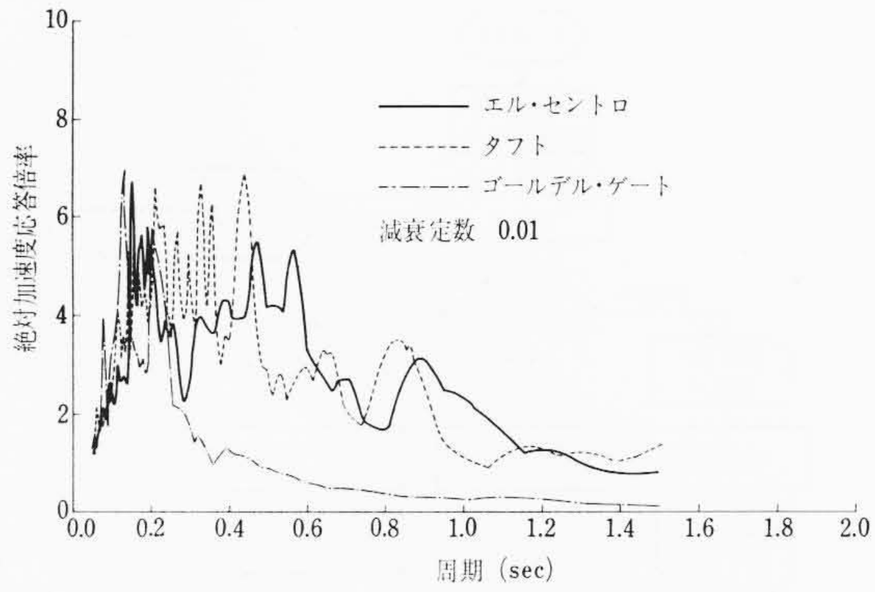

図5　応答スペクトル線図

に$\ddot{y}_0$として，建物の床での加速度波形を用いたものを床応答スペクトル曲線と称する。この応答スペクトル曲線によってある減衰定数，固有振動数をもつ系が，ある地震に遭遇するときの最大応答加速度を知ることができ，設計に利用される。同様にこの曲線は，入力波形のもつ周波数の特性も表わしている。なぜなら波形の中に，質点の固有振動数に相当する成分が多いと，一種の共振状態となって質点は大きな応答を示すことになるからである。

設計地震波としては，原子力発電所設置点の強震記録波形を用いることがよいが，ほとんど不可能であり，地盤の特性を調査し，似ているほかの地盤で記録された地震波形を用いている。また，地震には未知の要素が多く，地殻の構成，地震の規模，震央からの距離によって変化するので，周波数の特性が異なる複数個の波形を用いることが多い。代表的な強震記録波はアメリカで記録された下記の波形で，原子力発電所の耐震設計でもこれらが多く用いられている。

エル・セントロ	1940年	N-S成分
タフト	1952年	S69°E成分
ゴールデン・ゲート	1957年	S80°E成分

これらの波形の応答スペクトル曲線は，減衰定数0.01の系に対して，図5となる。この図からわかるように，ゴールデン・ゲート波形は，0.2秒付近に二つのピークを有するが，長周期の応答は小さく，波形には短周期の周波数成分が多いことが推定される。これに反し，エル・セントロとタフトの波形は長周期でもかなりの応答を示している。しかしエル・セントロに比較してタフトの波形は，鋭いピークが連続しており，複雄な波形であると推定される。

このように記録波形はその観測地点の地盤の特性を反映しているので，原子力発電所を設置する地点をよく考慮して，設計用地震波形を決定しなければならない。また図5から明らかなように，対象となる系の基本的な固有周期が0.2秒以上であれば，ゴールデン・ゲート波の応答は，ほかの2波の応答より小さくなることが自明であるので，ほかの波形で応答解析をすれば，ゴールデン・ゲート波で解析する必要はないことになる。

3.2 集中定数系地震応答計算コードの一例

集中定数系にモデル化された機器・建物の地震応答解析は，たとえば図6に示すような計算コードによって行なわれる。図に示すように静的解析，動的解析が可能であるが，特に，次のような計算も可能になっている。

回転慣性の考慮：　変位に対する振動方式のほかに，回転に対する振動方程式も考慮して解くことにより，建物のロッキング振動などを正確に扱うことができる。

2入力問題の解析：　二つの支持点をもつ構造物は，2種の地震波が入るので，2種の入力地震波を考慮した解析が必要になる。この問題に対する解法を有している。

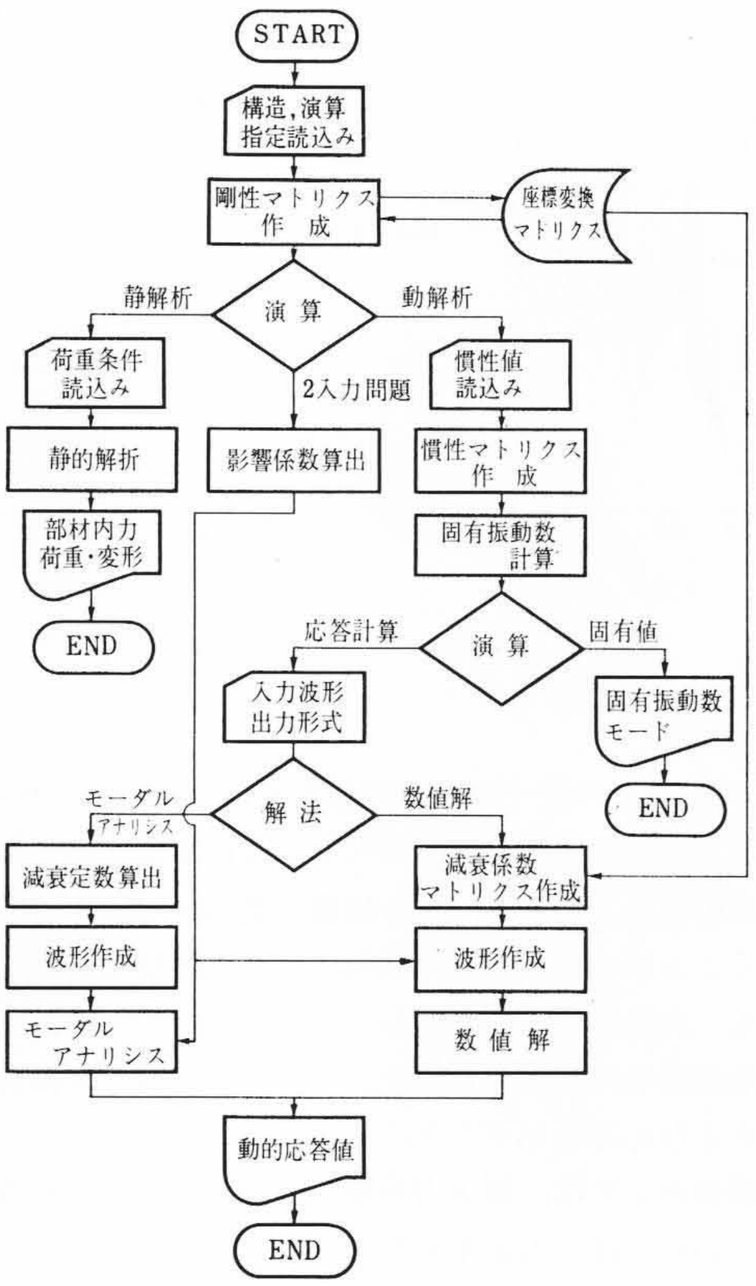

図6　集中定数系計算コードフローチャート

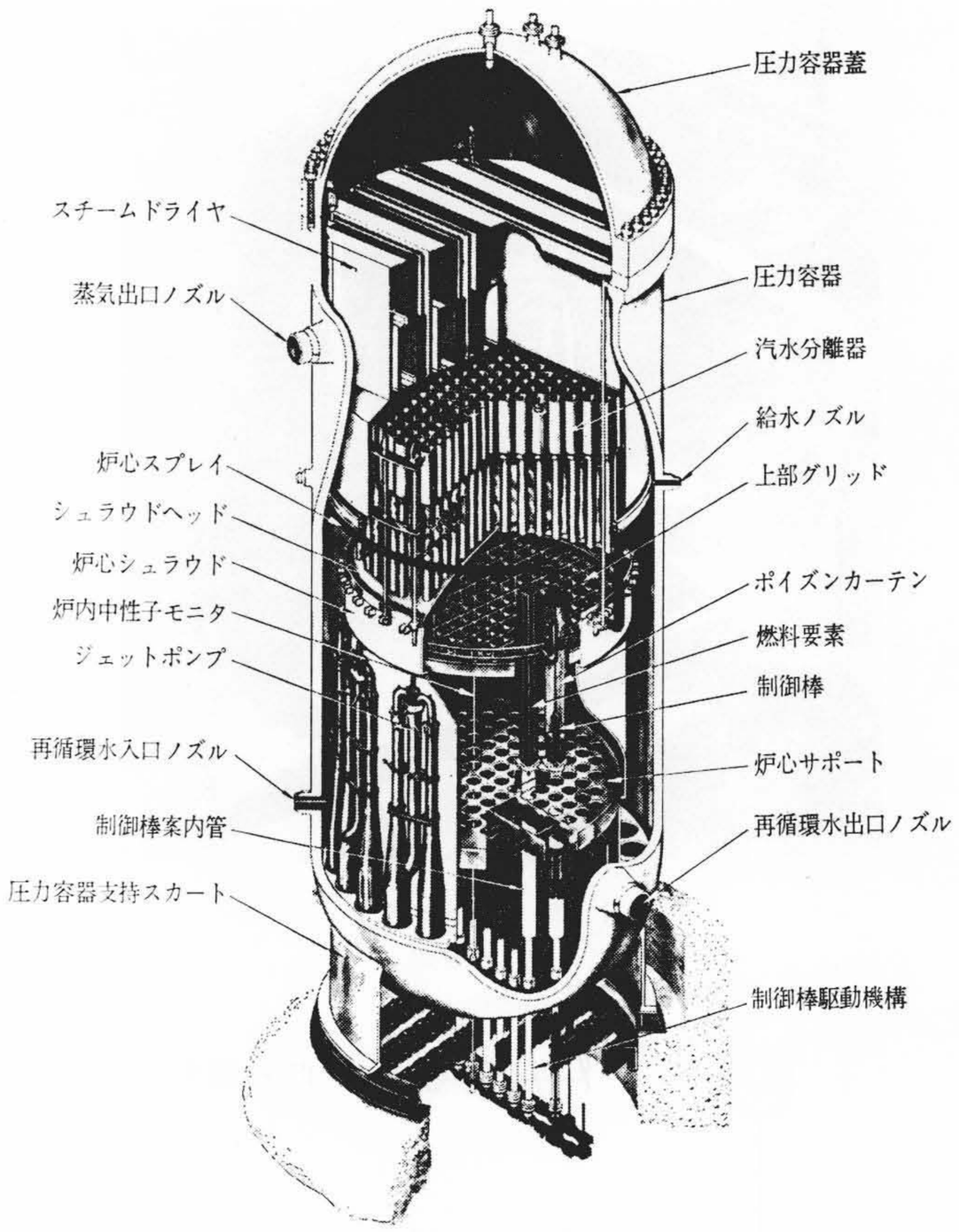

図7　GE形沸騰水形原子炉内構造物

水中構造物の振動：　水中で振動する構造物の水を介しての連成を考えると，慣性マトリクスが非対角要素をもつことになるが，このような慣性マトリクスの振動方程式を解くことができる。

種々の減衰定数の考慮：　材質の異なる種々の部材からなる連成系の解析が可能である。直接に数値解を求める方法では，内部減衰の形を考慮して減衰係数マトリクスを作成し，モーダル・アナリシスで等価的な各次の減衰定数を計算する。

応答値解析では，時刻歴のモーダル・アナリシスと，直接に数値解析する方法を可能にし，両者の比較も行なえるようになっている。この計算コードによって，原子炉建物と連成した原子炉内部構造物の解析などを行なっている。

3.3　沸騰水形原子炉内部構造物の解析

沸騰水形原子炉内部構造物は図7に示すように，燃料要素，制御棒，同案内管，同駆動機構ハウジング，炉内モニタ，同案内管，同ハウジング，ジェットポンプ，汽水分離器，シュラウドなどからなり，大部分は狭い空間内で炉水の中にある。地震応答解析は図8に示す解析モデルで行なわれるが，原子炉内部構造物を原子炉圧力容器，ガンマ線しゃへい体，原子炉建物と連成させ，建物基礎からの地震波によって解析する。しかし，固有振動数が20 cpsを越えるジェットポンプは連成系では重量のみを考慮し，別に据付位置の応答加速度を用いて解析する。また，質量と剛性の極端に小さい炉内モニタ案内管などは連成系に与える効果が小さいので切りはなし，連成系の解析で求めた据付点の応答加速度を用いて，2入力問題として解析している。

原子炉内部構造物は炉水の中で振動するので，水に対する考慮が必要である。構造物が水中で振動する場合の水の効果として，減衰定数の増加と構造物が水から受ける反力がある。前者は，実測などによって減衰定教を推定し，振動方程式で考慮する。後者は，あたかも構造物の質量が増加したかのような効果となるので，見掛け質量

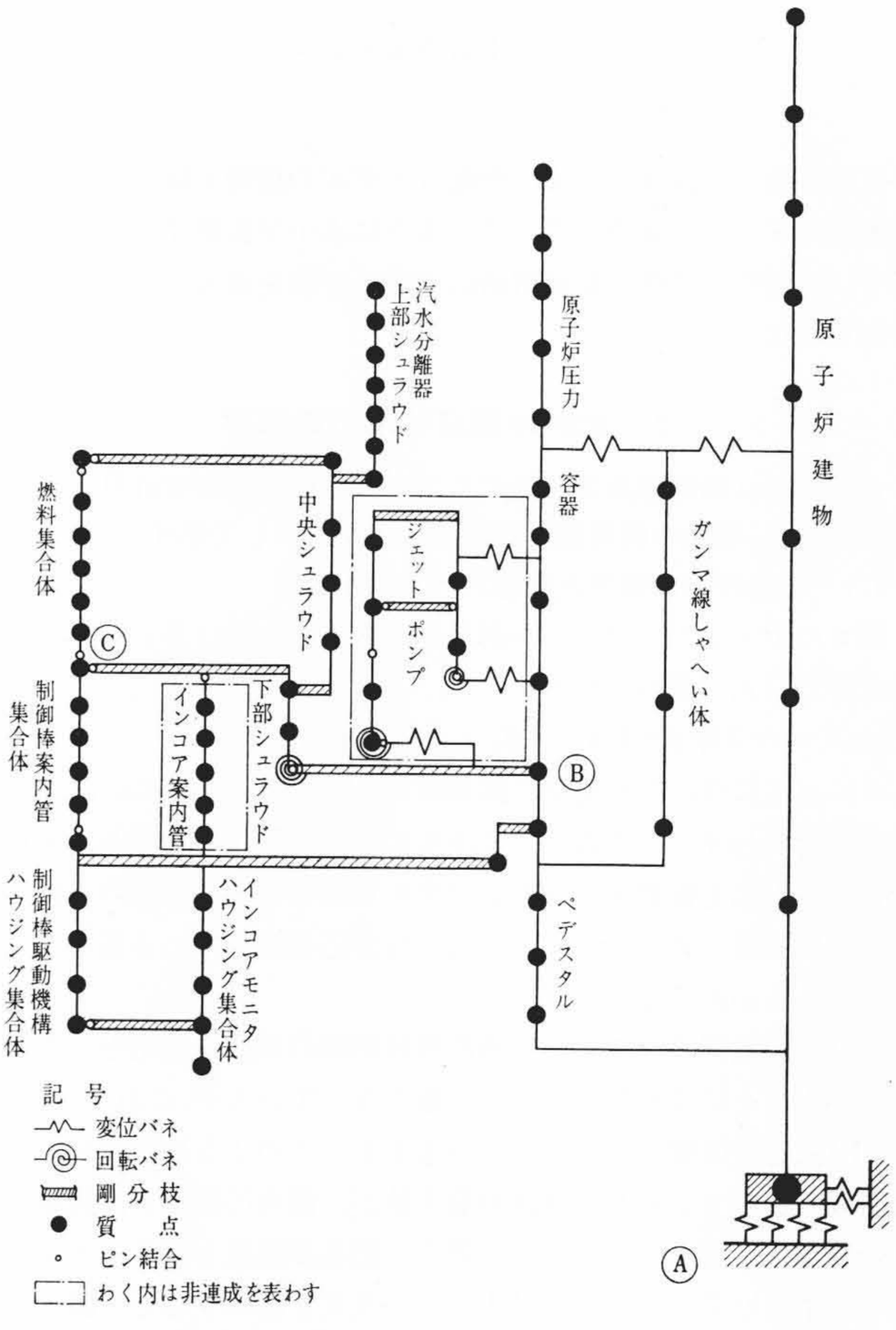

図8　原子炉内部構造物解析モデル

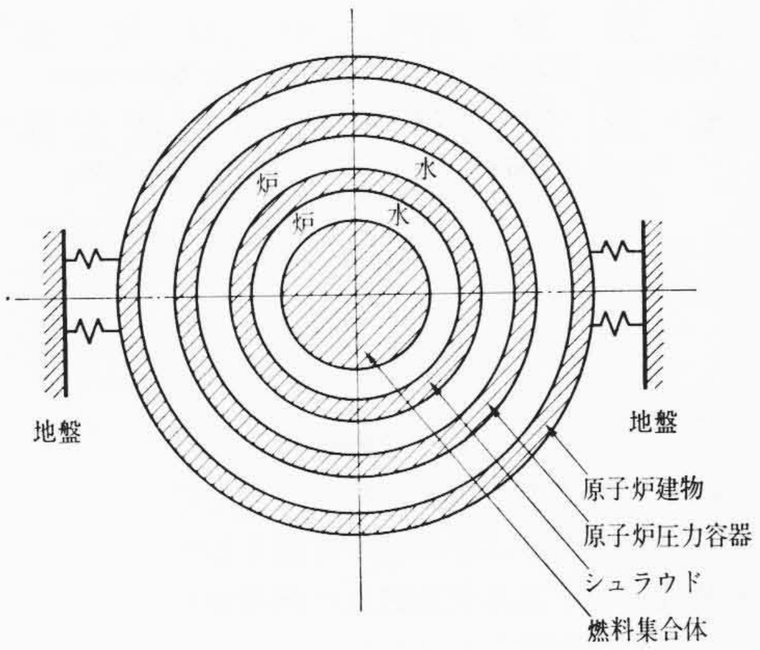

図 9　炉内構造物断面図

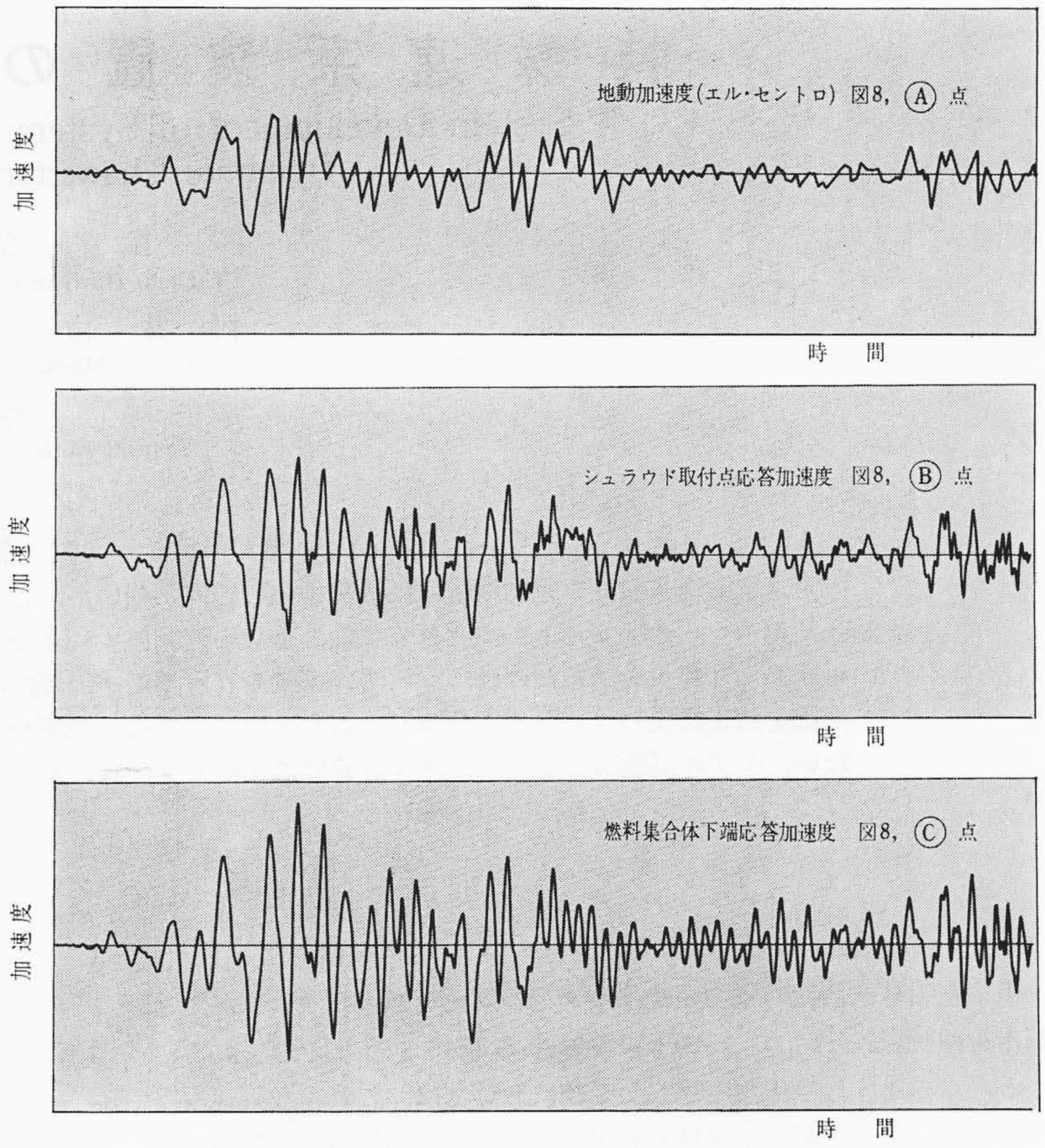

図 10　応答加速度波形

の増加として扱っている。図 9 は燃料要素位置での切断面を示したものであるが，炉水を介して燃料集合体，シュラウド，圧力容器が同心円状に並らび，たとえばシュラウドが振動すると，その圧力が炉水を媒体として燃料集合体と圧力容器に加わる。この水が構造物を連成させる効果は理論的に解析すると，非対角要素を有する慣性マトリクスの形で振動方程式に考慮すればよいことがわかる。これらを考慮して 3 章で述べた計算コードにより，原子炉内部構造物を解析すればよい。

図 8 のモデルで明らかなように，原子炉内部構造物は複雑である。たとえば燃料集合体を考えれば，建物基礎からはいった地震波形が燃料集合体に到達するまでに原子炉建物，原子炉圧力容器，シュラウドを通る。このために，波形は構造物を通過するたびにフィルタをかけられ増幅されていく。図 8 のモデルの基礎(図 8，Ⓐ点)から前述のエル・セントロ波形がはいり，シュラウドの取付点（図 8，Ⓑ点）を通って，燃料集合体の下端のサポート点(図 8，Ⓒ点)に到達するまでに変化する様子は図 10 のとおりである。この図から顕著に変化の過程を知ることができる（図 10 は標準的なプラントを 3. 2 で述べた計算コードの時刻歴モーダル・アナリシス法で解析した結果である)。このようにして応答波形の変化を知り，構造物の振動物性を把握(はあく)して，信頼性の高い耐震設計を行なっている。

4. 結　　言

現在，設計製作されている原子力発電設備は，ここに述べたような慎重な耐震設計法に準拠することによって，万全の安全性が追求されている。その手段として本文に一部述べたような，各種の理論的解析方法を用いるとともに，実験によって減衰定数を測定したり解析の裏付けを行なったりしている。

原子力発電所は，ますます大形化と高性能化が進んでいるが，そのためには耐震設計もその精度と安全性を高めるとともに，経済性を向上することが要求されている。日立製作所は機器製作者として，さらに理論的ならびに実験的研究開発を推進しているが，耐震技術は原子力発電関係者全体の中でも特に電力会社，建設会社および学界の総合的な協力が必要な分野であるから，従来より以上に関係各位からのご援助をいただいて，わが国の地震に対応する耐震技術の確立に寄与したいと念願するものである。